

NAS FRONTEIRAS DA CIÊNCIA: AS PARTÍCULAS FUNDAMENTAIS E O UNIVERSO

CARLOS HERDEIRO

Departamento de Física - Universidade de Aveiro,

RESUMO

Duas fronteiras naturais no nosso conhecimento científico são o extremamente grande, descrito pela Cosmologia, e o extremamente pequeno, descrito pela física das partículas. Nesta comunicação explicarei que a física do micro-cosmos tem um papel determinante na dinâmica do macro-cosmos, quer das galáxias quer do próprio Universo.

1. A PERGUNTA

A pergunta que quero colocar nesta palestra é a seguinte: “Do ponto de vista científico, que relação existe entre os fenómenos físicos ao nível do extraordinariamente grande e ao nível do extraordinariamente pequeno?” Porque de facto as escalas envolvidas são extraordinariamente díspares, como podemos constatar considerando uma escada de escalas.

2. UMA ESCADA DE ESCALAS

A maior escala que encontramos na actual descrição científica da natureza é o tamanho do Universo observável: 13.7 mil milhões de anos-luz ou, equivalentemente, cerca de 10^{26} metros. Este *não é* o tamanho do Universo. É o tamanho do nosso horizonte visual. A região para além deste horizonte não está causalmente ligada à nossa região do Universo, dado que a luz, ou qualquer outro sinal causal, não teve tempo de se deslocar desde essa região até nós no tempo de vida do Universo. Note-se que a existência deste escala nada nos diz sobre se o Universo é finito ou infinito.

Descendo 5 ordens de magnitude, para 10^{21} metros, encontramos a escala galáctica. A nossa galáxia, a Via Láctea, por exemplo, tem uma escala (eixo-maior) de cerca de 100 000 anos-luz. É uma galáxia elíptica, com braços em espiral, em que o Sol ocupa uma posição de subúrbio num desses braços, a cerca de 26 000 anos luz do centro. Antes assim; existe forte evidência de que no centro da nossa galáxia se encontra um gigantesco buraco negro [1] com uma massa da ordem de um milhão de massas solares, pelo que o centro urbano da nossa ilha cósmica poderá ser uma vizinhança bem desagradável.

O próximo patamar na escada de escalas é 10^{16} metros, que é a escala das distâncias às estrelas mais próximas do nosso Sol. Neste momento, a estrela mais próxima do nosso Sol é a *Próxima de Centauro*, uma estrela que se encontra gravitacionalmente ligada à estrela mais brilhante (vista da Terra) da constelação de Centauro: a alfa de Centauro. Esta estrela encontra-se a cerca de 4 anos-luz do Sol.

Cinco ordens de magnitude abaixo, 10^{11} metros, encontramos a unidade astronômica, isto é, a distância média entre a Terra e o Sol, cerca de 8 minutos-luz. Descendo outras cinco ordens de magnitude, para os 10^6 metros encontramos a escala do raio da Terra, cerca de 6.3 mil quilômetros. E descendo seis ordens de magnitude chegamos à escala do Homem: o metro.

Segue-se a descida para o extraordinariamente pequeno. O primeiro patamar, a 10^{-5} metros é a escala das bactérias, tipicamente entre 1 a 10 micrometros. Esta é uma escala que podemos ainda observar no sentido usual, isto é usando luz visível, através de microscópios. Mas cinco ordens de grandeza mais abaixo, 10^{-10} metros, encontramos-nos na escala do átomo, o Angstrom. Este é um mundo que começamos a desvendar apenas no sec. XX, e onde descobrimos que as regras são diferentes da nossa experiência macroscópica. Este o mundo da Mecânica Quântica, em que átomos podem estar numa sobreposição de estados diferentes, e só tomam um estado definido quando sujeitos a uma interação, como por exemplo serem “observados”.

Apesar de átomo significar, na sua gênese, indivisível, sabemos hoje que os átomos não são os blocos mais elementares da natureza. Os átomos são constituídos por um núcleo atômico, em que se concentra a sua carga positiva, rodeado de uma nuvem electrónica, onde se concentra a sua carga negativa.

Descendo mais cinco ordens de magnitude, para os 10^{-15} metros ou 1 Fermi, encontramos-nos na escala dos constituintes do núcleo atômico: os prótons e neutrões. Mas sabemos hoje também que estes nucleões não são partículas elementares. Experiências semelhantes, em espírito, aquelas que no início do sec. XX, em Manchester, sob a direção de Rutherford, revelaram a existência de um núcleo atômico, mostraram, na segunda metade do sec. XX, que os prótons e neutrões são constituídos, cada um deles, por três partículas mais elementares, denominadas *quarks*. E se descermos mais quatro ordens de magnitude, para os 10^{-19} metros, encontramos-nos na escala mais pequena sobre a qual temos alguma informação experimental. Esta é a escala dos quarks. Experiências muito recentes [2], levadas a cabo no acelerador RHIC, nos EUA, revelaram algumas propriedades da matéria e das suas interações a esta escala, ao criarem um estado da matéria denominado *plasma de quarks-gluões*. Contudo, permanece uma questão em aberto saber se os quarks são ou não partículas elementares. Voltaremos a essa questão em breve. Mas por agora salientamos que os dois extremos do nosso conhecimento científico, a extraordinariamente grande escala do horizonte cosmológico e a extraordinariamente pequena escala dos quarks, se encontram separados por 45 ordens de magnitude! Por isso voltamos a perguntar, agora com ainda mais propriedade: “Do ponto de vista científico, que relação existe entre o extraordinariamente grande e o extraordinariamente pequeno?”

A resposta que quero transmitir a esta questão é a seguinte: temos hoje razões para acreditar que a evolução do extraordinariamente grande é determinada pelo extraordinariamente pequeno. Mas os detalhes desta relação permanecem ainda um mistério, que é, do meu ponto de vista,

um dos maiores mistérios da ciência fundamental actual. Isto torna a época em que vivemos um tempo de dúvida científica e, exactamente por isso, uma época de grande oportunidade científica.

3. O MODELO COSMOLÓGICO PADRÃO E O ESPAÇO-TEMPO DINÂMICO

Para expôr a relação entre o micro e o macro cosmos, começo por discutir o modelo científico actual do Universo.

Acreditamos hoje que o Universo é dinâmico, que está em evolução, que poderá ter tido um início e que poderá vir a ter um fim. A primeira evidência do Universo dinâmico foi feita por Edwin Hubble em 1929. Hubble observou um conjunto vasto de galáxias nas quais conseguia resolver estrelas individuais e determinar o seu espectro. A característica importante que observou foi a existência de *um desvio para o vermelho* das linhas espectrais de praticamente todas as galáxias observadas, sendo que esse desvio era proporcional à distância à galáxia em questão. Interpretando esse desvio como efeito Doppler, conclui-se que as galáxias se estão a afastar da nossa e que essa *velocidade de recessão* é tanto maior quanto maior for a distância à galáxia.

Adoptando o princípio democrático (e humilde) de que a nossa posição no Universo não é privilegiada, concluímos que, se a mesma observação fosse feita num ponto diferente do Universo, obteríamos um resultado semelhante. Logo todas as galáxias estão-se a afastar umas das outras sendo que se afastam tanto mais rapidamente quanto mais distam umas das outras.

Esta dinâmica seria provavelmente difícil de interpretar caso tentássemos interpreta-la como um movimento das galáxias *sobre* o espaço. Contudo, 14 anos antes da observação de Hubble, tinha surgido uma nova teoria da gravidade, a teoria da Relatividade Geral de Albert Einstein, que modelava a interacção gravitacional usando um espaço-tempo dinâmico: as fontes de matéria e energia alteram o comportamento das réguas e relógios e a interacção gravítica pode ser totalmente descrita através do comportamento dessas réguas e relógios. Assim, à luz da nova teoria da gravitação de Einstein, existia uma maneira muito simples de perceber a observação de Hubble. É o próprio espaço que se está a expandir e as galáxias são meramente objectos co-móveis com essa expansão. Na escala das próprias galáxias a expansão é negligenciável. Mas como a escala intergaláctica é muito maior que a escala galáctica a expansão cosmológica é observável quando olhamos para outras galáxias. Hubble tinha descoberto a *expansão do Universo* e deste modo confirmado de uma maneira fantástica as ideias de Einstein sobre o espaço-tempo dinâmico.

A teoria de Einstein tinha, entretanto, obtido outro grande sucesso observacional. De acordo com a teoria, um raio de luz que passasse perto de um corpo massivo, sentiria a curvatura do espaço-tempo criada por esse corpo, o que causaria um desvio na sua trajectória. O corpo mais massivo na vizinhança da Terra é o Sol. Einstein compreendeu que era possível testar este efeito durante um eclipse do Sol, em que se vêem estrelas muito perto do Sol, podendo-se testar se, de facto, as estrelas pareciam estar numa posição diferente da real, devido ao efeito da curvatura do espaço-tempo. Este efeito foi verificado com sucesso em duas famosas expedições britânicas, em 1919. Uma delas, liderada por Arthur Eddington, dirigiu-se à ilha do Príncipe, no arquipélago de S.

Tomé e Príncipe, na altura colónia Portuguesa. Estas observações fizeram de Einstein uma figura mediática global, aparecendo na capa da revista “Time”. Nas palavras do seu biógrafo Abraham Pais, Einstein, que já tinha sido “beatificado” foi nesta altura “canonizado” [3].

Para uso futuro, quero mencionar que o desvio de raios de luz por corpos massivos origina um fenómeno de grande utilidade em astrofísica e cosmologica denominando *efeito de lente gravitacional*. O princípio é o mesmo. Se existir um corpo massivo entre o observador e uma fonte luminosa, os raios de luz da fonte vão ter a sua trajectória desviada pelo corpo massivo. Mas o mais importante é que, pelo tipo de imagem que recebe, se o observador conhecer algumas características da fonte pode reconstruir as características do corpo massivo que desviou os raios de luz e, nomeadamente, saber a sua massa gravitacional total. Por isso, o efeito de lentes gravitacionais tornou-se hoje numa ferramenta importante para calcular a massa de galáxias ou enxames de galáxias, que estejam situados entre nós e alguma fonte luminosa.

Servem estes últimos parágrafos para estabelecer que a teoria de Einstein já estava suportada por evidência observacional quando foi utilizada para interpretar (qualitativamente e quantitativamente) as observações de Hubble. O Universo está-se a expandir porque o espaço-tempo é dinâmico. Esta dinâmica deve ser definida pelo conteúdo de matéria-energia do Universo, da mesma maneira que os raios de luz de uma fonte luminosa são desviados por um corpo massivo de uma forma que depende do conteúdo de matéria-energia deste corpo. Logo, a questão natural é qual o conteúdo de matéria-energia do Universo?

4. O MODELO PADRÃO DA FÍSICA DE PARTÍCULAS

É altura de fazermos um preâmbulo para discutirmos um pouco da física de partículas. Afinal de contas toda a matéria-energia que existe no Universo deve ser decomponível num número elementar de partículas que, por sua vez, devem fazer parte dos nossos modelos de física de partículas. Como são estes modelos?

Existe um *modelo padrão de física de partículas*, extremamente bem sucedido experimentalmente. Este modelo estabelece uma divisão básica das partículas elementares em dois tipos: *fermiões* e *bosões*. Esta divisão relaciona-se com o tipo de estatística a que estas partículas obedecem, o que por sua vez se relaciona com o seu spin.

Os fermiões são as partículas que constituem a matéria. Dividem-se em *quarks* e *leptões*. Os quarks são os constituintes do próton e do neutrão. Mas estes dois nucleões usam apenas dois dos seis quarks disponíveis no modelo padrão. Os restantes quarks também se ligam em partículas do tipo dos nucleões mas bem mais pesadas e instáveis, que decaem rapidamente. Cada quark tem ainda uma carga chamada cor, havendo três possibilidades de cor. Genericamente chamam-se *bariões* a todas as partículas constituídas por quarks.

Os leptões são partículas mais leves (isto é com menor massa em repouso) do que os bariões. O exemplo que nos é mais familiar é o electrão. Existem outros dois leptões com propriedades físicas semelhantes às do electrão mas com maior massa e instáveis: o *muão* e o *tau*. Cada um

destes três leptões faz-se acompanhar por um *neutrino*, existindo por isso o neutrino electrónico, o neutrino muónico e o neutrino tauónico.

Os bosões são as partículas que medeiam as interações. O modelo standard de partículas considera que as interações fundamentais são quatro: a interação electromagnética, que é mediada pelo *fotão*; a interação nuclear forte que é mediada pelos *gluões*, que têm três cores possíveis, tal como os quarks que são os fermiões que sentem esta interação; a interação nuclear fraca que é mediada pelas partículas Z^0 , W^+ e W^- ; a interação gravítica que é mediada pelo *gravitão*.

De todas estas partículas apenas o gravitão não foi detectada experimentalmente. Existe ainda uma outra partícula muito importante no modelo padrão denominada *partícula de Higgs*, que não foi detectada directamente e espera-se que possa ser vista no *Large Hadron Collider* (LHC) que esta a começar a funcionar no centro Europeu de pesquisa nuclear (CERN). Acrescento ainda que todas estas partículas têm uma *anti-partícula* associada, com a mesma massa em repouso e cargas opostas. Em alguns casos a anti-partícula coincide com a partícula, como por exemplo para o fotão.

5. DE QUE É CONSTITUIDO O UNIVERSO?

Os parágrafos anteriores descrevem os ingredientes da nossa receita actual para o Universo. Mas a questão fundamental é: são estes os ingredientes que a receita da natureza tem? Infelizmente (ou felizmente) a receita da natureza parece usar mais qualquer coisa. De facto, um vasto conjunto de observações aponta para que o conteúdo de matéria-energia do Universo se pode dividir em três tipos: a *matéria bariónica*, a *matéria escura* e a *energia escura*. Mas destes, apenas o primeiro aparece como um ingrediente do modelo standard das partículas. Vejamos então a que corresponde cada um destes três tipos de conteúdo de matéria-energia do Universo.

5.1. A MATÉRIA BARIÓNICA

A matéria bariónica é a matéria “normal”. Todos os elementos que aparecem na tabela periódica de Mandeleev são matéria bariónica, porque fundamentalmente são constituídos por bariões (a massa do electrão é muito menor que a do protão e neutrão, que são bariões, e por isso qualquer átomo é, neste contexto, denominado matéria bariónica). Os planetas, as estrelas, as nuvens de poeira interestalar são, por isso mesmo, matéria bariónica. Se uma estrela colapsa para um buraco negro também este é matéria bariónica.

5.2. A MATÉRIA ESCURA

A matéria escura é, numa primeira definição, matéria que não emite radiação electromagnética. Por isso não se “vê” e a sua presença só pode ser inferida dinamicamente. Duas importantes fontes de evidência observacional para a matéria escura são as *curvas de rotação galácticas* e os *aglomerados galácticos*.

As curvas de rotação galácticas demonstram que as galáxias, em geral, rodam demasiado rapidamente (principalmente na zona exterior) para a matéria luminosa que apresentam. Dada a sua luminosidade é possível estimar a massa das galáxias e esta massa não é suficiente para ligar gravitacionalmente a galáxia com a velocidade de rotação observada. Há, por isso, matéria escura. Apenas por esta observação não se podia excluir que esta matéria escura fosse bariónica, por exemplo muitos buracos negros bariónicos que se encontravam distribuídos pela galáxia. Contudo, complementando estas observações com outras da radiação cósmica de fundo e análises da nucleossíntese primordial conclui-se que apenas uma pequena percentagem da matéria escura necessária poderá ser bariónica. Portanto, não só existe matéria escura como esta matéria escura não pode ser nada que existe no modelo standard de partículas.

Alternativamente, em vez de invocar a existência de matéria que não vemos e não conhecemos para explicar as curvas de rotação galácticas, poder-se-ia argumentar que o que está a falhar é que a lei da gravitação Newtoniana (que é usada para estudar a curva de rotação das galáxias) deixa de ser válida na escala galáctica. Esta alternativa tem sido explorada e modelos como o MOND (Modified Newtonian Dynamics) têm sido propostos. Contudo uma observação recente de uma colisão entre dois aglomerados galácticos – denominados agora “bullet cluster” [4] – deitaram por terra os modelos mais simples do MOND e reforçaram a ideia da existência da matéria escura não bariónica em abundância nas galáxias. Como esta é uma observação importante vale a pena explicá-la um pouco mais em detalhe.

Um aglomerado galáctico é um sistema de galáxias gravitacionalmente ligado, onde existe muito gás entre as galáxias e à volta destas. O gás tem uma temperatura de 10-100 milhões de graus Kelvin e emite radiação electromagnética na gama dos raios X. Pela emissividade sabemos que o gás contém mais matéria (visível) do que todas as galáxias do aglomerado juntas. Contudo estimativas dinâmicas mostram que a matéria visível das galáxias e do gás é insuficiente para manter o sistema gravitacionalmente ligado: é necessária cerca de 10 vezes mais matéria do que a matéria visível. Ou seja é necessária matéria escura. Alternativamente, como referido, a lei da gravitação poderia ser diferente.

O “bullet cluster” é o resultado de uma colisão de aglomerados galácticos. Isto é, dois enxames galácticos atravessaram-se mutuamente devido às suas velocidades peculiares. Do ponto de vista das galáxias, “colisão” é um exagero. De facto, como as distâncias intergalácticas no aglomerado são muito maiores do que a escala galáctica, os dois enxames passaram um pelo outro sem que um número significativo de galáxias tenha, de facto colidido. Mas do ponto de vista do gás, que enche todo o espaço entre as galáxias, a interacção entre as nuvens de gás dos dois enxames foi significativa. Assim, o que vemos no “bullet cluster” que é um instantâneo do resultado final da colisão, é dois conjuntos de galáxias afastados, com uma nuvem de gás entre eles, correspondendo às duas nuvens de gás dos dois aglomerados que foram “retidas” na área da colisão pela sua interacção mútua. Observacionalmente, este cenário constata-se pelo facto de que a distribuição espacial da emissividade no visível (devido às galáxias) é significativamente diferente da distribuição espacial da emissividade nos raios X. Mas existe uma terceira maneira de “ver” o “bullet cluster” e que nos permite identificar como é a distribuição da matéria gravitacional, que inclui a matéria escura e visível: usando o efeito de lente gravitacional. E o que se observa é que

o efeito de lente gravitacional, neste sistema, é provocado por uma distribuição de matéria que é praticamente coincidente com a distribuição das galáxias (e não do gás, que tem mais matéria visível do que as galáxias). Este resultado é uma forte evidência para a existência de matéria escura e que esta matéria escura se encontra maioritariamente nas galáxias, e não no espaço entre elas. Assim há uma pergunta importantíssima para ser respondida: o que é, em termos de física fundamental a matéria escura não bariónica?

5.3. A ENERGIA ESCURA

Não é só na dinâmica das galáxias que existe uma importante componente de matéria-energia escura. Há uma forte evidência, hoje, que o Universo como um todo está a ser dominado pela *energia escura*. Tal como no caso das galáxias, também aqui a inferência resulta de considerações dinâmicas.

Já discutimos anteriormente que o Universo esta a expandir. Esta expansão manifesta-se no facto de que as galáxias se estão a afastar mutuamente com uma certa velocidade, que depende da distância entre elas. Pode-se então perguntar se esta velocidade aumenta ou diminui com o tempo; isto é, a expansão é acelerada ou desacelerada?

Mais fácil de explicar, e nesse sentido mais natural, seria que a expansão observada fosse desacelerada. Isso significaria que o conteúdo de matéria-energia do Universo originaria uma gravidade *atractiva*. Ora, na gravitação Newtoniana a força gravítica é sempre atractiva, e portanto esta conclusão enquadrar-se-ia bem com a nossa noção Newtoniana de gravidade. Contudo, na gravitação de Einstein pode acontecer que a gravidade seja repulsiva.

A partir de 1998, começando com um conjunto de observações de supernovas longínquas [5], juntou-se forte evidência observacional de que a expansão do Universo é acelerada. Isto significa que o conteúdo de matéria-energia que domina a dinâmica do Universo em larga escala produz gravidade *repulsiva*. A este conteúdo chamou-se *energia escura*. Aqui, a palavra “escura”, significa essencialmente ignorância. Apesar da teoria da gravitação de Einstein conceber a possibilidade de gravidade repulsiva, não existe nenhum ingrediente no modelo padrão de física das partículas que origine este tipo de gravidade, nem mesmo a anti-matéria. Assim há uma pergunta importantíssima para ser respondida: o que é, em termos de física fundamental a energia escura?

5.4. O LADO ESCURO DOMINA

Dos parágrafos anteriores resulta que há partes do conteúdo de matéria-energia do Universo que nós não conhecemos. Resulta também que estas partes são significativas e que dominam a dinâmica galáctica, de enxames de galáxias e do Universo como um todo. Mas podemos ser até mais específicos: as estimativas mais recentes apontam para que cerca de 75% do conteúdo de matéria-energia do Universo seja energia escura, 21% seja matéria escura e apenas 4% seja matéria bariónica. O Universo é largamente dominado pelo lado escuro, ou seja, pelo lado sobre o qual somos mais ignorantes.

6. MORAL DA HISTÓRIA

A minha principal mensagem para o leitor é que, apesar de haver 45 ordens de magnitude de diferença entre as escalas das duas fronteiras do conhecimento que existem no extraordinariamente grande e no extraordinariamente pequeno, há uma profunda ligação entre os fenómenos físicos a estas duas escalas. De facto, *a física do micro-cosmos tem um papel determinante na dinâmica do macro-cosmos, quer das galáxias, quer do próprio Universo*. E podíamos, para além dos pontos que discutimos, fazer outras ligações, ainda não cabalmente esclarecidas, entre o Universo e a física das partículas. Por exemplo a assimetria entre matéria e anti-matéria, que parece ser tão fundamental para observarmos o Universo que observamos (onde só existe aparentemente matéria); a existência no início do Universo de uma outra época de expansão acelerada, denominada *inflação primordial*, que mais uma vez carece de explicação em termos de qual o ingrediente da física de partículas fundamentais que pode originar a necessária gravidade repulsiva; e, o grande mistério, do que é que terá sido o Big Bang: o início ou um ponto de passagem?

Em resumo, o nosso conhecimento do Universo depende crucialmente do nosso conhecimento da física de partículas; e as nossas teorias da física de partículas têm, na sua descrição do Universo, um teste fundamental.

É esta simbiose que liga os extremos.

BIBLIOGRAFIA

ABRAHAM PAIS, “Subtil é o Senhor”, Gradiva 1999, ISBN: 972-662-290-1.

PERLMUTTER, S. et al. 1999, *Astrophysical Journal*, 517, 565.

SCHÖDEL, R.; et al. (2002). «A star in a 15.2-year orbit around the supermassive black hole at the centre of the Milky Way». *Nature* 419 (6908): 694–696.

Veja o sítio da internet do RHIC: <http://www.bnl.gov/rhic/>

Veja fotos e animações sobre o “bullet cluster” em <http://chandra.harvard.edu/photo/2008/bullet/>