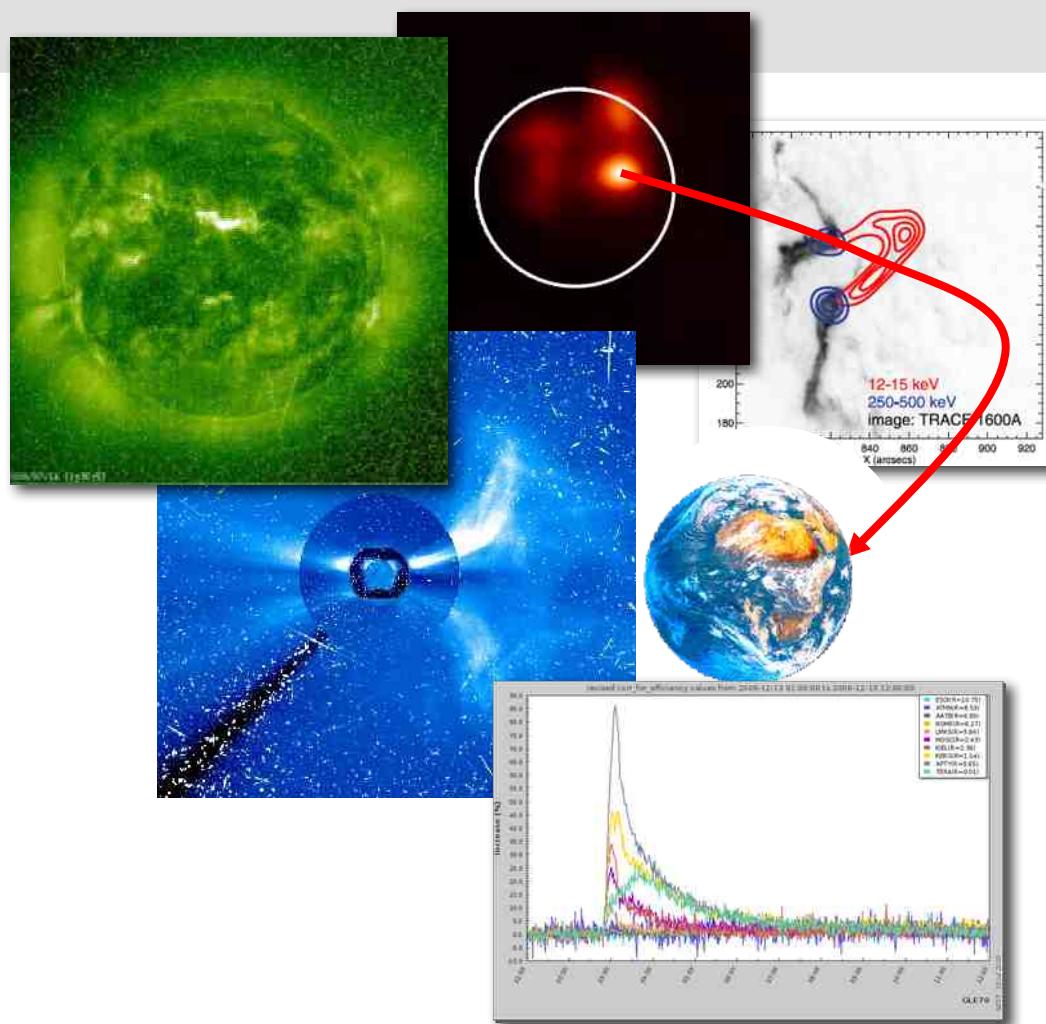


# Le Soleil: activité éruptive et particules de haute énergie



# Le Soleil: activité éruptive et particules de haute énergie

## Plan

- Les éruptions solaires ( «solar flares »)
- Aperçu des processus de stockage et dissipation d'énergie
- Les éjections coronales de masse (« CMEs »)
- Les particules de haute énergie

# Les éruptions solaires

Une introduction

# Les éruptions solaires

## Qu'est-ce qu'une éruption ?



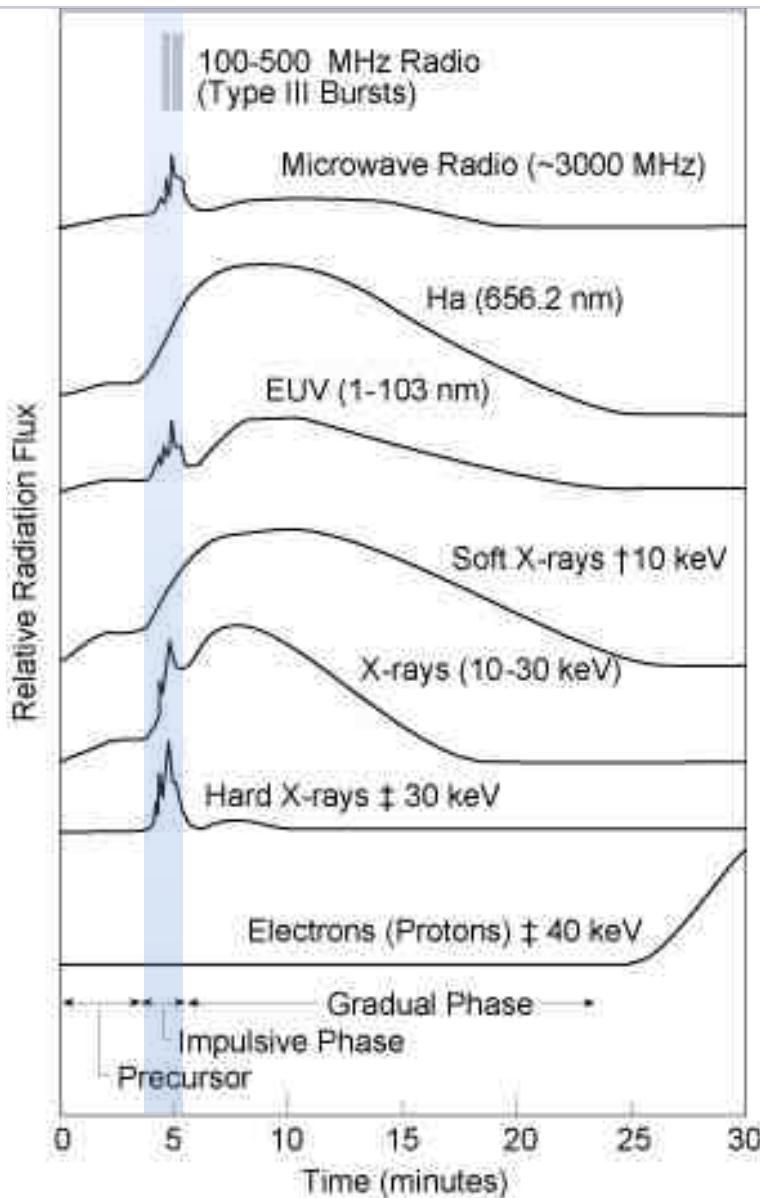
© SoHO/EIT (ESA/NASA)

- Observation :
  - embrillancement temporaire dans le spectre EM (en particulier: EUV, X, radio)
  - volume restreint de la couronne et de l'atmosphère sous-jacente, dans une région active
- Echelles de temps secondes à quelques heures; énergie ->  $10^{25}$  J
- Processus physiques :
  - chauffage du plasma à  $T > 10^7$  K
  - accélération de particules chargées (électrons, protons, ions), parfois aux énergies relativistes

# Les éruptions solaires

## Emissions électromagnétiques

- Distinction en gros :
  - bref & piqué (radio, micro ondes<sup>1</sup>, X durs)
  - long et à évolution lente (Hα, X mous)
- Phases d'une éruption :
  - précurseur
  - phase impulsive
  - phase principale ou graduelle
- Catégories
  - thermique : montée/décroissance lente
  - non thermique: forte variation temporelle

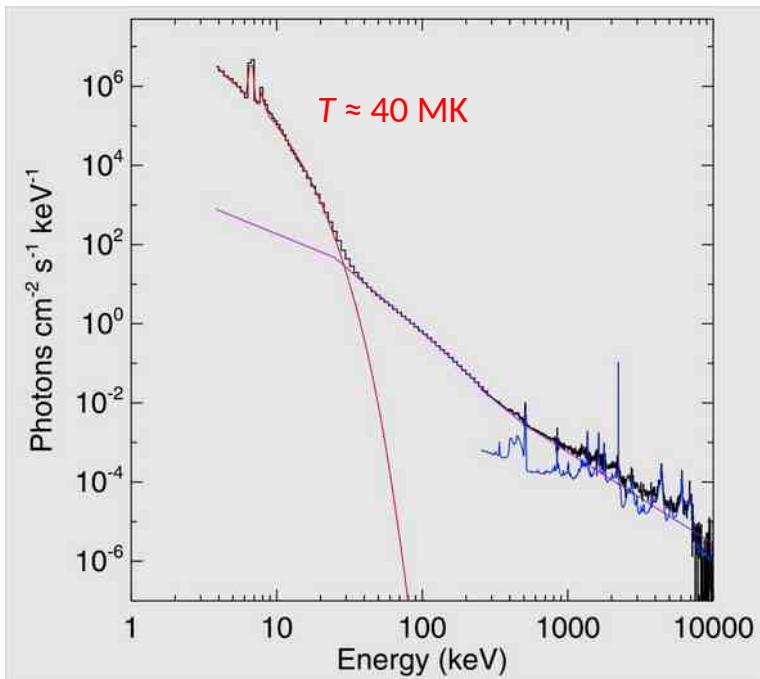


(1)  $\nu \geq 1$  GHz

# Les éruptions solaires

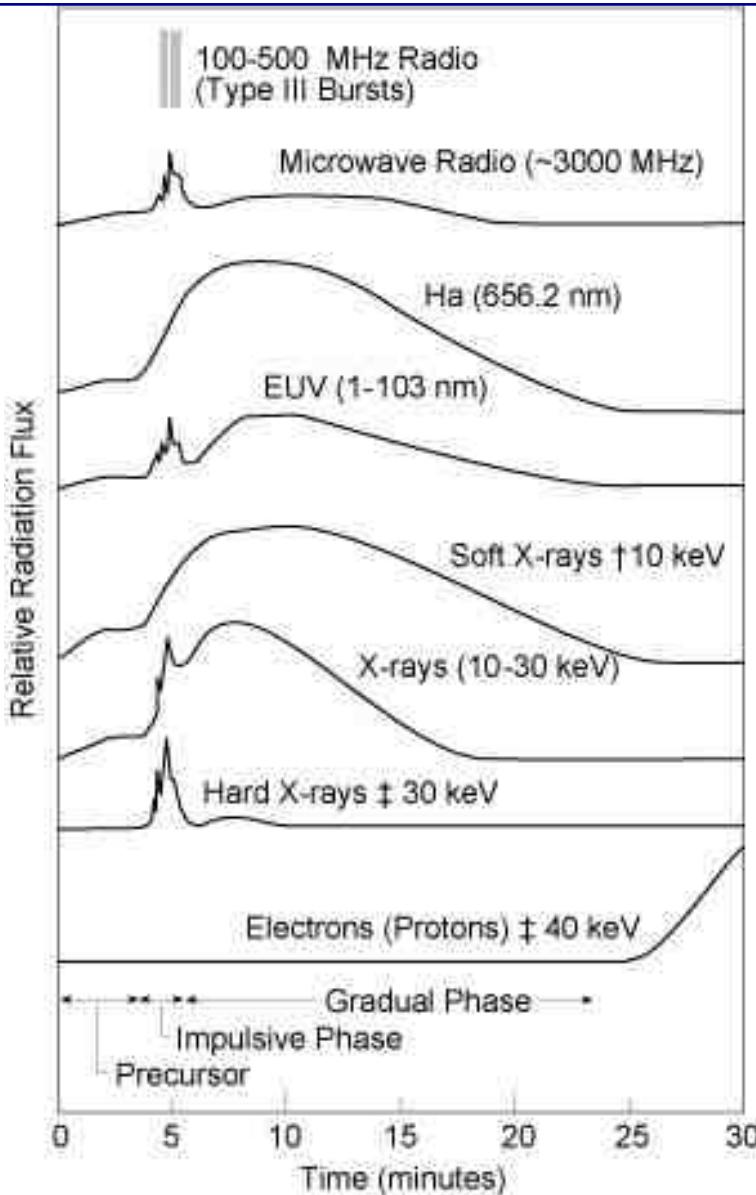
## Emissions thermiques

- Spectre de photons (RHESSI/NASA) – parties thermique (maxwellienne) et non-thermique (loi de puissance)



R.P. Lin 2011 *Space Sci Rev* 159, 421

- Thermique : raies spectrales et continu ( $h\nu < 50$  keV; population maxwellienne d'électrons dans la couronne)

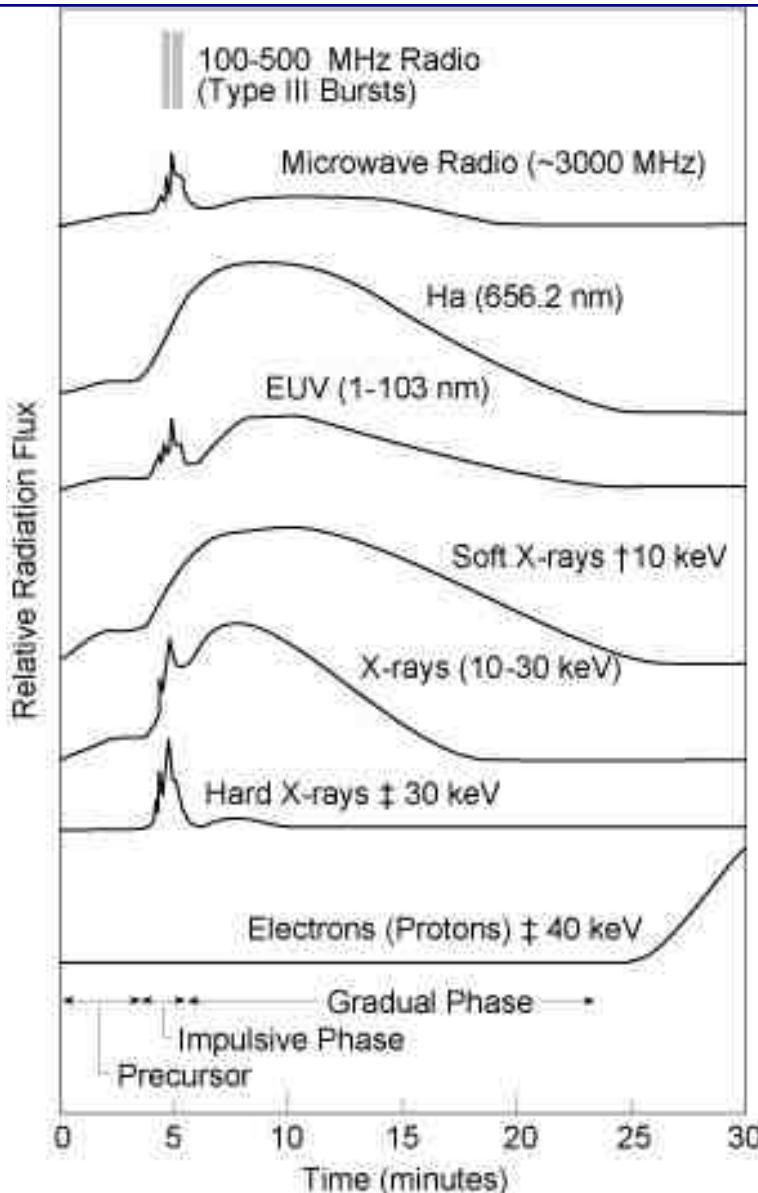


[https://ase.tufts.edu/cosmos/print\\_images.asp?id=27](https://ase.tufts.edu/cosmos/print_images.asp?id=27)

# Les éruptions solaires

## Emissions thermiques

- Evolution lente (échelle de temps minutes) : thermique
- Différents domaines spectraux différentes gammes de température, différentes régions de l'atmosphère:
  - Micro ondes (1 à quelques dizaines de GHz) -> chromosphère-couronne
  - H $\alpha$  -> chromosphère
  - EUV, X mous -> couronne

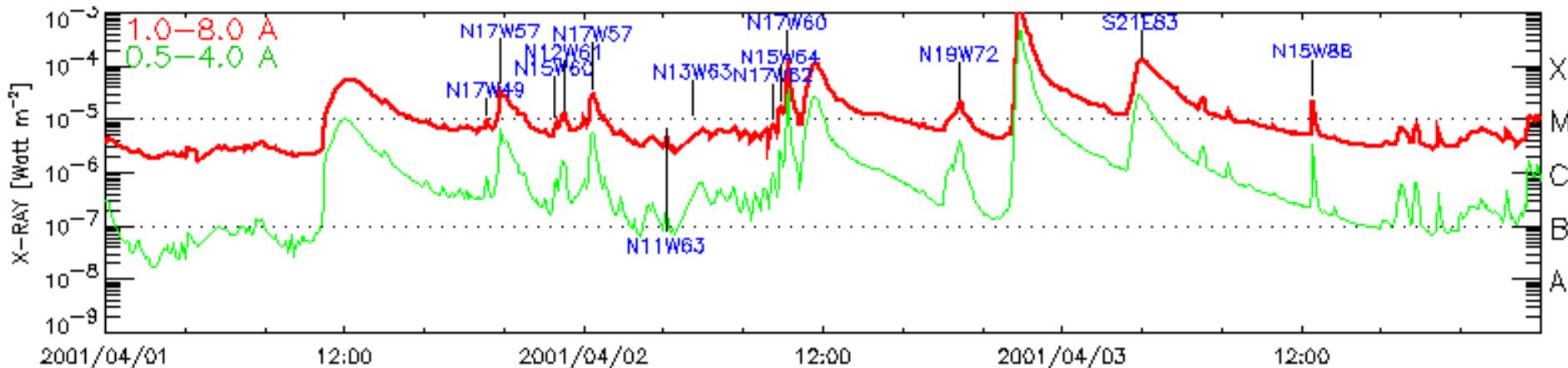


[https://ase.tufts.edu/cosmos/print\\_images.asp?id=27](https://ase.tufts.edu/cosmos/print_images.asp?id=27)

# Les éruptions solaires

## Emissions thermiques – classification des éruptions

- Surveillance en rayons X (satellites GOES, NOAA): 3 jours en 2001

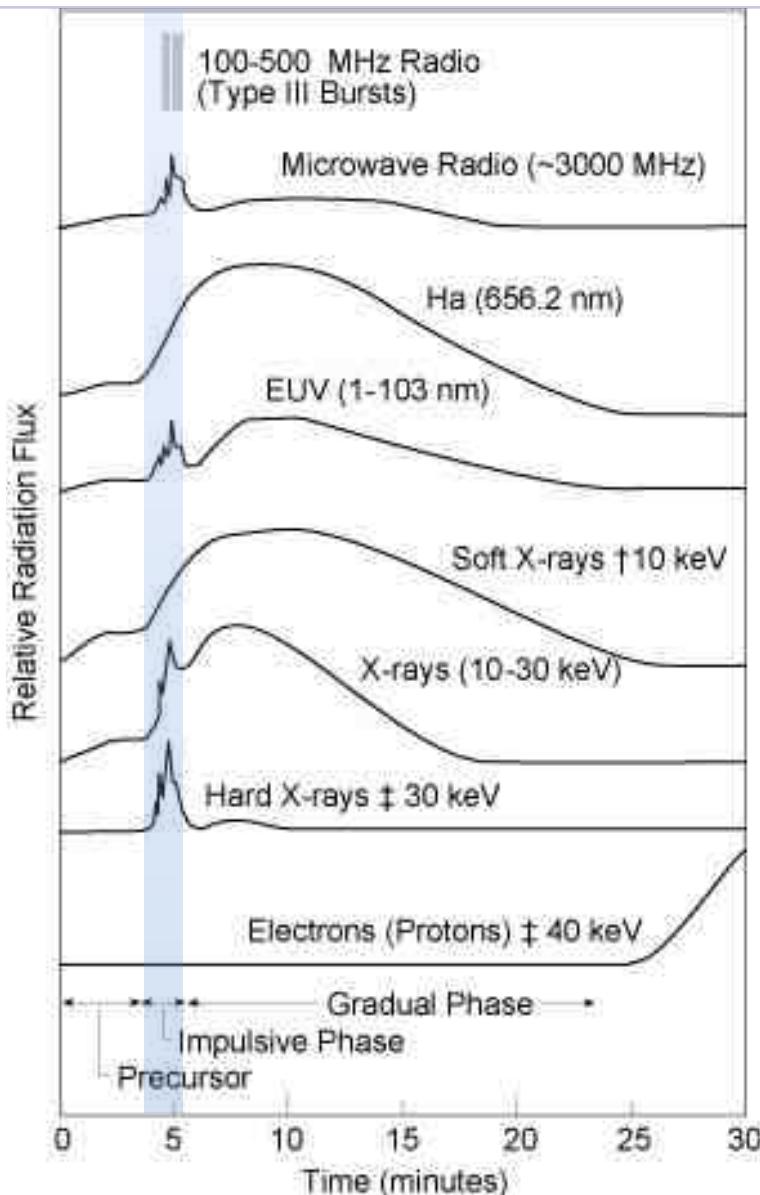


- Emission thermique (rayt. freinage + raies spectrales) : plasma  $T \geq 10^7 \text{ K}$
- Classification par le flux maximum dans la bande 0.1-0.8 nm :
  - Classe X :  $10^{-4} \text{ W/m}^2$
  - Classe M :  $10^{-5} \text{ W m}^{-2}$  etc. pour les classes C, B, A
  - Par ex. X3.5: flux max = 3,5  $10^{-4} \text{ W m}^{-2}$
- Courbes de lumière GOES : [www.solarmonitor.org](http://www.solarmonitor.org)
- Attention: mesure dans la gamme 0.1-0.8 nm, ne donne aucune information sur le spectre

# Les éruptions solaires

## Emissions d'électrons non thermiques

- Emission fortement variable, en particulier phase impulsive
- Différents domaines spectraux différents processus d'émission, différentes régions de l'atmosphère:
  - Micro ondes (1 GHz – qqs dizaines de GHz) -> gyrosynchrotron
  - X durs -> rayonnement de freinage (“bremsstrahlung”)

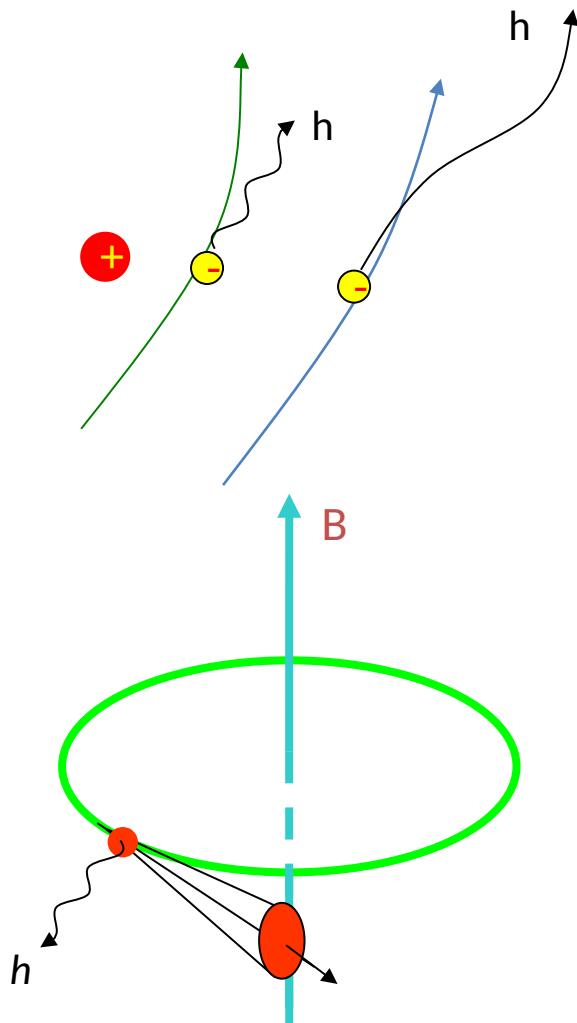


[https://ase.tufts.edu/cosmos/print\\_images.asp?id=27](https://ase.tufts.edu/cosmos/print_images.asp?id=27)

# Les éruptions solaires

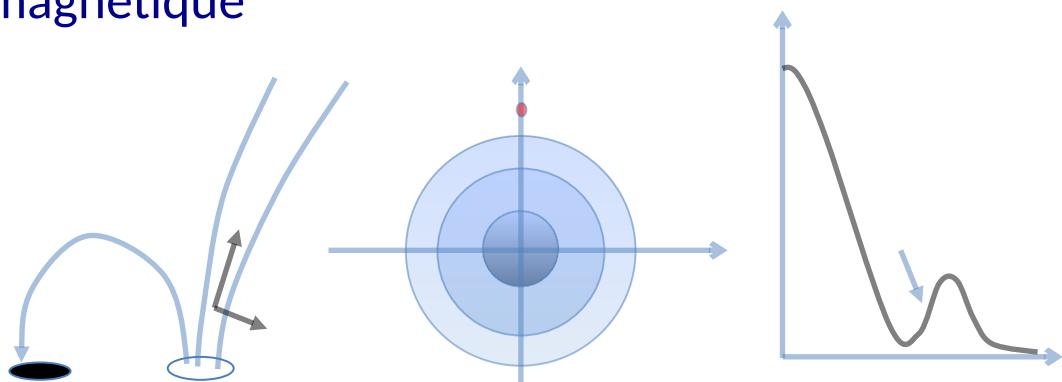
## Electrons non thermiques - ray<sup>t</sup> de freinage, ray<sup>t</sup> synchrotron

- Déviation d'un électron dans le champ électrique d'un proton (ion) : freinage (« bremsstrahlung »)
  - rencontre proche - forte déviation / fort chgt quantité de mouvement – onde EM à fréquence élevée (X durs)
  - rencontre lointaine - fréquence faible (radio)
  - émission optiquement mince (X durs) – de préférence en milieu dense (fort taux de collisions):  $I \propto n_e n_i$
- Déviation d'un électron par le champ magnétique : synchrotron (ou gyro-synchrotron)
  - orbite circulaire autour du B
  - + mouvement libre le long du B
  - = orbite hélicoïdale



## Electrons non thermiques - émissions radio cohérentes

- Emissions radio à  $v \leq 1$  GHz: souvent spectre à structure fine, très intense
- Emission intense, parce que population d'électrons anisotrope; par exemple : faisceau d'électrons se propageant le long du champ magnétique

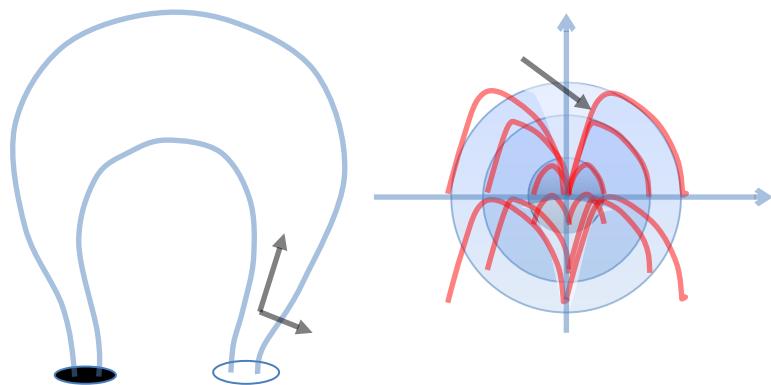


- Excitation d'oscillations de plasma ("ondes de Langmuir"), conversion en ondes EM (radio)

Fréquence  
(pulsation) plasma  
électronique

## Electrons non thermiques - émissions radio cohérentes

- Emissions radio à  $v \leq 1$  GHz: souvent spectre à structure fine, très intense
- Emission intense, parce que population d'électrons anisotrope; par exemple : cône de perte d'une population piégée



- Emissions au voisinage de 1000-1500 MHz: possibilité d'interférence avec radars de contrôle aérien (évt. Suède 4/11/2015) ou GPS

# Les éruptions solaires

Un aperçu  
des processus de stockage et de  
dissipation d'énergie

# Transport d'énergie de la photosphère à la couronne

## Couplage électrodynamique

- Energie dans la zone convective et la photosphère :  $m^{vts}$  du gaz, convection
- Photosphère-couronne : courants électriques alignés au champ magnétique - couplage électrodynamique; stockage d'énergie dans la couronne
- Illustration (obs. SoHO, ESA/NASA):
  - région active dans la photosphère, y compris tache solaire en rotation
  - connexion magnétique à la couronne (qqs boucles brillantes en EUV)
  - les boucles suivent la rotation de la tache
  - => transport d'énergie, stockage dans la couronne, éventuellement reconfiguration du champ magnétique coronal



# Les éruptions solaires

## Libération d'énergie vue par l'imagerie X et EUV

Krucker et al. 2008 ApJ 678, L63

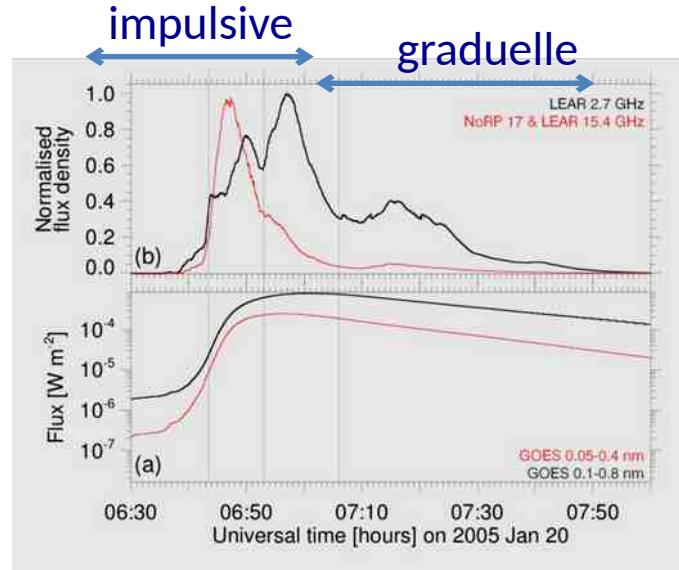


RHESSI & TRACE: impulsive phase



RHESSI & TRACE: gradual phase

- Phase impulsif : filets (“rubans”) d’éruption (chromosphère), boucle X mous (couronne), pieds visibles en X durs (chromosphère)



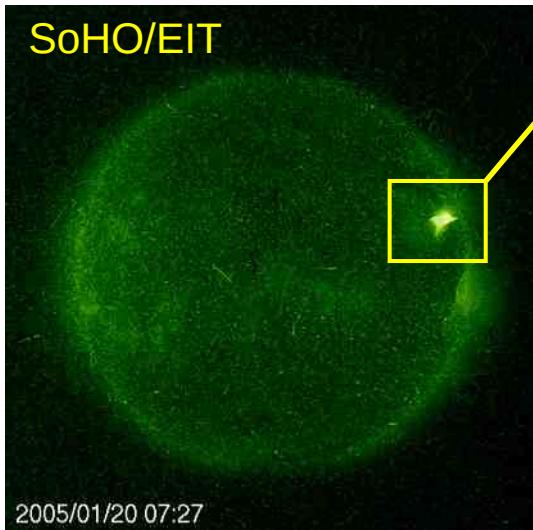
- Phase graduelle : filets qui se séparent, boucle X, arcade EUV; X durs faibles

Klein, Masson et al. 2014 AA 572, A4

# Les éruptions solaires

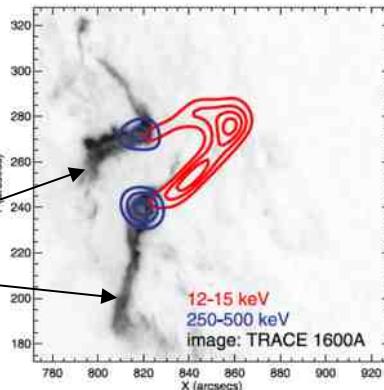
## Un scénario de libération d'énergie

- Rayons X pendant l'éruption : boucle (thermique,  $T > 10^7$  K) & pieds (impacte d'électrons énergétiques)



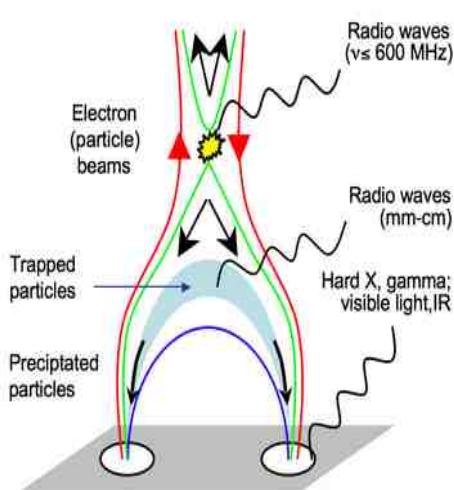
RHESSI + TRACE:

Filets UV  
(chromosphère chauffée pendant l'éruption)



Boucle X mous  
(thermique)

Pieds en X durs  
(non thermique)

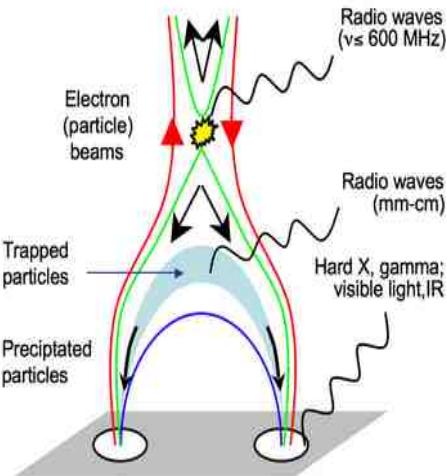


- Scénario : libération d'énergie, accélération de particules dans la couronne, boucles X en dessous (reconnexion magnétique)

# Les éruptions solaires

## Accélération de particules

- Pour accélérer une particule chargée : champ électrique
- Couronne solaire : forte conductivité ( $\approx \text{Cu}$ ), impossible de maintenir champ électrique statique le long du champ magnétique
- Configurations particulières où de tels champs électriques existent : nappes de courants et configurations transitoires (reconnexion magnétique, ondes de choc), ondes



# Ejéctions coronales de masse

# Ejections coronales de masse

## Qu'est-ce que c'est ?



© STEREO (NASA)

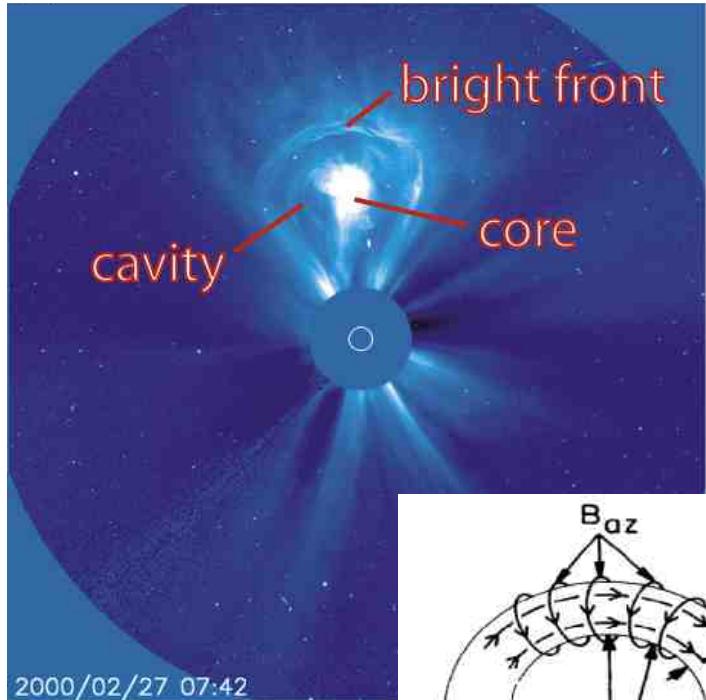
- Ejection coronale de masse (CME=*coronal mass ejection*)
  - observations standard : coronographe (lumière blanche)
  - structures éjectées de la couronne dans l'espace interplanétaire

14 – 17 Nov 2007

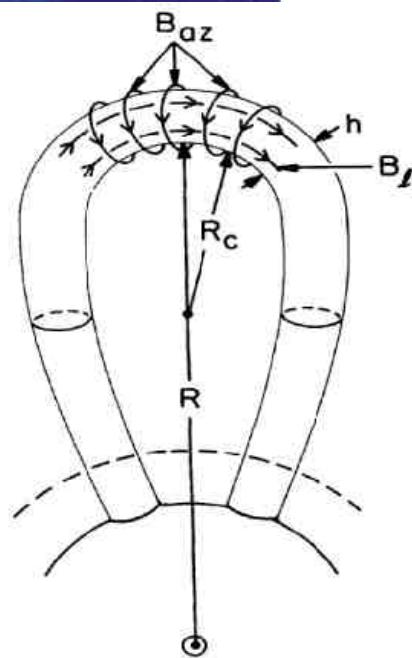
# Ejections coronales de masse

## Qu'est-ce que c'est ?

Riley 2008 ApJ 672, 1221



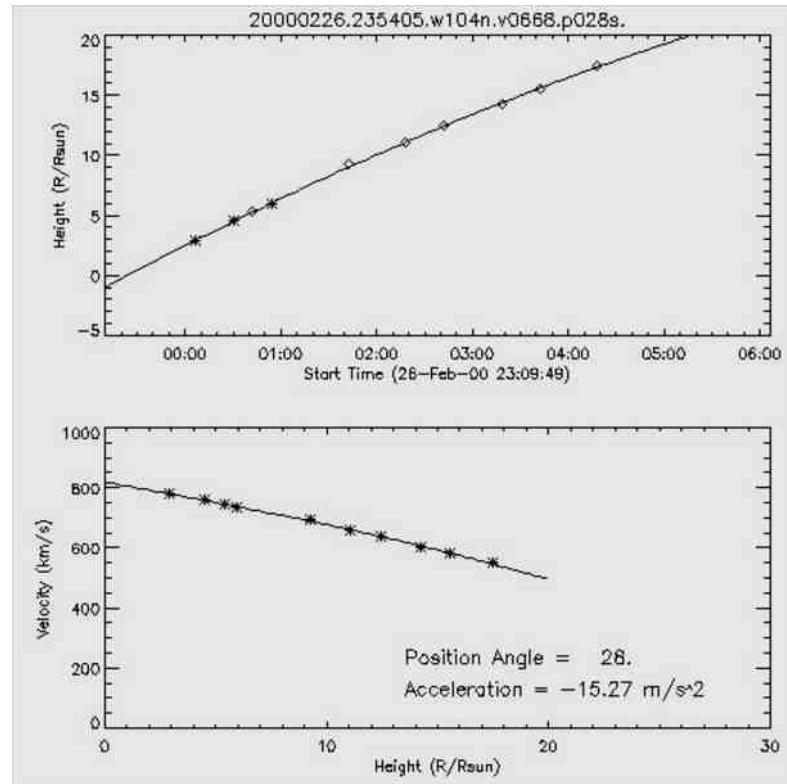
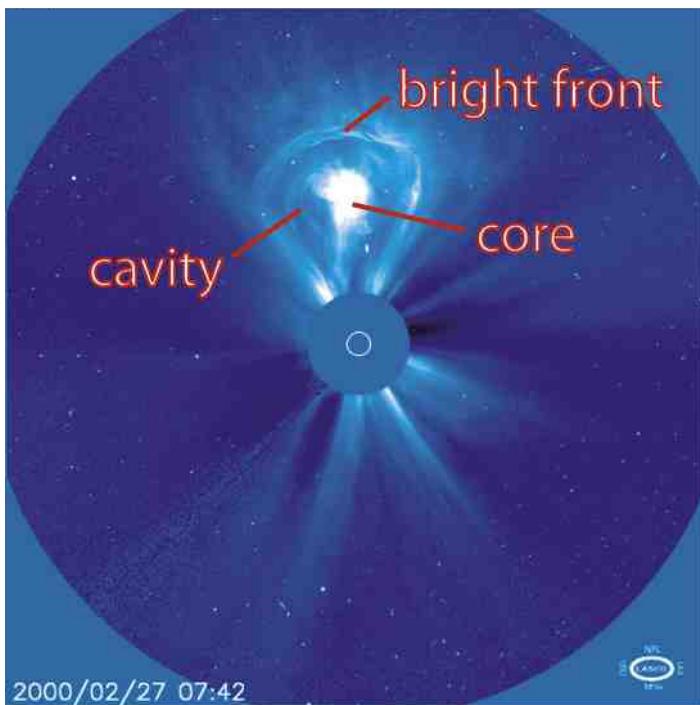
Mouschovias & Poland  
1978, ApJ 220, 675 –  
voir Chen 2011



- Structure en trois parts :
  - cœur = tube de flux torsadé (matière de la protubérance)
  - cavité: plasma à faible densité confiné par le tube de flux torsadé
  - front brillant :
    - boucle magnétique externe
    - plasma accumulé en amont par le mouvement ("chasse-neige")
    - plasma comprimé par une onde de choc (gaine)
- Présentation détaillée : Chen, Living Reviews in Solar Physics 8 (2011)  
<http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2011-1/>  
- Sect. 4)

# Ejections coronales de masse

## Cinématique et dynamique

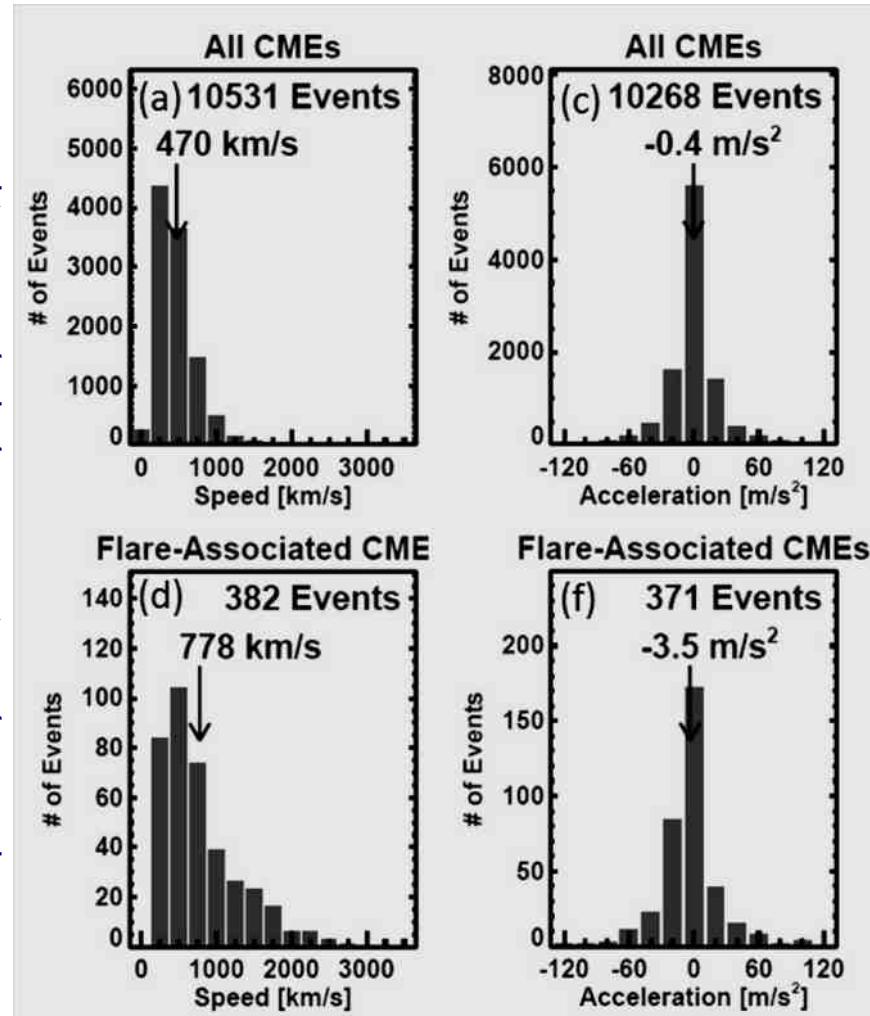


- Accélération continue vers l'extérieur
- Vitesse la plus élevée au front de la structure, les autres suivent plus lentement

[http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/](http://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/)

# Ejections coronales de masse

## Cinématique et dynamique

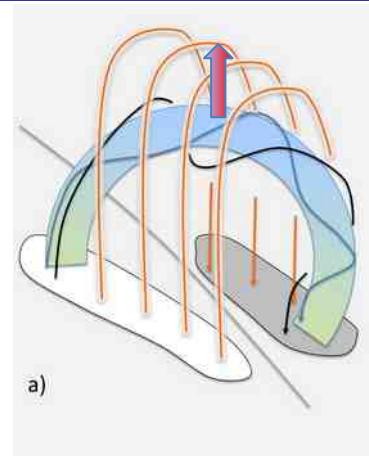


- Distribution des vitesses des CME (à gauche) et de leur accélération (à droite) dans le plan du ciel, 1996-2005
  - en haut: toutes les CME
  - en bas: CMEs accompagnant des éruptions à moins de 30° du bord du disque solaire
- Cinématique et dynamique :
  - accélération (CME initialement lentes) ou décélération (CME initialement rapides)
  - vitesses pouvant atteindre  $> 3000 \text{ km s}^{-1}$

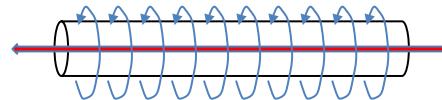
# Ejections coronales de masse

## Déstabilisation d'une structure magnétique dans la couronne solaire

- Equilibre pré-éruptif d'un tube de flux torsadé :
  - vers le haut : force de Laplace du tube de flux (pression magnétique), "hoop force"
  - vers le bas : force de Laplace du champ magnétique ambiant (tension magnétique)
- Instabilité ou perte d'équilibre :
  - changement du champ mag. ambiant (reconnexion magnétique): émergence de flux mag. au-dessous du tube de flux ("tether cutting") ou reconnexion du champ mag. au-dessus ("breakout")
  - accroissement de la torsion du tube de flux par les mouvements d'un de ses points d'ancrage photosphérique: instabilité "kink"



a)

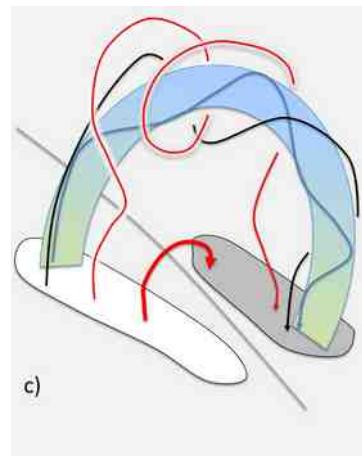
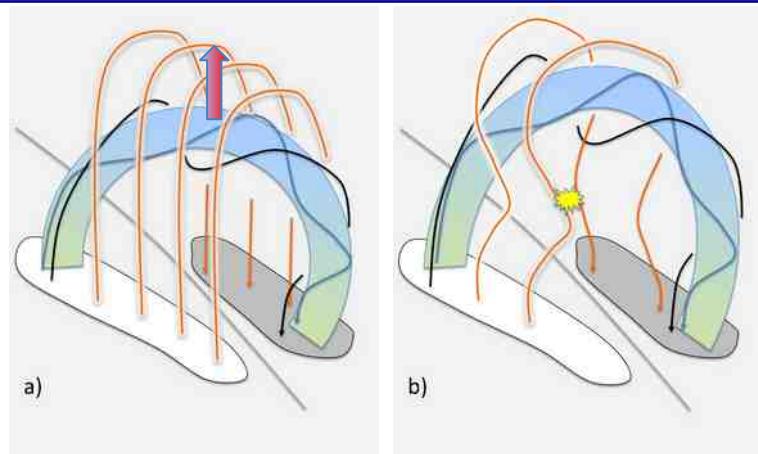
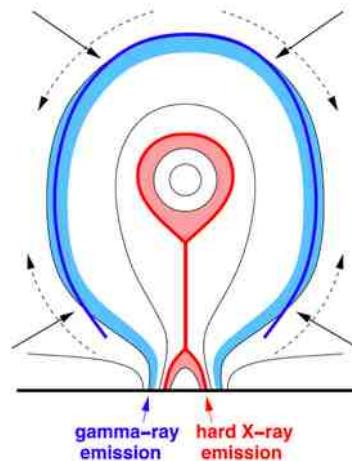


# Ejections coronales de masse

## Chauffage du plasma et accélération de particules

- Chauffage et accélération de particules :
  - reconnection magnétique, formation de boucles « post-éruptives », évaporation du plasma chromosphérique à leurs pieds
  - turbulence
  - ondes de choc en amont et sur les côtés de la structure éjectée (expansion latérale)

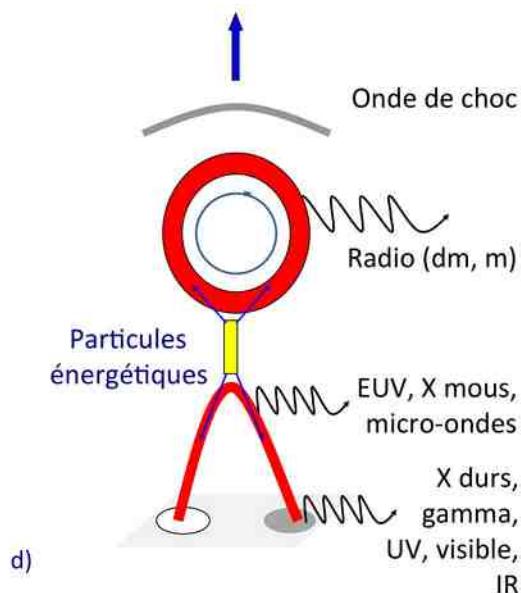
Pomoell et al. 2008  
Solar Phys 253, 249



# Ejections coronales de masse

## Chaudage du plasma et accélération de particules

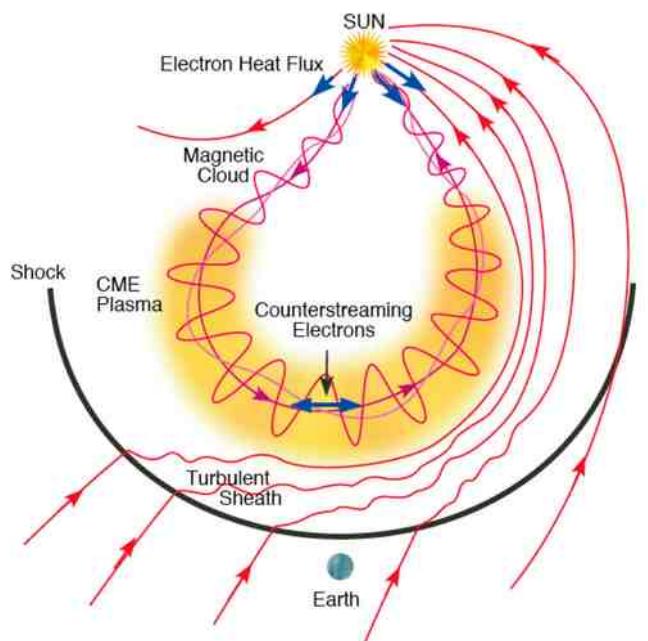
- Détails d'une éjection de masse dans la basse couronne en EUV (Solar Dynamics Observatory SDO, NASA):
  - expansion, puis éjection de boucles à grande altitude
  - suivis de la formation de boucles brillantes à basse altitude



<http://sdo.gsfc.nasa.gov/gallery/main.php>

# Ejections coronales de masse

## Du Soleil à la Terre



- STEREO (NASA): imagerie de la couronne et de l'héliosphère en lumière visible
- Schéma déduit de mesures in situ: tube de flux magnétique torsadé (« magnetic flux rope »; Zurbuchen & Richardson 2006, Spa Sci Rev 123, 31)



# Particules solaires de haute énergie

Particules dans  
l'espace interplanétaire

# Particules solaires de haute énergie

## Observation dans l'espace

- Après certaines éruptions, les détecteurs de SoHO « voient » des protons de haute énergie
- Sites d'accélération (aussi: électrons, noyaux lourds) : régions où un champ électrique transitoire est créé - régions de reconnexion, ondes de choc
- Relation étroite avec les éruptions (reconnexion) et éjections de masse (onde de choc)

<http://soho.esac.esa.int/>

# Particules solaires de haute énergie

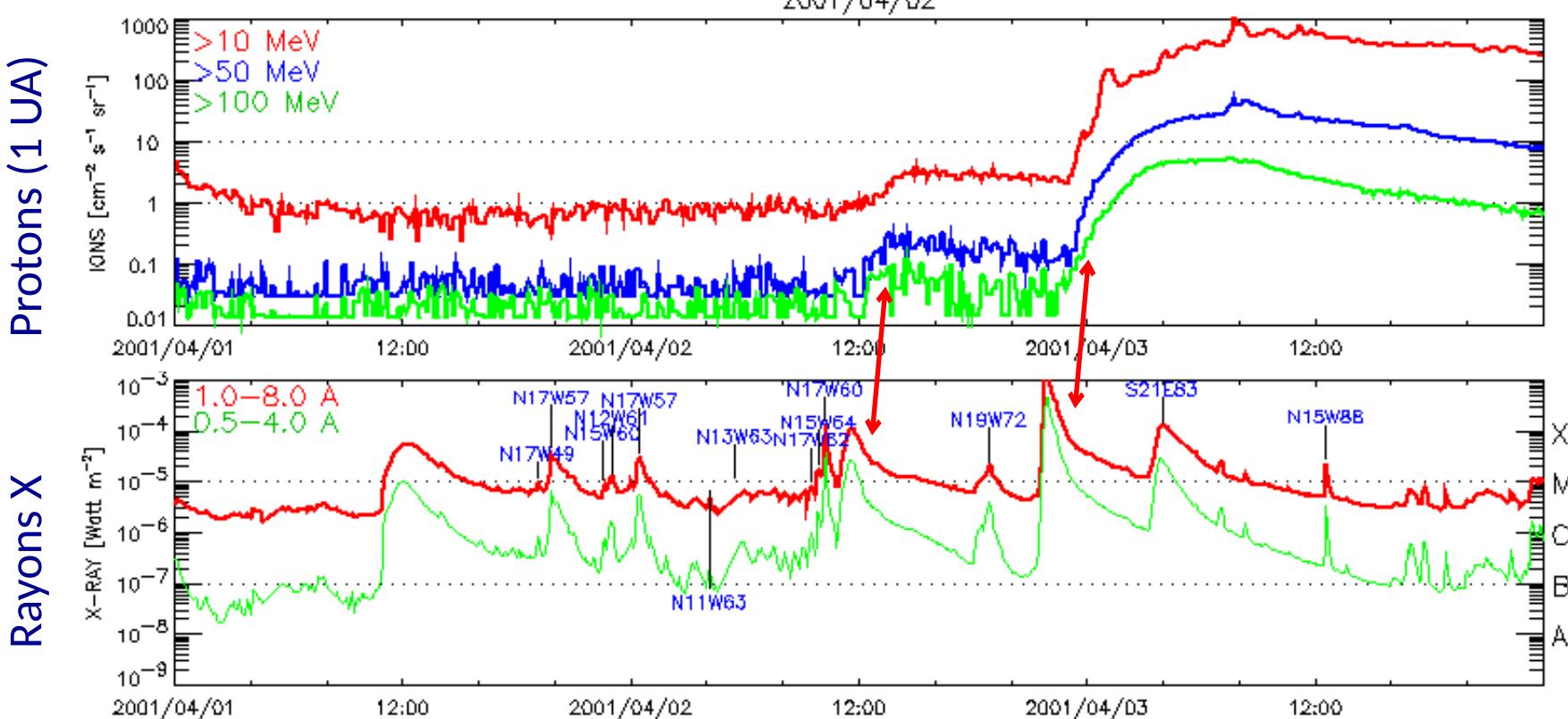
## Qu'est-ce qu'une « particule de haute énergie » ?

- Électrons, protons, ions plus lourds (He, C, N, O, ...).
- Énergie cinétique des particules dans la couronne « calme » à  $T=10^6$  K:
- Unité d'énergie usuelle:  $1 \text{ eV} = 1,60 \times 10^{-19} \text{ J}$     vitesses de 6700 km/s (électron), 160 km/s (proton)
- Éruptions, « événements à particules » (« *SEP events* »): particules atteignent vitesses proches de  $c$ , énergies des électrons jusqu'à quelques  $10^6$  eV (1 MeV = méga-eV), des protons jusqu'à quelques  $10^9$  eV (1 GeV=giga-eV).
- Rayons cosmiques les plus énergétiques (origine : Galaxies actives ?): environ  $10^{20}$  eV (énergie d'une balle de tennis, vitesse 100 km/h).

# Particules solaires de haute énergie

## Evénements à particules et sursauts X

- Satellites de surveillance GOES (NOAA;  
[https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/daily\\_plots/sephtx/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/daily_plots/sephtx/)): 3 jours en 2001

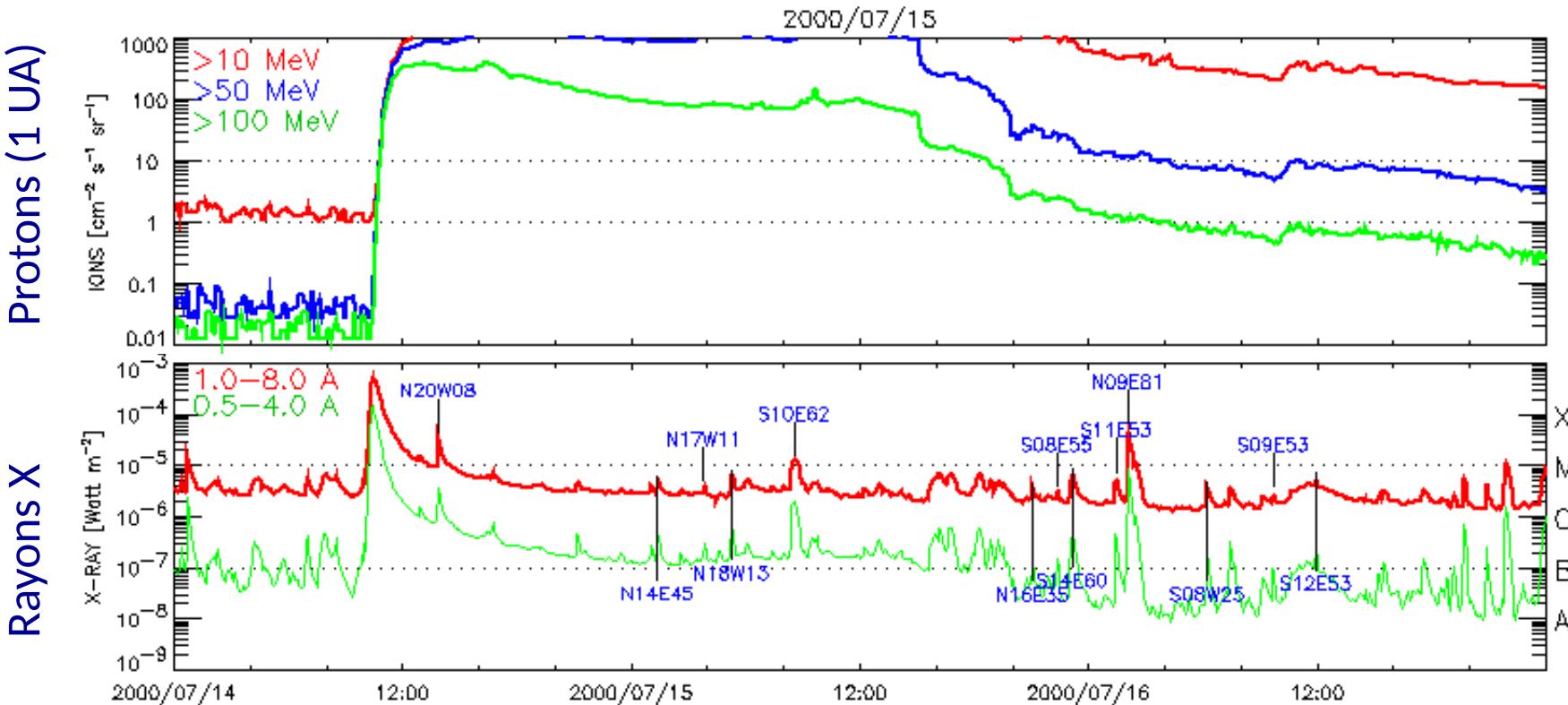


- Toutes les éruptions ne sont pas suivies d'un événement à particules.
- Longue durée (plusieurs jours) des grands événements à particules.

# Particules solaires de haute énergie

## Evénements à particules et sursauts X

- Satellites de surveillance GOES (NOAA; [https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME\\_list/daily\\_plots/sephtx/](https://cdaw.gsfc.nasa.gov/CME_list/daily_plots/sephtx/)): 13-15 Juillet 2000

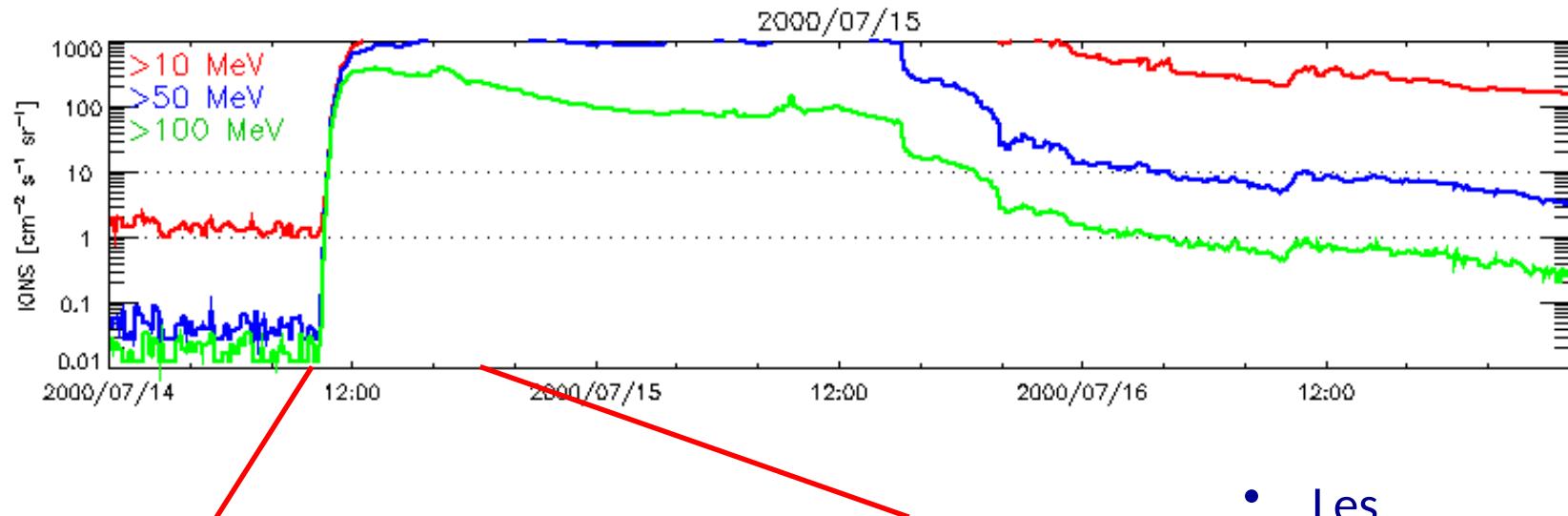


- Evénement très fort (dépasse échelles GOES habituelles pour les évts à particules)

# Particules solaires de haute énergie

## Evénements à particules relativistes

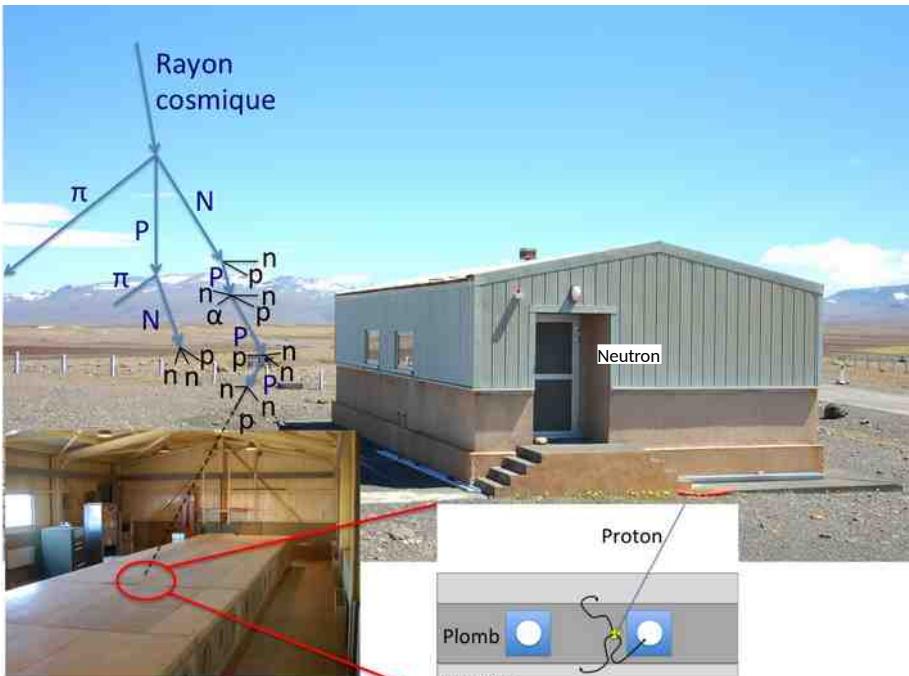
- Moniteurs à neutrons au sol de la Terre (cascade atmosphérique déclenchée par les protons/nucléons incidents lorsqu'elles ont des énergies  $> 430 \text{ MeV}$ )



- Les événements à particules les plus énergétiques du Soleil (quelques GeV)

# Particules solaires de haute énergie

## Cascade atmosphérique



© cliché IPEV et Obs Paris

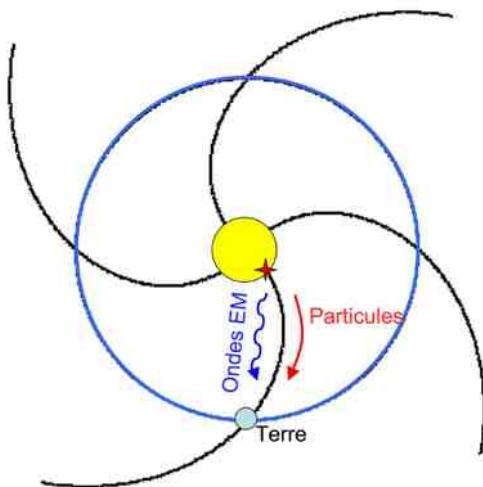
- Particules de haute énergie incidents sur l'atmosphère terrestre
- Production de particules secondaires
- Production de radio-isotopes ( $^{14}\text{C}$ ,  $^{10}\text{Be}$ ) qui se déposent dans le sol (arbres, carottes glaciaires)

- Détection de la gerbe cosmique (neutrons, protons) par des compteurs de particules au sol (« moniteurs à neutrons »)

# Particules solaires de haute énergie

## Propagation du Soleil à la Terre

Les particules énergétiques se propagent le long du champ magnétique IP : connexion favorable à la Terre pour particules depuis l'hémisphère ouest du Soleil ou par un champ magnétique interplanétaire perturbé (CME).



spirale d'Archimède  
(Parker)

spirale déformée ou tube de flux  
torsadé (éjection de masse - CME)



# Le Soleil: activité éruptive et particules de haute énergie

## Résumé

- Le champ magnétique de la couronne solaire ( $\beta \ll 1$ ) émane de la zone convective ( $\beta > 1$ ).
- Conséquence : transport d'énergie de la zone convective et la photosphère dans la couronne, stockage d'énergie dans la couronne (courants électriques).
- Instabilités, reconnexion magnétique :
  - dissipation de l'énergie, chauffage du plasma, accélération des particules (éruption solaire = « solar flare »)
  - éjection d'une structure magnétique (CME, ICME)
  - Accélération d'électrons, protons, ions à de hautes énergies (rayonnements, échappement dans l'espace)
- Référence : Klein 2018, [https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-60051-2\\_2](https://link.springer.com/chapter/10.1007/978-3-319-60051-2_2)

# Annexes

# L'activité du Soleil: particules de haute énergie

Résumé

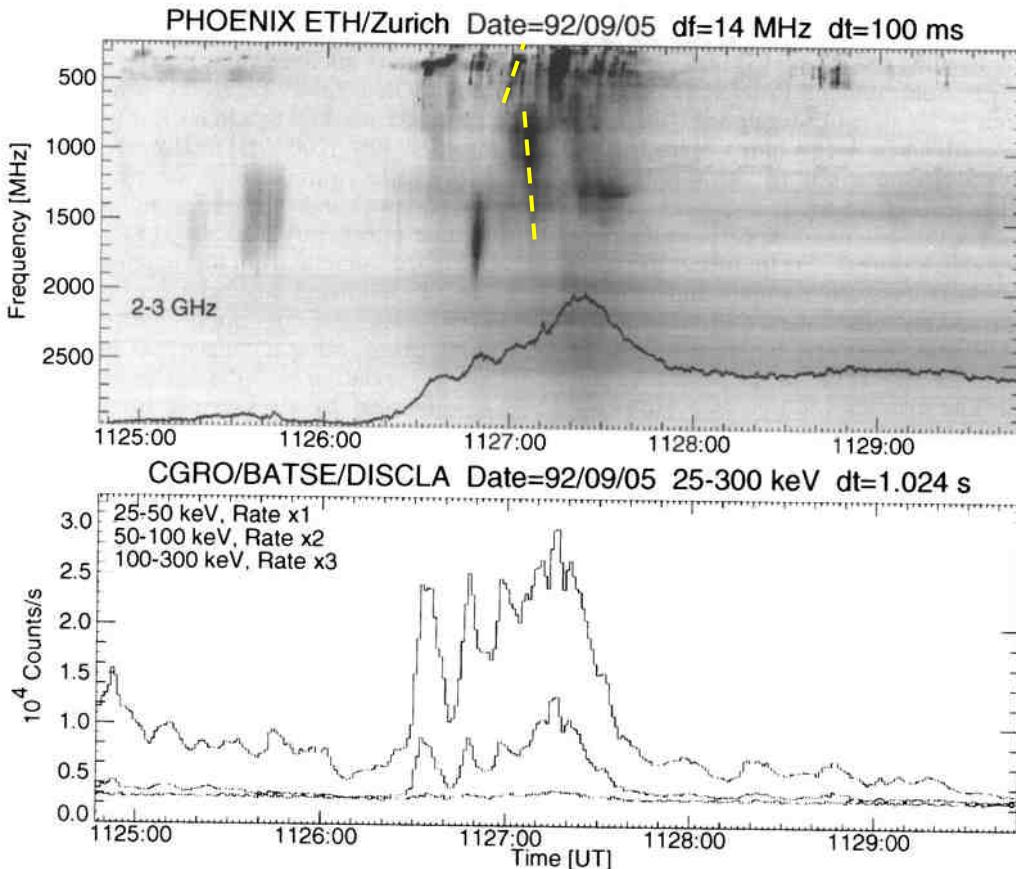
- Une grande partie de l'énergie libérée lors des éruptions est utilisée pour accélérer des électrons, protons et ions lourds à des vitesses qui avoisinent parfois celle de la lumière.
- On observe les particules dans l'atmosphère solaire grâce à leurs rayonnements, en particulier en rayons X durs et radio pour les électrons, raies gamma nucléaires pour les protons et ions.
- Une partie des particules accélérées lors des éruptions s'échappe dans l'espace IP et peut être détectée à bord des satellites artificielles s'il y a une connexion magnétique entre le satellite et la région d'accélération.
- Les ondes de choc des éjections de masse rapides accélèrent également des particules détectées à la Terre.



# Solar flares – energy release and particle acceleration

## Evidence from radio observations

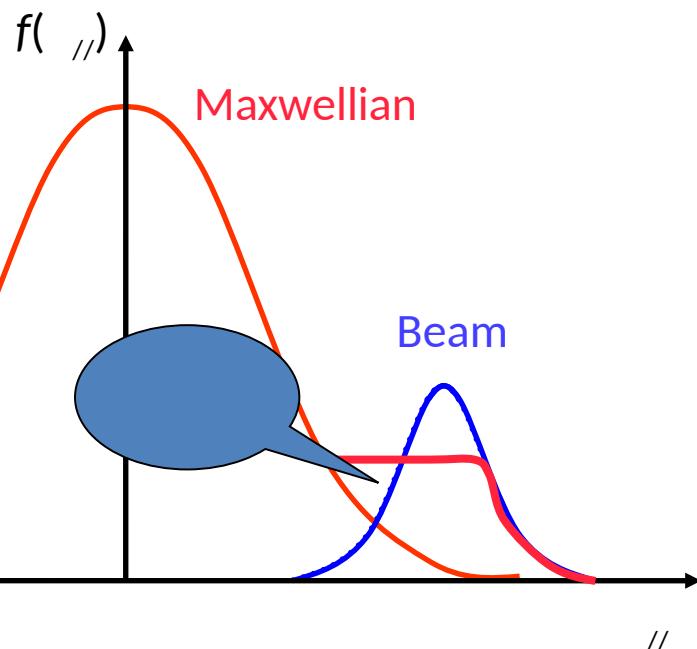
Aschwanden et al. 1993 ApJ 417, 790



- dm-m wave radio emission associated with HXR bursts
- Type III bursts: short bursts with a spectral drift
- Instantaneous bandwidth narrow ( $\Delta\nu < v_0$ ) – unlike gyrosynchrotron emission !

# Solar flares – energy release and particle acceleration

## Radio emission from electron beams

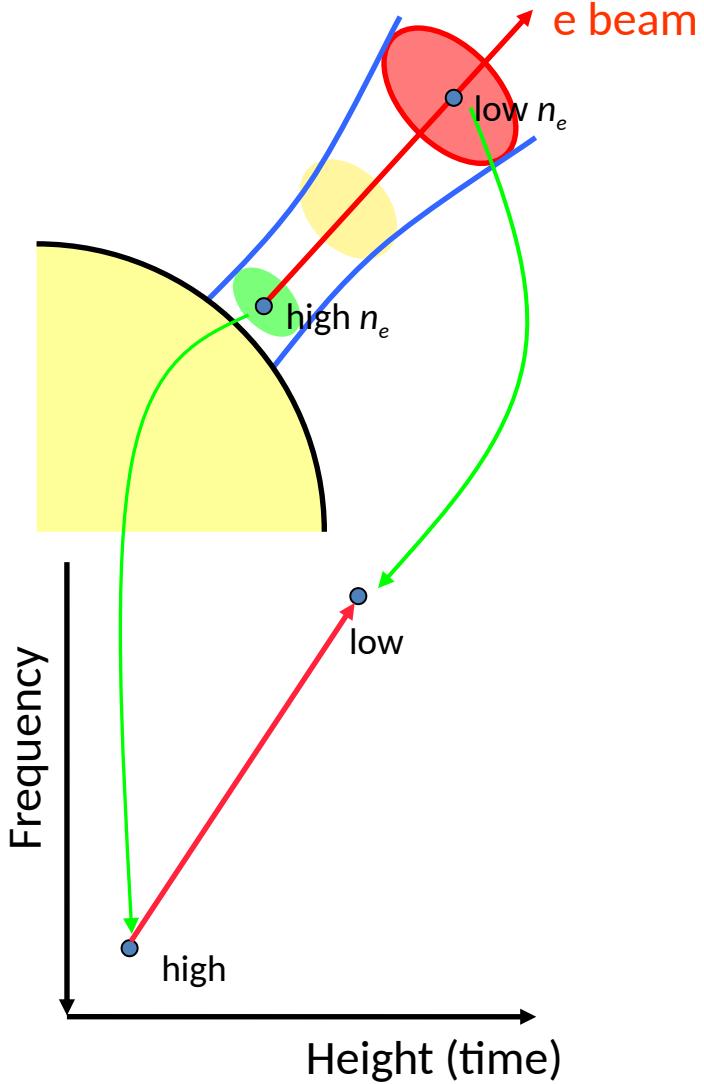


- Beam of suprathermal electrons injected upward from an active region.
- In the overlying corona: “bump on tail” distribution (maxwellian + e beam),  
 $f_{\parallel} > 0$
- Instability: transfer of energy from electrons to waves
  - growth of Langmuir waves,  
 $n_e$
  - plateau distribution (lower energy than beam)

The Langmuir waves cannot escape from the corona, but can generate EM waves.

# Solar flares – energy release and particle acceleration

## Radio emission from electron beams

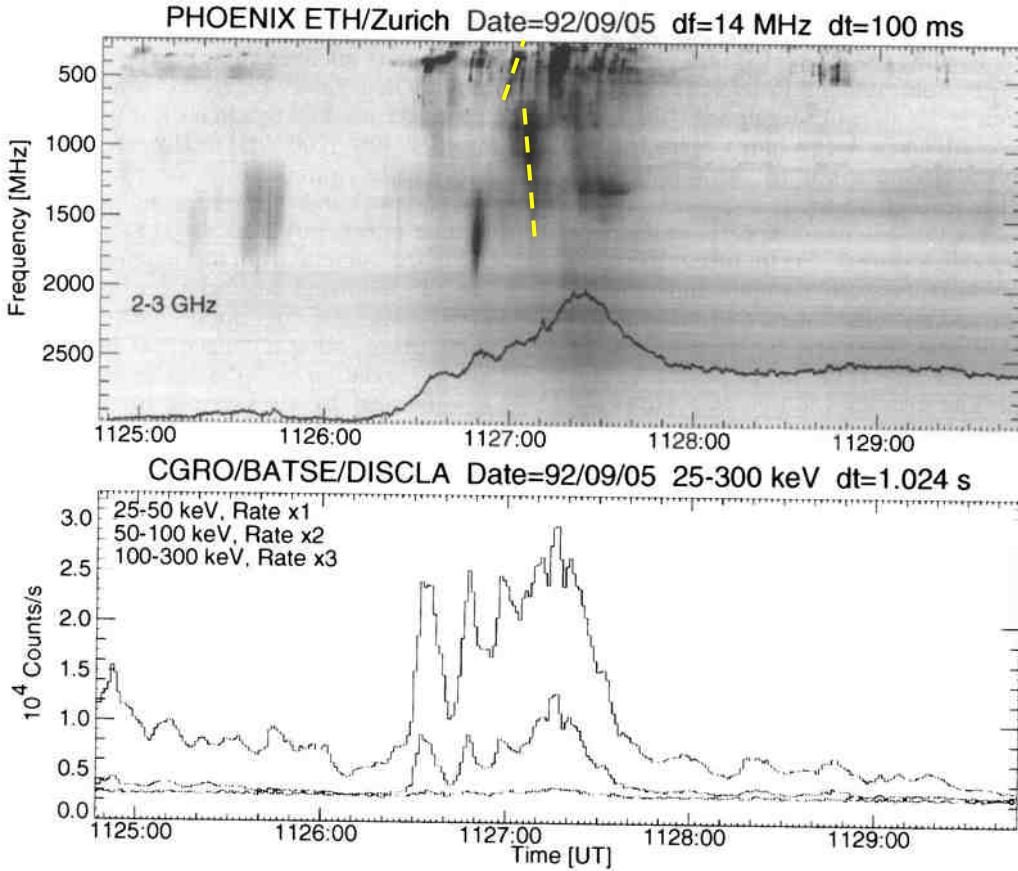


- e beam rising through corona  
Langmuir waves at decreasing
- Coupling with ion sound waves  
( $\omega_s \ll \omega_L$ ) or Langmuir waves  
EM waves (T=transverse) at
  - $\omega_T = \omega_L + \omega_S \approx \omega_L$   $n_{pe} \sim \sqrt{n_e}$   
“fundamental”
  - $\omega_T = \omega_L + 2\omega_L = 2\omega_L$   $2n_{pe}$  “harmonic”
- Short burst that drifts from high to low (“type III” burst); lower greater height
- Radio image: -dependent height

# Solar flares – energy release and particle acceleration

## Evidence from radio observations

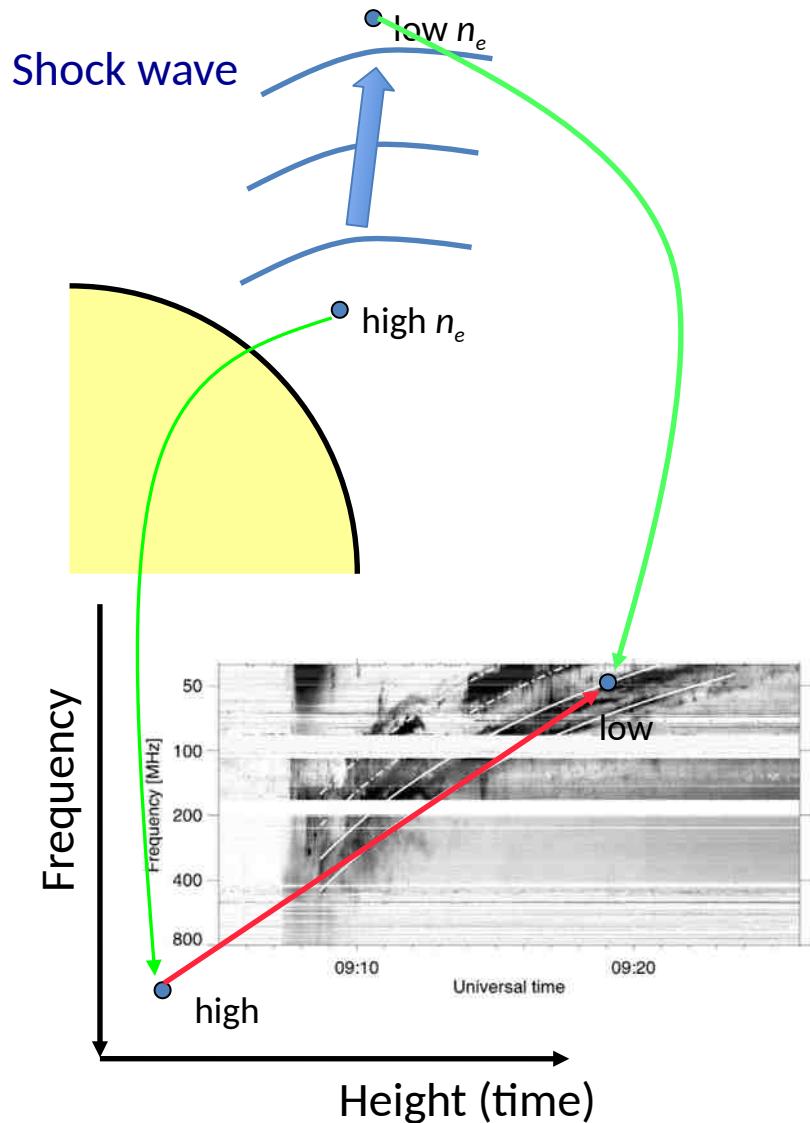
Aschwanden et al. 1993 ApJ 417, 790



- Drift of type III-like bursts: towards
  - low frequencies at  $\nu << 500$  MHz (upward propagating e-beams)
  - high frequencies at  $\nu >> 500$  MHz (downward propagating e-beams)
- Simultaneous bursts with opposite drifts (bidirectional beams):
  - acceleration region near the start frequency
  - infer  $n_e$  from the start frequency
  - harmonic emission:  $n_e = (10^9 - 10^{10}) \text{ cm}^{-3}$  (Aschwanden et al. 1995 ApJ 455, 347)

# Coronal mass ejections

## Radio emission from a shock wave

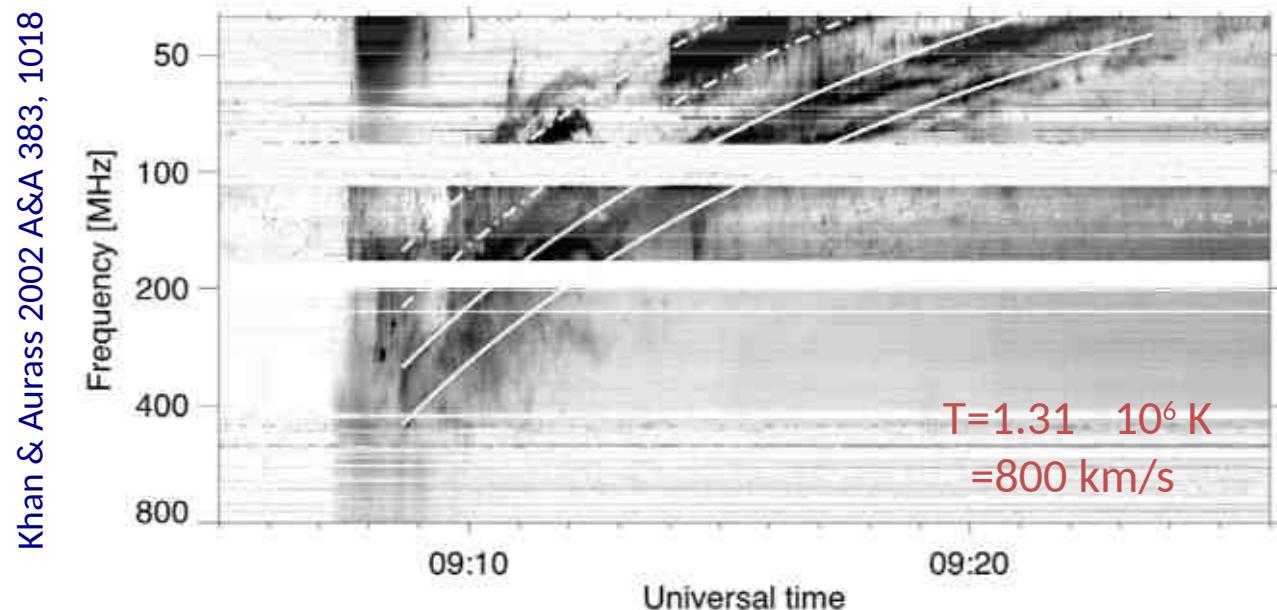


- Shock wave rising through corona reflection Langmuir waves at decreasing  $n_e$
- Coupling with ion sound waves ( $\lambda_s \ll \lambda_L$ ) or Langmuir waves EM waves (T=transverse) at
  - $\lambda_T = \lambda_L + \lambda_S \approx \lambda_L$   $n_{pe} \sim \sqrt{n_e}$  "fundamental"
  - $\lambda_T = \lambda_L + 2\lambda_L = 2\lambda_L$   $2n_{pe}$  "harmonic"
- Burst that drifts from high to low more slowly than type III ("type II" burst); lower height greater height

# Coronal mass ejections

## Shock parameters in the corona

- Compression ratio from type II burst spectra: split bands  
(interpretation: upstream/downstream emission)

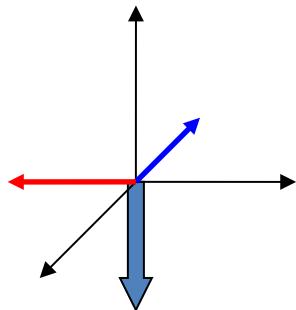


- Observation: extrapolated upstream/downstream densities correspond to measured values as shock passed 1 AU (Vrsnak et al. 2001 A&A 377, 321)

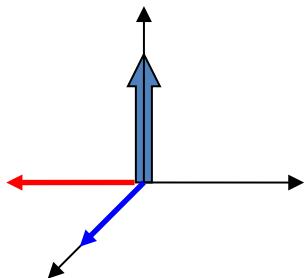
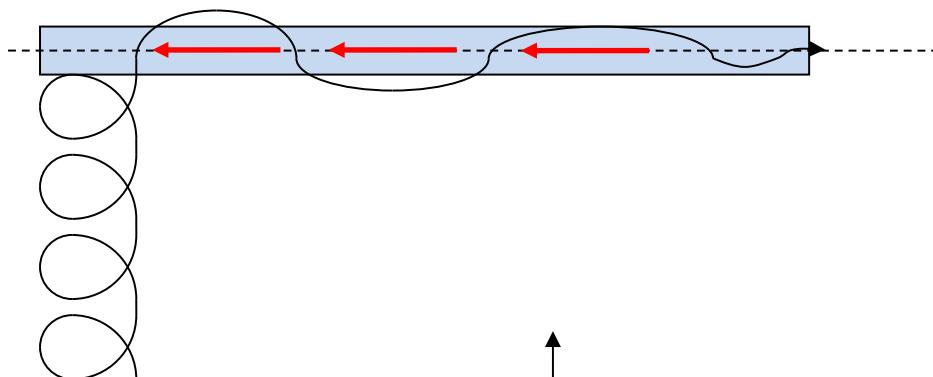
# Solar flares: a qualitative view on the acceleration processes

# Particle acceleration in solar flares

## « Direct » electric field acceleration in a current sheet



- A simple scenario of charged particle motions in a current sheet (CS).

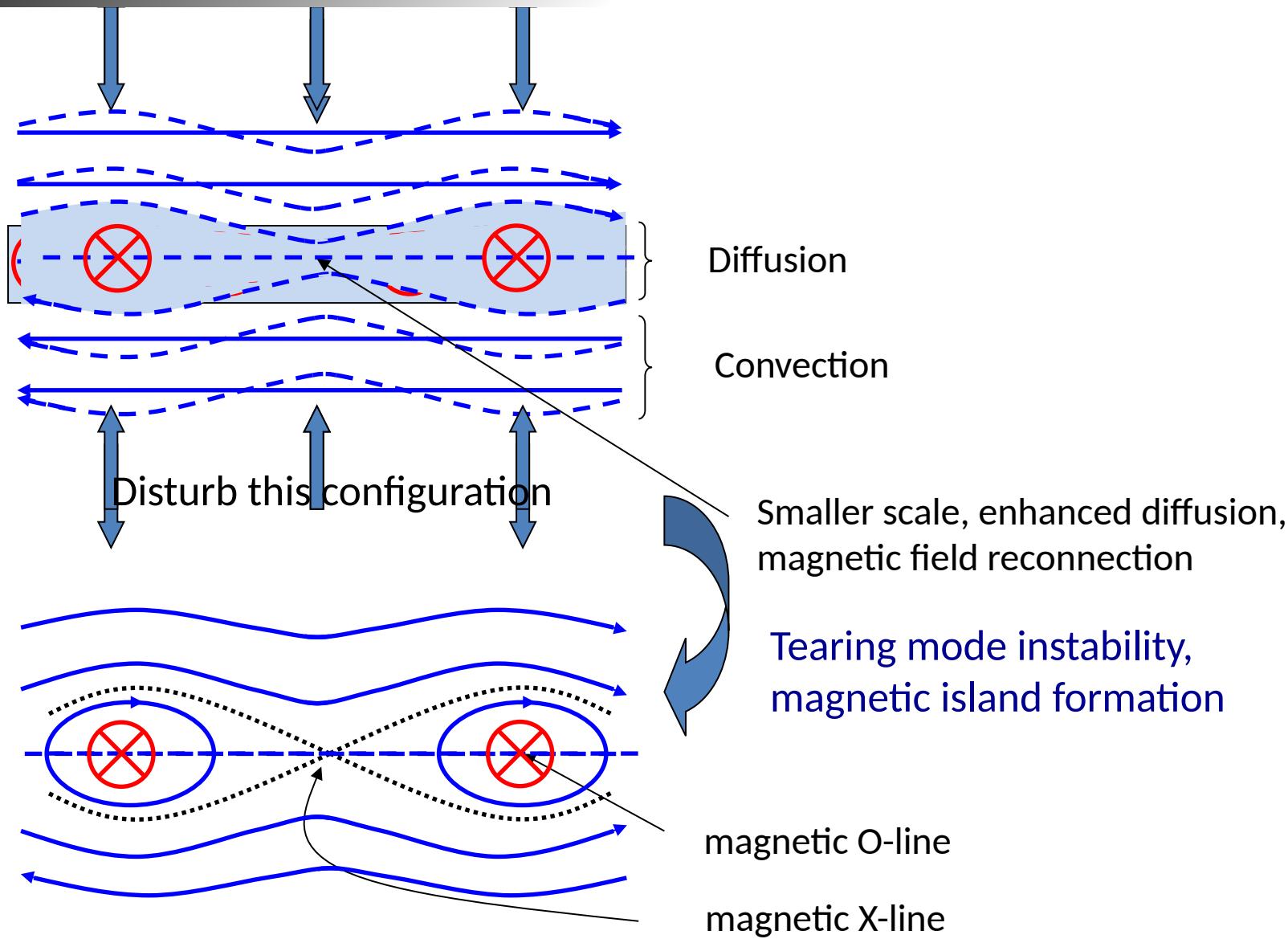


- Direct electric field (stationary situation)

- Charged particles (here : electron)  $\mathbf{E} \parallel \mathbf{B}$  - drift into the CS. Those crossing  $B=0$  are accelerated by the  $\mathbf{E}$  field (“meander orbit”).

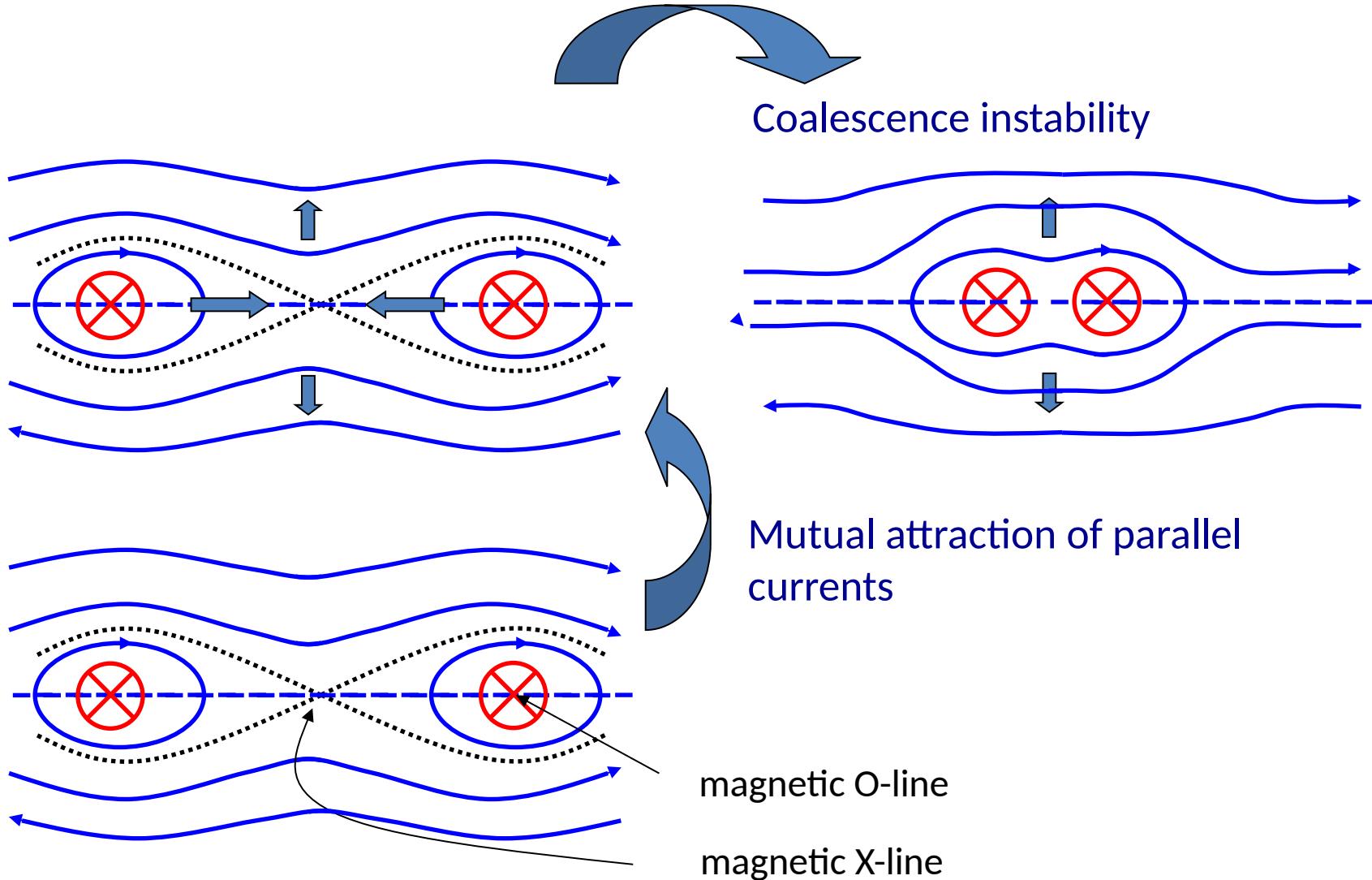
# Particle acceleration in solar flares

## Instability of a current sheet



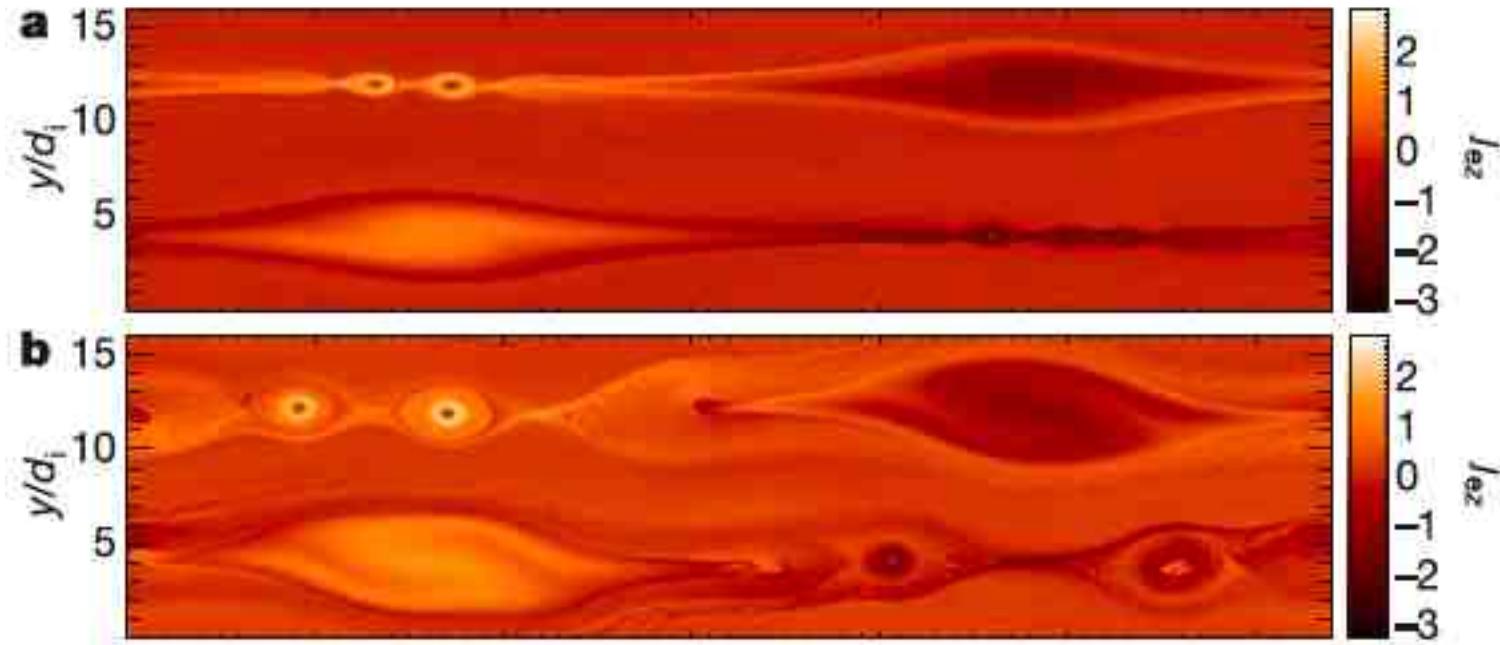
# Particle acceleration in solar flares

## Instability of a current sheet



# Particle acceleration in solar flares

## « Direct » electric field acceleration in a current sheet

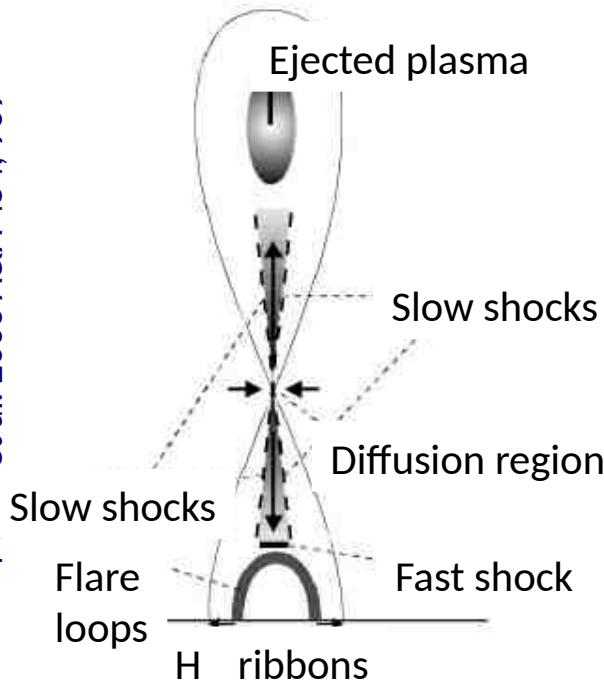


- Numerical simulation of island formation starting with two parallel current sheets (Drake et al. 2006 Nature 443, 553): sequence tearing-coalescence; fragmentation of the current sheet
- Trapping of particles between coalescing magnetic islands: particles collide with approaching islands to gain more energy (Fermi)

# Particle acceleration in solar flares

## Other acceleration mechanisms in a reconnecting CS

M<sub>2006</sub> et al. 2006 A&A 454, 969



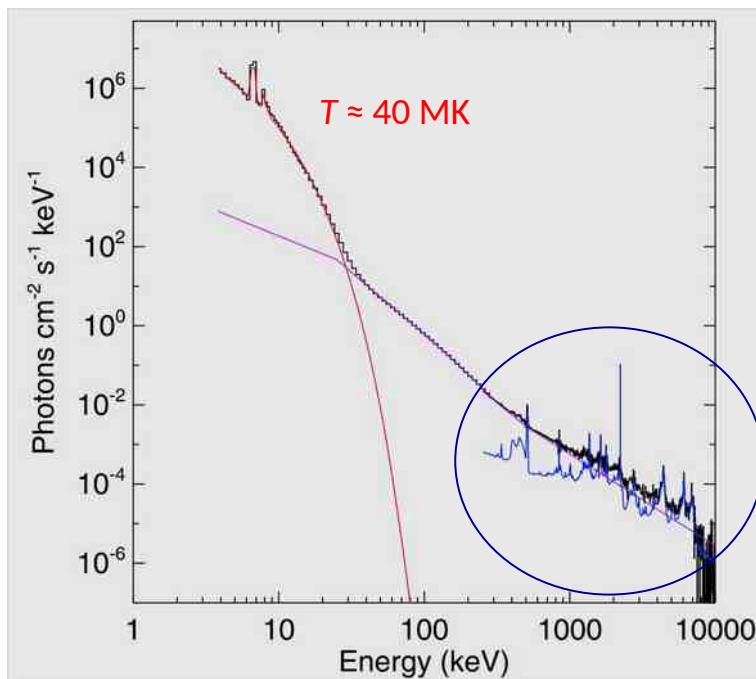
- Reconnection jets generate
  - shock waves when impinging on the underlying magnetic structures
  - waves (turbulence) in the ambient plasma - acceleration when particle resonates with Doppler-shifted wave frequency
- Reconnected magnetic field lines retract (magnetic tension) => trapped particles are accelerated by
  - reflection between “approaching” magnetic mirrors (Fermi 1)
  - electric fields induced by the compression of the magnetic field (betatron acceleration)



# Les éruptions solaires

## Protons et ions non thermiques - émissions gamma nucléaires

- Spectre de photons (RHESSI/NASA) – parties thermique et non-thermique (loi de puissance)



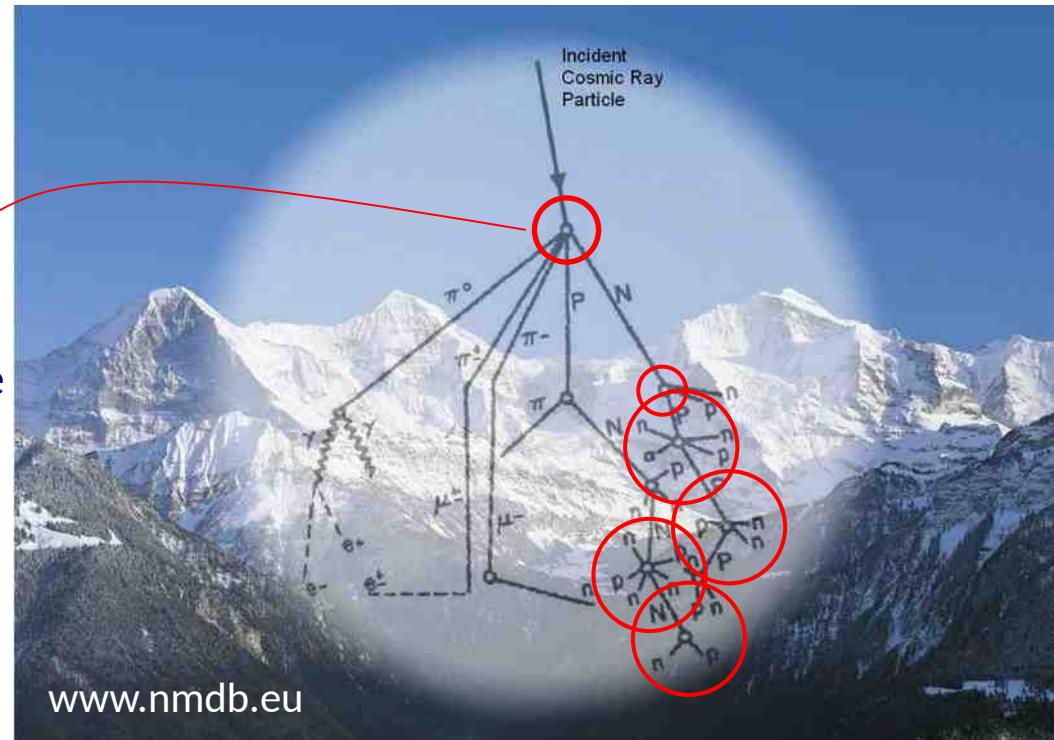
- $h\nu \approx 1\text{-}10 \text{ MeV}$  : raies gamma à partir de réactions nucléaires
- Revue récente : Vilmer et al. 2011, Spa Sci Rev

- protons accélérés qui impactant les ions de l'atmosphère : raies étroites de désexcitation
- ions accélérés impactant les protons de l'atmosphère : raies larges de désexcitation
- Raie de capture du neutron :
  - $p(> 30 \text{ MeV}) + X \rightarrow X' + n$
  - $n$  (*thermalisé*) +  $p \rightarrow {}^2H^* \rightarrow {}^2H + \gamma$  (2.223 MeV)

# Particules de haute énergie (« rayons cosmiques »)

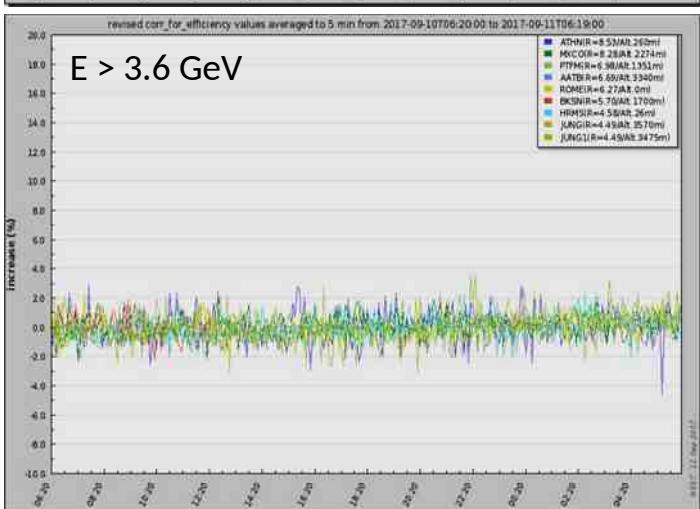
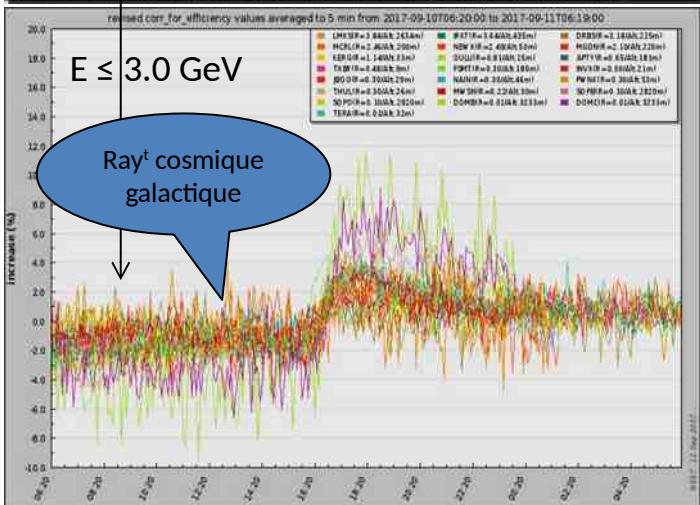
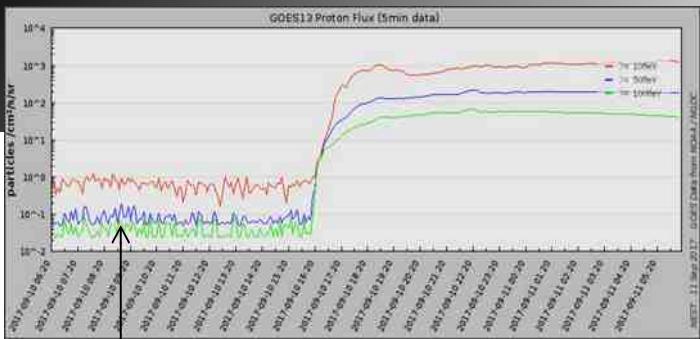
## Cascades dans l'atmosphère terrestre – particules relativistes

- Impact d'une particule de haute énergie sur l'atmosphère de la Terre:
  - désintégration de noyaux atomiques
  - particules secondaires: chaîne de processus qui peut se poursuivre jusqu'au sol
- Détection par des instruments au sol (par ex.: moniteurs à neutrons)
- Condition: la particule primaire dépasse un seuil d'énergie ( $\approx 450$  MeV)



# Particules solaires de haute énergie

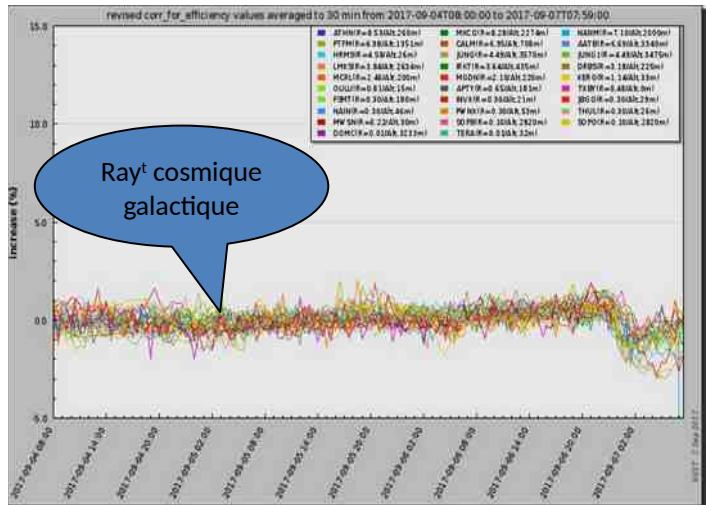
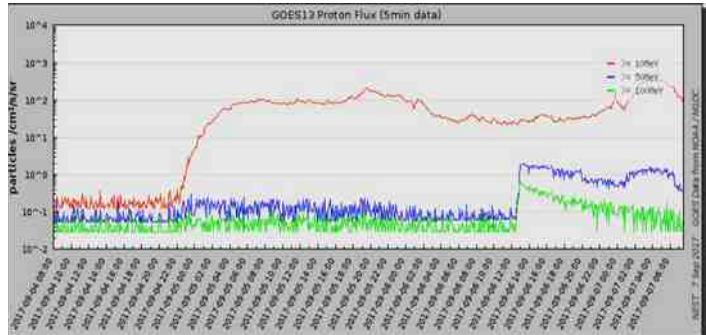
## Particules relativistes



- Techniques de mesure:
  - détecteurs de particules embarqués dans l'espace (ici: satellites GOES, NOAA, USA) jusqu'à quelques centaines de MeV
  - moniteurs à neutrons au sol de la Terre > 450 MeV
- Spectre d'énergie: selon les cas
  - Evénements notables > 10 MeV: ≈ 8 cas/an
  - Peut s'étendre à plusieurs GeV (rare: ≈ 1 cas/an), détectable par les moniteurs à neutrons

# Particules solaires de haute énergie

## Particules relativistes



- 2 ou 3 événements différents à particules
  - 1. Vu seulement à  $E>10$  MeV (GOES)
  - 2. Vu à  $E>100$  MeV (GOES), mais pas aux moniteurs à neutrons
- Dépression du flux du rayonnement cosmique galactique par une éjection coronale de masse atteignant la Terre (« effet Forbush »)