

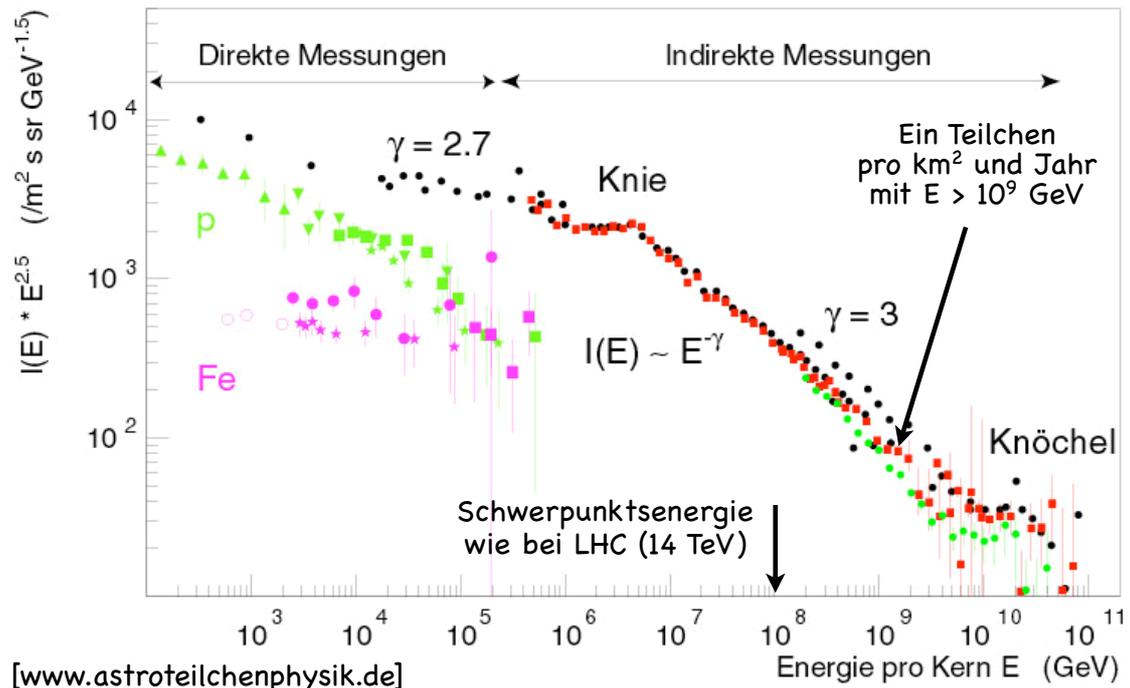
# **Moderne Physik: Elementarteilchenphysik, Astroteilchenphysik, Kosmologie**

Ulrich Husemann  
Humboldt-Universität zu Berlin  
Sommersemester 2008

Kapitel 9.2

## **Kosmische Beschleuniger**

# Energiespektrum



Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11

3

## Kosmische Beschleuniger

- Beobachtetes Energiespektrum geladener Teilchen: Potenzgesetz  $I(E) \sim E^{-\gamma}$  bis  $10^{11}$  GeV
- Universum enthält hochenergetische Photonen und Neutrinos
- Suche nach kosmischen Beschleunigern:
  - Punktquellen?
  - Produktionsmechanismen?
  - Beschleunigungsmechanismen?

Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11

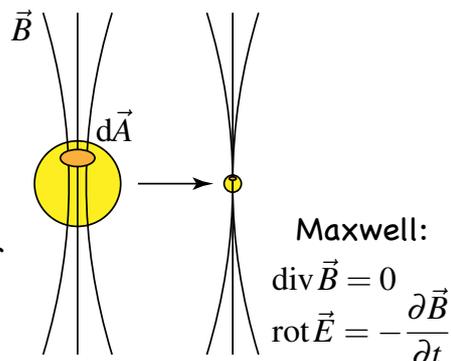
4

# Pulsare

- Beobachtung: „Pulsare“ (pulsating stars)
  - Schnell rotierende Neutronensterne → gerichtete Energieabstrahlung (vgl. Leuchtturm) im Radiowellenbereich
- Entstehung von Neutronensternen
  - Nach Supernova (SN) kollabieren Überbleibsel unter Gravitation, Radius schrumpft:  $10^6 \text{ km} \rightarrow 20 \text{ km}$
  - Extrem hohe Dichten ( $10^{13} \text{ g/cm}^3$ , vergleichbar mit Atomkern) → Umwandlung aller Elektronen und Protonen in Neutronen energetisch günstiger:  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$
  - Pauliprinzip verhindert Neutronzerfall: alle gebundenen Zustände besetzt, nicht genügend Energie für freie Elektronen

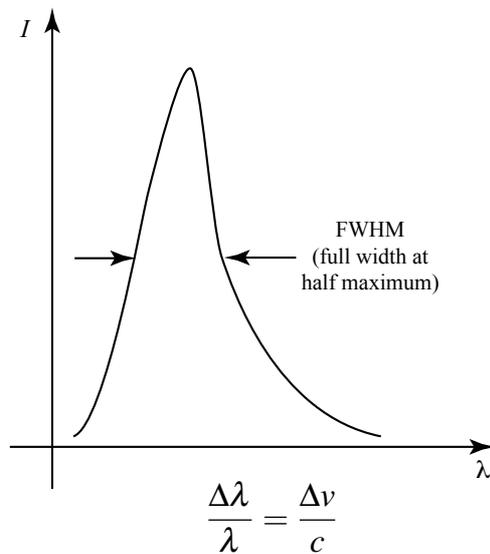
# Pulsare

- Drehimpulserhaltung:
  - Drehimpuls Kugel:  $L = 2/5 \omega m R^2 \rightarrow \frac{\omega_{\text{Neutronenstern}}}{\omega_{\text{Stern}}} = \frac{R_{\text{Stern}}^2}{R_{\text{Neutronenstern}}^2}$
  - Rotationsfrequenz: Tage → Millisekunden
- Magnetischer Fluss:  $\int \vec{B}_{\text{Stern}} \cdot d\vec{A}_{\text{Stern}} = \int \vec{B}_{\text{Neutronenstern}} \cdot d\vec{A}_{\text{Neutronenstern}}$ 
  - Zahl der Feldlinien durch Oberflächenelement konstant, Oberfläche schrumpft mit  $R^2 \rightarrow$  Magnetfelder bis zu  $10^8$  Tesla (vgl. LHC, MRI:  $< 10$  Tesla)
  - Starke veränderliche Magnetfelder induzieren starke elektrische Felder → Pulsare = Beschleuniger



# Aktive Galaxienkerne

- Energiespektren von Sternen in unserer Galaxie: schwarzer Körper mit  $T = 3000\text{--}40000\text{ K}$
- Beobachtung von Galaxien mit breiteren Emissionsspektren (Radiowellen bis Gammastrahlung):
  - Emission häufig aus kleinem Kerngebiet (quasi-stellare Radioquelle = „Quasar“)
  - Verbreiterte Spektrallinien → Dopplereffekt durch hochangeregte Atome ( $\Delta v > 1000\text{ m/s}$ )

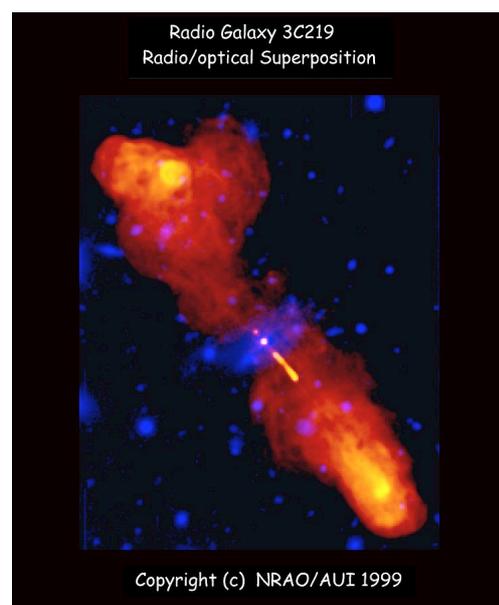


Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11

7

# Aktive Galaxienkerne

- Aktive Galaxienkerne (active galactic nuclei, AGN):
  - Viele Klassen von Galaxien mit aktivem Kern (Quasare, quasi-stellare Objekte, Blazare, ...)
  - Radiowellenbild: Kern + Strahlungskeulen + ausgedehnte Jets (bis zu 1 Mpc)
  - Energiespektrum: Potenzgesetz  $I \sim E^{-\gamma}$  (→ nicht thermisch)
  - Typisch: variable Leuchtkraft



Moderne Physik (PK 23a), HU Berlin, Sommersemester 2008, Vorlesung 11

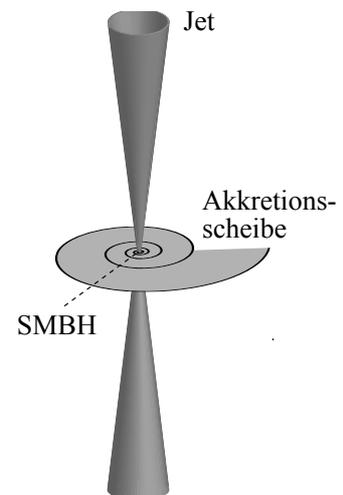
8

# SMBH

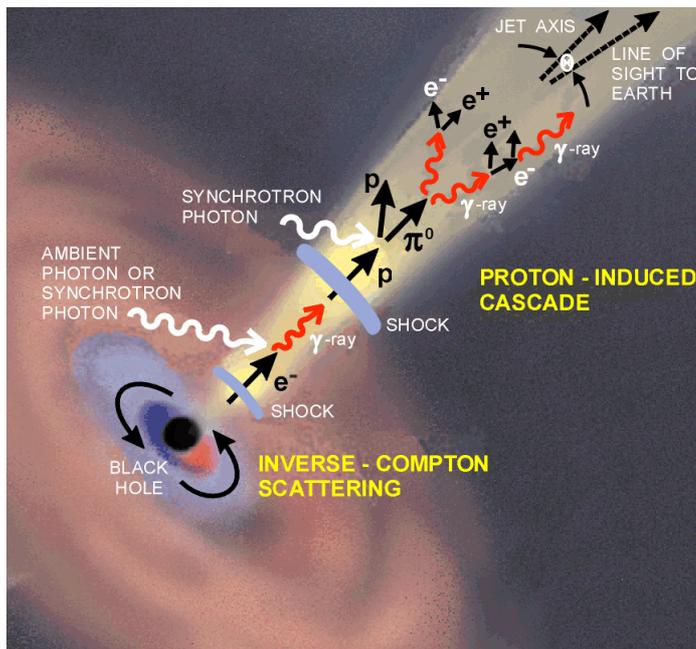
- Schwarze Löcher in der Allgemeinen Relativitätstheorie:
  - Singuläre Lösung der ART-Gleichungen → Gravitationsfeld so stark, dass Materie und EM-Strahlung nicht entkommt
  - Grenze des BH: Ereignishorizont (Radius: Schwarzschildradius)
  - Nur drei Quantenzahlen: Masse, Ladung, Drehimpuls (alle anderen Strukturen verschwinden in Singularität)
- Supermassive schwarze Löcher (super-massive BH, SMBH) in Galaxienzentren erklären alle AGN-Klassen
  - Gravitative Energiegewinnung durch „Akkretion“
  - Unterschiede: umgebende Hostgalaxien, Beobachtungswinkel (z. B. Blazar → Jet auf Erde gerichtet)

# Akkretion

- Abschätzung der Energie eines AGN:  
Leuchtkraft  $10^{39}$  J/s, Lebensdauer  $10^7$  Jahre → Gesamtenergie:  $10^{53}$  J
- Energiequelle: Gravitation
  - Kernfusion:  $E = \varepsilon \cdot mc^2$  mit Umwandlungseffizienz  $\varepsilon < 1\%$  (8 MeV freiwerdende Energie pro Fusion) →  $m > 10^{38}$  kg =  $10^8$  Sonnenmassen → braucht mehr Brennstoff als beobachtete Masse ( $10^5$ – $10^8 M_{\odot}$ )
  - ☑ Gravitation (Materie „fällt“ in SMBH) → Akkretionsscheibe: potentielle Energie umgesetzt in Wärme (Reibung) → 5% Umwandlungseffizienz



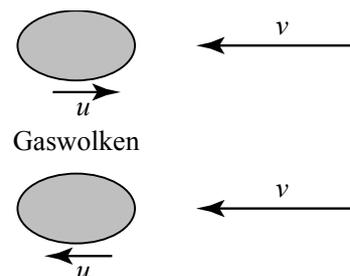
# Beschleunigung in AGN-Jets



- Wichtige Prozesse:
  - Schockwellenbeschleunigung
  - Hadronische und EM-Schauer
  - Inverser Compton-Effekt
  - Synchrotronstrahlung

# Beschleunigung an Gaswolken

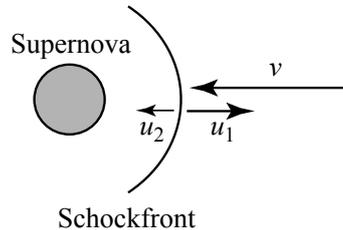
- Vielfache Streuung an magnetischen Gaswolken mit Relativgeschwindigkeit  $u$  → Reflexion in Magnetfeld



- $u$  parallel zu  $v$ :  $\Delta E_1 = \frac{1}{2}m(v+u)^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(2uv + u^2)$
- $u$  antiparallel zu  $v$ :  $\Delta E_2 = \frac{1}{2}m(v-u)^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(-2uv + u^2)$
- Energiegewinn:  $mu^2 \rightarrow \frac{\Delta E}{E} = 2\frac{u^2}{v^2} \rightarrow$  quadratisch in  $u, v$  (Fermi-Beschleunigung „zweiter Art“)
- Im Prinzip hohe Energien, aber  $u$  klein → Energiegewinn pro Kollision klein → ineffizient als Beschleuniger

# Schockwellenbeschleunigung

- Schockwellenbeschleunigung: Energiegewinn eines Teilchens mit Geschwindigkeit  $v$  an einer Schockfront



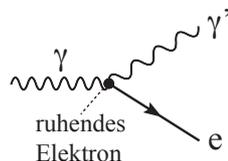
$$\Delta E = \frac{1}{2}m(v + (u_1 - u_2))^2 - \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(2v(u_1 - u_2) + (u_1 - u_2)^2) \approx mv(u_1 - u_2)$$

- Relativistisch:  $\frac{\Delta E}{E} = \frac{4}{3} \frac{u_1 - u_2}{v} \rightarrow$  linear in  $u_1 - u_2, v$   
 $\rightarrow$  Fermi-Beschleunigung „erster Art“
- Beschleunigung bis zu  $10^5$  GeV

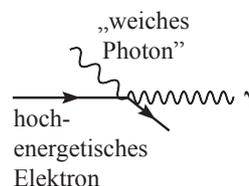
# Hochenergetische Photonen

- Produktion hochenergetischer Photonen:
  - Inverser Compton-Effekt: hochenergetisches Elektron und „weiches“ Photon  $\rightarrow$  „hartes“ Gammaquant

Compton-Effekt



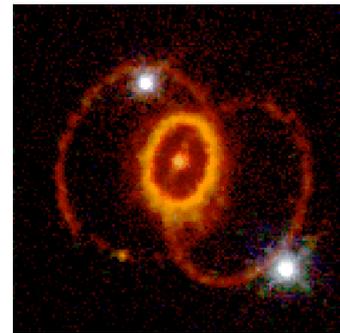
Inverser Compton-Effekt



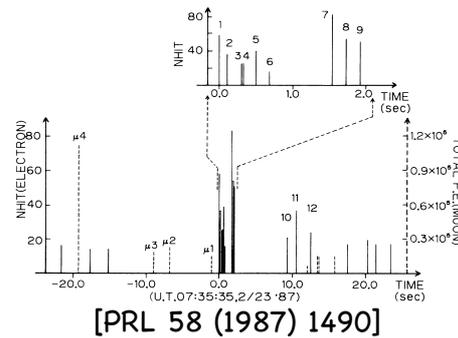
- EM- und hadronische Kaskadenzerfälle (vgl. Kalorimeter), Zerfall  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$
- Synchrotronstrahlung von bewegten geladenen Teilchen in kosmischen Magnetfeldern

# Neutrino­produktion

- Hadronische Wechselwirkungen → Pionen und Kaonen → Zerfall in Neutrinos, z.B.  $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \nu_\mu$
- Supernovae: zwei Neutrinoausbrüche
  - 1. Ausbruch:  $p + e^- \rightarrow n + \nu_e$  (vgl. Neutronenstern)
  - 2. Ausbruch:  $\gamma \rightarrow e^+ e^- \rightarrow Z \rightarrow \nu \bar{\nu}$
  - Beispiel: SN1987A → Neutrinos in Kamiokande nachgewiesen



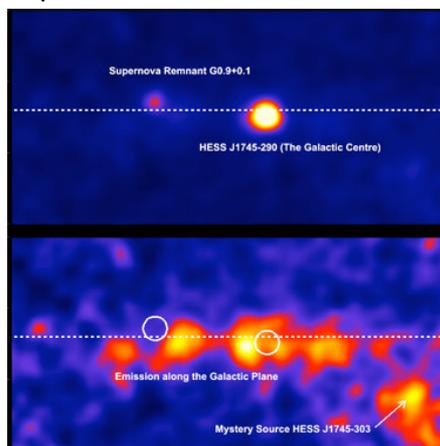
SN1987A



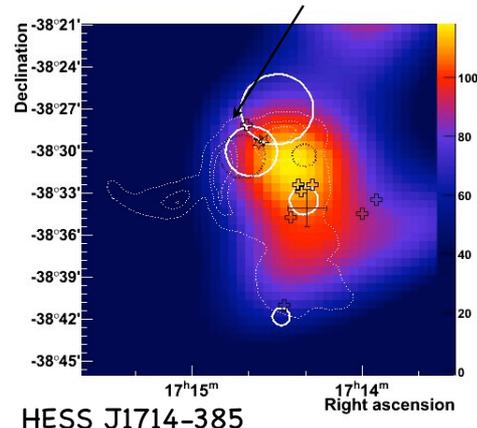
[PRL 58 (1987) 1490]

# Suche nach Punktquellen

- H.E.S.S.: Identifikation zahlreicher Punktquellen hochenergetischer Photonen:
  - Galaktisches Zentrum
  - Supernovae (und deren Reste), Pulsare



Vergleich mit Radiosignalen



HESS J1714-385

# Suche nach Punktquellen

- Höchstenergetische geladene Teilchen → etwa geradlinige Ausbreitung → Richtungsinformation
- Auger 2007: Korrelation mit bekannten AGNs → höchste Energie stammen von extragalaktischen Quellen

