



Universidade Federal do ABC

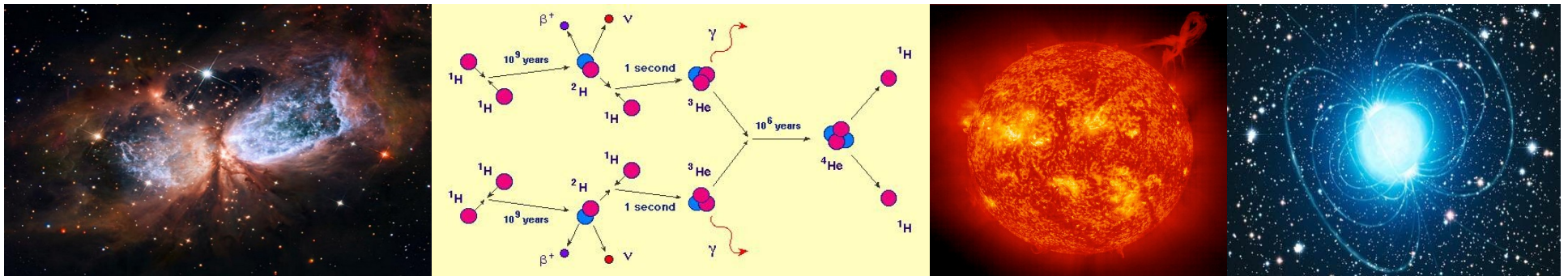
Introdução à Física Estelar

2. Conceitos gerais da Astronomia II

Prof. Pieter Westera

pieter.westera@ufabc.edu.br

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



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}_{tot} ou $\mathbf{F}_{\text{res}} = m \cdot \mathbf{a}$
3. $\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$ (actio = reactio)



Sir Isaac Newton

Mecânica Newtoniana

Ele também achou, a partir das Leis de Kepler, 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 (força aplicada em m por M): $\mathbf{F}_{mM} = -\frac{GMm\mathbf{r}}{|\mathbf{r}|^3} = -\frac{GMm}{r^2}\hat{\mathbf{r}}$,

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 $\hat{\mathbf{r}} := \mathbf{r}/r$, 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 , $\mathbf{r}_1 = \mathbf{r}_{mM_1} = \mathbf{r}_m - \mathbf{r}_{M_1}$, \mathbf{r}_2 idem):

$$\mathbf{F}_m = \mathbf{F}_{mM_1} + \mathbf{F}_{mM_2} = -Gm \cdot (M_1 \mathbf{r}_1 / r_1^3 + M_2 \mathbf{r}_2 / r_2^3),$$
$$U_m = U_{mM_1} + U_{mM_2} = -Gm \cdot (M_1 / r_1 + M_2 / r_2).$$

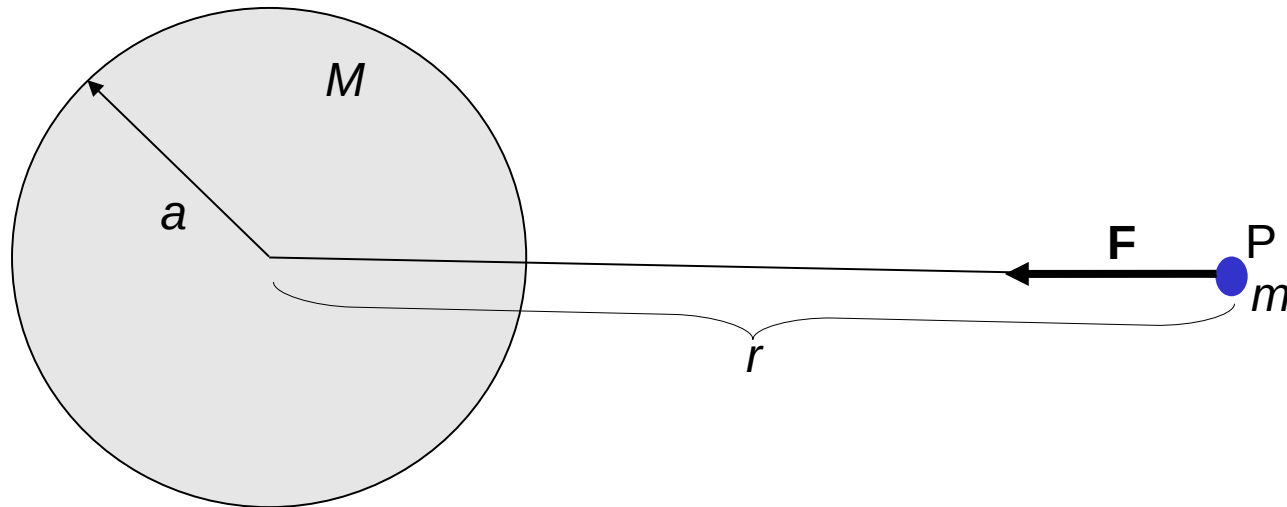
Uma **distribuição contínua** de **massa** $\rho(\mathbf{r})$ exerce sobre m :

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

O Teorema da Casca Esférica

Uma **casca esférica** de raio a e **densidade** (por unidade de área) **constante** σ (\Rightarrow a massa da esfera é $M = 4\pi a^2\sigma$) **exerce** sobre uma **massa** m na **distância** r do seu **centro** a **força** (na direção do centro da esfera):

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



O Teorema da Casca Esférica

Dedução:

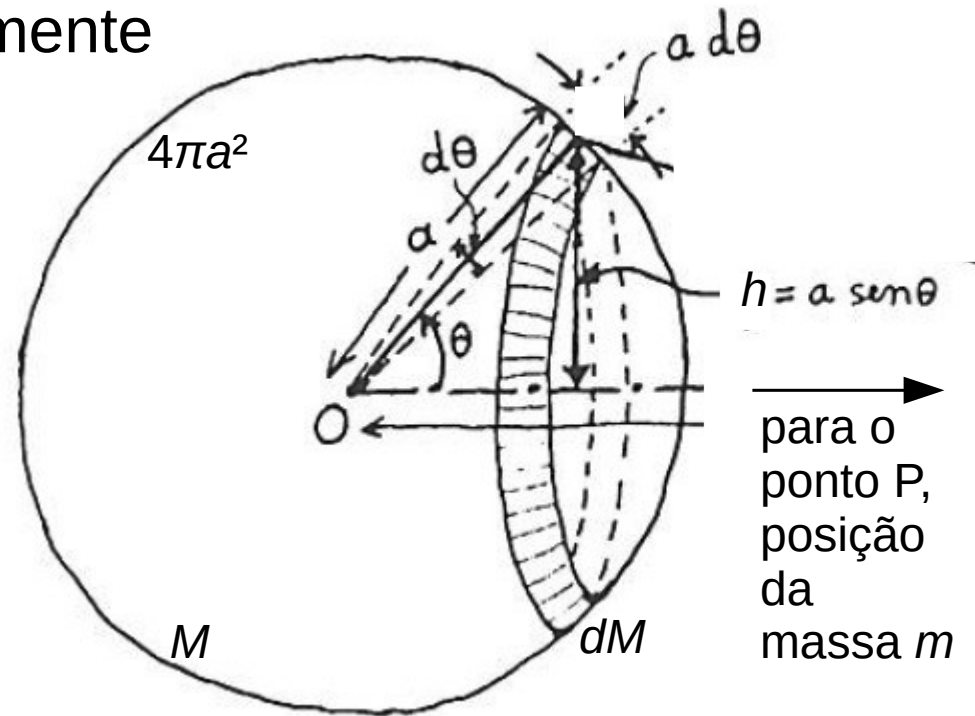
Considerando o anel infinitesimalmente fino destacado na figura:

Área do anel:

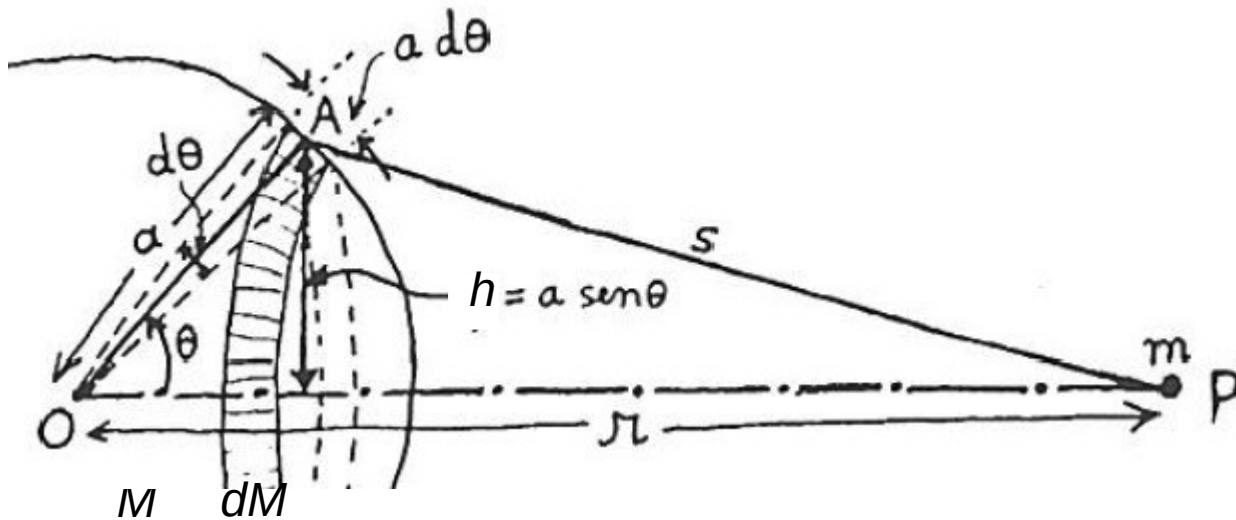
$$\begin{aligned} ad\theta \cdot 2\pi h &= ad\theta \cdot 2\pi a \sin \theta \\ &= 2\pi a^2 \sin \theta d\theta \end{aligned}$$

Massa do anel:

$$\begin{aligned} dM &= \sigma \cdot 2\pi a^2 \sin \theta d\theta \\ &= 2\pi a^2 \sin \theta d\theta / 4\pi a^2 \cdot M \\ &= \frac{1}{2} M \sin \theta d\theta \end{aligned}$$



O Teorema da Casca Esférica



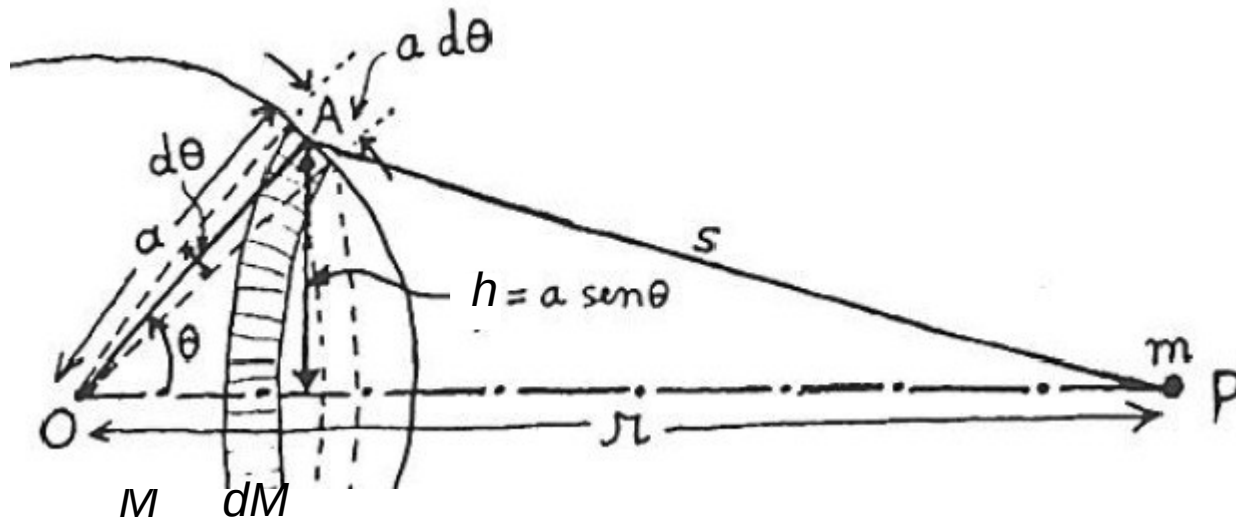
Pelo lei dos cossenos (aplicada no triangulo AOP):

$$s^2 = r^2 + a^2 - 2ar \cos \theta$$

Derivando os dois lados em θ (Não esqueçam, que s é uma função de θ , enquanto a e r são constantes):

$$2s \, ds/d\theta = 0 + 0 + 2ar \sin \theta = 2ar \sin \theta \Rightarrow \sin \theta \, d\theta = s/ar \cdot ds$$

O Teorema da Casca Esférica



Energia potencial de m devida ao anel, já que cada ponto do anel fica à mesma distância, s , de P :

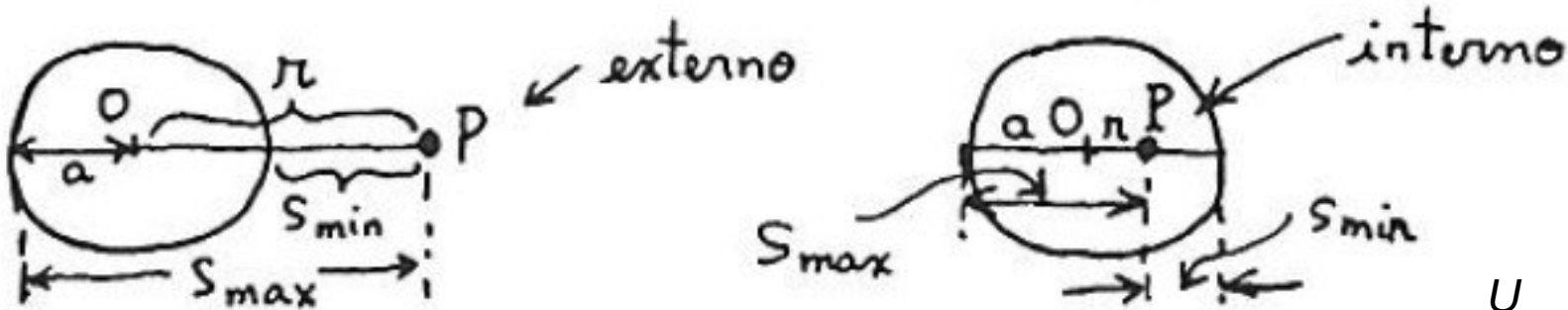
$$\begin{aligned} dU &= -GmdM/s = -\frac{1}{2}GmM/s \cdot \sin \theta d\theta = -\frac{1}{2}GmM/s \cdot s/ar \cdot ds \\ &= -\frac{1}{2}GmM/ar ds \end{aligned}$$

Integrando isto sobre todos os anéis do mais próximo a P , que é só um ponto, $s = s_{\min}$, ao mais distante a P , que também é só um ponto, $s = s_{\max}$:

$$U = \int_{s_{\min}}^{s_{\max}} dU = -\frac{1}{2}GmM/ar \int_{s_{\min}}^{s_{\max}} ds = -\frac{1}{2}GmM/ar (s_{\max} - s_{\min})$$

O Teorema da Casca Esférica

$$U = -\frac{1}{2}GmM/ar (s_{\max} - s_{\min})$$



Há dois casos:

$r > a \Rightarrow P$ é um **ponto externo**:

$$s_{\min} = r - a, s_{\max} = r + a \Rightarrow s_{\max} - s_{\min} = 2a \Rightarrow U = -GmM/r$$

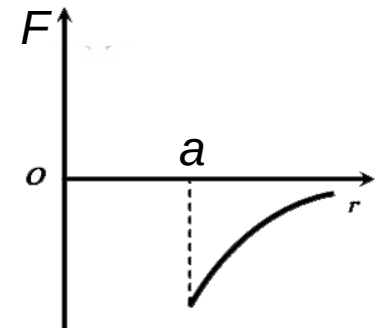
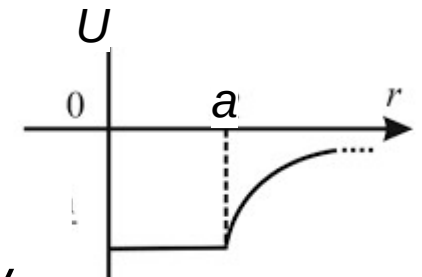
$\Rightarrow \mathbf{F} = -\nabla U = -GMm/r^2$, isto é,

GMm/r^2 na direção do centro da esfera

$r < a \Rightarrow P$ é um **ponto interno**:

$$s_{\min} = a - r, s_{\max} = r + a \Rightarrow s_{\max} - s_{\min} = 2r, U = -GmM/a$$

$$\Rightarrow \mathbf{F} = -\nabla U = 0$$



(d)

O Teorema da Casca Esférica

Repetindo: Uma **casca esférica** de raio a , massa M e **densidade constante** $\sigma = M/4\pi a^2$ **exerce** sobre uma **massa** m na **distância** r do seu **centro** a **força** (na direção do centro da esfera):

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

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.

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**, ...

O Teorema do Virial

Dedução:

Sejam \mathbf{r}_i os **vetores posição** das **partículas** do **sistema** (em relação à origem de algum sistema de coordenadas, o centro de massa é uma boa escolha), m_i as **massas**, \mathbf{v}_i as **velocidades** e \mathbf{p}_i os **momentos lineares** deles.

Definimos a grandeza: $Q = \sum_i \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{r}_i$,

Derivando no tempo:

$$dQ/dt = \sum_i (d\mathbf{p}_i/dt \cdot \mathbf{r}_i + \mathbf{p}_i \cdot d\mathbf{r}_i/dt) = \sum_i d\mathbf{p}_i/dt \cdot \mathbf{r}_i + \sum_i \mathbf{p}_i \cdot d\mathbf{r}_i/dt$$

(I) (II) (III)

O Teorema do Virial

$$dQ/dt = \sum_i d\mathbf{p}_i/dt \cdot \mathbf{r}_i + \sum_i \mathbf{p}_i \cdot d\mathbf{r}_i/dt$$

(I) (II) (III)

$$\begin{aligned} \text{(I): } dQ/dt &= d/dt \sum_i \mathbf{p}_i \cdot \mathbf{r}_i = d/dt \sum_i m_i \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{r}_i = d/dt \sum_i m_i d\mathbf{r}_i/dt \cdot \mathbf{r}_i \\ &= d/dt \sum_i \frac{1}{2} d/dt (m_i r_i^2) = \frac{1}{2} \cdot d^2/dt^2 \sum_i m_i r_i^2 \\ &= \frac{1}{2} \cdot d^2I/dt^2, \end{aligned}$$

$dr_i^2/dt = d^2r_i^2/dt^2 = 2\mathbf{r}_i \cdot d\mathbf{r}_i/dt$

onde $I = \sum_i m_i r_i^2$ é **momento de inércia** do sistema

$$\text{(III): } \sum_i \mathbf{p}_i \cdot d\mathbf{r}_i/dt = \sum_i m_i \mathbf{v}_i \cdot \mathbf{v}_i = 2 \cdot \sum_i \frac{1}{2} m_i v_i^2 = 2 \cdot \sum_i K_i = 2K,$$

onde K é a **energia cinética total** do sistema

O Teorema do Virial

$$dQ/dt = \sum_i dp_i/dt \cdot \mathbf{r}_i + \sum_i \mathbf{p}_i \cdot d\mathbf{r}_i/dt$$

(I)

(II)

(III)

Virial de
Clausius

\mathbf{F}_i : força total que age na partícula i

\mathbf{F}_{ij} : força que a partícula j aplica na partícula i

$$(II): \sum_i dp_i/dt \cdot \mathbf{r}_i = \sum_i \mathbf{F}_i \cdot \mathbf{r}_i = \sum_i (\sum_{j \neq i} \mathbf{F}_{ij}) \cdot \mathbf{r}_i$$

$$\mathbf{r}_i = 1/2(\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_j) + 1/2(\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j) \quad \swarrow = 1/2 \cdot \sum_i \sum_{j \neq i} \mathbf{F}_{ij} \cdot (\mathbf{r}_i + \mathbf{r}_j) + 1/2 \cdot \sum_i \sum_{j \neq i} \mathbf{F}_{ij} \cdot (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)$$

$$\mathbf{F}_{ij} = -\mathbf{F}_{ji} \quad \text{---} = 0 + \sum_i \sum_{j > i} \mathbf{F}_{ij} \cdot (\mathbf{r}_i - \mathbf{r}_j)$$

$$\mathbf{F}_{ij} = Gm_i m_j \mathbf{r}_{ij} / r_{ij}^3, \quad \text{---} = \sum_i \sum_{j > i} Gm_i m_j \mathbf{r}_{ij} \cdot (-\mathbf{r}_{ij}) / r_{ij}^3$$

onde $\mathbf{r}_{ij} = \mathbf{r}_j - \mathbf{r}_i$

$$= \sum_i \sum_{j > i} -Gm_i m_j r_{ij}^2 / r_{ij}^3$$

$$= \sum_i \sum_{j > i} -Gm_i m_j / r_{ij} = \sum_i \sum_{j > i} U_{ij} = U,$$

a energia potencial total do sistema

O Teorema do Virial

$$dQ/dt = \sum_i \underbrace{d\mathbf{p}_i/dt}_{(I)} \cdot \underbrace{\mathbf{r}_i}_{(II)} + \sum_i \underbrace{\mathbf{p}_i}_{(III)} \cdot d\mathbf{r}_i/dt$$

Substituindo:

$$\frac{1}{2} \cdot \frac{d^2 I}{dt^2} = U + 2K$$

e **mediando** no **tempo**:

$$\frac{1}{2} \cdot \langle \frac{d^2 I}{dt^2} \rangle = \langle U \rangle + 2\langle K \rangle$$

Já que o sistema está em **equilíbrio**, o **momento de inércia não muda** a longo prazo: $\langle dI/dt \rangle = 0$ e $\langle d^2 I/dt^2 \rangle = 0$.

$$\Rightarrow -2\langle K \rangle = \langle U \rangle, \text{ e}$$

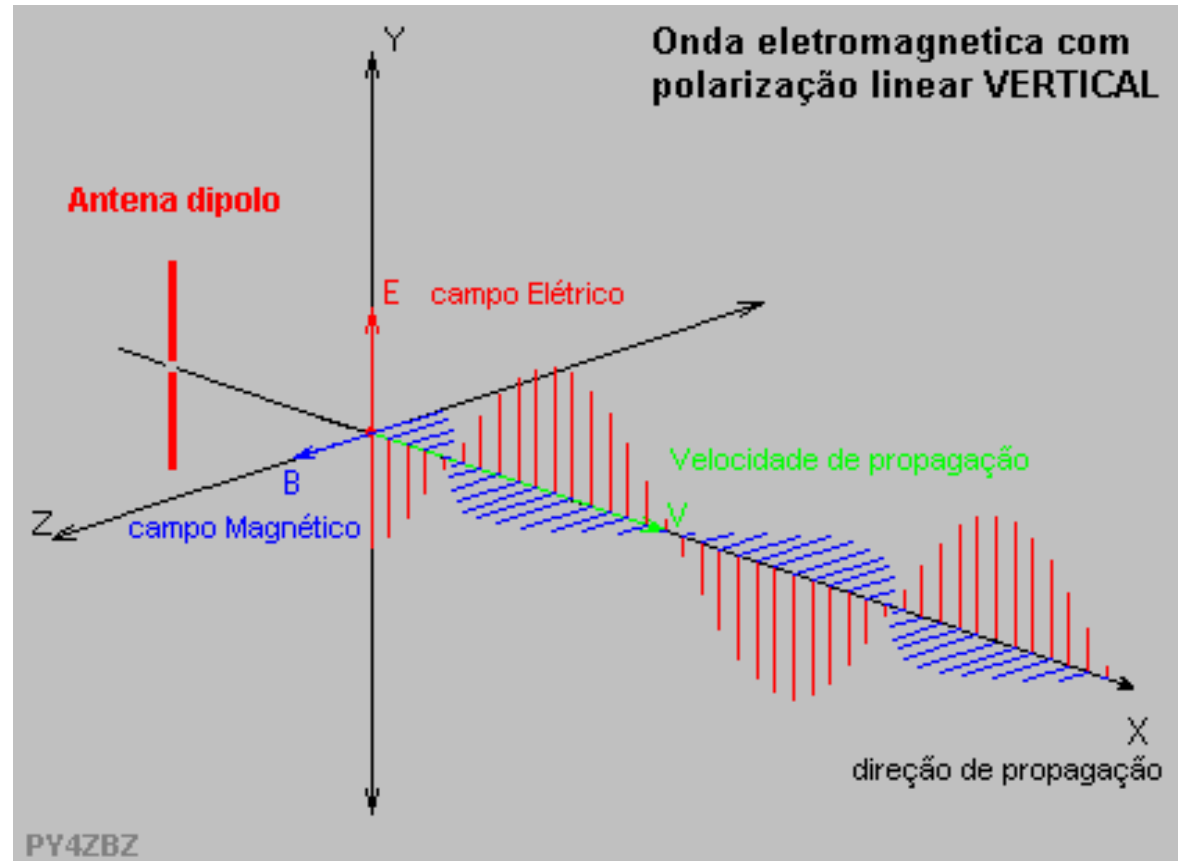
$$\langle E \rangle = \frac{1}{2} \cdot \langle U \rangle$$

QED

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

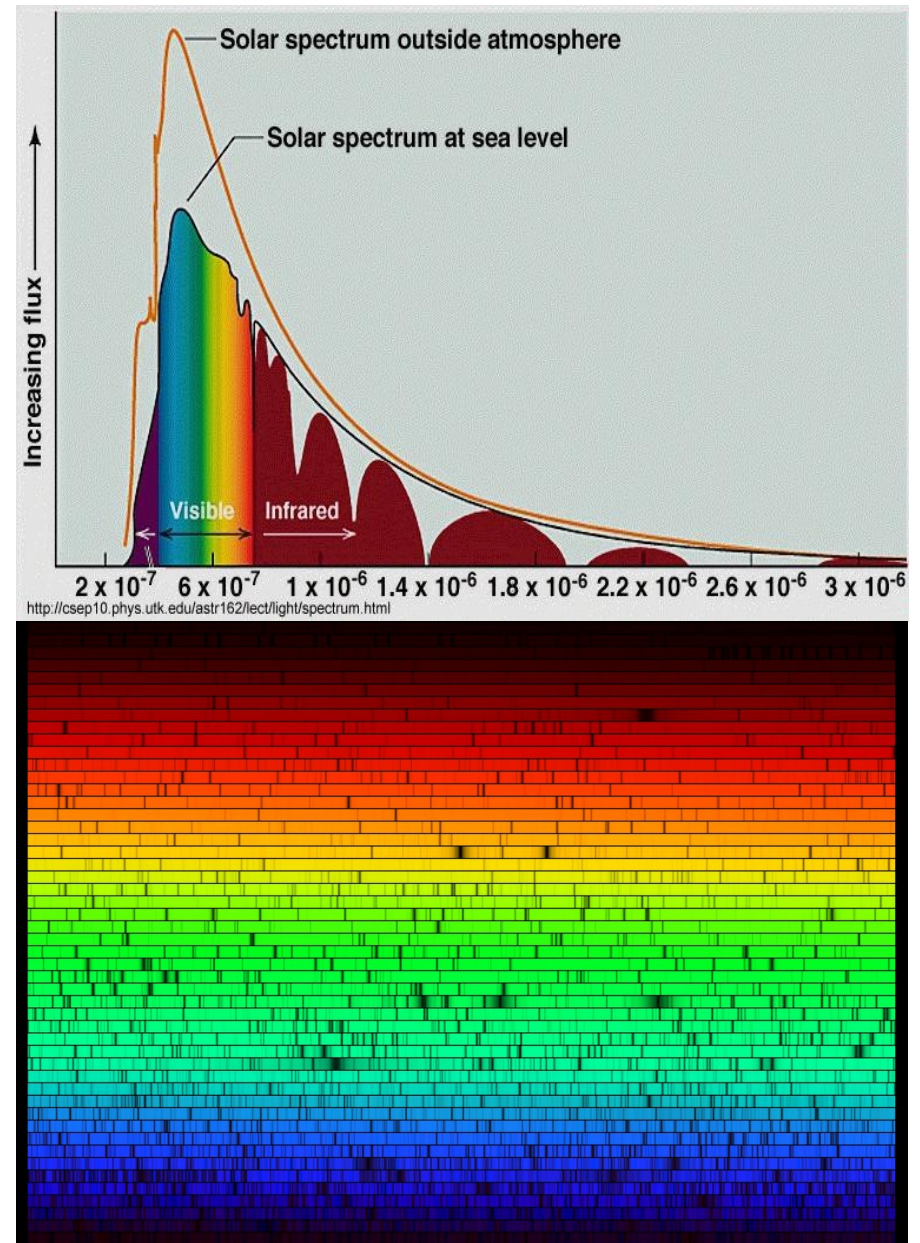


Louis V. de Broglie

O Espectro Solar

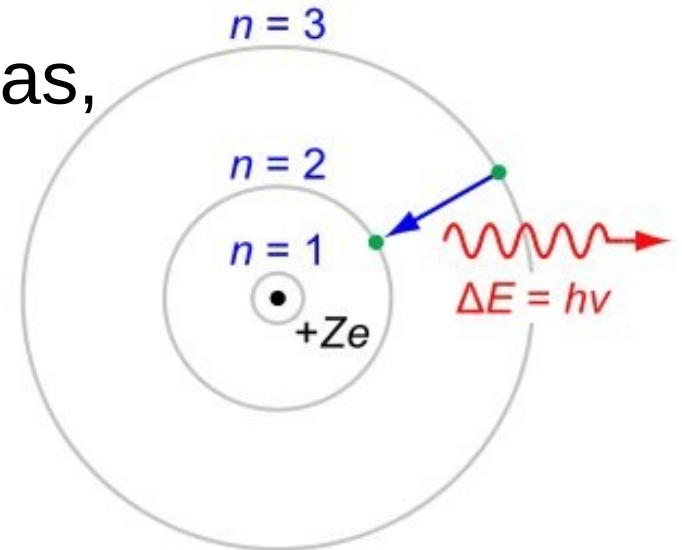
William Hyde **Wollaston**:
Em 1802, observou que passando a luz do Sol por uma fenda, e depois por um prisma, apareciam algumas **linhas escuras** no espectro, que ele interpretou como o limite das cores.

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 os espectros de 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

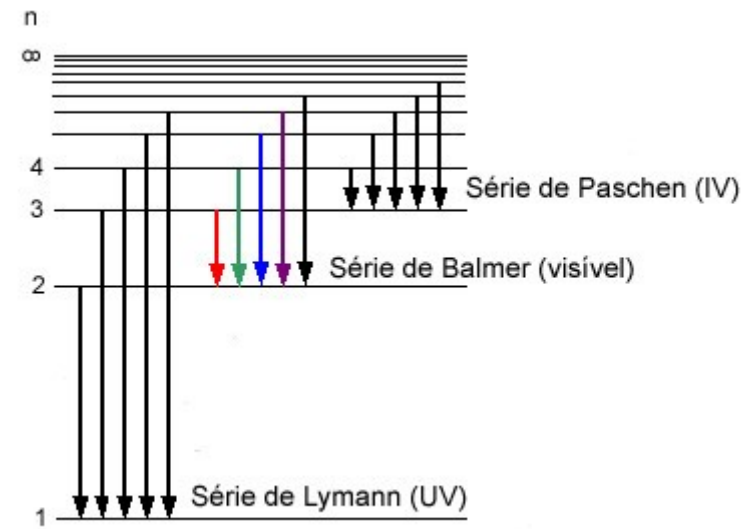
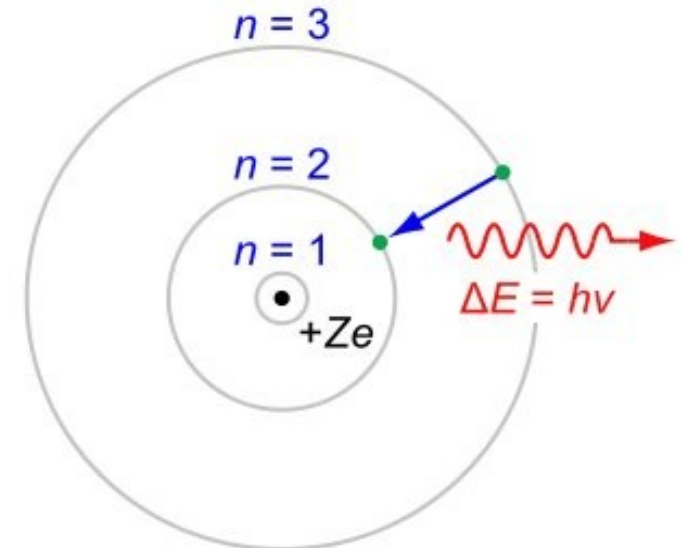
$E_n = -(1/n^2) \cdot E_0$, onde $n = 1, 2, 3, \dots$, onde

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

n é número quântico da energia

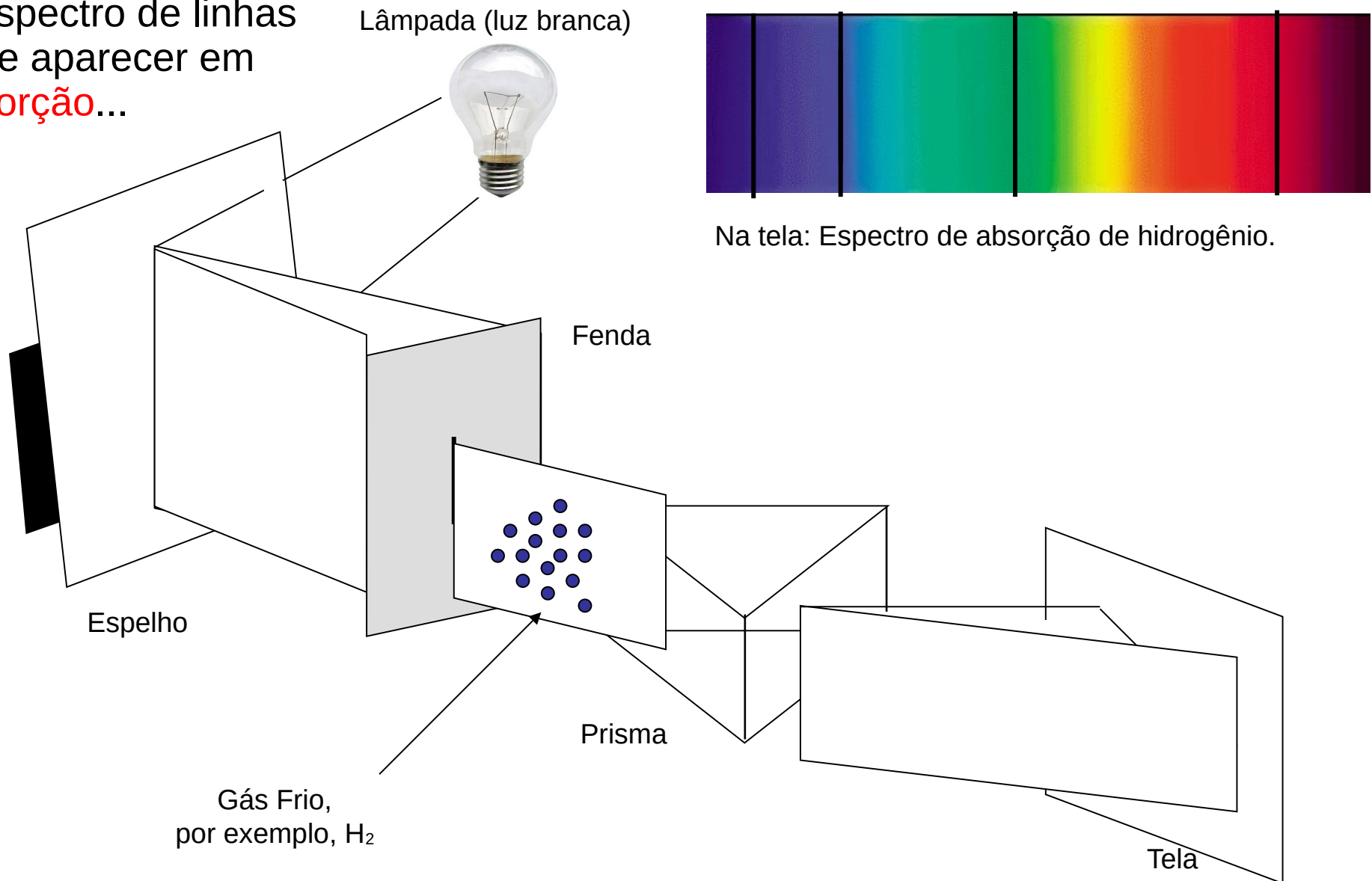
A Interação Matéria-Luz

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 a molécula, e se chama **espectro de linhas** deste.



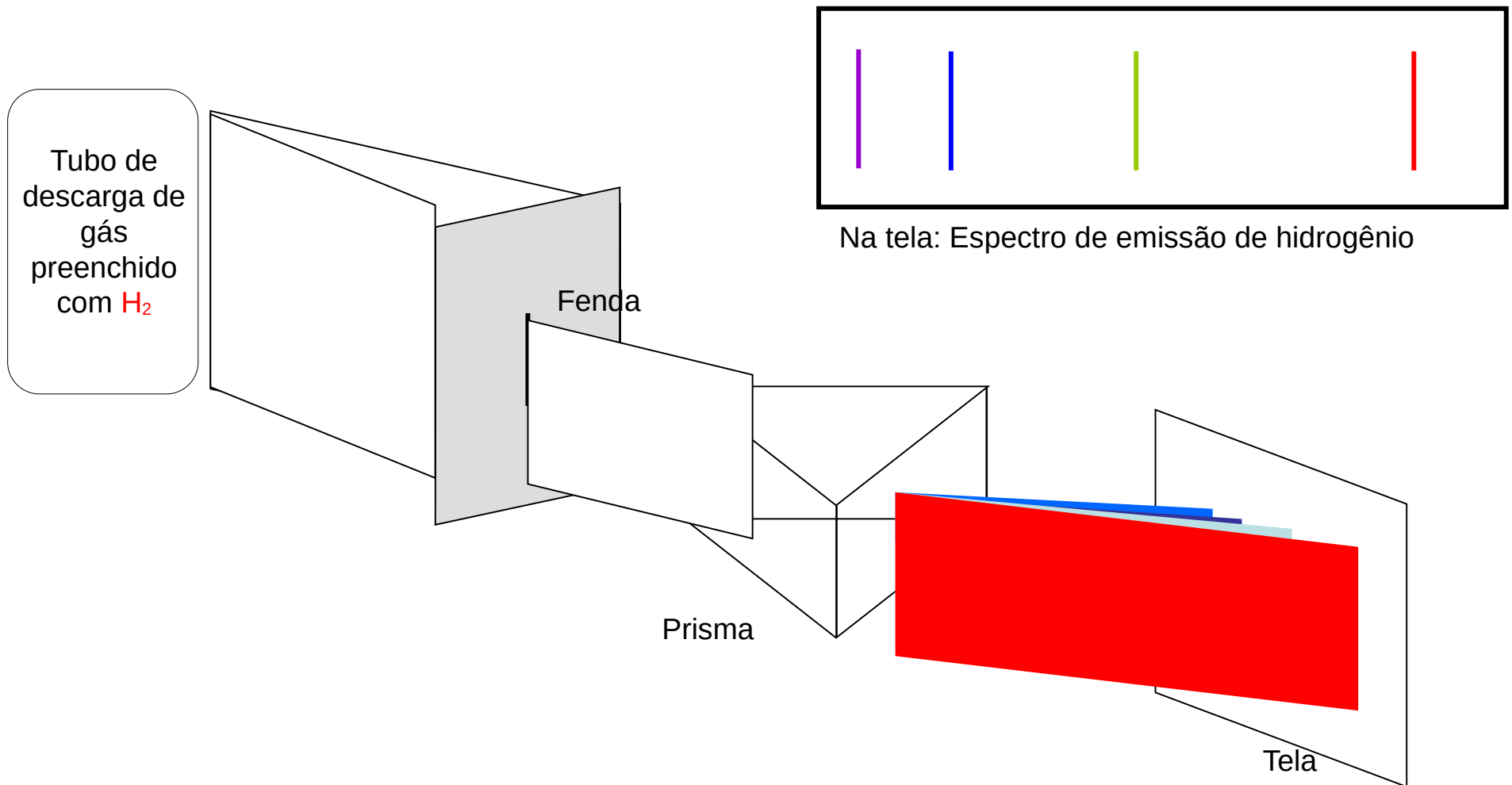
Absorção Atômica

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** e de outras **estrelas**.

A Interação Matéria-Luz

Linhas “permitidas” e “proibidas”

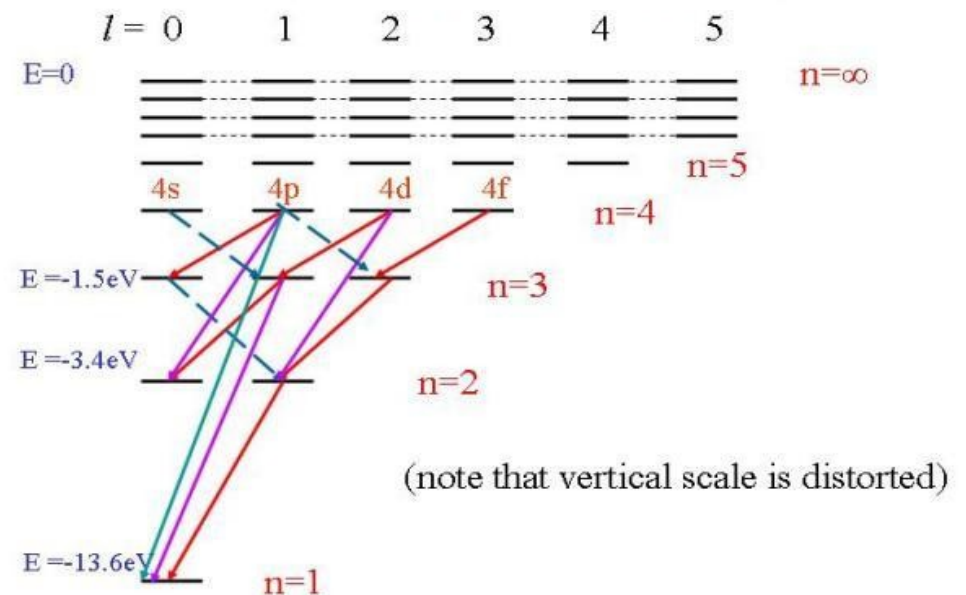
As **partículas** elementares, i. e. prótons, elétrons, nêutrons, etc., e as partículas compostas, p.e. átomos, têm um tipo de **momento angular intrínseco**, dado pelo número quântico l .

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 (regra de seleção para Δl).

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**.

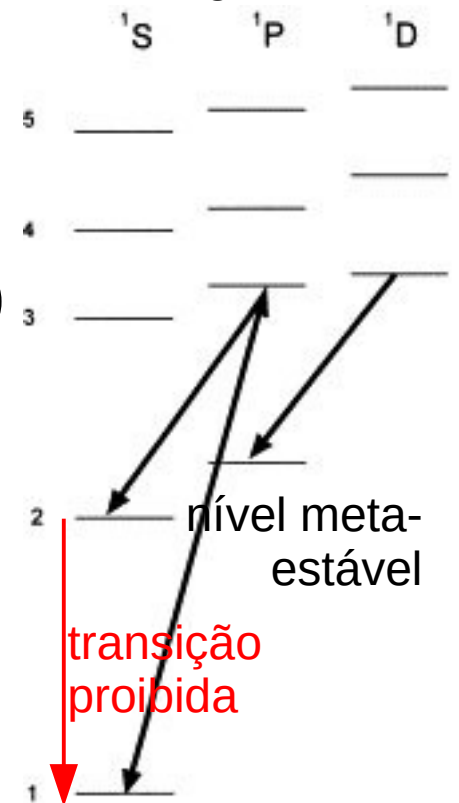
Porém, muito **raramente** (tipo, em milhões de anos) uma transição “proibida” pode acontecer, assim emitindo um fóton de uma **linha proibida**.

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

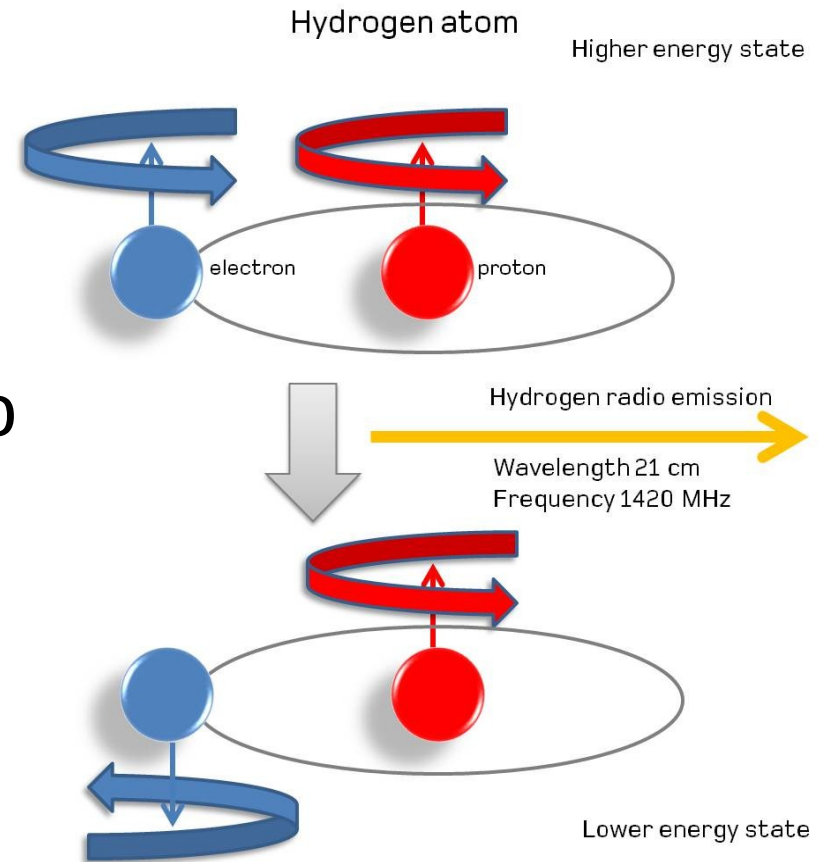


A Interação Matéria-Luz

A linha de 21 cm

Física Quântica: Os **próton** e **elétron** de um átomo têm um tipo de **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 $5.9 \cdot 10^{-6} \text{ eV} = 9.45 \cdot 10^{-25} \text{ J}$.

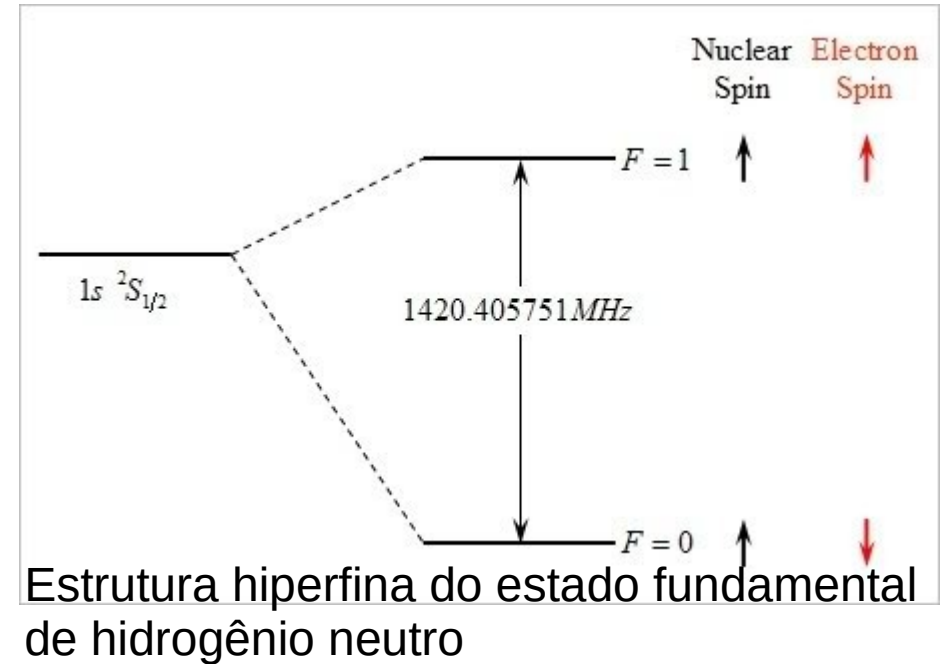


A Interação Matéria-Luz

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.



A Interação Matéria-Luz

A linha de 21 cm

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

=> Só em ambientes muito **tênu**es os átomos têm tempo para ficarem no estado excitado até se desexcitarem naturalmente, sem ter se chocado com outros átomos antes (similar às linhas proibidas).

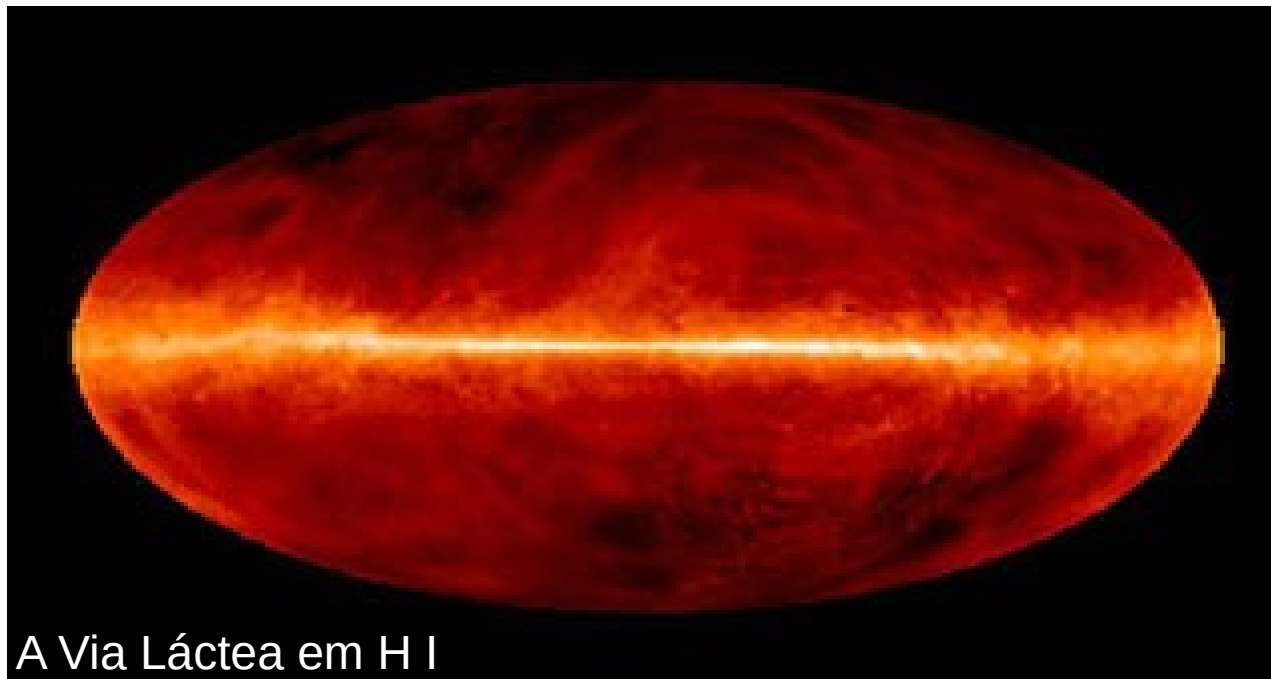
=> Só no **espaço**, em **nuvens difusas** de H I:

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

A Interação Matéria-Luz

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** e estimar **campos magnéticos** pelo **efeito Zeeman** (=> próximo slide).



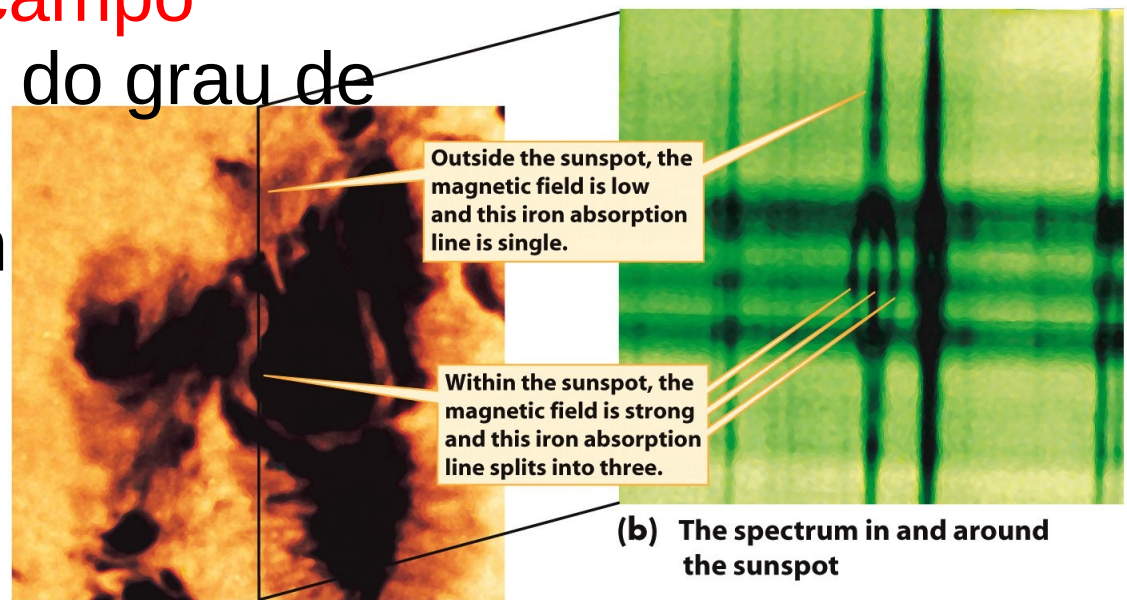
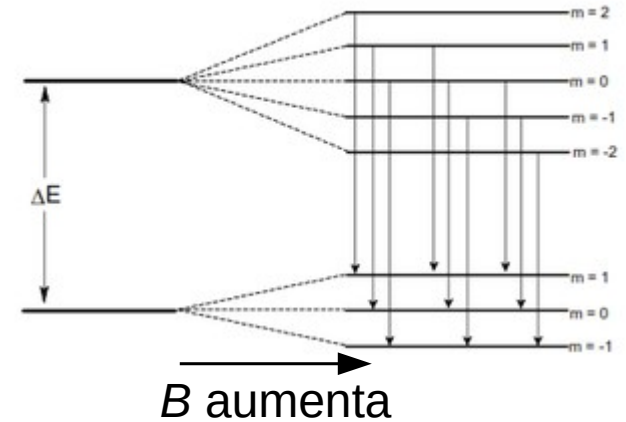
A Via Láctea em H I

A Interação Matéria-Luz

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**



(a) A sunspot

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

(b) The spectrum in and around the sunspot

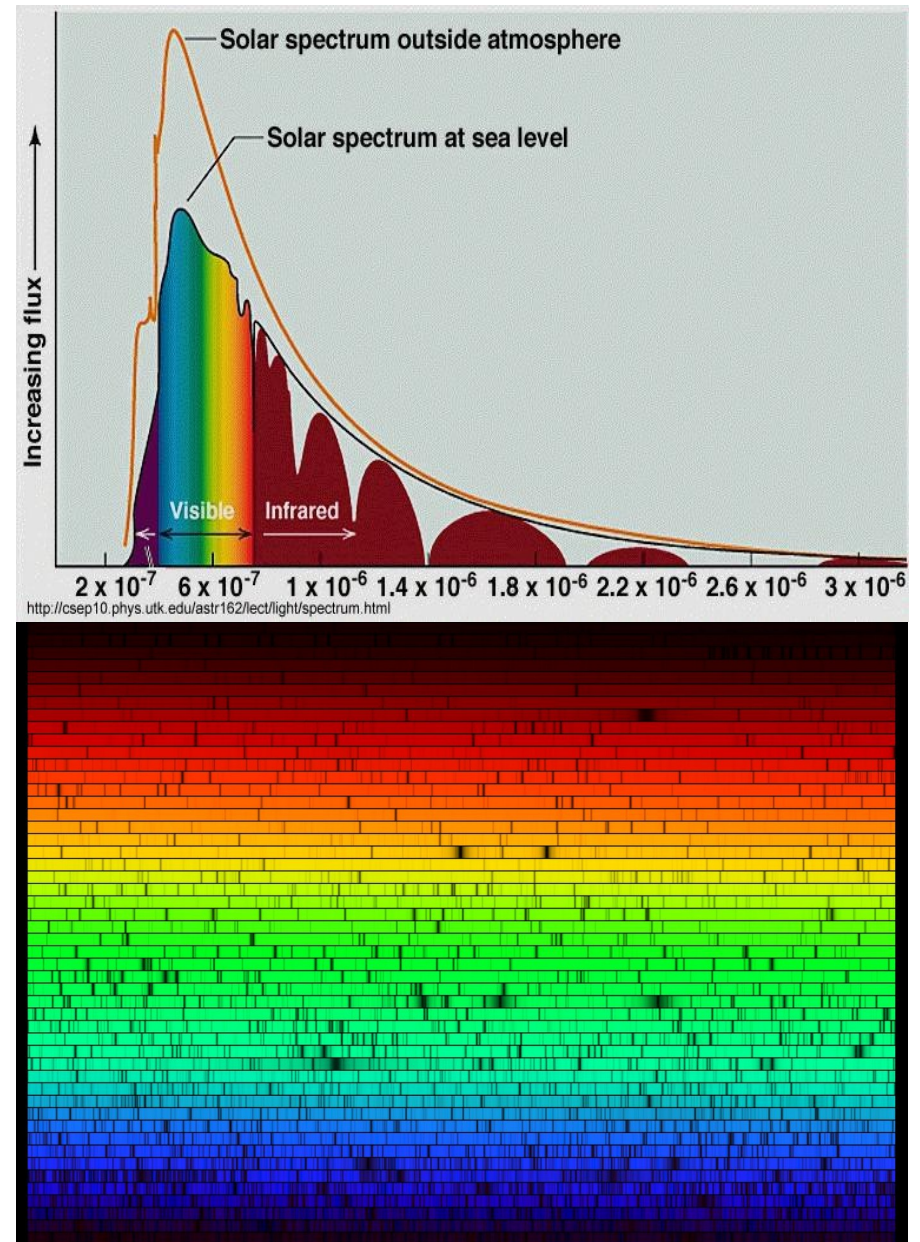
O Espectro Solar

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.

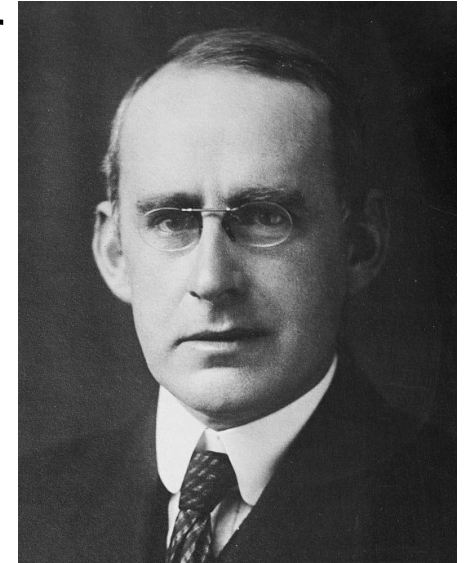
Sua **composição química**, com relação a sua **massa** é de 74 % de **hidrogênio**, 24 % de **hélio** e 2 % de outros elementos.

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 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.



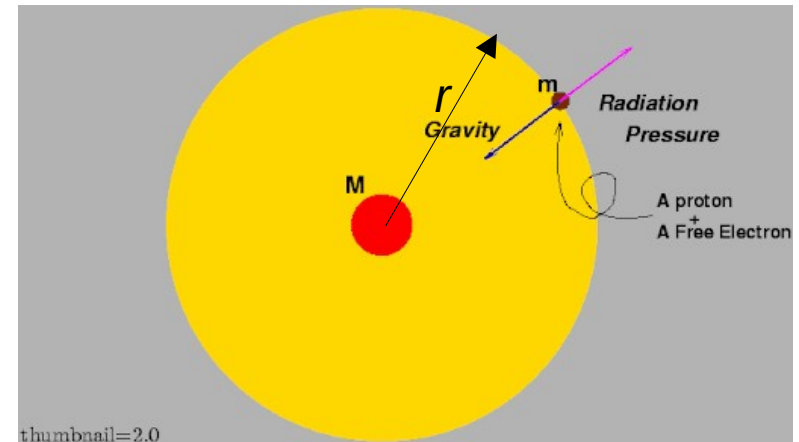
Arthur Stanley
Eddington
(1882-1944)

O Limite de Eddington

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:

$$\begin{aligned} GMm/r^2 &= dp_{\text{rad}}/dt = d(E_{\text{rad}}/c)/dt \\ &= 1/c \cdot F_{\text{rad}}\sigma_T = \sigma_T/c \cdot L_{\text{Ed}}/4\pi r^2 \end{aligned}$$

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



onde F_{rad} é o fluxo (potência por unidade de área) da radiação,
 $\bar{\kappa} = \sigma_T/m$ é a **opacidade** do **material acretado**,
no caso de hidrogênio: σ_T = seção transversal do elétron,
 $m = m_p$ = massa do próton

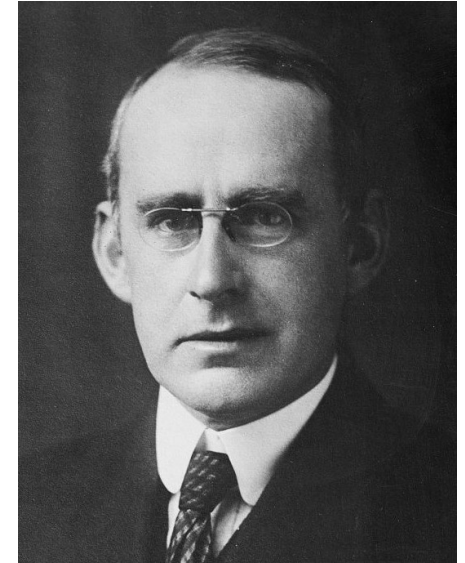
O Limite de Eddington

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**
- **binárias** com **transferência** de **massa** (i.e. novas, erupções de raios γ , ...)
- **pulsações** de **estrelas variáveis**,
- Na física de **quasares**, ...



Arthur Stanley
Eddington
(1882-1944)



Universidade Federal do ABC

Introdução à Física Estelar

FIM PRA HOJE

