

Evolução da Astronomia Moderna-1

A Gravidade de Newton

A Gravidade de Einstein

A luz: natureza e comportamento

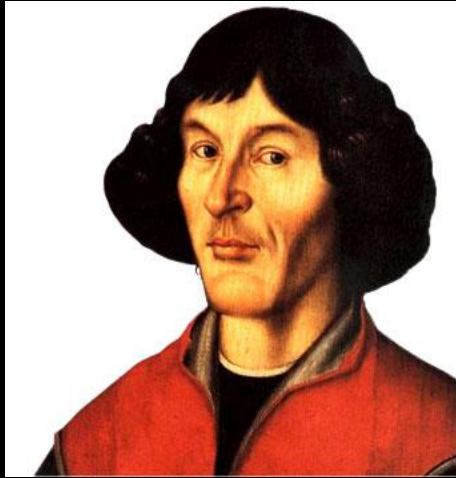
IAGUSP

Sandra dos Anjos

<http://astroweb.iag.usp.br/~aga210/>

Renascimento: os gigantes desta fase (~ 1400 – 1700)

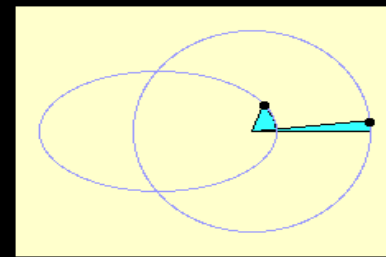
Trabalhos de Tycho Brahe, Kepler e Galileo eram empíricos



- **Copérnico**
- Modelo Heliocêntrico
- Explica corretamente a causa das Estações Ano
- Determina a distância relativa dos planetas

- **Tycho Brahe**
- Famoso pelas obs. e análises de Supernovas e Cometas
- Medidas de posições de Planetas
- Não aceitava Helioc.

- **Kepler**
- Movimento Planetário



- **Galileo**
- **Pai da ciência experimental: telesc.**
- Experimentos mecânica
- Conceito inércia
- Heliocentrismo



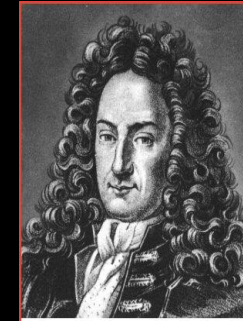
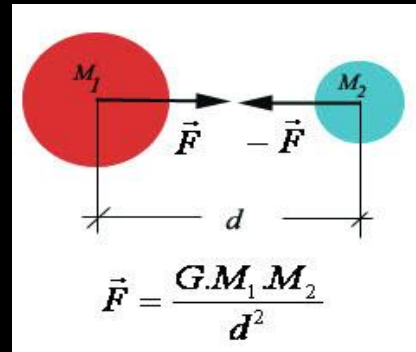
Isaac Newton (1642-1727)

Desenvolve **“ferramenta” física e matemática** para explicar as descobertas de Kepler e Galileo. Inventa o Cálculo

Realiza **experimentos em óptica**, como estudos da **natureza da luz** e desenvolve o **primeiro telescópio refletor**.

Desenvolve e **cria a Mecânica** que se ocupa do entendimento dos **movimentos dos corpos e cria o conceito de Energia**.

Formula as **3 Leis do Movimento** juntamente com as **Leis da Gravitação Universal** formando a base de um **entendimento inteiramente novo do Universo**.



$$d(xy) = xdy + ydx$$

$$d(x + y) = dx + dy$$

$$\int xdy + \int ydx = xy$$

$$\text{omn.l} = y \int dy = y^2$$



Enuncia as 3 Leis do Movimento

1ª Lei da Inércia - (1ª Lei do Movimento - já descoberta por Galileo)

Um corpo em repouso ou em movimento uniforme ($v=cte$, direção cte) permanece neste estado a menos que alguma **força** atue sobre ele.

2ª Lei da Força (2ª Lei do Movimento)

A aceleração produzida quando uma força atua é diretamente proporcional à força e ocorre na direção em que a força atua e matematicamente descrita na forma **$F = m \cdot a$**

3ª Lei da Ação e Reação (3ª Lei do Movimento)

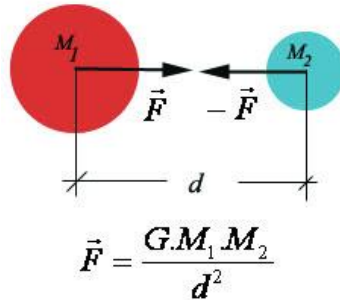
Força sempre ocorre aos pares, ou seja, para cada força em um sentido, existe outra igual em sentido oposto.

Lei da Gravitação Universal

GRAVIDADE, é a força que atrai corpos um em direção ao outro. É uma das 4 forças que atuam na natureza.

Cada par de objetos no Universo atrai um ao outro com uma força que é proporcional ao produto de suas massas e inversamente proporcional ao quadrado de suas distâncias.

Pode ser expressa, matematica e simplificada, como:



onde,

F = força gravitacional entre dois objectos

M_1 = massa do primeiro objecto

M_2 = massa do segundo objecto

d = distância entre os centros de massa dos objectos

G = constante universal da gravitação ($6.67 \times 10^{-11} \text{ N.m}^2/\text{Kg}^2$); $\text{N} = 1 \text{ Kg.m}/\text{seg}^2$

Os povos da antiguidade desenvolveram **métodos matemáticos quantitativos em Astronomia.**

Mas foi Newton quem desenvolveu a primeira base matemática para explicar um fenômeno - o movimento planetário abrindo o nascimento da Astrofísica e a estrutura da Teoria Científica



Consiste de Hipóteses cuja previsão podem ser testadas por experimentos ou observações

Portanto, o nascimento da física quantitativa teve suas raízes na Astronomia

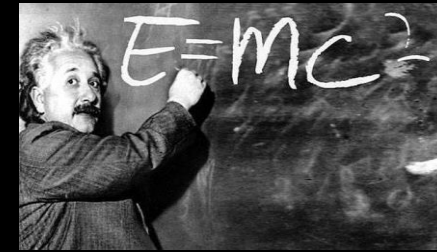
As consequências...

Mundo passa a ser visto com uma **interpretação lógica**...um mundo regido por uma visão mecânica...e descrita por equações matemáticas ! **Uma visão determinista do mundo...!**

Este cenário, leva a um melhor **planejamento de máquinas**..., e desencadeia a **primeira Revolução Industrial** com o surgimento de **máquinas a vapor**, a **Revolução no Sistema Econômico e Social**, engatilhando novas fases desta profunda Revolução que desembocaram nos **motores de combustão** movidos a derivados de petróleo, e uma **profunda revolução intelectual**...que leva, ao desenvolvimento da **Terceira Revolução Industrial**, ainda em expansão, alcançando a microeletrônica, engenharia genética, nanotecnologia, etc...

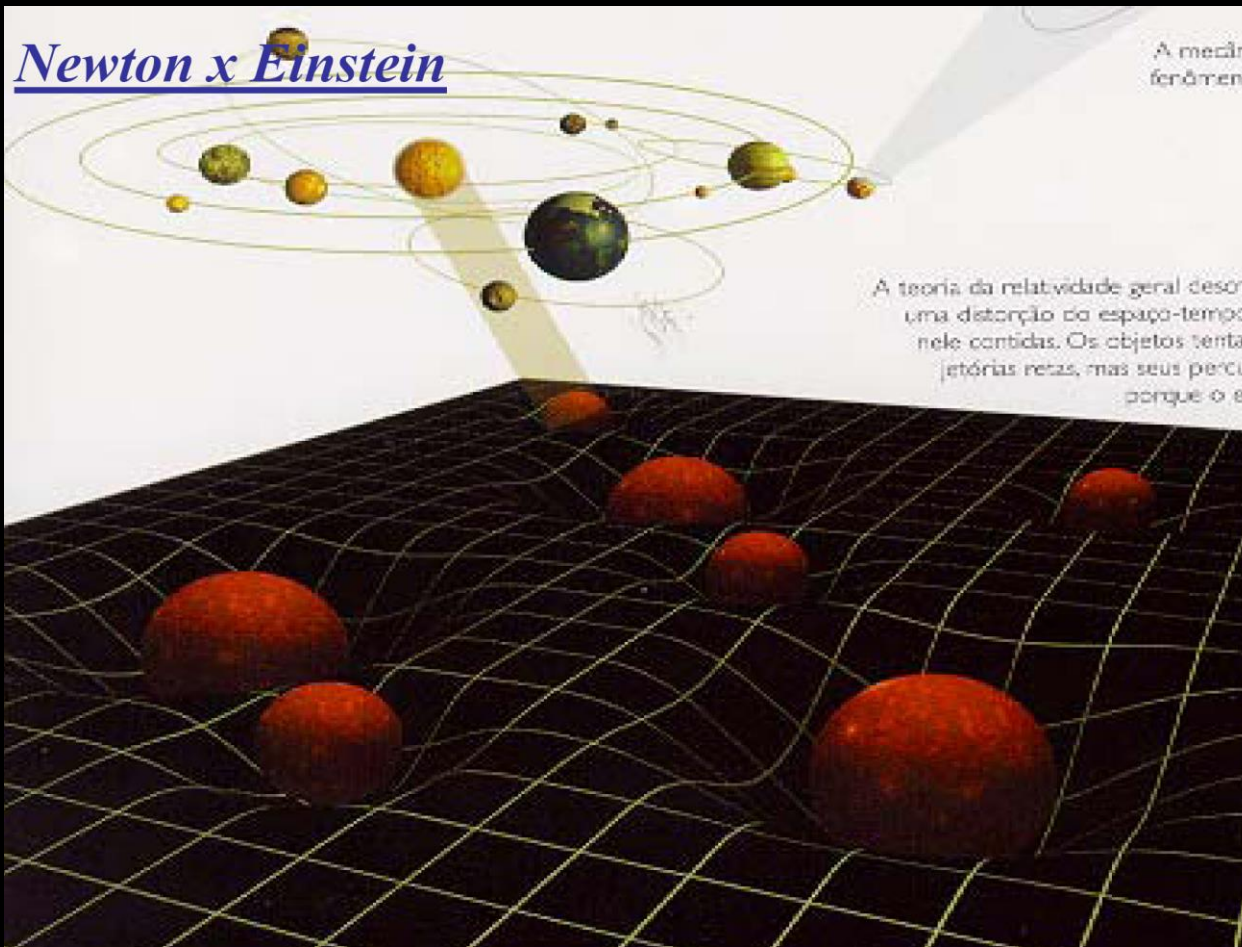
...mas, **Newton não explica porque as massas se atraem...!!**

Teoria da Relatividade de Einstein (1879-1955)



GRAVIDADE

é o efeito geométrico provocado pela deformação do “espaço-tempo”



A curvatura do
“espaço-tempo”
deforma a
passagem do tempo
e as medidas de
distância

Aqui cabem algumas observações...

A **Teoria da Relatividade** (TRE) é uma atribuição dada ao conjunto de 2 teorias científicas – **A Relatividade Especial ou Restrita e a Relatividade Geral**.

- **Relatividade Restrita** se baseia em 2 princípios:

1o – Princípio da Relatividade, onde **2 observadores que se movem com velocidade constante um em relação ao outro**, concordam com todos os **resultados dos experimentos físico**. Isto implica em que **a velocidade é relativa!** implicando em que se for feito um experimento parado ou numa nave viajando a velocidade da luz, o resultado do experimento deve ser o mesmo para os 2 observadores.

2o – A velocidade da luz no vácuo é finita, constante e é absoluta!

....Não depende da fonte nem do observador (experiência de Michelson & Morley; experiência de Roemer – veremos adiante). Implicando em que **c** é a velocidade que limita toda a matéria e toda a informação no Universo

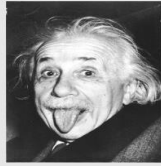
Se $v = s/t \rightarrow$ e $v = c$ onde **c** é absoluta, **s e t devem variar e vai haver uma interdependência...efeito de contração espacial e dilatação temporal**

O que resulta em uma visão de que os **conceitos de espaço e tempo não são independentes, passam a ser interpretados como uma única entidade**, ou seja, o espaço consiste de 3 dimensões (x,y,z) e o tempo é unidimensional, então o espaço-tempo passa a ser visto como uma entidade geométrica unificada, de 4 dimensões: 3 delas associadas a posição espacial (x, y, z) e a 4^a associada ao tempo - quadridimensional.

Importante enfatizar aqui que no referencial do **espaço-tempo**, a unidade de medida será o **ano-luz** – a distância que a luz percorre em 1 ano...!

As unidades metro (m) e segundo (s) passam a ser medidas da mesma grandeza, só que em escalas diferentes: $1\text{s} = 299.792.458\text{m} = \text{ano-luz}$

Na Teoria da Relatividade Geral, o campo gravitacional é uma manifestação de distorções na estrutura do espaço-tempo. Os efeitos da gravidade são integrados e então surge a noção de **espaço-tempo curvo**....
A “**curvatura do espaço-tempo**”, deforma a **passagem do tempo e as medidas da distância**...



Equação de Campo de Einstein

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{R}{2} \cdot g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = G \cdot \frac{8\pi}{c^4} T_{\mu\nu}$$



Curvatura do espaço-tempo

Distribuição de matéria e energia

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} R g_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

A equação de campo de Einstein $R_{\mu\nu}$ = Tensor de curvatura de Ricci $g_{\mu\nu}$ = Tensor métrico ("métrica") R = Curvatura escalar $T_{\mu\nu}$ = Tensor momento - energia

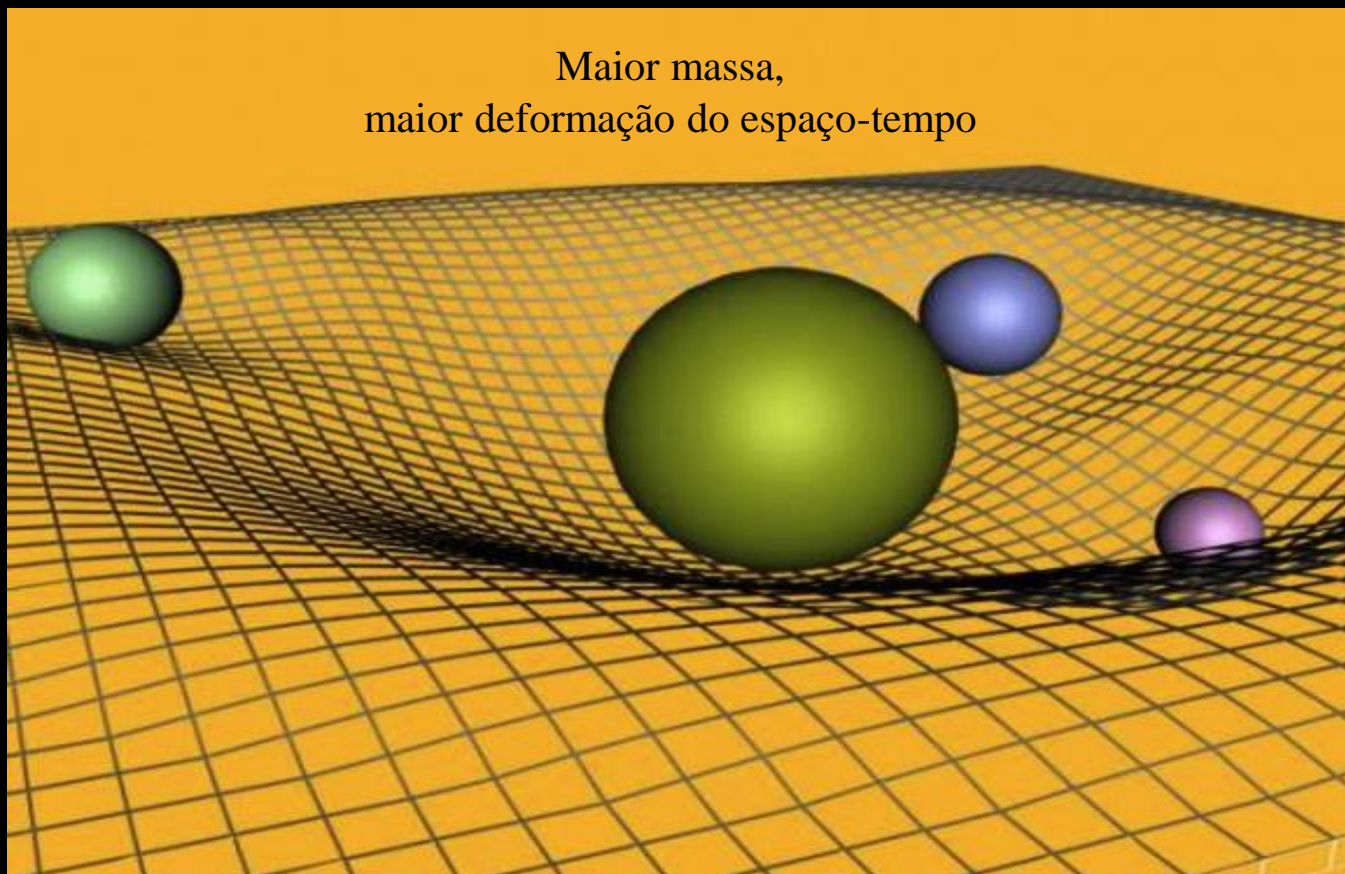
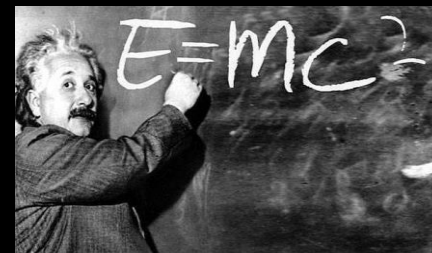
$$g_{\mu\nu} = \begin{pmatrix} -1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2} g_{\mu\nu} R = \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

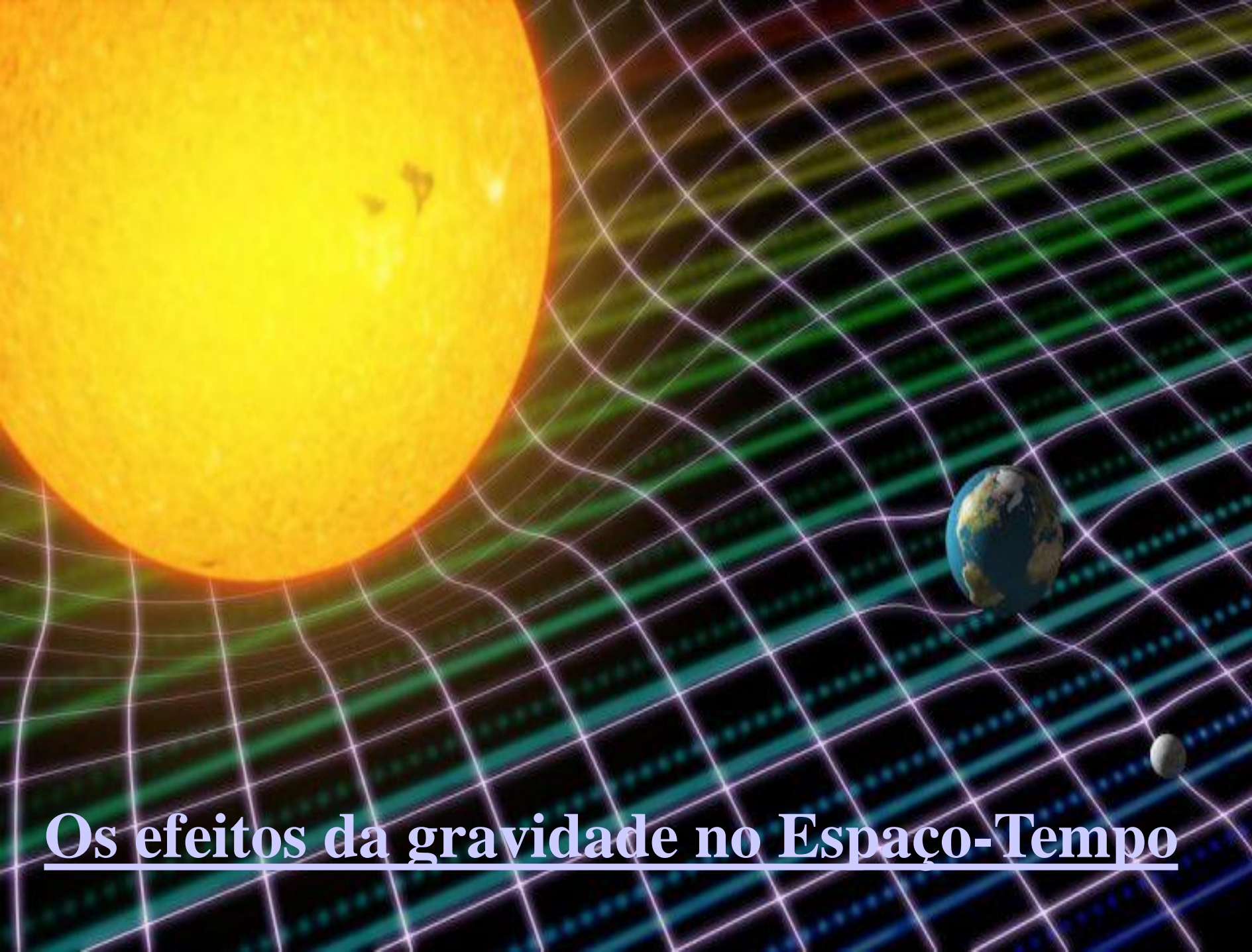
Este tensor, com números diferentes de zero na diagonal principal da Matriz, representa matematicamente uma métrica que considera o universo homogêneo e isotrópico.

* Os tensores são generalizações de vetores e escalares.

“O **espaço-tempo** diz à matéria como se mover...
a matéria diz ao espaço-tempo como se curvar”

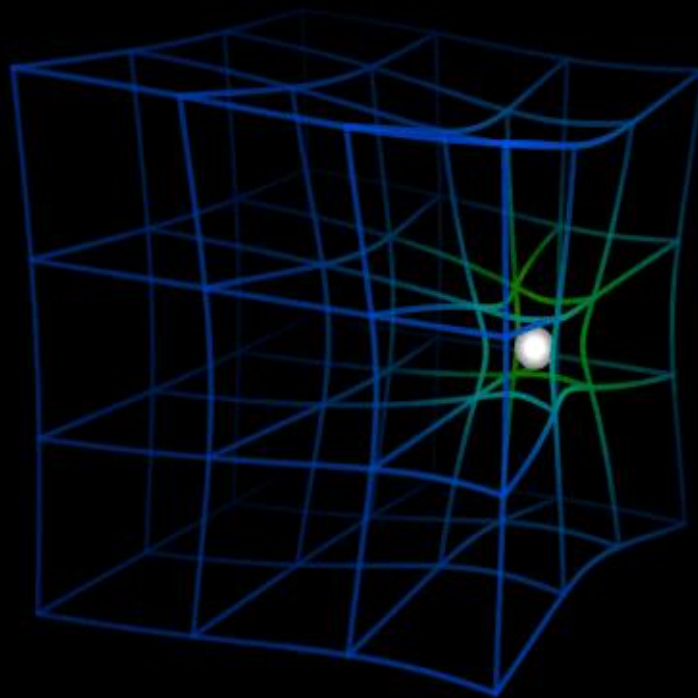


Como checar esta hipótese ? (1916)



Os efeitos da gravidade no Espaço-Tempo

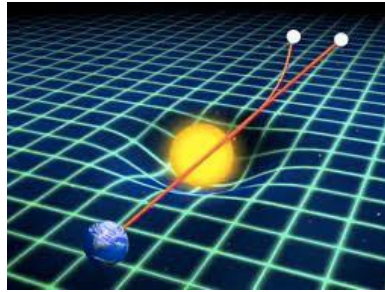
“O **espaço-tempo** diz à matéria como se mover...
a matéria diz ao espaço-tempo como se curvar”



Einstein e o Eclipse de 1919

<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num1/eclipse.pdf>

Em 1911 Einstein teve a idéia de realizar um **experimento** que lhe permitiria esclarecer o **desvio dos raios luminosos (fig)** aplicando o princípio de Huygens a respeito da propagação em linha reta da luz e as leis de reflexão e refração.

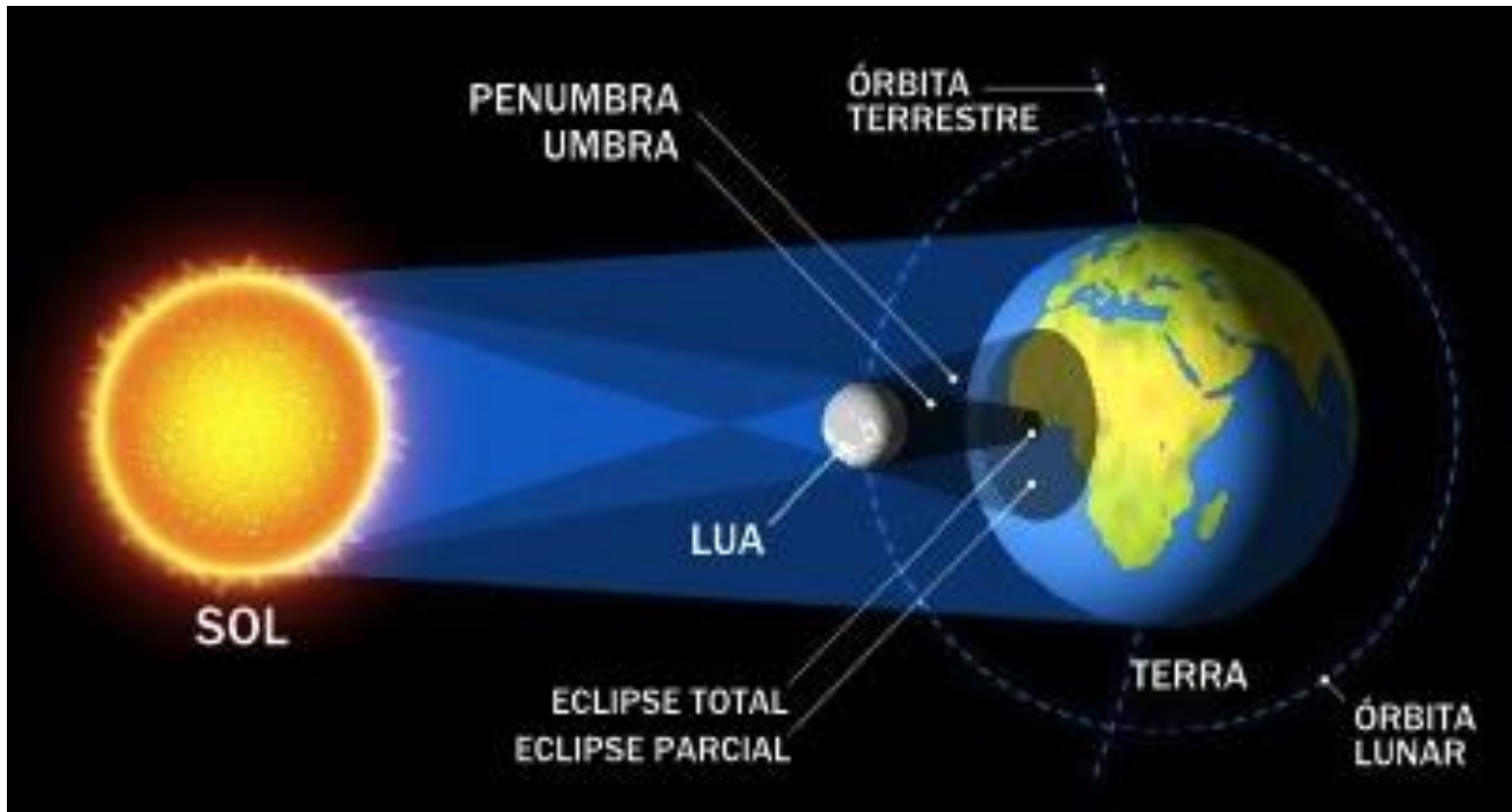


O experimento requereria um campo gravitacional muito intenso para que a medida pudesse ser efetivada. Para a verificação experimental, seria preciso obter duas fotografias, uma do **campo de estrelas durante a passagem do corpo maciço (por exemplo, o Sol)** diante dele e outra **do mesmo campo de estrelas sem a presença desse corpo**, e comparar, nas duas imagens, as posições das **estrelas mais próximas da borda desse corpo**. **Se o efeito existisse, a posição dessas estrelas estaria ligeiramente modificada.**

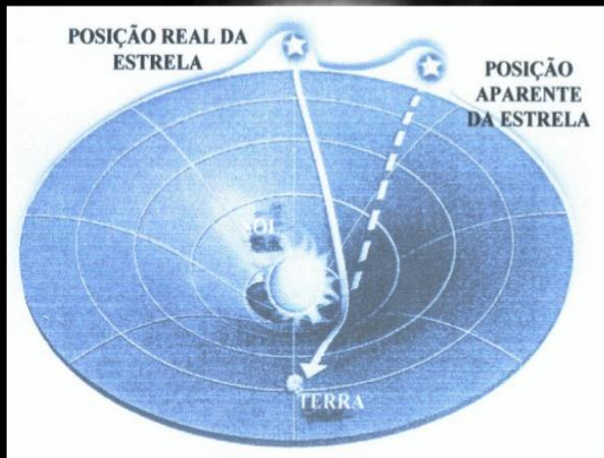
Caso o Sol fosse usado como ‘corpo teste’ para as idéias de Einstein, restaria uma outra dificuldade causada pela luminosidade do Sol, já que esta impediria que as estrelas mais próximas da sua borda fossem fotografadas.

Como realizar este experimento?

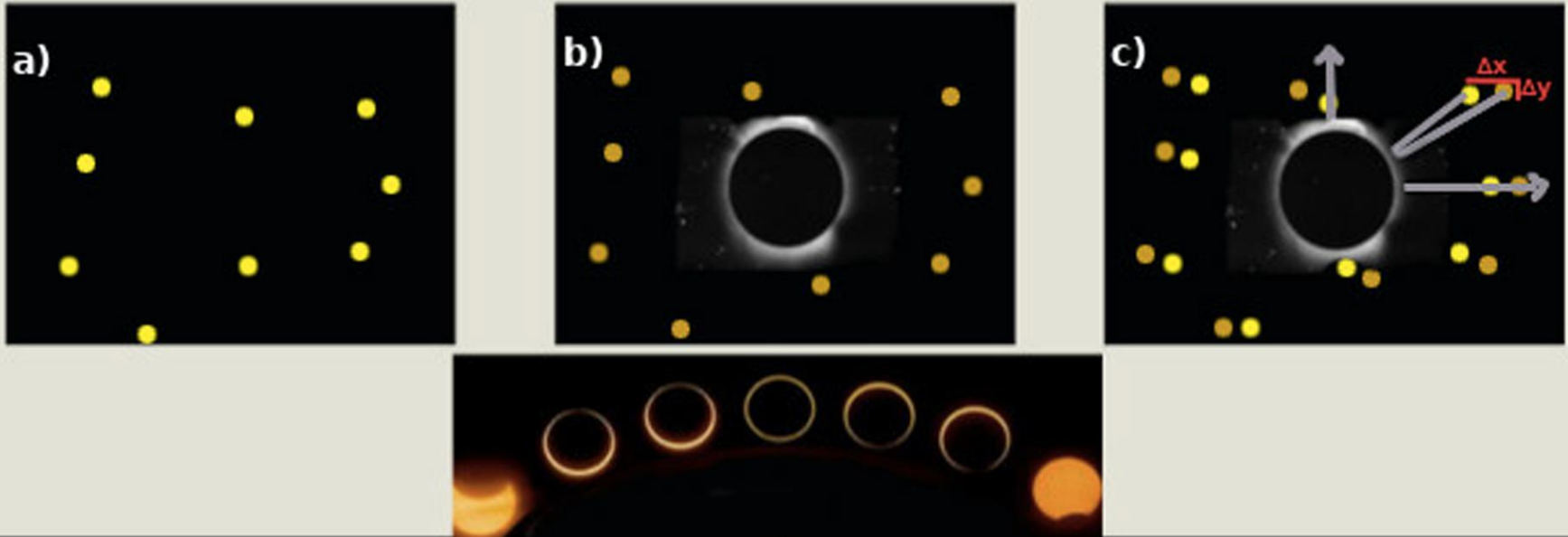
Obter as fotografias com o Sol no céu, mas sem a sua luz, seria possível em apenas uma única circunstância: durante um **eclipse solar total**.



A idéia do experimento: observar se ocorria desvio dos raios luminosos... aplicando o princípio de Huygens a respeito da propagação em linha reta da luz e as leis de reflexão e refração.



Medida do Desvio da Luz



- O Eclipse Solar Total no Brasil - Sobral... Medida do ângulo de deflexão em 3 etapas.
- a) Estrelas são imagiadas no campo de visão sem a presença do Sol.
 - b) Posição deslocada das mesmas estrelas no momento do eclipse, e
 - c) Superposição final das duas chapas fotográficas e determinação do ângulo de desvio.

O resultado revelou-se de acordo com a teoria de Einstein.

Imagem obtida do artigo Revista Brasileira do Ensino de Física
<https://doi.org/10.1590/1806-9126-RBEF-2019-0199>

O Eclipse Solar Total no Brasil....

Fotografia do eclipse de 29 de maio de 1919, obtida em Sobral



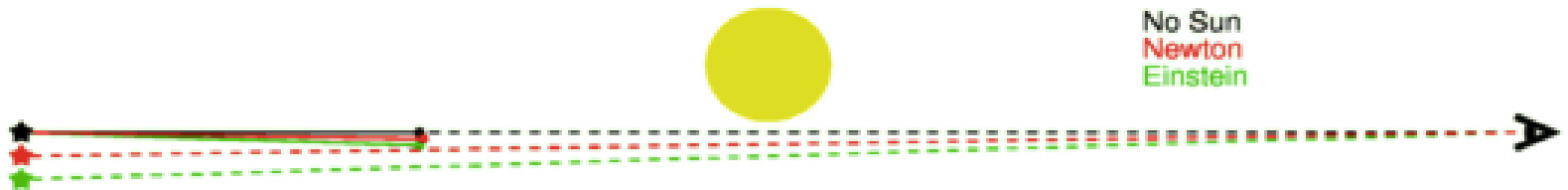
As linhas verdes marcam as posições das estrelas usadas para a verificação da teoria de Einstein

Einstein e o Eclipse de 1919

<http://www.sbfisica.org.br/fne/Vol6/Num1/eclipse.pdf>

Três eram os possíveis resultados para as medições, todos eles referentes a um raio de luz que praticamente tocasse a borda do disco solar:

- a) desvio igual a **zero**, que exigiria que se formulasse uma nova compreensão da composição da luz;
- b) desvio igual **0,87** segundos de arco (este resultado confirmaria a teoria de Newton);
- c) um desvio de **1,75** segundos de arco, explicado pela TRG de Einstein



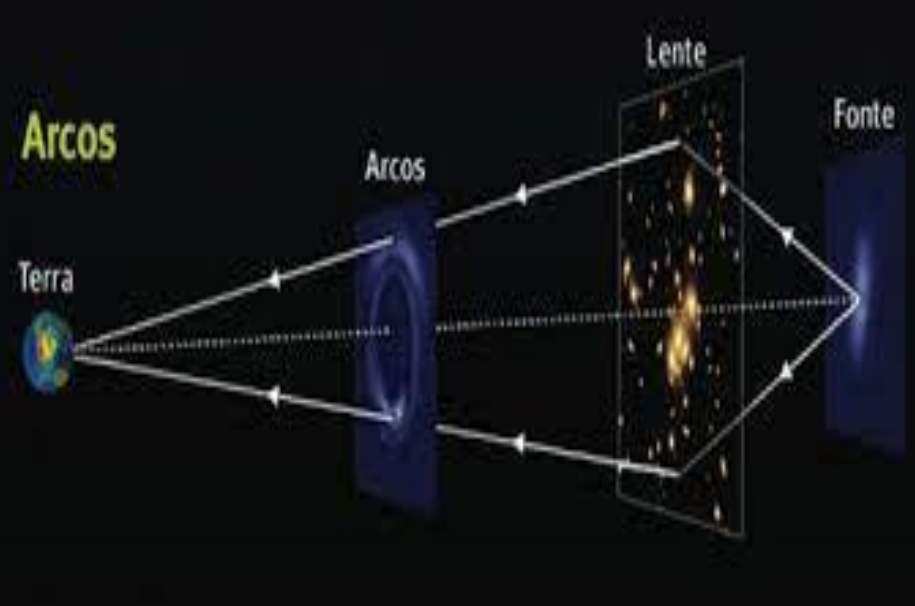
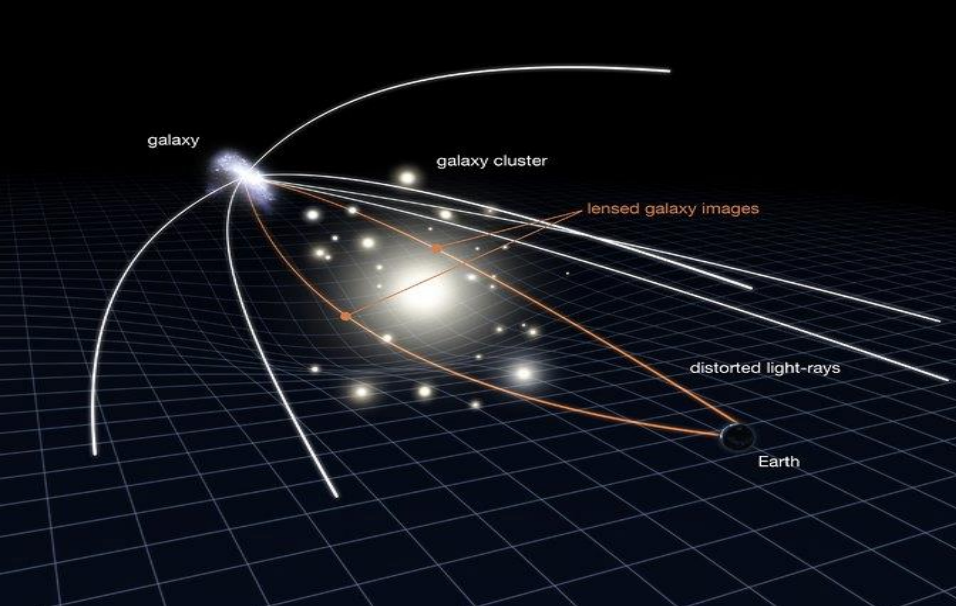
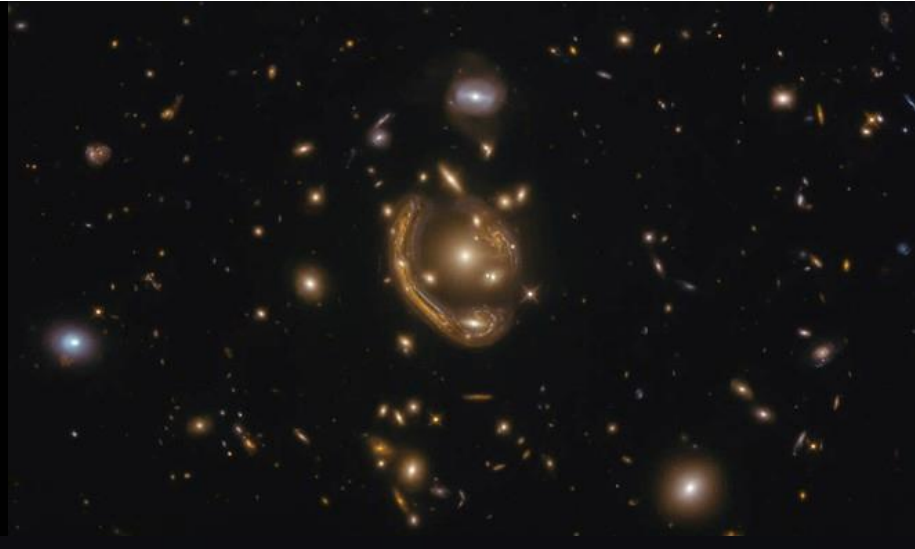
Em preto: a luz segue em linha reta (sem a presença do Sol).

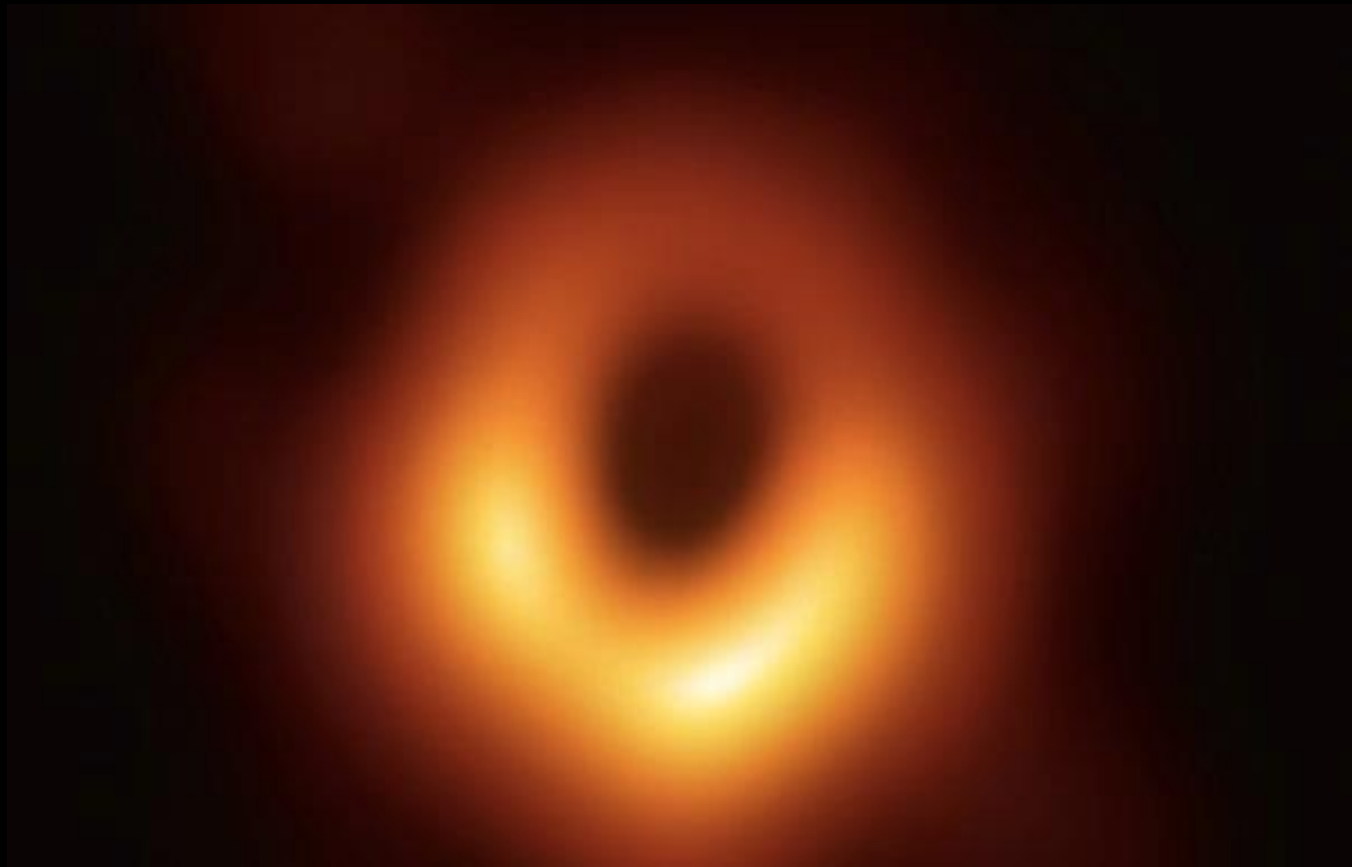
Em vermelho: a previsão pela teoria clássica de Newton.

Em verde: a previsão da TGR de Einstein, confirmada no eclipse solar de 1919. (Crédito Ned Wright)

Desvio medido nas placas fotográficas de Sobral = 1,98 segundos de arco com uma margem de erro de $\hat{A}\pm 0,12$, confirmando a TRE

Mas estas previsões foram confirmadas em outras situações astrofísicas como as “lentes gravitacionais”





Vimos até aqui que a gravidade tem importante papel no entendimento físico da **dinâmica do Universo**. Vimos também o **comportamento da luz** dentro desta nova perspectiva da visão relativística.

Vamos ver agora uma outra fonte de informação que nos permite ampliar, em muito...., a visão atual do Universo...

Gravidade e Luz

..vamos lembrar que as 2 fontes de informação que mais contribuíram para a visão atual do Universo

Exceto por alguns corpos no Sistema Solar, não temos acesso direto aos astros.

Informação chega à Terra (observador) via:

- meteoritos
- raios cósmicos
- neutrinos
- ondas-gravitacionais (detectadas diretamente e está abrindo nova área de pesquisa)
- partículas de matéria escura? (ainda não detectada diretamente)
- energia escura??? (não sabemos...)

De longe, a fonte de informação mais importante é a **Radiação Eletromagnética**.

O conhecimento de **propriedades físicas dos astros** passa a ser adquirido através da **avaliação, análise quantitativa da intensidade, dispersão e polarização da luz em várias regiões do espectro eletromagnético**.

Observamos os astros devido a detecção da LUZ....!
...uma faixa do Espectro Eletromagnético
...e a única informação possível para entendermos a natureza dos objetos
que estão muito distantes.



Que informações podemos obter através dela?
Qual a importância em se entender a **natureza da luz...**
...e que **informações físicas** que ela carrega ?

Registros Históricos

Por volta do ano 1000 já existiam registros do interesse e o conhecimento de que ocorria mudanças na posição real da luz das estrelas no céu devido aos efeitos da atmosfera, como a refração.

Questões como se a luz se propaga **instantaneamente** e **consequentemente é infinita**, ou tem uma **velocidade determinada e é finita já eram questionadas**

Isaac Beeckman, em 1629, realiza o primeiro experimento para responder a esta questão, ainda precário, envolvendo detonação de explosivos e uma sequência de espelhos para verificar se ocorreriam diferenças nos “flashes” de luz → **inconclusivo!**

Galileu, em 1638 realiza outro experimento utilizando 2 lanternas a 1 milha de distância para verificar se haveria atraso perceptível entre as duas → também **inconclusivo!**

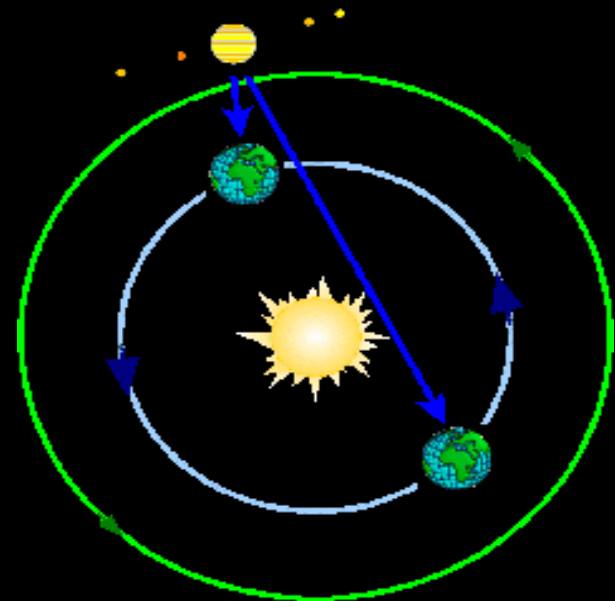
Roemer, em 1676 utiliza a observação de **eclipses das luas de Júpiter, como se resume a seguir.**

Ele notou que os tempos de eclipses discordavam das previsões de Cassini, variando em 22 minutos em um período de seis meses.

Constata que a **diferença de tempo** era devido ao tempo necessário para a luz se propagar e, portanto, a **velocidade era finita!** Esta diferença de tempo levava a um valor da velocidade da luz de 220 mil km/h.

Sabemos que o valor é da ordem de 300.000 km/h.

O erro de Roemer é atribuído aos valores errados dos diâmetros de órbita da Terra e Júpiter



Velocidade da Luz

- Huygens quem **equacionou e estimou** um valor para a velocidade da luz.
- Hoje, sabemos ser real o fato da luz tem uma **velocidade finita**.
- A velocidade da luz no vácuo, c (do latim celeritas que significa velocidade) é uma **constante** da natureza e seu valor exato é de 299.792,458 km/s
- A luz leva 1,2 s para ir da Terra até a Lua (e vice-versa).

- A luz leva ≈ 500 segundos ($\sim 8,3$ minutos) para vir da superfície do Sol até a Terra.

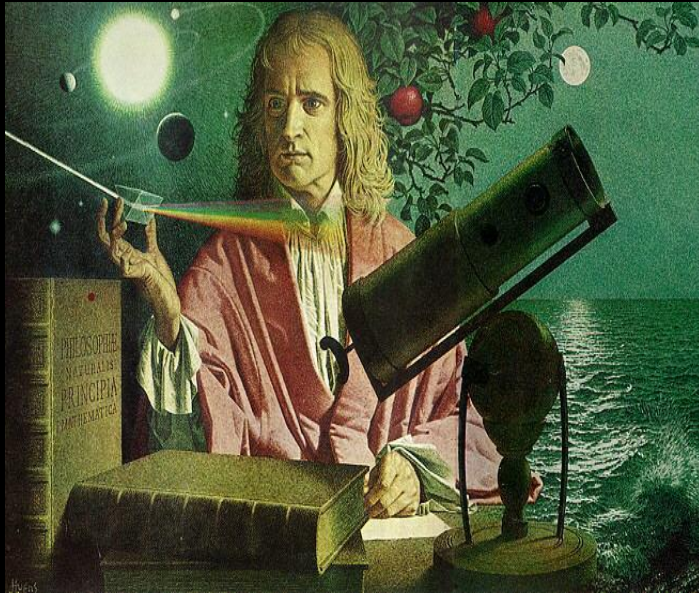
LUZ – o que é? Qual sua natureza?

Onda ou partícula ? Que informações a luz carrega?

Como partícula, seria possível tratar de aspectos como a **interação com a matéria.**

Como onda, permitiria utilizar e obter parâmetros e informações importantes do comportamento da luz como, por exemplo, intensidade, frequência e comprimento de onda, úteis para formalizar os aspectos de sua propagação.

Newton



a **luz branca** atravessa um prisma, mudando de um meio para outro (ar \rightarrow lente), ocorrem fenômeno como dispersão, refração \rightarrow gera o **espectro contínuo**

corpúscular

Huygens



Equacionou e estimou um valor para a velocidade da luz, é uma **constante** da natureza e seu valor exato é de 299.792,458 km/s

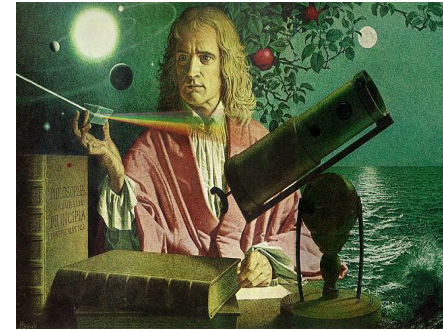
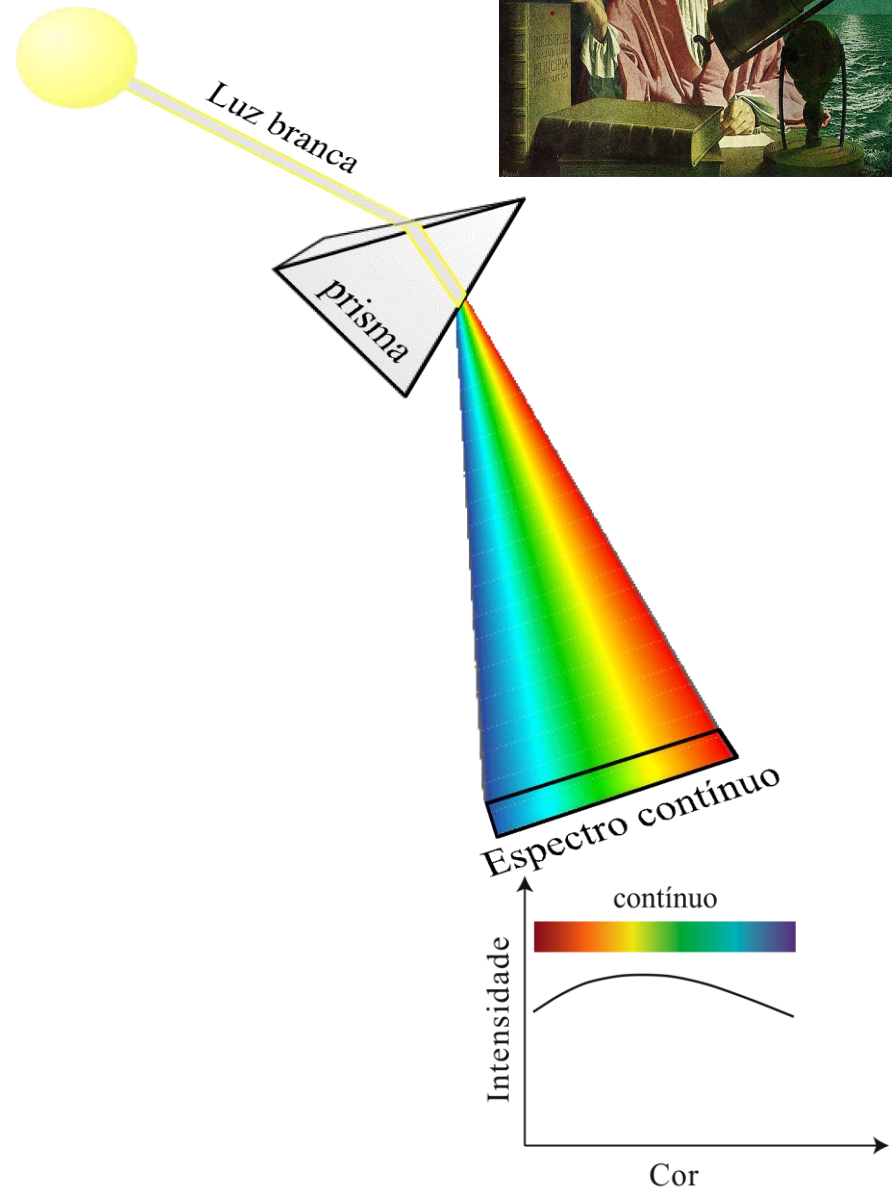
ondulatória

Luz

Newton acreditava que a luz tinha natureza corpuscular, já que seus estudos de decomposição da luz mostram que quando a **luz branca** atravessa um prisma, mudando de um meio para outro (ar \rightarrow lente), ocorre um fenômeno denominado **refração**.

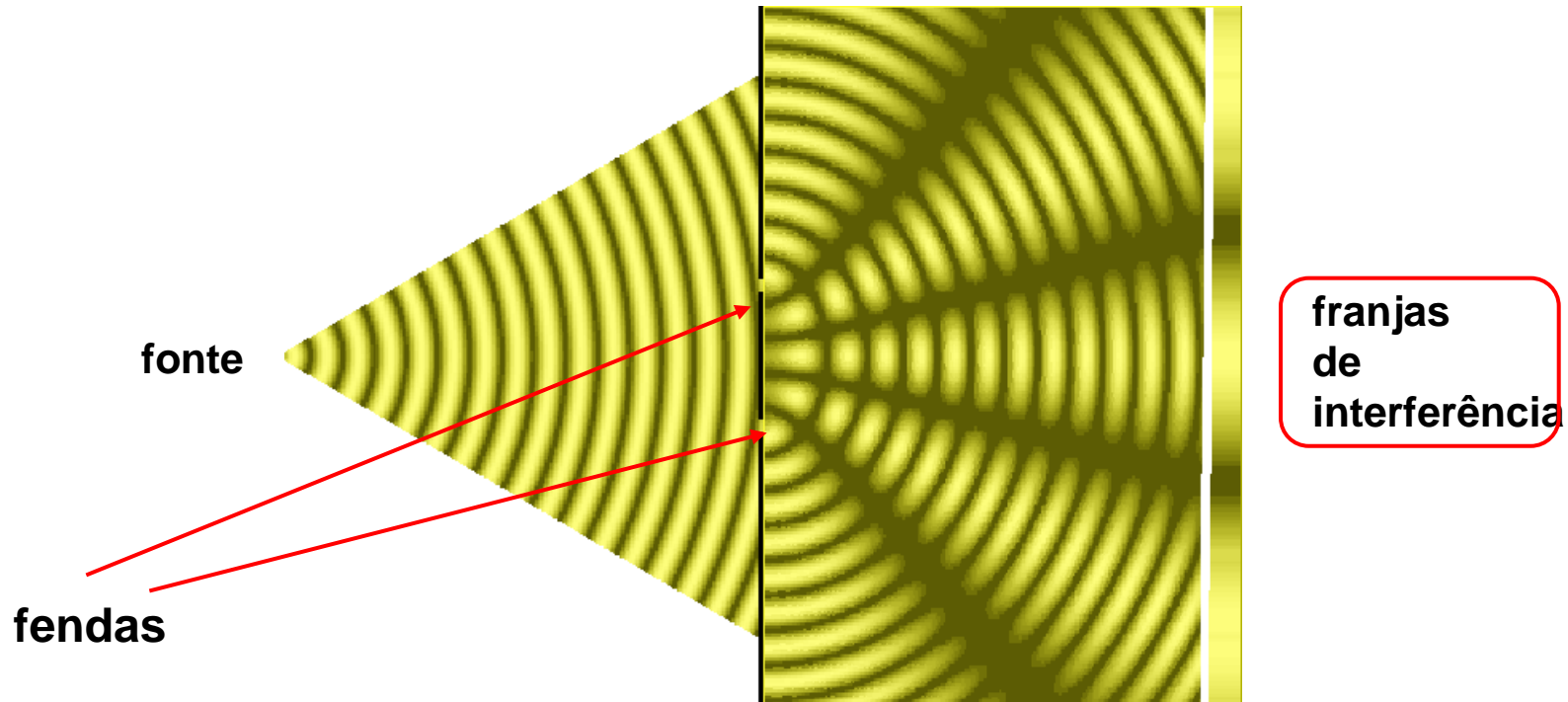
•A **refração** é responsável pelo aparecimento das cores observadas no arco-íris, ou seja, aparece o que definimos como um **espectro contínuo**.

Espectro Contínuo (E.C) é, portanto, a distribuição contínua de energia distribuída em uma faixa de valores, com variação gradual da intensidade.



O que os experimentos realizados na época indicavam ?

- A natureza corpuscular da luz prevaleceu, graças a Newton, e até o início do século XIX.
- Em 1801, Thomas Young realiza a experiência da fenda dupla, mostra o fenômeno de interferência da luz e conclui sobre sua natureza ondulatória.
- Augustin-Jean Fresnel confirma mais tarde os resultados de Young.



Luz é uma forma de Radiação Eletromagnética

...exibe propriedades de onda e partículas

...pode ser visível e invisível

Nos anos 1860, James Clark Maxwell unifica o magnetismo com a eletricidade em uma **única teoria** definida como : **Eletromagnetismo**.

Mostra que uma solução de suas equações corresponde a uma **onda eletromagnética (O.E)** e que estas ondas se propagam com a velocidade da luz.

O que é confirmado por Heinrich Hertz (1889) que realiza um experimento onde **produz ondas eletromagnéticas em laboratório**, conforme previsto teoricamente por Maxwell, confirmando-a.

A luz é reconhecida como uma **radiação eletromagnética**.

...o processo de transferência de energia através de **ondas eletromagnéticas** e...é consequência da oscilação dos campos elétrico e magnético

Radiação Eletromagnética

Radiação: é o processo de transferência ou propagação de energia via ondas ou partículas com Energia Cinética (E_c).

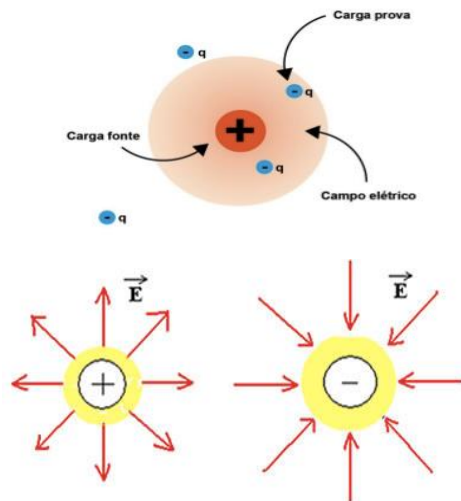
Radiação Eletromagnética: é o processo de transferência de energia através de ondas eletromagnéticas

...é consequência da oscilação dos campos elétrico e magnético

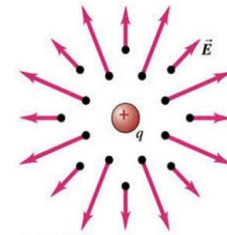
Uma carga em repouso gera um campo elétrico em sua volta.

CAMPO ELÉTRICO

É uma propriedade física estabelecida em todos os pontos do espaço que estão sob a influência de uma carga elétrica (**carga fonte**), tal que uma outra carga (**carga de prova**), ao ser colocada num desses pontos, fica sujeita a uma **força de atração** ou de **repulsão**, exercida pela **carga fonte**.



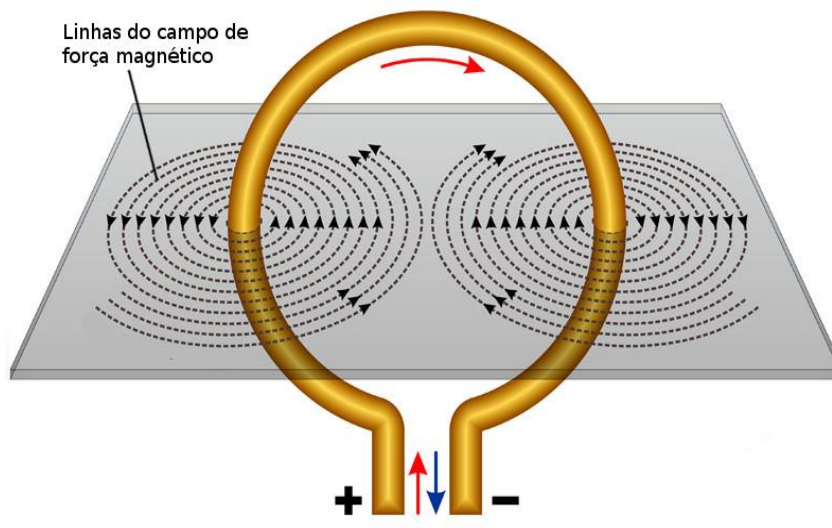
O campo elétrico



- Uma carga elétrica modifica o espaço em torno de si.
- Esta carga cria um campo elétrico no espaço, cuja intensidade é dada através da equação abaixo:

$$\vec{E} = \frac{\vec{F}}{q^{(+)}_{prova}}$$

Se esta carga estiver em movimento (acelerado), o **campo elétrico**, em uma posição qualquer, estará variando no tempo e gerará um **campo magnético** que também varia com o tempo.



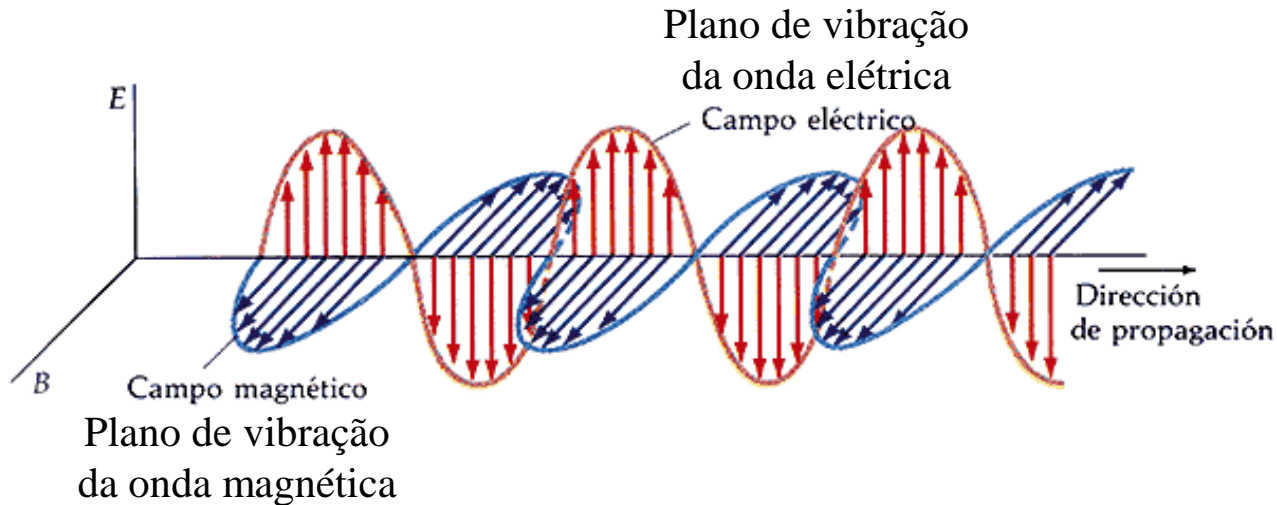
Estes campos, em conjunto, constituem uma **onda eletromagnética**, que se propaga mesmo no vácuo.

Radiação Eletromagnética

...o modelo para a propagação

Oscilação dos campos elétrico (E) e magnético (M ou B) gera transferência de energia através de ondas eletromagnéticas

Os **campos** (E e B) são perpendiculares; As **ondas** são transversais.



Ondas mecânicas (som, ondas do mar) são **ondas de compressão**, portanto, precisam de um meio p/ se propagarem.

Mas....., ondas eletromagnéticas, ao contrário das ondas mecânicas, **não precisam de um meio de propagação.**

Características das Ondas Eletromagnéticas

Comprimento de Onda (λ), frequência (ν), velocidade (V), amplitude (A)

- Variáveis básicas de uma onda mecânica:
- λ : comprimento de onda (distância entre cristas)
- ν : frequência (número de ondas por segundo)
- V : velocidade de propagação

$$V = \lambda \nu \quad (1)$$

- No caso da radiação eletromagnética:

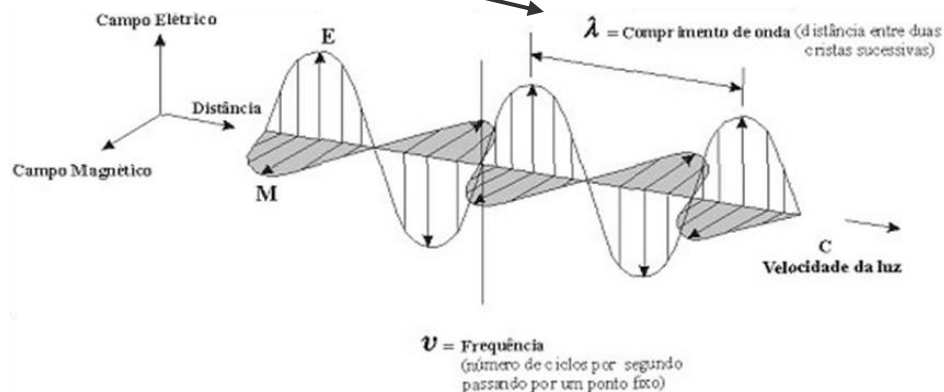
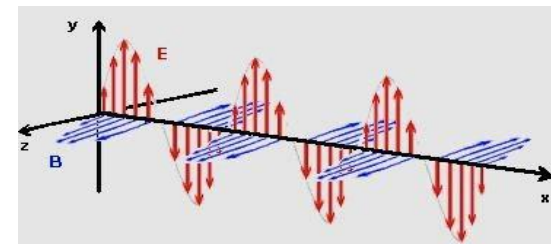
$V = c$ (velocidade da luz), então a equação acima fica: $c = \lambda \nu$

- λ é medido em unidades de

μ = micrômetro = 10^{-6} m
nm = nanômetro = 10^{-9} m
Å = Angstrom = 10^{-10} m

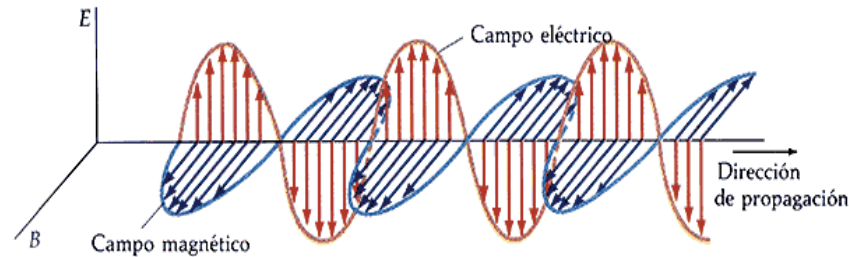
- ν é medida em unidades de

i.e., [1/tempo] Hertz, megahertz, gigahertz
1 Hertz = 1 onda ou ciclo por segundo



Como **ondas** podemos usar a ferramenta matemática da ondulatória, que correlaciona vários parâmetros que definem o comportamento de ondas

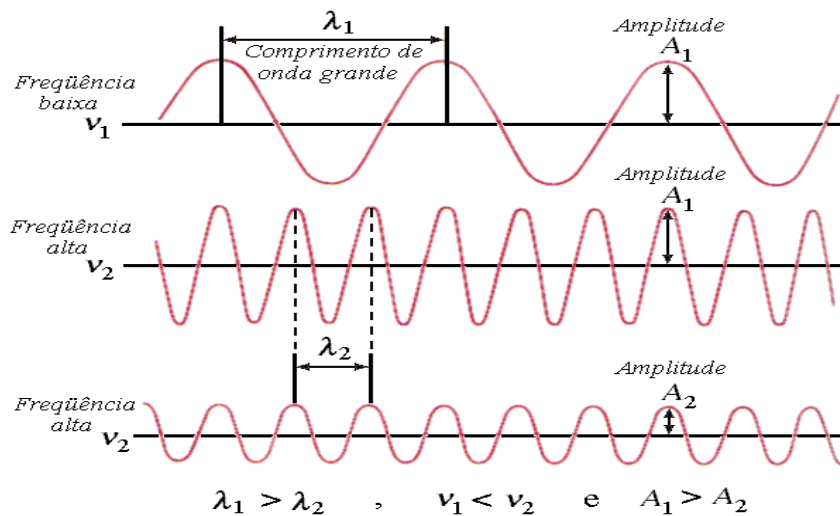
frequencia (**ν**), amplitude (**A**), comprimento de onda (**λ**).



ν = número de ondas por segundo

λ : comprimento de onda (distância entre cristas)

v : velocidade de propagação

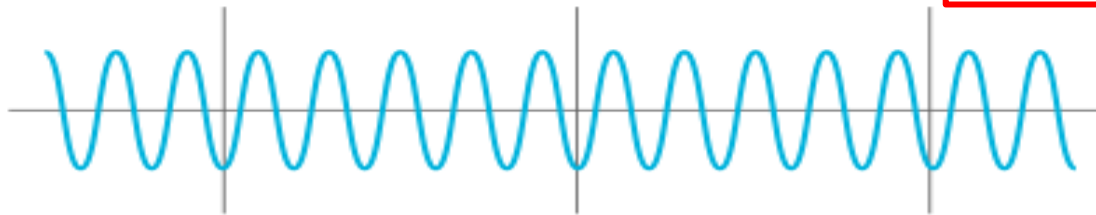


Lembrando que para a **radiação eletromagnética** **$v = c$** (velocidade da luz) \rightarrow **$\lambda v = c$**

A variação de um dos parâmetros implica na alteração do outro...

Como **c** é constante no vácuo, se a frequência (ν) muda, o comprimento de onda (λ) também muda...

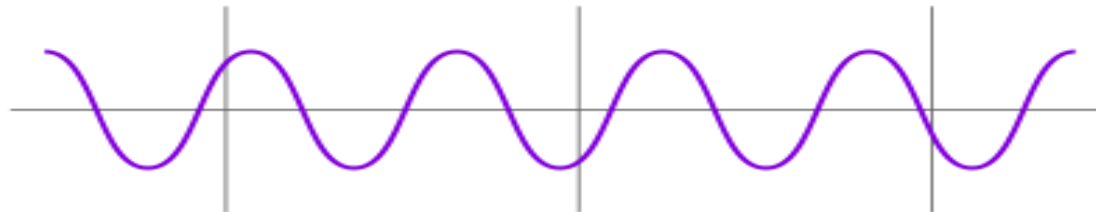
Onda A:



- Frequência maior
- Comprimento de onda menor

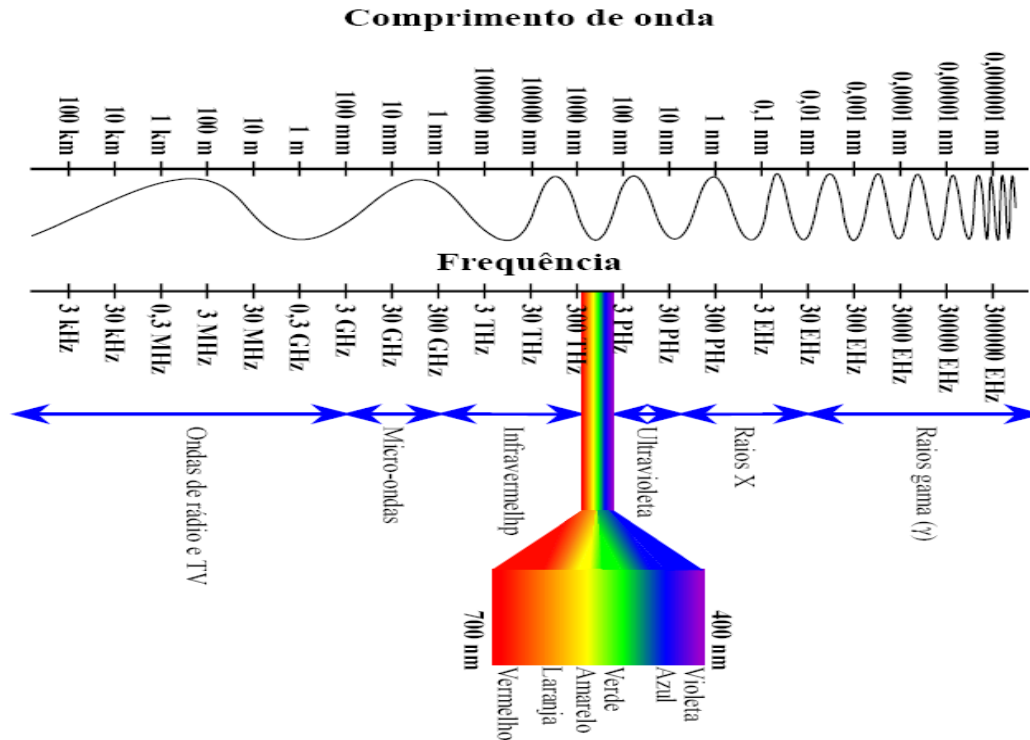
$$\lambda \nu = c \text{ (cte)}$$

Onda B:



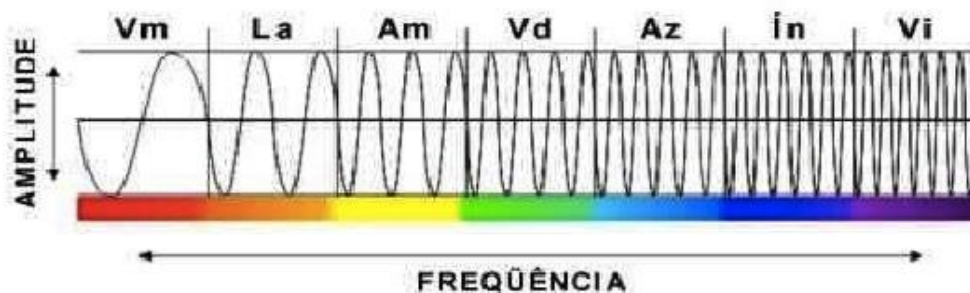
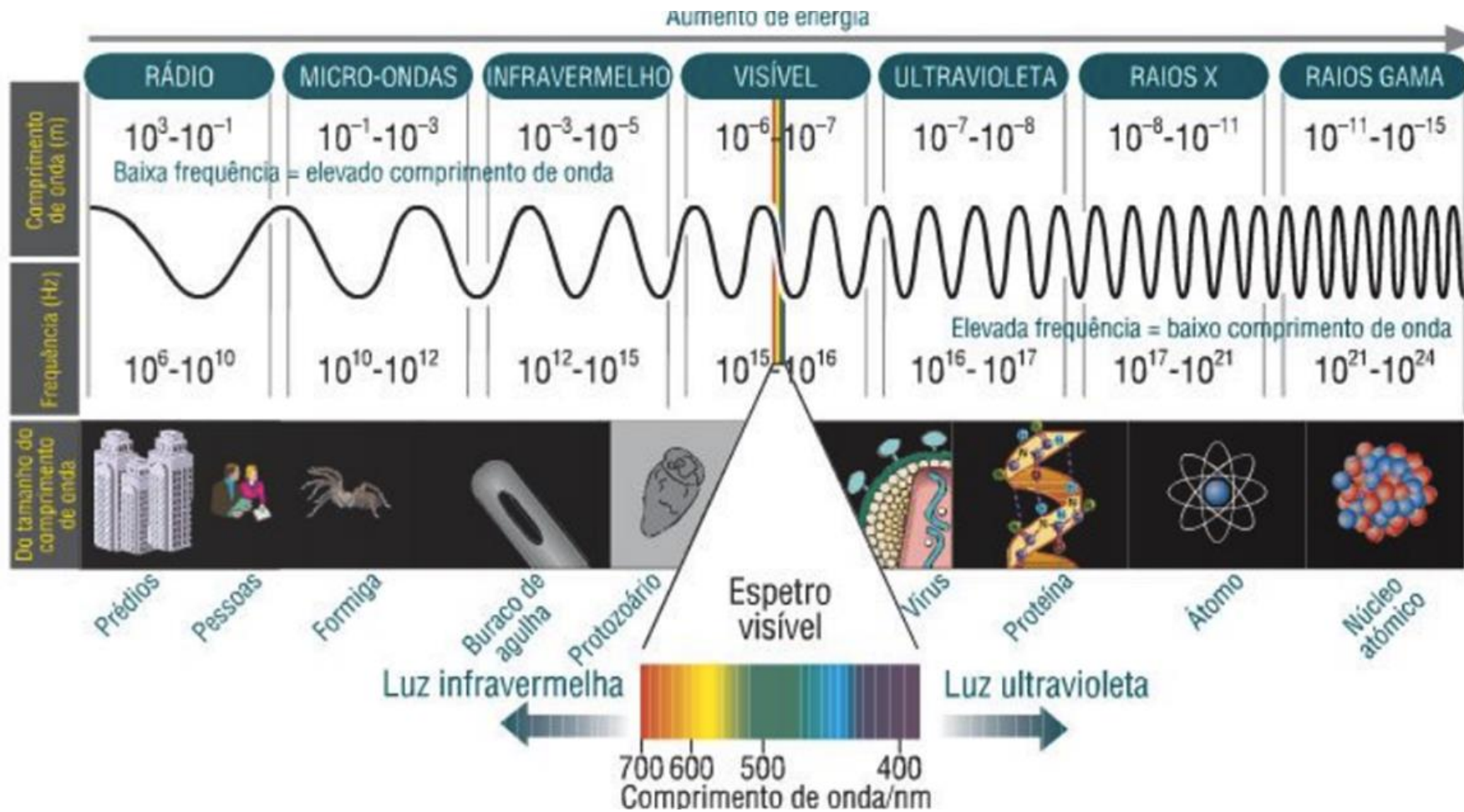
- Frequência menor
- Comprimento de onda maior

A variação da intensidade de uma fonte de luz em função do comprimento de onda (ou frequência), é definida como sendo o “**Espectro Eletromagnético- E.E**”, inclui a radiação visível e invisível, e pode ser representada como se observa na figura abaixo.

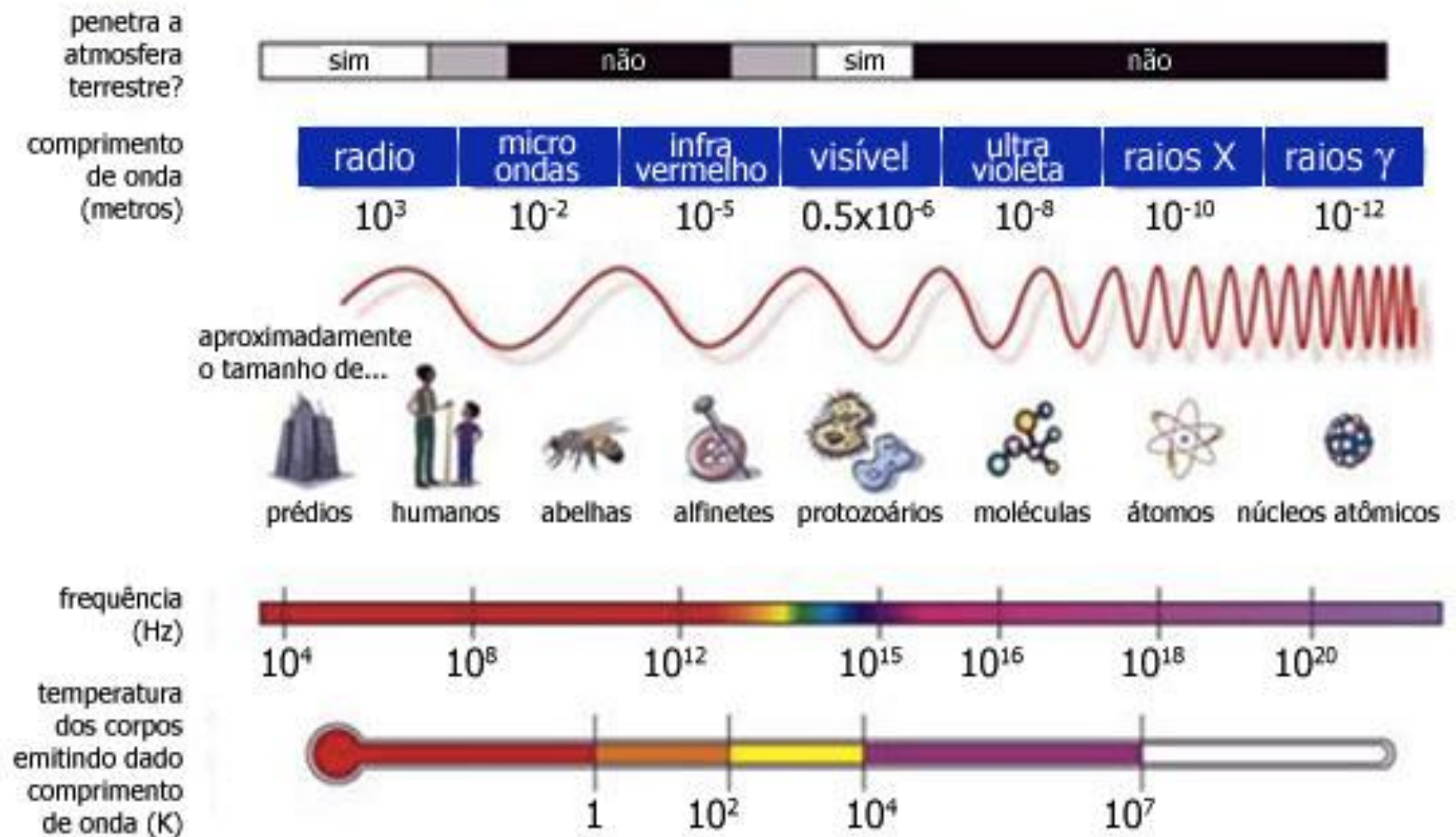


Intervalos de Comprimentos de Onda e as Frequências Respectivas

A faixa colorida representa o intervalo de Frequências ou Comprimentos de Onda no Visível (de 4000 a 7000 angstroms)



O Espectro Eletromagnético



Síntese

4 Propriedades Fundamentais das Ondas Eletromagnéticas

1. Velocidade de propagação, **C**, no vácuo é constante.
2. Direção de propagação é perpendicular a ambos os campos, o elétrico (E) e o magnético (B), ou seja, E e B são **perpendiculares um em relação ao outro**.
3. Direção da polarização é a mesma do campo elétrico (E).
4. Intensidade da onda depende da magnitude dos campos **B** e **E**.

Equações Básicas que relacionam as variáveis de uma onda eletromagnética

$$c = \lambda \cdot \nu$$

velocidade da luz

$$\lambda = c/\nu$$

comprimento de onda

$$\nu = c/\lambda$$

onde:

$$\nu = \text{frequency} \quad \text{frequência}$$

Equação da energia de um fóton (partícula)

$$E = h\nu, \text{ mas } \nu = c/\lambda,$$

$$\text{portanto, } E = h c/\lambda$$

$$h = 6,62607 \times 10^{-34} \text{ joule / segundo,}$$

$$= 6,62607 \times 10^{-27} \text{ erg / segundo, e}$$

$$c = 2.9979 \times 10^8 \text{ m/s}$$

Como ondas deveriam exibir as seguintes propriedades
...quando se propagam estão sujeitas aos fenômenos de difração, refração e interferência

1-Difração: As componentes da luz branca, ao **passarem por um obstáculo** ou uma fenda, são **desviadas**, proporcionalmente ao seu comprimento de onda. Luz branca é o nome dado ao que o olho humano percebe ao conjunto de cores visíveis que quando combinadas geram iluminação branca.

2-Interferência: Os diferentes comprimentos de onda de um feixe de luz são refletidos por uma superfície irregular, causando interferências construtivas e destrutivas, dependendo do comprimento de onda.

3-Refração: Mudança de direção e velocidade da luz ao atravessar uma superfície separadora de meios diferentes.

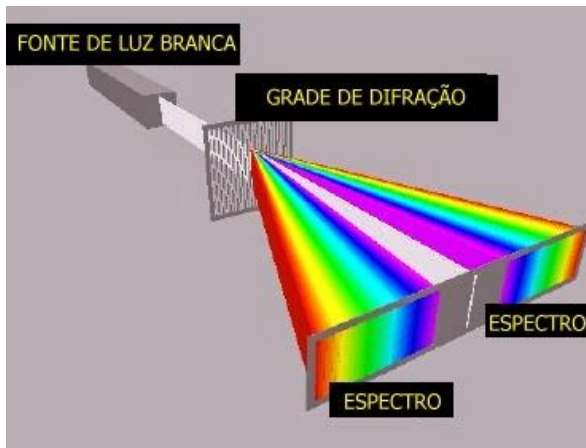


Fig. 1 – Difração; Refração

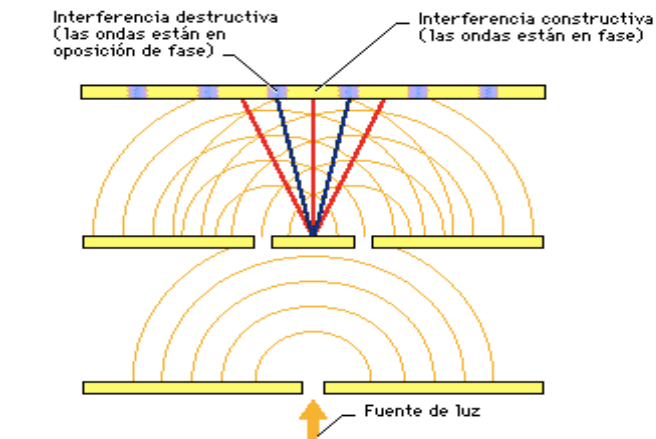


Ilustración de Microsoft

Fig. 2 – Difração; Interferência

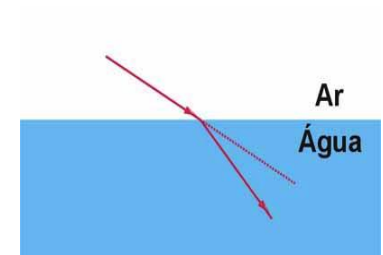
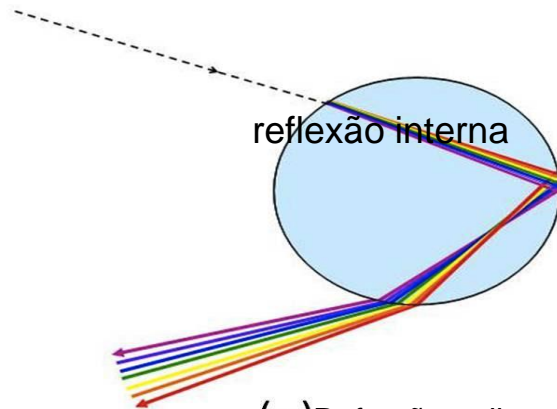


Fig. 3 -Refração

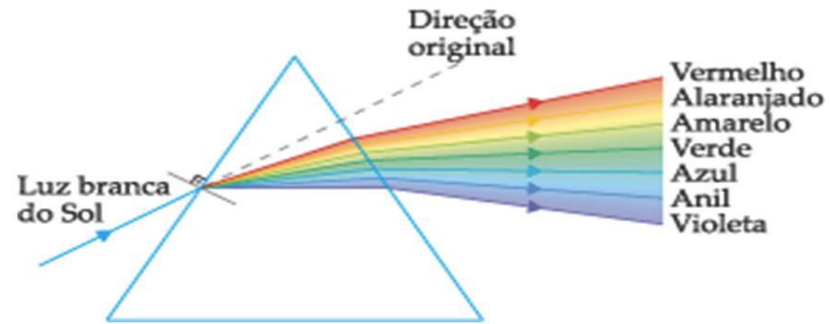
Fig. 1 – Difração; Refração

Um bom exemplo: no arco-íris se vê efeitos combinados de dispersão, refração e reflexão

Os fenômenos....

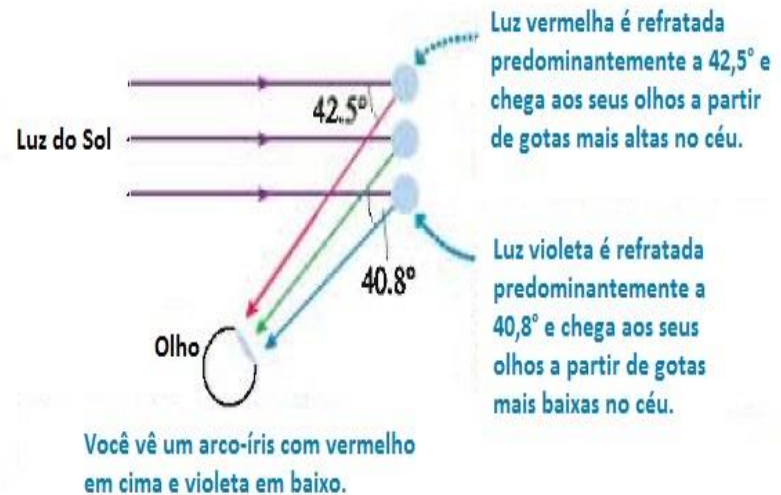


(a) Refração e dispersão



(b) Dispersão

A explicação...



Na próxima aula veremos algumas consequências conceituais sobre a interpretação da luz como ondas eletromagnéticas e o conceito de Efeito Doppler.

Veremos também outro aspecto sobre a interpretação da luz, ou seja, o comportamento como partícula, e que dará lugar a Dualidade Onda-Partícula