

Kosmische Strahlung

Oskar Schneider

Scheinseminar Astro- und Teilchenphysik SS 2010
Friedrich-Alexander Universität Erlangen-Nürnberg

8. Juli 2010

- 1 Einführendes
 - Historisches
 - Messverfahren
- 2 Eigenschaften
 - Chemische Zusammensetzung
 - Ausbreitung im ISM
 - Spektrum
- 3 Spektrum und mögliche Beschleuniger
 - Das Knie
 - Knie bis Knöchel
 - Knöchel und UHECR
- 4 Quellen

Entdeckung

- Ionisierende Strahlung an Erdoberfläche schon länger bekannt
Aber: Wird radioaktiver Strahlung zugeordnet

- **1912:** Österreicher Viktor Franz Hess
Ballonmessungen bis 5 km Höhe
Ergebnis: Strahlung nimmt mit Höhe zu
⇒ Strahlung kommt aus Weltall
⇒ Begriff **Kosmische Strahlung**
Nobelpreis 1936



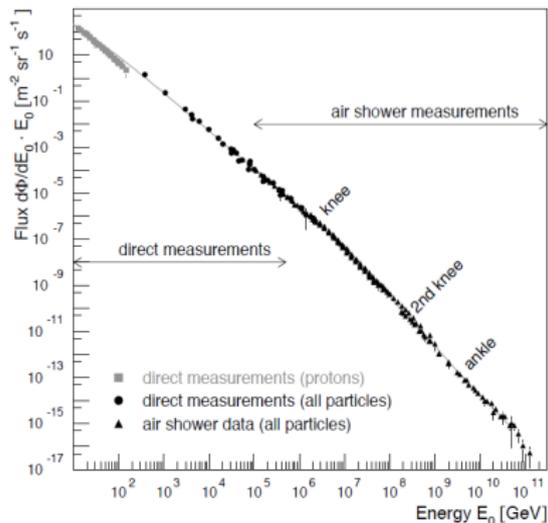
Abbildung: Hess im Ballon [1]

Weitere Forschung...

- **1927**: Dimitry Skobelzyn kann erstmals Sekundärteilchen der KS in Nebelkammer fotografieren
- **1938**: Pierre Auger misst bei Koinzidenzmessungen in den Alpen zwei zusammengehörende Ereignisse in voneinander entfernten Detektoren. Er schließt daraus die Existenz ausgedehnter Luftschauer.
- **1932-47**: Entdeckung vieler Elementarteilchen in Nebelkammern und Fotoemulsionen durch KS
(Positronen, Myonen, Pionen, Kaonen)
⇒ Motivation zum Beschleunigerbau

...bis Heute

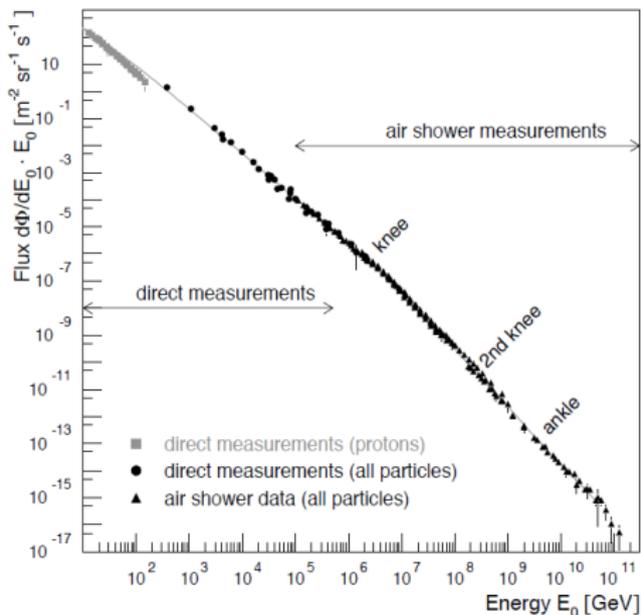
Bis Heute wurden Energien von $10^8 - 10^{21}$ eV detektiert und recht lange an der KS geforscht. Dennoch:



????

- Quellen ?
- Beschleunigung ?
- Ausbreitung ?
- Höchste Energien ?

Unterschiedliche Flüsse



Abnahme des Flusses

$$> 1 \text{ GeV} \quad \frac{1000}{\text{sm}^2}$$

$$> 1 \text{ PeV} \quad \frac{1}{\text{yrm}^2}$$

$$> 100 \text{ EeV} \quad < \frac{1}{10 \text{ yr km}^2}$$

⇒ Unterschiedliche Messverfahren

- Direkte Verfahren
- Indirekte Verfahren

Direkte Messverfahren

Bis circa 100 TeV sind direkte Untersuchungen der KS möglich.

Direkte Messungen

Ballon- und Satellitenexperimente

- Ionisationsdetektoren
- Magnetspektrometer (Impulsmessung)
- Szintillatoren
- Kalorimeter
- ...

Indirekte Messverfahren

Über 100 TeV werden große Flächen benötigt um Teilchen Nachzuweisen.
Rückschlüsse auf Eigenschaften aus **Luftschauerexperimenten**.

Luftschauer

- KS-Teilchen reagiert in Atmosphäre
- Sekundärprodukte erzeugen Kaskaden von Zerfällen

⇒ Ausgedehnte Luftschauer

Messverfahren

- Fluoreszenzteleskope
- Wasser-Cherenkov-Tanks
- ...

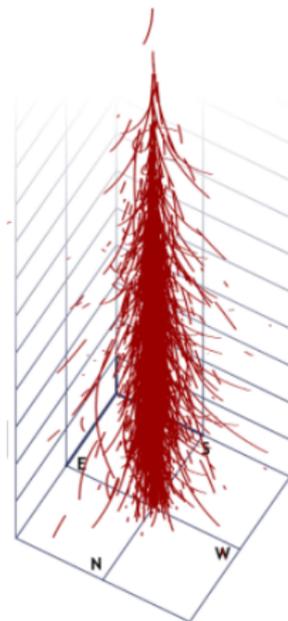


Abbildung: Luftschauer [3]

Beispiele für Experimente

Direkte Experimente

- Ballonexperimente
 - Japanese-American Cooperative Emulsion Experiment (JACEE)
- Satelliten
 - Alpha Magnetic Spectrometer (AMS01, AMS02)

Indirekte Experimente

- Pierre-Auger-Observatory
- HiRes
- KARlsruhe Shower Core and Array DETector (KASCADE)
- Fly's Eye

Chemische Zusammensetzung

Chemische Zusammensetzung

Geladene Kosmische Strahlung im Bereich 1-100 TeV

- ca 98 % Atomkerne
 - ca 87 % H-Kerne bzw. Protonen
 - ca 12 % α -Kerne
 - ca 1 % schwerere Kerne (alle Elemente des Periodensystems nachgewiesen)
- ca 2 % Elektronen
- geringer Anteil Antiprotonen, Positronen

Zusätzlich

- Photonen
- hochenergetische Neutrinos

Elemente in KS und Sonnensystem

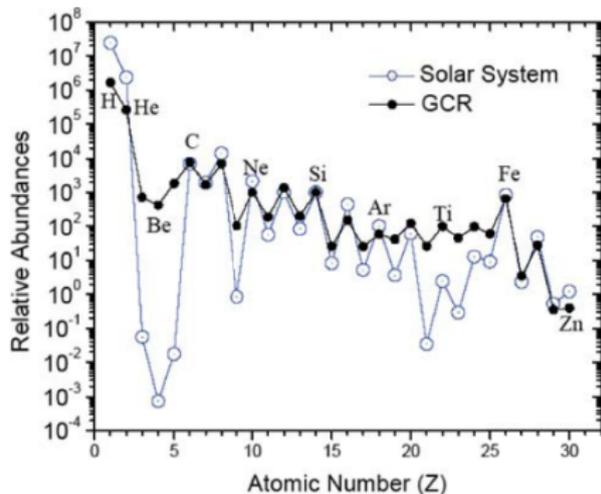


Abbildung: Relative Häufigkeit der Elemente bis ca. 100 TeV [2]

Übereinstimmungen

C, N, O

⇒ Elementsynthese in Sternen

Unterschiede

Li, Be, B:

- Schwache Bindungsenergie
- Zwischenprodukt in Sternen
⇒ Sekundärreaktionen von C, N, O der KS im interstellaren Gas

Elemente in KS und Sonnensystem

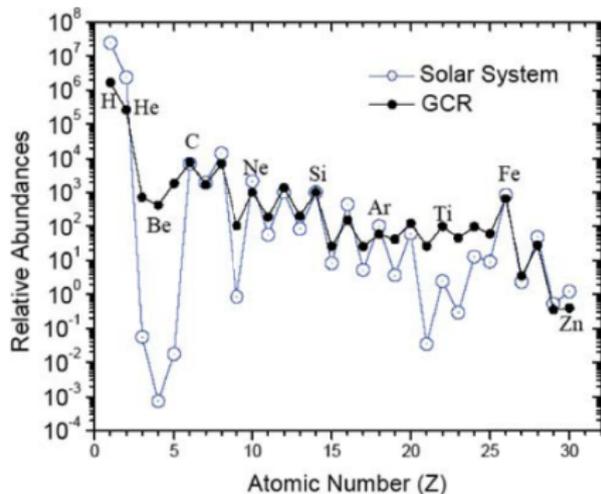


Abbildung: Relative Häufigkeit der Elemente bis ca. 100 TeV [2]

Unterschiede

- **Sc, Ti, V, Mn:**
Spallationsprodukte von Fe und Ni
- **H, He:**
schwerer zu ionisieren
⇒ seltener beschleunigt

Bei höheren Energien ändert sich die Zusammensetzung.

Ausbreitung

Ausbreitung

Wegstrecke

- Verhältnis der Isotopen (z.B. $\frac{B}{C}$, $\frac{^{10}Be}{^{12}C}$), erlaubt Abschätzung der **mittleren Verweildauer**.

$$\Rightarrow \bar{\tau} \approx 10^7 \text{ Jahre}$$

- Zusätzlich **relativistische Geschwindigkeiten** nahe c
 \Rightarrow Wegstrecke \gg Durchmesser Galaxie

Folgerung

KS-Teilchen bewegen sich auf **ungeordneten Bahnen**, durch **galaktische Magnetfelder** abgelenkt.

Galaktisches Magnetfeld

Eigenschaften

- **Feldstärke:** $B \approx 3\mu\text{G}$
- **Feldverteilung:**
 - nicht homogen
 - zeichnet Struktur der Spiralarme nach

Gyroradius

Bahnradius eines geladenen Teilchens im Magnetfeld (senkrechte Komponente)

$$\rho = \frac{pc}{ZeB}$$

mit p Teilchenimpuls, Ze Teilchenladung

Vorsicht: Nur äußerst grobe Abschätzung.

Galaktisches Magnetfeld

Auswirkungen

- GM fängt und akkumuliert KS (ca 10^7 Jahre)
- GM isotropiert Richtungsverteilung
⇒ Quellen nicht aus Richtung bestimmbar

Dennoch lässt sich für höchstenergetische Teilchen eine Aussage machen.
Proton mit $E = 10^{20}$ eV und $B_{GM} = 3\mu\text{G}$

$$\Rightarrow \rho = \frac{pc}{ZeB} \approx 11\text{Tpc} \quad (r_{MS} \approx 15\text{kpc})$$

Folgerung

⇒ Höhere Energien weisen auf extragalaktische Quellen hin.

Spektrum

Energiespektrum

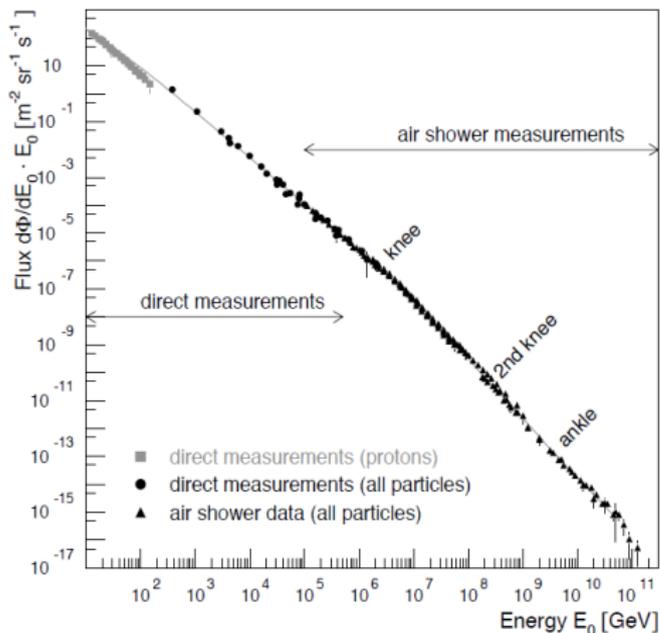


Abbildung: Energiepektrum [4]

Energiespektrum

- Sehr steiler Abfall
- Power-Law:

$$\frac{dN}{dE} = E^\gamma$$

⇒ kein thermisches
Spektrum

„featureless“

⇒ andere Darstellung

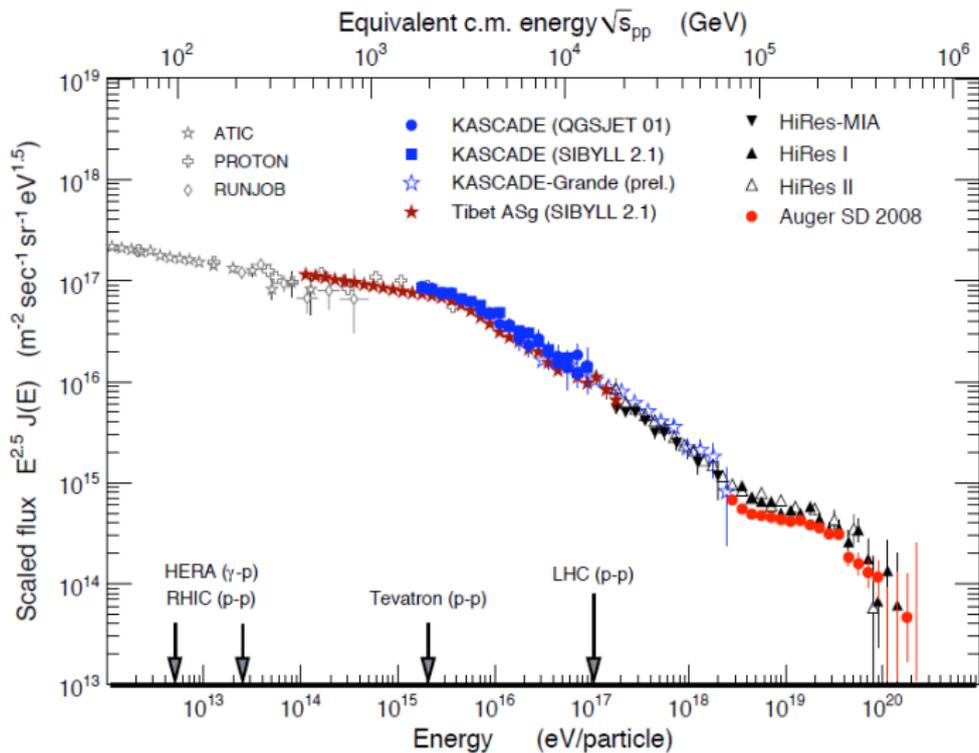
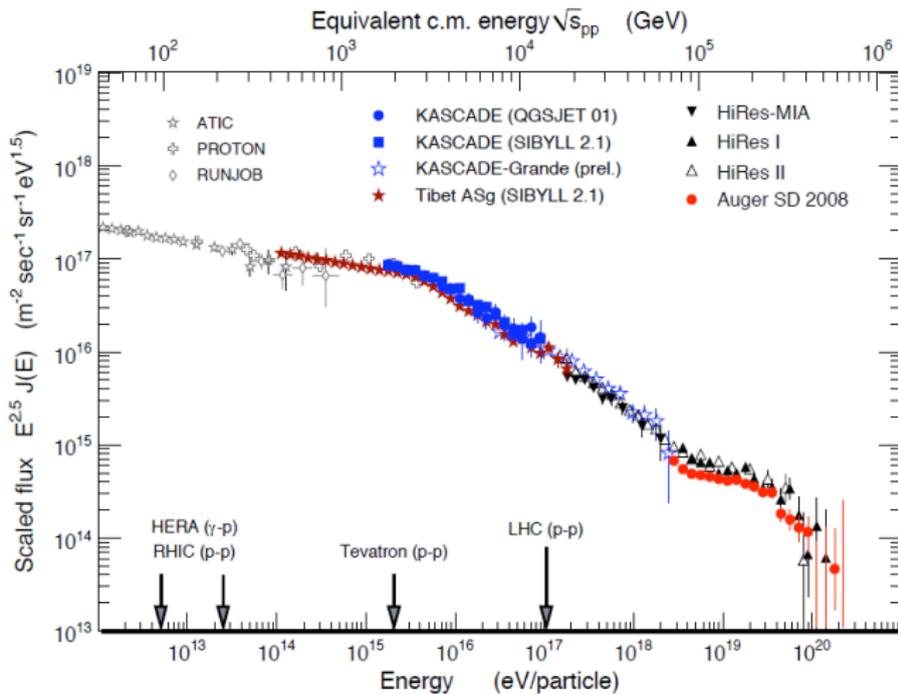


Abbildung: Mit $E^{2,5}$ multipliziertes Spektrum [1]



Markante Bereiche

- **Knie:** $\frac{dN}{dE} \propto E^\gamma, \gamma \begin{cases} -2,7 & \text{wenn } E < 4 \cdot 10^{15} \text{ eV} \\ -3,1 & \text{wenn } 4 \cdot 10^{15} < E < 5 \cdot 10^{18} \text{ eV} \end{cases}$
- **Knöchel** ab ca 100EeV, erneute Abflachung

Stochastische Beschleunigung

Power-Law erklärbar durch **stochastische Beschleunigung**.

Annahmen

- $E = \xi E_0$, Energie nach Beschleunigung
- P , Wahrscheinlichkeit in Beschleunigerregion zu bleiben

Nach k Beschleunigungen

$$\begin{aligned} \bullet N &= N_0 P^k & \Rightarrow \frac{\ln(N/N_0)}{\ln(E/E_0)} &= \frac{\ln(P)}{\ln(\xi)}, \quad \frac{N}{N_0} = \left(\frac{E}{E_0} \right)^{\frac{\ln P}{\ln \xi}} \\ \bullet E &= E_0 \xi^k \end{aligned}$$

\Rightarrow Power-Law

$$\frac{dN}{dE} = \text{const.} \cdot E^{-1 + \frac{\ln P}{\ln \xi}} \propto E^\gamma$$

Das Knie

Beschleunigung in Supernovae?

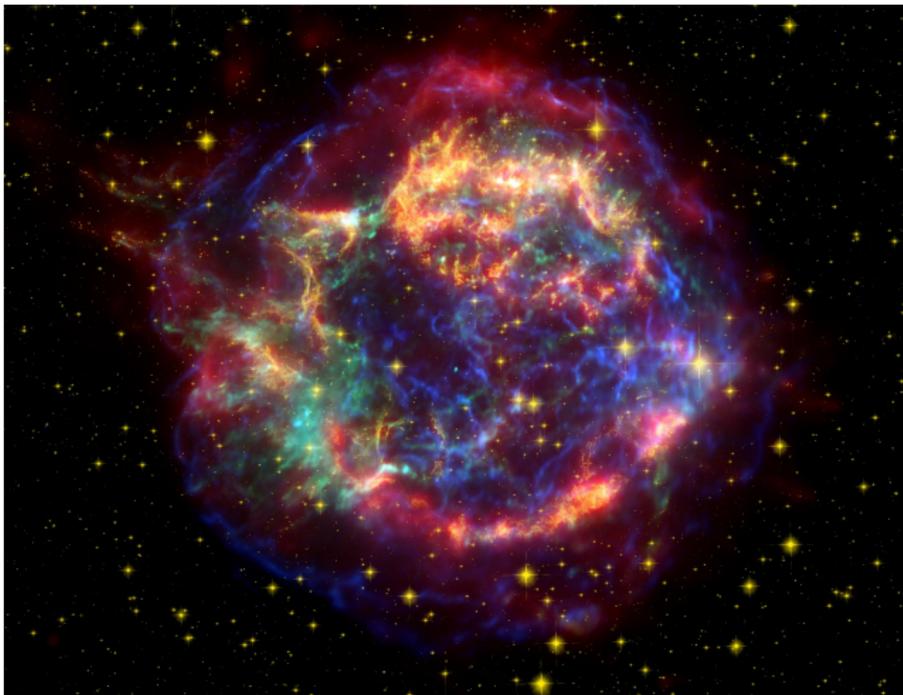


Abbildung: Cassiopeia A [11]

Bringen SNs die nötige Beschleunigungsleistung?

Kosmische Strahlung

- **KS-Energiedichte:** $\rho_E^{KS} \approx 0,5 \frac{\text{MeV}}{\text{m}^2}$
- **Verweildauer:** $\tau_G^{KS} \approx 10^7 \text{ a}$
- **Volumen Galaxis:** $V_G \approx 10^{61} \text{ m}^3$

$$\Rightarrow L_{KS} = \frac{V_G \cdot \rho_E^{KS}}{\tau_G^{KS}} \approx 3 \cdot 10^{33} \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

Supernovae

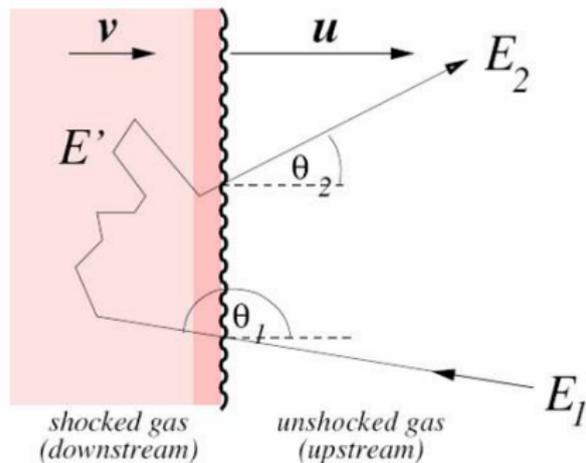
- **Zeit** zw. SN-Explosionen: $\tau_G^{SN} \approx 30 - 50 \text{ a}$
- **Energie** pro SN-Explosion: $E^{SN} \approx 3 \cdot 10^{46} \text{ J}$

$$\Rightarrow L_{SN} = \frac{E^{SN}}{\tau_G^{SN}} \approx 3 \cdot 10^{35} \frac{\text{J}}{\text{s}}$$

⇒ Effizienz von 1 – 10% Beschleunigung würde reichen.

Beschleunigung in SNe Schockfronten I

Die Beschleunigung wird in den **Schockwellen** der SN-Explosionen angenommen. Ein gutes Modell bietet die **Fermi-Beschleunigung 1. Ordnung**.



Relativistische Rechnungen ergeben:

Mittlere Energie

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

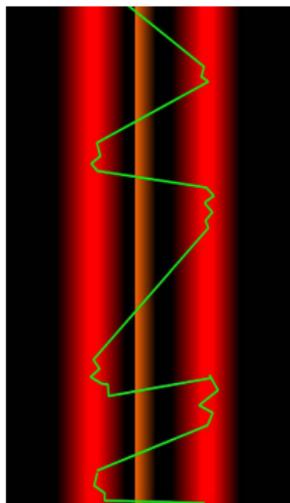
wobei $\beta = \frac{u}{c}$

Abbildung: Skizze Fermibesleunigung 1.Ordnung [2]

Beschleunigung in SNe Schockfronten II

Vor und nach der Front bildet sich **Plasma** mit **turbulenten Magnetfeldern** aus.

⇒ Mehrfache Beschleunigung möglich.



Legende

- Schockfront
- Plasma mit Magnetfeld
- Teilchenbahn

Abbildung: Veranschaulichung
Schockwellenbeschleunigung [5]

Beschleunigung in SNe Schockfronten III

Maximale Energie

Lebenszeit einer Schockfront:

$$\tau \approx 10^5 \text{ a}$$

$$\Rightarrow E_{max} \approx Z \cdot (0.1 - 5) \text{ PeV}$$

\Rightarrow Z-Abhängiges Abknicken der Elemente

Verschiedene Modelle berücksichtigen unterschiedliche

- Magnetfeldstärken der SNe
- Verfügbare Energien
- Umgebendes Medium

Beschleunigung in SNe Schockfront IV

Vergleich mit Power-Law

Numerische Abschätzungen ergeben für Supernovae-Schockfronten

$$\frac{dN}{dE} = \text{const.} \cdot E^{-1 + \frac{\ln P}{\ln \xi}} \propto E^\gamma$$

$$\gamma = 2,0 \dots 2,2$$

Mit Berücksichtigung von **Energieverlustprozessen im ISM** ist das mit dem realen Wert von $\gamma = 2,7$ im Spektrum vereinbar.

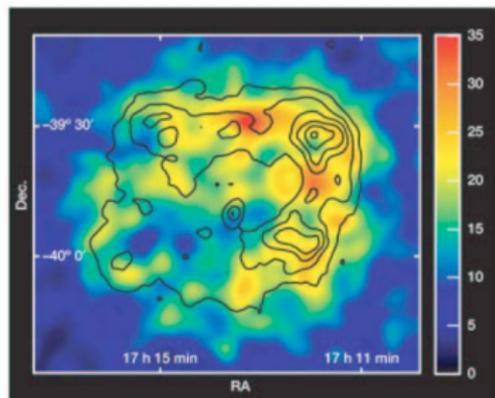
γ -Spektrum SNe I

Abbildung: γ -ray Bild von H.E.S.S., RX J1713.7-3946

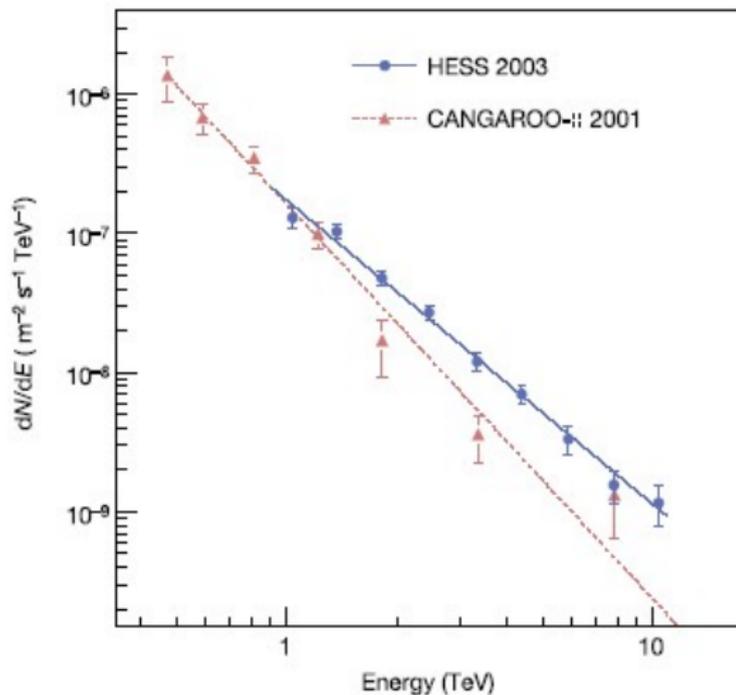


Abbildung: Power-Law im γ -Bereich [8]

γ -Spektrum SNe II

Power-Law im γ -Spektrum

Auch im γ -ray Spektrum konnte ein Power-Law erkannt werden mit Index:

$$\gamma_\gamma = 2,13 \pm 0,03$$

Übereinstimmung mit Schockwellen-Modellen.

(Wechselwirkung beschleunigter Protonen mit umgebendem Medium)

Gamma-Quanten solcher Energien können nur von geladenen Teilchen mit noch höheren Energien erzeugt werden.

⇒ Supernovae können bis über 100 TeV beschleunigen.

⇒ SNe können Spektrum bis zum Knie gut erklären. Es gibt jedoch noch weitere Erklärungsversuche für das Knie.

Einzelne nahe Quelle?

Einzelne nahe SN

Spektrum kommt Zustande durch

- Naher SNR
- Untergrund

Auch hier wäre ein Z-abhängiges Abknicken zu beobachten.

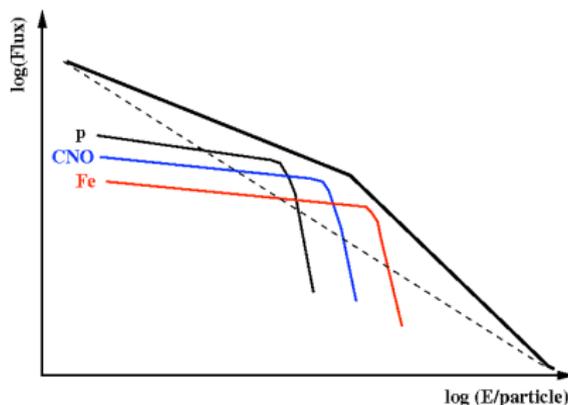


Abbildung: Nahe Quelle + Untergrund [12]

Entweichen aus der Galaxie I

Erinnerung: Gyroradius

$$\rho = \frac{pc}{ZeB}$$

⇒ Teilchen können ab gewisser Energie Galaxis verlassen. Dies wäre auch **Z-Abhängig**.

Entweichen aus der Galaxie II

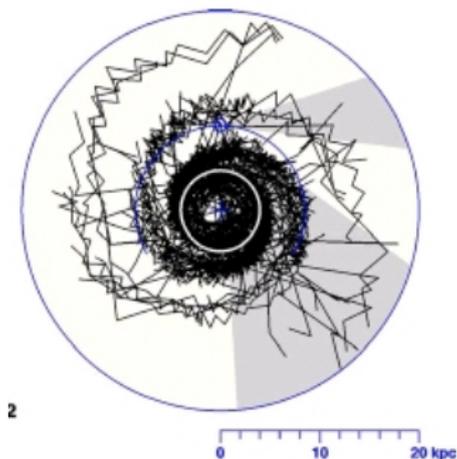


Abbildung: Simulation: 10^{18} eV, isotrop injiziert bei 4kpc [12]

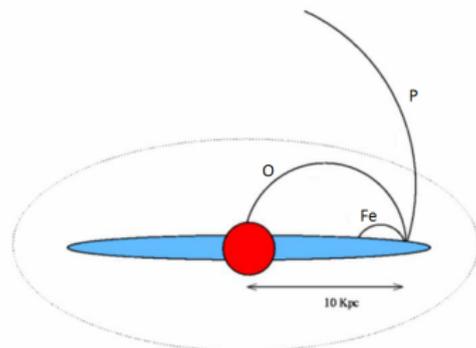


Abbildung: Z-Abhängigkeit Gyoradius [2]

Problem bei Luftschaueranalyse?

Unbekannte Komponente bei Luftschauern

Bekannte Komponenten:

- Elektromagnetische Komponente
- Myonische Komponente
- Hadronische Komponente

Vielleicht gibt es ab bestimmter Energie eine weitere **unbekannte Komponente**. Dies würde ein **A-**, also ein **Masseabhängiges** Abknicken zur Folge haben.

Unterschied Z- oder A-Abhängiges abknicken

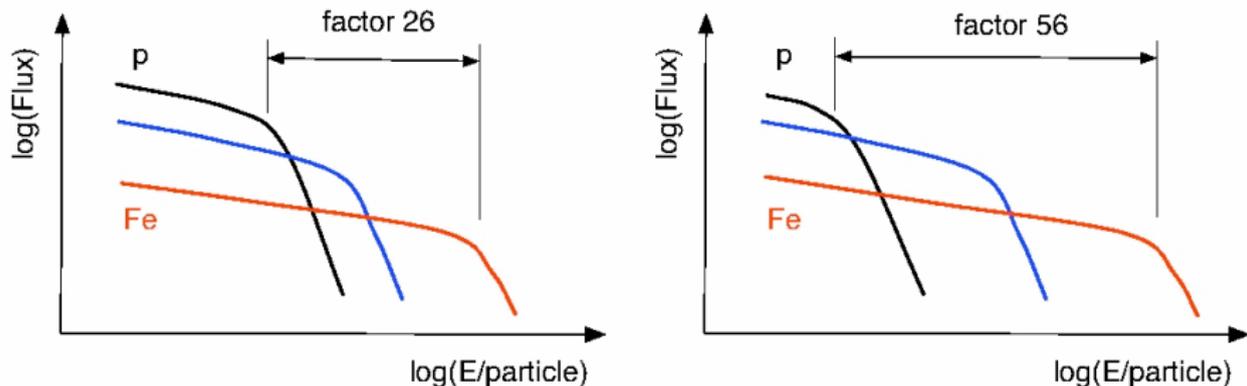


Abbildung: Schematische Darstellung [12]

Bilderklärung

- Links: **Z-Abhängig** (E_{max} SNe, bzw. diffundieren aus Galaxis)
- Rechts: **A-Abhängig** (Unbekannte Luftschauerkomponente)

Messungen

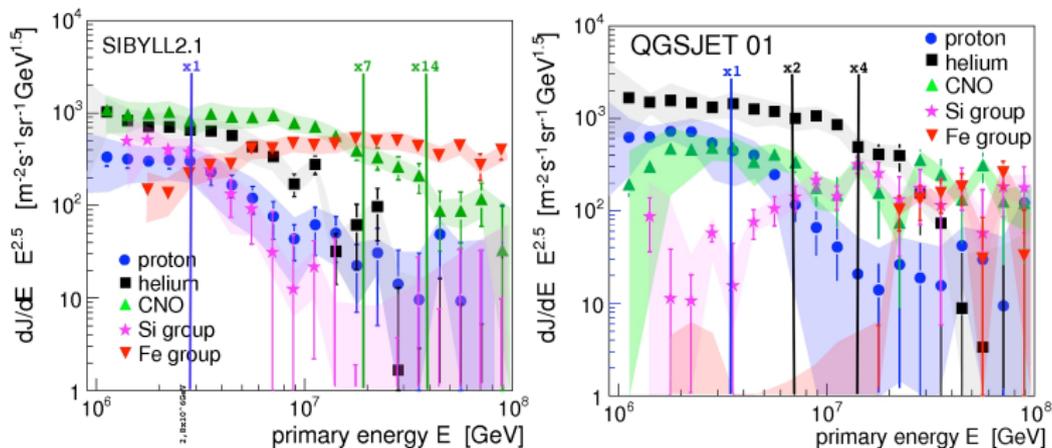


Abbildung: Messergebnisse Cascade [6]

Ergebnis

A- und Z- Abhängigkeit nicht unterscheidbar. Jedoch ist offensichtlich, dass leichtere Komponenten zuerst abknicken.

Zusammenfassung Knie

Beobachtung

- Verlust leichter Elemente (Z-oder A-Abhängig)
- Korrelation von KS-Spektrum und Schockfrontenmodellen von SNR
- Korrelation mit γ -ray-Spektren von SNR und Schockfrontenmodellen

⇒ Kombination von:

- E_{max} SNR ($E_{max} \approx Z \cdot (0.1 - 5) \text{PeV}$)
- Diffundieren aus der Galaxis

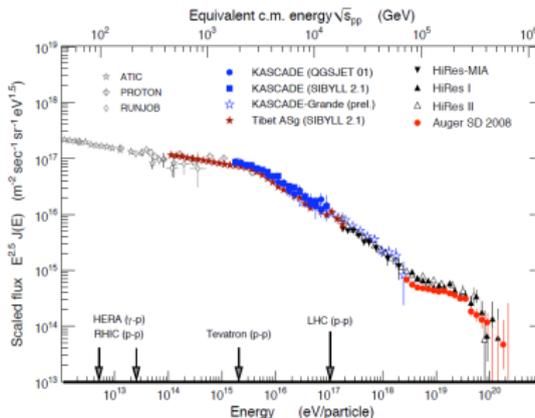
Knie bis Knöchel

Übergang zu extragalaktischen Quellen

- Erinnerung: Ab gewisser Energie ist Gyroradius zu groß um Teilchen in Galaxis zu binden.
- Trotzdem werden Teilchen mit höheren Energien detektiert

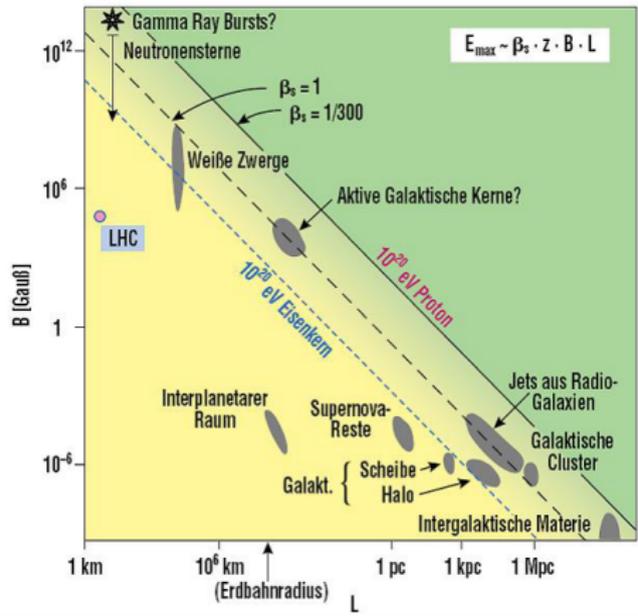
⇒ Irgendwo im Bereich $10^{16} - 10^{18}$ eV kommen extragalaktische Quellen hinzu.

Doch was sind mögliche Quellen?



Hillas Diagramm

Eine vereinfachte und grobe Abschätzung möglicher Quellen bietet das Hillas-Diagramm.



Legende

- β_s Schockgeschwindigkeit
- z Kernladungszahl
- B Magnetfeldstärke
- L Ausdehnung

Abbildung: [7]

Beschleuniger

Beschleunigungsmechanismen

- Akkretion bzw. Plasmabewegung \Rightarrow Magnetfelder
- Schockwellen- und EM-Beschleunigung in Jets

Kandidaten

- Pulsare (bis $\approx 10^{19}$ eV)
- AGN (bis $\approx 10^{21}$ eV)
- Doppelsternsysteme (bis $\approx 3 \cdot 10^{19}$ eV)
- Mikroquasare
- GRBs
- ...

Wenig Statistik und Isotropisierung macht das Identifizieren schwer

Komposition der extragalaktischen KS

Weitere Anhaltspunkte?

Wie im Hillas-Diagramm erkennbar ist, kommt es auch auf die **Kernladungszahl**, also die Komposition der extragalaktischen KS an. Dadurch lässt sich auf

- den Übergangsbereich von gal. zu extragal. KS
- mögliche Quellen

schließen.

Komposition bei hohen Energien

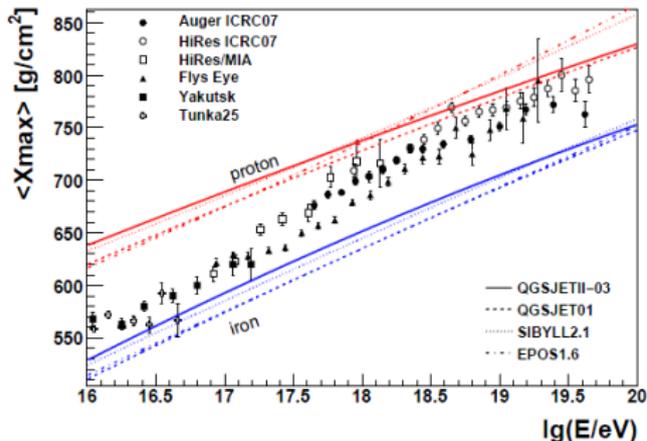


Abbildung: Komposition bei höheren Energien [10]

$\langle X_{max} \rangle$

Mittlere atmosphärische Tiefe, in der EM-Kaskade das Maximum erreicht:

$$\langle X_{max} \rangle = \alpha (\ln E - \langle \ln A \rangle) + \beta$$

Ergebnisse

schwer \rightarrow leicht \rightarrow schwer?

\Rightarrow Höhere Statistik und bessere Modelle vonnöten.

Knöchel und UHECR (Ultra-High-Energie-Cosmic-Rays)

$$E > 10^{20} \text{ eV}$$

Ab 1993 misst **AGASA** mehrere Events mit $E > 10^{20}$ eV, so genannte „oh my god“-Teilchen.

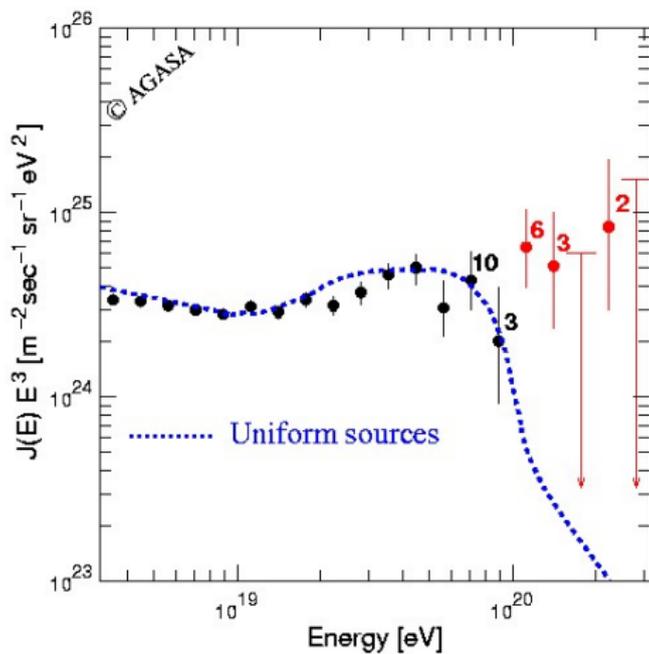


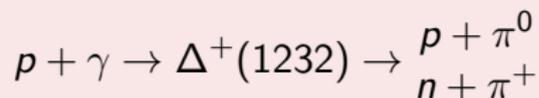
Abbildung: AGASA Messungen [9]

GZK-Cutoff

Problem

Greisen-Zatsepin-Kusmin-Cutoff

- Ab Schwerpunktsenergie $E_{GZK} = 1,073\text{GeV}$ können Kerne und Protonen mit Photonen der CMB wechselwirken.



- **Energieverlust:** p verliert im Mittel 20% Energie
- **Mittlere freie Weglänge** 30 – 50 Mpc
⇒ Galaxienahe Quellen.
- **Aber:**Keine Quellen in näherer Umgebung der MS bekannt, die so hohe Energien beschleunigen kann.

GZK-Cutoff

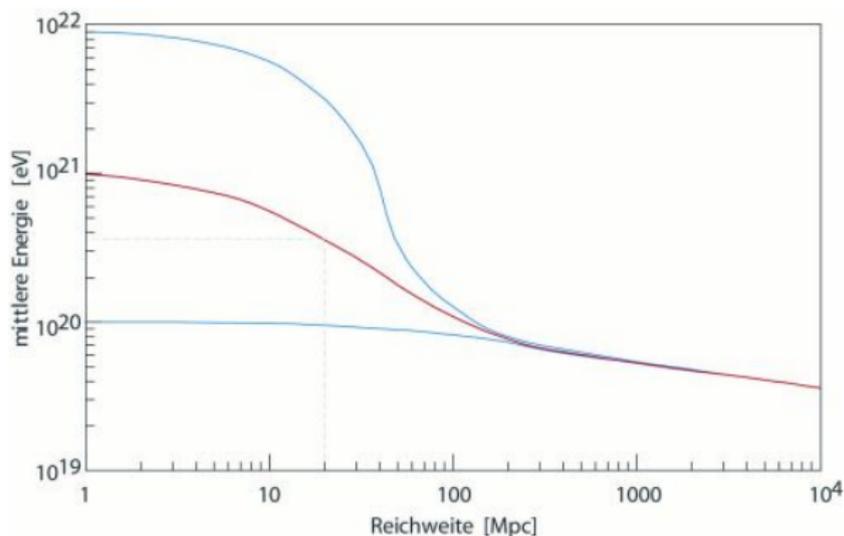


Abbildung: GZK-Effekt mehrfach möglich. Irgendwann landen alle Protonen bei ca $5 \cdot 10^{19}$ eV. [7]

Erklärungsversuch

Zerfall superschwerer Teilchen (Top-Down Modell)

- 1 Superschwere X-Teilchen aus Inflation
- 2 Sammeln sich im Halo der MS an
- 3 Spontaner Zerfall

Probleme:

- Höhere Anisotropie vom Galaxiezentrum als gemessen
- Neue Teilchenphysik
- Evidenzen für solche Teilchen wurden nie gefunden

Messung Pierre-Auger-Observatory, HiRes

GZK-Cutoff doch Nachgewiesen

⇒ AGASA hat wohl falsch gemessen.

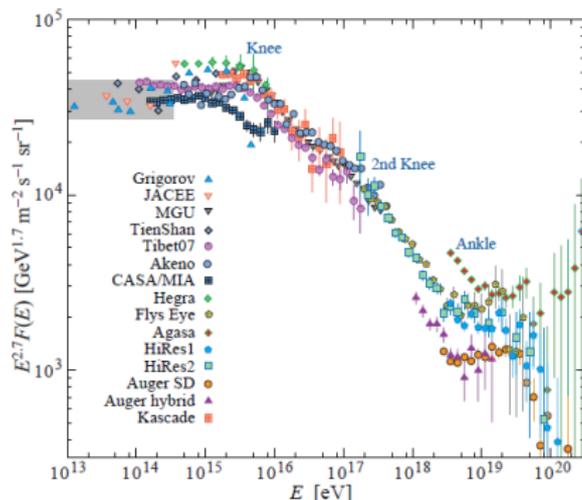
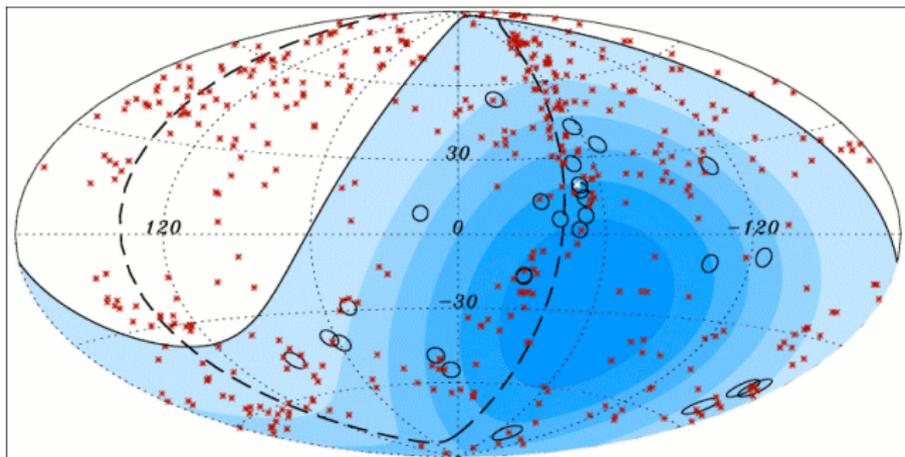


Abbildung: Energiespektrum mit AGASA [10]

Ursprung höchster Energien

Bei den höchsten Energien wird die Strahlung nicht mehr so stark durch das galaktische Magnetfeld Isotropisiert (Gyroradius wird sehr groß).

⇒ Anisotropien können auf mögliche Quellen hinweisen



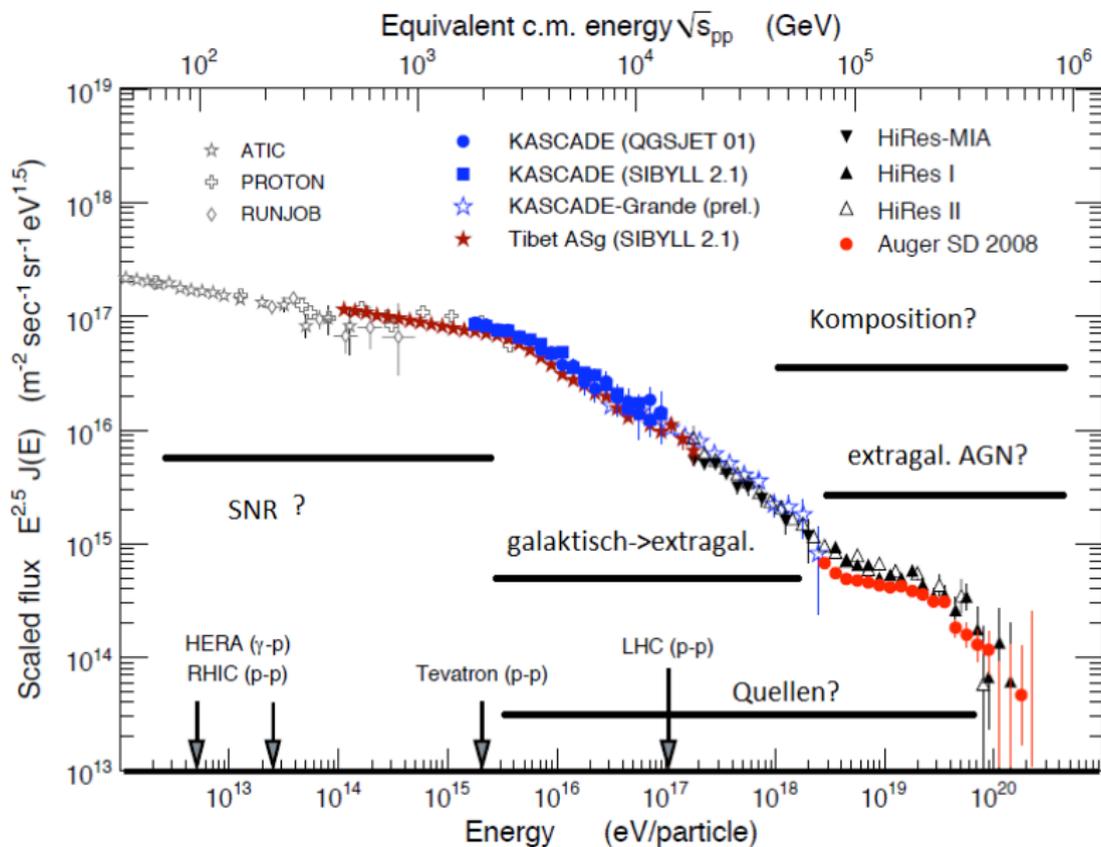
Legende

- **Sterne:** AGN
- **Kreise:** Hochenergie KS
- **Bänder:** Blickfeld

Abbildung: AGN und UHECR; Messung Auger [7]

Zusammenfassung und Ausblick

Zusammenfassung



Ausblick

- **LHC:** Bessere Interpretation der Luftschauerdaten.
- **Höhere Statistik der Komposition und der höchsten Energien** (Auger etc.)
- **Messungen Neutrinos, Photonen:**
Besseres Verstehen des hochenergetischen Bereichs, Quellen und Beschleunigungsmechanismen.

?FRAGEN?

-  [1] www.astroteilchenphysik.de
-  [2] Skript zur Vorlesung Astroteilchenphysik, Hermann Kolanoski, Humboldt-Universität zu Berlin
-  [3] <http://www.astro.ru.nl>
-  [4] www.weltderphysik.de
-  [5] <http://www.ecap.physik.uni-erlangen.de/katz/ws05/atp/talks/sr/SR.pdf>
-  [6] H. Ulrich: INDIRECT MEASUREMENTS AROUND THE KNEE-RECENT RESULTS FROM KASCADE
-  [7] www.auger.de
-  [8] <http://www.mpi-hd.mpg.de/hfm/HESS/pages/home/som/2005/01/>
-  [9] <http://www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA>
-  [10] M. Unger, Cosmic Rays above the Knee

-  [11] www.wikipedia.de
-  [12] <http://particle.astro.kun.nl/hs0607/A-Vogel.pdf>
-  [13] T. Yamamoto, The UHECR spectrum measured at the Pierre Auger Observatory and its astrophysical implications
-  [14] J. Blümer, R. Engel, J. Hörandel, Cosmic Rays from the Knee to the Highest Energies
-  [15] T.K. Gaisser, Cosmic Rays at the Knee