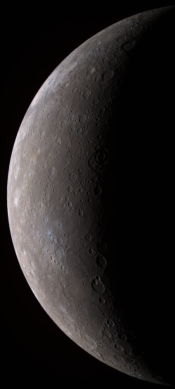


O Problema da Precessão da Órbita de Mercúrio

Da mecânica celeste newtoniana à relatividade geral

Prof. Dr. Rafael Camargo Rodrigues de Lima | Astronomia



O problema astronômico

Contexto histórico

A inadequação newtoniana

A solução relativística

Significado físico

Sobral, 1919: luz, eclipse e Brasil

Crash course em relatividade geral

Atividades e fechamento

Como usar em duas aulas

Aula 1: o problema

- Mercúrio como laboratório natural;
- Kepler, Newton e órbitas fechadas;
- Le Verrier, Vulcano e a anomalia;
- por que 43'' por século importam.

Aula 2: a solução e os testes

- relatividade geral em linguagem mínima;
- precessão relativística de Mercúrio;
- eclipse de Sobral em 1919;
- Einstein no Brasil em 1925 e legado.

Mercúrio como laboratório natural



Mercúrio em cor realçada, NASA/MESSENGER, domínio público

Mercúrio é pequeno, rápido e muito próximo do Sol.

Isso torna a órbita dele um lugar excelente para testar gravitação:

- campo gravitacional solar relativamente forte;
- velocidade orbital alta;
- muitas voltas acumuladas por século;
- órbita excêntrica, com periélio bem definido.

A assinatura é pequena, mas sistemática.

O que é precessão orbital?

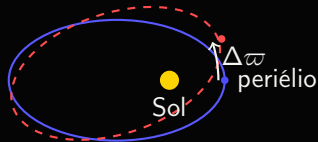
Em uma órbita kepleriana ideal, o periélio permanece fixo.

Na prática, a elipse gira lentamente no plano orbital:

$$\Delta\varpi \neq 0.$$

Para Mercúrio, esse efeito é especialmente visível porque:

- sua órbita é bastante excêntrica;
- está muito perto do Sol;
- acumula muitas revoluções por século.



Parâmetros orbitais de Mercúrio

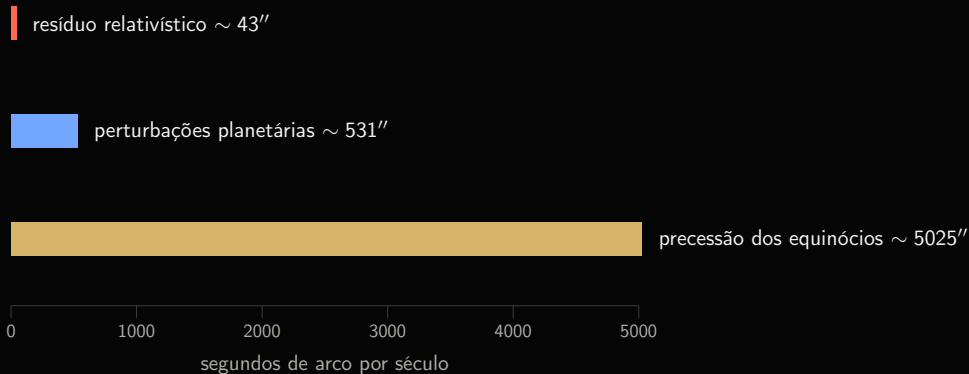
Grandeza	Valor aproximado	Por que importa
Semi-eixo maior a	0,387 UA	proximidade do Sol
Excentricidade e	0,206	periélio bem marcado
Período orbital	87,97 dias	muitas órbitas/século
Periélio	0,307 UA	campo solar mais forte
Velocidade média	47,9 km/s	regime mais relativístico

Em termos relativísticos, o parâmetro pequeno é

$$\frac{GM_{\odot}}{ac^2} \sim 10^{-8}.$$

Pequeno, mas mensurável quando acumulado ao longo de muitas órbitas.

A escala do efeito



O desafio histórico foi separar uma assinatura pequena dentro de um movimento total muito maior.

O caso de Mercúrio

A longitude do periélio de Mercúrio avança cerca de

5600'' por século

quando medida em relação ao equinócio terrestre.

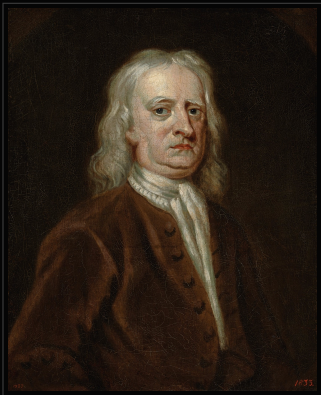
A maior parte desse valor não é misteriosa:

- mudança do sistema de referência: precessão dos equinócios;
- perturbações gravitacionais dos outros planetas;
- pequenos efeitos ligados à forma e ao movimento do Sol.

O problema histórico era o resíduo persistente:

$$\Delta\varpi_{\text{anomia}} \approx 43''/\text{século}.$$

A tradição newtoniana: um enorme sucesso



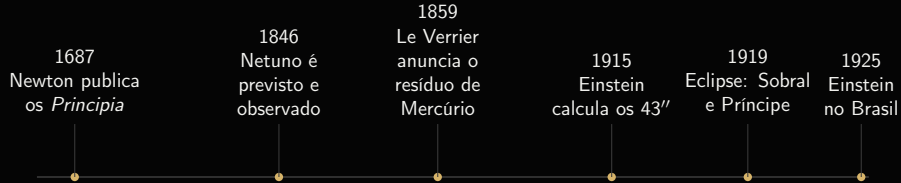
Isaac Newton, Wikimedia Commons

A gravitação universal transformou astronomia em cálculo.

- A mesma lei explica queda de corpos e órbitas planetárias.
- As leis de Kepler aparecem como consequência.
- Pequenas diferenças passam a ser interpretadas como perturbações calculáveis.

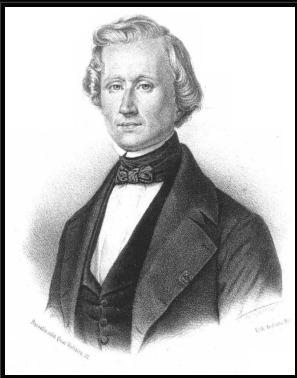
No século XIX, a pergunta não era se Newton funcionava. Era até onde ele funcionava.

Linha do tempo do problema



A história de Mercúrio atravessa quase 250 anos: de uma teoria extremamente bem-sucedida a uma nova concepção de espaço e tempo.

Le Verrier e a precisão da mecânica celeste



Urbain Le Verrier, Wikimedia Commons

- Em 1846, Urbain Le Verrier ficou célebre ao prever Netuno a partir de perturbações na órbita de Urano.
- Esse sucesso fortaleceu a confiança no programa newtoniano: discrepâncias orbitais poderiam revelar matéria ainda não observada.
- Em 1859, Le Verrier analisou a órbita de Mercúrio e encontrou uma precessão residual do periélio.

A pergunta natural era:

há uma massa desconhecida perturbando Mercúrio?

Netuno como precedente metodológico

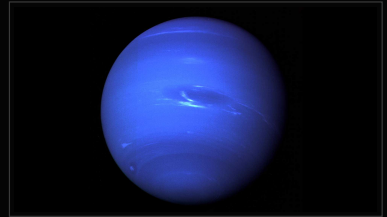
A descoberta de Netuno criou um roteiro poderoso:

1. observar uma discrepância orbital;
2. calcular a perturbação que faltava;
3. apontar o telescópio para a região prevista;
4. encontrar um novo corpo celeste.

Para Mercúrio, parecia razoável repetir a estratégia:

anomalia orbital $\implies$ planeta intramercurial?

A força da hipótese de Vulcano vinha menos da fantasia e mais do sucesso anterior da mecânica celeste.



Voyager 2, NASA/JPL-Caltech

A hipótese de Vulcano

Para explicar o resíduo, foi proposta a existência de um planeta intramercurial:

Vulcano, orbitando entre Mercúrio e o Sol.

A hipótese era plausível dentro da física da época:

- repetia a lógica bem-sucedida da descoberta de Netuno;
- introduzia uma fonte newtoniana adicional;
- poderia produzir uma precessão extra.

Mas as supostas observações de Vulcano nunca se tornaram reproduzíveis.



Leonard Nimoy, CC BY 2.0, Wikimedia Commons

Kepler contra pequenas correções

A órbita kepleriana é fechada porque a força é exatamente proporcional a $1/r^2$.

Com $u = 1/r$, a equação orbital newtoniana ideal tem a forma

$$\frac{d^2 u}{d\phi^2} + u = \frac{GM}{h^2}.$$

A solução é periódica em ϕ :

$$u(\phi) = \frac{GM}{h^2} (1 + e \cos \phi).$$

Qualquer termo extra pequeno pode quebrar esse fechamento perfeito.

O que Newton prevê?

Para uma força central exatamente inversa ao quadrado,

$$F(r) = -\frac{GMm}{r^2},$$

as órbitas ligadas são elipses fechadas:

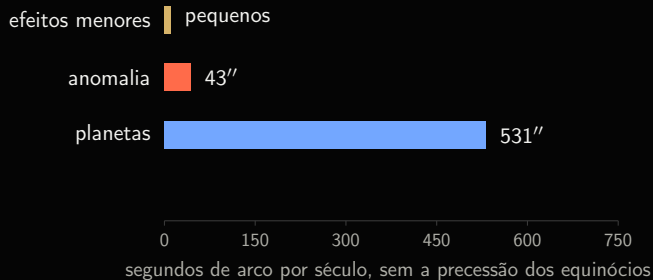
$$r(\phi) = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos \phi}.$$

Isso significa que, no problema de dois corpos isolado:

$$\Delta\varpi_{\text{Newton, 2 corpos}} = 0.$$

Portanto, a precessão observada só poderia vir de perturbações: planetas, achatamento solar, poeira, massas não vistas ou correções à lei gravitacional.

O resíduo em gráfico



Depois de remover os efeitos conhecidos, o que sobra é pequeno, mas não desaparece.

Perturbações planetárias: quase tudo, mas não tudo

Contribuição	Avanço do periélio ("/século)
Precessão dos equinócios	5025
Perturbações dos planetas	531
Achatamento solar e efeitos menores	pequeno
Resíduo histórico	43

O ponto crucial não era que Newton “falhava muito”, mas que falhava pouco e de modo sistemático.

Essa pequena diferença estava acima dos erros observacionais acumulados.

Tentativas newtonianas de solução

Antes de Einstein, foram consideradas várias saídas:

- um planeta intramercurial, Vulcano;
- um anel de pequenos corpos perto do Sol;
- mudanças empíricas na lei de força;
- efeitos do achatamento do Sol.

O problema é que essas hipóteses exigiam evidências independentes ou geravam conflitos com outras órbitas planetárias.

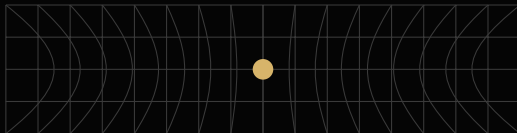
A anomalia de Mercúrio virou um teste sensível para qualquer teoria gravitacional mais profunda.

Aula 2 começa aqui: a gravidade muda de papel

De uma força entre massas



para a geometria do espaço-tempo



massa curva a geometria; trajetórias livres seguem essa geometria

A ideia central da relatividade geral

Na relatividade geral, a gravidade não é uma força no sentido newtoniano.

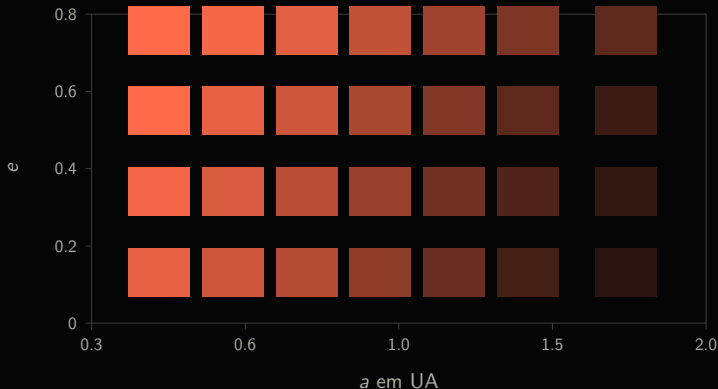
A presença de massa e energia curva o espaço-tempo, e os corpos livres seguem geodésicas:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}.$$

Para uma partícula orbitando o Sol, a geometria relevante, em primeira aproximação, é a métrica de Schwarzschild:

$$ds^2 = - \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right) c^2 dt^2 + \left(1 - \frac{2GM}{c^2 r} \right)^{-1} dr^2 + r^2 d\Omega^2.$$

Quanto a precessão depende da órbita?



Quanto menor a e maior e , maior é $\Delta\varpi$. Mercúrio está no canto favorável do Sistema Solar.

A correção relativística à órbita

Escrevendo $u = 1/r$, a equação orbital relativística pode ser aproximada por

$$\frac{d^2 u}{d\phi^2} + u = \frac{GM}{h^2} + \frac{3GM}{c^2} u^2.$$

O termo novo,

$$\frac{3GM}{c^2} u^2,$$

não existe na teoria newtoniana.

Ele faz a órbita deixar de ser uma elipse perfeitamente fechada: o periélio avança a cada revolução.

Fórmula do avanço do periélio

A relatividade geral prevê, por revolução,

$$\Delta\varpi = \frac{6\pi GM}{a(1 - e^2)c^2}.$$

Para Mercúrio:

$$a \approx 5,79 \times 10^{10} \text{ m},$$

$$e \approx 0,206,$$

$$T \approx 87,97 \text{ dias}.$$

Convertendo para segundos de arco por século:

$$\Delta\varpi_{\text{RG}} \approx 43''/\text{século}.$$

Por que Mercúrio é o melhor teste?

A correção relativística escala como

$$\Delta\varpi \propto \frac{1}{a(1 - e^2)}.$$

Logo, o efeito cresce quando:

- a órbita é pequena, isto é, próxima do Sol;
- a excentricidade é maior;
- o corpo completa muitas órbitas em pouco tempo.

Mercúrio combina exatamente esses fatores. Para planetas mais externos, a precessão relativística existe, mas é menor.

Abrir dashboard interativo: variar a e e

fallback: [abrir dashboard_orbita_mercurio.html](#) na pasta da apresentação

O triunfo de 1915

Em novembro de 1915, Einstein aplicou sua nova teoria ao periélio de Mercúrio.

O resultado reproduziu justamente o resíduo anômalo:

$43''/\text{século}$.

Isso foi decisivo porque:

- não exigia Vulcano nem massas invisíveis;
- surgia de princípios geométricos gerais;
- explicava uma anomalia já conhecida, não apenas uma previsão ajustada depois.

Comparação conceitual

Aspecto	Newton	Relatividade geral
Gravidade	força	geometria do espaço-tempo
Espaço e tempo	absolutos	dinâmicos
Órbita ideal	elipse fechada	quase-elipse precessante
Anomalia de Mercúrio	resíduo inexplicado	consequência natural

A relatividade geral contém a gravitação newtoniana como limite:

$$v \ll c \quad \text{e} \quad \frac{GM}{rc^2} \ll 1.$$

Outro teste: a luz também deve curvar

Se gravidade é geometria, a luz também segue a geometria do espaço-tempo.

Para um raio de luz passando rasante ao Sol, a relatividade geral prevê:

$$\alpha_{\text{RG}} = \frac{4GM_{\odot}}{c^2 R_{\odot}} \approx 1,75''.$$

A previsão newtoniana aproximada para uma partícula de luz seria metade:

$$\alpha_{\text{Newton}} \approx 0,87''.$$

Medir essa diferença exigia observar estrelas muito próximas do disco solar.

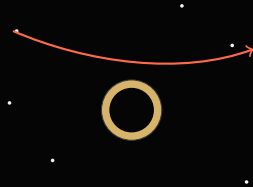
Por que um eclipse total?

Normalmente, o brilho do Sol impede observar estrelas próximas no céu.

Durante um eclipse total:

- a Lua bloqueia o disco solar;
- estrelas próximas ao Sol tornam-se visíveis;
- compara-se a posição aparente das estrelas com placas de referência.

O deslocamento esperado era minúsculo, da ordem de segundos de arco.



o eclipse revela estrelas perto do Sol

As expedições de 1919

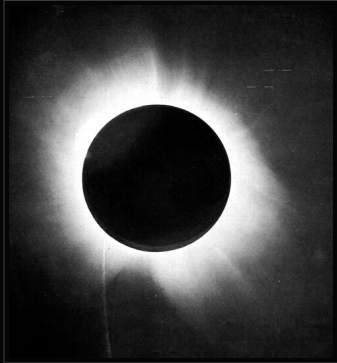
Duas equipes observaram o eclipse total de **29 de maio de 1919**:

- Eddington e Cottingham em Príncipe, na costa oeste da África;
- Crommelin e Davidson em Sobral, no Ceará;
- organização ligada à Royal Society e à Royal Astronomical Society.

Einstein não estava em Sobral. Ele estava na Europa, aguardando os resultados.



Sobral nas placas fotográficas



Placa positiva do eclipse de Sobral, 29/05/1919, domínio

público

O método era fotográfico:

- fotografar estrelas próximas ao Sol durante o eclipse;
- fotografar o mesmo campo estelar sem o Sol;
- medir deslocamentos em placas de vidro;
- inferir a deflexão da luz.

O Brasil entrou na história da relatividade porque Sobral estava na faixa de totalidade e teve condições observacionais decisivas.

Resultados: perto de Einstein

Conjunto de dados	Deflexão medida	Interpretação histórica
Sobral, lente de 4 pol.	$1,98'' \pm 0,16''$	próximo de Einstein
Príncipe	$1,61'' \pm 0,40''$	compatível com Einstein
Sobral, astrográfico	$\sim 0,93''$	descartado por problemas ópticos

Em 6 de novembro de 1919, os resultados foram anunciados em Londres.

A partir daí, Einstein deixou de ser apenas conhecido entre físicos e virou figura pública mundial.

Mito e história: Einstein veio a Sobral?

Não.

O eclipse de Sobral aconteceu em **29 de maio de 1919**.

As equipes estrangeiras em campo foram:

- Crommelin e Davidson em Sobral;
- Eddington e Cottingham em Príncipe.

Einstein não participou da viagem observacional.

Sim, Einstein veio ao Brasil depois.

Ele visitou o Rio de Janeiro entre **4 e 12 de maio de 1925**.

O eclipse de Sobral já havia tornado a relatividade geral famosa seis anos antes.

Einstein no Brasil, 1925



Einstein no Museu Nacional, Rio de Janeiro, 07/05/1925, domínio público

A visita de Einstein ao Brasil faz parte da circulação internacional da relatividade.

- Passou pelo Rio de Janeiro em maio de 1925.
- Visitou instituições científicas e culturais.
- O episódio mostra o Brasil não só como local de observação, mas como parte da recepção pública da nova física.

Por que Sobral importa nesta apresentação?

Mercúrio e Sobral testam a mesma teoria por caminhos diferentes.

Teste	Observável	Previsão relativística
Mercúrio	avanço do periélio	43''/século
Sobral/Príncipe	desvio da luz solar	1,75''

O primeiro explicou uma anomalia antiga; o segundo tornou a teoria mundialmente conhecida.

Ideia 1: queda livre apaga a gravidade local

O ponto de partida físico é o princípio da equivalência:

massa gravitacional = massa inercial.

Em uma pequena região em queda livre, os efeitos da gravidade desaparecem localmente. O que resta não é uma força comum, mas a geometria do espaço-tempo.

Newton

$$m\vec{a} = -\frac{GMm}{r^2}\hat{r}$$

A gravidade acelera corpos.

Einstein

corpos livres seguem geodésicas

A gravidade curva trajetórias.

Ideia 2: a métrica mede distâncias no espaço-tempo

Em relatividade geral, o objeto central é a métrica $g_{\mu\nu}$:

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu.$$

Ela diz como medir intervalos, tempos próprios, comprimentos e cones de luz.

No espaço-tempo plano da relatividade especial:

$$ds^2 = -c^2 dt^2 + dx^2 + dy^2 + dz^2.$$

Perto de uma massa, a métrica deixa de ser plana. Essa diferença é o campo gravitacional em linguagem geométrica.

Ideia 3: partículas livres seguem geodésicas

Uma geodésica é a trajetória “mais reta possível” em um espaço-tempo curvo.

Sua equação é:

$$\frac{d^2 x^\mu}{d\tau^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx^\alpha}{d\tau} \frac{dx^\beta}{d\tau} = 0.$$

Os símbolos $\Gamma_{\alpha\beta}^\mu$ são calculados a partir da métrica e codificam como o espaço-tempo muda de ponto a ponto.

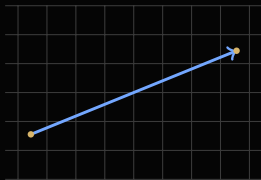
Para Mercúrio, a órbita é uma geodésica na geometria produzida pelo Sol. A precessão aparece porque essa geometria não é exatamente newtoniana.

Geodésica: reta local, curva global

Uma geodésica não precisa parecer reta quando vista de fora.

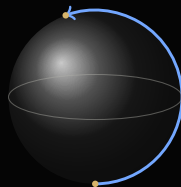
O ponto é local: quem caminha sobre a superfície segue sempre “em frente”, sem virar para a esquerda ou para a direita.

Plano



geodésica = reta usual

Esfera



geodésica = grande círculo

A palavra “reta” passa a significar: trajetória que não tem aceleração própria.

A analogia das formigas na esfera

Imagine formigas vivendo sobre uma esfera enorme.

Para cada formiga, uma pequena vizinhança parece plana: ela pode desenhar régua, ângulo reto e linhas locais sem perceber a curvatura.

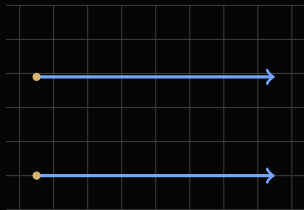
Mas elas podem descobrir a curvatura sem sair da superfície:

- caminham sempre em frente, seguindo geodésicas;
- comparam trajetórias inicialmente paralelas;
- observam que essas trajetórias se aproximam e podem se cruzar.

Essa é a moral da explicação popularizada por Kip Thorne: curvatura não precisa ser vista de fora; ela pode ser medida por experiências internas.

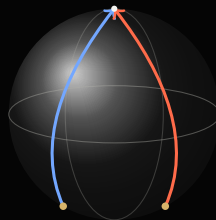
Formigas: paralelas que se encontram

No plano



linhas paralelas
mantêm distância

Na esfera



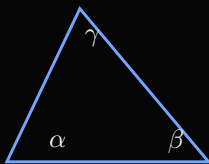
meridianos começam paralelos
e se cruzam no polo

Em uma geometria curva, a separação entre geodésicas revela a curvatura.

Curvatura medida por triângulos

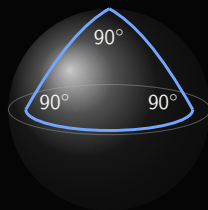
Outra experiência interna: desenhar um triângulo com geodésicas.

Plano euclidiano



$$\alpha + \beta + \gamma = 180^\circ$$

Esfera



$$90^\circ + 90^\circ + 90^\circ > 180^\circ$$

A soma dos ângulos de um triângulo é uma medida de curvatura.

Da esfera ao espaço-tempo

A analogia da esfera tem uma limitação: ela é uma superfície curva embutida em um espaço externo.

Na relatividade geral, não precisamos imaginar um “lado de fora” do espaço-tempo.

A curvatura aparece em experiências internas:

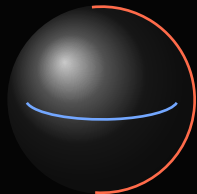
- geodésicas que convergem ou divergem;
- relógios que acumulam tempos próprios diferentes;
- luz que muda de direção perto do Sol;
- órbitas que não fecham exatamente.

Mercúrio é uma dessas experiências internas: ele segue sempre uma geodésica, mas a geometria solar faz o periélio avançar.

Não precisamos de um lado de fora

A curvatura pode ser descrita apenas por medidas feitas dentro do próprio espaço.

Imagem intuitiva



a esfera parece curva
vista de fora

Descrição física

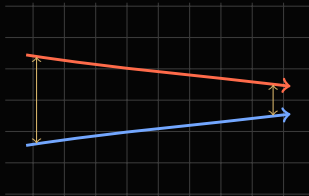
Um diagrama dentro de um retângulo cinza. Duas linhas retas, uma vermelha e uma azul, se cruzam no centro. A linha vermelha tem uma inclinação negativa, enquanto a linha azul tem uma inclinação positiva. Abaixo das linhas, a equação $ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu$ é escrita em uma fonte matemática.

a métrica contém
toda a geometria

Na relatividade geral, a pergunta operacional é: que medidas relógios, réguas, luz e partículas livres fazem?

Experiência interna 1: geodésicas convergem

Se duas partículas livres partem próximas, a curvatura pode mudar a separação entre elas.



a separação muda mesmo sem forças locais

A equação de desvio geodésico resume a ideia:

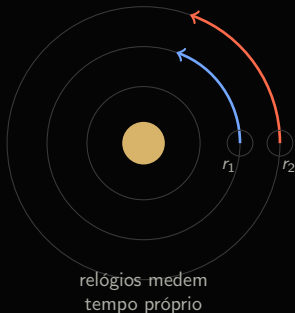
$$\frac{D^2 \xi^\mu}{d\tau^2} = -R^\mu{}_{\nu\alpha\beta} u^\nu \xi^\alpha u^\beta.$$

Aqui ξ^μ é a separação entre trajetórias vizinhas.

Se $R^\mu{}_{\nu\alpha\beta} \neq 0$, a curvatura tem efeitos mensuráveis.

Experiência interna 2: relógios e tempo próprio

Relógios em regiões gravitacionais diferentes não precisam marcar o mesmo tempo próprio.



No campo de Schwarzschild, para um relógio parado a raio r :

$$d\tau = \sqrt{1 - \frac{2GM}{rc^2}} dt.$$

Mais perto da massa:

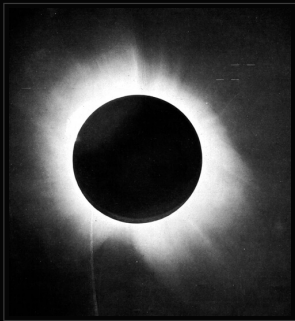
$$d\tau < dt.$$

Curvatura também é testada por relógios.

Abrir dashboard interativo: variar r e t

fallback: [abrir dashboard_tempo_proprio.html](#) na pasta da apresentação

Experiência interna 3: luz muda de direção



Eclipse de Sobral, 1919, domínio público

A luz não tem massa de repouso, mas segue geodésicas nulas: $ds^2 = 0$.

Perto do Sol, essas geodésicas são desviadas:

$$\alpha \approx \frac{4GM_{\odot}}{c^2 b}.$$

Para um raio passando próximo à borda solar:

$$\alpha \approx 1,75''.$$

Sobral testou exatamente esse tipo de experiência interna: observar posições aparentes de estrelas.

Experiência interna 4: órbitas não fecham



Mercúrio, NASA/MESSENGER

A órbita de Mercúrio é uma geodésica na geometria do Sol.

No limite newtoniano ideal, a elipse fecha.

Na geometria relativística, surge um avanço:

$$\Delta\varpi = \frac{6\pi GM_{\odot}}{a(1-e^2)c^2}.$$

A cada volta, o periélio retorna ligeiramente deslocado.

O mesmo diagnóstico em quatro observáveis

Observável	O que se mede	Sinal de curvatura
Geodésicas próximas	separação ξ^μ	convergência/divergência
Relógios	tempo próprio τ	ritmos diferentes
Luz	posição aparente de estrelas	deflexão angular
Órbitas	retorno ao periélio	elipse não fecha

A relatividade geral não pede para visualizar uma quarta dimensão espacial. Ela pede para medir como trajetórias, luz e relógios se comportam.

Mercúrio é o caso orbital dessa lista; Sobral é o caso óptico.

Ideia 4: matéria diz ao espaço-tempo como curvar

As equações de Einstein conectam geometria e conteúdo físico:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}.$$

Geometria

$$G_{\mu\nu}$$

Curvatura do espaço-tempo.

Matéria e energia

$$T_{\mu\nu}$$

Massa, energia, pressão e fluxos.

Fora de uma estrela esférica e não rotante, a solução é a métrica de Schwarzschild, usada para calcular a precessão relativística de Mercúrio.

Ideia 5: Newton reaparece como aproximação

A relatividade geral precisa recuperar Newton quando o campo é fraco e as velocidades são pequenas:

$$v \ll c, \quad \frac{GM}{rc^2} \ll 1.$$

Nesse limite, a componente temporal da métrica contém o potencial newtoniano:

$$g_{00} \approx - \left(1 + \frac{2\Phi}{c^2} \right), \quad \Phi = - \frac{GM}{r}.$$

Mercúrio vive quase nesse regime. O “quase” é precisamente o suficiente para produzir os 43'' por século.

Atividade 1: lendo o dashboard

Abra o dashboard e teste três cenários:

1. Mercúrio real: $a = 0,387$ UA, $e = 0,206$.
2. Um planeta mais distante: $a = 1$ UA, $e = 0,0167$.
3. Um planeta próximo e excêntrico: $a = 0,25$ UA, $e = 0,6$.

Pergunta para discussão:

qual parâmetro muda mais dramaticamente a precessão: a ou e ?

Atividade 2: estimativa de ordem de grandeza

Use

$$\Delta\varpi = \frac{6\pi GM}{a(1 - e^2)c^2}$$

para comparar Mercúrio e Terra.

Mercúrio

$$a = 0,387 \text{ UA}, \quad e = 0,206$$

Terra

$$a = 1 \text{ UA}, \quad e = 0,0167$$

O objetivo não é decorar números: é ver como a estrutura da fórmula decide qual órbita é o melhor teste.

Atividade 3: debate histórico

Divida a turma em três grupos:

- **Grupo Newtoniano:** defender a busca por Vulcano ou matéria intramercúria.
- **Grupo Relativista:** defender uma mudança conceitual na teoria da gravitação.
- **Grupo Observacional:** exigir critérios de evidência, erro e reprodutibilidade.

Pergunta-guia:

quando uma anomalia exige remendo, e quando exige nova teoria?

Síntese para duas aulas

Aula 1

- uma anomalia pequena pode ser profunda;
 - Newton não “falhou” simplesmente: chegou ao limite de validade;
 - o sucesso de Netuno tornou Vulcano uma hipótese razoável.
-

Aula 2

- a RG explica Mercúrio por geometria;
- Sobral testou a curvatura da luz;
- Einstein veio ao Brasil em 1925, não na expedição de 1919.

A precessão de Mercúrio mostra como uma pequena discrepância pode revelar uma mudança profunda de teoria.

- Newton explicou quase toda a mecânica planetária com enorme precisão.
- Mercúrio deixou um resíduo de cerca de $43''$ por século.
- Hipóteses newtonianas auxiliares não se sustentaram.
- A relatividade geral explicou o resíduo como efeito da curvatura do espaço-tempo perto do Sol.

O problema de Mercúrio tornou-se um dos primeiros grandes testes observacionais da nova teoria da gravitação.

Referências essenciais

-  A. Einstein, *Explanation of the Perihelion Motion of Mercury from the General Theory of Relativity*, 1915.
-  S. Weinberg, *Gravitation and Cosmology*, Wiley, 1972.
-  S. Carroll, *Spacetime and Geometry*, Addison-Wesley, 2004.
-  C. M. Will, *Theory and Experiment in Gravitational Physics*, Cambridge University Press, 1993.
-  F. W. Dyson, A. S. Eddington e C. Davidson, *A Determination of the Deflection of Light by the Sun's Gravitational Field*, 1920.
-  *Nature, Results of the Total Solar Eclipse of May 29 and the Relativity Theory*, 1919.

Fontes visuais e históricas

-  Eclipse 1919, *The Sobral expedition*.
-  Centro Brasileiro de Pesquisas Físicas, *O eclipse de Sobral: o Brasil no mapa da teoria da relatividade*.
-  Academia Brasileira de Ciências, *Einstein at the Brazilian Academy of Sciences*.
-  Wikimedia Commons: imagens de Mercúrio/MESSENGER, Newton, Le Verrier, Eddington, eclipse de Sobral e Einstein no Museu Nacional.