

*Galaktische Röntgen- und
Gammaquellen
(Quellen der kosmischen Strahlung?)*

Scheinseminar Astro- und Teilchenphysik

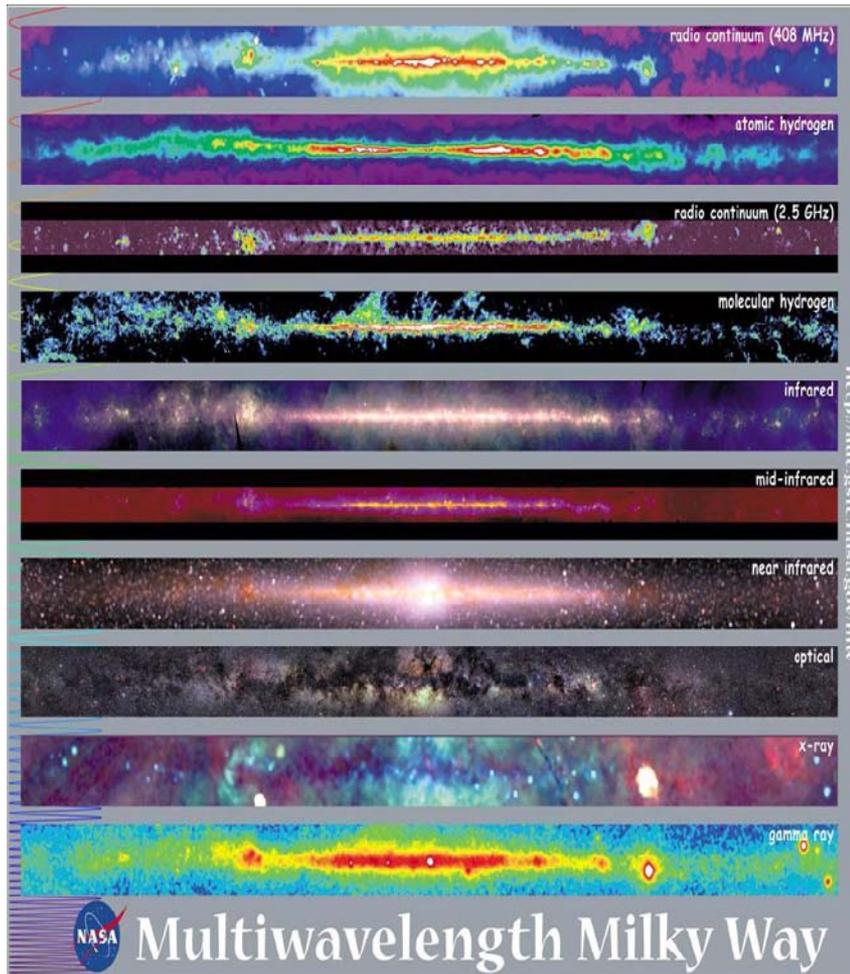
Matthias Schindler

01.07.2010

Inhalt

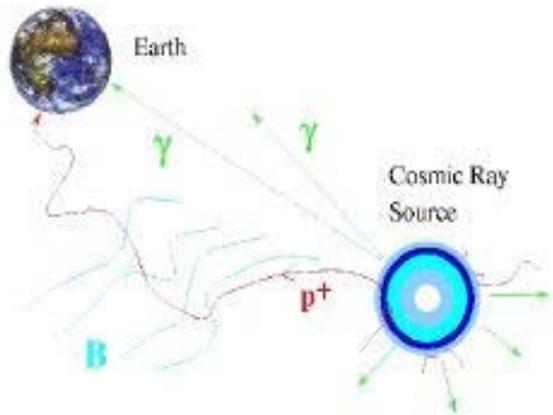
1. Motivation
2. Erzeugung der Strahlung
 - 2.1. Schwarzkörperstrahlung
 - 2.2. Radioaktivität
 - 2.3. Beschleunigungsmechanismen
 - 2.4. Umwandlung in Röntgen- und Gammastrahlung
3. Energieverluste
4. Objekte
 - 4.1. Sterne
 - 4.2. Pulsarwindnebel
 - 4.3. Supernovaüberreste
5. Literaturverzeichnis

Licht als elektromagnetische Welle



- Optisches Licht ist nur ein kleines Spektrum
- Nicht jede Wellenlänge kann Materie durchdringen
- Um Strukturen zu untersuchen → alle Wellenlängen

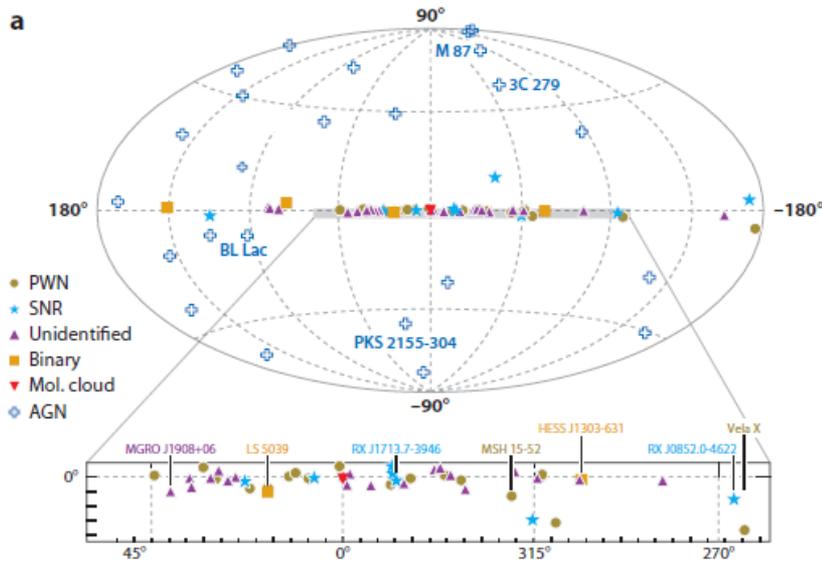
Ablenkung von Strahlung



Particle.astro.kun.nl/hs/0607

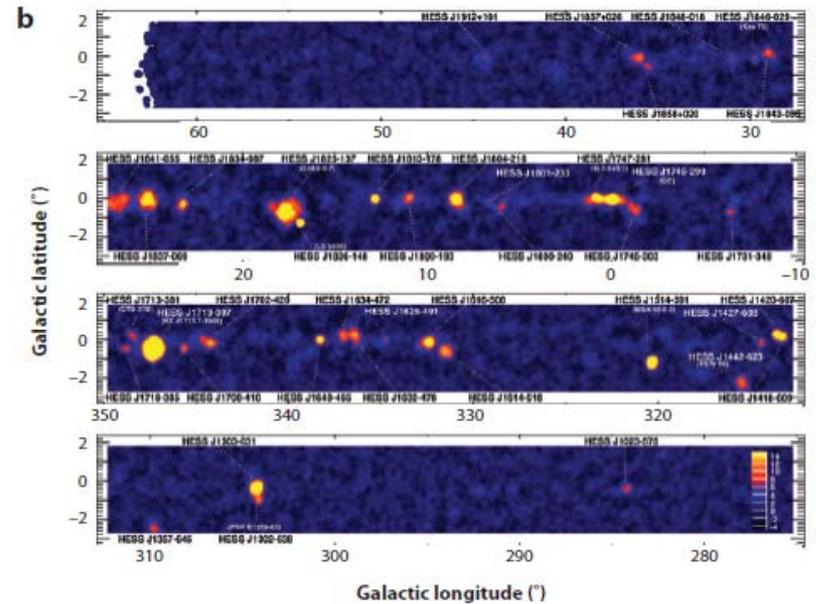
- Magnetfelder im Weltall (10^{-10} T) lenken geladene Teilchen ab
- Photonen werden nicht abgelenkt → deuten direkt auf die Quelle
- Zusätzlich sinnvoll Neutrinos zu beobachten

Katalog der Gammaquellen



Katalog der VHE Gammaquellen

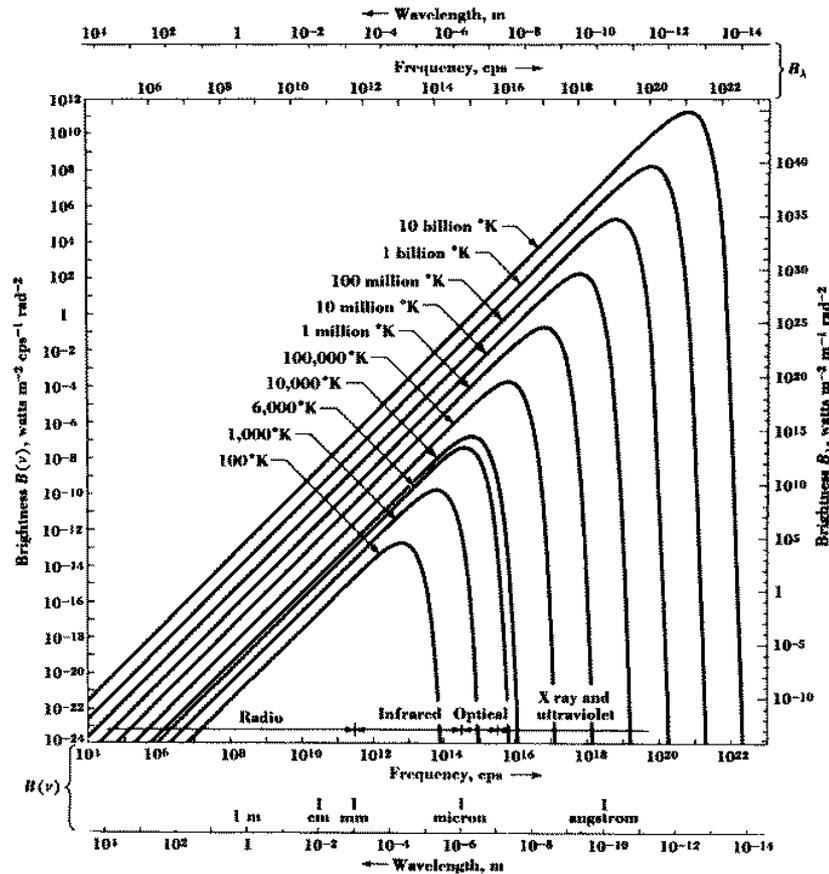
Hinton et al.



Milchstraße gesehen von HESS

Hoppe et al.

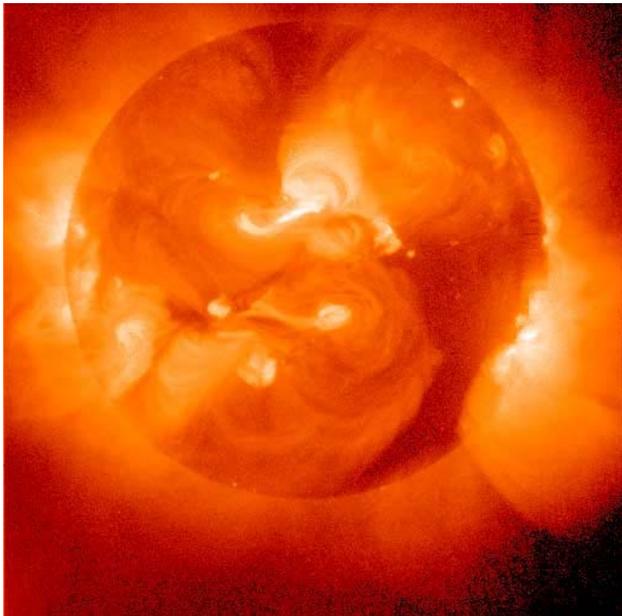
Schwarzkörperstrahlung



- Abstrahlung EM-Strahlung im Thermischen Gleichgewicht
- Wiensches Verschiebungsgesetz

$$\lambda_{\max} = \frac{b}{T}$$
- Für Röntgenstrahlung einige Millionen Kelvin

Sonne als Thermischer Strahler

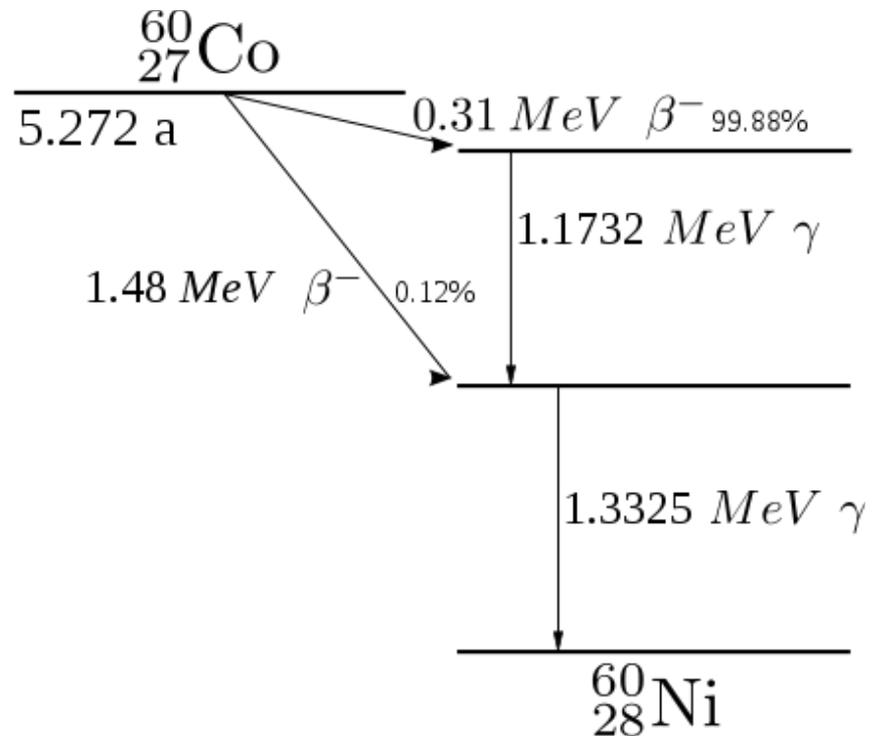


- Oberflächentemperatur von 6000K → sichtbares Licht
- Koronatemperatur von einigen Millionen Kelvin → Röntgenstrahlung
- TeV Strahlung nicht möglich

<http://www.etsu.edu/physics/bsmith/chandra/chandra.html>

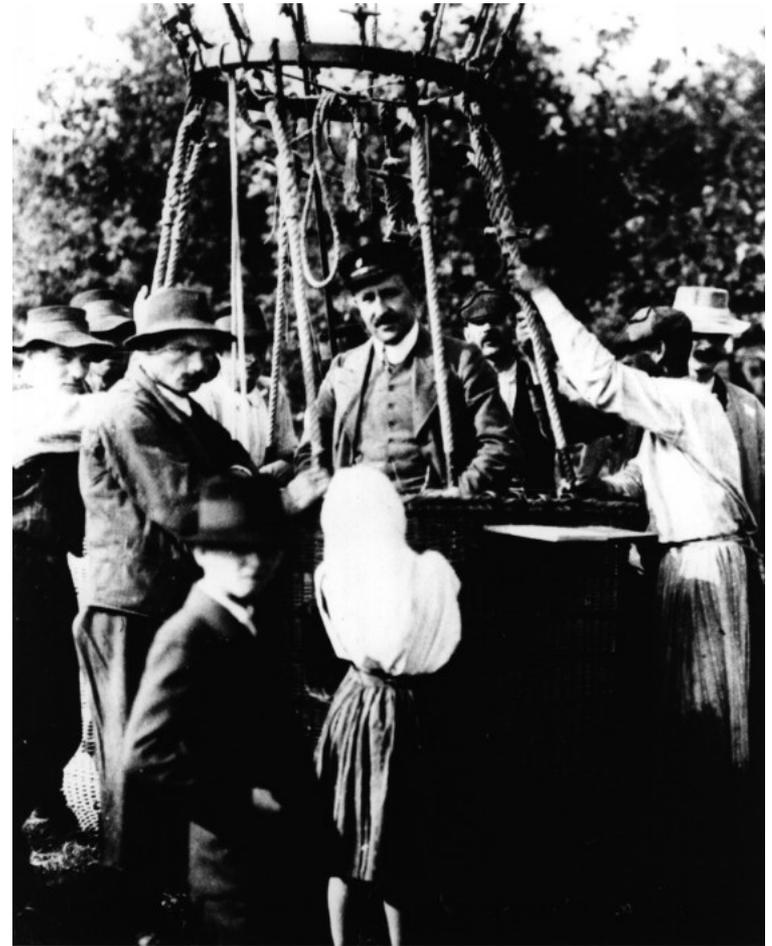
Radioaktivität

- Zerfall von instabilen schweren Kernen kann Gammastrahlung aussenden
- Häufig Cobalt-60
- Vor allem in Supernovaexplosionen
- Abklingkurven



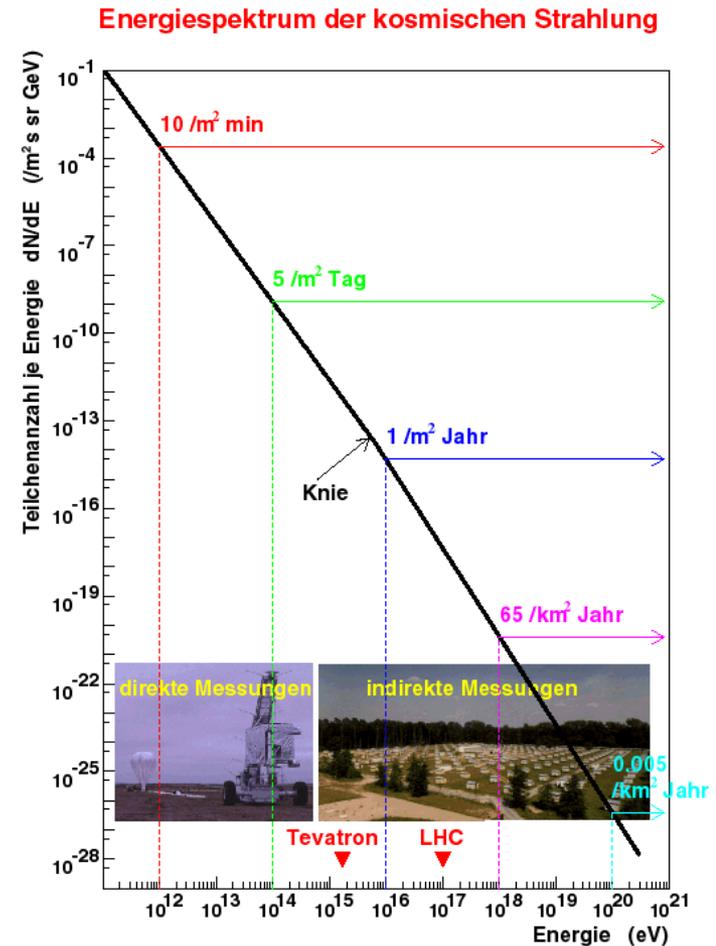
Woher kommt nun die Röntgen- und Gammastrahlung?

- Da Radioaktivität und Schwarzkörperstrahlung nicht relevant sind für TeV-Strahlung muss es andere Effekte geben
- Lösung: Abstrahlung von Gammaquanten durch beschleunigte geladene Teilchen
→ Kosmische Strahlung
- Entdeckt von Viktor Hess (1912)

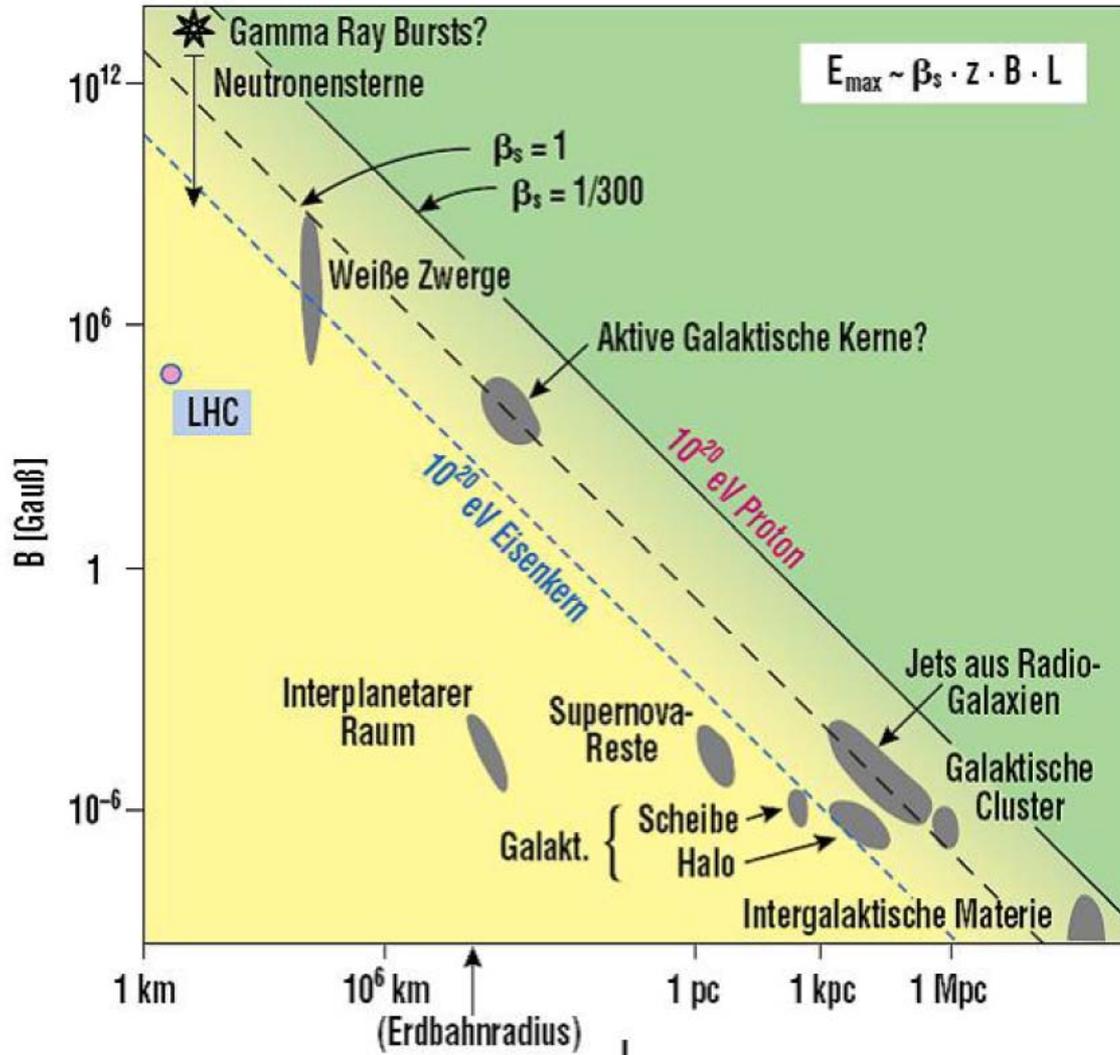


Kosmische Strahlung

- Zusammensetzung
 - EM-Strahlung
 - Neutrinos
 - Klassische kosm. Strahlung
 - 98% ion. Kerne
 - 87% Protonen
 - 12% Helium
 - 1% $Z > 3$
 - 2% Elektronen



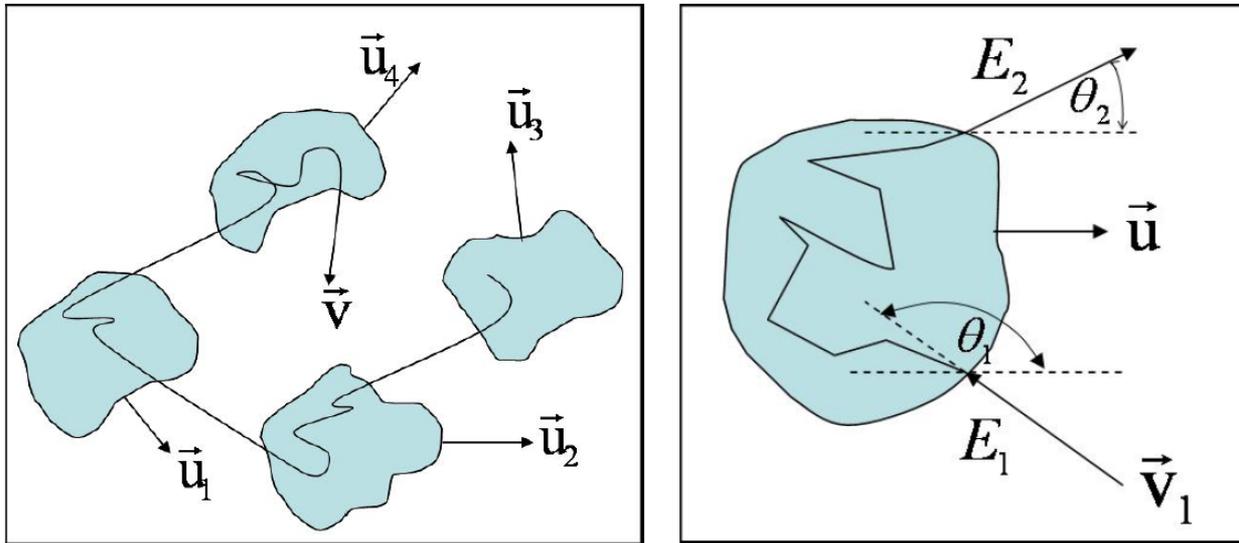
Hillas-Diagramm



Beschleunigungsmechanismen

- Notwendigkeit der Beschleunigung von Hadronen und Leptonen auf hohe Energien
 - Kosmisches Strahlungsspektrum soll mit Energiespektrum der Photonen korrelieren
- Fermimechanismus 1. und 2. Ordnung

Fermimechanismus 2. Ordnung



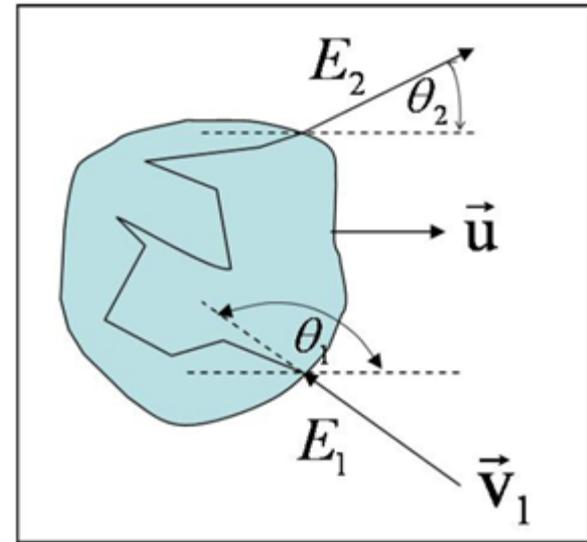
www.zeuthen-desy.de

Teilchen mit Geschwindigkeit v_1 wird an isotrop verteilten magnetisierten Plasmawolken mit Geschwindigkeiten u_i gestreut.

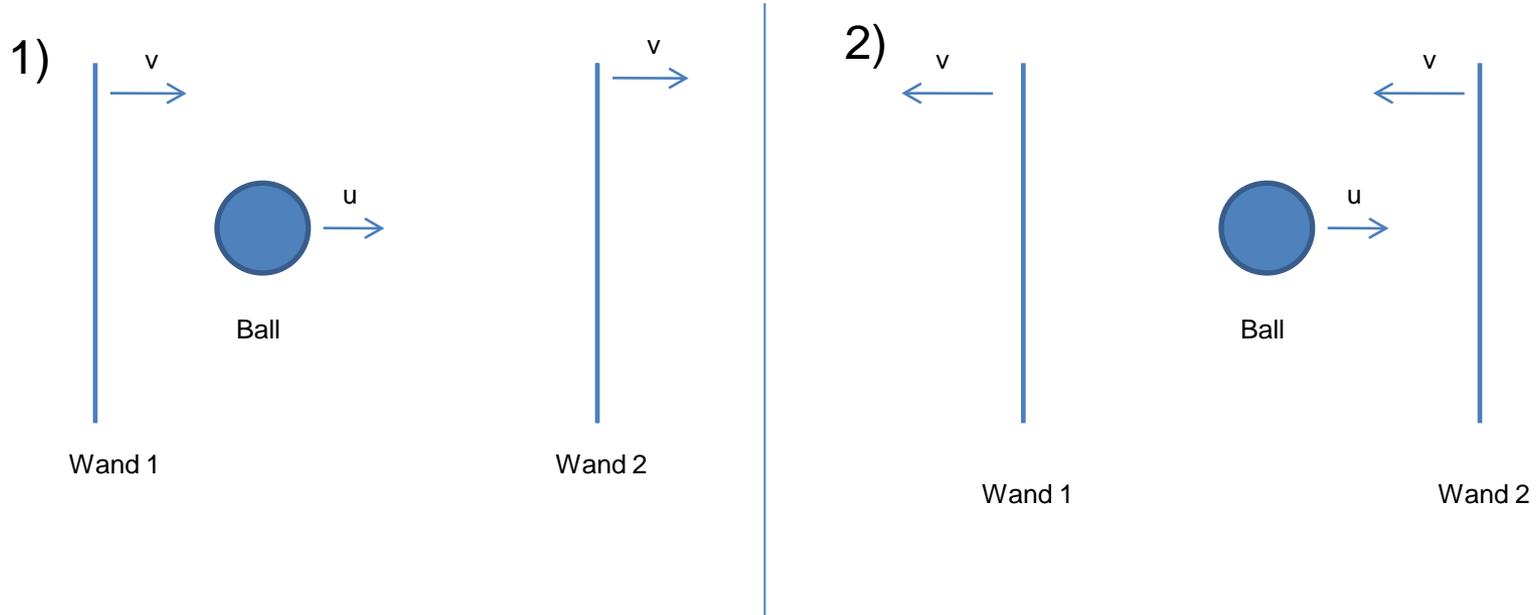
Fermimechanismus 2. Ordnung

- Streuung im Wolkensystem isotrop
- Lorentztrafo in dieses System $E'_1 = \gamma E_1 (1 - \beta \cos \Theta_1)$
- Streuung in Wolke sei elastisch $E'_1 = E'_2$
- Austrittsenergie im Laborsystem durch Rücktransformation

$$E_2 = \gamma^2 E_1 (1 + \beta \cos \Theta_2)(1 - \beta \cos \Theta_1)$$



Überlegungen zu Fermi 2. Ordnung



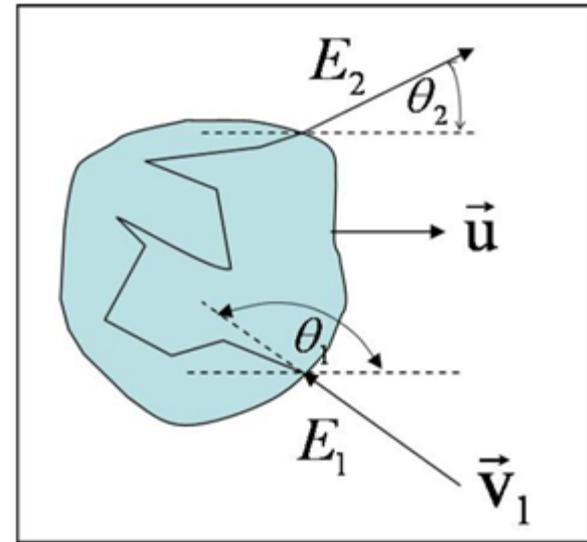
Stoßwahrscheinlichkeit in Situation 2 etwas größer als in Situation 1

→ Stochastischer Prozess

Fermimechanismus 2. Ordnung

- Wegen Isotropie der Streuung $\langle \cos \Theta_2 \rangle = 0$
- Θ_1 -Mittelung komplizierter da Stoßwahrscheinlichkeit von der Relativgeschwindigkeit abhängt $\frac{dN}{dt d \cos \Theta_1} \propto v_{rel} = u - v \cos \Theta_1$
- Mittelung über $\cos \Theta_1$

$$\langle \cos \Theta_1 \rangle = -\frac{\beta}{3}$$



Fermimechanismus 2. Ordnung

- Für die Energie danach findet man

$$\langle E_2 \rangle = E_1 \left(1 + \frac{4}{3} \beta^2 + O(\beta^4) \right)$$

- Teilchen nach k Stößen $E_k = E_0 \left(1 + \frac{4}{3} \beta \right)^k$

- Für das Energiespektrum findet man durch Umformung

$$\frac{dN}{dE} = \frac{dN}{dE} (E_0) \left(\frac{E}{E_0} \right)^\alpha$$

- Entspricht einem Potenzgesetz wie man es erwartet

Probleme mit Fermi 2. Ordnung

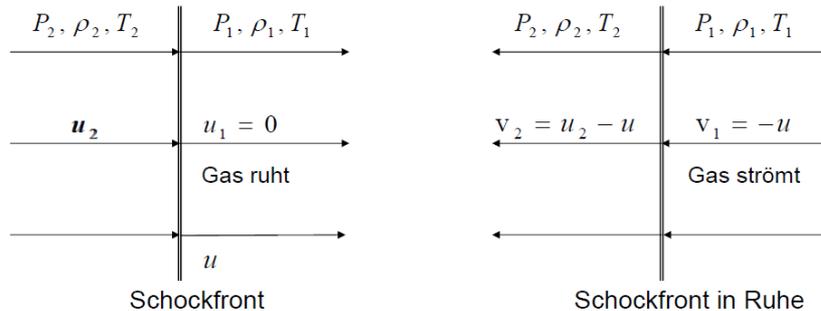
- Energiezuwachs sehr klein $u/c < 10^{-4}$
- Mittlere freie Weglänge für eine Kollision mit Plasmawolken $O(1\text{pc})$
→ Etwa 1 Kollision pro Jahr
- Energieverlust ähnlich groß wie Gewinn
→ Suche nach linearem Prozess

Anforderungen an effektiveren Mechanismus

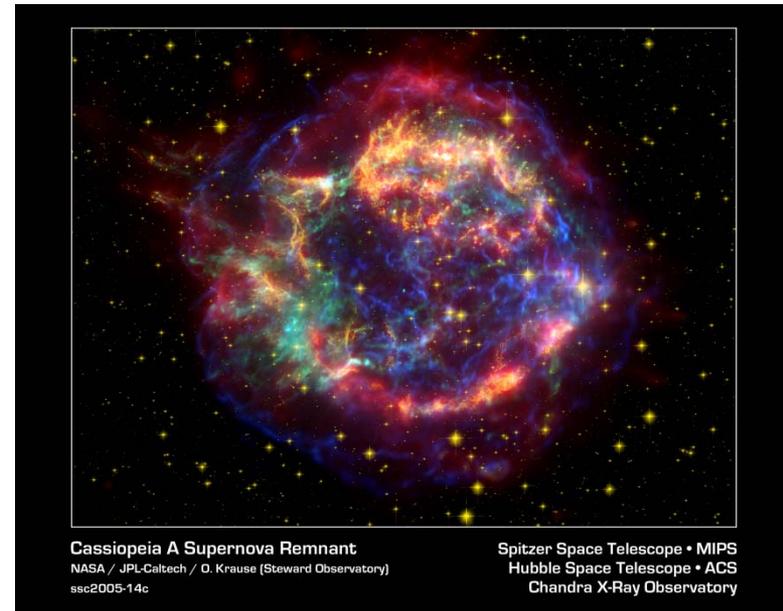
- Um den Energiegewinn zu erhöhen:
 - größere Häufigkeit der Wechselwirkung
 - größerer Energiegewinn pro Reaktion
(frontaler Zusammenstoß am effektivsten)
- In den 70er Jahren wurde erkannt, dass Überschallschockfronten in magnetischem Plasma solche Bedingungen liefern
→ Fermibeschleunigung 1. Ordnung

Schockwellen

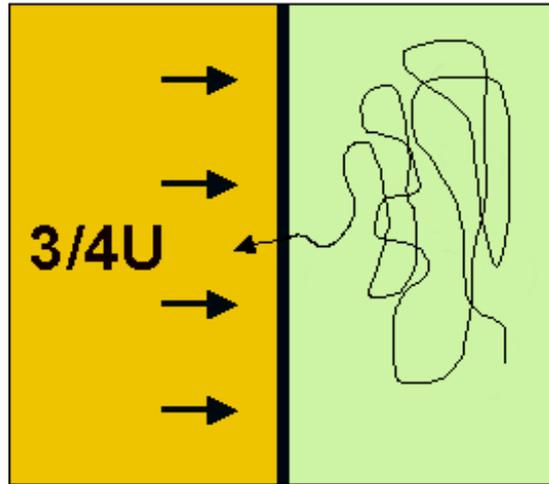
- Supernovaexplosionen bilden Schockwellen
- Man kann zeigen, dass Geschwindigkeit hinter der Schockfront: $u = \frac{3}{4} u_{Schock}$



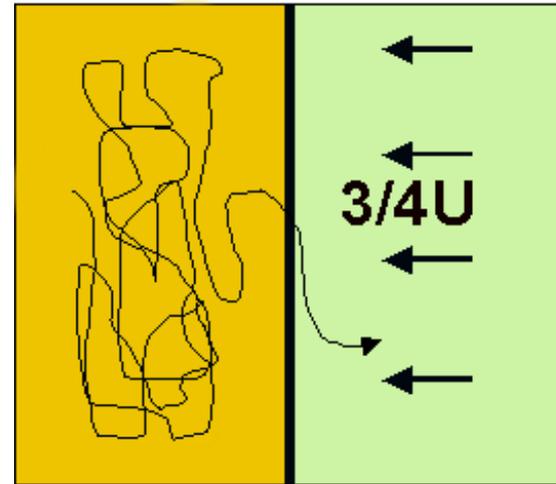
www.zeuthen-desy.de



Fermibeschleunigung 1. Ordnung



Beobachter sieht geschockte Welle
mit $\frac{3}{4}U$ auf sich zukommen



Beobachter sieht ungeschockte Materie
mit $\frac{3}{4}U$ auf sich zukommen

Vor und hinter der Schockwelle liegt
Symmetrie vor.

Fermibeschleunigung 1. Ordnung

- Anfang genauso wie Fermi 2. Ordnung

$$E_2 = \gamma^2 E_1 (1 + \beta \cos \Theta_2)(1 - \beta \cos \Theta_1)$$

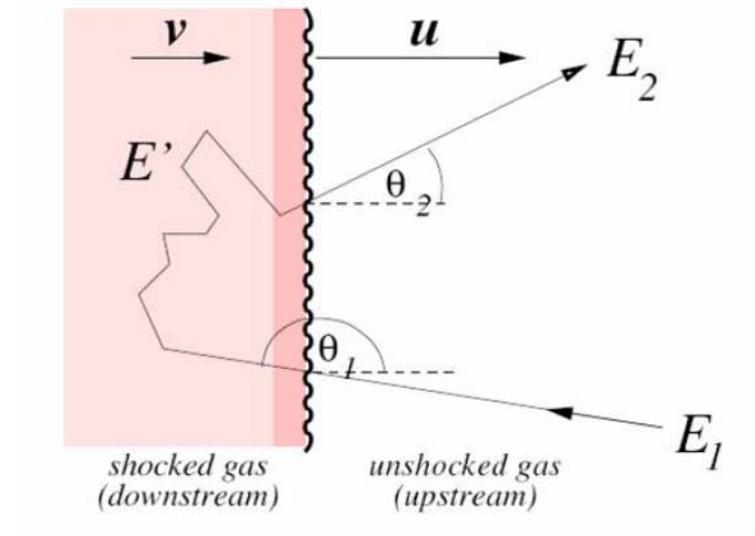
- Da Schockwelle eine Vorzugsrichtung hat, ergibt sich eine andere Mittelung

$$\langle \cos \Theta_1 \rangle = -1/2$$

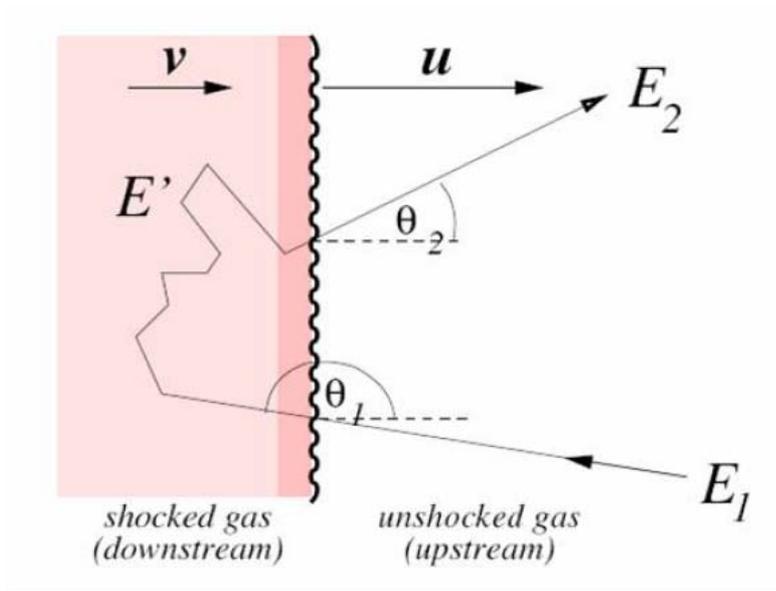
$$\langle \cos \Theta_2 \rangle = 1/2$$

- Energie nach Stoß

$$E_2 = E_1 (1 + \beta + O(\beta^2))$$



Fermibeschleunigung 1. Ordnung



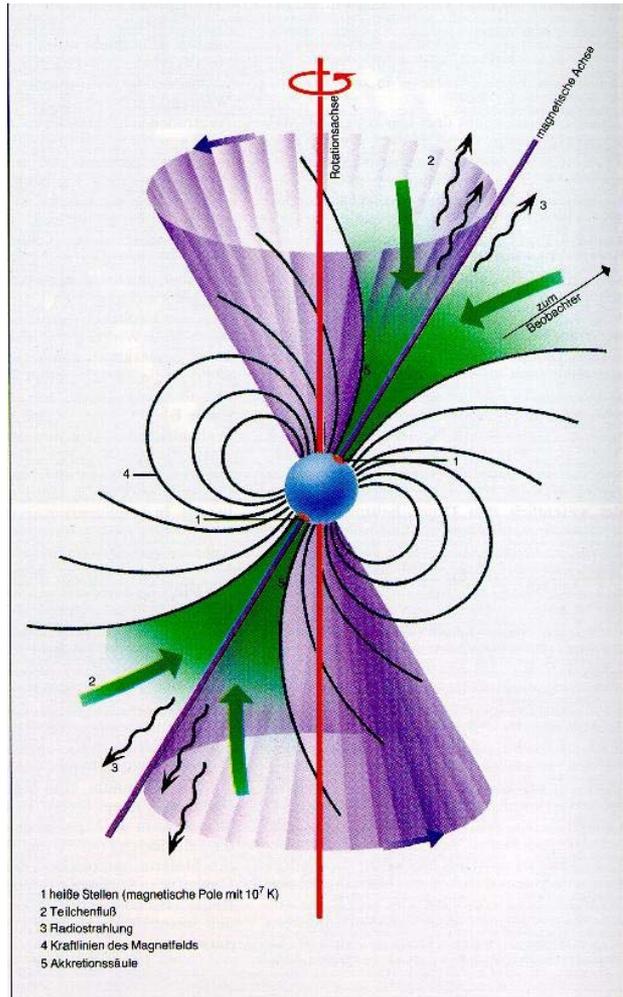
www.zeuthen-desy.de

- Spektrum stimmt mit experimentellen Daten überein

$$\frac{dN}{dE} = \frac{dN}{dE}(E_0) \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\alpha=-2,1}$$

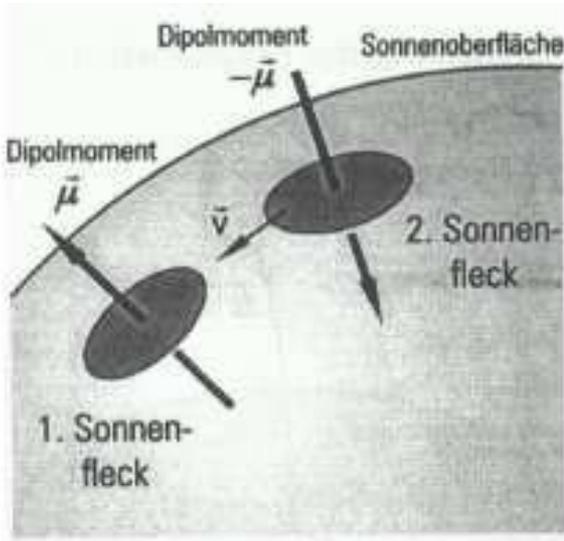
- Universelles Potenzgesetz
- Entspricht dem gemessenen Potenzgesetz
- Gemessen $\alpha=-2,7$ durch Energieverluste
- Effizient da linear in β

Pulsare



- Komplizierte Objekte
- Verschiedene Theorien
 - ~~Goldreich-Julian-Modell~~
 - Polar-cap
 - Outer-gab
- Starkes $B(t)$
- Starke E-felder $O(10^{12} \text{ V/m})$
 - Beschleunigung ($eE > \text{Gravitation}$)
 - Teilchenstrahlen
- Für junge Pulsare $< 20000a$

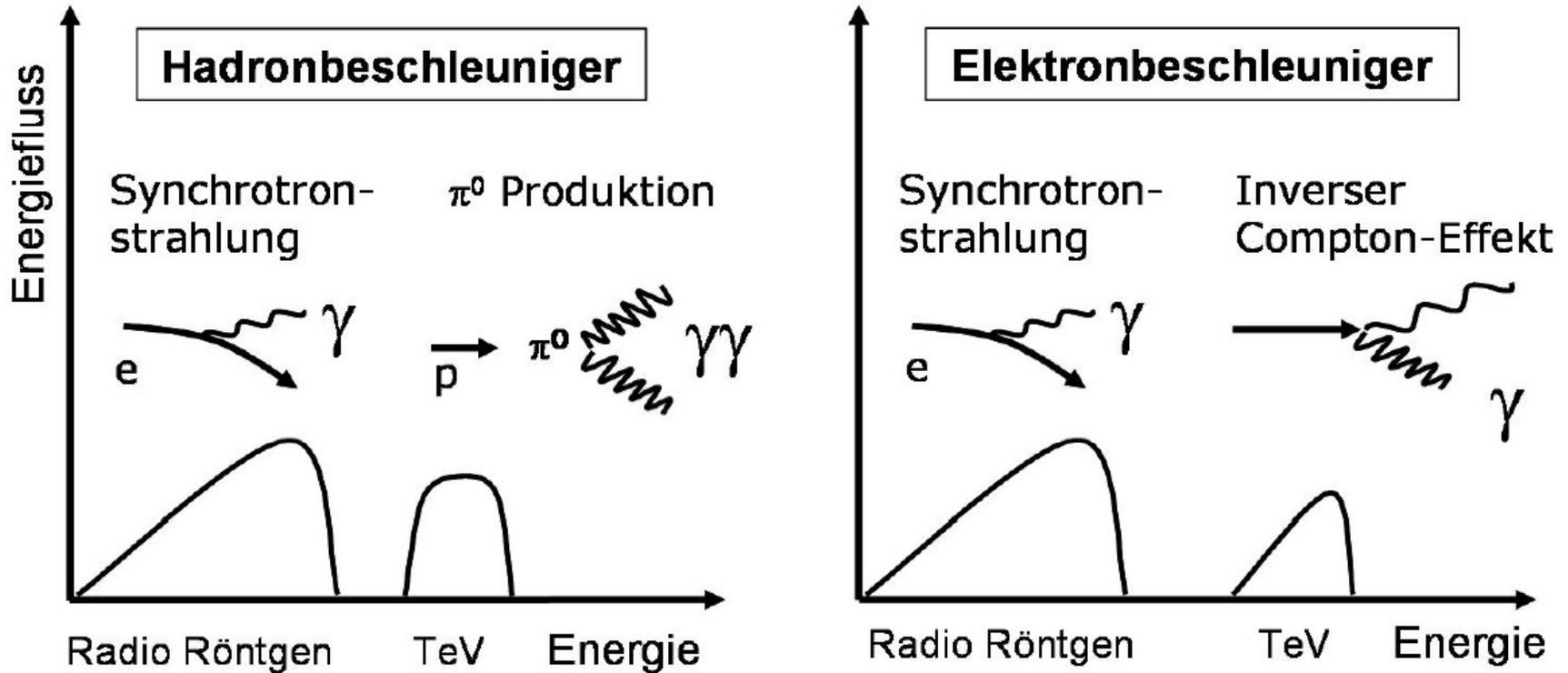
Sonnenflecken (magnetic reconnection)



www.astroteilchenphysik.de

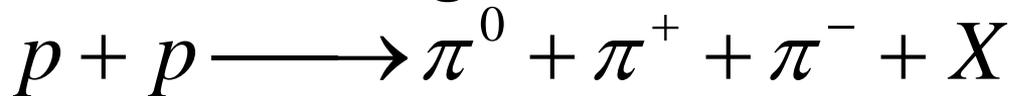
- Sonnenflecken unterschiedlicher magnetischer Polarität ziehen sich an \rightarrow E-feld
- Beschleunigung geladener Teilchen

Röntgen- und Gammastrahlung



Hadronische Beschleuniger

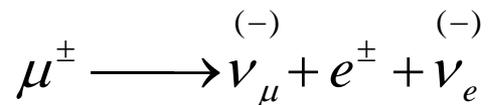
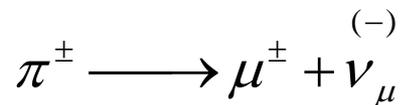
- Hochenergetische Protonen können eine pp-, yp-Reaktion eingehen



- Ungeladenes Pion erzeugt Gammaquanten



- Geladene Pionen



- Sinnvoll Beobachtung von Neutrinos und Gammastrahlung

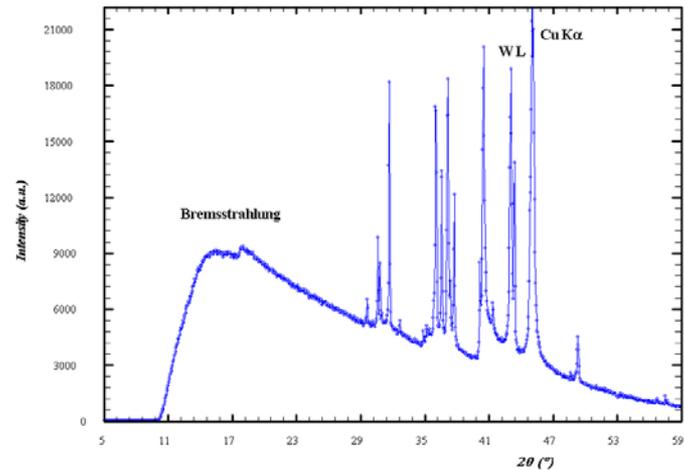
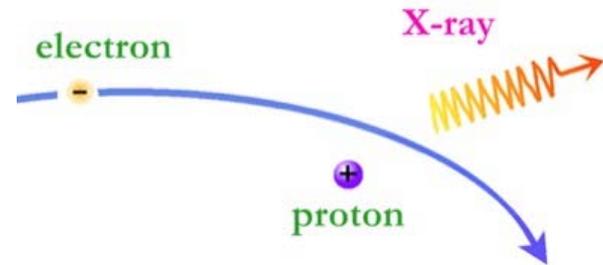
Bremsstrahlung

- Streuung von Elektronen im Coulombfeld von Kernen

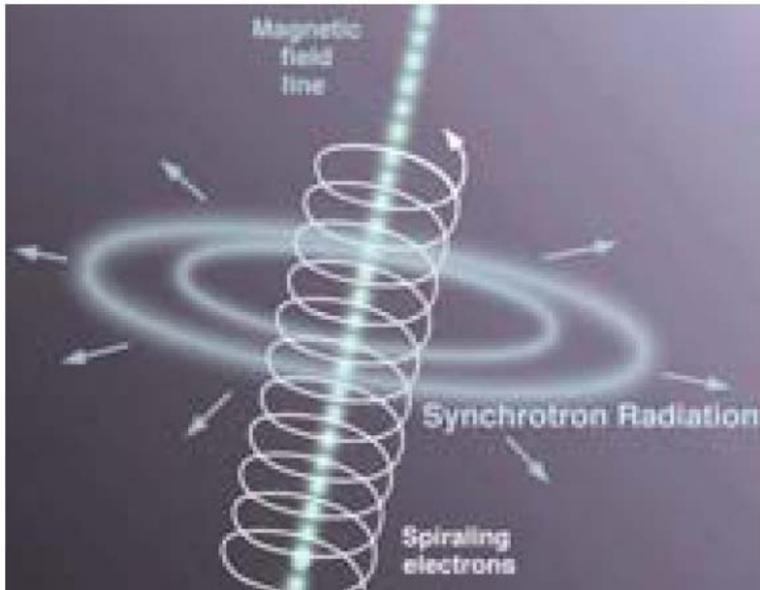
$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle = \frac{E}{\tau_{rad}}$$

$$\tau_{rad} = \frac{1}{n_p cm^3} 10^{15} s \text{ Kühlzeit}$$

- Rückschlüsse auf Protonendichte



Synchrotronstrahlung



www.zeuthen-desy.de

- Elektron im B-Feld durch Lorentzkraft bestimmt

$$\frac{d\vec{p}}{dt} = z \frac{e}{m} (\vec{p} \times \vec{B})$$

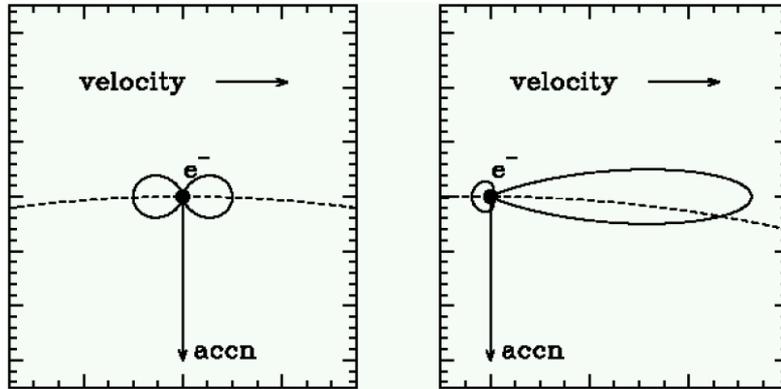
- Helixbahn mit Gyroradius

$$r_B = \frac{p}{zeB}$$

- Abstrahlung infolge der Beschleunigung

$$a = \ddot{d}$$

Synchrotronstrahlung



www.desy-zeuthen.de

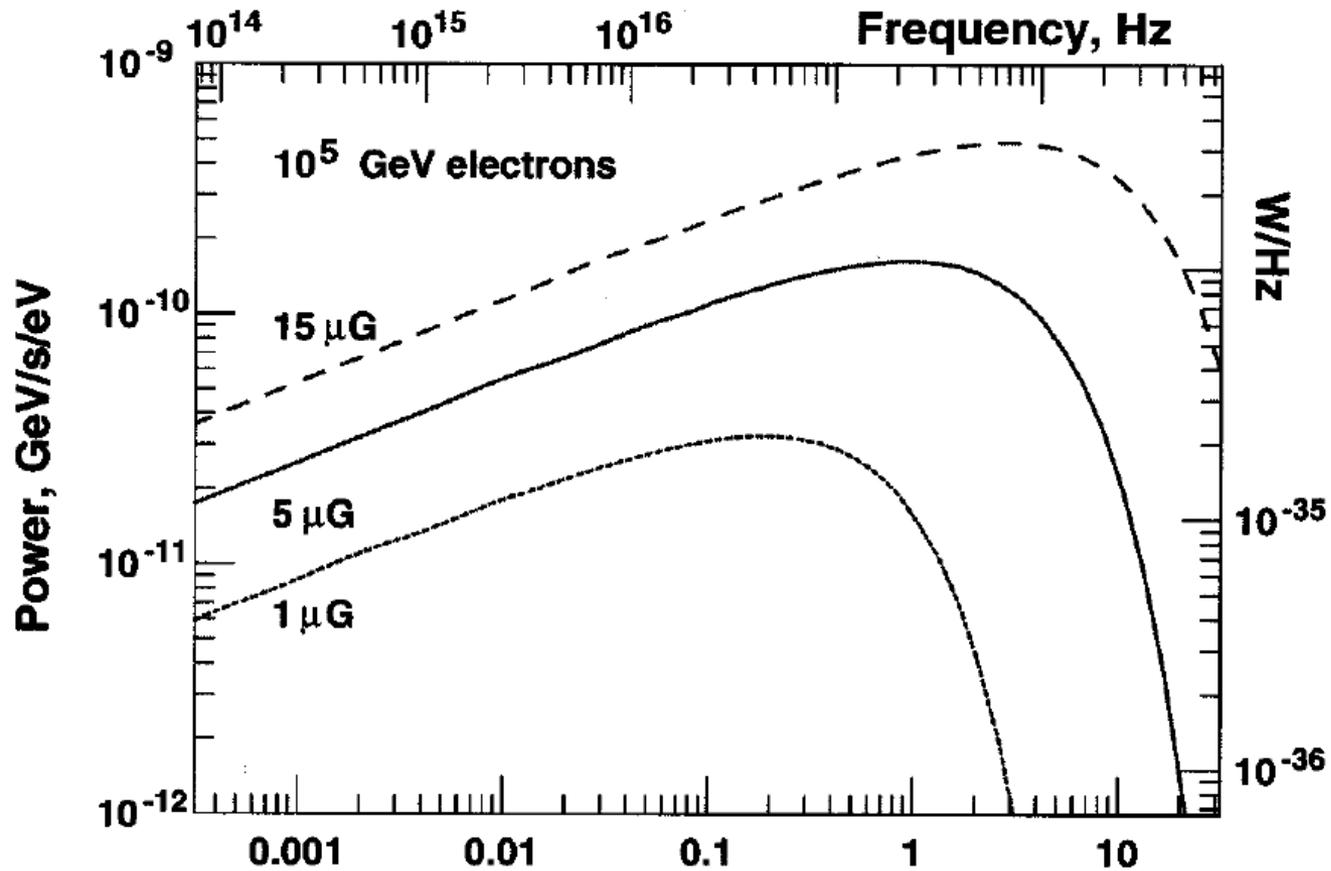
- Im Elektronensystem Abstrahlung wie Dipol
- Lorentz-Boost in Flugrichtung
- Öffnungswinkel

$$\tan \vartheta = \frac{m_0 c^2}{E} = \frac{1}{\gamma}$$

→ Kollimiert mit der Elektronengeschwindigkeit

$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle_{syn} = \frac{4\sigma_T c B^2}{6\mu} \beta^2 \gamma^2 = \frac{4}{3} \sigma_T c u_{mag} \beta^2 \gamma^2$$

Synchrotronstrahlung

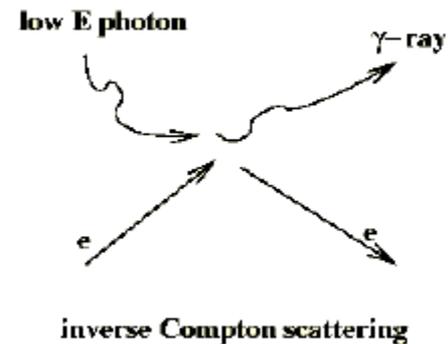
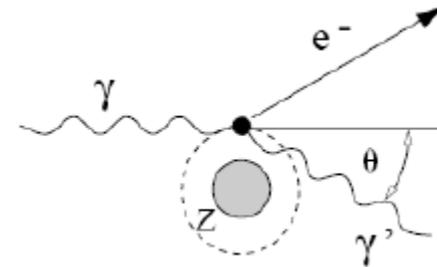


Inverser Comptoneffekt

- Streuung hochenergetischer Elektronen an niedrigenergetischen Photonen
- Strahlung bis in den TeV-Bereich möglich

$$E_{\gamma\text{max}} \approx 4\gamma^2 E_{\gamma}$$

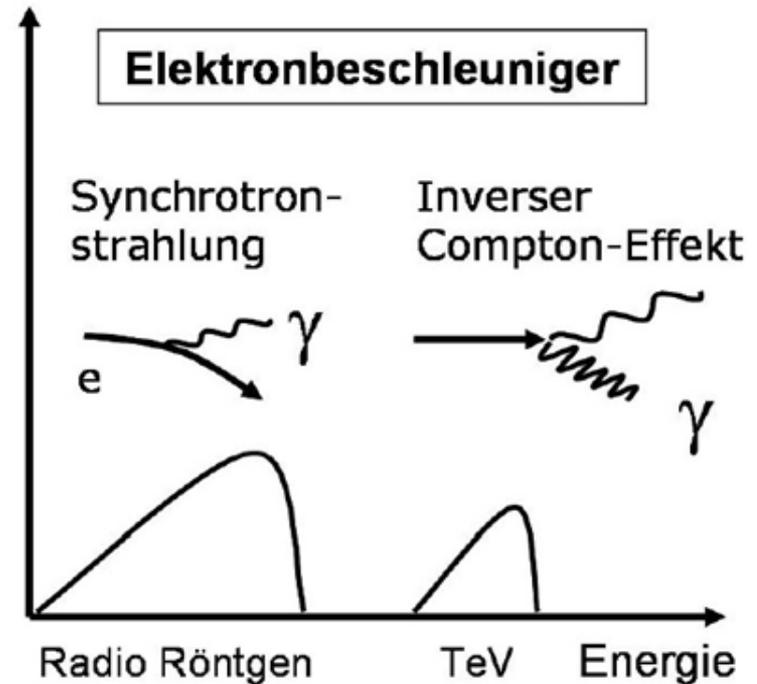
$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle_{IC} = \frac{4}{3} \sigma_T c u_{rad} \beta^2 \gamma^2$$



Kolanosky

Spektrenvergleich

- Rückschluss auf IC wenn man Synchrotronstrahlung als bekannt annimmt
 - Entweder CMB oder B-Feld als bekannt annehmen
- Zweites Spektrum liegt fest



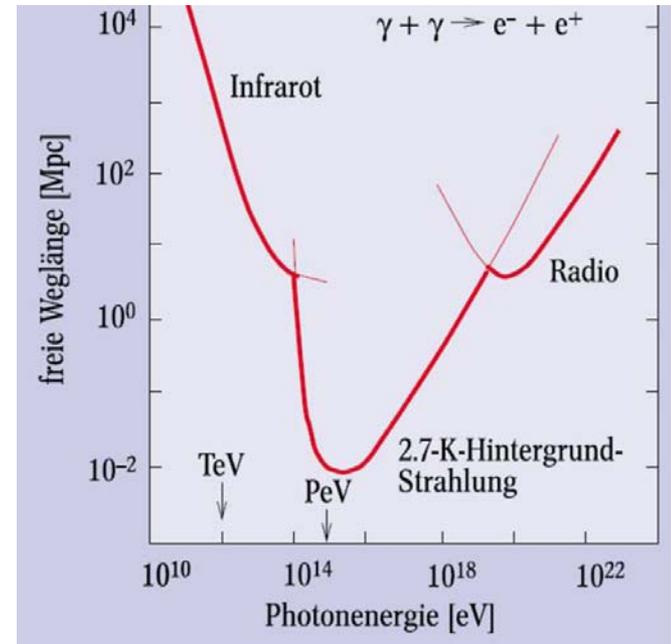
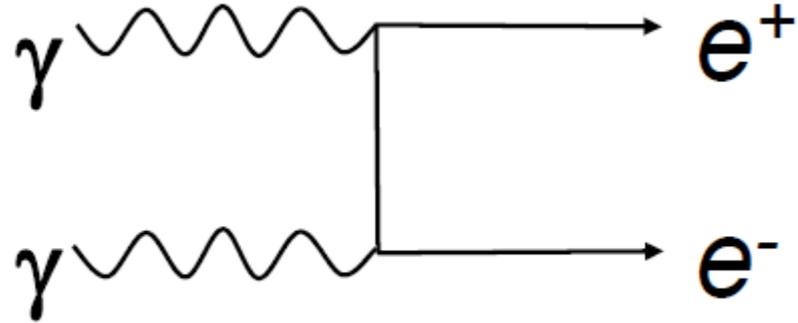
$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle_{IC} = \frac{4}{3} \sigma_T c u_{rad} \beta^2 \gamma^2$$

$$\left\langle \frac{dE}{dt} \right\rangle_{syn} = \frac{4}{3} \sigma_T c u_{mag} \beta^2 \gamma^2$$

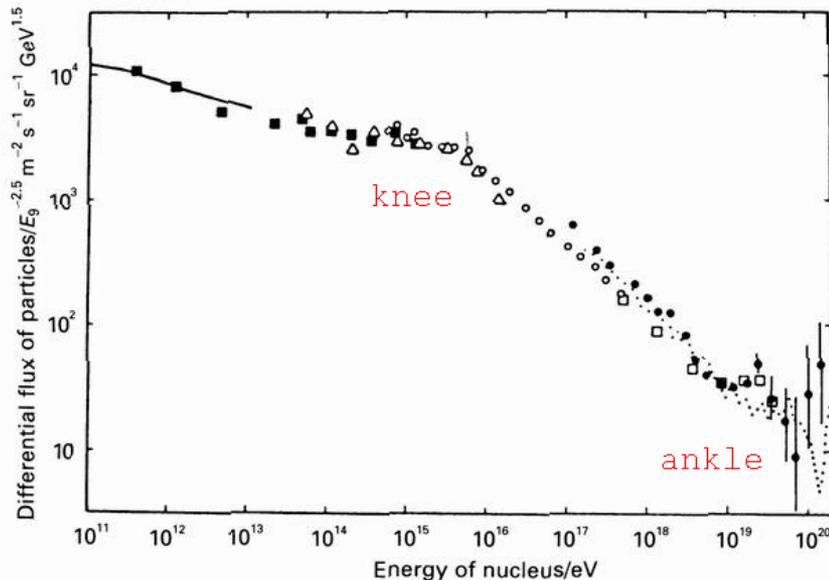
Energieverluste der Photonen

- Compton-Effekt
- Paarbildung für $s > (2m_e c^2)^2$
- Radius der Galaxis
10 kPc

→ spielt intergalaktisch
keine Rolle



Energiespektrum der Teilchen

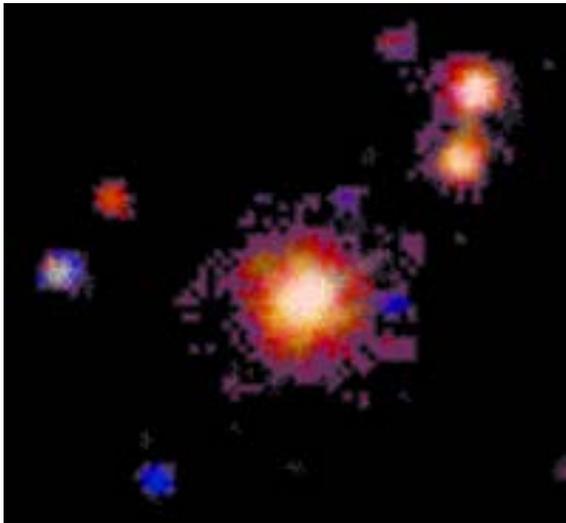


Malcolm S. Longair: High Energy Astrophysics

- Knie: Teilchen mit $E > 10^{15}$ eV können Milchstraße verlassen
- Knie Entspricht in etwa Energie bei einer SN
- Knöchel: Extragalaktische Teilchen

Sterne

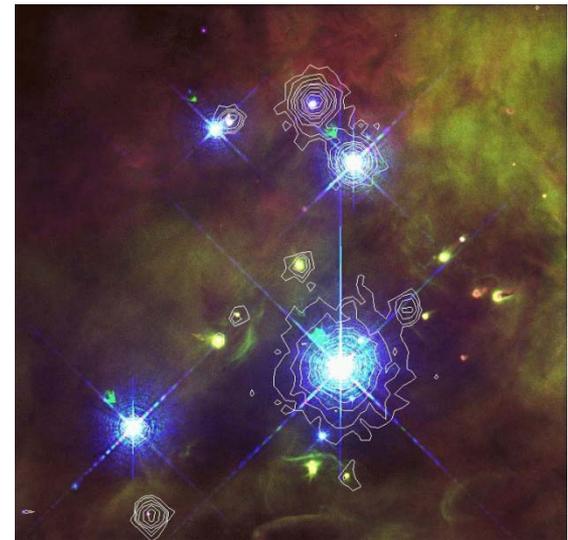
- „Röntgenstrahlung durch magnetic reconnection“
- Röntgenstrahlung durch Schwarzkörperstrahlung



Orion Trapez X-ray (Chandra)

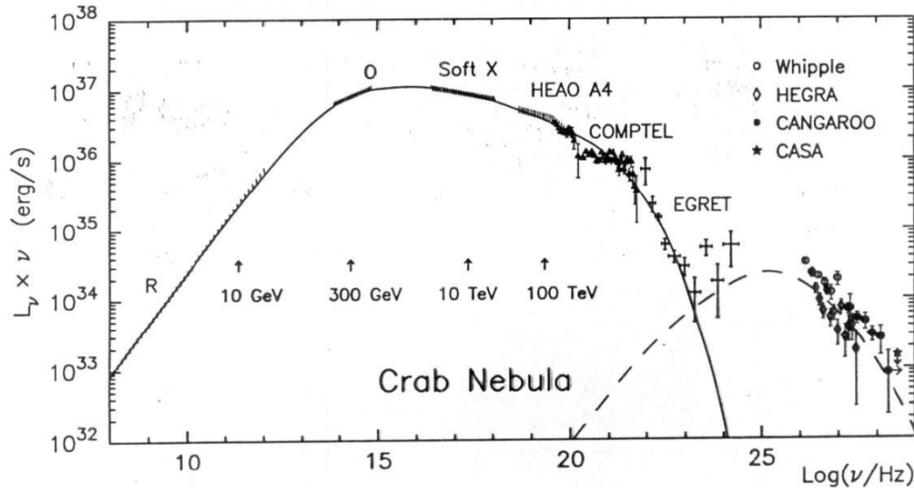


Orion Trapez Optisch (ESA)

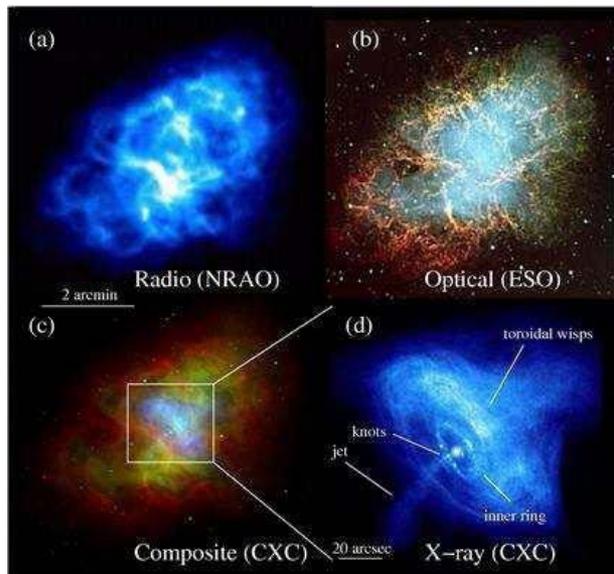


Orion Trapez X-ray + Optisch (Chandra)

Pulsarwindnebel

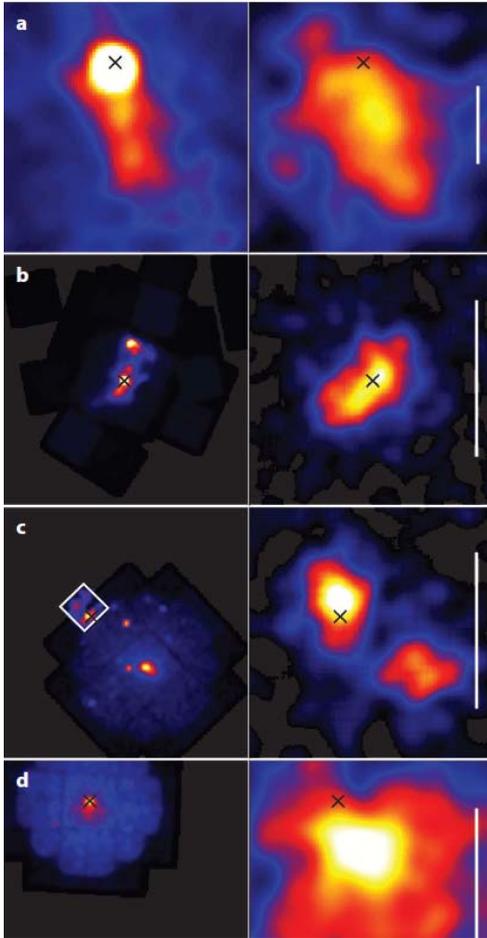


- An den Polen treten hochenergetische Teilchen aus
→ Pulsarwind
- Verlust von Rotationsenergie
- Für junge Pulsare < 20000 Jahre
- $dE/dt > 4 \cdot 10^{36} \text{ erg s}^{-1}$
- IC und Synchrotronstrahlung



TeV-Quellen meist PWN

PWN in Röntgen und Gamma



a) Vela X

b) MSH 15-52

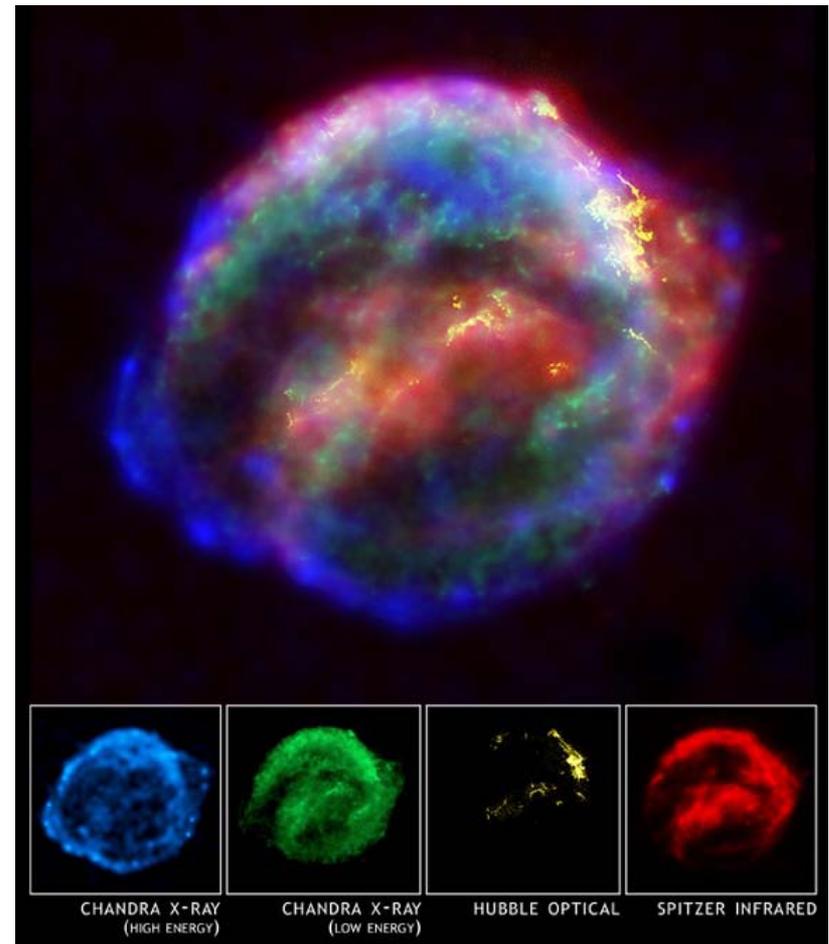
c) K3 und Rabbit PWN

d) J1825-137

X = Pulsar

Supernovaüberreste: SNR

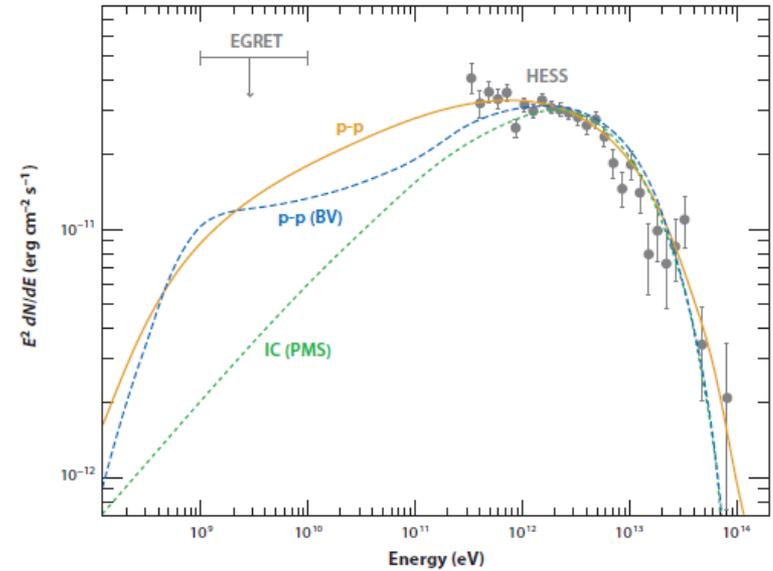
- Schockwellenbeschleunigung
- Wechselwirkung durch IC
- Synchrotronstrahlung



Keppler SNR: Chandra

Spektrum RXJ1713.7-3946

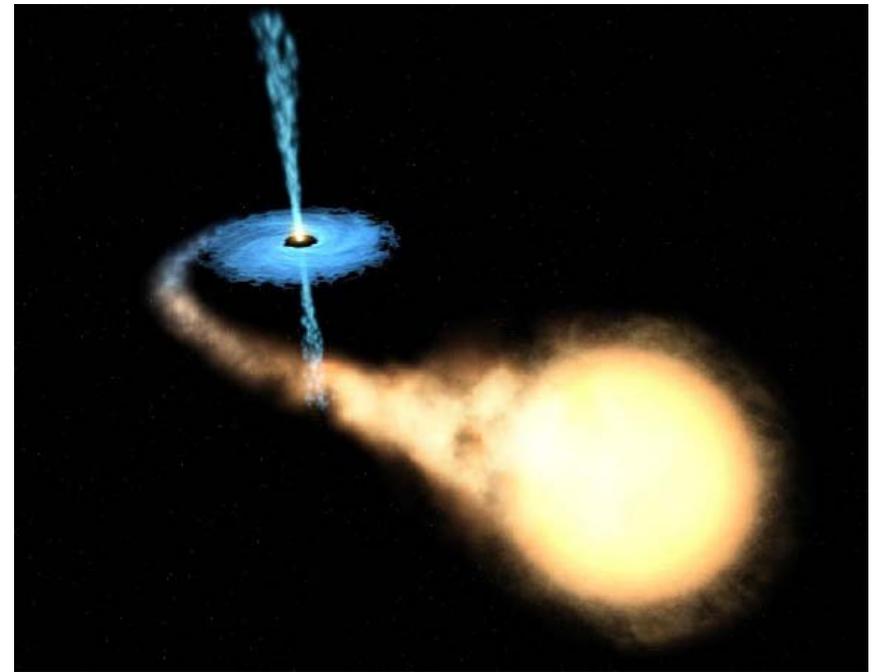
- Messdaten von Hess
- IC und pp-Prozesse
- Beste Näherung pp mit exponentiellem cutoff



Hinton et al.

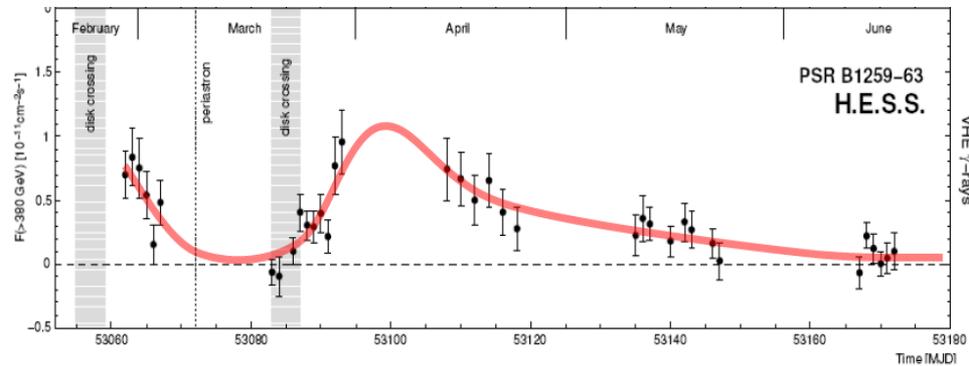
Doppelsternsysteme

- 2 einander umkreisende Sterne
- Kleiner Abstand ($<$ Roche-Grenze)
- Massereicher Stern akkretiert Materie vom Begleiter
- Scheibe um massereichen Stern
- Ausbildung von Jets
→ Schockwellenbeschleunigung



Wikipedia

Binärsystem: PSR B1259-63

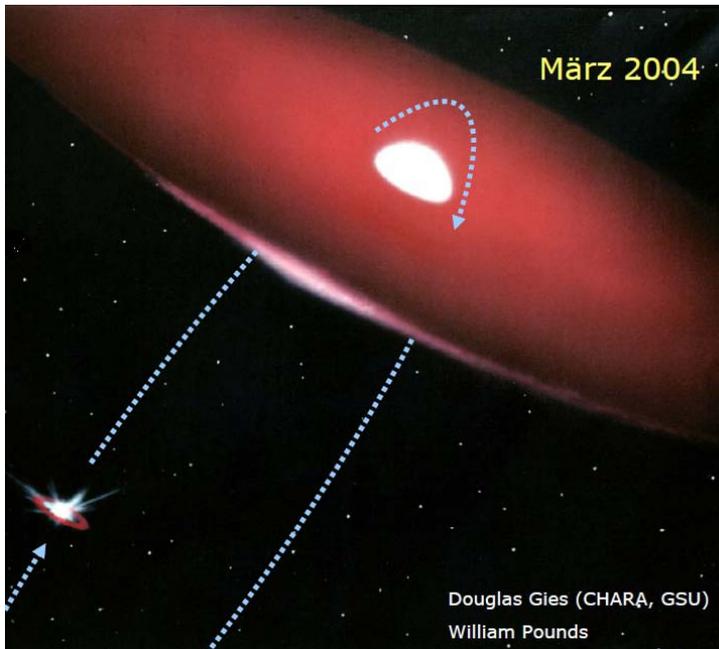


Pulsar + 10 Sonnenmassen-Stern

Stark exzentrische Bahn
Min Abstand 10^{13} cm

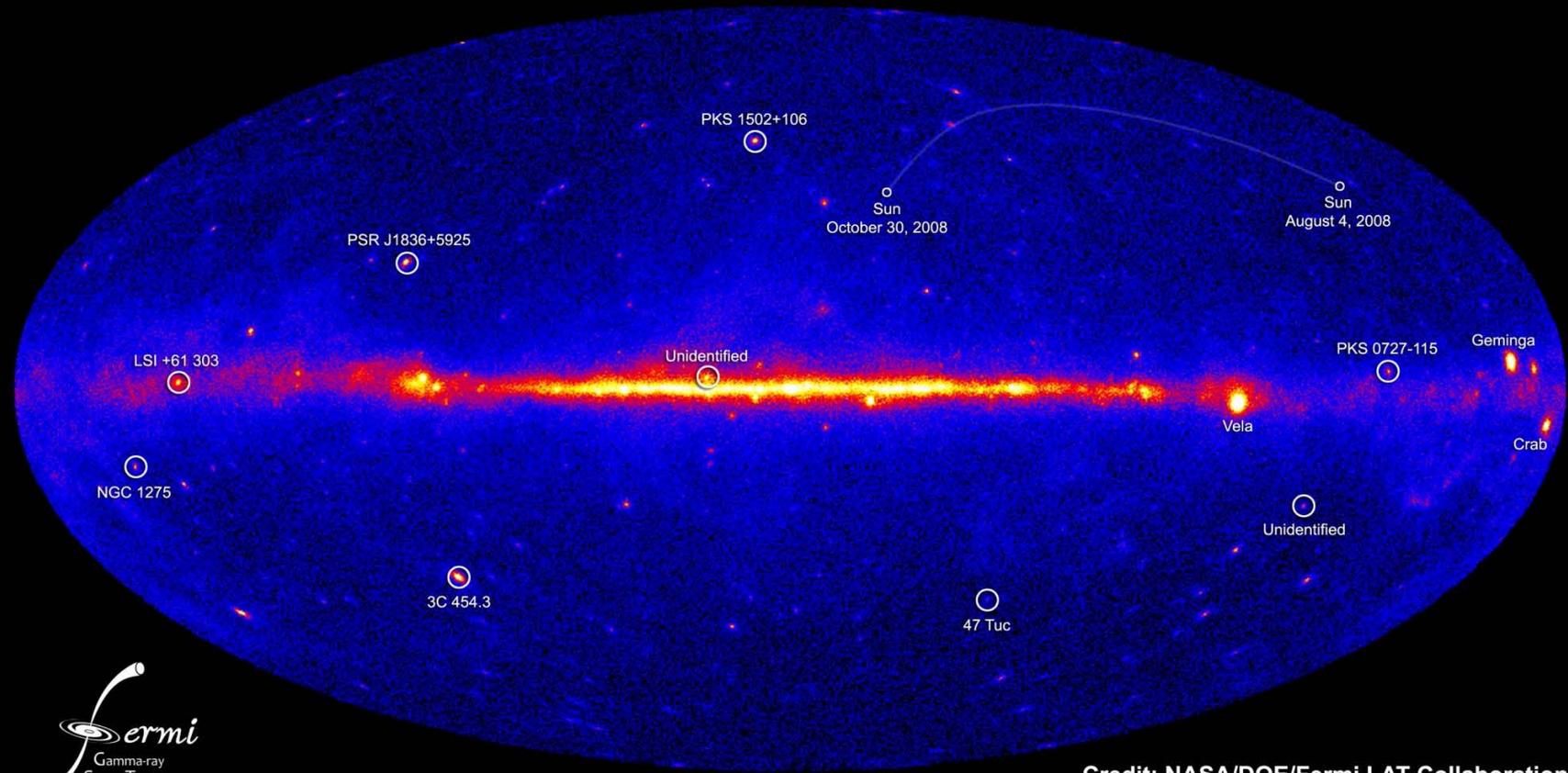
„Inverser Comptoneffekt“

Erste und bisher einzige variable Quelle im TeV-Bereich



Die Galaxis im Gammabereich

NASA's Fermi telescope reveals best-ever view of the gamma-ray sky



Credit: NASA/DOE/Fermi LAT Collaboration

Quellenverzeichnis

- Desy Zeuthen: Skript Astrophysik
- www.astroteilchenphysik.de
- Malcolm S. Longair: High Energy Astrophysics
- Particle.astro.kun.nl/hs/0607
- Hinton et al. 2009: Teravolt Astronomy
- Gaensler und Slane: <http://arxiv.org/abs/astro-ph/0601081>
- Wikipedia
- Chandra.harvard.edu
- Kolanosky: Skript Astroteilchenphysik