O lado escuro do universo I

D

NOSSA VÃ FILOSOFIA

Desde tempos imemoriais a curiosidade humana tem procurado saber quais são os elementos básicos que compõem o universo. Aristóteles, por exemplo, formalizou um sistema para classificar os elementos primordiais: esses seriam a terra, a água, o fogo e o ar. A partir de combinações desses quatro elementos todos os outros elementos conhecidos na Terra seriam formados. Aristóteles também “explicou” a gravidade postulando que o lugar natural desses elementos seria no chão. Mas o que dizer então dos objetos celestes? Por que eles simplesmente não caem? O que os mantém suspensos em uma abóbada no céu? (A idéia de que as estrelas estariam todas fixas em uma abóbada celestial era corrente na época.) Isso parecia indicar que esses objetos eram de fato feitos de outro elemento, desconhecido na Terra, um quinto elemento. Será que as estrelas são feitas de algo que não existe aqui na Terra? E a Lua, não é feita de queijo?

A física evoluiu muito desde os tempos de Aristóteles. A pura filosofia grega, sem grandes preocupações com a comprovação de suas idéias, deu lugar ao chamado método científico, em que teorias são colocadas em teste pelo crivo de experimentos. Basta a teoria não ser capaz de explicar um único resultado experimental para que os cientistas tenham a obrigação de aprimorá-la ou simplesmente descartá-la, e adotar uma outra que explique todos os resultados experimentais. Portanto, uma teoria ou mo-

ROGÉRIO ROSENFELD
é professor do Instituto de Física Teórica da Universidade Estadual Paulista.

delo nunca pode ser provada exatamente correta, mas pode-se sim dizer que descreve de maneira adequada todos os experimentos então realizados, tornando-se um modelo confiável do mundo. Previsões podem então ser feitas com esse modelo, que constituem novos testes para seu sucesso.

O que veremos a seguir é que Aristóteles não estava muito errado, afinal. Apesar de os objetos celestes, como estrelas, serem feitos dos mesmos elementos químicos conhecidos, esses representam apenas uma pequena porção do universo, cerca de 5%. Portanto, 95% do universo é de fato formado por algum elemento atualmente desconhecido. Há mais coisas entre o céu e a Terra do que supõe a nossa vã filosofia...

UMA BREVE HISTÓRIA DAS PARTÍCULAS

Experimentos realizados ao longo de centenas de anos revelaram a estrutura da matéria que conhecemos. Os elementos químicos foram catalogados na tabela periódica de Mendeleev. Cada elemento químico seria formado de átomos, partículas indivisíveis com propriedades características do determinado elemento. Portanto, o número de elementos primordiais naquela época era muito grande, um tipo de átomo para cada elemento químico. No fim do século XIX, novos experimentos mostraram que os átomos não eram indivisíveis: foi descoberto o elétron, parte do átomo. Nas primeiras décadas do século XX ficou estabelecido o modelo atômico: átomos são formados de um núcleo atômico com elétrons distribuídos ao seu redor. A física que descreve o mundo dos átomos é bastante diferente da que estamos acostumados no nosso dia-a-dia: o mundo atômico é regido pelas leis da física quântica. Um pouco mais tarde descobriu-se que o núcleo atômico é composto de prótons e nêutrons. Novamente uma grande simplificação ocorreu em termos do número de partículas fundamentais: toda matéria que conhecemos pode ser

construída a partir de prótons, nêutrons e elétrons. Também naquela época já havia a interpretação de que a luz é composta de um enxame de partículas que ficaram conhecidas como fótons.

Nos inícios dos anos de 1970, experimentos realizados com grandes máquinas chamadas aceleradores de partículas revelaram um novo nível de elementaridade: prótons e nêutrons possuem estrutura, não são elementares. Partículas denominadas quarks são “coladas” através da interação de partículas chamadas glúons (da palavra *glue*, que significa “cola” em inglês) para formar os prótons e nêutrons presentes no núcleo dos átomos. Portanto, toda matéria que existe em nosso mundo, ou seja, todos os elementos químicos, é feita de quarks, glúons e elétrons. A matéria que forma os núcleos atômicos, responsável por quase a totalidade da massa dos átomos (o elétron é 2.000 vezes mais leve que um próton) é denominada de *matéria bariônica*. Para completar a lista de partículas estáveis, ou seja, que não se desintegram, e que podem ser encontradas na Terra temos que adicionar os fótons, partículas de luz, e os neutrinos (ver artigo de Renata Funchal neste dossiê). Neutrinos são partículas produzidas em algumas reações nucleares e raramente interagem com a matéria, tornando-os extremamente difíceis de serem detectados. Apesar de milhões de neutrinos provenientes do Sol atravessarem nossos corpos todos os dias, eles não surtem nenhum efeito. Somos transparentes aos neutrinos. De fato, neutrinos podem atravessar a Terra toda sem ser afetados. Portanto, a Terra também é transparente aos neutrinos solares. Os neutrinos só foram detectados na década de 1950, quando começou a exploração da produção de eletricidade a partir da energia nuclear gerada em reatores. Essas reações nucleares criam uma enorme quantidade de neutrinos, o que acabou possibilitando a sua detecção. Atualmente, grandes detectores, como o detector chamado Super-Kamiokande, que tem 50.000 toneladas de água e está localizado no Japão, trabalham continuamente para estudar as propriedades dos neutrinos.

Existe também um grande número de partículas instáveis, isto é, que se desintegram rapidamente após serem produzidas. Um exemplo é a partícula chamada múon, que é muito parecida com o elétron. A diferença é que o múon é cerca de 200 vezes mais pesado que o elétron. Portanto, o múon pode ser descrito como um irmão mais gordo do elétron. Porém, o múon se desintegra em um milionésimo de segundo e não existe naturalmente no universo. Quando foi descoberto na década de 1950, um físico famoso perguntou: “Quem encomendou isso?”.

Neste artigo estamos preocupados em descrever do que é feito o universo hoje e portanto as partículas instáveis não contribuem para sua composição. Elas simplesmente não estão por aí, já se desintegraram, podendo ser criadas apenas artificialmente em aceleradores de partículas. Portanto, nos concentraremos apenas nas partículas estáveis que conhecemos, basicamente a matéria bariônica, elétrons, fótons e neutrinos.

E O RESTO DO UNIVERSO?

Podemos estudar em nossos laboratórios a matéria que está presente ao nosso redor. Mas como estudar o que não podemos alcançar diretamente? Por exemplo, como podemos saber do que o Sol, essa estrela que nos aquece, é feito? Bem, podemos certamente estudar a luz que vem do Sol. Cada elemento químico possui uma impressão digital, conhecida tecnicamente por linhas espectrais, deixada na luz que ele emite quando aquecido. Portanto, a luz do Sol carrega informações acerca da natureza dos elementos nele presentes. De fato, o elemento hélio foi descoberto pela primeira vez analisando essas impressões digitais da luz solar. Hoje sabemos que a maior parte do Sol é composta de hidrogênio, o elemento químico mais simples. A energia solar é produzida a partir de reações nucleares de fusão do hidrogênio que ocorrem em seu interior. Essas reações nucleares, além

de produzirem a luz que vemos, produzem também uma enorme quantidade de neutrinos que são detectados na Terra. Portanto, o Sol é feito do mesmo tipo de matéria que conhecemos.

O Sol é uma estrela na nossa galáxia, a Via Láctea. Existem centenas de bilhões de estrelas na nossa galáxia. Existem bilhões de galáxias no nosso universo. As estrelas emitem luz e por esse motivo podemos vê-las. Porém, pode existir matéria feita de átomos que não emite luz. A Lua, por exemplo, não emite luz própria. Ela brilha pois reflete a luz do Sol. O mesmo se passa com os planetas. Os átomos podem estar em objetos que não emitem luz própria, mas certamente eles *interagem* com a luz. A Lua não é transparente à luz do Sol, muito pelo contrário, ela é totalmente opaca. Existe também poeira nas galáxias que interage com a luz. Chamaremos à matéria que pode interagir com a luz de *matéria luminosa*. Mas será que existe algum outro tipo de matéria no universo que não interage com a luz? Caso houvesse, essa matéria seria totalmente transparente à luz e não seria observada diretamente. Esse tipo de matéria é denominada de *matéria escura*. Mas, se não podemos observar a matéria escura nas galáxias, como podemos saber se ela está presente ou não?

EVIDÊNCIAS PARA A MATÉRIA ESCURA

Apesar de não podermos vê-la, a matéria escura, como qualquer tipo de matéria, exerce força gravitacional. Ela deve atrair matéria com força proporcional à sua massa e inversamente proporcional ao quadrado da distância, como já nos ensinou Newton. Essa é a chave para observá-la, identificar seus efeitos gravitacionais sobre a matéria luminosa. Evidências para a existência de matéria escura começaram a surgir na década de 1930 com as observações de Fritz Zwicky, astrônomo suíço trabalhando no observatório americano do

Monte Wilson. Zwicky mostrou que, para explicar o movimento observado das galáxias em agrupamentos denominados aglomerados de galáxias, era necessário invocar uma massa para o aglomerado muito maior que a soma da massa de todas as estrelas nele contidas. Observações mais recentes das chamadas curvas de rotação de galáxias confirmam a existência da matéria escura (veja Figura 1 nesta página).

A Figura 1 mostra dados observacionais de curvas de rotação da galáxia espiral de Andrômeda, catalogada como M33. Curvas de rotação mostram a velocidade de objetos luminosos como função da distância ao centro da galáxia. Caso toda a matéria fosse luminosa, esperaríamos medir uma curva como a da linha pontilhada acima. No entanto, as observações seguem a curva sólida, o que só pode ser explicado caso Andrômeda possua um extenso halo de matéria escura.

Figura 1

Em resumo, há mais matéria que não emite luz no universo do que matéria luminosa. Mas poderia toda essa matéria ser composta de átomos?

INSIGNIFICÂNCIA CÓSMICA

Sabemos que o universo no passado era extremamente quente e denso. Um dos res-

quícios desse passado que é medido hoje com grande precisão é a chamada radiação cósmica de fundo, o calorzinho que sobrou do início do universo (veja os artigos de Thyrso Villela e Raul Abramo neste dossiê). Nesse passado remoto quente e denso, alguns minutos após o big-bang, reações nucleares eram frequentes e sintetizaram, a partir dos núcleos de hidrogênio, núcleos de elementos leves como hélio, deutério e lítio. Esse processo denomina-se *nucleossíntese primordial*. Estudando o quanto existe de hélio hoje no universo, descontando-se o fato de que ele é produzido também em estrelas, pode-se determinar a quantidade de hidrogênio presente no universo primitivo e que acabou dando origem a todos os átomos que existem hoje. Em outras palavras, é possível estimar a quantidade total de átomos (ou, como discutimos anteriormente, de matéria bariônica) que existe no universo! Uma outra maneira, totalmente independente da nucleossíntese primordial, de se estimar a quantidade total de átomos no universo resulta de uma análise minuciosa das pequenas flutuações na radiação cósmica de fundo.

Os dados atuais sobre a abundância dos elementos leves e das flutuações na radiação cósmica de fundo indicam que apenas aproximadamente 5% do universo é feito de átomos. As duas medidas independentes apontam para a mesma conclusão, ou seja, que 95% do universo é feito de algo que não conhecemos.

Esse é mais um golpe para o antropocentrismo. Nós não estamos no centro do sistema solar, o Sol não está no centro de nossa galáxia e nossa galáxia não tem nenhum destaque entre os bilhões de galáxias. Para piorar ainda mais nossa insignificância cósmica, apenas uma pequena fração do universo é feita das mesmas coisas que nós somos feitos. Com as novas medidas de supernovas e da radiação cósmica de fundo, o melhor modelo para descrever o universo requer que ele seja feito de 30% de matéria (5% de matéria bariônica e 25% de matéria escura). Os 70% restantes seriam compostos por alguma forma de energia que permeia o universo. Essa energia, por

falta de um nome mais adequado, denomina-se *energia escura* (ver artigo de José Ademir Lima neste dossiê). A energia escura é algo diferente da matéria escura, pois apresenta características que não podem ser explicadas por nenhuma partícula elementar. Por exemplo, a energia escura gera uma força repulsiva, uma espécie de antigravidade. Essa força repulsiva é responsável pela expansão acelerada do universo, detectada pela primeira vez em 1998 por dois grupos independentes. Atualmente não existe nenhum consenso na comunidade de qual é a origem dessa energia escura.

Algo surpreendente decorrente das observações é que 25% da matéria do universo não é feita de átomos. Ela é transparente e não emite luz. A natureza dessa matéria escura será o assunto do restante deste artigo.

CANDIDATOS A MATÉRIA ESCURA

Sabemos que a matéria escura deve ser composta por um tipo de partícula estável e que não interage com a luz. A única partícula que conhecemos atualmente e que satisfaz a esses requisitos é o neutrino. Neutrinos foram produzidos em abundância no início do universo e, como são estáveis, ainda estão por aí. De fato, cada centímetro cúbico no universo deve conter em média algo como 200 neutrinos. Isso pode não parecer muito, mas podemos comparar esse dado com a densidade média do universo, que corresponde a 10 prótons por metro cúbico, ou um décimo de milhar de próton por centímetro cúbico. Caso esses neutrinos tenham uma massa eles podem contribuir significativamente para a massa total do universo. De fato, bastaria os neutrinos possuírem uma massa maior que 1/10.000 da massa de um elétron para que eles fossem os responsáveis pela matéria escura.

No entanto, neutrinos apresentam dois problemas. Primeiramente, medidas recentes no detector Super-Kamiokande e outros parecem indicar que a massa desses neutrinos é muito menor que a necessária para que

eles tenham um papel importante em cosmologia. Em segundo lugar, caso a matéria escura fosse composta de neutrinos o processo de formação de galáxias seria afetado, resultando em um universo diferente do que observamos hoje. Assim, neutrinos estão praticamente descartados como candidatos a matéria escura do universo.

Neutrinos eram antigamente os candidatos favoritos pois ao menos têm sua existência comprovada experimentalmente. Com neutrinos fora do páreo, que partícula poderia ser responsável pela matéria escura? Deve ser necessariamente uma nova partícula, que ainda não foi produzida ou detectada nos laboratórios terrestres. Portanto, o enigma da matéria escura requer uma *nova física*! Eis uma conexão muito interessante entre o mundo microscópico, das partículas elementares, e o mundo macroscópico, o universo como um todo, as maiores escalas de tamanho observáveis.

A imaginação dos físicos teóricos é muito grande e de fato existem várias teorias, extensões de teorias bem-sucedidas até o momento, bem motivadas e definidas, mas que ainda não foram confirmadas experimentalmente e portanto não temos certeza se de fato estão corretas, ou seja, se descrevem a natureza. Essas teorias podem conter partículas que obedecem aos requisitos necessários para compor a matéria escura no universo. Atualmente, a teoria favorita entre os físicos de partículas chama-se teoria supersimétrica, que estende o modelo conhecido das partículas elementares adicionando, entre outras coisas, uma partícula supersimétrica para cada partícula convencional. Nessa teoria, uma partícula denominada *neutralino*, com massa tipicamente da ordem da massa de 100 prótons, seria um candidato natural a matéria escura. De fato, para uma região de parâmetros razoável do modelo supersimétrico, os neutralinos são produzidos no universo primitivo na quantidade certa para serem matéria escura, ou seja, cerca de 25% da densidade total do universo. Como podemos testar se essa hipótese é correta ou não?

CAÇANDO NEUTRALINOS

Caso os neutralinos fossem de fato as partículas que compõem a matéria escura, eles estariam presentes no halo de nossa galáxia. Em particular, nosso planeta estaria viajando em um mar muito diluído dessas partículas. Portanto, se construirmos um detector especial, geralmente um cristal com muitos átomos agrupados de maneira regular, existe uma chance muito pequena (pois neutralinos possuem o mesmo tipo de interação que neutrinos) de que os neutralinos que atravessem nosso caminho interajam e sejam detectados. Tipicamente, o neutralino pode bater em um átomo (no núcleo de um átomo, para ser mais preciso) do detector e gerar luz, calor ou ondas sonoras, dependendo do material com o qual o detector é construído. Esses minúsculos sinais gerados podem ser as evidências experimentais da existência de um halo escuro feito de neutralinos em nossa galáxia.

Em geral, partículas com as características de um neutralino são também conhecidas como Wimps, sigla em inglês para Weakly Interacting Massive Particle. Hoje existem da ordem de uma dúzia de experimentos em todo o mundo empenhados na detecção de Wimps. Até o momento nenhum sinal foi confirmado pelos experimentos. Apenas limites para a massa e probabilidade de interação dos Wimps foram determinados.

Existe também uma maneira indireta de se detectar os Wimps. Como vimos anteriormente, essas partículas estão presentes nas galáxias. Devido à interação gravitacional, elas estão mais concentradas nos centros das galáxias. Dada essa concentração, existe uma probabilidade maior de dois Wimps se chocarem no centro das galáxias. Quando esse choque acontece, ocorre uma reação que transforma esses dois Wimps em outras partículas, geralmente neutrinos. Esses neutrinos escapam do centro da nossa galáxia e podem facilmente

atingir detectores aqui na Terra. De fato, um detector no Pólo Sul chamado Ice Cube, que tem potencial para “enxergar” esses neutrinos, está sendo desenvolvido.

Porém, nada substitui a prova mais concreta: produzir essas partículas aqui na Terra, sob total controle experimental, e estudar suas propriedades em detalhes. Isso poderá ocorrer depois de 2007, quando um grande acelerador de partículas denominado Large Hadron Collider (LHC) entrará em operação em um laboratório localizado em Genebra, Suíça. Esses instrumentos custam extremamente caro e são resultados de grandes colaborações internacionais, inclusive com a participação de grupos brasileiros. O LHC será o mais poderoso acelerador de partículas já construído e poderá desvendar o segredo da matéria escura do universo, produzindo-a como resultado de colisões de prótons com altíssimas energias.

O QUE SABEMOS

Graças a avanços científicos e tecnológicos extraordinários nos últimos anos, passamos a conhecer nosso universo observável com um grau de precisão e detalhes nunca antes obtido. O que encontramos foi algo novo e surpreendente. Sabemos que o universo possui aproximadamente 5% de matéria bariônica, 25% de matéria escura e 70% de energia escura. No momento não sabemos a origem da matéria escura e da energia escura. Estamos vivendo tempos muito interessantes, em que grandes descobertas científicas, talvez mesmo revolucionárias, devem surgir em breve para explicar os novos e cada vez mais precisos dados observacionais que serão obtidos por uma nova geração de experimentos já planejados, dedicados a perscrutar a natureza do universo e das partículas elementares. O macro e o microcosmos totalmente conectados.