

---

# Comprovação da Relatividade

---

Gabriela Aydos Marcondes

---

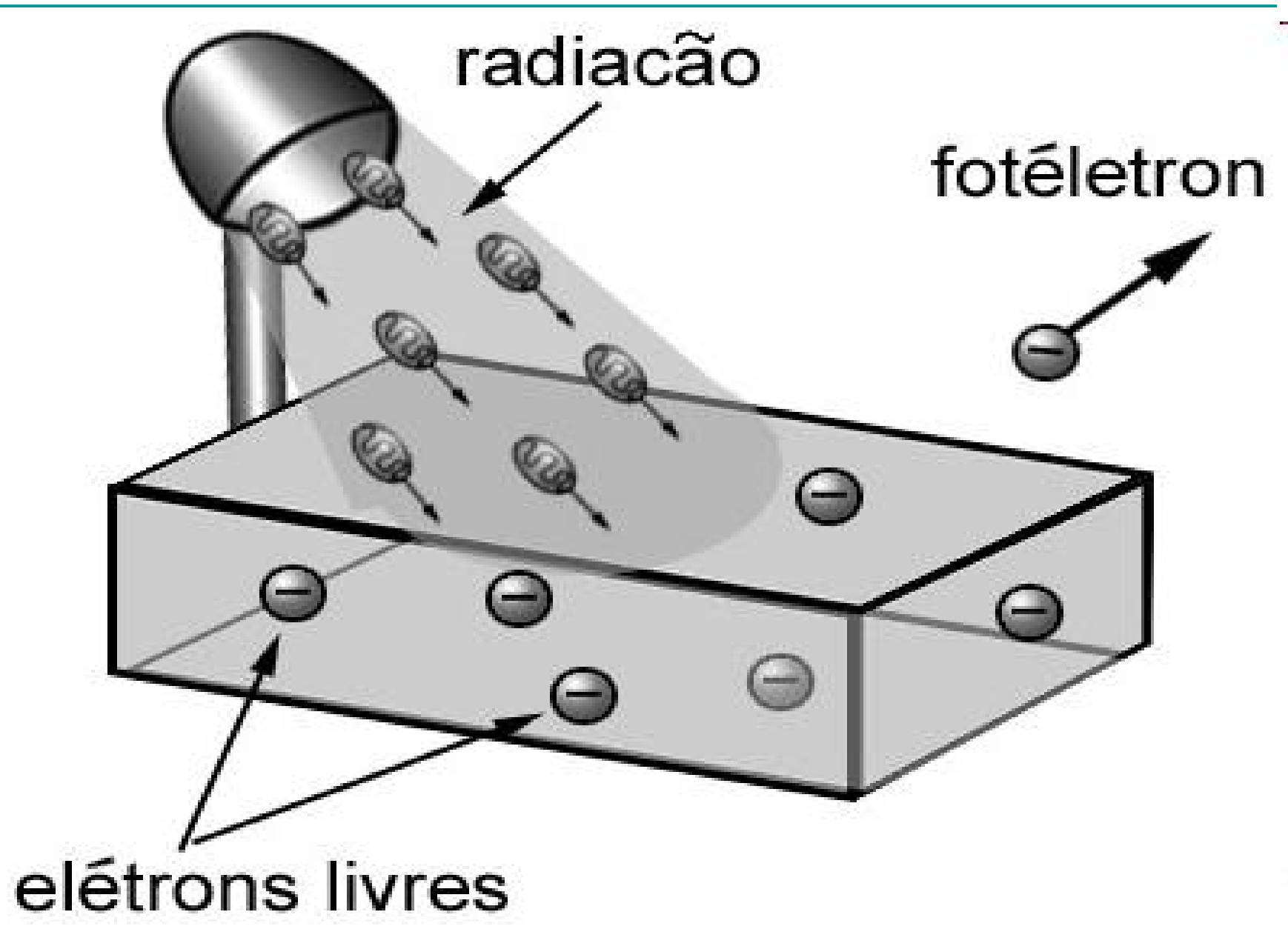
# RELATIVIDADE RESTRITA E O “ANO MILAGROSO”

- n Correr ao lado de um feixe de luz;
  - n Contradição entre o modelo newtoniano (em que velocidade poderiam ser somadas e subtraídas) e o modelo maxwelliano (em que a velocidade da luz era uma constante).
  - n O Bonde que anda à velocidade da luz.
  - n O artigo foi publicado no volume 17 dos Annalen der Physik, de setembro de 1905.

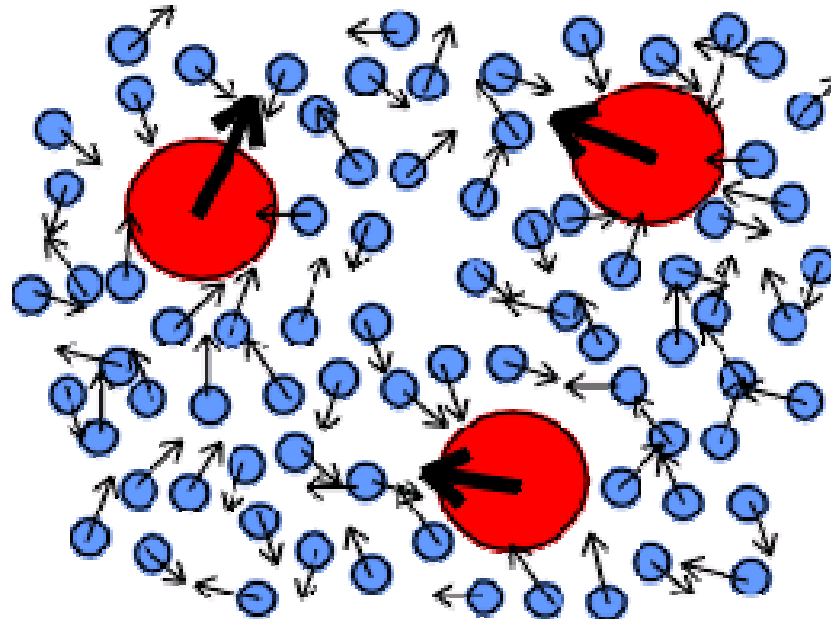
- 
- n De forma bem ambiciosa, Einstein começou o artigo afirmando que suas teorias funcionavam não apenas para a luz, como para o próprio universo. Notadamente, derivava todo o trabalho de dois postulados simples aplicados a referenciais inerciais (isto é, objetos que se movem com velocidade constante entre si):
    - n As leis da física são as mesmas em todos os referenciais de inércia.
    - n a velocidade da luz é uma constante em todos os referenciais de inércia.
  - n Esses dois princípios, que parecem simples, representam os insights mais profundos sobre a natureza do universo desde a obra de Newton. Deles é possível derivar um quadro totalmente novo de espaço e tempo.
-

- 
- n No final de 1905, Einstein foi em frente e deu o próximo passo decisivo. Escreveu um pequeno artigo, quase uma nota de rodapé, que iria mudar a história do mundo:
    - n  $E = mc^2$ , a mais célebre equação de todos os tempos.

- 
- n A mente inquieta de Einstein atacou mais um problema naquele ano: o efeito fotoelétrico. Procurou explicar o efeito fotoelétrico usando a nova teoria quântica descoberta recentemente por Max Plank.
    - n Einstein raciocinou que, se a energia ocorria em pacotes descontínuos, a própria luz devia ser quantizada. (o pacote de “quanta luminosos” de einsteins foi mais tarde batizado de “fóton”, uma partícula de luz.) Concluiu ainda que se a energia do fóton era proporcional à sua frequência, a energia do elétron expulso também deveria ser proporcional à sua frequência, contrariando a física clássica.
    - n O novo modelo de Einstein, uma teoria quântica da luz, fazia uma previsão direta experimentalmente testável. Aumentando-se a frequência do raio de luz recebido, deveria ser possível medir um aumento ligeiro da voltagem gerada no metal.
-



- n Ainda em outro artigo escrito durante o “ano milagroso” de 1905, Einstein abordou a questão do átomo.
- n Utilizou o movimento browniano (movimentos minúsculos e aleatórios de partículas pequenas em um líquido).
- n A teoria atômica, se verdadeira, deveria ser capaz de calcular as dimensões físicas dos átomos pela análise do movimento browniano.



- 
- n Assim, 1905 foi sem dúvida um ano incrível na história da ciência. Einstein ecerrara o ano de 1905 formulando a teoria dos fótons, fornecendo indícios da existência de átomos e derrubando o arcabouço da física newtoniana, cada um desses feitos dignos de aclamação internacional.




---

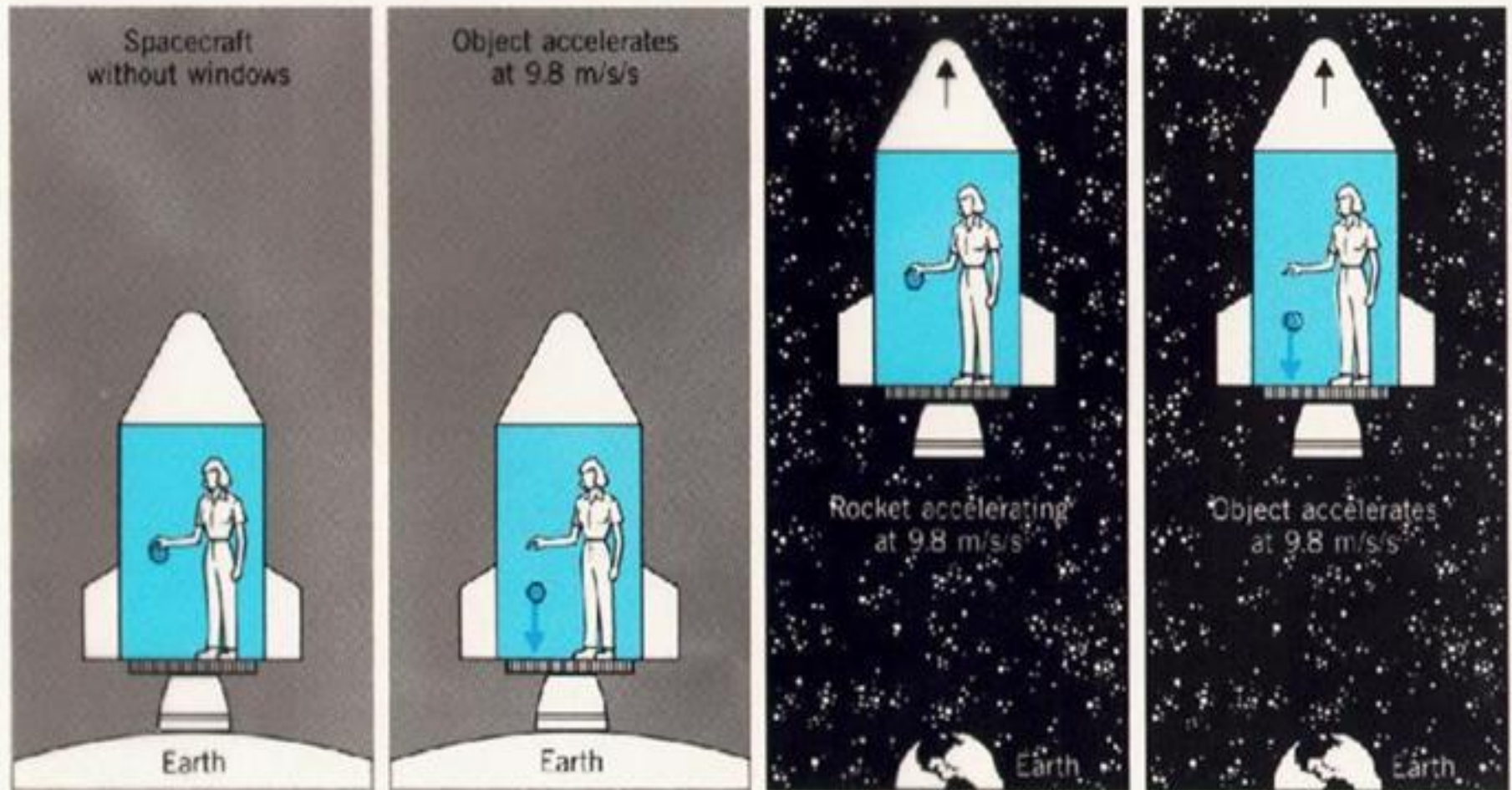
# RELATIVIDADE GERAL

- n Einstein ainda não estava satisfeito;
- n Precebeu que havia pelo menos dois furos gritantes na teoria da relatividade:
  - n Primeiro, ela se baseava inteiramente em movimentos inerciais. A teoria da relatividade de 1905 não conseguia explicar sequer a aceleração mais comum encontrada na terra.
  - n Segundo, a teoria nada dizia sobre a gravidade. Apesar da pretensão ambiciosa de ser uma simetria universal da natureza, aplicável a todos os setores do universo, a gravidade parecia além de seu alcance.
- n As deficiências da relatividade eram óbvias.
  - n Velocidade da luz era a velocidade máxima do universo X mecânica Newtoniana.
- n Einstein, portanto, precisava reformular totalmente as equações de Newton a fim de incorporar a velocidade da luz.

- 
- n Em suma, ele percebeu a imensidão do problema de generalizar sua teoria da relatividade para incluir acelerações e gravidade. Começou a chamar sua teoria de 1905 de “teoria da relatividade restrita”, para diferenciá-la da “teoria da relatividade geral”.
  
  - n O insight básico para a nova teoria da relatividade ocorreu em quanto Einstein ainda se ocupava dos pedidos de patentes, como um funcionário subalterno, em 1907.
-

- 
- n Num instante, Einstein percebeu que se tivesse caído da cadeira, ficaria momentaneamente sem peso  em queda livre o efeito da gravidade seria perfeitamente cancelado por sua aceleração, fazendo com que parecesse sem peso.

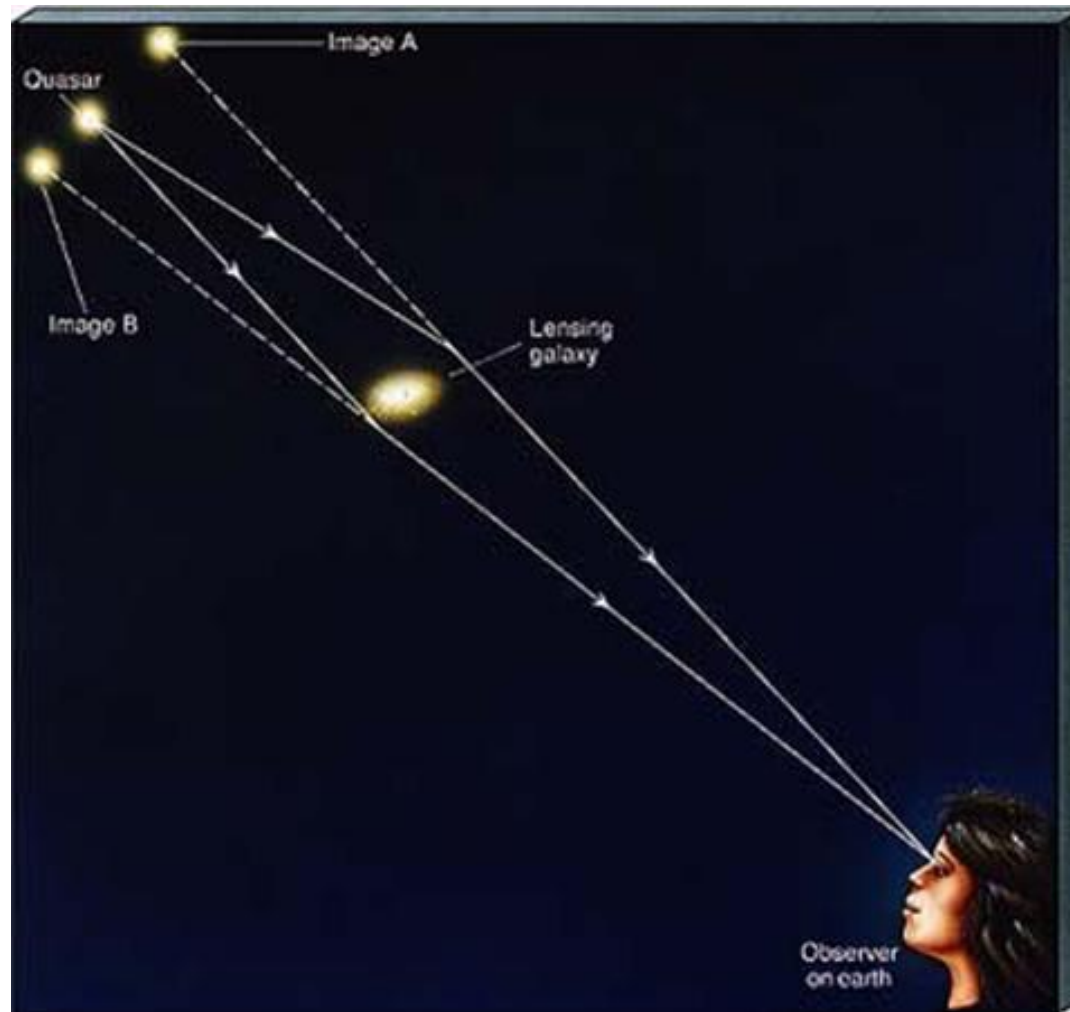
- 
- n Trata-se do princípio da equivalência, pelo qual todas as massas caem à mesma velocidade sob a gravidade ( mais precisamente, a massa inercial é igual à massa gravitacional.)
  
  - n A partir do princípio da equivalência Einstein concluiu que:
    - n 1) Todas as interações (inclusive a gravitacional) se processam com velocidade máxima igual à da luz no vácuo. Não existe ação instantânea à distância. (Este princípio é também da relatividade restrita).
    - n 2) Princípio da equivalência: não é possível distinguir entre um campo gravitacional e um referencial acelerado. Em ambos os casos, devemos observar os mesmos fenômenos físicos. A experiência de um corpo em queda livre num campo gravitacional constante é equivalente à experiência feita por um outro observador em um referencial cuja aceleração seja idêntica.
-



The principle of equivalence.

- 
- n 1911 – Einstein teve outro “insight” com base no “Princípio de Fermat” da ótica: “a luz viaja entre dois pontos pela trajetória que minimiza o tempo de viagem”.
    - n Einstein concluí que o espaço não é Euclidiano.
    - n A presença da massa curva o espaço.
  - n Newton, em seu livro Optick, já se perguntava se a gravidade poderia ou não influenciar a luz das estrelas, mas dada a tecnologia da época ele não pôde dar a resposta.
  - n Mas agora, decorridos mais 200 anos, Einstein retornou essa pergunta. Imagine uma lanterna sendo acesa dentro de um foguete que era acelerando no espaço. Como o foguete está acelerando para cima, o raio de luz pende para baixo. Agora invoque o princípio da equivalência. Como a física dentro do foguete deve ser indistinguível da física na terra, segue-se que a gravidade deve também curvar a luz. Em pouco passos breves, Einstein foi levado a um fenômeno físico novo: a curvatura da luz devido à gravidade. Percebeu imediatamente que tal efeito era calculável.
-

- n O desvio da luz ao passar por um campo gravitacional produz o efeito conhecido como “lentes gravitacionais”.



- 
- n O maior campo gravitacional no sistema solar é gerado pelo Sol. Portanto Einstein se perguntou se o sol era suficiente para curvar a luz de estrelas distantes.

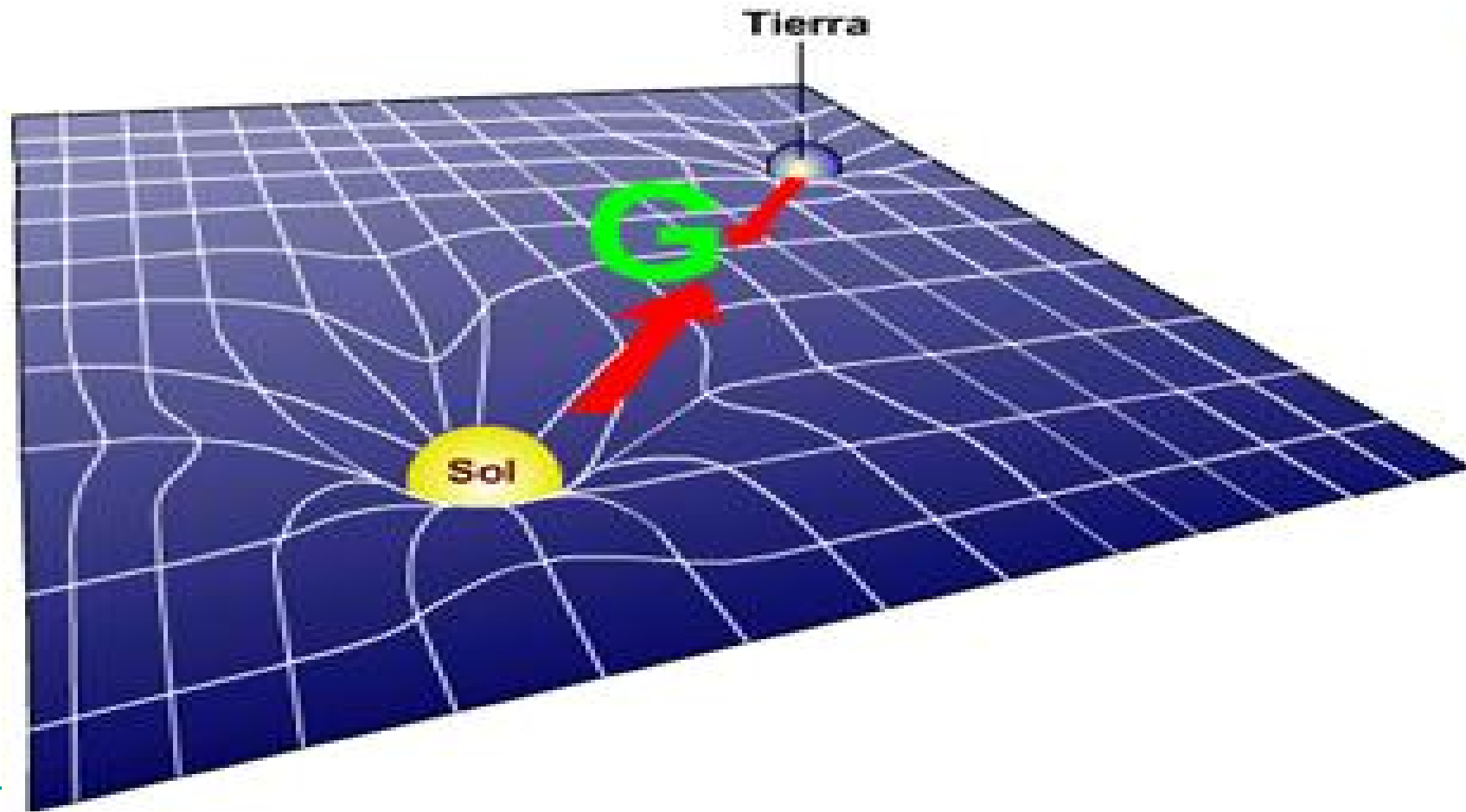


- n Será comprovado com o Eclipse de Sobral.
-



- 
- n Por volta de 1912, ele começou a perceber que precisava reformular nossa compreensão de espaço e tempo.
  - n Percebeu que a geometria da terra é curva. Uma vez que percebemos que o espaço pode ser curvo, uma imagem nova e surpreendente vem à tona.
    - n Imagine uma pedra pesada colocada sobre uma cama. Claro que a pedra afundará a cama. Agora jogue uma bola de gude sobre a cama. Ela não se moverá em uma linha reta, mas numa linha curva ao redor da pedra.
    - n Agora substitua a pedra pelo Sol, a bola de gude pela Terra e a cama de pelo espaço tempo. Newton diria que um força invisível chamada gravidade atrai a Terra ao redor do Sol. Einstein responderia que não existe atração gravitacional.

- n Com essa imagem Einstein pôde explicar por que qualquer perturbação no Sol levaria 8 minutos para atingir a terra.
- n Naturalmente essa curvatura é invisível e, à distância, o quadro de Newton parece correto.



- 
- n Na busca das equações finais, Einstein concentrou-se em três experimentos básicos que poderiam comprovar suas idéias sobre o espaço curvo e a gravidade: a curvatura da luz estrelas durante um eclipse, o desvio para o vermelho e o periélio de Mercúrio.

---

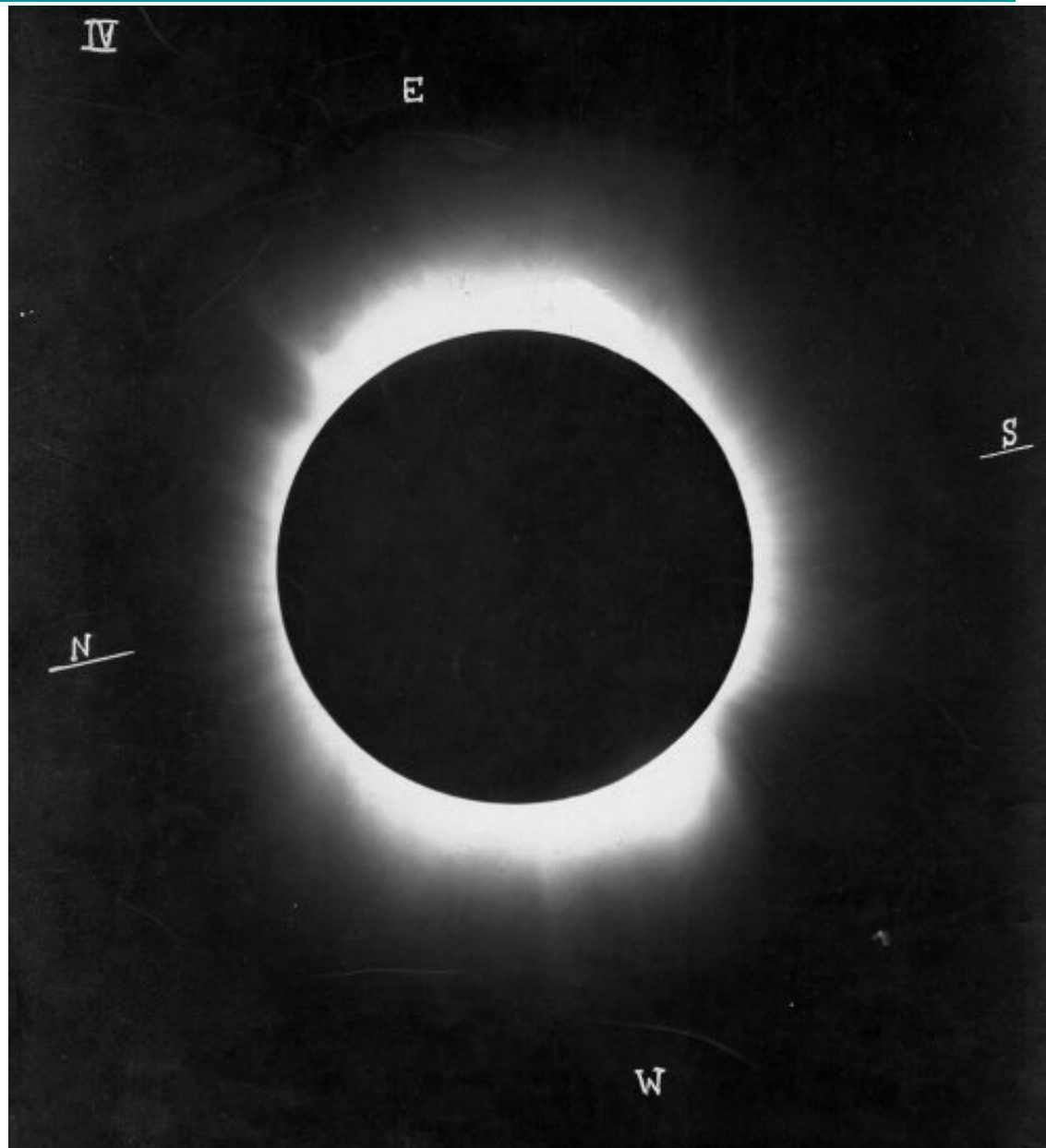
# AS COMPROVAÇÕES!

---

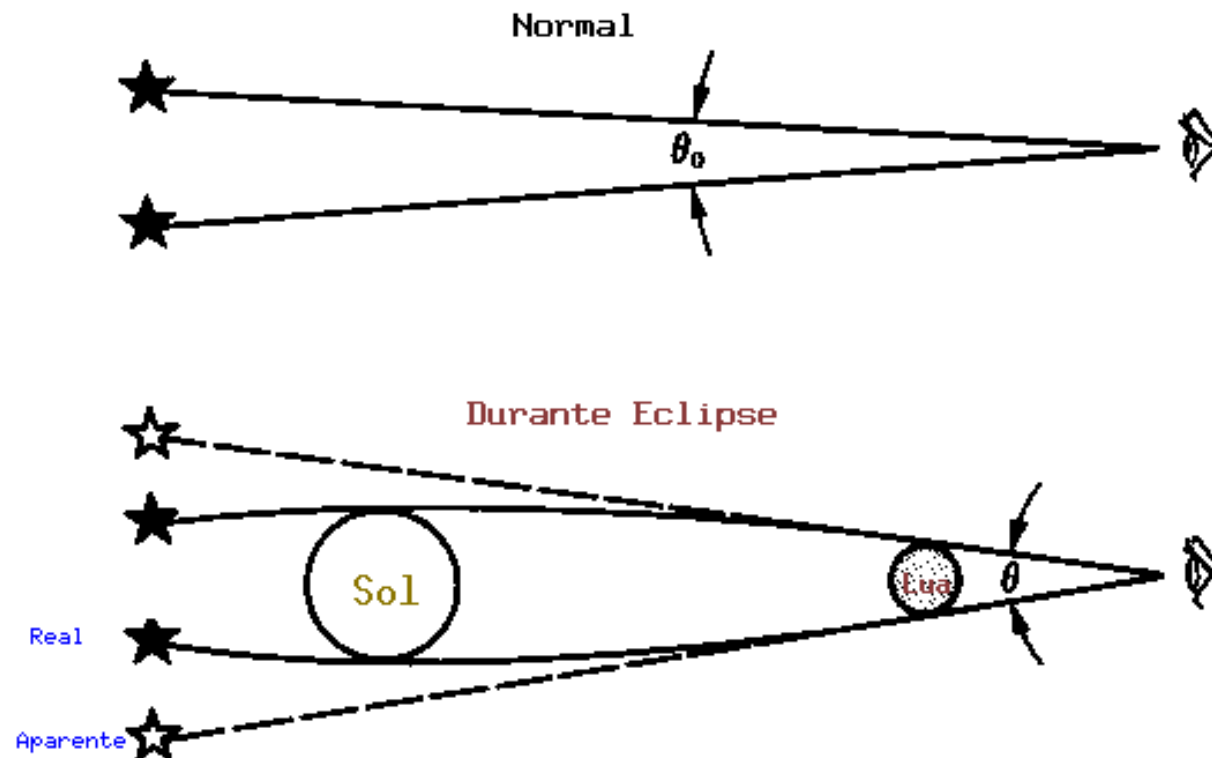
# O ECLIPSE DE SOBRAL

- n A previsão da relatividade geral de que um raio de luz é desviado ao passar por um corpo massivo foi confirmada em 1919 por uma expedição dupla chefiada pelo astrônomo inglês Sir Arthur Stanley Eddington (1882-1944) a Sobral, no Ceará, e à ilha de Príncipe, na África, para medir a posição das estrelas durante um eclipse total do Sol de 29 de maio de 1919, na constelação do Touro, com as 13 estrelas brilhantes das Hyades no campo.

A expedição ao Brasil foi coordenada pelos ingleses Andrew Claude de la Cherois Crommelin (1865-1939) e Charles Rundle Davidson (1875-1970) e retornou com 7 fotografias boas.



- n Medindo a distância entre as estrelas à esquerda do Sol e as estrelas à direita do Sol durante o eclipse, e comparando com medidas das mesmas estrelas obtidas 2 meses mais tarde, quando elas eram visíveis à noite, Eddington encontrou que as estrelas pareciam mais distantes umas das outras durante o eclipse.



---

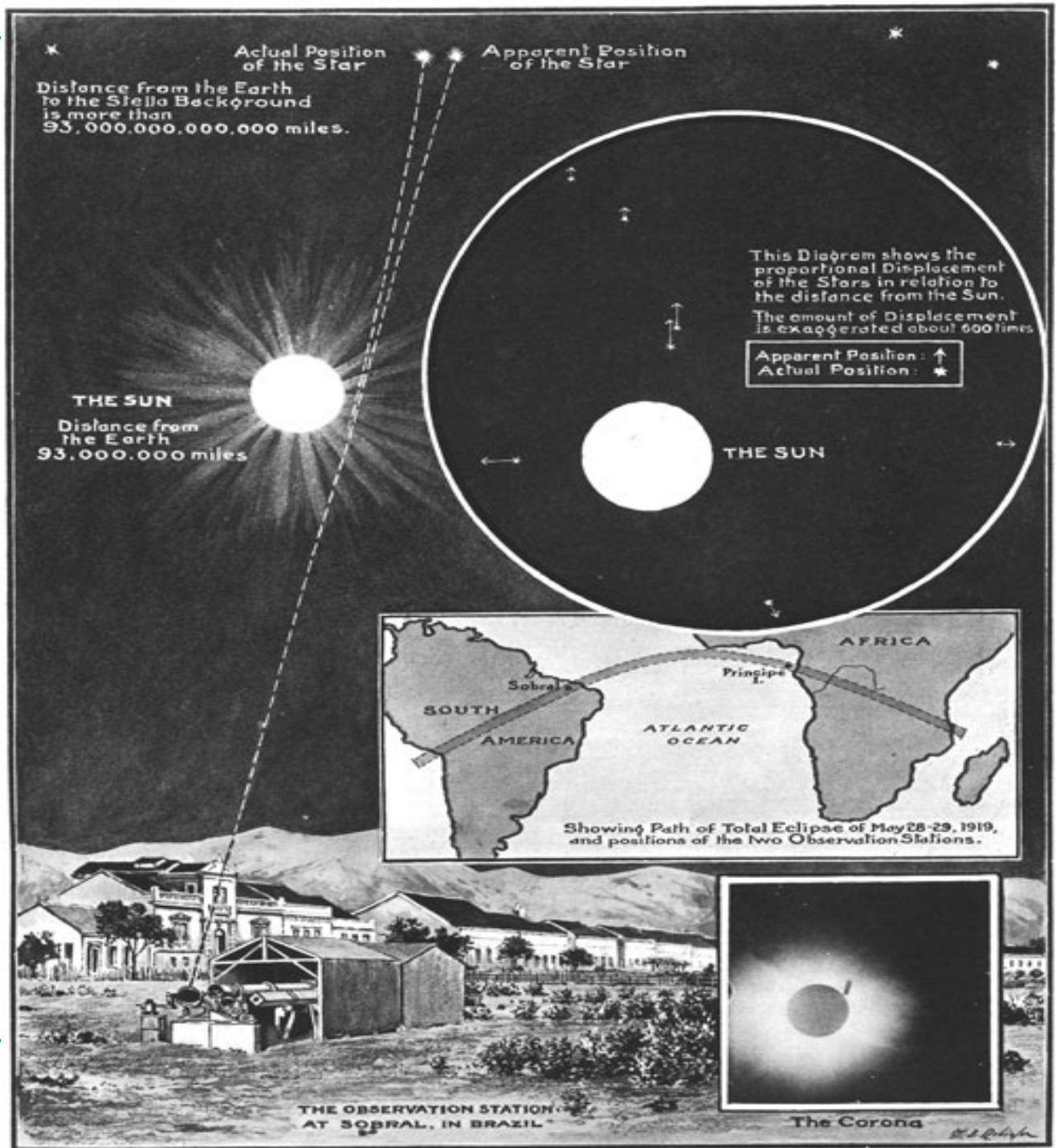
n Isto implica que os raios de luz destas estrelas foram desviados pelo campo gravitacional do Sol, como previsto por Einstein.

n O desvio previsto era de

$$\theta - \theta_0 = \frac{1,7 \text{ segundos de arco}}{\Delta},$$

a uma distância de  $\Delta$  raios do Sol do centro do Sol. As duas expedições obtiveram  $1,98 \pm 0,12''$  (interno)  $\pm 0,30''$  (sistematico) e  $1,61 \pm 0,30''$  (interno), confirmando a teoria. A única razão de realizar estas medidas durante um eclipse é que durante um eclipse podemos enxergar e medir as estrelas próximas ao disco do Sol.





---

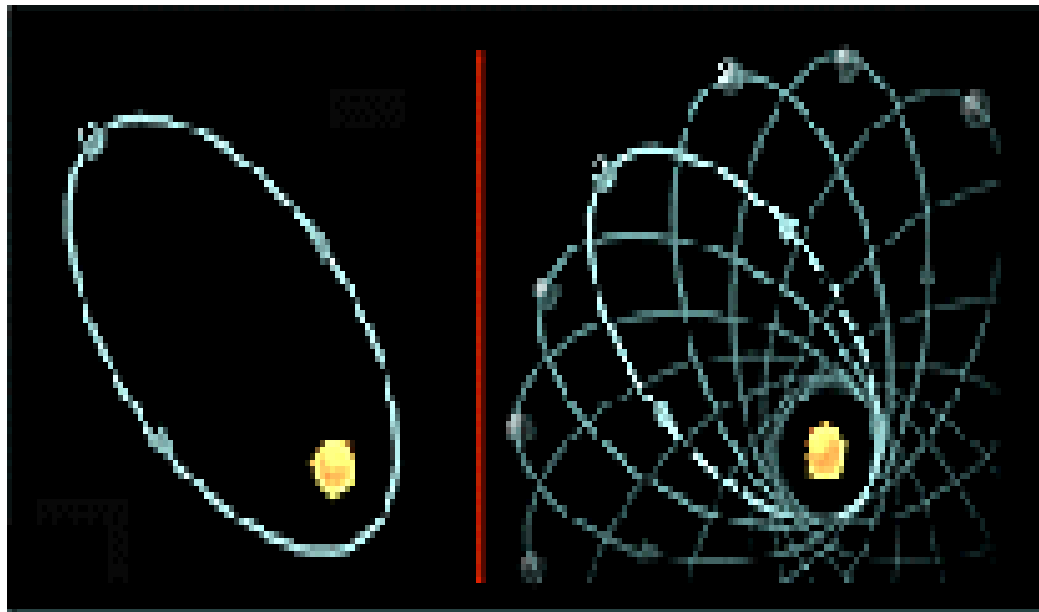
# O DESVIO PARA O VERMELHO

- n Einstein calculou como a gravidade afetaria a frequência de um raio de luz. Se um foguete é lançado da terra ao espaço, a gravidade da terra age como um força contrária, puxando o foguete de volta. A luta do foguete contra a atração da gravidade acarreta uma perda de energia. De forma semelhante, Einstein raciocinou que a luz emitida pelo sol também sofreria a ação contrária da gravidade, fazendo com que o raio luminoso perdesse energia. Ele não muda a velocidade, mas a frequência da onda diminui à medida que o raio de luz perde energia na luta contra a gravidade do sol. O desvio gravitacional para o vermelho, porém, é um efeito extremamente pequeno, e Einstein não tinha esperança de que viesse a ser testado tão cedo. (na verdade, mais quatro décadas decorreriam até que se conseguisse ver em laboratório o desvio gravitacional para o vermelho.)
-

---

# O TRÂNSITO DE MERCÚRIO

- n Einstein tentou solucionar um problema antigo: por que a órbita de mercúrio oscila e se desvia ligeiramente das leis de Newton?



- 
- n Normalmente, os planetas perfazem elipses perfeitas em seus deslocamentos ao redor do sol, com exceção de distúrbios ligeiros causados pela gravidade dos planetas próximos, resultando numa trajetória semelhante à pétalas de uma margarida. A órbita de mercúrio, porém, mesmo depois de descontada a interferência dos planetas próximos, mostrava um desvio pequeno, mas nítido, em relação às leis de Newton.
  
  - n Esse desvio foi observado pela primeira vez em 1859 pelo astrônomo Urbain Leverrier, que calculou um desvio minúsculo de 43,5 segundo de arco por século, inexplicável pelas leis de Newton, mas é perfeitamente descrito pela teoria da relatividade.
  
  - n Enquanto na teoria de Newton somente a massa contribui para a gravidade, na teoria de Einstein a energia cinética do movimento dos planetas também contribui.
-

---

# FONTES

- n Kaku, Michio. O cosmo de Einstein: como a visão de Albert Einstein transformou nossa compreensão de espaço e tempo. São Paulo: Companhia das Letras, 2005.
- n <http://astro.if.ufrgs.br/univ/sobral.htm>
- n [http://www.if.ufrgs.br/~thaisa/cosmologia/cosmo2\\_corr\\_8.htm](http://www.if.ufrgs.br/~thaisa/cosmologia/cosmo2_corr_8.htm)