

AGA 315 – Aula 4

Processos elementares radiação-matéria 2

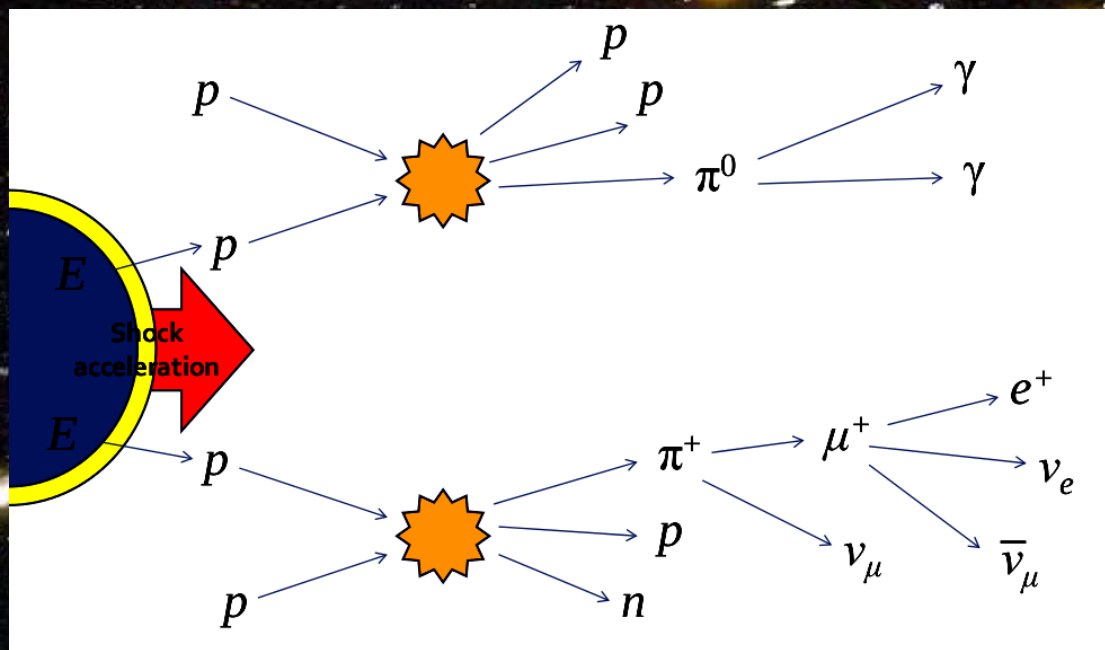
J.E. Horvath,
IAG – USP
São Paulo, Brasil



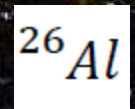
Fontes de pósitrons e aniquilação

Possivelmente devido ao decaimento do π^+ os pósitrons são injetados no ISM e finalmente se aniquilam com elétrons.

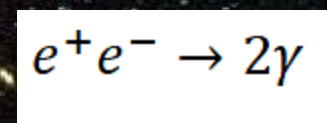
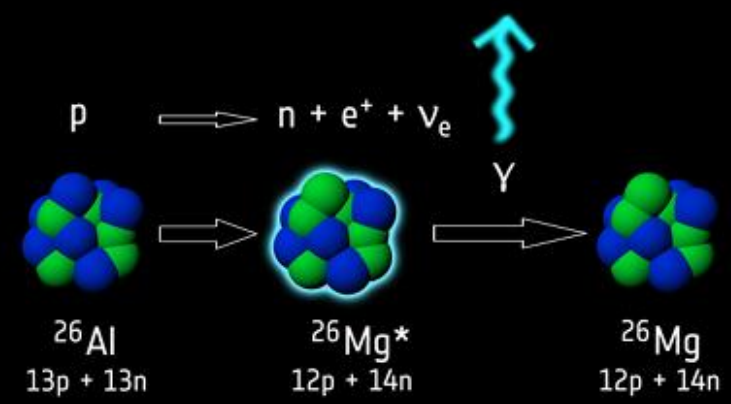
Como as fontes devem ser aceleradores de prótons, o número de pósitrons está relacionado com o número de γ



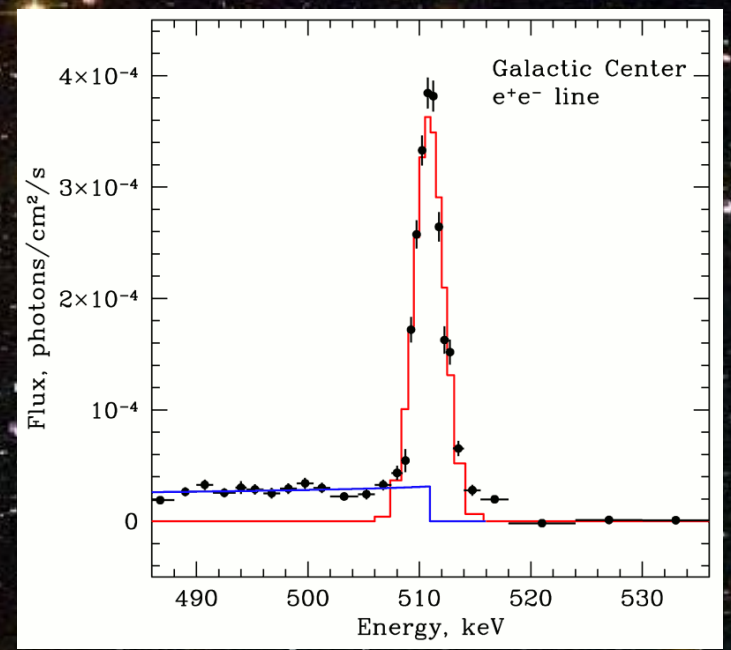
Outra fonte de pósitrons é o decaimento do produzido em supernovas, com



$$\tau \sim 10^6 \text{ yr}$$



Linha de aniquilação e^+e^-
 no centro da nossa galáxia
 O quê é? Não é claro, poderia
 ser da aniquilação da matéria
 escura



Radiação de síncrotron

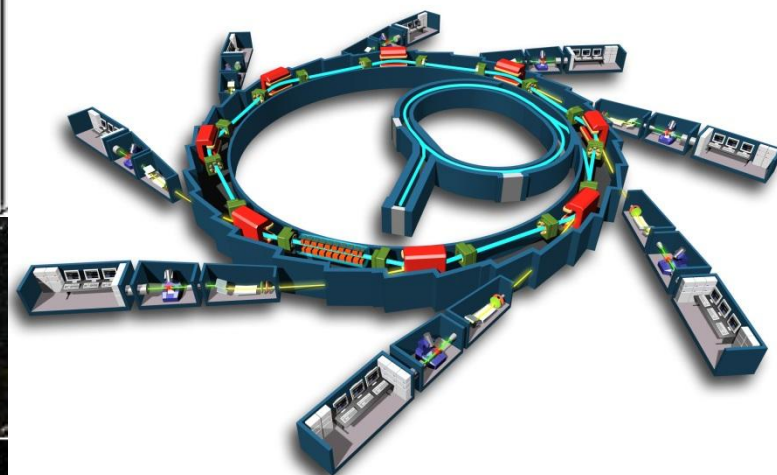
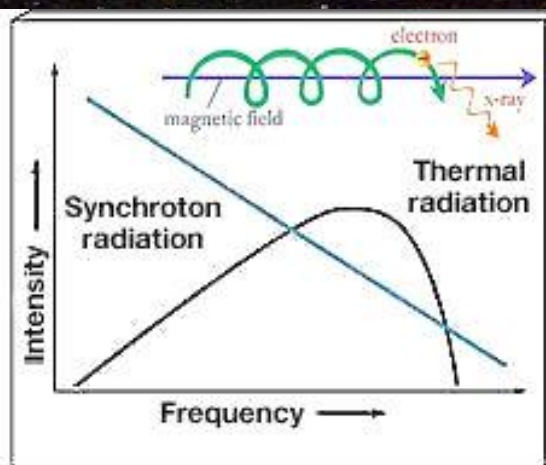
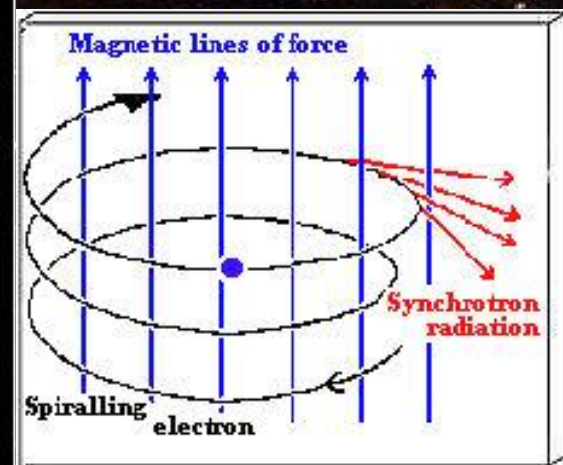
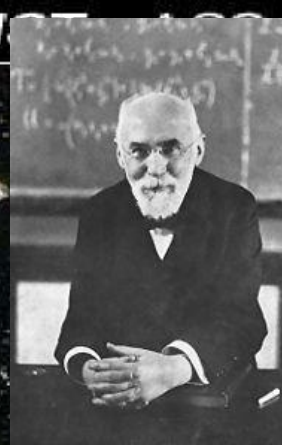
Partículas carregadas em um campo magnético uniforme

$$\vec{F} = q\vec{E} + q\vec{v} \times \vec{B}$$

elétrica

magnética

A força magnética é \perp ao campo B sempre



Equação de movimento (relativística, unidades SI)

$$\frac{d}{dt}(\gamma m_0 \vec{v}) = q(\vec{v} \times \vec{B})$$

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

Movimento helicoidal com ângulo de *pitch* fixo θ .

Frequência de giro (ou *cícotron*) $\omega_g = \frac{|q| B}{\gamma m_0}$

Como $a_{\parallel} = 0$ a potência radiada é

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right) = \frac{\gamma^4 e^2}{6\pi\epsilon_0 c^3} |a_{\perp}|^2 = \frac{e^4 B^2}{6\pi\epsilon_0 c m_e^2} \frac{v^2}{c^2} \gamma^2 \sin^2 \theta \quad \text{Larmor}$$

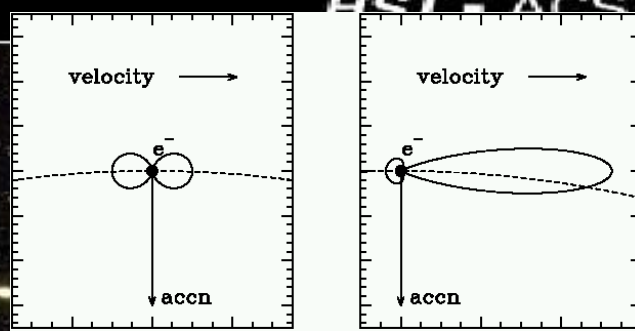
Se definirmos a densidade de energia magnética $U_{\text{mag}} = B^2/2\mu_0$ e tomarmos o *limite não relativístico* $\gamma = 1$ temos que

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right) = 2\sigma_T c U_{\text{mag}} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \sin^2 \theta = \frac{2\sigma_T}{c} U_{\text{mag}} v_{\perp}^2 \quad \text{cícotron}$$

No limite ultrarrelativístico

$$-\left(\frac{dE}{dt}\right) = 2\sigma_T c U_{\text{mag}} \gamma^2 \sin^2 \theta$$

para cada ângulo θ



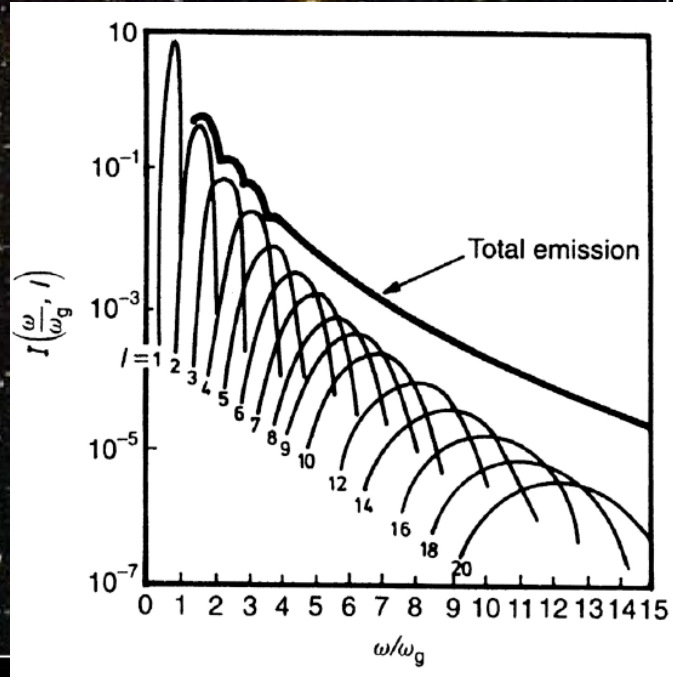
Podemos fazer uma média angular e escrever a potência como

$$p(\theta) d\theta = \frac{1}{2} \sin \theta d\theta$$

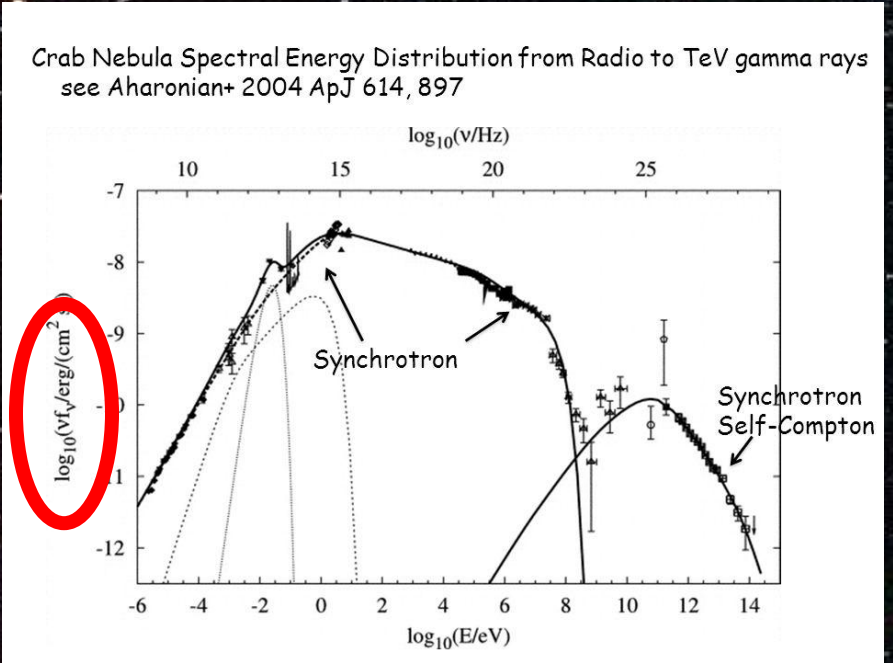
$$-\left(\frac{dE}{dt}\right) = \frac{4}{3} \sigma_T c U_{\text{mag}} \left(\frac{v}{c}\right)^2 \gamma^2$$

O espectro de cada elétron tem um pico em e harmônicos cada vez mais amplos, até esmaecer e se transformar em um contínuo (envelope). Para uma população temos

$$I\left(\frac{\omega}{\omega_g}, l\right) = \int_0^{E_{\text{max}}} \int_0^R \left(-\frac{dE}{dt}\right) n(E, r) dr dE d\omega$$



O exemplo astrofísico: a nebulosa do Caranguejo



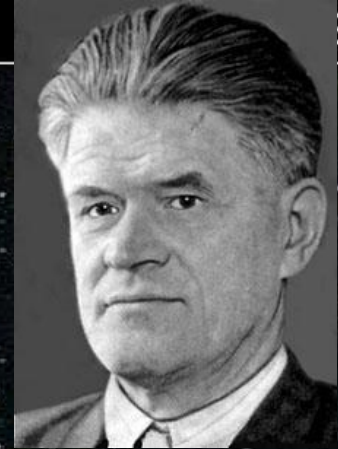
Em muitos casos (como este), elétrons injetados pela fonte na nebulosa com a distribuição de energia $n(E) \propto E^{-\Gamma}$ produzem um espectro do tipo

$$I(\omega) \propto \omega^{-\alpha} \text{ com } \alpha = \frac{1-\Gamma}{2}$$

Os astrônomos de imediato sabem que não está termalizada, é ópticamente fina

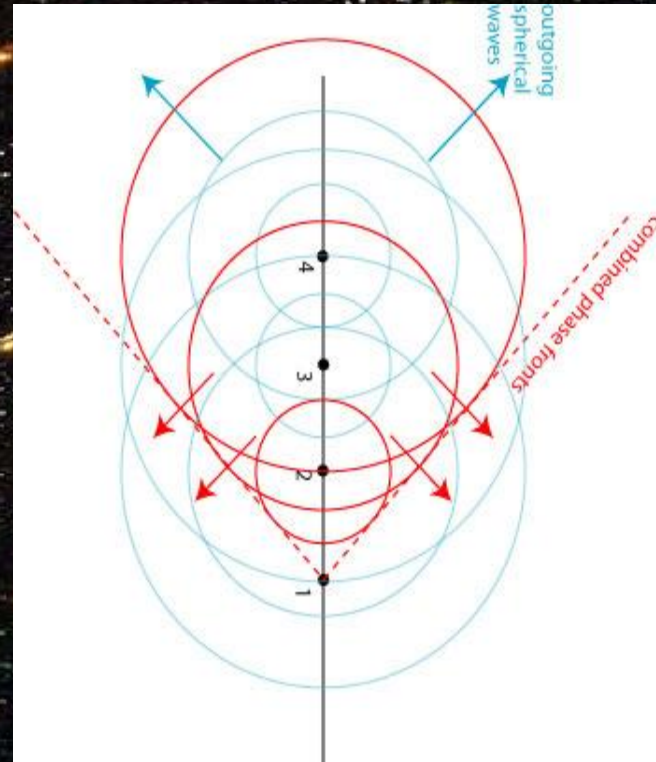
Intervalo !





Radiação de Čerenkov (1934)

Análogo da luz para um shock sónico



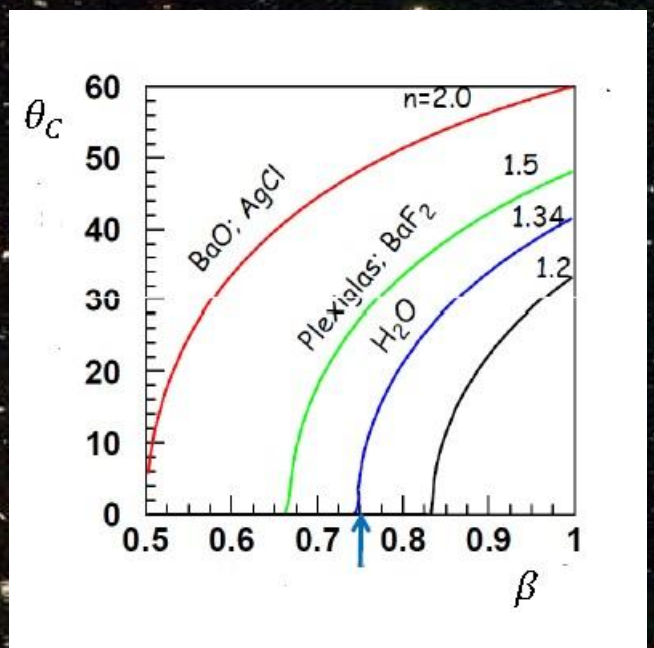
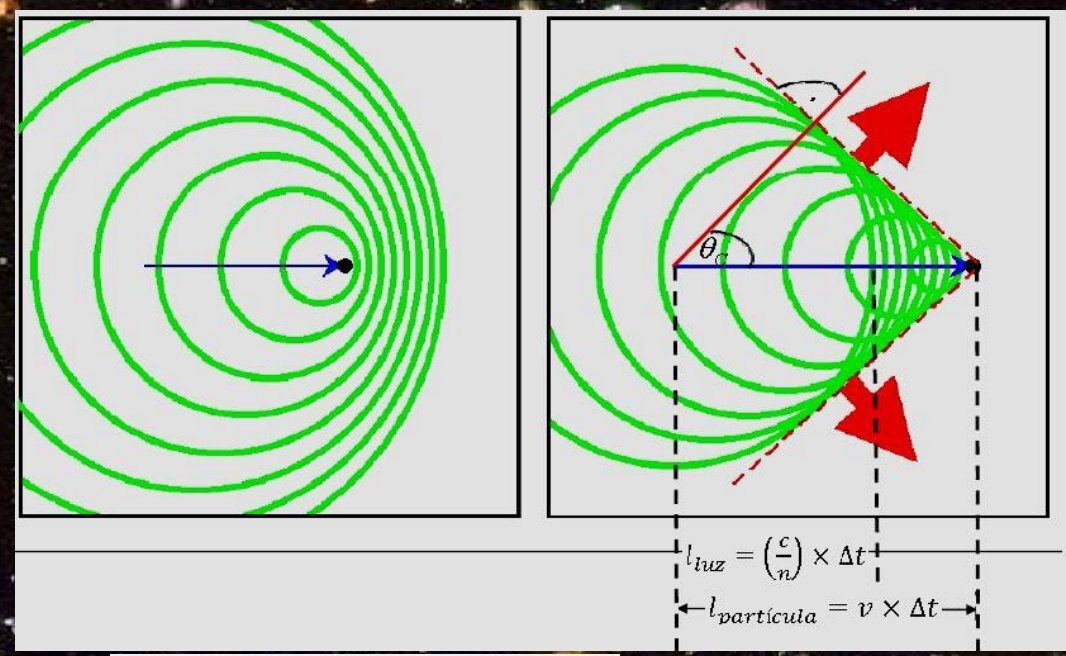
Uma partícula carregada pode viajar a uma velocidade maior do que a velocidade da luz no meio (mas menor que c !)

Exemplo: a água tem $n \sim 1.3$. A relação de dispersão dos fótons no meio é

$$\omega = 2\pi\nu = \frac{2\pi\left(\frac{c}{n}\right)}{\lambda} = k \frac{c}{n}$$

A partícula perde energia excitando moléculas na passagem, e a radiação de Čerenkov resulta da desexcitação destas

Cone de Čerenkov

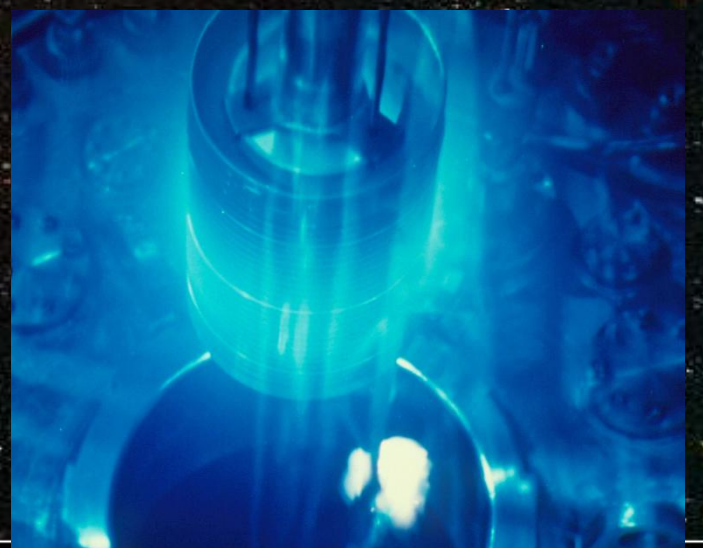


$$\cos \theta_c = \frac{\left(\frac{c}{n}\right) \times \Delta t}{v \times \Delta t} = \frac{1}{\beta n}$$

real se $\beta \geq \frac{1}{n}$

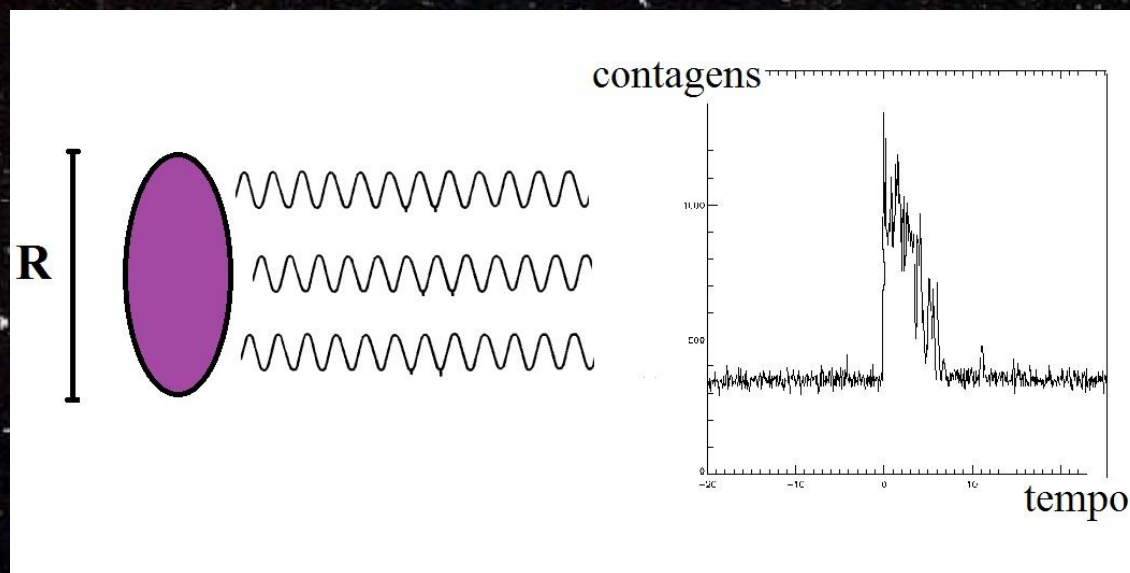
Número de fónons radiados

$$\frac{d^2 N}{dx d\lambda} = \frac{2\pi Z^2}{\lambda^2} \text{sen}^2 \theta_c \propto \frac{1}{\lambda^2}$$



Domínios temporal, espacial e espectral

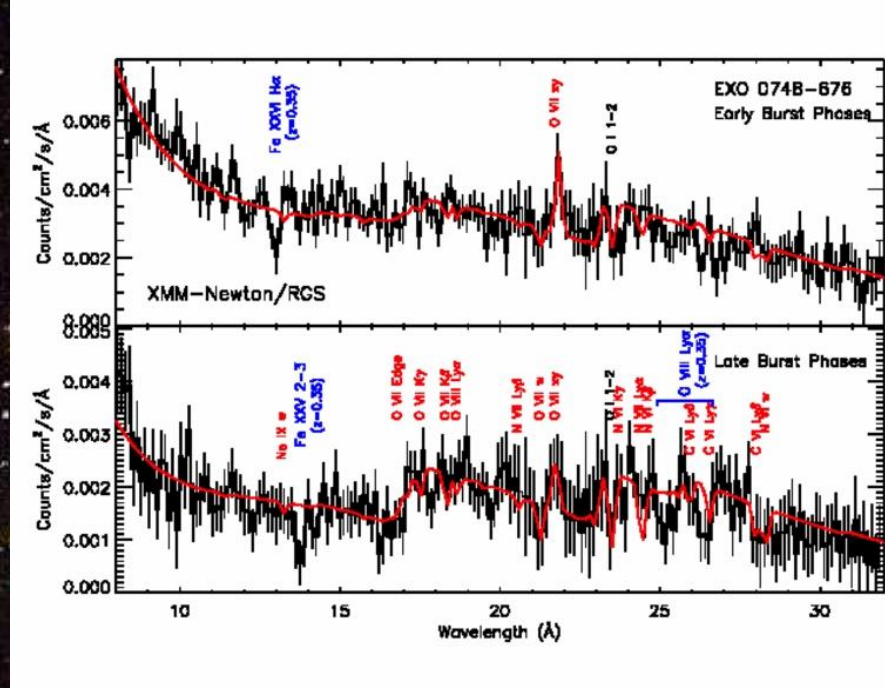
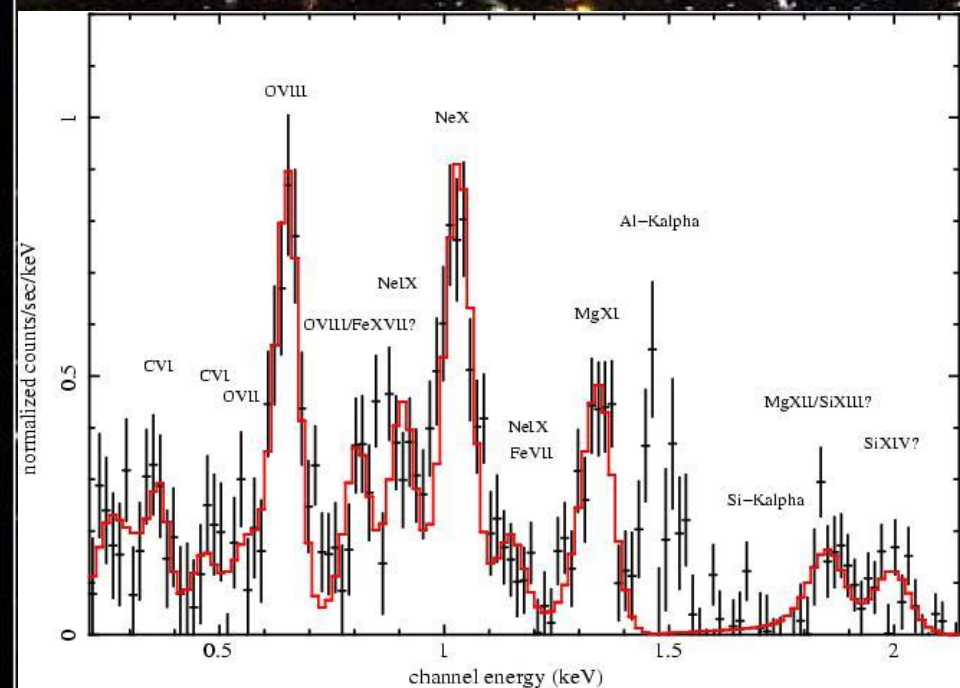
Variabilidade temporal: curvas de luz



Se τ é a menor escala temporal observada, então as dimensões da fonte devem cumprir $R \leq c \times \tau$. Por exemplo, se observarmos 1 ms, então seguro que a região é compacta (não necessariamente Toda a fonte, mas a região que participa da emissão)

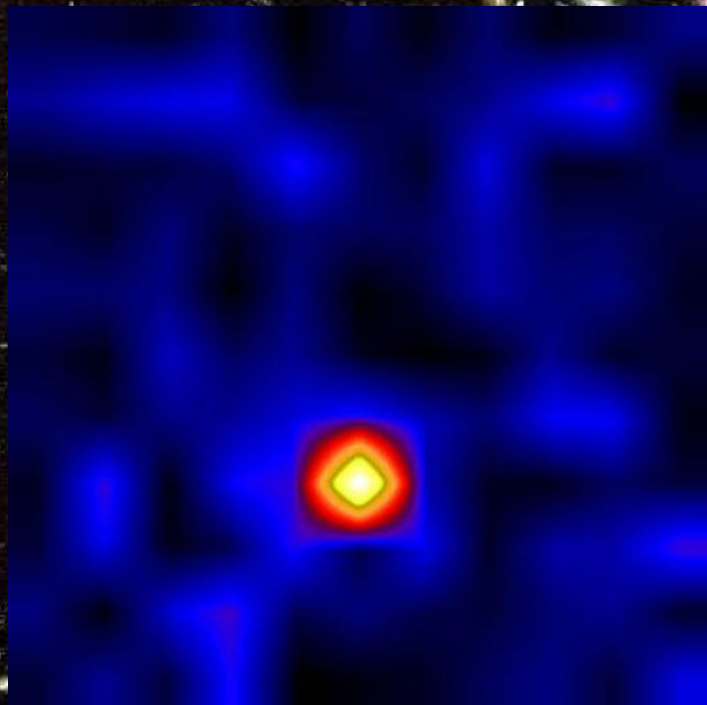
Espectros

Linhas de elementos de alta excitação, aniquilação, etc



Corona solar

Surto de raios X
(estrela de nêutrons)

Resolução espacial

Cygnus X-1 com o experimento no balão HERO (vários arcmin) e com o satélite CHANDRA (1 arcsec)

Efeitos adicionais nas linhas (nucleares, aniquilação, etc.)

1) Alargamento Doppler

Não relativístico $\frac{\Delta\nu}{\nu} = \frac{v}{c}$ deslocamento para o vermelho ou azul (v tem um sinal + ou -). Se o movimento da fonte é relativístico, há também Doppler transversal (predição da Relat.)

2) Redshift gravitacional

Os fótons que querem escapar de um campo gravitacional perdem energia. Sua frequência na chegada ao observador é

$$\nu_{\infty} = \nu \left(1 - \frac{2GM}{Rc^2}\right)^{1/2}$$

Nada a ver com a cosmologia.
Traz informação do objeto que produz o campo!

