Cosmic Rays Energy Spectrum & Acceleration Mechanisms

Birgit Trappl

14. 6. 2010

・ロト ・聞 ト ・ 国 ト ・ 国 ト

Contents

- Properties of Cosmic Rays
 - Definition
 - Composition
 - Energy Spectrum

Dynamics of Charged Particles in Electromagnetic Fields

- Gyration
- Drifts
- Adiabatic Invariants
- Magnetic Mirror

Acceleration Mechanisms

- Free Energy Sources & Classification
- Direct Electrostatic Acceleration
- Stochastic Acceleration
 - Fermi Mechanism
 - Shock Acceleration
 - Energy Gain
- 4

Applications to the Energy Spectrum

- Acceleration Sites
- Propagation and Energy Losses

Image: A match the second s

→

Dynamics of Charged Particles in Electromagnetic Fields Acceleration Mechanisms Applications to the Energy Spectrum Defintion Composition Energy Spectrum

What are Cosmic Rays?

high energy particles



Birgit Trappl Cosmic Rays

Dynamics of Charged Particles in Electromagnetic Fields Acceleration Mechanisms Applications to the Energy Spectrum Defintion Composition Energy Spectrum

What are Cosmic Rays?

- high energy particles
- primary vs. secondary



Dynamics of Charged Particles in Electromagnetic Fields Acceleration Mechanisms Applications to the Energy Spectrum Defintion Composition Energy Spectrum

What are Cosmic Rays?

- high energy particles
- primary vs. secondary
- components
 - charged component
 - neutrino component
 - photon component



Dynamics of Charged Particles in Electromagnetic Fields Acceleration Mechanisms Applications to the Energy Spectrum Defintion Composition Energy Spectrum

Which particles occur?

- 98% fully ionized nuclei
 - 87% protons (H nuclei)
 - 12% α -particles (He nuclei)
 - 1% heavier nuclei
- 2% electrons



イロト イヨト イヨト

Dynamics of Charged Particles in Electromagnetic Fields Acceleration Mechanisms Applications to the Energy Spectrum Defintion Composition Energy Spectrum

Which particles occur?

- 98% fully ionized nuclei
 - 87% protons (H nuclei)
 - 12% α -particles (He nuclei)
 - 1% heavier nuclei
- 2% electrons
- vs. solar system abundances (\$)
 - \rightarrow even-odd-effect
 - $\rightarrow\,$ peaks for C, N, O and Fe
 - $\not \! \! \rightarrow$ Li, Be, B and Sc, Ti, V, Mn



Dynamics of Charged Particles in Electromagnetic Fields Acceleration Mechanisms Applications to the Energy Spectrum Defintion Composition Energy Spectrum

Which particles occur?

- 98% fully ionized nuclei
 - 87% protons (H nuclei)
 - 12% α -particles (He nuclei)
 - 1% heavier nuclei
- 2% electrons
- vs. solar system abundances (\$)
 - \rightarrow even-odd-effect
 - $\rightarrow\,$ peaks for C, N, O and Fe
 - → Li, Be, B and Sc, Ti, V, Mn
- low (•) vs. high (○) energy data



Dynamics of Charged Particles in Electromagnetic Fields Acceleration Mechanisms Applications to the Energy Spectrum Definition Composition Energy Spectrum

What about their energy?

 same distribution for different nuclei



Dynamics of Charged Particles in Electromagnetic Fields Acceleration Mechanisms Applications to the Energy Spectrum Definition Composition Energy Spectrum

What about their energy?

 same distribution for different nuclei

overall spectrum

- solar modulation
- GZK-cutoff



Dynamics of Charged Particles in Electromagnetic Fields Acceleration Mechanisms Applications to the Energy Spectrum Defintion Composition Energy Spectrum

What about their energy?

- same distribution for different nuclei
- overall spectrum
 - \circ solar modulation
 - \circ GZK-cutoff



- knee (~ $10^{15} eV$)
- \circ ankle (~ 5.10¹⁸ eV)



→ ∃ →

Image: A math a math

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

How do e⁻ and ions move in uniform magnetostatic field?

• pitch angle: $\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} \right)$



・ロト ・聞 ト ・ ヨト ・ ヨトー

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

How do e⁻ and ions move in uniform magnetostatic field?

- pitch angle: $\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{v_{\perp}}{v_{\parallel}} \right)$
- equation of motion: $m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q \left(\mathbf{v} \times \mathbf{B} \right)$



・ロト ・聞 ト ・ ヨト ・ ヨトー

 $\mathbf{v}_{\perp} + \mathbf{v}_{\parallel}$

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

How do e⁻ and ions move in uniform magnetostatic field?

• pitch angle:
$$\alpha = \tan^{-1}\left(rac{v_{\perp}}{v_{\parallel}}
ight)$$

• equation of motion: $m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ solution for $\mathbf{B} = \mathbf{B} \hat{\mathbf{e}}_z$

$$x = \pm r_g \sin(\omega_g t) + x_0$$
$$y = r_g \cos(\omega_g t) + y_0$$

with gyrofrequency and gyroradius

$$\omega_{\rm g} = rac{|q|B}{m}$$

$$r_g = rac{v_\perp}{|\omega_g|} = rac{mv_\perp}{|q|B}$$



sense of gyration, R. Kippenhahn & C. Möllenhoff, Elementare Plasmaphysik (1975)

・ロト ・聞 ト ・ヨト ・ ヨト

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

How do e⁻ and ions move in uniform magnetostatic field?

- pitch angle: $\alpha = \tan^{-1} \left(\frac{\mathbf{v}_{\perp}}{\mathbf{v}_{\parallel}} \right)$
- equation of motion: $m \frac{d\mathbf{v}}{dt} = q (\mathbf{v} \times \mathbf{B})$ solution for $\mathbf{B} = \mathbf{B} \hat{\mathbf{e}}_z$

$$x = \pm r_g \sin(\omega_g t) + x_0$$
$$y = r_g \cos(\omega_g t) + y_0$$

with gyrofrequency and gyroradius

$$\omega_g = \frac{|q|B}{m} \qquad \qquad r_g = \frac{v_\perp}{|\omega_g|} = \frac{mv_\perp}{|q|B}$$

• guiding center (x_0, y_0) moves with \mathbf{v}_{\parallel}



Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

What happens if **E** and **B** are arbitrary?

• $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift: $\mathbf{v}_E = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$



grad B drift, W. Baumjohann & R.A. Treumann, Basic Space Plasma Physics (1997)

イロト イヨト イヨト

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

What happens if **E** and **B** are arbitrary?

- $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift: $\mathbf{v}_E = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$
- polarisation drift: $\mathbf{v}_P = \frac{m}{qB^2} \frac{d\mathbf{E}_{\perp}}{dt}$



polarization drift, J. Howard Introduction to Plasma Physics (2002)

イロト イヨト イヨト イヨト

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

What happens if **E** and **B** are arbitrary?

•
$$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$$
 drift: $\mathbf{v}_E = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$

• polarisation drift: $\mathbf{v}_P = \frac{m}{qB^2} \frac{d\mathbf{E}_{\perp}}{dt}$

• curvature drift:
$$\mathbf{v}_R = \frac{m \mathbf{v}_{\parallel}^2}{q} \frac{\mathbf{R}_C \times \mathbf{B}}{R_C^2 B^2}$$



A B A A B A A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A
 A

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

What happens if **E** and **B** are arbitrary?

•
$$\mathbf{E} \times \mathbf{B}$$
 drift: $\mathbf{v}_E = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$

• polarisation drift:
$$\mathbf{v}_P = rac{m}{qB^2} rac{d\mathbf{E}_{\perp}}{dt}$$

• curvature drift:
$$\mathbf{v}_R = \frac{m v_{\parallel}^2}{q} \frac{\mathbf{R}_C \times \mathbf{B}}{R_C^2 B^2}$$

• gradient drift:
$$\mathbf{v}_{\nabla} = rac{mv_{\perp}^2}{2qB^3} \left(\mathbf{B} \times \nabla B \right)$$



イロト イヨト イヨト イヨト

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

What happens if **E** and **B** are arbitrary?

- $\mathbf{E} \times \mathbf{B}$ drift: $\mathbf{v}_E = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{B}}{B^2}$
- polarisation drift: $\mathbf{v}_P = \frac{m}{qB^2} \frac{d\mathbf{E}_{\perp}}{dt}$
- curvature drift: $\mathbf{v}_R = \frac{m v_{\parallel}^2}{q} \frac{\mathbf{R}_C \times \mathbf{B}}{R_C^2 B^2}$
- gradient drift: $\mathbf{v}_{\nabla} = \frac{m v_{\perp}^2}{2q B^3} \left(\mathbf{B} \times \nabla B \right)$



gravitational force drift http://en.wikipedia.org/wiki/File:Charged-particle-drifts.svg

• gravitational force drift: $\mathbf{v}_G = \frac{m}{q} \frac{\mathbf{g} \times \mathbf{B}}{B^2}$

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

Which quantities are conserved?

• magnetic moment:
$$\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B}$$

• magnetic flux:
$$\Phi_{\mu} = \frac{2\pi m}{q^2} \mu$$

・ロト ・ 日 ト ・ 日 ト ・ 日 ト ・

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

Which quantities are conserved?

• magnetic moment:
$$\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B}$$

• magnetic flux:
$$\Phi_{\mu} = \frac{2\pi m}{q^2} \mu$$

violation of invariance

$$\omega_{E,B} > \omega_{g}$$

 $L_{\nabla E,B} < r_{g}$

× . .

・ロト ・ 日 ・ ・ ヨ ・ ・ ヨ ・ ・

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

What happens if $\mathbf{B} \parallel \nabla \mathbf{B}$ for stationary \mathbf{B} ?

- invariant magnetic moment: $\mu = \frac{mv_{\perp}^2}{2B} = \frac{mv^2 \sin^2 \alpha}{2B} = const.$
- particle energy conserved: $\frac{mv^2}{2} = \frac{m}{2}(v_{\parallel}^2 + v_{\perp}^2) \Rightarrow \frac{mv_{\parallel}^2}{2} = \frac{mv^2}{2} \mu B$



mangetic mirror, W. Baumjohann & R.A. Treumann, Basic Space Plasma Physics (1997)

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

Where is the mirror point?

• mirror condition (
$$v_{\parallel} = 0$$
): $\frac{mv_{\parallel}^2}{2} = \frac{mv^2}{2} - \mu B \Rightarrow \frac{mv^2}{2} = \mu B$



・ロト ・ 日 ト ・ 日 ト ・ 日 ト ・

Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

Where is the mirror point?

• mirror condition
$$(v_{\parallel} = 0)$$
: $\frac{mv_{\parallel}^2}{2} = \frac{mv^2}{2} - \mu B \Rightarrow \frac{mv^2}{2} = \mu B$
• loss cone condition: $sin(\alpha^*) = \left(\frac{B_{min}}{B_{max}}\right)^{\frac{1}{2}}$



Gyration Drifts Adiabatic Invariants Magnetic Mirror

Where is the mirror point?

- mirror condition $(v_{\parallel} = 0)$: $\frac{mv_{\parallel}^2}{2} = \frac{mv^2}{2} \mu B \Rightarrow \frac{mv^2}{2} = \mu B$
- loss cone condition: $sin(\alpha^*) = \left(\frac{B_{min}}{B_{max}}\right)^{\frac{1}{2}}$
- scatters back ($lpha > lpha^*$) or escapes ($lpha < lpha^*$)



→ < Ξ →</p>

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

Where do particles get their energy from?

• top-down-scenarios - supermassive particle decay

イロト イヨト イヨト

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

Where do particles get their energy from?

- top-down-scenarios supermassive particle decay
- bottom-up-scenarios acceleration processes

possible energy sources - classification:

- o dynamic graviational potential: transfer of potential energy
- hydrodynamic kinetic energy: acceleration via collisions or rotation
- electromagnetic em. potential: energy gain per coulomb force

process - classification: direct vs. stochastic

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

How do particles speed up via electric fields?

- no electrostatic fields
- ⇒ non-stationary electric fields
- $\Rightarrow \text{ time-varying magnetic fields} \\ (\rightarrow \text{ induction})$

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

How do particles speed up via electric fields?

- no electrostatic fields
- ⇒ non-stationary electric fields
- $\Rightarrow \text{ time-varying magnetic fields} \\ (\rightarrow \text{ induction})$
 - betatron or cyclotron effect

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = -\nabla \times \mathbf{E}$$
$$\Phi = \int \mathbf{B} \cdot d\mathbf{A} = B\pi R^2$$
$$-\frac{d\Phi}{dt} = \oint \mathbf{E} \cdot d\mathbf{s} =: U_{ind}$$



$$\Delta E = -|q|U_{ind} = e\pi R^2 rac{dB}{dt}$$

Image: A matrix of the second seco

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

What is the Fermi mechanism?

• collisions with interstellar clouds



メロト メポト メヨト メヨト

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

What is the Fermi mechanism?

- collisions with interstellar clouds
- elastic scattering at magnetic mirrors (pitch angle scattering)



イロト イポト イヨト イヨト

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

What is the Fermi mechanism?

- collisions with interstellar clouds
- elastic scattering at magnetic mirrors (pitch angle scattering)





Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

What is shock front acceleration?

• collisions with shock fronts





イロト イヨト イヨト

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

What is shock front acceleration?

- collisions with shock fronts
- assumptions: strong shock & monoatomic gas







M. S. Longair, High Energy Astrophysics - Vol. 2 (1981)

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

What is shock front acceleration?

- collisions with shock fronts
- assumptions: strong shock & monoatomic gas
- diffusion up- & downstream

Upstream frame U = (3/4) U Downstream frame -U,=(3/4)U u - u2

M. S. Longair, High Energy Astrophysics - Vol. 2 (1981)

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

What is shock front acceleration?

- collisions with shock fronts
- assumptions: strong shock & monoatomic gas
- diffusion up- & downstream
- only head-on \Rightarrow energy gain



M. S. Longair, High Energy Astrophysics - Vol. 2 (1981)

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

How much energy do particles gain?

• fractional energy gain: $\Delta E = \xi E$

$$E_n = E_0(1+\xi)^n \Rightarrow n = ln\left(\frac{E}{E_0}\right)/ln(1+\xi)$$

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

How much energy do particles gain?

• fractional energy gain: $\Delta E = \xi E$

$$\begin{split} E_n &= E_0 (1+\xi)^n \Rightarrow n = \ln\left(\frac{E}{E_0}\right) / \ln(1+\xi) \\ \Rightarrow &N(\geq E) \propto \sum_{m=n}^{\infty} (1-P_{esc})^m = \frac{(1-P_{esc})^n}{P_{esc}} = \frac{1}{P_{esc}} \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\gamma} \\ \text{with } \gamma &= \ln\left(\frac{1}{1-P_{esc}}\right) / \ln(1+\xi) \approx \frac{P_{esc}}{\xi} \end{split}$$

・ロト ・聞 ト ・ ヨト ・ ヨト …

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

How much energy do particles gain?

• fractional energy gain: $\Delta E = \xi E$

$$\begin{split} E_n &= E_0 (1+\xi)^n \Rightarrow n = \ln\left(\frac{E}{E_0}\right) / \ln(1+\xi) \\ \Rightarrow & N(\geq E) \propto \sum_{m=n}^{\infty} (1-P_{esc})^m = \frac{(1-P_{esc})^n}{P_{esc}} = \frac{1}{P_{esc}} \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\gamma} \\ \text{with } \gamma &= \ln\left(\frac{1}{1-P_{esc}}\right) / \ln(1+\xi) \approx \frac{P_{esc}}{\xi} \end{split}$$

• Fermi mechanism - 2nd order Fermi mechanism $\xi \sim \frac{4}{3} \left(\frac{u_i}{c}\right)^2 \Rightarrow \gamma \gg 2$

・ロト ・聞 ト ・ ヨト ・ ヨト

Free Energy Sources & Classification Direct Electrostatic Acceleration Stochastic Acceleration

How much energy do particles gain?

• fractional energy gain: $\Delta E = \xi E$

$$\begin{split} E_n &= E_0 (1+\xi)^n \Rightarrow n = \ln\left(\frac{E}{E_0}\right) / \ln(1+\xi) \\ \Rightarrow &N(\geq E) \propto \sum_{m=n}^{\infty} (1-P_{esc})^m = \frac{(1-P_{esc})^n}{P_{esc}} = \frac{1}{P_{esc}} \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-\gamma} \\ \text{with } \gamma &= \ln\left(\frac{1}{1-P_{esc}}\right) / \ln(1+\xi) \approx \frac{P_{esc}}{\xi} \end{split}$$

• Fermi mechanism - 2nd order Fermi mechanism $\xi \sim \frac{4}{3} \left(\frac{u_i}{c}\right)^2 \Rightarrow \gamma \gg 2$

• Shock acceleration - 1st order Fermi mechanism $\xi = \frac{4}{3} \left(\frac{u}{c} \right) \implies \gamma \simeq 2 \qquad \checkmark$

Acceleration Sites Propagation and Energy Losses

Which objects are known accelerators?

- Solar Origin: $(E < 10^9 eV)$
 - Sunspots
 - Solar Wind
 - Solar Flares and Coronal Mass Ejections



Acceleration Sites Propagation and Energy Losses

Which objects are known accelerators?

- Solar Origin: $(E < 10^9 eV)$
 - Sunspots
 - Solar Wind
 - Solar Flares and Coronal Mass Ejections
- Galactic Origin I: $(10^9 eV < E < 10^{15} eV)$
 - Interstellar Clouds
 - Shock Fronts of Supernova Explosions



Acceleration Sites Propagation and Energy Losses

What is a Hillas Plot?



Birgit Trappl Cosmic Rays

Acceleration Sites Propagation and Energy Losses

Which objects are possible accelerators?

- Galacic Origin II: $(10^{15} < E < 10^{19} eV)$
 - SN Remnants Pulsars
 - Binaries
 - Galactic Wind



Acceleration Sites Propagation and Energy Losses

Which objects are possible accelerators?

- Galacic Origin II: $(10^{15} < E < 10^{19} eV)$
 - SN Remnants Pulsars
 - Binaries
 - Galactic Wind
- Extragalactic Origin: $(E > 10^{19} eV)$
 - Structure Formation Shocks
 - Clusters of Galaxies
 - Radio Galaxies
 - Active Galactic Nuclei
 - Gamma-Ray Burts
 - Colliding Galaxies



Acceleration Sites Propagation and Energy Losses

Do particles lose energy whilst propagation?

- Insterstellar and Intergalactic Medium
- Cosmic Photon Fields
- Cosmic Magnetic Fields

< ロ > < 同 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < 回 > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ > < □ >

Do particles lose energy whilst propagation?

- Insterstellar and Intergalactic Medium
- Cosmic Photon Fields
- Cosmic Magnetic Fields
- Interactions of Cosmic Ray Electrons
 - o synchrotron radiation in cosmic magnetic fields
 - $\circ\;$ inverse Compton scattering of ambient photon gases
 - o triplet pair production in ambient photon gases
 - o nonthermal electron bremsstrahlung in ambient matter fields
 - o ionization and excitation of atoms and molecules in ambient matter fields
 - Coulomb interactions with ionized gas

イロト イヨト イヨト

Do particles lose energy whilst propagation?

- Insterstellar and Intergalactic Medium
- Cosmic Photon Fields
- Cosmic Magnetic Fields
- Interactions of Cosmic Ray Electrons
 - o synchrotron radiation in cosmic magnetic fields
 - $\circ\;$ inverse Compton scattering of ambient photon gases
 - o triplet pair production in ambient photon gases
 - o nonthermal electron bremsstrahlung in ambient matter fields
 - $\circ\;$ ionization and excitation of atoms and molecules in ambient matter fields
 - Coulomb interactions with ionized gas
- Interactions of Cosmic Ray Nuclei
 - pair production
 - photo-production of hadrons
 - photo-desintegration of the nucleus
 - pion production
 - excitation of nuclei
 - Coulomb and ionization interactions

References

Thank you for your attention!

- - 4 回 🕨 - 4 回 🕨

크

- C. Grupen, Astroparticle Physics Springer-Verlag (2005)
- T. K. Gaisser, Cosmic Rays and Particle Physics Cambridge University Press (1990)
- T. Stanev, High Energy Cosmic Rays Springer-Verlag (2004)
- M. S. Longair, High Energy Astrophysics Volume 1 & 2 Cambridge University Press (1981)
- D. Perkins, Particle Astrophysics Oxford University Press (2003)
- R. Schlickeiser, Cosmic Ray Astrophysics Springer-Verlag (2002)
- R. Kippenhahn, C. Möllenhoff, Elementare Plasmaphysik B.I.-Wissenschaftsverlag (1975)
- H. V. Klapdor-Kleingrothaus, K. Zuber, Teilchenastrophysik Teubner Studienbücher (1997)
- W. Baumjohann, R. A. Treumann, Basic Space Plasma Physics Imperial College Press (1997)
- R. J. Goldston, P.H. Rutherford, Introduction to Plasma Physics IoP Publishing (1995)
- J. A. Simpson, Ann. Revs. Nucl. & Part. Sci 33, 323 (1983)
- F. Fraschetti, Phil. Trans. R. Soc. A, 366 (2008)
- R. D. Blandford, Astroph. Jorn. Supp. S. vol. 90, 515 (1994)
- S. P. Swordy, Space Science Reviews, vol. 99, Issue 1/4, 85-94 (2001)
- R. A. Ong, I. Journ. of Mod. Phys. A, vol. 15, 740 (2000)
- L. O'C. Drury, Rep. Prog. Phys., vol. 46, 973 (1983)
- A. M. Hillas, Ann. Rev. Astron. Astrophys. 22, 425 (1984)
- M. Bustamente, G.D. Carillo Montoya, et.al. 5th CERN-Latin American School of High-Energy Physics, 533 (2009)
- A. R. Bell, Mon. Not. R. astr. Soc., 182, 147 & 443 (1978)
- M. Orstrowski, Astropart. Phys., 18, 229-236 (2002)
- H. Schlaepfer, Spatium Cosmic Rays No. 11, (November 2003)
- J. Howard, Introduction to Plasma Physics, lecture notes, Austrailian National University (2002)
- H. Kolanoski, Einführung in die Astroteilchenphysik, lecture notes, Humbolt-Universität zu Berlin (2005/2006)
- O. Ostermeier, Quellen kosmischer Strahlung Ausbildungsseminar Teilchen-Astrophysik (2008)
- etc.