

EletroMagnetismo

MEFT 2020-2021

Prof. Pedro Abreu

pedro.t.abreu@técnico.ulisboa.pt

25ª Aula

Duas grandes revoluções no séc.XX com origem no Eletromagnetismo:
Experiência de Michelson–Morley e a relatividade restrita;
A catástrofe do ultravioleta e a mecânica quântica.

A beleza e a clareza da teoria dinâmica, que sustém que o calor e a luz são modos de movimento, está atualmente obscurecida por duas nuvens:

- 1. A 1ª envolve a questão de como pode a Terra mover-se num meio sólido elástico como o é na sua essência o éter luminoso ?*
- 2. A 2ª é a teoria de Maxwell–Boltzmann sobre a partição da Energia.*

William Thomson (Lord Kelvin)[1824–1907, ca.1900]

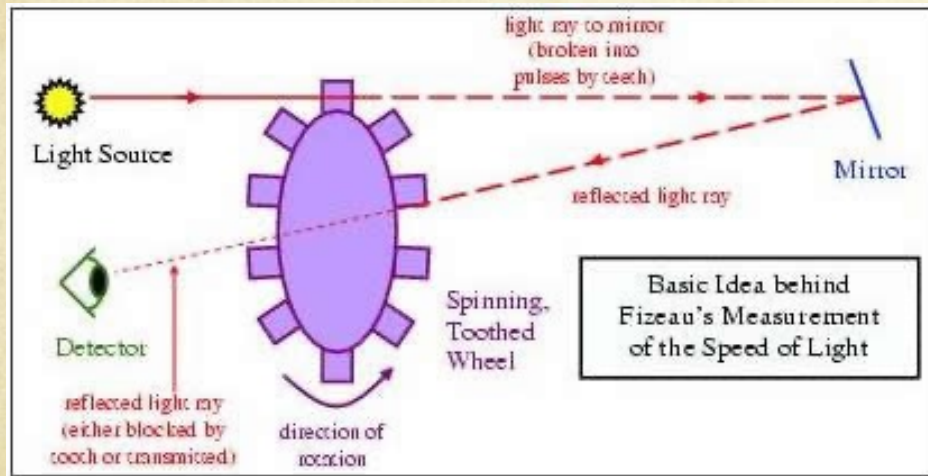
A Luz

...tem velocidade! No vácuo, é

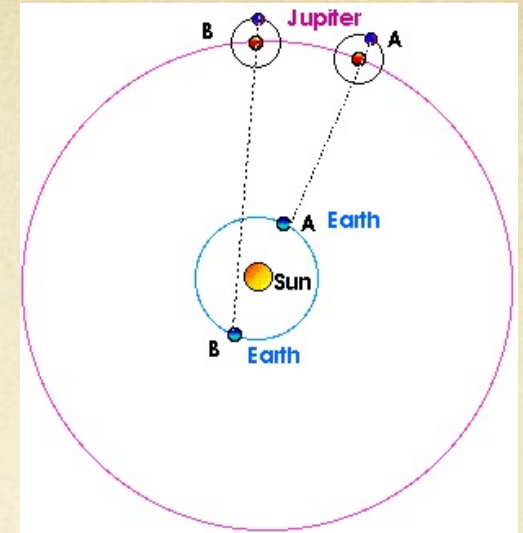
$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} = 299\,792\,458 \text{ m/s}$$



Galileo
(muito rápida)



Fizeau ~ 1850



Roemer 1670

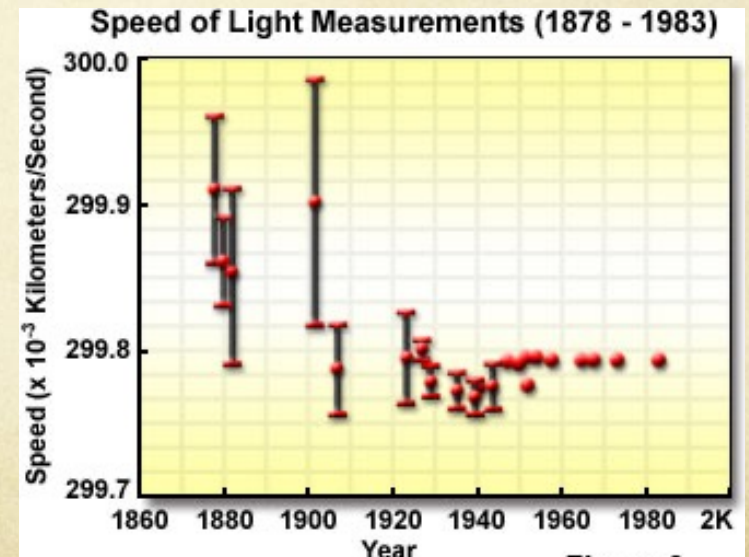


TABLE 23-3
THE SPEED OF LIGHT: SOME SELECTED MEASUREMENTS

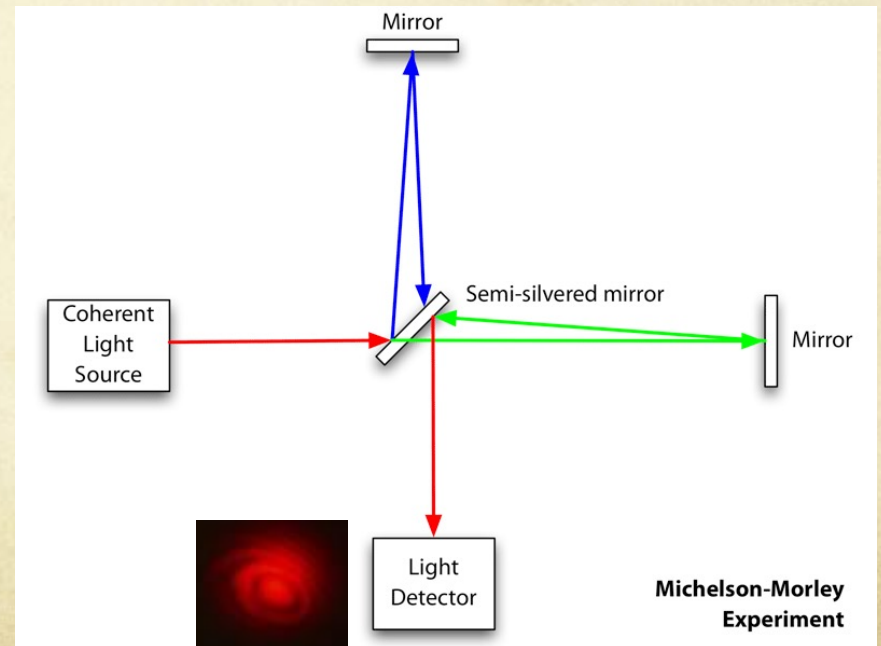
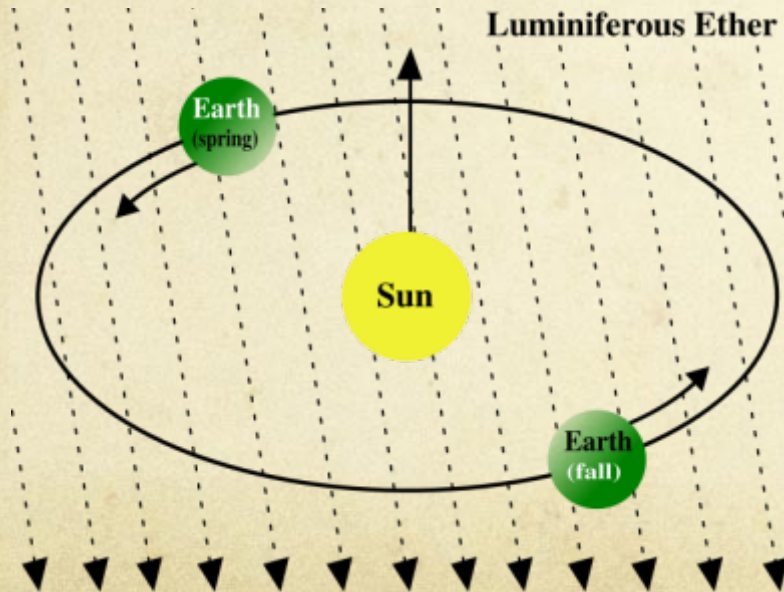
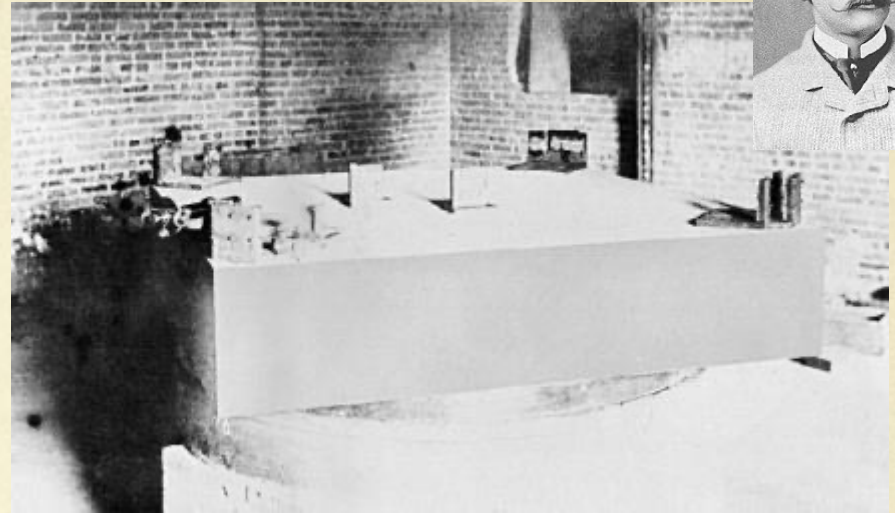
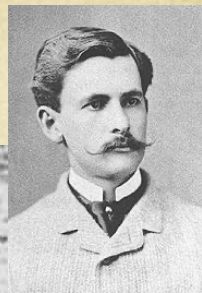
DATE	EXPERIMENTER	COUNTRY	EXPERIMENTAL METHOD	SPEED (10^8 m/s)	UNCERTAINTY (m/s)
1600	Galileo	Italy	Lanterns and shutters	“Fast”	?
1676	Roemer	France	Moons of Jupiter	2.14	?
1729	Bradley	England	Aberration of light	3.08	?
1849	Fizeau	France	Toothed wheel	3.14	?
1879	Michelson	United States	Rotating mirror	2.99910	75,000
	Michelson	United States	Rotating mirror	2.99798	22,000
1950	Essen	England	Microwave cavity	2.997925	1,000
1958	Froome	England	Interferometer	2.997925	100
1972	Evenson et al.	United States	Laser method	2.997924574	1.1
1974	Blaney et al.	England	Laser method	2.997924590	0.6
1976	Woods et al.	England	Laser method	2.997924588	0.2
1983	Internationally adopted value:			2.99792458	Exact

Mas o que é a luz? Isto é, qual o meio que vibra na onda luminosa?
 (séc.XIX => luz = onda eletromagnética = vibração do campo elétrico-magnético)

Michelson – Morley

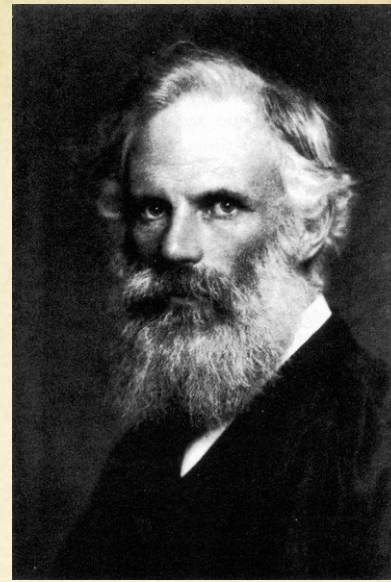
1881, 1885, 1887 – procuram medir a velocidade da Terra em relação ao meio de propagação (éter luminífero), usando interferências devidas ao seu movimento (~ 30 km/s; erro: 8 km/s).

Michelson

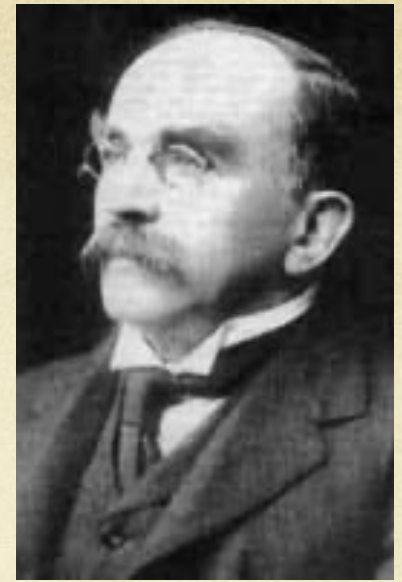


Procurando salvar o éter...

- As equações de Maxwell não são invariantes nas transform. Galileu!
- Michelson e Morley não conseguiram detectar o “vento do éter”!

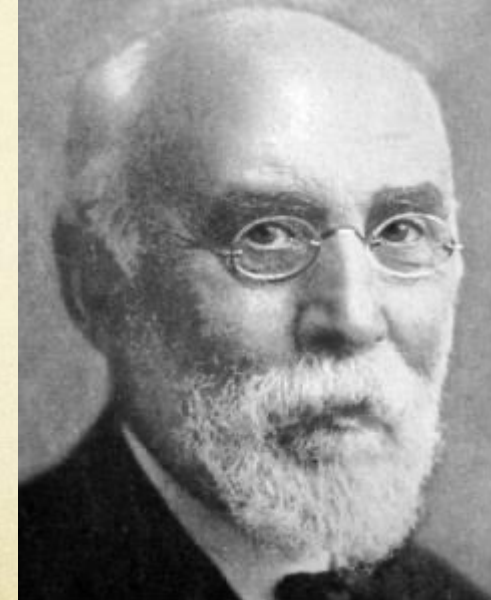


Francis FitzGerald



Joseph Larmor

- FitzGerald introduziu a hipótese da contração do comprimento.
- Larmor publicou as transformações de Lorentz, e previu a dilatação do tempo.
- Lorentz publicou as transformações de Lorentz em 1895, 1899 e em 1904.

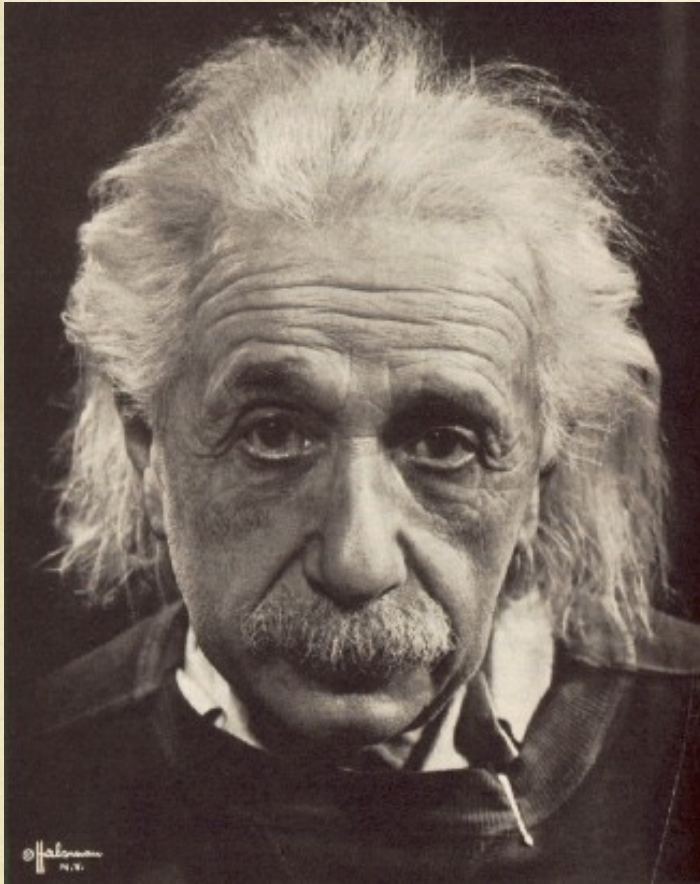


Hendrick Lorentz

...e não fizeram a revolução!!!

1905 – A Revolução

(ou como a Democracia voltou à Física!)



“É mais fácil esmagar um núcleo atômico do que um preconceito!”

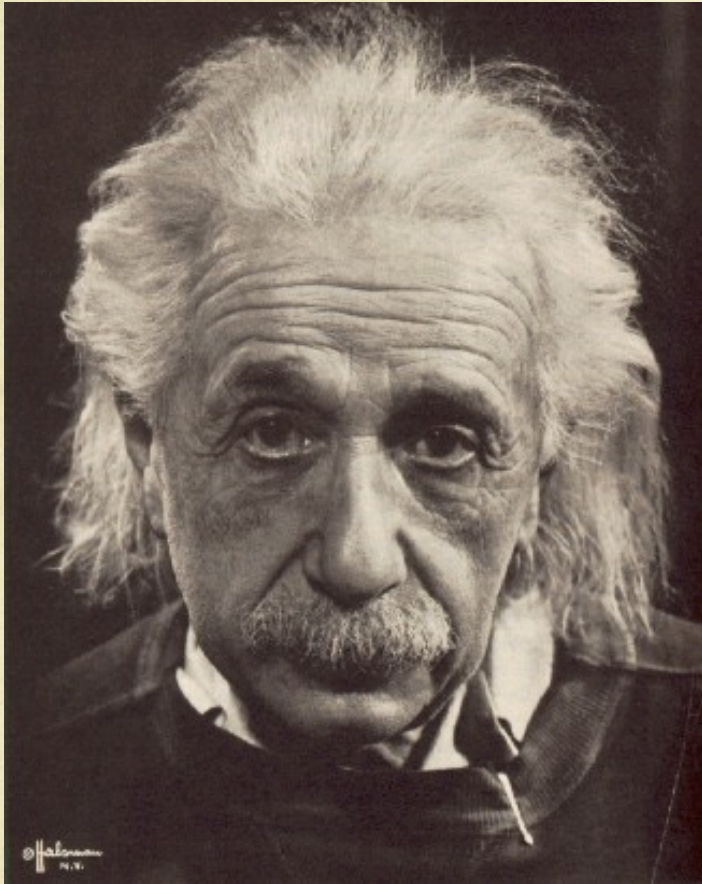
Albert Einstein (1879-1955)

Da eletrodinâmica dos corpos em movimento;

3. *Zur Elektrodynamik bewegter Körper;* von A. Einstein.

[1] Daß die Elektrodynamik Maxwells — wie dieselbe gegenwärtig aufgefaßt zu werden pflegt — in ihrer Anwendung auf bewegte Körper zu Asymmetrien führt, welche den Phänomenen nicht anzuhaften scheinen, ist bekannt. Man denke z. B. an die elektrodynamische Wechselwirkung zwischen einem Magneten und einem Leiter. Das beobachtbare Phänomen hängt hier nur ab von der Relativbewegung von Leiter und Magnet, während nach der üblichen Auffassung die beiden Fälle, daß der eine oder der andere dieser Körper der bewegte sei, streng voneinander zu trennen sind. Bewegt sich nämlich der Magnet und ruht der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten ein elektrisches Feld von gewissem Energiewerte, welches an den Orten, wo sich Teile des Leiters befinden, einen Strom erzeugt. Ruht aber der Magnet und bewegt sich der Leiter, so entsteht in der Umgebung des Magneten kein elektrisches Feld, dagegen im Leiter eine elektromotorische Kraft, welcher an sich keine Energie entspricht, die aber — Gleichheit der Relativbewegung bei den beiden ins Auge gefaßten Fällen vorausgesetzt — zu elektrischen Strömen von derselben Größe und demselben Verlaufe Veranlassung gibt, wie im ersten Falle die elektrischen Kräfte.

Postulados Relatividade Restrita



1. Todas as Leis da Física são as mesmas para todos os referenciais de inércia.
2. A velocidade da luz no vácuo tem o mesmo valor $c=299792548$ m/s para todos os referenciais inerciais, independentemente das velocidades do observador ou receptor.

Transformações de Lorentz, Dilatação do Tempo, Contração do Espaço

$E = mc^2 \Rightarrow E^2 = m^2c^4 + c^2p^2$ e $\Delta E = (\Delta m)c^2$...fissão e fusão nucleares!

(...a seguir ao powerpoint)

$E = mc^2 \rightarrow$ Energia em repouso de um objeto de massa

Se objeto em mov. no lab., com quantidade de mov. \vec{p} , então

$$E \neq mc^2, \quad E \neq \frac{p^2}{2m} (= \frac{1}{2}mv^2)$$

" $E = \underbrace{E_{\text{repouso}}}_{mc^2} + \underbrace{E_{\text{movimento}}}_{c \cdot p}$ "

$$E^2 = (mc^2)^2 + \underbrace{c^2 \vec{p} \cdot \vec{p}}_{c^2 p^2}$$

$E_0 = mc^2$ $E_c = E - E_0 = \sqrt{\underbrace{m^2 c^4 + c^2 p^2}_{= mc^2}}$

~~$\vec{p} = m\vec{v}$~~

$\vec{p} = \frac{m\vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma m\vec{v}$

$$E^2 = (mc^2)^2 + c^2 \gamma^2 m^2 v^2$$

$$\beta \equiv \sqrt{1 - \frac{1}{\gamma^2}}$$

$$= c^4 [m^2 + \gamma^2 m^2 \beta^2] = m^2 c^4 (1 + \underbrace{\beta^2 \gamma^2}_{= \frac{v^2}{c^2}})$$

$$E = \gamma mc^2$$

$$\ll \gamma^2 - 1$$

$$\vec{p} = \gamma m \vec{v}$$

$$E = \gamma m c^2$$

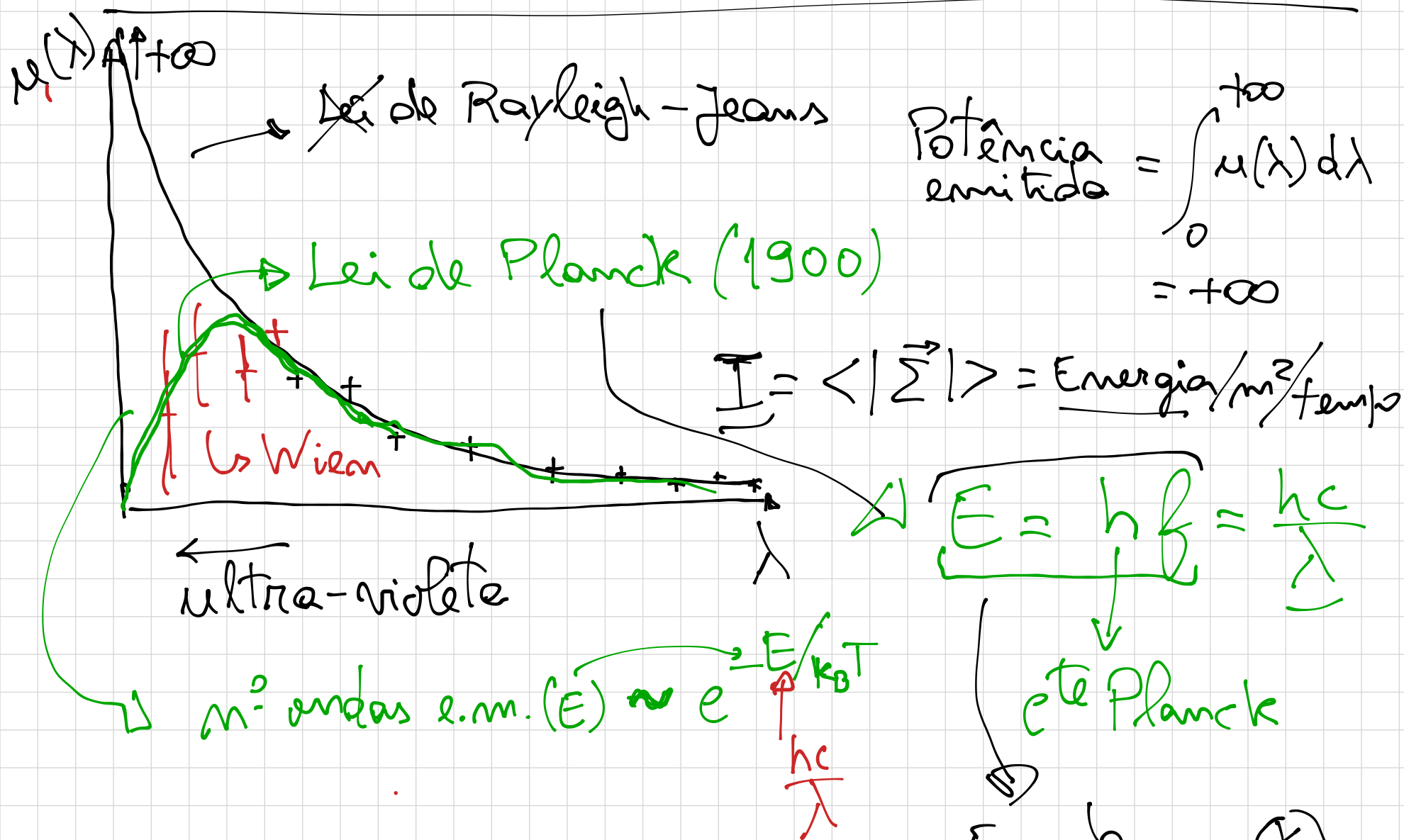
$$E_0 = m c^2$$

$$\gamma = \frac{E}{m c^2}$$

$$\vec{\beta} = \frac{\vec{v}}{c} \Rightarrow \beta = \frac{c p}{E}$$

$$E_c = (\gamma - 1) m c^2 \approx (se \ v \ll c) \approx \frac{1}{2} m v^2$$

$$\frac{1}{\sqrt{1 - \beta^2}} \approx 1 + \frac{1}{2} \beta^2$$



Einstein → (1905) →

$$E = n h f$$

$n^o \text{ fótons}$

fóton c

$$E = h f,$$

$$m = 0$$

$$e \quad p = \frac{h}{\lambda} = \frac{E}{c}$$