

# O estranho caso da Matéria Escura

Ilídio Lopes

Centro Multidisciplinar de Astrofísica (CENTRA) e Departamento de Física  
Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa

## Resumo

**Durante os últimos 100 anos, um progresso assinalável em várias áreas da física, astrofísica e cosmologia contribuiu definitivamente para uma melhor compreensão sobre a matéria de que é feito o universo. No entanto, para grande surpresa de todos uma nova forma de matéria foi descoberta – a matéria escura. Esta é muito mais abundante do que a matéria comum de que nós e o Sol somos feitos. Atualmente só conhecemos a sua existência devido à sua ação gravítica. De que partículas fundamentais é feita esta nova forma de matéria? Como interage a matéria escura com a matéria comum? Estas são duas das muitas questões sobre a matéria escura a que os físicos e astrofísicos terão que responder nas próximas décadas.**

A maior parte da massa da Via Láctea não reside nas regiões de gás e estrelas que podem ser diretamente observados com telescópios, mas antes numa nova substância invisível, constituída por partículas que até agora escaparam à deteção direta de um grande número de detectores na Terra. Este défice da massa observada em relação à verdadeira massa total é encontrado na nossa, assim como em muitas outras galáxias. Este resultado é obtido através da aplicação das leis do movimento e da lei da gravitação universal, tal como Newton propôs no seu famoso livro *Principia* há 330 anos. Estima-se hoje que mais de 90 por cento da massa de uma galáxia seja devida a esta substância invisível, que por razões históricas chamamos “matéria escura”. Que motivos têm os físicos para fazer uma afirmação tão surpreendente?

Atualmente, fundamenta-se tal afirmação em três factos:

1. embora não tenhamos ainda detectado a matéria escura, a sua existência é inferida a partir da atração gravitacional que esta exerce sobre a matéria “luminosa” que observamos;
2. as observações cosmológicas a grandes escalas mostram que a massa total do Universo excede largamente a massa total de matéria normal, de que nós somos feitos, assim como as estrelas, planetas, rochas, nuvens de gás e poeira; na verdade, a matéria

normal representa apenas uma pequena fração da massa total do Universo;

3. o último argumento vem da necessidade de incluir matéria escura nos modelos teóricos que explicam a formação do Universo, pois só assim estes modelos reproduzem as características do universo em que hoje vivemos; isto é, a matéria escura é necessária para que ocorra a formação de planetas, estrelas, enxames de estrelas, galáxias e enxames de galáxias, que os cosmólogos observam coletivamente como aglomerados e grupos de galáxias.

Efetivamente, todas as provas experimentais que temos sobre a existência da matéria escura vêm da astrofísica e cosmologia. Estas medições astronómicas baseiam-se exclusivamente na forma como esta matéria interage gravitacionalmente. Temos dois métodos de estudar os efeitos da gravidade da matéria escura sobre os corpos celestes:

(i) podemos observar como um grupo de objetos astronómicos se move sob a influência da sua gravidade, (ii) ou medir como esta gravidade modifica a forma como a luz viaja. Atualmente, existe uma grande variedade de resultados observacionais que nos dão conta da presença da matéria escura no Universo. Como tal, escolhi apresentar brevemente dois exemplos que os astrónomos usam para mostrar a existência de matéria escura. Num caso, a matéria escura é inferida a partir da aplicação das leis de Newton e, num segundo caso, a partir da teoria da relatividade geral de Einstein.

## Matéria escura e a curva de rotação das galáxias

Em 1975, durante uma reunião da Sociedade Astronómica Americana, Vera Rubin comunicou um resultado aparentemente surpreendente: que as estrelas mais distantes nas galáxias espirais, como a Via Láctea, giram com uma velocidade constante em torno do centro da galáxia. Este resultado observacional parecia contrariar as leis de movimento

de Newton, tal com ilustrado na Figura 1: enquanto que, no caso do movimento dos planetas em torno do Sol, as velocidades orbitais observadas são consistentes com os valores previstos pela leis de movimento de Newton, no caso do movimento das estrelas na Via Láctea, tal parece não se verificar. Será que as leis de Newton já não se aplicam? Uma análise cuidada do problema permitir-nos-á concluir que tal não é o caso. Para ilustrar o que está a acontecer no caso das galáxias espirais, os astrónomos usam dois resultados fundamentais das leis do movimento – a conservação do momento angular e a lei da gravitação universal, os quais passo a explicar de forma breve:

(i) Começemos por considerar o movimento das estrelas em torno do centro galáctico, como ilustrado na Figura 1(b). Efetivamente, o facto da velocidade orbital destas estrelas ser independente da distância ao centro da galáxia parece contradizer a conservação do momento angular. Esta lei fundamental do movimento diz que num sistema fechado em evolução, o momento angular é conservado. Para ilustrar este ponto, consideremos os casos simples de um bailarino clássico fazendo piruetas, de um planeta a rodar em torno do Sol, ou ainda de uma estrela a rodar em torno do centro da galáxia. Estes últimos dois exemplos correspondem aos casos ilustrados na Figura 1. Em todos estes exemplos, podemos calcular o momento angular do sistema,  $L$ , como

$$L = mr^2\omega = mvr$$

onde  $m$  é a massa do corpo em movimento, isto é a massa do bailarino, planeta ou estrela,  $\omega$  e  $v$  são as velocidades angular e linear desse corpo,  $r$  é a distância ao eixo de rotação do sistema, sendo o eixo uma linha vertical imaginária perpendicular ao

plano de movimento, isto é a cintura do bailarino, o plano de movimento dos planetas (eclíptica) e o disco galáctico, respectivamente.

Assim, de acordo com a equação acima referida, para que  $L$  se mantenha constante, sempre que uma quantidade da equação variar, uma outra terá que compensar essa variação, mantendo assim constante  $L$ . Por exemplo, o leitor compreenderá agora como o bailarino Mikhail Baryshnikov aumentou a sua velocidade de rotação nas suas famosas 11-piruetas do filme *White Nights*<sup>1</sup>. Como o  $L$  do bailarino é conservado, para aumentar a sua velocidade de rotação, isto é para aumentar  $\omega$  e  $v$ , depois do impulso inicial o bailarino simplesmente diminui  $r$  contraindo uma perna e os braços. No final do exercício o bailarino reverte o processo, isto é diminui a rotação abrindo novamente os braços para terminar o exercício com elegância e em equilíbrio. Tipicamente, um bailarino de 50 kg, por contração da perna e braços poderá aumentar a sua velocidade angular de 2 rotações por segundo para 32 rotações por segundo.

A formação do sistema planetário e da galáxia a partir de uma nuvem de gás inicial resulta do equilíbrio de forças que se estabelecem durante o colapso gravitacional da nuvem de gás em rotação devido à conservação de  $L$ . Tal como no exemplo do bailarino, a contração do tamanho da nuvem em rotação, isto é a diminuição de  $r$ , é acompanhada com um aumento significativo da velocidade de rotação da nuvem  $\omega$ . No entanto, como a nuvem de gás não é um corpo rígido, resulta que os corpos celestes junto ao eixo de rotação ficam a girar mais rapidamente do que os mais exteriores. Assim, os planetas exteriores do nosso sistema planetário rodam mais lentamente, como ilustrado na Figura 1(a).

O mesmo também era esperado para as estrelas localizadas a grandes distâncias do centro galáctico, como ilustrado

<sup>1</sup> Ver <https://youtu.be/02EvsGal-Wc> ou <https://youtu.be/UZ2tD4PLcOM>

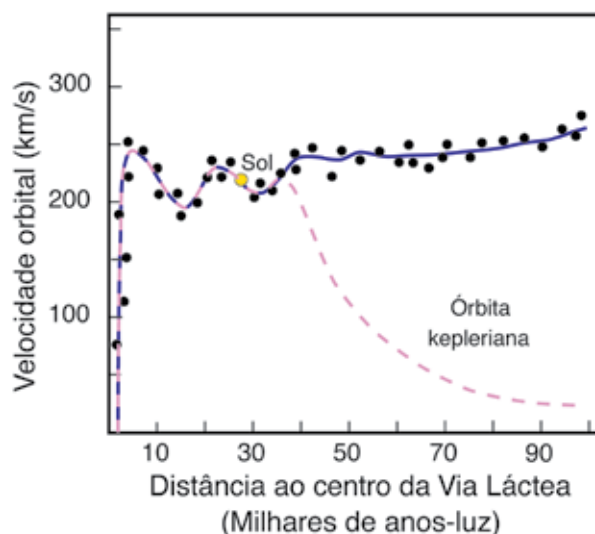
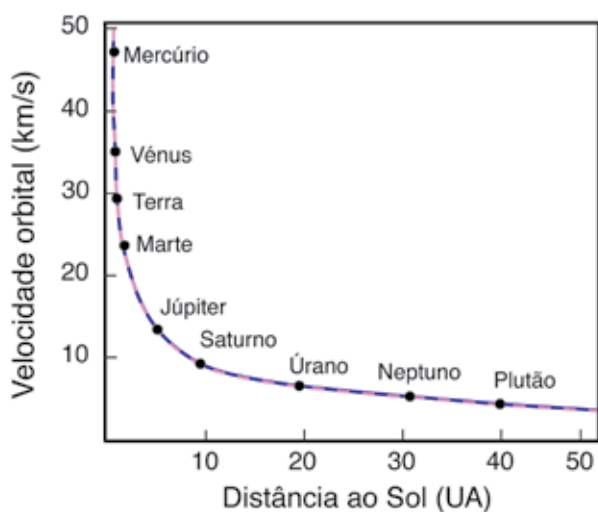


Fig. 1 - (a) Velocidade orbital dos planetas em torno do Sol. A distância está expressa em unidades astronómicas. (b) Velocidade orbital das estrelas em torno do centro da Via Láctea; a curva a azul corresponde à velocidade orbital média, determinada a partir das velocidades das estrelas medidas pelos astrónomos; a curva a tracejado-rosa corresponde à velocidade orbital calculada a partir da massa luminosa (estrelas e nuvens de poeira da galáxia) observada. A velocidade orbital é calculada a partir das leis de movimento de Newton (ou leis de Kepler).

na Figura 1(b); no entanto, tal não se observa. Pode agora o leitor imaginar a surpresa de Vera Ruben ao verificar que estas estrelas mais exteriores rodavam todas com velocidades muito elevadas, aparentemente contrariando a conservação do momento angular. Então, o que estaria errado afinal?

Para compreendermos o que está acontecer neste caso temos que analisar um pouco mais este problema.

(ii) Consideremos então os dois últimos exemplos: os planetas a girarem em torno do Sol e as estrelas a rodarem em torno do centro galáctico. Podemos calcular a velocidade orbital  $v$  de um planeta ou de uma estrela, a partir da lei da gravitação universal de Newton. Como as órbitas são praticamente circulares, no movimento orbital de um planeta ou estrela de massa  $m$  temos que a força de gravidade iguala a força centrípeta. Como tal

$$\frac{GMm}{r^2} = \frac{mv^2}{r},$$

onde  $G$  é a constante universal da gravitação (ou constante de Newton),  $M$  é a massa central do sistema. Resolvendo a última equação em ordem a  $v$ , obtemos

$$v = \sqrt{\frac{GM}{r}},$$

expressão que dá a velocidade orbital do planeta ou estrela em função da distância ao centro do sistema. Constatamos que  $v$  varia como  $1/\sqrt{r}$ . No entanto, este simples resultado tem duas leituras distintas, para os dois sistemas em consideração.

No primeiro exemplo, como o Sol contém 99 % da massa do sistema solar, podemos aproximar  $M$  pela massa do Sol. Por exemplo, para calcularmos a velocidade orbital da Terra, podemos desprezar as massas dos restantes planetas internos à distância  $r$ . Tal como previamente mencionado,  $v$  diminui com a distância. A Figura 1(a) ilustra o exemplo apresentado. O resultado fundamenta as conhecidas leis do movimento planetário, como foram empiricamente deduzidas por Johannes Kepler no século XVII.

No segundo exemplo, a massa  $M$  corresponde a toda a massa interna ao raio  $r$ , e não somente à massa central do sistema que, neste caso, seria a massa do buraco negro supermassivo localizado no centro da nossa galáxia. Na verdade, quando Vera Rubin, assumiu que  $M$  correspondia à massa de todos os objetos luminosos observados, em particular todas as estrelas, nuvens de gases e poeiras, ela esperava que  $v$  diminuísse com a distância ao centro da galáxia (órbita kepleriana, Figura 1(b)), mas tal não se verificava. Na Figura 1(b), está ilustrada a velocidade orbital calculada a partir da equação prévia, assim como a velocidade medida a partir das observações. Vera Rubin concluiu que a única forma de  $v$  se manter constante era considerar que  $M$ , para além da matéria visível  $M_{vi}$ , contém também matéria não visível  $M_{me}$ , a que hoje identificamos ser ma-

téria escura, tal que  $M = M_{vi} + M_{me}$ . Portanto,  $M_{me}$  é a quantidade adicional de matéria escura, que faz com que as estrelas distantes continuem gravitacionalmente ligadas à galáxia. Caso  $M_{me}$  deixasse de existir, a força gravitacional devido a  $M$  diminuiria. Como consequência, as estrelas mais exteriores acabariam por escapar da galáxia, isto porque a velocidade medida nestas estrelas é superior a  $\sqrt{2}v$ , isto é superior à velocidade de escape. Esta é a razão porque sabemos que todas as galáxias espirais, incluindo a Via Láctea, estão imersas num halo de matéria escura.

## Matéria escura e colisão de galáxias

A mais forte indicação de que a matéria escura é constituída por partículas de um tipo desconhecido foi pela primeira vez observada em 2004, no aglomerado galáctico 1E0657-558 na constelação de Carina, conhecido pelo nome de “aglomerado da bala”, aqui reproduzida na Figura 2. Nesta imagem podemos identificar uma colisão entre dois enxames de galáxias. Atualmente, mais de 70 aglomerados galácticos foram descobertos com características idênticas ao aglomerado da bala.

O magnífico resultado mostrado na Figura 2 foi obtido através da combinação de três imagens distintas. As galáxias em cor de laranja e branco correspondem a uma imagem óptica observado pelo Telescópio Espacial Hubble. Sobreposta a esta, encontra-se uma imagem de raios x obtida pelo satélite Chandra (NASA), identificada por duas regiões cor-de-rosa distintas. A última imagem, de cor azul, dá-nos a concentração de massa no aglomerado. Esta distribuição de massa foi cartada através da distorção que a gravidade do aglomerado galáctico produz na luz de objetos distantes que o atravessam, um mecanismo físico conhecido por lente gravitacional.

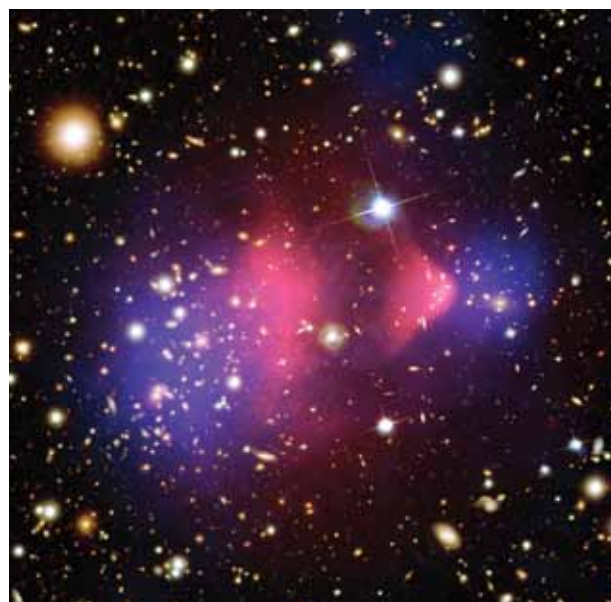


Fig. 2 - Aglomerado galáctico (1E 0657-558) na constelação de Carina, também conhecido pelo nome de “aglomerado da bala”.

*MRA Instrumentação*

# *Fotónica e imagem*

Na área de tecnologias de Fotónica, Visão e Imagem o Grupo Álava Ingenieros dispõe da mais avançada gama de instrumentos, componentes e sistemas tanto para o espectro visível como para o ultravioleta e o infravermelho.

Dispomos da mais completa gama tecnológica do mercado em conjunto com uma excelente equipa formada por técnicos especialistas de produto, engenheiros de aplicações e implementação de sistemas, técnicos especialistas em instalações e um pessoal altamente qualificado para disponibilizar-lhe a melhor opção tecnológica e fornecer-lhe o melhor apoio e assistência pós-venda.

Lasers científicos e industriais

Visão artificial

Câmaras de alta e ultra alta velocidade

Óptica e optomecânica

Câmaras multi e hiperspectrais

Sistemas aerotransportados

Espectrometria

Termografia infravermelha

Correlação digital de imagem (DIC)

Caracterização fontes de luz

Câmaras científicas

Mecânica de fluídos e tamanho de partículas

Hoje sabemos que as regiões cor-de-rosa devem-se à emissão de raios x pelo gás quente (matéria normal) presente no aglomerado. Esta distribuição de matéria é claramente distinta da região azul que contém toda a matéria do aglomerado (matéria normal e matéria escura), mostrando de forma evidente a existência de uma grande quantidade de matéria que não emite radiação de raios x. Em conformidade com outros resultados observacionais identificamos esta região como sendo dominada pela matéria escura.

Compreender com se faz a cartografia da matéria neste tipo de aglomerado galáctico é central para interpretar a Figura 2. Por essa razão, de forma abreviada, vamos detalhar como funciona uma lente gravitacional ideal, isto é, como é que um campo gravitacional criado pela matéria modifica o trajeto da luz.

Tal como Einstein explicou na sua nova Teoria da Relatividade Geral, concluída em 1916, a luz de uma estrela distante propaga-se no espaço em linha reta, sendo a sua trajetória curvada ou deflectida quando a luz passa perto de um objecto massivo, por exemplo o Sol, como ilustrado na Figura 3. No âmbito da nova teoria, Einstein foi o primeiro a obter a fórmula que dava o ângulo de deflexão da luz  $\theta$  que passa a uma distância  $r$  de um objecto esférico de massa  $M$ , tal que

$$\theta = \frac{4GM}{c^2} \frac{1}{r}$$

onde  $c$  é a velocidade da luz no vácuo. Durante um eclipse total solar, tal como dado pela última equação, a luz das estrelas sofre um desvio angular  $\theta$ , que é função de  $r$ . Em particular, para o caso do Sol de raio  $R_{\odot}$  e massa  $M_{\odot}$ , temos

$$\theta_{\odot} = \frac{4GM_{\odot}}{c^2 R_{\odot}}$$

isto é  $\theta_{\odot} = 1.74''$ . Quando Einstein obteve este resultado, não lhe deu muita relevância, pois nessa época não era es-

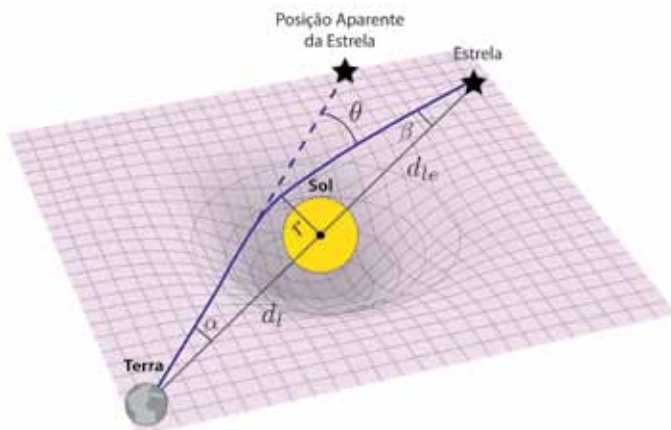


Fig. 3 - Esquema de uma lente gravitacional: A lente de massa  $M$ , por exemplo o Sol, encontra-se entre a fonte de luz, por exemplo uma outra estrela, e o astrónomo localizado na Terra. Devido ao campo gravítico do Sol que altera o trajeto da luz, o astrónomo não vê a estrela, mas somente a sua imagem (posição aparente da estrela).

perado que este efeito pudesse ser observado. No entanto, contrariando as expectativas, tal acabou por acontecer em 1919: o valor  $\theta_{\odot}$ , foi confirmado (com um erro de 20 %) por uma equipa de astrónomos liderada por Sir Arthur Eddington, numa expedição conjunta à ilha do Príncipe e ao Sobral no Brasil para observar o eclipse total do Sol. Como o diâmetro aparente da Lua e do Sol são idênticos, durante o eclipse é possível determinar o ângulo de deflexão da luz para estrelas com posições angulares próximas do disco solar, pois como ilustrado na Figura 3, devido à ação do campo gravítico do Sol sobre a luz, a posição aparente da estrela (imagem) é distinta da posição real da estrela. Comparando as posições das estrelas (imagens) em fotografias obtidas antes e durante o eclipse solar, a equipa do Eddington pôde calcular  $\theta$ , o ângulo de deflexão da luz.

No seguimento da apresentação deste resultado teórico, cuja validação experimental fez Einstein famoso, vamos determinar um outro que é fundamental para o estudo observacional da matéria escura. No modelo simplificado ilustrado na Figura 3, o ângulo  $\theta$  é pela geometria dos triângulos igual a  $\alpha + \beta$ . Cada um destes ângulos pode ser expresso em termos de distâncias. Uma vez que em ambos os triângulos,  $r$  é muito mais pequeno que qualquer das outras distâncias, podemos aproximar as tangentes dos ângulos pelos próprios ângulos, assim temos  $\alpha = r/d_l$  e  $\beta = r/d_{le}$ . Definindo a grandeza  $f$  tal que  $\theta = r/f$ , a equação escreve-se como

$$\frac{1}{f} = \frac{1}{d_l} + \frac{1}{d_{le}}$$

onde  $d_l$  é a distância a que se encontra a massa  $M$  (Sol na Figura 3) e  $d_{le}$  é a distância a que a estrela se encontra da massa  $M$ . O leitor com conhecimentos em óptica geométrica provavelmente já verificou que esta equação é a mesma que descreve a formação de uma imagem por uma lente, onde  $f$  se identifica com a distância focal da lente. Do ponto de vista do astrónomo, a localização angular da imagem em relação à estrela é dada pelo ângulo  $\alpha$ , o qual é obtido resolvendo a equação em ordem a  $r$  e dividindo o resultado por  $d_l$ . Assim, temos

$$\alpha = \sqrt{\frac{4GM}{c^2} \frac{d_{le}}{d_l(d_l + d_{le})}}$$

Esta relação permite determinar a partir do ângulo aparente  $\alpha$  a massa total  $M$  do sistema responsável pelo efeito de lente gravitacional. Existe um caso particular de alinhamento dos astros em que o efeito de lente gravitacional dá origem à forma-

ção de uma imagem peculiar. Consideremos que a Figura 3 corresponde a um sistema de duas galáxias longínquas, tal que a galáxia lente (Sol) e galáxia fonte (estrela) estão localizadas exatamente na linha de visão do astrónomo. A imagem formada não será uma imagem localizada numa única região, como a posição aparente da estrela mostrada na Figura 3, mas antes forma-se uma imagem anular (dada pelo ângulo  $\alpha$ ), devido ao espalhamento da luz. Este tipo de imagem é conhecida por anel de Einstein.

A Figura 4 é um exemplo quase perfeito de um anel de Einstein obtido pelo telescópio Hubble devido ao alinhamento de duas galáxias com o telescópio. O campo gravítico da galáxia lente, vista em primeiro plano, é responsável pela formação do anel. Em objetos como LRG 3-757, o anel de Einstein permite aos astrónomos determinar a massa da matéria escura da galáxia lente, uma vez que  $\alpha$  só depende de distâncias e da massa da galáxia lente  $M$ . Tal como no caso ilustrado, na maioria das vezes as lentes gravitacionais funcionam como lentes divergentes ou convexas, isto é, quando um feixe de luz paralelo passa por estas lentes, a luz espalha-se como consequência da imagem resultante ser uma ampliação do objeto real. A distribuição de massa inferida pelo efeito de lente gravitacional na Figura 2 foi obtida usando o princípio físico aqui descrito, embora usando uma técnica numérica mais elaborada. Tal como no primeiro exemplo, a interpretação deste resultado observacional implica a existência de uma grande quantidade de matéria escura.



Fig. 4 - Imagem LRG 3-757 lente gravitacional) obtida pelo Hubble Space Telescope: o campo gravítico de uma galáxia luminosa laranja distorce gravitacionalmente a luz de uma galáxia azul muito mais distante. O alinhamento quase perfeito entre a Terra e galáxia azul dá origem a que a imagem resultante se distribua em forma de ferradura, num anel de Einstein quase completo.

### As forças da matéria escura

Depois de os físicos e astrónomos falharem em obter uma explicação sobre a constituição da matéria escura como sendo feita de partículas fundamentais conhecidas, rapidamente chegaram à conclusão de que esta matéria é constituída por um novo tipo de partículas. A única certeza que temos hoje é que a matéria escura não é feita de partículas normais. No

final da década de 80, foram feitas muitas propostas sobre as propriedades destas partículas, baseadas nas observações astronómicas. A mais consensual é que a partícula de matéria escura deve ser mais pesada que o protão, ter uma velocidade claramente inferior à da luz, ser electricamente neutra e interagir muito fracamente com a matéria normal. O nome genérico desta classe de partículas é “partícula massiva de interação fraca” ou WIMP (*weakly interacting massive particle*, em inglês).

Mas como se compara a partícula de matéria escura com outras que conhecemos bem, tais como o eletrão, o protão ou mesmo o neutrino? Talvez seja interessante lembrar o leitor sobre o modelo padrão de partículas elementares – um dos grandes sucessos da física moderna. Esta teoria classifica as partículas subatómicas e define as regras das interações fundamentais entre partículas. A Figura 5 apresenta um esquema breve das partículas elementares que constituem o modelo padrão. Com a descoberta do bosão de Higgs em 2012 ficámos finalmente a conhecer todas as partículas fundamentais que constituem este modelo. Tal como a tabela periódica de Mendeleev permite uma melhor compreensão da formação e propriedades dos elementos químicos, o modelo padrão estabelece como as partículas interagem entre si, dando origem à formação de outras partículas mais complexas, tais como núcleos e átomos. No âmbito desta teoria, a formação da matéria é explicada como resultando da interação de 12 partículas elementares – os fermiões (*quarks* e *leptões*) – que interagem entre si por intermédio de outras 4 partículas elementares – os bosões, os quais estão associados às forças fundamentais: interação eletromagnética, fraca, forte (ver Figura 5).

Então, como se comparam as partículas de matéria escura com as partículas do modelo padrão? O nosso conhecimento é ainda muito limitado e não sabemos as suas propriedades mais básicas, tais como a massa, a carga elétrica, se têm momento dipolar elétrico ou magnético. Ou ainda se são partículas estáveis, ou decaem para partículas elementares do modelo padrão como o neutrino, ou ainda outras partículas desconhecidas. Também não sabemos se estas partículas são ou não elementares. E se são partículas elementares, de que tipo? Fermiões ou bosões ou algo desconhecido? Será a matéria escura feita de partículas elementares ou partículas compostas, tal como sugerem al-

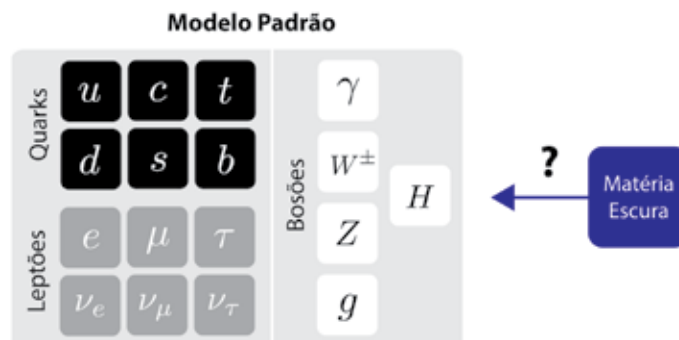


Fig. 5 - Tabela de partículas elementares que, de acordo com o modelo padrão, formam toda a matéria (normal) do Universo. Indicada está também a matéria escura formada por um novo tipo de partículas, cuja natureza enigmática tem levado os físicos a propor modelos alternativos ao modelo padrão.

guns modelos teóricos mais recentes? Em qualquer dos casos, a sua explicação implica generalizar o modelo padrão.

A verdade é que estas são algumas das muitas perguntas às quais esperamos dar resposta nas próximas décadas, com a ajuda dos detectores e aceleradores de partículas já em construção.

Uma resposta final só vai ser possível quando detectarmos estas novas partículas, tal como fizemos para todas as partículas fundamentais do modelo padrão. A grande dificuldade experimental na detecção da matéria escura reside no facto destas partículas interagirem muito fracamente com a matéria normal, sendo por isso a sua detecção extremamente difícil.

Para compreendermos o significado de “interação fraca”, podemos recorrer aos neutrinos que vem do Sol, que igualmente interagem muito pouco com a matéria normal. Um neutrino percorre em média uma distância de  $10^{16}$  m (1 seguido de 16 zeros) entre duas colisões sucessivas. Por exemplo, um neutrino produzido no Sol percorre uma distância que é cem mil vezes a distância da Terra ao Sol antes de colidir com uma partícula de matéria normal. Uma partícula de matéria escura tem uma interação ainda mais fraca do que o neutrino.

Apesar disso, desde a década de 60 do século passado, várias experiências foram construídas para detectar os neutrinos que vêm do Sol, o que fazem atualmente com regularidade. Hoje os telescópios a neutrinos para observar o Universo são uma realidade promissora em astrofísica. A possibilidade de observar neutrinos e medir as suas propriedades tem revolucionado a nossa compreensão da física de neutrinos, assim como tem aberto novos caminhos ao modelo padrão. Por isso mesmo, T. Kajita e A. B. McDonald, responsáveis pelas equipas dos observatórios de neutrinos Super-Kamiokande e Observatório de Neutrinos

de Sudbury, receberam em 2015 o prémio Nobel da Física. A experiência acumulada na construção dos observatórios de neutrinos dá-nos esperança de que, num futuro próximo, as partículas de matéria escura acabarão por ser descobertas.

No epílogo destes primeiros 100 anos após a publicação da teoria da relatividade geral, a história recorda-nos de um século com revoluções permanentes na física, astrofísica e cosmologia, repleto de descobertas nos aceleradores de partículas, telescópios, e mais recentemente em satélites astronómicos. Mais do que qualquer outra atividade humana, as aplicações tecnológicas que daqui resultaram têm contribuído positivamente para ajudar a humanidade.

O mais extraordinário legado científico de Einstein foi o facto de a sua teoria da Relatividade Geral, desenvolvida para explicar o universo visível, ser hoje fundamental na investigação de um inesperado universo invisível. Einstein teria ficado bem surpreendido. Hoje, este universo invisível constitui um tremendo desafio para os cerca de 3 milhões de físicos e astrónomos entre os 7 mil milhões de habitantes no planeta.

### Agradecimentos

O autor agradece a José Lopes por ter realizado as Figuras 1, 3 e 5, e a Susana Brandão e Cláudia Rola pelos comentários feitos a uma versão preliminar do manuscrito. O autor agradece ainda à NASA, ESA e Hubble Space Telescope pela permissão da utilização das imagens 2 e 4. Agradece também à Sociedade Portuguesa de Física e ao Gonçalo Figueira pelo convite para escrever este artigo.



**Ilídio Lopes** é Professor Auxiliar no Departamento de Física do IST e investigador do CENTRA-IST. Licenciou-se na Universidade do Porto, fez o mestrado e doutoramento na Universidade de Paris e um pós-doutoramento no Commissariat d’Energie Atomique (CEA, Paris). Trabalhou como investigador nas Universidades de Cambridge e de Oxford (Reino Unido), antes de voltar a Portugal como professor na Universidade de Évora. Os seus interesses de investigação incluem astrofísica, cosmologia e física das partículas. As publicações mais recentes são em tópicos de física solar e estelar, heliosismologia, astrossismologia, magnetismo solar, neutrinos solares, primeira gerações de estrelas, matéria escura e ondas gravitacionais. Mantém uma colaboração regular com várias instituições internacionais, nomeadamente, Universidade de Oxford, Universidade de Paris e Universidade de John Hopkins.