



Universidade Federal do ABC

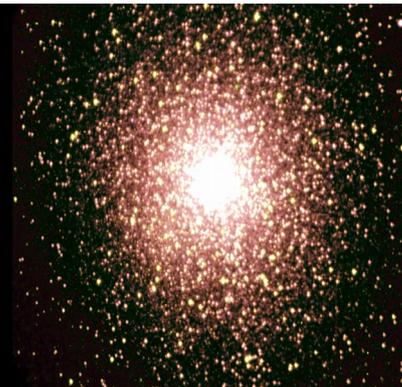
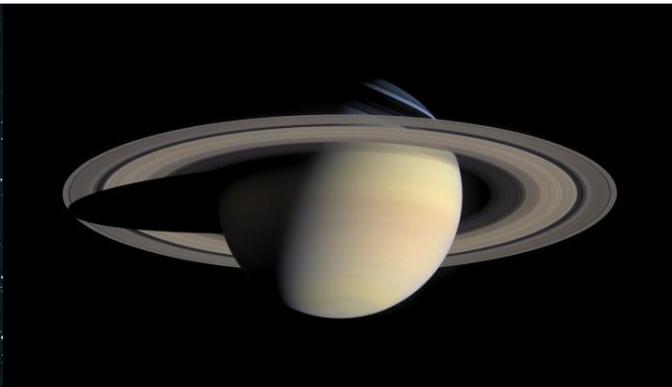
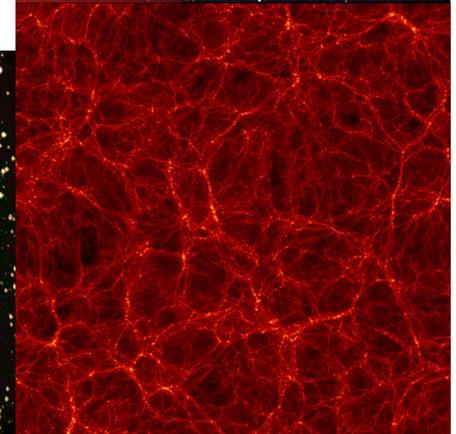
Física Contemporânea

06. Partículas Elementares, Telescópios e Sondas, Sistema Solar I: O Sol

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

<http://professor.ufabc.edu.br/~pieter.westera/Astro.html>



Átomos

A **menor unidade** de uma **substância** (do grego a-tomo = indivisível).

O conceito vem dos **gregos** (mas na **Índia**, o conceito já existia também) por considerações filosóficas, e foi fortemente defendido por **Newton**, **Claus**, **Maxwell** e **Boltzman**.

Mas no final do século XIX estava desacreditado.

John Dalton: Teoria Atômica

1808 - John Dalton

Primeiro modelo atômico

com base experimental,

baseado nas razões

sempre iguais entre

substâncias em reações químicas,

“Modelo da bola de bilhar”



John Dalton,
1766-1844

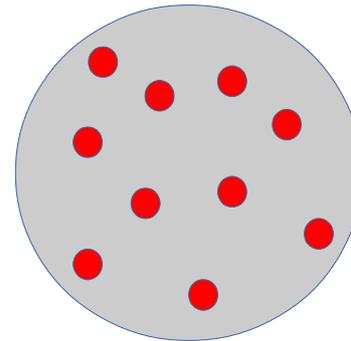
O átomo é uma partícula maciça e indivisível.

Uma molécula é um grupo de átomos ligados uns aos outros.



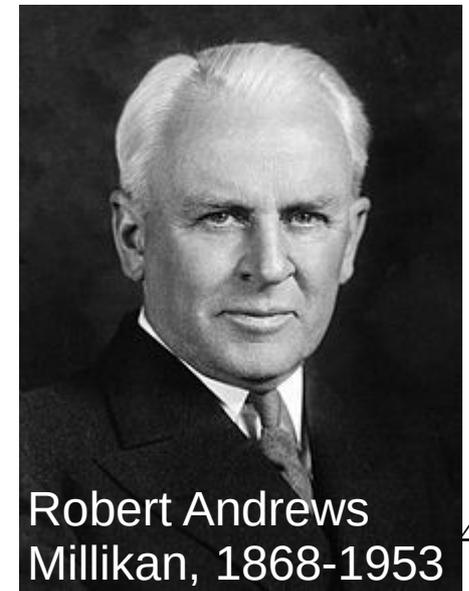
O Átomo de Thomson: Pudim de Ameixas (Plum Pudding)

- Em 1897, J. J. **Thomson** descobriu o **elétron**, levando ele a um novo **modelo atômico**, uma **distribuição uniforme** dos **elétrons** num mar de **massa** e **carga positiva** garantindo o **equilíbrio**.



Joseph John Thomson,
1856-1940

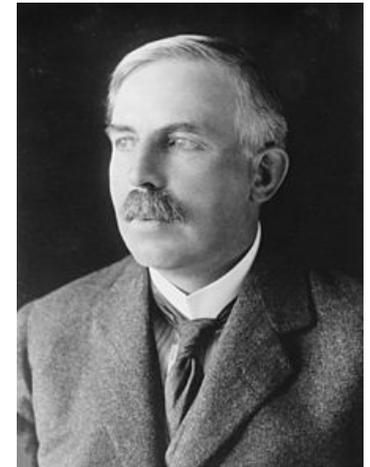
- Em 1911, Robert A. **Millikan** determinou **massa** ($9,10 \cdot 10^{-31}$ kg) e **carga** ($-1,602 \cdot 10^{-19}$ C) do e^-
=>  Prêmio Nobel em 1923



Robert Andrews
Millikan, 1868-1953

O Átomo de Rutherford

- Em 1908-11, Ernest **Rutherford** descobriu o **núcleo atômico**, identificou uma partícula **carregada positivamente** descoberto por Eugen Goldstein em 1886 como a partícula que dá a carga ao núcleo, chamando ele de **próton** (massa $m_p = 1,673 \cdot 10^{-27}$ kg), e desenvolveu o **modelo planetário** do **átomo** (próximo slide).



Ernest Rutherford,
1871-1937

- Em 1832, **Chadwick** descobriu o **nêutron** (massa $m_n = 1,675 \cdot 10^{-27}$ kg),



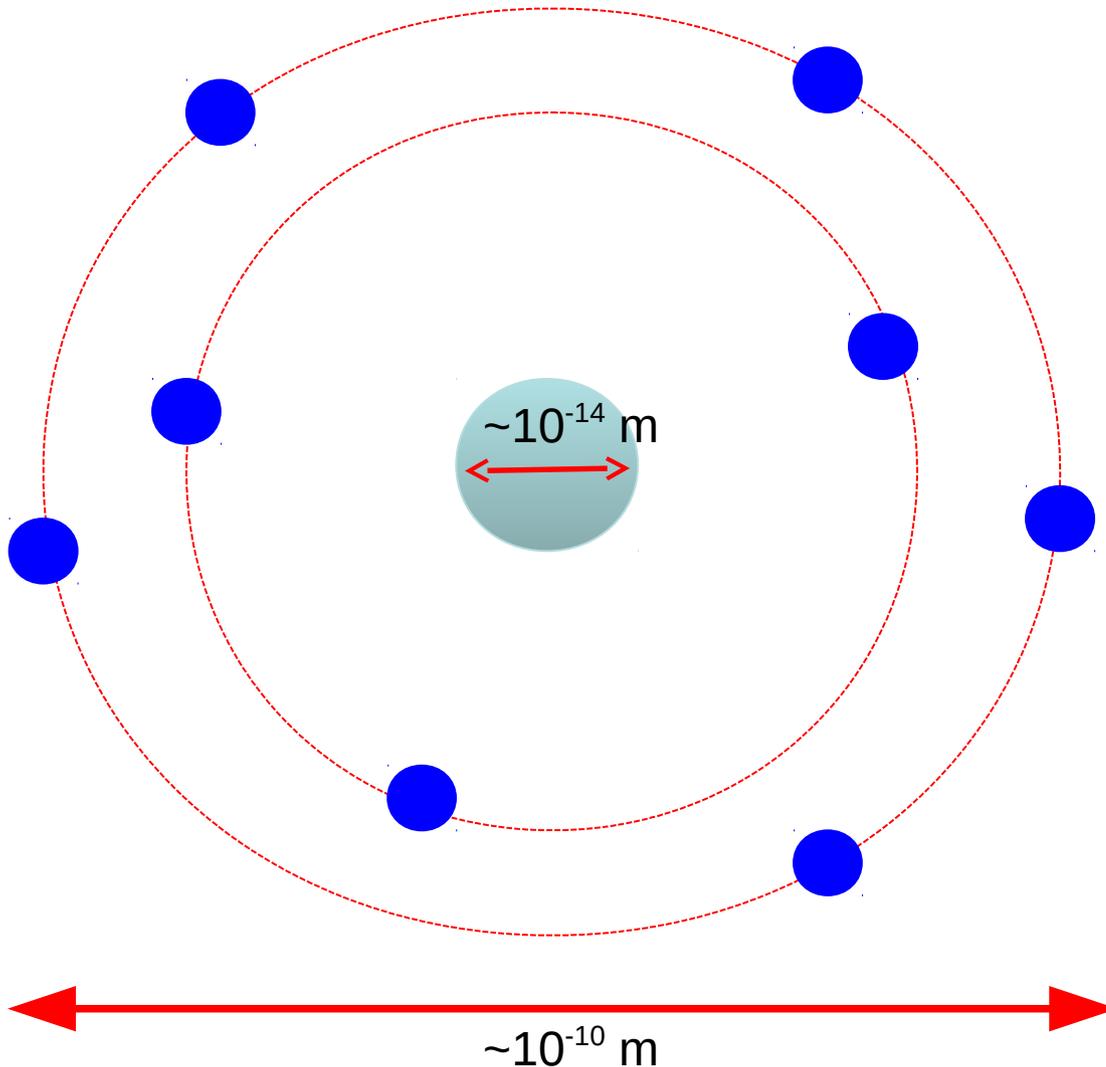
rendendo a ele o Prêmio Nobel em 1935

=> O **núcleo** atômico é **composto** por **prótons** e nêutrons.



James Chadwick,
1891-1974

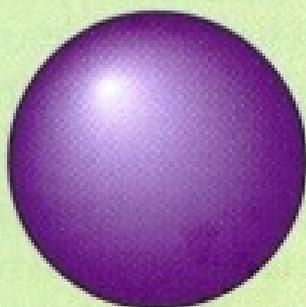
O Átomo de Rutherford



- **Núcleo** de carga Ze **rodeado** por Z **elétrons** (modelo planetário).
 Z é chamado **número atômico** (H: $Z = 1$, He: $Z = 2$, etc.).
O **número atômico** determina as **propriedades físicas** do átomo.
- Quase toda a massa é **concentrada** no **núcleo**
- Tamanho do núcleo $\sim 10^{-14}$ m

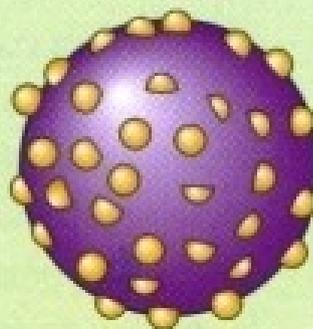
Resumo: Os modelos atômicos

Dalton:
"Bola de bilhar"



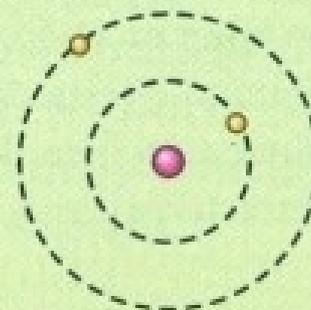
O átomo é uma esfera maciça, indivisível, neutra.

Thomson:
"Pudim de passas"



O átomo é uma esfera maciça, positiva com elétrons encravados nela.

Rutherford:
"Modelo planetário"



O átomo tem um núcleo positivo e muito pequeno ao redor do qual giram os elétrons.

Linha do tempo

1803



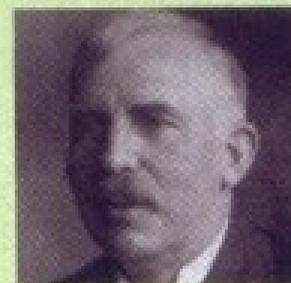
J. Dalton (1766-1844)

1897



J. J. Thomson (1856-1940)

1911



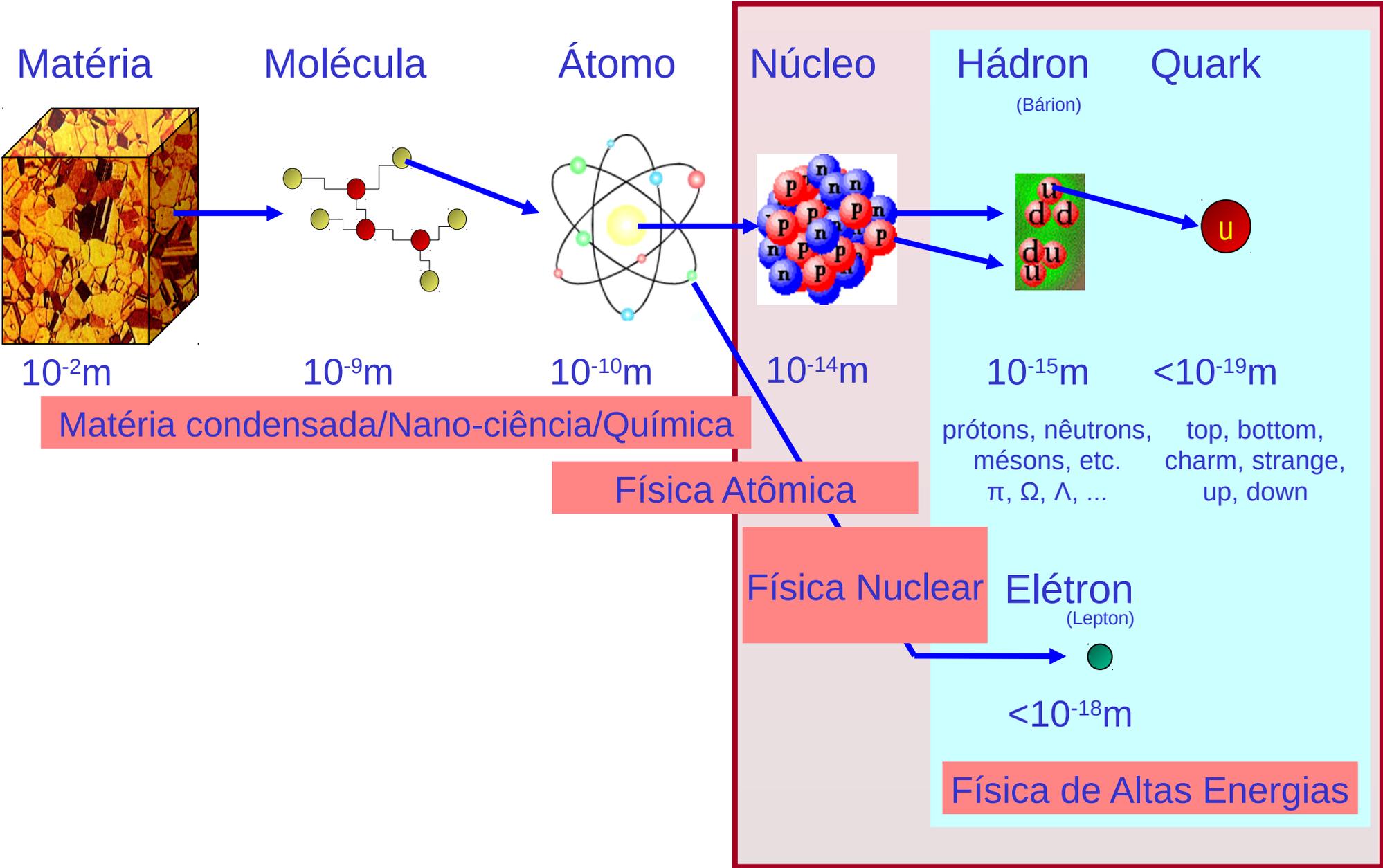
E. Rutherford (1871-1937)

Podemos continuar
dividindo?

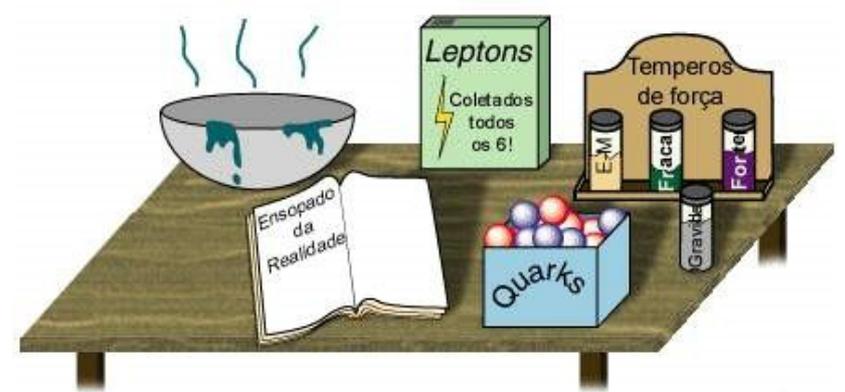
Podemos continuar dividindo?

Só modificando
as propriedades da matéria
(Moléculas => Átomos,
Átomos => Núcleos e Elétrons
Nucleons => Quarks)

A Estrutura da Matéria



Modelo padrão



- O modelo padrão explica o que é o mundo e o que o mantém unido
- É uma teoria simples e compreensível que explica todas as centenas de partículas e interações complexas com apenas:
 - ✓ **6 quarks.**
 - ✓ **6 léptons.** O lépton mais conhecido é o elétron. Nós iremos falar sobre os léptons algumas páginas adiante.
 - ✓ **Partículas transportadoras de força,** como o fóton.
- Todas as partículas de matéria que nós conhecemos são compostas de quarks e léptons, e elas interagem trocando partículas transportadoras de força.

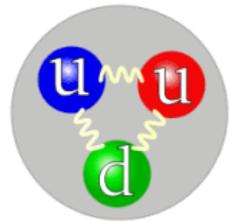
O que são os quarks ?

O **núcleo** atômico é formado de **prótons** e **nêutrons**.

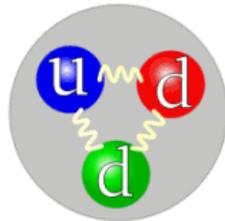
Os prótons e os nêutrons são formados por dois “sabores” de **quarks** (tipos de quarks)

Existem **6** tipos de quarks, mas usualmente falamos em **três pares**: **up/down**, **charmoso/estranho** e **top/bottom**.

Os quarks têm **carga elétrica fracionária**, ao contrário do próton e do elétron que tem cargas inteiras $+e$ e $-e$, respectivamente.



Proton

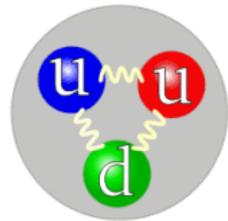


Neutron

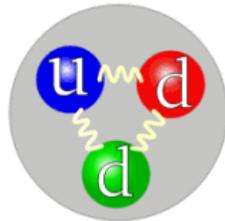
Quark composition of a proton and a neutron (diagrams from Wikipedia)

| | Quarks | |
|--------------|-----------------------------|---------------|
| Sabor / Nome | Massa [Gev/c ²] | Carga el. [e] |
| d down | 0.006 | -1/3 |
| u up | 0.003 | 2/3 |
| s strange | 0.1 | -1/3 |
| c charm | 1.3 | 2/3 |
| b bottom | 4.3 | -1/3 |
| t top | 175 | 2/3 |

O que são os quarks ?



Proton



Neutron

Quark composition of a proton and a neutron (diagrams from Wikipedia)

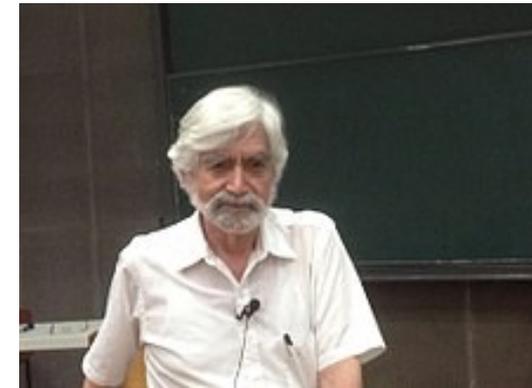
O Modelo de quarks (nome inspirado em *Finnegans Wake* de James Joyce) foi **proposto** independentemente por **Gell-Mann** e **Zweig** em 1964, e estendido nos anos seguintes por outros físicos.

Os quarks foram **descobertos** de 1968 a 1995 em **aceleradores de partículas**.

| | Quarks | |
|--------------|-----------------------------|---------------|
| Sabor / Nome | Massa [Gev/c ²] | Carga el. [e] |
| d down | 0.006 | -1/3 |
| u up | 0.003 | 2/3 |
| s strange | 0.1 | -1/3 |
| c charm | 1.3 | 2/3 |
| b bottom | 4.3 | -1/3 |
| t top | 175 | 2/3 |



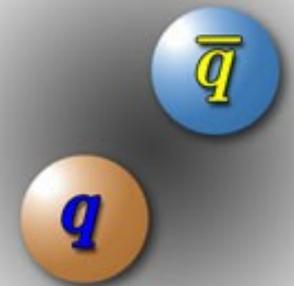
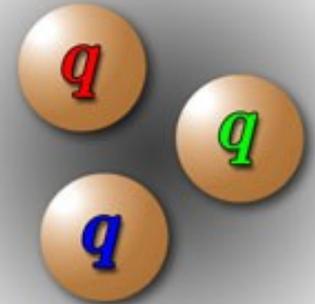
Murray Gell-Mann,
1929-2019



George Zweig,
nascido em 1937

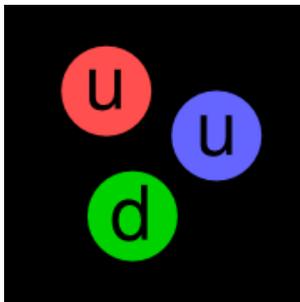
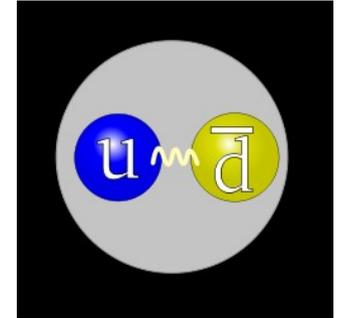
Hádrons

- Temos 6 quarks diferentes agrupados em três famílias. Cada um desses quarks tem o seu anti-quark (anti-up, anti-down, ..., simbolizado por uma barra)
- As **anti-partículas** têm a mesma massa da partícula correspondente, mas têm **carga elétrica com sinal oposto**
- Os quarks se combinam para formar partículas chamadas **hádrons**. Os hádrons se dividem para formar **dois grupos** de partículas:
 1. Partículas formadas por 3 quarks (ou três anti-quarks) são chamadas de bárions (do grego baros = pesado).
 2. Partículas formadas por dois quarks (um quark e um anti-quark) são chamadas de mésons (do grego meso = meio)



Hádrons

- Exemplos de bárions: **próton** (uud) e **nêutron** (ddu)
- Exemplos de mésons: π^- (píon - $d\bar{u}$) e K^+ (káons - $u\bar{s}$)
- **Não** existem partículas formadas por **um** único quark e até o momento não temos evidência de hádrons compostos por **mais de 3** quarks.
- Os quarks da **primeira família** são os que compõem o **núcleo** atômico no Universo. Os **quatro** quarks **restantes** (e seus anti-quarks) formam **partículas menos estáveis** que têm **vidas curtas** mas que existem em nosso ambiente natural. Elas existiam com maior abundância no **nascimento** do **Universo** e são observadas nos **acelerados** de **partículas**.



Resumo

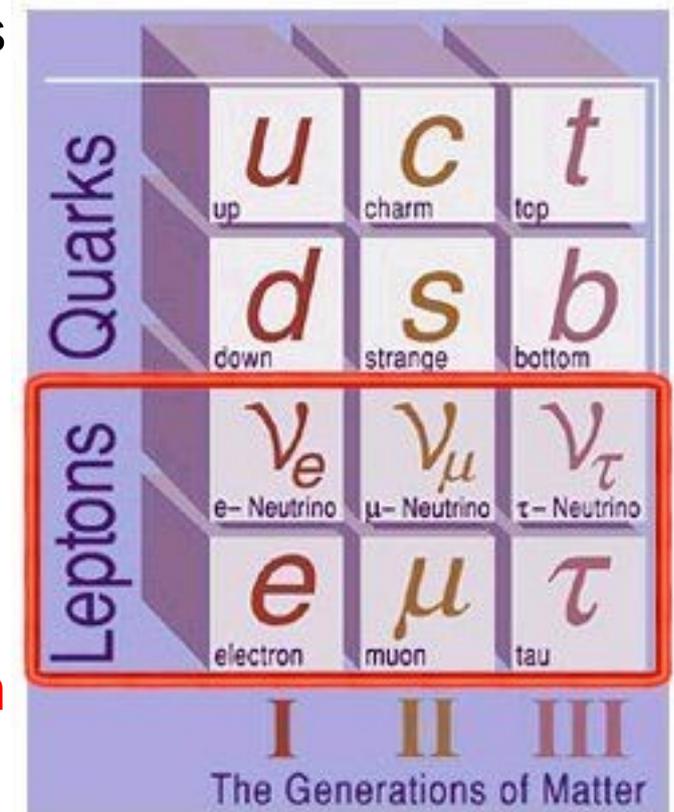
| Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$ | | | | | |
|--|-------------|---|-----------------|-----------------------|------|
| Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons. | | | | | |
| Symbol | Name | Quark content | Electric charge | Mass GeV/c^2 | Spin |
| p | proton | uud | 1 | 0.938 | 1/2 |
| \bar{p} | anti-proton | $\bar{u}\bar{u}\bar{d}$ | -1 | 0.938 | 1/2 |
| n | neutron | udd | 0 | 0.940 | 1/2 |
| Λ | lambda | uds | 0 | 1.116 | 1/2 |
| Ω^- | omega | sss | -1 | 1.672 | 3/2 |

Resumo

| Mesons $q\bar{q}$ | | | | | |
|---|--------|---------------|-----------------|-----------------------|------|
| Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons. | | | | | |
| Symbol | Name | Quark content | Electric charge | Mass GeV/c^2 | Spin |
| π^+ | pion | $u\bar{d}$ | +1 | 0.140 | 0 |
| K^- | kaon | $s\bar{u}$ | -1 | 0.494 | 0 |
| ρ^+ | rho | $u\bar{d}$ | +1 | 0.770 | 1 |
| B^0 | B-zero | $d\bar{b}$ | 0 | 5.279 | 0 |
| η_c | eta-c | $c\bar{c}$ | 0 | 2.980 | 0 |

Léptons

- Outro tipo de partículas de matéria são os **léptons** (do grego leve)
- Existem **6** léptons e todos são partículas **elementares**, ou seja são **indivisíveis**.
- Temos **três** léptons **carregados negativamente**: o elétron e^- , o múon μ^- e o tau τ^- . Suas anti-partículas tem carga positiva ($+e$)
- Temos também **três** léptons **neutros**: o **neutrino do elétron** ν_e , **neutrino do múon** ν_μ e o **neutrino do tau** ν_τ . Os neutrinos também tem anti-neutrinos.



A Descoberta do Neutrino

1932: W. Pauli propõe a **existência** dos **neutrinos** no **decaimento beta**.

1955: Cowan e Reines **detectam experimentalmente** os neutrinos.



Reines recebeu o prêmio Nobel em 1995 em nome dos dois.



Clyde L. Cowan (1919-1974) Frederick Reines (1918-1998)

Por muito tempo, considerou-se a possibilidade, que neutrinos **não** têm **massa**, mas nos anos 80, **neutrinos** provindo do **Sol refutaram** esta tese (=> mais pra frente).

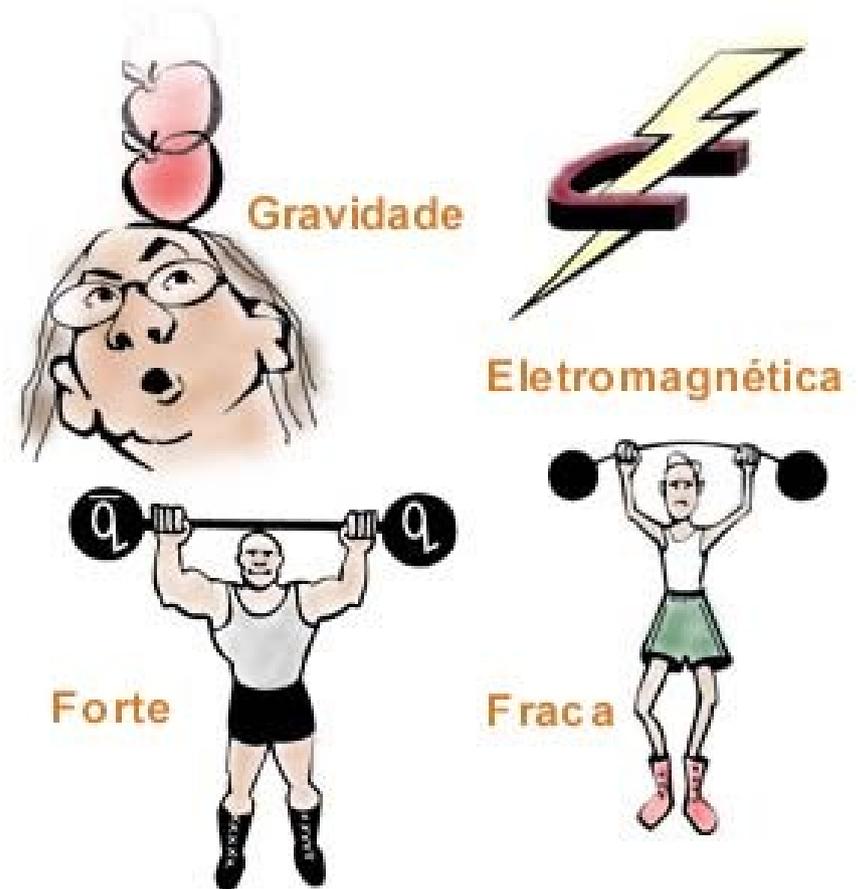
Resumo

| FERMIONS | | | matter constituents spin = 1/2, 3/2, 5/2, ... | | |
|------------------------------|----------------------------|--------------------|--|---------------------------------------|--------------------|
| Leptons spin = 1/2 | | | Quarks spin = 1/2 | | |
| Flavor | Mass GeV/c ² | Electric charge | Flavor | Approx. Mass GeV/c ² | Electric charge |
| ν_e electron neutrino | $<1 \times 10^{-6}$ | 0 | u up | 0.003 | 2/3 |
| e^- electron | 0.000511 | -1 | d down | 0.006 | -1/3 |
| ν_μ muon neutrino | <0.0002 | 0 | c charm | 1.3 | 2/3 |
| μ^- muon | 0.106 | -1 | s strange | 0.1 | -1/3 |
| ν_τ tau neutrino | <0.02 | 0 | t top | 175 | 2/3 |
| τ^- tau | 1.7771 | -1 | b bottom | 4.3 | -1/3 |

Interações fundamentais da natureza

- O Universo que conhecemos só pôde ser criado, por que as **partículas fundamentais** da natureza **interagem** entre elas. Essas interações incluem forças repulsivas, atrativas, de decaimento e aniquilação.
- Existem quatro **interações fundamentais** na natureza :

Força gravitacional,
eletromagnética,
força nuclear fraca e
força nuclear forte



Interações fundamentais da natureza

- Todos os fenômenos da natureza são provocados por essas quatro forças.
- Próton e nêutron dentro do núcleo são mantidos pela **força forte**.
- A **interação fraca** é responsável pelo decaimento beta dos núcleos atômicos.
- A queda de uma maçã e o movimento dos planetas são causados pela **força gravitacional**.
- Uma onda eletromagnética que se propaga, como a luz, as ondas de rádio ou as reações químicas que ocorrem nos neurônios em nossos cérebros são devidas à **força eletromagnética**.

Interações fundamentais da natureza

- Somente a **força gravitacional** tem um **caráter universal**, já que ela atua em toda matéria, independente da carga ou de qualquer outra propriedade.
- A força eletromagnética, por exemplo, tem sua origem na carga elétrica e portanto não atua em partículas sem carga como é o caso do nêutron.

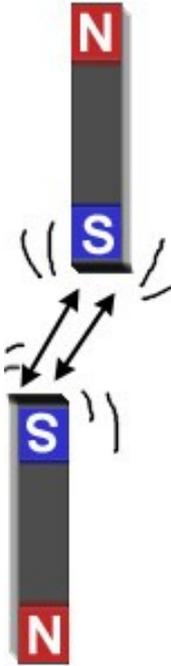
Como as partículas interagem ?

- O problema é que as coisas interagem sem se tocar! Como dois ímãs "sentem" a presença um do outro e se atraem ou se repelem de acordo com a situação? Como o Sol atrai a Terra?

A resposta seria "magnetismo" e "gravidade", **mas o que são essas forças?**

Em um nível fundamental, a força não é apenas algo que acontece para as partículas.

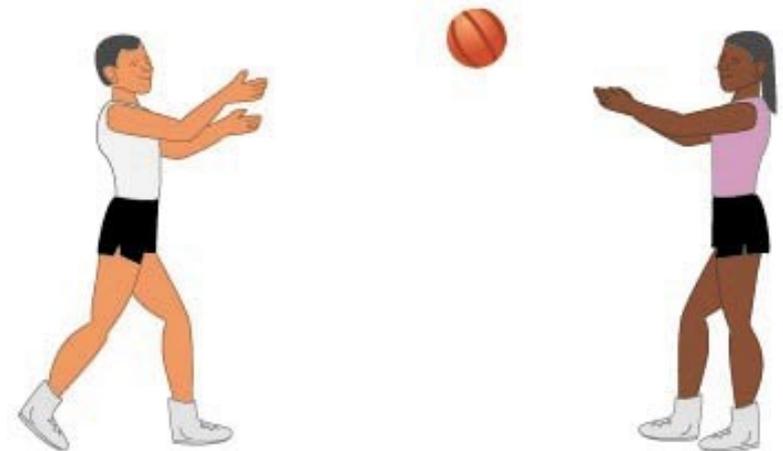
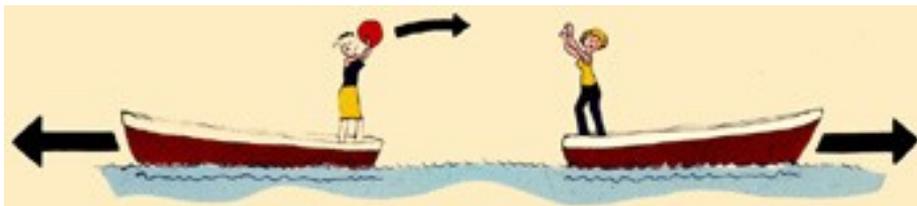
"É uma coisa que é trocada entre duas partículas".



- Descobriu-se que todas as interações que afetam as partículas da matéria são devidas a uma troca de **partículas transportadoras de força**, um tipo completamente diferente de partícula. Essas partículas são como bolas de basquete atiradas entre as partículas da matéria (que são como os jogadores de basquete). O que nós pensamos normalmente como "forças" são, na verdade, os efeitos das partículas transportadoras de força sobre as partículas da matéria.

Importante:

Uma partícula transportadora, de um tipo particular de força, só pode ser absorvida ou produzida por partículas da matéria que são afetadas por essa força. Por exemplo, elétrons e prótons têm carga elétrica; portanto, eles podem produzir e absorver as transportadoras de forças eletromagnéticas, ou seja, os fótons. Nêutrons, por outro lado, não têm carga elétrica, então eles não podem absorver ou produzir fótons.



Eletromagnetismo



A força eletromagnética faz com que objetos com cargas opostas se atraiam e objetos com cargas iguais venham a se repelir. Muitas forças do cotidiano, como a força de atrito, e até mesmo o magnetismo, são causadas pela força eletromagnética



A partícula transportadora da força eletromagnética é o **fóton** (γ).
O fóton é o *quantum* da radiação eletromagnética \rightarrow luz.

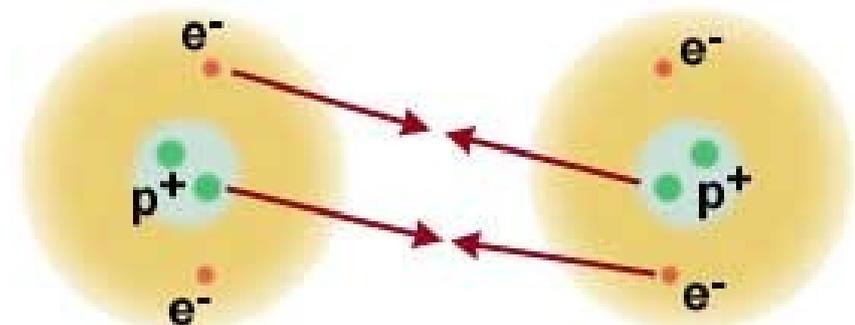
Fótons de energias das mais diversas varrem todo o espectro eletromagnético de raios-x, luz visível, ondas de rádio e assim por diante.

Os fótons têm massa zero e sempre viajam à "velocidade da luz", c , que é cerca de 300.000.000 metros por segundo.

Os átomos geralmente têm o mesmo número de prótons e de elétrons. Eles são eletricamente neutros, isso porque os prótons positivos existem em número igual ao dos elétrons negativos. **Uma vez que os átomos são neutros, o que faz com que eles se grudem formando moléculas estáveis?**

Resposta: *A força residual eletromagnética*. As partes carregadas de um átomo podem interagir com as partes carregadas de outro átomo. Isso permite que diferentes átomos se juntem.

É a força eletromagnética quem permite que os átomos se unam formando moléculas, mantendo o mundo unido e criando a matéria que interage conosco o tempo todo



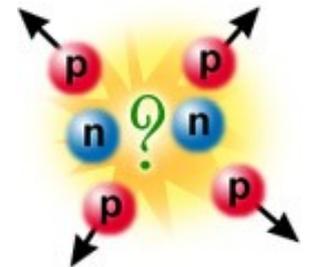
Força residual E-M em ação: Os átomos são eletricamente neutros, mas os elétrons de um são atraídos pelos prótons do outro, e vice-versa!



E o núcleo? Quem o mantém unido?

- O núcleo é formado de prótons e nêutrons. Os nêutrons têm carga nula, e os prótons têm carga positiva e se repelem uns aos outros. Por que então o núcleo não explode?

Nós não podemos contar com o núcleo mantido unido apenas pela força eletromagnética. O que mais poderia ser? Gravidade? Não! A força gravitacional é fraca demais para exceder a força eletromagnética.



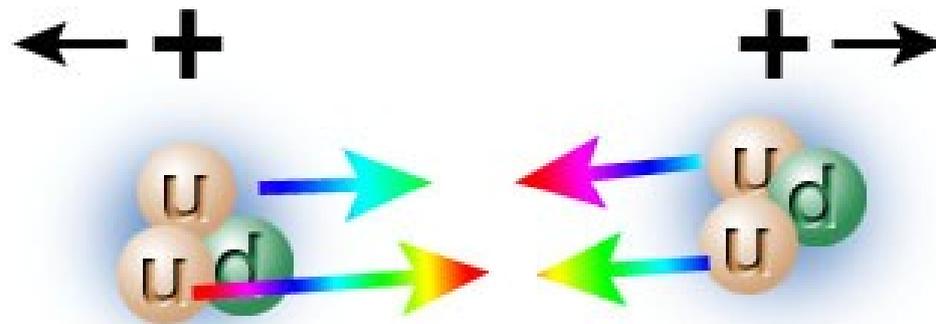
Força Forte



- Temos que saber mais coisas sobre os quarks que compõem os prótons e os nêutrons.
- Os quarks além da carga eletromagnética têm outro tipo de carga, a chamada **carga de cor**. A força entre partículas carregadas com cor é muito forte.
- A força forte segura os quarks grudados para formar os prótons e os nêutrons.
- Suas partículas transportadoras são chamadas de **glúons** (vem do inglês glue = cola)
- A carga de cor comporta-se de modo diferente da carga eletromagnética. Os glúons possuem carga de cor.
- E enquanto os quarks têm carga de cor, as **partículas compostas** de quarks (prótons, nêutrons, ...) não têm essa carga (elas têm **cor neutra**). Por essa razão, a força forte apenas é levada em consideração em interações **entre quarks**. Ela **não** age entre os núcleos de **átomos diferentes**.

Força Forte Residual

- A **força forte** prende os quarks juntos por terem **carga de cor**. Mas isso ainda não explica o que mantém o núcleo unido....
- Não é à toa que a força tem o nome de forte. A força forte entre os quarks de um próton e os quarks de outro próton é **forte** o bastante para **superar** a **força eletromagnética repulsiva**.



Isso é chamado de **interação forte residual**, e é essa interação que **mantém** o **núcleo coeso**.

Força Fraca



- Sabemos que existem seis tipos de quarks e seis tipos de léptons (o elétron e seu neutrino são léptons).
- Toda matéria estável no Universo é composta pelos quarks mais leves (up e down) e pelo elétron que é o lépton carregado mais leve.
- **Interações fracas** são as responsáveis pelo decaimento de quarks e léptons pesados em quarks e léptons mais leves. Quando partículas fundamentais decaem observamos seu desaparecimento e sua substituição por duas ou mais partículas diferentes. Mesmo que o total de massa e energia seja conservado, um pouco da massa original da partícula é convertido em energia cinética, e as partículas resultantes sempre têm menos massa que a partícula original que decaiu.
- *A única matéria estável ao nosso redor é composta dos menores quarks e léptons, que não podem mais decair.*
- As partículas transportadoras das interações fracas são as partículas W^+ , W^- , e a Z . As W são carregadas eletricamente e a Z é neutra. Elas são partículas com massa, ao contrário do fóton que media a interação eletromagnética.

Gravidade



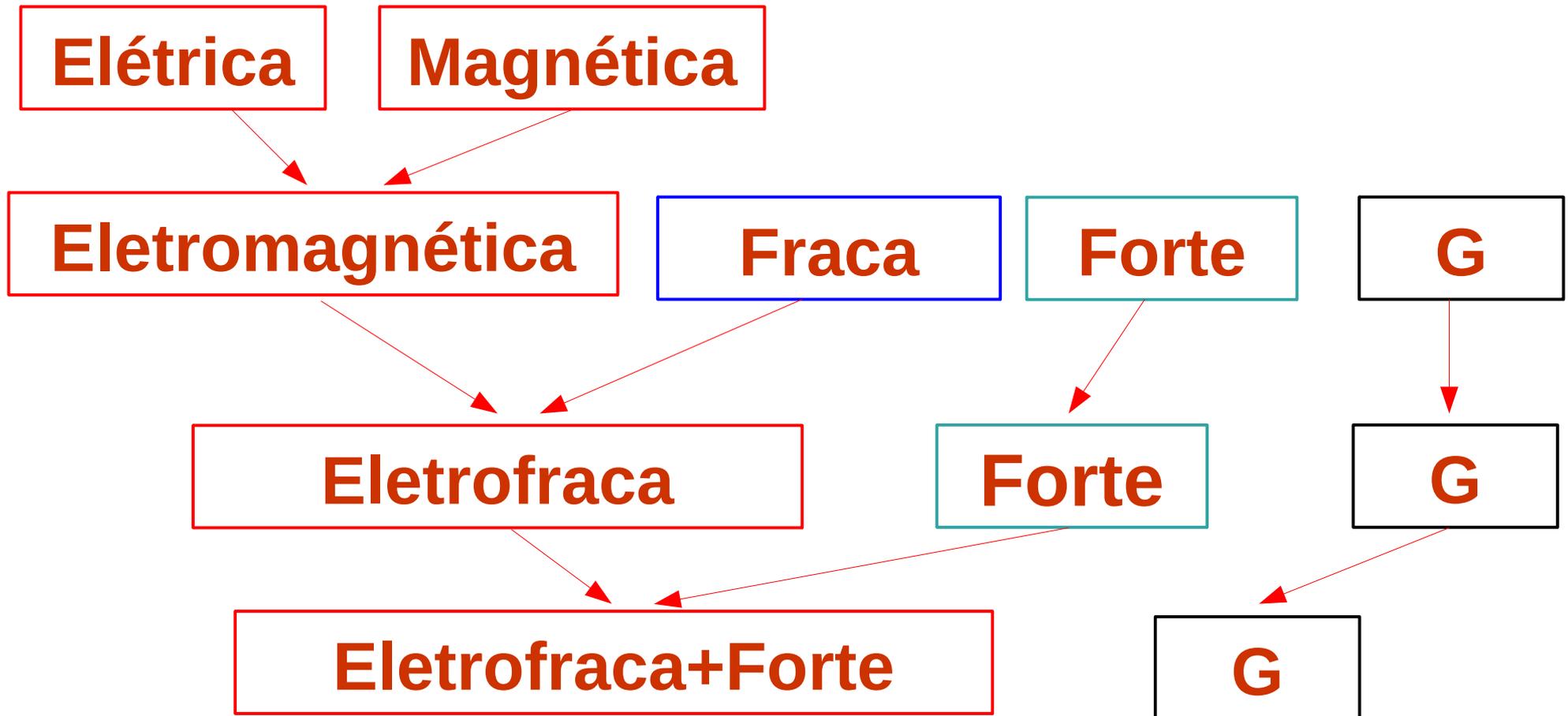
- A gravidade certamente é das interações fundamentais, mas ela é um pouco **mais complicada**
- A partícula transportadora da gravidade ainda não foi encontrada. Tal partícula, contudo, foi prevista e poderá ser encontrada um dia: o **gráviton**.
- Os efeitos da gravidade são **extremamente pequenos** (comparado com as outras três interações) na maioria das situações em física de partículas. O Modelo Padrão funciona bem mesmo sem explicar a gravidade.

Resumo sobre as interações



| | Gravidade | Fraca (Eletrofraca) | Eletromagnética | Forte |
|-------------------|--|------------------------|--|-----------------|
| Transportada por: | Gráviton <small>(ainda não observado)</small> | W^+ W^- Z^0 | Fóton | Glúon |
| Atua em: | TODAS | Quarks e Léptons | Quarks e Léptons carregados W^+ W^- Z^0 | Quarks e Glúons |

O Santo Graal da ciência



Voltando pra Astronomia:

Distâncias

Magnitudes

Telescópios e Sondas

Algumas Unidades de Distância

1 **AU** (unidade astronômica) é a **distância média** entre o **Sol** e a **Terra**, o “raio” da órbita da Terra:

$$1 \text{ AU} = 1.496 \cdot 10^{11} \text{ m} \approx 150 \text{ mio. km}$$

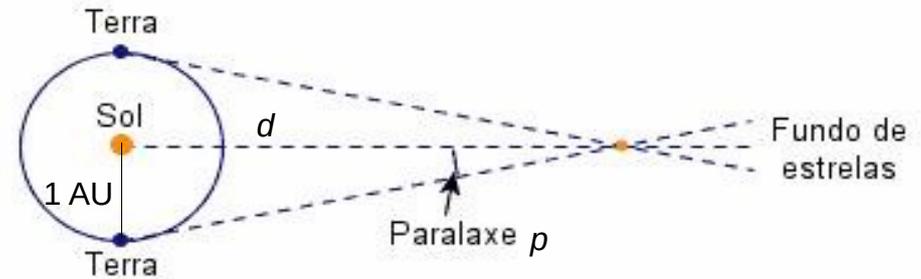
É normalmente usada para distâncias dentro do **Sistema Solar** (ou sistemas de tamanho comparável).

1 **ly** (ano-luz) é a distância, que a **luz** percorre em **um ano**:

$$\begin{aligned} 1 \text{ ly} &= 1 \text{ ano} \cdot c = 1.15569 \cdot 10^7 \text{ s} \cdot 299'792'458 \text{ m/s} \\ &= 9.46 \cdot 10^{15} \text{ m} \approx 9.5 \text{ trio. km} \end{aligned}$$

Algumas Unidades de Distância

1 **pc** (parsec) é a distância de um objeto cuja **paralaxe anual** (\Rightarrow desenho) mede um **segundo de arco** ($''$) (abreviação de *parallax of one second of arc*):



$$1 \text{ pc} = 1 \text{ AU} / \tan^{-1} 1'' = 206'265 \text{ AU} = 3.26 \text{ ly} \\ = 3.086 \cdot 10^{16} \text{ m} \approx 30 \text{ trio. km}$$

A distância d até um objeto com paralaxe anual p é:

$$d = 1 \text{ AU} / \tan^{-1} p \approx^* 1 \text{ AU} / p = 1 \text{ pc} / p['],$$

onde $p[']$ é a paralaxe em unidades de segundo de arco.

* Aproximação válida, se p é pequeno ($\Rightarrow d \gg 1 \text{ AU}$), que é o caso para objetos fora do Sistema Solar.

Algumas Unidades de Distância

1 pc é uma **distância típica** entre **estrelas vizinhas**:
A estrela mais próxima de Sol, Proxima Centauri, ou α Centauri (α Cen) é a 1.3 pc daqui.

O método de paralaxe só pode ser usado para objetos (estrelas) **próximos**.
Senão, p é pequeno demais para ser medida.

O satélite Hipparcos conseguiu medir as paralaxes de $\sim 118'000$ a 1 mi. estrelas, considerado a vizinhança do Sol.

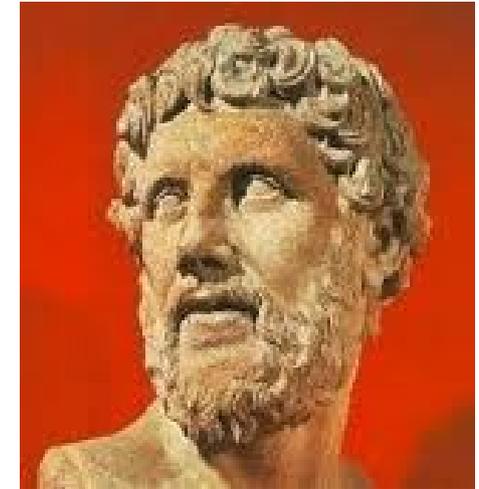


Satélite Hipparcos

O satélite Gaia (lançado em 2013) deve conseguir fazer medidas de ~ 10 microssegundos de arco de precisão, assim conseguindo determinar as paralaxes de 20 a 200 mi. estrelas (até 10 kpc), boa parte da Via Láctea.

Magnitudes Aparentes

Mais de 2000 anos atrás,
o astrônomo grego **Hiparco**
(o mesmo dos epiciclos)
inventou um sistema para classificar
as estrelas visíveis por
brilho aparente no céu,
o sistema de **magnitudes**:



Hiparco

As estrelas **mais brilhantes** eram de **1^a magnitude**,
as **mau visíveis** de **6^a magnitude**.

Magnitudes Aparentes

Como no século XIX se achava que o olho humano percebe brilho de maneira **logarítmica**, e estrelas de 1^a magnitude são da ordem de **100 vezes** mais brilhantes que as de 6^a magnitude, aproximaram as magnitudes por (exercício pra casa):

$$m = -2.5 \cdot \log_{10} F/F_0 = -2.5 \cdot \log_{10} F + C,$$

onde F é a intensidade da radiação observada, e F_0 , aquele de uma estrela de 0^a magnitude e $C = 2.5 \cdot \log_{10} F_0$; Frequentemente a estrela Vega é usada como “ponto zero” da escala.

! A escala de magnitudes é **decrecente** !

Magnitudes Aparentes

As magnitudes aparentes de alguns objetos:

Sol: -26.74

Lua: -2.50 a -12.74

Vênus: -3.82 a -4.89

Júpiter: -1.61 a -2.94

Marte: 1.84 a -2.91

Mercúrio: 5.73 a -2.45

Sirius (estrela mais brilhante tirando o Sol): -1.44

Saturno: 1.47 a -0.49

objeto mais fraco já observado: ~36

Magnitudes Absolutas

A **intensidade observada** F depende da **luminosidade intrínseca** L do objeto e da sua **distância** d : $F = L/4\pi d^2$

$$\Rightarrow m = -2.5 \cdot \log_{10}(L/4\pi d^2) + C$$

A **magnitude absoluta** M é a magnitude aparente que o objeto teria, caso se encontrasse a 10 pc de distância:

$$M = -2.5 \cdot \log_{10}(L/4\pi(10 \text{ pc})^2) + C$$

É fácil de mostrar (casa) que

$$M = m - 5 \cdot \log_{10}(d/10 \text{ pc}) \Rightarrow d = 10^{(m-M+5)/5} \text{ pc}$$

A grandeza $m - M = 5 \cdot \log_{10}(d/10 \text{ pc})$

é chamada **módulo de distância**.

Magnitude Bolométrica

Caso nas fórmulas para as magnitudes é usada o **fluxo bolométrico**, quer dizer integrada sobre **todos os comprimentos de onda**,

$$F_{\text{bol}} = \int_0^{\infty} F_{\lambda} d\lambda$$

se fala de **magnitude bolométrica**:

$$m_{\text{bol}} = -2.5 \cdot \log_{10} \left(\int_0^{\infty} F_{\lambda} d\lambda \right) + C_{\text{bol}}$$

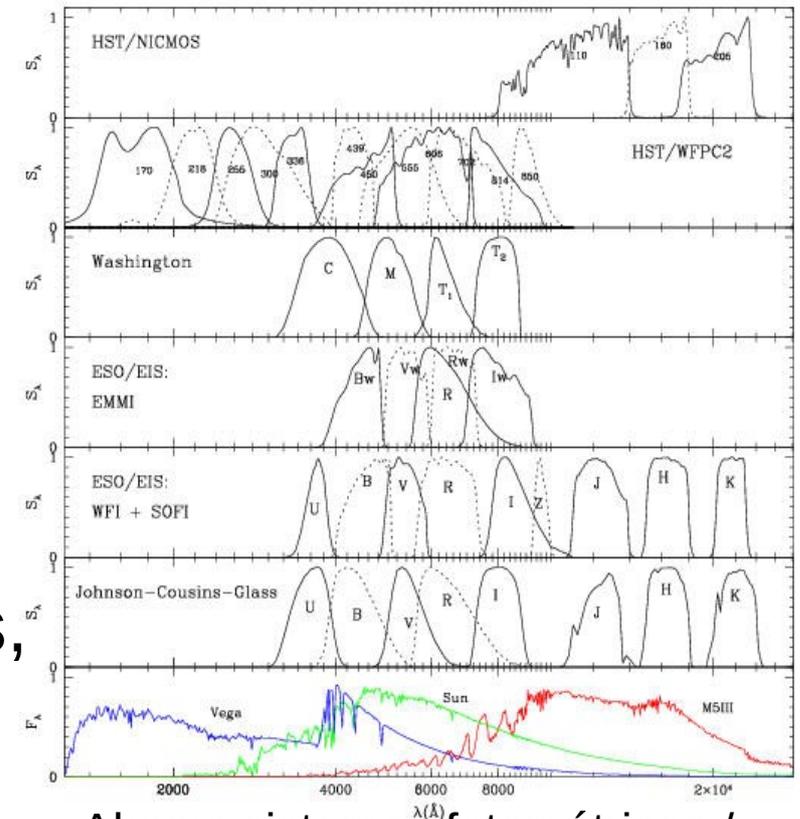
$$\text{e } M_{\text{bol}} = m_{\text{bol}} - (m - M)$$

!! C_{bol} , que seria $2.5 \cdot \log_{10} F_{0,\text{bol}}$ não é ligado à Vega; foi escolhido livremente (\Rightarrow dois slides pra frente), tal que $F_{0,\text{bol}}$ não tem significado.

Coors

Na prática, não se mede o fluxo em todos os comprimentos de onda, mas usando **detectores** (p. e. câmeras digitais chamadas câmeras CCD), cujas **sensibilidades** dependem do **comprimento de onda** seguindo funções características, S_x , chamadas **bandas** ou **filtros fotométricos**.

O conjunto de bandas fotométricas de uma câmara se chama **sistema fotométrico**.
Ex. No sistema Johnson-Cousins, a banda *V* mede no visível (verde), *B* no azul, e *U* no ultravioleta próximo.



Alguns sistemas fotométricos / espectros de três estrelas

Cores

Ex.: O fluxo que se mede no visível é $F_V = \int_0^\infty S_V \cdot F_\lambda d\lambda$
 $\Rightarrow m_V = -2.5 \cdot \log_{10} F_V + C_V$ e $M_V = m_V - (m - M)$

A diferença entre m_{bol} e m_X , $BC_X = m_{\text{bol}} - m_X = M_{\text{bol}} - M_X$
 $= -2.5 \cdot \log_{10} (F_{\text{bol}} / F_X) + C_{\text{bol}} - C_X = -2.5 \cdot \log_{10} (\int F_\lambda d\lambda / \int S_X \cdot F_\lambda d\lambda) + C_{\text{bol}} - C_X$
é chamada **correção bolométrica** para a banda X, e é normalmente negativa para estrelas. (Era para ser sempre negativa, mas bobearam na escolha de C_{bol}).

Grandezas como

$$B - V := m_B - m_V = -2.5 \cdot \log_{10} (F_B / F_V) + C_{B-V}$$
$$= -2.5 \cdot \log_{10} (\int S_B \cdot F_\lambda d\lambda / \int S_V \cdot F_\lambda d\lambda) + C_{B-V},$$

onde $C_{B-V} = C_B - C_V$,

se chamam **cores**.

Cores

exemplo: a cor $B - V = -2.5 \cdot \log_{10} \left(\frac{F_B}{F_V} \right) + C_{B-V}$,

quantifica, se o objeto é mais brilhante no verde ou no azul, então $B - V$, $U - B$, etc. dão uma dica sobre a **cor** do objeto.

Em geral: Quanto **maior** é a **cor**, tanto mais o espectro é concentrado em **comprimentos de onda longos** (Na língua dos astrônomos: tanto mais **vermelho** é o objeto; para o caso oposto, ele diz: tanto mais **azul** é o objeto.).

Usando os pontos zero de Vega, as cores da Vega também são zero.

Não é difícil mostrar, que a **cor** de um objeto **independe** da sua **distância** (bom exercício para casa).

Cores

Lembrete de Estrutura da Matéria, Física Quântica, etc. (Corpo Negro):

A **cor** de um corpo que brilha por **conta própria** (i. e. uma estrela)

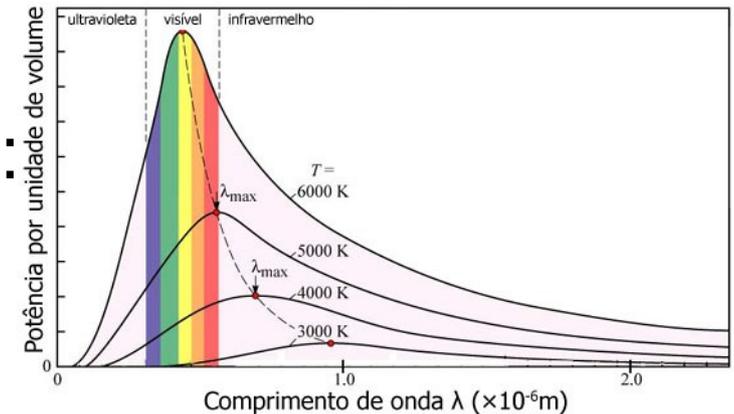
é correlada com a sua

temperatura:

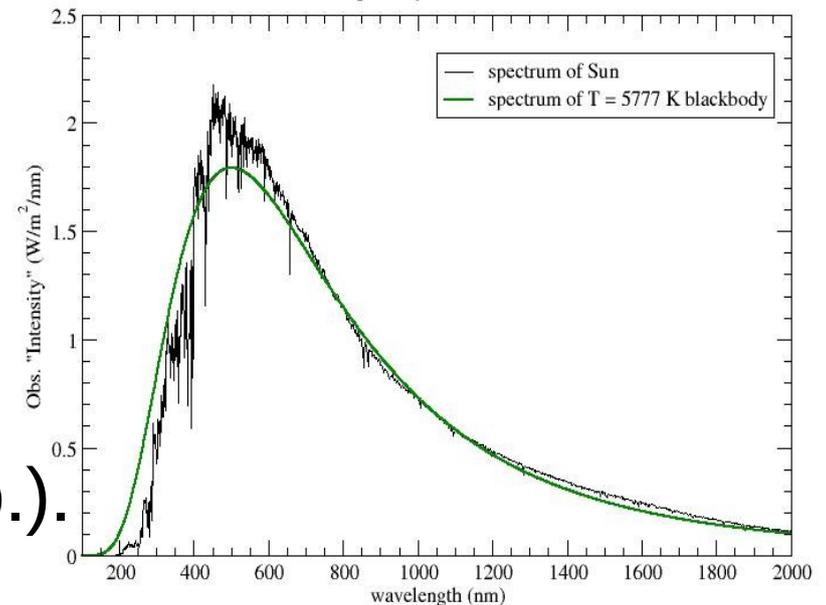
Quanto **maior** é **B – V** (ou outra cor), tanto **mais baixa** é a

temperatura da estrela

(podem existir exceções, já que o espectro de uma estrela não é exatamente o de um Corpo Negro.).



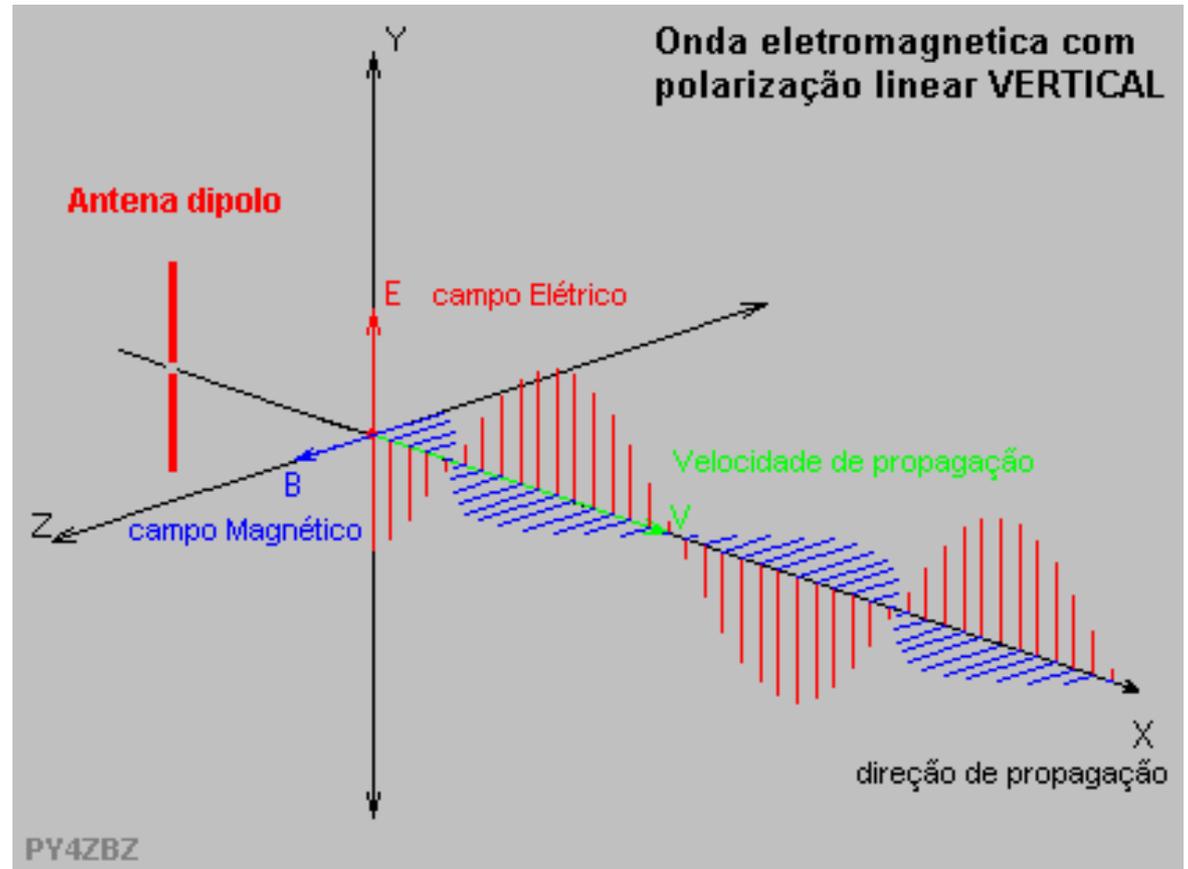
Sun's Spectrum vs. Thermal Radiator
of a single temperature $T = 5777$ K



Espectro do Sol e de um Corpo Negro da mesma temperatura

Luz como Onda

Lembrete de Estrutura da Matéria: Luz é um tipo de **radiação eletromagnética**, uma **onda** que consiste de **campos elétrico e magnético** perpendiculares, que **oscilam** e se **propagam** no vácuo com a velocidade $c = 299'792'458$ m/s.



Relação entre **comprimento de onda** λ e **frequência** ν :
 $c = \lambda \cdot \nu$

Luz como Partícula

Lembrete:

Luz também tem características de **partículas**, chamadas **fótons**.

Energia E e **momento linear p** de um fóton são relacionados com **frequência** e **comprimento de onda** pelas **Relações de de Broglie (1924)**:

$$E = h \cdot \nu = h \cdot c / \lambda,$$

$$p = E/c = h \cdot \nu / c = h / \lambda,$$

onde $h = 6.626 \cdot 10^{-34}$ J·s =
constante de Planck



Louis V. de Broglie

Telescópios

Um telescópio capta radiação no seu **coletor**:

- **lente**,
- **espelho**
- ou algo mais inusitado, p. e. uma bacia de água ou gelo (no caso de um telescópio de neutrinos)

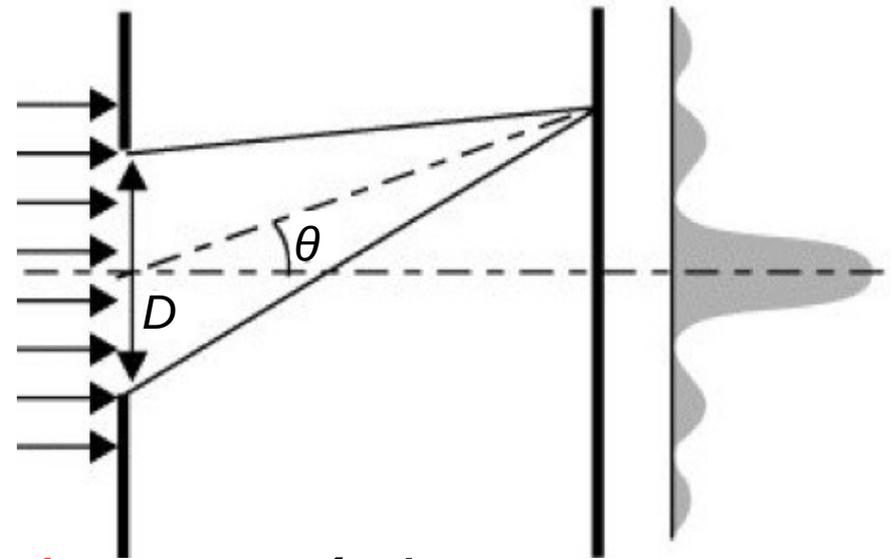
Quanto **maior** é o **coletor**, mais alta será a **sensibilidade**.

Telescópios

Outra grandeza que determina a qualidade de um telescópio é seu poder de **resolução angular**, **espectral** ou **temporal**.

Um fator que **limita** a **resolução angular** é o **espalhamento de Rayleigh**, **interferência** da luz vindo de partes diferentes do **coletor**.

Para poderem ser distinguidos, dois objetos têm que estar **separados**, no mínimo, por um **ângulo** que corresponde à largura do 1º pico do padrão de interferência produzido por uma fonte “pontiforme” (estrela, quasar, ...) chamado *Point Spread Function* (PSF).



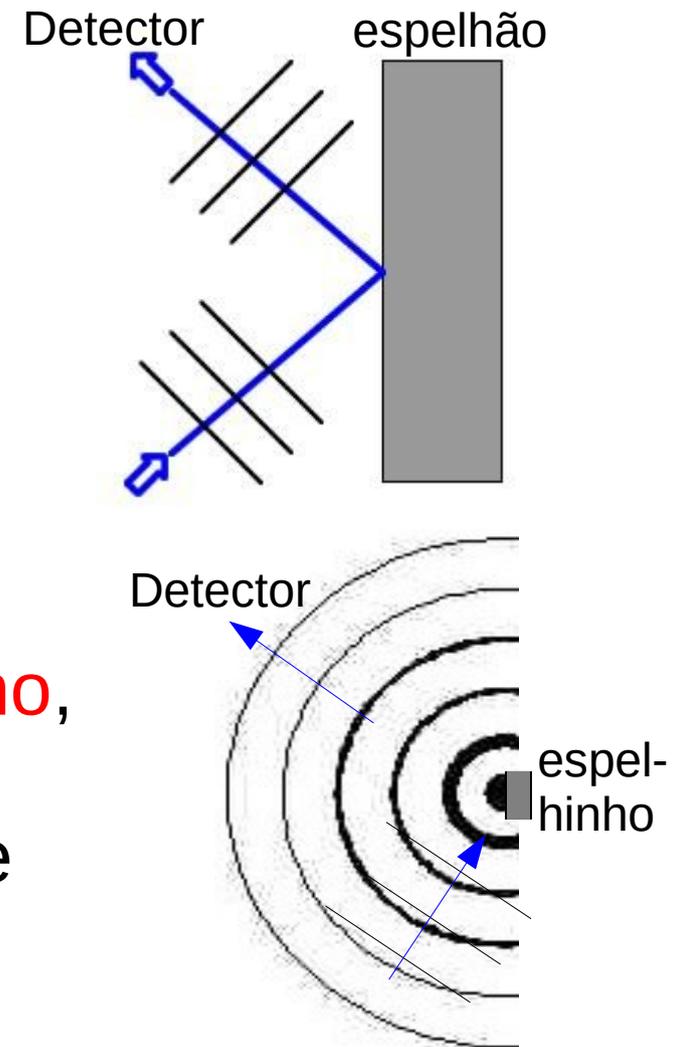
Telescópios

Argumento qualitativo:

Se o **espelho** (ou lente) é muito **grande comparado** ao **comprimento de onda** da radiação (óptico: $\lambda \approx 500 \text{ nm}$), a onda refletida é plana, é dá para determinar, de onde a onda incidente veio => **alta resolução**

Se o **espelho** (ou lente) é muito **pequeno**, a onda refletida é esférica e perde-se a informação, de onde a onda incidente veio => **baixa resolução**

=> Quanto **maior** o **espelho**, tanto **melhor** a **resolução**.
=> bons telescópios são **grandes**.



Telescópios

A **separação angular mínima** que pode ser **resolvida** é:

critério de Rayleigh: $\theta_{\min} = 1.22 \cdot \lambda / D$,

onde D é o **diâmetro** do **coletor** e λ , o comprimento de onda da luz observada.

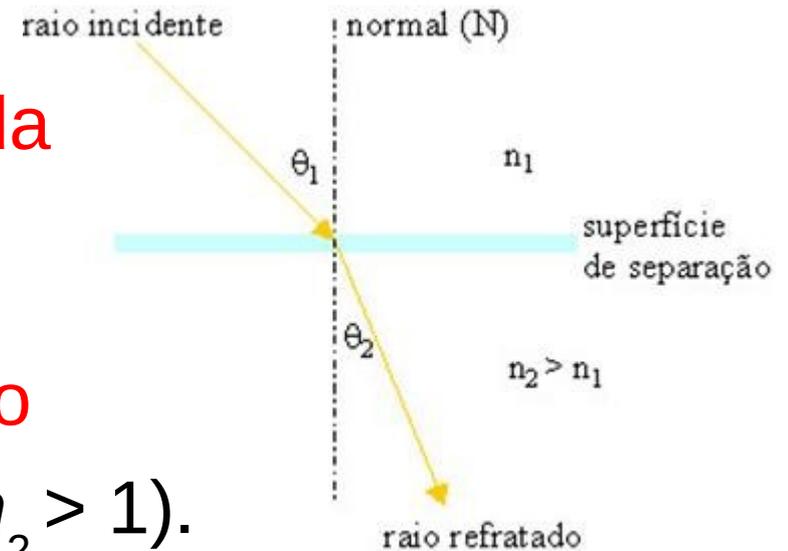
Telescópios Refratores (Lunetas)

São **telescópios** que funcionam com **lentes**.
Os **primeiros telescópios** (incl. aquele de Galileu) eram telescópios refratores.

Quando **luz** passa por uma **lente**,
ela é **defletida** na **entrada** e na **saída**
da lente seguindo a **Lei de Snel**:

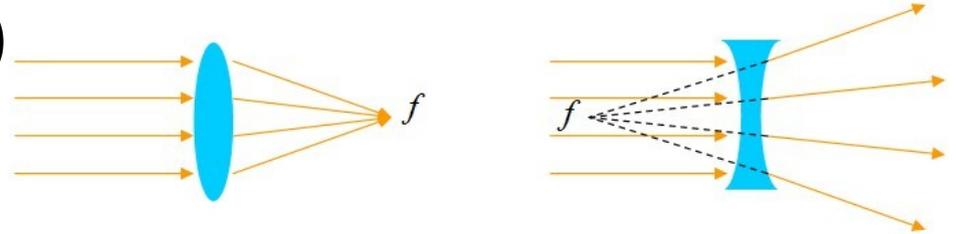
$$n_1 \cdot \sin \theta_1 = n_2 \cdot \sin \theta_2,$$

n_1 e n_2 sendo os **índices de refração**
dos dois meios ar ($n_1 \approx 1$) e vidro ($n_2 > 1$).

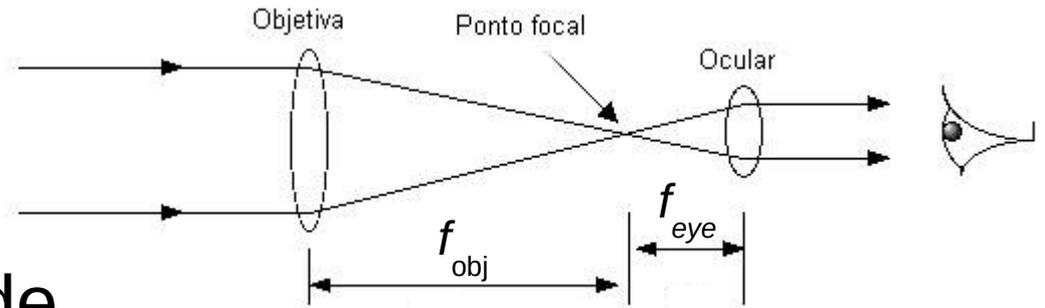


Telescópios Refratores (Lunetas)

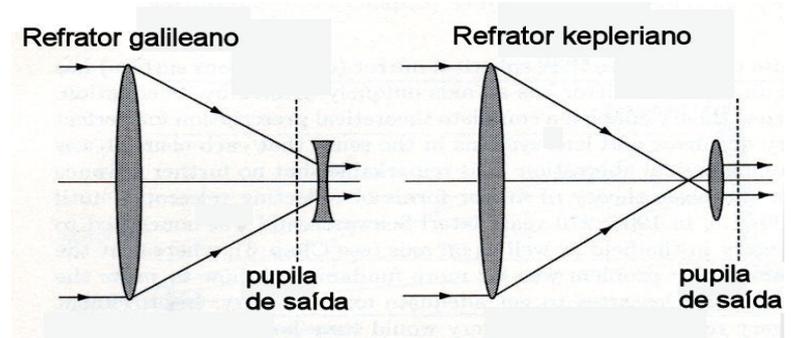
Assim, raios **paralelos** são focados na direção em (lente convexa) ou vindo de (lente côncava) um ponto, o **foco** f .



Colocando **duas lentes** na distância da **soma** das suas **distâncias focais**, obtém-se uma **magnificação angular** de $m = f_{obj} / f_{eye}$



Existem **diferentes geometrias** de telescópios refratores.



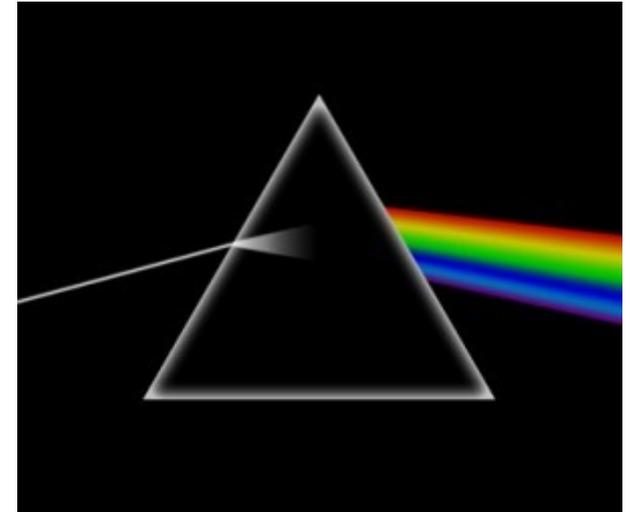
Telescópios Refratores (Lunetas)

Problema: os **índices de refração** dos materiais **dependem** do **comprimento de onda**.

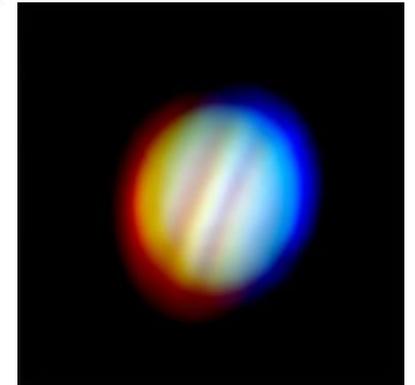
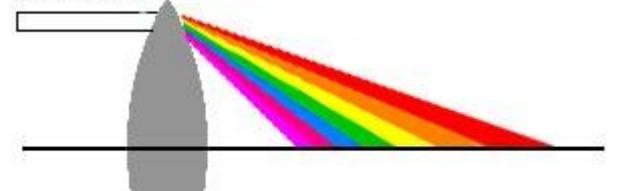
=> **Luz** de **cores diferentes** é **focada** em **pontos diferentes**, fenômeno chamado **aberração cromática**.

Para um dado arranjo de lentes, apenas uma cor é bem focada.

Outro problema: Lentes de mais de 1 m de diâmetro se deformam sob seu próprio peso.



Luz branca



Telescópios Refletores

=> Usar **espelhos**:

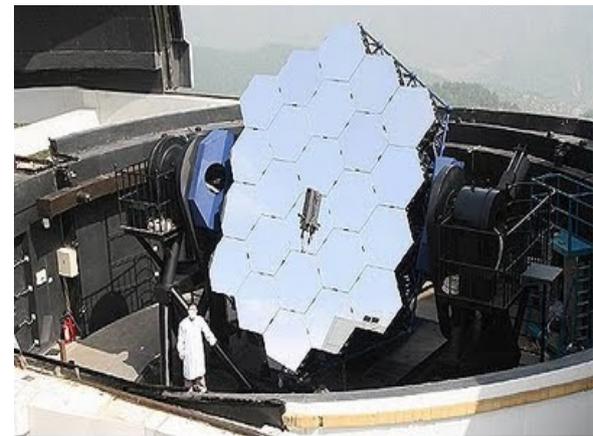
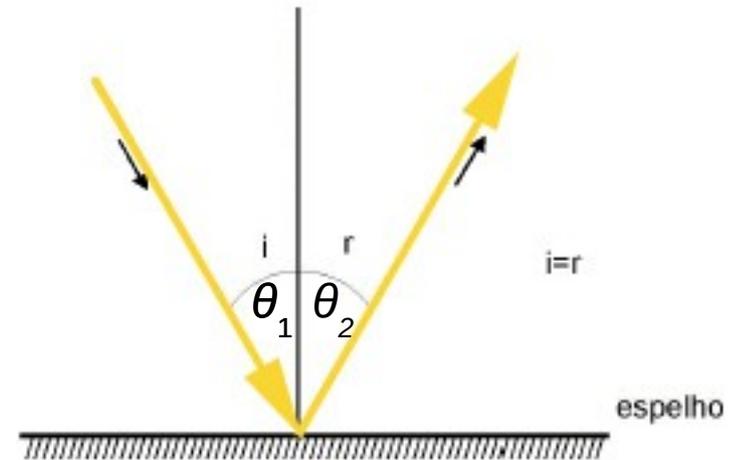
O **ângulo de reflexão não** depende de λ : $\theta_1 = \theta_2$

=> não causa aberração cromática,

e **espelhos** podem ser feitos **muito finos** e ser **segmentados**.

=> praticamente sem limites para o tamanho.

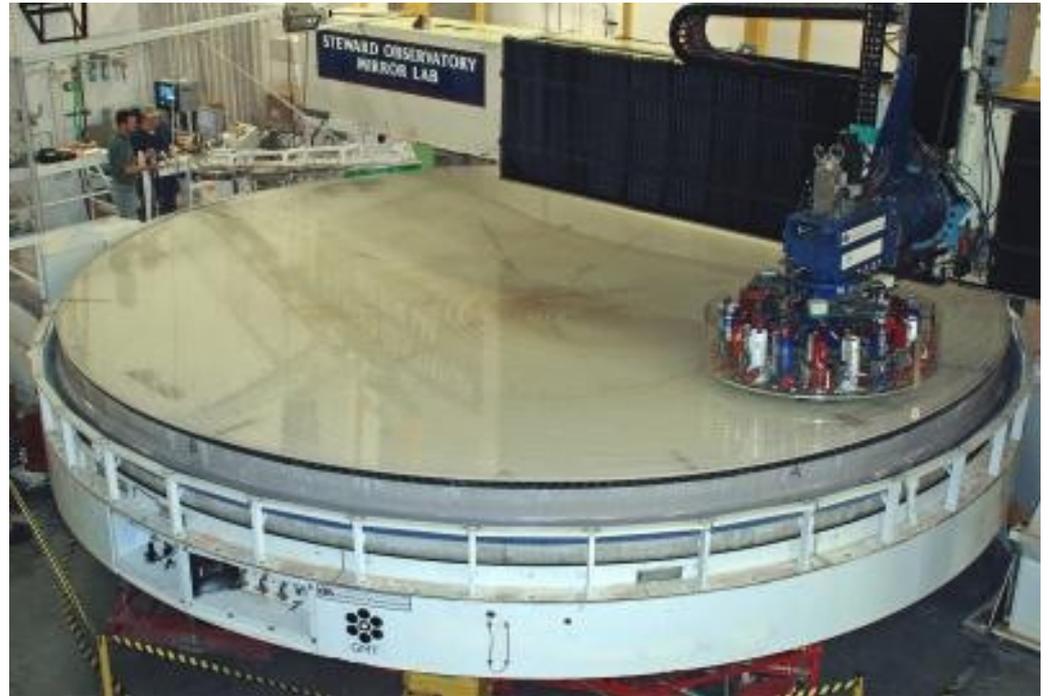
=> Os **telescópios** mais **modernos** são **refletores**.



Telescópios Refletores

O(s) espelho(s) tem que ser bem **polido(s)**:

Este espelho do telescópio em construção *Giant Magellan Telescope* (GMT) de 8.4 m de diâmetro, leva três anos a ser polido, até que a superfície está dentro de 25 nanômetros da forma perfeita.

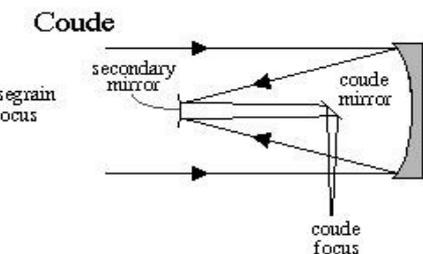
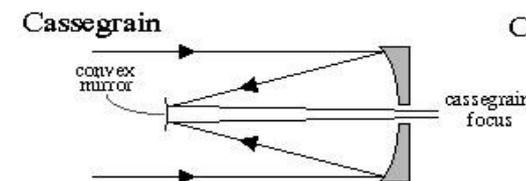
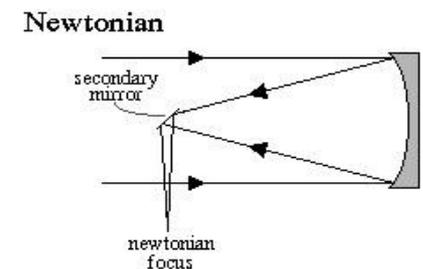
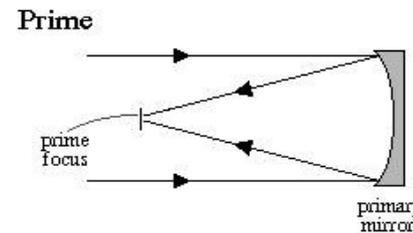
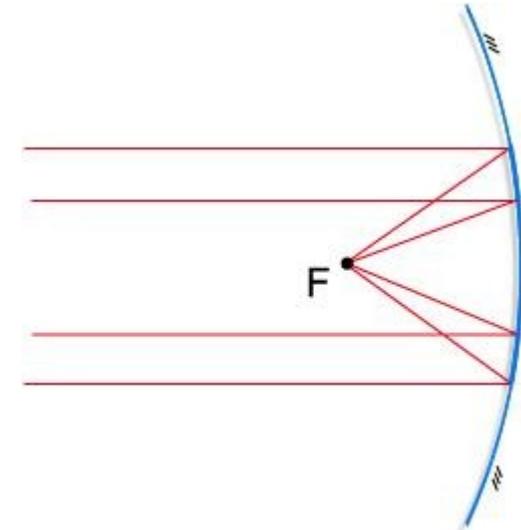


Telescópios Refletores

Espelhos **parabólicos** focam raios paralelos em um **ponto**.

=> O espelho **coletor**, ou **primário**, normalmente é parabólico.

Também existem **várias geometrias** de telescópios refletores, na maioria usando espelhos adicionais, os **espelhos secundários**.

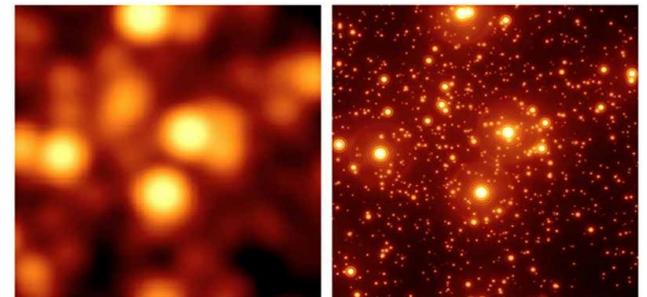
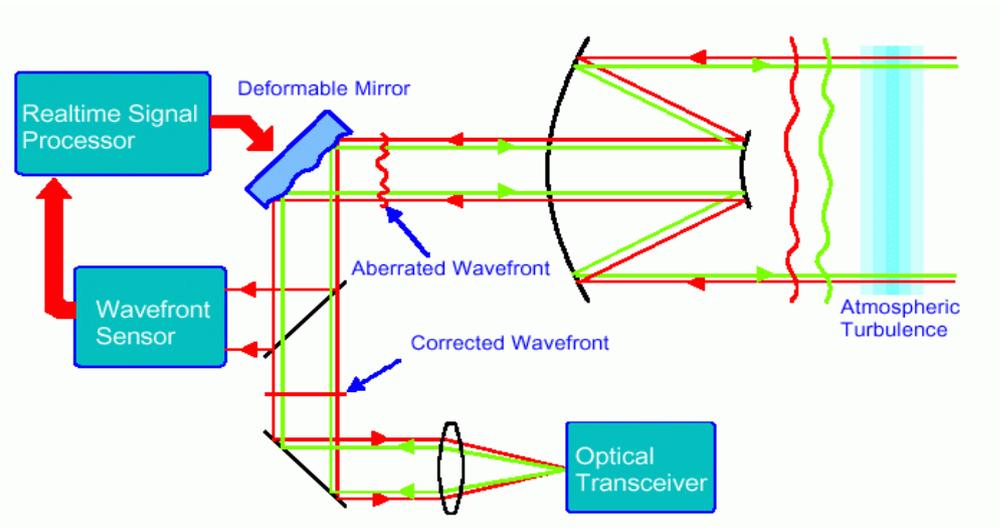


Telescópios Refletores

Outro problema: **Turbulências** na **atmosfera** **distorcem** as frentes de onda da luz.

Se chama a qualidade da imagem devido às condições atmosféricas de **Seeing**.

Solução: **Ótica adaptativa**:
A **deformação** do **espelho** secundário em **tempo real** para compensar a distorção.



Melhoras no seeing devido à ótica adaptativa

Telescópios Óticos

Maiores atuais:
espelhos primários da
ordem de **10 m** de
diâmetro.

Encontram se em lugares
altos, secos e politicamente
estáveis: Havaí,
Chile (deserto Atacama),
Ilhas Canárias, ...

Alguns são **múltiplos**

Trouxeram avanços em todas as áreas da astronomia.



Very Large Telescope (VLT), Chile:
4 telescópios de 8 m

Telescópios Óticos

No futuro (~2024-2027):
3 telescópios de ~30 m:

- *Giant Magellan Telescope*,
Chile, 24.5 m (com possível
participação da UFABC)

- *30 Meters telescope (TMT)*
Havaí, 492 segmentos

- *European Enormously
Large Telescope (E-ELT)*, Chile, 39.3 m, 798 segmentos

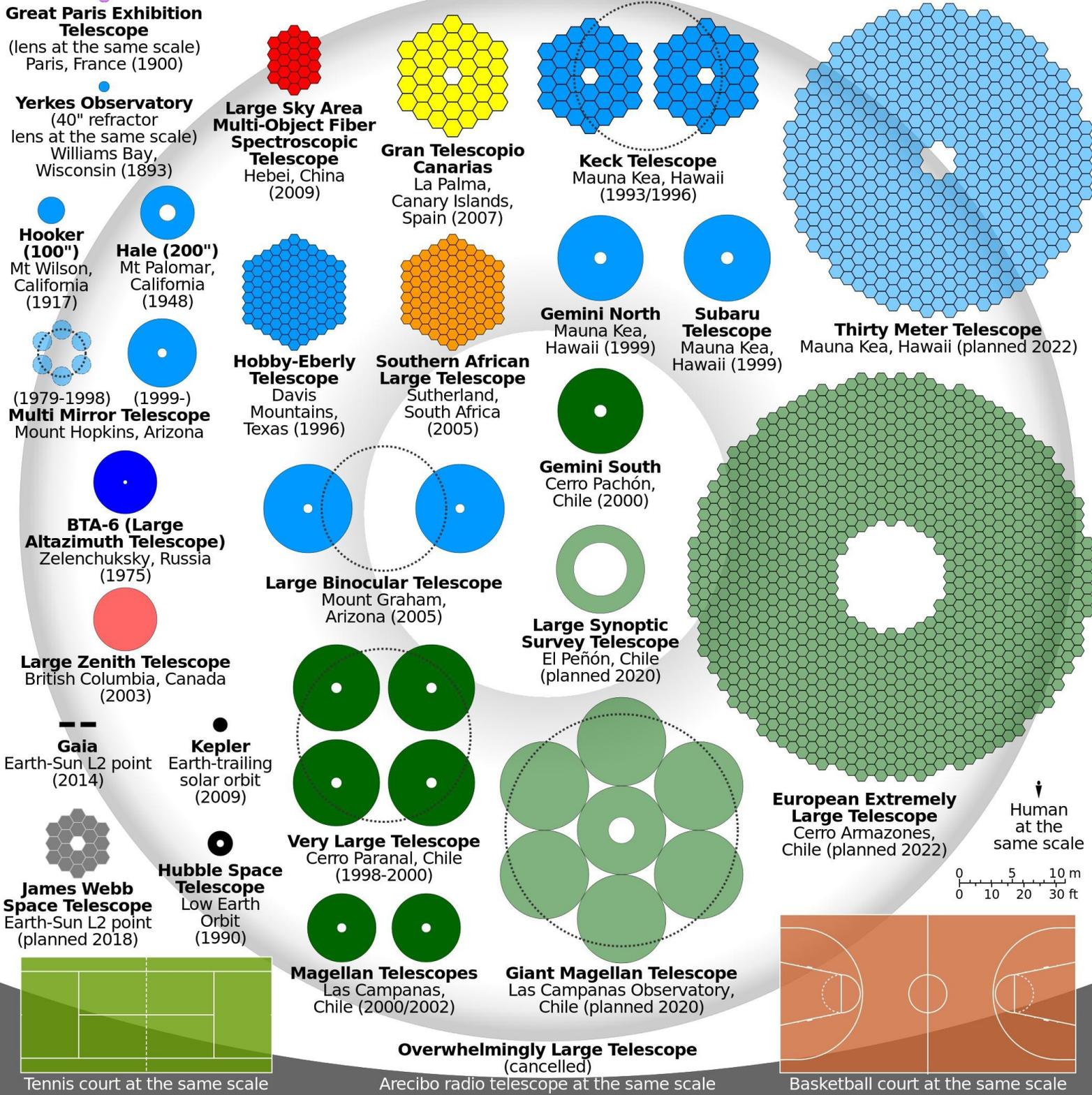
Investigarão (entre outros): exoplanetas habitáveis,
a natureza e distribuição das Matéria e Energia Escura,
a primeira luz e as primeiras galáxias do Universo



TMT (Interpretação artística)

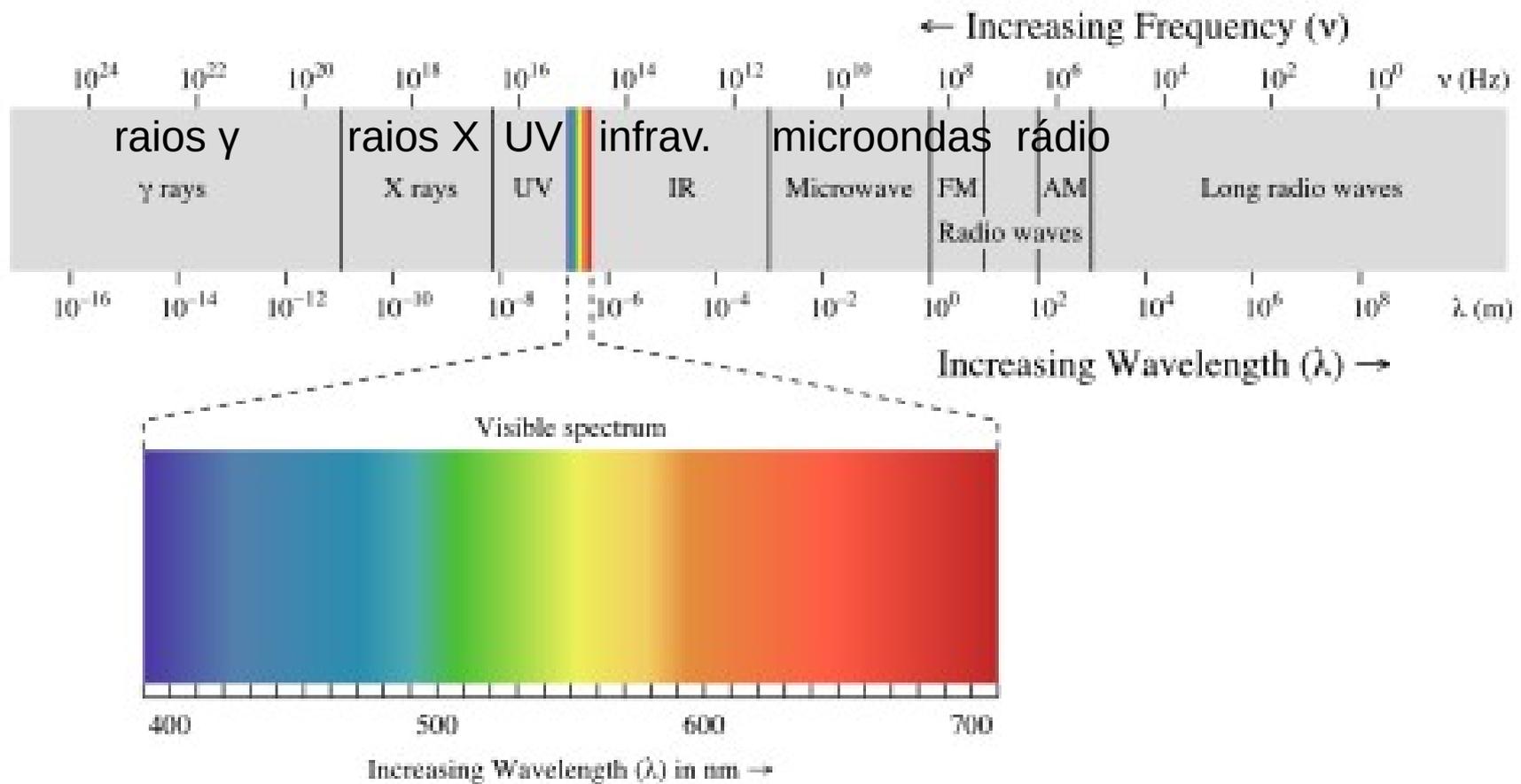
Comparação dos tamanhos dos espelhos primários

© Cmglee



O Espectro da Radiação Magnética

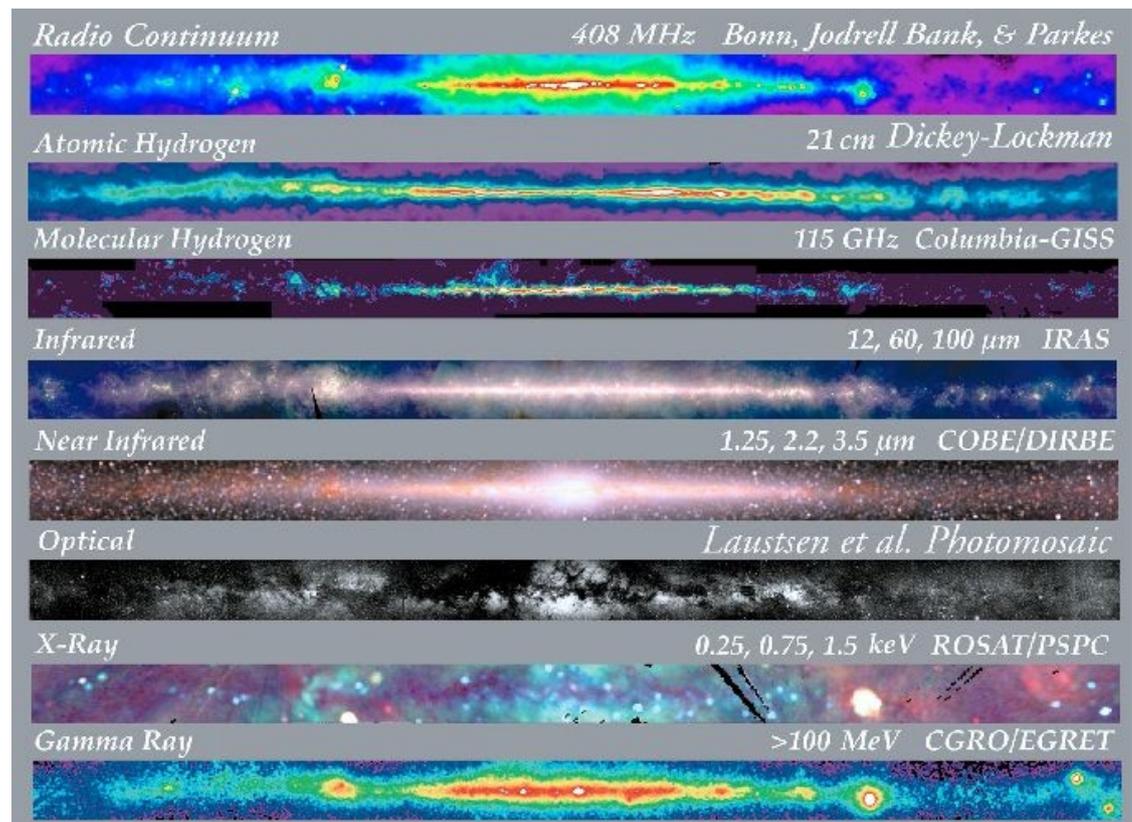
Mas **radiação eletromagnética** não é só luz visível ...



O Espectro da Radiação Magnética

Para ter uma visão geral dos objetos/processos astronômicos temos que observar em **todos** os **comprimentos de onda**:

- Rádio
- Microondas
- Infravermelho (IR)
- Ótico
- Ultravioleta (UV)
- Raios X
- Raios gama (γ)



A Via Láctea vista em várias partes do espectro eletromagnético

Rádio-Telescópios

Ondas **rádio** têm **comprimentos de onda maiores** (1 m - vários km)
=> **Espelhos maiores**

Desvantagem: Não dá pra apontar para um objeto

Vantagens:

O espelho não precisa ser tão polido,
e ondas rádio atravessam nuvens
=> observações com céu nublado possíveis



Radiotelescópio de Arecibo

Rádio-Telescópios

O radiotelescópio de Arecibo em Porto Rico foi até faz pouco o maior telescópio fixo do mundo, com um espelho de 305 m de diâmetro feito de placas de alumínio...

Determina distâncias e massas de galáxias, observa vários pulsares, também fez parte do projeto SETI (*Search for Extraterrestrial Intelligence*), uma busca por vida extraterrestre.



Radiotelescópio de Arecibo

Rádio-Telescópios

... mas agora a China construiu o radiotelescópio FAST (*Five hundred meter Aperture Spherical Telescope*), de 500 m, que teve “*first light*” em setembro 2016.

Ele observará pulsares, quasares, ...



FAST

Interferometria

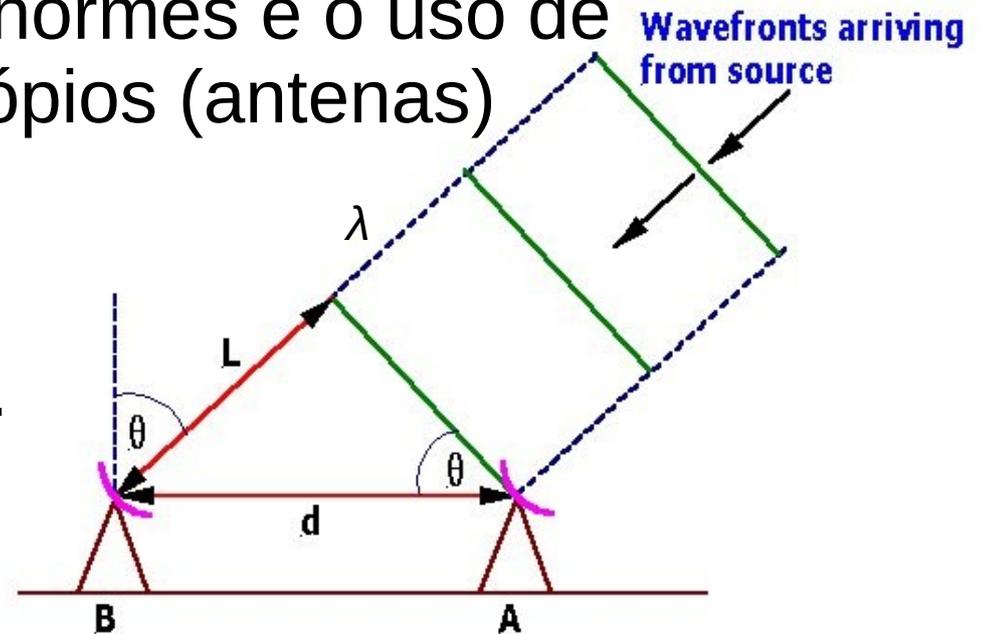
Mais comum que espelhos enormes é o uso de **interferometria**, vários telescópios (antenas) trabalhando **juntos**:

A **distância** entre as antenas é chamada **linha de base** (d).

As frentes de ondas chegam nas antenas com uma

diferença de caminho L , onde $\sin \theta = L/d$, e são **sobrepostos**.

Dependendo da **diferença de fase**, L/λ , os sinais se amplificam: $L/\lambda = i$ ($i=0,\pm 1,\pm 2,\dots$) \Rightarrow **interferência construtiva**, se cancelam: $L/\lambda = i+0.5$ ($i=0,\pm 1,\pm 2,\dots$) \Rightarrow **interferência destrutiva**, ou algo intermediário.



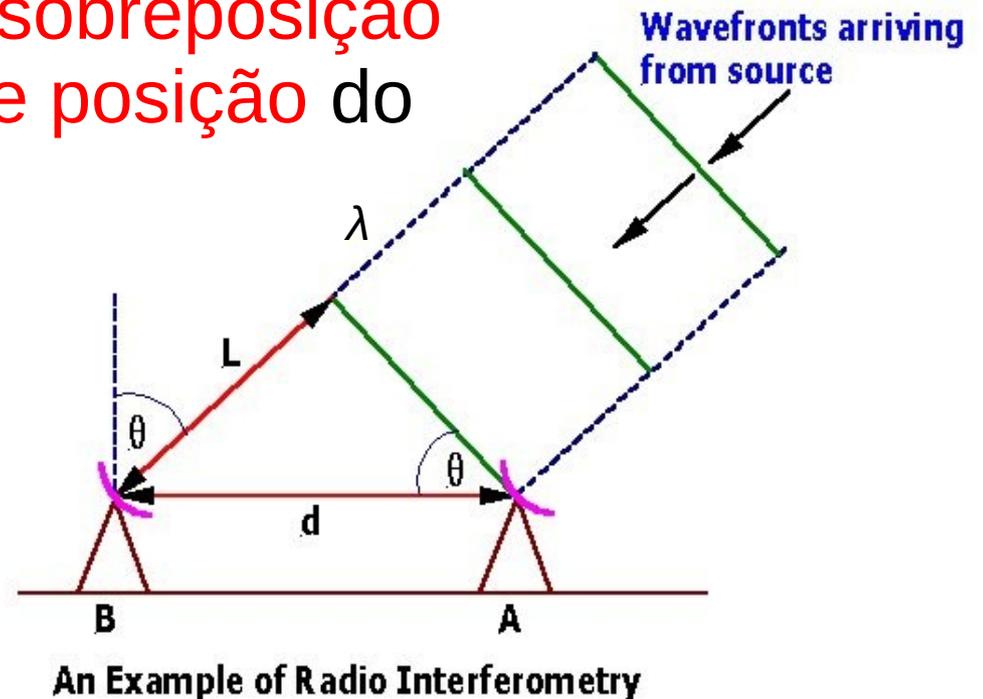
An Example of Radio Interferometry

Interferometria

=> A **intensidade** do sinal da **sobreposição** dos sinais nos dá o **ângulo de posição** do objeto observado.

Consegue-se a **resolução angular** que teria um telescópio de **diâmetro d** (mas não a sensibilidade; esta é proporcional à área total dos coletores juntos).

Interferometria é usada para outras faixas espectrais também, mas é mais difícil ajustar as distâncias entre os telescópios, por causa dos comprimentos de onda mais curtos.



Rádio-Telescópios

Redes **LBI** (*Long Baseline Interferometry*)

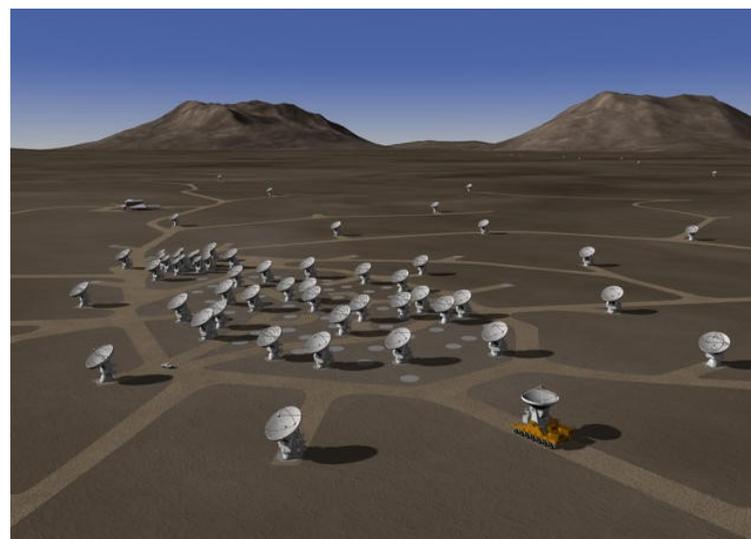
VLA (*Very Large Array*):
27 antenas, 25 m cada um,
New Mexico, EUA,
linha de base máxima 36 km

2012: ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*): 50-64 antenas,
12 m ou 7 m cada uma,
deserto de Atacama, Chile,
5000 m de altura,
distância máxima 16 km

Estudam radiogaláxias, quasares,
pulsares, Sol e planetas, formação
de galáxias, estrelas e planetas



Antenas do VLA



Arranjo das Antenas do ALMA

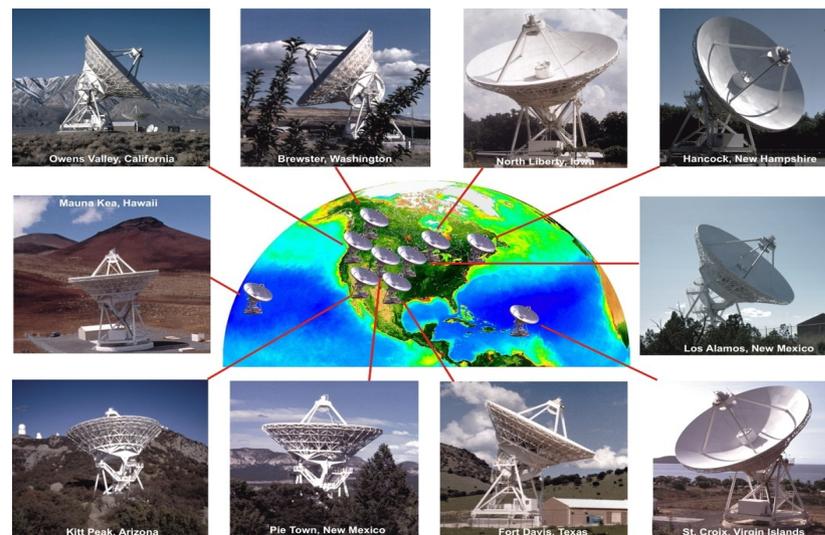
Rádio-Telescópios

... e **VLBI** (*Very Long Baseline Interferometry*)

Já há redes que se estendem por continentes inteiros:
VLBA: *Very Long Baseline Array*, Estados Unidos

e pela Terra inteira:
EVN: *European VLBI Network*

Às vezes, as duas redes colaboram para formar uma rede maior ainda.



Redes de antenas do VLBA ...

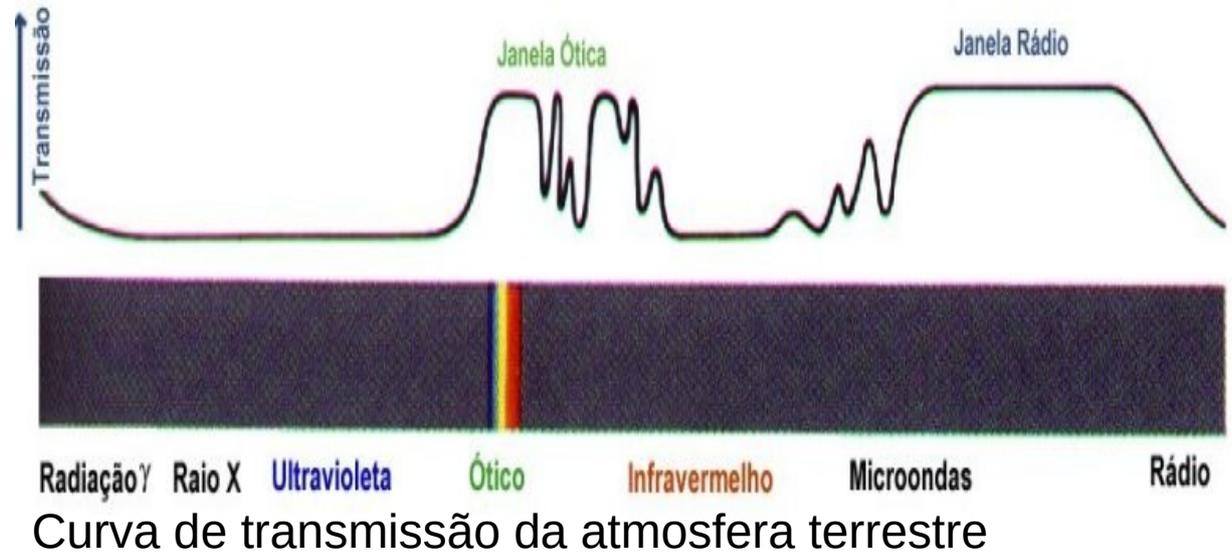


e EVN

A Curva de Transparência da Atmosfera

E os outros tipos de radiação eletromagnética?

Infelizmente, só a radiação ótica (e infravermelho próximo) e rádio chegam até a superfície da Terra.



=> Para as **outras faixas**, temos que ir pro **espaço**.

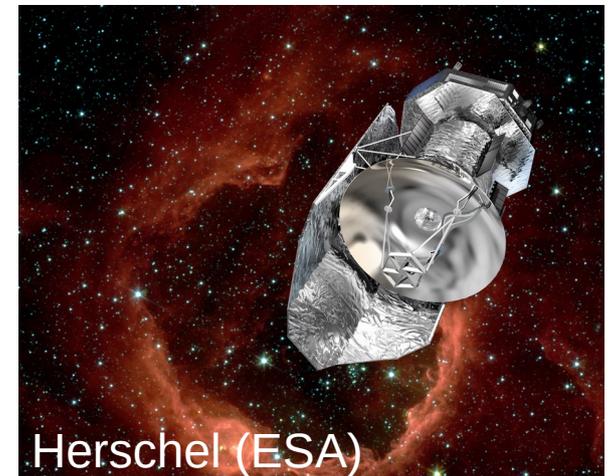
Telescópios Infravermelhos

Enquanto no **infravermelho próximo** ainda dá para observar desde **montanhas altas** e da **altura** da nossa **atmosfera** ...

... pro **infravermelho** mais distante é necessário ir pro **espaço**.

Telescópios infravermelhos funcionam **similar** como **telescópios óticos**, mas têm que ser **resfriados**, i. e. com hélio líquido, senão a **radiação térmica** deles mesmos atrapalharia (assim como aquela da Terra, outro motivo para ir pro espaço).

No infravermelho dá para observar a formação de estrelas e galáxias, a composição química de planetas, ...



Telescópios Espaciais: Microondas e UV

Telescópios para **microondas** e o **ultravioleta próximo** também funcionam de maneira **similar** que telescópios **óticos** (os pro ultravioleta distante são mais como telescópios para raios X, => próximo slide)

Em microondas se observa a radiação cósmica de fundo, a formação do Universo, ...

e no ultravioleta, a formação de estrelas e galáxias, mapas UV do céu, ...



Telescópio microondas Planck (ESA)

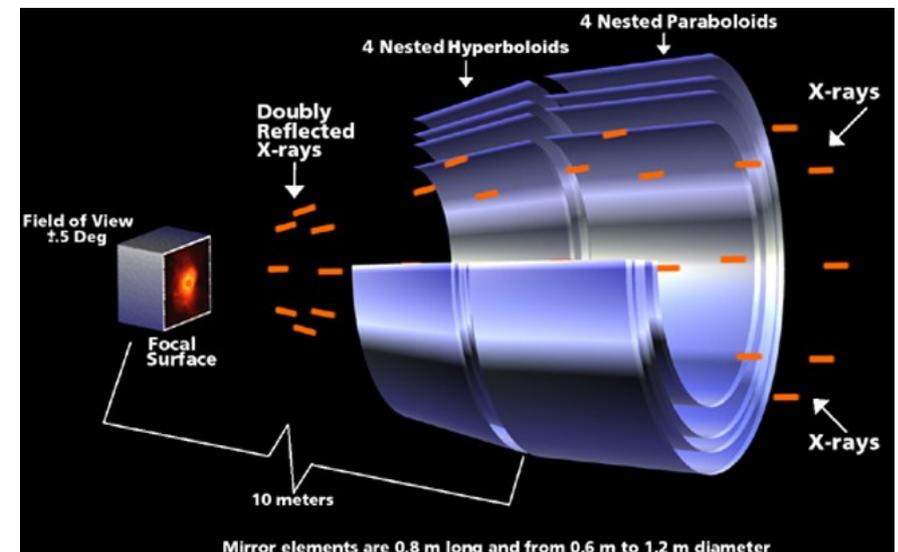


Telescópio ultravioleta GALEX (NASA)

Telescópios Espaciais: Raios X

Raios X não podem ser refletidos como raios óticos. Eles atravessariam o espelho sem serem defletidos. Só “roçando” o espelho, eles ricocheteiam direção detector. Por isto, telescópios de raios X são feitas de vários espelhos hiperbólicos concêntricos.

Raios X são bons pra observar Supernovas e Buracos Negros e determinar a distribuição de Matéria e Energia Escuras.

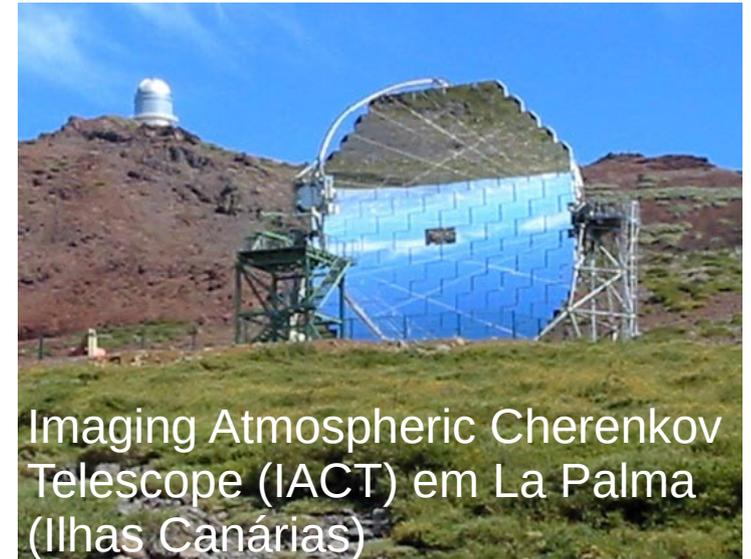


Telescópios de Raios Gama

Raios γ não podem ser **defletidos** por espelhos nem “roçando”. São fótons de energia tão alta, que chegam “fóton por fóton”.

É preciso de técnicas similares àquelas pra detecção de **raios cósmicos** (por partículas secundárias => jájá).

Na faixa γ conseguimos detectar as misteriosas erupções de raios gama, que são provavelmente as explosões finais de Estrelas de Nêutrons.



Telescópios Espaciais

O *Hubble Space Telescope* (HST, NASA/ESA)

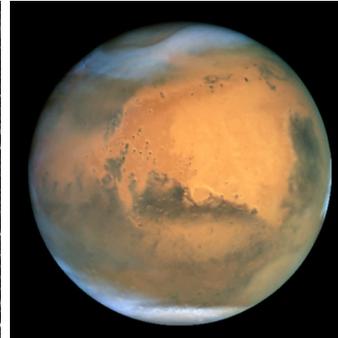
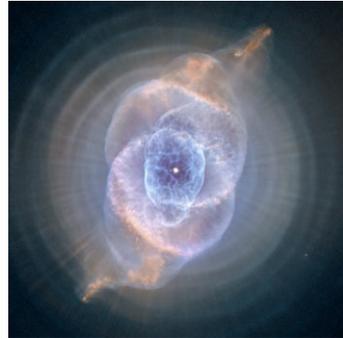
- Ótico, infravermelho e UV
- Espelho de 2.4 m
- Resolução no ótico: 0.05"
- Funcionando desde 1990 e desde 1993 com uma lente corrigindo um erro no espelho, última missão de manutenção em 2009



Telescópios Espaciais

O *Hubble Space Telescope* (HST, NASA/ESA)

- Ainda em operação graças ao sucesso enorme
- Já fez o seu 25^{imo} aniversário, e será aposentado quando os instrumentos falharem (2030-2040?)
- Avanços em cada área da astronomia, e imagens lindas



Telescópios Espaciais

Futuros Telescópios Espaciais

2018: *Transiting Exoplanet Survey Satellite* (TESS), em operação

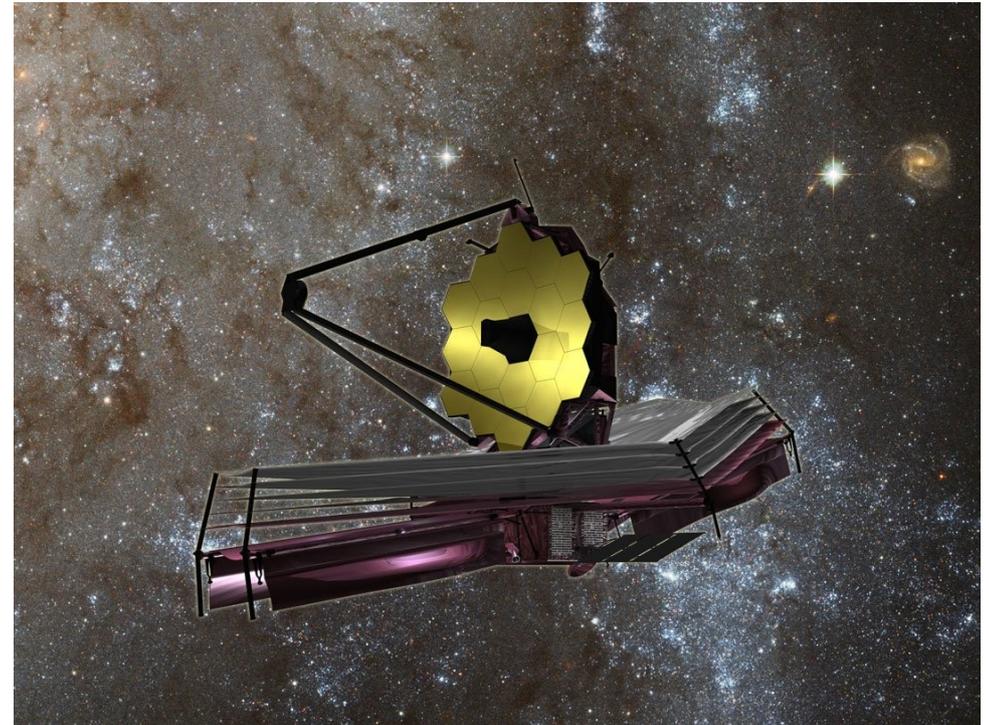
2020: *James Webb Space Telescope* (JWST) (IR, “Sucessor” do HST)

2020: Euclid (óptico e IR)

2021: IXPE (*Imaging X-ray Polarimetry Explorer*)

2024: *Exoplanet Characterisation Observatory* (EChO)

2028: ATHENA (*Advanced Telescope for High ENergy Astrophysics*, raios X) e outros



James Webb Space Telescope
(interpretação artística)

Outros tipos de Radiação

Além da **radiação eletromagnética** existem outros tipos de **radiação**, i. e.

- **neutrinos**
- **raios cósmicos**
- **ondas gravitacionais**

Estes requerem **telescópios** que funcionam de **maneiras diferentes**.

“Telescópios” de Neutrinos

Neutrinos (ν) são partículas produzidas no *Big Bang*, em explosões de Supernovas, dentro do Sol e em certos processos de desintegração.

Eles quase não interagem com a matéria.

A cada segundo, passam vários pelo seu corpo e um interage com você a cada ~35 anos.

=> Difícilimos de detectar

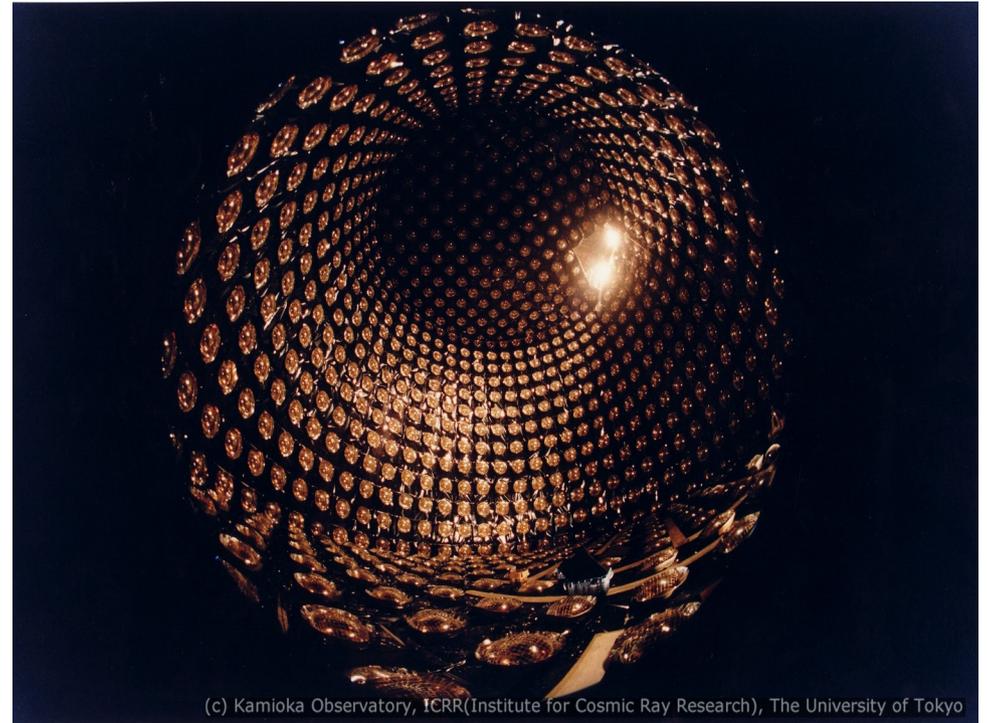
=> É preciso de muito material para captar/detectar um

“Telescópios” de Neutrinos

Exemplo:

Super-Kamiokande
no Japão:

- 50'000 toneladas
(Ø 33.8 m, altura 36.2 m)
de **água ultra-purificada**
- 1 km de baixo da terra
para bloquear outros sinais
- 11'146 **tubos**
fotomultiplicadores (detectores muito sensíveis à luz)
montados em torno da bacia



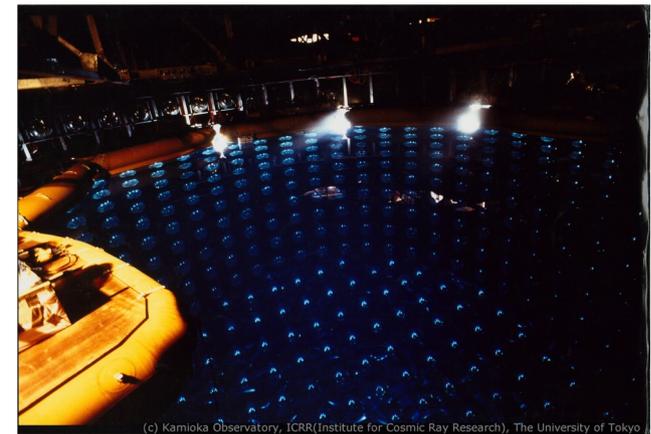
Interior de Super-Kamiokande

“Telescópios” de Neutrinos

ν passando pode **interagir** com uma **molécula de água**, o que gera uma **partícula carregada de alta velocidade**, que também **interage** com a **água**, emitindo radiação Cherenkov

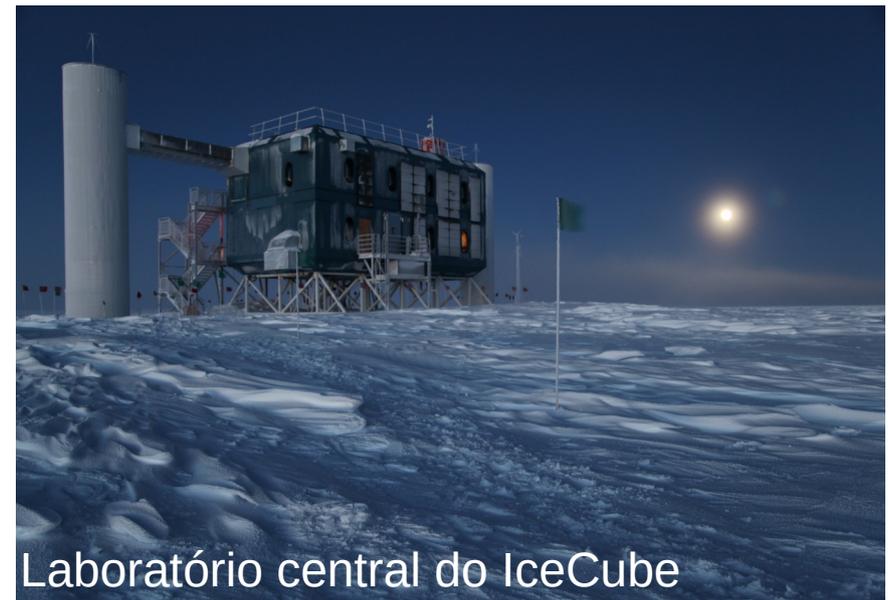
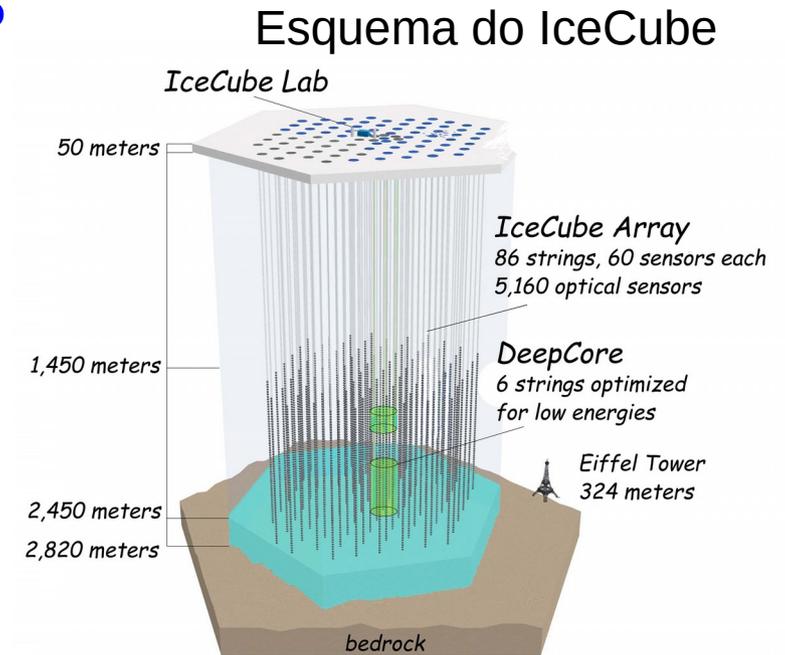
=> **sinal** em forma de anel na grade de **fotomultiplicadores**

Usado para estudos dos neutrinos solares e atmosféricos e detecção de neutrinos de Supernovas na Via Láctea.



“Telescópios” de Neutrinos

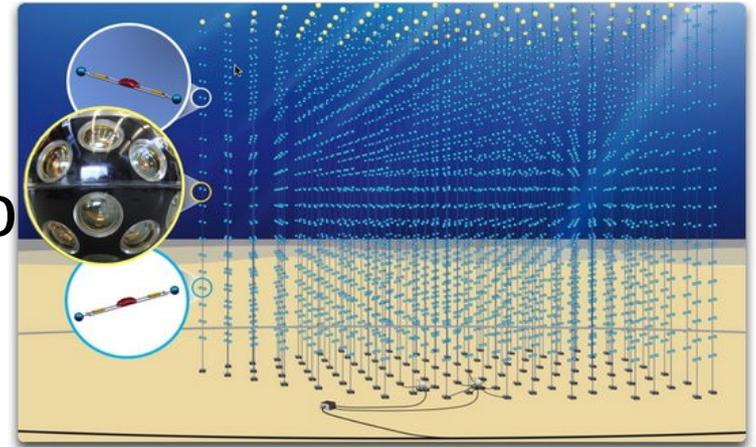
- Alguns outros “telescópios” de neutrinos:
- Antares
- IceCube: um km^3 de gelo na Antártica



Laboratório central do IceCube

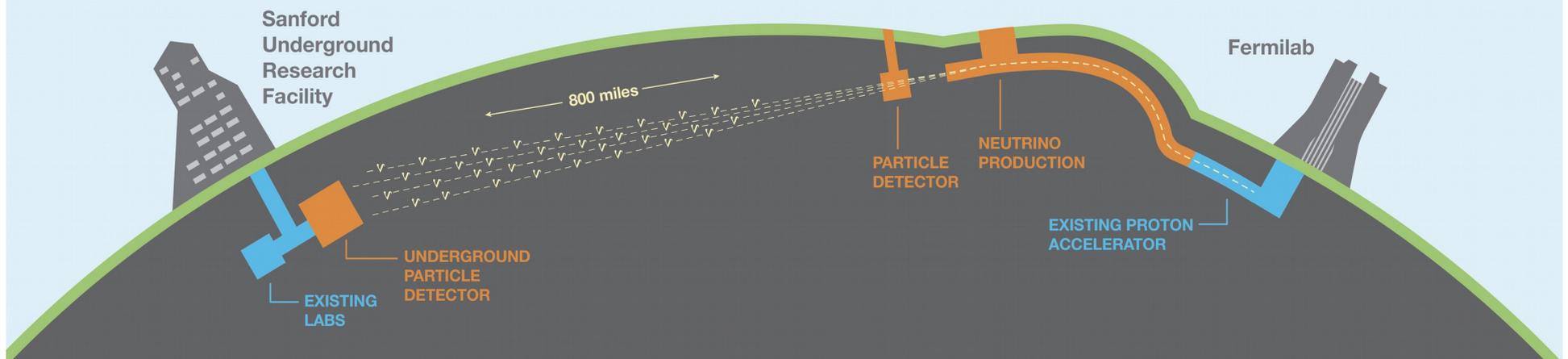
“Telescópios” de Neutrinos

- Alguns outros “telescópios” de neutrinos:
- Km3net: se usa de um km cúbico de água no mar mediterrâneo



Previsto para 2022-2026:

DUNE (*Deep Underground Neutrino Experiment*)
coletor: 40 kton de argônio líquido



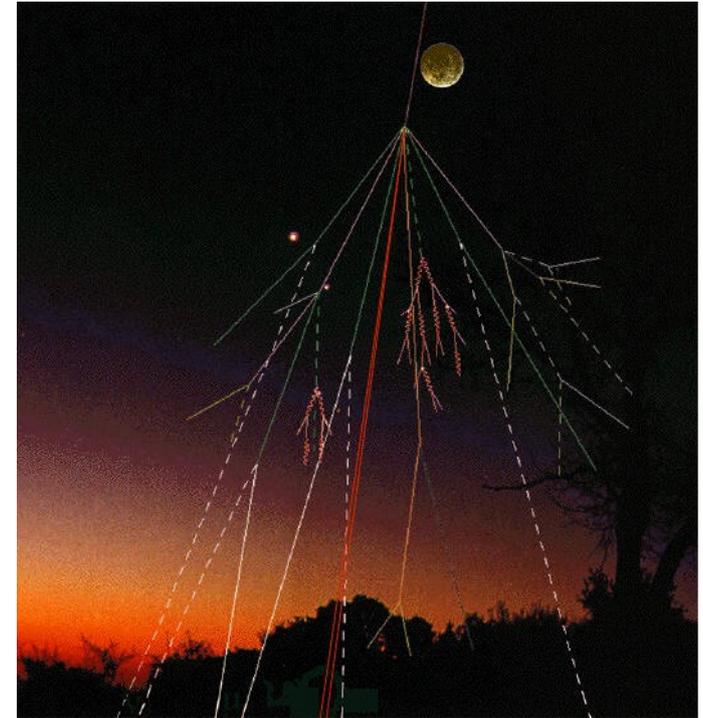
“Telescópios” de Raios Cósmicos

Raios Cósmicos: **Partículas** de **átomos** (prótons, núcleos de hélio, elétrons, ... => não são raios!) de alta energia

- Origem **solar**, **Galáctica** ou **extragaláctica** (Buracos Negros, Pulsares, Quasares ?)

- Ao chegar na **atmosfera** da Terra, produzem **chuva** de “**partículas secundárias**”

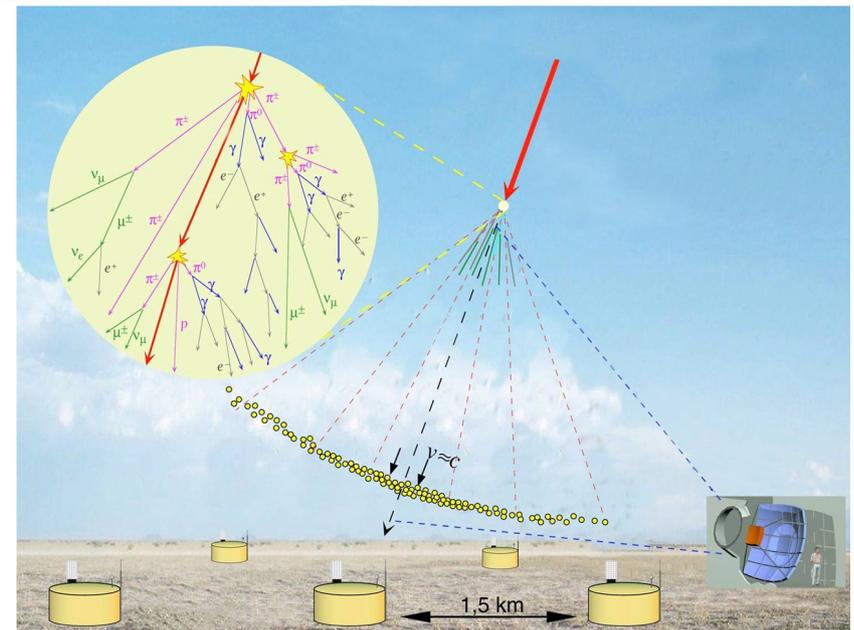
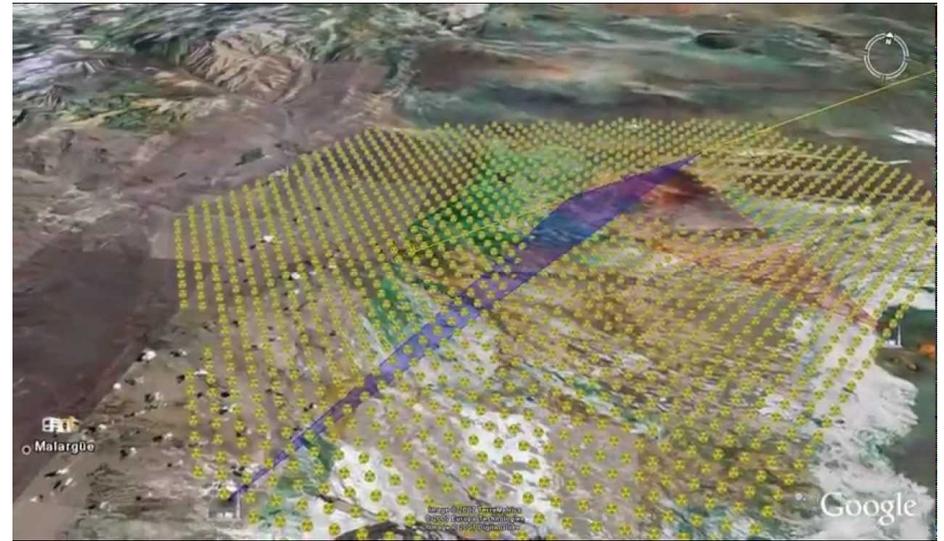
- “Telescópios” de raios cósmicos detectam estas partículas secundárias



“Telescópios” de Raios Cósmicos

Exemplo: Observatório Pierre Auger (Argentina)

- **Grade** de **detectores** distribuídos numa área de 3000 km^2
- Por **Correlação temporal** dos **sinais** nos detectores consegue se determinar
 - a **energia total**, e
 - a **direção de vinda** da **partícula primária**
- Inaugurado em 2008



“Telescópios” de Raios Cósmicos

Observatório Pierre Auger

Evidenciou que raios cósmicos de alta energia nos chegam isotropicamente de todas as direções.

=> as fontes devem ser extragalácticas.

Verificou o limite GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin), que é a energia máxima para raios cósmicos, devido à interação com a Radiação Cósmica de Fundo
(=> aulas Cosmologia)



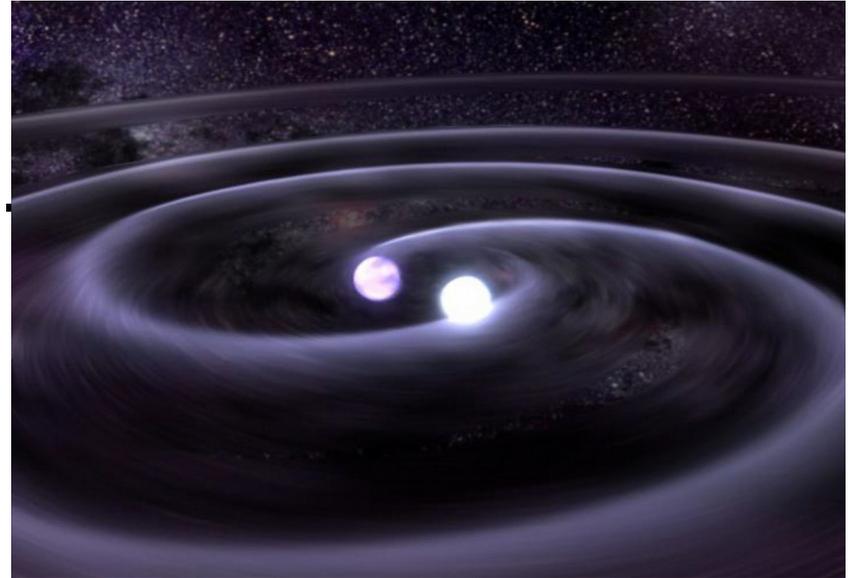
“Telescópios” de Ondas Gravitacionais

Ondas gravitacionais são previstas pela teoria da **Relatividade Geral** (Einstein, 1915, => aula Relatividade).

São **deformações** periódicas do **espaço-tempo** que se **propagam** à **velocidade** da **luz**.

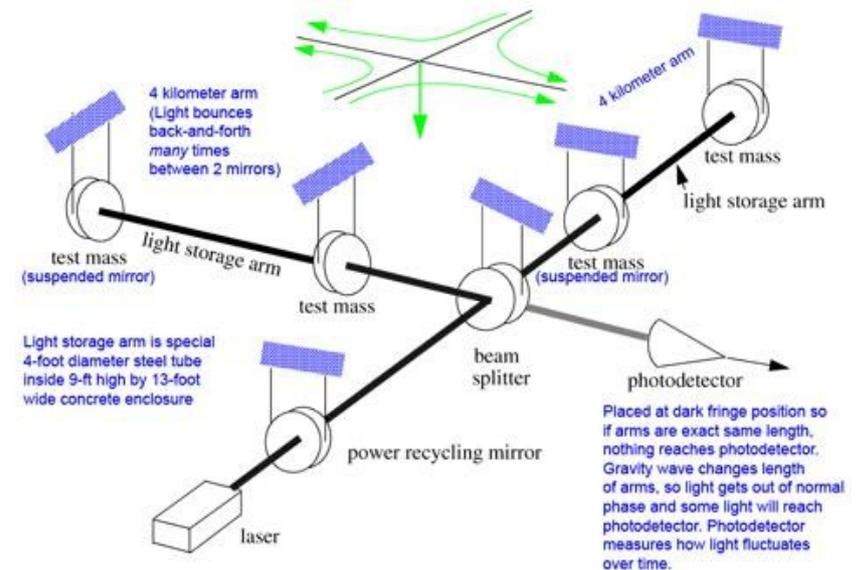
As mais intensas deveriam provir de binários de Estrelas de Nêutrons e/ou Buracos Negros (=> aula Estágios Finais), e de uma época chamada Inflação logo depois do Big Bang (=> aulas Cosmologia).

Já houve **detecções indiretas**: Perda de energia rotacional nas órbitas de pares de pulsares, i. e. o pulsar binário PSR1913+16, ou Hulse-Taylor (1974).



“Telescópios” de Ondas Gravitacionais

Elas devem ser diretamente **detectáveis** medindo as **diferenças de comprimentos** de dois **braços perpendiculares** de um “telescópio” de ondas gravitacionais. Isto é feito medindo a **diferença de tempo de viagem** de **dois raios de luz** (laser) percorrendo os braços. **Sobrepondo** os raios após o caminho pode-se medir diferenças de caminho muito pequenas pela **interferência** dos sinais.



“Telescópios” de Ondas Gravitacionais

Já foram construídos vários destes telescópios na Europa e nos Estados Unidos, como Virgo, na Itália, que entrou em operação em 2007.

O mais sensível até hoje é o LIGO (*Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory*) em Livingston e Hanford (EUA), que está operando desde 2010.



LIGO, EUA

Evidências para Ondas Gravitacionais

14/09/2015 (anunciado 11/02 2016)

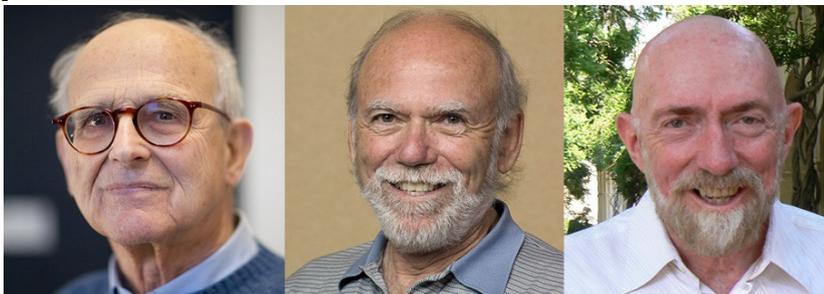
LIGO (Hanford e Livingston, EUA):

Detecção de **ondas gravitacionais**

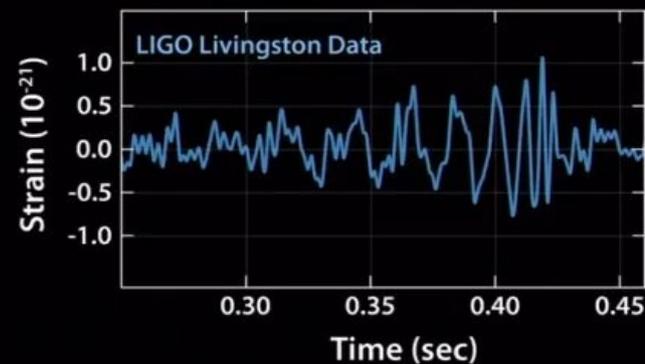
devidas a um evento de fusão de 2 Buracos Negros.

Hoje já são mais de 20 detecções, e no caso de uma, também foi detectada a contrapartida ótica.

=>  Prémio Nobel de física (2017) para K. Thorne, R. Weiss e B. C. Barish.



LIGO detector em Hanlon



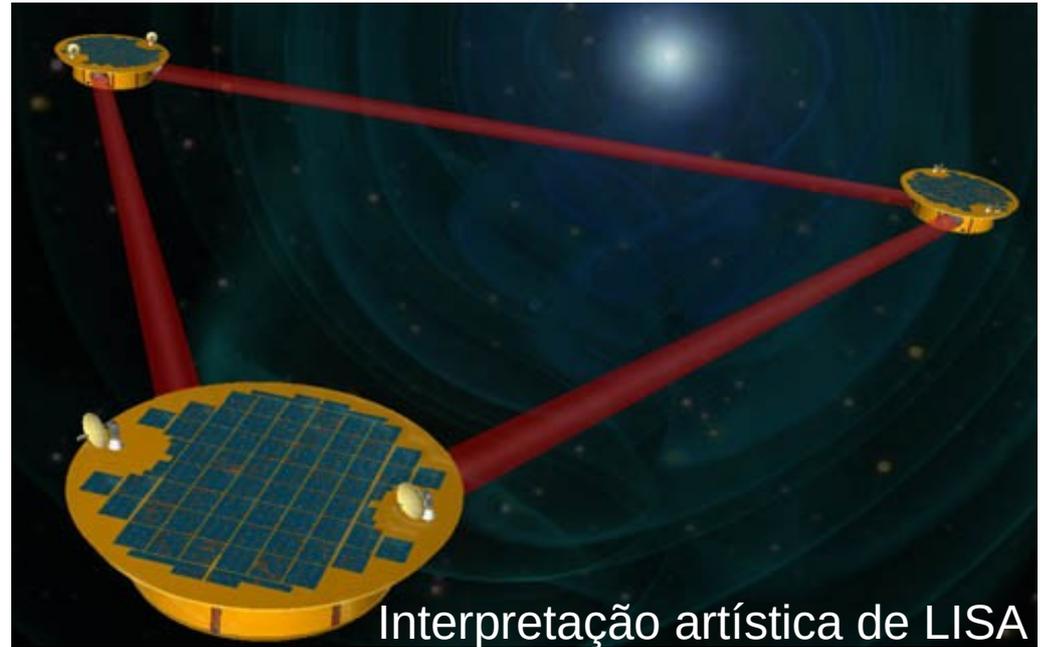
“Telescópios” de Ondas Gravitacionais

Telescópios de ondas gravitacionais do futuro incluem conjuntos de satélites, resultando em braços muito maiores.

O “telescópio” LISA (*Laser Interferometer Space Antenna*) foi projetado como

colaboração das NASA e ESA. Porém, a NASA saiu do projeto por causa dos custos altos, e a ESA redimensionou o projeto, agora projetado para ser lançado em 2034.

O Japão propôs um telescópio similar, chamado DECIGO (*Deci-Hertz Interferometer Gravitational wave Observatory*), a ser lançado em 2027.



Interpretação artística de LISA

Além de Telescópios

Quando o objeto de interesse se encontra no nosso Sistema Solar, ele pode ser estudado (além de com telescópios) usando vários tipos de **sondas espaciais**:

- (- Os **Telescópios Espaciais** são, às vezes, classificados como sondas)
- **Sondas Sobrevoos**: Sobrevoam o corpo celeste de interesse, ou passam perto dele no caminho para um outro destino, às vezes para assistência gravitacional (ser impulsionado pelo astro)
- **Sondas Orbitadoras**: Orbitam e observam o corpo de interesse
- **Sondas de Impacto**: Colidem com o corpo, analisando-o durante a queda e/ou ejetam material do corpo, para ser analisado por uma sonda sobrevoos ou orbitadora por perto
- **Sondas Aterrisadores**: Pousam no astro para estudá-lo in situ
- **Sondas Veiculares**: Se deslocam sobre rodas na superfície do astro, alvo preferido: Marte

Sondas para os Planetas do Sistema Solar

Uma lista (praticamente completa, tirando o enorme número de missões que falharam):

Луна (Luna) 1 a 24 (1959 a 1976): série de sondas soviéticas (todos os tipos) estudando a Lua, entre elas as 1^{as} sondas a trazer material de um outro corpo celeste pra Terra, e a 1^a a tirar fotos do lado escuro da Lua

Венера 1 (Venera 1), Зонд 1 (Zond 1), Венера 2 e 3: lançados 1961, 64, 64, 65, passaram por Vênus, não forneceram dados

Mariner 2: lançado 1962, estudou Vênus no mesmo ano

Mariner 4, 6 e 7: lançados 1964, 69 e 69, passaram Marte

Венера 4, 5 e 6: lançados 1967, 69, 69, entraram e analisaram a atmosfera de Vênus nos mesmos anos



Reprodução da Venera 1, 1^a sonda a sobrevoar um outro planeta

Sondas para os Planetas do Sistema Solar

Mariner 5: lançado 1967, passou por Vênus no mesmo ano

Венера 7 a 16: lançados 1970 a 1983, orbitaram, passaram e/ou aterrissaram em Vênus

Mariner 9: lançado 1971, orbitou Marte de 1971 a 1973

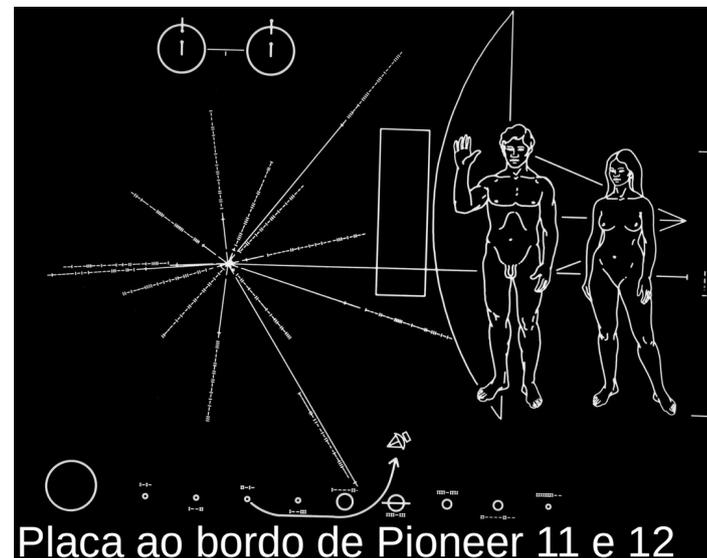
Марс-2 e -3 (Mars 2 e 3): lançados 1971, orbitaram Marte, deixaram cair aterrissadores (o de Марс-3 conseguiu pousar)

Pioneer 11 e 12: lançados 1972, 73, passaram Júpiter, Saturno (só P. 11), hoje no limite do Sistema Solar

Mariner 10: l. 1973, estudou Mercúrio e Vênus

Viking 1 e 2: lançados 1975, orbitaram Marte, deixaram aterrissadores pousarem no planeta

Voyager 1 e 2: lançados 1977, passaram Júpiter, Saturno, V. 2 passou por Urano e Netuno também, hoje estão no limite do Sistema Solar e ainda mandando dados!



Placa ao bordo de Pioneer 11 e 12



Um dos Voyagers (interpretação artística)

Sondas para os Planetas do Sistema Solar

Pioneer Venus 1 e 2: lançados 1978,
P. V. 1 orbitou Vênus de 1978 a 1992

P. V. 2 entrou a atmosfera de Vênus
em 1978, uma sub-sonda aterrisou
Bera (Vega) 1 e 2: lançados 1984,
passaram Vênus e deixaram cair uma
sonda na atmosfera do planeta,
no caminho pro cometa de Halley

Фобос 2 (Fobos 2): I. 1988, orbitou Marte,
falhou em pousar na lua marciana Phobos

Magellan: lançado 1989, orbitou Vênus de 1990 a 1994

Galileo: lançado 1989, passou por Vênus, mandou uma sonda entrar na
atmosfera de Júpiter em 1995, orbitou o planeta de 1995 a 2003

Mars Global Surveyor: lançado 1996, orbitou e mapeou Marte por 7 anos

Mars Pathfinder: lançado 1996, rolou sobre Marte por 84 dias

Cassini-Huygens: lançados 1997, passou por Vênus e Júpiter, estudaram
Saturno e Titã em 2004-2005, Huygens aterrisou em Titã,
Cassini se suicidou entrando na atmosfera de Saturno em 2017



Cassini (interpretação artística)

Sondas para os Planetas do Sistema Solar

Mars Odyssey: lançado 2001, orbitando Marte até hoje

Mars Express: lançado 2003, orbitando Marte até hoje

Spirit, Opportunity: lançados 2003, rolaram sobre Marte, Opportunity até hoje

MESSENGER (*MERCURY Surface, Space ENVIRONMENT, GEOchemistry, and Ranging*): lançado 2004, passou várias vezes por Mercúrio, Vênus e a Terra, orbitou e mapeou e estudou o campo magnético de Mercúrio de 2011 a 2013

Venus Express: I. 2005, orbitou Vênus de 2006 a 2014

MRO (*Mars Reconnaissance Orbiter*): lançado 2005, orbitando Marte

Phoenix: lançado 2007, aterrisou em Marte

Akatsuki: I. 2010, passou por Vênus em 2010, orbitando esta desde 2015

IKAROS (*Interplanetary Kite-craft Accelerated by Radiation Of the Sun*): lançado 2010, sobrevoou Vênus

Curiosity: lançado 2011, rolou sobre Marte até 2018 (perda de contato)

Juno: lançado 2011, orbitando Júpiter desde 2016

Mars Orbiter Mission, MAVEN (*Mars Atmosphere and Volatile Evolution*): lançados 2013, orbitando Marte

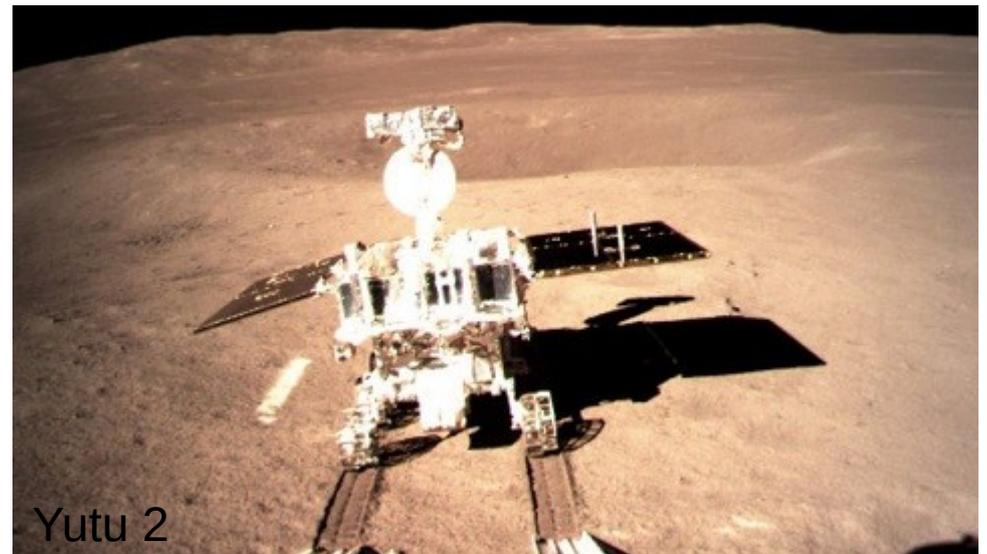


Sondas para os Planetas do Sistema Solar

ExoMars: lançado 2016, está orbitando Marte, soltou a sonda aterrissadora Schiaparelli que era para procurar um sítio pro pouso de mais um carrinho, dois anos depois, mas acabou quebrando na tentativa de pouso.

InSight: lançado 05/03/2018, pousou em Marte 26/11/2018

Chang'e 4: pousou (03/01/2019) na Bacia Sul-Aitken, do lado "escuro" da Lua e soltou a sonda veicular Yutu 2



Sondas para os Planetas do Sistema Solar

Missões Futuras

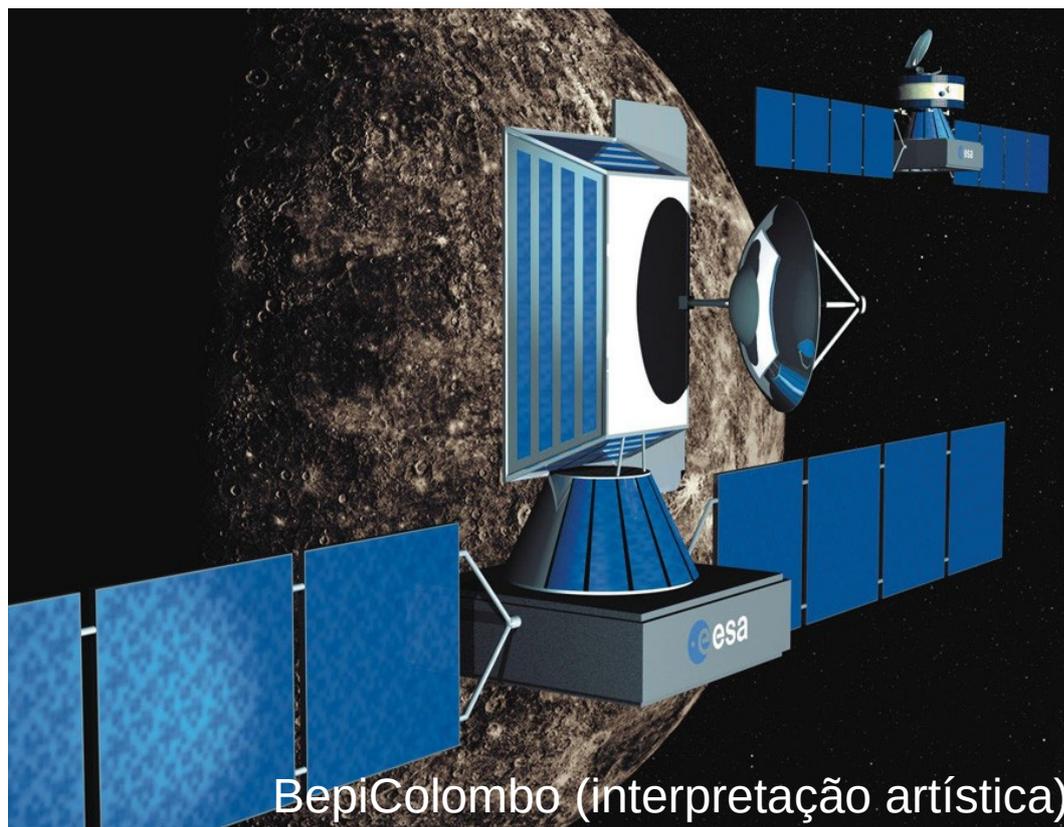
BepiColombo: 2 sondas, lançados 2018, passarão por Vênus, orbitarão, mapearão e medirão o campo magnético de Mercúrio em 2024

Hope Mars: lançamento projetado 2020, orbitará Marte

JUICE (*JUpiter ICy moons Explorer*): lançamento 2022, orbitará Ganímedes e estudará Ganímedes, Calisto e Europa

Europa Clipper e Lander: 2023, aterrissaria em Europa, anos 20

+ um monte de missões propostas, mas ainda não aprovadas



Sondas para os Corpos Menores

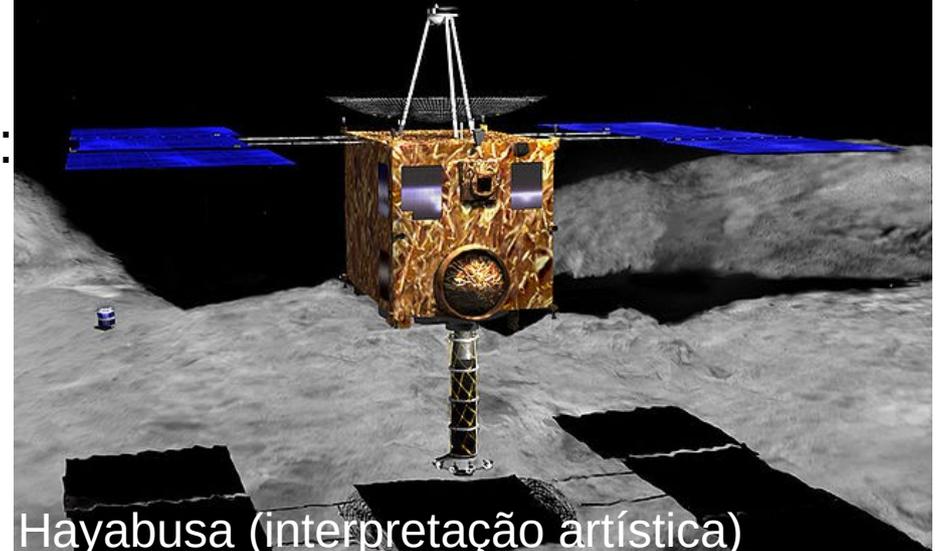
ICE (*International Cometary Explorer*): 1985 sobrevoou cometa 21P/Giacobini-Zinner Bera 1 e 2, Suisei e Giotto: 1986 sobrevoaram cometa 1P/Halley Giotto: sobrevoou 1992 cometa 26P/Grigg-Skjellerup Galileo: sobrevoou asteróides 951 Gaspra (1991) e 243 Ida (1993) e descobriu a lua deste, Dactyl

NEAR Shoemaker (*Near Earth Asteroid Rendezvous – Shoemaker*): sobrevoou asteróide 253 Mathilde (1997) e orbitou e pousou no asteróide 433 Eros (1998-2001)

Hayabusa: pousou 2005 no asteróide 25143 Itokawa e levou amostras pra Terra



NEAR Shoemaker (interpretação artística)



Hayabusa (interpretação artística)

Sondas para os Corpos Menores

Deep Space 1: sobrevoou
asteróide 9969 Braille (1999)
e cometa 19P/Borrelly (2001)

Stardust: sobrevoou 2002 asteróide
5535 Annefrank e 2004 cometa 81P/Wild,
coletou material da cauda deste,
e sobrevoou o cometa 9P/Tempel 2011

Deep Impact: sobrevoou cometa
9P/Tempel (e soltou um impactador)
em 2005 e 103P/Hartley em 2010

Rosetta: lançado 2004, passou por
Marte, sobrevoou asteróides 2867 Šteins
(2008), 21 Lutetia (2010) e
cometa 67P/Churyumov-Gerasimenko,
e a sonda **Philae** pousou no cometa
(2014)



Stardust (interpretação artística)

Rosetta + Philae (interpretação artística)

Sondas os Corpos Menores

New Horizons: lançado 2006, passou por Júpiter em 2007, hibernou até fim de 2014, passou por Plutão em julho 2015, sobrevoou o objeto trans-netuniano 2014 MU₆₉ (Ultima Thule) em 01/2019

Dawn: 2007 (lançamento), sobrevoou Marte, orbitou asteróide 4 Vesta 2011-2012 e está orbitando asteróide 1 Ceres

Chang'e 2: sobrevoou 2012 asteróide 4179 Toutatis

OSIRIS-REx (*Origins, Spectral Interpretation, Resource Identification, Security, Regolith Explorer*): lançada 2016, pousará em 2020 no asteróide 101955 Bennu e levará material pra Terra em 2023

Hayabusa 2: lançado 2014, levou para o asteróide Ryugu sondas veiculares, aterrisador e impactador



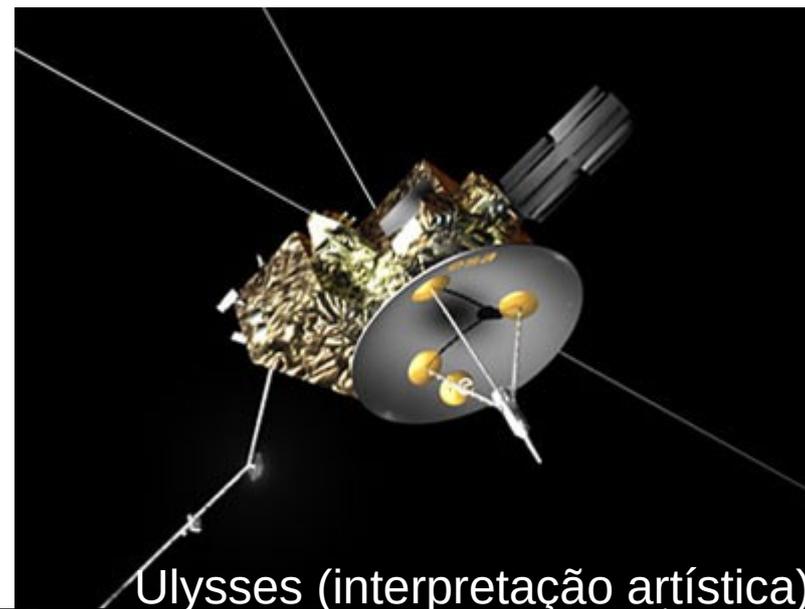
Sondas para o Sol

Já que o Sol é muito brilhante, ele pode bem ser observado a partir da Terra e de satélites perto da Terra, tal que as missões para o Sol são poucas.

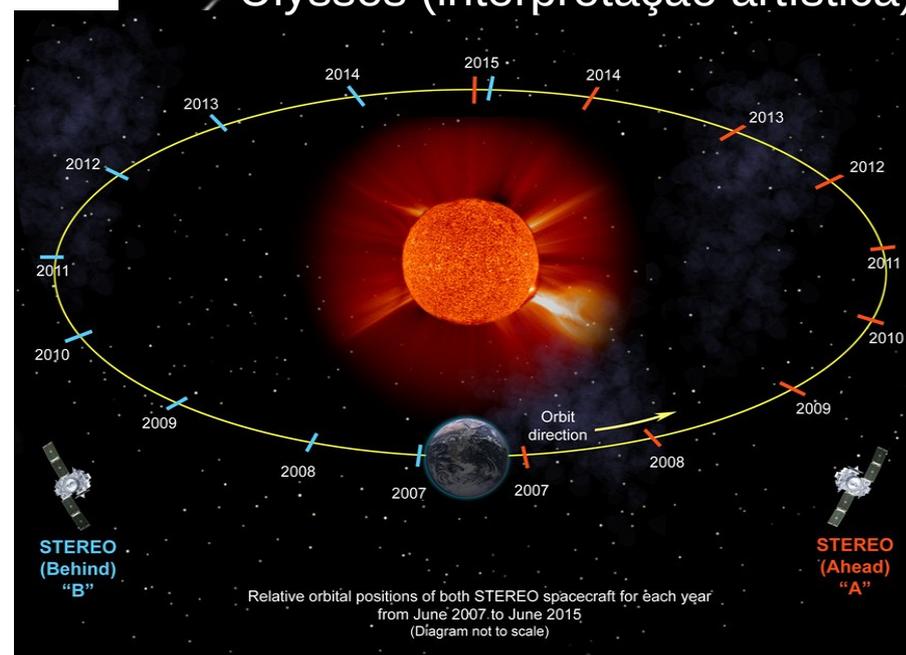
Até agora

Ulysses, lançado 1990, orbitou o Sol de 1994 até hoje em uma órbita polar, parou a comunicação em 2009, examinou o campo magnético solar, o plasma do vento solar e raios cósmicos Galácticos.

STEREO (*Solar TERrestrial RELations Observatory*), lançados 2006, 2 orbitadores gêmeos, estão gerando imagens estereoscópicas e coletando dados 3D sobre o Sol e ejeções de massa coronal.



Ulysses (interpretação artística)



Sondas para o Sol

Sondas futuras

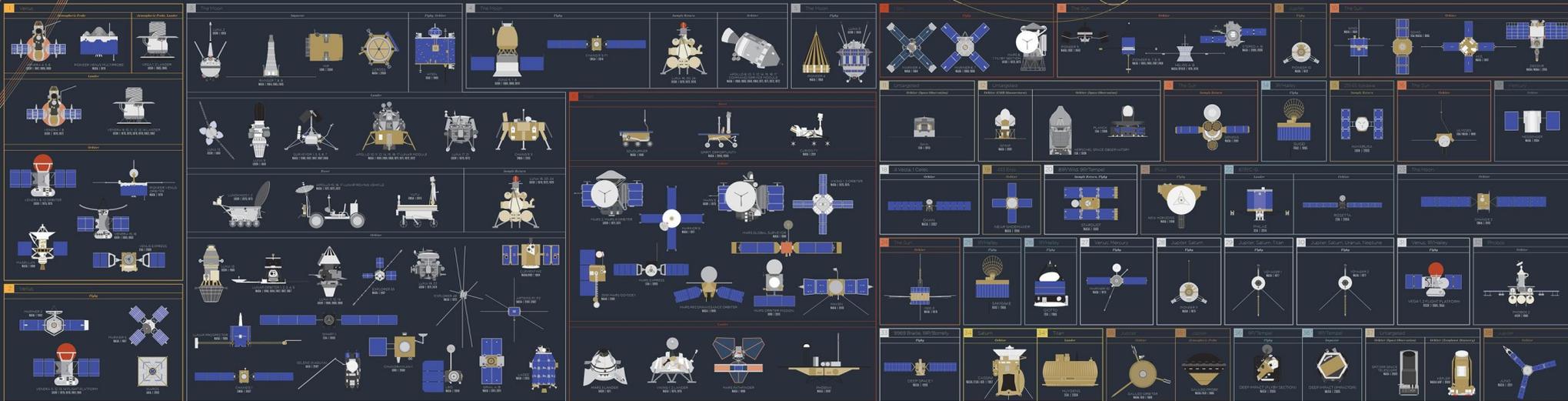
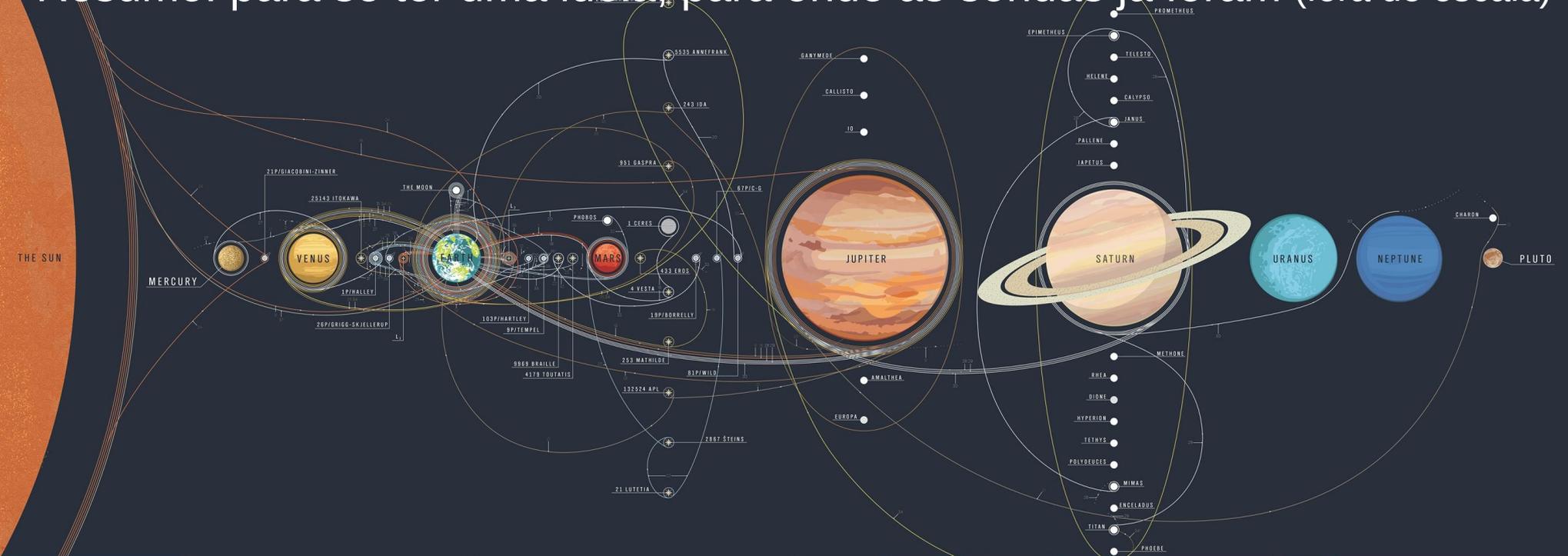
Parker Solar Probe, lançado 2018, orbitará o Sol (a 9.86 raios solares!), se aproxima ao Sol para fazer medidas diretas das partículas e energia provindas da coroa solar.

Solar Orbiter, previsto para 2020, orbitará o Sol (0.28 AU) para estudar como o Sol cria e controla a sua heliosfera.



Sondas

Resumo: para se ter uma ideia, para onde as sondas já foram (fora de escala)



THE CHART OF COSMIC EXPLORATION

Original Mission
Planned Mission
Mission Status

Legend
● Launch
● Landing
● Mission
● Mission Status

Presença Humana no Espaço

Alguns conhecimentos astronômicos vêm das nossas visitas ao espaço fora da atmosfera terrestre.

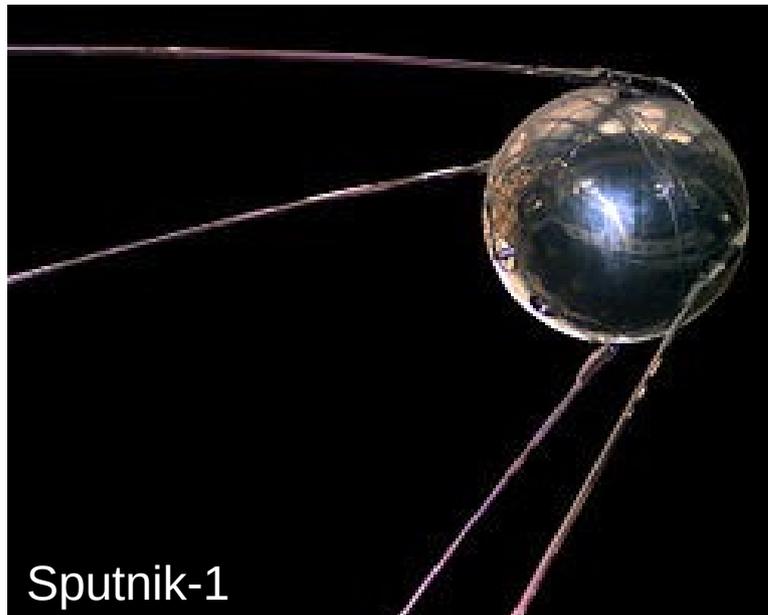
Algumas datas históricas

~1947-~1991: A **Guerra Fria**,
uma das frentes desta sendo:

1955-1969: A **Corrida Espacial***

1957: Спутник-1 (Sputnik-1):

**1º satélite
artificial**



*Algumas das sondas mencionadas nos slides anteriores também resultam da corrida espacial

Presença Humana no Espaço

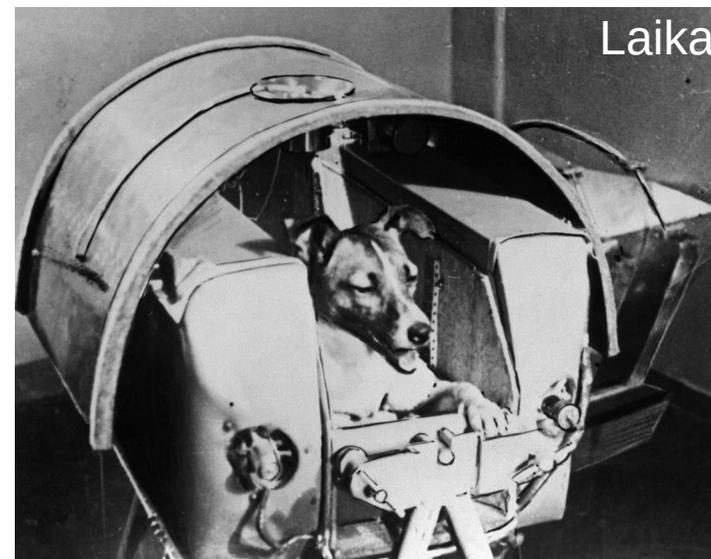
Algumas datas históricas

1957: **1º ser vivo no espaço:**
A cachorra Лайка (Laika)
ao bordo da Спутник-2 (Sputnik-2)

1961: **Primeira pessoa no espaço:**
Юрий Гагарин
(Yuri Gagarin)
ao bordo da Восток-1
(Vostok-1)



Yuri Gagarin



Laika

1965: Алексéй Леóнов (Alexei Leonov):
Primeiro passeio espacial em torno
da espaçonave Восток-2 (Voskhod-2)

1967-hoje: **Naves espaciais Союз (Soyuz)**

Presença Humana no Espaço

Algumas datas históricas

1969: missão **tripulada** numa **órbita lunar** na Apollo 8
(Frank Borman, James Lovell e William Anders)

1969: **Primeiras pessoas na Lua** (dia 20/07):
Neil Armstrong e Buzz Aldrin
ao bordo da Apollo 11

1971: **1ª Estação espacial** Салют-1 (Salyut-1)

1975(1981) - 2011: ônibus espaciais *Space Shuttles*
2 explodiram: 1986, o Challenger,
e 2003, o Columbia



Buzz Aldrin na Lua



Um dos *Space Shuttles*

Presença Humana no Espaço

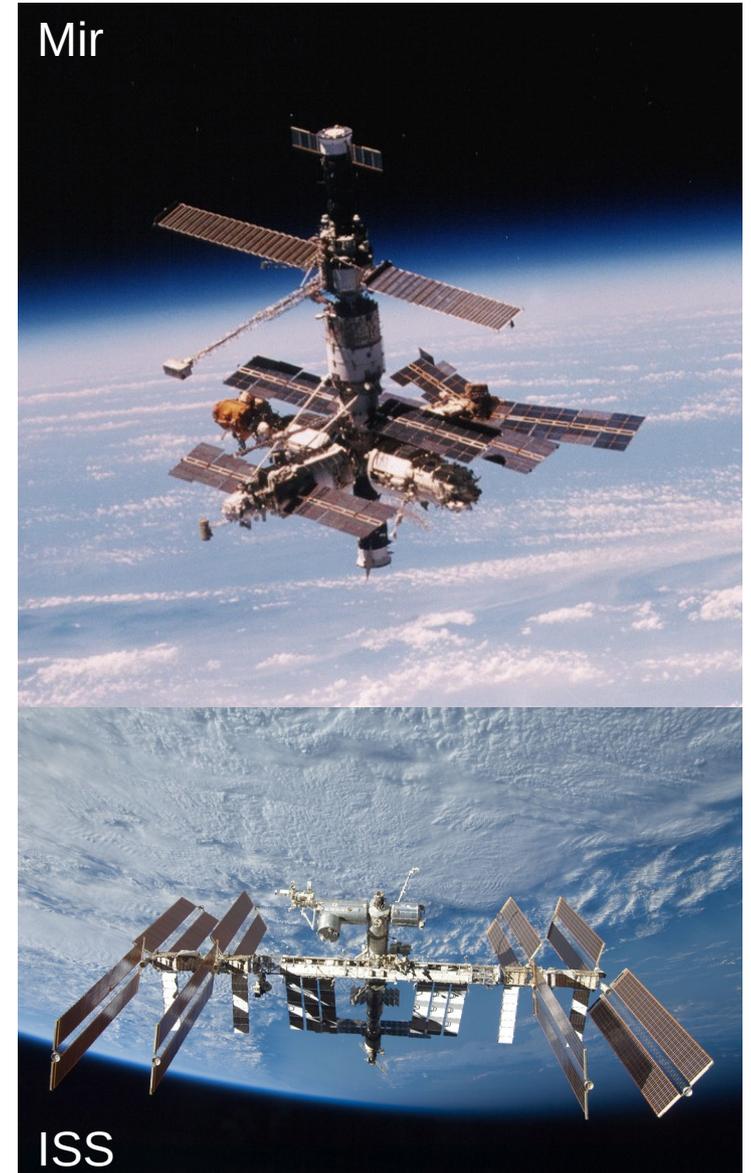
Algumas datas históricas

1986(1996)-2001: Estação espacial **Мир**
(Mir)

ao bordo deste ocorreu a mais longa estadia de uma pessoa no espaço:
Валерий Поляков (Valeri Polyakov),
437 d 18 h

1998(2011)-2030(?): Estação espacial **ISS**
(*International Space Station*),
tripulada ininterrompidamente desde
2000

visível a olho nú!



Presença Humana no Espaço

Algumas datas históricas

2001: 1º turista espacial: Dennis Tito

2006: 1º brasileiro no espaço:
Marcos Cesar Pontes
(atualmente ministro da
Ciência e Tecnologia)

2008: 1º foguete comercial no espaço
(Dragon da empresa SpaceX)

Esta empresa também construiu o primeiro foguete reutilizável (Falcon 9, 2017), e pretende mandar gente para Marte (previsão deles: 1ª chegada em 2024/2025) em parceria com a NASA e ainda sonha em colonizar o planeta vermelho.

Recentemente, o presidente dos EUA, Donald Trump, também mencionou intenções para a volta humana à Lua e a ida para Marte.



Marcos Pontes



Foguete *Dragon*

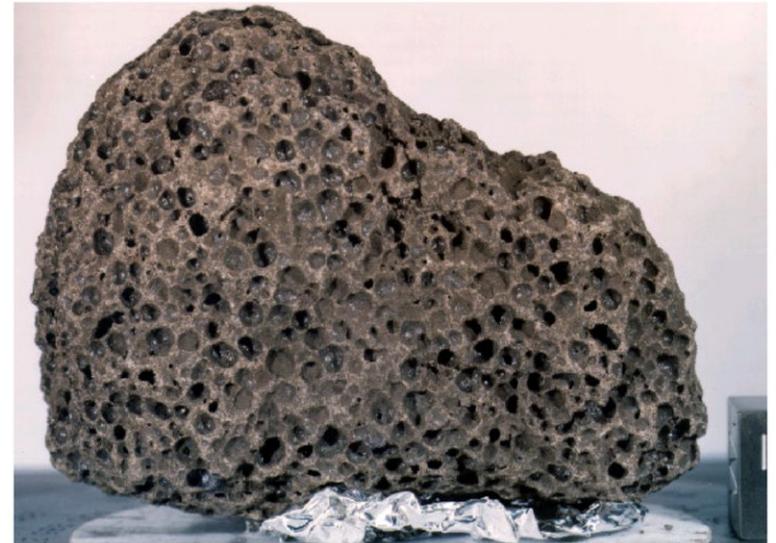
Além de Telescópios

Voltando pro chão:

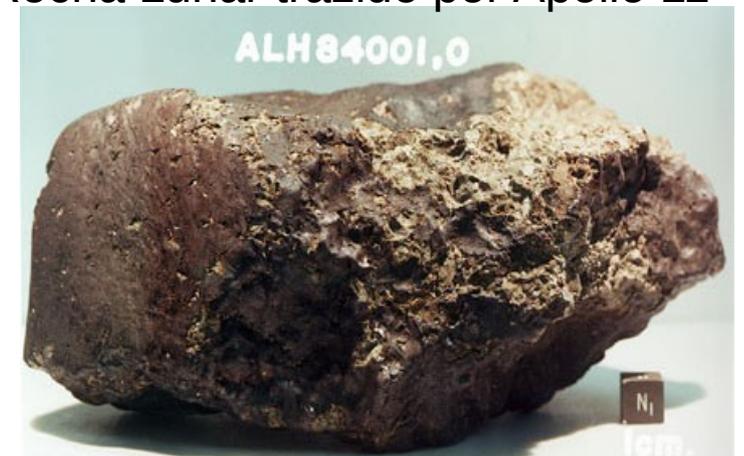
Outras fontes de informação

No caso da nossa **Lua**, também obtivemos informação de **material** trazido pra **Terra** por **sondas** e **visitas pessoais**,

e no caso da Lua e de **Marte**, por **meteoritos** encontrados na Terra, mas provindo do satélite natural / do planeta irmão (até agora, 8 de Marte).



Rocha Lunar trazido por Apollo 11



Meteorito que originou em Marte

O Sistema Solar I:

O Sol

O Sol

Símbolo ☉

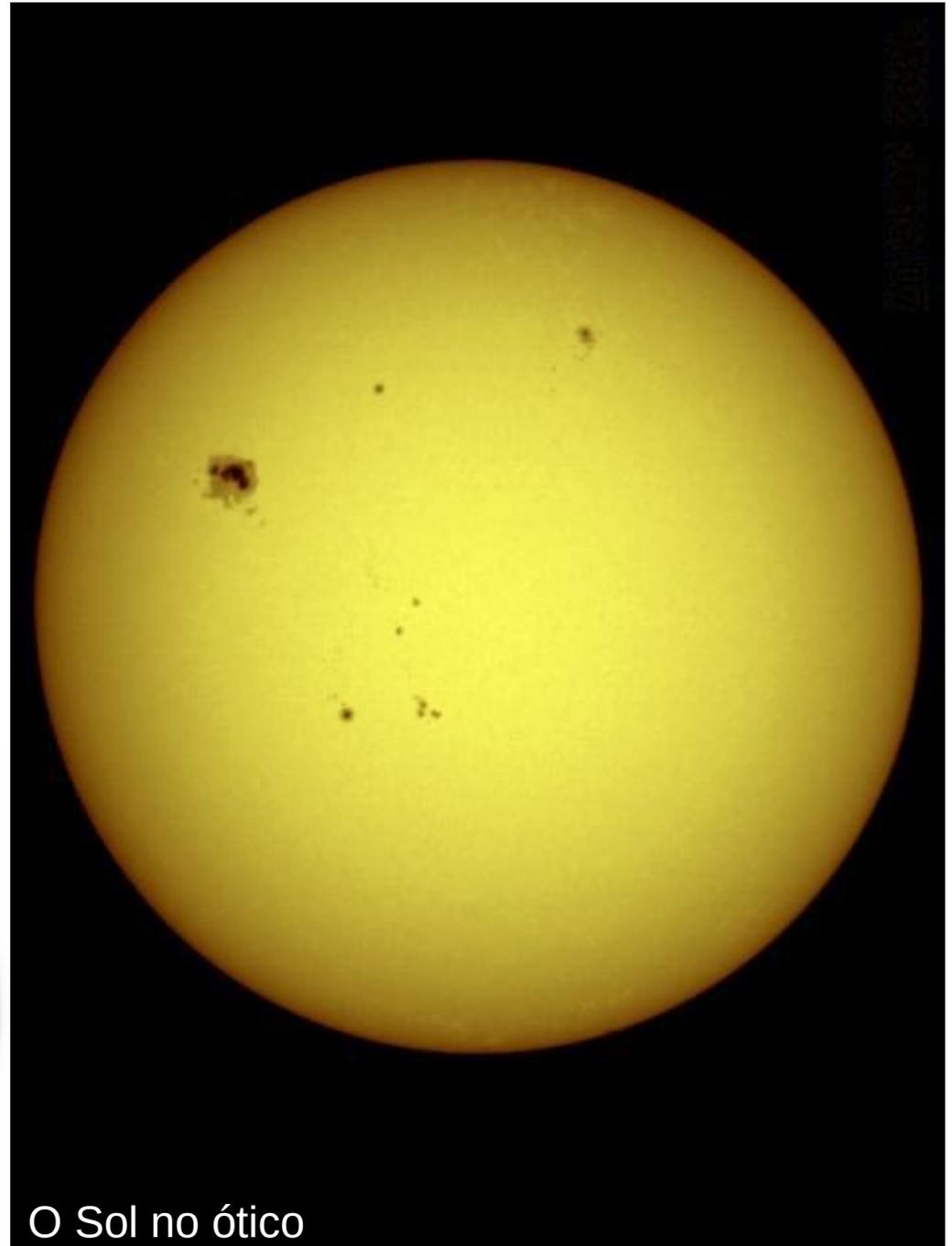
Associado com centenas de divindades por culturas em todos os continentes.



Helios, deus grego do Sol



deus Inca do Sol



O Sol no ótico

O Sol

Estrela Central

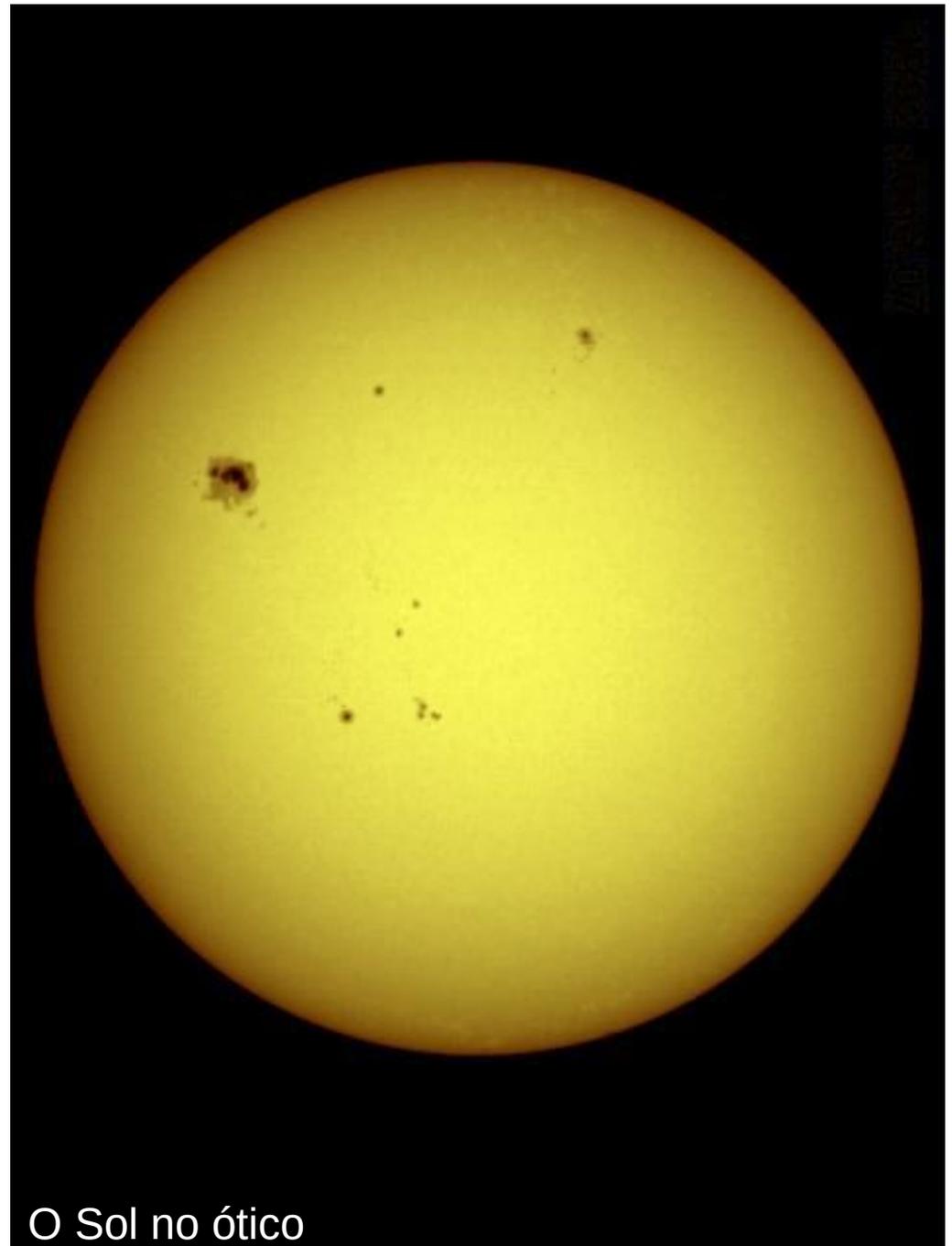
(Estrela = bola de gás e plasma quente fazendo fusão nuclear no interior, vide próximas aulas)
do **Sistema Solar**:

A uma distância de
1 AU \approx 150 mio. km
 \approx 8.3 minutos-luz da Terra

$$m_V = -26.7, M_V = +4.8$$

Diâmetro de 1'390'000 km,
108 vezes o da Terra
10 vezes o de Júpiter

$$\text{Volume} = 1.3 \text{ mio. } V_{\oplus}$$



O Sol no ótico

O Sol

$$M =: M_{\odot} = 1.989 \cdot 10^{30} \text{ kg}$$

$$= 333'000 M_{\oplus}$$

$$= 1047 M_{\text{J}}$$

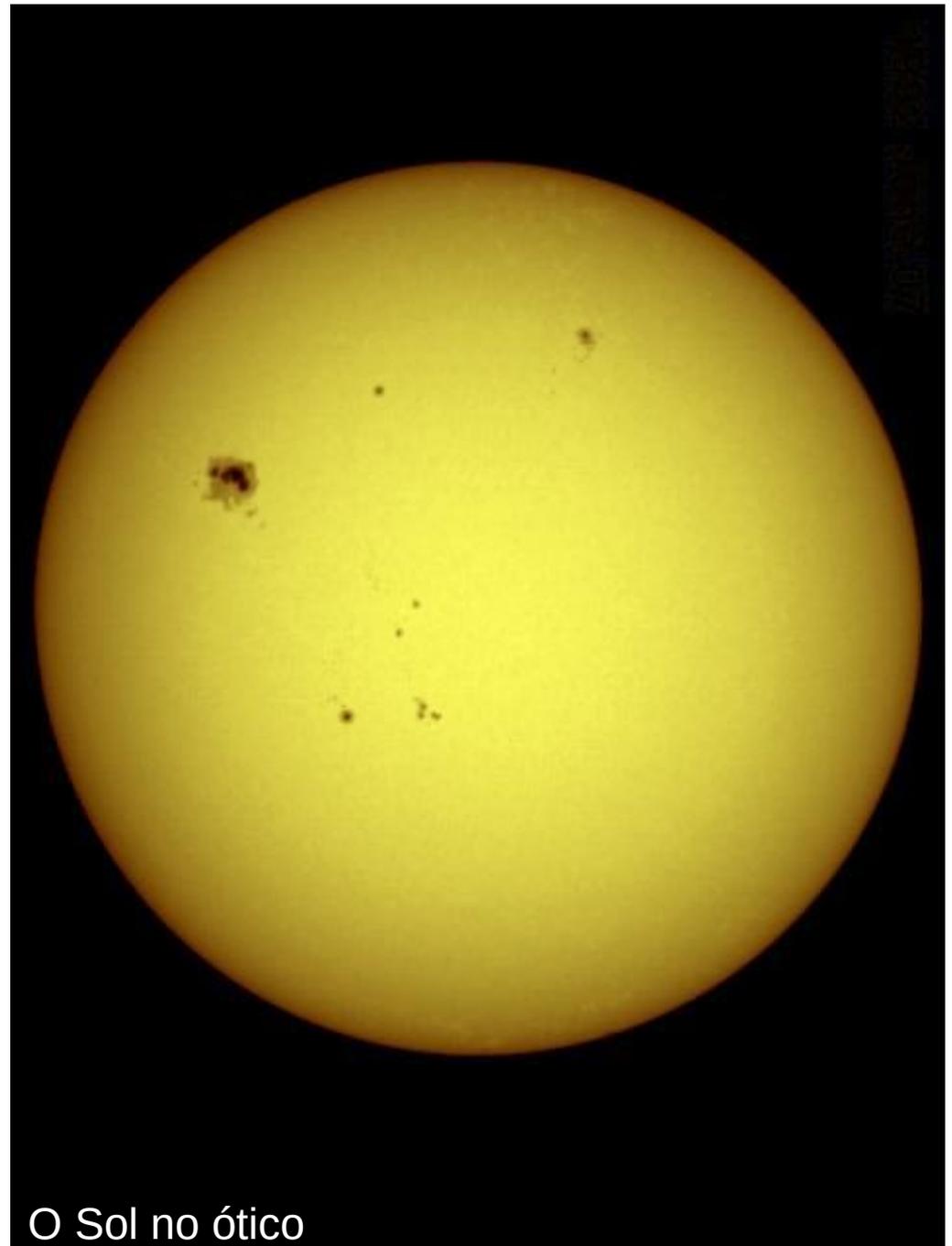
$$= 99.85 \% \text{ de } M_{\text{Sistema Solar}}$$

é frequentemente usada como unidade de massa na astronomia

dens. média: 1410 kg/m^3

temperatura na superfície:
 $5504 \text{ }^{\circ}\text{C} = 5777 \text{ K}$

Fornece ~**toda a luz e energia** do **Sistema Solar**, $3.9 \cdot 10^{26} \text{ W}$, valor chamado **constante solar**.

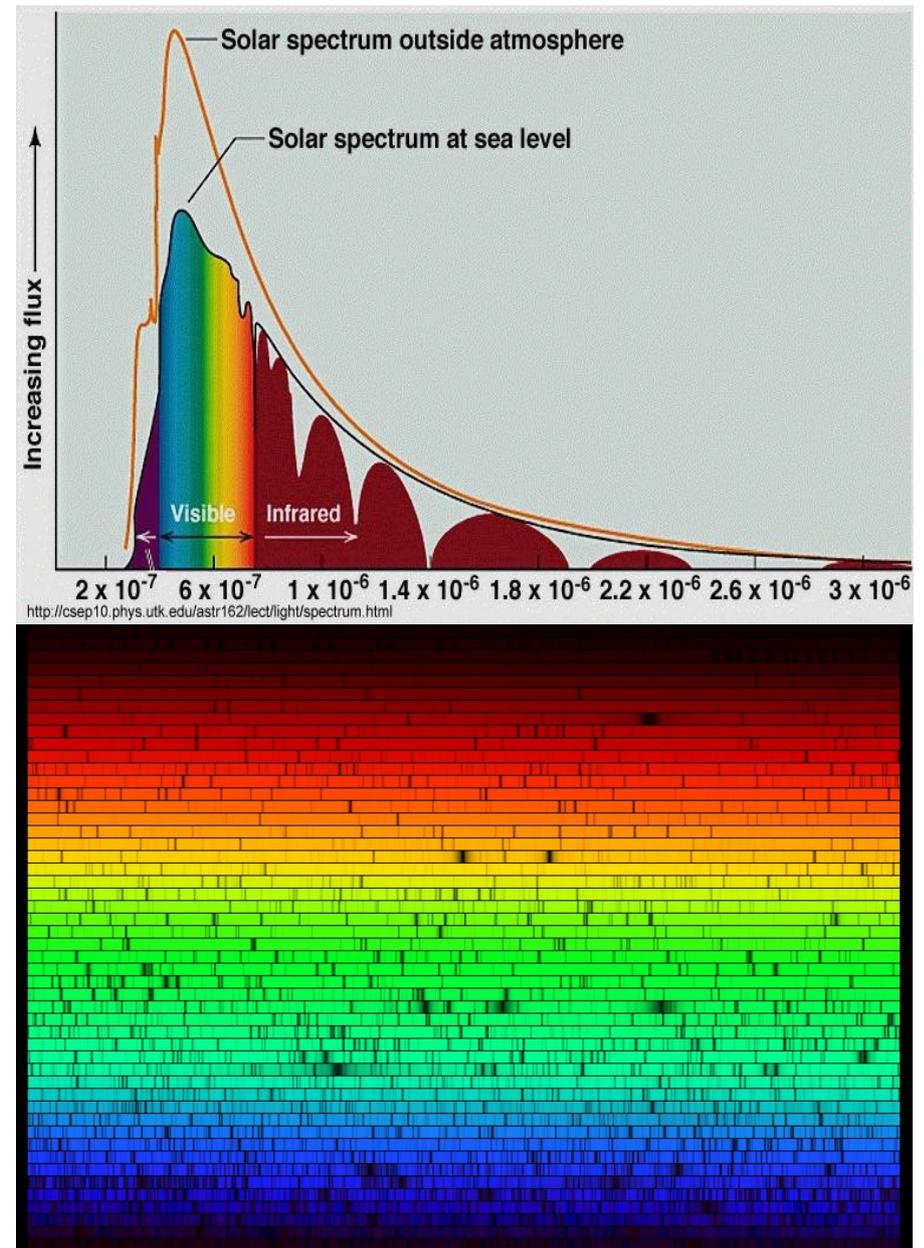


O Sol no ótico

O Espectro Solar

William Hyde **Wollaston**:
Em 1802, observou que passando a luz por uma fenda, e depois por um prisma, apareciam algumas **linhas escuras** no espectro, que ele interpretou como o limite das cores.

Joseph von **Fraunhofer**:
Até 1826, esse fabricante de instrumentos de vidro já havia contado 574 linhas escuras no espectro solar, chamadas depois de **linhas de Fraunhofer**.



A Interação Matéria-Luz

Para entender o espectro do Sol, lembremos algumas coisas sobre a **interação** entre **matéria** e **radiação** (luz).

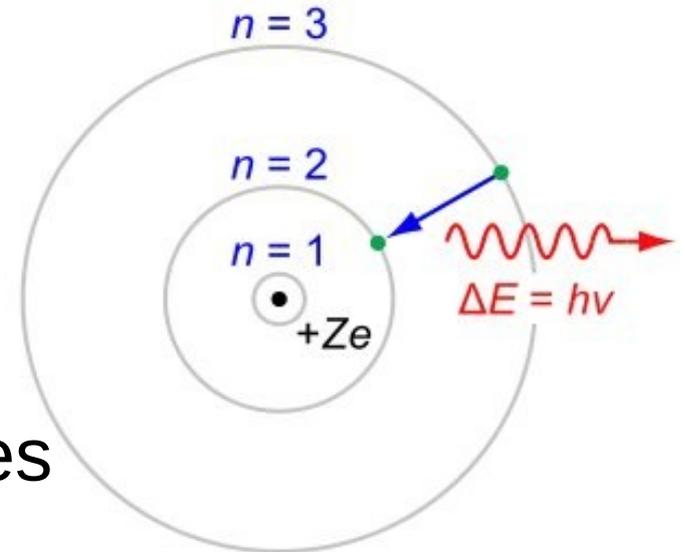
Os átomos e moléculas têm diferentes **níveis** de **energia**, dependendo do estado orbital dos elétrons, do estado de vibração, etc.

Ex. Os níveis de energia do átomo de hidrogênio são

$E_n = -(1/n^2) \cdot E_0$, onde $n = 1, 2, 3, \dots$, onde

$E_0 = m_e e^4 / 32\pi^2 \epsilon_0^2 \hbar^2 = 2.18 \cdot 10^{-18} \text{ J} = \text{Energia de Bohr}$, e

n é número quântico da energia



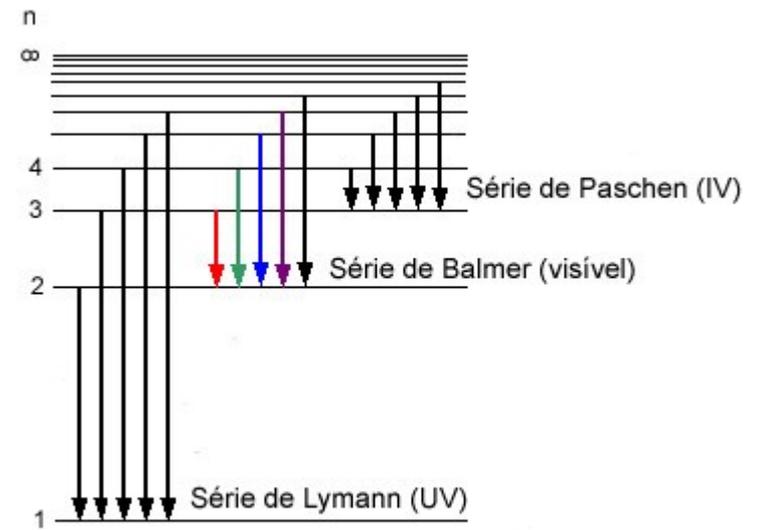
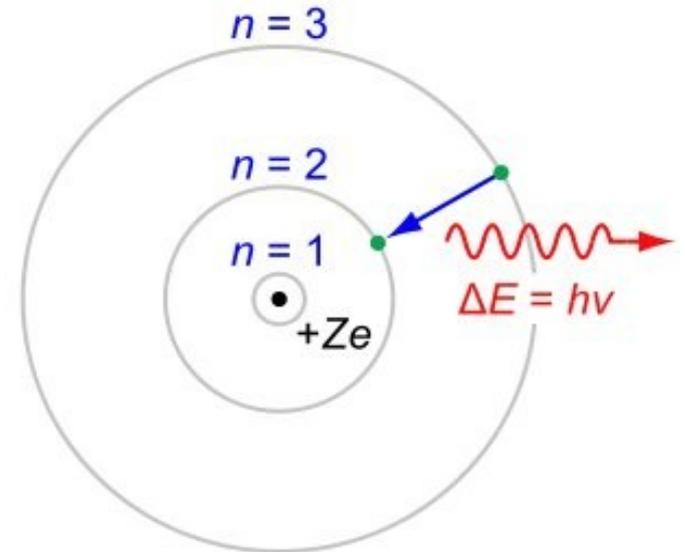
A Interação Matéria-Luz

As **diferenças de energia** entre níveis são as energias que o átomo tem que ganhar ou perder para mudar de estado, de n_i para n_f .

Se isto ocorre por absorção ou emissão de um fóton, este fóton vai ter uma energia de

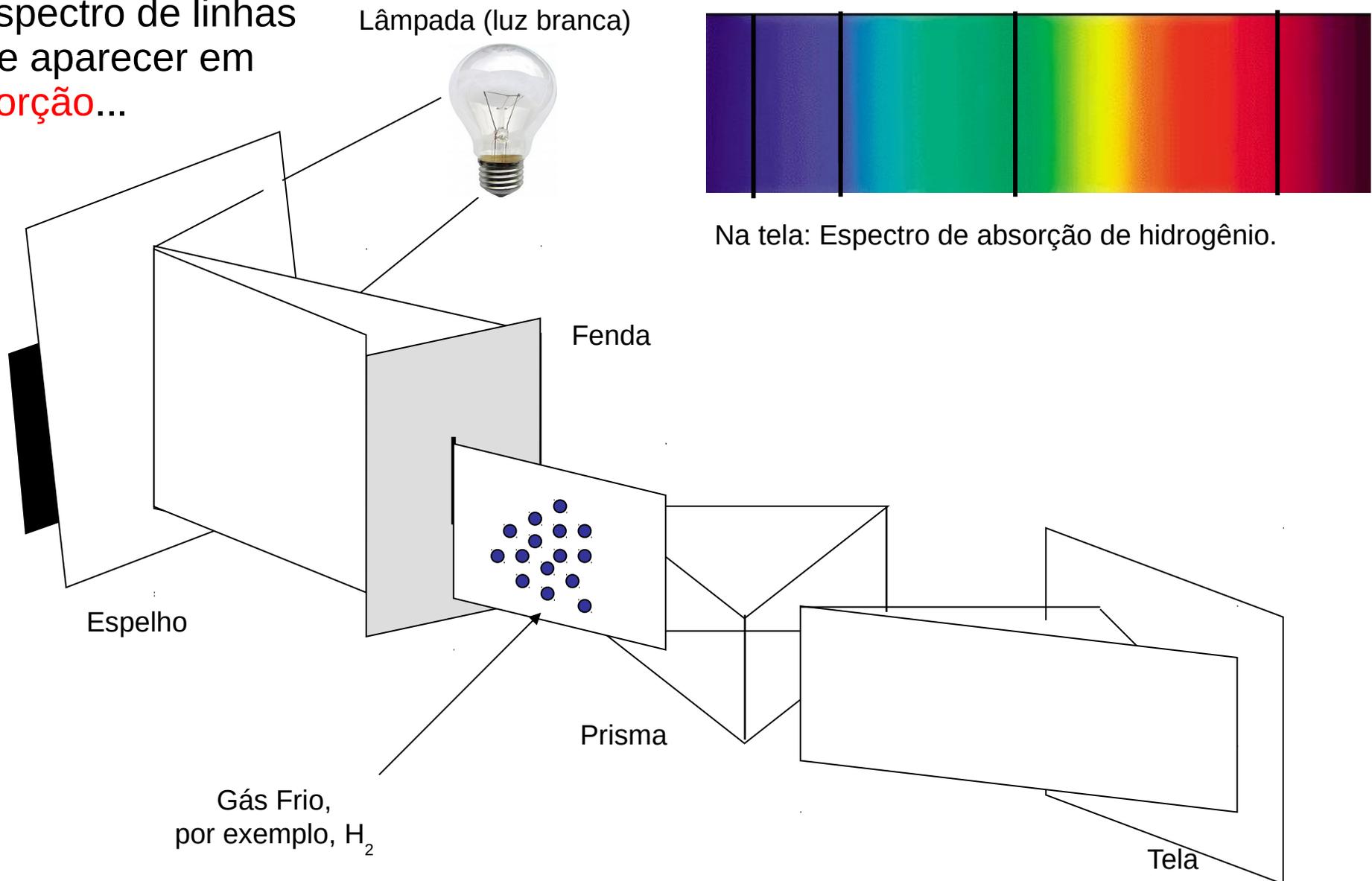
$$h\nu = \Delta E = E_i - E_f = E_0 \cdot (1/n_f^2 - 1/n_i^2)$$

O conjunto das **frequências / comprimentos de onda** destes fótons é **característico** para o **elemento** ou a molécula, e se chama **espectro de linhas** deste.



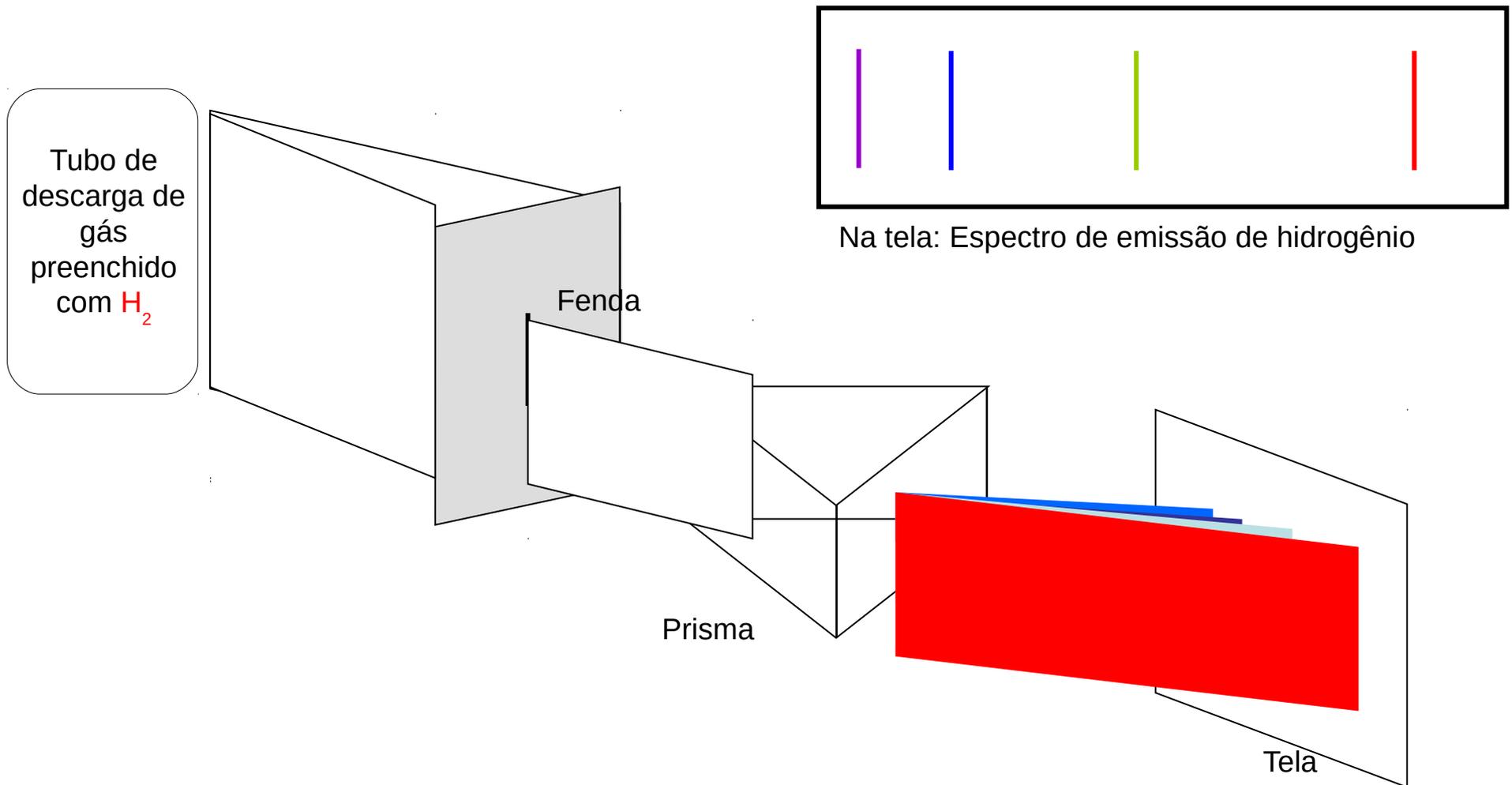
Absorção Atômica

O espectro de linhas pode aparecer em **absorção**...



Emissão Atômica

Ou em **emissão**.



A Interação Matéria-Luz

Leis de Kirchhoff

Um corpo **opaco quente**, sólido, líquido ou gasoso, emite um **espectro contínuo**.

Um **gás transparente** produz um **espectro de linhas de emissão**. O número e a posição (comprimento de onda) das linhas depende dos **elementos químicos** presentes no gás.

Se um **espectro contínuo** passar por um **gás** à temperatura mais baixa, o gás frio provoca o aparecimento de **linhas escuras** na tela. O número e a posição destas linhas depende também dos **elementos químicos** presentes no gás.

Estas leis ajudarão mais tarde para interpretar o **espectro do Sol**.

A Interação Matéria-Luz

Linhas “permitidas” e “proibidas”

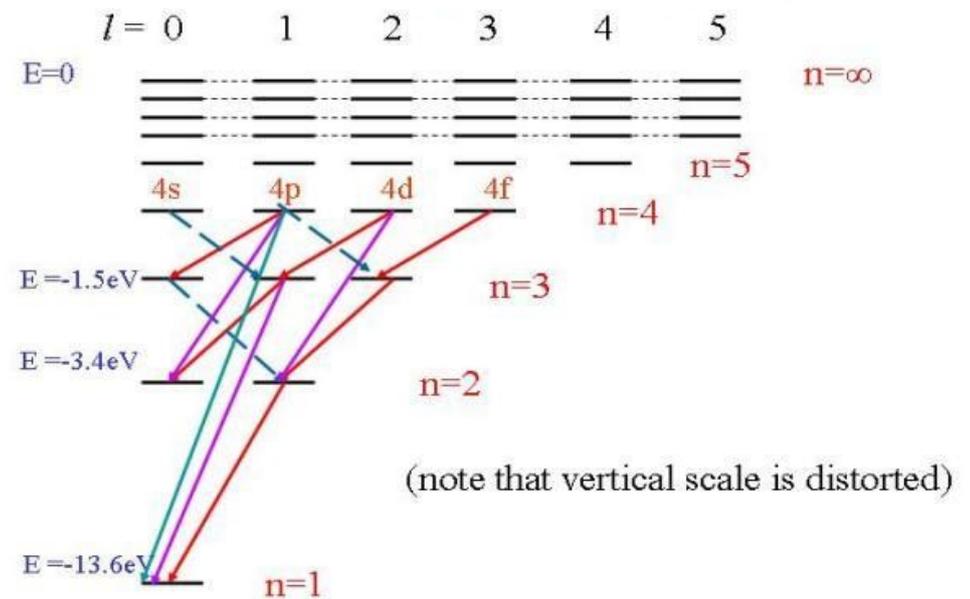
As **partículas** elementares, i. e. prótons, elétrons, nêutrons, etc., e as partículas compostas, p.e. átomos, têm um tipo de **momento angular intrínseco**, dado pelo número quântico l .

No exemplo de hidrogênio, o número de possíveis valores de l aumenta com o nível de energia (veja a figura).

Em uma **transição**, naquela um **fóton** é **emitido**, este carrega pra fora **uma unidade**, positiva ou negativa, de momento angular (fótons têm momento angular 1) => l muda por ± 1 .

Linhas permitidas são linhas que correspondem a **transições**, naquelas o **momento angular** do átomo **muda** por ± 1 .

Diagrama de níveis de energia de hidrogênio



A Interação Matéria-Luz

Linhas “permitidas” e “proibidas”

=> Existem **níveis** de **energia**, de onde o átomo **não** pode sair por **emissão permitida** de um **fóton**, chamados **níveis metaestáveis**.

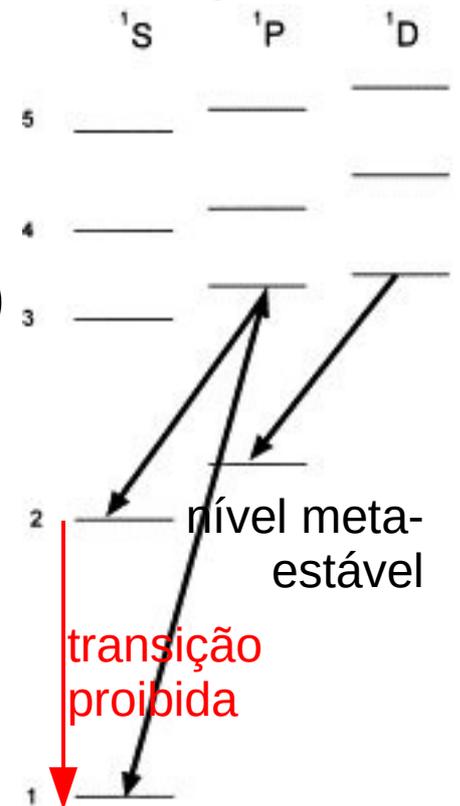
Porém, muito **raramente** (tipo, em milhões de anos) uma transição “proibida” pode acontecer, assim emitindo um fóton de uma **linha proibida**.

Linhas proibidas normalmente são simbolizadas usando colchetes, exemplos: [He I], [O II], ...

Em ambientes de **densidades “comuns”**, os átomos **não** ficam em níveis metaestáveis por um tempo suficiente para ocorrer uma **transição proibida**. Eles logo são excitados para outros níveis por choques com outros átomos.

=> **Linhas proibidas** são assinaturas de **gases** muito **tênues**.

Diagrama de níveis de energia de hélio



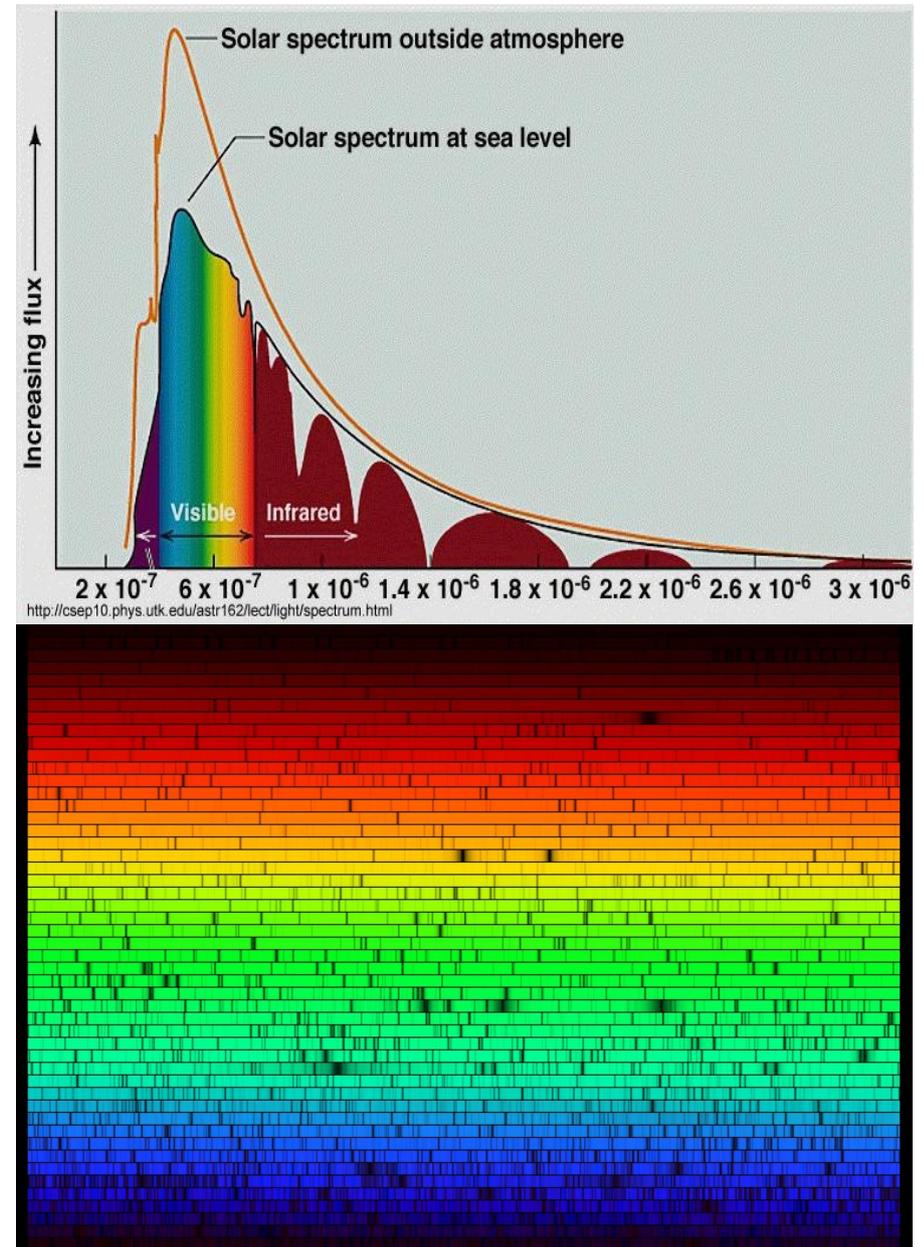
O Espectro Solar

Voltemos ao **espectro do Sol**

É o espectro de um Corpo Negro de 5777 K com as **linhas de absorção** dos **componentes** da sua camada exterior, a fotosfera.

Sua **composição química**, com relação a sua **massa** é de 74 % de **hidrogênio**, 24 % de **hélio** e 2 % de outros elementos.

O hélio tem seu nome por ter sido encontrado pela primeira vez no espectro solar em 1868 (grego: Helios = Sol). Na Terra, o hélio foi encontrado só em 1895.



O Sol

O Sol tem idade $4.57 \cdot 10^9$ anos e irradia $L = 3.9 \cdot 10^{26}$ W

De onde ele tira esta energia toda?

Será que é **energia potencial gravitacional**, liberada na sua contração?

Supondo que ele tem densidade constante, e que a Nébula Solar inicialmente tinha tamanho infinito ($E_0 = 0$):

Energia potencial gravitacional de uma bola de densidade constante: $E = -3/5 \cdot GM^2/R \Rightarrow$ liberamos $3/5 \cdot GM^2/R$

Mas, pelo teorema do virial, metade desta energia virou energia cinética das partículas do Sol, agora quente.

\Rightarrow resta $\Delta E = 3/10 \cdot GM^2/R$

O Sol brilharia $\Delta E/L \approx 5$ mio. anos para gastar esta energia, bem **menos** que sua **idade**.

\Rightarrow **Energia potencial gravitacional não explica** a potência do Sol.

O Sol

Será que é **energia química**?

Supondo que o Sol consiste de petróleo:

Queimar petróleo libera $Q_{\text{pet}} = 42 \cdot 10^6 \text{ J/kg}$

(Outras reações químicas envolvem energias por massa comparáveis)

Tempo para queimar uma massa solar de petróleo na taxa da potência solar: $E_{\text{tot}}/L = M \cdot Q_{\text{pet}}/L \approx 7000 \text{ anos}$.

Energia química também **não explica**

(sem falar que ainda se teria que explicar de onde vem o oxigênio necessário para queimar o petróleo).

Por muito tempo a fonte de energia do Sol era um **mistério**.

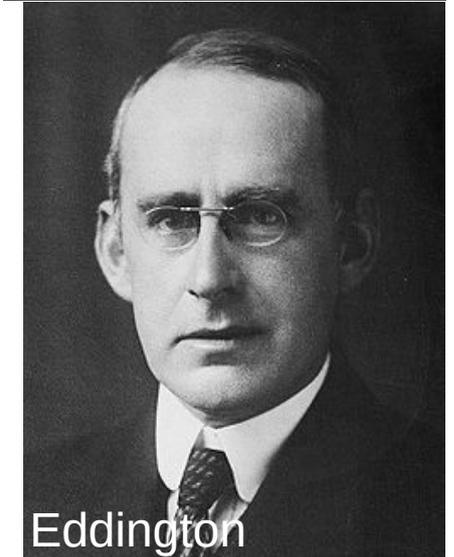
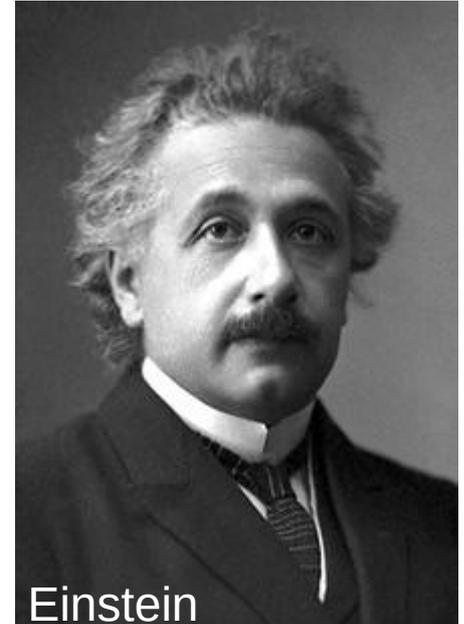
O Sol

Em 1905, **Albert Einstein** desenvolveu a **Teoria da Relatividade** Restrita/Especial, e em 1915, a Geral, um dos resultados sendo a **equivalência massa-energia**:

$$E = mc^2$$

Em 1920, F. W. Alston descobriu que **um átomo de hélio** tem da ordem de 7 ‰ **menos massa** que **4 átomos de hidrogênio**.

No mesmo ano, **Sir Arthur Eddington** levantou a hipótese, que a fonte de energia do Sol poderia ser a transformação de **hidrogênio** em **hélio** por **fusão nuclear**.



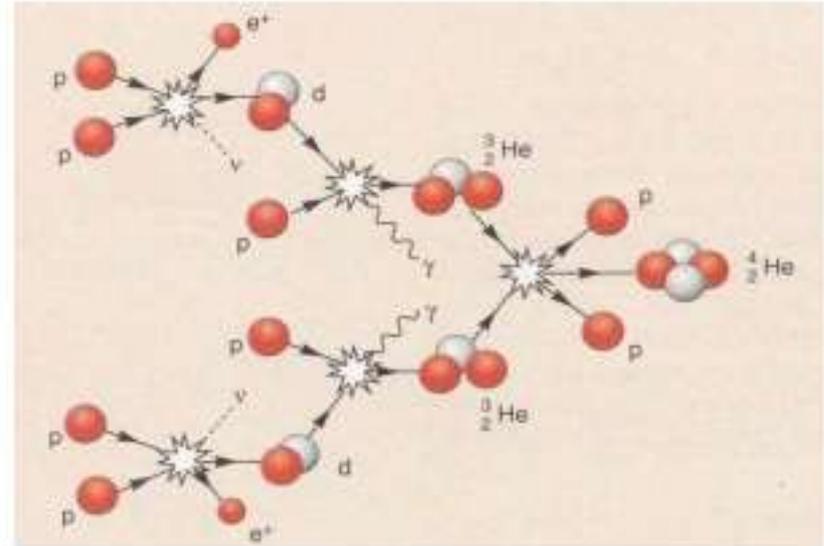
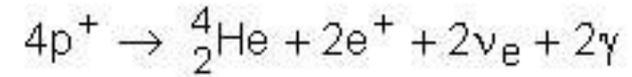
O Sol

No Sol, isto acontece predominantemente por um processo chamado **cadeia p-p** (próton-próton).

Já que, inicialmente, 74 % da massa do Sol era hidrogênio, ele tinha um estoque para gerar por “queima” (fusão nuclear) de hidrogênio uma energia de:

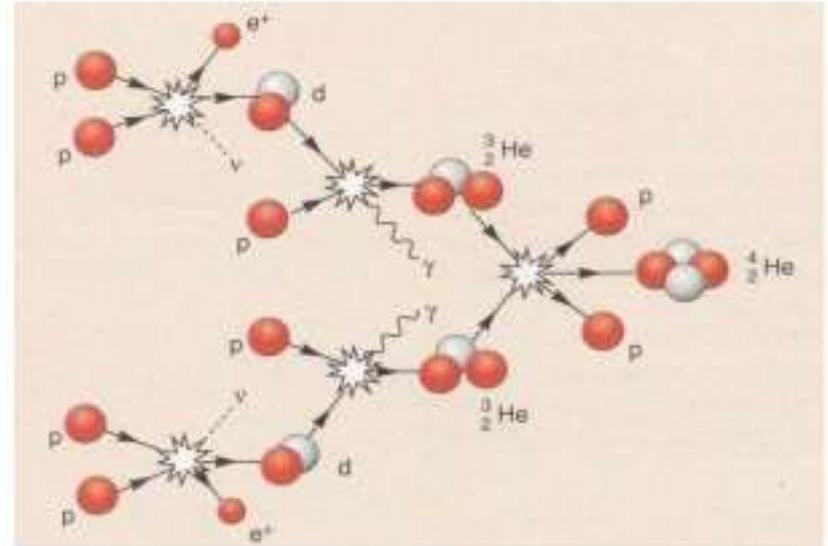
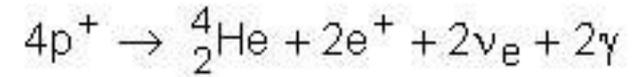
$$\Delta m \cdot c^2 = 0.007 \cdot M_{\text{H}} c^2 = 0.007 \cdot 0.74 \cdot M_{\odot} c^2 = 9.3 \cdot 10^{44} \text{ J},$$

o suficiente para brilhar por **75 bio. anos** à taxa atual, de 10^{38} transformações $4\text{H} \rightarrow \text{He}$ por segundo.



O Sol

Para a **fusão** acontecer, os prótons têm que ser jogados com bastante **velocidade** um contra o outro, para **superar** a **repulsão de Coulomb** (\Rightarrow Fen. El.mag.) entre eles.
 \Rightarrow Só em ambientes de **altas temperatura** e **pressão**, como no **núcleo do Sol** (16 mio. K, $2.3 \cdot 10^{16}$ Pa).



A **energia** é liberada em forma de dois **pósitrons** (as antipartículas dos elétrons, e^+) e dois **fótons** (γ).
Os **pósitrons** logo se **aniquilam** com **elétrons**, gerando mais dois **fótons**.

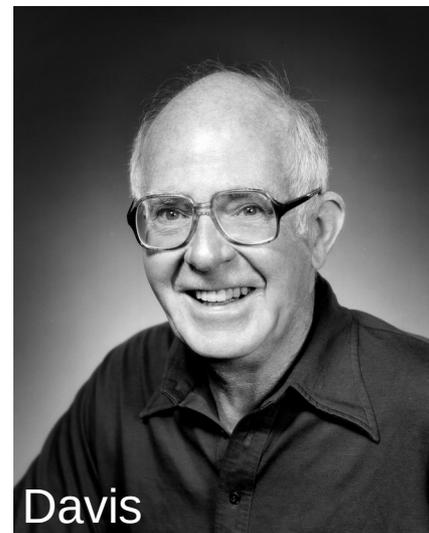
O Sol

Os **neutrinos**, ν_e , conseguem atravessar o Sol, e foram **detectados** por “telescópios” de neutrinos na Terra.

Nestas detecções foi descoberto também, que os **neutrinos oscilam**, q. d. mudam de “sabor” (existem neutrinos eletrônicos, ν_e , muônicos, ν_μ e tauônicos, ν_τ) durante sua passagem pelo Sol (confirmado por análises de raios cósmicos na atmosfera terrestre).

Uma consequência disto é que **neutrinos têm massa**.

=>  Prêmio Nobel de Física para Raymond Davis e Masatoshi Koshiba em 2002.



Davis



Koshiba

O Sol

Se a **taxa** de **reações nucleares** diminui

=> o Sol se **contraí**

=> o núcleo **aumenta** sua **densidade** e se **esquenta**

=> a **taxa** de **reações nucleares** **aumenta**

Se há **aumento** na produção de energia nuclear

=> o Sol se **expande**

=> o gás no núcleo **esfria**

=> a **taxa** de **reações** **diminui**

=> Enquanto está queimando hidrogênio, o Sol se mantém em **equilíbrio**.

Esta fase (a atual) da evolução do Sol se chama **Sequência Principal**, e compõe maior parte da sua vida.

Mais sobre o assunto na aula sobre evolução estelar

O Sol

No decorrer dos Giga-anos (Ga ou Gyr, bilhões de anos), este **equilíbrio** é lentamente **alterado**:

Apesar da energia gerada no núcleo, ele se **contrai** lentamente (afinal, 4 átomos são transformadas em um constantemente), assim **perdendo energia potencial**.

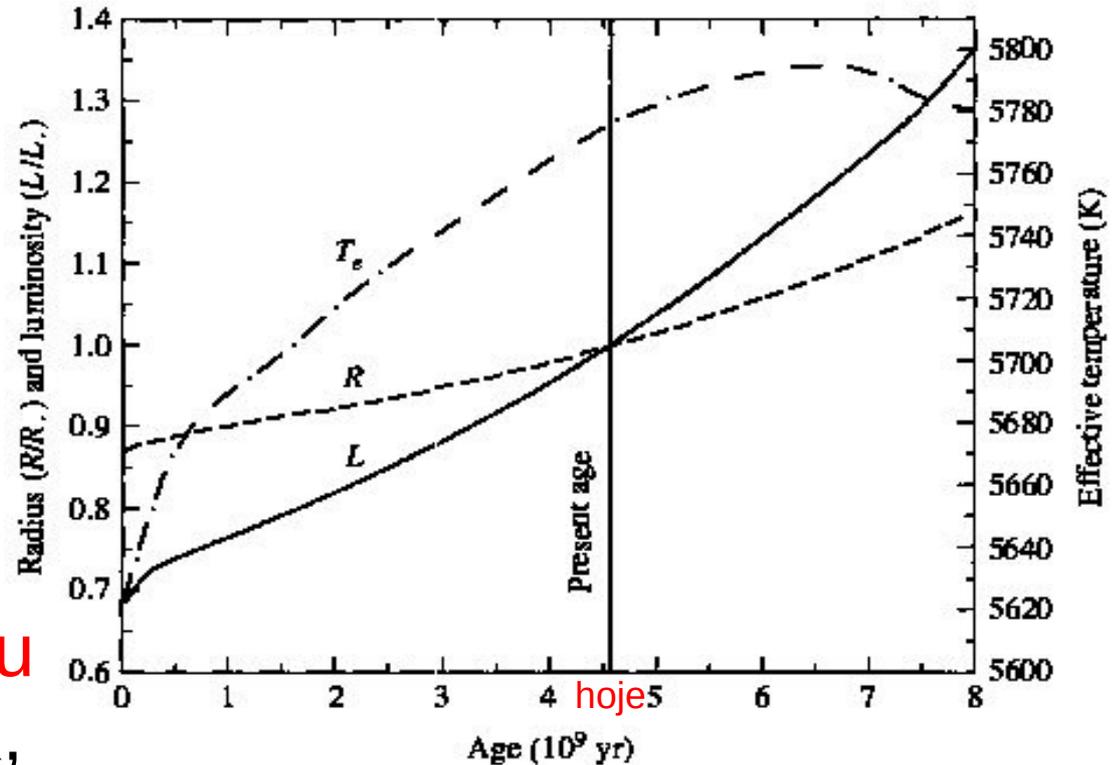
Pelo teorema do virial, metade desta energia é **irradiada** para fora, e a outra metade **aquece** a camada a cima, que começa a **queimar hidrogênio** também, gerando mais energia ainda que assim **aquece** e faz **expandir o envelope**.

(Regra geral da evolução estelar: Quando o caroço de uma estrela se contrai, o envelope se expande, e vice-versa.)

O Sol

Em consequência:

- Desde a formação do Sol, o **raio aumentou** por ~15 % e **aumentará** por mais ~15 % nos próximos ~3.5 Gyr.
- A **temperatura aumentou** de ~5620 K para 5777 K, e **aumentará** mais um pouco.



As propriedades do Sol durante a sua fase na Sequência Principal

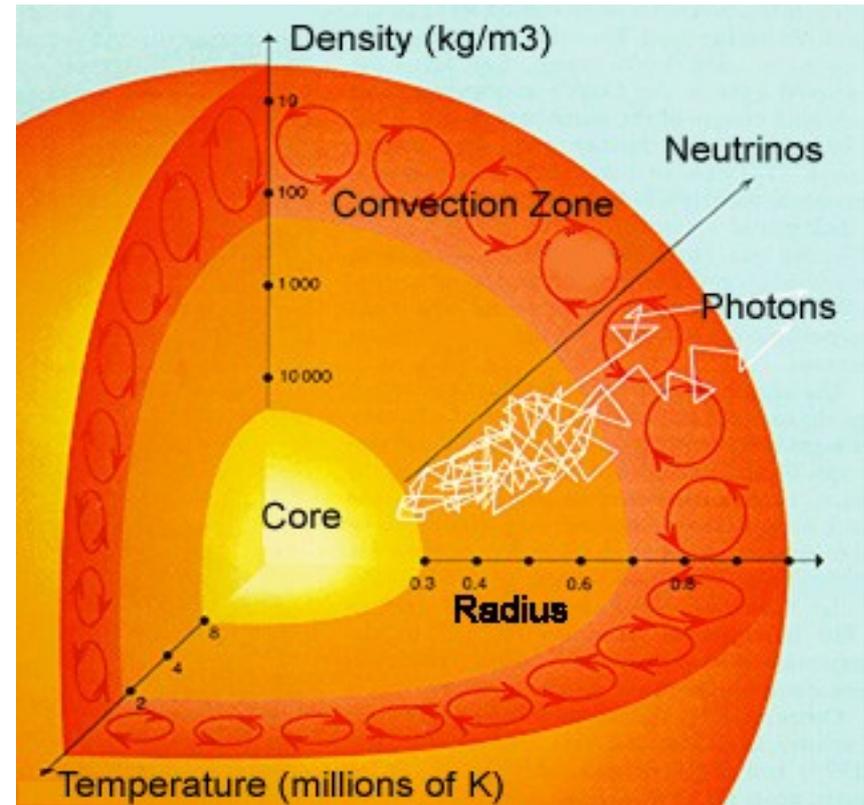
=> A **luminosidade** $L = 4\pi R^2 \cdot \sigma T^4$ **aumentou** por ~48 %, e **aumentará** por mais ~35 %.

Daqui a 1 ou 2 Gyr, a vida na Terra já deve ser impossível.

A Estrutura do Sol

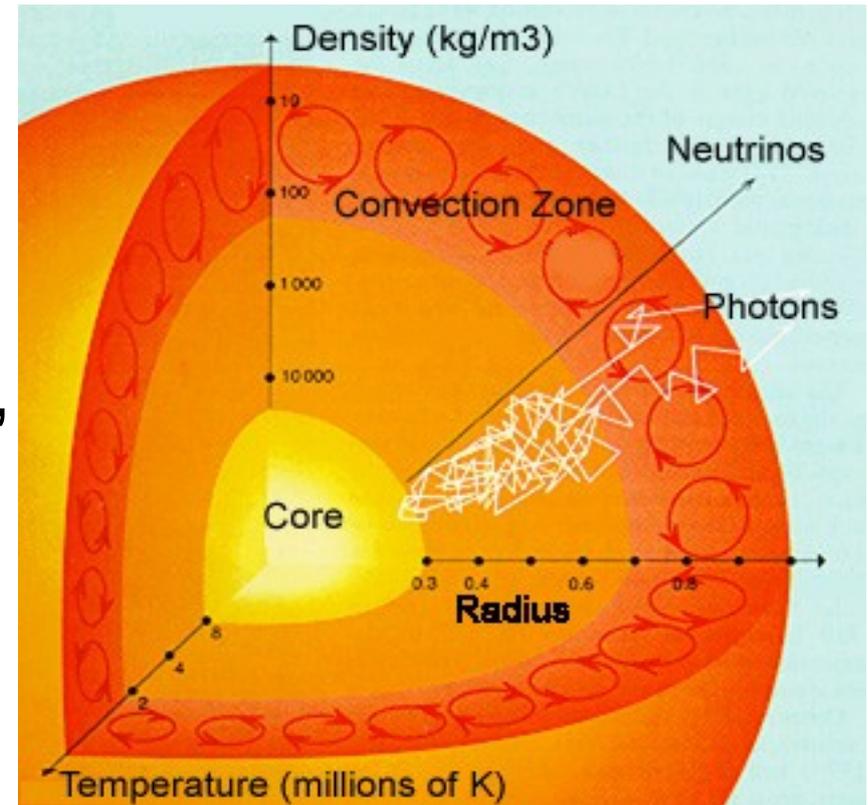
Para entender, como a energia produzida no centro do Sol chega na superfície, temos que dar uma olhada na sua **estrutura**:

- No **núcleo** acontece a **queima** de **hidrogênio**.
- Depois, os fótons passam pela **zona de radiação**, sendo **absorvidos** e **reemitidos** por **íons** (H e He).
- Na **tacoclina**, a zona de transição entre as zonas de radiação e de convecção, os fótons **esquentam** o **gás**.



A Estrutura do Sol

- Na próxima camada, o transporte de energia acontece por **convecção**: gás se **esquenta** do lado inferior, se **expande**, **ascende**, chega na **fotosfera**, se **esfria** emitindo **fótons**, se **contraí** e **desce** de novo.
- Da **fotosfera**, a maioria dos **fótons** chegam até o **espaço** (uns poucos são **absorvidos**, o que gera as **linhas de absorção** no espectro solar). São estes que **observamos**, e a fotosfera é tida como a **superfície** do **Sol**.



A Estrutura do Sol

- Em cima da fotosfera ainda há a **atmosfera** solar, consistindo da **cromosfera**, de uma **zona de transição** e da **coroa solar**, todas de muito baixa densidade, e só visíveis sob condições especiais, como eclipses solares.



O Núcleo do Sol

O **Núcleo** do Sol, onde acontece a **fusão nuclear**, se estende até $0.3 R_{\odot}$ e contém $\sim 60\%$ da **massa**.

Segundo modelos, a temperatura no centro é **16 mio. K**, a pressão $2.3 \cdot 10^{16}$ Pa, da ordem de 2 bio. vezes a pressão atmosférica na Terra, e a densidade $1.5 \cdot 10^5$ kg/m³ ($150 \cdot \rho_{\text{água}}$).

Até $0.3 R_{\odot}$, a temperatura cai a 7 mio. K, e pressão e densidade a menos que 10 % dos seus valores centrais.

Até hoje, a fração de massa em **Hidrogênio** no centro se reduziu de 71 % a **34 %**, e a de **Hélio** aumentou a **64 %**.

A Zona de Radiação

O **Zona de Radiação** se estende de $0.3 R_{\odot}$ a $0.7 R_{\odot}$.

A temperatura cai de **7 mio. K** a **2 mio. K**
e a densidade de **$2 \cdot 10^4 \text{ kg/m}^3$** a **$200 \text{ kg/m}^3$** .

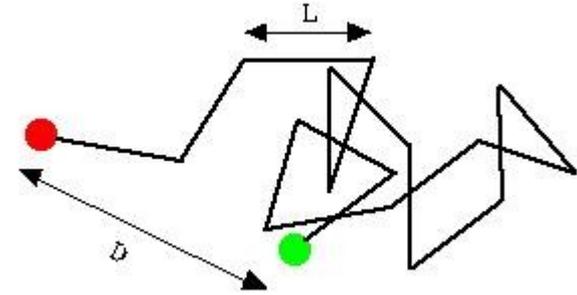
Nesta zona, a energia é transportada por **fótons**, que são **absorvidos** e **re-emitidos** constantemente pelos **íons** nos seus caminhos.

Entre dois choques, os fótons percorrem, em média, uma distância, o **percurso livre médio** l , que depende da **densidade** de íons, n , e da **seção transversal** dos íons para a absorção de um fóton, σ : **$l = 1/n\sigma$**

Para as **densidades altas** na zona de radiação, o percurso livre médio dos fótons é da ordem de **1 cm**.

A Zona de Radiação

Após cada choque, os fótons são re-emitidos em **direções aleatórias**, resultando em um **passéio aleatório**.



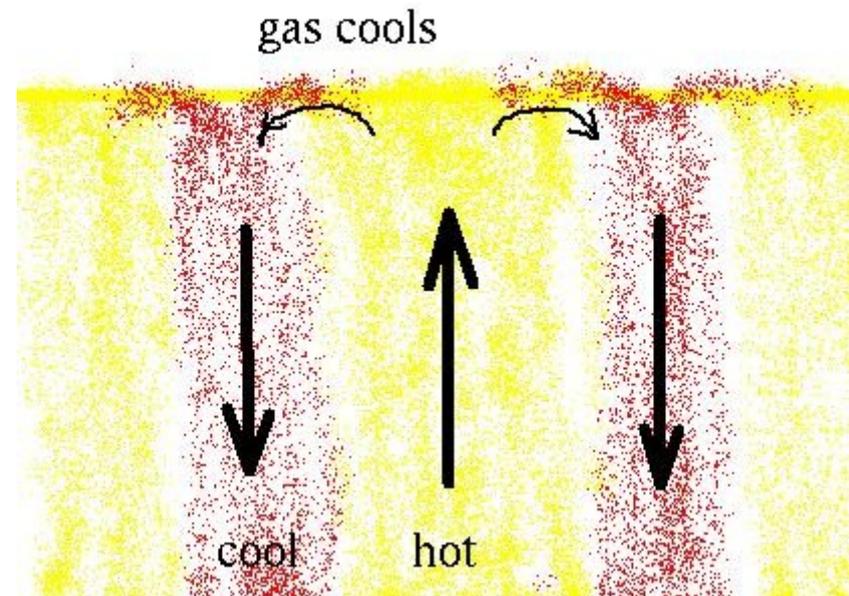
Dá pra mostrar que, em N choques, um fóton se afasta, em média, pela distância $\sqrt{N} \cdot l$ da sua posição inicial.

Assim, os fótons levam, em média, **$\sim 170'000$ anos** para atravessar a zona de radiação (<https://youtu.be/Z-UO-RZBQ3U>).

No topo da zona de radiação, eles chegam na **tacoclina**, a zona de transição entre as zonas de radiação e de convecção, que também é o lugar, onde começa a rotação diferencial (=> em breve).

A Zona de Convecção

Nos últimos 30 % do caminho, o transporte de energia acontece por **convecção**: gás se **esquenta** do lado inferior desta zona, se **expande**, **ascende**, chega na **fotosfera**, se **esfria** emitindo **fótons**, se **contraí** e **desce** de novo.



A Zona de Convecção

Dá pra **ver** as colunas de gás chegando e descendo da **fotosfera**.

Se vê uma **granulação** na superfície do Sol, as regiões mais **claras** sendo gás quente **subindo**, e as mais **escuras**, gás frio **descendo**.

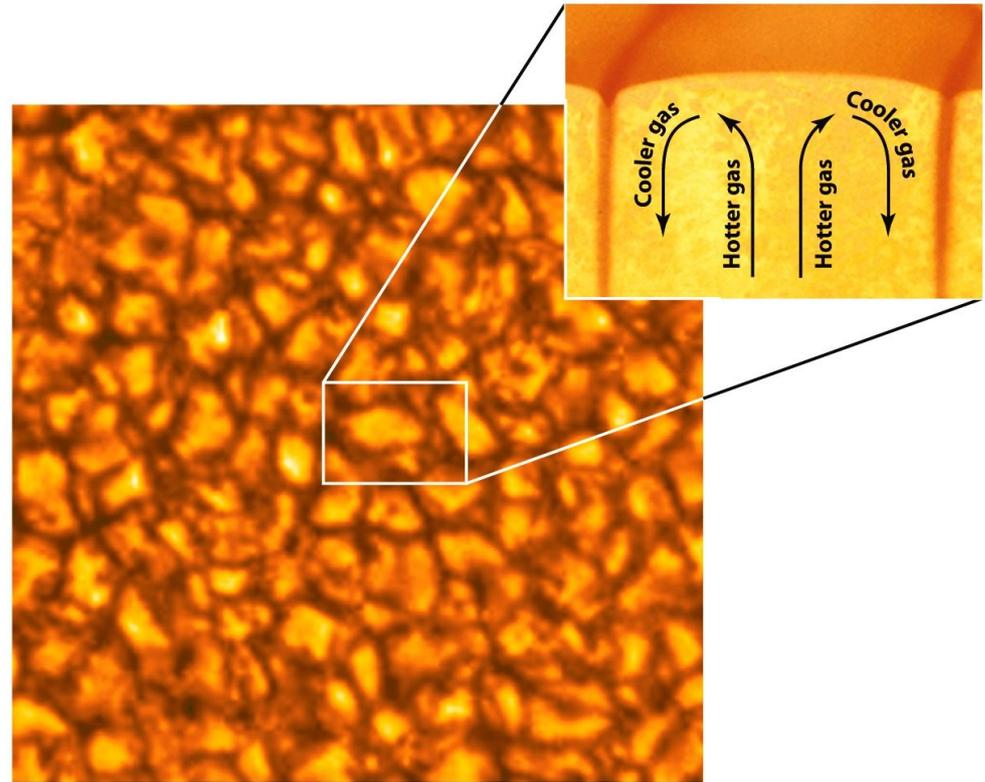


Figure 16-9
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

O diâmetro típico de uma **célula de convecção** é 700 km, e ela “vive” da ordem de 5 a 10 minutos.

=> A **superfície** do **Sol** está em **mudança** constante.

Dê uma olhada em <http://www.youtube.com/watch?v=O-UjQwTfjGg> .

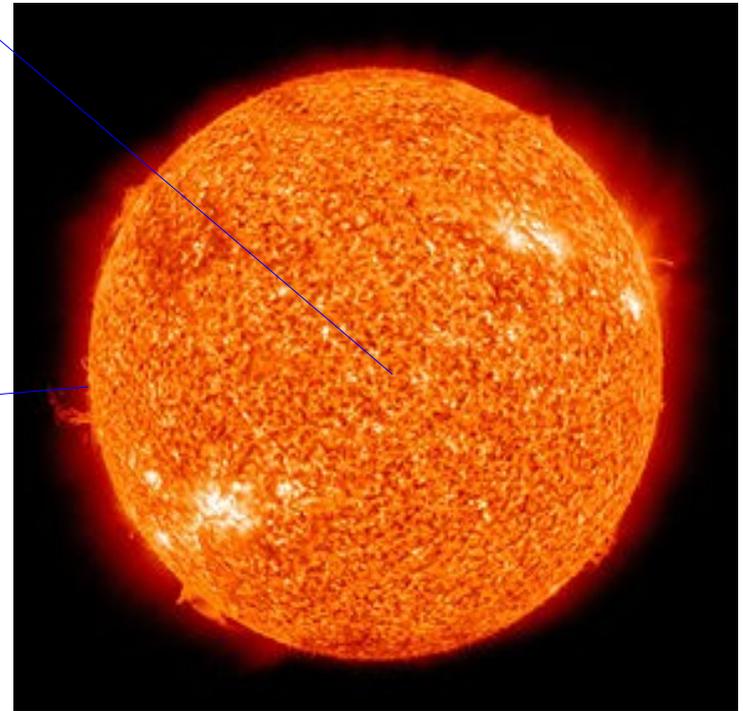
O Sol

Pelo **efeito Doppler**, dá pra medir a **velocidade radial**, a velocidade na **direção da linha de visada**, do gás.

Olhando **aqui** se vê a **velocidade** das **colunas de gás** subindo e descendo: ~ 0.4 km/s

Olhando **aqui** se vê a **velocidade** de **rotação** do Sol.

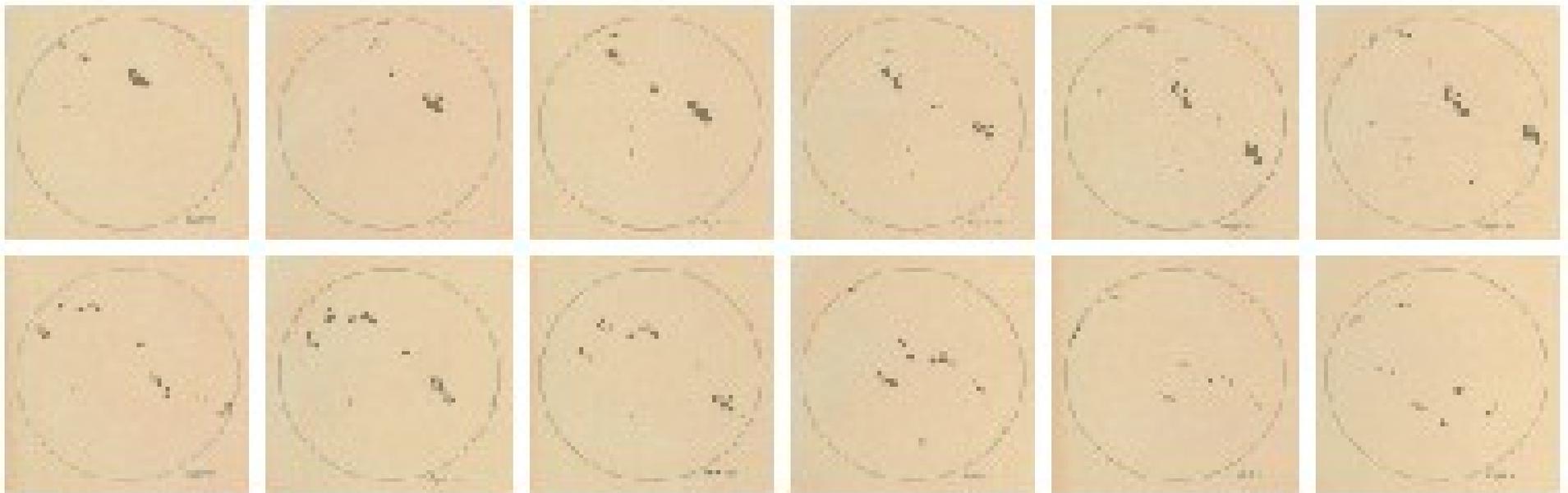
Encontra-se, que o **Sol gira** em torno de um eixo, perpendicular à eclíptica, no **mesmo sentido** que a **revolução dos planetas**, na ordem de um **mês**.



O Sol

! Galileu já tinha percebido a rotação do Sol, **400 anos atrás**, observando as **manchas solares**.

Desenhos originais de Galileu



<http://www.youtube.com/watch?v=UkDpZm7oOYk>

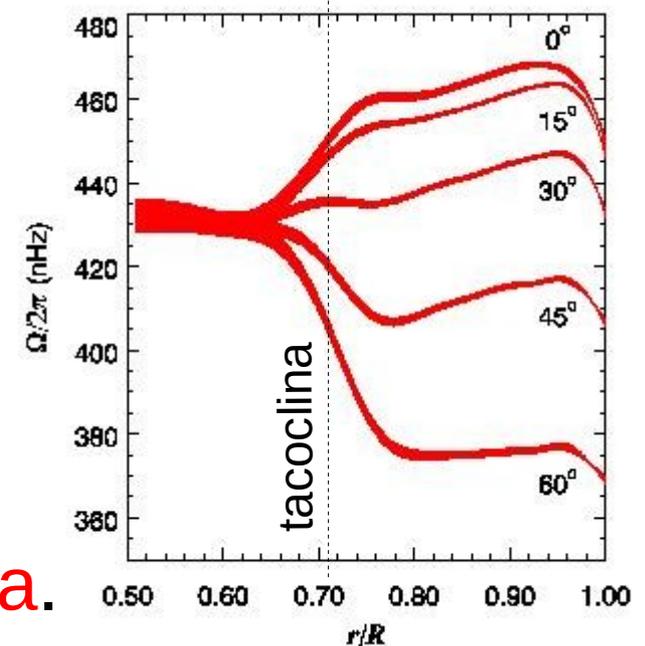
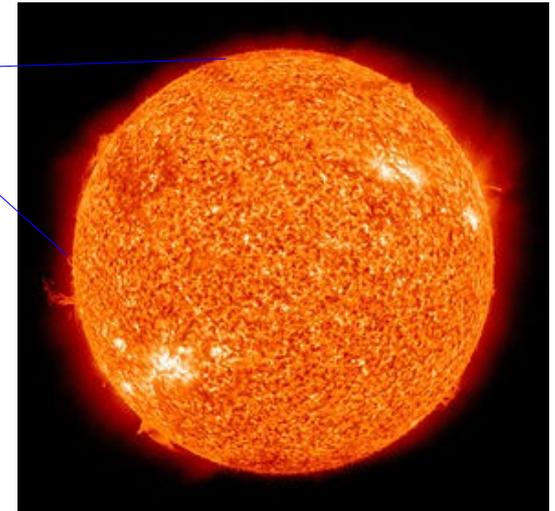
O Sol

A segunda vista, olhando aqui e aqui, a rotação não é tão constante assim:

O Sol mostra **rotação diferencial**.
O período é **~25 dias** no **equator**, e **~36 dias** nos **polos**.

A rotação também varia com a **distância** do **centro** do **Sol**:
O **núcleo** e a **zona de radiação** giram como um **corpo rígido**, e a **zona de convecção**, **diferencialmente**.

A zona de **transição** entre os dois regimes de rotação se chama **tacoclina**.



O Sol

Visualização mais clara dos padrões de rotação em função da posição no Sol.

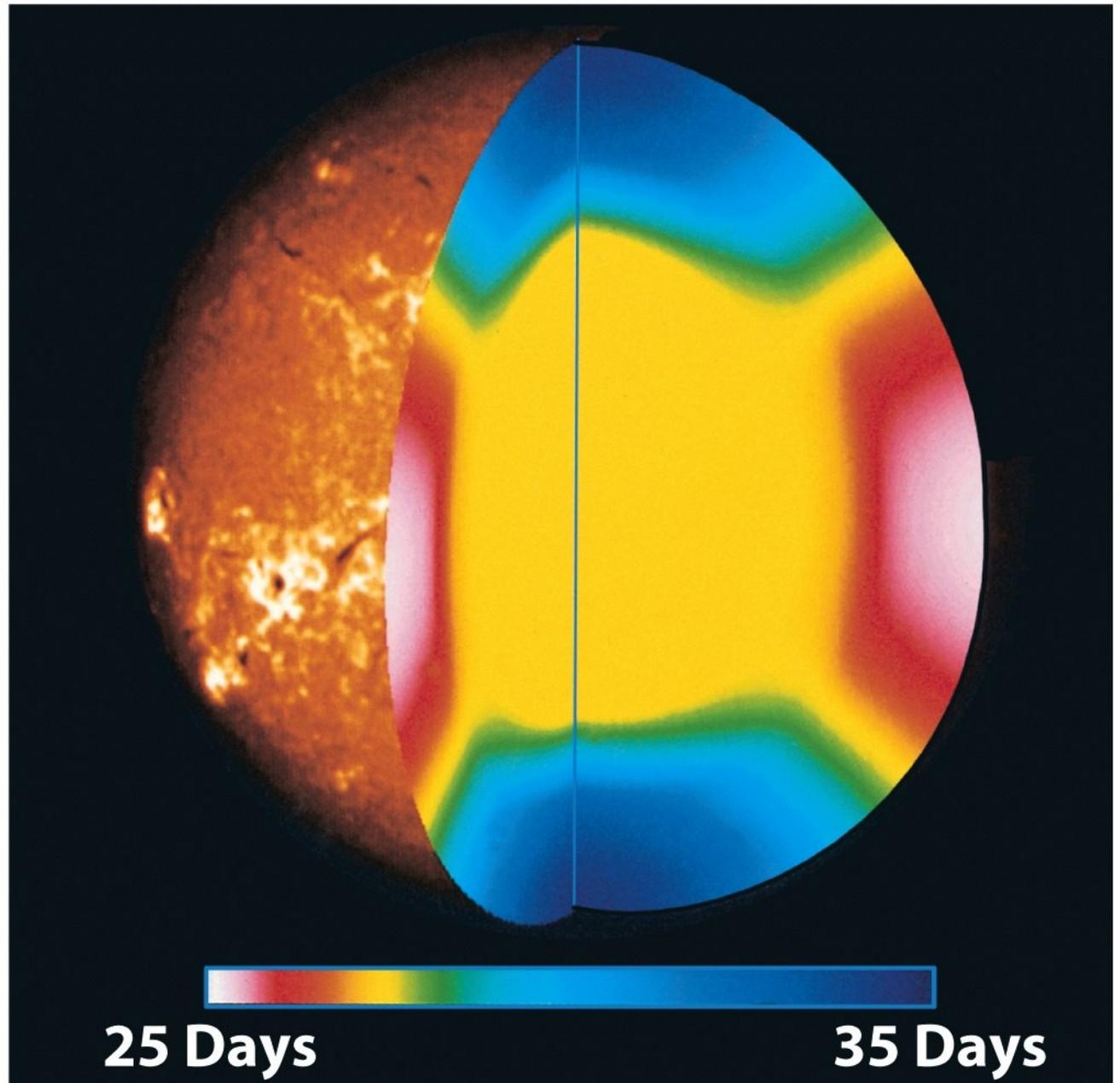


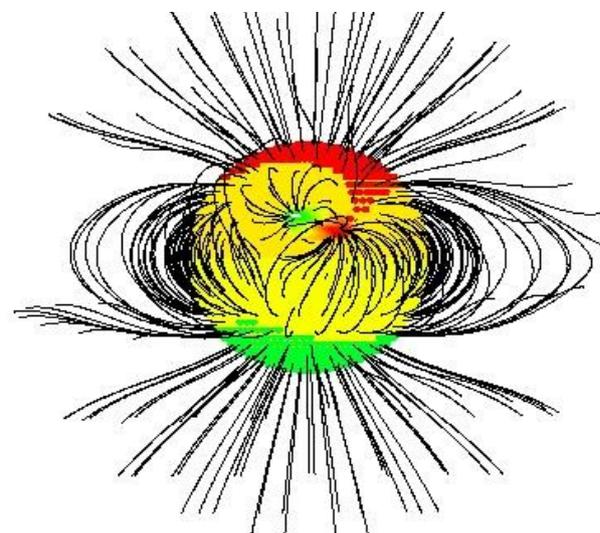
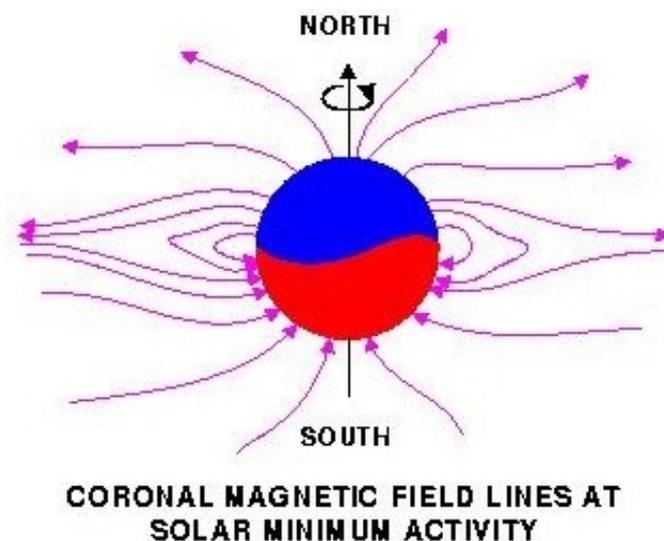
Figure 16-24
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

O Campo Magnético Solar

Acredita-se que o **campo magnético** solar é gerado na **tacoclina** pelo **efeito dínamo**.

Ele é de poucos 10^{-4} T (o da Terra é $6 \cdot 10^{-5}$ T), e é mais **complexo** que o campo terrestre, chegando a ser **quase caótico**, às vezes.

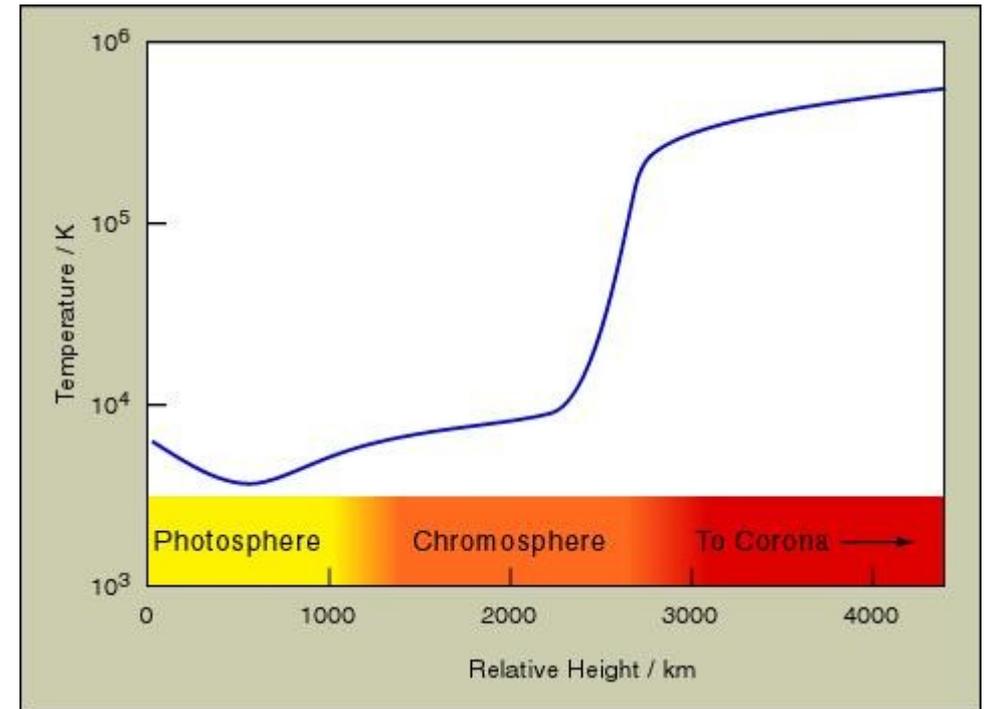
Até ocorrem **linhas de campo abertas**.



A Fotosfera

É a zona de onde **origina** a **luz** que chega em nós, a “**superfície**” do **Sol**, e fica no topo da zona de convecção.

Na verdade, por ser **semi-opaca**, ela **não** é uma superfície **nítida**, mas uma **camada** de ~600 km de espessura (~0.0009 R_{\odot}), com **temperatura variando** de 9400 K a 4400 K.



A **sobreposição** da radiação

vindo das **várias alturas** corresponde a **5777 K**.

A **altura** de **temperatura mínima** é definida como o topo da fotosfera. Mais pra cima, a temperatura **aumenta** de novo.

O Sol

O fato de a fotosfera ser semi-opaca também explica, por que as bordas do Sol aparacem mais escuras e avermelhadas que o meio

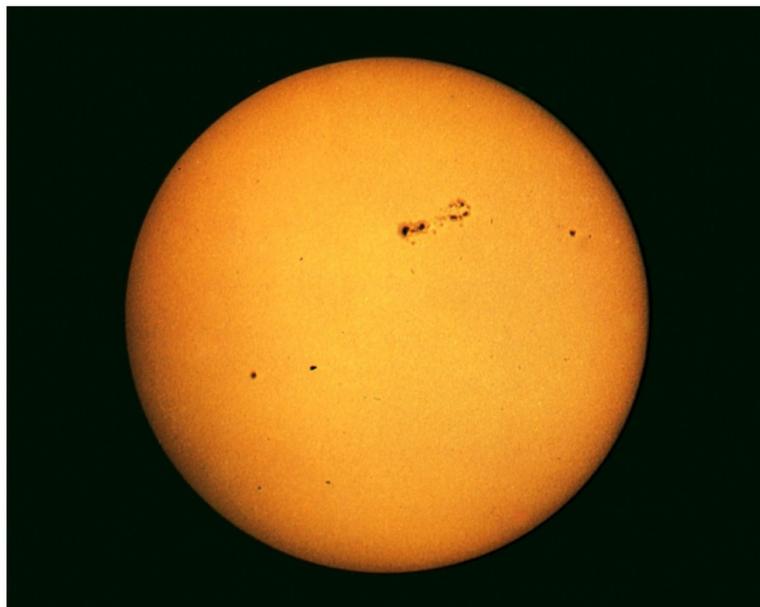


Figure 16-7
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

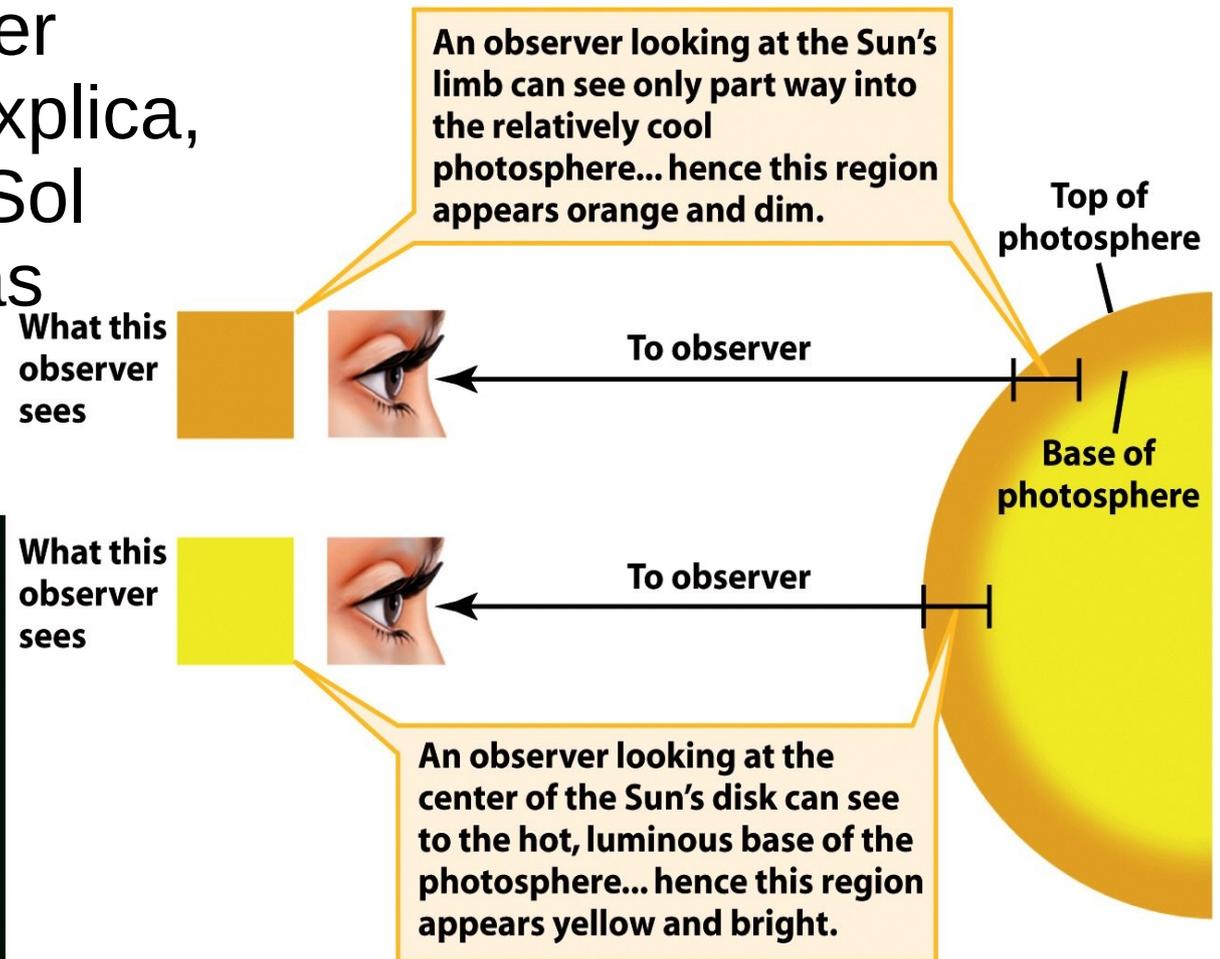


Figure 16-8
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

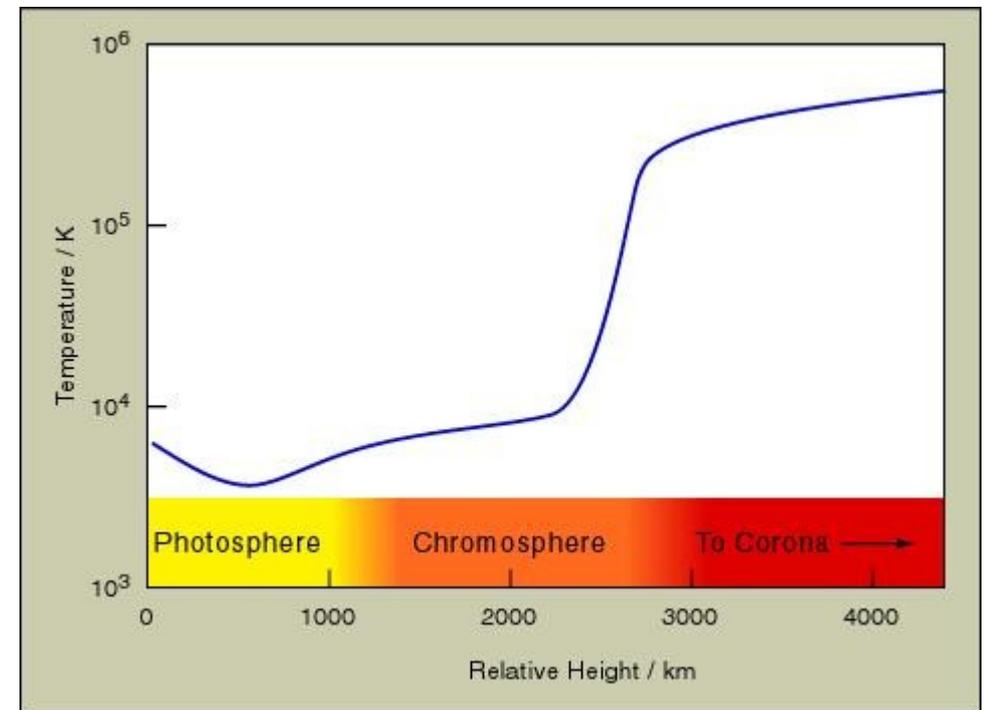
A Cromosfera

A Cromosfera é considerada a parte inferior da **atmosfera solar**, são os primeiros **~1600 km** em cima da fotosfera:

Intensidade 10^{-4} vezes a da fotosfera
=> normalmente **invisível**

Queda da densidade
por um fator $> 10'000$

Aumento da temperatura
de 4400K a 10'000 K



(Temperatura: energia cinética das partículas, dividida por $3k_B/2$)

A Cromosfera

Durante **eclipses solares**, a cromosfera aparece por poucos segundos, e pode-se tomar um **espectro**, chamado *flash spectrum* (“espectro relâmpago”).

O espectro é de **emissão** com linhas de **H**, He, Fe, Si, Cr e Ca ionizados.

Tem até linhas de emissão nos **raios X**, sinal de que se trata de **gás quente**.

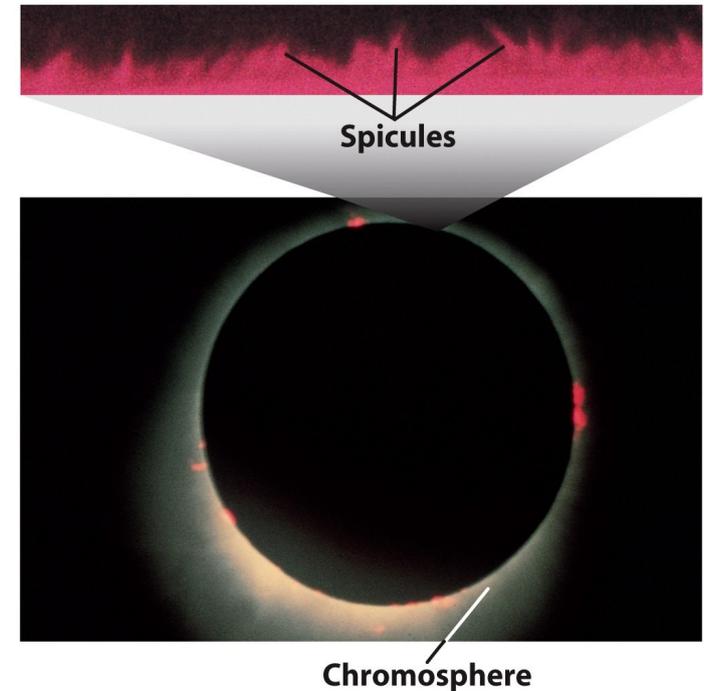
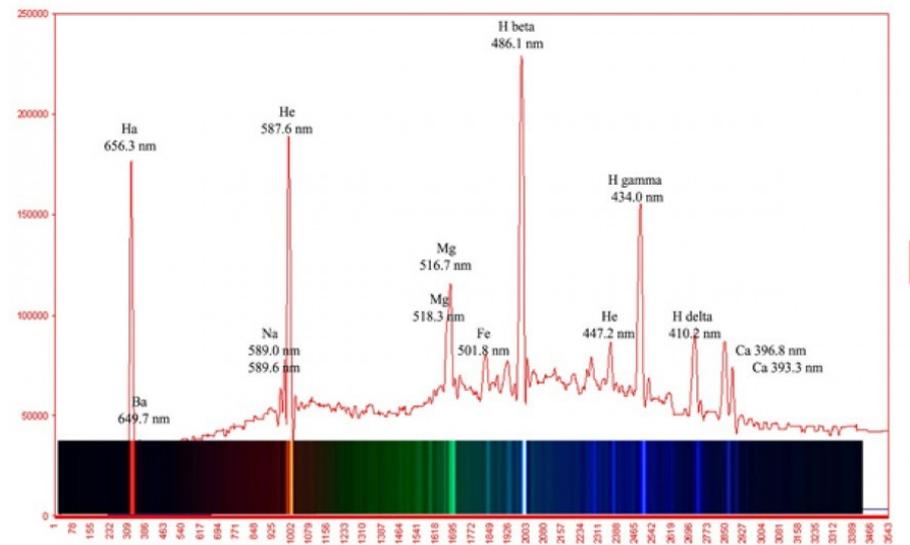


Figure 16-11
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

The Solar Chromosphere Spectrum (Flash Spectrum)



A Cromosfera

Usando **filtros** que isolam a luz nestas **linhas**, dá pra ver a cromosfera até sem eclipse:

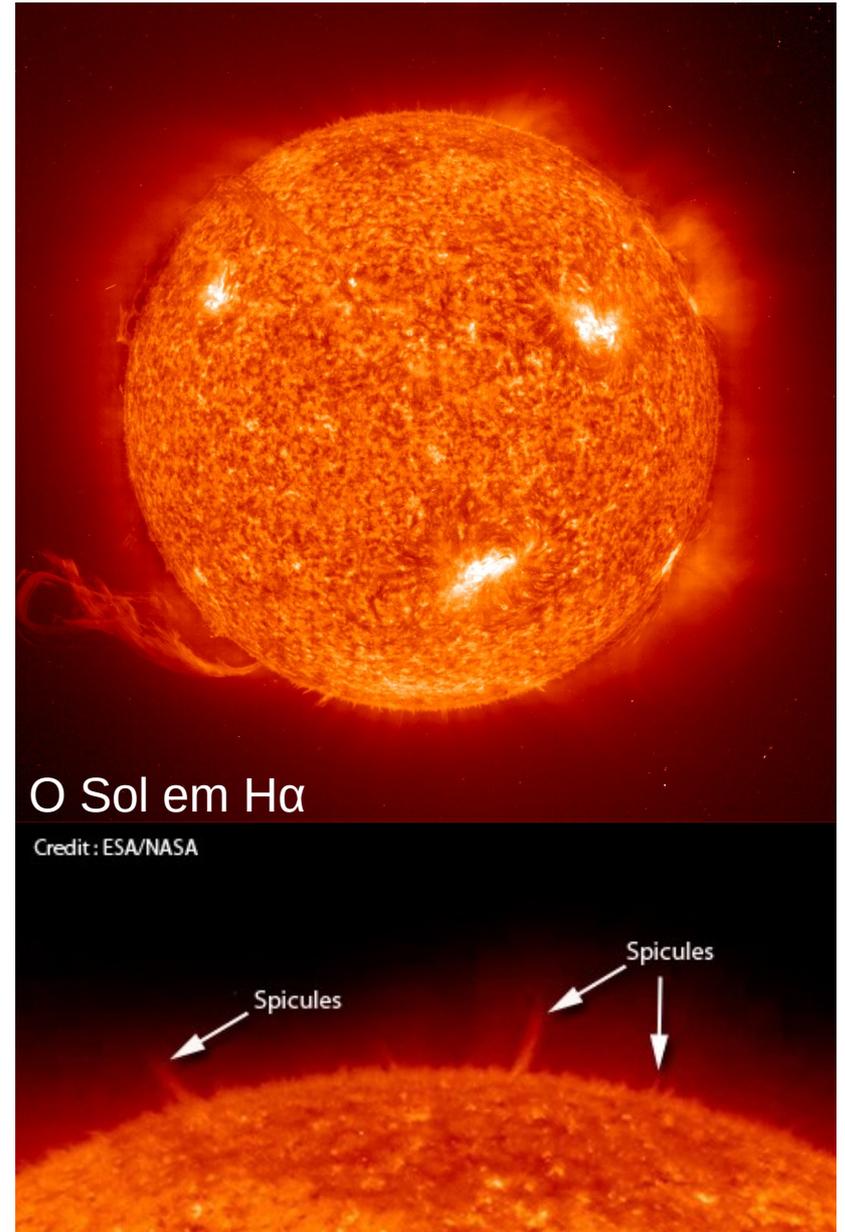
- **Supergranulação**, a extensão da granulação da fotosfera

supergranulation in chromosphere



granulation in photosphere

- **Espículas**, filamentos de gás estendendo-se por 10'000 km a cima da cromosfera, com vida-média de ~15 min.

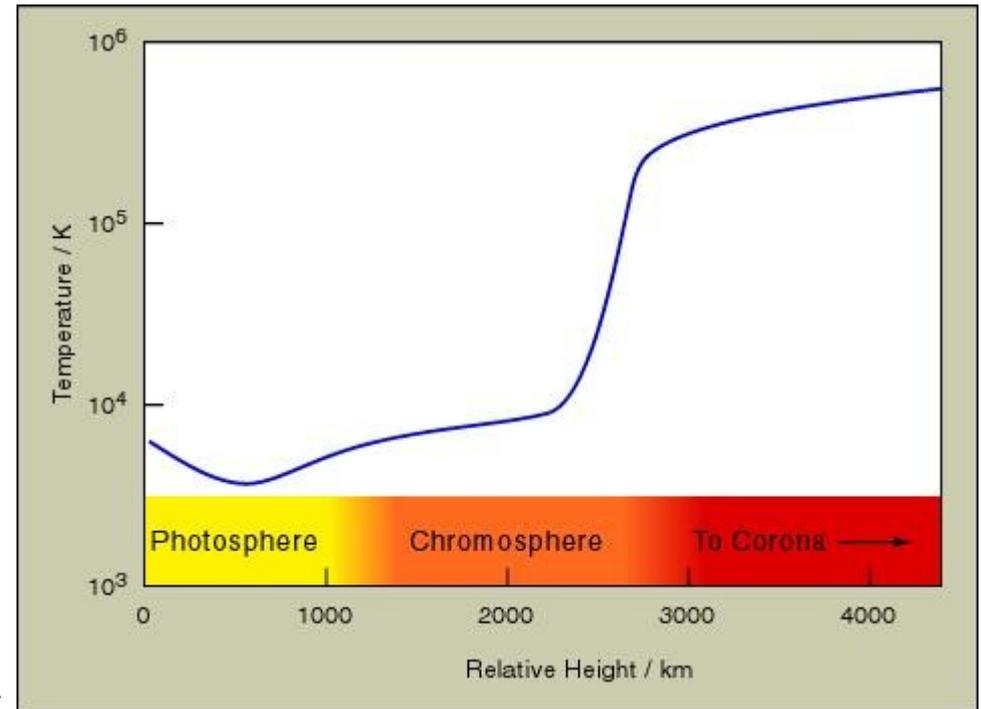
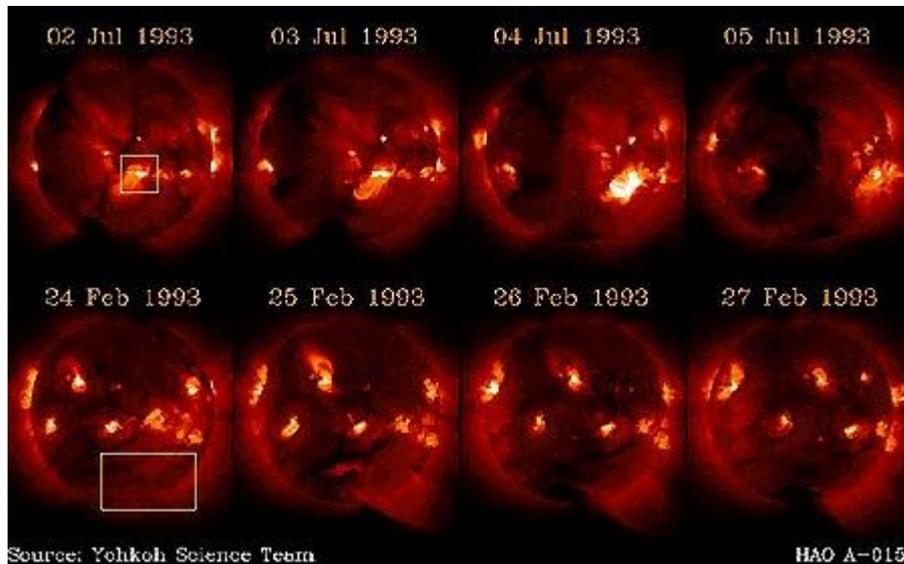


O Sol em H α

Credit: ESA/NASA

A Zona de Transição

Entre a cromosfera e a coroa há uma zona de transição, onde a temperatura aumenta por um fator >10 dentro de uns 100 km.



Dá pra observá-la em certas linhas espectrais no ultravioleta.

A Coroa

É a **parte exterior** da **atmosfera solar** e pode ser vista durante a totalidade de um eclipse solar.

Ela tem **intensidade** 10^{-6} vezes mais **fraca** que a cromosfera, **densidade** muito **baixa**, 10^{15} partículas/m³, é **transparente** à maior parte da radiação eletromagnética (exceto ondas de rádio longas) e seu limite exterior não é claramente definido.

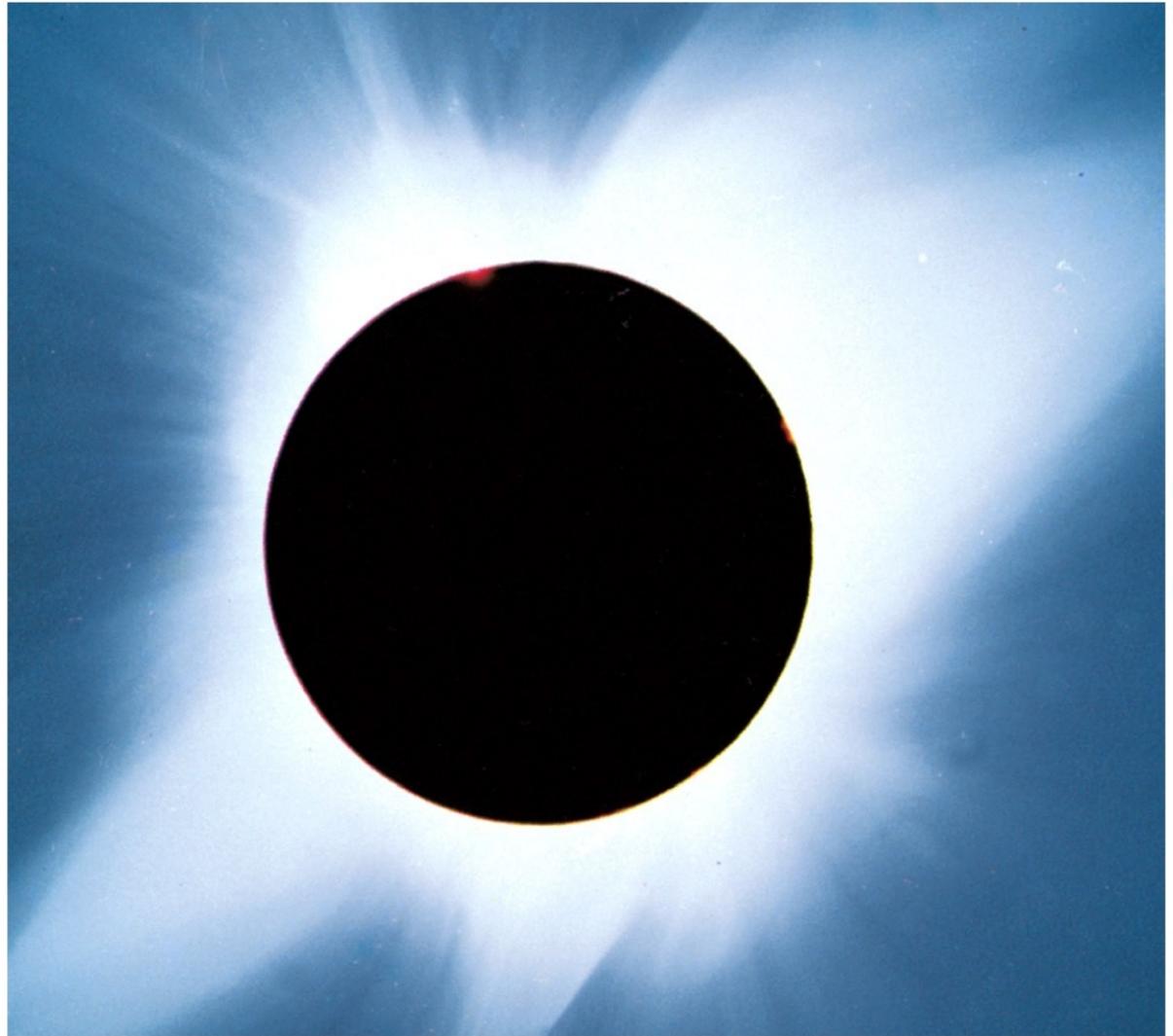


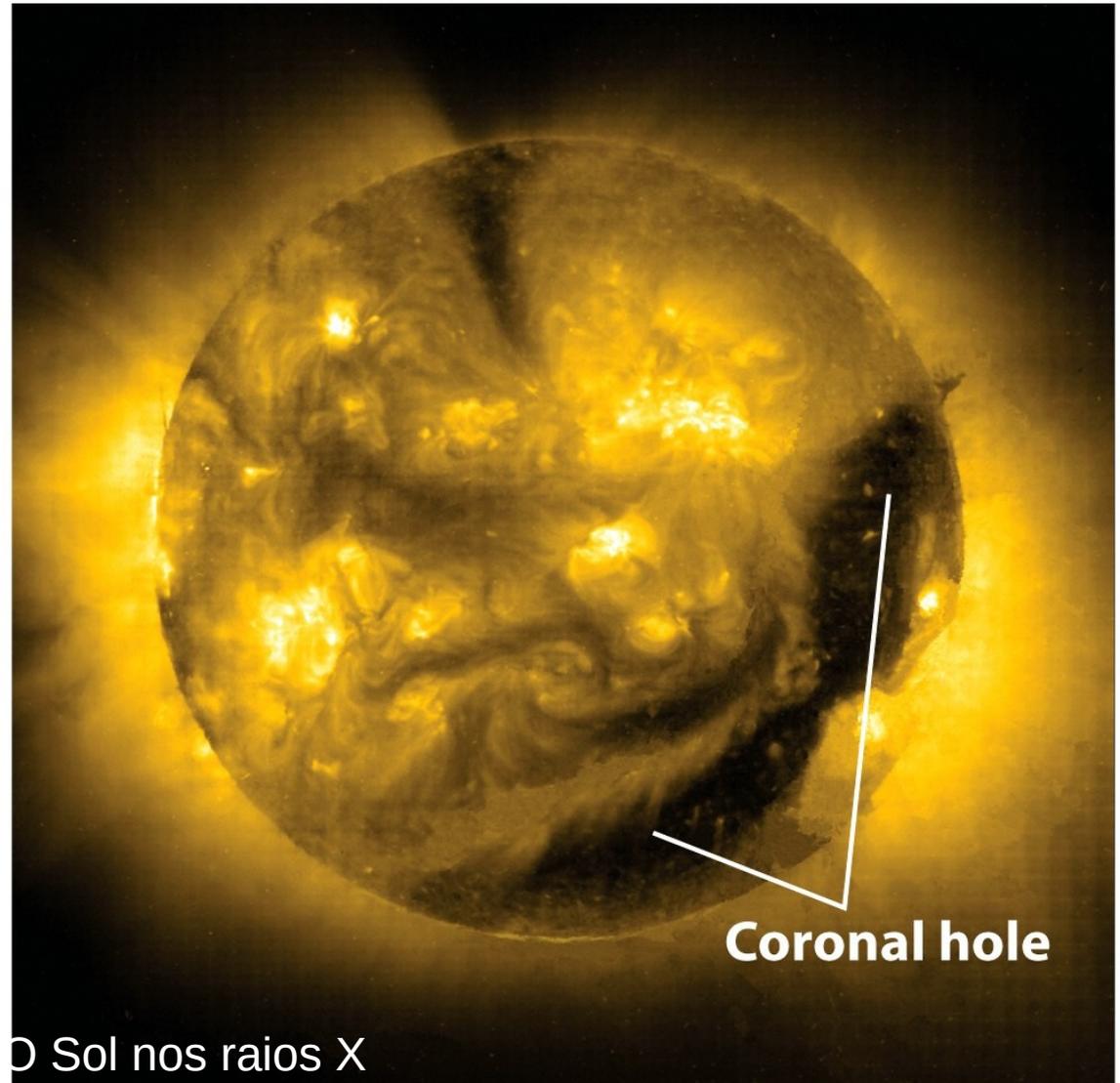
Figure 16-13
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company

A Coroa

Por ter **temperaturas** de até **> 1 mio. K**, ela brilha nos **raios X**, e mostra linhas de emissão de ferro altamente ionizado.

As regiões **brilhantes** estão lá, onde tem **interação** entre **partículas carregadas**, íons e elétrons.

Isto acontece, onde linhas do **campo magnético solar** re-entram na cromosfera ...



O Sol nos raios X

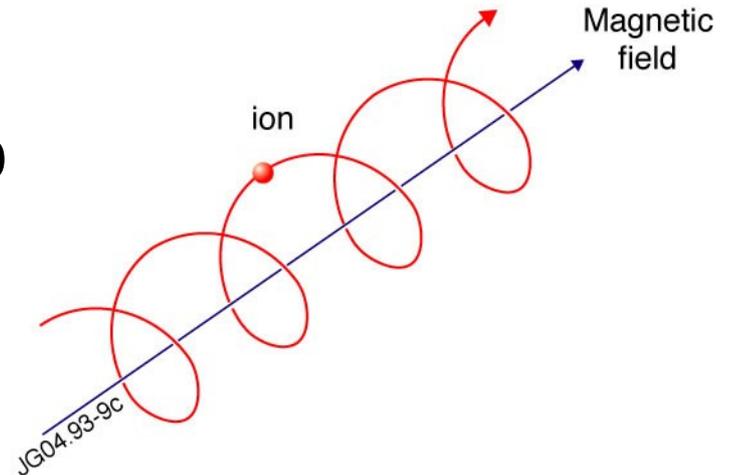
Figure 16-15
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company

A Coroa

... já que partículas carregadas seguem linhas de campo magnético em trajetórias helicoidais (=> Fenômenos Eletromagnéticos).

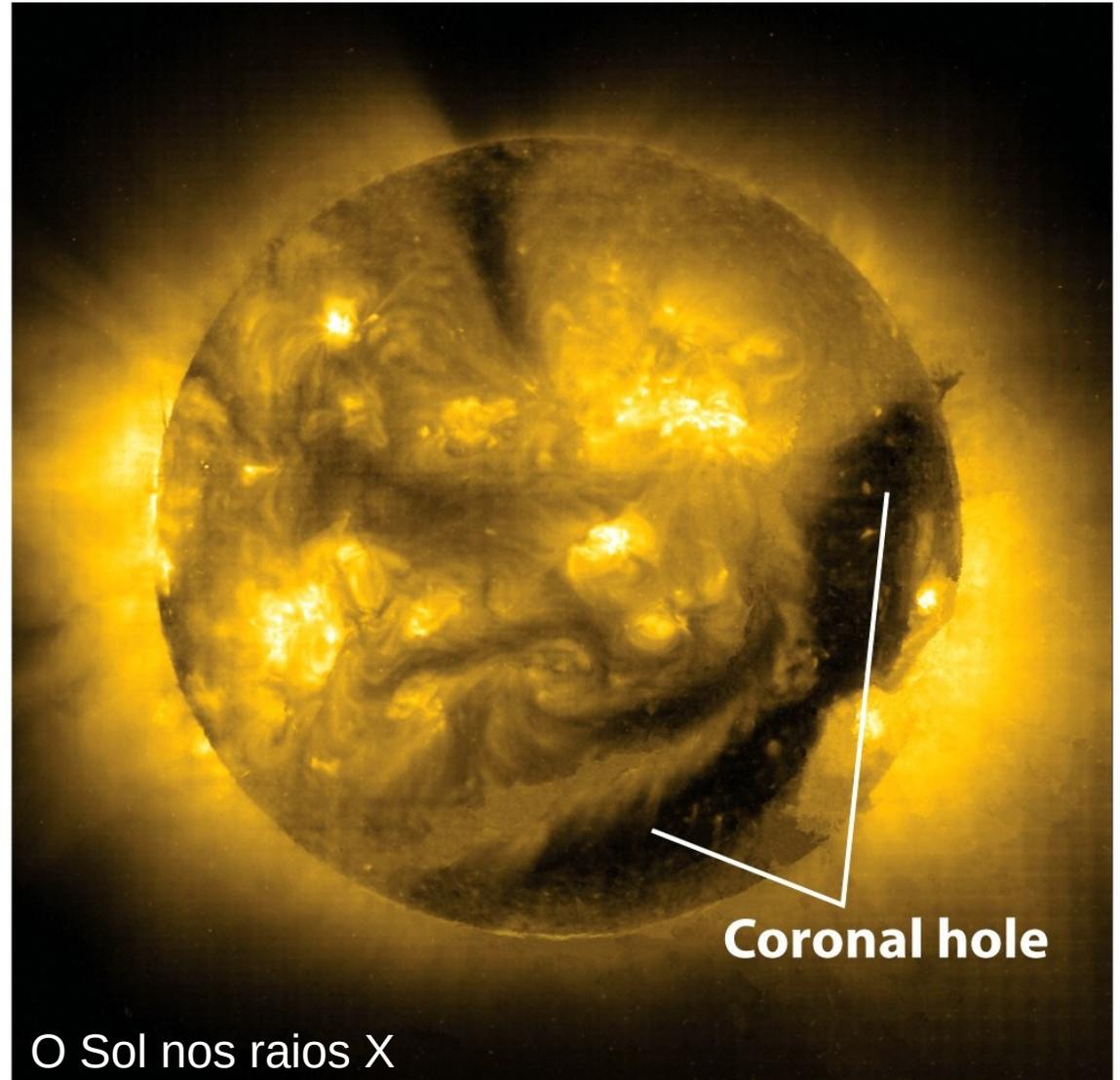
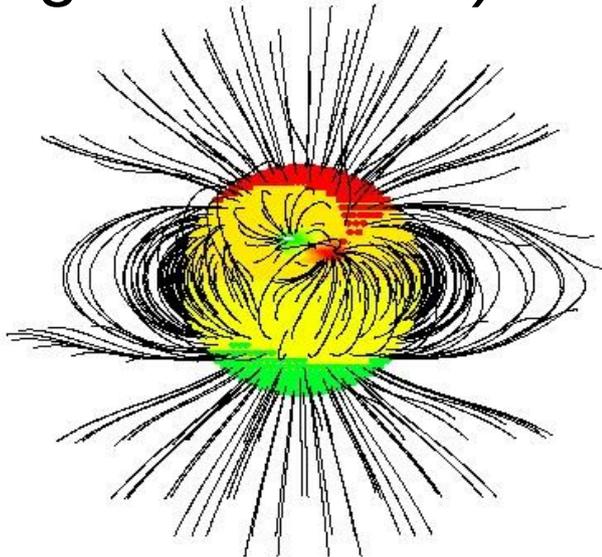
=> As regiões **brilhantes** da coroa estão lá, onde tem **linhas de campo magnético fechados**. As colisões entre estas partículas aprisionadas causam **ventos solares lentos**, ~300 km/s.

As partículas seguindo as **linhas de campo abertos** compõem **ventos solares rápidos** de ~750 km/s.



A Coroa

Por isto, ventos solares rápidos originam nas partes escuras da coroa, os **buracos coronais** (vida média: algumas horas).



O Sol nos raios X

A Coroa

As partículas do vento solar são **íons** e **elétrons**.

As energias cinéticas destas partículas correspondem a **temperaturas** de 40'000 K (íons), resp. 100'000 K (e⁻).

A **densidade média** a 1 AU do Sol é de $7 \cdot 10^6$ íons/m³.

A uma velocidade de 500 km/h, isto leva a uma taxa de **perda de massa** de $dM/dt = 4\pi r^2 \rho v = 3 \cdot 10^{-14} M_{\odot}/\text{ano}$.

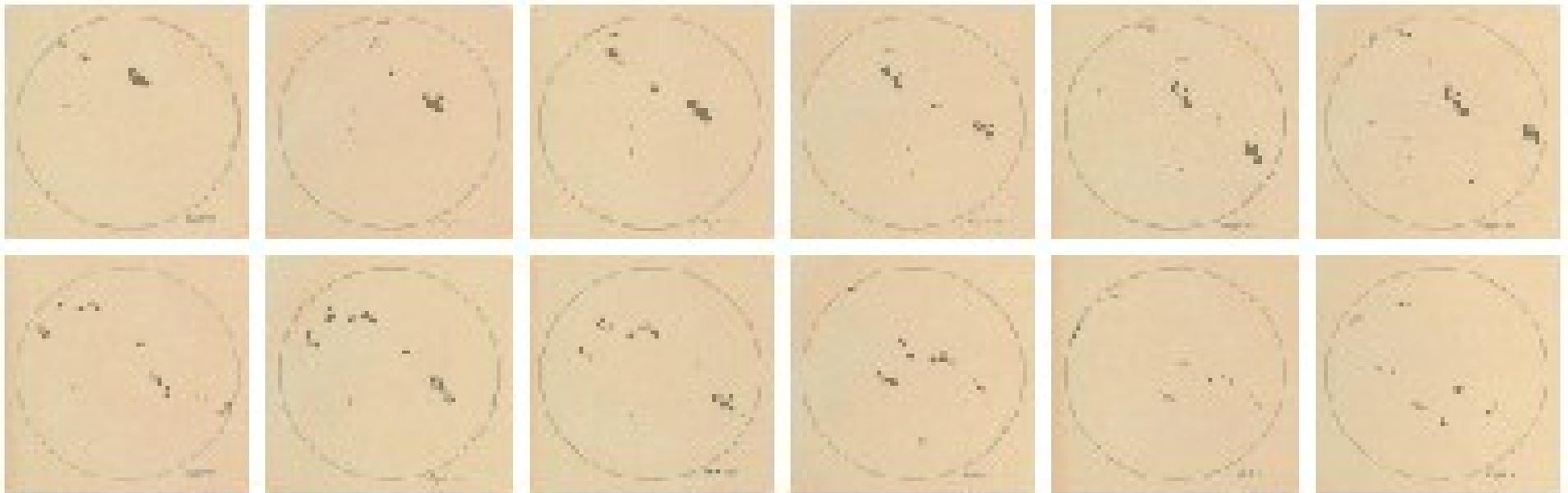
A esta taxa, o Sol levaria mais de 10^{13} anos para ser dissipada.

Uma perda de massa tão lenta influencia muito pouco nos processos e na estrutura internos do Sol.

=> **Não** precisamos levar em conta em **modelos solares**.

Manchas Solares

Como mencionado, Galileu Galilei descobriu ~400 anos atrás, que o Sol às vezes apresenta **manchas “escuras”**.



São áreas **menos quentes**, a partir de 3900 K, que aparecem em **pares** ou grupos maiores na **fotosfera**, e que “vivem” por até um mês.

O fluxo bolométrico na superfície das manchas é um fator até $(5777/3900)^4 = 4.8$ menor que no resto da fotosfera.

Manchas Solares

Manchas solares medem até 30'000 km de diâmetro (>2 diam. terrestres), e consistem de uma parte escura, a **umbra** e uma menos escura em torno, com estrutura de filamentos, a **penumbra**.

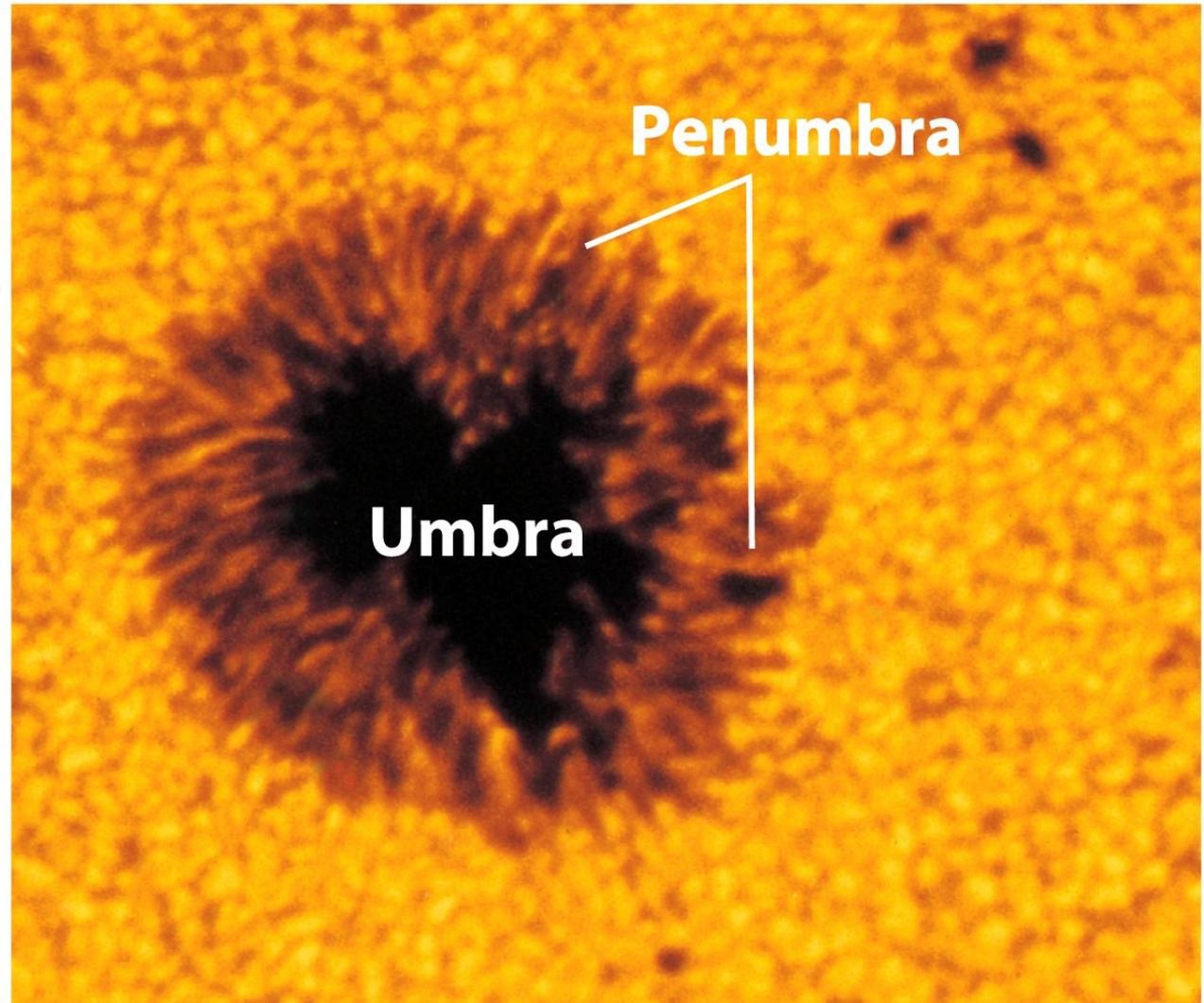


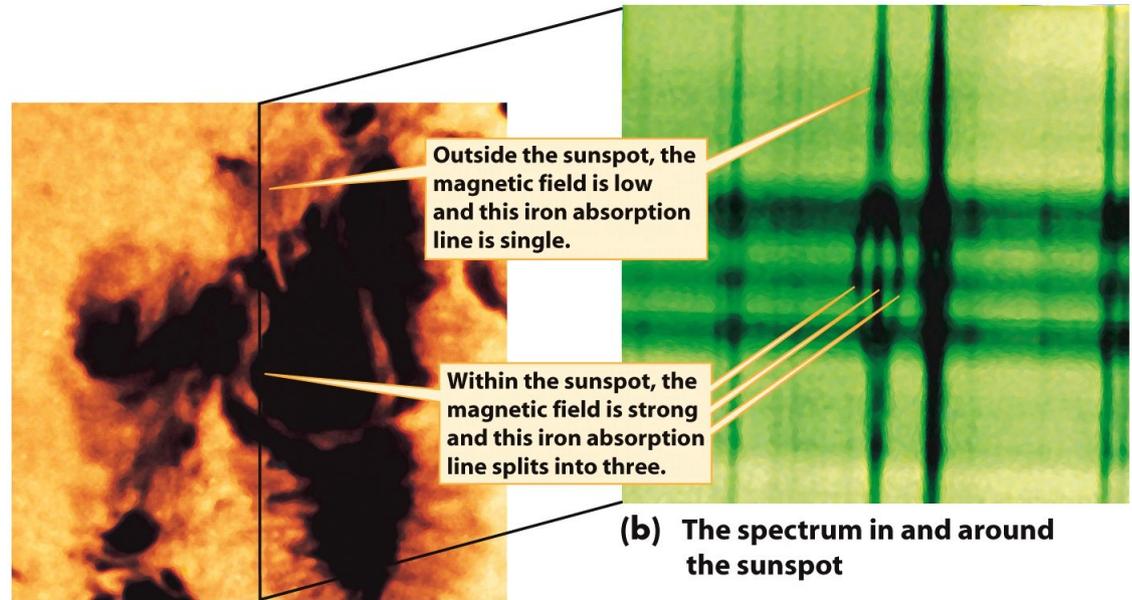
Figure 16-16a
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Manchas Solares

Medidas de **linhas espectrais** mostram que **manchas solares** são associadas com **campos magnéticos**. Estes inibem a convecção.

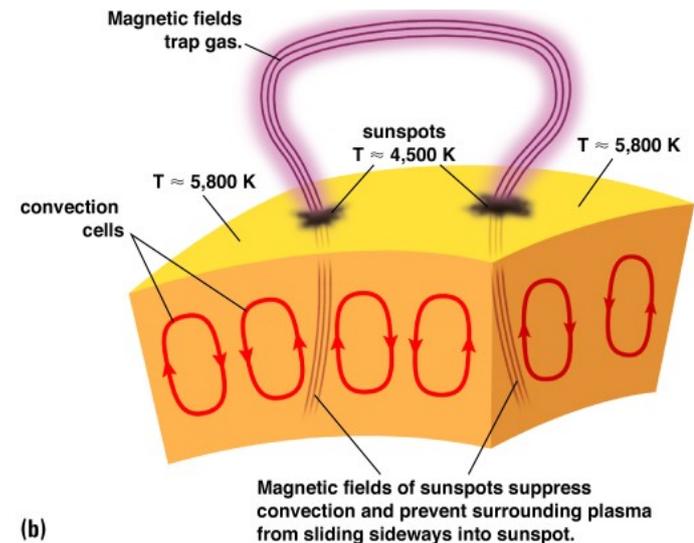
Efeito Zeeman: certas linhas espectrais são desdobrados em campos magnéticos.

Isto também explica, por que as manchas ocorrem em **pares**.



(a) A sunspot

Figure 16-20
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company



(b)

Copyright © Addison Wesley

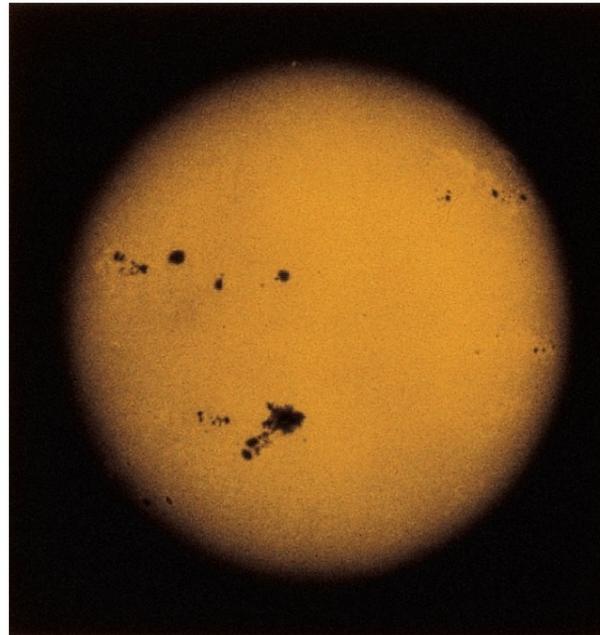
Manchas Solares

As **contagens** de **manchas solares** feitos nos últimos dois séculos, mostram que o **número** de manchas **oscila** com um período de onze anos.

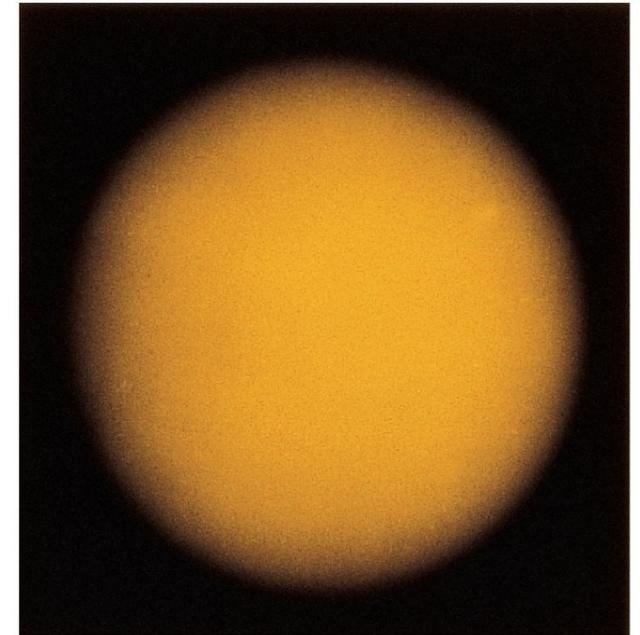
As fases com **mui-**

tas manchas são chamadas de fases de **atividade solar**.

Na verdade, o período é de **22 anos**, por que os campos magnéticos invertem a polarização entre dois máximos. Este período é chamado **Ciclo Solar**.



Near sunspot maximum



Near sunspot minimum

Figure 16-18bc
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

O Ciclo Solar

O número média de manchas solares em função do tempo para os últimos 260 anos.

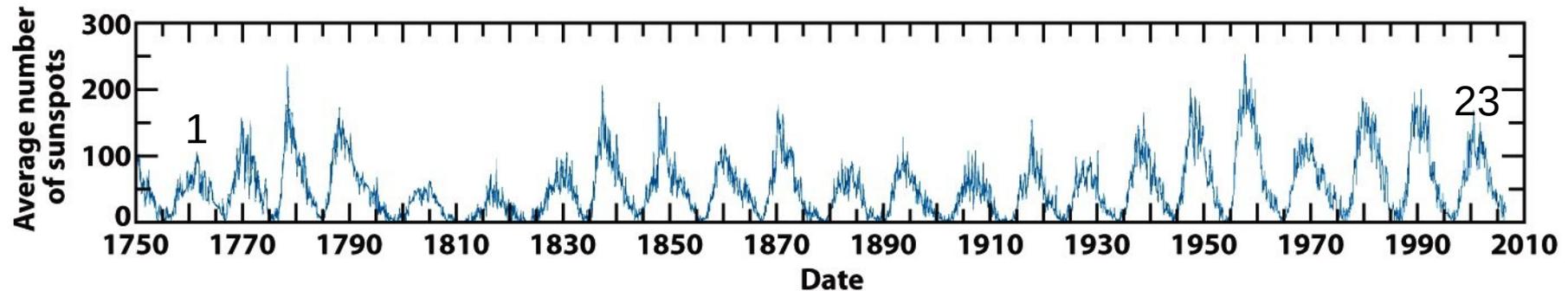


Figure 16-18a
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

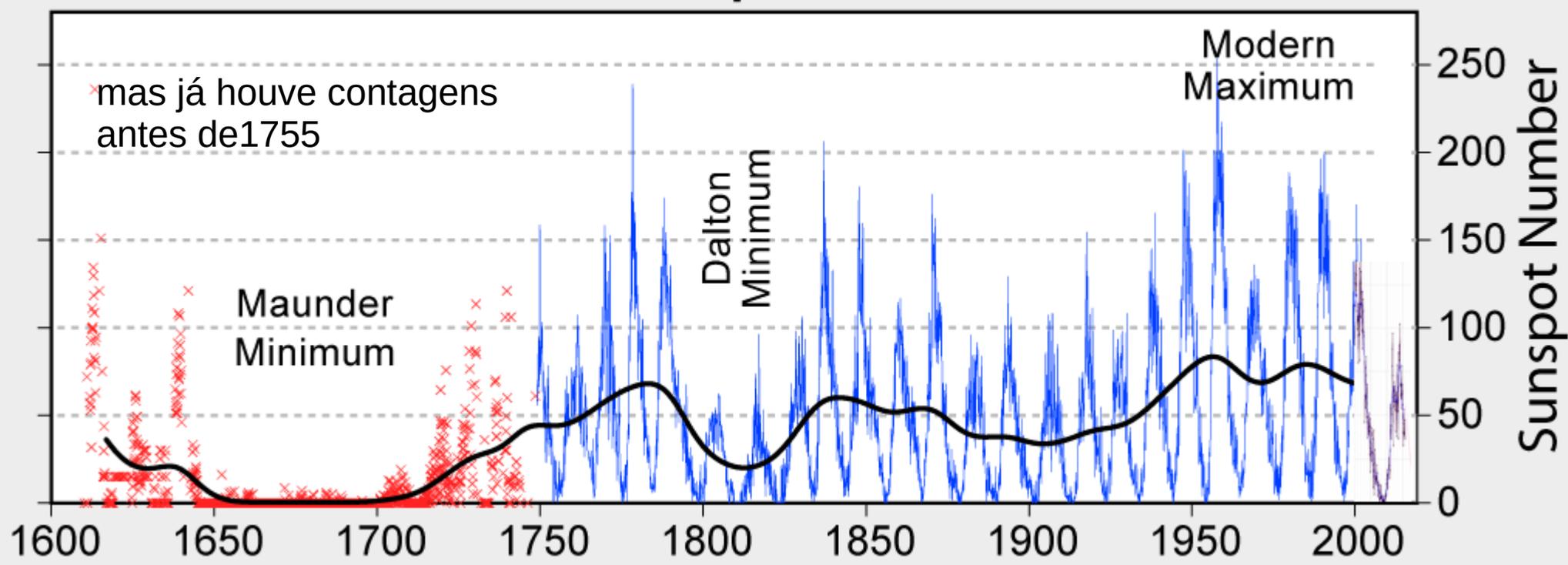
Os ciclos solares (na verdade, meio ciclos) são contados a partir de 1755, quando a contagem mais extensa começou.

Já que **manchas solares** são **escuras** e de **baixa temperatura**, a **energia** irradiada pelo Sol **diminui** por $\sim 0.1\%$ durante os **máximos**.

O Ciclo Solar

e para os últimos 400 anos

400 Years of Sunspot Observations

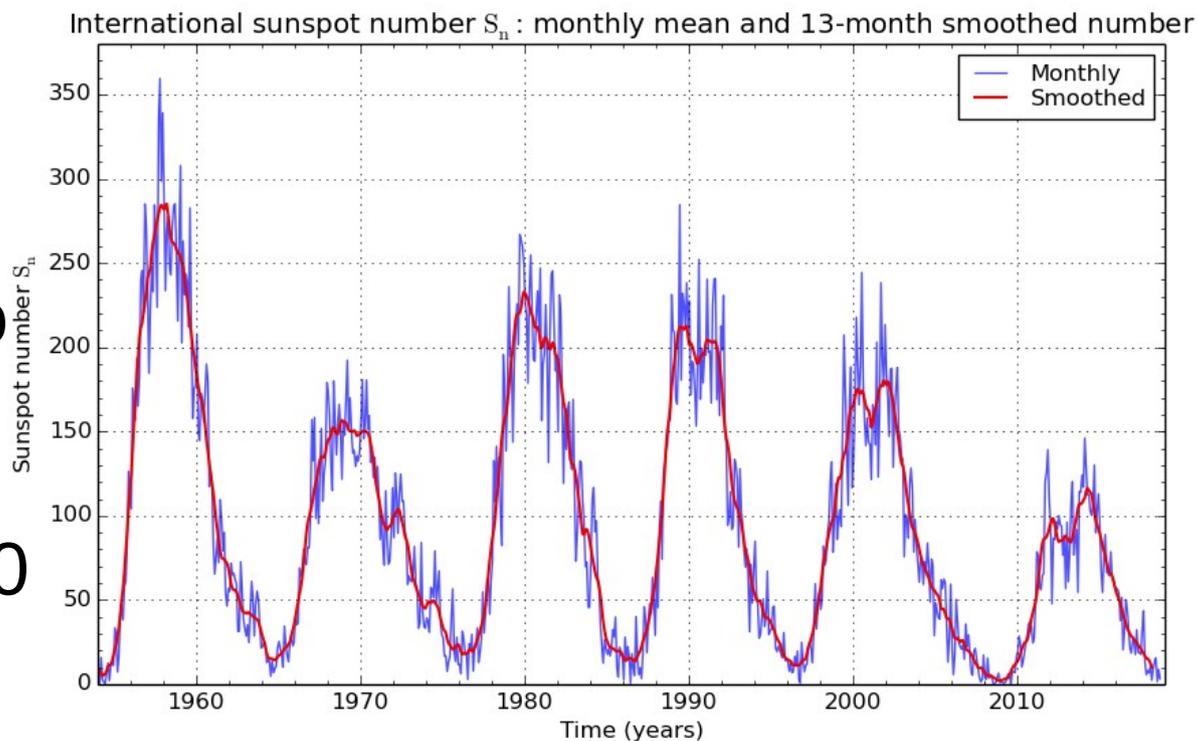


Períodos com ciclos fracos como os mínimos de Maunder e Dalton parecem coincidir com períodos de baixas temperaturas na Europa, mas não necessariamente no resto do mundo.

O Ciclo Solar

Um zoom nos anos mais recentes

Atualmente estamos no ciclo 24, que deve terminar entre o fim deste ano e o começo de 2020, e está a caminho de ser o mais fraco desde 1820 (o mínimo de Dalton).



Modelos climáticos que buscam quantificar a **influência da irradiância solar** sobre a **temperatura** na Terra **não** conseguiram explicar o **aquecimento rápido** das últimas décadas.
=> Este tem **outra(s) causa(s)**.

SILSO graphics (<http://sidc.be/silso>) Royal Observatory of Belgium 2018 October 1

O Ciclo Solar

As primeiras manchas de um ciclo aparecem em torno de latitude solar $\pm 40^\circ$, mas durante o ciclo aparecem cada vez mais perto do equador solar, resultando em **diagramas de borboleta**.

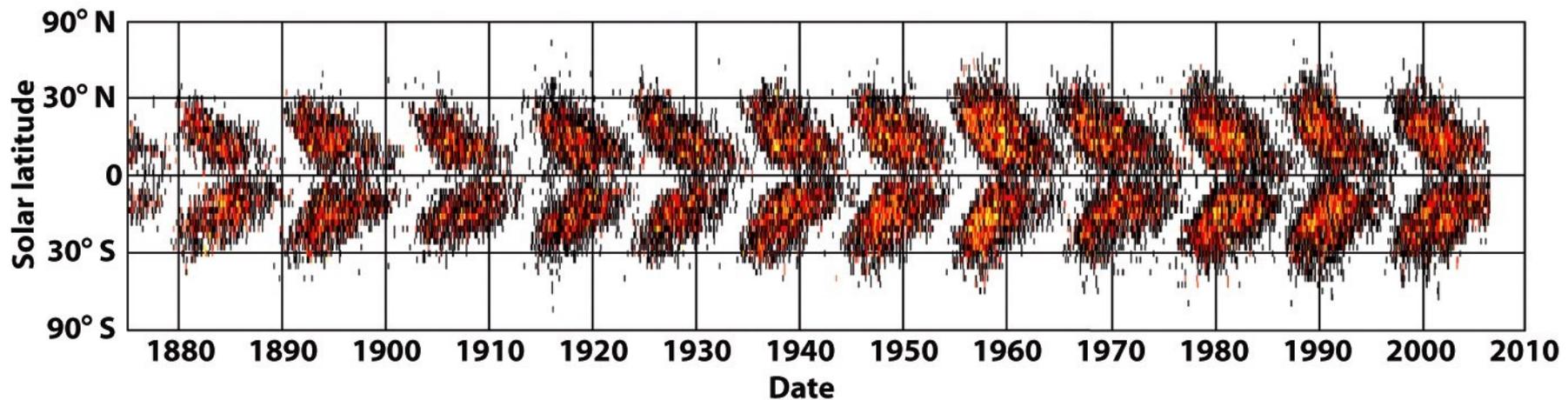


Figure 16-19
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Latitudes das manchas solares em função do tempo

O Ciclo Solar

Plages (francês para praias) são regiões na **cromosfera** brilhantes em **H α** perto de **manchas solares**, que surgem pouco antes do aparecimento das manchas e somem logo depois do sumiço das manchas naquela região.

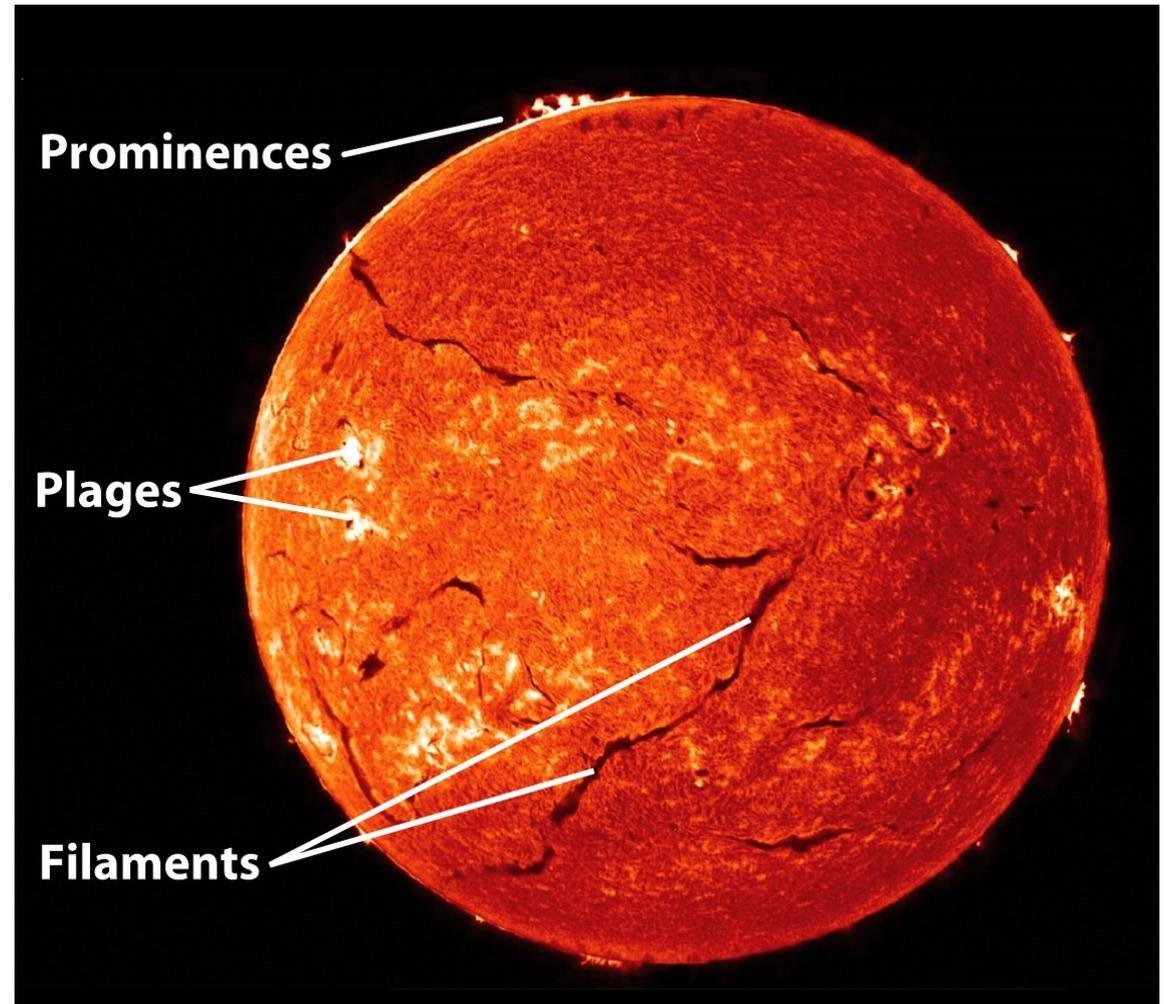


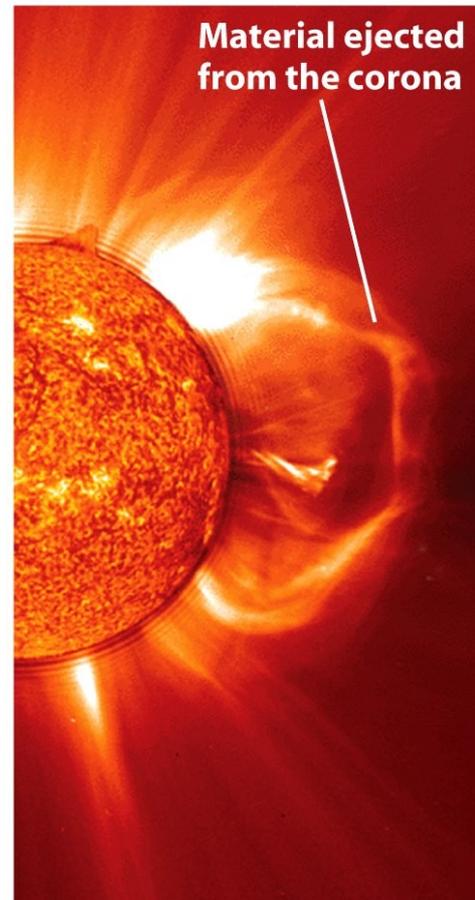
Figure 16-26
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

O Ciclo Solar

Outro fenômeno associado com atividade de manchas solares são as **erupções solares**.

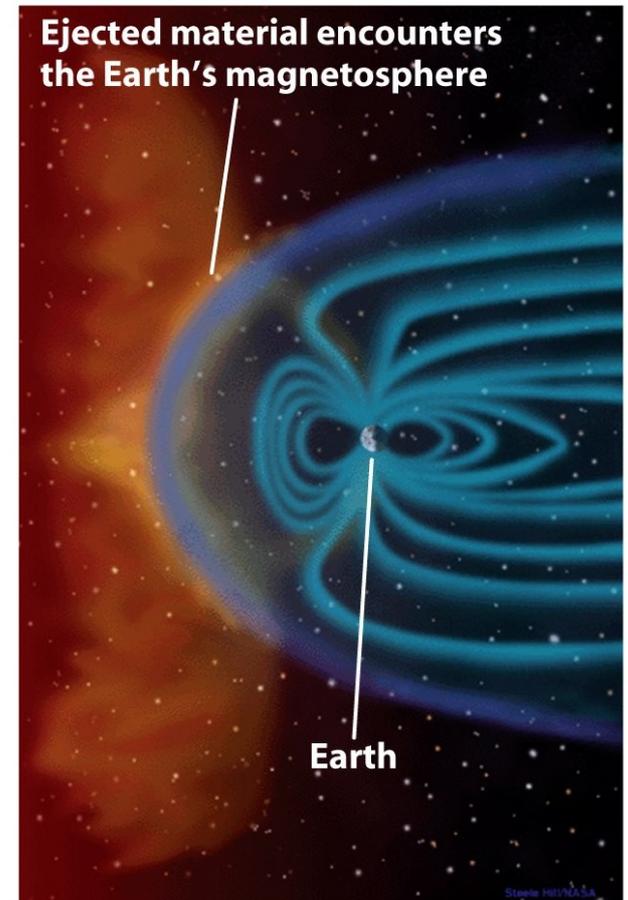
Elas medem até 100'000 km e liberam **energias** de 10^{17} J a 10^{25} J em **ms** a **horas**, parcialmente na forma de **partículas carregadas**, que podem inter-

romper comunicações ou causar perigo para astronautas quando chegam na Terra entre 0.5 e 4 horas depois.



(a) A coronal mass ejection

Figure 16-28
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company



(b) Two to four days later

O Ciclo Solar

As erupções surgem em cima de **grupos de manchas solares**, quando o **campo magnético** é perturbado.

A **reconexão** de linhas de campo magnético libera a **energia armazenada** no **campo**, produzindo **fótons** e, às vezes, acelerando **raios cósmicos** (partículas) solares.

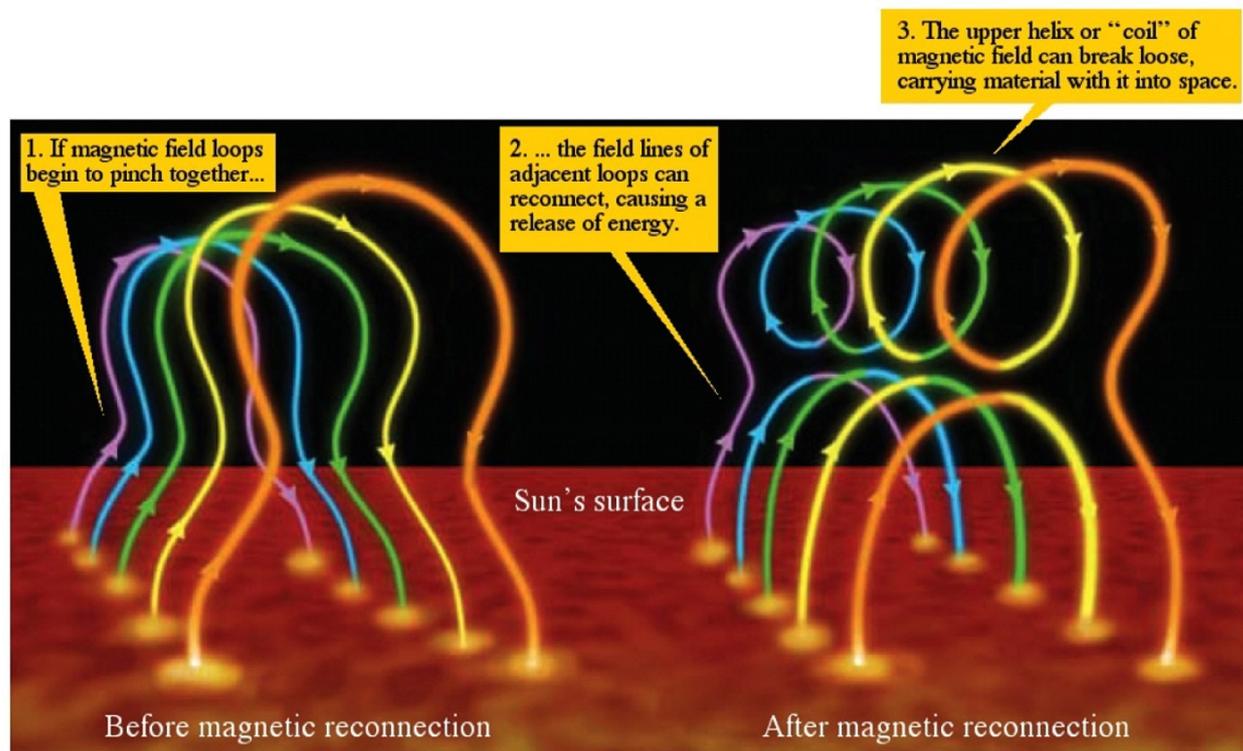


Figure 16-25b
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

Energia e Pressão Magnética

Fenômenos Eletromagnéticos:

Densidade de **energia** estocada num **campo magnético** B :

$$u_m = B^2/2\mu_0, \text{ onde } \mu_0 = \text{constante magnética} = 4\pi \cdot 10^{-7} \text{ N/A}^2$$

=> **Comprimir** o **campo aumenta** sua **densidade** de **energia**,

ou seja, custa **trabalho** $W = \int P \cdot dV$

pela 3ª lei de Newton, o **campo** também exerce uma **pressão**,
a **pressão magnética** P_m , que deve ser igual a P .

$$\int u_m dV = \int dU_m = W = \int \mathbf{F} \cdot d\mathbf{s} = \int P_m A_{\perp F} ds_{\parallel F} = \int P_m dV$$

$$\Rightarrow P_m = u_m = B^2/2\mu_0$$

A pressão magnética é **igual** à densidade de energia magnética!

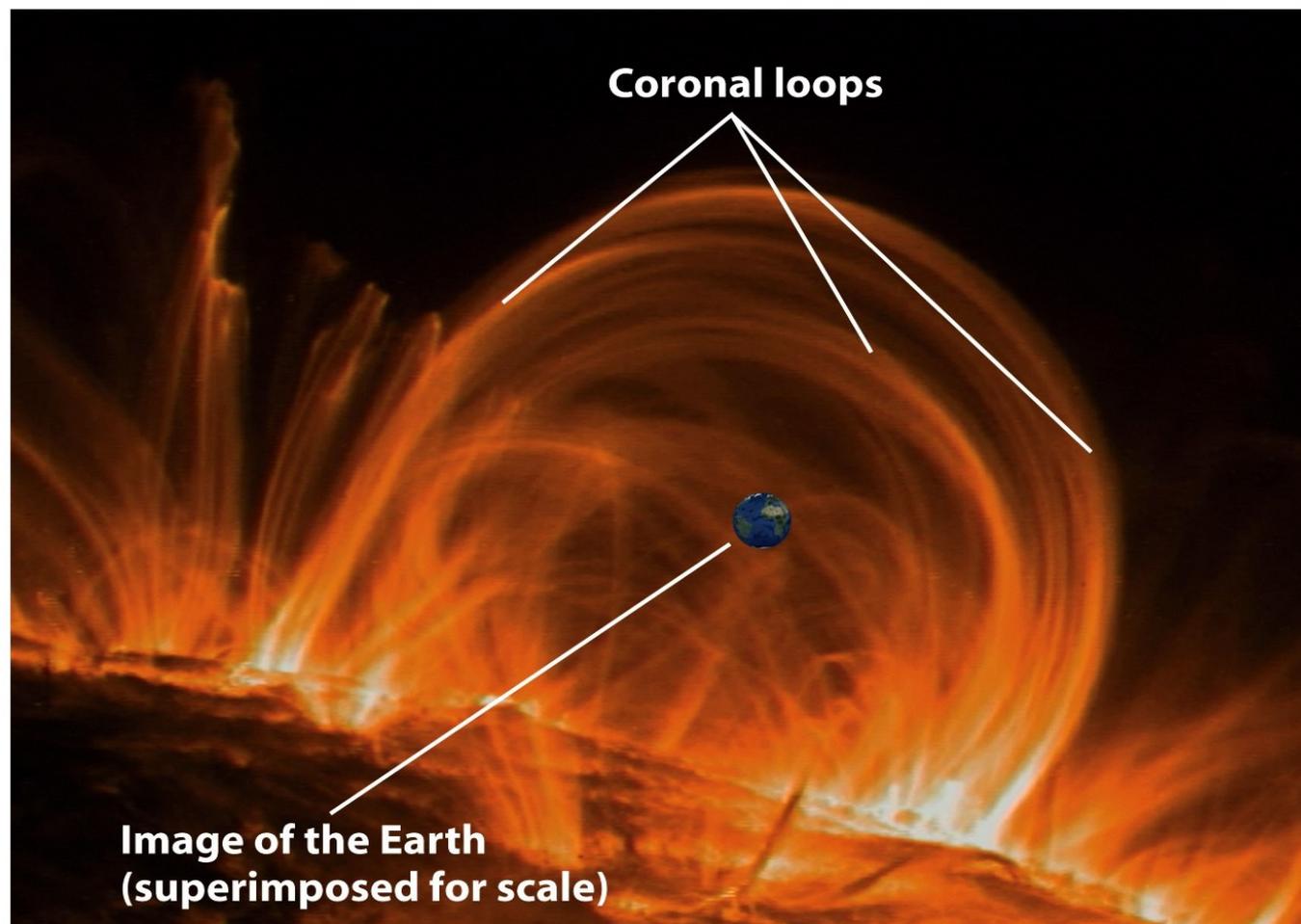
(Exercício: Confira que as unidades de densidade de energia e de pressão são as mesmas.)

O Ciclo Solar

Proeminências solares são cortinas de **gás ionizado**, que se formam ao longo de **linhas do campo magnético solar**.

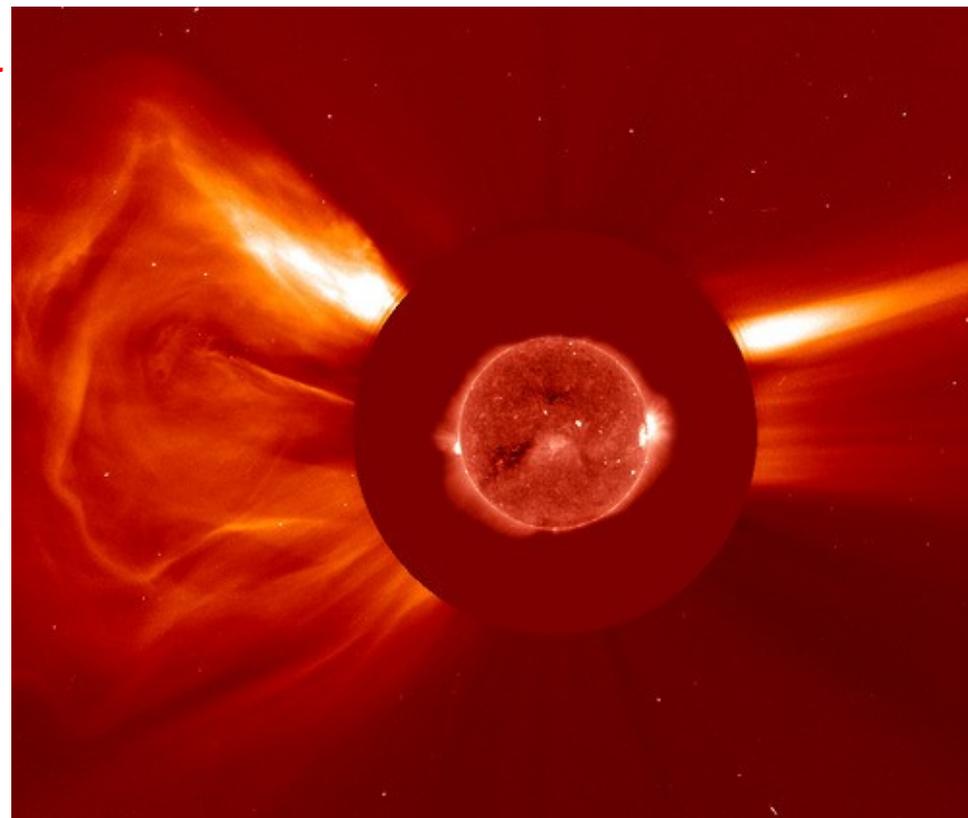
Elas são menos quentes, ~ 8000 K, e mais densas que o gás da coroa em volta.

Elas têm vida média de semanas ou meses e são observáveis em linhas de emissão de hidrogênio.



O Ciclo Solar

Quando uma **Proeminência solar** se torna **instável**, pode ocorrer a **ejeição de massa coronal**, fenômeno similar a uma erupção solar, mas em maior escala, levando uma **fração significativa** da **massa da coroa**, de $5 \cdot 10^{12}$ kg a $5 \cdot 10^{13}$ kg junto a velocidades de 400 a 1000 km/s.



A **frequência** destes eventos **aumenta** durante fases de **alta atividade solar**.

O Ciclo Solar

O Modelo de Dínamo Magnético para explicar o Ciclo Solar (Horace Babcock, 1961)

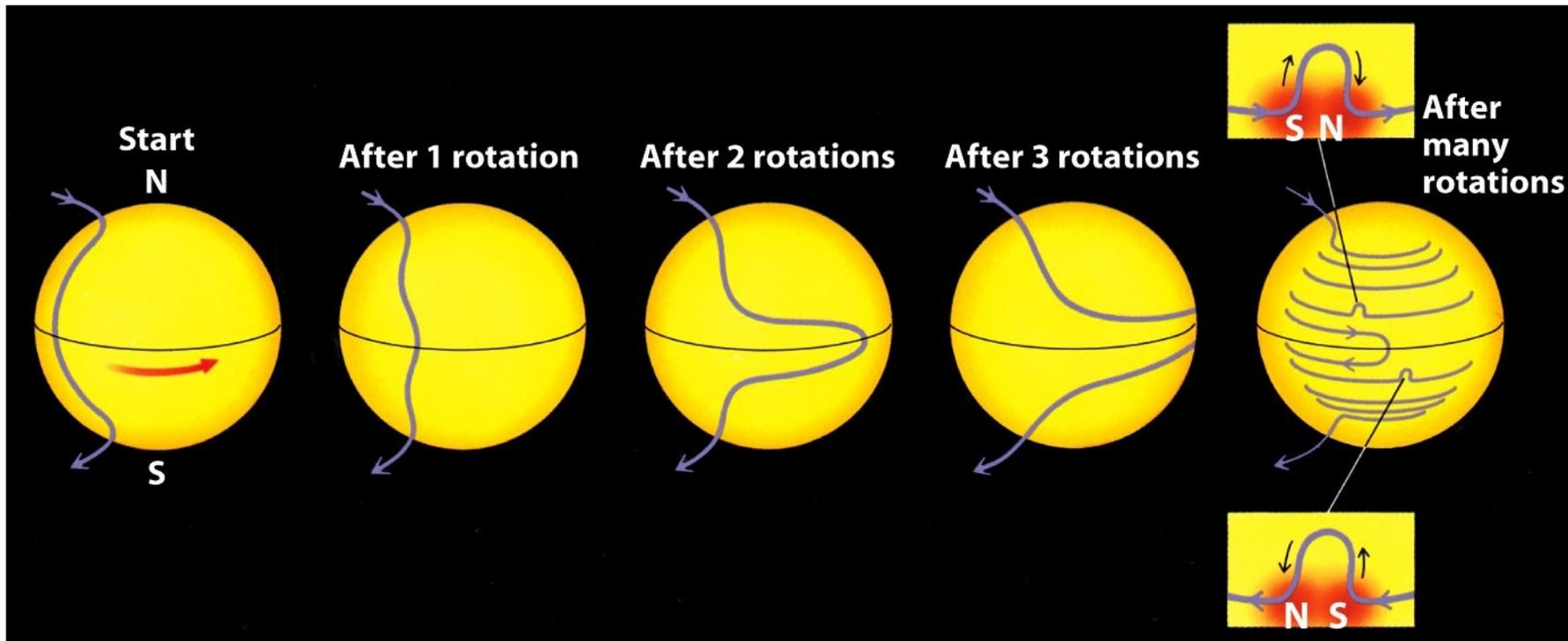


Figure 16-23
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

O Ciclo Solar

O Modelo de Dínamo Magnético

- As **linhas de campo** são **congeladas** no **gás**, e **arrastadas** juntas com a **rotação diferencial**. Isto adiciona uma **componente toroidal** ao campo inicialmente **poloidal**.
- A **convecção torce** as **linhas de campo**, gerando regiões de **campos fortes**.
- A **pressão magnética** faz as **linhas de campo** subirem até a superfície, onde geram os grupos de **manchas solares**.
- Inicialmente, estes grupos aparecem a **latitudes altas**.
- Enquanto a **rotação diferencial** produz mais e mais “**nós**” nas **linhas de campo**, as manchas aparecem **mais perto** do **equator solar**.

O Ciclo Solar

O Modelo de Dínamo Magnético

- Chegando no **equator**, as manchas de **polaridade oposta** se **cancelam**, diminuindo o número de grupos de manchas.
- Quando todos os nós nas linhas e todas as manchas solares são **cancelados**, o **campo poloidal** é **reestabelecido**, mas com **polaridade inversa**.

Este modelo explica qualitativamente um monte de fenômenos do ciclo solar.

Infelizmente, o cálculo exato requer um tratamento completo das equações da magnetohidrodinâmica, e é complicado demais para ser feito (por enquanto).

O Sol

Resumo: Contribuição integrada à energia total, e massa integrada em função da distância do centro do Sol

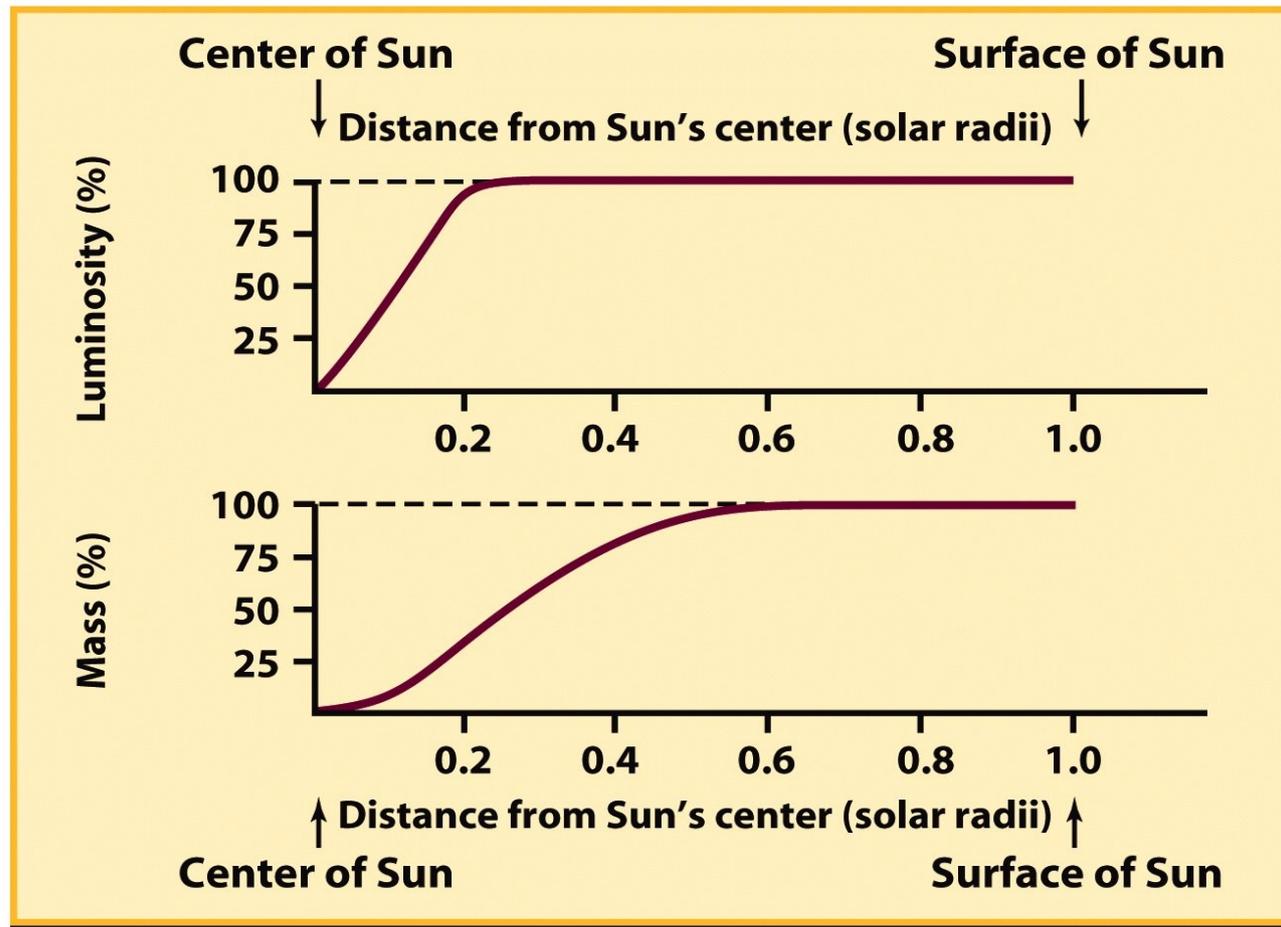


Figure 16-3 part 1
Universe, Eighth Edition
© 2008 W. H. Freeman and Company

O Sol

Resumo: Temperatura e Densidade em função da distância do centro do Sol

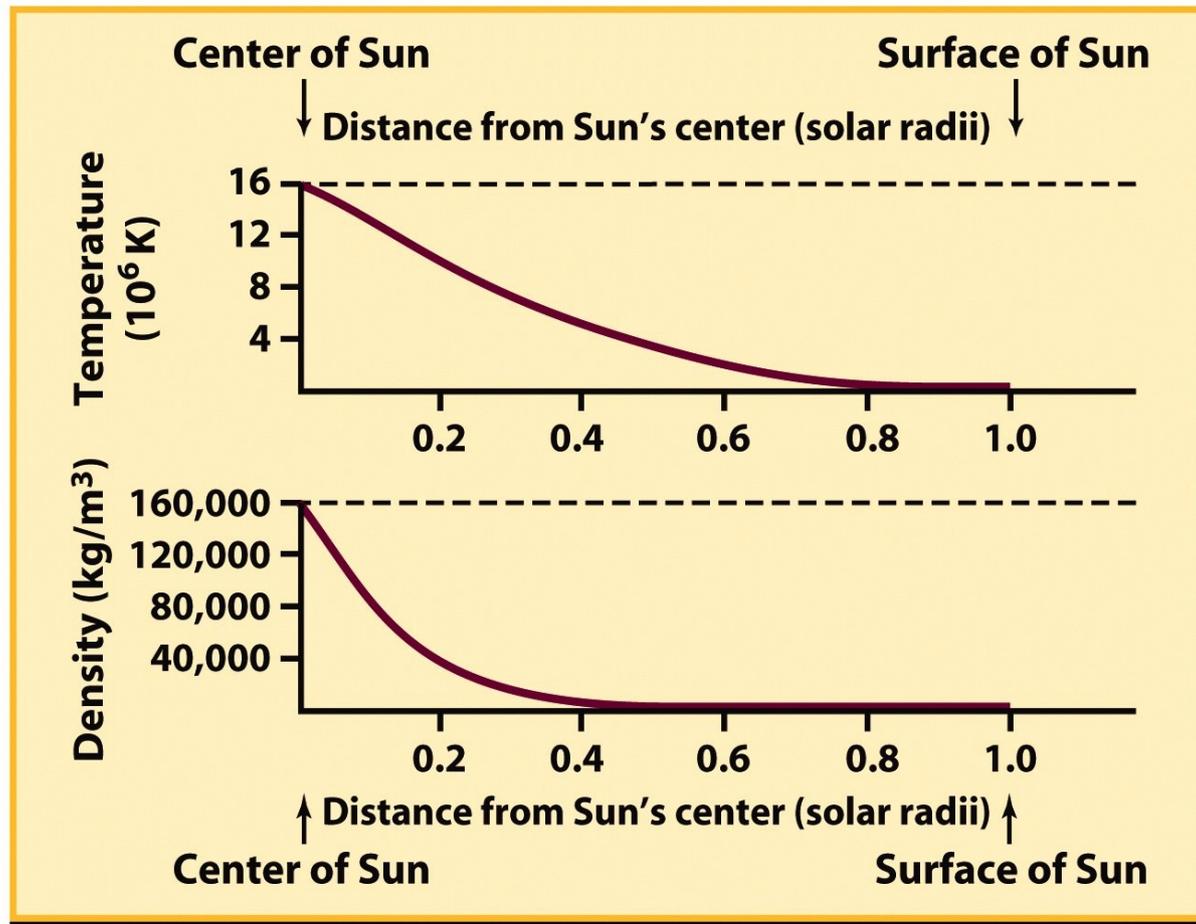


Figure 16-3 part 2
Universe, Eighth Edition
© 2008 W.H. Freeman and Company



Universidade Federal do ABC

Física Contemporânea

FIM PRA HOJE

