

# Hochenergie-Astro-Teilchen- Physik

Vorlesung SS 2006

Hans J. Pirner

## 2. Standard Model der Teilchenphysik

# Gliederung

## **1. Einleitung**

## **2. Standard Modell der Teilchen Physik**

2.1 Teilchen Inhalt

2.2 Symmetrien des Standard Modells

## **3. Wirkungsquerschnitte- Lebensdauern**

3.1 Compton Streuung-Feynman Diagramme

3.2 Compton Wirkungsquerschnitt

3.3 Inverse Compton Streuung

3.4 Wirkungsquerschnitte der starken Wechselwirkung

3.5 WQ der schwachen WW

3.6 Lebensdauern von Teilchen

## **4.0 Das thermische Universum**

4.1 Kosmische Hintergrundstrahlung (Bose Verteilung)

4.2 Fermi Druck in Neutronsternen (Fermi Verteilung)

4.3 Phasenübergang am Beispiel des Higgs Modells

## **5.0 Quellen der hochenergetischen Strahlung und Teilchen im Kosmos**

5.1 Supernovae Explosionen und Reste

5.2 Pulsare

5.3 Schwarze Löcher, aktive galaktische Kerne (AGN)

5.4 Exotische Quellen-Mini Black Holes-Supermassive Teilchen-Superstrings

## **6.0 Beschleunigung von geladenen Teilchen**

6.1 Beschleunigung in zeitabhängigen Magnetfeldern

6.2 Einführung in die Hydrodynamik-Euler Gleichungen  
Schallgeschwindigkeit-Unterschall-Überschallströmung

6.3 Akkretion

6.4 Beschleunigung mit Schockwellen (Fermi I linear in  $u$ )

6.5 Fermi II Beschleunigung (quadratisch in  $u$ )

## **7.0 Strahlung – Produktion von hochenergetischer Gammastrahlung**

7.1 Bremsstrahlung: klassisch und Bethe Heitler Formula

7.2 Synchrotron Strahlung: Energiespektrum der Strahlung

7.3 Astrophysikalische Anwendung :  
Quelle Elektronen mit einem Potenzspektrum

7.4 Synchrotron Selbst Absorption

## **8-0 Neutrinos**

8.1 Hintergrund Neutrinos-Entkopplungstemperatur und jetzige Energie des Neutrinos Hintergrunds

8.2 Neutrinos von Sternen und von der Sonne

8.3 Massen Eigenzustände und Neutrino Mischung

8.4 Ergebnisse für solare und atmosphärische Neutrinos

8.5 Dirac und Majorana Neutrinos- mögliche Erklärung der Massenhierarchie mit dem Seesaw Mechanismus

## **9.0 Transport der kosmischen Strahlung**

9.1 Intergalaktische Materie- Dichteverteilung, Temperaturverteilung, Volumenprozent,

9.2 Magnetfeld und Gyrationenradien von geladenen Teilchen

9.3 Das Modell der Leaky Box, elastische Streuung an Magnetfeldern in Wolken

9.4 Energieverlust/Absorption von Teilchen (Elektronen, Photonen, Protonen)

## **10.0 Kosmologie des Universums**

10.1 Robertson Walker Metrik

10.2 Der Energie Impulstensor – für Materie und Strahlung  
Energieerhaltungsgleichung

10.3 Friedmann Gleichungen

10.4 Geschichte des Universums- Inflation-Strahlungsdominanz  
Nichtrelativistische Materie Dominanz

10.4 Flaches Universum mit beschleunigter Expansion

## **11.0 Dunkle Materie und dunkle Energie im Universum**

11.1 Gründe für dunkle Materie: Kosmologisch, Rotationskurven,  
Gravitationslinsen, Galaxienbildung

11.2 Neutrinos, Axionen, WIMPS

11.3 Genauere Betrachtung des Ausfrierens, MSSM

11.4 Quintessenz

# Aufbau der Materie



Abbildung 1: Aufbau der Materie. Die

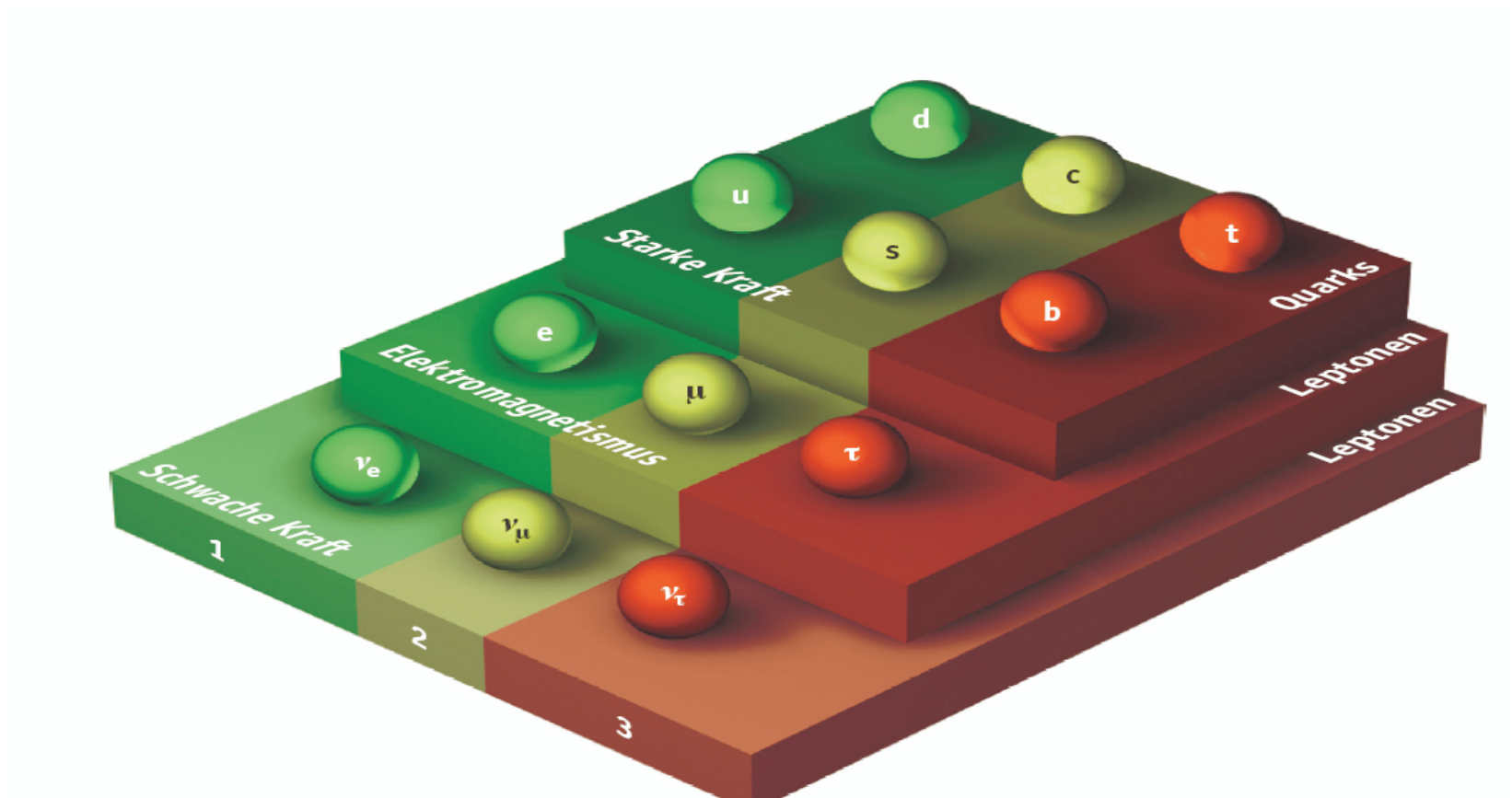
- Um die frühe Zeit des Universums zu verstehen müssen wir das Wissen um die Natur jetzt benutzen.
- Standardmodell  
+Gravitation
- Elementarteilchen sind die Urbausteine und wir verwenden die bekannten Naturgesetze



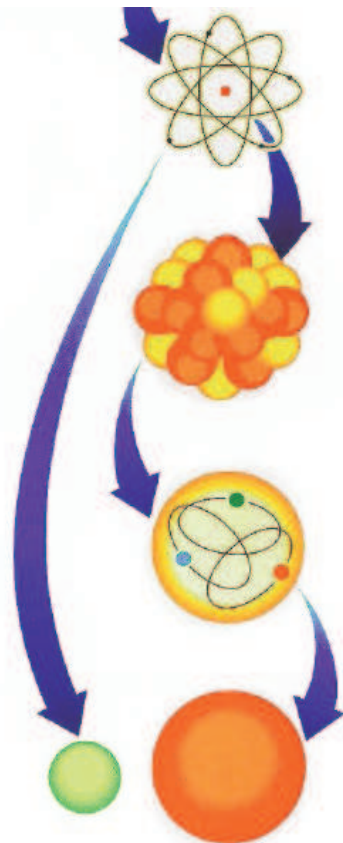
# *Teilchen*

<b>Fermionen</b>	<b>Familie</b>		
	1	2	3
Neutrino	$\nu_e$	$\nu_\mu$	$\nu_\tau$
Elektron, Muon, Tau	$e$	$\mu$	$\tau$
Quarks	u	c	t
	d	s	b

# Teilchen und Kräfte



# Wechselwirkungen im Standardmodell

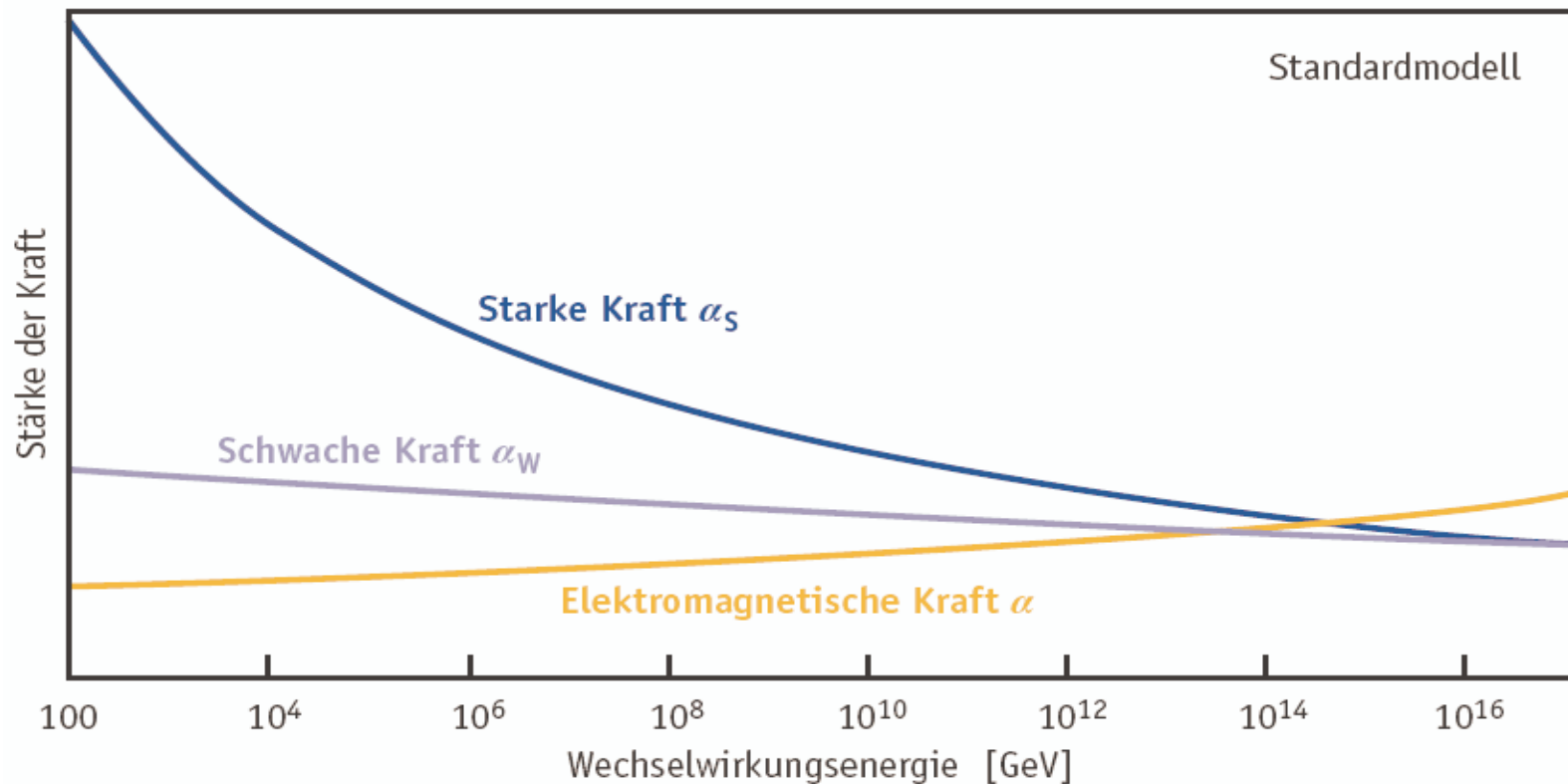


- Elektromagnetische Wechselwirkung im Atom von Photonen vermittelt
- Starke Wechselwirkung der Quarks im Nukleon von Gluonen vermittelt

# *Kräfte*

Wechselwirkung	Koppelt an	Austausch-Teilchen
Stark	Quark	8 Gluonen ( $g$ )
Elektromagnetisch	Elektrische Ladung	Photon ( $\gamma$ )
Schwach	Schwache Ladung	$W^{\pm}, Z^0$

# Wechselwirkungen bei verschiedenen Energien



# Inverse Compton Cross section & Photon Photon Pair Production

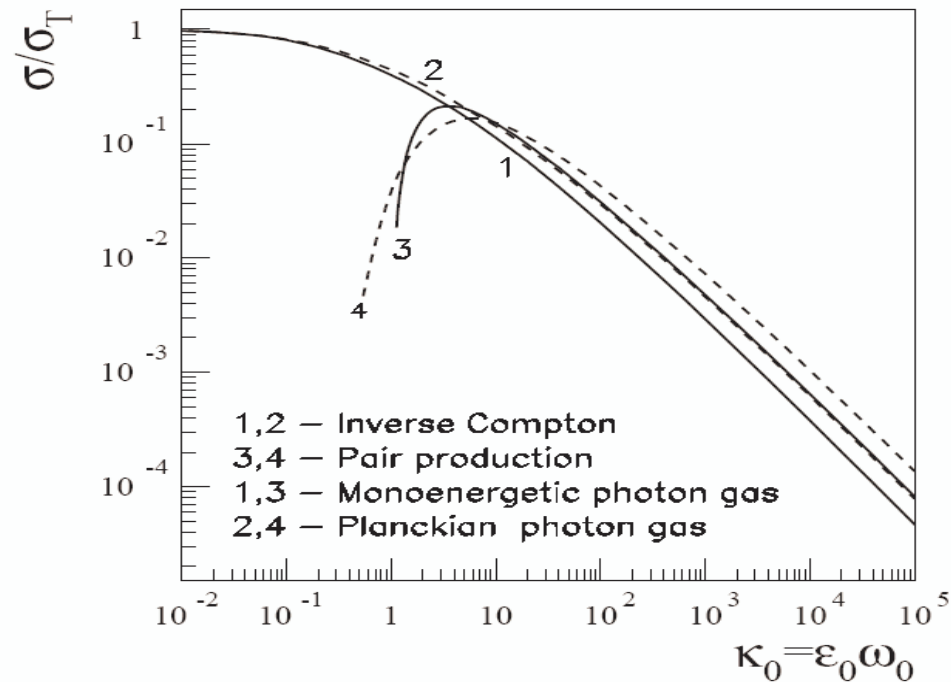


Fig. 3.4 Total cross-sections of the inverse Compton scattering and photon-photon pair production in isotropic radiation fields. Two spectral distributions for the ambient photon gas are assumed: (1) monoenergetic with energy  $\omega_0$  (curves 1 and 3) and Planckian with the same mean photon energy  $\omega_0 \simeq 3kT/m_e c^2$ .

# Pair Production Cross Section

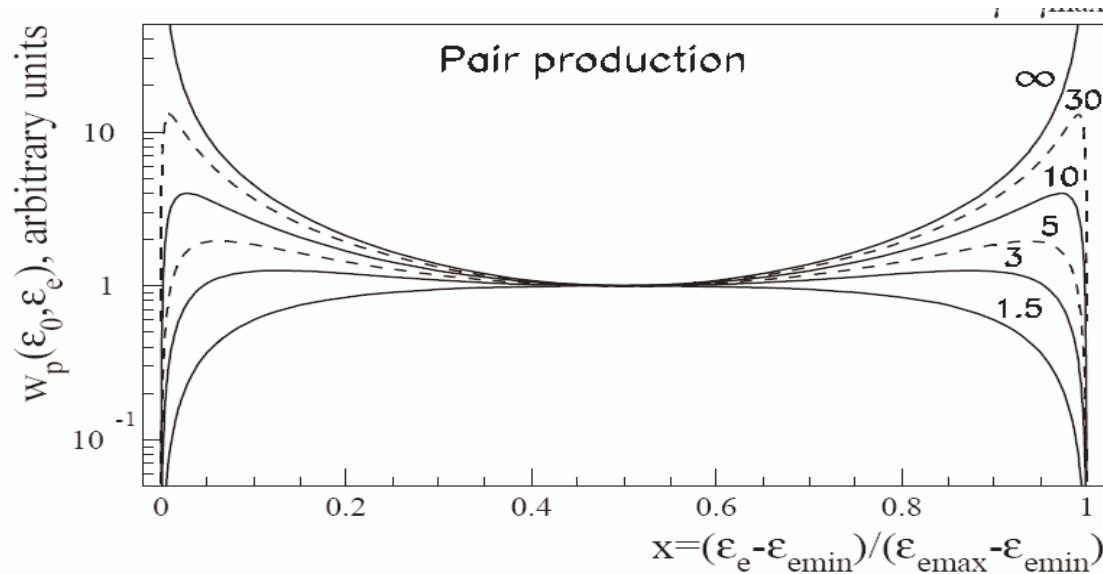


Fig. 3.5 Differential spectra of  $\gamma$ -rays from the inverse Compton scattering (upper panel) and electrons from photon-photon pair production (bottom panel) in the isotropic and mono-energetic photon field. The parameters  $\varepsilon_{\gamma,\max}$ ,  $\varepsilon_{e,\min}$  and  $\varepsilon_{e,\max}$  are defined as  $\varepsilon_{\gamma,\max} = 4\varepsilon_0(\kappa_0/1 + 4\kappa_0)$  and  $\varepsilon_{e,\min,\max} = 0.5\varepsilon_0(1 \mp \sqrt{1 - 1/\kappa_0})$ . The same values of the parameters  $\kappa_0 = \varepsilon_e\omega_0$  and  $s_0 = \varepsilon_\gamma\omega_0$  are indicated at the curves.

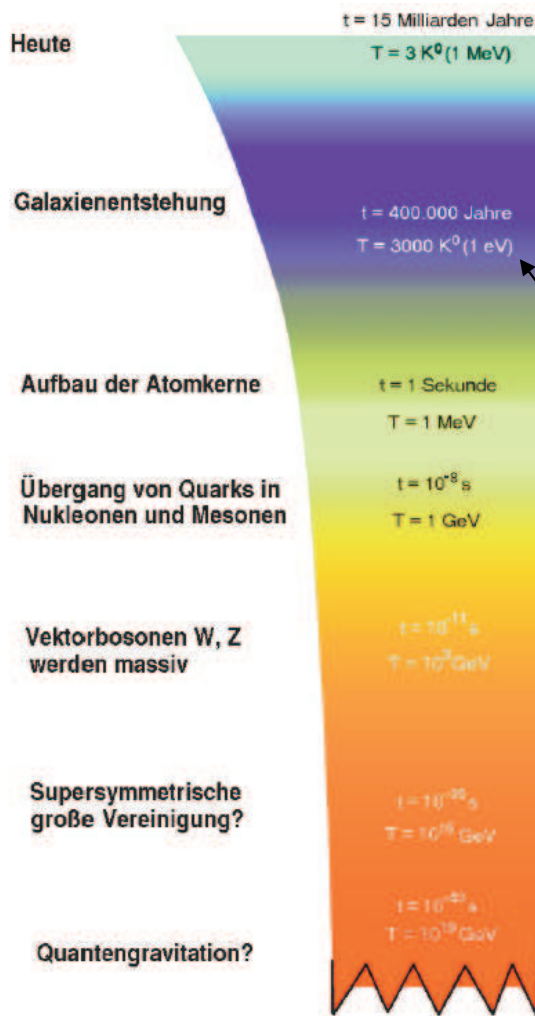


Abbildung 4: Geschichte des Universums mit den Zeiten nach dem Big Bang und den dazugehörigen Temperaturen.

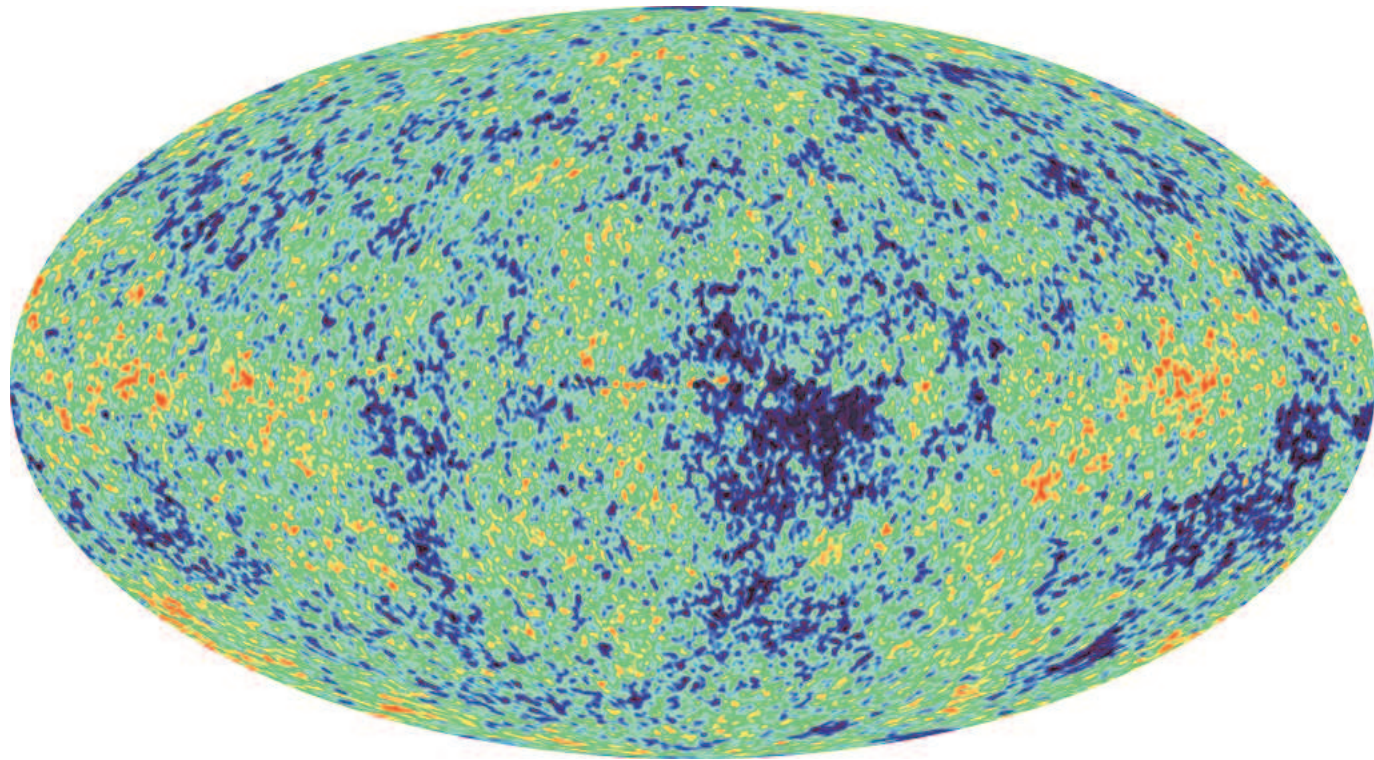
Jetzt-15 Milliarden Jahre  
 1 Milliarde Jahrenach Big Bang  
Galaxienbildung-(kann man  
 mit optischen Teleskopen  
 betrachten)

300 000 Jahre  
 nach dem Big Bang  
Atombildung  
 ( $e+p \rightarrow H + \text{photon}$ ) kann man  
 mit Radioteleskopen  
 betrachten)

3°K Strahlung kommt  
 aus der Zeit als das  
 Universum  $T=3000^\circ\text{K}$  –  
 heiss war



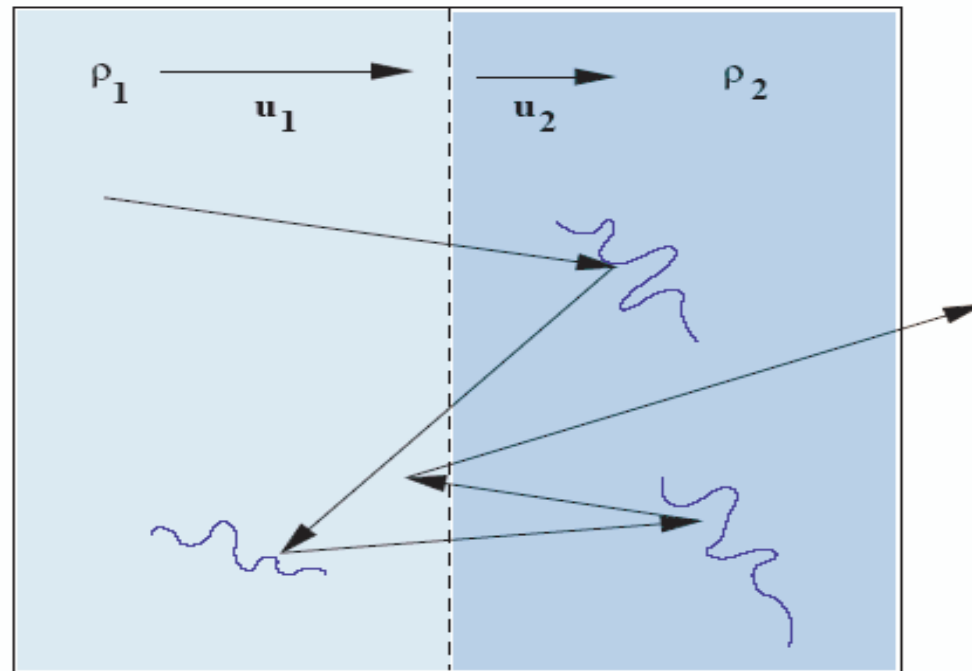
# 3°K Strahlung von Wilkinson Microwave Sateliten



Temperaturschwankungen sind extrem klein –ungefähr  $10^{-6}$

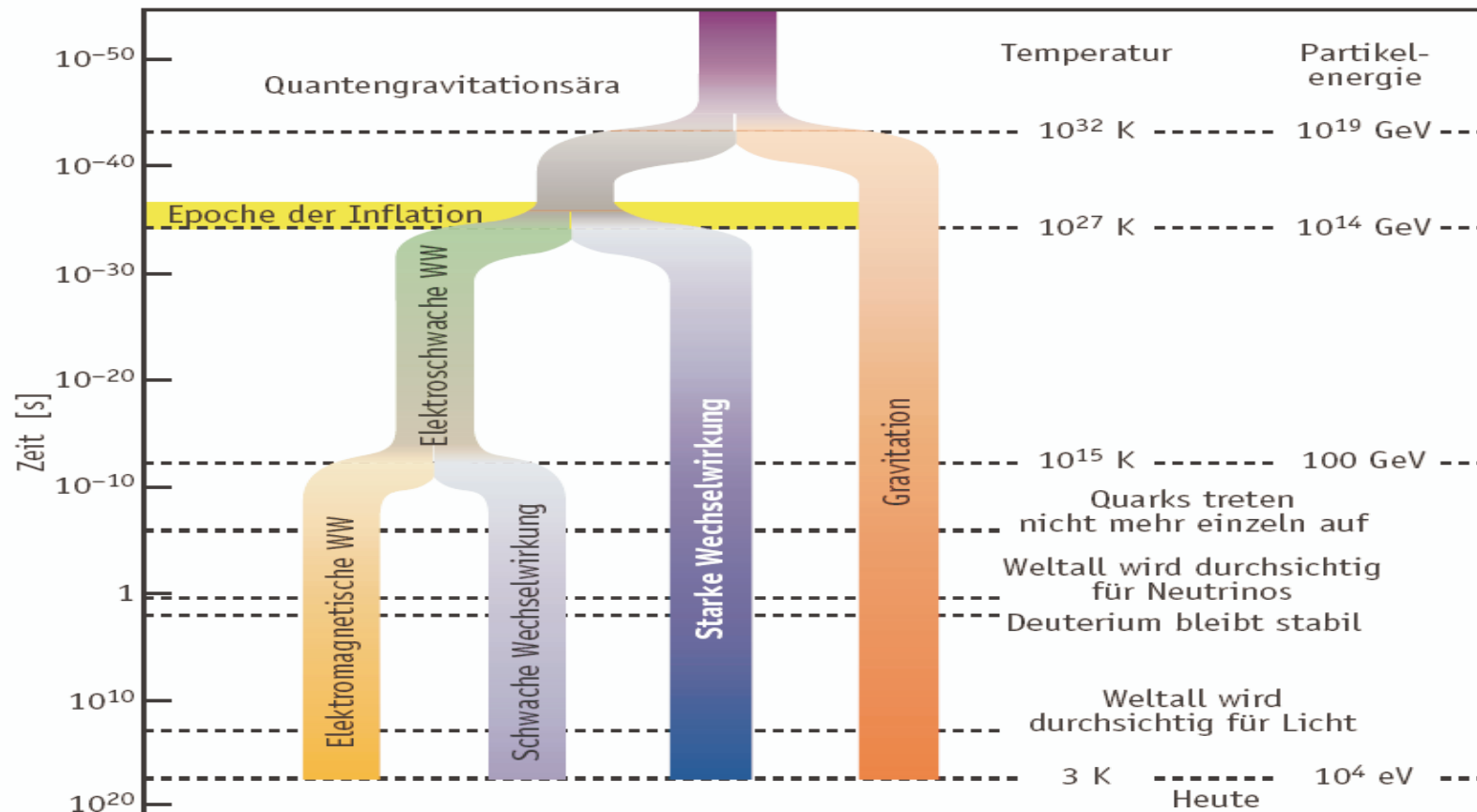
# Schockfront

## Beschleunigung an Stoßwellen



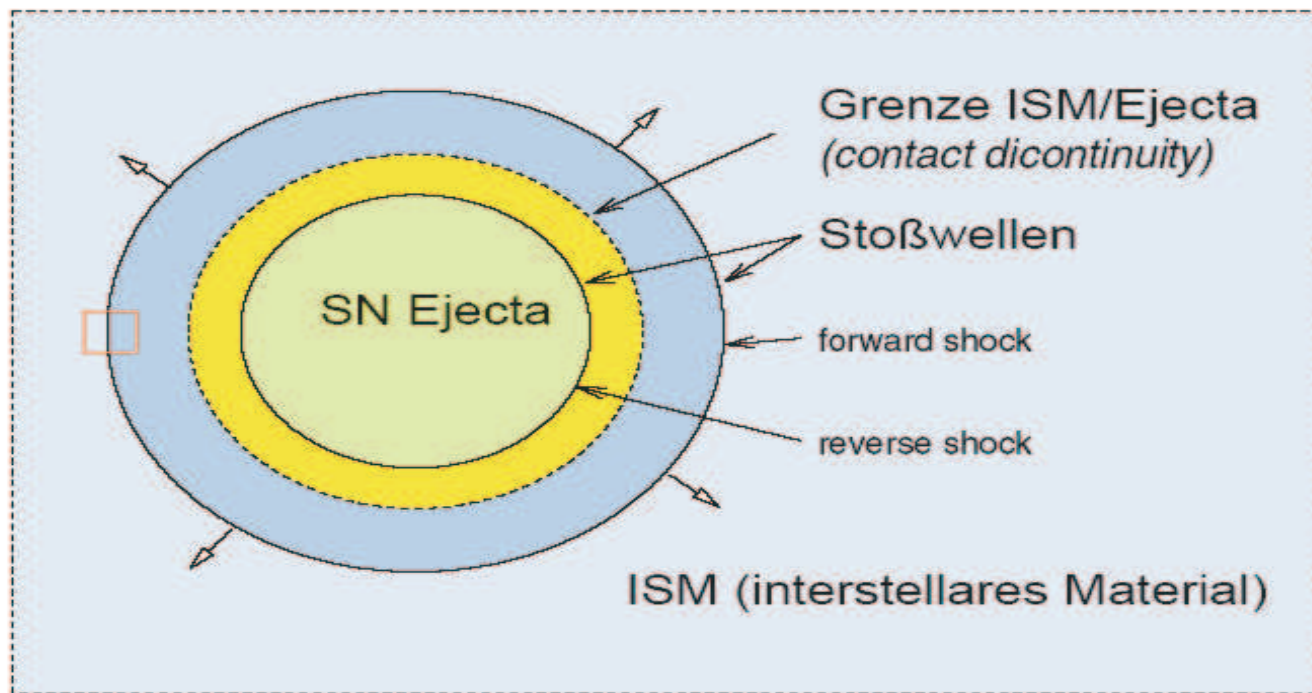
**Abbildung 4.** Stochastische Beschleunigung an Stoßwellen (engl.: shock acceleration) im mitbewegten Bezugssystem. Plasmapwellen dienen als Streuzentren.

# Evolution der verschiedenen Wechselwirkungen



# Fermi Beschleunigung

Moderne Fassung der Fermi-Beschleunigung: Beschleunigung an **Stoßwellen**, z.B. im Sonnenwind, in Erdmagnetosphäre, in Sternwinden, in **Supernova-Überresten**:



# Schockwellen

## Stoßwellen:

Ausbildung bei Kompression mit Überschallgeschwindigkeit. Im math. Idealfall: Diskontinuität der Dichte.

Kontinuitätsgleichung:

$$\rho_1 \mathbf{u}_1 = \rho_2 \mathbf{u}_2$$

Adiabatische Kompression:

$$r = \frac{\rho_2}{\rho_1} = \frac{u_1}{u_2} = \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1 + 2/\mathcal{M}^2}$$

Mit  $\gamma = C_p/C_V = 5/3$  für einatomiges Gas und mit Mach-Zahl  $\mathcal{M} = u_1/c_{s1} \gg 1$  für starke Stoßwelle:  $r = 4$ .

# Energiespektrum

Es ergibt sich ein Energiespektrum

$$\frac{dN}{dE} \propto \left( \frac{E}{E_0} \right)^{-\Gamma}$$

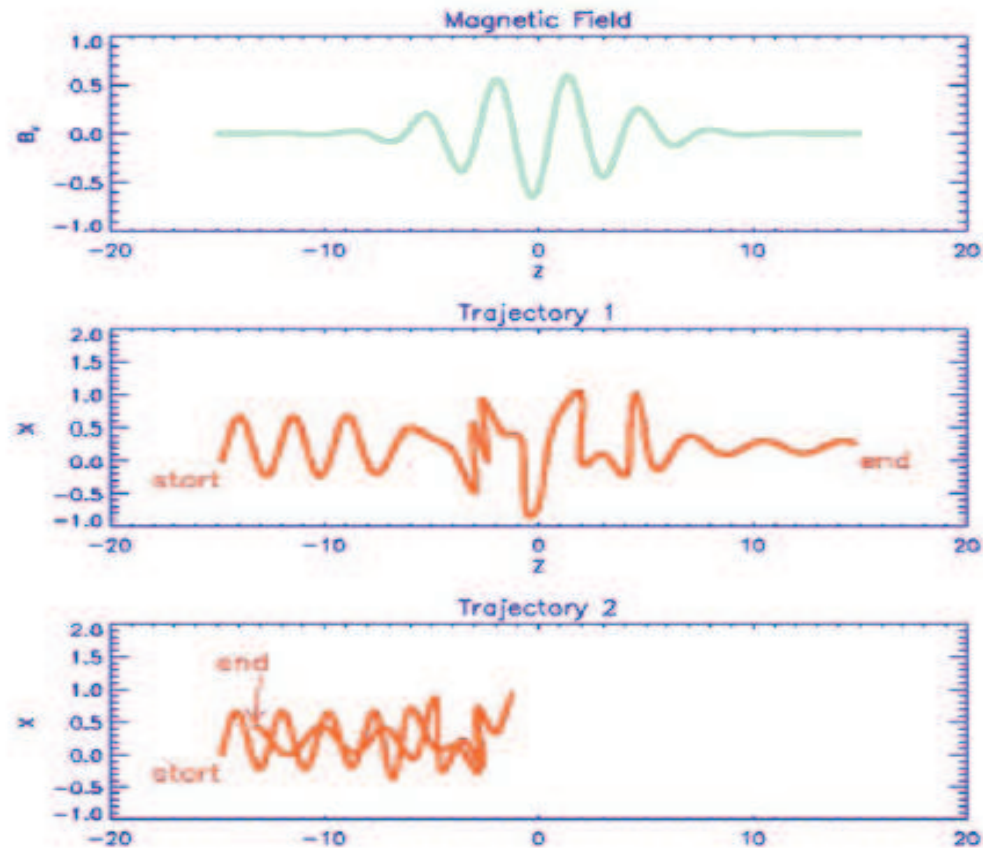
mit

$$\Gamma = \frac{3}{r-1} + 1 = \frac{r+2}{r-1}$$

Für  $r = 4$  (starke Stoßwelle) ergibt sich  $\Gamma = 2.0$ .

⇒ Bei der Fermi-Beschleunigung 1. Ordnung an Stoßwellen ergibt sich auf natürliche Weise das für die Quellen der Cosmic Rays geforderte Spektrum.

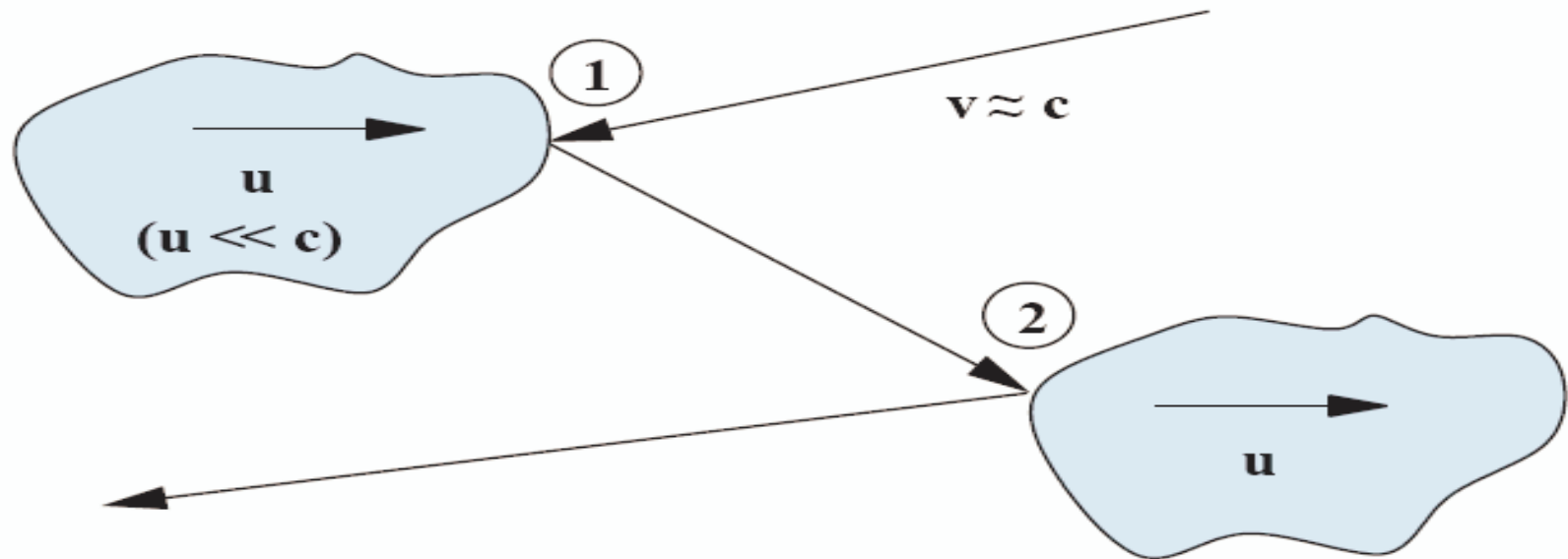
# Streuung an Alfvén Wellen



**Abbildung 2.** Streuung an Plasma-Wellen (z.B. Alfvén-Welle).

# Fermi Beschleunigung (quadratisch in $u$ )

**Fermi (1949)** (auch als **Fermi I** bezeichnet)

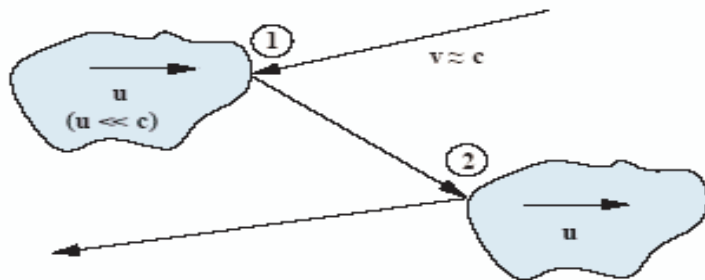


**Abbildung 1.** Fermi-I-Mechanismus (schematisch).

1. Stoß/Streuung an entgegenkommender Wolke
2. Stoß/Streuung an davonlaufender Wolke



# Energie Gewinn



Energiegewinn bei Stoß 1 (mit  $v \approx c$ , Winkel ignoriert):

$$E' \approx E(1 + 2u/c)$$
$$\Delta E_+/E \approx 2u/c$$

Energieverlust bei Stoß 2 (mit  $v \approx c$ ):

$$E' \approx E(1 - 2u/c)$$
$$\Delta E_-/E \approx -2u/c$$

Kein Nettogewinn bei einem solchen Zyklus.

# Netto Energie Gewinn

Aber: Weniger Kollisionen mit davonlaufenden Wolken als mit entgegenkommenden.

Für Cosmic Rays mit Geschwindigkeit  $v \approx c$ :

- Wahrscheinlichkeit für Fall 1:  $p_+ = (c + u)/2\ell$
- Wahrscheinlichkeit für Fall 2:  $p_- = (c - u)/2\ell$

bei mittlerem Wolkenabstand  $\ell$ .

Relative Energieänderung pro Zeiteinheit:

$$\begin{aligned}\frac{1}{E} \frac{dE}{dt} &\approx p_+ \frac{\Delta E_+}{E} + p_- \frac{\Delta E_-}{E} \\ &= \frac{c+u}{2\ell} \frac{2u}{c} - \frac{c-u}{2\ell} \frac{2u}{c} \\ &= \frac{2c}{\ell} \left(\frac{u}{c}\right)^2\end{aligned}$$

Zweite Ordnung in  $u/c$ : **Fermi-Beschl. 2. Ordnung.**

Ineffizient bei  $u \leq 10$  km/s und  $\ell \approx 30$  pc.

# Kosmische Strahlungsspektrum

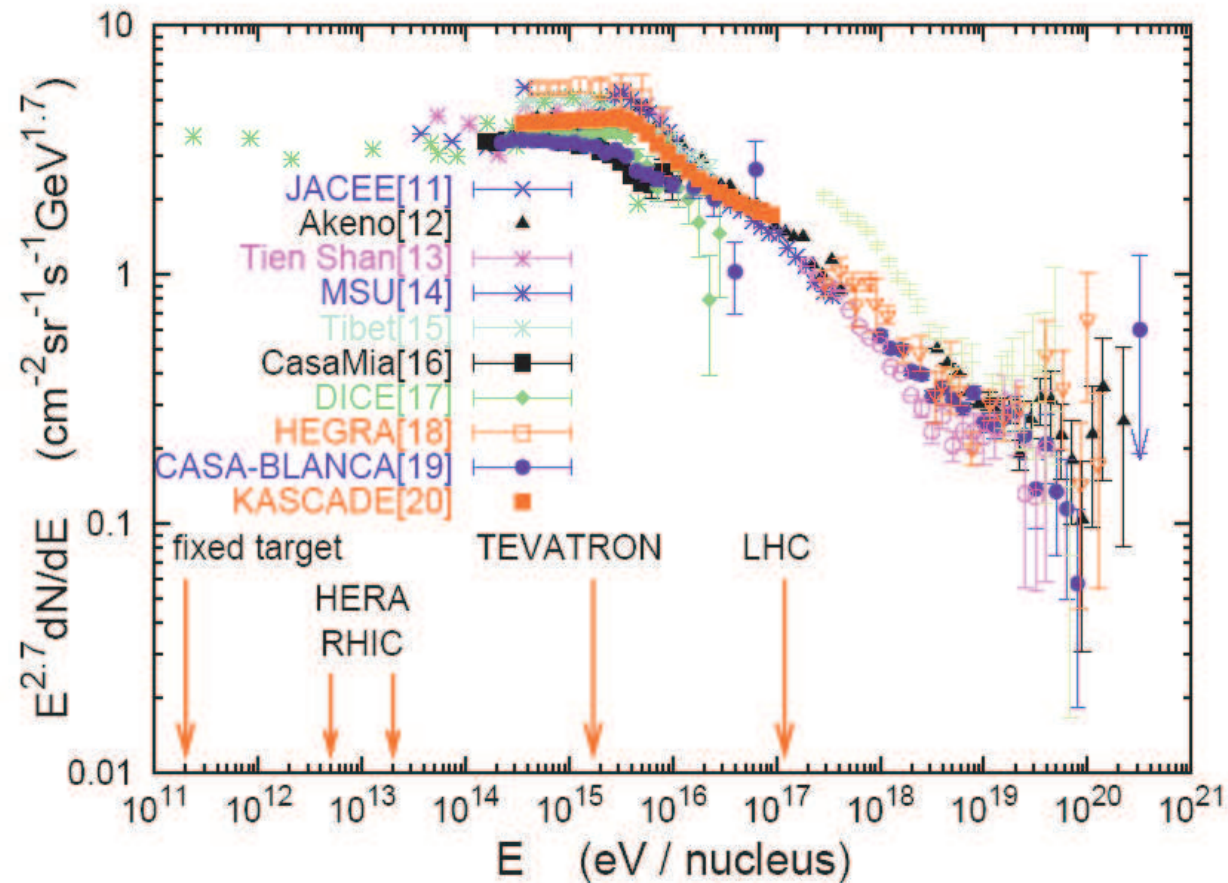
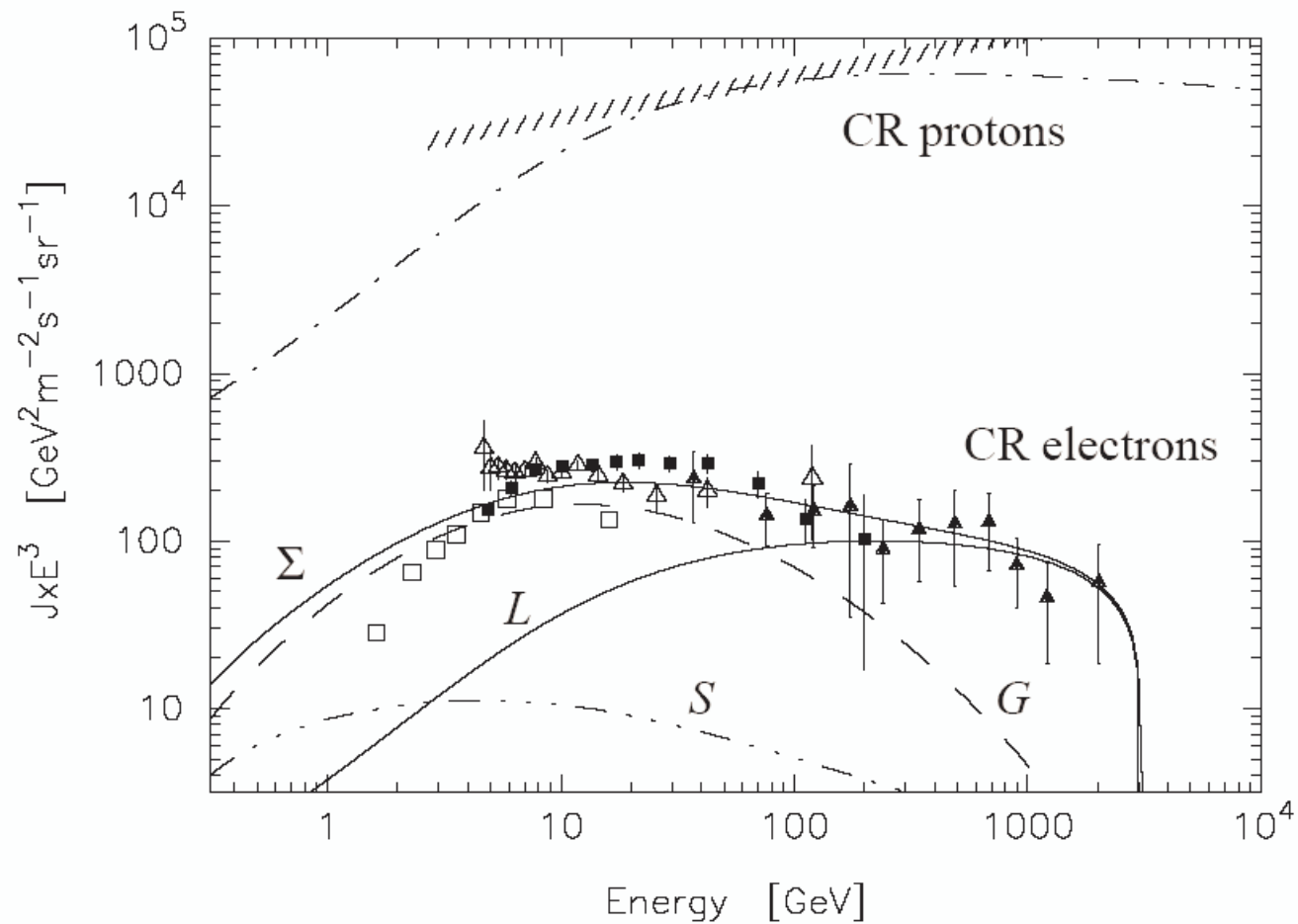


Fig. 4.1 Summary of measurements of the broad-band spectrum of high energy cosmic rays (from Gaisser, 2001).

# Kosmische Strahlung: Protonen versus Elektronen



# Erklaerung Protonen versus Elektronen

Fig. 4.2 Two-component approach to the observed CR electron flux (from Aharonian *et al.*, 1995). The thin solid line represents the Local (“L”) component of electrons that originates from a single,  $t = 10^5$  yr old burst like source at  $r = 100$  pc and  $t = 10^5$  yr. The dashed line represents the Galactic (“G”) component assuming a homogeneous distribution of CR sources in the galactic disk. The 3dot-dashed line corresponds to secondary electrons and positron produced by protons of galactic cosmic rays. The calculations are normalized to the observed flux at 10 GeV. This implies approximately  $W_e = 1.1 \cdot 10^{48}$  erg energy released in the form of accelerated electrons (the power-law index of the acceleration spectrum is assumed  $\Gamma = 2.2$ ). The required energy release in electrons is about  $W_e = 1.1 \cdot 10^{48}$  erg. The spectrum of protons from the same *local* source assuming  $W_p = 3 \cdot 10^{50}$  erg is also shown (dot-dashed line). The range of measured CR proton fluxes is indicated by the dashed region.

# Synchrotron, Inverse Compton, Bremsstrahlung and pi-decay

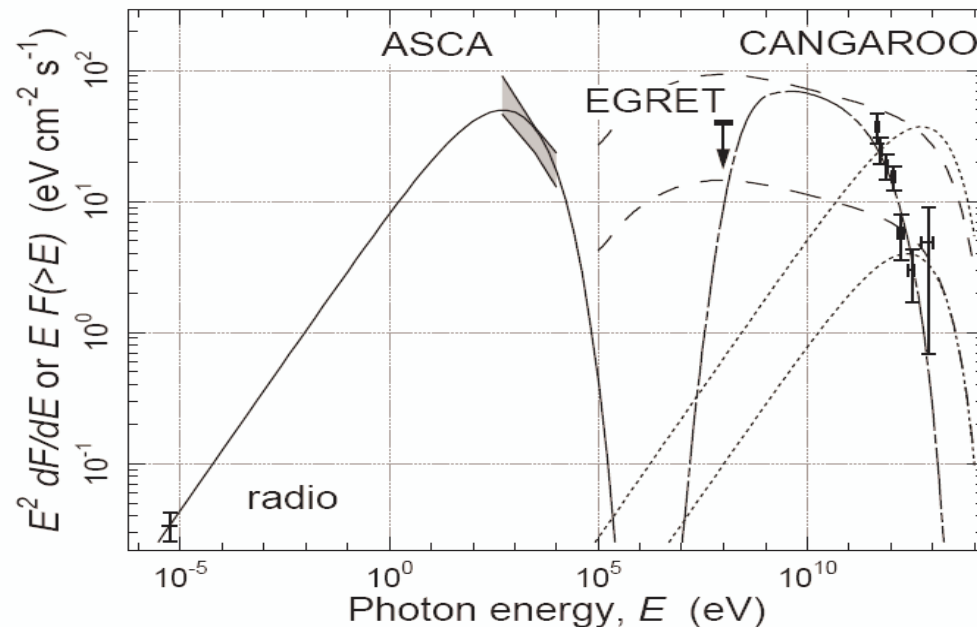


Fig. 2.9 Multiwavelength spectral energy distribution of RX J1713.7-394 (from Enomoto *et al.*, 2002). The solid, dotted, dashed, and dot-dashed curves correspond to model calculation for synchrotron, inverse Compton, bremsstrahlung, and  $\pi^0$ -decay radiation components. The upper and low curves for the inverse Compton and bremsstrahlung components are calculated for two representative magnetic fields, 3 and 20  $\mu\text{G}$ , respectively. The absolute fluxes of  $\pi^0$ -decay  $\gamma$ -rays are calculated assuming a spectral index of accelerated protons  $\Gamma_p = 2.08$ , an exponential cutoff at  $E_0 = 10$  TeV, and  $(W_p/10^{50} \text{ erg})(n_0/300 \text{ cm}^{-3})(d/6 \text{ kpc})^{-2} = 1$ , where  $W_p$  is the overall energy in protons,  $d$  is the distance to the source, and  $n$  is the ambient gas density.

# Neutrinos

**Table 13.1:** The persuasiveness of the evidence for neutrino flavor change. The symbol  $L$  denotes the distance travelled by the neutrinos. LSND is the Liquid Scintillator Neutrino Detector experiment.

Neutrinos	Evidence for Flavor Change
Atmospheric	Compelling
Accelerator ( $L = 250$ km)	Very Strong
Solar	Compelling
Reactor ( $L \sim 180$ km)	Compelling
From Stopped $\mu^+$ Decay (LSND)	Unconfirmed

# Mixing Parameters

$$1.9 \times 10^{-3} \text{eV}^2 < \Delta m_{\text{atm}}^2 < 3.0 \times 10^{-3} \text{eV}^2 ,$$

$$\sin^2 2\theta_{\text{atm}} > 0.90 .$$

- Atmospheric data
- Solar data
- Allow two mass eigenstate spectra

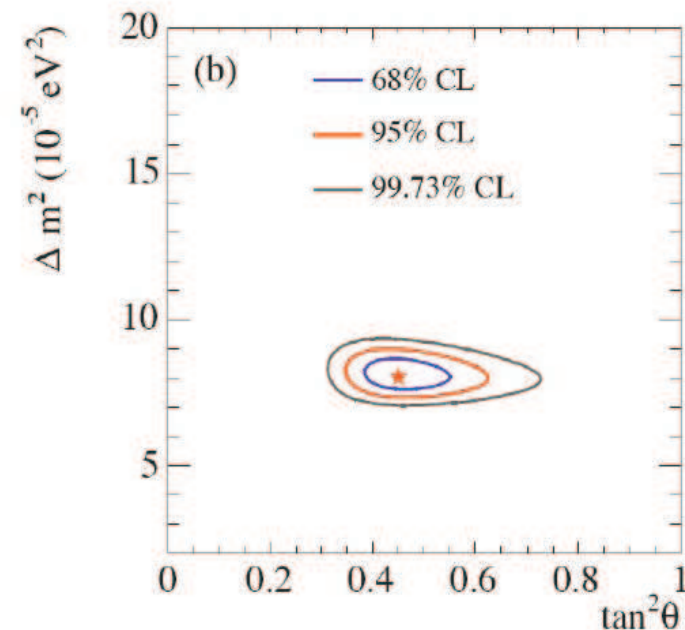
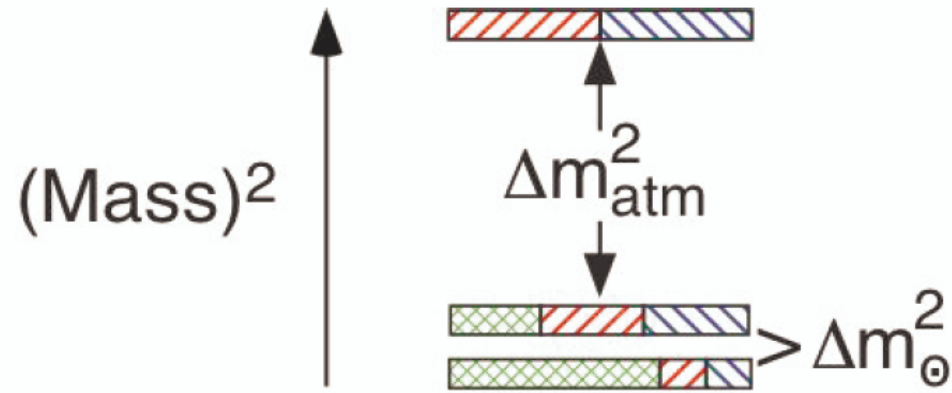


Figure 13.1: The region allowed for the neutrino parameters  $\Delta m_{\odot}^2$  and  $\theta_{\odot}$  by the solar and KamLAND data. The best-fit point, indicated by the star, is  $\Delta m_{\odot}^2 = (8.0^{+0.6}_{-0.4}) \times 10^{-5} \text{eV}^2$  and  $\theta_{\odot} = (33.9^{+2.4}_{-2.2})^\circ$ . [21] See full-color version on color pages at end of book.



# Spektrum of Mass Eigenstates



**Figure 13.3:** A three-neutrino squared-mass spectrum that accounts for the observed flavor changes of solar, reactor, atmospheric, and long-baseline accelerator neutrinos. The  $\nu_e$  fraction of each mass eigenstate is crosshatched, the  $\nu_\mu$  fraction is indicated by right-leaning hatching, and the  $\nu_\tau$  fraction by left-leaning hatching.

# Mittlere freie Weglänge von Photonen in der Galaxie

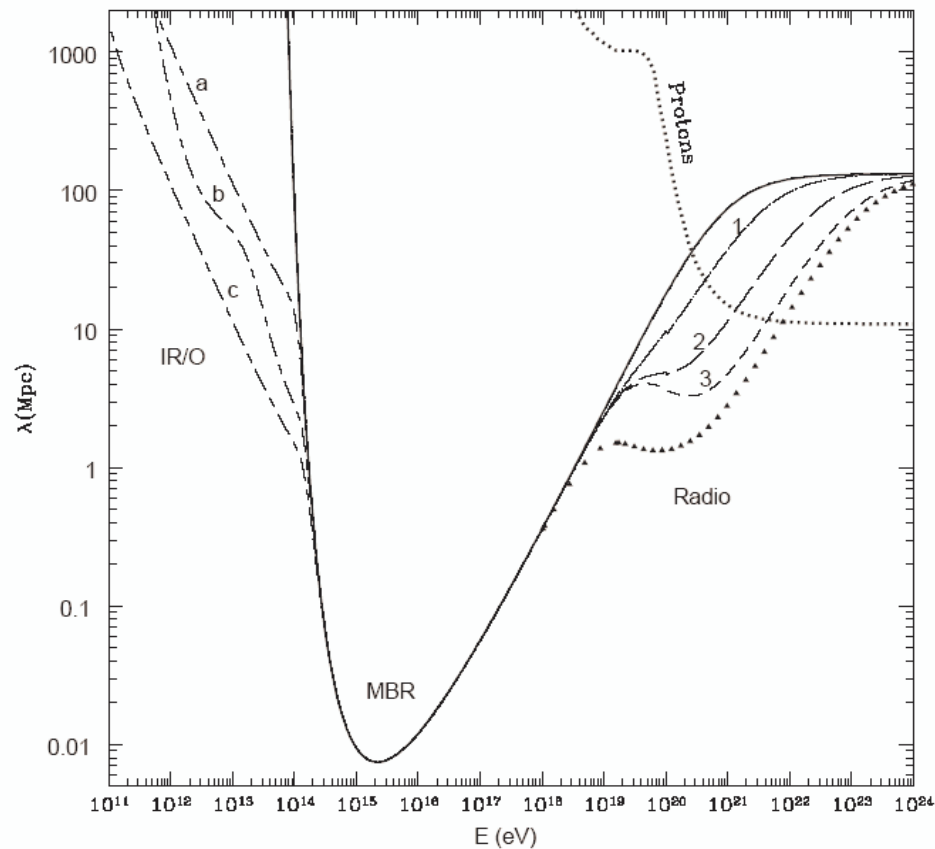


Fig. 1.4 Mean free paths of gamma-rays in the intergalactic medium at redshifts  $z \ll 1$ . Below  $10^{14}$  eV  $\gamma$ -rays interact with infrared and optical photons, above  $10^{19}$  eV - with low frequency