

## O LADO ESCURO DO UNIVERSO<sup>+</sup>

---

*Laerte Sodré Jr.*

Departamento de Astronomia – IAG/USP

São Paulo – SP

### Resumo

*O universo parece ser constituído por duas substâncias de natureza desconhecida: a matéria escura e a energia escura. Neste trabalho, descrevo brevemente como os constituintes do “lado escuro” foram descobertos e o que sabemos sobre suas propriedades.*

**Palavras-chave:** *Cosmologia; aglomerados de galáxias; matéria escura; energia escura.*

### Abstract

*The universe seems to be dominated by two substances of unknown nature: dark mass and dark energy. Here, I briefly describe how the dark components were discovered and what we know about their properties.*

**Keywords:** *Cosmology; galaxy clusters; dark matter; dark energy.*

## I. Introdução

A matéria a que estamos habituados, aquela que constitui as coisas à nossa volta, é constituída por partículas como o próton, o nêutron e o elétron. O próton e

---

<sup>+</sup> The dark side of the Universe

\* *Recebido: outubro de 2010.*

*Aceito: outubro de 2010.*

o nêutron são muito mais pesados que os elétrons; são eles que, de fato, contribuem para a massa de uma pessoa ou de uma pedra. Eles são um tipo de partícula chamados bárions e, por causa disso, a matéria comum que conhecemos é chamada de *matéria bariônica*.

Seria razoável supor que o grosso da matéria – da “coisa” que constitui o universo – fosse desse tipo, mas o espetacular avanço da Cosmologia no século XX e neste princípio de século XXI trouxe revelações extraordinárias: os bárions contribuem com apenas 4% do total da matéria e da energia do universo. A maior parte da contribuição vem de duas componentes misteriosas, que denominamos *matéria escura* e *energia escura*.

Outra coisa extraordinária é que, embora não saibamos nem o que é uma nem o que é a outra, conhecemos a quantidade das componentes do universo com alta precisão: a quantidade de bárions, matéria escura e energia escura é, respectivamente,  $4,41 \pm 0,30\%$ ,  $21,4 \pm 2,7\%$  e  $74,2 \pm 3,0\%$ <sup>[1]</sup>. Acho que nunca nossa “ignorância” foi quantificada com tamanha precisão. Descobrir a natureza da matéria escura e da energia escura é, talvez, um dos maiores desafios da ciência na atualidade.

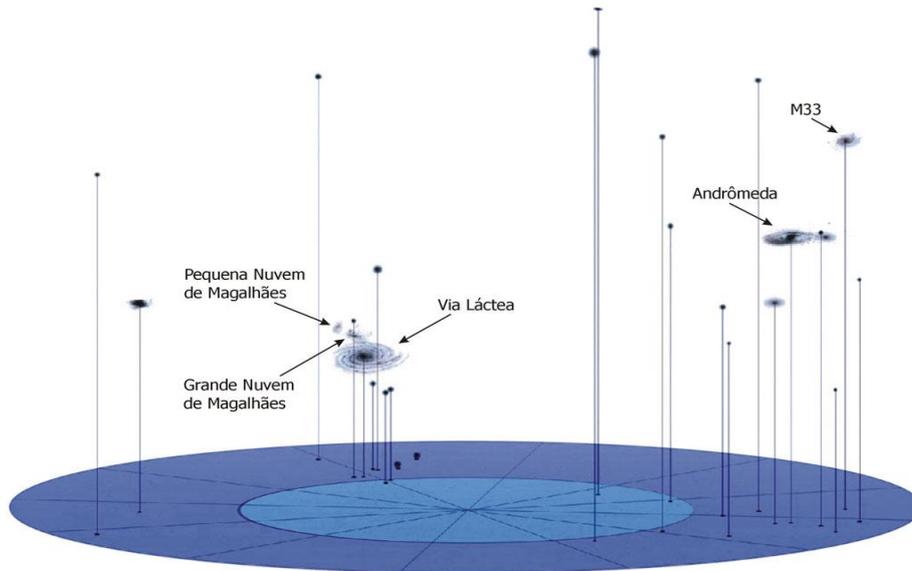
As primeiras indicações da existência de matéria escura remontam aos anos 30 do século passado. Já as evidências da energia escura são mais recentes, dos anos 90. Neste artigo descrevo como os constituintes do “lado escuro” foram descobertos e o que sabemos sobre suas propriedades.

## II. As evidências da matéria escura

A luz das estrelas é responsável pela maior parte da radiação visível (isto é, com frequências dentro do estreito intervalo que o olho é capaz de detectar) que existe no universo. As estrelas que observamos no céu noturno, junto com centenas de bilhões de outras, formam uma imensa estrutura: a galáxia que denominamos Via Láctea. Em escalas suficientemente grandes são sistemas estelares desse tipo – as galáxias – que povoam o universo.

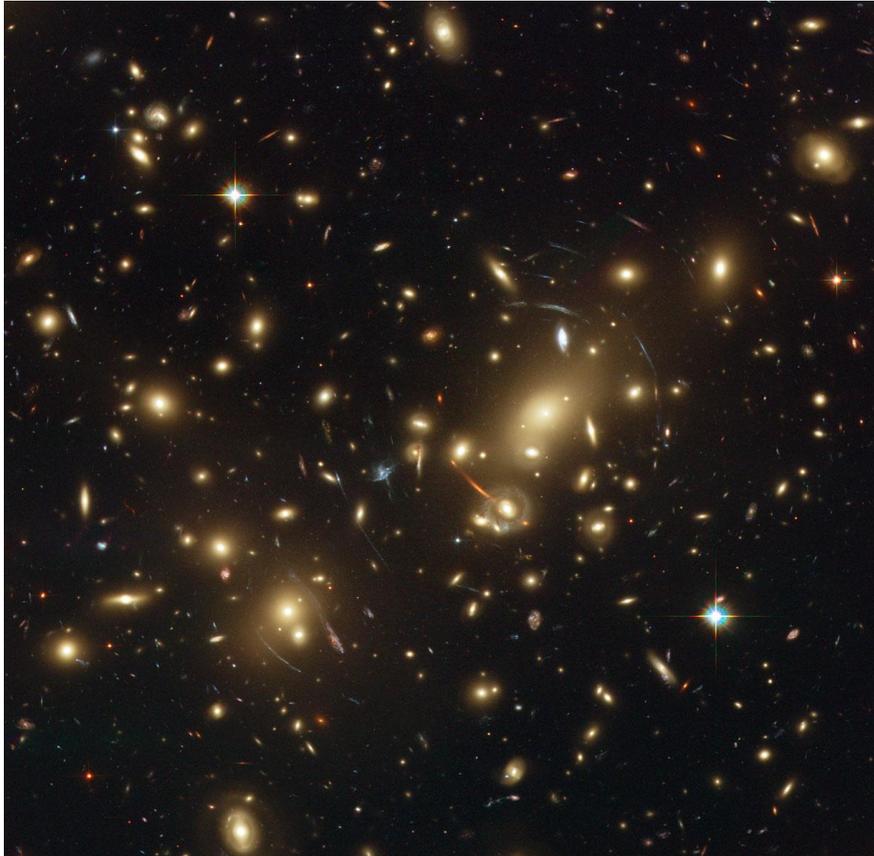
Devido à natureza atrativa da gravitação, as galáxias tendem a se agrupar. Assim, a Via Láctea possui várias galáxias satélites às que a orbitam, como a Lua em torno da Terra. Nossa galáxia, junto com seus satélites, forma um sistema binário com a galáxia de Andrômeda, com uma girando em torno da outra. Andrômeda é um pouco maior que a Via Láctea e, como ela, possui seu sistema de

satélites. Esse conjunto, com mais de 30 galáxias conhecidas, constitui nosso endereço no universo em grandes escalas e é denominado Grupo Local.



*Fig. 1. Esquema do Grupo Local de galáxias, mostrando suas duas galáxias principais, a Via Láctea e Andrômada, e suas galáxias satélites mais luminosas.*

Mas nem todas as galáxias luminosas se encontram em pares, como a Via Láctea e Andrômada. Cerca de 10% estão em estruturas muito ricas, os aglomerados de galáxias, com centenas a milhares de membros dentro de um volume pouco maior que o do Grupo Local. A região central dos aglomerados de galáxias são as regiões mais densas do universo em grandes escalas. Nos aglomerados mais “ricos”, num volume equivalente ao do Grupo Local, encontram-se não 30, mas até alguns milhares de galáxias. Esses aglomerados frequentemente possuem uma galáxia gigante no centro, com um número de estrelas mais de 100 vezes maior que o da Via Láctea.



*Fig. 2 - Imagem da região central de um glomerado de galáxias obtida com o Hubble Space Telescope. A maior parte dos objetos na imagem são galáxias do aglomerado. Note a presença de vários arcos, que são imagens de galáxias distantes distorcidas pelo campo gravitacional do aglomerado, que age como uma lente gravitacional.*

A massa de um aglomerado pode ser estimada supondo-se que ele é um sistema em equilíbrio. Nesse caso, a velocidade típica das galáxias é tal que contrabalança a atração gravitacional entre elas. Conhecendo as velocidades e as posições das galáxias, podemos determinar a massa total do sistema. Supondo que as galáxias dos aglomerados de Virgo (o aglomerado mais próximo de nós) e de Coma (o aglomerado mais povoado do universo local) constituíssem um sistema gravitacional em equilíbrio, Fritz Zwicky, em 1933, encontrou que a massa desses aglomerados era umas 400 vezes maior que a que se poderia atribuir às estrelas que eles continham<sup>[2]</sup>.

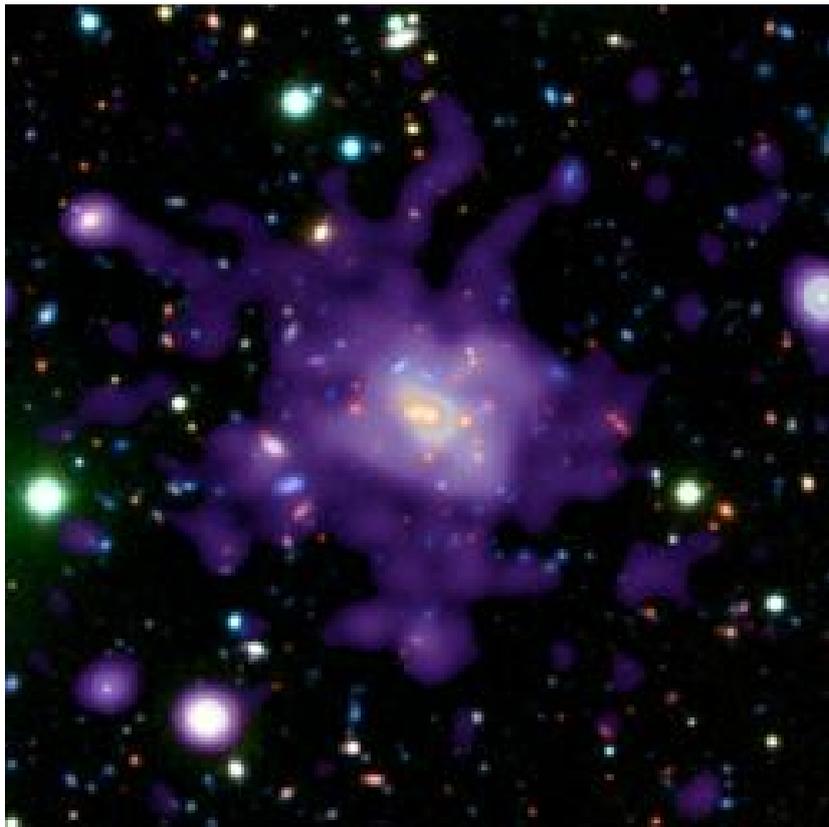
A luz visível das galáxias vem das estrelas e de nuvens de gás que elas aquecem. Examinando-as em outros intervalos de frequência, verificamos que galáxias como a nossa contêm grande quantidade de gás, difuso ou na forma de nuvens, constituído principalmente de hidrogênio. Parte do material está também na forma de grãos de “poeira”, que contribuem para a absorção da luz. Mas os aglomerados de galáxias têm proporcionalmente muito mais gás. De fato, a maior parte da massa bariônica nessas estruturas parece estar no meio intergaláctico, como um gás quente emitindo raios-X (observado com telescópios espaciais como o XMM-Newton ou o Chandra).

Se supusermos que o gás emissor de raios-X está em equilíbrio hidrostático nos aglomerados, conhecendo a distribuição de densidade e temperatura do gás, podemos também determinar a massa dessas estruturas. Esse tipo de estudo confirma os resultados obtidos com o teorema do virial. De fato, a massa que se estima para os aglomerados é quase 10 vezes maior que a massa de todos os bárions – em estrelas e nesse gás quente no meio intra-aglomerado – que eles contêm. Essa massa excedente é a matéria escura. Assim, embora a maior parte dos bárions em aglomerados seja escura, no sentido de que não emite radiação visível (e sim raios-X), não são eles que constituem o grosso da matéria escura.

Um problema com a determinação de massas usando seja o teorema do virial, seja a emissão de raios-X, é que ambos assumem que os aglomerados de galáxias são estruturas em equilíbrio. Essa hipótese, contudo, em muitos casos é discutível, já que os aglomerados crescem capturando galáxias e grupos de galáxias ou mesmo fundem-se a outros aglomerados. Essas interações podem ser suficientemente fortes para tirar essas estruturas do equilíbrio. Felizmente, uma outra técnica pode evitar esse problema, já que sua aplicação não depende do estado de equilíbrio das estruturas: o uso dos aglomerados de galáxias como lentes gravitacionais.

As lentes gravitacionais são uma consequência da deflexão da luz por um campo gravitacional, uma importante predição da Teoria da Relatividade Geral. Um aspecto interessante desse fenômeno, para nós brasileiros, é que sua primeira

verificação ocorreu a partir da observação de um eclipse total do Sol em Sobral, no Ceará, por uma equipe de astrônomos ingleses. O anúncio dos resultados da análise dessas observações, em novembro de 1919, deu a Einstein uma fama junto ao grande público que ele jamais tivera e que manteria pelo resto de sua vida. Mais tarde, em 1925, durante sua visita a nosso país, ele escreveria: *A questão que minha mente formulou foi respondida pelo radiante céu do Brasil*<sup>[3]</sup>.



*Fig. 3 - Imagem composta óptica/raios-X mostrando as galáxias do centro do aglomerado RDCS 1252.9-2927 e, sobreposta, a emissão-X (em roxo) medida pelo telescópio espacial Chandra. A maioria dos bárions em um aglomerado está na forma de um meio intergaláctico gasoso que, por ser muito quente, é o responsável pela emissão de raios-X.*

Einstein chegou a discutir a possibilidade das lentes gravitacionais, mas ele certamente não imaginou que elas se tornariam uma das ferramentas mais importantes para se sondar a constituição do universo. Einstein e Eddington tinham verificado a possibilidade de ocorrência de imagens múltiplas se duas estrelas estivessem muito alinhadas, mas foi Zwicky, o descobridor da matéria escura, que, em 1937, argumentou que os aglomerados de galáxias, por serem enormes concentrações de massa, poderiam ser lentes gravitacionais poderosas, afetando a imagem de galáxias que estão atrás deles (denominadas galáxias de fundo).

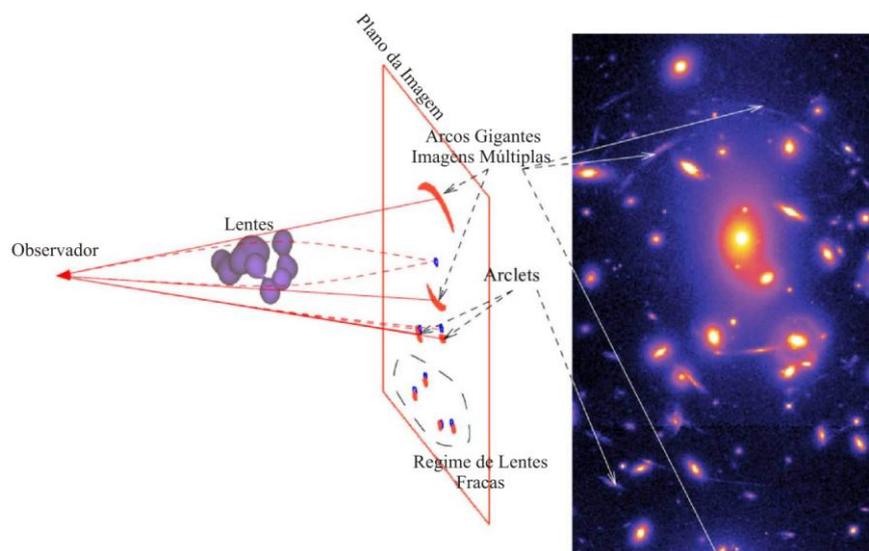


*Fig. 4 - Fritz Zwicky (1898-1974). Astrônomo suíço, radicado nos Estados Unidos, foi o descobridor da matéria escura. Em 1933 ele afirmou que havia muito mais massa em aglomerados do que se podia atribuir à matéria conhecida. Foi também o primeiro a propor que os aglomerados de galáxias poderiam ser lentes gravitacionais poderosas. A primeira vez que isso foi observado foi mais de 10 anos depois de sua morte. Cientista brilhante, era conhecido por seu mau humor.*

O tipo de efeito de lente vai depender da posição relativa do centro do aglomerado e da galáxia de fundo em relação ao observador. Se a galáxia de fundo estiver longe do centro do aglomerado, o efeito de lente pode não ser forte, mas é detectável. A razão é que as galáxias são objetos extensos e a luz proveniente de cada parte da galáxia sofre uma deflexão ligeiramente diferente. Como consequência, a imagem da galáxia fica ligeiramente distorcida. Por exemplo, se uma galáxia fosse intrinsecamente esférica, a imagem que detectaríamos não seria circular, mas sim elíptica, com o eixo maior seguindo as linhas de mesmo potencial gravitacional. No caso de um aglomerado com uma distribuição de massa com simetria esférica, isso corresponde a distorções mais importantes na direção perpendicular à direção do centro do aglomerado. Uma consequência observacional disso é um alinhamento das imagens das galáxias de fundo. Quanto mais próxima do centro do aglomerado a galáxia de fundo está, maior é a distorção e o alinhamento. Esse efeito não pode ser medido numa galáxia sozinha, mas sim estatisticamente, como uma média das orientações das galáxias de fundo que estão numa certa posição no aglomerado. Ele foi detectado pela primeira vez nos finais dos anos 80 e é denominado *lentes fracas*. Como consequência desse efeito, um aglomerado distorce as imagens de todas as galáxias que estão atrás dele, e o mapeamento desse padrão de distorções permite determinar a quantidade e a forma de sua distribuição de massa.

Nas regiões centrais dos aglomerados, o campo gravitacional é muito mais forte, e os efeitos de lentes são também mais dramáticos: é o regime de *lentes fortes*. De fato, a distorção pode ser tão intensa que a imagem da galáxia adquire a forma de um arco gigante; os primeiros foram descobertos em 1987. Como a distribuição de matéria na região central pode ser bem irregular, podem-se produzir imagens múltiplas das galáxias de fundo, algumas delas espetaculares. O estudo das imagens múltiplas permite mapear a massa nas regiões mais centrais dos aglomerados e, assim, complementa o mapeamento que se pode fazer com lentes fracas nas regiões mais externas.

As lentes gravitacionais tornaram-se uma das principais ferramentas para se estudar os aglomerados de galáxias e confirmaram a descoberta de Zwicky: há muito mais massa nessas estruturas do que podemos atribuir à matéria conhecida.



*Fig. 5 - A figura mostra um aglomerado de galáxias (a lente) distorcendo a luz das galáxias de fundo e produzindo, próximo ao centro da lente, arcos e imagens múltiplas. Longe do centro, o efeito da distorção gravitacional da forma das galáxias é mais fraco e só é detectado estatisticamente.*

A matéria escura não é detectada apenas em aglomerados, mas também nas galáxias. A partir dos anos 70, a observação da rotação do disco das galáxias espirais apresentou uma nova e forte evidência da matéria escura. No sistema solar, quanto mais distante um planeta está do Sol, mais devagar ele o orbita: isso é denominado movimento kepleriano. Algo parecido era esperado no movimento de rotação das estrelas do disco em relação ao centro das galáxias espirais. Verificou-se, porém, que, em vez de a rotação decrescer com a distância ao centro, ela permanecia aproximadamente constante. Esse resultado foi interpretado por Freeman, em 1970, como evidência de que as galáxias continham uma massa não detectada, com uma distribuição diferente da das estrelas. Aparentemente, as galáxias são imensos esferoides de matéria escura, com as estrelas e outras formas de matéria bariônica residindo na região central.

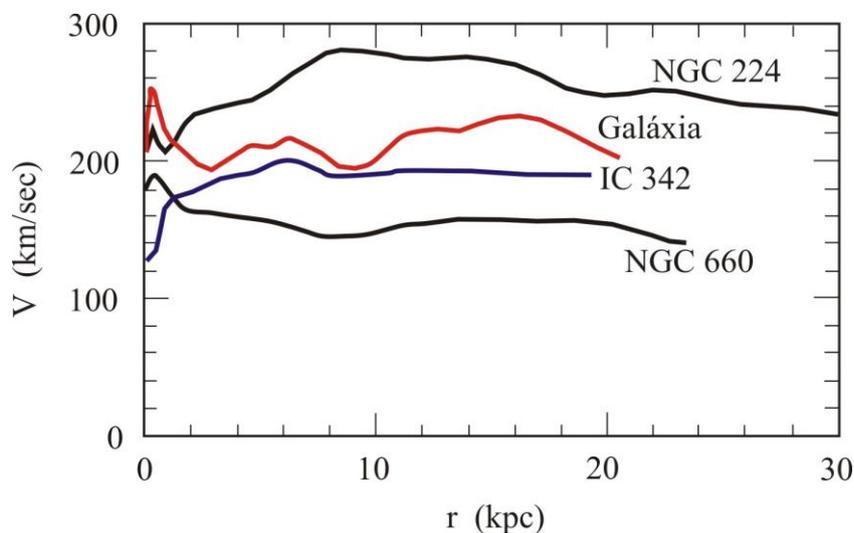


Fig. 6 - Exemplos de curvas de rotação de galáxias espirais, incluindo a Via Láctea. A velocidade de rotação mantém-se aproximadamente constante, bem além do raio óptico das galáxias (15 Kpc para a Via Láctea).

### III. A natureza da matéria escura

Quando falamos em matéria escura supomos que ela não é bariônica. Há duas razões para isso: uma observacional e a outra teórica. Em primeiro lugar, é difícil imaginar como poderíamos deixar de detectar a maioria da matéria se ela possuísse as mesmas propriedades da matéria que conhecemos. Por exemplo, a matéria bariônica pode tanto emitir quanto absorver radiação. A matéria escura parece nem emitir nem absorver a luz, sendo detectável apenas por seus efeitos gravitacionais. A outra razão tem a ver com o modelo do *Big Bang*. Esse modelo tem-se mostrado extremamente bem sucedido na explicação de várias observações fundamentais, como a expansão do universo, a radiação cósmica de fundo e a abundância dos elementos leves. É exatamente este último ponto que é relevante para nossa discussão.

Segundo o modelo do *Big Bang*, em seus primeiros momentos de vida o universo era extremamente denso e quente. Conforme ele se expandia sua densidade diminuía, ele se resfriava e sua constituição se modificava. Quando ele tinha por volta de alguns minutos de vida, a radiação tornou-se suficientemente fria para permitir que colisões entre prótons e nêutrons pudessem formar núcleos de deutério e hélio. Esse fenômeno é denominado *nucleosíntese primordial* e marca a formação dos primeiros núcleos atômicos, ou nuclídeos, do universo. Após a nucleosíntese primordial, os bárions do universo estão na forma de núcleos de hidrogênio, hélio e traços de lítio. Os demais elementos encontrados hoje no universo seriam sintetizados muito mais tarde, no interior das estrelas. O que dá credibilidade a esse cenário é a concordância entre suas previsões teóricas e as observações. Uma previsão bastante robusta dos cálculos é que, durante a nucleosíntese primordial, aproximadamente 25% da massa bariônica é convertida em núcleos de hélio. O estudo da abundância do hélio em galáxias permite estimar sua abundância primordial, após se descontar o efeito da evolução estelar, já que as reações nucleares no interior das estrelas também podem produzir hélio. Obtêm-se resultados inteiramente de acordo com as previsões teóricas. Note que as estrelas não podem (não têm tempo de vida suficiente) transformar mais que uns 5% da massa de hidrogênio em hélio. De fato, se não fosse a nucleosíntese primordial, não saberíamos explicar a quantidade de hélio que observamos.

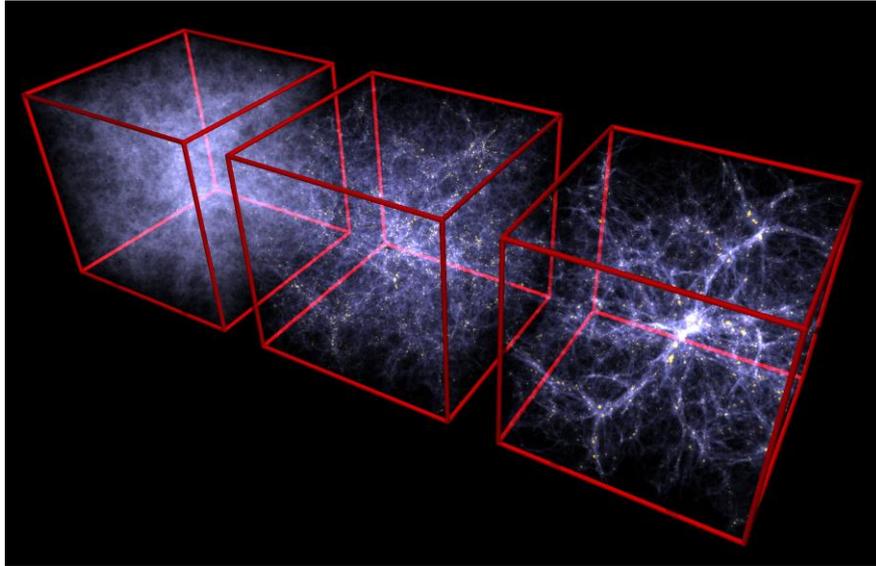
As observações da radiação cósmica de fundo também põem vínculos sobre a abundância de bárions no universo. Como vimos, o universo era, inicialmente, muito quente. Após os primeiros minutos ele contém núcleos dos elementos leves mencionados acima, mas não átomos, pois a temperatura da radiação é ainda muito elevada. Apenas após algumas centenas de milhares de anos a energia média da radiação cai abaixo do potencial de ionização do hidrogênio e os átomos desse elemento, o mais abundante do universo, podem se formar. Esse evento é chamado de época da recombinação. A radiação cósmica de fundo, detectada em frequências de microondas, é o remanescente da radiação muito quente dos primórdios do universo que se resfriou até a temperatura atual de 2.7 K devido à expansão. Um ponto interessante é que, observando esta radiação, estamos, na verdade, obtendo uma “fotografia” do universo na época da recombinação, pois, antes dela, o universo era opaco à radiação, enquanto que, depois, ele fica essencialmente transparente. Essa radiação é notavelmente uniforme, mas apresenta pequenas flutuações, da ordem de uma parte em 100 mil. Ocorre que essas flutuações dependem da densidade de bárions, e a análise do padrão dessas flutuações, medidas pelo satélite WMAP, está em excelente concordância com o valor obtido no estudo da nucleosíntese primordial.

Mas se a matéria escura não é constituída de bárions, ela é feita do quê? De um lado, enorme esforço tem sido aplicado às tentativas de detecção direta da matéria escura em laboratório, sem sucesso até agora. Existem muitas esperanças de que o LHC – Large Hadron Collider – ajude a apontar candidatos. Mas a astrofísica, pela observação da estrutura em grandes escalas, pode por vínculos sobre a natureza da matéria escura. A evolução da estrutura em grande escala depende tanto da quantidade como do tipo de matéria escura. Simulações em supercomputadores permitem estudar, por exemplo, como o número e a riqueza dos aglomerados de galáxias evolui com o tempo. Verifica-se que, dependendo do tipo de matéria escura, o cenário é completamente diferente. Se a matéria escura for quente (isto é, constituída por partículas relativísticas no momento de sua formação, como seria o caso com neutrinos massivos) grupos e aglomerados se formam por fragmentação de super-aglomerados; galáxias se formam por fragmentação dos grupos e aglomerados e assim por diante. No caso de matéria escura fria (constituída por partículas não-relativísticas no momento de sua formação), o cenário é o oposto: as primeiras estruturas que se formaram tinham massas sub-galácticas e as estruturas – galáxias, grupos e aglomerados – crescem por captura e agregação de estruturas menores. Esse cenário é denominado hierárquico e é o favorecido pelas observações atuais. As simulações numéricas mostram um padrão para a distribuição da matéria escura em grandes escalas muito semelhante àquele das galáxias, com grupos, aglomerados e superaglomerados achatados ou filamentosos.

O confronto entre a teoria de formação de estruturas num universo dominado por matéria escura e as observações do universo em grandes escalas parece favorecer um cenário de matéria escura fria. Mas não sabemos muito mais do que isso. Partículas hipotéticas, sugeridas pela física de partículas, são os candidatos mais discutidos para a matéria escura fria, em particular os *WIMPs* (da sigla em inglês para partículas massivas que interagem fracamente). Um exemplo é uma partícula denominada neutralino, que teria massa entre 50 e 500 vezes a do próton. Esperamos que tanto a observação astronômica quanto a detecção direta em laboratório nos ajude a descobrir a natureza desta componente ainda elusiva de nosso universo.

#### IV. Mas por quê partícula?

Até aqui assumi, sem discussão, que a matéria escura é constituída por partículas. Será? O que chamamos de matéria escura não poderia ser um reflexo de outra coisa, como uma propriedade da gravitação ainda desconhecida?



*Fig. 7 - Simulação numérica da matéria escura em um universo  $\Lambda$ CDM, isto é, um universo plano dominado por matéria escura fria e com constante cosmológica. Cada cubo representa uma época diferente e pode-se ver como a estrutura vai aparecendo, devido à interação gravitacional entre as partículas de matéria escura<sup>[7]</sup>.*

Na verdade, a história da astronomia tem o que nos ensinar a respeito. Analisando algumas anomalias no movimento de Urano, Le Verrier postulou, em 1846, a existência de um outro planeta. Poucas semanas depois Galle descobre Netuno. De forma análoga, Le Verrier propõe, em 1859, que o avanço observado no periélio da órbita de Mercúrio seria provocado por um planeta ainda hipotético: Vulcano. O astrônomo amador Lescarbault, no mesmo ano, alega ter observado um trânsito planetário sobre o disco solar, mas essa observação foi desconsiderada pois, no mesmo dia, Emmanuel Liais, trabalhando no Observatório Nacional no Rio de Janeiro, tinha observado o Sol e nada vira de diferente. Na verdade, a ano-

malia da órbita de Mercúrio seria explicada apenas em 1916 por Albert Einstein, com a teoria da relatividade geral. Assim, duas anomalias orbitais diferentes foram resolvidas de forma diferente: a de Urano com um novo planeta (“matéria escura”) e a de Mercúrio com uma modificação na lei da gravitação.

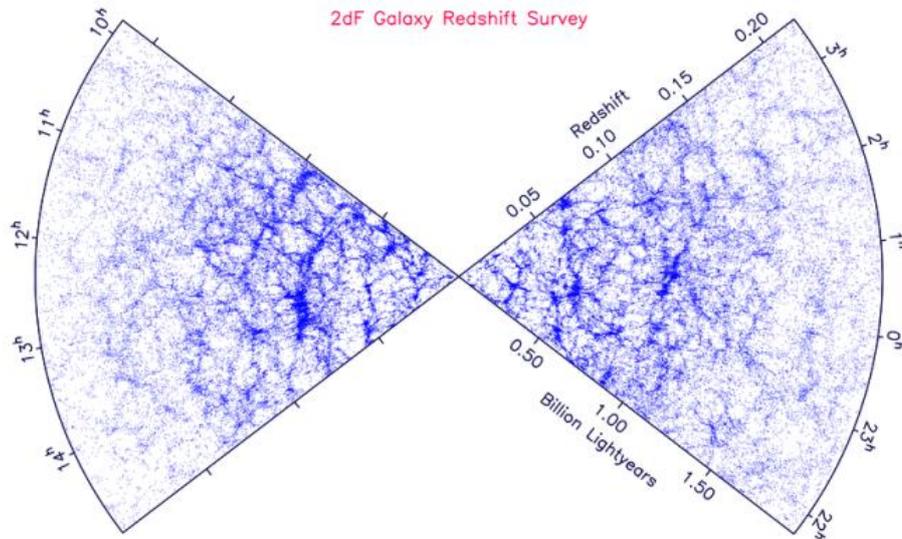
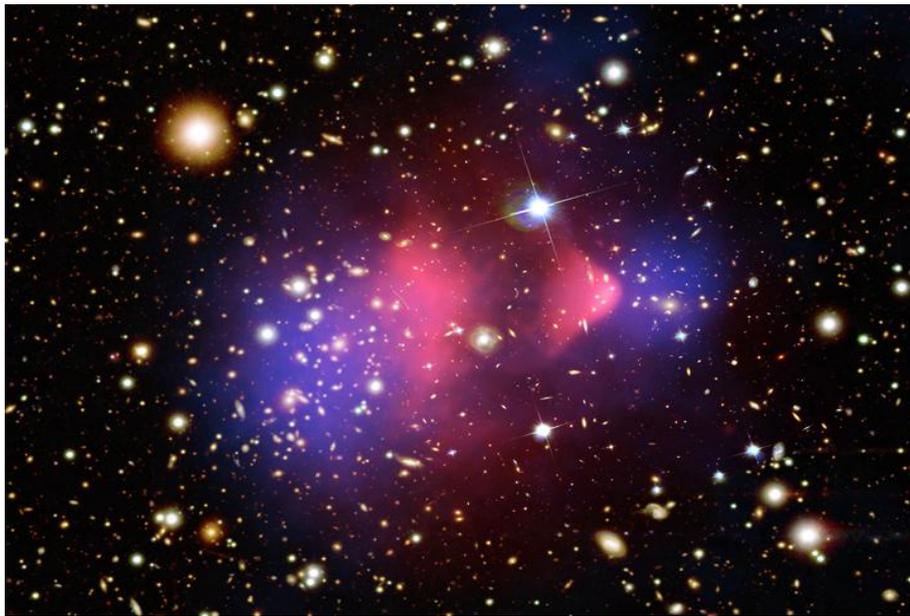


Fig. 8 - A distribuição de galáxias em grandes escalas, mostrando filamentos, aglomerados e vazios. Imagem produzida pelo Two Degree Field Galaxy Redshift Survey, 2dFGRS.

Embora não se possa descartar eventuais modificações na teoria da gravitação, uma observação recente trouxe evidências fortes favoráveis à existência da matéria escura. O *aglomerado bala* é o resultado da colisão de dois aglomerados a 4500 km/s. Esse é um dos fenômenos mais energéticos conhecidos, envolvendo uma energia de  $10^{56}$  erg. O aglomerado menor passou como uma bala pelo centro do aglomerado maior, da esquerda para a direita na figura. Levando em conta a composição dos aglomerados, isso permite testar a natureza da matéria escura.

Numa colisão frontal a alta velocidade, a matéria escura e as estrelas de um aglomerado atravessam o halo de matéria escura e estrelas do outro aglomerado sem serem muito perturbadas, pois são componentes não dissipativas, que não perdem energia na colisão. Já com o gás é diferente. O choque do meio intergaláctico gasoso dos dois aglomerados os freia e os aquece. Como consequência, o gás fica “no meio”, enquanto que as galáxias se afastam, deixando-o para trás.



*Fig. 9 - O Aglomerado Bala, 1E0657-56. Sobre a imagem óptica está superposto o mapa com a distribuição de massa determinada por lentes fracas (em azul) e a distribuição de raio-X (em vermelho), proveniente do gás quente. A maior parte das galáxias está nas duas regiões azuis, junto com a matéria escura.*

É precisamente isso que é observado no aglomerado bala e em outros sistemas parecidos. Mapeando a distribuição de massa do sistema com a técnica de lentes gravitacionais podemos verificar se a matéria escura é devida à massa ou a uma modificação na gravitação. Nos modelos de matéria escura ela domina a massa e ela deve se concentrar nas mesmas regiões onde se encontram as galáxias, pois essas duas componentes andam juntas, já que não dissipam energia na colisão.

Assim, esperamos que o mapa de massa tenha dois picos, cada um associado às galáxias de cada aglomerado. Já nos modelos onde os efeitos da matéria escura são atribuídos exclusivamente à gravitação modificada, espera-se que o mapa de massa tenha apenas um pico, coincidindo com a posição do gás, já que não tem matéria escura e a maior parte da massa bariônica está na componente gasosa. Os resultados são eloquentes: a matéria escura existe.

## V. A energia escura

Mas se a matéria escura é um mistério, a energia escura é um mistério ainda maior. Nesta segunda parte do artigo comento qual é o problema que a proposta de energia escura procura resolver, como ela foi descoberta e qual seria sua natureza.

Um dos grandes sucessos da cosmologia é que ela explica a expansão do universo. O responsável por isso é a gravitação. Essa interação física se manifesta como uma atração entre corpos com massa e, por isso, era de se esperar que a expansão fosse desacelerada. Mas ela está se acelerando! A explicação para isso é a energia escura.

A proposta de uma energia escura no universo precedeu sua descoberta. Um dos ingredientes da teoria do *Big Bang* é a *inflação*. Logo no começo de sua existência, o universo teria passado por uma breve fase de expansão muito acelerada. Essa hipótese resolve vários problemas importantes da teoria cosmológica. Por exemplo, explica porque o universo é tão homogêneo e isotrópico em grandes escalas. Mas uma consequência dessa tremenda expansão inflacionária é que o universo atual tem que ter curvatura nula.

Note que a gravitação é entendida, no âmbito da teoria da relatividade geral, não como uma força, mas como uma manifestação da curvatura do espaço produzida por corpos com massa e/ou energia. A curvatura depende da quantidade de matéria e energia. Costuma-se quantificar a quantidade de uma dada componente no universo com o *parâmetro de densidade*,  $\Omega$ . Para um universo de curvatura nula,  $\Omega=1$ , e para universos de curvatura negativa ou positiva ele é menor e maior que 1, respectivamente.

No final dos anos 80, os estudos de aglomerados de galáxias já mostravam que a quantidade de matéria (escura) era  $\Omega_M \approx 0.2 - 0.3$ , bem menor que o necessá-

rio para se ter a curvatura nula prevista pela inflação. Isso levou, então, a se ressuscitar um “espantinho” da relatividade geral: a *constante cosmológica*<sup>[4]</sup>.

A constante cosmológica aparece, pela primeira vez, em 1917, quando Einstein apresenta seu modelo cosmológico, baseado na relatividade geral e no que se sabia sobre o universo naquele tempo: a expansão do universo ainda não era conhecida e a lei de Hubble só seria descoberta uns dez anos mais tarde. Mas as equações da relatividade geral teimavam em dar soluções com o universo em expansão ou em contração. Para obter um universo estático, consistente com as observações astronômicas da época, Einstein, então, introduz a constante cosmológica, frequentemente designada pela letra grega  $\Lambda$ . Ela age como uma “antigravidade”, equilibrando a gravitação e permitindo, assim, que Einstein obtivesse um modelo de universo estático<sup>1</sup>. Mais tarde, depois que a expansão do universo foi descoberta, ele iria considerar a introdução da constante cosmológica a maior bobagem de sua vida...

## VI. A descoberta da energia escura

Mas em 1998, a observação de supernovas tipo Ia (SN Ia) distantes mostrou que elas estariam a distâncias maiores do que se esperaria com os modelos cosmológicos convencionais<sup>[5]</sup>. Essas supernovas são imensas explosões estelares que, de tão luminosas, podem ser observadas a grandes distâncias. Elas têm uma propriedade que as torna úteis como indicadores de distância: a máxima luminosidade que elas atingem é essencialmente constante. Elas são *velas padrão*: medindo-se seu fluxo no máximo, pode-se determinar sua distância. Foi o estudo da relação entre a distância e o *redshift* desses objetos que mostrou que as distâncias das SN Ia eram maiores que o esperado pelo seu *redshift*.

Isso pode ser explicado se o universo estiver se acelerando devido a uma constante cosmológica. Atuando como um tipo de antigravidade (na verdade um fluido de pressão negativa), ela pode produzir uma aceleração no universo. A quantidade de energia associada a  $\Lambda$  determina o grau de aceleração. E verificou-se que a quantidade necessária para explicar as distâncias das SN Ia,  $\Omega_\Lambda \approx 0.7 - 0.8$  era exatamente igual à necessária para se ter um universo plano (isto é, com  $\Omega_M + \Omega_\Lambda = 1$ ), como exigido pela inflação.

---

<sup>1</sup> O Universo de Einstein era estático e de curvatura positiva: uma hiperesfera.



*Fig. 10 - As supernovas Ia são explosões estelares extremamente luminosas. Foi o estudo desses objetos que levou à descoberta da aceleração do universo. As imagens acima, obtidas com poucas semanas de diferença, mostram o aparecimento da supernova SN1999BE na galáxia CGCG 089-013. Imagem da Supernova Cosmology Project.*

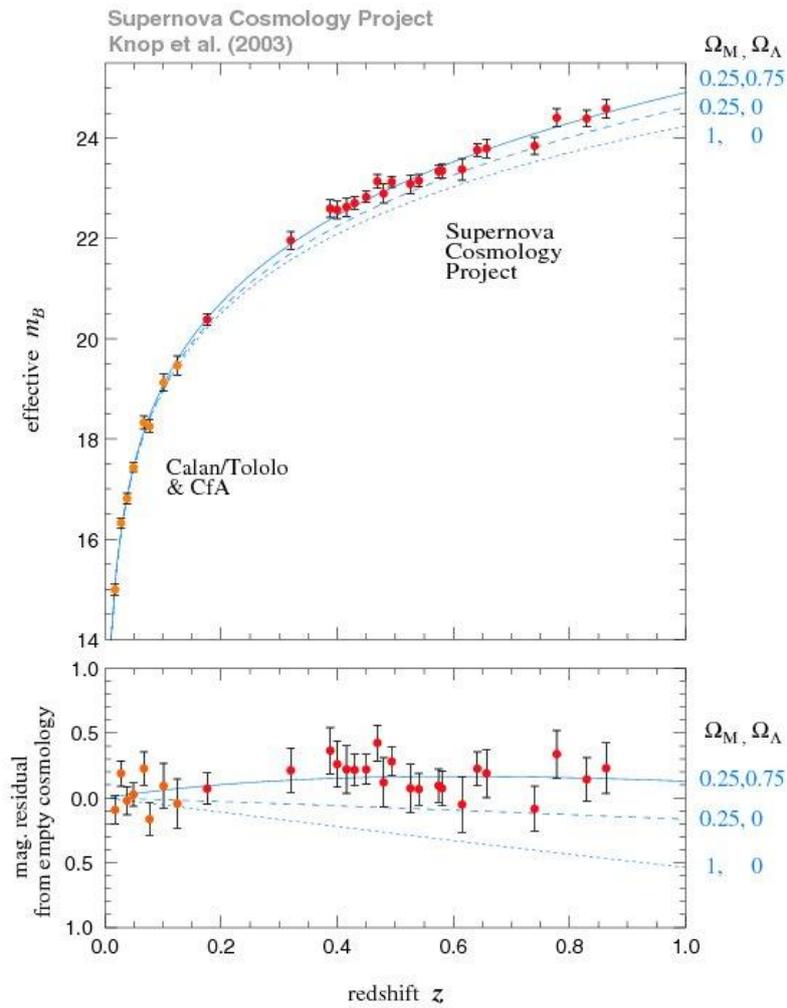


Fig. 11 - A relação entre brilho e redshift de supernovas Ia, mostrando que o melhor ajuste é com um modelo de universo plano com constante cosmológica<sup>[8]</sup>.

## VII. A natureza da energia escura

A componente responsável pela aceleração do universo é denominada misteriosamente energia escura. A constante cosmológica é um tipo de energia escura. Mas o que é a energia escura? Que tipo de substância pode exercer o papel de uma antigravidade?

Uma solução “natural”, do ponto de vista da mecânica quântica, é supor que a constante cosmológica está associada à energia gravitacional das partículas e antipartículas que povoam o vácuo e que, de acordo com o princípio da incerteza de Heisenberg, estão se criando e aniquilando o tempo todo [6]. Este vácuo pode ser descrito como um fluido de pressão negativa, análogo a uma constante cosmológica. O problema, é que a densidade prevista para esse fluido, de 1 massa de Planck ( $10^{-5}$  g) por volume de Planck ( $10^{-99}$  cm<sup>-3</sup>), é cerca de  $10^{120}$  vezes maior que o valor medido...

Mas a energia escura não precisa ser uma constante, como a constante cosmológica. Ela pode variar com o tempo e estar associada a um campo físico ainda desconhecido (às vezes chamados de quintessência). Do ponto de vista observacional, a grande questão, neste momento, é saber se a energia escura é consistente com  $\Lambda$  ou varia com o tempo. Grandes campanhas observacionais estão previstas para tentar responder a essa questão nos próximos anos.

## VIII. Conclusão

O paradigma cosmológico atual propõe um universo de curvatura nula dominado por energia escura e matéria escura fria: o modelo  $\Lambda$ CDM. Esse modelo explica com uma precisão surpreendente um conjunto muito diverso de observações do universo em grandes escalas: a abundância dos elementos leves, a radiação cósmica de fundo, a distribuição das galáxias no espaço, as distâncias das supernovas e muitas outras, a ponto de se dizer que vivemos na época da cosmologia de precisão. Paradoxalmente, sabemos com grande precisão a quantidade de matéria e energia no lado escuro,  $\Omega_M = 0,214 \pm 0,027$  e  $\Omega_\Lambda = 0,742 \pm 0,030$ , de acordo com estimativas recentes. Temos esperança de que as partículas de matéria escura fria serão detectadas em algum momento em um experimento como os do LHC ou com detectores em minas profundas ou no espaço. Mas a energia escura é muito mais difícil de ser estudada e, no momento, apenas as observações da distribuição de galáxias podem ajudar a esclarecer algumas de suas propriedades.

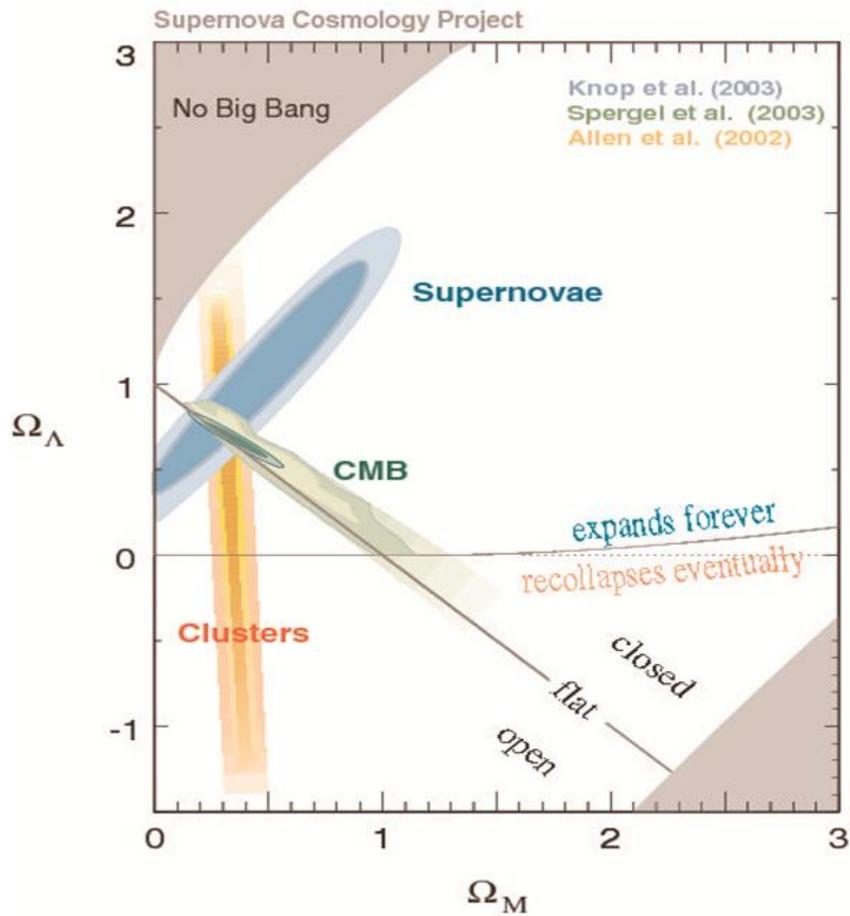


Fig. 12 - A concordância cósmica. As medidas de diversos observáveis cosmológicos – supernovas, aglomerados, radiação cósmica de fundo – são consistentes com um universo  $\Lambda$ CDM (The Supernova Cosmology Project).

Na cosmologia, o lado escuro domina. Vai ser o esforço das novas gerações de cientistas que permitirão iluminar esses grandes mistérios da ciência contemporânea.

## Referências

- [1] WMAP Parameters Summary. Disponível em:  
<lambda.gsfc.nasa.gov/product/map/dr3/parameters\_summary.cfm>
- [2] ZWICKY, F. Die Rotverschiebung von extragalaktischen Nebeln. **Helvetica Physica Acta**, v. 6, p. 110, 1933.
- [3] TIOMNO TOLMASQUIM, A. **Einstein – O Viajante da Relatividade na América do Sul**. Rio de Janeiro: Vieira & Lent, 2003.
- [4] CARROLL, S. M.; PRESS, W. H.; TURNER, E. L. The Cosmological Constant. **Annual Review of Astronomy & Astrophysics**, v. 30, p. 499, 1993.
- [5] RIESS, A. G. et al. Observational Evidence from Supernovae for an Accelerating Universe and a Cosmological Constant. **Astronomical Journal**, v. 116, p. 1009, 1998; PERLMUTTER, S. et al. Measurements of Omega and Lambda from 42 High-Redshift Supernovae. **Astrophysical Journal**, v. 517, p. 565, 1999.
- [6] ZELDOVICH, Ya. B. The Cosmological Constant and the Theory of Elementary Particles. **Soviet Physics Uspekhi**, v. 11, p. 381, 1968.
- [7] SPRINGEL, V. et al. Simulations of the formation, evolution and clustering of galaxies and quasars. **Nature**, v. 435, p. 629, 2005.
- [8] KNOP, R. A. et al. New Constraints on  $\Omega_M$ ,  $\Omega_\Lambda$ , and  $w$  from an Independent Set of 11 High-Redshift Supernovae Observed with the Hubble Space Telescope. **Astrophysical Journal**, v. 598, p. 102, 2003.

## Apêndice

### O eclipse que mudou o mundo

O dia 29 de maio de 1919 é marcante para a história da ciência mundial e brasileira. Nele ocorreu um eclipse do Sol que foi fotografado por duas expedições inglesas: uma em Sobral, no Ceará, e outra na ilha do Príncipe, no arquipélago de São Tomé e Príncipe, na costa da África.

O objetivo dos ingleses, liderados por Sir Arthur Eddington, era fotografar as estrelas que aparecem durante os poucos minutos que dura a totalidade de um eclipse solar e verificar se elas estariam ou não deslocadas no céu. Se sim, e dependendo de quanto, poderiam modificar completamente nossa imagem do universo.

No ano de 1687, Isaac Newton estabelece as leis do movimento dos corpos baseados numa ideia de um espaço absoluto, estático e regido pela geometria de Euclides, e de um tempo absoluto, com o mesmo ritmo em todos os lugares. Para ele, a gravidade era uma força universal, que dependia das massas e distâncias entre os corpos.

Em 1905, Einstein contesta essas ideias de espaço e tempo: as medidas de comprimento e de intervalo de tempo dependem do movimento do observador. E em 1911 começa a derrubar a teoria da gravitação universal. Com o Princípio de Equivalência – que estabelece que a gravidade é localmente equivalente a um referencial acelerado – ele mostra que um corpo massivo como o Sol deveria defletir a luz das estrelas e calcula que um raio de luz passando razante ao Sol deveria ser defletido por um ângulo pequeno, mas mensurável:  $\delta=0,87$  segundos de arco.

Mas Einstein ainda não estava satisfeito com sua teoria e, apenas em 1915, encontra as equações do que viria a se tornar a Teoria da Relatividade Geral. Nela, a gravitação não é uma força, mas uma manifestação da distorção do espaço e do tempo! Para Newton o espaço e o tempo eram imutáveis, mas para Einstein eles poderiam ser curvados pela presença de matéria e energia.

Com isso, Einstein consegue explicar um pequeno excesso observado no movimento de precessão da órbita de Mercúrio em torno do Sol, cuja explicação há muito atormentava os astrônomos. E faz uma nova previsão: devido à curvatura do espaço-tempo provocada pelo Sol, o ângulo de deflexão da luz de uma estrela passando razante ao disco solar deveria ser 1,75 segundos de arco, exatamente duas vezes maior que sua previsão anterior, de 1911.

O trabalho de Einstein foi publicado na Alemanha, em plena Primeira Guerra Mundial, mas de algum modo acabou sendo contrabandeado para a Inglaterra, onde Eddington o leu. Ele sabia que poderia testar a previsão da teoria sobre a deflexão da luz durante um eclipse total do Sol: bastaria fotografar as estrelas que aparecem durante a totalidade com muito cuidado! Einstein previa que, quanto mais próxima (angularmente) do Sol uma estrela está, maior a deflexão de sua luz.

O eclipse do Sol que ocorreria em 1919 parecia ser uma excelente oportunidade, devido à sua “longa” duração (uns 6 minutos) e que várias estrelas brilhantes poderiam ser observadas. Eddington, então, organiza duas expedições para duas

localidades ao longo da faixa onde o eclipse ocorreria como total: Sobral e Príncipe.

As missões produziram diversas fotografias, mas sua análise mostrou-se muito difícil: as nuvens atrapalharam; alguns telescópios não funcionaram bem; a revelação dos filmes sob o calor intenso produziu distorções, etc. No final, foram as imagens obtidas por um dos equipamentos em Sobral as efetivamente utilizadas para se obter o resultado.

Eddington comparou as posições das estrelas nessas fotografias com outras tomadas em outra época do ano, quando o Sol não estava presente. Os resultados da análise foram apresentados em novembro de 1919 em Londres, num encontro científico. Eles eram consistentes com os previstos pela Teoria da Relatividade Geral de Einstein!

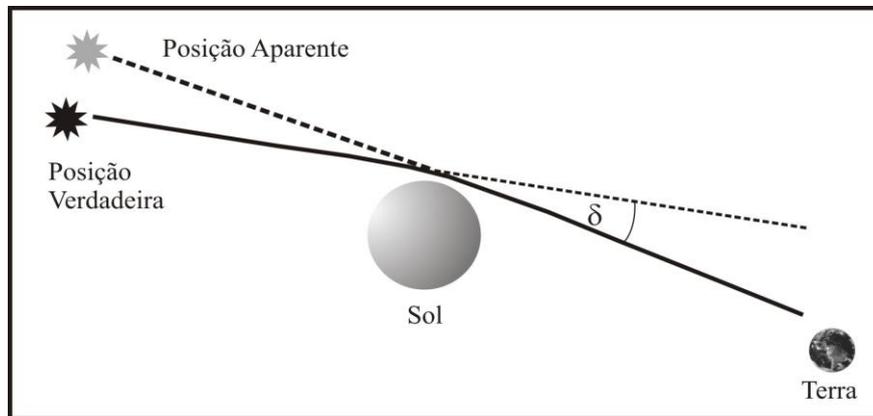
No dia seguinte, o Times de Londres, publicava, em primeira página, que Einstein triunfava sobre Newton, notícia que rapidamente se espalhou pelos principais jornais do planeta, transformando imediatamente Einstein, um cientista desconhecido fora do seu meio, num *pop-star* da ciência.

Hoje, a deflexão da luz é uma das principais ferramentas para estudar as grandes estruturas do universo, via o fenômeno das lentes gravitacionais: a imagem de uma galáxia distante pode ser distorcida e amplificada quando sua luz passa perto de grandes massas em seu caminho até a Terra. O estudo sistemático dessas distorções é considerado a melhor forma de se desvendar a natureza da energia escura e da matéria escura, as misteriosas entidades que dominam a matéria e a energia do universo.

Assim, um fenômeno que foi comprovado pela primeira vez por observações em Sobral se torna um poderoso instrumento para se observar e tentar compreender o universo. Neste Ano Internacional da Astronomia, o 29 de maio celebrou os 90 anos deste eclipse que mudou nossa forma de ver o mundo.



*Eclipse sobre a Turquia. Disponível em: <http://apod.nasa.gov/apod/ap060404.html>*



*A luz de uma estrela passando próxima ao Sol é defletida por um ângulo  $\delta$ .*



*As imagens em azul nesta imagem de um aglomerado de galáxias são da mesma galáxia que, devido ao efeito de lentes gravitacionais, tem sua imagem multiplicada.*