

Interactions induites par les particules énergétiques

Interactions coulombiennes

- RC + MIS → ...

- Pertes d'énergie

NB: cas d'un milieu ionisé (e.g. plasma interstellaire)

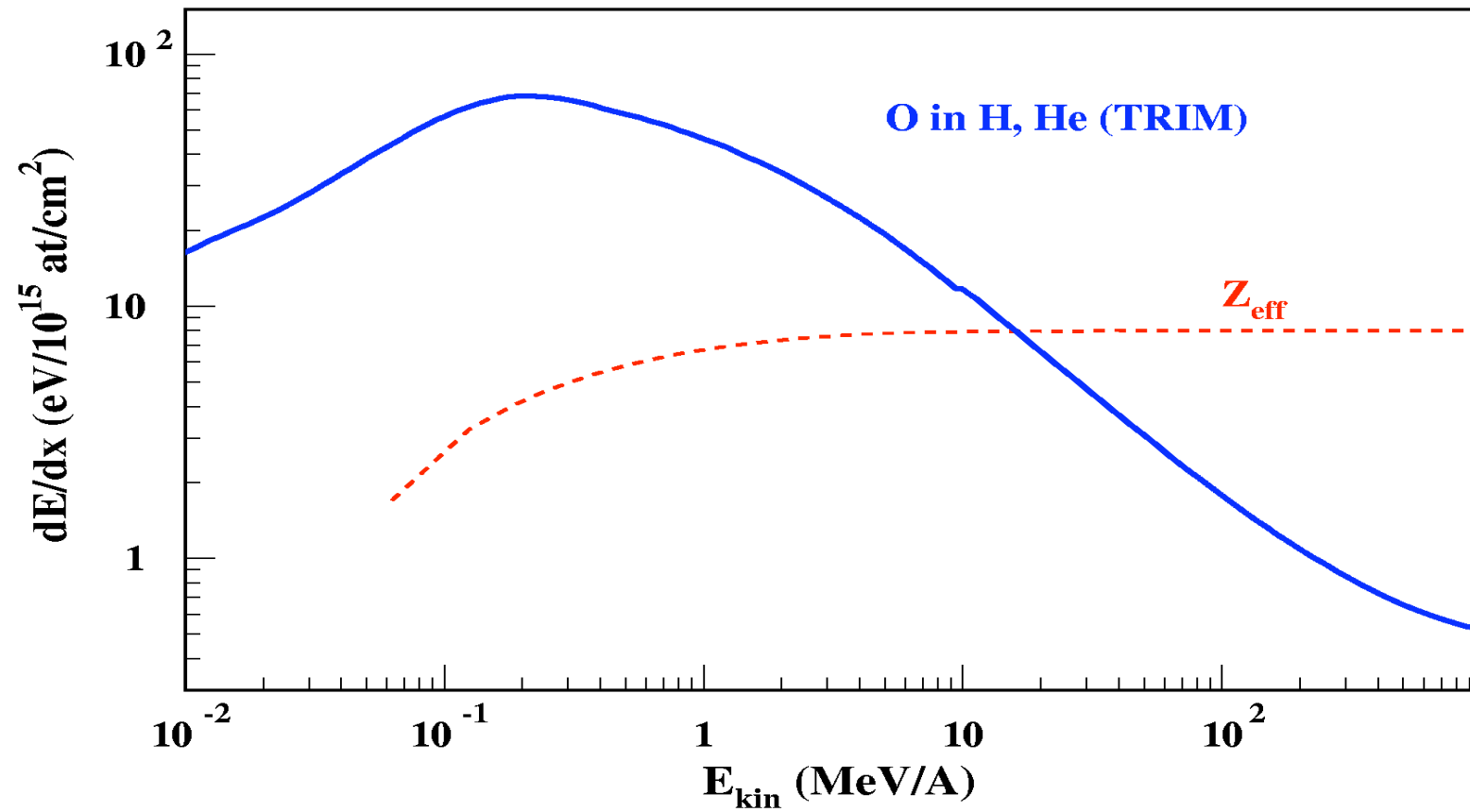
- Ionisation

indirectement observable (H_3^+) + influence sur l'astrochimie + régulation de la formation d'étoiles, etc.

e^- produits → nouvelles ionisations, Bremsstrahlung → rayonnement

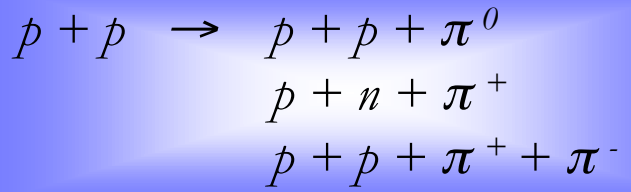
- Chauffage

Cas des noyaux : charge effective...

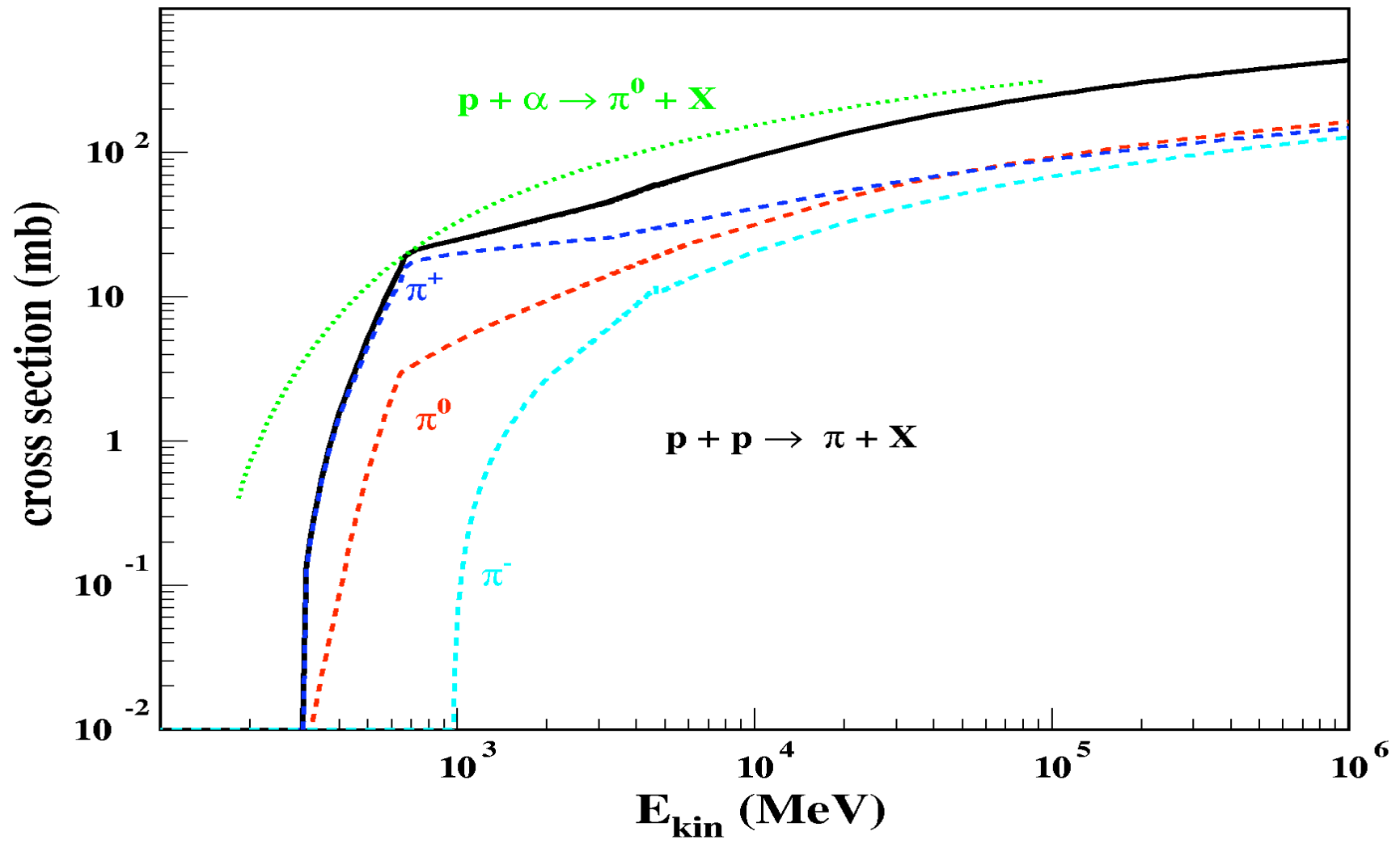


Processus nucléaires

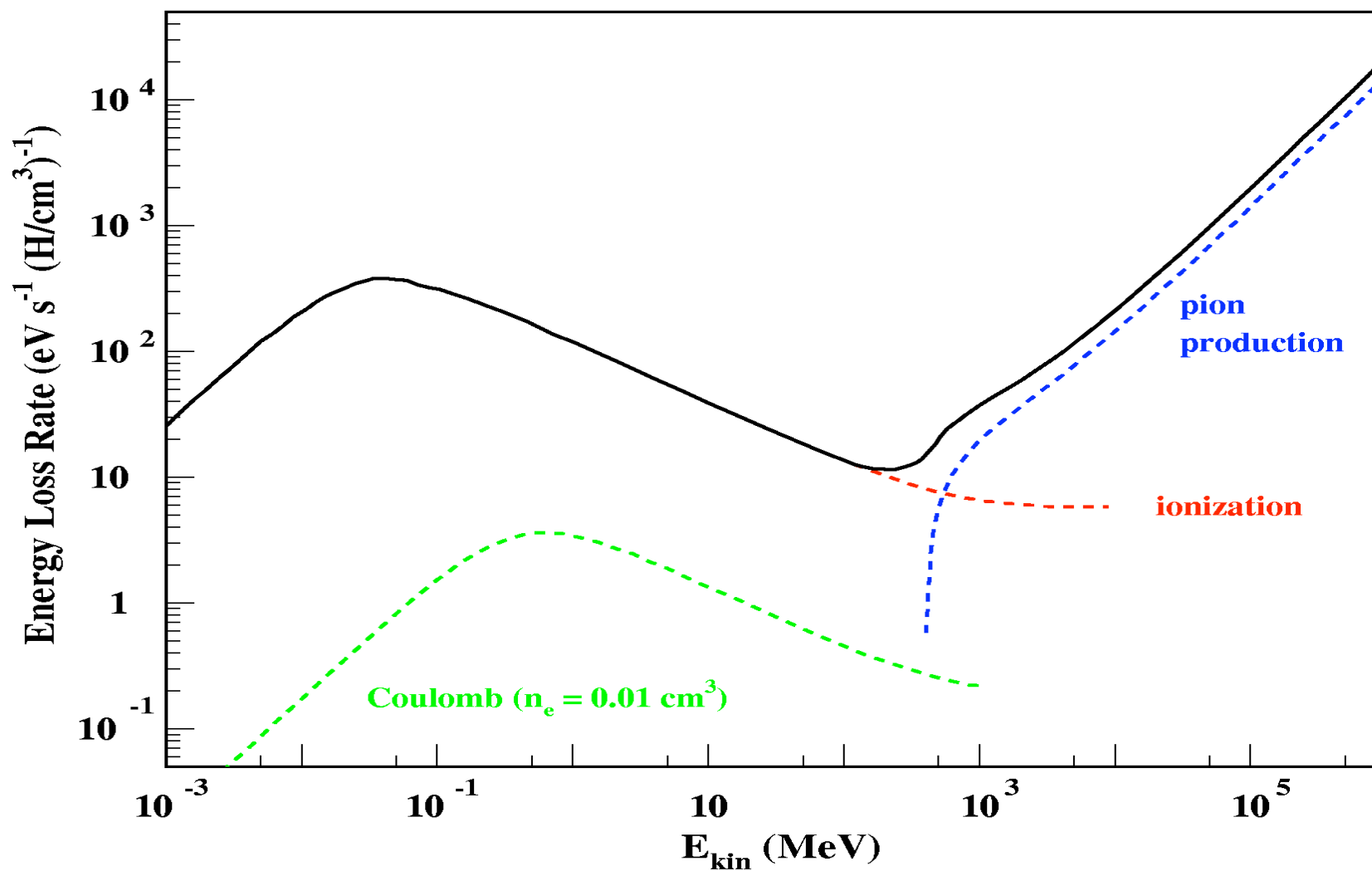
- Production de pions --> pertes et rayonnement !
- Spallation, fragmentation
- Excitations nucléaires --> raies gamma
- Décroissance radioactive



(diffusion élastique)



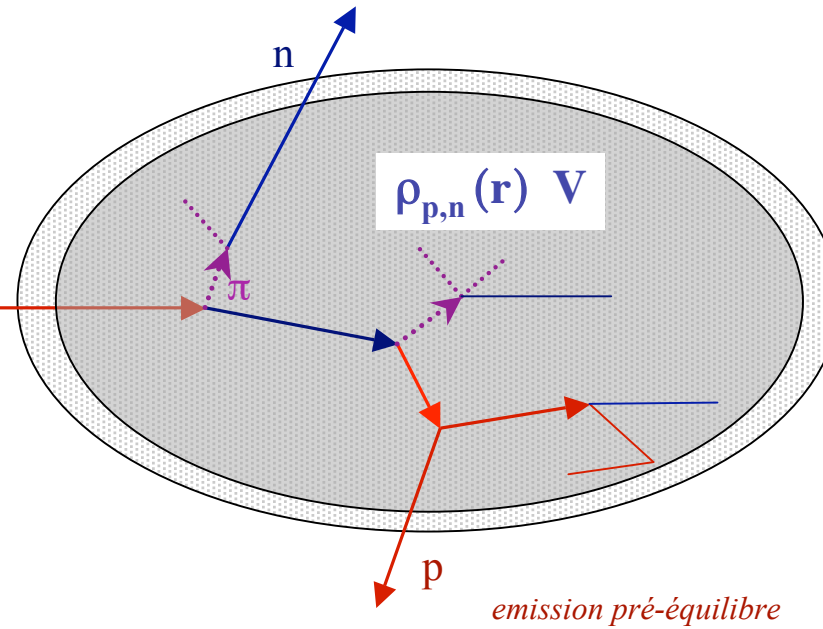
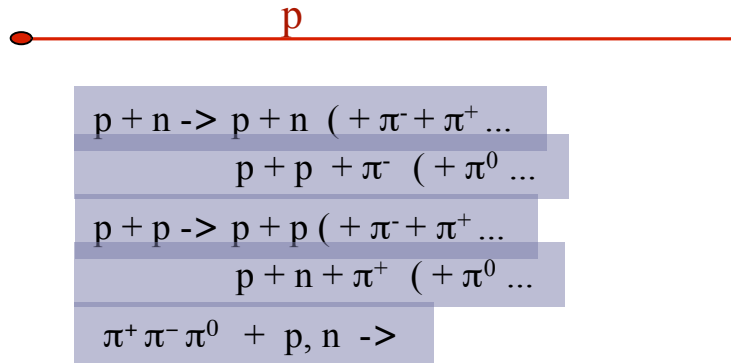
Pertes d'énergie des protons dans le MIS



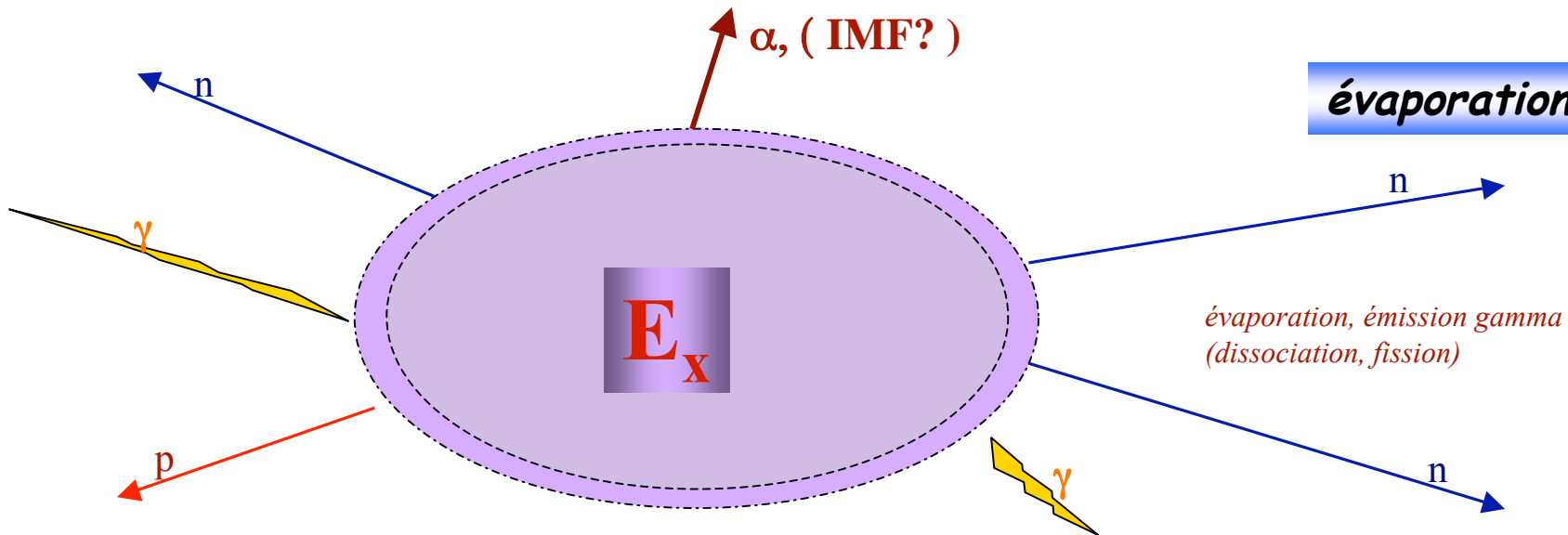
Réactions nucléaires: spallation

cascade intra-nucléaire

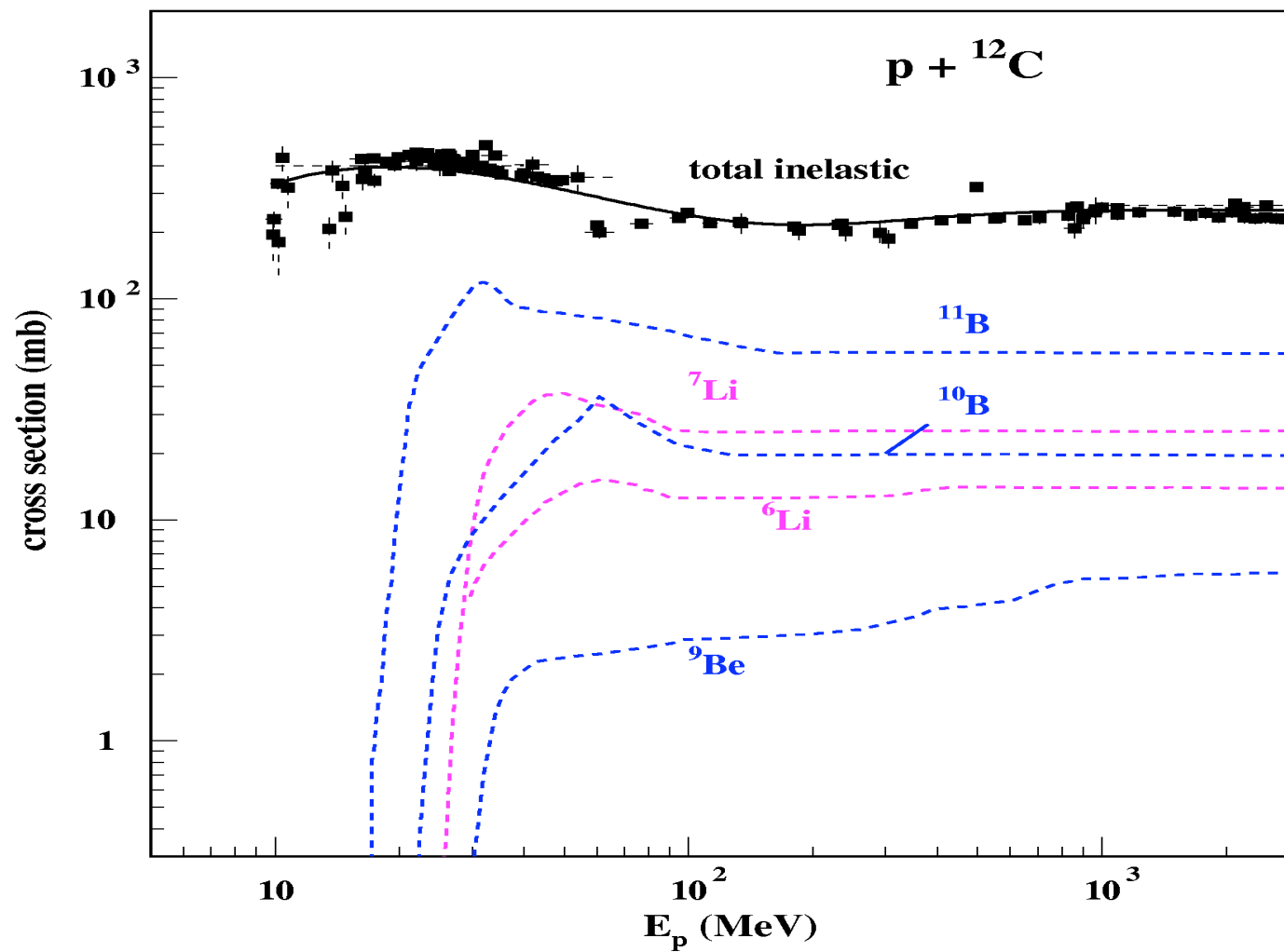
$\sigma_{N-N} \sigma_{N-\pi}$
Pauli blocking

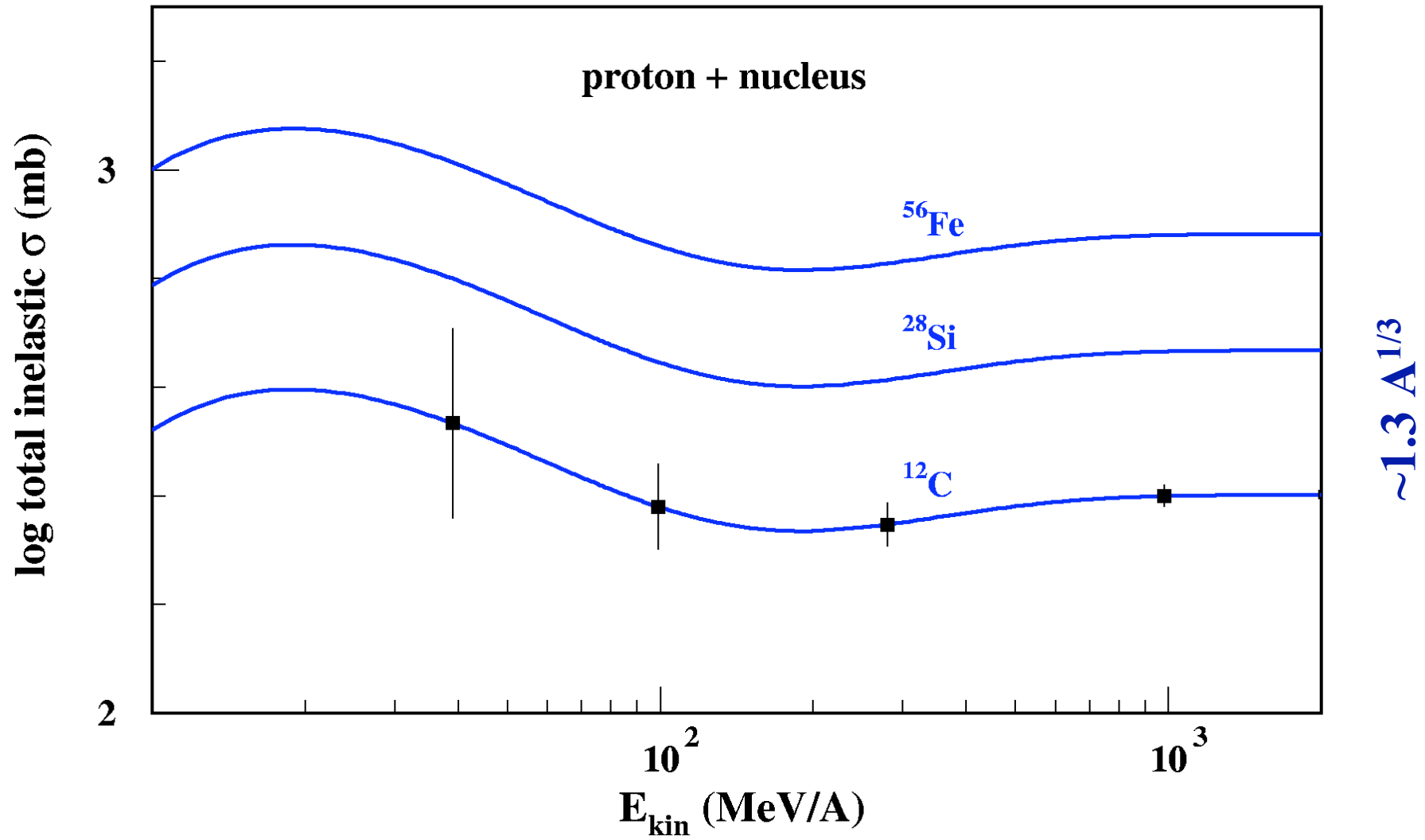


évaporation

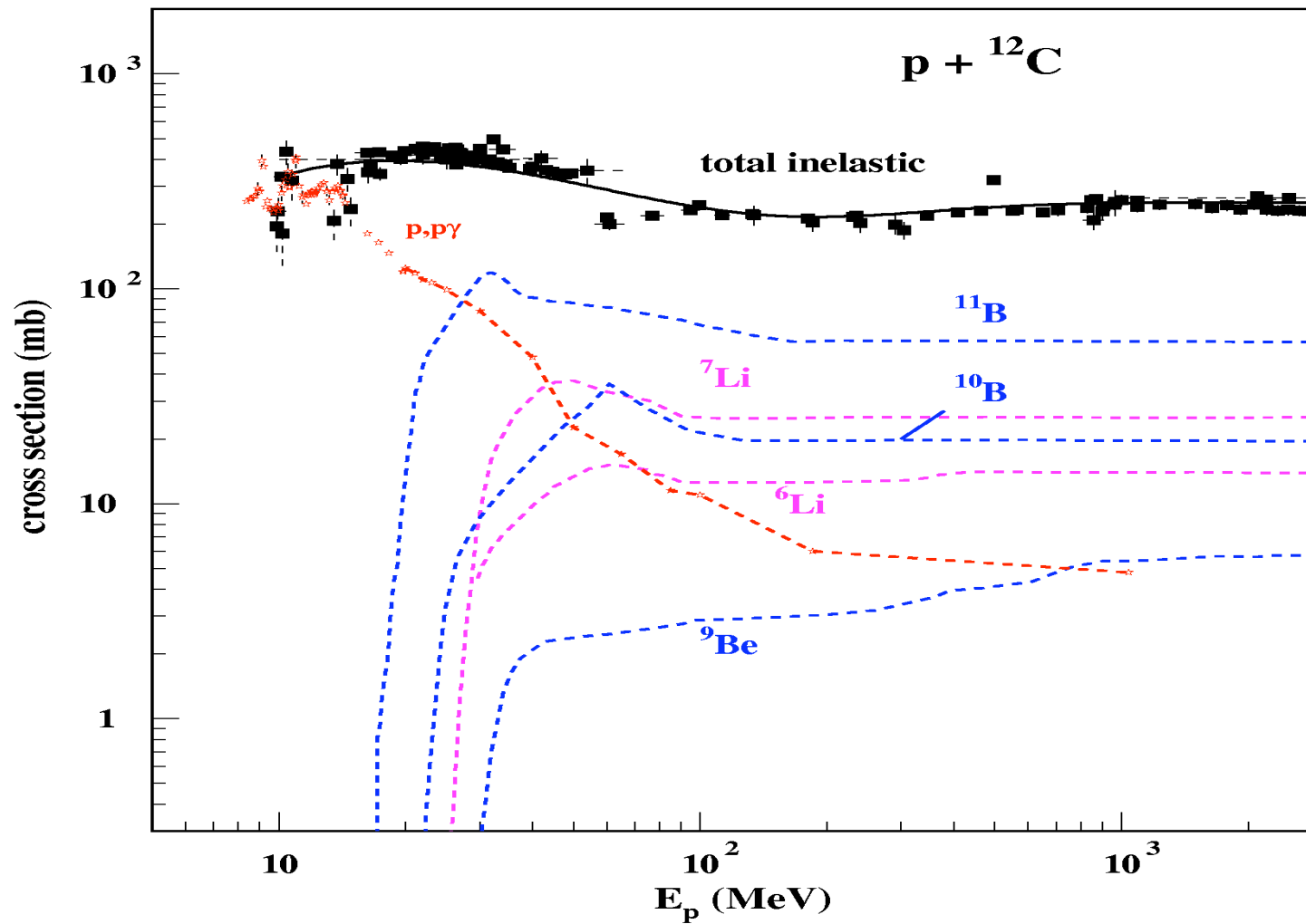


Sections efficaces partielles : fonctions d'excitation



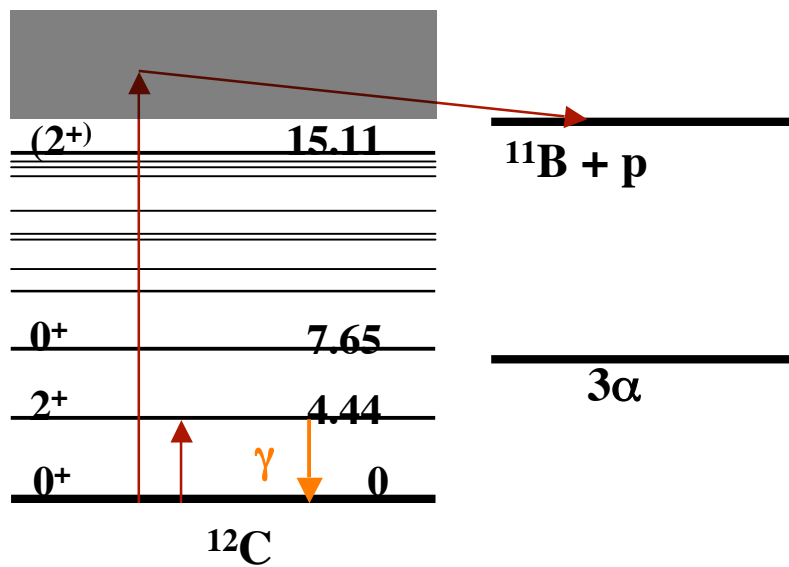
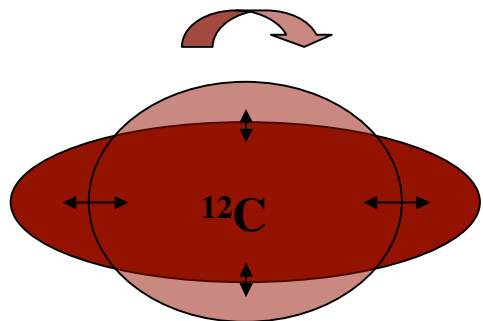


Sections efficaces partielles : fonctions d'excitation

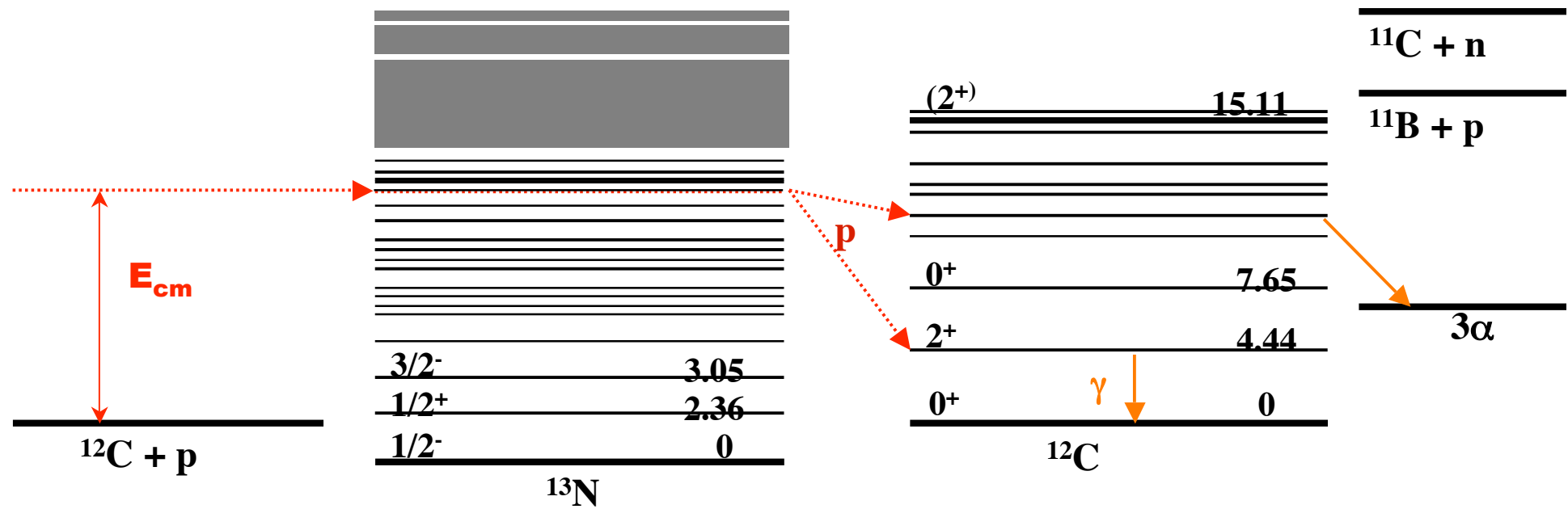


excit. collectifs, (single part.)
vibrations, rotations

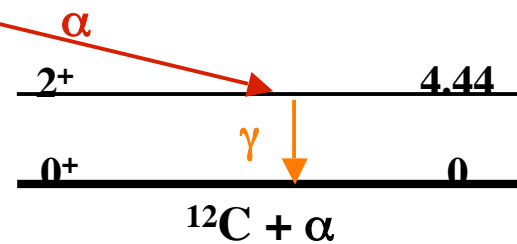
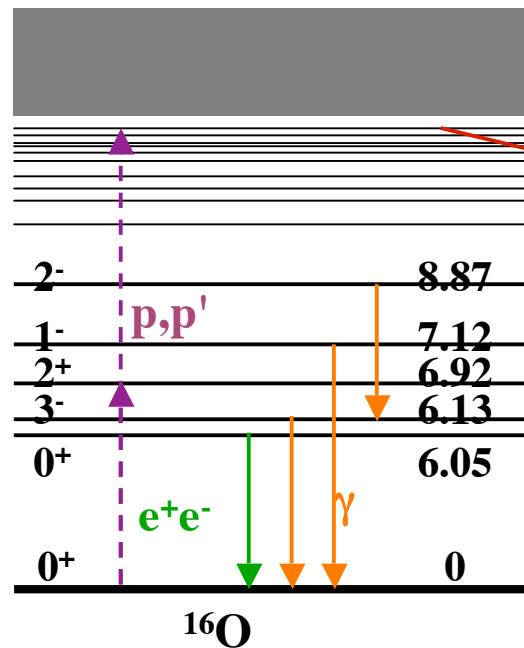
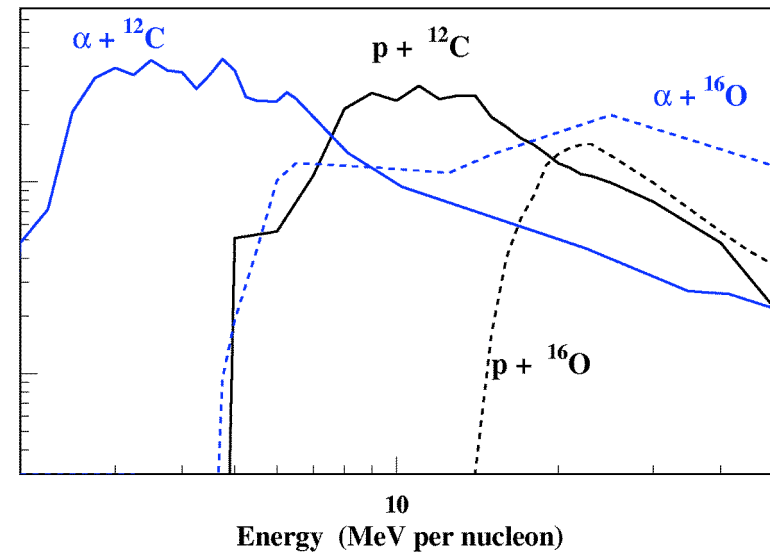
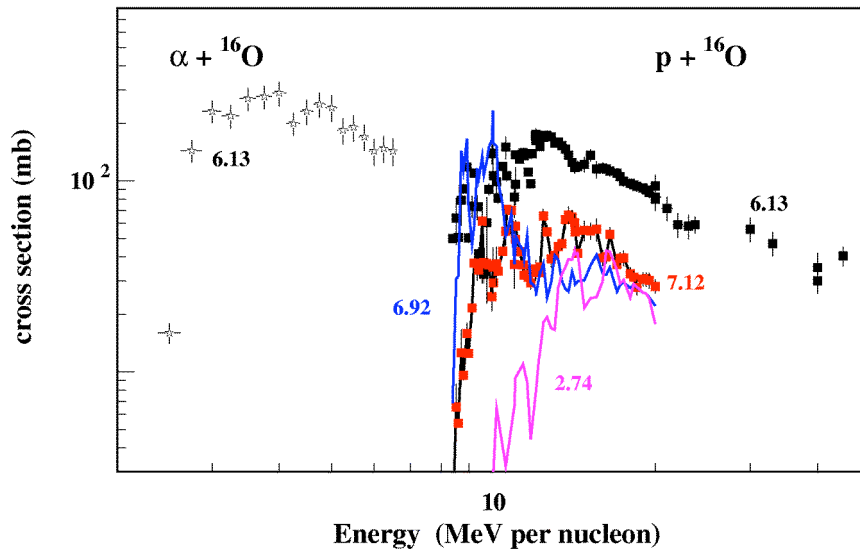
p



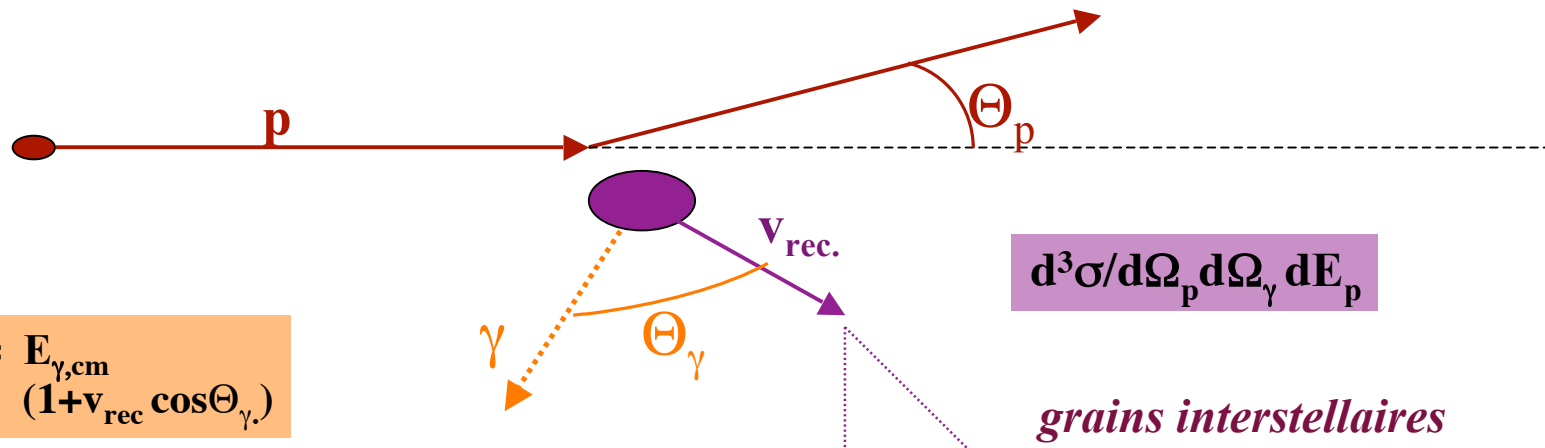
Modèle du noyau composé



sections efficaces de production gamma: ^{16}O , ^{12}C

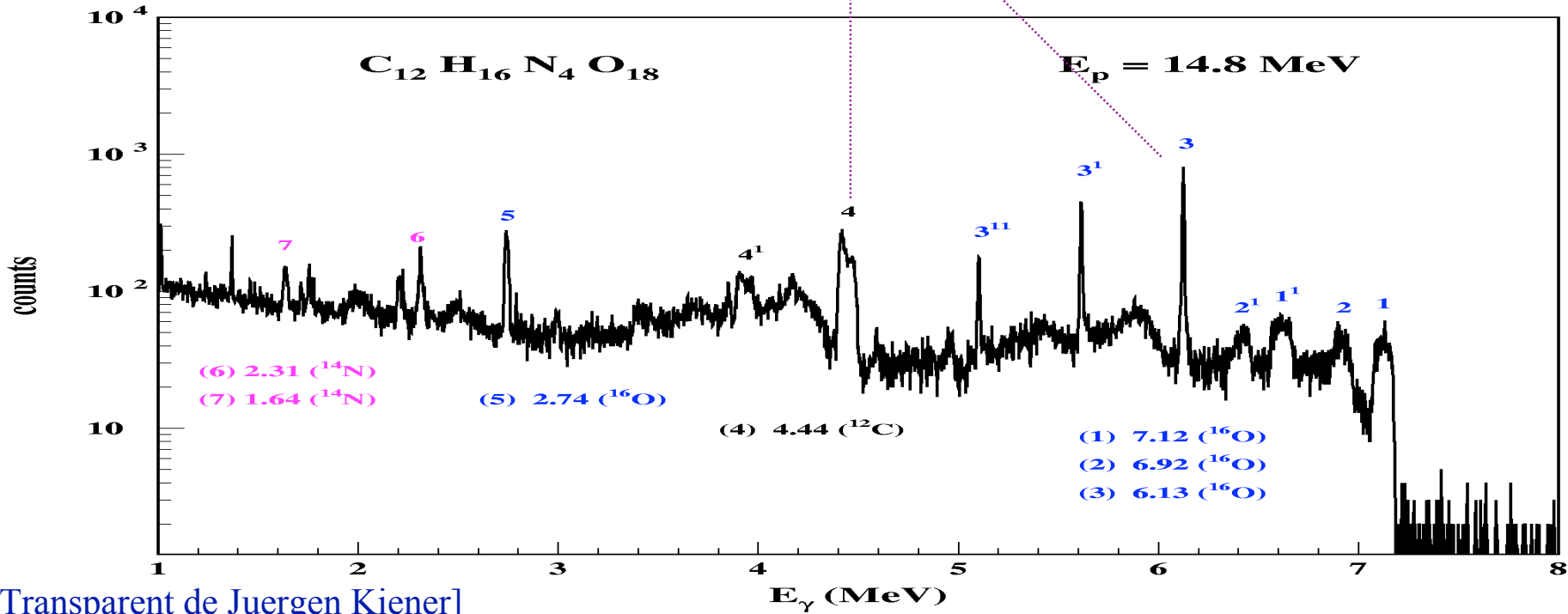


sections efficaces différentielles



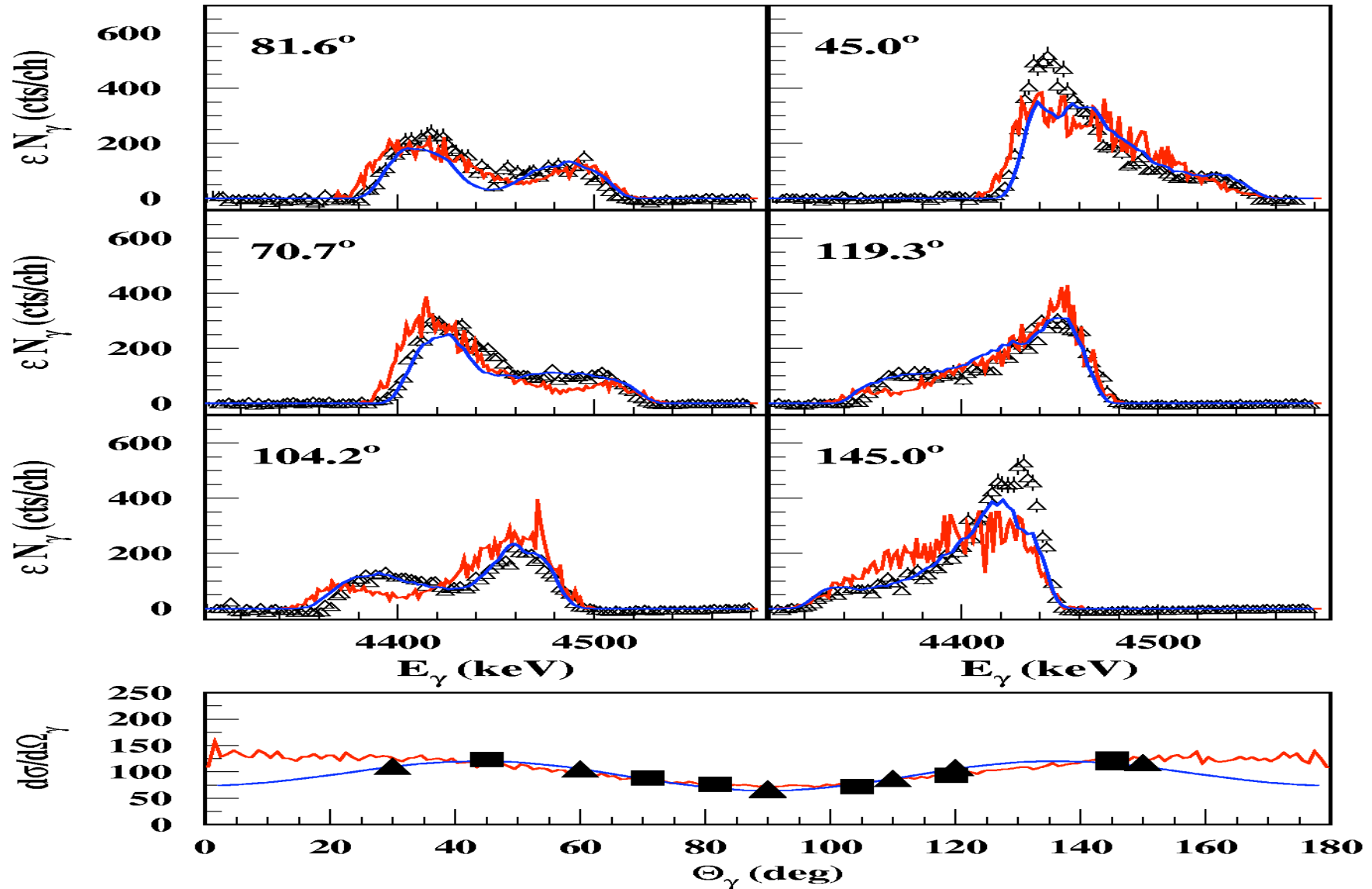
$$E_{\gamma,lab} = E_{\gamma,cm} (1 + v_{rec} \cos\Theta_\gamma)$$

$\Theta_{Ge} = 81.6^\circ$



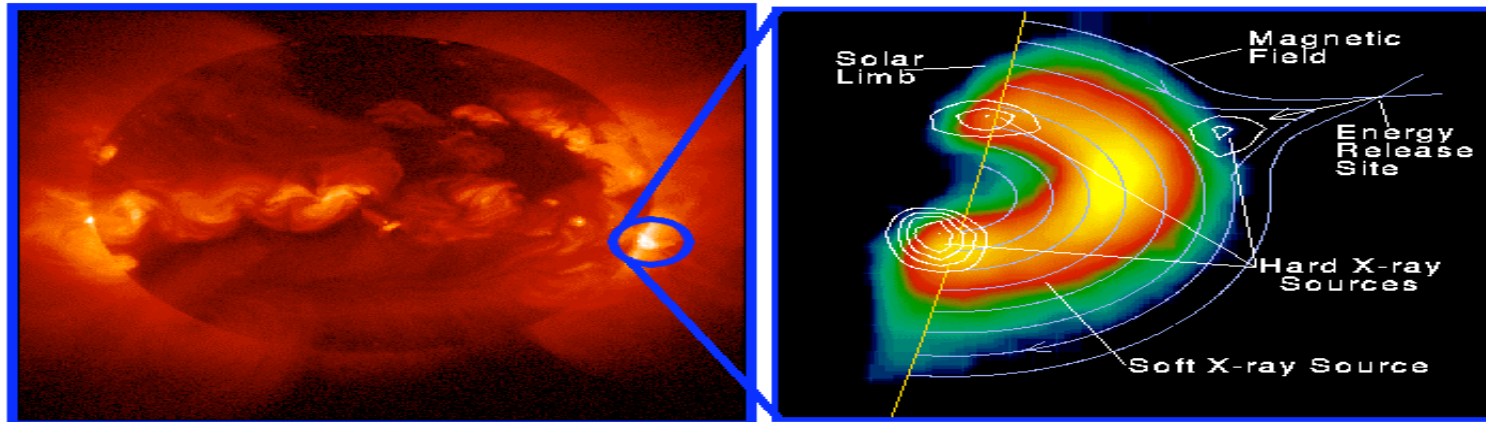
[Transparent de Juergen Kiener]

raies gamma nucléaires: profile

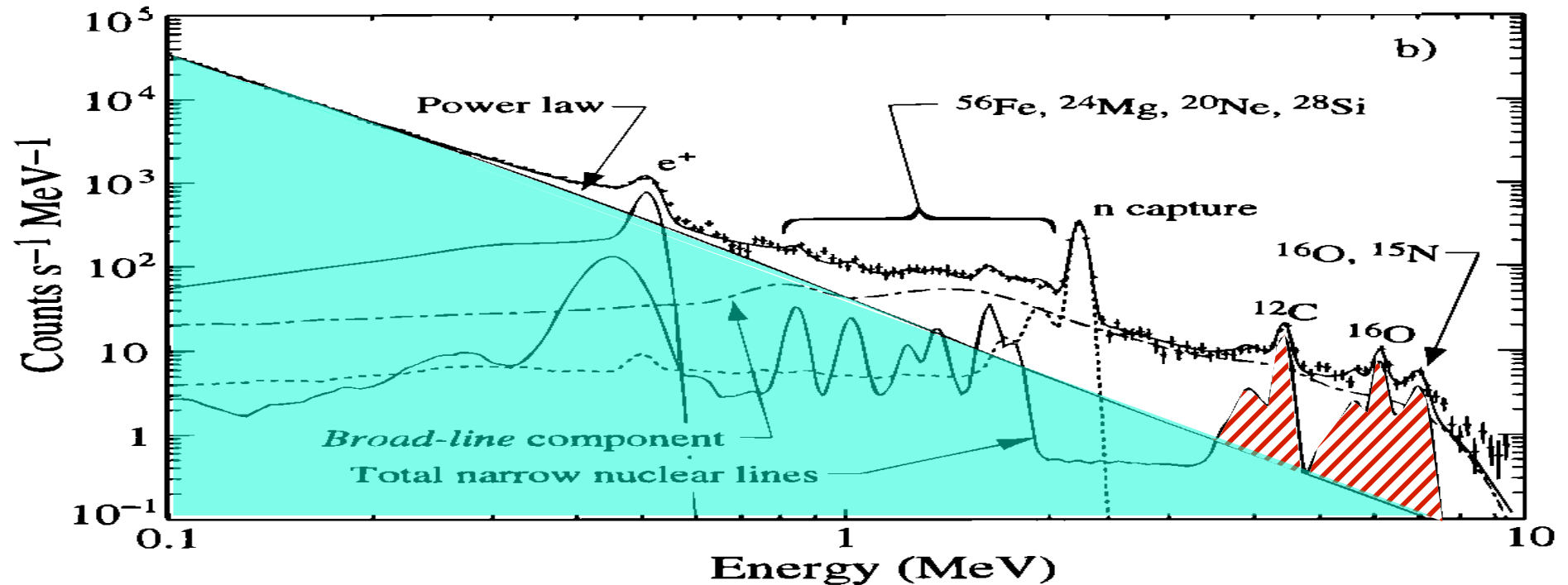


[Transparent de Juergen Kiener]

émission gamma des flares solaires

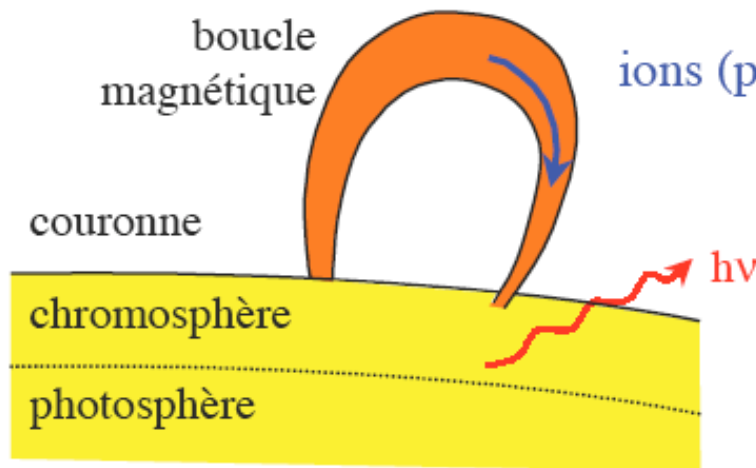


Yohkoh X-ray Image of a Solar Flare, Combined Image in Soft X-rays (left) and Soft X-rays with Hard X-ray Contours (right). Jan 13, 1992.



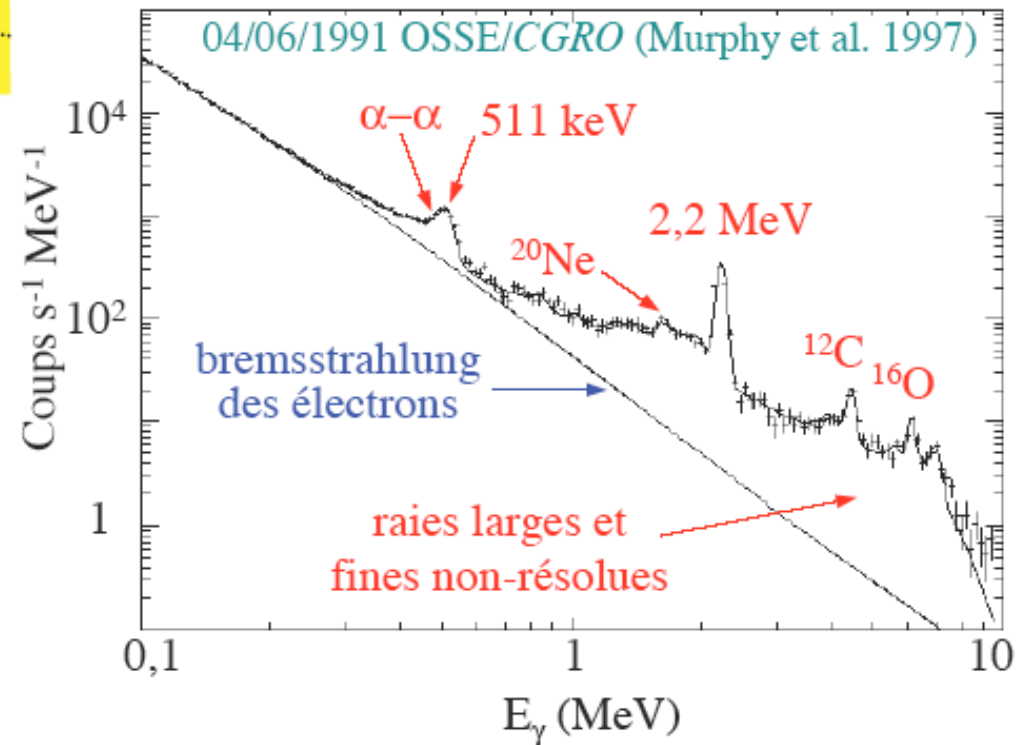
[Transparent de Juergen Kiener]

Raies γ nucléaires – l'exemple des éruptions solaires

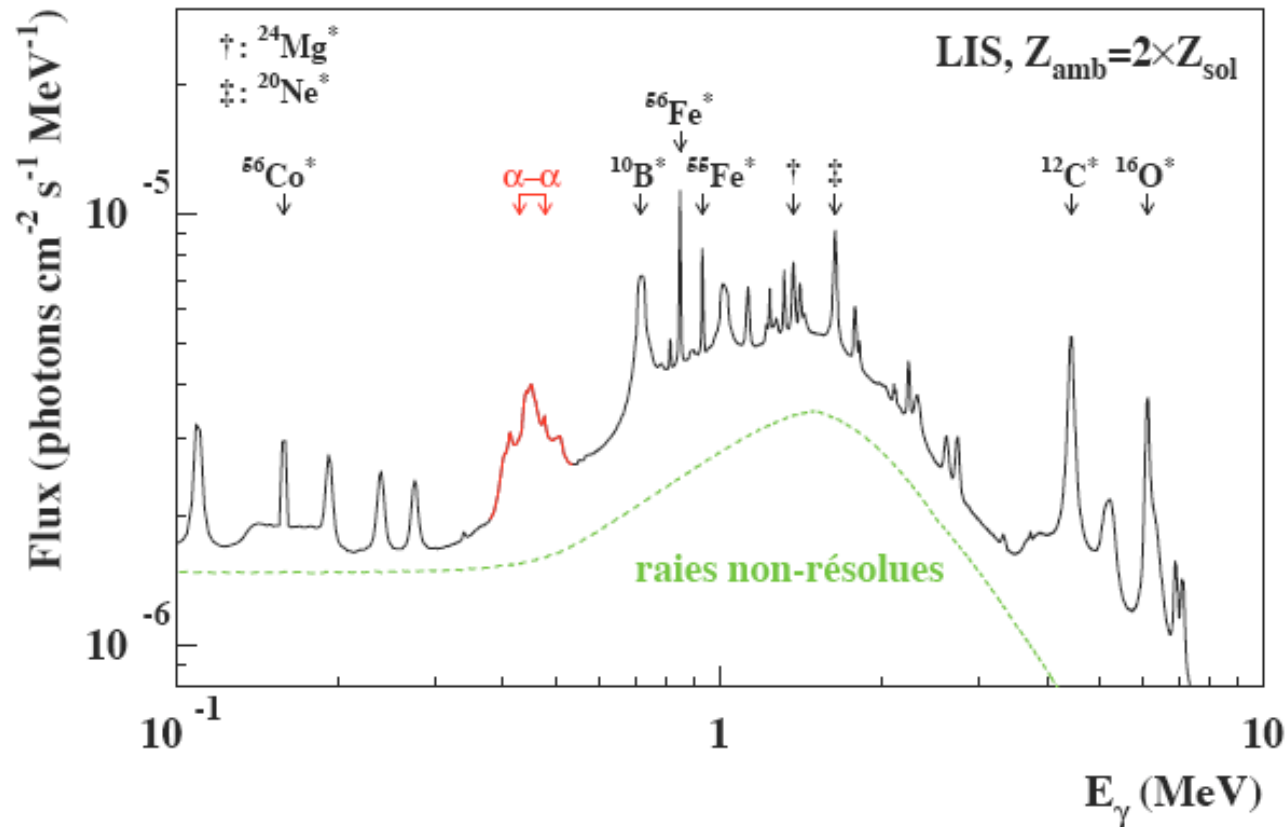


➤ Spectroscopie γ (18 raies fines observées avant *RHESSI*)

- Raies fines : $^{12}\text{C} + p \rightarrow ^{12}\text{C}^* \rightarrow h\nu$
- Raies larges : $^{12}\text{C} + p \rightarrow ^{12}\text{C}^* \rightarrow h\nu$
- Raie $\alpha-\alpha$: $^7\text{Be}^*$ et $^7\text{Li}^*$
- Raie à 511 keV : émetteurs β^+
- Raie à 2,223 MeV : $^1\text{H}(n, \gamma_{2,223})^2\text{H}$



Interaction du rayonnement cosmique – raies γ



D'après Ramaty et al.

- Raies fines : $^{12}\text{C}(p,p')^{12}\text{C}^*_{4,439}$, $^{12}\text{C}(\alpha,\alpha')^{12}\text{C}^*_{4,439}$, $^{12}\text{C}(p,2pn)^{10}\text{B}^*_{0,718}\dots$
- Raies larges : $^1\text{H}(^{56}\text{Fe}, ^{56}\text{Co}^*_{0,158})n\dots$ • Raie $\alpha-\alpha$
- Pas de raie à 2,223 MeV dans le milieu interstellaire ($T_{1/2}(n) = 614 \text{ s}$)
- Raie à 511 keV dominé par les produits de la nucléosynthèse stellaire (^{56}Co , $^{44}\text{Sc}\dots$)

Raies γ produites dans les grains de poussière du MIS

Lingenfelter & Ramaty (1977)

Exemple de la raie de ^{16}O à 6129 keV
($T_{1/2}=18,4$ ps)

➤ $\sim 1/2$ de l'O du milieu interstellaire est contenue dans les grains de poussière

➤ Pour $E_{\text{rec}}(^{16}\text{O}^*) = 1$ MeV

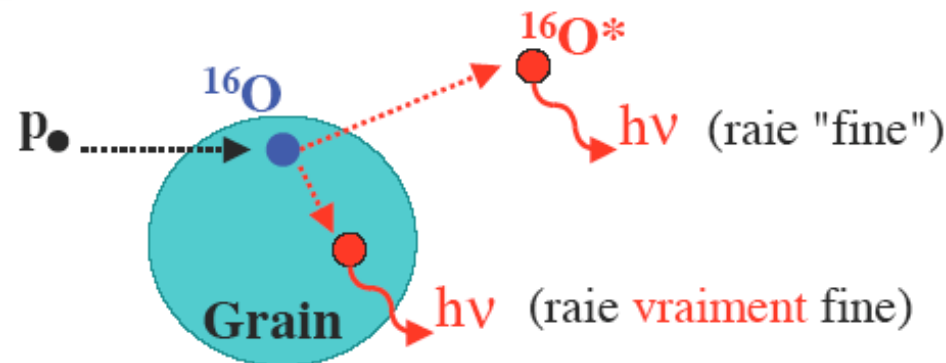
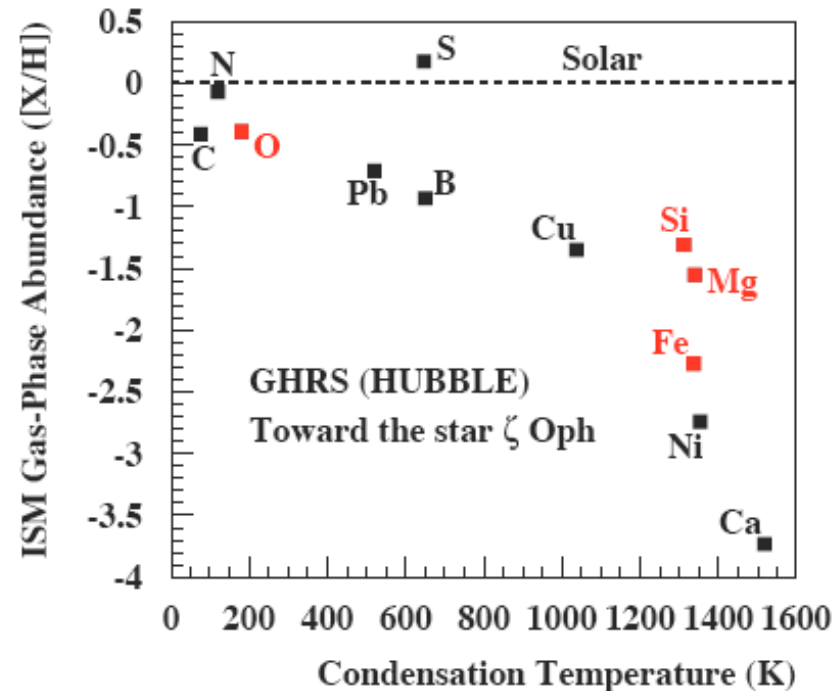
• Temps de ralentissement :

$$t_{\text{ral}} \approx \frac{E_{\text{rec}}}{(dE/dt)} = \frac{1 \text{ MeV}}{3,8 \times 10^{12} \text{ MeV/s}} = 0,26 \text{ ps}$$

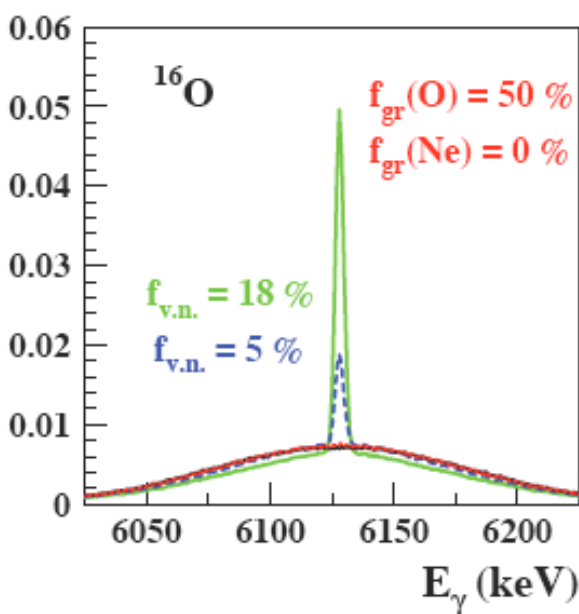
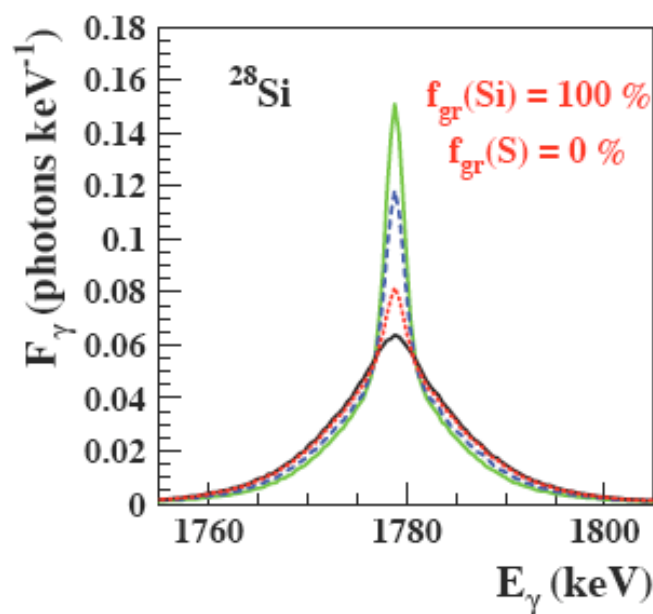
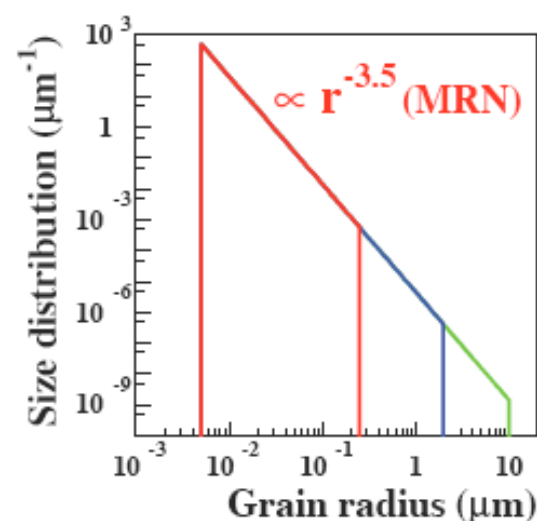
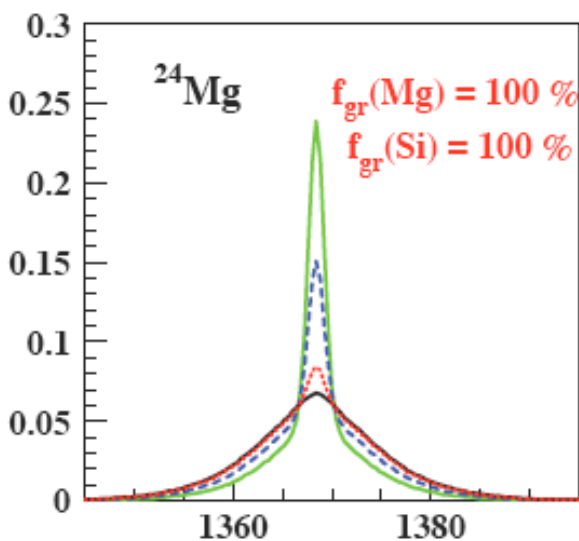
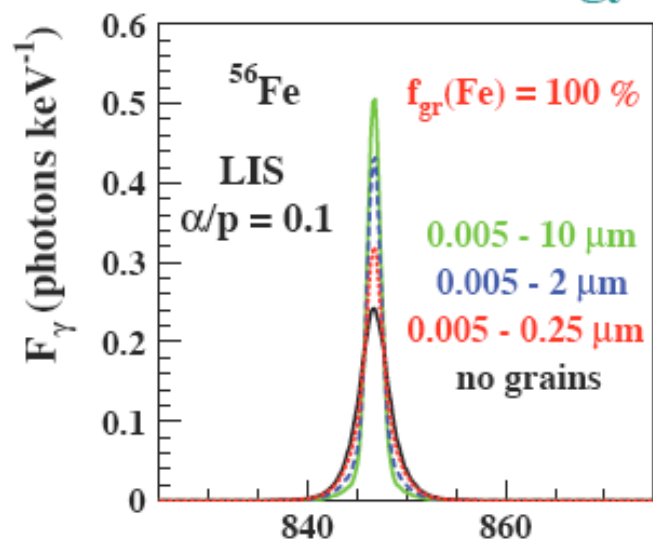
• Parcours dans silicate :

$$R(1 \text{ MeV}) = 1,4 \text{ } \mu\text{m}$$

⇒ Composante très fine



Gamma-ray line profiles with the energy resolution of SPI



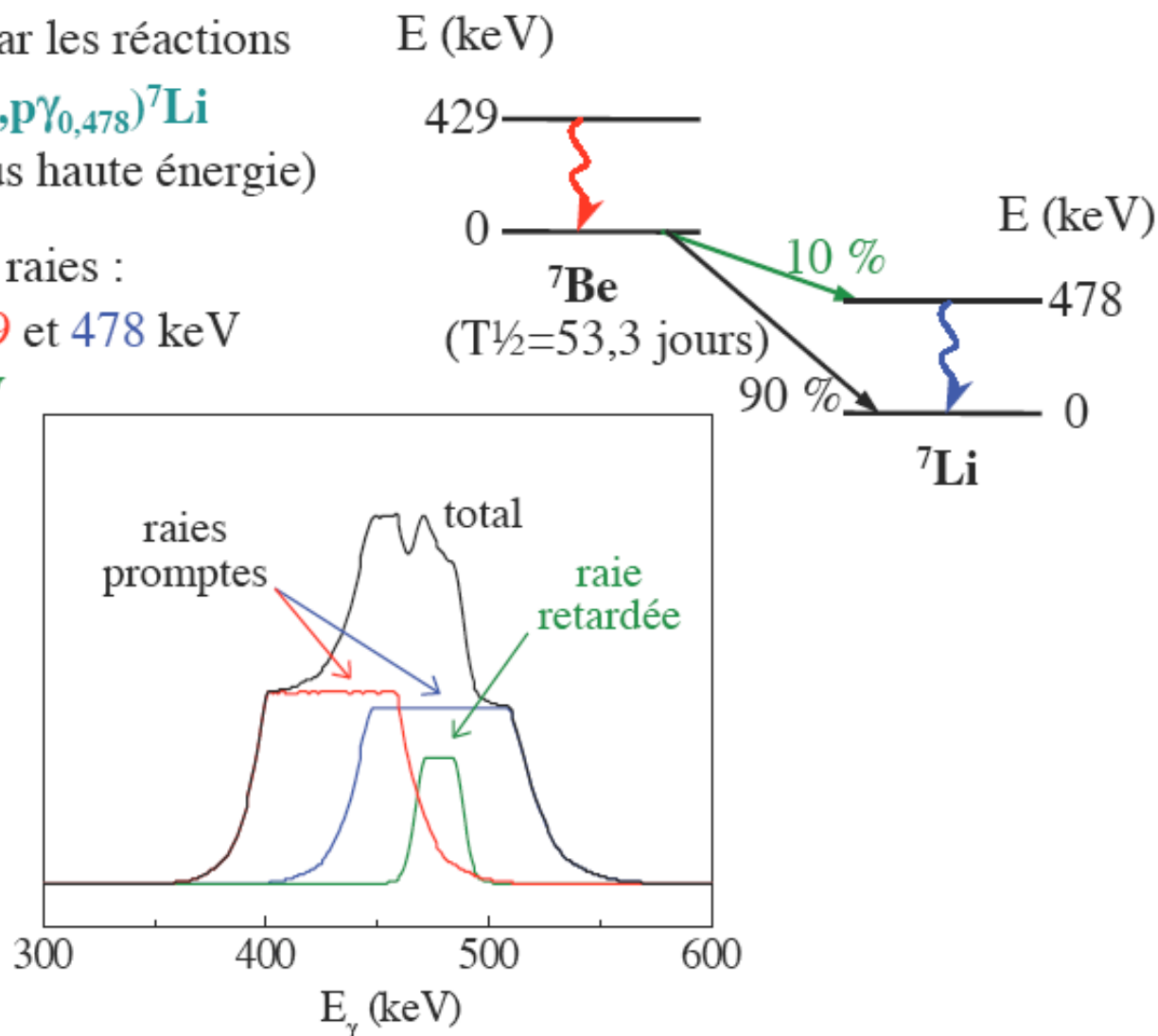
- MRN (extinction curve). IR emission of interstellar dust (e.g. Dwek et al 1997)
- *Ulysses* and *Galileo* detection of interstellar grains + X-ray scattering halos (e.g. Witt et al 2001)
- Presolar grains of stellar origin (e.g. Zinner 1998)

Raie du ${}^7\text{Li}$ - ${}^7\text{Be}$ (ou raie α - α)

- Essentiellement produite par les réactions ${}^4\text{He}(\alpha, n\gamma_{0,429}){}^7\text{Be}$ et ${}^4\text{He}(\alpha, p\gamma_{0,478}){}^7\text{Li}$ (+ spallation du CNO à plus haute énergie)

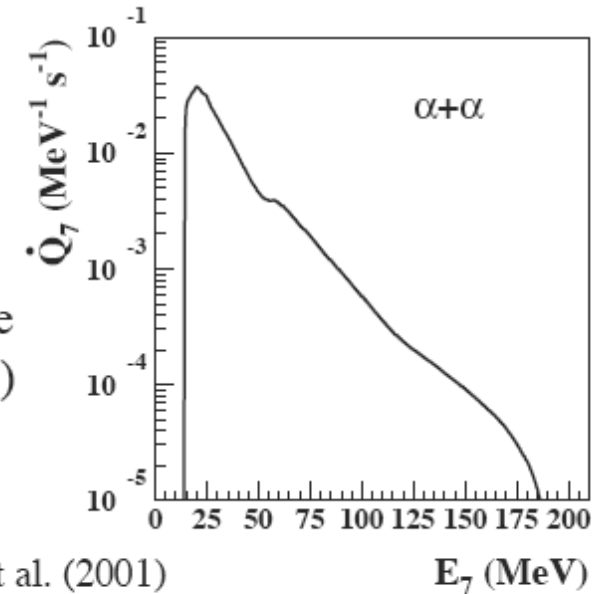
- Raie large car somme de 3 raies :
 - les 2 raies promptes à 429 et 478 keV
 - la raie retardée à 478 keV de désintégration du ${}^7\text{Be}$

- Le ${}^7\text{Be}$ décroît par capture électronique
 - ↓
 - Influence du cortège atomique !



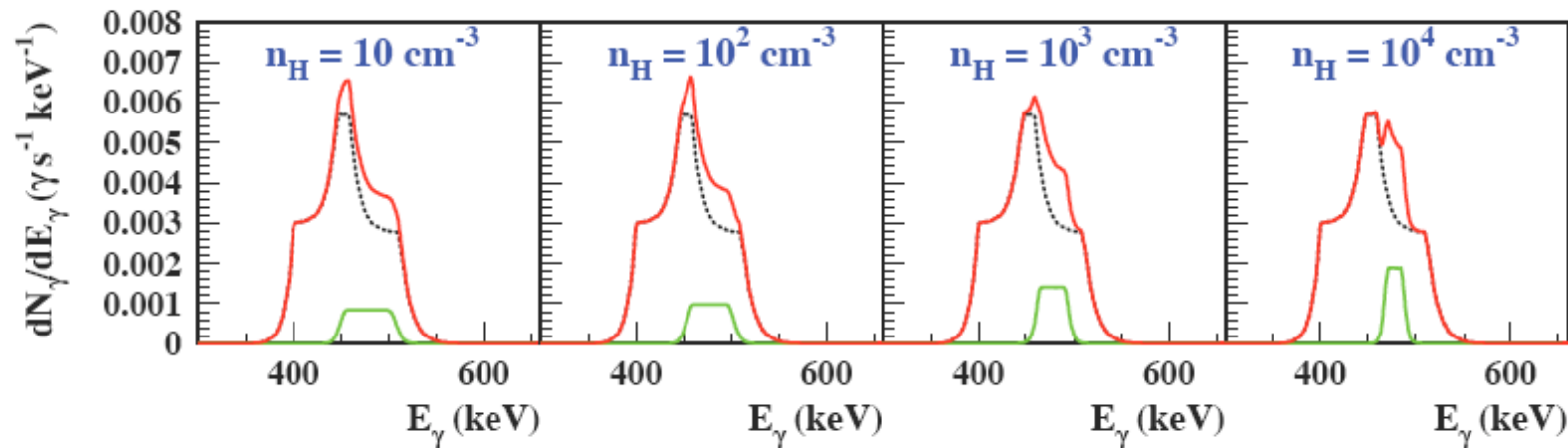
Raie de désintégration du ^7Be

- Le ^7Be est produit totalement épluché
 \Rightarrow initialement stable dans le MIS ($T_{1/2} > 10^{20}$ ans)
- L'ion ralentit, capture un (des) électron(s) puis décroît
 $(T_{1/2}=94$ jours pour $1 e^-$ 1s, 55 jours pour $2 e^-$ 1s)
- (i) Milieu "dense" : il décroît à relativement basse vitesse
 \Rightarrow raie γ étroite (émission "à l'arrêt" pour $n_H > 10^6 \text{ cm}^{-3}$)
- (ii) Milieu "dilué" : il décroît à plus grande vitesse
 \Rightarrow raie γ plus large



Tatischeff et al. (2001)

E_7 (MeV)



L'émission totale de raies γ

➤ **Raies non-résolues** (décroissance d'états d'énergie élevée)

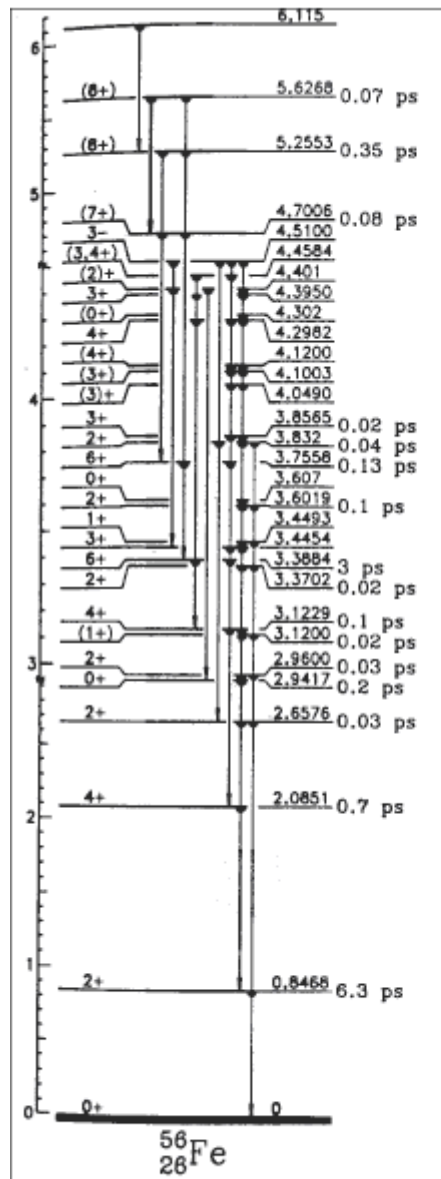
- $\sim 1/2$ (?) du flux γ total < 3 MeV (Ramaty et al.)
- Distribution en énergie ?

➤ Ordre de grandeur du flux galactique (norm. $\equiv E_\gamma(\pi^0)$) :

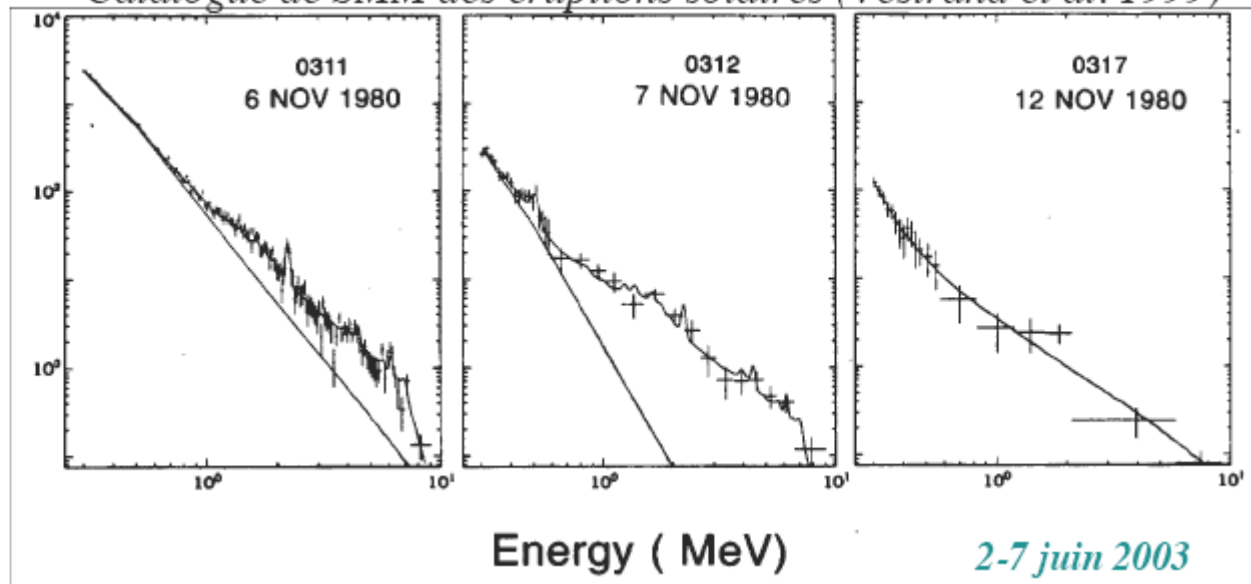
- **Sections efficaces de réaction totale** (inélastique)
- $\langle M_\gamma \rangle = 1 \pm 0,7$ photon par réaction pour $p, \alpha + \text{CNO}$
- $= 3 \pm 2$ photon par réaction pour $p, \alpha + A > 16$

$\Rightarrow \Phi_\gamma(\text{total}) = (6 \pm 4) \times 10^{-5} \text{ photons cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$ (IBIS ?)

Catalogue de SMM des éruptions solaires (Vestrand et al. 1999)



Ecole PARC, Goutelas



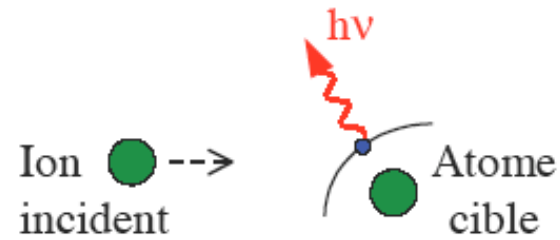
[Transparent de Vincent Tatischeff]

Interaction du rayonnement cosmique – Emission X (1)

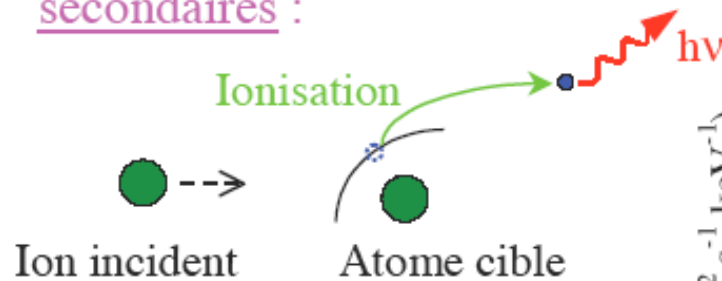
➤ Continuum :

- Bremsstrahlung inverse :

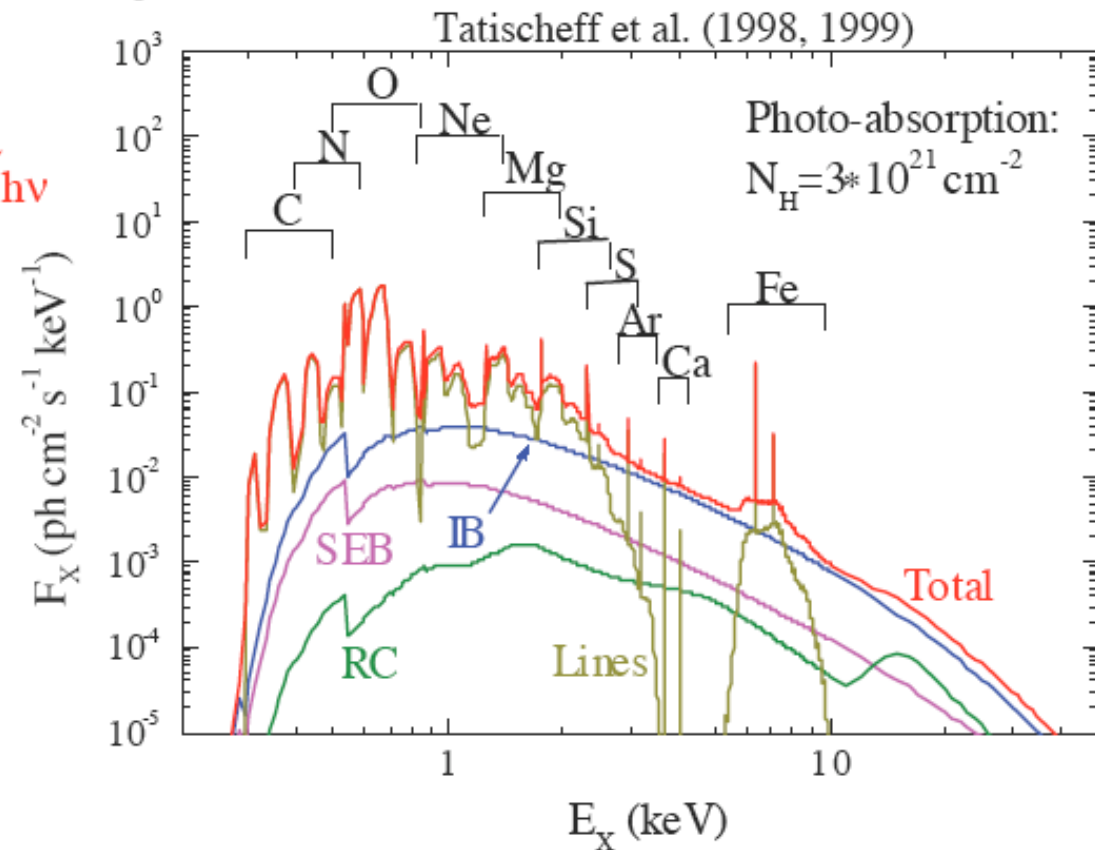
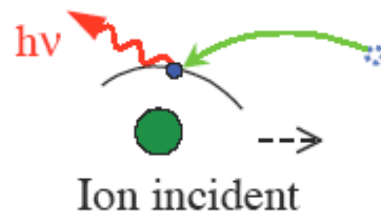
$$\frac{d\sigma_{B.I.}^{p \rightarrow H}}{dE_X}(E_X, E_p) \cong \frac{d\sigma_B^{e \rightarrow H}}{dE_X}(E_X, E_e = \frac{m_e}{m_p} E_p)$$



- Bremsstrahlung des électrons secondaires :



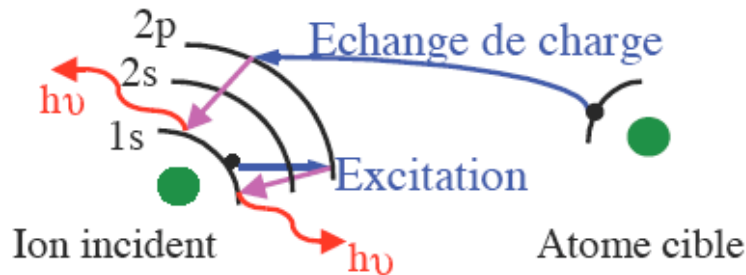
- Capture radiative :



Interaction du rayonnement cosmique – Emission X (2)

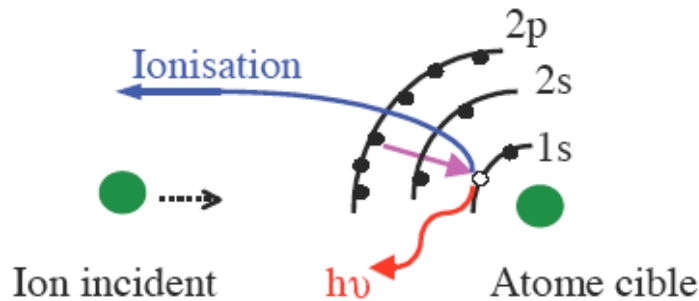
➤ Raies (K α et K β) :

• Raies larges

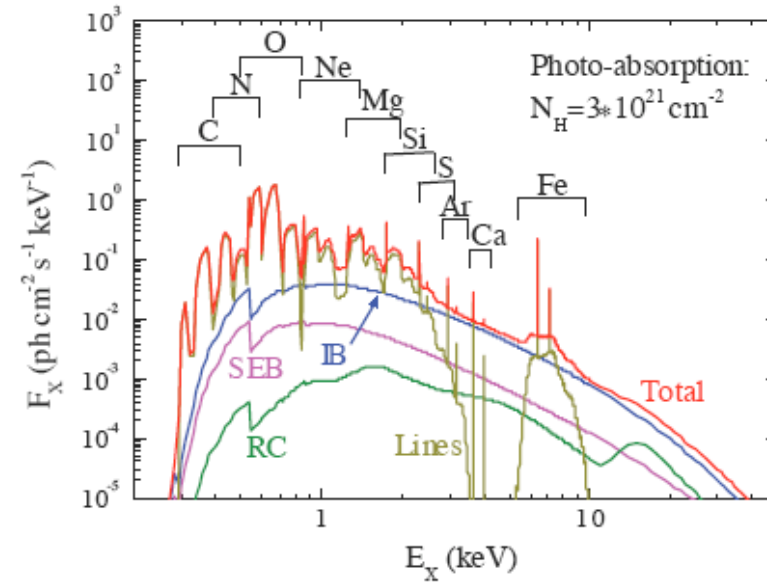
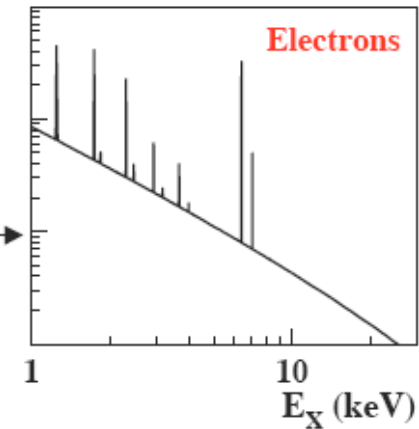


Signature d'ions de basse énergie

• Raies fines :

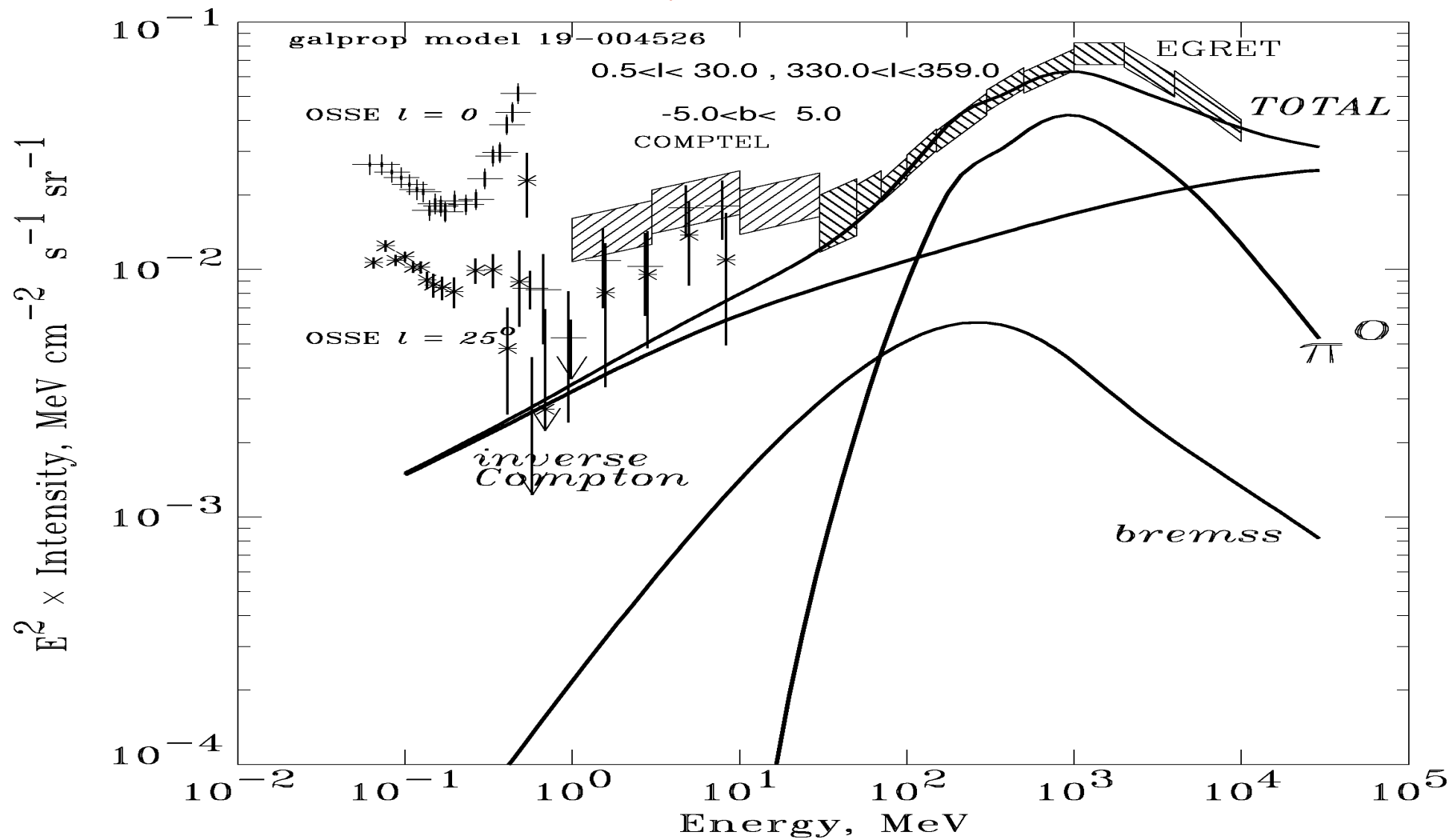


Egalement produites par impact d'électrons non-thermiques



émission gamma galactique

(- sources ponctuelles)



Strong, Moskalenko and Reimer 2000

Rayonnements non-thermiques

● Témoignage des particules énergétiques dans la Galaxie

● ...

● ...

● ...

● ...

Rayonnement d'une charge accélérée

- Potentiels de Liénard-Wiechert
- Pertes d'énergie
- Spectre rayonné
- Rayonnement synchrotron
- Rayonnement Bremsstrahlung

Diffusion Compton et rayonnement IC

- "Choc" photon/électron
- Thomson → Compton
- L'effet Compton inverse
- Pertes d'énergie

Particules secondaires

- Photons gamma : via les π^0
- Positons (et électrons) : p+p et/ou p+ γ
+ anti-protons !
- Noyaux secondaires
- Neutrons (1 sur 4 pour p+p, 1 sur 2 pour p+ γ)
- Neutrinos : via les π^+ et les π^-