

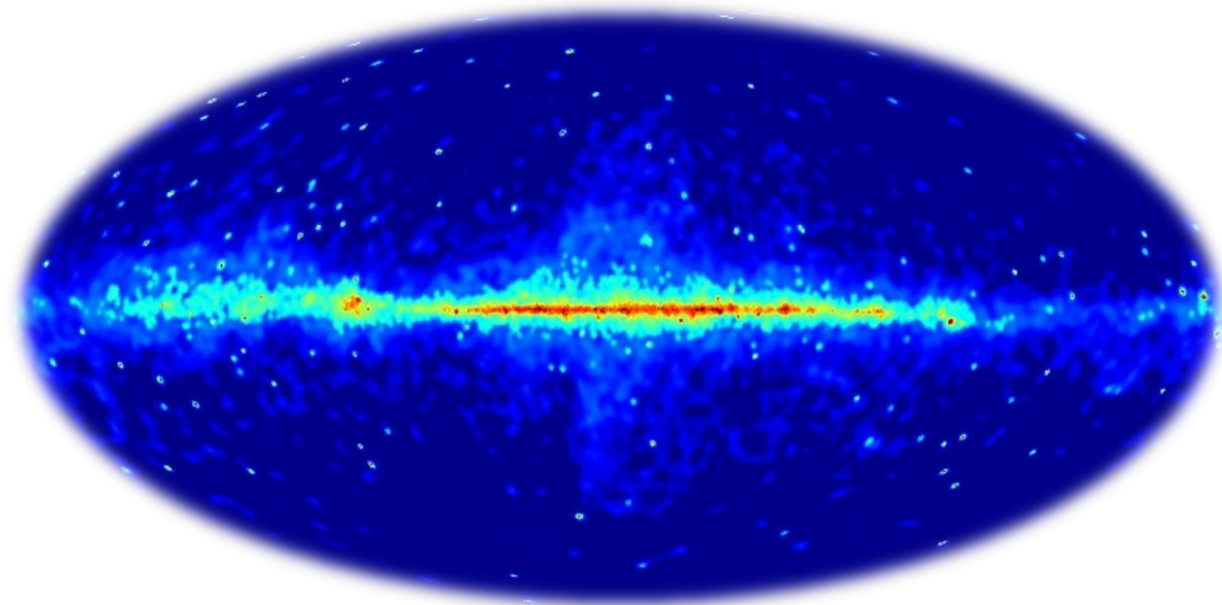
Astroteilchenphysik – I

Wintersemester 2013/14
Vorlesung # 06, 28.11.2013

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

Experimentelle Techniken

- höchste Energien:
PAO Messprinzip
GZK Cut-off
- Gamma-Astronomie:
Cherenkov-Teleskope
MAGIC, H.E.S.S.

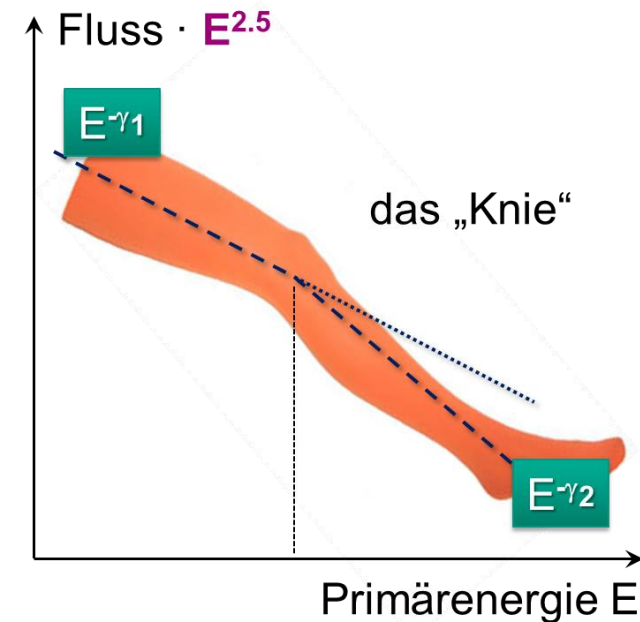


Energiespektrum & Hillas-Plot



■ **Energiespektrum** zeigt Variationen:

- Protonenknie bei $E \sim 4 \text{ PeV}$
- Eisenknie bei $E \sim 100 \text{ PeV}$
- Übergang galaktische zu extragalaktische Strahlung $\sim 10^{18} \text{ eV}$
- Propagationseffekte:
Diffusion im galaktischen B-Feld

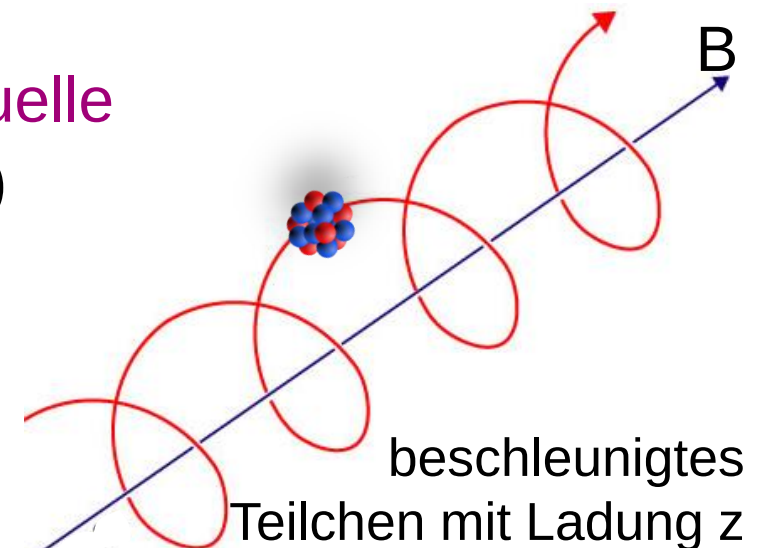


■ **Hillas-Plot** – Schockfront mit β_s

Larmor-Radius des Teilchens $<$ Dimension der Quelle
(notwendiges, aber nicht hinreichendes Kriterium)

$$E_{\text{max}} \sim \beta_s \cdot z \cdot B \cdot L$$

- hohes B, kleines L: GRBs, Pulsare
- kleines B, großes L: AGN-Jets, ...



Fermi-Beschleunigung in SN-Schockfronten



■ **SN-Schockfronten** = effektive Teilchenbeschleuniger
(Effizienz: einige %)

- Passieren des Schocks:

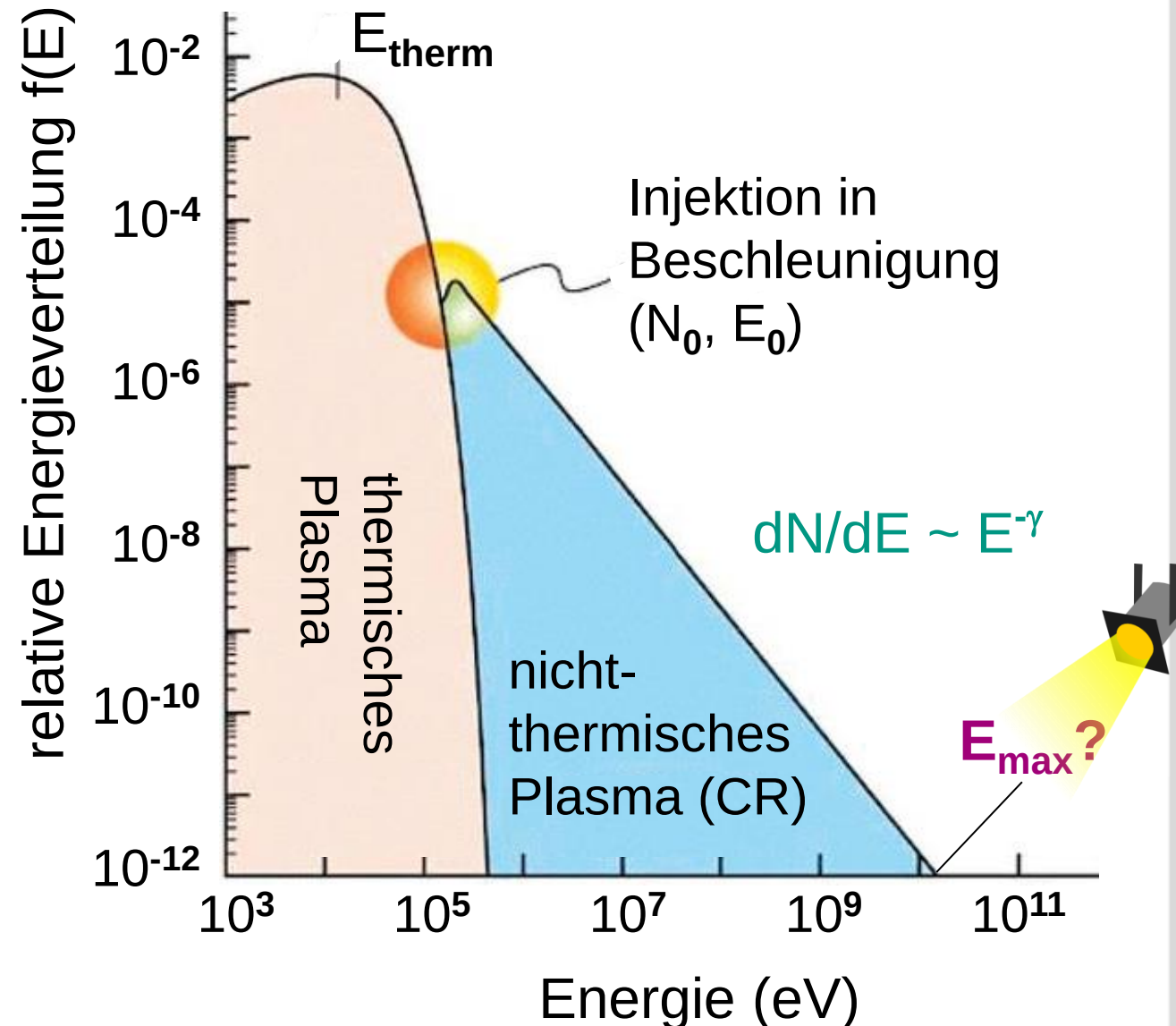
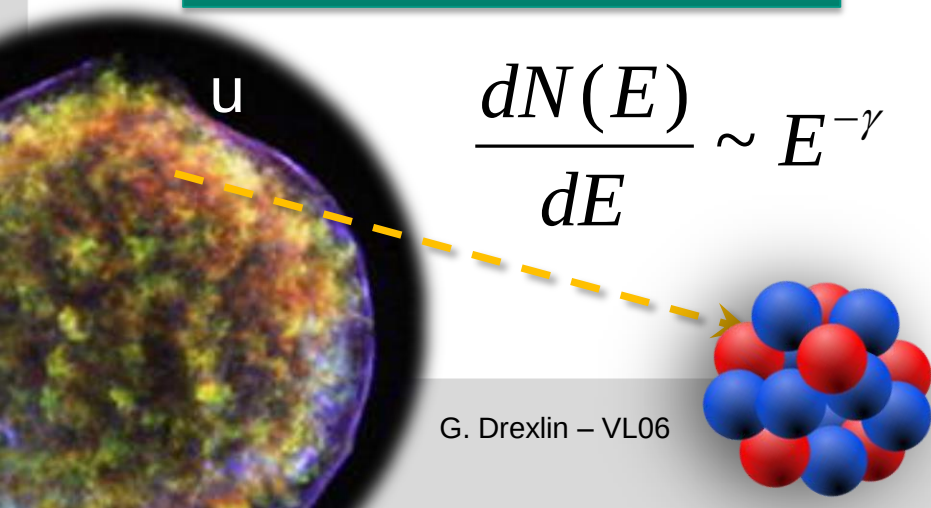
$$\Delta E = (u / c) \cdot E$$

■ Energie E nach n
Beschleunigungszyklen
mit Verlustrate $\sim P^n$



Power-Law Spektrum

$$\frac{dN(E)}{dE} \sim E^{-\gamma}$$



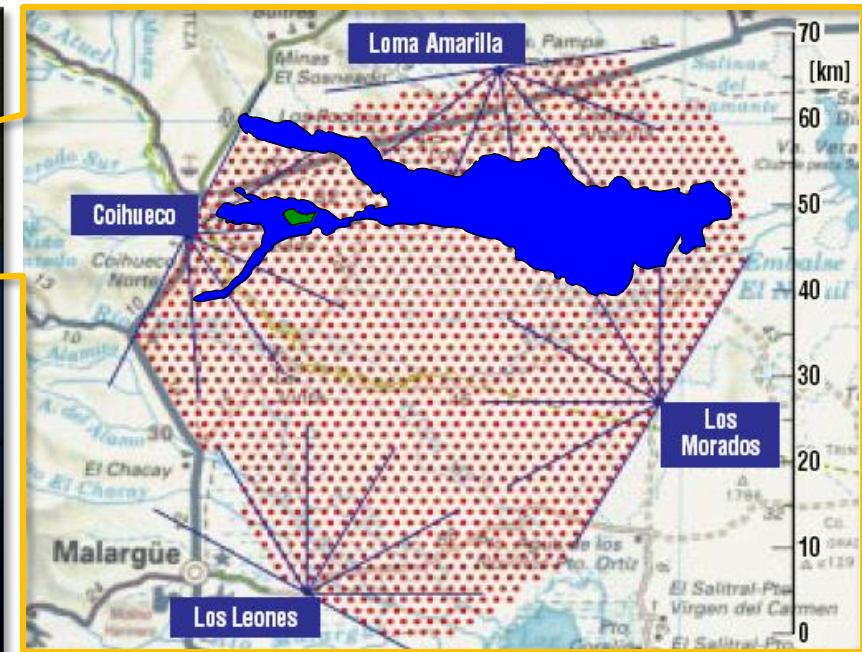
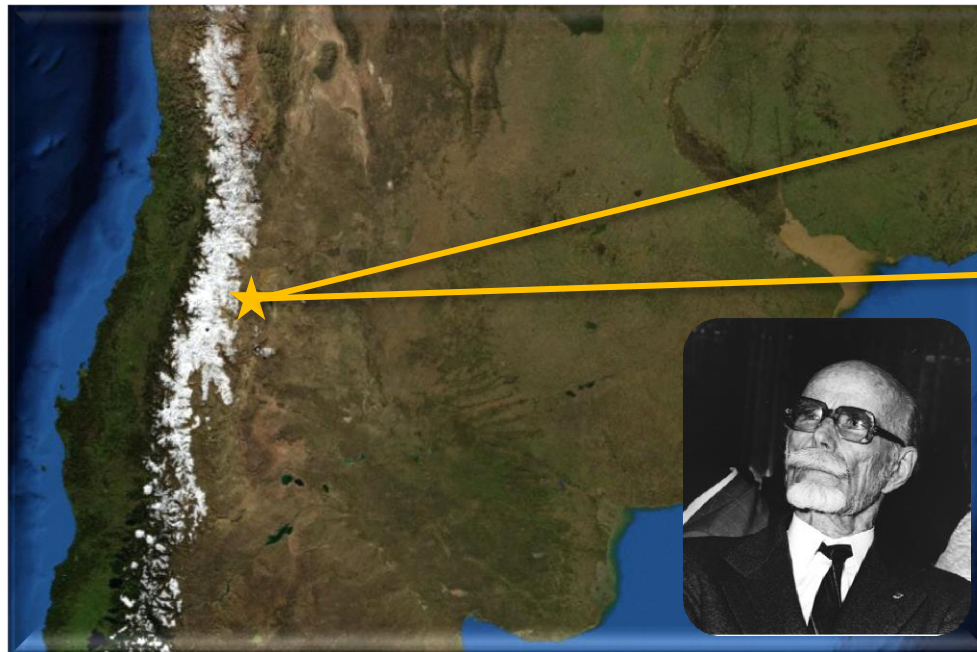
Pierre Auger Observatorium

■ Pierre Auger Observatorium

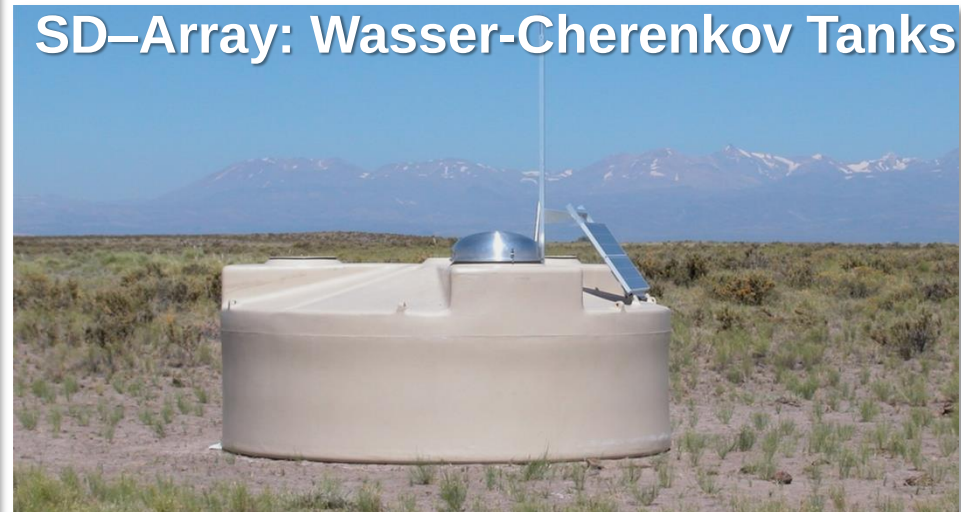
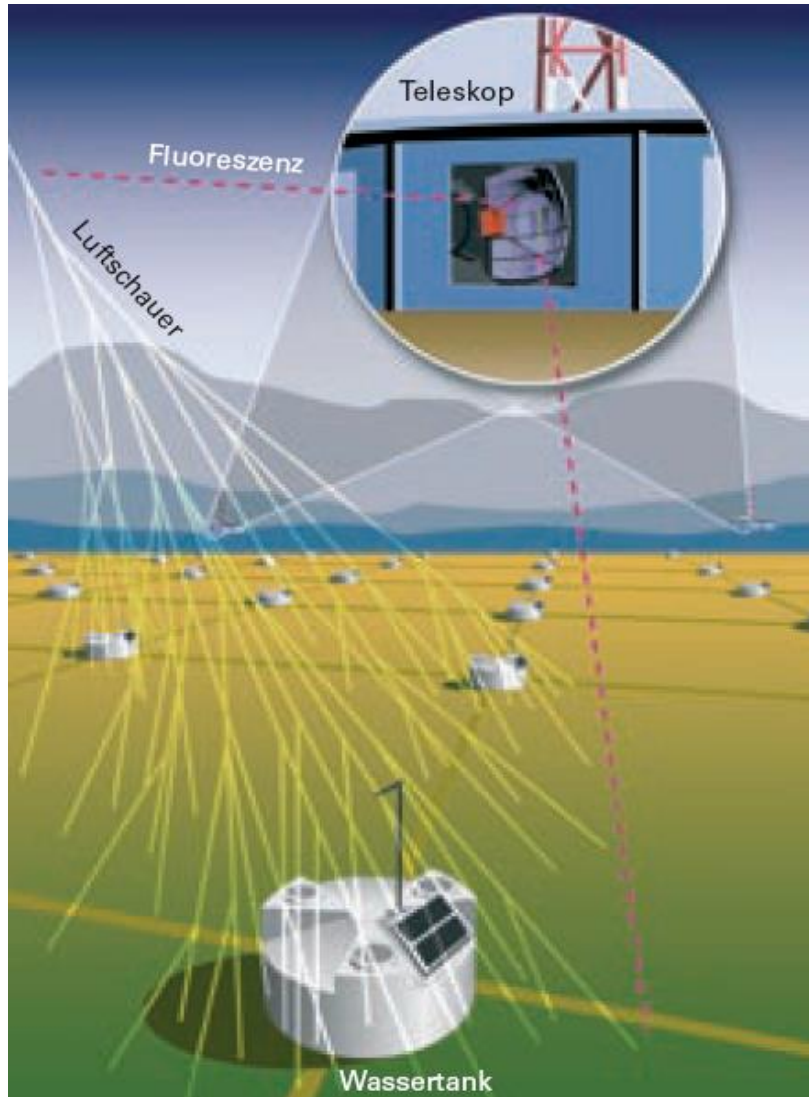
Ort: Pampa Amarilla bei Malargüe, Mendoza, Argentinien (h = 1400 m)

Ziel: Untersuchung der höchstenergetischen kosmischen Strahlung
bis $E = 10^{20}$ eV (gemessen $E > 100$ EeV)

Methode: - 3000 km² großes Array mit ~ 1600 Wassertanks
- 4 Fluoreszenzteleskop-Stationen



- **Hybrid-Detektor:** Wasser-Cherenkov-Detektoren (Lateralverteilung)
Fluoreszenz-Teleskope (Longitudinalverteilung)



4 × 6 Teleskope

klare, mondlose
Nächte ($\epsilon=10\%$)

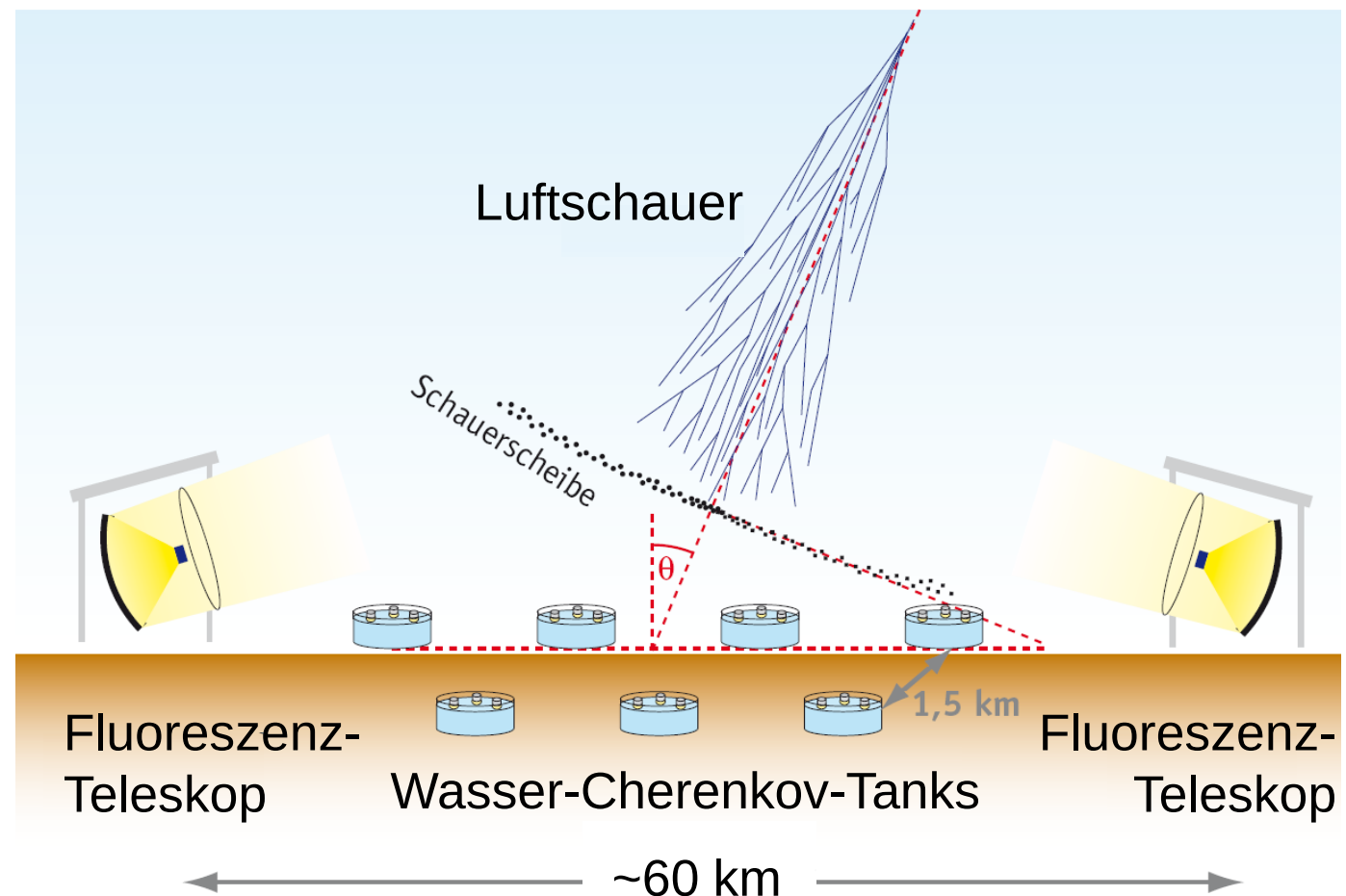
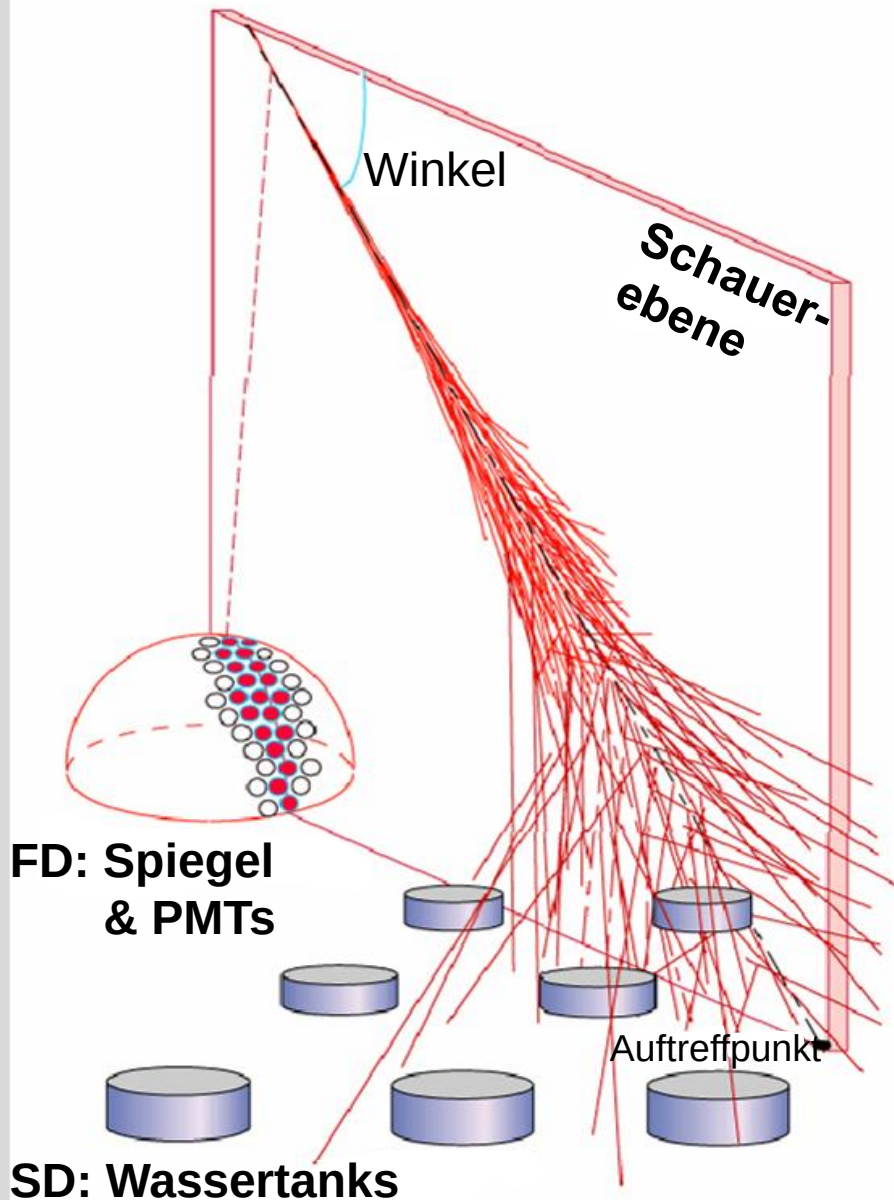


in $d = 1.5 \text{ km}$

1600 Tanks

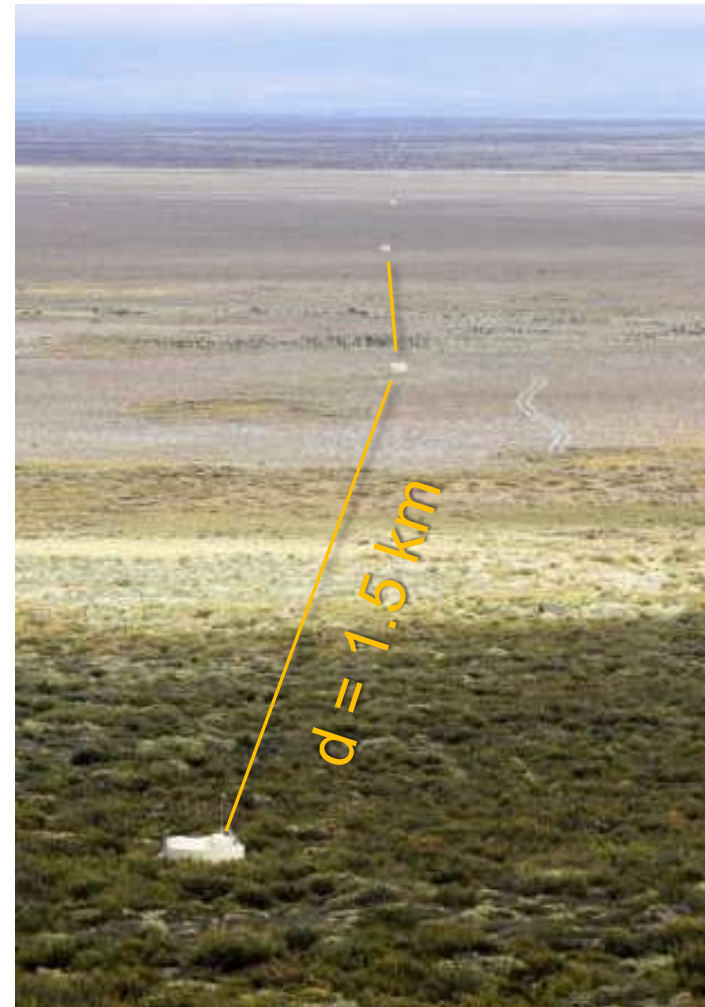
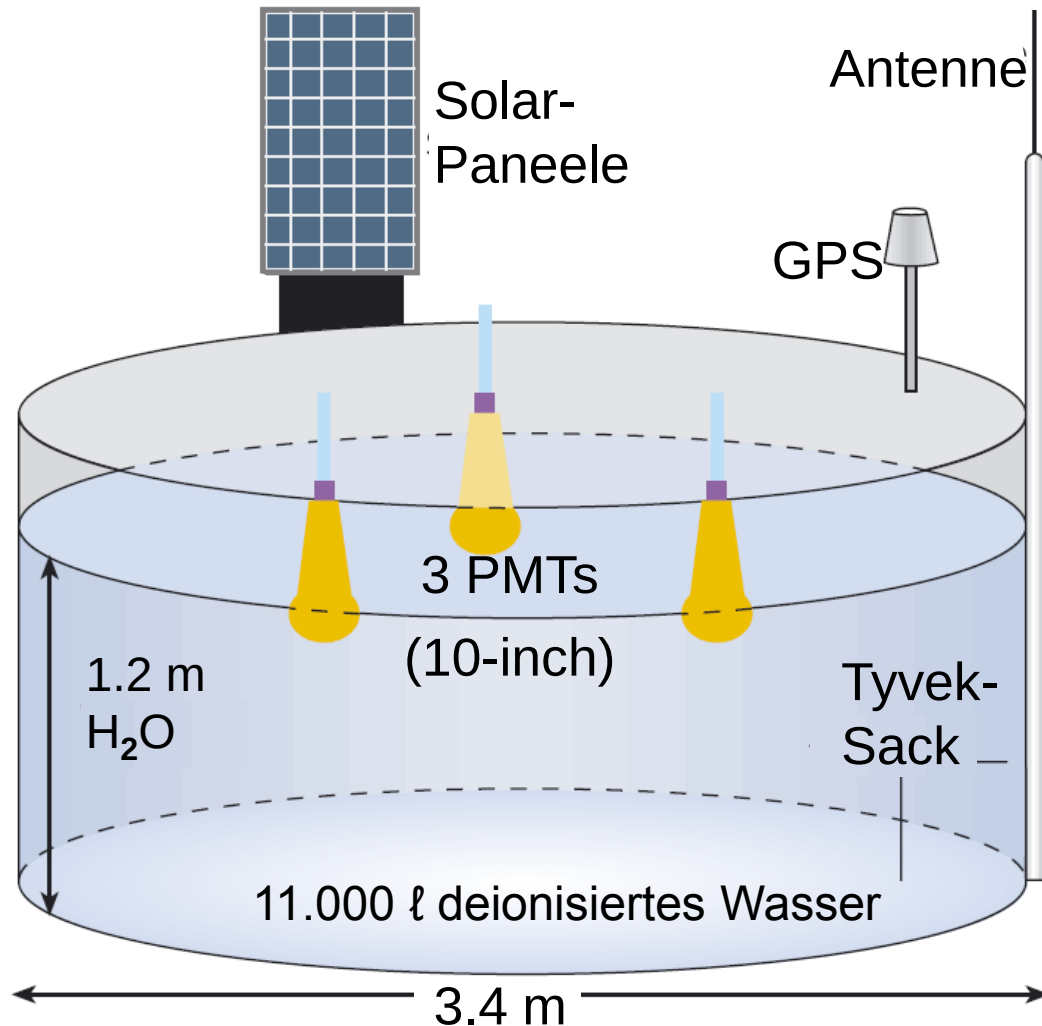
■ **Hybrid-Detektor:** unterschiedliche Observable im SD und FD Teil von Auger

- SD: Surface Detector
- FD: Fluorescence Detector



Auger – Wassertanks

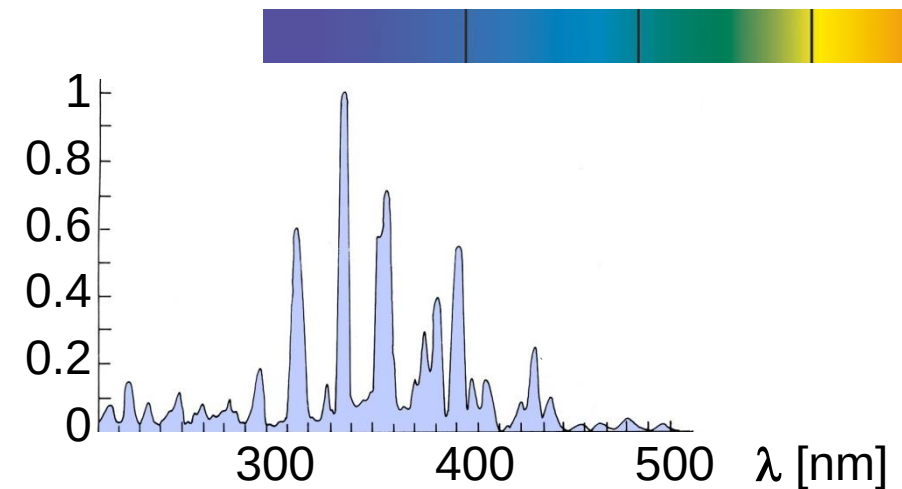
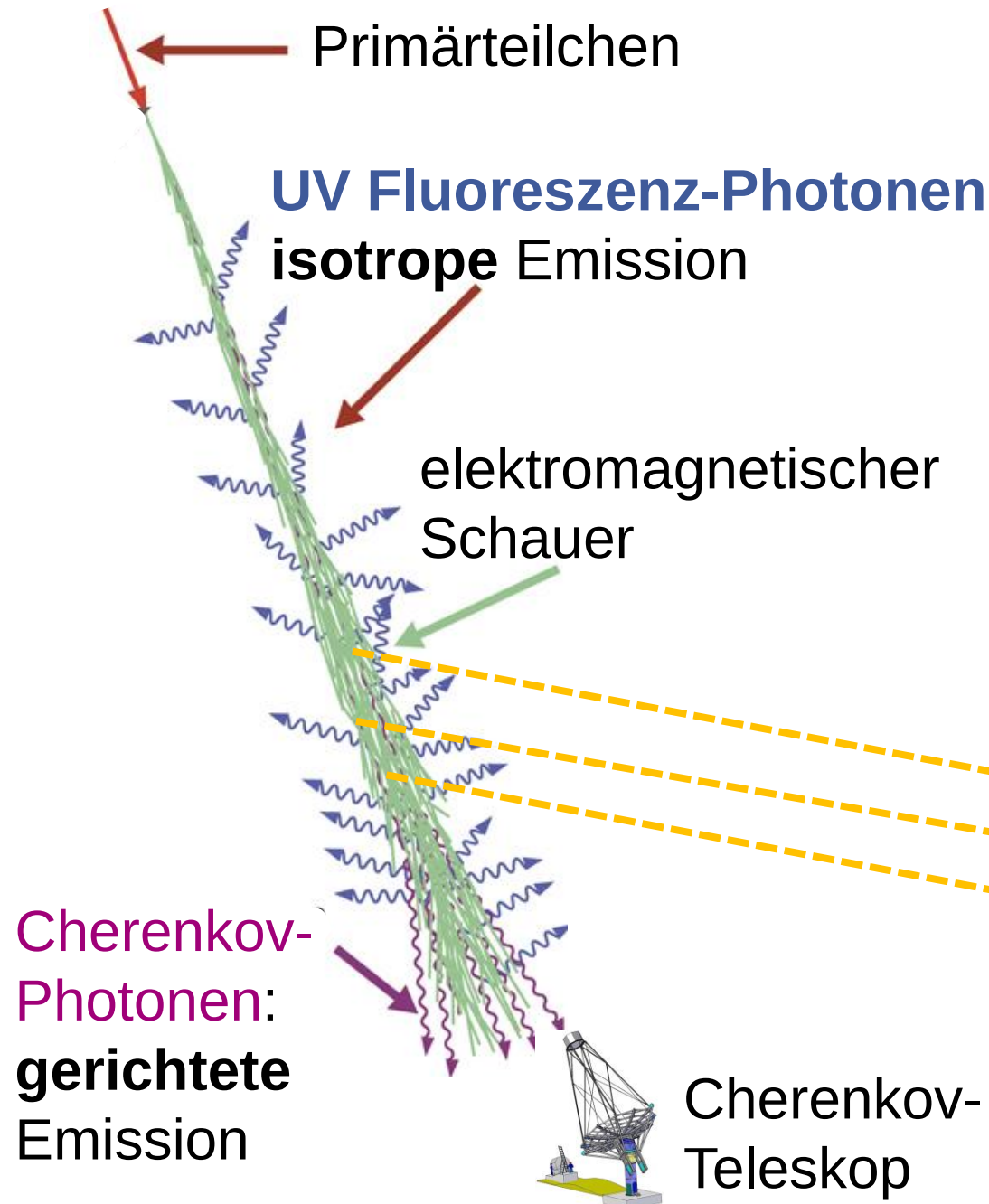
- **SD**: Nachweis des durch geladene Teilchen im H_2O -Tank erzeugten Cherenkov-Lichts mit drei PMTs ($\sim$ Anzahl der Myonen im Schauer) elektrische Energie von 8 W über Solarpaneele, Datentransfer per Funk



CR-Trigger

5 H_2O -Tanks
in $\Delta T = 20 \text{ ms}$
 $\Rightarrow \epsilon = 98\%$
bei $E = 10^{19} \text{ eV}$

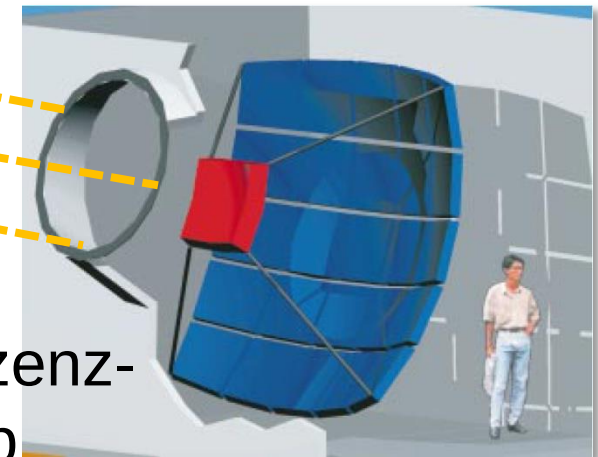
Auger – Fluoreszenzteleskope



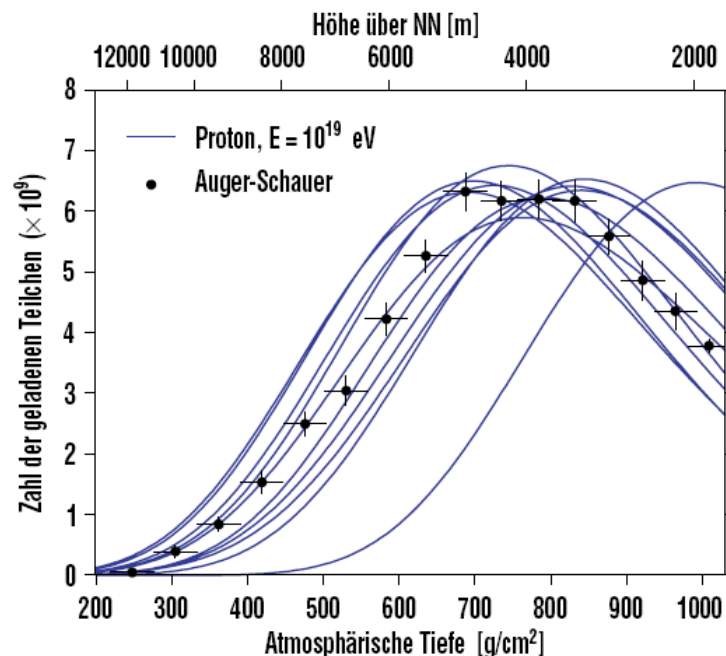
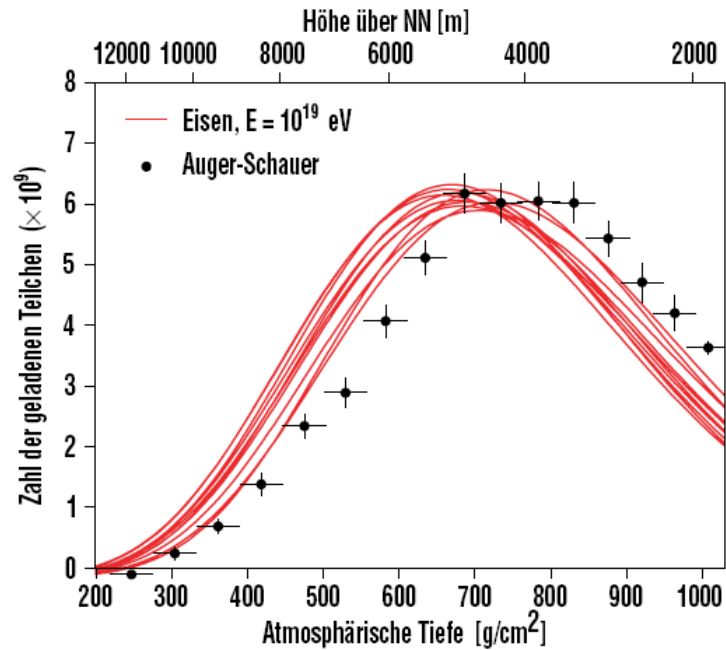
- N_2 Fluoreszenzspektrum
- atmosphärische Eigenschaften wichtig für FD-Analyse

$d \sim 10-30$ km

Fluoreszenz-
Teleskop



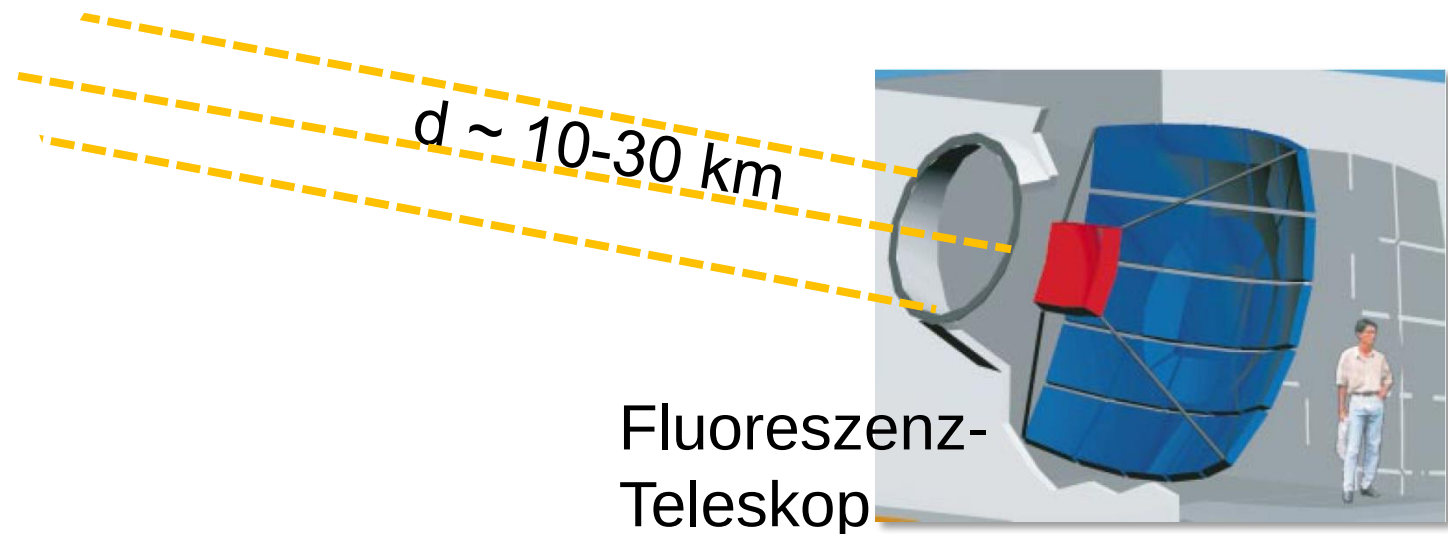
Auger – Fluoreszenzteleskope



Form der
Schauerentwicklung

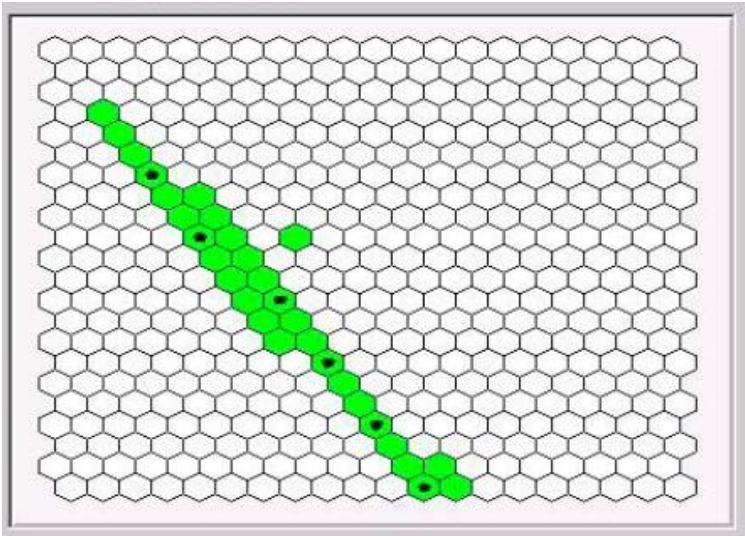


Bestimmung der
Teilchenart/Energie
(p, Fe-Kern)



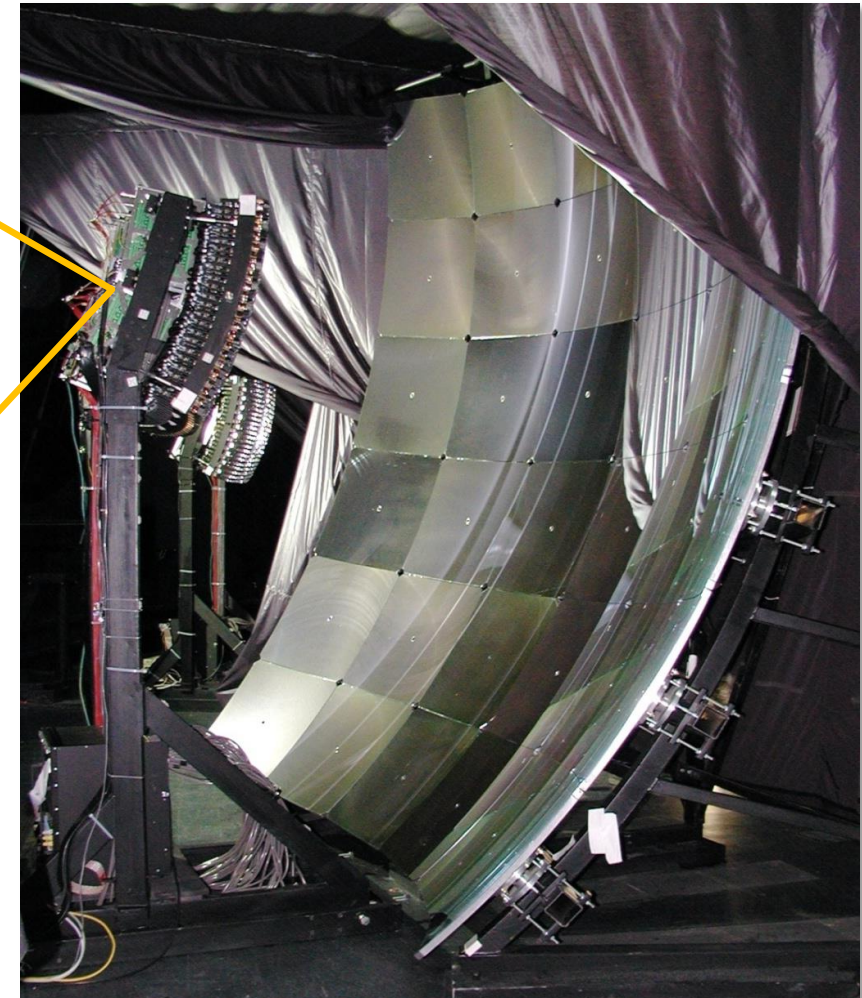
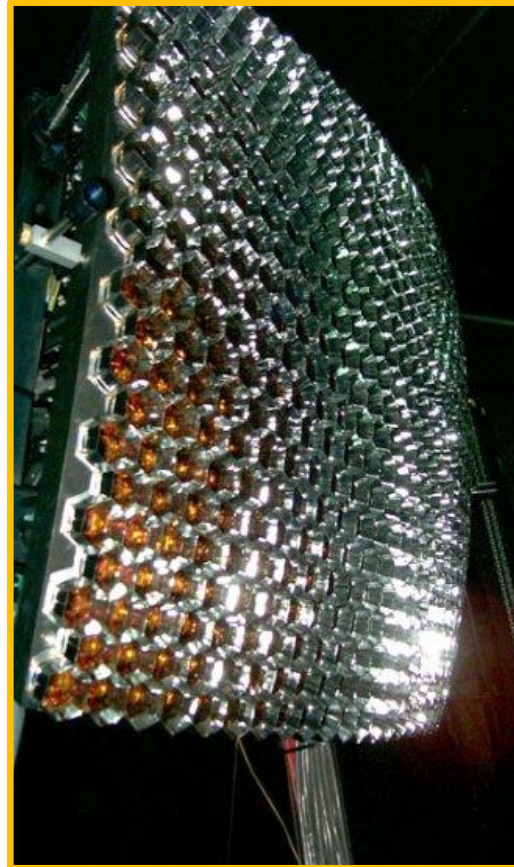
Auger – Fluoreszenzteleskope

- **Teleskop-Optik:** sphärischer Schmidt Spiegel mit $A = 12 \text{ m}^2$
Krümmungsradius $r = 3.4 \text{ m}$, Gesichtsfeld $30^\circ \times 30^\circ$,
segmentiert in 36 Elemente, Aluminium-beschichtet

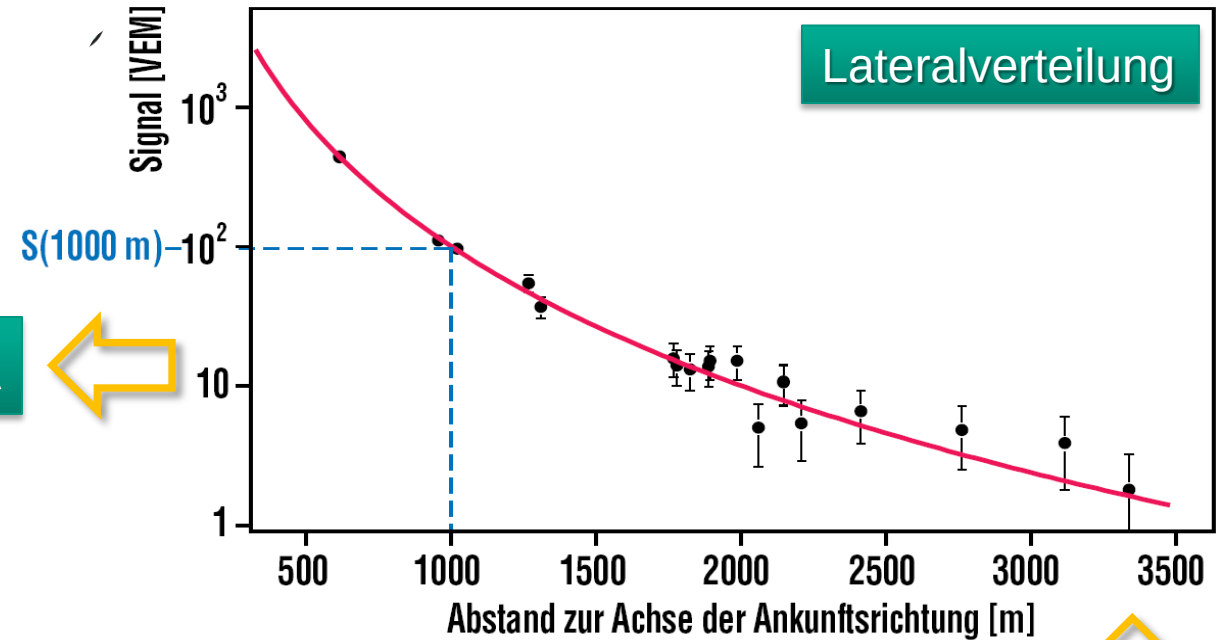
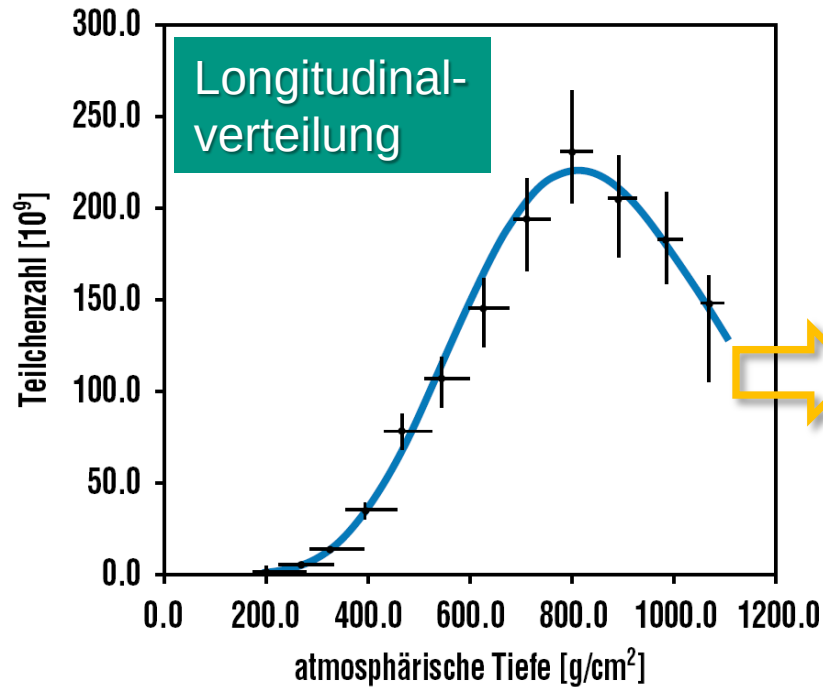


Kamera:

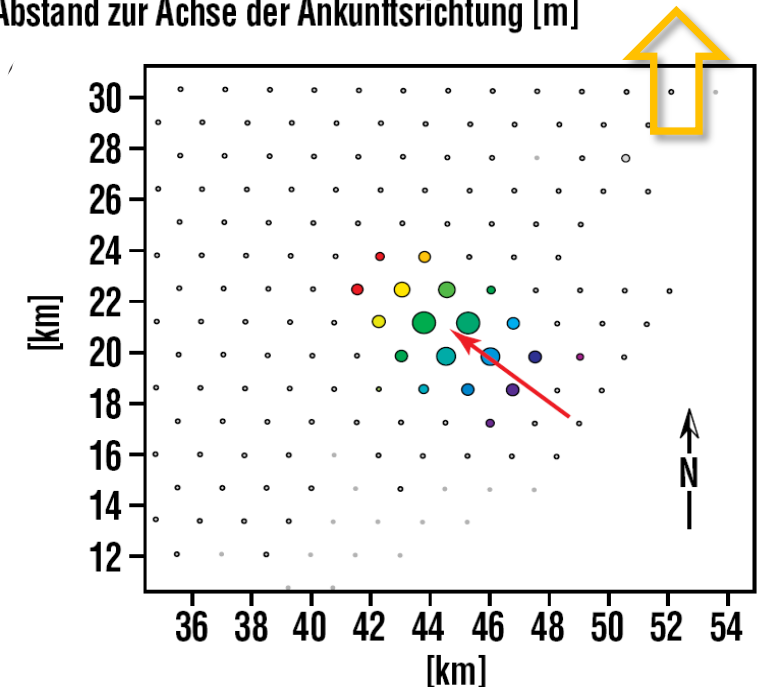
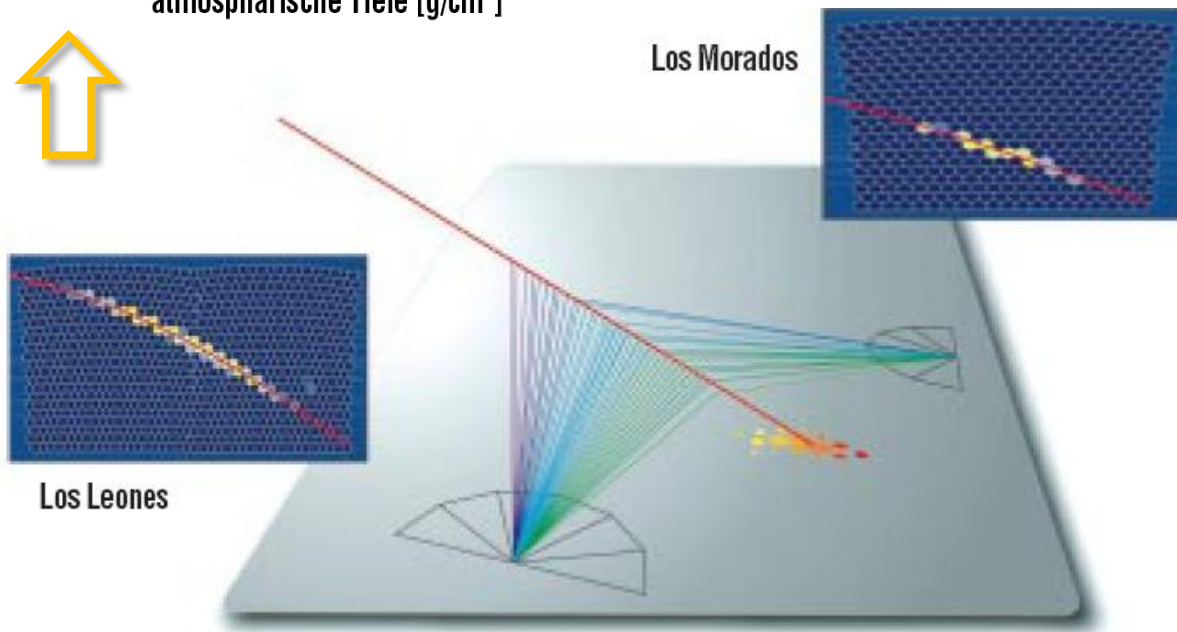
440 PMTs ($\varnothing=38\text{mm}$) in
 20×22 Matrix ($80 \times 80 \text{ cm}^2$)
Pixelgröße: $1.5^\circ \times 1.5^\circ$



Auger – Stereo-Hybrid Ereignis



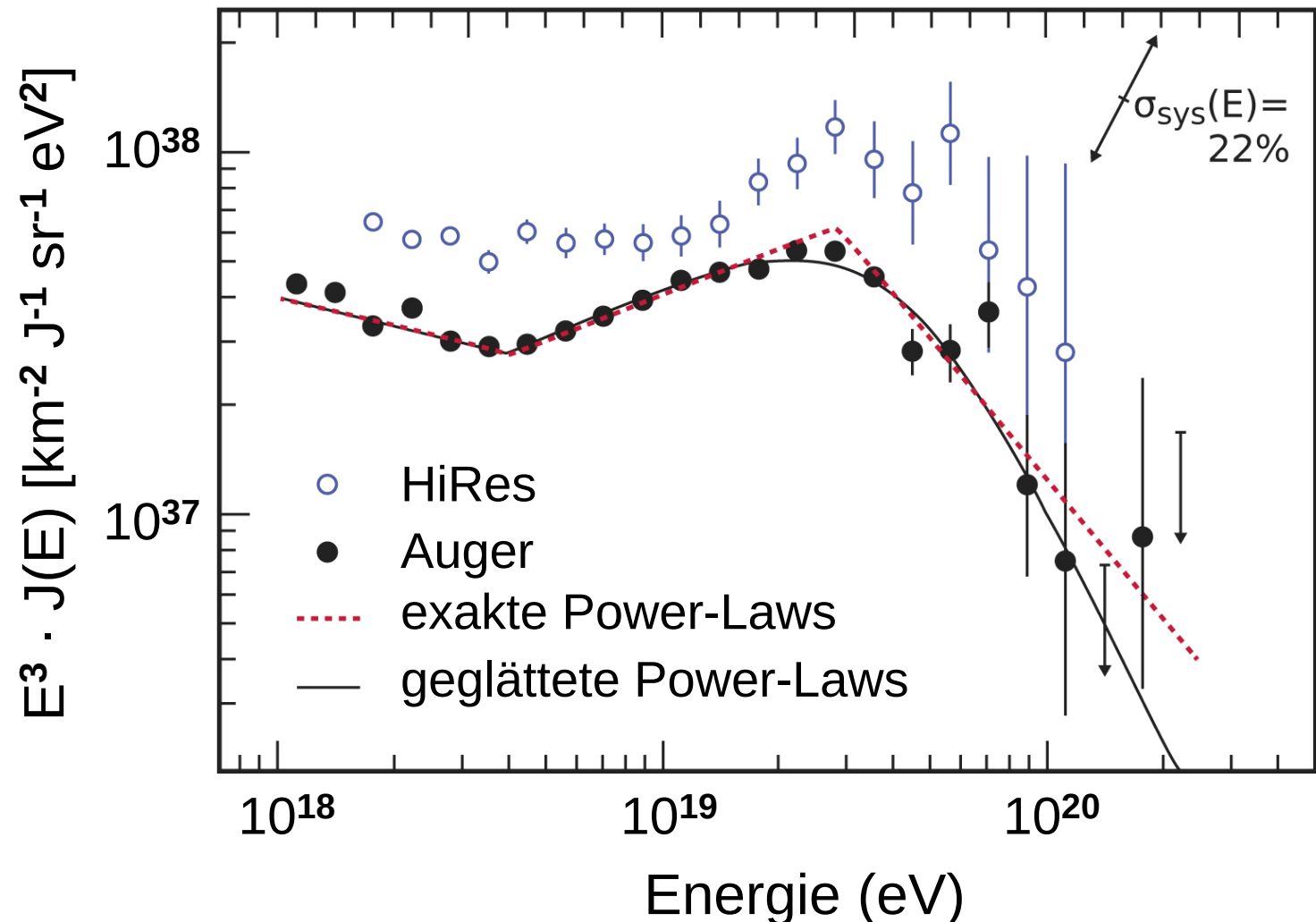
$E_{0,A}$



- **Höchste Energien:** bei Energien von $\sim 10^{19.6}$ eV beobachtet man eine deutliche Reduktion des Flusses der **UHECR** (ultra-hochenergetische kosmische Strahlung)

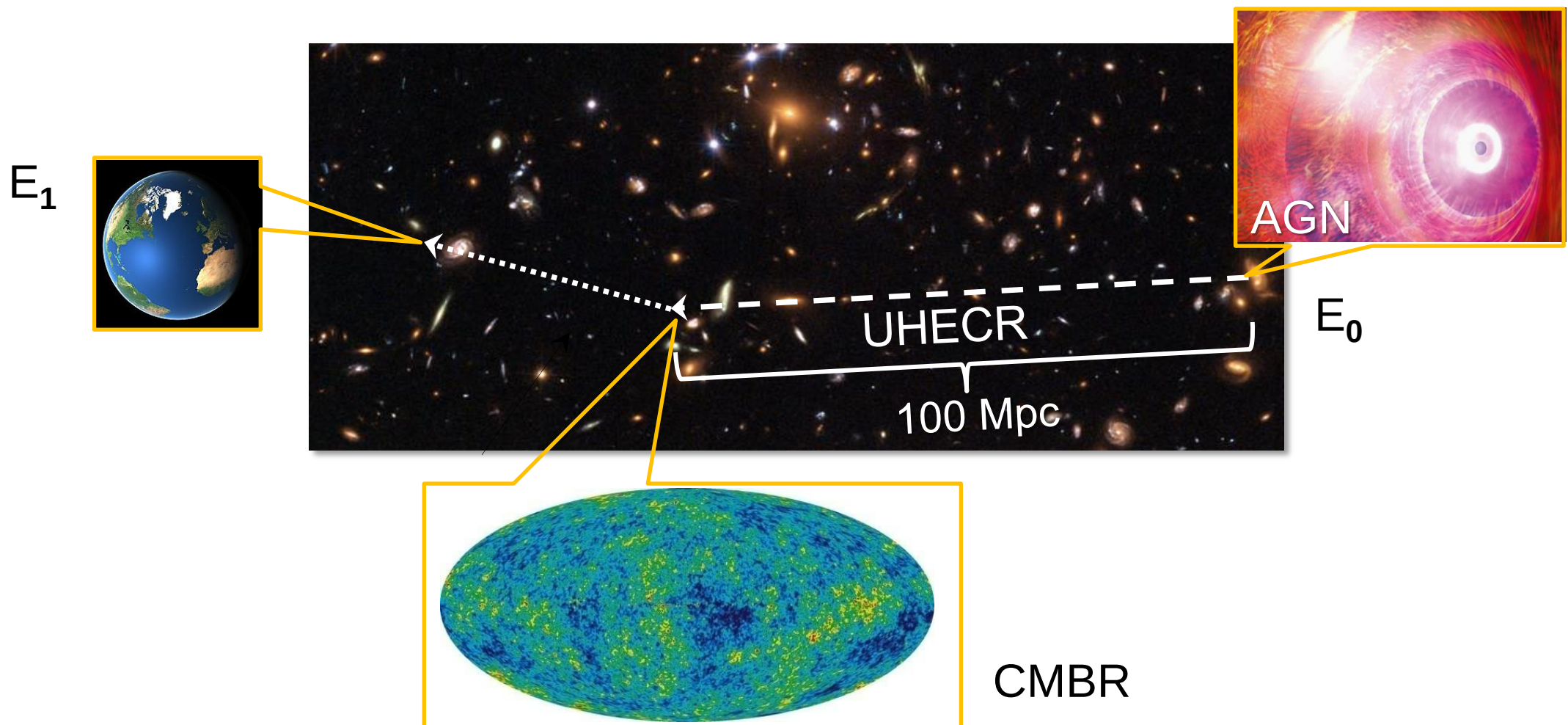
- wodurch entsteht die Unterdrückung des UHECR Flusses?

- a) Quelle erreicht ihre **maximale Energie**?
- b) Quelle in großem Abstand: **Effekt durch Propagation**?



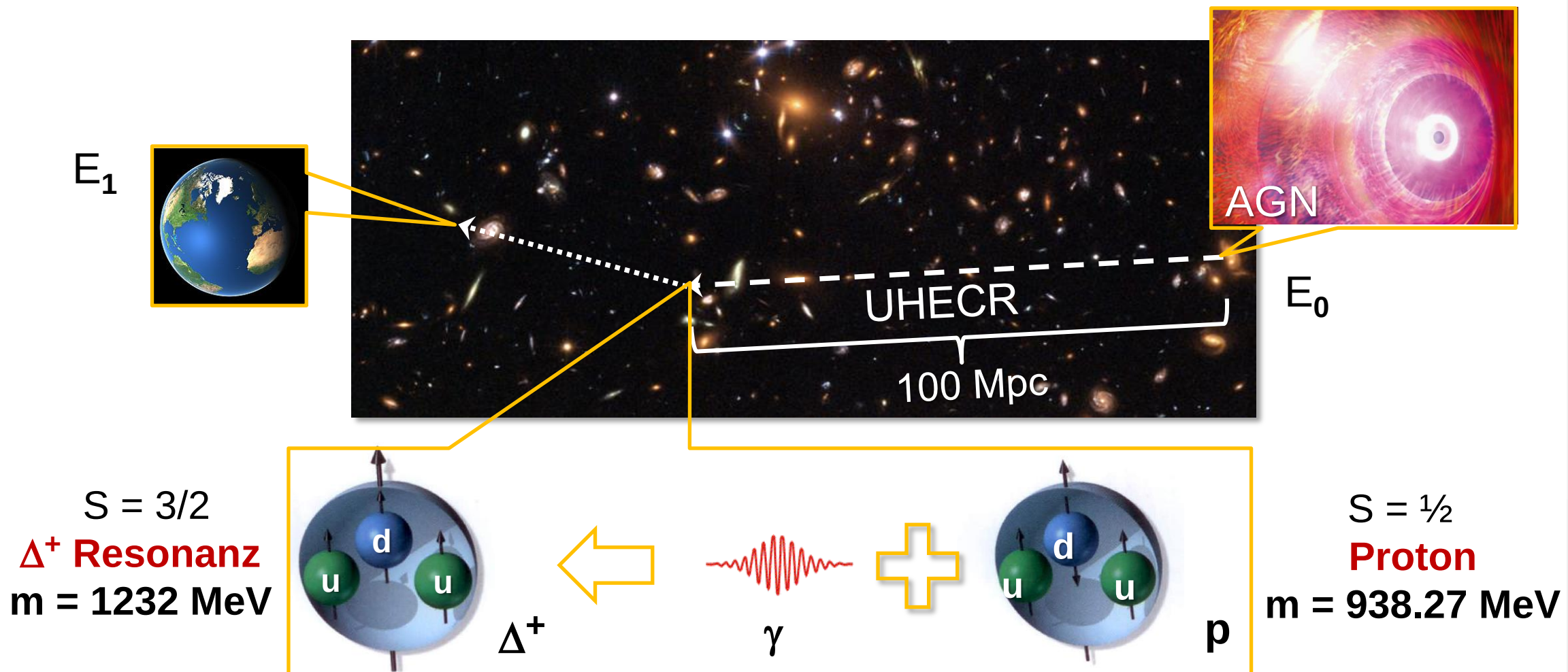
■ Möglichkeit II: Propagations-Effekt:

bei der UHECR Propagation von der Quelle (AGN, GRB) über große Entfernungen (10-1000 Mpc) kommt zur Wechselwirkung mit der CMBR



■ Resonante Streuung mit CMBR

UHECR erzeugt eine Δ^+ Resonanz mit den 3K Hintergrundphotonen der CMBR



■ Resonante Streuung mit CMBR

UHECR erzeugt eine Δ^+ Resonanz mit den 3K Hintergrundphotonen der CMBR

- Schwerpunktsenergie $s > (m_p + m_\pi)^2$

$$E_p(\text{GZK}) = 4 \times 10^{19} \text{ eV}$$

$$E_p - (p_p \cdot \cos \theta) \geq \frac{m_p \cdot m_\pi}{E_\gamma}$$

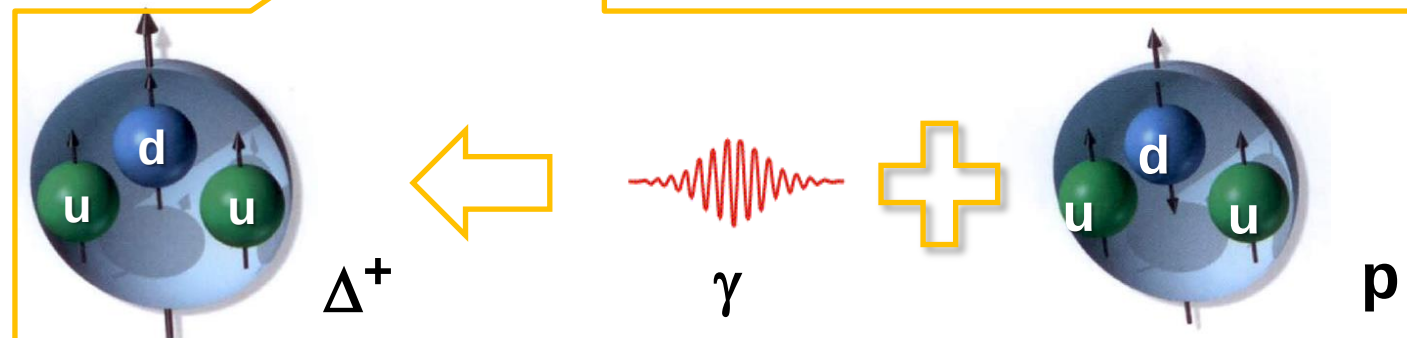


$$\sigma \sim 10^{-28} \text{ cm}^2$$

Zerfall:

$$n + \pi^+$$

$$p + \pi^0$$



$$S = \frac{1}{2}$$

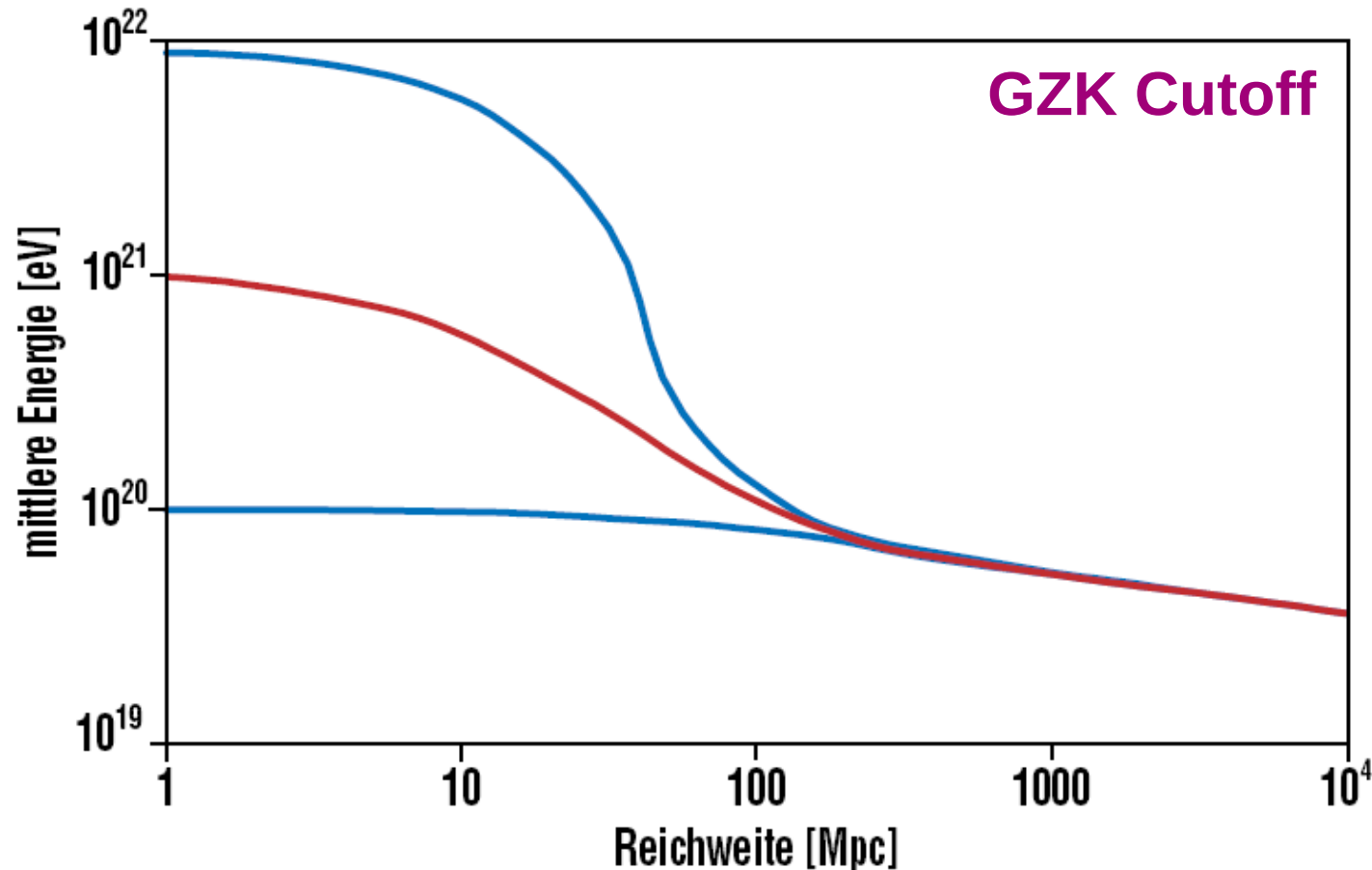
Proton

$$E_p$$

■ Resonante Streuung mit CMBR – GZK Cutoff

UHECR verliert Energie durch Erzeugung der Δ^+ Resonanz mit den 3K Hintergrundphotonen der CMBR

- ultrahochenergetische Protonen ($\gg 10^{20}$ eV) haben endliche Reichweite



■ GZK Cutoff erwartet

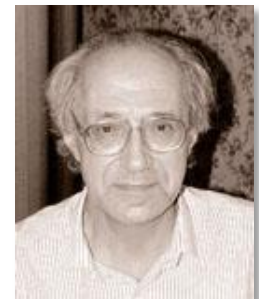
$$E_p(\text{GZK}) = 4 \times 10^{19} \text{ eV}$$



Kenneth
Greisen



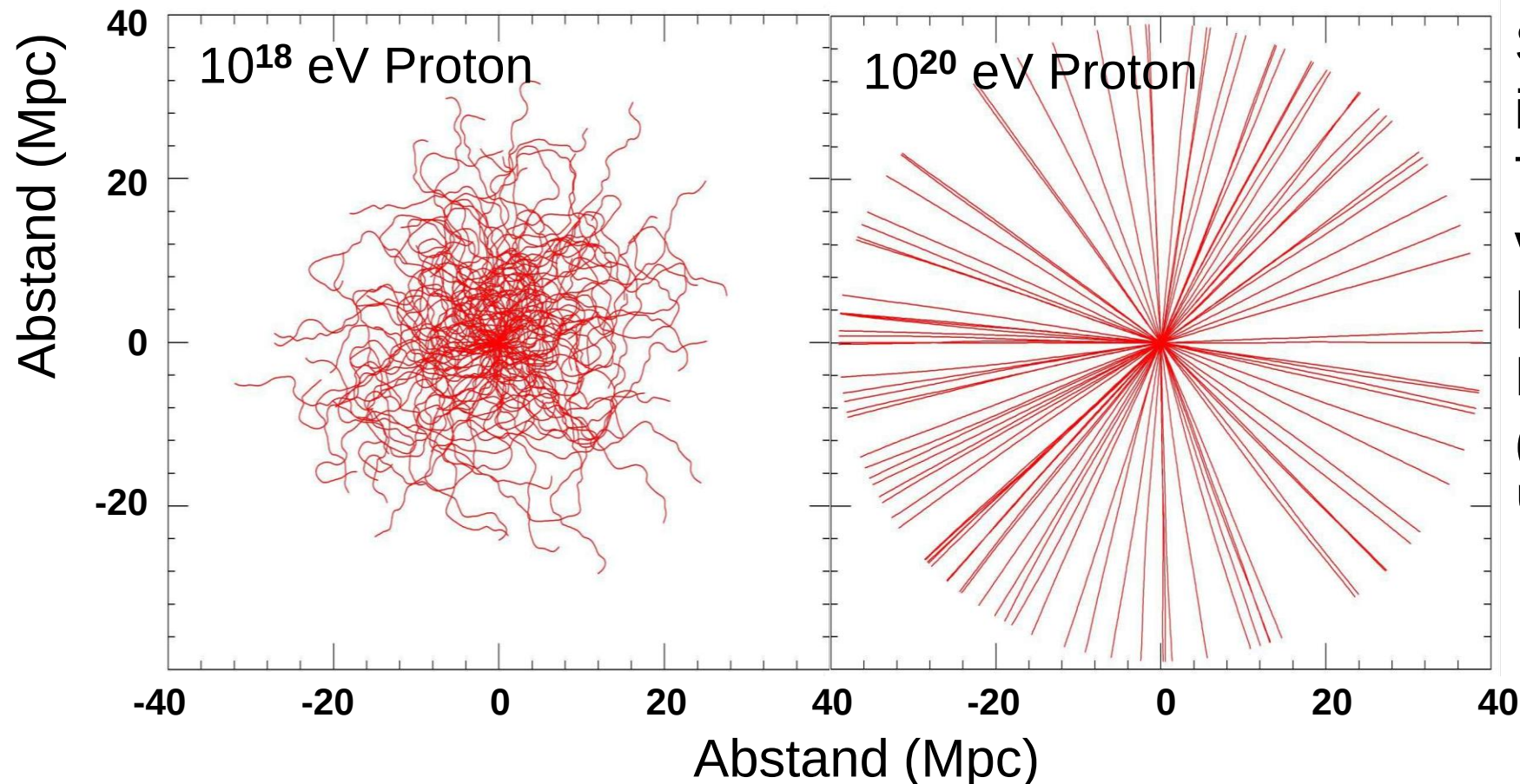
Georgy
Zatsepin



Vadim
Kuzmin

■ Ortskorrelationen bei der Suche nach den Quellen der UHECR:

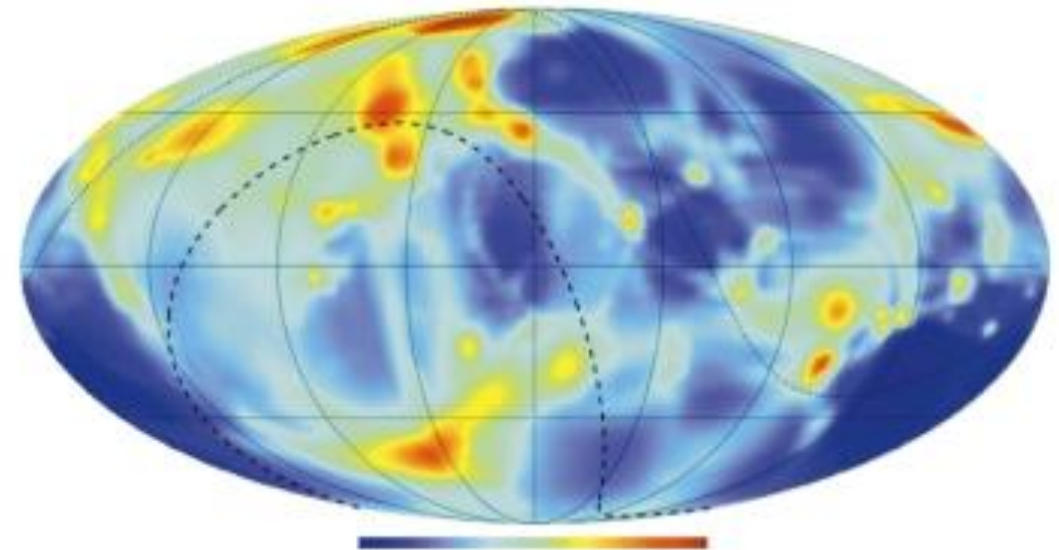
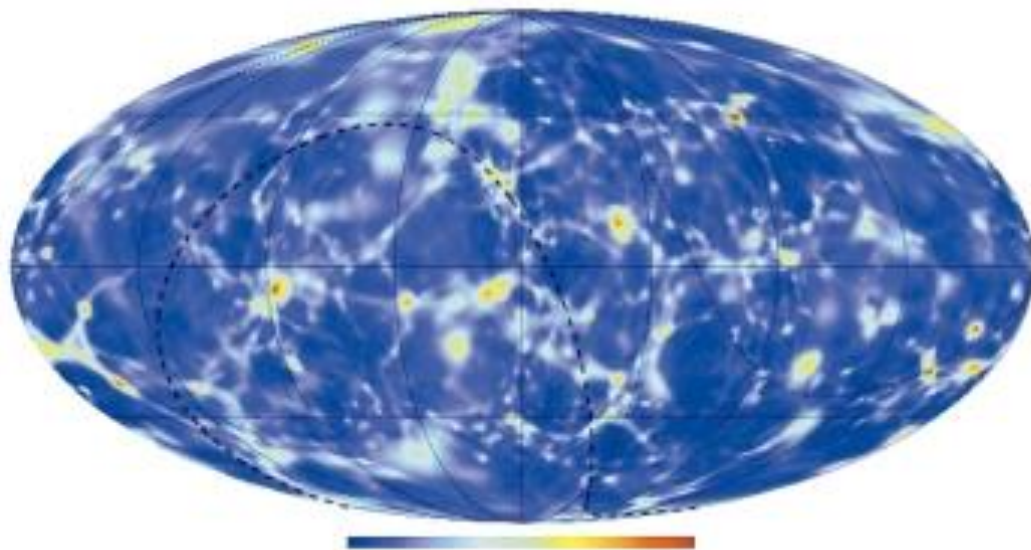
- Trajektorien sensitiv auf Größe intergalaktischer B-Felder ($\sim 10^{-9}$ G?)
- Proton mit $E = 10^{20}$ eV in $B_{\text{galakt}} = 30$ nT $\Rightarrow$ Zyklotronradius $R_L = 30$ kpc
- UHECR: gibt es Möglichkeit der **Astronomie mit geladenen Teilchen?**



Simulation der intergalaktischen Trajektorien von UHECR Protonen mit $B = 10^{-9}$ G (bei höherem z $\Rightarrow$ Ablenkung!)

GZK-cut-off

- **Ortskorrelationen** bei der Suche nach den Quellen der UHECR:
 - Trajektorien sensitiv auf Größe intergalaktischer B-Felder ($\sim 10^{-9}$ G?)
 - Proton mit $E = 10^{20}$ eV in $B_{\text{galakt}} = 30$ nT $\Rightarrow$ Zyklotronradius $R_L = 30$ kpc
 - UHECR: gibt es Möglichkeit der **Astronomie mit geladenen Teilchen?**



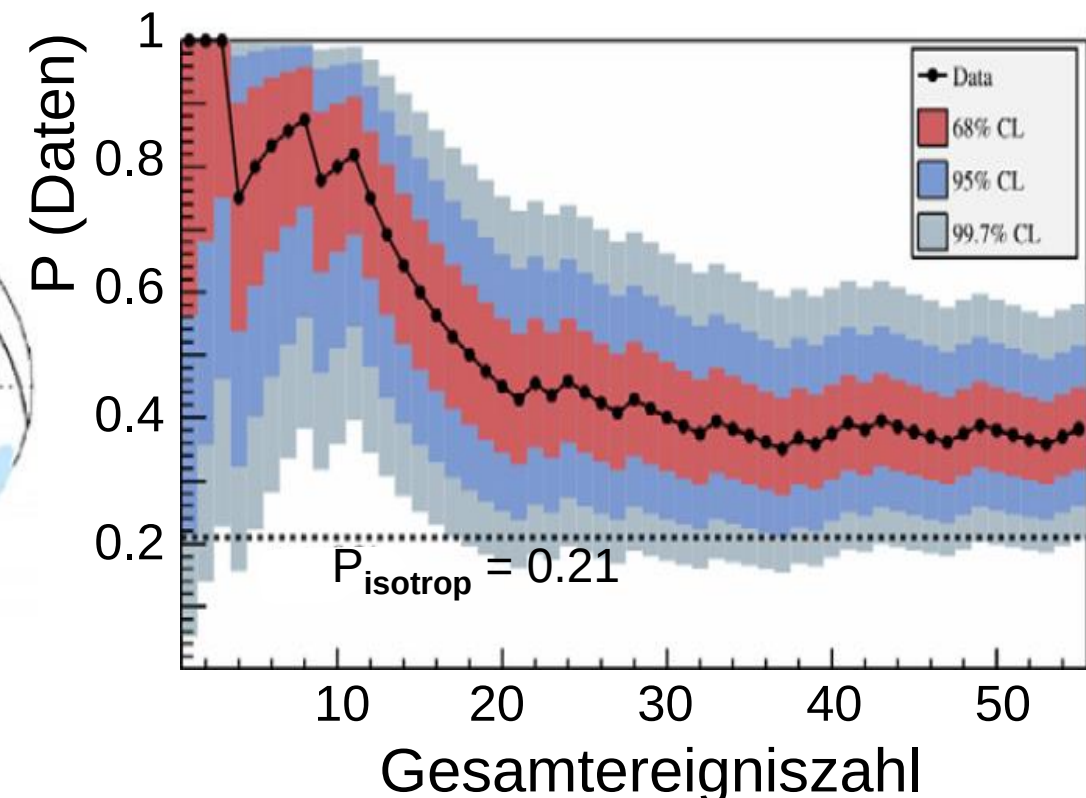
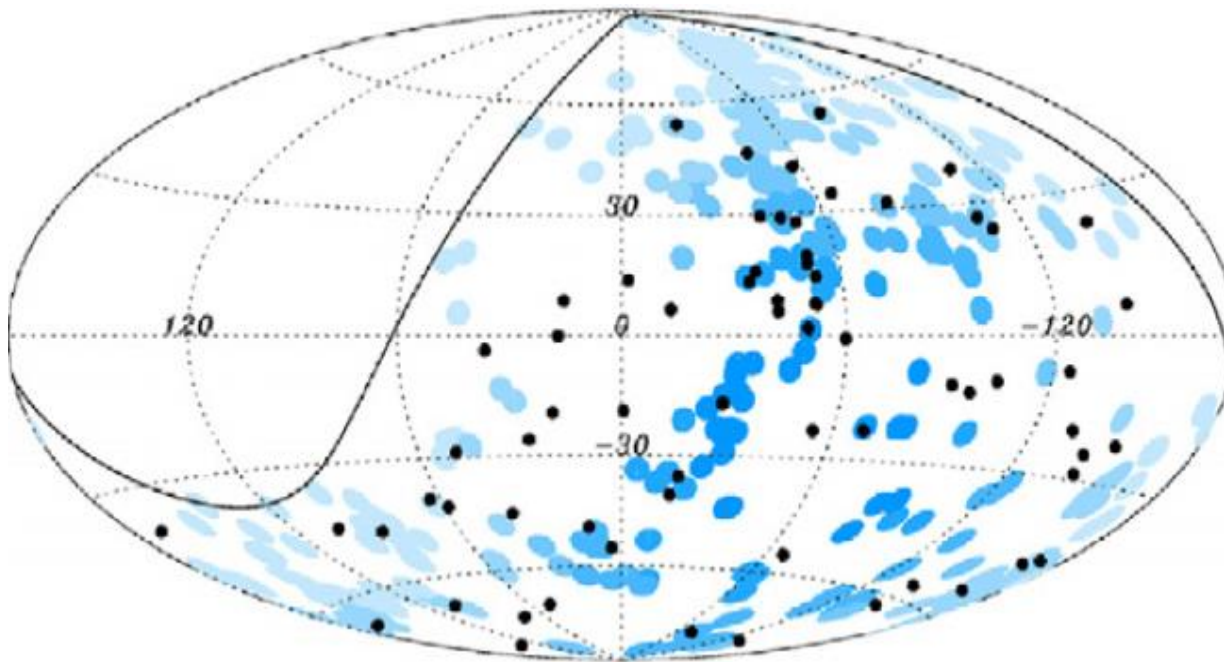
simulierte Himmelskarten für UHECR Protonen

GZK-cut-off

■ Winkelauflösung Auger: $\delta\theta = 0.7^\circ$

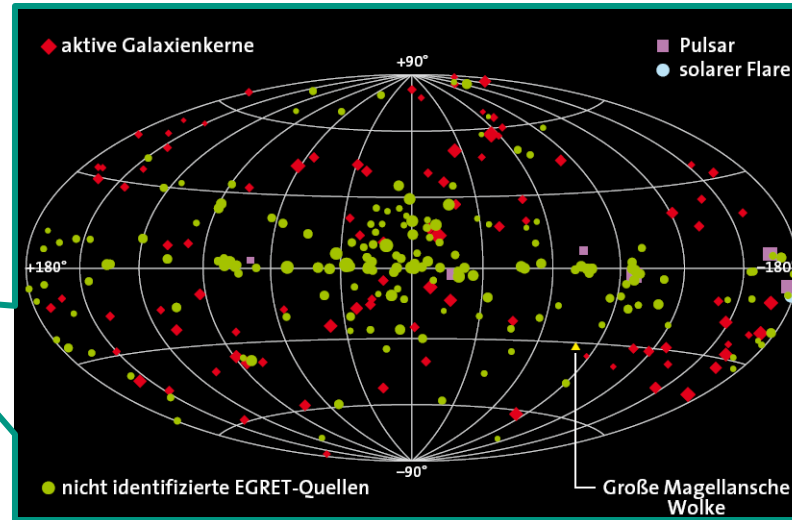
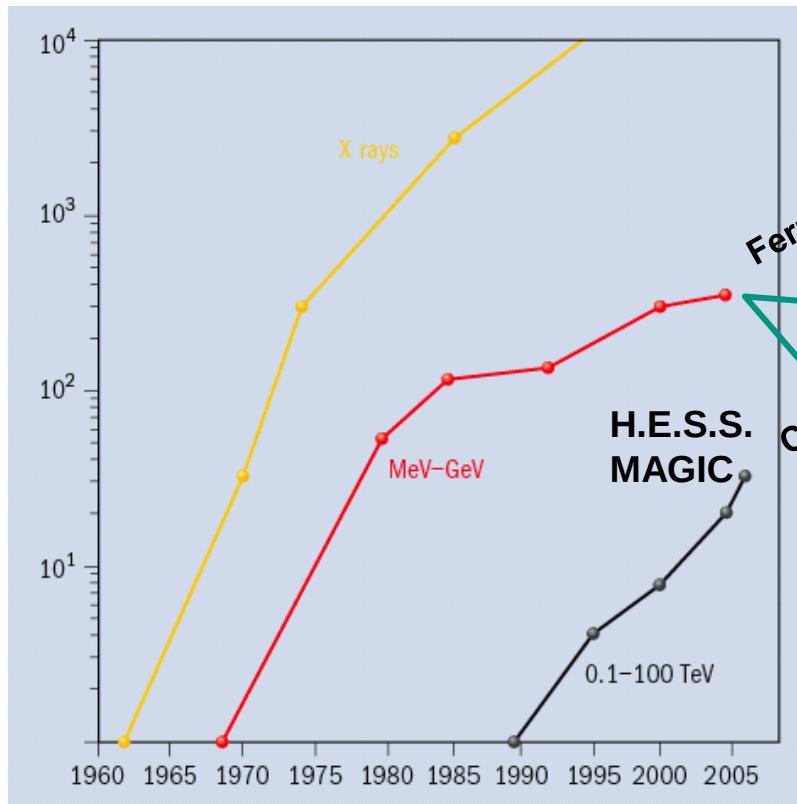
erlaubt gezielte Suche nach Anisotropien der UHECR

- Korrelationsanalyse von 69 Ereignissen > 55 EeV mit AGN Punktquellen
- Anteil der mit AGNs korrelierten Ereignissen ~ 0.4
(unabhängig: Komposition wird schwerer bei höchsten Energien)



2.1.2 Gamma-Teleskope

- **TeV Gamma-Astronomie:** ein neues Arbeitsgebiet
 - IACTs (Imaging Atmospheric Cherenkov Teleskop) untersuchen **nicht-thermische Objekte** (Pulsar-Winde, AGNs, SNRs,...) bei TeV-Energien
 - H.E.S.S. & MAGIC: viele neue Resultate seit 2004

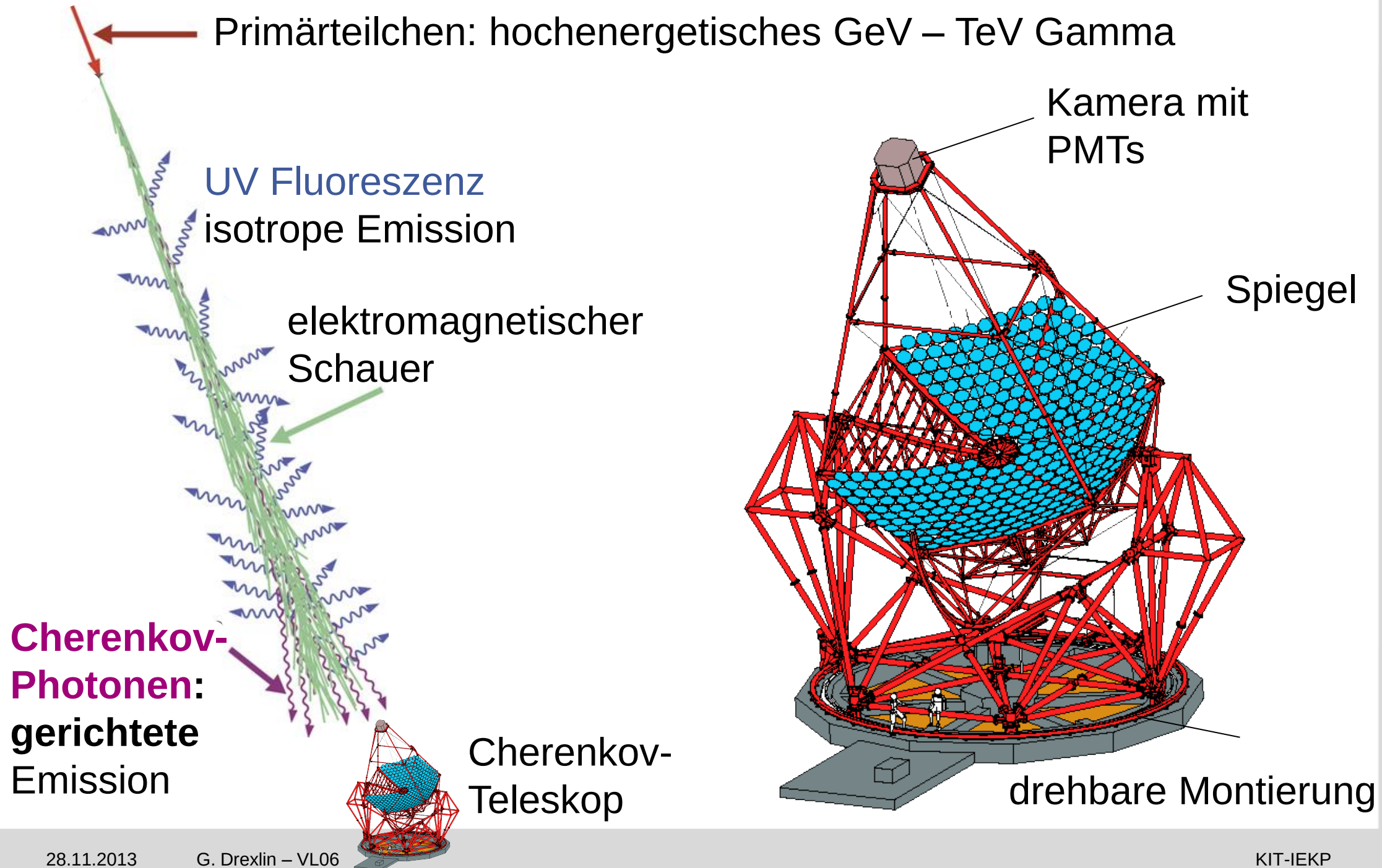


- TeV-Gammaastronomie hat wesentliche Durchbrüche & neue Erkenntnisse erzielt

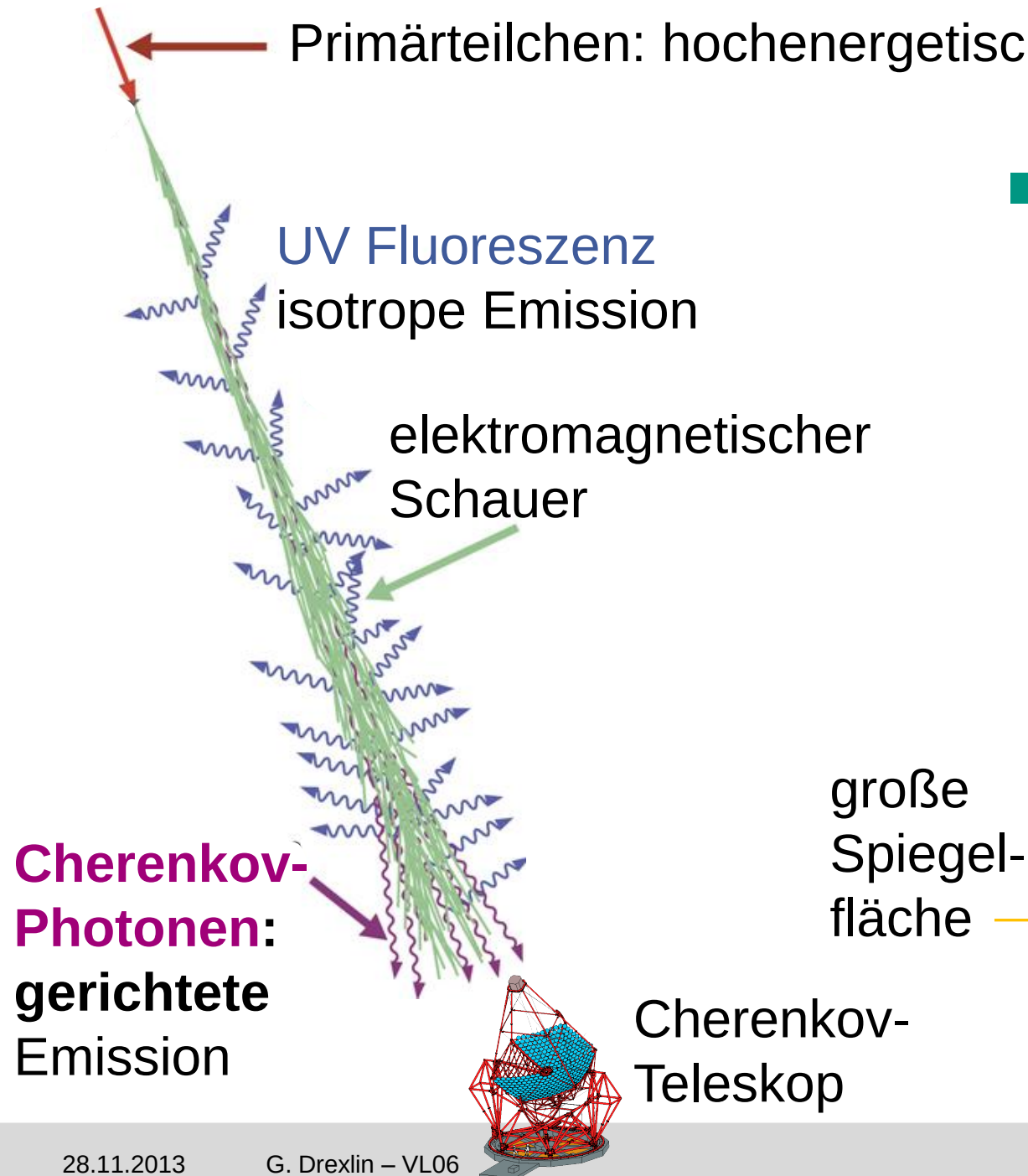
Imaging Atmospheric Cherenkov Telescope



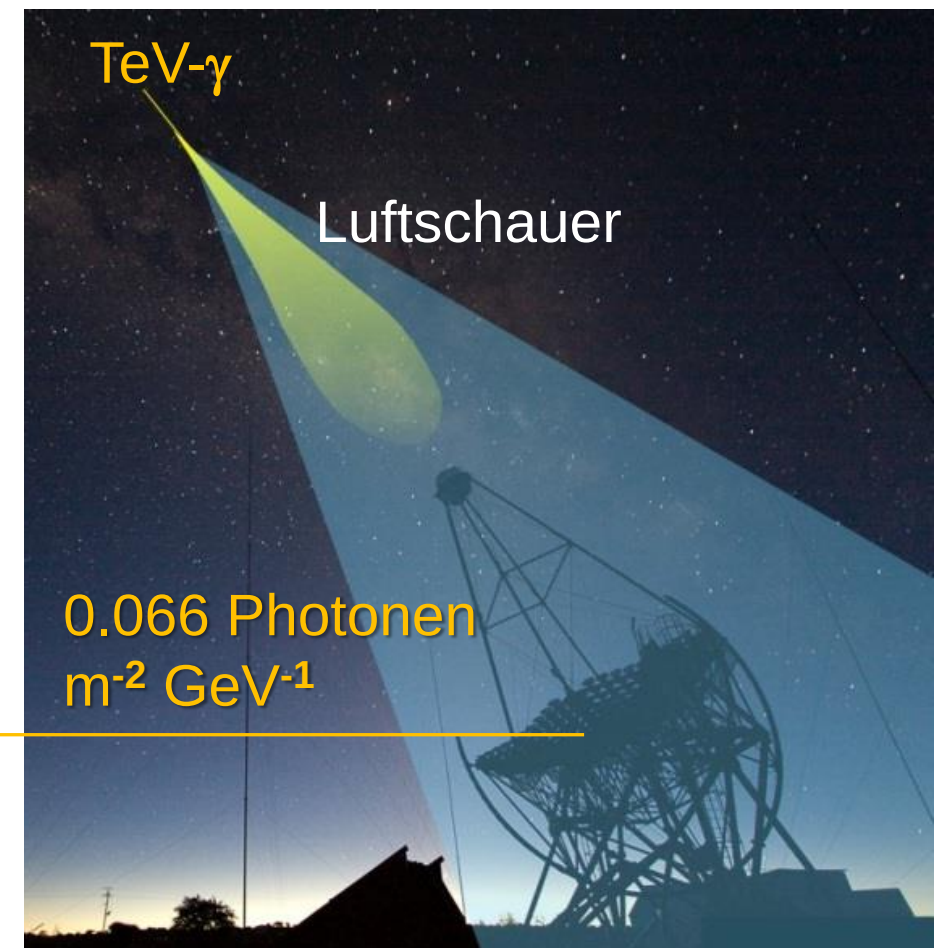
Cherenkov Licht von Schauern



Cherenkov Licht von Schauern



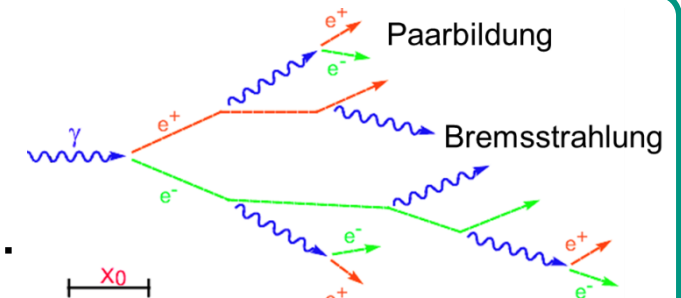
- 2-3 ns kurzes Lichtsignal, nach 10 km Transmission: $\lambda > 300$ nm



■ Schauerprozesse von TeV Gammas:

- elektromagnetischer **Kaskadenprozess**:

$\gamma \rightarrow e^+e^-$ (Paarbildung) $\rightarrow \gamma$ (Bremsstrahlung) $\rightarrow \dots$



TeV-
Gammaquant

Luftschauder

Cherenkov-Kegel

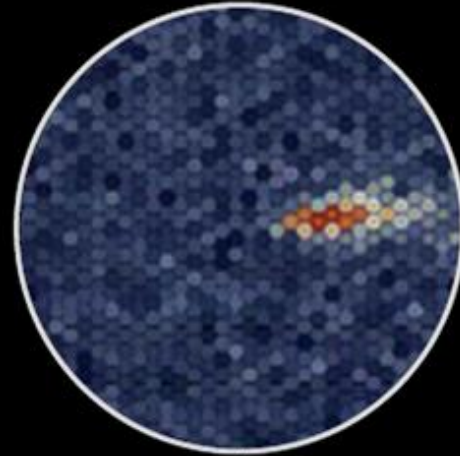
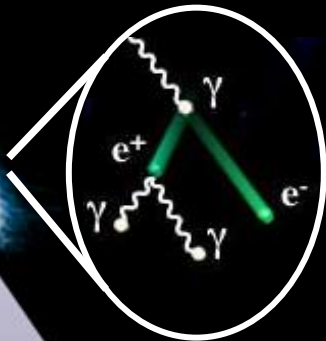
$n=1.0001$

$\sim 1^\circ$

~ 10 km

~ 120 m

Reflektorfläche ~ 100 m²



■ Cherenkov-Licht:

- Erzeugung in der oberen Atmosphäre ($n = 1.0001$) durch relativistische e^- / e^+ mit Energien $E > 35$ MeV

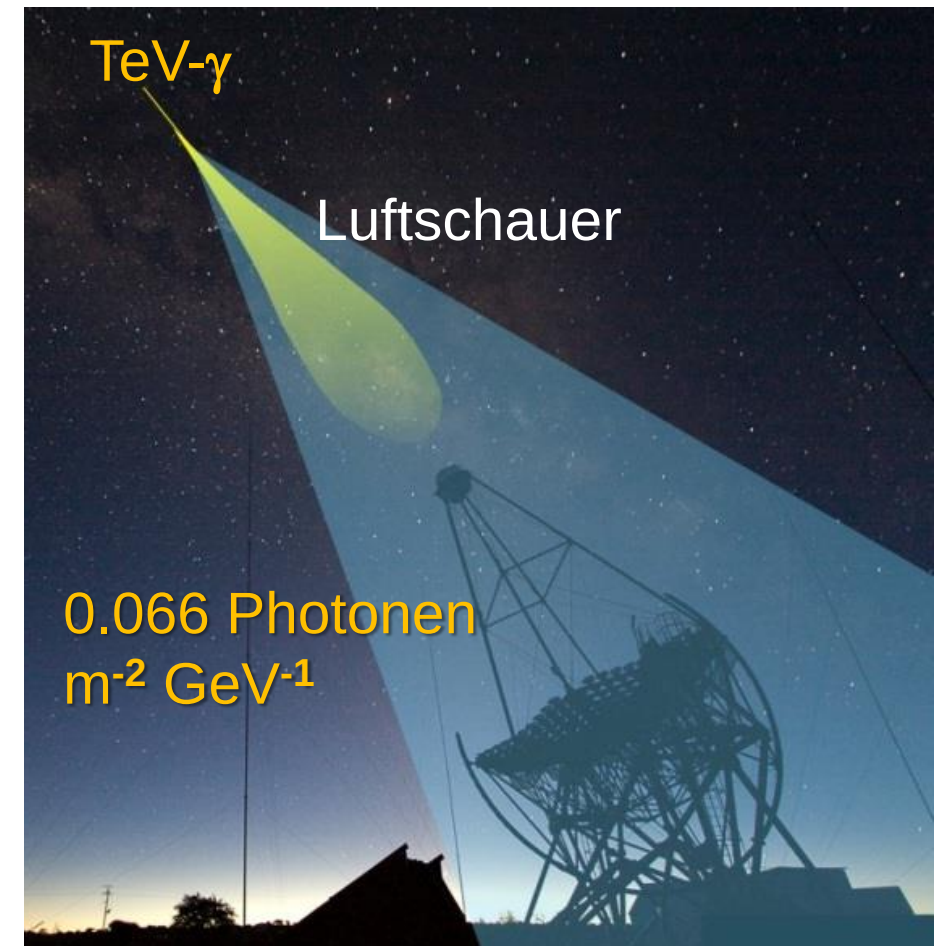
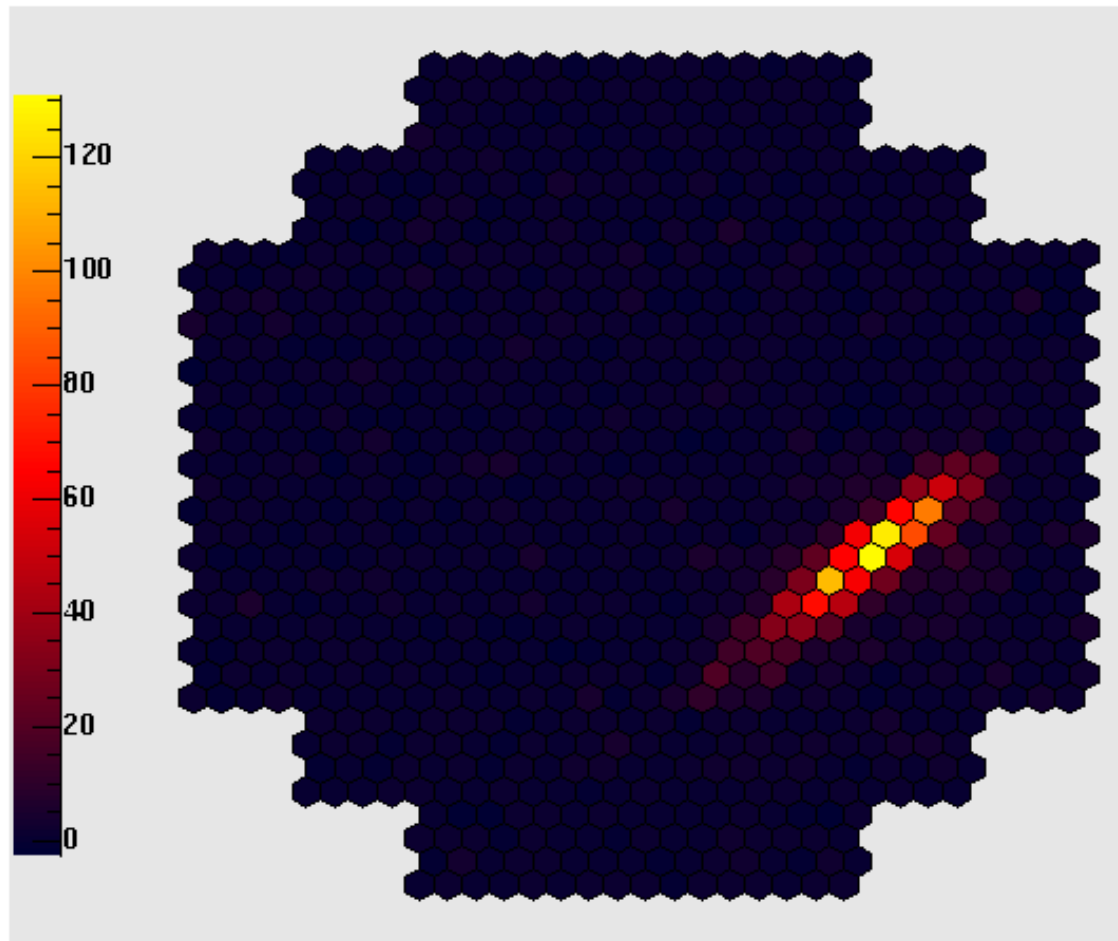
- enge Bündelung in Kegel mit **Öffnungswinkel $\theta \sim 1^\circ$**

$$\cos \Theta = 1 / (n \cdot \beta)$$

- Auftreff-Fläche $\sim 10^5$ m²

■ Schauerprozesse von TeV Gammas:

- **Kaskadenprozess:** $\gamma \rightarrow e^+e^-$ (Paarbildung) $\rightarrow \gamma$ (Bremsstrahlung) $\rightarrow \dots$
- relativistische e^+e^- emittieren Cherenkovphotonen in engem Kegel ($\sim 1^\circ$)



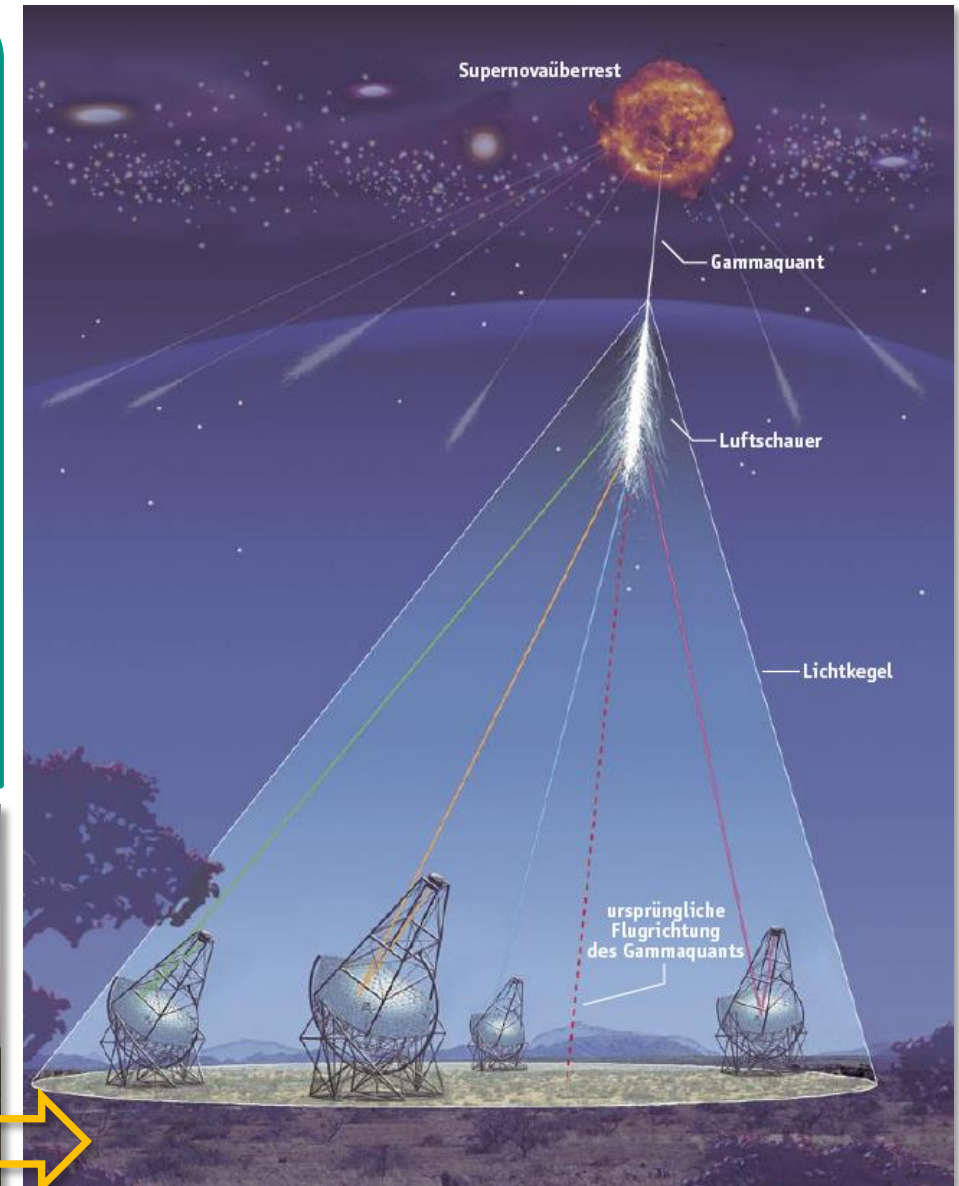
- lichtschwache Cherenkov-Signale: 1 TeV Gamma erzeugt ~ 100 Photonen/m²

experimentelle Herausforderungen

- geringe γ -Flüsse bei TeV-Energien
- **Trennung der Gammas von geladenen CR-Teilchen**: Lateralverteilung, Pulsdauer (p, He, Fe: diffusere Verteilungen)

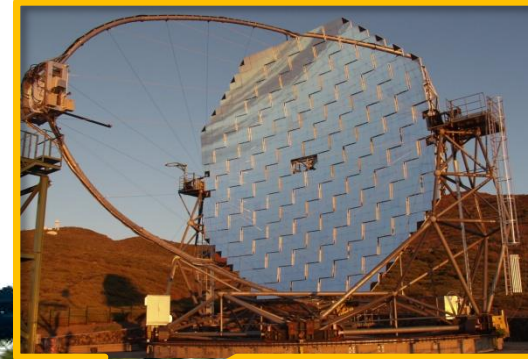
Observable in einem IACT:

- Bildintensität: Schauerenergie
- Bildorientierung: Schauerrichtung
- Bildprofil: Primärteilchen



TeV – Gamma-Observatorien

Veritas



MAGIC

Milagro



H.E.S.S.



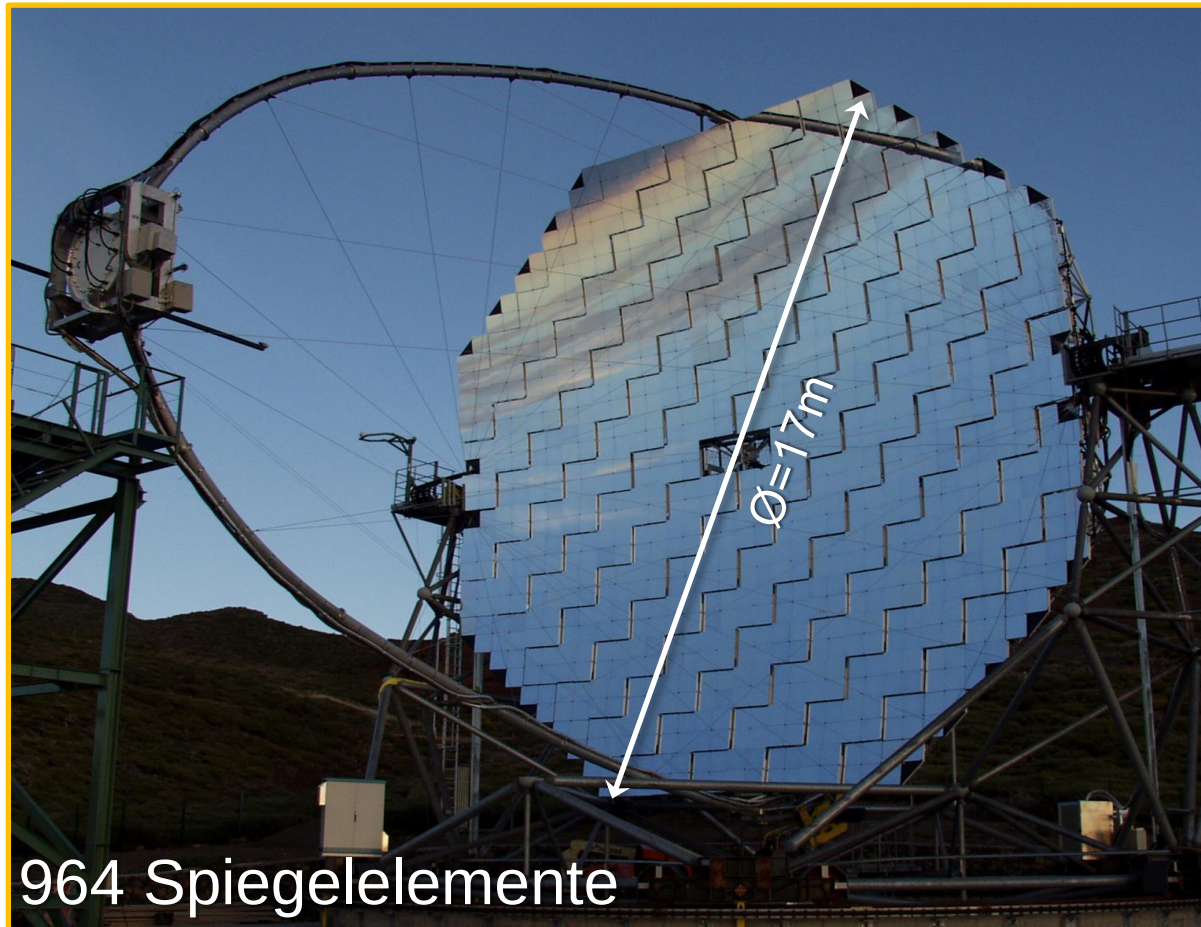
CANGAROO III



MAGIC Teleskope auf La Palma

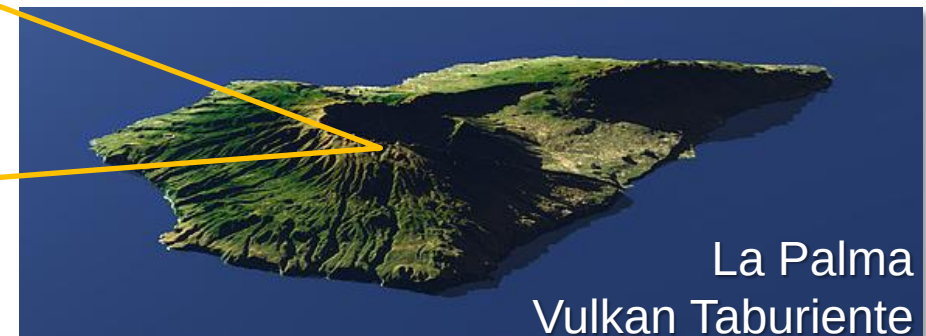
■ Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Teleskop

- IACT auf La Palma (Kanarische Inseln) mit 2 Spiegeln (seit 2009)
parabolischer Spiegel mit $\varnothing = 17\text{ m}$, $A = 236\text{ m}^2$, Gesichtsfeld: 3.6°



■ $E = 30\text{ GeV} - 50\text{ TeV}$

- Winkelauflösung $\delta\theta = 0.1^\circ$
- Leichtbauweise (64 t):
Kohlefaserstoffe zum
schnellen Positionieren
z.B. bei GRB's ($< 50\text{ s}$)
Auslese: 576 PMTs



MAGIC Teleskope auf La Palma

■ Major Atmospheric Gamma Imaging Cherenkov Teleskop

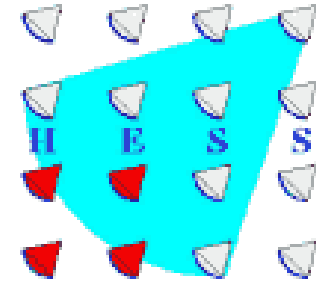
- IACT auf La Palma (Kanarische Inseln) mit 2 Spiegeln (seit 2009)
parabolischer Spiegel mit $\varnothing = 17 \text{ m}$, $A = 236 \text{ m}^2$, Gesichtsfeld: 3.6°



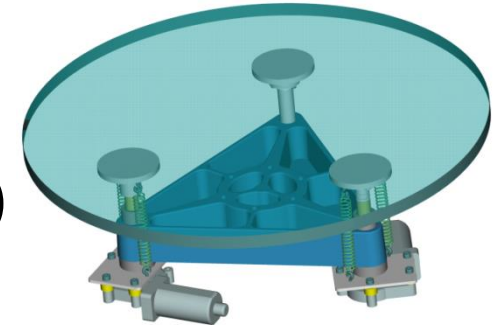
■ High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.)

Ort: Khomas-Hochland (Gamsberg), Namibia, seit 12/2003

- 4 Teleskope mit $\varnothing = 13$ m (Einzelspiegelfläche $A = 107$ m²)
- 382 aluminisierte Glas-Spiegel ($\varnothing = 60$ cm), μ m-Justierung



- Fokallänge 15 m, große Fokalebene
- Auslese: 960 PMTs (5° großes Gesichtsfeld)
- Energieschwelle 100 GeV (~ 1000 Cherenkov-Photonen)
- Winkelauflösung für Einzelschauer $< 0.1^\circ$



Fortschritte in Sensitivität & Energieschwelle



Whipple 1989
(Entdeckung): **50 h**

HEGRA 1997:
10 min

Messzeit für signifikantes
Signal vom Krebs-Nebel

γ -Fluss Einheit

TeV Gammas $E_\gamma > 1 \text{ TeV}$:

1 Crab =
 $\sim 1 \text{ Ereignis}/10^3 \text{ m}^2 \text{ h}$

5 Teleskope, je 8.5 m^2 Fläche



H.E.S.S. 2004:
30 sec



Crab:
leuchtkräftigste galakt. γ -Quelle

4 Teleskope, je $\varnothing = 12 \text{ m}$

