

# Accélération de Fermi

Etienne Parizot  
(IPN Orsay)

# Aperçu

- Idées générales sur l'accélération
- Quelques rappels (plasmas, ondes MHD, interactions ondes/particules, ondes de choc)
- Idée originale de Fermi
- Version moderne
- Accélération par changement de référentiel
- Accélération de Fermi du second ordre
- Taux d'accélération et spectre d'énergie
- Accélération de Fermi dans une onde de choc (Fermi du premier ordre)

# Particules énergétiques et astrophysique

- Émission radio, X, gamma, rayons cosmiques
- Les particules énergétiques sont partout !
- Émission non-thermique
- $\Rightarrow$  particules non-thermiques
- $\Rightarrow$  accélération !
- Les spectres en loi de puissance sont partout !
- Indices spectraux à peu près universels
- Énergétique  $\Rightarrow$  mécanismes efficaces !

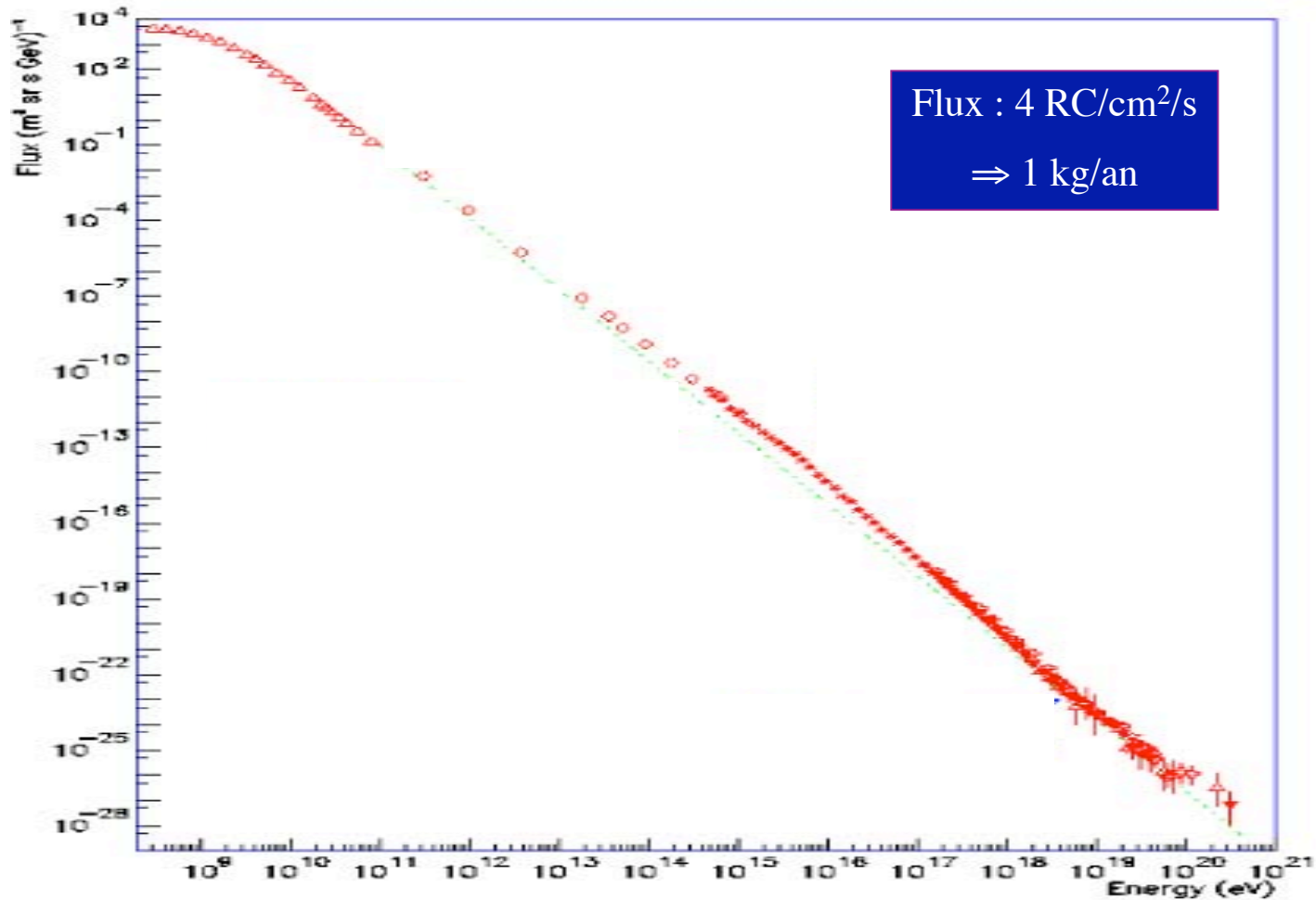


cf. Jacques Paul  
+ Alexandre Marcowith

# Quelques grammes de matière dans un monde de lumière !

De l'épaisseur d'un cheveu à 10 milliards d'a.l. !

32 ordres de grandeur !



12 ordres de grandeur !

De l'épaisseur d'un cheveu à 100 000 km!

# Pour accélérer...

- ... il faut prendre de l'énergie quelque part !
  - ◆ Énergie cinétique :
    - ✦ translation (chocs, nuages en mvt → accélération de Fermi)
    - ✦ Rotation (pulsars, trous noirs, étoiles à neutrons)
  - ◆ Énergie gravitationnelle
    - ✦ via l'accrétion...
  - ◆ Énergie électromagnétique (EM)
    - ✦ turbulence, compression, rotation d'aimants...
- *in fine*, les particules chargées interagissent avec les champs EM :
  - ◆  $F = q (E + v \times B)$

→ transfert d'énergie par les champs EM

# Champs E et B dans l'univers

- Dans le milieu interstellaire (MIS),  $\langle \mathbf{E} \rangle \approx 0$ 
  - ◆ le MIS est neutre et conducteur
- Champs  $\mathbf{E}$  transitoires
  - ◆ Reconnexion magnétique (ex. flares solaires...)
  - ◆ Ondes EM (ou MHD)
- Champs  $\mathbf{E}$  produits dans des “machines”
  - ◆ Machines à induction...
- Champs magnétiques
  - ◆  $\varepsilon_B \sim 1 \text{ eV/cm}^3 \sim \varepsilon_{\text{opt}} \sim \varepsilon_{\text{CMBR}} \sim \varepsilon_{\text{CR}} \quad !!!$
  - ◆ Plasmas astrophysiques :
    - ✦ MIS, étoiles, disques d'accrétion, MIG, jets, etc.

# Production de champs magnétiques

- Mvt à grande échelle de milieux ionisés
  - ◆ → génération de champs magnétiques, nuages magnétisés...
- Turbulence du MIS
  - ◆ → turbulence magnétique, inhomogénéités du champ B, ondes plasma...
- Instabilités hydro et MHD
  - ◆ e.g. Rayleigh-Taylor dans les SNRs
- Instabilité de « streaming »
  - ◆ Les RCs génèrent des ondes dans un plasma magnétoactif
  - ◆ → créent les conditions de leur propre diffusion

Dans de nombreux cas,  
**l'équipartition** peut être atteinte

ex. derrière une onde de choc :  
énergie thermique  $\sim$  énergie cinétique  $\sim$  énergie  
magnétique

$\Rightarrow$  Échange d'énergie entre des particules  
individuelles et des structures macroscopiques

$\Rightarrow$  Quelques particules peuvent acquérir de très  
hautes énergies !



# Champs magnétiques et accélération

- Comment est-ce possible ?
  - ◆ Les champs  $\mathbf{B}$  ne travaillent pas ( $\mathbf{F} \perp \mathbf{B}$ )
- Champs  $\mathbf{B}$  variables
  - ◆  $\nabla \times \mathbf{E} = - \partial \mathbf{B} / \partial t$
- Dans un autre référentiel,  $\mathbf{B}$  pur est vu comme  $\mathbf{E} \dots$ 
  - ◆  $\mathbf{E}' = \mathbf{v} \times \mathbf{B}$  (for  $v/c \ll 1$ )
- En principe, on peut toujours identifier le champ  $\mathbf{E}$  effectif qui fait le travail
  - ◆ mais une description en termes de  $\mathbf{B}$  est souvent plus simple

→ « accélération par changement de référentiel »

# Enrico Fermi: 1949

- « nuages magnétisés » = « miroirs magnétiques »...

Bouteille magnétique, mur magnétique, ligne de champ courbe



- Rôle central dans le modèle de Fermi

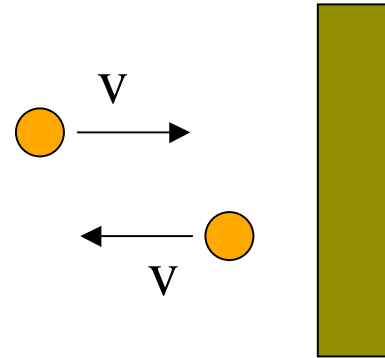


- N'est-ce pas paradoxal ?

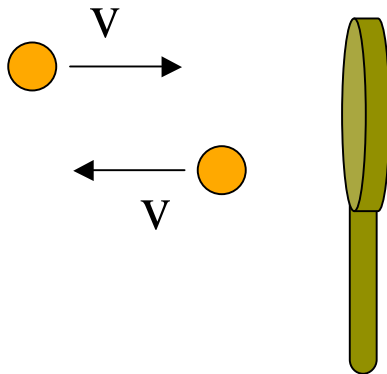
- Non !

# Analogie simple...

- Balle de tennis rebondissant sur un mur
  - ◆ Ni gain ni perte d'énergie



rebond = vitesse inchangée

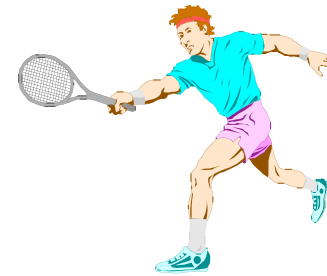
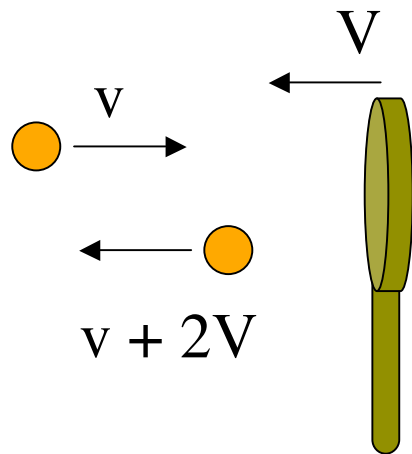


Même chose pour une raquette immobile...

Comment accélérer une balle et jouer au tennis ?!

## ■ Raquette en mouvement

- ◆ Ni gain ni perte d'énergie... dans le réf. de la raquette !

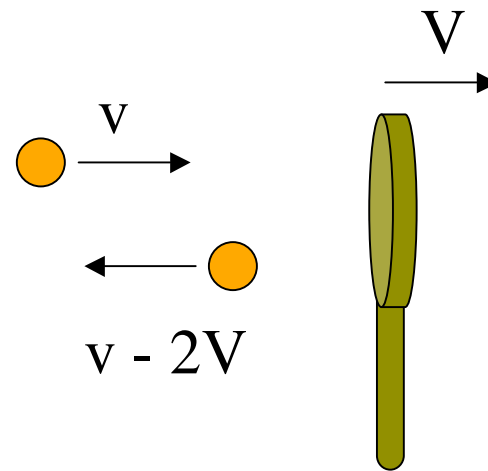


Arnaud  
Clément

Vitesse inchangée  
par rapport à la raquette

→ accélération par changement de référentiel

## ■ Amortie



Décélération des particules...

# Retour aux particules dans le MIS...

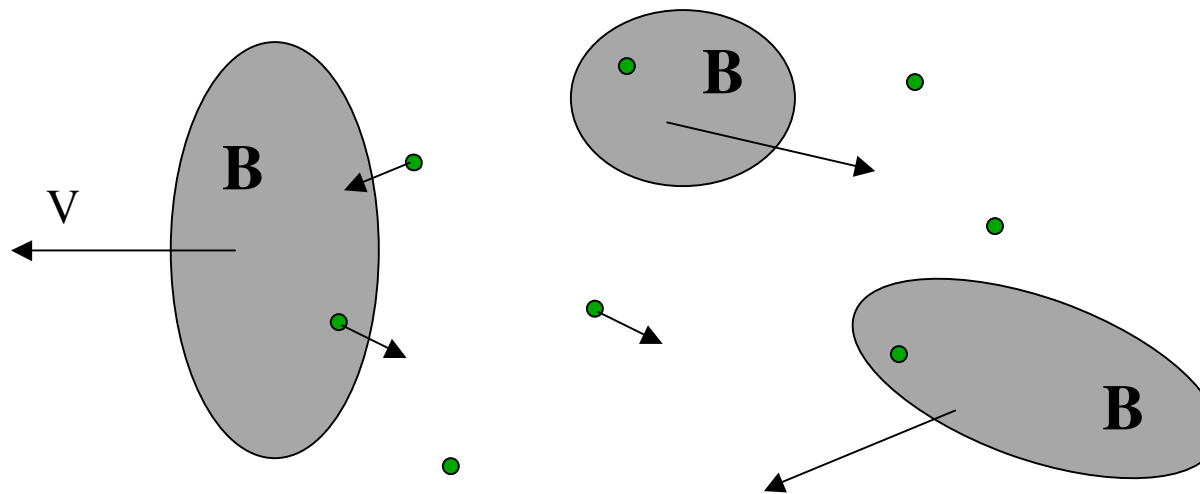
balle  $\leftrightarrow$  particule chargée  
raquette  $\leftrightarrow$  "miroir magnétique"

- Réflexion par un nuage magnétisé en mouvement
  - ◆ Par double changement de référentiel
  - ◆ Par le champ électrique induit



# Accélération de Fermi

Nuages magnétisés ( $M \gg m_p$ ), de vitesse typique  $V$  dans le MIS



- (ou bien « inhomogénéités magnétiques », ondes plasma...)

# L'essence de l'accélération stochastique de Fermi

- 1 Quand une particule est réfléchiée sur un miroir magnétique venant vers elle, dans une collision **frontale**, elle **gagne** de l'énergie
- 2 Quand une particule est réfléchiée sur un miroir magnétique s'éloignant d'elle, dans une collision **fuyante**, elle **perd** de l'énergie
- 3 Les collisions frontales sont **plus fréquentes** que les collisions fuyantes

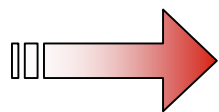
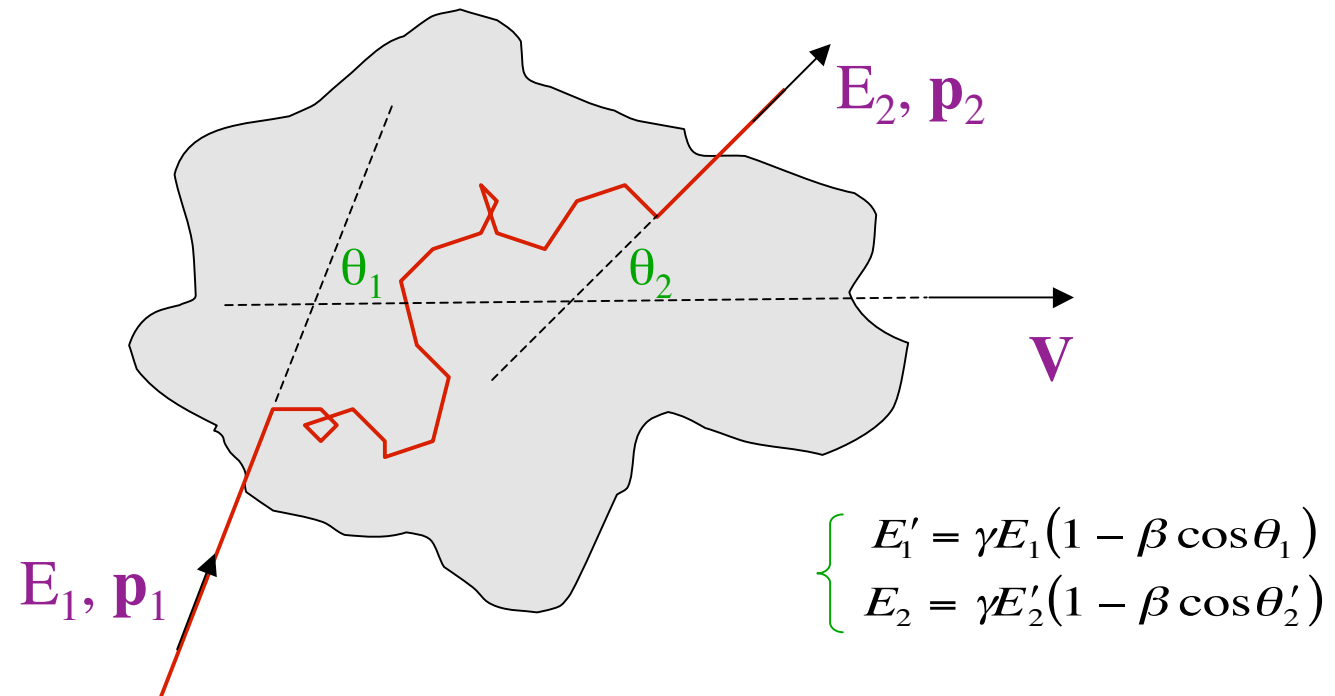
---

⇒ Gain d'énergie net, en moyenne (processus stochastique)



# Accélération de Fermi du 2nd ordre

- Direction randomisée par les diffusions sur les champs magnétiques ancrés dans le nuage



$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1 - \beta \cos \theta_1 + \beta \cos \theta'_2 - \beta^2 \cos \theta_1 \cos \theta'_2}{1 - \beta^2} - 1$$

En moyenne :

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1 - \beta \cos \theta_1 + \beta \cos \theta'_2 - \beta^2 \cos \theta_1 \cos \theta'_2}{1 - \beta^2} - 1$$

Angle de sortie :  $\langle \cos \theta'_2 \rangle = 0$

Angle d'entrée :

probabilité  $\propto$  vitesse relative ( $v - V \cos \theta$ )

$\rightarrow \langle \cos \theta_1 \rangle = -\beta / 3$



Finalement...

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{1 + \beta^2 / 3}{1 - \beta^2} - 1 \approx \frac{4}{3} \beta^2$$

**second ordre en  $V/c$**

# Taux de gain d'énergie

Libre parcours moyen entre les nuages  
le long d'une ligne de champ :  $L$

Temps moyen entre deux collisions

$$\langle L/(c \cos \phi) \rangle = 2L/c$$

Taux d'accélération

$$dE/dt = 2/3 (V^2/cL) \times E \equiv E/\tau_{\text{acc}}$$

**C'est la définition d'un processus de Fermi !**

# Problèmes du modèle de Fermi

- Inefficace

- ◆  $L \sim 1 \text{ pc} \rightarrow \tau_{\text{coll}} \sim \text{quelques années}$
- ◆  $\beta \sim 10^{-4} \rightarrow \beta^2 \sim 10^{-8}$



$$\tau_{\text{acc}} > 10^8 \text{ yr !!!} \quad (\tau_{\text{CR}} \sim 10^7 \text{ yr})$$

→ échelles plus petites

- Les pertes dominant à basse énergie, ainsi que pour les électrons
- Loi de puissance, certes, mais pas universelle

# Fermi après Fermi

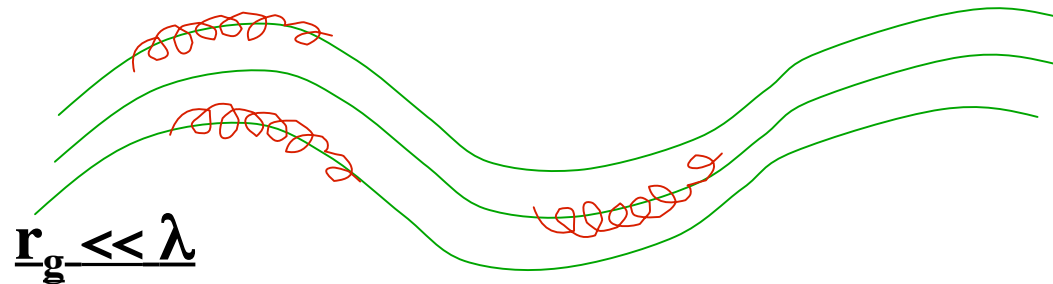
- Les particules peuvent interagir avec n'importe quel type de centres diffuseurs
- Accroissements de densité (= miroirs magnétiques) remplacés par de la turbulence MHD, représentée par des champs MHD aléatoires ou des ondes plasma
- Les particules interagissent avec les ondes par l'intermédiaire de résonances EM, permettant un transfert d'énergie et d'impulsion



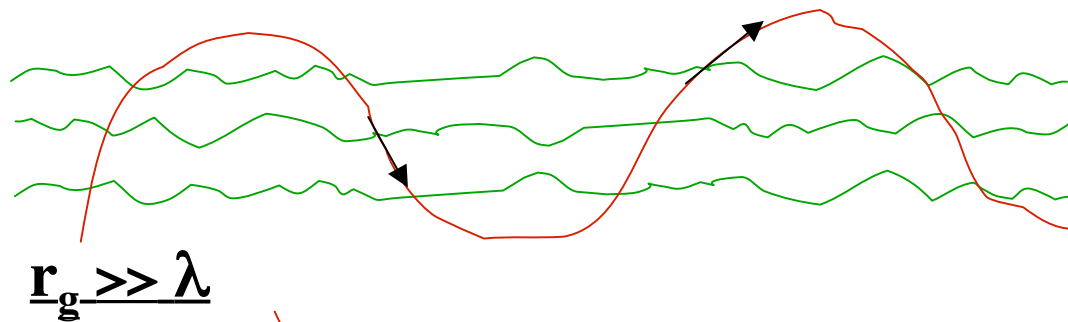
cf. Guy Pelletier

# Interaction onde-particule

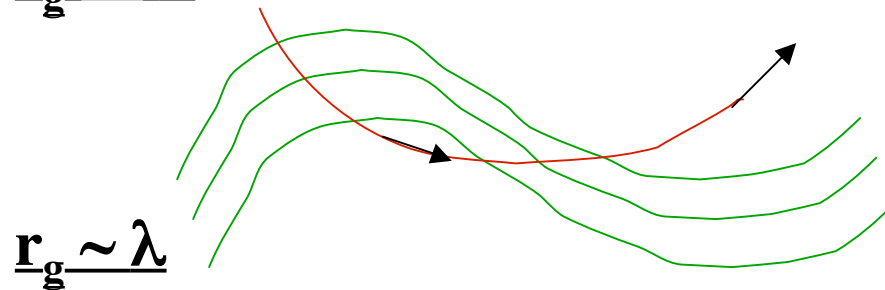
- Inhomogénéités magnétique  $\approx$  ligne de champ perturbée



Ajustement du premier invariant adiabatique :  
 $p_{\perp}^2 / B \sim \text{const}$



Rien de spécial...



**Diffusion du pitch-angle :**

$$\Delta\alpha \sim B_1/B_0$$

**Dérive du centre de guidage :**

$$r \sim r_g \Delta\alpha$$

# Génération d'ondes

- L'accélération turbulente nécessite un apport de puissance externe.
- Si  $\beta > 1$  ( $4\pi\rho v^2/B^2$ ), les sources sont essentiellement des instabilités MHD grande-échelle
  - ◆ Instabilités de surface sur un jet
  - ◆ Les chocs sont accompagnés de turbulence MHD...
- Si  $\beta < 1$ , le transport d'énergie est sous forme de champs et de courants
  - ◆ Instabilités « current driven » + résistives
  - ◆  $\Rightarrow$  turbulence MHD et plasma
  - ◆ ex.: un plasma à faible  $\beta$  relaxe spontanément vers un état d'énergie magnétique faible (via une turbulence MHD auto-générée conduisant à une reconnexion locale des lignes de champs)

# Ondes plasma

- Ondes d'Alfvén
  - ◆ polarisées circulairement, transverses et se propageant le long du champ B (ou avec un angle)
  - ◆ non compressives (à faible amplitude)
  - ◆ « oscillations transverse des lignes de champ »
  - ◆  $\omega^2 = k^2 c_A^2 \cos^2 \theta / (1 + c_A^2 / c^2)$ ,  $c_A = (B^2 / 4\pi\rho)^{1/2}$
  - ◆ existent pour  $\omega < \Omega_p = eB/m_p$  (siffleurs si  $\Omega_p < \omega < \Omega_e$ )
  
- Ondes magnétosoniques
  - ◆ compressives, se propageant à travers le champ B (ou avec un angle)
  - ◆ principalement longitudinales (quand  $\theta \rightarrow \pi/2$ )
  - ◆ force de rappel = pression plasma et magnétique
  - ◆ Deux branches (rapide et lente)



# Résonance Onde-Particule

- Les ondes affectent les particules relativistes à travers leurs champs électriques fluctuants
- L'influence est la plus grande quand il y a résonance, i.e. les vitesses de l'onde et de la particule sont bien ajustées
- Pour les ondes d'Alfvén: résonance cyclotron (ou Doppler):

$$\omega - k_{\parallel} v_{\parallel} = n\Omega \quad (\Omega = qB/\gamma m)$$

- Le  $\Delta B$  tournant de l'onde est en phase avec l'électron pour  $n=-1$  (+1 pour les protons) ( $\rightarrow$  force de Lorentz cohérente)

# Résonance Onde-Particule

- $n = 0$  :  $\omega = k_{\parallel} v_{\parallel}$  : résonance Landau (ou Cherenkov)
- L'onde est vue Doppler shiftée à fréquence nulle : interaction entre le moment magnétique de la particule et le gradient du champ de l'onde...
- Les particules peuvent interagir de cette façon avec n'importe quelle longueur d'onde, si elles ont le bon pitch-angle
- NB: le taux de gain d'énergie dépend de  $p_{\perp}$ , mais l'énergie va à  $p_{\parallel} \Rightarrow$  l'isotropisation des pitch-angles est nécessaire !

# Isotropisation et ralentissement

- Une distribution anisotrope de particules relativistes génère des ondes d'Alfvén résonantes à un taux proportionnel à l'anisotropie et à la vitesse relative de streaming.
- Les ondes auto-générées vont ensuite diffuser les particules, maintenant l'isotropie et réduisant la vitesse de streaming à  $\sim c_A$
- NB: si elle sont générées de l'extérieur, les ondes d'Alfvén peuvent aussi transférer de l'énergie aux particules, mais taux d'accélération plus faible que taux de diffusion par  $c_A/c \dots$

# Accélération turbulente de Fermi

- Les particules sont diffusées par les ondes comme elles l'étaient par les nuages magnétisés dans le modèle initial de Fermi
- L'influence de l'accélération turbulente par les ondes MHD sur le spectre des particules dépend du spectre de puissance des ondes, des mécanismes de pertes d'énergie concurrents, et de l'échappement des particules...
- NB: il existe un moyen générique d'obtenir un spectre en loi de puissance (= idée originale de Fermi)

# Les lois de puissance de Fermi...

- Taux d'accélération :  $dE / dt = E / \tau_{\text{acc}}$  ,  
avec  $\tau_{\text{acc}}$  indépendant de  $E$
- Taux d'échappement indépendant de  $E$   
 $\Rightarrow P_{\text{esc}} = dt / \tau_{\text{esc}}$
- Injection continue à une énergie  $E_0$



- $\Rightarrow$  loi de puissance d'indice  $x = - (1 + \tau_{\text{acc}}/\tau_{\text{esc}})$

# Une loi de puissance, mais à quel prix ?

- Il faut une injection stationnaire (en  $t$  et  $E$ )
- Il faut une accélération stationnaire (indpdte de  $E$ )
- Il faut un échappement stationnaire (indpdt de  $E$ )
  
- Besoin d'une approche plus générale, pour calculer le spectre des EP dans toutes les situations...

→ théorie cinétique