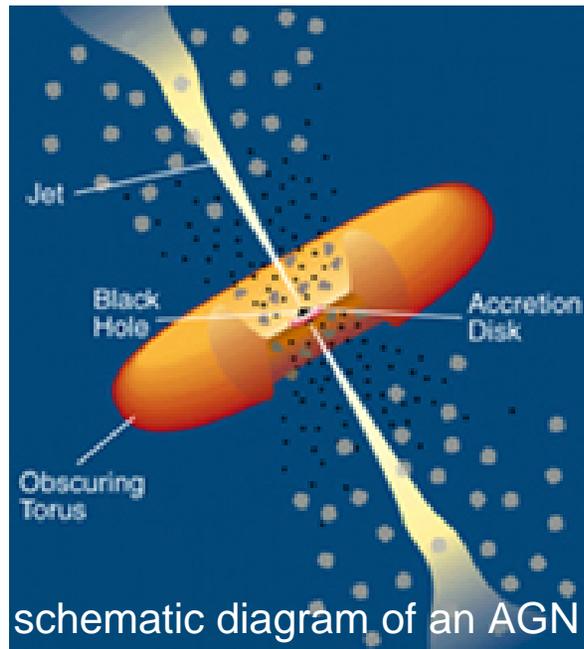
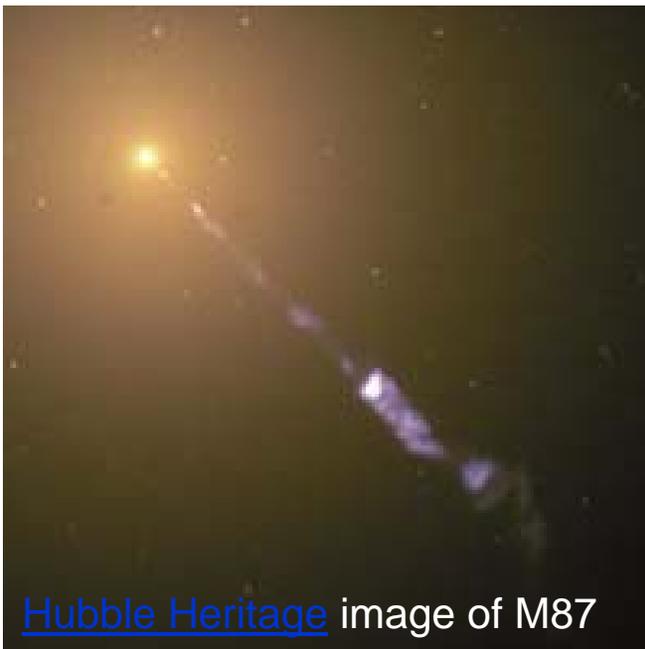


Kosmische Beschleuniger



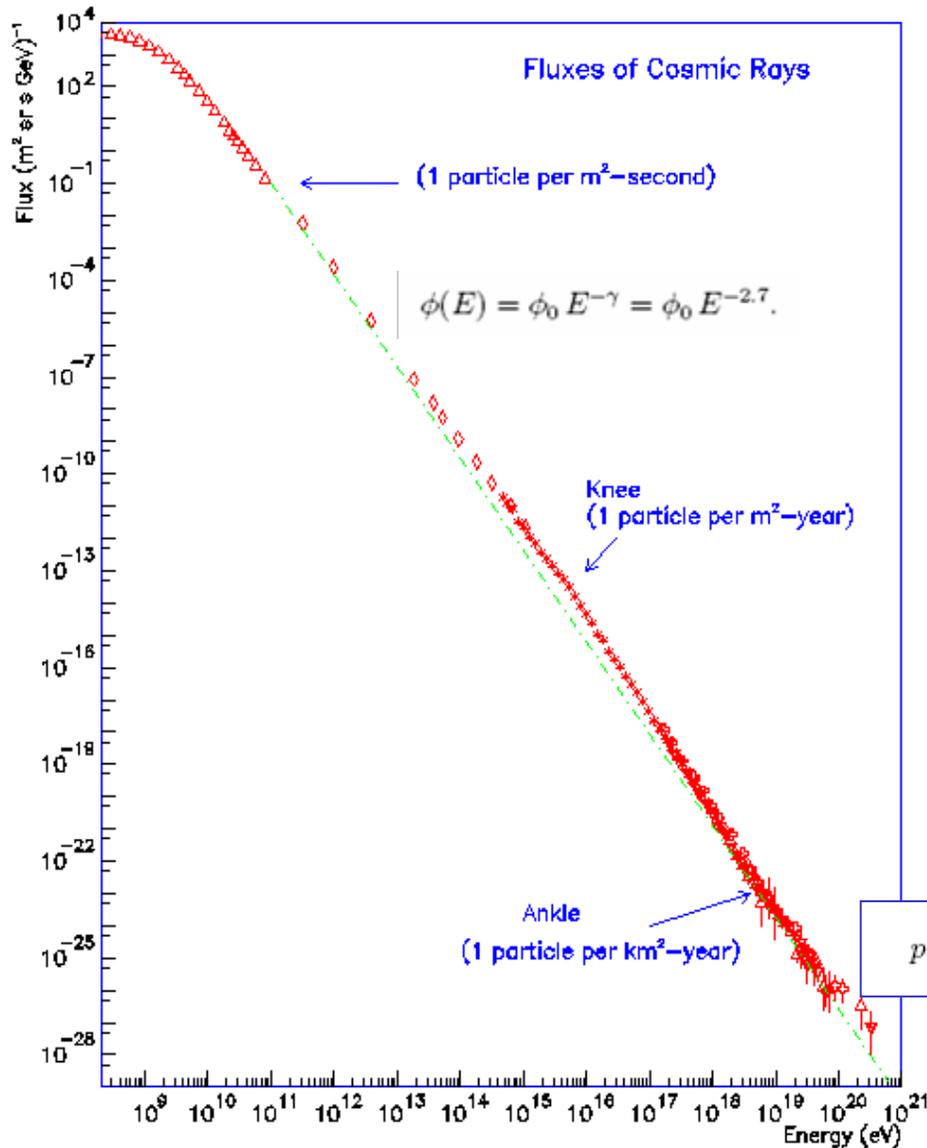
Supernova-Schockwelle



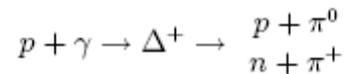
Kandidaten

- Schockwellen von Supernovae;
- Pulsare;
- Aktive Galaktische Kerne (AGN);
- Schwarze Löcher;
- Gammastrahlungsausbrüche (gamma ray bursts, GRB);
- ...

Energiespektrum



$$I_N(E) \approx 1.8 E^{-\alpha} \frac{\text{nucleons}}{\text{cm}^2 \text{ s sr GeV}}$$



Leistungsbilanz

Kosmische Strahlung - Supernovae

$\rho_E^{CR} \approx 0.5 \text{ MeV/m}^3$	CR-Energiedichte in der Galaxis
$\tau_G^{CR} \approx 10^7 \text{ Jahre}$	Verweilzeit der CR in der Galaxis
$V_G \approx 10^{61} \text{ m}^3$	Volumen der Galaxis ($r \approx 15 \text{ kpc}$, $h \approx 0.5 \text{ kpc}$)

Daraus berechnet sich die notwendige Beschleunigungsleistung für die galaktische kosmische Strahlung:

$$L_{CR} = \frac{V_G \cdot \rho_E^{CR}}{\tau_G^{CR}} \approx 3 \cdot 10^{33} \text{ J/s} \quad (7.1)$$

Die Gesamtleistung von Supernova-Explosionen schätzen wir mit folgenden Zahlenwerten ab:

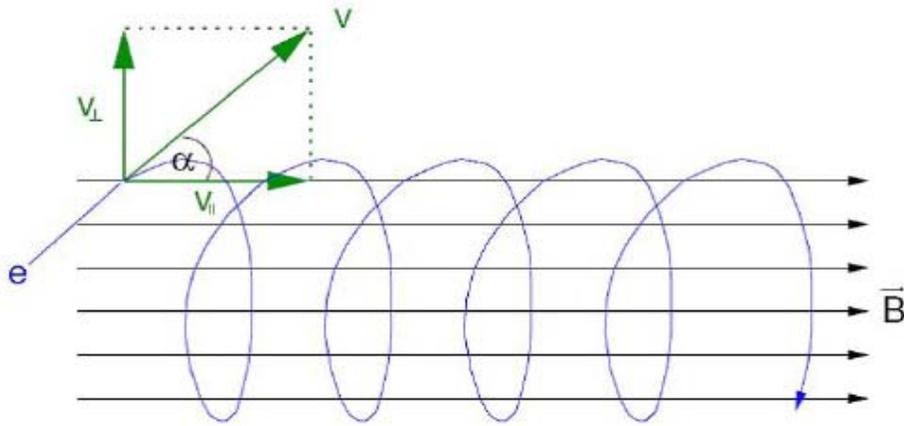
$\tau_G^{SN} \approx 30 - 50 \text{ Jahre}$	mittlere Zeit zwischen SN-Explosionen in der Milchstraße
$E^{SN} \approx 3 \cdot 10^{46} \text{ J}$	Energie pro SN-Explosion

Damit ergibt sich die Gesamtleistung der Supernova-Explosionen in der Milchstraße:

$$L_{SN} = \frac{E^{SN}}{\tau_G^{SN}} \approx 3 \cdot 10^{35} \text{ J/s} \quad (7.2)$$

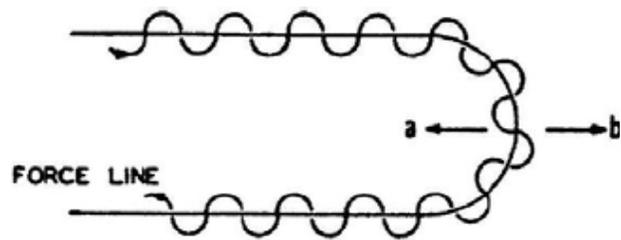
⇒ 1% der SN-Leistung könnte CR-Energien erklären

Magnetischer Einschluss

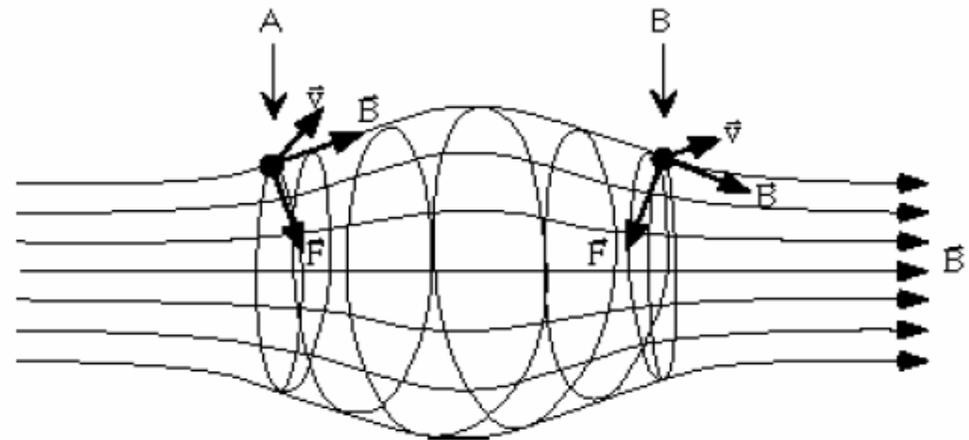


$$\phi_m = \pi r^2 B = \text{const}$$

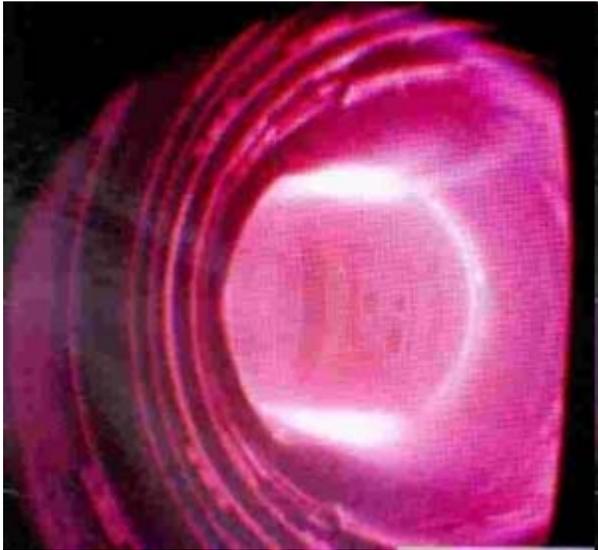
$$\frac{p_T^2}{B} = \text{const}$$



Magnetische Flasche



Einschluss von Magnetfeldern in Plasmen



$$B(t) = B_0 e^{t/\tau_M} \quad \tau_M = \frac{1}{4} \mu_0 \sigma R^2$$

$$P_m \approx j B R \approx \sigma R^2 B \dot{B} \approx \frac{B^2}{\mu_0}$$

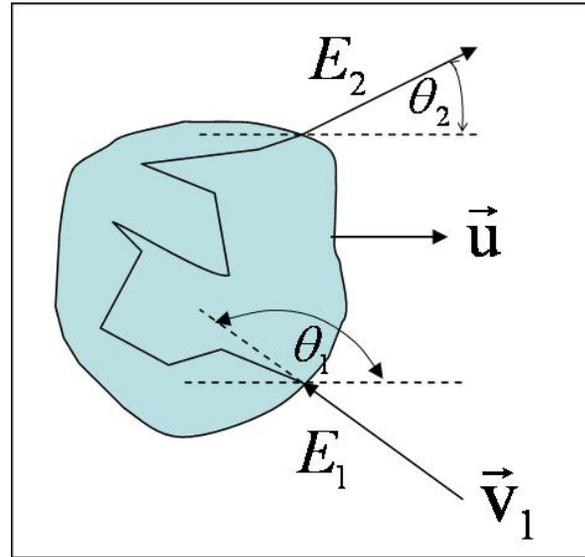
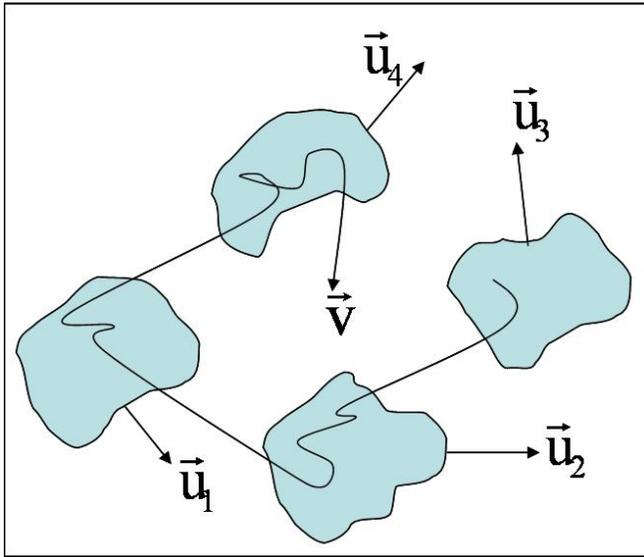
$$c_{\text{Alfvén}} = \sqrt{\frac{P_m}{\rho}} \approx \sqrt{\frac{1}{\mu_0 \rho}} B$$

$$\tau_P = \frac{R}{c_{\text{Alfvén}}} \approx \frac{R}{B} \sqrt{\rho \mu_0}$$

$$\tau_P \ll \tau_M \implies \sqrt{\rho} \ll B \sqrt{\mu_0} \sigma R$$

Magnetfeld im Plasma „eingefroren“

Fermi-Beschleunigung

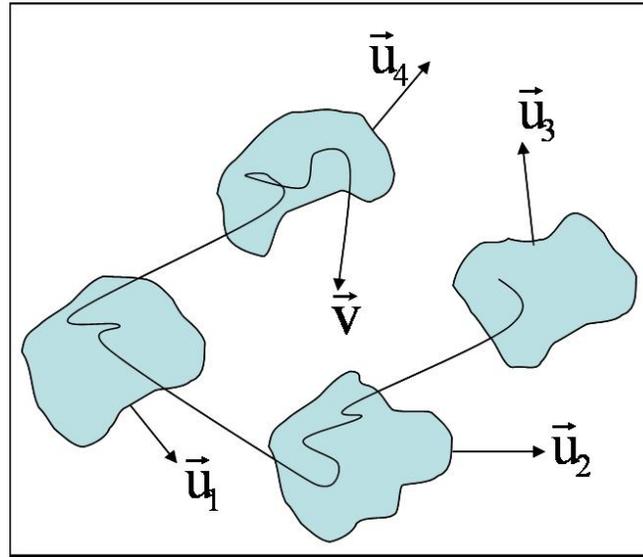


$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{\langle E_2 \rangle - E_1}{E_1} \approx \frac{4}{3} \beta^2$$

$$\frac{dN}{dE} = \frac{dN}{dE}(E_0) \cdot \left(\frac{E}{E_0} \right)^{-1 + \ln P / \ln \xi}$$

$$\alpha = -1 + \ln P / \ln \xi \approx -(2.0 \dots 2.2)$$

Fermi-Beschleunigung: grundsätzliche Probleme



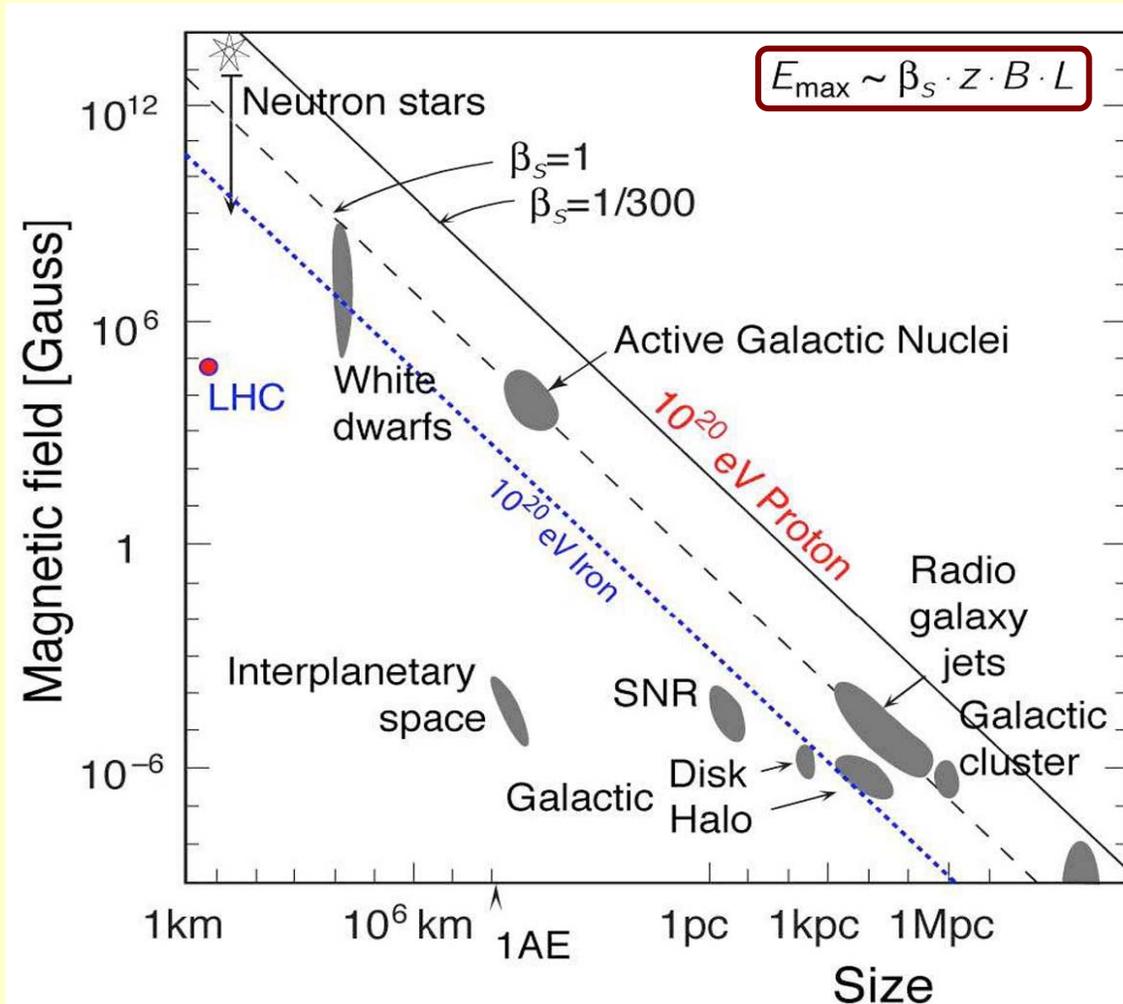
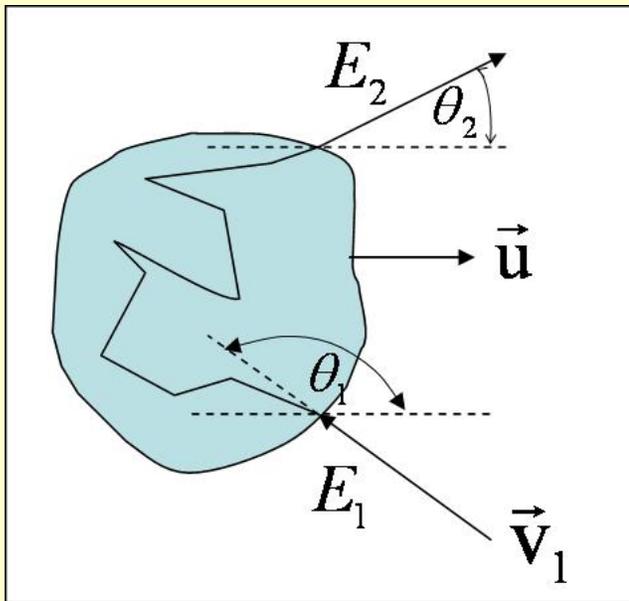
$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{\langle E_2 \rangle - E_1}{E_1} \approx \frac{4}{3} \beta^2$$

- $u/c = \beta \leq 10^{-4}$, damit ist der Energiezuwachs sehr klein;
- die mittleren freien Weglänge für die Kollision mit einer Plasmawolke sind $O(1 \text{ pc})$, das heißt, es kommt nur zu etwa einer Kollision pro Jahr;
- der Energieverlust (zum Beispiel durch Ionisation) ist ähnlich groß wie der Energiezuwachs.

Hillas-Diagramm

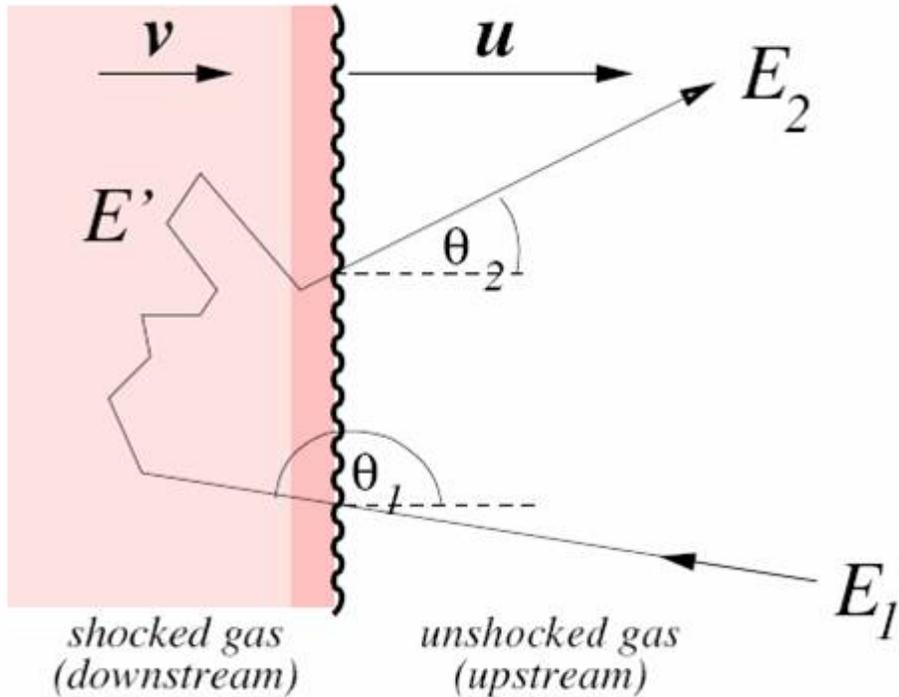
Questions:

- Where are the high energies generated?
- Where are the necessary conditions:
 $B \cdot L$ large

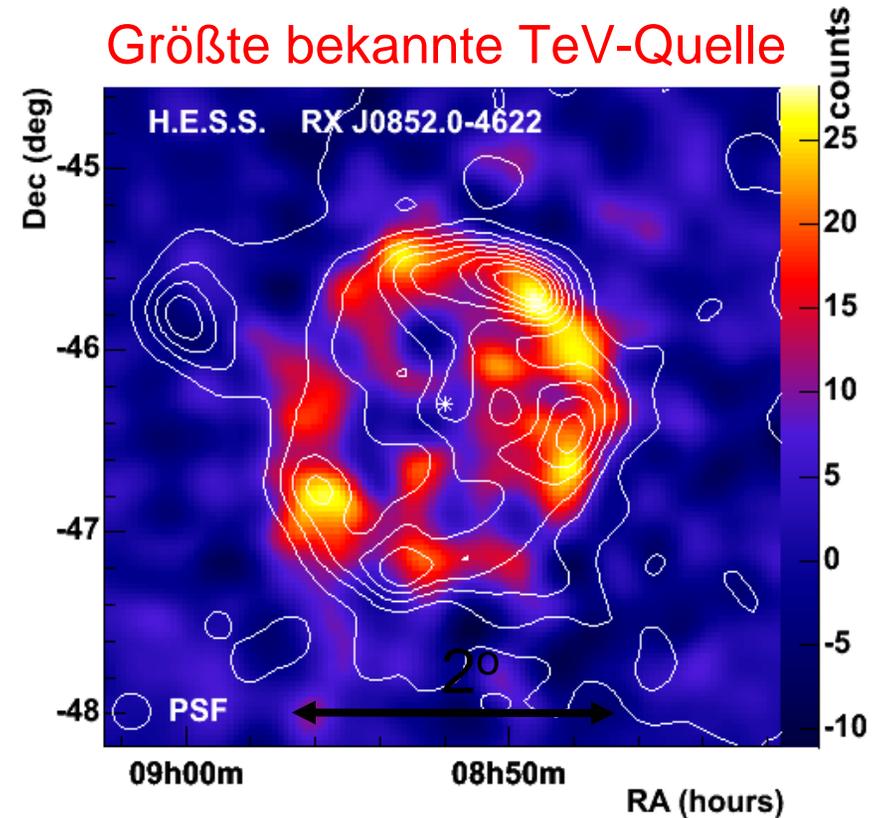
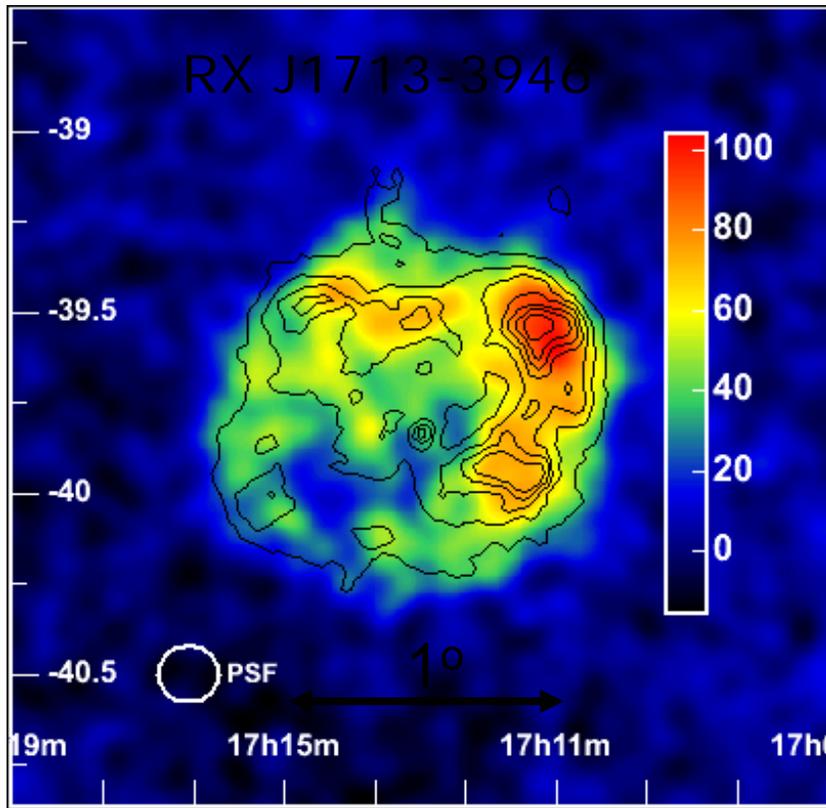


Schockwellen-Beschleunigung

„gerichtete“, 1. Ordnung Fermi-Beschleunigung

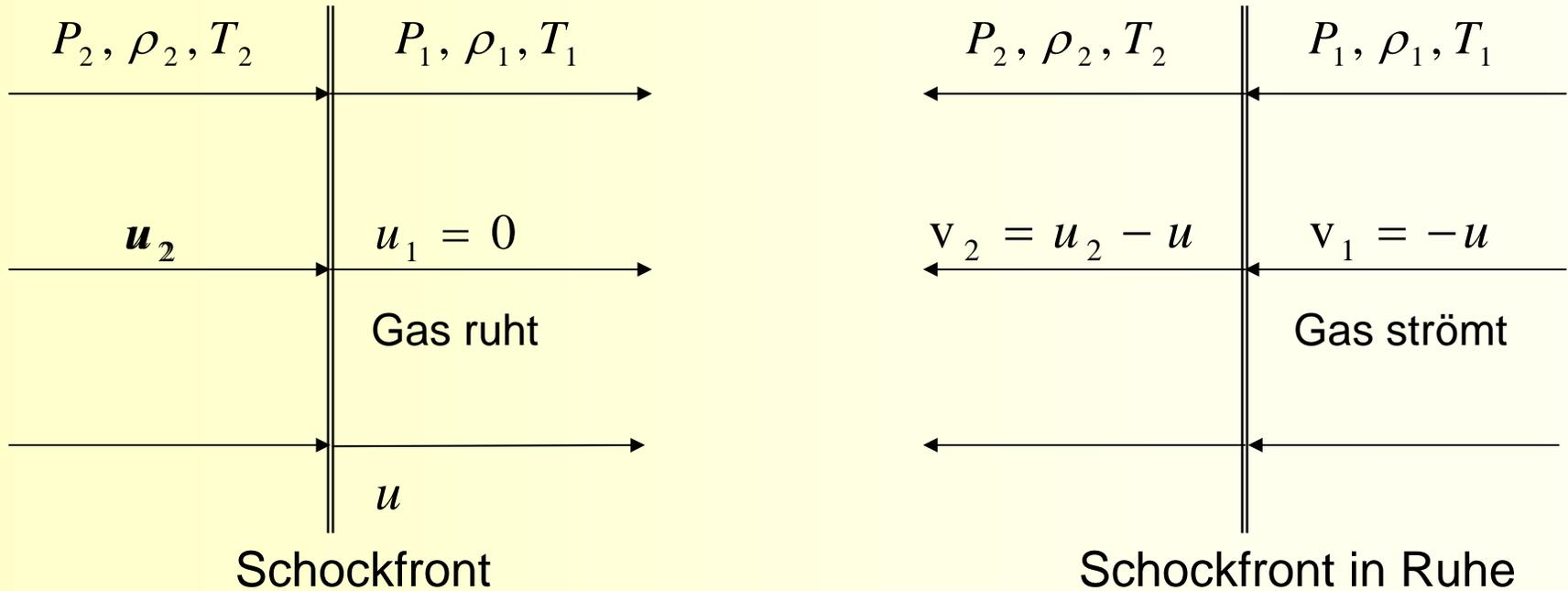


Aufgelöste SNR



Konturen: Röntgen-Daten (ASCA bzw. ROSAT)

Thermodynamik einer Schockwelle



$$u > c_{Schall} \quad \text{oder} \quad u > c_{Alfvén}.$$

Daraus ergibt sich:

- keine Störung vor der Wellenfront;
- Unstetigkeit an der Wellenfront, entsprechend dem 'Schock'.

„Schock-Bedingungen“

Kontinuität der Massen-, Energie- und Impulsflüsse

$$\rho_1 v_1 = \rho_2 v_2$$

$$P_1 + \rho_1 v_1^2 = P_2 + \rho_2 v_2^2$$

$$\frac{1}{2}v_1^2 + \frac{\epsilon_1 + P_1}{\rho_1} = \frac{1}{2}v_2^2 + \frac{\epsilon_2 + P_2}{\rho_2}$$

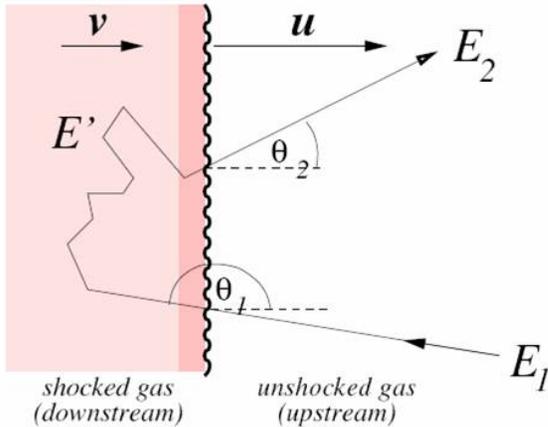
$$c_i = \sqrt{\frac{\gamma P_i}{\rho_i}}, \quad M_i = \frac{v_i}{c_i}$$

	für $M_1 \gg 1$	für $\gamma = \frac{5}{3}$
$\frac{P_2}{P_1}$	$\approx \frac{2\gamma}{\gamma+1} M_1^2$	$= \frac{5}{4} M_1^2$
$\frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{v_1}{v_2}$	$\approx \frac{\gamma+1}{\gamma-1}$	$= 4$
$\frac{T_2}{T_1}$	$\approx \frac{2\gamma(\gamma-1)}{(\gamma+1)^2} M_1^2$	$= \frac{5}{16} M_1^2$

$$-u = v_1 = 4v_2 = 4(u_2 - u)$$

$$u_2 = \frac{3}{4}u$$

Schockwellen-Beschleunigung



$$E_2 = \gamma^2 E_1 (1 + \beta \cos \theta'_2) (1 - \beta \cos \theta_1)$$

$$\beta = \frac{3u}{4c}$$

Gas hinter der Schockfront

$$\langle E_2 \rangle = \gamma^2 E_1 (1 + \beta \langle \cos \theta'_2 \rangle) (1 - \beta \langle \cos \theta_1 \rangle)$$

$$\langle E_2 \rangle = \gamma^2 E_1 \left(1 + \frac{1}{2}\beta\right)^2 = E_1 \frac{\left(1 + \frac{1}{2}\beta\right)^2}{1 - \beta^2}$$

$$\left\langle \frac{\Delta E}{E} \right\rangle = \frac{\langle E_2 \rangle - E_1}{E_1} \approx \beta = \frac{3}{4}u$$

$$\xi = 1 + \frac{3}{4}u/c$$

$$\frac{dN}{dE} = \frac{dN}{dE}(E_0) \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^{-1 + \ln P / \ln \xi} = \frac{dN}{dE}(E_0) \cdot \left(\frac{E}{E_0}\right)^\alpha$$