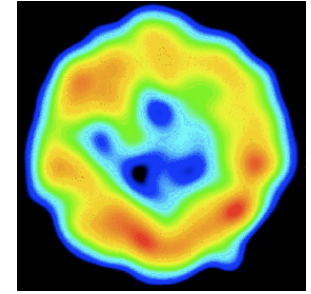
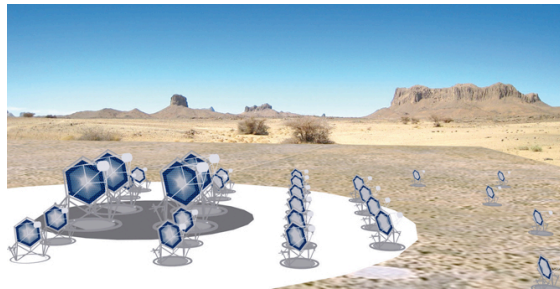
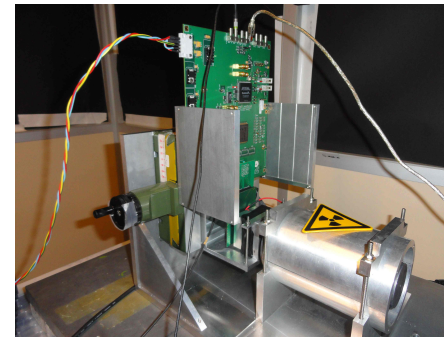
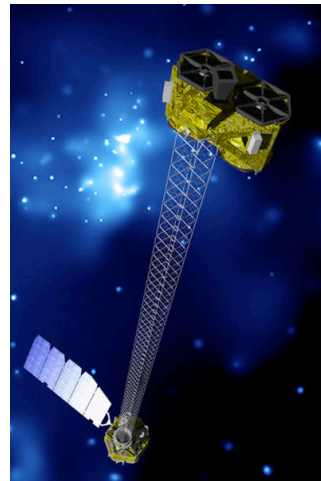
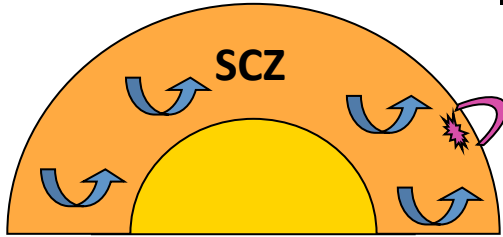
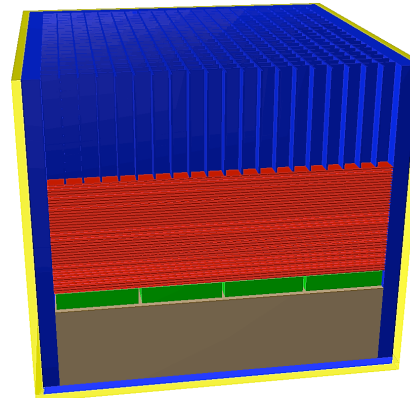
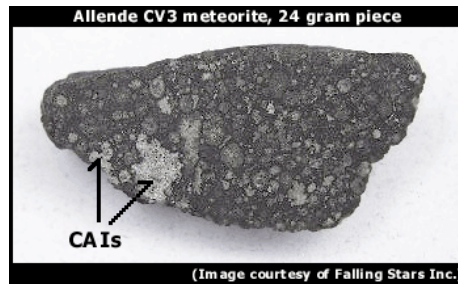
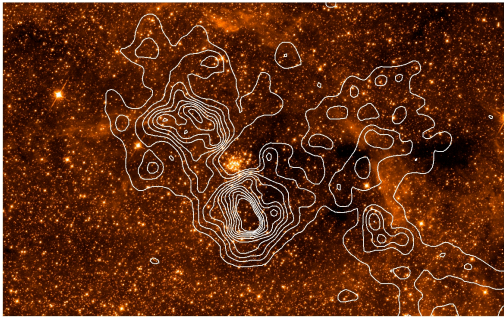


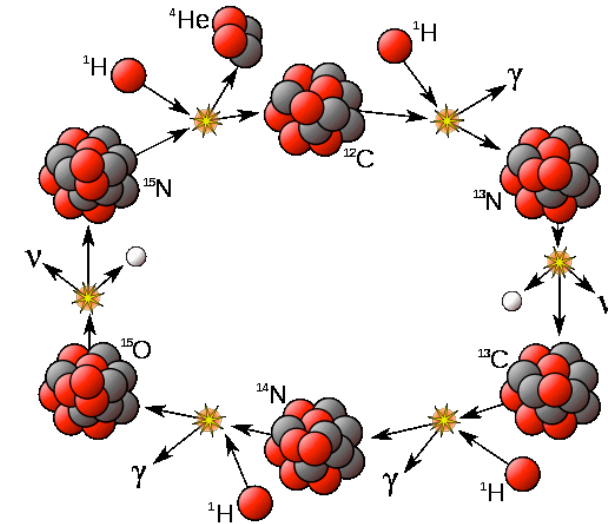
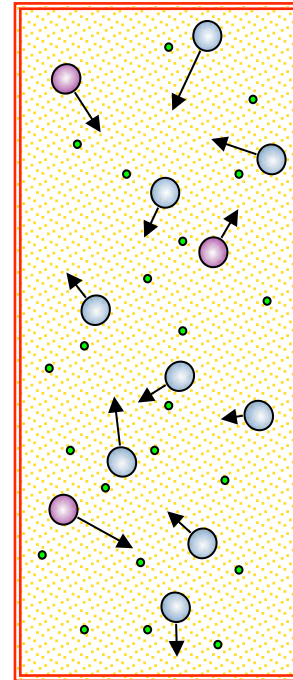
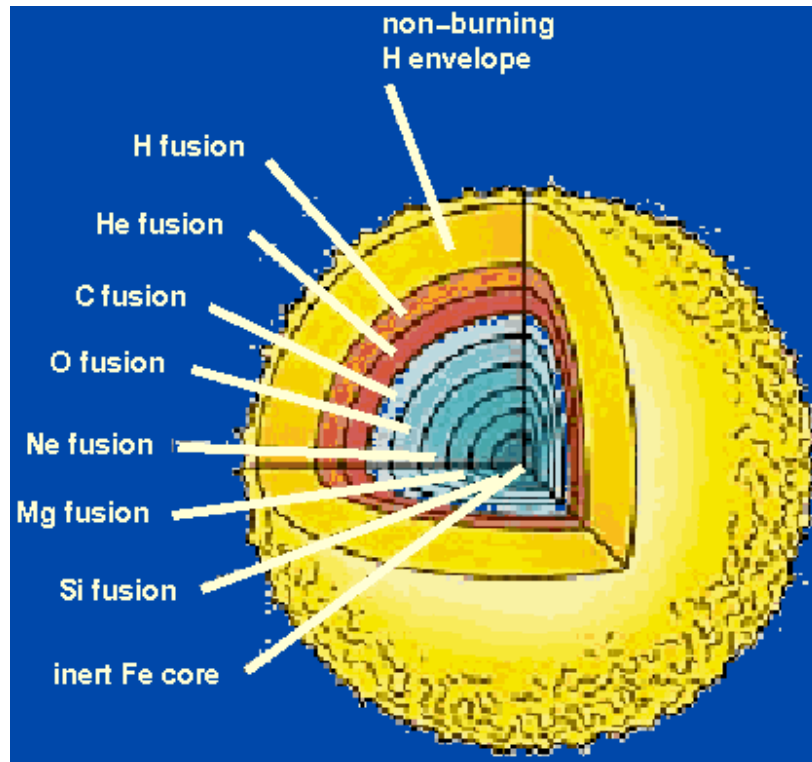
# Quelques perspectives en astrophysique nucléaire



## des phénomènes non thermiques



# L'astrophysique *thermo*nucléaire



- Etude des réactions thermonucléaires dans les étoiles et le Big Bang → **origine des nucléides**
- Mesures de sections efficaces sur accélérateur (e.g.  $p+^{17}\text{O}$  ; Chafa et al. 2005, 2006, 2007)

# L'astrophysique nucléaire **non thermique**

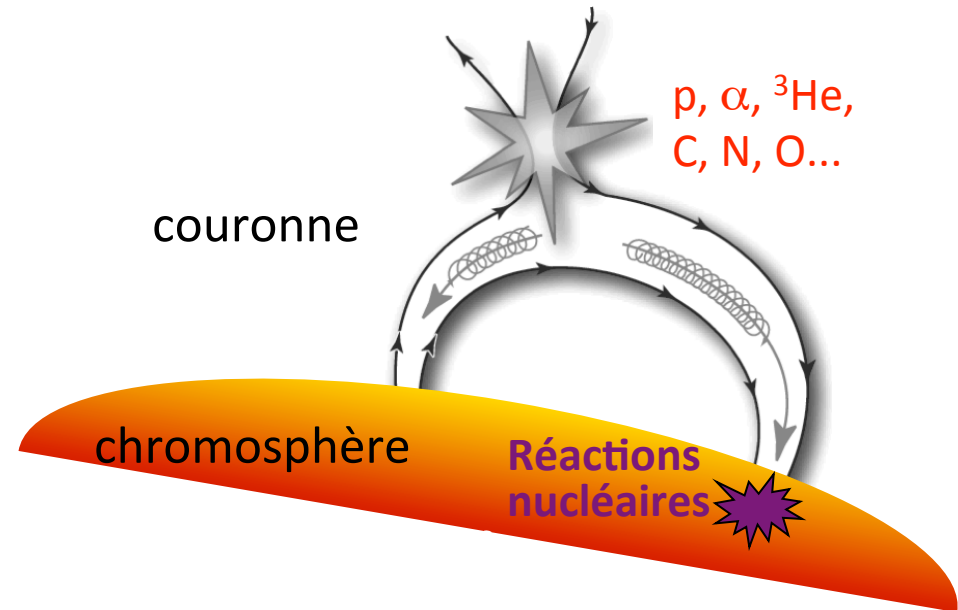
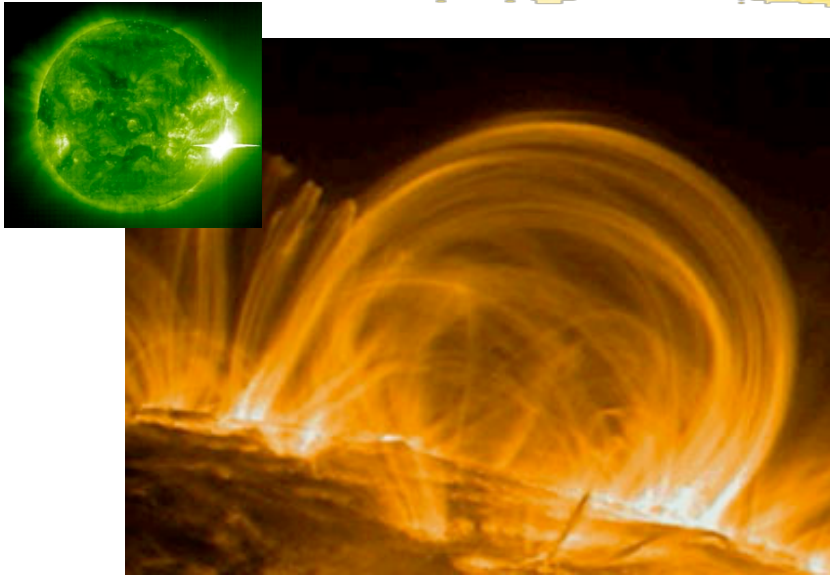


Etude de réactions nucléaires induites par des **particules accélérées** dans divers objets astrophysiques  $\Rightarrow$  nature de ces objets, nucléosynthèse non thermique, physique du milieu interstellaire, formation du système solaire...

1. Les éruptions solaires
2. Les phénomènes nucléaires dans les éruptions des autres étoiles
3. L'accélération de particules dans les ondes de choc d'explosions stellaires
  - 3.1 Les novae symbiotiques
  - 3.2 Les supernovae extragalactiques détectées en radio
4. A la recherche des rayons cosmiques de basse énergie
5. L'origine des radioactivités de courte période du système solaire primitif
6. L'astronomie gamma des moyennes énergies : un outil de choix
7. Conclusions



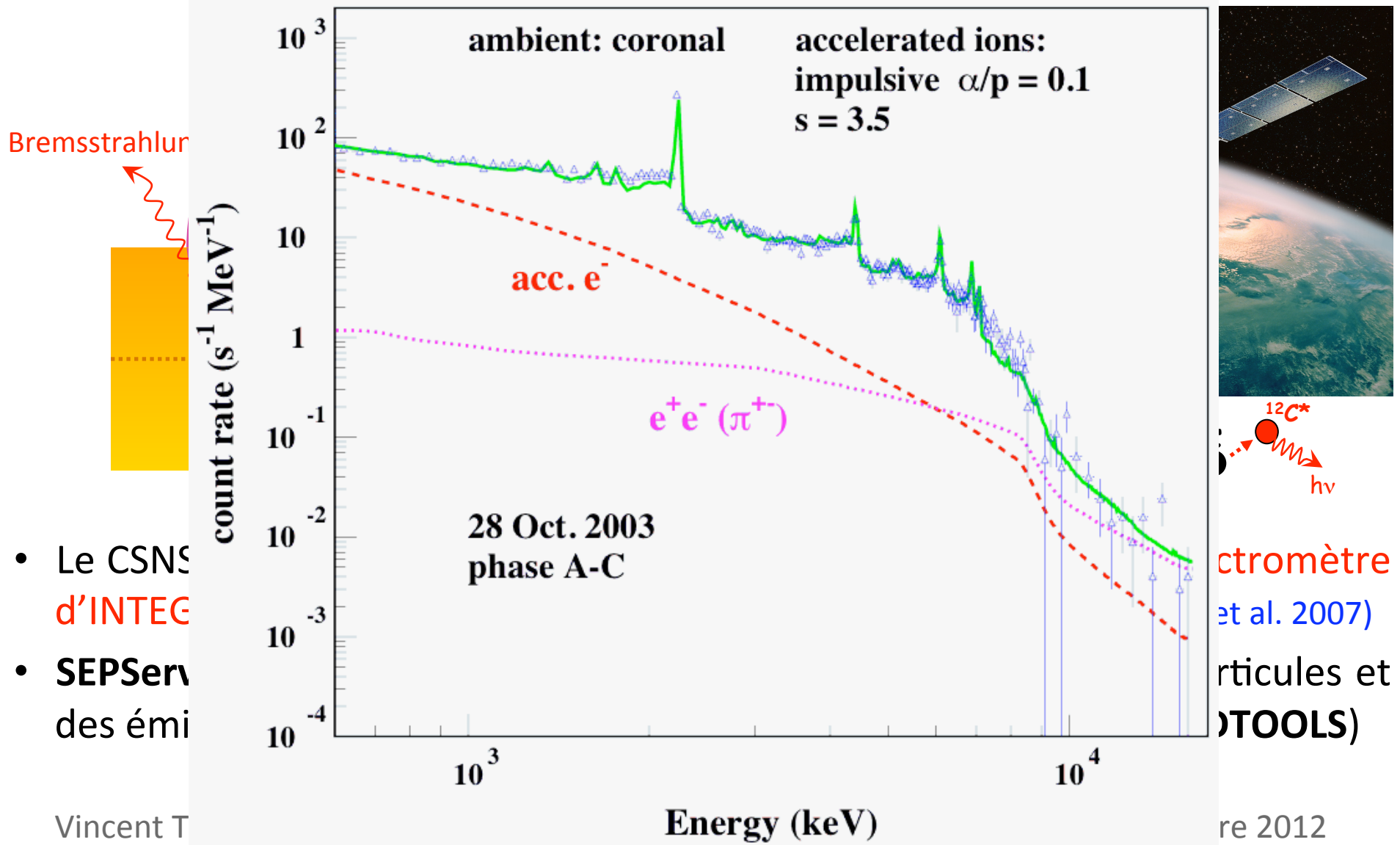
# Les éruptions solaires



- ✓ Comment des particules sont-elles **rapidement accélérées** jusqu'à des énergies de plusieurs GeV par nucléon ?
- ✓ Quelle relation entre les particules piégées à la surface du soleil et celles **s'échappant dans l'espace interplanétaire** (impact sur la Terre et le spatial) ?
- ✓ Comment utiliser les éruptions solaires pour **sonder** au mieux **les propriétés de l'atmosphère** de notre étoile ?

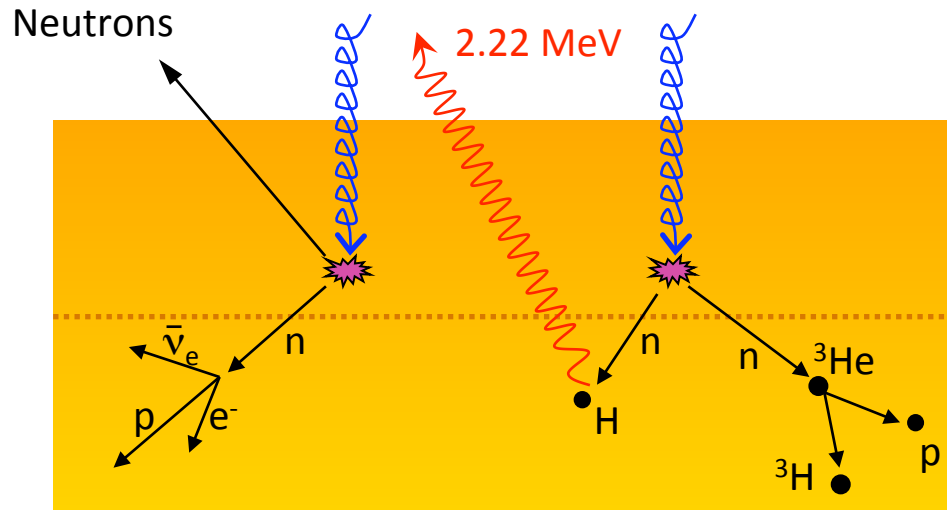


# Les éruptions solaires et *INTEGRAL*



- Le CSNS d'INTEGRAL
- SEPServ des émi

# L'émission à 2,2 MeV des éruptions solaires

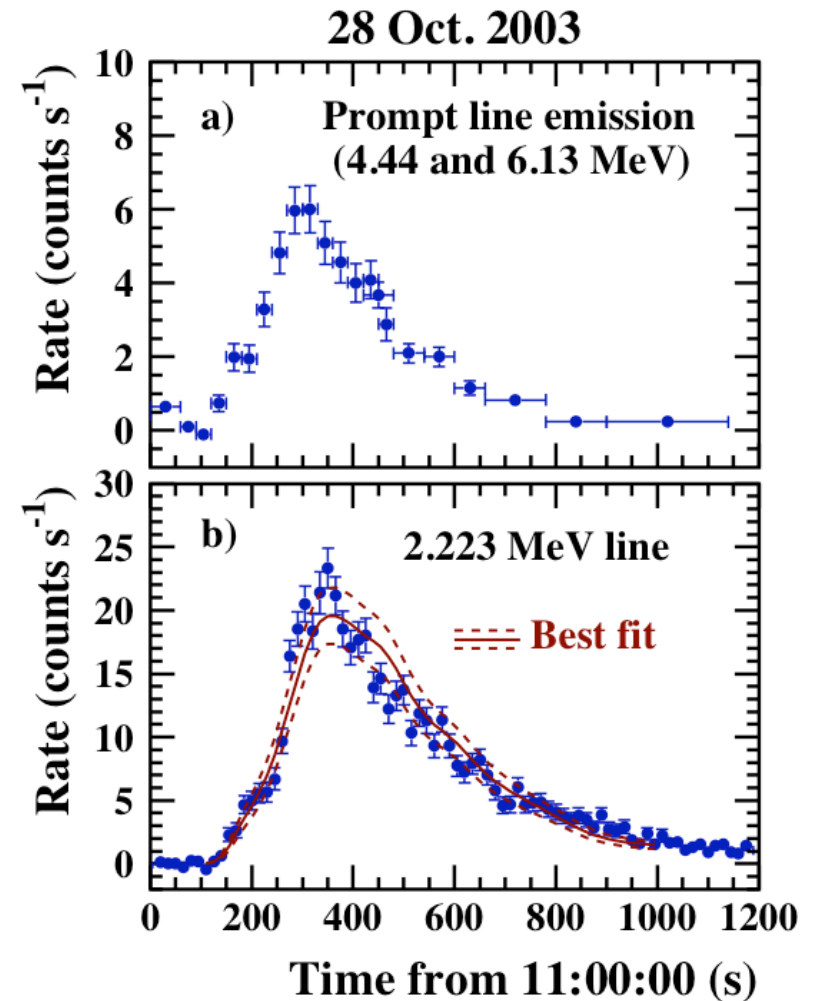


→ Abondance photosphérique de  $^3\text{He}$   
(e.g. Wang & Ramaty 1974 ; Tatischeff et al. 2005)

- Eruption du 28 Oct :  $^3\text{He}/\text{H} = (1,5^{+1,6}_{-1,0}) \times 10^{-5}$
- Dans l'atmosphère de Jupiter (*Galileo*) :  
 $^3\text{He}/\text{H} = (1,60 \pm 0,09) \times 10^{-5}$   
 $\text{D}/\text{H} = (1,94 \pm 0,39) \times 10^{-5}$

- Mélange du  $^3\text{He}$  produit par  $\text{D}(p,\gamma)^3\text{He}$  dans le cœur du jeune soleil ?

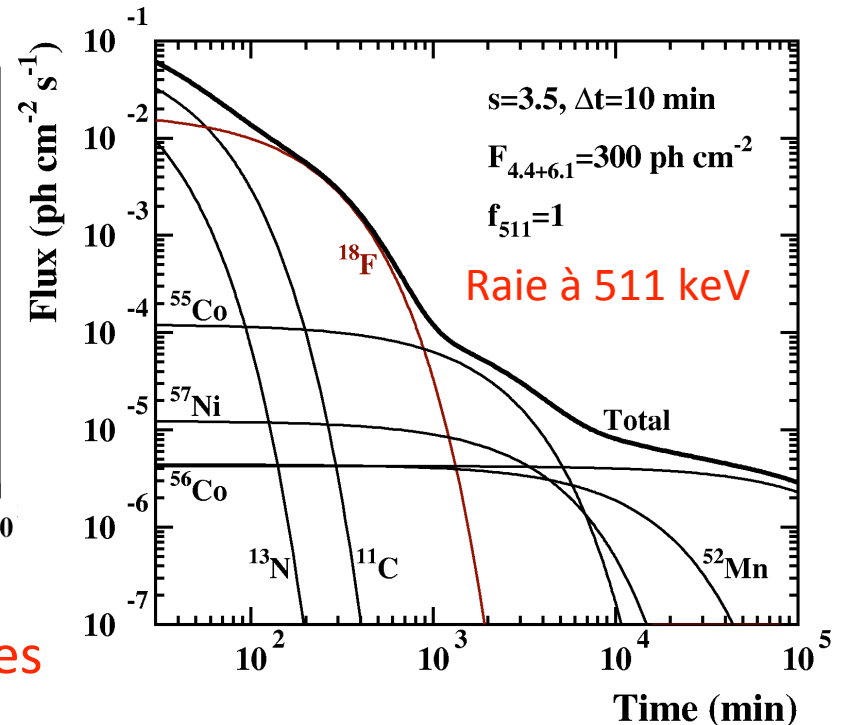
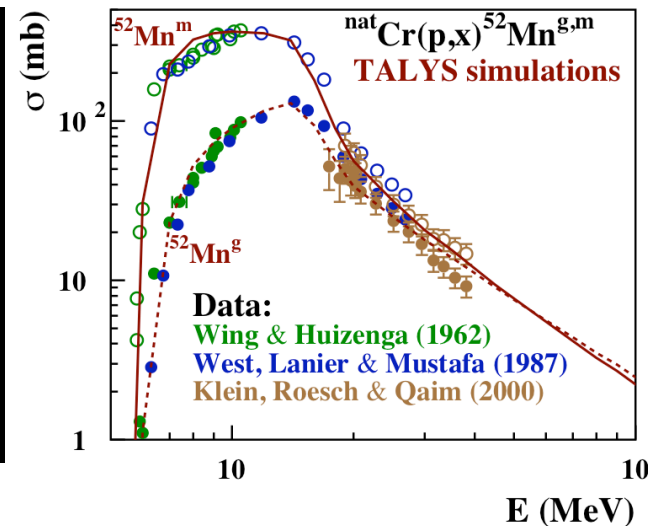
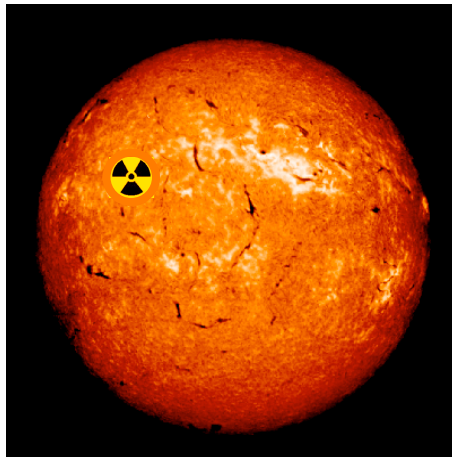
Vincent Tatischeff, soutenance d'habilitation à diriger des recherches, 19 décembre 2012



# L'émission radioactive des éruptions solaires

→ Un nouveau traceur des processus de mélange à la surface du soleil ?

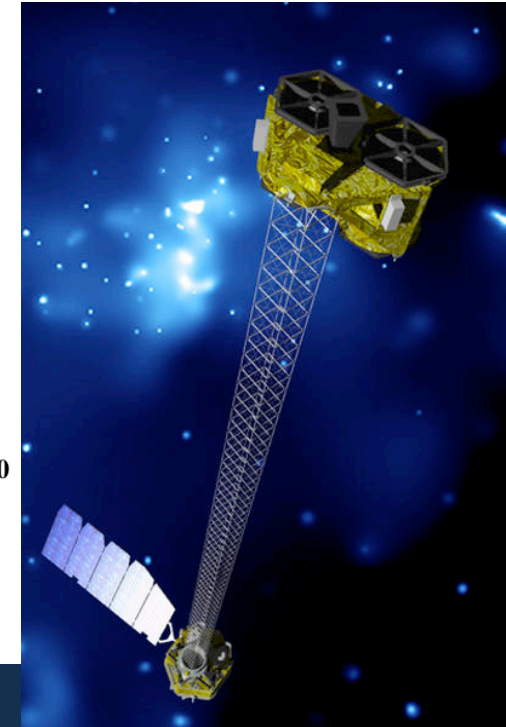
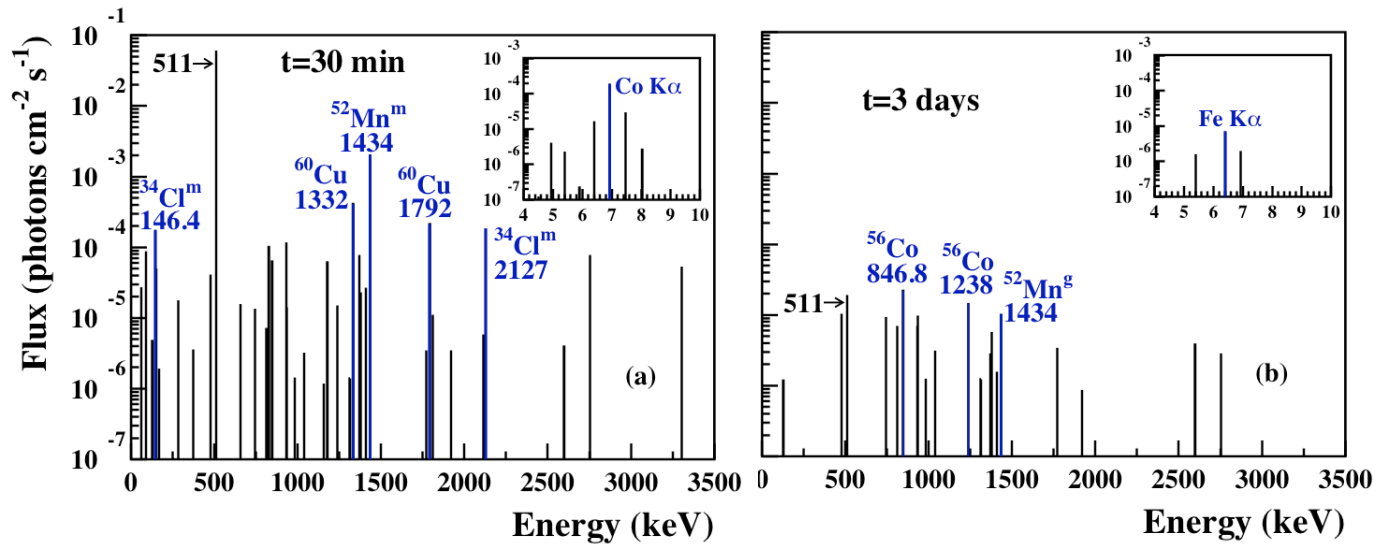
(Tatischeff et al. 2006, 2007)



- Calculs de la production de **25 radioisotopes** de période  $10 \text{ min} < T_{1/2} < 77 \text{ jours}$  ( $^{56}\text{Co}$ )
- Flux des raies retardées / fluence des raies promptes à 4,44 et 6,13 MeV
- La raie  $\gamma$  **la plus intense pendant 3 – 4 jours** est celle à **511 keV** ( $^{18}\text{F}$ ,  $^{55}\text{Co}$ )



# L'émission radioactive des éruptions solaires



- Autres raies  $\gamma$  : **1434 keV** ( $^{52}\text{Mn}^{m,g}$ ), 847 keV...
- Emission  $\gamma$  non détectée avec *RHESSI*
- **Raies X** : Co  $K\alpha$  à 6,92 keV (CI de  $^{58}\text{Co}^m$  + CE de  $^{57}\text{Ni}$ ), Fe  $K\alpha$  à 6,40 keV (CE de  $^{55,56,58g}\text{Co}$ )
- Emission X détectable avec **NuSTAR** ?
- **Imagerie fine** de la tache radioactive

## **NuSTAR**

**Bande passante** : 3 – 79 keV

**Champ de vue** :  $13' \times 13'$

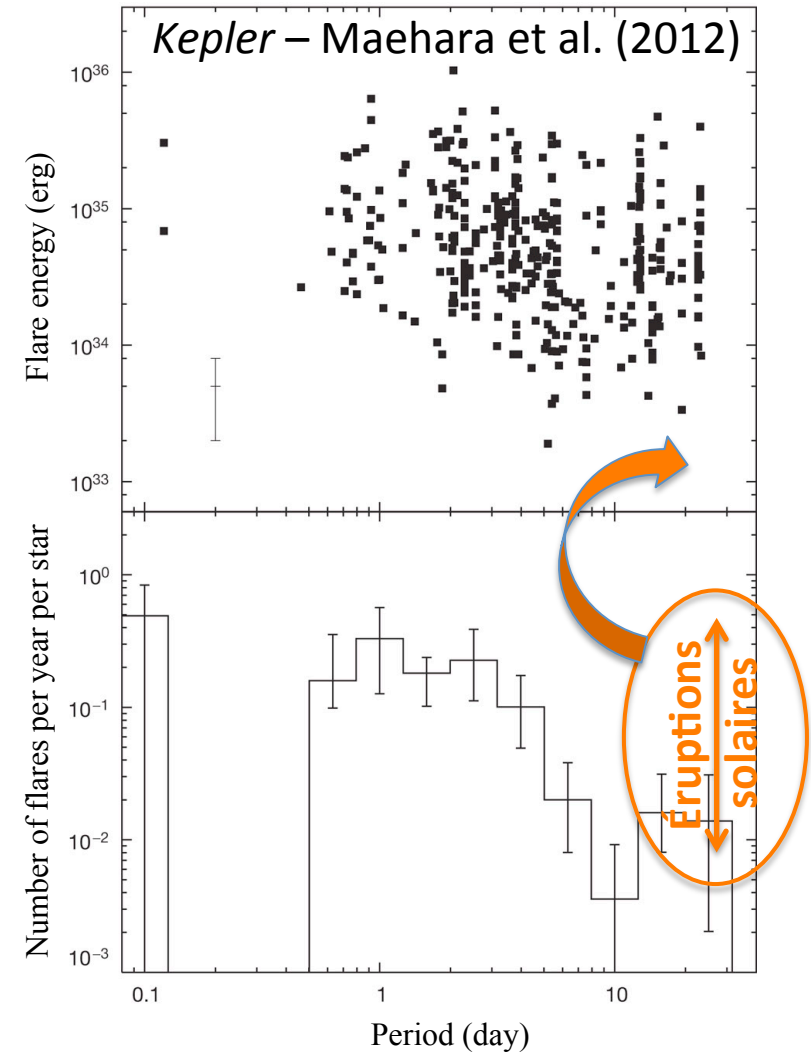
**Surface eff.** :  $\sim 800 \text{ cm}^2$  à 7 keV

**Résolution  $\Delta\theta$**  :  $17''$  (FWHM)

**Résolution  $\Delta E$**  : 0,4 keV à 6 keV

# Les éruptions des autres étoiles

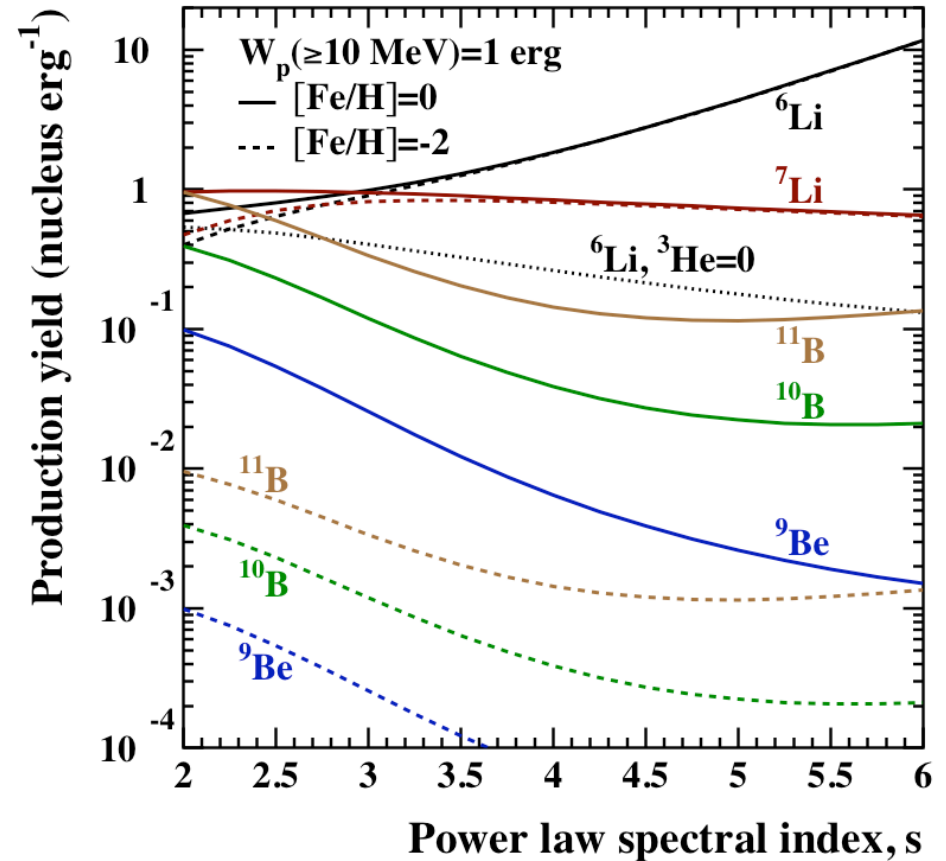
- ✓ Les autres étoiles semblables au soleil connaissent-elles également des **phénomènes nucléaires de surface** ?
- ✓ Comment détecter et étudier ces phénomènes nucléaires ? Avec **quels traceurs** ?
- ✓ La nucléosynthèse associée est-elle importante pour **l'enrichissement chimique** de la Voie lactée ?  
N.B. : les grosses éruptions solaires synthétisent quelques  $10^4$  kg de Li pur !



# Eruptions stellaires et nucléosynthèse de Li

- $\sim 375$  sursauts  $\gamma$  solaires par cycle (11 ans) relâchant  $\sim 10^{31}$  erg dans les protons  $\geq 1$  MeV/A :  $L_p^\odot \sim 10^{25}$  erg s $^{-1}$
- $\sim 2 \times 10^{11}$  étoiles dans la galaxie  $\Rightarrow$   $L_p \sim 2 \times 10^{36}$  erg s $^{-1}$ , soit  $\sim (3 - 4) \times 10^4$  moins que la puissance des rayons cosmiques galactiques

$\rightarrow$  Nucléosynthèse insignifiante pour l'enrichissement de la Voie lactée

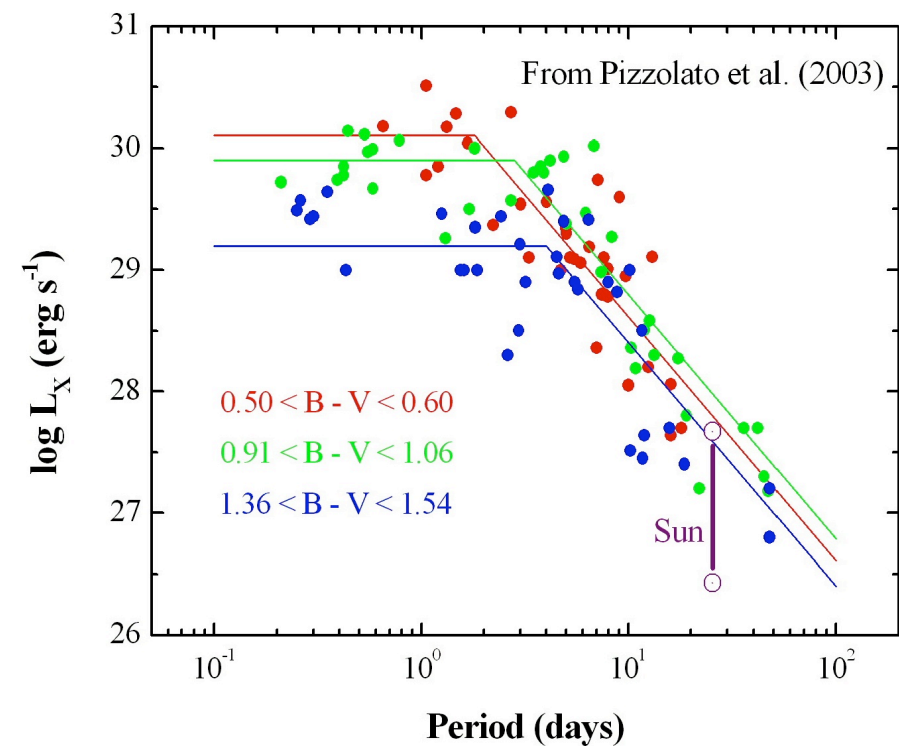
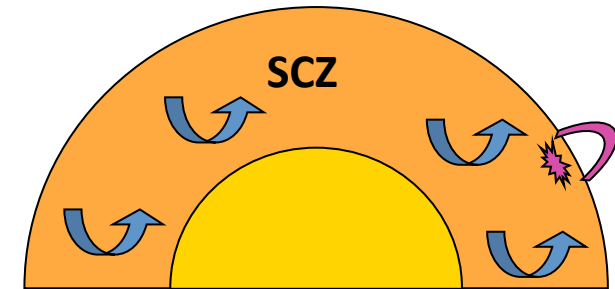


- Mais **nucléosynthèse *in situ***, dans les atmosphères stellaires, là où les abondances des éléments sont généralement mesurées ! (Tatischeff et al. 2008)

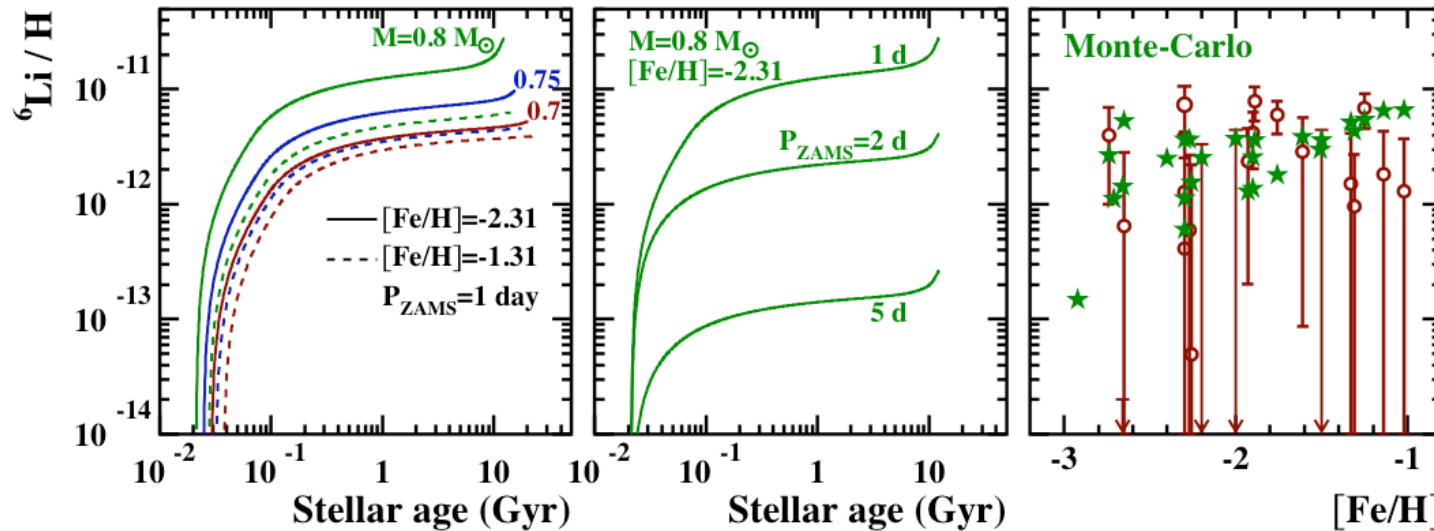


# Un nouveau modèle de nucléosynthèse

- Origine du  ${}^6\text{Li}$  détecté à la surface de vieilles étoiles du halo (Asplund et al. 2006) => **production in situ ?** (Tatischeff & Thibaud 2007)
- L'activité des étoiles de type solaire résulte de **l'amplification de champs magnétiques par effet dynamo** dans la zone convective de surface (ZCS)
  - Le degré d'activité dépend de la **température effective** (taille de la ZCS) et de la **période de rotation** (vorticité injectée dans la ZCS)
  - Nucléosynthèse de  ${}^6\text{Li}$  (+ ${}^7\text{Li}$ , Be et B) en fonction de la **métallicité** et la **masse** de l'étoile (=> taille de la ZCS) et de sa **période de rotation** initiale

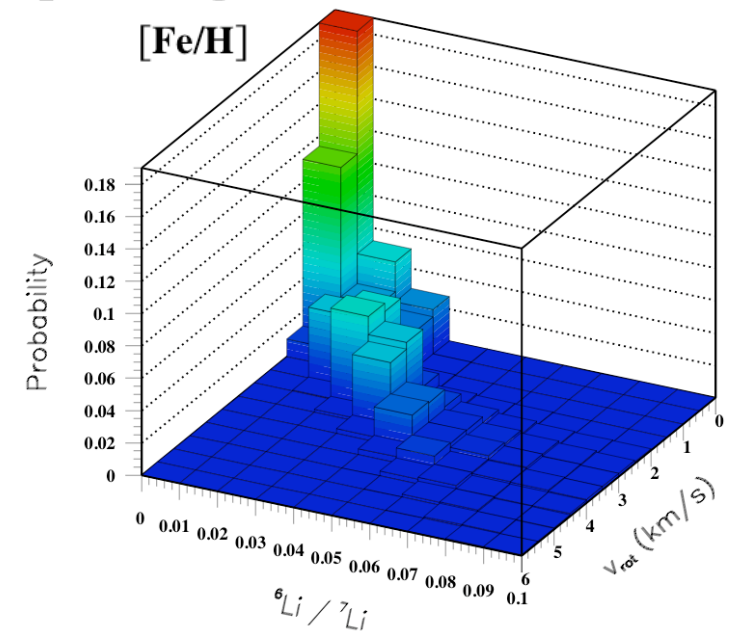


# Production de ${}^6\text{Li}$ dans de vieilles étoiles



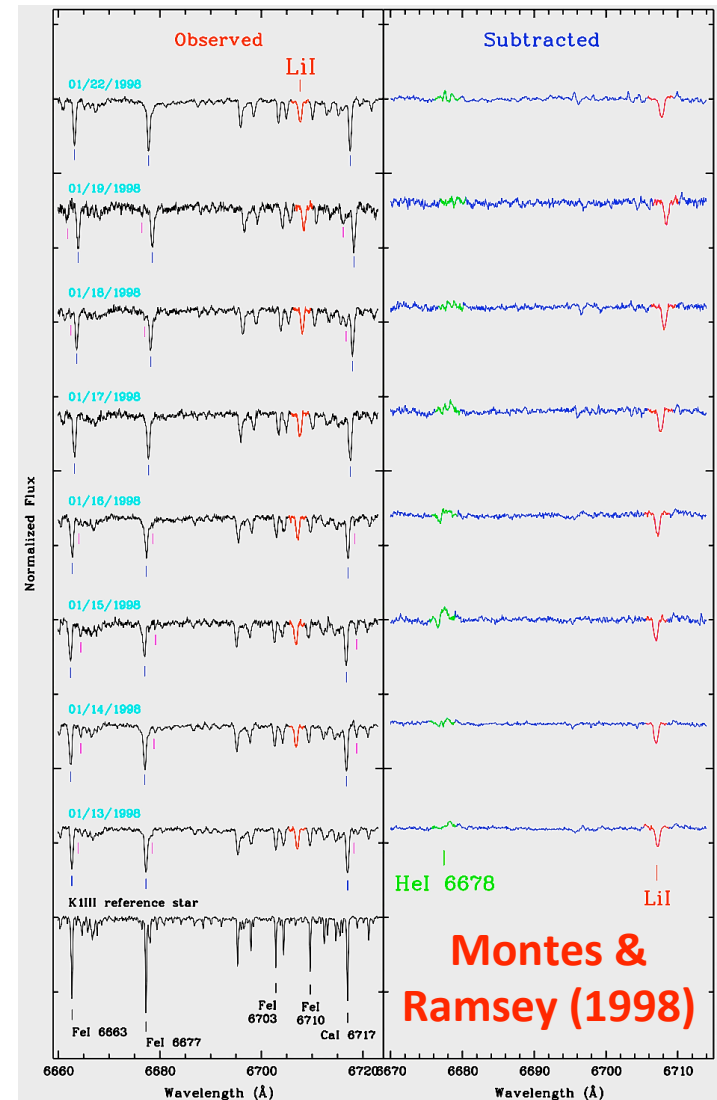
**Data:** Smith et al. (1998)  
Cayrel et al. (1999)  
Asplund et al. (2006)  
with a correction from  
Steffen et al. (2010)

- **Méthode Monte-Carlo** pour générer des distributions de fréquence de  ${}^6\text{Li}/\text{H}$  à partir des paramètres  $[\text{Fe}/\text{H}]$ ,  $M_*$  et  $P_{\text{ZAMS}}$
- Bon accord avec les abondances observées
- Test observationnel : corrélation de  ${}^6\text{Li}/\text{H}$  et de la **vitesse de rotation** des étoiles



# Observer **en direct** une production de Li ?

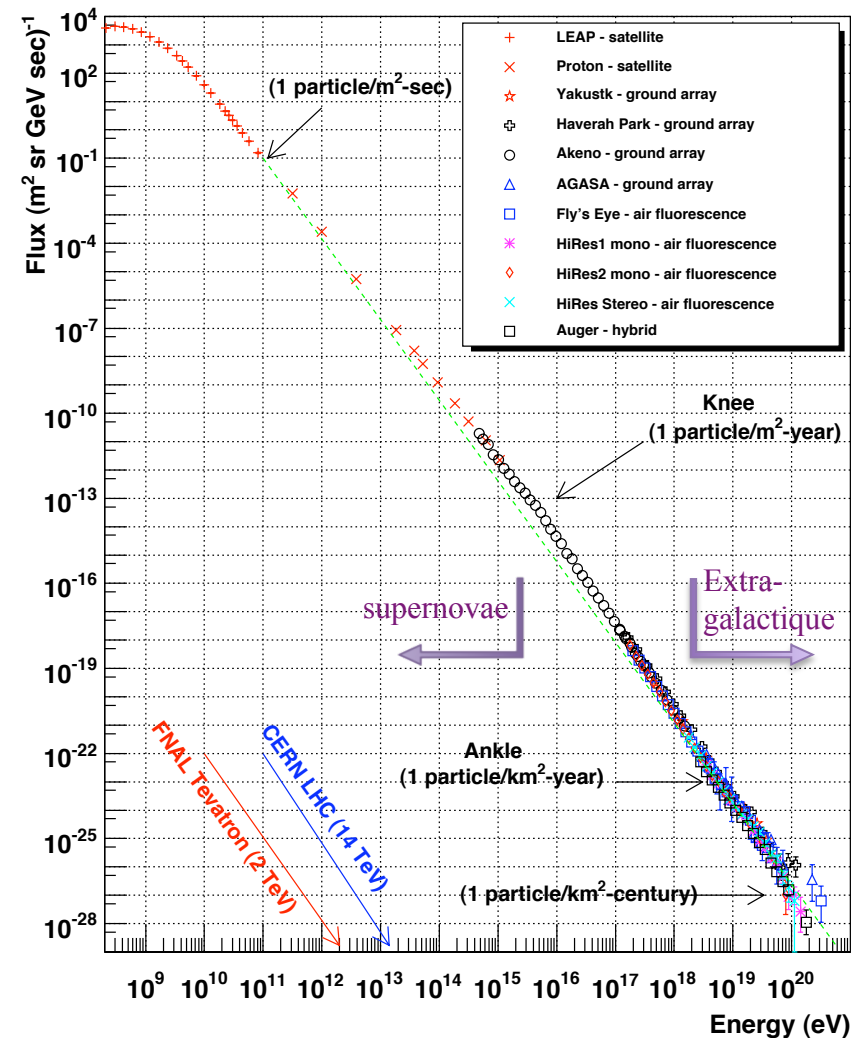
- Rechercher une apparition de la raie du Li I à 6708 Å (monitorage optique) pendant une **éruption d'une étoile proche et active de type spectral M0–M5**, e.g. **AD Leo** (type M3,  $D=4.9$  pc,  $V=9.43$ ,  $L_X/L_{bol} \approx 10^{-3}$ )
    - a) Ces étoiles **brûlent leur Li protostellaire** en moins de  $5 \times 10^7$  ans (cf. Tatischeff & Thibaud 2008)
    - b) Une abondance de Li de  $\sim 2 \times 10^{-13}$  peut être détectée dans ces objets (Pavlenko et al. 1995)
    - c) Les étoiles les plus actives subissent environ **1 fois par jour** une éruption susceptible de synthétiser une telle concentration de Li
- **Nouvelle lumière sur les éruptions stellaires**





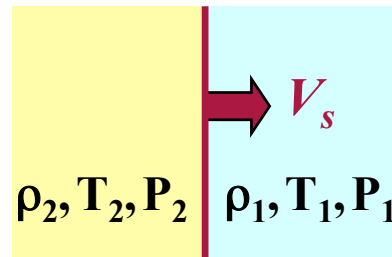
# L'accélération de particules dans les ondes de choc des explosions d'étoiles

- Les rayons cosmiques galactiques d'énergie  $< \sim 3 \times 10^{15}$  eV sont accélérés dans les **rémanents de supernova**
- ✓ Quelle est l'origine des rayons cosmiques de  $\sim 3 \times 10^{15}$  à  $3 \times 10^{18}$  eV ?  
Energie maximum des particules accélérées dans les rémanents de SN ?
- ✓ Quelle est l'efficacité d'accélération en fonction de l'âge du rémanent et du type de la supernova ?
- ✓ Comment les **électrons** sont-ils **injectés** dans le processus d'accélération ?

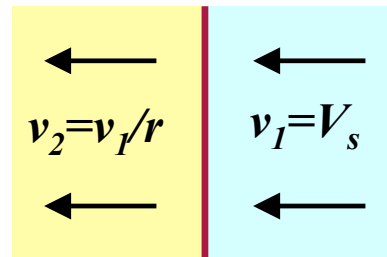


# L'accélération diffusive par onde de choc

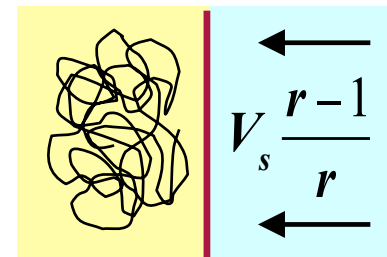
- Diffusion sur la **turbulence magnétique** de part et d'autre du front de choc



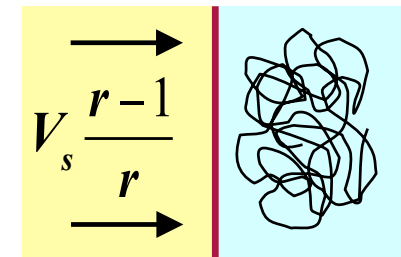
ref. frame: observer



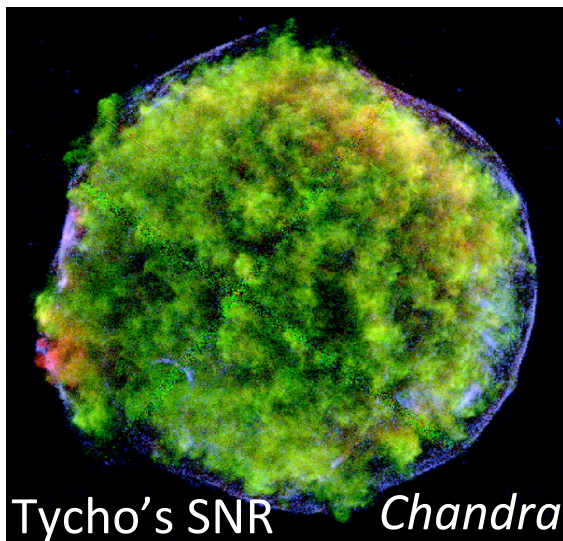
shock front



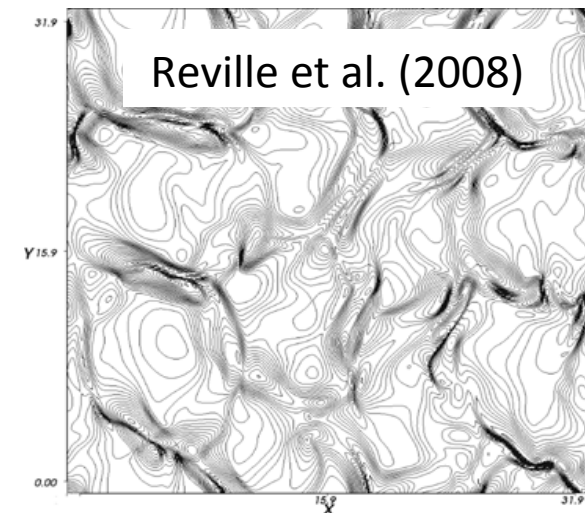
downstream gas



upstream gas

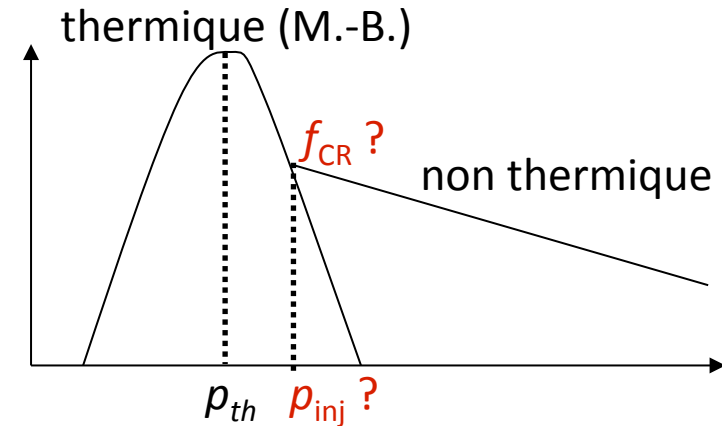
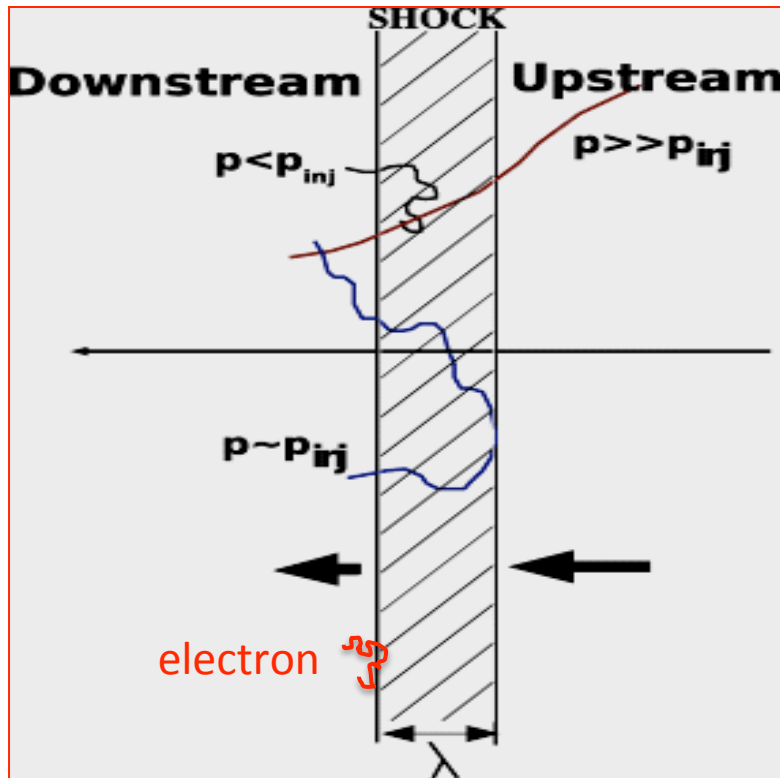


- Turbulence magnétique : **ondes MHD excitées par les rayons cosmiques** (instabilité de faisceau)
- Intensité du champ  $B_{\text{turb}}$  **amplifié** par les RCs
  - => taux d'accélération
  - => **énergie maximum**



# Comment devenir non thermique ?

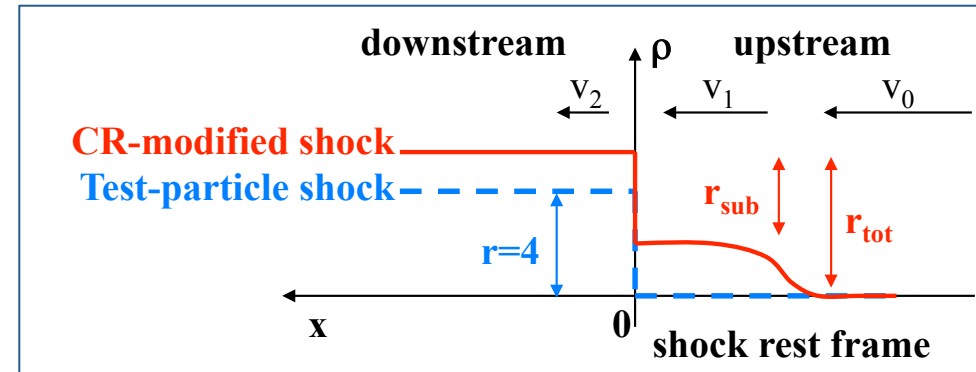
- Protons injectés dans le mécanisme d'accélération : ceux du **plasma post-choc** d'impulsion  $p > p_{inj}$  (« fuite thermique »)



- Impulsion limite ( $\leq$  épaisseur du choc) :  $p_{inj} = \xi p_{th}$  avec  $3 < \xi < 4$
- Efficacité d'injection** (nombre relatif de particules thermiques  $\Rightarrow$  RCs) :  $10^{-5} < \eta_{inj} < 5 \times 10^{-3}$  ( $\Rightarrow$  peu contrainte)
- Injection des électrons** ( $p_{e,th} \ll p_{p,th}$ ) ?  $\Rightarrow$  pré-accélération ?

# Les rayons cosmiques modifient le choc

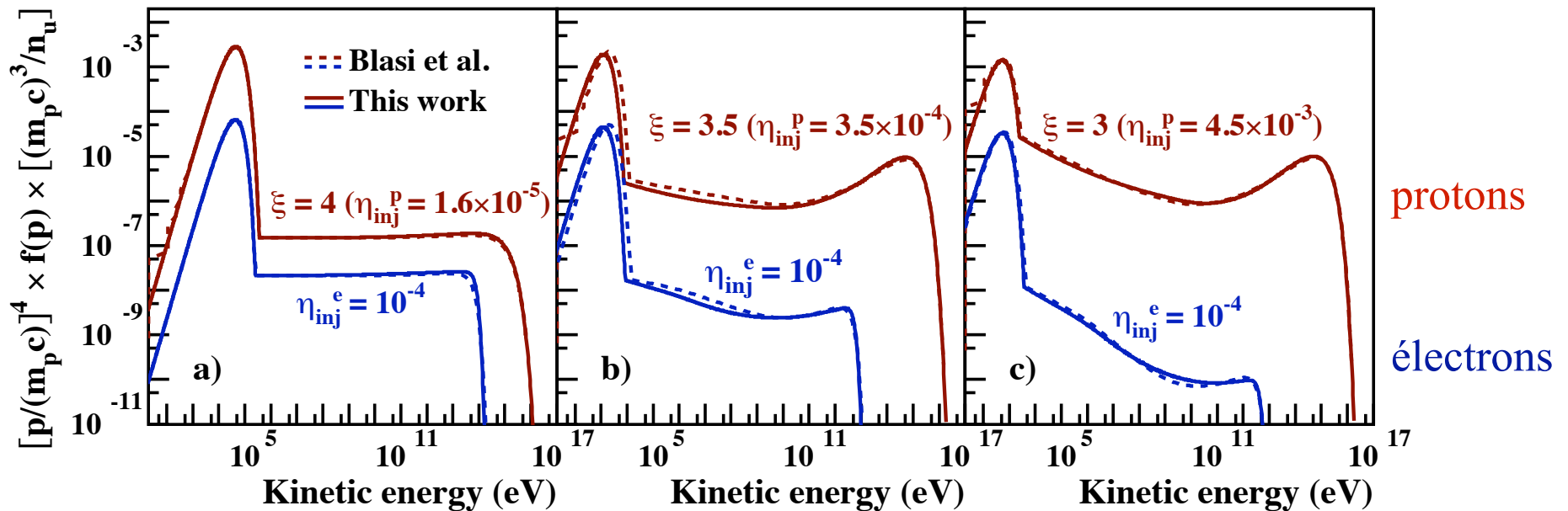
- Pression exercée par les RCs sur le plasma thermique : freinage du flot incident => "précurseur" en amont  
=> spectre des RCs concave



+ Diminution de la  $T^\circ$  du gaz choqué

+ Augmentation du champ  $B_{turb}$

+ Accroissement de la compressibilité



# Les novae symbiotiques

- Systèmes binaires où une **naine blanche** accrète de la matière d'une **géante rouge**
  - **Explosions thermonucléaires récurrentes** quand la  $T^\circ$  de l'enveloppe accrétée  $\sim 2,5 \times 10^7$  K
- ⇒ Ejection de  $\sim 10^{-5} - 10^{-4} M_\odot$  à quelques  $10^3$  km s $^{-1}$



|  | Novae symbiotiques                                  | Supernovae de type II                                |
|--|---|--|
| Masse éjectée dans l'explosion             | $M_{ej} \sim 3 \times 10^{-6} M_\odot$              | $M_{ej} \sim 10 M_\odot$                             |
| Energie de l'explosion                     | $E_{out} \sim 10^{44}$ erg                          | $E_{out} \sim 10^{51}$ erg                           |
| Taux de perte de masse par vent stellaire* | $\dot{M}_{GR} \sim 10^{-6} M_\odot \text{ an}^{-1}$ | $\dot{M}_{SGR} \sim 10^{-5} M_\odot \text{ an}^{-1}$ |
| Vitesse terminale du vent stellaire*       | $v_w \sim 10$ km s $^{-1}$                          | $v_w \sim 10$ km s $^{-1}$                           |

- Temps d'évolution du rémanent :  $t_c \propto M_{ej}^{3/2} v_w / (E_{out}^{1/2} \dot{M}_*) \sim 10^{-5} t_c$  (SN II)

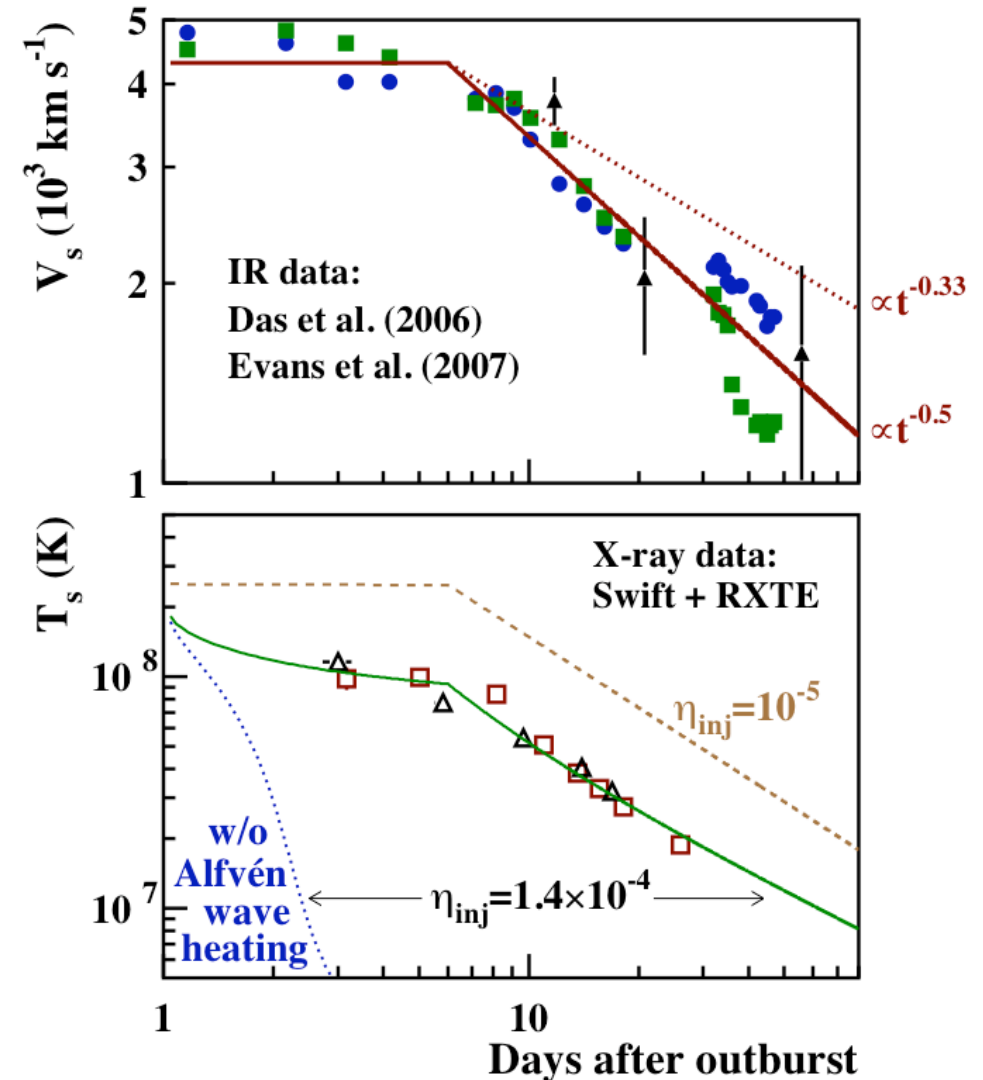
⇒ Phase d'expansion libre :  $\leq 1$  **semaine** ; expansion adiabatique :  $\sim 1$  **mois** !

⇒ **Dépendance temporelle du mécanisme d'accélération**



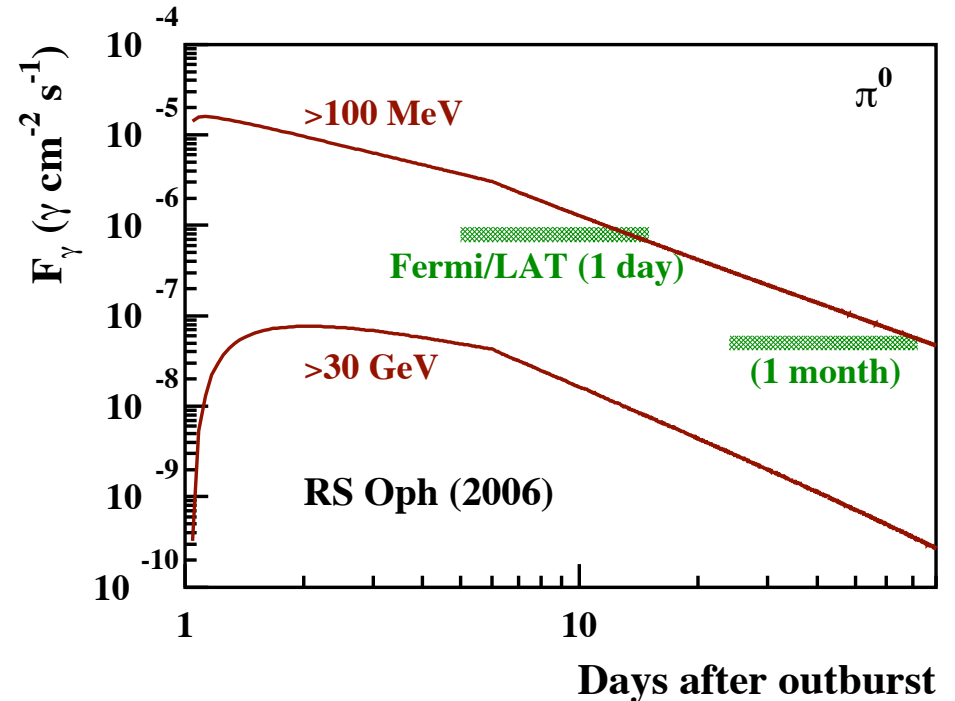
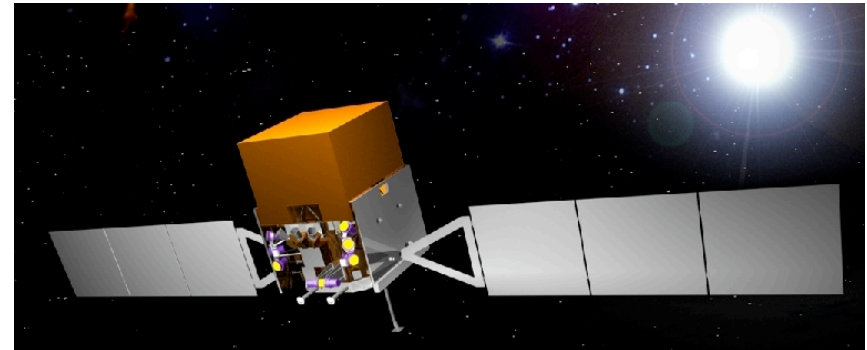
# L'éruption de RS Ophiuchi en 2006

- Précédentes éruptions : 1898, 1907, 1933, 1945, 1958, 1967 et 1985 (naine blanche massive  $\sim 1,35 M_{\odot}$ )
  - 1. Après environ 6 jours (expansion libre), "refroidissement" du choc (?)
  - 2.  $T^{\circ}$  du gaz post-choc **plus faible** que celle d'un choc hydro standard (?)
- ⇒ **Accélération de particules au choc**
- ⇒ Efficacité d'injection :  $\eta_{inj} = 1,4 \times 10^{-4}$
- Découverte de l'accélération de RCs **jusqu'au TeV** dans un rémanent de nova (Tatischeff & Hernanz 2007, 2008)



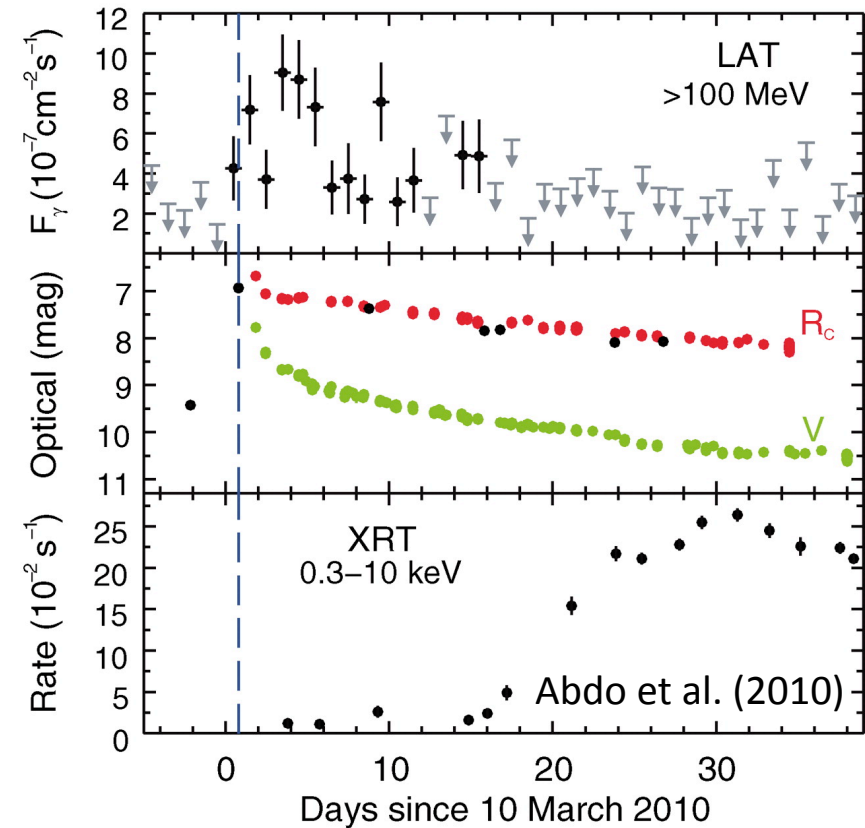
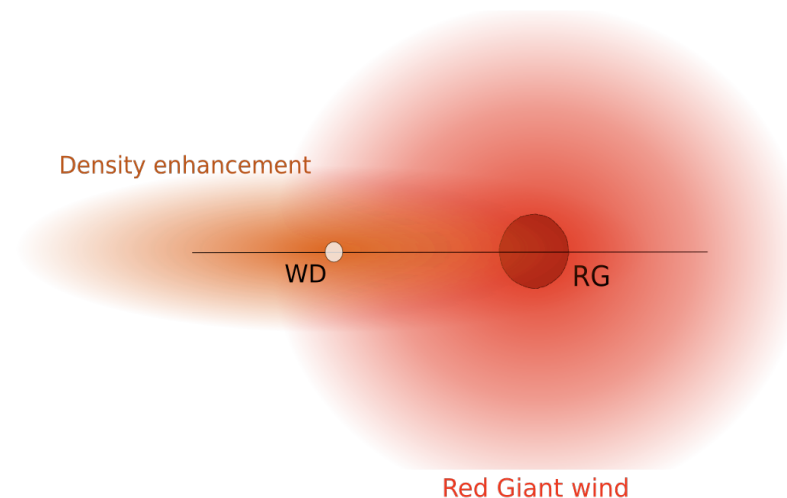
# L'émission gamma de RS Oph (2006)

- Emission  $\gamma$  au **GeV** :  $p + p \rightarrow p + p + \pi^0$
  - *Fermi*/LAT devrait détecter une éruption semblable à RS Oph (2006) jusqu'à  $D \sim 6$  kpc
  - Prédiction (Tatischeff 2008) :
    - ✦ 19 novae symbiotiques détectées depuis la moitié du XIXe siècle
    - ✦  $\sim 350$  novae classiques observées pendant la même période
    - ✦ Taux de novae classiques estimé :  $40 \text{ an}^{-1} \Rightarrow$  **symbiotiques :  $2,2 \text{ an}^{-1}$**
- $\Rightarrow$  **Détection avec *Fermi*/LAT de qq novae symbiotiques en 10 – 15 ans**



# Une nouvelle classe d'émetteurs gamma

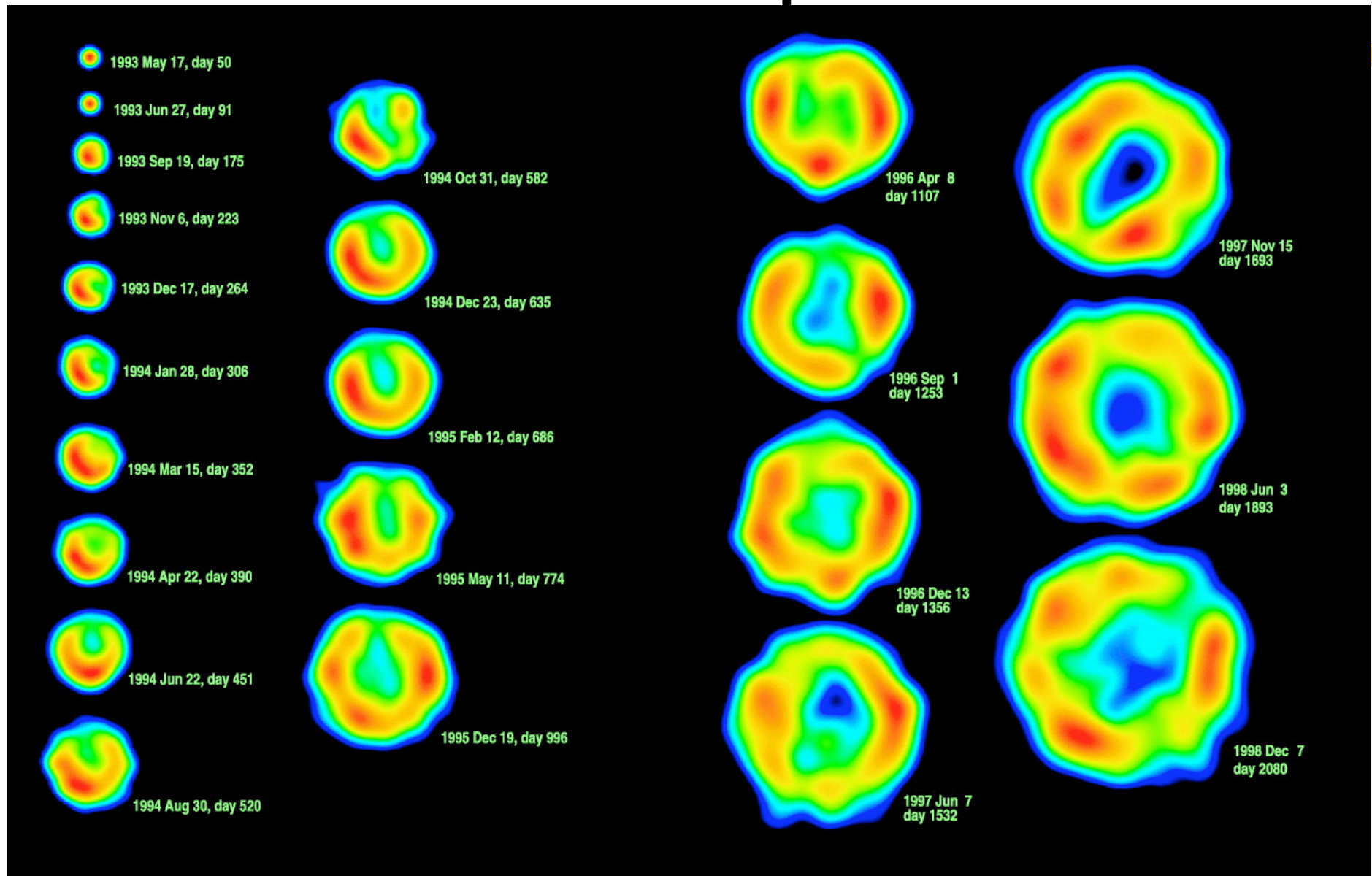
- Mars 2010 : **V407 Cygni** (naine blanche + étoile AGB de type Mira)
- Juin 2012 : **Nova Scorpii** et **Nova Monocerotis**. Novae classiques !?



- Au vu de V407 Cygni (grande séparation orbitale), le modèle d'accélération en 1D de Tatischeff & Hernanz (2007) apparaît trop limité
- ⇒ Extension de ce modèle à une **représentation en 2D** (Martin & Dubus 2012)

Vincent Tatischeff, soutenance d'habilitation à diriger des recherches, 19 décembre 2012

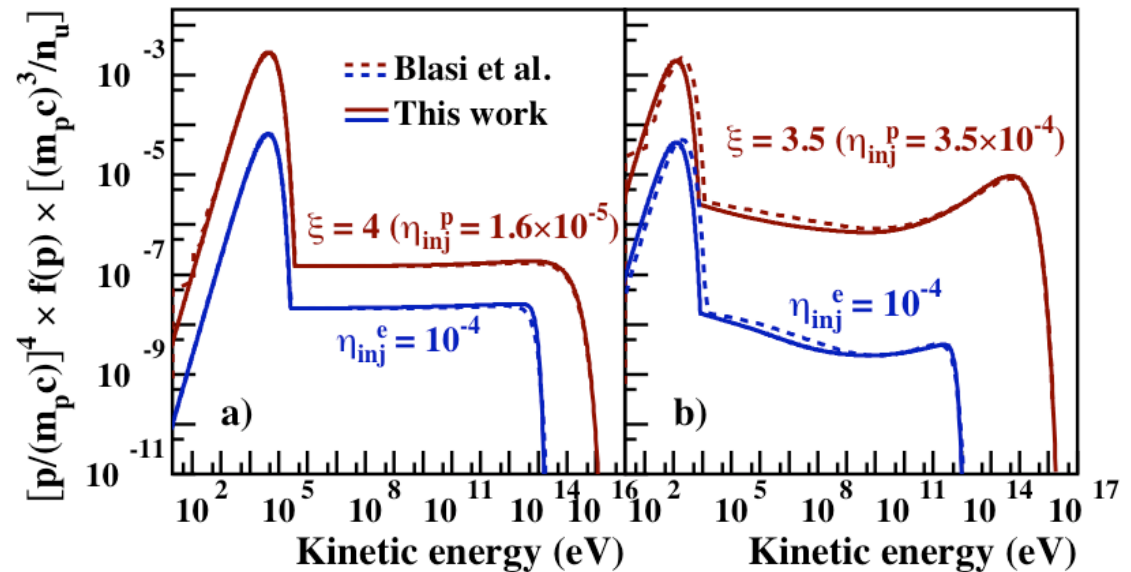
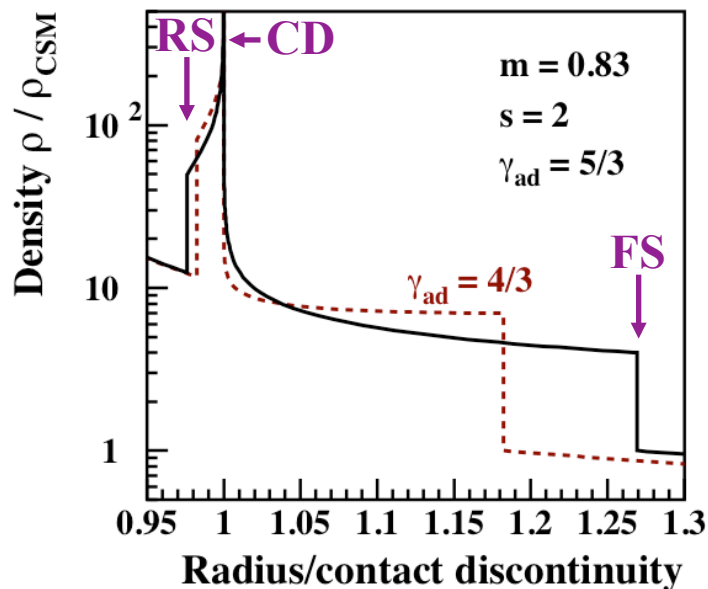
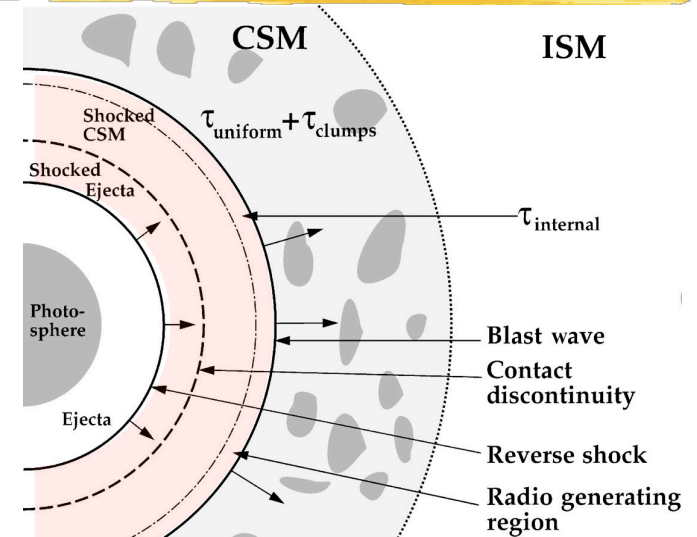
# L'émission radio des supernovae



Vincent Tatischeff, soutenance d'habilitation à diriger des recherches, 19 décembre 2012

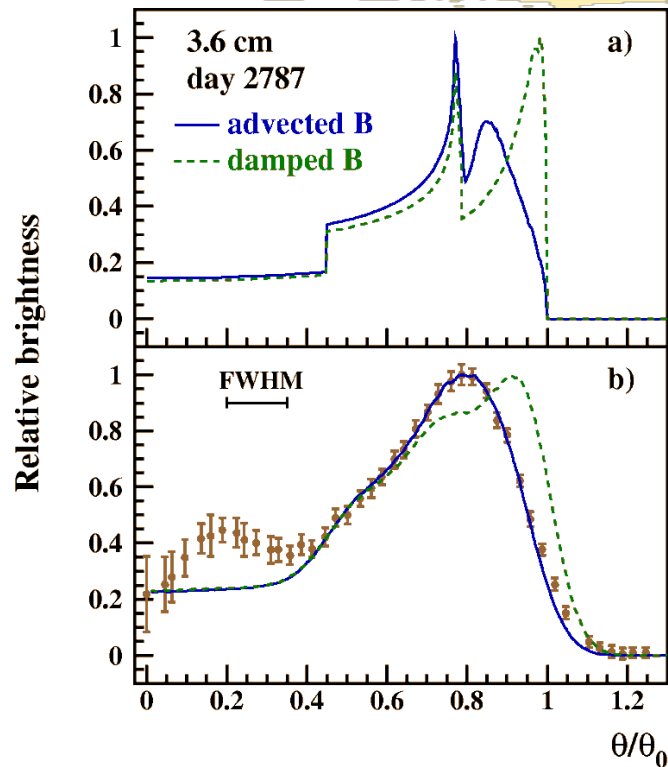
# Modèle d'émission radio des supernovae

- Accélération des électrons au choc, transport en aval et émission **synchrotron** (+ auto-absorption)
- Couplage de l'**hydrodynamique** avec un modèle **non-linéaire d'accélération** (Tatischeff 2007, 2009)
- **Efficacité d'injection des protons** => spectre des électrons + champ  $B$  turbulent => synchrotron



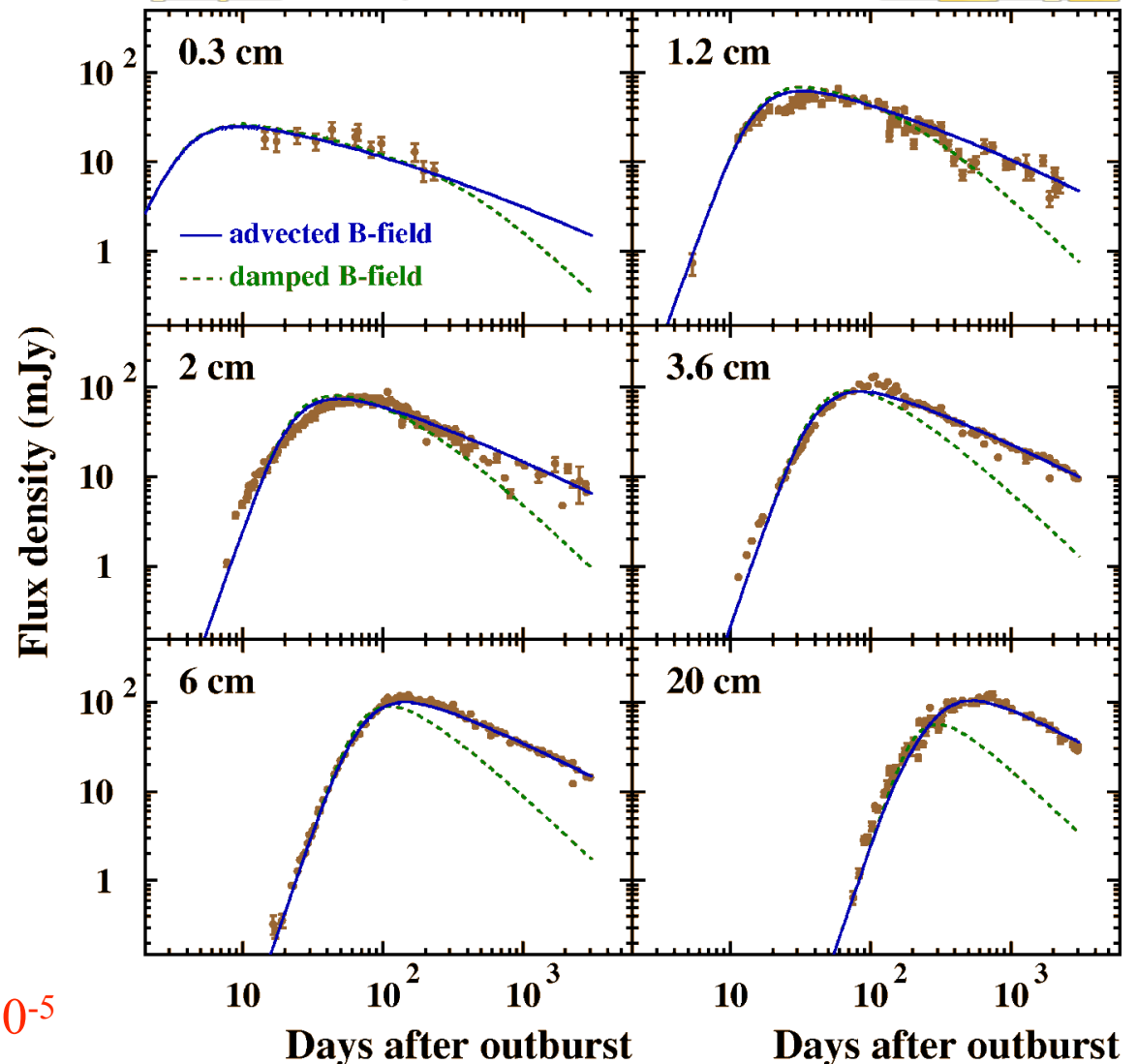


# L'émission radio de SN 1993J

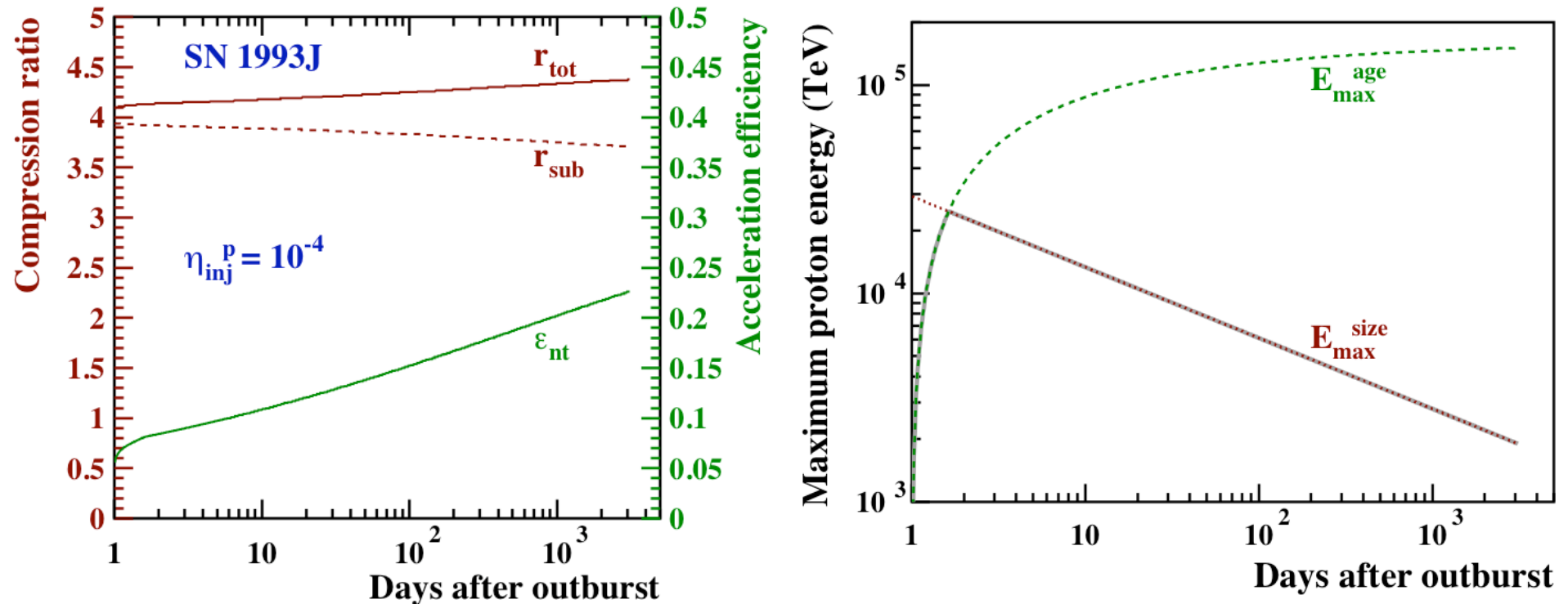


- Résultats des ajustements :

- $(dM/dt)_{\text{RSG}} = 3.8 \times 10^{-5} M_{\odot} \text{an}^{-1}$
- $B_{u0} = 50 \pm 20 \text{ G}$
- $\eta_{\text{inj}}^{\text{p}} = 1.0 \times 10^{-4}$  ;  $\eta_{\text{inj}}^{\text{e}} = 1.1 \times 10^{-5}$



# SN 1993J et l'origine des rayons cosmiques



- Energie cinétique totale des protons accélérés :

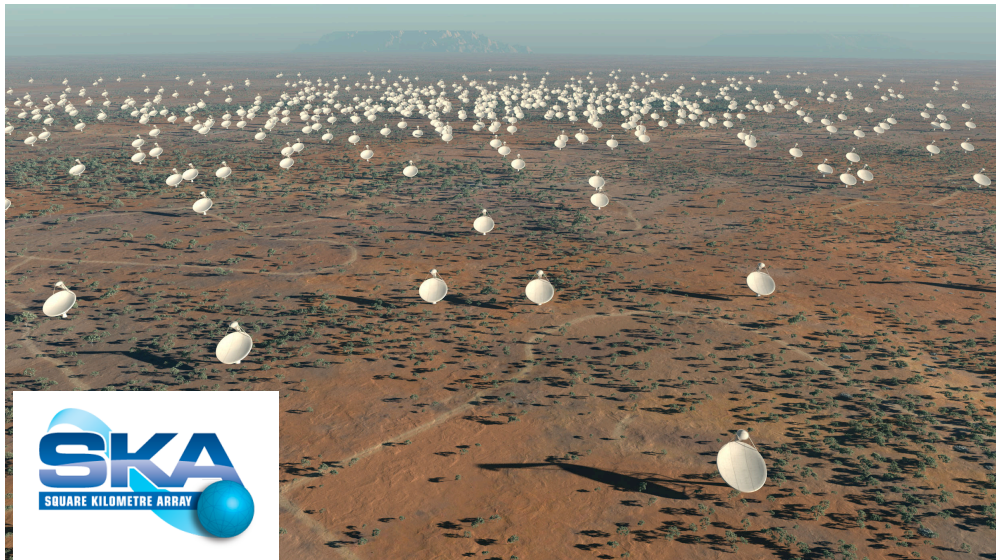
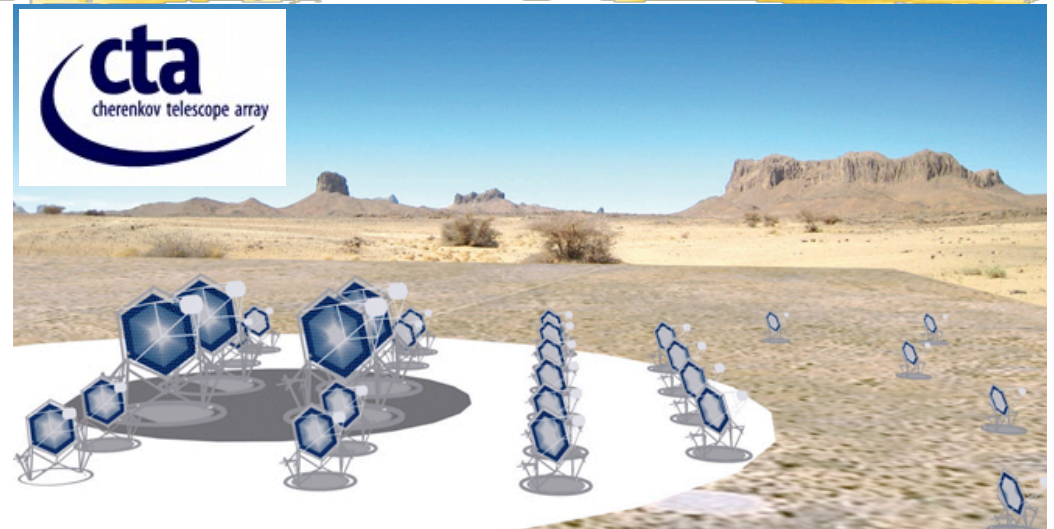
$$E_{CR} \cong \int_{\text{day 1}}^{\text{day 3100}} \varepsilon_{CR}(t) \times 0.5 \rho_{CSM} v_s^3 \times 4\pi r_s^2 dt = 7,4 \times 10^{49} \text{ erg} \sim 5\% \text{ de } E_{SN} !$$

⇒ Production significative de rayons cosmiques de plus de  $3 \times 10^{15}$  eV !

# L'émission gamma des SNe extragalactiques

- SN 1993J aurait pu être détectée avec **CTA** (mais pas avec *Fermi*)

⇒ Distance de détectabilité et **taux de détection des SNe** des différents types avec **CTA** (Renaud et al., en préparation)



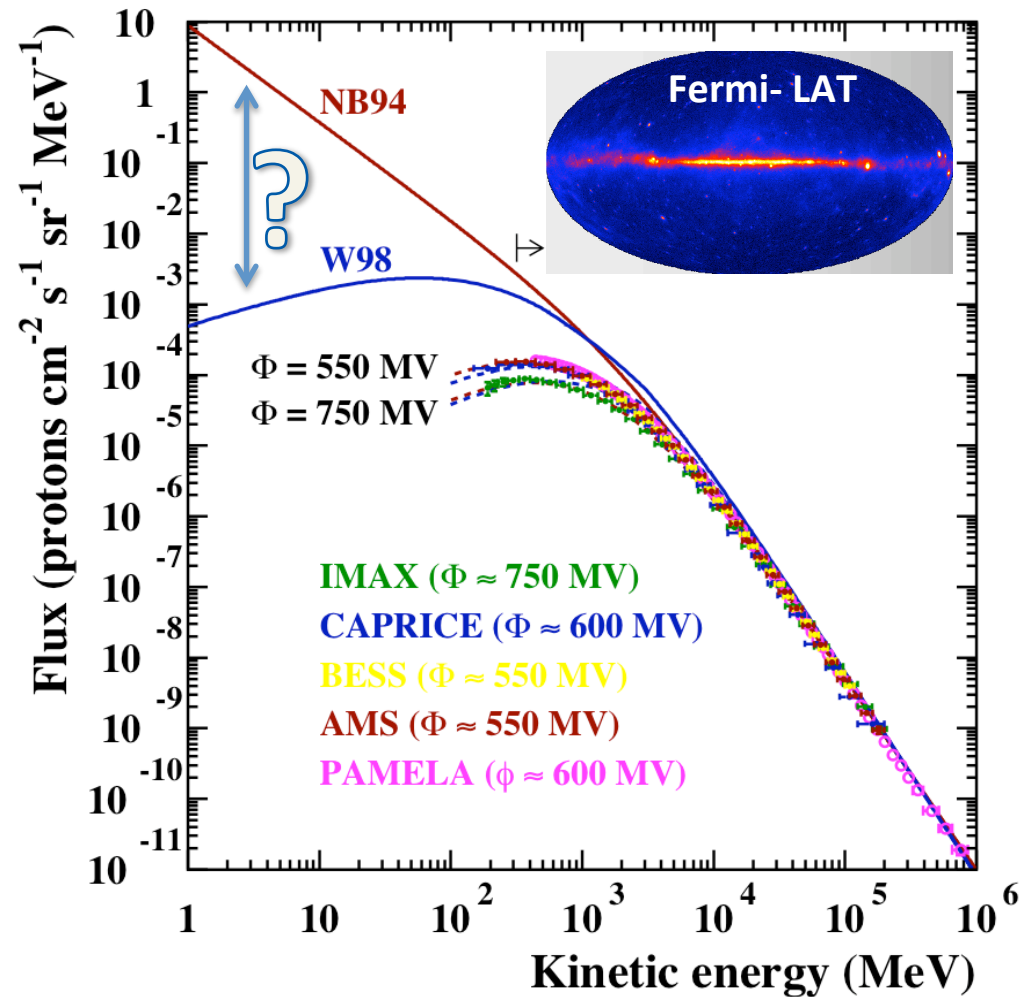
**CTA** : astronomie  $\gamma$  au sol, de qqs dizaines de GeV à  $\geq 100$  TeV  
 => construction : 2013 - 2018

- Détection avec le **SKA** de  $\sim 620$  SNe  $\text{an}^{-1} \text{deg}^{-1}$  jusqu'à un redshift de  $\sim 5$

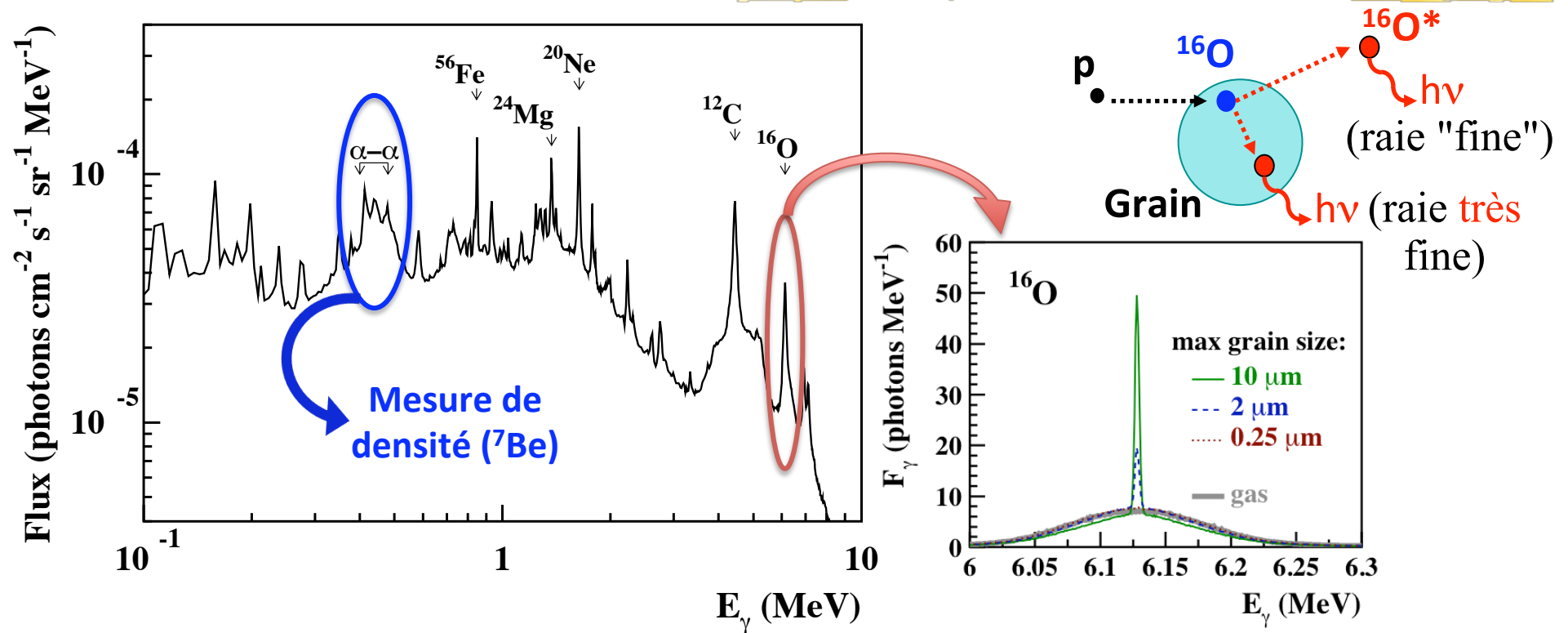
**SKA** : radiotélescope avec une surface collectrice de  $\sim 1 \text{ km}^2$   
 => construction : 2016 - 2024

# A la recherche des rayons cosmiques de basse énergie

- Observation de  $\text{H}_3^+$  dans des nuages moléculaires diffus => rayons cosmiques de basse énergie (Indriolo & McCall 2012)
- ✓ Comment identifier les ions interstellaires de moins de  $\sim 300 \text{ MeV nucléon}^{-1}$  ?
- ✓ Comment étudier leurs effets dans le milieu ambiant (ionisation, chauffage...)?



# L'émission galactique de raies gamma

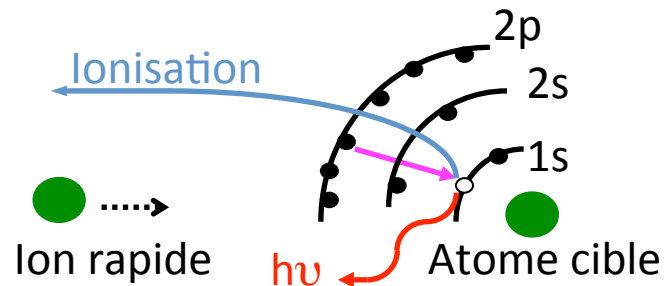


- Densité moyenne des RCs de basse énergie dans la Voie lactée + mesure de **densité** (Tatischeff et al. 2001), **taille de grains** de poussière (Tatischeff & Kiener 2004)
- Les flux prédits sont **à la portée des télescopes  $\gamma$**  de la prochaine génération (Benhabiles-Mezhoud et al. 2013)

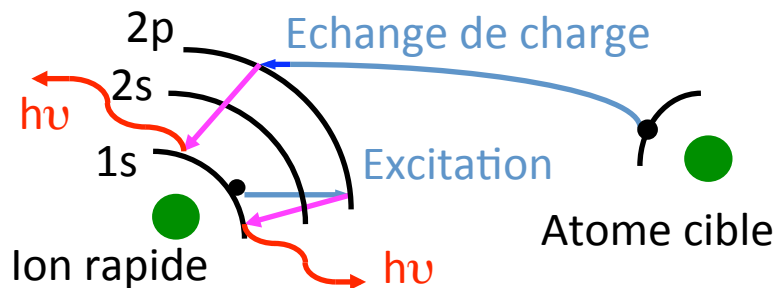


# L'émission X non thermique

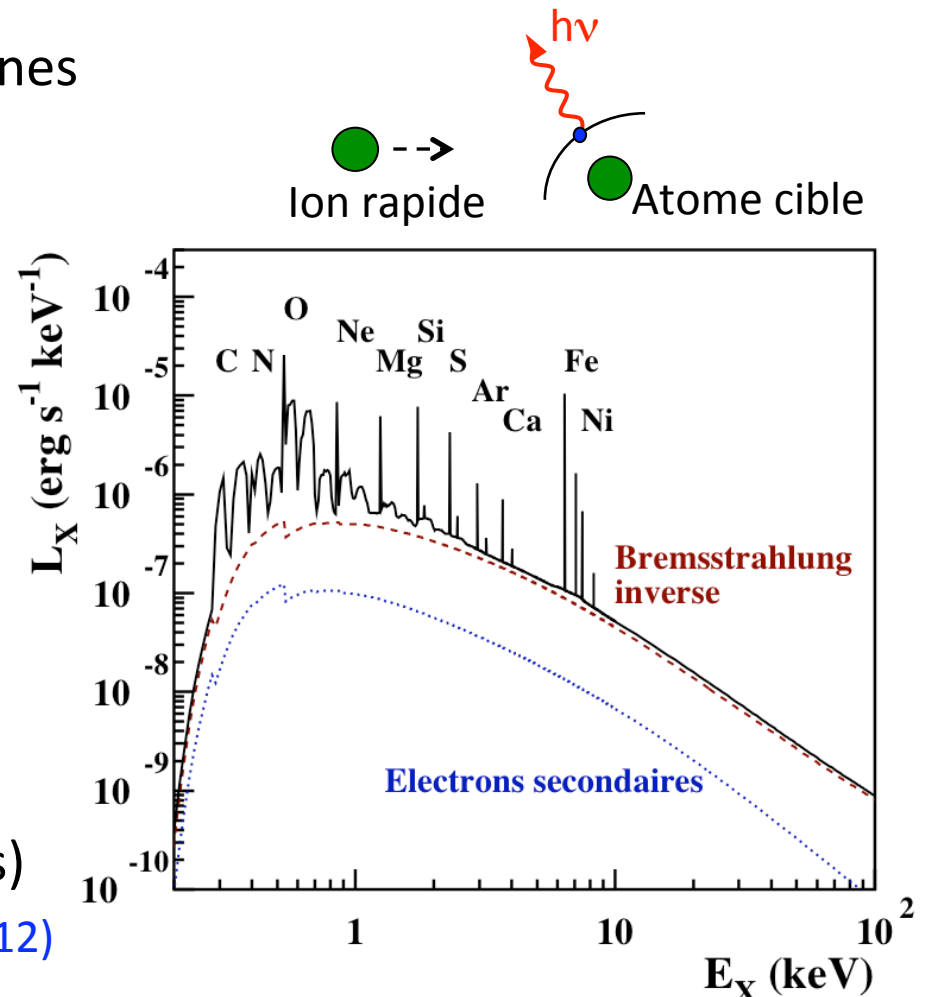
- **Fond continu** : Bremsstrahlung inverse (+ Bremsstrahlung des  $e^-$  secondaires)
- **Raies fines** : ionisation de couches internes



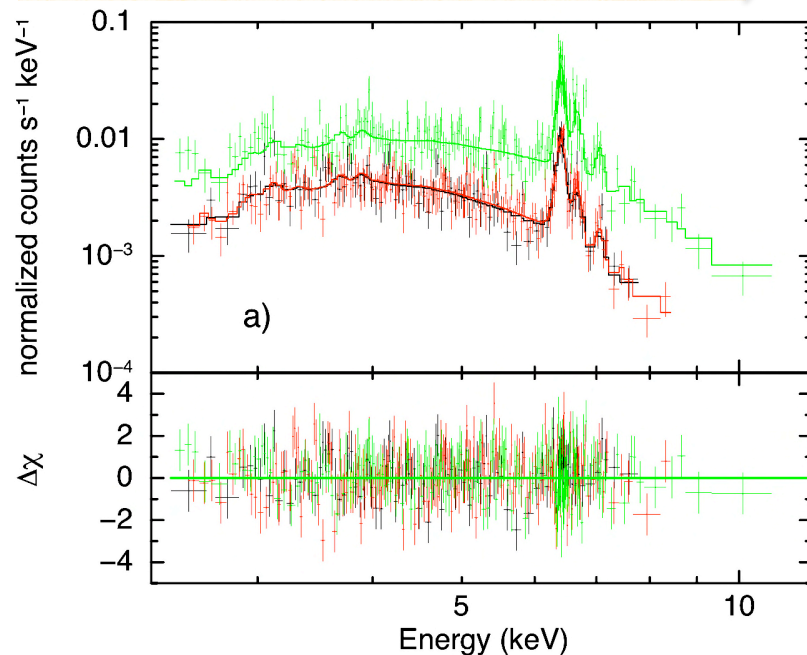
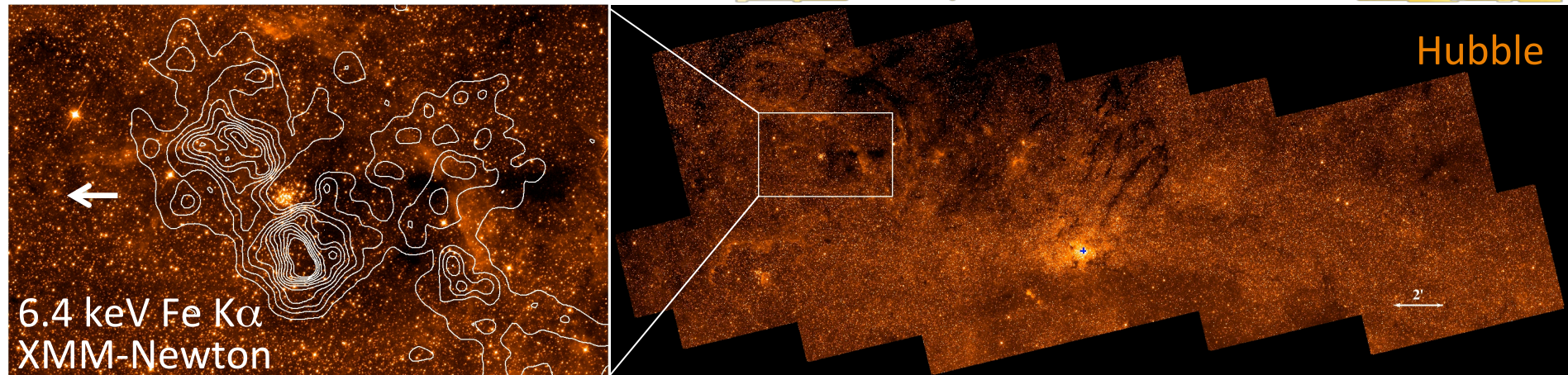
- **Raies larges** : échange de charge



⇒ **Modèles génériques** (ions et électrons)  
dans XSPEC (Tatischeff et al. 1998, 1999, 2012)

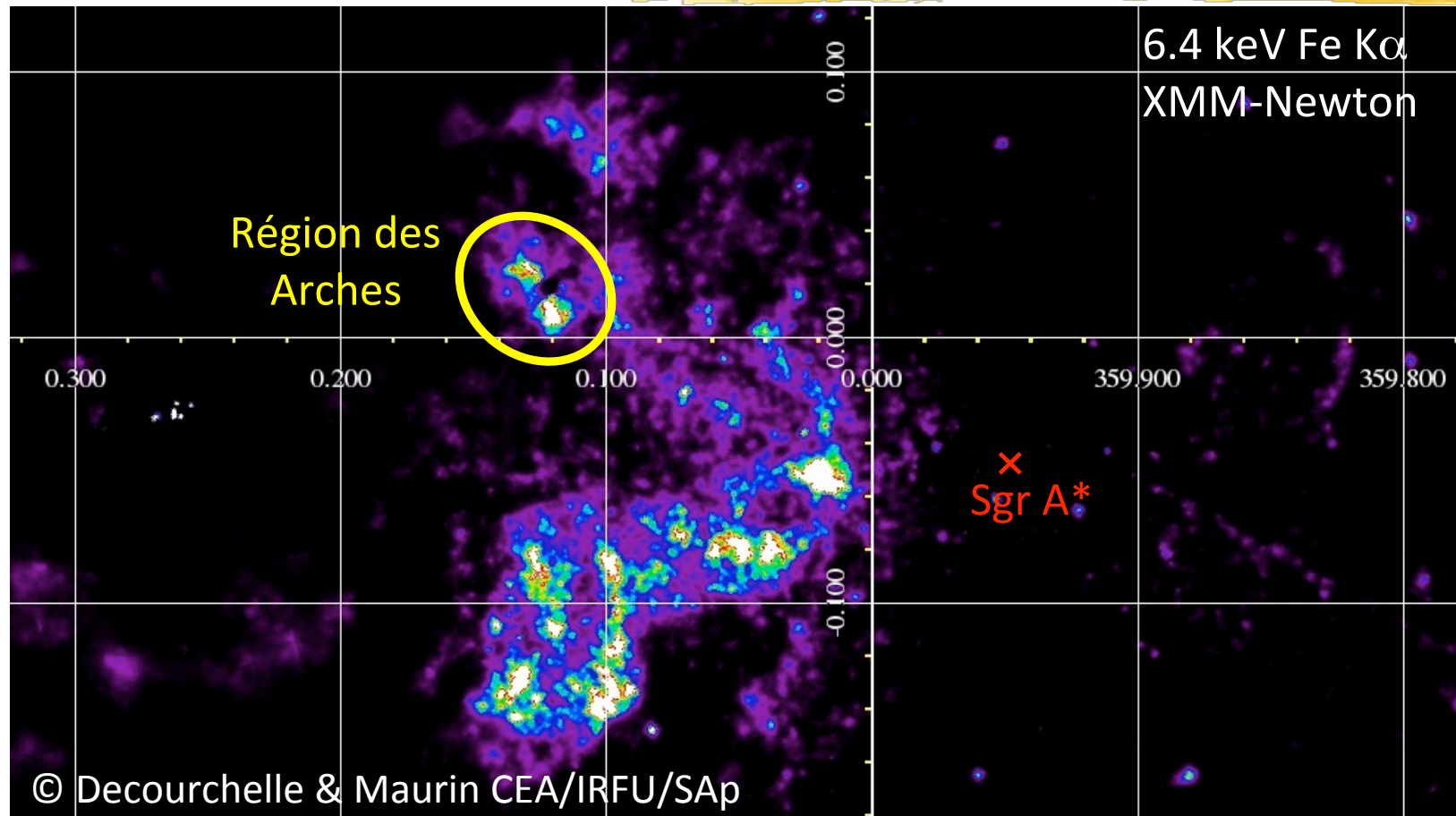


# Une nouvelle source de rayons cosmiques



- Analyse avec **XMM-Newton** de l'émission Fe K $\alpha$  à 6,4 keV de la **région des Arches**
  - ⇒ Ions accélérés dans le **choc d'étrave** dû au mouvement propre de l'amas stellaire
  - ⇒ Première découverte d'une **source de rayons cosmiques hadroniques de basse énergie** en dehors du système solaire (Tatischeff, Decourchelle & Maurin 2012)

# L'émission à 6,4 keV du centre galactique

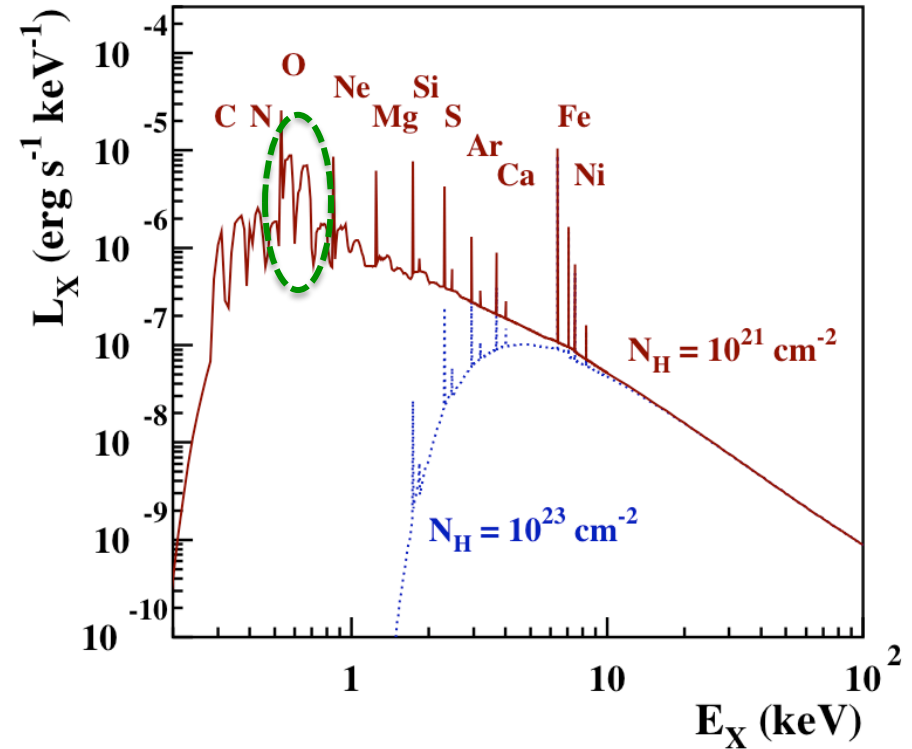
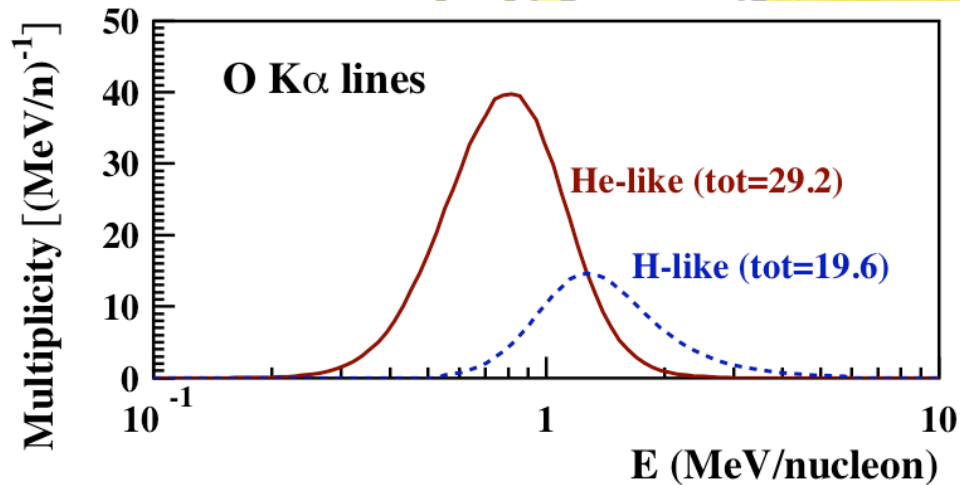


- Fluorescence X excitée par des éruptions de **Sgr A\*** + **rayons cosmiques**  
 ⇒ Grand programme d'observations avec **XMM-Newton** (Terrier et al. 2012)

Vincent Tatischeff, soutenance d'habilitation à diriger des recherches, 19 décembre 2012



# L'émission X non thermique – Perspectives



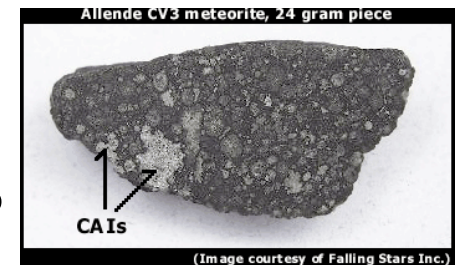
- Recherche des raies larges K $\alpha$  et K $\beta$  de O à 0,57 et 0,65 keV émis par un nuage moléculaire proche (e.g. Barnard 1 ; Tatischeff 2012)
  - Origine de l'émission variable à 6,4 keV de certaines protoétoiles (e.g. Elias 29 ; Giardino et al. 2007)
- ⇒ Particules accélérées ?



# L'origine des radioactivités de courte période dans le système solaire primitif

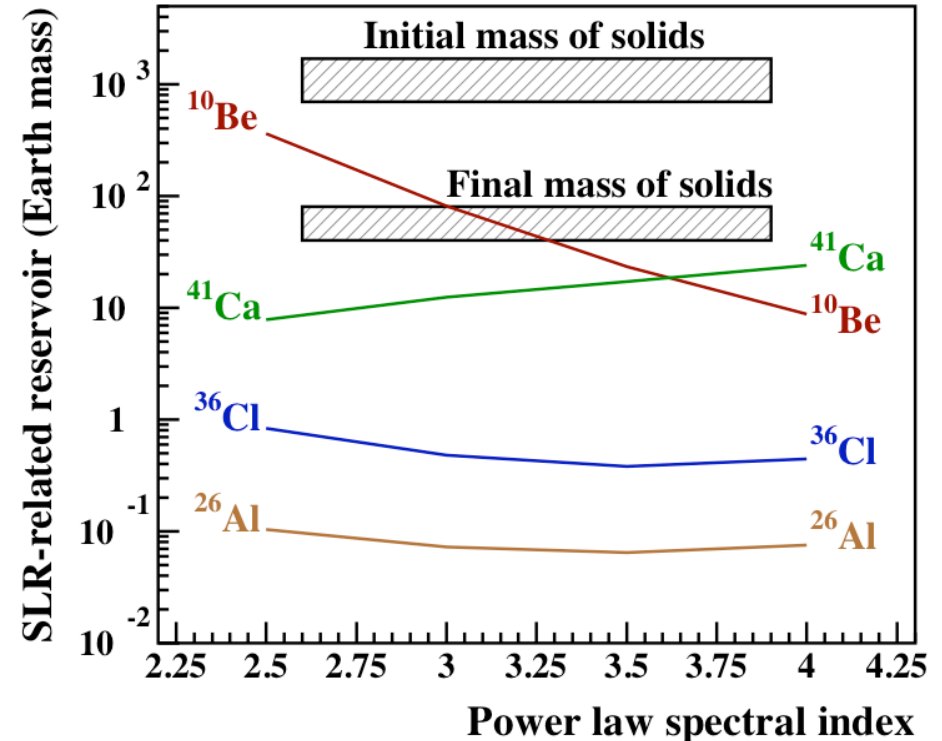
| Radio-isotope                          | Isotope fils      | Période (10 <sup>6</sup> ans)                   | Concentration initiale <sup>a</sup>                                |  |
|--|-------------------|---|--|--|
| Enrichissement continu de la Galaxie ? | <sup>41</sup> Ca  | <sup>41</sup> K                                 | $^{41}\text{Ca}/^{40}\text{Ca} = (1,41 \pm 0,14) \times 10^{-8}$   |  |
|  | <sup>36</sup> Cl  | <sup>36</sup> S (1,9%), <sup>36</sup> Ar(98,1%) | $^{36}\text{Cl}/^{35}\text{Cl} > 1,5 \times 10^{-5}$               |  |
|  | <sup>26</sup> Al  | <sup>26</sup> Mg                                | $^{26}\text{Al}/^{27}\text{Al} = (5,23 \pm 0,13) \times 10^{-5}$   |  |
|  | <sup>10</sup> Be  | <sup>10</sup> B                                 | $^{10}\text{Be}/^9\text{Be} = (7,0 \pm 0,8) \times 10^{-4}$        |  |
|  | <sup>60</sup> Fe  | <sup>60</sup> Ni                                | $^{60}\text{Fe}/^{56}\text{Fe} = (1,08 \pm 0,21) \times 10^{-8}$   |  |
|  | <sup>53</sup> Mn  | <sup>53</sup> Cr                                | $^{53}\text{Mn}/^{55}\text{Mn} = (6,28 \pm 0,66) \times 10^{-6}$   |  |
|  | <sup>107</sup> Pd | <sup>107</sup> Ag                               | $^{107}\text{Pd}/^{108}\text{Pd} = (5,9 \pm 2,2) \times 10^{-5}$   |  |
|  | <sup>182</sup> Hf | <sup>182</sup> W                                | $^{182}\text{Hf}/^{180}\text{Hf} = (9,72 \pm 0,44) \times 10^{-5}$ |  |
|  | <sup>129</sup> I  | <sup>129</sup> Xe                               | $^{129}\text{I}/^{127}\text{I} = (1,19 \pm 0,20) \times 10^{-4}$   |  |
|  | <sup>92</sup> Nb  | <sup>92</sup> Zr                                | $^{92}\text{Nb}/^{93}\text{Nb} = (1,6 \pm 0,3) \times 10^{-5}$     |  |
|  | <sup>244</sup> Pu | Produits de fission                             | 80   | $^{244}\text{Pu}/^{238}\text{U} = (6,8 \pm 1,0) \times 10^{-3}$  |
|  | <sup>146</sup> Sm | <sup>142</sup> Nd (décroissance $\alpha$ )      | 103  | $^{146}\text{Sm}/^{144}\text{Sm} = (8,4 \pm 0,5) \times 10^{-3}$ |

- Traces de **radioactivités** aujourd'hui **éteintes** dans des **météorites** (surplus d'abondance de l'isotope fils)
- ✓ Contexte astrophysique de **naissance du système solaire** ?
- ✓ **Spécificité de la formation des planètes** du système solaire ?



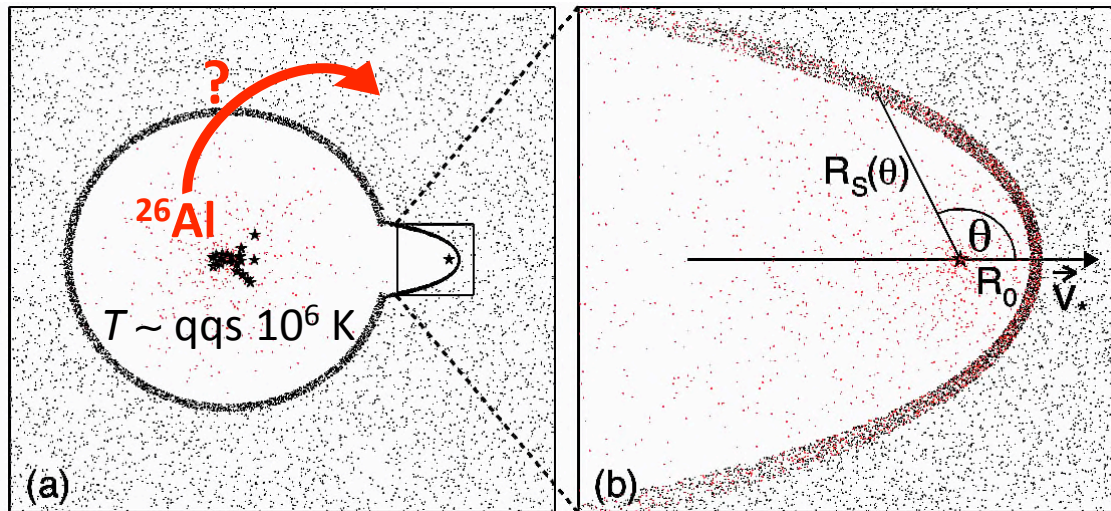


# Nucléosynthèse non-thermique dans le système solaire primitif



- Synthèse de  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{36}\text{Cl}$  et  $^{41}\text{Ca}$  par **irradiation du disque protoplanétaire** par des particules accélérées (e.g. Lee et al. 1998 ; Gounelle et al. 2006) ?
- **Production peu efficace** => ne peut expliquer une répartition homogène des radioactivités ( $^{26}\text{Al}$ ) dans le système solaire interne (Duprat & Tatischeff 2007, 2008)

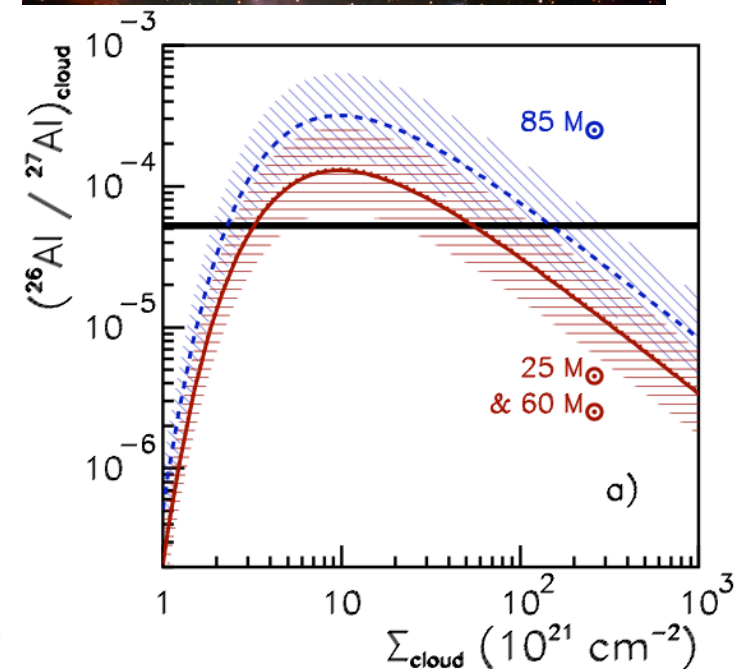
# Une étoile Wolf-Rayet fugeuse à l'origine du système solaire ?



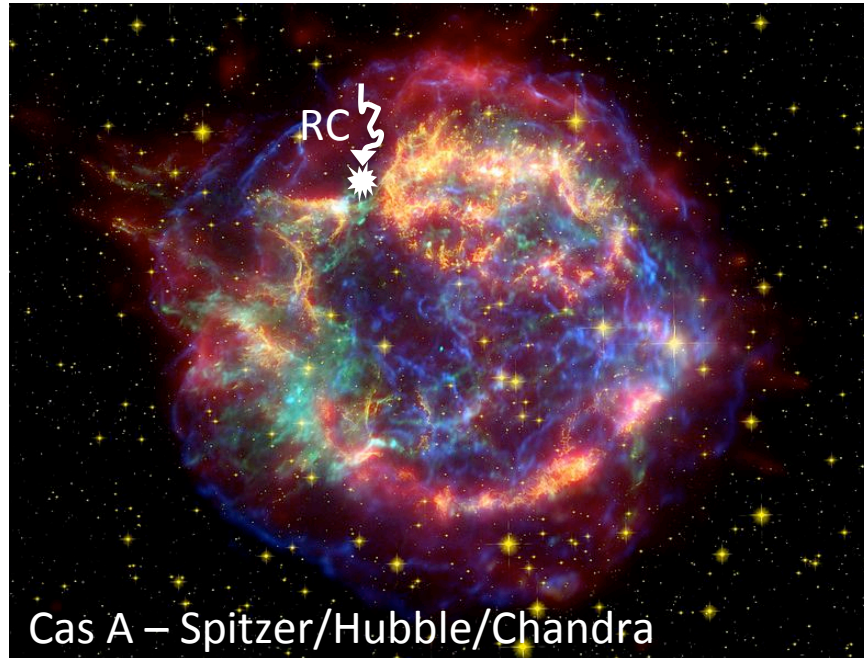
- **Incorporation rapide** de produits de nucléosynthèse dans un cœur moléculaire **froid** ?

⇒ **Choc d'étrave** d'une étoile **Wolf-Rayet** fugeuse ⇒ **origine de  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{41}\text{Ca}$  et  $^{36}\text{Cl}$**  (Tatischeff, Duprat & de Séreville 2010)

⇒ Formation du système solaire à partir d'un nuage (enrichi en radioactivités) de  **$\sim 100 M_\odot$**

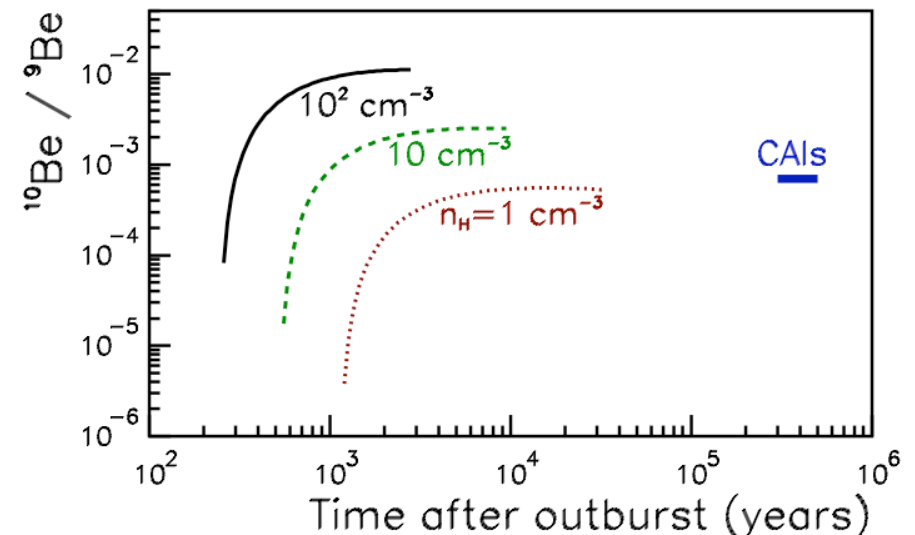
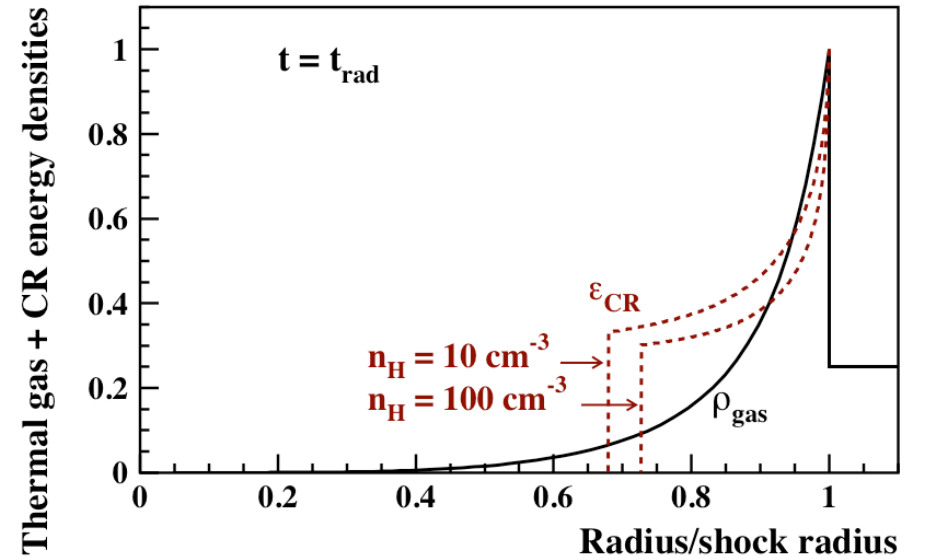


# Nucléosynthèse de $^{10}\text{Be}$ dans le rémanent de la supernova mère



Cas A – Spitzer/Hubble/Chandra

- Explosion de l'étoile Wolf-Rayet
- ⇒ Origine du  $^{10}\text{Be}$  : production dans le rémanent de supernova par les rayons cosmiques accélérés au choc principal (Tatischeff et al., en préparation)

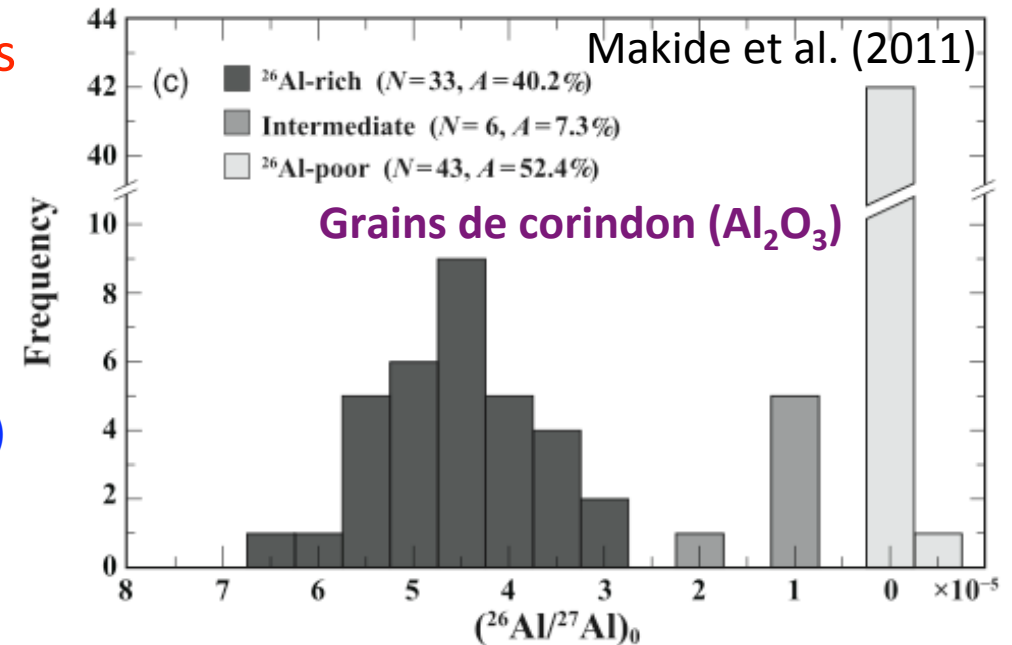
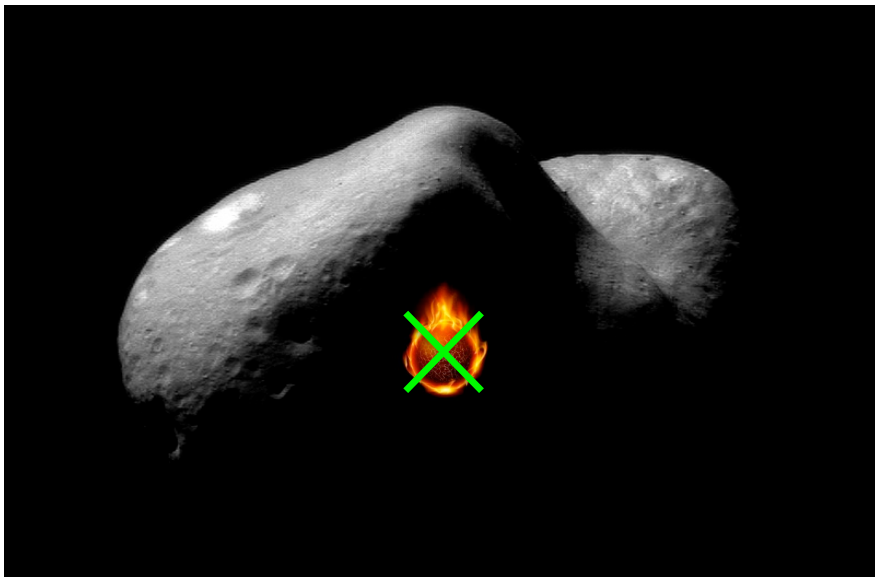




# Radioactivités de courte période dans le système solaire primitif – Perspectives

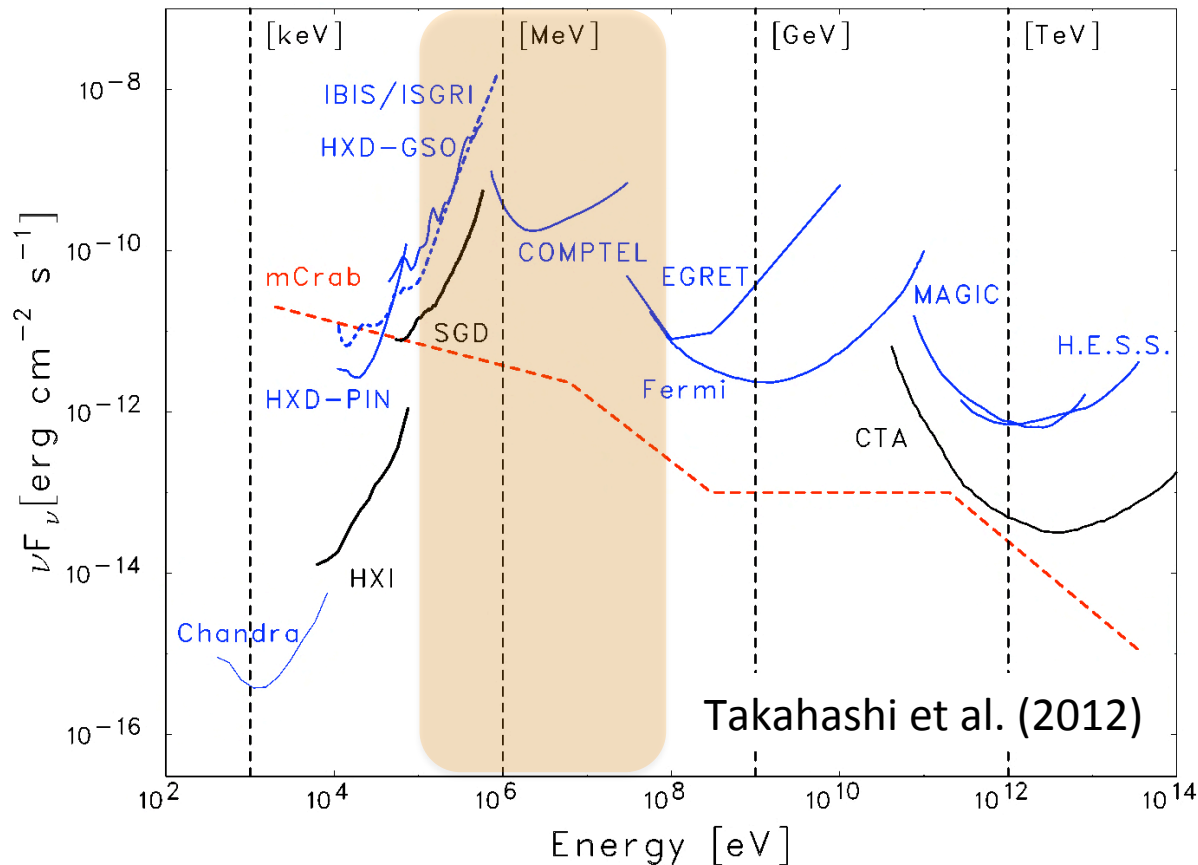
37

- Notre modèle reproduit les **teneurs moyennes en  $^{10}\text{Be}$ ,  $^{26}\text{Al}$ ,  $^{41}\text{Ca}$  et  $^{36}\text{Cl}$**  du disque protoplanétaire...
- ... mais il n'explique pas la "structure fine" de certaines données météoritiques (e.g. Makide et al. 2011)



- Origine stellaire de  $^{26}\text{Al}$   $\Rightarrow$  **le soleil n'est pas "une étoile comme les autres" !**
- Effet de l'absence de chauffage radioactif des planétoïdes primitifs sur la **formation des exoplanètes ?**

# L'astronomie gamma au MeV



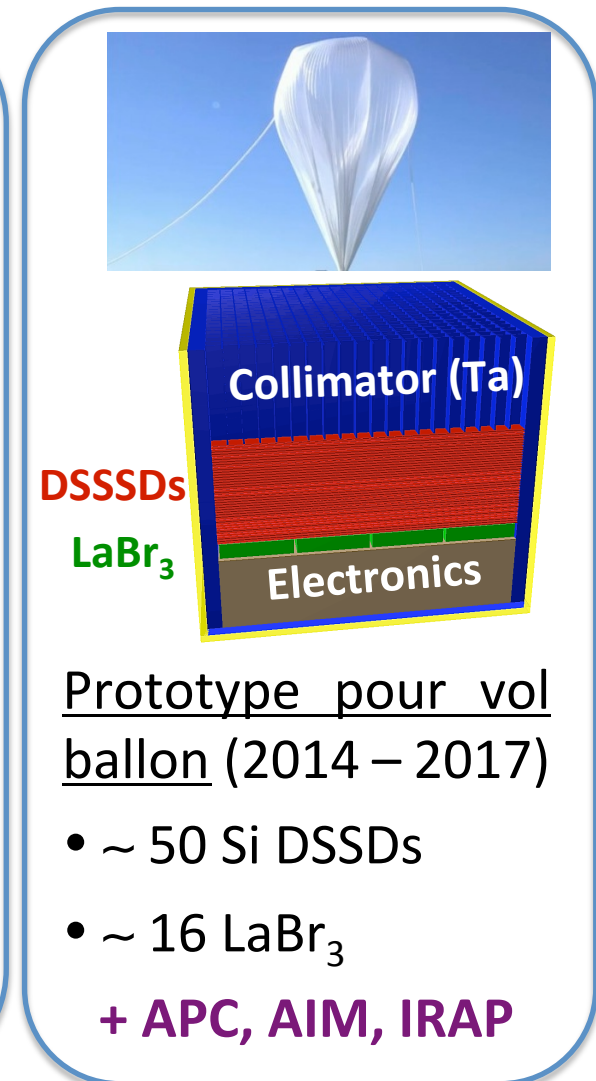
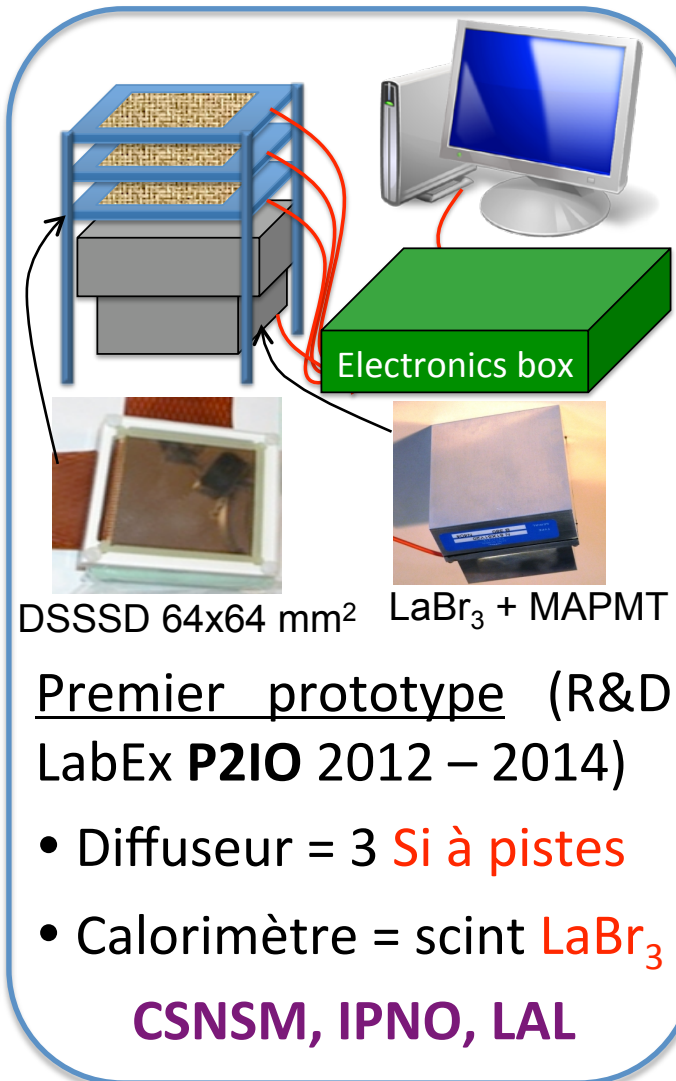
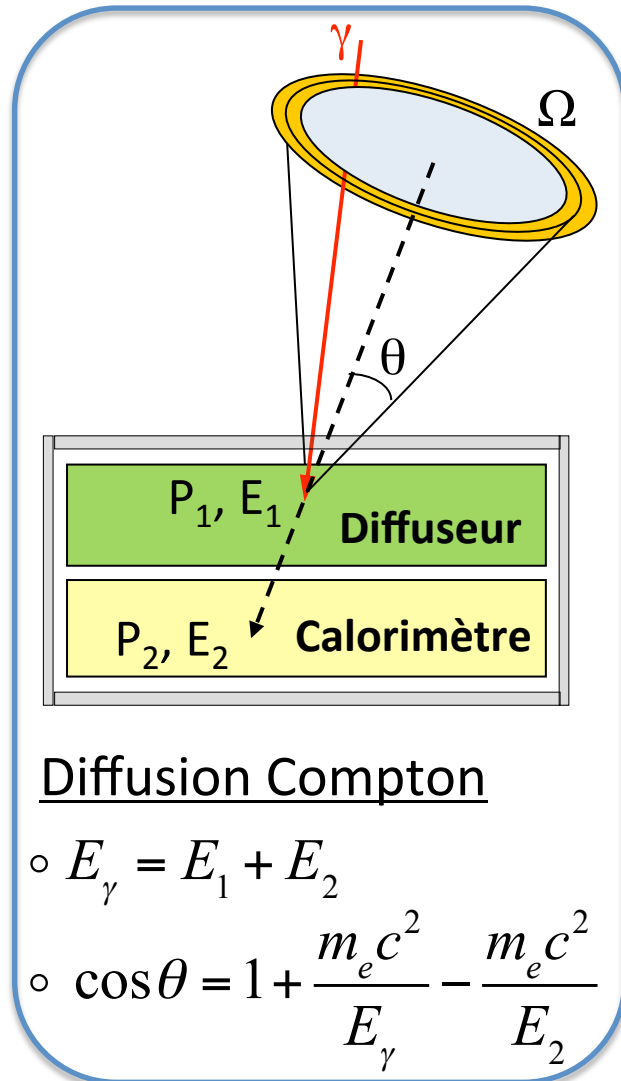
- Observations des **rayons cosmiques de basse énergie**, émissions  $\gamma$  promptes et retardées des **éruptions solaires**, accélération de particules dans les **supernovae** et les **novae**...

+ **Nucléosynthèse** stellaire, équation d'état de la **matière dense**, émission à **511 keV** de la Galaxie, physique fondamentale...

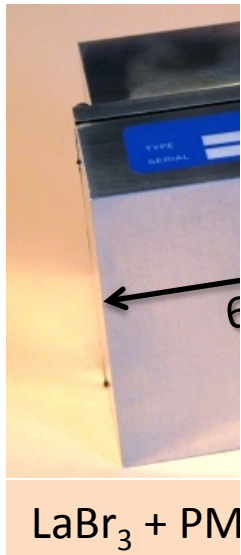
- ✓ Préparer un futur **observatoire à large bande passante**,  $\Delta E \sim 0,1-100$  MeV,  $\sim 100$  fois plus **sensible** à 1 MeV que *CGRO/COMPTEL* et *INTEGRAL/SPI*



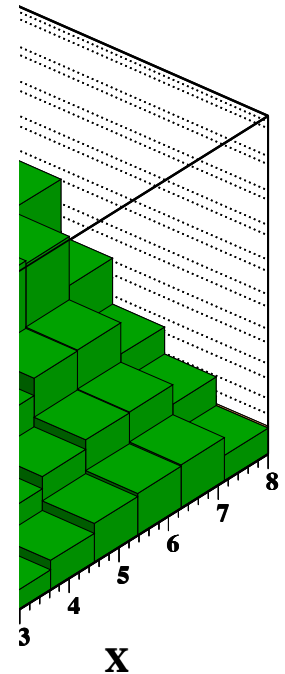
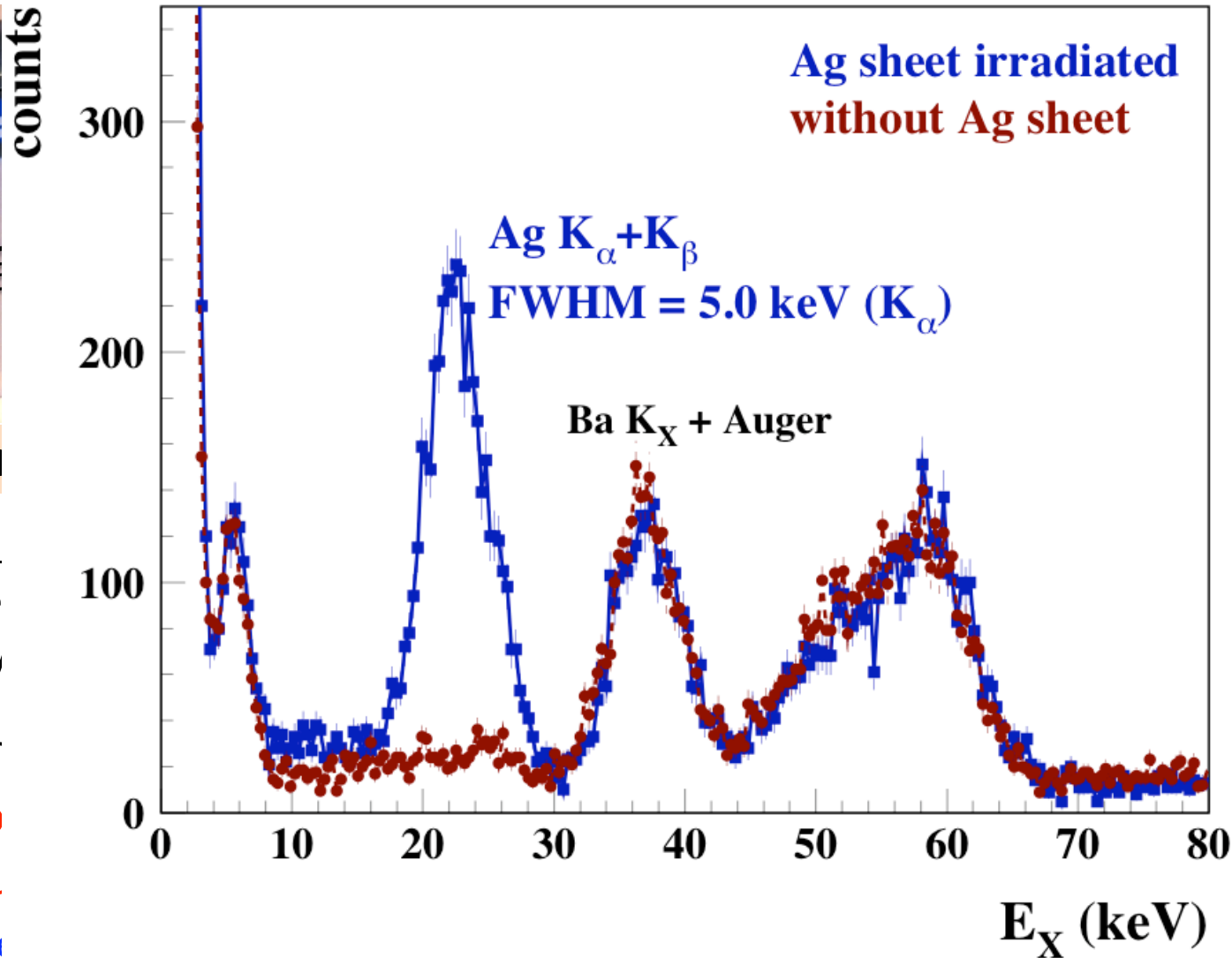
# Télescope Compton de nouvelle génération



# Un calorimètre-imageur en $\text{LaBr}_3$



- Modul  
couplé  
lues av
- **Seuil** (-
- **Positio**  
**Réseau**  
(Tatischeff



isants  
tion.  
teur

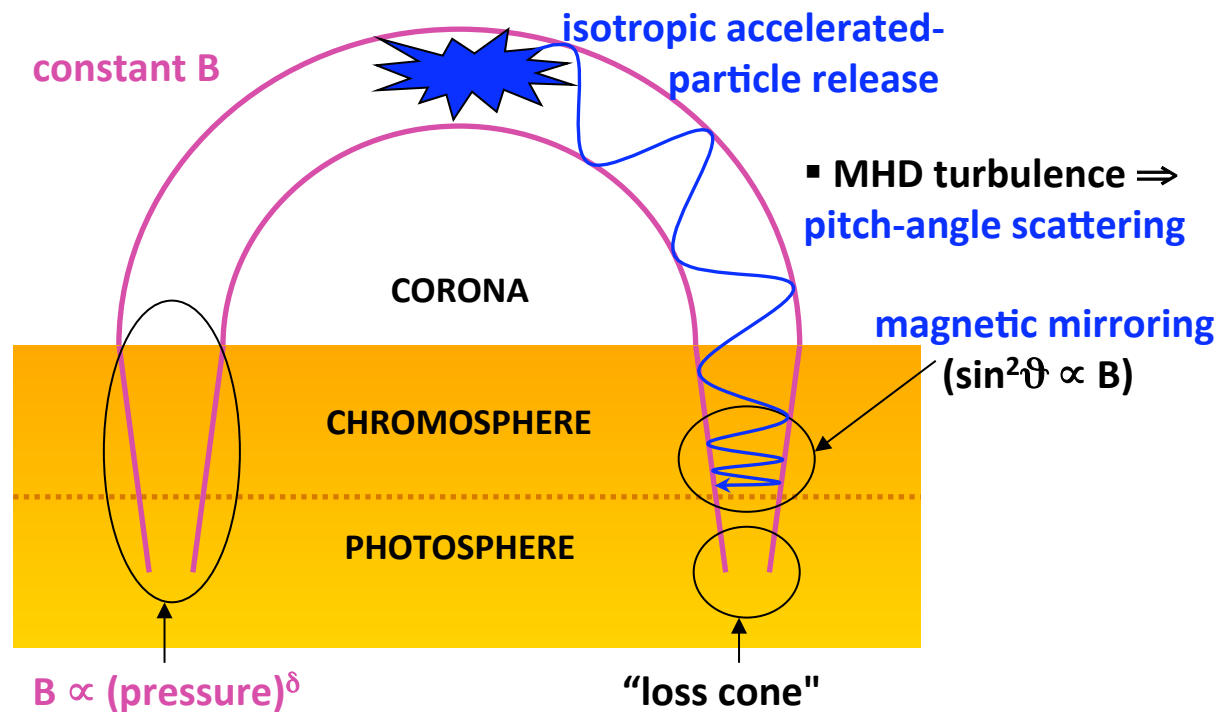
# Résumé des principales perspectives

- Mesurer l'abondance photosphérique d' $^3\text{He}$  avec d'autres **éruptions solaires**
- Détecter l'émission de **raies X de radioactivité solaire** avec *NuSTAR*
- Rechercher une variation de la raie du **Li** à 6708 Å dans des étoiles de type M proches et actives  $\Rightarrow$  **activité nucléaire de surface**
- Développer un modèle 2D d'accélération de particules dans les **novae**
- Etudier l'accélération d'électrons dans les **supernovae radio** (SN 2008D)
- Préparer l'observation gamma de supernovae extragalactiques avec **CTA**
- Rechercher de **nouvelles sources de rayons cosmiques** de basse énergie :
  - Emission à 6,4 keV des **régions centrales de la Galaxie**
  - Raies K larges d'ions O rapides dans un **nuage moléculaire proche**
- Confronter notre modèle de **formation du système solaire** à de nouvelles données météoritiques
- Préparer un **nouvel observatoire gamma** avec un module innovant en **LaBr<sub>3</sub>**



# Diapositives supplémentaires

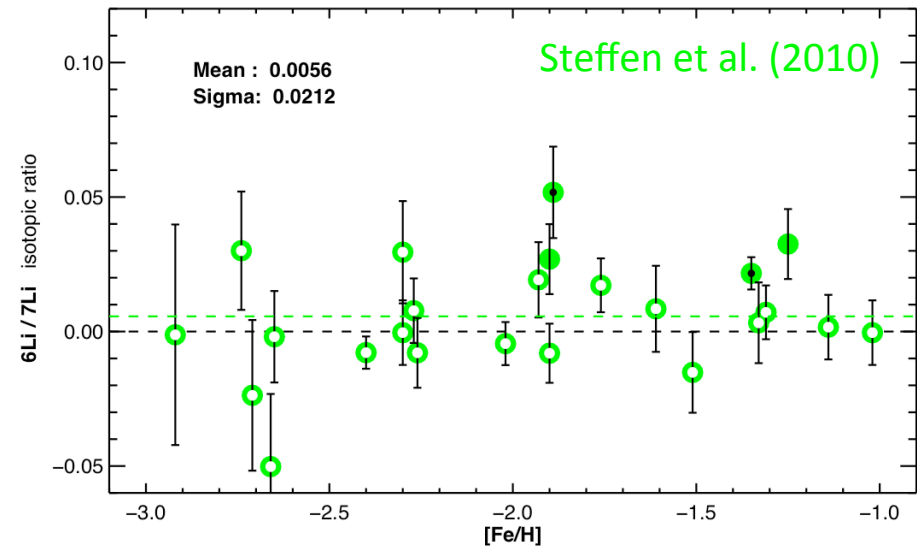
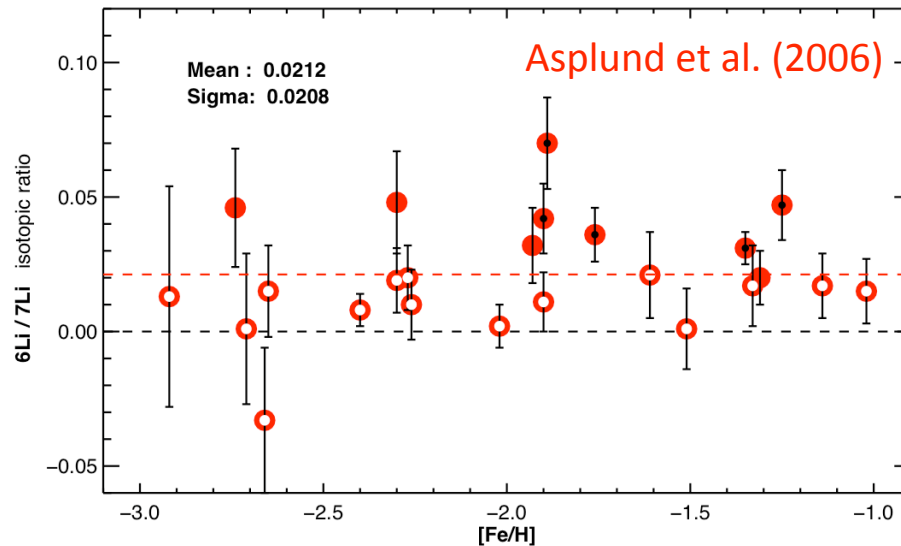
# Le modèle de boucle magnétique



- Principale incertitude du modèle (Hua et al. 1989) : niveau de turbulence MHD ⇒ **diffusion en angle d'attaque** des particules ⇒ **distribution angulaire**
- Eruption du 28 oct 2003 (forme des raies à 4,44 et 6,13 MeV ; Kiener et al. 2006) : régime de diffusion **proche de la saturation** (plasma très turbulent)

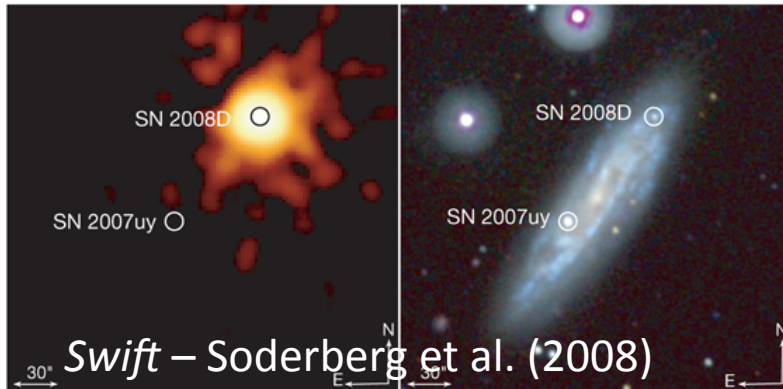


# Détection de ${}^6\text{Li}$ dans de vieilles étoiles



- Détection de  ${}^6\text{Li}$  ( $\geq 2\sigma$ ) dans 9 vieilles étoiles (pauvres en "métaux") sur 24 observées (Asplund et al. 2006), ou plutôt 5 sur 24 d'après Steffen et al. (2012)
- Ce  ${}^6\text{Li}$  n'a pas été produit par la nucléosynthèse primordiale standard, ni par les rayons cosmiques galactiques (e.g. Prantzos 2012)
- **Production *in situ*** par des éruptions stellaires ? (Tatischeff & Thibaud 2007)

# L'émission radio de SN 2008D



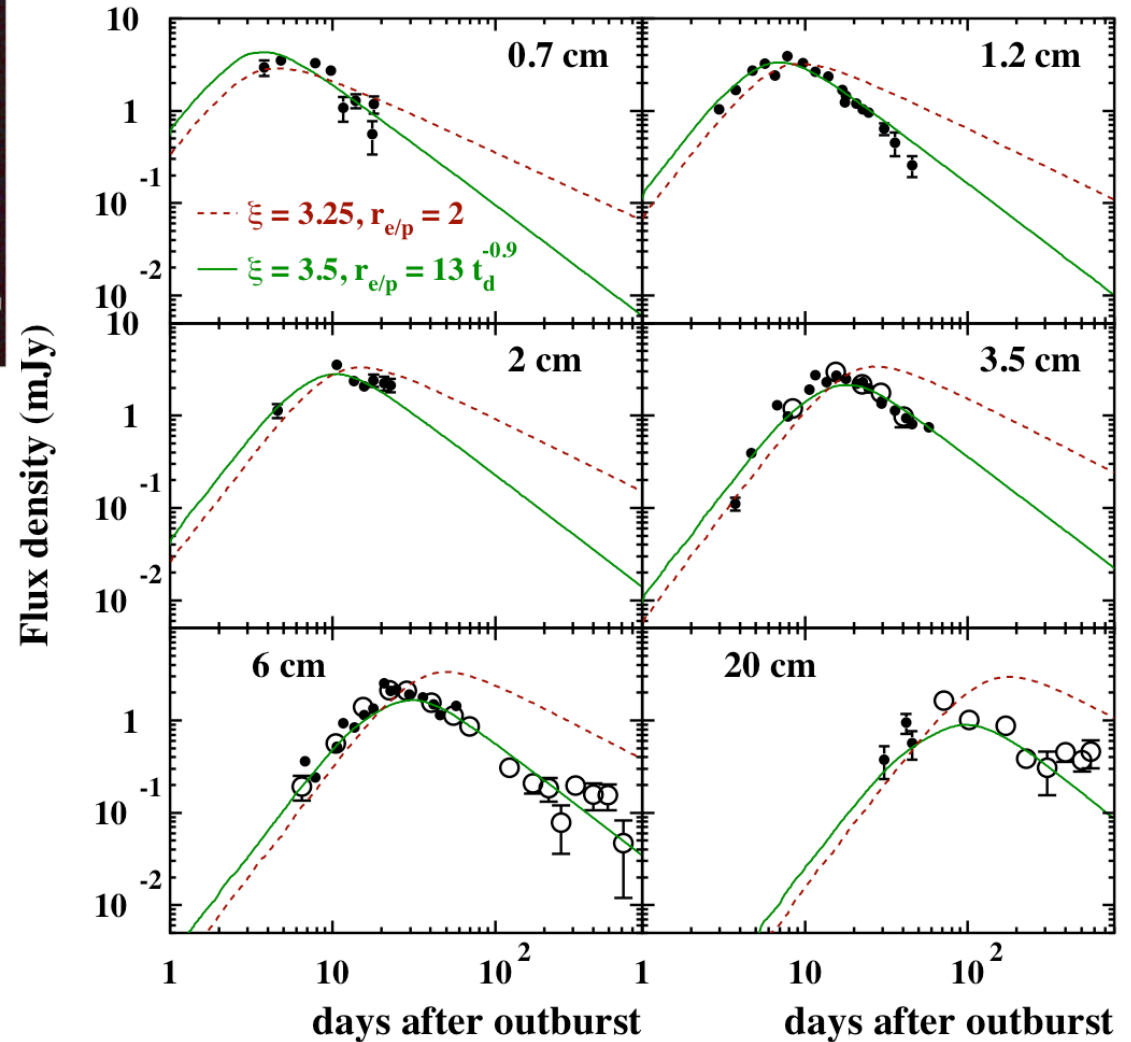
- Explosion d'une étoile **Wolf-Rayet** dans la galaxie NGC 2770 ( $D = 28$  Mpc)

- Modèle d'émission radio :

$$\eta_{\text{inj}}^{\text{p}} = 3,9 \times 10^{-4}$$

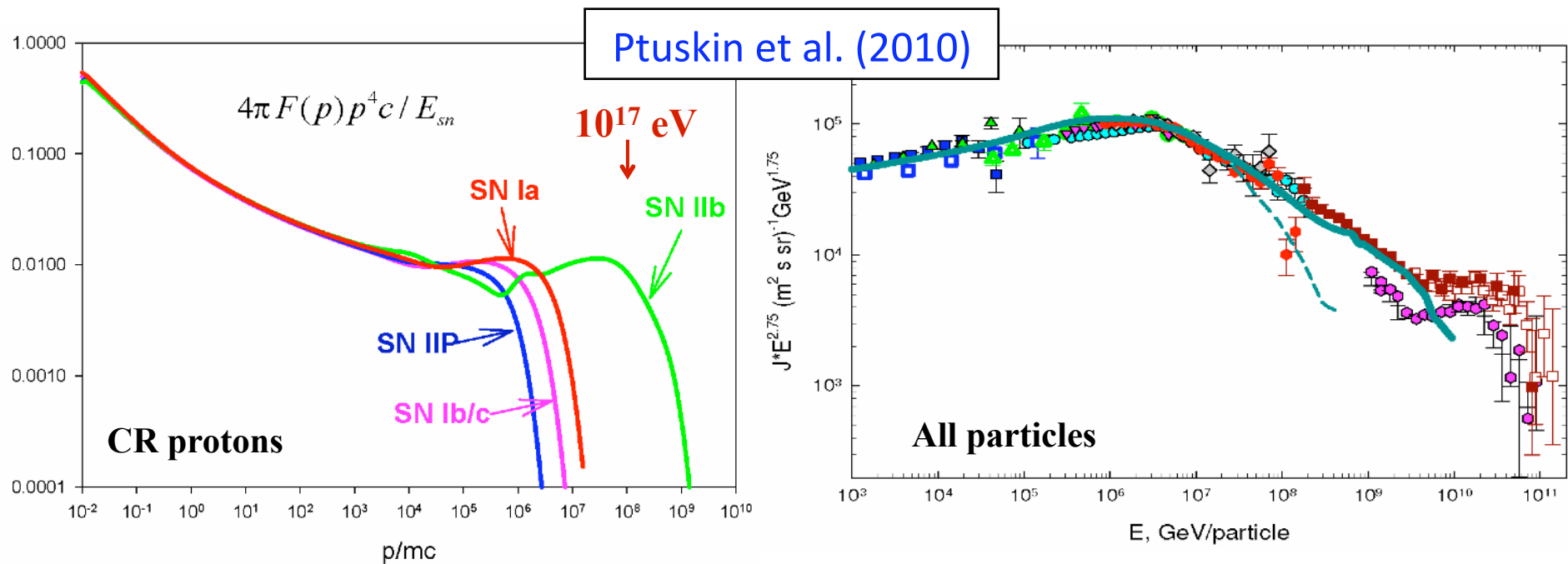
$$\eta_{\text{inj}}^{\text{e}} = 5,0 \times 10^{-3} \times (t/1 \text{ jour})^{-0,9}$$

- ⇒ **Surplus d'électrons accélérés les premiers mois !?**



# Les rayons cosmiques au-delà du genou

- **SNe IIb** (e.g. SN 1993J, Cas A) : explosion d'une supergéante rouge dans un vent particulièrement **dense**  $\Rightarrow B_{\text{turb}}$  **élevé** ( $B^2/8\pi \propto \rho_{\text{CSM}} V_s^2$ )  $\Rightarrow E_{\text{max}}$  **élevé**
- Système binaire ou étoile isolée de masse  $\sim 25 M_{\odot} < M_{\text{ZAMS}} < \sim 35 M_{\odot}$   
 $\Rightarrow$  **rare** (5,4% des SNe à EG)  $\Rightarrow$  **sources des RCs au-delà du genou ?**



# L'émission gamma de SN 1993J

- **Atténuation** de l'émission au TeV :  $\gamma + \gamma \rightarrow e^+ + e^-$  (rayonnement des éjectas)
- SN 1993J aurait pu être détectée par **CTA** (Renaud et al., en préparation)

