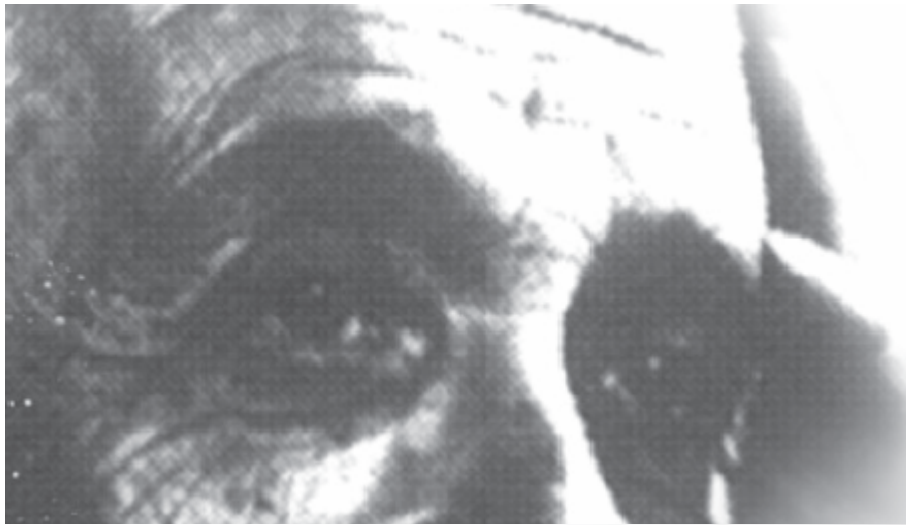


# Examinando o Espaço-tempo de Einstein

Um Guia do Educador



$$R_{i\kappa} - \frac{1}{2} g_{i\kappa} R = -\kappa T_{i\kappa}$$

## **PROJETO PEDAGÓGICO:**

### **CONTEÚDO DO TÓPICO A**

- \* Entendimento sobre o inquérito científico

### **CONTEÚDO DO TÓPICO B**

- \* Movimentos e forças
- \* Conservação de energia e aumento na desordem
- \* Interações entre energia e matéria

### **CONTEÚDO DO TÓPICO D**

- \* Origem e evolução do Universo

### **CONTEÚDO DO TÓPICO E**

- \* Habilidades do projeto tecnológico
- \* Entendimentos sobre ciência e tecnologia

### **CONTEÚDO DO TÓPICO G**

- \* Ciência como um esforço humano
- \* Natureza do conhecimento científico
- \* Perspectivas históricas

# Da Gravidade de Newton para o Espaço-tempo curvo de Einstein

Na teoria da Relatividade Geral de Einstein, a noção Newtoniana de espaço como um vasto vazio que não tem efeito sobre o movimento da matéria é transformado em uma rede “espaço-tempo” que acolhe a matéria e guia o seu curso. Gravidade não é simplesmente uma força que atrai a matéria; é também a curvatura e torção do próprio espaço-tempo. Como Einstein chegou a esta idéia de espaço-tempo? O que o fez duvidar que a teoria da Gravidade de Newton governasse o universo? E o que é exatamente “espaço-tempo curvo”? Nesta seção, nós aprendemos sobre duas questões que propeliram Einstein a questionar a teoria da gravidade de Newton e levaram Einstein à redefinir nosso universo. Em geral, usa-se o termo “gravidade” para expressar a força gravitacional, segundo a concepção Newtoniana, que a Terra exerce sobre outros corpos na sua superfície. Gravitação significa uma força gravitacional qualquer.

## A. Espaço-tempo

A teoria da gravitação de Newton (1687) é tão familiar para nós quanto andar para frente. A força invisível da gravidade emana da Terra e nos puxa para baixo, um pé depois do outro. Essa força é especialmente visível se nós tentarmos subir um morro – ela faz de cada passo um esforço enorme. A gravidade mantém moedas em nossos bolsos, puxa as folhas em direção ao solo e enche de café o nosso copo. Ela faz a água das cachoeiras caírem e os rios fluírem para os oceanos. Ela mantém nossas bolinhas de gude no chão e traz de volta nossas bolas de vôlei e astronautas de volta para a Terra.

Newton estendeu essa idéia além da Terra para incluir os planetas e o sistema solar. A gravidade solar viaja através do espaço vazio e atrai incessantemente os planetas para si. A gravidade solar também puxa cometas ao seu redor em órbitas elípticas e mantém asteróides orbitando entre Marte e Júpiter. A teoria da gravitação de Newton é uma explicação tão clara de todos esses fenômenos de forma a duvidarmos da existência de alguém que duvidasse. O que poderia estar errado na teoria da gravitação de Newton?

### Questão #1 – Quão rápida é a Gravidade?

No *Principia Mathematica* de Newton (1687), ele estabeleceu que a força atrativa da gravidade emanava da matéria, mas ele não explicou fisicamente como era transmitida de uma massa para outra, nem quanto tempo essa transmissão levava para ocorrer. Ele simplesmente assumiu que a força da gravidade **viajava instantaneamente** pelo espaço vazio de uma massa à outra.

Einstein, juntamente com muitos outros cientistas, começou a questionar essa conclusão em meados do século XX. No século XIX, Maxwell havia mostrado que a luz propagava numa velocidade finita pelo vácuo –

299,792 km/s. Em 1905, a teoria da relatividade especial de Einstein estava baseada na idéia de que essa velocidade era a velocidade limite de toda matéria e energia do universo. Se a gravidade era que transmitida entre massas da mesma maneira que a luz, a força da gravidade deveria ser igualmente restrita à 299,792 km/s. Apesar de mover-se

#### Sem hipóteses

No *Principia* (1687), Newton estabelece que “há uma força de gravidade permeando todos os corpos, proporcional às diferentes quantidades de matéria que eles têm. Conta-se que, ao ser indagado sobre como esta “força de gravidade” é transmitida de um corpo para outro, Newton respondeu “eu não faço hipóteses”.

com aproximadamente trezentos mil quilômetros por segundo, isto é diferente de ser instantâneo.

Olhe apenas a luz do sol cruzando o nosso sistema solar. Luz, na forma de fótons, sai do sol em direção ao infinito e outros planetas. Esses fótons cruzam enormes distâncias muito rapidamente. Mas até mesmo com sua grande velocidade, minutos e horas passam antes que eles alcancem os planetas (ver tabela abaixo). Se a força da gravidade não pode viajar mais rápido que a velocidade da luz, então a gravidade certamente não estará cruzando o espaço instantaneamente, como Newton sugeriu.

<b>Quão rápido a Gravidade do Sol alcança os planetas?</b>		
	<b>Newton</b>	<b>Einstein</b>
Mercúrio	<i>instantaneamente</i>	<i>3,2 minutos</i>
Terra	<i>instantaneamente</i>	<i>8,3 minutos</i>
Júpiter	<i>instantaneamente</i>	<i>45 minutos</i>
Plutão	<i>instantaneamente</i>	<i>5,5 horas</i>

Estava a teoria de Newton errada, mesmo que parecesse concordar com a órbita dos planetas? Ou a conclusão de Einstein estava errada, significando que a gravidade não era como as outras forças e na realidade poderia ser transmitida mais rápido que a luz? Ou teria a gravidade que ser entendida de outra maneira? Esta contradição alertou Einstein para procurar uma nova teoria da gravitação. Ele escreveu,

*Em 1907, (...) eu percebi que todos os fenômenos naturais poderiam ser discutidos em termos da relatividade especial exceto a lei da gravitação. Eu senti um profundo desejo de entender a razão por trás disto (...)*

“Subtle is the Lord”, Abraham Pais, p. 179.

A grande contribuição de Einstein nessa empreitada veio quando ele se deu conta que o “princípio da equivalência” permitiu a ele ir além dos conceitos de inércia e peso quando explicou como a gravidade faz as coisas caírem.

## **Questão #2-Sobre o Princípio da Equivalência**

Um dos princípios mais peculiares da física é também uma das experiências mais comuns de nossa vida cotidiana. Todo dia nós derrubamos coisas ou colocamos coisas para baixo: pertences em nossos bolsos, chaves na mesa, roupas na cadeira. Nós assumimos que ao soltarmos estes objetos de nossas mãos, eles serão puxados para baixo pela gravidade. Mesmo assim, o que é peculiar sobre estes eventos é que todos esses objetos, independente de suas massas, caem exatamente com a mesma aceleração. Embora uma caixa de livros e uma caixa de penas são sentidas dramaticamente diferentes em nossas mãos, elas caem em direção ao chão exatamente com a mesma aceleração.

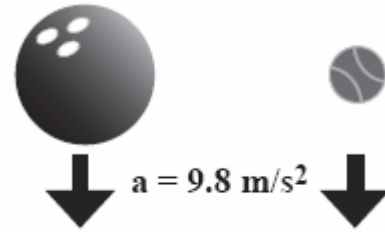
O fato que todos os corpos aceleram com a mesma taxa em um campo gravitacional independente de suas massas é um aspecto do Princípio da Equivalência. O astronauta da Apollo 15, Dave Scott, demonstrou isso soltando um martelo e uma pena na Lua (onde não há resistência do ar) e os viu tocarem a superfície ao mesmo tempo.

## Gravidade atrai mais intensamente alguma coisa?

O que exatamente está acontecendo aqui? Como podem dois objetos com massas dramaticamente diferentes cair em direção ao chão com a mesma aceleração?

A resposta para este paradoxo está no balanço incrível entre o tanto que a gravidade puxa um objeto (o peso do objeto) e o tanto que o objeto inerentemente resiste a esta força ( i.e., a inércia do objeto).

Pegue dois objetos com massas significativamente diferentes, como uma bola de boliche e uma bola de . A bola de boliche (5 kg) pesa aproximadamente 100 vezes mais que a bola de tennis (0,5 kg). O peso de cada objeto é diferente porque a massa de cada objeto é diferente. A força da gravidade em cada bola é proporcional à quantidade de massa que cada bola tem. Isso é uma suposição básica na teoria de Newton.



Naturalmente, poderia ser razoável assumir que se a força da gravidade fosse diferente para cada bola, então as bolas deveriam cair com acelerações diferentes. Mas isto não é o que acontece (ao menos, não no vácuo ou num ambiente sem resistência do ar). Quando a bola de boliche e a bola de são liberadas acima da Terra ao mesmo tempo, elas aceleram para o chão com a mesma taxa. Como?

Newton respondeu essa questão postulando que a bola de boliche e a de resistem à aceleração com intensidades diferentes. A bola de boliche, tendo uma massa maior, tem uma maior resistência à aceleração. A bola de , tendo uma massa menor, tem uma resistência menor à aceleração gravitacional. Então, mesmo que a gravidade atraia mais fortemente a bola de boliche que a bola de , a bola de boliche tem uma resistência maior a essa atração. O resultado é que a bola de boliche acelera para o chão à  $9,8 \text{ m/s}^2$  -- exatamente a mesma taxa da bola de .

Em todo objeto, a força da gravidade e a inércia do objeto estão em equilíbrio uma com a outra, significando que todos objetos aceleram com a mesma taxa independente de suas massas.

Essa é uma explicação aceitável até certo ponto. Entretanto, não há explicação de **porque** isso é verdade. Porque essas duas coisas estão em equilíbrio em todos os objetos no universo?

A resposta de Einstein para esta questão estava no desejo de saber se haveria alguma razão mais profunda para o fato de todos os objetos caírem com a mesma aceleração em um campo gravitacional. Poderia haver uma explanação alternativa para este notável comportamento? O que é a gravidade?

A solução de Einstein é tão contra-intuitiva que requer atenção redobrada e um pouco de tempo para sentirmos confortável com ela. A solução de Einstein é o segundo aspecto do Princípio da Equivalência: que nossa experiência com gravidade é equivalente a nossa experiência com aceleração. Conseqüentemente, gravidade é, simplesmente, o espaço-tempo curvo.

*Queda Livre = Flutuando no Espaço*

Voltando à bola de boliche e a bola de tênis. Em vez de simplesmente deixá-las caírem no chão, imagine-se entrando em um elevador e repetindo este teste. O ponto especial sobre este elevador é que assim que você entrar e as portas fecharem, o elevador começa a cair em direção ao chão. Depois que você se recuperar do susto, você notará algo surpreendente: a bola de boliche e a bola de tênis estarão flutuando bem na sua frente. De fato, você também estará flutuando dentro do elevador, e como você, tudo cai em direção ao chão.

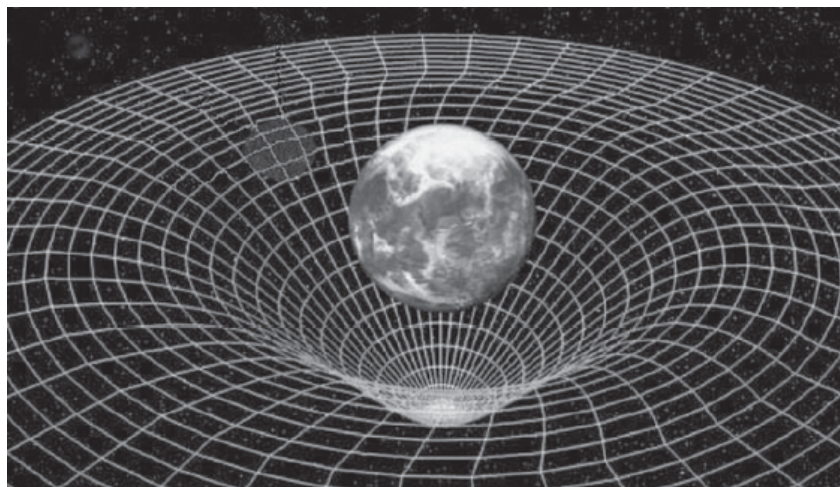


O que você está evidenciando é a queda livre. O que é espantoso é que esta experiência é idêntica à experiência de astronautas no espaço. Quando um deles está flutuando no espaço, longe de qualquer campo gravitacional, a experiência não é diferente de uma queda livre na Terra no seu campo gravitacional. Quando Einstein se deu conta disso, ele disse ter tido a sua idéia mais genial.

Nesta nova visão, é a curvatura do espaço-tempo que direciona nosso movimento. Enquanto a gravidade pode ainda ser considerada uma força, ela pode também ser entendida como uma geometria do espaço-tempo. Quando esta geometria é curvada, como ela é ao redor de todas as massas, objetos caem no chão. Os espaços aparentemente vazios ao nosso redor não são tão impotentes; é a curvatura do espaço-tempo que nos mantém no chão. É como se o palco, sobre o qual está desenvolvendo uma peça, também atuasse nesta mesma peça.

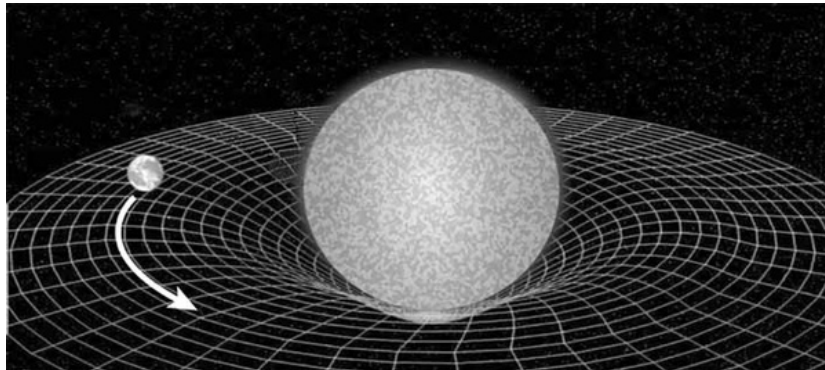
## B. Uma nova realidade: espaço-tempo curvo

Em 1916, Einstein presenteou o mundo com esta nova realidade – a Teoria da Relatividade Geral. Nesta teoria, o espaço não é um vácuo, mas uma estrutura invisível chamada espaço-tempo. O espaço não é simplesmente uma grade tridimensional onde matéria, luz e energia movem-se. Ele é uma estrutura quadridimensional chamada espaço-tempo cuja forma é curvada e torcida pela presença e movimento de massa e energia.



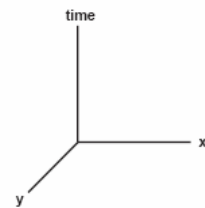
O espaço-tempo é curvado ao redor de qualquer massa. A presença de planetas, estrelas e galáxias entortam a estrutura do espaço-tempo de maneira similar à uma bola de boliche curvando um pano elástico. A massa da bola estica o tecido criando um poço, o qual decresce gradualmente quando nos afastamos da massa.

Quando uma massa menor passa próximo de uma massa maior, ela é acelerada em direção à massa maior porque o espaço-tempo é curvado em direção a ela. A pequena massa não é “atraída” pela massa maior por qualquer força. A massa menor simplesmente segue a estrutura do espaço-tempo curvado próximo à massa maior. Por exemplo, o massivo Sol curva o espaço-tempo ao redor dele, a curvatura alcança as bordas do sistema solar e além. Os planetas orbitando o Sol estão seguindo a curvatura do espaço-tempo causada pelo Sol.

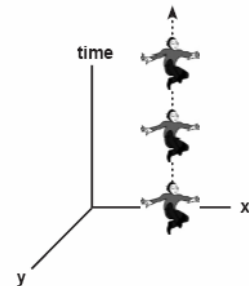


Aqui na Terra, qualquer corpo cai em linha reta por causa da curvatura do espaço-tempo. Entretanto, para entendermos como isto acontece, precisaremos de uma analogia diferente daquela do tecido elástico com um poço: precisamos de um desenho 3D e uma mão firme.

Em nosso gráfico de três eixos, nós expomos três dimensões – mas não as usuais dimensões  $x$ ,  $y$  e  $z$ . Este gráfico mostra o movimento espacial apenas nas direções  $x$  e  $y$ , ou no plano horizontal. O eixo vertical mostra a passagem do tempo. De fato, teríamos de fazer um gráfico quadridimensional, um feito talvez a ser atingido apenas por artista como M. C. Escher.

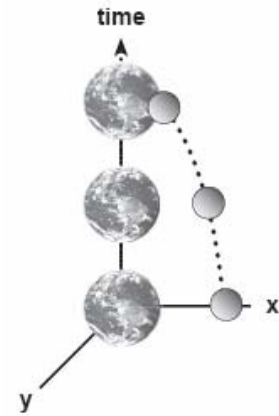


Neste gráfico, desenhamos o movimento de objetos como em qualquer outro gráfico tridimensional. Cada ponto é representado usando três coordenadas:  $x$ ,  $y$  e o tempo. O que não é usual neste gráfico é que mesmo quando alguma coisa aparenta não estar em movimento para nós, ela está em movimento no gráfico! Porque mesmo quando nós estamos parados, o tempo está passando. Então mesmo quando nós estamos parados, nós estamos nos movimentando através do tempo.



Em nosso gráfico o tempo traça uma linha reta vertical. Um exemplo deste movimento vertical é o movimento da Terra (relativo a um referencial terrestre). A Terra está na interseção dos eixos  $x$  e  $y$  e move-se para cima ao decorrer do tempo. Agora considere o trajeto de um objeto na Terra. Se nós colocássemos uma bola no lado de cima da Terra, ela também traçaria uma linha reta vertical em nosso gráfico ao decorrer do tempo.

Agora o que acontece quando a bola é solta? De nosso ponto de vista na Terra, ela parece cair. Mas no gráfico, ela faz algo mais estranho. Em vez de seguir em linha reta para cima, ela curva-se em direção à Terra ao decorrer do tempo. Se você deixar a bola cair do topo de um edifício alto, depois de um segundo ela deveria estar mais perto da Terra e depois de dois segundos ela deveria interceptar a Terra porque as duas movem-se através do tempo. Porque a trajetória da bola em nosso gráfico de espaço-tempo curva-se em direção à Terra? Não é necessariamente a força da gravidade, Einstein alertou. Isto é a curvatura do espaço-tempo ao redor da Terra. Como você pode ver no gráfico, o espaço-tempo próximo da Terra é aparentemente curvado na direção da Terra. Como os objetos viajam em queda-livre ao longo da dimensão tempo, eles seguem a curvatura do espaço-tempo ao redor da Terra.



Objetos caem na Terra porque eles estão seguindo a curvatura do espaço-tempo criada pela massa da Terra. Nós normalmente não vemos isso, porque nós estamos presos na nossa concepção de espaço de três dimensões. Mas quando visto através das lentes deste gráfico, o espaço-tempo curvo é tão óbvio quanto cair de um cavalo.

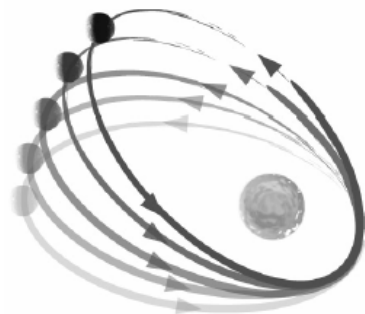
### C. Os Testes do Século Passado

A Física mundial e o mundo em geral ficaram chocados pelas afirmações de Einstein. Ele afirmou estar “zufrieden aber ziemlich kaputt” (“contente, mas esgotado”), depois de seus dez anos de esforço para encontrar uma nova teoria da gravidade. Para muitos, era incompreensível que a força gravitacional que nós conhecíamos tão bem poderia ser descrita alternativamente como a geometria de um espaço-tempo deformado pela presença de matéria. A única maneira de aceitar a teoria de Einstein de um espaço-tempo curvo era testá-la. Como em toda ciência, somente experimentos com observações e medidas reais poderiam convencer as pessoas de que Einstein estava certo.

Felizmente, algumas maneiras de testar sua teoria se revelaram logo após as revelações de Einstein. De fato, Einstein conduziu a primeira dessas experiências dias antes da publicação de sua teoria. Esta experiência foi sobre a não explicada precessão extra na órbita de Mercúrio, um mistério que tinha cinquenta anos de idade.

#### 1) A precessão anômala da órbita de Mercúrio

Nos primeiros dias da astronomia, mapas do sistema solar descreviam as órbitas dos planetas como círculos perfeitos. Depois, o astrônomo Johannes Kepler notou que estas órbitas não eram círculos, mas elipses. Mais interessante ainda, foi observado que a órbita elíptica de Mercúrio estava precessionando ligeiramente, ou seja, Mercúrio não seguia as mesmas trajetórias cada vez que orbitava o sol; sua esta órbita estava girando com uma minúscula taxa de 574 segundos de um arco por século (1/6 de um grau).



A precessão da órbita de Mercúrio não era um fenômeno usual. Muitos planetas no sistema solar precessam enquanto viajam ao redor do Sol. O que estava confuso sobre a precessão de Mercúrio era que a teoria da Gravidade de Newton não conseguia explicá-



la por completo. Quando Simon Newcomb usou as equações de Newton para calcular o efeito que todos os planetas tinham em Mercúrio, as Equações de Newton resultaram em uma taxa com 43 segundos de um arco por século a menos que a taxa observada. Onde estavam os restantes 43 segundos de um arco? Alguns astrônomos tinham proposto que um planeta menor, ainda não identificado, denominado “Vulcano”, estava orbitado dentro de Mercúrio e criando esta precessão anômala. Outros imaginaram que ela estava relacionada poeira planetária ou com um possível achatamento do Sol.

Entretanto, quando em 1915 Einstein aplicou suas equações a este mistério, seus resultados concordaram precisamente as observações sobre a precessão de Mercúrio e sua Teoria da Relatividade Geral teve sua primeira grande vitória.

## 2) Deflexão da luz

Outra Grande Vitória aconteceu logo. Em 1919, o astrônomo Britânico Sir Arthur Eddington pôs-se a testar uma das afirmações centrais de Einstein – que toda matéria e energia em movimento no universo deviam seguir as curvas do espaço-tempo. Isto inclui raios de luz que emergem de estrelas distantes e percorrem o universo para chegarem até a nossa vista. Quando a luz passa perto de um corpo muito massivo, como uma galáxia ou como o Sol, sua trajetória deflexiona ligeiramente para seguir a curvatura do espaço-tempo ao redor do corpo massivo.

Isto significa que se uma estrela é escondida de nós por um corpo massivo, como o sol ou uma galáxia, seria possível ainda ver essa estrela porque sua luz curva-se ao redor desta massa, podendo alcançar a Terra.

Eddington, com ajuda do astrônomo real Frank Dyson, organizaram expedições simultaneamente na América do Sul (Sobral no Brasil) e no Oeste da África para observar e fotografar um eclipse solar. Bloqueando a luz intensa do Sol, o eclipse solar deu a Eddington a oportunidade de ver estrelas que estavam perto da borda do Sol. De acordo com a teoria, estas estrelas apareciam em um local ligeiramente deslocado do usual devido a massa do Sol estar curvando o espaço-tempo.

Eddington provou isso fotografando a mesma área do céu após o eclipse e comparando os locais das estrelas. Quando o Sol estava entre a Terra e as estrelas distantes, o espaço-tempo tinha deflexionado a luz estelar. Isto significa que a estrela aparentava ter se afastado de sua posição original quando o Sol estava lá.

Desde então, este experimento tem sido repetido com mais e mais precisão usando raios de luz e ondas de rádio, sempre confirmando a predição de Einstein. Entre 1969 e 1975, vinte medidas foram feitas usando rádio-telescópios para medir a deflexão das ondas de rádio em um quasar distante. Essas medidas concordaram com as predições da teoria da relatividade geral com 1 % de erro.

## 3) Desvio para o vermelho gravitacional

O desvio para o vermelho (*redshift*) gravitacional e o atraso temporal de Shapiro, são dois outros aspectos da teoria de Einstein que têm sido muito bem. No primeiro caso, é predito que a luz perde energia quando emerge de um campo gravitacional. Quando a luz perde energia, seu comprimento de onda torna-se maior e a cor da luz desloca-se para o vermelho. Em 1960, os físicos Robert Pound e Glen Redka estavam detectando o desvio para o vermelho de raios gama de alta energia em uma torre de elevador na Universidade de Harvard. Suas medidas concordaram com as predições de Einstein com um erro de 10 %.

O experimento “Gravity Probe A” (GP-A), também conhecido como teste de Vessot-Levine, fez uma medida muito mais acurada do desvio para o vermelho gravitacional. Este experimento consistiu em um relógio atômico dentro de um foguete que voou em um arco alcançando uma altitude de 10.000 km acima da Terra. Como previsto, o relógio corre um pouco mais rápido em um campo gravitacional mais fraco afastado da Terra do que na superfície da Terra, um efeito análogo ao desvio para o vermelho gravitacional da luz. Depois de corrigir o fato de que relógios em movimento também correm mais devagar em relação a aqueles parados no chão, o resultado do GP-A concordou com a relatividade geral com um erro de 0,01%.

#### 4) *O atraso temporal de Shapiro*

No segundo caso, Irwin Shapiro predisse que ondas de luz (ou qualquer onda eletromagnética) deveriam ser atrasadas quando passassem através de um campo gravitacional. As ondas teriam que seguir as curvas no espaço-tempo, tornando suas trajetórias mais longas do que o esperado. Isto criaria um atraso no tempo de transmissão esperado das ondas eletromagnéticas. Desde 1964, cientistas têm usado rádio-telescópios para verificarem esta previsão de Shapiro com um erro de 0,5 %.

### D. O que mais precisa ser feito?

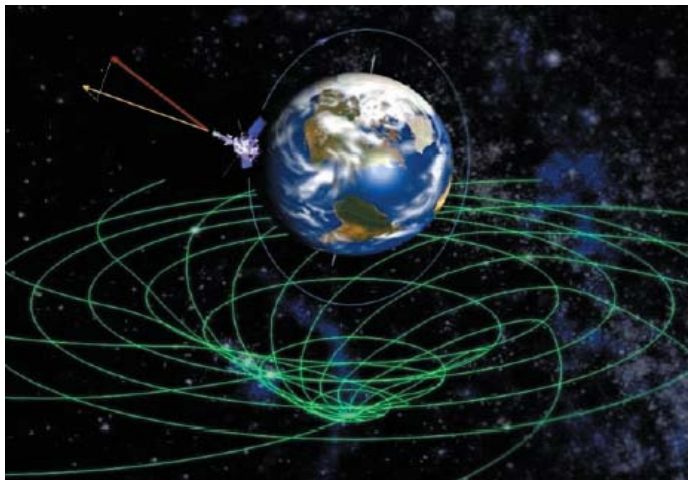
Logo após a publicação da Teoria da Relatividade Geral, Einstein tem passado em todos os testes. Cada experimento tem concordado com suas previsões e confirmado suas afirmações de que o universo não é regido pela “força da gravidade” mas pela curvatura do espaço-tempo. O que mais precisa ser feito?

#### 1) *Procurando por Ondas Gravitacionais*

De acordo com a teoria de Einstein, a força da gravidade não viaja pelo espaço instantaneamente. Ela viaja na velocidade da luz na forma de ondas gravitacionais. Essas ondas gravitacionais deveriam ser detectadas observando um evento gravitacional massivo, como a explosão de uma supernova ou o colapso de uma estrela com um buraco negro. Até o momento, não temos uma comprovação direta da existência destas ondas gravitacionais.

#### 2) *O Arrastamento do Espaço-Tempo*

Em 1918, poucos anos depois de Einstein desenvolver sua teoria do espaço-tempo curvo, os físicos austríacos Joseph Lense e Hans Thirring predisseram que uma massa poderia deformar o espaço-tempo de uma segunda maneira. Eles propuseram que a rotação de planetas e estrelas ou qualquer massa em rotação arrasta consigo a estrutura do espaço-tempo ao seu redor, torcendo-a. Em termos mais técnicos, uma massa em rotação produz uma corrente gravitomagnética, parecida com



uma corrente elétrica. Enquanto a massa rotaciona, essa corrente distorce o espaço ao redor, bem como qualquer objeto neste espaço. Lense e Thirring predizeram que este efeito seria extremamente pequeno, e tornar-se ainda menor nas regiões mais afastadas da massa em rotação. Entretanto, este efeito ocorreria ao redor de qualquer massa em rotação, seja um planeta, uma estrela ou uma galáxia.

O arrastamento do espaço-tempo nunca foi visto no universo com qualquer grau de certeza. No momento (2005-2008), um experimento denominado “Gravity Probe B” (GP-B) está em andamento e poderá confirmar ou não esta predição, a única das predições presenciadas por Einstein sem que ele tenha visto sua confirmação. Além disto, este experimento GP-B fornecerá a medida mais precisa da curvatura do espaço-tempo ao redor da Terra do que qualquer outra já feita.

Tradução e adaptação de Jorge e Esmerindo Bernardes a partir de materiais de domínio público produzidos pela NASA.