



Universidade Federal do ABC

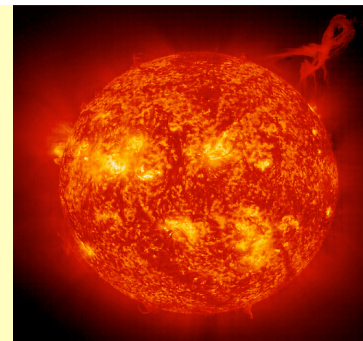
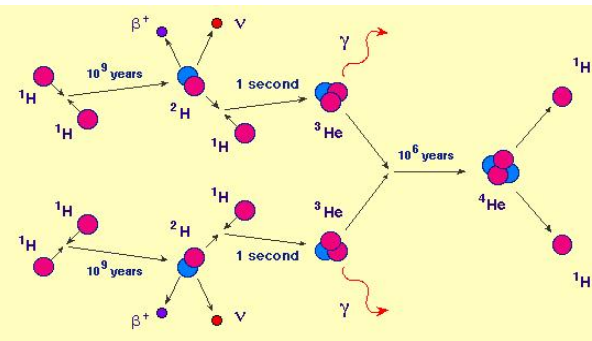
Introdução à Física Estelar

0. Coisas Administrativas e Introdução

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

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



Introdução à Física Estelar

Minha sala: Bloco A, Torre 3, Sala 625-3

Código NHZ3083-15

TPI: 4-0-4

Carga Horária: 48

Recomendação:

- segundo o catálogo de disciplinas: Noções de Astronomia e Cosmologia
- recomendações adicionais minhas: FUV, FVV, Estrutura da Matéria, FeMec, FeTerm, Eletromag, Física Quântica, ...

A disciplina é dada junto com a profa. Laura Paulucci:

Eu dou a primeira parte, sobre a história do conhecimento sobre estrelas (curto), a física envolvida e o Sol, 17/09-22/10,

e a profa. Laura, a segunda parte, sobre formação, evolução, morte e estágios “pós-morte” das estrelas (Anãs Brancas, Estrelas de Nêutrons e Buracos Negros), 24/10-03/12

Introdução à Física Estelar

O seguinte site trata da minha metade da disciplina:

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

Livro:

B. W. Carroll & D. A. Ostlie, An Introduction to Modern Astrophysics,
editora Pearson / Addison Wesley, capítulos 8-10, 12-15,
e partes de outros capítulos (2.4., 3.2., 3.6., 5.1.)

Bibliografia básica e complementar => site

Não cobro presença em aula*, nem entrega de listas.

*menos nas provas: É obrigatório fazer as duas, P1 e P2
(ou uma destas mais a sub da outra).

Introdução à Física Estelar

Provas

P1: 22/10/2016

P2: 03/12/2016

Sub: 05/12/2016

Rec: a determinar

Vista de provas: Quando eu estiver na minha sala
(irregular, é melhor combinar por e-mail)

Vista final: 17/12/2016, 10:00-12:00 e 14:00-16:00

Nota Final: $(P1+P2)/2$ ou $(P1+Sub)/2$ ou $(P2+Sub)/2$

Pós-Rec: a determinar

Conceitos: $A \geq 8,$ $8 > B \geq 6.5,$
 $6.5 > C \geq 5,$ $5 > D \geq 4.5$

Monitoria:

Não haverá monitoria. Vocês podem tirar dúvidas comigo.

Introdução à Física Estelar

Ementa

Estrutura estelar: equações de estrutura, equações de estado da matéria estelar, modelos politrópicos. Teoria da evolução estelar: equações de evolução, transporte de energia por radiação, condução e convecção, principais ciclos de queima nuclear, emissão de neutrinos, atmosferas estelares.

Estrelas: diagrama HR, formação das protoestrelas, contração pre-sequência-principal, evolução na sequência principal, evolução após a sequência-principal, queima de Hélio, estrutura de camadas das fases posteriores, ciclos nucleares e estabilidade das camadas, Fases finais e colapso gravitacional, explosões de supernovas, formação de anãs brancas, estrelas de nêutrons e buracos negros.

Estrelas Anãs Brancas. O limite de Chandrasekhar. Acresção em anãs brancas e supernovas tipo I: processos físicos nas explosões, curvas de luz e aplicações na cosmologia.

Estrelas de nêutrons: características observadas, composição interna, pulsares (modelo do dipolo magnético e alternativas).

Buracos negros: Acreção sobre buracos negros. Observações indiretas de buracos negros. Gamma Ray Bursts (GRBs): observações e modelos teóricos dos progenitores.

Introdução à Física Estelar

!!! Física estelar é, obviamente, um ramo da **física**, e

Grandezas físicas têm

Unidades



Universidade Federal do ABC

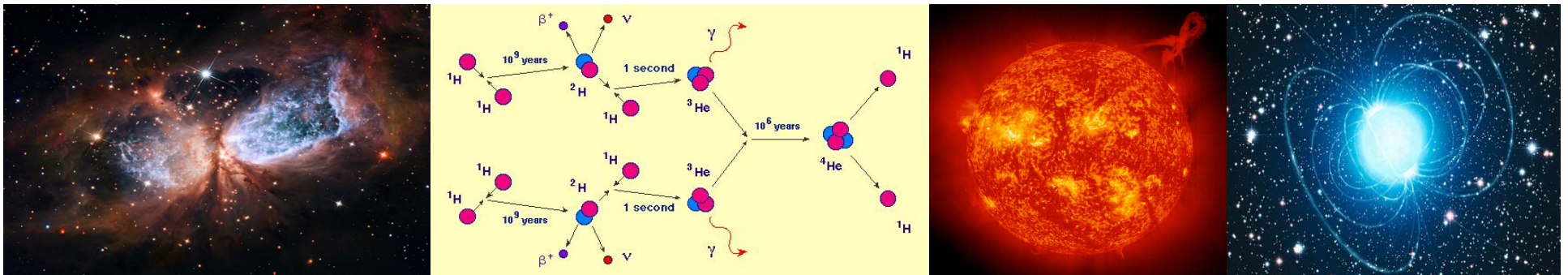
Introdução à Física Estelar

1 e 2. Alguns Definições e Lembretes

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

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



Astronomia

Wikipedia:

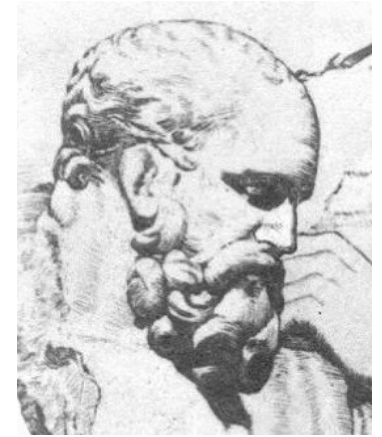
A **Astronomia**, ou **Astrofísica** (do grego astron (ἄστρον), "estrela" e nomos (νόμος), "lei" ou "cultura") é uma **ciência natural** que estuda **corpos celestes** (como estrelas, planetas, cometas, nebulosas, aglomerados de estrelas, galáxias) e fenômenos que se originam **fora da atmosfera da Terra** (como a radiação cósmica de fundo em micro-ondas). Ela está preocupada com a **evolução**, a **física**, a **química**, e o **movimento** de **objetos celestes**, bem como a **formação** e o **desenvolvimento** do **Universo**.

!! Astronomia **não** é **Astrologia**, q. d. **não** trata de horoscópios e afins.

O que são Estrelas?

Na **Grécia antiga** (Anaximandro, sexto século a. C.; seu aluno Anaximenes; Platão, ~350 a. C., seu aluno Eudócio de Cnido, Aristóteles, Ptolomeu e outros) e na **idade média** (Copérnico), estrelas eram os **pontinhos luminosos**, “de fogo” na **Esfera das Estrelas Fixas***, ou **Firmamento**, ou, alternativamente, **furinhos** nesta esfera, através daqueles passa a **luz divina**.

*Sem necessidade de chamá-las de “fixas”. Não houve estrelas “não-fixas”.



Anaximandro



Anaximenes



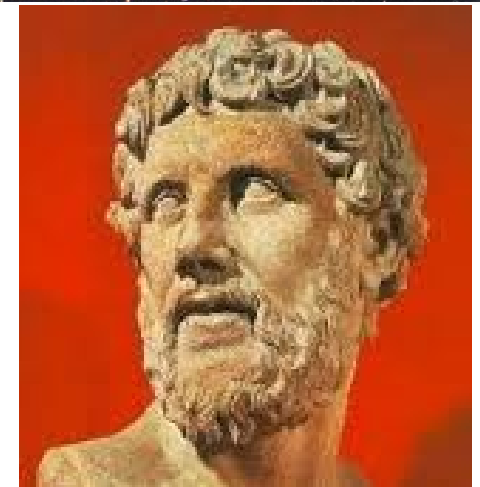
O que são Estrelas?

Nesta esfera, as estrelas são agrupadas em **constelações** simbolizando deuses e outras entidades da mitologia grega.



A constelação Orion

Um dos primeiros **catálogos estelares** foi compilado por **Hiparco** de Nicea por volta de 135 a. C. e continha pelo menos 850 estrelas.



Hiparco

O que são Estrelas?

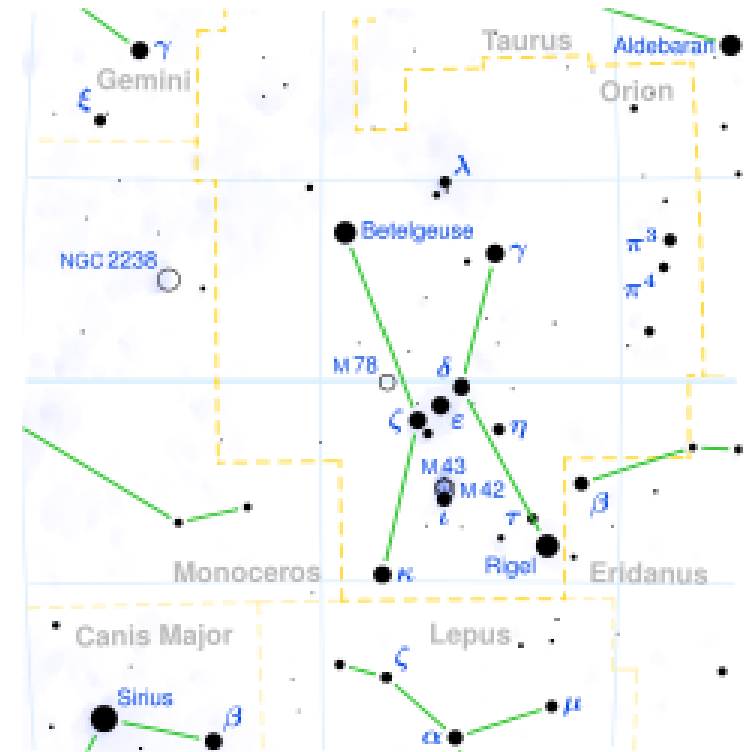
Nomes

Algumas estrelas têm nomes próprios: Vega, Sirius, Arcturus, ...

Estrelas também podem ser designadas pelo nome da constelação, daquela elas fazem parte, precedido por uma letra grega, que indica o brilho (aparente) da estrela,

α significando a estrela mais brilhante da constelação (designação de Bayer):
Exemplo: α Orionis = Betelgeuse.

Um sistema similar, usando números em lugar de letras gregas e ordenando por uma coordenada celeste, é o de Flamsteed, naquele Betelgeuse é 58 Orionis.



O que são Estrelas?

Nomes

Já que hoje conhecemos muito mais estrelas, este sistema de nomeação não é mais viável.

Elas têm, em geral, números em catálogos. Exemplo: uma estrela no catálogo de Henry Draper se chama HD225300.



O observatório Pan-STARRS, responsável por um catálogo de mais de 3 bi. de estrelas

Às vezes, sondas ou telescópios produzem seus próprios catálogos:

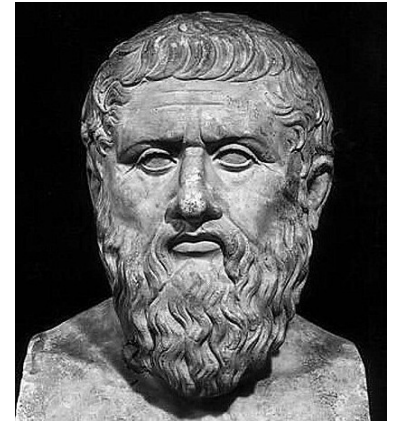
Exemplo: A estrela Kepler-186 foi observada pela sonda Kepler.

O que são Estrelas?

Voltando pros Gregos:

A **esfera** de **estrelas gira** ao **redor** da **Terra** em aproximadamente 23 horas e 56 minutos, em torno de um **eixo** que passa pelo **polo** norte **celeste** (e pelo polo sul celeste, mas

este é invisível a partir da Grécia e do resto da Europa), no sentido do **leste** para o **oeste**.



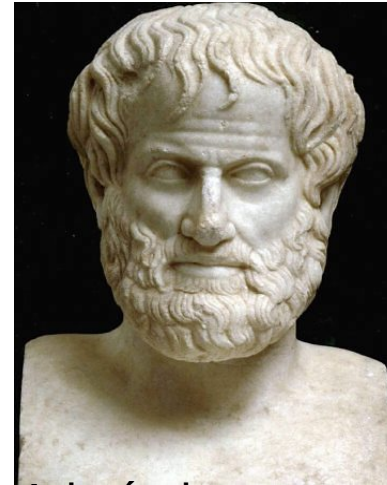
Platão



Foto de longa exposição do céu noturno

O que são Estrelas?

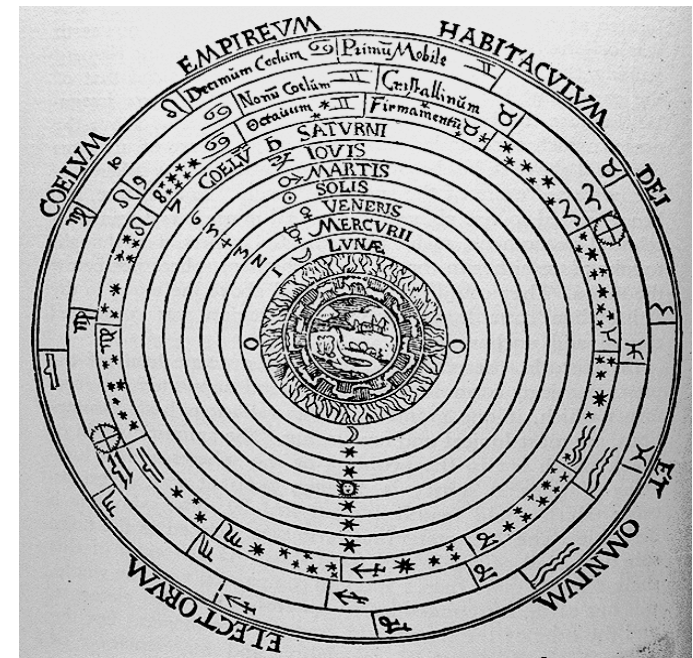
Além das estrelas, houve **sete astros** que **não** seguem este **movimento** exatamente, mas **orbitam** a **Terra** em outras maneiras, e foram chamados de **planetas** (“estrelas errantes”):
O **Sol**, a **Lua**, **Mercúrio**, **Vênus**, **Marte**, **Júpiter** e **Saturno**.



Aristóteles



Ptolomeu



Representação esquemática do modelo geocêntrico

O que são Estrelas?

Heráclides do ponto (388 - 315 a. C.):

Foi o primeiro a propor, que o **movimento aparente** das **estrelas** seria devido à **rotação** da **Terra**. A Terra giraria em torno do seu eixo em um dia na direção do oeste pro leste (“refutado” por Aristóteles). Assim, o **firmamento** fica realmente **fixo**.



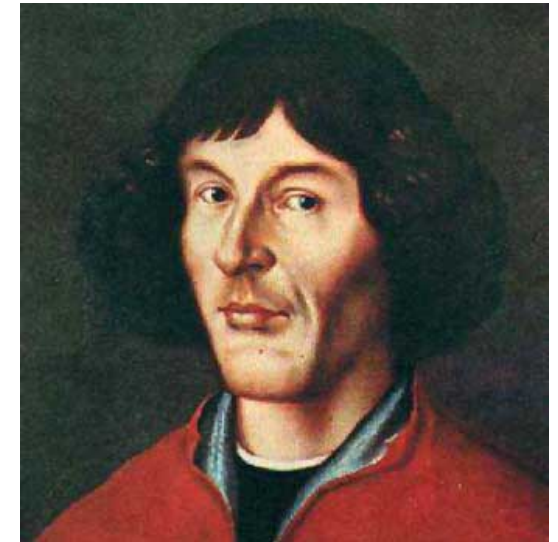
Heráclides do Ponto

O que são Estrelas?

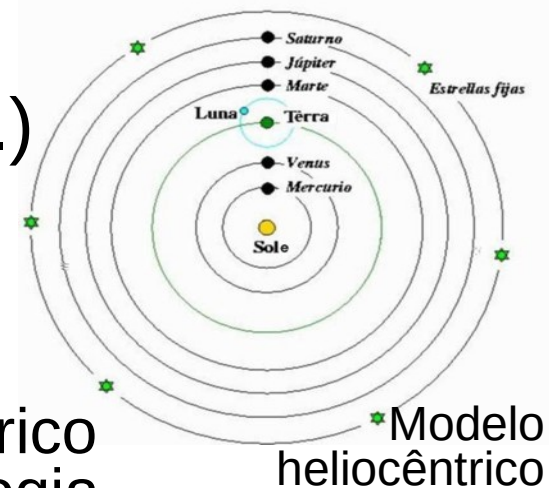
1543: **Copérnico: Modelo Heliocêntrico**

O Copérnico propôs isto também, e que o **centro** da **esfera** não fosse a Terra, mas o **Sol**, segundo ele **imóvel** (e não é mais considerado um planeta).

A **Terra** (que agora é um planeta) e os outros **planetas** (Mercúrio, Vênus, Marte, Júpiter e Saturno) **giram** em torno do **Sol**, (A Lua, que é nem estrela, nem Sol, nem planeta, gira realmente em torno da Terra.)



Nicolau Copérnico

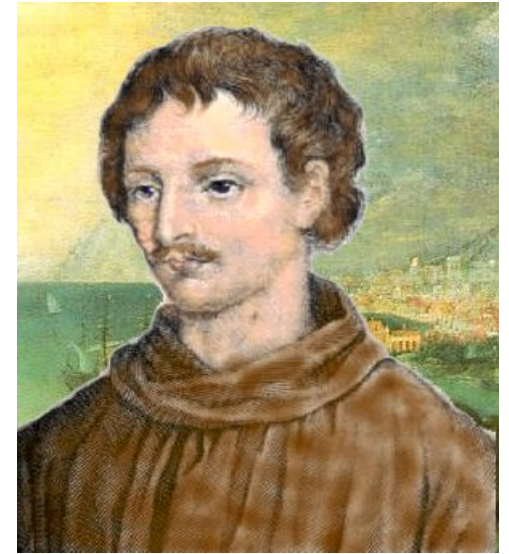


Mais sobre os modelos geocêntrico vs. heliocêntrico nas disciplinas Noções de Astronomia e Cosmologia e História da Astronomia.

O que são Estrelas?

Giordano Bruno (1548-1600):

Frade dominicano italiano, teólogo, filósofo e escritor, sugeriu que o **Universo** seria **infinito**, que o **Sol** seria uma **estrela** como as estrelas fixas, que existiriam **planetas** girando em torno de **outras estrelas**, e que nestes poderia existir **vida inteligente**.



Giordano Bruno

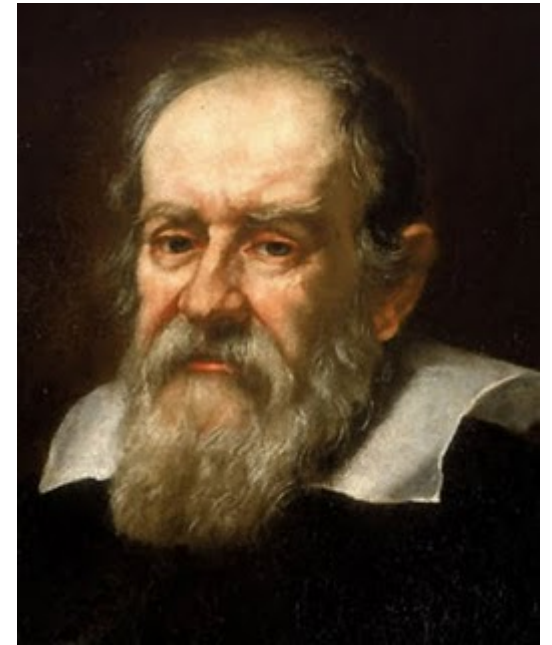
Foi condenado e queimado pela inquisição.

O que são Estrelas?

Galileu Galilei (1564-1642) foi o primeiro a apontar um telescópio pro céu (1609), e é considerado o pai da **astronomia observacional moderna**.

Ele observou que há **mais estrelas**, do que aquelas **visíveis a olho nu**, i. e. a **Via Láctea** não é simplesmente uma nuvem, mas consiste de **estrelas**.

Além disso, ele observou pela primeira vez as **crateras da Lua**, as **manchas solares**, as **fases da Vênus** e as **Luas de Júpiter**, **corroborando** o modelo **heliocêntrico** de Copérnico, e fez contribuições importantes para a mecânica.



Galileu Galilei



A luneta de Galileu

O que são Estrelas?

Em 1718, Edmund **Halley** confirmou a hipótese de **Macrobius** (AD 400), de que as **estrelas** se **movimentam** no céu.

Halley conseguiu mostrar, que Sirius, Arcturus e Aldebaran tinham se deslocado por $> 0.5^\circ$ no céu em relação à posição determinada por Hiparco 1850 anos antes.

Movimento **angular** no “plano” do céu é chamado **movimento próprio**.

Movimento na direção da **linha de visada** é chamado **movimento radial**, e pode ser detectado relativamente facilmente pelo **efeito Doppler** da luz emitida pela estrela.



Macrobius com filho



Halley

O que são Estrelas?

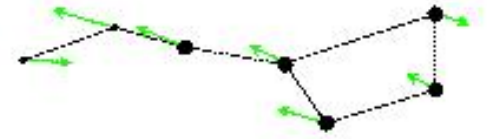
Por isto, as constelações mudam de aparência no decorrer das milênias.

A maioria das estrelas se movimentam por poucos milissegundos de arco por ano.

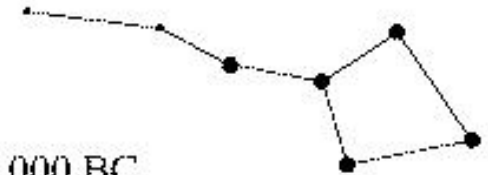
A estrela com o maior movimento próprio, a estrela de Barnard, se desloca por $\sim 10.3''$ /ano.

Nada de estrelas fixas!

Today



50,000 BC



Urso maior 52000 anos atrás e hoje

O que são Estrelas?

Quão Longe são as Estrelas?

O primeiro a medir a **distância** até uma estrela fixa foi **Friedrich Bessel**, em 1838, por um método chamado **paralaxe**, um tipo de triangulação usando a órbita da Terra como base (vide daqui a pouco)

Ele achou que 61 Cygni se encontra a $\sim 10^{14}$ km daqui, distância típica para as estrelas mais próximas.

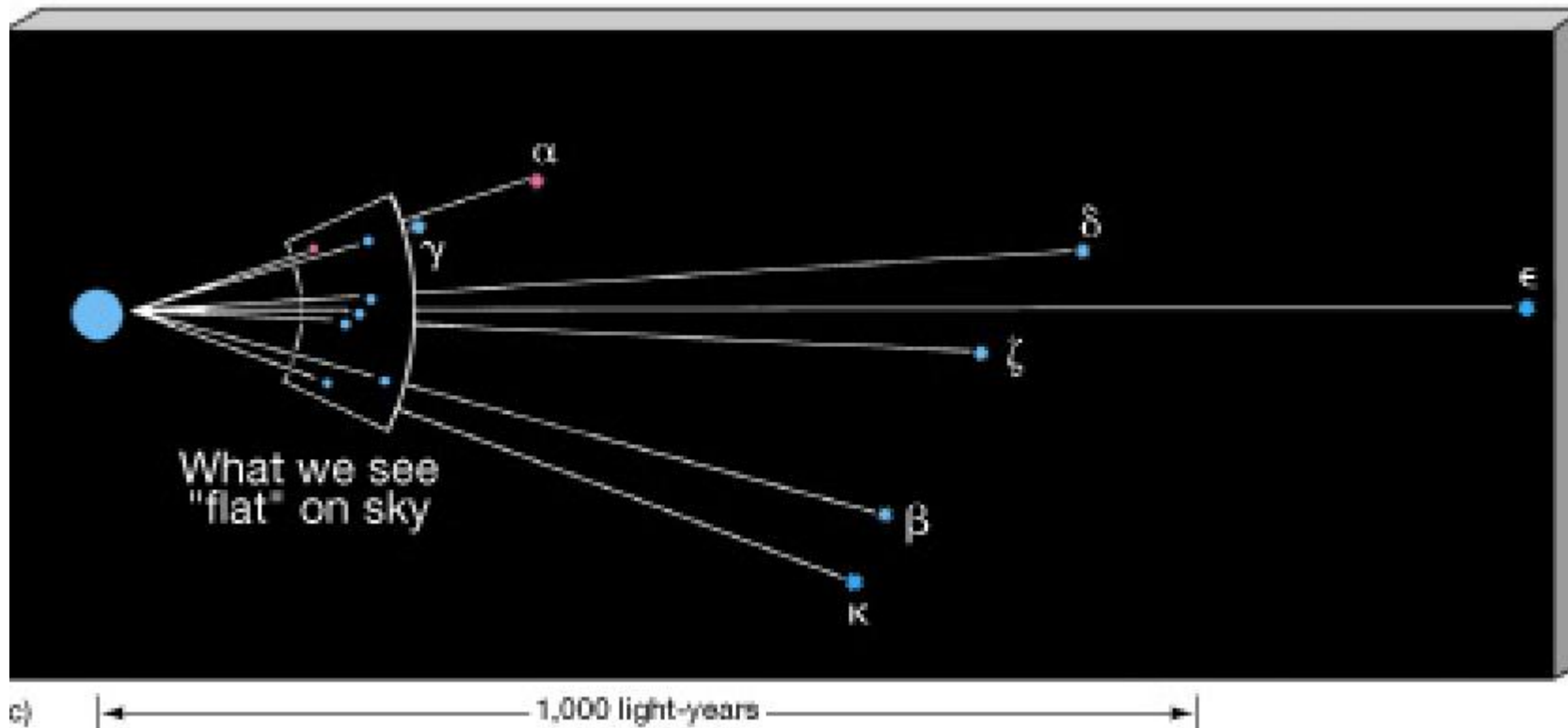
Estrelas são **muito distantes** mesmo!



Friedrich Wilhelm Bessel
(1784-1846)

O que são Estrelas?

Quão Longe são as Estrelas?



Resultado colateral: A medição das distâncias até as estrelas mostra, que as **constelações não** são **agrupamentos** reais de estrelas.

O que são Estrelas?

Para serem visíveis em distâncias tão altas por um tempo tão longo (pelo menos umas milhares de anos, mas podem ser Giga-anos (Gyr)), estrelas precisam de uma **fonte** de **energia** bem **forte**.

A maioria das fontes que conhecemos (energia potencial gravitacional*, química, radioativa, ...) não são suficientemente rendosos.

*A energia potencial gravitacional pode ser muito alta, sim, mas só para massas muito mais concentradas que em estrelas comuns, i. e. Buracos Negros.

A fonte de energia que explica a alta luminosidade das estrelas é a **fusão nuclear**, pois neste processo, massa é transformada em energia, o fator de conversão sendo $c^2 = 9 \cdot 10^{16} \text{ m}^2/\text{s}^2$.

O que são Estrelas?

=> Def. **Estrela**: Uma grande e luminosa **esfera** de **plasma** ou **gás quente**, cuja fonte de energia é a **fusão nuclear estável** no seu interior.

Esta definição classifica os pontinhos luminosos como estrelas, mas não objetos menos luminosos como Anãs Marrons (“estrelas frustradas”, que podem fazer alguma fusão nuclear no interior, mas não estável), planetas, Anãs Brancas (“cadáveres de estrelas de baixa massa”), Estrelas de Nêutrons (“cadáveres de estrelas massa mais alta”), ...

O que são Estrelas?

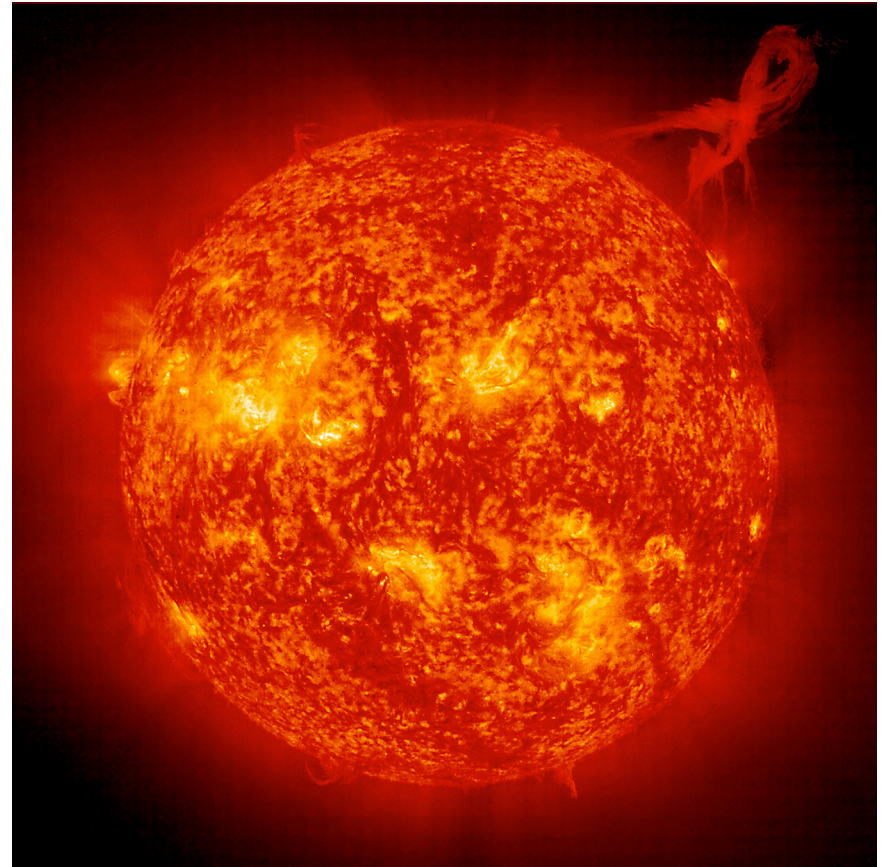
Segundo esta definição, o **Sol** também é uma **estrela** (e não um planeta).

Por se encontrar muito mais **próximo** da Terra que as outras estrelas,

a $1 \text{ AU} = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$, o Sol é de longe a estrela **melhor estudada**.

Até faz pouco, era a única estrela observável com uma certa **resolução angular**

(e ainda é quase a única, e as poucas outras podem ser resolvidas em poucos píxels).



O que são Estrelas?

Para muitos estudos de estrelas, o **Sol** serve como **referência**.

Usa se, por exemplo, as unidades

massa solar:

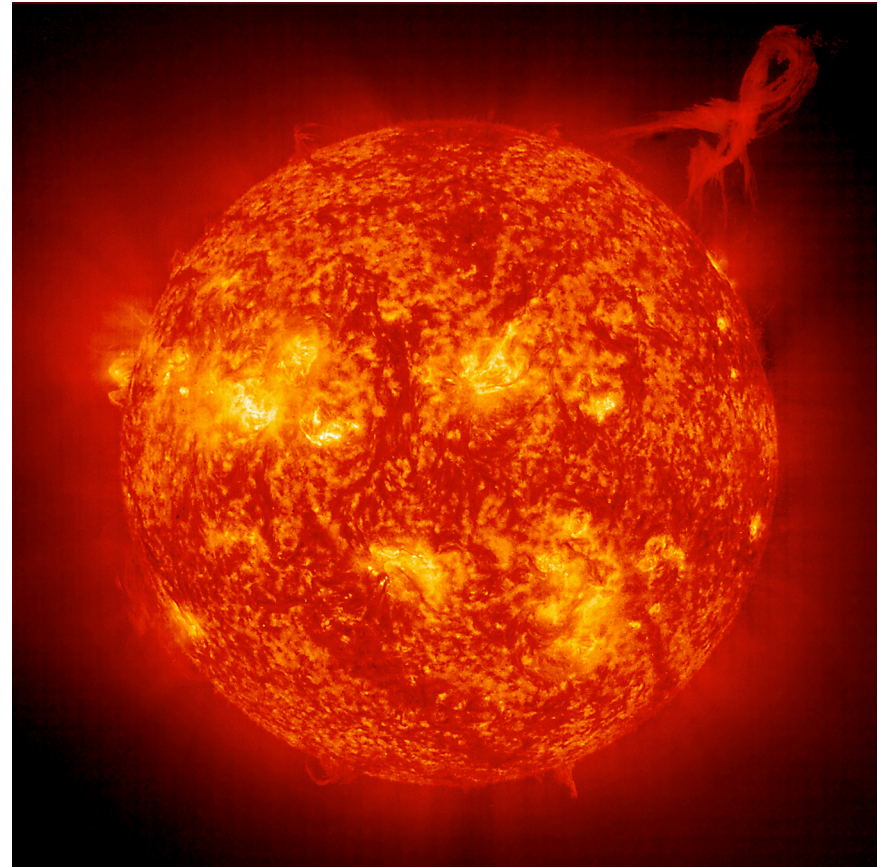
$$M_{\odot} = 1,989 \cdot 10^{30} \text{ kg},$$

luminosidade solar:

$$L_{\odot} = 3,827 \cdot 10^{26} \text{ W},$$

e **raio solar:**

$$R_{\odot} = 6,960 \cdot 10^8 \text{ m}.$$



Algumas Unidades de Distância

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

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

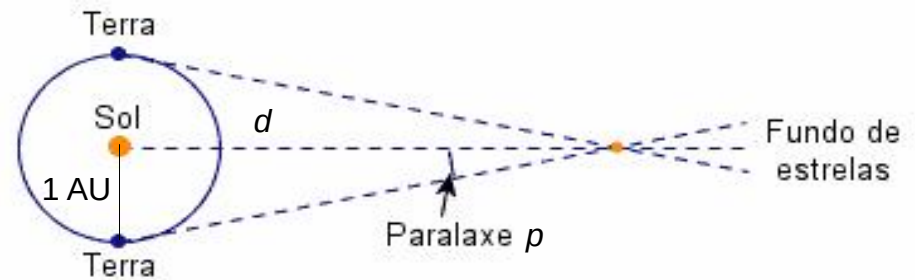
É normalmente usada para distâncias dentro do **Sistema Solar** (ou sistemas de tamanho comparável).

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.

Alguns Métodos de Medir Distâncias

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

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.



Satélite Hipparcos

Alguns Métodos de Medir Distâncias

Velas Padrão

Para distâncias além do alcance da paralaxe podem ser usados vários tipos de **Velas Padrão**

Vela Padrão: Objeto, cuja **luminosidade intrínseca** L é **conhecida**.

Medindo o **fluxo** F da luz do objeto que chega em nós, e usando o fato de que o fluxo cai com o quadrado da distância d :

$$F = L/4\pi d^2,$$

dá para determinar a **distância** até o objeto: $d = \sqrt{L/4\pi F}$

Alguns Métodos de Medir Distâncias

Velas Padrão

Algumas velas padrão são: a **Sequência Principal** de **aglomerados estelares** (=> aula evolução estelar), **RR Lyrae** (um tipo de estrelas variáveis, => aula estrelas variáveis), **Cefeidas** (outro tipo de estrelas variáveis), **galáxias espirais** (relação Tully-Fisher), **Supernovas Ia** (=> aula morte estelar), e outras.

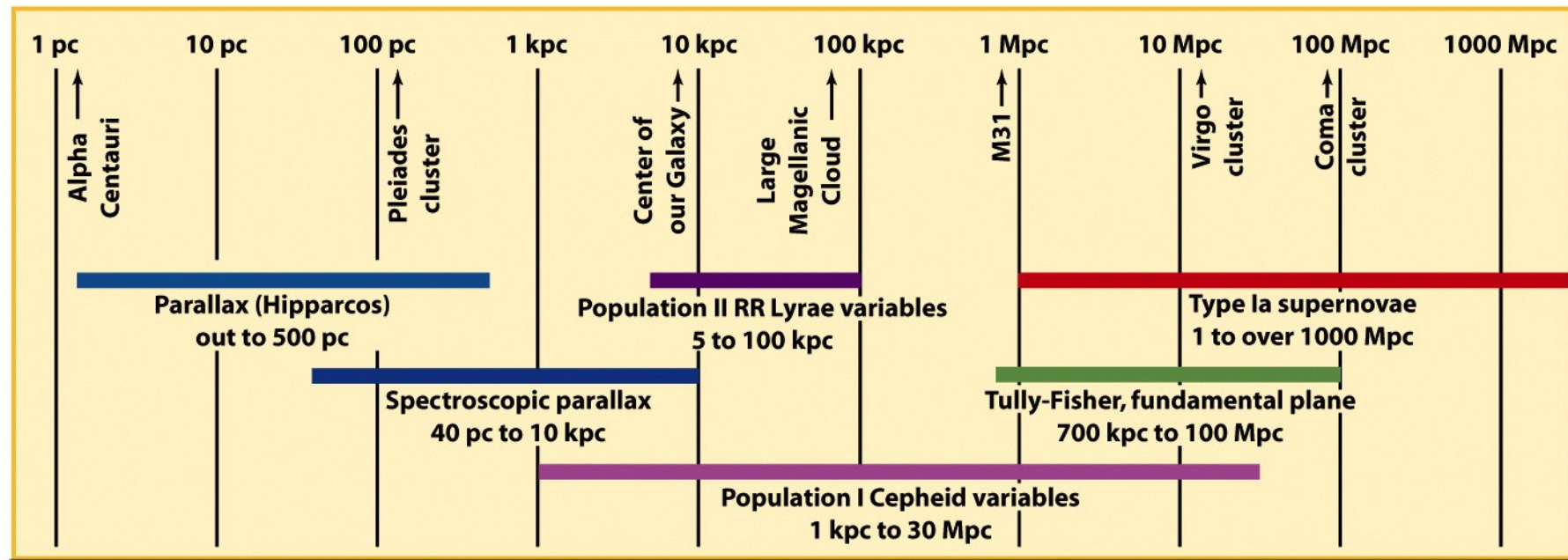
Problemas:

- Para cada tipo de vela padrão, o método tem que ser **calibrado**, i.e. a distância até um destes objetos tem que ser determinado por um outro método.
- **Poeira interestelar** (=> aula Matéria Interestelar e Formação Estelar) pode **absorver** parte da **luz**, levando a uma sobre-estimação da distância até o objeto (ou até o objeto usado pra calibração).

Alguns Métodos de Medir Distâncias

O Redshift

E como se **mede** as **distâncias** até **galáxias** muito distantes? Maioria deles são tão **longes**, que os métodos que conhecemos até agora (paralaxe, ajuste da Sequência Principal, Velas Padrão como Cefeidas, etc.) não funcionam, por que não dá pra observar paralaxes, estrelas individuais, Cefeidas, etc.



Alguns métodos de medição de distâncias

Alguns Métodos de Medir Distâncias

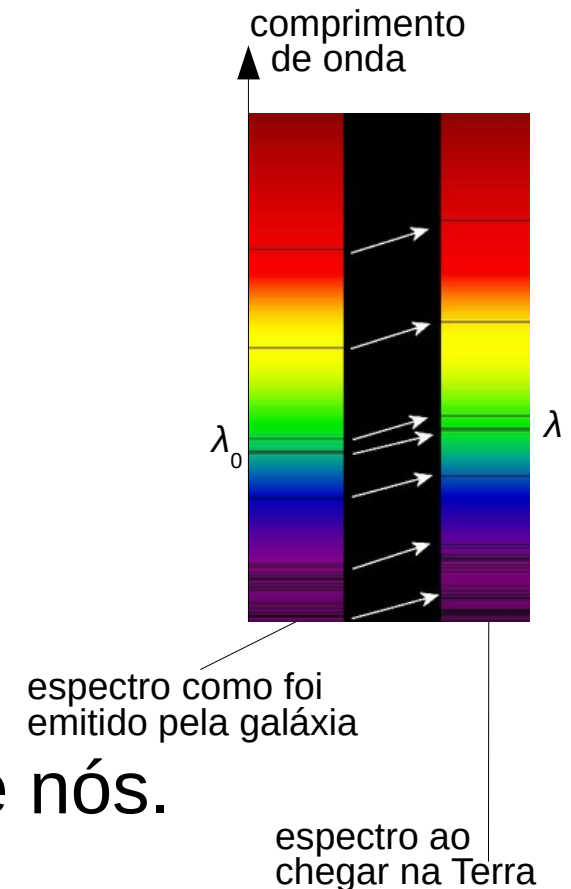
O Redshift

Em 1914, V. M. **Slipher** descobriu, que os **espectros** da maioria das **galáxias** são **deslocados** para **comprimentos de onda maiores** que os de repouso.

Eles sofrem um **redshift** (“deslocamento para o vermelho”).

Interpretando este **redshift** como um **efeito Doppler**, isto significaria, que estas galáxias estariam se **afastando** de nós.

Uma exceção notável é a galáxia de Andrômeda, cujo espectro sofre um **blueshift**, e que está se aproximando.



Alguns Métodos de Medir Distâncias

O Redshift

Na verdade, **não** é exatamente um **efeito Doppler**. É a **expansão do Universo** (\Rightarrow aulas Cosmologia), que “**estica**” os **comprimentos de onda** da luz que o permeia.

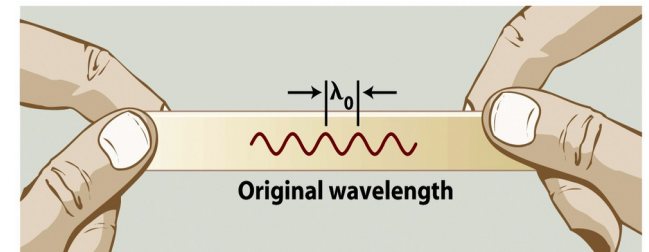
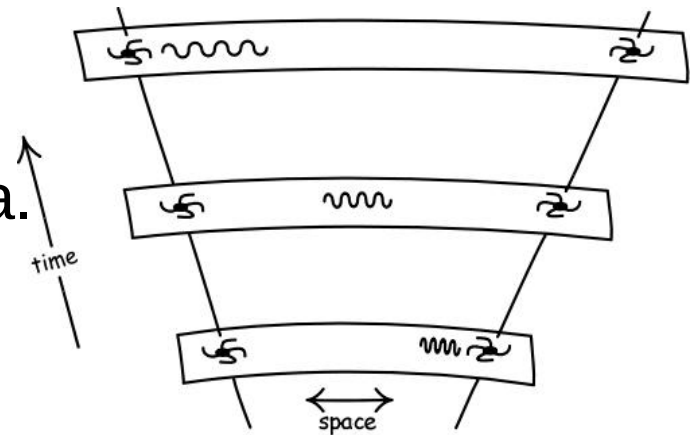
Os comprimentos de onda são esticados por um fator $1+z$, onde z é chamado de **redshift (cosmológico)**:

$$\lambda = (1+z) \cdot \lambda_0$$

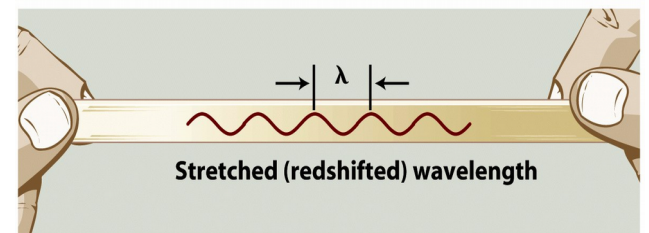
Para z pequenos ($\ll 1$), uma galáxia com redshift z está se **afastando** com velocidade

$$v = c \cdot z$$

! As próprias **galáxias não** estão **expandindo**. Elas são **gravitacionalmente ligadas**. É o **espaço entre as galáxias** que está **expandindo**.



(a) A wave drawn on a rubber band ...



(b) ... increases in wavelength as the rubber band is stretched.

Alguns Métodos de Medir Distâncias

Lei de Hubble-leMaître (1929):

Edwin Hubble (e independentemente, Georges leMaître em 1927) descobriu, que estas **velocidades** de **recessão** das **galáxias** distantes são **proporcionais** às **distâncias** até elas (medidas usando cefeidas):

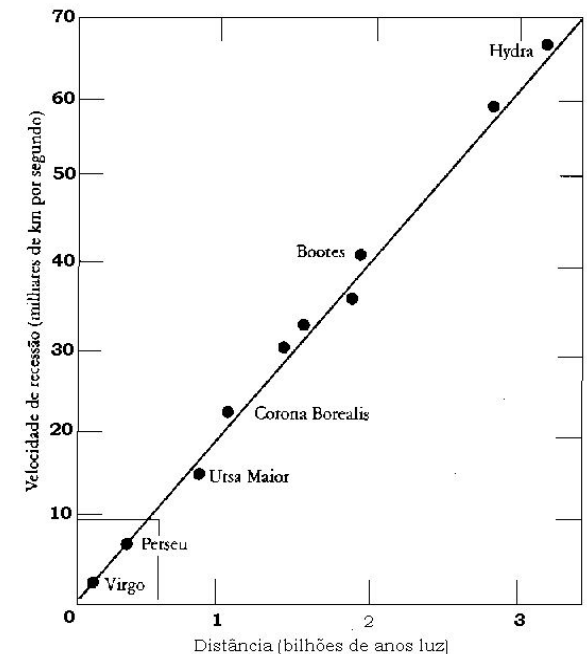
$$v = H_0 \cdot d$$

H_0 : **constante de Hubble**, medida para a **taxa da expansão** (inclinação da reta no gráfico).

O valor da constante de Hubble foi um assunto controverso por décadas, mas hoje as opiniões convergiram para um valor de $\sim 70 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$.

Adotemos $67.7 \text{ km}/(\text{s} \cdot \text{Mpc})$.

Diagrama de Hubble: velocidade vs. distância.



Alguns Métodos de Medir Distâncias

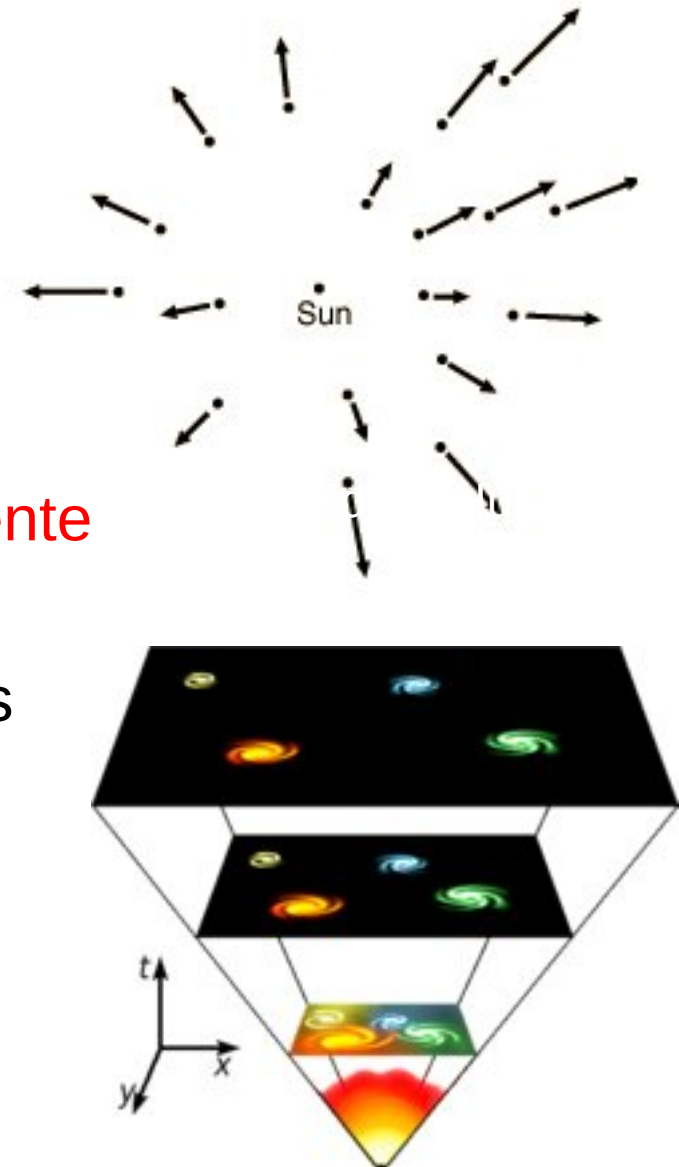
Lei de Hubble-leMaître (1929):

Se as velocidades de recessão das galáxias são proporcionais às suas distâncias até nós, então estamos no **centro** da **expansão**?

Afinal, a Terra é o **centro** do **Universo**?

Não, num Universo **expandindo uniformemente** (homogenea- e isotropicamente), **qualquer ponto** “vê” os outros pontos se afastando com velocidades proporcionais às suas distâncias.

=> **Qualquer ponto** se “sente” o **centro** do **Universo**.



Alguns Métodos de Medir Distâncias

Lei de Hubble-leMaître (1929):

Além de provar a expansão do Universo, a Lei de Hubble nós fornece um **método para medir a distância** até uma galáxia:

medir z através de uma linha espectral conhecida:

$$z = \lambda/\lambda_0 - 1$$

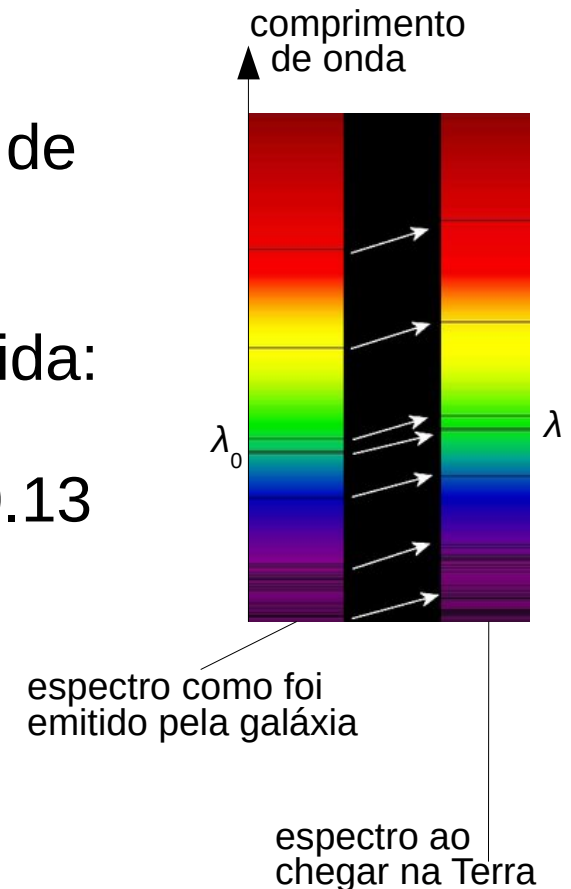
=> **Distância** $d = v/H_0 = c \cdot z/H_0$ válido para $z \leq 0.13$

até um *redshift* de 2, a fórmula

$$d \approx c/H_0 \cdot [(z+1)^2 - 1]/[(z+1)^2 + 1]$$

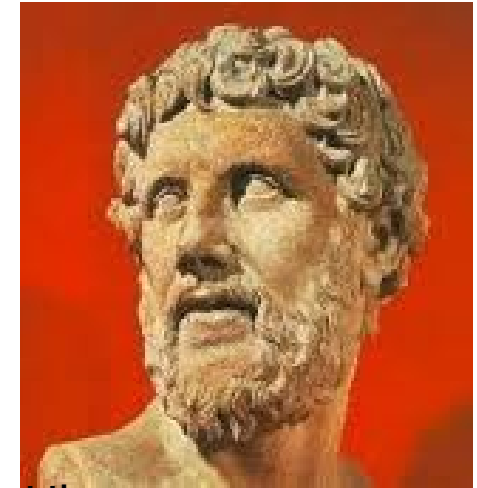
é uma boa aproximação.

Mais sobre *redshift*, expansão do Universo e outros assuntos nas disciplinas Noções de Astronomia e Cosmologia e Introdução à Cosmologia.



Magnitudes Aparentes

Mais de 2000 anos atrás,
o astrônomo grego **Hiparco**
(o mesmo do catálogo estelar)
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

Sírius (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**:

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

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

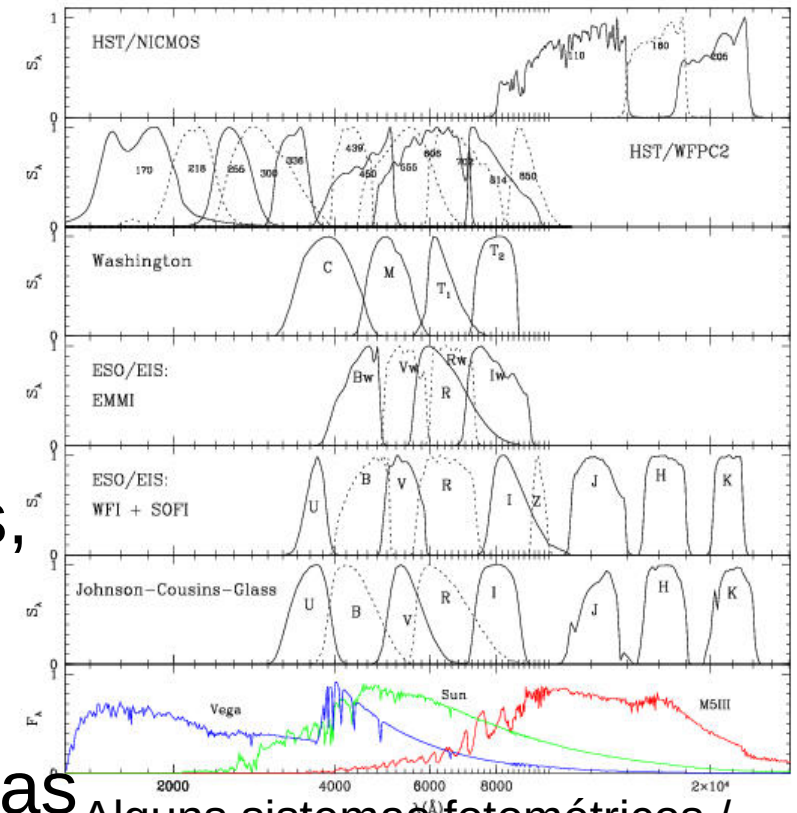
!! C_{bol} , que seria $2.5 \cdot \log_{10} F_{0,\text{bol}}$ não é ligado à Vega; foi escolhido livremente (\Rightarrow dois slides pra frente), tal que $F_{0,\text{bol}}$ não tem significado.

Cores

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 câmera 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 $B - V = -2.5 \cdot \log_{10} (F_B / F_V) + C_{B-V}$,

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.

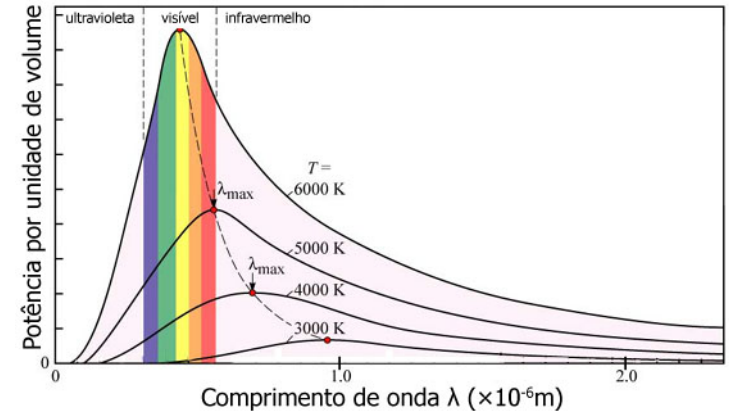
Não é difícil mostrar, que a **cor** de um objeto **independe** da sua **distância** (bom exercício para casa).

Cores

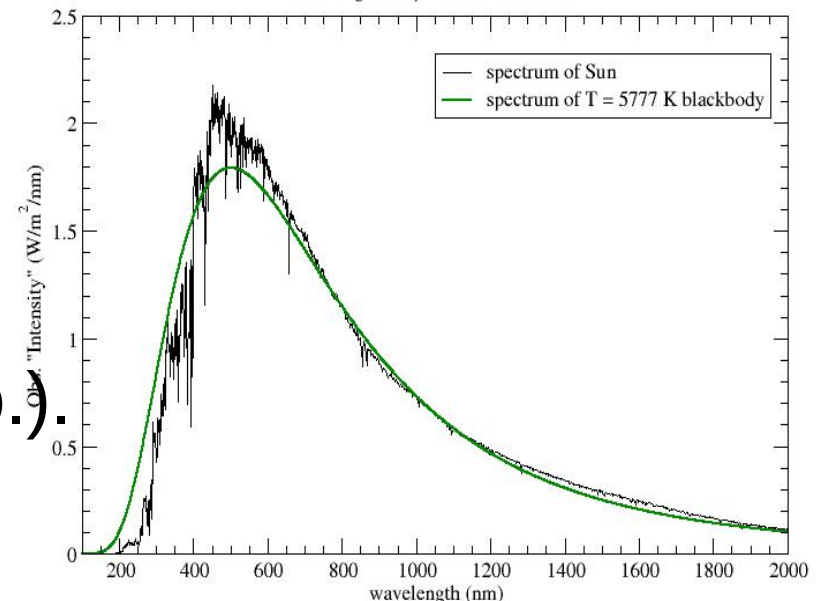
Lembrete de Estrutura da Matéria,
Física Quântica, etc.
(Corpo Negro, Lei de Wien):

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

Mecânica Newtoniana

Baseado nos conceitos de **inércia** e **aceleração**, introduzidos por **Galileu**, o físico e matemático Sir **Isaac Newton** (1642-1727), publicou na sua obra prima, *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica* (1687) as três **leis fundamentais da mecânica**, ou **Leis de Newton** (=> Fenômenos Mecânicos):

1. Se $F = 0$, então $\mathbf{v} = \text{constante}$ (lei de inércia)

2. $\mathbf{F}_{\text{tot}} = m \cdot \mathbf{a}$

3. $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$

(actio = reactio)



Sir Isaac Newton

Mecânica Newtoniana

Ele também achou a **Lei da Gravitação**,
descrevendo a força atrativa entre
duas massas M e m na distância r :

$$F = G \frac{Mm}{r^2}$$

onde $G = 6.673 \cdot 10^{-11} \text{ N m}^2 \text{ kg}^{-2}$

é a constante gravitacional universal

vetorial: $\mathbf{F} = -\frac{GMm\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} = -\frac{GMm}{r^2}\hat{\mathbf{r}}$,

onde \mathbf{r} (ou \mathbf{r}_{mM}) é o vetor apontando de M para m , $\mathbf{r} = \mathbf{r}_m - \mathbf{r}_M$,
 \mathbf{r}_M e \mathbf{r}_m sendo os vetores posição de M e m , resp. ($\Rightarrow |\mathbf{r}| = r$)
e $\hat{\mathbf{r}}$, o vetor unidade na direção de \mathbf{r} .



Sir Isaac Newton

Mecânica Newtoniana

Sendo uma **força conservativa**, podemos associar uma **energia potencial** a estas **duas massas**, tomando a situação “massas totalmente separadas” como ponto zero, $r_0 = \infty$:

$$U = \int_{r_0}^r -F dr = \int_{\infty}^r -GMm/r^2 dr = -GMm/r$$

Assim, a **energia mecânica total** de um corpo/partícula de massa m e velocidade v na distância r da massa M é:

$$E_{\text{tot}} = K + U = \frac{1}{2}mv^2 - GMm/r$$

A **velocidade de escape** é aquela, para aquela a **energia total é nula**:

$$\frac{1}{2}mv_{\text{esc}}^2 - GMm/r = 0 \Rightarrow v_{\text{esc}} = \sqrt{2GM/r}$$

Mecânica Newtoniana

Para deduzir duas leis muito importantes na astronomia precisamos do **princípio da superposição**, que afirma que **força e potencial gravitacional** que duas massas M_1 e M_2 **juntas** exercem sobre uma terceira massa m é a **soma** das duas **forças/potenciais individuais** (\mathbf{r}_1 é o vetor apontando de M_1 para m , $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_{mM1} = \mathbf{r}_m - \mathbf{r}_{M1}$, \mathbf{r}_2 idem):

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{F}_{mM1} + \mathbf{F}_{mM2} = -Gm \cdot (M_1 \mathbf{r}_1 / r_1^3 + M_2 \mathbf{r}_2 / r_2^3),$$
$$U_m = U_{mM1} + U_{mM2} = -Gm \cdot (M_1 / r_1 + M_2 / r_2).$$

Uma **distribuição contínua** de **massa** $\rho(\mathbf{r})$ exerce sobre m :

$$\mathbf{F}_m = -Gm \cdot \int \rho(\mathbf{r})(\mathbf{r}_m - \mathbf{r}) / |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}|^3 dV,$$
$$U_m = -Gm \cdot \int \rho(\mathbf{r}) / |\mathbf{r}_m - \mathbf{r}| dV.$$

O Teorema da Casca Esférica

(Dedução no quadro): Uma **casca esférica** de raio a e **densidade** (por unidade de área) **constante** ρ (\Rightarrow a massa da esfera é $M = 4\pi a^2 \rho$) **exerce** sobre uma **massa** m na **distância** r do seu **centro** a **força** (na direção do centro da esfera):

$$F(r) = \begin{cases} GMm/r^2 & \text{para } r > a \\ 0 & \text{para } r < a \end{cases}$$

ou seja: Sobre **pontos externos** ela exerce a **mesma força** como se a sua **massa** estivesse concentrada no seu **centro**, e sobre **pontos internos**, **nenhuma** força.

Em consequência, uma **distribuição esfericamente simétrica** de **massa**, $\rho = \rho(r')$, exerce sobre uma massa m na distância r do seu centro a **força**:

$$F(r) = GM_r m / r^2, \text{ onde}$$

$M_r = \int_0^r dM = \int_0^r \rho dV = \int_0^r \rho(r') \cdot 4\pi r'^2 dr'$ é a **massa contida** na esfera com raio r .

O Teorema do Virial

Um teorema bastante útil, e que vale para qualquer **sistema** de partículas / corpos / ... **gravitacionalmente ligado** e em **equilíbrio** (se diz equilíbrio virial), é o **Teorema do Virial**:

$$-2\langle K \rangle = \langle U \rangle, \text{ ou}$$
$$\langle E \rangle = \frac{1}{2} \cdot \langle U \rangle$$

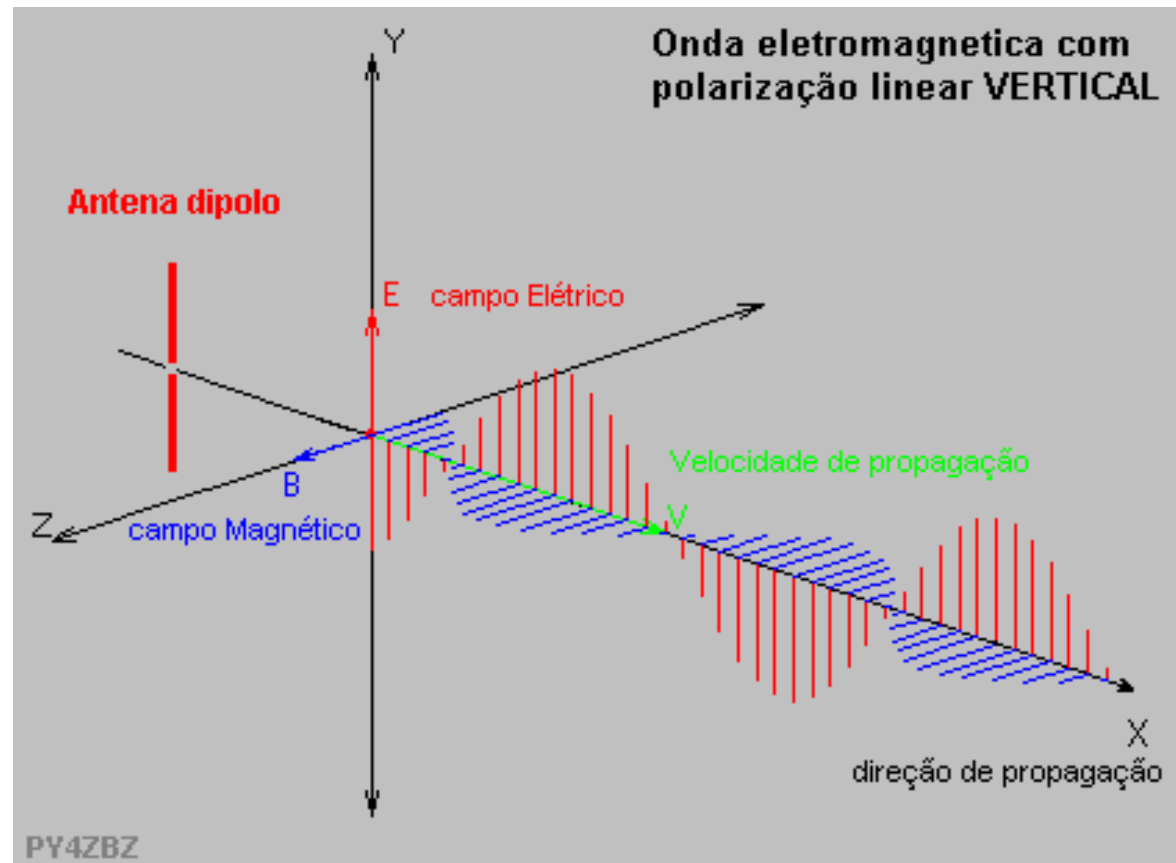
onde $\langle K \rangle$ a **energia cinética total** do sistema, $\langle U \rangle$ a **energia potencial total** e $\langle E \rangle$ a **energia mecânica total**, todas **em média** no tempo (dedução no quadro).

É útil para **determinar** as **massas totais** de conjuntos de partículas, estrelas, galáxias, ...; estimar a **energia** produzida em **estrelas**; estimar a **massa mínima** de uma **nuvem** de **gás** para **colapsar**, estimar a **energia transferida** na **colisão** de **galáxias**, ...

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 de Estrutura da Matéria, Física Quântica, etc.:
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 $h = 6.626 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} =$
constante de Planck

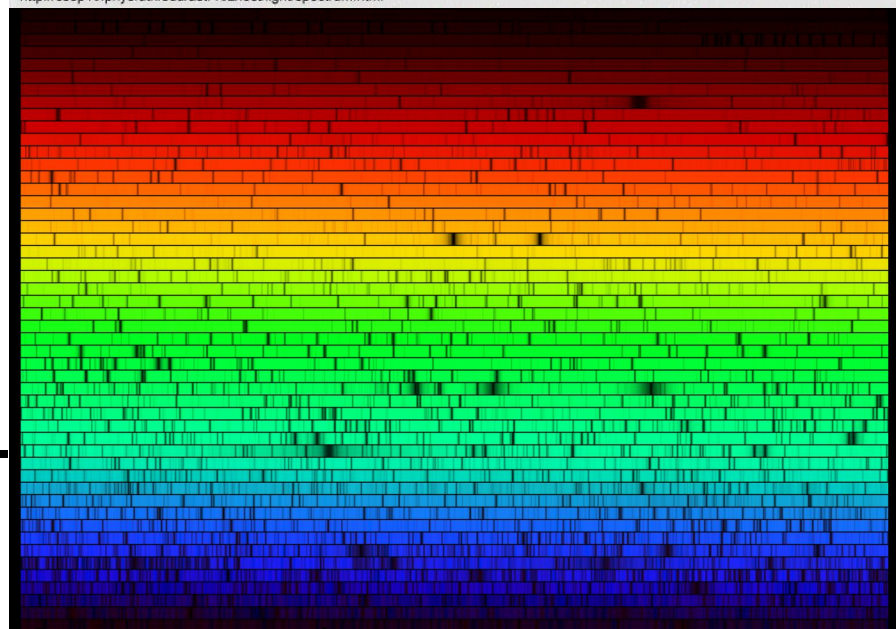
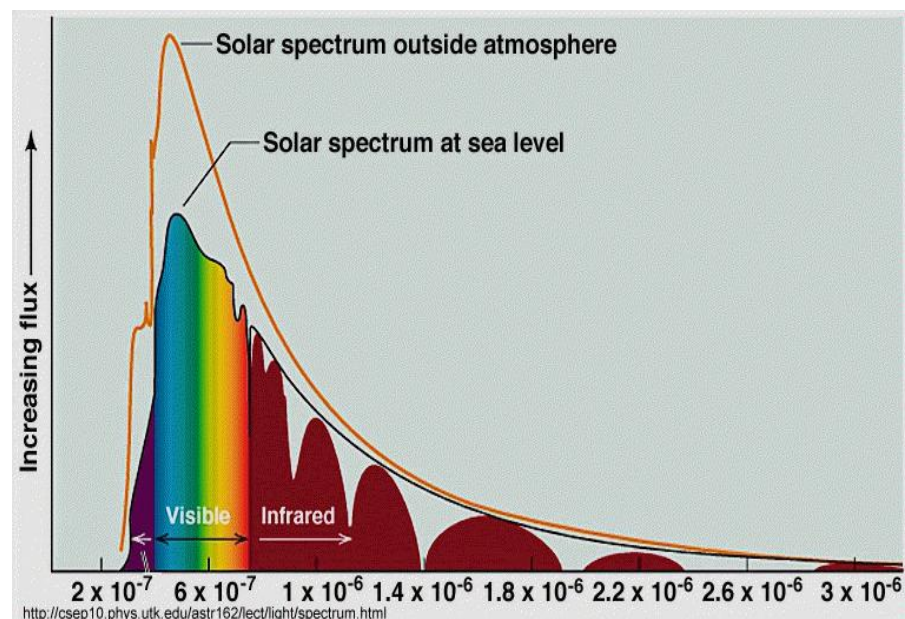


Louis V. de Broglie

Linhas Espectrais

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**.



O espectro solar

A Interação Matéria-Luz

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

(=> Estrutura da Matéria, Física Quântica, Interações Atômicas e Moleculares, ...).

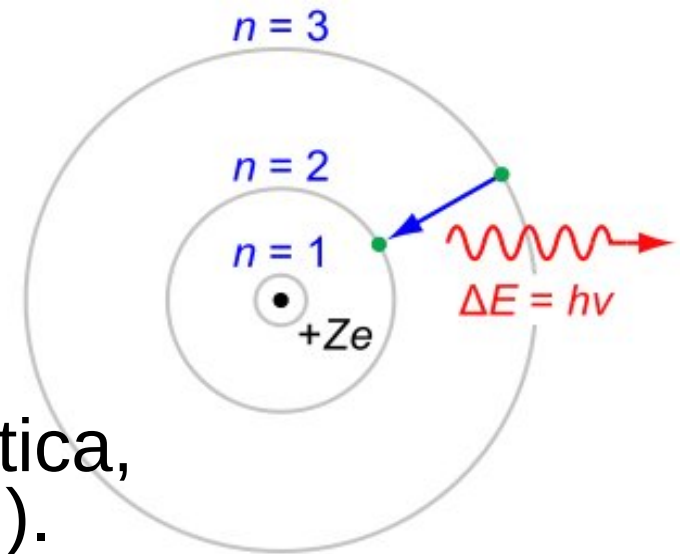
Os átomos e moléculas têm diferentes **níveis** de **energia**, dependendo do estado orbital dos elétrons, do estado de vibração, etc.

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



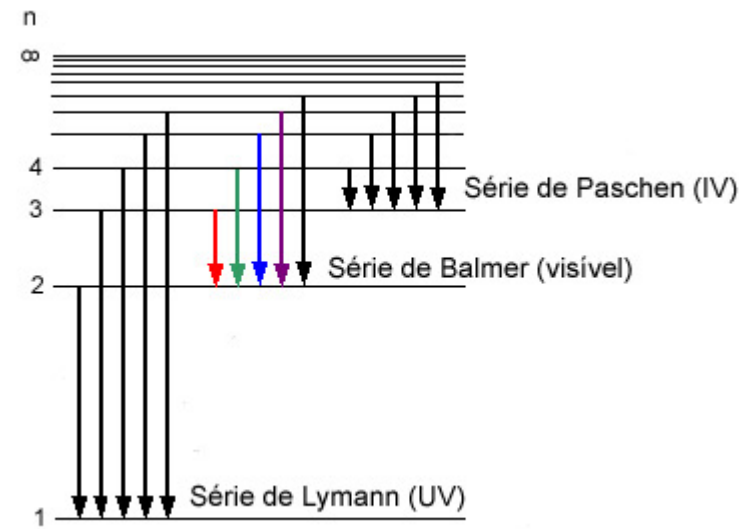
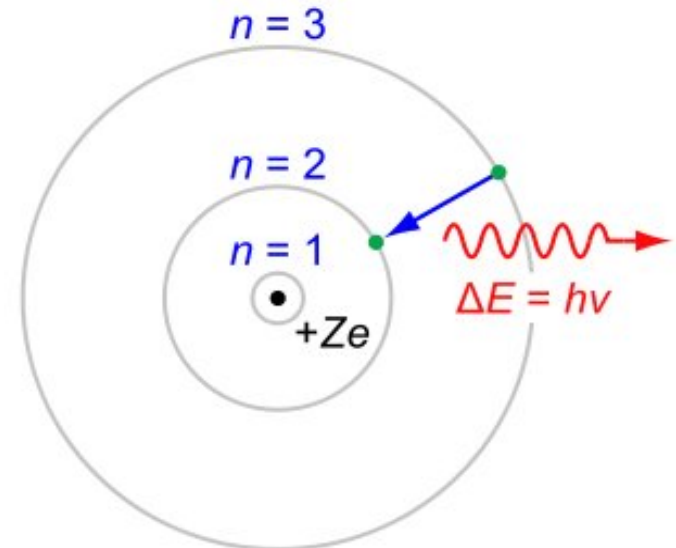
A Interação Matéria-Luz

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

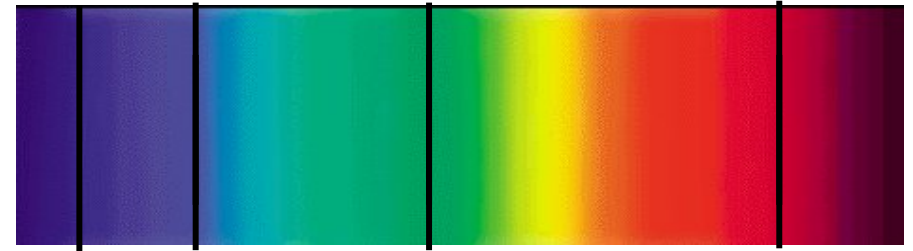
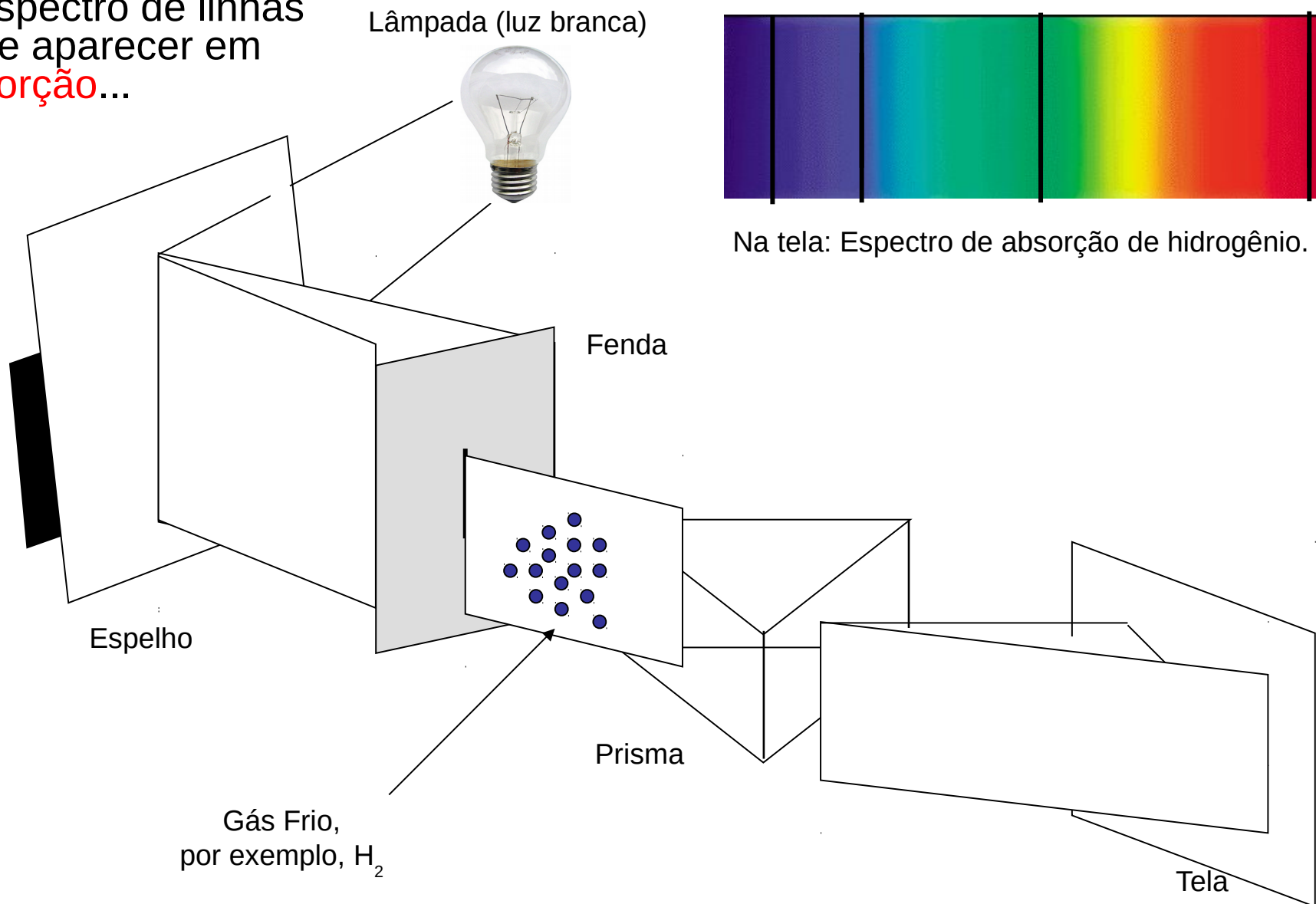
$$h\nu = \Delta E = E_i - E_f = E_0 \cdot (1/n_f^2 - 1/n_i^2)$$

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



Absorção Atômica

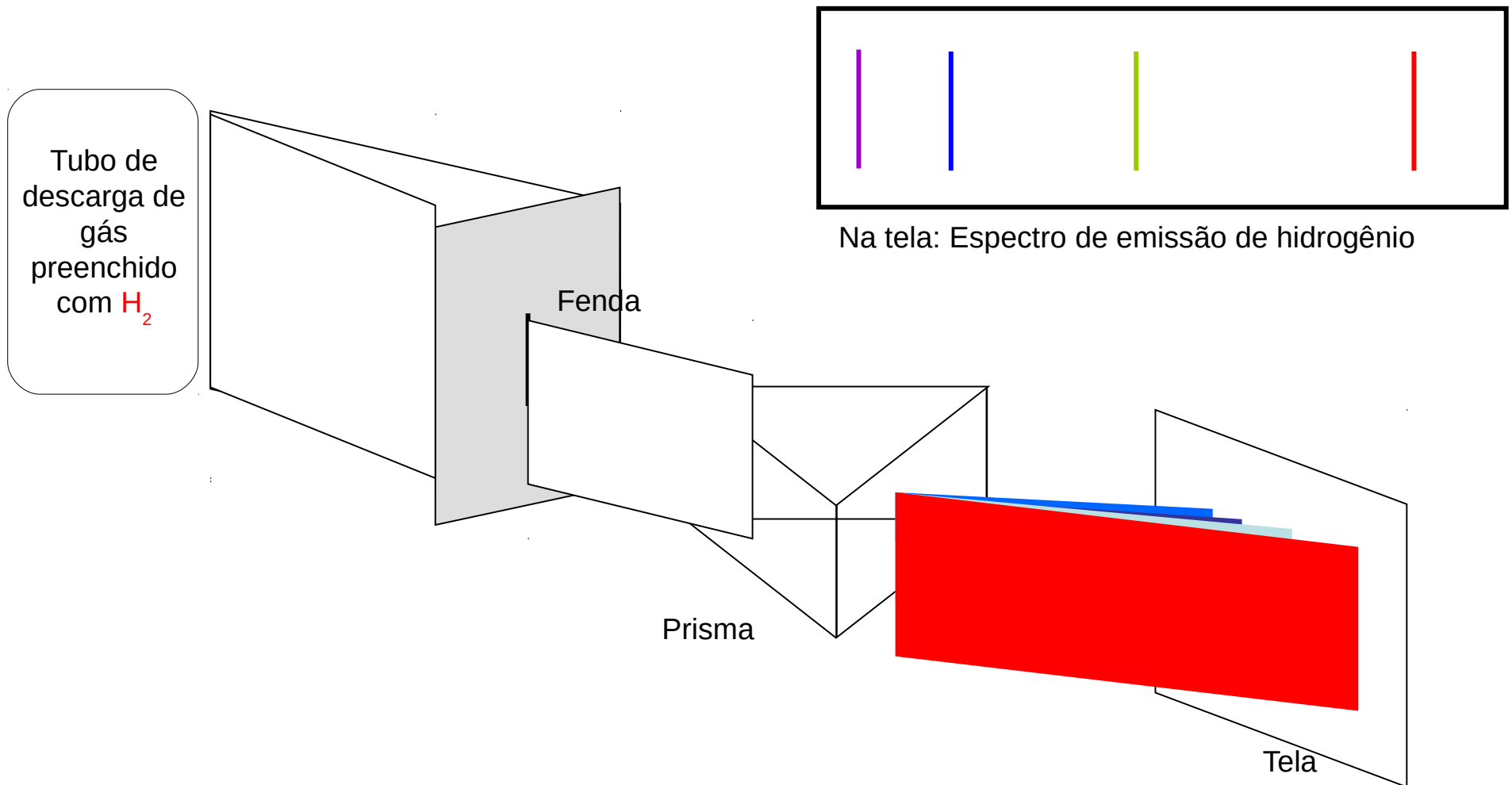
O espectro de linhas
pode aparecer em
absorção...



Na tela: Espectro de absorção de hidrogênio.

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 as posições (comprimentos de onda) das linhas dependem 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 as posições destas linhas dependem também dos **elementos químicos** presentes no gás.

Estas leis ajudarão mais tarde para interpretar o **espectro do Sol** e de outras **estrelas**.

A Interação Matéria-Luz

Linhas “permitidas” e “proibidas”

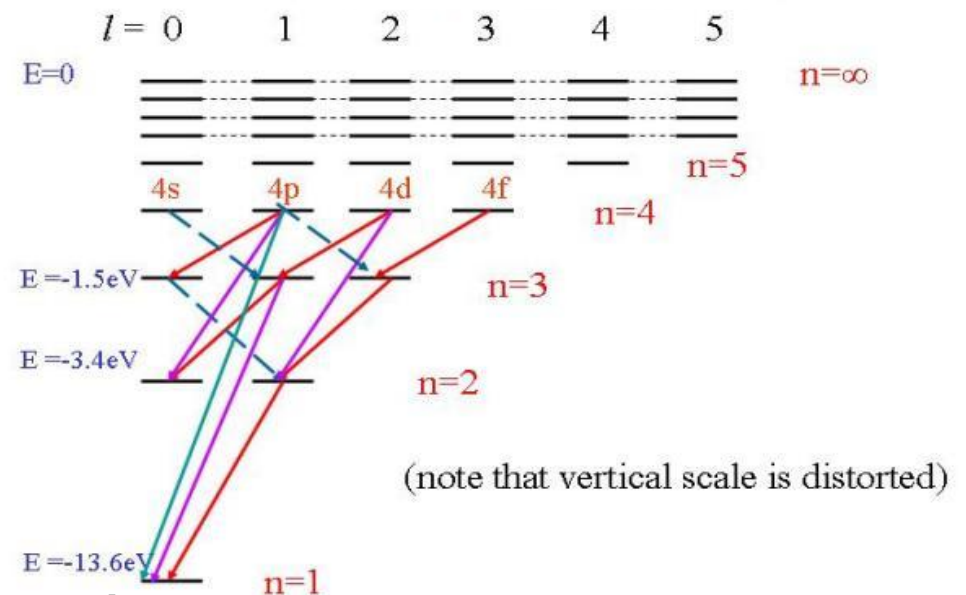
As **partículas** elementares, i. e. prótons, elétrons, nêutrons, etc., e as partículas compostas, p.e. átomos, têm um tipo de **momento angular intrínseco**, dado pelo número quântico l .

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) $\Rightarrow l$ 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**.

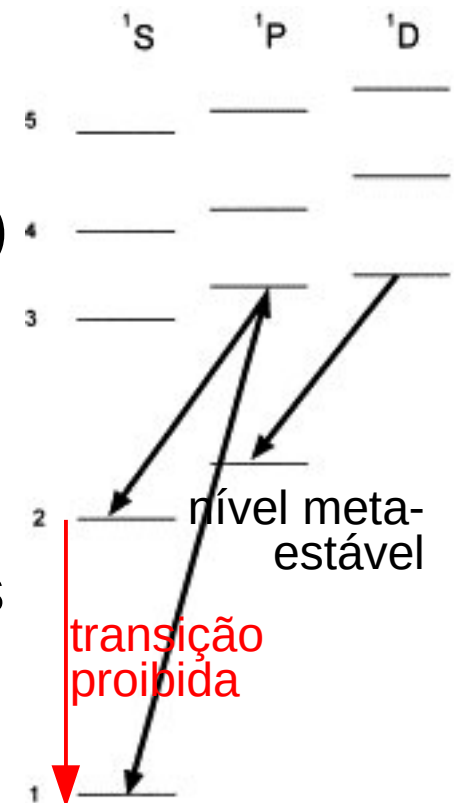
Porém, muito **raramente** (tipo, em milhões de anos) uma transição “proibida” pode acontecer, assim emitindo um fóton de uma **linha proibida**.

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

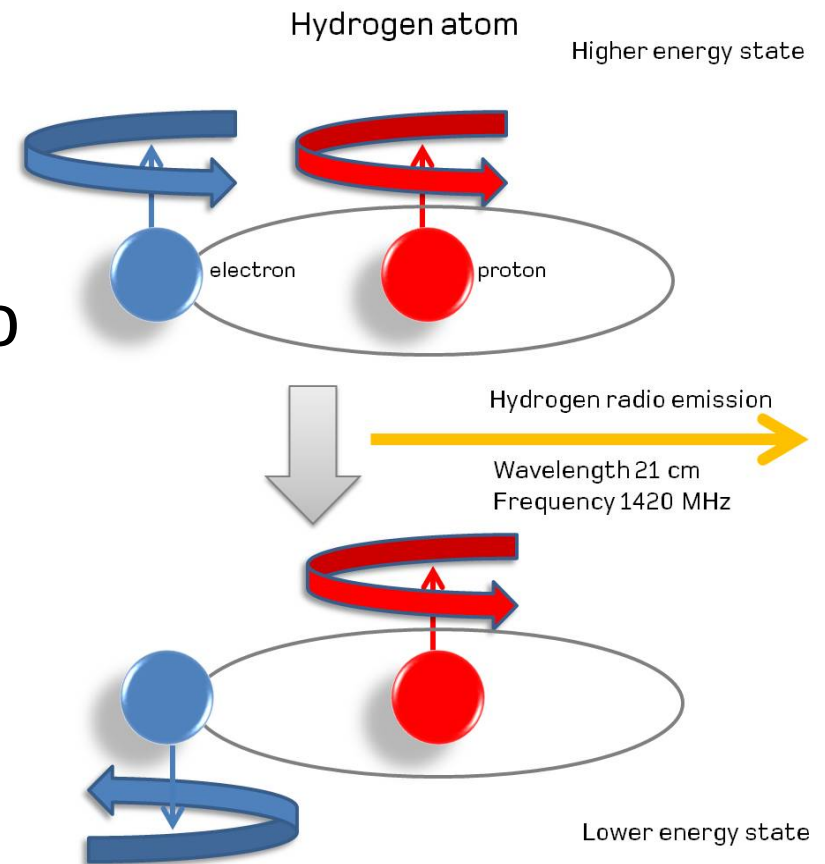


O Meio Interestelar

A linha de 21 cm

Física Quântica: Os **próton** e **elétron** de um átomo têm um tipo **momento angular intrínseco**, chamado **spin**.

Eletromag => se os dois spins são **alinhados**, os dois **momentos magnéticos** são **anti-alinhados**, e a energia do átomo é ligeiramente **mais alta**, por $5.9 \cdot 10^{-6} \text{ eV} = 9.45 \cdot 10^{-25} \text{ J}$.

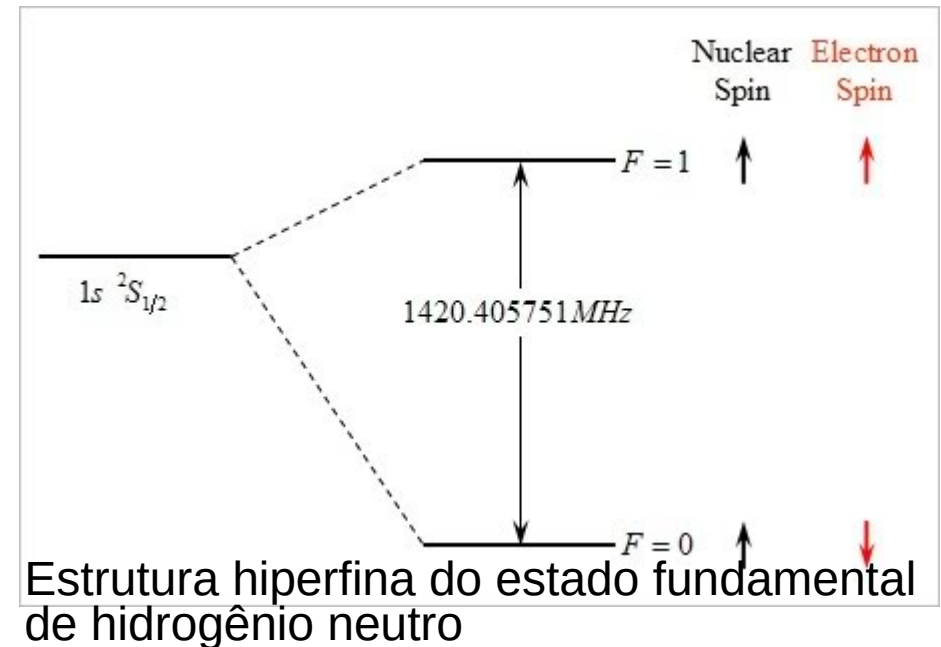


O Meio Interestelar

A linha de 21 cm

Este desdobramento do nível de energia do estado fundamental de H I se chama **estrutura hiperfina**.

Quando os spins se **desalinham**, o átomo **emite** um **fóton** de $h\nu = 9.45 \cdot 10^{-25}$ J, ou $\nu = 1420$ MHz, ou $\lambda = 21$ cm.



O Meio Interestelar

A linha de 21 cm

Porém, o estado hiperfinamente excitado (spins alinhados) tem **tempo de vida** de **várias mil. anos**.

=> Só em ambientes muito **tênuos** os átomos têm tempo para ficarem no estado excitado até se desexcitarem naturalmente, sem ter se chocado com outros átomos antes.

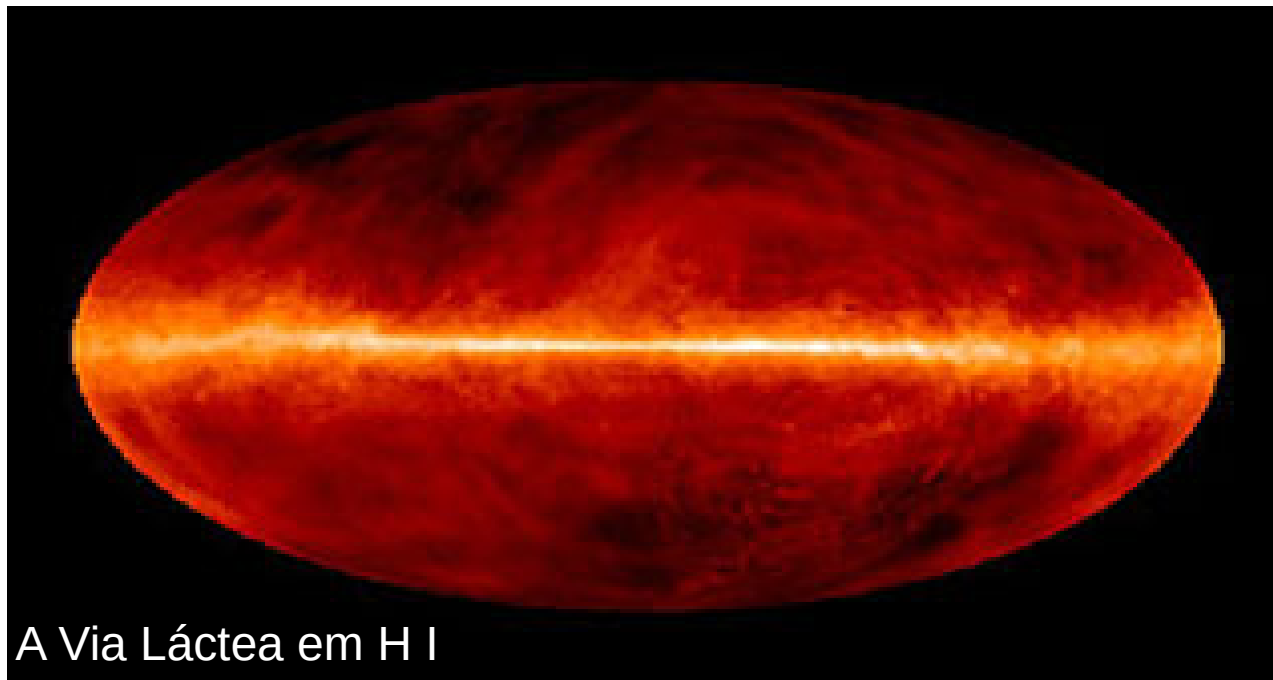
=> Só no **espaço**, em **nuvens difusas** de H I:

$T = 30 - 80 \text{ K}$, $\rho = 1 - 8 \cdot 10^8 \text{ part/m}^3$, $M = 1 - 100 M_{\odot}$.

O Meio Interestelar

A linha de 21 cm

A linha de 21 cm pode ser usada para **mapear** as **localização** e **densidade** do H I e medir **velocidades radiais** pelo **efeito Doppler**.



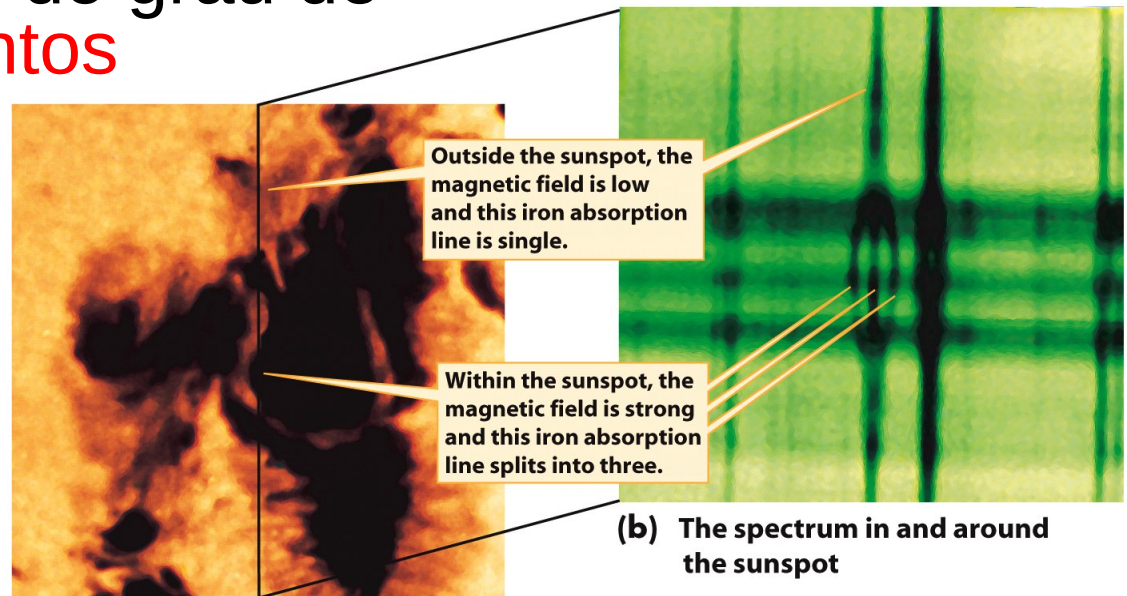
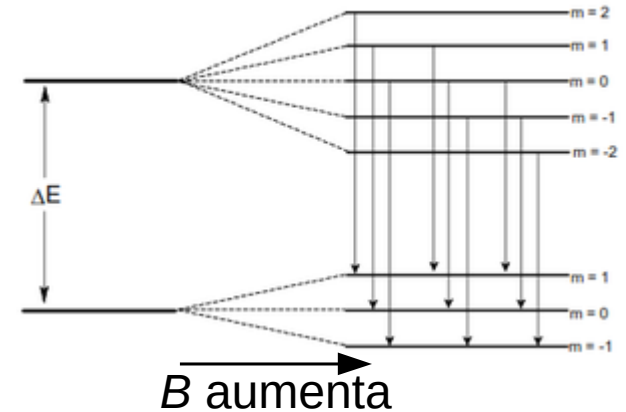
A Via Láctea em H I

O Meio Interestelar

O Efeito Zeeman

Os diferentes estados de **spin** dos **elétrons** de um **átomo** também implicam em **níveis** diferentes de **energia** do átomo, quando ele se encontra dentro de um **campo magnético**, dependendo do grau de **alinhamento** dos **momentos magnéticos** com o **campo**, causando um **desdobramento** das **linhas espectrais** do átomo.

=> **Efeito Zeeman**



Outside the sunspot, the magnetic field is low and this iron absorption line is single.

Within the sunspot, the magnetic field is strong and this iron absorption line splits into three.

(b) The spectrum in and around the sunspot

(a) A sunspot

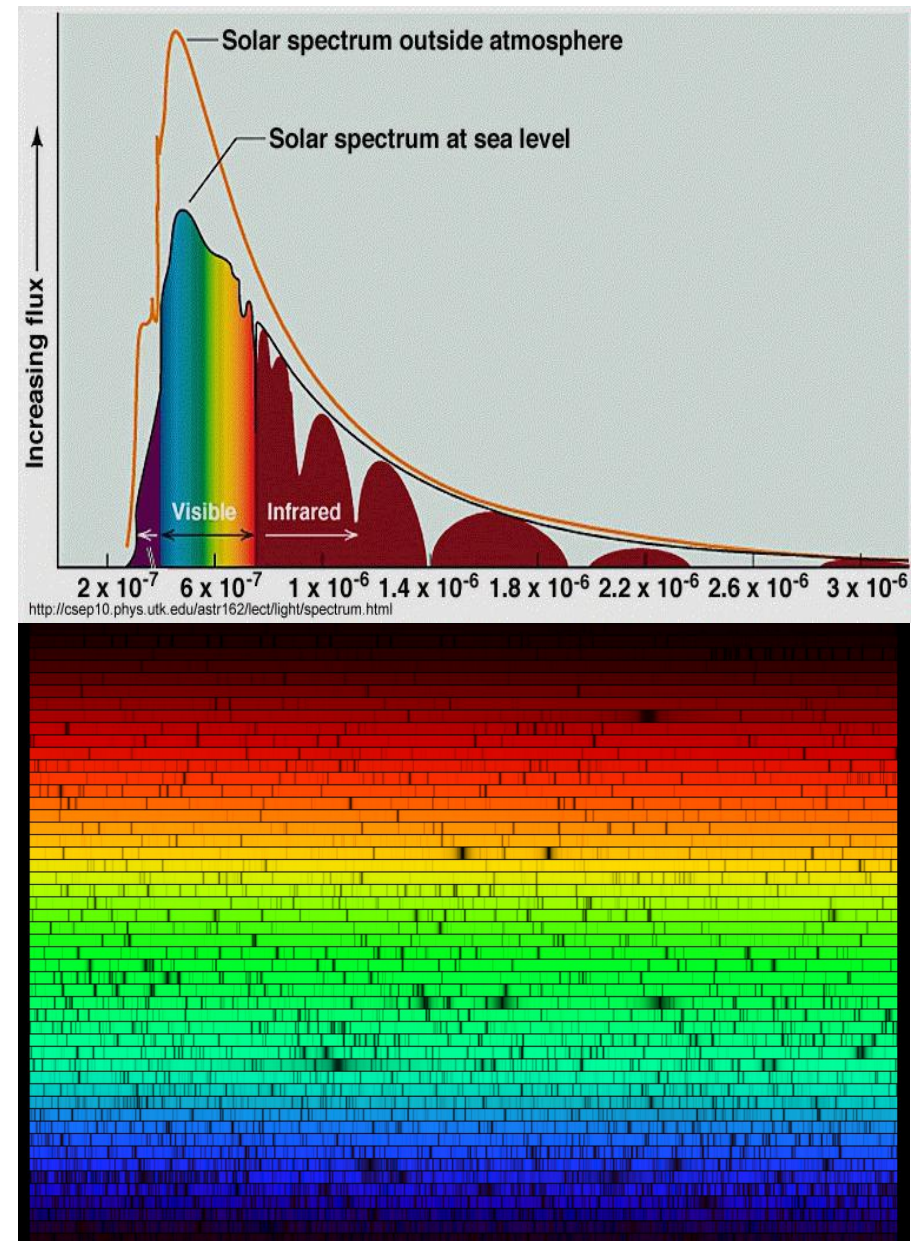
O Espectro Solar

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 à sua **massa** é de 74 % de **hidrogênio**, 24 % de **hélio** e 2 % 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 Limite de Eddington

É a **luminosidade máxima** que pode ser gerada por material sendo **acretado** com simetria esférica por uma **massa** M .

Se a massa irradia com luminosidade maior, a pressão desta radiação impede o material de cair em cima.

Considerando uma **partícula** com **massa** m e **seção transversal** de **Thomson** σ_T na distância r da massa M sendo acretado por esta, e equilibrando **gravitação** e **pressão** da **radiação** agindo na partícula:

$$GMm/r^2 = dp_{\text{rad}}/dt = d(E_{\text{rad}}/c)/dt = 1/c \cdot F_{\text{rad}} \sigma_T = \sigma_T/c \cdot L/4\pi r^2$$

$$\Rightarrow L_{\text{Ed}} = 4\pi GMmc/\sigma_T = 4\pi Gc/\bar{\kappa} \cdot M,$$

onde F_{rad} é o fluxo (potência por unidade e área) da radiação,

$\bar{\kappa} = \sigma_T/m$ é a **opacidade** do **material acretado**,

no caso de hidrogênio: σ_T = seção transversal de Thomson do elétron, $m = m_p$ = massa do próton

O Limite de Eddington

Luminosidades super-Eddington podem acontecer em sistemas sem simetria esférica (a radiação sai em outra direção que de onde vem o material acretado).

Mesmo assim L_{Ed} é uma boa estimativa da luminosidade máxima possível por acreção.

O limite de Eddington tem importância em **estrelas em formação** e **binárias com transferência de massa** (i.e. novas, erupções de raios γ , ...), **pulsações de estrelas variáveis**, na física de **quasares**,



Universidade Federal do ABC

Introdução à Física Estelar

FIM PRA HOJE

