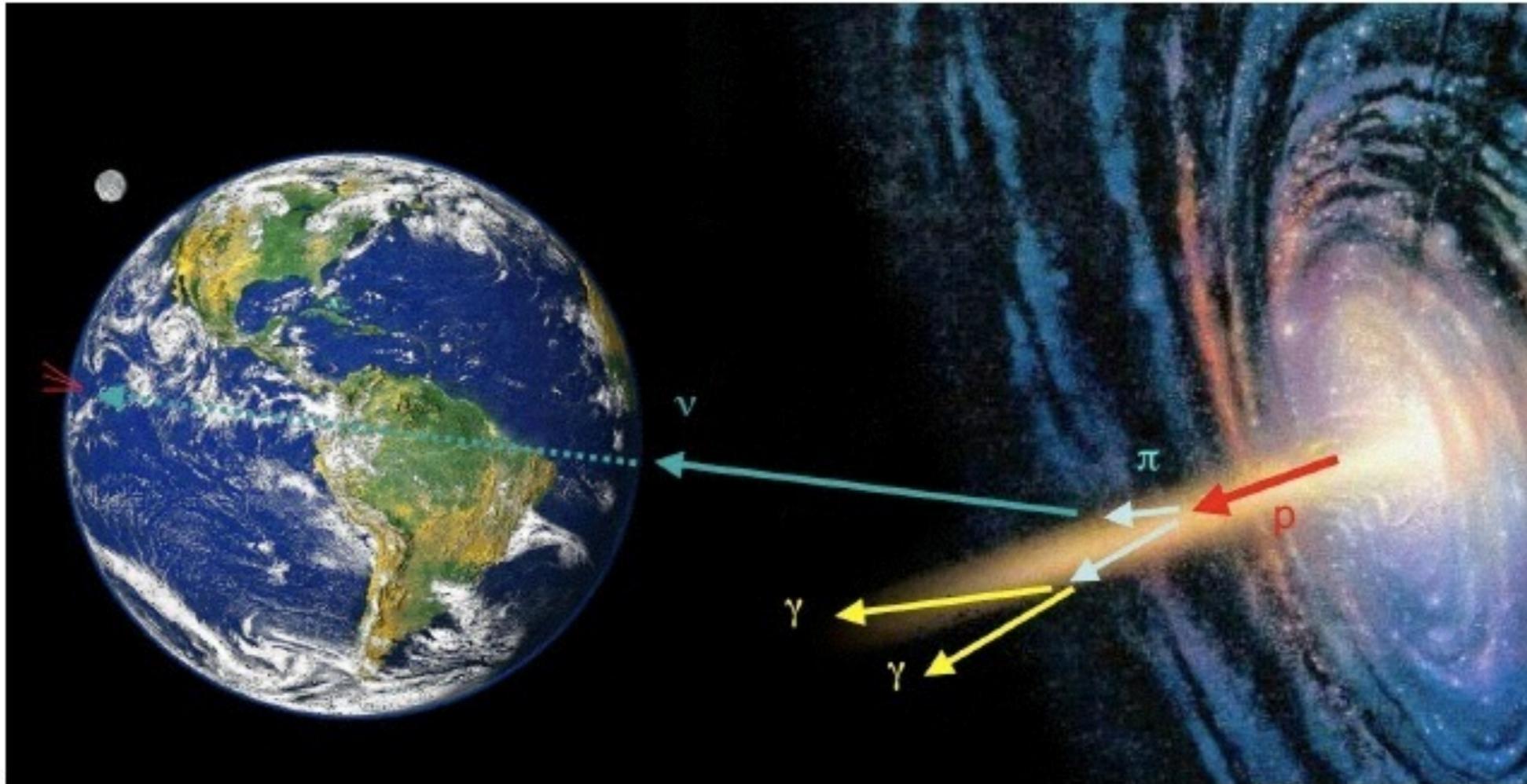


Teilchenphysik mit kosmischen und mit erdgebundenen Beschleunigern

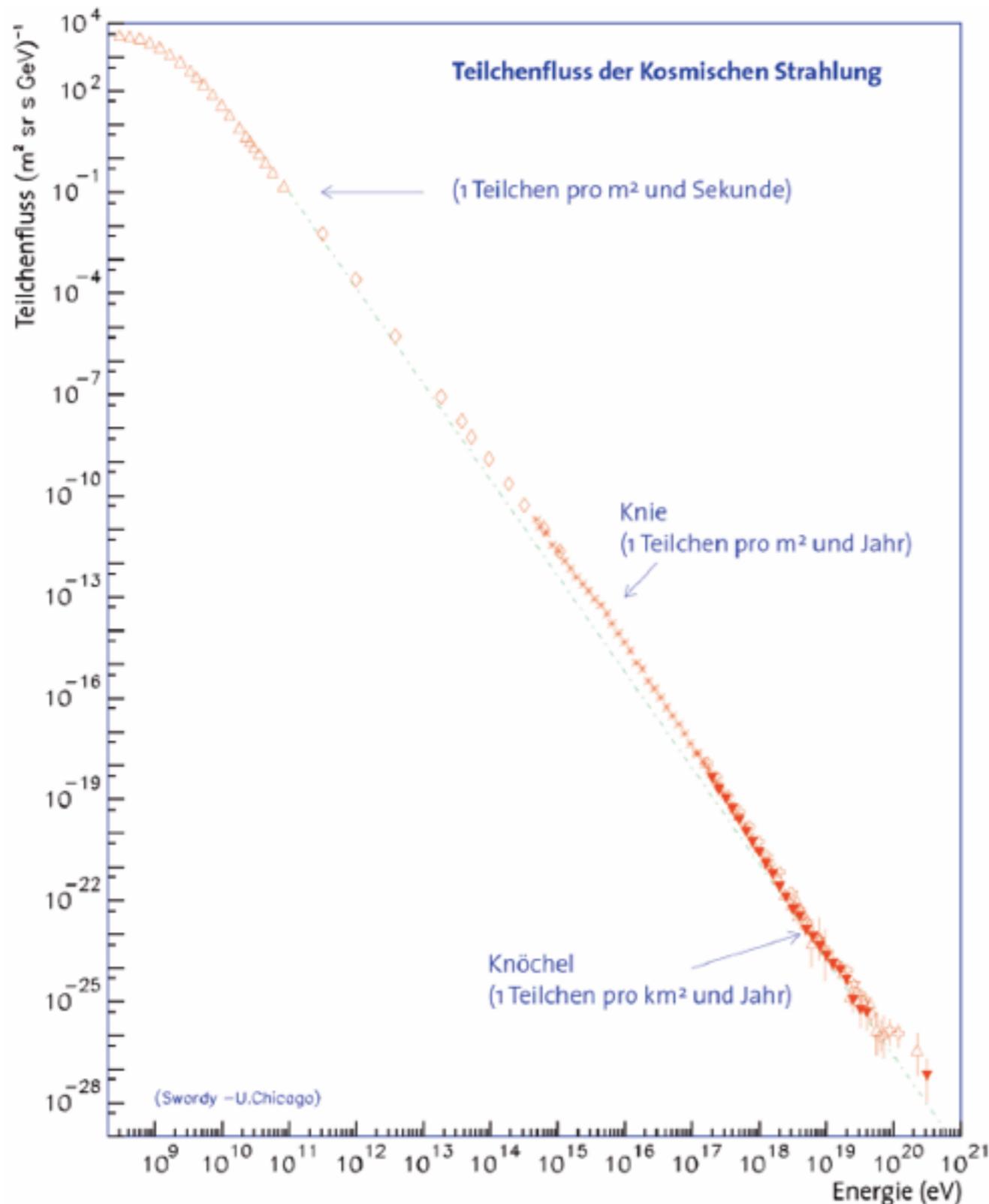


09. Kosmische Strahlung I

16.06.2013



Kosmische Strahlung: Spektrum & Messung

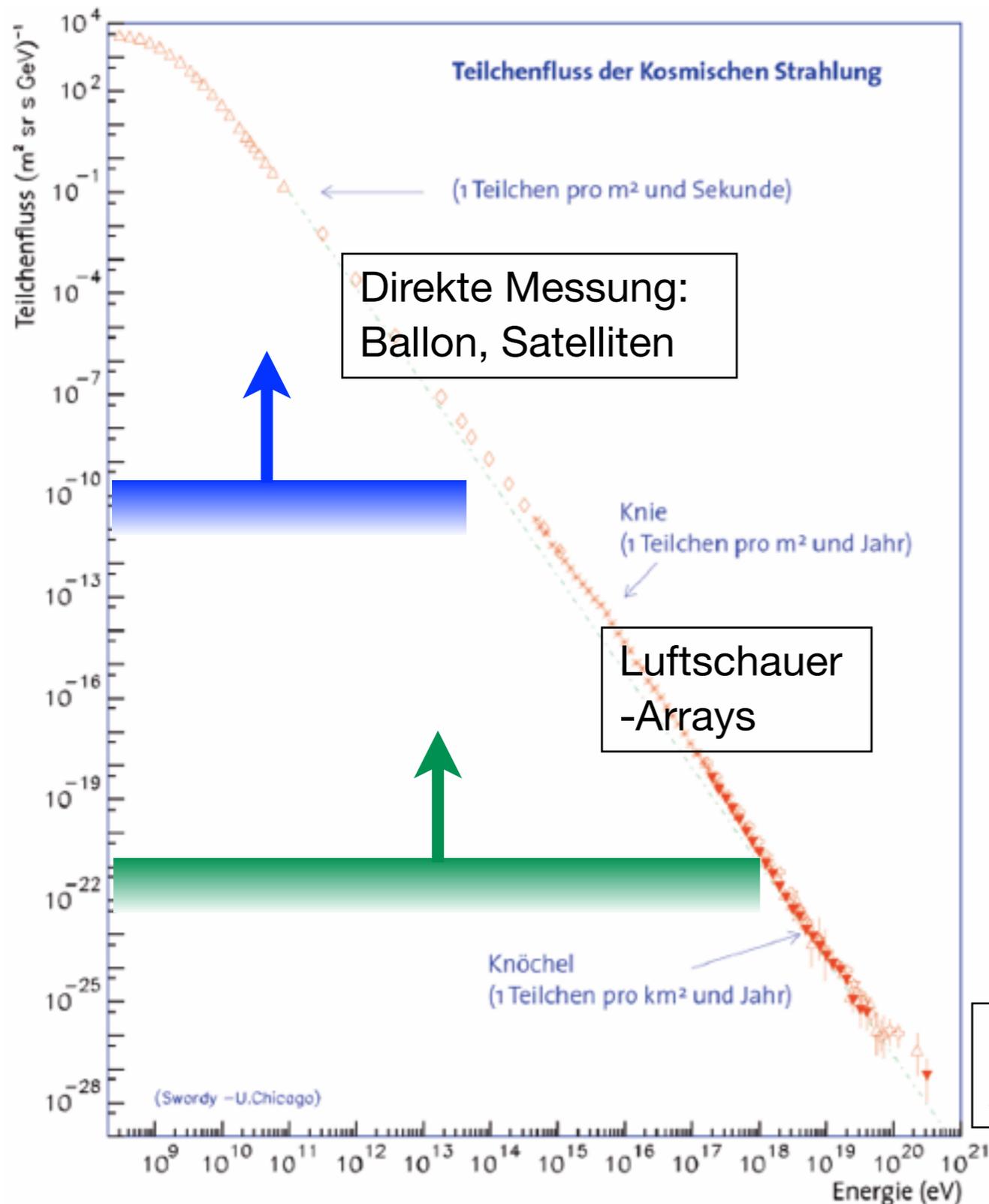


- Reicht über viele Größenordnungen in Energie und Fluss:
 - ▶ GeV (10⁹ eV) - ZeV (10²¹)
 - ▶ >1 cm⁻²s⁻¹ - < 1 km⁻² pro Jahrhundert
- Folgt im Wesentlichen einem Potenzgesetz ("power law"):

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

- $\gamma \sim 2.7$ $E < 10^{15}$ eV
- $\gamma \sim 3.0$ 10^{15} eV < $E < 10^{18}$ eV
- $\gamma \sim 2.7$ 10^{18} eV < E

Kosmische Strahlung: Spektrum & Messung



- Die Messmethode richtet sich nach der Energie und der Häufigkeit der Teilchen
- Direkte Messungen durch Ballon-Experimente und Satelliten, Aktive Fläche $\sim 1 \text{ m}^2$
- Messungen mit Luftschauer-Arrays Aktive Fläche $\sim 10\,000 \text{ m}^2$
- Messungen mit Giant Airshower Arrays Aktive Fläche $\sim 1000 \text{ km}^2$

Luftschauer: Die Atmosphäre als Kalorimeter

- Nukleare Wechselwirkungslänge $\lambda_I \sim 90 \text{ g/cm}^2$
- Strahlungslänge $X_0 \sim 36.6 \text{ g/cm}^2$
- Dicke der Atmosphäre: $\sim 1035 \text{ g/cm}^2$
- ▶ $\sim 11 \lambda_I, \sim 28 X_0$

Erinnerung:

Strahlungslänge: Energieverlust von Elektronen in Materie: $\langle E_e(x) \rangle \propto e^{-\frac{x}{X_0}}$

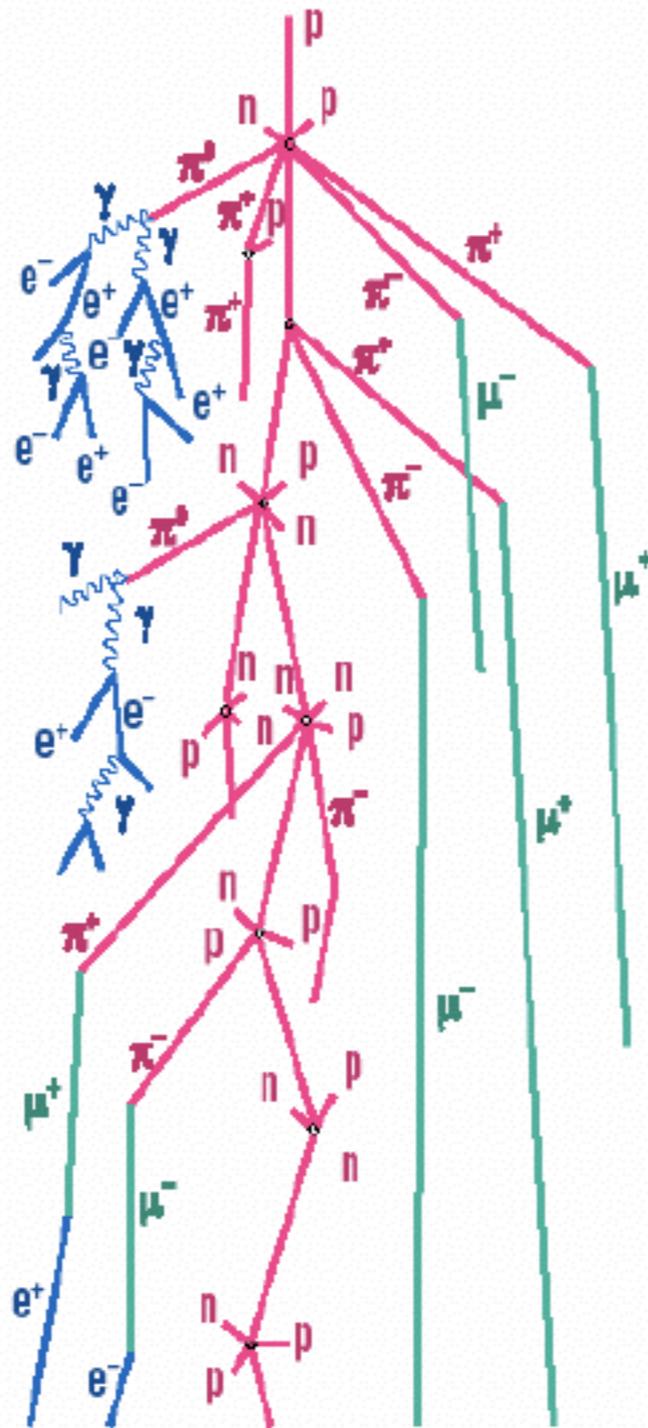
Nukleare Wechselwirkungslänge: Durchschnittliche

Wegstrecke bis zu einer Kernreaktion, Wahrscheinlichkeit

dass keine Reaktion stattfindet:

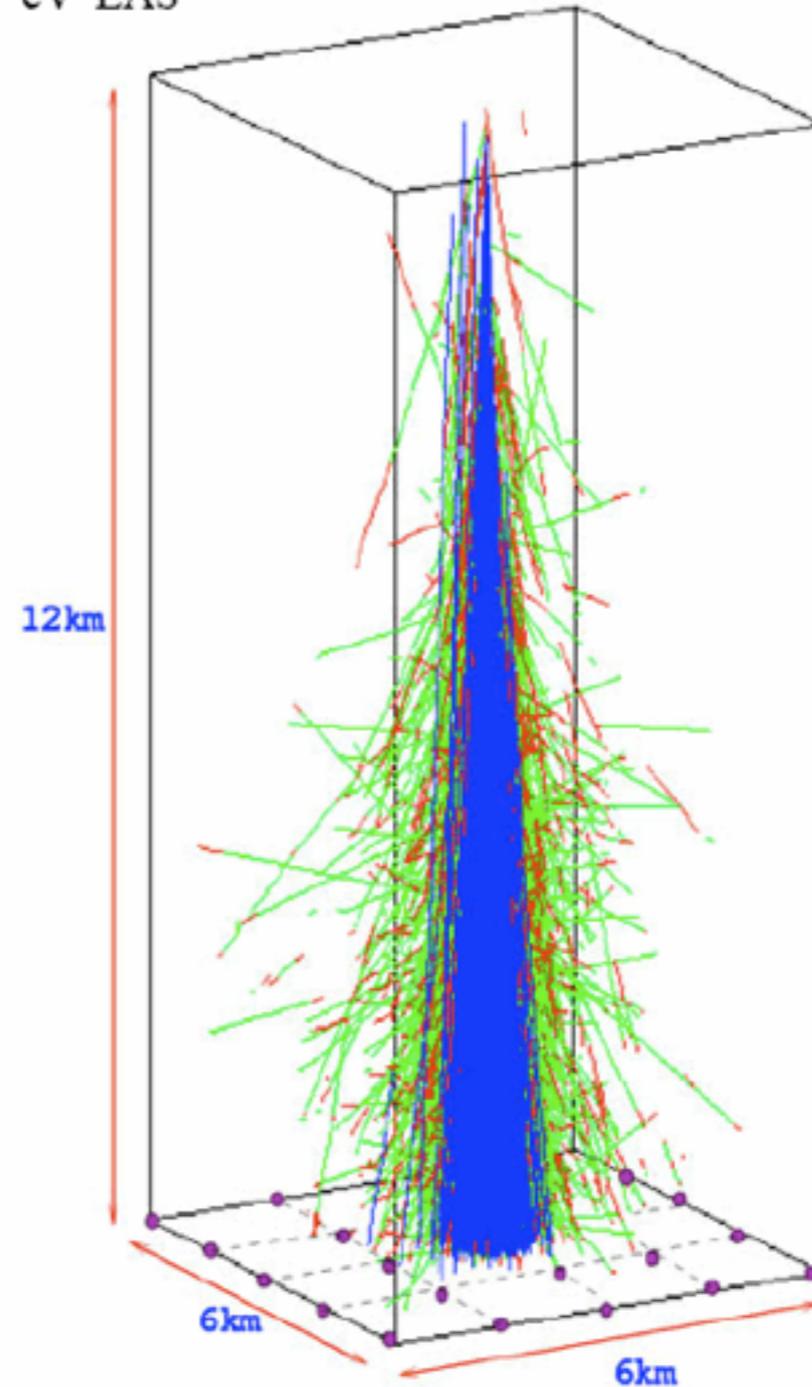
$$P(x) = e^{-\frac{x}{\lambda_I}}$$

Ausgedehnte Luftschauer (EAS)



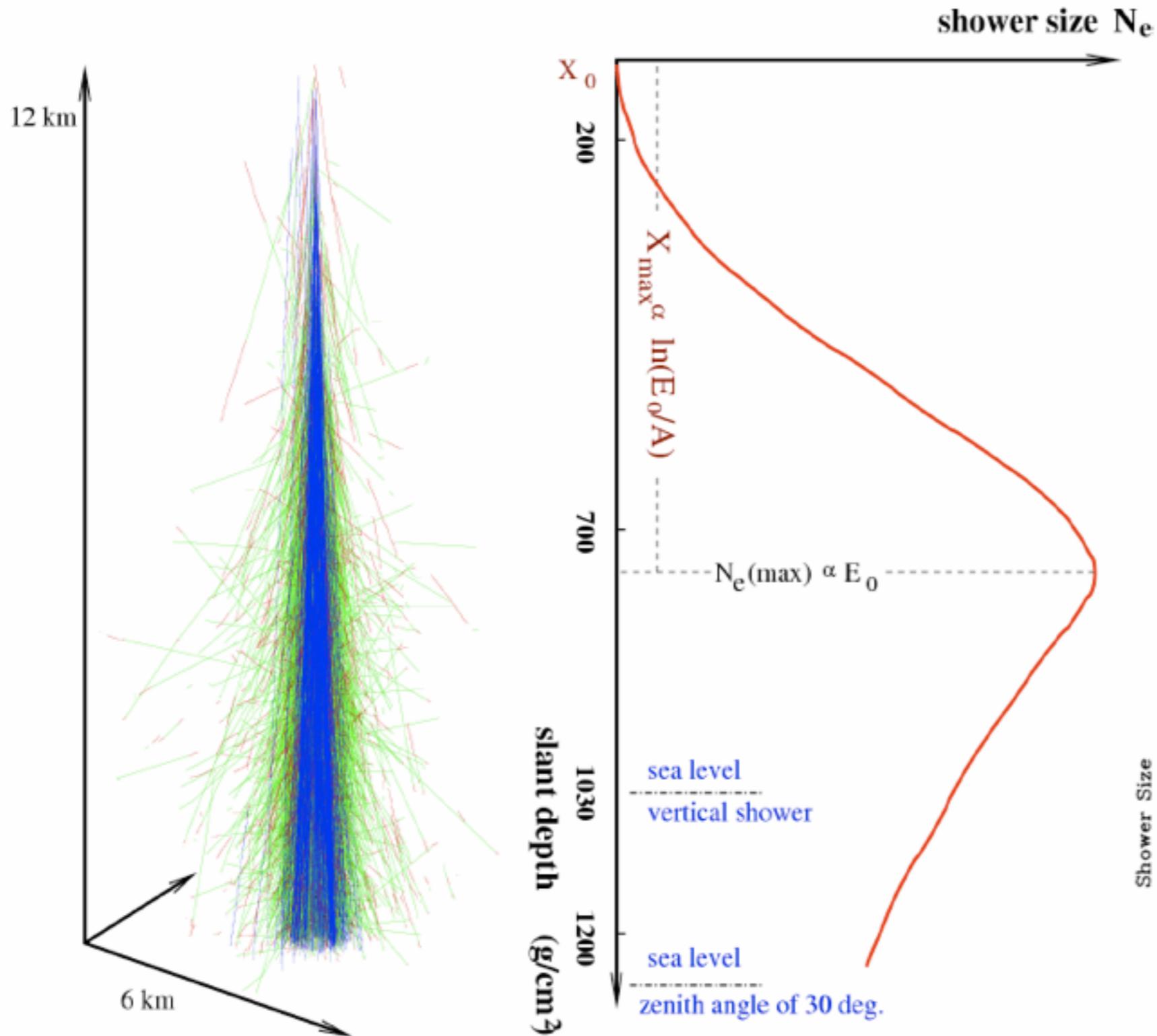
elektromagnetische Komponente
hadronische Komponente
myonische Komponente

10^{19} eV EAS

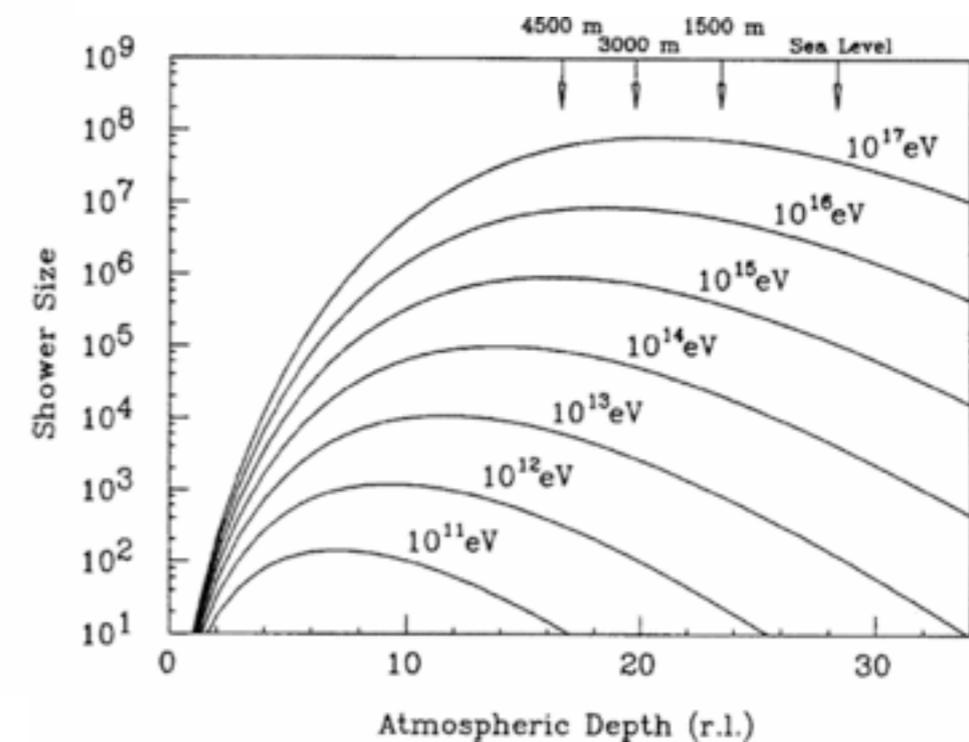


100 billion particles at sea level
photons, electrons (99%), muons (1%)
• Ground Array stations

EAS: In der Atmosphäre



- Hauptsächlich elektromagnetisch: Photonen, Elektronen
- Schauermaximum: $\sim \ln(E_0/A)$



R.Engel, ISAPP2005

EAS: Hadronische Komponente

- Inelastische Reaktion des einfallenden Hadrons (Proton, Kern) mit Atomkernen in der Atmosphäre, nach $\sim 1 \lambda_I$, typischerweise 40%-60% Energieverlust, Produktion von hadronischen Sekundärteilchen: p , n , π^0 , π^\pm , K^\pm , ...

EAS: Hadronische Komponente

- Inelastische Reaktion des einfallenden Hadrons (Proton, Kern) mit Atomkernen in der Atmosphäre, nach $\sim 1 \lambda_I$, typischerweise 40%-60% Energieverlust, Produktion von hadronischen Sekundärteilchen: p , n , π^0 , π^\pm , K^\pm , ...
- ▶ Neutrale Pionen: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $\tau \sim 10^{-16} \text{ s}$
 - ▶ Elektromagnetischer Schauer

EAS: Hadronische Komponente

- Inelastische Reaktion des einfallenden Hadrons (Proton, Kern) mit Atomkernen in der Atmosphäre, nach $\sim 1 \lambda_I$, typischerweise 40%-60% Energieverlust, Produktion von hadronischen Sekundärteilchen: p , n , π^0 , π^\pm , K^\pm , ...

▶ Neutrale Pionen: $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$, $\tau \sim 10^{-16} s$

▶ Elektromagnetischer Schauer

▶ Geladene Pionen: $\pi^\pm \rightarrow \mu^\pm \nu_\mu$, $\tau \sim 2.6 \times 10^{-8} s$ ($c\tau \sim 8 m$)

▶ Hadronische Wechselwirkung vor Zerfall, oder Zerfall in Myon + Neutrino (bei $\sim 10 - 20$ GeV ist Reichweite $\sim 1 \lambda_I$)

▶ Myonische Komponente, integrativ, denn der Myonzerfall spielt keine Rolle, Lebensdauer $\sim 2 \times 10^{-6} s$

▶ Zu Beginn des Schauers weitere Hadronbildung, gegen Ende Zerfall in Myonen wahrscheinlicher

EAS: Elektromagnetische Komponente

- Paarerzeugung durch Photonen aus Pionzerfall (oder primäres Photon):

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

EAS: Elektromagnetische Komponente

- Paarerzeugung durch Photonen aus Pionzerfall (oder primäres Photon):

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

- Bremsstrahlung im Feld von Atomkernen

$$\begin{array}{l} e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma \\ \quad \quad \quad \downarrow \quad \quad \quad \downarrow \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \gamma \rightarrow e^+ + e^- \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad \downarrow \\ \quad \quad \quad \quad \quad \quad e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma \end{array}$$

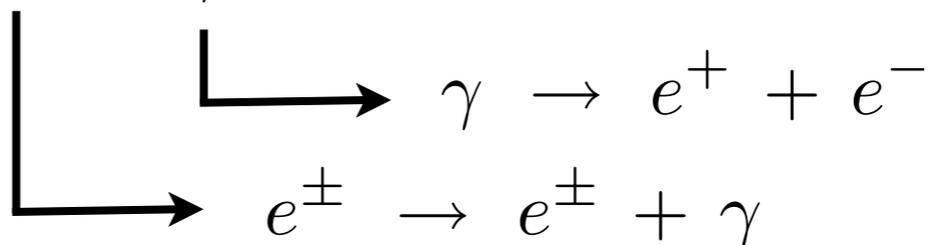
EAS: Elektromagnetische Komponente

- Paarerzeugung durch Photonen aus Pionzerfall (oder primäres Photon):

$$\gamma \rightarrow e^+ + e^-$$

- Bremsstrahlung im Feld von Atomkernen

$$e^\pm \rightarrow e^\pm + \gamma$$



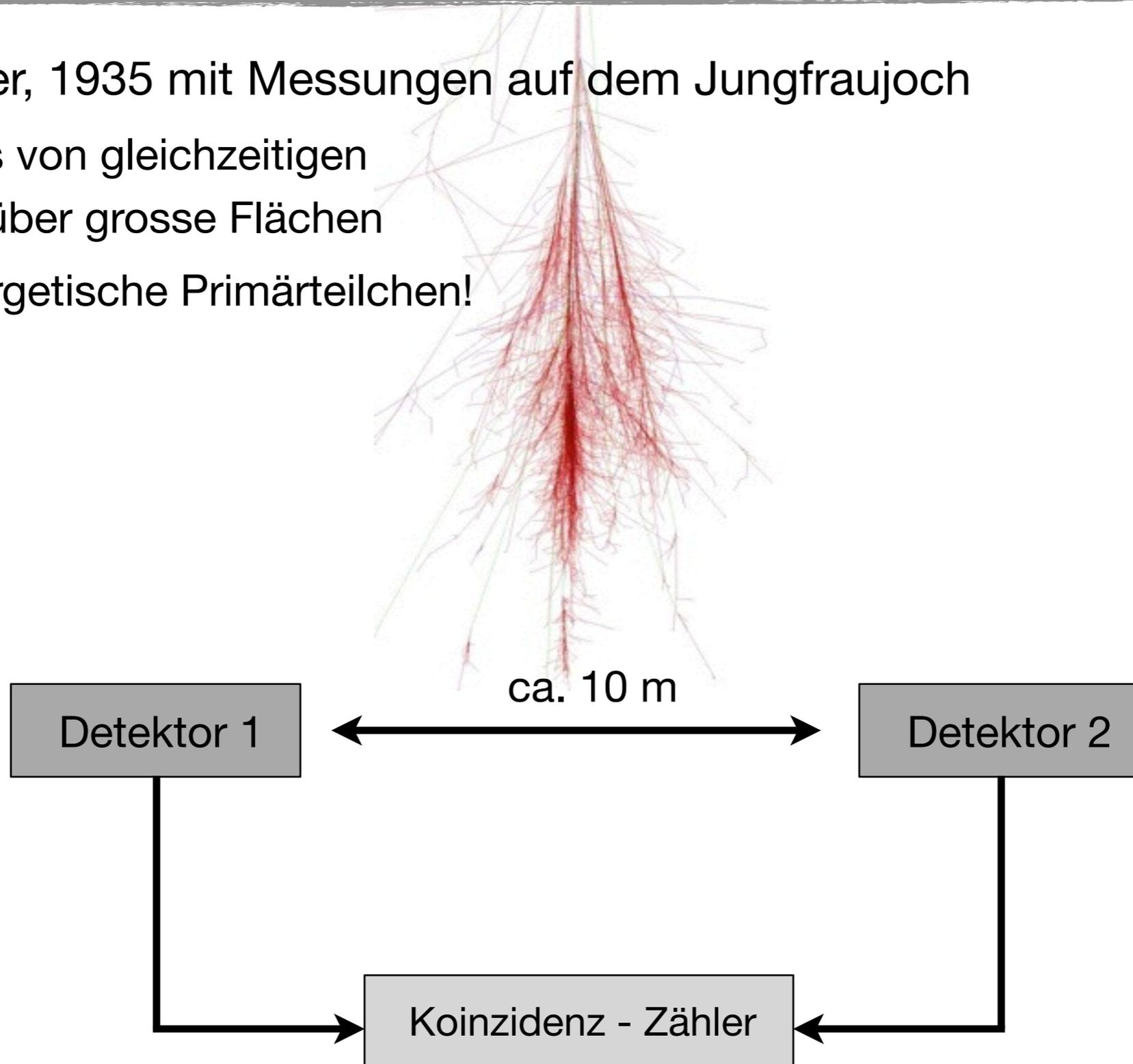
- Fortsetzung der Kaskade bis

$$\left(\frac{dE}{dx}\right)_{ion} > \left(\frac{dE}{dx}\right)_{brems}$$

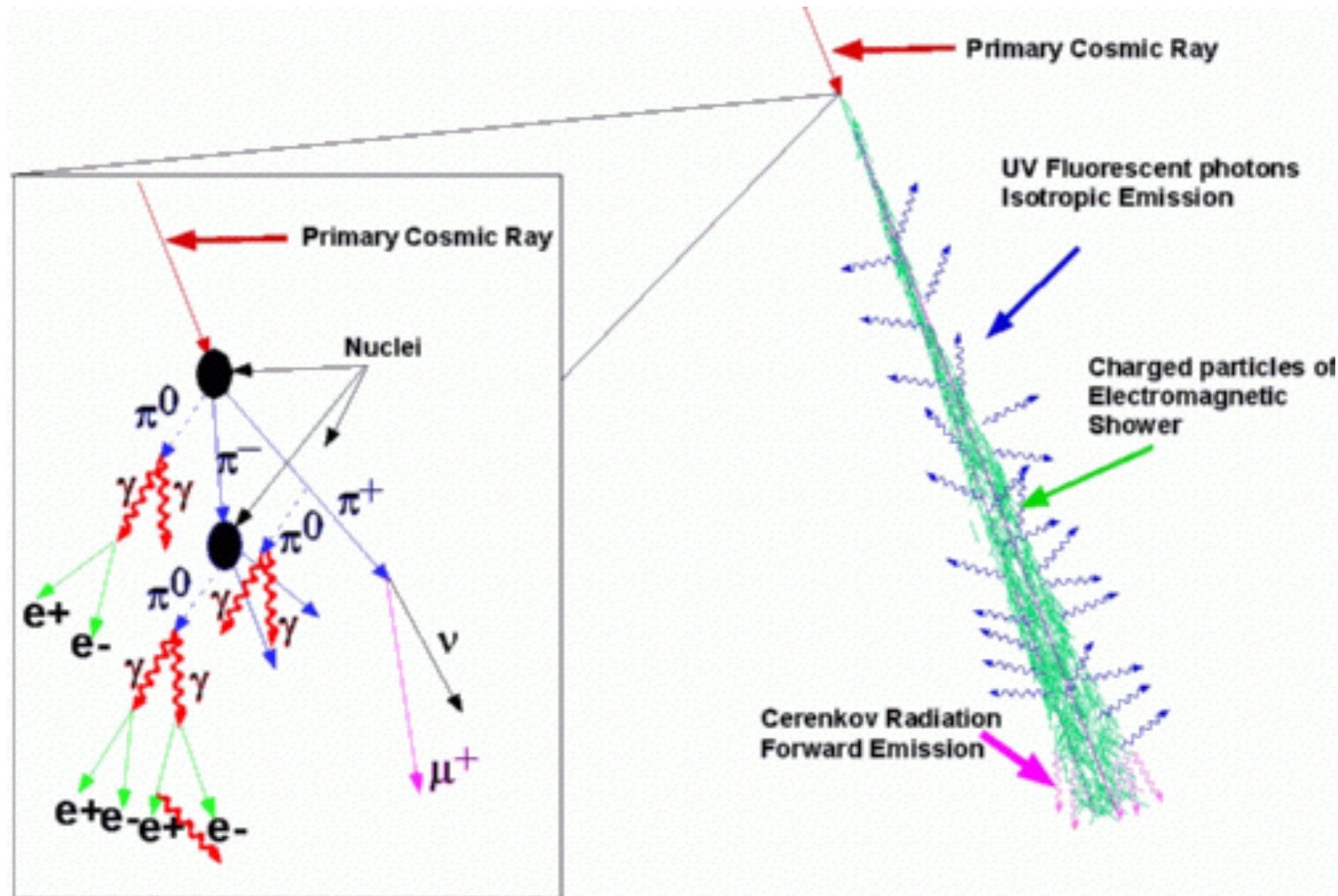
- Maximale Teilchenanzahl im Schauermaximum, danach wieder Rückgang

Ausgedehnte Luftschauer: Entdeckung

- Pierre Auger, 1935 mit Messungen auf dem Jungfraujoch
 - Nachweis von gleichzeitigen Teilchen über grosse Flächen
 - ▶ Hochenergetische Primärteilchen!



EAS: Messung

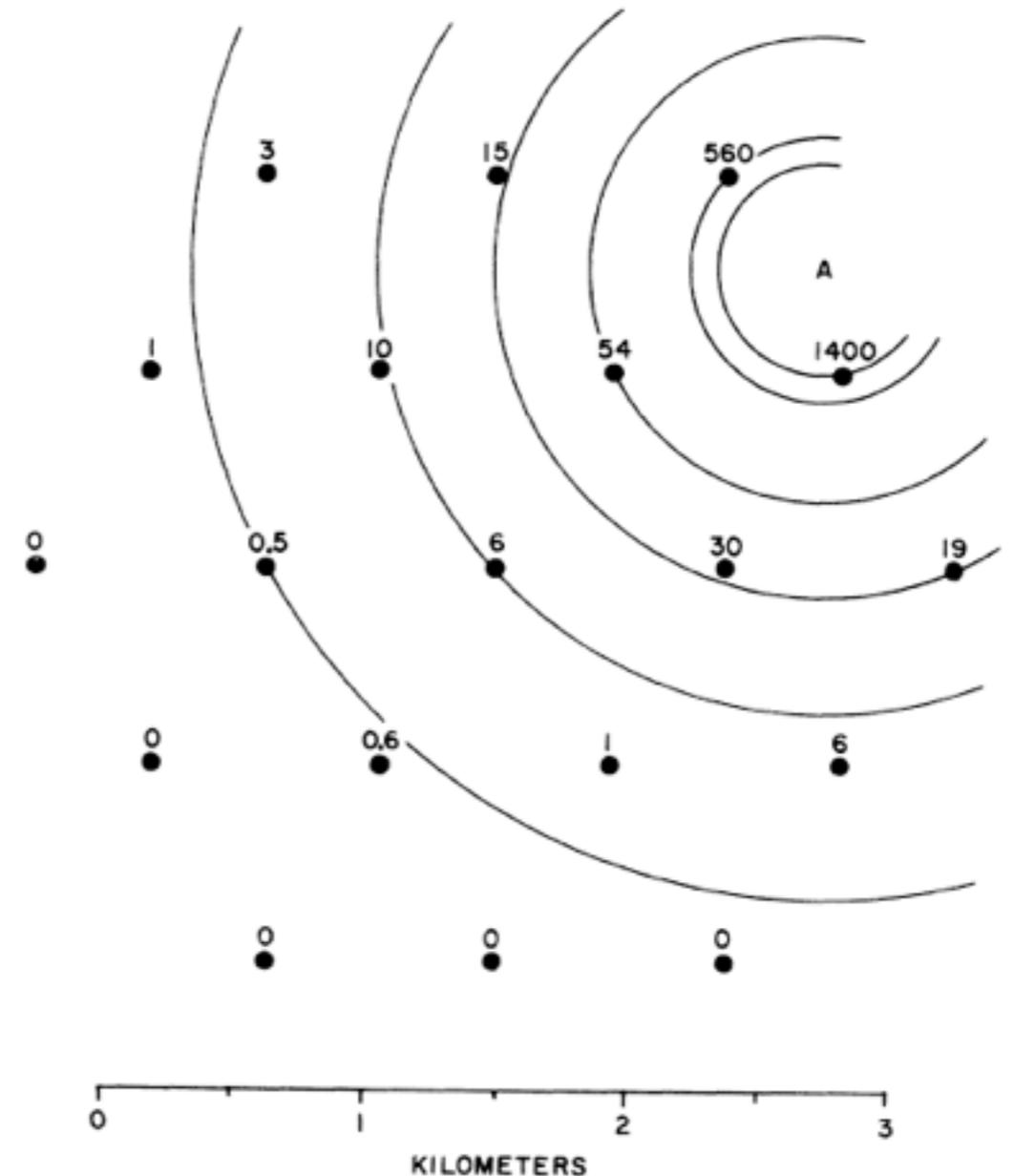


- Messung der geladenen Teilchen am Boden in Ground Arrays
- Messung von Fluoreszenz-Licht
- Messung von Cherenkov-Strahlung

Höchstenergetische Teilchen: Entdeckung



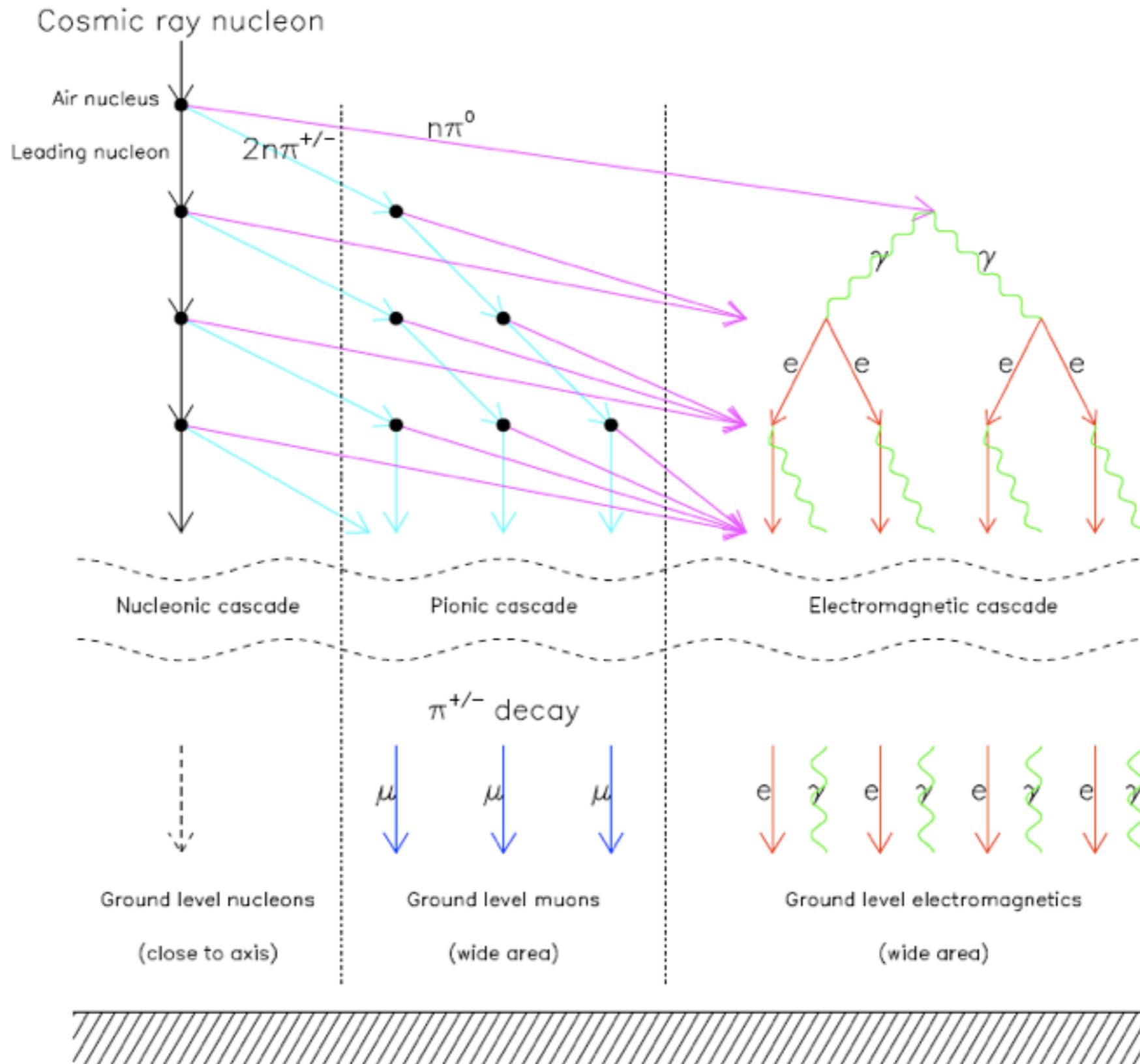
- Primärenergie bestimmt zu 10^{20} eV



- John Linsley et. al, 1962, MIT Volcano Ranch Array, NM, USA
- ~ 8 km², 19 Detektoren a 3.3 m² (Scintillation Counters)
- Bestimmung der Primärenergie aus der Schauergroße (Zahl der Teilchen) am Boden

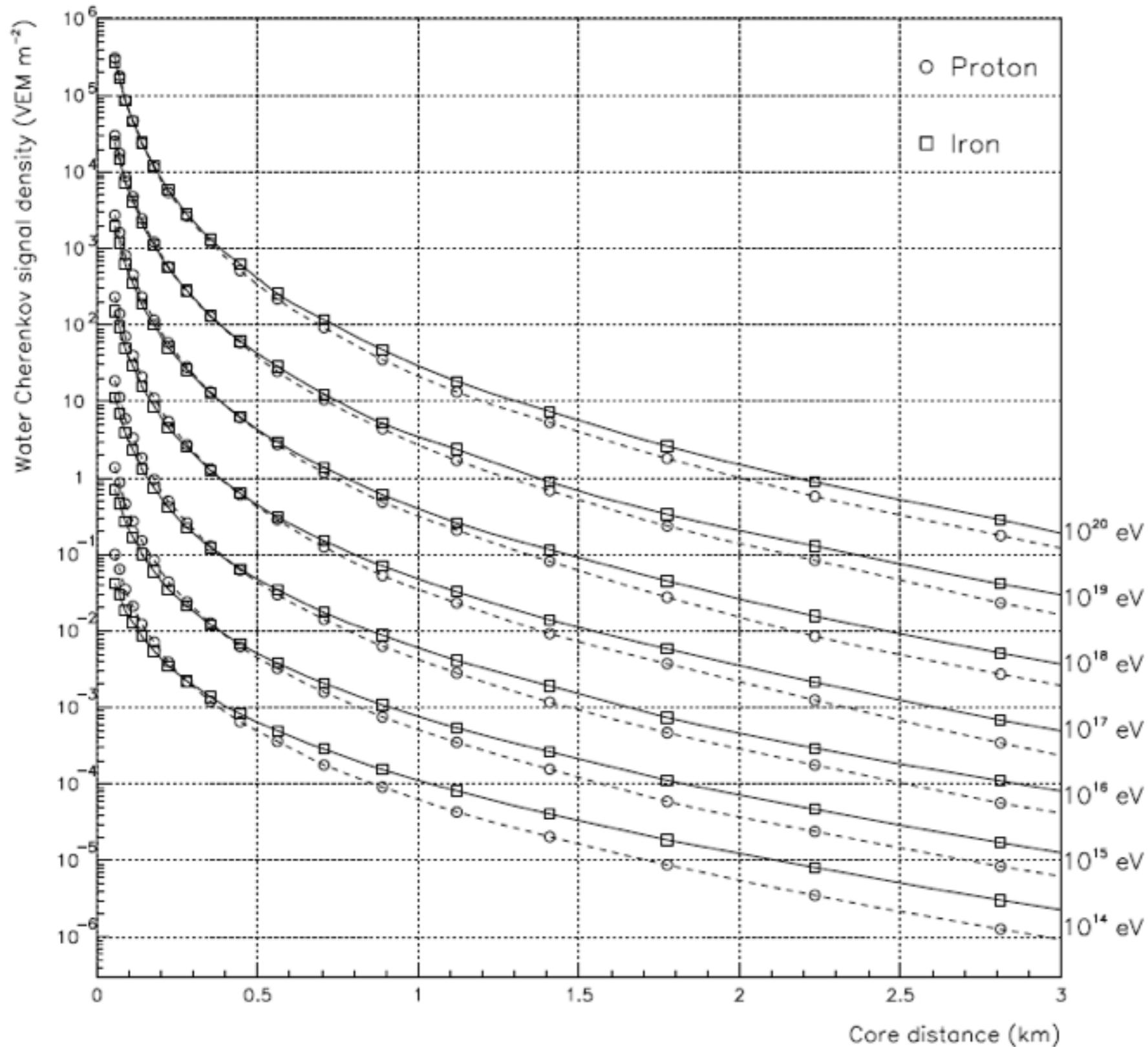
Phys. Rev. Lett. 10, 146 (1963)

Extended Air Showers



AUGER TDR

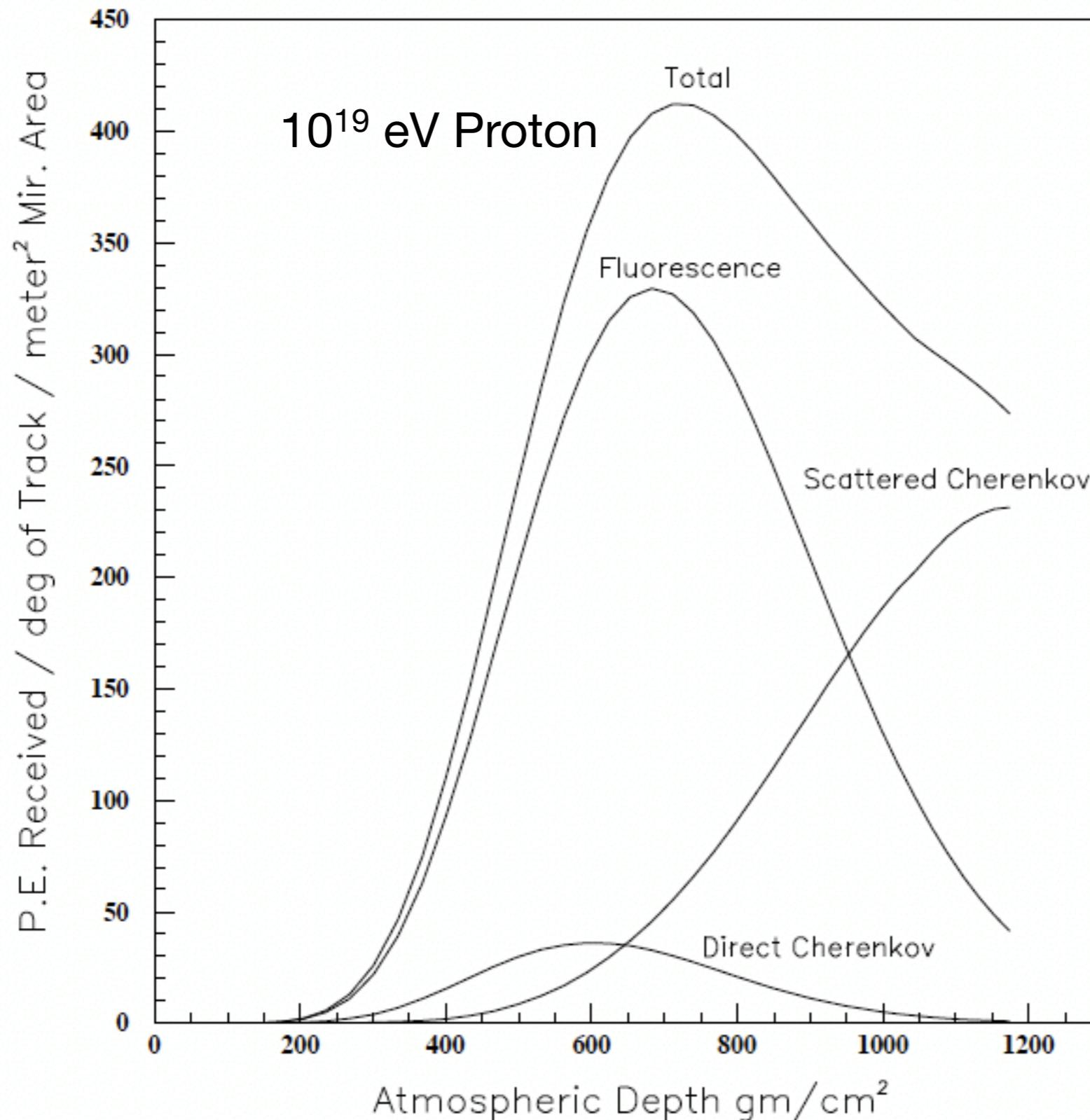
Schauermultiplizität und Energie



- Teilchendichte am Boden bei verschiedenen Abständen vom Core ist ein gutes Mass für die Gesamtenergie

AUGER TDR

EAS: Lichtmessung



- Nachweis von Fluoreszenz- und Cherenkov- Licht zur Energiemessung
- Auch genaue Entwicklung des Schauers in der Atmosphäre nachweisbar!

AUGER TDR

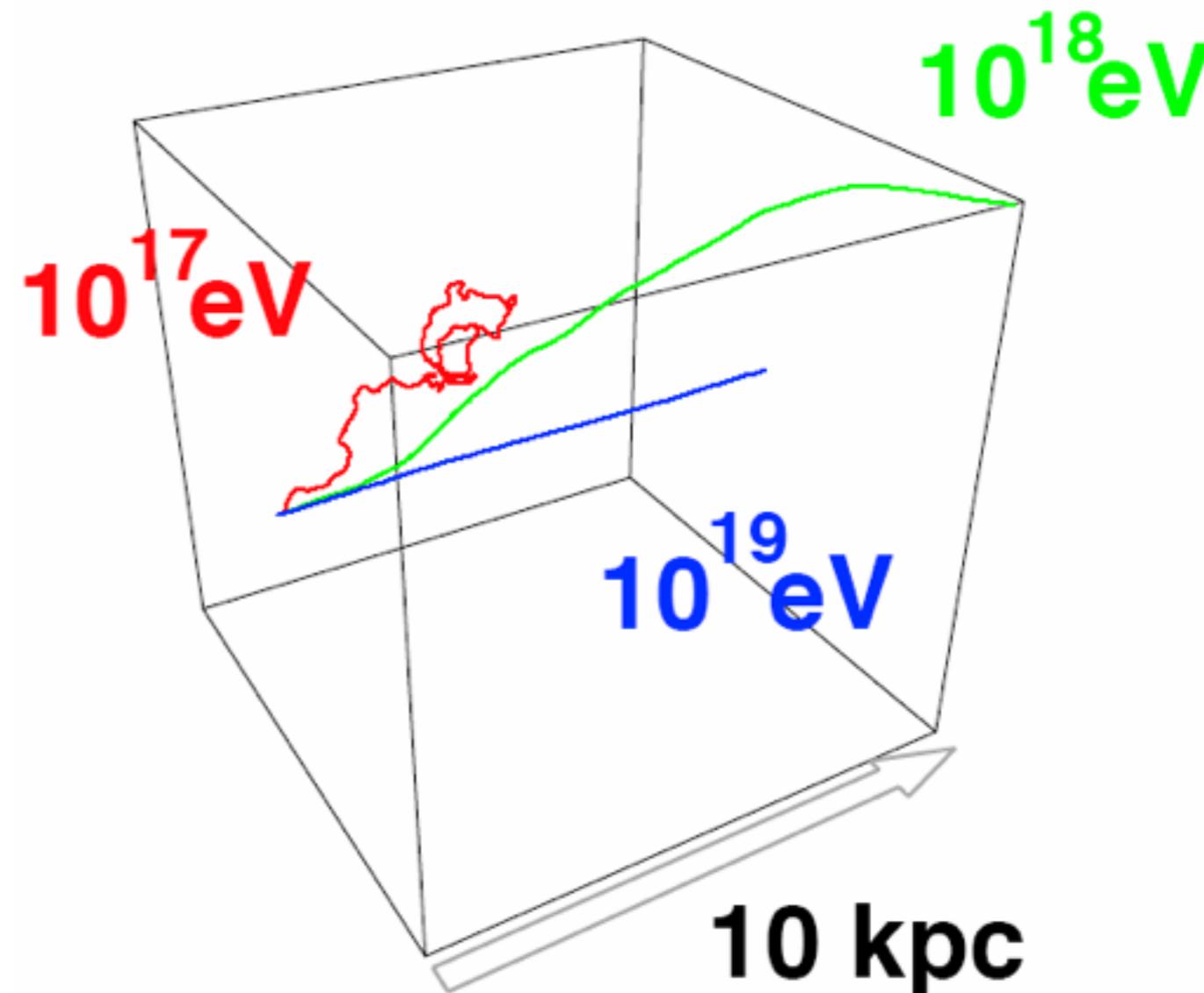
Was ist interessant an höchsten Energien?

- Natürlich erst einmal: Was für Objekte sind in der Lage, solche hohen Energien zu erzeugen?

Was ist interessant an höchsten Energien?

- Natürlich erst einmal: Was für Objekte sind in der Lage, solche hohen Energien zu erzeugen?

Kaum Ablenkung im Magnetfeld, die Teilchen könnten zu ihren Quellen zeigen!

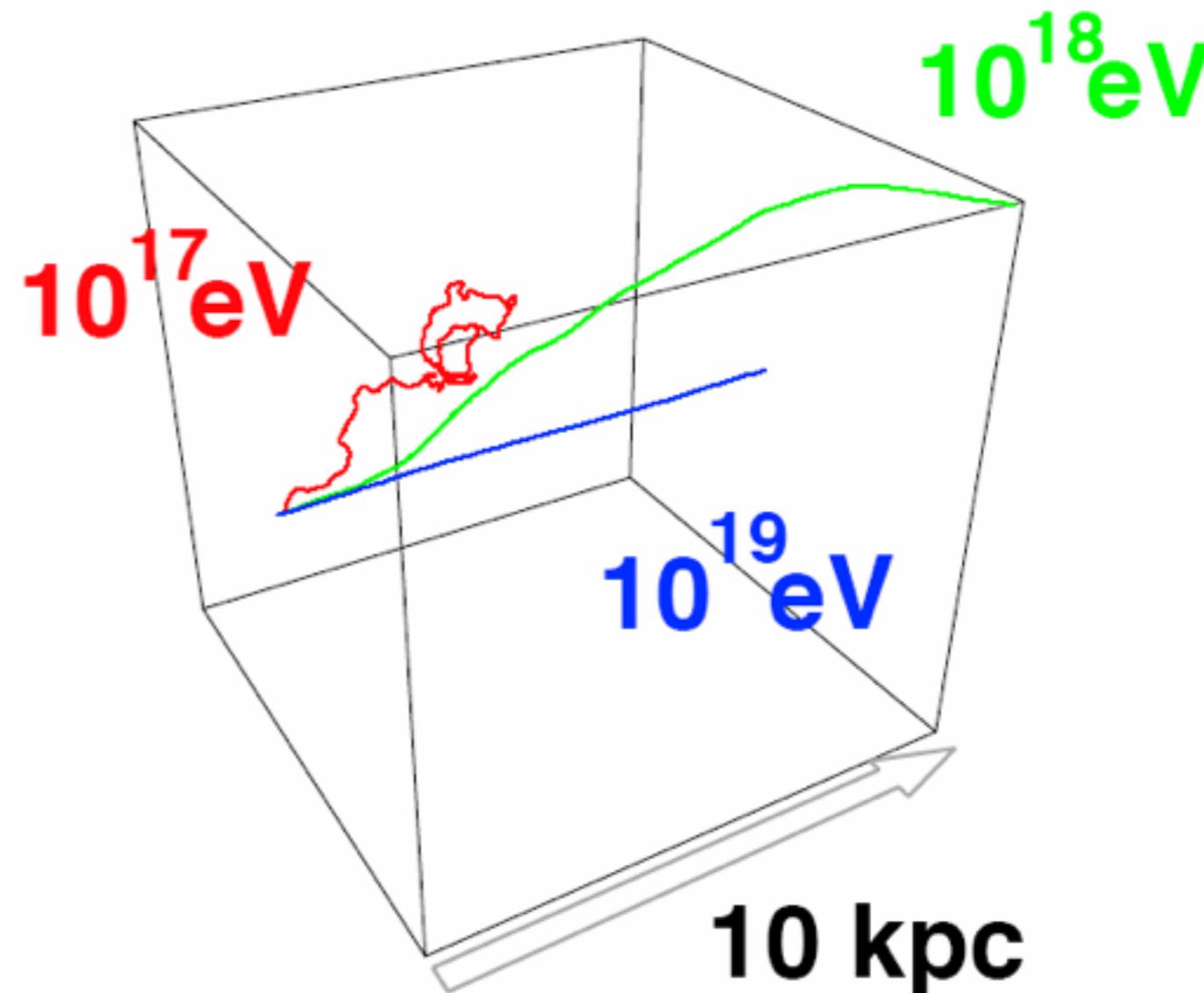


Was ist interessant an höchsten Energien?

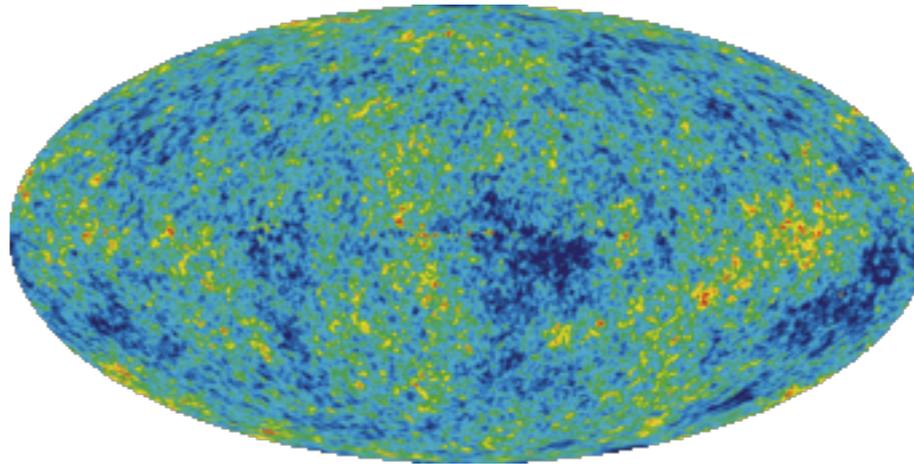
- Natürlich erst einmal: Was für Objekte sind in der Lage, solche hohen Energien zu erzeugen?

Kaum Ablenkung im Magnetfeld, die Teilchen könnten zu ihren Quellen zeigen!

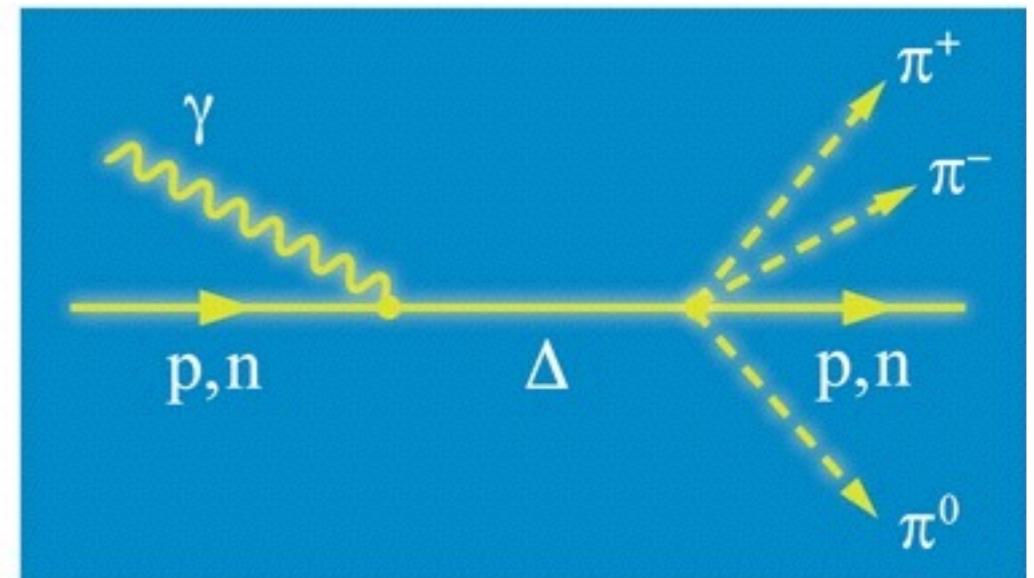
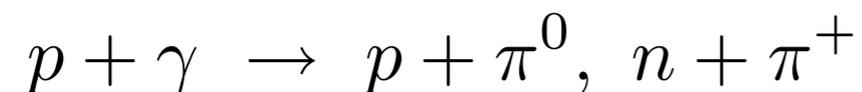
⇒ Der Beginn der “Teilchen-Astronomie” ?



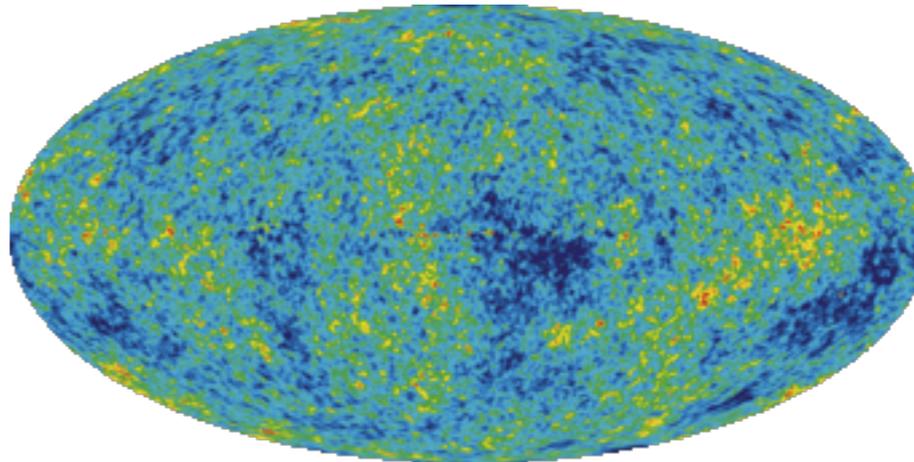
Kosmische Geschwindigkeitsbegrenzung?



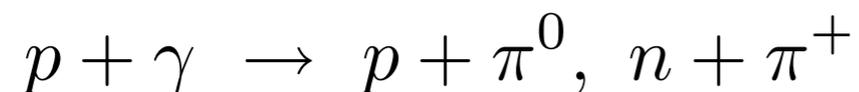
- Greisen - Zatsepin - Kuzmin Cutoff (1966):
 - Wechselwirkung der kosmischen Teilchen mit Photonen der Hintergrundstrahlung
 - Mittlere freie Weglänge zwischen zwei Kollisionen: ~ 50 Mpc
 - Bei hohen Energien: Möglichkeit für Pion - Produktion:



Kosmische Geschwindigkeitsbegrenzung?



- Greisen - Zatsepin - Kuzmin Cutoff (1966):
 - Wechselwirkung der kosmischen Teilchen mit Photonen der Hintergrundstrahlung
 - Mittlere freie Weglänge zwischen zwei Kollisionen: ~ 50 Mpc
 - Bei hohen Energien: Möglichkeit für Pion - Produktion:



Schwerpunktsenergie der Reaktion

$$\sqrt{s} = \sqrt{m_p^2 + 2E_p E_\gamma (1 - \cos\alpha)}$$

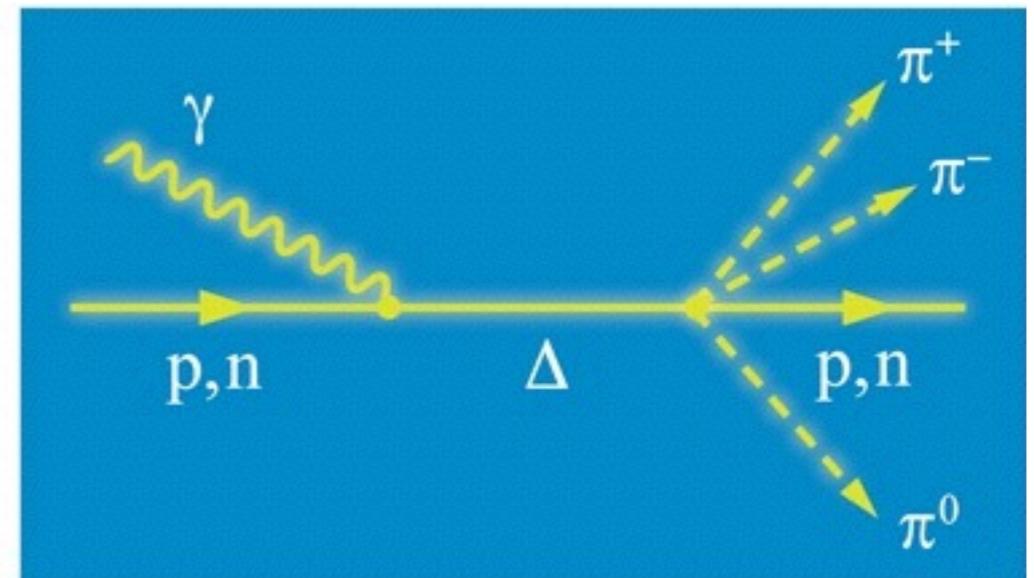


Photo-Pion Produktion mit CMB-Photonen

Pion-Produktion wird möglich, sobald $\sqrt{s} > m_p + m_\pi$

Photo-Pion Produktion mit CMB-Photonen

Pion-Produktion wird möglich, sobald $\sqrt{s} > m_p + m_\pi$

⇒ Energie-Schwelle $\sqrt{s} = \sqrt{m_p^2 + 2E_p E_\gamma (1 - \cos\alpha)} = m_p + m_\pi$

Photo-Pion Produktion mit CMB-Photonen

Pion-Produktion wird möglich, sobald $\sqrt{s} > m_p + m_\pi$

⇒ Energie-Schwelle $\sqrt{s} = \sqrt{m_p^2 + 2E_p E_\gamma (1 - \cos\alpha)} = m_p + m_\pi$

$$E_{max} = \frac{(m_\pi + m_p)^2 - m_p^2}{2E_\gamma (1 - \cos\alpha)}$$

Photo-Pion Produktion mit CMB-Photonen

Pion-Produktion wird möglich, sobald $\sqrt{s} > m_p + m_\pi$

⇒ Energie-Schwelle $\sqrt{s} = \sqrt{m_p^2 + 2E_p E_\gamma (1 - \cos\alpha)} = m_p + m_\pi$

$$E_{max} = \frac{(m_\pi + m_p)^2 - m_p^2}{2E_\gamma(1 - \cos\alpha)} \Rightarrow \gamma p \rightarrow p\pi^0 : 6.8 \times 10^{19} \left(\frac{E_\gamma}{10^{-3} \text{ eV}} \right)^{-1} \text{ eV}$$

Photo-Pion Produktion mit CMB-Photonen

Pion-Produktion wird möglich, sobald $\sqrt{s} > m_p + m_\pi$

⇒ Energie-Schwelle $\sqrt{s} = \sqrt{m_p^2 + 2E_p E_\gamma (1 - \cos\alpha)} = m_p + m_\pi$

$$E_{max} = \frac{(m_\pi + m_p)^2 - m_p^2}{2E_\gamma(1 - \cos\alpha)} \Rightarrow \gamma p \rightarrow p\pi^0 : 6.8 \times 10^{19} \left(\frac{E_\gamma}{10^{-3} \text{eV}} \right)^{-1} \text{eV}$$

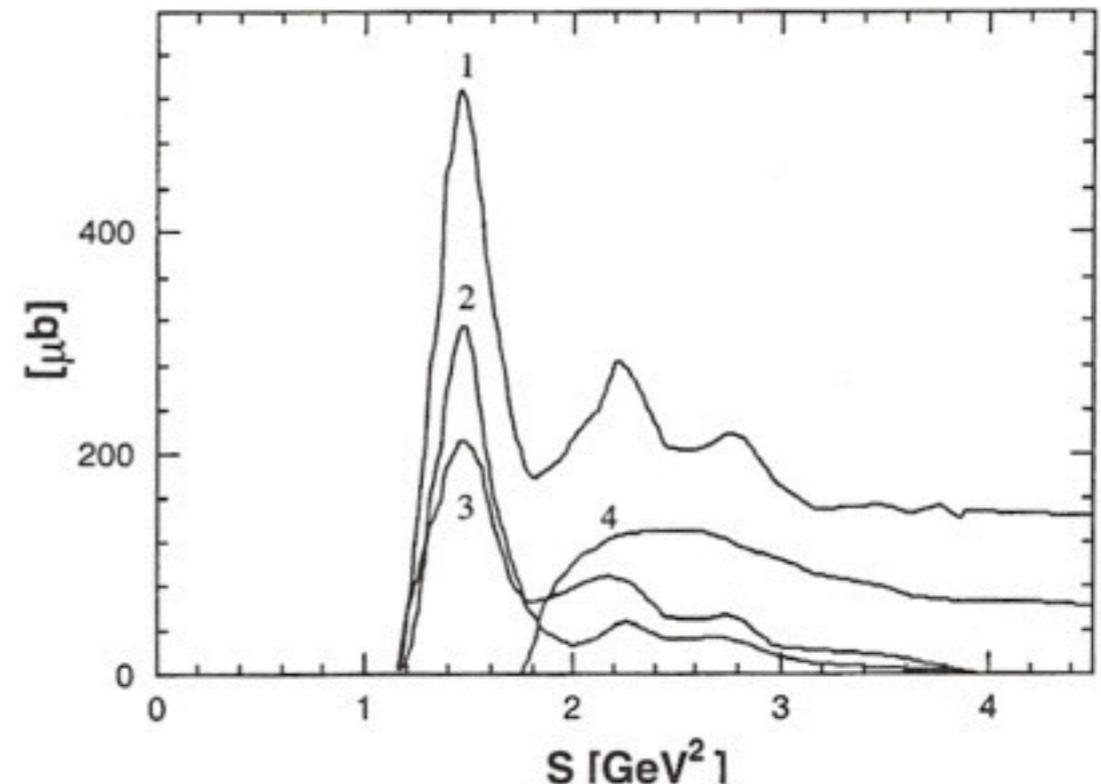


FIG. 3.2: Cross sections for photopion production [9]. 1 denotes the summation of all channels, 2 $\gamma p \rightarrow p\pi^0$, 3 $\gamma p \rightarrow n\pi^+$, and 4 $\gamma p \rightarrow p + \text{double pion}$.

S. Yoshida, "Ultra-High Energy Particle Astrophysics"

Photo-Pion Produktion mit CMB-Photonen

Pion-Produktion wird möglich, sobald $\sqrt{s} > m_p + m_\pi$

⇒ Energie-Schwelle $\sqrt{s} = \sqrt{m_p^2 + 2E_p E_\gamma (1 - \cos\alpha)} = m_p + m_\pi$

$$E_{max} = \frac{(m_\pi + m_p)^2 - m_p^2}{2E_\gamma(1 - \cos\alpha)} \Rightarrow \gamma p \rightarrow p\pi^0 : 6.8 \times 10^{19} \left(\frac{E_\gamma}{10^{-3} \text{ eV}} \right)^{-1} \text{ eV}$$

- Kosmische Hintergrundstrahlung:
Schwarzkörper mit 2.7 K, $\sim 2.3 \times 10^{-4}$ eV
- ▶ Photonen bis zu $\sim 10^{-3}$ eV
- ▶ Kosmisches “Tempo-Limit” bei
 $\sim 7 \times 10^{19}$ eV

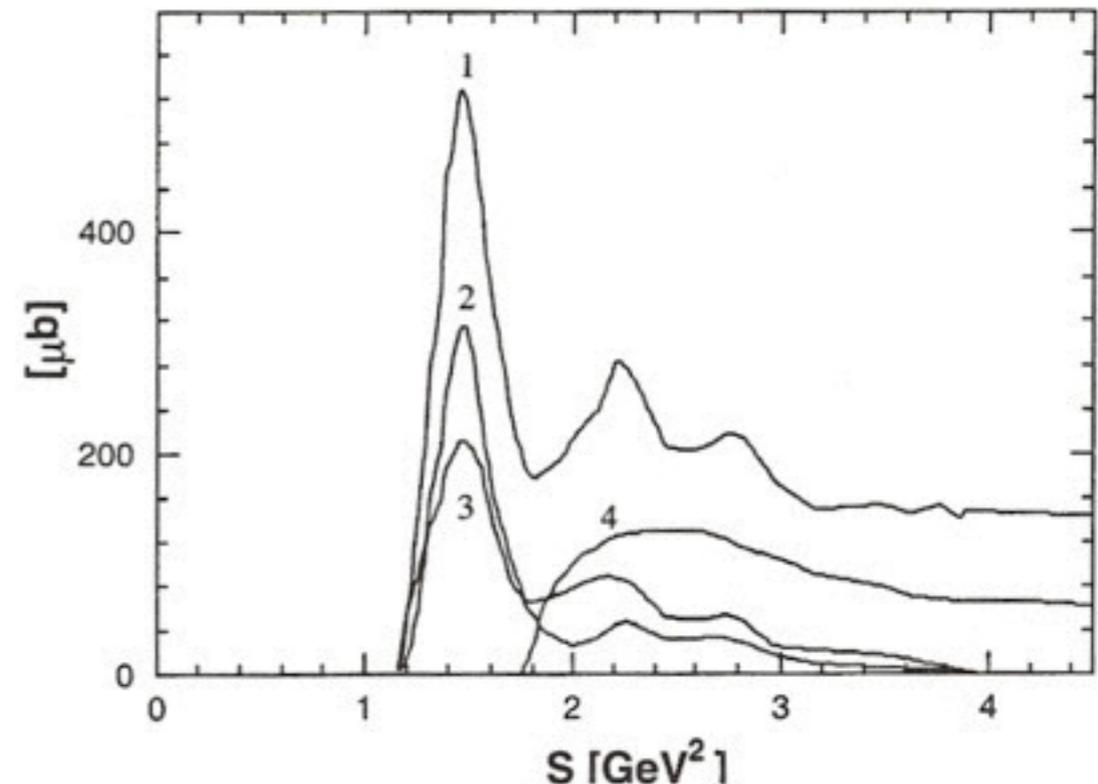
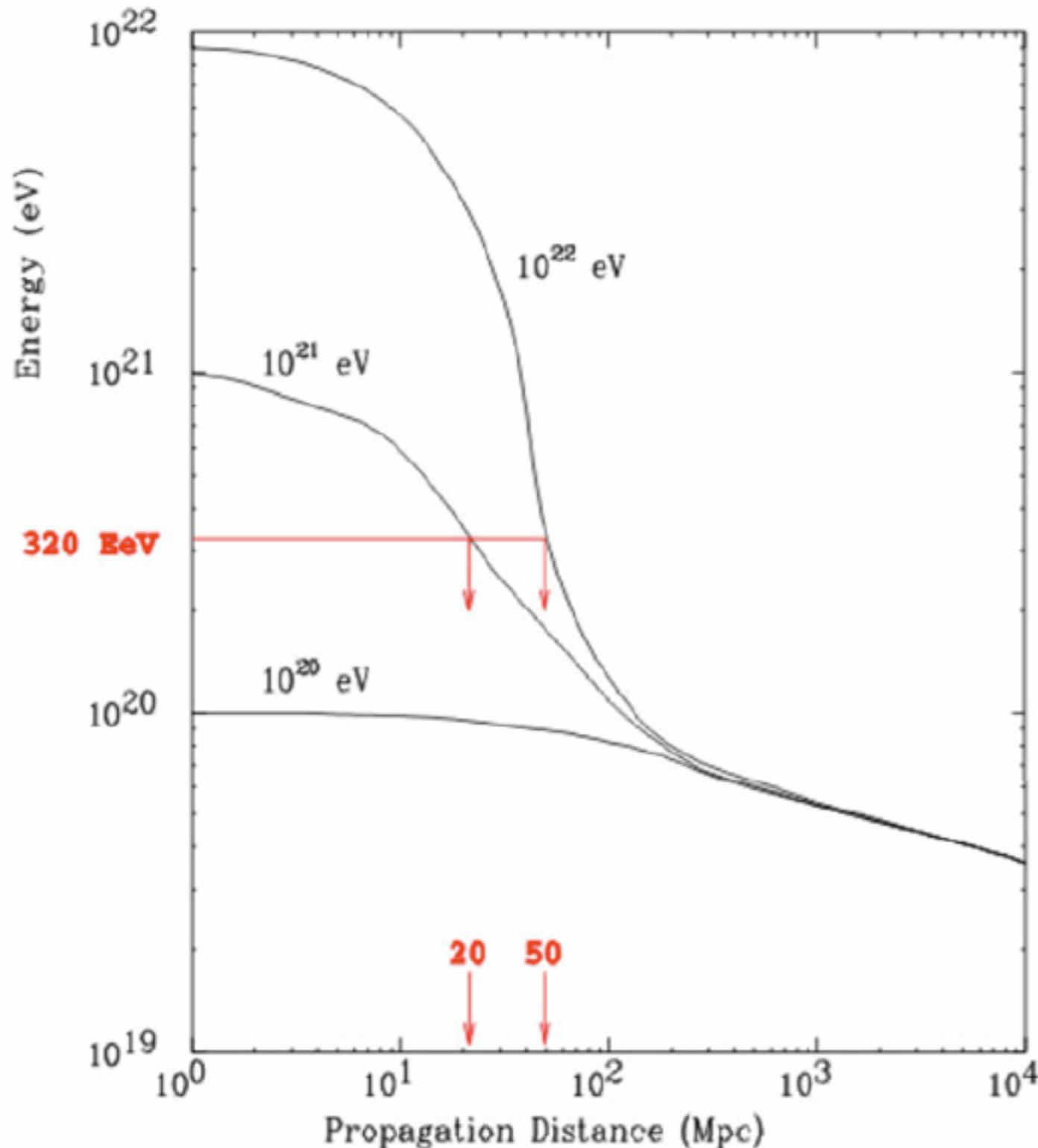


FIG. 3.2: Cross sections for photopion production [9]. 1 denotes the summation of all channels, 2 $\gamma p \rightarrow p\pi^0$, 3 $\gamma p \rightarrow n\pi^+$, and 4 $\gamma p \rightarrow p + \text{double pion}$.

S. Yoshida, “Ultra-High Energy Particle Astrophysics”

Energieentwicklung durch GZK-Effekt



- ▶ Hochenergetische Teilchen verlieren schnell Energie durch Photo-Pion Produktion:
 - Pro Wechselwirkung gehen $\sim 30\%$ der Energie verloren!
- ▶ Reichweite von Teilchen oberhalb von $\sim 10^{20}$ eV beschränkt auf < 100 Mpc

Energie-Grenzen

- Der GZK-Cutoff sollte für Kerne noch dramatischer zuschlagen als für Protonen: Photodisintegration!

Energie-Grenzen

- Der GZK-Cutoff sollte für Kerne noch dramatischer zuschlagen als für Protonen: Photodisintegration!

Die Schwelle hierfür liegt bei einigen 10^{18} eV/Nukleon, und ab 10^{19} eV/Nukleon kann fast jedes CMB-Photon eine Riesenresonanz anregen: Riesiger Wirkungsquerschnitt, freie Weglänge kleiner als die Galaxie!

Energie-Grenzen

- Der GZK-Cutoff sollte für Kerne noch dramatischer zuschlagen als für Protonen: Photodisintegration!

Die Schwelle hierfür liegt bei einigen 10^{18} eV/Nukleon, und ab 10^{19} eV/Nukleon kann fast jedes CMB-Photon eine Riesenresonanz anregen: Riesiger Wirkungsquerschnitt, freie Weglänge kleiner als die Galaxie!

Ausserdem: e^+e^- - Paarerzeugung mit CMB-Photonen (Bethe-Heitler-Prozess, wie Bremsstrahlung): Niedrige Energieschwelle im Bereich von einigen 10^{17} eV

Energie-Grenzen

- Der GZK-Cutoff sollte für Kerne noch dramatischer zuschlagen als für Protonen: Photodisintegration!

Die Schwelle hierfür liegt bei einigen 10^{18} eV/Nukleon, und ab 10^{19} eV/Nukleon kann fast jedes CMB-Photon eine Riesenresonanz anregen: Riesiger Wirkungsquerschnitt, freie Weglänge kleiner als die Galaxie!

Ausserdem: e^+e^- - Paarerzeugung mit CMB-Photonen (Bethe-Heitler-Prozess, wie Bremsstrahlung): Niedrige Energieschwelle im Bereich von einigen 10^{17} eV

Aber: Typischerweise nur geringer Energieverlust: $2m_e/m_p \sim 10^{-3}$, bei höheren Energien noch geringer. Zum Vergleich: GZK-Ereignisse 30% oder mehr Energieverlust!

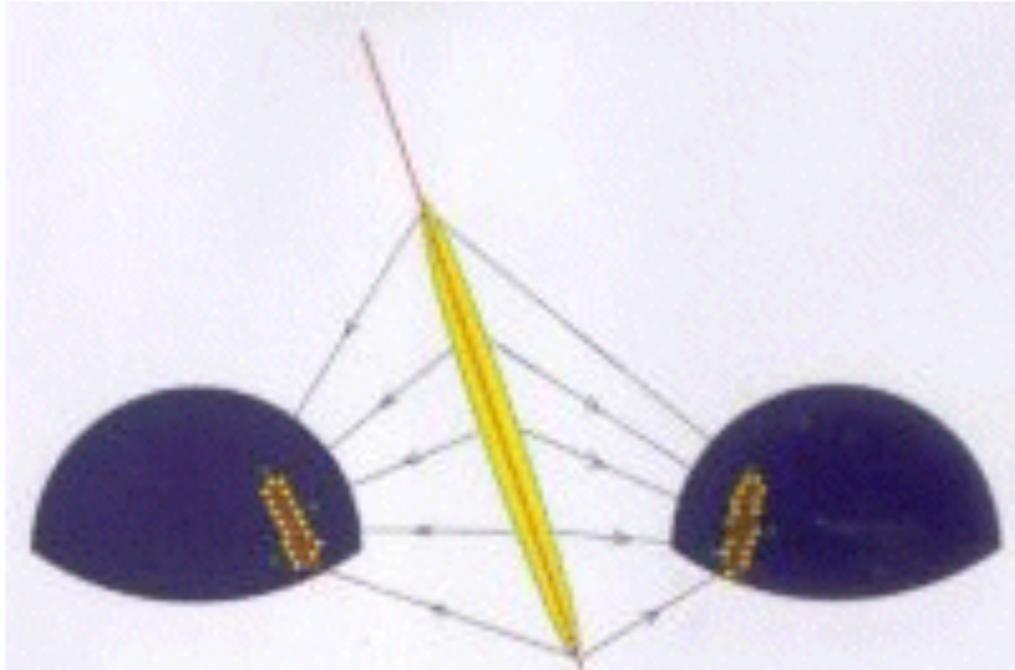
⇒ Nur geringe Auswirkung auf das Spektrum

Fly's Eye



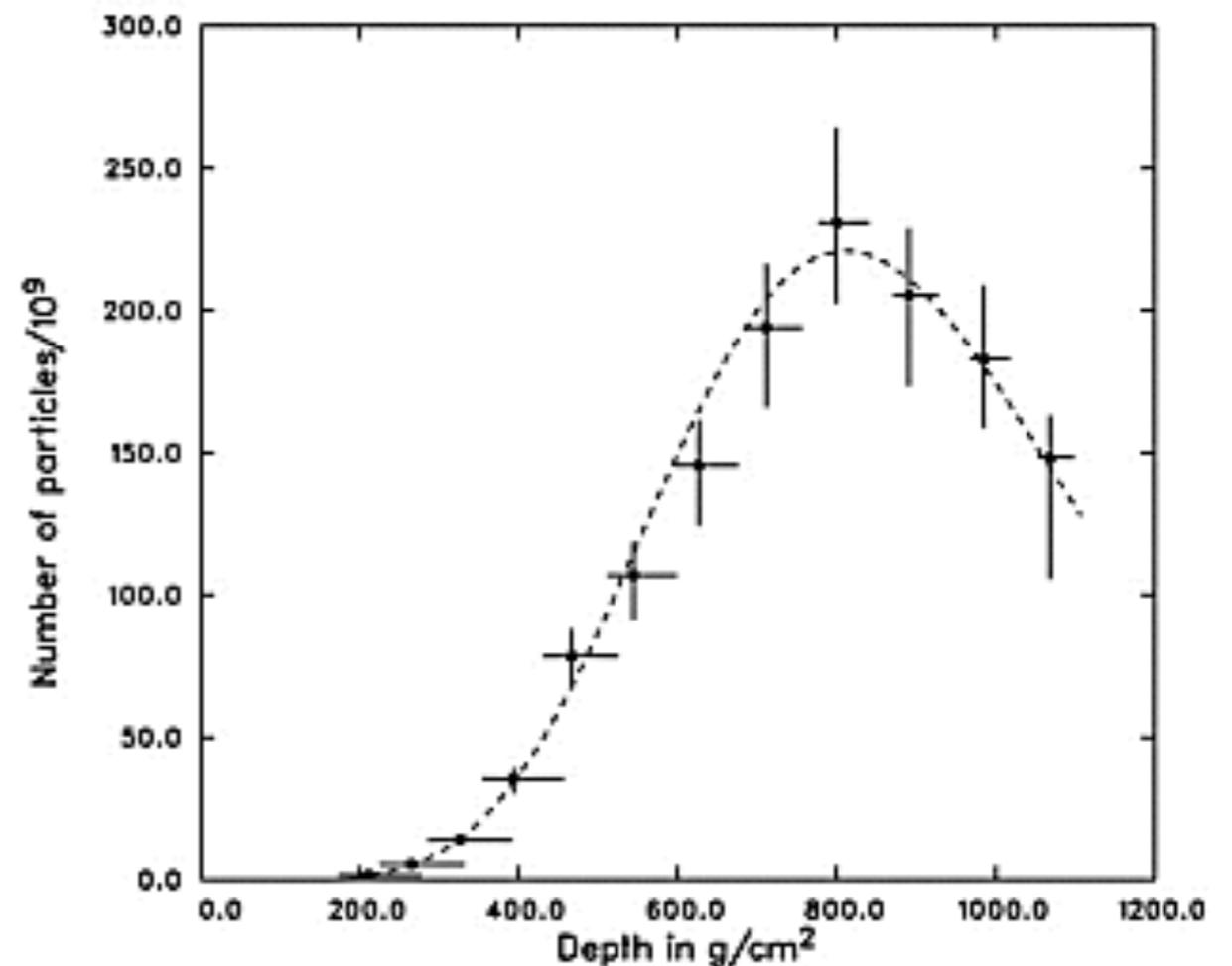
- Messung von Fluoreszenzlicht in der Atmosphäre

Fly's Eye: Das höchstenergetische Teilchen

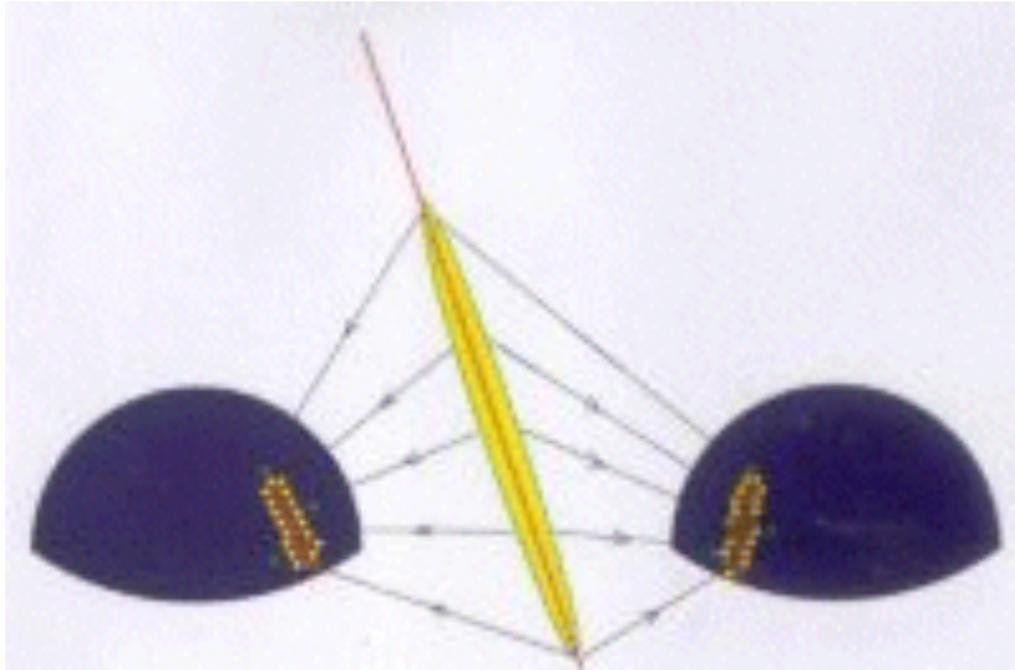


- Das höchstenergetische je auf der Erde nachgewiesene Teilchen: 15.10.1991, Utah: Energie $\sim 3 \times 10^{20}$ eV

- Stereo-Beobachtung von zwei Detektor-Anlagen aus erlaubt die genaue Bestimmung der Schauer-Richtung



Fly's Eye: Das höchstenergetische Teilchen

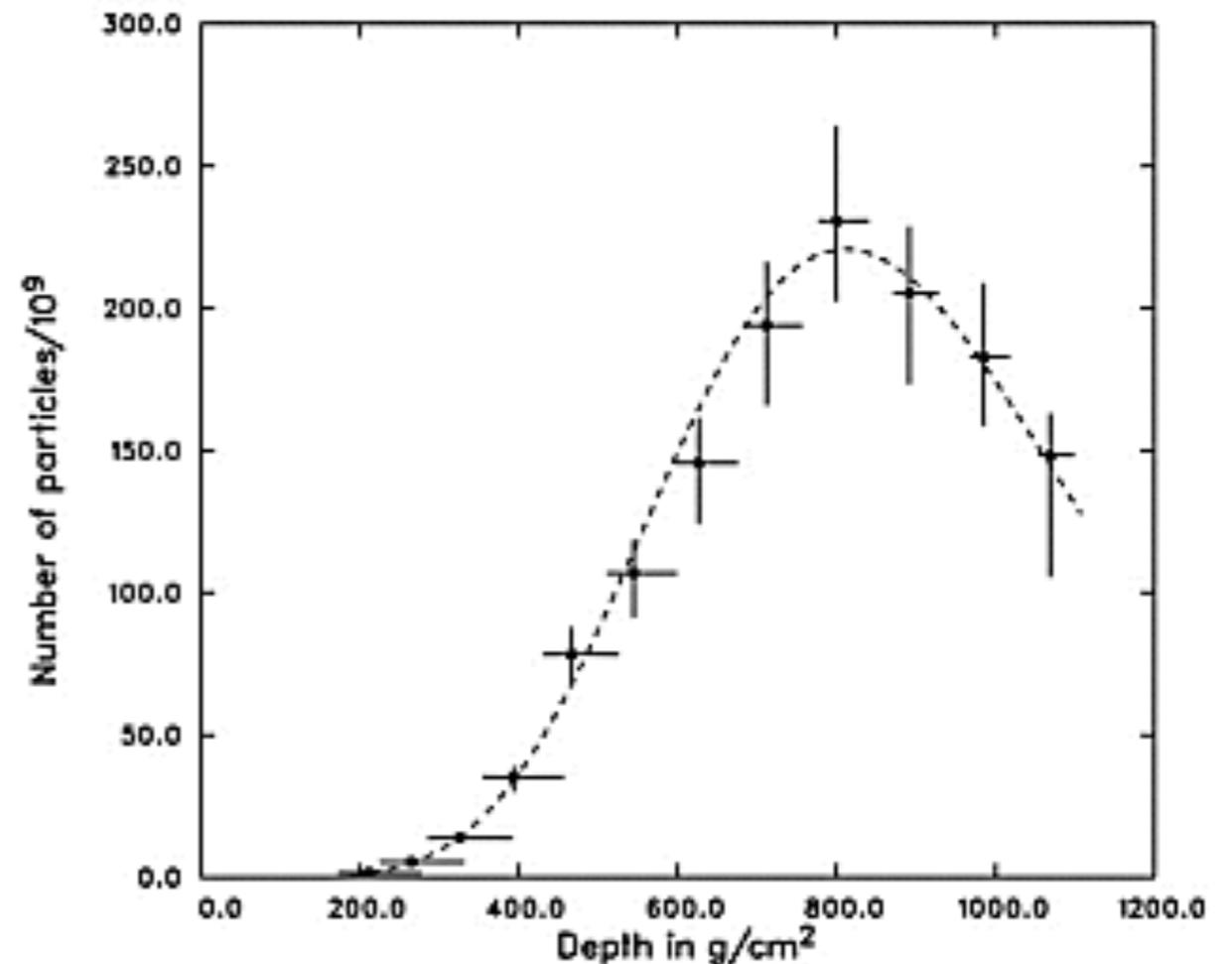


- Stereo-Beobachtung von zwei Detektor-Anlagen aus erlaubt die genaue Bestimmung der Schauer-Richtung

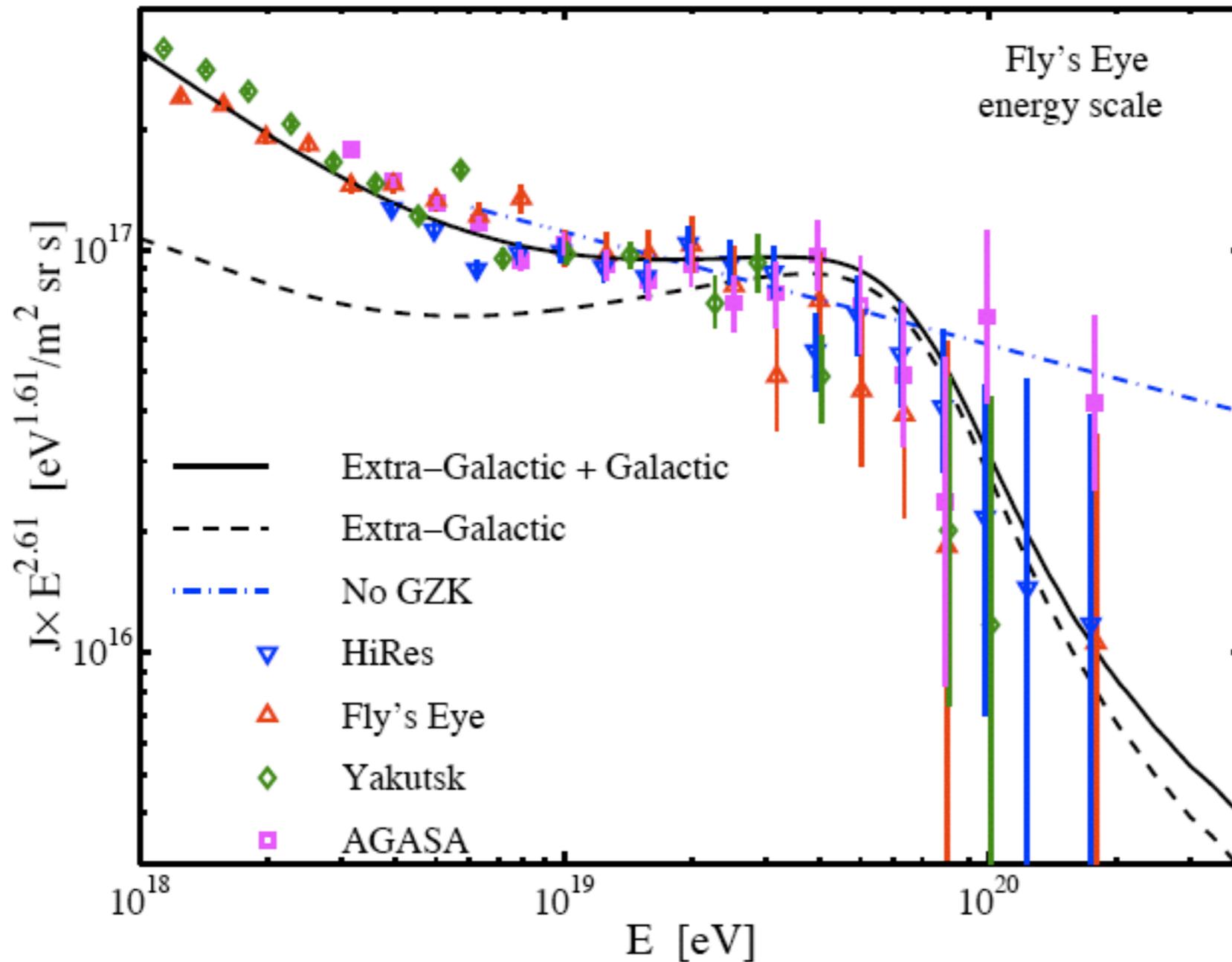
- Das höchstenergetische je auf der Erde nachgewiesene Teilchen: 15.10.1991, Utah: Energie $\sim 3 \times 10^{20}$ eV

50 J !

“Oh-my-God particle”



GZK-Cutoff: Status - 2003

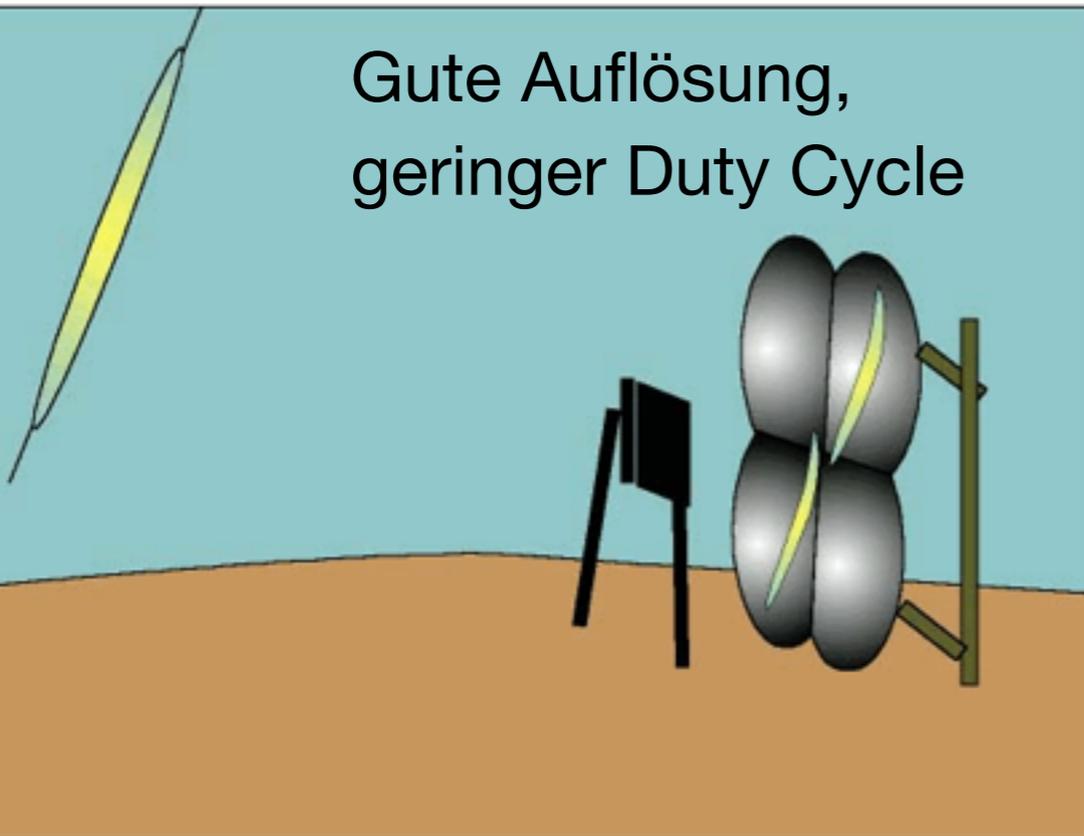


Nucl. Phys. B556, 1
(2003)

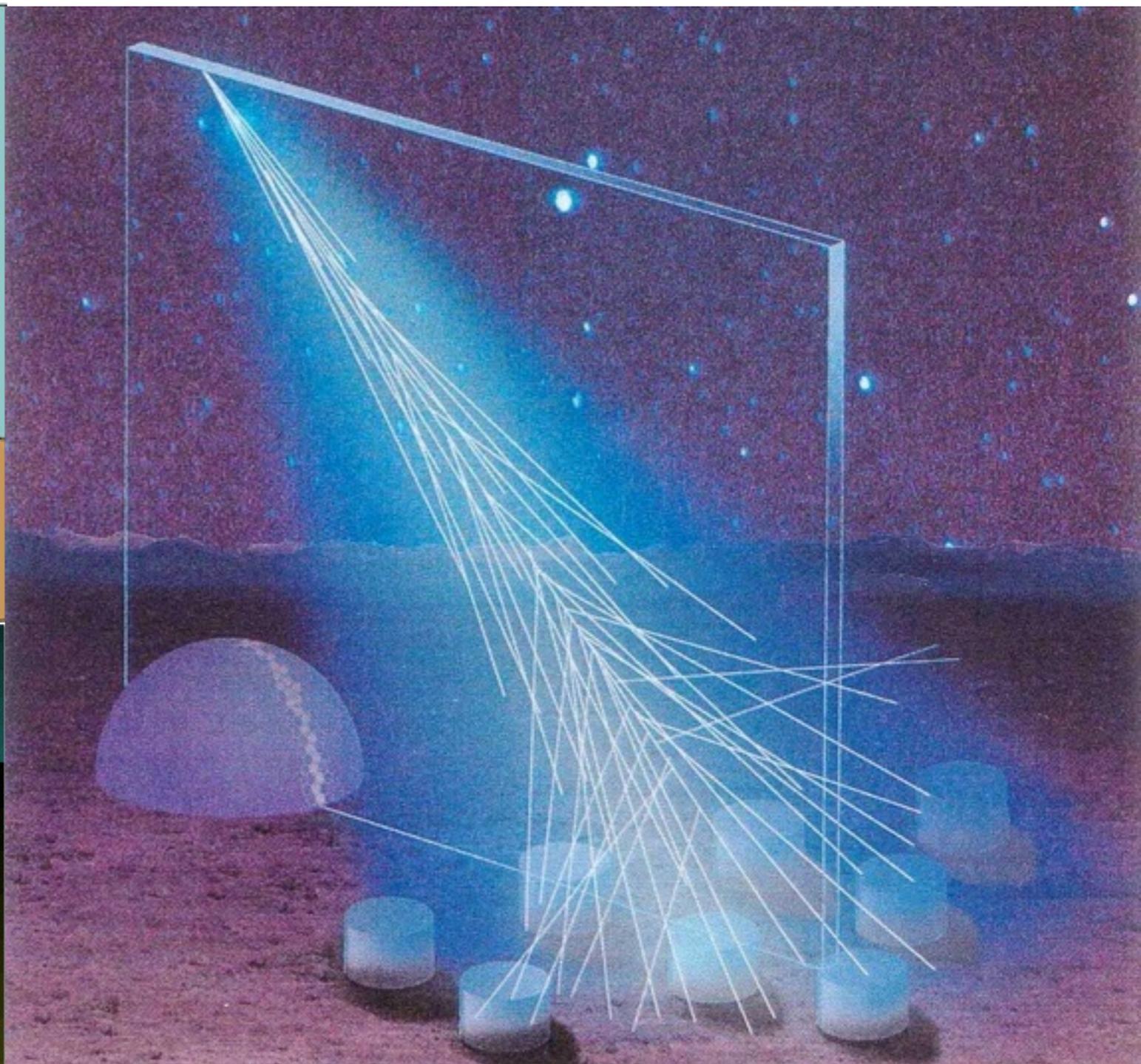
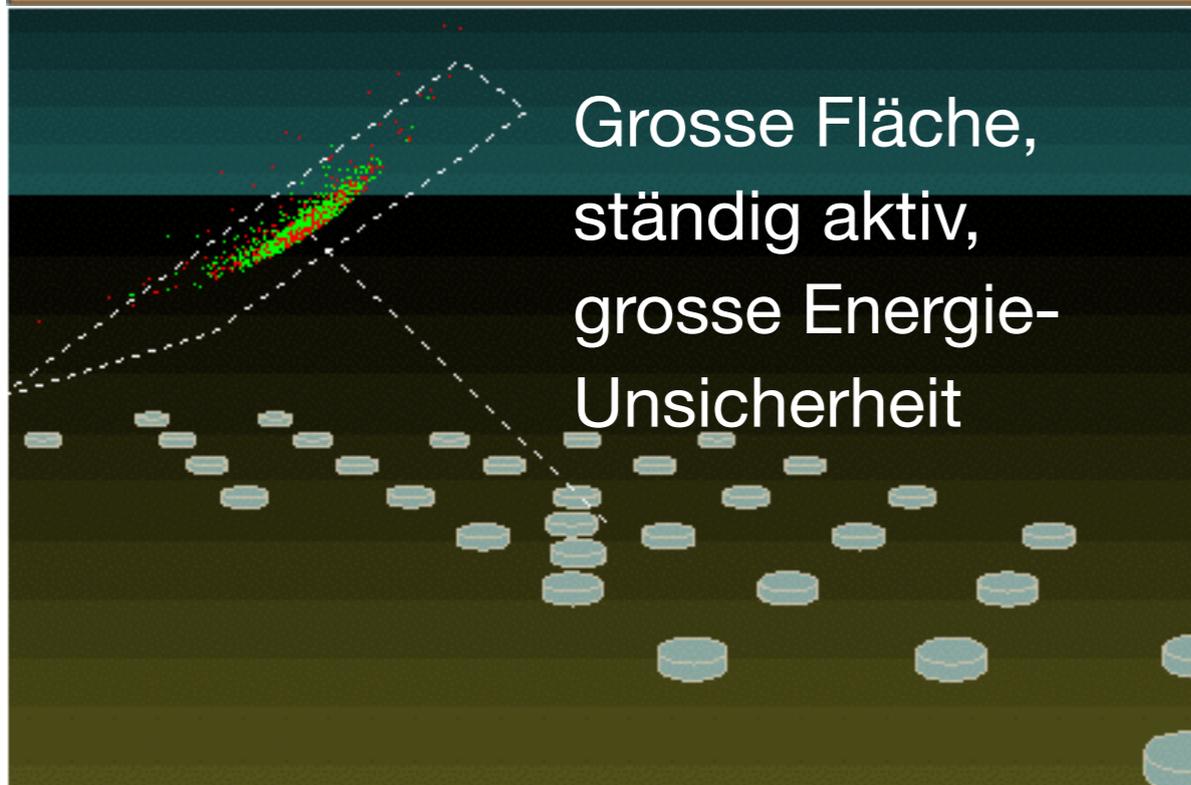
- Energie der einzelnen Experimente verschoben, so dass alles bei 10^{19} eV mit Fly's Eye zusammenfällt
- ▶ Starke Hinweise, dass der GZK cutoff existiert

AUGER: Kombination von zwei Techniken

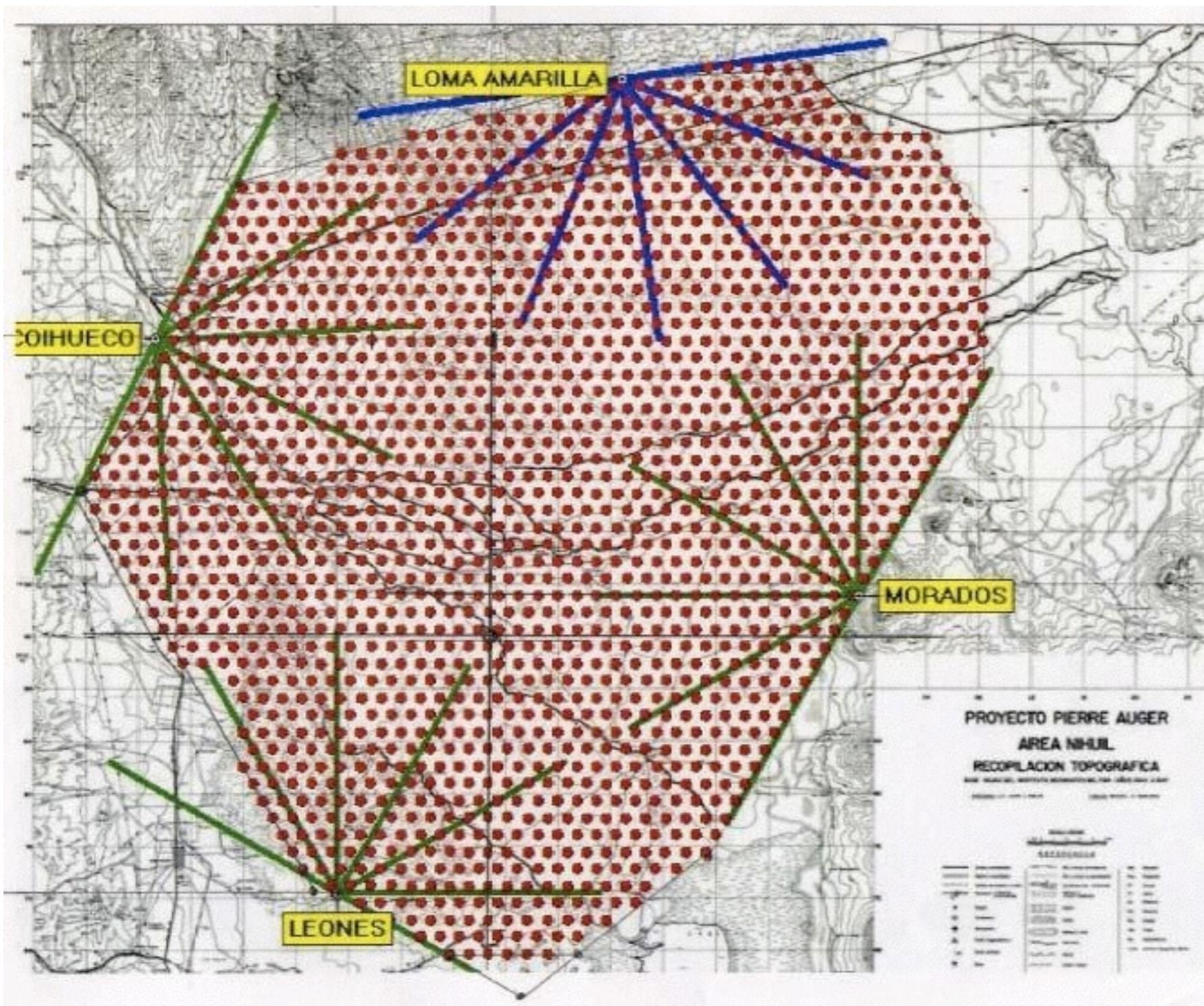
Gute Auflösung,
geringer Duty Cycle



Grosse Fläche,
ständig aktiv,
grosse Energie-
Unsicherheit

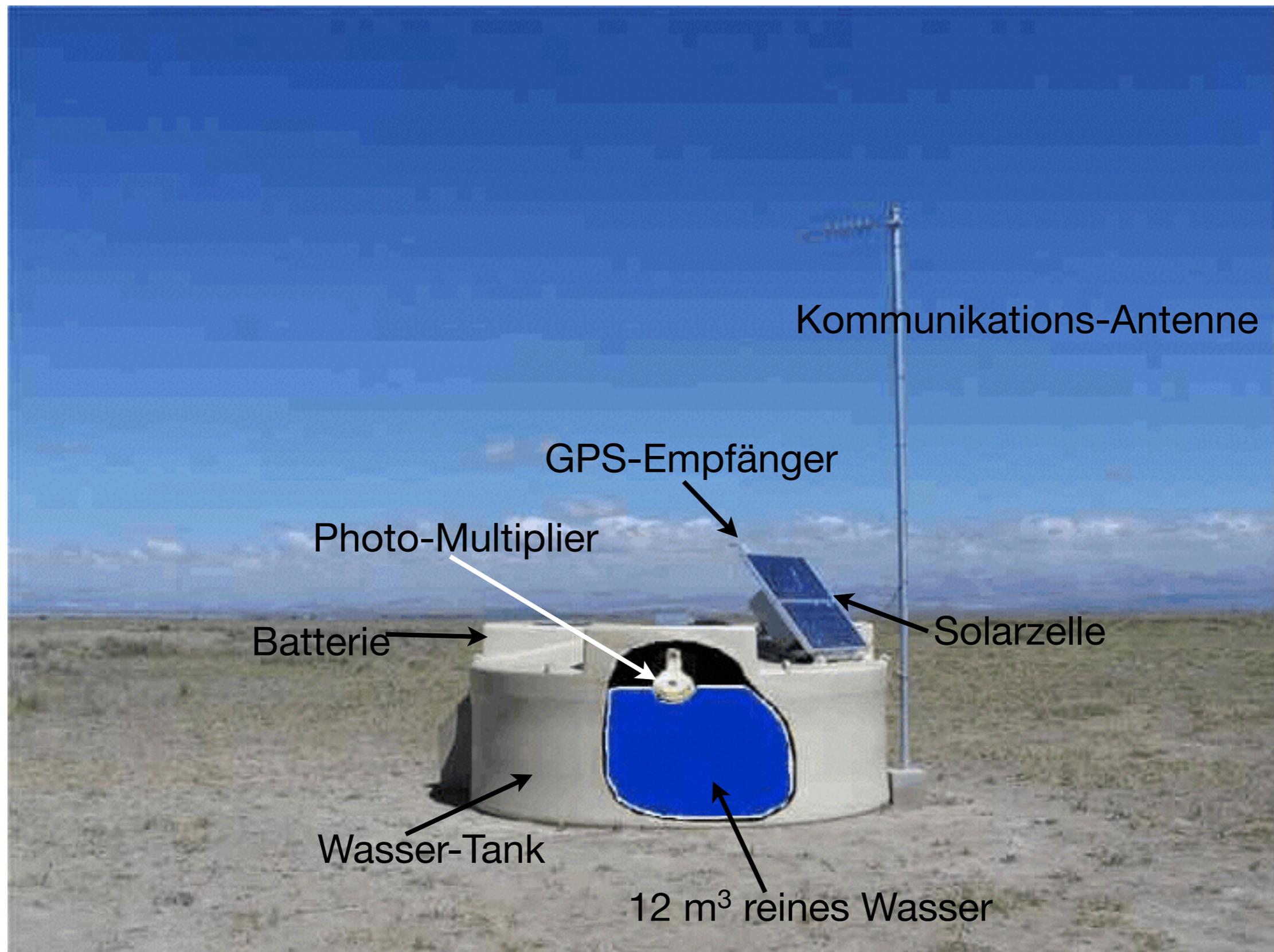


AUGER-Süd: Argentinische Pampa



- 1600 Wasser-Cherenkov-Detektoren am Boden
- 4 Fluoreszenz-Stationen mit je 6 Teleskopen
- Abgedeckte Fläche: 3000 km² (10 x München)

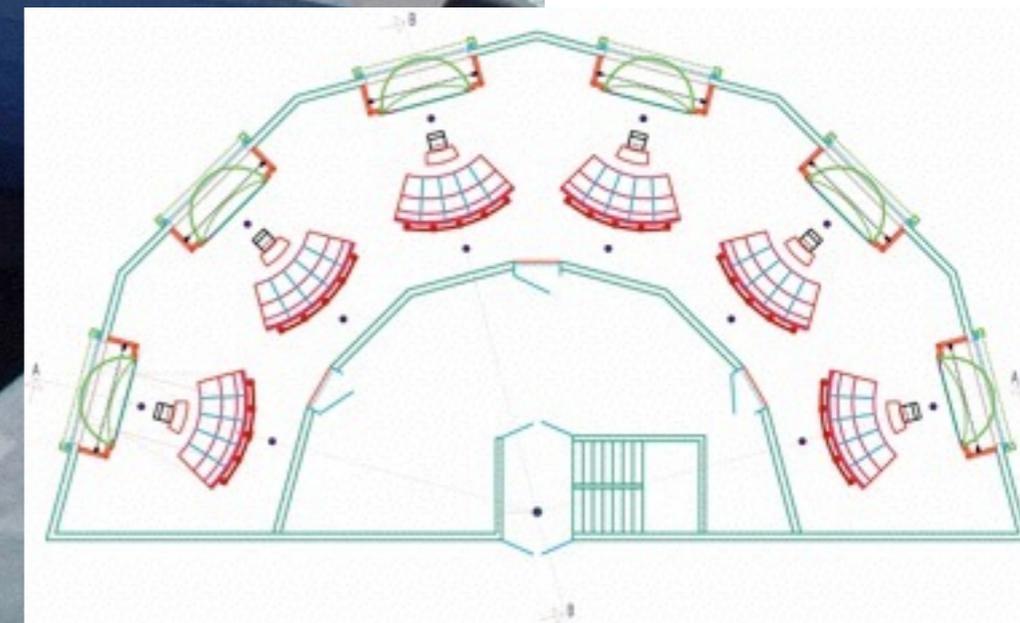
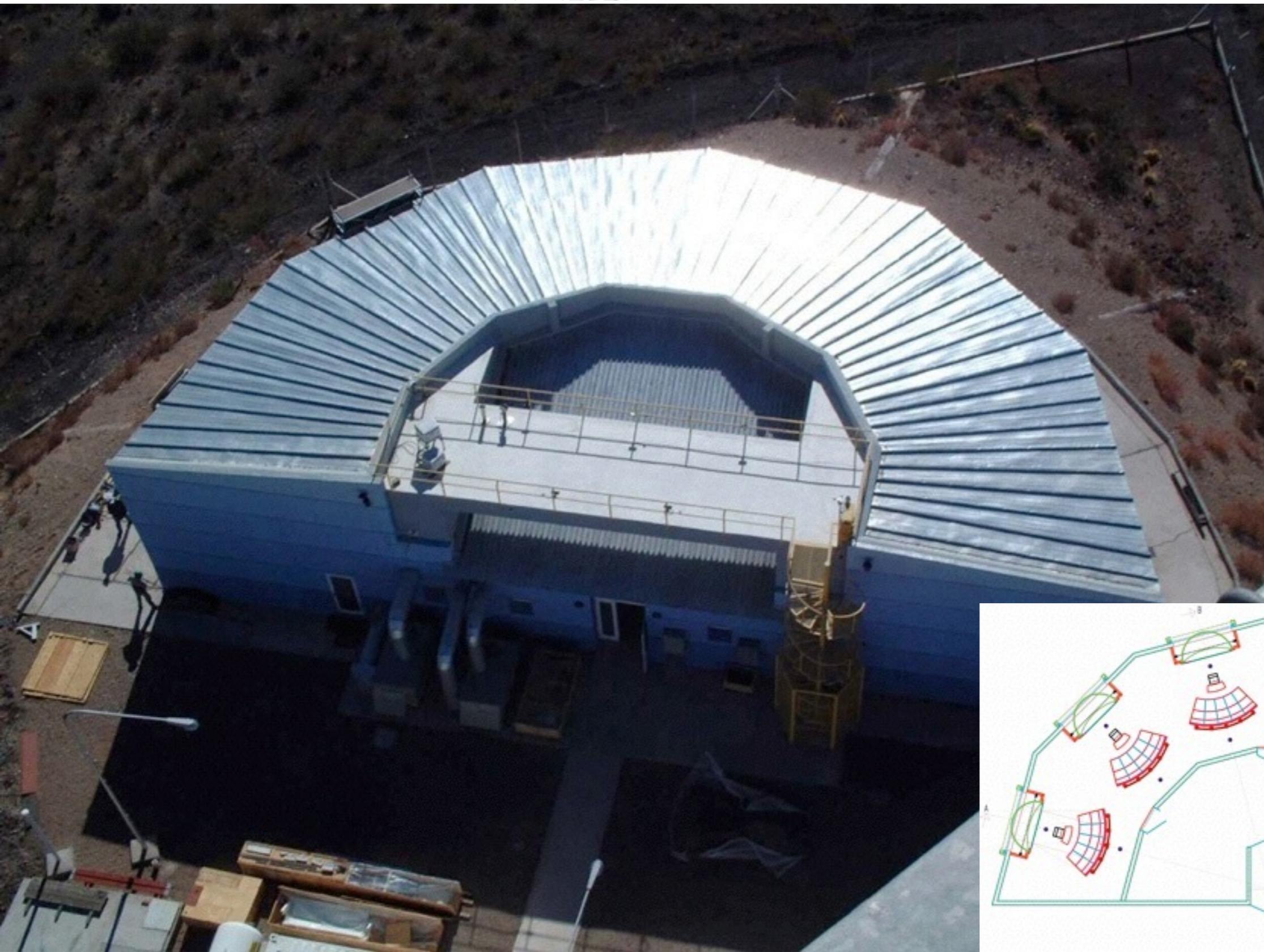
AUGER-Detektor: Ground Array



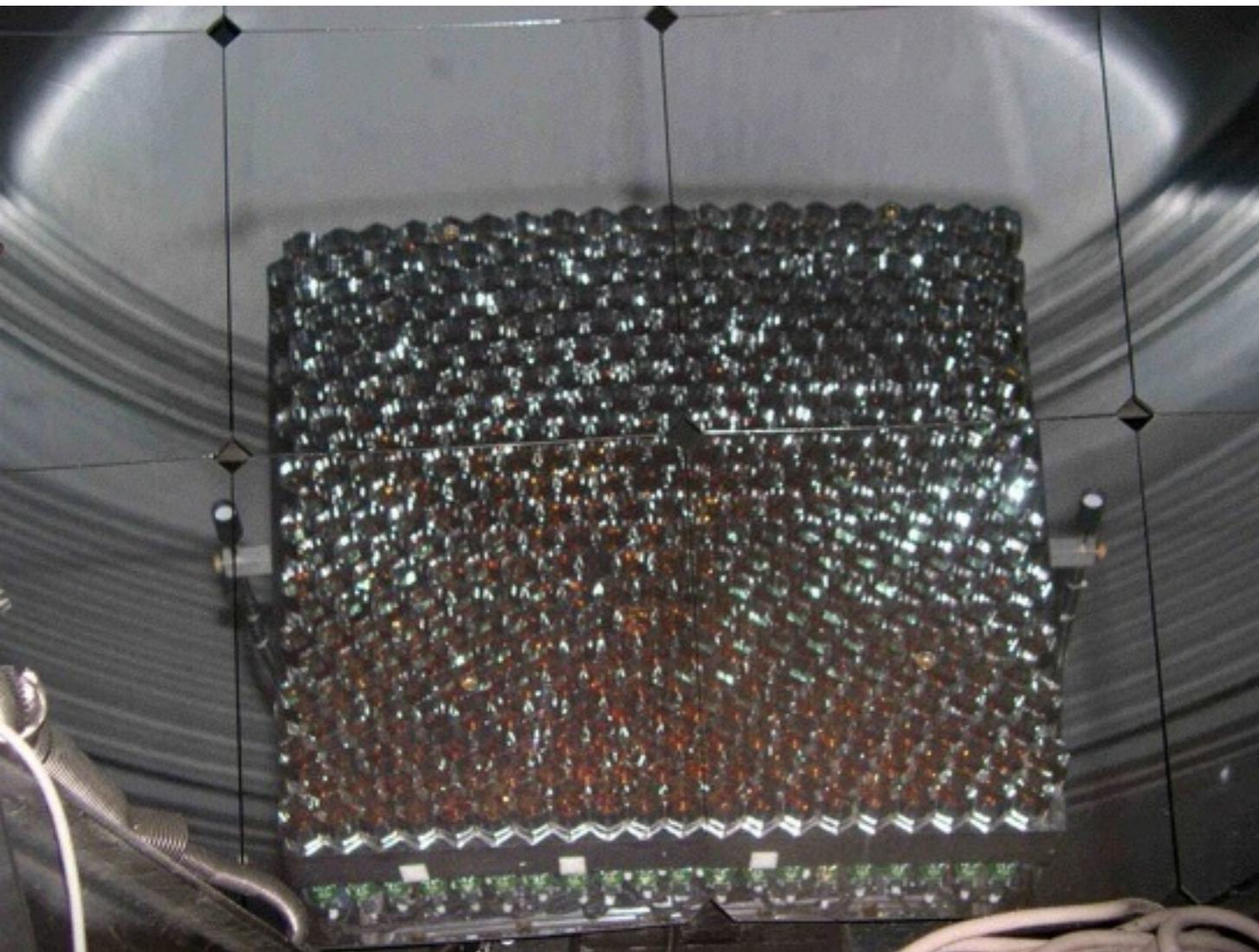
AUGER Installation



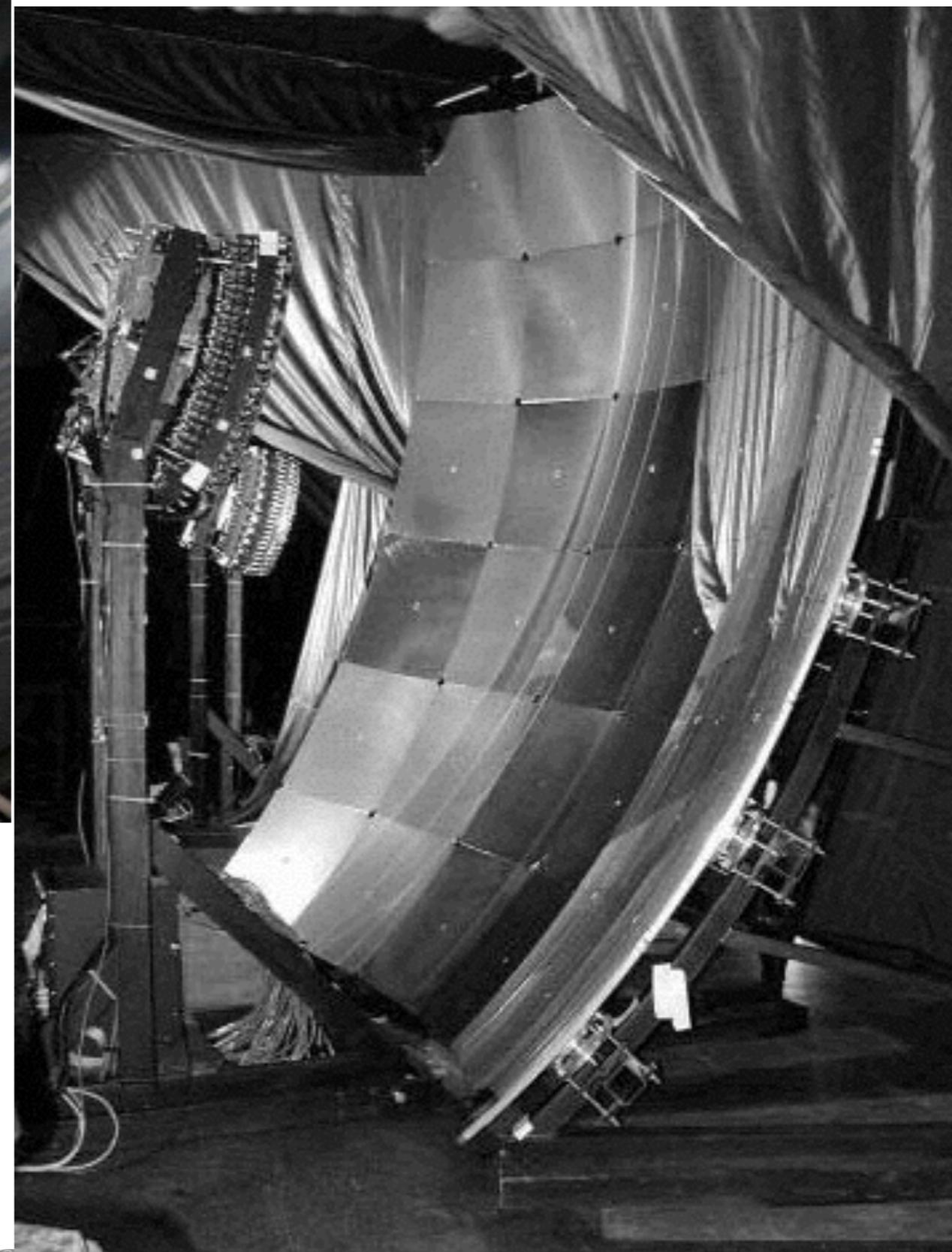
AUGER Fluoreszenz-Teleskope



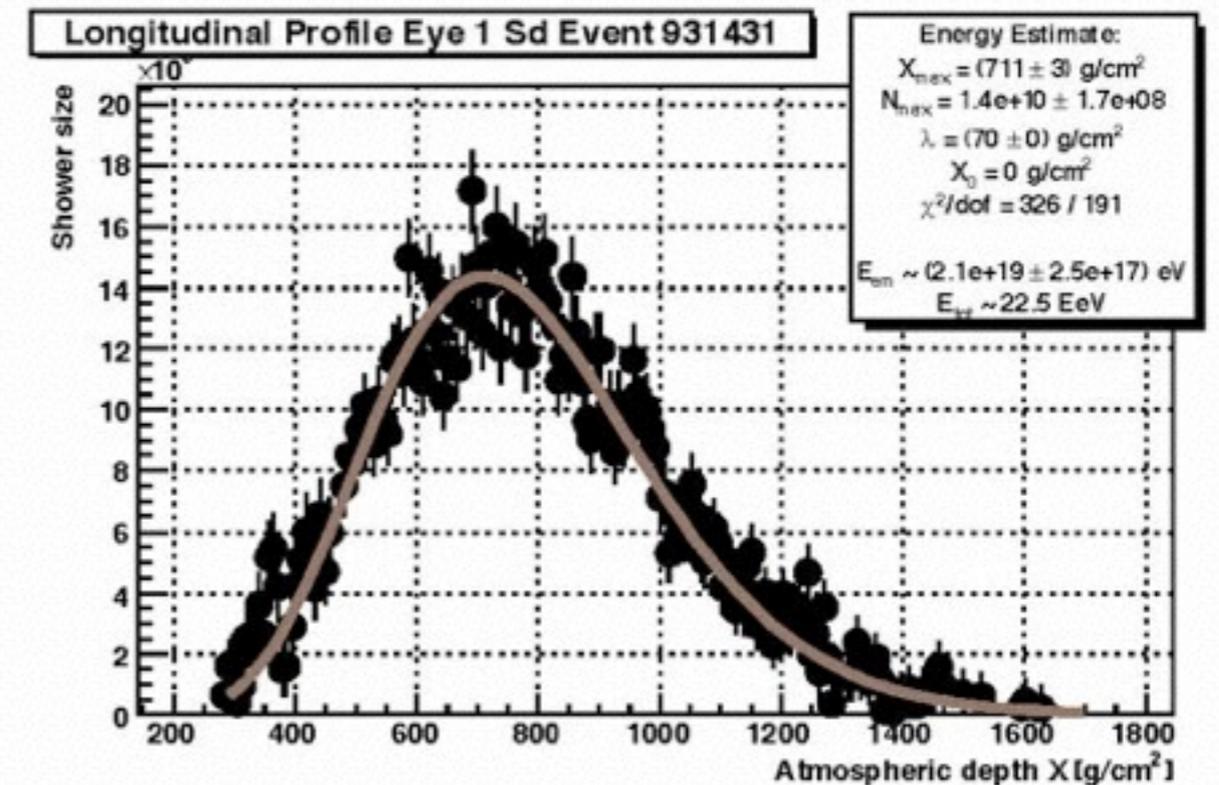
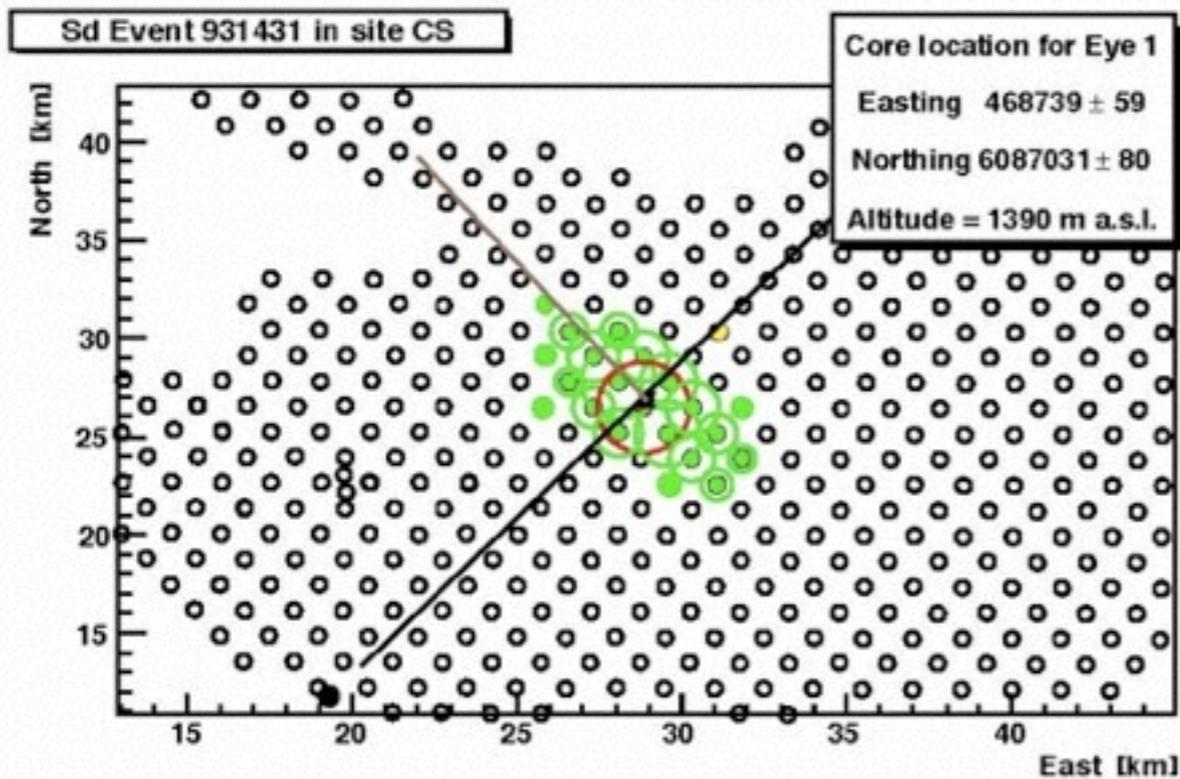
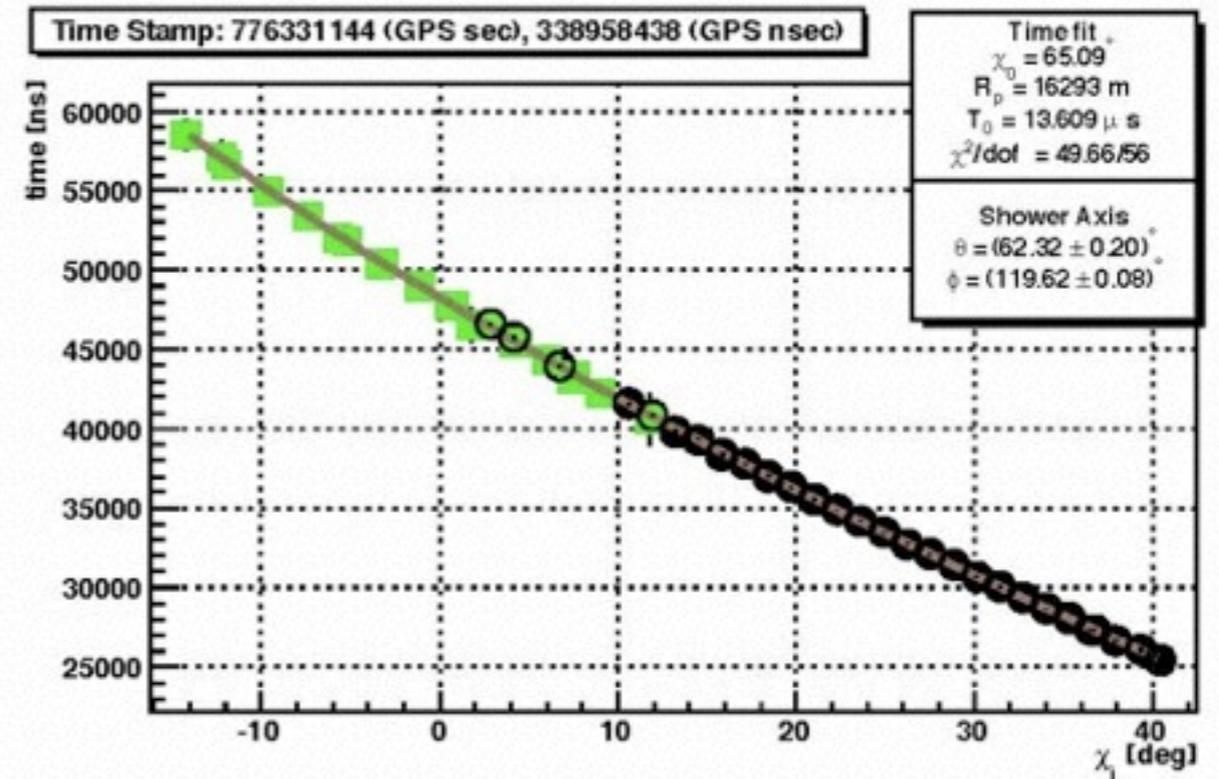
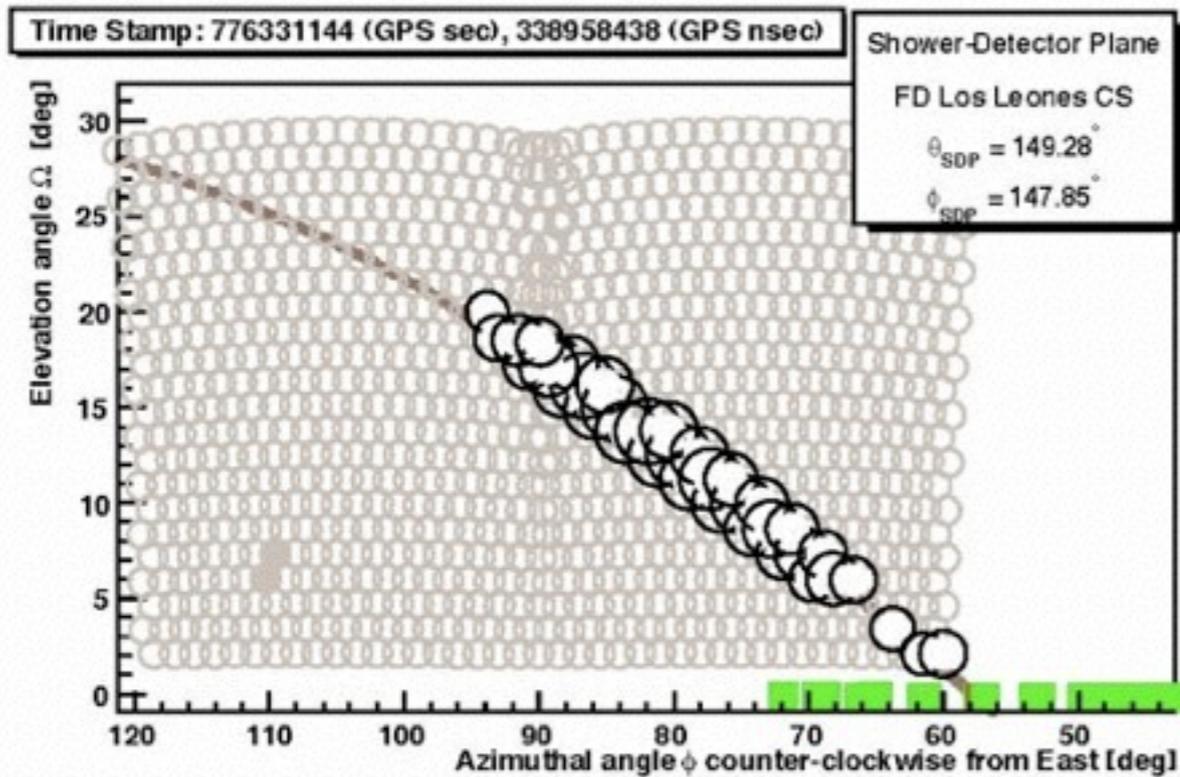
AUGER Fluoreszenz-Teleskope



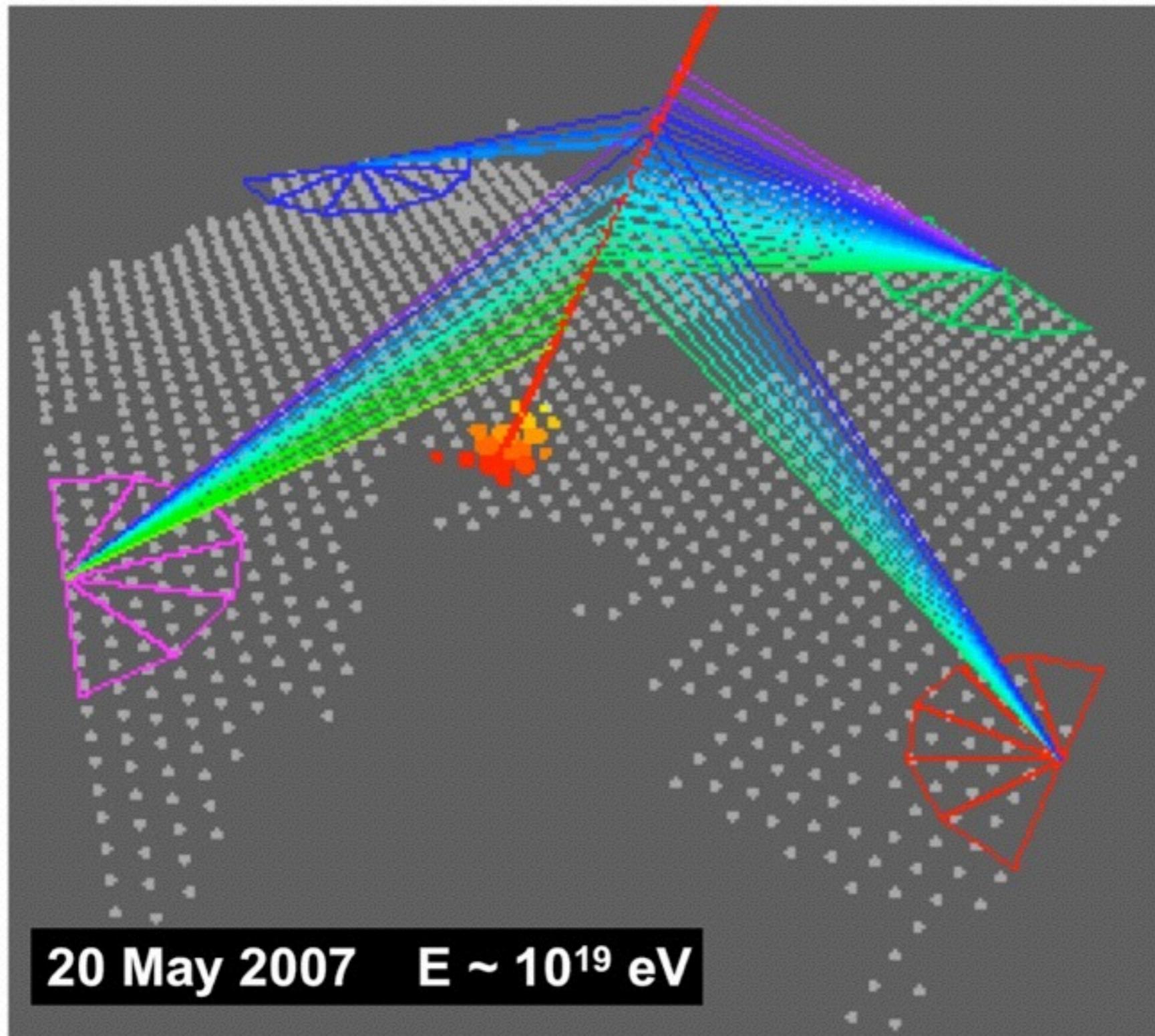
- 440 PMTs, 1.5° pro Pixel



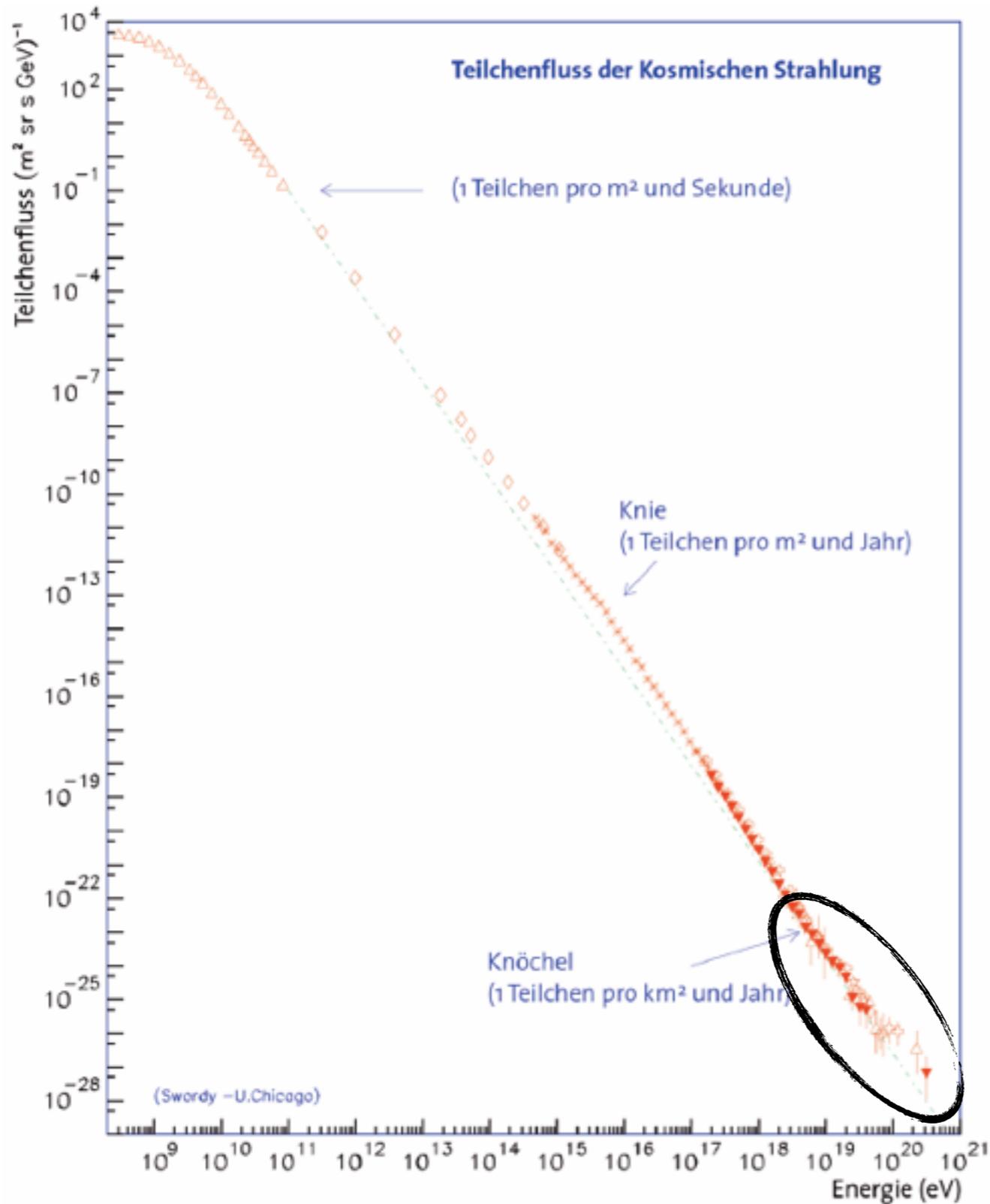
AUGER-Hybridereignis



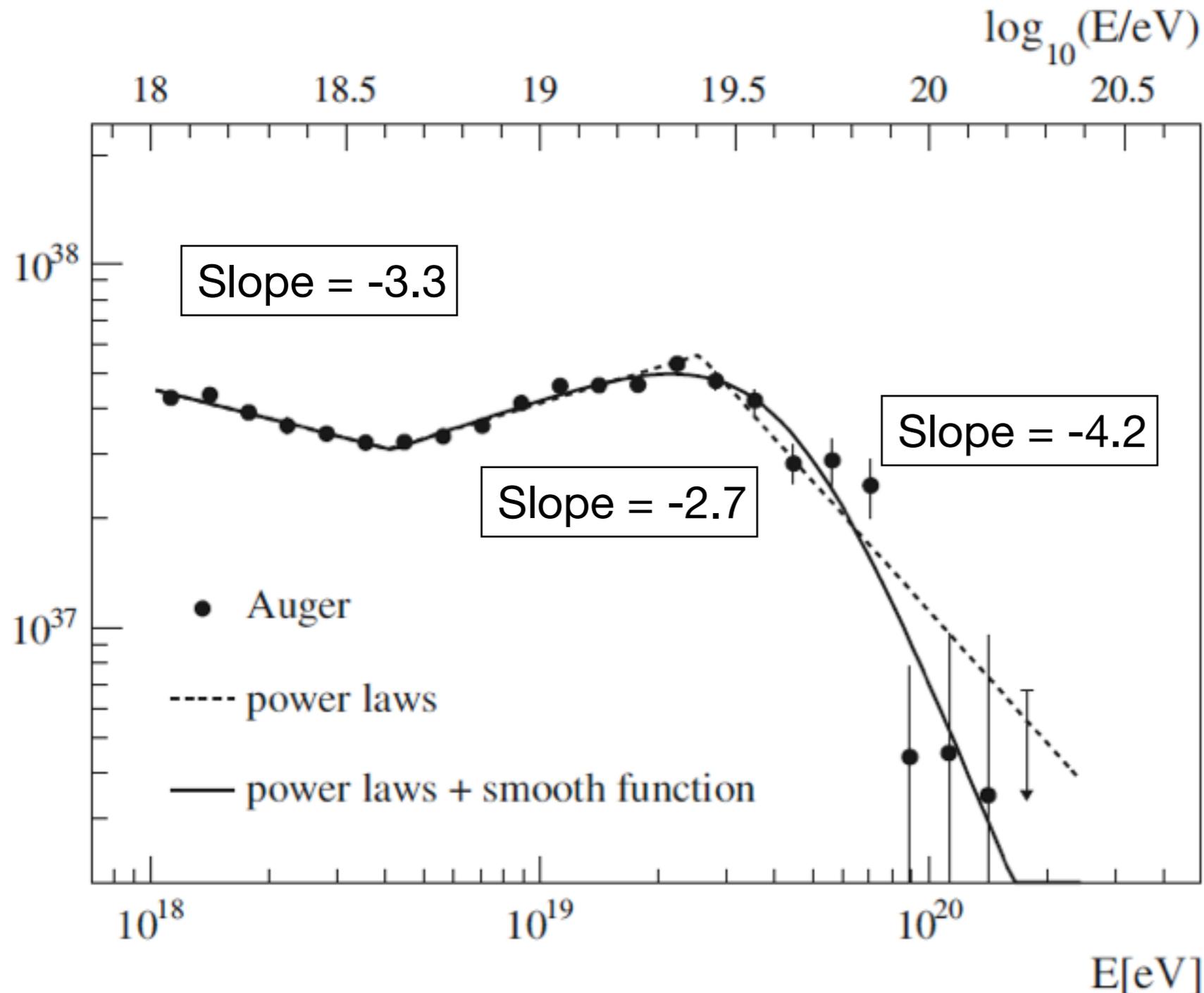
AUGER 4-Fach-Hybrid



AUGER-Spektrum: Höchste Energien



AUGER-Spektrum: Höchste Energien



Unterdrückung um Faktor 2
 bei 4.1×10^{19} eV verglichen
 mit Power-Law
 Extrapolation:
 Signifikanz $> 20\sigma$

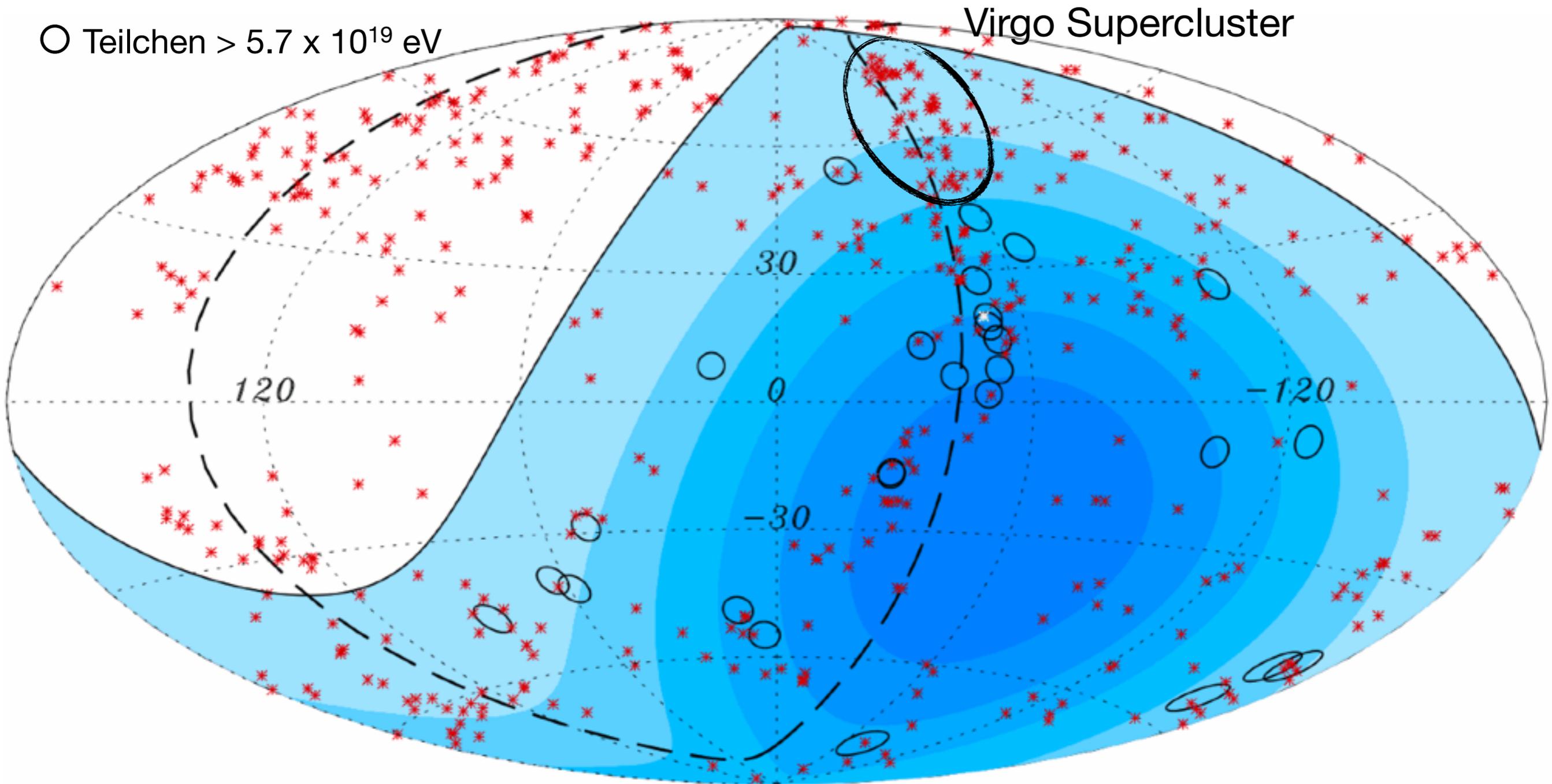
Ohne GZK: 30 - 50
 Ereignisse / Jahr $> 10^{20}$ eV
 Gesehen: ~ 1 Ereignis/Jahr

EPJP 127, 87 (2012)

- Sehr deutliche Hinweise auf GZK-Cutoff!
- Oder den Quellen geht dort die Luft aus, dadurch verändertes Spektrum..

AUGER: Verteilung (Stand 2007)

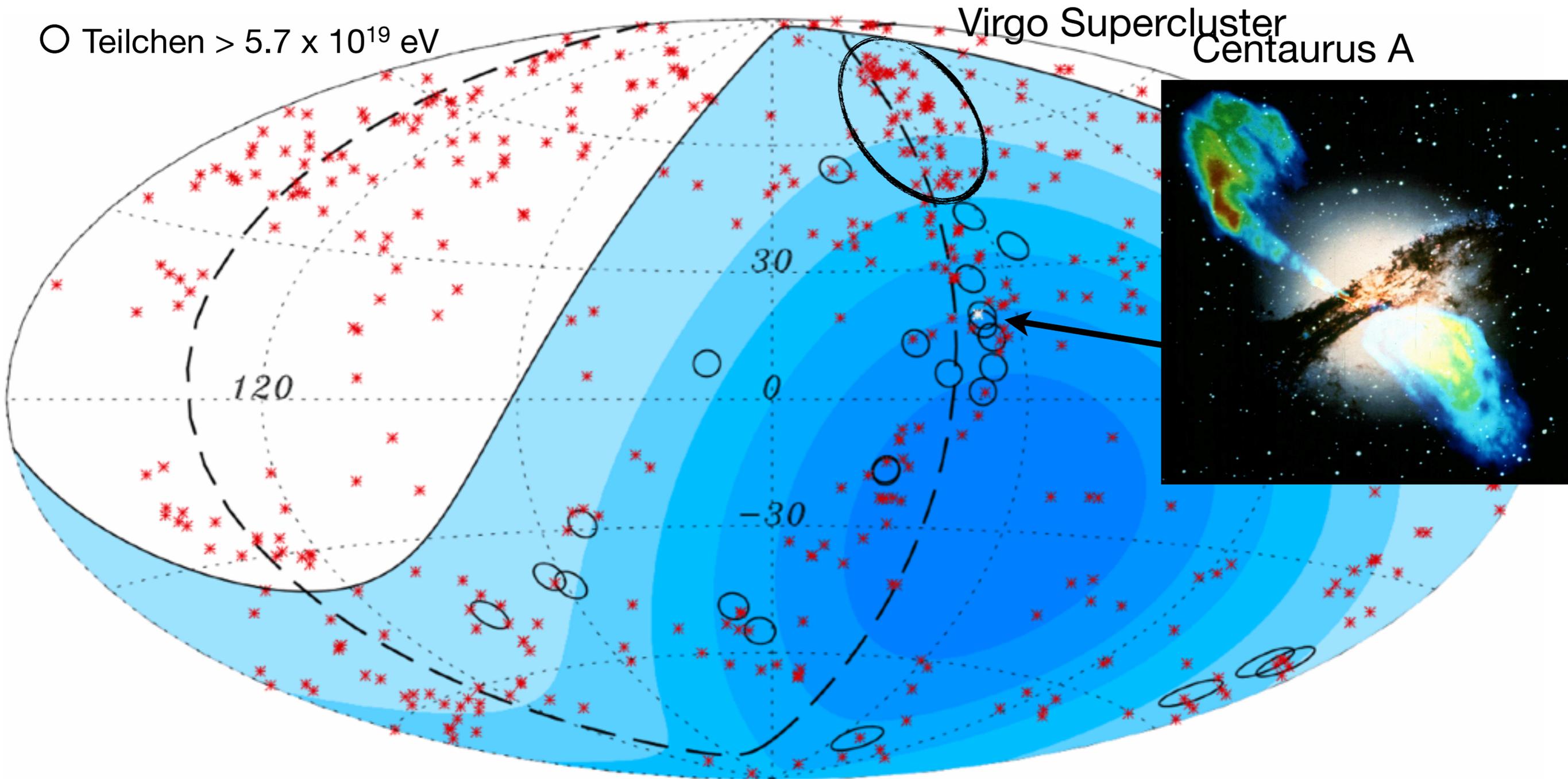
○ Teilchen $> 5.7 \times 10^{19}$ eV



- Höchstenergetische Teilchen sind nicht isotrop verteilt
- Korrelation mit nahem bekannten AGNs, Supergalaktischer Ebene

AUGER: Verteilung (Stand 2007)

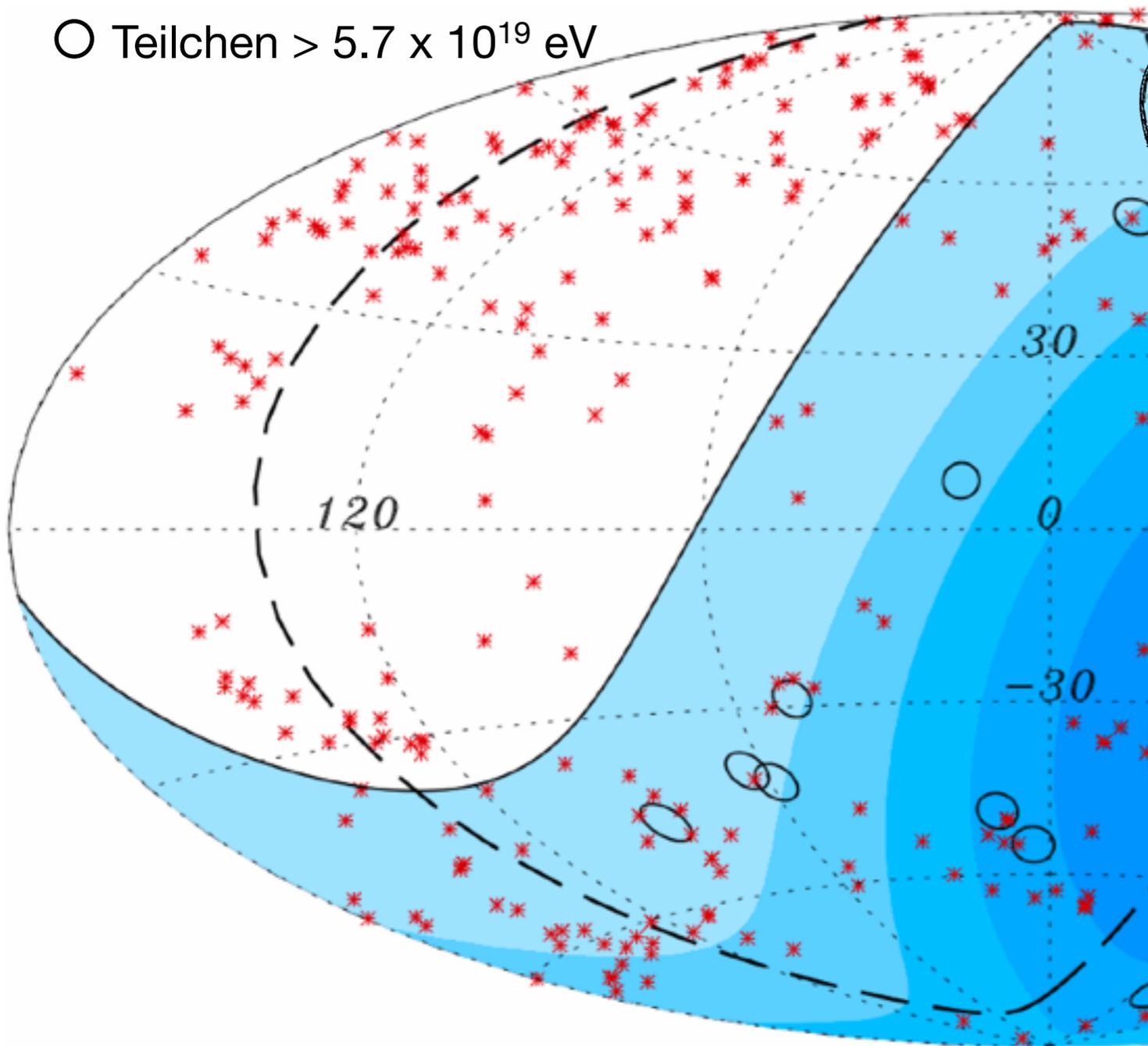
○ Teilchen $> 5.7 \times 10^{19}$ eV



- Höchstenergetische Teilchen sind nicht isotrop verteilt
- Korrelation mit nahem bekannten AGNs, Supergalaktischer Ebene

AUGER: Verteilung (Stand 2007)

○ Teilchen $> 5.7 \times 10^{19}$ eV

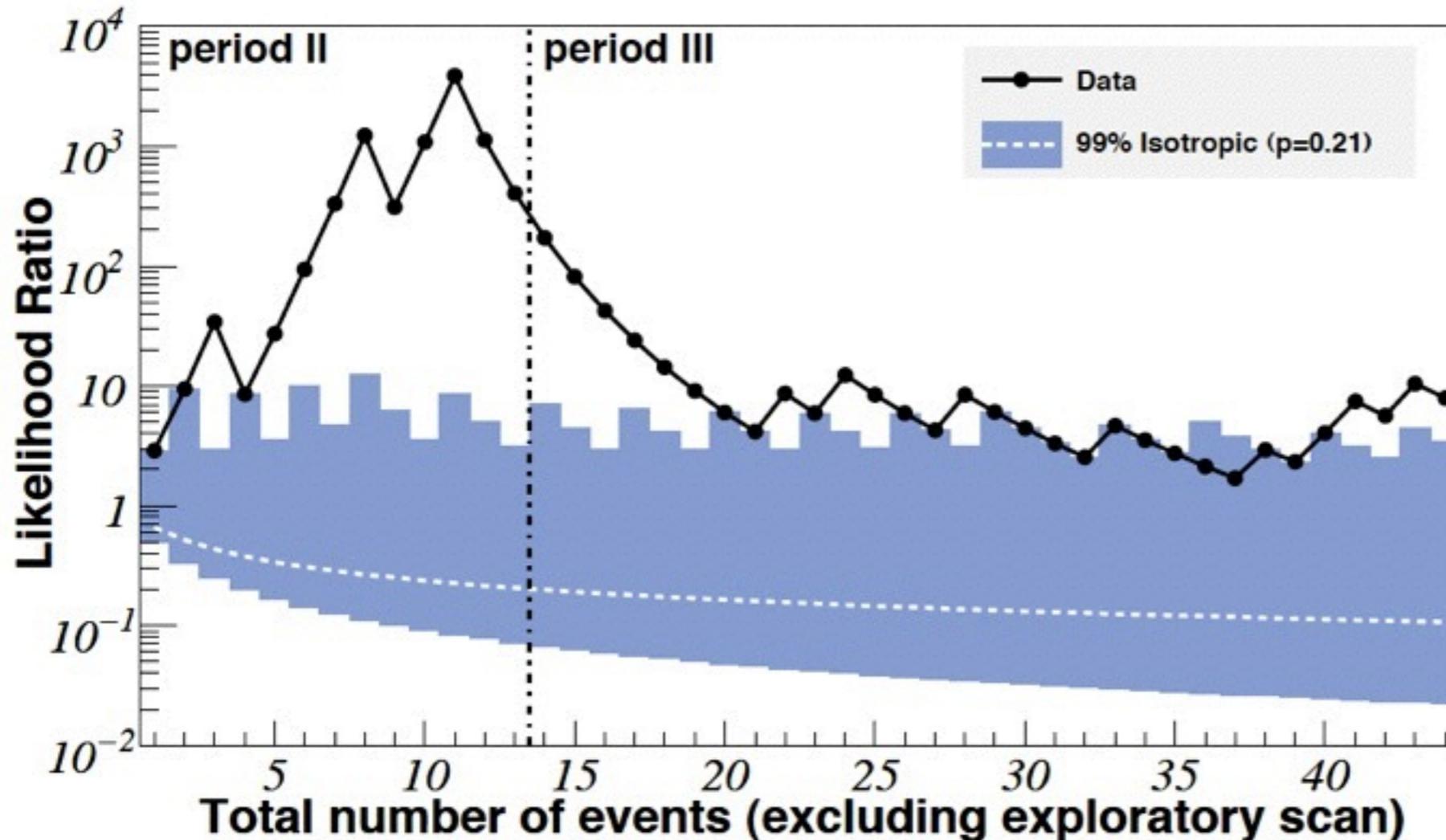


- Höchstenergetische Teilchen sind nicht isotrop verteilt
- Korrelation mit nahem bekannten AGNs, S



AUGER: Existiert die Korrelation wirklich?

- ... oder: Der Fluch von mehr Daten:



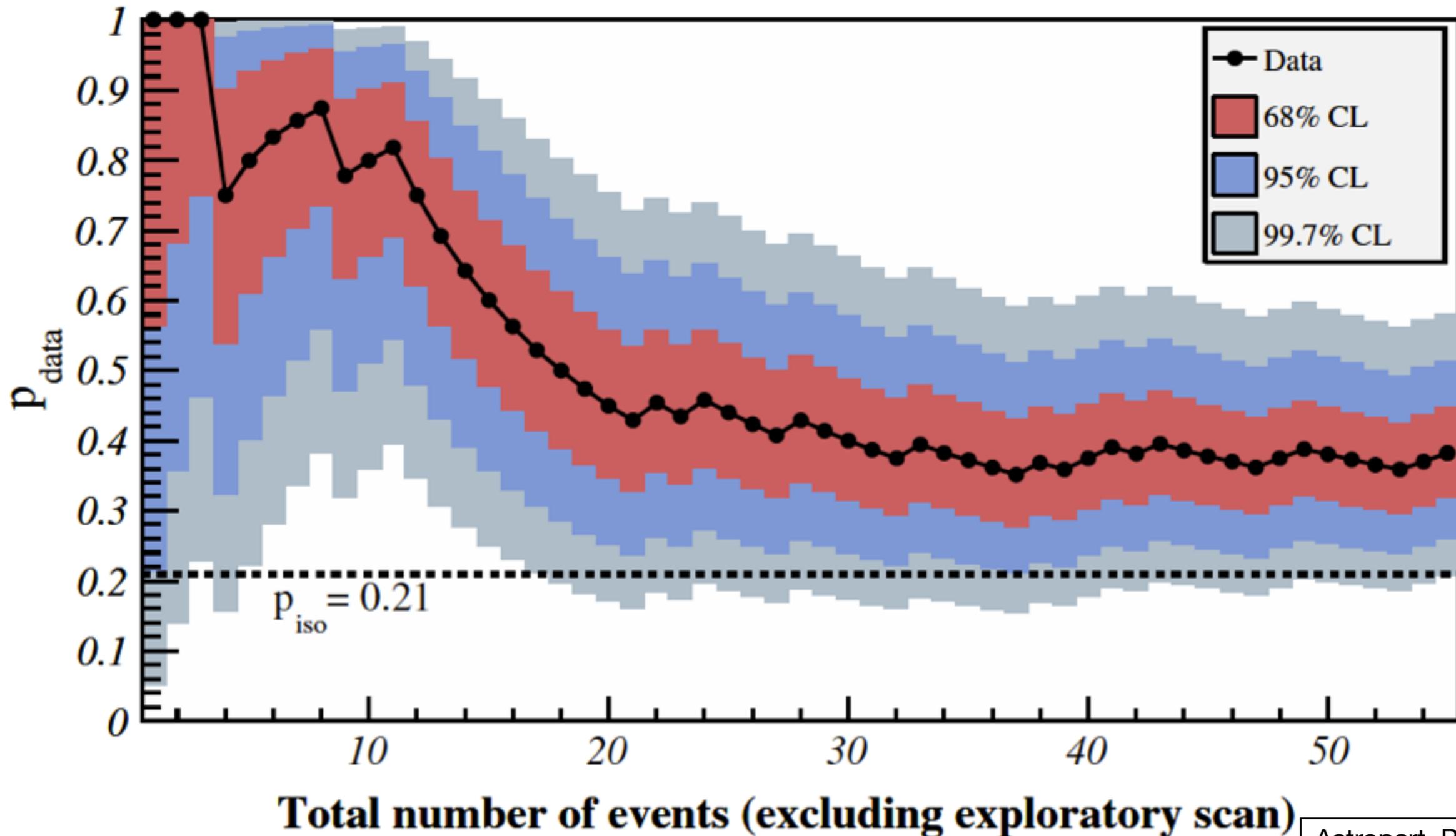
Korrelation mit AGNs
< 75 Mpc aus dem
Veron-Cetty & Veron
Katalog,
Teilchenrichtung
innerhalb 3.1° vom AGN

Wahrscheinlichkeit für
einen Zufallstreffer (bei
isotroper Verteilung):
21%

Wichtig: Der VCV-Katalog erhebt keinen Anspruch auf Vollständigkeit, gerade bei nahen AGNs sind die Informationen allgemein sehr lückenhaft (Schwerpunkte der Beobachtungen bis jetzt meist weit entfernte Objekte!)

AUGER: Keine Isotropie!

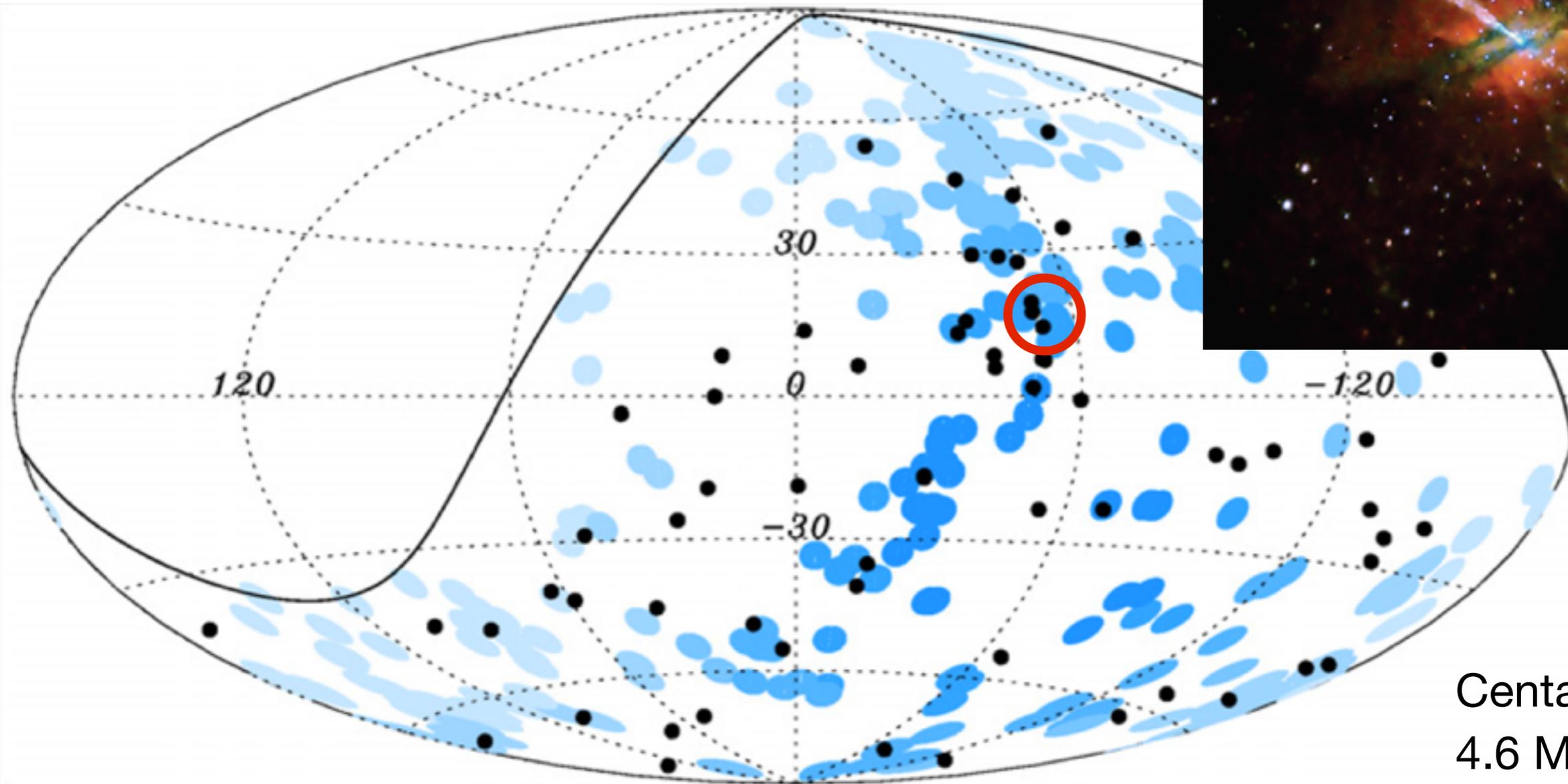
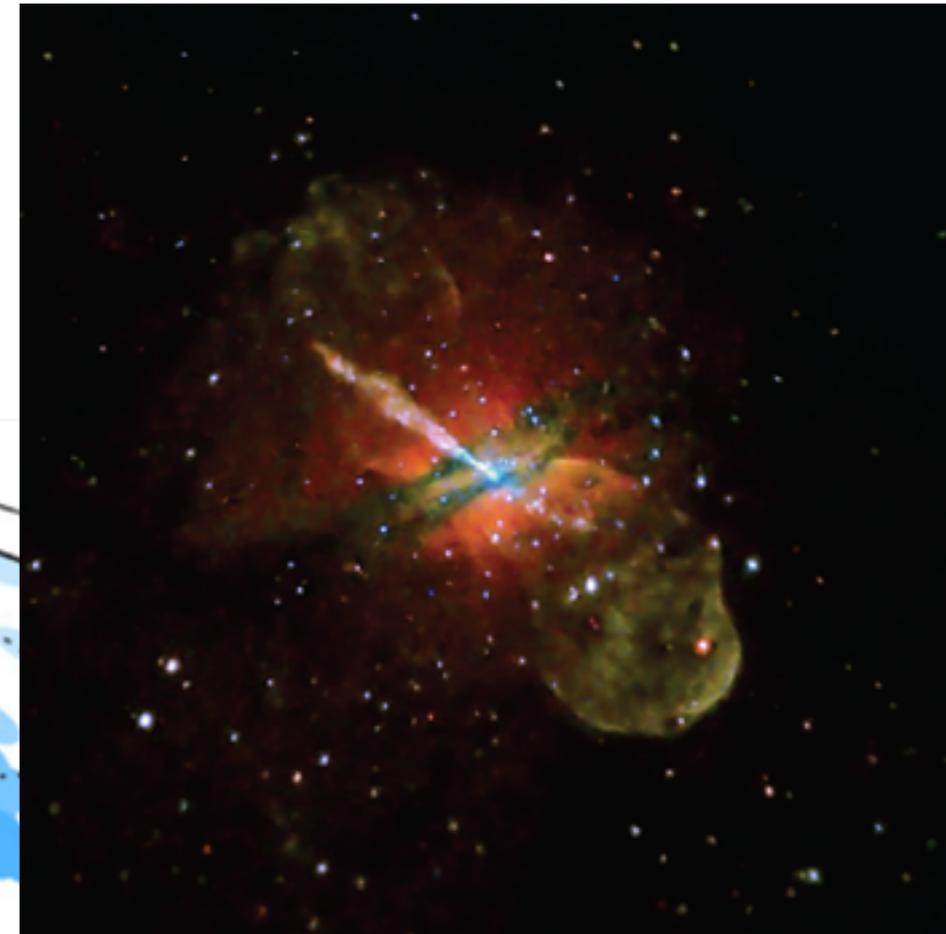
- Immer noch starke Hinweise, dass die UHCRs nicht homogen verteilt sind:
 - Korrelationen mit Quellen können untersucht werden!



Astropart. Phys 34, 314 (2010)

Update: Verteilung hochenergetischer Ereignisse

- Aktuelle Karte der Ereignisse > 55 EeV von Auger
 - Die 5 höchstenergetischen Ereignisse korrelieren nicht mit AGNs im VCV-Katalog... aber es gibt Korrelationen:

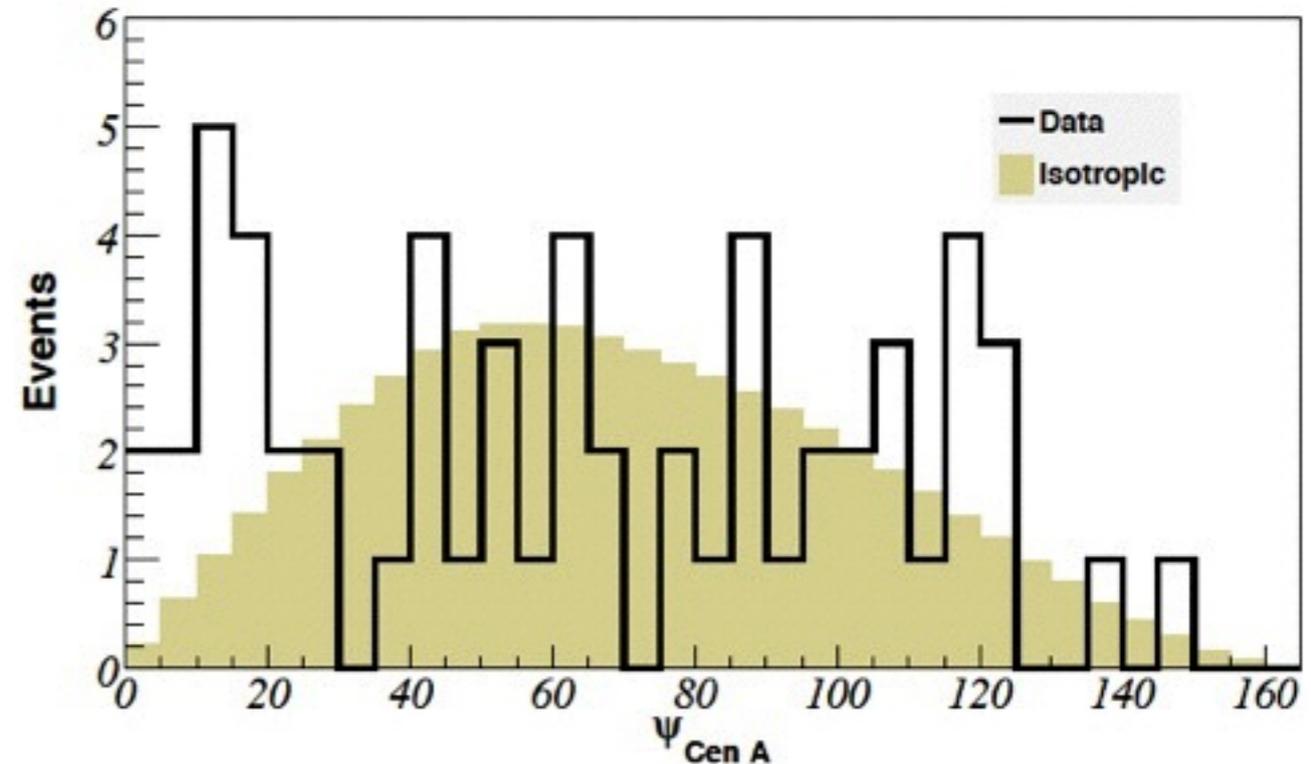
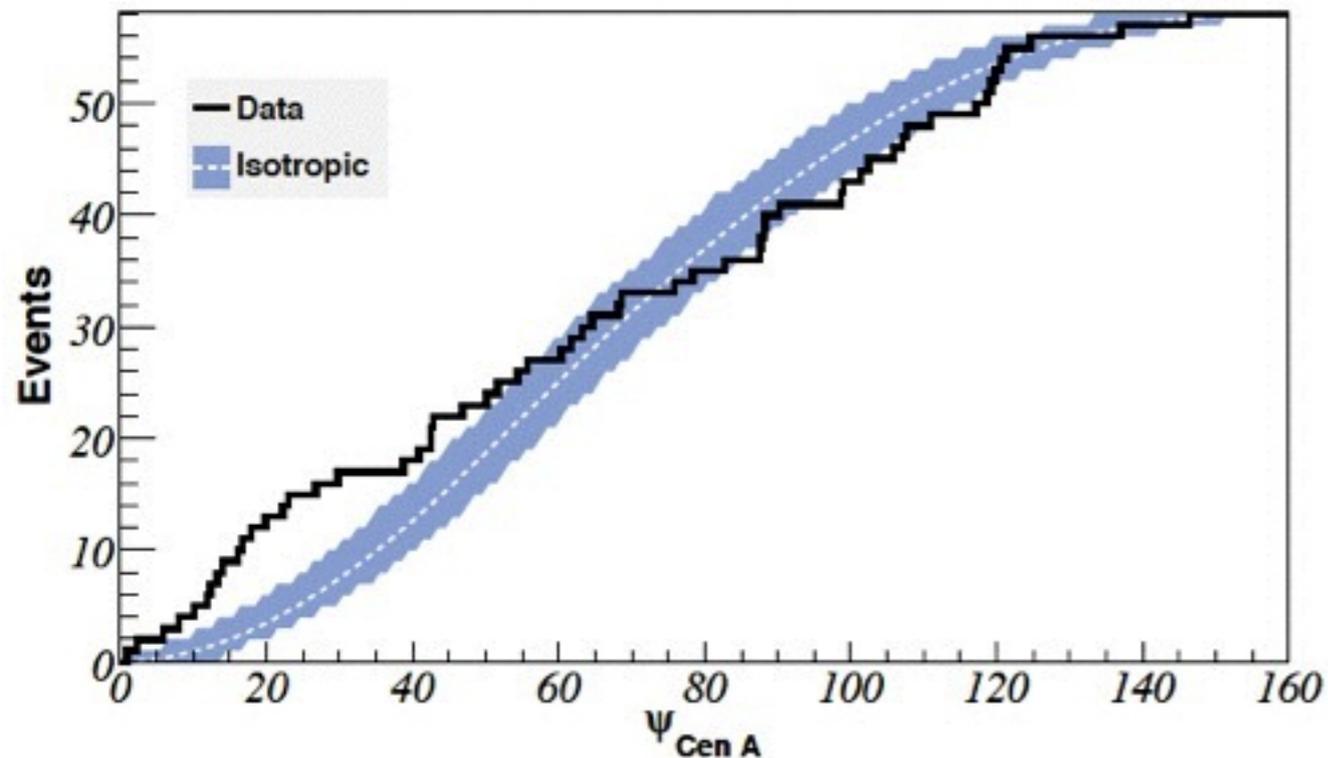


Centaurus A
4.6 Mpc entfernt

AUGER: Genauere Untersuchung von Cen A.

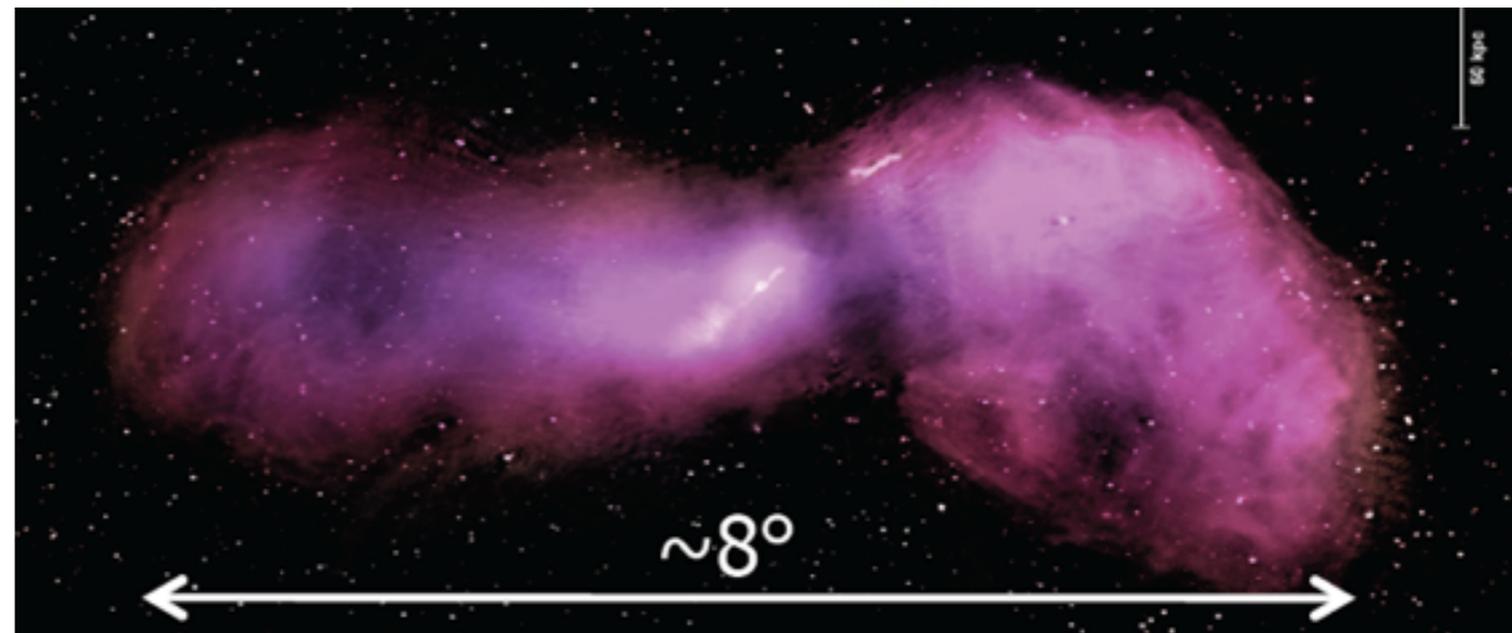
- Beispiel: Centaurus A (4.2 Mpc entfernt)
 - Aktive Galaxie, gut im Blickfeld von AUGER

Ereignisse ($E > 55 \text{ EeV}$) als Funktion des Winkels zu Cen A.



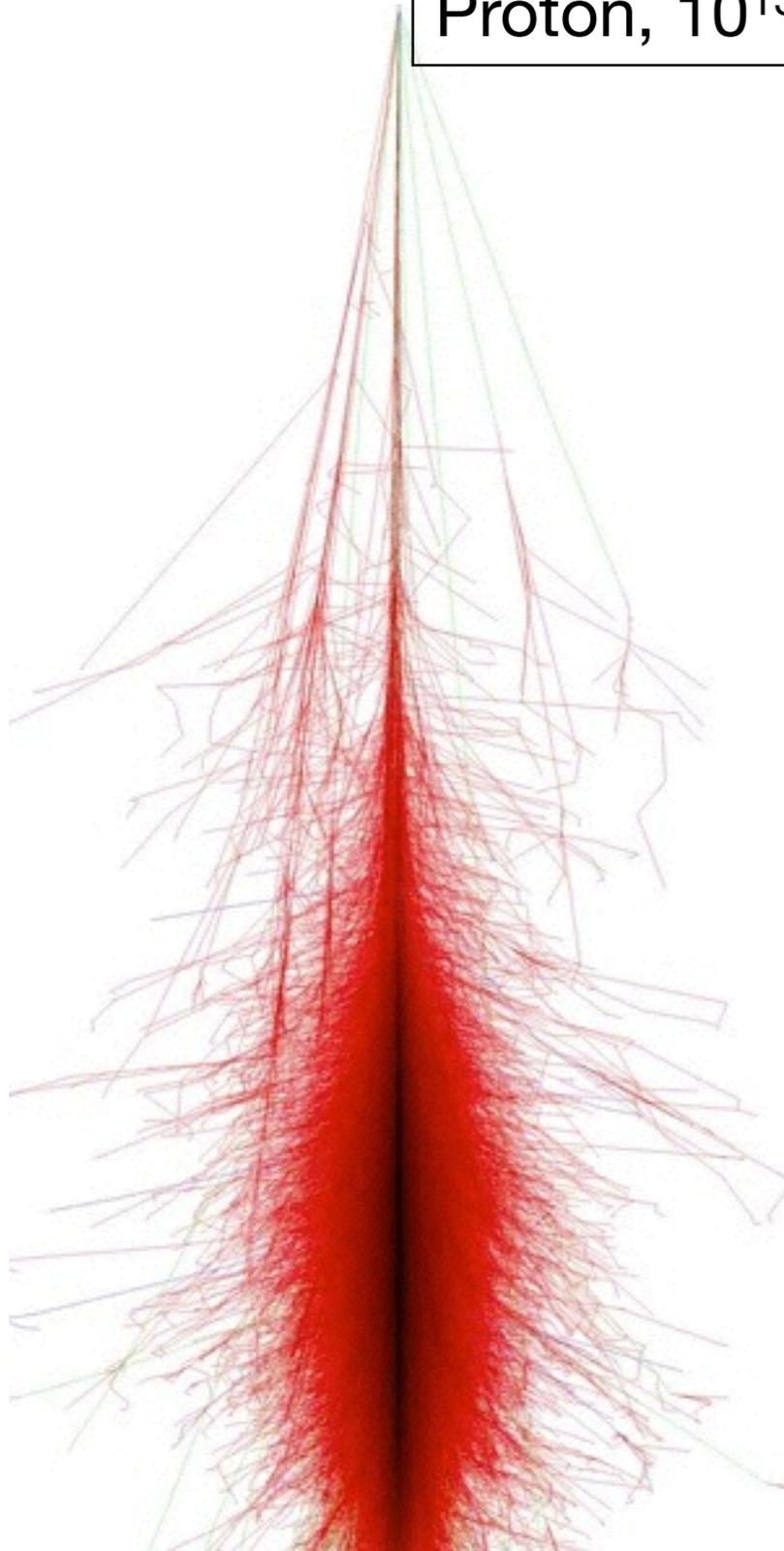
Kumulative Ereigniszahl ($E > 55 \text{ EeV}$) als Funktion des Winkels zu Cen A.

13 Ereignisse innerhalb 18°
(3.2 erwartet)

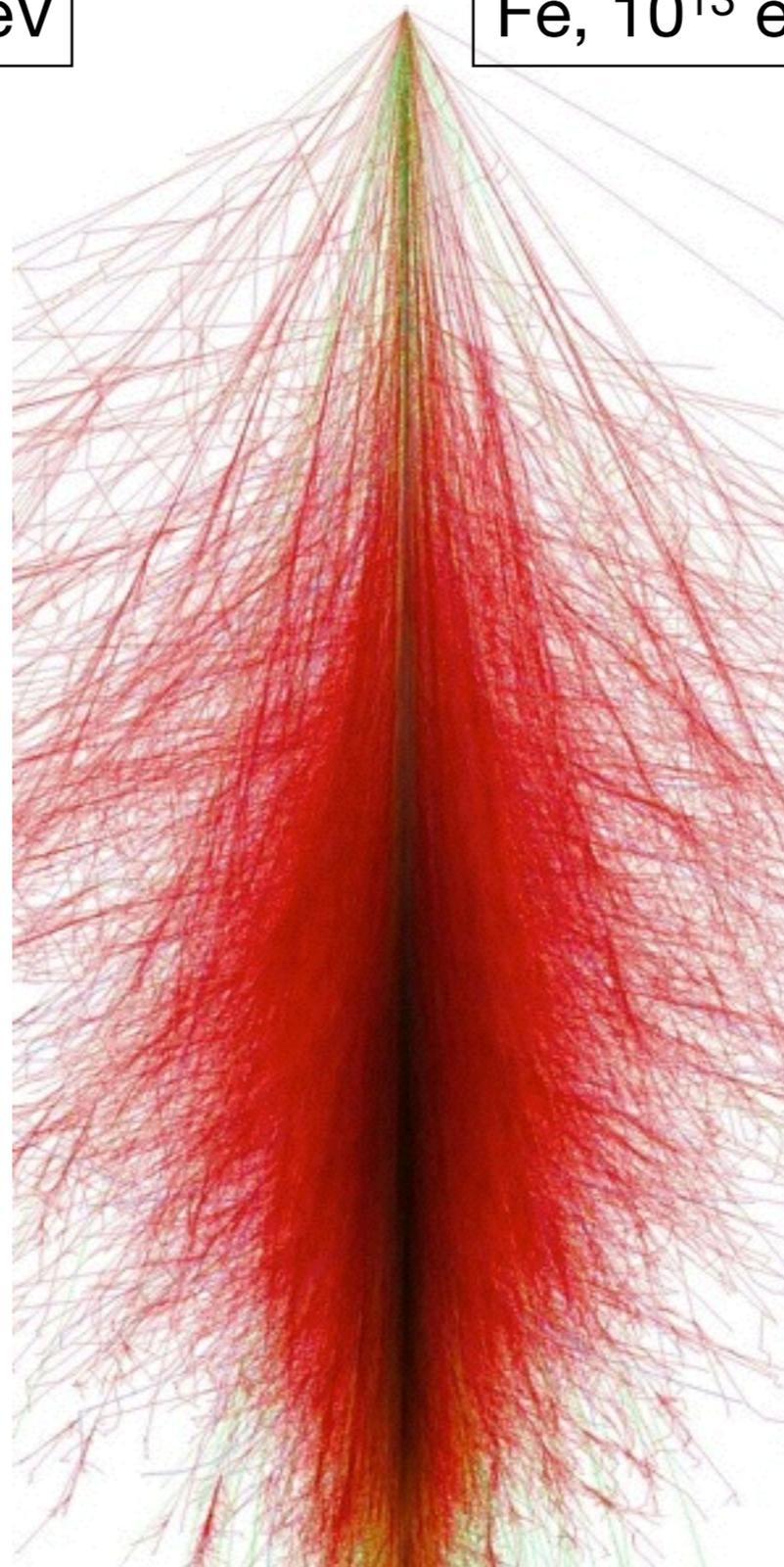


Element-Zusammensetzung: Proton vs Fe

Proton, 10^{13} eV



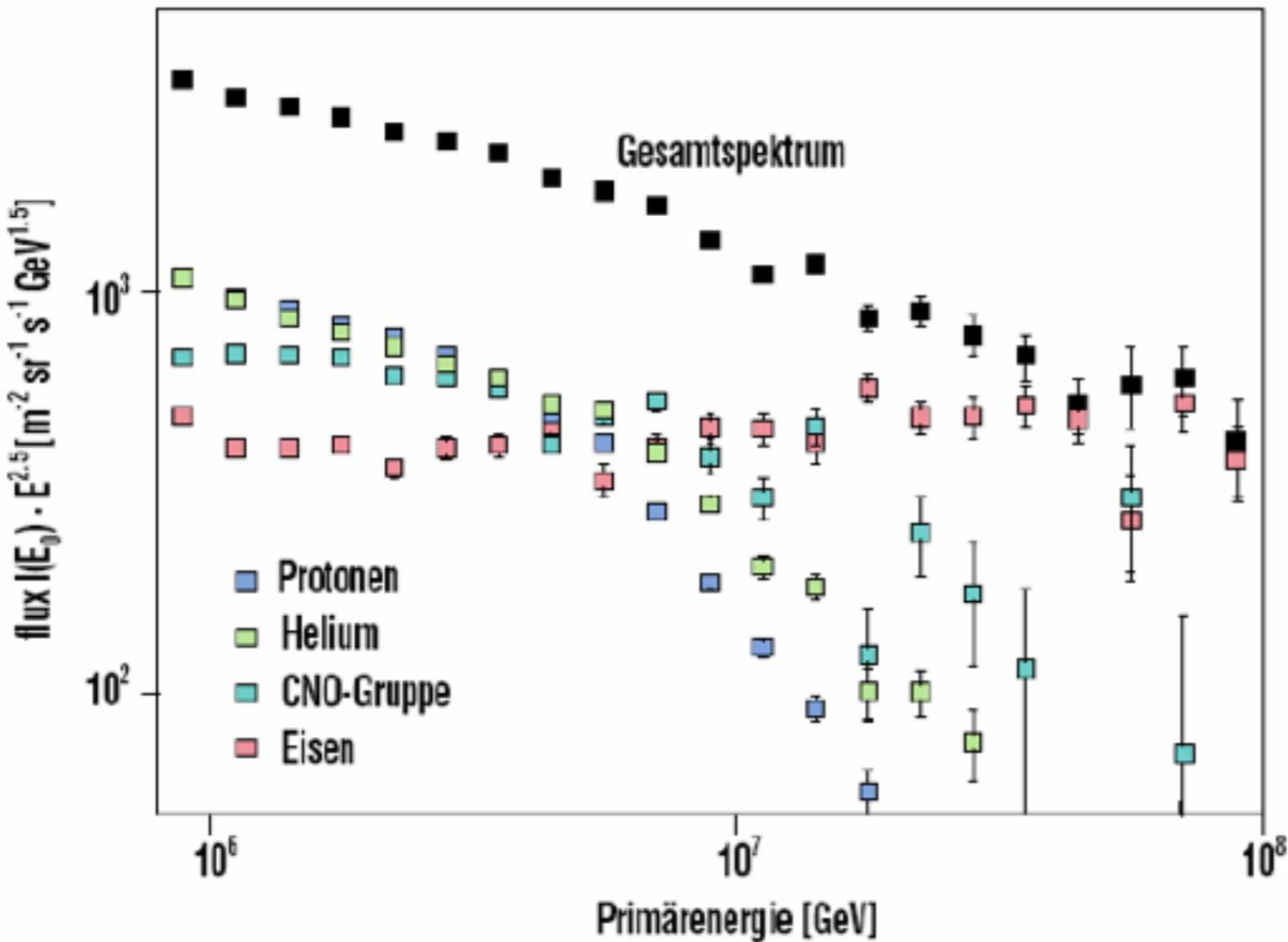
Fe, 10^{13} eV



- Unterscheidung nach Primärteilchen aufgrund der Schauerform möglich:
- Schauer schwerer Kerne beginnen früher und erreichen in größerer Höhe ihr Maximum

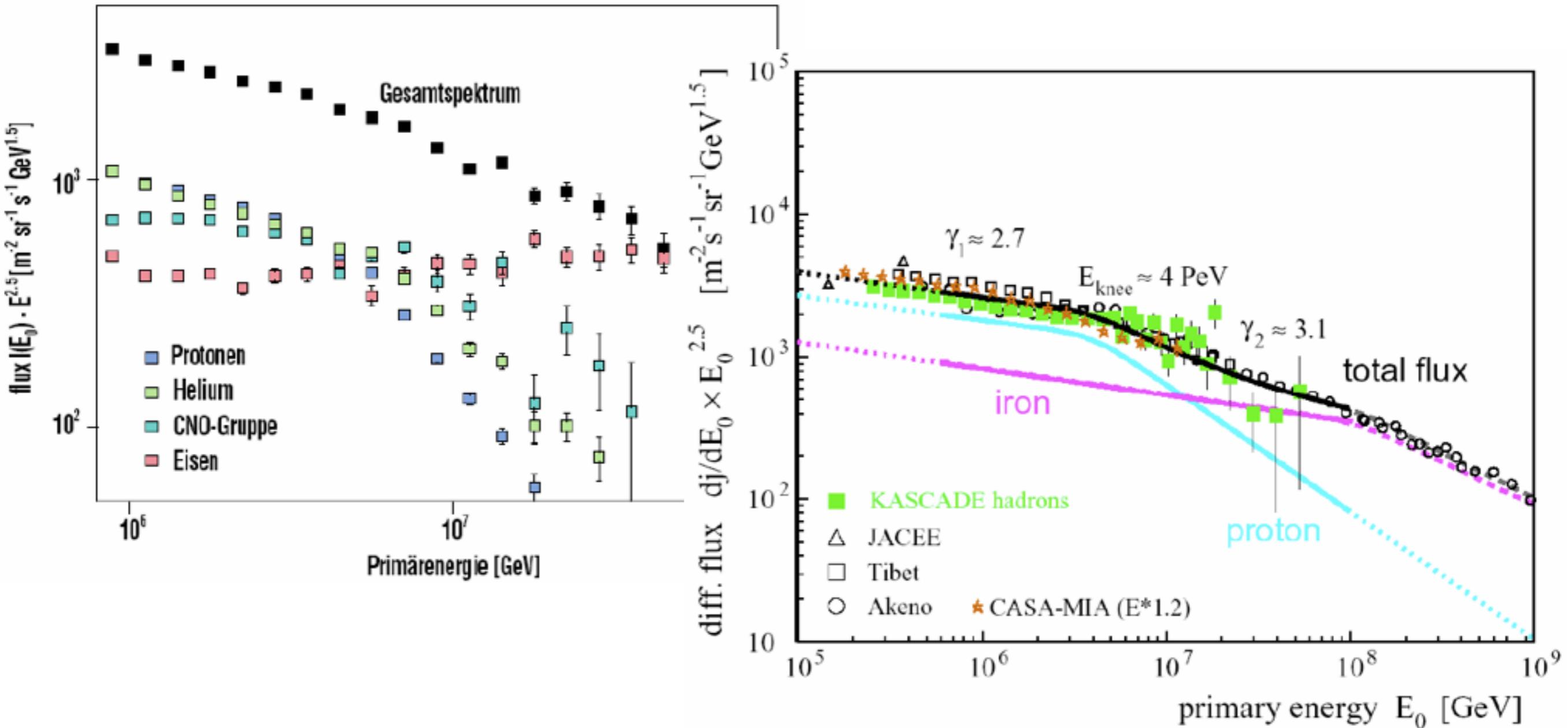
<http://www.ast.leeds.ac.uk/~fs/showerimages.html>

Zusammensetzung um das Knie herum



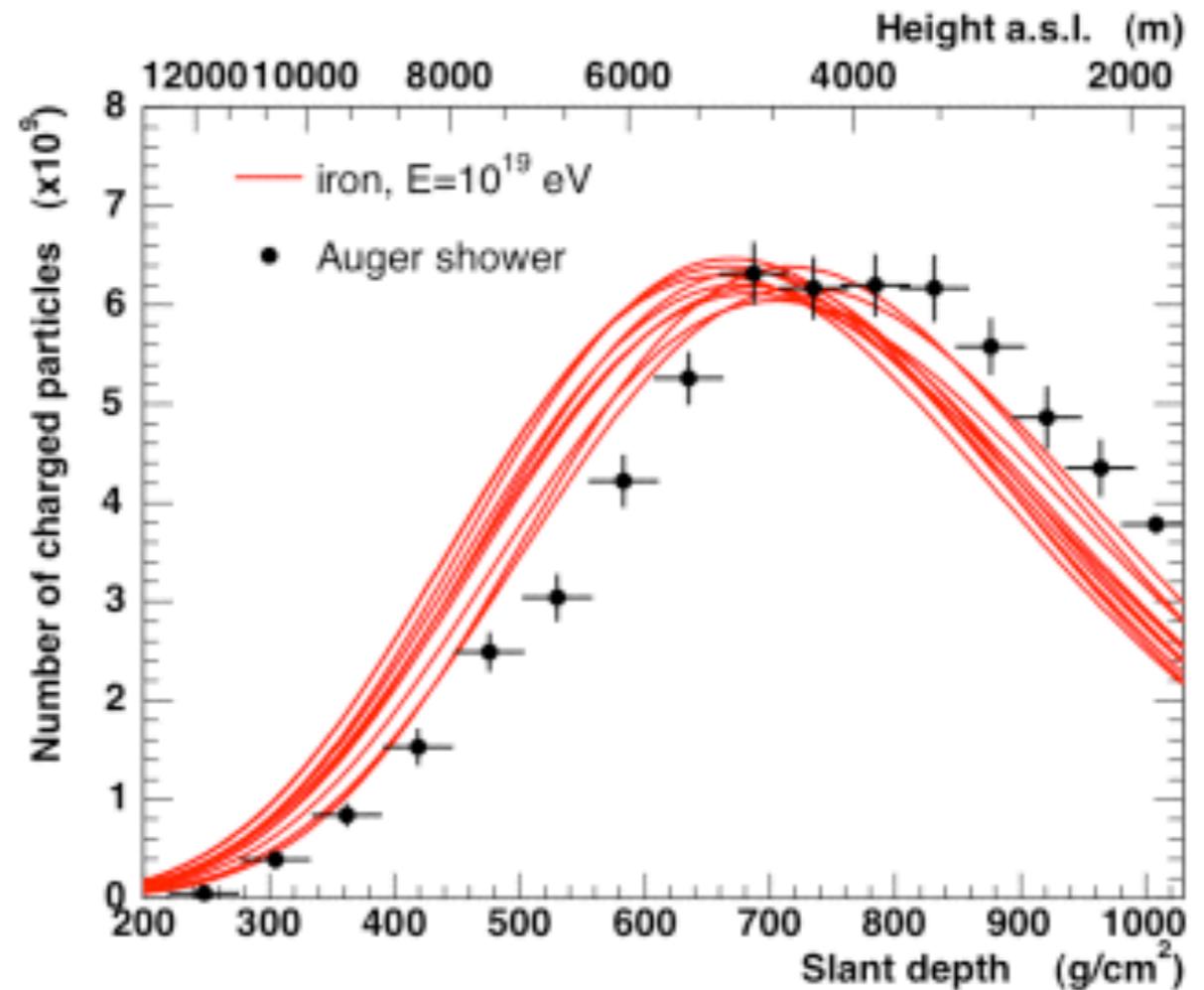
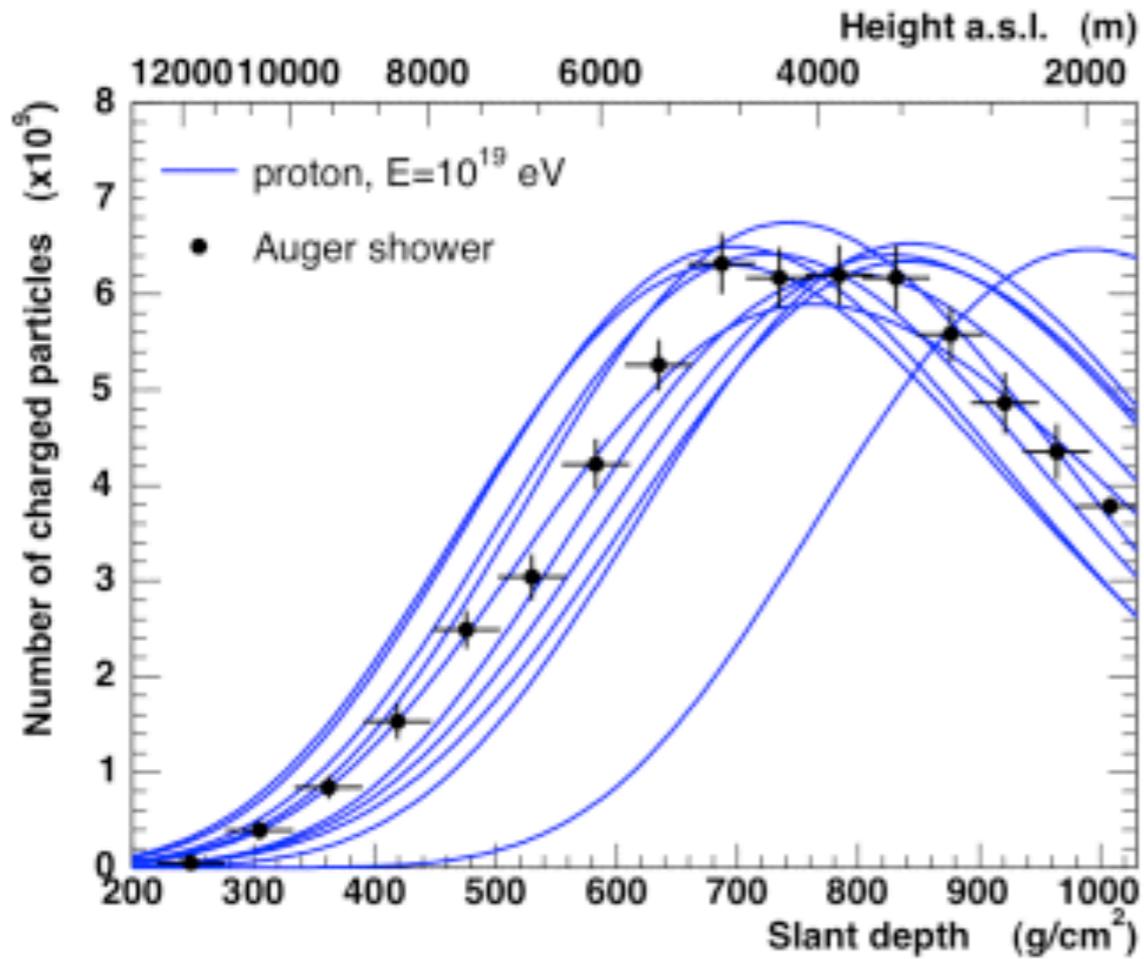
- Position des Knies hängt vom Element ab: schwere Kerne erst bei höheren Energien
 - Passt zu unserem Verständnis der Beschleunigungsmechanismen
- Bei hohen Energien dominieren schwere Kerne (zB. Fe)

Zusammensetzung um das Knie herum



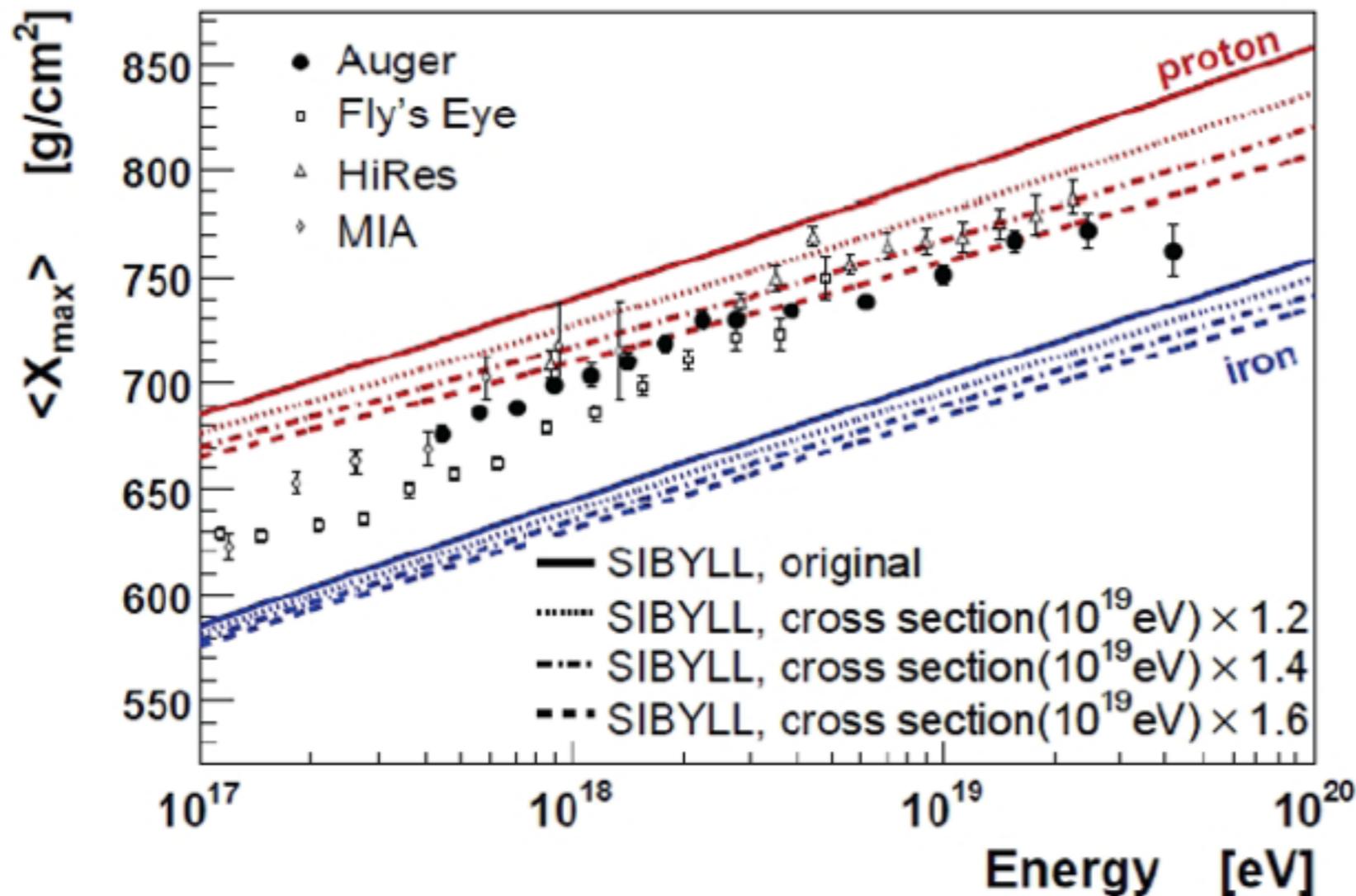
- Position des Knies hängt vom Element ab: schwere Kerne erst bei höheren Energien
 - Passt zu unserem Verständnis der Beschleunigungsmechanismen
- Bei hohen Energien dominieren schwere Kerne (zB. Fe)

Zusammensetzung bei höchsten Energien



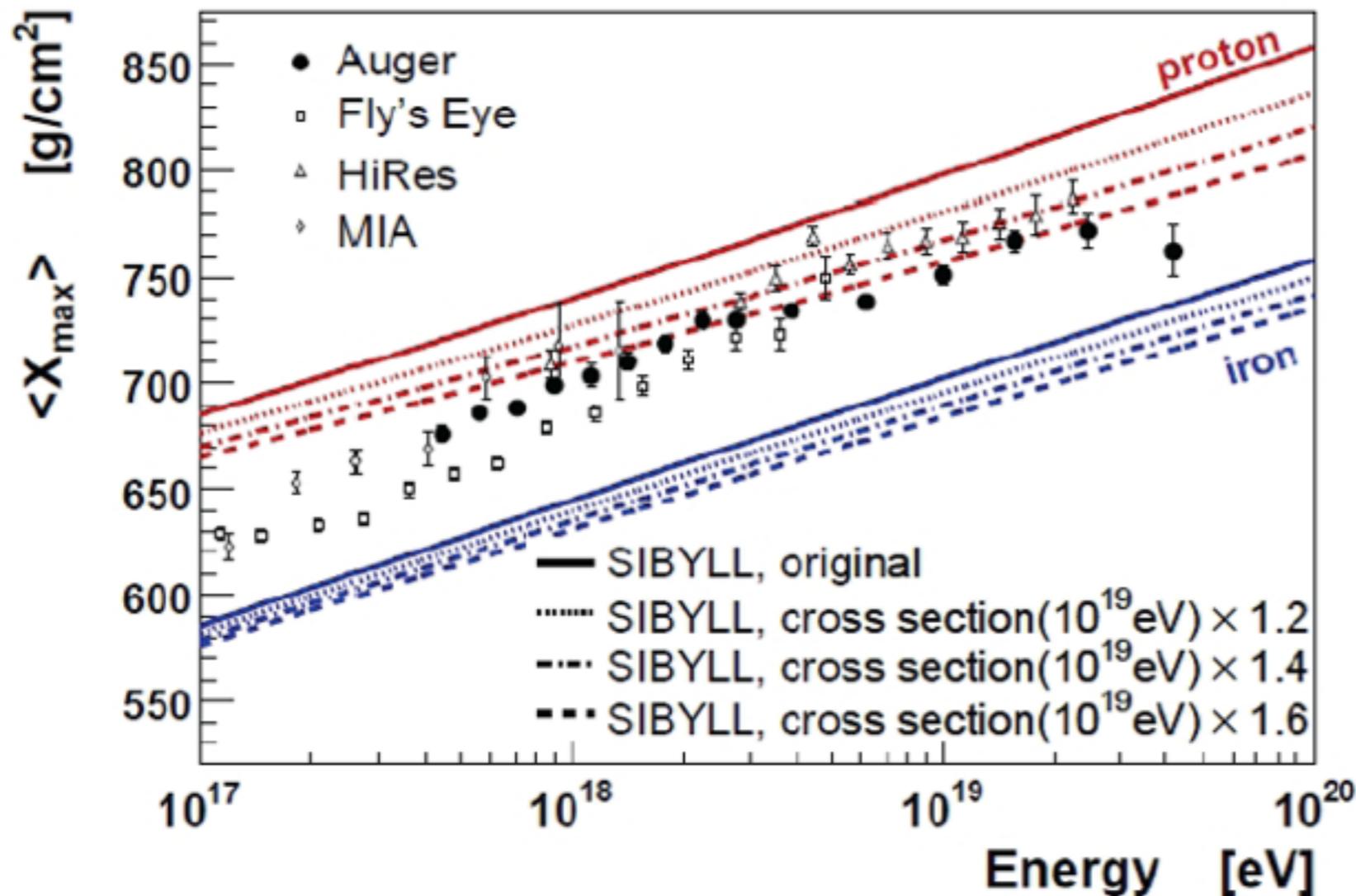
- Ein bei Auger gemessener Schauer: Vermutlich ein Proton!

Zusammensetzung bei höchsten Energien



- Bis 2×10^{18} eV scheint der Proton-Anteil zuzunehmen, ab 2×10^{19} eV geht es wieder mehr Richtung Eisen
- ... falls das stimmt: Eine Anisotropie für Fe bei $E > 55$ EeV würde eine vergleichbare Anisotropie bei Protonen für $E > 2.2$ EeV bedeuten (wenn die Quelle auch Protonen beschleunigt)

Zusammensetzung bei höchsten Energien

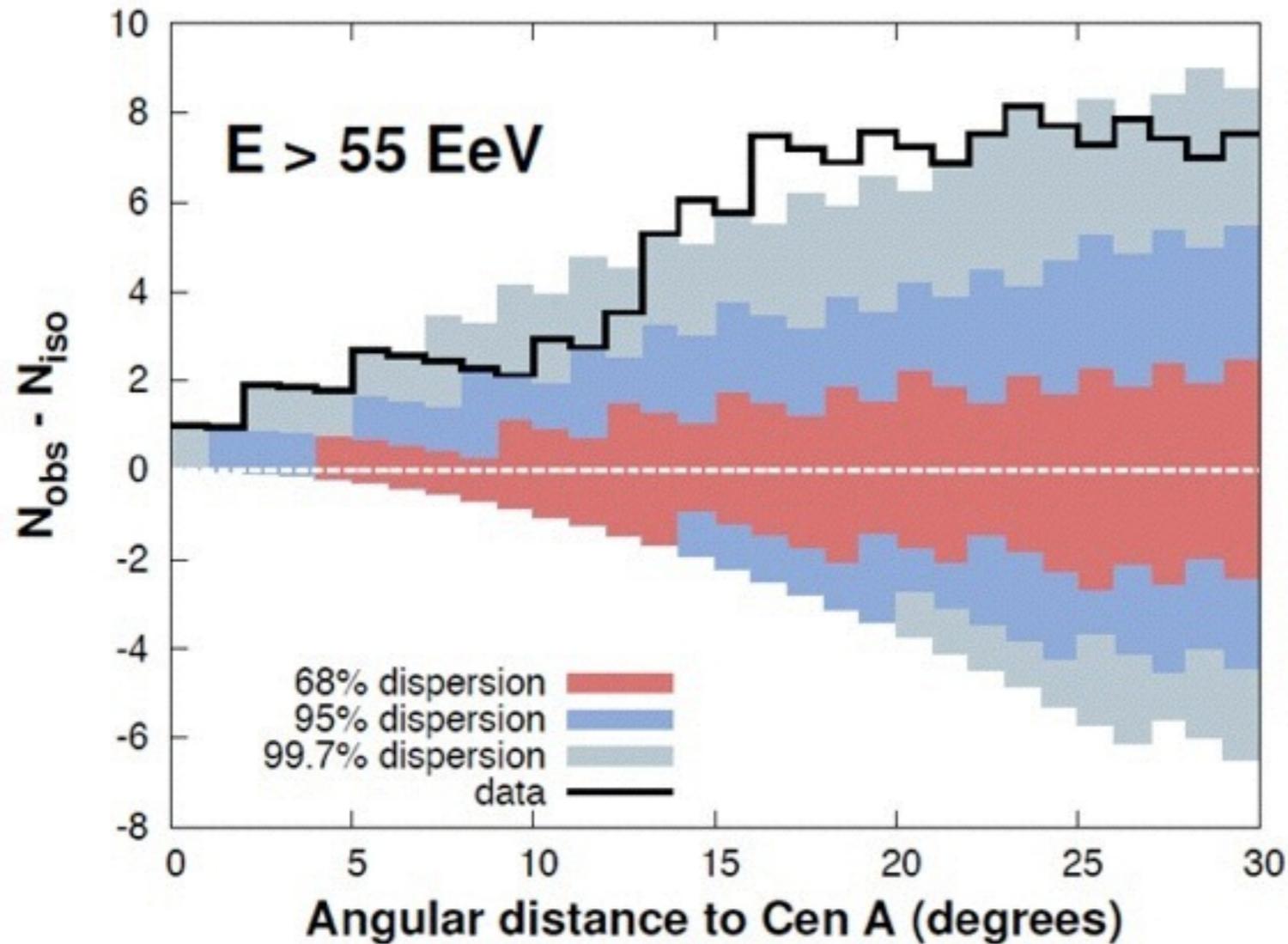


Aber: Ziemlich große Unsicherheiten in den Modellen... Extrapolation des WQ weit ausserhalb des bekannten Bereichs

- Bis 2×10^{18} eV scheint der Proton-Anteil zuzunehmen, ab 2×10^{19} eV geht es wieder mehr Richtung Eisen
- ... falls das stimmt: Eine Anisotropie für Fe bei $E > 55$ EeV würde eine vergleichbare Anisotropie bei Protonen für $E > 2.2$ EeV bedeuten (wenn die Quelle auch Protonen beschleunigt)

Suche nach Quellen: Eisen vs Protonen

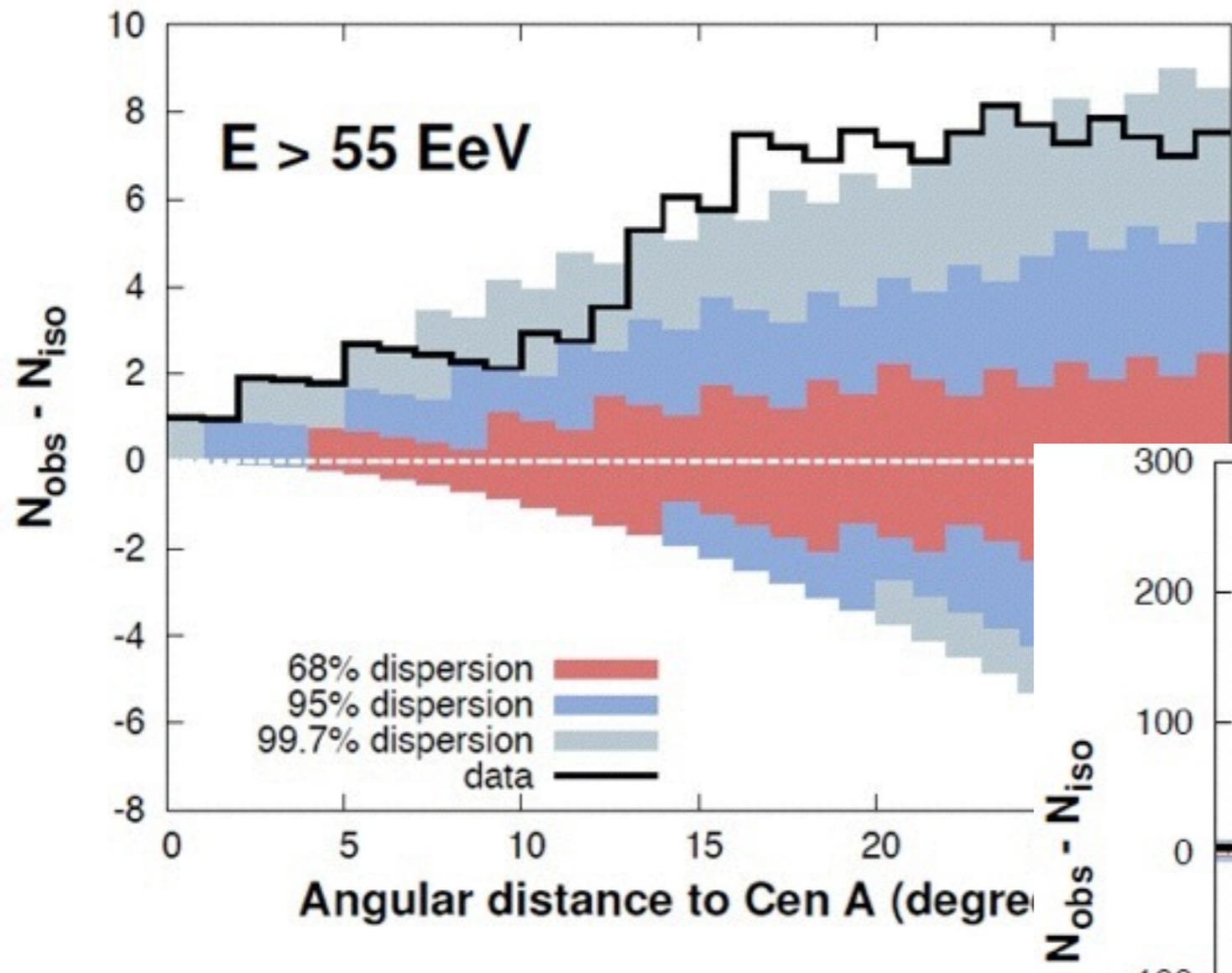
JCAP06(2011)022



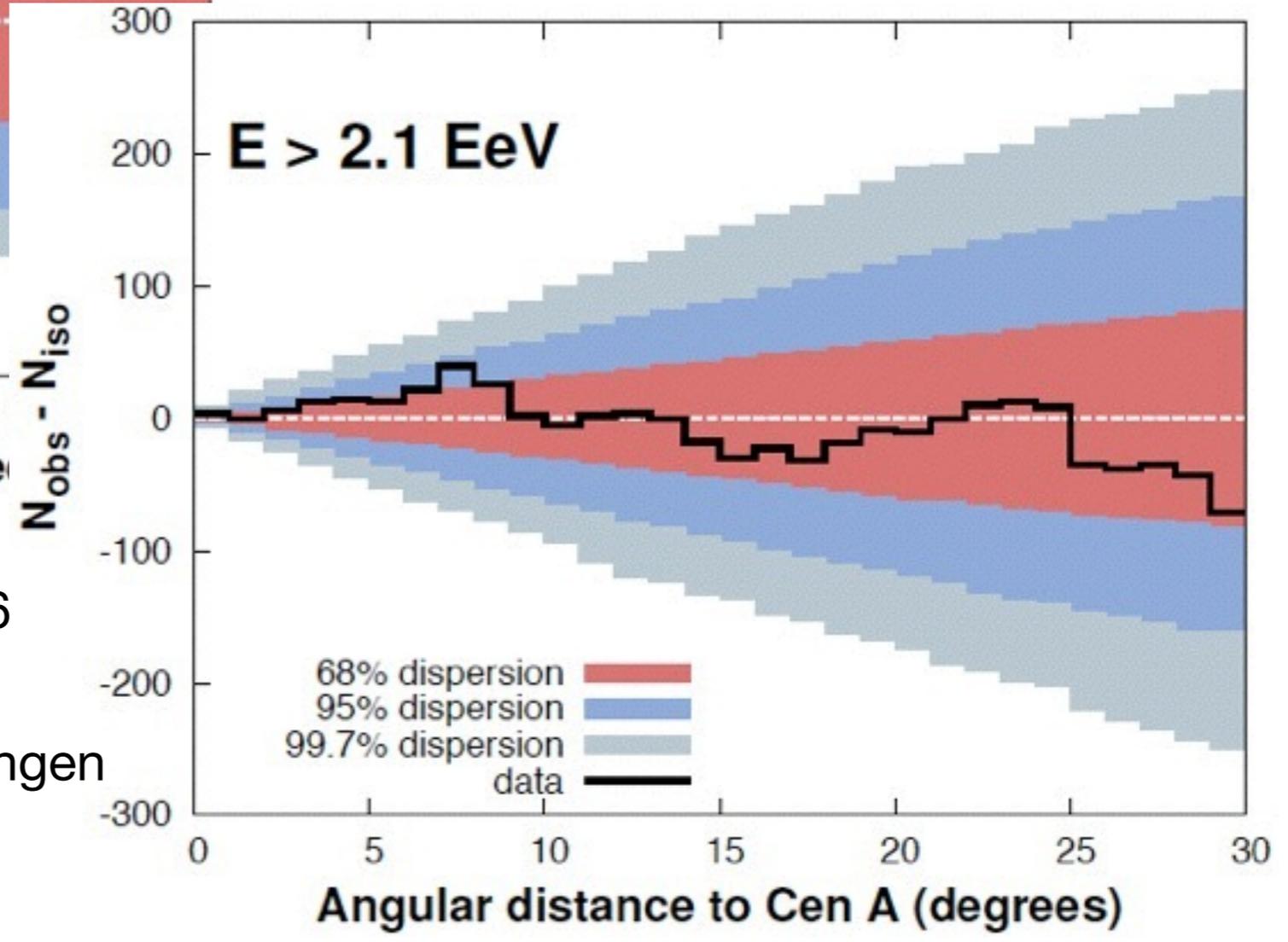
- Centaurus A als Quelle: Deutlich mehr höchstenergetische Teilchen innerhalb von 18°

Suche nach Quellen: Eisen vs Protonen

JCAP06(2011)022



- Centaurus A als Quelle: Deutlich mehr höchstenergetische Teilchen innerhalb von 18°

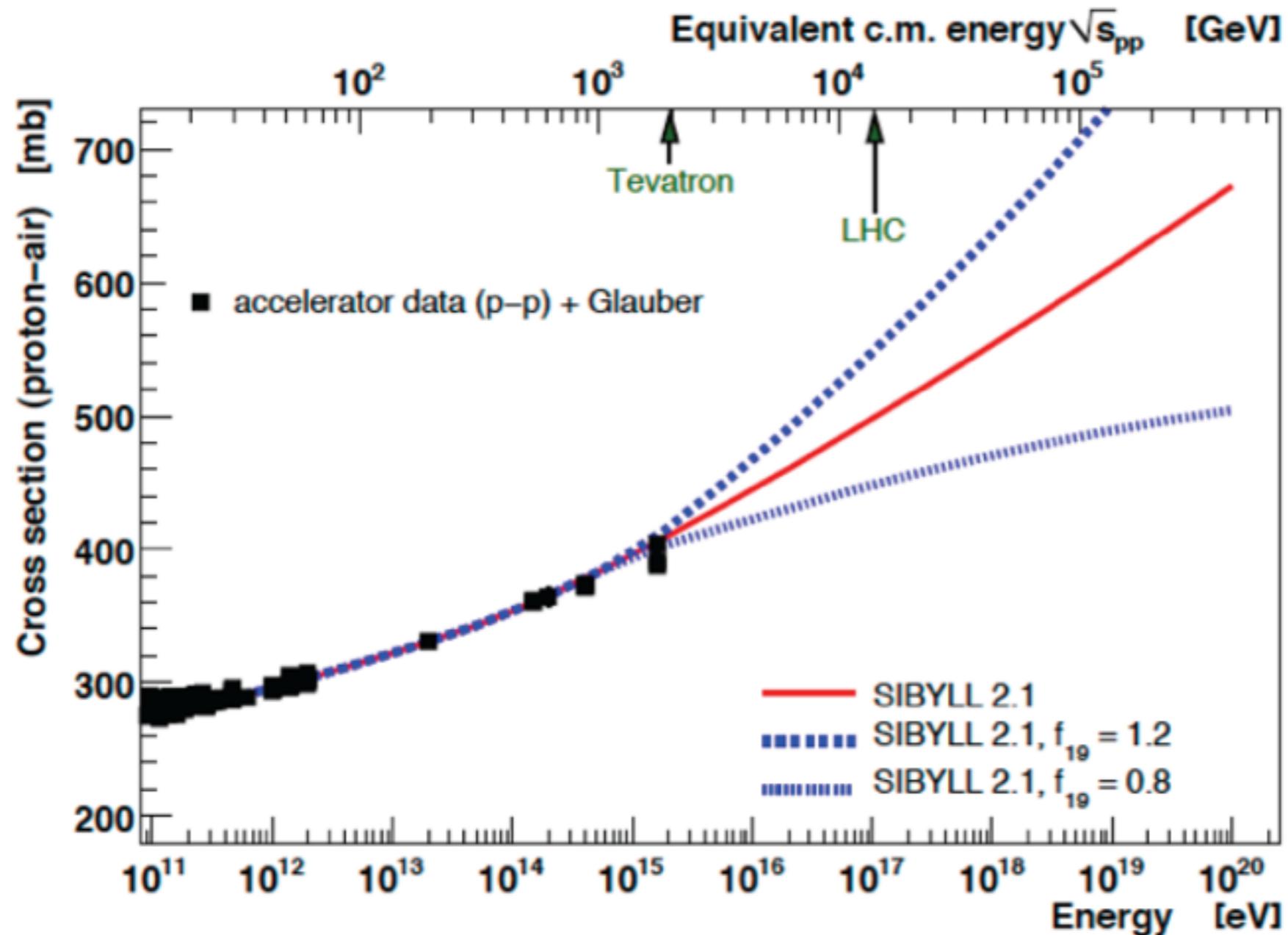


- Keine Hinweise auf Anisotropien bei E/26 (erwartet, falls die höchstenergetischen Teilchen Eisen sind): Starke Einschränkungen auf für die Zusammensetzung (ist aber modellabhängig)



Verbindungen zur Teilchenphysik (LHC)

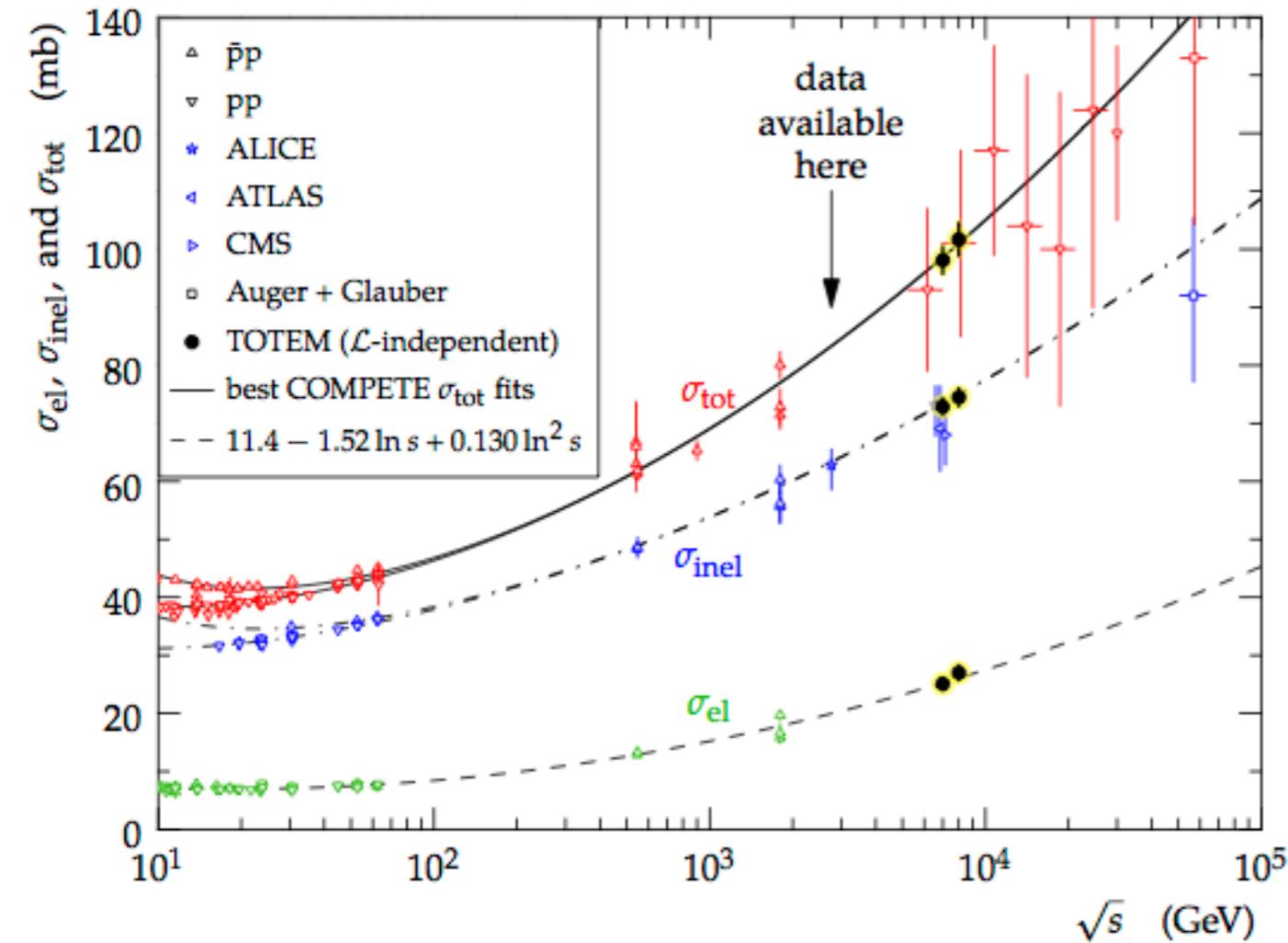
- Verbesserung der Abschätzung des pp-Wirkungsquerschnitts durch Messungen bei hoher Energie



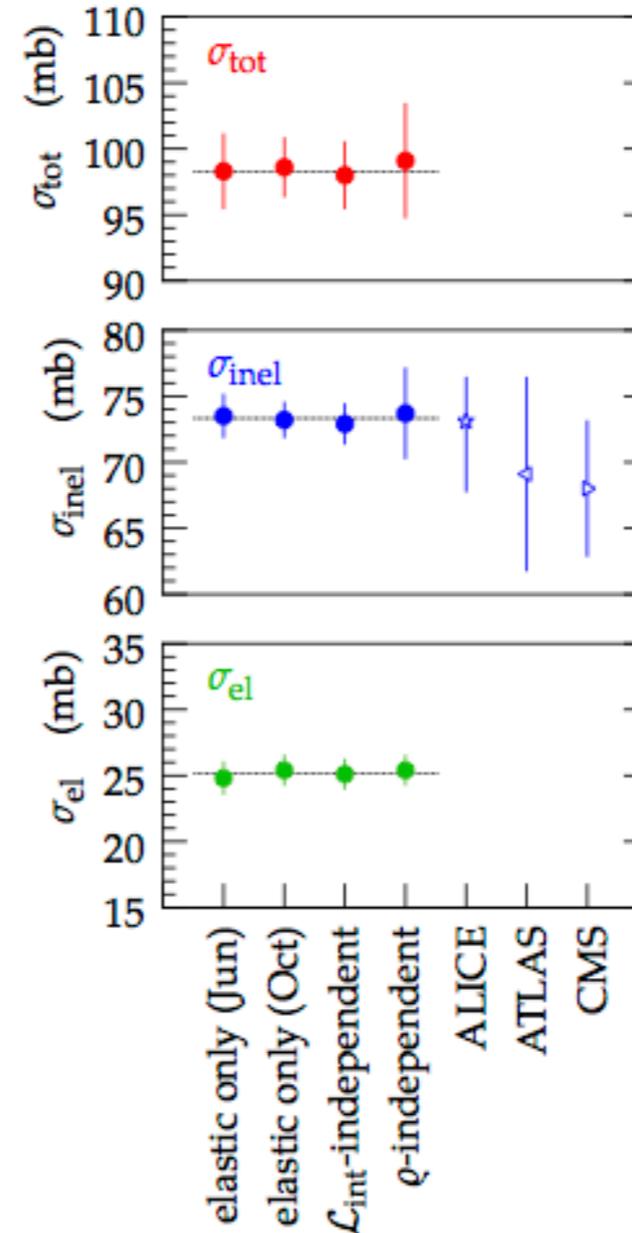
... spezielle Experimente am LHC: Totem, LHCf

Verbindungen zur Teilchenphysik (LHC)

- Verbesserung der Abschätzung des pp-Wirkungsquerschnitts durch Messungen bei hoher Energie



Measurements at $\sqrt{s} = 7$ TeV



... spezielle Experimente am LHC: Totem, LHCf

TOTEM results für 7 & 8 TeV

Zusammenfassung

- Hochenergetische Teilchen erzeugen Luftschauer in der Atmosphäre
 - Nachweis durch Teilchenmultiplizität am Boden und durch Fluoreszenzlicht
- Teilchen bei Energien bis 3×10^{20} eV beobachtet
- Durch Wechselwirkung mit Photonen des kosmischen Mikrowellenhintergrundes gibt es eine Energiegrenze
 - Der GZK - Cutoff: ca. 7×10^{19} eV für Protonen, experimentell so gut wie gesichert
- Suche nach Quellen voll in Fahrt: Erste Hinweise auf anisotrope Verteilung und Korrelation mit aktiven Galaxien
 - Centaurus A ein heisser Kandidat
- Zusammensetzung der Strahlung bei höchsten Energien nicht geklärt - Spezielle Experimente am LHC können die Modelle für die Interpretation verbessern

Zusammenfassung

- Hochenergetische Teilchen erzeugen Luftschauer in der Atmosphäre
 - Nachweis durch Teilchenmultiplizität am Boden und durch Fluoreszenzlicht
- Teilchen bei Energien bis 3×10^{20} eV beobachtet
- Durch Wechselwirkung mit Photonen des kosmischen Mikrowellenhintergrundes gibt es eine Energiegrenze
 - Der GZK - Cutoff: ca. 7×10^{19} eV für Protonen, experimentell so gut wie gesichert
- Suche nach Quellen voll in Fahrt: Erste Hinweise auf anisotrope Verteilung und Korrelation mit aktiven Galaxien
 - Centaurus A ein heisser Kandidat
- Zusammensetzung der Strahlung bei höchsten Energien nicht geklärt - Spezielle Experimente am LHC können die Modelle für die Interpretation verbessern

Nächste Vorlesung: 23.06., “Kosmische Strahlung II”, F. Simon



Themenübersicht

07.04.	Einführung
14.04.	Beschleuniger
28.04.	Detektoren in der Nicht-Beschleuniger-Physik
05.05.	Kosmische Beschleuniger
12.05.	Das Standardmodell
19.05.	Starke Wechselwirkung
26.05.	Niederenergie - Präzisionsexperimente
02.06.	Dunkle Materie & Dunkle Energie
09.06.	Pfingsten - Keine Vorlesung!
16.06.	Kosmische Strahlung I
23.06.	Kosmische Strahlung II
30.06.	Neutrinos I
07.07.	Neutrinos II