

Chapter 8

Relatividade Geral

Ele subitamente interrompeu a discussão...apanhou um telegrama que estava no peitoril da janela e deu a mim dizendo: “Olhe, isso talvez possa interessá-la”. Era o telegrama de Eddington, comunicando os resultados colhidos pela expedição que acompanhara o eclipse. Quando eu expressei alegria pelo fato dos resultados coincidirem com os cálculos, ele disse tranqüilamente: “Eu sabia que a teoria é correta”; e quando lhe perguntei o que teria acontecido se não se vissem confirmadas suas previsões, comentou: “Então eu lamentaria pelo bom Deus - mas a teoria está correta”. (**As Idéias de Einstein**, J. Berstein, Ed. USP 1975)

8.1 Einstein Ataca de Novo!

Vimos no capítulo dois que as leis da mecânica clássica de Newton tiveram que ser substituídas pelas leis da mecânica relativística de Einstein. As leis de Newton só são válidas no limite de baixas velocidades. A relatividade, por sua vez, é formulada sobre dois princípios básicos, o

de que as leis da física são válidas em todos os sistemas inerciais (ou seja, que se movem com velocidade relativa constante), e o de que a velocidade da luz é a mesma em todos esses sistemas. Como resultados principais desses postulados, vimos a contração do espaço, a dilatação do tempo e a famosa fórmula $E = mc^2$, expressão da equivalência entre massa e energia. Tudo isso é válido em sistemas inerciais, ou seja, que não sofrem aceleração. Por esta limitação, a teoria ficou conhecida como *Relatividade Restrita*.

Após a publicação da relatividade restrita, Einstein se preocupou em desenvolver uma teoria geral, que incluísse sistemas não inerciais, ou seja, que sofrem aceleração. Dez anos se passaram para o resultado final aparecer. Em 1916, em plena Primeira Guerra Mundial, Einstein publica sua segunda grande contribuição à física: a *Teoria da Relatividade Geral*. Ao incluir sistemas de referência acelerados, a relatividade geral naturalmente tornou-se uma teoria de gravitação, e portanto substituiu a gravitação newtoniana, até então a suprema teoria física “dos céus”. Além dos já conhecidos efeitos sobre relógios e réguas da teoria restrita, aparece na teoria geral mais uma novidade bombástica: a de que a luz possui “peso”. Este resultado teórico foi dramaticamente confirmado em 1919 por uma expedição de astrônomos comandados pelo inglês Sir Arthur Eddington!

8.2 O Princípio da Equivalência

Einstein costumava dizer que só conseguira chegar às suas idéias porque pensava como uma criança. No capítulo dois mencionamos a experiência

imaginada do espelho, que ele formulara aos 16 anos de idade. Com a relatividade geral não foi diferente. A teoria surgiu a partir de questionamentos muito simples, mas que ninguém até então havia feito. Nas palavras de Einstein:

Eu estava sentado em minha cadeira no escritório de patentes em Berna, quando subitamente me ocorreu um pensamento: 'Se uma pessoa cai livremente, ela não sentirá o próprio peso.' Fiquei chocado. Esta idéia simples causou-me uma profunda impressão, e levou-me à teoria da relatividade geral.

Quantos de nós, físicos profissionais, se chocam com idéias desse tipo! A consequência foi o *princípio da equivalência*, que pode ser compreendido a partir da seguinte experiência pensada: suponha que um observador se encontre dentro de uma caixa fechada, na superfície da Terra. Ele sente o próprio peso e, ao soltar um objeto dentro da caixa, o verá cair com uma aceleração igual a g , a aceleração da gravidade. Imagine então que, ao invés de realizar a experiência na superfície do planeta, sem que o observador saiba, a caixa seja transportada para o espaço interestelar, longe da influência do campo gravitacional da Terra, ou de qualquer outro astro. Imagine ainda que embaixo da caixa existam motores de propulsão que a acelerem com o mesmo valor g . Ou seja, a aceleração sentida pelo observador será *numericamente* igual à aceleração da gravidade na Terra, porém produzida por motores, e não pela massa do planeta. Nessas condições o observador continuará sentindo o próprio peso e ao repetir a experiência de largar

o objeto observará uma queda exatamente como antes. Ou seja, ele será *incapaz de distinguir as duas situações*. Conseqüentemente, *sistemas de referência uniformemente acelerados são equivalentes a sistemas de referência em repouso, onde exista um campo gravitacional uniforme*. Este é o princípio de equivalência¹. A primeira consequência importante deste princípio foi a explicação para a “misteriosa” igualdade entre a massa inercial e a massa gravitacional mencionada no capítulo um, considerada uma “estranha coincidência” por Newton. De fato, se aceitarmos que um referencial acelerado é indistinguível de um campo gravitacional, podemos escrever para a segunda lei de Newton:

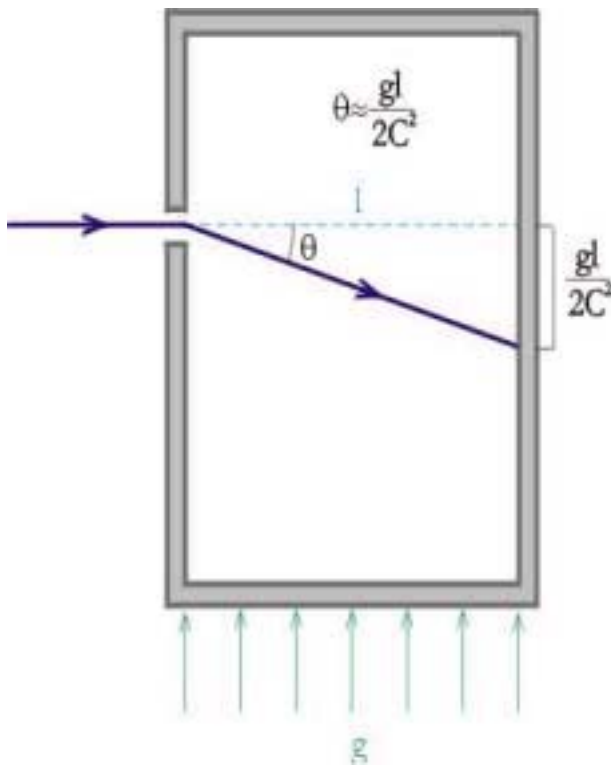
$$m_{inercial} \times a = m_{inercial} \times g = m_{gravitacional} \times g$$

e as duas massas devem coincidir.

Vamos agora, usando argumentos clássicos, levar um pouco mais adiante o experimento pensado do observador na caixa. Imagine que haja um buraco em um dos lados da caixa que se move impulsionada pelos motores, e que por ele entre um fecho de luz. A luz atravessa a caixa com velocidade c ; se l for o comprimento da caixa, o raio atingirá o lado oposto em um tempo $t = l/c$. Acontece que neste intervalo de tempo a caixa terá se deslocado para cima de uma distância igual a $at^2/2 = gl^2/2c^2$, de modo que o observador dentro dela vê o raio atingir o lado oposto ao buraco por onde entrou, a uma altura ligeiramente abaixo. Em outras palavras, ele vê a luz se curvar. Mas, como o princípio de equivalência afirma que a caixa acelerada é fisicamente

¹No caso da pessoa que cai livremente, ela não sente o próprio peso, mas se encontra em um referencial uniformemente acelerado (com aceleração g). Ao contrário, se ela ficar parada em um referencial inercial, ela passa novamente a sentir o seu peso.

indistinguível de um campo gravitacional uniforme, devemos concluir que um observador parado sobre a superfície da Terra também deverá ver a luz se curvar sob a ação de seu campo gravitacional! É como se a luz fosse atraída pelo campo da Terra; é como se ela tivesse peso! É fácil estimar o ângulo de curvatura nesse exemplo simples da caixa: ele é dado por $\theta \approx gl/2c^2$.



Um observador em um elevador acelerado veria a luz se desviar. Como o Princípio da Equivalência iguala objetos massivos a referenciais acelerados, a luz deve igualmente se curvar ao passar perto de massas muito grandes.

A relatividade geral prevê um desvio angular duas vezes maior do que o obtido com argumentos clássicos, e este é um dos seus resultados

mais impressionantes. Em 1919 (3 anos depois da publicação da teoria) o astrônomo inglês Sir Arthur Eddington (que ainda não era ‘Sir’ nesta época) organizou uma expedição para medir o “peso da luz” previsto por Einstein. Eddington sabia que no dia 29 de maio daquele ano haveria um eclipse do Sol, e nas circunstâncias especiais daquele eclipse a deflexão da luz emitida por um conjunto de estrelas ao passar pelo enorme campo gravitacional do Sol poderia ser medida. Uma parte da expedição de Eddington seguiu para o município de Sobral, no estado do Ceará, no Nordeste brasileiro, e a outra (com a qual Eddington permaneceu) foi para a Ilha do Príncipe, na África. A previsão teórica feita por Einstein para este experimento era de que a luz deveria se desviar de 1,74 segundos (lembre que a circunferência tem 360 graus, cada grau valendo 60 minutos e cada minuto 60 segundos. Portanto, *segundo* aqui não é unidade de tempo, mas de *ângulo*). Em Sobral o desvio medido foi de 1,98 segundos, e na Ilha do Príncipe de 1,61 que, dentro do erro experimental, estava de bom acordo com a teoria. Mais uma vez Einstein estava certo! Por muitos anos outras medidas semelhantes foram feitas, todas confirmando as previsões da teoria.

Vale a pena o leitor parar para refletir sobre esse experimento. De um lado Einstein com as suas previsões teóricas espetaculares; de outro, Eddington com sua equipe e seu laboratório incomum: as estrelas, o Sol e a Terra. É o vôo supremo da alma humana!



Ao passar nas proximidades do Sol, a luz de uma estrela é desviada. Vista da Terra, a estrela parece estar em uma posição diferente da real.

Foi somente a partir dos resultados do experimento de Eddington que Einstein realmente ganhou popularidade e deixou de ser uma pessoa comum e passou a ser um “gênio”. Em novembro de 1919 eles (os resultados) foram apresentados em uma sessão da *Royal Society* em Londres. Cabe lembrar que esta instituição britânica tem em Isaac Newton seu maior representante e expoente. Nesta sessão, contudo, era precisamente a gravitação newtoniana - a pérola do *Principia* - que era colocada em xeque. Jeremy Bernstein reproduz uma descrição da atmosfera da reunião, feita por Alfred North Whitehead, em seu livro **As Idéias de Einstein** (Ed. USP 1975):

A atmosfera, impregnada de tenso interesse, era exatamente a dos dramas gregos. Compunhamos o coro, comen-

tando o decreto do destino, tal como se revelava no desenvolvimento de um incidente supremo. No próprio ambiente havia qualidade dramática - a cerimônia tradicional, e ao fundo, o retrato de Newton para lembrarmos de que a maior das generalizações científicas estava, agora, passados mais de dois séculos, a ponto de receber sua primeira modificação. E nem faltava o elemento do interesse pessoal; uma grande aventura do pensamento concretizava-se, enfim.

Outros dois resultados importantes foram obtidos por Einstein com a relatividade geral. O primeiro diz respeito à variação da frequência de uma onda eletromagnética (ou fóton) em um campo gravitacional, outra consequência do princípio de equivalência. Considere um fóton emitido de um ponto P em direção a um detector D que se encontra a uma distância vertical L do ponto de emissão. Vamos chamar de f a frequência do fóton emitido. Se g é a aceleração da gravidade (considerada uniforme) a relatividade geral prevê que o campo gravitacional causará uma mudança na frequência do fóton (o que equivale a uma mudança na sua energia), de modo que o detector D verá o fóton com frequência f' . A razão calculada entre as frequências é igual a:

$$\frac{f'}{f} = 1 \pm \frac{gL}{c^2}$$

Onde o sinal '+' se aplica se o fóton estiver se deslocando no mesmo sentido do campo gravitacional, e '-' se estiver se deslocando em sentido oposto ao do campo. De certa forma o problema é análogo à perda ou ganho de energia cinética de um objeto massivo, como uma pedra, se

jogada para o alto ou largada para cair livremente de uma certa altura. Nesta situação poderíamos escrever:

$$T = E - mgz$$

onde mgz é a energia potencial da pedra, sendo z a sua altura do solo. E é a energia total (ou seja, potencial mais cinética), que neste caso se conserva. Se a pedra for jogada para o alto, a medida em que z aumenta, como E é constante, T diminui. Eventualmente a pedra alcançará uma altura máxima (o que obviamente não acontece com o fóton), onde a energia potencial será igual à E , e T será zero. Se, ao contrário, a pedra estiver caindo livremente, T será zero no início do movimento e, na medida em que ela cai, z diminui até o valor 0, onde T será máxima.

A presença do fator $c^2 \approx 9 \times 10^{16} \approx 10^{17} \text{ m}^2/\text{s}^2$ no denominador torna a fração do lado direito na expressão do deslocamento em frequência muito pequena. Se, por exemplo, substituirmos $L = 10 \text{ m}$, e $g \approx 10 \text{ m/s}^2$ teremos

$$\frac{gL}{c^2} \approx \frac{10^2}{10^{17}} = 10^{-15}$$

Comparado com '1', este número é realmente pequeno:

$$1 + 0,0000000000000001 = 1,0000000000000001$$

para o fóton "caindo", ou

$$1 - 0,0000000000000001 = 0,9999999999999999$$

para fótons “subindo”. Então, para fótons que “caem” no campo gravitacional da Terra de uma altura de 10 m, a sua frequência (e conseqüentemente energia) aumentaria de f para $1,0000000000000001f$; e para fótons que “escapam” do campo da Terra, a 10 m de altura, a sua frequência diminuiria de f para $0,9999999999999999f$.

O leitor desavisado poderia pensar que não haveria qualquer esperança de tal resultado ser verificado experimentalmente. Contudo, diante dos experimentos que já vimos, que mais parecem peças de ficção científica, é pouco cauteloso achar que alguma coisa seja impossível para certas pessoas! Em 1960 V.R. Pound e G.A. Rebka realizaram, na Universidade de Harvard, a confirmação experimental deste resultado. Para isso eles usaram fótons emitidos do decaimento gama do ^{57}Fe . Esses fótons possuem energia de 14,4 keV, o que equivale a uma frequência de:

$$f = \frac{E}{h} = \frac{14,4 \times 10^3 \times 1,6 \times 10^{-19} \text{ J}}{6,6 \times 10^{-34} \text{ Js}} = 3,5 \times 10^{18} \text{ Hz}$$

O experimento foi realizado na Torre Jefferson, que possui cerca de 25 m de altura. Para medir o deslocamento em frequência do fóton previsto pela relatividade geral, Pound e Rebka utilizaram um outro importante efeito que havia sido recém-descoberto (em 1958) por R. Mössbauer na Alemanha. O chamado efeito Mössbauer é simples de entender: sabemos que um núcleo que se encontra inicialmente em um estado de energia E_i , e decai para um estado de energia mais baixa E_f , emite um fóton com uma energia igual a $\hbar\omega = (E_f - E_i)$, onde $\omega = 2\pi f$ é a frequência angular do fóton emitido. Este fóton pode ser re-absorvido por outro núcleo que se encontre em um estado E_f , sendo assim ex-

citado para E_i (ou seja, percorrendo o caminho inverso). Porém, se os núcleos emissor e absorvedor forem partículas livres, devido à conservação do momento linear, haverá um pequeno recuo, tanto do núcleo que emite o fóton quanto do que o absorve. Este recuo dificulta a observação do efeito. Mössbauer descobriu um “truque” para contornar a dificuldade (veja painel XIV). Ele utilizou núcleos radioativos inseridos em redes cristalinas, com isso evitando o recuo dos núcleos.

A relatividade geral prevê que sob a ação do campo gravitacional, a frequência do fóton, f , será alterada. Pound e Rebka colocaram então uma amostra contendo uma fonte de ^{57}Co no topo (ou na base) da torre. Este radioisótopo decai para o ^{57}Fe emitindo os gamas mencionados. Estes gamas eram detectados na base (ou no topo) da torre utilizando o efeito Mössbauer em outra amostra de ferro. Ao viajar do topo para a base, a frequência dos fótons deveria ser aumentada pelo campo gravitacional, modificando ligeiramente a posição da linha de absorção dos fótons no efeito Mössbauer. Se o fóton viajar da base para o topo, a sua frequência (e portanto energia) seria diminuída pelo mesmo fator, como no exemplo da pedra (comparar fótons com pedras, só mesmo em um livro igual a este!). O experimento durou 4 meses. O resultado esperado com base na teoria era uma variação fracional de frequência igual a $(f' - f)/f = \Delta f/f = 4,905 \times 10^{-15}$. O resultado encontrado foi de $(4,902 \pm 0,041) \times 10^{-15}$. Esses números dispensam comentários...

PAINEL XV
O EFEITO MÖSSBAUER

Vimos no capítulo anterior que núcleos excitados podem decair emitindo fótons (decaimento gama). Ao fazer isso, a fim de que o momento seja conservado, o núcleo deve recuar um pouco. É como ocorre em um tiro de canhão: o projétil vai para frente, e o canhão para trás. Se \mathbf{p}_γ é o momento do fóton emitido, e \mathbf{p}_R o momento de recuo do núcleo, a lei de conservação de momento requer:

$$-\mathbf{p}_R = \mathbf{p}_\gamma$$

Além do momento, a energia também é conservada. Antes do decaimento a energia inicial era a energia do estado excitado no núcleo, E_i . Após o decaimento o núcleo estará em um estado E_f , e o fóton terá uma energia E_γ . Temos também que adicionar a energia cinética devida ao recuo do núcleo E_R . Ou seja:

$$E_i = E_f + E_\gamma + E_R \implies \Delta E = E_\gamma + E_R$$

onde $\Delta E = E_i - E_f$ é a variação de energia do núcleo.

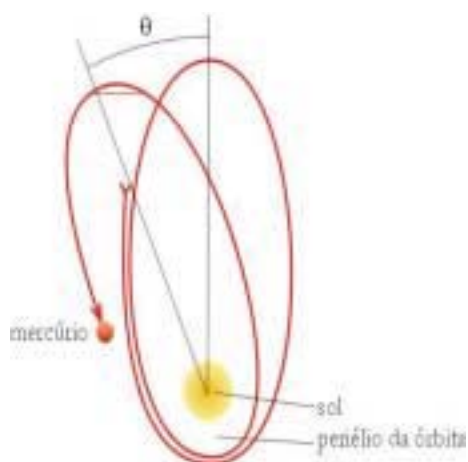
Não fosse pela presença do termo de recuo, E_R , um segundo núcleo que apresentasse níveis de energia separados pela mesma quantidade ΔE poderia absorver o fóton emitido. A presença do termo E_R significa que para que um núcleo absorva este fóton, ele teria que apresentar níveis de energia ligeiramente mais próximos do que o núcleo emissor. Mais exatamente, se também levarmos em conta a energia de recuo do núcleo absorvedor, a diferença entre os níveis de energia dos núcleos emissor e absorvedor, necessária para que o fóton pudesse ser absorvido, seria de $2E_R$. Esta diferença de energia praticamente impossibilita a observação do fenômeno entre átomos livres.

Em 1958 Rudolph Mössbauer descobriu como contornar este problema. Ele percebeu que o recuo seria muito menor se os núcleos emissor e absorvedor estivessem presos a uma rede cristalina. Neste caso a energia de recuo seria absorvida por toda a rede, e não por apenas um núcleo. É mais ou menos como tentar chutar um tijolo solto e um preso a uma parede! O da parede praticamente não

recuará, pois toda a parede absorverá a energia do chute. Mössbauer usou fótons com $E_\gamma = 129$ keV emitido pelo decaimento do ^{191}Ir e demonstrou o que ficou conhecido como o *Efeito Mössbauer*.

Desde a sua descoberta, o efeito Mössbauer tornou-se uma importante técnica de investigação experimental, principalmente em ciência dos materiais. Mas, na opinião do autor, sua aplicação mais espetacular foi o teste do princípio de equivalência por Pound e Rebka em 1960.

O outro resultado importante da relatividade geral foi a explicação da precessão do periélio de Mercúrio. O periélio é o ponto de maior aproximação do Sol na órbita de um planeta. Um problema antigo em mecânica era o da precessão do periélio de Mercúrio (o planeta mais próximo do Sol no nosso sistema). A variação é de apenas 5600 segundos de arco (cerca de 1,5 grau) por século. Destes, a mecânica clássica de Newton consegue explicar 5557 segundos de arco, em termos da interação gravitacional de Mercúrio com outros planetas. Os outros 43 segundos só podem ser explicados pela relatividade geral²!



O periélio (ponto de maior aproximação da trajetória de um planeta em torno do Sol) de Mercúrio sofre uma precessão de 5600 segundos de arco por século. Este fenômeno nunca foi compreendido até o advento da Relatividade Geral.

²É instrutivo aqui ressaltar o rigor exigido pela Física. 43 segundos de arco em 5600 é de fato uma variação muito pequena. Antes da relatividade geral acreditava-se que esta variação se devia a algum detalhe não levado em conta nas equações de movimento clássicas. Que nada! Era a minúscula ponta de um imenso iceberg que só foi descoberto por causa desta demanda irrevogável do rigor científico!

8.3 Geometria e Gravitação

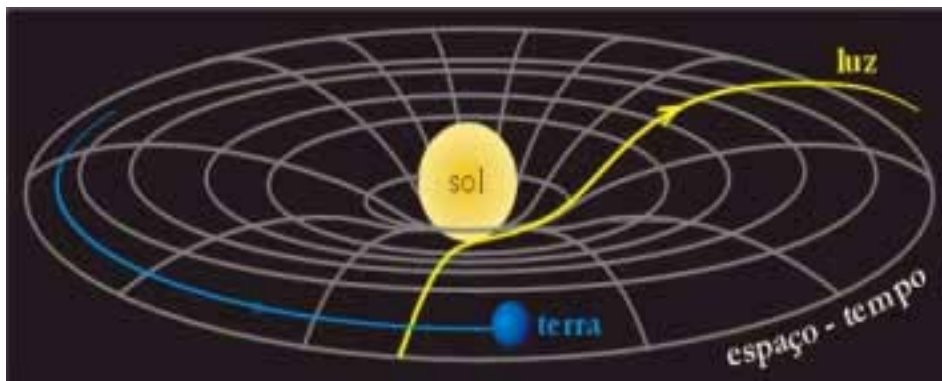
A relatividade geral vai muito além dos resultados descritos acima. Ela provocou modificações profundas de conceitos e idéias sobre a estrutura do Universo cujas conseqüências ainda estão longe de serem esgotadas. Vimos no capítulo dois que na relatividade restrita espaço e tempo não são independentes um do outro. Classicamente consideramos o espaço como tendo três dimensões, x , y e z . O tempo pode ser considerado uma quarta dimensão, independente do espaço. Na relatividade, espaço e tempo se misturam. A expressão matemática desta interdependência aparece nas transformações de Lorentz. É extremamente difícil visualizarmos esta interconexão, mas no entanto ela existe, e devemos agora pensar não em uma estrutura tridimensional espacial, com o tempo fluindo separadamente como considera a mecânica clássica, mas sim em uma estrutura *quadridimensional*, sendo três dimensões espaciais e uma temporal. Chamamos tal estrutura de *espaço-tempo*.

Na relatividade geral a idéia de força é abandonada, e substituída por geometria! Considere o seguinte exemplo, oferecido por P.C. Davies e J. Brown (**Superstrings. A Theory of Everything?**, Cambridge 1988): imagine quatro objetos que caem em queda livre em um campo gravitacional. Inicialmente, no momento em que são soltos, os quatro objetos formam um quadrado no plano vertical, com um dos vértices apontando para baixo. De acordo com a mecânica clássica, como a força gravitacional varia com o inverso do quadrado da distância, o objeto no vértice mais próximo da Terra sofrerá uma força ligeiramente maior do que o que se encontra no vértice oposto. Os objetos que se encontram

na posição intermediária estarão sujeitos à mesma força, e portanto manterão suas posições relativas. Conseqüentemente, à medida que cai, o quadrado é *alongado* em uma de suas diagonais, tornando-se um losango. Na relatividade geral entende-se que tal deformação não é causada pela ação da força gravitacional, mas sim porque o próprio espaço-tempo possui aquela geometria. É como se os objetos rolassem *livremente* sobre uma superfície do espaço-tempo com determinada forma geométrica. Com o movimento de um planeta em torno do Sol se dá o mesmo. Para a relatividade geral não há forças atuando sobre o planeta; este se move livremente descrevendo uma trajetória sobre uma superfície do espaço-tempo, como uma bola de gude que rola sobre uma mesa (lembre no entanto que a geometria a que nos referimos é a do espaço-tempo, e não só do espaço. Embora para nós seja muito difícil a visualização da situação, do ponto de vista matemático não há problema algum em se lidar com estruturas multidimensionais).

E como essa geometria aparece? O que determina a forma da órbita de um planeta ou da trajetória de um objeto em queda livre na relatividade geral? Resposta: a *massa*. A massa de planetas, estrelas, galáxias, etc., é o que cria as distorções no espaço-tempo, como se ele fosse uma folha de papel curvada. Retire a massa do Universo, e não sobra nada. Compare o Universo com uma sala mobiliada; mesas, cadeiras, poltronas, quadros, etc., representam planetas, estrelas, galáxias, etc. Retire a mobília da sala; o que sobra? Para Newton, sobraria o espaço que era antes ocupado pelos objetos. Para Einstein: não sobra nada. É como se a própria sala fosse gerada pela mobília. Deste ponto de vista, o desvio na trajetória da luz no experimento de Eddington ocorre sim-

plesmente porque nas vizinhanças do Sol o espaço-tempo é deformado. A luz é uma espécie de “linha” desenhada sobre a superfície espaço-temporal, deformada pela massa do Sol. Note a mudança conceitual dramática em relação à mecânica clássica. É a marca de Einstein! O espaço e o tempo, ou melhor, o espaço-tempo, não é mais uma mera estrutura estática e absoluta dentro da qual os fenômenos da Natureza se desenrolam, mas sim um objeto físico, gerado e modificado pela matéria do Universo.



Para a Relatividade Geral, objetos se movem livremente sobre a superfície do espaço-tempo, que tem sua geometria determinada pela massa do Universo.

Obviamente embasando esses resultados espetaculares está muita matemática. Uma das razões para a relatividade geral levar dez anos para ser desenvolvida até a forma final encontrada por Einstein foram exatamente as dificuldades matemáticas que apareceram ao longo do caminho. Durante este período, Einstein publicou uma série de trabalhos, cada um deles retratando ou corrigindo algum erro do anterior.

Por conta disso, certa vez teria dito sobre si mesmo: *o camarada Einstein age de acordo com suas conveniências. A cada ano corrige o que disse no ano anterior.*

A aceitação inicial da teoria se deu em grande parte à beleza e elegância de sua formulação matemática. Este é um ponto importante, mas que em geral não faz parte do ensino profissionalizante do físico. Há muito de sentido estético em física. Resultados com significados profundos em geral são expressos por fórmulas matemáticas simples, como $F = ma$, $E = mc^2$, $\lambda = h/p$, etc. É o contraste entre a simplicidade e a abrangência que causa a sensação do belo!

Da mesma forma em que a mecânica clássica é recuperada da relatividade restrita no limite de baixas velocidades, ela também o é da relatividade geral no limite de *massas pequenas*. Não poderia ser de outra forma. A mecânica newtoniana é uma teoria de imenso sucesso, e obviamente não está errada, mas somente *limitada*. A relatividade geral de Einstein é uma generalização da mecânica clássica de Newton para o limite de massas muito grandes (massas de galáxias), assim como a relatividade restrita o é para o limite de velocidades muito altas, próximas a da luz. Podemos então afirmar que a mecânica newtoniana é válida sempre que as massas envolvidas no problema não forem muito grandes, sempre que as velocidades dos objetos não forem muito altas, e ainda, sempre que os objetos não forem muito pequenos, da ordem de tamanhos atômicos, pois quem “manda” nesse limite é a mecânica quântica.

8.4 Nascimento e Morte das Estrelas: Buracos Negros

No capítulo anterior fizemos um breve comentário sobre o ciclo de vida de uma estrela. Corpos celestes são formados a partir da atração gravitacional entre partículas soltas no espaço. A conexão entre uma dada distribuição de matéria e o campo gravitacional por ela gerado foi estabelecida por Einstein sob a forma de um conjunto de dez equações na teoria da relatividade geral. A partir delas o campo gravitacional de uma dada distribuição de matéria pode ser calculado. Dentre as muitas soluções destas equações estão aquelas das quais decorrem objetos conhecidos como *buracos negros*. Nesta seção vamos rever com um pouco mais de detalhes o ciclo de vida de alguns objetos celestes.

Em uma estrela como o Sol, a matéria cria uma compressão gravitacional forte o suficiente para iniciar uma fusão termonuclear que transforma hidrogênio em hélio. Mencionamos também no capítulo anterior que o destino final de uma estrela depende de sua massa. Um fato curioso sobre as estrelas é que as maiores (e mais massivas) vivem menos do que as menores. Isso ocorre porque quanto maior a massa, maior a contração gravitacional, e mais rápida será a queima do combustível nuclear que mantém a estrela “acesa”.

Daqui a uns 5 bilhões de anos o Sol começará a se expandir e se tornará uma gigante vermelha. Após este período ele começará a esfriar e a se contrair, mas não “acenderá” novamente. Ao contrário, se tornará uma pequena estrela conhecida como *anã branca*. A massa do Sol é usada como uma espécie de unidade de massa de estrelas. Uma

estrela cuja massa seja maior do que 8 vezes a massa do Sol tem um destino diferente. Quando em tais estrelas o hidrogênio acaba, o processo de contração continua, queimando o hélio, e então carbono, e então silício, e finalmente produzindo ferro como o último produto de fusão. O ferro forma uma espécie de núcleo do qual não é mais possível retirar energia pelo processo de fusão. Este núcleo de ferro então colapsa sob a ação da gravidade, fazendo toda a estrela colapsar. A pressão aumenta tanto que ocorre uma explosão, literalmente despedaçando a estrela e lançando matéria e energia no espaço: é o que chamamos de *supernova*. Este fenômeno é comumente observado da Terra. Uma das mais famosas explosões de supernova foi observada em fevereiro de 1987.

Pode ocorrer ainda que durante o processo de colapso da massa de uma estrela com massa da ordem daquela de uma supernova, elétrons sejam forçados para dentro dos prótons, transformando-os em nêutrons. Quando isso ocorre, a estrela se torna estável. Terá um diâmetro de apenas alguns quilômetros, mas poderá ser tão massiva quanto o Sol. Esta é chamada uma *estrela de nêutrons*. Estrelas de nêutrons podem girar rapidamente e emitir radiação eletromagnética, que é detectada na Terra sob a forma de pulsos de radiação. Tal objeto é chamado um *pulsar*, e realiza dezenas de rotações por segundo! Imagine um objeto tão massivo quanto o Sol girando desse jeito! Pulsares foram detectados pela primeira vez por astrônomos ingleses no final dos anos 60. A regularidade dos pulsos levou-os a pensar que se tratava de uma comunicação inteligente extra-terrestre! Atualmente são conhecidos cerca de 400 pulsares.

Mas, o objeto mais estranho que pode resultar da vida de uma

estrela aparece se a sua massa for tal que os próprios nêutrons colapsem, e se transformem numa espécie de ponto superdenso. O espaço-tempo em torno de tal região é completamente deformado, em uma espécie de rodemoinho do qual nada que se aproxime o suficiente consegue escapar, inclusive a luz. Tal objeto é um *buraco negro*. Enquanto estrelas de nêutrons e pulsares podem ser detectados diretamente por técnicas de radioastronomia, buracos negros só podem ser “observados” indiretamente através de seus efeitos gravitacionais.

A primeira evidência da existência de um buraco negro apareceu em 1970, através da observação de uma fonte de raios-X em um sistema binário chamado Cygnus X-1. Essas observações revelaram a existência de um objeto com raio comparável ao de uma estrela de nêutrons (pulsar) e uma massa da ordem de 8 a 10 vezes a massa do Sol. Acredita-se que exista um buraco negro neste sistema a cerca de $8,2 \times 10^3$ anos-luz da Terra. Astrofísicos e cosmólogos estimam que 10^8 (100 milhões) de buracos negros se formaram no Universo, um deles estando no centro da nossa galáxia.

Resumindo: uma estrela é uma espécie de fábrica cósmica de elementos pesados. Pense nisso: somos feito de material produzido no interior das estrelas! O ciclo da vida de uma estrela começa com a queima de hidrogênio em hélio, e o seu destino final depende de sua massa. Elas podem se transformar em gigantes vermelhas e então em anãs brancas, ou em supernovas. Podem ainda virar estrelas de nêutrons ou buracos negros.

8.5 Novos Desafios à Relatividade

A despeito de seu enorme sucesso, a relatividade geral carece de testes experimentais, o que é mortal para qualquer teoria física (mesmo as de Einstein!). Os testes mencionados nas seções anteriores (deflexão da luz, deslocamento para o vermelho, e precessão do periélio de Mercúrio) foram os únicos realizados até hoje, mais de 80 anos após a publicação da teoria. Esta situação contrasta com a da relatividade restrita, que foi testada milhares de vezes, até que ninguém mais duvidasse, por exemplo, de que $E = mc^2$. Pior ainda para a relatividade geral, ao longo dos anos teorias alternativas surgiram e foram capazes de prever a existência dos mesmos fenômenos previstos por Einstein. A única maneira de distinguir (e decidir) qual a melhor teoria, é realizando experimentos. Este é um ponto particularmente dramático para teorias de gravitação, pois os experimentos envolvem galáxias inteiras! Muitas das teorias alternativas à relatividade geral puderam ser descartadas através de experimentos que testaram certas previsões teóricas que não estão contidas na teoria de Einstein. No entanto, descartar teorias alternativas não é suficiente para corroborar a relatividade geral. É preciso testá-la diretamente!

Com esse intuito, a Universidade de Stanford e a NASA vêm desenvolvendo o mais ambicioso projeto experimental deste século para testar a relatividade geral. Ele é chamado de GPB, sigla em inglês para *Gravity Probe B*, que poderíamos traduzir por *Sonda Gravitacional B*. A idéia é simples na sua concepção, porém imensamente complexa na sua realização. O experimento se utiliza do fenômeno de precessão

de um giroscópio em um campo gravitacional, conhecido por qualquer criança que já brincou de pião! Um pião possui dois movimentos: um de *rotação* em torno de seu eixo, e outro de *precessão* em torno do campo gravitacional. Vamos nos referir à rotação como sendo o “spin” do pião (não confundir com o ‘spin’ intrínseco de partículas, discutido no capítulo três). A precessão é causada pelo torque do campo gravitacional sobre o spin. Curiosamente, o fenômeno é análogo à precessão de spins nucleares em torno de um campo magnético (capítulo seis).

A velocidade angular de precessão de um pião, Ω , é proporcional à razão entre a aceleração da gravidade g , e a frequência angular de spin ω :

$$\Omega \propto \frac{g}{\omega}$$

Quanto mais rápida for a rotação, ou seja, quanto maior for ω , mais lenta será a precessão, e vice-versa. Quem já brincou de pião também já notou esse fato. A medida em que o pião vai parando, a precessão aumenta cada vez mais. Por outro lado, na ausência de gravidade, ou seja $g = 0$, o pião não apresentará movimento de precessão. Note que se tivéssemos um meio de medir Ω , ω e outras quantidades relacionadas ao movimento do pião, teríamos uma maneira de medir a aceleração da gravidade no local onde o pião se encontra. Este é o espírito do experimento GPB: utilizar o movimento de um giroscópio para medir efeitos gravitacionais previstos pela relatividade geral!

A fim de se medir efeitos relativísticos, é preciso eliminar do experimento outros efeitos não-relativísticos. Por “não-relativísticos” entenda-se aqueles efeitos que podem ser explicados exclusivamente pela mecânica

clássica, como por exemplo o torque do campo gravitacional sobre o pião. Em outras palavras, deve-se isolar o que é genuinamente relativístico. Essa demanda cria problemas sérios para o experimento, uma vez que no Sistema Solar a relatividade geral fornece resultados praticamente idênticos aos da mecânica clássica (pois as massas envolvidas não são suficientemente grandes!). A dificuldade deve ser contornada com muita imaginação!

Um giroscópio é colocado em um satélite orbitando a cerca de 600 km de altura em torno da Terra. A esta altitude, a aceleração da gravidade é muito menor do que na superfície da Terra, o que virtualmente elimina o efeito de precessão causado pela gravidade terrestre sobre o pião.

A verificação de dois efeitos previstos na relatividade geral será particularmente buscada no experimento GPB. Difícil é apontarmos qual o mais bizarro: o *arraste do espaço-tempo*, ou o *efeito gravito-magnético*. O primeiro foi previsto em 1918 por W. Lense, e H. Thirring. Eles calcularam que a rotação de um corpo massivo deveria “arrastar” consigo o próprio espaço-tempo. Tal efeito, causado pelo movimento de rotação da Terra, seria extremamente pequeno, porém grande o suficiente para ser percebido pelos giroscópios do experimento GPB. O segundo é uma espécie de análogo entre o campo magnético e o campo elétrico, como descreveu o físico americano John Wheeler. Mencionamos no capítulo um que campos elétricos em movimento geram campos magnéticos. Algo semelhante ocorreria com o campo gravitacional: o seu movimento geraria o efeito gravito-magnético.

Os “piões” utilizados no experimento (em número de quatro) são,

por si só, peças de arte e tecnologia. Eles consistem de esferas perfeitas de quartzo, revestidas de material supercondutor (capítulo seis). Quando postos a girar em torno de um eixo, o supercondutor dá origem a um momento magnético chamado de *momento de London*, em homenagem a Fritz London, um dos primeiros estudiosos da supercondutividade. Como vimos no capítulo seis, momentos magnéticos são grandezas proporcionais a momentos angulares. Então, variações nos momentos angulares, causadas pelas alterações gravitacionais locais, serão captadas através das respectivas variações dos momentos magnéticos de London dos piões. Essa aparente complicação se faz necessária, pois é muito mais simples a detecção de variações em momentos magnéticos (que geram sinais elétricos), do que em momentos angulares!

A implementação de tal experimento, como dá para perceber, desafia a imaginação não só dos melhores escritores de ficção científica do século, como também de técnicos, físicos e engenheiros envolvidos no projeto. O uso de supercondutores implica que os giroscópios precisam ser mantidos a baixas temperaturas; o fato de as medidas serem realizadas observando-se variações minúsculas dos momentos magnéticos das esferas (e não dos momentos angulares correspondentes), implica na necessidade de blindagens das esferas dos efeitos do campo magnético da Terra, etc. As variações nos momentos magnéticos serão medidas usando-se aparelhos extremamente sensíveis conhecidos como SQUIDS (sigla em inglês para *Superconducting Quantum Interferometer Device* - Interferômetro Quântico de Supercondutores). As esferas devem ser posicionadas de modo a manterem seus momentos alinhados com o eixo de um telescópio que aponte para estrelas distantes fixas, fornecendo

assim um sistema de referência, em relação ao qual as variações serão medidas. E vai por aí afora. O experimento foi classificado por um dos cientistas-chefes como o “mais desafiador já realizado pela NASA”. É aguardar para ver!

PAINEL XVI
RELATIVIDADE E IMPOSTURAS INTELECTUAIS

As ciências humanas e sociais (sociologia, filosofia, psicologia, etc) muitas vezes buscam inspiração nos conceitos das ciências exatas para aplicá-los aos fenômenos sociais e mentais, e tentar compreender melhor estes complexos fenômenos. Embora a princípio esta iniciativa possa parecer saudável, dado o enorme sucesso das ciências exatas, particularmente da física, autores famosos têm “escorregado” na hora de fazer a transposição de uma área de conhecimento para outra. Vários destes deslizes foram compilados em um livro chamado “Imposturas Intelectuais”, de Alan Sokal e Jean Bricmont [Ed. Record (1999)] onde os autores criticam severamente figuras eminentes com o peso de Jacques Lacan, Gilles Deleuze e Felix Guattari, Paul Virilio, etc. Particularmente atingida por estas “imposturas” estão as relatividades (especial e geral). Abaixo transcrevemos alguns trechos do livro de Sokal e Bricmont. Se o amigo leitor não compreender o que eles significam, não se preocupe, pois de acordo com os autores de “Imposturas Intelectuais” não há muito o que compreender mesmo.

I. *Estas lutas contra privilégios na economia ou na física são literalmente, e não metaforicamente, as mesmas [...] Quem irá se beneficiar com o envio de todos estes observadores para plataformas, trens, raios de luz, Sol, estrelas próximas, elevadores acelerados, confins do cosmos? Se o relativismo estiver correto, cada um deles se beneficiará tanto quanto os outros. Se correta estiver a relatividade, apenas um deles (isto é, o enunciador, Einstein ou algum outro físico) será capaz de juntar num único lugar (seu laboratório, seu escritório) os documentos, relatos e medições transmitidos por todos os seus enviados.* [Bruno Latour - Extraído de “Imposturas Intelectuais, Alan Sokal e Jean Bricmont, Ed. Record (1999)]

II. *Algumas vezes a constante-limite surge ela própria como uma relação no conjunto do universo, ao qual todas as partes são sujeitas*

sob uma condição finita (quantidade de movimento, força, energia...). Novamente, é preciso que haja sistemas de coordenadas, aos quais os termos da relação se referem: este é pois um segundo significado do limite, um enquadramento exterior ou uma exorreferência. Pois os protolimites, externos a todas as coordenadas, geram inicialmente abscissas de velocidades sobre as quais serão erguidos eixos coordenáveis. Uma partícula terá uma posição, uma energia, uma massa, um valor de spin, porém com a condição de receber uma existência ou uma atualidade física, ou de “aterrissar” em trajetórias que podem ser captadas pelos sistemas de coordenadas. São esses primeiros limites que constituem a desaceleração no caos ou o limiar de suspensão do infinito, que servem de endoreferência e operam uma contagem: não são relações, apenas números, e toda teoria das funções depende de números. Será invocada a velocidade da luz, o zero absoluto, o quantum da ação, o big-bang: o zero absoluto da temperatura é de -273,15 graus centígrados, a velocidade da luz, 299.796 quilômetros por segundo, onde as distâncias se contraem a zero e os relógios param. Tais limites não têm o valor empírico que assumem somente dentro dos sistemas de coordenadas; agem primeiramente como a condição de desaceleração primordial, que se estende com relação ao infinito sobre toda a escala das velocidades correspondentes, sobre suas acelerações ou desacelerações condicionadas. Não é somente a diversidade desses limites que nos habilita a duvidar da vocação unitária da ciência. Na verdade, cada limite gera por si só sistemas de coordenadas heterogêneas irreduzíveis, e impõe limiares de descontinuidade, dependendo da proximidade ou distanciamento da variável (por exemplo o distanciamento das galáxias). A ciência está obcecada não por sua própria unidade, mas pelo plano de referência constituído por todos os limites ou fronteiras sob as quais a ciência enfrenta o caos. São estas fronteiras que dão ao plano suas referências. No que diz respeito ao sistema de coordenadas, eles povoam ou guarnecem o próprio

plano de referência. [Deleuze e Guattari - Extraído de “Imposturas Intelectuais, Alan Sokal e Jean Bricmont, Ed. Record (1999)"]

III. *Como podemos entender plenamente tal situação senão com a aparição de um novo tipo de intervalo, O INTERVALO TIPO LUZ (sinal nulo)? A inovação relativista deste terceiro intervalo é realmente em si mesma um tipo de revelação cultural não-observada.*

Se o intervalo de TEMPO (sinal positivo) e o intervalo de ESPAÇO (sinal negativo) dispuseram a geografia e a história do mundo através da geometrização das áreas agrárias (parcelamento) e das áreas urbanas (o sistema cadastral), a organização dos calendários e a medida do tempo (os relógios) igualmente presidiram uma vasta regulamentação cronopolítica das sociedades humanas. O recentíssimo surgimento de um intervalo de terceiro tipo sinaliza, portanto, para nós um brusco salto quantitativo, uma profunda mutação no relacionamento entre o homem e seu meio ambiente.

TEMPO (duração) e ESPAÇO (extensão) são inconcebíveis sem LUZ (limite-velocidade), a constante cosmológica da VELOCIDADE DA LUZ...

[Paul Virilio - maiúsculas no original. Extraído de “Imposturas Intelectuais, Alan Sokal e Jean Bricmont, Ed. Record (1999)"]

8.6 O Universo teve um Início? A Grande Explosão

Em 1923 o astrônomo americano Edwin Hubble fazia medições da luz emitida por galáxias distantes, e comparava com a luz emitida pelos mesmos tipos de átomos em laboratórios na Terra. Ele verificou que o comprimento de onda da luz emitida pelas galáxias era deslocado em direção ao vermelho. Desta observação ele chegou a conclusão que as galáxias estavam se afastando da Terra com uma velocidade igual a

$$v = Hd$$

onde d é a distância da galáxia à Terra e H o chamado *parâmetro de Hubble*, que vale:

$$H = 67 \frac{\text{km/s}}{\text{Mpc}}$$

onde Mpc é uma unidade de distância utilizada em astronomia chamada *megaparsec*. Para entender esta unidade, precisamos entender primeiro o que é o *ano-luz*. 1 ano-luz é a distância percorrida pela luz em 1 ano. É fácil calcular este valor em quilômetros: como a velocidade da luz é de aproximadamente 3×10^8 m/s, e 1 ano possui 3×10^7 s, 1 ano-luz equivale a uma distância de $9 \times 10^{15} \approx 10^{16}$ metros, ou 10^{13} km (10 trilhões de quilômetros). Agora, 1 pc (1 parsec), é igual a 3,16 anos-luz; e finalmente 1 Mpc é igual a 1 milhão de parsec. Ou seja: 1 Mpc = $3,26 \times 10^6$ anos-luz, ou seja, cerca de 10^{19} km (10 mil quatrilhões de quilômetros). A constante de Hubble nos diz que se uma galáxia se encontra a uma distância da Terra igual a 1 Mpc, ela

se afastará com uma velocidade de 67 km/s. Se a distância for de 10 Mpc, a velocidade de afastamento será de 670 km/s. Para efeitos de comparação, a velocidade orbital da Terra em torno do Sol é de aproximadamente 29 km/s.

Esta foi uma das descobertas mais significativas do século XX, com profundas implicações não somente para a Física, mas para a Filosofia, em particular para a Teologia³. A razão é simples: se as galáxias se afastam umas das outras, é porque o Universo está se expandindo. Conseqüentemente em algum instante remoto do passado, toda a matéria do Universo deveria estar concentrada em um só ponto. Ou seja, o *Universo foi criado* em algum instante, estimado em cerca de 15 bilhões de anos atrás. O quadro que se tem deste momento da criação do Universo tornou-se conhecido como a Grande Explosão (ou o “Big Bang”). Ele não deve contudo ser visto como uma explosão ordinária, porque o próprio espaço-tempo estava sendo criado neste momento. Uma das questões mais intrigantes é precisamente para onde se dá tal expansão. Algumas vezes comparamos a situação com a de uma bola sendo enchida, as galáxias sendo representadas como pontos sobre a superfície da bola, que se afastam à medida que aumenta a sua área superficial. À medida em que ocorre a expansão, o espaço-tempo vai sendo criado.

Os elementos constituintes da matéria foram sendo criados à me-

³A Física do século XX fez a festa dos filósofos e deve ter confundido a cabeça de muitos teólogos. Primeiro acabou com o absolutismo do espaço e do tempo com a relatividade. Depois acabou com o determinismo clássico com a mecânica quântica. Nos colocou como senhores absolutos de nossa própria existência com a explosão da primeira bomba atômica. Depois, com a radioastronomia descobriu que o Universo não era eterno, e que houve um “início absoluto”. O que mais virá por aí?!

dida em que o Universo se expandia e se resfriava. Núcleos atômicos apareceram quando o Universo tinha apenas 3 minutos de idade. Não havia ainda elétrons em torno dos núcleos, ou seja, não havia átomos. De fato, os cosmólogos são capazes de calcular o número de núcleos que foram formados durante esses 3 primeiros minutos e comparar com resultados experimentais. Essas comparações têm reforçado a teoria do Big Bang. Átomos só foram formados a partir de 500 mil anos após o Big Bang.

Uma outra importante evidência a favor da teoria do Big Bang foi a observação, em 1964, pelos radio-astrônomos Arno Penzias e Robert Wilson da chamada *radiação de fundo* do Universo. Trabalhando com aparelhos de detecção de microondas, Penzias e Wilson detectaram ondas eletromagnéticas que chegam à Terra por todos os lados. Esta radiação foi interpretada como o calor que “sobrou” da energia liberada após o Big Bang. Ela corresponde a uma temperatura de apenas 2,7 K (abaixo da temperatura de liquefação do hélio!). O estudo dessa chamada radiação de fundo pode ajudar a compreender como o Universo surgiu, quando e como as galáxias se formaram, etc. Em 1992 o telescópio COBE (Cosmic Background Explorer), da agência espacial americana, NASA, detectou flutuações extremamente pequenas na radiação de fundo: o telescópio media um temperatura de 2,7281 K quando apontado para uma determinada direção, e 2,7280 K quando apontado para outra. Note a precisão da medida! Essa diferença de apenas 1 décimo de milésimo de graus Kelvin está associada a uma possível diferença na densidade da matéria do Universo em seus primórdios, e é fundamental para entendermos o surgimento

das galáxias. Estudar a radiação de fundo, é portanto olhar para o Universo como ele era há bilhões de anos atrás!

8.7 O Universo terá um Fim? O Grande Colapso

A idéia de que o Universo teve um início sugere a pergunta óbvia se ele terá um fim. Em outras palavras, o Universo continuará se expandindo para sempre, ou em algum momento a expansão cessará e o movimento reverso começará a ocorrer? Se isso acontecer, toda a matéria do Universo será novamente comprimida em um ponto. Os físicos se referem a essa situação como o *Grande Colapso*. A resposta para essa pergunta depende da massa total do Universo. Se esta for grande o suficiente a reversão ocorrerá e em algum ponto do futuro o Universo colapsará. Por outro lado, se a massa não for suficiente, o Universo continuará se expandindo para sempre. No jargão da cosmologia um Universo que se expande para sempre é chamado de *aberto*, e um que se expande e depois se contrai de *fechado*. Existe ainda uma terceira categoria entre o aberto e o fechado, que é o *Universo plano*. Um Universo plano também se expande para sempre. A massa do Universo calculada da teoria do Big Bang corresponde a um Universo plano, ou seja, nem fechado nem aberto. Acontece que a massa que é observada atualmente pelos astrônomos corresponde a apenas 10% da massa total esperada. Os outros 90% que não se vêem são chamadas de *matéria escura* do Universo (dark matter), uma espécie de “sombra com substância”. Uma das questões mais importantes da cosmologia

na atualidade é saber do que é feita a matéria escura, e existem vários possíveis candidatos, com siglas estranhas: os WIMPs (Weakly Interacting Massive Particles - partículas massivas com fraca interação); os *áxions*, partículas com pequena massa produzidas durante a transição dos quarks para bárions; e os MACHOS⁴, objetos massivos compactos que incorporam anãs-brancas, planetas e buracos negros.

Existe ainda um outro candidato bizarro à matéria escura: as *cordas cósmicas*. Estas foram propostas em 1976 pelo físico inglês Iom Kibble, e seriam relíquias do Big-Bang. Tratam-se de tubos de energia extremamente finos e longos, com diâmetro da ordem daquele de um núcleo atômico, porém com comprimentos que se estendem por todo o Universo. Cada centímetro desta corda pesaria milhões de vezes mais que o Monte Everest. Devido à sua incrível densidade e dimensões astronômicas, tais objetos agregariam em torno de si enorme quantidade de matéria sob a forma de aglomerados galácticos.

Por fim, os neutrinos são os mais sérios candidatos à matéria escura, ou pelo menos boa parte dela. Estes abundam no Universo, propagam-se a velocidades altíssimas e interagem muito fracamente com a matéria.

Seja lá qual for a sua natureza, a quantidade de matéria escura no Universo é o que determinará em última instância o seu destino: se houver matéria suficiente, a atração gravitacional interromperá a expansão causada pelo Big Bang, e o Universo iniciará seu longo retorno até o Grande Colapso.

Onde saber mais: deu na Ciência Hoje.

⁴Por enquanto ainda não descobriram partículas chamadas FÊMEAS.

1. *Estamos Descobrendo Efeitos Antigravitacionais?*, José Antônio de Freitas Pacheco, vol. 3, no. 15, p. 20.
2. *Novas Teorias do Cosmo*, Mário Novello, vol. 1, no. 3, p. 54.
3. *A Teoria do Big Bang e o Deutério do Meio Interestelar*, José Antônio de Freitas Pacheco, vol. 2, no. 7, p. 22.
4. *Nascimento, Vida e Morte das Estrelas*, Augusto Damini Neto, vol. 1, no. 2, p. 10.
5. *Formação de Galáxias: uma Teoria em Crise*, Ívano Damião Soares, vol. 13, no. 75, p. 11.
6. *Nebulosas Planetárias de nossa Galáxia*, Walter Junqueira Maciel, vol. 30, no. 18, p. 11.
7. *Galáxias em Grupos Compactos*, Cláudia Mendes de Oliveira, vol. 14, no. 79, p. 8.
8. *Qual a Origem das Galáxias?*, Mário Novello e Hans Heintzmann, vol. 4, no. 24, p. 16.
9. *Gravitação e Relatividade em Debate*, Mário Novello, vol. 6, no. 31, p. 72.
10. *Duplas Imagens de Lentes Gravitacionais*, Ronaldo Santos Barbieri, vol. 6, no. 31, p. 18.
11. *Manchas Estelares*, Carlos Alberto P.C. Oliveira Torres, vol. 2, no. 9, p. 42.
12. *A Matéria do Universo*, José Antônio de Freitas Pacheco, vol. 13, no. 74, p. 8.
13. *O Poder dos Buracos Negros*, José P.S. Lemos, vol. 13, no. 74, p. 12.
14. *Vento Solar e Ventos Estelares*, José Antônio de Freitas Pacheco, vol. 1, no. 1, p. 54.
15. *Supernova em NGC5128*, Francisco Jablonski e Rodrigo Prates Campos, vol. 5, no. 26, p. 12.
16. *A Gênese do Big Bang*, Antônio Augusto Passos Videira, vol. 25, no. 145, p. 36.
17. *Há uma Galáxia Gigante à Nossa Porta*, Renée C. Kraan-Kortweg, vol. 20, no. 117, p. 44.
18. *A Prova Cearense das Teorias de Einstein*, Jean Eisenhardt e Antônio Augusto Passos Videira, vol. 20, no. 115, p. 24.
19. *O Destino das Estrelas*, José P.S. Lemos, vol. 17, no. 97, p. 42.

Resumo - Capítulo Oito

A Teoria da Relatividade Geral foi publicada por Einstein em 1916, dez anos após a publicação da Relatividade Restrita. Nesta teoria Einstein estende a descrição dos fenômenos físicos para sistemas não inerciais (ou seja, acelerados). O Princípio de Equivalência postula que é impossível distinguirmos sistemas uniformemente acelerados de campos gravitacionais. As duas conseqüências principais deste princípio são o desvio da luz por campos gravitacionais e o deslocamento da frequência (e conseqüentemente mudança da energia) de fótons em campos gravitacionais. Ambas previsões foram confirmadas experimentalmente inúmeras vezes. Outro resultado importante da relatividade geral foi a explicação da precessão do periélio de Mercúrio. Ao incluir campos gravitacionais, a relatividade geral tornou-se uma teoria de gravitação, aperfeiçoando a gravitação newtoniana que existia há 300 anos. A relatividade geral descreve o movimento de objetos, não em termos da ação de forças, como na mecânica clássica, mas em termos de trajetórias descritas sobre a superfície do espaço-tempo. A geometria do espaço-tempo é determinada pela distribuição de massas no Universo. Ou seja, o espaço e o tempo não são estruturas absolutas e estáticas como na teoria newtoniana, mas objetos físicos em si, gerados pela matéria do Universo. Acredita-se que o Universo teve início com uma grande explosão que ocorreu há cerca de 15 bilhões de anos atrás. Esta explosão, conhecida como o 'Big Bang', gerou não só a matéria do Universo, mas também o espaço-tempo. Nos dias de hoje uma das principais evidências de que tal explosão ocorreu é a chamada 'radiação de fundo' do Universo, o calor que restou do Big Bang. O destino do Universo dependerá da massa total que nele existe. Se esta for grande o suficiente, a atração gravitacional acabará por frear a expansão causada pelo Big Bang, e o Universo iniciará uma contração até o Grande Colapso. Caso contrário, ele se expandirá para sempre.