



Massa e luz
no
universo

V

INTRODUÇÃO

vivemos um momento interessante na evolução das teorias cosmológicas. De fato, observações astronômicas de várias naturezas têm convergido para um modelo em que, em grandes escalas, o universo é “plano”, isto é, de curvatura nula, e dominado por *energia escura* (~ 70%) e *matéria escura* (~ 30%). Aquela matéria que conhecemos, constituída de prótons e nêutrons, é denominada *matéria bariônica* e acredita-se que sua abundância seja quase 10 vezes menor que a de matéria escura. Não sabemos o que constitui nem a energia escura nem a matéria escura.

As primeiras indicações da existência de matéria escura remontam aos anos 30 do século passado, quando estudos de movimentos de estrelas e galáxias mostraram que a maior parte da massa no universo não estava na forma de estrelas. Já as indicações da energia escura são mais recentes, dos anos 90, quando observações de supernovas (estrelas que explodem) distantes mostraram que elas estavam mais longe do que se esperaria pelo seu brilho, sugerindo que o universo estaria se acelerando. Naturalmente, a identificação da natureza tanto da matéria escura quanto da energia escura está entre os grandes desafios da ciência no século XXI. Aqui vou discutir apenas a matéria escura; as evidências e teorias sobre a energia escura são apresentadas no artigo de José Ademir Sales de Lima e em outras contribuições neste dossiê.

LAERTE SODRÉ JR.
é professor do
Departamento de
Astronomia do IAG-USP.

Este trabalho tem sido conduzido por uma colaboração internacional coordenada por Eduardo Cypriano (INA/Soar) e que inclui Jean-Paul Kneib e Luis Campusano, além de mim mesmo. Este trabalho seria impossível sem o apoio que recebo da Fapesp e do CNPq.

Aqui apresento, com um viés astronômico, uma visão geral sobre a matéria escura, discutindo as observações e teorias que indicam que a maior parte da massa no universo é escura e de um tipo diverso do que constitui a matéria que conhecemos. A matéria escura é detectável por seus efeitos sobre a radiação e a matéria bariônica. Embora saibamos como, em grandes escalas, a luz emitida pelas galáxias se distribui, com as galáxias formando estruturas – pares, grupos, aglomerados – que constituem o tecido do universo nessas escalas enormes, a distribuição da matéria escura é muito mais elusiva. Ela se distribui como a luz ou não? Vou discutir como responder a essa questão contribui para esclarecer a natureza da matéria escura. A seguir, mostro como a técnica astrofísica de lentes gravitacionais em aglomerados de galáxias pode ser útil tanto para ajudar a determinar a natureza da matéria escura como para estudar a estrutura e evolução do universo em grandes escalas. Finalmente, apresento resultados de um estudo muito recente de aglomerados de galáxias que mostram que, em grandes escalas, a luz segue a massa. Antes de prosseguir esclareço que há teorias sobre a matéria escura muito diferentes das que vou considerar aqui, envolvendo, por exemplo, modificações na força gravitacional ou efeito de branas.

PESANDO O UNIVERSO

Vou usar o parâmetro de densidade, representado por Ω , para quantificar alguns tipos de matéria e energia no universo. Pela teoria da relatividade geral de Einstein, a forma do universo depende da quantidade total de matéria e energia que ele contém. Já sua evolução depende também do tipo de matéria e energia. Na teoria aparece uma certa quantidade, denominada densidade crítica. Se o universo tem uma densidade de matéria mais energia igual à densidade crítica ele tem curvatura nula; diz-se que ele é plano. Se a densidade for maior que a crítica ele é de curvatura positiva e se for

menor é de curvatura negativa. Uma forma conveniente de resumir isso tudo é com o parâmetro de densidade Ω , que é igual à razão entre a densidade do universo e a densidade crítica. Assim, universos planos, de curvatura positiva e de curvatura negativa, correspondem a Ω igual a 1, maior que 1 e menor que 1, respectivamente.

O parâmetro de densidade corresponde à soma das distintas formas de massa e energia que constituem o universo. Existe um desejo teórico de que Ω seja igual a 1, um universo plano, pois isso é o que se espera se o universo tiver passado por uma fase de expansão muito forte logo após o big-bang. Essa fase, denominada inflação, é invocada para explicar, por exemplo, por que em escalas muito grandes o universo é tão homogêneo quanto se observa. As observações recentes do céu na faixa de microondas pelo satélite WMAP (Bennett et al., 2003) indicam que $\Omega = 1.02 \pm 0.02$, que é uma boa indicação de que o universo é plano. Essas mesmas observações indicam que a quantidade de energia escura é $\Omega_v = 0.73 \pm 0.04$, a de matéria escura é $\Omega_m = 0.27 \pm 0.04$ e a de bárions é $\Omega_b = 0.044 \pm 0.004$.

A DISTRIBUIÇÃO DE GALÁXIAS

A imensa maioria da radiação visível (isto é, com frequências dentro do estreito intervalo que o olho é capaz de detectar) que existe no universo provém das estrelas. Aquelas 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.

As galáxias tendem a se agrupar, devido à natureza atrativa da gravitação. Assim, a Via Láctea possui várias galáxias-satélite anãs 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 cerca de 30 galáxias constitui nosso endereço no universo em grandes escalas e é denominado grupo local.

Uma grande parte das galáxias luminosas se encontra em pares, como a Via Láctea e Andrômeda; outras estão em grupos mais numerosos, com algumas dezenas de membros. Cerca de 10% estão em estruturas muito ricas, os aglomerados de galáxias, com centenas a milhares de membros dentro de um volume parecido com o do grupo local. Grupos e aglomerados também se agrupam, formando estruturas muito maiores, até centenas de vezes maiores que o grupo local, denominados superaglomerados de galáxias. Por exemplo, o grupo local e mais algumas dezenas de outros formam parte da estrutura que denominamos superaglomerado local, que tem em seu centro o aglomerado de Virgo, com umas 200 galáxias brilhantes.

As regiões centrais 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 freqüentemente possuem uma galáxia gigante no centro, com um número de estrelas mais de 100 vezes maior que o da Via Láctea. É essa grande concentração de massa que possibilita que os aglomerados atuem como lentes gravitacionais poderosas.

EVIDÊNCIAS DA MATÉRIA ESCURA

Num sistema estelar em equilíbrio a velocidade típica das estrelas é tal que impede que o sistema se contraia devido à atração gravitacional entre seus componentes. Medindo-se velocidades e posições das estrelas, é possível estimar-se 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) constitu-

íssem 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.

Quando observamos as galáxias no visível, vemos a luz que vem das estrelas e de nuvens de gás aquecidas por estrelas jovens. Examinando-as em outros intervalos de freqüência, 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. 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. Num aglomerado de galáxias típico, a massa desse gás é muito maior que a massa de estrelas. Porém, a massa que se estima para os aglomerados é quase 10 vezes maior que a massa de todos os bárions – em estrelas e no gás – que eles contêm. As medidas em aglomerados são consistentes com as obtidas pelo WMAP, $\Omega_m = 0.27$ e $\Omega_b = 0.044$, para toda a matéria e só para a matéria bariônica, respectivamente. 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, não são eles que constituem o grosso da matéria escura.

A matéria escura não é detectada apenas em aglomerados, mas também nas galáxias.

Na verdade, foi estudando o movimento de estrelas próximas que, em 1932, o astrônomo Jan Oort encontrou a primeira evidência da matéria escura. A Via Láctea é uma galáxia espiral e, como tal, possui um disco de estrelas. Esse disco é fino (sua espessura é bem menor que o diâmetro da galáxia) e sua espessura depende do movimento das estrelas na direção perpendicular ao disco que, por sua vez, depende da massa do disco. Com esse tipo de análise, Oort concluiu que as estrelas eram responsáveis por apenas 10% da massa necessária

para explicar a estrutura vertical do disco de nossa galáxia.

Embora haja disputa quanto à quantidade de matéria escura na vizinhança solar, 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, ao invés 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. Imagina-se que as galáxias estejam imersas em um halo esférico de matéria escura, muito extenso. Se a massa desse halo crescer linearmente com o raio, espera-se que as curvas de rotação fiquem planas, como se observa. Espera-se, também, que as velocidades dos satélites das galáxias sejam parecidas com a parte constante da curva de rotação. O estudo do movimento dos satélites da Via Láctea indica que o movimento não-kepleriano parece se estender a distâncias de centenas de milhares de anos-luz, pois, em distâncias mais de 10 vezes maiores que o disco de nossa galáxia, a velocidade típica das galáxias-satélite é parecida com a do Sol em torno do centro da Via Láctea. Assim, aparentemente as galáxias são imensos esferóides de matéria escura, com as estrelas e outras formas de matéria bariônica residindo na região central.

BÁRIONS E NÃO-BÁRIONS

Mas por que essa matéria escura não pode ser bariônica? Há duas razões para essa suposição: uma observacional e a outra teórica. Em primeiro lugar, é muito 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. O progresso na tecnologia de detectores que permitem a observação dos corpos celestes em frequências muito maiores ou muito menores que as do visível e o uso de telescópios espaciais que permitem a detecção de radiações em frequências que são absorvidas pela atmosfera, embora tenham ampliado extraordinariamente a capacidade e a profundidade da observação astronômica, falharam até agora em identificar o que constitui a matéria escura.

A outra razão pela qual se imagina que a matéria escura seja não-bariônica tem a ver com o modelo do big-bang. Esse modelo, que está no coração da cosmologia contemporânea, tem-se demonstrado 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. Reações nucleares semelhantes ocorrem no interior do Sol. Antes disso a radiação era muito quente e impedia que esses bárions (prótons e nêutrons) formassem um núcleo atômico estável. Depois de uns 20 minutos a temperatura já é muito fria, e as reações nucleares não mais ocorrem. Esse fenômeno é denominado *nucleossíntese primordial* e marca a formação dos primeiros núcleos atômicos, ou nuclídeos, do universo. Após a nucleossíntese 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 nucleossíntese primordial aproximadamente 25% da massa bariônica é convertida em núcleos de hélio. A abundância medida hoje deve ser maior que isso, pois as estrelas sintetizam hélio em seu interior e, durante sua evolução, parte desse hélio volta ao meio interestelar, enriquecendo as gerações futuras de estrelas que se formarão a partir desse gás. O estudo da abundância do hélio em galáxias permite estimar sua abundância primordial, após se descontar o efeito da evolução estelar. Obtêm-se resultados inteiramente de acordo com as previsões teóricas.

A nucleossíntese primordial leva a previsões não apenas sobre a abundância do hélio (tanto para o hélio 4, mais abundante, quanto para outras espécies isotópicas) mas também sobre os outros nuclídeos leves formados nesse processo, como o deutério e o lítio. E mais: a abundância desses nuclídeos depende da densidade total de bárions. Assim, estimando-se o valor de suas abundâncias primordiais podemos saber quantos bárions existem no universo. As abundâncias primordiais concordam com as observações para $\Omega_b = 0.040 \pm 0.006$ (Steigman, 2004).

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 fun-

do, detectada em frequências de microondas, é o remanescente da radiação muito quente dos primórdios do universo que se resfriou até a temperatura atual de 2.725 ± 0.002 K devido à expansão. Um ponto interessante é que, observando essa radiação, estamos, na verdade, obtendo uma “fotografia” do universo na época da recombinação pois, antes dela, o universo era opaco à radiação, enquanto, depois, ele fica essencialmente transparente. Essa radiação é notavelmente uniforme, mas apresenta pequenas flutuações, da ordem de 1 parte em 100 mil. Ocorre que essas flutuações dependem da densidade de bárions, e a análise do padrão dessas flutuações, medidas pelo satélite WMAP, resulta em $\Omega_b = 0.044 \pm 0.004$, em excelente concordância com o valor obtido no estudo da nucleossíntese primordial.

A NATUREZA DA MATÉRIA ESCURA

Mas se a matéria escura não é constituída de bárions, ela é feita do quê?

Os bárions foram formados no começo do big-bang. A maioria deles foi aniquilada por suas antipartículas e desapareceu. Os bárions do universo atual foram os que sobreviveram a essa aniquilação, que ocorreu nos primeiros instantes após o big-bang. O mesmo ocorreu com outras partículas, e a matéria escura pode, então, ser um remanescente exótico dos momentos iniciais do universo.

A observação da estrutura em grandes escalas põe vínculos sobre a natureza da matéria escura. Em primeiro lugar, ela parece ser não-dissipativa, isto é, não perde energia por emissão de radiação (ao menos significativamente): ela é realmente escura. Uma razão para essa hipótese é que a matéria escura parece estar distribuída como um esferóide e não como um disco. As galáxias espirais possuem um disco porque as nuvens de gás a partir das quais elas se formaram, mesmo que tivessem originalmente uma distribuição esférica, colidiram entre si dissipando energia e,

como o sistema todo girava, encontraram no disco uma configuração de equilíbrio. Isso acontece porque estruturas bariônicas são dissipativas, perdendo energia por radiação durante colisões.

A literatura técnica apresenta muitos candidatos, freqüentemente separados como matéria escura quente ou fria, dependendo se as partículas se movem com velocidades próximas à da luz ou muito menores. O neutrino é uma partícula conhecida que, se possuir massa, teria as propriedades de matéria escura quente. Partículas hipotéticas, sugeridas pela física de partículas, são os candidatos mais discutidos para a matéria escura fria. Exemplos: os neutralinos e os áxions. Os primeiros teriam massa entre 50

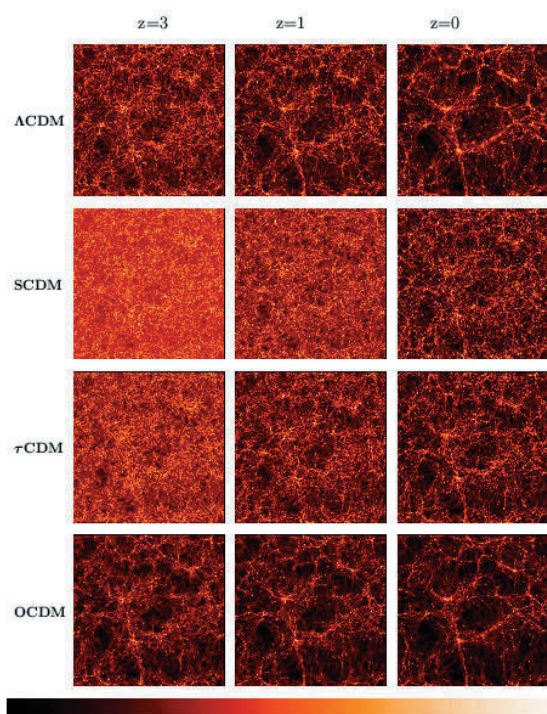
e 500 vezes a do próton, enquanto a massa dos áxions seria muitíssimo menor.

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 evoluem com o tempo. Verifica-se que, dependendo do tipo de matéria escura, o cenário é completamente diferente. Se a matéria escura for quente (como seria o caso com neutrinos massivos), grupos e aglomerados se formam por fragmentação de superaglomerados; galáxias se formam por fragmentação dos grupos e aglomerados e assim por diante. No caso de matéria escura fria o cenário é o oposto: as primeiras estruturas que se formaram tinham massas subgalácticas, e as estruturas – galáxias, grupos e aglomerados – crescem por captura e fusão de estruturas menores. Esse cenário é denominado hierárquico e é o favorecido pelas observações atuais. Por exemplo, um dos satélites da Via Láctea, a galáxia anã Sagitarius, está sendo destruído pelas forças de maré produzidas por nossa galáxia, e suas estrelas (e matéria escura) serão incorporadas à nossa galáxia. As galáxias gigantes que são encontradas no centro de aglomerados também crescem por canibalismo galáctico.

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 filamentosares.

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. Há, grosso modo, dois enfoques complementares para se procurar a resposta: a observação astronômica e a busca de detecção em laboratório. De fato, há diversos experimentos em realização ou em planejamento visando detectar as partículas da matéria escura, e remeto o leitor interessado ao rela-

Figura 1



The VIRGO Collaboration 1996

Resultados de simulações numéricas realizadas pelo consórcio Virgo (Jenkins et al., 1998) ilustrando a evolução das grandes estruturas em quatro cosmologias diferentes. A observação da abundância de aglomerados de galáxias em função do tempo (ou do redshift z) permite testar os diferentes modelos cosmológicos.

tório coordenado por Turner (2003). Aqui vou discutir como a abordagem astronômica pode ajudar na solução desse problema.

Como vimos, a matéria escura fria tem sido muito bem-sucedida para explicar as estruturas em grandes escalas, como as observadas na radiação cósmica de fundo (milhares de milhões de anos-luz) e na distribuição espacial das galáxias brilhantes (dezenas a centenas de milhões de anos-luz). Mas em escalas menores que alguns milhões de anos-luz esse modelo enfrenta dificuldades. Por exemplo, a teoria prevê que as galáxias brilhantes deveriam ter um número de galáxias-satélite muito maior que o que se observa. Outro exemplo: as simulações numéricas mostram que a massa, tanto em galáxias individuais como em aglomerados como um todo, deveria ser mais centralmente concentrada do que se observa.

Mas essas simulações consideram um modelo muito simples para as partículas da matéria escura fria: elas só interagem entre si gravitacionalmente, pois supõe-se que as outras interações entre elas sejam muito fracas. Mas isso não precisa necessariamente ser assim, e, então, pode-se atribuir outras propriedades às partículas de matéria escura e verificar se com isso se resolvem as dificuldades apontadas acima (Ostriker & Steinhardt, 2003). Por exemplo, se a matéria escura for repulsiva, pode-se evitar a formação de regiões nucleares muito concentradas. Isso também ocorreria se a matéria escura fosse auto-aniquilante e, em regiões densas, colidisse e se aniquilasse emitindo radiação. Nesse caso, essa radiação poderia, eventualmente, ser detectada. Várias outras características da matéria escura podem ser consideradas e suas consequências observacionais examinadas. Tal linha de pesquisa permitirá colocar vínculos importantes sobre as propriedades da matéria escura, mas seu sucesso vai depender de observações com a qualidade necessária para permitir discriminar entre vários modelos.

A realização desse programa requer determinações precisas da distribuição de massa em várias escalas. Mas isso não é fácil. No caso dos aglomerados de galáxias, durante muito tempo a única técnica

disponível aos astrônomos para determinar a massa dessas estruturas era o teorema do virial, a mesma utilizada por Zwicky. Supondo que as galáxias estão em equilíbrio gravitacional dentro do aglomerado, medidas de posições e velocidades permitem estimar a massa total do sistema. Contudo, se os aglomerados evoluem hierarquicamente, eles crescem capturando galáxias e grupos de galáxias e se fundindo com outros aglomerados. Isso de fato é observado, e muitos aglomerados apresentam subestruturas que são provavelmente grupos recém-chegados. Assim, a hipótese de equilíbrio não é apropriada para muitos aglomerados, e as massas estimadas com a aplicação do teorema do virial podem estar superestimadas.

Vimos que, nos aglomerados, a maior parte da massa bariônica não está em galáxias, mas na forma de um gás quente e de baixa densidade que ocupa o espaço entre as galáxias. Devido à sua temperatura esse gás emite copiosamente em raios-X e, a partir dos anos 80, com o advento de telescópios espaciais com detectores sensíveis a essa região espectral, foi possível mapear sua distribuição e suas propriedades em muitos aglomerados. Ao contrário das galáxias, o gás sente mais rapidamente as variações do potencial gravitacional e se acomoda a ele. Assim, a distribuição da matéria escura pode ser determinada analisando-se a emissão de raios-X de um aglomerado. Embora esse método geralmente produza estimativas mais confiáveis que as obtidas com o teorema do virial, em muitos casos se verifica que o gás está fora de equilíbrio, apresentando, por exemplo, frentes de choque produzidas por grupos de galáxias caindo sobre o aglomerado. Na verdade, um bom diagnóstico sobre o estado de equilíbrio de um aglomerado vem da comparação dos resultados obtidos com esses dois métodos: se o aglomerado está em equilíbrio, as massas calculadas concordam entre si.

A grande vantagem da técnica de lentes gravitacionais sobre as precedentes é que ela permite a obtenção de mapas de massa sem necessidade de assumir hipóteses de equilíbrio. Por essa razão, ela tem todas as

condições de ter um papel especial nos estudos sobre a distribuição espacial da matéria escura.

LENTEs GRAVITACIONAIS

Em 1916 Einstein publicou sua teoria geral da relatividade, em que propunha três testes para a teoria: o *redshift* gravitacional das linhas espectrais, a deflexão da luz das estrelas pelo Sol, e a precessão do periélio de Mercúrio. A base das lentes gravitacionais é o fenômeno da deflexão da luz. 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.

Pela relatividade geral, uma concentração de matéria e energia, como o Sol, distorce o espaço e o tempo em sua vizinhança. Uma consequência disso é que um raio de luz que passe perto do Sol vai sofrer uma deflexão em sua trajetória. Isso pode ser entendido com a mecânica newtoniana supondo que a luz seja constituída de partículas com massa que são defletidas porque sentem a atração gravitacional do Sol. Mas o valor previsto para essa deflexão pela relatividade geral é o dobro do esperado classicamente. Assim, em 1919, a Royal Astronomical Society organizou duas expedições, sob a coordenação de Arthur Eddington, para observar o eclipse e testar a relatividade geral. Uma das expedições, com o próprio Eddington, foi para a Ilha do Príncipe, no Atlântico, na altura da Guiné Equatorial, enquanto a outra veio para Sobral. Parece que o tempo estava bem melhor em Sobral que em Príncipe e foram as fotografias do eclipse obtidas no Ceará que foram as determinantes para o veredicto. O anúncio dos resultados em novembro de 1919, favorável à relatividade geral, 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” (Tiomno Tolmasquim, 2003).

Embora Einstein tivesse discutido a possibilidade das lentes gravitacionais, ele certamente não imaginou que elas se tornariam uma das ferramentas mais importantes para se sondar a constituição do universo. Zwicky, um dos descobridores da matéria escura, foi também o primeiro a considerar a possibilidade de os objetos extragalácticos atuarem como lentes gravitacionais. Einstein e Eddington tinham verificado a possibilidade de ocorrência de imagens múltiplas se duas estrelas estivessem muito alinhadas, mas foi Zwicky, em 1937, que mostrou que o efeito de lentes por galáxias seria mais comum e que também permitiria a observação de galáxias muito distantes. Uma revisão geral do fenômeno de lentes gravitacionais é apresentada em Mellier (1999).

Considere um raio de luz vindo de uma estrela e uma outra na frente, quase exatamente alinhada com o observador ao longo da linha de visada. A luz vinda da estrela mais distante é defletida e pode chegar ao observador por duas trajetórias diferentes, formando então uma imagem dupla da fonte. Nesse exemplo a lente é uma estrela que, na prática, possui uma imagem puntual. Se a lente for uma distribuição de massa extensa, como uma galáxia ou aglomerado, mais de duas imagens podem ser detectadas. Apenas em 1979, com a descoberta da imagem de um quasar duplo, essas previsões foram confirmadas. Se o alinhamento da fonte e da lente com o observador for perfeito, a imagem da fonte será um anel. Os primeiros anéis de Einstein, como são chamados, foram descobertos durante os anos 90.

Além da deflexão, as lentes também podem aumentar o brilho superficial das fontes, um efeito denominado magnificação. Como consequência, uma estrela passando na frente de outra pode magnificar o brilho da que está atrás. Se eventualmente essas estrelas estiverem sendo monitoradas, pode-se detectar um aumento no brilho que independe da frequência da observação. Esse fenômeno é denominado microlente e é muito raro, mas pode ser detectado moni-

torando-se milhões de estrelas tanto no halo de nossa galáxia quanto na direção das Nuvens de Magalhães, nossos satélites mais luminosos.

Os aglomerados de galáxias, por serem enormes concentrações de massa, podem também ser lentes gravitacionais poderosas, afetando a imagem de galáxias que estão atrás deles (denominadas galáxias de fundo). O tipo de efeito 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 foi detectado pela primeira vez nos finais dos anos 80 e é denominado *lentes fracas*: a distorção da imagem é pequena porque a intensidade do campo gravitacional (ou a distorção do espaço-tempo) é pequena.

As lentes fracas são uma das principais ferramentas para estudar-se a distribuição de massa em aglomerados, fora das regiões centrais. 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 forma da distribuição de massa total (bariônica e não-bariônica), bem como sua quantidade total (pela intensidade da distorção e pela magnificação das galáxias).

Nas regiões centrais dos aglomerados o campo gravitacional é muito mais forte, e os efeitos de lentes 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. Vale a pena destacar aqui a enorme contribuição trazida para o estudo das lentes gravitacionais pelo Telescópio Espacial Hubble (HST). Embora muitas das imagens múltiplas sejam detectáveis com telescópios no solo, na maioria dos casos não têm detalhes que permitam verificar se de fato são imagens diferentes de um mesmo objeto. 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.

Há um outro aspecto das lentes fortes que merece ser destacado: elas permitem usar um aglomerado de galáxias como um *telescópio gravitacional*. A magnificação produzida pela lente permite observar ga-

Figura 2



Imagem obtida com o HST da região central do aglomerado de galáxias CL 0024+1654. As imagens azuis são do mesmo objeto!

laxias tdo distantes e tdo fracas que, se ndo fosse pelo efeito da amplificaçdo gravitacional do aglomerado, ndo poderiam ser detectadas. Em alguns casos, detalhes estruturais de galaxias distantes podem ser observados e estudados. Almd disso, as galaxias mais distantes conhecidas no momento foram descobertas utilizando-se essa tdnica. Medindo-se as imagens mltiplas faz-se um mapa de massa da regido central do aglomerado e identificam-se as regides onde se espera que a magnificaçdo serd mxima; faz-se ali um imageamento profundo, no infravermelho prximo, e, examinando-se as propriedades das fontes detectadas, estima-se a distncia (o *redshift*). Esse tipo de tdnica vai ser fundamental para se estudar a evoluçdo inicial das galaxias.

Finalmente, gostaria de mencionar mais uma aplicaçdo das lentes gravitacionais que deve trazer resultados relevantes dentro de pouco tempo: a tomografia gravitacional de grandes estruturas. Embora quando passe por um aglomerado de galaxias a deflexdo que a luz de uma galaxia distante sofre seja grande, em seu caminho atd a Terra a deflexdo total depende da distribuçdo de massa ao longo de toda a sua trajetria. Assim, a medida dos padrdes de distorçdo e alinhamento de imagens em reas prximas do cu pode permitir tanto estimar, estatisticamente, a quantidade total de mterid quanto estudar a forma e a evoluçdo de sua distribuçdo espacial em grandes escalas.

MASSA E LUZ EM AGLOMERADOS DE GALAXIAS PRXIMOS

Esta discussdo demonstra claramente o potencial das lentes gravitacionais para o estudo da mterid escura e das grandes estruturas. Mas sua implementaçdo exige um grande nmero de procedimentos e anlises, telescpios espaciais e no solo, imagens de alta qualidade, etc. Por exemplo, d possvel se detectar arcos gravitacionais do

solo, desde que se façam imagens profundas (porque o brilho superficial d pequeno) em boas condiçdes atmosfricas, mas a identificaçdo de imagens mltiplas d difcil porque as imagens obtidas no solo sdo “borradas” pelo espalhamento da luz na atmosfera e, por isso, nessa reia o HST tem se mantido imbatvel. Jd a detecçdo e a anlise do efeito de lentes fracas sdo possveis do solo. Vou ilustrar isso comentando os primeiros resultados de um mapeamento via lentes fracas da distribuçdo de massa e luz que estamos conduzindo em uma amostra de 24 aglomerados de galaxias prximos (Cypriano et al., 2004). Essa amostra constitui a primeira parte do Low-z Lensing Survey (LZLS). Esse projeto foi parte da tese de doutoramento de Eduardo Cypriano, atualmente no telescpio Soar, no Chile, e d uma colaboraçdo internacional que envolve tambm Jean-Paul Kneib, do Observatoire Midi-Pyrnnes (e atualmente no Caltech) e Luis Campusano, da Universidad de Chile.

Os aglomerados selecionados tinham mapas de raios-X previamente determinados, o que nos d informaçdes sobre a distribuçdo do gs. Em alguns casos temos tambm medidas de massas usando o teorema do virial. Uma caracterstica importante dessa amostra d que ela d constituída de aglomerados de galaxias relativamente prximos para permitir produzir mapas com maior resoluçdo, isto d, com mais detalhe espacial. As observaçdes opticas foram feitas em 3 bandas espectrais diferentes com o telescpio de 8 metros Antu, do VLT, em condiçdes atmosfricas muito boas.

Nas imagens de cada aglomerado h muitas galaxias que pertencem ao aglomerado e outras que estdo tanto na frente como atrs dessa estrutura. Para fazer mapas de luz e de massa precisamos saber quais galaxias pertencem ao aglomerado e quais ndo. Para isso geralmente se mede o *redshift* de cada galaxia em seu espectro (isto d, sua distribuçdo de energia) e se determina sua distncia com a lei de Hubble: devido d expansdo do universo, os espectros das galaxias se deslocam para o lado vermelho

e medindo-se esse deslocamento determina-se a distância. Infelizmente só temos esta informação para poucas galáxias (observacionalmente, obter espectros é muito mais custoso que obter imagens). Uma alternativa interessante é utilizar os chamados *redshifts* fotométricos: fazem-se imagens em diversas bandas fotométricas e, com essa informação, tenta-se inferir a forma da distribuição de energia em função da frequência (o espectro) das galáxias e, daí, estima-se simultaneamente seus *redshifts* e seus tipos. Nesse estágio do projeto estamos recorrendo a procedimentos estatísticos – baseados nas cores das galáxias – para fazer os mapas. Galáxias de tipos diferentes têm cores e espectros diferentes e habitam ambientes diferentes. As galáxias azuis, por exemplo, têm essa cor por apresentarem muita formação estelar. Elas são normalmente galáxias espirais ou irregulares e são

encontradas em sua maioria em regiões de baixas densidades de galáxias. Nas galáxias vermelhas, ao contrário, a luz provém das estrelas velhas. Elas são geralmente elípticas ou lenticulares, e dominam a região central dos aglomerados. Essas galáxias obedecem a uma relação entre sua cor e seu brilho bem definida, que é utilizada para identificar as galáxias do aglomerado.

Para fazer um mapa de massa com a técnica de lentes fracas precisamos inicialmente identificar as galáxias que estão atrás do aglomerado e que sofrem a ação da lente. Na ausência de informações sobre as distâncias, selecionamos galáxias azuis fracas. Estatisticamente, espera-se que a maior parte delas esteja atrás do aglomerado. Essa amostra está certamente contaminada por galáxias azuis do aglomerado e mesmo na frente dele, cujo efeito é diluir o sinal de lente. A análise requer a medida cuidadosa

Figura 3

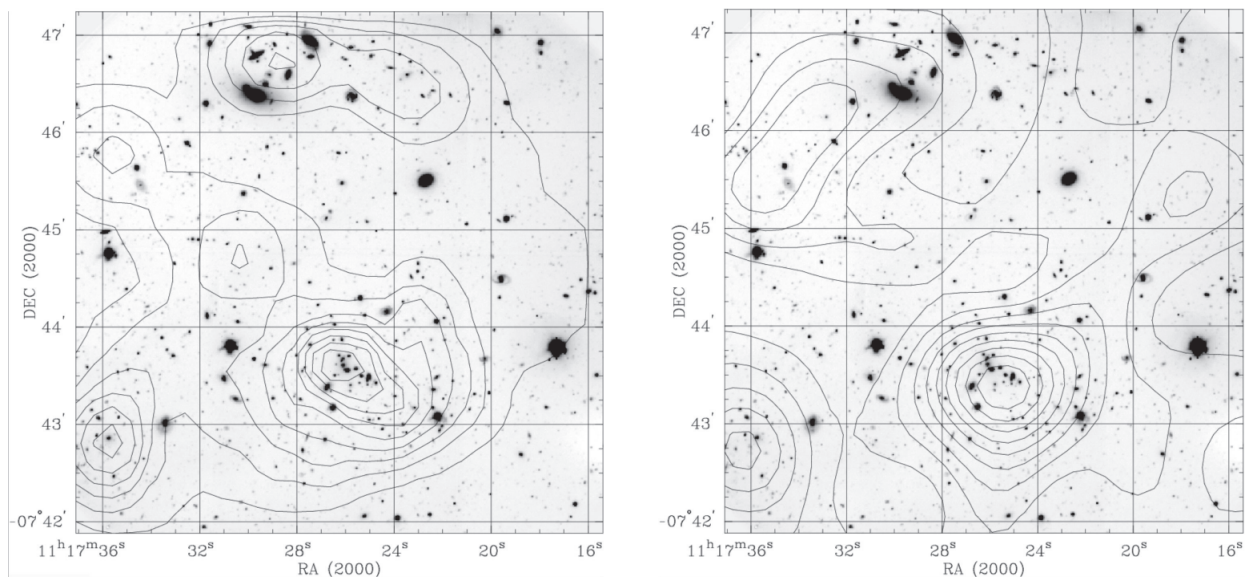


Imagem do aglomerado de galáxias distante VMF097 ($z = 0.48$). O aglomerado corresponde à concentração logo abaixo do centro da imagem. A imagem da esquerda contém um mapa de contornos da distribuição de luz, e a da esquerda o mapa da distribuição de massa. Note que ambos os mapas indicam a presença de um outro aglomerado, provavelmente ainda mais distante, no canto inferior esquerdo das imagens.

da forma das galáxias. Neste trabalho elas são representadas por elipses. Para se determinar essa elipse, tem-se que levar em conta que as imagens obtidas com telescópios no solo são borradas e, ademais, a intensidade do borrão pode variar sobre a imagem. Além disso, deve-se levar em conta que as galáxias têm intrinsecamente uma elipticidade, sobre a qual vai ocorrer a distorção da lente. As técnicas que adotamos para ajustar elipses às galáxias incorporam correções para todos esses efeitos. Obtidas essas medidas de forma, determinam-se valores locais da orientação média das galáxias e, daí, o mapa de massa. O mapa de luz, por sua vez, é confeccionado usando-se a luminosidade e a posição das galáxias vermelhas. Esses mapas têm uma resolução média de um milhão de anos-luz. Assim, só estruturas maiores que essas podem ser discerníveis nos mapas.

Como se compara a distribuição de massa e luz nessa amostra? Verificamos que, para a maioria dos aglomerados, o centro da distribuição de massa coincide com o da luz. Além disso, muitos deles apresentam subestruturas significativas, detectáveis tanto em massa quanto em luz. Verificamos também que, na maioria dos casos, a galáxia central do aglomerado está alinhada com a distribuição de massa. Todos esses resulta-

dos tendem a confirmar que, em escalas acima de um milhão de anos-luz, a distribuição de luz tende a seguir a de massa. Em apenas um caso encontramos uma subestrutura escura, sem contrapartida óbvia na distribuição de galáxias. Mas, como o efeito de lente é cumulativo ao longo da linha de visada, esse objeto pode estar associado a algum aglomerado distante. Isso vai ser investigado. Outro resultado interessante deste trabalho é que, pela comparação entre as distribuições de massa, luz e gás, podemos saber se um dado aglomerado está em equilíbrio ou se está numa fase ativa, capturando grupos próximos. Verificamos que todos os aglomerados muito massivos de nossa amostra são ativos. Isto é, incidentalmente, o que se espera no cenário hierárquico de formação de estruturas.

Vale a pena, para concluir, ressaltar a grande contribuição que o telescópio Soar pode trazer para as pesquisas em lentes gravitacionais, graças à sua óptica e aos recursos de óptica ativa que ele possui, o que deverá, no médio prazo, levar à produção rotineira de imagens de alta resolução espacial. Pretendemos, então, estudar aglomerados em vários *redshifts* para determinar como as distribuições de massa e de luz evoluíram com o tempo e os vínculos que isso coloca sobre a natureza da matéria escura.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- BENNETT, C. L. et al. "First-Year Wilkinson Microwave Anisotropy Probe (WMAP) Observations: Preliminary Maps and Basic Results". *Astrophysical Journal Supplement Series*, vol. 148, p. 1 (2003).
- CYPRIANO, E. S.; SODRÉ, L.; KNEIB, J. P. & CAMPUSANO, L. E. "Weak Lensing Mass Distributions for 24 X-Ray Abell Clusters". *Astronomical Journal* (2004 – no prelo).
- JENKINS, A. et al. "Evolution of Structure in Cold Dark Matter Universes". *Astrophysical Journal*, vol. 499, p. 20 (1998).
- MELLIER, Y. "Probing the Universe with Weak Lensing". *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, vol. 37, p. 127 (1999).
- OSTRIKER, J. P. & STEINHARDT, P. "New Light on Dark Matter". *Science*, vol. 300, p. 1.909 (2003).
- STEIGMAN, G. "Primordial Alchemy: From the Big Bang to the Present Universe", in C. Esteban, R. J. García López, A. Herrero e F. Sanchez (eds.). *Cosmochemistry: the Melting Pot of the Elements*. XIII Canary Islands Winter School of Astrophysics, Cambridge University Press, 2004.
- TIOMNO TOLMASQUIM, A. *Einstein – O Viajante da Relatividade na América do Sul*. Vieira & Lent, 2003.
- TURNER, M. S. (coor.). *Connecting Quarks with the Cosmos: Eleven Science Questions for the New Century*. The National Academies Press, 2003 (disponível em www.nap.edu).

