

O ESTRANHO UNIVERSO EM QUE VIVEMOS

Raul Abramo

Quando, no começo do século XX, o astrônomo e ex-advogado Edwin Hubble resolveu utilizar o poderoso telescópio do Observatório de Monte Wilson, na Califórnia, para caçar as estrelas variáveis conhecidas como *cefeidas*, ele atirou no que viu e acertou no que não viu. Como todos sabemos hoje, Hubble acabou descobrindo que aquelas estrelas habitam outras galáxias, muito distantes da nossa galáxia (a Via Láctea) (1); que essas galáxias estão todas se afastando umas das outras, tão mais rápido quanto mais longe estiverem umas das outras; que esse afastamento mútuo implica que o universo está se expandindo; e que a contrapartida inexorável dessa expansão é o parto quente e explosivo do nosso universo há uns 14 bilhões de anos atrás — o Big Bang. Assim, as cefeidas foram os primeiros faróis a iluminar o descobrimento do universo pelo homem, e o primeiro navegador desses mares intergalácticos foi Edwin Hubble.

Mas, antes de enveredarmos pelo abismo que separa nossa experiência humana da imensidão acachapante do espaço sideral, vale a pena refletir: o que é o “universo”? Uma definição rigorosa diria que o universo é tudo que existe ou que existiu — incluindo o próprio espaço onde esse “tudo” existe, e o tempo em que esse “tudo” vive. Uma outra definição, mais provisória e flexível, contabiliza só aquela parte do universo que realmente importa de um ponto de vista pragmático: nosso universo compreende tudo aquilo que é observado (medido) por nós.

É desse universo observado que tratam a física e a astronomia, com seus papéis complementares de descrever as leis que regem o universo e o estado em que ele se encontra. Podemos dizer, portanto, que o universo de que trata a cosmologia se alarga à medida que os novos telescópios fazem avançar o horizonte da nossa visão, incluindo cada vez mais fenômenos, enriquecendo nossa galeria de objetos e exigindo cada vez mais força e consistência da teoria que almeja explicar a natureza do cosmos. Essa teoria, o Modelo Cosmológico Padrão (MCP), tem como base teórica as leis da física (em particular a relatividade geral e a mecânica quântica), e tem servido formidavelmente bem aos propósitos de explicar a evolução do nosso universo desde a sua mais tenra idade até os dias de hoje.

Porém, nem tudo vai bem na cosmologia. Porque, para compreender aquilo que enxergamos, com as leis físicas que conhecemos, precisamos postular coisas invisíveis.

O LADO ESCURO DO UNIVERSO Assim como Hubble foi o primeiro cientista a detonar as noções pré-históricas de um universo estático e imutável, seu colega de profissão e rival do vizinho Instituto de Tecnologia da Califórnia, Fritz Zwicky, foi o primeiro

a notar que algumas peças cruciais daquela fabulosa nova teoria estavam faltando (2).

Zwicky observou durante a década de 1930 o aglomerado de galáxias de Coma, no qual centenas de galáxias ocupam um espaço muito pequeno, tal qual um enxame de abelhas. A única força que mantém as galáxias de um aglomerado juntas é a força gravitacional entre cada uma das galáxias do aglomerado e todas as outras, o que não permite que nenhuma delas escape para fora do enxame e assim mantém o aglomerado coeso. Ele contou, então, cuidadosamente, as galáxias do aglomerado, estimou seus tamanhos e massas e mediu suas velocidades. Seus resultados foram absolutamente inacreditáveis: para que as galáxias no aglomerado de Coma não saíssem voando, seria necessário que a massa total daquele aglomerado fosse muitas vezes superior à massa das galáxias que Zwicky contabilizou (400 vezes, segundo suas observações na época; hoje sabemos que esse número é da ordem de 10). Cientista furiosamente metódico e supinamente confiante que era, Zwicky sabia que não havia cometido erro algum: ele tinha certeza de que dentro daquele aglomerado de galáxias havia mesmo muito mais matéria do que poderia ser observada por telescópios, matéria que não emitia nem refletia luz alguma. Esse resultado foi replicado em todos os outros aglomerados de galáxias jamais observados, e assim se estabeleceu a noção da *matéria escura*: a quantidade de matéria que fica faltando para explicar por que os aglomerados de galáxias permanecem coesos.

Mas os aglomerados de galáxias não são as únicas evidências de matéria escura: na segunda metade do século XX diversos astrônomos, principalmente Vera Rubin (3) do Instituto Carnegie de Washington, perceberam que as próprias galáxias não poderiam girar da maneira que eram observadas se apenas a massa de suas estrelas e o gás intergaláctico fossem contabilizados. Parecia, portanto, que todas as grandes estruturas do universo (galáxias, aglomerados, “aglomerados de aglomerados”, e assim por diante) são compostos por uma parte visível, feita de estrelas, planetas e gás, e que respondem por apenas 10% da massa total; e que os outros 90% da massa são compostos por uma outra parte invisível, como um halo difuso — a matéria escura.

Naturalmente, a primeira hipótese que se fez é que essa matéria escura seria simplesmente matéria normal, átomos frios e escuros que não estariam emitindo luz. Porém, ainda em meados da metade do século XX já se sabia que essa explicação estava errada, por duas razões. Primeiro, mesmo os átomos frios e inertes têm a capacidade de absorver e re-emitir luz e, portanto, não são totalmente escuros. Como os sinais de átomos escuros no universo são muito fracos, eles não poderiam explicar mais do que uma pequena fração da matéria faltante. A segunda razão pela qual a matéria escura não pode ser feita de átomos normais esbarra em um dos mais fascinantes capítulos da cosmologia. Uma das consequências do início quente e explosivo do universo (o Big Bang) é que numa época muito remota, quando o universo tinha menos de um minuto de vida, a temperatura era tão alta que não existia nenhum núcleo atômico — apenas uma sopa de partículas elementares: bárions (prótons e nêutrons), elétrons, neutrinos, etc. À medida que o universo foi se resfriando, essa sopa foi coagulando e os primeiros núcleos atômicos (principalmente

hidrogênio e hélio) puderam se formar. Acontece que essa “receita de bolo” para formar elementos leves é obra de um cozinheiro perfeccionista: qualquer mínima alteração na quantidade de matéria bariônica (prótons + nêutrons) da sopa levaria a uma proporção final de elementos atômicos completamente diferente da observada.

As observações das abundâncias desses elementos leves no universo confirmam espetacularmente a descrição da nucleossíntese, e demonstram que a matéria bariônica está presente em pequenas quantidades, consistentes com o total da matéria visível observada.

Portanto, se quisermos explicar a dinâmica de galáxias e aglomerados não podemos simplesmente postular uma quantidade de átomos frios cinco ou dez vezes maior que a diretamente observada, sob o risco de todo o MCP desabar.

Desse modo, ficamos na incômoda posição de ter de admitir que, primeiro, em todas as grandes estruturas do universo, de 80% a 90% de massa estão numa componente escura; e, segundo, que essa componente escura não é feita de átomos “normais”, mas de uma outra forma de matéria. Os físicos e astrônomos precisavam de uma pista, e rápido. Mas como resolver um caso de polícia como esse, em que o seu principal suspeito é o homem invisível?

CAÇANDO FANTASMAS Explicar algo apelando-se para a “matéria invisível” cheira a mistificação. E os cientistas, naturalmente, relutaram muito antes de engolir a noção de uma matéria escura não-bariônica. O assunto gerou décadas de muita controvérsia, e deu origem aos mais diversos modelos alternativos que tentavam explicar o comportamento de galáxias e aglomerados apenas com a matéria visível. Vários desses modelos buscam alterar a própria força da gravidade, que se comportaria de modo diferente em galáxias e aglomerados, comparado com as leis de gravidade que observamos na Terra e no sistema solar. Outras explicações introduzem uma “quinta força”, que seria uma interação fundamental diferente das conhecidas (as forças gravitacionais, eletromagnéticas, nuclear forte e nuclear fraca). Ou seja, trocaríamos uma matéria desconhecida por uma interação fundamental desconhecida, mas continuaríamos sem uma explicação muito convincente.

Porém, em 2006 um grupo liderado por Douglas Clowe, do Observatório Steward, no Arizona, fez uma série de observações que, praticamente, encerrou as controvérsias e deu fortes evidências da matéria escura não-bariônica (4). Eles observaram o chamado Aglomerado da Bala (também conhecido como 1E0657-56), que, na verdade, é o resultado da colisão de dois aglomerados de galáxias. Essas observações, tanto em astronomia óptica quanto em raios-X (a melhor maneira de detectar o gás quente que permeia os aglomerados) revelaram algo surpreendente.

Se a teoria da matéria escura estivesse correta, um aglomerado de galáxias seria composto de átomos (uns 10%, a maior parte disto na forma de gás) e a própria matéria escura (uns 90%). Se dois aglomerados são jogados um contra o outro, essas duas componentes se comportam de modos muito distintos: enquanto a matéria normal interage entre si, assim como os nossos átomos interagem com os átomos do papel desta revista, a matéria escura não interage com nada, e atravessa tudo como se fosse um fantasma. Isso

ESA (Agência Espacial Europeia)

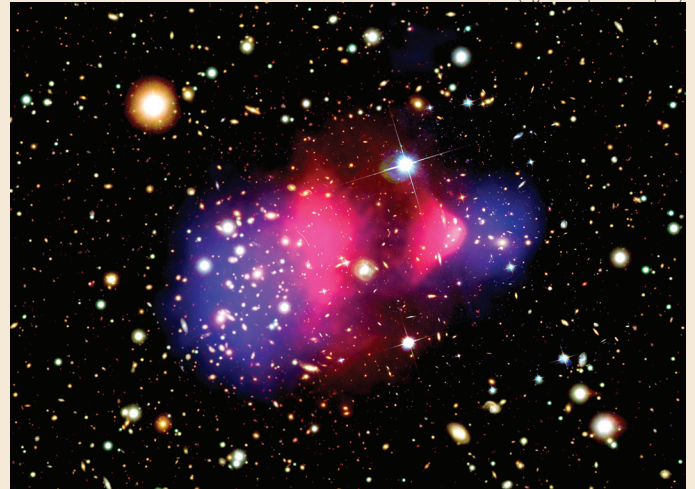


Figura 1 – Aglomerado da Bala. Superposição do mapa do aglomerado de Bala em raios-X com o mapa da massa (obtida por meio do efeito de lentes gravitacionais). Esses mapas revelam que a maior parte da massa do aglomerado, que é o resultado da fusão de dois aglomerados, está localizada em duas manchas azuis, distantes do local da colisão. As manchas avermelhadas representam o gás, que é feito de matéria normal e representa menos que 10% da massa total do sistema.

significa que, numa colisão de aglomerados, a matéria normal de fato colide, enquanto a matéria escura passa batida. Se observarmos uma fotografia num instante após a colisão, portanto, veremos uma confusão de matéria bariônica no centro (o ponto onde ocorreu a colisão), e duas concentrações de matéria escura, uma de cada lado do ponto de impacto.

O leitor atento perceberá que encaixamos aqui um elemento novo: como é que podemos “detectar” essa massa, se ela é, em sua maior parte, invisível? A resposta para essa pergunta passa por ninguém menos que Albert Einstein. Depois de formular sua teoria da gravitação (a relatividade geral), em 1916, Einstein mostrou que a presença de uma massa tem o efeito de “atrair” os raios de luz. Esse desvio na trajetória da luz é chamado de lente gravitacional — pois, assim como uma lente comum deforma os raios de luz, a força gravitacional também pode gerar imagens deformadas de objetos como estrelas ou galáxias.

O que os astrônomos que observaram o Aglomerado da Bala fizeram foi mapear, cuidadosamente, a deformação dos raios de luz ao redor do aglomerado. Eles utilizaram esse mapa da lente gravitacional do aglomerado para determinar onde estava, e como estava distribuída, a sua massa.

O resultado dessas duas observações complementares (de matéria normal, observada em raios-X; e de matéria escura, mapeada pelo efeito de lente gravitacional) está mostrado na figura 1. Perto do centro, em vermelho, estão as nuvens de gás (principalmente hidrogênio e hélio), em dois pedaços que evidentemente interagiram entre si; o pedaço da direita tem o formato de uma bala atravessando um objeto — daí o nome “Aglomerado da Bala”. Em ambos os lados

da figura, em azul, estão denotadas as maiores concentrações de massa do sistema. Claramente, essa massa não parece ter sido afetada pelo processo de colisão. Em termos da massa de cada uma dessas componentes, a “azul” detém 90% do total, enquanto a matéria “vermelha” fica com os 90% restantes.

Essa figura demonstra três fatos muito importantes: primeiro, que a matéria escura de fato não parece interagir com nada, nem com matéria normal, nem com ela mesma. Segundo, que a maior parte da massa de um aglomerado está nessa componente “azul”, que não interage com mais nada — a matéria escura. E, terceiro, que a componente azul está num local totalmente diferente da componente vermelha. Esse terceiro fato é crucial para eliminar as teorias nas quais não existe matéria escura (5,6), mas sim uma modificação das leis da gravidade. Mas, como essas teorias não conseguem explicar uma força da gravidade que aponta para um lugar diferente de onde está a matéria, elas foram descartadas.

No entanto, por mais que as observações do Aglomerado da Bala apontem firmemente para a teoria da matéria escura, não podemos dizer que elas constituam uma “evidência direta” de matéria escura. Para isso, teríamos que ser capazes de detectar sinais diretos emitidos pelas partículas elementares que constituem a matéria escura — que não podem ser nenhuma das partículas conhecidas pelo homem até hoje. Mas, para observar diretamente esses sinais com experimentos que, necessariamente, são feitos de matéria normal (átomos), a matéria escura deveria interagir ao menos um pouco com a matéria normal, ou então duas partículas de matéria escura poderiam se aniquilar mutuamente, gerando partículas de matéria normal.

Existem sinais sutis de que talvez esse segundo processo (aniquilação de partículas de matéria escura) esteja ocorrendo em lugares onde há uma grande concentração de matéria, como o centro da nossa galáxia. Em 2008, o satélite Pamela, resultado de uma colaboração entre instituições italianas e russas, detectou uma misteriosa emissão de elétrons e anti-elétrons (também conhecidos como pósitrons) que têm como origem o centro da Via Láctea (7). A emissão de elétrons e pósitrons, em si, não é nenhuma novidade, e poderia ser explicada por diversos processos astrofísicos, como pulsares (um pulsar é uma estrela de nêutron com campos magnéticos fortíssimos, que gira rapidamente e emite um feixe de radiação). Porém, o que tem despertado a curiosidade dos cientistas é que mais pósitrons do que elétrons foram detectados acima de uma certa energia. Esse excesso de pósitrons detectado pelo satélite Pamela é precisamente o sinal que se espera, em diversas teorias, do resultado da aniquilação de duas partículas de matéria escura. Porém, esse resultado ainda é inconclusivo, e outras observações serão necessárias para descartar as outras possíveis fontes que possam explicar o excesso de pósitrons.

MAIS UM MISTÉRIO: A ACELERAÇÃO DO UNIVERSO Como se não bastasse um grande enigma sem solução para agitar os mares da cosmologia, um outro mistério surgiu em 1998, quando dois grupos

de astrônomos revelaram o resultado de observações de supernovas do tipo Ia (8,9).

Assim como as cefeidas de Hubble, as supernovas Ia têm uma curiosa característica: suas luminosidades são variáveis. O que as cefeidas e as supernovas Ia têm em comum é que essa variabilidade de seus brilhos pode ser utilizada para estimar a distância até esses objetos. Porém, enquanto as cefeidas são estrelas relativamente normais cujos brilhos oscilam em períodos curtos e muito bem definidos, as supernovas são estrelas que explodem. Portanto, o brilho de uma supernova cresce muito por um breve período, e depois diminui à medida que a explosão termina (do começo ao fim, essa explosão dura algumas dezenas de dias). No pico de sua luminosidade, uma supernova Ia pode brilhar mais do que toda uma galáxia, o que a torna uma *vela-padrão* (uma medida padronizada de luminosidade) incomparavelmente mais poderosa que qualquer cefeida. Isso significa que as supernovas Ia nos permitem ir muito mais além do ponto onde Hubble pode observar o universo com as cefeidas, e testar não só a expansão do universo, mas também como essa expansão tem evoluído no tempo. O único inconveniente das supernovas Ia é que, como toda explosão, elas são processos bastante imprevisíveis e, portanto,

ao contrário das cefeidas que são bem entendidas e permitem uma calibração precisa das distâncias, no caso das supernovas Ia, são mal compreendidas e não permitem deduzir as distâncias até elas com grande precisão.

Quando os astrônomos traçaram a evolução da expansão do universo com o tempo, através das observações de supernovas Ia, tivemos mais uma surpresa: depois de dez bilhões de anos se expandindo da maneira esperada (desaceleradamente), o universo passou a acelerar sua expansão e, durante os últimos quatro bilhões de anos, o universo começou a se expandir cada vez mais

rápido (aceleradamente)!

Na verdade, essa surpresa não foi tão grande assim, pois algumas vezes isoladas já vinham dizendo que essa aceleração era uma forte possibilidade (10). Esses arautos do universo acelerado baseavam suas conclusões num outro tipo de observação, que busca “pesar” o universo como um todo. Quando “botamos o universo na balança”, percebemos que sua massa total é bem maior do que a soma das massas da matéria normal e da matéria escura. Mais precisamente: o universo seria aproximadamente 5% de matéria normal, 25% de matéria escura e os 70% restantes de alguma outra componente desconhecida, que seria a responsável pela inesperada aceleração do universo, a *energia escura*.

UMA BALANÇA PARA PESAR O UNIVERSO Para entender como funciona essa “balança cósmica”, temos de tocar numa das outras pedras fundamentais da cosmologia, que é a radiação cósmica de fundo. Nos primórdios do universo, as altas temperaturas impediam que átomos neutros pudessem se formar — tudo que existia eram núcleos atômicos de carga positiva (compostos por prótons e nêutrons) e elétrons livres de carga negativa, formando um *plasma*

NO PICO DE SUA LUMINOSIDADE, UMA SUPERNOVA TIPO IA PODE BRILHAR MAIS DO QUE TODA UMA GALÁXIA

de partículas carregadas. Demorou 380 mil anos desde o Big Bang para que a temperatura do universo baixasse o suficiente para que os elétrons livres pudessem ser capturados pelos núcleos, formando os átomos neutros.

A principal consequência da existência desse plasma de íons carregados no universo primordial foi que, durante 380 mil anos, o universo era um local totalmente opaco para a luz. Como a luz é facilmente absorvida e re-emitada por partículas com cargas elétricas, ela apenas podia se propagar por curtíssimas distâncias — pelo menos enquanto aquele plasma perdurou. Isso significa que até uma idade de 380 mil anos, o plasma e a luz estavam como que em equilíbrio — ou seja, eles compartilhavam a mesma temperatura.

Mas, à medida que o universo esfriou devido à sua expansão, quase todas as partículas carregadas foram se combinando, formando átomos neutros, e os obstáculos para a propagação da luz se esvaneceram. Nesse momento, o universo ficou transparente para a luz, e praticamente nada afetou a radiação desde aquele momento. Aquela radiação, presente em todos os lugares, passou a se propagar em todas as direções, e hoje preenche todo o espaço — por isso o nome, “radiação cósmica de fundo”. A previsão teórica dessa radiação que “desacoplou” da matéria numa era muito distante do passado foi feita por volta dos anos 1950 pelo russo-americano George Gamow e seus estudantes (11, 12).

Hoje em dia, podemos observar essa radiação de fundo em telescópios que detectam microondas (muito parecidas com aquelas do forno de microondas e dos telefones celulares, mas com intensidades muitíssimo menores). Como essa radiação não foi afetada por mais nada desde a época em que o universo tinha 380 mil anos de idade até hoje, quando a observamos, ela constitui uma fotografia do estado inicial do universo quando ele tinha uma fração da idade que ele tem hoje (aproximadamente 14 bilhões de anos). As primeiras observações mais detalhadas da radiação cósmica de fundo foram feitas pelo satélite Cobe, da Nasa (Agência Espacial Americana), e renderam o Prêmio Nobel de Física de 2006 aos norte-americanos George Smoot e John Mather (13).

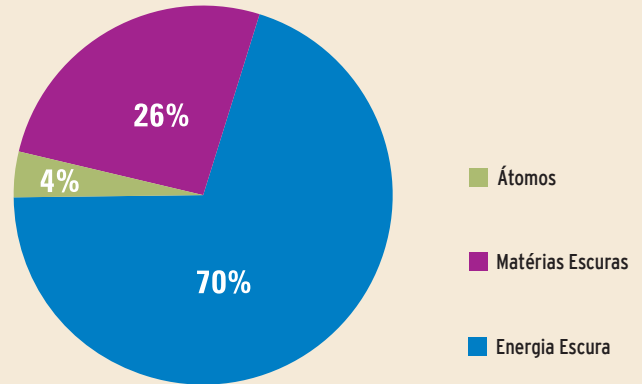
Comparando o universo de 380 mil anos de idade com o universo atual, descobrimos que o universo tem uma densidade muito especial, chamada densidade crítica, que só ocorre quando há um equilíbrio delicado entre a massa do universo e sua expansão.

Porém, nem a matéria normal nem a matéria escura podem dar conta dessa densidade crítica. Ao contabilizarmos as massas de todas as estruturas visíveis do universo, e ainda adicionarmos a matéria escura, não chegamos nem perto do total necessário para completar essa densidade crítica.

Isso significa que existe mais uma componente invisível no universo, sobre a qual ainda não tínhamos desconfiado. Essa componente, que vai pelo nome de energia escura, seria a causa da recente aceleração do universo. É fascinante que essas descobertas tenham sido feitas mais ou menos na mesma época (final dos anos 1990): se a observação que determinou que o universo tem a densidade crítica tivesse ocorrido muito antes ou muito depois da descoberta da aceleração do universo, talvez tivéssemos entrado em muitos becos sem-saída antes de ligar os dois fatos. A história da ciência às vezes joga a favor dos cientistas.

Gráfico 1 - ORÇAMENTO DE MATÉRIA/ENERGIA DO UNIVERSO

4% de matéria normal (átomos), 26% de matéria escura (mais concentrada em galáxias e aglomerados de galáxias) e 70% de energia escura, que pode estar difusa por todo o universo.



Em resumo, o orçamento de matéria e energia do universo, portanto, é aproximadamente o seguinte: 4% de matéria normal (átomos, em estrelas, planetas e, principalmente, gás); 26% de matéria escura, que deve ser algum tipo de partícula elementar ainda desconhecida; e 70% de energia escura, uma componente sobre a qual não sabemos quase nada, a não ser que ela deve ser a causa da recente aceleração da expansão do universo (figura 2).

A ENERGIA ESCURA Como vimos acima, 70% da densidade do universo estão numa segunda componente escura — distinta da matéria escura, que se manifesta na gravitação das grandes estruturas. Essa outra pedra no sapato da cosmologia, a energia escura, tem algumas propriedades curiosas. Primeiro, ela não foi detectada em nenhum objeto específico, como galáxias ou aglomerados de galáxias, portanto, ela parece ser bastante difusa — ou seja, ela parece estar espalhada mais ou menos homogeneamente pelo universo. Segundo, ela parece estar causando a aceleração do universo — já que tanto a matéria normal quanto a matéria escura se atraem mutuamente, então o efeito delas seria desacelerar o universo, e não acelerá-lo.

Dentro da teoria da gravitação de Albert Einstein (conhecida como relatividade geral), a única maneira de produzir uma aceleração da taxa de expansão do universo seria através de alguma substância cuja pressão fosse negativa — uma substância tal que, ao preencher um certo volume, ela exerce pressão para dentro sobre as paredes desse volume (seria, assim, impossível inflar um balão de borracha com esse tipo de matéria!). Concluímos, portanto, que a energia escura deve ser alguma componente bastante exótica, de pressão negativa e que responde pela maior parte (70%) de toda a densidade de energia do universo!

NOVIDADES À VISTA É evidente que ninguém pode estar satisfeito com uma situação onde, para explicar os fenômenos do cosmos, precisamos apelar para dois tipos distintos de substâncias invisíveis.

Uma delas, a matéria escura, pode ainda vir a ser detectada em experimentos de física de partículas, já que boa parte dos modelos prevê que as partículas de matéria escura interagem (muito pouco, mas o suficiente para serem observadas) com as partículas que conhecemos em aceleradores como o Cern (sigla para Organização Europeia de Pesquisa Nuclear).

Porém, a outra substância invisível, a energia escura, não parece ter a menor perspectiva de jamais ser detectada diretamente em laboratório, ou mesmo por algum telescópio terrestre. O que fazer em uma área da ciência na qual 70% do objeto de estudo depende exclusivamente de pistas indiretas?

Ainda não temos boas respostas para essas perguntas, mas a principal consequência dessa tensão entre teoria e observações é que a pressão por novos resultados teóricos e por novos instrumentos tem sido muito grande. E, assim como a “zona de conforto” e a acomodação são os inimigos do avanço científico, essa pressão está se traduzindo em novidades cada vez mais frequentes.

É bem possível que nos próximos anos nossas noções mais básicas sobre o universo e os tipos de matéria que existem na natureza mudem completamente; nossas ideias sobre a gravitação também podem vir a mudar, caso as observações detalhadas de aglomerados de galáxias revelem a inadequação da relatividade geral de Albert Einstein; e o mais interessante é que sempre que os avanços ocorrem nessa velocidade, acabamos descobrindo coisas sobre as quais nem desconfiamos, novidades além da nossa imaginação. Esse é o prospecto para os próximos anos para a cosmologia.

Raul Abramo é professor associado do Instituto de Física da Universidade de São Paulo (USP)

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Hubble, E. "A relation between distance and radial velocity among extra-galactic nebulae". *Proceedings of the National Academy of Sciences*, Vol. 15, n.3, pp.168-173. 1929.
2. Zwicky, F. "On the masses of nebulae and of clusters of nebulae". *Astrophysical Journal*, Vol.86, p.217. 1937.
3. Rubin, V. & Ford Jr, W. K. "Rotation of the Andromeda nebula from a spectroscopic survey of emission regions". *Astrophysical Journal*, Vol.159, p.379. 1970.
4. Clowe, D., Bradac, M., et al. "A direct empirical proof of the existence of dark matter". *Astrophysical Journal Letters*, Vol.648, pp.109-113. 2006.
5. Bekenstein, J. D. "Relativistic gravitation theory for the modified Newtonian dynamics paradigm". *Physical Review D*, Vol.70: 083509. 2004.
6. Milgrom, M. "A modification of the newtonian dynamics as a possible alternative to the hidden mass hypothesis". *Astrophysical Journal* Vol.270, pp.365-370. 1983.
7. Adriani, O., et al. "An anomalous positron abundance in cosmic rays with energies 1.5-100 GeV". *Nature*, Vol.458, pp.607-609. 2009.
8. Riess, A. G., et al. (Supernova Search Team). "Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant", *Astronomical Journal*, Vol.116, pp.1009-1038. 1998.

9. Perlmutter, S., et al. (The Supernova Cosmology Project). "Measurements of Omega and Lambda from 42 high redshift supernovae". *Astrophysical Journal*, Vol.517, pp.565-86. 1999.
10. Krauss, L. M. e Turner, M. S. "The cosmological constant is back". *General Relativity and Gravitation*, Vol.27, pp.1137-1144. 1995.
11. Gamow, G. "Expanding universe and the origin of elements". *Physical Review*, Vol.70, n.7-8, pp.572-573. 1946.
12. Alpher, R. A. & Herman, R. C. "Remarks on the evolution of the expanding universe", *Physical Review*, Vol.75, n.7, pp.1089-1095. 1949.
13. Smooth, G. F., et al. "Structure in the COBE differential microwave radiometer first-year maps". *Astrophysical Journal Letters*, Vol.396, n.1, pp.L1-L5. 1992.

SUGESTÕES PARA LEITURA

- Commission on Physical Sciences, Mathematics, and Applications (CP-SMA). *Cosmology: a research briefing*. 1995. Disponível em: <http://www.nap.edu/readingroom/books/cosmology/index.html> .
- Gleiser, Marcelo. *A dança do universo*. Editora Companhia das Letras, São Paulo. 1998.
- Greene, Brian. *O universo elegante: supercordas, dimensões ocultas e a busca da teoria definitiva*. Editora Companhia das Letras, São Paulo. 2001.
- Weinberg, Steven. *Os três primeiros minutos*. Editora Guanabara Dois, Rio de Janeiro. 1980.
- Wright, Ned. *Cosmology Tutorial*. 2009. Curso de cosmologia quase sem matemática, em inglês, francês e italiano. Disponível em: <http://www.astro.ucla.edu/~wright/cosmolog.htm> .