

Documento da Física Nuclear e suas Aplicações

1. Estado da Arte

1.1. Estado da Arte da Física Nuclear, seus desafios e perspectivas

A Física Nuclear tem como objetivo a investigação da origem, evolução, estrutura e fases da matéria nuclear de interação forte. Questões fundamentais em aberto levaram a Física Nuclear a ampliar seus horizontes e hoje seu alcance se estende desde as partículas mais fundamentais, como os quarks, até gigantescas estruturas do universo, como as super-novas. De fato, os fenômenos nucleares estão relacionados a um enorme intervalo de energia e às mais diversas escalas de comprimento.

A comunidade internacional de Física Nuclear desenvolve um programa balanceado de esforço experimental e teórico para responder a diversas questões chaves. Existe um consenso internacional sobre a importância destas questões, já que elas receberam formulações quase idênticas nos relatórios do "Nuclear Science Advisory Committee" (NSAC-EUA) em 2007 e do "Nuclear Physics European Collaboration Committee" (NUPECC- União Européia) em 2004. Estas questões e as instalações onde estas questões podem receber respostas estão listadas abaixo:

1.1.1. Qual é a estrutura da matéria nuclear e qual é o papel dos núcleos na evolução do universo?

O papel original e central da Física Nuclear é buscar a compreensão das propriedades dos núcleos e da matéria nuclear. Esta é uma tarefa das mais árduas, que parece ser melhor resolvida se for feita por etapas sucessivas: das equações básicas da QCD, através de teorias de campos efetivos até a interação nucleon-nucleon, sistemas de poucos corpos e núcleos muito leves; em seguida, usando as diferentes aproximações para descrever a estrutura nuclear, indo de "Green's Function Monte Carlo" (GFMC) ao modelo de camadas "no-core" ou teoria funcional de densidade. Cálculos baseados em interações microscópicas de nucleon-nucleon, com a inclusão de forças de 3 corpos obtiveram sucesso quantitativo na descrição de propriedades de núcleos leves. No entanto este acordo ainda não foi obtido para núcleos pesados. Este é um problema não apenas da descrição de núcleos pesados, mas é comum à descrição de outros sistemas complexos, como proteínas, por exemplo.

O objetivo primordial da Física Nuclear é desenvolver uma teoria completa e preditiva dos núcleos complexos. Em todo mundo isto levou ao desenvolvimento de feixes radioativos de alta qualidade, pois eles permitem passar da imagem unidimensional onde somente a massa do núcleo variava, à imagem bidimensional onde tanto o número de prótons como de nêutrons pode variar sobre uma grande extensão. Feixes radioativos podem ser obtidos pela fragmentação em vôo ou pelo processo "Isotope Separation On-Line" (ISOL). Existem hoje várias instalações em funcionamento dos dois tipos em vários países (Alemanha, França, USA, Japão, Suíça, Canadá etc) e outros tantos em construção ou em projeto. A procura por elementos super-pesados é um campo ativo na Rússia, Alemanha e Japão.

No Brasil (USP), está em funcionamento desde 2004 o sistema de duplo solenóide supercondutor RIBRAS (Radioactive Ion Beams in Brasil), que é a primeira instalação experimental no hemisfério sul que permite produzir feixes radioativos leves e de baixa energia.

A abundância dos núcleos H, He e Li foi produzida na nucleossíntese primordial, que aconteceu durante o esfriamento que se seguiu por volta de 3 minutos após do Big-Bang. Todos os outros elementos químicos existentes no universo foram produzidos por meio de reações nucleares em estrelas, explosão de supernovae, novae, estrelas de nêutrons, etc. É outro objetivo central da Física Nuclear explicar a origem e a abundância da matéria no Universo. A astrofísica nuclear tem como objetivo responder as questões fundamentais, tais como: a origem dos elementos; o mecanismo do colapso do caroço nas supernovas; a estrutura e esfriamento de estrelas de nêutrons e a presença de matéria estranha; a origem, aceleração e interações dos raios cósmicos mais energéticos; e a natureza de fontes de raios gama galácticos e extragalácticos. A astrofísica nuclear teve enorme progresso com as observações e modelagens astronômicas.

A comunidade de Física Nuclear tem contribuído diretamente para um melhor entendimento da astrofísica, tanto com relação à nucleossíntese, como com relação ao processo de evolução estelar. A descoberta de que os nucleons são, na realidade, sistemas compostos, redirecionou o interesse de muitos físicos nucleares para a investigação dos graus de liberdade de quarks e, com isto, atualmente os domínios da pesquisa da física nuclear e da física das partículas elementares se tornaram interligados, dando origem a Física de Hádrons. Landau propôs a existência de estrelas de nêutrons depois que os nêutrons foram descobertos por Chadwick, em 1932. Em 1934 sugeriu-se que as estrelas de nêutrons eram formadas depois de uma explosão de supernova, o que acontece quando o caroço de uma estrela muito massiva sofre um colapso gravitacional. A estrutura das estrelas de nêutrons e protonênútrons caracteriza-se por sua massa e raio que podem ser calculados a partir de equações de estado apropriadas para densidades da ordem de 10 vezes a densidade observada em núcleos comuns. Nessas densidades os efeitos relativísticos são certamente importantes. É interessante observar que, na área de Física de Hádrons, os mesmos modelos relativísticos que são capazes de descrever a matéria formada numa colisão de íons pesados podem ser utilizados na descrição da matéria estelar, uma vez que os parâmetros livres da teoria sejam convenientemente ajustados. Muito trabalho tem sido realizado na direção de melhor entender a evolução e as propriedades estelares e sua direta correlação com propriedades nucleares, como a pele de nêutrons e a fase pasta, possivelmente existente na crosta dos objetos compactos, por exemplo.

Além disso, cabe mencionar que uma nova era se abriu na astrofísica nuclear com o advento das instalações produtoras de feixes radioativos, pois estes núcleos de vida média curta podem ter enorme importância em reações relevantes à astrofísica. As medidas relevantes incluem processos de captura, a determinação de massas, vidas médias e estrutura de núcleos exóticos que ocorrem em ambientes estelares cataclísmicos. O Brasil também tem um programa de pesquisa em astrofísica nuclear com o uso de feixes radioativos do RIBRAS.

Nesta área, de estrutura, dinâmica e astrofísica nuclear, mesmo laboratórios de baixa energia como o Laboratório Aberto de Física Nuclear (LAFN), situado na USP, podem contribuir significativamente, existindo vários exemplos de laboratórios muito ativos e reconhecidos na área com alcance de energia comparável a este.

1.1.2. A estrutura e interações de hádrons podem ser compreendidas em termos da QCD?

Núcleons são partículas compostas de quarks e glúons. Hoje em dia existem respostas parciais sobre a distribuição e movimento de quarks no nucleon e o Prêmio Nobel de Física de 2004 foi concedido pela descoberta da liberdade assintótica no contexto de Cromo Dinâmica Quântica (QCD) perturbativa. No entanto a QCD permanece não solúvel no regime de confinamento onde o acoplamento é demasiadamente intenso para permitir o uso de métodos perturbativos. Exemplos destes problemas são a massa e o spin do nucleon: os quarks de valência somente explicam 1% da massa do próton, o resto se deve a pares quark-antiquark e nuvens de pions. Somente 25% do spin do nucleon é explicado. A estrutura dos hádrons, e em particular do nucleon tem muitos aspectos ainda pouco entendidos, além das propriedades medidas através do espalhamento elástico e profundamente inelástico de léptons. A “tomografia” da estrutura eletrofraca do nucleon observada através do espalhamento Compton profundamente virtual é um desafio tanto a nível teórico como experimental. Novas ressonâncias hadrônicas estão sendo observadas que desafiam as interpretações tradicionais, abrindo espaço para novas estruturas exóticas como tetraquarks, ou moléculas mesônicas. A solução destes problemas exigem avanços tanto na teoria como nas experiências. Experiências estão sendo realizadas para fazer comparações com previsões da QCD em facilidades nos EUA, Japão e Europa, em particular os Laboratórios ainda em construção de J-PARC em KEK (Japão), FAIR em GSI (Alemanha) e o "upgrade" para 12GeV do Jefferson Lab. (EUA) foram todos desenhados para responder estas questões em detalhe.

No Brasil temos vários grupos teóricos ativos trabalhando nesta área (IFUSP, IFT, ITA, UFSC).

1.1.3. Quais são as fases da matéria nuclear?

Núcleos são a manifestação mais importante da matéria nuclear, pois eles representam 99.9% da matéria visível no universo. No entanto, hoje sabemos que a matéria escura e a energia escura são preponderantes no universo. A matéria nuclear também pode ser aquecida, absorvendo energia em colisões relativísticas. Neste caso, temperaturas similares àquelas nos primeiros momentos após o Big-Bang podem ser atingidas e a matéria nuclear, nesse regime, estudada.

A principal motivação no estudo de colisões entre íons pesados relativísticos é o de entender a equação de estado da matéria nuclear. Em energias de excitação mais elevadas, os núcleons são excitados em estados ressonantes bariônicos, seguindo de produção de partículas e formação de ressonâncias hadrônicas. Em colisões de íons-pesados, espera-se que estas excitações sejam capazes de criar matéria hadrônica. Em algumas destas colisões ocorre uma transição de fase para o estado no qual quarks e glúons encontram-se desconfinados. Esse estado é chamado de plasma de quarks e glúons (QGP, do Inglês, *Quark Gluon Plasma*). A formação deste plasma é o objetivo principal de experimentos envolvendo íons-pesados relativísticos. Para este propósito foram construídos o colisor RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*) que está em operação desde o ano 2000 e o LHC (*Large Hadron Colider*), no Cern,

que iniciou sua operação em 2008. No LHC, o experimento ALICE possui seu foco principal no estudo do plasma de quarks e glúons. O RHIC, além de explorar a fundo as propriedades da matéria nuclear em temperaturas extremas, possui um amplo programa dedicado ao estudo da origem do spin dos nucleons. Há grupos ativos no IFUSP e na UNICAMP que participam de experiências no RHIC (experimentos STAR e PHENIX) e que estão também envolvidos com experimentos no LHC. Também há diversos grupos teóricos trabalhando nesta área (IFUSP, IFT).

Apesar do grande interesse na observação e estudo aprofundado do QGP, a caracterização das várias fases da matéria nuclear que sucedem as colisões é igualmente importante. Essa caracterização é feita através de um grande número de diferentes análises que se complementam e fornecem a base para a compreensão desse cenário.

1.1.4. Que Física existe além do Modelo Padrão?

O Modelo Padrão foi testado com muitas experiências de precisão, mas ainda é considerado incompleto.

1. O Modelo Padrão é incapaz de explicar a predominância de matéria sobre a anti-matéria existente no universo. Existe uma grande atividade experimental à procura de sinais de violação de Invariância de Reversão Temporal (TRI) nas propriedades de mésons, nêutrons e átomos.
2. O Modelo Padrão não explica a massa de neutrinos indicada pela sua oscilação. A observação do decaimento beta duplo sem neutrino revolucionaria o significado do número leptônico no Modelo Padrão e determinaria a massa do neutrino. Laboratórios subterrâneos, que procuram o decaimento do próton, o decaimento beta duplo sem neutrino, e a matéria escura, tem uma importância enorme na solução destes problemas.
3. A natureza de forças "super-fracas" que desapareceram quando o universo esfriou. Tanto experiências de Física de Partículas Elementares, como de Física Nuclear estão à procura de indicações da existência destas forças nos momentos iniciais do Big-Bang. Medidas de violação de paridade atômica em experimentos com armadilhas usando feixes de núcleos radioativos constituem outra opção nuclear para testar o Modelo Padrão. Estas medidas necessitam de grande precisão e demandam grande tempo de uso de feixe acelerado. O Laboratório Aberto de Física Nuclear possui feixes radioativos de baixa energia e bastante tempo disponível de utilização de feixe. Se os feixes forem freados, poderiam ser armazenados em armadilha, permitindo seu uso para medidas de alta precisão de violação de paridade e outros fins. Esta linha de pesquisa está sendo planejada em colaboração com pesquisadores do Laboratório TRIUMF.
4. O Modelo Padrão não explica a existência da matéria escura e energia escura e não incorpora a força da gravidade.

1.2. O Brasil na Área

A comunidade de Física Nuclear no Brasil atualmente é constituída de 107 doutores experimentais, dos quais 89 com emprego permanente e 18 pós-docs; 127 estudantes de pós-graduação experimentais e 38 técnicos e engenheiros. Também somos 107 doutores teóricos, dos quais 89 com emprego permanente e 18 pós-docs e 111 estudantes de pós-graduação teóricos.

Grande parte de nossa comunidade científica encontra-se no Estado de São Paulo (80% da pesquisa experimental e 35% da teórica), motivado pela localização dos aceleradores. No Instituto de Física da USP são 42 doutores, dos quais 31 experimentais, e 80 estudantes de pós-graduação, dos quais 58 experimentais. Temos 16 pós-docs, sendo 8 experimentais e 8 teóricos. No Instituto de Física Teórica, da UNESP, são 6 pesquisadores doutores teóricos, 3 pós-docs e 12 estudantes de pós-graduação. No ITA de São José dos Campos trabalham 4 doutores teóricos e 9 estudantes de pós-graduação. Na UNICAMP trabalham 15 doutores com posição fixa, dos quais 10 experimentais e 14 estudantes de pós-graduação. Na Universidade de Sorocaba (UNISO) temos um doutor experimental e um aluno de pós-graduação trabalhando em física nuclear e suas aplicações na área de ensaios não destrutivos. No Depto. de Física e Biofísica do Instituto de Biociências da UNESP de Botucatu existem 3 docentes doutores que trabalham com física nuclear e suas aplicações a medicina. Além dos números citados, todos correspondentes a Universidades, existe o Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares (IPEN), onde há atividades de pesquisa básica, aplicada e de instrumentação executados por 15 pesquisadores doutores experimentais, 37 estudantes de pós-graduação (experimentais) e 6 pós-docs, também experimentais.

No Estado do Rio de Janeiro existem quatro instituições com atividades em Física Nuclear, além dos centros de pesquisa da CNEN. O número de pesquisadores doutores que desenvolvem pesquisa em Física ou Engenharia Nuclear nestes centros é da ordem de 8 com 7 estudantes de pós-graduação nesta área. Esta informação foi dada pela Divisão de Aplicações Médicas e de Pesquisa (DIAMP) da CNEN. Em Niterói, a UFF possui 5 doutores, dos quais 3 experimentais, 4 pós-docs e 6 estudantes de doutorado. Na UFRJ do Rio de Janeiro trabalham 9 doutores teóricos e 13 estudantes de pós-graduação. No CBPF existem 4 doutores teóricos e 4 estudantes de pós-graduação e 2 pós-docs. Na UERJ também existe um grupo de teóricos, com 3 pesquisadores e 4 estudantes de pós-graduação. No CEFET/RJ há 2 professores teóricos.

Na região Centro-Oeste na Universidade Federal de Mato Grosso (Cuiabá) há 2 pesquisadores com 2 alunos trabalhando em Física Nuclear. Na IUNI há 1 pesquisador com 1 aluno em atividade de pesquisa em Física Nuclear.

Na região Sul existem centros de pesquisa em Física Nuclear no Paraná, Santa Catarina e no Rio Grande do Sul. Em Londrina, na UEL, são 7 doutores experimentais permanentes e 2 pós-docs, além de 5 estudantes de doutorado e 3 de mestrado experimentais e dois técnicos. No CEFET de Curitiba há 2 doutores experimentais e 3 estudantes. Em Guarapuava, na Unicentro, são 2 doutores experimentais permanentes. Em Toledo, na Unioeste, um doutor experimental permanente. Na UFSC de Florianópolis há 6 doutores teóricos e no Campus

Curitibanos mais 1, com 11 estudantes de pós-graduação e 1 pós-doc. Ainda em Santa Catarina, há 1 professor na Universidade Federal da Fronteira Sul, Campus de Chapecó. No Rio Grande do Sul, há 4 professores na Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 4 na Universidade Federal do Rio Grande (FURG), 1 na Universidade Estadual do Rio Grande do Sul, 5 na Universidade Federal de Pelotas, 1 na Unipampa e 2 na Universidade de Caxias do Sul, todos teóricos. O RS conta ainda com 2 pós-docs e 13 estudantes de pós-graduação atuando na área de física nuclear, com ênfase na física de hádrons.

No Nordeste, em Ilhéus, Bahia, na Universidade Estadual de Santa Cruz existe um grupo de 7 pesquisadores doutores com 8 alunos de pós-graduação. Eles tem atividades em física nuclear básica teórica e física nuclear aplicada experimental e estão desenvolvendo infraestrutura local. Na Universidade Federal do Vale do São Francisco (UNIVASF), em Juazeiro, Bahia, há 2 pesquisadores, um teórico e um experimental trabalhando em instrumentação nuclear. Também há um pesquisador teórico em atividade na Universidade Federal da Paraíba, em João Pessoa, 2 na Universidade Federal de Campina Grande e um na Universidade Estadual da Paraíba, com alguns estudantes.

No Norte, na Universidade Federal de Roraima, existe um pequeno grupo teórico de Astrofísica nuclear formado por um pesquisador doutor e 3 estudantes de pós-graduação que estudam matéria hadrônica no interior de estrelas de nêutrons.

O quadro abaixo procura fazer um sumário dos dados regionais acima apresentados.

	Sudeste		Sul		Norte e Nordeste		Centro-Oeste		Totais
	Exp.	Teo	Exp.	Teo	Exp.	Teo	Exp.	Teo	
Doutores c/posição permanente	71	53	12	25	5	9	1	2	= 178
Pós-docs	16	15	2	3	--	--	--	--	= 36
Pós-graduandos	111	76	11	24	4	9	1	2	= 238
TOTAIS	198	144	25	52	9	18	2	4	TOTAL GERAL 452

2. Relevância para a Sociedade

2.1. Formação de Pessoal

A formação de recursos humanos na área de Física Nuclear é de grande importância para que o país continue a dominar a tecnologia nuclear. Assim sendo, a parte educacional desempenha um papel importantíssimo dentro das atividades em Física Nuclear, cuja área apresenta características que a distingue das outras áreas da física: um forte componente experimental, aplicado e tecnológico e que requer uma sólida formação em física básica. O papel da física nuclear teórica nas nossas instituições deve ser também enfatizado, tanto na formação dos estudantes como na contribuição para a formulação de questões de fronteira, que por sua vez realimentam, em uma cooperação saudável, as atividades experimentais. É importante mencionar que a busca por novas tecnologias só pode ocorrer desde que a capacitação dos alunos esteja amparada nos fundamentos acima mencionados e portanto, naturalmente inserida em programas de pós-graduação em física nuclear.

Os estudantes que trabalham dentro de um laboratório de Física Nuclear podem se envolver com o projeto, construção e manutenção de equipamentos experimentais sofisticados, além de utilizá-los para a pesquisa, tendo contato com a tomada de dados experimentais e interpretação dos resultados. Os estudantes aprendem técnicas modernas e fazem contribuições significativas para os programas de pesquisa. A excelente formação adquirida com essas atividades garante a geração dos futuros líderes científicos das ciências nucleares e de outras atividades de importância para o desenvolvimento tecnológico. A interação com outras áreas do conhecimento estará descrita mais adiante.

Exemplificando a formação de um físico experimental que trabalhe com aceleradores, um estudante de pós-graduação nesta área desenvolve know-how em desenvolvimento de novos materiais (para a construção de detectores), de informática (para a aquisição e tratamento de dados), de eletrônica rápida, de ultra-alto vácuo etc. Estes conhecimentos serão de grande valia no desenvolvimento do nosso parque tecnológico de ponta.

Para os próximos cinco anos há uma intensa necessidade de contratação dos pós-doutores atualmente existentes, e de um número apreciável de novos doutores. Em face do número grande de instituições e do tamanho variado dos grupos de pesquisa estimamos que a área necessita de 10 a 15 contratos novos/ano, 70% deles na área experimental.

2.2. Desenvolvimento científico e tecnológico e impacto na Economia

Os vários desenvolvimentos tecnológicos que têm origem na pesquisa em Física Nuclear desempenham um papel importante em um número imenso de aplicações práticas. A energia nuclear constitui-se numa fundamental componente da política energética, sendo que o desenvolvimento de novos conceitos em reatores de fissão poderá resultar em reatores ainda mais eficientes e seguros. Técnicas nucleares vêm sendo largamente aplicadas em diagnóstico e tratamento de doenças, por meio da Radiologia Diagnóstica, Radioterapia e Medicina Nuclear. Para citar apenas alguns dentre os muitos exemplos: terapia de câncer com prótons ou com feixes de íons pesados (^{12}C , por exemplo), imagens por ressonância

magnética, tomografia por emissão de pósitrons (PET) para gerar imagens de funções do cérebro, uso de iodo radioativo como traçador do funcionamento da tireóide. Os radioisótopos também são utilizados como traçadores em pesquisas relacionadas aos mais variados campos como Genética, Fisiologia, Botânica, etc. Na agricultura, novas variedades de plantas com características melhoradas vêm sendo criadas por meio do processo de mutação induzida pela radiação. A excepcional sensibilidade das técnicas nucleares analíticas tem sido utilizada para o estudo estratégico do meio ambiente, como em pesquisas de poluição do ar, bem como em Arqueologia, por exemplo, na datação de objetos, em Biologia, Química, Odontologia, etc. O uso de aceleradores nucleares também encontra importantes aplicações na indústria. Por exemplo, feixes de partículas carregadas e raios gama são utilizados na esterilização de alimentos, na determinação da composição e propriedades de materiais, etc. Além disso, o desenvolvimento da pesquisa em Física Nuclear, por meio de novas e sofisticadas técnicas experimentais, também propicia o desenvolvimento de inovações tecnológicas não propriamente na área de Física Nuclear. Assim, inovações em tecnologia do vácuo, em criogenia, etc, muitas vezes decorrem da pesquisa em Física Nuclear. Com o crescente desenvolvimento de tecnologias, espera-se que novas e importantes aplicações continuem surgindo, consolidando cada vez mais a contribuição da Física Nuclear para o desenvolvimento e bem estar da sociedade. A figura 1 é um esquema ligando a Física Nuclear Básica, sua Instrumentação e algumas de suas diversas aplicações. Adiciona-se a este esquema a sub-área em rápido crescimento no país que é a de caracterização de objetos arqueológicos, de arte e do patrimônio cultural por métodos atômicos e nucleares, com ou sem o emprego de aceleradores. Outra sub-área que deve ser acrescentada é a de caracterização não-destrutiva de materiais envolvendo técnicas com aceleradores e metodologias com raios X e gama (composição química elementar, imageamento 3D, propriedades estruturais, etc.)

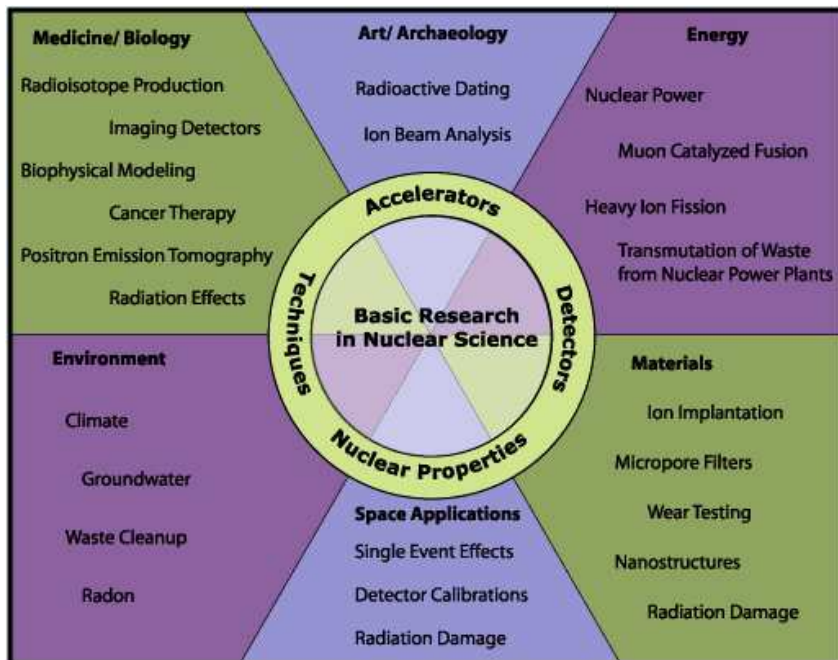


Fig 1 – A Física Nuclear e algumas de suas aplicações

Para o desenvolvimento de projetos experimentais em Física Nuclear é necessário constantemente o projeto e construção de equipamentos de ponta, que serão os embriões que contribuirão significativamente para o desenvolvimento do parque de instrumentação científica do país, desde avanços significativos em áreas como eletrônica e novos materiais, chegando a equipamentos supercondutores. O desenvolvimento da informática nacional teve início em laboratório de Física Nuclear Básica.

Claramente, a importância da Física Nuclear para o conhecimento básico da natureza, sua relevância na produção de energia, sua abrangência interdisciplinar e a ampla gama de aplicações práticas em tão diferentes áreas, a torna uma área de extrema importância estratégica para o país.

3. Infraestrutura

3.1. Aceleradores

3.1.1. Instituto de Física da Universidade de São Paulo

3.1.1.1. O Acelerador Pelletron.

O Laboratório Aberto de Física Nuclear (LAFN) é o único laboratório no Brasil com acelerador voltado à pesquisa básica em Física Nuclear e produzindo feixes estáveis e radioativos com energias maiores que a barreira Coulombiana, tornando possível o estudo dos efeitos da interação nuclear. Na área de estrutura e dinâmica nuclear e astrofísica nuclear, mesmo laboratórios de baixa energia, como o nosso LAFN, podem contribuir significativamente. Existem atualmente no mundo 30 laboratórios em atividade com aceleradores de energia comparável a nossa, mas destes apenas 10 possuem feixes radioativos. O LAFN é localizado no Departamento de Física Nuclear do Instituto de Física da USP e tem como principal equipamento **o Acelerador eletrostático Tandem Pelletron 8UD** que permite produzir feixes de íons leves e pesados com energias até 3-5 MeV/nucleon e conta com um grande complexo de instalações que atende a um expressivo conjunto de pesquisadores e estudantes de mestrado, doutorado e pós-doutorado, além de programas de iniciação científica. Nos últimos 10 anos os resultados das atividades do LAFN correspondem a 57 teses de mestrado e doutorado, 96 publicações em revistas indexadas e 59 contribuições a conferências, publicadas em revistas indexadas. Estes trabalhos foram todos realizados no LAFN com uso de seus equipamentos. Os equipamentos periféricos mais importantes do LAFN, instalados na área experimental são:

3.1.1.1.a. Em 2004 foi instalado o **sistema RIBRAS** (Radioactive Ion Beams Brasil), para a produção de feixes radioativos de núcleos leves, tais como ${}^6\text{He}$, ${}^7\text{Be}$, ${}^8\text{Li}$, ${}^8\text{B}$, ${}^{10}\text{Be}$, na investigação da estrutura de núcleos exóticos e na investigação de reações de interesse astrofísico. Ele consiste de dois solenóides supercondutores de campo magnético máximo de $B=6.0\text{T}$, montados em série. O feixe primário estável do Acelerador Pelletron bombardeia um alvo (primário) para produzir os feixes secundários de núcleos radioativos a partir de reações de transferência de poucos nucleons, que são selecionados pelos solenóides.

3.1.1.1.b. Uma câmara de espalhamento de grande porte. O conjunto de detectores instalados nela são formados por telescópios triplos que permite a investigação de escalas temporais de reações nucleares e reações fora do plano.

3.1.1.1.c. Espectrômetro SACI-PERERE, que consiste de 4 detectores gama de Germânio Hiperpuro dotados de supressores Compton, e 11 detectores cintiladores plásticos tipo *phoswich* ($\Delta E-E$) dispostos com a geometria de um dodecaedro, cobrindo um ângulo sólido total de detecção de partículas carregadas próximo de 4π .

3.1.1.1.d. Espectrógrafo magnético Enge com campo magnético máximo de 17kG, do tipo pólo partido. As partículas carregadas emergentes da reação são analisadas pelo campo do espectrógrafo (uma discriminação de momentos com resolução intrínseca $\sim 3.6 \cdot 10^{-4}$), e detectadas na superfície focal, sendo o ângulo sólido de admitância de 2,68 msr.

3.1.1.1.e. Detectores de nêutrons sensíveis à posição. Foram construídos dois detectores de nêutrons de grande área ($2 \times 2 \text{ m}^2$) no laboratório, que podem ser utilizados em conjunto para aumentar a eficiência. Consiste de 24 células longas e retangulares com seção quadrada de 8cm, com fotomultiplicadoras acopladas em cada extremo.

3.1.1.2. O pós-acelerador Linac.

O pós-acelerador Linac tem como objetivo acelerar os feixes previamente acelerados pelo acelerador Pelletron. A energia fornecida pelo Pelletron chega a 3-5 MeV/nucleon. Se os feixes forem injetados no acelerador LINAC, sua energia final irá aumentar até 10 MeV/nucleon. **O acelerador LINAC, em fase de instalação no prédio do LAFN e utiliza estruturas ressonantes na geração de um campo elétrico oscilante (região de radiofrequência - 97 MHz) no processo de aceleração de partículas.** Esses ressoadores foram adquiridos através de um convênio com o Laboratório Nacional de Argonne (EUA), que desenvolveu o projeto. A unidade ressoadora tipo *split-ring*, fabricada em cobre e nióbio, foi projetada para operar à temperatura de hélio líquido (4° K), temperatura na qual o nióbio apresenta propriedades supercondutoras, minimizando o valor da potência necessária para a geração do campo elétrico. Como, em operação, o fator de qualidade dessas estruturas é da ordem de 10^7 , potências de poucas dezenas de Watts são suficientes para gerar intensos campos elétricos com valores de 3 a 4 MV/m. No acelerador haverá duas classes de ressoadores: beta-baixo ($\beta = v/c = 0.06$), cujas geometrias favorecem a aceleração de íons lentos, e beta-alto, utilizadas para a aceleração final dos íons (cujo beta está em torno de $v/c = 0.10$). O acelerador Pelletron funcionará como injetor de feixe para o LINAC.

Os recursos necessários para finalizar o LINAC são de 2,5 MR\$ e os recursos anuais para manter em funcionamento adequado o conjunto Pelletron+Linac e os liquefatores de Nitrogênio e de Hélio são de 650 kR\$. O investimento já realizado é da ordem de 7 MR\$.

3.1.1.3. Acelerador Microtron do Instituto de Física da USP

O Acelerador Microtron está projetado para produzir um feixe de elétrons com até 50 microA de corrente e energia variável até 38 MeV, cuja característica principal é a corrente contínua, o que favorece, em relação às máquinas pulsadas convencionais, todas as medidas cuja

qualidade dependa *inversamente* da taxa de eventos, em particular medidas de coincidência e de taxa de produção de partículas. O injetor encontra-se em funcionamento, fornecendo um feixe de elétrons de 1,8 MeV, e já demonstra a operação correta de vários subsistemas: vácuo, microondas, transporte e diagnóstico do feixe, refrigeração, proteção pessoal e controle. A estabilidade obtida com os sistemas automáticos de controle garante a produção de um feixe de elétrons estável e reproduzível. Construído com tecnologia local, à exceção da válvula Klystron e alguns acessórios, o domínio das condições experimentais é completo, o que capacita o laboratório a desenvolver experimentos que necessitem de infra-estrutura nas áreas de eletrônica, aquisição de dados, alto vácuo, soldagens especiais e microondas de baixa e alta potência. Principais linhas de pesquisa a serem iniciadas a cada etapa concluída e que terão continuidade nas etapas sucessivas.

Energia	Principais projetos de pesquisa
1,8 MeV	Transporte de elétrons na matéria: ionização de camadas internas por impacto de elétrons, distribuição angular do bremsstrahlung de elétrons.
5 MeV	Medida da fluorescência do N ₂ gasoso (projeto Auger); continuação dos estudos de produção de elétrons secundários e validação do código PENELOPE de transporte de elétrons e fótons; estudo de materiais em profundidade por radiação gama; eletrofissão.
6 MeV	Dosimetria de campos pequenos em <i>phantoms</i> para incremento da precisão da simulação, pelo programa PENELOPE, do tratamento por radioterapia de tumores.
38 MeV	Processos quânticos de dissipação de energia na ressonância gigante nuclear. Radiação paramétrica e aplicações. Eletro e fotofissão.

Os recursos necessários para finalizar o Microtron com a energia máxima prevista de 38 MeV são de 1,72 MR\$.

3.1.1.4. Acelerador LAMFI

No Laboratório de Análises de Materiais por Feixes Iônicos (LAMFI), são desenvolvidos e oferecidos métodos de física nuclear para a análise e modificação de materiais e filmes finos. O principal aparato é o acelerador de partículas tipo Pelletron tandem (5SDH) com tensão de terminal máxima de 1,7 MV e “stripper” gasoso, onde são instalados diversos arranjos experimentais para análises por espalhamento elástico, por reações nucleares e por espectroscopia de raios-X e raios-gama característicos. A sensibilidade típica é da ordem de uma parte por milhão e a resolução espacial é de 5 nm para a maior parte da tabela periódica. O laboratório dispõe de duas fontes de íons (RF/Rb para feixe He⁻ e uma fonte SNICS II para feixes de H⁻, Li⁻, O⁻) que permitem produzir os feixes usados nas três estações de análise instaladas em linhas de feixe exclusivamente dedicadas a cada técnica:

- Linha PIXE: 2 detectores de Si(Li) + estação de análise completa dedicada
- Linha RBS: detectores de barreira de superfície + estação de análise completa dedicada
- Feixe externo: Detectores + estação de análise completa dedicada

3.1.1.5. Acelerador LIO

O Laboratório de Implantação Iônica dispõe de dois implantadores da Danfysik projetados para trabalhar em tensões de 400 e 70 kV com fontes de íons tipo PIG, intercambiáveis entre

as diferentes versões (gasosa, forno e “sputtering”), que permitem executar implantações com doses de até 10^{18} íons/cm². O implantador de 70 kV faz implantações regularmente em uma câmara de alto vácuo com vácuo base de $2 \cdot 10^{-7}$ Torr de íons selecionados por um eletroímã instalado após fonte de íons. O implantador de 400 kV está sendo modificado para permitir tanto a realização de implantações iônicas com feixes mais energéticos quanto a realização de medidas de AMS em linha dedicada, na qual já foi projetado e instalado um “stripper” gasoso, etapa fundamental para a viabilização da técnica.

3.1.2 Instituto de Pesquisas Energéticas e Nucleares

3.1.2.1 Reator de pesquisa do IPEN

O **IEA-R1** é um reator de pesquisa do tipo piscina, moderado e refrigerado a água leve, utilizando grafite como refletor. Foi projetado e construído pela empresa norte-americana **Babcock & Wilcox**, em 1956. Em 1997 sua potência foi aumentada de 2MW para 5MW e a partir de 2001, visando a produção de novos radioisótopos, o ciclo de operação foi alterado para 120 horas contínuas semanais.

As atividades de pesquisa básica e aplicada em Física Nuclear com uso do reator envolvem as áreas de Estrutura Nuclear, Física Aplicada e Instrumental. Métodos espectroscópicos como espectroscopia gama de alta resolução, espectroscopia beta e correlação angular gama-gama e beta-gama compõem os tópicos de investigação em pesquisa básica. As aplicações envolvem: análises multielementares pelo o método de ativação neutrônica, desenvolvimento de métodos para a obtenção de fontes radioativas padronizadas em atividade e para a calibração de campos de nêutrons e análises por neutronografia.

Em termos de instrumentação tem-se o desenvolvimento de detectores (de nêutrons, de partículas carregadas e do tipo sensível a posição), módulos eletrônicos e elaboração de software.

3.1.2.2 Cíclotron do IPEN

É utilizado para produção de radioisótopos para diagnóstico e localização de tumores na Medicina. Os radioisótopos produzidos são: ⁶⁷Ga, ²⁰¹Tl, ¹¹¹In, ¹⁸F, ¹²³I, com meias vidas entre 1.8 e 78.2 h.

3.2. Computação

A Física Nuclear sempre fez uso intenso de sistemas computacionais de alto desempenho e tradicionalmente vem desempenhando um papel pioneiro no uso de novas tecnologias no Brasil, tanto no que se refere a sistemas de aquisição de dados como em ferramentas para processamento e análise dos mesmos. No início dos anos de 1990, com a popularização e barateamento de computadores pessoais, tanto a aquisição quanto análise de dados em baixas energias migraram dos mainframes centralizados para essa nova arquitetura, propiciando maior eficiência e capacidade de atualização.

O Departamento de Física Nuclear (DFN) do Instituto de Física da Universidade de São Paulo sempre foi uma das referências no Brasil para sistemas de aquisição e análise de dados em Física Nuclear de baixas energias e vem continuamente desenvolvendo novas ferramentas para esses fins.

Por outro lado, reações nucleares de altas energias, com o início de operação dos grandes laboratórios, é uma área que demanda elevado poder de processamento e capacidade de armazenamento de dados. Para suprir essas necessidades, está instalado no DFN do IFUSP o SAMPA (Sistema de Análise e Multi-Processamento Avançado). O SAMPA consiste de um cluster de computadores com 132 núcleos de processamento, 140 GB de memória RAM e aproximadamente 30 TB de espaço para armazenamento de dados. Esse sistema é dedicado para análise e processamento de dados dos experimentos STAR (RHIC) e ALICE (LHC). A comunicação com o LHC se dá através de tecnologia de GRID computacional, colocando a Física Nuclear, mais uma vez, na vanguarda da tecnologia de informação. Espera-se realizar uma atualização nesse sistema ao longo de 2010, aumentando o número de núcleos de processamento de pelo menos um fator 3. Sistemas similares, de menor porte, estão sendo montados na UNICAMP¹, na UFSC, no CBPF e na UERJ.

Alem de contribuir para o processamento e análise de dados de grandes experimentos, sistemas desse tipo permitem o treinamento em nível elevado de uma nova geração de profissionais de informação e físicos, que usarão esses conhecimentos para agregar novas tecnologias na iniciativa privada.

4. Inclusão Social

Os desenvolvimentos tecnológicos atuais e futuros exigem cada vez mais uma população bem informada e com uma razoável base científica. A sociedade tende a aceitar e incentivar as pesquisas básicas quando há uma expectativa de benefícios que estas podem trazer. É, portanto, importante que se trabalhe para divulgar a ciência e em particular a Física Nuclear, atuando em maior proximidade da população, como, por exemplo, por meio da promoção de palestras de divulgação científica e atividades para professores de ensino médio.

Acreditamos que as diversas aplicações da Física Nuclear já descritas anteriormente, como nas áreas da Produção de Energia, Saúde, Ambiental, Tecnologia de Alimentos, Caracterização de Materiais e Arqueometria, tornam esta área das Ciências Físicas uma das que mais podem melhorar o perfil da inclusão social em nosso país.

5. Recomendações

A área de Física Nuclear no Brasil é bem diversificada, o que é excelente, pois várias das sub-áreas específicas são desenvolvidas. Existem diversos projetos importantes em andamento e acreditamos que a prioridade para os próximos anos deva ser a conclusão de

¹ Exclui-se, nesse texto, clusters de computadores dedicados às análises de Física de Partículas do LHC.

projetos em andamento e a manutenção de infra-estrutura existente. Dentre as principais metas a serem atingidas nos próximos anos destacamos:

1 - Conclusão do acelerador LINAC da USP, a ser utilizado como um pós-acelerador do atual Pelletron. Esse projeto foi iniciado pelo Prof. Oscar Sala no fim dos anos 80. O prédio foi construído no fim dos anos 90 e a maior parte das componentes comprada e entregue na mesma época. No entanto, sua montagem avança muito lentamente, provocando descrença e desânimo na comunidade de físicos nucleares, principalmente os diretamente interessados em sua utilização. Uma renovação na gestão motivaria mais pessoas interessadas em sua utilização a participar de forma mais ativa na instalação e finalização desse projeto. Isso poderia também renovar o entusiasmo da comunidade para com esse projeto, motivando assim as entidades financiadoras a dar o apoio final que esse projeto necessita. Com o LINAC em funcionamento poderemos aumentar a energia e as massas dos feixes acelerados, permitindo produzir um maior número de reações nucleares de interesse. Também poderemos produzir feixes radioativos secundários mais energéticos e com maior variedade de isótopos. A maioria dos Laboratórios de Física Nuclear de baixas energias tem projetos já concretizados, ou em andamento, de aumento de energia através da construção de pós-aceleradores lineares (Legnaro, Canberra, Florida State, TRIUMF-Vancouver, REX-Isolde no CERN). A finalização desse pós-acelerador é um passo absolutamente necessário e dentro das tendências atuais da Física Nuclear. A conjugação das duas instalações, LINAC e RIBRAS, abrirão perspectivas excelentes de pesquisa para o Laboratório, tornando o LAFN mais competitivo no cenário mundial e permitindo o desenvolvimento de uma produção científica de excelente qualidade com um custo relativamente baixo.

Os recursos necessários para finalizar o LINAC são de 2,5 MR\$ e os recursos anuais para manter em funcionamento adequado o conjunto Pelletron+Linac e os liquefatores de Nitrogênio e de Hélio são de 650 kR\$.

2 - Conclusão do acelerador Microtron da USP. A conclusão do Acelerador Microtron é fundamental para manter viva uma linha de pesquisa (processos de interação de elétrons e fótons com a matéria) que já deu muitos frutos e que tem longa tradição no Brasil e que, além do interesse acadêmico, é fundamental em áreas como radioterapia, diagnóstico médico e em certas aplicações ao estudo de materiais. Assim, o plano integra aspectos instrumentais, que garantirão a caracterização do feixe e boas condições experimentais, com estudos acerca dos processos de interação de elétrons e fótons com a matéria, tanto nos seus aspectos nucleares quanto atômicos.

Os recursos de investimento necessários para concluir o Acelerador Microtron são de 1,72 MR\$.

3- Continuidade e ampliação da participação brasileira nas grandes colaborações em Física Nuclear e Altas Energias. Vários grupos de pesquisa experimental no Brasil participam de colaborações em aceleradores de íons-relativísticos como RHIC e LHC com foco no estudo da matéria nuclear em condições extremas. Esses grupos estabeleceram, na última década, importante reconhecimento internacional para o Brasil nessa área de pesquisa, participando ativamente no desenvolvimento de infra-estrutura para execução desses experimentos. Recentemente, o MCT criou a RENAFEA (Rede Nacional de Física de Altas

Energias), visando, principalmente, a manutenção desses grupos de pesquisa nesses experimentos e maior inserção da comunidade científica no cenário internacional de física de altas energias. É importante a manutenção dessa rede e sua expansão, tanto no aspecto orçamentário quanto logístico, propiciando o surgimento de novos grupos experimentais e teóricos nessa área. Além disso, seria interessante a criação de mecanismos mais dinâmicos para o estabelecimento de convênios bi-laterais entre centros de excelência no Brasil e exterior, propiciando um maior intercâmbio científico e tecnológico. É importante, também, a criação de infra-estrutura local, como laboratórios dedicados à instrumentação em física nuclear de altas energias e ampliação e criação de centros de processamento de dados de alto desempenho são fundamentais para consolidar o Brasil como participante importante desses grandes empreendimentos.

4- Continuidade, ampliação e financiamento de atividades em Física Nuclear Aplicada desenvolvidas por diversos grupos brasileiros, com interesse tecnológico e em diversos outros ramos da ciência básica. Dentre as técnicas a serem desenvolvidas destacam-se a de Espectrometria de Massa com Aceleradores, com o laboratório que está sendo implantado na UFF, Espectrometria de Raios Gama nos laboratórios LFNA da UEL, LARA da UFF e do CENA/ USP (neste último também ativação neutrônica), transmissão e espalhamento de raios X e gama para análise de materiais como no LFNA da UEL e LIN da COPPE/UFRJ. As metodologias não destrutivas e não invasivas atômico-nucleares, em especial as portáteis, são muito importantes, inclusive pelo enorme potencial de aplicação na área industrial e tecnológica, amplamente exploradas nos países desenvolvidos, mas ainda incipientes no Brasil.

É importante frisar que existem duas grandes categorias de metodologias, aquelas com aceleradores e aquelas que não empregam aceleradores nucleares. Mesmo dentre aquelas técnicas que não usam aceleradores existem instalações que são ordens de grandeza mais caras que outras. Desta forma, sugere-se que editais específicos para projetos de Física Nuclear Aplicada sejam anualmente abertos pela FINEP e/ou CNPq, contemplando duas magnitudes de valores, uma de até uma centena de milhares de reais e outra de até muitas centenas de milhares de reais, para que os vários grupos de pesquisa ou rede de grupos de pesquisa na área aplicada, possam criar / atualizar a infraestrutura de equipamentos e materiais necessários.

5- Ampliação de cursos de extensão em todo o país para formação de recursos humanos e capacitação de pessoal para trabalhar em diversas das aplicações da Física Nuclear, como por exemplo para subsidiar o novo desenvolvimento do programa brasileiro de energia nuclear que visualiza-se ser estratégico para o país e atualmente é encarada por ficologistas como a solução mais viável para produção em larga escala de energia, sem agressão ao meio ambiente; aplicações médicas, cada vez mais difundidas na vida cotidiana de nossos cidadãos; aplicações em agricultura; testes não destrutivos em várias áreas, etc. O país tem enorme carência de formação adequada do pessoal que trabalha nestas áreas e a comunidade de Física Nuclear tem condições de suprir esta carência através de engajamento em projetos bem estruturados.

6- Ampliação e financiamento de atividades computacionais ligadas aos grupos teóricos, principalmente ligadas às simulações de evolução estelar na área de astrofísica nuclear e cálculos de Monte Carlo para estudar colisões de íons pesados e modelos hidrodinâmicos. A contratação de técnicos de informática para uma gestão eficiente de clusters tornou-se uma necessidade prioritária.

7- Estabelecimento de colaborações multilaterais com outros países da América Latina em Física Nuclear.

Na recente conferencia “VIII Latin American Symposium on Nuclear Physics and Applications” em Santiago, Chile, Dez. 15-19, 2009, foi fundada a Associação Latino-americana de Física Nuclear e suas Aplicações (ALAFNA) cujos objetivos são:

--Fortalecer vínculos entre as comunidades latinas americanas que realizam pesquisa em física nuclear e suas aplicações para fomentar a colaboração e promoção de suas atividades.

--Contribuir à educação da comunidade científica e do público através da promoção da física nuclear e os usos pacíficos da tecnologia nuclear.

--Avaliar periodicamente o desenvolvimento das ciências nucleares na América Latina dentro do contexto de atividades a nível mundial, e

--Discutir a nível multinacional a planificação futura de atividades relacionadas com as ciências nucleares na América Latina.

8- Estabelecimento de colaborações internacionais com a **CompStar**, uma rede europeia mantida pela “European Science Foundation”, que teve início em 2008 (<http://compstar-esf.org>). Essa rede congrega cientistas de vários grupos e de dez países da Europa, envolvidos em áreas correlacionadas com física da matéria hadrônica em condições extremas, astrofísica e relatividade geral. Os principais objetivos da rede são:

- Coordenar esforços para se avançar no entendimento de objetos estelares compactos em todos os estágios de sua evolução, desde a sua formação a partir de uma explosão de supernova até o momento do seu completo resfriamento e evolução de objetos compactos.

-Promover eventos com a participação de cientistas de renome na área e atividades voltadas à formação de jovens cientistas, aberta aos campos interdisciplinares das comunidades envolvidas.

A comunidade científica brasileira atuante nas áreas relacionadas ao tema astrofísica nuclear tem grande interesse em formar uma Rede de Estrelas Compactas no Brasil e para tal, precisará do apoio financeiro das agências de fomento brasileiras. Atualmente, essa comunidade faz parte da CompStar apenas como participante externa, mas pretende integrá-la de forma oficial para ter direito ao envio de estudantes a Europa com apoio contínuo e não esporádico, como acontece no momento.