

Kosmische Strahlung

Seminar Astroteilchenphysik
Am 25.01.2010

Von

Janine Scherer

Friedrich- Alexander- Universität
Erlangen- Nürnberg

Zur historischen Entdeckung der kosmischen Strahlung

- Ende 19.Jhd.: Coulomb macht die Entdeckung, dass eine geladene Kugel sich nach und nach entlädt
- 1900: Beobachtung: Elektroskop entlädt sich im Dunkeln, fernab von radioaktiven Quellen → Ionisierung der Luft durch unbekannte Strahlung

Welcher Natur ist diese Strahlung?

- Naheliegende Vermutung:
Natürliche Radioaktivität
→ Unwahrscheinlich, da
- Standortveränderungen der Nachweisexperimente nur geringfügige Änderungen herbeiführen

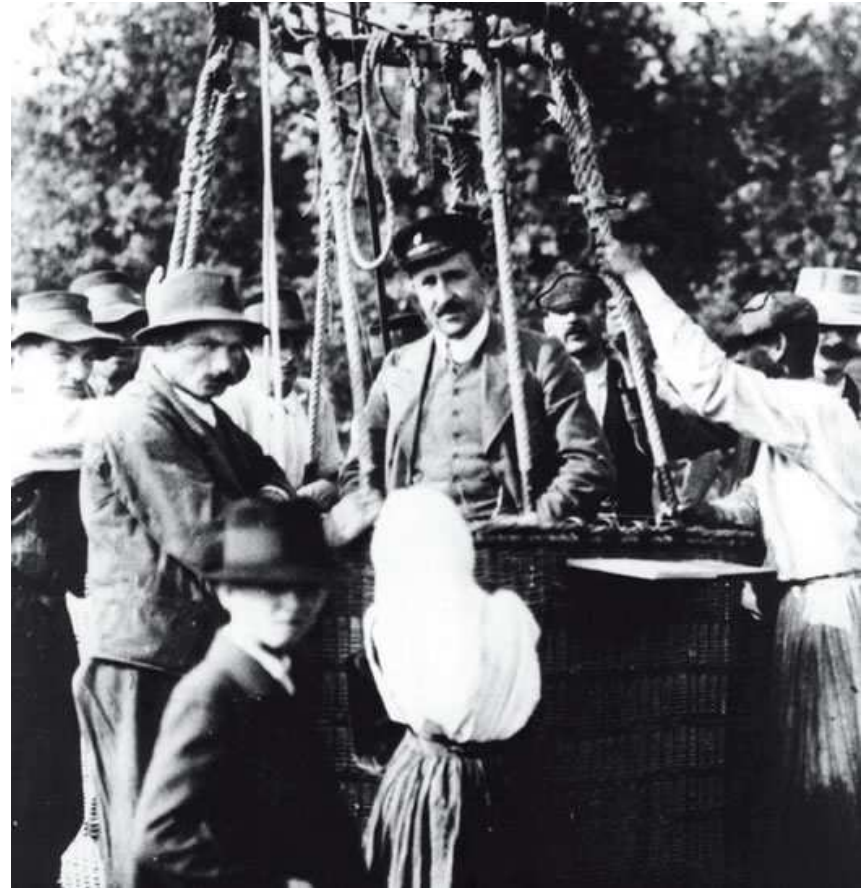
Zur historischen Entdeckung der kosmischen Strahlung

- **Großer Durchbruch:**

1912: Victor Hess unternahm bemannten Ballonflug, um mit einer Ionisationskammer die Abhängigkeit der Ionisation von der Höhe zu messen

Resultat: bis 2000m Abnahme wegen Bodenradioaktivität, dann Zunahme des Ionisationsgrades

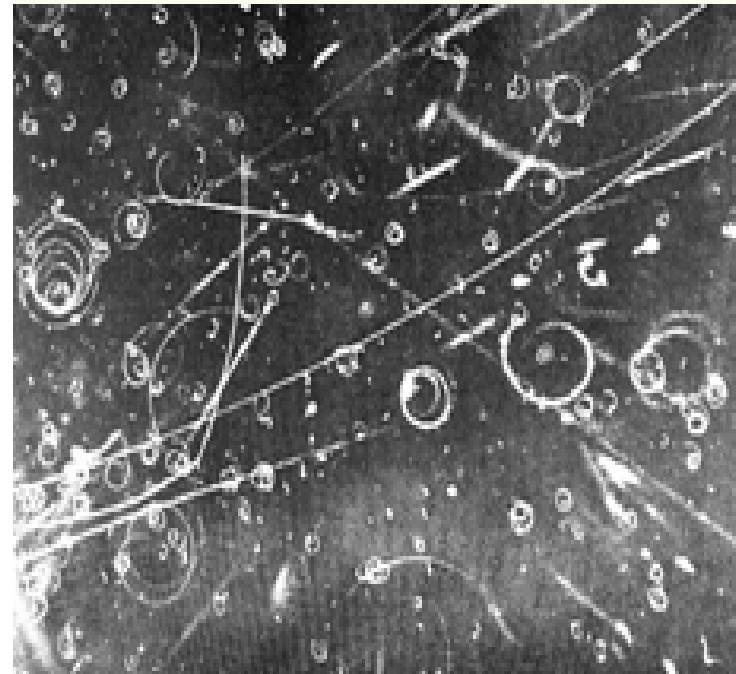
→ Strahlung ist extraterrestrischen Ursprungs



Zur historischen Entdeckung der kosmischen Strahlung

Nach wie vor ist man jedoch über die Natur der Strahlung im Unklaren
Vermutung: γ - Strahlung höherer Durchdringungskraft (Millikan)

- 1929: Bothe und Kolhörster:
kosmische Strahlung besteht
aus *geladenen Teilchen*
- 1929: Erste Aufnahme der Spur
eines Teilchens der kosmischen
Strahlung in einer Nebelkammer
durch Skobeltsyn

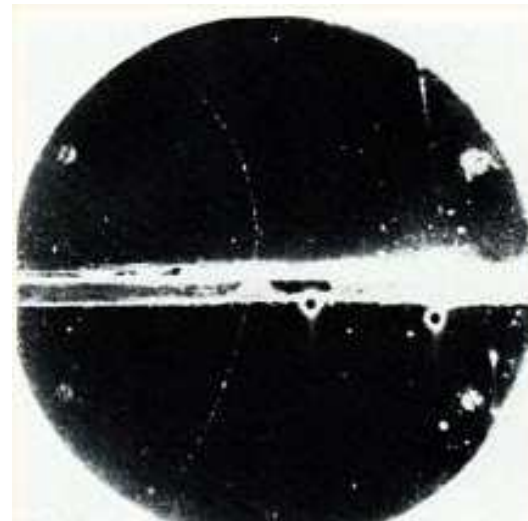


Entdeckung von Elementarteilchen

- 30er bis 50er Jahre: Kosmische Strahlung stellt natürliche Quelle hochenergetischer Teilchen dar

→ *Entdeckung neuer Teilchen*

- 1932: Anderson entdeckt Positron in einer Nebelkammer → Bestätigung der Vorhersage Paul Diracs
- 1936: Anderson und Neddermeyer: Entdeckung des Myons



Beitrag zur Entdeckung von Elementarteilchen

- 1947: Rochester und Butler: Entdeckung von geladenen und neutralen Kaonen in einer Nebelkammer
- 1947: Lattes, Occhialini, Powell, Muirhead: Entdeckung von Pionen in Kernemulsionen
- Ab 1953: Teilchenbeschleuniger
Vorteil:
 - Erzeugung mit bekannter Energie
 - Teilchen können direkt aufs Target gerichtet werden

Chemische Zusammensetzung der kosmischen Strahlung

Kosmische „Strahlung“ ($10^{10} \text{ eV} < E < 10^{14} \text{ eV}$) besteht zum Großteil aus *geladenen Teilchen*:

98% ionisierte Kerne, davon:

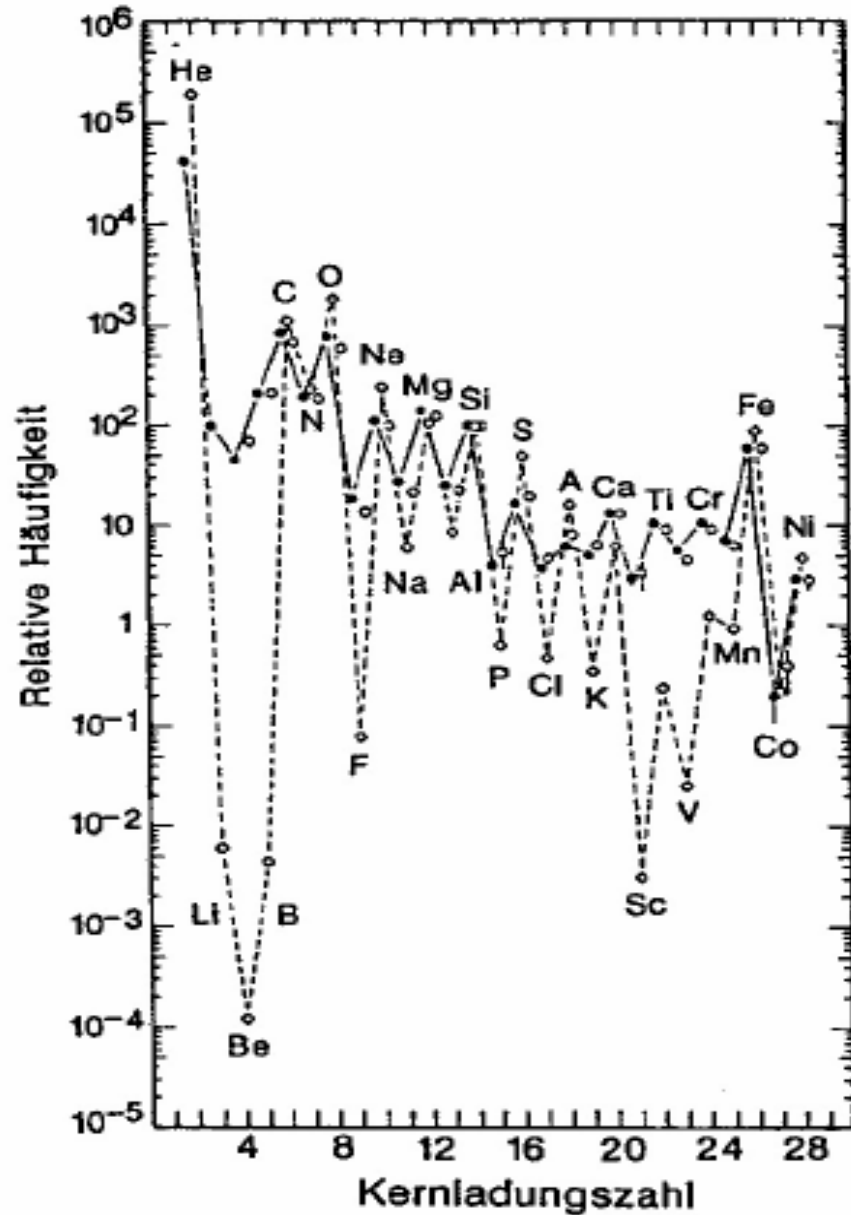
- 87% Protonen
- 12% α - Teilchen
- 1% schwerere Elemente

2% Elektronen

Frage: Positive Aufladung der Erde?

→ Nein. Wenn alle Energien in Betracht gezogen werden, treffen gleich viele Elektronen wie Protonen auf der Erde ein.

Chemische Zusammensetzung der kosmischen Strahlung



Elementhäufigkeiten am Rande der Atmosphäre: Vergleich der Häufigkeiten der KS mit derjenigen des Sonnensystems

Fazit:

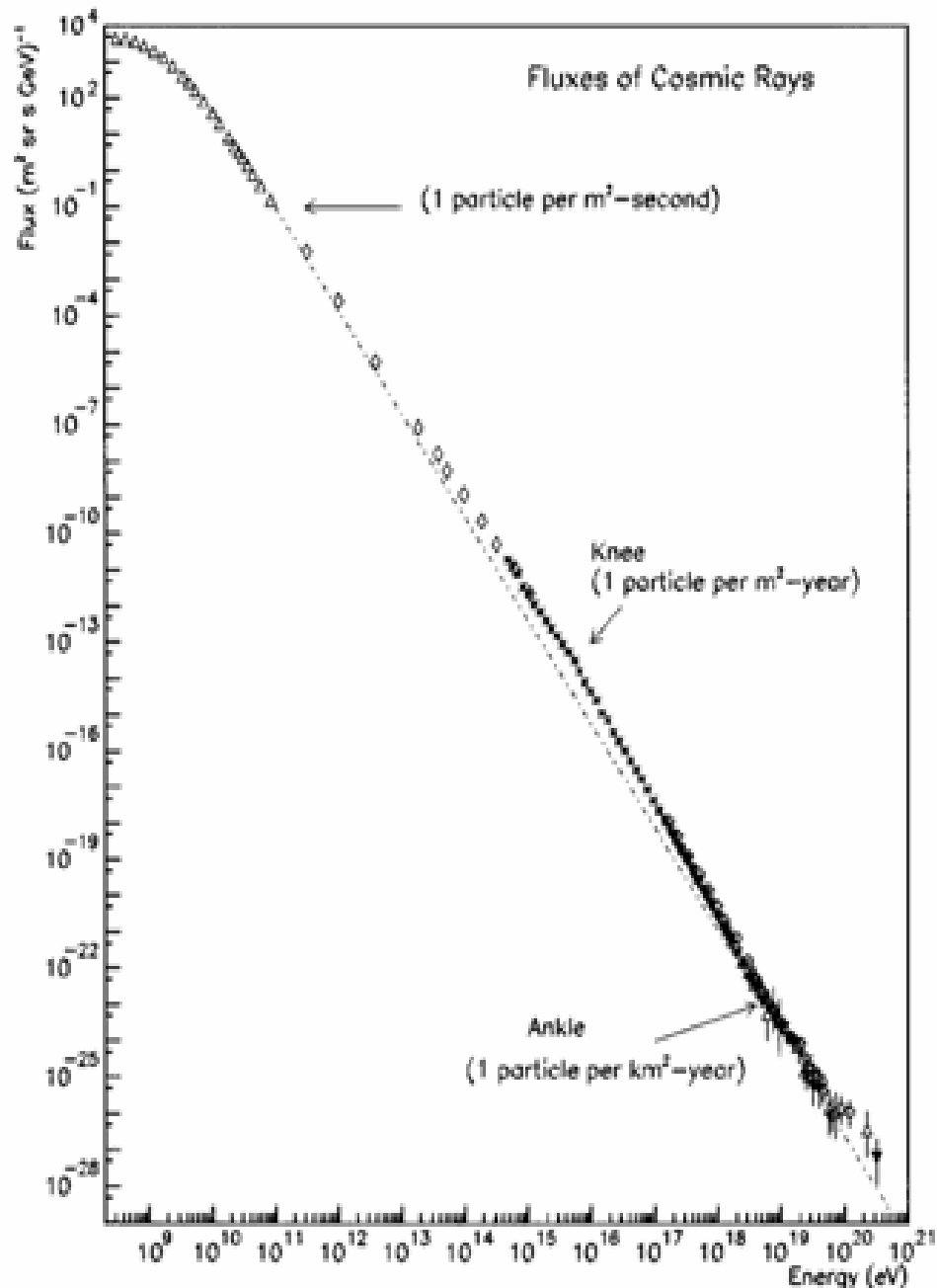
- Verteilungen weisen große Ähnlichkeit auf → evtl. gleicher Entstehungsmechanismus
- Bedeutende Abweichungen hinsichtlich der Elemente Li, Be, B; sowie Sc, V und Mn

Chemische Zusammensetzung der kosmischen Strahlung

Aber: Die betreffenden überhäufigen Elemente sind kein Endprodukt der Stellaren Nukleosynthese.

→ Entstehung erfolgt durch den Zusammenstoß primärer Teilchen der kosmischen Strahlung mit interstellarem Medium; Spallation der häufigen Elemente C, N, O, bzw. Fe

Aus dem Verhältnis primärer zu sekundärer Teilchen kann auf die Aufenthaltsdauer der KS in der Galaxie geschlossen werden (etwa 10^7 Jahre).

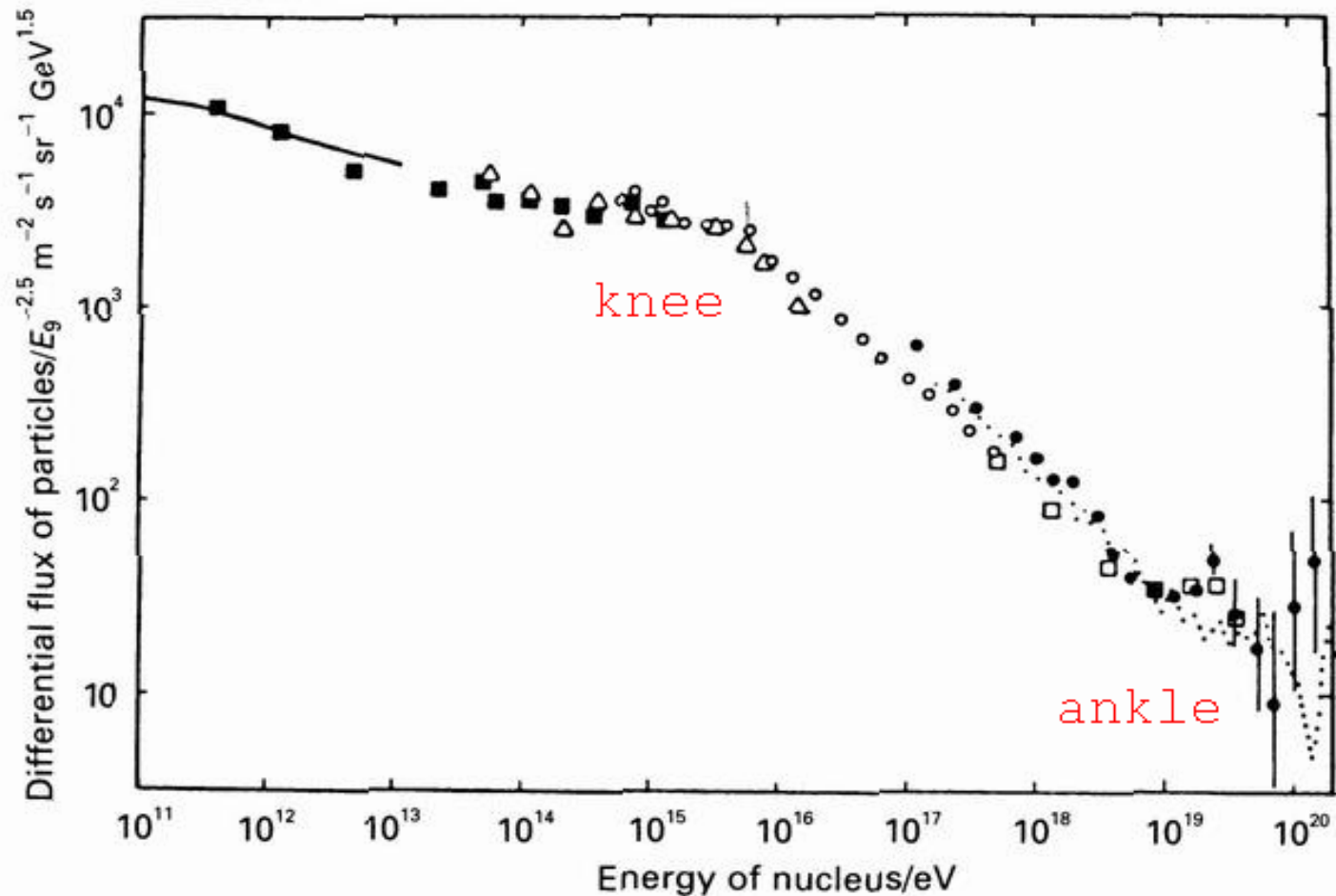


Energiespektrum der kosmischen Strahlung

- Spektrum sehr steil
→ rasche Abnahme des Flusses mit steigender Energie
- Sehr großer Energiebereich
- Differentielles Spektrum proportional zu $E^{-\gamma}$
- Aber: Details schwerlich erkennbar

Energiespektrum der kosmischen Strahlung

Nun sind „Knicke“ im Spektrum erkennbar:



"Knie":
 $\approx 10^{15} \text{ eV}$

"Knöchel":
 $\approx 5 \times 10^{18} \text{ eV}$

Energiespektrum der kosmischen Strahlung

Wie kommt das "Knie" im Spektrum zustande?

- Milchstraße hat im Gesamten ein Magnetfeld von $\approx 10^{10} T$

Zentripetalkraft gleich Lorentzkraft setzen und nach dem Impuls auflösen :

$$p = r \cdot q \cdot B \quad (B \perp v)$$

$$\Rightarrow p_{\max} = 4.6 \cdot 10^{15} eV$$

wenn für den Gyroradius 5kpc, also ein Wert in der Größenordnung der Milchstraße eingesetzt wird. D.h. Teilchen, deren Energie $10^{15} eV$ überschreitet laufen Gefahr, die Milchstraße zu verlassen.

- $10^{15} eV$ ist auch ungefähr die max. Energie, die einem Teilchen bei einer Supernovaexplosion mitgegeben werden kann.

Energiespektrum der kosmischen Strahlung

Energiebereich unterhalb des „Knöchels“ ist auf Teilchen galaktischen Ursprungs zurückzuführen.

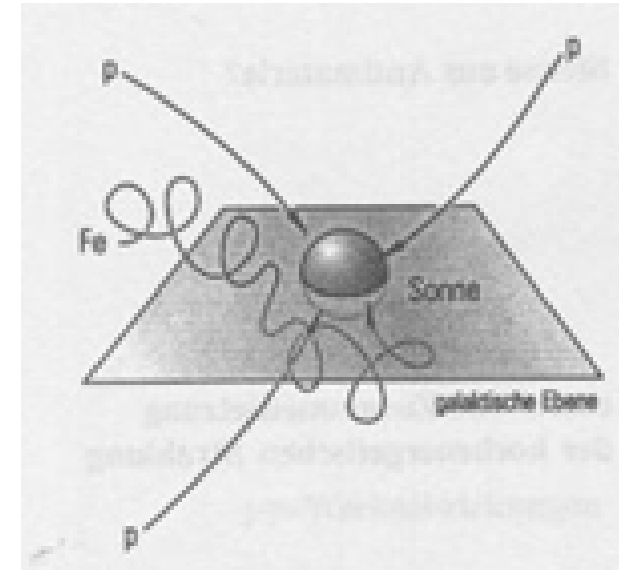
→ „Knöchel“ kommt zustande, weil Teilchen extragalaktischen Ursprungs zur galaktischen Komponente hinzukommen.

Ursprung der kosmischen Strahlung: Quellen und Beschleunigungsmechanismen

Schwierigkeit:

Die Teilchen der KS sind geladen
→ Ablenkung in interstellaren
Magnetfeldern

→ Verteilung am Himmel ist isotrop;
zeigen nicht wie Photonen oder
Neutrinos auf ihre Quellen
zurück



Aber:

Entstehungsorte der kosmischen Strahlen sind gemeinhin
auch die Orte, an denen die Teilchen beschleunigt werden.

Es lässt sich daher etwas über die Quellen erfahren, wenn
man die **Beschleunigungsmechanismen** betrachtet.

Ursprung der kosmischen Strahlung: Quellen und Beschleunigungsmechanismen

Beschleunigungsmechanismen

- **Zyklotronmechanismus** → *Sonne, bzw. generell Sterne*

Turbulente Plasmabewegungen, bestehend hauptsächlich aus Protonen und Elektronen, führen zu Magnetfeldern (Sonnenflecken). Deren Auf- und Abbau ruft ein elektrisches Feld hervor, in welchem Protonen und Elektronen beschleunigt werden können.

Bei einem Sonnenflecken - Radius von 10^9 cm und einem Magnetfeld von $2000T$ ergibt sich :

$$-\frac{d\phi}{dt} = \oint \vec{E} \cdot d\vec{s} = U$$

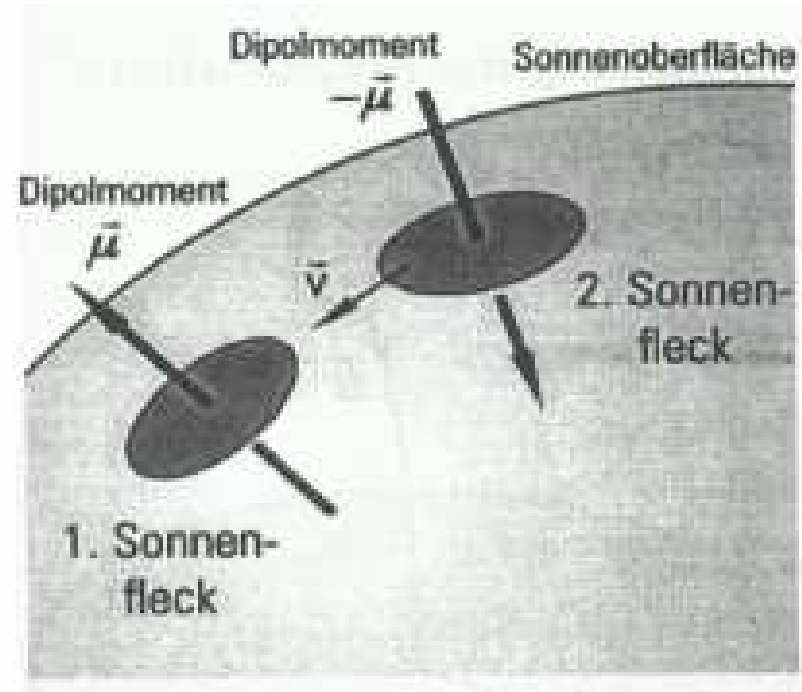
$$\Rightarrow E = eU = e \cdot \pi \cdot R^2 \cdot \frac{dB}{dt}$$

Erreichbare Energien : bis zu 10^{11} eV

Ursprung der kosmischen Strahlung: Quellen und Beschleunigungsmechanismen

- **Sonnenflecken- Paare → Sonne, bzw. generell Sterne**

Sonnenflecken entgegengesetzter magnetischer Polarität bewegen sich aufeinander zu und erzeugen elektrisches Feld



$$\vec{E} \parallel \vec{v} \times \vec{B}$$

Beschleunigung auf ungefähr $10^9 eV$ möglich.

Ursprung der kosmischen Strahlung: Quellen und Beschleunigungsmechanismen

- **Fermi- Mechanismus 2.Ordnung**

Der Mechanismus beschreibt den Zusammenstoß eines Teilchens der Geschwindigkeit v mit einer magnetischen Wolke der Geschwindigkeit u .

- v und u antiparallel: Energiegewinn

$$\Delta E_1 = \frac{1}{2} m \cdot (v + u)^2 - \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \cdot (2uv + u^2)$$

- v und u parallel: Energieverlust

$$\Delta E_2 = \frac{1}{2} m \cdot (v - u)^2 - \frac{1}{2} m v^2 = \frac{1}{2} m \cdot (-2uv + u^2)$$

$$\text{Netto- Gewinn: } \Delta E = \Delta E_1 + \Delta E_2 = m \cdot u^2 \quad \Rightarrow \quad \frac{\Delta E}{E} = 2 \cdot \frac{u^2}{v^2}$$

Aber: $u \ll v \approx c \Rightarrow$ Energiegewinn pro Kollision sehr klein

\Rightarrow Nachbeschleunigungsmechanismus

Ursprung der kosmischen Strahlung: Quellen und Beschleunigungsmechanismen

- **Schockbeschleunigung** → *Supernova*

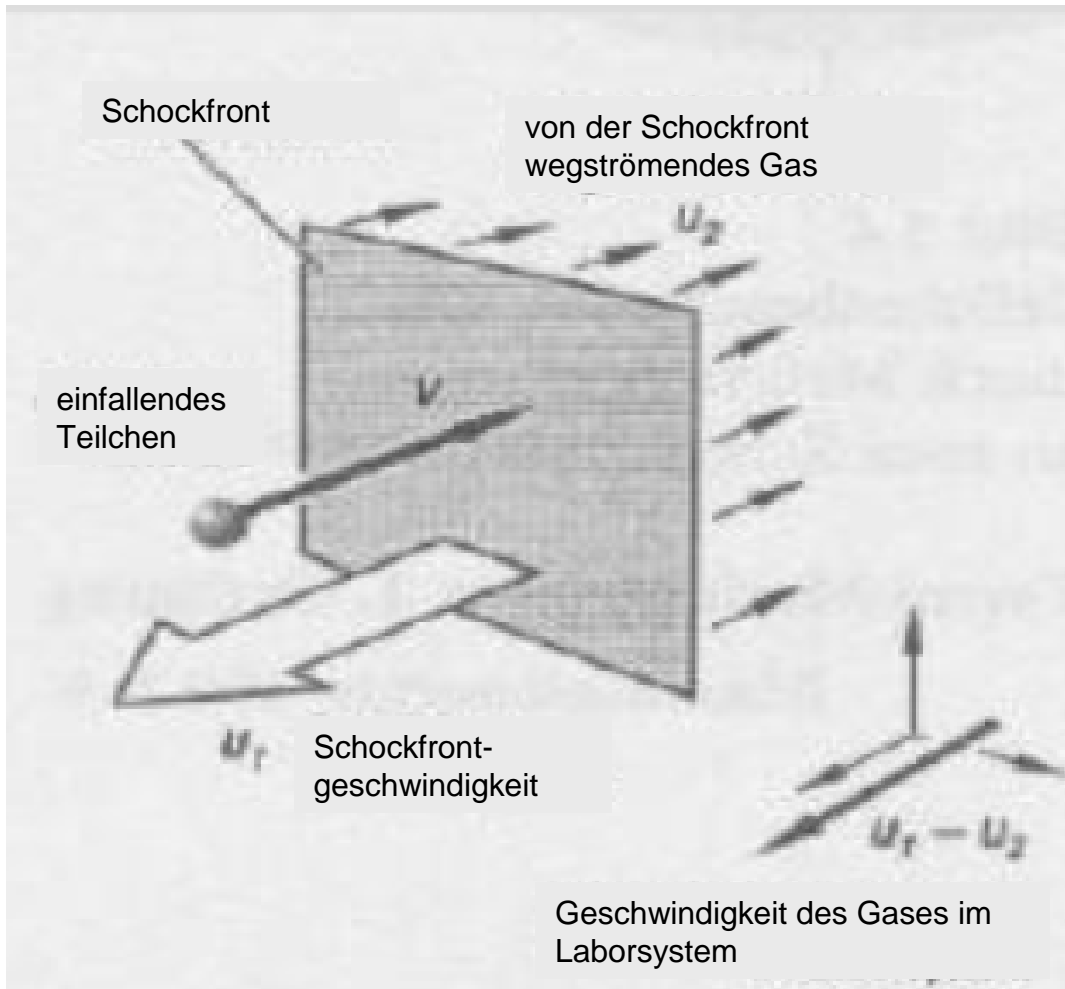
Schockwelle:

Störung, die sich mit einer Geschwindigkeit ausbreitet, welche größer ist als die Schallgeschwindigkeit des umgebenden Mediums



Bei Supernova: abgestoßene Hülle stellt Schockfront gegenüber interstellarem Medium dar

Teilchen gewinnen Energie durch mehrmaliges Durchqueren der Schockfront



Energiegewinn eines mit v auf die Front auftreffenden Teilchens:

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{4}{3} \cdot \frac{u_1 - u_2}{c}$$

→ Beschleunigung auf

$$\approx 10^{14} - 10^{15} \text{ eV}$$

Energiezuwachs linear abhängig von Schockwellengeschwindigkeit:

→ Fermi- Mechanismus 1.Ordnung

Ursprung der kosmischen Strahlung: Quellen und Beschleunigungsmechanismen

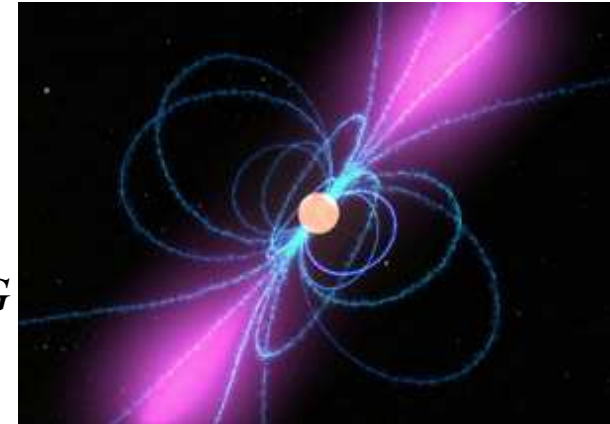
▪ Pulsare

→ sehr starke Magnetfelder

$$B_{Pulsar} = B_{Stern} \cdot \frac{R_{Stern}^2}{R_{Pulsar}^2}$$

mit $R_{Stern} = 10^6 km$; $R_{Pulsar} = 20km$ und $B_{Stern} = 1000G$

$$\Rightarrow B_{Pulsar} = 2.5 \times 10^8 T$$



- Rotationsachse und Symmetrieachse des Magnetfeldes stimmen in der Regel nicht überein

- Vektor dieser magnetischen Felder dreht sich um Rotationsachse

⇒ starke elektrische Felder, in denen Teilchen beschleunigt werden können

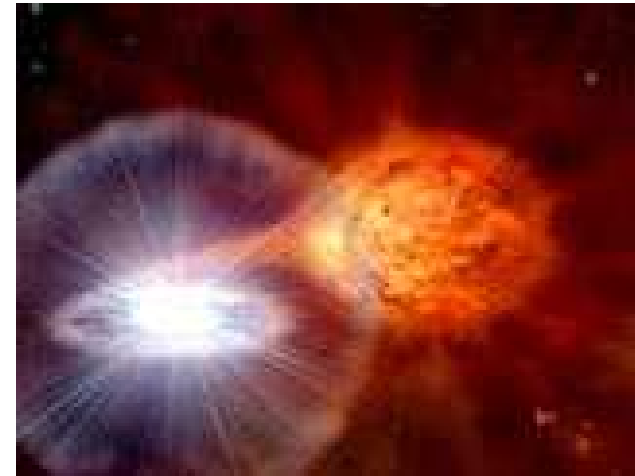
Energiegewinn (etwa 10^{19} eV) erfolgt also durch Umwandlung von Rotations- in Beschleunigungsenergie

Aber: Kein Beschleuniger hadronischer Materie!

Ursprung der kosmischen Strahlung: Quellen und Beschleunigungsmechanismen

- **Akkretierendes Doppelsternsystem**
 - System besteht aus Pulsar/ Neutronenstern und „normalem“ Stern
 - Masse wird dem Begleiter entzogen und bildet Akkretionsscheibe um das kompakte Objekt
 - Aufgrund dieser enormen Plasmabewegungen werden in der Nachbarschaft des massiven Sterns starke elektrische Felder erzeugt

⇒ Energiegewinn bis zu $3 \times 10^{19} eV$

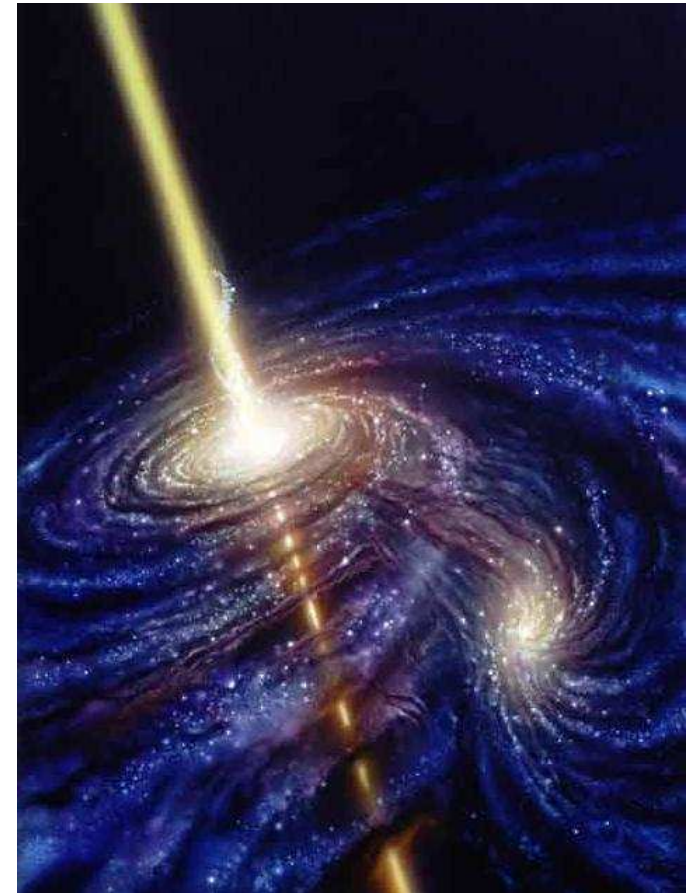


Ursprung der kosmischen Strahlung: Quellen und Beschleunigungsmechanismen

- **AGN („Active Galactic Nucleus“)**
 - unter dem Begriff werden verschiedene Objekte zusammengefasst: Quasare, Radiogalaxien, Seyfert- Galaxien, BL Lacertae- Objekte...
 - Kernregion: supermassives schwarzes Loch
 - senkrecht dazu: Jet (Länge: mehrere Mpc)
 - Leuchtkraft mit derjenigen der gesamten Galaxie vergleichbar

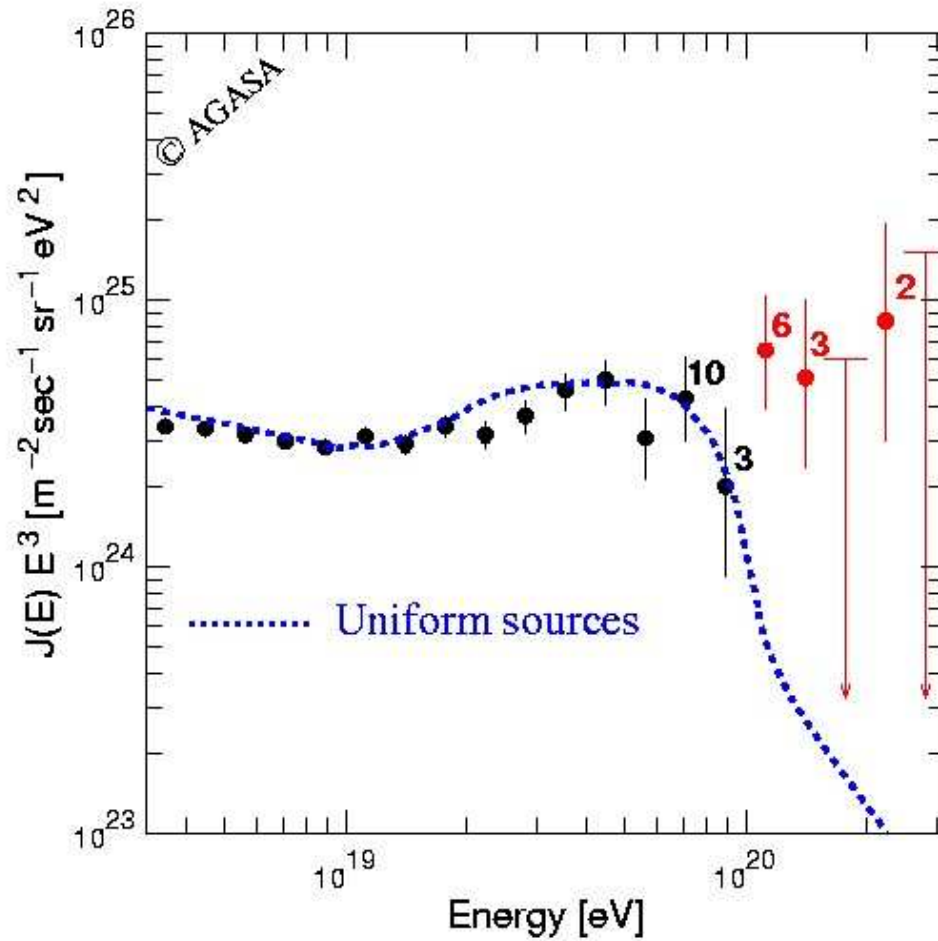
In den Jets können über Schockwellen Protonen beschleunigt werden.

sehr hohe Energien: bis zu $10^{21} eV$



Problem:

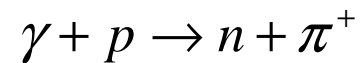
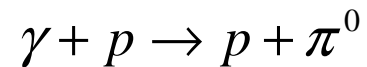
AGASA beobachtet im Spektrum oberhalb von $10^{19} eV$ keinen Abfall



Im Prinzip auf bekannte Beschleunigungsmechanismen zurückföhrbar, aber...

Greisen- Zatsepin- Kuzmin- Cutoff (1966):

Teilchen mit $E > 6 \times 10^{19} \text{ eV}$ interagieren mit kosmischer Schwarzkörperstrahlung über



Und verlieren dadurch Energie

Mittlere freie Weglänge: 10Mpc

→ Mögliche Lösung:

Quellen sehr nahe (< 30Mpc)

Aber: nicht genügend AGNs innerhalb dieser Distanz

Mehrere mögliche Lösungsvorschläge:

- In Rede stehende primäre Teilchen sind keine Protonen, sondern *Kerne*
→ Cutoff wird zu höheren Energien hin verschoben

Problem: unklar, wie die Kerne so stark beschleunigt werden könnten, ohne Strahlungsprozessen oder Photodisintegration zu unterliegen

- Bei primären Teilchen handelt es sich um Zerfallsprodukte superschwerer Teilchen, welche vom Urknall übrig geblieben sind

Problem: recht spekulativ...

- Vielleicht stimmt die spezielle Relativitätstheorie doch nicht?
→ Hinge die Lorentz- Transformation von absoluten Geschwindigkeiten ab; so würde sich die Schwellenergie für γ_p - Kollisionen erhöhen

Problem: noch spekulativer...

- AGASA hat falsch gemessen

Messungen

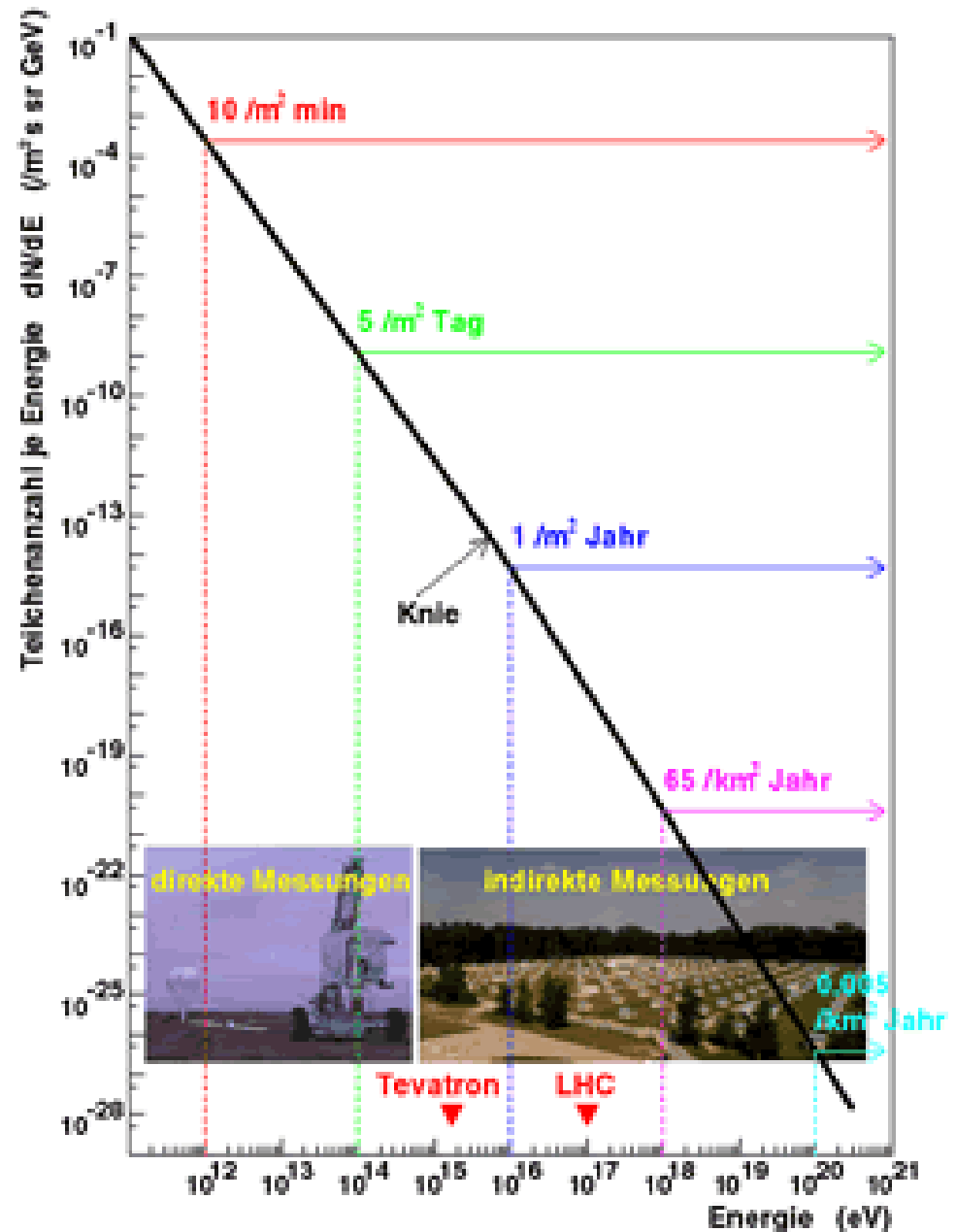
Schwierigkeit:

Teilchen der KS sind ab $E > 1 \text{ PeV}$ nicht mehr direkt durch Ballon- oder Satellitenexperimente messbar:

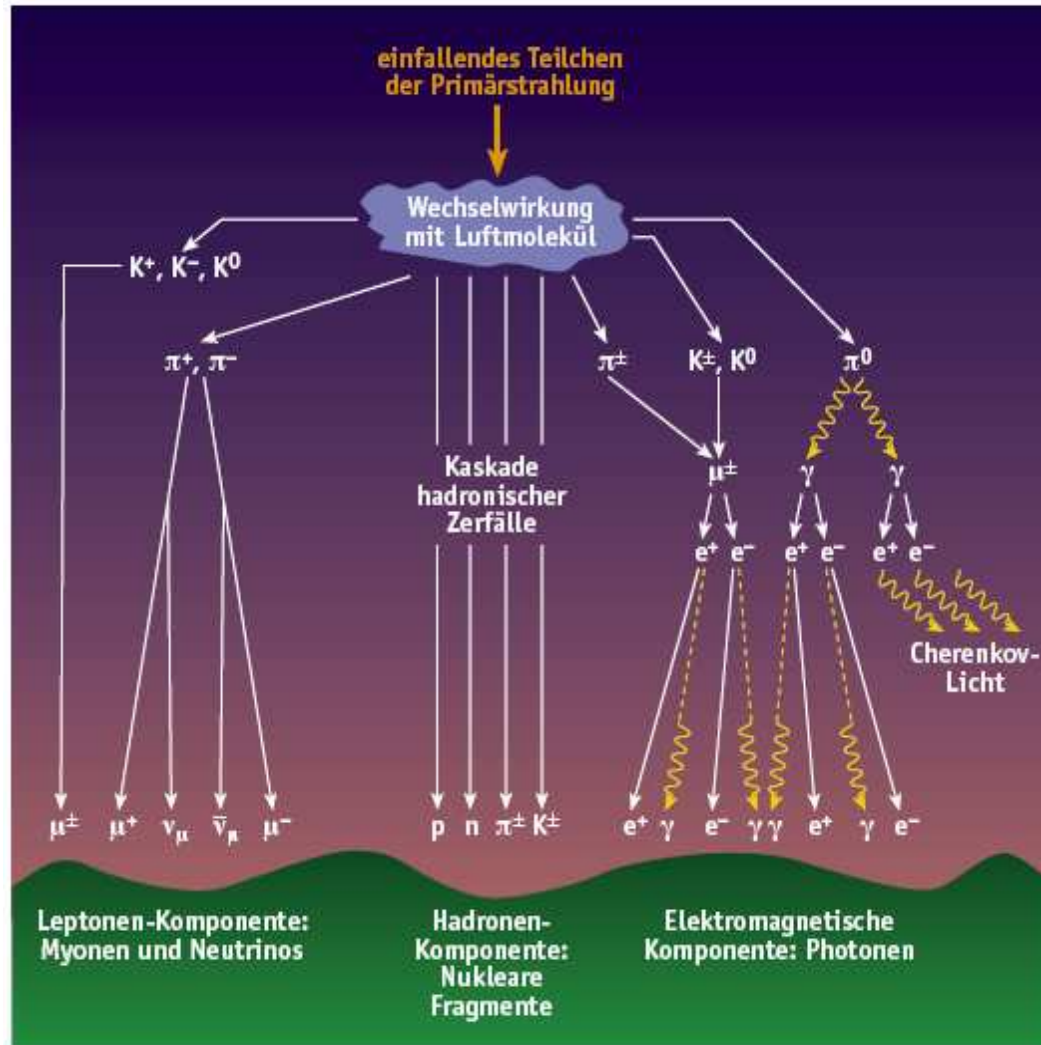
Im Energiebereich $10^{15} - 10^{16} \text{ eV}$ ist die Rate < 1 Teilchen pro m^2 pro Jahr

→ Messung erfolgt über Sekundärteilchen

Energiespektrum der kosmischen Strahlung



Messungen



Luftschauer:

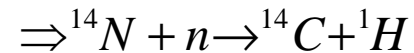
Entstehung:

- KS trifft auf Luftatom \rightarrow Teilchenkaskade:
- Hadronische Komponente
- Elektromagnetische Komponente
- Leptonische Komponente

Radiocarbonmethode

C^{14} Methode

PT reagiert mit Atmosphäre → es werden u.a. Neutronen freigesetzt



Bildung von ${}^{14}\text{CO}_2$ in der Atmosphäre

→ wird von lebenden Organismen
Aufgenommen

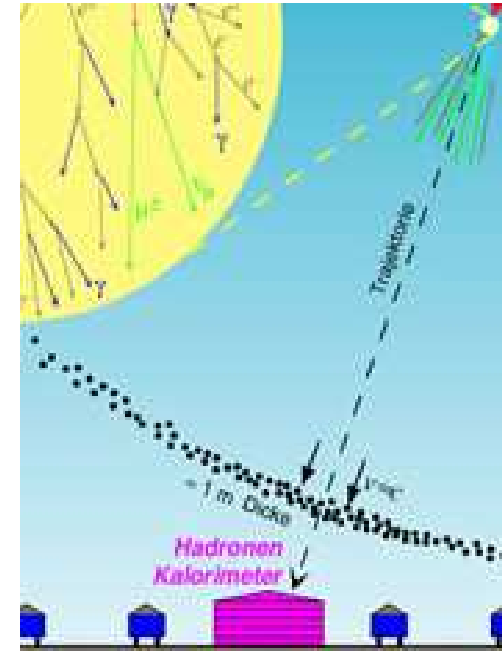
Altersbestimmung über $\frac{{}^{14}\text{C}}{{}^{12}\text{C}}$ -Verhältnis
möglich



Messungen

Zusammensetzung des Schauers am Boden:

80 %	Photonen
18 %	Elektronen/ Positronen
1.7%	Myonen
0.3%	Hadronen



Schauerteilchen bilden eine Scheibe, die sich mit nahezu c in der Atmosphäre senkrecht zur Einfallsrichtung des Primärteilchens ausbreitet

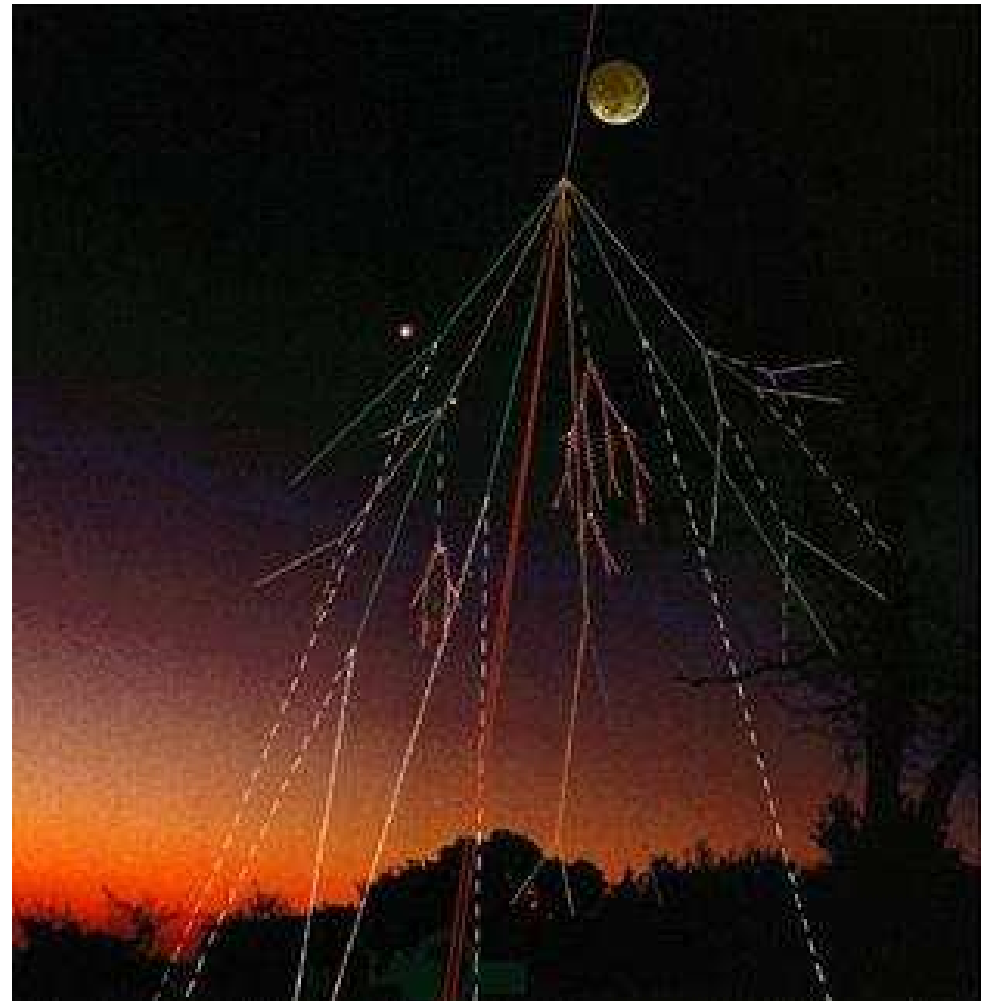
Informationen aus Schauermessungen:

- je höher die Energie des Primärteilchens, desto tiefer liegt Schauermaximum
- totale Anzahl der Schauerteilchen hängt linear von der Energie des PT ab
- Massenabschätzung anhand des Myonen- Elektronen- Verhältnisses
- Schauerform → Vergleich mit Computersimulationen

Messungen

Zwei verschiedene messbare Vorgänge:

- Teilchenschauer selbst
- Fluoreszenzlicht

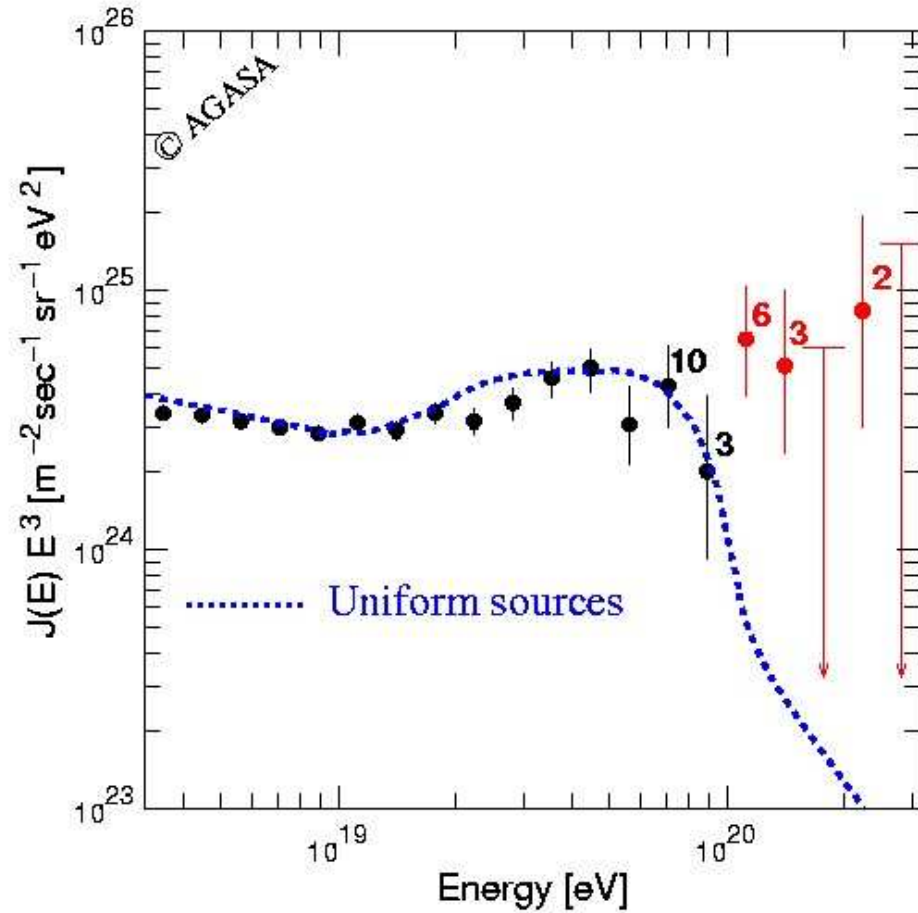


Messungen

▪ Teilchendetektor

Beispiel: AGASA (1990-2003)

- Detektor- Array in Japan
- Fläche: 100km²
- 111 Cherenkov-Detektoren (surface)
- 27 Myon- Detektoren (underground)
- 11 Ereignisse oberhalb des GZK- Cutoffs gemessen

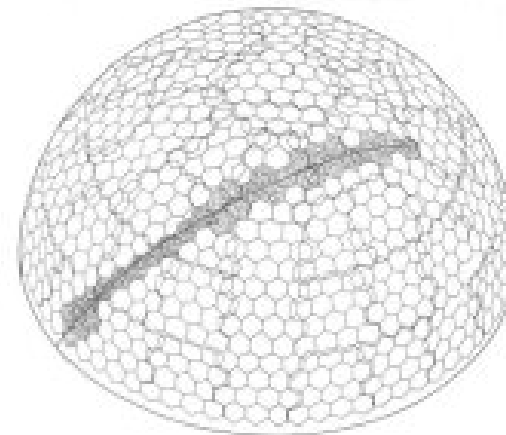


Messungen

- **Fluoreszenzlicht**

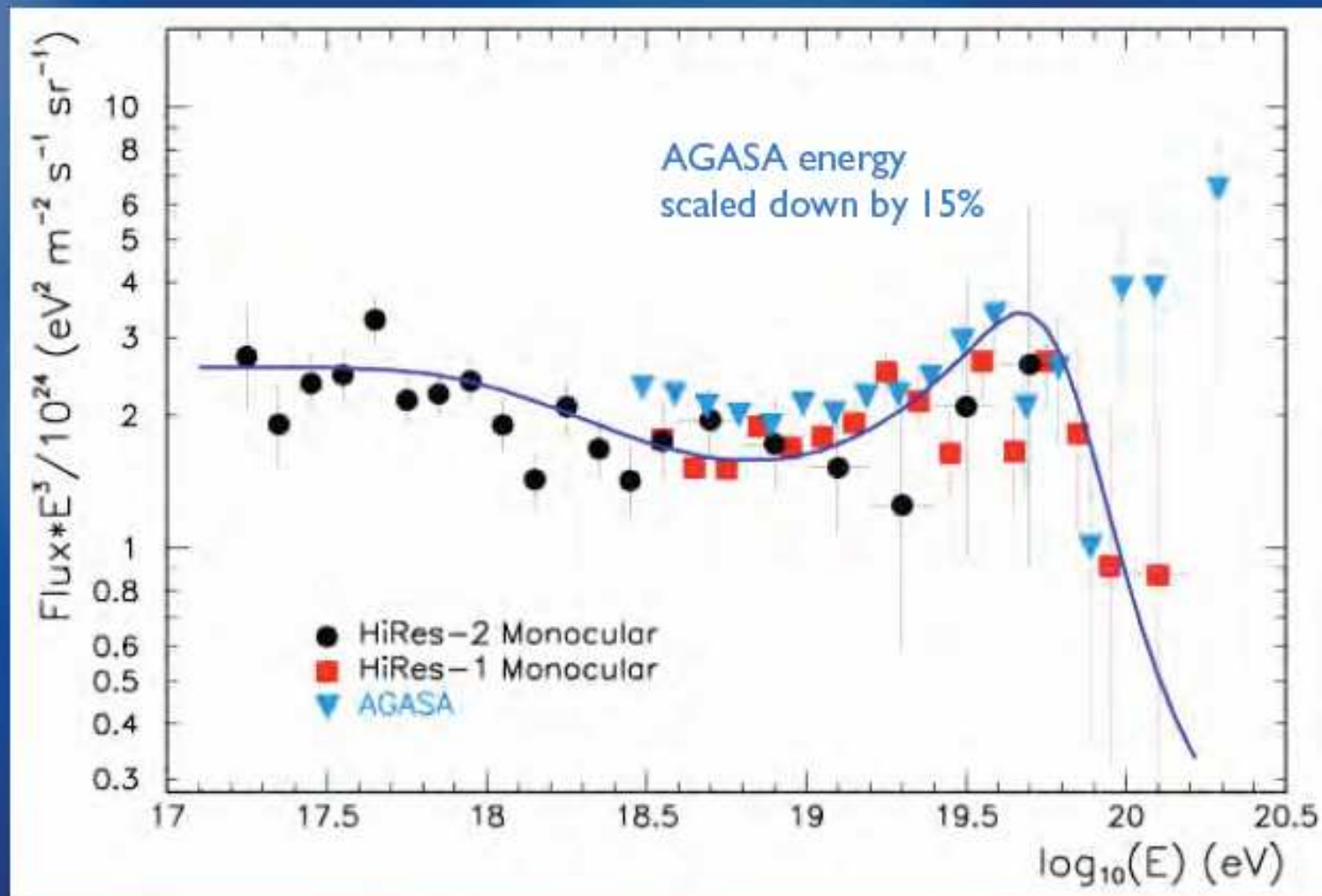
Beispiel: Fly's Eye (1981-1993)

- 880 Photoröhren und 67 Spiegel
- Jede Photoröhre beobachtet best. Raumwinkel
- Stereobeobachtung möglich durch zweites „Auge“
- Entwicklung des Schauers messbar



Nachfolger HiRes (1997- 2006)
bestätigt GZK- Cutoff

Messungen

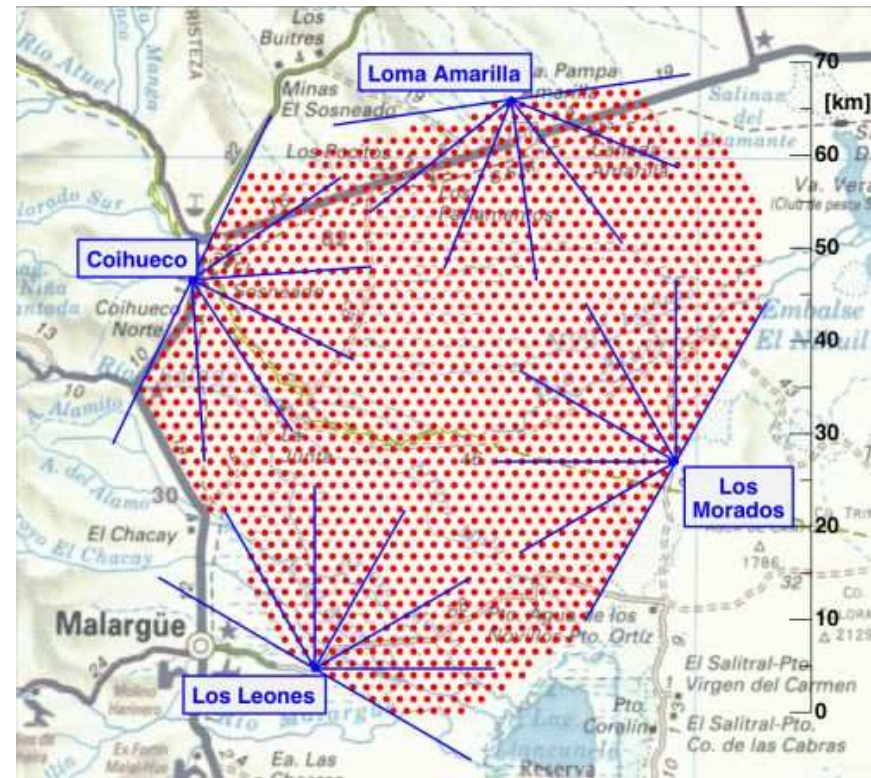


De Marzo et al; Astropart. Phys. 2003: „disagreement on 2 σ level after energy shift“

Messungen

Pierre- Auger- Observatorium (2005)

- Standort: Argentinien
- Kombinierte Nachweismethode
- Oberflächendetektor:
 - 1600 Stationen → Dreiecksformation
 - Cherenkov- Detektoren
 - Energie und Richtung des PT
- Fluoreszenzdetektor
 - 24 Teleskope an 4 Standorten
 - Schauerentwicklung
 - Ergebnisse unabhängig vom Oberflächendetektor



Messungen

Ergebnisse der Messungen:

1. *Auger bestätigt HiRes:*

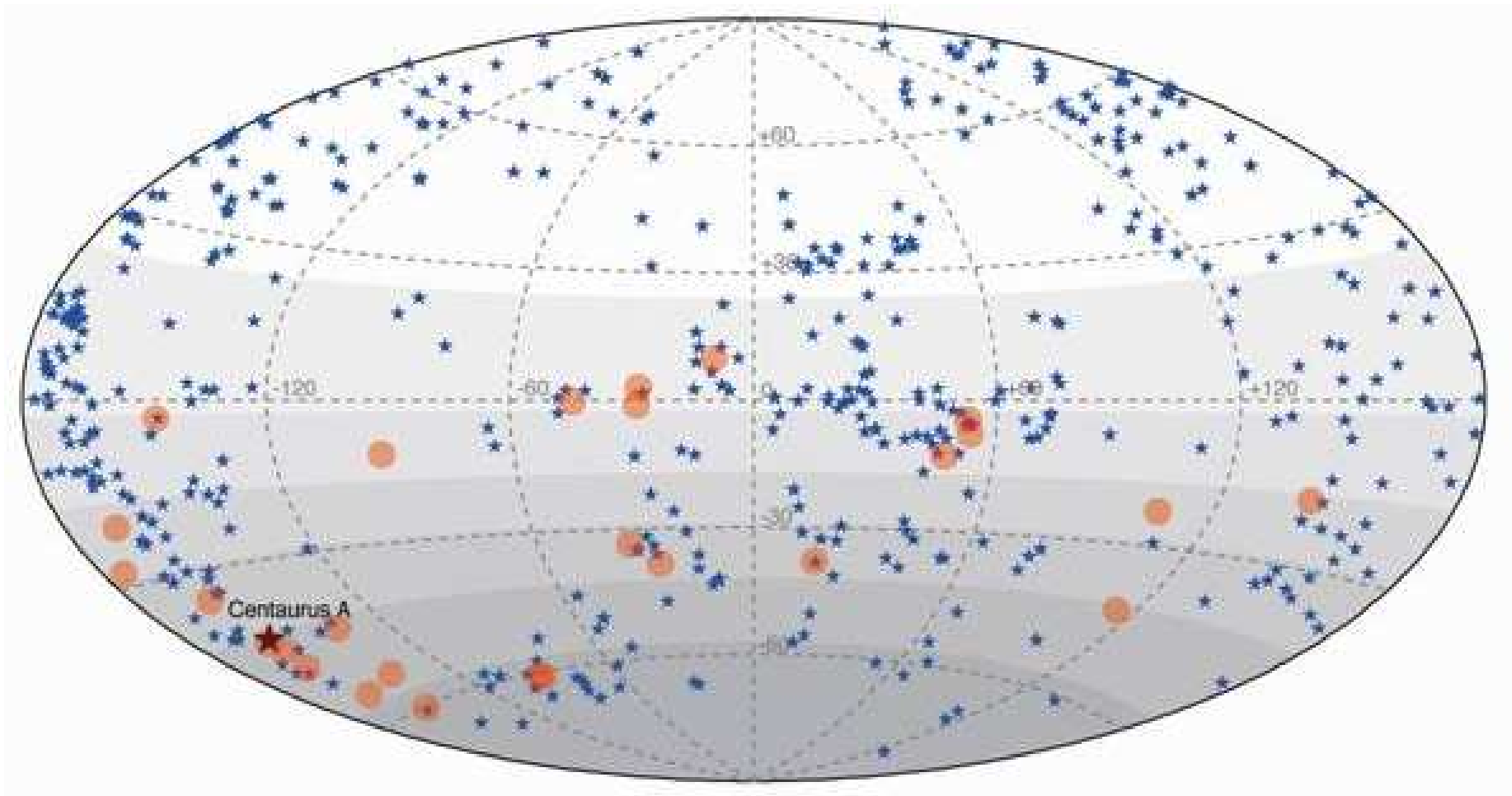
Starke Unterdrückung der Strahlung
bei $4 \times 10^{19} \text{ eV}$

→ Schwellenenergie des Cutoffs!

2. *Anisotropie der höchst-energetischen Teilchen*

→ Teilchen derart hoher Energie
zeigen auf Quellen zurück

→ Quellen der höchstenergetischen
Teilchen sind AGNs



● Herkunftsrichtung der energiereichsten kosmischen Strahlung

★ AGNs

Quellen

- Claus Grupen: Astroparticle Physics
- Malcolm S. Longair: High Energy Astrophysics
- J.G.Wilson, G.E.Perry: Kosmische Strahlen
- H.V.Klapdor-Kleingrothaus, K.Zuber: Teilchenastrophysik
- www.auger.de
- www.cosmic-ray.org
- www-akeno.icrr.u-tokyo.ac.jp/AGASA/
- www.astroteilchenphysik.de
- Diverse www- Seiten