

Novas concepções sobre espaço e tempo

O trabalho de **EINSTEIN** (enviado em 30/07/1905) sobre a eletrodinâmica dos corpos em movimento abordava sobre o conflito aparente entre a teoria eletromagnética e o princípio da relatividade - pelo qual as leis da física não devem ter a mesma forma para todos os observadores inerciais.

ELETROMAGNETISMO oferecia uma descrição unificada dos fenômenos elétricos, magnéticos e ópticos e já tinha décadas de sucesso

MECÂNICA CLÁSSICA mais de 200 anos de êxito quase absoluto em seu domínio descritivo

No entanto, as equações de Maxwell do EM não são compatíveis com o princípio da relatividade que está na base da mecânica clássica. Como conciliá-los? Hipóteses ad hoc (sem maiores fundamentações teóricas) haviam sido formuladas (Hendrick Lorentz) - não ofereciam uma solução teórica

A proposta de Einstein é radical: estender o princípio da relatividade para toda a física e introduzir a hipótese adicional- independência da velocidade da luz em relação ao movimento da fonte que a emite.

O início do artigo de Einstein deixa claro ser propósito de unificar as duas teorias. Nele Einstein mostra ser supérflua a introdução do "éter luminífero" - conceito este que era um física como meio transmissor da luz e aceito como realidade por praticamente todos os cientistas de sua época. ¹

- Premissa de que a luz tem a mesma velocidade para todos os observadores, quaisquer que sejam seus movimentos → **conflito** com o senso comum e com a **mecânica de Newton**, que previa velocidades diferentes quando medidas em relação a referenciais que se deslocam um relação ao outro.

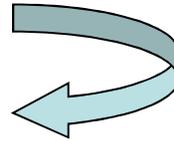
EINSTEIN revisão dos fundamentos cinemáticos da física: rediscute os conceitos de tempo e espaço e a maneira como são mensurados. Sua nova definição de se medir o tempo e sincronizar os relógios por meio de sinais luminosos, levou ao abandono da noção de **TEMPO ABSOLUTO**:

Dois eventos simultâneos para um observador (com um relógio) em repouso **NÃO SÃO** simultâneos para um observador em movimento. Resultados importantes físicos da nova formulação:

1. O tempo flui em taxas diferentes para observadores em movimento relativo entre si; tanto os intervalos de tempo quanto os comprimentos medidos, dando origem à **DILATAÇÃO TEMPORAL** e a **CONTRAÇÃO ESPACIAL**.

2. A nova lei de soma das velocidades, que não obedecem mais a soma direta das velocidades $v = v_1 + v_2$ como ocorre na mecânica Newtoniana, permite resolver a aparente inconsistência entre seus dois princípios

3. Ocorre variação da massa do objeto com a velocidade



IT'S NOT GOOD TO INTRODUCE THE CONCEPT OF THE MASS LIKE $M = m/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ OF A MOVING BODY FOR WHICH NO CLEAR DEFINITION CAN BE GIVEN. IT'S BETTER TO INTRODUCE NO OTHER MASS CONCEPT THAN THE REST MASS "m". INSTEAD OF INTRODUCING M IT IS BETTER TO MENTION THE EXPRESSION FOR THE MOMENTUM AND ENERGY OF A BODY IN MOTION.

- **PROBLEMA 1** No referencial da Terra, a distancia l entre NY e LA e de cerca de 4000km. De quanto a distancia será encurtada de um “jetliner flying”? Do “space shuttle”? E de raios cósmicos de prótons viajando a $0.9c$?

Space Shuttle
leva 1.5 h para
orbitar ao redor
da terra com um
raio de orbita de
6500 Km

Referencial de repouso = l

Para um observador viajando com velocidade u ao longo da linha que une as cidades $l' = l/\gamma$ contração espacial $l - l' = (1 - \frac{1}{\gamma})l = (1 - \sqrt{1 - \beta^2})l$

Jetliner = $7.2 \times 10^{-7}m$ Shuttle = 1.3 mm raios cósmicos 2300km

- **PROBLEMA 2** No referencial do laboratório, em repouso o muon tem vida media $T=2.2 \times 10^{-6}s$ ou $2.2 \mu s$. (o tempo média que um muon existe entre sua produção e o seu decaimento e de $2.2 \mu s$. Se, como experimentais, precisarmos de uma amostra de muons com vida media maior, igual a $11 \mu s$, a que velocidade devemos acelerar os muons? Qual a distancia l , na media, que precisamos que estes muons viajem antes de decair?

$$T'/T = 5 = \gamma \quad \text{logo} \quad v = \sqrt{\frac{24}{25}}c$$

$$l = vT = 630m$$

Esta nova formulação dos conceitos fundamentais de TEMPO e ESPAÇO, tomados como dados a priori por séculos, constitui certamente uma das revoluções mais importantes da ciência, embora seu próprio autor não pensasse assim:

Artigo de 1905 (3 páginas)

"A inércia de um corpo depende de seu conteúdo energético?"

Quantidades muito pequenas de massa podem ser convertidas em quantidades enormes de energia e vice-versa. A massa e a energia são de fato equivalentes.

Físico/matemático **HENRI POINCARÉ (1854-1912)** independentemente de Einstein, desenvolveu trabalhos importantes sobre a relatividade e deduziu muitas das expressões matemáticas contidas na teoria (postura conservadora em relação ao éter)

1907 - matemático **HERMAN MINKOWSKI (1864-1909)**, professor de Einstein em Zurique, apresentou a idéia importante de considerar o tempo e o espaço conjuntamente constituindo um continuo quadri-dimensional no qual o tempo, como quarta dimensão funde-se com as outras três espaciais (Poincaré já havia também expresso esta idéia)
ESPAÇO E TEMPO

ESPAÇO E TEMPO - VETOR DE 4 ELEMENTOS QUE SE TRANSFORMAM VIA TRANSFORMAÇÃO DE LORENTZ

$$\begin{pmatrix} ct' \\ x' \\ y' \\ z' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma & -\beta\gamma & 0 & 0 \\ -\beta\gamma & \gamma & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} ct \\ x \\ y \\ z \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \gamma(ct-\beta x) \\ -\gamma(ct-\beta x) \\ y \\ z \end{pmatrix} \quad \text{com} \quad \gamma = (1-\beta^2)^{1/2} \quad \beta = v/c$$

A partir da **Relatividade**, surge uma nova visão do mundo, uma nova **Weltanschauung**.

O espaço no qual se medem distâncias e tempos, quantificados com réguas e relógios, não são mais absolutos nem independentes.

ENERGIA RELATIVÍSTICA

Energia cinética – Trabalho

$$E_K = \int_0^x dx' F' = \int_0^x dx' \frac{dp'}{dt} = \int_0^p dp' \frac{dx'}{dt'} = \int_0^p v' dp'$$

$$E_K = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} - mc^2 \quad \text{onde usamos que } p = \gamma mv$$

$$E_K + mc^2 = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = \gamma mc^2$$

$$E = \gamma mc^2$$

$$p = \gamma mv$$

$$\frac{v}{c} = \frac{pc}{E}$$

$$E = \sqrt{(pc)^2 + (mc^2)^2}$$

Equivalência entre massa e energia

Massa pode ser convertida em energia e vice-versa

**MASTER EQUATION OF
SPECIAL RELATIVITY**

Valida universalmente para qualquer partícula

Para $m=0$ “massless particles” – fótons $E = pc$ $p = E/c$

Resultado observado experimentalmente para os fótons e os elétrons

– EFEITO COMPTON $m = \frac{E}{c^2} \sqrt{1 - v^2/c^2}$ Apenas partícula de massa nula podem se deslocar com $v=c$

Resultados importantes: Energia e Momentum

$$E^2 = p^2 c^2 + (mc^2)^2$$

Partícula em repouso $\rightarrow p=0 \rightarrow E=mc^2$

Partícula sem massa $\rightarrow m=0 \rightarrow E=pc$

A massa tem o mesmo valor em qq referencial pois não depende do mov. da partícula

$E^2 - (pc)^2 = (mc^2)^2$ constante de movimento em todos os ref. - invariante frente a TL

Como E e p dependem do SR no qual eles são calculados, vamos ver a relação entre essas quantidades segundo 2 sistemas de referencia:

$$(E, p_x, p_y, p_z) \stackrel{\text{TL}}{\Rightarrow} (E', p_x', p_y', p_z') \quad \text{SR que se move com veloc. } v \text{ em } x$$

Combinar a transformação de **velocidades**:

$$\frac{dx'}{dt'} = \frac{\frac{dx}{dt} - v}{\left(1 - \frac{v}{c^2} \frac{dx}{dt}\right)}; \quad \frac{dy'}{dt'} = \frac{\frac{dy}{dt}}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c^2} \frac{dx}{dt}\right)}; \quad \frac{dz'}{dt'} = \frac{\frac{dz}{dt}}{\gamma \left(1 - \frac{v}{c^2} \frac{dx}{dt}\right)}$$

γ em termos da veloc. da partícula no referencial onde o **p** esta sendo calculado

velocidade em S

veloc. do S' || S no

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

Usando estas relações, obtem-se que:

$$E' = \gamma E - \beta \gamma p_x c$$

$$p_x' c = -\beta \gamma E + \gamma p_x c$$

$$p_y' c = p_y c$$

$$p_z' c = p_z c$$

$$\text{com } \gamma = \left(1 - \frac{v^2}{c^2}\right)^{-1/2}$$

$$\beta = \frac{v}{c}$$

Note que com estas transformações a massa da partícula não se altera quando mudamos o SR:

$$(m'c^2)^2 = E'^2 - p'^2 c^2 = \dots = (mc^2)^2$$

PROVE

DESVIO DOPPLER

A velocidade da luz emitida de uma fonte é **c** (independente do referencial), entretanto, a energia dos quanta individuais da luz (fotons), depende da velocidade da fonte.

Desvio em **ENERGIA** de uma fonte de fotons em movimento comparada com uma fonte em repouso—“**Doppler shift**”

Desvio em $E \rightarrow v \rightarrow \lambda$
 energia
 freqüência
 comprimento de onda

BLUE SHIFT

energia maior
 freq. maior
 λ maior

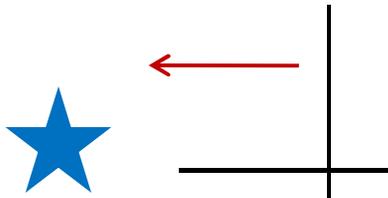
RED SHIFT

energia menor
 freq. menor
 λ menor

390/455 455/492
 Violeta azul

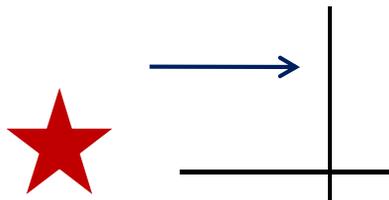
780 λ (nm)
 vermelho

Deslocar para o vermelho: aumenta $\lambda \rightarrow$ diminui E
 Deslocar para o azul: diminui $\lambda \rightarrow$ aumenta E



Medido em relação a um SR que se move em direção a fonte de fótons com $v=\beta c$
 $E' = \gamma E + \beta \gamma E = E\gamma(1+\beta)$

λ' menor do que λ
BLUE SHIFT



Medido em relação a um SR que se afasta da fonte de fótons com $v=\beta c$
 $E' = \gamma E - \beta \gamma E = E\gamma(1-\beta)$

λ' maior do que λ
RED SHIFT

Considera-se uma fonte de fótons com energia E , no SR em repouso da fonte

Fótons $m=0$ $p=E/c$

$$E' = E \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}} \quad \frac{E'}{E} = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \frac{\lambda'}{\lambda} = \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$$

$$E' = E \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}} \quad \frac{E'}{E} = \sqrt{\frac{1-\beta}{1+\beta}}$$

$$E = \frac{hc}{\lambda} \quad \frac{\lambda'}{\lambda} = \sqrt{\frac{1+\beta}{1-\beta}}$$

Einstein toma como paradigma da teoria física a TEORIA de MAXWELL em vez da Mecânica clássica. Atribui-se assim ao princípio da relatividade um **caráter mais universal**, estendendo-o aos fenômenos **eletromagnéticos** e, mais tarde, à **gravitação**. Pode-se mencionar três etapas:

1. Formulação da **Relatividade Restrita (especial) de 1905** na qual se considerou apenas os movimentos retilíneos e uniformes;
2. Formulação da **Relatividade Geral de 1919** quando ele estende o princípio aos movimentos acelerados, resultando uma nova Teoria da Gravitação e a base teórica de uma cosmologia científica;
3. Formulação da **Teoria de Campo Unificado de 1950** com a qual estende as idéias Relatividade Geral ao eletromagnetismo, fechando o ciclo

1.2 Einstein's principle of relativity

Einstein's principle of relativity says, roughly, that every physical law and fundamental physical constant (including, in particular, the speed of light in vacuum) is the same for all non-accelerating observers. This principle was motivated by electromagnetic theory and in fact the field of special relativity was launched by a paper entitled (in English translation) "On the electrodynamics of moving bodies" (Einstein 1905).[‡] Einstein's principle is not different from Galileo's except that it explicitly states that electromagnetic experiments (such as measurement of the speed of light) will not tell the sailor in the windowless room whether or not the boat is moving, any more than fluid dynamical or gravitational experiments. Since Galileo was thinking of experiments involving bowls of soup and cannonballs dropped from towers, Einstein's principle is effectively a generalization of Galileo's.

David W. Hogg

*School of Natural Sciences
Institute for Advanced Study
Olden Lane
Princeton NJ 08540*

hogg@ias.edu

1 December 1997

The governing equations of electromagnetism, Maxwell's equations (e.g., Purcell 1985), describe the interactions of magnets, electrical charges and currents, as well as light, which is a disturbance in the electromagnetic field. The equations depend on the speed of light c in vacuum; in other words, if the speed of light in vacuum was different for two different observers, the two observers would be able to tell this simply by performing experiments with magnets, charges and currents. Einstein guessed that a very strong principle of relativity might hold, that is, that the properties leaves out the phrase "with respect to the Earth," but it is there implicitly. In other words, you cannot contest a speeding ticket on the strength of Galileo's principle since it is implicit in the law that the speed is to be measured with respect to the road.

When Kepler first introduced a heliocentric model of the Solar System, it was resisted on the grounds of common sense. If the Earth is orbiting the Sun, why can't we "feel" the motion? Relativity provides the answer: there are no local, observational consequences to our motion.[†] Now that the Earth's motion is generally accepted, it has become the best evidence we have for Galilean relativity. On a day-to-day basis we are not aware of the motion of the Earth around the Sun, despite the fact that its orbital speed is a whopping 30 km s^{-1} ($100,000 \text{ km h}^{-1}$). We are

David W. Hogg

*School of Natural Sciences
Institute for Advanced Study
Olden Lane
Princeton NJ 08540*

hogg@ias.edu

1 December 1997

also not aware of the Sun's 220 km s^{-1} motion around the center of the Galaxy (e.g., Binney & Tremaine 1987, Chapter 1) or the roughly 600 km s^{-1} motion of the local group of galaxies (which includes the Milky Way) relative to the rest frame of the cosmic background radiation (e.g., Peebles 1993, Section 6). We have become aware of these motions only by observing extraterrestrial references (in the above cases, the Sun, the Galaxy, and the cosmic background radiation). Our everyday experience is consistent with a stationary Earth.