

# A FÍSICA NO BRASIL

SOCIEDADE BRASILEIRA  
DE FÍSICA

1987

# A FÍSICA NO BRASIL

**SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA**

1987

# **SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA**

**DIRETORIA JULHO-1985 / JULHO-1987**

<b>Presidente</b>	Ramayana Gazzinelli
<b>Vice-Presidente</b>	Sergio Machado Rezende
<b>Secretário Geral</b>	Humberto Siqueira Brandi
<b>Secretário</b>	Gil de Costa Marques
<b>Tesoureiro</b>	Artemio Scalabrín
<b>Sec. Assuntos Ensino</b>	Luiz Carlos de Menezes
<b>Sec. Adj. Ass. Ensino</b>	Arden Zylbersztajn

## **SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA**

**Instituto de Física da USP**

**Departamento de Física dos Materiais e Mecânica**

**Caixa Postal 20.553**

**01000 - São Paulo - SP - Fone: (011) 815.5599 - Ramal 222**

**JULHO 1987**

# RESPONSÁVEIS PELO DOCUMENTO

## COMISSÃO COORDENADORA

Sergio M. Rezende (Coord.Geral) – UFPE  
Silvio R. Salinas – USP  
Gil da Costa Marques – USP  
Alejandro S. Toledo – USP  
Paulo Sakanaka – UNICAMP

## COMISSÃO TÉCNICA

### MATÉRIA CONDENSADA

Silvio R. Salinas – USP  
Afonso G. Gomes – CBPF  
Alaor S. Chaves – UFMG  
Celso Pinto de Melo – UFPE  
Eugenio Lerner – UFRJ  
George Bernski – CBPF  
Humberto S. Brandi – PUC/RJ  
Lia Amaral – USP  
Mário Engelsberg – UFPE  
Orciro R. Nascimento – IFQSC  
Roberto Luzzi – UNICAMP  
Spero P. Morato – IPEN

### FÍSICA DE PARTÍCULAS E SUBÁREAS CORRELATAS

Carlos Ourivio Escobar – USP  
Erasmus Ferreira – PUC-RJ  
Gil da Costa Marques – USP  
José Fernando Perez – USP  
Juan Alberto Mignaco – CBPF  
Mario Novello – CBPF  
Ricardo S. Schor – UFMG  
Victor de Oliveira Rivelles – UnB

### REVISÃO E DIAGRAMAÇÃO

Angela T. Weber  
Cilene Vieira  
Maria Helena Sá Barreiro

### FÍSICA NUCLEAR

Alejandro S. Toledo – USP  
Giorgio Moscati – USP

### FÍSICA NAS EMPRESAS

Felipe R. Barbosa – TELEBRÁS  
Frederico Dias Nunes – ELEBRA  
Sergio Celaschi – TELEBRÁS

### ENSINO DE FÍSICA

Luiz Carlos de Menezes – USP

### PLASMAS

Paulo H. Sakanaka (Coord.) – UNICAMP  
Darcy Dillenburg – UFRGS  
Iberã L. Caldas – USP  
Ricardo M. O. Galvão – USP-INPE

### DATILOGRAFIA

Solange de Lucena Kreismann

**COPYRIGHT**

by

**Sociedade Brasileira de Física**

**Reservados os direitos da edição**

**Sociedade Brasileira de Física 1987**

**Printed in Recife, Brasil**

**S678f**

**Sociedade Brasileira de Física  
A física no Brasil. – São Paulo:  
Sociedade Brasileira de Física, Instituto  
de Física da USP, 1987.  
455p.**

**ISBN 85-292-0001-2**

**1. FÍSICA—BRASIL—HISTÓRIA 2. FÍSICA—  
INVESTIGAÇÕES 3. FÍSICA—NUCLEAR  
4. FÍSICA BIOLÓGICA. I. Título**

**CDU—53 (81)**

**PeR—BPE**

# Índice

APRESENTAÇÃO .....	9
VISÃO GERAL DA FÍSICA .....	11
BREVE HISTÓRICO E DADOS SOBRE A FÍSICA NO BRASIL .	25
FÍSICA DAS PARTÍCULAS E SUBÁREAS CORRELATAS ....	51
FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA .....	75
FÍSICA DE PLASMAS .....	225
FÍSICA NUCLEAR .....	269
ENSINO DE FÍSICA .....	281
SITUAÇÃO DA FÍSICA NAS EMPRESAS .....	287
ENDEREÇOS DAS INSTITUIÇÕES .....	293

# Apresentação

Este documento é o resultado de um estudo quantitativo e qualitativo da Física no País realizado pela Sociedade Brasileira de Física. Ao contrário de levantamentos anteriores, como as Avaliações e Perspectivas do CNPq, este trabalho não foi encomendado pelo Governo tendo surgido da própria iniciativa dos físicos. Infelizmente não foi possível fazer uma análise mais detalhada dos recursos financeiros investidos na Física brasileira. Também não foi possível promover reuniões para realizar uma avaliação global da Física e fazer projeções. Entretanto, estamos certos de que este documento será valioso pelas informações relevantes que contém. Esperamos que ele estimule uma análise crítica mais profunda da Física e sirva de instrumento para um planejamento mais coerente de seu crescimento no País.

O levantamento da SBF foi iniciado em novembro de 1985 e realizado em duas partes. Uma delas consistiu na obtenção de dados numéricos das instituições para atualização das tabelas publicadas no Avaliação e Perspectivas do CNPq de 1982. Este trabalho foi inicialmente realizado pelos secretários regionais da SBF. Posteriormente as tabelas foram enviadas diretamente aos dirigentes das instituições para serem conferidas. Esta parte geral está apresentada nas duas primeiras seções deste documento, na elaboração das quais utilizamos dados e descrições contidas nos relatórios de Avaliação e Perspectivas do CNPq de 1978 e 1982.

A outra parte constou do levantamento de dados quantitativos e qualitativos dos grupos de pesquisa. Isto foi feito através de comissões relatoras das áreas mais relevantes da Física no País, coordenadas por físicos experientes. Os dados foram obtidos através de correspondência e telefonemas, tendo sido solicitados aos grupos de pesquisa diretamente pelos coordenadores das comissões e através do Boletim nº 1 de 1986 da SBF. As informações dos grupos foram discutidas nas

reuniões tópicas e nas reuniões anuais da SBF de 1986 e 1987. A partir dos dados e das discussões as comissões fizeram análises, projeções, e elaboraram recomendações para cada área.

É preciso ressaltar que os relatórios das diversas subáreas não estão com formato uniforme porque não foi possível promover discussões entre as várias comissões relatoras. Assim sendo, o grau de detalhamento de cada relatório deve ser atribuído ao trabalho da comissão e não ao estágio de desenvolvimento da subárea no País.

A comissão coordenadora deste trabalho está ciente de que há grupos de Física no País cujas informações não estão contidas no presente documento. Este é o caso das subáreas pequenas que não são objeto de estudo neste documento. Em todo caso, os pesquisadores e estudantes destes grupos estão contabilizados nas tabelas das instituições. É possível também que tenha havido falhas das comissões na identificação de todos pesquisadores das subáreas, mas certamente não faltaram solicitações públicas de colaboração feitas no Boletim e nas reuniões da SBF. Esperamos que as falhas detectadas pela comunidade sejam comunicadas à SBF visando melhorar futuras versões deste documento.

Nesta oportunidade agradecemos aos secretários regionais da SBF, aos dirigentes das instituições, aos membros das comissões relatoras, aos funcionários da SBF e a todos que de alguma forma colaboraram na realização deste trabalho.

Finalmente desejamos agradecer as agências que financiaram este trabalho. A FINEP apoiou as reuniões tópicas e a reunião anual da SBF nas quais o trabalho foi discutido. A CAPES financiou as reuniões das comissões relatoras e parte do trabalho de impressão. O CNPq cobriu as despesas com a impressão final do documento.

*Sergio M. Rezende*  
Recife, 20 de julho de 1987

## **VISÃO GERAL DA FÍSICA**

<b>FÍSICA E A SOCIEDADE .....</b>	<b>13</b>
<b>OBJETO E MÉTODO DA FÍSICA .....</b>	<b>14</b>
<b>AREAS DA FÍSICA .....</b>	<b>15</b>
<b>AREAS INTERDISCIPLINARES .....</b>	<b>22</b>

# Visão Geral da Física

## FÍSICA E A SOCIEDADE

A Física é o campo da ciência que investiga os fenômenos e as estruturas mais fundamentais da natureza. O conhecimento acumulado neste campo tem possibilitado a humanidade compreender aspectos cada vez mais complexos da natureza, e através dele criar sistemas, dispositivos e materiais artificiais que têm contribuído decisivamente para o progresso tecnológico.

Foram as investigações de físicos europeus sobre os fenômenos elétricos e magnéticos, no século passado, que levaram à invenção do gerador e do motor elétricos, utilizados atualmente para gerar energia elétrica e para produzir movimento, numa variedade enorme de aplicações que afetam nossa vida diária. Essas mesmas investigações levaram à descoberta no século passado de que a luz é uma onda eletromagnética. Ondas desta natureza, mas com menor frequência propiciaram a invenção do rádio, da televisão, do radar e dos sofisticados meios de telecomunicações que estão incorporados na sociedade moderna.

A descoberta da mecânica quântica na década de 1920 possibilitou a compreensão detalhada da estrutura atômica e das partículas fundamentais da natureza. Além de abrir espaço para um grande desenvolvimento da Física e de outros campos da ciência, como a Química, a Biofísica e a Astrofísica por exemplo, a mecânica quântica conduziu à descoberta de novos fenômenos. Um deles, o da condução eletrônica em semicondutores, possibilitou a invenção do transistor em 1947 e dos circuitos integrados no final da década de 50. Essas invenções revolucionaram a eletrônica e abriram o caminho para a disseminação dos computadores que estão transformando os costumes da sociedade. Outra invenção, a do laser em 1960, propiciou o advento das comunicações ópticas e está produzindo profundas modificações na eletrônica. Infelizmente a Física tem possibilitado tanto algumas invenções que tornam a vida melhor e mais confortável, quanto outras que podem destruí-la. Como utilizar as descobertas científicas apenas para o bem é um dos principais desafios da sociedade moderna e nessa discussão os físicos podem desempenhar importante papel esclarecedor.

## OBJETO E MÉTODO DA FÍSICA

Uma característica essencial da pesquisa em Física é a procura dos aspectos mais fundamentais das estruturas e dos fenômenos, bem como a sua compreensão e descrição em termos de leis as mais gerais possíveis. A Física investiga desde partículas subatômicas, átomos e moléculas, até fenômenos que envolvem grandes aglomerados delas, como a matéria ordinária. Nessa escala, por exemplo, suas leis e métodos são usados para o estudo da Terra, e dos fenômenos que se passam em sua atmosfera, dos planetas e das galáxias. Em uma escala maior, essas leis e métodos permitem uma descrição do Universo como um todo, e a criação de modelos para a sua evolução. Nesse percurso do microcosmo ao macrocosmo passa-se de dimensões de  $10^{-15}\text{m}$  (raio do próton) até o tamanho de uma galáxia ( $10^{21}\text{m}$ ) ou do Universo ( $10^{25}\text{m}$ ).

A Física se encontra em estágio de grande vitalidade e quase toda a atividade atual de pesquisa é feita sobre temas inexistentes há cem anos. A maioria deles decorrentes da descoberta da estrutura atômica da matéria e sua compreensão por meio da mecânica quântica. Na Física de hoje muitos fenômenos estudados não fazem parte de nossa experiência cotidiana, sendo necessárias condições muito especiais para produzi-los e analisá-los. Isto tem levado a espetaculares sucessos tecnológicos que suscitam grandes investimentos nesta área, com a consequência de que há atualmente um grande número de profissionais dedicados à pesquisa física. Esses dois aspectos (a dificuldade em produzir e analisar os fenômenos e o grande número de participantes do processo) do panorama científico contemporâneo estabelecem uma diferença importante entre a Física de nossos dias e a Física Clássica. O pesquisador moderno necessita de equipamento sofisticado, apoio técnico de alto nível, uma infra-estrutura adequada e acesso rápido aos resultados obtidos por outros pesquisadores. Apesar disso, o método básico científico permanece, em essência inalterado.

Contudo, a complexidade dos equipamentos e da linguagem matemática das teorias tornou inevitável a divisão dos físicos em duas categorias: teóricos e experimentais. Os experimentais realizando o contato concreto com os fenômenos, planejando, construindo e utilizando o equipamento para testar conjecturas geradas pelas próprias experiências ou sugeridas pelos teóricos, que, por sua vez, trabalham preponderantemente na elaboração de modelos abstratos para conjuntos de fenômenos ou, em nível mais avançado, na construção de teorias. Ambos são indispensáveis ao progresso da Física, como elos de uma mesma corrente. A pesquisa experimental na Física Contemporânea exige alto grau de engenhosidade e equipamentos especializados. Com frequência estes equipamentos são criados e desenvolvidos pelos próprios físicos, e muitas vezes encontram aplicações na indústria e em outros campos da ciência. Em geral pesquisadores, estudantes e técnicos de apoio trabalham congregados em grupos de pesquisa, que normalmente recebem recursos diretamente dos órgãos financiadores. Raramente os físicos trabalham isoladamente, sendo as publicações científicas em geral assinadas por vários autores, e com frequência a colaboração científica extrapola os muros das instituições congregando físicos de vários locais ou até mesmo de países diferentes.

O processo científico moderno é complexo e dispendioso. Por isso seu desenvolvimento e manutenção dependem de decisões políticas do poder público, que afetam de muitas maneiras toda a sociedade.

## ÁREAS DA FÍSICA

Sendo um campo extremamente sofisticado da ciência, a Física investigada nos dias de hoje é subdividida em várias áreas distintas. Uma divisão frequentemente utilizada é a seguinte:

- Física das Partículas Elementares
- Física Nuclear
- Física de Plasmas
- Física da Matéria Condensada
- Física Atômica e Molecular
- Física Geral e Física Clássica
- Áreas Interdisciplinares

A seguir apresentamos uma descrição resumida das principais características e objetivos dessas áreas.

### Física das Partículas Elementares

A Física das Partículas Elementares tem por objetivo a descoberta e a compreensão dos constituintes mais simples da matéria e das forças básicas que atuam entre eles. Busca-se, sobretudo, as leis básicas e princípios unificadores que forneçam um quadro racional dos fenômenos já conhecidos e possam prever fenômenos novos.

Podemos caracterizar uma partícula elementar como sendo aquela que não apresenta estrutura interna. Com tal definição em mente, constatamos facilmente que o próprio conjunto das partículas elementares tem variado conforme a época histórica considerada. Os átomos foram considerados os constituintes mais simples da matéria por longo tempo. Descobriu-se então que os átomos são constituídos de um núcleo, formado por prótons e nêutrons, e elétrons. Os prótons e nêutrons foram considerados elementares por cerca de 50 anos; porém, durante as duas últimas décadas, descobriu-se que os mesmos possuem uma estrutura interna que pode ser descrita em termos de partículas mais simples chamadas quarks. Os elétrons, por outro lado, até hoje não apresentaram indícios de possuir uma estrutura interna e portanto são considerados como partículas elementares.

As partículas elementares, atualmente, são classificadas em três categorias: os léptons, os quarks e os bósons de gauge (ou de calibre). Os léptons são: o elétron, o muon, o tau e seus respectivos neutrinos. O elétron, o muon e o tau possuem carga elétrica e massa. Os neutrinos não possuem carga elétrica e busca-se esclarecer se possuem ou não massa. Os quarks são as partículas que compõem os hádrons denominação dada aos mésons (p. ex., os mésons pi, rho, etc.) e aos bárions (p. ex., o próton, o nêutron, os híperons, etc.). Os bósons de gauge são partículas mediadoras da interação entre os quarks e os léptons. O mediador da força eletromagnética é o fóton.

Existem quatro forças básicas na Natureza: a da gravitação, a eletromagnética, a interação fraca e força nuclear forte. A intensidade com que essas forças atuam sob condições típicas é dada pelo valor de sua constante de acoplamento, que em unidades naturais têm os seguintes valores; força gravitacional  $10^{-39}$ , força fraca  $10^{-5}$ , força eletromagnética  $10^{-2}$  e força forte 1. Um dos objetivos

básicos da pesquisa nesta área é a obtenção de modelos que unifiquem todas as interações. Já existe uma teoria unificada das interações eletromagnéticas e fracas, mas ainda não há um esboço satisfatório de uma teoria de unificação de todas as forças. O esforço para a compreensão das partículas elementares tem extrapolado para áreas tradicionalmente distantes, como a Relatividade, Gravitação e Cosmologia. Descobertas recentes na teoria das partículas têm levado a pistas importantes para a compreensão da origem do universo.

Na Física das Partículas Elementares as experiências consistem basicamente na observação dos resultados das colisões entre partículas, a fim de obter informações acerca de suas interações. Quase todas as experiências nessa área são efetuadas utilizando-se aceleradores que produzem feixes de partículas de alta energia que são utilizados para o estudo de colisões com alvos adequados. Devido à necessidade de um aporte apreciável de recursos financeiros para a construção de grandes aceleradores de partículas, existem poucos laboratórios no mundo em condições de realizar experiências de vanguarda nessa área. Isto faz com que a cooperação científica internacional seja essencial para a pesquisa nesta área.

A Física de Partículas tem quarenta anos de tradição no Brasil, tendo dado relevantes contribuições tanto em problemas teóricos como em descobertas experimentais. Atualmente o País conta com poucos grupos experimentais nesta subárea. Pesquisas teóricas em Fenomenologia de Partículas e em Teoria Quântica dos Campos são desenvolvidas por diversos grupos do País, os quais têm conseguido manter razoável intensidade de cooperação internacional. Esta cooperação é essencial para a atividade de pesquisa em Física de Partículas e Teoria de Campos tanto teórica como experimental, e deve ser considerada como requisito básico para a manutenção do bom nível científico nessas pesquisas. A ausência de uma maior atividade experimental se constitui no grande empecilho a um maior desenvolvimento desta subárea. Em consequência, está havendo, uma certa emigração de pesquisadores para áreas limítrofes.

## Física Nuclear

Compreende o estudo da estrutura de núcleos nos estados fundamentais e excitados; o estudo das interações entre núcleos e outras partículas, tais como fótons, elétrons, mésons, etc, tanto no que diz respeito à natureza da interação envolvida, como à informação sobre a estrutura do núcleo assim obtido; estudo de interações entre núcleos e núcleons ou outros núcleos; e a interação de núcleos ou radiações nucleares com a matéria.

Os problemas da Física Nuclear são caracterizados pelo fato de que a interação entre núcleons, responsável por sua agregação em núcleos, ainda é conhecida somente em termos fenomenológicos, contrastando fortemente neste sentido com a Física Atômica. Além disso, a estrutura nuclear não é caracterizada nem como um problema de poucos corpos quase independentes, como os elétrons das camadas atômicas, nem como um sistema de muitos corpos, típico da matéria condensada. Por estas razões, a estrutura do núcleo e suas interações podem ser classificadas teoricamente. As experiências e as teorias até agora desenvolvidas revelam que o núcleo tem um rico espectro de modos de excitação, que ainda desafia as explicações teóricas. A extensão do estudo de interações nucleares até energias mais altas e a sistemas mais complexos, como, por exemplo, nas

interações entre núcleos complexos acima da barreira coulombiana, revela novos e fascinantes modos de excitação.

Durante o seu desenvolvimento, a Física Nuclear tem tido interações fortes com quase todas as outras subáreas da Física.

Atualmente, as principais ferramentas da Física Nuclear são os aceleradores: aceleradores eletrostáticos para baixa energia e cíclotrons, aceleradores lineares e outros tipos para energias mais altas. Os reatores ainda oferecem interessantes possibilidades para a pesquisa nessa subárea. No País são poucos os laboratórios sem algum tipo de acelerador que atualmente mantém um programa significativo de pesquisas em Física Nuclear.

Uma área onde o impacto de Física Nuclear transcende as fronteiras das Ciências Exatas, tendo imensas implicações sociais econômicas e políticas, é a área de Energia Nuclear. Uma análise das suas conseqüências para nossa sociedade, tanto positivas quanto negativas, transcende a este documento, mas certamente a Energia Nuclear se destaca como uma das principais causas do reconhecimento da importância e relevância da ciência para os problemas imediatos da nossa sociedade.

## **Física de Plasmas**

Física de Plasmas investiga movimentos coletivos de partículas carregadas, elétrons ou íons, ou estados de equilíbrio destas partículas, sujeitas à ação de campos elétricos e magnéticos externos e à ação de seus próprios campos. Este conjunto de partículas e campos representa um meio fluido chamado Plasma. Em particular, são tratadas questões como confinamento de plasma, equilíbrio e sua estabilidade, aquecimento e propriedades de transporte, propagação de ondas, interação de partículas com onda, instabilidades, turbulência e caos.

Plasmas são encontrados na natureza, como em descargas elétricas (relâmpagos), na ionosfera, no espaço interplanetário e intersidial, na corona solar, nas estrelas, anãs brancas e pulsares, e também são produzidos nos laboratórios, como em descargas elétricas, em dispositivos para pesquisa de fusão nuclear, em lasers a gás, dispositivos de semicondutor e metais e equipamentos de plasmas industriais.

O estudo desta área no Brasil só foi iniciado na década de 70, mas mostra-se em pleno vigor atualmente.

## **Física da Matéria Condensada**

A Física da Matéria Condensada investiga os estados da matéria em que os átomos constituintes estão suficientemente próximos e interagem simultaneamente com muitos vizinhos. Ela é uma área de investigação básica, que procura a explicação detalhada de propriedades e fenômenos da matéria condensada a partir dos conceitos e das equações fundamentais da mecânica quântica e da física estatística. São particularmente interessantes as propriedades elétricas, ópticas, magnéticas, mecânicas e térmicas. Por outro lado a Física da Matéria Condensada tem uma enorme quantidade de aplicações na tecnologia moderna. Por exemplo, foi a partir de investigações nesta área que surgiram grandes inovações tecnológicas como os transistores, os circuitos integrados, os microprocessadores,

os fios supercondutores e os lasers semicondutores que deram origem às comunicações ópticas.

Esta área da Física começou a adquirir características próprias apenas a partir de 1948, inicialmente sob o nome de Física do Estado Sólido. Até aquela época as propriedades da física dos sólidos eram objeto de estudo como exemplo de aplicação da mecânica quântica, estabelecida há pouco mais de vinte anos. Foi a descoberta do transistor naquele ano que deu um enorme impulso à pesquisa em Física de Sólidos.

Na década de 50 os trabalhos nesta área estavam concentrados nos sólidos cristalinos, cujos íons formam um arranjo ordenado periódico. Nesses sólidos ocorrem fenômenos que não existem em materiais amorfos. Além disso, como eles têm estrutura cristalina com propriedades de simetria bem definidas, os fenômenos podem ser interpretados pelas leis da Física com mais facilidade. Com o progresso das técnicas experimentais e teóricas de investigação, esta área se estendeu a materiais como o vidro, polímeros orgânicos diversos (teflon, poliacetileno, etc.), ligas amorfas e até mesmo aos líquidos, passando a ser conhecida como Física da Matéria Condensada. Nesta área da Física trabalham atualmente mais de 40% dos físicos em todo o mundo e a cada ano surgem novas linhas de pesquisa, impulsionadas pela descoberta de novos fenômenos e de novos materiais artificiais. Estas linhas por sua vez abrem o potencial para o desenvolvimento de novos dispositivos que encontram aplicações nos mais variados segmentos tecnológicos.

Entretanto, não foi apenas por causa de sua importância tecnológica que a nova área se desenvolveu rapidamente. A enorme variedade de fenômenos que os elétrons e os núcleos apresentam coletivamente em sólidos deu origem a descobertas fundamentais e excitantes. A Física da Matéria Condensada é atualmente uma das áreas mais estimulantes da ciência, contribuindo continuamente para a descoberta de novos fenômenos fundamentais e de novos materiais avançados. Apenas nos últimos dez anos pode-se destacar: a descoberta do efeito Hall quântico; o desenvolvimento de materiais semicondutores fabricados pela deposição sucessiva de monocamadas atômicas de modo a formar super-redes, hetero-estruturas ou poços quânticos; a descoberta de efeitos magnéticos e eletrônicos em sistemas de dimensionalidade menor que 3; a identificação e compreensão de fenômenos críticos e transições de fase em sistemas complexos, a formulação teórica e a observação experimental de fenômenos de turbulência e caos em uma grande variedade de sistemas; a descoberta de processos de condução por ondas de densidade de carga e mais recentemente, a síntese de materiais supercondutores a temperaturas mais altas.

## Física Atômica e Molecular

Esta área estuda a estrutura e os fenômenos eletrônicos em átomos individuais ou em átomos que compõem moléculas isoladas. Como é bem conhecido, as tentativas de entender a estrutura dos átomos constituíram a base da Física Moderna, desenvolvida nas décadas de 20 e 30. De certa maneira, depois daquela época, o interesse dos físicos passou mais para as áreas da Física Nuclear e de Partículas Elementares, deixando os problemas da estrutura de moléculas para os químicos. Nos últimos anos, entretanto, esta área foi revolucionada com o

desenvolvimento dos lasers e das modernas técnicas de Óptica, ressurgindo como um dos principais ramos de pesquisa da Física.

Os lasers têm possibilitado a espectroscopia atômica e molecular com alta precisão e resolução, desde o infravermelho distante até a faixa ultravioleta. Além disso eles têm permitido a realização de experiências novas, como a observação dos átomos em colisão ou em reações químicas, a geração de pulsos de curtíssima duração ( $10^{-13}$  seg), a construção de relógios atômicos de precisão e padrões para metrologia, etc.

Por outro lado, o surgimento dos grandes computadores têm estimulado bastante os trabalhos teóricos nesta área. A teoria das estruturas de átomos e moléculas compreende a teoria de estruturas eletrônicas de átomos e moléculas, técnicas computacionais e numéricas para estes estudos e o cálculo de propriedades específicas de átomos e moléculas. Os cálculos teóricos têm sido incentivados não somente pelo seu interesse intrínseco, mas, também, pelos resultados experimentais obtidos a partir de novas espectroscopias com lasers e de fotoelétrons.

Esta área está relativamente pouco desenvolvida no Brasil. Neste documento ela está apresentada como uma subárea de Física da Matéria Condensada, porque nela trabalham quase todos os físicos que estudam átomos e moléculas no País.

## **Física Geral e Física Clássica**

Compreende aspectos da Física Teórica, da Física Matemática, Instrumentação e técnicas de laboratório, aspectos educacionais, históricos e filosóficos da Física.

A arte do físico teórico está em abstrair de uma situação física complexa, apenas, os aspectos mais relevantes ao fenômeno em estudo, construindo o modelo mais simples possível, evitando, porém, omitir fatores que possam desempenhar um papel importante. Os conceitos teóricos com que trabalha são, conforme frisou Einstein, "livres criações do espírito humano".

A meta da Física Teórica é reduzir a aparente complexidade dos fenômenos naturais a um conjunto de leis básicas simples, das quais os fenômenos observados possam ser obtidos por dedução. Este caráter dedutivo leva ao emprego da Matemática como ferramenta básica de trabalho.

A Física Matemática examina e aperfeiçoa essa ferramenta de trabalho e o rigor das deduções, promovendo contribuição tanto da Matemática à Física quanto da Física à Matemática.

A Física Teórica e a Física Matemática têm uma longa tradição de qualidade no Brasil, que felizmente se mantém. Além da contribuição fundamental dos vários físicos estrangeiros ilustres, que formaram escolas entre nós (Gleb Wataghin, Bernhard Gross, Guido Beck) cumpre ressaltar os trabalhos e a atuação de Theodoro Ramos, Henrique Morize, Pontes de Miranda e outros.

Física Clássica é uma denominação que se contrapõe à Física Quântica, que estuda a estrutura atômica e suas subestruturas. A Física Clássica compreende a Mecânica de Newton e suas aplicações tanto a sistemas discretos (como os planetas em seu movimento ao redor do Sol) quanto contínuos (Movimentos de fluidos, Acústica, Elasticidade), o Eletromagnetismo (incluindo a Óptica) e a Termodinâmica. Nesta subárea também se incluem a Teoria da Relatividade, a Gravitacão e a Cosmologia, que têm uma longa tradição no Brasil.

## Relatividade, Gravitação e Cosmologia

A teoria da Relatividade de Einstein se constitui, através de uma profunda análise dos conceitos de espaço e tempo, em uma revolução que não poupou, ao menos do ponto de vista conceitual, nenhuma subárea da Física. Entre as suas conseqüências mais espetaculares estão a demonstração da equivalência entre a massa e energia, e a nova teoria da gravitação, que substituiu a gravitação universal de Newton. A esta última teoria foi dado, por Einstein, o nome de *Relatividade Geral*. Ela nasceu da necessidade de abolir na teoria da gravitação newtoniana o conceito de "ação a distância", incompatível com a Teoria da Relatividade (Restrita) de Einstein.

Durante muitos anos a Relatividade Geral foi campo de trabalho de um número reduzido de físicos, tanto por causa do desenvolvimento, em parte simultâneo, da Física Quântica, quanto pela impossibilidade técnica de testes experimentais da teoria, adicionada aos três testes clássicos propostos por Einstein. Este é, aliás um exemplo interessante da necessidade de um desenvolvimento paralelo dos aspectos teóricos e experimentais de uma área da Física para que ela possa florescer.

O grande refinamento das técnicas experimentais dos últimos anos, ligado ao aperfeiçoamento dos radares, lasers e relógios, radioastronomia, bem como o uso dos satélites artificiais, estimularam a retomada dos trabalhos experimentais em Relatividade Geral.

Entre os tópicos mais vibrantes da pesquisa atual nesta subárea estão os buracos negros e as ondas gravitacionais. A existência de buracos negros é uma das conseqüências da Relatividade Geral. Neles a atração gravitacional se torna tão intensa que, classicamente, nem mesmo a luz pode escapar. A observação experimental deste fenômeno é ainda uma questão controversa. Ondas gravitacionais se encontram na mesma situação, já que sua existência não foi ainda diretamente confirmada pela experiência.

Um dos resultados mais importantes da Relatividade Geral é o modelo cosmológico do Universo em expansão, a partir da explosão inicial de um Universo muito quente, seguida de sua expansão e resfriamento. A descoberta de uma radiação de fundo isotrópica de 3K de temperatura deu um apoio experimental muito importante a este modelo cosmológico "standard."

Mais recentemente tem havido uma grande interação entre a Cosmologia e a Física das Partículas Elementares, já que o comportamento dos primeiros minutos do Universo parece ser dominado pela Física daquelas partículas subatômicas.

No Brasil, o estudo da *Relatividade Geral* nasceu antes mesmo da fundação da USP, existindo publicações de Theodoro Ramos e de Pontes de Miranda na década de 20. Este estudo nunca foi abandonado, sendo utilizado hoje em dia por vários grupos de boa qualidade.

No século XX, a Física se desenvolveu principalmente na direção da explicação microscópica dos fenômenos. Entretanto, vários ramos da Física Clássica continuam a ser de grande interesse não só por seu valor intrínseco na explicação dos fenômenos naturais, mas, também, por suas aplicações.

Alguns deles estão descritos sucintamente a seguir.

● **Mecânica** — é o estudo do movimento dos corpos sob a ação de forças. A Mecânica Clássica trata de objetos grandes em comparação com átomos e com velocidades pequenas em relação à velocidade da luz. Atualmente, os estudos de Mecânica têm sido revitalizados pelo cálculo de órbitas de satélites, e há programas ativos em técnicas de aproximação e previsão utilizando computadores.

● **Mecânica dos Meios Contínuos** — compreende a Elasticidade e a Reologia, que estudam os corpos deformáveis, e a Mecânica dos Fluidos, que trata do movimento de gases e líquidos sob a ação de forças. Seus princípios constituem os fundamentos da Engenharia Mecânica e de Estruturas. Recentemente, a Mecânica de Fluidos tem-se tornado especialmente importante para a Física dos Plasmas, a Dinâmica de Fluidos, também, tem evidentes aplicações em Aerodinâmica e Meteorologia, bem como na Engenharia Nuclear.

● **Acústica** — trata da geração e propagação de vibrações mecânicas na matéria e de sua aplicação em vários campos da ciência e da tecnologia. Poderia ser descrita como parte da Mecânica dos Meios Contínuos, mas é tratada separadamente por sua grande importância. É outro campo da Física Clássica que ganhou novo impulso recentemente, particularmente no que diz respeito ao domínio de ultrasons.

● **Eletromagnetismo** — antigamente estudado como dois campos distintos, Eletricidade e Magnetismo, o Eletromagnetismo trata da interrelação entre campos elétricos e magnéticos variáveis no espaço e no tempo, bem como de sua propagação. As equações de Maxwell exprimem de forma concisa os fundamentos da teoria eletromagnética. As aplicações na geração, transporte e utilização de Energia e de Telecomunicações são imensas. Esta última tem interfaces com a área multidisciplinar de dispositivos eletromagnéticos e com a área de microondas em Engenharia.

● **Óptica** — a Óptica Física teve um renascimento como área de pesquisa com a descoberta do laser, que ao mesmo tempo gerou fontes coerentes, monocromáticas e de alta potência. Entre os assuntos mais importantes, atualmente, podemos citar Óptica Coerente, incluindo Holografia e vários tipos de Interferometria, Óptica Não-linear, que faz interface com várias áreas importantes da Física Atômica e Molecular, discutidas em outra seção, e Propagação da Luz em meios Inhomogêneos, por exemplo em fibras ópticas que tem óbvias implicações tecnológicas mas que tem, também mostrado ser uma área bastante rica em problemas fundamentais. A Óptica no Brasil é muito usada para investigar fenômenos em sólidos. Por isso neste documento ela está analisada como uma subárea da Física da Matéria Condensada.

● **Termodinâmica** — estuda as relações entre calor e trabalho, e é baseada num pequeno número de leis gerais da Natureza. O poder da Termodinâmica está em sua capacidade de analisar os sistemas mais gerais sem considerar sua estrutura microscópica. Seus princípios e métodos permeiam toda a Física, Química e Engenharia.

Mesmo sem uma descrição mais detalhada das subáreas Clássicas de Fenomenologia, pode-se perceber sua importância para a ciência e a tecnologia. A pesquisa nestes campos no Brasil é quase inexistente. Isto se explica talvez pela origem recente da Física no País. A maioria dos físicos foi atraída para os cam-

pos abertos recentemente, e a Física Clássica, como área de pesquisa, foi relegada a um segundo plano.

## Áreas Interdisciplinares

São as que reúnem duas ou mais das principais áreas da ciência ou da tecnologia, uma delas sendo a Física. A principal dificuldade nesse tipo de atividade científica é a necessidade de se somarem competências de mais de um setor de atividade científica. Algumas dessas áreas de mais atividade no País estão descritas a seguir.

### ● Ciências dos Materiais

A subárea de Ciência dos Materiais está situada na fronteira entre a Física e a Tecnologia de Materiais. Sua importância está no desenvolvimento de novos materiais de uso tecnológico, na compreensão básica das propriedades de materiais, e como elemento de formação de pessoal técnico-científico de alto nível, capaz de enfrentar futuros desafios tecnológicos. A variedade de técnicas experimentais e teóricas modernas e clássicas de alta sofisticação usadas nesse campo, contribui para sua aproximação acentuada à Física do Estado Sólido.

Incluem-se nesta subárea o crescimento e preparação de cristais, deposição de filmes, estudo de propriedades (térmicas, mecânicas, elétricas, magnéticas e ópticas) de cerâmicas, vidros, polímeros, metais e suas ligas, corrosão e oxidação, etc. A preparação de dispositivos de semicondutores, eletromagnéticos e de polímeros, também se enquadra nesta subárea, bem como o desenvolvimento de novos materiais como, por exemplo, materiais compostos.

### ● Biofísica, Física Médica e Engenharia Biomédica

O interesse que grande número de físicos vem tendo no estudo dos processos biológicos tem-se acentuado nestes últimos anos. A Biofísica abrange um vasto campo de interesses, que tende a aumentar. Os problemas a enfrentar são de natureza complexa e altamente desafiantes, exigindo pessoal com boa formação em Física e em Biologia. Pode ser qualificada como uma subárea essencialmente interdisciplinar, onde técnicas clássicas, como por exemplo Raios X, têm sido extensivamente utilizadas ao lado de técnicas mais modernas, como Espectroscopia de Batimento Óptico, Espectroscopia Raman, Ressonância Eletroparamagnética, Efeito Mössbauer, etc.

Em paralelo a essas atividades de pesquisa básica, tem-se desenvolvido de forma acelerada, nos últimos anos, o uso de técnicas largamente utilizadas por físicos e engenheiros na área médica, o que se tem chamado de Física Médica e Engenharia Biomédica. As técnicas que mais se tem empregado são as de ultra-som, Raios X em diagnose médica, radiações ionizantes no tratamento do câncer, e de sinais elétricos das mais diversas origens, tanto em diagnose (por exemplo, em eletrocardiograma) como em análise clínica (medidores contínuos de concentração de íons). O uso da Eletrônica Digital e de métodos computacionais no tratamento de sinais obtidos pelos mais variados tipos de transdutores é, também, uma área de grande processo. O desenvolvimento de órgãos artificiais e os mais varia-

dos tipos de equipamentos auxiliares, como criobisturi, magnetocardiógrafo, tomógrafo de RMN, é o que mais caracteriza a área de Engenharia Médica.

#### ● Fontes Não Convencionais de Energia

A importância crescente que os problemas de energia assumiram no desenvolvimento das nações modernas na última década trouxe aos físicos novas e importantes oportunidades e desafios.

Estes problemas decorrem basicamente da necessidade de desenvolver novos métodos de produção de Energia (solar, ventos, gradiente térmico dos oceanos, ondas, etc.) e de aumentar a eficiência das máquinas comuns, baseadas no uso dos combustíveis fósseis convencionais (carvão, petróleo e gás). Em geral, os métodos e aparelhos envolvidos funcionam na base das leis da mecânica clássica e são conhecidos há muito tempo, havendo, porém, sérios problemas de engenharia na sua realização prática.

Muitos físicos estão participando no estudo dos problemas de energia, ao lado de engenheiros, economistas, urbanistas e cientistas sociais, tendo contribuído significativamente para os progressos do campo.

## **BREVE HISTÓRICO E DADOS SOBRE A FÍSICA NO BRASIL**

<b>DESCRIÇÃO .....</b>	<b>27</b>
<b>DADOS NUMÉRICOS .....</b>	<b>34</b>

# Breve Histórico da Física no Brasil

## DESCRIÇÃO

O desenvolvimento científico do Brasil, em particular o da Física, ocorreu praticamente nos últimos 50 anos. As causas deste atraso estão intimamente ligadas à política colonial imposta pela metrópole, Portugal, que foi um País particularmente atrasado em relação ao progresso científico e cultural do resto da Europa.

A vinda de D. João VI produziu importantes modificações na vida da Colônia: abrindo os portos à navegação e ao comércio exterior; derogando o alvará de 05 de janeiro de 1785 que ordenara o fechamento de todas as fábricas; fundando a Imprensa Régia, em que se imprimiram as primeiras obras editadas no País; inaugurando a primeira biblioteca pública (que é hoje a Biblioteca Nacional) e criando cursos médico-cirúrgicos na Bahia e no Rio de Janeiro, a Academia de Marinha e a Academia Real Militar. As academias e escolas médicas então criadas destinavam-se a fornecer os médicos e engenheiros de que o governo português necessitava para reorganizar o exército e a marinha; elas ampliaram o campo de ação do ensino superior, dando à cultura econômica e técnica a importância que antes era desfrutada apenas pelas atividades literárias.

Em 1858 a Academia Militar foi transformada em Escola Central, com a introdução de uma seção de ciências físicas e matemáticas, mostrando bem claramente que a criação das "escolas profissionais" acabou — em consequência de seu próprio desenvolvimento — por dar origem a um núcleo incipiente de ciências. Em 1874, a Escola Central foi transformada em Escola Politécnica do Rio de Janeiro pelo Visconde do Rio Branco, perdendo seu caráter militar e dedicando-se exclusivamente à formação de engenheiros. Esta transformação foi apoiada por D. Pedro II, conhecido entusiasta da ciência. O apoio do imperador também foi fundamental para a reorganização do Observatório Nacional em 1870 e a criação da Escola de Minas de Ouro Preto em 1875, com a colaboração de um grupo de cientistas franceses.

Outros acontecimentos marcantes para a Física foram a criação em 1893 da Escola Politécnica de São Paulo e da Academia Brasileira de Ciências em 1916. Faltavam porém ao País condições necessárias ao desenvolvimento da pesquisa pura no campo das ciências físicas, que só se concretizaria mais tarde com a criação das Faculdades de Filosofia, Ciências e Letras. Surgiram, não obstante às condições desfavoráveis de sua época, professores e cientistas talentosos que acompanharam o desenvolvimento que ocorria em outras partes do mundo e contribuíram também, se bem que modestamente, para este desenvolvimento.

A estas manifestações esporádicas de atividade científica nacional juntou-se o impulso vigoroso das correntes de imigração e o surto industrial decorrente da Primeira Grande Guerra Mundial. A industrialização lenta, mas progressiva do País e a extraordinária expansão e diferenciação da vida urbana, bem como os progressos tecnológicos no domínio da produção, do transporte e das comunicações criaram fortes pressões sobre o precário sistema de ensino superior existente no País. As perseguições políticas na Europa na década de 30 provocaram grande fluxo migratório de intelectuais, do qual o Brasil aproveitou-se em parte. Destaca-se, a vinda para São Paulo de Gleb Wataghin, que implantou o Departamento de Física da FFCL-USP e, para o Rio de Janeiro, de Bernhard Gross, que deu início a investigações na área de Física dos Sólidos. Eles foram responsáveis pela formação de escolas que se mostraram essenciais para o posterior desenvolvimento da Física brasileira.

No decorrer da década dos anos 40 firmou-se a geração que realmente fundamentou a construção da Física no Brasil. A Universidade de São Paulo cresceu e os grupos experimentais em Física Nuclear começaram a mostrar suas iniciativas, com a implantação dos primeiros aceleradores de partículas. Na parte teórica Mário Schenberg estimulava jovens em São Paulo. No Rio de Janeiro, borbulha a atividade com pioneiros como Gross e Joaquim Costa Ribeiro e os jovens como Leite Lopes (ex-estudante de Luis Freire, em Pernambuco), Jayme Tiomno, Elisa Frota Pessoa, que vão se nucleando em volta da Faculdade de Filosofia da Universidade do Brasil. Eles propiciam a volta para o Rio de Janeiro de Cesar Lattes, que acabara de participar da descoberta do méson, e fundam o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF) em 1949, com o decisivo apoio do Almirante Álvaro Alberto.

Se a Física teve um início tardio, teve, pelo menos, um início correto. O elevado nível dos pioneiros criou uma tradição de rigor e de qualidade que colocou a Física em posição de destaque na ciência brasileira.

A visão e o prestígio do Almirante Álvaro Alberto e de físicos como Leite Lopes, Lattes e Tiomno também foram essenciais para a criação em 1951 do Conselho Nacional de Pesquisas, o CNPq. Embora em geral contando com recursos limitados, o CNPq passou a atuar decisivamente no desenvolvimento da ciência brasileira e da Física em particular. Integrado na comunidade científica através da utilização de assessoria de cientistas de alto nível, o CNPq soube desempenhar papel muito superior ao que seria previsível em face das modestas somas de que dispunha. A criação do CNPq foi um ato político de reconhecimento da importância da ciência no processo de desenvolvimento. Apoiando os programas de formação de pessoal, estimulando a descentralização dos recursos para pesquisa e facilitando o intercâmbio com o exterior, o CNPq deu o primeiro grande impulso para o desenvolvimento da Física brasileira.

Também, no início dos anos 50 foi criada a Campanha (mais tarde Coordenação) de Aperfeiçoamento do Pessoal de Ensino Superior – CAPES, no Ministério da Educação. Durante anos a ação da CAPES foi muito limitada e tímida, mas a partir da década de 70 ela adquiriu grande importância na formação de pessoal pós-graduado no País e no Exterior. Atualmente a CAPES dispõe de um mecanismo exemplar de avaliação dos cursos de pós-graduação, em todas as áreas no Brasil.

A partir de 1950, os laboratórios de Física Nuclear da Universidade de São Paulo passaram por uma fase de expansão, com a instalação de dois aceleradores nucleares: um Betatron e um Van de Graaff. A Física Nuclear e a Física de Partículas Elementares, desenvolvidas na USP e no CBPF, foram os campos nos quais se formaram e quase totalidade dos físicos brasileiros na década de 50. Por outro lado, em 1960, quando o transistor já tinha mais de 10 anos de existência e o laser já tinha sido desenvolvido, não havia nem meia dúzia de físicos de Estado Sólido no País. Só mais tarde a Física da Matéria Condensada ganhou impulso no Brasil.

O fato mais importante para o desenvolvimento da Física no início dos anos 60 foi a criação do FUNTEC, do Banco Nacional de Desenvolvimento Econômico, que dirigido por José Pelúcio Ferreira, passou a subvencionar programas de pós-graduação e atividades de pesquisa fundamental, ampliando a ação de fomento iniciada pelo Conselho Nacional de Pesquisas. Graças a ele foram reequipados os laboratórios de São Paulo e do Rio de Janeiro, que haviam sido instalados a partir de 1950, e surgiram outros grupos em vários pontos do País. Estes programas de pós-graduação multiplicaram o número de físicos em atividade no Brasil.

Por outro lado, a derrubada do governo João Goulart em 1964 trouxe incertezas, restrições e até demissões que afetaram muito a Física. O surto de entusiasmo em torno da Universidade de Brasília não persistiu face às pressões políticas do governo militar, que levaram vários físicos competentes a deixar o País. Mais tarde, as cassações motivadas pelo AI-5 tiraram Leite Lopes e Tiomno do convívio da comunidade científica brasileira. Foi neste ambiente de perseguições que em parte inspirada no modelo da Universidade de Brasília, o governo decretou a reforma universitária em 1968. Apesar de sua origem autoritária, não se pode negar que a reforma estimulou o desenvolvimento das ciências naturais no País, introduzindo as contratações de tempo integral nas Universidades Federais, reforçando a posição dos grupos de pesquisa básica em institutos e departamentos próprios e institucionalizando a pós-graduação.

A década de 1970 foi a mais propícia para o desenvolvimento da Física e de outros campos da ciência no País. Isto deve-se em grande parte à criação do Fundo Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico – FNDCT – e da FINEP (Financiadora de Estudos e Projetos), que dirigida por Pelúcio assumiu o papel de maior agência de financiamento no lugar do BNDE a partir de 1971. Apesar de ter sido aquém do necessário, o crescimento da Física desde 1970 foi formidável. Como mostra a Figura 1 o número de doutores passou de 190 em 1971 para quase 1000 atualmente, o que corresponde a uma taxa média anual de crescimento de aproximadamente 12%. A taxa de aumento do número de mestres também foi dessa ordem. O volume da produção científica, medido pelo número de artigos publicados em revistas de circulação internacional, passou de

90 em 1971 para mais de 800 em 1986. Mais significativo ainda é o fato de que a qualidade dos artigos publicados tem melhorado substancialmente, dando a algumas áreas da Física brasileira uma posição de destaque no cenário internacional.

O crescimento da Física na década de 70 resultou da prioridade orçamentária dada pelo Governo Federal à Ciência e Tecnologia e do dinamismo e agressividade dos físicos. Esta prioridade está refletida por exemplo, no aumento do número de bolsas concedidas pelo CNPq e pela CAPES para a Física. A evolução histórica do número de bolsas do CNPq, mostrada na Figura 2, demonstra claramente o apoio à Física e à Astronomia nos anos 70. As Figuras 3 e 4 demonstram que os programas de pós-graduação em Física responderam aos estímulos governamentais, formando um número de mestres e doutores que tem aumentado continuamente desde a década de 60.

FIGURA 1

Físicos pós-graduados nas instituições de ensino e pesquisa do Brasil. Dados dos documentos Avaliação e Perspectivas do CNPq de 1978 e 1982 e deste levantamento.

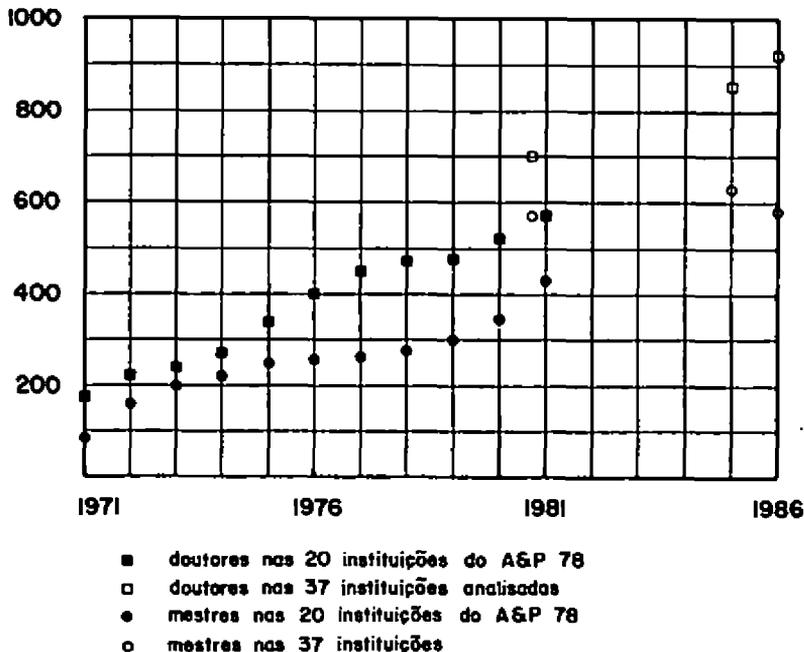
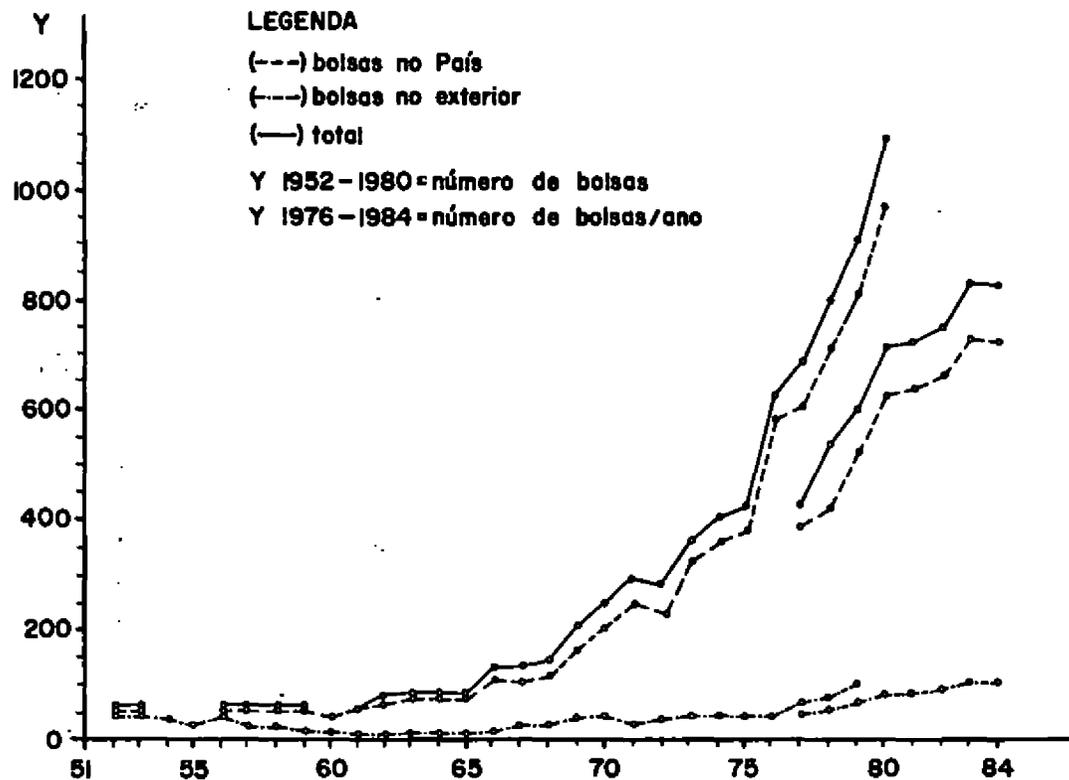


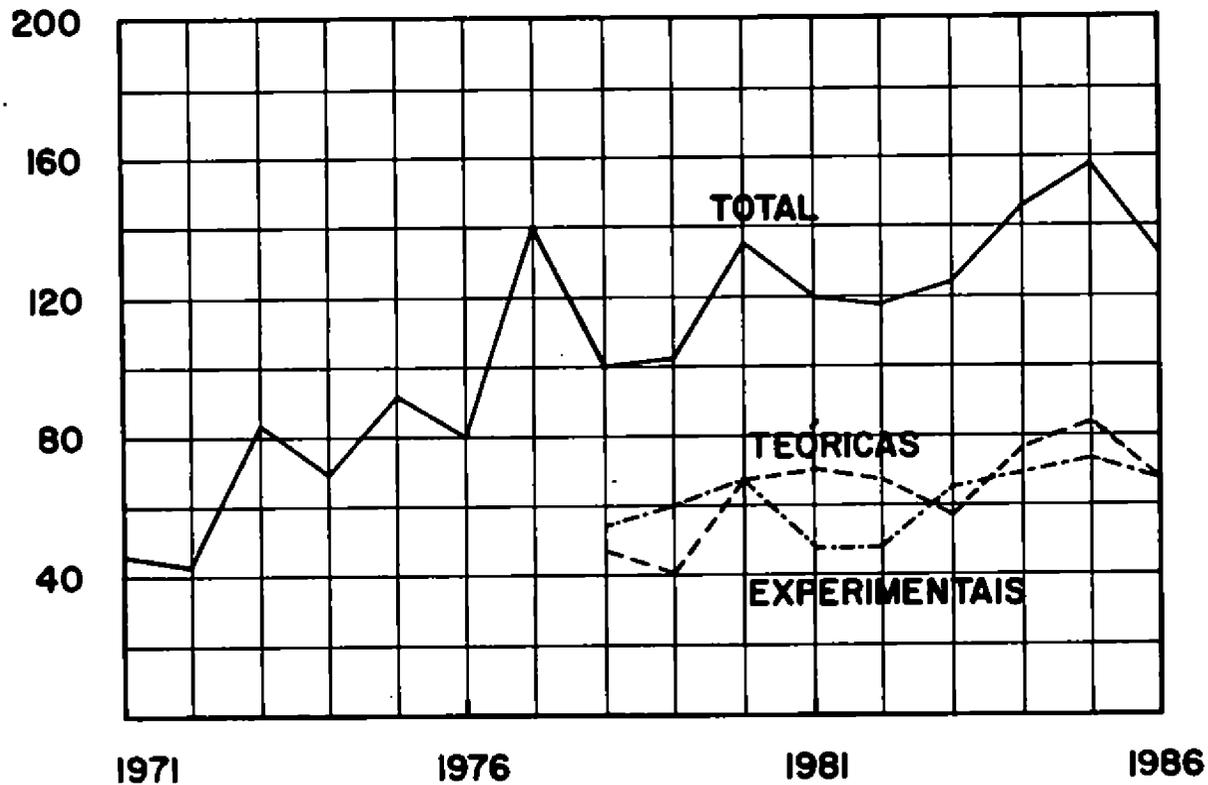
FIGURA 2

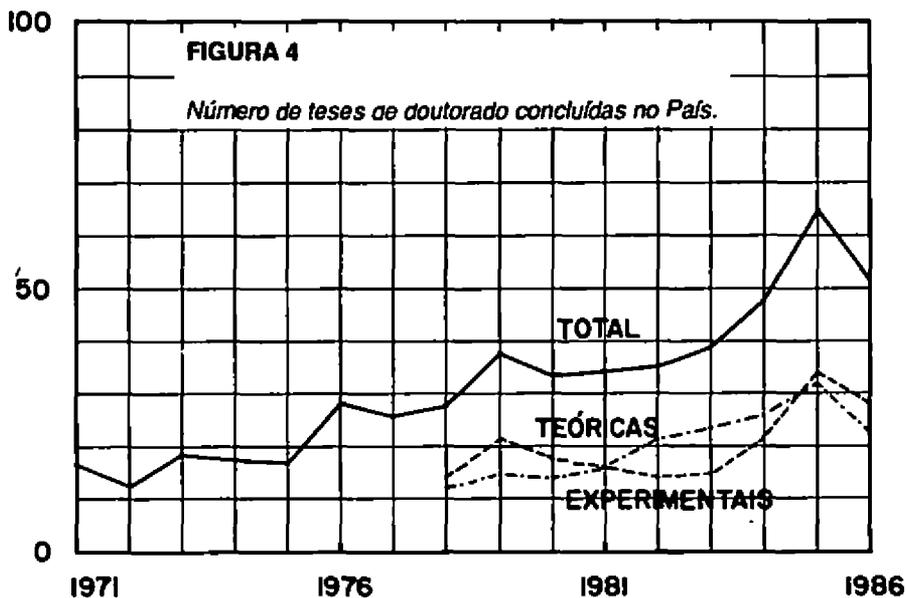
*Evolução do número de bolsas no país, no exterior e total concedidas à física e astronomia pela CNPq.*



8 FIGURA 3

Número de teses de mestrado concluídas no País





Dois aspectos importantes do desenvolvimento da Física brasileira na década de 70 foram a descentralização geográfica do eixo Rio-São Paulo e a diversificação de áreas. A Física da Matéria Condensada, que era quase inexistente nos anos 50, adquiriu uma dimensão considerável. Hoje cerca de 60% dos pesquisadores ativos trabalham nesta área, produzindo resultados científicos relevantes, com um transbordamento natural para a emergente indústria nacional de alta tecnologia. Uma medida da descentralização geográfica é o fato da região Nordeste ter, hoje cerca de 100 físicos com doutorado e uma produção científica per capita maior do que a média nacional.

Uma indicação da vitalidade da Física brasileira é a variedade de encontros, reuniões e conferências tópicas cujo nível científico melhora a cada ano. Há vários anos a Sociedade Brasileira de Física tem patrocinado reuniões anuais de Física da Matéria Condensada, Física Nuclear e Física de Partículas Elementares nas cidades das águas (Cambuquira, São Lourenço, Poços de Caldas e Caxambu), além da reunião anual conjunta com a SBPC e o Simpósio Nacional de Ensino de Física.

Infelizmente, esta vitalidade da Física é restrita à área acadêmica. Quase não existe atividade de pesquisa e desenvolvimento na indústria, pois sendo predominantemente multinacional, ela não tem interesse em desenvolver projetos em nosso País. Também quase não existem laboratórios nacionais voltados para pesquisa e transferência de tecnologia das universidades para as empresas. A título de comparação com o que ocorre nos países industrializados, no Japão e nos Estados Unidos mais de 50% dos físicos com doutorado estão na indústria enquanto que no Brasil eles não chegam a 2%. Na verdade a atividade de Física nas empresas era inexistente há alguns anos atrás, sendo seu crescimento recente devido ao desenvolvimento tecnológico nacional do qual a Lei da Reserva de In-

formática é um importante instrumento. A ausência de um mercado de trabalho maior e mais atrativo nas empresas é um dos maiores entraves para o desenvolvimento da Física no País.

O desenvolvimento da Física nos últimos anos foi prejudicado pela diminuição dos recursos destinados à ciência e tecnologia. Entre 1979 e 1984, a participação conjunta de CNPq, CAPES e FINEP caiu de 1,16% para 0,58% no orçamento da União e de 54,9% para 12,6% no total que esta destina à ciência e tecnologia. Neste processo, o mais sacrificado foi o FNDCT que, de um valor correspondente a 31,9% do orçamento da União para C & T em 1979, baixou para 5,9% do orçamento realizado em 1984 e 3,5% do orçamento planejado para 1985. Como resultado a FINEP foi gradualmente deixando de investir na expansão dos laboratórios, passando principalmente a custear o funcionamento das instituições existentes. CNPq e CAPES foram menos sacrificados mas sua participação no orçamento realizado também caiu de 15,0% e 4,2% em 1979 para 9,4% e 2,9% em 1984. Em consequência da contratação e da instabilidade no financiamento, os grupos de pesquisa têm tido grande dificuldade em manter sua infraestrutura e adquirir equipamentos mais sofisticados. A crise afeta tanto as instituições mais tradicionais quanto as novas. As primeiras não têm conseguido modernizar seus laboratórios e vão gradualmente perdendo sua capacidade de competir na ciência de fronteira. Por outro lado, os grupos emergentes encontram enormes obstáculos para montar laboratórios e para dar condições de trabalho à muitos doutores recém-formados em física experimental. Além da falta de recursos, os grupos experimentais continuam com enormes dificuldades para manter os equipamentos de pesquisa, importar componentes e peças de reposição e algumas matérias primas notadamente gás hélio, fundamental para as pesquisas em baixas temperaturas.

Evidentemente, tanto os números relativos quanto os absolutos são pequenos para fazer face às pretensões de desenvolvimento científico e tecnológico do País. É preciso realizar um esforço muito maior do que tem sido feito. A criação do Ministério da Ciência e Tecnologia em 1985 trouxe novas esperanças para a comunidade científica. O MCT tem conseguido aumentar substancialmente os recursos do CNPq e recuperar em parte o FNDCT. O Ministério promete fazer os recursos federais para C & T alcançarem 2% do PNB, o que representará um impulso significativo para o desenvolvimento científico nacional.

## DADOS NUMÉRICOS

A evolução recente e a situação atual da Física no País estão retratadas numericamente nas tabelas desta seção e nos gráficos anteriormente apresentados. Os dados referentes ao período 1971-1981 foram obtidos dos documentos Avaliação Perspectivas do CNPq de 1978 e 1982. Todos os dados aqui apresentados foram reconferidos pelas próprias instituições que têm portanto completa responsabilidade por sua veracidade. Mas é importante notar que os dados referentes a 1986 não estão completos.

A Tabela 1 mostra que o número total de doutores nas 37 instituições é 927. Quando somados aos doutores que estão nas empresas, nas instituições menores ou que estão com bolsas de pós-doutorado sem vínculo empregatício, este número se aproxima de 1000. Um fato que chama a atenção nesta Tabela é que os doutores experimentais representam 48% do total, que é praticamente o mes-

mo percentual de 1981. O mesmo ocorre com os mestres, uma vez que tanto em 1981 quanto hoje os experimentais representam 56% do total. Nos países desenvolvidos a proporção de físicos experimentais é muito maior. É inegável que a manutenção do número reduzido de experimentais tem sido prejudicial ao desenvolvimento da Física no País. Esta distorção decorre em parte das dificuldades enfrentadas para realizar pesquisa experimental nas nossas universidades, mas também é fruto da falta de um esforço maior da comunidade para alterar esta situação.

A Tabela 2 contém informações sobre os cursos de graduação em Física. Ela mostra que o número de alunos aumentou em cerca de 20% de 1978 a 1985 (as informações de 1986 não estão completas). Por outro lado o número de alunos formados tem sido praticamente constante e da ordem de 7% do número total. Isto indica uma enorme perda por evasão ou desistências e sugere que a situação dos cursos de graduação seja examinada em profundidade pela comunidade.

As Tabelas 3 e 4 contém dados relativos a pós-graduação, que também estão mostrados graficamente nas Figuras 5 e 6. Elas mostram que de 1978 a 1986 o número de estudantes no mestrado cresceu 20% e o de doutorado 60%. Esta evolução não é satisfatória considerando que o número de doutores cresceu 88%. Por outro lado o número de formados em cada ano é baixo, sendo em média 20% para os mestres e 10% para os doutores relativos aos respectivos totais de alunos. Estas baixas taxas de formados indicam não somente uma alta perda mas também uma excessiva duração dos programas de pós-graduação. Espera-se que a recente valorização das bolsas de pós-graduação pelo Governo Federal traga mais estímulos para os programas de formação, atraindo maior número de estudantes bem qualificados. Por outro lado é desejável que nas instituições com tradição em mestrado e doutorado, os bons alunos sejam estimulados a ingressar diretamente no doutorado, diminuindo assim o tempo de formação pós-graduada, que é em geral muito longo no País. Um dado alentador da Tabela 4 é a aparente tendência de aumento do número de teses de doutorado experimentais em relação às teóricas, mostrada nos últimos anos.

A Tabela 5 mostra os números de artigos publicados em revistas de circulação internacional. Apesar da média nacional de artigos ser ainda baixa (0,9 artigos/doutor-ano) em comparação à de países desenvolvidos, ela tem evoluído nos últimos anos.

A Tabela 6 apresenta as principais subáreas de pesquisa das instituições avaliadas, segundo a divisão utilizada neste documento.

Finalmente a Tabela 7 mostra a distribuição aproximada dos físicos com doutorado nas grandes áreas de pesquisa. Para esta tabela foram utilizados os dados obtidos no levantamento das comissões relatoras, cujo total de doutores é 849. Este número é inferior ao total da Tabela 1 (927), pois alguns físicos trabalham em subáreas que não constam do levantamento e outros não estão ativamente envolvidos em atividades de pesquisa.

Não foi possível obter dados sobre os recursos investidos nas várias instituições. Alguns números estão apresentados nas informações sobre os grupos de pesquisa nas seções seguintes. Entretanto, é possível comparar alguns números globais da Física no País, com os correspondentes em Países industrializados, tendo o cuidado de não fazer extrapolações simplistas e apressadas. Nos Estados Unidos há cerca de 30 mil físicos com Doutorado, dos quais 10 mil estão em atividades em outras áreas, 10 mil trabalham em Física nas indústrias e 10 mil

estão nas universidades e nos laboratórios nacionais de pesquisa. A pesquisa básica em Física nessas instituições é financiada principalmente por quatro agências federais, a National Science Foundation (NSF), a NASA, o Departamento de Energia (DOE) e o Departamento de Defesa (DOD). Nos últimos anos, essas quatro agências dispenderam em média com a Física cerca de US\$ 900 milhões/ano (NSF 16%, NASA 11%, DOD 12% e DOE 39%, esta última principalmente com os laboratórios nacionais). Isto corresponde a US\$ 90 mil/doutor-ano em média nas universidades e laboratórios nacionais. Esta quantia inclui os salários dos pesquisadores dos laboratórios federais, mas não os dos professores universitários que são pagos pelas universidades, que são mantidas pelos estados ou por recursos privados.

Por outro lado, no Japão a pesquisa nas universidades é quase totalmente financiada pelo Ministério da Educação. Lá existem em todas as áreas cerca de 450 mil cientistas, dos quais 230 mil estão na indústria, 180 mil nas universidades e 40 mil nos laboratórios. O orçamento do Ministério da Educação em 1986 foi de US \$ 9 bilhões, o que corresponde a US \$ 50 mil/cientista-ano. Este número é semelhante ao americano se levarmos em conta que ele inclui áreas menos dispendiosas que a Física.

No Brasil, por outro lado, os recursos federais para custeio e investimento por doutor são bem menores do que nos países industrializados. As operações contratadas pela FINEP entre 1980 e 1985 (inclusive) na área da Física somaram cerca de US \$ 60 milhões, o que dá uma média de US\$ 10 milhões/ano. Neste período, os auxílios, concedidos pelo CNPq, à pesquisa em Física não ultrapassam US\$ 2 milhões/ano na média. Quando somados aos gastos com salários e bolsas do CNPq e da CAPES, os recursos federais para a Física nos anos recentes não ultrapassaram US \$ 24 milhões/ano. Isto corresponde a uma quantia inferior a US \$ 30 mil/doutor-ano para todos os gastos com salários, custeio e investimento, que é uma cifra bem menor do que as do Japão e dos Estados Unidos.

A menor disponibilidade de recursos por doutor, somada à falta de tradição e às dificuldades para realizar pesquisa no Brasil, faz com que o esforço que o País realiza para formar recursos humanos não esteja ainda produzindo os benefícios que se pode esperar de nossa Física.

Tabela 1 - RECURSOS HUMANOS NAS INSTITUIÇÕES DE ENSINO E PESQUISA EM DEZEMBRO DE 1988

Instituição	DOCENTES / PESSOAS ADICIONAIS										
	Doutores			Mestres			Técnicos de nível superior		Técnicos de nível médio		Pessoal Administrativo
	Taor	Exp	Total	Taor	Exp	Total	Total	de nível superior	de nível médio	Administrativo	
<b>NORTE - NORDESTE</b>											
UF Amazonas	3	1	4	8	1	9	8	0	2	1	
UF Alagoas	6	1	7	2	6	8	2	4	4	8	
UF Bahia	6	4	10	10	9	19	4	10	10	35	
UF Ceará	5	12	17	8	15	24	2	15	5	5	
UF Pará	3	4	7	3	3	6	0	2	2	5	
UF Pernambuco	18	3	22	16	0	16	0	3	3	8	
UF R. G. Norte	15	9	24	0	1	1	1	15	15	23	
UF Sergipe	13	2	15	10	12	22	1	4	4	7	
Sub-total	1	0	1	3	0	3	0	2	2	2	
	71	36	107	61	47	108	18	57	57	94	
<b>CENTRO - CENTRO-OESTE</b>											
UF Brasília	22	3	25	9	1	10	1	5	5	13	
UF Goiás	1	7	8	4	4	8	0	8	8	7	
UF M. Grosso do Sul	1	0	1	4	4	8	0	2	2	2	
Sub-total	24	10	34	17	12	29	1	13	13	22	
<b>SUDESTE</b>											
UF Campinas - UNICAMP	36	32	128	2	4	6	32	105	109	109	
CBPF	52	16	68	6	9	15	29	54	34	34	
Inst. Energia Nuclear - RU	0	4	4	0	14	14	2	11	3	3	
UF Esp. Santo	8	5	13	7	6	13	0	3	5	5	
Inst. Física Teórica - IFT	15	0	15	0	0	0	2	1	1	9	
INPE	8	6	14	10	14	24	0	6	2	2	
ITACATIA	13	5	19	3	1	4	0	9	3	3	
UF Fluminense	24	8	33	32	19	41	2	10	10	32	
UF Minas Gerais	14	22	36	9	19	28	3	12	16	16	
UF Est. Rio de Janeiro	8	4	12	8	10	18	1	3	24	24	
UF Rio de Janeiro	43	13	56	35	20	55	5	23	42	42	
PUC - RJ	21	16	37	0	1	1	5	13	13	13	
UF Viosa	0	8	8	4	10	14	1	0	3	3	
IPEN - SP	0	42	42	0	43	43	22	1	1	1	
UNESP - Rio Claro	5	4	9	3	6	11	0	9	152	152	
USP - SP	63	69	132	2	23	25	24	91	44	23	
USP - São Carlos	15	24	39	3	9	12	22	44	8	8	
UF São Carlos	13	12	25	1	7	8	0	8	3	3	
Sub-total	308	360	688	125	217	332	150	394	394	474	
<b>SUL</b>											
UF Londrina	2	3	5	4	7	11	0	4	1	1	
UF Maringá	3	0	3	22	0	22	1	10	3	3	
UF Paraná	7	3	10	8	4	18	0	2	5	5	
PUC - RGS	0	0	0	0	18	18	1	3	4	4	
UF R. G. Sul	28	34	60	15	15	28	14	34	34	46	
UF Santa Catarina	8	12	18	15	14	29	1	6	15	15	
UF Santa Maria	1	1	2	15	15	15	1	8	8	2	
Sub-total	45	53	98	77	52	129	17	67	76	76	
Total	478	449	927	280	328	598	184	531	531	666	

Tabela 2 - ESTUDANTES DA GRADUAÇÃO

Instituição	Estudantes no curso de graduação em Física										Alunos formados no curso de graduação em Física									
	78	79	80	81	82	83	84	85	86	87	88	89	90	91	92	93	94	95	96	
<b>NORTE - NORDESTE</b>																				
U. Aracaju	75	71	66	118	125	128	98	106	113	1	0	8	4	2	1	14	16	6		
UF Alagoas	114	109	89	72	149	125	229	267	245	7	4	14	14	7	4	6	3	4		
UF Bahia	151	113	136	155	149	125	229	267	245	7	4	14	14	7	4	6	3	4		
UF Ceará	228	247	282	228	242	256	223	180	9	4	11	4	9	11	6	7	4	11		
UF Paraíba	30	30	40	40	44	60	62	62	62	6	4	5	4	2	1	2	2	3		
UF Pernambuco	81	80	146	223	184	163	110	90	121	5	4	5	4	2	3	6	2	2		
UF Rio Grande do Norte	198	220	212	232	22	72	62	62	62	17	10	13	12	2	9	10	10	8		
UF Rio Grande do Sul	67	72	94	108	138	141	134	146	146	4	6	8	12	10	7	6	8	5		
UF Sergipe	6	71	86	62	107	117	123	116	129	2	1	1	3	2	1	3	7	7		
Sub-total	858	1052	1277	1246	1264	1048	1003	1137	1160	42	43	62	69	66	49	49	46	41		
<b>CENTRO CENTRO-OESTE</b>																				
UF Brasília	137	130	137	113	106	106	124	106	106	15	13	14	19	14	9	15	9	4		
UF Goiás	100	109	120	140	134	139	142	119	112	6	16	9	10	12	10	7	11	11		
UF Mato Grosso do Sul			33	42	64	71	72	62										4		
Sub-total	237	239	257	285	282	309	337	286	188	21	29	23	29	26	19	22	24	4		
<b>SUDESTE</b>																				
Unicamp	247	231	244	253	184	253	253	234	229	19	23	23	23	18	24	34	45	34		
UF Esp. Santo	71	117	189	241	133	106	113	95	111	2	0	1	5	10	4	2	3	4		
UF Fluminense	370	454	529	578	518	245	240	243	213	18	14	15	21	16	26	15	29	30		
UF Minas Gerais	218	225	229	229	255	264	250	244	213	20	20	20	20	20	29	45	25	30		
UF São Carlos	219	207	223	241	457	457	440	385	451	12	8	8	12	6	8	8	16	16		
UF Rio de Janeiro	368	450	445	478	452	451	436	401	300	15	18	31	26	38	20	34	37	40		
PUC - RJ	40	40	44	57	58	58	41	35	40	4	7	7	11	9	9	10	10	6		
UF Vespasiano																		1		
UNESP - Rio Claro	91	84	78	65	78	68	107	116	116	17	17	7	6	8	10	7	12	12		
UNESP - SP	1471	1238	1591	1318	1020	1580	1694	1665	1511	130	115	102	110	132	61	97	62	63		
USP - São Carlos	64	80	99	121	89	80	127	157	168	4	4	12	4	12	3	6	12	24		
UF São Carlos	153	162	175	181	186	183	200	177	162	6	13	7	17	8	4	14	18	15		
Sub-total	3340	3388	3620	3660	3552	3654	3780	2905	256	245	229	239	269	259	269	269	256	205		
<b>SUL</b>																				
UF Londrina	45	96	125	143	143	141	129	109												
UF Maringá	260	239	197	178	178	204	240	293	325	313										
UF Paraná	217	236	176	175	204	240	293	325	313	11	7	6	7	2	6	4	16	7		
PUC - RGS					56	52	60	76	66											
UF Rio de Janeiro	310	315	320	325	353	341	361	343	346	15	22	19	11	13	12	22	14	22		
UF Rio Grande do Sul	11	16	62	60	154	164	156	157	174	3	8	4	5	8	8	6	10	5		
UF Santa Catarina																				
Sub-total	843	902	672	622	911	828	999	1130	921	56	66	50	38	43	40	61	66	42		
Total	5378	5591	6256	6313	6769	6349	6353	6543	6674	377	382	364	383	414	371	491	377	282		

Tabela 3 – ESTUDANTES NO CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FÍSICA

Instituição	78		79		80		81		82		83		84		85		86	
	M	O	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D
<b>NORTE - NORDESTE</b>																		
UF Bahia	12		10		9		11		11		13		12		11		10	-
UF Ceará	32		34		19		10		8		13		18		15		16	-
UF Paraíba	13		14		22	5	20	5	20	7	21	8	21	7	18	6	22	5
UF Pernambuco	28	10	25	14	21	11	23	15	20	16	22	15	21	13	22	18	21	12
<b>Sub-total</b>	<b>85</b>	<b>10</b>	<b>83</b>	<b>14</b>	<b>71</b>	<b>16</b>	<b>64</b>	<b>20</b>	<b>59</b>	<b>23</b>	<b>69</b>	<b>23</b>	<b>72</b>	<b>20</b>	<b>64</b>	<b>22</b>	<b>74</b>	<b>17</b>
<b>CENTRO CENTRO-OESTE</b>																		
U Brasília	11		5		11		11		7		10		7		11		14	
<b>SUDESTE</b>																		
UNICAMP	60	81	74	70	66	53	74	54	79	49	102	58	129	88	134	107	141	125
CBPF	46	49	63	57	84	61	62	81	60	78	58	79	56	82	52	68	39	64
I Física Teórica-IFT	13	5	17	5	19	7	15	10	15	11	17	11	16	13	20	11	19	10
ITA - CTA	16	2	18	2	25	5	19	2	20	2	14	3	20	3	15	2	18	4
UF Fluminense	21		24		26		31		36		43		36		35	4	35	4
UF Minas Gerais	27	13	35	13	38	10	37	19	36	31	37	27	30	24	31	26	35	24
UF Rio de Janeiro	54		60		52	9	61	14	51	19	50	21	33	36	30	38	34	43
PUC - RJ	28	16	29	17	29	15	23	18	21	18	26	23	27	22	22	28	28	20
USP - SP	130	110	131	70	151	88	156	94	145	102	149	108	161	119	168	120	148	122
USP - São Carlos	40	18	44	32	59	33	83	38	123	71	124	82	138	83	140	109	74	76
<b>Sub-total</b>	<b>455</b>	<b>294</b>	<b>495</b>	<b>266</b>	<b>549</b>	<b>279</b>	<b>561</b>	<b>330</b>	<b>588</b>	<b>381</b>	<b>620</b>	<b>412</b>	<b>646</b>	<b>468</b>	<b>645</b>	<b>513</b>	<b>571</b>	<b>492</b>
<b>SUL</b>																		
UF Paraná													12		15		17	
UF R G Sul	29	30	43	34	55	27	53	39	39	33	36	40	40	40	38	42	43	31
UF Santa Catarina	34		37		31		35		40		40		34		30		32	
<b>Sub-total</b>	<b>63</b>	<b>30</b>	<b>80</b>	<b>34</b>	<b>86</b>	<b>27</b>	<b>88</b>	<b>39</b>	<b>79</b>	<b>33</b>	<b>76</b>	<b>40</b>	<b>86</b>	<b>40</b>	<b>83</b>	<b>42</b>	<b>92</b>	<b>31</b>
<b>Total</b>	<b>614</b>	<b>334</b>	<b>663</b>	<b>314</b>	<b>717</b>	<b>322</b>	<b>724</b>	<b>389</b>	<b>731</b>	<b>437</b>	<b>775</b>	<b>475</b>	<b>811</b>	<b>528</b>	<b>809</b>	<b>577</b>	<b>751</b>	<b>540</b>

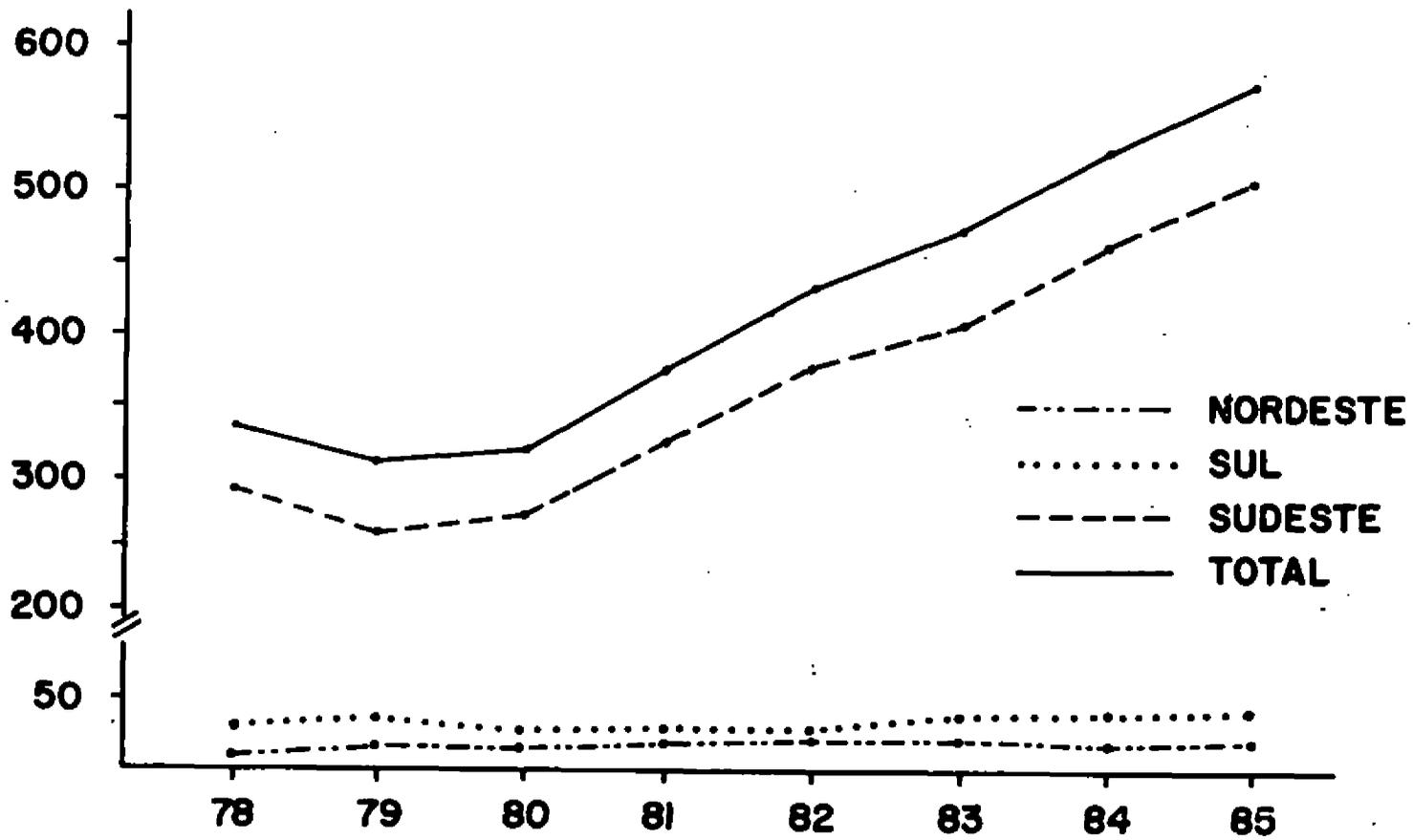
Tabela 4a - DISSERTAÇÕES E TESES DEFENDIDAS - 1978/1981

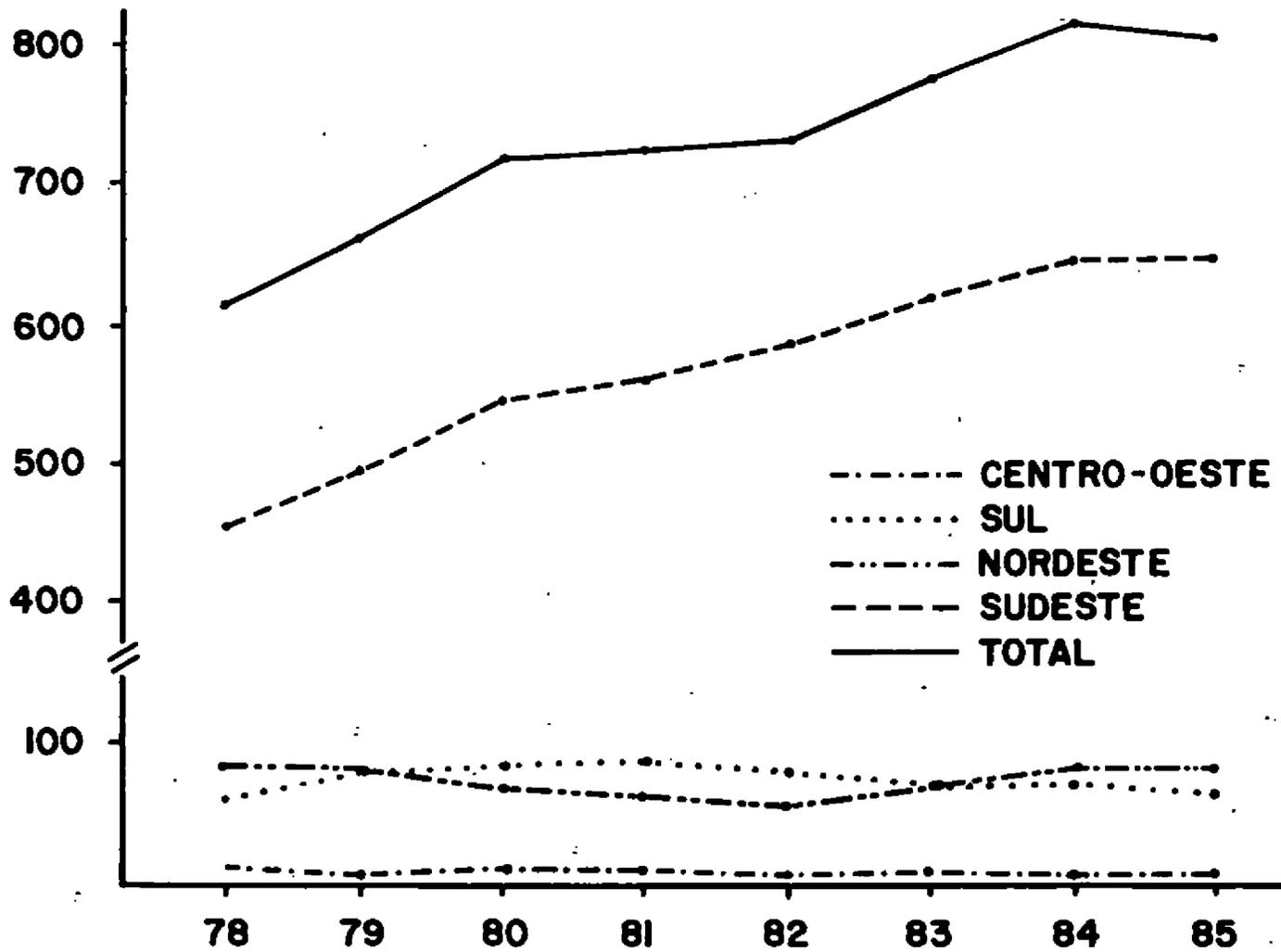
Instituição	1978				1979				1980				1981			
	T	M	D	E	T	M	D	E	T	M	D	E	T	M	D	E
<b>NORTE-NORDESTE</b>																
UF Bahia	0	1			1	0			1	0			2	0		
UF Ceará	0	1			0	3			3	3			1	4		
UF Paraíba	3	0							1	0			4	0		
UF Pernambuco	2	0			6	1			4	0	2		3	3	2	
<b>Sub-total</b>	<b>5</b>	<b>2</b>			<b>7</b>	<b>4</b>			<b>9</b>	<b>3</b>	<b>2</b>		<b>10</b>	<b>7</b>	<b>2</b>	
<b>CENTRO-CENTRO-OESTE</b>																
U Brasília					1	0			1	2			3	0		
<b>SUDESTE</b>																
Unicamp	2	16	4	8	4	20	4	5	4	13	7	7	8	8	1	6
CBPF	6	1	3	1	3		2	1	8	6	1	1	4	4	4	0
I Fís. Teórica-IFT	3	0	1	0	6	0			6	0			2	0	1	0
UF Fluminense									1	1			2	2		
UF Minas Gerais	2	2			2	3	1	0	5	4			4	2		
UF Rio de Janeiro	5	1			2	5			5	5			5	3		
PUC - RJ	7	2			2	2	2	0	5	1	2	2	4	4	2	0
USP - SP	12	12	5	2	8	14	8	4	15	13	4	3	14	12	4	4
USP - São Carlos	1	9	1	2	1	7	1	3	1	12	2	1	3	4	2	6
<b>Sub-total</b>	<b>38</b>	<b>43</b>	<b>14</b>	<b>13</b>	<b>28</b>	<b>54</b>	<b>18</b>	<b>13</b>	<b>50</b>	<b>55</b>	<b>16</b>	<b>14</b>	<b>46</b>	<b>39</b>	<b>14</b>	<b>16</b>
<b>SUL</b>																
UF Paraná																
UF R G Sul	4	6	1	0	5	2	4	3	6	2	0	1	9	0	1	1
UF Santa Catarina	1	2							2	6			3	3		
<b>Sub-total</b>	<b>5</b>	<b>8</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>3</b>	<b>8</b>	<b>8</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>12</b>	<b>3</b>	<b>1</b>	<b>1</b>
<b>Total</b>	<b>48</b>	<b>53</b>	<b>15</b>	<b>13</b>	<b>41</b>	<b>60</b>	<b>22</b>	<b>16</b>	<b>68</b>	<b>68</b>	<b>18</b>	<b>15</b>	<b>71</b>	<b>49</b>	<b>17</b>	<b>17</b>

Tabela 4b - DISSERTAÇÕES E TESES DEFENDIDAS - 1982/1988

Instituição	1982				1983				1984				1985				1986			
	T	M	E	D	T	M	E	D	T	M	E	D	T	M	E	D	T	M	E	D
<b>NORTE-NORDESTE</b>																				
UF Bahia	1	0			0	2			1	0			0	1			1	0	0	0
UF Ceará	2	2							2	1			1	1			1	1	0	0
UF Paraíba					5	0	1	0	2	0	1	0	3	0						
UF Pernambuco	1	5	1	0	1	4	0	0	2	2	2	0	4	3	2	2	8	2	3	2
<b>Sub-total</b>	<b>4</b>	<b>7</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>6</b>	<b>6</b>	<b>1</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>0</b>	<b>7</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>3</b>	<b>3</b>	<b>2</b>
<b>CENTRO-CENTRO-OESTE</b>																				
UF Brasília	2	1			4	0			0	1			0	1						
<b>Sub-total</b>	<b>2</b>	<b>1</b>			<b>4</b>	<b>0</b>			<b>0</b>	<b>1</b>			<b>0</b>	<b>1</b>			<b>2</b>			
<b>SUDESTE</b>																				
Unicamp	1	5	3	3	2	7	4	5	6	20	4	2	7	29	2	8	3	2	0	1
CBPF	9	1	5	0	6	1	8	2	10	0	5	3	12	3	10	4	5	17	2	1
I Fis. Teórica - IFT	8	0	2	0	5	0	0	0	3	0	1	0	2	0	1	0	6	0	4	3
ITA/CTA																	4	0	1	0
UF Fluminense	1	0			4	2			1	2			2	1			3	0		
UF Minas Gerais	6	5	1		1	4			5	3	1		8	6		1	5	2	2	3
UF Rio de Janeiro	6	2	2	0	3	5	2	0	11	2	3	0	5	8	1	3	4	1	1	2
PUC - RJ	1	3	1	0	1	4			6	2	1	3	6	3	4	3	5	1	2	1
USP - SP	19	9	3	6	11	4	8	3	16	18	8	6	27	8	7	7	18	17	5	7
USP - São Carlos	4	8	1	3	9	23	1	4	4	10	2	7	1	9	3	5	4	12	2	6
<b>Sub-total</b>	<b>55</b>	<b>33</b>	<b>18</b>	<b>12</b>	<b>42</b>	<b>50</b>	<b>21</b>	<b>14</b>	<b>64</b>	<b>57</b>	<b>23</b>	<b>21</b>	<b>68</b>	<b>63</b>	<b>28</b>	<b>29</b>	<b>55</b>	<b>52</b>	<b>19</b>	<b>24</b>
<b>SUL</b>																				
UF Paraná																		1		
UF R G Sul	8	5	2	2	8	6	1	2	5	3	0	1	5	4	2	2	1	6	1	2
UF Santa Catarina		4			1	3			1	8			4	1			2	5		
<b>Sub-total</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>7</b>	<b>9</b>	<b>1</b>	<b>2</b>	<b>6</b>	<b>9</b>	<b>0</b>	<b>1</b>	<b>9</b>	<b>5</b>	<b>2</b>	<b>2</b>	<b>4</b>	<b>11</b>	<b>1</b>	<b>2</b>
<b>Total</b>	<b>69</b>	<b>50</b>	<b>21</b>	<b>14</b>	<b>59</b>	<b>65</b>	<b>23</b>	<b>18</b>	<b>77</b>	<b>70</b>	<b>28</b>	<b>22</b>	<b>84</b>	<b>74</b>	<b>32</b>	<b>33</b>	<b>69</b>	<b>66</b>	<b>23</b>	<b>28</b>

### ESTUDANTES DE DOUTORADO





**Tabela 5 - ARTIGOS PUBLICADOS EM REVISTAS DE CIRCULAÇÃO INTERNACIONAL**

Instituição	78	79	80	81	82	83	84	85	86
<b>NORTE - NORDESTE</b>									
UF Amazonas	-	-	-	2	2	1	2	1	3
UF Alagoas	-	3	3	3	6	14	12	16	15
UF Bahia	1	5	6	4	4	2	8	4	8
UF Ceará	-	7	6	9	10	16	10	7	13
UF Pará	2	-	2	-	1	1	2	1	3
UF Paraíba	3	4	9	4	12	20	14	16	20
UF Pernambuco	26	18	37	37	42	47	48	31	34
UF R G Norte	4	15	18	11	15	13	14	28	23
UF Sergipe	-	-	1	-	2	-	-	-	1
<b>Sub-total</b>	<b>36</b>	<b>52</b>	<b>80</b>	<b>70</b>	<b>94</b>	<b>114</b>	<b>110</b>	<b>104</b>	<b>120</b>
<b>CENTRO - CENTRO-OESTE</b>									
U Brasília	6	7	13	11	13	21	24	31	26
UF Goiás	1	4	4	4	7	4	5	6	
UF M Grosso do Sul						4	2	0	0
<b>Sub-total</b>	<b>7</b>	<b>11</b>	<b>17</b>	<b>15</b>	<b>20</b>	<b>29</b>	<b>31</b>	<b>37</b>	<b>26</b>
<b>SUDESTE</b>									
UE Campinas - Unicamp	95	106	127	153	142	118	153	128	
CBPF	36	58	64	41	44	59	53	74	91
I Energia Nuclear - RJ	-	1	-	5	1	2	3	2	0
UF Esp. Santo	5	1	7	6	3	3	6	12	5
I Física Teórica - IFT	9	8	21	9	11	11	8	12	22
ITA - CTA	2	2	1	26	30	32	24	30	26
UF Fluminense	4	14	15	23	17	25	14	12	14
UF Minas Gerais	11	13	20	18	25	35	44	52	34
U Est. Rio de Janeiro	-	-	-	-	-	-	-	-	-
UF Rio de Janeiro	42	35	19	27	31	30	33	36	61
PUC - RJ	26	39	39	32	29	31	45	33	39
UF Viçosa	-	-	-	-	3	4	5	7	2
IPEN - SP									
UNESP - Rio Claro	-	1	2	3	3	4	5	6	
USP - SP	62	70	51	63	79	76	87	75	104
USP - São Carlos	20	31	42	33	53	42	48	61	65
UF - São Carlos	5	10	13	9	26	14	10	13	5
<b>Sub-total</b>	<b>317</b>	<b>389</b>	<b>421</b>	<b>448</b>	<b>497</b>	<b>488</b>	<b>538</b>	<b>553</b>	<b>468</b>
<b>SUL</b>									
UF Londrina	2	4	3	-	1	4	1	1	
UF Maringá	-	-	-	-	-	-	-	4	
UF Paraná									8
PUC - RGS	-	-	-	-	2	3	2	3	
UF R G Sul	30	59	58	57	46	62	47	59	47
UF Santa Catarina	-	2	3	6	3	13	13	12	18
<b>Sub-total</b>	<b>32</b>	<b>65</b>	<b>64</b>	<b>63</b>	<b>52</b>	<b>82</b>	<b>63</b>	<b>79</b>	<b>73</b>
<b>Total</b>	<b>392</b>	<b>517</b>	<b>582</b>	<b>596</b>	<b>663</b>	<b>713</b>	<b>742</b>	<b>773</b>	<b>687</b>

**Tabela 6 – PRINCIPAIS SUBÁREAS DE PESQUISA DAS INSTITUIÇÕES**

<b>INSTITUIÇÃO</b>	<b>ÁREAS DE PESQUISA</b>
<b>NORTE-NORDESTE</b>	
U Amazonas	Matéria Condensada (E): Semicondutores
UF Alagoas	Matéria Condensada (T): Física Estatística e Magnetismo
UF Bahia	Matéria Condensada (T e E): Física Estatística e Cristalografia
UF Ceará	Matéria Condensada (T e E): Óptica, Física Estatística, Semicondutores, Magnetismo e Mössbauer
UF Paraíba	Teoria de Campos, Relatividade e Gravitação Matéria Condensada (T): Óptica, Física Estatística, Magnetismo Física Nuclear (T)
UF Pernambuco	Física Atômica e Molecular (T e E) Matéria Condensada (T e E): Óptica, Física Estatística, Semicondutores, Magnetismo e Ressonância Magnética Física Nuclear (T)
UF R G Norte	Matéria Condensada (T e E): Física Estatística, Semicondutores, Magnetismo e Mössbauer
UF Sergipe	Matéria Condensada (T): Física Estatística e Magnetismo
<b>CENTRO-CENTRO-NORTE</b>	
U Brasília	Física Atômica e Molecular (E) Partículas Elementares (T), Relatividade e Gravitação Matéria Condensada (T e E): Física Estatística, Semicondutores, Magnetismo, Física Nuclear (T)
UF Goiás	Matéria Condensada (T e E): Cristalografia, Magnetismo e Ressonância Magnética

Tabela 6 – PRINCIPAIS SUBÁREAS DE PESQUISA DAS INSTITUIÇÕES (Continuação)

INSTITUIÇÃO	ÁREAS DE PESQUISA
SUDESTE UNICAMP	Partículas Elementares (E) Matéria Condensada (T e E): Óptica, Cristalografia, Física Estatística, Semicondutores, Baixa Temperatura e Supercondutividade, Magnetismo e Ressonância Magnética
CBPF	Física de Plasmas (T e E) Partículas Elementares (T e E), Teoria de Campos, Relatividade e Cosmologia Física Atômica e Molecular (T) Matéria Condensada (T e E): Cristalografia, Física Estatística, Baixas Temperaturas, Magnetismo e Ressonância Magnética
I Energia Nuclear - RJ UF Esp. Santo	Biolísica (E) Física Nuclear (T e E) Física Nuclear (E) Relatividade e Gravitação (T)
IFT	Matéria Condensada (T e E): Magnetismo Partículas Elementares (T), Teoria de Campos, Cosmologia, Física Matemática Matéria Condensada (T): Física Estatística Física Nuclear
INPE	Física da Matéria Condensada (T e E): Óptica, Física Estatística, Semicondutores e Magnetismo
ITA	Física de Plasmas (T e E) Física Atômica e Molecular (T e E) Física da Matéria Condensada (T e E): Semicondutores Física de Plasmas (T e E)
UF Fluminense	Partículas Elementares (T), Cosmologia

**Tabela 6 – PRINCIPAIS SUBÁREAS DE PESQUISA DAS INSTITUIÇÕES (Continuação)**

<b>INSTITUIÇÃO</b>	<b>ÁREAS DE PESQUISA</b>
UF Minas Gerais	Matéria Condensada (T e E): Óptica, Física Estatística, Semicondutores, Magnetismo Física de Plasmas (T e E) Física Nuclear (T e E) Teoria de Campos e Física Matemática Matéria Condensada (T e E): Óptica, Física Estatística, Semicondutores, Magnetismo, Ressonância Magnética e Mössbauer
UF Rio de Janeiro	Partículas Elementares (T) Matéria Condensada (T e E): Óptica, Baixas Temperaturas, Magnetismo, Ressonância Magnética e Mössbauer Física Nuclear (T e E) Ensino
PUC-RJ	Física Atômica e Molecular (T e E) Partículas Elementares (T), Teoria de Campos, Física Matemática e Cosmologia Matéria Condensada (T e E): Óptica, Física Estatística, Semicondutores, Baixas Temperaturas, Magnetismo e Ressonância Magnética Física Nuclear (T e E) Física Médica (E)
IPEN	Matéria Condensada (E): Cristalografia, Óptica e Magnetismo Física Nuclear (E)
USP	Partículas Elementares (T e E), Teoria de Campos, Física Matemática, Cosmologia Física Atômica e Molecular (T) Matéria Condensada (T e E): Cristalografia e Cristais Líquidos, Física Estatística, Baixas Temperaturas e Supercondutividade, Magnetismo e Ressonância Magnética Física de Plasmas (T e E)

Tabela 6 – PRINCIPAIS SUBÁREAS DE PESQUISA DAS INSTITUIÇÕES (Continuação)

INSTITUIÇÃO	ÁREAS DE PESQUISA
USP São Carlos	Física Nuclear (T e E) Ensino Partículas Elementares (T), Teoria de Campos, Física Matemática Matéria Condensada (T e E): Óptica, Cristalografia, Física Estatística, Semicondutores, Baixas Temperaturas e Supercondutividade, Magnetismo e Ressonância Magnética Biofísica e Física Médica (T e E) Física Matemática Matéria Condensada (T e E): Física Estatística, Semicondutores, Magnetismo e Ressonância Magnética
UE Londrina	Física Nuclear (E) Teoria de Campos Matéria Condensada (T) Física Nuclear (T)
UF Paraná UF R G Sul	Matéria Condensada (T e E): Cristalografia, Física Estatística, Semicondutores Partículas Elementares (T), Teoria de Campos Física Atômica e Molecular (T e E) Matéria Condensada (T e E): Óptica, Física Estatística, Semicondutores, Magnetismo e Mössbauer
US Santa catarina	Física de Plasmas (T) Física Nuclear (T e E) Ensino Física Molecular (T) Matéria Condensada (T e E): Óptica, Cristais Líquidos, Física Estatística
UF Santa Maria	Física Nuclear (T) Física da Matéria Condensada (T): Física Estatística e Magnetismo.

**Tabela 7 – DISTRIBUIÇÃO DE FÍSICOS COM DOUTORADO NAS GRANDES ÁREAS DE PESQUISA**

<b>ÁREA</b>	<b>DOUTORES</b>	<b>PORCENTUAL</b>
Física de Partículas e Subáreas Correlatas	170	20,0
Física da Matéria Condensada	530	62,5
Física de Plasmas	40	4,7
Física Nuclear	109	12,8
<b>Total</b>	<b>849</b>	<b>100,0</b>

## **FÍSICA DAS PARTÍCULAS E SUBÁREAS CORRELATAS**

<b>DESCRIÇÃO</b> .....	<b>53</b>
<b>BREVE HISTÓRICO GERAL</b> .....	<b>61</b>
– Relatividade, Gravitação e Cosmologia .....	<b>63</b>
– Física das Energias Intermediárias .....	<b>63</b>
– Física das Partículas Elementares e Teoria Quântica dos Campos	<b>64</b>
– Física Matemática .....	<b>65</b>
<b>DADOS SOBRE GRUPOS DE PESQUISA</b> .....	<b>66</b>
<b>PERSPECTIVAS, PROJEÇÕES E NECESSIDADES</b> .....	<b>73</b>

# Física das Partículas e Subáreas Correlatas

## DESCRIÇÃO

A Física das Partículas Elementares tem por objetivo a descoberta e compreensão constituintes mais simples da matéria e das forças básicas que atuam entre eles. Busca-se, sobretudo, as leis básicas e princípios unificadores que forneçam um quadro racional dos fenômenos já conhecidos e possam prever fenômenos novos.

Podemos caracterizar uma partícula elementar como sendo aquela que não apresenta estrutura interna. Com tal definição em mente, constatamos facilmente que o próprio conjunto das partículas elementares tem variado conforme a época histórica considerada. Os átomos foram considerados os constituintes mais simples da matéria por longo tempo. Descobriu-se então que os átomos são constituídos de um núcleo, formado por prótons e nêutrons, e elétrons. Os prótons e nêutrons foram considerados elementares por cerca de 50 anos; porém, durante as duas últimas décadas, descobriu-se que os mesmos possuem uma estrutura interna que pode ser descrita em termos de partículas mais simples chamadas quarks. Os elétrons, por outro lado, até hoje não apresentaram indícios de possuir uma estrutura interna e portanto são considerados como partículas elementares.

As partículas elementares, atualmente, são classificadas em três categorias: os léptons, os quarks e os bósons de gauge (ou de calibre). (Veja Tabelas 1 e 2).

Os léptons são: o elétron, o muon, o tau e seus respectivos neutrinos. O elétron, o muon e o tau possuem carga elétrica e massa. Os neutrinos não possuem carga elétrica e busca-se esclarecer se possuem ou não massa.

Os quarks são as partículas que compõem os hádrons denominação dada aos mésons (p. ex., os mésons pi, rho, etc.) e aos bárions (p. ex., o próton, o nêutron, os híperons, etc.). Um méson é formado por um par quark-antiquark enquanto um bárion é composto por três quarks. São conhecidos 5 tipos de

quarks que são designados pelas seguintes letras:  $u$  (up),  $d$  (down),  $s$  (strange),  $c$  (charm),  $b$  (beauty ou bottom). Cogita-se a existência de um sexto tipo de quark designado pela letra  $t$  (top). Os quarks possuem carga elétrica fracionária:  $u$ ,  $c$  e o hipotético quark  $t$  possuem carga  $2e/3$  e  $d$ ,  $s$  e  $b$  possuem carga  $-1e$ , onde  $e$  é a carga do elétron. Além disso, os quarks possuem outra carga ou número quântico chamado cor, que é responsável pelas interações características dos hadrons. Cada quark possui três estados de cor e as combinações de quarks que formam os hadrons são incolores (isto é, os hadrons têm número quântico de cor igual a zero). Os quarks e léptons também são agrupados em gerações; assim, a primeira geração é constituída pelos quarks  $u$  e  $d$ , o elétron e seu neutrino; a segunda geração pelos quarks  $c$  e  $s$ , o muon e seu neutrino. Uma terceira geração seria constituída pelos quarks  $b$  e  $t$  (top), o tau e seu neutrino. Apesar do quark  $t$  ainda não ter sido observado experimentalmente, poucos físicos duvidam de sua existência. Isso se deve ao fato de que, por razões de consistência interna, o modelo padrão que descreve o comportamento das partículas elementares exige, entre outras coisas, gerações completas de dois quarks e dois léptons.

As interações entre os quarks e léptons que constituem a matéria são mediadas pelas forças básicas classificadas na categoria de bósons de gauge. Existem quatro forças básicas na Natureza: a gravitação, o eletromagnetismo, a interação fraca e a força nuclear forte. A intensidade com que essas forças atuam sob condições típicas é dada pelo valor de sua constante de acoplamento, que em unidades naturais têm os seguintes valores: força gravitacional  $10^{-39}$ , força fraca  $10^{-5}$ , força eletromagnética  $10^{-2}$  e força forte 1.

A força eletromagnética atua sobre as partículas portadoras de carga elétrica e seu alcance é infinito. O bóson de gauge ou o portador da força eletromagnética é o fóton, que não possui carga elétrica nem massa. A força fraca atua sobre os hadrons e léptons e seu alcance é da ordem de  $10^{-16}$  cm. Apesar de sua intensidade ser pequena ela é extremamente importante, sendo, por exemplo, a responsável pelo decaimento beta nuclear. Os bósons de gauge associados à força fraca são os  $W^\pm$  e o  $Z^0$  com massas de 83 GeV e 90 GeV, respectivamente. A força forte atua nas partículas portadoras de cor, isto é, nos quarks e portanto é relevante nas interações hadrônicas. Seu alcance é da ordem de  $10^{-13}$  cm e os bósons de gauge associados são chamados de gluons, que são oito em número. Por fim, a força gravitacional, que atualmente não admite um tratamento quântico, será considerada mais adiante. No caso de vir a ser quantizada, o bóson de gauge associado é denominado graviton.

A descrição teórica do comportamento das partículas elementares é efetuada no contexto de uma teoria quântica de campos relativísticos. As leis que governam as interações são fornecidas pelo princípio da invariância de gauge, de modo que a cada interação é associado um grupo de gauge. O eletromagnetismo está associado ao grupo  $U(1)$ , o grupo das transformações de fase (que leva à conservação da carga elétrica), enquanto as interações fortes estão associadas ao grupo  $SU(3)$ .

A teoria de gauge associada ao grupo  $SU(3)$  é conhecida como cromodinâmica quântica. Para a descrição das interações fracas é necessário que a teoria de gauge apresente o fenômeno da quebra espontânea de simetria, que com a introdução de campos escalares básicos chamados campos de Higgs, torna os bósons de gauge  $W^\pm$  e  $Z^0$  massivos. Na eletrodinâmica quântica e na cromodinâmica quântica não há quebra espontânea de simetria e como conseqüência o fóton

e os glúons têm massa nula. Além disso, é necessário, para uma descrição consistente das interações fracas, que as interações eletromagnéticas sejam incluídas, resultando numa teoria em que as forças fraca e eletromagnética são unificadas. Dessa maneira as interações fracas e eletromagnéticas são encaradas como dois aspectos de uma mesma interação eletrofraca. A descrição atualmente mais aceita das interações eletrofracas é efetuada através de uma teoria de gauge com grupo  $SU(2) \times U(1)$  com quebra espontânea de simetria, de forma que os bósons de gauge  $W^\pm$  e  $Z^0$  são massivos e o fóton permanece sem massa, e há uma partícula de Higgs massiva (ainda não detectada experimentalmente).

Avanços recentes levaram à propostas de teorias que unifiquem as interações eletrofracas com as interações fortes dentro do contexto das teorias de gauge, resultando nas chamadas teorias gran-unificadas. A principal previsão dessas teorias é a de que o próton não é estável, possuindo, no modelo mais simples, uma vida média da ordem de  $10^{31}$  anos. Experiências recentes indicam que a vida média do próton é maior do que a prevista, colocando em xeque a proposta das teorias gran-unificadas. Tentativas de unificação mais ambiciosas, envolvendo inclusive a gravitação, são efetuadas dentro do contexto das teorias supersimétricas. Tais teorias são baseadas numa nova simetria fundamental entre bósons e férmions, chamada supersimetria e leva à predição de uma enorme variedade de novas partículas elementares. Até o momento, não foi descoberta nenhuma partícula supersimétrica. Por fim, há propostas recentes de unificação, as chamadas teorias de cordas supersimétricas, que sugerem um esquema mais geral do que a teoria de campos, em que os objetos elementares deixam de ser pontuais e passam a possuir uma extensão finita. Essas novas propostas levam, quase sempre, a conseqüências experimentais que estão fora do alcance dos experimentos atuais, de forma que elas são elaboradas em cima de dois requisitos básicos: a consistência interna da teoria e sua capacidade de reproduzir a teoria eletrofraca e a cromodinâmica quântica a baixas energias. Outras teorias propõem que as atuais partículas elementares não sejam fundamentais, mas compostas de constituintes ainda mais básicos chamados préons. Não existe, porém quer do ponto de vista experimental, quer do ponto de vista teórico, nenhuma necessidade premente para postularmos um novo nível de elementariedade.

Na Física das Partículas Elementares as experiências consistem basicamente na observação dos resultados das colisões entre partículas, a fim de obter informações acerca de suas interações. Quase todas as experiências nessa área são efetuadas utilizando-se aceleradores de partículas que produzem feixes de partículas de alta energia. Na montagem tradicional o feixe de partículas atinge um alvo fixo. Grande parte do progresso experimental das últimas décadas é proveniente de tais experimentos. A demonstração de que os prótons e nêutrons são constituídos por quarks, uma das experiências que descobriu o quark  $c$ , a descoberta do quark  $b$  e a descoberta da violação da simetria CP, são alguns exemplos. Mais recentemente desenvolveu-se um novo esquema, os anéis de colisão, onde feixes de partículas de alta energia viajam em direções opostas e colidem frontalmente. Dessa forma, a energia disponível para as colisões aumenta drasticamente quando comparada à dos aceleradores de alvo fixo. Experiências com anéis de colisão elétron-pósitron são responsáveis pela co-descoberta do quark  $c$ , a descoberta das partículas charmosas, e descoberta inesperada do lépton tau, a descoberta das estruturas de jatos na produção de partículas e grande parte da evidência da existência dos glúons. E mais recentemente, os anéis de colisão pró-

ton-antipróton permitiram a descoberta dos bósons de gauge  $W^\pm$  e  $Z^0$ .

Os anéis de colisão que estão atualmente em operação são o Tevatron, no FERMILAB (EUA), e o Sp̄pS, no CERN (Suíça). (Veja Tabela 3). Existem anéis de colisão em construção nos Estados Unidos, Europa, Japão e União Soviética. Há também, a proposta dos Estados Unidos construir um super acelerador, o SSC, com orçamento da ordem de 4 bilhões de dólares, com um anel de 22 km de diâmetro utilizando 10.000 magnetos supercondutores.

O propósito dos aceleradores em construção é investigar mais detalhadamente as previsões das teorias eletrofracas e da cromodinâmica quântica, e em particular, elucidar o vetor de Higgs da teoria eletrofraca, sobre o qual não se dispõe de nenhum dado experimental direto. Outra pesquisa de extrema importância será a busca do quark  $t$ . Pretende-se investigar, também, a possibilidade de novas gerações de léptons e quarks, uma vez que o modelo padrão não fixa o número de gerações. Isso pode ser feito através da medida mais precisa da largura de massa do  $Z^0$  (que fixaria o número máximo de neutrinos passíveis de existência) ou através da descoberta direta de novos quarks. Pretende-se, também, investigar a possibilidade das partículas conhecidas apresentarem estrutura interna, explorar alguns aspectos das teorias de grande unificação, e buscar as partículas requeridas pelos esquemas supersimétricos.

Existem, também, outros tipos de experiências que não envolvem aceleradores. A mais conhecida é a que utiliza detectores de raios cósmicos. Neste caso a colisão se dá entre as partículas constituintes dos raios cósmicos, que podem ser extremamente energéticas, e a atmosfera superior. Tal tipo de experimento teve grande popularidade antes do advento dos grandes aceleradores, quando os raios cósmicos eram a única fonte de partículas de alta energia. Hoje, continuam sendo usados, havendo inclusive um ressurgimento de interesse para a investigação de partículas de altíssimas energias e o estudo de fontes cósmicas localizadas. Os raios cósmicos forneceram descobertas extremamente importantes: o muon, o méson pi, uma grande quantidade de mésons e bárions, e mais recentemente, e bem antes que os aceleradores, a descoberta de que as seções de choque totais dos hadrons crescem com a energia. Atualmente a ênfase no estudo dos raios cósmicos tem-se deslocado para a investigação da composição e do espectro de energia das partículas primárias dos raios cósmicos, que causam os chamados chuviros atmosféricos. Tais partículas primárias provêm do espaço interestelar, provavelmente fora da nossa galáxia, e fornecem dados importantes para a Cosmologia e Astrofísica.

A possibilidade de que o próton não seja estável, aberta pelas teorias de gran-unificação, deu origem a uma nova linha de experiências de grande porte. Procura-se detectar o decaimento do próton utilizando-se grandes quantidades (várias toneladas) de algum material escolhido convenientemente para atuar simultaneamente como fonte e detector de eventos, colocado num local de baixa atividade de fundo, usualmente uma mina profunda. Seis experiências desse tipo estão em andamento na Europa, Estados Unidos, Japão e Índia e a não observação do decaimento do próton implica, hoje, uma vida média superior a  $10^{32}$  anos.

Na Física de Partículas Elementares há, também, diversas experiências de pequeno porte. Por exemplo, experiências utilizando-se reatores atômicos e experiências em que se buscam efeitos diminutos em transições nucleares são efetuadas com o intuito de se determinar a massa do neutrino, não havendo ainda

resultados conclusivos. Outras experiências atômicas testam os detalhes da eletrodinâmica quântica e a violação de simetrias fundamentais.

Vários avanços têm acontecido na interface da física de partículas com outras áreas, e que têm sido extremamente estimulantes. Na física nuclear, a possibilidade da formação de um plasma de quarks e gluons, que experimentalmente poderia ser observado na colisão de íons pesados de alta energia, abriu uma área de investigação extremamente produtiva. Existe, nos Estados Unidos, a proposta de construção de um acelerador para essa finalidade. A observação desse fenômeno terá relevância não só para a Física de Partículas e Física Nuclear, mas também para a Astrofísica e Cosmologia. A interface entre a Física de Partículas e a Cosmologia registrou progressos notáveis nestes últimos anos. Os modelos conhecidos genericamente como universos inflacionários tentam explicar, entre outras coisas, a predominância da matéria sobre a anti-matéria e a abundância da radiação em relação à matéria no universo em termos das teorias de gran-unificação. Além disso, acredita-se que às densidades extremamente altas, como aquelas existentes no universo primordial, as simetrias fundamentais da natureza seriam restauradas; a Cosmologia fornece um meio de testar essas idéias. Também, há evidências experimentais para a existência de matéria escura, isto é, matéria não emissora de radiação, no universo. Diversas teorias de partículas elementares existentes propõem candidatos, como neutrinos pesados e axions, para a matéria escura; por outro lado, considerações cosmológicas impõem severas restrições a essas teorias.

A simulação das teorias de gauge na rede tem requerido novas arquiteturas para computadores, que permite o processamento em paralelo e que trouxe conhecido avanço na área. Finalmente, cabe salientar a crescente "geometrização" das teorias fundamentais, que teve início com a descoberta de estruturas geométricas nas teorias de gauge semelhantes às da relatividade geral. Isso tem levado à aplicação de técnicas matemáticas sofisticadas da geometria diferencial e topologia em diversos problemas, produzindo novos progressos, tanto na física quanto na matemática.

A Física das Partículas Elementares tem se caracterizado por ser uma área em que são necessários investimentos de alto porte, devido, principalmente, à construção e manutenção dos grandes aceleradores. Nos Estados Unidos, por exemplo, a área de Física de Partículas é a que recebe maior volume de recursos governamentais. Para fazer frente a essa situação, muitos países optaram pela criação de laboratórios nacionais, onde os aceleradores ficam situados, enquanto a construção dos detectores fica a cargo das universidades e institutos de pesquisas. Os Estados Unidos contam com 5 laboratórios nacionais na área.

Os países europeus optaram pela construção de um laboratório multinacional, o CERN, situado em Genebra. Atualmente, 14 países europeus fazem parte do CERN. O retorno dos investimentos tem se dado principalmente através do desenvolvimento de alta tecnologia e do desenvolvimento de aceleradores de pequeno porte para uso na indústria e na medicina. Vários avanços em microeletrônica, materiais supercondutores, sistemas de aquisição de dados de alta velocidade, tecnologia de vácuo, etc., foram conseguidos graças às necessidades geradas pelos aceleradores. Recentemente, o CERN fez um estudo a respeito do assunto (M. Bianchi et alii. Economic Utility Resulting from CERN Contracts. Yellow Report 84, 14. 1984) e chegou à conclusão de que as utilidades geradas pelas encomendas do CERN às empresas de alta tecnologia, superam as vendas ao CERN

na relação 4:1. Nem todos os países, entretanto, declaram-se a favor da manutenção de empreendimentos desse porte na área de física de partículas. O Reino Unido já anunciou a decisão de diminuir a sua participação no CERN; na Alemanha Ocidental existem estudos no mesmo sentido embora esteja em construção, nesse país, um anel de colisões de elétrons e prótons (HERA). Por outro lado, existem fortes pressões, nos Estados Unidos, para a retomada da vanguarda experimental construindo o SSC. Em outros países, como União Soviética, Japão e China, a física de partículas tem prioridade muito alta na política científica.

A teoria que descreve a gravitação é a Relatividade Geral. Ela é baseada no princípio da equivalência, isto é, na hipótese de que localmente não é possível distinguir um campo gravitacional de um campo de acelerações. A força da gravitação manifesta-se como uma curvatura do espaço-tempo, passando esse último a adquirir um papel dinâmico na teoria. Conseqüentemente, a Relatividade Geral é formulada naturalmente em termos geométricos.

O princípio da equivalência tem sido testado em experiências terrestres sem constatar-se nenhuma violação até uma precisão de 1 parte em  $10^{11}$ . Espera-se chegar à precisão de 1 parte em  $10^{15}$  em experiências realizadas em satélites, em órbita terrestre. Todos os testes efetuados até agora, no laboratório ou no sistema solar, confirmam a teoria da relatividade geral. Note-se, porém, que tais experimentos envolvem apenas aspectos estáticos da teoria. Efeitos de massas em movimento, como, por exemplo, radiação gravitacional ainda não foram observados diretamente apesar dos esforços feitos nas últimas décadas. Há, porém, evidências experimentais indiretas provenientes do pulsar binário PSR 1913-16.

Ainda no campo da Relatividade Geral vários resultados teóricos merecem ser mencionados, como por exemplo, a existência de singularidades; soluções de buracos negros carregados e em rotação; a "evaporação" quântica dos buracos negros e a prova de que distribuições de massa não singulares têm energia positiva. Mais recentemente, efeitos causados pela relatividade geral têm sido levado em conta em processos astrofísicos com ótimos resultados.

A Relatividade Geral permite tratar o Universo em larga escala. Isto possibilita a construção de modelos cosmológicos que permitem estudar, pela primeira vez, a evolução do Universo. Evidências observacionais tais como a expansão de Hubble, a abundância de  $\text{He}^4$  e a existência da radiação cósmica de fundo à temperatura de 3K dão suporte aos modelos isotrópicos de Friedman, o modelo padrão da cosmologia. Tais modelos apresentam uma singularidade inicial, a chamada grande explosão ou "big bang" que deu origem ao Universo, e fornecem uma descrição do Universo a partir de alguns minutos após a grande explosão. Atualmente, tenta-se obter uma descrição do Universo a partir de  $10^{35}$  s depois da grande explosão inicial, onde o modelo padrão não é satisfatório. Nessa época, as temperaturas eram tão elevadas que as interações entre as partículas elementares tornaram-se relevantes e devem ser levadas em conta. Os modelos inflacionários, já discutidos anteriormente, aplicam-se à esta época. Do ponto de vista experimental a Cosmologia encontra-se num estágio que necessita desesperadamente de dados observacionais.

O retrato da área apresentada acima está longe de ser acabado. Naturalmente, a descoberta de novas partículas ou objetos cósmicos pode corroborar ou exigir a reformulação das teorias vigentes. Mas a própria descrição da dinâmica dos objetos conhecidos não é completa. A Teoria Quântica de Campos, que tem sido a linguagem básica dessa descrição, não é completamente entendida ou ma-

tematicamente tratável. Não existe uma prova clara do confinamento dos quarks e glúons a partir da cromodinâmica quântica. Nem se pode dizer que se tenha idéia de todos os efeitos dinâmicos possíveis nessa teoria. Em gravitação, a unificação com as outras forças da natureza, sugere a formulação de uma Teoria Quântica da gravitação. Tal teoria não existe ainda. As várias propostas correntes precisam de desenvolvimento para a confirmação de viabilidade. (Dentre essas, citamos a Teoria das Cordas Supersimétricas que é no momento a esperança de grande parte dos pesquisadores da área).

Em resumo, a própria linguagem usada na descrição dos processos físicos é uma vasta área de pesquisa. Sua complexidade admite tentativas de desenvolvimento pela utilização de métodos aproximativos. Exemplos são a expansão em potências de algum parâmetro pequeno, o estudo de situações dinâmicas simplificadas, a redução no número de dimensões do espaço-tempo, ou a substituição do contínuo espaço-tempo por um reticulado de pontos discretos. As idéias e técnicas aqui desenvolvidas têm sido de larga utilização em todas as áreas de física teórica.

**Tabela 1: QUARKS E LÉPTONS**

	PRIMEIRA GERAÇÃO	SEGUNDA GERAÇÃO	TERCEIRA GERAÇÃO
QUARKS	u, d	s, c	b, t (?)
LÉPTONS	e, $\nu_e$	$\mu, \nu_\mu$	$\tau, \nu_\tau$

O quark t (ainda) não foi descoberto.

**Tabela 2: BÓSONS DE GAUGE**

FORÇA	BÓSON DE GAUGE	ALCANCE	INTENSIDADE (UNIDADES NATURAIS)	PARTÍCULAS NAS QUAIS ATUAM
GRAVITAÇÃO	GRAVITON (?)	$\infty$	$G_N \approx 10^{-39}$	TODAS
ELETRO- MAGNÉTICA	FÓTON	$\infty$	$e^2 \approx 10^{-2}$	PORTADORES DE CARGA ELÉTRICA
FORTE	GLUONS	$10^{-13}\text{cm}$	$g^2 \approx 1$	HADRONS
FRACA	$W^\pm, Z^0$	$10^{-16}\text{cm}$	$G_F \approx 10^{-5}$	HADRONS E LÉPTONS

O graviton é o bóson de gauge hipotético da força gravitacional.

Tabela 3: ANÉIS DE COLISÃO EM OPERAÇÃO PROJETADOS

NOME	LOCALIZAÇÃO	TIPO	ENERGIA DO FEIXE (GeV)	INÍCIO DE OPERAÇÕES
Sp̄p̄S	CERN, Suíça	p̄p̄	300	em operação
TEVATRON	FERMILAB, EUA	p̄p̄	900	em operação
SLC	SLAC, EUA	e <sup>+</sup> e <sup>-</sup>	50	1987
TRISTAN	KEK, Japão	e <sup>+</sup> e <sup>-</sup>	35	1987
BEPC	BEIJING, China	e <sup>+</sup> e <sup>-</sup>	2.2	1988
LEP	CERN, Suíça	e <sup>+</sup> e <sup>-</sup>	50	1989
HERA	DESEY, Alemanha	e <sup>-</sup> p	e <sup>-</sup> 30 p -820	1990
UNK*	SERPUKHOV, URSS	p̄p̄	3000	1995
SSC	EUA	p̄p̄	20000	1996

\* Na primeira etapa espera-se construir um acelerador de alvo fixo com um feixe de prótons de 3000 GeV até 1990.

# Física das Partículas e Subáreas Correlatas

## FÍSICA DAS PARTÍCULAS E SUBÁREAS CORRELATAS

### BREVE HISTÓRICO

É bastante difícil traçar uma história comum para as quatro partes que constituem nossa área neste levantamento. Também não é fácil separá-las nos primórdios, em que encontramos muitas figuras em comum.

Todavia, todas elas partilham certas características no quadro das instituições onde se desenvolvem as atividades de pesquisa. Essas características são em parte comuns com outras áreas da Física. A Física de Partículas e Campos teve o papel de ser uma das primeiras, ou, realmente a primeira a ser implantada no Brasil.

Poder-se-ia falar numa etapa pré-histórica, no sentido que atividades de pesquisa incipientes, mais ou menos isoladas, desenvolvem-se em algumas instituições. Cronologicamente, esse período abrange desde as primeiras décadas deste século até 1940. Nessa época, as atividades de pesquisa científica se desenvolviam principalmente em volta dos institutos de ciências da saúde e biológicos, como o Butantã e Manguinhos, em São Paulo e no Rio de Janeiro. Cerca do final desse período, em 1934, começou a organização de cursos de Física e Matemática na Universidade de São Paulo, com a participação do físico russo-italiano Gleb Wataghin e do matemático italiano Luigi Fantappiè. Uma tentativa análoga na Universidade do Distrito Federal, no Rio de Janeiro, sob a inspiração de Anísio Teixeira teve vida efêmera. Antes, em Recife, Luiz Freire teve um importante papel no estímulo de jovens talentosos, como Mario Schenberg, Leopoldo Nachbin e José Leite Lopes. No Rio de Janeiro, no Observatório Astronômico, os pacientes trabalhos de Mourize alternavam-se com momentos de um certo brilho, como os da expedição inglesa à Sobral para medir o deslocamento do perihélio do Mercúrio em 1919, ou a passagem de Einstein em 1925.

No decorrer da década de 40 firma-se a geração que realmente, na história, fundamenta a construção da Física no Brasil. A Universidade de São Paulo cresce

e os grupos experimentais em Física Nuclear começam a mostrar suas iniciativas, com a implantação dos primeiros aceleradores de partículas. Na parte teórica Mario Schenberg reúne as gerações jovens.

No Rio de Janeiro, borbulha a atividade com pioneiros como Gross e Costa Ribeiro e os jovens como Leite Lopes (ex-estudante de Freire em Pernambuco), Jayme Tiomno, Elisa Frota Pessoa, que vão nucleando-se em volta da Faculdade de Filosofia da Universidade do Brasil. Eles propiciam a volta para o Rio de Janeiro de Cesar Lattes, que acabara de descobrir o méson pi, com o intuito de fundar o Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (CBPF).

A década de 50 apresenta um ritmo de crescimento definido da atividade. Em São Paulo funda-se o Instituto de Física Teórica. O persistente aumento do número de pesquisadores formados pelas instituições existentes permite preparar uma expansão institucional que acontecerá nas décadas seguintes.

É importante notar que nessa época é criado o CNPq, bem como a CNEN. A comunidade da nossa área, na época, confundia-se com a da Física Nuclear, e esse conjunto era o mais importante na Física brasileira.

No início da década de 60 institucionaliza-se o Centro Latinoamericano de Física (CLAF). No começo de sua vida, sob a direção de Gabriel Fialho, o CLAF teve uma atividade de fomento importante. Em São Paulo, a Física afirma-se no interior do estado.

A derrubada do governo de João Goulart, em 1964, representa um percalço muito difícil de superar, pois trouxe inquéritos, restrições e até demissões que afetaram particularmente a área. Houve um surto de entusiasmo em torno da Universidade de Brasília, que infelizmente não persistiu, face às pressões políticas do governo militar. Na esteira do fato, vários físicos capazes deixaram o País. Mais tarde, as cassações, motivadas pelo AI-5, tiraram Leite Lopes e Tiomno do convívio da comunidade científica.

No meio desse clima desfavorável o governo militar deslançou a Reforma Universitária em 1968. Embora criticada com justiça, ela trouxe a formalização da pós-graduação no Brasil, o que deu um impulso institucional muito grande, em particular para a Física. Num tempo relativamente curto, os recursos humanos em Física experimentaram um crescimento elevado, que fornece, até hoje, uma base forte para o desenvolvimento da Física no País.

O estabelecimento de novos grupos continuou como, por exemplo, o da PUC no Rio de Janeiro, que rapidamente se consolidou, e pouco mais tarde os grupos de Recife, João Pessoa, Fortaleza e Belém iam dar uma expansão nacional nova. Esses grupos foram muito importantes na sustentação e no crescimento da atividade, enquanto os centros tradicionais da nossa área procuravam superar as conseqüências negativas das decisões que lhes alcançaram.

As iniciativas na formação de recursos humanos, que encontraram um terreno fértil, foram bem desenvolvidas na década de 1970, com investimentos significativos, que começaram a cair no virar dos anos 80. Do ponto de vista de fomento, o BNDE primeiro e a FINEP depois, tiveram uma contribuição importantíssima.

Infelizmente, a situação econômica desfavorável tem tido reflexos deploráveis para a manutenção do crescimento. Pessoas bem preparadas encontram-se desempregadas, e aquelas com emprego padecem de salários insuficientes. Em particular, na nossa área, o recrutamento de jovens parece ir muito devagar, aquém do que seria desejável.

Tendo caracterizado a evolução global da área, passamos a considerar os diferentes setores nela compreendidos, do ponto de vista de suas características próprias na evolução histórica.

## **Relatividade, Gravitação e Cosmologia**

O iniciador de um programa sistemático de estudos e pesquisas em Gravitação e Relatividade Geral foi Colber de Oliveira. Em particular, a existência do maior grupo de pesquisas nessa área no Brasil (no CBPF), deve muito à atividade pioneira de Colber cujo início se deu no começo dos anos 60.

No que tange a Cosmologia destacáramos as atividades do grupo de cosmologia do CBPF, liderado por Mário Novello, o qual vem desenvolvendo diversas linhas de pesquisa há quase duas décadas.

É importante frisar que diversos pesquisadores têm atuado nessa área de uma forma não sistemática. Nesse contexto se incluem algumas contribuições de Mario Schenberg na Universidade de São Paulo, cujo interesse por essa área remonta à década de 40 quando propôs, juntamente com Gamow e Chandrasekhar, um modelo para explicar alguns aspectos do processo de evolução estelar.

A partir da afirmação dos centros de pesquisa considerada acima, em São Paulo e no Rio de Janeiro, a atividade foi-se expandindo e o número de pesquisadores crescendo.

Hoje, os grupos trabalhando na área encontram-se no IFT, e na USP em São Paulo, na USP de São Carlos, no CBPF, UFRJ, ON e UFF no Rio de Janeiro, em Brasília, Vitória e João Pessoa. Os grupos são relativamente novos, para ser mais preciso, formaram-se e partir da década de 70.

A área realiza desde 1978, a cada dois anos, uma Escola de Relatividade e Gravitação.

## **Física das Energias Intermediárias**

Por volta da metade da década de 1970, em vários países percebeu-se que vinha se desenvolvendo um domínio particular da Física no qual convergia a Física Nuclear, em especial, a dedicada ao problema com poucos corpos, e a Física de Partículas Elementares em baixas energias.

No Brasil essa afinidade foi reconhecida a partir dos grupos que estudavam reações com dêuterons ou modelos para núcleos com poucos corpos. Esses grupos tinham sede, originalmente, na PUC-RJ, na UFRJ, na UFPE, USP e no Rio Grande do Sul. Este último se desenvolveu a partir da mudança de assunto de Theodor Maris e alguns dos seus colaboradores.

Em 1977, na UFRJ, teve lugar o primeiro encontro do pessoal envolvido na área. Ela é bastante eclética, abrangendo desde níveis e propriedades estruturais (como fatores de forma) de núcleos leves até os níveis do sistema núcleon-antinúcleon e o espalhamento de prótons e nêutrons em núcleos leves como dêuterons, trítio, He, etc. até 10 GeV de energia.

O campo tem-se desenvolvido razoavelmente, e mantém um encontro especializado realizado a cada dois anos.

Hoje, aos grupos originais somam-se outros do CBPF, e da UFF no Rio, do IFT em São Paulo e de João Pessoa.

## Física das Partículas Elementares e Teoria Quântica dos Campos

A Física de Partículas Elementares começa no Brasil com a vinda de Gleb Wataghin para a Universidade de São Paulo. Ele fez uma experiência pioneira com Paulus A. Pompéia e Marcelo Damy de Souza Santos, aonde demonstra a existência de mais de uma classe de mésons na radiação cósmica. Junto com Mario Schenberg, estudou os chuveiros penetrantes na radiação cósmica, ou seja, a produção múltipla de mésons pela radiação cósmica nas altas camadas da atmosfera. Em 1947, Cesar Lattes, que começara seus trabalhos científicos com Wataghin e Occhialini, participou do descobrimento do méson, partícula muito importante na descrição das forças nucleares. Posteriormente, ele foi um dos líderes do experimento que produziu pela primeira vez o méson em laboratório, no ciclotron de Berkeley.

Desde 1949, Lattes estabeleceu uma colaboração com o Japão para estudar raios cósmicos, tendo sido os precursores do descobrimento de eventos, que como o Centauro, são agora encontrados por grupos similares na Índia. Os acelerados do futuro prevêm um estudo da produção desses eventos.

Na parte teórica, Jayme Tiomno foi o descobridor da simetria quiral para os férmions relativísticos, e fez contribuições importantes nos anos 50 para a compreensão das interações fracas e sua estrutura formal.

Os anos 50 foram marcados também pela fundação do Instituto de Física Teórica, na época visitado por eminentes cientistas de reputação internacional, como R. Waizacker, Taketani.

Leite Lopes, num trabalho pioneiro, previu em 1957 as correntes neutras nas interações fracas, opção mais tarde retomada por Glashow e os outros dois cientistas ligados a formulação do modelo "Standard", Weinberg e Salam.

Em 1960 foram reconhecidos mundialmente os trabalhos desenvolvidos pelo grupo teórico de Porto Alegre, liderado por Theodor Maris. Eles estudaram o grupo de renormalização e a quebra de simetria quiral na eletrodinâmica quântica.

A década de 70 foi marcada pelo surgimento da liderança de Jorge André Swieca, que, junto com seus colaboradores, fez o estudo mais sistemático e conclusivo de modelos de teorias de campo bidimensionais, subárea ainda de grande atividade.

No plano experimental, houve um enfraquecimento da atividade depois do golpe de 64. Só nos últimos dez anos a atividade retomou alento com colaboração de instituições européias e americanas.

Por sua vez, o grupo original de raios cósmicos, liderado por Lattes, continua produzindo resultados de interesse no marco da colaboração com Japão, Bolívia e outros países. As sedes do grupo encontram-se na UNICAMP e no CBPF, e há projetos para manter-se atualizados os procedimentos de medição.

Os grupos teóricos atuantes, hoje, na área encontram-se no Rio Grande do Sul, em São Paulo (USP, IFT, UNICAMP, CTA), no Rio de Janeiro (PUC-RJ, CBPF, UFRJ e UFF), em Brasília, Londrina e João Pessoa. É claro que, à exceção dos grupos dos centros tradicionais, os outros grupos compõem-se de poucos pesquisadores.

Bianualmente realiza-se a sessão da Escola Jorge André Swieca de Física de Partículas Elementares e Teoria de Campos.

O encontro anual da área (juntamente com Relatividade, Gravitação e Cosmologia) realiza-se com a participação de cerca de 200 pesquisadores.

## A Física-Matemática

A grande dificuldade de se definir no que consiste a Física-Matemática reside na impossibilidade de delinear precisamente suas fronteiras com a Física Teórica e a Matemática. Uma atitude possível, longe de ser a única, que adotaremos aqui consiste em considerar como pertencentes a comunidade de Física-Matemática aqueles grupos que vêm produzindo trabalhos em Física Teórica com uma acentuada preocupação na obtenção de resultados matematicamente rigorosos.

A temática típica, como se pode constatar no veículo de divulgação mais significativo da área, o "Communications in Mathematical Physics", e no temário das conferências periódicas da "International Association of Mathematical Physics", inclui:

- ( 1 ) Métodos Matemáticos com relevância direta para a Física
- ( 2 ) Mecânica Estatística de equilíbrio e fora do equilíbrio
- ( 3 ) Teorias da Campo e Gravitação
- ( 4 ) Sistemas Dinâmicos
- ( 5 ) Teoria Quântica de Campos
- ( 6 ) Propriedades Espectrais de Operadores de Schrödinger
- ( 7 ) Sistemas Desordenados.

A história da Física-Matemática no Brasil, nas suas origens, se confunde com o próprio desenvolvimento da Física Teórica em nosso País.

Os dois principais grupos que atuam em departamentos de Física no Brasil tiveram suas origens no então Departamento de Física da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da USP com Jorge André Swieca, e no Departamento de Física da PUC-RJ com Michael O'Carroll, ambos no final da década dos sessenta. Na USP, a temática era centrada principalmente no estudo de propriedades de modelos em Teoria Quântica de Campos e Mecânica Estatística; na PUC, a preocupação maior era no estudo de propriedades espectrais de operadores de Schrödinger e espalhamento quântico.

Dois grupos maiores podem ser identificados pelo volume e regularidade tanto da produção científica, como na formação de pessoas especializadas.

Em São Paulo, no Departamento de Física-Matemática da USP, o grupo é liderado por José Fernando Pérez e Walter Felipe Wrezniski, ambos com doutorado na ETH, Zurique, Suíça em 1973. Desde sua implantação, o grupo formou quinze mestres e três doutores e mantém uma colaboração internacional com a Universidade da Califórnia em Irvine, Estados Unidos. Suas principais linhas de pesquisa têm sido: Mecânica Estatística de Equilíbrio, Teoria Quântica de Campos, Operadores de Schrodinger e Sistemas Desordenados. Mais recentemente, Coraci Malta, do mesmo Departamento, vem desenvolvendo trabalhos na área de Sistemas Dinâmicos, tendo formado dois mestres.

Em Belo Horizonte, no Departamento de Física da UFMG, o grupo é liderado por Michael O'Carroll, doutorado na Universidade de Maryland, Estados Unidos, em 1968 e que está no Brasil desde 1969, e por Ricardo Schor, que se doutorou no Instituto Courant em Nova York, Estados Unidos, em 1977. As atividades deste grupo iniciaram-se em 1979 com o retorno de Schor e a incorpo-

ração de O'Carroll dando-se em 1980. O grupo formou sete mestres, dos quais seis se encontram em programa de doutorado (cinco no exterior) e mantém uma colaboração internacional com a Northeastern University em Boston, Estados Unidos. As principais linhas de pesquisa são Mecânica Estatística e Teoria Quântica de Campos.

Em Campinas, no Instituto de Física da UNICAMP identificamos o grupo de Sistemas Dinâmicos, liderado por Alfredo Ozório de Almeida, cujos principais interesses se localizam no estudo da quantização semi-clássica e do caos.

Dois grupos principais trabalhando em Institutos de Matemática devem ser mencionados. São eles: (1) O grupo de Mecânica Estatística fora do equilíbrio e Dinâmica Estocástica do Instituto de Matemática e Estatística da USP, liderado por Antônio Galves. Este grupo tem três doutores e mantém colaboração com pesquisadores da UFRJ e IMPA, além de intercâmbios internacionais intensos com grupos das Universidades de Roma, Rutgers e Paris. (2) O grupo de Sistemas Dinâmicos do IMPA, de grande renome internacional, liderado atualmente por Jacob Pallis. Este grupo tem raízes e âmbito de atuação essencialmente no contexto da Matemática.

Uma das principais dificuldades na formação de mestres e doutores em Física-Matemática no Brasil tem sua origem no nível matemático deficiente dos alunos egressos dos cursos de Física. Paralelamente aos cursos de pós-graduação anuais, torna-se necessário uma formação suplementar em Matemática, o que exige do estudante e orientador um esforço redobrado quando comparado a outras áreas da Física.

A participação da Física-Matemática dentro da comunidade de Física, pelas próprias características da área, é reduzida. Entretanto, o percentual atualmente observado no Brasil é extremamente pequeno quando comparado a índices mantidos nos países desenvolvidos. Decorre daí a necessidade de um investimento sistemático na formação de recursos humanos e na estabilização e aprimoramento dos grupos existentes. Neste contexto, é importante se observar que um pesquisador formado em Física-Matemática, devido a variedade de conhecimentos adquiridos, está apto a atuar em diversas áreas que vão desde a Física Teórica até a Matemática Aplicada.

A crescente dependência da moderna Física Teórica com relação aos métodos e linguagem da Física-Matemática, bem como a versatilidade potencial do pesquisador, estão tornando a área cada vez mais popular nos países desenvolvidos. É de se notar que ela foi incluída na lista de áreas prioritárias pela "National Science Foundation" dos Estados Unidos.

## DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

Há cerca de 230 físicos brasileiros trabalhando nessas áreas nas instituições brasileiras, dos quais cerca de 170 são doutores, e 60 são mestres. Desses 230 físicos, apenas 25 são experimentais; entre os físicos teóricos, apenas cerca de 40% fazem algum tipo de fenomenologia, a maioria dedicando-se a problemas puramente teóricos. (Ver Tabela 1).

O número de estudantes de mestrado e doutorado em nossas instituições é aproximadamente igual ao número de físicos: temos cerca de um estudante de pós-graduação por pesquisador, o que nos parece uma média baixa. A distribui-

Tabela 1 – RECURSOS HUMANOS EM FÍSICA DE PARTÍCULAS E SUBÁREAS CORRELATAS

INSTITUIÇÕES	DOUTORES	MESTRES	TEÓRICOS	EXPERIMENTAIS	TEÓRICOS FENOMENOLOGISTAS	ESTUDANTES DOUTORADO	ESTUDANTES MESTRADO
UFRGS	10	4	14	–	11	3	–
UE Londrina	1	1	2	–	–	–	–
U S P	15	–	14	1	5	27	15
USP-S. Carlos	1	–	1	–	–	1	–
IAG-USP	18	15	29	4	29	44	27
I F T	9	–	9	–	4	3	8
UNICAMP	10	3	4	9	3	6	10
C T A	6	–	6	–	–	–	–
UFRJ	22	18	40	–	10	15	15
CBPF	29	4	25	8	7	26	11
P U C	11	–	11	–	6	–	2
OBS.NACIONAL	3	2	5	–	–	1	1
UERJ	1	2	3	–	1	–	–
U F F	6	7	11	2	4	3	3
UFES	3	–	3	–	–	–	–
UFMG	2	–	2	–	–	1	2
UNB	9	2	11	–	2	–	15
UFPB	7	–	6	1	–	–	4
UFPE	3	–	3	–	3	1	2
UF Pará	1	–	1	–	–	–	–
<b>TOTAL</b>	<b>167</b>	<b>58</b>	<b>200</b>	<b>25</b>	<b>85</b>	<b>131</b>	<b>115</b>

ção desses estudantes entre as instituições é extremamente irregular: no Instituto de Física da USP há 3 estudantes por doutor, e em outras instituições há praticamente zero.

Outra característica marcante das informações relativas ao número de estudantes nessas áreas é a redução progressiva do número de mestrandos, o que mostra a existência de um esvaziamento ocorrido nos últimos anos, o qual *ainda* não afetou fortemente o número de estudantes de doutorado.

Estes dados sobre número de estudantes deverão ser comparados com os obtidos em outras áreas de Física, a fim de se poder ter idéias de suas causas, que podem ser de natureza geral (tais como falta de perspectivas de emprego, ou os baixos valores das bolsas fora do Estado de São Paulo) ou setorial.

## **Distribuição de Pesquisadores entre as Diversas Linhas de Pesquisa**

A tabela 2 mostra a distribuição de linhas principais de atividade para 217 físicos em nossas instituições. Observamos a acentuada concentração nas áreas de teoria de campos e de astrofísica/ cosmologia (este último caso sendo fortemente influenciado pelas grandes dimensões do IAG/USP). A tabela evidencia nossas notórias deficiências em física experimental e física teórica fenomenológica (modelos específicos para interações, propriedades de partículas, estudos de processos).

A distribuição dos artigos científicos por subárea, mostrada na Tabela 3 acentua ainda mais a falta de uniformidade das atividades em Física de Partículas no País.

## **Formação de Pessoal**

### **No País**

A tabela 4 mostra os números de mestres e doutores formados em nossas instituições desde 1981. É claro que podemos aí ter apenas uma flutuação estatística, mas merece observação (e talvez preocupações) o fato de que os números relativos a 1986 são os menores dos últimos anos.

### **No Exterior**

Há pelo menos 35 bolsistas no exterior, formando-se nas áreas compreendidas por este levantamento, como mostra a Tabela 5. Este número deve ser comparado e adicionado aos 131 que fazem doutoramento no País atualmente. Devêríamos estar preparados para o ingresso de cerca de 40 físicos por ano em nossas instituições, apenas nas áreas da Física que são aqui analisadas.

### **Doutores Brasileiros sem vínculo Permanente no País.**

De acordo com nosso levantamento, já há pelo menos 19 doutores brasileiros, nessas áreas da Física, sem vínculo permanente no País. Este número está em crescimento rápido, com a formação de doutores no País e no exterior, e ao

Tabela 2 – PESQUISADORES POR SUBÁREA DE PESQUISA E POR INSTITUIÇÃO EM FÍSICA DE PARTÍCULAS ELEMENTARES E SUBÁREAS CORRELATAS

/PACS	02 Métodos Matemáticos	03 Física Geral Quântica e Clássica	04 Relatividade e Gravitação	11 Teoria dos Campos	12 Teoria e Modelo para Interações	13 e 14 Processos Específicos e Propriedades de de Partículas	29 Métodos Experimentais e Instrumentação	94.40 Raios Cósmicos	99 Astrofísica e Cosmologia
INSTITUIÇÃO									
UFRGS	-	-	-	5	8	1	-	-	-
UE Londrina	-	-	-	2	-	-	-	-	-
USP	1	-	1	8	3	2	-	-	-
USP - S. Carlos	-	-	1	-	-	-	-	-	-
IAG-USP	-	-	-	-	-	-	-	-	33
IF T	-	-	1	6	1	1	-	-	3
UNICAMP	-	-	-	-	-	3	2	8	-
C.T.A	-	-	-	6	-	-	-	-	-
UFRJ	1	2	8	7	5	4	-	-	-
CBPF	1	4	4	9	1	8	-	2	6
PUC	1	-	-	5	3	2	-	-	-
OBS. Nacional	-	-	1	-	-	-	-	-	4
UERJ	1	-	1	-	1	-	-	-	-
UFF	-	1	-	1	1	2	-	3	5
UFES	-	-	3	-	-	-	-	-	-
UFMG	-	-	-	2	-	-	-	-	-
UNB	2	-	5	2	2	-	-	-	-
UFPB	-	-	1	4	-	-	-	1	1
UFPE	-	-	-	-	3	-	-	-	-
UFPA	-	1	-	-	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>28</b>	<b>57</b>	<b>28</b>	<b>23</b>	<b>2</b>	<b>14</b>	<b>52</b>

Tabela 3 – PESQUISADORES E ARTIGOS CIENTÍFICOS POR SUBÁREA DE PESQUISA

PACS	02 Métodos Matemáticos	03 Física Geral Quântica e Clássica	04 Relatividade e Gravitação	11 Teoria dos Campos	12 Teoria e Modelos para Interações	13 e 14 Processos Específicos e Propriedades de Partículas	29 Métodos Experimentais e Instrumentação	94.40 Raios Cósmicos	98 Astrofísica e Cosmologia	TOTAL
Número de Físicos	7	8	26	57	28	23	2	14	52	217
Número de Artigos em 1985-1986	6	45	36	116	9	45	4	2	44	307

**Tabela 4 – RECURSOS HUMANOS FORMADOS EM FÍSICA DE PARTÍCULAS E SUBÁREAS CORRELATAS**

INSTITUIÇÃO	1981		1982		1983		1984		1985		1986		1987		1988	
	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D	M	D
UFRGS	1	1	3	-	2	-	-	-	-	1	-	-	-	2	-	1
USP	7	2	11	2	6	5	8	4	12	3	4	2	-	-	-	-
IAG-USP	2	2	10	2	2	4	3	-	5	-	8	1	6	5	3	4
IFT	-	1	7	3	3	-	2	1	1	2	1	1	5	2	-	-
UNICAMP	2	1	1	3	1	-	-	-	2	-	4	1	6	5	4	2
UFRJ	3	-	4	2	2	1	8	2	4	-	2	1	-	-	-	-
CBPF	2	1	2	2	1	2	6	1	7	5	3	-	3	-	-	-
PUO	2	1	1	-	1	-	3	-	2	1	2	1	1	-	2	1
OBS. NACIONAL	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	1	1	-	-
UFF	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	3	3	-	-
UFMG	-	-	2	-	1	-	2	-	2	-	-	-	1	-	1	1
UNB	3	-	2	-	3	-	-	-	-	-	2	-	1	-	-	-
UFPE	1	1	-	1	1	-	1	1	1	-	1	-	1	-	-	1
<b>TOTAL</b>	<b>23</b>	<b>10</b>	<b>43</b>	<b>15</b>	<b>23</b>	<b>12</b>	<b>33</b>	<b>9</b>	<b>36</b>	<b>12</b>	<b>27</b>	<b>7</b>	<b>28</b>	<b>18</b>	<b>10</b>	<b>10</b>

**Tabela 5 – BOLSISTAS EM DOUTORAMENTO NO EXTERIOR EM FÍSICA DE PARTÍCULAS**

	<b>Nº de Bolsistas</b>	<b>Nº de respostas recebidas</b>	<b>Sem vínculo de emprego</b>	<b>Fazem Fenomenologia</b>	<b>Experimentais</b>
CNPq	19	13	10	5	1
CAPES	14	12	11	2	-
FAPESP	-	-	-	-	-
OUTROS	2	2	2	-	-

mesmo tempo que deve constituir uma preocupação para a SBF e instituições governamentais, indica as possibilidades e as limitações para a expansão das atividades de pesquisa no Brasil.

## PERSPECTIVAS, PROJEÇÕES E NECESSIDADES

Do que foi exposto, pelo levantamento realizado através da análise da situação atual da Física de Partículas e Campos no Brasil, chegamos às seguintes conclusões.

• Deficiências na formação de bacharel em Física, especialmente nas áreas tecnológicas e experimental, assim como em computação. Recomenda-se:

– A introdução de cursos experimentais, nos quais sejam realizadas experiências simples com raios cósmicos do mar, tais como determinação da vida média do muon, medida do fluxo de raios cósmicos a nível do mar, propriedades da radiação Cerenkov. Para isto são necessários fotomultiplicadoras, cintiladores e eletrônica não muito sofisticada (padrão NIM).

– Introdução de cursos mais avançados de computação e robótica, com linguagem de alto nível (tipo LISP para robótica), introdução a problemas modernos de visão em robótica, assim como soluções numéricas de equações de Langevin ou métodos de Monte-Carlo.

A entrada do Brasil em "networks" tais como Bitnet, possibilitaria a utilização de computadores dos grandes laboratórios, assim como uma rápida comunicação com grupos de pesquisas em outros países já integrados no sistema. Atualmente este é o meio de comunicação mais eficiente, rápido e barato à disposição da comunidade científica internacional. Esta seria uma medida com impacto em outras áreas da física, que também utilizam recursos de computação, e mantém colaborações no exterior.

– Apoio aos projetos para desenvolvimento de processadores paralelos, e renovação de computadores já existentes.

– Fortalecimento dos grupos teóricos já existentes no país. Há vários grupos de destaque em atividades de fronteira, necessitando de elementos em áreas matemáticas, como elemento de ligação naquele tipo de pesquisa, assim como elementos treinados em aspectos mais fenomenológicos, de modo a completar o quadro de teoria de campos, que é de uma descrição matemática e precisa dos fenômenos elementares.

• Tendo em vista também a existência de pelo menos duas dezenas de doutores brasileiros com larga experiência pós-doutoral, ainda no exterior, recomenda-se:

– Apoio ao retorno destes pesquisadores aos grupos estabelecidos, através da criação de posições pós-doutorais renováveis, para alimentar os grupos de inovações e métodos renovados.

– Criação de posições de pesquisadores, ocupados por cientistas de larga experiência, agindo como polarizadores de novos grupos, e com disponibilidade para mudanças de endereço, do tipo do programa de pesquisadores do CNRS francês.

– Fomento ao intercâmbio de pesquisadores entre os vários centros nacionais, possibilitando uma colaboração mais efetiva entre grupos de interesse comum, através de estadias (curtas ou longas) destes mesmos pesquisadores. De-

ve-se possibilitar também intercâmbios intermitentes (semanais ou mensais, por exemplo) entre centros próximos.

– Fortalecimento da ligação brasileira com grandes centros no exterior, geralmente abertos aos nossos pesquisadores, como ICTP (Trieste) que mantém o quadro de associados e afiliados, do CERN (Genebra), acordo-Paris VI-IFT, Termilab (USA) e outros.

– Facilidade para envio de pesquisadores brasileiros aos grandes centros, assim como a vinda de colaboradores estrangeiros que participem de pesquisas conjuntas.

● Comparando-se os gastos com Física de Partículas entre o Brasil e os países desenvolvidos, cremos que a situação nos é extremamente desfavorável. Recomenda-se:

– Fortalecer as colaborações no sentido já indicado acima, diversificar as colaborações na medida do crescimento dos grupos, e enviar pesquisadores aos centros renovados, onde novos elementos entram em atividade, como Hamburgo, na Alemanha (HERA), CERN – Genebra (LEP), União Soviética (UNK), Japão (KEK) e Estados Unidos (SLC).

– Fortalecimento de grupos teóricos em áreas de fronteira, onde se procura explicar os fenômenos observados nestes aceleradores. Estes grupos teóricos são responsáveis por um grande contingente de mão de obra teórica altamente especializada e treinada.

● A inexistência de instrumentação avançada no Brasil é um fator de limitação à participação brasileira, em vista do que se recomenda:

– A interação com indústrias nacionais interessadas no setor, com a divulgação dos recursos já existentes em instrumentação e eletrônica, com o objetivo de se formar um "pool" nacional, assim como o incentivo de aplicação de verbas, por parte da indústria na formação de mão de obra em pesquisa, produção de material de pesquisa, manutenção de grupos teóricos e experimentais, assim como incentivo a doações à pesquisa básica.

● Dado o crescente número de grupos brasileiros interagindo com pesquisadores de outros países, recomenda-se:

– Participação mais ativa e materialmente mais significativa nas pesquisas onde grupos brasileiros estejam envolvidos.

– Recomenda-se que os órgãos financiadores de pesquisa adotem um procedimento mais ágil na concessão de auxílios e viagem (passaporte e diárias) que visem a possibilitar a saída do país em prazos mais curtos e frequência necessária para participar de colaborações, testes de equipamentos, participação em congressos, tomada de dados ou finalização de trabalhos científicos.

## **FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA**

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>79</b>
<b>ANÁLISE DA SITUAÇÃO NO BRASIL</b> .....	<b>81</b>
– Física Atômica e Molecular .....	<b>84</b>
• Descrição .....	<b>84</b>
• Breve Histórico .....	<b>86</b>
• Quadro Resumo da Situação Atual .....	<b>87</b>
• Análise e Perspectiva .....	<b>89</b>
– Óptica .....	<b>90</b>
• Descrição .....	<b>90</b>
• Breve Histórico .....	<b>92</b>
• Quadro Resumo da Situação Atual .....	<b>93</b>
• Análise e Perspectiva .....	<b>93</b>
– Cristalografia .....	<b>97</b>
• Descrição .....	<b>97</b>
• Breve Histórico .....	<b>98</b>
• Quadro Resumo da Situação Atual .....	<b>101</b>
• Análise e Perspectiva .....	<b>99</b>

– Física Estatística . . . . .	104
• Descrição . . . . .	104
• Breve Histórico . . . . .	106
• Quadro Resumo da Situação Atual . . . . .	109
• Análise e Perspectiva . . . . .	110
– Física de Semicondutores . . . . .	112
• Descrição . . . . .	112
• Breve Histórico . . . . .	112
• Quadro Resumo da Situação Atual . . . . .	114
• Análise e Perspectiva . . . . .	113
– Física de Baixas Temperaturas e Supercondutividade . . . . .	117
• Descrição . . . . .	117
• Quadro Resumo da Situação Atual . . . . .	120
• Análise e Perspectiva . . . . .	119
– Magnetismo . . . . .	122
• Descrição . . . . .	122
• Breve Histórico . . . . .	125
• Quadro Resumo da Situação Atual . . . . .	127
• Análise e Perspectiva . . . . .	126
– Ressonância Magnética . . . . .	131
• Descrição . . . . .	131
• Breve Histórico . . . . .	133
• Quadro Resumo da Situação Atual . . . . .	136
• Análise e Perspectiva . . . . .	135
– Espectroscopia Mössbauer . . . . .	147
• Descrição . . . . .	147
• Breve Histórico . . . . .	148
• Quadro Resumo da Situação Atual . . . . .	149
• Análise e Perspectiva . . . . .	151

– Biofísica E Física Médica .....	154
· Descrição .....	154
· Breve Histórico .....	155
· Quadro Resumo da Situação Atual .....	157
· Análise e Perspectiva .....	156
<b>DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA .....</b>	<b>160</b>
– Física Atômica e Molecular .....	160
– Óptica .....	164
– Cristalografia e Cristais Líquidos .....	178
– Física Estatística .....	182
– Física de Semicondutores .....	188
– Física de Baixas Temperaturas e Supercondutividade .....	196
– Magnetismo .....	203
– Ressonância Magnética .....	208
– Espectroscopia Mössbauer .....	215
– Biofísica e Física Médica .....	220

# Física da Matéria Condensada

## INTRODUÇÃO

A Física da Matéria Condensada investiga os estados da matéria em que os átomos constituintes estão suficientemente próximos e interagem simultaneamente com muitos vizinhos. Ela é uma área de investigação básica, que procura a explicação detalhada de propriedades e fenômenos da matéria condensada a partir dos conceitos e das equações fundamentais da mecânica quântica e da física estatística. São particularmente interessantes as propriedades elétricas, ópticas, magnéticas, mecânicas e térmicas. Por outro lado, a Física da Matéria Condensada tem uma enorme quantidade de aplicações na tecnologia moderna. Por exemplo, foi a partir de investigações nesta área que surgiram grandes inovações tecnológicas como os transistores, os circuitos integrados, os microprocessadores, os fios supercondutores e os lasers semicondutores que deram origem às comunicações ópticas.

Esta área da Física começou a adquirir características próprias apenas a partir de 1948, inicialmente sob o nome de Física do Estado Sólido. Até aquela época as propriedades da física dos sólidos eram objeto de estudo como exemplo de aplicação da mecânica quântica, estabelecida há pouco mais de vinte anos. Foi a descoberta do transistor naquele ano que deu um enorme impulso à pesquisa da Física de Sólidos.

Na década de 50 os trabalhos nesta área estavam concentrados nos sólidos cristalinos, cujos íons formam um arranjo ordenado periódico. Nesses sólidos ocorrem fenômenos que não existem em materiais amorfos. Além disso, como eles têm estrutura cristalina com propriedades de simetria bem definidas, os fenômenos podem ser interpretados pelas leis da Física com mais facilidade. Com o progresso das técnicas experimentais e teóricas de investigação, esta área se estendeu a materiais como o vidro, polímeros orgânicos diversos (teflon, poliacetileno, etc.), ligas amorfas e até mesmo aos líquidos, passando a ser conhecida

como Física da Matéria Condensada. Nesta área da Física trabalham atualmente mais de 40% dos físicos em todo o mundo e a cada ano surgem novas linhas de pesquisa, impulsionadas pela descoberta de novos fenômenos e de novos materiais artificiais. Estas linhas por sua vez abrem o potencial para o desenvolvimento de novos dispositivos que encontram aplicações nos mais variados segmentos tecnológicos.

Entretanto, não foi apenas por causa de sua importância tecnológica que a nova área se desenvolveu rapidamente. A enorme variedade de fenômenos que os elétrons e os núcleos apresentam coletivamente em sólidos deu origem a descobertas fundamentais e excitantes. Esta é uma das razões para que cerca de 50% dos prêmios Nobel nos últimos 15 anos tenham sido dados a físicos que trabalham nesta área. Foram eles J. Bardeen, L. N. Cooper e J. R. Schrieffer (1972 — *teoria de supercondutividade*), L. Esaki, I. Giaever e B. Josephson (1973 — *efeitos de tunelamento em sólidos*), P. W. Anderson, N. F. Mott e J. H. Van Vleck (1977 — *estudos de sólidos amorfos e propriedades magnéticas da matéria*), P. Kapitza (1978 — *estudos em baixas temperaturas*), N. Bloembergen, A. L. Shalov e K. M. Siegbahn (1981 — *espectroscopia com lasers e a fotoelétrons*), K. G. Wilson (1982 — *teoria de grupo de renormalização e transições de fase*), K. von Klitzing (1985 — *efeito Hall quântico*) e G. Binnig, H. Rohrer e E. Ruska (1986 — *invenção do microscópio de tunelamento e do microscópio eletrônico*).

A Física da Matéria Condensada é atualmente uma das áreas mais estimulantes da ciência, contribuindo continuamente para a descoberta de novos fenômenos fundamentais e de novos materiais avançados. Apenas nos últimos dez anos pode-se destacar: a descoberta do efeito Hall quântico; o desenvolvimento de materiais semicondutores fabricados pela deposição sucessiva de monocamadas atômicas de modo a formar super-redes, hetero-estruturas ou poços quânticos; a descoberta de efeitos magnéticos e eletrônicos em sistemas de dimensionalidade menor que 3; a identificação e compreensão de fenômenos críticos e transições de fase em sistemas complexos, a formulação teórica e a observação experimental de fenômenos de turbulência e caos em uma grande variedade de sistemas; a descoberta de processos de condução por ondas de densidade de carga e mais recentemente a síntese de materiais supercondutores a temperaturas mais altas.

A interpretação dos novos fenômenos na matéria condensada tem requerido a utilização cada vez mais freqüente de técnicas originadas na teoria de campos e no estudo de partículas elementares, como a teoria de grupo de renormalização. Este fato tem atraído para esta área o concurso de físicos teóricos do mais alto calibre, que por sua vez desenvolvem técnicas novas, que encontram aplicações nas outras áreas. O rápido progresso nas técnicas de computação eletrônica permitiu ainda o cálculo semiquantitativo de inúmeras propriedades dos sólidos. Do ponto de vista fundamental, encontramos na Física da Matéria Condensada uma variedade muito grande de sistemas de muitas partículas. A investigação destes sistemas, ou de modelos propostos para descrevê-los, tem evidenciado aspectos fundamentais da Física de Muitos Corpos, constituindo um imenso "laboratório" para o estudo da Termodinâmica e da Mecânica Estatística. A compreensão de propriedades termodinâmicas de equilíbrio e de não-equilíbrio dos sistemas mais simples tem fornecido informações valiosas para a descrição de sistemas mais complexos de muitas partículas, como ocorre em Astrofísica ou no domínio biológico.

Do ponto de vista experimental, uma característica importante da Física da Matéria Condensada é seu caráter descentralizador, pois ela possibilita a investigação de um problema físico de fronteira completo, com laboratórios de custos e dimensões pequenos comparados aos das grandes máquinas utilizadas na Física Nuclear e de Partículas Elementares. Além disso ela utiliza uma grande variedade de técnicas experimentais baseadas em instrumentação eletrônica, óptica e criogenia, fazendo com que se torne muito propícia para a formação de técnicos e pesquisadores. A instrumentação típica usada nesta área encontra aplicações em outros campos da ciência, como a Química, Biofísica, Geofísica, Ciência de Materiais, Ciências Agrárias, assim como em Engenharia e Medicina. Um dos exemplos mais notáveis é a tomografia de ressonância magnética nuclear, que está causando um enorme impacto na Medicina.

## A FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA NO BRASIL

O precursor da Física da Matéria Condensada no Brasil foi Bernard Gross, físico alemão que imigrou em 1933. Gross foi trabalhar no Instituto Nacional de Tecnologia fundado no Rio de Janeiro naquele ano, onde montou um laboratório para estudar propriedades elétricas de materiais dielétricos. Um de seus primeiros discípulos foi Joaquim Costa Ribeiro, que em 1944, descobriu o efeito termo-dielétrico que ocorre no processo de solidificação de dielétricos — o efeito Costa Ribeiro. Apesar deste início promissor a Física dos Sólidos custou a se estabelecer no Brasil. Dez anos após a descoberta do transistor, quando o laser já estava sendo investigado, não havia mais do que meia dúzia de físicos de sólidos no País, concentrados em dois grupos — o do Rio de Janeiro e o de São Carlos, este último criado por Sergio Mascarenhas, discípulo de Gross e Costa Ribeiro. O crescimento continuou muito lento na década de 60, período em que foram criados pequenos grupos nas Universidades de São Paulo, sob os auspícios do físico teórico Mario Schenberg, nas Federais de Minas Gerais, do Rio Grande do Sul e do Ceará, na PUC e no CBPF do Rio de Janeiro. A partir dos anos 70, no entanto, este quadro começou a mudar rapidamente, com a criação de grupos em várias universidades brasileiras, como na UNICAMP em Campinas e na Federal de Pernambuco. Para isto foi fundamental a criação da FINEP com a visão de seu primeiro presidente, José Pelúcio Ferreira, que entendia que o desenvolvimento tecnológico não poderia existir sem uma ciência básica forte. Também foram importantes a ambição e a mentalidade ousada trazidas para a UNICAMP pelo grupo que veio do Laboratório da Bell, Sérgio Porto, Rogério Cerqueira Leite e José Ripper Filho. Neste período surgiram grupos de pesquisa em várias cidades e os que já existiam se ampliaram consideravelmente.

A Física da Matéria Condensada está em pleno vigor no Brasil atualmente. Isto tem se verificado mesmo a despeito da crise econômica que freou a ciência no País a partir de 1980 e da perda prematura de seus líderes mais experientes, alguns faleceram (Costa Ribeiro e Porto), outros mudaram de campo na ciência e vários buscaram ocupações diversas em outros ramos. Nesta área trabalham cerca de 60% dos 950 físicos com doutorado no País, publicando artigos científicos nos melhores periódicos internacionais em linhas de fronteira, tais como: super-redes de semicondutores; efeito Hall quântico; He superfluido; sistemas de campo aleatório; fenômenos críticos e transições de fase; turbulência e caos; etc.

Com a experiência acumulada na construção e utilização de instrumentos científicos, os físicos da matéria condensada no País têm dado significativas contribuições em áreas aplicadas, tais como em biofísica, genética (melhoramento do milho com ressonância magnética), arqueologia (datação por várias técnicas), agricultura (instrumentação de análise, técnicas criogênicas), física médica (bisturis criogênico e a laser, técnicas diversas com lasers, magnetocardiógrafo, tomografia de RMN), entre outras. Mais recentemente começaram a surgir efeitos concretos desta área de Física na tecnologia avançada, como na microeletrônica e nas comunicações ópticas através de um fenômeno de transbordamento e de conhecimento acumulado nas universidades para as indústrias nacionais. Este fenômeno tem sido possível em parte à proteção dada à indústria nacional pela Lei da Reserva de Informática, aprovada em 1984. A necessidade de copiar, adaptar e desenvolver tecnologia avançada tem levado indústrias nacionais a contratarem pesquisadores em física, procurando uma maior interação com as universidades. Este fato está abrindo melhores perspectivas para o papel da Física da Matéria Condensada no País.

O atual quadro favorável da Física da Matéria Condensada no Brasil é resultado da política de formação de pessoal empreendida a partir de 1970 e dos investimentos realizados durante a década de 70. É preciso ressaltar, entretanto, que os investimentos para montar novos laboratórios e para expandir e modernizar os já existentes praticamente cessaram em 1980. Este fato tem preocupado muito a comunidade científica nos últimos anos, pois ela está percebendo que os laboratórios nacionais estão ficando obsoletos e perdendo a capacidade de competir em linhas de fronteira. É importante fazer as autoridades governamentais entenderem que os grupos experimentais no Brasil foram instalados na década de 70 com equipamentos de custo inferior a cem mil dólares, como aparelhos eletrônicos, lasers, espectrômetros analógicos, etc. Por outro lado, os modernos laboratórios de pesquisa em matéria condensada dispõem atualmente, além dos equipamentos pequenos, outros de porte médio de custo entre cem mil e um milhão de dólares. Estes equipamentos de porte médio, que são essenciais para produzir e caracterizar inúmeros materiais artificiais usados para pesquisa avançada e para aplicações tecnológicas, são quase inexistentes no Brasil.

Uma grande preocupação da comunidade científica no momento é que o Governo Federal, principalmente através do Ministério da Ciência e Tecnologia, tem procurado aumentar os recursos para C & T principalmente buscando grandes projetos para apoiar. Uma mudança brusca na política de financiamento da pesquisa, passando de investimentos em equipamentos de custo inferior a cem mil dólares para máquinas de dezenas de milhões de dólares, sem passar pelo estágio intermediário, não é a melhor forma de aumentar a qualidade e a competitividade da Física brasileira.

O apoio a grandes projetos localizados pode e deve ser dado, desde que os grupos universitários, que são os centros formadores de recursos humanos, estejam sendo adequadamente financiados. A pesquisa em Física da Matéria Condensada no País pode ser revitalizada através de grandes projetos *deslocalizados*, abrangendo grupos de várias instituições, por exemplo nas subáreas de semicondutores, materiais supercondutores, materiais magnéticos, cristais líquidos, óptica, etc. Caso seja bem sucedida, a construção de uma grande máquina, como a fábrica de fótons do Laboratório Nacional de Luz Síncrotron, será de grande importância para a Física da Matéria Condensada no País. Entretanto, é importante

ênfatizar que a revitalização da ciência experimental no Brasil não será alcançada sem a estabilização e o financiamento pleno dos *bons* grupos universitários de pesquisa.

A situação da cada subárea da Matéria Condensada no País está apresentada na continuação desta secção. Cabe esclarecer qua a escolha das subáreas foi feita com base nos temas discutidos nas reuniões tópicas de Matéria Condensada realizadas anualmente em torno do mês de maio. Esses temas abrangem tanto técnicas, como ressonância magnética e espectroscopia Mössbauer, quanto tópicos da pesquisa como magnetismo e física de semicondutores. Eles incluem também subáreas que embora não pertençam a ela, tem uma grande interface com a Física da Matéria Condensada, como é o caso de Física Atômica a Molecular e da Biofísica. É preciso ressaltar, entretanto, que este documento não aborda certas subáreas que, mesmo tendo identidade própria, tem dimensão bem inferior às demais.

O número da pesquisadores atualmente em atividade em Matéria Condensada no País é cerca da 60% do número total de físicos. Isto corresponde a cerca da 530 doutores, cuja distribuição aproximada é a seguinte:

Física atômica e molecular 9%

Óptica 13%

Cristalografia a cristais líquidos 7%

Física estatística 13%

Física de semicondutores 23%

Física de baixas temperaturas e supercondutividade 4%

Magnetismo 12%

Ressonância magnética 6%

Espectroscopia Mössbauer 6%

Biofísica e Física médica 7%

# Física da Matéria Condensada

## FÍSICA ATÔMICA E MOLECULAR

### DESCRIÇÃO

Os objetivos básicos da Física Atômica e Molecular (FAM) são estudar as leis fundamentais da física, a matéria ao nível atômico e molecular e a interação de átomos e moléculas com campos externos. Ao estudar as leis fundamentais da física é necessário o desenvolvimento de equipamentos e técnicas de alta precisão, que sirvam para estabelecer a validade dessas leis. A segunda grande linha de pesquisa em FAM está ligada ao estudo da estrutura atômica e molecular, hoje quase que indissociável do estudo da interação da radiação eletromagnética com átomos e moléculas. A terceira grande linha de pesquisa nesta área da física estuda os processos dinâmicos relacionados com as interações entre átomos, íons, moléculas e elétrons.

Pela natureza da FAM, é grande sua interface com outras áreas da ciência e da tecnologia tais como a astronomia, a biofísica, a química, a meteorologia e programas de energia.

Recentemente foi publicada pela "National Academy of Sciences" uma análise das perspectivas da física nos EUA na próxima década. Na área de FAM foi elaborado um levantamento detalhado, com recomendações específicas de apoio para certos programas durante os próximos anos. Uma descrição sucinta das áreas de pesquisas consideradas neste trabalho como meritórias de apoio e com perspectivas de desdobramentos importantes é apresentada a seguir, pois poderá servir de referência aos interessados bem como balizar uma análise da situação da FAM no País. No Brasil a maior parte dos físicos que atuam em FAM também pesquisam em Matéria Condensada. Os físicos que trabalham somente em FAM são em número relativamente reduzido e por esta razão esta subárea, para efeito deste levantamento, está incluída nesta seção.

## Física Atômica Fundamental

Problemas incluem os limites da eletrodinâmica quântica (medidas extremamente precisas do momento magnético anômalo do elétron, do pósitron e do deslocamento Lamb do hidrogênio); a natureza das simetrias fundamentais e dos princípios de invariância (CP violado; portanto, existe uma violação de simetria sobre inversão temporal; busca de momento de dipolo elétrico em nêutrons); interações fracas e violação da paridade (experiências bem sucedidas em várias espécies atômicas); os fundamentos da mecânica quântica (experiências sobre as desigualdades de Bell mostram que a mecânica quântica é completa); efeitos da gravidade no tempo (desenvolvimento de "relógios" de grande precisão que poderão ser construídos a partir de íons que são aprisionados em armadilhas formadas por campos externos).

## Estrutura Atômica

Alguns problemas de interesse são: estados atômicos fracamente ligados (estados de Rydberg têm uma descrição precisa e uma física extremamente rica, porém dois elétrons fracamente ligados têm um movimento altamente correlacionado que sugerem modos vibracionais e rotacionais do tipo molecular); átomos em campos intensos (o comportamento de átomos na presença de campos elétricos ou magnéticos tem aberto problemas novos no que diz respeito ao papel da simetria na estrutura e na dinâmica de sistemas de dois e três corpos, na natureza do contínuo, na compreensão do movimento regular e caótico) estados atômicos coletivos (abandonando a descrição monoelétrica da estrutura atômica adequada para excitações de uma partícula, novos estados altamente correlacionados, são necessários para descrever algumas experiências envolvendo absorção multifotônica onde dois ou mais elétrons dividem a energia absorvida); efeitos relativísticos em átomos pesados.

## Colisões Atômicas

Estrutura do contínuo eletrônico (estudo de ressonâncias complexas e seus papéis nos processos colisionais, papel dos efeitos de correlação em ressonâncias do tipo "Wannier - ridge"); colisões ultra-lentas (movimento adiabático e correlação, ionização perto do limiar e correlação, movimento adiabático de dois elétrons próximos de um íon); colisões com átomos de Rydberg; leis de conservação aproximadas ("promotion model" a estados de Rydberg em presença de campos elétricos); comparação do espalhamento de elétrons e de pósitrons (efeitos de polarização de longo alcance).

## Estrutura de Moléculas

Novos tipos de estruturas eletrônicas em moléculas: moléculas de Rydberg (estados de moléculas altamente excitadas), moléculas de longo alcance (são moléculas em estado vibracionais altamente excitadas para as quais os núcleos estão quase que separados. Suas propriedades podem ser compreendidas a partir dos átomos isolados); cálculos "ab initio". Estrutura vibracional de moléculas poliatômicas (substituição da descrição de modos vibracionais através de modos nor-

mais por uma estrutura de modos locais, onde a vibração surge como um movimento de grande amplitude associado a uma única ligação).

## **FAM com Radiação de Síncrotron**

A possibilidade de gerar luz de alta intensidade em pulsos de pico segundos abre grandes possibilidades para o estudo do movimento correlacionado dos elétrons. O acesso a praticamente qualquer camada atômica de átomos pesados pode ser obtido com a produção de raios-X. Testes para a eletrodinâmica quântica em regimes onde esses efeitos são significativos poderão ser propostos. Juntamente com o uso de lasers o uso de radiação de síncrotron abre acesso à espectroscopia fotoeletrônica a um conjunto enorme de níveis atômicos e moleculares inacessíveis à espectroscopia por outras técnicas.

## **BREVE HISTÓRICO**

As atividades de pesquisa em FAM no Brasil podem ser enquadradas em um dos seguintes tópicos:

- a) Propriedades estruturais de átomos e moléculas
- b) Colisões atômicas e moleculares
- c) Interação de átomos e moléculas com a radiação
- d) Técnicas e instrumentação
- e) Interface com outras áreas da ciência e tecnologia.

A história das atividades de pesquisa em FAM é curta pois começou no início dos anos 70 com atividades teóricas em colisões atômicas na PUC/RJ e na UNICAMP, e experimentais em espectroscopia de raios-X na PUC/RJ. A concentração no estudo de colisões atômicas e moleculares não foi resultante de qualquer planejamento, mas de circunstâncias específicas envolvendo pesquisadores ou grupos. Hoje nessa subárea da FAM existem em atividade dois grupos experimentais e um grupo teórico.

Por volta de 1972 começaram os estudos teóricos de propriedades estruturais de átomos e moléculas utilizando-se diferentes abordagens e métodos, desde métodos semi-empíricos a técnicas adequadas para cálculo de aglomerados. Nesse sentido foram pioneiros os grupos dos departamentos de física da PUC/RJ, da UFMG, da UNB e do departamento de química da UFSCar. Houve uma evolução de interesses acoplando justamente esta subárea (a) com outras áreas da física, como semicondutores, óptica e com química quântica no País. Hoje existem em atividade doze grupos teóricos e dois grupos experimentais.

Por volta de 1975 na UFPE e na PUC/RJ começava-se alguma atividade no campo da interação de átomos e moléculas com a radiação que aqui separamos do grupo de atividades em óptica, uma vez que o estudo de propriedades atômicas e moleculares na presença da radiação intensa era o objetivo básico destas linhas de pesquisas. Existem em atividade no País pelo menos três grupos teóricos e um experimental.

Algum desenvolvimento em instrumentação tem sido feito por grupos experimentais.

Hoje são cerca de 60 doutores e 30 mestres em atividade no País nesta subárea.

**QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO DA FÍSICA ATÔMICA E MOLECULAR NO BRASIL**

GRUPO	INÍCIO	DOCTORES	MESTRES	ESTUDANTES		TESES		ARTIGOS
				DOCTORES	MESTRES	DOCTORES	MESTRES	
UFRJ-QUÍMICA	1978	4	-	1	1	1	1	-
PUC-RJ (Exp)	1965	8	-	1	2	4	20	60
PUC-RJ (Teor)	1970	5	2	-	2	3	30	100
UFPE-QUÍMICA	1979	8	-	-	-	-	-	-
UFPE-FÍSICA	1973	5	2	-	3	1	4	40
SBPF	-	4	-	4	1	-	-	-
UFSCARLOS	1972	4	-	-	1	-	-	-
UFSCARLOS		2	-	1	-	-	-	-
UFRGS	1963	3	1	1	5	-	-	20
ITA	1960	5	3	-	3	-	-	-
UFMG-QUÍMICA	1978	2	-	-	2	1	3	-
UFSC	1979	2	-	-	6	-	-	-
UNB	1973	4	3	4	2	3	20	-
IFUSP	1968	7	-	4	-	6	10	40
IFGO	1984	1	2	-	-	-	-	-
UNICAMP-QUÍMICA	1978	1	-	1	1	-	-	-
UFBA	1986	2	-	-	2	-	-	-
<b>TOTAL</b>		<b>67</b>	<b>13</b>	<b>17</b>	<b>31</b>	<b>19</b>	<b>98</b>	<b>260</b>

## (C) QUADRO RESUMO DA SUBÁREA

GRUPO	INÍCIO	DOCTORES	MESTRES	ESTUDANTES		TESES		ARTIGOS
				DOCTORES	MESTRES	DOCTORES	MESTRES	
ITA	1960	4	3		3			
PUC-RJ (Exp)	1965	8		1	2	4	30	60
UFRJ-QUÍMICA	1978	4		1	1	1	1	
PUC-RJ (Teor)	1970	5	2		2			
UFPE-QUÍMICA	1986	1						
UFPE-FÍSICA	1984	5	2		3	1	4	40
CBPF		1		4	1			
UFSCARLOS-QUÍMICA	1972	4			1			
UFSCARLOS		2			1			
UFRGS	1963	3	1	1	5			20
UFMG	1978	2			2	1	3	
UFSC	1979	2			6			
UNB	1973	4	3	4	2			
IFUSP	1977	5		4				
UFGO	1984	1	2					
UNICAMP-QUÍMICA	1978	1		1	1			
UFBA	1986	2			2			
<b>TOTAL</b>		<b>54</b>	<b>13</b>	<b>16</b>	<b>32</b>	<b>7</b>	<b>38</b>	<b>120</b>

## ANÁLISE E PERSPECTIVAS

Os dados obtidos para a elaboração do presente levantamento indicam que há muito pouca atividade nos tópicos mencionados anteriormente em física atômica fundamental, no estudo de colisões atômicas e alguma em estrutura de moléculas. É praticamente inexistente aplicações da radiação síncrotron ao estudo de problemas da FAM. A maior parte das atividades em FAM se concentra em teoria de estrutura eletrônica com interface com Química Quântica e aplicações a semicondutores, sendo dada ênfase a cálculos mono-eletrônicos em praticamente todos os grupos que responderam ao questionário. Os três grupos experimentais (excluindo os de óptica) que responderam ao questionário trabalham em colisões atômicas, com poucos contatos com os teóricos da área. Têm trabalhado basicamente em problemas envolvendo também efeitos de uma partícula. Algum trabalho tem sido desenvolvido a nível teórico em átomos em campos externos e a nível experimental (por grupos de óptica) em estados de Rydberg em campos externos.

A área apresenta uma razão superior de dois teóricos para um experimental (incluindo os dois grupos de óptica que responderam o questionário inicial).

Os grupos da subárea de FAM se ressentem de problemas comuns a toda a física brasileira: bibliotecas deficientes, intercâmbio deficiente e absoluta necessidade de melhores recursos computacionais. A carência de recursos computacionais é particularmente séria em FAM.

Vários grupos apontam a urgência de definições de política científica para a FAM no Brasil, incluindo a sugestão de elaboração de um plano decenal de desenvolvimento.

# Física da Matéria Condensada

## ÓPTICA

### DESCRIÇÃO

A Óptica não é propriamente uma área da Física da Matéria Condensada. Ela está incluída nesta seção porque é neste ramo da Física que ela encontra maior aplicação no País atualmente. As técnicas ópticas têm, historicamente, ocupado papel importante em vários campos da ciência. Por exemplo, elas são a base dos telescópios utilizados desde os primórdios da astronomia, dos microscópios que são essenciais na biologia, dos instrumentos de espectroscopia usados na química, etc. Na Física, o estudo das propriedades ópticas de átomos, moléculas e sólidos também tem historicamente constituído um campo de intensa atividade.

A construção do laser em 1960 tornou a óptica mais importante ainda em vários campos da ciência, como também proporcionou o desenvolvimento de inúmeras aplicações tecnológicas. Hoje ela é um dos campos mais dinâmicos e inovativos da Física, caracterizado pela contínua descoberta de novas fontes de luz, novos métodos de espectroscopia e uma enorme variedade de aplicações. Por conta disso as linhas de pesquisa em óptica moderna têm evoluído rapidamente, estando grosseiramente compreendidas em três grandes linhas: (I) desenvolvimento de lasers e novas fontes de luz; (II) espectroscopia em lasers e (III) óptica quântica. Um elenco representativo dos principais tópicos de pesquisa está apresentado abaixo. Ele foi extraído do temário da 6ª Conferência em Laser e Eletro-Óptica e da 14ª Conferência Internacional de Eletrônica Quântica, que reuniram cerca de 5000 pesquisadores em San Francisco em junho de 1986.

- Estados atômicos altamente excitados
- Eletrodinâmica quântica de cavidade
- Estados comprimidos do campo eletromagnético
- Resfriamento de feixes atômicos ( $\mu\text{K}$ )
- Aprisionamento de átomos e íons

Conjugação da fase óptica  
Biestabilidade a caos óptico  
Lasers de raios-X, raios  $\gamma$ , laser de elétrons livres e laser de excímeros  
Dinâmica da fenômenos ultra-rápidos em sólidos  
Dispositivos a fenômenos de opto-elatrônica ultra-rápida  
Fibras ópticas; óptica Não Linear Integrada  
Física da Semicondutores. Poços Quânticos  
Memórias. Armazenamento de Dados  
Novos materiais não lineares

A distribuição geográfica dos grupos de pesquisa em óptica no País está relativamente bem equilibrada, existindo, já há alguns anos, grupos ativos nos estados do Rio Grande do Sul, São Paulo, Rio de Janeiro, Minas Gerais, Pernambuco e Ceará; grupos mais novos estão surgindo na Paraíba, Alagoas e Santa Catarina. Entretanto, o número total de pesquisadores na área é muito pequeno num contexto internacional. Por esta razão o número da pesquisadores em cada linha é pequeno, quando não inexistente.

Uma das características de toda nova área da pesquisa é a ausência de instrumentação apropriada para a realização da pesquisa. Em consequência a realização da pesquisa está intimamente ligada à construção total ou parcial do aparelho que é necessário. Não é portanto surpreendente que em quase todos os laboratórios exista bastante atividade em instrumentação. Há trabalhos sobre lasers de corantes contínuos, sintonizáveis no visível, lasers de centro de cor no infravermelho entre 2,4 e 2,8  $\mu\text{m}$ , e lasers moleculares no infravermelho distante, bombeados opticamente por  $\text{CO}_2$ , lasers de  $\text{N}_2$  no ultravioleta, e de um laser de Nd: YLF na região de 1,06  $\mu\text{m}$  cujo cristal foi crescido pelo grupo do IPEN em São Paulo. Claro está que essa atividade é inexistente naquelas áreas que já atingiram um grau de amadurecimento tal que já existem aparelhos prontos para essa pesquisa.

A área de espectroscopia não-linear com lasers ainda está bastante incipiente e apenas tem sido explorada em poucos laboratórios. Nestes, a ênfase tem sido nas aplicações à Matéria Condensada com estudos de processos multifotônicos, misturas de ondas e outros efeitos paramétricos em materiais isolantes e semicondutores. Há trabalhos sobre mistura de ondas e conjugação de fase em cristais, processos de absorção de dois fótons por impurezas em sólidos, efeitos de conversão ascendente e transferência de energia entre impurezas, além de alguns resultados com corantes orgânicos. Muito pouco está sendo feito com relação às aplicações à Física Atômica.

Na área de espectroscopia de pulsos ultra-rápidos existe apenas um laboratório no País. Esta é um dado preocupante se considerarmos que esta é uma das fronteiras mais ativas no cenário internacional. Felizmente, cerca de uma dezena de estudantes está sendo treinada no País e no exterior.

Alguns temas de grande interesse atual estão sendo abordados pelos grupos teóricos, tais como: fenômenos de biestabilidade óptica, instabilidade de turbulências ópticas, estados comprimidos do campo eletromagnético, entre outros temas. Lamentavelmente apenas na área de biestabilidade óptica existe uma atividade experimental.

Em áreas mais convencionais, tais como espalhamento de luz, absorção linear a luminescência, existem alguns grupos em atividade.

Nestas áreas o maior interesse será focalizado no estudo das propriedades de simetria de sólidos com vários trabalhos relacionados a transições de fase estruturais em certas famílias de cristais.

## BREVE HISTÓRICO

O início das atividades em óptica no País confunde-se sobremaneira com as atividades em física atômica e molecular. Estas últimas se valiam da primeira no uso do instrumental adequado e até mesmo no desenvolvimento de instrumentos conforme a arquitetura experimental exigia. Datam do início da década de 50, por exemplo, os primeiros estudos do efeito Raman em São Paulo, no antigo Departamento de Física da FFCL-USP, quando foram observadas novas raias Raman em Br, halogenetos e compostos orgânicos e quando foi desenvolvida uma lâmpada especial de descarga em He. Esta atividade "pré-laser", segundo denominação de Nussenzweig, foi seguida de atividades em óptica teórica no CBPF e na USP, quando foram estudadas a teoria quântica do processo de emissão espontânea, a teoria da difração e as teorias quânticas da coerência e do efeito Cerenkov. Paralelamente a estes desenvolvimentos, foi fundada em São Paulo a Associação de Amadores em Astronomia, quando então foram construídos instrumentos ópticos, lunetas, lentes e um telescópio para o ITA. No CBPF, foram, naquela época, projetados e construídos sistemas ópticos, lentes e interferômetros. Na área educacional foi estabelecido no IBECC (hoje FUNBEC), na década de 60, um projeto piloto para o ensino de ciências no curso secundário sendo, então, desenvolvido um kit de óptica. Em 1966, iniciou-se um grupo de Lasers na UFRGS.

A época pós-laser no País foi marcada pelo início das atividades dos grupos de estado sólido e de dispositivos semicondutores em Campinas em 1971, que levou, em 1973, à criação do Grupo LPD com apoio da TELEBRÁS. Também em 1971, a UFPE recebeu o apoio do CNPq para a implantação de um núcleo de óptica, o mesmo acontecendo, em 1975, na UFCE. Em 1974, na UNICAMP, houve a implantação de uma série de grupos com o retorno ao Brasil de Sérgio P. S. Porto, um dos pioneiros mundiais em Espectroscopia Raman com o emprego de lasers. Além da UNICAMP, Porto estimulou outros grupos de pesquisa em óptica no País, como IEAv no CTA e no IPEN-SP. Em 1979 a USP de São Carlos iniciou, independentemente, suas atividades em óptica através da implantação de um grupo e da consolidação das atividades em crescimento de cristais. Em 1982, foi criado o comitê de óptica da SBF (hoje Comissão de Óptica da SBF), e, em 1984, houve o ingresso do Brasil na Comissão Internacional de Óptica da IUPAP e a publicação de "Optics Brazil", baseada em informações obtidas de dez grupos de pesquisa.

Temos atualmente no País cerca de 24 grupos atuantes em óptica e uma indústria nascente que, embora formada por um pequeno número de empresas cuja maioria ainda está no início de suas atividades, já ocupa um espaço importante na evolução nacional desta tecnologia de ponta. O desenvolvimento de competência nesta área foi fruto da associação favorável entre a necessidade de um mercado nascente por um lado e, por outro, o investimento de recursos humanos, ou seja, em profissionais de física, com especialização em óptica e área afins.

## QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL

Os grupos de óptica têm assumido posição de vanguarda na pesquisa brasileira, quer por sua agilidade, quer por uma mentalidade voltada para a instrumentação e aplicações tecnológicas. Eles concentram o maior número de físicos experimentais, preocupando-se constantemente com treinamento em nível técnico e formação de recursos humanos capazes de atuar dentro e fora da universidade. Esta posição pode ser verificada pelo volume de trabalhos apresentados nas Reuniões Anuais de Física da Matéria Condensada e pelo número crescente de indústrias de alta tecnologia instaladas hoje no País. Entre elas podemos citar a OPTO – ELETRÔNICA – São Carlos, ELEBRA – S.P., LASERTECH – São José dos Campos, UNILASER – Campinas, ABC-XTAL – Campinas, TELEBRÁS – Campinas, TECNOLASER – Campinas, FUNBEC – São Paulo, OPTRON – Campinas e outras nascidas quase sempre de projetos desenvolvidos nos departamentos de física onde os grupos de óptica floresceram e que contam, em seus quadros, com físicos experimentais oriundos desta área de pesquisa e desenvolvimento.

## ANÁLISE E PERSPECTIVAS

Muito embora a atividade em óptica tenha atingido uma posição de destaque entre as demais áreas da física no País, a pesquisa fundamental ainda é tímida quando comparada com o estágio atual do campo em nível internacional. Para se atingir este estágio é necessário um aporte de recursos substancial pelas Agências Financiadoras. Em óptica o retorno social do investimento feito em pesquisa básica associado com investimentos em pesquisa aplicada já produziu exemplos notáveis como o caso das comunicações ópticas.

Uma das causas do atual estado de coisas é a obsolescência em que se encontra a maioria dos equipamentos adquiridos há pelo menos uma década, na época do chamado "milagre econômico". Embora esta situação tivesse sido constatada pelo MCT, que acenou com uma solução paliativa através do programa emergencial, até o presente nada de concreto ocorreu.

Esta carência de financiamentos na área fundamental, acrescida da escassez de recursos humanos, tem dificultado de forma sensível uma pesquisa básica mais moderna em estudos da interação da radiação com átomos e moléculas, ou mesmo estudos de espectroscopia de alta resolução em materiais biológicos. Falta, também, um maior entrosamento entre a área de Óptica e a área de Física Atômica e Molecular para que esta possa se utilizar dos avanços recentes relativos a lasers e espectroscopia de alta resolução (energia e tempo).

Apesar de haver um interesse fundamental intrínseco, áreas como a óptica quântica não se tornaram, até o momento, suficientemente atrativas para envolver pesquisadores e agências financiadoras, deixando um vazio científico muito grande em relação aos países desenvolvidos. Apesar da maior parte dos financiamentos ter sido carreada para as atividades tecnológicas, estas são ainda insuficientes para atingir o desenvolvimento necessário, capaz de acompanhar de perto o desenvolvimento no exterior. Isso se reflete, também, na pesquisa básica e na formação de pessoal em todos os níveis do País.

## QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL

INSTITUIÇÃO	ATIVIDADES	INÍCIO	DOCTORES	MESTRES	ESTUDANTES		TESES		Nº de ARTIGOS	INVESTIMENTO GLOBAL (US\$)
					DOCTORADO	MESTRADO	DOCTORADO	MESTRADO		
UFCE	Laboratório de Espelhamento de luz.	1975	4	3	-	7	2	7	20	400.000
UFPE	Óptica	1972	4	7	3	7	1	9	30	780.000
UFMG	Laboratório de Óptica e Espelhamento de luz.	1974	3	2	2	10	-	10	25	505.000
UFF	Laboratório de Espectroscopia e Laser	1980	1	2	2	3	1	7	0	125.000
PUC - RJ	Grupo de Óptica	1983	1	1	-	1	-	-	4	10.000
	Óptica Teórica	-	4	4	5	-	-	-	-	-
UFRJ	Propriedades Ópticas/Materiais	1967	2	4	4	2	0	10	30	275.000
CNEN/SP	Laboratório de Propriedades Ópticas e Magnéticas de Compostos Moleculares.	1974/75	4	2	2	2	2	3	10	795.000
	Óptica Aplicada	1980	5	6	3	2	3	2	30	465.000
USP/S. Carlos	Óptica	1979	4	4	5	5	2	5	36	2.195.000
UNICAMP	Espectroscopia de Materiais Isolantes e Ciências dos Materiais Vítreos	1979	1	2	5	7	7	5	20	465.000
	Ressonância Magnética, Espectroscopia e Magnetismo.	1972	3	1	2	2	-	2	9	755.000
UNICAMP	Desenvolvimento e Aplicação de Lasers.	1975	5	2	3	1	7	6	30	735.000
	Fibras Ópticas	1975	3	-	2	4	1	14	133	600.000
	Grupo de Pico Segundos	1982	2	4	5	3	1	3	7	250.000
	Propriedades Ópticas da Matéria Laser e Aplicações.	1977	6	-	4	6	4	3	44	830.000
	Grupo de Óptica	1976	8	5	6	5	5	5	41	540.000
	Grupo Espectroscopia	1977	3	1	2	2	1	3	17	285.000
	Fotônica	1976	3	-	1	2	3	3	50	780.000
	Elemento Fototérmico e Transição de fase	1985	2	-	-	2	1	-	9	175.000
	Óptica não Linear	1975	2	-	2	4	1	1	10	220.000
	Grupo de Espectroscopia	1974	2	-	1	-	4	1	70	540.000
	Óptica do Raios-X	1980	1	-	1	-	-	-	-	220.000
	UFPR	Óptica Quântica - Teoria	1980	2	2	1	4	-	4	30
UFSC	Grupo de Laser	1968	3	3	2	4	1	5	40	322.000
IEAv-CTA	Divisão de Laser	1980	5	18	4	3	3	4	15	1.300.000

No que diz respeito à pesquisa fundamental, e sendo a área de óptica bastante ativa, espera-se que para os próximos anos novas técnicas sejam acrescentadas às já instaladas. Deverá haver uma ampliação e consolidação das áreas de espectroscopia de resolução temporal em femtosegundo, biestabilidade óptica, espalhamento Raman ressonante em super-redes, controle óptico de crescimento de monocristais, lasers sintonizáveis no infravermelho longo, espectroscopia de alta resolução, filmes finos e lasers sintonizáveis de centro de cor, lasers de vapor metálico na região do visível e de gases nobres Ar e Kr.

A exemplo do que já acontece internacionalmente, a fusão das áreas de micro-eletrônica e óptica (óptica integrada) oferece, por outro lado, uma oportunidade única de desenvolvimento no País, de física básica e aplicada. A micro-eletrônica, de certa forma já desenvolvida, amadurecida e transferida para o setor produtivo, tomou-nos de surpresa, tendo nos escapado em parte e necessitando de enormes esforços e apoio governamental no sentido da reserva de mercado para garantir um desenvolvimento autônomo. Na óptica integrada corremos também o risco daquele surfista que perdeu uma primeira onda de oportunidades e estaria prestes a perder a segunda para mostrar seu desempenho. A óptica integrada necessita urgentemente de grandes esforços laboratoriais e teóricos. Os retornos devidos aos investimentos nesta área são de cunho social assegurado tanto pelos resultados científico-tecnológicos em si quanto, e principalmente, no tocante à formação de pessoal para as áreas que serão relevantes na próxima década. A óptica integrada e também a opto-eletrônica abrem um enorme leque de possibilidades para a compreensão, produção e identificação de novos materiais para componentes ópticos ou eletro-acusto-ópticos, abrindo assim para os físicos, que até agora estiveram limitados ao não menos importante campo da instrumentação, a oportunidade de pesquisa na área de componentes e dispositivos. Estes formam um estágio mais aprofundado em termos científicos e tecnológicos e logo exigirão o concurso de teóricos e experimentais para sua ativação, além de unir as áreas de óptica e ciências dos materiais. A viabilidade da implantação de novas técnicas, bem como a automação dos laboratórios já existentes irão exigir, das fontes de financiamento, um apoio decidido em prazo relativamente curto. Isto só será possível através de uma ação integrada da FINEP-CNPq-CAPES, Ministério da Ciência e Tecnologia, Ministério da Educação, Ministério da Indústria e Comércio e Fundações Estaduais de Amparo à Pesquisa.

A área de óptica carece de facilidade e agilidade na importação de novos equipamentos, treinamento de técnicos de nível médio no exterior, formação acelerada em nível de doutoramento fora do País (em áreas de ponta), crescimento paralelo de uma tecnologia de automatização e informatização, e melhoria do intercâmbio nacional e internacional. Como em outras áreas da física, faz-se sentir a necessidade de um sistema diferenciado e justo quanto a cargos e salários dos pesquisadores de Universidades e Institutos de Pesquisa, a fim de fixá-los em suas respectivas instituições. Faz-se, também, necessário um aumento substancial nos valores e no número de bolsas de pós-graduação em nível de mestrado, doutoramento e pós-doutoramento. Além disso, o setor produtivo, ao invés de adquirir simplesmente pacotes tecnológicos no exterior, deve facilitar e apoiar o desenvolvimento da óptica no país, incrementando o intercâmbio com as universidades e centros de pesquisa, aproveitando, dessa forma, a capacidade já instalada e abrindo novos campos para a pesquisa e desenvolvimento. Cabe a nós da comunidade contribuir para esta conscientização do setor produtivo.

# Física da Matéria Condensada

## CRISTALOGRAFIA E CRISTAIS LÍQUIDOS

### DESCRIÇÃO

Foram englobados nesta área os Laboratórios de Cristalografia e os grupos que estudam Cristais Líquidos.

Nos Laboratórios de Cristalografia desenvolvem-se estudos de matéria condensada utilizando essencialmente técnicas de difração (raio X, nêutrons lentos, elétrons) centrados em aspectos estruturais e na interação da radiação com o meio. Frequentemente as microscopias óptica e eletrônica são técnicas auxiliares nesses laboratórios. As atividades englobam a cristalografia estrutural (ênfase na determinação de estruturas atômicas) e a cristalografia física (ênfase nas propriedades físicas).

São investigados monocristais (desde monoatômicos até macromoleculares), policristais, defeitos em cristais, cristais líquidos, transições de fase, materiais amorfos, filmes finos, superfícies e interfaces, membranas e partículas em solução. As atividades são frequentemente de caráter interdisciplinar envolvendo, além de pesquisa típica de matéria condensada, as áreas de ciência dos materiais e também de química, físico-química, biofísica e bioquímica. Existe também interligação com mineralogia e geociências, que tradicionalmente empregam técnicas de difração no estudo de cristais naturais.

Os estudos de Cristais Líquidos têm sempre uma componente estrutural, que os liga à área de Cristalografia, mas se diferenciam por abrangerem estudos desses materiais enquanto fluidos anisotrópicos. Nesses grupos às técnicas de difração se somam técnicas ópticas, de medidas elétricas e magnéticas, calorimetria, medidas de difusão, reologia, etc. Também neste caso a interdisciplinaridade (nas direções de materiais, química e biologia) é característica importante, sendo fundamental a interação constante entre físicos e químicos.

## BREVE HISTÓRICO

### Evolução até 1975

A evolução histórica da área se deu a partir de alguns eventos independentes e de seus desdobramentos e interligações.

A pesquisa em Cristalografia utilizando difração de raios X tem início nos anos 50, quando Elisário Távora, após doutoramento nos EUA com Buerger no MIT, retorna à Faculdade Nacional de Filosofia do Rio de Janeiro. Essa vertente dá origem, por um lado à pesquisa de caráter mineralógico e por outro à formação de físicos e químicos que depois se fixaram no IFQSC-USP. É o caso de Yvonne Mascarenhas que, após formação no Rio e em Pittsburgh, EUA, dá início em 1961 à instalação do Laboratório de Cristalografia de São Carlos, com ênfase em cristalografia estrutural. É a partir das atividades desse Laboratório, e dos contatos internacionais efetuados através dele, que alguns novos grupos se instalam no País. Cesar Cusatis, após mestrado nos EUA (1969), doutoramento no IFQSC-USP e pós-doutoramento em Bristol, Inglaterra, implanta a linha de Óptica de Raios X na UF Paraná. Aldo Craievich, após doutoramento na França, é convidado para se fixar em São Carlos, onde inicia trabalhos em espalhamento de raios X em baixo ângulo no início da década de 70.

A vertente mineralógica, por outro lado, dá origem no início dos anos 70, de forma independente, aos grupos de Física dos Cristais da UF Goiás (Antonio Ghilardi) e ao Laboratório de Cristalografia da UF Bahia, este com a vinda de Z. Baran da Polônia. Ambos os laboratórios davam ênfase ao estudo de cristais naturais.

De forma independente, no IEA (atual IPEN) a decisão de iniciar atividades na área de matéria condensada foi tomada no final de 1963. Surgiram então grupos de difração de nêutrons (C.B.R. Parente) e de espalhamento de nêutrons lentos, este último com a ida de Lia Q. Amaral para estágio na Suécia no estudo de materiais hidrogenados. No final da década de 60 foi implantada no IEA também o grupo de difração de raios X, com a vinda de S. Caticha-Ellis do exterior, que passa a investigar defeitos produzidos por irradiação em monocristais. A transferência de S. Caticha-Ellis para a UNICAMP em 1971 define o início do Laboratório de Cristalografia da UNICAMP. Também é a partir das atividades desenvolvidas no IEA que tem início em 1974 o Laboratório de Cristalografia do IFUSP, com atividades de pesquisa em defeitos em cristais (C.A. Pimentel) e em cristais líquidos (L. Q. Amaral).

Pesquisas em cristais líquidos no país iniciaram-se em 1939, com a presença de Hans Zöcher no Departamento Nacional de Produção Mineral do Rio de Janeiro, mas essa linha não tem continuidade. As pesquisas são retomadas em 1968 quando Leonard W. Reeves, da Universidade de Waterloo, Canadá, estabelece uma colaboração permanente com o Instituto de Química da USP (IQUSP) na linha de cristais líquidos liotrópicos. Surge então o grupo de RMN do IQUSP, liderado atualmente por José Atilio Vanin, e a colaboração se estende ao IFUSP em 1974 através de projeto de Lia Q. Amaral.

Paralelamente, o Departamento de Física da UFSC – Florianópolis decide em 1971 optar por uma linha de pesquisa em cristais líquidos termotrópicos, com a vinda dos EUA de John D. Gault e Ted Taylor.

Dessa forma, em meados da década de 70, já se encontravam em plena atividade os principais grupos de pesquisa da área.

## Situação a partir de 1975

Na tabela anexa estão reunidos os dados fornecidos pelos vários grupos relativos a pessoal em 1975/1980 e 1985. A data de início refere-se tipicamente à volta de pessoal do exterior ou à transferência de pessoal para a instituição.

A análise dessa tabela evidencia os seguintes aspectos:

1. O desenvolvimento da área coincide com certas facilidades de obtenção de verbas no período do "milagre brasileiro".
2. Apesar de ter havido uma duplicação de pessoal qualificado na última década, o número de pesquisadores ainda é extremamente pequeno.
3. O número de estudantes em relação ao número de docentes vem diminuindo, traduzindo um desestímulo dos estudantes em relação à pesquisa em física em geral e ao trabalho experimental em particular.
4. A área de cristais líquidos teve particular desenvolvimento na última década, inclusive com formação recente de novos grupos.

A análise dos questionários revela que as fontes de financiamento básicas são FINEP e CNPq, além das próprias instituições (universidades e CNEN). Financiamentos específicos do BIRD, BID, BNDE e acordo Brasil-RDA foram importantes na aquisição de equipamentos de maior porte. Auxílios da FAPESP, CAPES, UNESCO, FUNTEC, MINIPLAN e IAEA são também importantes.

Em todos os casos a infra-estrutura (oficinas, etc.) apresenta condições mínimas compatíveis com os laboratórios e verbas mínimas para a manutenção têm sido obtidas. Após o "milagre" as possibilidades de aquisição de novos equipamentos se tornaram entretanto, muito reduzidas.

Quanto às atividades de pesquisa, elas são bastantes diversificadas, o que é característico da área, essencialmente interdisciplinar. Destacam-se estudos de cristalografia estrutural e de cristalografia física em Matéria Condensada, Ciência dos Materiais e Ciências Biológicas. A interação constante entre físicos e químicos é também fundamental na área.

## PERSPECTIVAS, PROJEÇÕES E NECESSIDADES

Os laboratórios de Cristalografia mais bem equipados são os do IFQSC-USP (o mais antigo e único em condições de fazer estudos estruturais completos) e da UNICAMP (com espectro amplo de recursos), que são também os que contam com maior número de pessoas. Esses dois laboratórios abordam as linhas básicas da Cristalografia (Estrutural e Física) com ênfase também em materiais de interesse biológico.

O grupo de Cristais Líquidos da UFS Catarina conseguiu um bom número de docentes qualificados, após obterem doutoramento fora da Instituição e conta com facilidades experimentais razoáveis para estudo de cristais líquidos por várias técnicas, inclusive raios X.

O IFUSP atua significativamente tanto em Cristalografia como em Cristais Líquidos, tendo porém porte intermediário.

## EVOLUÇÃO HISTÓRICA

GRUPO	INÍCIO	LÍDERES NO INÍCIO	1975				1980				1985			
			O	M	ED	EM	O	M	EO	EM	D	M	ED	EM
IFQSC-USP Cristalografia	1961	Y. P. Mascaronhas	02	-	4	-	3	-	7	-	3*	1	8	3
UNICAMP Cristalografia	1971	S. Caticha Ellis	6	3	3	12	5	2	2	6	8	0	2	8
IFUSP Cristalografia e Cristais Líquidos	1974	C.A.F. Pinonhei L. Q. Amaral	2	1	-	4	2	1	2	6	3	1	3	6
IFUSP Óptica Cristais Líquidos	1985	A.M. Figueiredo Neto	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	-
UFSCar Cristais Líquidos e Cristalografia	1972	J.D. Gault T.R. Taylor	3	-	1	5	4	2	4	6	8	3	1	9
CBPF Difração de Raio - X	1983	A. Craviovich	-	-	-	-	-	-	-	-	1	-	-	2
IPEN Difratometria de Nêutrons	1965	N.G. Neronson S.B. Hórdade C.B.R. Parente	1	-	-	2	1	2	1	3	1	2	1	2
UFParaná Óptica Raios x	1969	C. Cusatis	1	-	-	-	2	1	-	-	2	1	-	-
UFGolés Física dos Cristais	1971	A.J.P. Ghilardi V.N. Almeida	-	4	-	-	-	5	-	-	2	4	-	-
UFBahia Cristalografia	1971	Z. Baran	1	1	-	1	2	4	-	10	4	3	-	5
<b>TOTAL +</b>			16	9	8	24	19	17	16	31	33 +3	15	15	27

\* Doutores do Dept<sup>o</sup> Física e Ciência dos Materiais. No Laboratório de Cristalografia do IFQSC-USP trabalham mais 5 docentes do Dept<sup>o</sup> de Química e Física Molecular

+ Foram acrescentados os doutores que trabalham na área mas não responderam ao 1<sup>o</sup> questionário: K. Imakuma (IPEN), A. Mammata (UNICAMP) e M. B. Lacerda Santos (UFMG).

QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL

INSTITUIÇÃO	INÍCIO	SITUAÇÃO ATUAL				INTEGRAL DESDE O INÍCIO NO PAÍS			INVESTIMENTO GLOBAL (US\$)
		DOUTORES	MESTRES	ESTUDANTES DOUTORADO MISTRADO	TESES DOUTORADO MISTRADO	Nº DE ARTIGOS			
IFQSC-USP	1961	8	1	8	4	9	25	110	400.000
UNICAMP	1971	8	-	3	11	7	22	115	950.000
UFSC	1972	8	4	1(USP)	8	3(fora)	30	16	64.000
IFUSP	1974	4	-	2	2	4	7	50	2000.000
(Raios x)									
UF Paraná	1969	1	2	1(IFQSC)	-	-	-	6	300.000
UF Goiás	1979	2	4	1(fora)	2(fora)	1(fora)	2(fora)	4	65.000
IPEN	1965	2	4	1	-	8	8	75	500.000
(Nêutrons)									
IPEN	1971	1	1	1	4	2	7	60	90.000
CBPF	1983	1	-	1	2	-	-	26	160.000
UF Bahia	1971	4	3	-	5	-	-	-	-
IFUSP	1985	1	1	1	1	-	-	12	41.000
(Óptica)									
CTI	1985	2	2	2	4+3UNICAP	-	-	3	110.000
UFMG	1988	1	-	-	-	-	-	-	-
UFRJ	(*)	2	1	-	-	-	-	-	-

(\*) O grupo da UFRJ que utilizava eventualmente técnica de difrações passa a se caracterizar agora também como grupo de Cristalografia.

Existem vários grupos de Cristalografia de porte intermediário ou pequeno implantados há bastante tempo (IPEN, UF Paraná, UF Goiás, UF Bahia) e apenas um novo (CBPF) mas originado por transferência de pesquisador. Existem alguns grupos novos de Cristais Líquidos (IFUSP, CTI, UFMG).

A situação atual é positiva no sentido da área estar claramente em desenvolvimento ao longo da última década.

Ressalte-se que a área é relativamente recente no Brasil e que não existe tradição na física brasileira enfatizando áreas interdisciplinares. Só na última década a ciência dos materiais passou a ser vista como parte integrante da Física da Matéria Condensada e não apenas como tecnologia aplicada. A físico-química e a biofísica, apesar de solidamente implantadas, ainda não conseguiram espaço suficiente na Física brasileira, sendo ainda consideradas essencialmente como subáreas da Química e da Biologia.

Dessa forma um dos maiores problemas de desenvolvimento da área tem sido a falta de reconhecimento interno da comunidade de física, apesar da maioria dos grupos ter boas e constantes interações com grupos de ótimo nível no exterior. Isso é devido essencialmente à falta de compreensão local para a importância da pesquisa interdisciplinar, que é confundida com pesquisa aplicada. Nos países desenvolvidos a situação é totalmente diferente; basta mencionar a importância da União Internacional de Cristalografia, uma das mais bem organizadas e atuantes das ciências exatas e o grande desenvolvimento da área de Cristais Líquidos. Esta área pelas suas características de interdisciplinaridade em pesquisa básica e potencialidade tecnológica deveria ser efetivamente estimulada no País e a comunidade de física deveria explicitar esse apoio.

As linhas de trabalho, técnicas e instalações projetadas para os próximos anos pelos vários grupos correspondem essencialmente à continuidade, consolidação e expansão das linhas atuais. Todos os grupos tem necessidades específicas de apoio.

Merece consideração o Projeto do Laboratório Nacional de Radiação Síncrotron, de interesse direto para o desenvolvimento da área. A viabilização desse Projeto passa pelo apoio aos grupos existentes. É fundamental que esses grupos se desenvolvam e adquiram condições plenas de capacitação para que o Projeto possa se concretizar.

Quanto ao estudo de Cristais Líquidos, parece ter sido alcançado no país, após uma década de esforços, um número mínimo de pessoas qualificadas trabalhando ativamente, com ótimos contatos internacionais, e um início de integração maior com a comunidade de física do País. Também está começando a ser aceito como imprescindível o trabalho conjunto de físicos e químicos. A maior dificuldade refere-se à obtenção de recursos.

Quanto aos Laboratórios de Cristalografia, espera-se que a implantação do Projeto Síncrotron possa significar uma aceleração no processo de desenvolvimento. O maior problema aqui nos parece a falta de pessoal; praticamente todos os laboratórios teriam condições de absorver mais pessoas e em muitos casos é fundamental atingir massa crítica para pleno desenvolvimento. Equipamentos de maior porte são também claramente necessários para manter a competitividade do trabalho a nível internacional. Geradores de anodo rotatório e detectores sensíveis à posição são indispensáveis aos laboratórios que ainda não os possuem.

O reconhecimento de pesquisas em ciências dos materiais e matéria condensada (transições de fase, cristais líquidos, cristais moleculares, amorfos, semi-

condutores, defeitos cristalinos, etc.), já é bastante razoável, mas ainda falta uma aceitação maior na comunidade de física das pesquisas classificadas como pertencentes à físico-química, biofísica e bioquímica. Nesta direção a cristalografia tem muito a contribuir.

Um equívoco freqüente é a idéia da cristalografia ser apenas uma técnica física aplicada em várias áreas (física, química, biologia, geologia, etc). Essa é a visão de quem não tem noção do que seja pesquisa interdisciplinar. A formação sólida em física é imprescindível ao estudo de difração em sistemas complexos para obtenção de informações básicas sobre os mesmos. No momento a atuação de físicos nessas áreas interdisciplinares está encontrando muita dificuldade de financiamento no País, pois elas são consideradas como apêndices das áreas tradicionais.

### **Medidas para melhoria:**

- ( 1 ) Garantir aos laboratórios em funcionamento os recursos mínimos de manutenção, reposição e atualização, concedendo inclusive, recursos necessários para aquisição de equipamento competitivo.;
- ( 2 ) Apoio a acordos de cooperação entre grupos do País e laboratórios no exterior. A cooperação entre grupos locais deveria ser incrementada bastante no intercâmbio de alunos, uso de equipamentos, etc.;
- ( 3 ) Adoção de medidas que visem a uma melhor caracterização de áreas interdisciplinares para possibilitar obtenção de recursos nos órgãos competentes. Isto poderia ser feito através da presença de pesquisadores da área nos comitês assessores de Física ou mesmo da estruturação de comitês interdisciplinares. Atualmente Físico-Química e Biofísica são vistas como subáreas da Química e da Biologia. Cristalografia sequer consta como subárea;
- ( 4 ) Apoiar a realização periódica de Congresso e Escolas de Cristalografia e Cristais Líquidos incluindo, nos mesmos, assuntos de interesse básico, tecnológico e industrial. No momento a Sociedade Brasileira de Cristalografia não está conseguindo recursos para isso, devido justamente à falta de apoio a atividades interdisciplinares.
- ( 5 ) Apoio ao Projeto do Laboratório Nacional de Radiação Síncrotron e à formação de pessoal na área de Cristalografia, sem detrimento da prioridade à manutenção dos grupos atuais.

# Física da Matéria Condensada

## FÍSICA ESTATÍSTICA

### DESCRIÇÃO

A Física Estatística fornece os elementos para o estudo dos sistemas complexos, organizados, a partir de seus componentes mais simples. A Física do século XX se desenvolveu prioritariamente no sentido de descobrir os componentes últimos ou elementares da matéria. A Física Estatística, por outro lado, representa uma tendência complementar, que reconhece a necessidade da introdução de novas leis e regularidades para explicar o comportamento dos sistemas complexos.

No final do século XIX, a termodinâmica já se havia estabelecido como a grande teoria macroscópica, capaz de explicar o comportamento térmico, "visível", da matéria na presença de agentes externos. A segunda lei da termodinâmica que define um sentido temporal inequívoco representa um exemplo do comportamento característico da matéria macroscópica (pois as leis da mecânica, que se aplicam às partículas que constituem a matéria, nunca distinguem entre o passado e o futuro). A mecânica estatística tem sua origem na formulação da chamada teoria cinética dos gases, que procura explicar as propriedades térmicas dos gases (lei de Boyle, calores específicos, coeficientes de transporte) através de um modelo constituído por partículas em movimento, governadas pelas leis da mecânica clássica. A equação de Boltzmann, proposta em 1872, que constitui o protótipo dos métodos cinéticos modernos, representa uma tentativa de construir a função entropia da termodinâmica com base nas leis da mecânica. Foi o próprio Boltzmann quem percebeu a importância da introdução de conceitos probabilísticos e propôs a famosa definição estatística de entropia,  $S = k \log W$ , onde  $W$  é o número de estados microscópicos igualmente prováveis. A moderna mecânica estatística de equilíbrio foi formulada por Gibbs, no início do século, e praticamente não sofreu qualquer transformação com a necessidade de reconhecer que o mundo microscópico é na realidade governado pelas leis da mecânica.

ca quântica. A formulação de uma termodinâmica ou de uma mecânica estatística para processos fora do equilíbrio, no entanto, ainda é objeto de pesquisa e continua sujeita a pontos de vista diferentes.

Não há fronteiras distintas entre a física estatística e a física da matéria condensada. Um dos primeiros triunfos práticos da física estatística foi a utilização de dados espectroscópicos para calcular a entropia e o calor específico de um grande número de substâncias. Fenômenos de transporte em meios materiais (condutividade térmica, condutividade elétrica, viscosidade) também foram amplamente estudados com o auxílio de técnicas cinéticas. O estabelecimento das estatísticas quânticas (Fermi-Dirac e Bose-Einstein) possibilitou uma enorme gama de aplicações desde o estudo de propriedades térmicas de metais e de semicondutores até a proposta de uma explicação para a transição superfluida no hélio líquido. As grandes teorias modernas sobre o comportamento térmico da matéria condensada entre as quais se sobressaem as teorias do paramagnetismo e do diamagnetismo e a teoria da supercondutividade têm sido formuladas no âmbito da mecânica estatística quântica.

O estudo moderno das transições de fases constitui um exemplo do tipo característico de abordagem da física estatística. Desde o início do século são conhecidas teorias fenomenológicas para as transições em fluidos (Van der Waals), materiais magnéticos (Curie-Weiss), ligas metálicas (Bragg-Williams) etc. Cumpre à mecânica estatística estabelecer modelos microscópicos em termos dos quais seja possível explicar transições desta natureza. O modelo de Ising, proposto inicialmente por Lenz para explicar o ferromagnetismo, constitui o melhor exemplo não trivial de um empreendimento nesta direção. O estudo das propriedades físico-matemáticas do modelo de Ising principalmente na medida em que se constatou o caráter universal do comportamento crítico da matéria, tem despertado o interesse de uma parcela considerável de pesquisadores na área da física estatística nos últimos trinta anos. Em particular, a solução exata do modelo de Ising bidimensional na ausência de um campo, publicada por Onsager em 1944, representa um dos grandes triunfos da física teórica contemporânea. Embora a solução exata do modelo de Ising em três dimensões continue representando um grande desafio, o estudo de suas conexões com a teoria de campos resultou na chamada teoria do grupo de renormalização, proposta por Wilson no início da década de setenta, que tem tido uma enorme repercussão na área. Deve-se assinalar que, apesar da natureza quântica das interações a que estão sujeitos os componentes elementares da matéria, a utilização de modelos clássicos de spins, abandonando quaisquer regras de comutação, tem levado a um notável avanço na compreensão de transições de fases e fenômenos críticos em magnetismo.

Vamos relacionar alguns tópicos que despertaram maior interesse durante a última Conferência Internacional de Termodinâmica e Física Estatística (realizada em Boston, nos EUA, em agosto de 1986):

1. sistemas de baixa dimensionalidade, que têm sido amplamente estudados tanto teórica quanto experimentalmente. Além de soluções exatas em uma ou duas dimensões, tem sido utilizada, em diversas versões, a técnica moderna de grupo de renormalização no espaço real. Recentemente se percebeu, na área teórica, a importância de certas idéias de invariância, conforme desenvolvidas inicialmente no âmbito da teoria de campos. Continuam despertando grande atenção o efeito Hall quântico e os sistemas eletrônicos bidimensionais;

2. sistemas com diversos tipos de desordem ou aleatoriedade (nas interações de troca, na presença ou ausência de elementos ativos, nas anisotropias, nos campos aplicados), que têm sido submetidos a extensas investigações. Continua em aberto a solução de um modelo realista para um vidro de spin (a própria teoria de campo médio para o vidro de spin de Ising constitui um problema que, apesar de todo o esforço, ainda não foi colocado em bases teóricas perfeitamente sólidas);

3. sistemas que exibem pontos multicríticos e diagramas de fases mais complexos, incluindo polímeros, colóides, microemulsões e diversos tipos de cristais líquidos. Em particular, há um grande interesse em sistemas com interações ou períodos competitivos, que podem exibir transições do tipo comensurável-incomensurável. Neste campo há tentativas de contacto com métodos matemáticos utilizados na teoria dos sistemas dinâmicos;

4. aplicações de métodos computacionais (Monte Carlo, dinâmica molecular e suas variações) para estimar propriedades de modelos estatísticos. Há também grande interesse em autômatos celulares e na aplicação de técnicas da física estatística para o estudo de modelos de inteligência artificial;

5. cinética química e fenômenos de transporte em fluidos densos. Fenômenos ligeiramente fora do equilíbrio ou propriedades de transporte em fluidos suficientemente diluídos ainda podem ser tratados pelos métodos cinéticos convencionais. No entanto, a própria formulação geral da mecânica estatística de processos fora do equilíbrio constitui um tópico aberto, sujeito a diferentes abordagens;

6. processos de equilíbrio e de agregação cinética, modelos de crescimento, formação de moldes e padrões, turbulência e caos. Ao lado das técnicas mais conhecidas de equações diferenciais e derivadas parciais, na abordagem destes fenômenos utilizam-se técnicas matemáticas recentes (equações de recorrência, geometria dos fractais) e recursos computacionais moderníssimos;

7. desordem e transporte em sistemas eletrônicos, sistemas de férmions pesados. Novamente, neste tópico é difícil distinguir entre física estatística e física da matéria condensada.

## BREVE HISTÓRICO

A pesquisa sistemática em problemas de física estatística no Brasil somente tomou impulso a partir da década de setenta, beneficiando-se dos investimentos federais no ensino em nível de pós-graduação. No passado, houve trabalhos isolados de pesquisadores como Mario Schenberg, que foi pioneiro na aplicação de técnicas de teoria de campos à mecânica estatística. Físicos de estado sólido, como Newton Bernardes em São Paulo, ou Roberto Lobo em São Carlos, também utilizaram técnicas de mecânica estatística para tratar problemas de muitos corpos em matéria condensada.

Em meados da década de sessenta surge um grande interesse no estudo das transições de fases e do comportamento da matéria nas vizinhanças dos chamados pontos críticos. Técnicas experimentais mais sofisticadas haviam possibilitado medidas detalhadas de grandezas termodinâmicas associadas à "matéria crítica". Substâncias aparentemente muito diferentes, como fluidos, ferro e antiferromagnetos, ligas metálicas, pareciam se comportar de maneira idêntica nas vizinhanças da criticalidade. Por outro lado, ficava cada vez mais patente que as teo-

rias clássicas (Van der Waals para fluidos, Curie-Weiss para materiais magnéticos) produziam resultados incorretos na região crítica. Logo se formulam as hipóteses de universalidade e de escala. Também se reconhece a grande relevância de resultados e cálculos rigorosos para modelos estatísticos simplificados. Finalmente, a teoria do grupo de renormalização, proposta no início da década de setenta, produz resultados quantitativos, passíveis de verificação experimental e justifica a universalidade e as leis de escala, constituindo um grande triunfo da moderna mecânica estatística.

Os primeiros trabalhos sobre transições de fases realizados no Brasil são fortemente influenciados pelas pesquisas mais tradicionais em magnetismo. Procura-se analisar dados experimentais, obtidos no País ou no exterior, sobre transições de fases magnéticas. O pessoal teórico do grupo de Recife, doutorado no Brasil, realizou estágios de pós-doutoramento no exterior e comparece a quase todas as conferências internacionais de magnetismo (Maurício D. Coutinho Filho trabalhou em Cornell, Ivon P. Fittipaldi em Temple e Marco A. G. de Moura na Universidade da Pensilvânia). O grupo de São Paulo, que também tem vários contactos no exterior, é influenciado por medidas magnéticas realizadas no Laboratório de Baixas Temperaturas do IFUSP (Silvio R. A. Salinas e Mário J. de Oliveira completaram o doutoramento na Carnegie-Mellon University, em Pittsburgh). Em Porto Alegre, Cláudio Scherer, que tinha realizado um estágio de pós-doutoramento em Santa Bárbara, também trabalha com modelos magnéticos. Lindberg L. Gonçalves retorna para o Ceará em 1977 após completar o doutoramento em Oxford, trabalhando com modelos magnéticos. Pascal Lederer, especialista em magnetismo, visita o Brasil e dá vários seminários sobre o grupo de renormalização, influenciando o trabalho de físicos do CBPF e da PUC-RJ (Affonso A. G. Gomes e Carlos Maurício Chaves trabalham com Lederer). Em São Carlos, no entanto, as técnicas de muitos corpos aplicadas aos líquidos quânticos é que influenciam os primeiros trabalhos na área de mecânica estatística (Sylvio G. Rosa Jr., doutorado nos Estados Unidos, colabora com Roberto Lobo e Oscar Hipólito). Posteriormente se estabelece em São Carlos uma linha de trabalho utilizando técnicas de grupo de renormalização para estudar o comportamento de modelos de mecânica estatística e de teoria de campos (sob a liderança de Roland Köberle, originário da área de partículas e campos), contando com o apoio de Jorge A. Swieca que havia se transferido para a Universidade Federal de São Carlos). Em Belo Horizonte há um grande empenho no estudo, tanto experimental quanto teórico, de fenômenos de transição de caráter ferroelétrico (Francisco C. de Sá Barreto e Alaor Chaves, doutorados nos Estados Unidos, lideram o grupo mineiro, que também contou, diversas vezes, com a colaboração do físico iugoslavo R. Blinc). Constantino Tsallis, doutorado na França, vem para Brasília em 1975, trabalhando com modelos magnéticos e estruturais, mas depois se transferiu para o CBPF, iniciando uma linha de pesquisa sobre fenômenos de percolação e magnetismo aleatório. Mais tarde, Walter e Alba Theumann, formados em Nova York, se estabelecem em Porto Alegre, utilizando técnicas de grupo de renormalização e teoria de campos. As áreas mais tradicionais da mecânica estatística, que se caracterizaram, no exterior, por progressos menos espetaculares durante os últimos anos, permanecem muito pouco desenvolvidas no Brasil. Apesar de esforços isolados no estudo de fenômenos fora do equilíbrio, até recentemente apenas se destacavam os trabalhos sobre semicondutores do grupo da Unicamp, sob a liderança de Roberto Luzzi.

Atualmente a física estatística aplicada a problemas da matéria condensada, com ênfase em fenômenos de transição de fases, é praticada em quase todas as universidades do País. Vários alunos dos grupos mais antigos foram absorvidos nas suas próprias instituições de origem, ou se fixaram em locais mais recentes, embora, as posições em física teórica estejam cada vez mais escassas. Surgiram grupos teóricos em Natal (Liacir Lucena, doutorado em Boston), João Pessoa (onde A.N. Chaba, físico indiano radicado no Brasil, trabalha há vários anos em regras de soma na rede), Salvador (onde Roberto F. S. Andrade, doutorado em Regensburg, trabalha também com modelos matemáticos de turbulência), Niterói (onde Paulo Murilo Oliveira e Múcio Continentino se estabeleceram na Universidade Federal Fluminense) e Florianópolis (onde Wagner Figueiredo, doutorado em São Paulo, trabalha com modelos magnéticos). Os grupos experimentais têm se desenvolvido com grande dificuldade, estando praticamente limitados aos laboratórios de baixas temperaturas de São Paulo (Nei F. Oliveira Jr., Carlos C. Becerra, Armando Paduan Filho e colaboradores) e da UFRJ (sob a liderança de Eugênio Lerner). Na área experimental ainda devem ser lembrados os grupos de Fortaleza (Josué Mendes Filho, Evangelista C. Moreira), onde se estudam transições de fase estruturais em cristais iônicos moleculares, e do Recife (sob a liderança de Sergio M. Rezende, especialista em magnetismo), com esforço recente na investigação de transições de fases em antiferromagnéticos diluídos na presença de um campo magnético. Há também alguns físicos matemáticos, com interesses em resultados rigorosos em mecânica estatística e teoria de campos, que têm dado uma contribuição significativa a esta área (J. Fernando Perez e Walter F. Wreszinski, no IFUSP, e Ricardo Schor e Michael O'Carroll, na UFMG, certamente devem ser mencionados).

Os Encontros Nacionais de Física da Matéria Condensada contribuíram para a difusão da física estatística por todo o Brasil e para o estabelecimento de vínculos de cooperação entre os diversos grupos de pesquisa. Talvez esta seja uma das áreas onde há maior integração dentro do País. O seu vigor pode ser atestado pelo êxito de reuniões locais (em São Carlos, por exemplo) e pela concordância da IUPAP em escolher o Rio de Janeiro para sediar a XVII Conferência Internacional de Termodinâmica e Física Estatística.

**QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL**

Instituição	Início das atividades	Doutores	Mestres	Estudantes		Teses de Doutorado	Dissertação de Mestrado	Artigos Publicados
				Doutorado	Mestrado			
UFCE	1977	2	0	*	1	*	2	30
UFRN	1979	3	1	*	1	*	0	-
UFPB	1975	4	4	1	5	-	-	-
UFPE	1975	7	0	7	6	6	10	87
UFAL	1978	5	7	*	*	*	*	40
UFBA	1981	1	0	-	-	-	-	-
CBPF	1977	3	0	7	0	6	5	100
PUC-RJ	1974	5	0	2	0	3	4	35
UFF	1981	5	1	3	0	0	2	33
UFMG	1971	7	6	8	7	4	8	100
UNB	1982	2	2	*	2	*	-	-
IFUSP	1974	4	1	5	2	4	13	50
UNICAMP	1970	9	0	5	0	8	10	70
IFQSCarlos	1960	7	1	6	3	10	17	-
UFSCarlos	1977	3	0	*	*	*	*	-
INPE	1986	1	0	*	*	*	*	-
IEAv/CTA	1985	1	0	*	*	*	*	-
UFPR	1985	1	0	*	2	-	-	-
UFSC	1979	3	8	*	7	0	-	-
UFRGS	1982	4	0	3	4	0	1	-
<b>TOTAL</b>		<b>77</b>	<b>31</b>	<b>47</b>	<b>40</b>	<b>41</b>	<b>72</b>	<b>545</b>

\*Não há programa de pós-graduação, a nível de mestrado ou de doutorado.

*Nota: Os números deste quadro se referem ao segundo semestre de 1986 (explicações detalhadas podem ser encontradas nos dados sobre os grupos de pesquisa). Um traço indica a falta de informações. Um asterisco indica a inexistência de programas de pós-graduação, a nível de mestrado ou doutoramento. Obviamente há superposições com outras áreas, principalmente no número de doutores. O número de artigos publicados muitas vezes é uma estimativa que pode não corresponder à produção científica do grupo desde o seu início.*

## PERSPECTIVAS, PROJEÇÕES E NECESSIDADES

A área de mecânica estatística teve um crescimento rápido nos últimos dez anos, com uma produção científica profissionalmente aceita em nível internacional. Atualmente há pouco mais de setenta doutores ativos na área, distribuídos geograficamente por quase todo o País, trabalhando principalmente em problemas teóricos. Aproximadamente metade destes doutores foram formados pelos próprios grupos nacionais.

Os pesquisadores da área têm tido uma participação ativa nos Encontros Nacionais de Física da Matéria Condensada e têm até mesmo conseguido realizar reuniões específicas, de caráter anual, na cidade de São Carlos. Há uma boa dose de intercâmbio entre os diversos grupos nacionais, que foi dinamizado nos últimos anos pela realização das reuniões nacionais. Em janeiro de 87 foi realizada uma Escola de Mecânica Estatística, em São Carlos, com a participação de pesquisadores estrangeiros de prestígio. Por decisão do comitê de física estatística da IUPAP, a XVII Conferência Internacional de Termodinâmica e Física Estatística, *Statphys*, será realizada em 1989 no Rio de Janeiro.

Apesar do progresso da área no País, pode-se apontar diversos problemas. Continuam muito fracos os contactos entre os grupos experimentais e os grupos teóricos. Na realidade, as dificuldades impostas pelo financiamento à pesquisa no Brasil, aliadas à nossa tradição acadêmica, não têm estimulado o surgimento de novos grupos experimentais. Estas circunstâncias obrigam muitas vezes os grupos teóricos a se dedicarem ao estudo de problemas abstratos, cuja própria relevância pode ser questionada. Certamente isto poderia ser evitado se houvesse uma dedicação maior a problemas relevantes sob o ponto de vista experimental. A médio prazo, o fortalecimento da área no Brasil passa necessariamente por uma independência maior na geração de problemas e questões que possam ser estudados no País, tanto teórica quanto experimentalmente. As nossas linhas de pesquisa também permanecem concentradas em poucos temas, embora já existam condições para uma abertura maior. Há muito pouca atenção no País para fenômenos fora do equilíbrio, para a física dos processos de agregação e crescimento, para o estudo mecânico-estatístico de novos materiais, como polímeros, vidros, fluidos anisotrópicos. É absolutamente necessário melhorar a nossa capacidade computacional e realizar um certo esforço no desenvolvimento dos diversos tipos de simulação numérica.

Quase todos os grupos da área têm sofrido com a falta crônica de recursos para material bibliográfico, intercâmbio e aquisição de equipamentos. Há vários anos a atuação do CNPq vem sendo criticada. No estágio atual de desenvolvimento da área, é importante assegurar um nível mínimo de intercâmbio com o exterior, tanto convidando pesquisadores estrangeiros quanto enviando fortes delegações às principais conferências internacionais. Os grupos experimentais e os pequenos grupos teóricos, em particular, deveriam ser muito mais fortemente apoiados. O fortalecimento e a própria sobrevivência dos grupos pequenos dependem também da valorização da carreira de pesquisador no sistema universitário. Qualquer crise maior no sistema federal poderá afetar seriamente todo o trabalho nesta área.

Todos os grupos teóricos se ressentem de uma carência crônica de recursos computacionais. Este fato é particularmente grave na área de física estatística, em que o computador tem desempenhado um papel central em muitos desenvol-

vimentos recentes. Dentro deste quadro, certamente o desenvolvimento de pesquisas e o treinamento de pessoal nas novas técnicas computacionais estão sendo seriamente prejudicados.

No futuro seria importante analisar em detalhe a qualidade da produção científica da área, incluindo as dissertações de mestrado, as teses de doutoramento e os artigos publicados. Tomando como base as repercussões desta produção científica, talvez houvesse condições para iniciar um trabalho sistemático de avaliação da área no País.

# Física da Matéria Condensada

## FÍSICA DE SEMICONDUTORES

### DESCRIÇÃO

As pesquisas básicas e aplicadas nos materiais semicondutores têm sido intimamente interligadas nos últimos quarenta anos. Devido a isto esta é uma área onde as linhas divisórias entre Física, Ciência dos Materiais e Engenharia são especialmente indefinidas. No levantamento atual muito da atividade que melhor seria definida como Engenharia ou Ciência dos Materiais foi incluída na área da Física. Em particular, foi incluída toda a atividade de pesquisa em produção e caracterização de materiais semicondutores e desenvolvimento de dispositivos utilizando tais materiais. A pesquisa em indústria foi incluída no levantamento. Nesse caso foi tomado um cuidado especial para se separar a pesquisa em materiais e dispositivos da pesquisa em projetos de circuitos eletrônicos e equipamentos. Por exemplo, no Departamento de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica da USP (POLI-USP) dois grandes laboratórios exercem atividade em física dos semicondutores (FS) na visão abrangente deste relatório: o laboratório de Microeletrônica (LME) e o Laboratório de Sub-Sistemas Integráveis (LSI). No LME essencialmente toda a atividade foi enquadrada em FS. No LSI foram enquadrados os trabalhos em transistores tipo FET e nos silicetos de titânio e cobalto.

### BREVE HISTÓRICO

A primeira atividade em FS no País ocorreu no IFUSP em 1963, com trabalhos experimentais em efeitos magneto-oscilatórios. Entretanto, a pesquisa em FS naquele instituto só adquiriu dimensão significativa após 1978 e é desde então muito predominantemente teórica.

A FS adquiriu um bom impulso em 1970-1971 quando se criou na UNICAMP um grande grupo de pesquisa na área, constituído de brasileiros recém-

chegados do exterior e de estrangeiros. Apesar de a UNICAMP ter diminuído a ênfase original em FS e ser hoje mais diversificada, o maior grupo de pessoas trabalhando em FS do País ainda se encontra naquela Universidade. A pesquisa básica em FS na Unicamp se enfraqueceu nos últimos anos. Entretanto, ainda existe lá intensa atividade de pesquisa em dispositivos opto-eletrônicos. Além do mais, da pesquisa em dispositivos na Unicamp resultou, no Centro de Pesquisa e Desenvolvimento (CPqD) da Telebrás, o Projeto Laser para comunicações ópticas.

Na presente década surgiram vários grupos de FS no País, por exemplo em São Carlos (USP e Federal), INPE, PUC-RJ, UFF, UnB e UFMG. Neste período houve também uma grande expansão no grupo do IFUSP. Nos setores de engenharia e indústria houve grande expansão dos laboratórios LME-POLI e LSI-POLI e o surgimento de algumas indústrias com laboratórios de pesquisa em dispositivos, tais como a SID – Microeletrônica, a Elebra e a Itaucom. Deve-se ressaltar, entretanto, que a expansão da pesquisa básica em FS no País tem se baseado essencialmente em trabalhos teóricos. Tal fato se deve, em grande parte, à diminuição de recursos disponíveis para investimento e custeio em laboratórios ocorrida nos últimos seis anos. A pesquisa experimental em FS é relativamente dispendiosa, talvez a mais dispendiosa dentro da matéria condensada. Além disto, essa área sofreu notáveis mudanças na presente década que resultaram na obsolescência de grande parte da capacidade de pesquisa instalada. Para se ter uma idéia do investimento necessário para se recuperar os laboratórios existentes, somente o LME-POLI necessita segundo estimativas do próprio LME, de cinco milhões de dólares para um programa muito modesto de modernização. Na Unicamp além de obsoleto, está fora de condições de operação.

Apesar de nosso esforço, não foi possível conseguir-se uma estimativa confiável do investimento realizado na FS no País. Tal investimento é relativamente alto e se concentra singularmente em Campinas (Unicamp, CPqD – Telebrás e CTI) e na POLI-USP. Recentemente foi realizado um investimento relativamente grande na UFMG com a compra de um sistema de produção de hetero-estruturas pela técnica de Epitaxia de Feixe Molecular (MBE) no valor de quinhentos mil dólares.

## **PERSPECTIVAS, PROJEÇÕES E NECESSIDADES**

Apesar da FS ter sido uma das áreas da Física que recebeu maiores investimentos no Brasil, constatou-se que os laboratórios estão precariamente equipados. Nos últimos cinco anos, enquanto os laboratórios dos centros mais avançados no exterior passaram por um intenso processo de modernização, nossos laboratórios se deterioraram devido à falta de recursos. Além disto, os grupos experimentais deram uma ênfase crescente à atividade aplicada, o que agravou ainda mais a situação da Física básica. O País tem apresentado uma produção científica muito baixa em FS experimental. Algumas distorções são também claramente visíveis nos dados sobre os Grupos de Pesquisa. Alguns tópicos são fortemente investigados, por exemplo células fotovoltaicas e estrutura eletrônica de defeitos pontuais em semicondutores, ao passo que áreas fundamentais como transporte elétrico e produção de cristais volumétricos são pouquíssimo desenvolvidas. Aparentemente, ninguém no País cresce cristais volumétricos do grupo III-V.

**QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL**

INSTITUIÇÃO	DOUTOR			MESTRES			BACHAREL
	T	E	D	T	E	D	
IFUSP	8	2	-	9	1	-	5
POLI-USP (LME)	-	-	12	-	-	26	12
POLI-USP (LSI)	-	-	3	-	-	3	7
UNICAMP-IFGW	5	18	8				35
USP-SC	3	2	-				
UFSCARLOS	5	4	-	4	-	-	2
INPE	5	1	-	5	-	9	7
UNESP-Guaratinguetá	-	-	-	1	-	-	
UFRJ-COPPE	-	-	1	-	-	3	2
PUC-RJ	2	1	-	1	1	-	1
UFF	5	-	-	2	-	-	4
UFMG	4	8	-	-	-	-	4
UFU	1	-	-	1	-	-	
UnB	5	1	-	-	-	-	2
UFRPR	-	2	-	-	1	-	
UFRGS		2					
UFAM	-	1	-	1	-	-	-
UFRN	2	-	-	-	-	-	
UFPE	2	-	-	-	-	-	
IME	-	2	-	-	-	-	
TELEBRÁS - CPqD	-	-	1	-	-	18	8
SID Microeletrônica	-	-	4	-	-	1	13
ELEBRA	-	-	2				
CTI	-	-	3			2	
HELIODINÂMICA	-	-	-	-	-	-	4
<b>TOTAL</b>	<b>47</b>	<b>44</b>	<b>34</b>	<b>24</b>	<b>3</b>	<b>62</b>	<b>106</b>

T (Teoria) E (Experiência) D (Dispositivo)

Os inventários contidos nos dados sobre os Grupos de Pesquisa e no quadro resumo dão uma visão demasiadamente otimista da área: várias linhas de pesquisa enumeradas são na verdade atividades esporádicas dos grupos e vários pesquisadores dividem suas atividades com outras áreas.

Constatamos vários planos de investimento em diversas instituições. Nos grupos de pesquisa em Universidade, grande parte das pretensões se referem a estudos de hetero-estruturas produzidas por MBE. No instituto de Física da USP estão sendo feitas as avaliações prévias para a possível implantação de um sistema de MBE dedicada a GaAs-AlGaAs e de laboratórios de caracterização com investimentos globais de cerca de dois milhões de dólares. O IFGW da Unicamp entrou na FINEP com um projeto de seis milhões de dólares para a compra de um sistema de MBE dedicado a Compostas II-IV e de uma variada linha de equipamentos de análise. É provável que o País venha a ter em breve uns cinco sistemas de MBE. Cinco sistemas de MBE no País podem dar uma idéia de exagero. Nosso ponto de vista é de que devido a importância crescente das hetero-estruturas semicondutoras e levando-se em conta que os equipamentos de MBE devem ser dedicados à produção de um único tipo de composto, o atendimento das pretensões mencionadas seria altamente apropriado e interessante. Cabe mencionar que o sistema Bell (AT & T Bell Laboratórios e Bell Communications Research) conta com cerca de vinte e cinco equipamentos de MBE. O LSI da POLI-USP tem um programa nascente de Circuitos Integrados de GaAs-AlGaAs. Tal programa merece amplo apoio.

Julgamos que as intenções de se iniciar pesquisa em novos materiais semicondutores esbarrarão, além da barreira de recursos financeiros, na escassez de pessoal especializado. É urgente iniciar-se um programa de formação de pessoal especializado na produção de novos materiais semicondutores, na sua caracterização e no desenvolvimento de dispositivos eletrônicos e opto-eletrônicos baseados em tais materiais. Tal programa deveria incluir o envio de grande número de pessoas para doutoramento e pós-doutoramento no exterior.

O País tem pretensões de desenvolver uma indústria nacional de produtos de informática com alto nível de autonomia. Pouco se tem progredido na área de desenvolvimento de componentes. É necessário estar-se atento às pretensões da SID Microeletrônica, da Elebra e da Itaucom de produzir circuitos integrados MOS de silício e procurar apoiar o esforço de tais empresas. Os circuitos MOS de silício ainda são o que há de mais importante em microeletrônica, em termos econômicos, e ainda falta bom tempo antes que os dispositivos baseados em GaAs-AlGaAs suplantem os Si-MOS em importância econômica. É imperativo que se preencha o vazio que há no País em pesquisa básica de sistemas Si-MOS. Em conversas com o pessoal da SID constatamos que tal empresa se ressentia fortemente da incipiência da pesquisa em materiais e dispositivos Si-MOS no País e da inexistência de profissionais qualificados para recrutamento. É nosso ponto de vista que um programa nacional arrojado de pesquisa básica em semicondutores é essencial para o sucesso da indústria de informática no País e tal programa deveria antecipar as necessidades futuras de tal indústria, sem entretanto ignorar suas necessidades atuais pelo mero fato de envolver pesquisa básica que já deixou de ser moda nos centros mais avançados.

É preciso estar atento a novos e importantes avanços na FS e iniciar (no exterior) a formação de pessoal capaz de trazer eficazmente tais novidades para o País. Novas formas de epitaxia em que reações químicas prometem revolucio-

nar a microeletrônica. Além disto litografias gravadas por feixe eletrônico ou raios-x estão se tornando rotina nos centros avançados e resoluções da ordem de 50Å já são obtidas.

A FS se enquadra em duas áreas prioritárias do Ministério da Ciência e Tecnologia: Informática e Novos Materiais. É importante utilizar-se tal privilégio para um programa arrojado de desenvolvimento da FS no País.

# Física da Matéria Condensada

## FÍSICA DE BAIXAS TEMPERATURAS E SUPERCONDUTIVIDADE

### DESCRIÇÃO

A área de Baixas Temperaturas e Supercondutividade se caracteriza principalmente por sua interdisciplinaridade pois os mais variados fenômenos de diversas outras áreas ocorrem a temperaturas baixas. A definição de baixa temperatura é relativa, pois se considerarmos os líquidos criogênicos mais utilizados, nitrogênio e hélio líquidos, poderíamos estabelecer que temperaturas abaixo de 77K (ponto de ebulição do nitrogênio) seriam consideradas baixas. No entanto, de um modo geral, se considera que abaixo de 20K se têm baixas temperaturas, e temperaturas na região dos milikelvin são consideradas ultra baixas temperaturas. Os fenômenos de superfluidez que ocorrem com os gases quânticos,  $^3\text{He}$  e  $^4\text{He}$ , e suas misturas, assim como, o de supercondutividade, são considerados basicamente fenômenos de baixas temperaturas. A criogenia, técnica da produção de baixas temperaturas, é também uma característica tecnológica de baixas temperaturas, utilizada em praticamente todas as áreas que estão sendo consideradas neste levantamento. Dentro do contexto desta tecnologia está o desenvolvimento de técnicas da obtenção de ultra baixas temperaturas, que em si só pode ser considerado um tema de pesquisa. O refrigerador de diluição, por exemplo, para a obtenção de temperaturas na região dos milikelvin, envolve propriedades dos líquidos quânticos, misturas de  $^3\text{He}$  e  $^4\text{He}$ .

Neste levantamento ficaram caracterizados como linhas de pesquisa pertencentes à área de baixas temperaturas as pesquisas realizadas com  $^3\text{He}$  (férmions),  $^4\text{He}$  (bósons), suas misturas, a supercondutividade, transições de fase de gases nobres absorvidos, propriedades de transporte e desenvolvimento de dispositivos que utilizam especificamente fenômenos de baixas temperaturas (transformadores de fluxos, por exemplo), que denominamos de magnetometria. Outras linhas de pesquisa que se utilizam de baixas temperaturas, através de líquidos criogênicos, ou refrigeradores apropriados, são também apresentadas, demonstrando-se a interdisciplinaridade e a importância do desenvolvimento da instrumentação e técnicas criogênicas.

Na pesquisa teórica desta área, podemos destacar a investigação das propriedades de muitas partículas de sistemas bosônicos com aplicações ao  $^4\text{He}$  superfluido (IFQSC – USP, UFSCar, IFUSP), sistemas eletrônicos bidimensionais sobre  $^4\text{He}$  líquido e outros sólidos criogênicos (IFQSC-USP, UFSCar) e transições de fase em gases nobres adsorvidos (PUC-RJ).

Vinte e cinco anos se passaram desde que Mario Schenberg, durante a reunião anual da SBPC, em 1961, na Cidade de Poços de Caldas, anunciava que estava instalado no Instituto de Física da USP o primeiro liquefator de hélio do País, e quem desejasse realizar experiências a baixas temperaturas poderia ir ao Instituto de Física e ter o seu recipiente apropriado cheio de hélio líquido.

A idéia da implantação de um Laboratório de Baixas Temperaturas surgiu logo após o retorno dos Estados Unidos em 1960 de Newton Bernardes, que se doutorou pela Washington University e estagiou algum tempo no laboratório dirigido por John G. Daunt em The Ohio State University. Nesta época Mario Schenberg era o Diretor do Departamento de Física da Faculdade de Filosofia, Ciências e Letras da USP, e os dois professores tomaram a iniciativa de implantar o primeiro Laboratório de Baixas Temperaturas do País. Convidaram J. G. Daunt como consultor do projeto, solicitando que ele apresentasse a relação de equipamentos básicos que deveriam ser adquiridos para se iniciar algumas experiências a baixas temperaturas e sugestões sobre os tipos possíveis de pesquisas.

Em julho de 1961 Daunt veio ao Brasil, e o primeiro liquefator de hélio estava justamente sendo montado na Universidade de São Paulo pela firma que fabricou o liquefator e que é a mesma de todos os liquefatores em uso no Brasil, nos dias de hoje. Existe um total de nove liquefatores de hélio com seus respectivos sistemas de recuperação nos Institutos e Departamentos de Física na UFRGS, IFUSP, IFQSCarlos (USP), UNICAMP, UFRJ, CBPF, UFMG e UFPE, sendo que a PUC/RJ e a UFCE possuem sistemas de recuperação e purificação de hélio.

## Supercondutividade em Temperaturas Acima de 90K

No mês de fevereiro de 1987 foi possível presenciar o anúncio de uma descoberta que promete ter repercussões extraordinárias. No começo do presente levantamento o fenômeno de supercondutividade tinha sido justamente considerado como inerente à área de baixas temperaturas. Apesar do aparecimento de novos materiais com temperaturas críticas cada vez mais elevadas o progresso era relativamente lento. As temperaturas de transição apenas tinham crescido de 4.3 K a 23.3 K desde a descoberta do fenômeno em 1911 até o início de 1986. No último ano o crescimento foi vertiginoso tendo sido alcançado uma temperatura de transição na vizinhança de 100 K, em fevereiro de 1987. Os novos materiais que apresentam supercondutividade em temperaturas acima de nitrogênio líquido, uma meta almejada por décadas, são cerâmicas baseadas no óxido de cobre. O mecanismo responsável pela supercondutividade nestes materiais é ainda pouco entendido e motivo de intensa atividade de pesquisa.

No Brasil o interesse pelo enorme potencial de aplicações práticas tem levado vários grupos de pesquisa a acompanhar de perto o desenvolvimento destes novos materiais. Apenas dois meses após a descoberta de fevereiro de 1987, um grupo no IPEN anunciou a síntese do composto básico  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_{6-x}$  dando início a um programa de pesquisas em colaboração com o Instituto de Física da

USP. No X Encontro de Física da Matéria Condensada realizado em Caxambu em 5-8 de maio de 1987, grupos do Instituto de Física e Química de São Carlos (USP) e da UNICAMP também apresentaram resultados positivos de suas pesquisas com os novos materiais. Pouco mais tarde, no mês de maio, grupos da UFPE e da UFRJ anunciaram que também tinham conseguido sintetizar as cerâmicas supercondutoras. Atualmente além dos grupos já mencionados vários outros como os do CBPF, UF São Carlos, UFRGS e PUC estão dando seus primeiros passos nas atividades de pesquisa que visam uma melhor caracterização dos materiais e compreensão do fenômeno. Apesar de serem muito recentes, estes acontecimentos parecem assinalar uma patente revitalização da área de supercondutividade, com perspectivas bastante alentadoras no âmbito nacional.

## QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL

O quadro abaixo diz respeito somente ao que foi considerado diretamente pertinente à Área de Baixas Temperaturas e Supercondutividade, sendo que os dados relativos às linhas de pesquisas, que se utilizam de baixas temperaturas, são melhor classificados em outras áreas e podem ser encontrados nos respectivos levantamentos conforme indicado no texto.

## PERSPECTIVAS, PROJEÇÕES E NECESSIDADES

Baixas Temperaturas é uma área à qual pertence a Criogenia que é a produção de frio, por intermédio de refrigeradores ou através de líquidos criogênicos. Deste modo a Criogenia é utilizada pela maioria dos grupos de pesquisa em Matéria Condensada. A pesquisa dos fenômenos tipicamente de baixas temperaturas como a supercondutividade, a superfluidez de  $^4\text{He}$  e  $^3\text{He}$ , os fenômenos de transição de fase de sistemas absorvidos e propriedades de transporte, e fenômenos eletrônicos de sistemas bidimensionais sobre  $^4\text{He}$  é executada por um número pequeno de grupos como se pode verificar pelo quadro resumo. A obtenção de temperaturas de 1 a 100K, para se tomar um intervalo de referência não oferece nenhum problema grave, a não ser as dificuldades de se obter o gás hélio ( $^4\text{He}$ ) importado e a demanda do nitrogênio líquido ser maior do que em geral a facilidade de produzi-lo nos laboratórios, obrigando os pesquisadores a obter o líquido criogênico, a alto custo, dos fornecedores industriais locais. Instalação de centrais criogênicas em sítios estratégicos, financiados pelos órgãos governamentais, com acesso grátis aos usuários é recomendável e merece a atenção das agências financiadoras. Para temperaturas abaixo de 1K, ou se utiliza um refrigerador de  $^3\text{He}$ , ou então um refrigerador de diluição (outras técnicas podem ser utilizadas mas no momento não o são no Brasil). O primeiro tem limitação de temperatura no que diz respeito à temperaturas de milikelvins. O refrigerador de diluição só existe nos Institutos de Física da USP e da UFRJ, tendo sido montados há alguns anos, mas até hoje não estão em funcionamento normal, devido a problemas de termometria e vazamento, que ainda estão sendo resolvidos. Estes equipamentos serão utilizados em pesquisas que só podem ser realizadas a ultra Baixas Temperaturas.

As pesquisas que se desenvolvem no momento no Brasil na área de Baixas

	USP	CBPF	UFRGS	UFRJ	PUC	FTI	UNICAMP	IFQSC USP	UFSCar	LNCC
Transições de Fase Sistemas Adsorvidos				5D, 2AD, 1AM	2D					
Supercondutividade*				1D, 3AD, 2AM		1D, 6E	5D, 6AD, 5AM		1D	
Propriedades de Transporte		1D, 1M	6D, 3AD, 2AM				3D, 2AD, 2AM			
Magnetometria	1D, 1AM	1D, 1M			2D, 1M					
Líquidos Quânticos - Teoria								2D, 1AD	3D	1D

OBS.: D-Doutor, AD-Aluno Doutorado, AM-Aluno Mestrado, E-Engenheiros, M-Mesira.

FTI - Fundação de Tecnologia Industrial - MIC - Lorena SP

LNCC - Laboratório Nacional de Computação Científica - CnPg - RJ

\* Não inclui supercondutividade em altas Temperaturas, pois não é possível precisar o número de pesquisadores recentemente envolvidos nesta área.

Temperaturas e Supercondutividade são em geral muito demoradas devido à falta de automatização na obtenção dos dados, falta esta que está sendo reparada na maioria dos laboratórios. Outro fator que amortece o desenvolvimento das pesquisas nesta área é a falta de um maior número de físicos teóricos que se interessem pelos assuntos pesquisados experimentalmente. Deve-se também mencionar que um maior relacionamento entre as Instituições envolvidas nesta área, assim como relacionamentos entre pesquisadores desta área com as outras afins é mais do que recomendável e seria um fator de progresso e desenvolvimento técnico e científico apreciável.

Deve-se acrescentar que os desenvolvimentos em baixas temperaturas na UNICAMP foram aplicados nas implantações de centrais criogênicas de nitrogênio líquido do Programa Nacional de Inseminação Artificial e criação da primeira empresa nacional em criogenia, a CRYOMETAL. Os trabalhos em supercondutividade, principalmente em Nióbio, estão sendo aplicados no desenvolvimento de bobinas supercondutoras pelo Instituto de Física da USP e pelo Departamento de Materiais Refratários da FTI. O aproveitamento de especialistas em baixas temperaturas na área de Ciências dos Materiais deve ser incentivado por todos os meios.

Outro fator que deve ser levado em conta no desenvolvimento da área é a formação de pessoal técnico. Deve haver um apoio substancial que possibilite a formação de pessoal de apoio no desenvolvimento do técnico em criogenia. Na medida do possível está se aproveitando a competência dos poucos técnicos existentes na formação de outros e na manutenção dos liquefatores de hélio e nitrogênio em todo o País. Treinamento apropriado e salários condizentes devem ser implementados e merecem atenção das instituições e das agências financiadoras.

# Física da Matéria Condensada

## MAGNETISMO

### DESCRIÇÃO

O Magnetismo é um dos campos mais férteis e mais ativos da Física da Matéria Condensada, que atrai atualmente grande atenção de físicos experimentais e teóricos, estes notadamente da área de mecânica estatística.

Os principais objetivos da pesquisa neste campo são a compreensão das origens microscópicas das propriedades magnéticas dos materiais, a descoberta de novos materiais e fenômenos, o estudo das propriedades termodinâmicas e das excitações dinâmicas dos sistemas magnéticos, bem como o desenvolvimento de novas aplicações tecnológicas.

O estudo da origem do Magnetismo em isolantes e metais envolve diversos aspectos. A existência de momentos magnéticos imediatamente levanta a questão da sua conexão com a estrutura eletrônica dos materiais em questão. Isolantes e metais, dadas as suas características, apresentam origens distintas para o momento magnético por átomo. Exemplos clássicos do primeiro caso são os calcogenetos (óxidos, sulfetos etc.) de terras raras ou de metais de transição e os fluoretos de metais de transição. Por oposição, sistemas metálicos como o Fe puro, assim como alguns compostos intermetálicos de transição, caracterizam os ferromagnetos itinerantes. Nos sistemas itinerantes, o momento magnético por átomo resulta de um balanço detalhado entre energia cinética e interação coulombiana entre pares de elétrons itinerantes. No caso de isolantes, efeitos de campo cristalino e as regras de Hund fornecem a origem dos momentos magnéticos.

Alguns compostos intermetálicos de terras raras (por exemplo, Gd) e metais de transição como o Fe, apresentam os dois tipos de momento magnético: de origem itinerante na subrede do Fe e localizado no caso da sub-rede da terra rara. Considerações de estrutura eletrônica estabelecem também o mecanismo de interação entre estes momentos magnéticos: interações de "super-exchange" ou

de Bloembergen-Rowland no caso de sistemas isolantes; interações mediadas pelos elétrons de condução para sistemas exibindo momentos magnéticos localizados como é o caso de intermetálicos de terras raras.

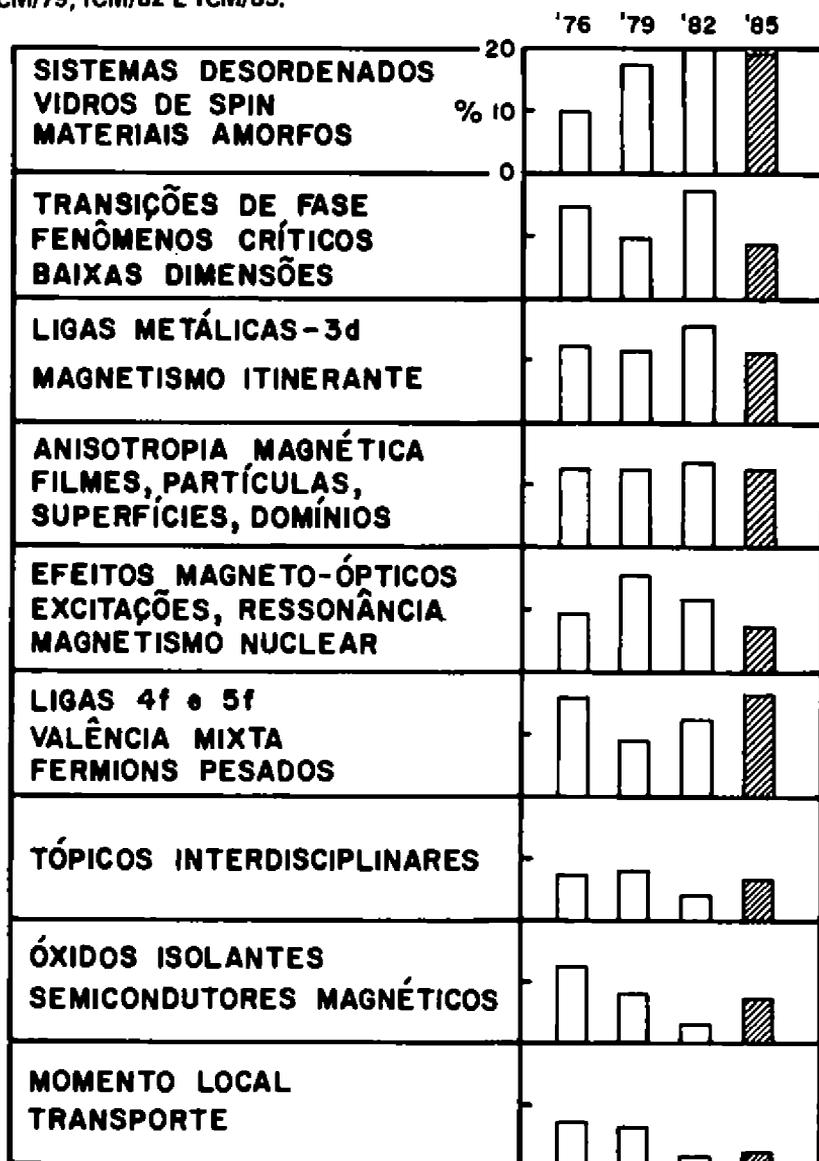
As interações entre os momentos magnéticos, que são determinantes das propriedades macroscópicas dos materiais, dependem fundamentalmente de sua estrutura eletrônica. Nos últimos 15 anos foram descobertas diversas classes de materiais sintetizados artificialmente, cujas interações podem ser descritas por modelos matemáticos simples, alguns dos quais eram anteriormente considerados objetos de mera especulação. Este é o caso dos sistemas cujas interações magnéticas ocorrem em uma ou duas dimensões apenas. Esta é uma das razões que faz com que o Magnetismo seja o campo de maior aplicação das poderosas ferramentas da Mecânica Estatística, que são usadas para estudar os fenômenos coletivos dos momentos magnéticos, tais como transições de fase e fenômenos críticos. Suas aplicações vão desde os simples sistemas ordenados unidimensionais aos complexos vidros de spin e sistemas de campo aleatório.

As propriedades e os fenômenos magnéticos são investigados experimentalmente por uma grande variedade de técnicas, tais como medidas de magnetização susceptibilidade d.c. e a.c., calor específico, resistividade, magnetostricção, ressonância magnética eletrônica e nuclear, absorção e luminescência óptica, espalhamento de luz, espalhamento de nêutrons, etc. Por esta razão o magnetismo é também uma excelente área para a formação de pesquisadores e técnicos experimentais para atuarem em diversos campos da ciência e da tecnologia.

A intensa atividade de pesquisa básica em Magnetismo é refletida nas conferências internacionais periódicas que atraem cada uma cerca de 1000 pesquisadores. As mais importantes são a Conferência Anual de Magnetismo e Materiais Magnéticos, realizada nos Estados Unidos, e a Conferência Internacional de Magnetismo (ICM) realizada a cada três anos em países diferentes. As linhas de pesquisa em Magnetismo na atualidade estão espelhadas na distribuição de artigos apresentados nas conferências ICM de 1976 a 1985 mostrada na figura a seguir.

Finalmente, os materiais magnéticos desempenham um importante papel na tecnologia moderna, pois encontram um grande número de aplicações em produtos e processos industriais dos mais variados setores. As aplicações vão desde dispositivos com funções muito simples, como os pequenos ímãs permanentes usados para fechaduras de portas, de móveis e utensílios, a inúmeros componentes sofisticados utilizados na indústria eletro-eletrônica. Neste setor os materiais magnéticos somente são suplantados em volume de aplicação pelos semicondutores, mas em termos econômicos eles têm uma importância quase tão grande quanto estes. Muitas das aplicações atuais dos materiais magnéticos resultaram de avanços tecnológicos obtidos nos últimos 20 anos nos laboratórios industriais e nos centros de pesquisa do Japão, dos Estados Unidos, da Europa e da União Soviética. No Brasil a indústria de materiais e dispositivos magnéticos é predominantemente multinacional, não se desenvolvendo nem os materiais nem os processos de produzi-los. Por outro lado, a pesquisa em Magnetismo nas universidades é predominantemente teórica e em geral desligada do mundo real dos materiais magnéticos. Com a tendência "nacionalizante" da indústria eletrônica em decorrência da Lei da Informática, será fundamental realizar pesquisa básica e desenvolver tecnologia em materiais magnéticos de importância tecnológica. Isto vai requerer um certo esforço da "comunidade magnética" acadêmica, no sentido de se engajar em novos problemas e de procurar contactos com indústrias instaladas no País.

DISTRIBUIÇÃO DOS ARTIGOS PUBLICADOS NOS ANAIS DAS ICM/76, ICM/79, ICM/82 E ICM/85.



## BREVE HISTÓRICO

A evolução histórica do Magnetismo no Brasil está vinculada no nosso entender a quatro momentos e quatro regiões distintas do País. Em cada caso, técnicas experimentais assim como a liderança de algumas pessoas tiveram um papel preponderante. Gostaríamos de citar em particular os principais focos de propagação no início da década de sessenta:

1 — A atuação de T. Maris na UFRGS ao incentivar a implantação da Correlação Angular no Instituto de Física, tendo como objetivo inicial estudos em Física Nuclear. Posteriormente, graças a iniciativa decisiva de J. Rogers, o qual utilizou a Correlação Angular para estudos em Matéria Condensada, foi possível a formação científica de vários pesquisadores.

A técnica experimental em questão, sendo de natureza microscópica, entra em contraste com outras introduzidas em outro polo de difusão.

2 — O papel de Mário Schenberg na USP foi um dos exemplos mais marcantes de visão científica com implicações experimentais, novamente partindo de um pesquisador de formação e atuação teórica. Trata-se, de por seu intermédio, implantar os equipamentos de baixas temperaturas (nitrogênio e hélio), assim como convidar especialistas como Daunt, Quadros e Salinger para auxiliar na implantação dos equipamentos e planejamento inicial de experiências a baixas temperaturas. Nascia desta forma o ponto de partida do que hoje em dia constitui uma técnica fundamental não apenas para estudos de Magnetismo, mas também para a maioria dos campos em Física da Matéria Condensada.

3 — No Rio de Janeiro a contribuição de físico-químico de formação, como J. Danon, consistiu em trazer para o estudo de problemas na área de complexos moleculares técnicas como o efeito Mössbauer e também métodos tipo R.P.E. A expansão para outros sistemas, alguns de natureza metálica, foi o encaminhamento natural. Observa-se aí o reencontro de atividades iniciadas na UFRGS, em São Paulo e no Rio, no que diz respeito a estudos em sistemas metálicos.

Partindo-se destes três núcleos pode-se tentar acompanhar a evolução dos grupos de pesquisa em Magnetismo no Brasil. Por outro lado, estes núcleos tiveram pouca influência na criação, na década de setenta, de vários grupos de magnetismo atualmente existentes no Nordeste (ver também o levantamento da área de mecânica estatística). Estes grupos se originaram principalmente do grupo implantado a partir de 1971 na UFPE, em Recife, sob a liderança de Sergio Rezende, pesquisador formado no exterior, trabalhando na área de fenômenos dinâmicos em magnetismo. Convém, para poder efetuar uma análise das dificuldades que tiveram de ser superadas na implantação, examinar pelo menos rapidamente a relação de facilidades experimentais disponíveis. Levando-se em conta a verba envolvida (e as gestões para obtê-la) assim como as dificuldades de importação, o esforço empregado foi muito grande devido às condições brasileiras.

Deve-se notar que do ponto de vista experimental podemos caracterizar por décadas o estabelecimento de técnicas novas além de desenvolvimento e consolidação das descritas acima.

A década de 70 poderia ser caracterizada pela implantação de métodos ópticos, micro-ondas (mais sofisticação do que foi iniciado nos 60), assim como altos campos magnéticos e baixas temperaturas. Na década de 80 podemos assinalar a implantação de ultra baixas temperaturas (mK), o implantador de fons da

UFRGS, a técnica de SQUID e a disseminação em vários centros de altos campos magnéticos obtidos com bobinas supercondutoras.

Do ponto de vista da temática de estudos experimentais observa-se além do desenvolvimento dos estudos de interações hiperfinas e medidas magnéticas (na origem dos primeiros grupos), a passagem para estudos sugeridos pelos avanços da Mecânica Estatística e da teoria das transições de fase.

Coexistindo com estes temas assistimos na década dos 80 o interesse crescente na Ciência dos Materiais e a pesquisa de Materiais Magnéticos (cristalinos e amorfos).

Ao mesmo tempo devemos notar uma "transição de fase" na Mecânica Estatística, que com algumas exceções, foi adquirindo grau crescente de abstração, em oposição com os temas modificados pelos vários estudos experimentais.

Esta observação levanta a questão da interação entre experimentais e teóricos. Nos grupos de magnetismo a grande maioria é composta por físicos experimentais; dos relatórios obtidos apenas um grupo foge à regra, sendo composto apenas de teóricos.

Existem casos de uma estreita interação entre experimentais e teóricos e isoladamente estas interações começam a aparecer entre grupos de pesquisa, às vezes até bem separados geograficamente.

Teses de conteúdo experimental-teórico começam a ser preparadas e algumas já defendidas. No nosso entender este tipo de colaboração deveria ser fortemente encorajada.

Encontros regulares entre experimentais e teóricos, com a finalidade específica de aumentar a interação estreita e daí definir linhas de trabalho comum, seriam altamente recomendáveis.

Tais encontros não entram em conflito com as reuniões científicas normais, pois teriam mais o caráter de planejamento de atividades em comum.

No que diz respeito ao estudo teórico de Magnetismo, é importante lembrar o nome de A.M. de Graaf. Trazido à USP por iniciativa de Mario Schenberg, de Graaf tinha recentemente concluído seu doutoramento sob a direção de W. Baltensperger. Chegando a São Paulo, de Graaf passou a colaborar com dois alunos da USP, Affonso A. G. Gomes e Roberto Luzzi. Após um ano de trabalho sugeriu a um deles que fosse preparar seu doutoramento em Paris. Desta forma e através dessa iniciativa de Graaf (apoiado por Mario Schenberg) foi possível trazer de volta ao País influências da escola de J. Friedel, seguidor de Sir N. Mott. Roberto Luzzi, terminando seu doutoramento sob a direção de Graaf no CBPF, abriu novos caminhos em estudos de magnetismo. Na USP, outros teóricos de formação americana, como Guimarães Ferreira, tiveram um papel decisivo nos primeiros anos de atividades experimentais em termos de uma frutuosa colaboração.

## PERSPECTIVAS, PROJEÇÕES E NECESSIDADES

Dentro da Física de Matéria Condensada, a área de magnetismo é uma das mais clássicas e no Brasil é uma daquelas mais tradicionais, representando um dos primeiros temas de interesse.

Podemos constatar, no material contido neste relatório, a diversidade dos temas estudados nas diversas instituições brasileiras.

QUADRO RESUMO - PERÍODO 80/85

INSTITUIÇÃO	DOCTORES	MESTRES	ESTUDANTES		TESES DE DOUTORAMENTO	DISSERTAÇÕES DE MESTRADO	ARTIGOS PUBLICADOS
			DOUTORADO	MESTRADO			
UFRGS	16	20	11	3	8	20	62
USP	12	6	4	8	8 (5 exp)	18	40 (exp)
UNICAMP	10	-	7	6	8	5	(1980-1986)
UFS. CARLOS (USP)	1	1	-	-	-	-	-
UFS.CARLOS	1	1	-	-	-	-	- (1978-1986)
UFRJ	4	3	-	-	1	9	22 (Trab. Exp.)
CBPF	12	3	-	-	2	9	25 (1980-1986) (Trab. Exp.)
UFMG	3	2	-	-	-	-	-
UFES	2	2	-	-	-	-	-
UFPE	7	2	-	-	11	16	(1980-1985) 40 Trab. E e T
UFF	6	4	-	-	-	-	-
<b>TOTAL</b>	<b>74</b>	<b>44</b>	<b>22</b>	<b>17</b>	<b>38</b>	<b>77</b>	

**QUADRO SOBRE INTERAÇÃO TEÓRICO/EXPERIMENTAL**

INSTITUIÇÃO	TEÓRICOS	INTERAÇÃO TEÓRICO EXPERIMENTAL	
		INTRA-GRUPO	INTER-GRUPO
UFRGS	X	-	X
USP	X	X	X
UNICAMP	X	X	X
UFSCARLOS (USP)	X	-	-
UFRJ	-	-	X
CBPF	X	X	X
UFMG	-	-	X
UFPE	X	X	X
UFF	X	-	-

Uma constatação interessante foi obtida examinando-se o programa da última Conferência de Magnetismo e Materiais Magnéticos realizada em Baltimore, EUA, em fins de 1986. Constata-se que para a grande maioria dos temas discutidos, existem no Brasil trabalhos publicados nestes assuntos, trabalhos estes imaginados e realizados no Brasil, por pesquisadores brasileiros. Naturalmente, o nível de competitividade internacional fica aquém do correspondente a países mais avançados, mas no nosso avaliar não estamos em nenhuma situação crítica. A comparação com a Conferência de Magnetismo, indica a existência de maturidade e atualidade nos temas de pesquisa em magnetismo desenvolvidos no Brasil.

Uma possível causa para as dificuldades existentes seria a seguinte série de fatores:

1) Um número ainda relativamente pequeno de grupos de pesquisa e dentro destes grupos uma certa penúria de pesquisadores e estudantes. A escassez de material humano continua a ser um dos "calcanhares de Aquiles" mais comuns na atividade científica brasileira em geral.

2) A participação em Conferências, Escolas, etc., a nível internacional, ainda nos parece pequena e, mais grave ainda, com picos em certas áreas restritas e com forte componente "modista". Seria muito importante se houvesse um apoio à nível nacional, incentivando pesquisadores, através de um projeto coerente e bem estabelecido, de participação em eventos internacionais. Estas pessoas e eventos seriam escolhidos de tal forma que pudessem apresentar rapidamente um retorno maior do que a nível puramente individual, trazendo portanto incentivo e desenvolvimento de áreas. Vai aí uma sugestão aos comitês de decisão, para localizar e incentivar os setores com carências mas com clara potencialidade, e não apenas aqueles atualmente com bom desempenho. Na área de magnetismo em particular, uma avaliação de mérito das áreas em questão, dado um perfil atual de desempenho, seria uma atribuição importante e de grande responsabilidade à ser desenvolvida pelos comitês de decisão.

LINHAS DE PESQUISA EXPERIMENTAL

INSTITUIÇÃO	MÖSSBAUER	MAGNETOMETRIA	EPR	RMN	CORRELAÇÃO ANGULAR	ÓPTICA ESPECTROSCOPIA	ÓPTICA RAMAN BRILLOUIN	RESISTIVIDADE	LASER	RAIO-X	RESSONÂNCIA MAGNÉTICA
UFRG	**	**	-	-	**	-	-	**	-	**	-
USP	**	**	**	-	-	-	-	**	**	**	-
UNICAMP	-	**	**	**	-	-	**	**	**	**	-
UFSCARLOS	-	-	-	-	**	-	-	-	-	-	-
UFRJ	**	-	-	-	-	**	-	-	**	**	-
CBPF	**	-	**	**	**	-	-	**	-	**	-
UFMG	**	-	-	-	-	**	-	-	-	-	-
UFES	**	**	-	**	-	**	**	-	**	-	**
UFPE	-	**	-	**	-	**	**	-	**	-	**

\*\* - Equipamento Disponível

3) Do ponto de vista experimental (vide quadros anexos), as técnicas estão bastante bem disseminadas, quanto à existência de equipamentos. Não fica claro entretanto se, de maneira uniforme nos diversos grupos de pesquisa, a atividade é suficientemente intensa, no sentido da produção e competitividade. Novamente caberia aí uma avaliação feita com a necessária isenção, para investir em alguns grupos, com pessoal ou aperfeiçoamento de equipamento já existentes, além de incentivar onde não existisse a informatização da atividade experimental. Claramente alguns equipamentos tais como SQUIDS, obtenção por epitaxia de sistemas magnéticos, etc., ainda não existem no Brasil nos lugares onde seriam indicados; embora fugindo um pouco da especificidade da área de magnetismo, lembráramos que sistemas de temperaturas extremamente baixas (já em desenvolvimento em pelo menos duas instituições), seriam muito importantes para determinados tópicos em magnetismo.

# Física da Matéria Condensada

## RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

### DESCRIÇÃO

Ressonância magnética no sentido usual denota ao mesmo tempo um fenômeno e um grupo de técnicas espectroscópicas. O interesse básico é a observação de transições, induzidas por um campo magnético dependente do tempo, entre os níveis de energia de dipolos magnéticos que interagem com um campo magnético estático. A origem dos dipolos pode ser eletrônica ou nuclear enquanto que os campos magnéticos podem ser aplicados externamente ou gerados internamente. Quando os dipolos magnéticos são de origem eletrônica, é também usual estabelecer uma divisão adicional entre sistemas paramagnéticos e sistemas magneticamente ordenados (ferromagnetos ou antiferromagnetos).

Podemos resumir as diferentes técnicas experimentais que normalmente compõem a subárea da seguinte maneira:

**Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE)**

**Ressonância Ferro e Antiferromagnética (RFM, RAFM)**

**Ressonância Magnética Nuclear (RMN)**

**Ressonância Dupla Eletrônica – Nuclear (ENDOR)**

**Ressonância Quadrupolar Nuclear (RQN)**

Esta subdivisão é basicamente operacional, reunindo um conjunto de técnicas espectroscópicas que operam numa faixa definida do espectro eletromagnético que vai da região de rádio-freqüências até a região de microondas. A exclusão de técnicas como a detecção óptica de ressonância magnética é motivada por este critério. Por outro lado a Ressonância Quadrupolar Nuclear, que envolve transições entre níveis de energia resultantes de uma interação eletrostática e não propriamente magnética, é normalmente incluída no grupo pelas suas semelhanças operacionais.

Historicamente o fenômeno de Ressonância Magnética teve sua origem nos experimentos de Rabi e colaboradores com feixes atômicos e moleculares (1937).

A técnica cresceu enormemente em importância após a detecção do fenômeno na matéria em seu estado normal. A primeira observação do fenômeno de Ressonância Magnética Nuclear, produzido pelos núcleos de hidrogênio num bloco de parafina, teve lugar em 1945 em Harvard pelo grupo de E. Purcell e colaboradores. No mesmo ano em Stanford, F. Bloch e colaboradores observaram o fenômeno de RMN nos núcleos de hidrogênio da água e, pouco antes (1944), E. Zavoisky, na URSS realizou a primeira observação do fenômeno de Ressonância Paramagnética Eletrônica.

A primeira vista, a única diferença que existiria entre a Ressonância Magnética e outras técnicas espectroscópicas, seria a região do espectro eletromagnético em que ela opera. Sem dúvida esta diferença tem importantes conseqüências no que diz respeito ao tipo de processos físicos que podem ser estudados usando a técnica. Entretanto, para fazer justiça no aspecto histórico, é necessário apontar uma outra diferença que colocou a Ressonância Magnética numa posição de especial importância sob o ponto de vista conceitual. Esta importância no contexto da física decorreu de fato de que os experimentos de Bloch e Purcell ilustraram pela primeira vez a relação entre estados quânticos e precessão coerente. A abordagem espectroscópica do grupo de Purcell e a abordagem do grupo de Bloch, baseada em idéias clássicas como precessão e torques, pareciam inicialmente tão diferentes que o reconhecimento de que se tratava em ambos os casos do mesmo fenômeno, não foi muito generalizado. Posteriormente, a generalidade, destes conceitos (estados quânticos e precessão coerente) foi verificada em relação a outros fenômenos em diversas faixas do espectro eletromagnético.

Nos últimos quarenta anos a Ressonância Magnética tem se convertido numa técnica com aplicações em diversas áreas do conhecimento produzindo resultados importantes na Física, Química, Biologia e outras ciências. As aplicações são as mais diversas e vão desde o estudo da estrutura e das funções da hemoglobina até a pesquisa das propriedades de líquidos quânticos como o Hélio<sub>3</sub> e da tomografia computadorizada até o estudo da física e química de superfícies. A simples enumeração de todas as áreas de atuação nos levaria a uma listagem bastante extensa.

Apesar do grande número de aplicações já existentes, a Ressonância Magnética tem conseguido manter um grau bastante acentuado de renovação. Pode-se afirmar que a versatilidade das modernas técnicas de Ressonância Magnética que existem na atualidade não têm sido ainda explorada em sua total potencialidade.

Em aplicações na Física da Matéria Condensada uma parte dos resultados experimentais envolve de alguma forma a análise de formas de linha, tempos de relaxação e deslocamentos da frequência de ressonância. A maioria dos trabalhos de pesquisa realizados atualmente no Brasil e em muitos outros países envolve medições de alguns destes parâmetros em sistemas físicos sujeitos a condições diversas de frequência, temperatura, pressão, tratamento térmico, químico etc. Técnicas modernas que permitem atingir maior especificidade ou maior resolução têm sido pouco exploradas. Citaremos alguns exemplos:

#### **a) Transições Quânticas Múltiplas**

Este método está baseado na Ressonância Magnética Nuclear Pulsada. As coerências quânticas múltiplas são sensíveis à ressonância de núcleos acoplados

dipolarmente com um ou mais vizinhos. A técnica permite estudar o tamanho médio de agregados de spins e tem sido utilizada recentemente para determinar o número médio de prótons em agregados de hidrogênio em silício amorfo. O método parece ser potencialmente importante no estudo de diversos fenômenos relacionados com sistemas desordenados.

#### **b) Espectroscopia de Alta Resolução em Sólidos**

Nos últimos anos foram desenvolvidos vários métodos de RMN pulsada que permitem eliminar em boa parte o efeito da interação dipolar permitindo assim obter espectros de alta resolução em sólidos. Além das diversas seqüências de pulsos que foram desenvolvidas para este fim existem duas outras técnicas que merecem ser destacadas pelo crescente interesse criado em torno delas: 1) Rotação Rápida no "Ângulo Mágico"; 2) RMN em Campo Nulo.

#### **c) Espectroscopia Fourier em Ressonância Paramagnética Eletrônica**

Os métodos de espectroscopia Fourier, amplamente difundidos em RMN, prometem ter uma expansão semelhante no caso da RPE. Com o aparecimento de conversores analógico/digital e acumuladores de sinal suficientemente rápidos, é possível atualmente obter espectros de RPE pelo método de pulsos com maior sensibilidade que com o método de onda contínua. Ao mesmo tempo o método de Fourier permite adquirir uma maior variedade e quantidade de parâmetros físicos que refletem diversos fenômenos de relaxação ou processos coerentes.

A Ressonância Magnética tem ganho um merecido espaço como ferramenta de pesquisa importante na Física da Matéria Condensada. Nos últimos anos tem surgido também uma outra aplicação que pela sua importância prática tem conseguido transcender os laboratórios de pesquisa para atingir o público. Trata-se da Geração de Imagens Tomográficas por RMN que por este motivo merece ser especialmente destacada. Apesar de que o grande impacto causado por esta técnica ocorreu principalmente na medicina, sua área de atuação está se tornando cada vez mais interdisciplinar com o aparecimento de aplicações em problemas muito diversos. O crescente número de aplicações e a própria evolução desta técnica tem gerado uma grande atividade na área de instrumentação, com o aparecimento de técnicas sofisticadas de processamento de sinais para atender as necessidades criadas pelos variados objetivos.

### **BREVE HISTÓRICO**

A Ressonância Magnética, como técnica de pesquisa em Física da Matéria Condensada, foi implantada no Brasil em torno de 1962. Neste ano foi instalado no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas um espectrômetro de Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE), tipo V-4502 fabricado pela Varian, que foi utilizado nas primeiras pesquisas experimentais e na formação dos primeiros pesquisadores na área. Um segundo espectrômetro de RPE foi adquirido pela PUC do Rio de Janeiro, em torno de 1966, dando origem a um grupo de pesquisa nesta instituição e contribuindo na formação de vários pesquisadores, cujos primeiros contatos com a física experimental foram estabelecidos através da ressonância magnética.

Como aconteceu em algumas outras áreas da Física, estes primeiros equipamentos foram adquiridos na forma de espectrômetros completos o que facilitou o início das atividades de pesquisa apesar da modesta infra-estrutura de apoio técnico existentes na época. Esta modalidade foi mudando gradualmente na medida em que algumas instituições foram equipando seus laboratórios com equipamentos eletrônicos de uso geral, e na medida em que seus pesquisadores adquiriram maior experiência e familiaridade com a instrumentação eletrônica e com a técnica de Ressonância Magnética. Em torno de 1970 foram iniciadas as atividades de pesquisa no Departamento de Física da UFMG, com um espectrômetro de RPE/ENDOR superheterodino montado na própria instituição. Aproximadamente na mesma época (1971) foi construído, no Instituto de Física e Química de São Carlos, (USP) um espectrômetro de RPE (banda X) utilizando componentes comprados individualmente, e no Departamento de Física da UFPE (1972) foi montado, usando o mesmo critério, um espectrômetro de Ressonância Ferromagnética (RFM) também em banda X. Estes exemplos constituíram as primeiras montagens experimentais na área de Ressonância Magnética com característica modular. Os módulos eram adquiridos individualmente usando um critério de versatilidade que permitisse uma grande facilidade para fazer modificações e melhorias sugeridas pelas necessidades dos próprios experimentos ou por futuros avanços tecnológicos. Paralelamente também foram realizados na época investimentos adicionais para a aquisição de novos espectrômetros convencionais fabricados comercialmente. Assim foram instalados equipamentos de RPE no Instituto Militar de Engenharia (1971), Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (1972), Instituto de Pesquisas Tecnológicas (1972) e Universidade de Brasília (ca. 1971). Estes equipamentos não só foram utilizados pelas instituições que os adquiriram, mas também, por pesquisadores das universidades que ainda não tinha conseguido os recursos para equipar seus laboratórios. Assim, pesquisadores da UFRJ, por exemplo, tiveram acesso aos equipamentos de RPE instalados na PUC e no IME e pesquisadores do IFUSP utilizaram e ainda utilizam os espectrômetros do IPEN e IPT.

Em 1975 foi criado na UNICAMP um grupo de pesquisa em RPE que utilizou um espectrômetro Varian já existente na instituição e em 1976, foi montado no Departamento de Física da UFPE um espectrômetro de ressonância magnética nuclear pulsada utilizando uma abordagem modular. Em 1979 foi adquirido pelo Departamento de Física da UFRJ um moderno espectrômetro de RPE fabricado pela Bruker (Mod. ER-420) e no DF do Instituto de Física e Química de São Carlos foi criado um grupo de pesquisa em RMN pulsada concluindo-se a montagem de um espectrômetro de características modulares. Em 1980 foi adquirido pelo DF da UNICAMP um espectrômetro de RMN pulsada de fabricação iugoslava e pelo CBPF um espectrômetro de RMN pulsada Bruker (SXP) dando-se início a atividades de pesquisa nesta área em ambas as instituições.

As drásticas restrições nas importações impostas a partir de 1980 aparentemente restringiram a criação de novos laboratórios e a expansão dos existentes. Apenas o grupo de ressonância magnética da Universidade Federal de São Carlos foi implantado recentemente (1983), com recursos modestos e com equipamentos em grande parte construídos pelos membros do grupo.

As atividades de pesquisa em Ressonância Magnética nos vários laboratórios existentes no País começaram com uma concentração quase que exclusiva em problemas básicos de interesse principalmente científico. Foram desenvolvidos trabalhos de relevância nas áreas de materiais magnéticos, materiais ferroelétricos, condutores superiônicos, transições de fase, metais e ligas, sistemas amorfos, sistemas de interesse biológico e outras. A partir de 1980 o quadro começou a mudar gradualmente, notando-se uma maior preocupação no desenvolvimento paralelo de aplicações de interesse tecnológico mais diretamente ligadas às ativi-

dades produtivas. Na UNICAMP, por exemplo, foi elaborado um projeto de melhoramento genético de sementes utilizando a RMN para a determinação não destrutiva do teor de óleo e na UFRJ foi implantado um programa de estudos sistemáticos por RPE de matéria orgânica sedimentar com ênfase nos carvões, turfas, xistos betuminosos e arenitos betuminosos brasileiros.

Uma aplicação de Ressonância Magnética que despertou grande interesse no Brasil a partir de 1983, foi a geração de imagens tomográficas por RMN. O desafio tecnológico da implantação da técnica, utilizando em grande parte recursos nacionais, foi enfrentado simultaneamente pelos grupos de RMN do IFQSC e da UFPE. Valendo-se inicialmente da versatilidade dos equipamentos de pesquisa existentes nestes laboratórios, foi possível demonstrar a viabilidade de desenvolver esta tecnologia e aglutinar em torno de um projeto de ressonância magnética, engenheiros, técnicos e profissionais da área médica. Este acontecimento marcou uma nova fase no desenvolvimento de instrumentação para a ressonância magnética, já que a implementação da técnica de geração de imagens tomográficas requereu o desenvolvimento completo de novos instrumentos bastante específicos, como também um esforço bastante considerável na área de "software".

## ANÁLISE E PERSPECTIVAS

Os dados apresentados anteriormente permitem fazer uma estimativa aproximada do investimento global na subárea de Ressonância Magnética no Brasil desde o começo das atividades de pesquisa. Se levarmos em consideração apenas os equipamentos específicos, sem incluir investimentos em infra-estrutura de caráter geral (Oficinas, Instrumentos de Teste, Computação, Criogenia, Biblioteca, Química etc.), estimamos que os recursos investidos não ultrapassam a casa de 3,5 milhões de dólares atuais. Levando em consideração o número de pessoas envolvidas na subárea e que o investimento foi realizado ao longo de um período de 25 anos, pode-se afirmar que o custo foi relativamente modesto. É claro que esta afirmativa merece uma análise mais crítica.

Para uma análise crítica detalhada da área de Ressonância Magnética no Brasil seria de grande interesse poder dar resposta a perguntas como as seguintes: a) Em relação ao conjunto da Física da Matéria Condensada, a ênfase dada no Brasil à Ressonância Magnética é compatível com a ênfase dada em outros países? b) Em relação às diferentes técnicas experimentais (RPE, RFM, RAFM, RMN, ENDOR, RQN), como se compara a ênfase relativa dada a cada uma delas no Brasil e em outros países? c) Como se compara a produtividade e a qualidade dos trabalhos de pesquisa realizados no Brasil com o desempenho de outros países na área de Ressonância Magnética? Apesar destas perguntas serem muito concretas e de óbvio interesse para uma análise crítica, dar uma resposta objetiva a todas elas não é tarefa fácil. Existem diversos parâmetros que podem ser escolhidos para uma comparação quantitativa, mas em todos os casos os resultados deverão ser examinados com cautela, levando em consideração que se trata apenas de indicadores relativos que podem refletir ou não a situação global da área. Um indicador de acesso relativamente fácil é a frequência de trabalhos de pesquisa publicados em revistas de circulação internacional e em congressos científicos. Outros parâmetros podem ser até mais reveladores, como por exemplo, o investimento realizado pelos diversos países na área de Ressonância Magnética relativo ao investimento global na área de Física da Matéria Condensada. Infelizmente neste último caso os dados são de difícil acesso.

Apresentaremos aqui alguns resultados obtidos num levantamento que realizamos recentemente utilizando o primeiro destes indicadores. Na Fig. 1 mostra-

## QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL

INSTITUIÇÃO	LINHAS DE PESQUISA	INÍCIO DAS ATIVIDADES	DOCTORES CONTRATADOS	MESTRES CONTRATADOS	ESTUDANTES (Atual)	
					DOCTORADO	MESTRADO
<b>CBPF</b>	Biofísica (EPR) Defeitos em Sólidos (EPR) Datação Geofísica (EPR) Interações híerlinas e quadrupolares em sistemas metálicos contendo terras (NMR) Aplicações da Ressonância Magnética na FMC	1962	6	2	3	7
<b>Inst. Mill. de Engenharia</b>	Cristalização de vidros metálicos (EPR) Centros de V <sup>2+</sup> em MgO (EPR) Estudos da lixiviação de ortolostatos de La e Ce	1971	1	1	1	2
<b>IFSCarlos</b>	Geração de imagens espectroscópica "in vivo" (MMR) Condutores iônicos (NMR) Isolantes magnéticos (NMR) (EPR)	1971	5	-	3	6
<b>UFGolás</b>	Laboratório em fase de implantação. Previsto NMR, EPR meados/87	-	3	-	-	-
<b>UFMG</b>	Transições de fase estruturais (principalmente ferroelétricos) EPR Transições de fase incomensuráveis (EPR)	1966	4	2	6	-
<b>UFSCarlos</b>	Propriedades magnéticas elétricas e ópticas de alumínio silicatos e					

QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL (Continuação)

INSTITUIÇÃO	LINHAS DE PESQUISA	INÍCIO DAS ATIVIDADES	DOCTORES CONTRATADOS	MESTRES CONTRATADOS	ESTUDANTES (Atual)	
					DOCTORADO	MESTRADO
	fosfatos de terras raras (MMR, fotoacústica)	1982	2	-	-	-
UFRJ	Complexos de metais de transição em redes de halogenetos alcalinos (EPR) Matéria orgânica sedimentar (EPR)	1978	2	3	5	2
UFPE	Fenômenos magnéticos não lineares em ferromagnetos (FMR) Excitações elementares e magnetismo de semicondutores magnéticos (FMR)	1971	6	-	5	4
	Percolação. Sistemas amorfo (RMM) Geração de imagens por RMN Polímeros e condutores orgânicos. Silício amorfo (EPR)					
UNICAMP	Gráficos intercalados Hidretos metálicos Ligas metálicas Defeitos em semicondutores Melhoramento genético de sementes oleaginosas (EPR, NMR)	1975	4	-	4	7
USP (Deprt <sup>o</sup> Física Exp.) (grupo RPE)	Sais hidratados de Níquel e Manganês concentradas e diluídas com Zinco (EPR)	1979	2	1	2	2
USP (Deprt <sup>o</sup> Física Exp.) (Grupos Centros de cor)	Defeitos em vidros óxidos (isolantes) e calcogenetos (semicondutores) Centros de cor em gemas naturais do Brasil Cinética de centros paramagnéticos induzidos por radiação em materiais (EPR)	1980	2	-	2	7

mos o número total de trabalhos apresentados no IX Encontro Nacional de FMC realizado em Poços de Caldas em abril de 1986 e comparamos com o número de trabalhos na subárea de Ressonância Magnética. Na mesma figura também mostramos uma comparação semelhante para os trabalhos apresentados no "March Meeting" da American Physical Society realizado em Las Vegas, Nevada, em abril de 1986. Este encontro é o maior que se realiza anualmente na área de Física da Matéria Condensada nos Estados Unidos. Da figura 1 concluímos que a porcentagem de trabalhos na área de Ressonância Magnética no encontro de Poços de Caldas é um pouco maior (7,8%), do que no encontro da APS em Las Vegas (4,4%). A diferença no entanto não parece muito significativa e pode-se concluir que, em relação ao indicador utilizado, a ênfase na subárea não apresenta grandes distorções. Em relação ao número absoluto de trabalhos apresentados em ambos os encontros, não seria prudente tirar maiores conclusões já que estes números dependem bastante da própria organização destes eventos.

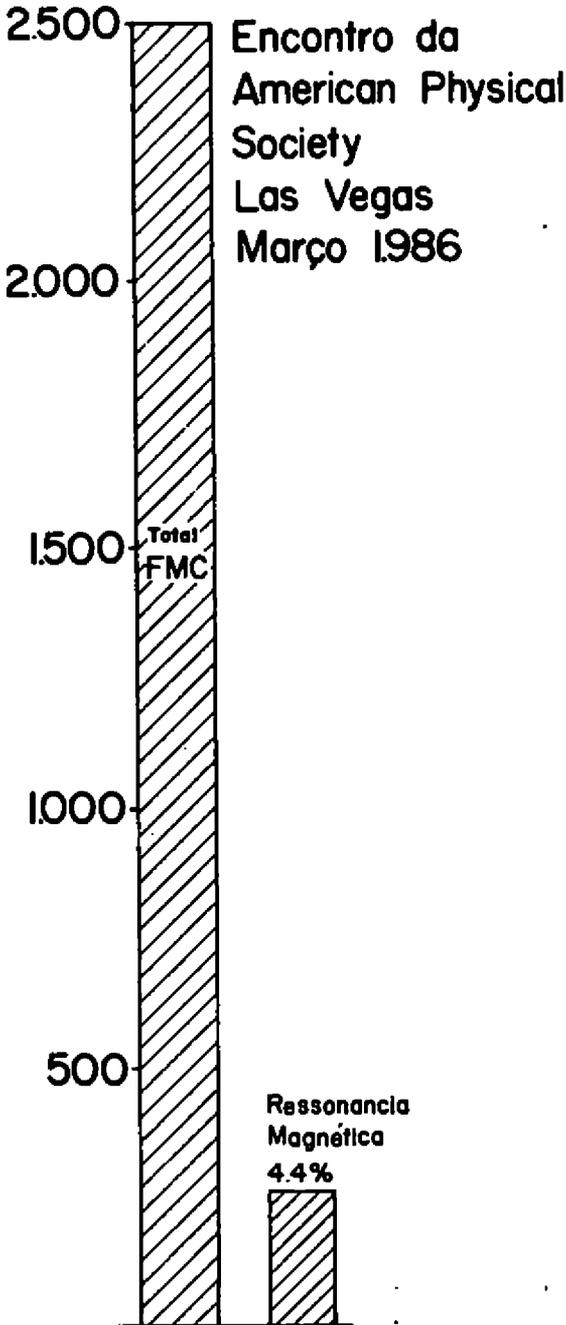
Nas discussões que acompanham nosso relatório escolhemos diversos padrões de referência para efetuar comparações. As razões para cada escolha merecem um breve esclarecimento. No caso do encontro da APS, a escolha foi motivada pelos seguintes fatores: a) o programa deste encontro é muito semelhante ao de Poços de Caldas, incluindo áreas como Física Médica, Biofísica, Físico-Química e outras que nem sempre fazem parte de encontros de FMC. Apesar de que um congresso internacional seria um padrão de comparação talvez mais interessante, estes encontros são geralmente muito mais especializados; b) Os resumos dos trabalhos apresentados são facilmente acessíveis, com relativamente pouco atraso; c) A área de Física nos Estados Unidos costuma responder com bastante rapidez às mudanças provocadas pelas tendências científicas mais modernas, frequentemente antecipando a evolução futura das diferentes técnicas experimentais.

Na figura 2 mostramos o peso relativo das diferentes técnicas que compõem a subárea de Ressonância Magnética, comparando o encontro da APS com o da SBF. Neste gráfico já aparecem diferenças bastante notáveis em relação ao peso relativo da RMN comparado com o da RPE. No âmbito nacional, a ênfase dada à RPE é consideravelmente maior do que a concedida à RMN, enquanto que a situação é a inversa no encontro de referência. Notamos também, a ausência de algumas técnicas experimentais no âmbito nacional.

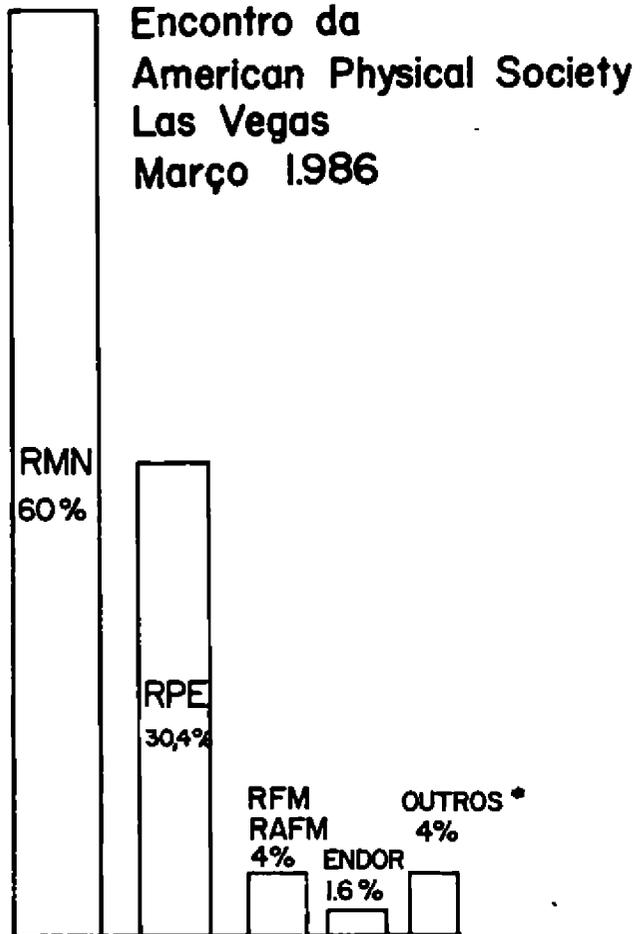
Tendo em vista o objetivo esboçado nesta análise crítica tentamos investigar mais profundamente utilizando outros padrões de comparação. Escolhemos assim, a revista de maior circulação internacional na área de Física da Matéria Condensada, *Physical Review B*, publicada pela American Physical Society. Esta publicação foi escolhida não apenas pela sua popularidade a nível internacional, como também, pelo bom padrão de qualidade dos trabalhos nela publicados. Não obstante estes fatores, outras escolhas poderiam ter sido igualmente aceitáveis como indicadores.

No quadro da Fig. 3 mostramos a porcentagem de trabalhos publicados no *Physical Review B*, na área de Ressonância Magnética relativamente ao total de trabalhos em Física da Matéria Condensada no período de Junho 85 – Maio 86. Para uma comparação com o panorama nacional, também é mostrada a porcentagem de trabalhos na área de Ressonância Magnética no IX ENFMC, de Poços de Caldas de 1986. Encontramos no *Physical Review B* porcentagem quase idêntica à obtida no encontro da APS (figura 1). Tendo em vista que aproximadamente a metade dos trabalhos publicados no *Physical Review B*, na área de Ressonância

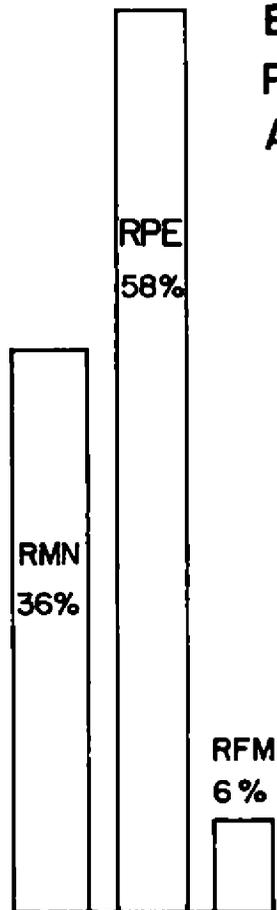
FIGURA 1



Encontro da  
American Physical Society  
Las Vegas  
Março 1.986



Encontro FMC  
Pocos de Calda  
Abril 1.986



↘ Principalmente rotação do spin de muons

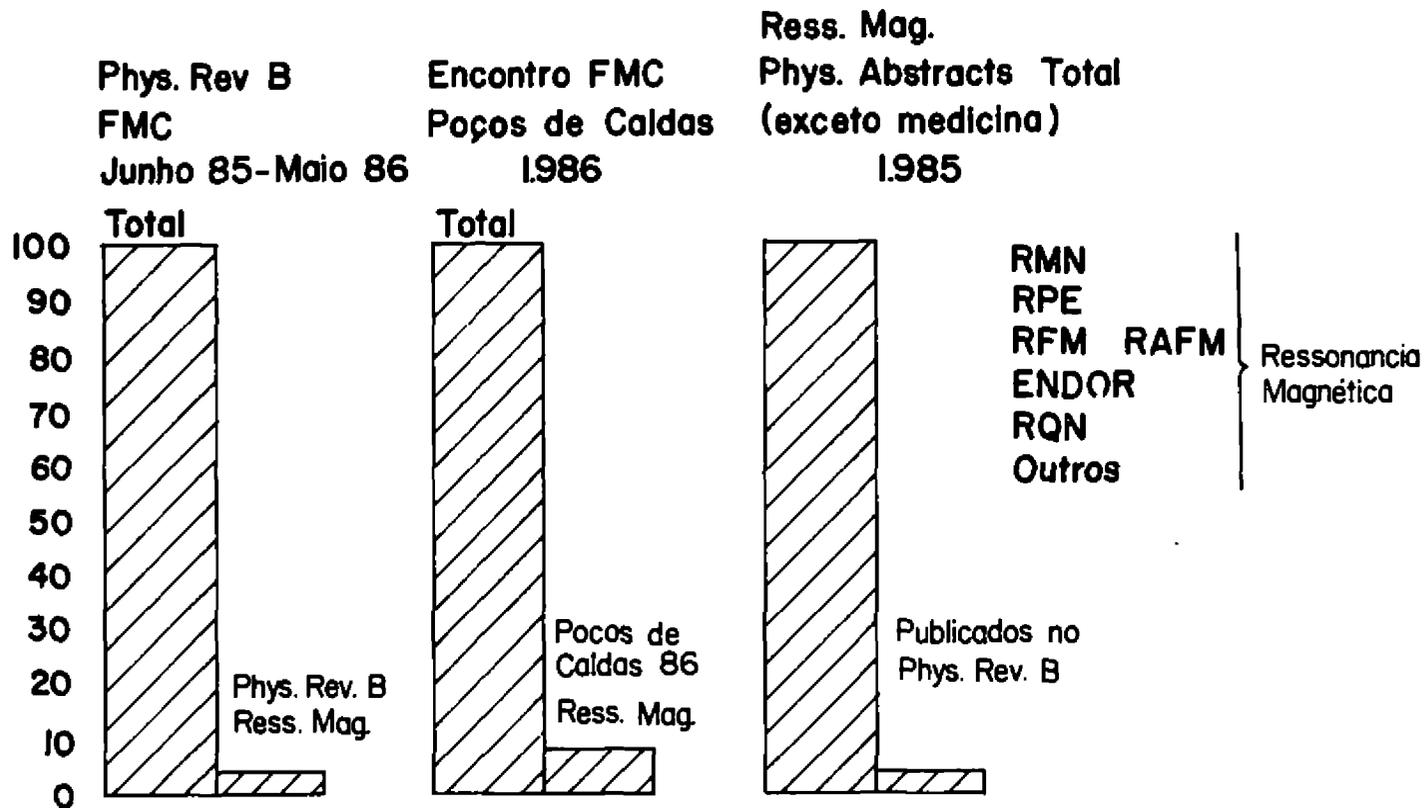
Magnética são oriundos de laboratórios localizados fora dos Estados Unidos, acreditamos que o peso de aproximadamente 5% correspondente à Ressonância Magnética representa de alguma forma uma média ponderada bastante realista. No entanto, o peso de 7.8% no âmbito nacional, se bem que um pouco elevado, não pode ser considerado como uma distorção significativa tendo em vista que esta subárea é das mais antigas entre as existentes no Brasil e que o crescimento de novas áreas de pesquisa vem sendo bastante lento.

orientação de estudantes envolvendo físicos teóricos e experimentais. Em algumas instituições esta interação já está acontecendo e vem dando resultados bastante satisfatórios para ambas as partes. Em outros grupos de pesquisa isto está ainda um pouco longe de acontecer pelos motivos mais diversos, tendo como consequência um certo grau de isolamento. No terreno das aplicações da Ressonância Magnética, a interação com pesquisadores de outras áreas, como também com engenheiros e técnicos, pode produzir resultados altamente estimulantes.

Uma análise do quadro de pesquisadores contratados pelas diversas instituições que vêm realizando trabalhos na subárea de Ressonância Magnética permite concluir que a qualificação dos pesquisadores é boa, e que os membros mais experientes de vários grupos têm atingido uma reputação científica bastante respeitável a nível internacional. Os membros mais jovens, por outro lado, estão encontrando dificuldades muito mais sérias do que seus predecessores para desenvolver trabalhos de pesquisa de forma independente já que não tem havido um aumento gradual na disponibilidade de equipamentos. O trabalho em equipe e a colaboração científica multi-pessoal parece ser a solução mais viável a curto prazo.

A área de Ressonância Magnética é bastante interessante na formação de pessoal com um perfil bem definido. Acreditamos que o programa para a formação de doutores em física nesta área não pode mais se limitar a obter e analisar alguns espectros num equipamento comercial. É verdade que muitas vezes este pode ser o caminho mais frutífero sob o ponto de vista prático, mas não sob o ponto de vista formativo. Uma participação ativa do doutorando em áreas como técnicas de pulsos, técnicas de rádio-freqüência e de microondas, eletrônica analógica e digital, desenvolvimento de "software", processamento de sinais, técnicas de vácuo e criogenia etc., deve dar como resultado um profissional altamente qualificado e versátil, capaz de se adaptar a situações bastante diversas, dentro ou fora da subárea. Vários grupos de pesquisa atualmente existentes no Brasil possuem suficiente maturidade para formar mestres e doutores com as características desejadas e satisfazer uma boa parte das necessidades de recursos humanos na subárea. No entanto a formação de pessoal no exterior não deve ser desestimulada quando a qualidade ou excelência do programa em relação aos das instituições brasileiras for clara. Também deve ser estimulada a interação entre os doutorandos que estão desenvolvendo suas teses no país e pesquisadores com liderança internacional na área, principalmente na fase final do programa.

Um problema da maior importância é o referente a equipamentos e recursos para o desenvolvimento da pesquisa. Os grupos já bem estabelecidos apontam a iminente obsolescência dos equipamentos e a dificuldade de obter peças de reposição como os pontos mais críticos. Os grupos mais novos assinalaram a falta de recursos para equipar os laboratórios como o principal problema. Em ambos os casos, o ponto de estrangulamento parece decorrer da drástica restrição às im-



portações imposta a partir de 1980. É inegável que esta política teve efeitos positivos em várias áreas da atividade produtiva e até em alguns aspectos da atividade científica. No entanto, em relação à pesquisa em geral, houve um efeito muito negativo que pode se tornar catastrófico a longo prazo se a situação persistir.

Em quase todos os laboratórios de pesquisa encontramos equipamentos e infra-estrutura funcionando precariamente por falta de peças de reposição, geralmente importadas. A esperança de substituição por peças encontradas nacional-

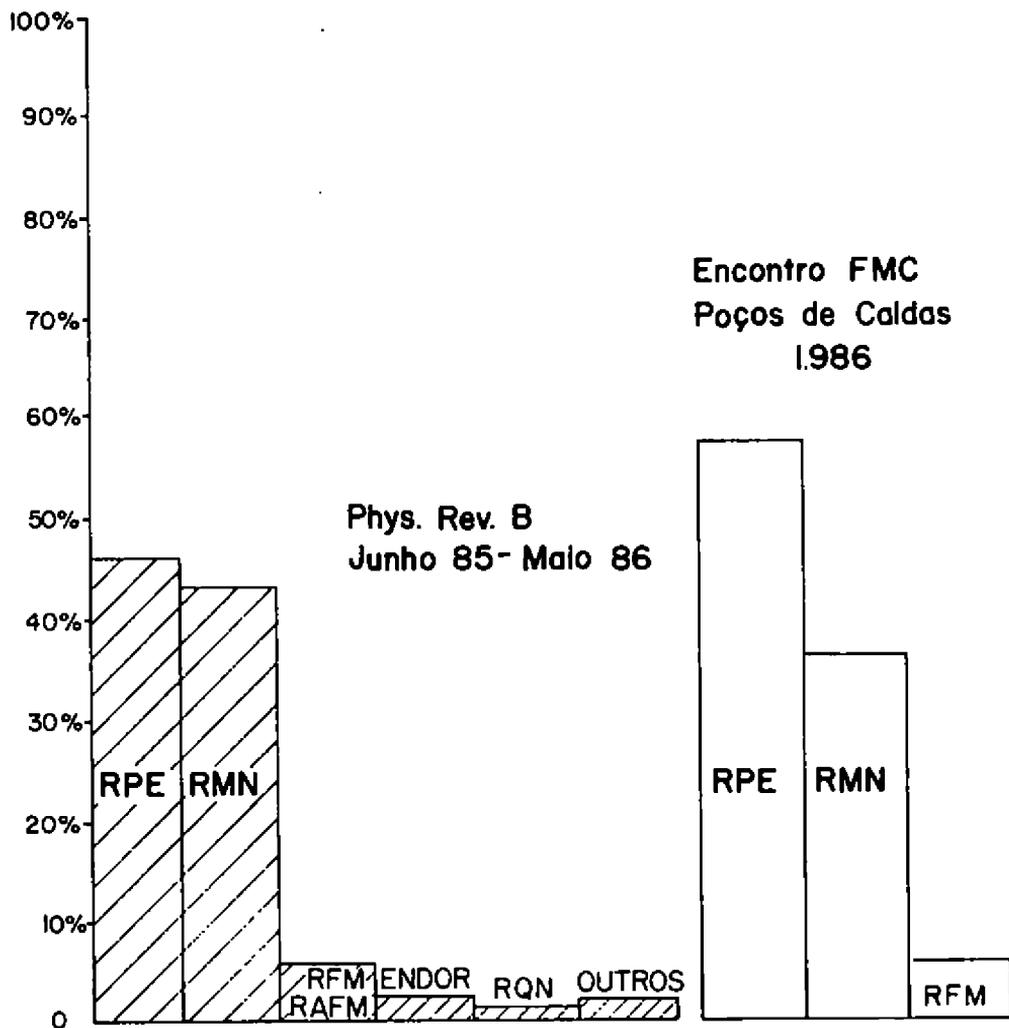
Na terceira coluna da Fig. 3 mostramos um levantamento realizado no Physics Abstracts. Nesta publicação são incluídos resumos de trabalhos que aparecem em quase todas as revistas de circulação significativa em áreas como Química, Física, biologia, Cristalografia, Ciência dos Materiais e outras. O resultado do levantamento mostra que no ano de 1985 apenas uma fração pequena dos trabalhos publicados na área de Ressonância Magnética apareceram no Physical Review. Isto sugere que, a nível internacional, a Ressonância Magnética é principalmente uma técnica de pesquisa interdisciplinar cujos resultados são divulgados principalmente nas diversas publicações mais especializadas, fora da área de Física da Matéria Condensada.

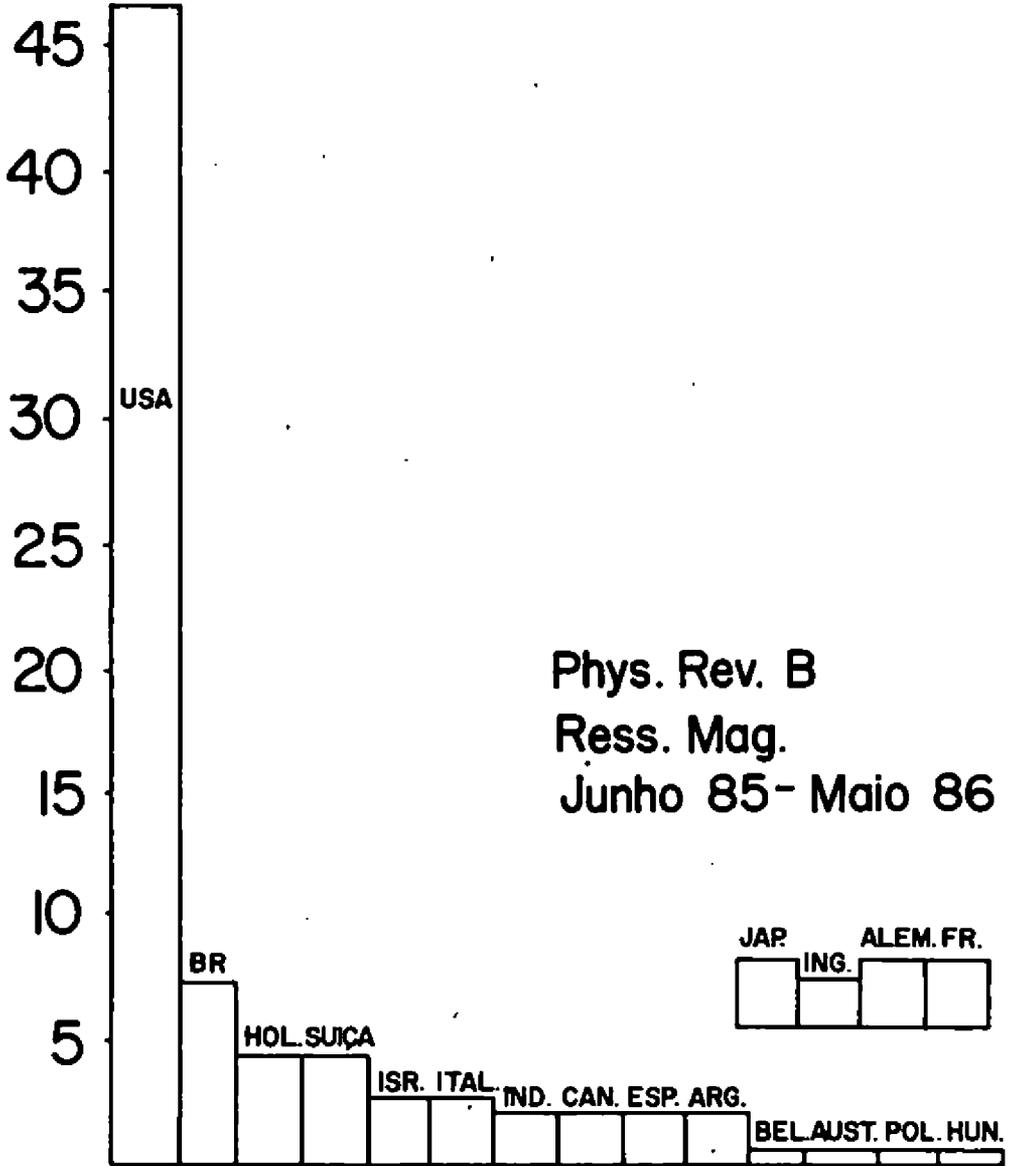
Na figura 4 mostramos as porcentagens de trabalhos de pesquisa nos quais são usadas técnicas de Ressonância Magnética em relação ao total da subárea. Os dados foram obtidos do Physical Review B, entre junho de 1985 e maio de 1986 e dos Resumos do IX Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada de Poços de Caldas (1986). No levantamento do Physical Review observamos que, ao contrário do que mostram os dados da figura 2 levantados no encontro da APS, os pesos relativos da RMN e da RPE são quase idênticos. Ainda existe uma discrepância acentuada em relação ao panorama nacional onde o peso relativo da RPE é bastante maior. Notamos também que algumas técnicas como RQN e ENDOR, de pequeno peso no Physical Review. B, não estão atualmente presentes no âmbito nacional. Por outro lado, os pesos correspondentes à RFM e RAFM são praticamente os mesmos em ambos levantamentos.

Com relação ao volume da produção científica nacional na área de Ressonância Magnética e sua qualidade, as conclusões que podem ser extraídas do levantamento realizado são bastante especulativas. Os trabalhos publicados no Physical Review se enquadram, na média, dentro de um bom padrão de qualidade. Entretanto, muitos autores têm preferência por outras revistas pelos motivos mais diversos. Esta preferência não é uniforme nos diversos países e, portanto, as conclusões tiradas dos dados da Fig. 5 não devem gerar um otimismo exagerado. Os dados mostrados, indicando o número de trabalhos na área de Ressonância Magnética publicados no Physical Review no período de Junho 85 – Maio 86, sugerem um desempenho muito bom do Brasil em relação a outros países nesta área de pesquisa.

Os dados apresentados permitem tirar algumas conclusões em relação às perspectivas e fazer algumas projeções. Entendemos que a evolução da subárea de Ressonância Magnética deve ser orientada no sentido de dar prioridade à modernização, seja no que diz respeito à implantação de novos métodos como no estudo de novos problemas físicos relevantes sob o ponto de vista básico ou aplicado. O crescimento da subárea, entendido como criação de novos grupos, deve ser, em nossa opinião, bastante moderado e principalmente direcionado a corrigir algumas das distorções apontadas, (por exemplo, a ênfase excessiva na técnica de RPE).

FIGURA 4





A modernização da subárea não significa, em nossa opinião, apenas uma renovação de instrumental. A modernização e manutenção dos equipamentos é certamente da maior urgência mas deve ser acompanhada por uma modernização no terreno das idéias. Neste sentido pode ser útil, entre outras iniciativas, estímulo para uma aproximação entre os pesquisadores da subárea e seus colegas com sólida formação teórica na área de Física da Matéria Condensada. A interação pode ser estimulada de diversas maneiras, através de seminários conjuntos ou de mente deve ser freqüentemente abandonada, especialmente quando se trata dos equipamentos mais sofisticados, essenciais para a pesquisa. Mesmo nos casos em que a substituição é possível em princípio, o desempenho nem sempre atinge as características ideais com a conseqüente degradação no funcionamento ou na qualidade dos resultados. A comunidade científica que, como poucas outras, valoriza a qualidade do seu trabalho, sente um profundo mal-estar por esta situação e pela lentidão e indiferença com que estes problemas são tratados pelos órgãos competentes.

# Física da Matéria Condensada

## ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER

### DESCRIÇÃO

Sabe-se que tanto o átomo quanto o núcleo, sofrem um recuo ao emitir (ou absorver) um fóton. Tal fato implica que a absorção ressonante nuclear é, via de regra, extremamente difícil de ocorrer. Entretanto, Rudolf Mössbauer descobriu, em 1957, que em certos casos especiais ela é facilmente observada. Para isso é conveniente que a energia de transição seja inferior a 100 KeV e que o núcleo esteja preso a uma estrutura cristalina.

Em poucas palavras, Mössbauer descobriu que para alguns núcleos, existe uma probabilidade de emissão sem recuo. Nesses casos o fóton será emitido com a energia de transição do estado nuclear, e a absorção ressonante nuclear ocorrerá facilmente.

A descoberta de Mössbauer causou enorme impacto na comunidade científica internacional, e imediatamente transformou-se numa potente técnica de análise, hoje denominada espectroscopia Mössbauer. Para se ter uma idéia do interesse despertado pelo fenômeno e pela técnica, basta lembrar que já em 1961 haviam sido publicados 17 artigos de revisão, 130 artigos de pesquisa e 1 livro (Frauenfelder). Também já haviam se realizado duas conferências internacionais (Illinois, 1960 e Paris, 1961).

A realização prática da técnica consiste essencialmente numa fonte com núcleos excitados emitindo raios- $\gamma$ , os quais serão ressonantemente absorvidos por núcleos idênticos contidos na amostra (absorvedor). A detecção dos fótons emergentes do absorvedor permitirá a investigação das interações hiperfinas (deslocamento isomérico, desdobramento quadrupolar e desdobramento magnético) ali existentes, as quais poderão fornecer informações sobre a natureza química, estrutura cristalográfica e ordenamento magnético de amostras contendo isótopos Mössbauer (Fe, Sn, En, Nd, Sm, Gd, entre outros).

As possibilidades de aplicação da espectroscopia Mössbauer são tão numerosas que seria impossível detalhá-las aqui. Apresentaremos tão somente uma visão geral e superficial.

Na área do Magnetismo é possível o estudo da temperatura e tipo de ordenamento magnético; transições de fase; determinação da distribuição de sítios, etc. Na área de Química, o deslocamento isomérico e o desdobramento quadrupolar têm sido bastante usados para se estudar estados de oxidação; ligações químicas; estrutura eletrônica, etc. Na área de Biofísica os estudos têm se concentrado nas proteínas que contém ferro, tais como hemoglobina e mioglobina.

Metalurgia Física é outra área de inúmeras aplicações da E.M. São encontrados na literatura trabalhos sobre distribuição atômica em soluções sólidas; efeitos de diversos tipos de tratamentos térmicos; transformações martensíticas; oxidação; difusão e defeitos cristalinos. Com o uso da espectroscopia Mössbauer de elétrons de conversão, as aplicações à Metalurgia Física tornaram-se mais numerosas, sendo possível analisar superfícies de metais ferrosos submetidos a diversos processos de corrosão, desgaste, fadiga, etc. Com essa técnica também tornou-se possível analisar amostras implantadas com diversos tipos de íons.

Finalmente, destacam-se as aplicações à Mineralogia, tais como análise química; estudos de granulação; propriedades magnéticas de rochas; determinação da relação  $Fe^{+2} / Fe^{+3}$ ; evolução térmica do sistema solar, etc.

## BREVE HISTÓRICO

Três anos após a publicação do artigo de Mössbauer, relatando sua descoberta, iniciava-se no CBPF a instalação do primeiro laboratório brasileiro de espectroscopia Mössbauer. É importante destacar aqui as enormes e naturais dificuldades técnicas daquele empreendimento, enfim superadas com engenhosidade e perspicácia. Quem hoje trabalha na área, com analisador multicanal e transdutor comercial, pode imaginar o que representa obter espectros com um analisador monocanal e um transdutor de velocidade consistindo de um pistão que se movimentava pela pressão de um fluxo de óleo vindo de uma jarra colocada a uma certa altura. Eram necessárias três pessoas para operar o espectrômetro: uma abria o óleo, outra anotava as medidas do monocanal, e a terceira media a velocidade da fonte.

A despeito da precariedade experimental, vários compostos de ferro foram estudados e o grupo do CBPF adquiriu respeito internacional. Já por volta de 1963, este grupo inicia a construção de um transdutor de aceleração constante, a partir do acoplamento de dois alto-falantes, concepção até hoje adotada nos transdutores comerciais.

Um aspecto relevante na implantação e consolidação dos laboratórios de espectroscopia Mössbauer no Brasil, refere-se ao esforço de desenvolvimento instrumental. Além da economia de recursos financeiros, tais iniciativas têm contribuído significativamente para a formação de pessoal técnico qualificado. Isso é muito claro não apenas no caso do CBPF, como também nos grupos que se seguiram.

Assim, o grupo da UFRGS tem início por volta de 1965 já com forte tendência ao desenvolvimento instrumental, como resultado da experiência acumulada pelo grupo de correlação angular do qual emergiram os primeiros compo-

**QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL**

INSTITUIÇÃO	LINHAS DE PESQUISA	INÍCIO	DOCTORES	MESTRES	ESTUDANTES		TESSES DEFENDIDAS	
					DOCTORADO	MESTRADO	DOCTORADO	MESTRADO
CBPF	Ligas bimetálicas envolvendo Sn, Fe, Eu Moléculas isoladas em matrizes de gás congelados a 5K Meteoritos Ordenamento de ligas Fe-Ni (condensação de vapor e irradiação com elétrons) Minerais de ferro Folhos finos semicondutores com impurezas de Fe e Sn Processo de degradação de tintas utilizadas em manuscritos antigos.	1961	4	1	1	2	12	10
UFMG	Bolhas de H <sub>2</sub> em metais e aços Oxidação interna de metais e ligas Ordem-desordem em ligas Fe, Ni e Pd <sub>3</sub> Fe Hidretos de ligas ordenadas e amorfas Implantação de C <sup>+</sup> em aços Sistema X <sub>2</sub> Fe <sub>14</sub> B (X: Terra rara) Minérios, meteoritos.	1966	7	3	4	-	8	11
UFMG	Propriedades eletrônicas, estruturais e magnéticas de ligas metálicas Minerais e solos Propriedades de aços boreados	1968	3	3	2	2	2	12

## QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL (Continuação)

INSTITUIÇÃO	LINHAS DE PESQUISA	INÍCIO	DOCTORES	MESTRES	ESTUDANTES		TESES DEFENDIDAS	
					DOCTORADO	MESTRADO	DOCTORADO	MESTRADO
UNB	Propriedades magnéticas de sistemas de pequenas partículas	1970	2	1	-	-	-	10
UFRJ	Magnetismo em espinéis $\text{LiFe}_{5-x}\text{A}_x\text{O}_8$ (A:Al, Ga) Magnetismo em ortoferritas $\text{AFe}_{1-x}\text{B}_x\text{O}_2$ (A:Li, Na, K e B:Al, Ga) Fosfatos com substituições de Mn Sistemas Ba, Fe, S.	1972	4	1	1	2	-	8
UFCE	Complexos pentacianoferratos Ferritas Oxidação do ferro e a evolução do sistema solar	1977	5	1	-	2	-	6
USP	Partículas ultrafinas de óxidos de ferro Ligas Fe-Ni Materiais amorfos Transições de fase	1979	2	-	1	-	-	3
UFES	Dinâmica de rede em compostos de ferro Minerais	1981	2	-	-	-	-	-
UFRN	Minerais Metais e ligas nitretadas Tantalita-Columbita (natural e sintética)	1987	1	1	-	-	-	-

mentes do laboratório Mössbauer. No início dos anos 70, é construído na UFRGS um transdutor eletromecânico de velocidade, e um sistema de aquisição de dados a partir de um pequeno computador PDP-11/05. A partir de 1980 tem início ali a construção de analisadores multicanal baseados em micro-processadores. Ao lado desses equipamentos, a equipe técnica da UFRGS tem construído pré-amplificadores e fontes de alta tensão, e adquirido experiência na manutenção de equipamentos comerciais.

Outro grupo que tem investido no desenvolvimento instrumental é o da UFMG, instalado por volta de 1968. Além de um transdutor de velocidade e de um sistema de aquisição de dados, destaca-se nesse grupo a iniciativa de construir um detector de elétrons para realização da espectroscopia Mössbauer de elétrons de conversão, técnica esta introduzida no país pelo grupo da UFRGS.

Enfim, excetuando-se os grupos da UFES (1981), da USP (1979) e da UFRN (1987), todos os outros UNB (1970), UFRJ (1972), UFC (1977) e os já mencionados, desenvolveram, em maior ou menor grau, algum tipo de equipamento. O sentimento geral da comunidade é de que já é possível construir um espectrômetro com tecnologia nacional.

No que se refere à evolução histórica das linhas de pesquisa, podemos dizer que os pesquisadores da área têm investido nas mais diversas possibilidades de aplicação da técnica. Assim, de um modo geral, os diversos grupos implantados no país iniciaram suas atividades dando prioridade aos estudos de compostos orgânicos e inorgânicos, ligas metálicas e minerais ferrosos, incluindo-se aqui os meteoritos. A seguir serão apresentadas as linhas de pesquisa atuais.

## ANÁLISE E PERSPECTIVAS

De acordo com os dados apresentados na Seção 3, existem no país 22 espectrômetros Mössbauer, com um investimento estimado, relativos aos preços atuais, da ordem de US\$ 500.000,00. Relativamente às dimensões físicas da base instalada, e às amplas possibilidades de aplicação, quer em estudos básicos, quer em pesquisa aplicada, o investimento é sensivelmente inferior às outras técnicas de análise. Ao lado desse aspecto financeiro, é interessante questionar o tipo de utilização desses equipamentos e analisar as perspectivas para o futuro próximo.

Na Figura 1 são apresentados valores percentuais relativos aos trabalhos apresentados nos cinco Encontros Nacionais de Espectroscopia Mössbauer (ENEM), no IX e X Encontro Nacional de Física da Matéria Condensada (ENFMC) e na "International Conference on the Applications of the Mössbauer Effect" (ICAME), realizada em Leuven (Bélgica), em 1985. Embora superficialmente, esses dados permitem-nos estimar o envolvimento dos pesquisadores nacionais nas várias áreas de aplicação, bem como estabelecer uma comparação com a comunidade internacional.

A escolha das áreas de aplicação foi inspirada no ENFMC. Essa definição não é trivial, há vários trabalhos que tanto podem pertencer a uma área, quanto a outra. Em particular, enquanto no ENEM há uma seção para estudos de minérios, no ENFMC esses trabalhos podem ser apresentados em Magnetismo, Metais e Ligas e Ciências dos Materiais. Foi feito um esforço para separar esses trabalhos, a fim de compatibilizar as estruturas dos eventos considerados. Além disso, na seção Metais e Ligas foram incluídos os trabalhos de Ciência dos Materiais do

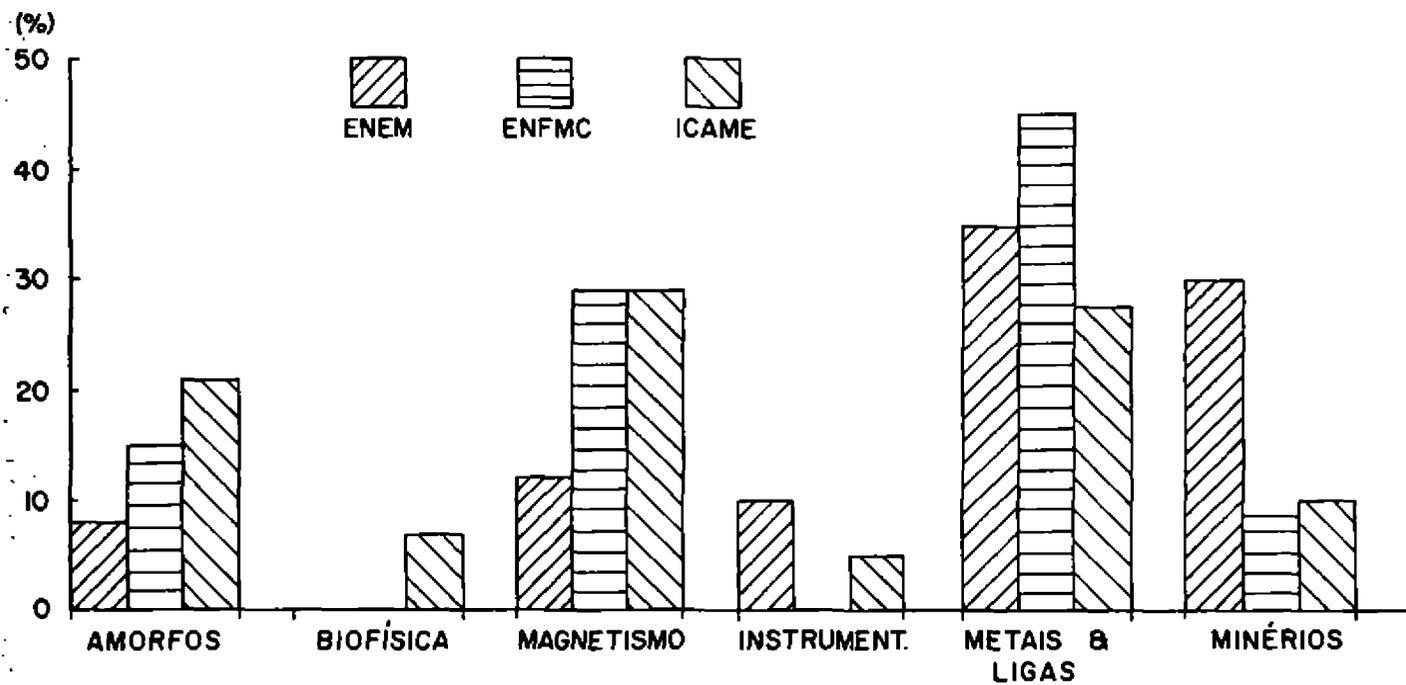


FIGURA 1

ENFMC. Os percentuais são relativos ao total de trabalho das seis áreas consideradas, em cada evento. Portanto, a figura reflete a distribuição de trabalhos por área e por evento.

Dois fatos destacam-se na figura 1. O primeiro é a absoluta falta de trabalhos dos pesquisadores nacionais na área de Biofísica, contrastando com a comunidade internacional (aproximadamente 7% dos trabalhos apresentados no ICAME estão nessa área). O segundo destaque refere-se à ausência de trabalhos sobre instrumentação nos dois últimos ENFMC.

Outra diferença entre a participação da comunidade nacional no ENEM e no ENFMC e a comunidade internacional, refere-se aos trabalhos com minérios. Aproximadamente 30% dos trabalhos apresentados nos ENEM pertencem a essa área, enquanto essa proporção cai para aproximadamente 10% nos ENFMC e ICAME.

Claramente, o tipo de participação da comunidade nos encontros nacionais é diferenciado. Talvez isso possa ser explicado a partir do fato de que no ENFMC não há uma seção sobre minérios. Aparentemente, esses trabalhos são reservados para o ENEM.

A figura sugere perspectivas de estudos. Por exemplo, uma área completamente em aberto é a de Biofísica. Nesse sentido, poderia ser proveitoso um intercâmbio com pesquisadores de Ressonância Magnética, bastante ativos nessa área.

A figura também sugere, e os Anais do IX e X ENFMC confirmam, que o pessoal de Espectroscopia Mössbauer poderia aumentar consideravelmente sua participação nas áreas de materiais amorfos e magnetismo, onde existem estudos teóricos e experimentais (com outras técnicas) em diversos sistemas adequados à E.M.

Um fato que necessita maior reflexão refere-se aos trabalhos sobre Instrumentação. É difícil de entender, por exemplo, a inexistência deles nos ENFMC (IX e X). Também deve ficar claro que a natureza desses trabalhos no País deve necessariamente ser diferente daqueles desenvolvidos no exterior. Apesar de que a experiência acumulada nos nossos laboratórios permite, em princípio, desenvolver um espectrômetro nacional, a transferência desse conhecimento para a indústria ainda não foi possível, conseqüência talvez do incipiente mercado consumidor. Nesse sentido, talvez uma parcela considerável dos trabalhos sobre Instrumentação deva ser simples transferência de tecnologia. Com o provável aumento das aplicações da E.M., o desenvolvimento de tecnologia nacional será de fundamental importância. Por causa disso, é possível justificar que a participação relativa dos trabalhos de Instrumentação nos ENEM seja o dobro do ICAME. Não apenas isso, mas também que essa diferença venha a aumentar.

Finalmente, cabe destacar o importante papel formativo que poderá ser desempenhado pela E.M. Pelo seu relativo baixo custo e simplicidade operacional, a técnica poderá também ser usada com grande proveito na iniciação científica de estudantes de graduação, bem como na formação de pessoal qualificado ao nível de mestrado. O envolvimento num laboratório Mössbauer permite o aperfeiçoamento de pessoal em técnicas de vácuo, Criogenia, instrumentação eletrônica, técnicas nucleares, proteção radiológica, tratamento numérico de dados (programas de ajuste), etc. Esse fato aponta para a necessidade de expansão da base instalada, bem como para o desenvolvimento instrumental, já discutido.

# Física da Matéria Condensada

## BIOFÍSICA E FÍSICA MÉDICA

### DESCRIÇÃO

A área de Biofísica e Física Médica se caracteriza especialmente como área interdisciplinar da ciência. A Biofísica envolve a Física da Matéria Condensada, a Bioquímica, a Biologia Molecular e aspectos da Físico-Química, Bio-Inorgânica, Química de Coordenação, etc. A Física Médica envolve a Física das Radiações, aspectos mais gerais da Física como Mecânica, Óptica, Sons e, modernamente, Teoria de Imagens, Ressonância Magnética Nuclear Pulsada, Biomagnetismo, Ação de Lasers em sistemas vivos, ultra-som, etc.

Enquanto a Biofísica se caracteriza mais como ciência básica, investigando problemas do tipo estrutura e função de biomoléculas como proteínas, enzimas e membranas, a Física Médica tem características mais aplicadas, investigando, por exemplo, efeitos de radiação e seu uso terapêutico e diagnóstico em sistemas vivos, como órgãos e partes orgânicas. Aqui vale mencionar as conquistas recentes da técnica de imagem por RMN que tem aberto caminho à investigação em processos fisiológicos não invasivos nos sistemas vivos.

As atividades da Biofísica no Brasil, desenvolvidas por físicos, dentro de departamentos de Física com tradição em pesquisas nas Universidades e Centros, se concentram nas seguintes linhas de pesquisas:

1. Biofísica de pigmentação celular
2. Biofísica de hemoproteínas e conformação de proteínas
3. Microorganismos magnetotáticos
4. Cálculos moleculares em sistemas biológicos
5. Biofísica de membranas artificiais e naturais
6. Física de complexos metálicos como modelos em sistemas biológicos
7. Marcadores de spin em sistemas biomoleculares
8. Instrumentação física e espectroscópica aplicada à biofísica molecular
9. Transferência de elétrons em biomoléculas

10. Danos de radiação em biomoléculas e em pequenas moléculas de interesse biológico  
As atividades da Física Médica no Brasil também desenvolvidas por Físicos, se concentram nas seguintes linhas de pesquisas:
11. Instrumentação em magneto-cardiografia
12. Efeitos físicos de biomateriais
13. Geração de imagens por Ressonância Magnética Nuclear e Aplicações Biomédicas
14. Processamento de imagens com aplicações biomédicas
15. Dosimetria de radiação por termoluminescência e câmaras de ionização.
16. Dosimetria de radiação por elétrons, fotoacústica e piezoeletricidade.
17. Datação de fósseis por métodos de termoluminescência
18. Datação de fósseis por métodos de ressonância paramagnética eletrônica.
19. Aplicação de laser à medicina

Dentro do contexto da Ciência é interessante "transcrever" aqui o comentário feito no *Physics Through The 1990's* (National Academy Press, Washington D.C. 1986) no volume "Scientific Interfaces and Technological Applications - Summary and Recommendations" pg. 6 parágrafo 3: "Pode-se dizer que a Física avançou a um nível no qual pode começar a investir na tentativa de solucionar a complexidade dos fundamentos da ciência biológica em dois níveis: o molecular e o supra-molecular. "Organizações institucionais, tanto educacionais como de recursos para a Física em Biologia (Biofísica moderna), algumas vezes parecem impedir o progresso nesta interface tão frutífera. Poucos departamentos de Física em Universidades acomodam Biofísica. A Biofísica é mais incorporada em muitos programas de pesquisa em ciências biológicas, mas a fertilização cruzada entre a Física moderna e a Biologia não parece estar adequadamente considerada. Como conseqüência recomenda-se "a criação de um fundo especial para interação interdisciplinar efetiva, como ocorreu em ciências dos materiais há 20 anos atrás", nos EUA.

## BREVE HISTÓRICO

Antes de iniciarmos o histórico da Biofísica no Brasil, cabe aqui esclarecer que estaremos relatando sobre a Biofísica desenvolvida por físicos utilizando-se os conceitos e técnicas da física moderna, diferenciando-se, portanto, da Biofísica Clássica desenvolvida por médicos e que hoje se identifica muito mais com a fisiologia do que com a Biofísica Molecular.

A Biofísica Molecular começa no Brasil nos anos 1968-71, na USP em São Paulo, com Shiguo Watanabe, na USP em São Carlos, com Sergio Mascarenhas e na PUC do Rio de Janeiro com George Bemski, como professor visitante apoiado por Sergio C.L. Costa Ribeiro. No início foram formados estudantes nos três centros, sendo mais profícuo, inicialmente, na formação de físicos em Biofísica, o Departamento de Física da PUC - Rio de Janeiro, onde o primeiro doutoramento foi conseguido em março de 1976. O crescimento dos grupos foi lento e concentrado na utilização da técnica de Ressonância Paramagnética Eletrônica (RPE) em hemoproteínas. A partir de 1980, novos grupos ligados aos departamentos de Física iniciaram suas atividades em Biofísica, havendo hoje dez grupos, com um total de 34 doutores e 11 mestres contratados.

Pelo ano de 1980 começam atividades de físicos ligados aos departamentos de Física no campo da Medicina e em Instrumentação moderna. Trabalham no desenvolvimento de detectores de radiação o grupo Shiguo Watanabe, que é o grupo mais antigo na área, em imagens por Ressonância Magnética Nuclear pul-sada os grupos de H. Panepucci (USP – São Carlos) e Mario Engelsberg (UFPE-Recife), em magneto-cardiografia o de Paulo Costa Ribeiro (PUC-RJ) e em aplicação de Lasers em medicina o de Jorge Nicola (UNICAMP).

Este levantamento não está catalogando grupos de físicos que mantêm alguma linha da Biofísica dentro dos seus inúmeros trabalhos, como, por exemplo, a cristalografia com seus estudos de estrutura de micelas ou membranas com técnicas de espalhamento de raios-x, indivíduos que trabalham isoladamente (por exemplo, nos departamentos de Química). Também não inclui o Instituto de Radio-Proteção e Dosimetria (IRD) ligado a CNEN que representa um capítulo a parte pelo seu tamanho e número de físicos envolvidos. Em geral, a Dosimetria e Raio-Proteção representam um forte mercado de trabalho (fora das Universidades) no Brasil, com cerca de 250 físicos empregados.

Os investimentos e gastos dos grupos existentes são ainda bem pequenos, já que em grande parte os grupos ainda usam equipamentos comprados para outros fins. Por exemplo, os espectrômetros de RPE (PUC, CBPF, USP) foram comprados para Física de Sólidos.

Os grupos de *Biofísica molecular* tiveram grandes dificuldades iniciais de aceitação nos Departamentos de Física.

## ANÁLISE E PERSPECTIVAS

Devido a dificuldades experimentais e, como conseqüência da origem dos grupos de Biofísica no Brasil, as linhas de trabalhos se concentraram basicamente no uso da técnica de RPE em Hemoproteínas e ainda hoje a maioria dos trabalhos utilizam esta técnica. Nestes últimos anos já começam a aparecer trabalhos em sistemas bio-moleculares mais diversos utilizando-se outras técnicas.

A falta de recursos e as dificuldades experimentais no Brasil têm como efeito o congelamento das linhas experimentais, — as linhas antigas continuam novas, e as novas levam muito tempo para se iniciarem. Como conseqüência, isso traz um maior distanciamento entre as linhas de pesquisas experimentais fora e dentro do País e uma possibilidade sempre latente de um desenvolvimento desproporcionado de áreas teóricas comparado com as experimentais, como ocorreu em outras áreas da Física.

Falta uma maior movimentação de pessoal experimental, treinado aqui para a realização de pós-doutorado fora, implicando uma limitação na criação de novas linhas de pesquisa na área.

Não existe ainda um entrosamento suficiente entre os físicos da Biofísica e os bioquímicos. Idealmente esta cooperação, indispensável para um desenvolvimento cada vez mais sofisticado, exige a existência de bioquímicos em laboratórios onde trabalham biofísicos. O progresso neste sentido é lento, já que faltam fundos e pessoas contratadas com este fim. Ao mesmo tempo existe um progresso razoável em contatos entre grupos como São Carlos-Ribeirão Preto, São Carlos – São José do Rio Preto, CBPF-PUC, São Paulo – CBPF. É necessário investir em intercâmbio mais eficaz e mais durável com programas conjuntos de trabalho. Sente-se que há uma grande necessidade de formação e absorção de pessoal

QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO ATUAL 1963 - 1986

GRUPO/INST.	LINHAS DE + PESQUISA	INICIO DE ATIVIDADES	Nº DR.	Nº MSc	ESTUD. DR.	ESTUD. Msc	Nº TESES DR. Compl.	Nº TESES MSc Compl.	Nº ARTIGOS	INVESTIMENTO GLOBAL (US\$)
Instituto de Física-USP	1, 8, 13, 14	1962	3	1	1	3	1	-	7	- 10 000
Instituto de Física-USP	13, 15, 17	1968	5	1	3	13	11	28	9	- 100 000
PUC-RJ	2,5,7,11,13	1971	2	-	1	2	3	7	10	- 30 000
C.B.P.F.	2,3,4,5,7,18	1978	7	-	7	6	3	2	23	- 10 000
USP-Ribeirão Preto	2,5,6,10,13, 15,18	1978	5	3	-	5	-	-	7	?
USP-S. Carlos	2,4,5,6,7,8, 9,14,15,16,18	1968	4	1	10	5	4	9	24	- 100 000
USP-S. Carlos	12,13	1981	3	-	3	5	-	2	?	- 100 000
Un. Julio de Mesquita Fº - São José de Rio Preto	2	1982	2	4	-	-	-	-	2	- 15 000
UFPE-Racão	12,13	1982	3	1	-	1	-	1	-	- 10 000*
UNICAMP	8,9	1979	2	-	2	2	-	1	4	- 0
IRD-Rio de Janeiro	15,10	1960	8	40	-	-	4	73	-	

Δ - Investimentos no equipamento adquirido para Biofísica.

\* - Nos próximos 2 anos Cr\$ 1,5.10<sup>6</sup> + US\$ 130 000

† - De número ministerial com as correlações na Decisão n. 2061

com treinamento no exterior para o fortalecimento da área nos grupos já existentes, especialmente na PUC-RJ, na USP – São Carlos e na USP – São Paulo que são os grupos com menor número de pesquisadores.

Há uma grande necessidade de investimentos de maior vulto, na aquisição de equipamentos sofisticados, para estudos de dinâmica de bio-moléculas, transferência de elétrons e de energia em processos rápidos de grande importância nos sistemas moleculares vitais. Só para dar um exemplo, a não existência destes recursos não permitiu até agora aqui no Brasil a investigação de processos rápidos que ocorrem a nível molecular no fenômeno de fotossíntese.

O crescimento mais acentuado nos investimentos está ocorrendo, neste momento, na área de Física em Medicina, especialmente no desenvolvimento da linha de Imagens por RMN.

É importante dizer ainda que linhas de pesquisa de problemas em Biofísica existem na área de Cristalografia e também como trabalhos de pesquisadores isolados em departamentos de Química ou Bioquímica.

Como o progresso dos grupos de Biofísica e Física Médica têm sido lento por falta de recursos e por dificuldades na absorção do pessoal formado a perspectiva de crescimento e estabelecimento com a massa crítica necessária para uma produção científica e continuidade dos grupos não é das melhores. Por exemplo, dos doutores que têm sido formados por São Carlos na área, um está na Indústria, dois na EMBRAPA, e dois estão em atividades acadêmicas em Universidades e pesquisando na área. Como a área está em fase ainda de abertura de espaço dentro da Física, esta dispersão de pesquisadores formados impede uma expansão mais rápida.

Há, portanto, uma necessidade urgente de contratação de pesquisadores junto aos grupos existentes e investimento especialmente voltado para a implantação de novas linhas de pesquisa, intercâmbio nacional e internacional para a consolidação da área.

Devem ser fortalecidos com pessoal os grupos da PUC-RJ, da USP – São Paulo e da USP – São Carlos (são os grupos com menor número de doutores). Todos os grupos precisam de recursos para aquisição de equipamentos, como sistema de fluorescência para pesquisas em membranas e proteínas, flash-fotólise, pelo menos até nano-segundos, para pesquisas em processos biológicos rápidos, espalhamento correlacionado de luz para medidas de tamanho e forma de agregados bio-moleculares como lipossomos, DNA e RNA e agregados proteicos. Também é necessário que cada grupo tenha a possibilidade de contratar um pesquisador em nível de doutor na área de Bioquímica.

Na USP – Ribeirão Preto está sendo iniciado um programa de pós-graduação em nível de mestrado em Física Aplicada à Medicina e Biologia, que precisa ser apoiado, pois é o primeiro no Brasil com as características voltadas à visão moderna interdisciplinar e que está inserido dentro de um campus com características bio-médicas.

No quadro resumo apresentado, na coluna investimento, vê-se que até agora o investimento global na área de Biofísica e Física Médica nestes 16 anos de história foi de US\$ 375 000, o que é realmente pouco. Para que a área possa se desenvolver e consolidar-se no Brasil é necessário que pelo menos o mesmo valor possa ser aplicado em equipamentos por ano durante pelo menos os três primeiros anos.

Com relação a recursos humanos, seria necessário que fossem formados a nível de doutor e absorvidos nos diferentes grupos pelo menos 4 doutores por ano durante os 5 primeiros anos. Isto implicaria um aumento médio de 2 pesquisadores por grupo nos cinco primeiros anos, o que nos parece o mínimo necessário facilmente realizável, excluindo um doutor em bioquímica por grupo.

# Física da Matéria Condensada

## DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

### FÍSICA ATÔMICA E MOLECULAR

*Instituto Tecnológico de Aeronáutica – Departamento de Física*

Abel Rosato, Carlos Speller, Marco Aurélio Lima, Fernando Ornellas, Orville Day Jr.

4 doutores (2 teóricos e 2 experimentais)

Propriedades eletrônicas de átomos e moléculas (teoria); Espectroscopia Raman (experimental); Espectroscopia de massa (experimental)

*Pontifícia Universidade Católica – RJ (experimental) – Departamento de Física*

Alceu G. Pinho Filho

8 doutores

Colisões atômicas e moleculares (experimental), início em 1985

*Pontifícia Universidade Católica – RJ (teoria) – Departamento de Física*

Humberto Brandi

4 doutores

Átomos em campos eletromagnéticos externos; estrutura eletrônica de polímeros e sistemas unidimensionais; Óptica quântica e não linear – início em 1971

*Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Química Fundamental*

Alfredo Simas

Química quântica computacional

Início em 1986

Oscar Malta, Arnóbio Gama, Ricardo Ferreira, Gilberto Sá, Antônio C. Pavão,  
Mozart N. Ramos, Benício Ramos.

**Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Física**

Celso P. de Melo, Luiz Carlos Gomide, Marcelo A. F. Gomes

Estrutura eletrônica (teoria)

Início em 1980

Sérvio Canuto

Estados Excitados Moleculares Teoria da Muitos Corpos

Início em 1980

José Roberto Rios Leite

Espectroscopia molecular (óptica)

Início em 1977

**Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**

Carlton Taft, Diana Guinzburguer, Mario Giambiagi, Myriam S. Giambiagi

Estrutura eletrônica de átomos, moléculas e sólidos (teoria)

**Universidade Federal da São Carlos – Departamento da Química**

Elson Longo, Fulvia Itamata, José Carlos Nogueira, Lee Mu-tao, Alberto Senna-  
peschi, Ione Iga

4 doutores (3 teóricos e 1 experimental)

Química teórica aplicada

Início 1972

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Física**

Flavio Horovitz

3 doutores (2 experimentais e 1 teórico)

Óptica de filmes finos; lasers (experimental)

Início em 1973

**Universidade Federal do Rio de Janeiro – Instituto de Química**

G. Gerson de Souza

3 doutores

Impacto de elétrons; espectroscopia UVV e Raios-X (experimental)

Início em 1978

Marco A. Chaer Nascimento

Estrutura Eletrônica de Moléculas

**Universidade Federal de Minas Gerais – Instituto de Química**

Heloisa Schor, Saul Tachieri

2 doutores

**Química quântica teórica**  
Início em 1978

**Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Física**

Jason Gallas  
2 doutores teóricos  
Átomos e moléculas em campos intensos  
Óptica quântica  
Início em 1979

**Universidade de Brasília – Departamento de Física**

J. David M. Vianna, Nestor Correia, Antônio Carlos Pedrosa  
4 doutores teóricos  
Física atômica e molecular teórica  
Início em 1973

**Universidade de São Paulo – Instituto de Física**

José Roberto Leite  
5 doutores teóricos  
Estrutura eletrônica de moléculas  
Início em 1977

**Universidade Federal de Goiás – Departamento de Física**

Orlando Amaral  
Estrutura eletrônica de moléculas  
Início em 1984

**Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Química**

Yuji Takahata  
Química quântica teórica  
Início em 1978

**Universidade Federal da Bahia – Departamento de Física**

Luiz Malbouisson  
1 doutor teórico e 1 experimental  
Estrutura eletrônica; reações catalíticas  
Início em 1986

**Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Física**

Luiz Eugênio Machado, Emerson Pires Leal  
*Espalhamento de elétrons por átomos e moléculas; ionização de átomos por impacto eletrônico; fotoionização de moléculas.*

**Universidade de Campinas – Instituto de Física**

**Gilda Menezes, Fernando Paixão**  
**Espalhamento de elétrons (teoria)**

# Física da Matéria Condensada

## DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

### ÓPTICA

UFCE, Departamento de Física, Laboratório de Espalhamento da Luz

#### LINHAS DE PESQUISA:

Raman, Luminescência, Fotocorrelação, Birefringência, Crescimento de Cristais, Constante Dielétrica e Instrumentação Eletrônica.

#### PESQUISADORES SENIORS:

Josué Mendes Filho, José Evangelista de Carvalho Moreira, Francisco Erivan de Alves Melo, Francisco Alcides Germano.

#### EQUIPAMENTO PRINCIPAL:

Laser de Ar Spectra Physics modelo 170, Espectrômetro duplo Spex modelo 1402, Ponte de capacitância Gen Rad, Fotocorrelador, Laser HeNe Spectra Physics modelo 125, Dye Laser Spectra Physics modelo 365, Raio-x Rigaku, Criostato circuito fechado. Valor total estimado US\$ 314.000.

#### PERIFÉRICOS:

Lock-in, choppers, microcomputadores, impressoras, plotters eletrômetros, fotocountadores, criostatos, containers, dewars e sistemas de vácuo. Total investido US\$ 86.000.

#### INFRA ESTRUTURA:

Oficina mecânica, Laboratório eletrônico, Laboratório de síntese, crescimento e preparo de cristais, Liquefator de  $N_2$ , Sistema de recuperação de He, Biblioteca, Computador.

## **UFPE, Departamento de Física, Óptica**

### **LINHAS DE PESQUISA:**

Processos ópticos não lineares envolvendo efeitos cooperativos entre fons em sólidos, Espectroscopia de Absorção saturada e Mistura de Ondas em Sólidos e gases Moleculares, Espalhamento Raman e Brillouin em Materiais Magnéticos, Desenvolvimento de Medidores de Onda para Lasers CW e Pulsados, Efeitos Magneto-ópticos, Espectroscopia em Átomos da Rydberg utilizando Feixes Atômicos

### **PESQUISADORES SENIORS:**

Sergio M. Rezende, Cid B. da Araújo, José Roberto Rios Leite, Sandra S. Vianna.

### **EQUIPAMENTO DE PORTE:**

Laser Nd: YAG Quanta Ray, 02 Lasers de Ar Coherent CR 2, Laser N<sub>2</sub> fabricação própria, Laser CO<sub>2</sub> fabricação própria, 02 espectrômetros duplos Spex, Ímã Supercondutor 70kOe, Fabry Perot de 5 passagens, Raio X. Valor total estimado US\$ 480.000.

### **PERIFÉRICOS:**

Moduladores eletro-ópticos, criostatos para He líquido, eletrônica, laser HeNe, fotocontadores, registradores, fontes, lock-in e box-car. Valor total estimado US\$ 300.000.

### **INFRA-ESTRUTURA:**

Oficina Mecânica, Oficina eletrônica, Biblioteca, Evaporedora, Liquefator de He, Liquefator de N<sub>2</sub>.

**UFMG, Departamento de Física, Laboratório da Óptica de Espalhamento da Luz**

### **LINHAS DE PESQUISA:**

Difusão molecular em líquidos viscosos, Dinâmica de crescimento de cristais, Cristais líquidos, Fluorescência em fluorperovskitas, Estatística de fótons, Detectores piezoelétricos, Espectroscopia Rayleigh, Brillouin (em impl.), Raman.

### **PESQUISADORES SENIORS:**

Geraldo Alexandre Barbosa, Oscar Nassif de Mesquita, Marcus Bastos Lacerda Santos.

### **EQUIPAMENTO DE PORTE:**

Lasers de argônio, Kriptônio e HeNe, espectrômetro Duplo Spex, 02 fotocorreladores, interferômetro Brillouin Burleigh, Criostato circuito fechado, Raio-X. Valor total estimado US\$ 405.000.

### **PERIFÉRICOS:**

Multicanal, estações de vácuo, mesas antivibratórias, lock-in, registradores, detectores, fontes de tensão, fotocontadores, eletrômetros, containers para LHe LN<sub>2</sub> e criostato. Total investido US\$ 100.000.

**INFRA-ESTRUTURA:**

Oficina mecânica, Oficina eletrônica, Laboratório de crescimento de cristais, Laboratório de preparação de amostras, Liquefator de hélio, Liquefator de  $N_2$ , Sistema de recuperação de He, Biblioteca.

**UFF, Instituto de Física, Laboratório de Espectroscopia e Laser**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Lasers gasosos  $N_2$  e  $CO_2$

**PESQUISADOR SENIOR:**

Carlos Massone

**EQUIPAMENTO DE PORTE:**

Osciloscópio Tektronix 7904, Módulos para Osciloscópio.

Valor estimado US\$ 75.000.

**PERIFÉRICOS:**

Detetores, sistema de vácuo, lasers HeNe, suportes ópticos e torno. Valor estimado US\$ 50.000.

**INFRA-ESTRUTURA:**

Biblioteca, oficina mecânica, Computador, Microcomputadores, Oficina eletrônica.

**PUC-RJ – Departamento de Física, Óptica Teórica**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Ionização Atômica por Campos de Lasers Intensos, Absorção Multifotônica em sólidos, Biestabilidade Óptica, Bifurcação e Caos Óptico, Estado comprimido de campo Eletromagnético, Momento Angular Complexo e Espalhamento Semi-clássico.

**PESQUISADORES SENIOR:**

Moisés Nussenzweig, Luis Davidovich, Humberto Brandi, Nicim Zagury.

**EQUIPAMENTOS DE PORTE E PERIFÉRICOS:**

Grupo Teórico

**INFRA-ESTRUTURA:**

Biblioteca, Computadores e Terminais

**PUC-RJ, Departamento de Física, Propriedades Ópticas de Materiais Isolantes**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Estrutura e aplicação de filmes finos de materiais isolantes, Dispersão cromática em fibras ópticas, Aplicações de fibras ópticas em sensores.

**PESQUISADORES SENIORS:**

Luiz Carlos Scavarda do Carmo, Jean Pierre Von der Veid

**EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Espectrofotômetro Cary 17 D, Espectrofotômetro PE 180, Espectrofotômetro Beckman, Laser de Ar Coherent CR 3. Valor total estimado US\$ 195.000.

**PERIFÉRICOS:**

Monocromadores, criostatos, lâmpadas, detetores, lock-in, fontes, registradores e sistemas de vácuo. Valor estimado US\$ 80.000.

**INFRA-ESTRUTURA:**

Oficina mecânica, Oficina eletrônica, Sistema de recuperação de H<sub>2</sub>, Microcomputadores, computador central, Microsonda, Biblioteca.

**UFRJ, Instituto de Física, Departamento de Física dos Sólidos, Propriedades Ópticas e Magnéticas de Compostos Moleculares.**

**LINHAS DE PESQUISA**

Centros Luminescentes em Materiais Cerâmicos

- a) Propriedades ópticas de centros de elementos da primeira série de transição atômica.
- b) Fenômenos de transferência de energia de excitação dos centros;

Propriedades Magnéticas de Materiais Cerâmicos

- a) Efeitos de diluição com impurezas diamagnéticas;
- b) Propriedades de aglomerados magnéticos em matrizes cerâmicas diamagnéticas;
- c) Propriedades estruturais de matrizes cerâmicas na presença de impurezas.

**PESQUISADORES SENIORS:**

Fernando Souza Barros, Teócrita Abrita, Júlio Mário Nato, Paulo H. Domingues.

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:**

Espectrômetro óptico Spex 1702, Laser de N<sub>2</sub> e corante, Espectrômetro IR Beckman IR-10, Raio-X Siemens tipo F com difratômetro Laue e Debye Scherrer, Raio-X Sintex. Valor total estimado US\$ 495.000.

**PERIFÉRICOS:**

Microcomputadores, forno, sistema de vácuo, componentes ópticos, registradores, fontes, lock-in, box-car e osciloscópio. Valor total estimado US\$ 300.000.

**INFRA-ESTRUTURA:**

Oficina mecânica, Oficina eletrônica, Liquefadores de H e de N<sub>2</sub>, Sistema de recuperação de hélio, computadores, Biblioteca.

**CNEN/SP, Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares, Óptica Aplicada.**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Desenvolvimento de Lasers de estado sólido de neodímio e de centros de cor; Síntese, purificação, crescimentos e caracterização de cristais para lasers; Espectroscopia de defeitos produzidos por irradiação e de impurezas em sólidos; Desenvolvimento de lâmpadas de catodo oco e sem eletrodo; Espectroscopia laser de emissão e absorção de elementos de *interesse nuclear*; Espectroscopia laser optogalvânica; Desenvolvimento de filmes finos; Desenvolvimento de chaveadores para lasers.

#### **PESQUISADORES SENIORS:**

Spero Penha Morato, Nilson Dias Vieira Junior, Laércio Gomes, Martha Marques Ferreira Vieira, Merly Bueno de Camargo.

#### **EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Laser CW Ar Spectra Physics 171, Laser de corante Spectra Physics, Laser N<sub>2</sub> Molelectron, Dye Laser Molelectron, Espectrômetro Simples Spex, Espectrofotômetro Cary 17 D, Evaporadora Varian 3117, Laser Nd YAG Quantronix 116. Valor total estimado US\$ 365.000.

#### **PERIFÉRICOS:**

Criostatos, lock-in, registradores, monocromadores 25 cm, lâmpadas, sistemas de vácuo, fotomultiplicadoras, fontes, cortadoras, politrizes e detectores IR. Valor estimado US\$ 100.000.

#### **INFRA-ESTRUTURA:**

Oficina mecânica local, Oficina eletrônica, Laboratório de preparação de amostras e bastões, Motogerador, Laboratório de crescimento de cristais.

**USP, Instituto de Física e Química de São Carlos, Óptica**

#### **LINHAS DE PESQUISA:**

Óptica não linear, Espectroscopia por absorção de dois fótons, Espectroscopia de átomos de Rydberg, Instrumentação eletrônica para óptica, Construção de lasers CO<sub>2</sub>, HeNe, Ar, centro de cor, anel, Espectroscopia de emissão vibracional, Óptica de Raio-X, Desenvolvimento de componentes ópticos, Biestabilidade óptica.

#### **PESQUISADORES SENIORS:**

Jarbas Caiado Castro Neto, Antônio Ricardo Droher Rodrigues, Sergio G. Zílio, Máximo Siu Li.

#### **EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Espectrofotômetro Cary 17 D, Espectrofotômetro PE 180, Laser Nd YAG, Laser CO<sub>2</sub>, Evaporadora Balzers, Espectrômetro FFT, Laser de argônio Spectra 165, Laser de argônio Coherent CR 8, Máquinas de corte e polimento de lentes. Valor total estimado US\$ 1.895,000

#### **PERIFÉRICOS:**

Microcomputadores, sistemas de vácuo, registradores, terminais gráficos, criostatos, dewars de LHe, LN<sub>2</sub>, lock-in, fontes, eletrômetros, choppers, etc. Valor total estimado US\$ 300.000.

#### **INFRA-ESTRUTURA:**

Laboratório de crescimento de cristais, Oficina mecânica, Oficina eletrônica, Liquefatores de N<sub>2</sub> e He, Sistema de recuperação de He, biblioteca.

**USP, Instituto de Física e Química de São Carlos, Espectroscopia, Luminescência e Ciência de Materiais Vítreos**

#### **LINHAS DE PESQUISA:**

Defeitos em materiais, amostras e cristais; Estudo e preparação de vidros cerâmicos, filmes finos e pós ultra-finos pelo processo sol gel.

#### **PESQUISADORES SENIORS:**

Michel A. Aegerter

#### **EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

02 microscópios Zeiss, laser micro analyser, Refratômetro de ABBE, Interferômetro, Laser Korad Nd pulsado, Criostato Janis supervaritemp, Pontes dielétricas, Cadinhos de Platina. Valor total estimado US\$ 265.000.

#### **PERIFÉRICOS:**

Fornos, controladores, microscópios, autoclaves, serras de diamante, suportes ópticos, registradores, fontes, etc. Valor total estimado US\$ 200.000.

#### **INFRA-ESTRUTURA:**

A mesma disponível no Instituto de Física e Química de São Carlos-USP.

**USP, Instituto de Física e Química de São Carlos, Grupo de Ressonância Magnética, Espectroscopia e Magnetismo.**

#### **LINHAS DE PESQUISA:**

Propriedades ópticas e magnéticas de centros de cor em halogenetos alcalinos e em isolantes magnéticos puros e dopados; Medidas ópticas da relaxação spin-rede e ressonância eletrônica do estado excitado, dicroísmo circular magnético de absorção, fluorescência, elipsometria de reflexão, transferência de excitações.

#### **PESQUISADORES SENIORS:**

Horácio Carlos Panepucci, Renê Ayres Carvalho, Maria Cristina Terrile, Alberto Tannús.

#### **EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Laser de ar (Spectra Physics 166), Laser de corante (Spectra Physics 375), Sistema de ímã supercondutor. IGG, Bobina dewar e fonte, Controles com campo magnético até 65, Eletroímã VARIAN 12", fonte, Espectrômetro de RPE banda X super heterodino ou homodino operando até temperatura de -1.8 k (montado no laboratório), monocromador Jarrell Ash (f=1/2 m), modulador fotoelástico de polarização. Valor total estimado US\$ 555.000.

#### **PERIFÉRICOS:**

Fontes e lâmpadas de W, Xe, Hg, fotomultiplicadores, filtros, lentes, espelhos, etc. Valor estimado US\$ 200.000.

#### **INFRA-ESTRUTURA:**

A mesma disponível no Instituto de Física e Química de São Carlos – USP.

**UNICAMP – IFGW, Departamento de Física do Estado Sólido e Ciência dos Materiais, Desenvolvimento e Aplicações de Lasers.**

#### **LINHAS DE PESQUISA:**

Desenvolvimento de Lasers

Laser de CO<sub>2</sub> contínuo de até 250 watts; Laser de HeNe de baixa potência; Laser de argônio pulsado; Laser de CO<sub>2</sub> excitado por RF.

#### **Aplicação de Lasers**

Laser "annealing" de semicondutores; Estudo de cortes com laser; Interação do laser de CO<sub>2</sub> em processos metalúrgicos; Foto CVD.

#### **Espectroscopia Óptica**

Efeitos não térmicos no laser sobre tecido vivo; Propriedades ópticas da hematóporfirina; Estudo da estrutura e conformação de polímeros por espalhamento Raman.

#### **Desenvolvimento de Equipamentos**

Mesa coordenadora x-y controlada por computador; Sistema de recuperação de gases para laser de CO<sub>2</sub>; Medidor de potência para infravermelho; Espelhos para laser.

#### **PESQUISADORES SENIORS:**

Jorge Humberto Nicola, Rosa M. Couto, Zoraide Z. Arguello, Hugo Franco, Esther M. D. Nicola.

#### **EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Laser Nd: YAG, Laser de Ar Coherent CR-8, Laser de Kr Coherent CR-8, Laser corante, Laser de CO<sub>2</sub> 600 W, Laser Ar-166-Spectra, Laser de CO<sub>2</sub> 250 W, Laser Ar-52 R Coherent, Espectrômetro duplo Spex, Espectrômetro simples Spex, Evaporadora Edwards, Mesa para medidas de espalhamento em baixo ângulo. Valor total estimado US\$ 535.000.

#### **PERIFÉRICOS:**

Fóton contador, registradores, microcomputador, politrizes, disco Winchester sistema de baixa temperatura, laser He-Ne, motores de passo, fontes, multicanal, impressora, criostato He. Valor estimado US\$ 200.000.

#### **INFRA-ESTRUTURA:**

Oficina mecânica, oficina de vidro, liquefator de He e N<sub>2</sub>, oficina eletrônica, computação, gráfica, oficina de vácuo, raio-X, biblioteca e circuito fechado de recuperação de He.

**UNICAMP, Instituto de Física, Gleb Wataghin, Departamento de Eletrônica Quântica, Fibras Ópticas.**

**LINHAS DE PESQUISA:**

CVD – Chemical Vapour Deposition, Puxamento de Fibras CVD, Caracterização Óptica, Caracterização mecânica de Fibras Ópticas, Materiais Vítreos para Fibras Ópticas, Geração e Detecção de pulsos de Picosegundos, Compressão de Pulsos e Refletometria Óptica em Domínio de Tempo, Produção de Acopladores de Fibras Ópticas, Efeitos de Propagação em Fibras Ópticas Multimodo e Monomodo, Caracterização de Fibras Monomodo.

**PESQUISADORES SENIORS:**

Luis Carlos Barbosa, Hugo Fregnito, C. H. Brito Cruz.

**EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

01 laser de HeNe. 01 laser Nd: YAG Quantronix, 01 forno de RF de 5 MHz, 30 Kw, 01 forno de indução 10 MHz, 30 Kw, Equipamento completo de óptica para fibras ópticas. Valor total estimado US\$ 425.000.

**PERIFÉRICOS:**

Lock-in, box-car, micro-posicionadores, suportes, fotodiodos, tubos fotomultiplicadores integradores, microscópios defletores, medidor de frequência, multicanal, osciloscópio. Valor total estimado US\$ 200.000.

**INFRA-ESTRUTURA:**

A mesma disponível no Instituto de Física – UNICAMP.

UNICAMP, IFGW, Departamento de Eletrônica Quântica, Picosegundo.

**LINHAS DE PESQUISA:**

Geração e Aplicação de Pulsos Laser com Duração de Femtosegundos e Picosegundos, Estudo de Fenômenos Ultra-rápidos em Semicondutores e Corantes Diluídos.

**PESQUISADORES SENIORS:**

Carlos Henrique Brito Cruz, Marcos Antônio Scarparo.

**EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Laser de argônio modelo 170 – Spectra Physics, Laser de argônio modelo CR-4 – Coherent Radiation, Laser de Corante, Cavidade em anel (Construído no Laboratório). Laser de nitrogênio (Construído no laboratório), Osciloscópio Tektronix 7904. Valor total estimado US\$ 200.000.

**PERIFÉRICOS:**

Lock-in Amplifier, Power supply, Registrador HP, Espectrômetro, Detetores Ultra-rápidos, Estágios de Transição Motorizados, Sistema Óptico e infra-estrutura completa. Valor total estimado US\$ 50.000.

**INFRA-ESTRUTURA:**

A mesma disponível para o IFGW-UNICAMP

**UNICAMP – IFGW, Departamento de Física do Estado Sólido e Ciências dos Materiais, Propriedades Ópticas da Matéria.**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Refletividade Modulada em Super-redes Semicondutoras, Espectroscopia de Impurezas em Semicondutores, Caracterização de Filmes Policristalinos de Semicondutores II–VI, Espalhamento Raman de Moléculas Adsorvidas, Instrumentação Raman, Espalhamento Brillouin em Líquidos sob gradientes térmicos.

**PESQUISADORES SENIORES:**

Fernando Cerdeira, Vólia Lemos Crivelenti, Paulo Motisuke, Gilberto de Matos Gualberto, Eliermes Arraes Meneses, Antônio R. B. de Castro.

**EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

1 Laser Ar CR8 Coherent, 1 Laser Ar 166 Spectra, 2 Laser N<sub>2</sub> C 5000 – C 950 Everett, 2 Laser Ar 52B Coherent, 3 Espectrômetro duplo Spex 140f, 2 Espectrômetro simples Spex, 1 Laser corante 490 Coherent, 1 Circulador de hélio LT 3 - 110 Air Products, 1 Osciloscópio D 44Tektronix, 2 Laser Nd: YAG Quantronix, 4 Osciloscópio Tektronix. Valor total estimado US\$ 780.000.

**PERIFÉRICOS:**

Amplificador lock-in, pré-amplificador diferencial, amplificador discriminador, fóton contador, multicanal fontes, controladores de temperatura, geradores de função, criostato HeNe, multímetro digital. Valor total estimado US\$ 200.000.

**INFRA-ESTRUTURA:**

A mesma disponível para o IFGW – UNICAMP.

**UNICAMP, Instituto de Física, Departamento de Eletrônica Quântica, Aplicações.**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Estudo de lasers no infravermelho e no infravermelho longínquo. Espectroscopia sintonizável no infravermelho longínquo utilizando diodos de contactos de ponta; Estudo de íons moleculares e radicais livres por lasers que operam na região IV e IVL; Rotação magneto-óptica em sólidos; Espectroscopia optogalvânica; Espectroscopia dinâmica de picosegundos; Interação de lasers potentes com gases atômicos e moleculares; Efeitos de lasers intensos sobre a matéria condensada.

**PESQUISADORES SENIORS:**

Antônio G. J. Balbin Villaverde, Artemio Scalabrin, Carlos A. Ferrari, Carlos A.S. Lima, Carlos H. Brito Cruz, Elza C. C. Vasconcellos, Miriná B. S. Lima, Daniel Pereira.

**EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Laser argônio CR8, Laser argônio Spectra modelo 171-182, Espectrômetro duplo

Spex, Laser de CO<sub>2</sub> CR42, Dye laser, Osciloscópio Tektronix 7904, Laser Integrator 160, Hewlett Packard Recorder 710, Optical engineering CO<sub>2</sub> Spectrum Analyser, Sistema alto vácuo Varian, Laser da Ruby-Molobeam Modelo 600, Laser de Nd: YAG – Molobeam modelo 2550, Osciloscópio Tektronix modelo 7844, Osciloscópio WGB modelo 05-20, Laser nitrogênio Arco, Sistema alto vácuo Pfeifer. Valor estimado US\$ 438.000.

#### **PERIFÉRICOS:**

Detetores, fotomultiplicadores, bombas de vácuo, medidores de vácuo, fontes, linhas de vidro, etc.

Valor total estimado US\$ 100.000.

#### **INFRA-ESTRUTURA:**

A mesma disponível para o IFGW—UNICAMP

**UNICAMP, Instituto de Física, Departamento de Física do Estado Sólido, Óptica.**

#### **LINHAS DE PESQUISA:**

Materiais fotossensíveis, fotolitografia, componentes ópticos, metrologia óptica, holografia, processamento de imagens.

#### **PESQUISADORES SENIORES**

Jaime Frejlich, Geraldo F. Mendes, José J. Lunazzi.

#### **EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Laser de Ar CR-8, Laser de HeNe 35 mW, Fonte de Hg 1000 W, monocromador Jarrel Ash. Valor total estimado US\$ 85.000.

#### **PERIFÉRICOS:**

Choppers, Suportes Ópticos, Mesas e Bancos Ópticos, Sistema Piezoelétrico com Fontes, Filtros Espaciais, Lentes e Espelhos, Capela, etc. Valor total estimado US\$ 200.000.

#### **INFRA-ESTRUTURA:**

Além da disponível para o IFGW-UNICAMP, o grupo dispõe de oficina eletrônica e oficina mecânica própria, câmara escura e laboratório químico.

**UNICAMP, Instituto de Física, Departamento de Eletrônica Quântica, Espectroscopia Fototérmica**

#### **LINHAS DE PESQUISA:**

Propriedades Ópticas e Térmicas dos Materiais (polímeros, semicondutores, sistemas biológicos); Materiais catalíticos, Células solares; Detecção em sistemas de duas camadas; efeito fotoacústico na região de microondas; Estudo de aditivos em cabos elétricos; Estudo de impurezas em sistemas orgânicos; Determinação e estudo da difusividade térmica em semicondutores; Usos do efeito fotoacústico em transições de fase; Efeito mirem e piezoelétrico; Aplicações a sistemas biológicos.

**PESQUISADORES SENIORS:**

Helion Vargas, Curt Egon Hennies, Edson Corrêa da Silva.

**EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Espectrômetro Fotoacústico Comercial, Espectrômetro Miragem Piezoelétrico, Espectrômetro EPR, Oscilador de Microondas, Osciloscópio, 02 canais, 20 MHz. Valor total estimado US\$ 630.000.

**PERIFÉRICOS:**

Lâmpadas, fontes, células. lock-ins, choppers, microcomputador, interface registradores, linha de vácuo, etc. Valor total estimado US\$ 150.000.

**INFRA-ESTRUTURA:**

A mesma disponível no IFGW-UNICAMP.

**UNICAMP – IFGW, Departamento de Eletrônica Quântica, Efeito Fototérmico e Transições de Fase.**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Propriedades Ópticas e Térmicas em função da temperatura medidas com técnicas fototérmicas (fotoacústica e deflexão de feixe). Física Médica.

**PESQUISADORES SENIORS:**

Dimitrios George Bonzini, Antônio Fernando dos Santos Penna, Carlos Lens Cesar.

**EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

01 laser de Ar Coherent modelo CR8, 01 espectrômetro duplo 1 m Spex modelo 14018, 01 laser de HeNe Spectra Physics modelo 125, 01 osciloscópio Tektronix modelo 7623 A. Valor total estimado US\$ 145.000.

**PERIFÉRICOS:**

Choppers, Geradores de Pulso, Contadores de Pulso, Fotomultiplicadora, Célula Fotoacústica, Controladores de Temperatura, Sistema de Vácuo, Eletrometro, Fotocontador, Multímetro Digital, Fontes, Laser HeNe 0,5 mW, Detetores de Posição de Feixe. Valor total estimado US\$ 30.000.

**UNICAMP – IFGW, Departamento de Eletrônica Quântica, Óptica não Linear**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Auto Difração em Grade de População, Dinâmica de Absorvedores Saturáveis, Lasers de N<sub>2</sub> e de Corantes, Propriedades de Iniciação de Oscilações de Lasers, Eletro Emissão de Materiais Amorfos, Biestabilidade, Caos e Propriedades Ópticas de Fractais, Compressão de Pulsos e Mode-Lock de Lasers Pulsados.

**PESQUISADORES SENIORS:**

Alvim Kiel, Hugo Fagnito

#### **EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Laser de  $N_2$  Molectron UV 1000, Espectrômetro — 1 metro Cromatix, OMA (optical multicanal) Princetom, Laser e Amp. de YAG. Nd Holobeam, Osciloscópio 7904 · Plug-ins Tektronix, Nanopulser de Xenon xenon Corp., Osciloscópio + Plug-in Tektronix 5000, Sistema de Detecção Molectron. Valor total estimado US\$ 170.000.

#### **PERIFÉRICOS:**

Multímetro, fotomultiplicadores, registrador, fontes, eletrômetros, microcomputador, corantes, detetores. Valor total estimado US\$ 50.000.

#### **INFRA-ESTRUTURA:**

A mesma disponível no IFGW — UNICAMP.

**UNICAMP — IFGW, Departamento de Eletrônica Quântica, Espectroscopia.**

#### **LINHAS DE PESQUISA:**

Espalhamento Raman e Espectroscopia Infravermelho de Materiais Ferroelétricos e Superiônicos; Raman e Infravermelho em Semicondutores Amorfos; Estudo de Impurezas de Hidrogênio em Espalhamento Raman Ressonante em Ligas Semicondutoras III-V.

#### **PESQUISADORES SENIORS:**

Ram Itham Katyar, José Antônio Sanjurjo.

#### **EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Espectrofotômetro de infravermelho Perkin 180, Espectrofotômetro de infravermelho de transformada de Fourier, Politec-FIR 30, Espectrômetro de visível MC · Pherson, Espectrômetro de Raman duplo Spex 1401, Monocromador triplo para Spex 1401, Laser de Argônio CR-8 Coherent radiation, Laser de argônio Spectra Physics modelo 166, Laser de HeNe Spectra Physics, Sistema Photon Counting ORTEC, Analisador Multicanal, Sistemas de Vácuo, 03 osciloscópios Tektronix, Registrador X-Y H.P.; 02 registradores X-T H.P., Sistema de controle de temperatura Artronix. Valor total estimado US\$ 440.000.

#### **PERIFÉRICOS:**

Criostatos, bombas de vácuo, controlador de temperatura, fontes, sistema de corte e crescimento de cristais. Valor total estimado US\$ 100.000.

#### **INFRA-ESTRUTURA:**

A mesma disponível no IFGW-UNICAMP

**UFPR — Departamento de Física, Óptica de Raios-X e Instrumentação**

#### **LINHAS DE PESQUISA:**

Dispositivos Ópticos, Interferômetros Polarizadores e Monocromadores; Medidas da parte real e imaginária do índice de refração na região de Raios-X, Topografia de Raios-X e instrumentação óptica para Raios-X.

**PESQUISADOR SENIOR:**

Cesar Cusatis

**EQUIPAMENTOS DE PORTE:**

Gerador RX Rigaku, Gerador Phillips, Máquina de Corte, Mesa Divisória, Detetor GE, Tubos RX. Valor total estimado US\$ 180.000.

**PERIFÉRICOS:**

Registradores, Câmeras, Microcomputadores, Impressoras. Valor estimado US\$ 40.000.

**INFRA-ESTRUTURA:**

Oficina Mecânica, Oficina Eletrônica, Biblioteca, Computador Central.

**UFSC, Departamento de Física, Óptica Quântica.**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Caos em Lasers, Biestabilidade Óptica.

**PESQUISADORES SENIORS:**

Jason Gallas, Fernando Cabral

**EQUIPAMENTO PRINCIPAL E PERIFÉRICOS:**

Microcomputadores PC e periféricos, Terminal de vídeo gráfico, Equipamentos de apoio (ar condicionado). Valor total estimado US\$ 35.000.

**INFRA-ESTRUTURA:**

Computador Central IBM 4341 de Universidade, Biblioteca.

**UFRGS – Instituto de Física, Grupo de Laser**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Transferência de energia rotacional em estados eletrônicos excitados de moléculas; Espectroscopia de dupla ressonância usando laser de corante sintonizáveis de alta resolução; Óptica não linear; Descargas elétricas em gases: efeito optogalvânico e caos; Filmes finos: produção e caracterização de filmes finos; Instrumentação: desenvolvimento da infra-estrutura do próprio laboratório; Laser de nitrogênio, lasers de corante de alta resolução, Pirani, deslocadores de feixe, transladores e outros.

**PESQUISADORES SENIORS:**

Ricardo Franke, Sílvia Cunha, Flávio Horovitz

**EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Lasers de nitrogênio duplos, 400 KW, 01 laser de nitrogênio de 300 KW, 01 câmara de alto vácuo para deposição de filmes finos, 02 integradores chaveados por modelo 162, 02 integradores chaveados C.C., 03 osciloscópios Tektronix modelo 596, 7633 e 7904; 01 espectrômetro Spex de 1 m, 04 laser de corante sintonizáveis. Valor total estimado US\$ 272.000.

**PERIFÉRICOS:**

Mesas ópticas, vácuo, registradores, espelhos, lentes, filtros, suportes ópticos.  
Valor estimado US\$ 50.000.

**INFRA-ESTRUTURA:**

Oficina Mecânica, Oficina Eletrônica, Computação, Biblioteca.

**Centro Técnico Aeroespacial, Instituto de Estudos Avançados, Divisão de Lasers.**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Desenvolvimento de Lasers gasosos (CO<sub>2</sub>, Excimer e He - Ne), corante, vapores metálicos e Nd; Eletro-ótica; Projeto e desenvolvimento de sistemas ópticos; Espectroscopia molecular; Processamento de materiais com lasers; Interação laser-plasma.

**PESQUISADORES SENIORS:**

Carlos Schwab, Alberto Monteiro dos Santos, Marcos Tadeu T. Pacheco, José Nivaldo Hinkel, Vladimir J. Trava Airoldi.

**EQUIPAMENTO PRINCIPAL:**

Espectrofotômetro Perkin-Elmer IV, Espectrofotômetro Perkin-Elmer Vis-UV, Espectrômetro a diodo-laser IV - médio SP 5000 (Spectra-Physics), Interferômetro Zygo MKII, Elipsômetro Gaertner L-117, Evaporadora Varian 3117. Máquinas de corte e polimento de lentes, Laser CO<sub>2</sub>-CW 200W (Fab.própria), Lasers CO<sub>2</sub>-CW 30W (fab. própria), Sistemas (3) de lasers CO<sub>2</sub>-TEA (fab. própria), Laser de vapor de cobre 40W (fab. própria), Laser de vapor de cobre 10W (fab. própria), Laser Ar CR-18 Coherent, Laser Ar CR-3 Coherent, Laser Nd: YAG (fab. própria). Valor total estimado US\$ 500.000.

**PERIFÉRICOS:**

Osciloscópios, Choppers, Lock-in, Box-cars, Microcomputador, Sistemas de Vácuo, Detetores, Lasers He-Ne. Monocromadores, Equipamentos Eletrônicos variados. Valor estimado em US\$ 500.000.

**INFRA-ESTRUTURA:**

Oficina mecânica, Oficina Eletrônica, Oficina de Óptica, Oficina de Vidraria, Biblioteca, Computador CDC 170/750.

# Física da Matéria Condensada

## DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

### CRISTALOGRAFIA E CRISTAIS LÍQUIDOS

#### USP – Instituto de Física e Química de São Carlos

- Cristalografia estrutural: Y. P. Mascarenhas (4D) e E.E. Castellano (1D e 3M) (+ 1 mestre em D. no exterior e 5 docentes químicos).
- Soluções de Macromoléculas: Y. P. Mascarenhas (1D).
- Ciência dos Materiais: A. Craievich (atualmente no CBPF) (2D).

#### Equipamentos:

1 difratômetro automático, 4 geradores, 2 SAXS, várias câmaras, microdensitômetro.

#### Intercâmbios:

UNESP – Presidente Prudente, UFMG, U. Pittsburgh (USA), Berkeley College, U. York (Inglaterra) e U. de La Plata (Argentina).

#### UNICAMP

- Defeitos, Filmes Finos, Teoria Dinâmica: S. Caticha Ellis (1M), S. L. Chang (1M), I. Torriani (1M), C. Campos e L. P. Cardoso.
- SAXS (amorfos, membranas e macromoléculas): I. Torriani (2D e 1M).
- Superfície e interfaces: E. A. Farah (1M) e S. Bilac (1M).
- Topografia: C. K. Suzuki (2M).

#### Equipamentos:

1 gerador de anodo rotatório, 5 geradores, difratômetros de alto e baixo ângulo, várias câmaras, Microsonda Iônica, Microsonda Eletrônica.

#### Intercâmbios:

UFBA; Inst. de Física de Líquidos e Sis. Biol. (IFLYSIB, Le Plete, Argentine); Brookhaven Nat. Lab. (USA); Division de Microestructuras (INIFTA, La Plata, Argentina).

### **IFUSP**

- Difração em Cristais Líquidos: L. Q. Amaral e D. R. S. Bittencourt
- Amorfos: L. Q. Amarel (1D) e Aldo Craievich
- Óptica de Cristais Líquidos: A. M. Figueiredo Neto (1D e 1M)
- Síntese e preparação de Cristais Líquidos: M. E. M. Helene.
- Semicondutores: L. Q. Amaral (1D) e V. Stojanoff (2M).
- Apoio Químico: M. E. M. Helene

### **Equipamentos:**

4 geradores, difratômetros de cristal duplo e de baixo ângulo, algumas câmaras, e microscópios ópticos, refratômetro, conoscopia laser, laboratório de Química do Departamento de Física Experimental.

### **Intercâmbios:**

Siltec Silicon Division (USA), Laboratoire de Physique des Solides-Orsay – França, EPUSP (Lab. Microeletrônica), UFSCatarina, IQUSP, UNICAMP, IFQSC-USP e UFParaná.

### **UFSCatarina**

- Síntese de Cristais Líquidos: H. Gallardo (3M).
- Transições de fase e dosimetria: S. Jayaraman.
- Estruturas: I. Vencato.
- Reologia: L. T. S. Siedler.
- Cristais Líquidos Termotrópicos: H. J. Müller (2M).
- Cristais Líquidos Liotrópicos: J. D. Gault (1M), T.R. Taylor (1M), A. V. A. Pinto (2M).

### **Equipamentos:**

Laboratório de Química, gerador de raios X, medidas elétricas calorimetrie, 2 microscópios, medidas ópticas, medidas de difusão, reologia.

### **Intercâmbios:**

I. Für Physikalische Chemie (Alemanha), Liquid Crystal Institute (USA), IFUSP.

### **CBPF**

- Amorfos, Fractais e Transições de Fase: A. Craievich (2M).

### **Equipamentos:**

2 geradores, difratômetro de policristais, várias câmaras.

### **Intercâmbios:**

IFQSC-USP, IQ-UNESP – Araraquara, CTA – São José dos Campos, LURE e Laboratoire des Verres (França), U. Columbia (USA), colaboração com projeto Síncrotron/CNPq.

## **IPEN**

- Difractometria de nêutrons: C. B. R. Parente (1D e 2M + 1 mestre contratado).

## **Equipamentos:**

Difractômetro de Nêutrons com criostato e sistema de controle de temperatura.

## **Intercâmbios:**

H. J. Brunye – Clausthal Universität (Alemanha).

## **UFParaná**

- Óptica de Raios X e Instrumentação: C. Cusatis (+ 1 Mestre contratado) e A. R. D. Rodrigues (atualmente no IFQSC—USP).
- Cristalografia Estrutural: R. W. Becker (do Departamento de Química).

## **Equipamentos:**

2 geradores, difrattômetro de pó, difrattômetro de duplo cristal (construído no local), câmaras.

## **Intercâmbios:**

M. Hart (Inglaterra), IFQSC-USP e IFUSP.

## **UFGoiás**

- Caracterização de Cristais Naturais: W. G. Machado e M. Y. Okuda (+ 4 mestres contratados e 1 fazendo doutoramento em São Carlos).

## **Equipamentos:**

1 gerador de raios X com câmaras, microscópios, espectrofotômetro, fornos.

## **UFBahia**

- Transições de fase em halogenetos metálicos: M. M. F. d'Aguilar Neto
- Topografia de cristais naturais: Z. Baran.
- Teoria Dinâmica: W. A. Keller (1M), E. Ratajczsk.  
(Outras áreas da Física do Estado Sólido: 6 doutores e 11 mestres contratados, 6 estudantes de M).

## **Equipamentos:**

1 gerador de anodo rotatório, 2 geradores, 2 difrattômetros, várias câmaras.

## **UFRJ**

- Refinamento de estruturas de material cerâmico policristalino: Manoel Rothier do Amaral e Hélio Salim de Amorim.
- Estudo de materiais cerâmicos por análise de perfil de linha: Hélio Salim de Amorim e Manoel Rothier do Amaral.
- Estruturas de materiais superiônicos: Julio Maria Neto, H. S. Amorim e M.
- Instrumentação de Raios X: M. R. do Amaral, José Alberto Portela Bonapae, Hélio Salim de Amorim.

## **EQUIPAMENTOS:**

- 1 difratômetro de policristais Siemens
- 1 autodifratômetro de monocristais de quatro círculos.
- Câmaras de processão, Veisseberg e Guinier
- 1 Câmara de hidrogenação
- Programas de Análise e tratamento de dados de monocristais e policristais.

## **INTERCÂMBIOS:**

Apoio a diversos estudantes e pesquisadores ad UFRJ e outras instituições -- colaboração com profs. Emerico Mattievich e Ney Vermon Vugman.

---

*Nota: D e M = número de estudantes de Dr. e MSc envolvidos no projeto.*

# Física da Matéria Condensada

## DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

### FÍSICA ESTATÍSTICA

#### Universidade Federal do Ceará – Departamento de Física

Lindberg L. Gonçalves, Ph. D., Oxford, 1977

Newton T. de Oliveira, Dr., IFQSCarlos – USP, 1981.

– comportamento crítico (propriedades estáticas e dinâmicas) de sistemas magnéticos de baixa dimensionalidade. Soluções exatas.

– início em 1977.

#### Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Departamento de Física.

Liagir S. Lucena, Ph. D., Boston Univ., 1980

Ananias M. Mariz, Dr., CBPF, 1985.

Luciano R. da Silva, Dr. CBPF, 1985

– transições de fases e fenômenos críticos. Modelos magnéticos. Percolação. Aplicações de técnicas de grupo de renormalização no espaço real.

– início em 1979.

#### Universidade Federal da Paraíba – Departamento de Física

A. N. Chaba, Ph. D., Waterloo, 1972.

– regras de soma na rede cristalina

Natanael R. da Silva, Ph. D., Imperial College, 1980

João Medeiros da Silva, Dr., IFQSCarlos – USP, 1980

Pedro L. Christiano, Dr. IFQSCarlos – USP, 1985

– transições de fases e fenômenos críticos. Sistemas desordenados. Vidros de spin.

- início em 1975
- há um pesquisador na área de física matemática, Cesar A. Bonato, com interesse em resultados rigorosos em mecânica estatística.

#### **Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Física**

- Ivon P. Fittipaldi, Dr., IFUSP, 1973
- Marco A. G. de Moura, Dr., IFUSP, 1973
- Maurício D. Coutinho Filho, Dr., IFUSP, 1973
- Sergio G. Coutinho, Dr., UFPE, 1977
- Francisco G. Brady Moreira, Dr., UFPE, 1979
- Jairo R. de Almeida, Ph. D., Birmingham, 1979
- Oziel F. de A. Bonfim, Ph. D., Oxford, 1980.
- transições de fases e fenômenos críticos. Vidros de spin e sistemas desordenados. Efeitos não lineares em materiais magnéticos. Semicondutores e metais magnéticos. Caos em sistemas magnéticos.
- início em 1975.
- o grupo experimental, liderado por Sergio M. Rezende, está descrito na sub-área de magnetismo.

#### **Universidade Federal de Alagoas – Departamento de Física**

- Enaldo S. de Albuquerque, Ph. D., Essex, 1978
- Solange B. Cavalcanti, Ph. D., Queen Elizabeth College, 1984
- Uriel M. S. Costa, Dr., CBPF, 1985
- Antonio F. Siqueira, Dr., UFPE, 1986.
- Roberto J. V. dos Santos, Dr., UFPE, 1986
- transições de fases e fenômenos críticos. Modelos magnéticos.
- início em 1978.

#### **Universidade Federal da Bahia – Departamento de Física**

- Roberto F. S. Andrade, Dr. Rer. Nat., Regensburg, 1981
- transições em modelos magnéticos. Fenômenos não lineares. Fenômenos fora do equilíbrio.
- início em 1981
- em Salvador também há diversos teóricos na área de magnetismo.

#### **Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**

- Constantino Tsallis, Dr., Paris, 1974
- Agláé C. N. Magalhães, Dr., CBPF, 1982
- Evaldo M. F. Curado, Dr., CBPF, 1983
- transições de fases e fenômenos críticos. Magnetismo de superfície. Sistemas caóticos. Fractais. Autômatos celulares. Aplicações à biofísica. Aplicações de técnicas de grupo de renormalização, Monte Carlo, campo efetivo, expansões diagramáticas e teoria de grafos.
- início em 1977
- o grupo conta com um técnico em computação e vários físicos que colaboram

em tempo parcial.

– no CBPF, Affonso A. G. Gomes e vários teóricos desenvolvem uma atividade intensa na área de magnetismo.

– o trabalho de Paulo M. Bisch, formado em Bruxelas e trabalhando com processos fora do equilíbrio, está sendo descrito na subárea de Biofísica.

#### **Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Física**

Carlos M. G. F. Chaves, Dr., PUC-RJ, 1973

Raimundo R. dos Santos, Ph. D., Oxford, 1981

Sergio L. A. de Queiroz, Dr., PUC-RJ, 1981

Rosane Riera Freire, Dr., PUC-RJ, 1985

– transições de fases e fenômenos críticos. Sistemas diluídos. Percolação e diluição correlacionada. Dinâmica crítica. Fractais e modelos de crescimento. Aplicações de métodos de teoria de campos.

Gilson M. Carneiro, Ph. D., Illinois, 1973

– modelos para transições em gases adsorvidos

– início em 1974

#### **Universidade Federal Fluminense – Departamento de Física**

Múcio Continentino, Ph. D., Imperial, College, 1978

Paulo Murilo C. de Oliveira, Dr., PUC-RJ, 1980

Evandro L. de Mello, Ph. D., Seattle, 1983

Claudete E. Cordeiro, Dr. Rer. Nat., Ruhr Univ., 1984

Rita M. Z. dos Santos, Dr., PUC-RJ, 1986

– transições de fases e fenômenos críticos. Vidros de spin. Percolação. Aplicação de técnicas de grupo de renormalização no espaço real. Modelos para transições em gases adsorvidos.

– início em 1981.

#### **Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Física**

Francisco C. de Sá Barreto, Ph. D., Pittsburgh, 1971

Nilton P. da Silva, Ph. D., Michigan, 1974

Antonio S. T. Pires, Ph. D., Santa Barbara, 1976

Alencastro V. de Carvalho, Ph. D., Pittsburgh, 1976

João A. Placak, Dr., UFMG, 1984

José R. F. Ferreira, Dr., UFMG, 1986

Maria E. G. Aburachid, Dr., UFMG, 1986

– grupo de renormalização, teorias de campo efetivo e princípios variacionais aplicados a sistemas de spins. Sistemas diluídos. Dinâmica de sistemas de spins e excitações não lineares.

– início em 1971

– na UFMG há um grupo de Física Matemática (Ricardo Schor e Michael O'Carroll) com interesse em mecânica estatística.

#### **Universidade de Brasília – Departamento de Física**

José D. M. Vianna, Dr., Genebra, 1973

- métodos formais da mecânica estatística.  
Roberto Osório, Ph. D., Berkeley, 1982
- transições de fases em ligas e materiais magnéticos.  
– início em 1982
- o grupo teórico da UNB agrega outros pesquisadores que estão melhor enquadrados nas áreas de Magnetismo, Semicondutores e Física Matemática.

#### **Universidade de São Paulo – Instituto de Física**

- Silvio R. A. Salinas, Ph. D., Carnegie-Mellon, 1973
- Mário J. de Oliveira, Ph. D., Carnegie-Mellon, 1979
- Carlos S.O. Yokoi, Dr., IFUSP, 1982
- Jürgen F. Stilck, Dr., IFUSP, 1983
- transições de fase em equilíbrio. Modelos magnéticos. Fenômenos críticos e multicríticos. Interações competitivas. Sistemas desordenados.  
– início em 1974
- o grupo experimental do IFUSP está descrito nos relatórios das subáreas de Magnetismo e de Baixas Temperaturas. Os pesquisadores que trabalham com resultados rigorosos em mecânica estatística e teoria de campos, J. F. Perez e W.F. Wreszinski, estão relacionados na área de Física Matemática.

#### **Universidade Estadual da Campinas – Instituto de Física “Gleb Wataghin”**

- Roberto Luzzi, Dr., Bariloche, 1966
- José Galvão P. Ramos, Dr., IFUSP, 1970
- Aurea R. Vasconcellos, Dr., UNICAMP, 1976
- Antonio C. Algarte, Dr., UNICAMP, 1983
- mecânica estatística de processos dinâmicos em semicondutores.
- Amir Caldeira, Ph. D., Essex, 1980
- Kioko Furuya, Dr., IFUSP, 1981
- dinâmica quântica de subsistemas. Efeitos dissipativos em teorias quânticas. Modelos exatamente solúveis.
- Paulo R. P. Silva, Ph. D., Pittsburgh, 1967
- Armando F. S. Moreira, Dr., UNICAMP, 1977
- José A. Roversi, Dr., UNICAMP, 1985
- transições de fases em modelos de cristais ferroelétricos.  
Transições bidimensionais.  
– início em 1970

#### **Universidade de São Paulo – Instituto de Física e Química de São Carlos**

- Roberto L. Lobo e Silva Filho, Ph. D., Purdue, 1967
- Oscar Hipólito, Dr., IFQSCarlos–USP, 1973
- sistemas eletrônicos bidimensionais. Simulações numéricas.
- Valério Kurak, Dr., PUC-RJ, 1979
- Roberto N. Onody, Dr., IFQSCarlos – USP, 1985
- sistemas exatamente solúveis em redes bidimensionais.
- Roland Köberle, Ph. D., Chicago, 1967
- José R. Drugovich de Felício, Dr., IFQSCarlos – USP, 1982

– grupo de renormalização fenomenológico. Métodos de escala em sistemas de tamanho finito. Aplicações da invariância conforme. Cinética das separações da fases.

Sylvio G. Rosa Jr., Ph. D., Wyoming, 1972

– sistemas clássicos com interações aleatórias. Vidros de spin.

– início em 1960

– o grupo teórico de São Carlos inclui também vários pesquisadores cujo trabalho está sendo descrito nas áreas de Magnetismo (Luiz N. de Oliveira – metais e ligas), Semicondutores ou Física Matemática. Em São Carlos há vários físicos experimentais que realizam trabalhos de interesse para a área de Mecânica Estatística.

**Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Física**

Nelson Studart, Dr., IFQSCarlos-USP, 1979

José P. Rino, Dr., IFQSCarlos-USP, 1983

– sistemas eletrônicos bidimensionais. Dinâmica molecular.

Francisco C. Alcaraz, Dr., IFQSCarlos-USP, 1980

– grupo de renormalização fenomenológico. Métodos de escala em sistemas finitos. Aplicações de invariância conforme fenômenos críticos.

**Instituto de Pesquisas Espaciais**

Enzo Granato, Ph. D., Brown, 1986

– crescimento epitaxial e super-redes. Modelos frustrados. Redes de junções Josephson.

– início em 1986

**Instituto de Estudos Avançados do Centro Técnico Aeroespacial**

Carlos E. I. Carneiro, Dr., IFUSP, 1982

– fenômenos multicríticos. Simulações numéricas

– início em 1985

**Universidade Federal do Paraná – Departamento de Física**

Gilberto M. Kremer, Dr. Rer. Nat., Berlin, 1985

– teoria cinética de fluidos densos.

– início em 1985

**Universidade Federal de Santa Catarina – Departamento de Física**

Virendra K. Saxena, Ph. D., Banaras Univ., 1968

Subramania Jayaraman, Ph. D., Maryland, 1972

Vitor H. F. dos Santos, Dr., UFRGS, 1979

Wagner Figueiredo, Dr., IFUSP, 1980

– transições de fases em modelos de cristais líquidos e de materiais antiferromagnéticos. Fenômenos de superfície. Aplicações de técnicas de grupo de renormalização.

– início em 1979

– na UFSC há um grupo experimental na área de cristais líquidos.

#### **Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Física**

Walter K. Theumann, Ph. D., Yeshiva, 1967

Miguel A. Gusmão, Dr., UFRGS, 1982

– transições de fases e fenômenos críticos em matéria condensada. Aplicações da técnicas de grupo de renormalização e de teoria de campos.

Alba Theumann, Ph. D., New York Univ., 1968

– transições de fases em sistemas desordenados. Localização de Anderson.

Claudio Scherer, Dr., UFRGS, 1971

– fenômenos de não equilíbrio em mecânica estatística.

– início em 1982

#### **Universidade Federal do Rio de Janeiro – Instituto de Física**

– a UFRJ possui um grupo experimental ativo na área de Baixas Temperaturas que tem se dedicado ao estudo do comportamento termodinâmico de gases nobres adsorvidos em substratos de grafite.

# Física da Matéria Condensada

## DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

### FÍSICA DE SEMICONDUTORES

Para maior concisão, as unidades definidas como grupos com exceção do LME-POLI e LSI-POLI, são departamentos, quando se trata de instituições universitárias. Devido a isto ficou difícil decidir quem seriam os principais pesquisadores, uma vez que tal definição deveria ser feita a nível de departamento. Além do mais, equipamentos e/ou linhas de pesquisa equivalentes podem existir em mais de um grupo de pesquisa definido na forma convencional. Tal multiplicidade não é explicitada nas informações que se seguem.

#### **Unidade Federal do Amazonas – Departamento de Física**

##### **LINHAS DE PESQUISA:**

Fotocondutividade e fotoluminescência em GaAs e outros semicondutores III-V. Gases de elétrons em poços quânticos semicondutores. Grupo em implantação. Início das atividades: 1985

##### **EQUIPAMENTOS DISPONÍVEIS:**

Pequenos itens para óptica, vácuo, criogenia e medidas elétricas.

##### **PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

1 experimental.

#### **Universidade Federal do Rio Grande do Norte – Departamento de Física**

##### **LINHAS DE PESQUISA:**

Teoria de propriedades eletrônicas de hetero-estruturas, estruturas semicondutoras Início das atividades: 1983

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

2 teóricos

**Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Física**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Estrutura de defeitos pontuais em semicondutores (teoria). Gás de elétrons confinado em poços quânticos semicondutores (teoria).

Início das atividades: 1985

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

2 teóricos

**Universidade da Brasília – Departamento de Física**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Propriedades ópticas de semicondutores III-V e de heteroestruturas GaAs-AlGaAs (experiência e teoria). Estrutura eletrônica de semicondutores (teoria)

Início das atividades: 1980

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

5 teóricos e 1 experimental

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:**

Laser, espectrofotômetro e montagem para fotoacústica.

**Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Física**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Produção de heteroestruturas de GaAs-AlGaAs por MBE. Ressonância paramagnética eletrônica em semicondutores. Fotoluminescência; Raman ressonante e efeito Hall quantizado em heteroestruturas de GaAs-AlGaAs (laboratórios em fase de aquisição) Defeitos pontuais em semicondutores (teoria). Gás de elétrons confinado em poços quânticos semicondutores (teoria).

Início das atividades: 1984

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

4 teóricos, 8 experimentais

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS DISPONÍVEIS:**

Sistema de MBE, espectrômetros de RPE.

**Universidade Federal de Uberlândia – Departamento de Física**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Estrutura eletrônica de defeitos pontuais em semicondutores (teoria)

Início das atividades: 1985

**Universidade Federal do Rio de Janeiro – Programa de Engenharia Metalúrgica e de Materiais (COPPE)**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Contactos metal-semicondutor, filmes semicondutores amorfos, difusão nesses filmes, células solares e outros dispositivos de silício amorfo hidrogenado.

Início das atividades: 1978

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

1 - Física Aplicada

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:**

Espectrômetros Auger e SIMS, sistemas de deposição de películas por evaporação, sistema de "sputtering" e de deposição por decomposição em descarga luminescente (glow-discharge), equipamentos para caracterização elétrica de dispositivos.

**Universidade Federal Fluminense – Departamento de Física**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Bandas de impurezas e semicondutores, estrutura eletrônica de amorfos e de sistemas de baixa dimensionalidade, propriedades dielétricas de semicondutores, semicondutores magnéticos, super-redes semicondutores. (atividade teórica)

Início das atividades: 1976

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

5 teóricos

**Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Física**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Caracterização de monocristais e heteroestruturas semicondutoras III-V por fotoluminescência, catodoluminescência e absorção óptica (experimental). Propriedades eletrônicas de ligas semicondutoras ternárias (teórica)

Início das atividades: 1984

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

2 teóricos, 1 experimental

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:**

Laser, espectrofotômetro, sistemas de vácuo e criogenia.

**Universidade de São Paulo – Instituto de Física**

1 – Departamento de Materiais e Mecânica

**LINHAS DE PESQUISA:**

Estrutura eletrônica de defeitos pontuais em semicondutores. Estrutura de bandas em smicondutores. Gás de elétrons confinados em poços quânticos. (atividade teórica).

Início das atividades: 1975

**PESQUISADORES EM DOUTORADO:**

**8 teóricos**

**2 – Departamento de Física Experimental**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Ressonância Paramagnética, Eletrônica em semicondutores, difratometria de raios-x

Início das atividades: 1980

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

**2 experimentais**

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:**

Espectrômetro de RPE, difratômetros de raios-x.

**Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica. Laboratório de Microeletrônica**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Materiais – cristais de silício, ligas de silício amorfo hidrogenado, epitaxia do silício por deposição de fase de vapor (CVD), filmes diversos ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{TiO}_2$ ,  $\text{Ta}_2\text{O}_5$ , etc...)

Processos – Oxidação do silício, difusão térmica de dopantes, implantação iônica, fotolitografia, metalização.

Dispositivos – MESFET de GaAs, células solares de silício (monocristalino, policristalino e amorfo), sensores de posição (atitude), diodos retificadores, tiristores, memórias ROM e RAM.

Início das atividades: 1967

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

**12, dispositivos**

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:**

Sistema computacional, fornos para difusão, reatores para CVD, equipamentos para fazer fotomáscaras, equipamentos para caracterização de materiais e dispositivos, equipamentos para decapagem, equipamentos para deposição de filmes, alinhados de fotomáscaras.

**Universidade de São Paulo – Departamento de Engenharia de Eletricidade da Escola Politécnica**

Laboratório de Sub-Sistemas Integráveis (POLI-USP, LSI)

**LINHAS DE PESQUISA:**

Componentes discretos e circuitos integrados de MDS (Silício e GaAs), estudos de silicetos de titânio e cobalto e de suas aplicações em dispositivos.

Início das atividades: 1967

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

### 3, dispositivos

#### EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:

Sistema computacional, fornos para difusão equipamentos para produção de silicetos, equipamentos para caracterização de materiais e dispositivos, equipamentos para decapagem, equipamentos para deposição de filmes, alinhadores de fotomáscaras.

#### Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Física

##### 1 – Departamento de Física do Estado Sólido e Ciência dos Materiais

#### LINHAS DE PESQUISA TEÓRICA:

Tunelamento ressonante de elétrons em heteroestruturas de GaAs-AlGaAs, super-redes semi-magnéticas, estrutura eletrônica de heteroestruturas/super-redes, defeitos em semicondutores, propriedades dielétricas de semicondutores, relaxação ultra-rápida em semicondutores, semicondutores altamente excitados.

#### LINHAS DE PESQUISA EXPERIMENTAL:

Cristalografia de filmes duros semicondutores, luminescência em semicondutores, refletividade óptica em super-redes semicondutoras, espectroscopia de impurezas em semicondutores, produção e caracterização de filmes de semicondutores II-VI, fotolitografia micron e sub-micron.

Início das atividades: 1971

#### EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:

Lasers, espectrofotômetros, difratômetros de raios-x, espectrômetro SIMS, equipamentos para produção de filmes finos, alinhadores para fotolitografia, sistemas de decapagem, equipamentos de criogenia.

##### 2 – Departamento de Física Aplicada

#### LINHAS DE PESQUISA:

Células fotovoltaicas de silício amorfo hidrogenado (produção de materiais e construção das células) estudos ópticos de filmes semicondutores, eletrodepositados (CdSe e outros), produção LPE e MOCVD e caracterização (óptica e elétrica) de heteroestruturas semicondutores de GaAs-AlGaAs, InP-InGaAs e InP – InGaAsP, desenvolvimento de lasers usando essas estruturas.

Início das atividades: 1971

#### EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:

Equipamentos para produção e caracterização de silício amorfo hidrogenado, lasers de gás, espectrofotômetros, reatores de LPE, reator de MOCVD, alinhadores de máscara para fotolitografia, sistemas de deposição de filmes e de decapagem, equipamentos para testes de células fotovoltaicas e de lasers. Equipamento para efeito Hall.

### **3 – Departamento de Eletrônica Quântica**

#### **LINHAS DE PESQUISA:**

Caracterização de carbono e oxigênio em silício cristalino por espectroscopia infravermelha, estudo vibracionais de defeitos de dopagem em semicondutores amorfos, espalhamento Raman em nitreto de silício e nitreto de germânio amorfos, espalhamento Raman ressonante em filmes de AlGaAs e heteroestruturas GaAs-AlGaAs, estudo de defeitos em semicondutores e de grafite intercalado por RPE e fotoluminescência.

Início das atividades: 1975

#### **EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:**

Lasers de gás e de corante, espectrômetros de visível e de infravermelho distante, espectrômetros de RPE e sistemas de criogenia.

#### **PESQUISADORES COM DOUTORADO NA UNICAMP:**

3 teóricos, 18 experimentais, 8 dispositivos.

#### **Universidade de São Paulo – São Carlos – Departamento de Física**

#### **LINHAS DE PESQUISA TEÓRICA:**

Gás de elétrons em poços quânticos, propriedades dielétricas de heteroestruturas semiconduotas, semiconduotes magnéticos. Interações elétron-fonons interfaciais, éxitons em poços quânticos bi e unidiemencionais, propriedades eletrônicas de (QWW) "quantum well wires"

#### **LINHAS DE PESQUISA EXPERIMENTAL:**

Crescimento de silício monocristalino, crescimento de GaAs-AlGaAs por MBE, caracterização de semicondutores por fotoluminescência e efeito Hall.

Início das atividades: 1973

#### **PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

3 teóricos, 2 experimentais

#### **EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:**

fornos para crescimento de cristais, sistema de MBE, lasers, espectrofotômetro, equipamento para efeito Hall.

#### **Universidade Federal de São Carlos – Departamento de Física**

#### **LINHAS DE PESQUISA:**

Gás de elétrons confinados em poços quânticos, efeito Hall quantizado, tunelamento eletrônico em heteroestruturas semiconduotas, estrutura de bandas em heteroestruturas semiconduotas, interação elétron-fonon superficiais, estrutura eletrônica de semicondutores magnéticos (pesquisa teórica). Fabricação e caracterização de contatos ôhmicos em semicondutores compostos dos grupos IV-IV-V.

Início das atividades: 1979

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

5 teóricos, 4 experimentais

**EQUIPAMENTOS:**

Evaporador, características IxV e CxV.

**Instituto de Pesquisas Espaciais**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Fabricação e caracterização de detetores e lasers de compostos IV-IV, desenvolvimento de células solares de Simono-cristalino para uso espacial, propriedades eletrônicas: bandas de impurezas, sistemas bidimensionais, interação elétron-fonon, difusão iônica em superfícies, defeitos profundos.

Início das atividades: 1978

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

5 teóricos, 1 experimental

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:**

Sistemas de crescimento de cristais volumétricos (bridgman Czochralski fase vapor) e epitaxiais (HWE e LPE), caracterização de cristais (microscopia óptica, raios-x, efeito Hall e densimetria) e de dispositivos (radiometria IV, característica IxV, tempo de resposta).

**Universidade Federal do Paraná – Departamento de Física**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Estudo de semicondutores por raios-x

Início das atividades: 1975

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

2 experimentais

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:**

Difratômetro de pó, câmaras de Weisemberg e Debye-Scherrer, difratômetro de duplo eixo.

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Física**

**LINHAS DE PESQUISA:**

Implantação de íons em semicondutores

Início de atividades: 1981

**PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

2 experimentais

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:**

Implantador de íons

## **Telebrás – Centro de Pesquisa e Desenvolvimento**

### **LINHAS DE PESQUISA:**

**Materiais** – crescimento de heteroestruturas GaAs-AlGaAs, InP-In GaAs e InP-InGaAsP por LPE, crescimento epitaxial de compostos III-V por MOCVD. Difusão em compostos III-V, deposição de dielétricos ( $\text{Si}_3\text{N}_4$ ,  $\text{Al}_2\text{O}_3$ ) por técnicas de plasma CVD, “sputtering” e feixe eletrônico, contactos ôhmicos, fotolitografia úmida e seca. Caracterização de materiais por fotoluminescência, catodoluminescência, microscopia eletrônica de varredura e EBIC, microscopia de transmissão de IV, difração de raios-x, efeitos Hall.

**Dispositivos** – construção de LEDs e lasers, caracterização e testes acelerados de vidas.

Início de atividades: 1978

### **PESQUISADORES COM DOUTORADO:**

1, dispositivos

### **EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS:**

Reatores de LPE e MOCVD, lasers de gás, espectrofotômetro, difratômetro de raios-x, microscópios de IV, microscópio eletrônico de varredura com catodoluminescência e EBIC, laboratório de fotolitografia, equipamentos de solda, montagem, e teste de dispositivos.

## **Heliodinâmica S/A.**

### **LINHAS DE PESQUISA:**

Produção e caracterização de silício poli e monocristalino, construção de células solares.

## **Indústrias de Microeletrônica: SID Microeletrônica, Elebra, Itaucom.**

Essas indústrias surgiram nos últimos três anos e estão empreendendo importantes esforços na produção de dispositivos eletrônicos discretos e circuitos integrados. As três estabeleceram metas de produzir (cada uma) cem milhões de circuitos integrados MOS de silício a partir de 1990. Não obtivemos informações detalhadas dessas empresas, com exceção da SID. Esta empresa está muito bem equipada, tem um ótimo corpo técnico e de manutenção (30 técnicos de nível superior só na manutenção) e pretende investir oitenta milhões de dólares nos próximos três anos.

Projeto Laser (Telebrás – CPqD)

# Física da Matéria Condensada

## DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

### BAIXAS TEMPERATURAS E SUPERCONDUTIVIDADE

**Universidade de São Paulo – Instituto de Física – Laboratório de Estado Sólido**

A implantação do laboratório se deu em 1961, com a montagem e colocação em funcionamento de dois liquefatores de nitrogênio e um de hélio. O primeiro responsável pelo laboratório foi Carlos Quadros, que com dois técnicos e a colaboração Gerhard Salinger, construiu o primeiro criostato que foi utilizado para medidas de suscetibilidades magnéticas de sais paramagnéticos de terras raras.

As linhas de pesquisas existentes com os principais pesquisadores envolvidos, que utilizam baixas temperaturas são:

- a) **Transições de fase magnéticas e fenômenos críticos**
  - Nei F. Oliveira Jr.
  - Carlos C. Bezerra
  - Armando Paduan Filho
- b) **Espectroscopia Mössbauer**
  - Hercilio R. Rechemberg
  - Angelo Piccini
- c) **Propriedades de Materiais Amorfos (magnéticos e supercondutores)**
  - Frank P. Missel
  - José Manuel de V. Martins
  - Hercilio R. Rechemberg
- d) **Magnetometria (dispositivos magnetométricos a partir de filmes finos)**
  - Nei F. Oliveira Jr.

Informações adicionais dessas linhas podem ser encontradas no levantamento da Área de Magnetismo de Metais, Ligas e Isolantes.

Os principais equipamentos existentes são:

Liquefatores de nitrogênio (2)

Liquefatores de hélio (2)  
Sistema de recuperação de hélio  
Refrigerador de diluição ( $^3\text{He} + ^4\text{He}$ )  
Bobinas supercondutoras (7)  
Eletroímãs de ferro (2)  
"Melt Spinners" (2)

### **Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – Laboratório de Criogenia**

A criação do Laboratório de Criogenia do CBPF foi iniciada em 1964 com a instalação de um liquefator de nitrogênio e foi realizada por Jacques Danon e Ramiro de Porto Alegre Muniz, com o objetivo da utilização dos líquidos criogênicos em experiências de Espectroscopia Mössbauer e Ressonância Paramagnética Eletrônica. O liquefator de hélio foi adquirido somente em 1967.

As linhas de pesquisas existentes com os principais pesquisadores envolvidos, que utilizam baixas temperaturas, são:

- a) Ressonância Paramagnética Eletrônica  
George Bemski  
Eliane Waynberg  
Alexandre M. Rossi
- b) Ressonância Magnética Nuclear  
Alberto Passos Guimarães
- c) Espectroscopia Mössbauer  
Jacques Danon  
Rosa B. Scorzelli  
Isabel de Souza Azevedo
- d) Correlações Angulares Perturbadas  
Henrique Saitovitch
- e) Espectroscopia Mössbauer de Sistemas Amorfos – SIMGI (Sistemas isolados em matrizes de gás inerte)  
Elisa M. B. Saitovich
- f) Propriedades de Transporte e Magnetometria  
Sônia Franco da Cunha

Informações adicionais sobre as linhas e), b) e d) podem ser encontradas nos levantamentos das Áreas de Ressonância Magnética e Magnetismo de Metais, Ligas e Isolantes respectivamente. As linhas e) e f) são características da subárea de Baixas Temperaturas

Os principais equipamentos são:  
Liquefatores de nitrogênio (2)  
Liquefatores de hélio (2)  
Sistema de recuperação de hélio  
Bobinas Supercondutoras (2)

**Universidade de São Paulo – Instituto de Física e Química de São Carlos – Departamento de Física e Ciência dos Materiais**

Em São Carlos trabalhos com líquidos criogênicos foram iniciados por volta de 1968, por Sergio Mascarenhas, utilizados em técnicas de medidas de corren-

te de despolarização termoestimulada e espectroscopia. Em 1972 foi instalado o primeiro liquefator de hélio (Phillips), que foi desativado em 1980. Outro liquefator foi adquirido em 1985, semelhante aos demais do país e instalado em 1986.

As linhas de pesquisas existentes com os principais pesquisadores envolvidos, que utilizam baixas temperaturas, são:

a) Ressonância Magnética e Magneto Óptica

Horácio Carlos Panepucci  
Rene Ayres Carvalho  
Maria Cristina Terrile  
José Pedro Donoso Gonzales  
Cláudio José Magon  
Nicolau Beckman

b) Óptica

Jarbas Caiado de Castro Neto  
Sergio Carlos Zilio  
Antonio Ricardo Dröher Rodrigues  
Vanderlei Salvador Bagnato  
Máximo Sui-Li  
Tomaz Catunda  
Luiz Antonio de Oliveira Nunes

c) Espectroscopia Óptica

Michel Andre Aegerter  
Heitor Cury Basso

Informações adicionais sobre essas linhas a), b) e c) podem ser encontradas nos levantamentos das Áreas de Ressonância Magnética e Óptica respectivamente.

Os principais equipamentos existentes são:

Liquefatores de nitrogênio (2)  
Liquefatores de hélio  
Sistema de recuperação de hélio  
Purificação de hélio.

### Universidade Federal de Minas Gerais – Departamento de Física

As atividades de pesquisa utilizando nitrogênio líquido foram iniciadas em 1967, quando foi instalado e entrou em operação o liquefator de nitrogênio adquirido com recursos da Fundação Rockefeller. O liquefator de hélio adquirido em 1971 com recursos do BID só foi instalado em 1976.

As linhas de pesquisa que utilizam baixas temperaturas são:

a) Ressonância Magnética

(7 pesquisadores)

b) Espectroscopia Mössbauer

(4 pesquisadores)

c) Óptica

(4 pesquisadores)

d) Física de Metais

(1 pesquisador)

e) Correlação Angular

(3 pesquisadores)

Os principais equipamentos existentes são:

Liquefator de nitrogênio

Liquefator de hélio

Sistema de recuperação de hélio

#### **Universidade Federal de Pernambuco – Departamento de Física**

Em 1971 foram iniciados os trabalhos de pesquisa dentro de um programa organizado para implantar atividades de pesquisa no recém-criado Departamento de Física. A criação do grupo resultou da iniciativa de cinco pesquisadores, Ivon P. Fittipaldi, Mauricio D. Coutinho Filho, Marco A. G. de Moura, Cid B. de Araújo e José R. Rios Leite que, sob a liderança de Sergio M. Rezende, único doutor na época, concentraram esforços na área de Magnetismo, visando maximizar as chances de sucesso do projeto em local sem qualquer tradição científica.

As linhas de pesquisas existentes com os principais pesquisadores envolvidos, que utilizam baixas temperaturas, são:

- a) Excitações Elementares e Fenômenos Físicos em Isolantes Magnéticos  
Sergio M. Rezende
- b) Magnetismo em Semicondutores Magnéticos  
Sergio M. Rezende  
Mauricio Coutinho Filho  
José Marcilio C. Ferreira
- c) Ressonância Magnética Nuclear em Isolantes Magnéticos  
Mario Engelsberg  
José Albino Aguiar
- d) Óptica Não-Linear em Sólidos  
Cid B. Araújo

Informações adicionais sobre as linhas a) e b) podem ser encontradas no levantamento da Área de Magnetismo de Metais, Ligas Isolantes e as c) e d) nas Áreas de Ressonância Magnética e Óptica respectivamente.

Os principais equipamentos existentes são:

Liquefator de nitrogênio

Liquefator de hélio

Sistema de recuperação de hélio

Bobina supercondutora

#### **Universidade Federal do Rio Grande do Sul – Instituto de Física**

O início das atividades em Baixas Temperaturas, utilizadas na unidade de refrigeração a hélio gasoso, foi em 1972 por John Rogers e Fernando C. Zawislak. Em 1973 foi instalado e colocado em operação um liquefator de hélio.

As linhas de pesquisas existentes com os principais pesquisadores envolvidos, que utilizam baixas temperaturas, são:

- a) Espectroscopia Mössbauer  
Adalberto Vasquez  
João Batista Marimon da Cunha

Livio Amaral  
José Irineu Kunrath  
Moacir I. da Costa Jr.

**b) Propriedades de Transporte (resistividade)**

Mário Norberto Baibich  
Delmar Estevam Brandão  
Julio Vitor Kunzler  
Paulo Schaf  
Wido Herwig Schreiner

Informações adicionais sobre a linha a) podem ser encontradas no levantamento da Área de Magnetismo de Metais, Ligas e Isolantes.

Os principais equipamentos existentes são:

Liquefator de nitrogênio  
Liquefator de hélio  
Sistema de recuperação de hélio  
Bobina supercondutora

**Universidade Federal do Rio de Janeiro – Instituto de Física**

As atividades em Baixas Temperaturas foram iniciadas em 1973 por Eugenio Lerner, com a implantação do Laboratório de Baixas Temperaturas, instalando-se em 1974 os liquefadores de nitrogênio e hélio com a participação ativa de Erich Meyer.

As linhas de pesquisas existentes com os principais pesquisadores envolvidos, que utilizam baixas temperaturas, são:

**a) Transições de Fase de Sistemas Absorvidos**

Eugenio Lerner  
Raul E. Rapp  
Francisco Artur B. Chaves  
Miguel A. Novak  
Fortine Hanono

**b) Sistemas Magnéticos Desordenados e de Baixa Dimensionalidade**

Miguel A. Novak  
Raul E. Rapp  
Eugenio Lerner

**c) Propriedades Magnéticas de Sistemas de Terras Raras (Teórico)**

Laercio Cabral Lopes

**d) Metaestabilidade Estrutural e Supercondutividade (Exp. e Teor.)**

Erich Meyer

**e) Magnetismo em Ferritas**

Fernando de S. Barros  
Julio Maria Neto  
Paulo Henrique P. Domingues

**f) Sistemas com Baixa Dimensionalidade Magnética**

Paulo Henrique P. Domingues  
Julio Maria Neto

**g) Magnetismo de Materiais Amorfos Isolantes**

Paulo Henrique P. Domingues

- Julio Maria Neto
- h) Espectroscopia Óptica  
Fernando de S. Barros  
Teocrito Abritta
- i) Ressonância Paramagnética Eletrônica  
Ney Vernon Vugman  
Nelson M. Pinhal

Informações adicionais sobre as linhas b), c), e), f) e g) podem ser encontradas no levantamento da área de Magnetismo de Metais, Ligas e Isolantes e os das linhas h) e i) nas áreas de Óptica e Ressonância Magnética respectivamente.

Os principais equipamentos existentes são:  
Liquefatores de nitrogênio (2)  
Liquefator de hélio  
Sistema de recuperação de hélio  
Aparelho de Raio X  
Bobina supercondutora  
“Melt Spinner”

#### **Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – Departamento de Física**

As atividades em Baixas Temperaturas foram iniciadas em 1973, por Paulo Costa Ribeiro, com a instalação de um sistema de recuperação de hélio e a organização de uma infra-estrutura de apoio para a obtenção de hélio líquido, com a colaboração do Instituto de Física da UFRJ.

As linhas de pesquisas com os principais pesquisadores envolvidos são:

- a) Propriedades Ópticas e Elásticas de Cristais e Filmes de Materiais Iônicos – Moleculares  
Luiz Carlos Scavarda  
Jean Pierre V. der Weid
- b) Biofísica Molecular  
Sônia R. Wanderley Louro
- c) Biomagnetismo  
Paulo Costa Ribeiro  
Sônia R. W. Louro
- d) Desenvolvimento de Transformadores de Fluxo  
Paulo Costa Ribeiro  
Jean Pierre V. der Weid

Informações adicionais sobre a linha a) podem ser obtidas no levantamento da Área de Óptica e sobre as linhas b) e c) no das Áreas de Biofísica e Magnetismo de Metais, Ligas e Isolantes respectivamente.

Os principais equipamentos existentes são:  
Sistema de recuperação e purificação de hélio  
Magnetômetro Supercondutor  
Magnetocardiógrafo

## **Universidade Feral do Ceará – Instituto de Física**

As atividades de pesquisa em Baixas Temperaturas foram iniciadas no início da década de 80. Foi instalado um sistema de recuperação de hélio que está ligado aos laboratórios de espalhamento de luz e espectroscopia Mössbauer. O gás hélio é transportado em cilindros para Recife, é liquefeito na UFPE e transportado em botijões de 100 litros para Fortaleza, por via terrestre.

### **Fundação de Tecnologia Industrial – Divisão de Materiais Refratários**

No momento está se implantando um laboratório de Baixas Temperaturas e Supercondutividade, por Daltro G. Pinatti, cujo grupo já vem trabalhando nesta área desde 1974, com pesquisas desenvolvidas na UNICAMP.

As principais linhas de pesquisa são:

- a) Cabos Supercondutores de NbTi e Nb<sub>3</sub>Sn
- b) Magnetos Supercondutores

Os principais equipamentos que estão sendo implantados:

Central Criogênica com capacidade para 240 l/h

Estação de altos campos magnéticos composta de dois magnetos de Nb<sub>3</sub>Sn dosados com Ti.

# Física da Matéria Condensada

## DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

### MAGNETISMO

Universidade de São Paulo – Instituto de Física  
Laboratório de Baixas Temperaturas e Altos Campos Magnéticos

#### Experimentais:

- Nei F. de Oliveira Jr.  
Transições de Fase, Fenômenos Críticos, Filmes Magnéticos
- Franck Missel  
Materiais Magnéticos Cristalinos e Amorfos
- Carlos C. Bezerra, Armando Paduan Filho e Carlos H. Westphal  
Magnetismo, Transições de Fase, Fenômenos Críticos,
- Hercílio R. Rechenberg  
Magnetismo em Ligas Metálicas
- A. Piccini  
Magnetismo
- J. M. V. Martins  
Materiais Magnéticos
- Estudantes: 4 de doutoramento e 10 de mestrado.

#### Teóricos:

- Sonia Frota Pessoa  
Estrutura Eletrônica
- Silvio R. Salinas, Carlos Yokoi e Mario J. de Oliveira  
Transições de Fase em Equilíbrio, Fenômenos Críticos e Multicríticos, Sistemas Desordenados  
Ver também Mecânica Estatística
- Estudantes: 1 de doutorado e 1 de mestrado

## **Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Física “Gleb Wataghin”**

- Reiko Turtelli  
Materiais Ferro-Magnéticos Amorfos  
Ver também Baixas Temperaturas
- Mario Foglio  
Valência Intermediária (propriedades magnéticas)
- Guilherme Cabrera  
Magnetismo de Metais e Ligas
- Carlos Rettori  
Ressonância Paramagnética Eletrônica, Nuclear e Magnetização em Compostos Metálicos (análise de sementes e compostos intercalados)  
Ver também ressonância magnética
- José Suassuna Filho  
Hidretos Metálicos  
Ver também ressonância magnética
- Gaston Barberis  
Defeitos Pontuais em Semicondutores (RPE, ENDOR)  
RPE em Metais e Ligas  
Ver também ressonância magnética
- Edson Zacarias da Silva  
Estrutura Eletrônica de Compostos Metálicos e Ligas Magnéticas

## **Universidade Federal do Espírito Santo**

- Carlos Larica  
Mossbauer em Solos
- Klinger M. Alves e A. C. Barata  
NMR em Sistemas com Terras Raras (em colaboração com A. P. Guimarães CBPF)
- Evaristo Nunes Filho  
Medidas de Susceptibilidade em Sistemas de Terras Raras e Solos.

## **Universidade de São Paulo – Instituto de Física e Química de São Carlos**

- Luiz Nunes de Oliveira  
Ligas Magnéticas Diluídas
- 2 doutorandos

## **Universidade Federal de Santa Catarina**

- Wagner Figueiredo  
Magnons em Superfícies  
Ver também Mecânica Estatística

## **Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**

Experimentais:

- A. Passos Guimarães, S. F. Cunha, E. B. Saitovitch, R. B. Scorzelli, H. Saitovitch, I. Azevedo, J. Danon  
NMR em Sistemas Intermetálicos de Terras Raras  
Ver também ressonância magnética  
Propriedades de Transporte e Magnetometria em Sistemas Fases de Laves  
Correlação Angular  
Efeito Mössbauer em Ligas Fe Ni  
Sistemas Amorfos Mn Sn: Estudos por Efeito Mössbauer

#### **Teóricos:**

- A. A. Gomes, J. Helman, O. L. T. de Menezes, X. A. da Silva, C. Taft, A. Troper.  
Propriedades Magnéticas e Estrutura Eletrônica de Sistemas Metálicos e Intermetálicos de Terra Rara, Actínídeos e Metais de Transição, Valência Intermediária, Supercondutividade.

#### **Universidade Federal de São Carlos**

- Maristela O. M. D. de Souza, Sylvio D. de Souza  
Ligas de Heusler Estudadas por Correlação Angular

#### **Universidade Federal Fluminense**

- Mucio A. Continentino  
Resistividade Elétrica de Metais com Metaestabilidade Magnética e Estrutural  
Metaestabilidade em Antiferromagnetos Desordenados  
Relaxação Estrutural e Magnética em Vidros Magnéticos
- Enrique Anda  
Estudo da inter-relação da Correlação Eletrônica Local e da Desordem em Sistemas Unidimensionais  
Transição Metal-Isolante e Propriedades Magnéticas de Sistemas com Correlação Eletrônica Local  
Transição de Valência em Sólidos
- Roberto Bechara Muniz, José d'Albuquerque e Castro  
Ondas de Spin em Ligas Binárias Metálicas  
Ondas de Spin no Ferro  
Propriedades Magnéticas de Intermetálicos de Metais de Transição e Actínídeos
- Norberto Majlis, Silvia Selzer  
Propriedades Magnéticas de Superfícies  
Efeitos de Potenciais Superficiais Arbitrários sobre as Excitações Localizadas e de Volume  
Magnetização Superficial em Metais Ferromagnéticos  
Magnetismo de Superfície em Sistemas com Spins Localizados  
Propriedades Magnéticas de Interfaces

#### **Universidade Federal do Rio de Janeiro – Instituto de Física**

- Fernando de Souza Barros, Julio Maria Neto, Paulo Domingues, Helio Salim de Amorim e Manoel Rothier de Amaral Jr.
  1. Ferritas
    - a) Estudo de ordem magnética de curto alcance nas faces cristalográficas de ordem e desordem
    - b) Continuação dos estudos das propriedades magnéticas de ferritas de lítio diluídas por gálio. Diagrama de fase e estruturas triangulares.
    - c) Continuação do estudo de aglomerados magnéticos de ferro em aluminatos e galatos de lítio. Caracterização da ordem local por Raios-X
- Paulo Domingues e Julio Maria Neto
  2. Sistemas com baixa dimensionalidade magnética  
Trata-se de proposta para estudo de sulfeto de bário e ferro. O primeiro estágio, determinação dos diagramas de fase para formação dos compostos  $BaFe_2S_4$  e  $BaFe_2S_3$ , já iniciado.
  3. Magnetismo de materiais amorfs isolantes  
A proposta inicial consiste no exame dos compostos  $Mg_3Fe_2O_6$  e  $Zn_3Fe_2O_6$
  4. Propriedades Magnéticas de Sistemas de Terra Rara com valência intermediária  
Laércio Cabral Lopes
  5. M. Novak, R.Rapp, Eugenio Lerner: estudos de sistemas magnéticos desordenados e de baixa dimensionalidade (2 dimensões)

#### Universidade Federal de Minas Gerais

- E. Galvão da Silva, R. A. Mansur, G. A. P. Alcazar  
Propriedades eletrônicas e estruturais de ligas metálicas
- E. Galvão da Silva  
Propriedades físicas de minerais e solos
- E. Galvão da Silva  
Aplicação de elétrons de conversão Mössbauer ao estudo de películas delgadas
- Estudantes: 3

#### Universidade Federal de Pernambuco

- Sergio M. Rezende, Osiel de A. Bonfim, Maurício D. Coutinho Filho, José Marcílio C. Ferreira  
Ver também Mecânica Estatística  
Fenômenos dinâmicos não lineares em ferromagnetos  
Espalhamento de luz em isolantes magnéticos – Experimental  
Propriedades magnéticas, fenômenos críticos e transições de fase em sistemas magnéticos – Experimental e teórico
- Excitação elementares e magnetismo de semicondutores magnéticos - Experimental e teórico.  
Ver também Baixas Temperaturas  
Origens do magnetismo itinerante e propriedades magnéticas de metais
- Mário Engelsberg, José Albino de Aguiar  
Ressonância Magnética  
Ver também Ressonância

## Universidade Federal do Rio Grande do Sul

- 1) Estudos através de Espectroscopia Mössbauer  
A. Vasquez, L. Amaral, M. Behar M. Costa, J. B. M. Cunha, J. I. Kunrath e F. Zawislak  
Hidretos, Ordem-desordem em  $\text{Pd}_3\text{Fe}$ ,  $\text{NiFe}$ , Ligas de Heusler, Oxidação interna, Amorfos  $(\text{FeNi})\text{B}_{20}$ , Minerais, Intermetálicos Leves.
  
- 2) Propriedades de Transporte  
D. Brandão, J. Kunzler, W. Schreiner, M. N. Baibich, J. Schaf, P. Pureur, R. Livi  
Ligas de Heusler, amorfos  $(\text{FeNi})\text{B}_{20}$ , vidros de spin e desordem por implantação
  
- 3) Implantação em metais, ligas e aços, filmes finos observados por Espectroscopia Mössbauer, ligas de Fe, Sn,  $\text{FeSi}$  e  $\text{FeC}$   
I. Baumvol, M. Behar, P. H. Dionísio e F. Zawislak.
  
- 4) Magnetização de ligas  $\text{FeSi}$   
F. P. Livi e J. Schmidt
  
- 5) Ruídos magnéticos, mecanismos de magnetização  
F. P. Livi

# Física da Matéria Condensada

## DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

### RESSONÂNCIA MAGNÉTICA

**Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**

Início das Atividades: (1962)

#### PRINCIPAIS PESQUISADORES:

George Bemski (Experimental, Doutor, Universidade da Califórnia Berkeley, 1953).

Ramiro P. A. Muniz (Experimental, Mestre, Universidade da Califórnia (aposentado)).

Alberto P. Guimarães (Experimental, Doutor, Universidade de Manchester, Inglaterra, 1971)

Eliane Wajnberg (Experimental, Doutor, PUC-RJ, 1984)

Gerard Poupeau (Experimental, Doutor, Universidade de Paris, 1974).

Alexandre Rossi (Experimental, Mestre, CBPF, 1975).

Jorge Helmen (Teórico, Doutor, Universidade de Córdoba, Argentina, 1966).

Ximenes A. de Silva (Teórico, Doutor, CBPF, 1973)

#### LINHAS DE PESQUISAS:

*Interações Hiperfinas e Quadrupolares em Sistemas Metálicos Contendo Terras Raras, Estrutura Magnética de Compostos Intermetálicos, Ligas de Heusler (RMN) (Alberto P. Guimarães)*

*Biofísica, principalmente estudo de Proteínas de Heme (RPE) (George Bemski, Eliane Wajnberg, Alexandre Rossi)*

*Defeitos em Sólidos (RPE) (Ramiro P. A. Muniz, George Bemski);*

*Datação Geofísica (RPE) (Gerard Poupeau)*

Ressonância Magnética e Relaxação na Física da Matéria Condensada (Teoria)  
(Jorge Helman, Ximenes A. da Silva).

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS E INFRA-ESTRUTURA:**

Espectrômetro RPE Varian V - 4502 (1962)

Espectrômetro RPE Varian E - 9 (1970)

Espectrômetro RMN Bruker SXP (5-100 MHz) (1980)

Hélio Líquido e Nitrogênio Líquido, Oficina Mecânica e Eletrônica, Biblioteca com acervo bem atualizado.

**Instituto Militar de Engenharia**

Início das Atividades: 1971

**PRINCIPAIS PESQUISADORES:**

Ronaldo Sergio de Biasi (Experimental, Doutor, University of Washington, 1971)

Antonio Alberto Ribeiro Fernandes (Experimental, Mestre, IME, 1982)

**LINHAS DE PESQUISAS:**

Estudo da Cristalização de Vidros Metálicos (RPE)

(Ronaldo Sergio de Biasi, Antonio Alberto Ribeiro Fernandes)

Estudo da Lixiviação dos Ortofosfatos de Lantânio e Cério (Ronaldo Sergio de Biasi)

Investigação de Centros de  $V^{2+}$  em MgO produzidos por Radiação Ionizante

(Ronaldo Sergio de Biasi e Antonio A. Ribeiro Fernandes) (RPE)

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS E INFRA-ESTRUTURA:**

Espectrômetro RPE Varian E / 12 (1971), Nitrogênio Líquido, Oficinas de Apoio (quase inexistentes), Biblioteca razoável, mas com acervo desatualizado.

**Universidade de São Paulo – Instituto de Física e Química de São Carlos**  
**Departamento de Física e Ciência dos Materiais**

Início das Atividades: 1971

**PRINCIPAIS PESQUISADORES:**

Horácio Carlos Panepucci (Experimental, Doutor, CBPF, 1971)

Maria Cristina Terrile (Experimental, Doutor, Universidade de Cuyo, Argentina, 1976).

Renê Ayres Carvalho (Experimental, Doutor, IFQSC/USP, 1977)

José Pedro Donoso Gonzalez (Experimental, Doutor, UNICAMP, 1982)

Claudio José Magon (Experimental, Doutor, IFQSC/USP, 1985).

**LINHAS DE PESQUISAS:**

Imagens e Espectroscopia "in vivo" (Horácio Carlos Panepucci)

Isolantes Magnéticos (Claudio J. Magon, Renê A. Carvalho, Maria Cristina Terrile)

Condutores Iônicos (José P. Donoso González, Horácio Carlos Panepucci)

## **EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS E INFRA-ESTRUTURA:**

Magneto Varian 12"

Magneto Varian 9"

Magneto Supercondutor (0-60 Kgauss)

Magneto Supercondutor (0-20 Kgauss) para espectroscopia "in vivo"

Espectrômetro RPE (Banda X e Q)

Espectrômetro de RMN pulsado e CW

Hélio Líquido e Nitrogênio Líquido, Oficina Mecânica, Oficina Eletrônica, Central de Computação, Oficina de óptica, Biblioteca com acervo atualizado.

### **Universidade Federal de Goiás**

Início das Atividades: (O início das atividades de pesquisa está previsto para 1987)

#### **PRINCIPAIS PESQUISADORES:**

Waldemar Wolney Filho (Experimental, Doutor – Universidade de Sheffield, Inglaterra, 1980)

Ricardo Fraua Bufaiçal (Experimental, Doutor – Universidade de Sheffield, Inglaterra, 1982)

Fernando Pelegrini (Experimental, Doutor – Universidade de Sheffield, Inglaterra, 1984)

#### **LINHAS DE PESQUISAS:**

Ressonância Magnética Nuclear (Waldemar Wolney Fo.)

Ressonância Paramagnética Eletrônica (Ricardo F. Bufaiçal)

Ressonância Ferromagnética (Fernando Pelegrini).

#### **EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS E INFRA-ESTRUTURA:**

As características do grupo são bastante insólitas já que conta com três doutores em Física Experimental sem nenhum equipamento. A instalação de um laboratório de RMN e RPE está prevista para 1987.

Oficinas eletrônica e mecânica parcialmente equipadas, Biblioteca em fase de organização, Centro de Computação em fase de organização.

### **Universidade Federal de Minas Gerais**

Início das Atividades: 1966

#### **PRINCIPAIS PESQUISADORES:**

Ramayana Gazzinelli (Experimental, Doutor-Universidade de Columbia USA, 1964)

Geraldo Mathias Ribeiro (Experimental, Doutor, USP, 1972)

Alaor Silveira Chaves (Experimental, Doutor – Universidade de Southern Califórnia USA, 1973)

José F. Sampaio (Experimental, Doutor, UFMG, 1986)

Maria S. Dantas (Experimental, Mestre, UFMG, 1977).

#### **LINHAS DE PESQUISAS:**

Transições de Fase Estruturais (principalmente materiais ferroelétricos) (R. Gaz-

zinelli, G. M. Ribeiro, A. S. Chaves, J. F. Sampaio, J. C. Machado da Silva).  
Transições de Fase Incomensuráveis (R. Gazzinelli, G. M. Ribeiro, A. S. Chaves,  
M. S. Dantas)

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS E INFRA-ESTRUTURA:**

Espectrômetro RPE 9 GHz

Espectrômetro RPE 35 GHz

Espectrômetro RPE/ENDOR 9 GHz

Hélio Líquido e Nitrogênio Líquido, Fonte de Raios X (90 KV, 15mA), Sistema para medidas de constante Dielétrica, microcomputadores (dois), Sistema de Iluminação de Alta-Potência.

Todo o equipamento está em funcionamento, porém as fontes dos eletroímãs estão em forma precária. Oficina Mecânica, Oficina de Vidro, Oficina Eletrônica, Raios X. Biblioteca com acervo atualizado.

**Universidade Federal de São Carlos**

Início das Atividades: 1982

**PRINCIPAIS PESQUISADORES:**

Paulo Sergio Pizani (Experimental, Doutor, IFQSC/USP, 1983)

Aderbal Carlos de Oliveira (Experimental, Doutor-Oxford University Inglaterra, 1982).

**LINHAS DE PESQUISAS:**

Propriedades Magnéticas, Elétricas e Ópticas em Aluminossilicatos (Centros de Cor) e em família de Fosfatos de Terras Raras (Aderbal C. de Oliveira, Sergio Pizani).

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS E INFRA-ESTRUTURA:**

Eletroíma de 7" (construção própria)

Eletroíma de 9" (sem fonte) (Doação)

Equipamento Eletrônico para RMN CW

Oficina de Criogenia com sistema de recuperação de gás Hélio a ser liquefeito no IFQSC/USP, Oficina Eletrônica precariamente equipada, Oficina Mecânica, Biblioteca com acervo insuficiente, ou desatualizado.

**Universidade Federal de Pernambuco**

Início das Atividades: 1971

**PRINCIPAIS PESQUISADORES:**

Sergio M. Rezende (Experimental, Doutor-MIT, USA 1967)

Mario Engelsberg (Experimental, Doutor-Washington University USA, 1971)

Mauricio D. Coutinho Fo. (Teórico, Doutor-USP, 1973)

Marcilio C. Ferreira (Experimental, Doutor-UFPE, 1985)

J. Albino O. de Aguiar (Experimental, Doutor-UFPE, 1986)

Fernando Sampaio Moraes (Experimental, Doutor-Universidade da Califórnia, Santa Barbara, USA, 1985)

#### **LINHAS DE PESQUISAS:**

Fenômenos Magnéticos não lineares em Ferromagnetos (RFM) (Sergio Rezende).  
Excitações elementares e Magnetismo de Semicondutores Magnéticos (RFM) (Marcilio C. Ferreira, Mauricio D. Coutinho Fo. e Sergio Rezende)  
Sistemas magnéticos desordenados. Percolação (RMN) (J. Albino O. de Aguiar, Mario Engelsberg)  
Sistemas amorfos. Vidros (RMN) (Mario Engelsberg)  
Geração de Imagens por RMN (Mario Engelsberg)  
Polímeros e Condutores Orgânicos. Silício Amorfo (RPE). (Fernando Sampaio Moraes)

#### **EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS E INFRA-ESTRUTURA:**

Magneto Varian 12''  
Magneto Varian 9''  
Magneto Supercondutor (0-80 Kgauss)  
Magnetos 4'' (dois)  
Espectrômetros RMN pulsados (dois)  
Espectrômetros RMN onda contínua  
Equipamentos e dispositivos de Microondas (várias frequências)  
Hélio Líquido e Nitrogênio Líquido, Oficinas Mecânica e Eletrônica, Centro de Computação, Raios-X e Preparação de amostras. Biblioteca com acervo atualizado.

**Universidade Federal do Rio de Janeiro**

**Início das Atividades: 1978**

#### **PRINCIPAIS PESQUISADORES:**

Ney Vernon Vugman (Experimental, Doutor-CBPF, 1973)  
Antonio S. Mangrich (Experimental, Doutor-IO-UFRJ, 1983)  
Suely Reis N. da Silva (Teoria, Mestre-IF-UFRJ, 1976)  
Nelson M. Pinhal (Experimental, Mestre-IF-UFRJ, 1977)  
João J. F. de Souza (Experimental, Mestre-IF-UFRJ, 1983)

#### **LINHAS DE PESQUISAS:**

Novos complexos de metais de transição em redes de halogenetos alcalinos submetidos a danos de radiação (Nelson M. Pinhal, Ney V. Vugman, Suely Reis Nogueira) (RPE)  
Matéria Orgânica Sedimentar, propriedades de arenitos e xistos betuminosos (RPE) (João José F. de Souza, Ney V. Vugman)  
Interação de íons metálicos ( $V^{2+}$ ,  $Mn^{2+}$ ,  $Fe^{3+}$ ,  $Cu^{2+}$ ) com ácidos húmicos de turfas e carvões brasileiros e com zeólitos utilizados como catalizadores de craqueamento de óleos pesados (Antonio S. Mangrich, Ney V. Vugman).

#### **EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS E INFRA-ESTRUTURA:**

Espectrômetro RPE Bruker Mod. ER-420 (1979) com acessórios para controle de temperatura, computador, cavidade de transmissão óptica, célula eletrolítica para RPE.  
Hélio Líquido, Nitrogênio Líquido, Oficinas de apoio, Raios-X.

**Espectrômetro Mössbauer.**

**Universidade Estadual de Campinas – Instituto de Física “Gleb Wataghin”**

**Início das Atividades(1975)**

**PRINCIPAIS PESQUISADORES:**

**Carlos Rettori (Experimental, Doutor – Universidade de Buenos Aires, Argentina, 1971)**

**Gaston Barberis (Experimental, Doutor,- Universidade de Buenos Aires, Argentina, 1975)**

**José Suassuna Filho (Experimental, Doutor, Unicamp, 1979)**

**Flavio C. G. Gandra (Experimental, Doutor, Unicamp, 1981)**

**LINHAS DE PESQUISAS:**

**RPE e Susceptibilidade Magnética em Grafites Intercalados, Defeitos Pontuais em Semicondutores, Hidretos Metálicos, Ligas Metálicas, melhoramento Genético de Sementes Dieaginosas.**

**EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS E INFRA-ESTRUTURA:**

**Espectrômetro de RPE**

**Espectrômetro de RMN**

**Susceptibilidade SQUID (com defeito)**

**Analisador por RMN**

**Laboratório de Química, Reatores para preparação de amostras, Hélio Líquido e Nitrogênio Líquido, Oficinas elétrica e mecânica, Oficinas de apoio técnico (pre-cárias) Biblioteca (relativamente desatualizada).**

**Universidade de São Paulo, Departamento de Física Experimental**

**Início das Atividades: 1979**

**PRINCIPAIS PESQUISADORES:**

**Walter Sano (Experimental, Doutor, USP, 1975)**

**José C. Sartorelli (Experimental, Doutor, USP, 1982)**

**José Alberto Ochi (Experimental, Mestre-USP, 1977)**

**Walter M. Pontuschka (Experimental, Doutor-USP, 1979)**

**Sadao Isotani (Experimental, Doutor, USP, 1971)**

**LINHAS DE PESQUISAS:**

**Estudo de estados de defeitos em vidros óxidos (isolantes) e calcogenetos (semicondutores) (Walter Pontuschka, Sadao Isotani)**

**Centros de cor em gemas naturais do Brasil (Walter Pontuschka, S. Isotani)**

**Cinética de crescimento e decaimento de centros paramagnéticos induzidos por radiação (Walter Pontuschka, S. Isotani).**

**Estudos de sais hidratados de Níquel e Manganês como ferrosilicatos, fluorboratos, percloratos, cloretos etc. (Walter Sano, José C. Sartorelli, José A. Ochi).**

**Estudos dos Isomorfos de Zinco dos sais acima citados, com diluição de níquel**

e manganês (Walter Sano, José C. Sartorelli, José A. Ochi)

#### EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS E INFRA-ESTRUTURA:

O grupo utiliza o espectrômetro de RPE do IPT através de um convênio especial. Não possui um espectrômetro próprio.

Está sendo concluído um espectrômetro RQN pulsado (Walter Pontuschka)

Outras técnicas utilizadas (principalmente em outros laboratórios):

Absorção óptica, Infravermelho, Fluorescência de Raios-X.

Outras técnicas previstas ou já funcionando: Calor específico, Condutividade elétrica.

#### Universidade Federal Fluminense

Início das atividades: 1974 no Núcleo de Pesquisas Científicas do Rio de Janeiro (NEPEC).

#### PRINCIPAIS PESQUISADORES:

João Carlos Fernandes (Experimental, Mestre, Livre Docente)

José Manoel Seixos (Tempo parcial) (Experimental, Mestre)

José Leonardo Demetrio de Souza (Experimental, Mestre)

#### LINHAS DE PESQUISAS:

O grupo está na atualidade em condições de realizar as primeiras medições utilizando técnicas de Ressonância Magnética numa faixa de frequências geralmente considerada como pouco acessível (80 MHz até 700 MHz). As linhas de pesquisa já iniciadas ou previstas são: em sólidos magnéticos e RFM em materiais de baixa anisotropia magnética.

#### EQUIPAMENTOS PRINCIPAIS E INFRA-ESTRUTURA:

O grupo montou um espectrômetro *super-regenerativo*, modulado em frequência que pode operar entre 80 e 700 MHz. Possui também um magneto VARIAN de 9 polegadas com campo máximo de 9.500 Gauss, equipamentos diversos de uso geral no laboratório, sistema de vácuo completo e criostato para utilizar com nitrogênio líquido. A oficina mecânica é modesta, mas o pessoal é competente. A biblioteca ficou dois anos sem receber nenhuma revista, mas atualmente seu acervo está sendo atualizado.

# Física da Matéria Condensada

## DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

### ESPECTROSCOPIA MÖSSBAUER

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas

Início das Atividades: 1961

#### DOUTORES:

- Elisa Saitovitch
- Isabel de Souza Azevedo
- Jacques Danon
- Rosa Scorzelli

#### LINHAS DE PESQUISAS:

- Ligas bimetálicas amorfas preparadas pelo método de condensação do vapor, envolvendo isótopos Mössbauer de  $^{119}\text{Sn}$ ,  $^{57}\text{Fe}$  e  $^{151}\text{Eu}$ . (E. Saitovitch)
- Moléculas isoladas em matrizes de gás congelados a 5K, envolvendo isótopos de  $^{119}\text{Sn}$ ,  $^{57}\text{Fe}$  e  $^{151}\text{Eu}$ . (E. Saitovitch).
- Meteoritos (J. Danon, R. Scorzelli, I. S. Azevedo).
- Ordenamento de ligas Fe Ni obtidas pela condensação de vapor.
- Ordenamento de ligas FeNi induzido por irradiação com elétrons.
- Minerais naturais contendo ferro (J. Danon, R. Scorzelli, I. S. Azevedo).
- Filmes finos semicondutores com impurezas de  $^{57}\text{Fe}$  e  $^{119}\text{Sn}$  (E. Saitovitch).
- Processo de degradação de tintas utilizadas em manuscritos antigos (J. Danon, S. I. Araújo).

#### PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS:

- 3 espectrômetros
- 2 criostatos para nitrogênio líquido
- 3 criostatos para He líquido (1 com temperatura variável, 1 com magneto supercondutor).
- 1 criostato para He líquido com evaporador e magneto supercondutor).

**Universidade Federal do Rio Grande do Sul**

Início das Atividades: 1966

**DOUTORES:**

- Adalberto Vasquez
- Israel J. R. Baumvol
- João Batista M. da Cunha
- José Irineu Kunrath
- Lívio Amaral
- Moacir Indio da Costa Jr.
- Paulo Henrique Dionísio

**LINHAS DE PESQUISAS:**

- *Boilhas de Hélio em metais e aços* (A. Vasquez, S. M. M. Ramos, M. T. X. Silva, L. Amaral, M. Behar, F. C. Zawislak).
- *Oxidação interna de metais e ligas* (A. Vasquez, M. T. X. Silva, L. Amaral)
- *Ordem-desordem em ligas Fe, Ni e Pd<sub>3</sub>Fe* (A. Vasquez, M. H. P. Corrêa, L. I. Zawislak).
- *Hidretos de Ligas ordenadas e amorfas* (A. Vasquez, L. I. Zawislak, M. H. P. Corrêa).
- *sistema Fe-C: Implantação de C<sup>+</sup> e evolução térmica dos carboetos; efeitos de alta pressão* (J. A. H. Jornada, A. Vasquez, L. S. Oliveira, M. T. X. Silva).
- *Ímãs X<sub>2</sub>Fe<sub>14</sub>B (X: Terra rara)* (A. Vasquez).
- *Minérios, meteoritos* (A. Vasquez, J. I. Kunrath, J. C. P. Oliveira).

**PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS:**

- 5 espectrômetros
- 2 criostatos para nitrogênio líquido
- 2 criostatos para He líquido p/ imersão (1 vertical, outro horizontal).
- 2 criostatos de fluxo
- 1 magneto supercondutor até 6T
- 1 implantador de íons.

**Universidade Federal de Minas Gerais**

Início das Atividades: 1968

**DOUTORES:**

- Anuar Abras
- Eustáquio Galvão da Silva
- Ronaldo A. Mansur

#### **LINHAS DE PESQUISAS:**

- Propriedades eletrônicas, estruturais e magnéticas de ligas metálicas.
- Minerais e solos
- Propriedades de aços boretados

#### **PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS:**

- 4 espectrômetros
- 1 criostato para He líquido
- 1 criostato com magneto supercondutor até 6T
- 1 criostato para nitrogênio líquido

#### **Fundação Universidade de Brasília**

Início das Atividades: 1970

#### **DOUTORES:**

- Kalil Skeff Neto
- Yao Sun Lin

#### **LINHAS DE PESQUISAS:**

- Propriedades magnéticas de sistemas de pequenas partículas (K. Skeff Neto, P. C. Morais).

#### **PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS:**

- 3 espectrômetros
- Criostato para nitrogênio
- Sistema de refrigeração Displex CS - 202

#### **Universidade Federal do Rio de Janeiro**

Início das Atividades: 1972

#### **DOUTORES:**

- Enrico Mattievich
- Fernando de Souza Barros
- Júlio Maria Neto
- Paulo Henrique Domingues

#### **LINHAS DE PESQUISAS:**

- Estudo do magnetismo em espinéis do tipo  $\text{Li Fe}_{5-x} \text{A}_x \text{O}_8$ , A = Al, Ga.
- Estudo do magnetismo em ortoferritas do tipo  $\text{AFe}_{1-x}\text{B}_x\text{O}_2$ , A = Li, Na, K e B = Al, Ga.
- Identificação, caracterização e estudo de distribuição de fosfatos com substituições de Mn.
- Estudo do sistema (Ba, Fe, S).

#### **PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS:**

- 2 espectrômetros
- 1 criostato para nitrogênio líquido
- 1 criostato para He líquido

#### **Universidade Federal do Ceará**

**Início das Atividades: 1977**

#### **DOUTORES:**

- Francisco Flávio Torres de Araújo
- Heliomar Abraão Maia
- Miguel Antonio Borges de Araújo
- Tereza Verônica Vieira Costa
- Vicente Walmick Almeida Vieira

#### **LINHAS DE PESQUISAS:**

- Estudo de complexos pentacianoferratos (M.A.B. de Araújo, J. H. de Araújo)
- Espectroscopia Mössbauer de ferritas (H. A. Maia, V. W. A. Vieira, F. F. T. de Araújo, M. C. A. de Lima)
- O estado de oxidação do ferro e a evolução do sistema solar (V. W. A. Vieira, F. F. T. de Araújo, T. V. V. Costa, H. A. Maia).

#### **PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS:**

- 2 espectrômetros (em estado precário)
- 1 criostato para nitrogênio líquido
- 1 criostato de He líquido (até 15 K)
- 1 forno para medidas até 1250 K.

#### **Universidade de São Paulo**

**Início das Atividades: 1979**

#### **DOUTORES:**

- Ângelo Piccini
- Hercílio R. Rechenberg

#### **LINHAS DE PESQUISAS:**

- Partículas ultra-finas de óxidos de ferro
- Ligas Fe - Ni
- Magnetismo em materiais amorfos
- Transições de fase em compostos de ferro

#### **PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS:**

- 1 espectrômetro
- 1 criostato para nitrogênio líquido

## **Universidade Federal de Espírito Santo**

**Início das Atividades: 1981**

### **DOUTORES:**

- Carlos Larica
- V. K. Garg

### **LINHAS DE PESQUISAS:**

- Dinâmica de rede em compostos de ferro
- Interações hiperfinas em minerais

### **PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS:**

- 1 espectrômetro
- 1 criostato para nitrogênio líquido

## **Universidade Federal do Rio Grande do Norte**

**Início das Atividades: 1987**

### **DOUTORES:**

- Carlos Alberto dos Santos

### **LINHAS DE PESQUISAS:**

- Interações hiperfinas e propriedades magnéticas de minerais (C.A. dos Santos)
- Interações hiperfinas em metais e ligas nitretadas (C.A. dos Santos, C. Alves Jr.)
- Interações hiperfinas em tantalita-columbita natural e sintética (C.A. dos Santos, C. Alves Jr.)

### **PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS:**

- 1 espectrômetro (diversos componentes emprestados pelos laboratórios da UFRGS, UNB, CBPF, UFRJ e USP)
- 1 câmara de nitretação (construção própria).

# Física da Matéria Condensada

## DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

### BIOFÍSICA E FÍSICA MÉDICA

Universidade de São Paulo – Instituto de Física  
Grupo de Biofísica e Física Médica (Armando Ito)

#### LINHAS DE PESQUISAS:

Processamento de imagens planares para fins diagnósticos

Processamento de imagens fotográficas

Desenvolvimento de sistemas microcomputadorizados para imagem médica em geral

Instrumentação em sistemas de sondas de cintilação

Propriedades Biofísicas de pigmentação celular

Espectroscopia de fluorescência em Sistemas Biológicos

Desenvolvimento de espectroscópio de fluorescência com resolução temporal

Equipamentos: espectrômetro de absorção óptica, espectroscópio de fluorescência com resolução temporal (em construção)

#### DOUTORES:

Cecil Chow Robilotta

Amando Siuiti Ito

José Hiromi Hirata

Maria Tereza M. L. Freund

Universidade de São Paulo – Instituto de Física

Física Aplicada à Medicina, à Proteção Radiológica e à Arqueologia (Shigueo Watanabe)

#### LINHAS DE PESQUISAS:

Efeitos dos tratamentos térmicos no LiF

Propriedades ópticas, elétricas e termoluminescentes de calcite

Dosimetria de nêutrons

### **Termoluminescência de KCl**

Descrição microscópica de supralinealidade em termoluminescência. Dano de radiação detectadas pela termoluminescência

Imagens em Medicina Nuclear pela Dosimetria TL

Efeitos de pulverização do cristal no TL

Modelo fenomenológico do TL foto-transferida

Efeito da imogeneidade na dose radioterapêutica

Datação de fósseis de peixes de Araripe, Ceará pelo método do TL

Dosimetria TL em radiodiagnóstico

### **EQUIPAMENTOS:**

Leitores termoluminescente. Espectrofotômetro Zeiss. Câmaras para medidas de correntes de despolarização

Microcomputadores Apple. Fontes radioativas. Fornos.

### **DOCTORES:**

Shiguo Watanabe

Emico Okuno

Marília Teixeira da Cruz

Ana Regina Blak

Masao Matsuoka

Gita Kukavka Guinsburg

**Pontifícia Universidade Católica, Rio de Janeiro – Instituto de Física**

### **LINHAS DE PESQUISAS:**

Magnetocardiografia

Estudo conformacional de proteínas

### **EQUIPAMENTOS:**

Espectrômetro de RPE Varian V4502, banda X e banda Q, Espectrômetro Cary 17 (Beckman), Espectrômetro de infravermelho (Perkin-Elmer)

Magnetômetro Supercondutor

Calorímetro (4.2K a 300K)

Magnetocardiógrafo supercondutor

### **DOCTORES:**

Paulo Costa Ribeiro

Sonia Wanderley Louro

**Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas**

### **LINHAS DE PESQUISAS:**

Microorganismos Magnetotáticos

Metaloproteínas em particular hemoproteínas

Cálculos moleculares em sistemas de interesse biológico

Estrutura e dinâmica de filmes e membranas

Equipamentos: 2 espectrômetros de Ressonância Paramagnética Varian (6K a 400K), Gaussímetro

Espectrômetro Cary 17, espectrômetro fotoacústico PAR  
Microscopia óptica, magnetômetro e sistema de vídeo

**DOUTORES:**

Darci M. S. Esquivel.  
Éliane Wajnberg  
George Bemski  
Henrique Lins de Barros  
Lea Jaccoud El Jaick  
Mario Giambiagi  
Myriam Segré Giambiagi  
Paulo Bisch

Universidade de São Paulo, Ribeirão Preto – Setor de Física

**LINHAS DE PESQUISAS:**

Dosimetria de Radiação Ionizante  
Efeitos Físicos em Biomateriais: Materiais Odontológicos; Biomoléculas  
EQUIPAMENTOS:  
Laboratório de dosimetria (equipado)  
Laboratório de qualidade de imagens médicas  
Laboratório de espectroscopia, Beckman DU-7  
Fotoacústica

**DOUTORES:**

Thomaz Ghilardi Netto  
Oswaldo Baffa Filho  
Robert Lee Zimmerman  
Carlos Alberto Pela  
José Rodas Duran  
Antonio Jílio Ghilardi  
Rolando F. Fonseca  
Adelaide de Almeida  
M. Concepta P. da Silva

Universidade de São Paulo, São Carlos – Instituto de Física e Química de São Carlos  
(Grupo de Biofísica, Física Médica e Dosimetria)

**LINHAS DE PESQUISAS:**

Estudo comparativo entre *algumas moléculas de mioglobina de diferentes espécies*  
Mudanças de simetria do íon de ferro em mioglobinas e hemoglobinas em função da hidratação  
Marcadores de spin como sondas no estudo de mudanças conformacionais em mioglobina e hemoglobinas de diferentes espécies e estados físicos.  
Influência de umidade em amostras de *heproteínas* no efeito cooperativo de oxigenação

Estudo da ação de drogas vaso-dilatadoras em hemoglobinas humanas  
Estudo de complexos metálicos de coordenação de íons de  $\text{Cu}^{2+}$  com ligantes de interesse biológico, tais como aminoácidos dipeptídeos e peptídeos pequenos  
Formação e caracterização de radicais livres formados por radiação X e outras, em cristais moleculares de interesse biológico  
Estudo de marcador de spin tempol como impureza de tempol precursor  
Construção de um sistema para flashfotólise para medidas de constante de associação de ligantes  $\text{O}_2$ ,  $\text{N}_3$ ,  $\text{CO}$ ,  $\text{NO}$  em hemoproteínas  
Biofísica, Física Aplicada, Medicina e Biologia, dosimetria de radiação  
Minitomografia computadorizada de raios X e gama  
Datação de fósseis por ESR  
Dosimetria fotoacústica e piezoelétrica  
Dosimetria de eletretos para radioterapia  
Novo método para carregamento de eletretos com radiação alfa  
EQUIPAMENTOS: Laboratório de preparação de amostras (equipado)  
Espectrômetro de RPE Varian E-109  
Espectrômetro de RPE band S (em construção)  
Espectrômetro Beckman DK2  
Espectrômetro Shimadzu (UV-Vis.)  
Espectrômetro para medir poder rotativo e dicroísmo circular  
Laboratório de dosimetria e física médica (equipado)  
Microcomputadores, terminal de vídeo

#### DOUTORES:

Otacíro Rangel Nascimento  
Sergio Mascarenhas  
Rosemary Sanches  
José Nelson Onuchic  
Marcel Tabak

Universidade de São Paulo, São Carlos – Instituto de Física e Química de São Carlos  
(Grupo de Ressonância Magnética, Espectroscopia e Magnetismo)

#### LINHAS DE PESQUISAS:

Geração de Imagens por Ressonância Magnética Nuclear

#### DOUTORES:

Horacio Panepucci  
Alberto Tannus  
Claudio Magon  
Nicolau Beckmann  
Tito Bonagamba

#### EQUIPAMENTOS:

Espectrômetro de RMN (Varian 12  
Magneto supercondutor (2 tesla)  
Equipamento de eletrônica

**Universidade Estadual Paulista, São José do Rio Preto**  
**Departamento de Física**

**Iniciando a pesquisa**

**Equipamentos:** Um espectrômetro IR-Sarl-Zeiss

**Laboratório de preparação de amostras (em montagem)**

**Equipamentos para medidas elétricas**

**DOUTORES:**

José Ruggiero Neto

Roberto Ruggiero

Marcio Francisco Colombo

Olivieri Rizzieri

Luis Carlos Teixeira do Prado

Jorge Chahine

**Universidade Federal de Pernambuco — Departamento de Física**

**LINHAS DE PESQUISAS:**

**Geração de imagens por RMN e aplicações biomédicas**

**Equipamentos:** 2 espectrômetros de RMN pulsada (10-100MHz), 1 espectrômetro de RMN onda contínua

**Eletroímã Varian de 12"**

**Magneto supercondutor (80 Koe)**

**Equipamentos para processamento de dados**

**Minicomputador**

**Criostato super-Varitempo**

**Osciloscópios, etc.**

**DOUTORES:**

Mario Engelsberg

Stefan Nadolski (visitante até 1986)

J. Albino O. de Aguiar

**Universidade de Campinas — Instituto de Física Gleb Wataghin**

**LINHAS DE PESQUISAS:**

**Aplicação de Laser à medicina**

**Equipamentos:** Laser de CO<sub>2</sub> (30W); Laser de argônio (4W), Laser de Corante.

**DOUTORES:**

Jorge Humberto Nicola (físico)

Rosa Maria Couto (físico)

Ester Maria Danieli Nicola (médica)

Paulo Henrique Fachina Nunez (médico)

Francisco Pessini (químico).

## **FÍSICA DE PLASMAS**

<b>DESCRIÇÃO</b> .....	<b>227</b>
<b>EMERGÊNCIA DA FÍSICA DE PLASMAS</b> .....	<b>231</b>
<b>PLASMA DE FUSÃO TERMONUCLEAR</b> .....	<b>235</b>
– Conceito Básico .....	235
– O Processo de Fusão .....	236
– Confinamento Magnético .....	239
– Confinamento Inercial .....	242
– Confinamento Magnético Toroidal .....	243
• Tokomaks .....	243
• Stellarators .....	246
• Constrição de Campo Reverso (RFP) .....	248
– Confinamento Magnético Não-Toroidais .....	249
• Espelho Magnético .....	249
• Toróides Compactos .....	250
<b>PLASMAS ESPACIAIS E ASTROFÍSICOS</b> .....	<b>251</b>
<b>BREVE HISTÓRICO</b> .....	<b>252</b>
<b>DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA</b> .....	<b>255</b>
<b>ANÁLISE E PERSPECTIVAS</b> .....	<b>263</b>
<b>QUADRO RESUMO DA SITUAÇÃO DA ÁREA</b> .....	<b>267</b>

# Física de Plasmas

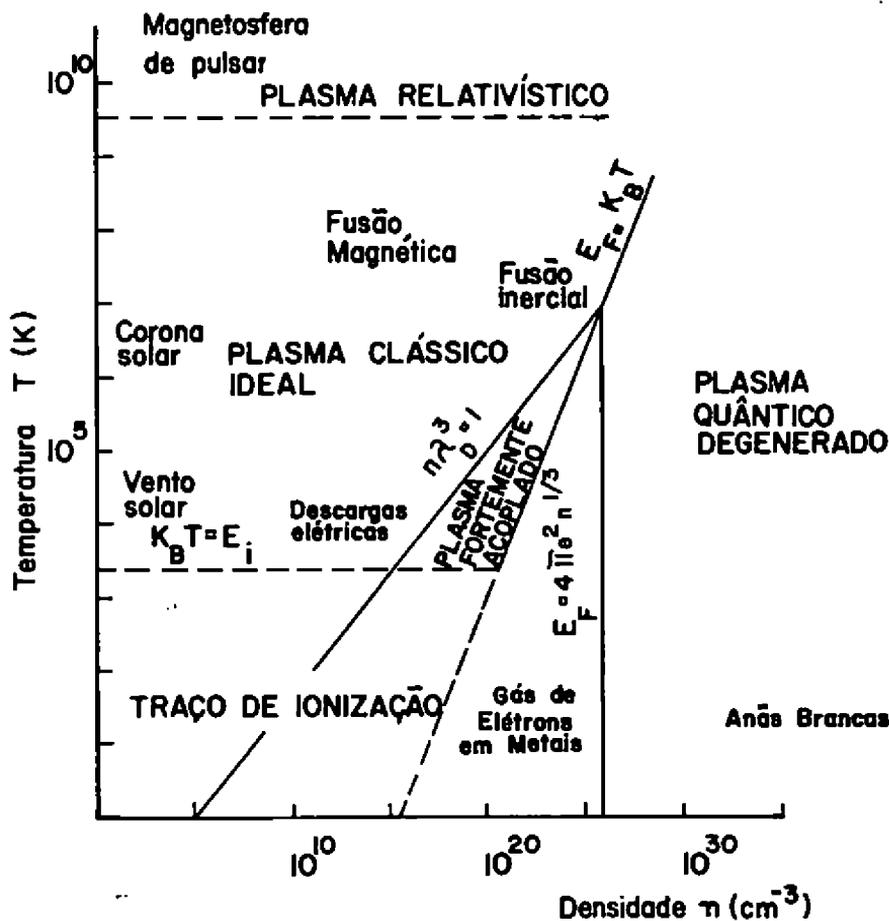
## DESCRIÇÃO

Física de Plasmas é uma disciplina que lida com movimentos coletivos de partículas carregadas, elétrons ou íons, ou estados de equilíbrio destas partículas, sujeitas à ação de campos elétricos e magnéticos externos e à ação de seus próprios campos. Este conjunto de partículas e campos representa um meio fluido chamado PLASMA. A Física de Plasmas é a ciência que estuda o estado e o movimento deste fluido. Em particular, são tratadas questões como confinamento de plasma, equilíbrio a sua estabilidade, aquecimento a propriedades de transporte, propagação de ondas, interação de partículas com onda, instabilidades, turbulência a caos.

Plasmas são encontrados na natureza, como em descargas elétricas (relâmpagos), na ionosfera, no espaço interplanetário e intersidial, na corona solar, nas estrelas, anãs brancas e pulsares, e também são produzidos nos laboratórios, como em descargas elétricas, em dispositivos para pesquisa de fusão nuclear, em lasers a gás, dispositivos de semicondutor a metais e equipamentos de plasmas industriais. Eles podem ser classificados como tênue ou denso, clássico ou quântico. Dada a vasta amplitude de parâmetros de plasmas estudados é instrutivo colocar num único "display" esta diversidade de tipos de plasmas em termos de temperatura  $T$  (kelvins) a densidade  $n$  (partículas por centímetro cúbico) como na figura 1.

O plasma pode variar entre dois extremos opostos. Por um lado ele pode ser extremamente quente, relativístico, clássico e tênue como o encontrado nas magnetosferas de pulsar. Por outro lado pode ser extremamente denso, quântico, degenerado e frio, encontrado em anãs brancas. Para entender a figura 1.1 note-se que a energia de interação coulombiana média entre duas partículas vizinhas é da ordem de  $\langle \phi \rangle = e^2 n^{1/3}$  e a energia cinética média por partícula é  $(3/2)k_B T$ . Portanto, a reta  $n \lambda_D^3 = 1$  representa a condição  $k_B T = 4\pi \langle \phi \rangle$ , ou seja, a energia

Figura 1 – CLASSIFICAÇÃO DE PLASMAS POR REGIÃO DE ESPAÇO TEMPERATURA x DENSIDADE.



$E_i$  é a energia de ionização;  $\lambda_D = K_B T / 4 \pi n e^2$ , o comprimento de Debye;  $E_F = (h^2 / 8 m_e) (2 n / \pi^2)^{1/3}$  a energia de Fermi.

cinética da ordem de grandeza da energia de interação entre partículas vizinhas. O plasma com temperatura alta tal que  $k_B T \gg \langle \phi \rangle$  é CLÁSSICO e IDEAL. Pertencem a esta categoria, com uma variação enorme de densidades e temperaturas, plasmas naturais como coroa solar e plasmas interplanetários, como também plasmas de laboratório, tais como, descargas gasosas e plasmas termonucleares.

Em plasmas muito mais densas a energia de Fermi pode ser maior que a energia cinética média e a energia de interação coulombiana. Quando isto acontece o plasma é QUÂNTICO IDEAL e DEGENERADO, e modelos de interação fraca podem ser usados para descrevê-los. São plasmas encontrados em anãs brancas. No caso de  $k_B T < E_F < \langle \phi \rangle$  o plasma é QUÂNTICO NÃO-IDEAL como no caso de plasmas de elétrons em metais. Na região limitada pelas retas  $n = \lambda_D^{-3} = 1$ ,  $E_F = k_B T$  e  $k_B T = E_i$ , encontram-se plasmas CLÁSSICOS FORTEMENTE ACOPLADOS. As correlações devido a interações coulombianas são fortes e o estudo de tais sistemas só pode ser conduzido por simulação numérica usando computadores ultra-rápidos.

Neste relatório só serão tratados plasmas clássicos ideais e fracamente não ideais (isto é, quando  $n\lambda_D^3$  é pequeno, porém ainda muito maior que a unidade).

# Física de Plasmas

## EMERGÊNCIA DA FÍSICA DE PLASMAS

A Física de Plasmas é um dos ramos mais jovens da Física. Os seus fundamentos foram estabelecidos nos anos entre 1930 e 1950, porém a sua maturação só foi atingida após 1960 quando duas motivações poderosas estimularam o crescimento da Física de Plasmas. A pesquisa da fusão termonuclear controlada, que procura tornar acessível para humanidade uma fonte praticamente inesgotável de energia, exige uma compreensão profunda da Física de Plasmas de altas temperaturas. A pesquisa espacial, que se desenvolveu com lançamentos de satélites artificiais e sondas interplanetárias, tornou acessível a medição de características da natureza que envolve a Terra e o espaço mais além.

Os primeiros indícios de experimentos com plasma se datam dos anos de 1830 quando M. Faraday criou descargas elétricas para estudar transformações químicas induzidas por correntes elétricas. Lá, descargas exibiam brilhos estruturados, desconhecidos até então, que eram manifestações de um novo estado da matéria. Porém a percepção clara de que o plasma é o quarto estado da matéria só foi atingida após ocorrer desenvolvimento mais acentuado de eletromagnetismo, mecânica de fluidos, mecânica estatística e física atômica no início do século XX.

Avanços em entendimentos de plasmas no laboratório, no espaço e na atmosfera ocorreram, em paralelo, no decorrer do século XX. Nos anos de 1920, I. Langmuir descobriu oscilações coletivas de plasma no laboratório; e G. Breit e M. Tuve descobriram a reflexão de ondas de rádio pela ionosfera.

Entre 1930 e 1950 os fundamentos da física de plasmas foram estabelecidos, como produtos da pesquisa conjugada da ionosfera, do espaço terrestre/solar e da astrofísica, motivados por preocupações diversas como, por exemplo, para entender como se propagam ondas eletromagnéticas na ionosfera; como é que as atividades solares causam o aparecimento de auroras boreais e tempestades

magnéticas na terra; o papel do campo magnético no comportamento de estrelas, galáxias e meio interestelar. Contribuíram para esta pesquisa, entre muitos outros, H. Alfvén, E. Appleton, S. Chandrasekhar, S. Chapman, T. Cowling, M. Saha e L. Spitzer. Experimentos de descargas gasosas em laboratórios multiplicaram-se neste período. Em 1946, L. Landau desenvolveu a primeira teoria da interação entre ondas e partículas ressonantes, em um plasma sem colisões. Em 1950, já estava claro que a natureza não colisional de plasmas quentes era uma propriedade essencial que evidenciava as interações coletivas, interações estas fundamentais para plasmas.

Nos anos 50 houve dois eventos importantes que desencadearam um desenvolvimento rápido da Física de Plasmas. O lançamento de um satélite artificial iniciou a ERA ESPACIAL, abrindo um horizonte imenso e ilimitado para a curiosidade humana, evidenciando a necessidade de compreender aspectos novos de natureza até então desconhecidos e criando situações que exigem maior entendimento da física espacial. A revelação através da liberação de arquivos confidenciais pelos Estados Unidos e União Soviética sobre a pesquisa secreta para dominar a fonte de energia do Sol — FUSÃO TERMONUCLEAR CONTROLADA — para usos pacíficos. Os cientistas de ambas as partes concluíram que os obstáculos para a conquista da fusão termonuclear controlada não estava na ignorância da Física Nuclear, mas da Física de Plasmas. Em 1958 realizou-se o I Congresso Internacional de Física de Plasmas e Fusão Nuclear Controlada, em Genebra, quando se iniciou uma nova era, uma era de intensa colaboração internacional sobre a pesquisa desta fonte nobre de energia.

O esforço internacional para atingir a fusão termonuclear controlada estimulou o desenvolvimento da Física de Plasma de laboratório. A configuração de theta-pinch (constricção azimutal) produziu plasmas de temperaturas e densidades termonucleares, porém, o tempo de confinamento era de algumas ordens de magnitude menores que aquele requerido para a produção de energia líquida. Para atingir condições de temperatura, densidade e tempo de confinamento necessárias para a obtenção de energia útil eram exigidos melhoramentos significativos na compreensão de plasmas confinados por campos magnéticos ou por confinamento inercial (estes conceitos serão explicados mais adiante). Foram desenvolvidos vários esquemas diferentes de confinamento magnético, tais como, zpinch, stellarator, espelho magnético, tokamak, etc. Desenvolveram-se também esquemas de confinamento inercial com lasers de alta potência. As técnicas de diagnóstico de plasmas de fusão desenvolveram-se aos saltos, melhorando significativamente a precisão e a resolução de medidas como também a variedade de grandezas físicas medidas. Estas estimularam o desenvolvimento teórico da Física de Plasmas. Desenvolveram-se também, intensamente as técnicas numéricas para a resolução das equações que descrevem um plasma, intratáveis por meios analíticos. A simulação numérica de plasmas tornou-se um dos instrumentos mais importantes na pesquisa de fusão. A tecnologia necessária para criar condições de plasma de fusão no laboratório, tais como, alto campo magnético, descargas pulsadas de dezenas de megajoules de energia, magnetos supercondutores de grande volume, lasers de alta potência, técnica de alto vácuo e de superfícies limpas, fontes de alta potência para ondas eletromagnéticas (de quilowatts a megawatts com frequências de dezenas de megahertz até dezenas de gigahertz), foram desenvolvidas.

A emergência de tokamaks nos fins da década dos anos 60 como um sistema de confinamento magnético considerado como um forte candidato para reator de fusão, levou a um crescimento enorme do programa de fusão na década dos anos 70. Além dos Estados Unidos e da União Soviética, a Comunidade Européia e o Japão entraram na competição da pesquisa sobre fusão nuclear, cada qual estabelecendo programas de pesquisa de centenas de milhões de dólares anuais.

Programas de pesquisa para sistemas alternativos de confinamento magnético continuaram tendo apoio substancial em todos estes países. O sistema do espelho magnético sempre ocupou o segundo lugar entre os candidatos a fusão por confinamento magnético. No confinamento inercial, dois tipos de impulsores, o laser de CO e o de Nd-vidro, competem passo a passo. A fusão inercial carrega em si um inconveniente sério, aplicações militares, que a torna pesquisa classificada — vedada para estrangeiros.

Nos fins da década de 70 e no início de 80 surgiram dois conceitos de confinamento magnético bastante promissores. A Construção de Campo Reverso, RFP ('Reversed-Field Pinch'), e o Toróide Compacto, principalmente do tipo conhecido como Configuração de Campo Reverso, FRC ('Field-Reversed Configuration'). Estas configurações operam em alto beta (razão da pressão cinética pela pressão magnética), característica esta, muito importante para um reator de fusão e que é justamente a limitação mais séria dos tokamaks baixo beta, uma limitação intrínseca. Mesmo assim, o Tokamak continua sendo o mais forte candidato para reator de fusão, por apresentar um tempo de confinamento mais longo.

A Física de Plasmas, como ciência e técnica experimental, tem outras aplicações importantes. Entre elas, podem-se citar o girotron (um gerador de ondas milimétricas com potências de centenas de quilowatts) e lasers de elétron livre (que pode gerar radiações coerentes a partir de microondas, passando pelo visível e chegando até o raio-X). Estes geradores têm potencial para muitas aplicações em muitos ramos de ciência, indústria e medicina. É possível também usar os efeitos coletivos de plasma para acelerar partículas a altíssimas energias nunca antes imaginadas, — acelerador de onda de batimento. A separação de isótopos estáveis e instáveis de uma substância por técnicas de plasma é uma aplicação atraente para usos diversos, como combustível nuclear, medicina e agricultura. O maçarico de plasma, já tem demonstrado aplicações industriais variadas em talurgia, siderurgia, cerâmica, agricultura e microeletrônica. Todas estas aplicações surgiram nas últimas décadas ou são projeções futuras.

Os pesquisadores nesta área encontraram um grande desafio para compreender a natureza deste ramo emergente da Física. Dados experimentais e fenômenos novos vieram turbilhonando em volumes nunca antes vistos. Onde podiam, resolveram os problemas por técnicas até então existentes. Onde não podiam, encontraram técnicas novas para resoluções analíticas e numéricas. Modelamentos numéricos de plasmas em situações mais diversas foram desenvolvidos usando computadores ultra-rápidos, exigindo deles o limite de seu desempenho. Mas, muitos fenômenos físicos ainda ficaram sem explicações, sem soluções.

Disciplinas científicas bem desenvolvidas são caracterizadas por motivações filosóficas profundas, um conjunto unificado de técnicas experimentais e teóricas poderosas e uma diversidade de aplicações. A Física de Plasmas tendo um desenvolvimento integrado de pesquisas no laboratório, sobre fusão, no espaço e

sobre astrofísica, está se tornando uma disciplina bem desenvolvida. E quando uma disciplina científica amadurece inevitavelmente surgem inovações tecnológicas.

# Física de Plasmas

## FUSÃO TERMOMOLECULAR

### CONCEITO BÁSICO

A fusão termonuclear controlada é uma das poucas fontes de energia disponíveis para suprir a necessidade energética da humanidade a longo prazo. A origem da energia é a reação de fusão nuclear de dois elementos leves para formar um elemento mais pesado, tais como, reações de D-T (deutério + trítio) ou D-D (deutério + deutério). O deutério é encontrado em quantidades enormes na água (o deutério corresponde a 0,015% do número de átomos de hidrogênio natural), enquanto que o trítio é produzido pela reação de um nêutron com o lítio, também encontrado em grandes quantidades. É praticamente inesgotável a reserva de combustível para a energia de fusão nuclear. Além disso, ela oferece muitas vantagens sobre as outras alternativas energéticas propostas para o futuro distante: a energia solar e a fissão nuclear (como reator regenerativo). Do ponto de vista de meio ambiente, a fusão nuclear é uma forma de energia pura muito mais segura do que um reator regenerativo, tanto do ponto de vista de segurança da usina, como do ciclo de combustíveis, pois núcleos pesados fissionáveis não são envolvidos. A radioatividade associada com a operação de um reator de fusão provém da reação dos nêutrons energéticos, produtos da fusão, com a parede. Esta radioatividade e o seu tempo de vida podem ser minimizados escolhendo-se criteriosamente o material da parede.

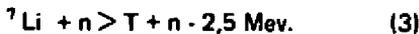
Estas vantagens da energia de fusão (fonte inesgotável, segurança e baixa radioatividade) têm sido reconhecidas pelos governos dos países mais desenvolvidos que, por mais de vinte anos, têm mantido programas extensos de pesquisa, com intensa colaboração técnico/científica entre eles. No Japão o governo declarou que o programa de fusão é uma meta nacional. Os Estados Unidos e a União Soviética mantêm os seus programas desde o início da década dos 50. Os países da Europa Ocidental se uniram e estabeleceram um programa comum de grande escala, sob o controle da Euratom.

## O PROCESSO DE FUSÃO

A reação mais provável para ser usada num reator de fusão de primeira geração é a do deutério com o trítio, o que ao reagirem produzem uma partícula (núcleo de hélio-4) energética e um nêutron ultra-energético, de acordo com a equação:

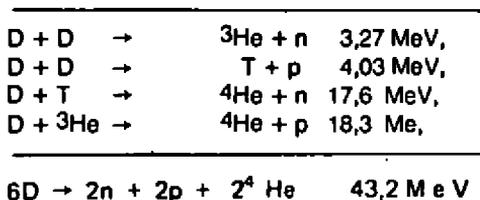


A partícula  $\alpha$  carrega 3,5 MeV de energia cinética. Ela não escapa do confinamento magnético por ter carga, permanece no plasma e por colisões compartilha a sua energia com o resto das partículas aquecendo-as. O nêutron, sem carga elétrica, escapa do confinamento carregando consigo 14,1 MeV de energia cinética, tendo assim, capacidade para produzir fissão nuclear quando encontrar átomos apropriados. O deutério existe na natureza. O trítio é produzido pelo nêutron, pela reação deste, com lítio nas duas reações abaixo:



A reação (2) é exotérmica e produz 4,8 MeV de energia adicional. A seção de choque desta reação é maior para nêutrons lentos de modo que é melhor trabalhar com nêutrons mais lentos. A reação (3) é endotérmica e absorve 2,5 MeV da energia. Existe um limiar de 3 MeV de energia do nêutron para que esta reação ocorra. O nêutron produzido nesta reação é lento e pode reagir com  ${}^6\text{Li}$  e produzir um outro trítio. O lítio natural tem 92,58% de  ${}^7\text{Li}$  e 6,42% de  ${}^6\text{Li}$ . A composição destes isótopos pode ser mudada para otimizar a produção do trítio. No cômputo geral, cada reação D-T produz um nêutron que em média pode produzir mais de um trítio, tornando viável um reator de fusão auto-suficiente, do ponto de vista de trítio.

Numa geração futura, segunda geração, pode-se eliminar o ciclo do trítio e operar o reator só com o deutério, com as seguintes reações:



Este ciclo só é possível com uma temperatura e uma ordem de grandeza maior que aquela do ciclo D-T.

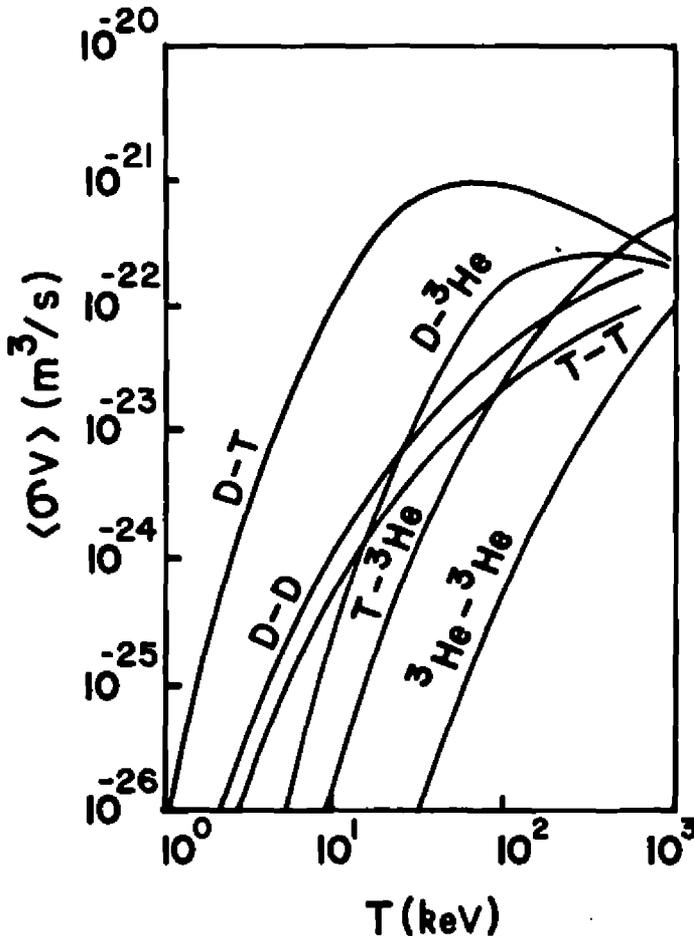
Há também possibilidade de produzir ciclos de combustível sem a geração de nêutrons tornando assim o reator livre de radioatividade e perfeitamente aceitável do ponto de vista de meio ambiente. Um exemplo desta possibilidade seria o ciclo:

H + 6Li	3He + 4He	4,0 MeV,
3He + 6Li	P + 22He	16,8 MeV,
3He + 3He	2P + 4He	12,9 MeV.

Estes ciclos livres de nêutrons, considerados como a terceira geração de reatores de fusão, requerem temperaturas bem maiores do que das gerações anteriores e, portanto, aumentam a razão de perda de energia por "bremsstrahlung" e radiação de síncrotron. Entretanto as vantagens oferecidas são muito atrativas.

Na fusão de primeira geração, o deutério e o trítio se combinam: para que isto aconteça os dois íons devem se aproximar o suficiente, vencendo a força de repulsão coulombiana. A figura 2; mostra a quantidade  $\langle \sigma v \rangle$  que é uma medida da razão média de reação de fusão, para uma distribuição maxwelliana de íons, à temperatura  $T_i$ , onde  $\sigma$  é a secção de choque e  $v$  a velocidade relativa das partículas em colisão.

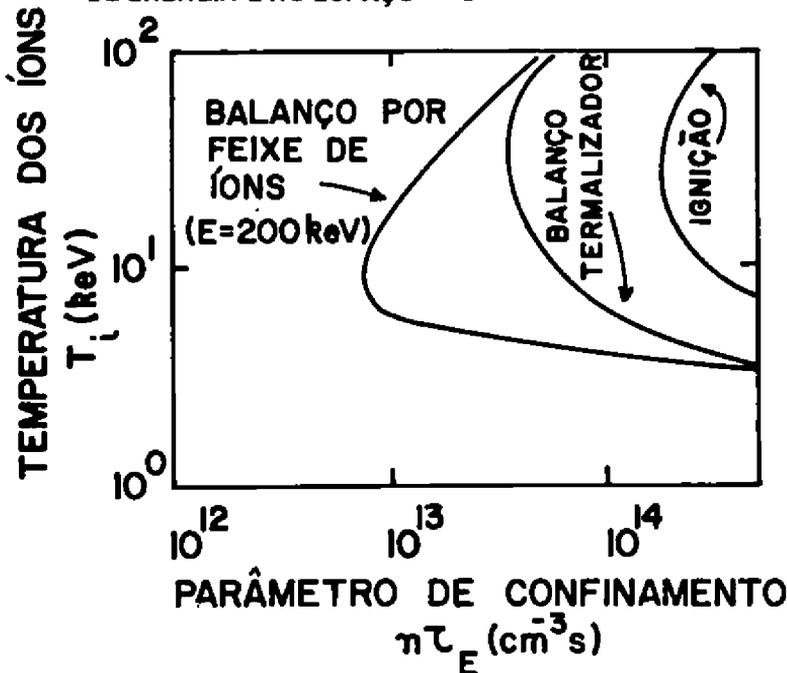
Figura 2 – RAZÃO DE REAÇÃO DE FUSÃO



A razão de reação  $\langle \sigma v \rangle$  atinge valores próximos ao máximo em uma faixa ampla de 20 a 100 keV para a temperatura dos íons. À temperatura de 10 keV ( $10^8$  K) o seu valor cai para um décimo do valor de máximo. O plasma deve ser aquecido acima desta temperatura e sua energia contida por um tempo suficientemente longo para que as reações (infreqüentes) de fusão ocorram.

Uma figura de mérito importante para um reator de fusão experimental é a razão da potência obtida das reações de fusão pela potência requerida para aquecer o plasma externamente. Esta razão, chamada de fator de multiplicação de energia é normalmente designada Q, depende da temperatura  $T_i$ , densidade n e do tempo de confinamento de energia  $\tau_E$  como mostra a figura 3. O valor  $Q = 1$  é a situação de balanço energético zero, normalmente conhecida como condição de viabilidade científica da fusão. Esta é a meta para a qual a pesquisa de fusão está dirigida, neste momento. O valor da Q aumenta rapidamente nas regiões de maiores densidades e temperaturas, porém a energia das partículas  $\alpha$  produto da fusão, começa a repor a energia de aquecimento externo. No ponto onde Q é infinito, o aquecimento externo é integralmente substituído pelo aquecimento por partículas  $\alpha$ . Este é o chamado ponto de ignição, mostrado na figura 3.

Figura 3 – CURVAS DO FATOR DE MULTIPLICAÇÃO DE ENERGIA Q NO ESPAÇO  $n\tau_E \times T_i$



Para a temperatura média dos íons de 10 keV, o valor de  $n\tau_E$  requerido é de  $3 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3} \text{ s}$ , para  $Q = 1$ . Esta condição, chamada CONDIÇÃO DE LAWSON, é a meta atual de todo esforço internacional para fusão. Obter a condição de Lawson é conhecida como demonstrar a "viabilidade científica" da fusão termonuclear controlada.

Do ponto de vista prático, levando em consideração a eficiência de conversão da energia de fusão para energia elétrica e também a eficiência de aquecimento do plasma, um reator de fusão pode produzir energia elétrica líquida útil se o valor do Q estiver, pelo menos, na faixa dos 10 a 20 no esquema de confinamento magnético e acima de 100 no confinamento inercial (neste caso é necessário compensar as ineficiências do impulsor e da interação feixe-partículas).

## CONFINAMENTO MAGNÉTICO

O chamado confinamento magnético, que é o esquema mais promissor para confinamento de plasmas à temperatura de fusão, se baseia no fato das partículas carregadas em movimento estarem presas às linhas de campo magnético, girando em hélices fechadas ao longo da linha de campo, de acordo com a força de Lorentz. O raio de giro, chamado raio de Larmor, de um íon de deutério à temperatura de 10 keV em um campo magnético de 50 quilogauss é somente 1 milímetro, enquanto que a partícula  $\alpha$  de 3,5 MeV, produto da fusão, tem o seu raio de giro de 2,6 cm, ambas perfeitamente possíveis de serem confinadas pelo campo se o reator, que as contém, tiver dimensões bem superiores à essas dimensões. O campo magnético pode confinar partículas carregadas na direção transversal, mas não as confina na direção longitudinal. O confinamento é possível, em princípio, se a configuração do plasma for fechada, isto é, se existir uma estrutura em que as linhas de campo magnético estão totalmente embebidas dentro de uma região topologicamente fechada. Topologicamente esta configuração pode ser uma esfera, um toróide (este tem um furo no meio) ou figuras mais complicadas (mais de um furo). Há, porém, possibilidades para confinamento sem que o plasma seja topologicamente fechado, se houver algum mecanismo para barrar a saída do plasma ao longo das linhas de campo. Esta barreira pode ser um espelho magnético, uma barreira eletrostática ou térmica.

O campo magnético, além de redirecionar o movimento das partículas, deve também suportar a pressão cinética do plasma. Um plasma termonuclear, com temperaturas de 10 keV e densidades da ordem de  $3 \cdot 10^{21} \text{ cm}^{-3}$  (condição de Lawson) tem uma pressão da ordem de 10 atmosferas, uma pressão razoavelmente alta. Esta pressão cinética descomprime as linhas do campo magnético causando uma depressão na pressão magnética,  $B^2/8\pi n$ . A pressão magnética deve ser maior que a pressão cinética do plasma para poder confiná-lo. Um parâmetro de mérito — chamado de BETA, muito importante para o confinamento magnético é a razão da pressão cinética para a pressão magnética. Um valor maior de beta significa maior eficiência, pois menos energia magnética é necessária para confinar o mesmo plasma.

O plasma confinado se difunde através das linhas de campo magnético quando ocorrem colisões entre partículas. O livre caminho médio fica, porém, reduzido a um raio de Larmor, pois uma colisão significa mudança de direção do movimento do íon. Isto implica na translação, no máximo, de um raio de Larmor durante a colisão. Com esta argumentação pode se chegar a um valor estimado do coeficiente de difusão do campo magnético (que equivale a difusão do plasma para fora), proporcional ao inverso do campo magnético ( $D \sim K_B Tc/(eB)$ ), onde D é o coeficiente de difusão,  $K_B$  a constante de Boltzmann, T a temperatura dos íons, c a velocidade da luz, e a carga iônica e B o campo magnético), co-

nhecido como DIFUSÃO DE BOHM. Um cálculo mais elaborado mostra que para uma frequência de colisão baixa (como no caso do plasma de fusão) o coeficiente de difusão varia com  $1/B^2$ , conhecida como DIFUSÃO CLÁSSICA, e para frequência de colisão da ordem da frequência de cíclotron dos íons o coeficiente varia com  $1/B$ , como no caso de Bohm.

Se a difusão fosse clássica, a fusão nuclear controlada talvez já tivesse sido atingida, porém, na prática o coeficiente de difusão está mais perto daquele de Bohm, devido principalmente às instabilidades que dão origem a uma frequência de colisão efetiva bem maior que a frequência de colisão binária.

Várias configurações magnéticas têm sido propostas e estudadas. Estas podem ser classificadas em três categorias globais: configurações lineares, toroidais e esféricas, dependendo da figura topológica do plasma. Entre as configurações lineares citam-se os theta-pinches e os espelhos magnéticos. Das configurações toroidais, os mais conhecidos são os tokamaks, stellarators, constrição de campo reverso, RFP ('reversed-field pinches') e héliotrons. Das configurações esféricas tem-se os toróides compactos que englobam os esferomaks e as configurações de campo reverso, FRC ('field-reversed configurations').

A configuração toroidal mais simples, o tokamak, é a mais importante de todas as configurações. É o experimento mais bem sucedido e tem produzido plasmas em condições próximas das condições de um reator de fusão:  $\tau_E = 10^{14} \text{ cm}^{-3}\text{s}$  e temperaturas acima de 10 keV. A figura de mérito  $n\tau_E T_i$  está somente uma ordem de grandeza abaixo das condições de Lawson.

A principal alternativa ao tokamak é o espelho magnético do tipo tandem. É uma máquina linear (linhas de campo magnético abertas) com o plasma barrado nas extremidades, por tampões eletrostáticos ou por uma barreira térmica. Com esta configuração os maiores valores de  $n\tau_E$  obtidos chegam a  $10^{12} \text{ cm}^{-3}\text{s}$ .

Dois alternativas de confinamento magnético ressurgiram no final da década de 70 e já estão ocupando posições importantes nos programas de fusão nuclear: a RFP, constrição de campo reverso, e a FRC, configuração de campo reverso. O primeiro tem configuração toroidal de plasma e produz um alto valor de beta, da ordem de 30% (em comparação, o limite máximo teórico dos tokamaks é 6%). Além disso esta configuração é comprovadamente um estado de mínima energia, intrinsecamente estável. Qualquer turbulência causada pelas deformações da configuração tendem a restaurar a configuração original. A segunda configuração, a FRC, tem uma topologia esférica, sem enlaçamento do solenóide com o plasma, característica esta de grande valor para um projeto de reator de fusão. Além deste fato notável, o seu beta pode chegar a um limite teórico próximo dos 100% (experimentalmente já se conseguiram betas maiores que 80%).

Na sua luta para obter parâmetros de um reator de fusão, os experimentos de confinamento magnético têm encontrado quatro processos principais de perda de energia e/ou partículas, listados na ordem decrescente de sua severidade: (1) instabilidades de plasma de amplitude grande, isto é, crescimento de deformações do campo magnético que permitem o plasma escapar abruptamente para fora do confinamento — são instabilidades do tipo magnetohidrodinâmico; (2) instabilidades de plasma de amplitude pequena, de origem macroscópica ou microscópica, que causam migrações de partículas através do campo magnético, ruptura e reconexões de linhas de campo magnético, reorganização da configuração de plasma na direção de atingir o estado de mínima energia; (3)

resfriamento radiativo do plasma, principalmente na forma de radiação ultravioleta de íons de impurezas, "bremsstrahlung" e radiação síncrotron dos elétrons para plasmas termonucleares; (4) colisões binárias, que destroem as órbitas das partículas confinadas e produzem uma difusão de partículas e, portanto, de energia.

Estes variados processos de perda de energia tomam formas diferentes para as diversas configurações magnéticas usadas nos experimentos de confinamento. Volumes enormes de trabalhos são apresentados e avanços visíveis na teoria são notados, mas, em geral, os problemas são tratados separadamente.

Tentativas de unificação de resultados até agora se mostraram frustradas. Um entendimento mais completo e fundamental destes fenômenos ainda está longe de ser alcançado. O transporte de energia em plasmas magnetizados tem sido um dos problemas mais difíceis encontrados pelos físicos de plasmas e constitui um desafio para a mente humana.

Embora a estabilidade e transporte do plasma confinado magneticamente seja muito sensível a forma do campo confinante, várias técnicas que foram desenvolvidas para aquecer plasmas confinados podem ser aplicadas a uma grande variedade de configurações magnéticas. O aquecimento por dissipação resistiva da corrente elétrica, por efeito Joule, é uma técnica eficiente e bem compreendida, notadamente em tokamaks. Por causa da queda rápida da resistividade dos plasmas com o aumento da temperatura dos elétrons, este tipo de aquecimento é inadequado em tokamaks para aquecer o plasma à temperaturas de fusão. Porém, em configurações de restrição azimutal ('pinches') toroidal, de alta densidade de corrente, do tipo RFP, o aquecimento ôhmico é suficiente para elevar a temperatura do plasma à fusão.

Sistemas auxiliares de aquecimento têm sido desenvolvidos para complementar o aquecimento ôhmico em tokamaks. Para um tokamak de tamanho típico para os primeiros reatores de fusão, produzindo 1000 MW de energia elétrica, o volume do plasma seria da ordem de  $100\text{m}^3$  e a potência necessária para o aquecimento seria da ordem de  $0,5\text{ MW/m}^3$ , dando um total de 50 MW para a potência de aquecimento. É uma potência respeitável, considerando-se as dificuldades de depositar esta energia no plasma, passando pelas barreiras que o confinam. Uma das técnicas mais bem estabelecidas é a técnica de injeção de partículas energéticas neutras de hidrogênio ou de deutério, chamada de NBI (neutral beam injection).

Estas partículas, sendo neutras, atravessam o campo magnético livremente até a sua ionização por colisão ou por troca de cargas com os íons do plasma. Uma alternativa a esta técnica é o aquecimento por ondas eletromagnéticas de rádio-freqüência baseado na absorção ressonante. Há várias freqüências de ressonância em plasmas magnetizados. As ressonâncias mais utilizadas até hoje são as ressonâncias ciclotrônica dos íons e dos elétrons e a híbrida inferior, embora outras ressonâncias também sejam seriamente consideradas, tais como os de Alfvén, whistler e híbrida superior. A freqüência varia amplamente entre uma ressonância e outra: começa com alguns megahertz, para ondas de Alfvén, até 200 gigahertz, para harmônicas superiores da ressonância ciclotrônica eletrônica. A terceira alternativa para o aquecimento auxiliar é a compressão adiabática do plasma. Uma compressão de fator dez (viável, talvez) elevaria a temperatura do plasma de cinco vezes — de 2 keV para 10 keV.

Uma das limitações do tokamak, como reator de fusão, é a sua operação pulsada, necessária para a indução de corrente, corrente está, indispensável para o equilíbrio, estabilidade e aquecimento inicial. Existem técnicas que geram correntes em plasmas e que podem substituir a corrente induzida tornando a operação do tokamak contínua. É a chamada geração de corrente por rádio-freqüência que é feita utilizando ondas lançadas numa direção preferencial. Estas ondas, em ressonância, transferem o seu momento para os elétrons gerando assim a corrente. Já foi amplamente comprovado que a ressonância híbrida inferior é eficiente para a geração da corrente capaz de sustentar uma operação contínua de tokamak. A maior limitação, porém, é o baixo limiar do corte da densidade -  $10^{13}$   $\text{cm}^{-3}$  para a sustentação da corrente, uma ordem de grandeza menor que o necessário para fusão.

## CONFINAMENTO INERCIAL

O esquema de confinamento inercial se baseia na irradiação uniforme de uma minúscula esfera sólida de combustível, a pelota, por feixes intensos de laser ou de partículas aceleradas, os ditos impulsores. A pelota implode porque a deposição de energia do feixe causa a vaporização quase instantânea da superfície da pelota produzindo uma reação do tipo foguete que a comprime com uma força brutal. Como conseqüência a densidade do centro da pelota sobe a valores altíssimos, da ordem de  $10^{25}$  a  $10^{26}$  partículas por centímetro cúbico (mil a dez mil vezes a densidade de sólido). O combustível se aquece por compressão e por ondas de choque hidrodinâmico e condições de fusão são produzidas. A fusão termonuclear ocorre, queimando o combustível em um período de dezenas de picossegundos antes que a esfera comece a se expandir com a velocidade térmica dos íons (10 micrometros em  $10^{11}$  segundos).

Todos estes mecanismos devem satisfazer requisitos físicos muito severos para se obter compressões ultra-altas e temperaturas termonucleares. Primeiro, a energia do feixe incidente deve ser absorvida eficientemente pela superfície da pelota, mas não dentro dela. Segundo, para atingir a alta compressão da pelota, a simetria de implusão deve ser excelente, e a temperatura do interior da esfera deve permanecer baixa até o instante de ignição. Finalmente, são necessários meios satisfatórios de iniciar a ignição no momento certo; isto é conseguido pela construção da pelota com camadas diferenciadas (a pelota tem um diâmetro de dezenas de micrometros).

A pesquisa em fusão inercial é dirigida para:

- elucidar a Física que domina o comportamento da interação impulsor-pelota;
- desenvolvimento de impulsores potentes:
  - (a) lasers de neodímio-vidro com comprimento de onda de  $1,05 \mu\text{m}$  e lasers de  $\text{CO}_2$  com comprimento de onda de  $10,6 \mu\text{m}$ , ambos com energia de até 100 kJ e uma potência de 100 TW ( $10^{14}$  W);
  - (b) feixes de íons leves com energia de até 4 MJ e uma potência de 100 TW.

A tabela 1 mostra os principais experimentos de fusão inercial existentes no mundo.

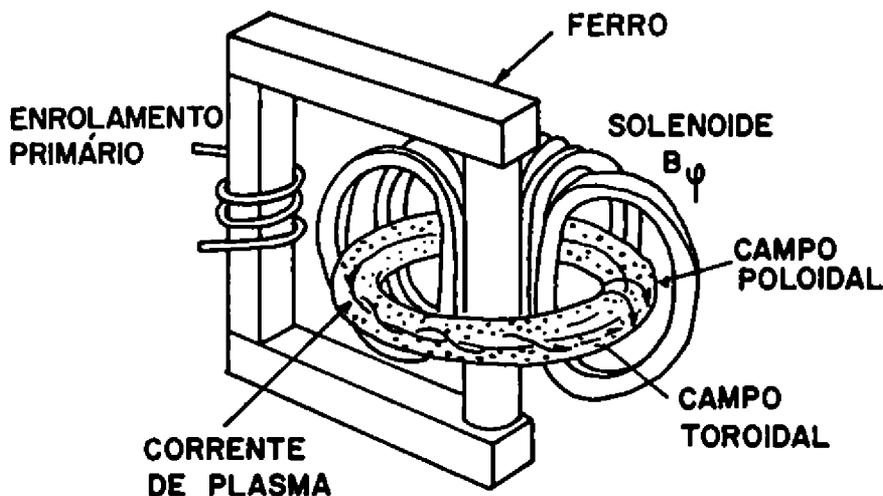
## CONFINAMENTO MAGNÉTICO TOROIDAL

### Tokamaks

Tokamak é uma sistema de confinamento magnético toroidal de plasmas, com simetria axial, com campos produzidos por solenóides enrolados sobre o toróide (campo toroidal) e por corrente do próprio plasma na direção toroidal (campo poloidal), figura 4. O plasma é aquecido, inicialmente, pela própria corrente, por efeito Joule, e posteriormente, por aquecimento adicional. Experimentos de tokamak têm produzido parâmetros de plasma próximos àqueles requeridos para um reator. Os maiores experimentos de tokamak, atualmente em operação, são: TFTR ('Tokamak Fusion Test Reactor') do Princeton, EUA, JET, ('Joint European Tokamak') de Culham, GB, e JT-60 ('Japanese Tokamak') do Tokai, Japão. Estes três tokamaks podem produzir plasmas com parâmetros de fusão em um futuro próximo.

Existem atualmente mais de 200 tokomaks de vários tamanhos distribuídos pelo mundo inteiro. Dentre estes, os principais estão relacionados na tabela 2. Na tabela, os raios maior e menor são os respectivos raios do toróide, o campo é a intensidade do campo toroidal e o pulso é a duração da corrente de plasma. A ordem da lista não representa nenhuma classificação.

Figura 4 – ESQUEMA DE TOKAMAK

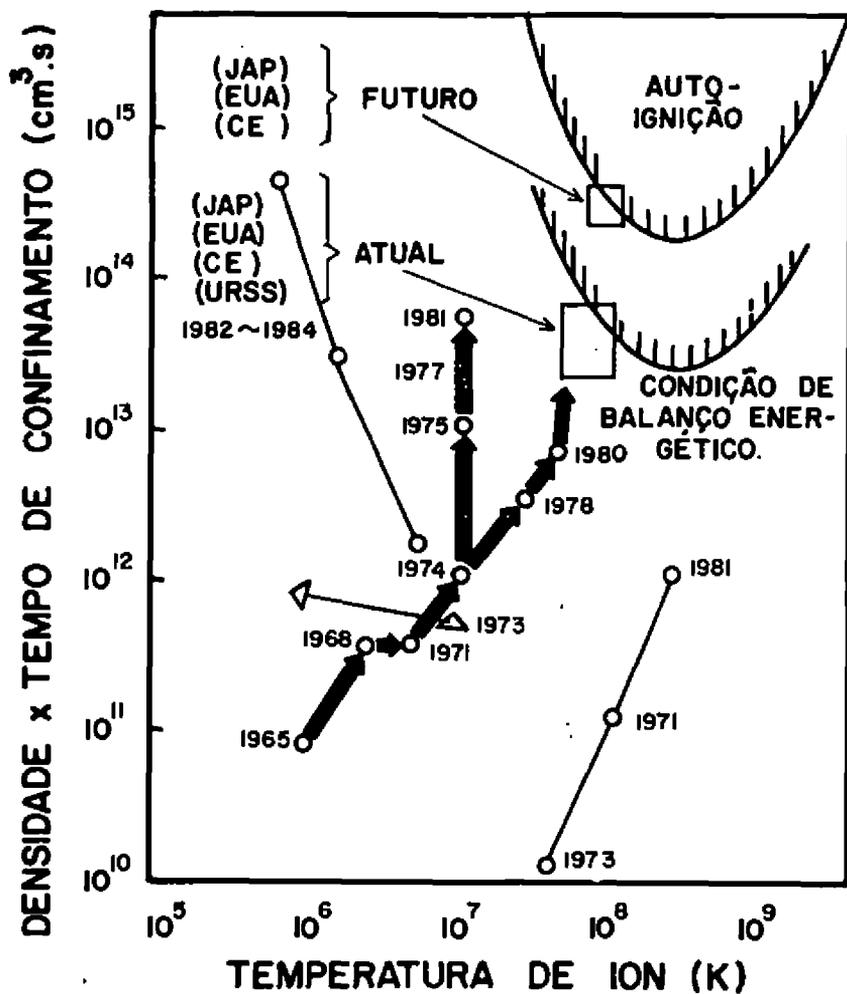


**Tabela 1. PRINCIPAIS EQUIPAMENTOS DE FUSÃO INERCIAL**

<b>EQUIPAMENTO</b>	<b>LOCALIDADE</b>	<b>IMPULSOR TIPO</b>	<b>ENERGIA (kJ)</b>	<b>POTÊNCIA (TW)</b>
NOVA	LLNL	Nd-vidro	(100)	(125)
NOVETTE	LLNL	Nd-vidro	30	25
PHAROS-III	NRL	Nd-vidro	(2)	(4)
PHAROS-II	NRL	Nd-vidro	1	2
OMEGA	Rochester	Nd-vidro	4	12
GDL	Rochester	Nd-vidro	0,1	0,5
CHROMA-1	KMSF	Nd-vidro	1	2
ANTARES	LANL	CO <sub>2</sub>	(30-40)	(30-40)
HELIOS	LANL	CO <sub>2</sub>	5-10	10-20
LAM	LANL	KrF	(10-70)	
RAPIER B	LLNL	KrF	0,8	
PBFA-II	Sandia	Ion Leve	(4000)	100
PBFA-I	Sandia	Ion Leve	1000	20
GAMBLE-II	NRL	Ion Leve	100	2
PHEBUS	França	Nd-vidro	(30)	(25)
OCTAL	França	Nd-vidro	4	4
GEKKO XII	Japão	Nd-vidro	(20)	(40)
GEKKO IV	Japão	Nd-vidro	2	4
HELEN	GB	Nd-vidro	1	3
VULCAN	GB	Nd-vidro	1	2
DELFIN	USSR	Nd-vidro	5	2-7
UMI-35	USSR	Nd-vidro	8-10	4-6
LEKKO III	Japão	CO <sub>2</sub>	10	10
LEKKO II	Japão	CO <sub>2</sub>	0,5	0,5
REIDEN IV	Japão	Ion Leve	50	1
KALIF	RFA	Ion Leve	75	2

*A ordem de grandeza dos investimentos na área de fusão inercial é acima de 500 milhões de dólares anuais.*

Figura 5 - EVOLUÇÃO DE PERFORMANCE DOS TOKAMAKS



**Tabela 2. TOKAMAKS REPRESENTATIVOS**

APARELHO	LOCAL	RAIO MAIOR (m)	RAIO MENOR (cm)	CAMPO TOROIDAL (KG)	CORRENTE PLASMA (MA)	PULSO (s)
DIII-D	EUA	1,7	82	22	3,5	10
TFTR	EUA	2,5	85	52	2,5	2
DIII	EUA	1,4	58	40	2,5	1
ALCATOR C	EUA	0,6	17	140	1,0	1
PLT	EUA	1,3	45	35	0,6	3
PDX	EUA	1,4	45	24	0,5	1
TEXT	EUA	1,0	28	30	0,4	0,5
ISX-B	EUA	0,9	37	18	0,3	0,3
Macrotor	EUA	0,9	40	4	0,1	0,1
JET	EEC	2,9	160	35	4,8	20
JT-60	Japão	3,0	100	45	2,7	10
T-15	USSR	2,4	70	45	2,0	1
ASDEX-U	RFA	1,6	50	39	2,0	6
Tore-Supra	França	2,1	70	45	1,7	30
FT	Itália	0,8	19	100	1,0	1
TFR-600	França	1,0	20	60	0,6	1
ASDEX	RFA	1,6	40	28	0,5	10
T-10	USSR	1,5	37	30	0,5	1
JFT-2M	Japão	1,3	45	15	0,5	1
TEXTOR	RFA	1,7	50	26	0,5	3
JIPP T-11	Japão	0,9	25	20	0,3	0,3
DITE	R.U.	1,2	28	27	0,3	0,5
T-7	USSR	1,2	31	24	0,2	1
JFT-2	Japão	0,9	16	20	0,3	0,3

**(b) Stellarators**

Stellarator é um sistema de confinamento magnético "toroidal" de plasmas, com simetria helicoidal, com campo magnético produzido por enrolamento helicoidal em volta do toróide, sem a corrente de plasma, figura 6. O plasma é totalmente aquecido por injeção de partículas neutras ou por rádio frequência. A tabela 3 mostra os stellarators mais representativos e suas dimensões.

Figura 6 – STELLARATOR

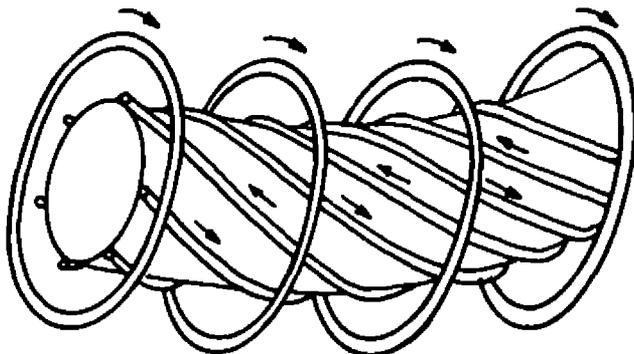


Tabela 3. STELLARATORS REPRESENTATIVOS

APARELHO	LOCAL	RAIO MAIOR (m)	RAIO MENOR (cm)	CAMPO (KG)	TRANS- FORMADA ROTACIONAL	PULSO (s)
ATF-1	EUA	2,1	30	20	0,95	5
IMS	EUA	0,4	5	8	0,6	0,1
W VII-AS	RFA	2,0	20	30	0,4	1
Héliotron	Japão	2,2	20	20	2,1	1
Uragan-3	USSR	1,0	16	30	0,7	0,5
L-2	USSR	1,0	12	20	0,7	0,3
W VII-A	RFA	2,0	10	25	0,2	1

### (c) Construção de Campo Reverso (RFP)

RFP é um sistema de confinamento magnético toroidal de plasmas com simetria axial, com o campo magnético produzido pelos solenóides colocados sobre o toróide (campo toroidal) e pela corrente de plasma (campo poloidal), exatamente como em tokamaks. O que difere o RFP do tokamak são: (1) o seu campo toroidal inverte de sinal na região próxima da parede do vaso de plasma; (2) o campo poloidal (e não o toroidal, como nos tokamaks) é responsável pelo confinamento do plasma; (3) o aquecimento ôhmico é suficiente para alcançar temperaturas termonucleares; (4) opera com valores altos de beta; e (5) a configuração é um estado de mínima energia.

Devido à alta densidade de corrente e de não necessitar de aquecimento auxiliar, esta configuração permite projetar reatores com dimensões compactas, qualidade esta muito apreciada.

A tabela 4 mostra os principais experimentos com RFP existentes no mundo:

Tabela 4 – PRINCIPAIS EXPERIMENTOS COM RFP

APARELHO	LOCAL	RAIO MAIOR (m)	RAIO MENOR (cm)	CORRENTE DE PLASMA (MA)
OITE	EUA	1,24	19	0,25-0,50
ZT-40	EUA	1,14	20	0,06-0,24
ETA BETA II	Itália	0,65	12,5	0,05-0,20
HBTX 1-A	G.B.	0,80	26	0,10-0,50
TPE-1R (M)	JAPÃO	0,50	9	0,13
REPUTE	Japão	0,80	20	0,4
STP-3M	Japão	0,50	9	0,3

## CONFINAMENTOS MAGNÉTICOS NÃO TOROIDAIS

### (a) Espelho Magnético

Espelho magnético é um sistema de confinamento magnético linear de plasmas, com o campo magnético produzido por solenóides colocados sobre um tubo linear em cujas extremidades são colocados espelhos magnéticos, barreiras eletrostáticas ou barreiras térmicas para coibir a evasão do plasma. A principal vantagem deste sistema é a facilidade de construção de reator, por ser uma estrutura linear.

A tabela 5 mostra os principais experimentos com espelhos magnéticos, todos do tipo tandem que têm dado melhores resultados até hoje.

A figura 5 mostra a evolução do performance dos tokomaks ao longo do tempo.

**Tabela 5 – ESPELHOS TANDEM REPRESENTATIVOS.**

APARELHO	LOCAL	PERÍODO OPERAÇÃO	PARÂMETRO DE CONFINAMENTO ( $\text{cm}^3 \text{s}$ )	BARREIRA TÉRMICA
MFTF-B	EUA	1986-	(1013)	sim
TMX-U	EUA	1982-	(1012)	sim
TARA	EUA	1984-	(1011)	sim
TMX	EUA	1978-1981	1011	não
Phaedrus	EUA	1978-	1010	não
Gamma-10	Japão	1983-	(1012)	sim
Ambal	USSR	1984-	(1011)	não
Gamma-6	Japão	1978-1981	1010	não

## (b) Toróides Compactos

Os toróides compactos, TC, formam uma classe de configurações magnéticas com topologia esférica, com campos magnéticos criados pela própria corrente que circula no plasma, sem a necessidade intrínseca de solenóides externos. Usam-se solenóides externos para formação dos toróides ou para a produção de campos de apoio, mas estes solenóides não enlaçam o plasma. O plasma permanece livre de qualquer ligação, podendo ser trasladado sem afetar o seu equilíbrio interno. Uma superfície magnética chamada separatriz divide as linhas de campo abertas da região fora do plasma e das linhas fechadas dentro do toróide compacto. Os campos magnéticos fora do toróide são gerados pelas correntes em solenóides.

Há dois tipos de toróides compactos: o ESFEROMAK e a FRC, configuração de campo reverso. Os esferomaks têm os dois campos, toroidal e poloidal, e são estados de mínima energia. As FRC's só possuem campos poloidais e são, possivelmente, também estados de mínima energia.

Os TC's estão ainda em um estágio comparativamente primitivo de desenvolvimento, mas poderão ter desdobramentos interessantes no futuro devido ao seu alto valor de beta e sua trasladabilidade.

A tabela 6 mostra os principais experimentos existentes de esferomaks e FRC's.

Tabela 6 – PRINCIPAIS TORÓIDES COMPACTOS

APARELHO	LOCAL	RAIO MAIOR (m)	RAIO MENOR (MA)	CORRENTE DE PLASMA
Esferomaks				
CTX	EUA	0,25	15	0,4
COP	EUA	0,04	4	0,01
PS-2	EUA	0,09	9	0,10
Proto S-1C	EUA	0,12	8	0,06
S-1	EUA	0,50	27	0,2
CTCC-1	Japão	0,26	14	0,2
Configuração de Campo Reverso, FRC				
FRX-C	EUA	0,07	3	1,5
CTTX-1	EUA	0,02	1	0,14
TRX-1	EUA	0,045	2	0,75
TRX-2	EUA	(0,045)	(2)	(0,75)
BN-1	USSR	0,05	2,5	0,5
TOR	USSR	0,07	3	1,1
TL	USSR	0,04	2	0,3
NUCTE-2	Japão	0,028	12	1,6
OCT	Japão	0,035	2	0,5
PIACE	Japão	0,026	1	0,6
STP-L	Japão	0,01	1	1,2

# Física de Plasmas

## PLASMAS ESPACIAIS E ASTROFÍSICAS

A descoberta dos cinturões de Van Allen e ventos solares nos fins da década de 50 demonstrou que o ambiente espacial em que a terra e o sol se movem deve ser expresso em termos de Física de Plasmas. A compreensão dos processos da natureza na escala do sistema solar é importante e útil, pois fenômenos atmosféricos e climatológicos dependem do ambiente espacial em que a terra se move, como por exemplo, das atividades solares.

A Física de Plasmas Espaciais e Astrofísicas abrange muitos assuntos com origens históricas distintas. A Física das Plasmas Espaciais inclui a Física do sol e dos ventos solares, a Física da ionosfera e magnetosfera planetária, a Física do cometa e o estudo da aceleração e transporte dos raios cósmicos no sistema solar. A pesquisa solar é a interface entre a Física Espacial e Astrofísica. A proximidade do sol torna possível fazer medidas da estrutura interna do sol e dos fenômenos de plasma nas camadas superficiais do mesmo, medidas estas impossíveis de serem feitas em outras estrelas. A Física de Plasmas Astrofísicas inclui a geração de campos magnéticos em planetas, estrelas e galáxias; os fenômenos de plasmas que ocorrem nas atmosferas estelares, no meio interestelar e intergaláctico e magnetosferas de estrelas de nêutrons, em galáxias de rádio astros e em quasars; e a aceleração e transporte dos raios cósmicos. Questões astrofísicas motivaram o estudo de plasmas relativísticos. Cada um destes assuntos depende de, e também contribui para, a Física de Plasma de laboratório. O estudo dos plasmas de laboratório, espaciais e astrofísicas têm tradicionalmente progredido independentemente. Só recentemente tem havido tendência de encará-la como uma disciplina unificada. Existe um conjunto comum de problemas físicos de importância intelectual significativa que unem estes três ramos de atividades sobre o plasma:

- ( 1 ) a reconexão de campo magnético;
- ( 2 ) a interação de turbulência com campos magnéticos;

- ( 3 ) o comportamento de fluxos de plasmas de grandes dimensões e suas interações com campos magnéticos e gravitacionais;
- ( 4 ) a aceleração de partículas energéticas;
- ( 5 ) o transporte e confinamento de partículas;
- ( 6 ) choques não-colisionais;
- ( 7 ) interações de feixe de plasmas e a geração de radiação eletromagnética; e
- ( 8 ) interações coletivas entre gases neutros e plasmas.

O fato de tais problemas emergirem de uma diversidade de contextos demonstra o seu significado geral e sugere que sua solução irá encontrar aplicações em situações que ainda não se pode imaginar. A existência de tais problemas gerais constitui uma base sobre a qual uma rede de interesses comuns, cooperações pessoais e, acima de tudo, uma disciplina comum está sendo constituída.

*Texto baseado no Physics Through the 1990s. Plasmas and Fluids. Panel on the physics of Plasmas and Fluids. National Academy Press, 1986.*

---

## BREVE HISTÓRICO

A Física de Plasmas no Brasil iniciou-se nos anos 50. Os trabalhos teóricos pioneiros foram realizados na Universidade de São Paulo por D. Bohm e W. Schützer.

Bohm produziu um importante trabalho sobre oscilações em plasmas e Schützer trabalhou na formulação quântica de fenômenos coletivos em plasmas. Os primeiros experimentos foram realizados por B. Gross no Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas e L. Q. Orsini da Universidade de São Paulo.

Já nos anos 60, G. Freire iniciou suas pesquisas sobre a propagação de ondas eletromagnéticas em plasmas no Instituto Tecnológico da Aeronáutica. Também nos anos 60 e início dos anos 70 foram realizados na USP trabalhos teóricos sobre alargamento de linhas espectrais e condutividade térmica, destacando-se a participação de J. Osada, M. S. D. Cattani, N. C. Fernandes, entre outros. A partir dessa época, investigações sobre espectros de plasmas foram desenvolvidas por M. S. D. Cattani e N. C. Fernandes.

Pode-se dizer que as atividades mais sistematizadas em Física de Plasmas iniciaram-se em 1974 quando se formaram os primeiros grupos com interesses voltados à plasmas termonucleares. Em 1974 surgiram os grupos da Universidade Estadual de Campinas (UNICAMP), com o seu theta-pinch, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), um grupo essencialmente teórico e o grupo do Instituto Tecnológico da Aeronáutica (ITA/CTA), também iniciando em teoria. Outros grupos se sucederam rapidamente. Em 1977 apareceram os grupos da Universidade de São Paulo (USP), com o seu tokamak, e da Universidade Federal Fluminense (UFF), primeiro aplicados na teoria e mais tarde a uma máquina de espelho magnético. Em 1978 surgiu o grupo do Instituto de Pesquisas Espaciais (INPE), com a sua máquina de plasma duplo. Em 1982 apareceu o grupo do Instituto de Estudos Avançados (IEAv), também do Centro Técnico Aeroespacial, voltado para o estudo de plasmas produzidos por laser.

Nos anos 80 surgiram grupos com interesses voltados à plasmas espaciais: em 1982 iniciaram-se o grupo do Instituto de Astronomia e Geociências (IAG) da Universidade de São Paulo, com interesse na Física de Plasmas Astrofísicos, e um outro grupo do INPE, o grupo de Plasmas Espaciais (INPE-PE); e, em 1985, nasceu o grupo da Universidade de Brasília, também com interesse em plasmas espaciais.

A primeira iniciativa de coordenar as atividades de pesquisa na área de plasma, que surgiram espontaneamente, ocorreu em 1975, quando a FINEP se dispôs a criar um programa nacional de plasmas e fusão nuclear com uma dotação de recursos para a pesquisa. O programa não foi levado adiante na forma proposta, porém, os projetos existentes tiveram prioridade e passaram a ser examinados individualmente. Os primeiros financiamentos saíram em 1976 para o grupo da UNICAMP e em 1977 para o grupo da USP. Desde então, a FINEP tem continuamente aumentado o financiamento nesta área de pesquisa, tornando-se o principal agente de desenvolvimento da Física de Plasmas no Brasil.

Em 1978, durante a realização da Escola de Verão sobre a Física de Plasmas na UFF, os participantes se conscientizaram da necessidade de formular um programa nacional para compatibilizar as atividades de pesquisa desenvolvidas por vários grupos de plasmas. O documento foi lançado no final de 1978 tornando-se um marco importante para a Física de Plasmas no Brasil.

Em 1981, o Ministério das Minas e Energia, através da Comissão Nacional de Energia Nuclear (CNEN), criou um Grupo de Trabalho com o objetivo de elaborar um Programa Nacional de Física de Plasmas e Fusão Termonuclear Controlada, produzir um projeto de um tokamak para o Centro Nacional de Plasmas a ser criado pelo Ministério e incentivar o desenvolvimento de tecnologia de plasmas. Este Grupo de Trabalho produziu um documento final em 1982. A CNEN dotou recursos, de porte semelhante aos recursos dados pela FINEP, para o programa, dando assim um impulso importante para a Física de Plasmas no Brasil. A CNEN iniciou também, um grupo de pesquisa na área de tecnologia de fusão nuclear, principalmente com relação a tratamento de trítio e "blankets", que, embora não possa ser enquadrada como Física de Plasmas, é uma área importante para a pesquisa de fusão termonuclear controlada. Contudo, o Centro não chegou a ser criado e o financiamento da CNEN, que foi substancial em 1982 e 1983, foi se deteriorando rapidamente com a inflação. O programa, porém, teve um impacto grande em todas as atividades de pesquisa de plasmas. A CNEN manteve o financiamento de bolsas de estudos para mestrado em número relativamente alto, apesar de suas dificuldades internas, colaborando, assim, no aumento do pessoal científico nesta área.

À época da formulação do programa de 1982 trabalhavam em Física de Plasmas 28 pesquisadores com nível de doutor, sendo 18 físicos teóricos e 10 experimentais, além de 15 físicos com mestrado, 22 estudantes de doutoramento e 30 de mestrado, perfazendo um total de 85 físicos.

Outro marco importante para o desenvolvimento das atividades de Física de Plasmas no Brasil foi a realização do I Encontro Latino-Americano de Física de Plasmas e Fusão Termonuclear Controlada em Cambuquira, em fevereiro de 1982. Este encontro demonstrou a existência da Física de Plasmas emergente no Brasil. É importante também notar a realização da Sessão de Fusão Nuclear durante o Simpósio Nipo-Brasileiro de Ciência e Tecnologia, em 1984.

Em 1986, o Ministério da Ciência e Tecnologia criou um primeiro Grupo de Trabalho para a instalação de um Laboratório Nacional de Plasmas. Porém este Grupo de Trabalho não chegou a tomar posse, por motivos técnicos. Entretanto o interesse do MCT em criar um Laboratório Nacional de Plasmas foi reafirmado pelo Ministro Renato Archer, que convidou, através de A. Raupp, diretor do INPE, os grupos de plasmas a elaborarem uma proposta. Por iniciativa do MCT, organizaram-se dois seminários em Campinas, junto à UNICAMP, com o objetivo de acessar o estado de desenvolvimento da pesquisa de plasmas no Brasil. O primeiro seminário foi sobre o maçarico de plasmas, com o objetivo de levantar o estado da arte no desenvolvimento deste equipamento e a potencialidade de sua utilização na indústria brasileira, principalmente em metalurgia. O segundo foi sobre a pesquisa de Física de Plasmas em geral, junto com a pesquisa de física nuclear para formular uma política de pesquisa nestas áreas pelo MCT. O desdobramento subsequente foi a criação do Grupo de Trabalho pelo MCT, em fevereiro de 1987, com o objetivo de elaborar o Programa Nacional de Plasmas e Fusão Termonuclear Controlada e um anteprojeto para a criação do Laboratório Nacional de Plasmas.

# Física de Plasmas

## DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA

A seguir são apresentados breves históricos de cada grupo de plasmas, as linhas de pesquisa adotadas por estes grupos e a situação atual do grupo (fevereiro de 1987).

### (a) UFRGS

O Grupo de Física de Plasmas do Instituto de Física da UFRGS teve seu início em 1974, através de um seminário com vários meses de duração do qual participaram vários físicos teóricos de diferentes áreas. O Grupo foi criado com os objetivos de ampliar a formação acadêmica em áreas de física que possuem grande potencial de aplicações práticas (como teoria eletromagnética, mecânica estatística, termodinâmica e dinâmica de fluidos) e formar pesquisadores em Física de Plasmas Teórica, tanto básica como aplicada. Contou inicialmente com a colaboração de professores visitantes (Pitter Graeff, John D. Gaffey, J. P. Mondt) e formou seus três primeiros doutores em 1979.

São três as principais linhas de pesquisa do Grupo: (I) Emissão e Absorção de Radiação por Plasmas: Os trabalhos nessa linha abrangem emissão de radiação por plasmas confinados magneticamente, por lasers de elétrons livres e por plasmas espaciais; e absorção de radiação por plasmas termonucleares para fins de aquecimento e de geração não indutiva de corrente. (II) Ondas e Instabilidades em Plasmas: Os trabalhos nessa linha consideram efeitos gerados por injeção de feixes de íons, por anisotropia em plasmas de alto beta, por gradientes e correntes em constritores de campo inverso. No momento essa linha está passando a incorporar a propagação de ondas não-lineares e/ou relativísticas em plasmas, não só de elétrons e íons, mas também elétrons e pósitrons. (III) Teoria de Grupos na Análise de Fenômenos Não-Lineares: Os trabalhos nessa linha são de caráter físi-

co-matemático. Atualmente estão sendo investigados invariantes exatos algébricos para o Sistema de Lorenz.

O Grupo contou com dois doutores, Darcy Dillenburg e Bernardo Liberman, no início, além dos professores visitantes. Em 1979, formaram-se três doutores e em 1983, mais um, totalizando presentemente 6 professores doutores:

- Bernardo Liberman (Doutor/UFGRS, 1971), Professor Adjunto,
- Darcy Dillenburg (Doutor/UFGRS, 1960), Professor Titular,
- Eda H. da Jornada (Doutor/UFGRS, 1979), Professor Adjunto,
- João Goedert (Doutor/UFGRS, 1979), Professor Adjunto,
- Luiz F. Ziebel (Doutor/UFGRS, 1983), Professor Adjunto,
- Ruth S. Schneider (Doutor/UFGRS, 1979), Professor Adjunto.

Além destes pertencem ao Grupo dois alunos de doutoramento e um de mestrado.

Desde a sua criação o Grupo formou 5 mestres e 4 doutores e produziu 28 trabalhos publicados em revistas especializadas e anais de congressos.

## (b) UNICAMP

O Laboratório de Plasmas do Instituto de Física da UNICAMP teve seu início em 1974 com a contratação de Paulo H. Sakanaka que iniciou a formação de pessoal, implantando um programa de pesquisa teórico e experimental tanto na área de plasmas básicos, como na área de plasmas de interesse à fusão nuclear, com ênfase aos sistemas pulsados de alto beta. O pessoal científico, a nível de doutor, foi crescendo rapidamente com a adesão de Helmut K. Böckelmann, contratações de José Busnardo Neto, Masanobu Niimura e Shuko Aihara, retorno de Ricardo M. O. Galvão e a adesão de Aruy Marotta. Em 1978, já contava com sete professores doutores, três alunos de doutoramento e doze de mestrado.

As linhas principais de pesquisa deste grupo são plasmas pulsados de alto beta, como theta-pinches e toróides compactos, teoria magnetohidrodinâmica e aquecimento de plasmas por rádio-freqüência. O Laboratório iniciou também, mais recentemente, o desenvolvimento do maçarico de plasmas para aplicação industrial. Como estratégia, o Laboratório desenvolveu várias máquinas pequenas de plasmas para que os estudantes tanto de pós-graduação, como de iniciação científica, tivessem a oportunidade de desenvolver sua competência experimental. Estas máquinas serviram também para um desenvolvimento controlado de técnicas de diagnósticos de plasmas.

Assim, foram construídas as máquinas listadas abaixo:

- Theta-Pinch I de 2 kJ e Theta-Pinch II de 6 kJ, ambas para o estudo da dinâmica de implosão magnética de plasmas. Foram desenvolvidos nestes equipamentos dispositivos de plasma com sondas eletromagnéticas e interferometria com feixe de laser.

- Máquina de Plasma Produzido por Laser, usando um laser de rubi de 2J, para o estudo da formação de plasma, espectroscopia, interação laser-plasma.

- Máquina de Plasma Quiescente, para estudo de ondas íon-acústicas não lineares, como sólitons e similares.

- Vários pequenos espelhos magnéticos para desenvolvimento de diagnósticos como sondas eletrostáticas e magnéticas, como também para estudos de interação plasma-rádio freqüência.

– vários sistemas de diagnósticos, além dos já citados, tais como, sonda de pressão, copo de Faraday, analisador eletrostático de energia dos íons, espectroscopia, etc. foram também desenvolvidos.

Em 1978, foi importado da Maxwell Laboratory, EUA, um sistema de theta-pinch de 55 kV, operado a 100 kV, com um solenóide de 100 cm de comprimento por 17 cm de diâmetro. Este possui um campo de polarização inverso que permite, por reconexão de linhas de campo, a formação de configuração de campo reverso, FRC. A espera do término da construção do prédio para a instalação do equipamento e dificuldades técnicas e financeiras causaram um atraso considerável na operação deste sistema, denominado TUPÃ. O sistema entrou em operação em fins de 1983.

Em 1983, iniciou-se uma outra linha de atividade: aplicação industrial. Foram desenvolvidos um maçarico de plasma para corte de aço inoxidável e maçaricos de aquecimento para possíveis aplicações a fornos industriais. Estes maçaricos têm vantagens sobre maçaricos convencionais por possuir uma atmosfera controlada e atingir temperaturas altas.

A evolução natural de theta-pinch de campo reverso é a Configuração de Campo Reverso, um toróide compacto sem o campo toroidal. Foi completada a construção, em 1987, de um sistema de toróide compacto, Torus C-I, com base em um theta-pinch de campo reverso de 20 kJ de energia a 10 kV, com um solenóide de 65 cm de comprimento por 17 cm de diâmetro. Neste sistema serão estudadas a fase de formação da configuração de campo reverso e a estabilização da instabilidade rotacional por um octopolo e/ou um divisor.

As linhas de pesquisa, em teoria, desenvolvidas na UNICAMP são: equilíbrio e estabilidade magnetohidrodinâmica; aquecimento de plasmas por rádio-freqüência nas freqüências de ressonância híbrida inferior, Alfvén e ion-ciclotrônico; geração de corrente não induzida por rádio-freqüência; simulação de theta-pinches e toróides compactos.

O pessoal científico da UNICAMP é atualmente constituído de seis professores doutores, a saber,

– Antônio G. Trigueiros (Doutor/Lund, 1985), Professor Assistente-Doutor;

– Aruy Marotta (Doutor/UNICAMP, 1977), Professor Livre-Docente;

– Helmut K. Böckelmann (Doutor/Southern Illinois, 1973), Professor adjunto;

– José Busnardo Neto (Doutor/Michigan, 1972), Professor Livre-Docente;

– Munemasa Machida (Doutor/Columbia, 1983), Professor Assistente-Doutor;

– Paulo H. Sakanaka (Doutor/Columbia, 1970), Professor Titular.

Além desses, compõem o Grupo 9 alunos de doutoramento e 5 alunos de mestrado.

O Laboratório formou nos 12 anos de sua existência, 22 mestres, 12 dos quais experimentais e 10 teóricos, 2 doutores, um experimental e um teórico, e 83 trabalhos publicados em revistas e anais de congressos.

### (c) ITA/IEAv

O Grupo de Plasmas do Instituto Tecnológico da Aeronáutica do Centro Técnico Aeroespacial foi iniciado em 1974 por José Pantuso Sudano, que retor-

nou da França nesta época. Os trabalhos iniciais no ITA foram teóricos, envolvendo, de um lado, cálculos em magnetohidrodinâmica tendo em vista confinamento magnético, e de outro lado, estudo de efeitos não-lineares em plasmas descritos pelas equações de Korteweg-de-Vries e de Schrödinger não-linear. Trabalhos experimentais foram iniciados em 1978 com a construção de tubos de descarga.

Em 1983 foram iniciados os trabalhos no IEAv. Foram experimentos de desenvolvimento de descargas de baixa taxa de ionização relevantes à construção de lasers a gás de alta potência.

No ITA foi criado um laboratório experimental de Física de Plasmas em 1980. Neste laboratório foram desenvolvidas descargas luminosas e descargas do tipo arco, sistemas de armazenamento de energia e fontes intensas de feixes de partículas. Dois professores do Departamento de Física completaram o doutoramento no exterior em Física de Plasma Experimental, recentemente, e vieram a reforçar o seu grupo de plasma. No IEAv foram construídos lasers de CO<sub>2</sub> de até 5 Joules de energia com pulsos de 80 nseg de duração. Estes lasers foram utilizados para produzir descargas no ar. Foram também desenvolvidos um detector de partículas e um sistema de medida de temperatura do plasma por emissão de raios-X. Em 1985, os programas do ITA e IEAv foram integrados com os pesquisadores do IEAv participando no programa de pós-graduação no ITA.

Os projetos de pesquisa desenvolvidos, atualmente, no grupo do CTA são: Câmara para experimentos de laser-plasma – para estudo da interação laser-plasmas em gases e em alvos sólidos planos; Tubo de Descarga de Longo-arco – para estudo da coluna de arco de baixa pressão onde se podem produzir camadas duplas e turbulência, e diagnóstico de plasmas; Descargas de Plasmas por Rádio-Frequência – para estudo da física de descarga rádio-frequência e desenvolvimento de diagnósticos; Dispositivo Orbitron – um dispositivo para confinamento de partículas carregadas; Espectrômetro de massa – para estudo físico-químico de plasmas de rádio-frequência; e, Gerador Marx, volante, heteropolar, pulsado e síncrono como desenvolvimento industrial.

O Grupo ITA/IEAv é, atualmente, constituído de três professores doutores,

- Homero S. Maciel (Doutor/Oxford, 1985),
- José Pantuso Sudano (Doutor/Paris, 1972) e
- Luis Carlos S. Goes (Doutor/Wisconsin, 1986), e 3 mestres (contratados) e 6 alunos de mestrado.

Desde a sua criação, o Grupo formou 7 mestres e produziu 16 trabalhos publicados em revistas e anais de congressos.

#### (d) USP

O atual grupo de Física de Plasmas da USP foi formado em 1974 por iniciativa de Ivan C. Nascimento do Instituto de Física e Calvin M. Burgoyne do Instituto Astronômico e Geofísico. Inicialmente constituiu-se um grupo de estudos com estudantes de pós-graduação. Com a colaboração de Ricardo M. O. Galvão, da UNICAMP, decidiu-se, em meados de 1976, iniciar um projeto experimental com a construção de uma máquina de confinamento de plasmas do tipo Tokamak. Em 1978, S. W. Simpson, da Austrália passou a colaborar com o grupo.

O TBR-1 (Tokamak Brasileiro 1) foi projetado em 1977 e teve sua construção iniciada em 1978. A sua operação em regime tokamak iniciou-se em junho de 1980.

O TBR-1 é um tokamak de raio menor de 8 cm, raio maior de 30 cm, com um campo magnético máximo de 5 quilogauss. Nos últimos anos, as atividades experimentais têm consistido na pesquisa de plasmas confinados por campos magnéticos, na implantação de diagnósticos e sistemas de aquisição de dados, além de modificações no projeto original do tokamak para melhorar o seu desempenho. Possui um sistema CAMAC para aquisição de dados, integrado a um microcomputador PCXT com 24 canais. Têm sido investigadas as características das descargas no tokamak, equilíbrio e estabilidade da coluna de plasmas e limpeza da câmara toroidal por descarga e usando microondas. Na área de diagnósticos o grupo desenvolveu sondas eletrostáticas múltiplas com varredura para investigação de turbulência, sonda eletrostática para íons, analisador eletrostático, espectrômetro óptico de alta resolução (0.04Å) e outros equipamentos.

A próxima etapa de desenvolvimento do grupo da USP é a construção de um tokamak de porte médio, TBR-2.

As atividades teóricas têm consistido, principalmente, no estudo do equilíbrio e estabilidade num tokamak, estudos teóricos e métodos de diagnósticos num plasma por polarimetria FIR, espectroscopia e emissão de radiação ciclotrônica e alargamento e deslocamento de linhas espectrais.

A equipe da USP é constituída de 10 professores doutores, a saber:

- Iberê L. Caldas (Livre-Docente/USP, 1984),
- Ivan C. Nascimento (Titular/USP, 1983),
- José H. Vuolo (Doutor/USP, 1983),
- Hugo Franco (Doutor/USMG-Grenoble, 1985),
- Maria Vittoria A. P. Heller (Doutor/USP, 1985),
- Mauro S. D. Cattani (Titular/USP, 1983),
- Mutsuko Y. Kucinski (Doutor/U.Sussex, 1974),
- Nelson Fieldler-Ferrari (Doutor/USP, 1985),
- Ricardo M. O. Galvão (\*) (Livre-Docente/USP, 1983) e
- Vilma S. Walder Vuolo (Doutor/USP, 1982), 6 mestres contratados, 3 bacharéis, 8 alunos de doutoramento e 8 alunos de mestrado.

Desde a sua criação o Laboratório da USP formou 3 doutores teóricos e 14 mestres, 12 dos quais experimetais, o primeiro em 1978. Produziu também, 48 trabalhos publicados em revistas e anais de congressos.

*Nota: (\*) Tempo Integral no INPE, tempo turno completo na USP.*

#### (e) UFF

A pesquisa na área de Física de Plasma no Instituto de Física da UFF foi iniciada em 1977, quando o seu diretor, J. R. M. Romeo e o chefe do departamento, C. A. Fânzeres, ao traçarem a política de pesquisa colocando a Física de Plasmas e Fusão Termonuclear Controlada como uma área prioritária, contrataram quatro doutores na área, Michael F. Reusch, Abraham L. Chian, King-Hay Tsui e Asaharu Tomimura. Em 1978, já se realizava a primeira Escola de Verão de Física de Plasma na UFF. Posteriormente juntaram-se ao grupo, K. Jayaram e Igor Alexeff da Universidade de Tennessee (este por um curto tempo). O primeiro

mestre contratado foi Cândido C. Rapozo, um experimental, formado em 1980.

A parte experimental se apoiou, em grande parte, no início, nos equipamentos e acessórios do síncro-ciclotron do Instituto, há bastante tempo abandonados, pois periféricos como sistema de vácuo, medidores, fontes, etc., foram de grande utilidade para os seus trabalhos iniciais. Assim foram construídos um marcapulso de plasma para corte e um conversor de corrente de plasma.

Ainda em 1980, foi iniciada, sob a liderança de Cândido, a montagem de uma máquina linear de plasma, LISA máquina esta, doada pelo Max-Planck-Institut, Garching, RFA; a LISA possui um tubo de plasma com 255 cm de comprimento e 17 cm de diâmetro e um campo magnético máximo de 10 quilogauss na região central e 13 quilogauss nas extremidades. As bobinas são alimentadas por um grupo gerador de corrente contínua de 1000 amperes com 360 quilowatts de potência a 360 volts. Para fornecer a energia necessária foi montada uma subestação de 600 KVA.

Com o apoio do Laboratório de Plasmas da UNICAMP, com quem a UFF mantém convênio, e especialmente com o apoio de Shuko Aihara, foi possível colocar em funcionamento pleno todo o sistema LISA, permitindo assim à UFF participação no programa nacional de plasmas e fusão controlada, com peso.

As linhas de pesquisa experimental da UFF são todas baseadas na máquina LISA: aquecimento de plasmas por rádio-freqüência através da ressonância ciclotrônica dos elétrons, ressonância híbrida inferior, ressonância plasma-"sheath" e ressonância magneto-acústica; fenômenos de batimento de ondas ciclotron-eletrônica e geração de corrente não indutiva por onda híbrida inferior. Em teoria, as linhas principais são as instabilidades magnetohidrodinâmicas resistivas em tokamaks e theta-pinches, instabilidades paramétricas, acoplamento de modos de guia de plasma e geração de corrente por rádio-freqüência. Como plano futuro, planeja-se utilizar uma outra máquina, também doada pela Max-Planck na mesma ocasião da doação da LISA, a DINAMARE, que é uma máquina toroidal, sem a indução de corrente de plasma; as dimensões são 10 cm de raio menor, 55 cm de raio maior e campo magnético máximo de 10 quilogauss.

O grupo da UFF é constituído de 4 professores doutores, a saber:

- Assaharu Tomimura (Doutor/Imperial College, 1977), professor adjunto,
- Cândido C. Rapozo (Doutor/UNICAMP, 1985), professor adjunto,
- King H. Tsui (Doutor/Texas, 1975), professor adjunto,
- Marcos A. M. Santiago (Doutor/UNICAMP, 1982), professor adjunto,

9 mestres e 2 bacharéis contratados e 6 alunos de mestrado.

O Grupo da UFF formou 7 mestres, dos quais dois experimentais e produziu 30 trabalhos publicados em revistas e anais de congressos.

#### (f) INPE

O programa de Física de Plasma do INPE teve início em 1978, com a proposta de criação de um grupo de pesquisa e de um laboratório de plasma. Hoje o Instituto atua intensamente no desenvolvimento desta linha de pesquisa através da execução de diversas atividades de caráter fundamental e aplicado. De uma maneira geral, são as seguintes as áreas de atuação do Laboratório Associado de Plasmas, LAP, do INPE:

Pesquisa Básica - Realização de pesquisas experimentais e teóricas em Física de Plasma e simulação em laboratório de processos em plasmas espaciais.

**Aplicações Tecnológicas — Aplicações avançadas de plasmas e desenvolvimento de tecnologias espaciais.**

**Fusão Termonuclear Controlada — Pesquisa em sistemas visando a produção de energia a partir de reações de fusão nuclear sob condições controladas.**

A execução de atividades experimentais e teóricas está distribuída em cinco projetos, os quais estão descritos resumidamente no texto a seguir:

O projeto Plasma Quiescente visa, de uma maneira geral, o estudo de propagação de ondas em plasmas e da evolução de instabilidades. Este dispositivo foi totalmente construído no INPE e se presta, também, ao desenvolvimento da tecnologia de fontes de plasma para processos de corrosão e deposição de filmes finos.

O projeto Centrífuga de Plasma visa o estudo de plasmas em rotação e sua aplicação na separação de isótopos. A centrífuga de plasma desenvolvida no INPE entrou em operação, com a produção de plasmas metálicos, no final de 1984. Destarte, a centrífuga de plasma poderá se tornar um dispositivo competitivo na separação de isótopos estáveis para aplicações em Física e Medicina Nuclear, entre outras.

O projeto Plasma e Radiação trata essencialmente de estudos dos mecanismos de geração de radiação eletromagnética e da interação desta radiação com plasmas termonucleares. A primeira fase deste projeto consiste na construção de um girotron, que é uma fonte coerente de microondas de alta potência. O projeto conceitual deste dispositivo vem sendo realizado a partir de modelos teóricos e computacionais desenvolvidos pelo LAP. Para viabilizar a construção do girotron estão sendo desenvolvidas várias tecnologias relevantes à confecção de dispositivos eletrônicos a vácuo em geral. Concomitantemente, estão sendo executados estudos teóricos e de simulação numérica visando a utilização do girotron no aquecimento de plasmas termonucleares, conforme proposto no Programa Nacional de Física de Plasmas e Fusão Termonuclear Controlada. Além das aplicações em máquinas de fusão, o girotron tem aplicações em sistemas avançados de telecomunicações e de radar.

O projeto Propulsão Iônica se insere no programa de desenvolvimento de plataformas espaciais e visa a construção de um micropropulsor eletrostático destinado ao controle de altitude e correção de órbita de satélites geostacionários. A fonte de plasma do propulsor iônico opera com argônio ou xenônio, tendo os testes em laboratório com o protótipo sido iniciados no final de 1985.

A equipe científica do LAP é constituída de vinte e um pesquisadores, sendo oito doutores, onze mestres e dois bacharéis. Além destes, a equipe conta com três alunos bolsistas e um engenheiro de carreira. São os seguintes os pesquisadores doutores:

- Antônio C. A. Ferreira (Doutor/MIT, 1981), Pesquisador Adjunto,
- Antônio Montes Filho (Doutor/Oxford, 1980), Pesquisador Adjunto,
- Gerson O. Ludwig (Doutor/Cornell, 1975), Pesquisador Senior,
- José A. Bittencourt (Doutor/Texas, 1975), Pesquisador Senior,
- José Leonardo Ferreira (Doutor/INPE, 1986), Pesquisador Auxiliar,
- Mario Ueda (Doutor/Cornell, 1986), Pesquisador Adjunto,
- Ricardo M. O. Galvão (Doutor/MIT, 1975), Pesquisador Senior e
- Yoshiyuki Aso (Doutor/Nagoya, 1984), Pesquisador Auxiliar.

O LAP formou três mestres, um doutor experimental e produziu 42 trabalhos publicados em revistas e anais de congressos.

### (g) IAG

O Grupo de Plasma Astrofísico do Instituto de Astronomia e Geofísica da Universidade de São Paulo foi iniciado essencialmente quando Reuven Opher foi contratado em 1982.

As linhas principais de pesquisa deste grupo são: perda de massa estelar pelas ondas Alfvén turbulentas; geração de correntes em "Flares" solares, jatos extragalácticos, supernovas e nuvens moleculares; instabilidade térmica em rádio fontes extragalácticas; física de plasma na formação das primeiras estrelas; mecanismos de aceleração das partículas em "flares" solares, supernovas e rádiofontes extragalácticas; e, radiação girociclôtrônica nas colunas de acreção de anãs brancas.

O Grupo é constituído por Reuven Opher (Doutor/Harvard, 1958) e seis alunos de doutoramento, um dos quais com contrato provisório e já possui 6 trabalhos publicados em revistas científicas.

### (h) INPE/PE

O Grupo de Física de Plasmas Espaciais e Astrofísicos do INPE foi criado em 1984, por Abraham Chian-Long Chian, para desenvolver pesquisas teóricas de Física de Plasmas dando-se ênfase ao relacionamento entre os processos físicos que ocorrem tanto em plasmas espaciais e astrofísicos, quanto em plasmas de laboratório. Na área de Plasmas Espaciais e Astrofísicos o Grupo está interessado em processos de geração de rádio-emissão coerente em plasmas planetários e estelares: radiação kilométrica terrestre, radiação decamétrica joviana, rádio-emissão na região dos arcos de choque planetários, rádio-emissão solar e rádio-emissão de pulsar. Na área de plasmas de laboratório o Grupo está interessado em laser de elétrons livres, acelerador coletivo de íons, interação laser-plasma, aquecimento de plasma por rádio-freqüência e rádio-emissão espontânea em tokamaks. O Grupo dirige atenção aos processos não-lineares de interação onda-onda e interação onda-partícula em plasmas. Atualmente o grupo está trabalhando em três linhas de pesquisa: (1) instabilidades paramétricas e turbulência de Langmuir, (2) conversão não-linear de ondas eletrostáticas de plasma em radiação eletromagnética, (3) espalhamento Raman estimulado num sistema feixe-plasma.

O Grupo é constituído por Abraham C. L. Chian (Doutor/Cambridge, 1977) e três mestres contratados.

### (i) UnB

O Grupo de Plasmas do Departamento de Física da Fundação Universidade de Brasília teve início em 1985. A linha principal de pesquisa é a Física de Plasma Espacial. O Grupo tem mantido um estreito contato com o Grupo de Plasmas Espaciais do INPE.

O Grupo é por enquanto, constituído de um só físico, F. Rogério F. Araújo (Doutor/Bochum, 1983).

# Física de Plasmas

## ANÁLISE E PERSPECTIVAS

Em 12 anos de existência da Física de Plasmas no Brasil, o seu avanço foi considerável, tanto do ponto de vista do pessoal como produtividade científica. Neste período formaram-se 10 doutores e 59 mestres, como podem ser vistos na tabela 7.

Há, atualmente, 40 doutores e 65 alunos de pós-graduação trabalhando nesta área. Entretanto este avanço em número de pesquisadores não está ocorrendo numa proporção satisfatória. Por exemplo, a razão entre os números de físicos experimentais por físicos teóricos deveria ser em torno de 2/1, na área de Física de Plasmas. Este valor é, de acordo com a tabela 8, 40/61  $\sim 2/3$ , longe do valor mencionado. Embora este valor tenha a tendência a aumentar, esta tendência é demasiadamente lenta, como se pode ver nas razões 13/24 para doutores, 11/25 para doutorandos e 17/12 para mestrandos. Em parte, a tendência de maior número de teóricos pode ser explicada pelas imensas dificuldades encontradas em desenvolver pesquisa experimental no Brasil, devido a falta de infraestrutura material, técnico/administrativa e de pessoal, como também verbas para pesquisa, que têm diminuído rapidamente. É necessário estabelecer uma política de incentivar mais trabalhos experimentais, aumentando o número de alunos experimentais mais rapidamente do que o número dos teóricos, dando, talvez até incentivos materiais de alguma forma. É também necessário que se envie para o exterior, alunos de doutoramento experimental em maior número, pois, as alternativas oferecidas pelos projetos experimentais no Brasil são muito precárias.

Com relação a publicações de trabalhos (o número de publicações é uma das medidas da produtividade científica), o desempenho foi regular. São 232 trabalhos publicados em revistas especializadas, 118 em anais de congressos nacionais e internacionais, com "referee" (114), o que dá uma média anual da or-

dem de dois artigos por cada pesquisador/doutor. Uma verificação mais aprofundada mostra, porém, que a produção científica na área experimental deixa ainda a desejar.

Há demonstrada competência, de nível internacional nas pesquisas teóricas em certas linhas, como, interação de radiação eletromagnética com plasmas, estabilidade magnetohidrodinâmica ideal e resitiva, geração de corrente não indutiva em plasma por rádio-freqüência e Física de Confinamento Magnético. Em se tratando de trabalhos experimentais, houve um grande avanço no desenvolvimento de técnicas de diagnóstico, porém, ainda se nota muitas dificuldades em desenvolver certas técnicas importantes, devido à falta de pessoal especializado, como também a falta de material, verbas apropriadas e disponibilidade de tempo. Há também competência demonstrada nas pesquisas de tokamaks pequenos e sistemas pulsados de alto beta. Na Física de Plasma Experimental Básica, importantes trabalhos foram feitos com ondas (on-acústicas não-lineares, potencial de plasmas na presença de rádio-freqüência e interação de rádio-freqüência com plasmas magnetizados. Na tecnologia, o desenvolvimento de maçarico de plasma chegou a maturidade, podendo-se já prever a sua introdução na indústria brasileira em um espaço de tempo relativamente pequeno. É também de reconhecimento internacional o projeto de girotron. Os laboratórios de pesquisa existentes nas Universidades devem ser ampliados para dar continuidade ao trabalho iniciado, aumentar a experiência nacional nessa área e garantir a formação dos novos especialistas necessários. Todos os dados sobre a situação da área aparecem na tabela 9.

Pode-se dizer que, no Brasil, já foi alcançada uma massa crítica de pesquisadores com uma certa maturidade e competência científica que permitem a realização de experimentos de maior porte, do que daqueles que existem atualmente nas universidades, tanto para a pesquisa em fusão termonuclear controlada, como para aplicações tecnológicas. Para tais experimentos, há necessidade de recursos especiais, acima da capacidade atual das agências financiadoras (FINEP, CNPq, FAPESP, etc). Por outro lado, há também a necessidade de realização de experimentos maiores, para os quais a estrutura das universidades não é adequada, devido ao seu caráter mais diversificado e ênfase em formação de pessoal. Estes experimentos só serão viáveis em um Laboratório Nacional, dentro de um programa coordenado com os grupos universitários. Um projeto deste porte é necessário no sentido de que o Brasil não deve deixar de participar da pesquisa da possível grande fonte de energia do futuro, a fusão termonuclear controlada e para isso, é necessário desenvolver a capacitação nacional nesta área, e o único modo de desenvolvê-la é construir experimentos competitivos de nível internacional.

Dentro deste cenário, os físicos de plasmas estão trabalhando junto ao Ministério da Ciência e Tecnologia, para a elaboração de um Programa Nacional de Física de Plasmas e Fusão Termonuclear Controlada e a implantação do Laboratório Nacional de Plasmas.

**Tabela 7 – FORMAÇÃO DE PESSOAL E PUBLICAÇÕES**

GRUPOS	FORMANDOS				PUBLICAÇÕES	
	DOCTORES		MESTRES		REVISTAS ESPECIALIZADAS	ANAIS DE CONGRESSO
	E	T	E	T		
UFRGS	-	4	-	5	24	4
UNICAMP	1	1	12	10	23	61
ITA/IEAv	-	-	1	6	5	10
USP	-	3	12	2	22	26
UFF	-	-	2	6	16	14
INPE	1	-	-	3	27	15
OUTROS					9	-
<b>TOTAL (E, T)</b>	<b>2</b>	<b>8</b>	<b>27</b>	<b>32</b>		
<b>TOTAL GERAL</b>	<b>10</b>		<b>59</b>		<b>118**</b>	<b>114**</b>

*E – Experimental*

*T – Teórico*

*(\*\*) – As somas dos números de publicações dos grupos totalizam valores maiores do que os números indicados na Linha Total Geral. As diferenças se referem a trabalhos de colaboração entre grupos que foram contados duplamente.*

MESTRES	ESTUDANTES		TESSES		Nº DE ARTIGO	INVESTIMENTO GLOBAL (US\$)
	Dr. Msc.	Dr. Msc.	Dr. Msc.	Dr. Msc.		
4	2	5	-	7	15	5.000 10.000
						10.000 10.000
5	8	8	3	14	48	400.000
9	-	6	-	8	30	800.000
						10.000 50.000
11	7	1	1	3	42	50.000 50.000 80.000 300.000 5.000 5.000
						200.000
1	4	2	-	-	8	
2	3	-	-	-	3	
-	-	-	-	-	.	
-	2	1	3	2	28	
-	10	6	2	22	84	500.000

Tabela 8 – PESQUISADORES DOS GRUPOS DE PLASMAS

268

INSTITUIÇÃO	INÍCIO	CONTRATADOS					ALUNO DE PÓS-GRADUAÇÃO			
		DOUTORES		MESTRES		BACHARÉIS	DOUTORAMENTO		MESTRADO	
		E	T	E	T		E	T	E	T
UFRGS	1974	-	6	-	-	-	-	2	-	1
UNICAMP	1974	5	1	-	-	-	4	6	4	2
ITA/IEAv	1974	3	1	-	2	-	-	2	3	2
USP	1977	4	6+	5	-	2	5	3	6	2
UFF	1977	1	3	2	7	2	-	-	3	3
INPE	1978	3	5+	6	5	1	2	5	1	-
IAG*	1982	-	1	-	1	-	-	4	-	2
INPE/PE*	1983	-	1	-	1	-	-	3	-	-
UNB*	1985	-	1	-	-	-	-	-	-	-
TOTAL (T, E)		16	24	13	16		11	25	17	12
TOTAL GERAL		40		29		5	36		29	

TOTAL EFETIVO = 105

*E – Experimental**T – Teórico**(\*) – Só Teóricos**(+) – Refere-se a R.M.O. Galvão, contratado pela USP e INPE, portanto subtrai um do total.*

## **FÍSICA NUCLEAR**

<b>DESCRIÇÃO .....</b>	<b>271</b>
<b>BREVE HISTÓRICO .....</b>	<b>274</b>
<b>DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA .....</b>	<b>278</b>
<b>PERSPECTIVAS, PROJEÇÕES E NECESSIDADES .....</b>	<b>276</b>

# Física Nuclear

## DESCRIÇÃO

Nosso mundo cotidiano é composto basicamente de matéria nuclear e as características fundamentais de nosso universo tais como as propriedades químicas e biológicas básicas, a síntese elementar, são determinadas pelas interações fundamentais da natureza. Podemos dizer, também, que a quase totalidade dessas interações se manifestam na interação entre núcleos (i. e., interações fortes como a eletromagnética e nuclear e as interações fracas).

A Física Nuclear tem por objetivo o conhecimento das propriedades do núcleo atômico, sua estrutura, sua forma de interação, ou simplesmente, a determinação das leis que governam as forças entre os constituintes da matéria nuclear.

Apesar das interações no núcleo terem suas origens na interação entre partículas elementares (quarks e glúons que compõem a matéria nuclear), forças dinâmicas de longo alcance estão presentes de uma forma inequívoca caracterizando a estrutura da matéria.

O estudo do núcleo é, sem dúvida, o elo mais importante entre o mundo infinitesimal e o astronômico, constituindo-se no melhor laboratório imaginável para a investigação das interações fundamentais do universo desde sua origem no "big bang".

As questões básicas da Física Nuclear cobrem, atualmente, um espectro muito amplo que vão desde aspectos de muitos corpos das interações fortes, teste das simetrias fundamentais da natureza, estrutura da matéria nuclear e seu comportamento coletivo, até questões fundamentais como a síntese elementar, fusão nuclear e também questões energéticas.

A Física Nuclear é uma ciência relativamente nova. A descoberta da existência do núcleo atômico tem três quartos de século; praticamente uma vida humana. Nosso conhecimento sobre as propriedades nucleares teve, conseqüentemente, uma evolução fantástica, principalmente na primeira metade deste século.

Entretanto, na segunda metade, vários modos de comportamento coletivo do núcleo foram descobertos, utilizando a técnica do espalhamento inelástico de partículas carregadas. Por exemplo, as vibrações gigantes monopolares despertaram um interesse particular pela sua relação com a compressibilidade da matéria nuclear. Estudos semelhantes, utilizando feixes de prótons, oferecem informações importantes sobre o papel dos prótons e nêutrons nas vibrações nucleares, assim como os estados excitados de núcleons, denominados ressonâncias deltas.

O espalhamento de elétrons de alta energia é utilizado, atualmente, como uma das ferramentas mais poderosas para observar, de forma sem precedente, detalhes sobre a estrutura nuclear em termos não somente dos núcleons envolvidos mas também, dos mésons presentes no núcleo. Estes estudos representam uma das fronteiras da Física Nuclear.

A caracterização das simetrias, das excitações simples e movimentos dos núcleons na matéria nuclear não está esgotada ainda. Os limites nos quais as simetrias são afetadas ou até quebradas merecem também uma atenção por causa da possibilidade de esclarecimentos que podem trazer ao entendimento do núcleo e também, pela aplicabilidade de novas técnicas matemáticas aos problemas de muitos corpos.

O recente desenvolvimento de aceleradores de grande porte permitiu o uso de feixes pesados, abrindo novas possibilidades para a investigação em Física Nuclear. A física de íons pesados tornou-se uma ponta de prova sem igual para o estudo da dinâmica da colisão entre núcleos, populando novos modos de excitação, permitindo a ocorrência de novos processos de reação, formando núcleos exóticos em situações extremas de energia, momento angular, temperatura e densidade.

Um fato importante a ser ressaltado é que quase todo o conhecimento acumulado em Física Nuclear até hoje, provém de experiências em um número muito reduzido de núcleos em condições muito restritas de temperatura (baixas) e densidade (normal). O domínio de altas temperaturas e densidades nucleares só começou a ser explorado recentemente com o uso de íons pesados relativísticos. Este assunto corresponde, sem dúvida, a um dos problemas de fronteira mais interessantes da Física Nuclear.

A seguir, podemos destacar alguns tópicos de interesse atual. Na área de estrutura nuclear, a Física Nuclear tenta responder a algumas perguntas básicas: "Como é que o núcleo rearranja sua forma e simetria sob o efeito de rotações muito rápidas?" "O que acontece aos núcleos perto do limite da estabilidade?"

A presença crescente de forças centrífugas e de Coriolis é responsável por mudanças no emparelhamento dos núcleons e grandes deformações podem ocorrer. O núcleo assimila o momento angular de duas formas possíveis. Uma, pelo alinhamento individual do movimento orbital de poucos núcleons com o eixo de rotação do núcleo ou, quando o núcleo é deformado, pelo movimento rotacional coletivo do mesmo. Observa-se um compromisso entre o alinhamento de núcleons que tendem a desestabilizar a rotação coletiva e as deformações centrífugas que tendem à estabilização. Desta forma, são formados núcleos com esquemas de decaimento regulares ou aleatório, dando origem a efeitos tipo "backbending" ou estados isoméricos.

Por outro lado, os conceitos de simetrias estão sendo estendidos, a fim de incluir as formas mais complexas. As simetrias investigadas em sistemas nucleares, originalmente geométricas, deram lugar às simetrias de tempo e espaço. Fi-

nalmente, as simetrias de caráter dinâmico, que descrevem as propriedades da interação entre constituintes de sistemas de muitos corpos, foram estendidas recentemente para incluírem as formas mais complexas. As super-simetrias se aplicam a sistemas nucleares relacionando os graus coletivos de liberdade bosônicos e graus de liberdade fermiônicos de partícula independente. Atualmente, perguntamo-nos qual é a origem microscópica dessas supersimetrias no núcleo e que propriedade da interação básica elas representam?

As simetrias podem também afetar as características estatísticas dos sistemas físicos. Um problema de grande interesse atualmente na Física Nuclear corresponde à transição entre o comportamento ordenado e caótico, assim como a correlação entre as propriedades estatísticas e aquelas associadas a poucos graus de liberdade. A caracterização desta correlação corresponde ainda a um problema em aberto na Física Quântica de muitos corpos. Sistemas nucleares se apresentam, com vantagens, como um excelente laboratório para estudar este problema.

Na área das excitações elementares, vários pontos ainda estão em aberto. Talvez o movimento de uma partícula independente no núcleo seja constituinte na forma mais fundamental e conceitualmente simples das excitações elementares. Com boa aproximação, pode-se descrever o núcleo como consequência do movimento de cada núcleon, de forma independente, num campo médio criado pela média de sua interação com todos os outros núcleons.

A evolução da determinação do campo médio, a partir de uma teoria fundamental, teve basicamente três estágios: o primeiro em termos dos núcleons, prótons e nêutrons unicamente; o segundo em termos de uma teoria relativística envolvendo explicitamente mésons e, finalmente, em termos de quarks e gluons na cromodinâmica quântica.

O modelo de camadas, baseado na descrição do campo médio, permite cálculos detalhados de estados levemente excitados de núcleos quase-esféricos. Experimentos recentes, baseados no espalhamento de elétrons energéticos, permitiram determinar, por exemplo, a diferença de densidades de carga entre o  $^{205}\text{Tl}$  e  $^{206}\text{Pb}$ , confirmando as previsões do modelo de camadas. A nova geração de aceleradores de elétrons de onda contínua permitirá certamente a elaboração de experiências de reações de "knock-out", sem fundo, permitindo o estudo das correlações de curto alcance entre núcleons.

Os modelos coletivos são, normalmente, utilizados na descrição de fenômenos nos quais um número relevante de núcleons se movem coerentemente. Novas técnicas experimentais, envolvendo excitações coulombianas e íons pesados, permitem determinar a estrutura quadrupolar do núcleo.

Finalmente, a localização, largura, intensidade, a variação  $Q$  com energia das ressonâncias gigantes fornecem uma grande oportunidade para testar os modelos macroscópicos baseados nas propriedades globais do núcleo e descrições microscópicas com base no modelo de camadas. Informações sobre a compressibilidade da matéria nuclear abrem perspectivas claras para testar os cálculos sobre a mesma, que pretendem explicar os fenômenos de onda de choque nas colisões de íons pesados relativísticos e explosões de supernovas.

O estudo dos fenômenos macroscópicos teve um impulso considerável com o desenvolvimento de feixes de íons pesados. As ressonâncias moleculares de íons permitem identificar estados estreitos, com estrutura simples e momentos angulares de 40 a 50  $\hbar$ .

Colisões amortecidas ou dissipativas constituem-se numa etapa intermediária entre as reações diretas e a formação de um núcleo composto. Dentre os mecanismos identificados claramente podemos citar a fusão completa. Existem, atualmente, indicações de que processos periféricos, ativando a superfície nuclear com transferência apreciável de energia e de núcleons, podem ter consequências sensíveis na evolução de sistemas dinucleares e conseqüentemente devem ter uma correlação estreita com a estrutura nuclear dos participantes. Esta correlação pode ser esclarecida com o estudo cuidadoso dos processos quase-elásticos, que competem com a fusão completa. Dependendo da assimetria do canal de entrada, dos valores dos momentos angulares envolvidos e energia de ligação dos participantes, processos muito inelásticos, reações de fissão rápida ou simétrica assim como processos de fusão incompleta podem também se manifestar de maneira significativa.

A matéria nuclear foi investigada, até recentemente, numa região muito limitada de sistemas, energia, densidade nuclear e temperatura, testando apenas seu equilíbrio e propriedades dinâmicas.

A natureza da matéria nuclear em condições extremas de compressão, densidade e temperatura, ainda não foi investigada experimentalmente. O uso de íons pesados relativísticos parece corresponder ao procedimento mais adequado para provocar a manifestação de uma mudança de fase líquida — gás da matéria nuclear. A uma densidade duas vezes superior à da saturação, espera-se a transição para uma fase denominada "condensação de píons", na qual o sistema desenvolve um campo macroscópico coerente de píons, similar ao campo eletromagnético num laser. A uma densidade ainda superior, pode ser formado um plasma de quarks-gluons, no qual os quarks deixam de ficar confinados e se movem independentemente. Talvez seja este assunto o que recebe maiores atenções atualmente e detenha as maiores expectativas na Física Nuclear moderna.

Finalmente convém lembrar as importantes aplicações da Física Nuclear e suas técnicas em outras áreas. Já foi citada a necessidade do conhecimento de secções de choque para fusão de sistemas leves para entender melhor a síntese elementar e formação das supernovas.

O estudo da estrutura de superfícies e dinâmica de materiais conta com as técnicas sensíveis das correlações angulares perturbadas e implantação de íons pesados. A magnitude das interações de campos magnéticos e elétricos podem ser determinados com precisão. Atualmente, efeitos de tunelamento e "blocking" em cristais são utilizados normalmente na Física Atômica do estado sólido.

O uso de técnicas de Física Nuclear em Física Atômica (estudo de moléculas, secções de choque para formação de íons exóticos, perfil de H em materiais), pode ser aplicada em Geologia e Arqueologia com a possibilidade de datação de materiais, em Medicina Nuclear com diagnósticos e tratamento radioterapêuticos. Finalmente, a Física Nuclear vem dando sem dúvida uma contribuição importante na busca de formas alternativas de energia.

## BREVE HISTÓRICO

A Física moderna no Brasil teve sua origem com a criação da Universidade de São Paulo e do Departamento de Física da Faculdade de Filosofia Ciências e Letras, em 1934. A área de pesquisa que se destacou imediatamente, tanto pela importância do assunto como pelo sucesso obtido pelo grupo de físicos de São

Paulo, foi a da radiação cósmica. Durante o período da segunda guerra mundial, as atividades de pesquisa nesta área foram diminuídas, mas não interrompidas, face às atividades do Departamento de Física de São Paulo no desenvolvimento e construção de sonares para a marinha de guerra brasileira.

Após o conflito mundial, o Departamento de Física decidiu que seria oportuno e importante dar início às atividades de pesquisa em Física Nuclear.

Em 1946, com apoio da Fundação Rockefeller, Gleb Wataghin e Marcelo Damy de Souza Santos foram aos Estados Unidos da América do Norte e decidiram pela aquisição de um acelerador de partículas. O acelerador escolhido foi um betatron de 22 MeV, fabricado pela Allis-Chalmers, e que foi adquirido com recursos fornecidos pelo governo e pela Fundação Rockefeller. Esta máquina iniciou suas operações no início da década de 50 com um programa de pesquisa em reações foto-nucleares, eletro e foto-desintegração, fissão com medidas de atividade residual.

Em 1947-48, estando Oscar Sala estagiando nos Estados Unidos foi a ele solicitado um estudo de possibilidades de construção de um acelerador, tipo Van de Graaff. O projeto foi desenvolvido e a construção iniciada em 1951.

Por esta ocasião, o recém criado Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas também decide que uma das áreas de pesquisa a serem desenvolvidas na instituição seria a da Física Nuclear. Decide, então, comprar um acelerador Cockcroft-Waltron para 750 kV, que foi adquirido da Philips e que aqui chegou no início da década de 1950. Infelizmente este acelerador, praticamente, não foi utilizado.

Ainda na década de 50, o CBPF decide pela operação de um sincrocíclotron idêntico ao recém construído na Universidade de Chicago. O protótipo do acelerador foi enviado ao Brasil e instalado em Niterói. Infelizmente este projeto também não teve prosseguimento e foi posteriormente cancelado.

Em 1954, foi concluída a construção do acelerador Van de Graaff da Universidade de São Paulo. Com esta máquina de 3,5 MV foi obtido, em 1955, pela primeira vez, um feixe pulsado para o desenvolvimento da Física de Nêutrons. Entretanto, face a dificuldades orçamentárias, este acelerador só passou a ser utilizado regularmente em fins da década de 1950, graças a auxílios da Fundação Rockefeller. A partir de então, este acelerador foi intensamente utilizado até 1972, contribuindo na formação de um número apreciável de físicos nucleares e publicações de trabalhos em periódicos internacionais.

Na década de 60, sob a orientação do Gral Argus, no CBPF, construiu-se um acelerador linear de elétrons para 2 MeV e, em seguida, um outro para 30 MeV. Infelizmente este último, que possuía para a época boas características, foi pouco utilizado.

No fim da década de 60, a PUC do Rio de Janeiro adquire da firma High Voltage Engineering um acelerador Van de Graaff para 4 MeV, que poderia acelerar elétrons ou íons. Após um longo período para a sua instalação, esta máquina está sendo utilizada exclusivamente para a aceleração de íons num programa de Física Atômica e Física Nuclear Aplicada.

Na década de 60, o acelerador Betatron da USP apresentou defeitos irreparáveis encerrando suas atividades. Em 1967, a Universidade de Stanford doou um acelerador linear de elétrons à USP. Este empreendimento, coordenado pelo Prof. José Goldemberg, começou a produzir os primeiros trabalhos no início da década de 70.

Em 1969, foi adquirido, pela Universidade de São Paulo com recursos do BNDE, o acelerador tandem tipo Pelletron, modelo 8UD, que entrou em operação em 1972.

Além destes aceleradores, no IPEN foi instalado um acelerador "divance-tron" de 3 MV e posteriormente um ciclotron de energia variável da "Cyclotron Corp" de 12 Kv. Estas máquinas destinam-se a estudos de danos de materiais e produção de isótopos de meias vidas curtas.

No INEN do Rio de Janeiro, foi instalado um ciclotron de energia variável, idêntico ao do IPEN, para a produção de isótopos de vidas curtas, radioquímica e estudo de problemas de fissão. Esta máquina é também operada pela grupo de Física Nuclear da UFRJ.

Atualmente, podemos afirmar que essencialmente dois aceleradores estão dedicados integralmente à pesquisa básica em Física Nuclear no país, ambos localizados no campus da Universidade de São Paulo, isto é, o Acelerador Linear de Elétrons e o Acelerador Pelletron de Íons Pesados. O Linear (Laboratório do Acelerador Linear), apesar de ser uma máquina projetada nos anos 50, possibilitou a elaboração de inúmeras dissertações de mestrado, teses de doutorado, bem como uma série de publicações. Atualmente, dificuldades na manutenção do Laboratório do Acelerador Linear limitam sua energia e tempo de uso, o que demanda o estudo de um novo projeto.

O outro acelerador da USP, o Acelerador Pelletron 8UD, opera continuamente com tensões de até 8.3MV. A substituição do sistema de aquisição de dados agilizou a performance do sistema, aumentando sua eficiência para valores altamente satisfatórios, da ordem de 70%.

Nos vários centros que possibilitaram a formação de núcleos experimentais germinaram grupos de pesquisa na área teórica. Tanto no Instituto de Física da USP como no CBPF e, mais recentemente, na UFRJ os vários grupos se consolidaram. Na região sul, a UFRGS apoiou a formação de um sólido grupo de Física Nuclear que acabou desviando sua linha principal para outras atividades de pesquisa correlatas.

Entretanto, o grupo da UFPE, que se desenvolveu a partir da década de 1970, permanece ativo apesar de estar reduzido atualmente.

Podemos citar vários outros novos grupos, que operam quase a nível individual, que estão em desenvolvimento no Paraná, UNESP, CTA (São José dos Campos, SP) e Paraíba.

## ANÁLISE E PERSPECTIVAS

A Física Nuclear brasileira, que se iniciou basicamente com atividades experimentais, pode ser considerada como a primeira área de pesquisa, no Brasil, organizada com programas de pesquisa de fronteira.

Numa análise crítica da situação da área não podemos ignorar a tendência da Física Nuclear Experimental de se concentrar em São Paulo. Como avaliar este fato? Não há dúvidas de que o nível da pesquisa realizada é bom no padrão internacional apesar de se encontrarem dificuldades óbvias para a contribuição em problemas de fronteira.

A Física Nuclear Experimental depende fortemente de equipamentos dispendiosos devido ao grande porte dos aceleradores. Entretanto, ela não canaliza uma fração apreciável dos recursos dotados à pesquisa nacional.

Ao longo dos anos, em todos os países do primeiro mundo, a Física Nuclear teve um apoio importante em suas atividades básicas, pelo fato de ser a atividade científica que mais contribuiu na formação de recursos humanos por requerer atividades multidisciplinares. Entre outras, podemos citar o conhecimento que se desenvolve em eletrônica analógica e digital, tecnologia de vácuo, técnicas em alta tensão, rádio frequência, computação, estado sólido, sistemas de controle, ciência dos materiais e instrumentação em geral.

Entretanto, apesar da importância da área, não podemos dizer que haja uma política científica definida nem que exista a infra-estrutura necessária para um desenvolvimento adequado. O programa central baseia-se unicamente em torno das máquinas existentes (isto é, Pelletron, Acelerador Linear da USP). Se a implantação dos laboratórios ocorreu em função do esforço de grupos de pessoas, não existe nenhum programa nacional coordenado para manutenção desses laboratórios e menos ainda para a implementação de periféricos indispensáveis para um melhor aproveitamento dos equipamentos, o que parece insensato. Existe, sem dúvida, uma capacidade estabelecida no País que não pode desaparecer.

Numa época em que a comunidade de físicos resolve "discutir" a implantação de laboratórios nacionais de grande porte (orçados em várias dezenas de milhares de dólares), acreditamos ser fundamental o aproveitamento da vivência e experiência acumulada dos laboratórios brasileiros de Física Nuclear, que correspondem à situação mais próxima a um laboratório nacional como os que se pretende implantar.

Não existindo recursos mínimos para a manutenção de infra-estruturas satisfatórias em vários centros no país, teria que ser de fundamental importância promover e patrocinar o intercâmbio entre universidades. Isto evitaria, no mínimo, um "inbreeding" prejudicial. Não se pode negar a importância dos laboratórios existentes também na função de formar pesquisadores com treinamento e experiência suficiente para propor e realizar experiências nos vários laboratórios internacionais.

A comunidade de física nuclear brasileira tem-se reunido anualmente nos Encontros Nacionais, nos quais têm tido uma participação ativa pelo fato dessas reuniões proporcionarem o único fóro para intercâmbio entre os diversos grupos de pesquisa. Várias vezes foram colocados em discussão projetos futuros e perspectivas futuras para a área. Apesar de não resultar nenhuma definição de política científica, ficou clara a existência de projetos concretos para a expansão de grupos de pesquisa estabelecidos. Podemos destacar os projetos de expansão do Laboratório Pelletron com um pós-acelerador linear supercondutores e do Acelerador Linear de Elétrons, também do IFUSP, com um Microton de onda contínua. A proposta de expansão do Laboratório Pelletron foi lançada na primeira reunião anual de Cambuquira, em 1978. Desde então, detalhes do projeto foram propostos por Oscar Sala em várias reuniões da comunidade na SBPC (SBF), CNPq, CBPF, IFUSP. Até recentemente, não houve manifestação explícita da comunidade através da sua entidade representativa, a SBF. Recebeu sim, declarações de "intenção de apoio" de algumas agências financiadoras.

O mesmo ocorre, de forma ainda menos definida, com respeito à necessidade de expansão (ou renovação) de um acelerador de elétrons, da USP.

É fundamental um posicionamento menos apático da comunidade a esse respeito, pois dele depende não só a qualidade da produção científica da comunidade brasileira de Física Nuclear, como sua própria sobrevivência.

Os grupos teóricos, mesmo dependendo menos de grandes recursos para equipamentos, poderiam beneficiar-se de infra-estrutura bibliográfica e de intercâmbio. Este problema é crucial para os grupos de pesquisa em desenvolvimento do Nordeste.

## **DADOS SOBRE OS GRUPOS DE PESQUISA**

### **1. Instituto de Física da USP**

O IFUSP que conta com um contingente de 43 Doutores e 9 Mestres possui, basicamente, três grandes grupos de pesquisa em física experimental e teórica, caracterizados pelo Laboratório do Acelerador Linear (DFE), Laboratório Pelletron (DFN) e Grupo de Física Nuclear Teórica (DFM).

As linhas de pesquisa são centradas na:

- Fissão induzida por elétrons em núcleos actinídeos;
- Reações fotonucleares e de eletrodesintegração;
- Decaimento de ressonâncias gigantes quadrupolares;
- Estudo de forças de três corpos;
- Espectroscopia nuclear;
- Dinâmica de colisões entre íons pesados;
- Fusão completa de íons pesados;
- Espalhamento elástico e inelástico de íons pesados;
- Processos quase-elásticos entre íons pesados;
- Estrutura nuclear;
- Física aplicada;
- Modelos coletivos nucleares;
- Quantização de sistemas dinâmicos;
- *Desenvolvimento formal de um tratamento de correlações quânticas em teorias de muitos Férmions interagentes.*

### **2. Universidade Federal de São Carlos (São Paulo)**

Quadro: 2 doutores.

Linhas de pesquisa:

- Medidas de correlações angulares (em implantação)

### **3. Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (São Paulo)**

Quadro: 6 doutores, 6 mestres.

Linhas de pesquisa:

- Espectroscopia nuclear com raios gama prontos de captura radioativa de nêutrons térmicos;
- Estudo de fotodesintegração e detectores de traços;
- Espalhamento de nêutrons;
- Correlações angulares gama-gama.

### **4. Universidade Federal do Rio de Janeiro**

**Quadro: 14 doutores, 13 mestres.**

**Linhas de pesquisa:**

- Reações nucleares com íons pesados;
- Vibrações nucleares;
- Estrutura nuclear;
- Espalhamento elástico e inelástico de radiação gama;
- Física atômica.

#### **5. Coordenação dos Programas de Pós-Graduação de Engenharia (COPPE-UFRJ)**

**Quadro: 5 doutores.**

**Linhas de pesquisa:**

- Interação NN

#### **6. Instituto de Engenharia Nuclear (Rio de Janeiro)**

**Quadro: 3 doutores, 14 mestres.**

**Linhas de pesquisa:**

- Razões isoméricas de produtos de reações com partículas carregadas;
- Produtos de fissão com partículas carregadas;
- Simulação de efeitos de radiação com partículas carregadas.

#### **7. Universidade Federal Fluminense**

**Quadro: 5 doutores, 1 mestre**

**Linhas de pesquisa:**

- Reações com íons pesados;
- Reações fotonucleares;
- Radioproteção e dosimetria.

#### **8. Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas (Rio de Janeiro)**

**Quadro: 6 doutores, 3 mestres.**

**Linhas de pesquisa:**

- Reações nucleares com íons pesados relativísticos;
- Astrofísica nuclear;
- Fotoprodução e fotofissão de núcleos pesados.

#### **9. Universidade Federal de Pernambuco**

**Quadro: 4 doutores, 3 mestres.**

**Linhas de pesquisa:**

- Estrutura nuclear;
- Estudo de forças de três corpos;
- Descrição estatística de processos nucleares.

#### **10. Universidade Federal da Paraíba**

**Quadro: 4 doutores, 1 mestre**

Linhas de pesquisa:

- Estrutura nuclear;
- Fotofissão;
- Estudo de larguras de ressonâncias gigantes.

#### 11. Universidade Estadual de Londrina

Quadro: 2 doutores, 2 mestres.

Linhas de pesquisa:

- Estrutura nuclear;
- Espalhamento inelástico de partículas carregadas.

#### 12. Universidade de Brasília

Quadro: 3 doutores, 1 mestre

Linhas de pesquisa:

- Modelos de partículas  $\alpha$  para núcleos  $^{12}\text{C}$  e  $^{16}\text{O}$ ;
- Energias intermediárias: sistemas de dois e três quarks pesados.

#### 13. Centro Tecnológico de Aeronáutica (IEAv-CTA)

Quadro: 5 doutores.

Linhas de pesquisa:

- Estrutura nuclear;
- Reações dissipativas com íons pesados.

#### 14. Universidade Federal do Rio Grande do Sul

Quadro: 4 doutores.

Linha de pesquisa:

- Energias intermediárias.

## **ENSINO DE FÍSICA**

<b>DESCRIÇÃO</b> .....	<b>283</b>
<b>ORIGENS</b> .....	<b>283</b>
<b>PÓS-GRADUAÇÃO</b> .....	<b>283</b>
<b>PESQUISA</b> .....	<b>284</b>
<b>SIMPÓSIOS E ENCONTROS</b> .....	<b>285</b>
<b>PUBLICAÇÕES</b> .....	<b>285</b>
<b>PROJETOS EDUCACIONAIS</b> .....	<b>285</b>
<b>CONSTITUIÇÃO DOS GRUPOS</b> .....	<b>286</b>

# Ensino de Física

## PROJETOS EDUCACIONAIS, PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO

### DESCRIÇÃO

Na presente avaliação consideram-se atuando em "Ensino de Física" os docentes universitários dedicados a esta atividade não como função didática regular, mas enquanto trabalho de pesquisa educacional, condução de projetos educacionais ou elaboração de material instrucional.

### ORIGENS

A área surgiu e se instituiu em decorrência da necessidade de docentes igualmente qualificados em Física e Educação, para o desenvolvimento adequado do ensino desta ciência. Esta, não é uma evolução só brasileira, já que esta especialidade, muitas vezes como modalidade de Educação em Ciência, existe em grande número de países. A Física é, no Brasil, pioneira neste tipo de iniciativa, mas há indicações de que outras ciências começam a desenvolver sua pedagogia específica.

### PÓS-GRADUAÇÃO

Pós-graduação específica nesta área existe na Universidade Federal do Rio Grande do Sul desde 1968 (no Instituto de Física), na Universidade de São Paulo desde 1973 (num programa conjunto entre o Instituto de Física e a Faculdade de Educação) e na Universidade Federal Fluminense desde 1984 (no Instituto de Física). Além disto as Faculdades de Educação da Universidade de São Paulo e da Universidade Estadual de Campinas têm promovido Mestres e Doutores especializados no ensino de Física, há vários anos.

O programa de pós-graduação da Federal Fluminense é ainda muito recente, não tendo ainda produzido Mestrados. A Universidade Federal do Rio Grande

do Sul e a Universidade de São Paulo tiveram a seguinte distribuição de Mestrados por ano, desde o início dos respectivos programas:

### MESTRADOS - UFRGS

anos		número de formandos	
71	a	75	05
76	a	80	09
81	a	86	13
TOTAL		27	

### MESTRADOS - USP

anos		número de formandos	
75	a	86	16
81	a	86	21
TOTAL		37	

Além destes, no exterior formaram-se 4 Mestres e noutras faculdades outros 4, sendo portanto 75 o total de Mestres na área.

Os Doutoramentos na área se distribuem da seguinte forma:

em Faculdade de Educação . . . . .	05
em Institutos de Física (excepcionalmente) . . . . .	02
no Exterior . . . . .	05

totalizando assim 12 Doutores formados em Ensino de Física.

Há, na realidade, um número de Doutores bem maior que este trabalhando nesta área, mas originalmente Doutorados noutra especialidade.

Atualmente há cerca de 100 pós-graduandos em Ensino de Física no Brasil, sendo que a metade deles está em fase de elaboração de dissertação. Pode-se esperar assim uma duplicação do número de Mestres em, pelo menos, cinco anos. Há ainda cerca de 10 doutorandos, o que permite supor o mesmo prazo para a duplicação do número de Doutores.

### PESQUISA

As linhas de pesquisa se refletem diretamente nos temas de dissertação, com tendências e concentração de tendências e concentração de interesses variando com o período e com os centros de pesquisa. Em São Paulo, por exemplo,

podem-se distinguir alguns grupos de temas, como: I) elaboração, aplicação e avaliação de propostas e materiais instrucionais (50%); II) estudos analíticos de condições para o aprendizado (30%); III) análises históricas ou institucionais da Física, de seu ensino e outros temas (20%). A maior parte destes trabalhos está voltada para o ensino de 2º grau, enquanto que no Rio Grande do Sul, os trabalhos são mais voltados para o ensino de 3º grau e a distribuição de temas é também diferente: I) aplicação e avaliação de teorias de aprendizado (70%); II) desenvolvimento de técnicas para o ensino experimental e outros temas (30%).

Quanto às tendências gerais das linhas de pesquisa, pode-se observar que inicialmente (principalmente nos anos 70) era grande a concentração na produção de materiais instrucionais e suas análises, sendo em geral baseadas em teorias do conhecimento e aprendizagem (comportamentalistas ou estruturalistas). O papel do professor era geralmente minimizado, centrando-se o aprendizado na relação aluno x material instrucional. Mais recentemente a pesquisa tem convergido para compreender o aluno (com seus conceitos intuitivos ou espontâneos) em sua relação com a conceituação científica trazida pelo professor. Também nos últimos anos cresceu o enfoque social e histórico em detrimento do enfoque mais psico-pedagógico dos anos anteriores.

## **SIMPÓSIOS E ENCONTROS**

Além de 7 simpósios nacionais de Ensino de Física (que eram trienais e passaram recentemente a ser bienais), foram realizados desde o início das atividades da área uma dezena de simpósios ou encontros regionais em quase todas as regiões do País. Não são simplesmente simpósios ou encontros de pesquisa, já que o interesse social e prático da área é até predominante, servindo também para reunir professores da escola média, analisar políticas educacionais e promover cursos. Encontros de pesquisa, específicos, estão agora programados para ocorrer também a cada 2 anos, intercalados, com os Simpósios Nacionais. É intensa também a participação da área nas reuniões anuais da SBF.

## **PUBLICAÇÕES**

A Revista Brasileira de Ensino de Física há anos substitui a seção de ensino da Revista Brasileira de Física, tendo já publicado centenas de artigos. Nem todos podem ser classificados como de "pesquisa em ensino" já que há artigos analíticos ou descritivos, pertinentes a uma publicação desta natureza, voltada para o professor que busca sugestões e propostas. As informações que hoje temos sobre o número de publicações, por grupos de pesquisa, por período, é muito fragmentária para valer a pena explicitá-la neste relatório. Há várias publicações no exterior que têm recebido contribuições brasileiras, mas não temos um registro regular destas. Regionalmente, no Brasil, estão surgindo publicações da área como os "Cadernos Catarinenses de Ensino de Física" que, ao lado de revistas voltadas para o ensino de Ciências em geral, procuram promover um melhor ensino de Física, mais do que registrar pesquisa original nesta especialidade.

## **PROJETOS EDUCACIONAIS**

Estes projetos são sem dúvida a principal atividade da área, ao lado dos programas regulares, formação e re-capacitação de professores. Atualmente, a

principal agência financiadora destes projetos é o PADCT, particularmente o "Sub-projeto Educação para a Ciência" do qual a Física é uma das principais receptoras de recursos, em quase todas as regiões do País. Agências internacionais como a UNESCO, têm tido seus recursos drasticamente reduzidos.

## CONSTITUIÇÃO DOS GRUPOS (e sua Distribuição Regional)

Listados a seguir, estão os grupos e/ou docentes por Instituição, agrupados por região. Não se tratam todos eles de grupos de "Pesquisa em Ensino" mas também, de grupos dedicados a projetos educacionais, programas de treinamento de professores e atividades afins.

	Doutores em Ensino	Doutores em Física	Mestres em Ensino	Mestres em Física	Bacharéis ou Licenciados	Total	
						por Instituição	por Região
<b>SUL</b>							
UFRGS	3	-	3	-	1	7	
UFSC	-	-	2	1	2	5	
UEM	-	-	1	3	3	7	
UEL	-	2	1	-	5	8	
UFSM	-	-	1	-	2	3	
							30
<b>SUDESTE</b>							
IFUSP	4	7	4	2	5	22	
FEUSP	1	-	1	-	1	3	
IFSC/USP	-	2	1	1	1	5	
UNESP	-	-	2	1	1	4	
UNICAMP	1	-	1	-	-	2	
UFRJ	1	-	-	4	7	12	
UFF	-	3	-	2	-	5	
PUC-RJ	-	1	-	1	-	2	
UFRJ	1	-	-	-	4	5	
UFMG	1	-	4	1	1	7	
*São Carlos							67
<b>CENTRO OESTE</b>							
UFMT	-	-	1	-	2	3	3
<b>NORDESTE</b>							
UFBA	-	-	1	-	3	4	
UFAL	-	1	1	-	1	3	
UFRP	-	-	2	-	-	2	
UNICAP	-	-	-	2	1	3	
UFRN	1	1	4	-	2	8	
UEPB	-	1	1	-	-	2	22
<b>NORTE</b>							
UFPA	-	1	-	1	2	4	
UFAM	-	-	1	-	3	4	
							8

## **SITUAÇÃO DA FÍSICA NAS EMPRESAS**

<b>INTRODUÇÃO</b> .....	<b>289</b>
<b>DEFINIÇÃO DA QUESTÃO</b> .....	<b>289</b>
<b>EVOLUÇÃO HISTÓRICA</b> .....	<b>290</b>
<b>DADOS SOBRE OS FÍSICOS NAS EMPRESAS</b> .....	<b>291</b>
<b>CONCLUSÕES</b> .....	<b>292</b>

# Situação da Física nas Empresas

## INTRODUÇÃO

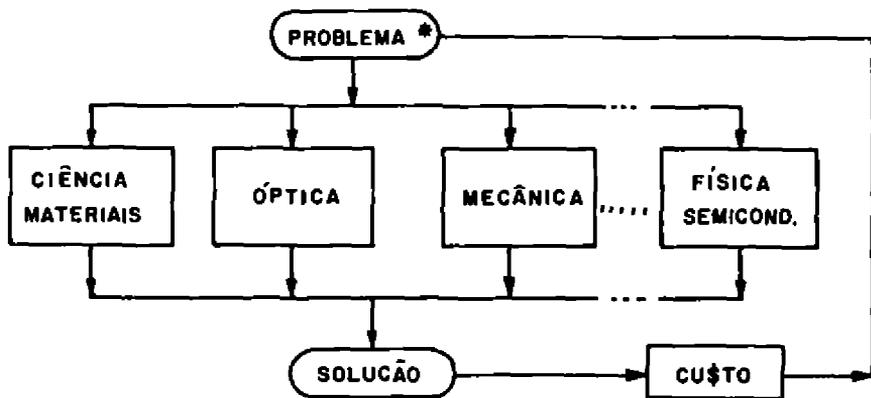
A natureza das atividades de pesquisa e desenvolvimento realizadas nas Empresas, Centros de Pesquisa à elas dedicadas ou pertencentes, é fundamentalmente diferente daquelas que se tem nas Universidades. Empresas têm produtos, serviços ou ambos, direcionados em linhas bem definidas, às quais devem sempre reverter os lucros ou dividendos. Significa que os investimentos devem ter retorno a curto e médio prazo; isto é válido tanto para estatais como para empresas privadas. Nesse sentido, não se criam atividades de pesquisa segundo linhas de conhecimento: Óptica, Física de Plasma, Metalurgia, Química Inorgânica, e sim segundo problemas específicos a serem resolvidos e novos produtos a serem desenvolvidos (Figura 1). Trata-se, então, de empregar um grupo de físicos, químicos, engenheiros para, segundo suas especialidades, aumentarem as potencialidades e realizações de suas empresas. Portanto, nas empresas envolvidas em alta e média tecnologia (não há definição nítida para os termos, deixamos portanto, que prevaleça a noção intuitiva), as atividades de P&D são fortemente multidisciplinares, conforme ilustrado na figura 1. Os próprios profissionais vêem-se, freqüentemente, envolvidos também em atividades multidisciplinares. Este é o quadro tal como se apresenta, independente do tempo.

## DEFINIÇÃO DA QUESTÃO

O que são empresas? Adota-se nesta avaliação a definição (ad hoc) de empresa como a atividade sócio-econômica *produtiva* que tem geração própria de recursos financeiros. Os produtos podem ser materiais ou imateriais, isto é, serviços/consultoria.

Objetivo da avaliação? Achar físicos em atividades técnico-científicas dentro das empresas; quais as empresas; quantas; onde. Não se tem conhecimento de

**FIGURA 1 – DIAGRAMA ESQUEMÁTICO DA ATIVIDADE DE P & D EM EMPRESAS.**



\* PROBLEMA: NOVO PRODUTO, NOVO PROCESSO, OU ETAPA DOS ANTERIORES.

que já tenha sido feita tal avaliação. Se o leitor tiver conhecimento de qualquer levantamento recente, realizado por órgão oficial ou não, ou mesmo por alguma Secretaria Regional da SBF, entre em contato com o autor ou colaboradores.

## EVOLUÇÃO HISTÓRICA:

Até o presente, ou até um passado recente que não se estende por mais de 10 anos, o esforço de pesquisa tecnológica ou "ciência operacional" esteve concentrado quase que exclusivamente nas Universidades e Centros de Estudos patrocinados pelo Governo. A Física, pela sua natureza de ciência fundamental, vinha encontrando espaço para seus profissionais apenas nessas entidades. Exemplos nítidos são o IPEN, CTA, IPT, todas situadas não casualmente em São Paulo.

Entretanto, a maciça industrialização do Brasil nos últimos 25 anos, levou enfim o País a buscar desenvolvimento tecnológico. Começam então empresas nacionais e multinacionais a desenvolver atividades de pesquisa tecnológica, e abre-se a partir dos dias de hoje, novas alternativas de atuação para físicos em Empresas. Um aspecto relevante que surge é o trabalhista: agora que se disputa um mercado é importante a regulamentação da profissão de físico, mas isto só deve ser feito se for possível assegurar condições não inferiores as do engenheiro, como ocorre nos países industrializados. A simples regulamentação da profissão não é suficiente para assegurar aos físicos boa participação no mercado. Um bom exemplo dos perigos da regulamentação é o que ocorreu com os bioquímicos, que por pressão das associações médicas não podem executar certas funções perfeitamente ao seu alcance, ficando assim relegados a uma profissão de categoria inferior.

## DADOS SOBRE OS FÍSICOS NAS EMPRESAS

O levantamento foi realizado a partir de contatos diretos com pessoas em Empresas e envio de formulários. As duas dificuldades básicas foram:

- Como localizar indivíduos nas Empresas (quem está onde).
- Como obter respostas das pessoas localizadas.

A primeira ainda persiste, e o trabalho de levantamento deve continuar sendo feito pela SBF. A segunda foi resolvida entrando em contato direto com as pessoas, avisando-as que seguiria um formulário e que fosse respondido rapidamente, que divulgassem, etc.

O retorno dos formulários e mais alguns contatos, permitiram obter os dados apresentados na Tabela 1. Nessa tabela aparecem as Empresas com seu ano de incorporação e o ano da criação da divisão ou diretoria onde se encontram físicos. Ressaltamos que a este levantamento só interessam os físicos que estejam efetivamente atuando em área técnico-científica. Indivíduos com grau em Física, mas que estejam em atividades comerciais ou outras (por ex., Informática) não estão sendo considerados.

Há informações de que existem físicos em empresas multinacionais como a Basf, Ford, Volkswagen, mas não foi possível contactá-las até o presente. O mesmo se aplica a físicos atuando na área Biomédica.

**Tabela 1 – DISTRIBUIÇÃO DOS FÍSICOS EM EMPRESAS NO BRASIL**

EMPRESAS	Bacharéis	Mestres	Doutores
Pirelli Cabos (1929/1975)	7	1	–
Kmp (1976)	–	1	–
Metal Leve (1950/1978)	–	1	–
Eletrometal	–	–	1
Embrapa UAPDIA (1973/1984)	1	3	1
Opto S. Carlos (1985)	1	1	1
IPT (1898) Papel (1976)	1	–	–
Metalurgia (1974)	2	1	–
Elebra Micro (1985)	–	4	4
ABC-Xtal Micro (1975/1980)	–	3	1
Telebrás CPqD (1972/1977)	1	20	5
Eletobrás CEPEL	–	2	1
DF Vasconcelos	2	–	–
Tecnolaser (1983)	–	–	1
FUNBEC	3	2	–
<b>TOTAL</b>	<b>18</b>	<b>39</b>	<b>15</b>

*OBS: Os números são corretos numa precisão de 10%, por omissões e recolocações.*

## CONCLUSÕES

O desenvolvimento tecnológico e científico pouco coerente do Brasil, faz com que os resultados obtidos já fossem esperados. Algumas instituições onde físicos exercem plenamente suas atividades profissionais, e em geral um quadro esparso com *uma tendência apenas incipiente do físico efetivamente fora* da Universidade de modo seguro e permanente. Esse quadro esparso significa que não se tem um *mercado de trabalho* para físicos, apesar de haver uma gama de opções de *emprego*.

Uma conclusão a que se chega é naturalmente que os físicos tendem a se encontrar em empresas de alta tecnologia. Estas correspondem: Semicondutores, Óptica, Lasers, Metais e Ligas, em suma, Física da Matéria Condensada. A atuação nessa área (Matéria Condensada) estende-se por empresas de média tecnologia, atuantes em metalurgia, cerâmica e vidros. Obviamente, a distinção entre alta e média tecnologia é feita pela atividade da empresa, não pela área de conhecimento; por exemplo, a ABC-Xtal atua em vidro (fibras ópticas, quartzo) e é de alta tecnologia, a Nadir Figueiredo (copos, etc) atua em vidro e é de média tecnologia.

Podemos, finalmente, concluir que a presença do físico nas empresas vem aumentando gradualmente, e poderá aumentar com gradiente maior, conforme se estabeleça um autêntico mercado de trabalho. Entende-se por autêntico mercado de trabalho nessa área, uma atuação forte de empresas nacionais ou multinacionais em tecnologia básica. Queremos adicionar que se pode observar que o controle acionário das empresas (nacional e multinacional) não é crítico para o desenvolvimento científico e tecnológico do País; o que é crítico é a natureza e a forma de atuação da empresa. Podemos observar a total ausência de físicos em empresas de informática (= fabricantes de microprocessadores, computadores e afins), *pelo simples fato de que estas empresas não desenvolvem conhecimento tecnológico básico*. Vemos, portanto, que há um grave erro no PNI (Plano Nacional Informática) e na Reserva de Mercado: não está sendo fomentada a devida capacitação técnico-científica que permite que o plano suceda a longo prazo.

É sabido que o País só pode atingir soberania autêntica pelo acúmulo e aplicação do conhecimento tecnológico e científico, que não temos e que não estamos buscando adequadamente, seja em componentes eletrônicos, seja em metalurgia, cerâmicas, vidros, mecânica, óptica, acústica, ou qualquer outra área de Ciências Exatas. É nossa tarefa e obrigação atuar no sentido de adequar os esforços às necessidades locais e nacionais. Não existem soluções prontas (veja Figura 1).

# Endereço das Instituições

## ENDEREÇOS DAS INSTITUIÇÕES DE FÍSICA NO PAÍS

### NORTE – NORDESTE

Fundação Universidade do Amazonas – FUAM  
Departamento de Física  
69.000 – Manaus – AM  
Fone: (092) 237.1237

Universidade Federal de Alagoas – UFAL  
Departamento de Física  
Cidade Universitária  
57.000 – Maceió – AL  
Fone: (082) 242.1261

Universidade Federal da Bahia – UFBA  
Instituto de Física  
Rua Caetano de Moura, 123 – Federação  
40.000 – Salvador – BA  
Fone: (071) 247.2714

Universidade Federal do Ceará – UFCE  
Centro de Ciências  
Departamento de Física  
Caixa Postal 3004  
60.000 – Fortaleza – CE  
Fone: (085) 243.2518

**Universidade Federal do Pará – UFPA**  
Departamento de Física  
Núcleo Básico do Guamá  
66.000 – Belém – PA  
Fone: (091) 228.2088

**Universidade Federal da Paraíba – UFPB**  
Departamento de Física  
Campus I  
58.000 – João Pessoa – PB  
Fone: (083) 224.7200 – 224.7219

**Universidade Federal de Pernambuco – UFPE**  
Departamento de Física  
Cidade Universitária  
50.739 – Recife – PE  
Fone: (081) 271.0111

**Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN**  
Centro de Ciências Exatas  
Departamento de Física Teórica e Experimental  
Campus Universitário  
59.000 – Natal – RN  
Fone: (084) 231.1233

**Universidade Federal de Sergipe – UFSE**  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas  
Departamento de Física  
Campus Universitário  
49.000 – Aracaju – SE  
Fone: (079) 224.1331

## **CENTRO – CENTRO-OESTE**

**Fundação Universidade de Brasília – UNB**  
Instituto de Ciências Exatas  
Departamento de Física  
Campus Universitário – Asa Norte  
Agência Postal – 153101  
70.910 – Brasília – DF  
Fone: (061) 273.4292

**Universidade Federal de Goiás – UFGO**  
Instituto de Matemática e Física  
Departamento de Física  
Campus II – Samambaia  
Caixa Postal – 131  
74.000 – Goiana – GO  
Fone: (062) 261.0333

Universidade Federal do Mato Grosso do Sul – UFMS  
Departamento de Física  
Cidade Universitária  
Caixa Postal – 649  
79.100 – Campo Grande – MS

## SUDESTE

Universidade Estadual de Campinas – UNICAMP  
Instituto de Física Gleb Wataghin  
Caixa Postal – 6165  
13081 – Campinas – SP  
Fone: (0192) 39 1301

Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas – CBPF  
Rua Xavier Sigaud, 150  
22.290 Urca, Rio de Janeiro, RJ  
Fone: (021) 295.9044

Instituto de Engenharia Nuclear – IEN-RJ  
Cidade Universitária – Fundão  
Caixa Postal – 2186  
20.001 – Rio de Janeiro – RJ

Universidade Federal do Espírito Santo – UFES  
Departamento de Física  
Campus Goiabeiras  
29.000 – Vitória – ES  
Fone: (027) 227.0100

Fundação Instituto de Física Teórica – IFT  
Rua Pamplona, 145  
Bela Vista  
Caixa Postal – 5956  
01.405 – São Paulo – SP  
Fone: (011) 288.5643

Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais  
Caixa Postal 515  
12.200 São José dos Campos, S. P.  
Fone: (0123) 22.9977

Instituto Tecnológico de Aeronáutica – ITA  
Centro Técnico Aeroespacial – CTA  
Departamento de Física  
12.200 – São José dos Campos – SP  
Fone: (0123) 251711

Universidade Federal Fluminense – UFF  
Instituto de Física  
Morro de São João Batista s/nº  
Caixa Postal – 296  
24.210 – Niterói – RJ  
Fone: (021) 718.8370

Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG  
Departamento de Física  
Caixa Postal – 702 – Pampulha  
30.000 – Belo Horizonte – MG  
Fone: (031) 441.2541

Universidade do Estado do Rio de Janeiro – UERJ  
Instituto de Física  
Rua São Francisco Xavier, 524  
20.550 – Rio de Janeiro – RJ

Universidade Federal do Rio de Janeiro – UFRJ  
Instituto de Física

Centro de Tecnologia  
Bloco A. 3º e 4º andar  
Caixa Postal – 68528  
21.910 – Rio de Janeiro - RJ  
Fone: (021) 280.9322 ramal 232

Pontifícia Universidade Católica do Rio de Janeiro – PUC-RJ  
Centro Técnico Científico  
Departamento de Física  
Rua Marques de São Vicente, 225  
22.452 – Rio de Janeiro – RJ  
Fone: (021) 274.9922 ramal 356

Universidade Federal de Viçosa – UF Viçosa  
Centro de Ciências Exatas e Tecnológicas  
Departamento de Física  
Campus Universitário  
36.570 – Viçosa – MG

Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares – IPEN  
Travessa R. 400  
Cidade Universitária  
Caixa Postal – 11049  
01.000 – São Paulo – SP  
Fone: (011) 211.6011

Universidade Estadual Paulista – UNESP – Rio Claro  
Departamento de Física  
Caixa Postal – 178  
13.500 – Rio Claro – SP  
Fone: (0195) 34.0122 ramal 46 ou 47

Universidade de São Paulo – USP  
Instituto de Física  
Cidade Universitária  
Caixa Postal – 20516  
01.498 – São Paulo – SP  
Fone: (011) 815.5599

Universidade de São Paulo  
Instituto de Física e Química de São Carlos – IFQSC  
Caixa Postal 369  
Av. Dr. Carlos Botelho, 1465  
Campus de São Carlos  
13.560 – São Carlos - SP  
Fone: (0162) 72.4417

Fundação Universidade Federal de São Carlos – UFSCAR  
Centro de Ciências e Tecnologia  
Departamento de Física  
Via Washington Luiz, Km 235  
Caixa Postal – 676  
13.560 – São Carlos – SP  
Fone: (0162) 71.1100

## **SUL**

Fundação Universidade Estadual de Londrina – FUEL  
Centro de Ciências Exatas  
Departamento de Física  
Campus Universitário  
Caixa Postal – 6001  
86.100 – Londrina – PR

Fundação Universidade Estadual de Maringá – UM  
Centro de Ciências Exatas  
Departamento de Física  
Av. Colombo, 3690 – Bloco G, 56  
Campus Universitário  
Caixa Postal – 331  
87.100 – Maringá – PR  
Fone: (0442) 22.4242

Universidade Federal do Paraná – UFPR  
Setor de Ciências Exatas  
Departamento de Física  
Centro Politécnico – Jardim América  
Caixa Postal – 19081  
80.000 – Curitiba – PR

Pontifícia Universidade Católica do Rio Grande do Sul – PUC-RS  
Instituto de Física  
Av. Ipiranga, 6681  
Caixa Postal – 1429  
90.000 – Porto Alegre – RS  
Fone: (0512) 369400

Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS  
Instituto de Física  
Av. Bento Gonçalves, 9500  
90.000 – Porto Alegre – RS  
Fone: (0512) 364677

Universidade Federal de Santa Catarina – UFSC  
Departamento de Física  
*Conjunto Universitário – Trindade*  
80.000 – Florianópolis – SC

Universidade Federal de Santa Maria – UFSM  
Departamento de Física  
Campus Universitário  
Faixa Camobi, Km 9, 1184  
97.100 – Santa Maria – RS

**Editado por:**

**SOCIEDADE BRASILEIRA DE FÍSICA**

**Instituto de Física da USP**

**Departamento de Física dos Materiais e Mecânica**

**Caixa Postal 20.553**

**01000 - São Paulo - SP - Fone: (011) 815-5599 - Ramal 222**



**LIBER GRÁFICA  
E EDITORA LTDA.**

**Rua Dom Bosco, 1216 - Boa Vista**

**Fone: (081) 231.4428 - 50.070 Recife - PE**