



Geografia do universo

T

oda forma de conhecimento que se pretenda ciência tem como princípio fundamental experimentos *reprodutíveis*. O saber científico, idealmente, se reduz em sua essência a um conjunto de leis e axiomas que explicam e prevêm certos fenômenos em certas situações controladas, em quaisquer laboratórios que desejem reproduzir aqueles experimentos.

A rigor, portanto, a cosmologia *não é* uma ciência: seu objeto (o cosmos) não pode ser reproduzido ou controlado, nem as circunstâncias de seu nascimento e os acidentes de sua evolução podem ser repetidos. Essas peculiares condições de trabalho limitam os cosmólogos à observação de fenômenos preexistentes, à constatação de que alguns acidentes ocorreram de uma certa maneira e não de outra, e ao exercício de usar a física que aprenderam em outras situações para explicar aqueles fenômenos. Este breve esclarecimento epistemológico serve para aliviar a cosmologia de ideais metodológicos inalcançáveis e retirar de sua alçada certas ladainhas metafísicas e indagações proto-religiosas.

Mas, então, como situar a cosmologia dentro da cultura científica da qual ela evidentemente faz parte? Uma boa comparação talvez seja dada pela geografia ou a geologia. As condições sob as quais o planeta Terra evoluiu até seu presente estágio, sua composição química e sua geomorfologia são fatos consumados, irreprodutíveis num ambiente de laboratório. Mesmo assim, após algumas décadas

LUÍS RAUL WEBER ABRAMO é professor do Instituto de Física da USP.

analisando os registros das camadas geológicas, através de estudos da crosta terrestre e de fósseis de animais e plantas, os geólogos e geofísicos foram capazes de formular um conjunto de mecanismos e de princípios que explicam razoavelmente bem o estado atual do planeta e a história de sua evolução. Apesar de nunca termos enviado uma sonda até o centro da Terra, sabemos que lá existe um cerne líquido de ferro e níquel; apesar de não termos filmado os movimentos dos continentes, sabemos que eles se deslocam sobre a crosta terrestre por meio do movimento das placas tectônicas; e até nos arriscamos a dizer que no final do período Cretáceo (há aproximadamente 65 milhões de anos) um grande meteoro atingiu a Terra, causando a maior extinção em massa de que se tem notícia.

Da mesma maneira, a cosmologia trata de reconstruir a história e a evolução do universo a partir das observações de suas estruturas visíveis e do estudo de fósseis que sobreviveram à ação do tempo. Assim como na geografia e na geologia, não podemos testar hipóteses e modelos cosmológicos através de experimentos, mas muitas vezes contamos com uma abundância quase inesgotável de eventos muito similares. A cosmologia é, portanto, uma *quase ciência*: apesar de não poder prever o resultado de nenhum experimento, ela se baseia na confirmação de leis e hipóteses através de um número estatisticamente significativo de observações.

QUE OBSERVAÇÕES?

A cosmologia moderna nasceu em 1926 com uma observação: Edwin Hubble notou que as galáxias distantes estão se afastando da nossa galáxia (a Via Láctea), de tal forma que a velocidade de recessão de uma dada galáxia é proporcional à distância até ela. Essa observação deu origem à famosa lei de Hubble, $v_g = H_0 \times d_g$, onde v_g é a velocidade da galáxia que está a uma distância d_g de nós e H_0 é o *parâmetro de Hubble* (às vezes também chamado *cons-*

tante de Hubble). A observação de Hubble foi imediatamente reconhecida por (quase) todos como revolucionária: ela demonstra que o universo está se expandindo.

Desde 1926, e principalmente nos últimos vinte anos, nosso conhecimento sobre o cosmos teve um salto de qualidade fenomenal. A tecnologia de telescópios, a construção de grandes observatórios em locais climaticamente mais propícios (Chile, Havaí, Ilhas Canárias, etc.) e a colocação de alguns deles em órbita espacial (Hubble Space Telescope, WMAP, Chandra, etc.), assim como os esforços concentrados de equipes multinacionais, significaram um imenso avanço na quantidade e na qualidade das observações astronômicas. Nos últimos anos as imagens do Hubble Space Telescope e os dados do WMAP (que mede a radiação cósmica de fundo, da qual falaremos mais adiante), por exemplo, têm tido impacto comparável ao de experimentos como os grandes aceleradores de partículas (Cern, Fermilab).

Quais são, então, as principais observações que permitem a formulação de uma teoria convincente do cosmos que é ao mesmo tempo simples e consistente com a física moderna?

A expansão do universo

Em primeiro lugar, hoje é absolutamente certo que o universo está se expandindo. Até onde podemos enxergar, quanto mais distante está um objeto, maior sua velocidade de recessão (afastamento) com relação a nós. Mas isso não significa que estejamos no centro do universo, pois essa expansão do universo é *homogênea e isotrópica*, ou seja, do ponto de vista de qualquer astrônomo, humano ou alienígena, qualquer que seja a galáxia onde se viva e qualquer que seja a direção para onde se aponte o telescópio, a mesma lei de Hubble será verificada (ver Figura 1).

A determinação da taxa presente de expansão do universo é feita a partir das observações de velocidades e distâncias de

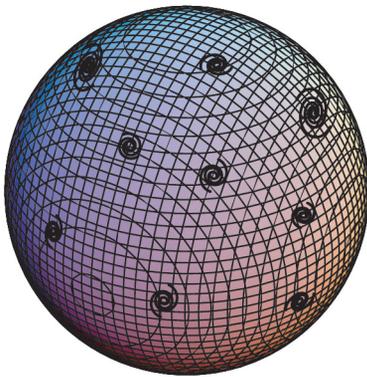
certas estrelas distantes que têm luminosidades extremamente regulares. Assim como um marujo estima a distância que o separa de um rochedo usando a luminosidade aparente de um farol, os astrônomos usam a luminosidade de certas “velas-padrão” para medir distâncias no universo. E assim como sabemos que uma ambulância está em alta velocidade porque ouvimos o tom (ou seja, a frequência da onda sonora) da sirene ficar mais grave ao nos ultrapassar, os astrônomos usam o desvio sofrido pela frequência da luz emitida desde uma estrela numa galáxia distante para calcular a velocidade com que a galáxia se afasta de nós. Vários grupos de astrônomos recentemente convergiram para um valor do parâmetro de Hubble H_0 de aproximadamente 70 km/(s Mpc), com uma incerteza de aproximadamente 10% nesse valor. O *mega-parsec* (Mpc) é a medida preferida de distâncias em cosmologia, e 1 Mpc é igual a 3.10^{24} cm – ou seja, a distância que um raio

de luz (que caminha à velocidade de 3.10^{10} cm/s) alcança em 3 milhões de anos, ou aproximadamente 15 vezes o tamanho da Via Láctea. Segundo a lei de Hubble, portanto, uma galáxia a um Mpc de distância de nós está se afastando a uma velocidade de 70 km/s, em média.

A quantidade de matéria no universo e as estruturas em que ela se encontra

Em segundo lugar, sabemos que o universo tem uma densidade de matéria *visível* – ou seja, matéria *bariônica* (prótons e nêutrons), elétrons e fótons – que não passa de 5.10^{-31} g/cm³. Isso equivale a um átomo de hidrogênio para cada três metros cúbicos, em média. É claro que essa matéria não está distribuída homogeneamente no universo, mas concentrada em estrelas, planetas, nuvens de gás, etc. Esses planetas, estrelas e nuvens, por sua vez, não estão espalhados homogeneamente no universo, mas fazem parte de estruturas maiores tais como nuvens de estrelas, aglomerados globulares e galáxias. E mesmo as galáxias também não estão bem distribuídas através do universo, mas se agrupam em aglomerados, onde centenas de galáxias formam uma imensa teia. De fato, o universo é ocupado por uma hierarquia de estruturas, desde escalas muito pequenas,

Figura 1



Uma boa analogia para a expansão homogênea e isotrópica do universo é a de galáxias pregadas na superfície de um balão de borracha que está sendo inflado. Suponha que habitamos um mundo de duas dimensões, ou seja, não existe “para cima” nem “para baixo”, mas apenas “para a frente”, “para trás”, “para a direita” e “para a esquerda”. Imagine que vivemos na superfície do balão, e que o balão está se expandindo. Quaisquer pontos da superfície do balão se afastam uns dos outros, sem que nenhum de nós, que vivemos em uma das galáxias na superfície do balão e não temos consciência da terceira dimensão, possa dizer que uma certa galáxia é mais “central” que qualquer outra. Do ponto de vista de qualquer observador, em qualquer galáxia, o “universo” (a superfície do balão) está se expandindo igualmente em todas as direções.

como sistemas solares, até escalas gigantescas, como superaglomerados de galáxias, que agregam aglomerados de galáxias e são as maiores estruturas que conhecemos, se estendendo por dezenas de megaparsecs e com massas dezenas de bilhões de vezes a massa do nosso Sol.

Um princípio básico caracteriza essa formidável hierarquia cosmológica: em todos os casos, quem exerce a coesão que preserva essas estruturas é a força gravitacional. De fato, a força gravitacional não só mantém todos esses objetos ligados entre si, mas é ela a própria responsável por sua formação.

A idade

Em terceiro lugar, as idades dos objetos astronômicos mais antigos que conhecemos (que certamente não são mais velhos que o próprio universo!) indicam que a idade do universo deve ser da ordem de 12 a 15 bilhões de anos.

A própria taxa de expansão do universo também pode ser usada para “rodar o filme de trás para frente” e simplesmente anotar o instante no qual a expansão parece ter começado – o famigerado big-bang. Note que o megaparsec é uma medida de distância, portanto a constante de Hubble, $H_0 = 70 \text{ km}/(\text{s Mpc})$, tem dimensões do inverso do tempo. Essa “idade da expansão do universo”, $T_0 = 1/H_0$, é igual a aproximadamente 14 bilhões de anos – de acordo, portanto, com a estimativa independente baseada na idade dos objetos mais antigos.

Relíquias de um passado remoto...

Em quarto lugar, a expansão do universo nos diz que o cosmos, que hoje é frio e rarefeito, teve necessariamente uma origem quente e densa – quem sabe até explosiva? Mas como testar esse big-bang, como verificar essa hipótese, como observar evidências de uma tal era “quente e densa” na qual

nem sequer as estrelas haviam se formado?

Quem propôs pela primeira vez a fantasmagórica idéia de que poderíamos observar numa “radiação cósmica de fundo”, as relíquias de um passado tão remoto, foi o físico russo-americano George Gamow e seus estudantes Ralph Alpher e Robert Herman, em 1948. Assim como as pinturas rupestres são um registro deixado pelo homem pré-histórico, a radiação de fundo é um fóssil do universo num passado longínquo (1).

Através da radiação cósmica de fundo temos uma fotografia do universo quando este tinha apenas 380.000 anos de idade. Esse retrato de um universo ainda bebê fornece informações essenciais para a cosmologia: a radiação de fundo nos dá as condições a partir das quais o universo assumiu sua forma atual. Ela também carrega marcas dos processos físicos que ocorriam naquele instante e, portanto, permite que testemos nossos modelos com um detalhe que poucas outras observações admitem.

... e outros fósseis

Além da radiação de fundo, existem evidências de tempos ainda mais remotos. As análises detalhadas dos elementos que compõem estrelas e nuvens de gás revelam que a matéria visível do universo é essencialmente composta por átomos de hidrogênio, hélio e, em menor medida, lítio e berílio – os elementos mais leves da tabela periódica. A proporção entre esses elementos é exatamente aquela prevista pela teoria da *nucleossíntese primordial*, que combina física nuclear com a hipótese de que o universo vem se expandindo e resfriando do modo previsto pela relatividade geral de Einstein.

Uma das conseqüências da teoria da nucleossíntese primordial é que praticamente todos os outros elementos da tabela periódica estavam ausentes no universo primordial, e foram gerados em tempos relativamente recentes no interior de supernovas – estrelas gigantescas que explodi-

1 A história das observações da radiação de fundo é um magnífico capítulo da cosmologia e pode ser encontrada no artigo de Thyrso Villela neste dossiê.

ram e semearam as galáxias como os frutos de suas entranhas. Ou seja: a maior parte dos átomos que compõem tanto o papel desta revista quanto os dedos que a manuseiam foi gerada há vários bilhões de anos, no interior de supernovas!

A CONSTRUÇÃO DO MODELO COSMOLÓGICO

A cosmologia busca então compreender esse conjunto de observações usando o arcabouço teórico da física moderna, principalmente a teoria da gravitação de Einstein, conhecida como *relatividade geral*.

Uma das primeiras aplicações da teoria da relatividade geral foi, de fato, a cosmologia: logo após a confirmação experimental de sua teoria pela observação do desvio gravitacional dos raios de luz e pela previsão correta da precessão do periélio de Mercúrio, Einstein passou a estudar o cosmos. Entretanto, em 1916 ainda se imaginava que o universo fosse aproximadamente estático, o que induziu Einstein a um pequeno deslize: já naquela época ele notou que as interações gravitacionais deveriam agir e se acumular sobre distâncias imensas, o que significa que, para que o universo fosse de fato estático, seria necessário algum mecanismo que contrabalançasse a atração gravitacional das galáxias. Einstein percebeu que poderia obter esse balanço naturalmente dentro de sua teoria, através de uma certa “constante cosmológica”. Todavia, Einstein não notou à época que, tal como um lápis equilibrado sobre sua ponta, seu mecanismo de estabilização do universo era altamente instável. Se aquele equilíbrio entre matéria e constante cosmológica sofresse qualquer minúsculo desvio, o universo descambaria, ou para um colapso causado pela atração gravitacional da matéria, ou para uma expansão desenfreada causada pela constante cosmológica. Einstein logo percebeu seu deslize e, mais tarde, amarguradamente qualificou o episódio de “*my biggest blunder*” (“meu maior vacilo”).

Cosmologia relativística

Apesar desse pequeno contratempo, e antes mesmo de Hubble divulgar seus resultados, A. Friedmann e W. de Sitter (seguidos, depois, por G. Lemaître, H. Robertson e A. Walker) demonstraram que um universo em expansão seria perfeitamente compatível com a teoria de Einstein. Esses precursores também determinaram uma consequência importante da relatividade geral: que a taxa de expansão do universo não depende apenas da massa da matéria que o preenche, mas também de sua pressão. No caso da matéria predominante ser do tipo “poeira” (ou seja, matéria tal como a que compõe as estrelas e planetas, que se move com velocidades muito lentas comparadas à velocidade da luz), a pressão seria muito pequena e a expansão um pouco mais rápida; no caso de “radiação” (matéria muito leve, com velocidades próximas ou iguais à velocidade da luz, tais como fótons e neutrinos), então a pressão seria considerável e a expansão um pouco mais lenta. Em ambos os casos, porém, a força da gravidade que atrai a matéria funciona como um freio, desacelerando a expansão do universo.

Esses desbravadores da cosmologia moderna também notaram um aspecto crucial da relatividade geral: a possibilidade de o espaço possuir uma “curvatura” intrínseca, que poderia alterar a dinâmica da expansão do universo. Para entender o significado dessa curvatura do espaço é útil retornar à nossa analogia do universo com apenas duas dimensões.

Imagine que seres bidimensionais habitam a superfície de uma folha (veja a Figura 2b). Se eles traçarem um triângulo e somarem os ângulos internos, verificarão o que Euclides já sabia – que a soma resulta em exatamente 180° . Mas suponha agora que os habitantes da superfície de uma esfera (Figura 2a) também tracem um triângulo e somem os ângulos internos: a resposta não será mais a da geometria euclidiana, mas algum número *maior* que 180° ! Finalmente, considere os habitantes da su-

perfície de uma sela (Figura 2c). Os geometras da sela diriam que, muito pelo contrário, a soma dos ângulos internos dos triângulos será sempre *menor* que 180° . Na verdade, todos estão certos: em cada caso a “curvatura” do espaço é diferente e, por essa razão, a geometria é bastante diferente nas três situações.

As superfícies de duas dimensões pertencem a uma dessas três categorias: ou são “fechadas” como a esfera, ou “abertas” como a sela, ou “planas” como a folha de

que os espaços homogêneos e isotrópicos de três dimensões podem ser fechados, abertos ou planos.

Aplicado à cosmologia, esse fato topológico implica que a curvatura do espaço pode agir de três maneiras distintas sobre a expansão do universo: ou ela aumenta a taxa de expansão (se o universo for aberto), ou ela diminui a taxa de expansão (se o universo for fechado), ou ela não tem efeito algum (se o universo for plano). Uma coisa, porém, é certa: desde que o universo esteja se expandindo de modo desacelerado, ao longo do tempo a influência da curvatura do espaço *sempre cresce*.

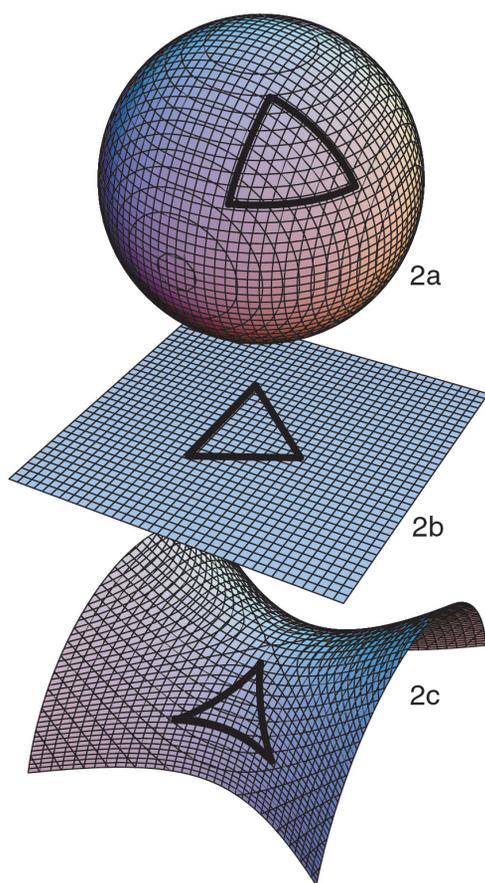
Nesse momento enfrentamos o primeiro “choque de realidade”: o universo claramente *não* é dominado pela curvatura. As observações (principalmente da radiação cósmica de fundo) são absolutamente claras a esse respeito: se o espaço no qual vivemos tem qualquer curvatura, ela é extremamente pequena. Como a tendência natural da curvatura seria de crescer de importância com o tempo, isso quer dizer que ela deveria, nos primórdios do universo, ser ainda mais irrisória do que é hoje – ou seja, totalmente insignificante.

Mas por que razão, entre todas as possibilidades disponíveis, o universo teria “escolhido” desde o início uma curvatura tão esdruxulamente pequena? Será que algum princípio metafísico misterioso preferiria que a curvatura fosse nula, ou será que poderíamos explicar esse número através de algum mecanismo que tenha logo suprimido a curvatura do universo?

Homogeneidade e isotropia

Quando observamos uma estrela distante, a luz que chega até nossos olhos passou milhões ou às vezes bilhões de anos viajando desde a superfície daquela estrela até nós. Quanto mais longe está um objeto, mais tempo sua luz demorou para chegar até aqui. Portanto, ao observarmos o universo através de objetos extremamente distantes, estamos observando aquele objeto no pas-

Figura 2



papel. A folha plana pode ser considerada como a situação-limite, em que o “aberto” e o “fechado” se encontram, ou seja, quando a curvatura é nula. Em três dimensões (o que é, aparentemente, o caso do espaço onde vivemos) ocorre praticamente o mesmo: desde o século XIX os matemáticos sabem

sado. Os objetos mais distantes que podemos observar em abundância emitiram sua luz quando o universo tinha apenas uns poucos bilhões de anos de vida, e alguns objetos estelares raros (quasares e galáxias muito ativas) emitiram a luz que captamos hoje quando o universo tinha apenas algumas centenas de milhões de anos.

Até onde podemos observar essas estrelas, galáxias e quasares, em todas as direções, o universo parece ter basicamente as mesmas características. Obviamente as estruturas não são exatamente as mesmas, mas o padrão geral se mantém, mesmo em escalas de comprimento gigantescas – da ordem de milhares de megaparsecs.

Porém, a observação que chega mais longe, tanto no espaço quanto no tempo, não é de uma supernova nem de um quasar: é a da radiação cósmica de fundo. A radiação de fundo foi gerada quando o universo tinha apenas 380.000 anos de idade, no momento em que os primeiros átomos neutros se formaram. Em torno dessa época o universo, que até então era composto por um plasma de núcleos atômicos leves e elétrons ionizados, esfriou o suficiente para que os núcleos capturassem os elétrons e a matéria neutra começasse a se formar. A luz, que até aquele momento ziguezagueava freneticamente entre o plasma ionizado, passou então a viajar praticamente intocada através da matéria neutra.

Hoje em dia somos capazes de observar em detalhe essa radiação primordial, que, devido à expansão do universo, perdeu quase todo seu ímpeto inicial e sobrevive apenas como um tênue banho de luz uniforme com uma temperatura característica de apenas 2,7 graus acima do zero absoluto – a título de comparação, a luz que ilumina este papel tem uma temperatura característica de milhares de graus.

Quem previu esse cenário foi George Gamow, em 1948, e os primeiros a observar de fato essa radiação de fundo foram os engenheiros de telecomunicações A. Penzias e R. Wilson, em 1965 (por isso ganharam o Prêmio Nobel de Física em 1978). Mais recentemente, uma espetacular série de experimentos, que culminou com o satélite

WMAP da Nasa, tem observado com incrível detalhe essa radiação de fundo (veja o artigo de Thyrso Villela neste dossiê).

Em poucas palavras, as observações da radiação cósmica de fundo nos dizem o seguinte: para onde quer que se apontem os detectores, a luz da radiação de fundo é *quase idêntica*. Isso significa que a temperatura e a densidade do universo nas regiões de onde emergiu a radiação de fundo eram *quase exatamente as mesmas*. Antes de discutir o porquê do “quase”, vamos nos indagar o porquê do “exatamente as mesmas”.

A radiação de fundo que medimos ao apontar nosso detector na direção do Pólo Norte, por exemplo, veio de uma região erma e distante do universo que jamais, até o momento de sua detecção, havia tido qualquer contato conosco. O mesmo vale para a radiação advinda da direção oposta. E se as regiões de onde vieram esses fótons estão tão afastadas assim de nós, então elas estão muito mais afastadas ainda umas das outras – de fato, tão afastadas que elas nunca teriam estado em contato.

Mas, nesse caso, por que razão as temperaturas e as densidades dessas regiões tão incrivelmente separadas umas das outras seriam tão bizarramente parecidas? Confrontados com esse fato, ou apelamos a um *hocus pocus* que determine que o universo *todo* deveria ter sido formado já com praticamente a mesma densidade e temperatura em todos os locais, ou então tentamos construir um mecanismo concreto que explique essa homogeneidade.

O “quase”

A radiação cósmica de fundo não é, afinal de contas, perfeitamente homogênea e isotrópica: a temperatura característica de seus fótons varia por um minúsculo fator, de aproximadamente 0.001%, dependendo da direção que se observa. Quando desenhamos o mapa dessas flutuações de temperatura num globo, notamos que algumas regiões são ligeiramente mais quentes e outras são ligeiramente mais frias, num

padrão aparentemente aleatório, sem qualquer ordem ou estrutura discernível (veja as figuras no artigo de Thyrso Villela).

Esse padrão de flutuações indica as condições iniciais a partir das quais as estruturas do universo se formaram. De fato, sabemos que a distribuição de matéria no universo era muito mais homogênea no passado do que é hoje em dia. Há dez bilhões de anos a maior parte das estruturas que observamos não havia ainda se formado, e se voltássemos ainda mais no passado veríamos que nem sequer as estrelas brilhavam – a matéria ainda estava distribuída quase homogeneamente através do universo. Ao longo do tempo a força gravitacional foi, pouco a pouco, aglomerando a matéria em torno das regiões um pouco mais densas e esvaziando as regiões um pouco menos densas, acendendo as primeiras estrelas e formando as primeiras galáxias.

A hipótese da formação de estruturas através de colapso gravitacional a partir de uma configuração quase homogênea é praticamente a única explicação razoável de que dispomos para justificar como se formaram as estruturas visíveis no universo. Para alívio geral, esse mecanismo gravitacional de formação de estruturas tem sido bem amparado pelas observações. Com apenas uma ressalva: o resultado desse processo – a atual “geografia” do universo – depende crucialmente do caráter das flutuações iniciais.

Isso portanto introduz mais uma questão espinhosa para a cosmologia: por que *esse* padrão particular de flutuações iniciais – chamado de “padrão gaussiano”? Por que as flutuações de 0.001%, por que essa distribuição espacial aparentemente aleatória, e, afinal, qual a origem dessas flutuações?

A INFLAÇÃO DO UNIVERSO

Em 1980 Alan Guth, um físico do Massachusetts Institute of Technology, propôs um mecanismo que poderia de uma tacada só: 1) suprimir a curvatura espacial; 2) dar conta da homogeneidade e isotropia do

universo observado; e 3) explicar a origem das flutuações iniciais.

Essa panacéia teórica é conhecida como *teoria da inflação* e basicamente supõe que o universo passou, nos primeiros instantes de vida, por uma fase de expansão *acelerada*. A expansão acelerada seria turbinada por uma forma de matéria conhecida como “campo escalar”, que funcionaria por um tempo como uma constante cosmológica (a mesma que produziria a expansão desenfreada no primeiro modelo cosmológico de Einstein), inflando o universo numa velocidade cada vez maior. Após fazer seu serviço, o campo escalar decairia e se transformaria nas formas conhecidas de matéria.

Por razões técnicas o primeiro modelo inflacionário de Guth não funcionou muito bem, mas a teoria foi sendo aprimorada e as encarnações atuais da inflação, assim como os estudos definitivos de seus desdobramentos, são devidos ao próprio Guth, Andrei Linde, Paul Steinhardt, Alexei Starobinski, Viatcheslav Mukhanov e outros.

Mas, afinal, como a inflação consegue resolver todos aqueles problemas?

Aniquilando a curvatura

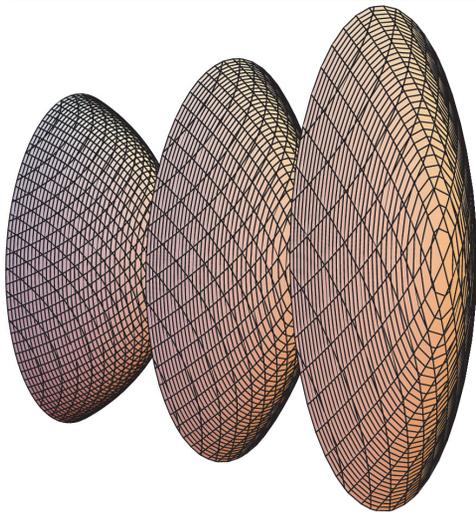
Durante uma fase de expansão acelerada o universo infla com uma velocidade crescente, ou seja, as distâncias espaciais são esticadas exponencialmente. Um pequeno volume inicial é multiplicado e se transforma num imenso volume, um grande volume inicial se transforma num gigantesco volume e assim por diante.

A expansão inflacionária é tão rápida que um objeto que esteja muito distante não conseguirá sequer fazer com que um sinal de luz chegue até nós. No jargão físico, dizemos que durante a inflação ocorre a formação de um “horizonte cosmológico”. No instante em que um objeto “cai” para fora do nosso horizonte (que é o mesmo instante em que nós caímos fora do horizonte do objeto), perdemos qualquer possibilidade de contato com aquele obje-

to. Por mais que tentemos nos reaproximar dele, a expansão do universo nos afastará mais rápido. De um certo modo, durante a inflação o paradoxo de Zenão se torna uma realidade: a cada passo que damos, tentando nos aproximar de um objeto muito distante, mais nos afastamos dele!

Mas essa expansão desenfreada tem um efeito ainda mais interessante: ela torna a curvatura do espaço (que era um aspecto

Figura 3



embaraçoso de nossa teoria sobre o big-bang) completamente irrelevante. Vamos supor que partimos de um universo fechado – semelhante à Figura 2a. Com a inflação, o raio desse universo cresce exponencialmente. Se construirmos um triângulo e medirmos os seus ângulos internos, a soma desses ângulos, que antes da inflação era algum número superior a 180° , se aproximará cada vez mais dos 180° da geometria euclidiana enquanto durar a inflação (veja a Figura 3). Esse universo bidimensional se parecerá cada vez mais com uma folha plana. Para nossos comparsas bidimensionais, a curvatura do universo terá se tornado totalmente irrelevante quando seus melhores instrumentos de medida não puderem mais determinar com certeza se a soma dos ângulos de triângulos é igual, ou

apenas ligeiramente superior, a 180° .

O mesmo ocorre com o espaço tridimensional que habitamos: uma fase de expansão acelerada transforma um universo com curvatura espacial (aberta ou fechada) num universo que é, para todos os efeitos práticos, plano. É bem verdade que após o final da era da inflação a curvatura volta a crescer de importância, mas a partir de um patamar tão irrisório que seriam necessários vários bilhões de bilhões de anos para que ela voltasse a ser detectável.

A pasteurização do universo

A expansão acelerada do universo também implica que aquilo que no início era o nosso quintal terá se transformado, após a inflação, num gigantesco latifúndio. Tipicamente, a inflação prevê que as distâncias são multiplicadas por um fator maior que 10^{30} . Ou seja, toda a parte observável do universo hoje, até distâncias de 6.000 Mpc (ou aproximadamente 2×10^{28} cm), poderia ter emergido de uma região que, antes da inflação, tinha apenas um décimo de um milímetro de comprimento.

Portanto a inflação é um agente homogeneizador: como todo o universo visível teria emergido da mesma vizinhança no passado remoto, é natural que hoje regiões que parecem incrivelmente remotas tenham as mesmas características gerais, a mesma temperatura média, o mesmo padrão de estruturas, etc. Isso dá conta da razão pela qual o universo parece ser tão homogêneo e isotrópico.

Embriões quânticos

Mas se a inflação pasteuriza o universo com tamanha eficiência, por que ele não é hoje completamente homogêneo, mas sim repleto de estruturas? De onde vieram as pequenas flutuações de densidade que deram origem a essas estrelas, galáxias e aglomerados?

Talvez o mais fascinante aspecto da inflação é que ela guarda as sementes de onde cresceram as estruturas. Curiosamente, a explicação envolve não apenas a relatividade geral de Einstein (que dá suporte ao período de expansão acelerada), mas também esse outro pilar da física moderna que é a mecânica quântica.

No coração da mecânica quântica está o princípio da incerteza, formulado por W. Heisenberg. Uma das conseqüências das relações de incerteza é que não é possível determinar com absoluta precisão por quanto tempo um certo sistema físico possui uma certa quantidade de energia.

Segundo a mecânica quântica, todos os graus de liberdade físicos possuem flutuações intrínsecas, que vão sobreviver por mais que se isole ou se esfrie aquele sistema. Mesmo o vácuo, o “vazio absoluto”, deve possuir pequenas flutuações: pares de partículas virtuais que surgem do nada e logo depois se aniquilam. Esse fato é testado diariamente em experimentos de colisões de partículas a altas energias, e é uma das mais bizarras (e mais bem confirmadas) conseqüências da mecânica quântica.

A teoria da inflação apenas assume que, se esse princípio vale hoje, deve também ter sido válido no universo primordial: pares virtuais de partículas devem ter surgido e se aniquilado então, assim como o fazem agora. Porém, se adicionarmos a esse mecanismo o ingrediente da expansão acelerada do universo, chegamos a um surpreendente resultado: suponha que um par de partículas seja criado do vácuo, num universo em expansão acelerada. Se esse par se afastar demais, há uma possibilidade (pequena, mas não nula) de que a expansão acabe por arrastar uma partícula para longe da outra, impossibilitando que elas se reencontrem e se aniquilem. Isso significa que uma “flutuação quântica” pode ser convertida, através da expansão do universo, em uma partícula real. Com isso, regiões onde por acaso mais partículas foram criadas terão uma densidade maior do que outras regiões, onde o número de partículas criadas foi menor. Em

outras palavras, a inflação é uma magnífica cornucópia quântica, capaz de arrancar matéria do vácuo.

O que a inflação prediz

Devido à expansão do universo, logo após sua geração uma perturbação já começa a aumentar de tamanho, assim como ocorre com uma borracha que vai sendo esticada. Como esse processo (geração e esticamento de perturbações) ocorre continuamente, a inflação vai gerando perturbações em todas as escalas de comprimento, desde as microscópicas (logo após a geração de uma perturbação) até escalas cosmologicamente grandes.

Esse processo não só *pode* ocorrer, como *deve* ocorrer em todos os pontos do espaço com igual probabilidade. Se a expansão do universo tiver aproximadamente a mesma aceleração durante a inflação, então a quantidade de partículas criadas por unidade de volume e por unidade de tempo será também constante, e portanto o padrão dessas perturbações de densidade deve se manter ao longo da inflação. Isso significa que, tanto em pequenas escalas quanto em grandes escalas de comprimento, as perturbações têm aproximadamente a mesma amplitude – dizemos que as perturbações são *invariantes de escala*. Esse padrão muito particular de perturbações de densidade invariantes de escala já tinha sido sugerido antes mesmo da formulação da inflação, nos anos 70, através de argumentos de cunho estético e fenomenológico, por Edward Harrison e Yakov Zeldovich – o grande físico e cosmólogo russo, pai da bomba de hidrogênio da União Soviética.

Aqui temos então uma previsão muito clara e específica da teoria da inflação: que o universo emergiu desse período de expansão acelerada repleto de perturbações de densidade invariantes de escala. Podemos testar diretamente essa previsão ao observar as perturbações numa época bastante remota, em que elas ainda conservavam as características com as quais nasce-

ram. Isso é possível justamente através da radiação cósmica de fundo. E as observações recentes da radiação de fundo obtidas pelo satélite WMAP foram categóricas: as perturbações no universo primordial seguem exatamente o padrão previsto pela teoria da inflação.

Ressaca

O paradigma do universo inflacionário tem obtido sucessos estrondosos em explicar o início do universo. Ele permite a compreensão da maior parte das observações astronômicas usando simplesmente a física que já usamos e testamos aqui na Terra.

Mas, apesar desses sucessos, muitos aspectos da cosmologia e da própria inflação ainda permanecem *sub judice*. Talvez o principal problema que nos acomete hoje em dia é que, de toda a massa no universo, apenas 5% parecem ser feitos de matéria “normal” – ou seja, aqueles tipos de matéria cuja existência pudemos comprovar por experimentos e observações diretas na Terra, como bárions (prótons e nêutrons), elétrons, fótons e neutrinos.

De fato, as observações que buscam “pesar” o universo, desde estimativas da matéria que mantém as galáxias e aglomerados coesos, até observações que buscam medir diretamente a quantidade total de energia no universo, são unânimes em afirmar que a matéria “normal” é uma mera coadjuvante. A massa do universo parece ser dominada por duas formas fantasmagóricas de matéria: a primeira, chamada de *matéria escura*, seria responsável por aproximadamente 25% da energia do universo e estaria gravitacionalmente ligada às estruturas visíveis do universo, na forma de imensos halos ao redor de galáxias e de aglomerados de galáxias (2). A segunda forma de matéria causa ainda mais perplexidade, pois, apesar de perfazer mais de dois terços da densidade de energia do universo, não parece ter nenhuma associação com a matéria normal. E, para a surpresa geral, descobriu-se recentemente que

essa forma escura de energia seria responsável por uma *aceleração* do universo nos dias de hoje!

O UNIVERSO ESTÁ ACELERANDO?

Uma das conseqüências da relatividade geral é que, se o universo está se expandindo, então a atração gravitacional da matéria que está espalhada pelo cosmos deve causar a desaceleração dessa expansão – assim como a elasticidade da borracha de um balão resiste à inflação do balão. Essa desaceleração deveria ter sido observada ao se analisar em detalhe a expansão do universo, por exemplo, através de distorções da lei de Hubble. Todavia, até recentemente as medidas da desaceleração da taxa de expansão do universo eram infelizmente por uma pequena quantidade de observações e uma tecnologia ainda inadequada.

Isso mudou a partir do final da década de 1990, quando astrônomos americanos e europeus foram capazes de, rapidamente, apontar poderosos telescópios (entre eles o Hubble Space Telescope) na direção de supernovas distantes que haviam acabado de explodir. Usando a notável similaridade entre essas estrelas, eles puderam mapear a expansão do universo em escalas antes inimagináveis. Para estupefação desses pesquisadores, e de quase toda a comunidade científica de cosmologia, foi constatado que o universo não está hoje em uma fase de desaceleração, como esperaríamos caso a matéria predominante fosse do tipo “normal”: ao contrário, o universo parece estar se *acelerando*, desde há pelo menos uns cinco bilhões de anos!

Pausa contemplativa

Apesar da persistência de pequenas dúvidas quanto à validade e interpretação dos resultados das supernovas, há várias outras indicações de que algo estranho (e

2 Veja o artigo de Rogério Rosenfeld neste dossiê.

escuro) parece ser a forma predominante de energia no universo. De fato, nenhuma observação cosmológica é inconsistente com a aceleração do universo, e várias observações apontam diretamente para uma aceleração.

Esse consenso observacional pegou os cosmólogos teóricos de surpresa. Antes das supernovas não havia quase nenhuma indicação de que o universo pudesse se comportar de modo tão inesperado. Mas, ao contrário de provocar uma catatonia criativa, essas observações provocaram os cientistas a buscar respostas para o fenômeno.

A primeira explicação aventada, e de certo modo a mais simples, remonta aos tempos de Einstein e invoca a constante cosmológica – também chamada de “energia do vácuo”. A constante cosmológica funciona praticamente como uma antigravidade em largas escalas, afastando cada vez mais rápido objetos distantes. Agindo sozinha, provocaria a eventual inflação do universo; em combinação com outros tipos de matéria, poderia ter uma influência irrisória por um longo tempo, mas, ao fim e ao cabo, acabaria dominando todo o resto e impor a sua taxa de expansão acelerada. Essa constante cosmológica teria sempre existido – seria simplesmente mais uma constante da natureza, ao lado da constante de Newton, da carga do elétron e da velocidade da luz, por exemplo.

Porém, algumas peculiaridades com a constante cosmológica causam grande desconforto estético a muitos físicos. Em primeiro lugar, a física teórica prevê que a constante cosmológica é relacionada às interações mais fundamentais da natureza através da “energia de vácuo”. Mas as previsões feitas através desses argumentos indicam que essa energia de vácuo deveria ser 10^{120} vezes maior do que o observado – o que é provavelmente o mais embaraçoso número que a física jamais legou à humanidade.

Em segundo lugar, temos um problema de coincidência: se a constante cosmológica é de fato uma constante, por que somente agora, no atual momento da história do universo, é que seu efeito começa a ser

sentido? Para que só nos dias de hoje ela tenha se mostrado eficaz para provocar a aceleração do universo, seria preciso que seu valor fosse 10^{40} vezes menor que qualquer outra escala de energia na época em que os primeiros núcleos atômicos se formaram. À época da inflação, essa diferença deveria ter sido de um fator 10^{100} !

Números tão esdrúxulos geralmente acusam uma falha em nossa compreensão dos mecanismos reais por trás das coisas. Esse conflito tem gerado grande atividade entre os teóricos, que buscam explicações mais razoáveis para o fenômeno da aceleração do universo.

Até o momento ainda não surgiu nenhuma resposta inteiramente satisfatória. Modelos rudimentares para explicar essa “energia escura” têm sido propostos, na maior parte utilizando os mesmos “campos escalares” que teriam provocado o período inflacionário nos primórdios do universo – afinal de contas, tanto aquela fase quanto a atual seriam de expansão acelerada. Porém ainda não está claro se esses modelos trazem grande vantagem com relação à boa e velha constante cosmológica. De qualquer modo, os cientistas têm trabalhado com ferocidade para encontrar respostas (3).

OLHANDO PARA A FRENTE

Hoje parece mais evidente que nunca que precisamos de novas idéias. A cosmologia vem sendo movida pela força das observações, informadas por uma teoria que tem funcionado razoavelmente bem – o que é um ótimo termômetro, pois indica que grandes avanços estão sendo feitos. Porém, para que essa parceria continue a dar frutos, os teóricos têm que encontrar respostas mais convincentes para os enigmas que insistem em nos desafiar. Entre outros embaraços, precisamos urgentemente explicar onde, e em que forma, o universo escondeu 95% de sua energia. As respostas para essas perguntas podem transformar, mais uma vez, o modo como enxergamos o universo.

3 Leia também o artigo de José Ademir Salles de Lima, neste dossiê, a respeito da aceleração do universo.

