



Nesse ano de 2005, decretado o Ano Mundial da Física, celebramos o centenário do ano miraculoso de 1905, quando um então desconhecido físico de apenas 26 anos chamado Albert Einstein publicou seus trabalhos que tiveram um profundo impacto no futuro desenvolvimento da Física. Em seu *annus mirabilis*, Einstein mostrou que massa é equivalente a energia, luz é feita

de partículas e moléculas são uma realidade. Sua carreira decolou a partir daí, culminando com o desenvolvimento de sua teoria da gravitação, denominada relatividade geral, onde o espaço é encurvado pela presença de

partículas seguem trajetórias nesse espaço curvo. Essa teoria foi confirmada no eclipse solar de 1919, com a análise de fotografias tomadas por 2 expedições britânicas, uma delas a Sobral, no Ceará. Tornou-se uma figura tão influente que foi eleito a personalidade do século XX pela revista Time. A teoria da relatividade geral é a base de um modelo para descrever o universo como um todo, denominado Modelo Cosmológico Padrão, que será o tema central desse artigo.

O que é cosmologia?

Ao olhar o céu em uma noite sem nuvens e longe das luzes da cidade, é inevitável a sensação de vastidão do cosmos. Inúmeras luzinhas, que hoje sabemos ser estrelas distantes, pon-

tuam o firmamento. Ao observar mais atentamente, percebemos uma faixa leitosa que atravessa o céu. Essa faixa nada mais é que a nossa galáxia, a Via Láctea. Ela tem uma forma achatada como uma “panqueca”, com as estrelas distribuídas em braços espirais (ver Box 1). Ela contém dezenas de bilhões de estrelas, nosso Sol sendo apenas uma delas, localizado em um dos braços a uma distância do centro

Cosmologia é a Ciência que estuda a estrutura, evolução e composição do universo.

Ciência é o método científico para criar e testar modelos; estrutura é o problema da forma e da organização da matéria no universo; evolução são as diferentes fases pelas quais o universo passou; composição é daquilo que é feito o universo

da galáxia correspondente a aproximadamente 2/3 do seu raio. Quando olhamos perpendicularmente ao plano de nossa galáxia, para cima ou para baixo da panqueca, não vemos tantas estrelas. A faixa leitosa no nosso céu nada mais é que a

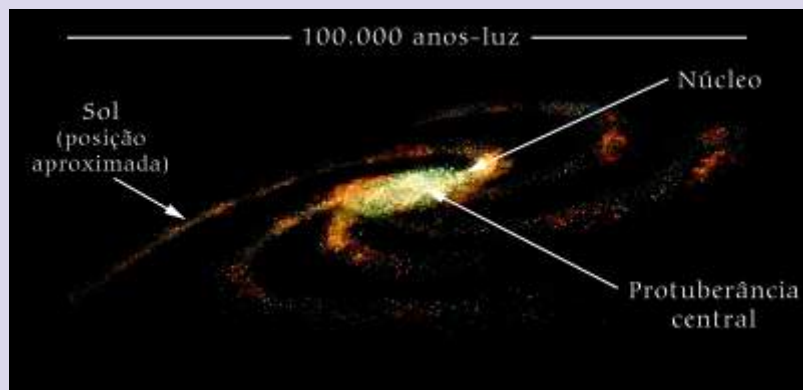
projeção de um grande número de estrelas na direção do plano galático. Tal concentração de estrelas não permite a identificação individual delas, resultando na aparência leitosa que dá origem ao nome de nossa galáxia, que é apenas uma entre as bilhões de galáxias que existem no nosso universo. Mas, afinal, o que vem a ser cosmologia?

Cosmologia é a Ciência que estuda a estrutura, evolução e composição do universo. Por Ciência, nos referimos ao uso do método científico para criar e testar modelos; por estrutura, entendase o problema da forma e da organização da matéria no universo; por evolução, as diferentes fases pelas quais o universo passou; por composição, veremos saber do que é feito o universo.

.....
Rogério Rosenfeld
Instituto de Física Teórica, UNESP
e-mail: rosenfel@ift.unesp.br
.....

Várias questões sobre nosso Universo têm instigado a mente de muitas pessoas por muito tempo. Do que é feito o Universo? Ele é finito ou infinito? Ele terá um fim? Ele teve um início? Estamos vivendo uma época excitante com novos dados observacionais revelando surpresas sobre o nosso Universo, onde essas questões estão começando a ser respondidas. Apesar dos grandes avanços recentes, não sabemos do que é feito 95% do Universo. Novos instrumentos no céu e na Terra devem ajudar os cientistas a responder essas questões fundamentais. Nesse artigo faremos uma breve introdução à Cosmologia, a Ciência que estuda o Universo.

Box 1: Nossa galáxia, a Via-Láctea



Concepção artística de nossa galáxia, a Via-Láctea. Nosso sol é uma das bilhões de estrelas que existem nela... e nossa galáxia é uma das bilhões que existem no universo (fonte: <http://solarsystem.nasa.gov/multimedia/gallery.cfm?Category=Planets&Page=15>).

Devemos nos considerar privilegiados, pois somos a primeira geração a ter capacidade tecnológica para estudar cientificamente o universo, graças ao desenvolvimento de instrumentos de alta precisão, desde os grandes telescópios dos montes Wilson e Palomar, ambos nos Estados Unidos, ao telescópio espacial Hubble e aos satélites COBE (Cosmic Background Explorer) e WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe). Sem o avanço tecnológico dos últimos 50 anos, seria impossível formular e testar teorias sobre o universo. Esses instrumentos trouxeram e alguns ainda trazem muitas informações acerca do universo.

Paradoxalmente, ao mesmo tempo que alcançamos um estágio de grande conhecimento, sabemos que a maior parte do universo é feita de algo que ainda não compreendemos: a **matéria escura** e a **energia escura**, que abordaremos mais adiante.

A estrutura do universo

Antes de discutirmos a estrutura do universo temos que introduzir a unidade de distância apropriada a seu estudo. Quando lidamos com o tamanho de uma sala, usamos o metro (m) como unidade. Quando olhamos em um mapa das estradas brasileiras, a unidade mais apropriada é o quilômetro (km). Obviamente podemos expressar a distân-

cia entre duas cidades em unidades menores, como o centímetro, mas certamente não é conveniente. Da mesma maneira, quando estudamos distâncias entre objetos no universo, a unidade mais apropriada é o ano-luz, definido como a distância que a luz percorre em um ano. A velocidade da luz no vácuo é de 300 mil quilômetros por segundo e, portanto, um ano-luz equivale a cerca de 10 trilhões de km. Outra unidade relacionada ao ano-luz e também muito usada é o parsec, que equivale a 3,26 anos-luz.

Para se ter uma noção de distâncias usando a velocidade da luz, vamos citar alguns exemplos: o perímetro da Terra é de aproximadamente 0,1 segundo-luz; a distância da Terra ao Sol vale cerca de oito minutos-luz; a estrela mais próxima de nós (Alfa Centauro) está a 4,2 anos-luz, enquanto uma das galáxias mais próximas (Andrômeda) encontra-se a cerca de 2 milhões de anos-luz. O tamanho do universo que podemos em princípio observar é de cerca de 13 bilhões de anos-luz.

É importante notar que, quando olhamos para um objeto muito distante, estamos vendo como ele era quando emitiu a luz que nos chega hoje, ou seja, estamos olhando para

o seu passado. Por exemplo, a luz que observamos hoje de Andrômeda e que imprime sua imagem em uma chapa fotográfica levou 2 milhões de anos para chegar até nós e, portanto, mostra como era essa galáxia há 2 milhões de anos atrás.

Observações indicam que o universo é organizado de uma maneira hierárquica até uma escala de tamanho de 300 milhões de anos-luz: estrelas formam galáxias (tipicamente com dezenas de bilhões de estrelas), galáxias formam aglomerados de galáxias e aglomerados de galáxias formam superaglomerados de galáxias. Existem projetos dedicados a fazer um mapa do universo. O mais completo desses projetos, denominado Sloan Digital Sky Survey (SDSS), está fazendo um levantamento com cerca de 1 milhão de galáxias (ver Box 2). O resultado é que nessas escalas de até 100 milhões de parsecs, o universo parece um queijo suíço, com estruturas que parecem paredes onde há uma grande concentração de galáxias cercandando regiões praticamente vazias.

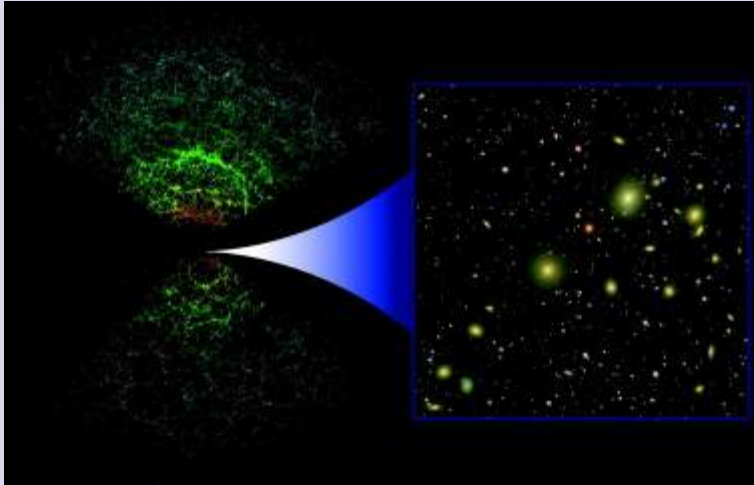
Em escalas bem maiores de 100 milhões de parsecs, há evidências de que o universo é homogêneo ou uniforme, isto é, não apresenta, na média, regiões muito diferentes. Isso significa que não seria possível distinguir ou privilegiar uma dada

região. Lembrando que estamos olhando para o passado, o universo primitivo foi muito mais homogêneo do que é hoje. De fato, como veremos mais adiante, as galáxias ainda não haviam sido formadas no passado. Mais ainda: o universo primitivo também foi isotrópico, ou seja, ao observá-lo em diferentes direções, os resultados são semelhantes.

Concluimos, portanto, que não existe uma posição privilegiada no universo, pois todas elas são equivalentes. Isso equivale a dizer que não há um "centro" do universo.

Paradoxalmente, ao mesmo tempo que alcançamos um estágio de grande conhecimento, sabemos que a maior parte do universo é feita de algo que ainda não compreendemos: a matéria escura e a energia escura

Box 2: A estrutura do universo



O estudo da estrutura do universo realizada pelo SDSS é feita em duas etapas: galáxias são identificadas em imagens bi-dimensionais (à direita) e, com a determinação de suas distâncias, um mapa tri-dimensional com profundidade de 2 bilhões de anos-luz é criado (à esquerda), onde cada galáxia é representada por um ponto e a cor representa sua luminosidade. Essa figura mostra “apenas” 66.976 das 205.443 galáxias identificadas pelo SDSS (fonte: <http://www.sdss.org/news/releases/20031028.powerspectrum.html>).

vão se afastando umas das outras. De fato, formiguinhas posicionadas em cada mancha veriam todas as outras manchas se afastando dela. Cada formiguinha pensaria que está no centro da expansão do balão. Mas, como já vimos, não existe um centro.

Se o universo não é estático, isto é, evolui, então ele possui uma história. Podemos pensar na evolução atual do universo como um filme. Rodando o filme de trás para frente, percebemos que no passado as galáxias estavam mais próximas umas das outras. Conseqüentemente houve, portanto, um momento em que todas as galáxias estavam juntas (na verdade, as galáxias não existiam no passado, tendo sido formadas durante a evolução do universo, a aproximadamente 1 bilhão de anos após o início), quando o balão estaria totalmente murcho (temos que imaginar que o balão se reduz a um ponto nesse caso). Esse seria o instante inicial do filme, e o tempo decorrido a partir daquele início até o presente é o que chamamos de idade do universo.

Conhecendo-se a velocidade das galáxias e as distâncias delas até nós, podemos estimar o tempo que elas levaram para que chegassem onde estão hoje. Com base na teoria da relatividade geral de Einstein, complementada com dados observacionais, foi possível chegar a uma boa estimativa da idade do universo: cerca de 13 bilhões de anos.

À medida que rodamos o filme da história do universo ao contrário, notamos que, como as galáxias ficam mais próximas umas das outras, o universo fica cada vez mais denso. Também, devido a essa compressão, o universo fica mais quente — quem já encheu um pneu de bicicleta com uma bomba manual talvez já tenha verificado que a bomba se aquece devido à compressão do ar. Levando essa contração ao extremo, concluímos que o universo começou sua evolução a partir de um estado extremamente quente e denso. Por esse motivo, a teoria que descreve essa evolução é denominada de *big bang*, desenvolvida princi-

A evolução do universo

Uma das maiores descobertas do século passado foi, sem dúvida, o fato de que o universo está em expansão. Por muito tempo, pensou-se que, descontado o movimento aparente das estrelas devido à órbita da Terra ao redor do Sol, o universo seria estático, imutável. Mesmo Einstein acreditava nisso, pois não havia evidências experimentais do contrário. Porém, em 1929, o astrônomo norte-americano Edwin Hubble (1889–1953) observou que as galáxias estão se afastando de nós, ou seja, que o universo está em expansão.

Mas será então que estamos no centro do universo? Afinal de contas todas as galáxias estão se afas-

Conhecendo a velocidade das galáxias e as distâncias delas até nós, podemos estimar o tempo que elas levaram para que chegassem onde estão hoje. Uma boa estimativa para a idade do universo é de cerca de 13 bilhões de anos

tando de nós! Para responder a essa pergunta, vamos imaginar o seguinte caso, que é análogo ao que acontece no universo: suponha que tenhamos nos transformado em pessoas “chatas” (no sentido de achatadas ou bidimensionais) ou em

formigas, daquelas espécies muito pequenas. Imaginemo-nos, agora, movendo-nos sobre a superfície de um balão de borracha, desses comuns em festas infantis, no qual tenhamos pintado, com uma caneta, manchas com o mesmo tamanho e formato para representar as galáxias. Para nós, em nossa nova forma (seres achatados ou formiguinhas), não existe nenhum ponto privilegiado ou centro na superfície do balão. Seria a mesma coisa que nos perguntar qual é o centro da superfície do planeta Terra. Lembrese de que, pelo fato de agora sermos

achatados, o espaço em que podemos nos mover é apenas a superfície curva do balão, ou seja, não temos acesso ao seu interior. Essa analogia bi-dimensional é mais fácil de imaginar do que um espaço curvo de três dimensões, que é o caso do nosso universo.

Nessa analogia, a expansão do universo é representada pelo enchimento do balão. À medida que o balão enche, as galáxias (manchas)

palmente pelo físico teórico russo George Gamow (1904-1968), que fez importantes trabalhos na área de cosmologia.

Quando esquentamos o gelo, ele derrete, formando água e, se continuamos a esquentar a água, ela evapora. O gelo, a água e o vapor são diferentes fases da água. Da mesma maneira, o universo passou por diferentes fases, dependendo de sua temperatura em um dado momento. Lembrem-se que temperatura e densidade aumentam à medida que olhamos cada vez mais no passado do universo. Uma das conseqüências mais interessantes é a de que, somente depois de aproximadamente 400.000 anos após o início do universo, sua temperatura ficou menor que alguns milhões de graus, correspondente à energia de ligação do hidrogênio. Foi apenas depois dessa época que os átomos puderam se formar. Antes disso o universo era um plasma de núcleos atômicos leves (hidrogênio e hélio, principalmente) e elétrons, fortemente acoplados pela radiação eletromag-

nética (luz). Assim, o universo era opaco antes dessa época. Depois de 400.000 anos, os átomos desses elementos leves puderam se formar e o plasma se neutralizou, tornando o universo transparente, pois os fótons não interagem diretamente com matéria eletricamente neutra. Chamamos a esse fenômeno de *recombinação*.

Ainda mais no passado (mais próximo ao início do universo), a temperatura e densidades eram ainda muito maiores, de modo que em seus primeiros momentos o universo era constituído por uma "sopa" quentíssima de partículas elementares. A teoria da relatividade geral, suplementada pela teoria da física das partículas elementares, fornece um modelo para a evolução do universo, o chamado Modelo Cosmológico Padrão, nome

mais pomposo para o *big bang*.

Fósseis do big bang

Uma das diferenças entre ciência e mitologia consiste justamente no fato de que modelos científicos devem ser verificados experimentalmente para serem comprovados ou rejeitados. Caso nossos modelos não possam ser verificados, ou seja, caso eles não façam previsões passíveis de teste, então estamos fazendo filosofia.

O Modelo Cosmológico Padrão faz previsões sobre fenômenos que ocorreram bilhões de anos atrás. Como podemos verificá-las? Felizmente, a evolução do universo deixou traços desses fenô-

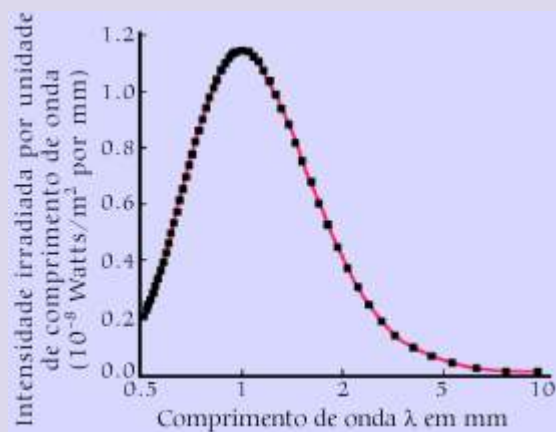
Somente 400.000 anos após o início do universo sua temperatura ficou menor que alguns milhões de graus, correspondente à energia de ligação do hidrogênio. Foi então que os átomos puderam se formar, em um fenômeno que foi batizado *recombinação*

menos que podemos detectar hoje e assim testar o modelo. Pode-se dizer que encontrar os fósseis deixados pela evolução do universo é um tipo de arqueologia cósmica. Aqui, nos

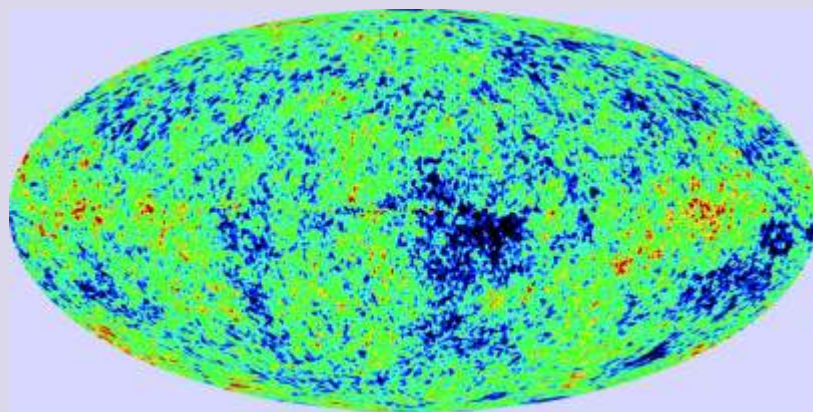
Box 3: A radiação cosmológica de fundo

Em 1964, os físicos norte-americanos Robert Wilson e Arno Penzias estavam trabalhando no laboratório da Companhia Telefônica Bell (Estados Unidos) com uma grande antena para detectar sinais fracos de rádio usados para comunicação telefônica. Com esse equipamento, eles captaram um ruído que não desaparecia, apesar de todos os esforços. Eles verificaram também que o ruído vinha de todo o espaço com a mesma intensidade, independentemente da direção para onde eles apontassem a antena.

Sem a menor idéia sobre a origem do ruído, Wilson e Penzias foram conversar com físicos da Universidade de Princeton. Os colegas imediatamente reconheceram na descoberta o sinal do 'calorzinho' que denominamos radiação cosmológica de fundo, um tipo de reverberação do *big bang*, prevista em 1948 por George Gamow e colaboradores. Penzias e Wilson receberam o prêmio Nobel em 1979 por sua descoberta acidental.



O espectro da radiação cosmológica de fundo medida pelo satélite COBE comparada com um ajuste da fórmula de Planck com uma temperatura de 2,74 K (fonte: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/bkg3k.html>).



Pequenas flutuações na radiação cósmica de fundo medidas pelo satélite WMAP. As cores artificiais são geradas de maneira que os pontos vermelhos são mais quentes e os azuis são mais frios. Essa luz capturada pelo experimento foi emitida quando o universo tinha apenas aproximadamente 400.000 anos, há mais de 13 bilhões de anos atrás, sendo um verdadeiro fóssil da história do universo (fonte: http://map.gsfc.nasa.gov/m_mm.html).

concentraremos em dois desses “fósseis”, que foram decisivos para determinar o sucesso do Modelo Cosmológico Padrão: a radiação cosmológica de fundo e a abundância de elementos leves.

O Modelo Cosmológico Padrão descreve o universo iniciando sua evolução a partir de um estado extremamente quente e denso. O universo, então,

se expande e esfria. O que restou hoje desse grande calor inicial equivale a uma temperatura de apenas 270 graus celsius negativos, muito próxima do chamado zero absoluto de temperatura. Portanto, todo o espaço é permeado por esse “calorzinho” ou radiação que sobrou do *big bang*. Essa é uma previsão do modelo, realizada em 1948 por Gamow e colaboradores. Pouco menos de duas décadas mais tarde, esse “eco” do *big bang* foi detectado por uma grande antena de comunicação nos laboratórios Bell, nos EUA. Hoje em dia ela representa o melhor espectro de corpo negro já medido (ver Box 3). O estudo experimental e teórico dessa chamada radiação cosmológica de fundo tem sido fundamental para o desenvolvimento da cosmologia. A radiação cosmológica de fundo é extremamente homogênea, mas suas pequenas variações de uma parte em 10.000, detectadas no início da década de 1990, deram origem às galáxias, estrelas e, ultimamente, a nós.

Um outro fóssil do início do universo está na presença de alguns elementos leves, como o deutério e o hélio, formados na fornalha cósmica que era o universo três minutos depois de seu surgimento, situação na qual a temperatura atingia cerca de um bilhão de graus. Os ou-

A radiação cosmológica de fundo é extremamente homogênea, mas suas pequenas variações de uma parte em 10.000, detectadas no início da década de 1990, deram origem às galáxias, estrelas e, ultimamente, a nós

Núcleos atômicos, como o carbono e ferro, também foram (e são) sintetizados através de reações nucleares no interior de estrelas e ejetados quando estas explodem em eventos chamados supernovas. Esse processo de formação de elementos químicos é denominado nucleossíntese

tros elementos, como nossos átomos de carbono, oxigênio, etc., foram sintetizados no interior de estrelas, onde as altíssimas temperaturas permitem produzi-los atra-

vés de reações nucleares. Esses elementos são ejetados das estrelas quando estas explodem em eventos chamados supernovas. Esse processo de formação de elementos é denominado nucleossíntese.

O Modelo Cosmológico Padrão prevê que aproximadamente a quarta parte de toda a matéria do universo foi convertida em hélio. Cálculos sofisticados também resultam em previsões para a abundância no universo de deutério e lítio. Esses números foram verificados observacionalmente nos últimos 20 anos (não é simples realizar essas medidas) e seu acordo com o Modelo Cosmológico Padrão representam mais um sucesso a seu favor.

Do que é feito o universo?

Perguntas simples de serem formuladas geralmente possuem respostas complexas. Por exemplo, se me perguntassem do que é feita a mesa que estou usando para escrever esse texto poderia responder simplesmente de que a mesa é feita de madeira. A resposta é correta mas pode não satisfazer totalmente a curiosidade de uma mente inquiridora. “Mas do que é feita a madeira?” seria a próxima pergunta. Uma sequência de perguntas deste tipo nos leva rapidamente à fronteira do conhecimento científico no mundo mi-

croscópico. A madeira é feita de moléculas e estas são compostas de átomos. Os átomos, apesar do nome de origem grega que significa indivisível, são de fato formados por um núcleo pesado contendo prótons e nêutrons e com elétrons orbitando ao seu redor. A estrutura do átomo, que começou a ser desvendada por Lord Rutherford nos anos de 1910, é o que geralmente aprendemos na escola. Hoje sabemos que os prótons e nêutrons são formados por outras partículas, denominadas quarks e gluons, mas isso não será relevante para nosso propósito. Portanto, ao invés de responder que a mesa é feita de elétrons, quarks e gluons, aqui será suficiente responder que a mesa é feita de átomos.

Aumentando um pouco nosso escopo, vamos atentar para o mundo que nos cerca, como o nosso planeta. Do que é feito o planeta Terra? Sem dúvida, toda a diversidade de nosso planeta pode ser reduzida a átomos. Mas não é só isso. Por exemplo,

caso não houvesse luz ao nosso redor, não conseguiríamos enxergar nada. A luz é apenas um exemplo particular do que chamamos de radiação eletromagnética, que abrange desde a radiação de nossos fornos de microondas até os raios-X usados para fazermos radiografias. Sabemos desde o início do século passado que a luz é feita de uma torrente de partículas elementares denominadas fótons.

Um outro ingrediente que temos ao nosso redor mas que não notamos são partículas de um tipo diferente produzidas em reações nucleares, como as que ocorrem no Sol ou em reatores aqui na Terra. São os chamados neutrinos, que interagem tão fracamente que bilhões deles podem passar por nossos corpos sem que percebamos. Eles foram detectados apenas na década de 1950, com o desenvolvimento dos primeiros reatores nucleares para geração de eletricidade. Podemos então responder simplificada-

O Modelo Cosmológico Padrão descreve o universo iniciando sua evolução a partir de um estado extremamente quente e denso

que no nosso planeta temos átomos, fótons e neutrinos.

Vamos agora iniciar nossa tentativa de responder à pergunta: do que é feito o universo? Primeiramente, temos que enfatizar algo óbvio: o universo é muito grande. Como podemos tentar responder a essa pergunta se nunca conseguimos sequer enviar espaçonaves para as redondezas do nosso sistema solar? Certamente temos que inferir a composição do universo a partir de observações realizadas por instrumentos aqui na Terra ou em sua órbita.

Como primeira tentativa, poderíamos pensar que o universo é feito das mesmas coisas que estão no nosso planeta: átomos, fótons e neutrinos. De fato, por muitos anos esse foi o paradigma científico. Esse paradigma começou a ruir quando observações iniciadas na década de 1930 pelo astrônomo suíço Fritz Zwicky, realizadas no observatório americano do Monte Wilson, mostraram que o peso das galáxias (ou, mais precisamente, a quantidade de massa), é cerca de 100 vezes maior que o de todas as estrelas da galáxia somadas. Portanto, existe na galáxia um tipo de matéria que não irradia luz, que ficou conhecida pelo nome de matéria escura (matéria transparente seria mais apropriado) (ver Box 4). Na década de 1970, avanços em cosmologia mostraram como calcular a quantidade de átomos de elementos leves, como o hélio e o deutério, que teriam sido produzidos nos três primeiros minutos do universo. Para explicar as quantidades observadas desses elementos leves em galáxias distantes, apenas uma fração muito pequena do universo, aproximadamente 5%, seria composta de átomos. Uma fração ainda muito menor corresponderia a fótons e neutrinos. Portanto, a maior parte do universo não é feito do mesmo material que nós somos feitos, de átomos. Mas então qual a composição dos outros 95% do universo?

Não temos ainda uma resposta definitiva. Chegamos à fronteira do conhecimento macroscópico. A

Box 4: Evidências para a existência da matéria escura

A teoria da gravitação de Newton prevê que a velocidade de rotação (v) de um corpo ao redor de outro de massa M como função do raio (r) é dada por:

$$m \frac{v^2}{r} = \frac{GmM}{r^2} \Rightarrow v = \sqrt{\frac{GM}{r}}$$

Essa relação é satisfeita com grande precisão no nosso sistema solar (ver Figura 1).

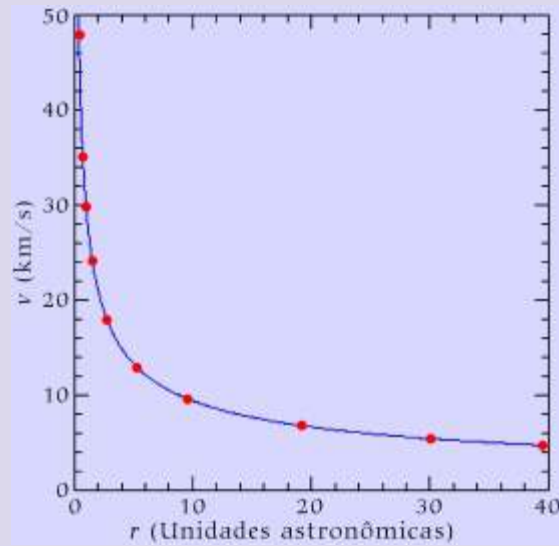


Figura 1: Curvas de rotação para os 10 planetas do nosso sistema solar (fonte: <http://bustard.phys.nd.edu/Phys171/lectures/dm.html>).

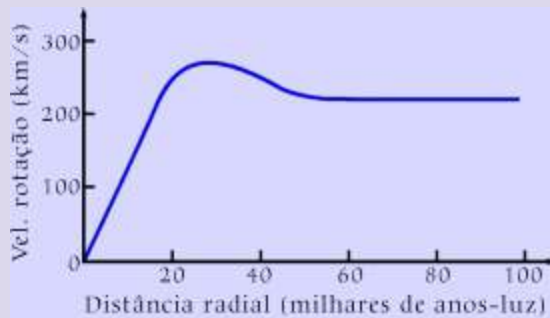


Figura 2: Curva de rotação para a galáxia de Andrômeda (fonte: <http://bustard.phys.nd.edu/Phys171/lectures/dm.html>).

Figura 3: Concepção artística de uma galáxia de matéria visível (a parte central, mais avermelhada) envolta em um halo esférico de matéria escura (mostrada em azul). Note que a presença de matéria escura se estende muito além das estrelas e poeira que formam a matéria visível e que identificamos, efetivamente, como nossa galáxia. A matéria escura na realidade é invisível (por isso a figura é apenas uma imagem artística), mas suas propriedades são determinadas indiretamente através de seu efeito gravitacional no movimento das estrelas e nuvens de gás da galáxia.



Para galáxias, a massa como função do raio inicialmente cresce com $M(r) \propto r^3$, o que implica em $v \propto r$ (assumimos uma densidade constante por simplicidade) até sua borda (onde não deveria haver mais muita matéria) e depois permanece constante. Portanto, a curva de rotação em uma galáxia deveria inicialmente aumentar linearmente e depois decrescer com o inverso da raiz quadrada da distância. Porém, o que se observa de fato é algo como o que mostra a Figura 2, onde a curva de rotação permanece praticamente constante mesmo para distâncias maiores que a borda visível da galáxia. Esse comportamento indica que a massa da galáxia cresce com $M(r) \propto r$ além da borda visível da galáxia, indicando a presença de matéria escura. Essa matéria escura estaria presente em um halo invisível esféricamente simétrico ao redor da galáxia, como mostrado em azul na Figura 3. Existem muitas outras evidências da existência de matéria escura: dinâmica de galáxias em aglomerados de galáxias, efeitos de lentes gravitacionais, efeitos na curvatura do universo e outros.

dinâmica das galáxias indica que 25% do universo é composto por um novo tipo de partícula elementar responsável pela matéria escura. Essa matéria, que não emite luz, compõe grande parte das galáxias no universo. Possíveis candidatos são postulados por várias teorias, mas ainda não foram produzidos ou detectados no laboratório. Existem vários experimentos tentando

A composição do universo:
5% de átomos,
25% de uma partícula
elementar ainda não
descoberta e...
70% de um meio difuso com
propriedades exóticas
(pressão negativa), cuja
origem não conhecemos
ainda!

capturar uma dessas partículas que circulam em nossa galáxia. A dificuldade é que essas partículas devem interagir muito fracamente e possuir uma densidade pequena, tornando sua detecção problemática. Há também a possibilidade fascinante de *criar* essas partículas nos grandes anéis de colisão. Em particular, o Large Hadron Collider, que vai entrar em operação em 2007 no laboratório CERN, na Suíça, poderá finalmente resolver o mistério da matéria escura. Eis aí uma conexão entre o macro e o microcosmo.

Mas a Natureza tinha ainda uma outra surpresa guardada para os cientistas. Graças a uma descoberta em 1998, considerada pela revista Science como uma das mais importantes do século XX, sabemos hoje que cerca de 70% do universo é composto de algo difuso, que não se concentra em galáxias e que provoca a expansão *acelerada* do universo. Como a gravidade é sempre atrativa, todos esperavam que a expansão do universo estivesse desacelerando! Podemos imaginar então a presença de um meio extremamente tênue que permeia todo o universo. Esse meio, porém, tem propriedades diferentes de um meio material: apresenta uma pressão grande e *negativa*, o que causa um efeito de anti-gravidade, resultando na expansão acelerada observada. A esse meio foi dado o nome de *energia escura*. Esse meio poderia ser formado pela chamada *constante cosmológica*, proposta por Einstein para explicar por-

que o universo seria estático, que era o paradigma do início do século XX. Com a descoberta da expansão do universo, Einstein reconheceu nessa constante seu maior erro. Talvez Einstein estivesse certo, afinal. Outros modelos alternativos existem para esse meio, com nomes exóticos e apelativos como quintessência, mas ainda estamos aguardando por mais fatos experimentais para confirmar ou excluir mo-

delos. Novos instrumentos de observação na Terra e no espaço, alguns já em operação, serão fundamentais para elucidar esses mistérios.

Conclusão

Estamos vivendo uma fase

fascinante e efervescente no estudo em cosmologia. Temos informações detalhadas e precisas sobre o universo. Essas informações produziram resultados surpreendentes: o universo está em expansão acelerada, é aproximadamente plano e não conhecemos 95% dele! Eis a receita de universo: 5% de átomos, 25% de uma partícula elementar ainda não descoberta e 70% de um meio difuso com propriedades exóticas (pressão negativa), cuja origem não conhecemos ainda. Certamente essas conclusões apontam para a necessidade de novos modelos em física de partículas elementares e teoria de campos. Novos instrumentos planejados ou já em atividade testarão esses novos modelos. Uma verdadeira revolução está em curso, da qual resultará um novo paradigma para as futuras gerações.

Sugestões para leitura

- S. Weinberg, *Os Três Primeiros Minutos* (Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro, 1980). Excelente livro de divulgação escrito por um ganhador do prêmio Nobel em Física e pesquisador da área de cosmologia. Concentra-se na discussão dos primeiros instantes do universo, principalmente na época da formação de elementos leves.
- M. Gleiser, *A Dança do Universo*, (Editora Companhia das Letras, São Paulo, 1998). Exposição feita por um pesquisador brasileiro especialista em cosmologia e de caráter mais geral que o livro de Weinberg, discutindo a história e desenvolvimento da Física desde os gregos até a cosmologia moderna.
- H. Cooper e N. Henbest, *Big Bang: A História do Universo*, de (Editora Moderna, São Paulo, 1998). Livro com várias ilustrações excelentes e com muita informação. É divertido e informativo, mas sem grande aprofundamento.
- B. Greene, *O Universo Elegante: Supercordas, Dimensões Ocultas e a Busca da Teoria Definitiva*, de (Editora Companhia das Letras, São Paulo, 2001). Texto de divulgação escrito por um pesquisador da área de supercordas que descreve o desenvolvimento da Física no século XX, partindo da teoria da relatividade restrita e chegando até as supercordas. Porém não dedica muito espaço para a cosmologia.
- S. Hawking, *O Universo Numa Casca de Noz* (Editora Mandarin, São Paulo, 2001).

Novo livro de divulgação do renomado físico britânico em uma edição primorosa. Os primeiros três capítulos são excelentes mas o restante do livro é extremamente especulativo.

Na Internet

- <http://www.nap.edu/readingroom/books/cosmology/index.html>. Excelente descrição sobre cosmologia desenvolvida pela Academia Americana de Ciência.
- <http://hepwww.rl.ac.uk/pub/bigbang/part1.html>. Páginas sobre cosmologia e física de partículas elementares desenvolvidas pelo Conselho Britânico de Pesquisa em Astronomia e Física de Partículas.
- <http://www.stsci.edu>. Nessas páginas, do Space Telescope Science Institute (Estados Unidos), pode-se encontrar fotografias tomadas pelo Telescópio Espacial Hubble e ter acesso aos resultados mais recentes obtidos por este projeto.
- <http://www.sdss.org/>. O Sloan Digital Sky Survey é um projeto americano para mapear o nosso universo com as posições de um milhão de galáxias. Nessas páginas, pode-se encontrar os avanços realizados por esse projeto.
- <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm>. Curso de cosmologia da Universidade da Califórnia, em Los Angeles (Estados Unidos), pode ser feito por qualquer pessoa com nível de estudante de graduação em ciências exatas. Possui também notícias atualizadas sobre pesquisas em cosmologia.