

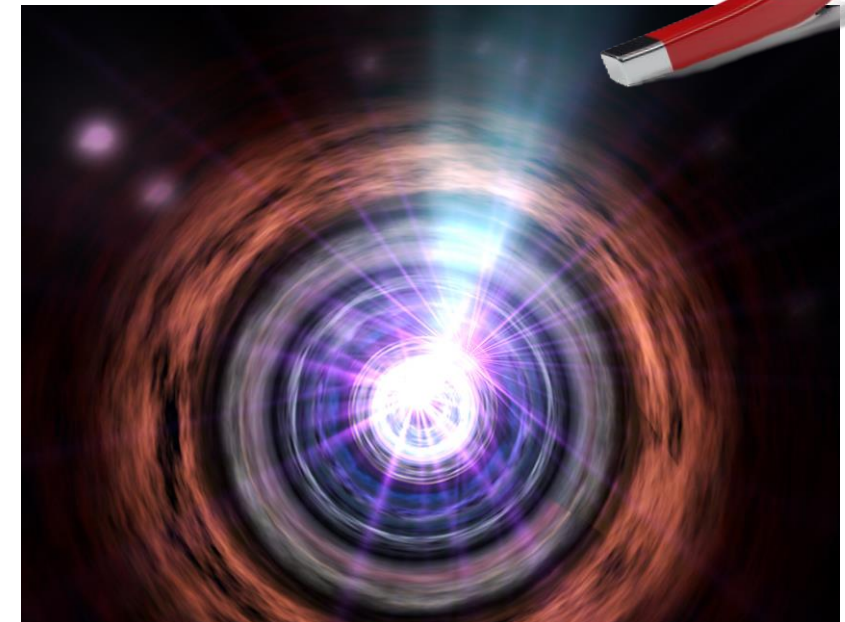
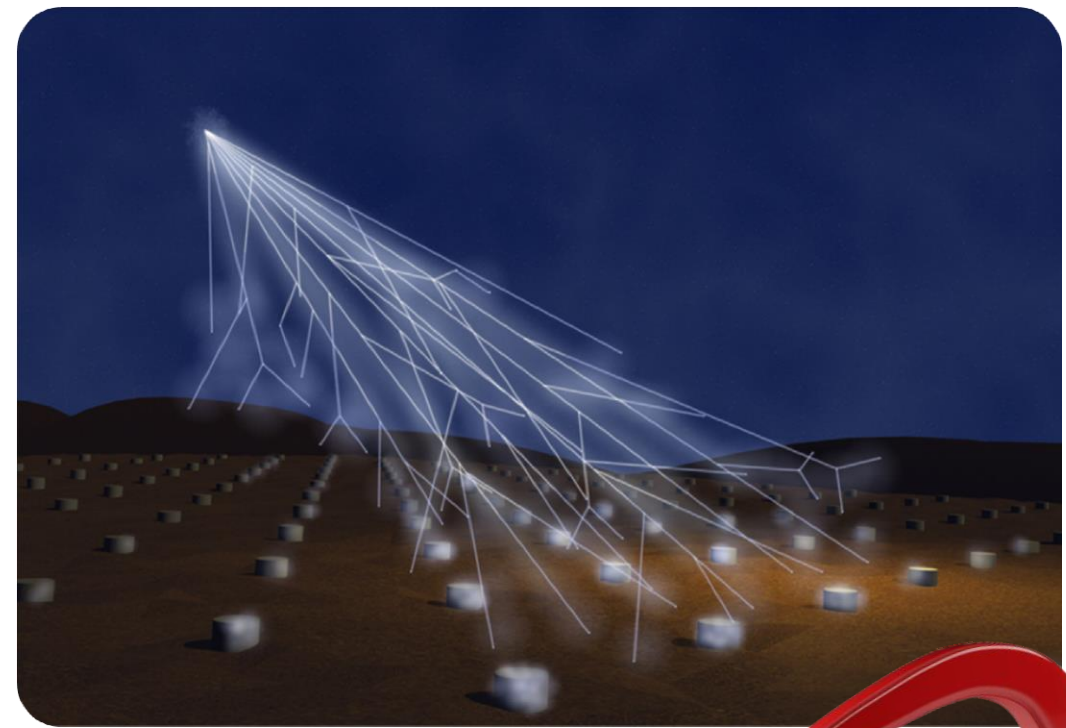
Astroteilchenphysik – I

Wintersemester 2013/14
Vorlesung # 05, 21.11.2011

Guido Drexlin, Institut für Experimentelle Kernphysik

Experimentelle Techniken

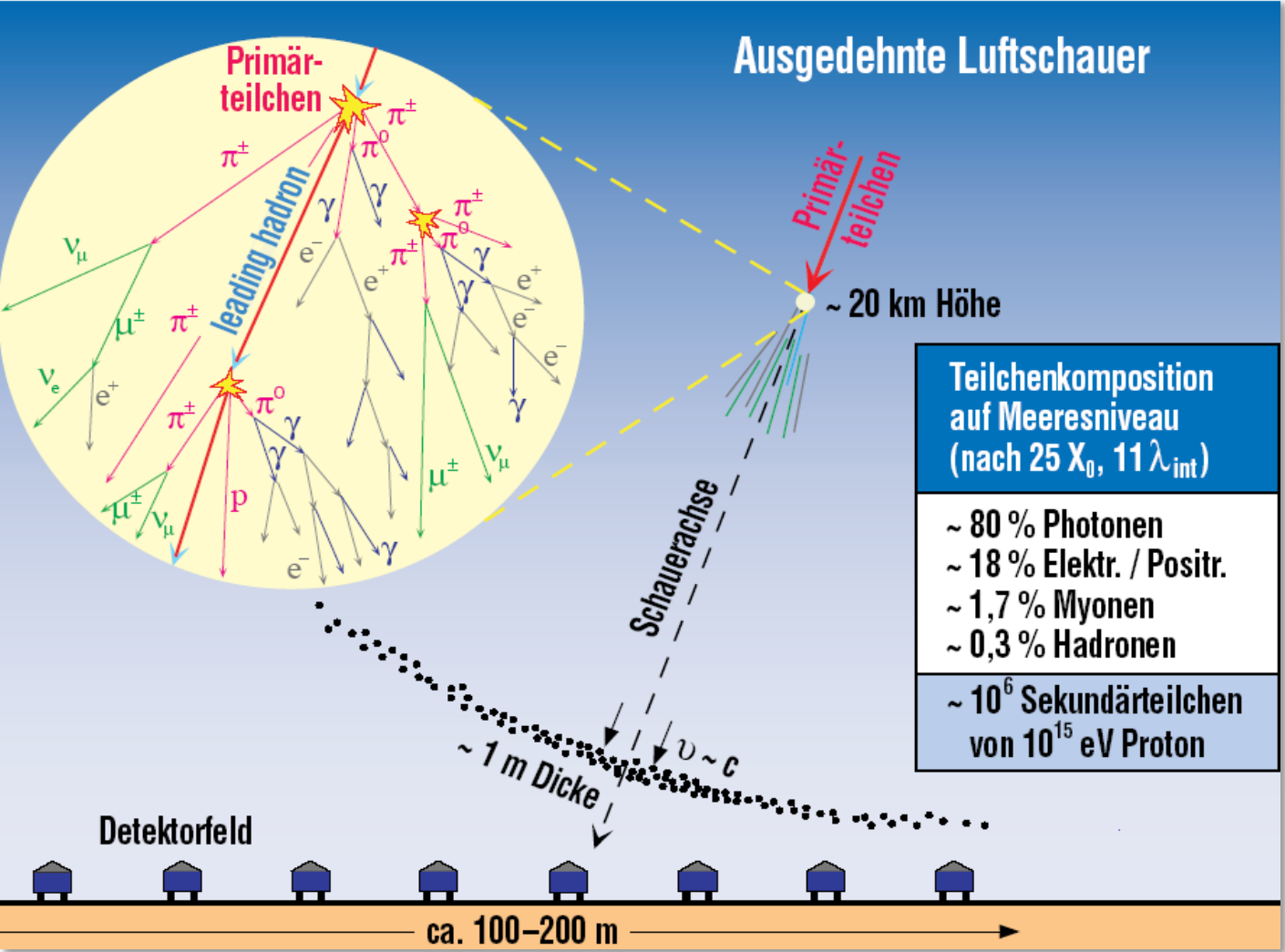
- CR Quellen & Propagation
- Isotropie
- das „Knie“
- Beschleunigungs-
mechanismus: Fermi
& Hillas Diagramm



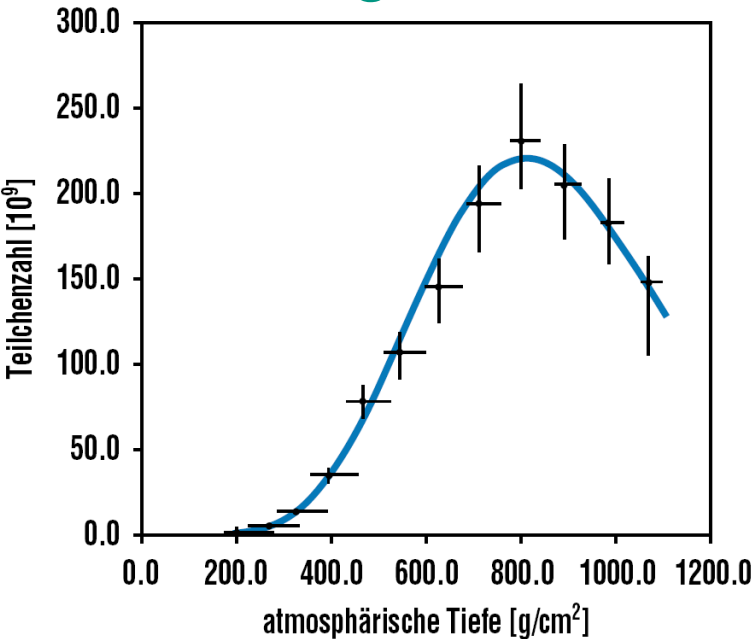
Luftschauer – Prozesse & Reaktionen



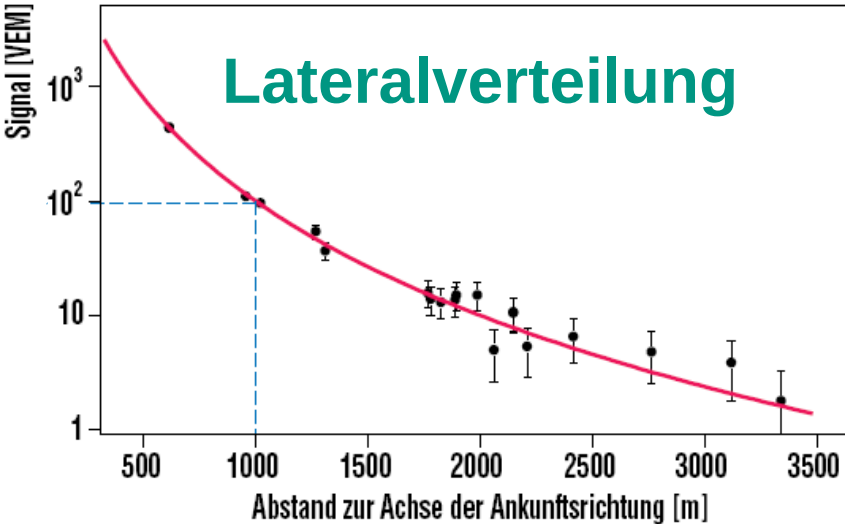
- Erdatmosphäre: **Kalorimeter** für Primärteilchen
Schauer bildet Pfannkuchen-artige Struktur



Longitudinalverteilung

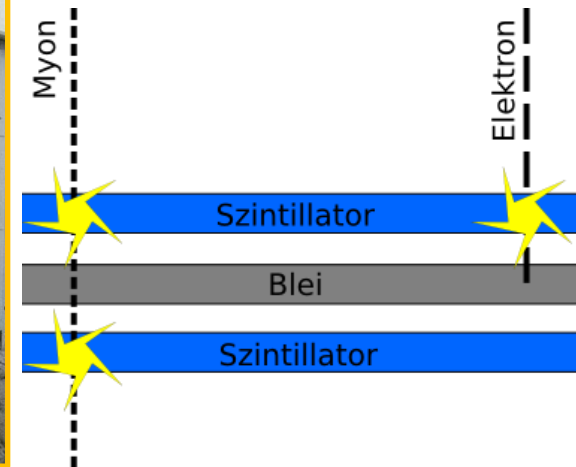
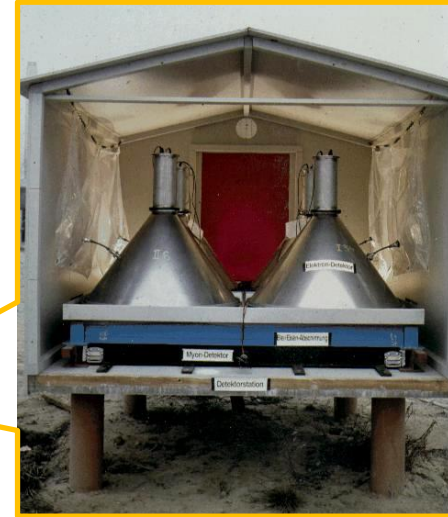


Lateralverteilung



Luftschauer – Nachweis

■ KASCADE - KARlsruhe Shower Core and Array DETector



■ Myonzahl N_μ und Elektronenzahl N_e : Messung über 2 Szintillatorschichten, getrennt durch Pb-Abschirmung

- ↳ **Energie**-Indikator, dazu Integration über Lateralverteilung
- ↳ Verhältnis N_e/N_μ : Schätzung der **Masse** des Primärteilchens

- leichte Kerne (**p**) wechselwirken tiefer in Atmosphäre ↳ N_e/N_μ **groß**
- schwere Kerne (**^{56}Fe**) wechselwirken früher ↳ N_e/N_μ **klein**

■ Chemische Zusammensetzung der kosm. Strahlung ändert sich

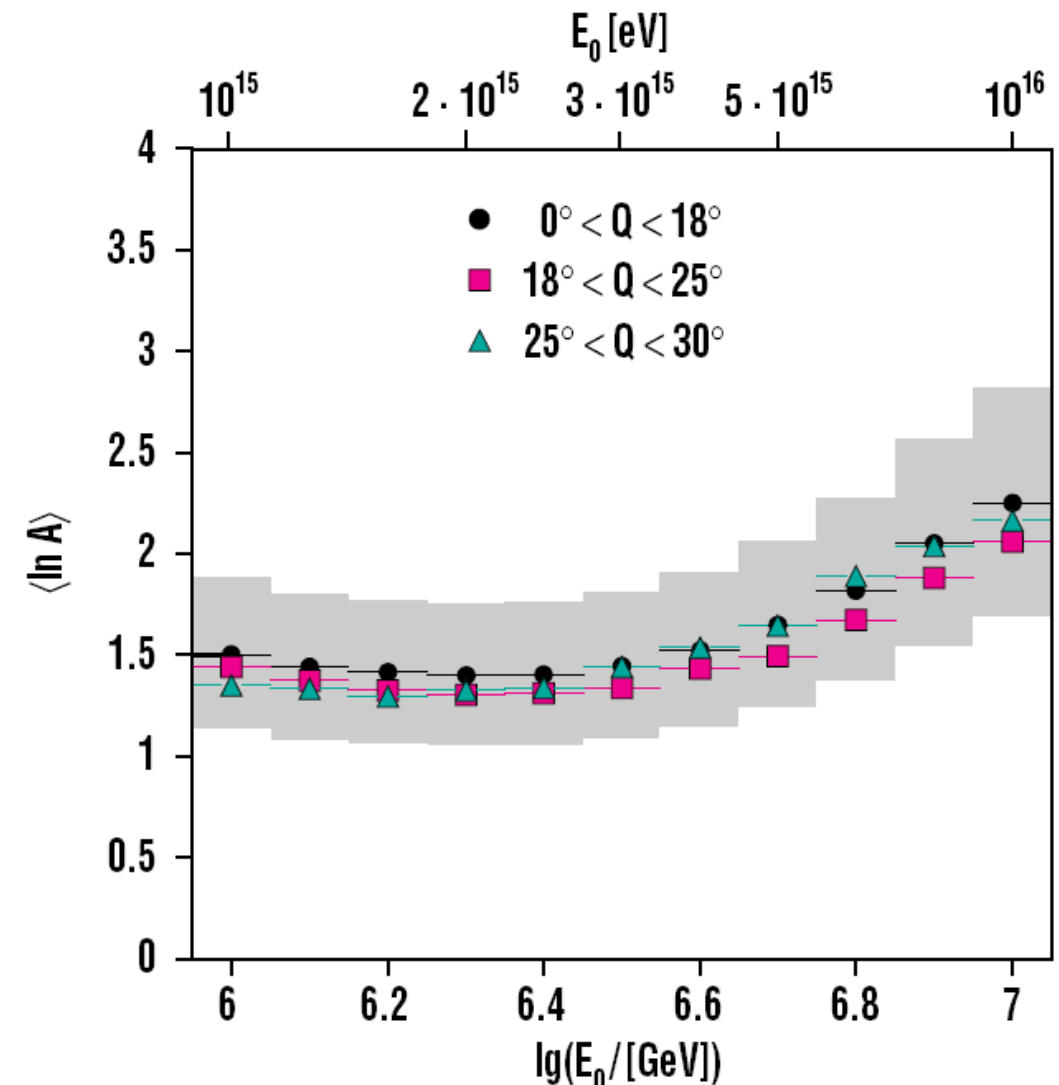
- bei Energien von $3\text{--}4 \cdot 10^{15}$ eV werden die primären CRs „schwerer“

- mittlere Massenzahl $\langle A \rangle$ nimmt mit wachsender Energie E_0 eines Schauers zu

- Fragestellungen aus diesem experimentellen Befund:

a) erreicht Quelle für leichte Teilchen das Ende ihres Beschleunigungsvermögens?

b) wie beeinflusst die Teilchenpropagation die Massenzusammensetzung?

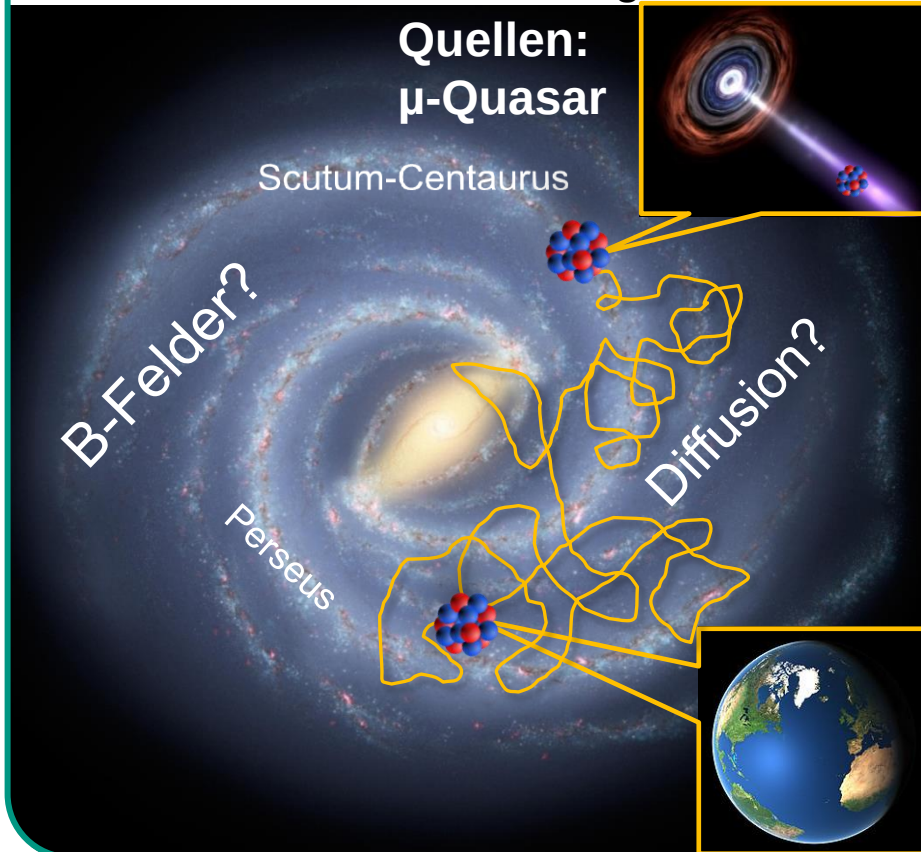


Propagation der kosmischen Strahlung

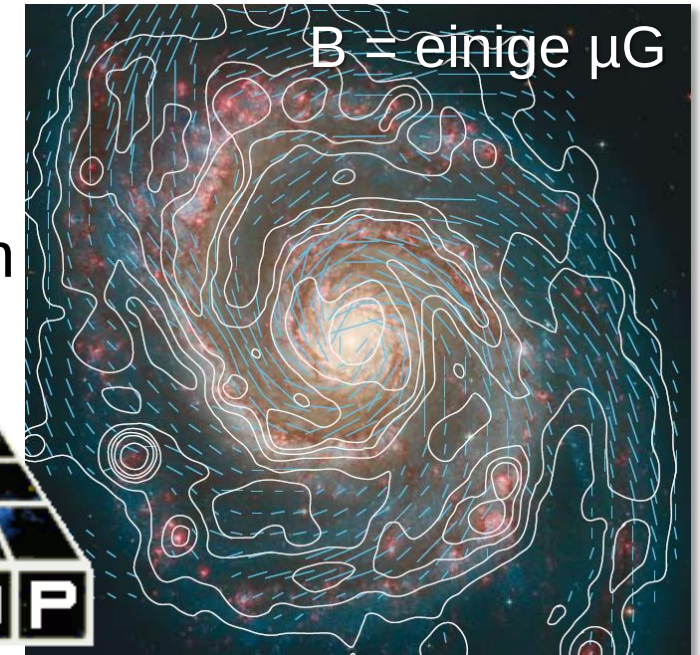
- Beeinflussung der **CR-Parameter Energie/Masse** durch Propagation

CR-Propagation in Galaxis

- geladene kosm. Strahlung beeinflusst durch $B_{\text{galaktisch}}$



- detaillierte Modellierung der Propagation



- GALPROP-Code zum Teilchentransport von Quelle bis zum Nachweis (Diffusion):
 - Modellierung der Magnetfelder
 - Modellierung von Energieverlusten: Synchrotronemission, inverser Compton

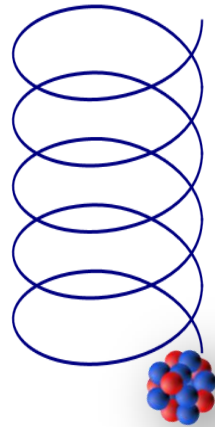
kosmische Strahlung – Propagation

- geladene Teilchen werden durch das galaktische Magnetfeld (einige μG) geführt)

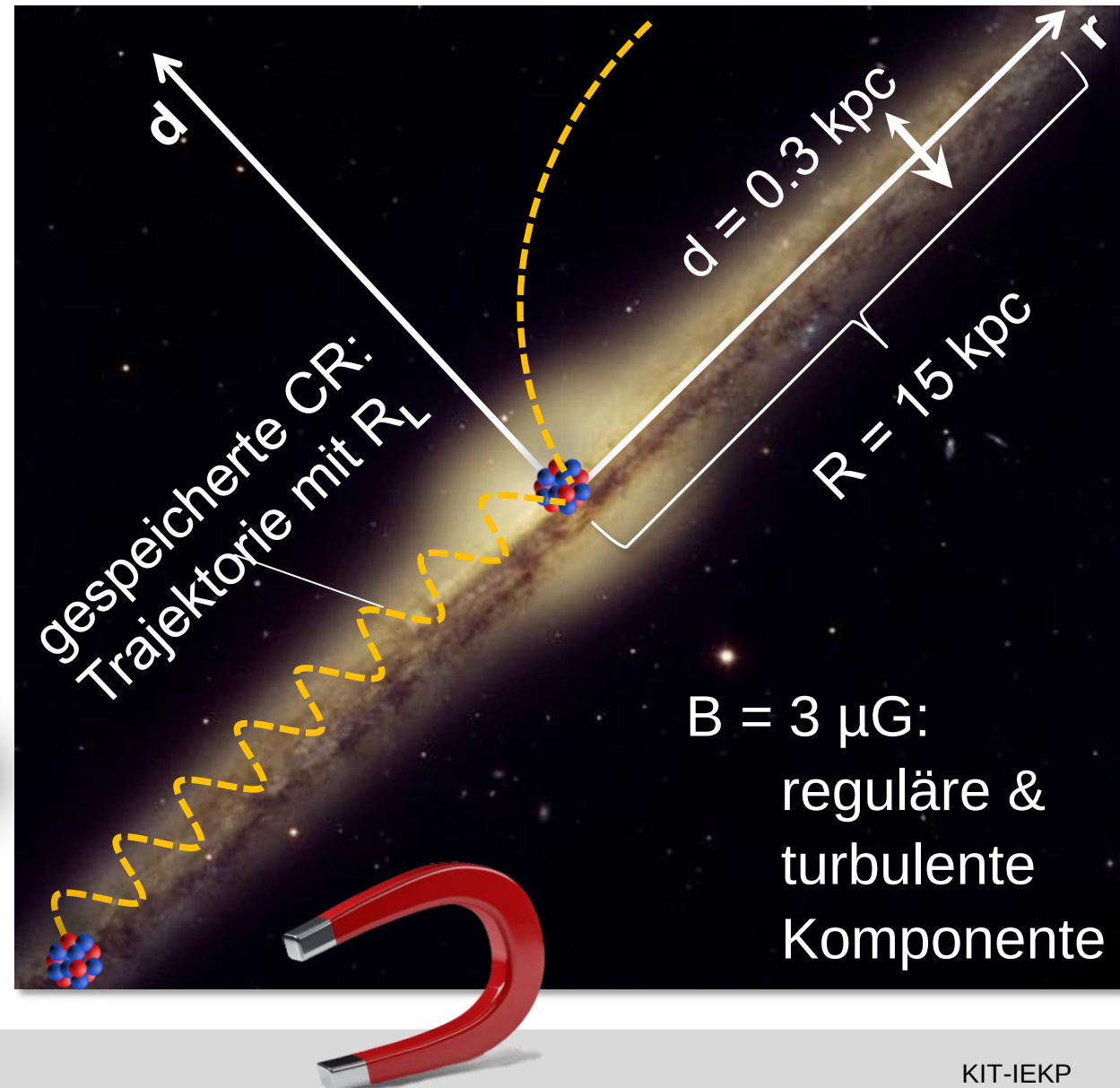
Larmor-Radius R_L :

$$R_L \cong 1 \text{ pc} \cdot \left(\frac{E}{10^{15} \text{ eV}} \right) \cdot \left(\frac{\mu\text{G}}{Z \cdot B} \right)$$

- Diffusionsprozess („leaky box“-Modell)
- Speicherzeiten der CR in Galaxis:
 $\sim \tau \sim 3\text{-}10 \cdot 10^6 \text{ Jahre}$
- Energiedichte der CR:
 $\sim 1 \text{ eV} / \text{cm}^3$



CR-Teilchen verlässt Galaxis



- **Energiedichte der kosmischen Strahlung** = gleiche Größenordnung wie die des galaktischen Magnetfelds und des Sternlichts

lokale Energiedichten in der Milchstraße

elektromagnetische Strahlung (Licht)	$\sim 0.6 \text{ eV/cm}^3$
galaktisches Magnetfeld $\sim B^2 / 2\mu_0$ ($3\mu\text{G}$)	$\sim 0.25 \text{ eV/cm}^3$
kosmische Hintergrundstrahlung CMB	$\sim 0.26 \text{ eV/cm}^3$
kosmische Strahlung	$\sim 1 \text{ eV/cm}^3$
lokale Materiedichte (WIMPs)	$\sim 0.3 \text{ GeV/cm}^3$



- **primäre kosmische Strahlung** ist überwiegend galaktischen Ursprungs

- Gesamt-Energie der galaktischen kosmischen Strahlung

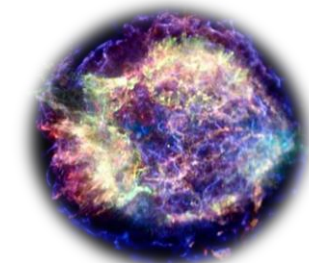
$$W_{\text{CR}} = \rho_{\text{CR}} \cdot \pi R^2 d \cdot \tau^{-1} = 2 \times 10^{41} \text{ J/Jahr}$$

$$1 \text{ J} = 10^7 \text{ erg}$$

- **Supernovae** = ideale Kandidaten der galaktischen CR

- Gesamt-Energie der SNaE der Galaxis ($\sim 3/100 \text{ a}$)

$$W_{\text{SN}} = 5 \times 10^{42} \text{ J/Jahr} \quad (\text{Effizienz für } E_{\text{kin}} \rightarrow E_{\text{CR}} : < 5\%)$$

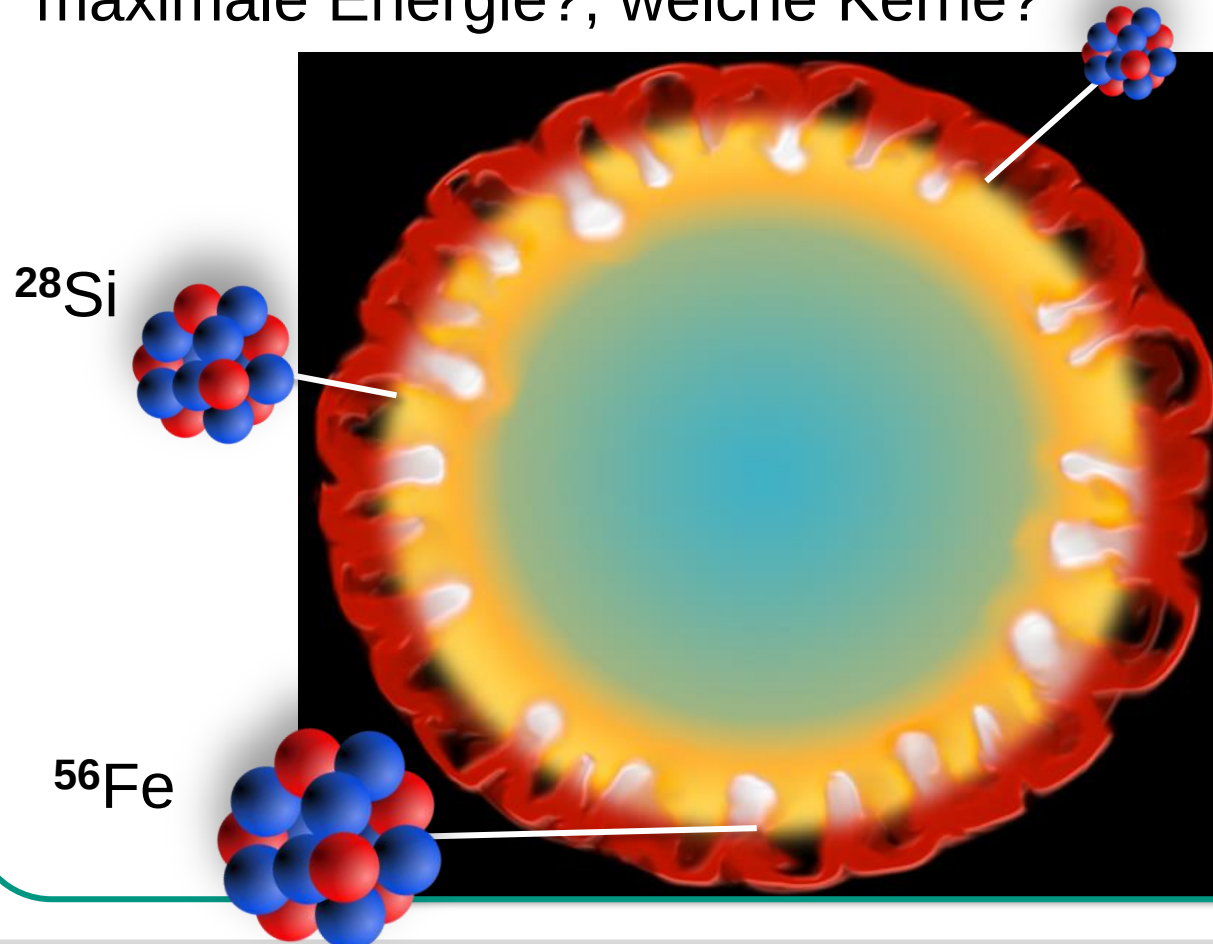


Quellen der kosmischen Strahlung

- Experimentelle Ziele seit 1912: Identifikation von galaktischen **CR-Quellen**

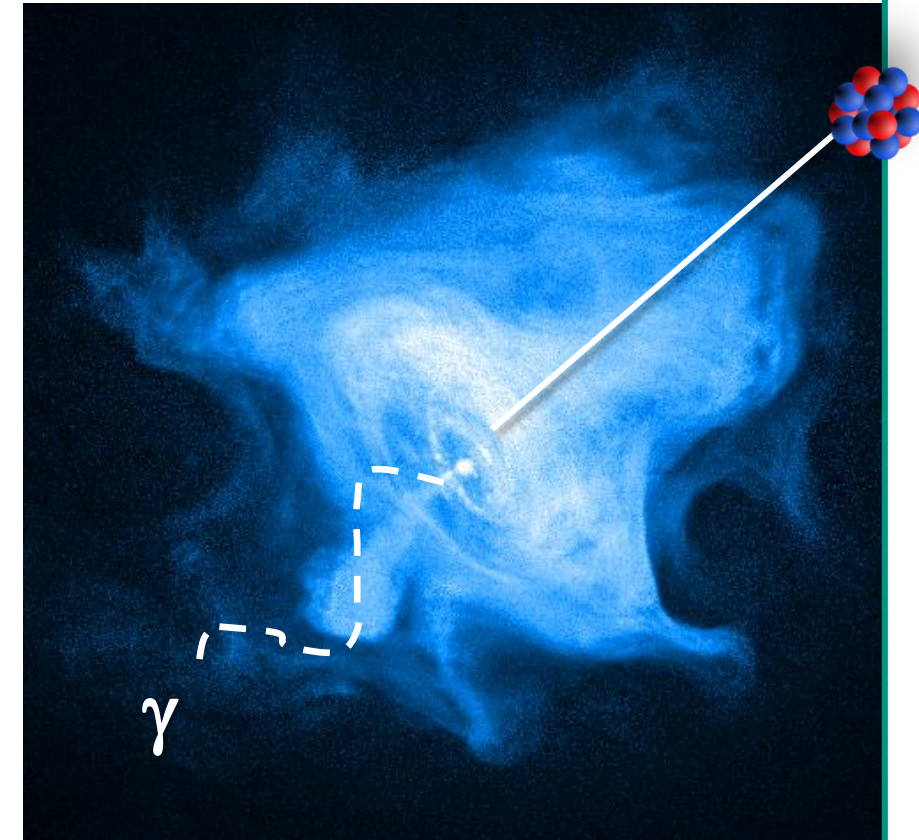
Supernova-Schockfronten

- SNR-Schocks: Energieverteilung?, maximale Energie?, welche Kerne?



Pulsare, Pulsarwindnebel

- Beschleunigungsmechanismus hadronisch, leptonisch ?



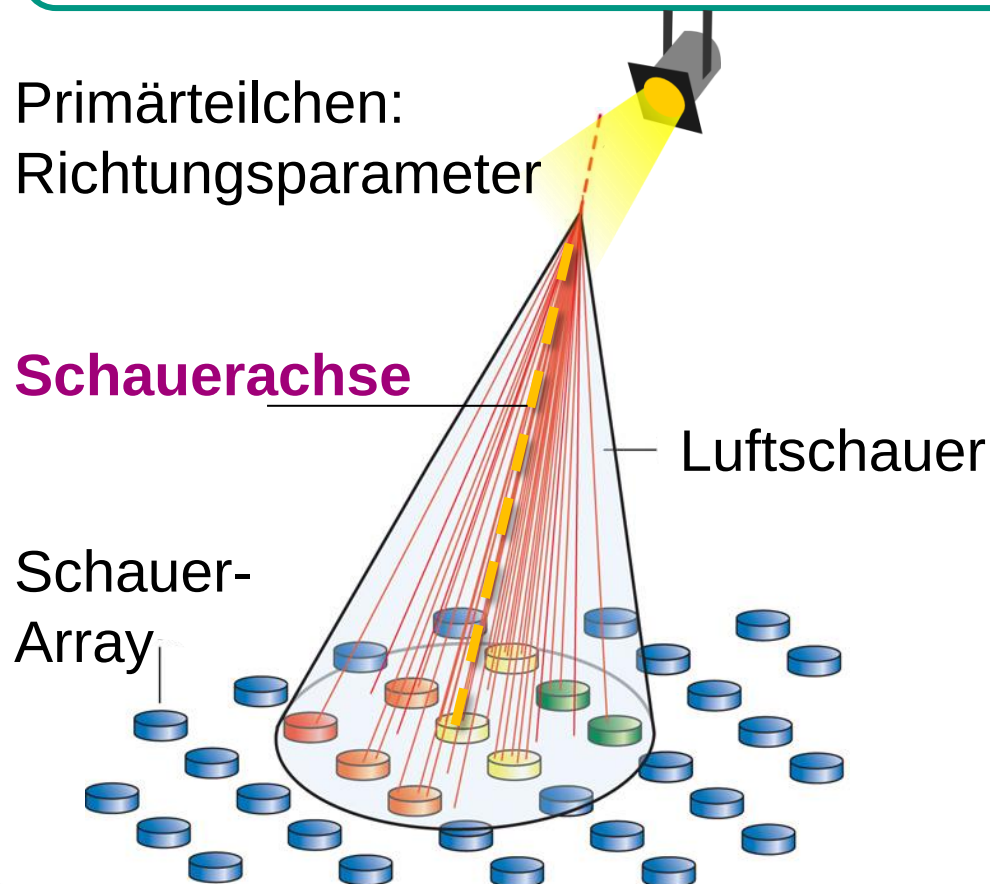
Isotropie der kosmischen Strahlung

■ Rekonstruktion der Primärrichtung aus **Schauerachse**

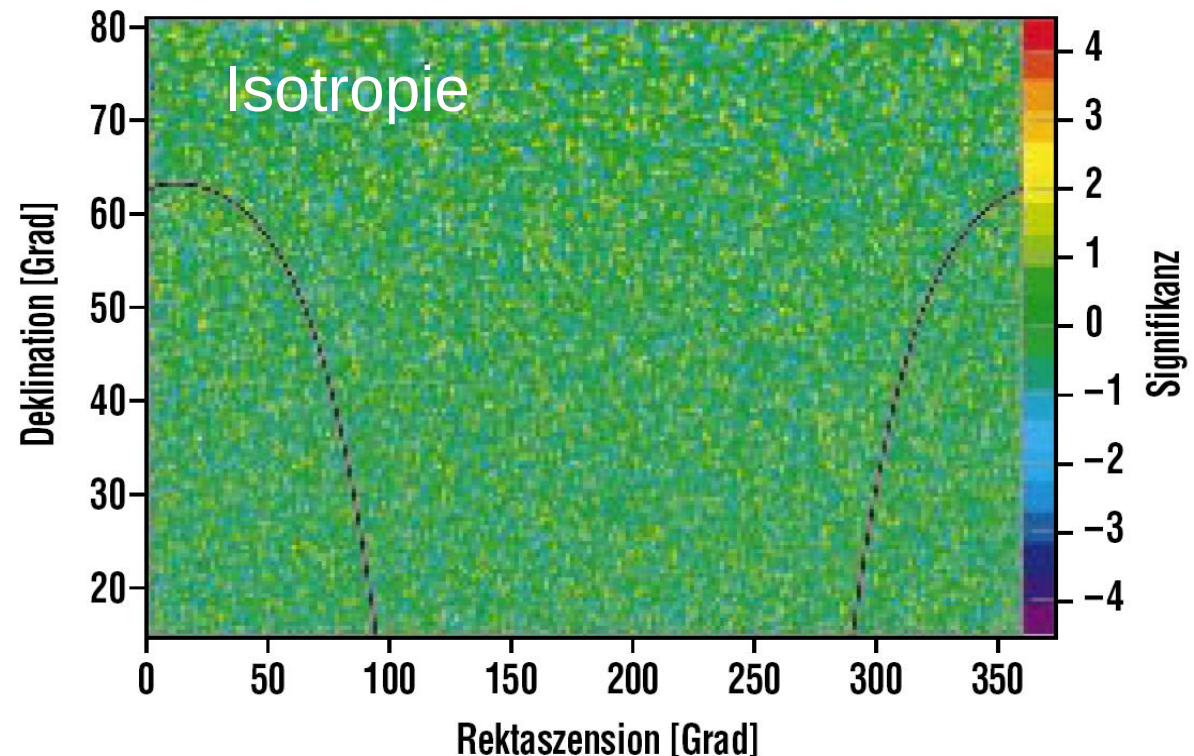
Resultate: in erster Ordnung (10^{-3}) isotrope Richtungsverteilung

↳ keine nahen Quellen

↳ keine neutralen Primärteilchen (Gammas), die zur Quelle (SNR, Pulsar) zurückzeigen



KASCADE: Richtungsverteilung der CR



Anisotropien auf der TeV – PeV Skala

- extrem schwache **räumliche Anisotropie** in den Experimenten TIBET-III (Nordhalbkugel) und IceCube-22 (Südpol)

Resultate: nicht-isotrope Richtungsverteilung mit Amplitude $A \sim 6 \cdot 10^{-4}$
↳ dominanter Dipol (aus Quellverteilung der CR + **Diffusion**)

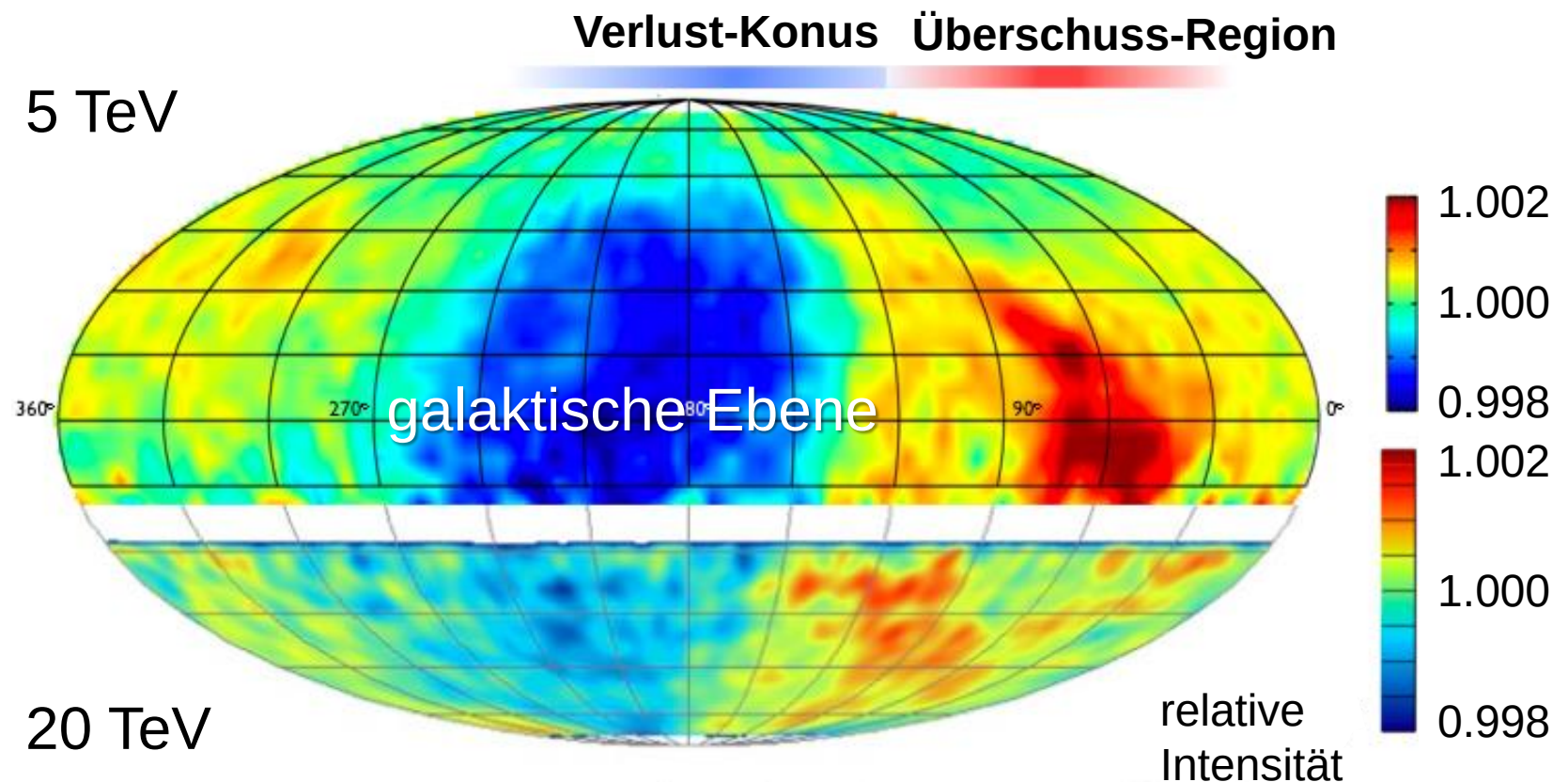
TIBET-III

5 TeV

konsistente
Daten
Nord-Süd

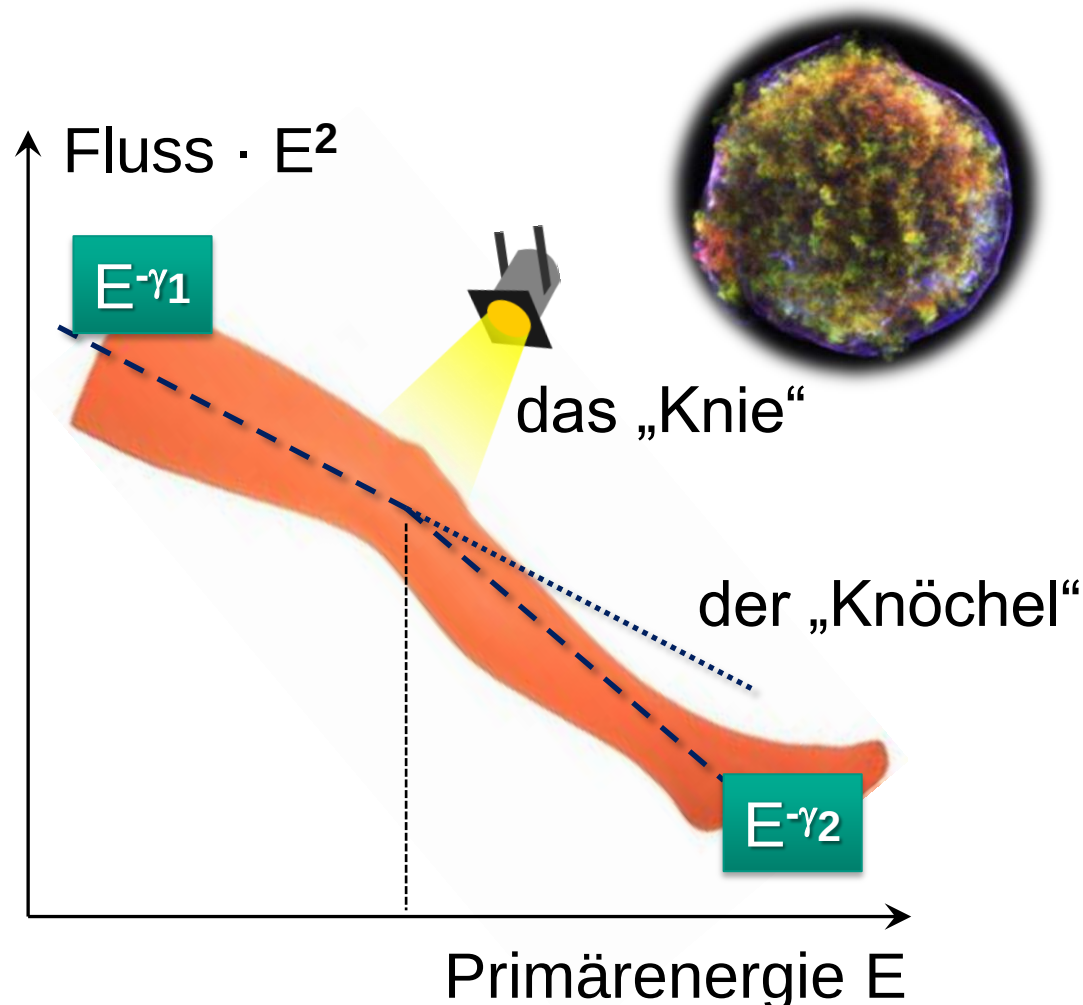
IceCube-22

20 TeV



■ Gesamtteilchenfluss & Energiespektrum

- Energiespektrum der kosmischen Strahlung zeigt ein typisches Power-Law (Potenzgesetz) - Verhalten

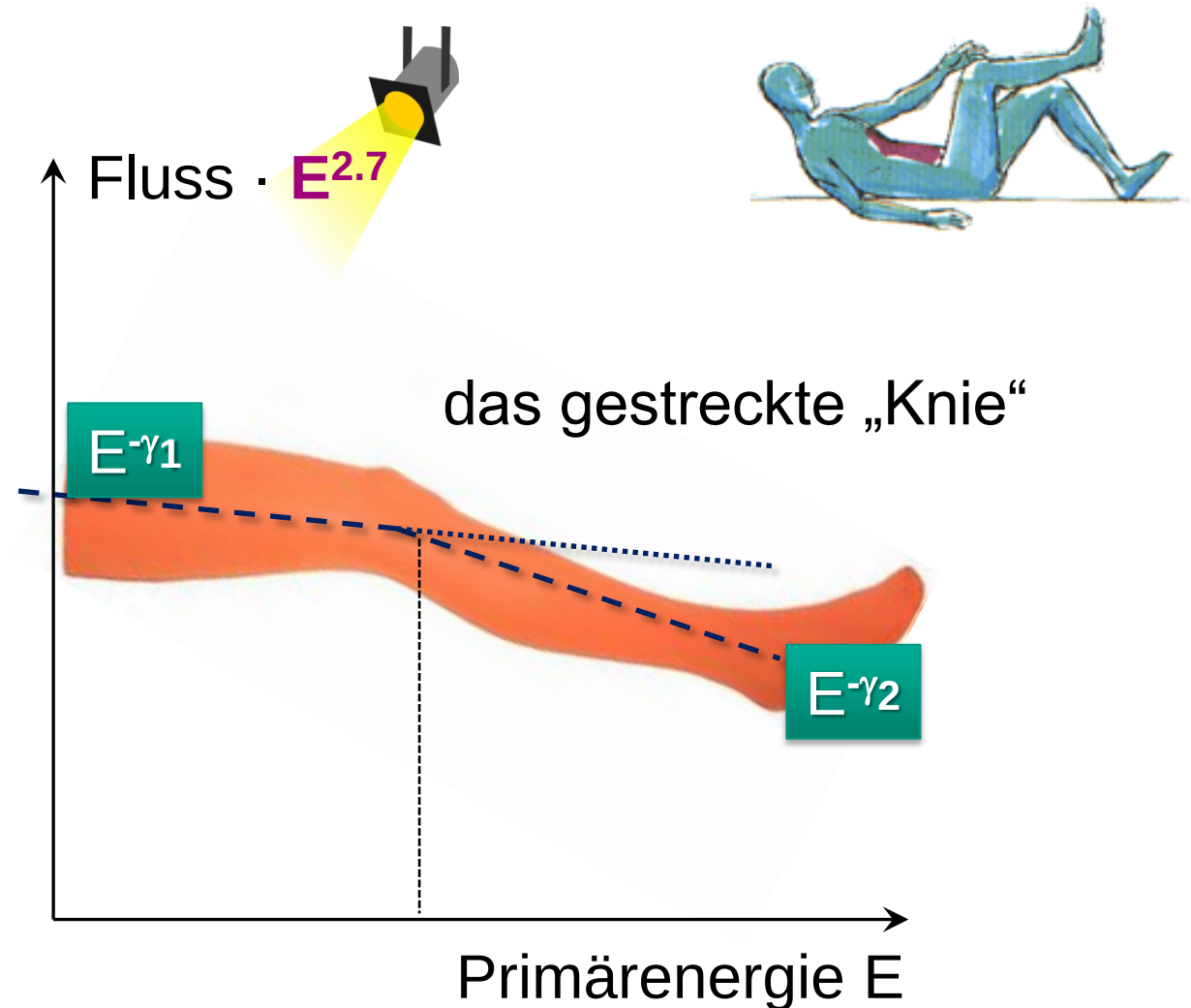
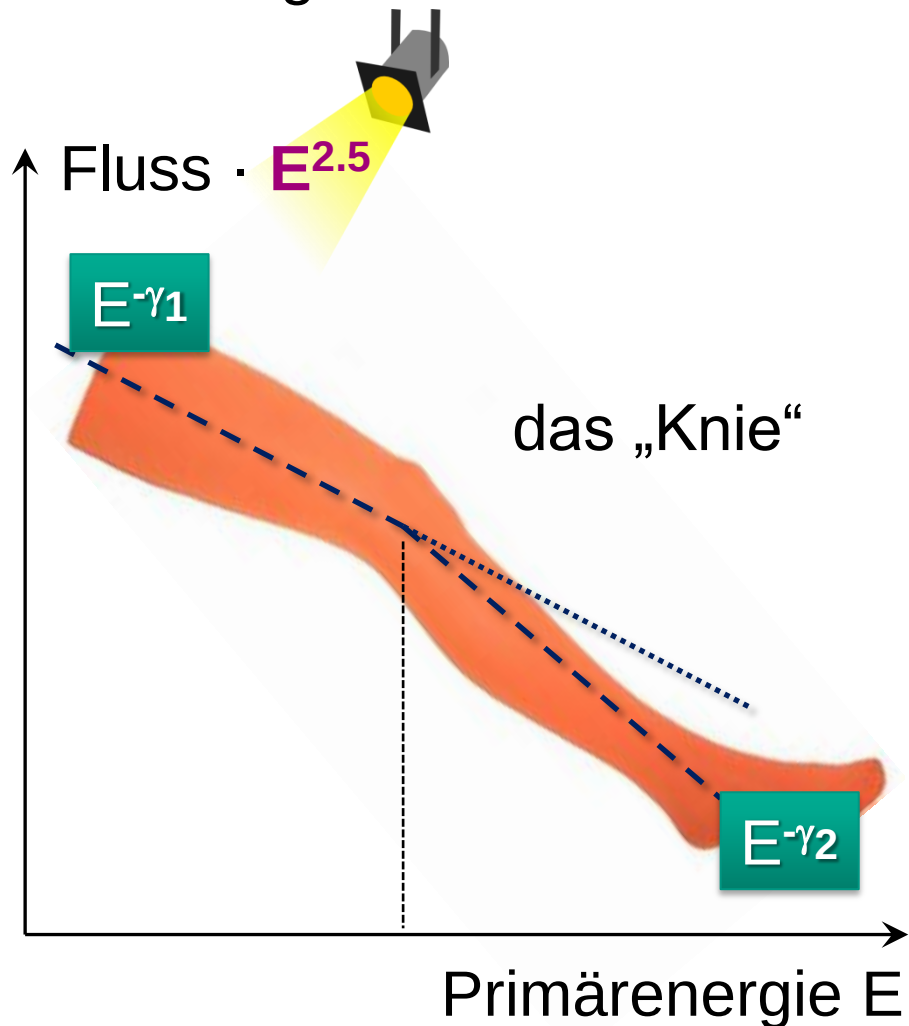


■ Änderungen im spektralen Verlauf (Knie, Knöchel) zeigen dass sich:

- die Massenzusammensetzung der CR ändert (**leicht** → **schwer**)
- die Beschleunigungsquelle ändert: **galaktisch** ⇔ **extragalaktisch**
- bestimmte Beschleunigungsmechanismen erreichen ihre maximale Energie
Beschleunigung in SN-Schocks

■ Gesamtteilchenfluss & Energiespektrum

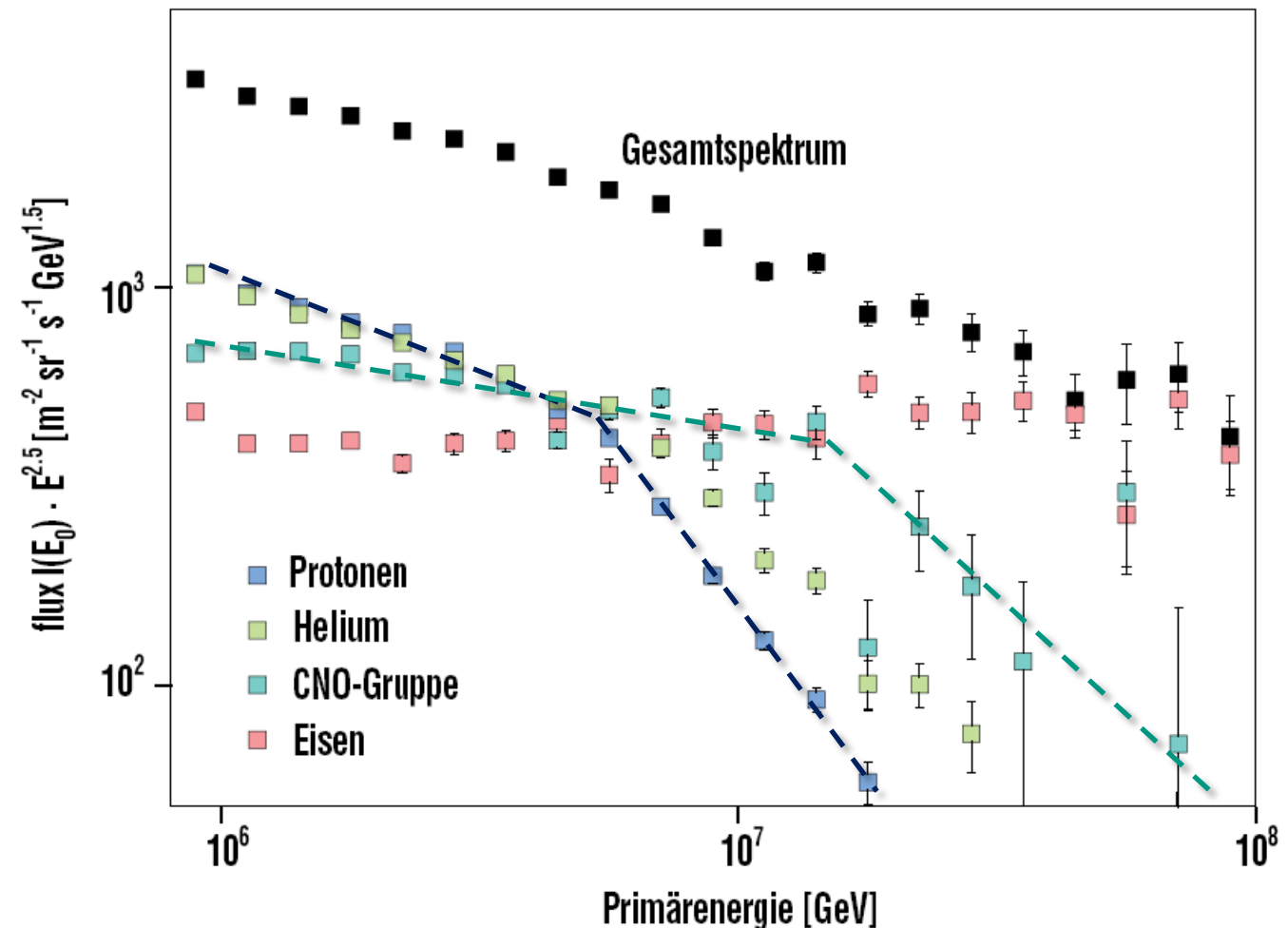
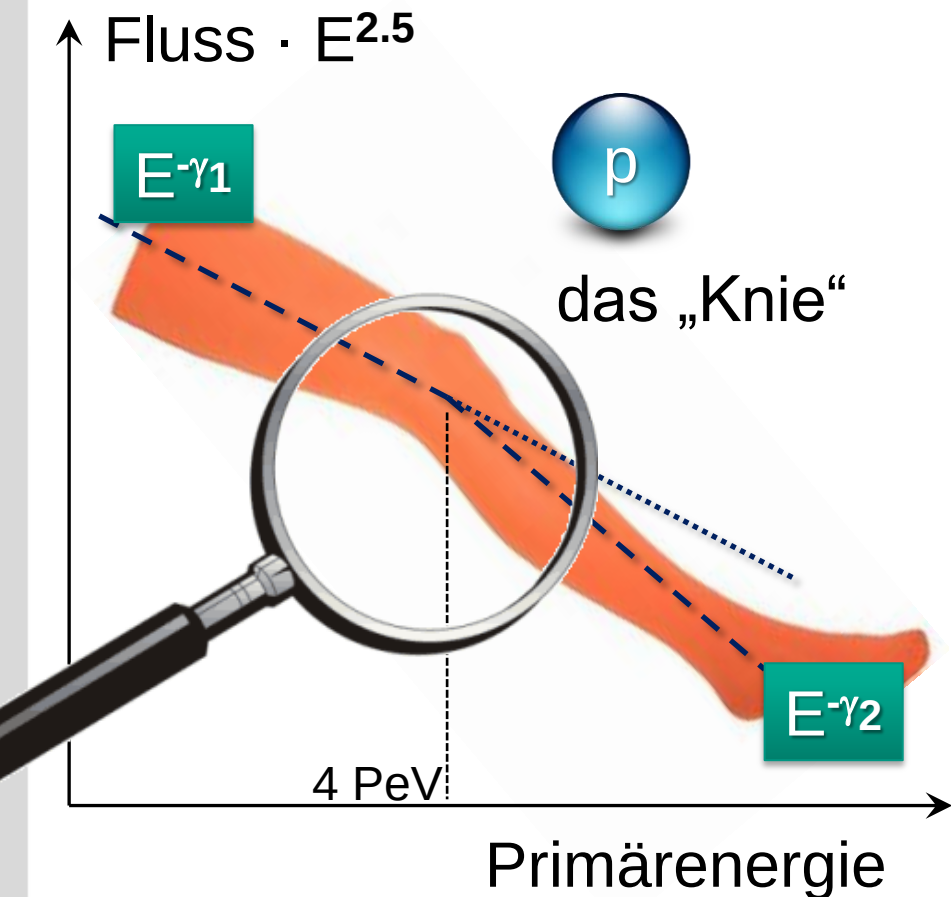
- Energiespektren werden zur besseren Darstellung oft multipliziert mit Energiefaktoren $E^{2...3}$



■ Gesamtteilchenfluss & Energiespektrum

- Änderung des spektralen Index im Power-Law Verhalten des Flusses:

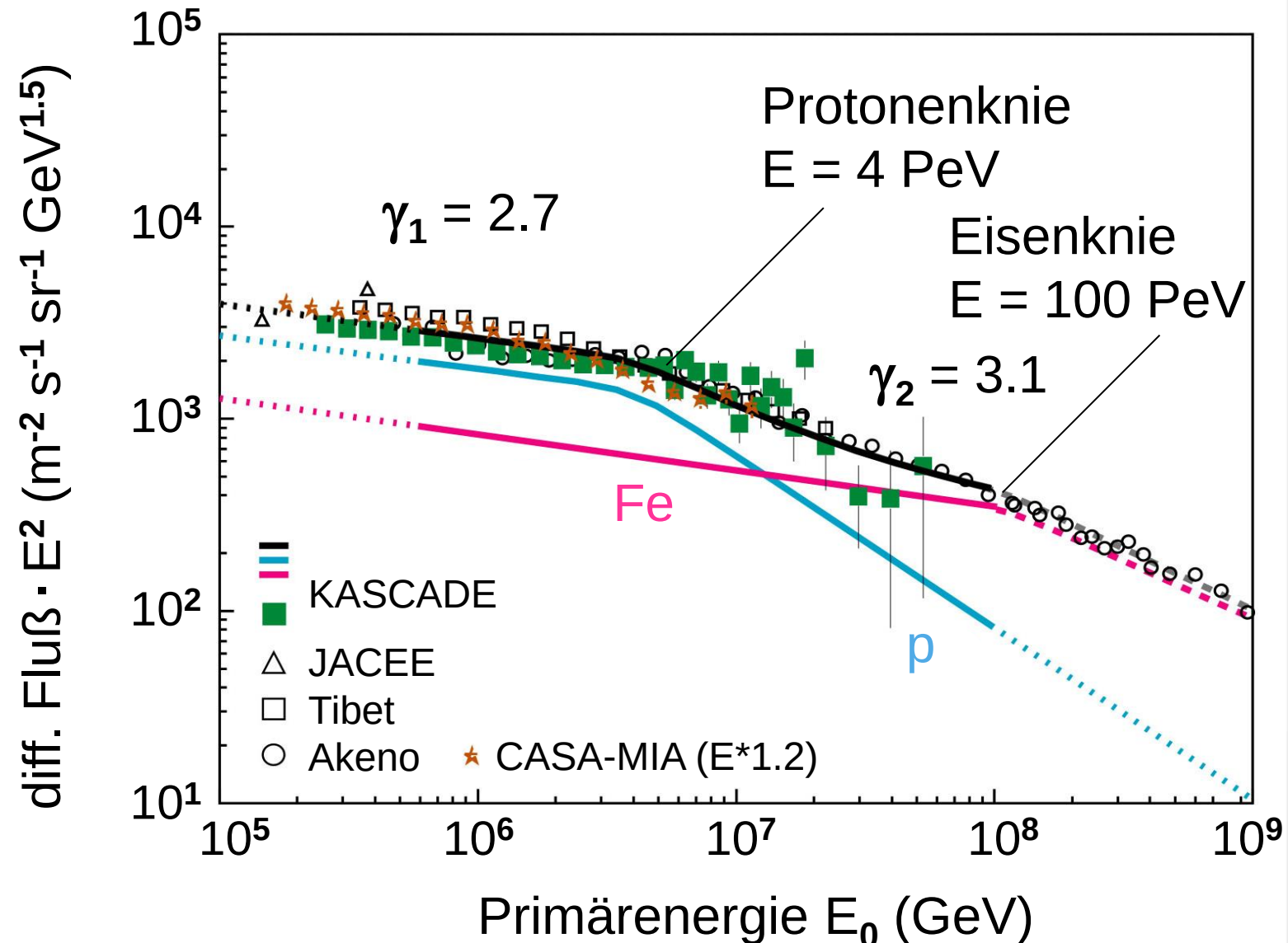
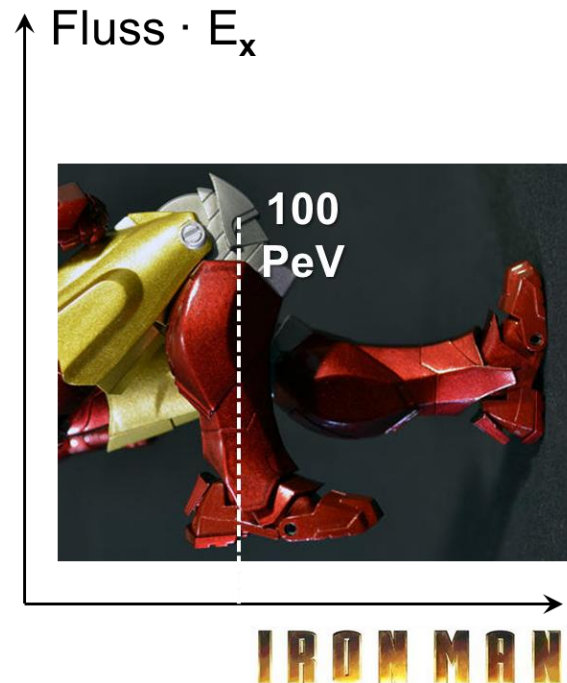
„das **Protonen-Knie**“ bei $E \sim 4 \text{ PeV}$ ($4 \cdot 10^{15} \text{ eV}$)



Energiespektren – das Eisen-Knie

■ Gesamtteilchenfluss & Energiespektrum

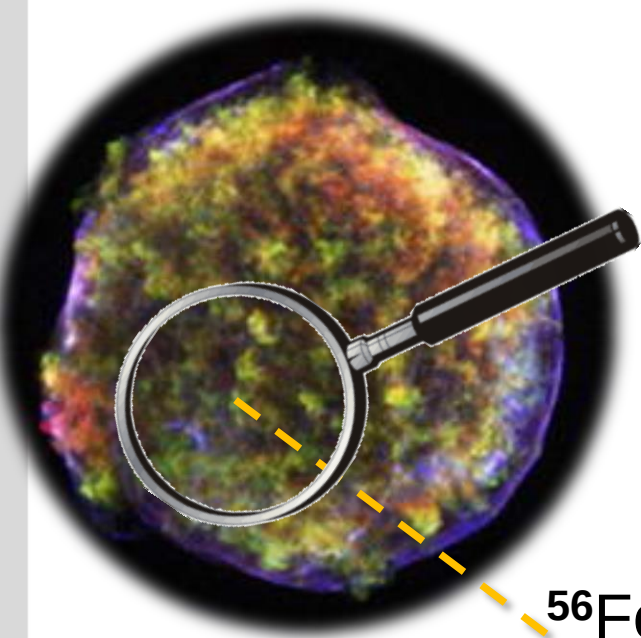
- KASCADE-Grande:
erste Beobachtung
des Eisen-Knies
bei 100 PeV



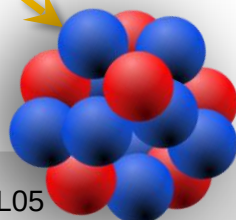
Energiespektren – das Eisen-Knie

■ Gesamtteilchenfluss & Energiespektrum

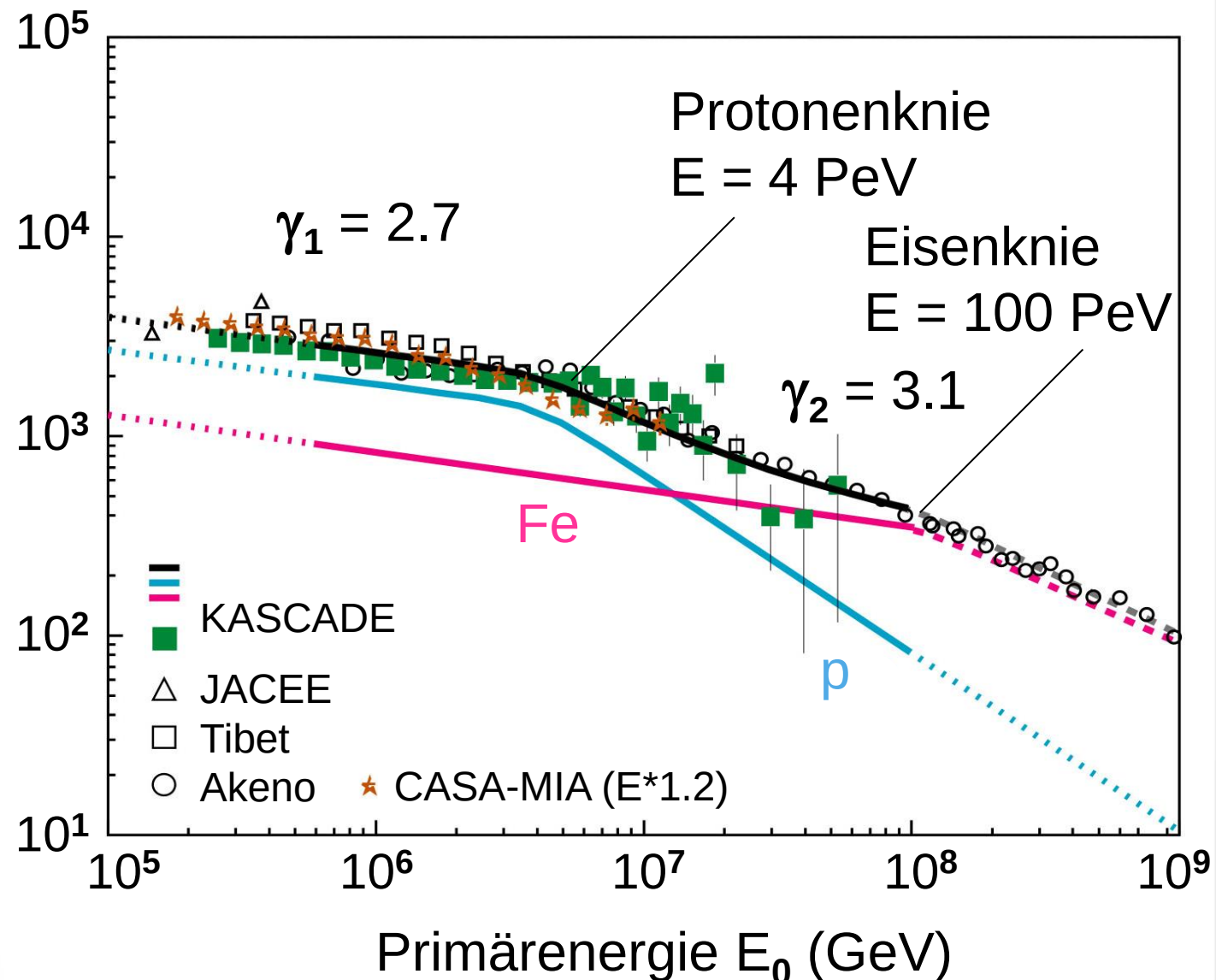
- KASCADE-Grande:
erste Beobachtung
des Eisen-Knies
bei 100 PeV



Beschleunigungs-
Mechanismus ?



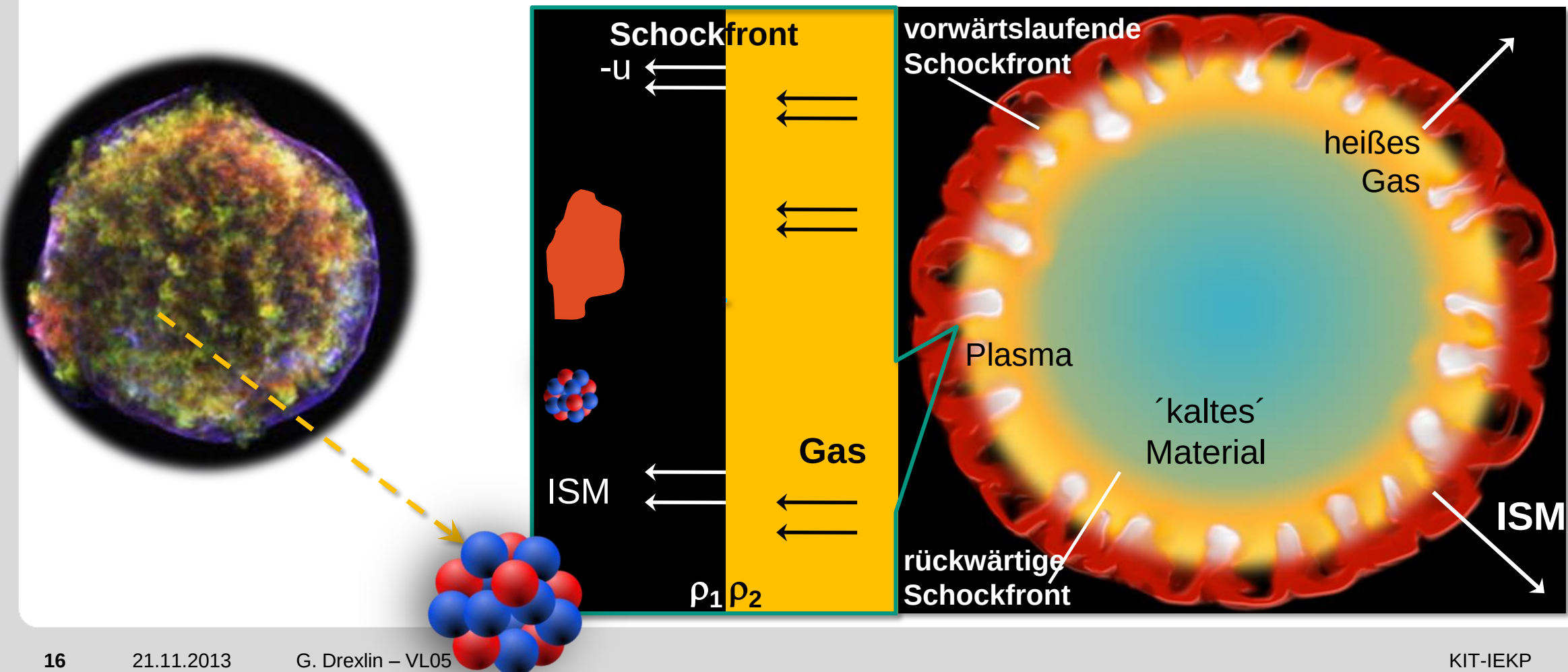
diff. Fluß · E^2 ($\text{m}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{GeV}^{1.5}$)



■ Teilchenbeschleunigung in SN-Schockfronten (Fermi-Prozess):

vereinfachtes 1-dim Szenario:

- Überschall-SN-Schockfront propagiert mit $u = \sim 10^4$ km/s durch das ruhende ISM (ρ_1)
- an der Schockfront tritt ein steiler Dichtegradient $\rho_2 \rightarrow \rho_1$ auf



Fermi-Beschleunigung in SNRs

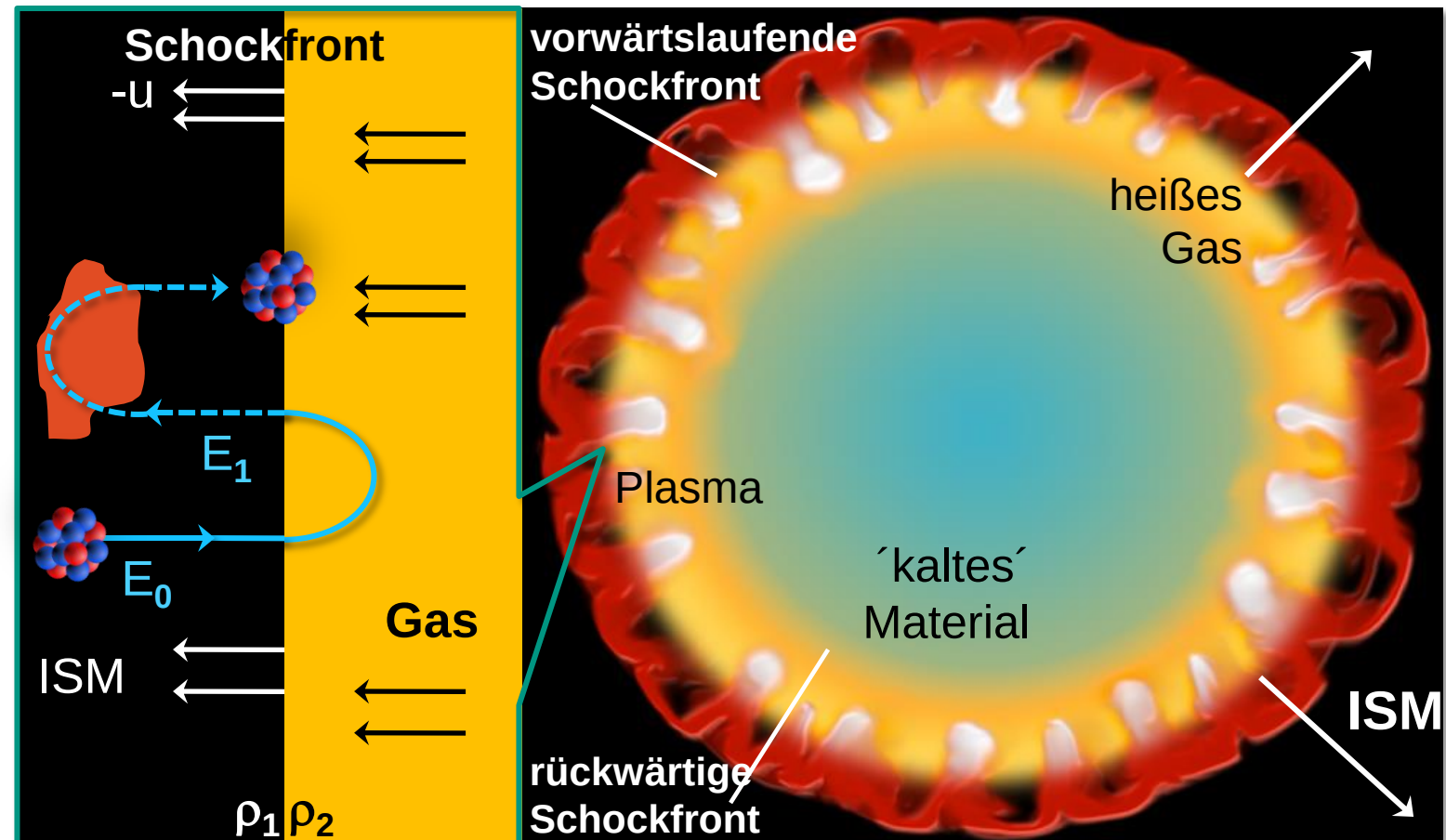
■ Beschleunigung von Teilchen mit Primärenergie E_0 :

- Teil 1: Rückstreuung im Gas nach Passieren des Dichtegradienten
- Teil 2: erneutes Passieren des Dichtegradienten (in anderer Richtung)
- Teil 3: erneute Streuung an magnetischen Wolken im ISM

- Teilchen kann die SN-Schockfront mehrere Male durchlaufen

- **Energiegewinn ΔE** pro Beschleunigungszyklus (richtungsunabhängig):

$$\frac{\Delta E}{E} = \frac{u}{c}$$



Fermi-Beschleunigung in SNRs

■ Entstehung von Power-Law Spektrum aus Primärenergie E_0 :

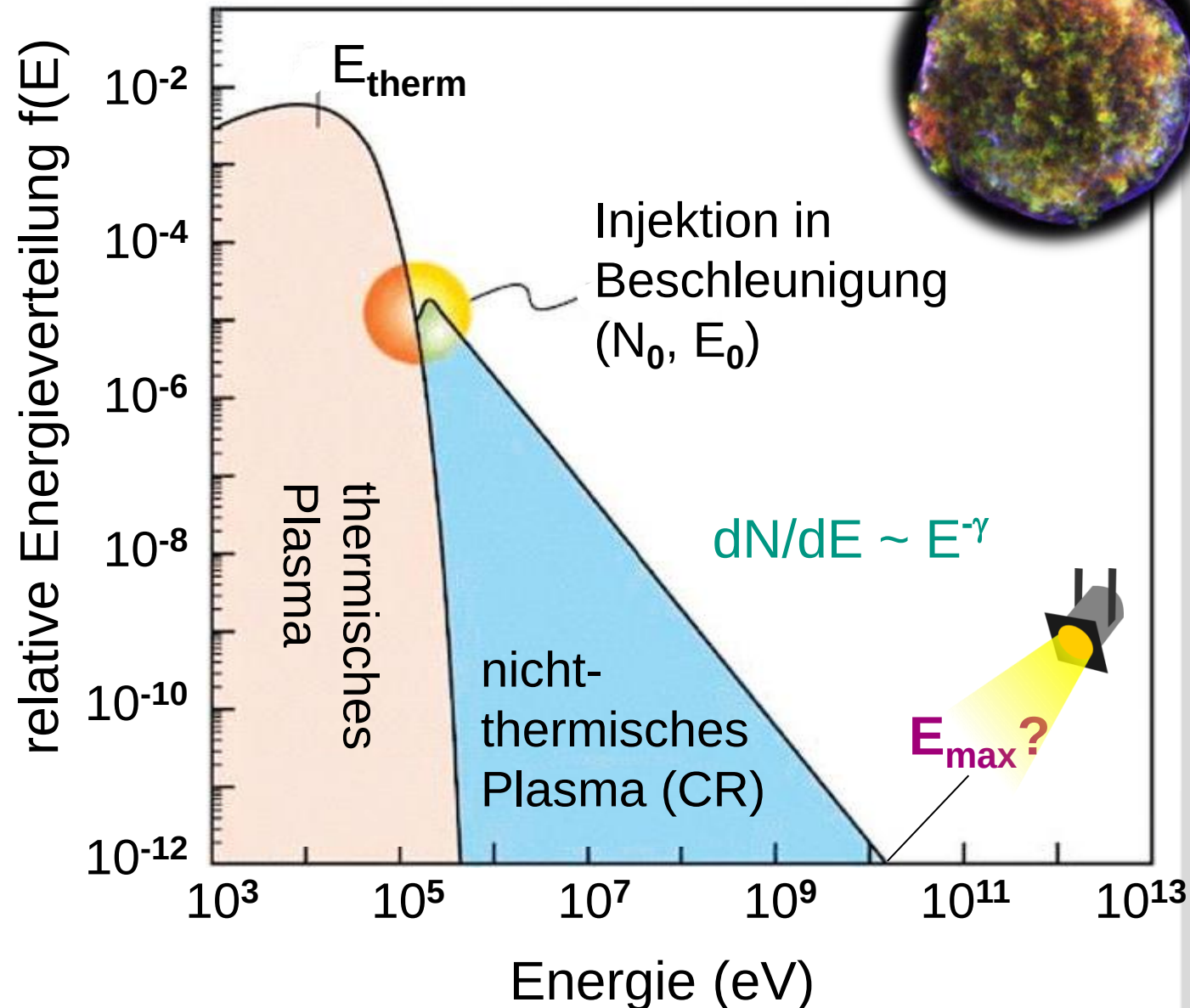
- Energie E nach n Beschleunigungszyklen

$$E = E_0 \cdot (1 + \alpha)^n$$

- Reduktion der Teilchenzahl $N(E)$ durch Verlassen des SN-Beschleunigungszyklus (stat. Wahrscheinlichkeit P^n)


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

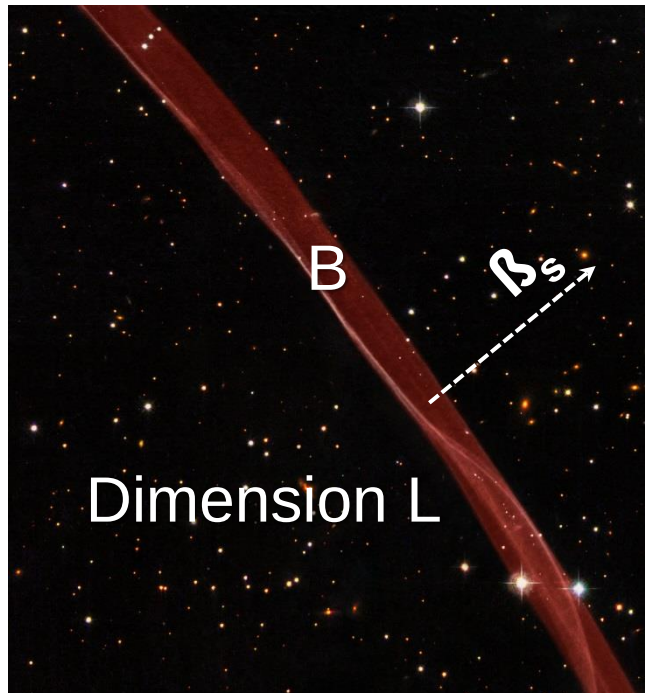
Power-Law Spektrum



kosmische Strahlung – Hillas Plot

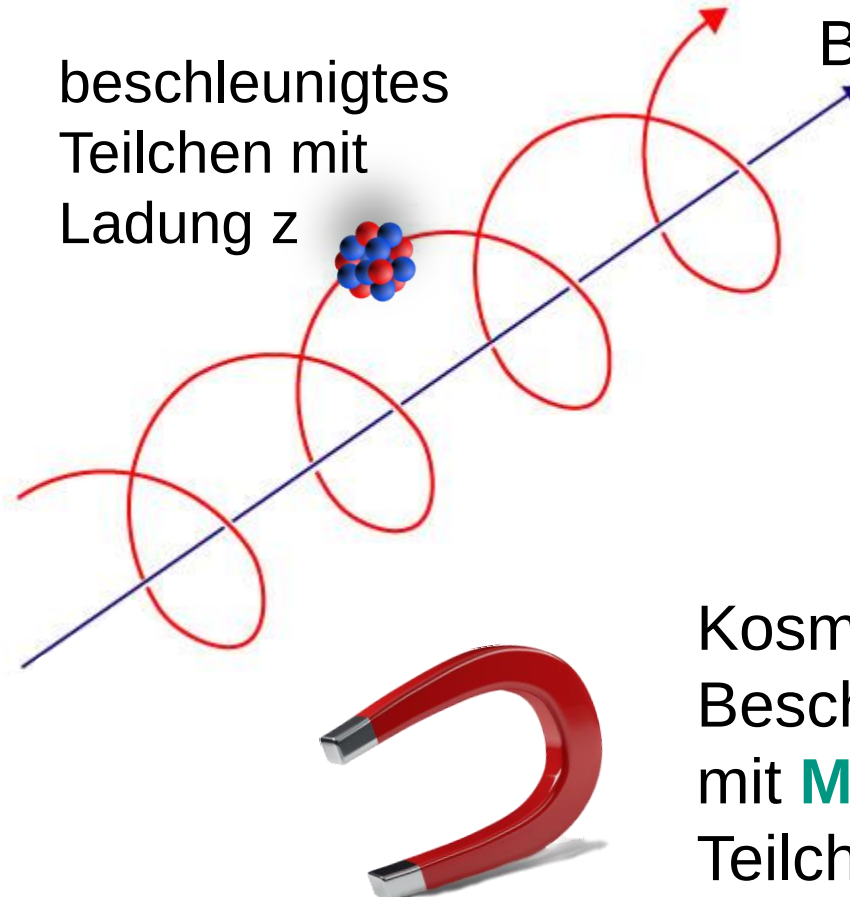
- **Hillas-Plot:** in Schockfront via Fermi maximal erreichbare Energie $E_{\max}$
Teilchen: $\sim$ Ladung z , **Quelle:** $\sim$ Feldstärke B , $\sim$ Ausdehnung $\sim L$, $\sim \beta_s$

SN-Schockfront mit
Geschwindigkeit β_s
relativ zum
Interstellaren Medium



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

beschleunigtes
Teilchen mit
Ladung z



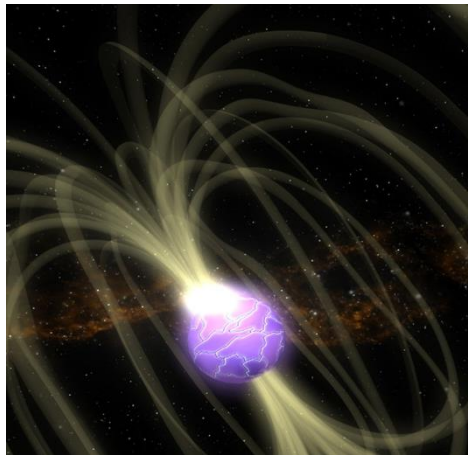
$E = E_{\max}$
Teilchen verlässt
den kosmischen
Beschleuniger

Kosmischer
Beschleuniger
mit **Magnetfeld B** zur
Teilchenführung

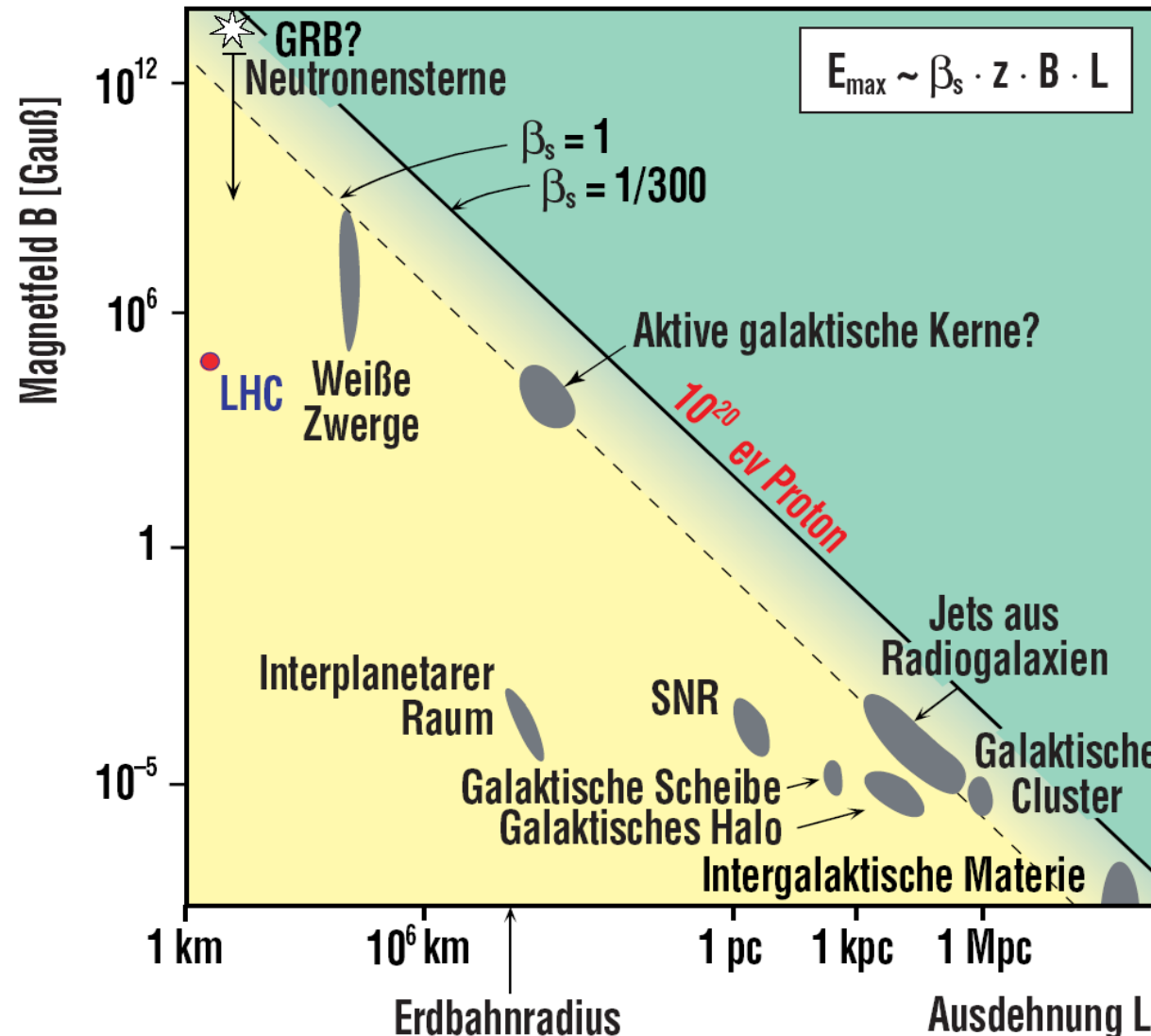
kosmische Strahlung – Hillas Plot

- **Hillas-Plot:** für hochenergetische kosmische Strahlung:
hohes B-Feld & kleine Dimensionen / kleines B-Feld & große Dimension

kleines L
hohes B



B-Feld
... 10^9 T
Dimension
10 km ...



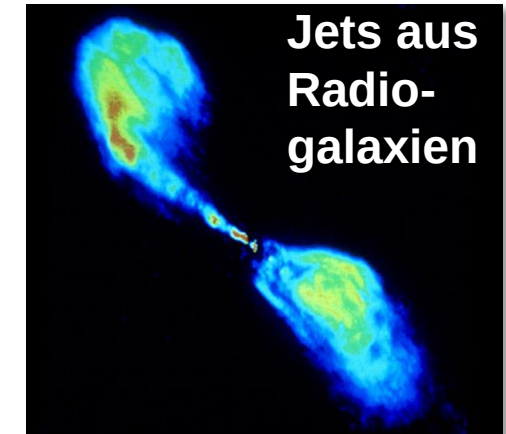
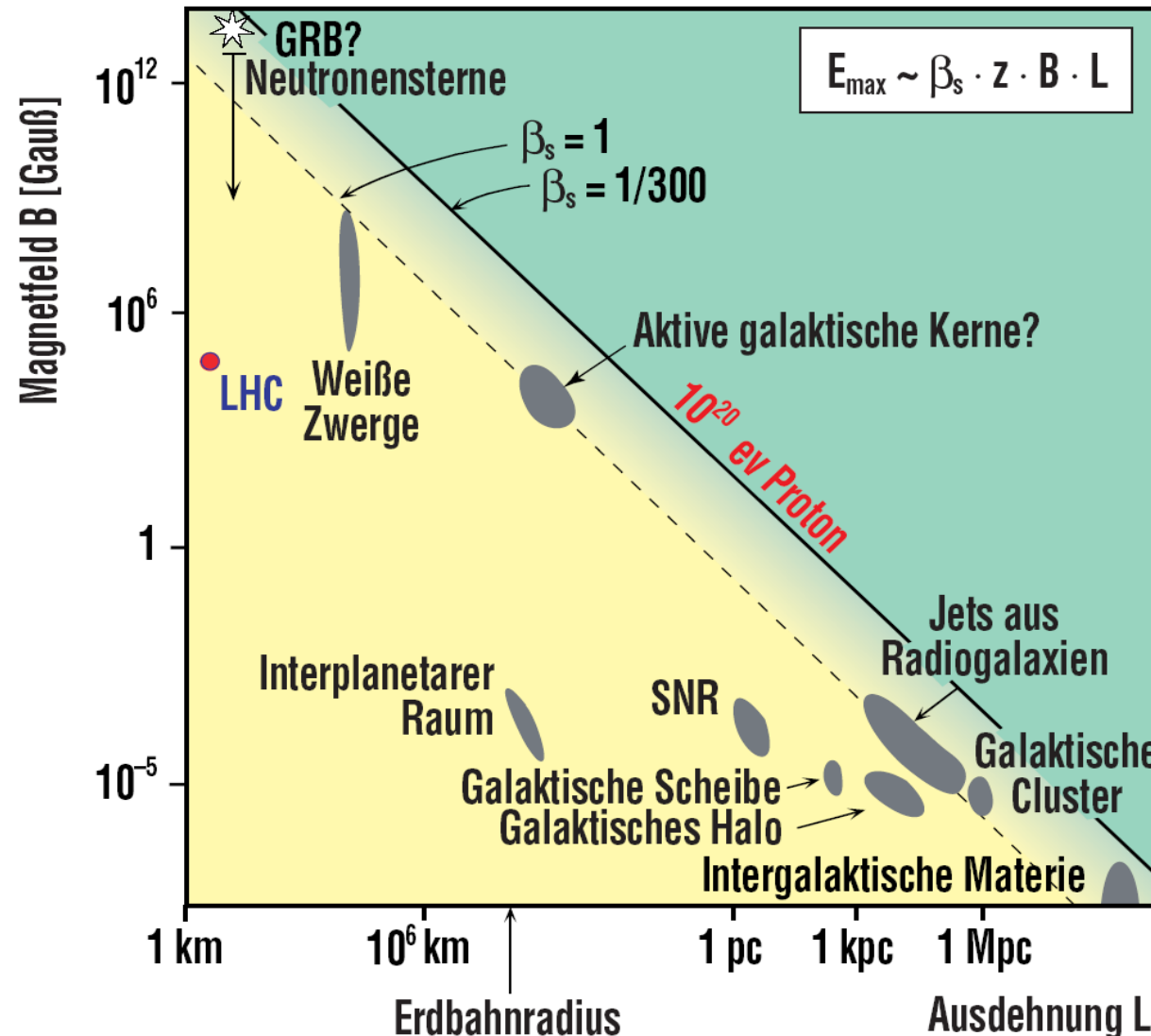
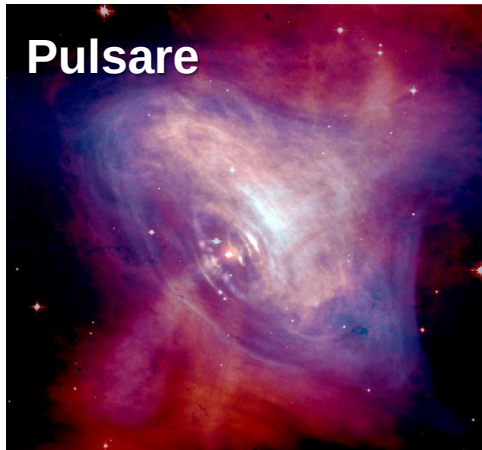
großes L
kleines B



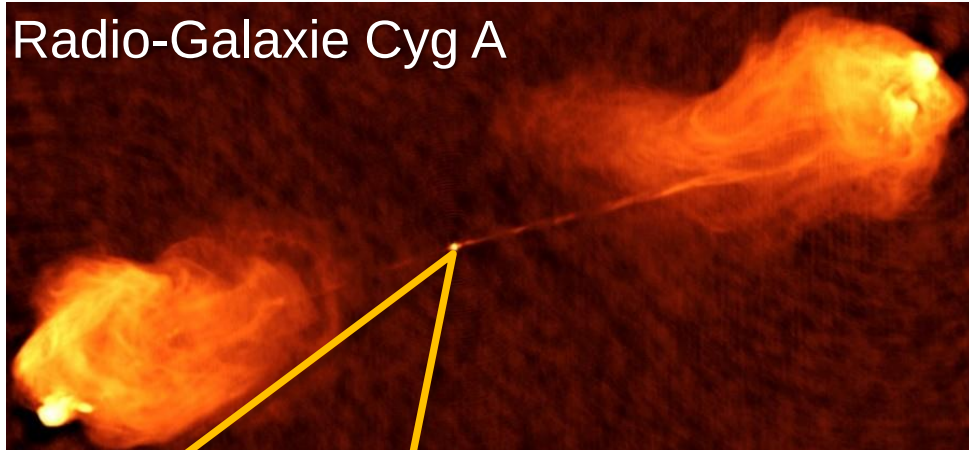
B-Feld
... 10^{-9} T
Dimension
1 Mpc ...

kosmische Strahlung – Hillas Plot

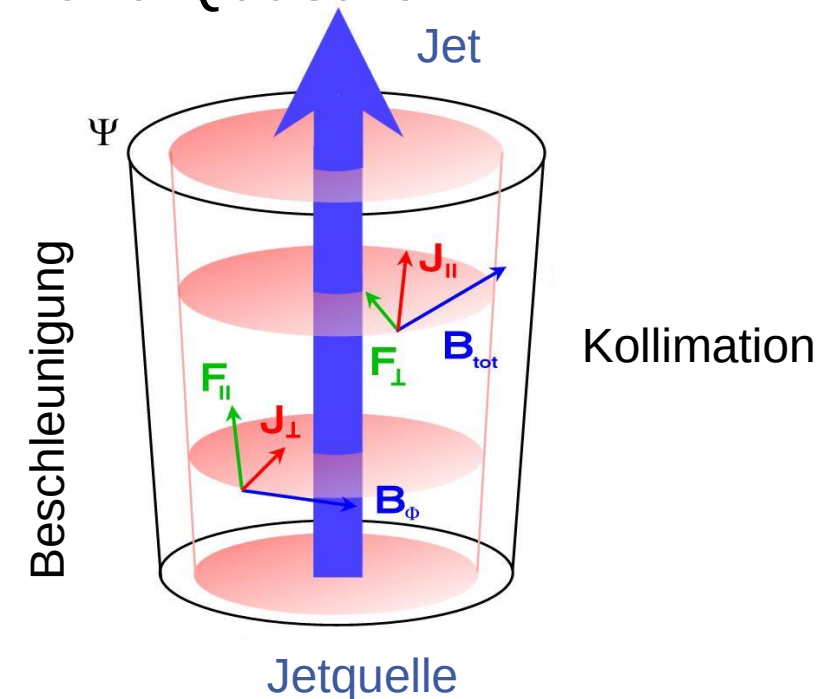
- **Hillas-Plot:** für ultra-hochenergetische kosmische Strahlung:
hohes B-Feld & kleine Dimensionen / kleines B-Feld & große Dimension



Quellen der allerhöchsten CR-Energien



- CR-Quellen mit allerhöchsten Energien:
SMBH's in AGNs (aktive Galaxienkerne)
- Beschleunigung in einem AGN-Jet bis zu $E_{\text{max}} > 10^{20}$ eV möglich,
- Prozesse in Schockfronten der **Jets** von Radiogalaxien und Quasaren



- J** Stromdichte Ψ magnet. Flußoberfläche
- B** Magnetfeld **F** Lorentzkraft

Energiespektrum: Knie und Knöchel

- **höchste Energien:** Änderung der CR-Beschleuniger(?), Übergang von der galaktischen (SNR) zur extragalaktischen (AGN, GRB) CR-Strahlung

