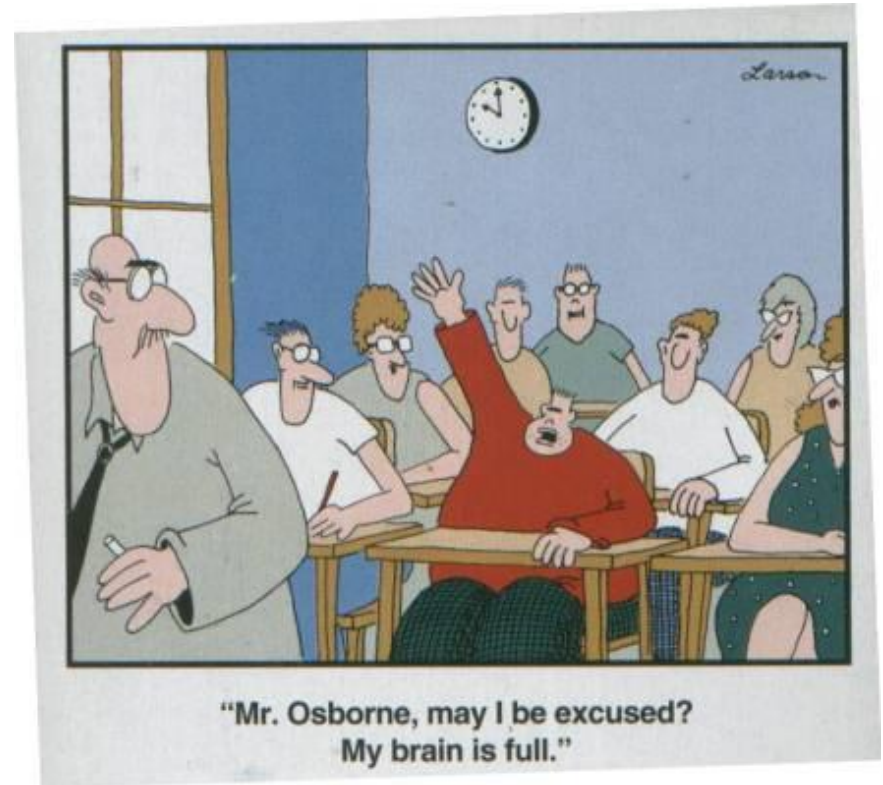


Roger Penrose, Andrea Ghez and Reinhard Genzel (left to right) received the 2020 Nobel physics prize for their research on black holes. Credit: David Levenson/Getty, Christopher Dibble, ESO/M. Zamani

Introdução à Física Moderna: Programa provisório

- **Análise Dimensional – uma introdução**
- **Relatividade Restrita**
- **Algumas noções de Relatividade Geral e cosmologia**
- **Fotões**
- **Átomos**
- **Ondas de Matéria**



Bibliografia



Disponibilidade livre

- “Mechanics and Relativity”, Timon Idema Chapters 10-14
<https://textbooks.open.tudelft.nl/index.php/textbooks/catalog/book/14>
- “University Physics Vol 3”, S. Ling Chapters 7-8
<https://openstax.org/books/university-physics-volume-3/pages/1-introduction>
- “World Science U” de Brian Greene e amigos
<http://www.worldscienceu.com/>

Na biblioteca Central UMinho

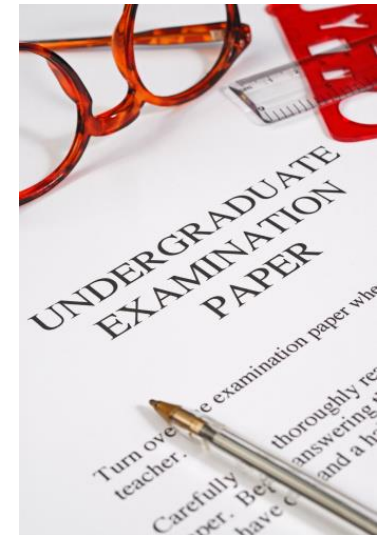
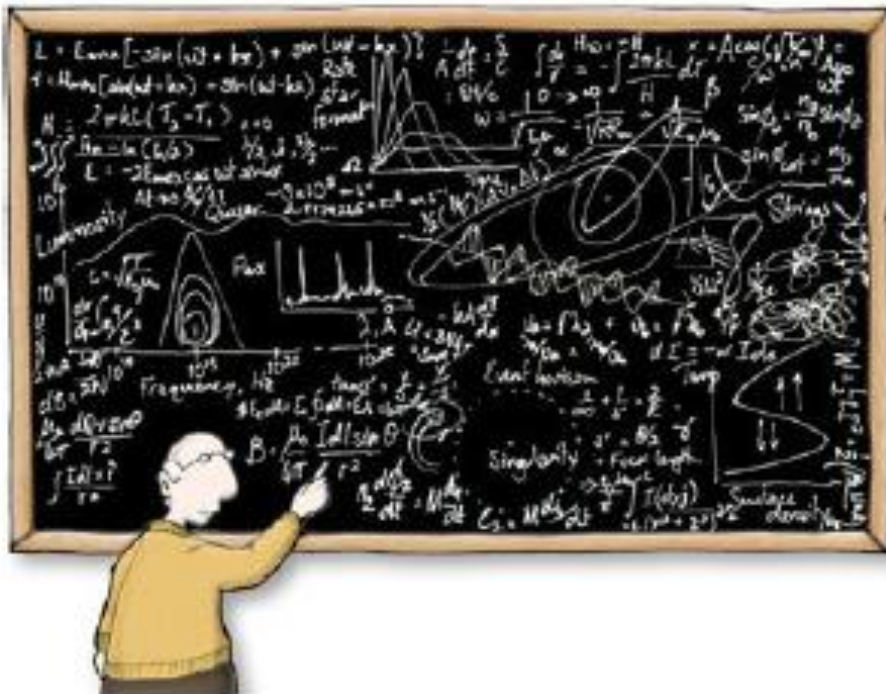
- Modern physics for scientists and engineers (2004) J.R. Taylor, C.D. Zafiratos, M.A. Dubson **530.1**
- Modern physics, P.A. Tipler e R.A. Llewellyn (2000) **530.1**
- Introdução à Física, J. Dias de Deus, M. Pimenta, A. Noronha, T. Peña, P. Brogueira (1993) **530.1 I**
- Taylor, E. F., Wheeler, J. A. (1992). Spacetime Physics (Second edition). W. H. Freeman and Co. **530.12**
- Quantum physics: a first encounter, V. Scarani (2006) **530.145**

Avaliação

Opção A: 2 Testes cada um com um peso de 50%

Opção B : Melhor teste 50%, outro teste 40%,

Participação em Persuall 10%^c



Perusall



Perusall

About

Pricing

Stories

Research

Blog

Webinar

Support

Log in

Every student prepared for every class, with

Perusall

the only truly social e-reader

✓ Get started (it's free!)

Set up for an entire semester in 15 minutes

<https://perusall.com>

código BELSLEY-797NW

Perusall

O Perusall ajuda a aprender mais rápido, através de anotações e discussão com os colegas da turma.

A colaboração permite

- a ajuda entre pares
- fornece informação sobre os aspetos que devem ser aprofundados nas aulas

▪ A collaborative e-book reader

- Developed at Harvard University by Eric Mazur, Gary King, Brian Lukoff and Kelly Miller

The screenshot displays the Perusall web application interface. On the left is a sidebar with navigation options: 'My Courses and CL...', 'Course home', 'Course setup', 'Gradebook', 'People', 'Student view', 'My scores', 'Notifications', 'Notes', 'Add to my calendar', and 'Unenroll from cour...'. Below these are 'Readings' (General Chemistry NY...), 'Documents', 'Assignments' (listing weeks from Dec 2 to Sep 5), and 'Chats' (Groups, General discussion). The main content area shows a textbook page titled '7.4 The Bohr Model' by Niels Bohr (1885-1962). The text describes the quantum model for the hydrogen atom, where electrons move in circular orbits. It notes that while the model was later proven incorrect, Bohr remained a central figure in understanding the atom, earning the Nobel Prize in 1922. The page includes a diagram of the Bohr model with orbits labeled $n=1$ through $n=5$, and a spectral line diagram showing discrete wavelengths. Below the diagram are two numbered points: 1. The model correctly fits the quantized energy levels of the hydrogen atom and postulates only certain allowed circular orbits for the electron. 2. As the electron becomes more tightly bound, its energy becomes more negative relative to the zero-energy reference state (corresponding to the electron being at infinite distance from the nucleus). As the electron is brought closer to the nucleus, energy is released from the system. On the right, a 'Current conversation' chat window shows student discussions. One student asks if allowed circular orbits vary with distance and what factors make them different. Another student responds, suggesting that the distance (radius) of the orbits varies with the energy levels (wavelength colors) and that each orbit has an associated energy. A third student, Zaria Oel, comments on the discussion, noting that the orbits are not circular and that Bohr's model wasn't quite accurate but was a good start.

Ordens de grandeza

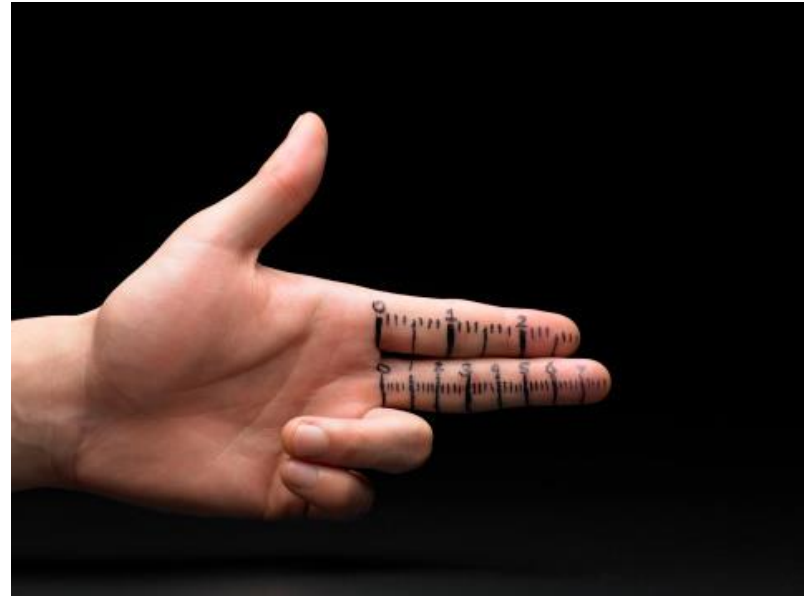
$$\hbar \approx 1.055 \times 10^{-34} \text{ Js}$$

$$c \approx 2.998 \times 10^8 \text{ m / s}$$

$$G \approx 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3 / \text{kg} \cdot \text{s}^2$$

$$M_{\text{sol}} \approx 2 \times 10^{30} \text{ kg}$$

$$m_e \approx 9.11 \times 10^{-31} \text{ kg}$$



A maior parte dos constantes físicos tem unidades associadas.

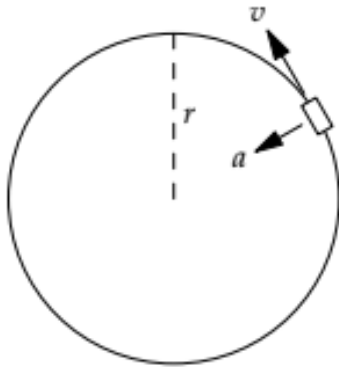
No sistema SI as unidades fundamentais são:

massa (kg), distância (m), tempo (s), corrente (Amperes = Coulomb/s),
temperatura (Kelvin), intensidade luminosa (candela)

“As leis de Física não devem depender do sistema das unidades usados”

Consistência dimensional

Em qualquer equação as dimensões dos vários elementos tem ser consistentes...
Considere um comboio a passar numa curva – qual é a aceleração?



$$a = ?$$
$$a = f(r, v)$$

$$\left. \begin{aligned} [a] &= \frac{D}{T^2} \\ [v] &= \frac{D}{T} \\ [r] &= D \end{aligned} \right\} a = \text{Const} \frac{v^2}{r}$$

Em geral

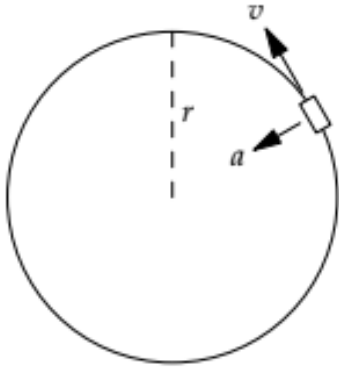
$$\begin{array}{ccc} \boxed{\text{blob A}} & = & \diamond \text{blob B} \\ f(r, v, x, y, \dots) & & g(r, v, x, y, \dots) \end{array}$$

Numa forma
adimensional



$$\frac{\boxed{\text{blob A}}}{\diamond \text{blob B}} = 1$$

Grupos adimensionais



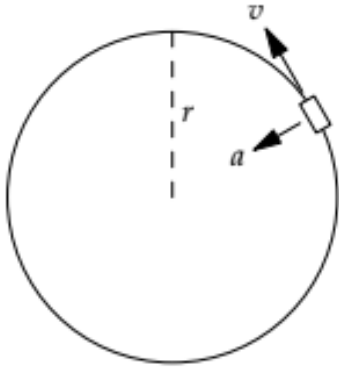
$$\left. \begin{aligned} [a] &= \frac{D}{T^2} \\ [v] &= \frac{D}{T} \\ [r] &= D \end{aligned} \right\}$$

Só existe uma combinação adimensional

$$\frac{ar}{v^2} = \text{Constante adimensional}$$

Porque não escrevemos $\left[\frac{ar}{v^2} \right]^3 = C \quad ?$

Grupos adimensionais



$$\left. \begin{aligned} [a] &= \frac{D}{T^2} \\ [v] &= \frac{D}{T} \\ [r] &= D \end{aligned} \right\}$$

Só existe uma combinação adimensional

$$\frac{ar}{v^2} = \text{Constante adimensional}$$

Porque não escrevemos $\left[\frac{ar}{v^2} \right]^3 = C \quad ?$

Resulta na mesma resultado $\frac{ar}{v^2} = C^{1/3}$

Ainda mais geral $f\left(\frac{ar}{v^2}\right) = C \rightarrow \frac{ar}{v^2} = f^{-1}(C) = C'$

$$\frac{ar}{v^2} = C \quad a \sim \frac{v^2}{r}$$

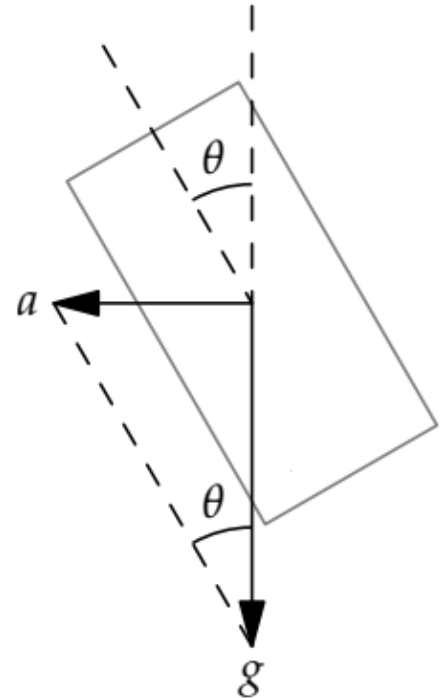
Desconhecemos o constante mas tipicamente é de ordem 1

Exemplo: Intercidades com $v = 220 \text{ km/h}$ ou seja cerca de 60 m/s
 r típica $\approx 2 \text{ km}$

$$a \sim \frac{(60 \text{ m/s})^2}{2 \times 10^3 \text{ m}} \approx 1,8 \text{ m/s}^2$$

$$g \approx 9,8 \text{ m/s}^2$$

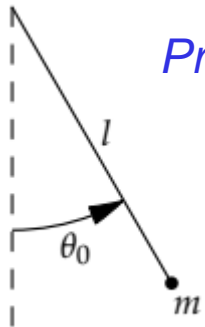
Convêm que $\frac{a}{g}$ seja modesto para que a inclinação não seja muito grande...



Grupos adimensionais

Existe uma vantagem em trabalhar com conjuntos de variáveis físicas que formam grupos adimensionais.

Exemplo: Imagine que queremos saber o período, τ , de oscilação dum pêndulo.



Primeiro listar as variáveis relevantes e determinar as suas dimensões

$$[\tau] = T$$

$$[l] = D$$

$$[m] = M$$

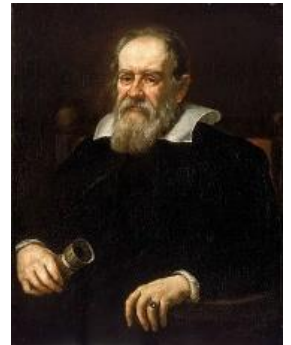
$$[g] = D / T^2$$

Notar que é impossível formar um grupo adimensional com m .

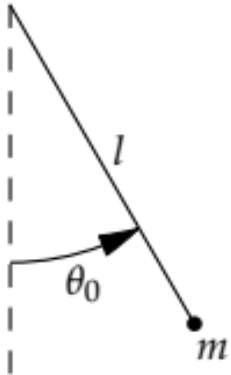
Logo o período não pode depender de m !

Há 1 grupo adimensional

$$f\left(\frac{\tau^2 g}{l}\right) = C$$



Em geral o Nº de grupos adimensionais é igual ao
o Nº de variáveis – Nº dimensões independentes



$$f\left(\frac{\tau^2 g}{l}\right) = C$$

$$\tau^2 = \frac{l}{g} f^{-1}(C)$$

$$\tau = C' \sqrt{\frac{l}{g}}$$

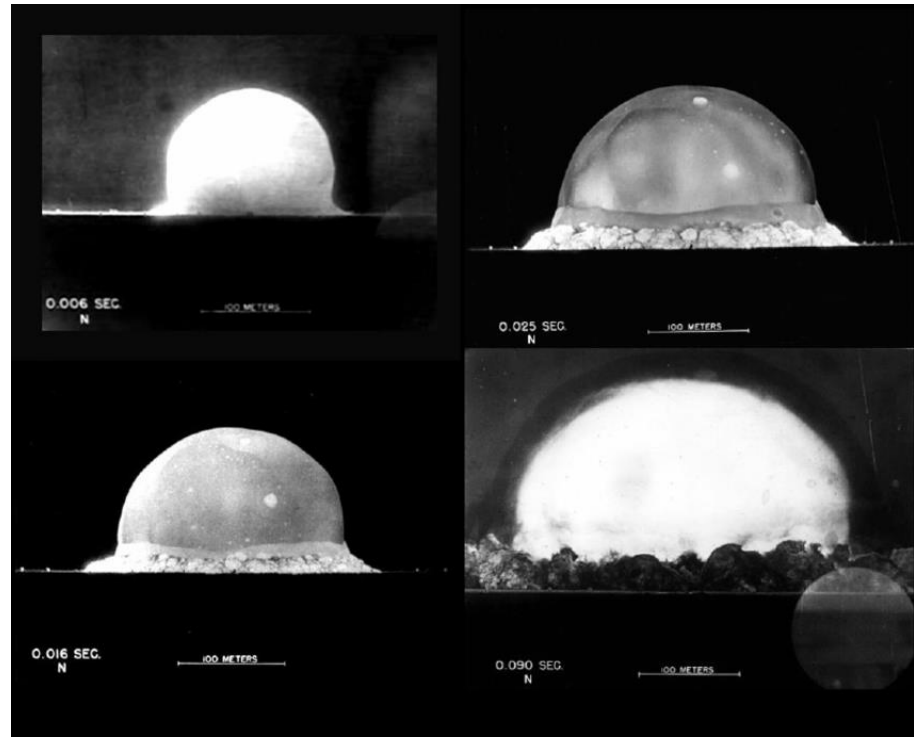
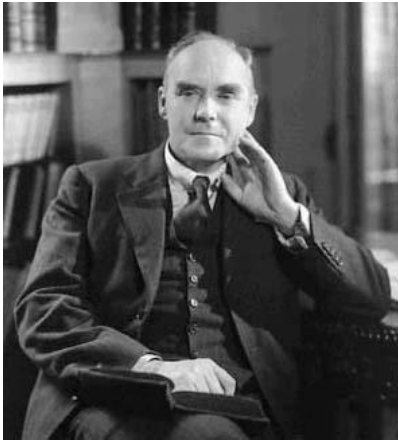
Como achar o constante C' ?

- Resolver a equação diferencial
- Fazer um experiência

$l = 0.65m$; 10 oscilações demoram 16.1s

$$C' = 1.61s \sqrt{\frac{(9.8m/s^2)}{0.65m}} \approx 6.25 \rightarrow 2\pi$$

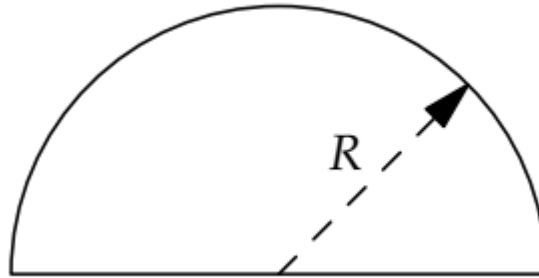
A Estimativa do G Taylor



Teste de “Trinity” e, 1945 explosão duma bomba atômica.
O jornal Life publicou as imagens (com escala de distâncias)
As forças armadas dos EUA não revelou a energia libertada pela bomba.

A Estimativa do G Taylor

t (ms)	R (m)
3.26	59.0
4.61	67.3
15.0	106.5
62.0	185.0



Variáveis importantes

Energia	E	$\frac{MD^2}{T^2}$
Raio da Explosão	R	D
tempo	t	T
densidade do ar	ρ	$\frac{M}{D^3}$

4 variáveis, 3 dimensões independentes
1 grupo adimensional

$$\left[\frac{E}{\rho} \right] \sim \frac{D^5}{T^2} \quad \left[\frac{Et^2}{\rho} \right] \sim D^5 \quad \left[\frac{Et^2}{R^5 \rho} \right] \sim 1$$

$$E = C \left(\frac{\rho R^5}{t^2} \right)$$

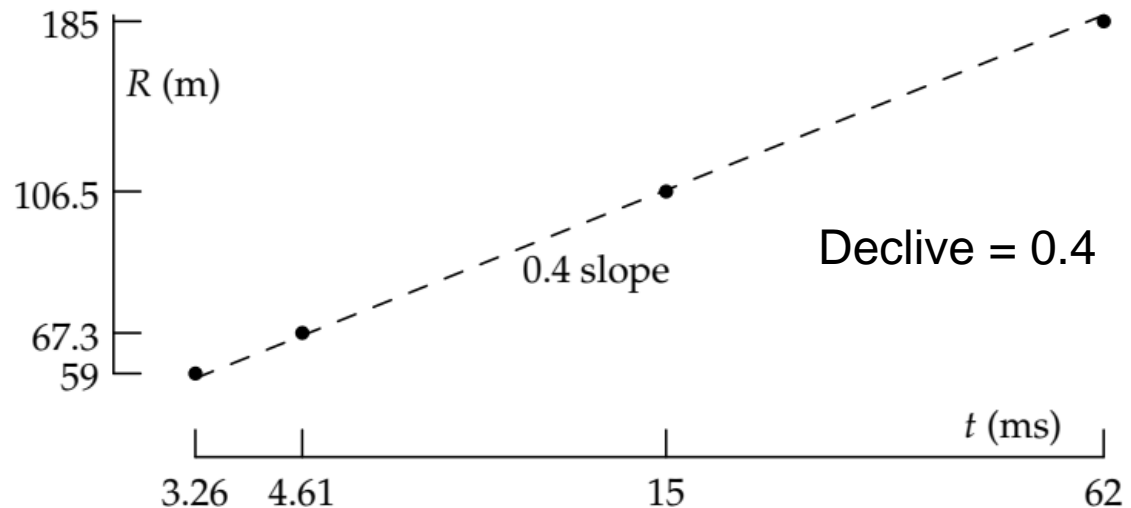
A Estimativa do G Taylor

$$E = C \left(\frac{\rho R^5}{t^2} \right)$$

Confirmação: Numa dada explosão E e ρ são constantes

$$E = C \left(\frac{\rho R^5}{t^2} \right) \rightarrow R \sim C' t^{2/5}$$

t (ms)	R (m)
3.26	59.0
4.61	67.3
15.0	106.5
62.0	185.0

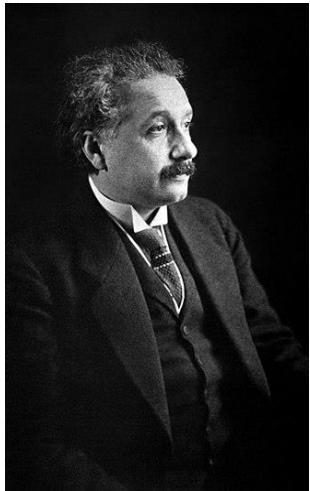
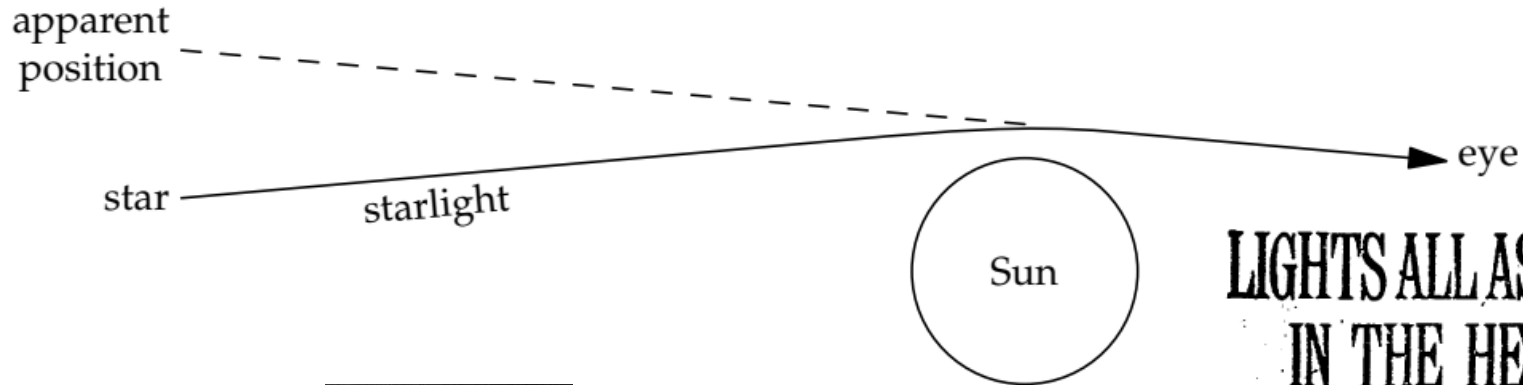


Densidade do ar $\rho = 1.2 \text{ kg} / \text{m}^3$ $E \sim \left(\frac{\rho R^5}{t^2} \right) \sim 7 \times 10^{13} \text{ J} \approx 17 \text{ kToneladas TNT}$

Valor atual 20 kToneladas TNT

Quando existe 2 grupos adimensionais

Desvio da luz por efeito gravítico



LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

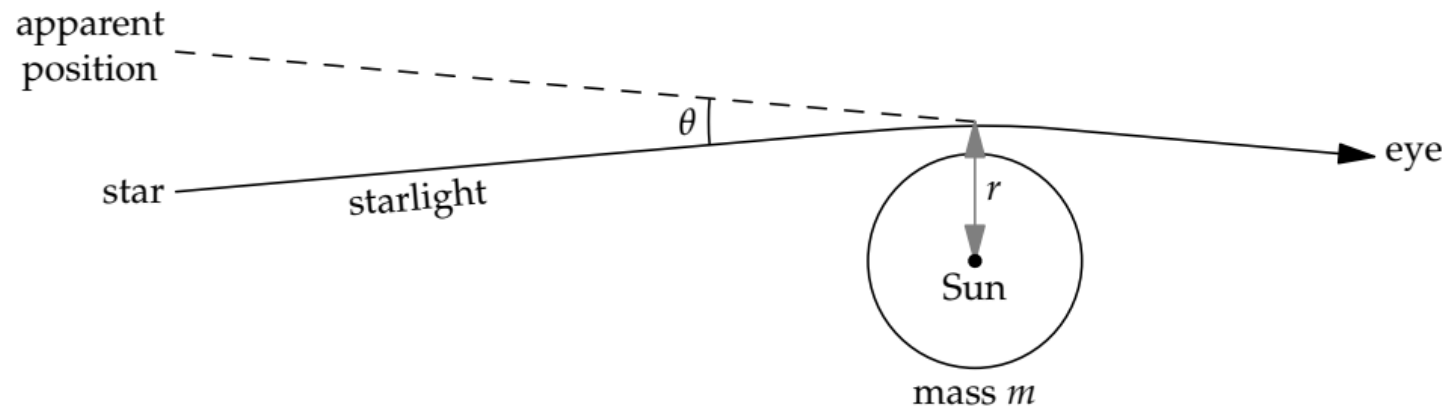
Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

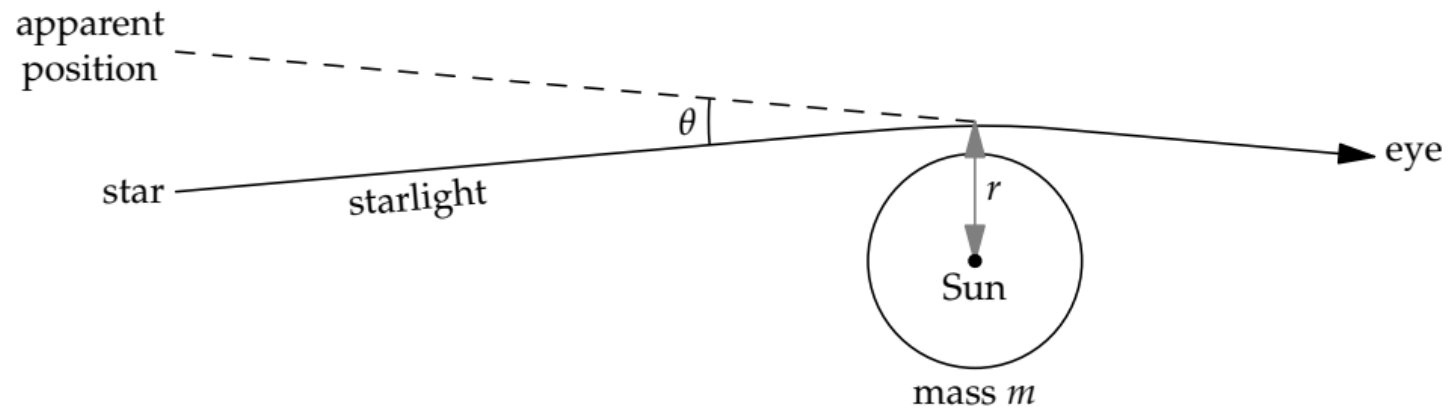
No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.



Variáveis relevantes

Ângulo	θ	1	
Distância menor	r	D	
Efeito de Gravidade	Gm	$\frac{D^3}{T^2}$	$[F] = \frac{MD}{T^2} - \frac{Gm_1m_2}{r^2} = F$

Com estas variáveis só podemos fazer um grupo adimensional, θ ???



Variáveis relevantes

Ângulo

θ

1

Grupos adimensionais

Distância menor

r

D

$$\theta \quad \frac{Gm}{rc^2}$$

Efeito de Gravidade

Gm

$$\frac{D^3}{T^2}$$

Velocidade da luz

c

$$\frac{D}{T}$$

$$\theta = f\left(\frac{Gm}{rc^2}\right)$$

$$\theta = f\left(\frac{Gm}{rc^2}\right) \quad \text{Simplificação notável}$$

Usar física para deduzir algumas constrangimentos

- Se Gm aumenta esperamos que o desvio aumenta
Logo a função desconhecido f devia ser uma função monotónica
- Imagine que a força gravítica fosse repulsiva ($G < 0$)
Neste caso o desvio devia ser < 0 , logo a função f deve ser impar

A solução mais simples é $\theta \sim \frac{Gm}{rc^2}$

Existe pelo menos 3 possibilidades para o constante de proporção

$$\theta = \frac{Gm}{rc^2} \begin{cases} 1 \text{ solução mais simples} \\ 2 \text{ previsão de Newton} \\ 4 \text{ valor previsto pela Relatividade Geral} \end{cases} \quad (\text{Resolver 10 equações diferenciais})$$

$$\theta = 4 \frac{Gm}{rc^2}$$

Será observável?

$$G = 6,67 \times 10^{-11} m^3 / s^2 kg$$

$$m_{sol} = 1,99 \times 10^{30} kg$$

$$r_{sol} = 6,96 \times 10^8 m$$

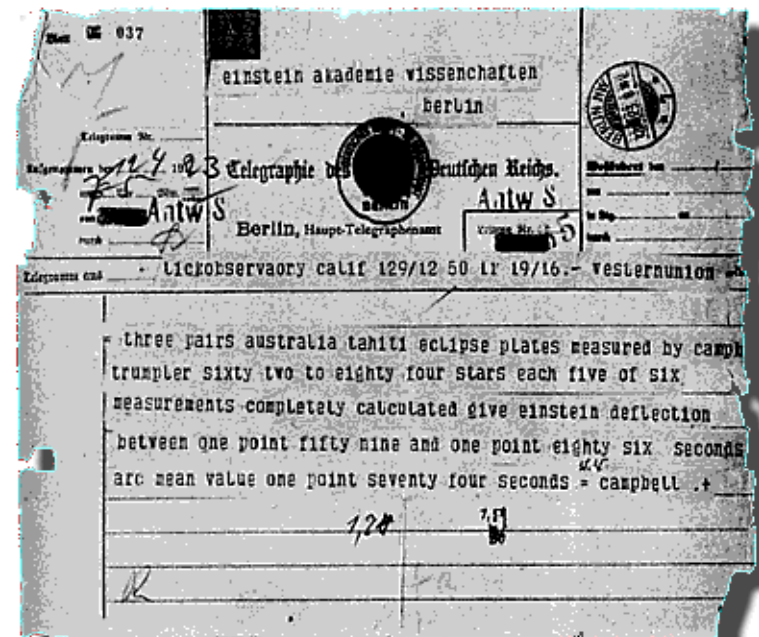
$$c = 2,998 \times 10^8 m / s$$

$$\theta = 4 \frac{Gm}{rc^2} \approx 8,5 \times 10^{-6} \text{radianos}$$

1,75 segundos de arco

Aproximadamente o limite de resolução do telescópio que Eddington usou em 1919 (Diâmetro = 33cm)

1922



LIGHTS ALL ASKEW IN THE HEAVENS

Men of Science More or Less
Agog Over Results of Eclipse
Observations.

EINSTEIN THEORY TRIUMPHS

Stars Not Where They Seemed
or Were Calculated to be,
but Nobody Need Worry.

A BOOK FOR 12 WISE MEN

No More in All the World Could
Comprehend It, Said Einstein When
His Daring Publishers Accepted It.

