

À Procura das Leis Fundamentais

(In search of fundamental laws)

V. Pleitez

Instituto de Física Teórica

Universidade Estadual Paulista

Rua Pamplona, 145

011405-900-São Paulo, SP, Brazil

Recebido em 5 de janeiro, 2000

Uma das atividades importantes do ensino de ciências em geral, e de física em particular, é a discussão de problemas não apenas atuais mas aqueles cuja solução é urgente. Quer dizer que dever-se-ia transmitir aos estudantes, principalmente aos da terceira série, a imagem de uma ciência ativa, viva; deixando claro os seus sucessos e seus fracassos, suas dificuldades para seguir adiante. Um ponto central dessa problemática é a caracterização do que deve entender-se por *leis fundamentais da natureza*. Em particular fazemos ênfase neste trabalho no fato que esse tipo de leis podem existir em áreas diferentes das tradicionalmente reconhecidas. Numa discussão desse tipo é impossível (e nem mesmo desejável) evitar a perspectiva histórica do desenvolvimento científico.

One of the main activities in science teaching, and in particular in Physics teaching, is not only the discussion of both modern problems and problems whose solution is an urgent matter. It means that the picture of an active and alive science should be transmitted to the students, mainly to the College students. A central point in this matter is the issue which characterizes the Fundamental Laws of Nature. In this work we emphasize that this sort of laws may exist in areas which are different from those usually considered. In this type of discussion it is neither possible nor desirable to avoid the historical perspective of the scientific development.

I Introdução

É frequente ouvir dizer ou ler que a ciência em geral, e a física em particular, está passando por momentos difíceis. Por exemplo o número de estudantes de física está diminuindo nos Estados Unidos [GO99, AI99] e provavelmente, isso ocorra no mundo todo [PF99]. No entanto quando analisada cuidadosamente é fácil se convencer de que a situação não deveria ser essa. Paradoxalmente, isso acontece justamente no momento em que a presença da ciência é mais contundente na sociedade moderna [MA99]. É incompreensível que não seja amplamente reconhecido que as contribuições da ciência, e da física em particular, em todos os aspectos da vida nas sociedades modernas têm sido, são e serão essenciais para o desenvolvimento da sociedade. Alguns dos problemas que a física enfrenta, são comuns à ciência em geral. Alguns cientistas acreditam que existem dificuldades nos próprios projetos da física; outros que esses problemas não estão nos temas de estudo da física mas nas suas relações com a sociedade [MA99].

De qualquer forma, a visão pessimista sobre as áreas de pesquisa na física enfraquece as relações dela com a sociedade. Acreditamos que, discutir em nível estritamente científico quais os rumos e dificuldades da física, contribui para melhorar o diálogo dos cientistas com a sociedade. Podemos então perguntar-nos o que seria necessário fazer para manter em bom estado a pesquisa, o ensino e a influência cultural da ciência em geral, e da física em particular [MA99, SC90].

É necessário que, entre outras coisas, se dê ênfase na importância da ciência física básica ¹ de maneira que se promova a pesquisa física orientada, motivada pela curiosidade. Isso não quer dizer que a pesquisa induzida não deva ser estimulada, ela é cada vez mais necessária, porém a médio e longo prazo as necessidades certamente vão mudar e apenas com uma sólida base científica poderá a sociedade se adaptar a essas futuras necessidades. Isto tem mais a ver com política científica e não será discutido aqui.

Temos que reconhecer também a importância de educar e informar ao público, isto é, a divulgação ci-

¹ Por “ciências físicas” entendemos a totalidade das ciências físicas: astronomia, astrofísica, cosmologia, matéria condensada, física do meio ambiente, física de partículas elementares, etc.

entífica; também melhorar o ensino da física e o jornalismo científico. Somente as motivações de curto prazo e econômicas não são suficientes. Devemos sempre ressaltar que os conceitos físicos são a base dos microprocessadores, do laser e da fibra ótica; apenas para mencionar algumas das contribuições importantes baseadas em princípios básicos. Porém poderíamos retroceder até o século passado e mencionar muitas outras contribuições da ciência ou então tentar prever quais serão os futuros impactos quando as revoluções do minilaser [GO98], da computação quântica sejam realidade [CO99] ou, mesmo os avanços imprevisíveis em outras áreas como as Ciências da Terra: ou será que descobrir qual é o mecanismo responsável pelo movimento das placas tectônicas não é fundamental? Acaso não terá impacto no desenvolvimento futuro conhecer melhor a evolução interna da Terra? [MA98].

Acreditamos que uma discussão sobre o que é a procura de *leis fundamentais da natureza* possa contribuir um pouco para o esclarecimento dessa problemática complicada. Afinal, a curiosidade continuará a ser uma motivação para alguns estudantes seguirem uma carreira científica, a física por exemplo.

II Un pouco de história

Pode-se dizer que, em certo sentido, a física contemporânea começou com Copérnico, Galileu e outros [CO98]. Por outro lado, a primeira síntese conceitual na descrição dos fenômenos observados na época, foi a de Newton no século XVII. As leis de Newton e outros princípios gerais, como as leis de conservação, permitiram a descrição de todos os fenômenos conhecidos até a época de Newton e nos anos posteriores.² O que veio depois é bem conhecido, Faraday, Ampere, ..., Maxwell.

Por outro lado, é interessante notar que mesmo no final do século passado a existência dos átomos não era ainda amplamente aceita, ou seja que não se acreditava que a *microfísica* fosse constituída de fenômenos diversos dos observados em escalas macroscópicas. Apenas em 1913 as experiências de J. Perrin mostraram que os átomos, os quais os químicos usavam apenas como uma maneira de descrição das reações químicas, tinham existência real [NY72]. Tampouco havia nessa época uma visão do universo como um todo, isto é, o conceito de que o universo evolui a partir de um estado inicial.³

Entre 1895 e 1897, foram feitas 3 descobertas experimentais que teriam grandes implicações ao longo de todo o século XX:

- a descoberta dos Raios-X por W. Röntgen;
- a descoberta da radioatividade natural por H.

Becquerel;

- a descoberta do elétron por J. J. Thompson.

As duas primeiras foram feitas por acaso. Nos anos seguintes ficaria claro que os raios-X são ondas eletromagnéticas de grande energia e que a radioatividade era um fenômeno atômico ou, melhor, nuclear. Isto não era evidente mas foi demonstrado por Rutherford nas primeiras décadas deste século. A descoberta de Thompson e outras experiências posteriores, mostraram que os portadores da eletricidade negativa são *constituintes universais* da matéria. Estava assim, descoberta a primeira partícula elementar [PL97].

Podemos dizer, de maneira resumida, que os físicos no começo do nosso século estudavam experimentalmente a radioatividade, os teóricos propunham modelos do átomo, outros pesquisadores experimentais estudavam os raios cósmicos ou tentavam obter baixas temperaturas. Teóricos como Einstein estudavam a generalização da relatividade restrita que o levaria à proposta da relatividade geral.

Até o começo dos anos 30 pensava-se que todos os fenômenos naturais tinham origem em apenas duas forças fundamentais: a gravitação e a eletromagnética. Estas teorias eram descritas como campos clássicos preenchendo o espaço todo. As suas fontes eram a massa e a carga elétrica, respectivamente. No caso gravitacional as equações de Einstein descrevem a gravitação em condições especiais, mas a teoria de Newton é usada na maioria das aplicações do dia-a-dia.

Pouco tempo depois, ainda nos anos 30, foi reconhecido que para explicar fenômenos atômicos e subatômicos (nucleares) era necessário admitir a existência de duas outras forças: a fraca e a forte. A primeira, a força fraca, para explicar o decaimento radioativo β e a segunda, para garantir a estrutura nuclear. Nenhuma das duas forças é observada macroscopicamente e, contrariamente às forças gravitacionais e eletromagnéticas, devem ter alcance muito curto.

Até hoje, as 4 forças podem ser tratadas separadamente. Em termos observacionais, isso significa quatro escalas diferentes para as seções de choque e vidas médias dos diferentes processos entre as partículas elementares até agora observadas. A descrição atual das forças fracas e fortes está baseada em teorias de calibre (ou de *gauge*) locais que têm como exemplo a eletrodinâmica quântica (QED). Todo este esquema não foi obtido sem reservas. Afinal a ciência tem de ser cética e os preconceitos, sejam positivos (adiantam o reconhecimento de um fato ou teoria) ou negativos (dificultam o mesmo) moram ao lado.

²Havia algumas discrepâncias mas, para a exposição sucinta que estamos fazendo isto não tem importância. Isto nos levaria a considerar a questão delicada de quando um experimento é crucial [PL99].

³É interessante observar que, ainda que muitas das idéias na física moderna tenham, de alguma forma, um conceito análogo na Grécia antiga, este não é o caso de um universo em expansão. Este último é um conceito que nasce no nosso século.

III Motivações

Acreditamos que uma discussão sobre o que poderia ser a procura de *leis fundamentais* ajudará estudantes de pós-graduação na escolha ou na valorização das suas respectivas áreas de pesquisa e os da graduação a escolher sua futura área de trabalho. Se o número de estudantes de Física esta diminuindo, como poderia se reverter essa tendência? Qualquer que seja a resposta a este desafio uma das suas componentes será a motivação dos estudantes sobre o que é importante pesquisar. Então, se faz necessário uma discussão sobre onde e como podemos procurar esse tipo de leis fundamentais. Este é um ponto importante e esperamos que este artigo possa contribuir, ainda que modestamente, a repensar o assunto. Sim, repensá-lo porque já existe uma resposta tradicional à pergunta de onde podemos identificar as leis fundamentais. No momento que novos fatos ou propriedades da matéria são descobertos, essa resposta não é mais apropriada. Precisamos então redescobrir qual o sentido das leis fundamentais.

Quer dizer que no ensino de ciências os aspectos pedagógicos não são mais suficientes. Se ensinar o que sabemos é difícil, não o é menos ensinar o que não sabemos. Não saber no sentido amplo do termo: coisas que a ciência está ainda pesquisando ou mesmo não tem condições, no momento, de responder.

Existem outros aspectos do problema como a educação do público em geral. Convencer as pessoas de que a física continuará a ser a base da ciência e a tecnologia no futuro e também jogará um papel importante na análise e resolução de problemas energéticos e do meio ambiente. Mas antes de chegar ao público, precisamos convencer os estudantes sobre quais são os problemas fundamentais que devem ser atacados por eles. Que este tipo de problemas existem em áreas não reconhecidas por uma mentalidade infantil que infelizmente ainda permeia os nossos meios acadêmicos. Um aspecto que não será tratado aqui é o fato que as diretrizes metodológicas não são suficientes para caracterizar completamente a atividade científica [PL96, PL99].

II Rompendo barreiras

O método científico, qualquer coisa que entendamos por isso, não tem um antídoto contra os preconceitos. Por exemplo, mesmo no começo do presente século físicos como Lord Kelvin (e Mach como veremos mais adiante) não acreditavam na existência dos átomos. Segundo eles os átomos seriam apenas abstrações úteis para os químicos. No entanto, o mesmo Lord Kelvin escreveu no prefácio do livro de Hertz [HE62]:

The explanation of the motion of the planets by a mechanism of crystal cycles and epicycles seemed natural and intelligible, and the improvement of this mechanism inven-

ted by Descartes in his vortices was no doubt quite satisfactory to some of the greatest of Newton's scientific contemporaries. Descartes's doctrine died hard among the mathematicians and philosophers of continental Europe; and for the first quarter of last century belief in universal gravitation was insularity of our countrymen.

Segundo Weinberg [WE93a]:

The heroic past of mechanics gave it such prestige that the followers of Descartes had trouble accepting Newton's theory of the solar system. How could a good Cartesian, believing that all natural phenomena could be reduced to the impact of material bodies or fluids on one another, accept Newton's view that the sun exerts a force on the earth across 93 million miles of empty space? It was not until well the eighteen century that Continental philosophers began to feel comfortable with the idea of action at a distance. In the end Newton's ideas did prevail on the Continent as well as in Britain, in Holland, Italy, France, and Germany (in that order) from 1720 on.

Apenas em 1728 após uma viagem de Voltaire a Londres a escola Newtoniana começou a ter discípulos em Paris [WE93b]. Não é surpreendente que o conceito de *ação a distância* não fora aceito pela comunidade. É interessante que o próprio Newton disse [WH51]:

...that one body may act upon another at a distance through vacuum, without the mediation of anything else ... is to me so great absurdity, that I believed no man, who has in philosophical matters a competent faculty for thinking, can ever fall into.

Por alguns anos, depois de 1687 (ano da publicação dos *Principia*), mesmo em Cambridge, continuo-se a ensinar o Cartesianismo. Apenas ocorreu que no Continente as ideais de Newton demoraram um pouco mais para serem aceitas [WH51]. Voltaire escrevia em 1730 [WH51]:

A Frenchman who arrives in London will find philosophy, like everything else, very much changed there. He has left the world a plenum, and now he finds a vacuum. It is the language used, and not the thing in itself, that irritates the human mind. If Newton had not used the world attraction in his admirable philosophy, every one in our Academy would have open his eyes to the light; but unfortunately he used in London a word to which an idea of ridicule was attached in Paris...

e, segundo Whittaker [WH51]:

In Germany, Leibnitz described the Newton formula as a return to the discredited scholastic concept of occult qualities and as late as the middle eighteenth century Euler and two of the Bernoullis based the explanation of magnetism on the hypothesis of vortices.

Deve-se lembrar também que essa oposição entre discípulos de Newton e Descartes fez com que os primeiros rejeitassem, posteriormente, a idéia de *éter* nos fenômenos elétricos e magnéticos. Vemos que como dissemos antes, o preconceito mora ao lado, a verdade aparece sempre com dificuldades! Neste caso o curioso é que posteriormente a visão newtoniana passou a ser o preconceito contra novas formas de descrever o mundo físico. De fato, não existe antídoto para o preconceito mesmo uma mentalidade aberta não é suficiente.

III Desafios

Usualmente, descreve-se o desenvolvimento da física como a evolução da explicação de fenômenos relativos a uma determinada escala das dimensões espaciais e do tempo, em termos de processos mais elementares característicos de uma escala espaço-temporal menor. Foi o que aconteceu com a descoberta da estrutura atômica da matéria a qual sabemos agora que é composta de átomos e moléculas. Logo se constatou que os átomos por sua vez são constituídos por elétrons e pelo núcleo atômico. Este último é formado pelos núcleons que por sua vez são formados pelos quarks. Foi esta hierarquia de fenômenos que levou os cientistas a acreditar que as leis fundamentais eram apenas aquelas que permitiam descer na escala das dimensões espaciais e do tempo. Isto é, o desenvolvimento da ciência, e em particular o da física, foi até pouco tempo totalmente *reducionista*.

Até onde vai esta cadeia? Sem dúvida a resposta a esta pergunta faz parte da chamada *pesquisa básica*. Porém, este tipo de pesquisa está restrita à procura de novas leis características de escalas menores? Não há novas *leis fundamentais*, por exemplo, na escala humana ou a nível atômico? Se a resposta for positiva, como podemos reconhecer leis fundamentais? Se for negativa, por quê? Não é fácil uma definição de *lei fundamental*. De fato, nenhuma definição é fácil. Mas podemos reconhecê-la. Quando um conceito ou lei não depende de outro de maneira direta que o explica podemos dizer que o primeiro é um conceito ou lei fundamental. Assim, a química tem conceitos e leis que não podem ser reduzidos à física. Isto é, a química tem seu status particular como ciência da natureza mesmo que seus fundamentos estejam baseados nas leis da física. Mas existem ainda mesmo áreas da física onde as leis clássicas ou quânticas ajudam pouco para se estabele-

cer suas leis e conceitos. Um exemplo, a ser discutido mais adiante, é o *caos determinístico*.

Além das dificuldades intrínsecas, a resposta à pergunta acima é particularmente delicada, porque a situação atual da física teórica é, em certo sentido, de crise. As palavras de Schweber resumem a problemática atual [SC93]:

A deep sense of unease permeates the physical sciences... Traditionally, physics have been highly reductionist, analyzing nature in terms of smaller and smaller building blocks and revealing underlying, unifying fundamental laws... Now, however, the reductionist approach that has been the hallmark of theoretical physics in the 20th century is being superseded by the investigation of emergent phenomena, the study of the properties of complexes whose 'elementary' constituents and their interactions are known. Physics, it could be said, is becoming like chemistry.

As pesquisas científicas são divididas segundo Weiskopf em *intensivas* e *extensivas*. As do primeiro tipo teriam a ver com a procura de leis fundamentais, as do segundo tentam descrever os fenômenos em termos das leis fundamentais conhecidas [WE67a]. Neste sentido a física da matéria condensada, física de plasma e outras áreas seriam do tipo extensivo, entanto que a física de altas energias e parte da física nuclear seriam intensivas. Tomada literalmente é uma maneira de desenvolvimento “barroca”, isto é, uma disciplina é separada numa diversidade de áreas, uma quantidade de detalhes e complexidades desorganizados. Isto pode ocorrer em ciências matematizadas ou mesmo nas ciências empíricas.

Na verdade estamos numa época de grandes mudanças em que as assunções básicas da pesquisa nas diversas áreas da física parecem deslocadas com relação às anteriores: a *complexidade* e a *emergência* (o da turbulência por exemplo) parecem ser os objetivos principais a serem tratados [SC93]. Outra área de grande futuro é a óptica quântica. É possível prever até onde nos levará os novos testes dos princípios da mecânica quântica? Desde os experimentos de Aspect e colaboradores [AS82] que testaram as desigualdades de Bell e mostraram que a interpretação ortodoxa era confirmada, passando pelos efeitos “superluminares” de Chiao *et al.* [ST93, CH93], até testes mais recentes [GH99], indicam que podemos estar assistindo ao começo de descobertas de novos fenômenos quânticos e isso terá importantes conseqüências em computação (que cada vez está atingindo dimensões menores) e, por isso, em todas as outras áreas da ciência e da tecnologia. Tudo isso não parece tão fundamental e básico como outras leis da natureza?

Paradoxalmente, a situação, no caso da física de

partículas elementares, é uma consequência do sucesso da teoria quântica de campos e do uso das simetrias, locais e globais. É, então, difícil prever qual será o formalismo que substituirá o atual. No entanto, quando apropriadamente considerada, a situação atual é empolgante. Acreditamos apenas que a física entrou numa nova fase de maturidade nas diversas áreas. Por exemplo, a física de neutrinos está numa fase de muita coleta de dados experimentais dos quais poderão sair dados definitivos das propriedades dos neutrinos [NU98, GE99].

O sentimento de dificuldade acima mencionado, não ocorre apenas na física de partículas elementares. O mesmo ocorre em áreas como a matéria condensada e a cosmologia, mesmo (ou justamente por causa delas) com os dados recentes do COBE [SM92]), parecem estar numa situação de aparente falta de perspectivas. No caso da matéria condensada não tem havido avanços na compreensão dos fenômenos críticos e a supercondutividade a altas temperaturas ainda não tem uma teoria bem estabelecida [SC93]. Mas podemos assinalar as descobertas experimentais da condensação de Bose-Einstein com diversos tipos de átomos, inclusive o hidrogênio [CO98b, KL99]. Mas, é nesta área onde fica mais evidente a necessidade de conceitos novos: a física “fundamental”, no sentido de tratar os elementos básicos da natureza, não tem nada a dizer sobre o problema dos processos irreversíveis. De fato, a física fundamental trata de processos que podem ser simplificados ao extremo e quase sempre reproduzíveis no laboratório. Já a maioria dos processos que observamos à nossa volta são complicados demais para serem tratados pelas teorias simples como as conhecemos. A “flecha do tempo” precisa de física nova [PR97].

Mesmo em áreas de grande desenvolvimento recente como o *caos determinístico* e fenômenos relacionados, parece ter-se alcançado uma estabilidade nas descobertas teóricas e experimentais [RU93]. Os *fractais* tampouco produziram uma renovação da nossa visão da natureza (pelo menos por enquanto) e servem (quase) apenas para produzir figuras exóticas com ajuda de computadores [KA86]. A área da programação, a despeito dos grandes avanços, continua na sua crise perene [GI94].

Tudo isso está relacionado com o que esperamos da física como um todo e, em particular, da física teórica. Considero que transmitir esse tipo de *ansiedade* é fundamental no *ensino de física*. Deve-se fazer ênfase na ignorância da ciência em certos assuntos. Isso coloca a prioridade da atualização dos professores com relação às necessidades puramente pedagógicas. Mais não apenas isso. Na atualidade a vida das pessoas é cada vez mais afetada pela ciência e a técnica. Elas precisam entender melhor em que consiste o método científico ou melhor, em que consiste a *maneira científica* de pensar e agir (e também quais são as suas limitações). Essa necessidade é fazer ‘compreender’ a ciência pelos estudantes (e o público geral) é mais importante que apenas

a mera atualização dos resultados obtidos pela ciência e a tecnologia. É uma tarefa para cientistas!

Do ponto de vista dos pesquisadores e dos estudantes de pós-graduação as meditações são mais delicadas, mas nem por isso menos urgentes ou necessárias. É urgente e/ou necessário obter uma função de onda para o universo (mesmo que o universo primordial)? Pode-se obter uma *teoria de tudo* com os conhecimentos empíricos atuais? A priorização dos objetivos da pesquisa é essencialmente uma escolha pessoal, ainda que outros fatores a influenciem (como o financiamento, mercado de trabalho, na pós-graduação a influência do orientador). Uma questão importante sempre será o quê estamos em capacidade de verificar experimentalmente. A especulação é válida mas temos de ter cuidado em não cair numa situação *grega*, isto é, uma situação onde há uma diminuição da importância da experiência e o conceito de teoria matematicamente “bela” é o que é mais importante. Os gregos não tinham como comprovar ou refutar as suas “teorias”. O conceito de ciência experimental não tinha sido descoberto.

Nesse quadro geral, o problema é colocado aos pesquisadores e, em particular, aos estudantes que começam sua pós-graduação, de escolher rumos nas suas pesquisas. A escolha é certamente um assunto pessoal. Todos estão sozinhos ao fazê-la. Vale a pena, no entanto, fazer análises que possam, pelo menos, colocar o assunto em discussão de maneira que vários critérios possam ser levados em conta na hora de escolher.

Um aspecto que atrai os pesquisadores para determinados campos da pesquisa é o fato de ela ser considerada ampla e “fundamental”. Isto é, base de tudo; o resto seria constituído apenas de detalhes. Os conceitos de “importância”, “beleza” e “consistência” são também, freqüentemente trazidos à tona.

Se uma área é “fundamental” ou, aceitando que essa palavra seja sinônima de “importante”, então ela deve ser relevante para áreas vizinhas. Por exemplo, parece indiscutível que há varios anos a biologia molecular é a área mais fundamental das ciências biológicas. Assim, um estudante pode ser motivado a escolher essa área de pesquisa. Os objetivos dessa ciência (compreender melhor a transmissão da informação genética) são, aparentemente, mais fáceis de identificar. Sua importância com relação a doenças como câncer, aids e outras, assim como a sua utilização em técnicas recentes de produtos transgênicos e clonagens é indiscutível. Se a física de altas energias é vista como uma maneira de entender melhor as forças nucleares então poderia ser comparada com a biologia molecular. No entanto, esse objetivo foi deixado de lado, no que se refere aos fatos principais a serem explicados, e se procura uma unificação das forças observadas (até o momento) na natureza. Ainda que isto possa ser uma motivação para atrair jovens talentosos, poderia ser uma maneira, a curto prazo, de frustrá-los e perder quadros valiosos.

Em 1964 Alan Weinberg [WE64] observara que o

afastamento da física de altas energias do resto das outras áreas da física diminui a sua importancia como ciência fundamental. Claro que como ciência tem objetivos bem definidos e ambiciosos. O problema, é que é cara. Por isso suas verbas são cada vez mais difíceis de serem obtidas nos países do primeiro mundo. Em parte porque tem de competir com áreas e/ou temas de pesquisa novos, isto é, que não existiam 10 ou 15 anos atrás (pelo menos não de maneira estruturada). Por outro lado, devemos lembrar que a ciência é uma só. Também, se um projeto é cancelado no primeiro mundo vai nos afetar também. Nós não podemos ficar, pelo menos na área de física teórica, resolvendo problemas diferentes dos da comunidade internacional. Não devemos aceitar a divisão do trabalho internacional. O desafio, levando em consideração as diferenças de recursos, é o mesmo.

A “beleza” e a “consistência” são fatores muitas vezes mais determinantes que a observação experimental na aceitação de uma determinada teoria. Isso serve para decidir entre duas teorias com diferentes graus de beleza. Mas, este adjetivo tem unicidade? *i.e.*, podemos formular apenas “uma” única teoria bela? Pelo menos por enquanto este parece ser o caso da Relatividade Geral e da Mecânica Quântica. O caso desta última é mais impressionante. Podemos fazer correções à Relatividade Geral acrescentando termos à lagrangeana mas não sabemos como modificar apenas “um pouco” a mecânica quântica! Por outro lado, esta não determina o tipo de partículas e suas interações.

O critério de beleza sempre foi utilizado pelos cientistas. Segundo Chandrasehkar [CH79]:

Science, like arts, admits aesthetic criteria; we seek theories that display a proper conformity of the parts to one another and to the whole while still showing some strangeness in their proportion.

O problema é que mesmo na arte o critério de beleza é cultural e depende também do tempo. Pior, na ciência como na arte os preconceitos têm um papel, para o bem ou para o mal, importante. A beleza manifesta, para nós, da teoria atômica não era evidente para grandes físicos do século passado, como Lord Kelvin e outros. Mach por exemplo dizia que [WE93a]:

If believe in the reality of atoms is so crucial, then I renounce the physical way of thinking. I will not be a professional physicist, and I hand back my scientific reputation.

Qualquer que seja a definição de beleza para teorias científicas, a “simplicidade” deve fazer parte dela. Mas, como se mede a simplicidade? Segundo Weinberg [WE93a], é a simplicidade de idéias o que im-

porta. Rubbia é mais enfático: o “script” é mais importante que os “atores”. A teoria de Newton é substituída por 3 equações entanto que a do Einstein tem 10! Mas, sem dúvida nenhuma, a última é considerada, pela maioria da comunidade de físicos, como sendo mais bela (e fundamental) que a primeira! Assim, não devemos identificar a simplicidade com o número mínimo de qualquer coisa. É interessante que o chamado “modelo padrão” da física de partículas elementares a despeito de contar com um número grande de parâmetros é de uma grande simplicidade na descrição das interações entre partículas elementares. E, o que é mais importante, o modelo não depende fortemente dos valores que esses parâmetros venham a ter na realidade. Na eletrodinâmica clássica, alguns dos parâmetros como o índice de refração tem que ser obtidos experimentalmente. Isso não tira beleza da teoria de Maxwell.

Por outro lado, é bom frisar que a explicação de porquê certos parâmetros têm os valores observados é um problema fundamental apenas se eles estiverem relacionados com objetos fundamentais. Talvez os quarks não sejam os objetos fundamentais da natureza. Por exemplo, os chamados ângulos de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa, que são ângulos entre os “eixos” que poderíamos chamar de autoestados da simetria eletrofraca com relação aos “eixos” dos autoestados da massa, são equivalentes à orientação de certas órbitas planetárias.⁴ Neste último caso essa orientação é de fundamental importância para nós: ela determina as estações na Terra. No entanto, não consideramos como fundamental explicar por primeiros princípios as orientações das órbitas porque eles (os planetas) há muito tempo deixaram de ser considerados objetos de estudo das leis fundamentais. Não era este o caso na época de, digamos, Kepler (ver mais adiante). Por enquanto consideramos os quarks como sendo fundamentais. Será isso mantido com o desenvolvimento da física nas próximas décadas ou séculos? Não sabemos.

A “inevitabilidade” é outra característica que Weinberg atribui à beleza de uma teoria [WE93a]. A teoria da relatividade geral parece inevitável uma vez adotados os princípios (simples) de Einstein. No entanto Weinberg subestima a inevitabilidade dos dados experimentais. Os dados astronômicos tornaram inevitável a lei do inverso do quadrado da distância. Nas outras interações a inevitabilidade é obtida dando prioridade às simetrias em vez de a matéria.

Um terceiro aspecto para Weinberg que deve ser incorporado à beleza é a sua “rigidez” [WE93a]. Pode-se descrever uma grande variedade de fenômenos construindo-se teorias as mais flexíveis possíveis. Não é isto o que esperamos de uma teoria fundamental. A rigidez das teorias em física de partículas elementares é dada pela simetria e pela consistência matemática

⁴O leitor pode pensar neles como dos dois sistemas de coordenadas retangulares, um deles girado por um ângulo arbitrário com relação ao outro.

como por exemplo renormalizabilidade e o cancelamento das anomalias do triângulo ou de Adler-Bell-Jackiw (ABJ) [AD71].⁵ As anomalias de ABJ têm de ser eliminadas, por exemplo, pelo conteúdo da representação da teoria. O desafio é, então, procurar estas características em outras áreas e circunstâncias físicas.

IV Caça ao universo

A procura da “fórmula do mundo” implica uma definição do mundo. Isto é, precisamos *a priori* definir o sujeito a ser explicado. Há apenas alguns séculos, o “mundo” era restrito aos planetas. Ainda que hoje em dia nosso “mundo” seja mais complexo e amplo, não vemos nenhuma razão pela qual já tenham sido observadas todas as suas características a serem explicadas. Surpresas podem aparecer mesmo naquelas escalas espaço-temporais nas quais atualmente pensamos já ter estudado em detalhe.

A postura adotada freqüentemente pelos físicos, é refletida na visão de Dirac. Segundo ele, a mecânica quântica estava completa em 1929 e as imperfeições relativas à sua síntese com a relatividade restrita eram [SC93]:

...of no importance in the consideration of atomic and molecular structure and ordinary chemical reactions...the underlying physical laws necessary for the mathematical theory of a large part of physics and the whole of chemistry are thus completely known, and the difficulty is only that the exact application of these laws lead to equations much too complicated to be soluble.

Estas palavras de Dirac foram motivadas pelo sucesso da mecânica quântica não relativística na explicação da estrutura dos átomos e das moléculas.

A visão de Dirac é atualmente compartilhada pela maioria dos físicos. De fato, como deixa claro acima Schweber, o reducionismo é a marca da física teórica deste século. Mais ainda, é uma característica, até recentemente dominante, de toda a ciência moderna. Não é possível negar os bons resultados obtidos. Ainda segundo Schweber [SC93]:

These conceptual developments in fundamental physics have revealed a hierarchical structures of the physical words. Each layer of the hierarchy successfully represented while remaining largely decoupled from other layers. These advanced have supported the notion of the existence of objective emergent properties and have challenged the reductionist approach. They have also given credence to the notion that to a high degree

of accuracy our theoretical understanding of some domains have stabilized, since the foundational aspects are considered known.

Quantum mechanics reasserted that the physical world present itself hierarchically. The world was not carved up into terrestrial, planetary and celestial spheres but layered by virtue of certain constants of nature... Planck's constant allow us to parse the world into microscopic and macroscopic realms, or more precisely into the atomic and molecular domains and the macroscopic domains composed of atoms and molecules. The story repeated itself with the carrying out of the nucleon domain: quasistable entities—neutrons and protons—could be regarded as the building blocks of nuclei, and phenomenological theories could account for many properties and interactions of nuclei.

Os físicos teóricos são as vezes otimistas demais com relação aos objetivos a serem alcançados a curto prazo. Porém alguns físicos são céticos, Weisskopf por exemplo se pergunta [WE91]

Is it really an aim of theoretical physics to get the world formula? The greatest physicists have always thought that there was one, and that everything else could be derived from it. Einstein believed it, Heisenberg believed it, I am not such a great physicist, I do not believe it... This I think, is because nature is inexhaustible.

Devemos perguntar-nos se o desenvolvimento futuro implica uma continuação nessa direção ou uma pausa para reorganizar todos os conhecimentos adquiridos até hoje, antes de ser possível a proposta de uma nova ordem.

Por outro lado, acreditamos que o problema não é se devemos ou não reconhecer se a física de partículas elementares é a única área fundamental da física. O que estamos tratando é mais profundo. É se existem leis verdadeiramente fundamentais a serem descobertas (ou que já o tenham sido) em estruturas diferentes daquelas das pequenas escalas sub-nucleares ou no universo primordial. É curioso observar que esse tipo de estruturas hierárquicas na dimensão espaço-temporal foram obtidas sempre que os instrumentos de observação eram refinados para poder atingir distâncias cada vez menores. Por exemplo, o processo de detecção e estudo de partes cada vez menores ocorre também na biologia. Depois de estudar doenças bacterianas, com o advento do microscópio eletrônico, foram detetadas doenças virais. Podem existir agentes produtores de doenças menores (*prions*) ainda não detetados [GA94]?. É possível

⁵Estas são contribuições infinitas quadráticas que não são contornadas pelo formalismo chamado de *renormalização* o qual da conta apenas das divergências logarítmicas.

que, além de refinamentos na sensibilidade dos aparelhos, que sem dúvida foi o eixo do desenvolvimento das ciências, o refinamento das capacidades de cálculo possa introduzir novos conceitos. O caos pode ter sido um dos primeiros exemplos. A física poderia entrar numa fase não reducionista (poderíamos dizer *holista* mas este termo já é usado com outros propósitos; ou *global* (que está muito estigmatizada) ou usar também *não-reducionista*). Em todo caso pode ser que não seja uma reviravolta completa. Os aspectos globais tem suas dificuldades também e seu progresso não deverá ser tão rápido como alguns podem pensar. (Mencionamos antes que mesmo áreas como o caos passam pelas mesmas dificuldades.) Por outro lado, a tradição reducionista ainda não foi esgotada e deverá dar resultados importantes nas próximas décadas. Segundo Weinberg [WE93a]:

At this moment in the history of science it appears that the best way to approach these laws is through the physics of elementary particle, but is an incidental aspect of reductionism and may change.

Argumento teóricos falharam as vezes redondamente. Vejamos por exemplo os seguintes argumentos de Maxwell [MA54]:

...to explain electromagnetic phenomena by means of mechanical action transmitted from one body to another by means of a medium occupying the space between them. The undulatory theory of light also assumes the existence of a medium.

To fill all space with a new medium whenever any new phenomena is to be explained is by no means philosophical, but if the study of two different branches of science has independently suggested the idea of a medium, and if the properties which must be attributed to the medium...are the same...the evidence for the physical existence of the medium will be considerably strengthened.

O que Maxwell não sabia era que a estrutura matemática da teoria dispensava a existência de qualquer meio para a transmissão de ondas eletromagnéticas. Por outro lado, historicamente a existência do meio para os fenômenos eletromagnéticos foi importante. Não apenas para Maxwell. Faraday, considerava o vácuo como uma substância. Isso o ajudava a ver o campo eletromagnético como sendo transmitido pelo meio. Isto foi um avanço com relação à ação a distância de Newton.

A física de partículas elementares tem sido mesmo reducionista. E é a isso que deve seu sucesso. O ponto é se *deve* continuar sendo, ou se chegou o momento de dar ênfase aos aspectos globais ou não-reducionistas. Assim colocada, esta discussão deixa de ser algo vazio. Ela pode determinar o sucesso ou o fracasso de novas gerações de pesquisadores. Como foi dito acima, é possível que nas próximas décadas a tendência na física de partículas elementares seja a mesma que a dos últimos 50 anos. Muitos dados experimentais serão obtidos antes de acharmos que devemos voltar a problemas mais fundamentais deixados para trás (se é que isso acontecerá algum dia).

Por outro lado, devemos ter sempre em mente, a historicidade dos problemas e de suas soluções. Na metade do Sec. XIX discutia-se se a criação espontânea da vida era possível. Poderia a vida ter surgido da não-vida? As experiências de Pasteur mostraram que o fenômeno de putrefação era provocado pelos micro-organismos presentes no ar. A biologia era assim, separada da química. Esta separação foi positiva nas décadas posteriores com ambas disciplinas se desenvolvendo separadamente. Mas, depois da mecânica quântica passou-se a acreditar que todos os processos biológicos são reduzidos a processos químicos que pela sua vez são manifestações das leis da física elementar. Porém, em algum momento da evolução do universo (ou da Terra) a vida surgiu da não-vida num processo ainda não conhecido. Apenas não são os processos simples do dia-a-dia nos quais acreditavam os defensores da geração espontânea pre-Pasteur, por exemplo pela fermentação e putrefação como acreditava F. A. Pouchet.⁶

Um outro exemplo, é a lei da gravitação de Newton. Como vimos na Sec. II, os físicos europeus (Descartes principalmente), e o próprio Newton, não aceitavam o conceito de “ação a distância” e de “espaço absoluto”. Mas, a lei de Newton da gravitação foi superior à dos vórtices de Descartes para preparar o caminho da teoria da gravitação geral de Einstein. Poderíamos colocar vários exemplos onde fica claro que uma solução a um determinado problema permite o desenvolvimento de uma área mesmo que posteriormente se verifique que aquela solução não era correta ou apenas o era de maneira aproximada. O objetivo da ciência continua a ser a *caça ao universo*. A discussão é qual o passo mais imediato a ser dado na direção certa.

⁶Félix-Archimède Fouchet (1800-1872) naturalista francês, foi diretor do Museu de História Natural de Rouen, e do Jardim das Plantas de Rouen. Em 1859 em seu livro *Hétérogénie (Heterogeneidade ou tratado sobre a geração espontânea, baseado em novas experiências)*, deu detalhes das condições sob as quais, segundo ele, os organismos vivos podem ser produzidos por processos químicos como a fermentação e a putrefação. Ele assumia uma *força vital* que os minerais não possuíam mas poderia acontecer criação de vida quando o material utilizado tivesse tido vida antes. Esta teoria foi desacreditada quando Louis Pasteur (1822-1895) na França e John Tyndall (1820-1893) na Inglaterra provaram a existência de microorganismos no ar [RO87, EB00]

V Partículas elementares: além do modelo padrão

Na década de 70, na área de física de partículas elementares ficou completo (do ponto de vista teórico) o chamado *modelo padrão* no qual o mundo subnuclear é composto em termos de gluons, bósons vetoriais intermediários, o fóton, quarks e leptons e o difícil de ser detectado até agora bóson de Higgs [WE67b, WI72, HI64]. Depois disso podemos nos perguntar se haverá uma outra camada de estrutura. Como mencionado acima, não sabemos. É por isso que a procura continua.

As idéias teóricas que permitiram à física de partículas elementares chegar ao estabelecimento de uma série de domínios hierárquicos quase autônomos são: o grupo de renormalização (que nos indica como podemos fazer extrapolações), o teorema de desacoplamento (que nos permite esquecer ao fazer as extrapolações, partículas de massa maior que a escala de energia relevante para as experiências), a liberdade assintótica (que nos permite usar teoria de perturbações) e a quebra espontânea de simetria (que nos permite gerar massa para as diferentes partículas sem estragar a consistência matemática da teoria).

O sucesso deste modelo na descrição das interações entre partículas elementares coloca o problema de se determinar quais as leis da física além deste modelo. Apesar da impressionante concordância com os dados experimentais, existe um consenso entre os físicos de que este modelo não é a teoria final. O modelo deixa muitas coisas sem resposta e tem muitos parâmetros a serem determinados pela experiência. Como mencionamos antes, isso poderia não ser um problema já que qualquer teoria física vai precisar sempre de um número (finito) de parâmetros de entrada a serem determinados pela experiência.

O ponto de vista reducionista implica que tudo na natureza é controlado por um mesmo conjunto de leis fundamentais. O modelo padrão estaria na base de tudo o resto mas, e depois, o que é que explica esse modelo? Quais os princípios gerais que explicariam porque esse modelo e não outro é o que é válido até as energias dos aceleradores atuais. Constitui este um problema fundamental a servir de guia para as futuras gerações? A resposta usual a esta pergunta está no espírito das palavras de Einstein que, em 1918, dizia [PA82]:

The supreme test of the physicist is to arrive at those universal elementary laws from which the cosmos can be built by pure deduction.

Tarefa difícil, nem mesmo sabemos como construir, *por primeiros princípios*, hadrons partindo de quarks e gluons! (Para não falar de núcleos em termos de núcleons, moléculas em termos de átomos.) Esse tipo de afirmação emotiva, mesmo vindo de físicos como Einstein devem ser analisadas cuidadosamente. Principal-

mente pelos estudantes que estão começando a sua pós-graduação.

Atualmente a área de neutrino é uma das mais ativas da física de partículas elementares fornecendo muitos dados experimentais que permitem testar hipóteses do que seria a física *além* do modelo padrão. De maneira geral as observações astrofísicas [GE99] se unem aos dados de aceleradores e de experimentos com energias baixas que estão medindo com maior precisão efeitos bem conhecidos para a procura da nova física. Novos dados sobre efeitos há muito tempo procurados como por exemplo a violação da simetria CP [FE99, CE99], ou novas possibilidades permitidas por novas técnicas experimentais como o estudo da anti-matéria com a produção e armazenamento de anti-prótons e mesmo de anti-hidrogênio [CE99]. Onde está a crise?

VI Direção única?

Por ser reducionista a ciência moderna é também unificadora. Unificadora no sentido que pretende uma descrição unificada dos fenômenos físicos e reducionista no sentido que pretende reduzir o número de conceitos independentes com os quais seriam formuladas as leis da natureza. Esse ponto de vista foi criticado por Anderson alguns anos atrás. Segundo ele [AN72]:

The main fallacy in this kind of thinking is that the reductionist hypothesis does not by any means imply the “constructionist” one: The ability to reduce everything to simple fundamental laws does not imply the ability to start from those laws and reconstruct the universe. In fact, the more the elementary particle physics tell us about the nature of fundamental laws, the less relevance they seem to have to the very real problems of the rest of science, much less to those of society.

The constructionist hypothesis breaks down when confronted with the twin difficulties of scale and complexity. The behavior of large and complex aggregates of elementary particles, it turns out, is not to be understood in terms of a simple extrapolation of the properties of a few particles. Instead, at each level of complexity entirely new properties appear, and the understanding of the new behaviors requires research which I think is as fundamental in its nature as any other.

O quadro do percurso desde o “menos fundamental” até o “mais fundamental” pode ser resumido na Tabela 1 na qual os elementos de uma ciência *X* obedecem as leis de uma ciência *Y* [AN72].

X	Y
Estado Sólido ou Muitos Corpos	Partículas Elementares
Química	Muitos Corpos
Biologia Molecular	Química
Biologia Celular	Biologia Molecular
⋮	⋮
Psicologia	Fisiologia
Ciências Sociais	Psicologia

Tabela 1: “Hierarquia” das ciências de Anderson.

A hierarquia mostrada na Tabela 1, porém, não implica que a ciência X seja *apenas* aplicação da ciência Y. Em cada nível novas leis, conceitos, generalizações e mesmo novos métodos de pesquisa são necessários. Mesmo que saibamos que após o aquecimento as moléculas se afastam até que a forma sólida se dissocie, as moléculas agora obedecem às leis dos fluidos que não podem ser deduzidas a partir das leis dos sólidos. Por exemplo, a vida (a biologia em geral) é em seu nível mais fundamental, química. Isso não implica que seja *apenas* química. O mesmo pode ser dito da química, ela é basicamente física mas as leis da física ajudam pouco no estabelecimento de novas leis químicas. Claro que essas novas leis da química não devem violar as leis da física. Mas, fazer química não é fazer física. E nunca será.

Na prática temos grupos desconexos nos diferentes domínios das ciências. Isso acontece nos dois sentido referidos acima: um domínio de sub-estrutura não ajuda na explicação da maioria dos processos da estrutura acima dela. Para reforçar o assunto enfatizemos que até pouco tempo atrás a física atômica entra como um fator de correção da física nuclear. Esta pela sua vez não é “construída” (no sentido de Anderson) pela física de quarks. Mas acreditava-se que por sua vez a física nuclear não teria nada a ver com a física atômica. No entanto, recentemente foi descoberto um efeito que contradiz esta última afirmação: foi encontrado que a orientação do spin do núcleo de uma molécula de H_2 afeta o espalhamento dessa molécula diatômica na superfície de um cristal [BE98]. Isso vai ajudar a estudar a estrutura do campo elétrico em superfícies. Até onde isso pode ir? isto é, será que um dia estaremos observando efeitos do conteúdo de quarks em física do estado sólido? Não sabemos, isso depende de melhoramentos na técnica que estão fora da nossa capacidade de previsão. Mas, se isso acontecer então Anderson estaria errado!

É usual acreditar que, quando encontradas, verdades universais devem ser explicadas em termos de outras mais profundas,..., até atingirmos a chamada *teo-*

ria final. Este é de fato *um* dos projetos para a ciência. Mas não é o único. E nem mesmo talvez seja o mais interessante. Um princípio científico explica outro se este último não viola as leis do primeiro. Porém, temos de entender que as leis do princípio mais básico não ajudam a determinar as leis do segundo. Apenas servem como referencial subjacente. É por isso que continuará havendo química independentemente de que seus fundamentos sejam físicos. Mais ainda, as leis da química ou da matéria condensada, para pôr dois exemplos, podem ter uma generalidade vertical (no sentido de Weiskopf acima). Podemos colocar a evolução do progresso científico da forma mostrada na Tabela 2 [DR98].

A visão de Dirac continua na tradição da física de partículas e campos. Na década dos anos 80 as teorias de supercordas que tinham sido elaboradas desde 1974 por Veneziano, pasando por Nambu e outros, apareceram como fortes candidatas para a teoria que unificasse as quatro interações conhecidas. Essa seria então a culminação da visão reducionista da física. Segundo Witten [OV91] a teoria das supercordas é

...a piece of twenty-first-century physics that has fallen into the twentieth century, and would probably require twenty-second-century mathematics to understand.

Em 1980 Hawking disse [HA81] que existia

...the possibility that the goal of the theoretical physics might be achieved in the not too distant future, say, by the end of the century. By this I mean that we might have a complete, consistent and unified theory of the physical interactions which would describe all possible observations.

Isso tem mais de pessimista que de otimista. Significa que todo o conhecimento teórico e em particular novos dados experimentais não serão capazes, nos próximos séculos, de indicar uma outra direção para as leis da natureza. Esse é o ponto fraco de todo o paradigma de “unificação”.

↓	1) Observações, fenômenos complexos, infinidade de objetos,	↑
Reduções sucessivas	2) Organização em termos de conceitos empíricos	Introdução de detalhes conceitos “úteis”
↓	3) Leis empíricas—noção de objetos compostos	↑
O fim a redução completa	4) As leis empíricas podem ser expressas como relações formais	Especialização
	5) Poucos objetos simples, leis mais gerais	↑
	6) Abstrações, matematização, idealização, generalização	O problema inverso: da redução à composição
	7) Objetos simples irreduzíveis, conceitos e relações universais, leis	

Tabela 2: Seqüências do reducionismo vs composição.

Essa posição começa a mudar. Um exemplo radical é o de Georgi que afirma [GE89a]:

It is true that in chemistry and biology one does not encounter any new physical principles. But the systems on which the old principles act differ in such a way drastic and qualitative way in the different fields that it is simply not useful to regard one as a branch of another. Indeed the system are so different that ‘principles’ of new kinds must be developed, and it is the principles which are inherently chemical or biological which are important.

In the same way, to study phenomena at velocities much less than c and angular momentum much greater than \hbar , it is simply not useful to regard them as special cases of phenomena for arbitrary velocity and angular momentum. We do not need relativity and quantum mechanics for small velocity and large angular momenta...if we had to discover the laws of relativistic quantum mechanics from the beginning, we probably would never have gone anywhere.

Nenhuma forma de estudar a natureza é comparável à pesquisa científica a partir (principalmente) de Galileu. Entendemos quantitativamente os fenômenos. Isso faz, entre outras coisas, a diferença entre nossos átomos e os de Demócrito. Entender quantitativamente os fenômenos diz respeito a que podemos fazer predições

quantitativas que podem ser confirmadas ou não pela experiência.⁷ Sem estas últimas não podemos dizer se uma teoria é correta ou não. Claro, as coisas não são tão simples como parecem uma vez que podem existir segundo os dados experimentais várias teorias possíveis. Aqui a simplicidade é útil. Mas apenas isso, útil, não definitiva. Assim, a divisão aristotélica de movimentos *naturais* e *não naturais* não passa de uma descrição cuja plausibilidade não pode ser testada. Mesmo que a física moderna fizesse uso de tais conceitos (como o faz do átomo) devemos distinguir uma opinião de uma pesquisa metodológica (mais ou menos) bem definida. Neste sentido, a referência aos átomos de Demócrito é apenas anedótica.

É bom lembrar ainda que físicos como Newton e Faraday tinham em mente uma “teoria final”, agora sabemos que o contexto teórico e experimental da época era bem restrito para tal efeito. Isso é mais um exemplo de que o método científico (qualquer coisa que isso signifique) não é suficiente para explicar as motivações, as escolhas e os preconceitos dos cientistas. Assim, acreditamos que a quantidade de especulação é restrita por fatos além das opiniões da comunidade científica e *a priori* não está bem definida.

Os exemplos da teoria geral da relatividade e da predição da radiação de fundo são exemplos de extrapolações que deram certo e isso motivou a extrapolação dos resultados teóricos além das possibilidades de verificação experimental. Mas, quantas extrapolações falharam? No mínimo para sermos consistentes com a es-

⁷ Não pretendemos que todos os aspectos de uma teoria tenham que ser testados pela experiência. Esta era a posição dos positivistas. As teorias segundo eles têm de estar baseadas *apenas* em observáveis.

tatística devemos considerar isso quando fizermos escolhas pessoais sobre o tema de pesquisa. O caso contrário também acontece. Achar que tudo já é conhecido e que não há mais espaço para especulações. É bem conhecida a opinião no final do século pasado (atribuída a Lord Kelvin) e mesmo no começo deste século (como Michelson) sobre o fato que tudo que tinha de ser descoberto já o tinha sido feito. Assim, podemos nos perguntar se a luta de Einstein é ainda a nossa. Não no sentido escolástico no qual não temos a menor dúvida que é. Mas no sentido de uma escolha pessoal da linha de pesquisa de um(uma) jovem cientista.

Que existe um sentido nas explicações não há dúvida: as leis de Newton explicam as de Kepler, as de Einstein as de Newton, etc. O ponto é, se esse sentido é único ou, existem ramificações? Quando uma teoria final no sentido

... → moléculas → átomos → núcleos → núcleons →
quarks → ...

for obtida, ainda fenômenos como a turbulência e supercondutividade a altas temperaturas, a irreversibilidade e outros fenômenos precisarão ser explicados e, qualquer coisa que esteja para além dos quarks poderá não ser importante para isso.

Se podemos dizer que as verdades mais fundamentais são aquelas mais abrangentes devemos, no entanto, aceitar que existem verdades fundamentais “horizontais” (“extensivas” no sentido de Weisskopf), isto é, não fazem parte de uma mesma cadeia de explicações em ordem crescente da escala de determinadas grandezas (massa, velocidade ou energia). Assim, as leis de Newton podem ser mais fundamentais que as de Kepler e as de Einstein, por sua vez, mais fundamentais que as de Newton. Mas, será que isso ajudaria na compreensão das propriedades do DNA? Será que apenas seria necessário um grande computador para explicar essas propriedades resolvendo equações da mecânica quântica para os elétrons e os núcleos? Talvez não. Do contrário teríamos voltado ao mecanicismo pre-Maxwell, apenas substituindo a mecânica clássica pela quântica. Podem existir questões que não possam ser resolvidas com as nossas ferramentas atuais, teóricas e/ou experimentais.

Alguns fatos, como a origem da vida, parecem ser devidos a acidentes históricos. Se, contudo, algum dia as condições iniciais passassem a ser parte das leis da física isso pode ser feito não necessariamente no sentido átomo → núcleon ... mas, mesmo com fenômenos macroscópicos. Novos princípios que não contradigam as leis microscópicas poderão encontrar novas generalidades não deduzíveis daqueles.

Por exemplo, a universalidade do caos é suficientemente abrangente e não depende (por enquanto) de leis

mais gerais em escalas menores. É este tipo de universalidade que acreditamos existir em diferentes níveis de organização independentes uns dos outros. Por outro lado, atualmente existem teorias tão especulativas (a teoria dos “baby universes” e outras) não completamente formuladas matematicamente e sem suporte experimental (mesmo a longo prazo) que podemos até compará-las com a situação *grega* mencionada antes, isto é, as hipóteses não podem ser confirmadas nem falsadas.⁸

Não é óbvio que vai acontecer com o caos o que aconteceu com a termodinâmica. Esta começou como ciência autônoma mas foi depois fundamentada na mecânica estatística. Muito menos óbvio é o caso da biologia ou do problema da consciência [HO94, PE94]. Ainda que a mecânica estatística “explica” a termodinâmica apenas no sentido que a incorpora.⁹

Mas devemos ser críticos também com relação a essas posições. É verdade que não adianta muito para os químicos saber que a matéria é formada por quarks. Mas de alguma maneira esse conhecimento é subjacente a toda a química. Gostemos ou não. Na prática nossos métodos teóricos são muito limitados. É sempre difícil considerar as situações limites como aquele entre a mecânica quântica e a clássica, ou como diz Georgi acima, entre a mecânica relativista e a não-relativista. Mas essas dificuldades devem ser vistas como limitações nossas e não são únicas nessas áreas.

Acontecem mesmo na mecânica clássica não-relativista. Por exemplo, sabemos que as diferentes maneiras de formular a mecânica clássica como 1) leis de Newton, 2) princípio de D’Alembert, 3) princípio dos deslocamentos virtuais, 4) princípio de Gauss, 5) princípio de Hamilton, 6) princípio de ação mínima, 7) coordenadas generalizadas e equações de Lagrange, 8) equações canônicas de Hamilton, 9) equações de Hamilton-Jacobi e teoria das transformações. Todos estes formalismos são completamente equivalentes no sentido que, qualquer problema de mecânica clássica pode, em princípio, ser resolvido por qualquer um desses métodos. (Na prática porque todos levam às equações de Newton.) Às vezes, alguns deles são mais ou menos apropriados para um problema particular. Outro têm a vantagem de permitir uma apreciação mais profunda dos sistemas dinâmicos. Finalmente, alguns deles são mais apropriados na respectiva extensão quântica [LO87]. Contudo, nem toda informação é a mesma em cada um destes formalismos. Por exemplo, com relação às simetrias e leis de conservação. A conservação da energia, momento linear e momento angular aparecem em qualquer dos formalismos acima mencionados. Mas, em geral as leis de conservação podem

⁸ Isto não quer dizer que acreditemos que “apenas os fatos falam”. Isso não é bem assim [FE77]. Mas se o método experimental é necessário, não é suficiente.

⁹ As críticas a Boltzmann estavam corretas porque apenas a mecânica quântica permitiria uma formulação coerente das leis estatísticas mas ela não era conhecida nos primeiros anos do século [KU87].

ser diferentes. As simetrias do sistema são diferentes quando se usam as equações do movimento ou a Lagrangeana. Qual delas seria mais fundamental? Lembremos que algumas equações do movimento não têm uma Lagrangeana ou Hamiltoniana correspondente. Não existem respostas definitivas dentro dos nossos conceitos teóricos atuais para esse tipo de pergunta. Nem por isso achamos que eles não descrevem a mesma mecânica clássica.

Por outro lado, devemos lembrar que algumas ciências são por natureza própria *globais* por exemplo as chamadas *Ciências da Terra* [BR92]. Nesta nova síntese a Terra é considerada como sendo um *sistema* cuja dinâmica regê-se por causas múltiplas que se ligam e regulam entre si [AL88]. A moral da história é que Terra não pode ser tratada de jeito nenhum de maneira reducionista. Constitui um problema suficientemente geral.¹⁰

VII Caos: leis fundamentais?

A ferramenta em física de partículas elementares para a extrapolação das leis de uma determinada escala para escalas menores é o *grupo de renormalização* [WI83]. Sabemos, então, como extrapolar leis conhecidas a uma determinada escala de distâncias para escalas menores. Porém, se novas leis serão descobertas no futuro, e não vemos nenhum princípio geral que o proíba, então deveremos ir atualizando nossas extrapolações. Assim, qualquer afirmação relativa ao futuro do universo como um todo deve ser entendida apenas como uma predição dos nossos conhecimentos *atuais* das leis fundamentais. Essas afirmações mudarão quando novas leis fundamentais sejam descobertas nas escalas intermediárias ou mesmo na direção horizontal. Quem poderia ter previsto a descoberta da radioatividade? Ou a mecânica quântica poderia ter sido postulada apenas por métodos formais? Além disso, tudo está baseado numa hipótese que mesmo razoável poderia não ser verdadeira: a que as leis da natureza foram sempre as mesmas. Claro, não existe uma proposta razoável para uma possível variação temporal dessas leis. A proposta de Dirac, que as constantes da natureza podem variar com o tempo não foi confirmada até agora e pode não ser a mais interessante [DI37].

Devemos perceber que, se nem a argúcia nem a estupidez são previsíveis muito menos o são as futuras descobertas teóricas e/ou experimentais. De qualquer forma, a Natureza é mais imaginativa do que nós. A elegância matemática não é suficiente. Podemos imaginar quais seriam as estruturas matemáticas

se os físicos do século passado tivessem tentado unificar, mais ou menos no sentido que conhecemos hoje, a eletrodinâmica de Neumann e Weber com a gravitação de Newton? Nessa eletrodinâmica as forças eletromagnéticas se propagam de um corpo a outro com velocidade infinita. Teriam resistido essas estruturas matemáticas às descobertas experimentais do final do século XIX? É bem provável que não. De fato, é interessante observar que Faraday queria mostrar que o eletromagnetismo estava relacionado com a gravitação [HO94]. Isso mostra, repetimos, que as motivações pessoais dos cientistas não tem nada a ver com os resultados reais obtidos. Faraday ficou longe de atingir seu desejo. Mas, visto retrospectivamente, será que precisava dele?

Em 1950 John Von Neumann construía seu computador *Johnniac* (*sic*). Acreditava Von Neuman que a meteorologia seria a área principal do uso dos computadores [DY88]. Segundo Von Neumann os fenômenos meteorológicos eram de dois tipos: os *estáveis* e os *instáveis*. Os primeiros são aqueles que suportam pequenas perturbações, os segundos não. Porém, assim que os computadores estivessem funcionando todos os problemas relativos à predição do tempo seriam resolvidos. Todos os processos estáveis seriam previstos e os instáveis controlados.

Von Neumann não imaginou que não é possível classificar o deslocamento de fluidos em previsíveis e controláveis. Não previu a descoberta do *caos determinístico* [RU93]. Este fenômeno é caracterizado por uma dependência hipersensível às condições iniciais, quaisquer que sejam estas condições. Isso quer dizer que neste tipo de sistemas, pequenas perturbações implicam grandes efeitos a longo prazo.

O movimento regido pelas leis da mecânica newtoniana é determinado sem ambigüidade pela condição inicial, no entanto, existe, em geral, uma limitação na predição de sua trajetória. Temos então, ao mesmo tempo determinismo e imprevisibilidade a longo prazo. O que define um sistema dinâmico é uma evolução temporal determinista bem definida. Talvez seja interessante observar que toda a física desde os gregos até poucos anos atrás foi baseada na geometria clássica (euclídeana ou não) na qual os elementos básicos das formas são as linhas, planos, círculos, esferas, cones, etc. No entanto a geometria *fractal* [MA77] parte de um universo mais parecido ao real: irregular e áspero. Podemos nos perguntar quais seriam as leis básicas se este tipo de geometria fosse o paradigma desde o começo. Será que o caos, seria um fato incorporado

¹⁰As suas leis poderão ser verificadas em planetas diferentes da Terra quando forem estudados. Recentemente foram encontradas evidências de que no planeta Marte houve inversões do campo magnético o que implicaria uma tectônica de placas semelhante à da Terra [CO99b].

nas próprias leis do movimento, em vez de sê-lo nas condições iniciais, como ocorre quando consideramos as leis de Newton? De qualquer forma o caos e a geometria fractal da natureza é a vingança de Simplício sobre Sartori [GA85]. O movimento real não é tão simpels como acreditava Galileu. (Este é mais um exemplo de que a escolha de teorias ou resultados tem um caráter histórico. A teoria de Galileo se mostrou frutífera enquanto que a visão global não o foi. Mas acabariam se encontrando!)

Do ponto de vista conceitual a descoberta do caos é uma revolução como o foram as teorias da relatividade e a mecânica quântica. No entanto trata-se de fenômenos de grandes escalas, inclusive com relação à escala humana. Assim, vemos que este poderia ser um exemplo de que as “leis fundamentais” aparecem não necessariamente quando estudamos processos característicos de dimensões cada vez menores. Um aspecto a ser levado em conta é a “universalidade” de qualquer coisa que possamos chamar de “lei fundamental”.

A dependência hipersensível das condições iniciais foi descoberta no final do século XIX por Jacques Hadamard. Contribuições importantes foram feitas por Duhem e Poincaré. No entanto apenas com o advento dos computadores rápidos foi possível fazer um estudo quantitativo rigoroso. Assim, podemos dizer que a colocação do caos como um novo paradigma é um feito que começou na década de 60. Isso significa que foram precisos mais de três séculos para que novas fenômenos com suas respectivas leis fossem descobertos “dentro das leis fundamentais” de Newton. Neste sentido, poderíamos comparar as experiências realizadas a altas energias como equivalentes à experiência de Cavendish: apenas estão tentando descobrir generalidades sobre leis fundamentais. O estudo detalhado fica como tarefa para as próximas décadas (séculos ?).

Assim, voltando a von Neumann, ele não imaginou que em alguns anos seria descoberto que o movimento caótico que geralmente é imprevisível e incontrollável é que é a regra não a exceção. Vemos então, e poderíamos dar muitos mais exemplos, que a predição é pequena mesmo para mentes como as de Von Neumann.

VIII Que biologia é essa?

Nos dias de hoje é freqüente escutar que “assim como a física foi a ciência do século XX a biologia será a ciência do século XXI”. De fato, da década de 50 para cá os avanços na biologia molecular são impressionantes. Atualmente os projetos de seqüenciamento dos genomas de vários organismos, em particular o projeto Genoma Humano [TE99, JA99] permite visualizar um sem fim

de aplicações da genômica nas áreas da saúde e agropecuária. Até tem sido dito que os físicos deveriam fazer biologia. Afortunadamente, quando a física estava realizando as suas hoje famosas descobertas nas três primeiras décadas deste século os biólogos continuaram ... a fazer biologia! Um fato, no entanto, deve ser enfatizado. A biologia realizando essa espetacular revolução fica menos biologia no sentido tradicional. Ela está se convertendo cada vez mais em uma ciência quantitativa como a química e a física. A matemática e a informática são cada vez mais imprescindíveis para continuar o seu desenvolvimento. Sem os programas sequenciadores não teria sido possível realizar os projetos Genoma. Craig Venter, da Celera Genomics, está instalando o segundo maior conglomerado de computadores do mundo (somente inferior ao do Departamento de Energia dos Estados Unidos) [TE99]. Segundo Leroy Hood “a biologia se tornou informação”, metade dos cientistas que trabalharão no instituto que ele está montando na Universidade de Seattle serão matemáticos, físicos, cientistas da computação e químicos [TE99]. O genoma humano não diz como os 100 mil genes trabalham juntos para formar o organismo humano. A compreensão disso é uma tarefa que não pode ser levada adiante somente pelos biólogos. Esse é um empreendimento multidisciplinar no qual os físicos poderão fazer contribuições importantes. Não apenas eles, para entender o modo como as diferentes partes de qualquer genoma interagem entre si serão necessários não apenas computadores cada vez mais rápidos e programas cada vez mais sofisticados, o que dá origem a uma nova área, a *bioinformática*, mas também será necessário construir modelos matemáticos e estatísticos, compreender melhor a interação entre as moléculas, tarefa para químicos.

De fato a influência dos físicos em outras áreas das ciências fica evidente quando vemos que: G. Mendel estudou física em Viena antes de ir ao mosteiro onde faria as suas hoje famosas experiências; neste século os seguintes físicos se destacaram em outras áreas: E. Rutherford, ganhou o prêmio Nobel de Química em 1908 por conseguir o que os alquimistas não conseguiram: a transmutação dos elementos; M. F. Perutz, ganhou o prêmio Nobel de Química em 1962 pelos seus estudos da estrutura das proteínas globulares. No mesmo ano F. H. C. Crick, ganhava o prêmio Nobel de Fisiologia e Medicina pela descoberta da estrutura da dupla hélice do DNA. Em 1962 foi a vez de M. Delbrück, discípulo de Niels Bohr, de ganhar esse prêmio pela descoberta do mecanismo de replicação e a estrutura genética dos vírus (em física temos o espalhamento Delbrück). W. Gilbert ganhou em 1980 o prêmio Nobel de Química pelos estudos da bioquímica dos ácidos nucleicos em

particular do DNA recombinante (em física é conhecido por sua demonstração do teorema de Goldstone) e apenas para citar o mais recente, em 1998 o prêmio Nobel de química teve um físico entre os ganhadores, W. Kohn pelas suas contribuições à química computacional. E que dizer da influência que teve o pequeno grande livro de Schrödinger, *What is life?* [SC45]. Sim, alguns físicos fizeram e continuarão a fazer biologia, mas a formação tradicional de biólogos (e médicos e outras carreiras afins) terá de ser reformulada.

IX Computação quântica

As contribuições dos físicos à área da computação têm sido também impressionantes. E não devemos esquecer que isso foi obtido sem ter como motivações com aplicações que posteriormente apareceram. A World Wide Web (WWW) foi desenvolvida no CERN (usando a já 25 anos idosa Internet) com outras finalidades [BI99]. A revolução somente aconteceu, no entanto, quando foi desenvolvido o Mosaic no NCSA (National Center for Supercomputer Applications)

Todas as áreas sem exceção têm sido influenciadas pela revolução da informática. Isso continuará ocorrendo sempre que a capacidade de tratar informação aumenta. No entanto, o crescimento da rapidez dos computadores está associado a uma maior capacidade de miniaturização. Aqui vale lembrar que o ponto de partida de tudo foi a descoberta do efeito transistor [AD76]. Mais ainda, o primeiro transistor tinha dimensões macroscópicas e seu preço era da ordem de US\$ 1. Daí para cá por esse preço podem-se comprar milhões deles! Foi isso que permitiu a revolução da informática não prevista mesmo por von Neumann (veja discussão na Seção VII).

De fato a densidade de transistores em cada chip aumentou exponencialmente nos últimos 24 anos. Manter esse ritmo nos próximos anos implicará em confrontar, em algum momento, as barreiras da mecânica quântica. Toda a ciência e a tecnologia nanométrica é dominada pelos efeitos quânticos. A escrita de dimensões nanométricas está cada vez mais desenvolvida [HO99]; as suas aplicações vão desde a química (onde as técnicas poderiam ser usadas para controlar a distância entre os reagentes numa reação química) até dispositivos eletrônicos com dimensões moleculares. A ciência aplicada chega cada vez mais perto da ciência básica. Neste domínio os fenômenos quânticos serão cada vez mais importantes.

Assim entender melhor essa estranha e bela teoria será um dos mais importantes temas que a física vai brindar ao resto das ciências e, em geral, a todas as

outras formas das atividades humanas. Por outro lado e não menos espetacular será o controle da computação quântica [PR99].

A maioria das áreas do conhecimento puderam ter grande desenvolvimento nos últimos anos apenas pelos avanços na informática e esta contou e continuará a contar, direta ou indiretamente, com a participação dos físicos. É por isso que muitos físicos continuarão a fazer física e muitos biólogos passarão a pensar cada vez mais ... como físicos! A física está longe de estar esgotada [DA99].

X Síntese versus diversidade

Algumas vezes a física se encontra em situações de síntese, enquanto na maior parte das vezes é a diversidade que prevalece. De fato, a diversidade é uma característica das ciências desenvolvidas.

Segundo Dyson [DY88] por períodos longos as diversas ciências permanecem dominadas pela *concretitude*. Por exemplo, na maior parte do século XIX e nas décadas posteriores aos anos 30 deste século. Em outras ocasiões, é a *abstração* que domina. Os pesquisadores de uma época determinada não podem escolher entre qual a tendência que domine. Isso está definido por fatores externos e, muitas vezes pelo acaso. Depois das revoluções da mecânica quântica e relatividade restrita e geral, como poderíamos esperar o desenvolvimento de esquemas teóricos mais gerais ainda num breve período de tempo?

No entanto, progressos importantes foram conseguidos no período de 1960-1980. O chamado *modelo padrão* das interações eletrofracas e fortes foi uma conquista do ponto de vista da teoria quântica de campos, acrescentadas de descobertas teóricas como a *liberdade assintótica* e o *mecanismo de Higgs* mencionados antes. A partir daí, uma série de extrapolações dessas estruturas levaram a maioria dos físicos a pensar que a síntese final estaria chegando ao fim. Isso fica evidente nas palavras de Hawking citadas anteriormente.

De fato foi a visão de Dirac dominou a física nas décadas passadas. Em 1970 Léon van Hove dizia [SC93]:

... *physics now look more like chemistry in the sense that...a much larger fraction of the total research deals with complex systems, structure and processes, as against a smaller fraction concerned with the fundamental laws of motion and interactions...we all believe that the fundamentals of classical mechanics, of the electromagnetic interaction, and of statistical mechanics dominate*

the multifarious transitions and phenomena you discuss this week; and I assume that none of you expects his work on such problem to lead to modifications of these laws. You know the equations more than the phenomena...

Agora sabemos que não foi bem assim. Novas leis fundamentais estavam sendo descobertas pelos teóricos e em pouco tempo testadas pelos físicos experimentais. (Lembremos do caos na mecânica clássica.) No fundo, temos a esperança que isso aconteça de novo. É, no entanto, pouco provável a curto prazo. No paradigma das teorias de grande unificação, supersimetria e supercordas, o problema é que as predições não ambíguas destas teorias só ocorrem para escalas que dificilmente serão atingidas pela física experimental em curto prazo. A possibilidade seria uma mudança de paradigma. Porém, não há nenhuma proposta teórica que traga uma luz nesse sentido. Mas, como dissemos antes, a natureza é mais esperta do que nós.

A ciência progride lentamente sem se importar com nossas pressas e angústias. Em 1896, ou seja antes da descoberta do núcleo atômico e da mecânica quântica, Emil Wiechert disse [DY88]:

A matéria que supomos ser o principal componente do universo é formada por tijolos independentes, os átomos químicos. Nunca será demais repetir que a palavra “átomo” está hoje em dia separada de qualquer especulação filosófica antiga: sabemos precisamente que os átomos com os quais estamos lidando não são em nenhum sentido os mais simples componentes concebíveis do universo. Ao contrário, diversos fenômenos, especialmente na área da espectroscopia, levam à conclusão de que os átomos são estruturas bastante complexas. Até onde vai a ciência moderna, devemos abandonar por completo a idéia de que penetrando no limiar do pequeno conseguiremos alcançar as fundações finais do universo. Acredito que podemos abandonar essa idéia sem nenhum remorso. O universo é infinito em todas as direções, não apenas acima de nós, na grandeza, mas também abaixo de nós, na pequenez. Se partirmos da nossa escala humana de existência e explorarmos o conteúdo do universo além e além, chegaremos finalmente, tanto no reino do pequeno quanto no reino do grande, a distâncias obscuras onde primeiro nos nossos sentidos e depois nossos conceitos nos falharão.

Depois disso fica difícil entender as palavras de Mach acima! Definitivamente os físicos hoje em dia não pensam mais como Mach. Por exemplo, é interessante a posição de Dyson [DY88]:

...a Natureza é complexa. Já não é mais nossa a visão que Einstein conservaria até sua morte, de um mundo objetivo de espaço, tempo e matéria, independente do pensamento e da observação humanos. Einstein esperava encontrar um universo dotado do que chamava ‘realidade objetiva’, de um universo de picos montanhosos que ele poderia compreender por meio de um conjunto finito de equações. A natureza, como em fim se descobriu, vive não nos cumes elevados, mas nos vales lá embaixo.

Este tipo de posicionamento ainda que mais freqüente na atualidade, não é majoritário.

Sabe-se agora que há milhares de teorias de supercordas que são matematicamente consistentes da mesma maneira que as duas teorias de Green e Schwarz. Esta consistência matemática é garantida pela invariância conforme. A menos que seja mostrado que essa diversidade de teorias são equivalentes, a única e importante consequência das teorias de supercordas é que as simetrias do espaço-tempo e internas não são colocadas a mão. De fato, em 1985 já se tinham reduzido a 5 as teorias de supercordas diferentes. Logo depois, a introdução de um novo tipo de simetria chamada de *dualidade-S* (o exemplo clássico é a dualidade dos campos elétrico e magnético) reduz a apenas 3. Mais recentemente, com a descoberta de novas dualidades as 5 de supercordas em 10 dimensões e uma teoria de campos em 11 dimensões são consideradas apenas a manifestação de apenas uma teoria-*M*, ainda que não exista uma formulação completa desse tipo de teoria [BE99, DU98, HI95]. O problema é que “no one knows how to write down the equation of this theory” [WE99]. De qualquer forma, o limite de baixas energias tem de ser escolhido antes. Por exemplo, se for confirmado um modelo que inclua o modelo padrão (de maneira unificada ou não) então deve haver uma teoria de supercordas cujo limite de baixas energias seja esse modelo e não outro. (Um das teorias de Green e Schwarz tem um limite de baixas energias perto do modelo padrão. Mas até o momento não foi encontrada uma teoria que reproduza a baixas energias os quarks e léptons conhecidos.) Mesmo que alguém descobrisse qual é essa teoria de supercordas, não saberíamos explicar porque esta teoria é a que descreve o mundo real. O

objetivo da física não é apenas descrever o mundo mas explicar porque ele é como é [WE93a].

Devemos portanto dar maior importância aos detalhes. Por exemplo, não é qualquer conjunto de equações diferenciais parciais que descreve o campo eletromagnético. São apenas as equações de Maxwell que o fazem. Da mesma maneira não é qualquer teoria não-Abeliana que descreve as interações de quarks e léptons. Em ambos casos, as equações de Maxwell e o modelo padrão, sempre podemos estudar maneiras de generalizá-los. Mas, não será qualquer generalização que será seguida pela natureza.

Mesmo que dispuséssemos de uma teoria de supercordas realística, que explicasse tudo o que o modelo padrão deixa em aberto (as massas dos férmions por exemplo) ainda teríamos que explicar porque essa teoria e suas hipóteses importantes são escolhidas pela natureza. Em outras palavras, é mais provável que essa teoria de supercordas precise de princípios ainda mais profundos para ser explicada.

Usualmente Einstein é considerado como um dos defensores da procura de leis unificadas da natureza. No entanto, ele via isso, pelo menos num período da sua vida, como um processo sem fim. Em 1917 ele escreveu para Felix Klein [PA82]:

However we select from nature a complex [of phenomena] using the criterion of simplicity, in no case will its theoretical treatment turn out to be forever appropriate (sufficient). Newton's theory, for example, represents the gravitational field in a seemingly complete way by means of the potential ϕ . This description proves to be wanting; the functions $g_{\mu\nu}$ take its place. But I do not doubt that the day will come when that description, too, will have to yield to another one, for reason which at present we do not yet surmise. I believe that this process of deeping the theory has no limits.

Klein escreveu para Einstein nesse mesmo ano falando sobre a invariância conforme na eletrodinâmica. Einstein respondeu [PA82]:

*It does seem to me that you highly overrate the value of formal point of view. These may be valuable when an **already found** truth needs to be formulated in a final form, but fail almost always as heuristics aids.*

Segundo Pais [PA82]:

Nothing is more striking about the later Einstein than his change of position in re-

gard to this advice, give when he was in his late thirties.

Quer dizer que segundo esta visão inicial de Einstein, a cadeia de explicações em termos de princípios cada vez mais gerais e profundos, não teria fim. Assim, uma teoria de tudo não seria possível. Por outro lado, segundo Weinberg [WE93a], o fato que nossos princípios têm se tornado mais simples e econômicos, poderia indicar que *deva* haver uma tal teoria. No entanto, o que queremos enfatizar aqui não é se concordamos ou não com as posições do tipo das de Weinberg. Queremos, então colocar é se a nossa compreensão da estrutura íntima da matéria será, em última instância, melhorada se dedicarmos mais esforços à física de 1 TeV ou à da escala de Planck (10^{19} GeV) ou, mesmo se novas leis “macroscópicas” poderão ser de utilidade na compreensão última do universo.

Uma “teoria de tudo” não seria eficaz com relação ao problema da complexidade organizada existente na natureza. De fato, é possível que as leis que regem a complexidade e que seriam válidas para qualquer sistema complexo, incluindo o universo, não sejam do tipo das leis da natureza conhecidas até o momento [BA94].

Pesquisar os detalhes de “vales e montanhas”, para usar a analogia de Dyson, pode ser mais interessante que pesquisar os picos. No mínimo vai se encontrar coisas diferentes e não menos importantes. Pior, não temos escolha. Se precisamos pesquisar detalhes ou não, depende do desenvolvimento de uma determinada ciência. Os vales não são apenas um ponto de referência para medir a altitude dos picos. Eles têm a sua própria diversidade, suas próprias leis e metodologia. Suas próprias surpresas. Não devemos ter medo de que a física, pelo momento, se torne uma botânica ou uma química. Depois, uma nova ordem geral virá. De novo podemos chamar a atenção aqui para a tectônica de placas. Por muitos séculos os estudos da Terra eram “chatos”. Procurava-se classificar as rochas, as diversas épocas geológicas! Mas sem essa fase aborrecida não teríamos a síntese atual.

Apenas agindo podemos ver o que realmente acontecerá. Devemos *participar* do processo científico. É por isso que a decisão pessoal mencionada acima é importante. Não é apenas uma questão de opinião. Segundo a decisão tomada seguiremos um ou outro caminho na nossa pesquisa e segundo esse caminho poderemos ser melhor ou pior sucedidos. Melhor, se acreditamos que o processo científico, longe de acabar, está apenas começando devemos tornar-nos participantes dele o quanto antes.

Se ainda é o sonho de alguns físicos a formulação de uma teoria que unifique todas as interações conhe-

cidas [GE89a], devemos ter sempre presente que uma teoria de tudo é em princípio impossível. Toda teoria tem sua componente fenomenológica, aspectos que não podem ser calculáveis usando os conceitos da mesma teoria. Todas as teorias são e serão aproximadas, estaremos sempre numa procura sem fim. E isso é, certamente, empolgante.

Nos últimos anos a nossa compreensão da teoria quântica de campos mudou consideravelmente. A descrição das partículas em teoria quântica de campos depende da energia na qual estudamos essas interações. Assim todas as teorias podem ser consideradas como *teorias efetivas*, levando em conta apenas as partículas relevantes na escala de energia considerada.

Este é uma realização do fato que podemos estudar fenômenos ou processos físicos apenas num intervalo limitado de energia. Aparecem infinitos pela exigência de *localidade* que significa que a criação e/ou aniquilação de partículas ocorre num ponto do espaço-tempo. O processo de *renormalização* foi interpretado até recentemente como uma maneira de absorver os infinitos nos parâmetros físicos. Isto é, introduzindo um *cut-off* Λ e modificando a teoria para distâncias menores que Λ^{-1} , aparecem apenas quantidades passíveis de serem medidas experimentalmente como a massa e a carga elétrica. Finalmente faz-se $\Lambda \rightarrow \infty$. A teoria fica independente do *cut-off*. Segundo Dirac, que nunca aceitou o processo de renormalização, a física teórica tomou um pista errada com esse desenvolvimento. Hoje em dia essa visão (de Dirac) é considerada muito restrita. Afinal a eletrodinâmica quântica é apenas uma parte do modelo eletrofraco que certamente é parte de uma teoria mais abrangente. O problema dos infinitos será resolvido quando tivermos uma teoria final mas não sabemos quando, como e que forma terá, quando for encontrada. Este caso é interessante para refletir. Às vezes os problemas apenas existem porque estamos supervalorizando nossos objetos de estudo. Por exemplo, Kepler propôs um modelo das órbitas dos planetas baseado em simetrias. Agora sabemos que as simetrias fundamentais não aparecem nesse tipo de sistemas. Assim a proposta de Kepler era interessante, mas aplicada ao problema errado. Os planetas não são mais objetos fundamentais para a formulação de teorias físicas básicas. Esta discussão parece banal mas não é. Muitas escolhas de estudantes ou mesmo de pesquisadores serão feitas segundo o aspecto que valorizam na pesquisa. Isto é, o que seja considerado um problema importante. Se alguém concorda com Dirac que “a eletrodinâmica quântica atual não corresponde ao elevado padrão de beleza matemática que seria de esperar de uma teoria física fundamental” e tentar modificar *apenas* a QED poderá encontrar problemas insolúveis

mesmo para mentes bem preparadas e privilegiadas.

As teorias de grande unificação tentavam esclarecer melhor o modelo padrão. Por exemplo dar resposta ao problema da quantização da carga e tentar calcular o ângulo de mistura eletrofraco ($\sin\theta_W$). Certamente não foram propostas como continuação das idéias de Einstein [GE89a]. Segundo Georgi:

Einstein's attempts at unification were rearguard action which ignored the real physics of quantum mechanical interactions between particles in the name of philosophical and mathematical elegance. Unfortunately, it seems to me that many of my colleagues are repeating the Einstein's mistake.

The progress of the fields is determined, in the long run, by the progress of experimental physics. Theorists are, after all, parasites. Without our experimental friends to do the real work, we might as well be mathematicians or philosophers. When the science is healthy, theoretical and experimental particle physics track along together, each reinforcing the other. But there are often short period during which one or other aspect of the field gets away ahead. Then theorists tend to lose contact with reality ...During such periods without experiments to excited them, theorists tend to relax back into their grounds states, each doing whatever come most naturally. As a result, since different theorists have different skills, the field tends to fragment into little subfields. Finally, when the crucial ideas or the crucial experiments come along and the field regains its vitality, most theorists find that they have been doing irrelevant things...But the wonderful thing about physics is that good theorists don't keep doing irrelevant things after experiment has spoken. The useless subfields are pruned away and everyone does more or less the same thing for a while, until the next boring period.

Segundo Heisenberg [HE93], em física teórica podem-se, i) formular teorias fenomenológicas, ii) esquemas matemáticos rigorosos, ou iii) usar a filosofia como guia. No primeiro tipo ficam as pesquisas de Heisenberg e o grupo de Sommerfeld (Pauli, Landé, Höln e outros). Eles inventavam fórmulas que reproduzisse os experimentos. No entanto, mesmo quando bem sucedidas essas teorias fenomenológicas não fornecem nenhuma informação real sobre o conteúdo físico

do fenômeno [HE93]. Às vezes os cálculos feitos com ambos esquemas coincidem. Isto não é de se estranhar. A equivalência pode ser matemática mas não física.

No entanto, às vezes resultados rigorosos também levam a resultados em discordância do observado. Isto é, eles têm também limitações. A tese de doutorado de Heisenberg versou sobre o cálculo da estabilidade de um fluxo entre duas paredes fixas. O resultado foi que para um certo número de Reynolds o fluxo torna-se instável e turbulento. Um ano depois E. Noether mostrou rigorosamente que o problema de Heisenberg não tinha solução: o fluxo devia ser estável em toda parte. Outro exemplo mais recente sobre as limitações das demonstrações gerais é o do mecanismo de Higgs, que nada mais é do que uma evasão do teorema de Goldstone. Este fôra recebido com descrença por muitos teóricos pois o teorema de Goldstone tinha sido mostrado rigorosamente pelos axiomáticos. Antes do seminário que daria em Princeton, Higgs conta, segundo Klaus Hepp,

... what I going to say must be nonsense because axiomatic field theorist had proved the Goldstone theorem rigorously using the methods of C^ -algebras. However, I survive questions from Arthur Wightman and others, so I conclude that perhaps the C^* algebrists should look again [HI91].*

No dia seguinte Higgs deu um seminário em Harvard. Segundo Sidney Coleman ele teria dito que ele e seus amigos “had been looking forward to some fun tearing to piece this idiot who thought he could get round the Goldstone Theorem” [HI91]. Agora sabemos que não foi bem assim!

Heisenberg disse que nunca se soube onde estava o erro na demonstração de Noether mas em 1944 (vinte anos depois) Dryden e colaboradores fizeram experiências precisas do fluxo laminar entre duas paredes e da transição para a turbulência e descobriram que os cálculos de Heisenberg estavam em concordância com a experiência. Lin do MIT simulou a experiência (von Neumann sugeriu usar computadores) e confirmou de novo os resultados de Heisenberg. Poderíamos colocar outros exemplos, mas esses são suficientes para mostrar as limitações dos métodos matemáticos rigorosos. Devemos lembrar, para fazer justiça que com os métodos fenomenológicos somos obrigados a usar sempre os velhos conceitos mesmo para uma situação nova. Bom, isto quer dizer que qualquer que seja o método usado na pesquisa teórica apenas quando verificado experimentalmente ¹¹ podemos dizer que a teoria funcionou. Também devemos enfatizar que o passo decisivo é sem-

pre descontínuo. Isso aconteceu, por exemplo, com a mecânica quântica [HE93].

A filosofia como guia da pesquisa teórica teve seu apogeu com o positivismo. Mach, e depois o círculo de Viena (recentemente teóricos como Chew), insistiram que uma teoria devia ser formulada em termos de quantidades observáveis [CA79]. Mach, e muitos dos seus contemporâneos, acreditava que os átomos eram apenas uma questão de conveniência, não acreditavam na existência real deles. Einstein fôra influenciado por esta visão no começo da sua carreira mas logo mudou de idéia. Ele diria que [HE93]:

... a possibilidade que se tem de observar ou não uma coisa depende da teoria que se usa. É a teoria que decide o que pode ou não ser observado.

XI Conclusões

Pode a comunidade científica errar o rumo? É uma questão delicada. Uma teoria é aceita pela comunidade dependendo de vários fatores como: sua exatidão nas predições, seu contexto e o grau em que está determinada pela experiência. Porém, a curto prazo, existem outros fatores que não é fácil reconhecer como sendo espúrios: modismo, ideologia e cegueira generalizada. Às vezes o prazo não é tão curto assim: o modelo solar de Aristarco passou despercebido pelos astrônomos ao longo de 17 séculos e por quase 200 anos a teoria da via Láctea de Kant tampouco foi popular nos meios acadêmicos. Recentemente alguns aspectos da mecânica quântica estão sendo esclarecidos, as conclusões de N. Bohr seriam corretas mas pelos argumentos errados? [DU99]

Deve-se insistir com os estudantes que um aspecto que importa (certamente não o único) no quê fazer científico é a “emoção”, qualquer coisa que isso signifique. Segundo Kadanoff [RU93]:

É uma experiência como nenhuma outra que eu possa descrever; a melhor coisa que pode acontecer a um cientista, compreender que alguma coisa que ocorreu em sua mente corresponde exatamente a alguma coisa que acontece na natureza. É surpreendente, todas as vezes que ocorre. Ficamos espantados com o fato de que um constructo de nossa própria mente possa realmente materializar-se no mundo real que existe lá fora. Um grande choque e uma alegria muito grande.

¹¹Aqui essa “verificação” é entendida de maneira ampla. Pode ser apenas indireta, por exemplo, uma consistência global da teoria com os dados experimentais. Isto é o que ocorre com o modelo padrão da física das partículas elementares.

ou, de maneira mais dramática nas palavras de Einstein:

The years of anxious searching in the dark, with their intense longing, their alternations of confidence and exhaustion and the final emergence into the light—only those who have experienced it can understand it.

Para sentir essas emoções não precisamos obter resultados tão importantes quanto os de Kadanoff ou Einstein! Apenas devem ser resultados *nostros*.

Nos Estados Unidos os estudantes estão deixando a academia para trabalhar na empresa privada. Isso não seria problema se entre eles, segundo Anderson [AN99], não estivessem os melhores. Os menos criativos ficam nas posições permanentes em física. Segundo Anderson, a National Science Foundation (NSF) e outras agências de fomento estão incentivando a falta de criatividade, talvez, influenciados pelo “Horganism”.¹² As causas disso residem pelo menos em parte também no sistema de “peer-review” mas este é um aspecto que não vai ser discutido neste artigo, serve apenas como uma confirmação de que a visão pessoal, sobre o que fazer científico e o futuro de ciência, têm implicações no desenvolvimento da própria ciência.

Uma característica do nosso tempo é a pressa. Não apenas na ciência. Umberto Eco trata do problema da rapidez [EC94]:

Quando enalteceu a rapidez, Calvino preveniu: ‘Não quero dizer que a rapidez é um valor em si. O tempo narrativo pode ser lento, cíclico ou imóvel...Esta apologia da rapidez não pretende negar os prazeres da demora. Se algo importante ou absorvente está ocorrendo, temos de cultivar a arte da demora.

Isto é válido não só na ficção mas também na ciência.

Como podemos ser pessimistas se nos últimos anos a física foi capaz de i) encontrar algumas novas leis da natureza, ii) obter novos comportamentos da natureza, iii) desenvolver instrumentos que permitiram observar fenômenos em condições completamente diferentes das estudadas no passado? [WE91] As experiências em Stanford no fim dos anos 60, e que desvendaram a estrutura do núcleo, não foram meras repetições da experiência de Geiger-Marsden. O conceito de visualização dos fenômenos tinha mudado. De fato novas maneiras de estudar (“ver”) a natureza são tão importantes quanto as leis fundamentais que surgirão desses estudos.

Chegamos ao fim?...que direito temos de supor que os núcleons, elétrons e neutrinos

são realmente elementares e não podem ser subdivididos em pares constituintes ainda menores? Há apenas meio século, não se supunha que os átomos eram indivisíveis?... embora seja impossível prever o desenvolvimento futuro da ciência da matéria, temos atualmente razões para acreditar que nossas partículas elementares são na verdade as unidades básicas e não podem ser novamente subdivididas...parece, assim, que chegamos ao fim de nossa pergunta dos elementos básicos que formam a matéria.

Estas palavras foram escritas por George Gamow em 1960 [GA62]. É interessante que elas continuam sendo, em parte verdadeiras. Os núcleons, elétrons e neutrinos continuam a ser indivisíveis no sentido direto. Como podia imaginar Gamow que os núcleons seriam divisíveis “em certo sentido”? Somos capazes de estudar a estrutura dos núcleons mas seus constituintes estão, aparentemente, confinados!

Weinberg nos alerta:

... it is foolhardy to assume that one knows even the terms in which a future final theory will be formulated.

É difícil usar argumentos gerais sobre a utopia que serviria de guia para o avanço da física de altas energias. Segundo Bohr [HE93]:

Quando se tem uma formulação correta, o oposto dela é, evidentemente uma formulação errada. Mas quando se tem uma verdade profunda, então seu oposto pode ser igualmente uma verdade profunda.

Assim, assumir que devem existir leis gerais com as quais possam ser descritas, pelo menos em princípio, todas as coisas parece uma verdade profunda. O seu oposto, que no fundo não existem leis fundamentais também o é (como argüem Wheeler e Nielsen [WE93a]).

Desde 1859 sabia-se que havia um problema com a órbita de Mercúrio se interpretada dentro da teoria da gravitação de Newton. Este problema, como é bem conhecido, foi resolvido pela teoria da relatividade geral de Einstein. Mas, em 1916 além dessa discrepância haviam também mais duas. Uma referia-se a anomalias relativas aos movimentos dos cometas Halley e Encke. A outra era a respeito do movimento da Lua [WE93a]. Em todos estes casos, como no da órbita de Mercúrio, os movimentos não concordavam com as previsões da

¹²A crença que o fim da ciência está próximo e, o que fica é apenas períodos de “ciência normal” segundo a visão de Kuhn [KU62].

teoria de Newton. Agora, no entanto, sabe-se que as anomalias nos movimentos dos cometas são devidas à pressão de escape dos gases já que o cometa é esquentado quando passa perto do sol. O movimento da Lua foi melhor compreendido quando se levou em conta o seu tamanho que implica em complicadas forças de maré. Assim, segundo Weinberg [WE93a]

...there is nothing in any single disagreement between theory and experiment that stands up and waves a flag and says "I am an important anomaly".

Assim, não sabemos em geral quando estamos lidando com um verdadeiro sinal de física nova.

Usualmente a maneira de fazer física de Dirac é considerada com a maneira matemática. Mas ele tinha uma posição mais ampla e um conhecimento das limitações dessa maneira de trabalhar [HE93]:

Em qualquer parte da física em que se saiba muito pouco, somos obrigados a nos prender à base experimental, sob pena de mergulharmos em especulações extravagantes, que quase certamente estarão erradas. Não desejo condenar completamente a especulação. Ela pode ser divertida e indiretamente útil, mesmo que acabe por se mostrar errada...mas é preciso tomar cuidado para não se deixar envolver demais por ela.

Onde fica a intuição em tudo isto? Quais os limites do método científico? Vale a pena se preocupar com isto? As respostas são pessoais. Às vezes os artistas enxergam mais longe que os cientistas. Um deles já disse, séculos atrás

*There are more things in Heaven and Earth. Horatio.
Than are dreamt of in your philosophy.*

Precisamos convencer os estudantes que existem (e que sempre existirão) muitas coisas a serem descobertas, talvez virando à esquina. Convencê-los que o progresso científico e tecnológico foi obtido lentamente, e por vezes de maneira caótica, e que não existe uma razão para que surpresas não ocorram de novo. Que a pressa não serve para queimar etapas. Que previsões são difíceis de se fazer. Não apenas para nós mas também era difícil para von Neumann. Precisamos colocar em discussão a maneira como se processa o desenvolvimento das idéias científicas, seus acasos, atrasos e acelerações devido a preconceitos que não fazem parte do método científico, mas estão sempre presente para bem ou para mal. Isso implica a valorização da perspectiva histórica no ensino de ciências.

Gostaria de fechar esta pequena reflexão, usando as palavras do árbitro anônimo que disse que “a física continua pujante, desafiadora e básica para todas as ciências”.

Agradecimentos

Agradeço ao CNPq pelo auxílio financeiro parcial.

References

- [AD71] S. L. Adler, Phys. Rev. **177**, 2426 (1969); J. S. Bell e R. Jackiw, Il Nuovo Cimento **60A**, 47 (1967).
- [AD76] A história da descoberta deste efeito está resumida na Adventures in Experimental Physics, Volume (5), 1 (1976).
- [AN72] P. W. Anderson, Science **177**, 393(1972).
- [AN99] P. W. Anderson, Physics Today **59**(9), 11 (1999).
- [AI99] Contudo parece que há uma tendência a se inverter como mostra pesquisa recente do AIP, *Maintaining Momentum: High School Physics for a New Millennium*. O documento pode ser obtido em <http://www.aip.org/statistics/trends/hstrends.htm>.
- [AL88] C. Allègre, *A Espuma da Terra*, Gradiva, Lisboa, 1988.
- [AS82] A. Aspect, J. Dalibard e G. Royer, Phys. Rev. Lett. **49**, 1804 (1982).
- [BA94] J. D. Barrow, *Teorias de Tudo*, Ciência e Cultura, Rio de Janeiro, 1994.
- [BE98] M. F. Bertino *et al.*, Phys. Rev. Lett. **81**, 5608 (1998).
- [BE99] Uma boa e curta introdução às supercordas pode ser encontrada em N. Bercovits, *Um novo formalismo da supercorda*, Preprint IFT-P.027/99.
- [BI99] J. Birnbaum, APS NEWS, **8**(6), 8 (1999).
- [BR92] G. Brown, C. Hawkesworth e C. Wilson (Eds.) *Understanding the Earth*, Cambridge University Press, Cambridge, 1992.
- [CA79] Uma revisão sobre o esquema de matrix-S que dispensaria a existência dos quarks é: F. Capra, Am. J. Phys. **47**, 11 (1979).
- [CE99] Para os experimentos no CERN veja-se <http://www.cern.ch/CERN/Experiments.html>.
- [CH79] S. Chandrasekhar, Physics Today **39** (7), 25 (1979).
- [CH93] R. Y. Chiao, P. G. Kwiat e A. M. Steinberg, Scientific American **269**(2), 52 (1993).
- [CO98] I. Bernard Cohen, *O Nascimento de uma Nova Física*, Gradiva, Lisboa, 1998.
- [CO98b] E. A. Cornell e C. E. Wieman, Scientific American **278**(3), 26 (1998).

- [CO99] Para ver as novidades sobre computação quântica veja o sítio na rede <http://squint.stanford.edu>.
- [CO99b] J. E. P. Connerney *et al.*, *Science* **284**, 794 (1999).
- [DA99] L. Davidovich, *NOTÍCIAS/FAPESP* **46**, 5 (1999).
- [DI37] P. A. M. Dirac, *Nature* **139**, 323 (1937).
- [DR98] M. Dresden, *Am. J. Phys.* **66**, 468 (1998).
- [DY88] F. Dyson, *Infinito em Todas as Direções*, Editora Best Sellers, São Paulo, 1988.
- [DU98] M. J. Duff, *Scientific American* **278**(3), 64 (1998).
- [DU99] S. Dürr, T. Nonn and G. Rempe, *Nature* **395**, 33 (1999).
- [EB00] Mais detalhes na *Encyclopaedia Britannica*.
- [EC94] U. Eco, *Seis Passeios Pelos Bosques da Ficção*, Companhia das Letras, São Paulo, 1994.
- [FE77] P. Feyerabend, *Contra o Método*, Francisco Alves, Rio de Janeiro, 1977.
- [FE99] Veja <http://fnphyx-www.fnal.gov/experiments/ktev/katev.html>
- [GA62] G. Gamow, *Um, dois, três...Infinito*, Zahar Editores, Rio de Janeiro, 1962.
- [GA85] Personagens do livro de Galileu, *Dois Novas Ciências* Nova Stella Editorial, São Paulo, 1985.
- [GA94] R. Gallo, *Caça ao Vírus*, Editora Siciliano, São Paulo, 1994.
- [GE89a] H. Georgi, Grand Unified Theories, em *The New Physics*, editado por P. Davis, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
- [GE89b] H. Georgi, Effective Quantum Theories, em *The New Physics*, editado por P. Davis, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
- [GE99] Para estar em dia com a física e astrofísica de neutrinos veja-se o site do Grupo de Estudos de Física e Astrofísica de Neutrino (GEFAN): <http://www.neutrinos.if.usp.br>.
- [GH99] P. Ghose, *Testing Quantum Mechanics on New Grounds*, Cambridge University Press, Cambridge, 1999.
- [GI94] W. W. Gibbs, *Scientific American* **271** (3), 72 (1994).
- [GO98] P. L. Gourley, *Scientific American*, **278**(3), 40 (1998).
- [GO99] D. Goodstein, *Am. J. Phys.* **67**, 183 (1999).
- [HA81] S.W. Hawking, *Phys. Bull.* **32**, 15(1981); The Edge of Space-Time, em *The New Physics*, editado por P. Davis, Cambridge University Press, Cambridge, 1989.
- [HE62] H. Hertz, *Electric Waves*, Dover, New York, 1962.
- [HE93] W. Heisenberg, 1968 Dirac Memorial Lectures reproduzido em A. Salam, W. Heisenberg e P. A. M. Dirac, *A Unificação das forças fundamentais*, Jorge Zahar Ed., Rio de Janeiro, 1993.
- [HI64] P.W. Higgs, *Phys. Lett.* **12**, 132(1964); F. Englert e R. Brout, *Phys. Rev. Lett.* **13**, 321(1964); G.S. Guralnik, C.R. Hagen and T.W. Kibble, *Phys. Rev. Lett.* **13**, 585(1964).
- [HI91] P. W. Higgs, em *Physics up to 200 TeV*, editado por A. Zichichi, Plenum, New York, 1991; pag. 439.
- [HI95] J. Hilgevoord (Ed.) *Physics and our View of the World*, Cambridge University Press, Cambridge, 1995.
- [HO94] J. Horgan, *Scientific American* **271**(1), 70 (1994).
- [HO94] J. Horgan, *Scientific American* **270**(2), 70 (1994).
- [HO98] J. Horgan, *The End of Science*, Addison-Wesley, New York, 1966.
- [HO99] S. Hong, J. Zhu e C. A. Mirkin, *Science* **286**, 523 (1999).
- [JA99] B. R. Jasný e P. J. Hines, *Science* **286**, 443 (1999).
- [KA86] L. P. Kadanoff, *Physics Today* **39** (2), 6 (1986).
- [KL99] D. Kleppner, *Physics Today* **52**(4), 11 (1999).
- [KU62] T. Kuhn, *The Structure of Scientific Revolutions*, The University of Chicago Press, Chicago, 1962.
- [KU87] T. Kuhn, *La teoría del cuerpo negro y la discontinuidad cuántica, 1894-1912*, Alianza Editorial, Madrid, 1987.
- [LO87] M. S. Longair, *Theoretical Concepts in Physics*, Cambridge University Press, Cambridge, Cambridge, 1987.
- [MA54] J. C. Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Dover, New York, 1954; vol. II, p.271.
- [MA77] B. B. Mandelbröt, *The Fractal Geometry of Nature*, W.H. Freeman and Company, New York, 1977.
- [MA98] J. Maddox, *What Remains to be Discovery*, The Free Press, New York, 1998.
- [MA99] Ver R. S. Mackintosh, physics/9904013.
- [NY72] M. Jo Nye, *Molecular Reality: A Perspective on the Scientific Work of Jean Perrin*, Elsevier, New York, 1972.
- [NU98] K. Lande (Homestake Collaboration), in *Neutrinos '98*, Proceedings of the XVIII International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics, Japan, 4-9 June 1998, edited by Y. Suzuki and T. Tosuka, to be published in *Nucl. Phys. B (Proc. Suppl.)*; Y. Fukuda *et al.* (Kamiokande Collaboration), *Phys. Rev. Lett.* **77**, 1683 (1996); T. Kirsten (GALLEX Collaboration) in *Neutrinos '98*; V. Gavrin (SAGE Collaboration) in *Neutrinos '98*; Y. Suzuki (SuperKamiokande Collaboration) in *Neutrinos '98*; Y. Fukuda *et al.* (SuperKamiokande Collaboration), *Phys. Lett.* **B433**, 9 (1998); *Phys. Rev. Lett.* **81**, 1562 (1998); *Phys. Lett.* **B436**, 33 (1988).
- [OV91] D. Overbye, *Lonely Hearts of the Cosmos*, Harper Collins Publishing Inc, New York, 1991, p. 372.
- [PA82] A. Pais, *Subtle is the Lord...*, Oxford University Press, New York, 1982.
- [PE94] R. Penrose, *Shadows of the Mind*, Oxford University Press, New York, 1994.

- [PF99] Na Alemanha faltam engenheiros químicos e mecânicos na indústria. Na França na Universidade de Paris-VI, o número de matriculados para o primeiro ciclo de estudos científicos caiu de 57 mil, em 1994, para 20 mil, em 1998; em 12 universidades da região de Paris o número de candidatos para carreiras científicas caiu em cerca de 40%; situação similar ocorre na Grã-Bretanha e Suécia segundo *PESQUISA FAPESP* **47**, 17 (1999).
- [PL96] V. Pleitez, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **18**(4), 355 (1996).
- [PL97] V. Pleitez e R. Rosenfeld, *Ciência Hoje* **22**(131), 24 (1997).
- [PL99] V. Pleitez, *Revista Brasileira de Ensino de Física*, **21**(2), 255 (1999); physics/9807046.
- [PR97] I. Prigogine, *The End of Certainty*, The Free Press, New York, 1997.
- [PR99] J. Preskill, *Physics Today*, **52**(6), 24 (1999).
- [RO87] C. A. Ronan, *História Ilustrada da Ciência*, Jorge Zahar, Rio de Janeiro, 1987; vol. IV.
- [RU93] D. Ruelle, *Acaso e Caos*, Editora UNESP, 1993; J. Gleik, *Caos: A Criação de uma Nova Ciência*, Editora Campus, São Paulo, 1990.
- [SC45] E. Schrödinger, *What is life?*, Cambridge University Press, New York, 1945.
- [SC90] E. Schatzman, *A Ciência Ameaçada*, Publicações América-Europa, Lisboa, 1990.
- [SC93] S.S. Schweber, *Physics Today* **46**(11), 34(1993). As referências originais se encontram nesse artigo de Schweber.
- [SM92] G. F. Smoot *et al.*, *Astrophys. J. Lett.* **396**, L1 (1992); E. L. Wright *et al.*, *Nucl. Phys. (Proc. Suppl.)* **51B**, 54 (1996).
- [ST93] A. M. Steinberg, P. G. Kwiat e R. Y. Chiao, *Phys. Rev. Lett.* **71**, 708 (1993).
- [TE99] No Brasil já existem projetos Genoma, ver M. Teixeira, *Genoma Humano*, Encarte Especial, NOTÍCIAS/FAPESP **43** e **44**, (1999).
- [WE64] A. M. Weinberg, *Physics Today* **17**(3), 42 (1964).
- [WE67a] V. Weisskopf, *Physics Today* **20**(5), 23 (1967).
- [WE67b] S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.* **19**, 1264(1967); A. Salam, in *Elementary Particle Theory*, edited by N. Svartholm (Almqvist and Wiksell, Stockholm, 1968), p. 367; S. Glashow, *Nucl. Phys.* **22**, 579(1961); S.L. Glashow, J. Iliopoulos and L. Maiani, *Phys. Rev. D* **2**, 1285(1970); M. Kobayashi and K. Maskawa, *Prog. Theor. Phys.* **49**, 652 (1973).
- [WE91] V. Weisskopf, em *Physics up to 200 GeV*, editado por A. Zichichi, Plenum, New York, 1991, pag. 445.
- [WE93a] S. Weinberg, *Dreams of a Final Theory*, Vintage Books, New York, 1993.
- [WE93b] Este ponto é colocado também em R. Westfall, *The Life of Isaac Newton*, Cambridge University Press, Cambridge, 1993, p. 193.
- [WE99] S. Weinberg, *Scientific American* **281**(6), 36 (1999).
- [WH51] E. Whittaker, *A History of the Theories of Aether and Electricity*, Thomas Nelson and Son Ltd, Londres, vol.1, 1951, pag. 28-30.
- [WI72] F. Wilczek e D. Gross, *Phys. Rev. D* **8**, 3633(1972).
- [WI83] K. Wilson, *Scientific American*, **241**(2), 149 (1979).