

O futuro da física

DAVID GROSS

Tradução de Saulo Adriano

Texto publicado em: *International Journal of Modern Physics A*, vol. 20, nº 26, 2005, pp. 5.897-909 (World Scientific Publishing Company).

Este texto foi baseado em uma palestra que dei no dia 7 de outubro de 2004 por ocasião do congresso comemorativo do 25º aniversário do Instituto Kavli de Física Teórica (KITP). É, em parte, baseado em questões enviadas pelos participantes do congresso, aos quais se pediu que levantassem questões que provavelmente conduziram a pesquisa em física, entendida em seu sentido amplo, nos próximos 25 anos.

Adriano



COSMOS

DAVID GROSS é diretor do Instituto Kavli de Física Teórica (KIPT) da Universidade da Califórnia (EUA) e Prêmio Nobel de Física de 2004.

A ORIGEM DO UNIVERSO

A primeira questão diz respeito à origem do universo. Essa era uma questão perene, não da ciência, mas da filosofia e da religião. Agora, perguntar como o universo teve início é uma questão ardente tanto para a física teórica quanto para a cosmologia.

De acordo com as observações atuais, sabemos que o universo está se expandindo. Então, se viajássemos de volta no tempo, ele estaria se contraindo. Se aplicarmos as equações de Einstein e nosso conhecimento da física de partículas, poderemos chegar próximos de quando ocorreu a “singularidade inicial”, quando o universo se encontrava encolhido em um estado de energia e densidade incrivelmente altas, um estado comumente chamado de big-bang. Não sabemos o que aconteceu por ocasião do evento big-bang, pois todas as nossas abordagens conhecidas da física básica (não apenas a relatividade geral e o modelo padrão, mas, até onde podemos ver, também a teoria das cordas) falham nesse ponto.

Para entender como o universo começou, precisamos saber o que foi o big-bang. Os cosmologistas observam os vestígios das flutuações quânticas que ocorreram próximas ao big-bang na radiação cósmica de fundo em microondas (RCFM). Tais flutuações são a origem da estrutura de larga escala do universo. Então, é imperativo para

a cosmologia e para a astrofísica a compreensão do que de fato ocorreu por ocasião do big-bang. Há por acaso uma maneira de se observar mais diretamente a física da época próxima ao big-bang? Quão longe podemos voltar atrás no tempo? Com a radiação comum, podemos voltar cerca de cem mil anos depois do big-bang, mas não antes disso. Houve muita discussão no congresso a respeito da possibilidade de se desenvolver métodos teóricos e observacionais fazendo uso ou da radiação gravitacional ou dos sinais na RCFM para impelir a observação até a época do big-bang.

E o que dizer da teoria? Podemos de fato dizer o que ocorreu no começo do universo? A teoria das cordas tem tido muito sucesso em destramar as singularidades que ocorrem na relatividade geral. Porém, as singularidades com as quais a teoria das cordas consegue lidar não são as mesmas do tipo que ocorreram no big-bang. São singularidades estáticas, independentes do tempo. Será a teoria das cordas capaz de destramar a singularidade inicial e nos dizer como o universo começou, qual era a sua condição inicial ou qual era sua função de onda inicial? Algumas pessoas especulam que na verdade não houve um começo, mas o universo era grande, entrou em colapso e depois se expandiu outra vez. Alguns defendem a idéia de um universo cíclico. Creio que é mais provável que a própria idéia de tempo seja um conceito emergente, como sugere a teoria das cordas. Assim, para responder questões sobre o início do universo e do tempo, precisaremos reformular a questão ou mudá-la, como sempre acontece em física. Talvez aí então se torne mais fácil respondê-la. De qualquer modo, as questões acima claramente guiarão muitas das pesquisas tanto na cosmologia inflacionária quanto na cosmologia da teoria das cordas nos anos a seguir.

A MATÉRIA ESCURA

A questão número 2 tem a ver com a natureza da matéria escura descoberta nos

últimos anos. Aparentemente a maior parte da matéria no universo não consiste de partículas das quais somos feitos, mas sim de um tipo novo de matéria, que não temos como observar diretamente. Essa “matéria escura” não tem radiação e presumivelmente interage muito fracamente com as partículas comuns e com a radiação. Só sabemos que existe por causa de seu arrasto gravitacional. Podemos mensurar sua massa ao observarmos as órbitas da matéria comum em torno das galáxias. O resultado dessa observação mostra que 25% do universo consiste de matéria escura, e não de prótons, nêutrons, quarks ou elétrons. A matéria bariônica comum, a substância da qual somos feitos, corresponde a apenas três ou quatro por cento da massa ou da densidade de energia do universo em nosso tempo presente. Então, o que vem a ser a matéria escura? Podemos observá-la diretamente em laboratório? Como ela interage com a matéria comum? A hipótese vigente é a de que a matéria escura consiste de partículas massivas de interação fraca. Os físicos de partículas elaboraram muitos modelos especulativos que vão além do modelo padrão da física de partículas, e tais modelos contêm muitas partículas candidatas a ocupar o posto de constituinte da matéria escura. Meu candidato favorito é o “neutralino”, a partícula neutra mais leve das extensões supersimétricas do modelo padrão, um candidato perfeito para a matéria escura. Porém, pode ser que ela seja constituída de “áxions”, outra partícula especulativa inventada na tentativa de resolução do problema de CP (carga-paridade) forte, ou talvez seja composta de alguma outra coisa. Além disso, há também as questões observacionais. É possível identificar e detectar matéria escura no laboratório? Somos capazes de detectar diretamente a matéria escura que permeia e rodeia as galáxias? Como a matéria escura se encontra distribuída no universo? E o que ela nos diz sobre a estrutura e a formação das galáxias? Nos modelos atuais de formação e distribuição das galáxias, a matéria escura tem um papel vital. É ela a substância que primeiro entrou em colapso, sendo que a seguir veio a matéria comum e entrou em

colapso dentro dos aglomerados de matéria escura. Não compreendemos de maneira suficiente e quantitativamente detalhada como as galáxias são formadas, e para sabê-lo precisamos de fato entender a natureza e as propriedades da matéria escura.

A ENERGIA ESCURA

A terceira questão está ligada à descoberta recente segundo a qual a maior parte da energia no universo se encontra em uma nova forma de energia chamada “energia escura”. Essa substância exerce uma pressão negativa que provoca a aceleração da expansão do universo. Os astrofísicos, ao observarem essa aceleração, deduziram que 70% da densidade da energia do universo atual se encontra na forma de energia escura, uma das descobertas mais misteriosas e mais surpreendentes das últimas décadas. O que vem a ser essa energia escura? A hipótese mais simples diz que é constante, mas ela pode variar no tempo. Então, como determinar por meio de observação se a energia escura é de fato uma constante ou se varia com o tempo? A hipótese mais simples a respeito dela é a de que é a “constante cosmológica”, Λ , que Einstein introduziu em suas equações para produzir um universo estático. Depois se descobriu que o universo estático de Einstein era instável e, além de não ser estático, expande-se. Einstein então descartou a constante cosmológica, e chegou a dizer certa vez que Λ era o seu maior equívoco. Agora, porém, as mensurações indicam que parece haver uma energia que não se dissipa e com pressão negativa, muito semelhante a uma constante cosmológica. É ela de fato uma constante cosmológica ou se trata de uma outra coisa? Como é que podemos saber? É de fato surpreendente que a maior parte da energia do universo seja a energia do vácuo, que, mesmo sendo a maior parte, ainda assim é impossível de se “ver”, a não ser que façamos a mensuração da expansão de todo o universo. Há uma outra maneira de se detectar a energia escura?

A FORMAÇÃO DAS ESTRELAS E DOS PLANETAS

A questão número 4 se refere às questões astrofísicas mais pragmáticas, ou seja, a formação dos objetos menores que as galáxias, as estrelas e os planetas. Há uma teoria razoável da formação das estrelas que não é muito quantitativa, e torná-la quantitativa é exatamente o que gostaríamos de fazer. Conseguimos compreender verdadeiramente a gama das massas das estrelas? Quantas binárias são formadas? Antigamente se acreditava que as binárias fossem raras, e hoje se crê que ao menos metade de todas as estrelas são formadas em sistemas binários. Há uma maneira de se calcular a frequência das binárias? Como as estrelas se aglomeram? O interesse renovado nessas questões é em parte fruto das novas investigações que exploram o passado e viajam no tempo até a era da geração das primeiras estrelas do universo. As primeiras estrelas foram criadas sob condições diferentes das atuais. Por exemplo, não havia elementos mais pesados que o hélio, os quais os astrofísicos chamam de “metais”, uma vez que tudo que é mais pesado que o hélio foi criado nas estrelas. As primeiras estrelas tinham apenas hidrogênio e hélio. Se a teoria da formação das estrelas fosse sólida o bastante, os astrofísicos poderiam nos falar da natureza das primeiras estrelas. Porém, o que ocorre é que as investigações acabaram por revelar resultados bem surpreendentes, em desacordo com o que se esperava. Por isso, ainda há muito a ser aprendido a respeito da teoria da formação das estrelas e das novas maneiras de se testar essas idéias.

Um tópico bem recente, de aproximadamente dez anos apenas, é a teoria da formação dos planetas. Pela primeira vez podemos observar diretamente os planetas localizados fora de nosso sistema solar. Em nossos dias, há centenas de planetas já observados, de maneira que estamos começando a acumular conhecimentos efetivos sobre os sistemas planetários. Esta é uma

ciência muito interessante. Uma das coisas que a faz muito interessante é a busca por vida fora de nosso sistema solar. Então se pergunta: “Qual é a frequência de planetas habitáveis? Quantos planetas há na galáxia capazes de sustentar vida? Somos capazes de desenvolver técnicas para determinar observacionalmente se um planeta tem vida, por meio talvez da observação das linhas espectrais das atmosferas de tais planetas?”. Por conta dessas questões, a teoria e a ciência planetárias se tornaram inesperadamente uma área vívida, povoada principalmente por astrofísicos muito jovens. É um campo de pesquisa muito fascinante.

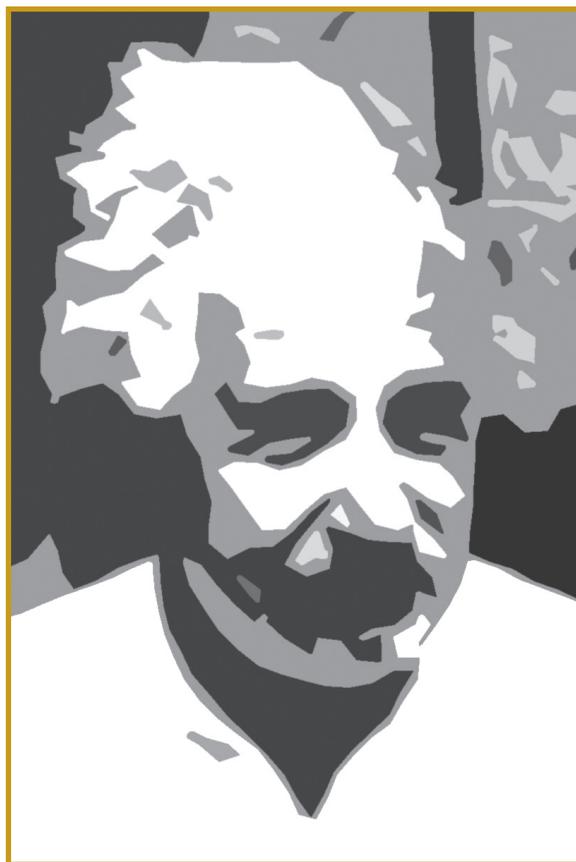
A RELATIVIDADE GERAL

Há muitas questões a respeito da relatividade geral (RG), a teoria da gravidade de Einstein, a linguagem da cosmologia e o arcabouço teórico para a discussão da estrutura em larga escala do universo. Alguns dos participantes do congresso perguntaram se nossa compreensão atual da relatividade geral está correta em todos os aspectos. A relatividade geral tem sido comprovadamente convincente em alguns casos; porém, há duas áreas nas quais ainda não chegamos a testá-la. Uma delas é em distâncias curtas. De fato, para distâncias menores que um milímetro ainda não testamos nem mesmo a teoria da gravidade de Newton. A outra área é onde a gravidade é mais forte, tão forte que distorce grandemente o espaço-tempo múltiplo, tal como ocorre nas proximidades dos buracos negros. Uma boa pergunta é saber se podemos usar as observações para determinar se a métrica de Kerr descreve de maneira correta a geometria em volta dos buracos negros. Quando um buraco negro se forma, a geometria do espaço e tempo ao seu redor é totalmente determinada uma vez que se conheça a massa e a rotação do buraco negro. Acredita-se hoje haver muitos buracos negros no universo. Na verdade, aparentemente todas as galáxias têm um buraco negro massivo em seus centros. Os astrofísicos e os físicos teóricos estão ten-

tando descobrir como usar as observações das radiações emitidas da matéria que cai dentro de um buraco negro para determinar a geometria do espaço-tempo. Talvez possamos determinar se a métrica de Kerr descreve corretamente o espaço-tempo do lado de fora do buraco negro no centro de nossa galáxia.

A MECÂNICA QUÂNTICA

Um outro sustentáculo teórico da física moderna é a mecânica quântica (MQ). É interessante que muitos dos mais distintos participantes deste congresso tenham perguntado se a MQ é a descrição definitiva da natureza ou não. Alguns deles, sendo 't Hooft um exemplo, argumentam que em distâncias curtas a MQ pode ser falha, e crêem que ela será substituída por uma teoria determinista. Tony Legget se preocupa se a MQ falhará para sistemas





complexos grandes. O motivo disso é que, como sabem todos os que estudam a MQ, quando começamos a pensar sobre a parábola do gato de Schrödinger, sentimo-nos um pouco desconfortáveis. É um pouco difícil de entender como o gato pode estar em um estado de sobreposição dos estados de estar vivo mais o de estar morto. Talvez a MQ não consiga descrever gatos, talvez seja falha no tocante a sistemas grandes e complexos. Os experimentalistas estão empregando grandes esforços para resolver essas questões. A tentativa de testar a MQ em sistemas macroscópicos complexos é uma grande fonte de estímulo para os físicos experimentais. Roger Penrose crê que a MQ falhará se tentar descrever a mente ou um sistema com consciência, e nisso também acredita Eugene Wigner. Pessoalmente, não tenho nenhum problema com esses três assuntos, e não vejo problema algum com a mecânica quântica. A quarta questão, porém, me incomoda também. Como usar a MQ para descrever o universo

como um todo? Que sentido há em se falar da função de onda do universo? Na teoria atual da inflação, algumas pessoas, como Andrew Linde, falam de inflação interna em porções diferentes do universo, que cria um aglomerado de universos, um “multiverso”, ou seja, diferentes universos que nunca serão capazes de se comunicar um com o outro. O que significa descrever a MQ de tal multiverso?

A FÍSICA DE PARTÍCULAS

Com a questão 7 nos voltamos para a física de partículas. Pode-se fazer muitas questões sobre o modelo padrão da física de partículas elementar, a teoria das interações eletrofracas e das interações fortes. O modelo padrão é uma teoria de um sucesso extraordinário, cuja consistência é provada por todas as experiências existentes. Porém, contém muitos mistérios e muitas questões abertas, algumas das quais cremos não ser de fácil solução. Os elementos mais misteriosos do modelo padrão são as massas e as combinações dos constituintes básicos da matéria, que cremos hoje serem os quarks e os léptons. Estes têm um espectro muito estranho de massa. A massa de um quark *top* é cem mil vezes a de um quark *up*. Os quarks se unem formando variados tipos de interações. Os neutrinos, por sua vez, têm um padrão de massas ainda mais estranho. De onde veio esse espectro? A respeito disso, o modelo padrão não fornece boas idéias, e o mesmo ocorre com as extensões teóricas simples do modelo padrão.

Há muitos outros traços do modelo padrão que são igualmente misteriosos. Como explicar a origem dos bárions? O número bariônico é conservado? Hoje acreditamos que o número do bárion não é conservado porque não há razão alguma pela qual ele deva ser. Então, os bárions poderiam ser criados à medida que o universo evoluiu a partir do big-bang. Conhecemos maneiras pelas quais isso poderia acontecer e criar a assimetria bariônica do universo. Entretanto, até agora somos teoricamente inca-

pazes de calcular com precisão o número de bárions do universo. E era para sermos capazes de fazê-lo. Também não sabemos quanto tempo dura um próton. Além destas, há muitas outras questões das quais o modelo padrão não dá conta, e que demandam uma teoria mais abrangente.

A SUPERSIMETRIA

Na minha opinião, a questão primordial para a física de partículas, tanto para os teóricos quanto para os experimentalistas, é a da supersimetria. A supersimetria é uma extensão nova e maravilhosa da simetria relativista do espaço e tempo. Se for provada sua veracidade, significa que há dimensões quânticas extras de espaço-tempo. As teorias supersimétricas são formuladas no superespaço que tem dimensões extras, fermiônicas, dimensões que são mensuradas por números não-comutativos. As teorias supersimétricas são simétricas nas rotações das dimensões quânticas em dimensões comuns do espaço-tempo, o que nos leva a prever que para cada partícula já observada deve existir um par supersimétrico correspondente. Há uma evidência bem forte a favor da supersimetria proveniente da extrapolação das teorias das interações eletromagnéticas, fortes e fracas para a energia bem alta. Com base em observações atuais, que medem tais forças com grande precisão, e em nossas ferramentas teóricas precisas e de grande sucesso, podemos extrapolar as forças do modelo padrão para a energia bem alta. Com essas ferramentas descobrimos que todas as forças se unificam em uma energia próxima de onde a gravidade se torna forte. Porém, essa unificação funciona somente se assumirmos que a teoria é supersimétrica e que a supersimetria é quebrada espontaneamente na escala de massa TeV. Felizmente esta é a escala de massa prestes a ser explorada no novo acelerador de partículas New Hadron Collider no Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire (Cern) dentro de dois anos. Uma das maiores motivações para a construção desse acelerador e um dos

maiores empreendimentos dos teóricos das partículas nos últimos dez anos tem sido explorar a possibilidade da existência da supersimetria. Se ela for descoberta, então virão décadas de novas físicas que tentarão compreender como a supersimetria é quebrada e também medir o espectro de massa das superpartículas. A questão interessante que se coloca é esta: se medirmos o espectro e os acoplamentos das partículas supersimétricas, com o uso dessa informação, seremos capazes de chegar a um entendimento mais direto da física na escala da unificação, ou na escala das cordas?

CROMODINÂMICA QUÂNTICA

Por fim, dentro do modelo padrão, há uma questão, a nona, sobre a cromodinâmica quântica (CQ), que é a minha favorita. É uma questão cuja resposta eu achei que sabia trinta anos atrás. Somos capazes de encontrar a solução para a CQ? Trinta anos atrás eu achava que sim e que levaria cinco anos para encontrarmos uma solução. Bem, acontece que ainda não chegamos lá. Ainda não somos capazes de calcular analiticamente em largas distâncias onde as forças são fortes. Creio que a maior esperança nessa direção é a construção de uma descrição dual de hádrons e mésons. Os mésons, estados confinados de quarks e antiquarks, assemelham-se muito a tubos de fluxo com quarks e antiquarks na extremidade que se comportam como cordas. Na verdade, temos hoje ampla evidência de que tanto na teoria das cordas quanto na teoria clássica singular (teoria de calibre) há tal descrição dual. Se imaginarmos que o número de cores (N_c) não é 3 mas o infinito, então nos convencemos de que há uma corda clássica que descreverá todos os mésons. Se pudéssemos descrever com precisão as equações clássicas da teoria dual (e estão trabalhando muito para encontrá-la), aí poderíamos ter a esperança de solucioná-la classicamente. Isso pode não ser tão difícil. Poderíamos então calcular analiticamente o espectro de massa dos hádrons no termo

inicial em uma expansão em $1/N_c$. Esse é um objetivo fascinante e, nos últimos anos, muito progresso tem sido feito para a sua completude. Essa questão guiará por muitos anos as pessoas envolvidas com CQ não-perturbativa e com a teoria das cordas.

A TEORIA DAS CORDAS

Volto-me agora para a teoria das cordas, a tentativa mais ambiciosa de se construir uma teoria unificada de todas as interações. Aqui a questão central é: o que é a teoria das cordas? Na verdade, não compreendemos o que ela é de fato em sua essência. O que temos são muitas descrições diferentes ou maneiras de se calcular certas partes de uma teoria que não conseguimos formular de fato. Esta é uma situação bastante estranha, pois as representações diferentes da teoria das cordas não raro são totalmente diferentes. Originalmente ela foi construída a partir da descrição do movimento clássico de uma corda se movendo em um espaço-tempo de dez dimensões e, a partir daí, da quantização desse sistema. Agora, porém, dispomos de uma descrição alternativa, em certos espaços-tempos, da teoria das cordas em termos de uma teoria de calibre comum (supersimétrica), a mesma teoria de Yang-Mills que usamos no modelo padrão. Temos evidências extremamente fortes para provar que essas teorias de calibre dão uma descrição matematicamente equivalente a uma teoria que poderia ser descrita como cordas se movendo no espaço anti-de Sitter de cinco dimensões, que é um espaço com uma constante cosmológica negativa. Temos muitas outras representações duais da teoria das cordas, mas desconhecemos a essência da teoria de todas essas descrições duais. As lições profundas dessa dualidade não foram ainda verdadeiramente assimiladas. O fato de que a teoria tenha muitas representações que parecem ser tão diferentes e que contêm objetos dinâmicos elementares diferentes coloca sérios obstáculos às nossas noções comuns da noção de elementaridade assim como às noções de localidade.

A NATUREZA DO ESPAÇO-TEMPO

A questão número 11 é: “O que é o espaço-tempo?”. Na teoria das cordas, muitos estão convictos de que “espaço e tempo podem estar com seus dias contados”. Temos muitos exemplos em que o espaço é um conceito emergente na teoria das cordas. Podemos facilmente mudar o número de dimensões espaciais ao mudarmos a força de um acoplamento. Há formulações da teoria das cordas nos termos da teoria de calibre em três dimensões espaciais, nas quais emergem seis dimensões, assim como a gravidade. Há formulações da teoria M, que é descrita à baixa energia pela supergravidade em onze dimensões, nos termos do modelo matricial da mecânica quântica, no qual todas as dez dimensões espaciais e a gravidade aparecem como maneiras aproximadas de se descrever os fenômenos macroscópicos. Assim, temos muitos exemplos de formulações da teoria das cordas em que o espaço não é um conceito primordial, mas emergente. Se o espaço é um conceito emergente, então o tempo também deve ser. Porém, como imaginar o tempo como sendo emergente? Não sei como formular a teoria da física sem o tempo desde o começo. Creio que a resposta para essa questão, a respeito da real natureza do espaço-tempo, será necessária para se entender o significado real da teoria das cordas, e que ela necessitará de conceitos revolucionários.

A FÍSICA É UMA CIÊNCIA AMBIENTAL?

Uma outra questão fascinante, a número 12, largamente discutida pelos teóricos das cordas, sendo porém bem mais geral, pergunta: “A física é uma ciência ambiental?”. Prefiro colocar a questão da seguinte maneira: “Todas as leis e todos os parâmetros que caracterizam o universo físico são calculáveis em princípio ou

alguns deles são determinados por acidentes históricos ou mecânico-quânticos?”. Alguns exemplos de parâmetros físicos incalculáveis são os raios dos planetas de nosso sistema solar. Ninguém imagina que possamos calcular esses raios. Eles não são fundamentais, foram determinados por um acidente histórico. E o que falar da constante de estrutura fina e as massas dos quarks e léptons? Aparentemente há muitas soluções da teoria das cordas, muitos estados fundamentais ou vácuos possíveis. Recentemente alguns teóricos das cordas descobriram o que chamaram de “paisagem”, um número imenso de estados metaestáveis do universo. Alguns argumentam que esses estados podem ser muito diferentes entre si, podendo ter números diferentes de dimensão de espaço-tempo (grandes dimensões de espaço-tempo), valores diferentes de acoplamentos de calibre, massas diferentes e números diferentes de quarks e léptons. Em especial, podem ter valores diferentes da constante cosmológica. Argumenta-se que, quando o universo surgiu do big-bang, poderia assumir qualquer um desses estados, ou que diferentes porções do universo poderiam passar por uma expansão inflacionária e assumir diferentes estados. Podemos, então, ter um multiverso. Algumas partes dele são de uma forma, outras de outra, e assim por diante. Então, onde é que nós estamos? A vida existe, galáxias se formam, e isso ocorre em apenas poucos desses universos. Eles então invocam o “princípio antrópico” para dizer que só podemos estar na porção pequena dos universos onde a vida existe. Eles desistem de calcular, por meio de argumentos racionais, os valores das constantes da natureza, ou de inferir algumas das leis fundamentais, mas esperam conservar algum poder preditivo por meio do princípio antrópico. Pessoalmente não gosto nem um pouco dessa abordagem. Creio piamente que Einstein estava certo quando afirmou sua convicção de que a natureza é constituída de tal forma que no final tudo é calculável, e que as leis da natureza são tão fortes que todos os parâmetros estão completamente determi-

nados, e não podem ser mudados sem que se destrua toda a teoria. Porém, se isso é fato, permanece uma questão aberta.

CINEMÁTICA E DINÂMICA

Uma outra questão, a de número 13, pergunta se a distinção tradicional entre cinemática e dinâmica sobreviverá. Tradicionalmente, temos em física a cinemática, ou seja, a espinha dorsal da física, isto é, a teoria quântica de campos ou mecânica quântica, ou, anteriormente, a teoria clássica de campos ou mecânica clássica. Dentro de tal estrutura, introduzimos uma dinâmica diferente, assim como o modelo padrão. Porém, você poderia introduzir leis dinâmicas diferentes na mesma estrutura cinemática, isso ficaria a seu critério. Essa separação entre cinemática e dinâmica é estranha, se pensarmos a respeito. Creio que, se chegarmos a entender a teoria das cordas e a natureza do espaço-tempo, essa distinção será desfeita. Haverá uma estrutura que não poderá ser dividida entre cinemática e dinâmica, e uma única dinâmica concebível será interligada à estrutura cinemática. Então a mecânica quântica se revelará inevitável e menos misteriosa.

A FÍSICA DA MATÉRIA CONDENSADA

A física da matéria condensada, mais que os demais campos da física, é movida a experiências. Então, quando peço aos físicos da matéria condensada que me dêem questões, encontro resistência da parte de muitos deles. Dizem estes: “Não fazemos perguntas, nós respondemos às experiências”. Porém, quando forcei um pouco mais, recebi deles umas poucas e boas questões. Uma tem a ver com os possíveis novos estados da matéria, uma área fascinante da física da matéria condensada que explora os sistemas que não são descritos pelo pa-

radigma da teoria padrão desenvolvida por Landau e conhecida por teoria do líquido de Fermi. O sistema de Hall quântico é dessa natureza e tem sido fascinante trabalhar em sua estrutura na última ou nas últimas duas décadas. Mas haverá outros sistemas de matéria condensada de interações gerais que apresentem comportamento diferente do líquido de Fermi e sejam acessíveis experimentalmente em um modo rotineiro? Os teóricos já conseguiram chegar a muitos modelos matemáticos interessantes que não são bem descritos pela teoria do líquido de Fermi. Muitos dos modelos foram desenvolvidos para se entender a supercondutividade de alta T_c , que ainda não foi desvendada. Porém, não é claro se eles aparecem na natureza.

ciências exatas

SISTEMAS DINÂMICOS COMPLEXOS

Um campo que era muito popular quando o KITP foi fundado, há 25 anos, era a análise de sistemas dinâmicos que apresentavam comportamento caótico e complexo. Vinte e cinco anos mais tarde, um dos participantes do congresso perguntou: “Hoje em dia, quando nos deparamos com um sistema complicado, nós o colocamos em um computador potente e analisamos. Obtemos dados a partir das simulações do computador, mas aí o que se pode fazer com os dados? Que fazer para entendê-los?”. Sabemos que esses sistemas complexos têm limites intrínsecos de previsibilidade, e geralmente eles têm feições caóticas. Porém, só olhar as simulações não permitiu aos teóricos descobrir como discernir se estamos olhando para algo complicado ou algo com um tipo de comportamento caótico interessante. Então, os teóricos sentem muito a necessidade de se desenvolver ferramentas para analisar essas simulações complexas de computador e aprender o que subjaz a elas.

COMPUTADORES QUÂNTICOS

A computação quântica é um campo novo, talvez tenha 10 anos de idade. Seu objetivo é a construção de um computador que use elementos quânticos, o qual, em alguns casos, mostrou ser capaz de trabalhar exponencialmente melhor que um computador clássico. Em relação a isso, a questão mais interessante para os teóricos, a de número 16, pergunta se os computadores quânticos serão “silenciosos” ou “surdos”. O problema central em se construir um computador quântico é proteger o sistema quântico da perda de coerência. Caso um computador quântico perca a coerência, por causa de sua interação inevitável com o meio externo, ele se torna então um computador clássico. É difícil evitar que um estado quântico

não interaja com o meio externo. Há duas estratégias, sendo a primeira a estratégia “silenciosa”, ou seja, a redução do ruído tanto quanto possível isolando do meio externo os bits quânticos que compõem o computador. O outro método é a criação de um computador “surdo”, no qual a informação é embutida em quase-partículas topológicas que são deslocalizadas, que não podem ser destruídas, sendo assim separadas do ruído. Esta é uma abordagem mais recente e mais fascinante dos computadores quânticos. Aqui o problema é mostrar que existem sistemas de matéria condensada com excitações topológicas gerenciáveis que podem ser construídas e manipuladas.

E, por fim, temos a seguinte questão: “Somos realmente capazes de construir um computador quântico?”. Trata-se de um computador construído com qubits básicos, como *spins* que podem ser *up* ou *down*, correspondentes a 0 ou 1, mas que são quânticos por natureza. Cálculos reais demandariam 10.000 qubits, mas no momento só conseguimos construir um computador quântico de 2 ou 3 qubits. Temos então um longo caminho pela frente até chegar aos 10.000 qubits.

SUPERCONDUTORES DE ALTA TEMPERATURA

Nosso congresso de aniversário contou basicamente com teóricos envolvidos em pesquisa básica. Mesmo assim, houve uma questão muito interessante, a de número 17, sobre aplicações. Temos como fabricar um material supercondutor em temperatura ambiente ou acima? De acordo com os teóricos da matéria condensada, não há razão para se duvidar da possibilidade de fabricação de um supercondutor em temperatura ambiente. Porém, as teorias atuais simplesmente não são sólidas o suficiente para nos dizer se isso seria possível ou não. Uma outra questão fascinante é a seguinte: “Temos como fabricar um ferromagneto à temperatura ambiente – um ferromagneto

que não seja feito de ferro, mas de material semicondutor eletrônico fabricável?”. Caso seja possível, então poderemos manipulá-lo em escalas microscópicas, que é um objetivo muito interessante e uma questão fantástica para os teóricos.

BIOLOGIA

Agora nos voltamos para a biologia, um campo que tem começado a atrair o interesse de muitos físicos da matéria condensada mole. Hoje há uma enorme e maravilhosa quantidade de dados no mundo da biologia, sendo um dos exemplos o genoma humano. Somos capazes de entender a vida com base em todos esses dados? Há uma teoria da biologia ou a vida é meramente um acidente histórico? Esta parece ser uma pergunta muito difícil. Os físicos teóricos são muito bons na compreensão de sistemas complexos; porém, os sistemas biológicos



ciências exatas

são diferentes dos sistemas de matéria condensada. Há como os físicos ajudarem? É necessária uma nova matemática para descrever a biologia, não apenas a matemática que foi desenvolvida para calcular e descrever os fenômenos físicos? Uma possível razão para tal é que, em biologia, temos que lidar com a dinâmica sobre muitas escalas de tempo de alcance amplo. Há mudanças importantes que estão acontecendo a cada instante em nossos neurônios e em nosso genoma em escalas de nanossegundos ou menos. Com o passar do tempo, isso pode afetar a vida em longos períodos. Os físicos ainda não tiveram que lidar com esse tipo de problema, e presumivelmente serão necessários novos métodos, talvez até mesmo uma nova matemática.

GENÔMICA

Agênômica é uma área em que os físicos estão particularmente interessados, e na qual já começaram a trabalhar. Temos hoje em mãos o desenho completo, o genoma humano. Há como fazer uso do genoma para, por exemplo, entender a evolução? É possível usar o genoma para comparar o DNA de pessoas diferentes e traçar a história da evolução das espécies no passado.

Os teóricos com métodos de física teórica serão capazes de fazer disso uma ciência quantitativa e preditiva? Uma questão de que eu particularmente gosto é a seguinte: “É possível saber a forma de um organismo ao examinarmos seu genoma?”. Imagino que daqui a vinte anos, com muita ajuda da física e dos físicos, a biologia teórica possa alcançar um estágio no qual, num exame final de um curso de biologia teórica, os alunos receberão um pequeno segmento de DNA e terão que examiná-lo e desenhar o organismo correspondente a ele.

NEUROCIÊNCIA

A neurociência é um outro campo em que os físicos têm trabalhado por muitos anos. Isso ocorre porque entender como o cérebro funciona é uma questão fascinante e desafiadora, e os físicos gostam de desafios. Claramente se faz necessária uma teoria para se entender o funcionamento do cérebro, pois, sem modelos, somente a observação não será suficiente. Uma das questões mais fascinantes em pesquisa cerebral é a natureza da consciência, ou, mais especificamente, os princípios que subjazem à memória e à consciência. Uma questão de que eu particularmente gosto é: é possível medir o despertar da consciência em um bebê? Um embrião no útero é provavelmente inconsciente. Quando uma pessoa chega aos 13 anos de idade, é provavelmente consciente. Em algum ponto entre o estágio embrionário e o início da adolescência a consciência é ativada. Mas quando isso ocorre? Leva dois dias, duas semanas, dois anos? Como então medir o despertar da consciência? É um evento abrupto (uma transição de fase de primeira ordem, ou contínuo)? Quando pudermos dizer a um pesquisador prático experimental como medir a natureza da transição, teremos entendido muito a respeito do que possa ser a consciência. Uma outra boa questão é: “Seremos capazes de construir uma máquina consciente, com livre-arbítrio, com comportamento voluntário, e que seja viva?”.

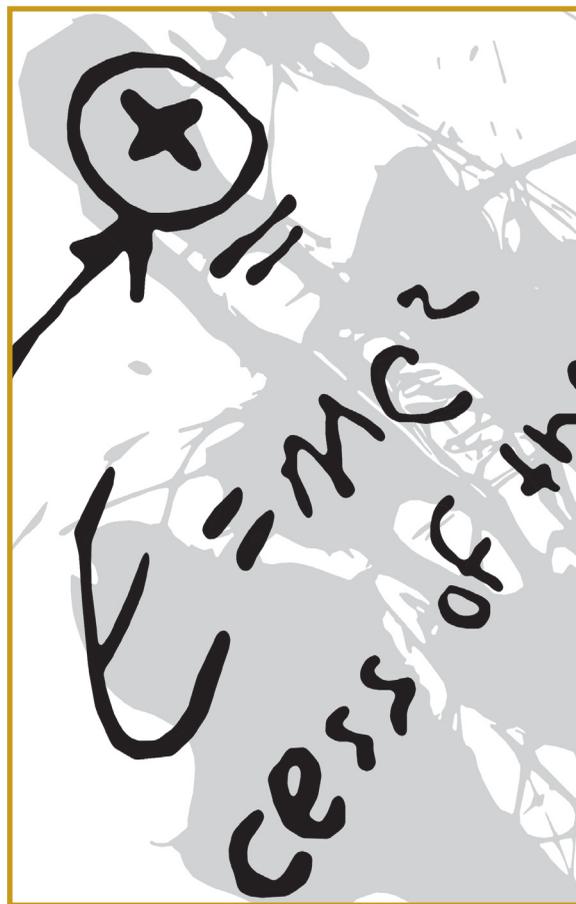
FÍSICA COMPUTACIONAL

Muitas das questões formuladas diziam respeito à física computacional, uma abordagem da física teórica que se tornou muito importante nos últimos anos. Hoje em dia, muitos cientistas e muitos físicos, quando se deparam com um problema difícil, preferem simulá-lo no computador em vez de fazer cálculos num papel. A questão 21 foi a seguinte: “O computador substituirá as técnicas analíticas? E, se for o caso, deveríamos mudar a formação oferecida aos físicos?”. Temos ensinado aos alunos da mesma maneira por centenas de anos, e raramente os ensinamos a usar computadores ou a fazer simulações numéricas. Nós os ensinamos a calcular integrais e a solucionar parcialmente equações integrais. Deveríamos mudar a maneira como formamos os físicos? Por fim, Frank Wilczek perguntou: “Quando será que os computadores se tornarão físicos teóricos criativos?”. Note bem que ele não perguntou “será que”, mas sim “quando será que”. E como nós ensinaremos os computadores? Esta é uma questão muito interessante que podemos considerar bem antes mesmo do tempo em que tenhamos um computador que possa se tornar um físico teórico criativo. Deveríamos ensinar um computador do mesmo modo que ensinamos uma pessoa, ou teria que ser de um modo diferente? Quando ensinamos pessoas, começamos pela mecânica clássica, e a partir daí ensinamos a eletricidade e o magnetismo, e depois a mecânica quântica. Para ensinar computadores, deveríamos ao contrário começar pela teoria das cordas, e depois derivar a teoria de campo quântica e a física clássica como uma aproximação? Não sei a resposta, mas isso é algo interessante para se pensar.

A UNIDADE DA FÍSICA

Houve muitas questões sobre a sociologia da ciência. Em específico, houve muitas a respeito da possível fragmenta-

ção da física. A física está se tornando tão grande, com tantas áreas, que alguns perguntaram: “A física se dividirá em campos e disciplinas diferentes?”. Alguns campos já se dividiram. Um exemplo é a química, a qual tem departamentos separados de química orgânica e de química inorgânica, e esses campos separados ensinam seus alunos de maneiras diferentes. Considero isso um perigo para a física, cuja grande tradição é a de preservar o núcleo comum de educação e cultura que distingue um físico, mesmo quando este expande seus horizontes e se beneficia das possibilidades oferecidas pelos campos vizinhos. De fato, a unidade da física foi comprovada pelo sucesso do congresso de aniversário, que uniu com sucesso líderes mundiais de todas as subáreas da física, da cosmologia à biofísica, para discutir o futuro da física como um empreendimento intelectual e cultural. Espero e acredito que a física não se dividirá em campos separados.



REDUCCIONISMO

Tony Legget fez a seguinte pergunta, a de número 23: “Costumamos assumir que, como as coisas grandes são feitas de coisas pequenas, o comportamento das grandes deve ser totalmente determinado pelo das pequenas, ao menos em princípio. Isso é mais inquestionavelmente verdadeiro do que a idéia de que a natureza pode distinguir sua mão esquerda da direita?”. Sou um reducionista. Creio mesmo que as coisas pequenas determinam as coisas grandes, mas devemos manter a mente aberta. Mesmo na teoria das cordas, vejo pontos em que há certa confusão entre o que é “grande” e o que é “pequeno”.

O PAPEL DA FÍSICA TEÓRICA

Uma outra questão sociológica, a de número 24, foi sobre o papel da teoria na física. A pergunta foi a seguinte: “Qual é o papel da física teórica?”. Há duas visões extremadas a esse respeito. Uma diz que o papel da teoria é estar intimamente ligada ao campo experimental e fenomenológico, ajudar os experimentalistas a interpretar suas experiências e a distinguir o sinal do ruído. Segundo a outra visão, o objetivo da física teórica é chegar a um nível mais alto de entendimento. Para conseguir tal entendimento, podemos nos concentrar na solução de modelos matemáticos bem definidos que sejam consistentes com os princípios físicos gerais, independente do fato de esses modelos serem reais ou não. De fato, qual é o valor que damos à simplicidade e à elegância matemática? É a isso que o segundo grupo dá importância. Por outro lado, qual é o valor que damos à habilidade

de descrever sistemas complicados, com todos os seus detalhes, e que é o interesse do primeiro grupo? Estas são duas posturas diferentes, duas abordagens diferentes da teoria. Alguns teóricos preferem a primeira e outros a segunda. Na minha opinião, ambas são tão boas quanto necessárias. Uma é fortalecida pela outra, e considero que ambas compõem um físico teórico.

PERIGOS DA GRANDE CIÊNCIA

Finalmente, temos a questão 25, sobre os perigos que rondam a física moderna. Essa pergunta foi feita não por um físico de partículas, mas por um astrofísico. Ele comentou que é visível que não só a grande física tradicional e a física de partículas necessitam de aceleradores maiores e mais caros. Também os projetos astrofísicos estão sendo impossibilitados de avançar, e podem se tornar irrealizáveis nos próximos 25 anos. Na física de partículas, esse perigo já assoma no horizonte e o mesmo vale para a astrofísica. Os instrumentos que os astrofísicos gostariam de colocar no espaço estão rapidamente se tornando caros demais para qualquer governo financiar. É provável que as grandes questões continuem, mas pode ser que não sejamos capazes de explorá-las. Então, que novas abordagens devem ser consideradas agora e já, e não daqui a 25 anos, antes que seja tarde demais, e qual deveria ser o papel dos teóricos na preparação para esse perigo?

Estas foram as 25 questões levantadas no congresso. Vou acrescentar mais uma, porque sei a resposta. A física continuará a ser importante daqui a 25 anos e o instituto KITP continuará também a ser importante? A resposta para esta é um claro “sim”.