

11. Gültigkeitsgrenzen für das Standardmodell:

Experimente mit kosmischer Strahlung

- Luftschauer-Experimente mit Höhenstrahlung
 - ▷ Quellen der Höhenstrahlung
 - ▷ kosmische Beschleuniger
 - ▷ Čerenkov-Teleskope
 - ▷ "Knie & Knöchel" im Höhenstrahlungsspektrum
- Dunkle Materie im Universum
 - ▷ Rotationskurven von Galaxien
- Teilchen-Kandidaten für Dunkle Materie u. Suchergänge
 - ▷ Neutrinos
 - ▷ Axion-Teilchen
 - ▷ WIMP-Teilchen

Höhenstrahlung

- Da die Suche nach neuen Teilchen in Beschleuniger-Experimenten bisher erfolglos verlief: Suche nach diesen Teilchen in kosmischer Höhenstrahlung, die Energie weit obhalb aller bisherigen Beschleuniger erreicht. Auch sollten neue Teilchen im Urknall entstanden sein und die stabilen darunter bis heute überlebt haben. Sie könnten sich in charakteristische Reaktion zeigen, z.B.

leichtestes SUSY-Teilchen (LSP): $\tilde{\chi}^0$

→ Paarvernichtung: $\tilde{\chi}^0 \tilde{\chi}^0 \rightarrow \gamma\gamma$ oder $e\gamma$

→ Gamma-Strahlung mit $E_\gamma = m_{\tilde{\chi}^0}$ bzw. $m_{\tilde{\chi}^0} \left(1 - \frac{m_{\text{min}}^2}{m_{\tilde{\chi}^0}^2}\right)$

Höhenstrahlung

- **Quellen:** Abgesehen von Sonnenflares liegende Quellen außerhalb des Sonnensystems, z.B. in
 - ▷ **Sternexplosionen** (Supernovae)
 - ▷ **aktiven Galaxiekerns AGN** (vermutl. schwarze Löcher)
- **Energiebereich:** von niedrigsten Energien (Magnetfelder von Erde u. Sonne halten niedrigstenerget. Teilchen ab) bis zu $3 \cdot 10^{20}$ eV (≈ 48 Joule!). Noch ist völlig unklar, was / wie diese Teilchen auf solche Energien beschleunigt hat / wurden. Mehrere Experimente versuchen, die Quelle(n) zu lokalisieren.
- **Chemische Zusammensetzung** der (niederenergetischen) Höhenstrahlung: Protonen : ${}^4\text{He}$: C : Fe $\approx 4000:220:18:1$ (für höchstenerget. Komponente unbekannt)
- **Quellenlokalisierung** nur für Gamma-Strahlungs-anteil möglich. Geladene Teilchen werden durch das im Detail nicht bekannte galaktische Magnetfeld abgelenkt. weisen nicht auf Ursprungsort zurück.

Chemische Zusammensetzung d. Höhenstrahlung

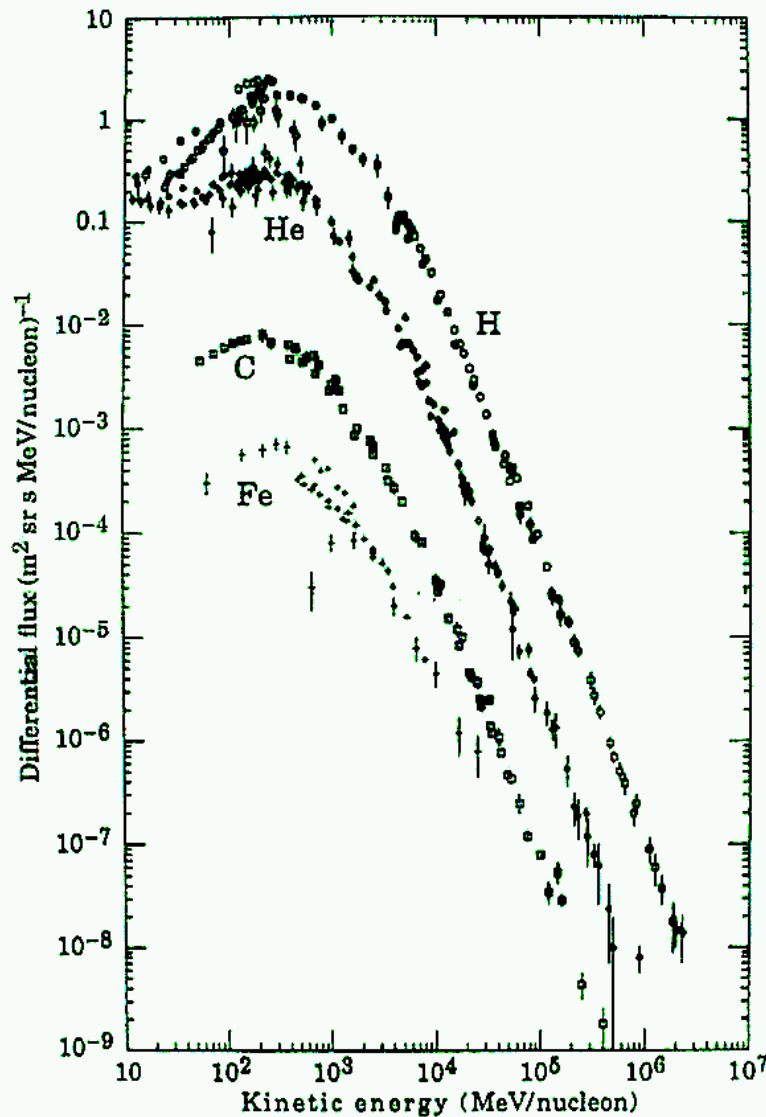


Figure 20.1: Major components of the primary cosmic radiation (from Ref. 1).

NB: diese Teilchen/Atome treffen auf die obere Atmosphäre und erzeugen durch Wechselwirkung u.U. sehr ausgedehnte Teilchenschauer

Kosmische Teilchenbeschleuniger

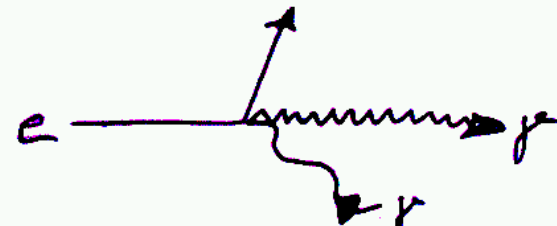
● Schockwellen aus Supernovae

- ▷ Prinzip: Hochenergetische Teilchen durchqueren die Schockfront und erhalten durch Streuprozesse eine isotrope Geschwindigkeitsverteilung. Diese Verteilung ist nur isotrop bezgl. des Referenzsystems des Mediums, durch das die Schockfront läuft. Die Referenzsysteme sind unterschiedlich vor und hinter der Schockfront, so daß das Teilchen beim Durchqueren der Schockfront jedesmal Energie gewinnt. (Fermi-Beschleunigung 1. Ordnung)

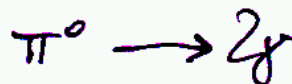
▷ Maximale Energie: 10^{15} eV

▷ Energiespektrum: $dN/dE \sim E^{-2.7}$

● Photonenquellen:

▷ Inverse Compton-Streuung: 

▷ Pion-Zerfall



Wobei die π^0 aus hadronischen Wechselwirkungen stammen

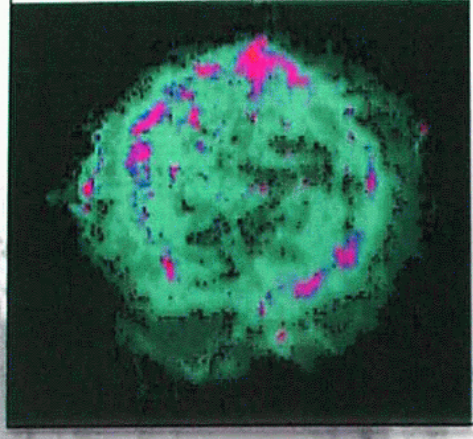
● Energien $> 10^{15} \text{ eV}$?

Quasare mit schwarzen Löchern als zentrale Antriebsmaschine?

Supernova Remnants (Shell)

sources of hadronic cosmic rays?

- 1 supernova / 30 years
- acceleration in shock front



Cas-A

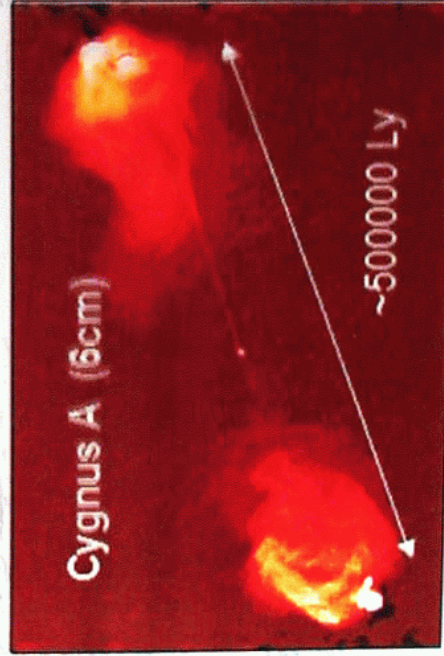
- reaction with interstellar matter $p + \text{ISM} \rightarrow \pi^0 + X$

Active Galactic Nuclei



Unified model:

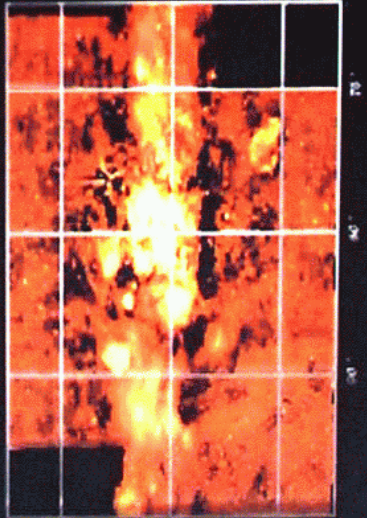
- central engine:
massive black hole
 $M \sim 10^7 - 10^{10} M_{\odot}$
- accretion disk
- well collimated jets
perpendicular to the
accretion disk



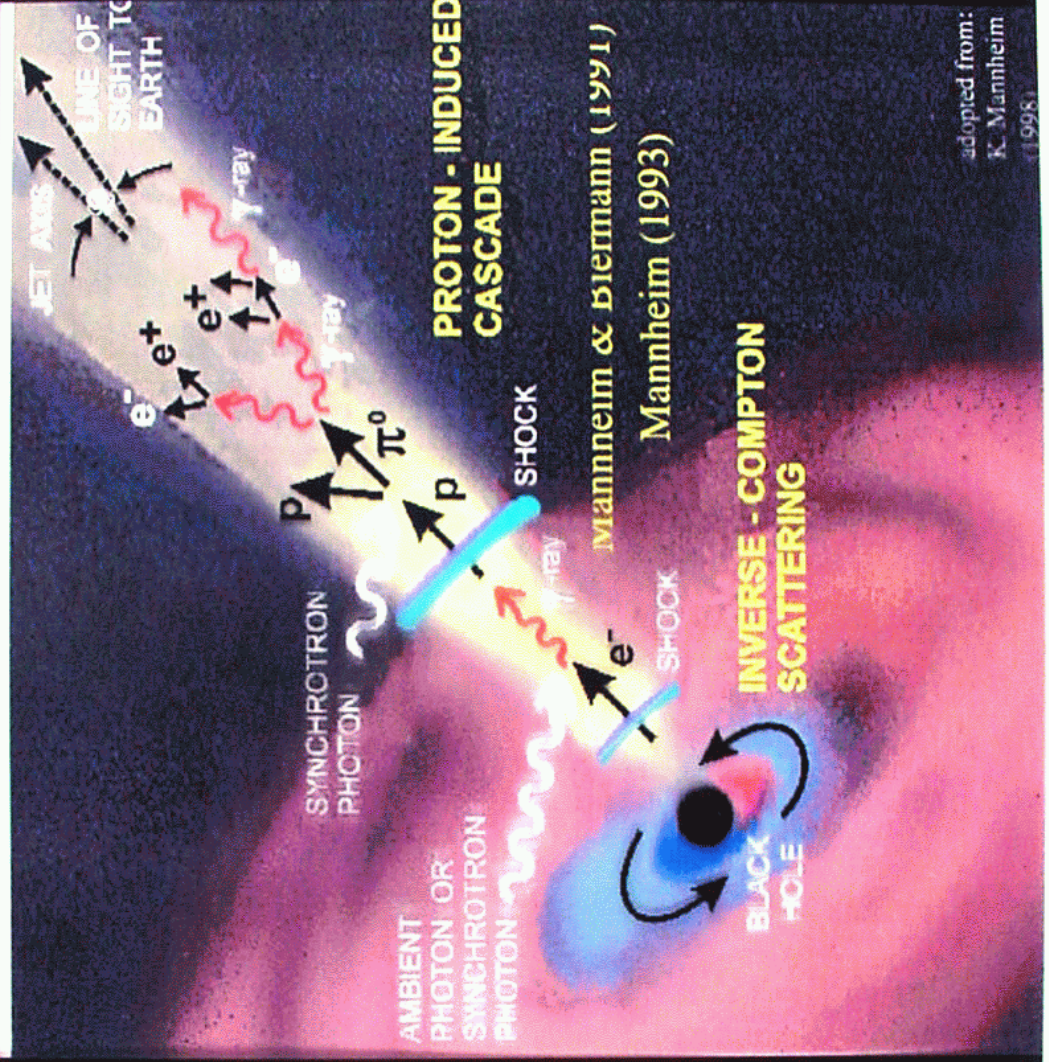
Radio Gores: Particle Accelerators and High-Energy Laboratories

Shockwellenbeschleunigung in Materiejets schwarzer Löcher

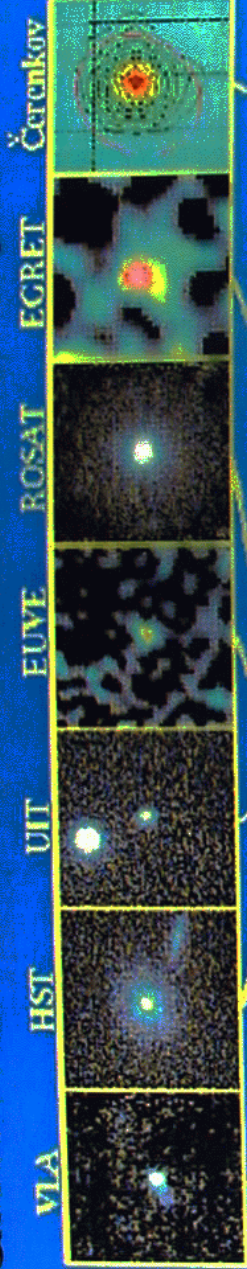
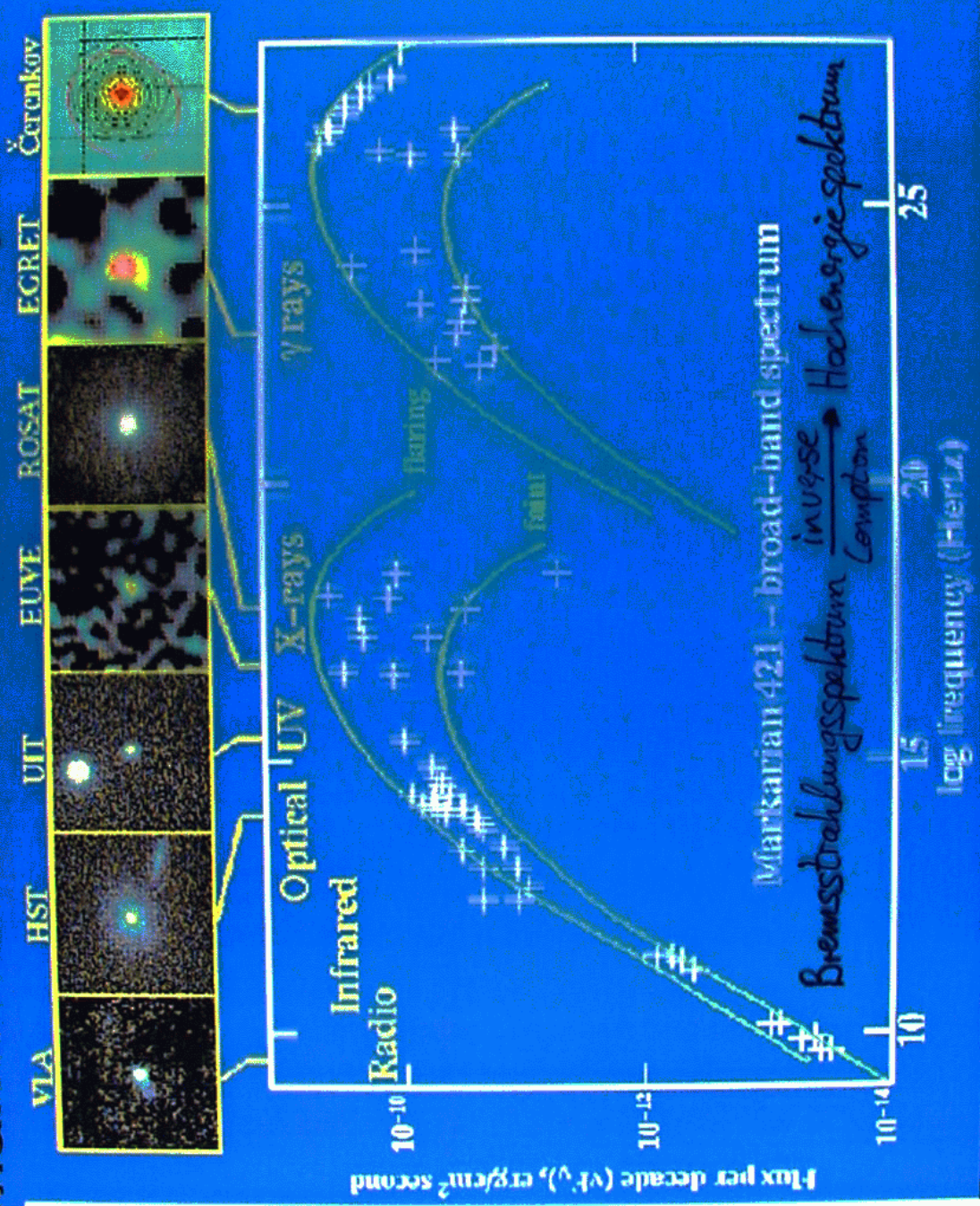
Cygnus-X-region 100-nm-Erdfernteskop 1.4 GHz



MICHAEL ET AL. (1998)



Markarian 421 broad-band spectrum



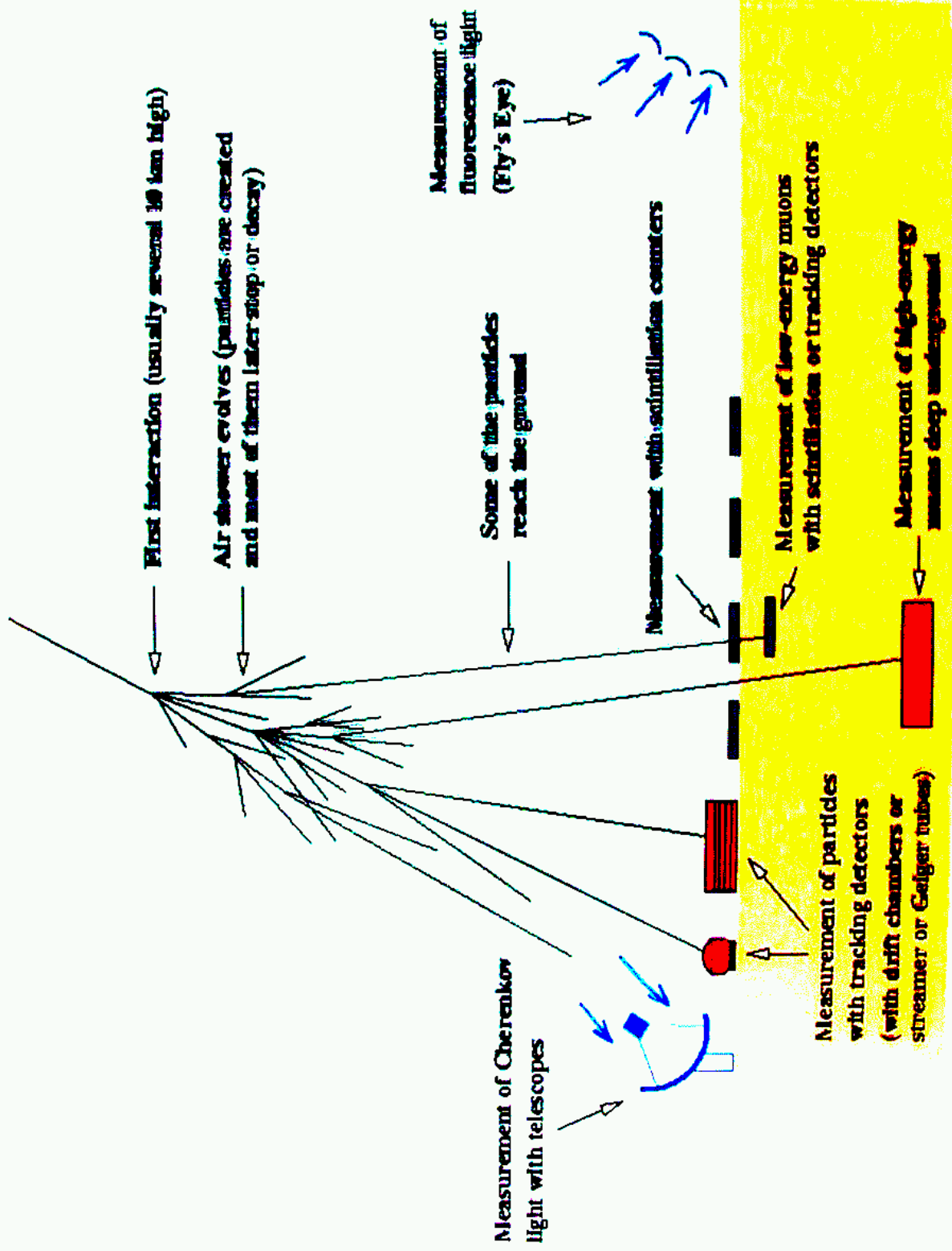
Transformation der Photonenergie durch z.B. inverse Compton = Streuung:

Luftschauer-Experimente mit Höhenstrahlung

- Beobachtung kosmischer Teilchen durch Luftschauer, d.h. die Atmosphäre dient als Kalorimeter, in dem sich elektromagnetische und hadronische Kaskaden ausbilden. Die Signale werden als
 - ▷ Teilchenstrahlung (i.w. Myonen, indirekt auch ν 's)
 - ▷ Čerenkov-Licht
 - ▷ Fluoreszenzlicht (Anregung von ^{14}N -Atomen)gemessen.

- Untersuchungen zum Beschleunigungsmechanismus z.B. an Makarian 421 und 501 (von nördl. Hemisphäre aus sichtbar). Beide Quellen zeigen enorme und sehr schnelle Variabilität (γ -Fluß um Faktor 5-10 innerhalb von $\approx \frac{1}{2}$ Stunde), so daß die "zentrale Maschine" sehr kompakt (Größenordnung: Lichtstunde) sein muß \Rightarrow schwarzes Loch als zentrale Maschine?!

Measuring cosmic-ray and gamma-ray air showers



Cerenkov - Telescope : Z.B. HEGRA auf La Paloma

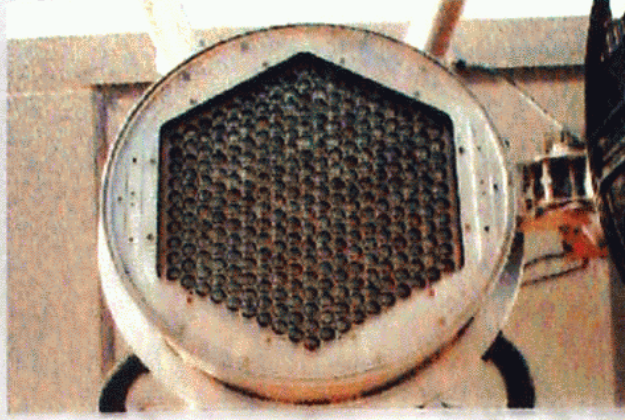
TeV Gamma-ray astronomy



Hegra telescope

8.5m²

field of view 4°



Camera


271 pixels

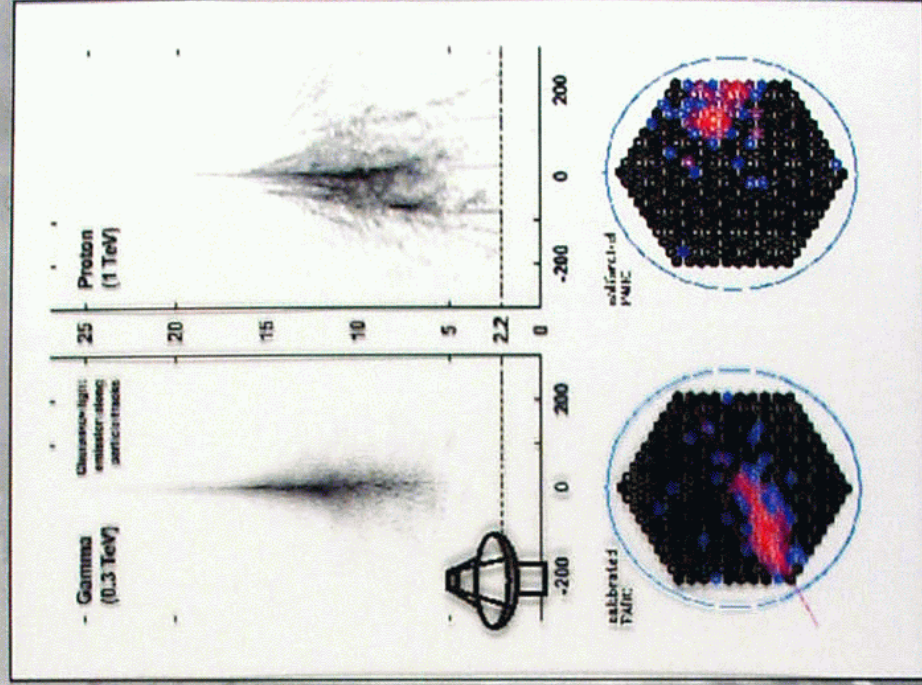
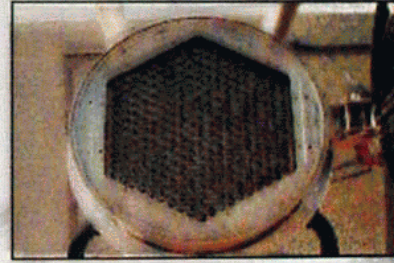
Unterscheidung: Photon \leftrightarrow Proton induziertes Schauer

TeV Gamma-ray astronomy

Background suppression

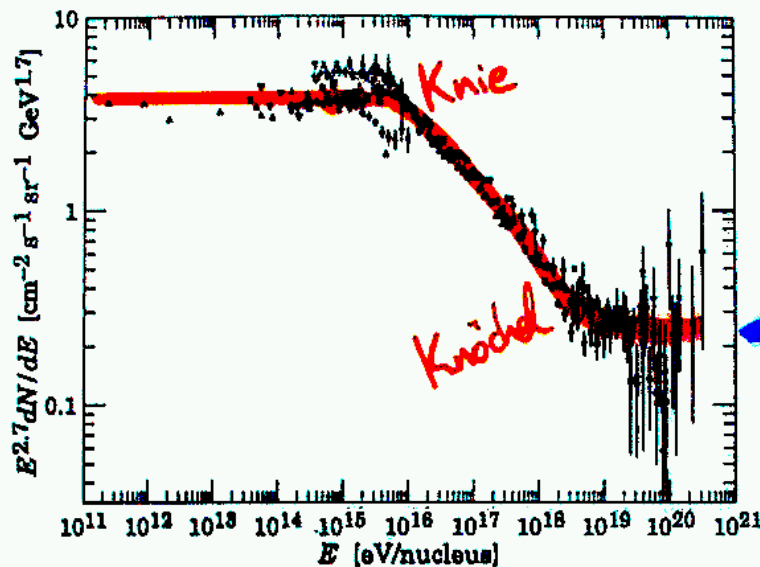
- Gammas from **point sources**
- Cosmic rays **isotropic**
- Differences in **shower shape**

 **image of the shower**



"Knie" und "Knöchel" im Strahlungsspektrum

- Energiespektrum der kosmischen Strahlung $\propto E^{2.7}$:



← entspricht ca.
1 Teilchen/
km²·Jahr =
hundert
bei 10²⁰ eV

Figure 20.9: The all-particle spectrum: Für alle Bestandteile der kosm. Strahlung ^{Zusammen}

- bis 10¹⁵ eV : Schockwellen als Beschleunigungsmechan.
- zwischen 10¹⁵ - 10¹⁸ eV : Spektrum $\sim E^3$
evtl. noch aus Schockwellen-Beschleunigung
- oberhalb 10¹⁸ eV : Spektrum $\sim E^{<2.7}$
Beschleunigungsmech. unbekannt (topologische Defekte, kosmische Strings, ...)
außerdem Abschneiden des Spektrums bei $\approx 5 \cdot 10^{19}$ eV
erwartet durch den Prozess:



falls $E_{\text{proton}} > 4 \cdot 10^{19}$ eV

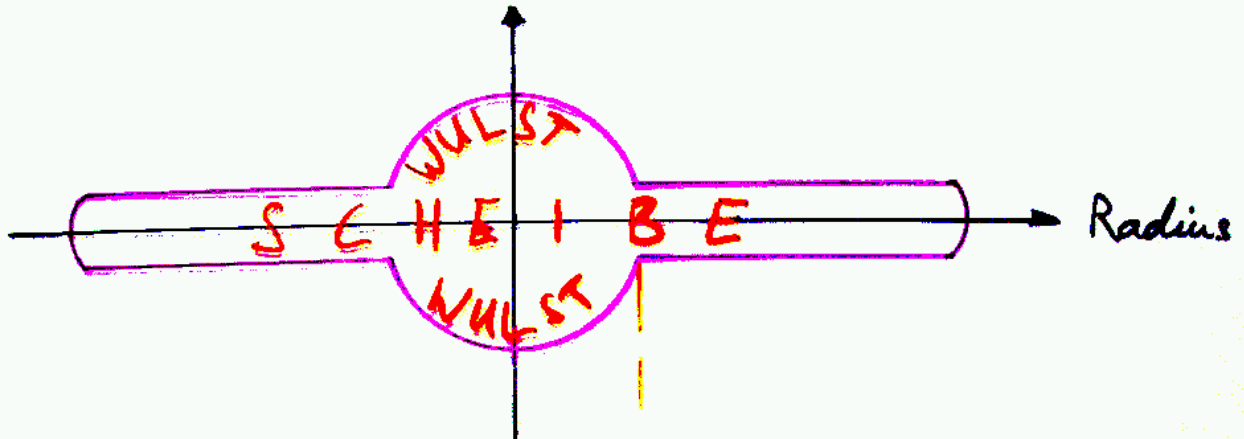
(Greisen-Zatsepin-Kuzmin cut-off)

Dunkle Materie im Universum

- **Urknall** mit extrem hohen Energien sollte auch "neue" Teilchen erzeugt haben, deren stabile Zerfallsprodukte noch heute im Universum existieren, abgekühlt (wie die Mikrowellenhintergrundstrahlung von $T \approx 10^4 \text{ K}$ auf $T \approx 2.7 \text{ K}$) auf geringe Energien, so daß diese Teilchen heute nicht mehr "strahlen"
→ sogenannte **nicht-baryonische Dunkle Materie**
 - **Dunkle Materie** allgemein ist nicht- oder schwach-leuchtende Materie wie z.B.
 - ▷ brauner Zwerg (Masse $< 0.08 M_{\odot}$, zu gering für Fusion)
 - ▷ weißer Zwerg (Sternendstadium mit $M = 0.5 \dots 1.4 M_{\odot}$)
 - ▷ Neutronensterne (Sternendstadium mit $M > 1.4 M_{\odot}$)
 - ▷ Planeten (Erde & Mond ...; aber Planeten im Sonnensystem $\hat{=} 1\%$ der Sonnenmasse M_{\odot})
- } **MACHO** (MASSive Compact Halo Object)
↑ im Halo einer Galaxie
- Alle diese sind aus "gewöhnlicher" baryonischer Materie aufgebaut. Häufigkeit & Massenbeiträge können durch ihre gravitative Wirkung festgestellt werden.

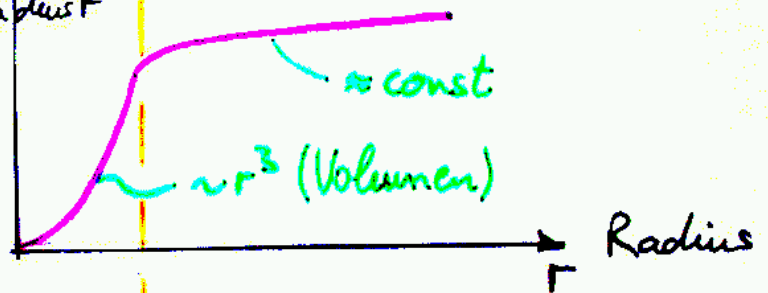
Rotationskurven von Galaxien

- Seitenansicht einer Galaxie:

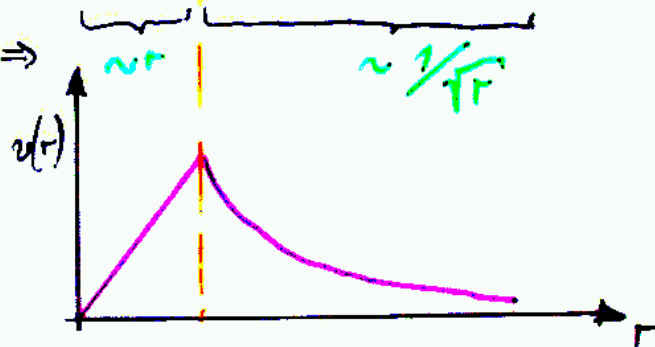


- Erwartung für die Massenverteilung:

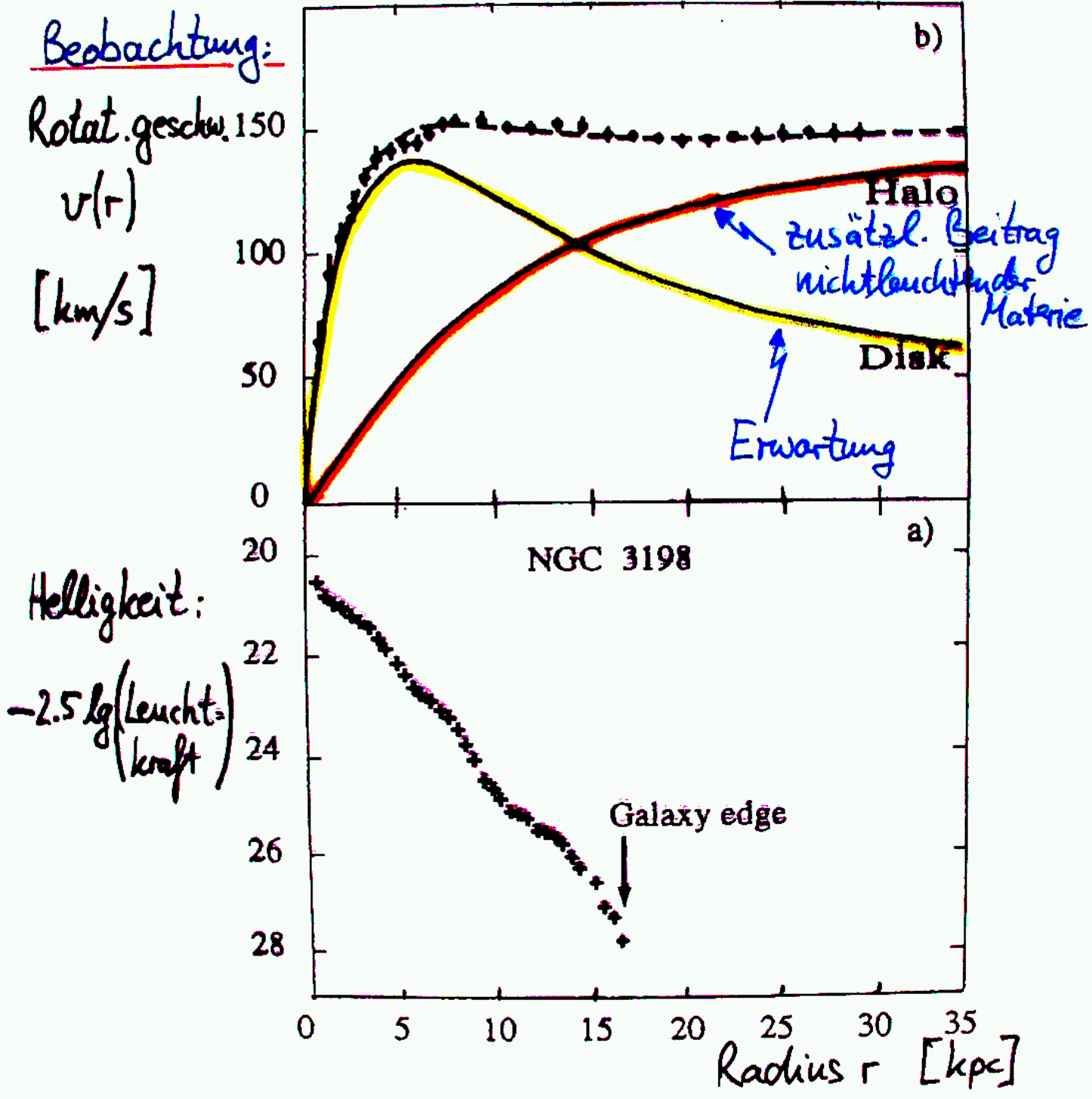
Massen=
summe $M(r)$
bis Radius r



- Rotation: $v(r) \sim \sqrt{\frac{M(r)}{r}} \Rightarrow$



... Rotationskurve von Galaxien



aus $\left(\frac{M}{L}\right) \Rightarrow$
 Masse-zu-Leuchtkraft

$$\Omega_{\text{Halo}} \approx 0.02 \dots 0.10$$

d.h. der Anteil
 an der kritischen
 Dichte des Universums

M31 - Andromeda (ca. 2 Mly)



V6C 4565

(ca. 50 Mly)



Dunkle Materie im Universum

- **Messungen** (z.B. Mikrogravitationslinseneffekt massiver, kompakter Objekte auf dahinter vorbeiziehende Sterne) und **Hochrechnungen** aus beobachteten Häufigkeiten (z.B. Zahl & Größe von Einschlagskratern auf dem Mond) ergeben, daß die Gesamtmasse der MACHOs nicht genügt, um die gemessenen Galaxierotationskurven zu erklären.

⇒ **nicht-baryonische Dunkle Materie** wird zur vollständigen Beschreibung der Rotationskurven benötigt!

Tatsächlich ist etwa 90% der Masse im Universum durch nicht-baryonische Teilchen und nur ca. 10% durch baryonische (Proton, Neutron, ...) gegeben.

Nicht-baryonische Kandidaten für "Dunkle Materie"

- Eigenschaften:
 - ▶ massiv
 - ▶ elektrisch- & colour-neutral
 - ▶ schwach wechselwirkend
- Kandidaten:
 - ▶ **Neutrinos** mit Masse > 0
geringe Masse genügt,
da ca. $330 \text{ Neutrinos/cm}^3$
 - ▶ **Axion-Teilchen**
hypothetisch
Masse?
 - ▶ **WIMP-Teilchen**
(= Weakly Interacting Massive Particle)
sehr massiv: $m_{\text{WIMP}} \gg m_{\text{Proton}}$

Massive Neutrinos als 'Dunkle Materie'

Neutrinos beim Urknall erzeugt

- Anzahldichte $n_\nu = \frac{3}{11} n_\gamma = 110/\text{cm}^3$ je Generation

$$\Rightarrow \Omega_\nu = \frac{\sum m_\nu}{94 \text{ eV}/c^2}$$

- Neutrino-Massengrenzen:

- ▷ $m_{\nu_e} < 5 \text{ eV}/c^2$

- ▷ $m_{\nu_\mu} < 170 \text{ keV}/c^2$

- ▷ $m_{\nu_\tau} < 18 \text{ MeV}/c^2$

und

- ▷ 3 Neutrinogenerationen $m_\nu < 45 \frac{\text{eV}}{c^2}$

- Hinweise auf $m_\nu > 0$

Defizite: $\left\{ \begin{array}{l} \text{atmosphär. Neutrinos} \\ \text{Sonneneutrinos} \end{array} \right\} \rightarrow$ Neutrino-Oszillationen
 $\rightarrow m_\nu < 0.1 \frac{\text{eV}}{c^2}$

\Rightarrow

$$\Omega_\nu < 0.003$$

Zu wenig!

Axion-Teilchen

- hypothetische Teilchen, die als Folge der Lösung des Problems der CP-Verletzung durch die starke Wechselwirkung erscheinen.
- ▷ starkes CP-Problem: Die QCD gestattet einen Term:

$$\Theta_{\text{eff}} \cdot \frac{\alpha_s}{8\pi} \cdot G_a^{\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}^a$$

$\tilde{G}_a^{\mu\nu} = \frac{1}{2} \epsilon^{\mu\nu\alpha\beta} G_{\alpha\beta}^a$
 $G_a^{\mu\nu} = 2^{\mu} G_a^{\nu} - 2^{\nu} G_a^{\mu} + \sqrt{4\pi\alpha_s} f_{abc} G_b^{\mu} G_c^{\nu}$
 ← Gluonfeld G_a^{μ}

der CP-verletzend ist. Experimentell findet man jedoch, daß

$$\Theta_{\text{eff}} \ll 10^{-9}$$

obwohl $\Theta_{\text{eff}} \sim 1$ in QCD erlaubt wäre.

- ▷ Lösung: Neue Symmetrie $(U(1))_{PQ}$ (Peccei & Quinn), die spontan gebrochen ist und ein neues Teilchen hervorbringt (ein Pseudo-Goldstone Boson):
Axion a mit dem Feld Φ_a
 und den CP-verletzenden Term modifiziert:

$$\left(\Theta_{\text{eff}} - \frac{\Phi_a}{f_a} \right) \cdot \frac{\alpha_s}{8\pi} G_a^{\mu\nu} \tilde{G}_{\mu\nu}^a$$

f_a ist Axionzerfallskonstante (Wert unbekannt)

$$\rightarrow m_a \approx 0.62 \frac{\text{eV}}{c^2} \cdot (10^7 \text{ GeV} / f_a)$$

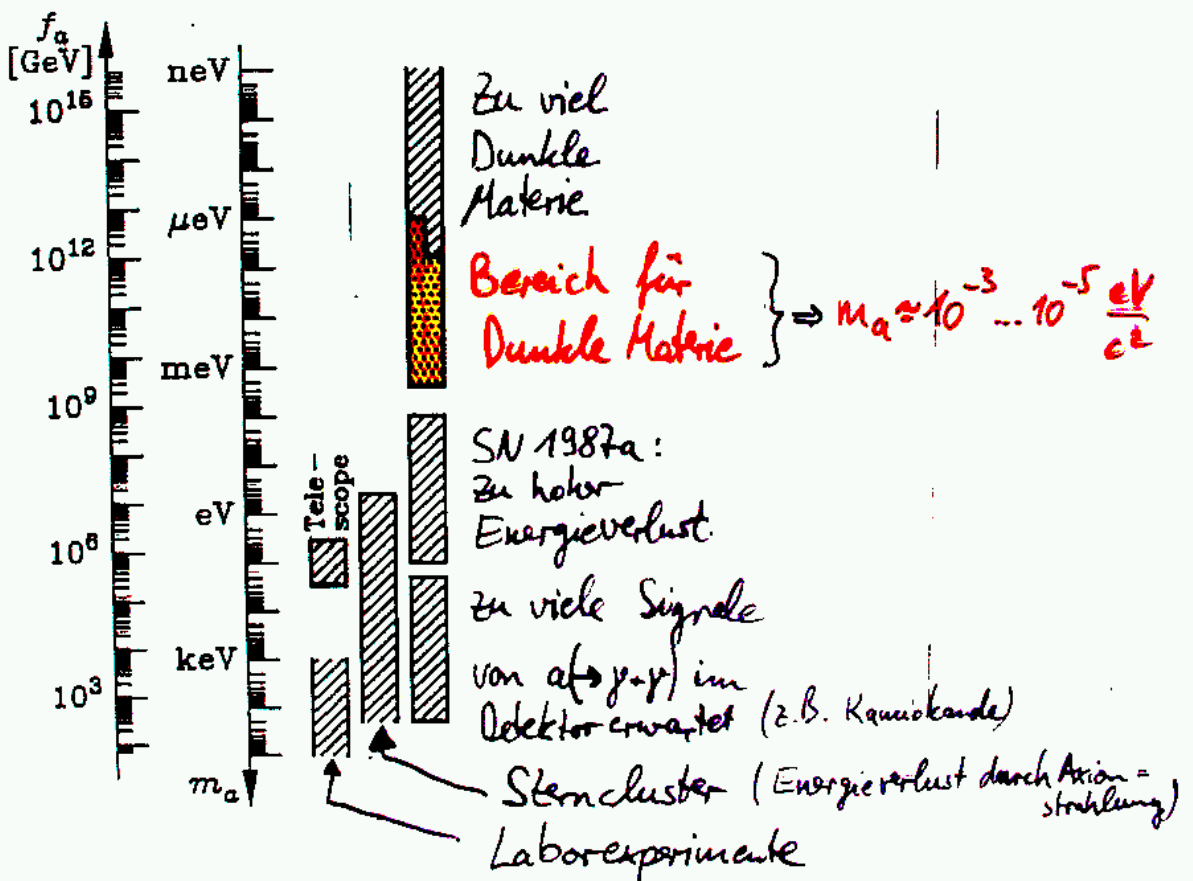
Kosmologische Einschränkungen des Axions

• Axion-Masse:

$$m_a \approx 0.62 \frac{\text{eV}}{c^2} \cdot \left[\frac{10^7 \text{ GeV}}{f_a} \right]$$

f_a : Axion zerfallskonstante

$$f_a = 10^3 \dots 10^{25} \text{ GeV}$$

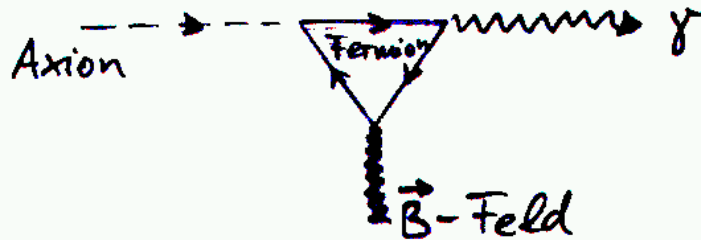


\Rightarrow Für Dunkle Materie relevante Axion-Massen:

$$6 \mu\text{eV}/c^2 < m_a < 2.5 \text{ meV}/c^2$$

Axion-Teilchen

• Nachweis:

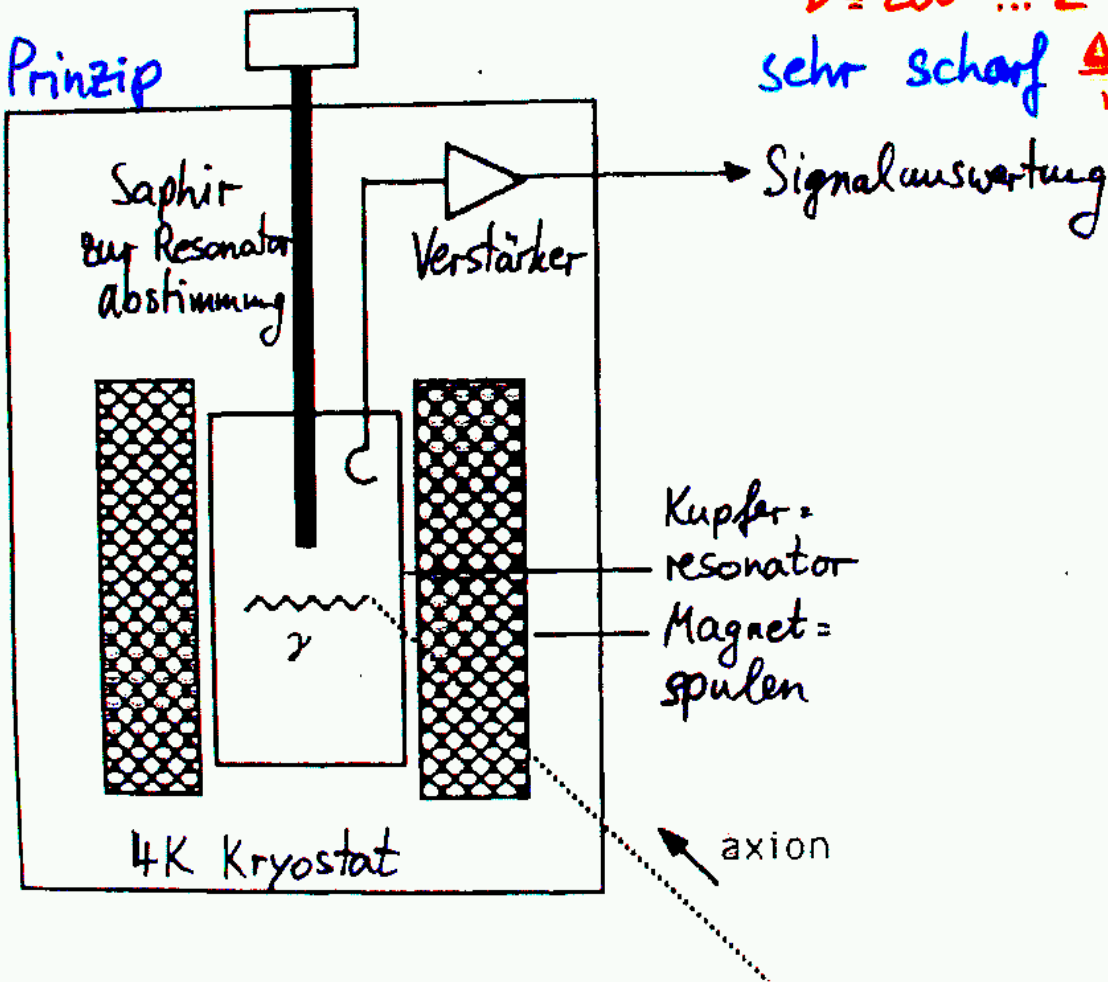


$$m_a = 10^{-3} \dots 10^{-5} \frac{eV}{c^2}$$

Frequenz des Photons γ

$\nu = 200 \dots 2 \text{ GHz}$
sehr scharf $\frac{\Delta\nu}{\nu} \approx 10^{-6}$

Prinzip

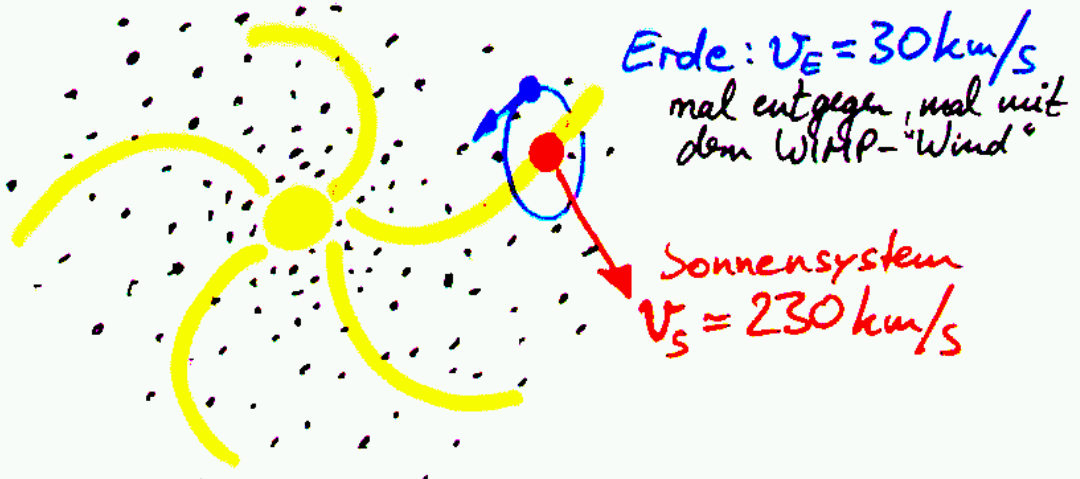


\Rightarrow kein Signal für $m_a \approx 10^{-5} \dots 10^{-6} \frac{eV}{c^2}$

WIMP-Teilchen

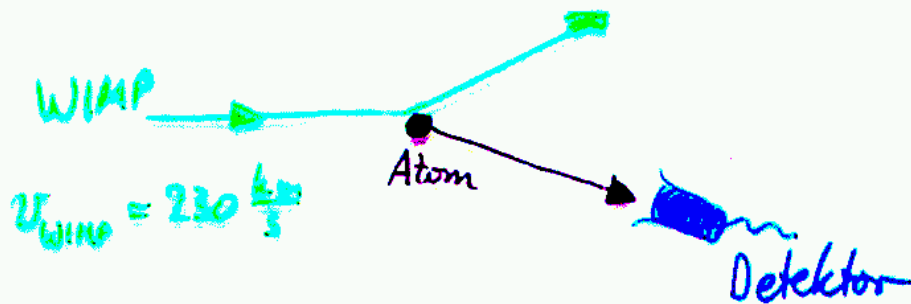
Weakly Interacting Massive Particles (WIMP, engl.: Schwächling)

- wichtige Kandidaten:
Supersymmetrische Partnerpartikel zu gewöhnlichen Elementarteilchen
- konkret: **leichtestes SUSY-Teilchen (LSP)**
(wenn stabil)
- Wissensstand: $m_{LSP} \gtrsim 40 \text{ GeV}/c^2$
(Experimente am LEP-Beschleuniger)
- WIMPs aus Urknall sind "kalt"
 $T_{WIMP} \leq T_U = 1,95 \text{ K}$ (für Neutrinos aus Urknall)
- bilden Halo um Galaxis



WIMP-Teilchensuche

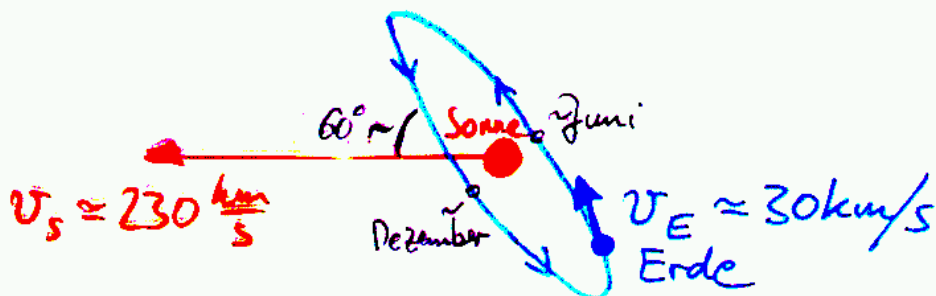
- nutze Rückstoßenergie zum Nachweis.



- Messung der Rückstoßenergie:

- ▶ Szintillationslicht aus Ionisation im Stoß z.B. DAMA
- ▶ Phononenabsorption an supraleitendem Thermometer, welches genau auf der Sprungtemperatur T_c gehalten wird (bolometrischer Nachweis) z.B. CRESST

- Erwartung einer jährlichen Modulation der WIMP-Stoßrate ($\leq 7\%$ Amplitude)



DAMA-Experiment Gran Sasso

≈ 100kg NaI(Tl) -Szintillator

Meßdauer ≈ 580 Tage

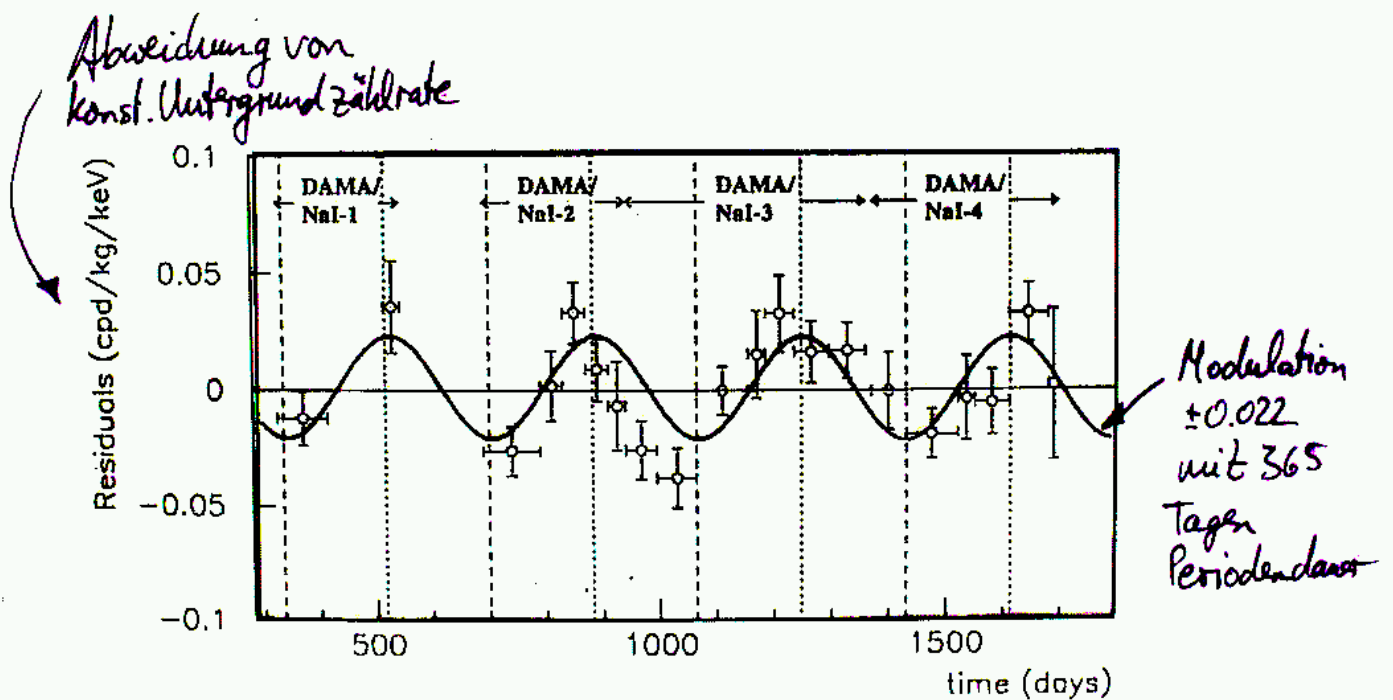


Positives Resultat des DAMA-Experiments?

DAMA (= DARK MATTER, Gran Sasso Labor, Italien)

- insgesamt $\approx 100\text{kg NaI}$ (TL) - Szintillator
- Rückstoßenergie ($\sim \text{keV}$) \rightarrow Lichtsignal
- Meßdauer ≈ 580 Tage
- Modulation der Zählrate : $\approx 2.2\%$

($\approx 19\%$ Wahrscheinlichkeit f. Oszillation)



- Anpassung der Vorhersage:

$$m_{\text{WIMP}} = (52 \pm \frac{10}{8}) \text{ GeV}/c^2$$

\rightarrow Resultat muß von anderen Experimenten noch bestätigt werden

WIMP-Masse aus DAMA - Resultat

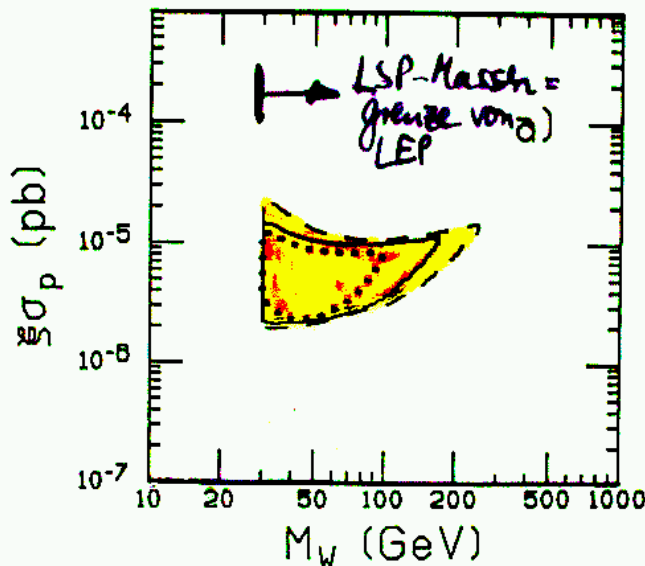
- kinetische Energie des WIMP-Teilchens:

$$E_{kin} = \frac{1}{2} m_{WIMP} v^2 \approx 0.3 \text{ keV} \cdot m_{WIMP} \left[\frac{\text{GeV}}{c^2} \right]$$

- Streu-Wirkungsquerschnitt ist unbekannt: σ_p

- WIMP-Dichte unbekannt: $\xi \equiv \frac{\rho_{WIMP}}{0.3 \text{ GeV/cm}^3}$

Halodichte in Sonnens
umgebung folgt aus
Sterkinematik über-
legungen



99% CL Konturen

Figure 4: a) Regions allowed at 3σ C.L.: i) for $v_0 = 220$ km/s (dotted contour); ii) when accounting for v_0 uncertainty ($170 \text{ km/s} \leq v_0 \leq 270 \text{ km/s}$; continuous contour); iii) when considering also a possible bulk halo rotation as in ref. [7] (dashed contour); b) Regions allowed at 3σ C.L. - for the same conditions as previously reported - when including the constraint arising from the results of ref. [2].

Fazit

- Das kosmische Höhenstrahlungsspektrum reicht bis zu makroskopischen Energien. Bis ca. 10^{15} eV ist der Beschleunigungsmechanismus im Schockwellen zu suchen. Oberhalb von 10^{15} eV ist der Mechanismus noch unklar. Die Quelle für Teilchen von mehr als $5 \cdot 10^{19}$ eV wird intensiv gesucht.
(Solche Teilchen dürften die Erde eigentlich nicht erreichen, weil sie mit der kosmischen Hintergrundstrahlung zu Pionen wechselwirken.)
- Dunkle Materie wird zur Erklärung von u.a. den Galaxienrotationskurven benötigt.
- Es gibt viele Teilchen-Kandidaten für nicht-baryonische Dunkle Materie, jedoch Neutrinos scheiden wegen ihrer vermutl. geringen Massen als alleiniger Beitrag aus.
- Das positive Signal für ein WIMP-Teilchen im DAMA-Experiment muss noch unabhängig bestätigt werden.