

Vorlesung 12:

Ausbreitung der kosmischen Strahlung

Galaktische Ausbreitung: Leaky-Box-Modell (Teil 2)

- Erzeugung von sekundären Kernen
- Durchlaufene Materiesäule
- Lebensdauer in unserer Galaxie

Extragalaktische Ausbreitung

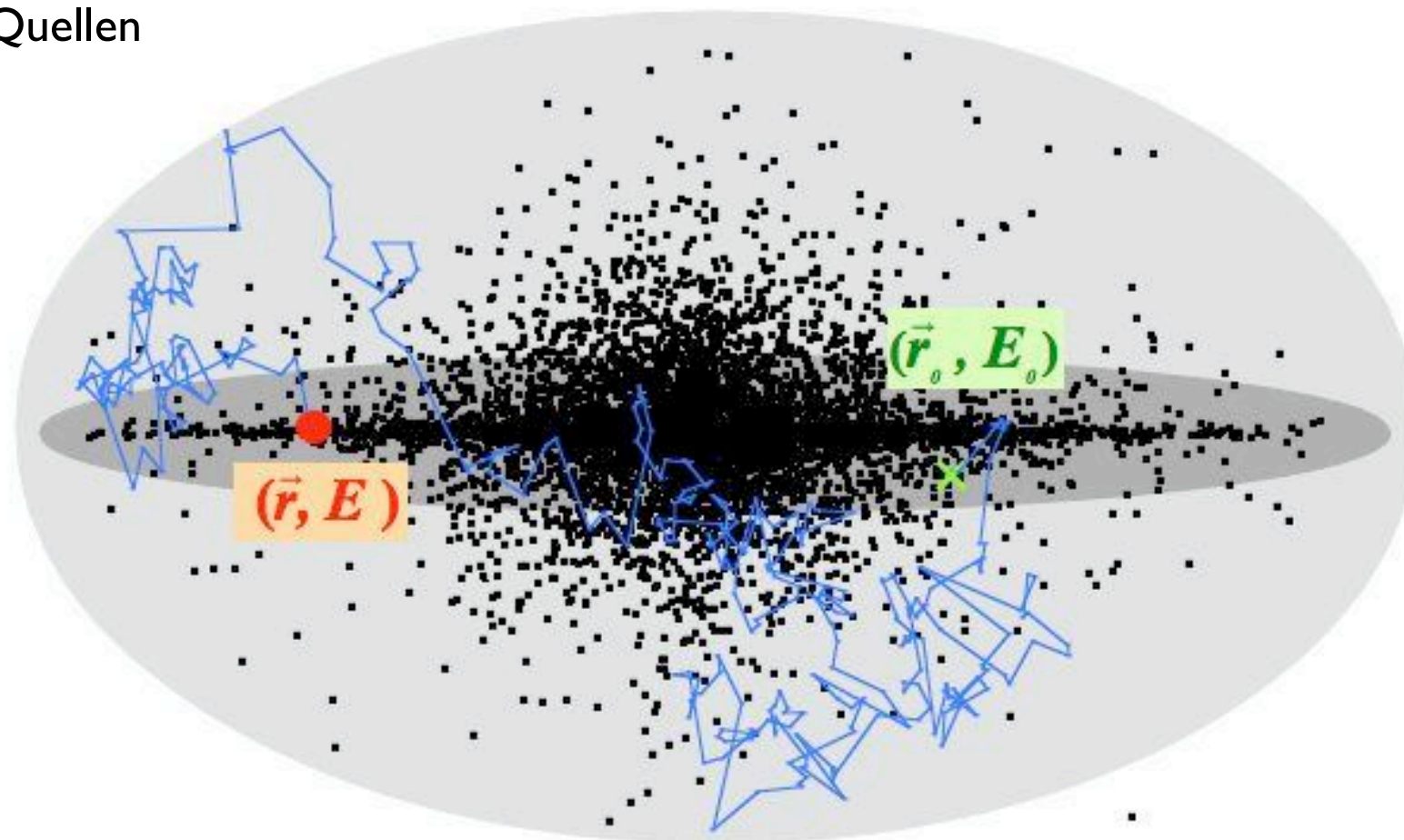
- Übergang von galaktischen zu extragalaktischen Quellen
- Energieverlustprozesse (GZK-Unterdrückung)
- Galaktische und extragalaktische Magnetfelder
- Richtungsablenkung, Zeitverzögerung

Physik von Schockwellen (Stoßwellen)

- Kontinuitätsgleichung
- Teilchengeschwindigkeiten

Beschleunigung an Schockfronten

- Fermi-Beschleunigung 1. Ordnung
- Fermi-Beschleunigung 2. Ordnung
- Erwartetes Energiespektrum



Vorlesung und Übungen : Daten

Vorlesung: Dienstags

~~3. Nov. 2020~~
~~10. Nov. 2020~~
~~17. Nov. 2020~~
~~24. Nov. 2020~~
~~1. Dez. 2020~~
~~8. Dez. 2020~~
~~15. Dez. 2020~~
~~22. Dez. 2020~~
~~12. Jan. 2021~~
~~19. Jan. 2021~~
~~26. Jan. 2021~~
~~2. Feb. 2021~~
~~4. Feb. 2021~~
~~9. Feb. 2021~~
~~16. Feb. 2021~~

Ersatz für 19.1.

Übungen: Donnerstags

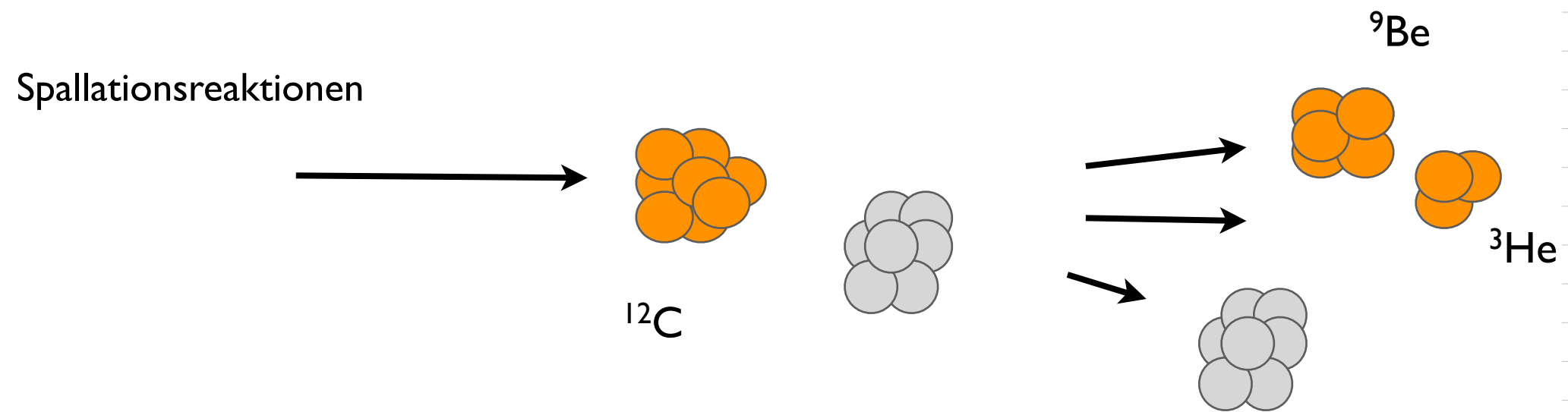
gehalten von Max Stadelmaier

~~19.11.2020 - Blatt 1~~
~~03.12.2020 - Blatt 2~~
~~17.12.2020 - Blatt 3~~
~~14.01.2021 - Blatt 4~~
11.02.2021 - Präsentation (Paul Filip)
18.02.2021 - Blatt 5

Transportgleichung

$$\frac{dn_i}{dt} = D\nabla^2 n_i - \frac{\partial}{\partial E} (b_i(E) n_i) - \frac{n_i}{\tau_{\text{spal},i}} + Q_i + \sum_{j>i} \frac{p_{ij}}{\tau_j} n_j - \frac{n_i}{\tau_{\text{rad},i}}$$

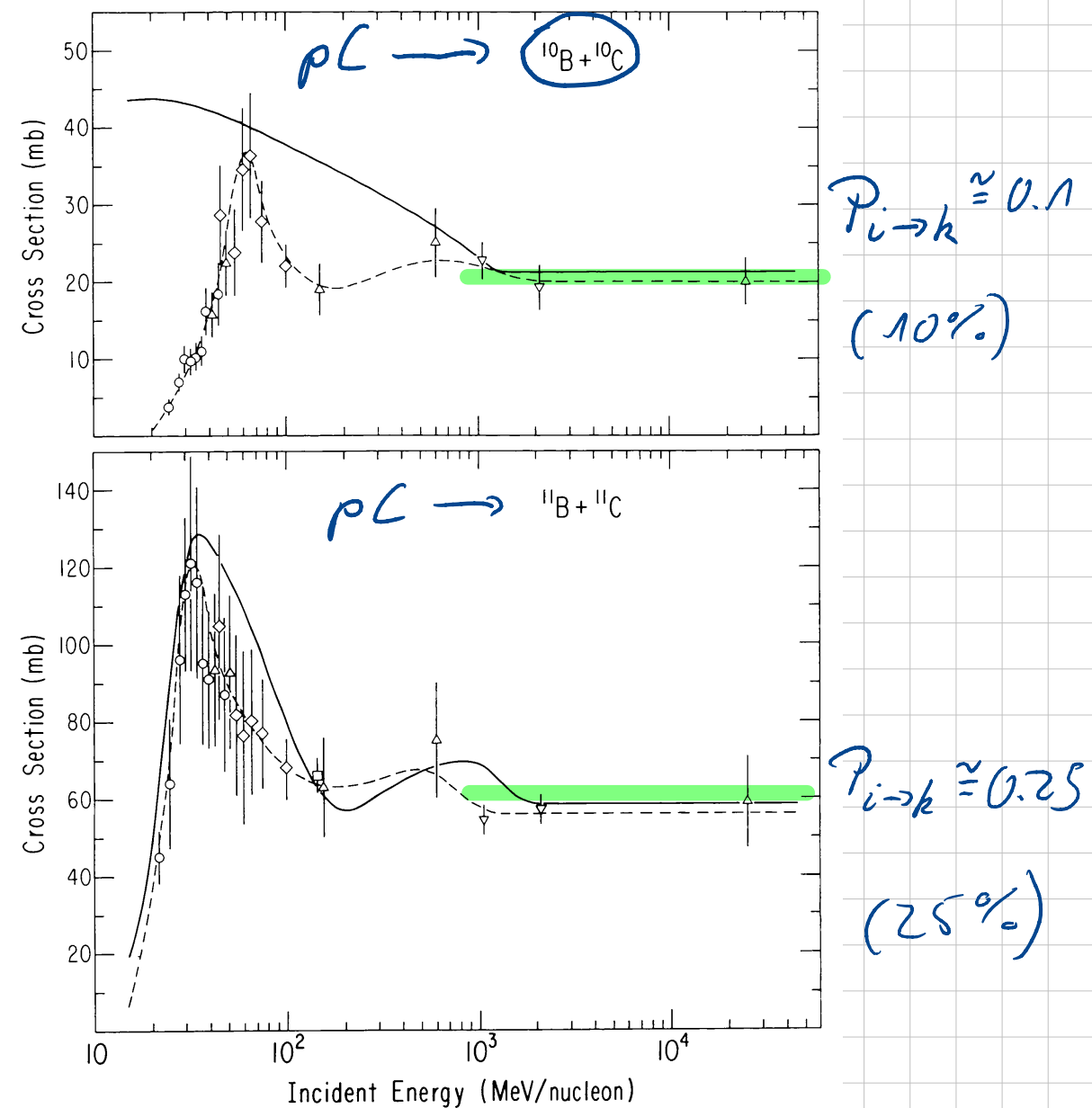
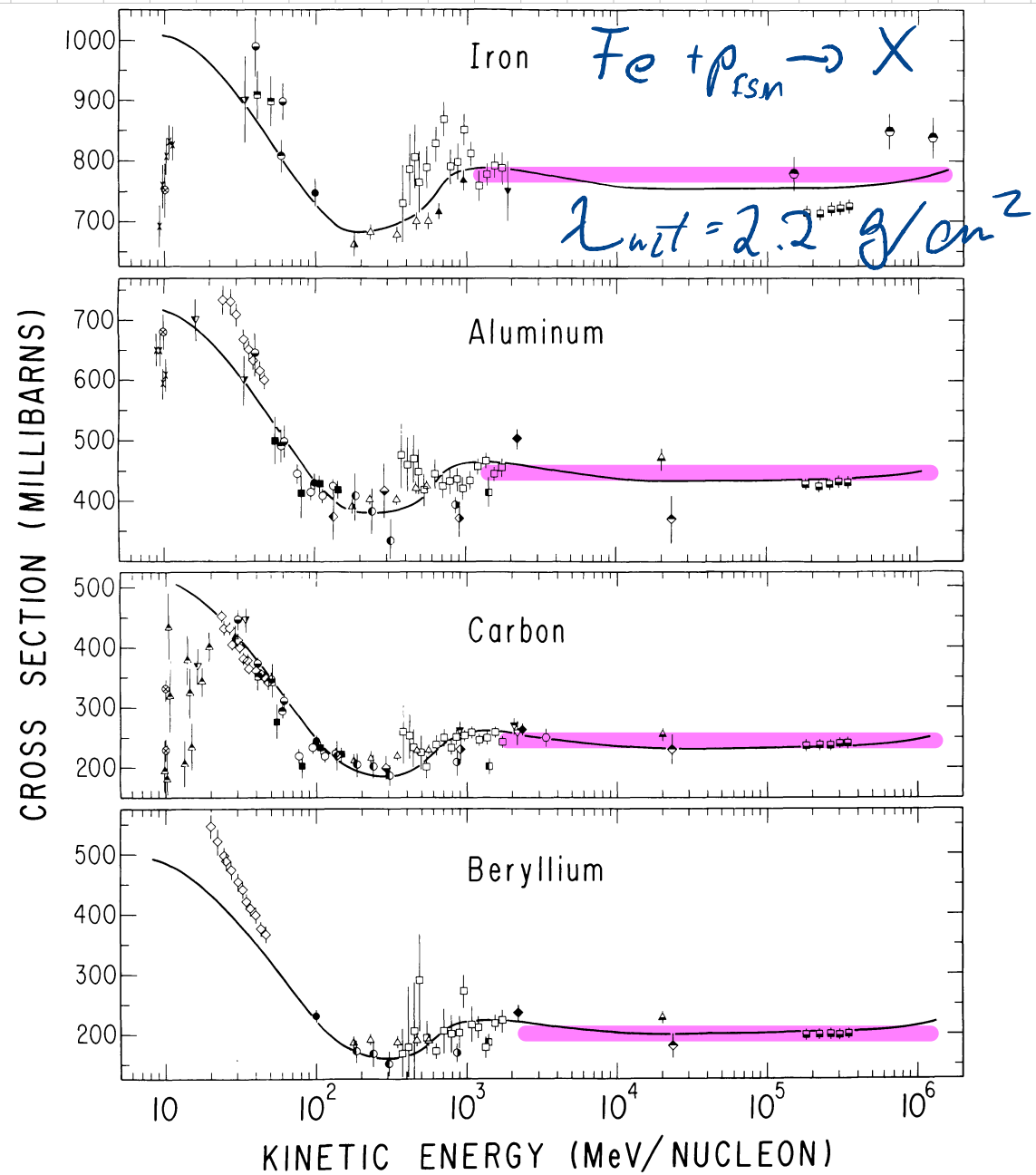
Erzeugung seltener Kerne (Sekundärteilchen)



Umschreiben der Gleichung:

- Energie pro Nukleon
- durchlaufene Materiesäule

Beschleunigerdaten für Wechselwirkung mit Kernen



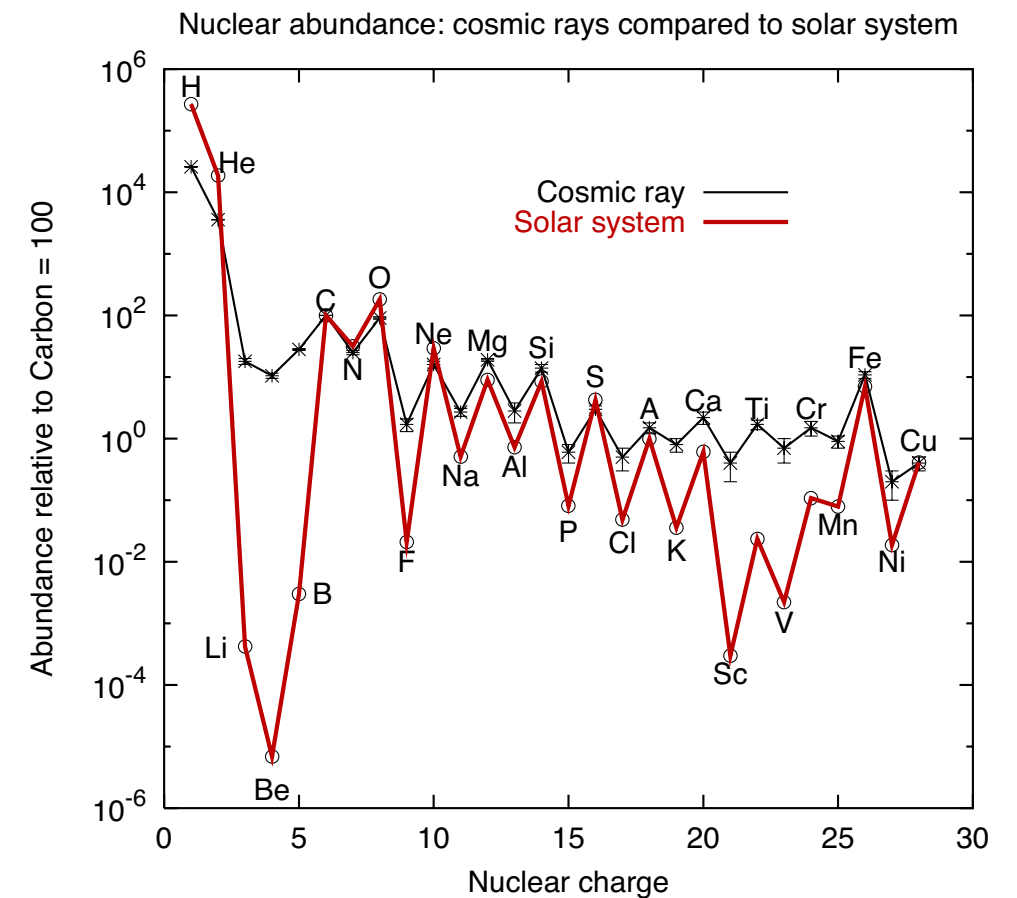
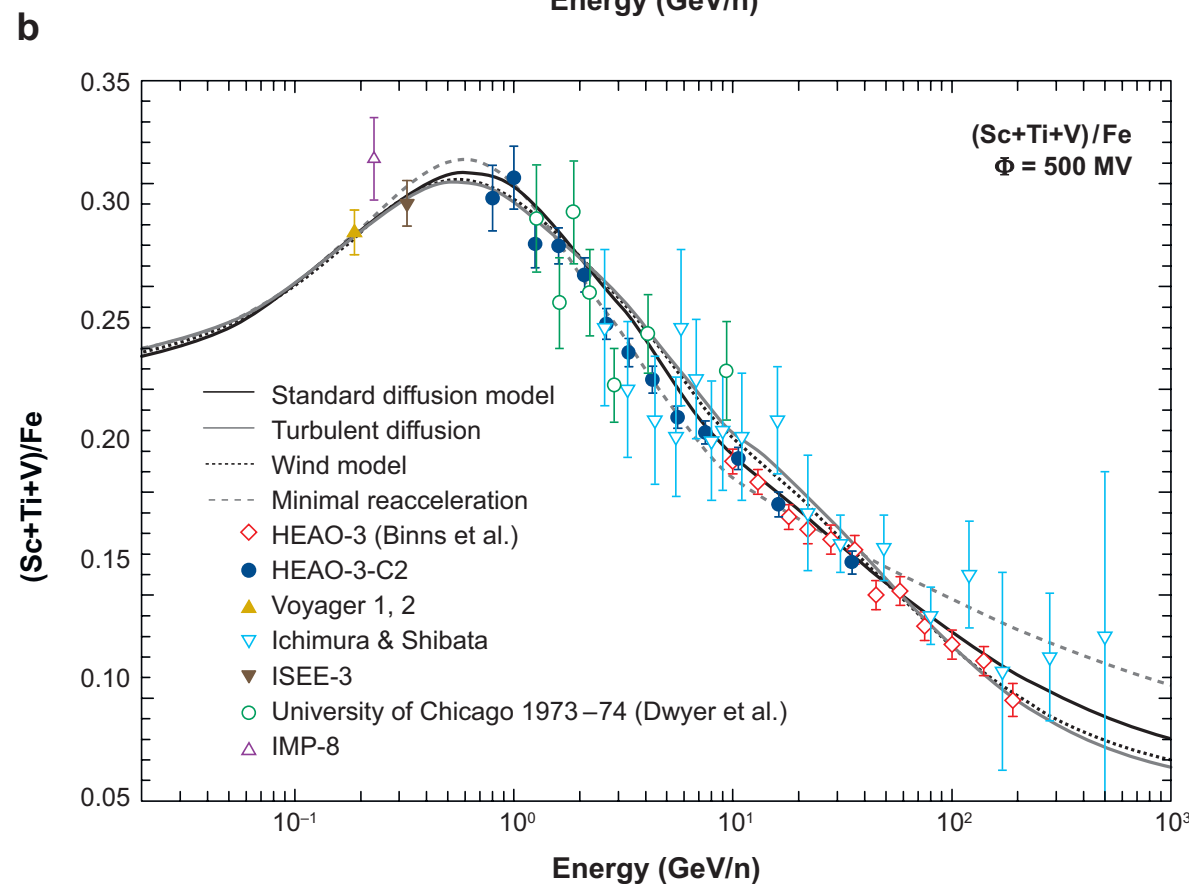
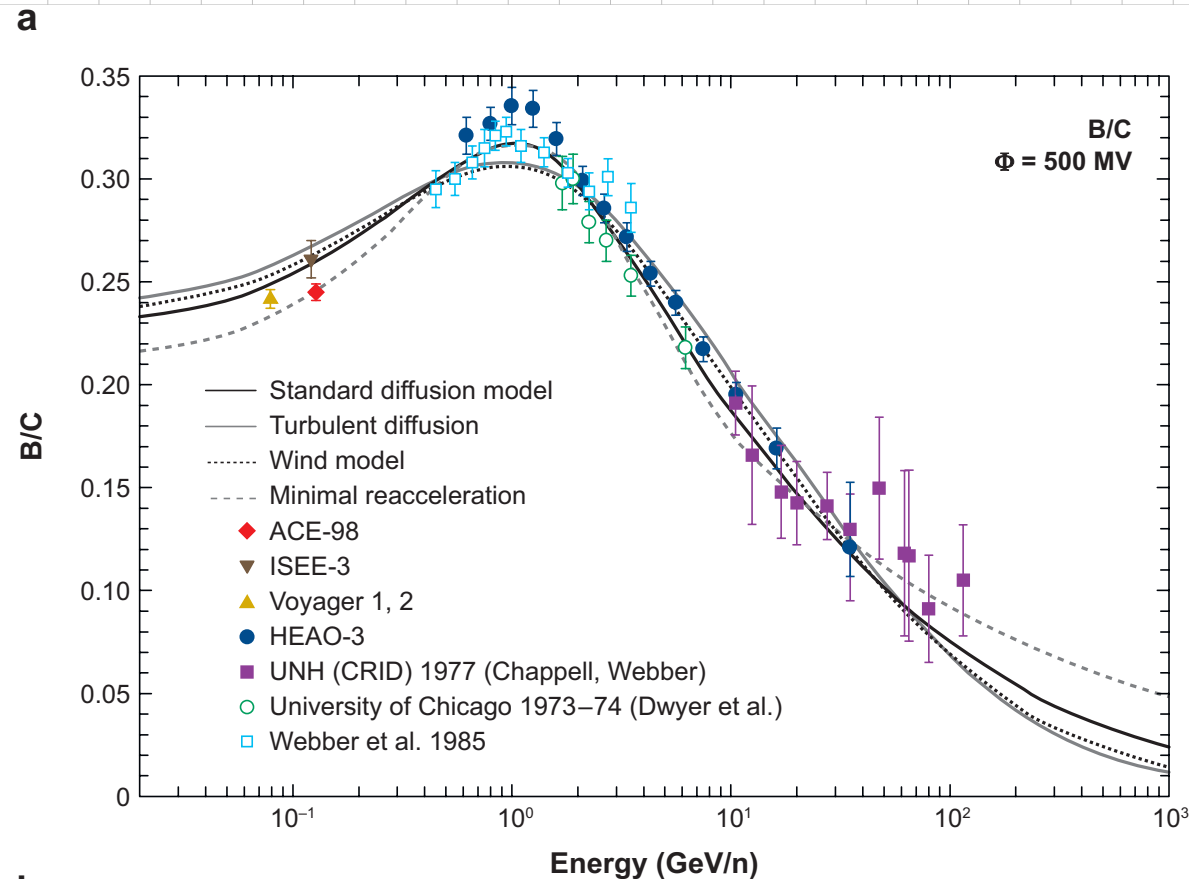
λ_{int}

Erwartung für Sekundärkerne

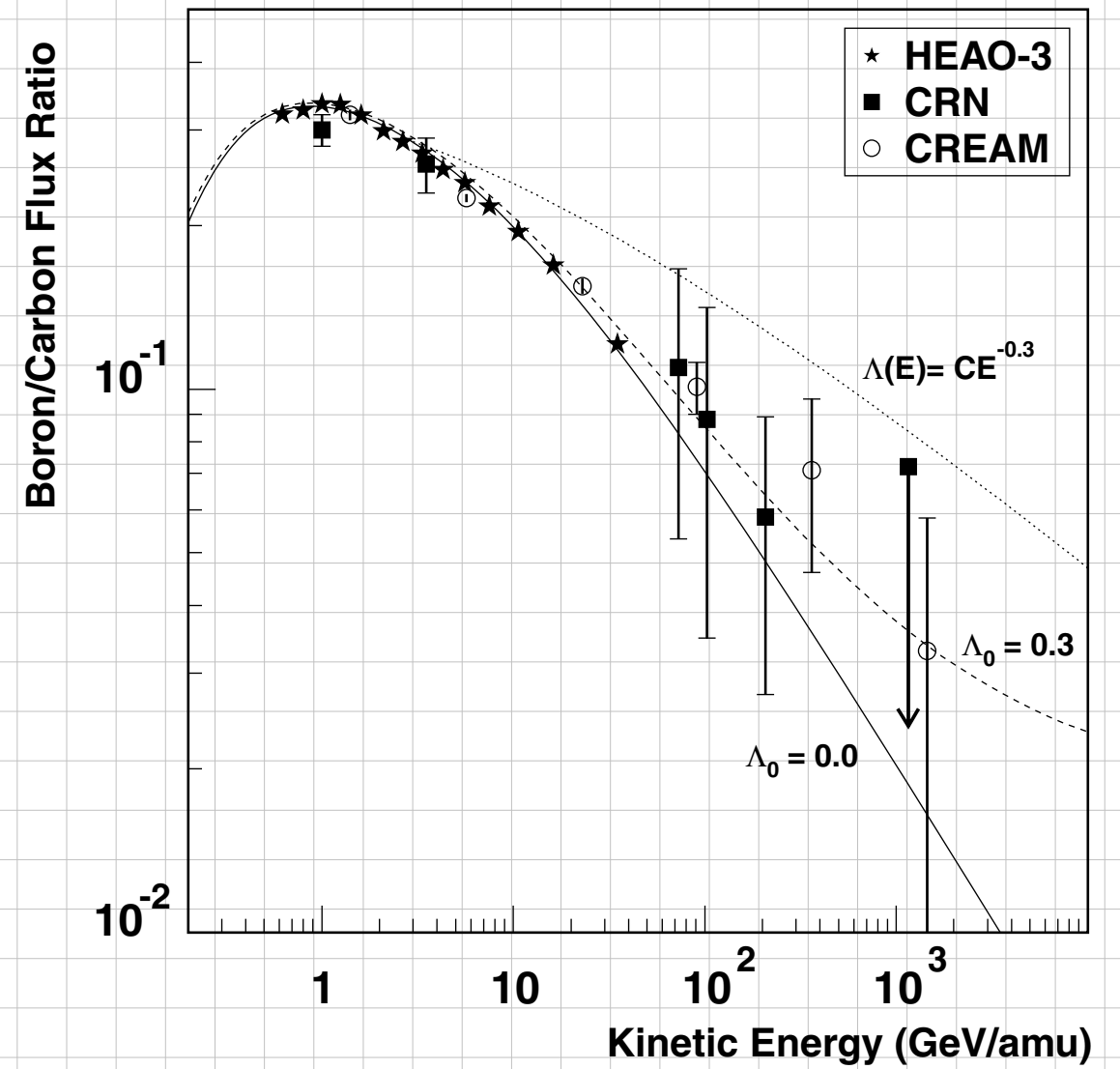
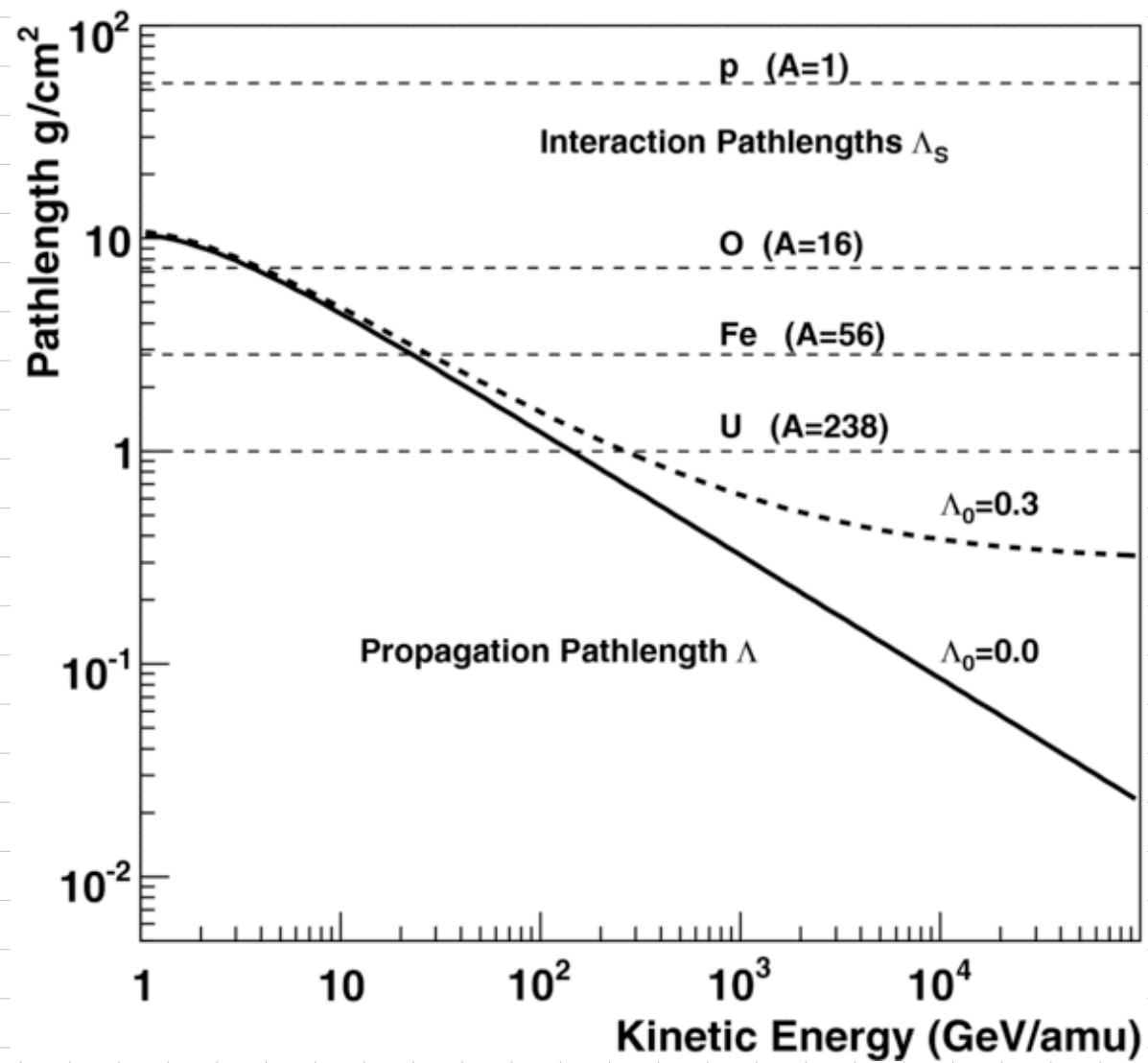
Verhältnis von sekundären zu primären Elementen

Ballon- und Satellitenmessungen

Daten entsprechen qualitativ den theoretischen Erwartungen $\tau_{\text{esc}} \sim E^{-0.6}$

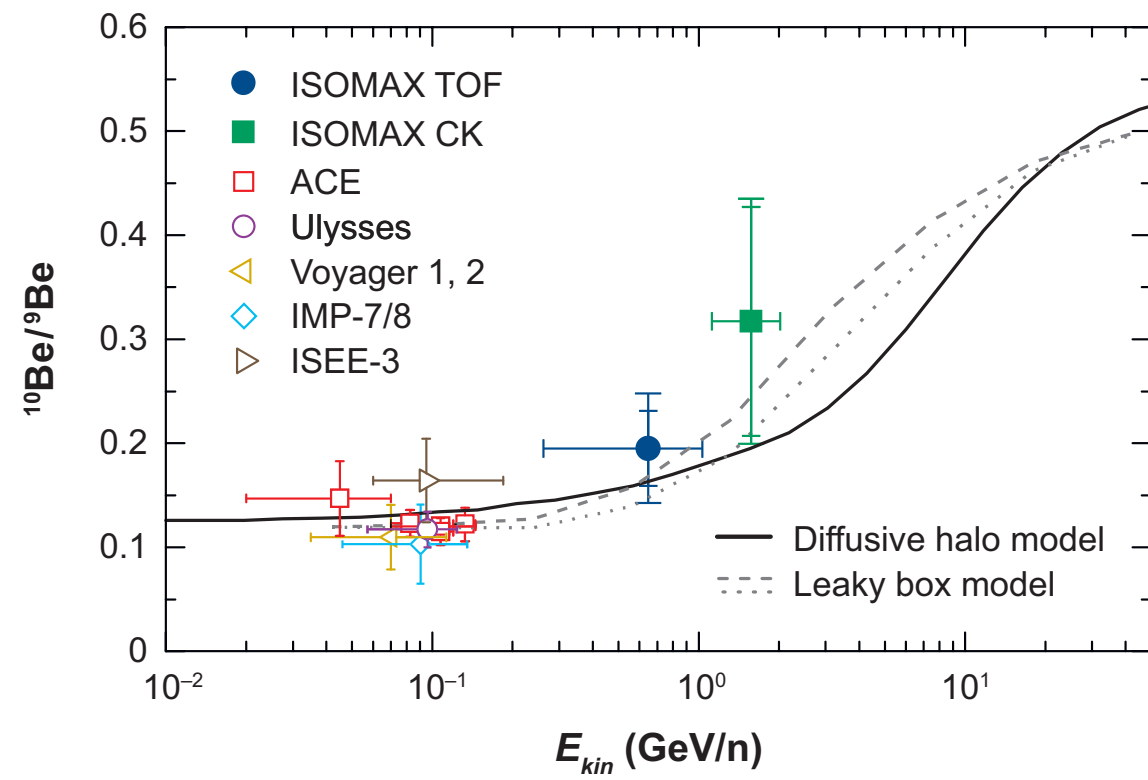


Durchlaufene Materiesäule



Mittlere Lebensdauer der Kosm. Strahlung

Vergleich mit Daten



Standardmodell für galaktische kosm. Strahlung

- Quellen (theoretische Erwartung):

$$Q(E) \sim \left(\frac{E}{Z} \right)^{-p}$$

- lokales Energiespektrum:

$$\frac{dN}{dE} \sim \left(\frac{E}{Z} \right)^{-(p+\delta)}$$

- durchlaufene Materiesäule (Quelle - Erde):

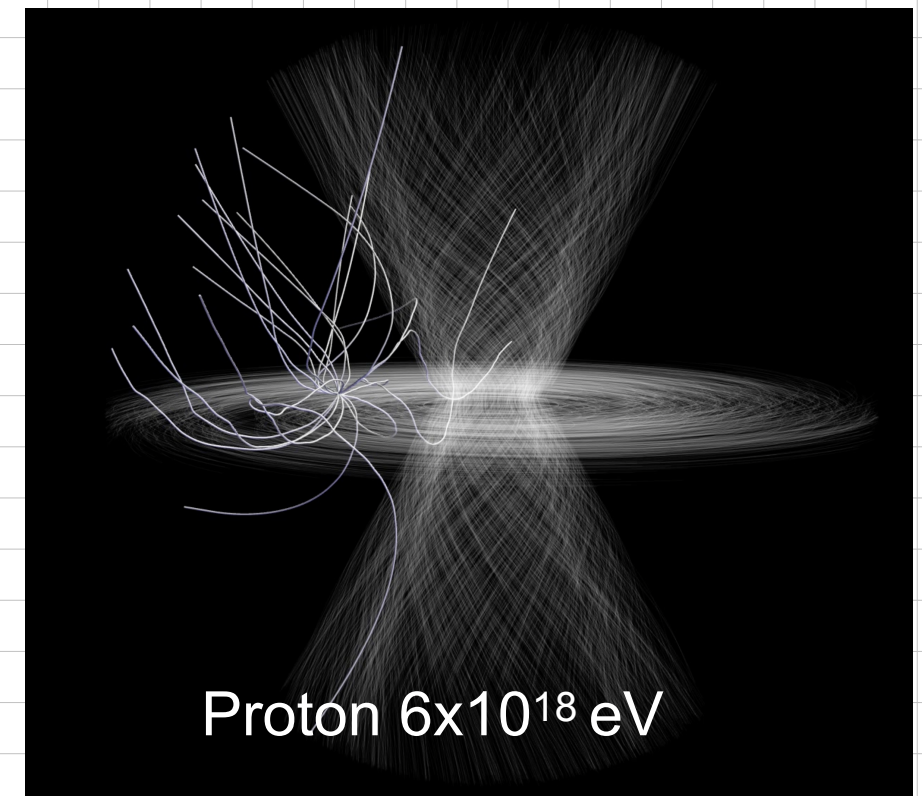
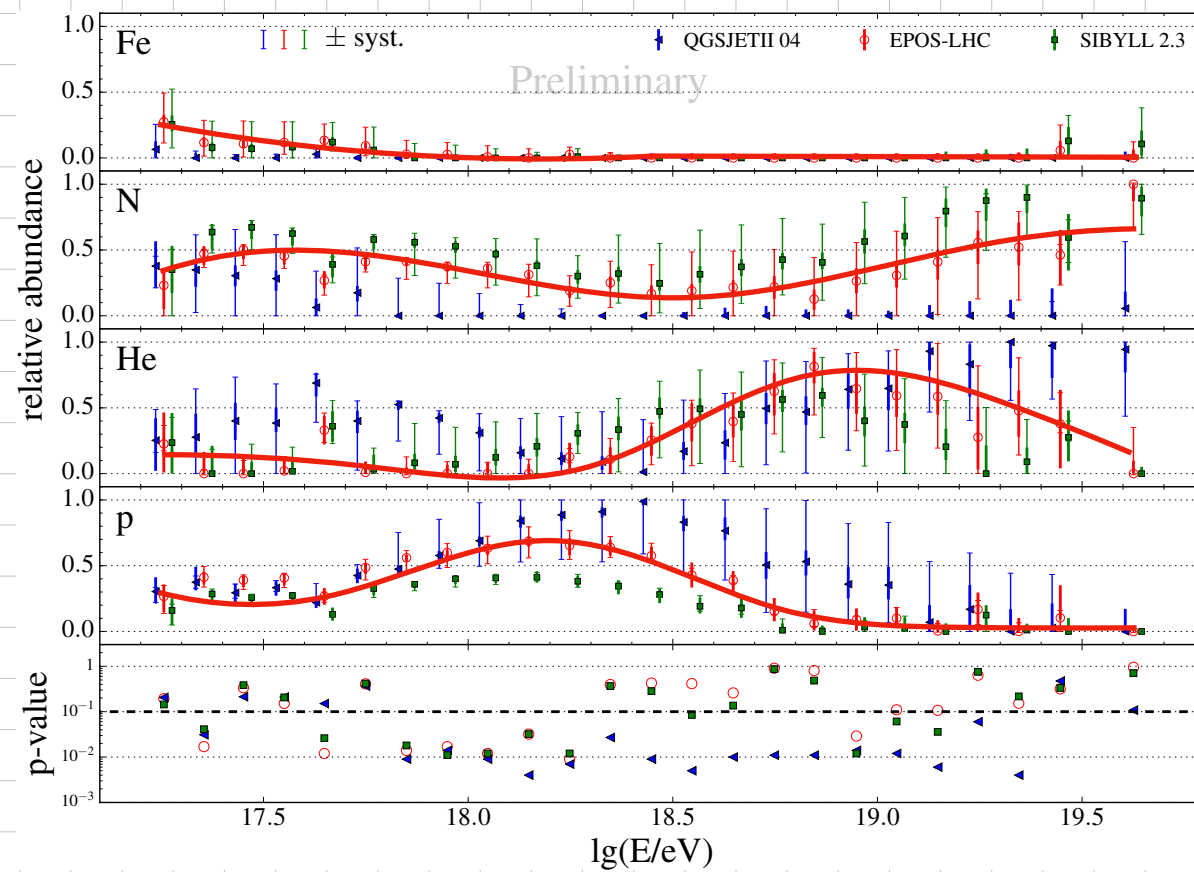
$$\lambda_{\text{esc}} \sim \lambda_0 \left(\frac{E}{Z} \right)^{-\delta}$$

- Lebensdauer (direkte Messung):

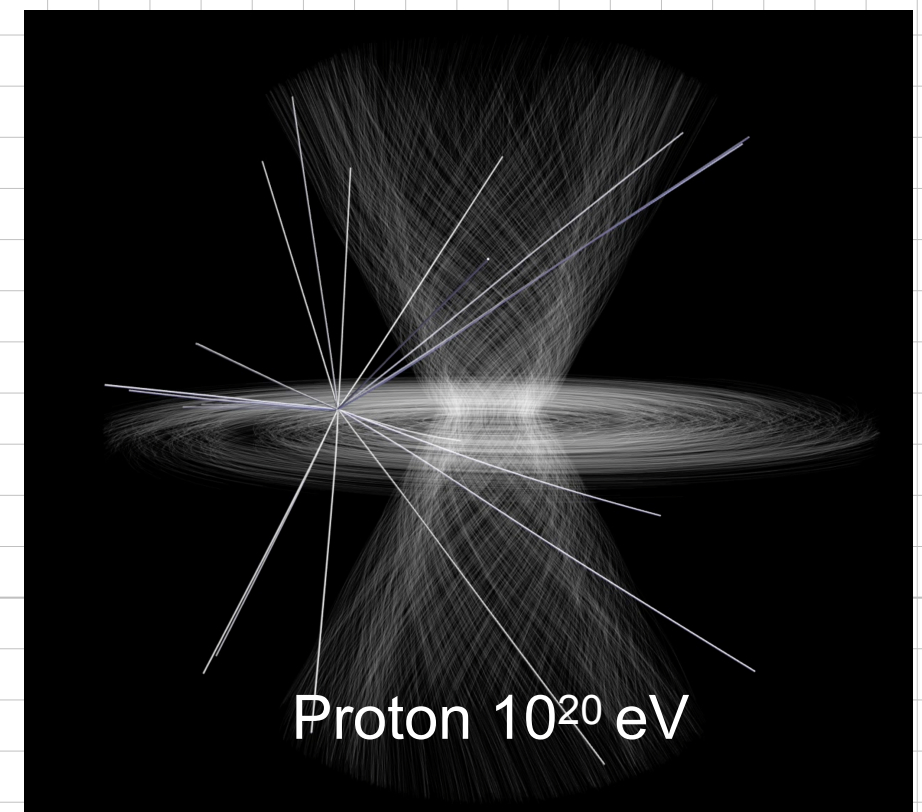
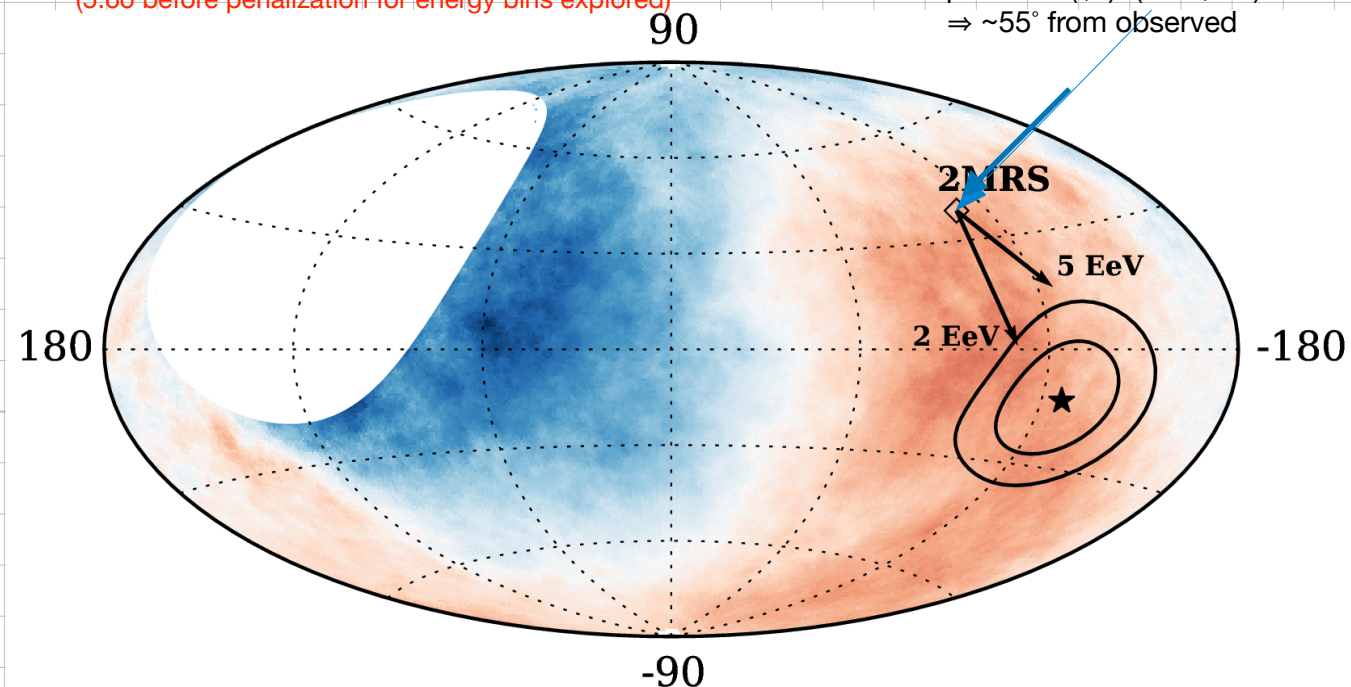
$$\tau_{\text{esc}} \sim 2 \times 10^7 \text{ yr}$$

- Probleme: Interpretation des Knies im Spektrum und Anisotropie

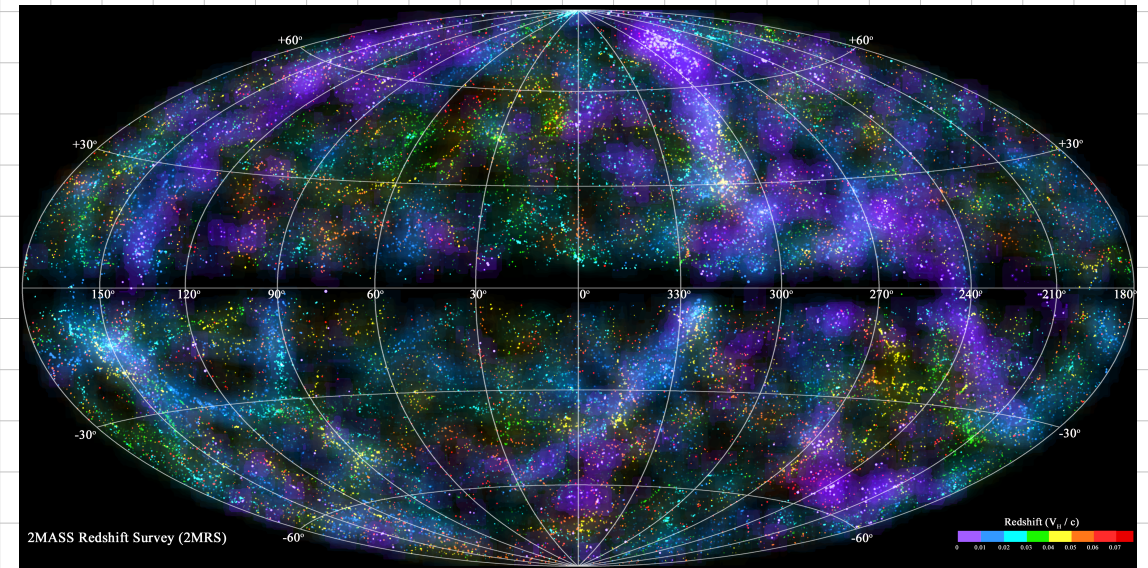
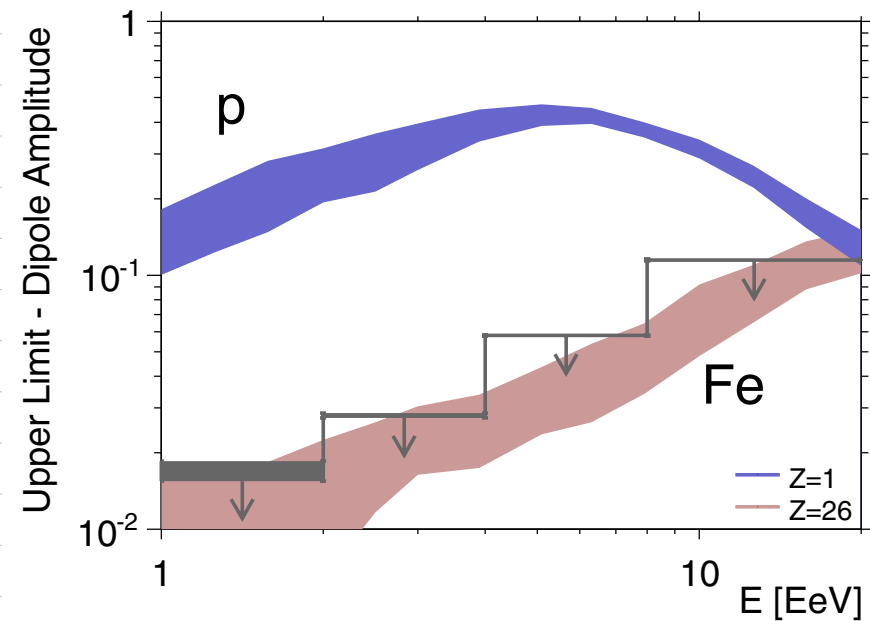
Übergang von galaktischen zu extragalaktischen Quellen



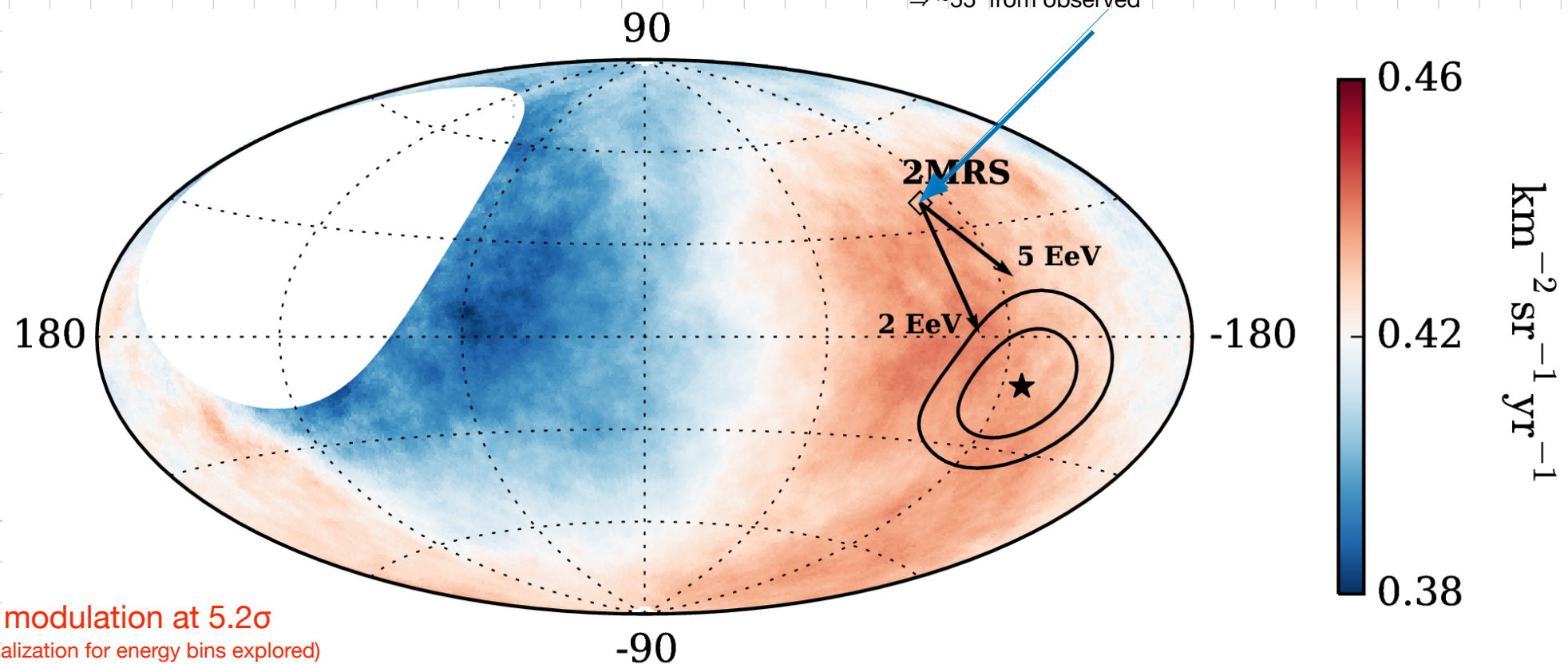
Significant modulation at 5.2σ
(5.6σ before penalization for energy bins explored)



Übergang von galaktischen zu extragalaktischen Quellen

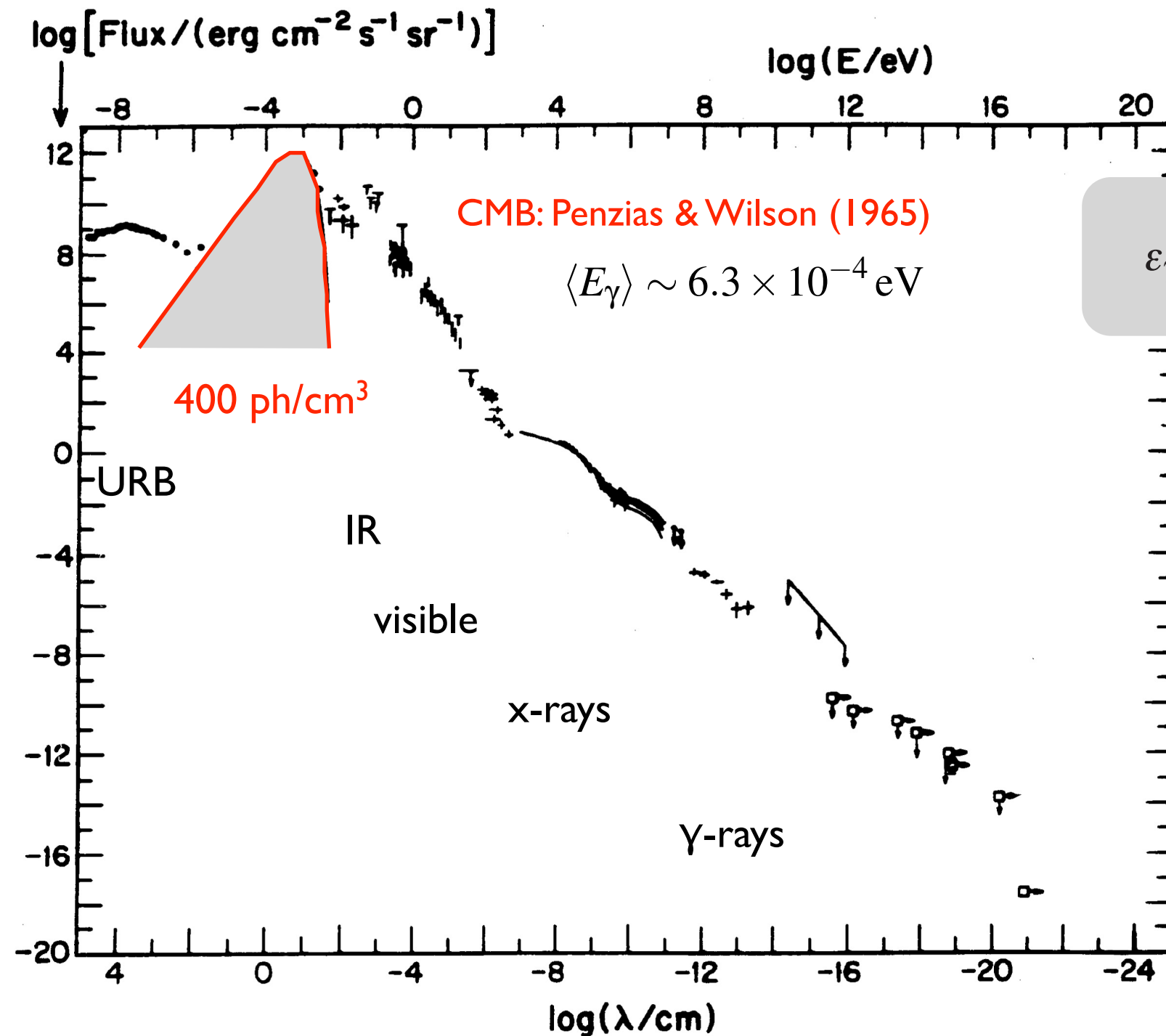


The flux-weighted dipole from IR galaxy distribution in 2MRS points to $(l,b)=(251^\circ, 38^\circ)$
 $\Rightarrow \sim 55^\circ$ from observed



Significant modulation at 5.2σ
 (5.6 σ before penalization for energy bins explored)

Photon-Hintergrundstrahlung im Universum



$$\varepsilon_\gamma \frac{dn_\gamma}{d\varepsilon_\gamma} = \frac{8\pi}{h^3 c^3} \frac{\varepsilon_\gamma^3}{e^{\varepsilon_\gamma/kT} - 1}$$

Greisen, Zatsepin & Kuzmin (1966)

$$p \gamma \rightarrow p \pi^0$$

$$p \gamma \rightarrow n \pi^+$$

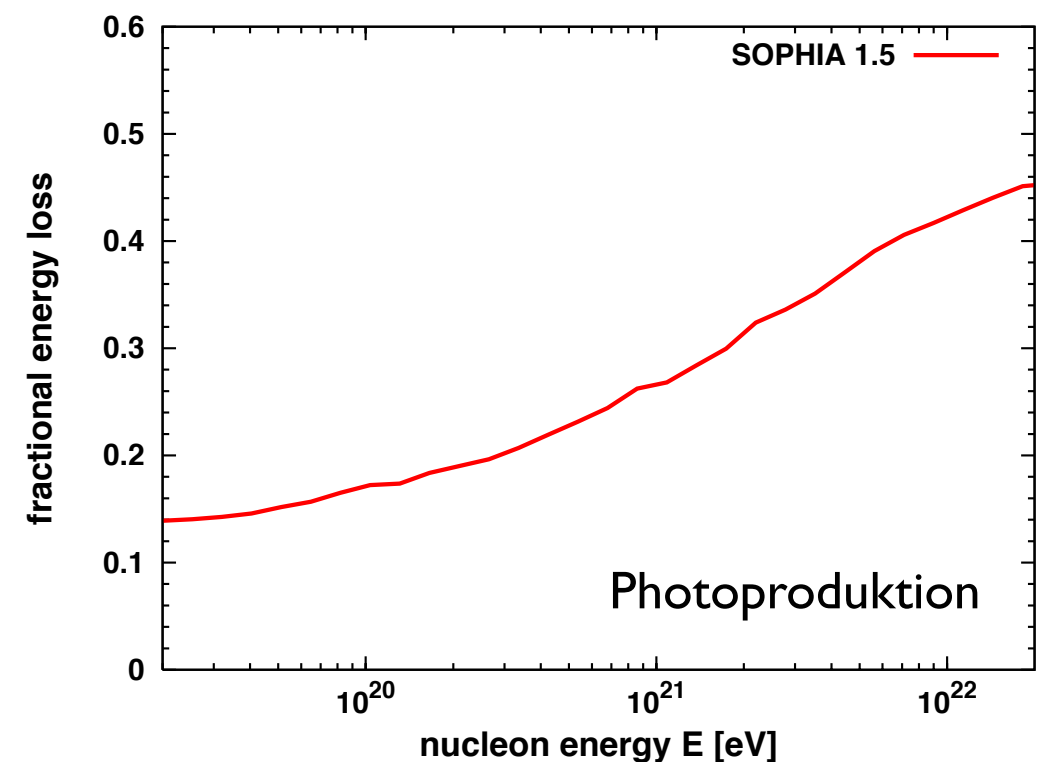
Universum „bremst“
Teilchen mit $E > 10^{20}$ eV

Wechselwirkung von Protonen mit Photonen

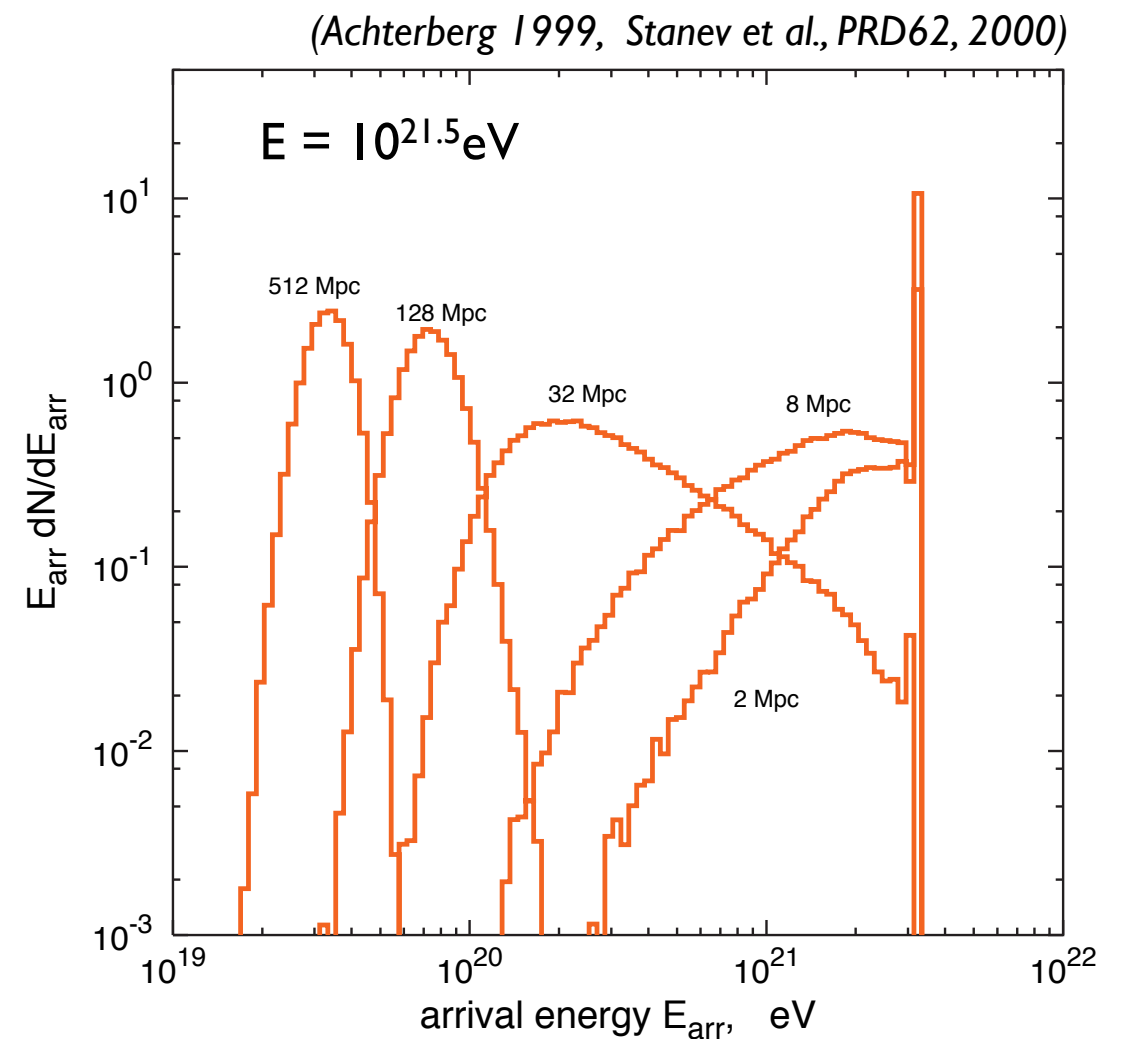
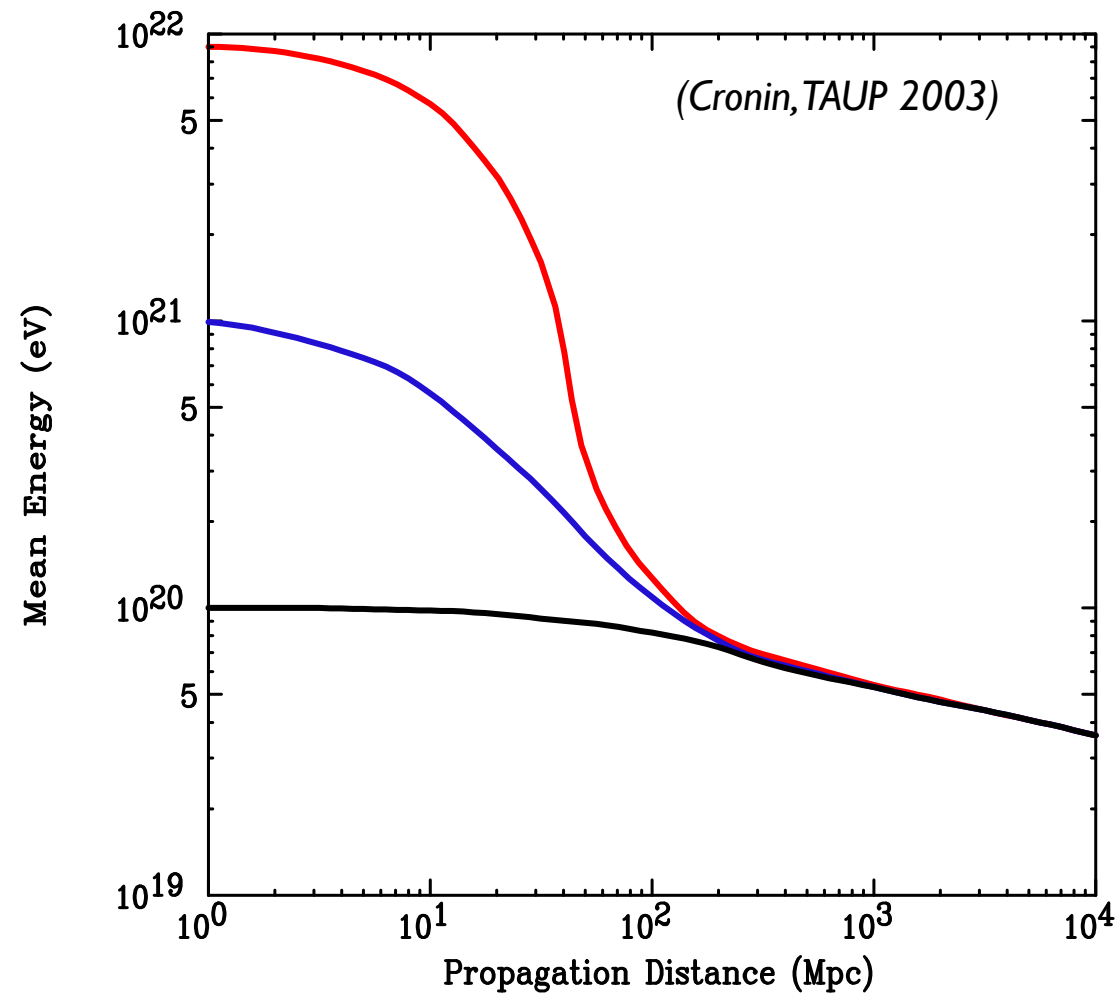


$$E_{p,\min} = \frac{m_{\Delta}^2 - m_p^2}{E_{\gamma,\max}(1 - \cos\theta)} \approx 5 \times 10^{19} \text{ eV}$$

Laborsystem der Erde: relativer Energieverlust

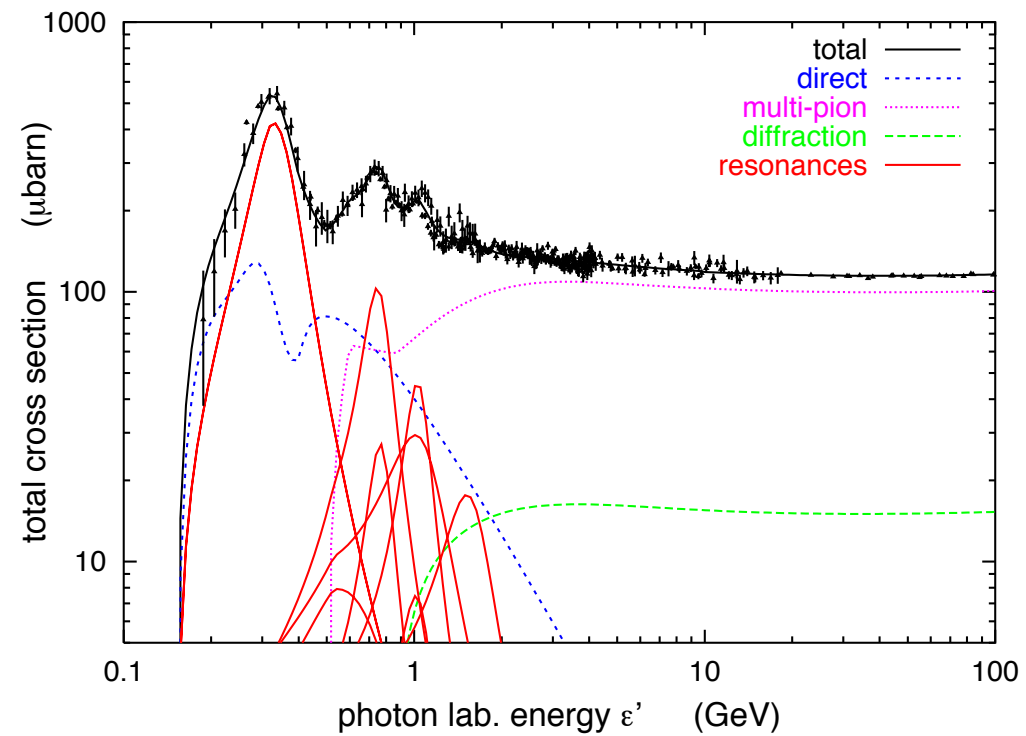


Energieverlust: mono-energetische Protonen

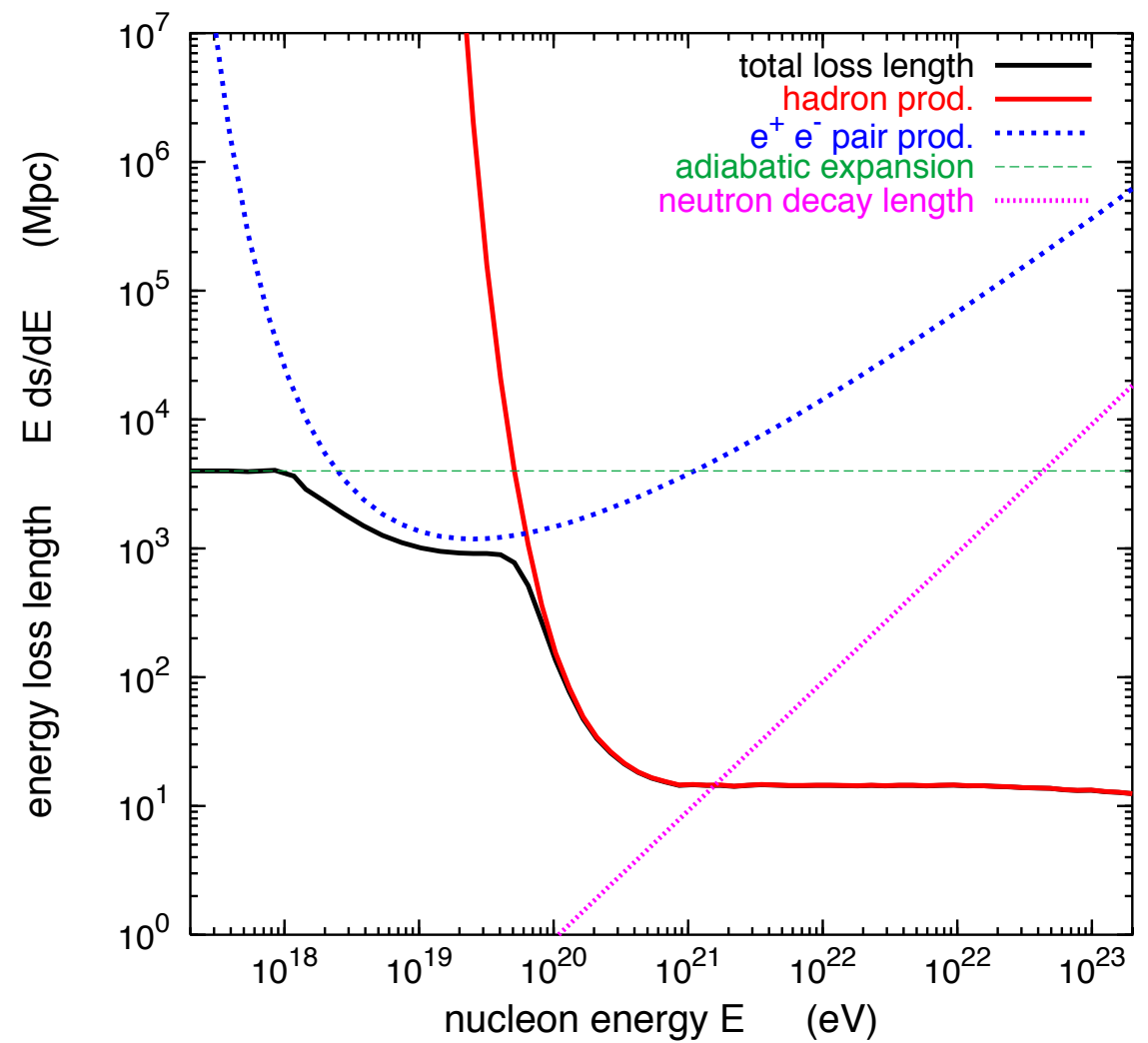


Energieverlust ist stochastischer Prozess

Energieverlustlänge für Kerne



$$\frac{dE}{ds} = -\frac{E}{l_{\text{loss}}}$$



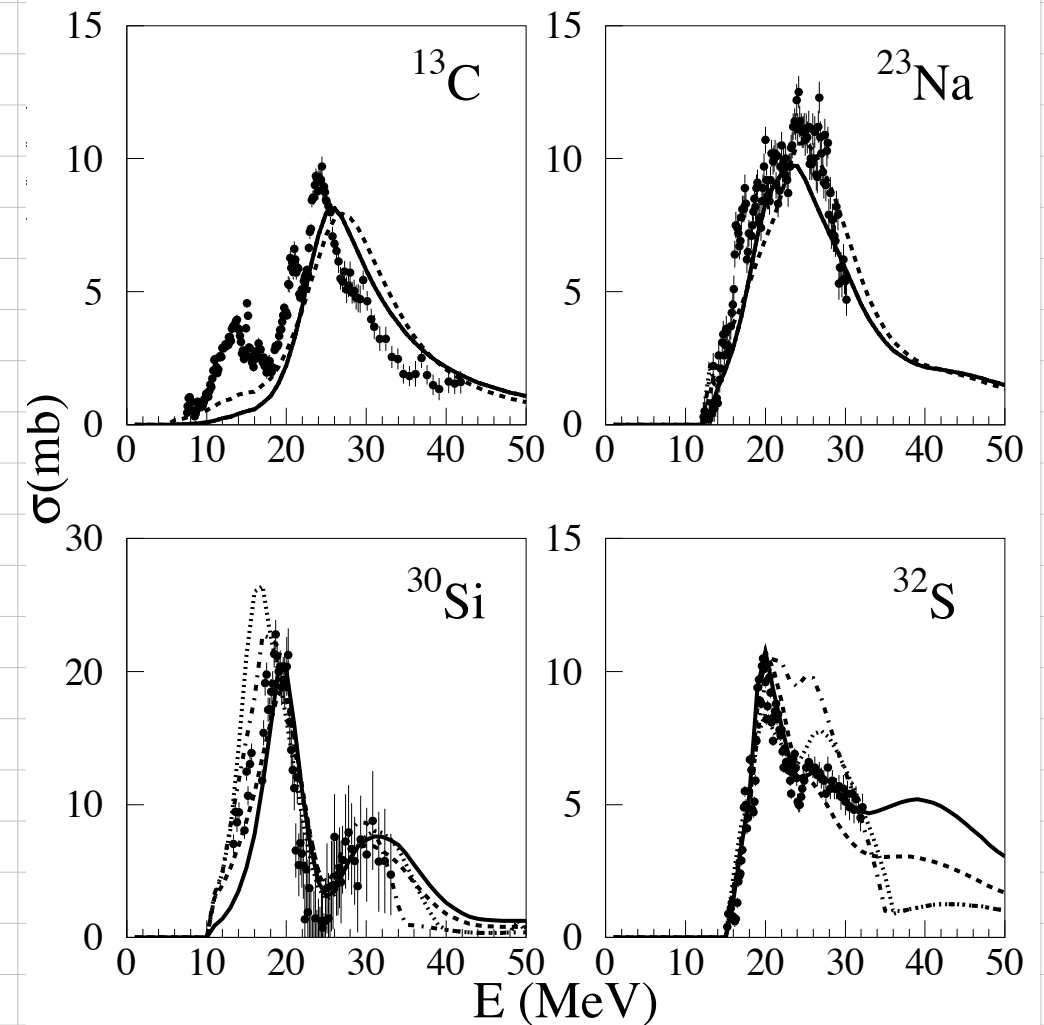
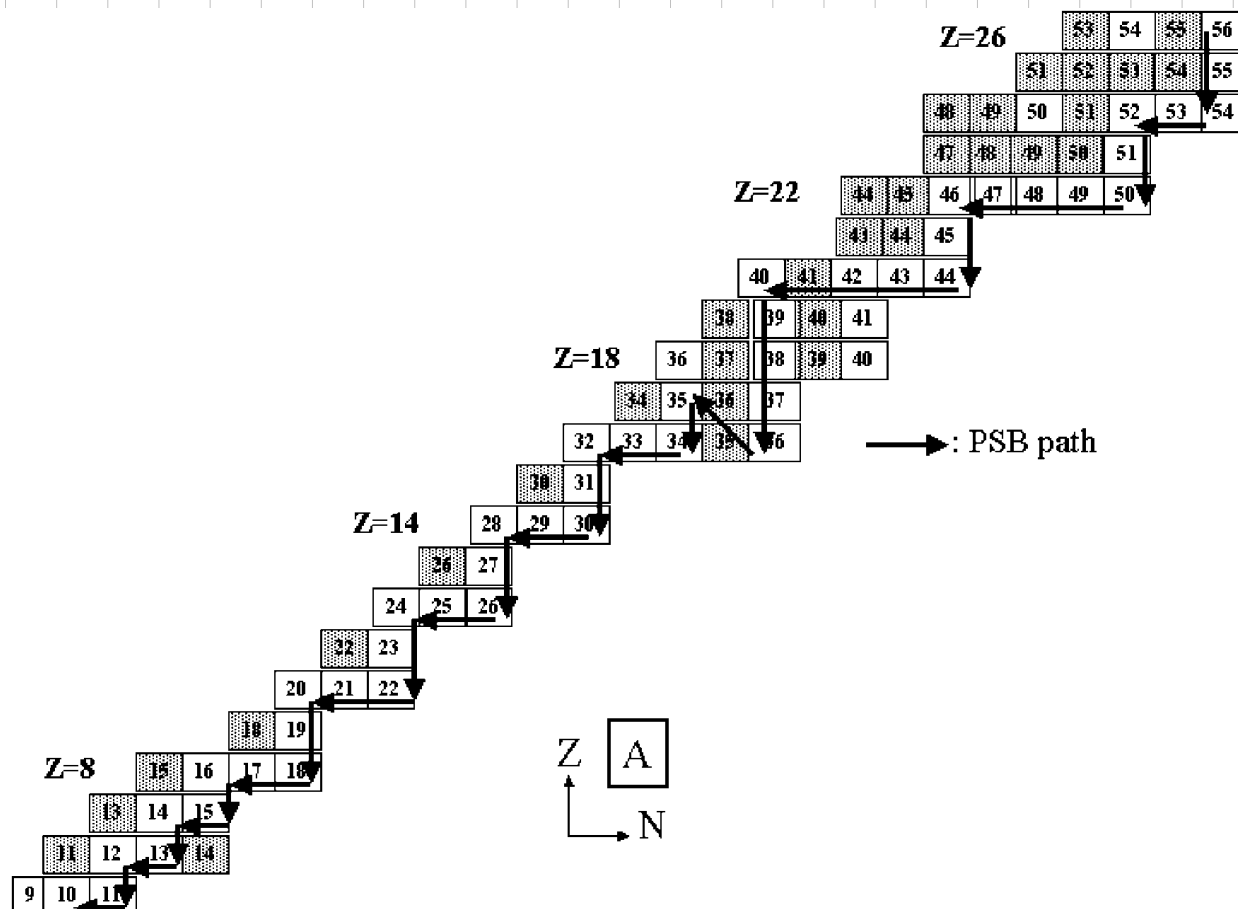
Photodissoziation von Kernen

Hauptbeitrag: große Dipolresonanz

$$T_{E1}(\varepsilon_\gamma) = \frac{8}{3} \frac{NZ}{A} \frac{e^2}{\hbar c} \frac{1 + \chi}{mc^2} \frac{\Gamma_{\text{GDR}} \varepsilon_\gamma^4}{(\varepsilon_\gamma^2 - E_{\text{GDR}}^2)^2 + \Gamma_{\text{GDR}}^2 \varepsilon_\gamma^2}$$

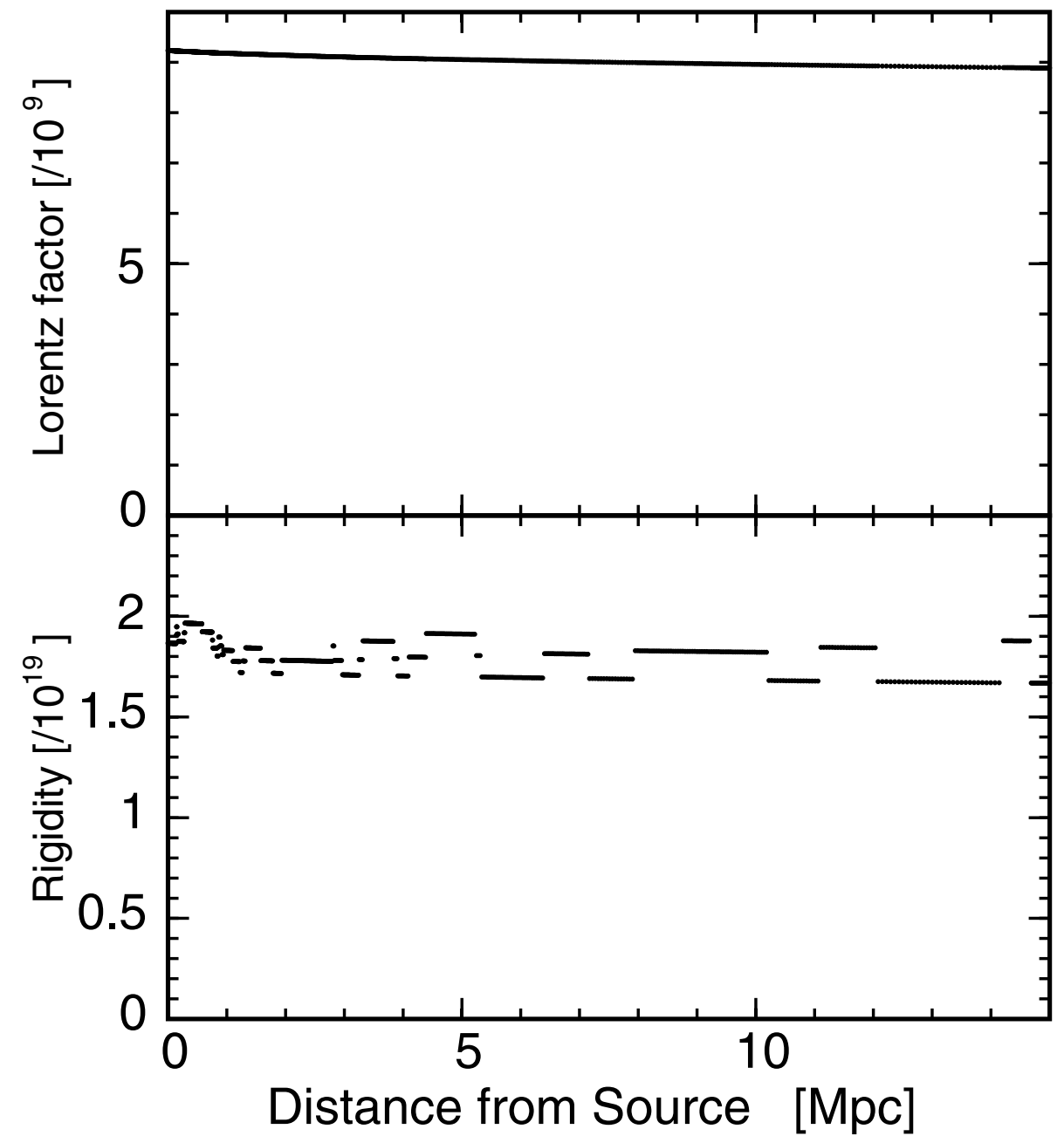
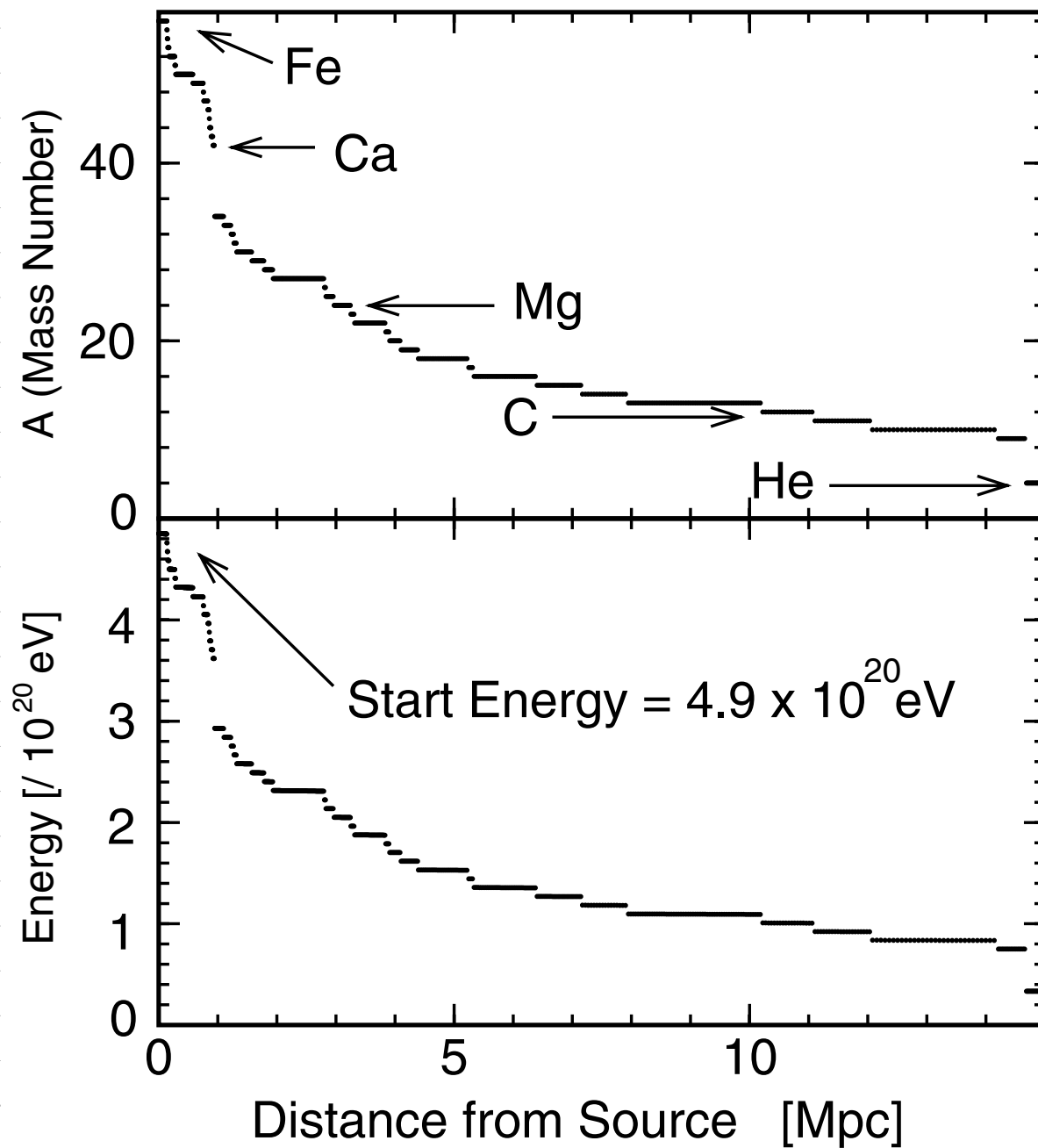
Wichtigste Emissionsprozesse:

- einfaches Neutron/Proton
- Quasi-Deuteron
- Alphateilchen



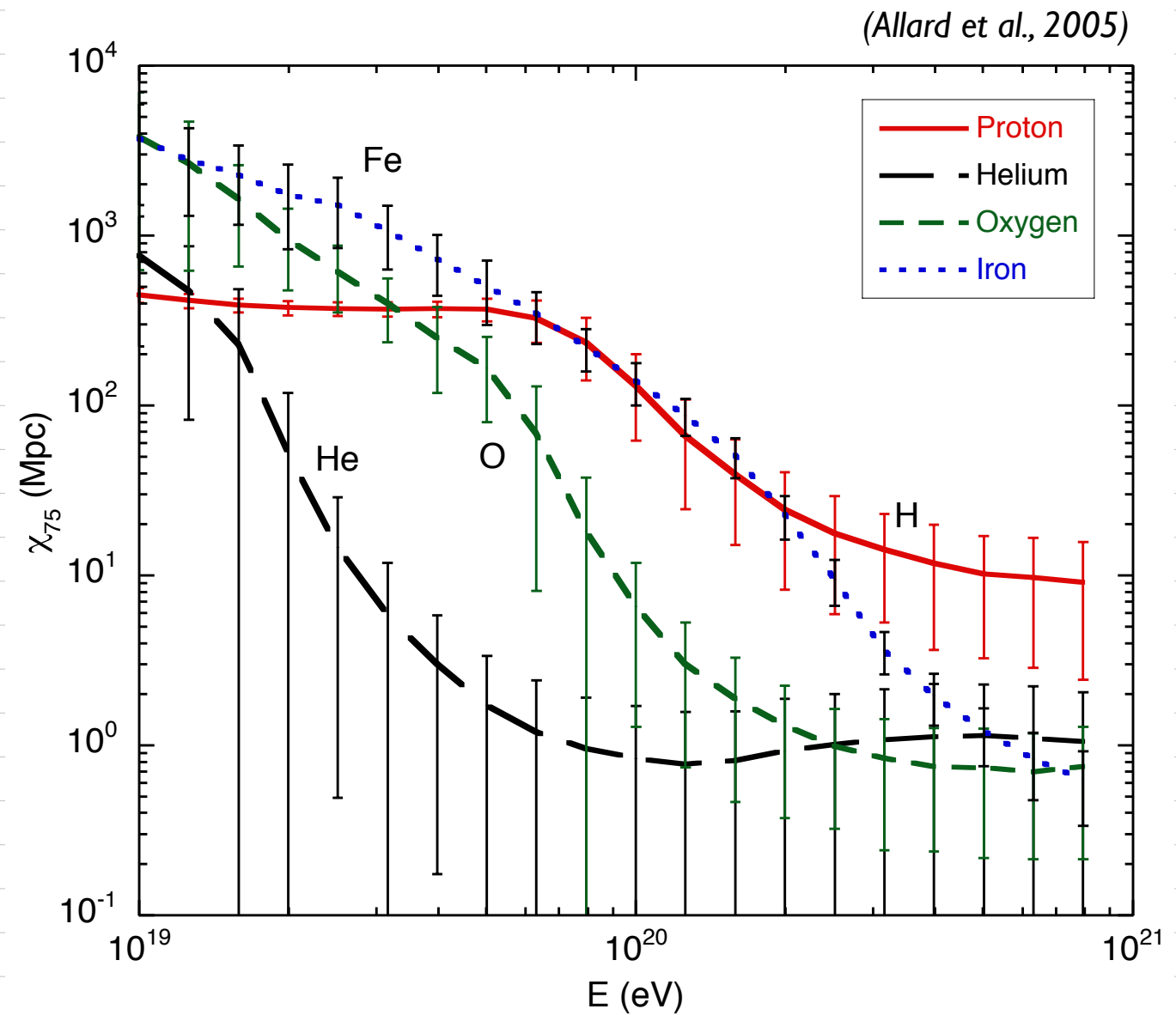
(Khan et al., *Astropart. Phys.*, 23, 2005)

Beispiele für Dissoziationsketten



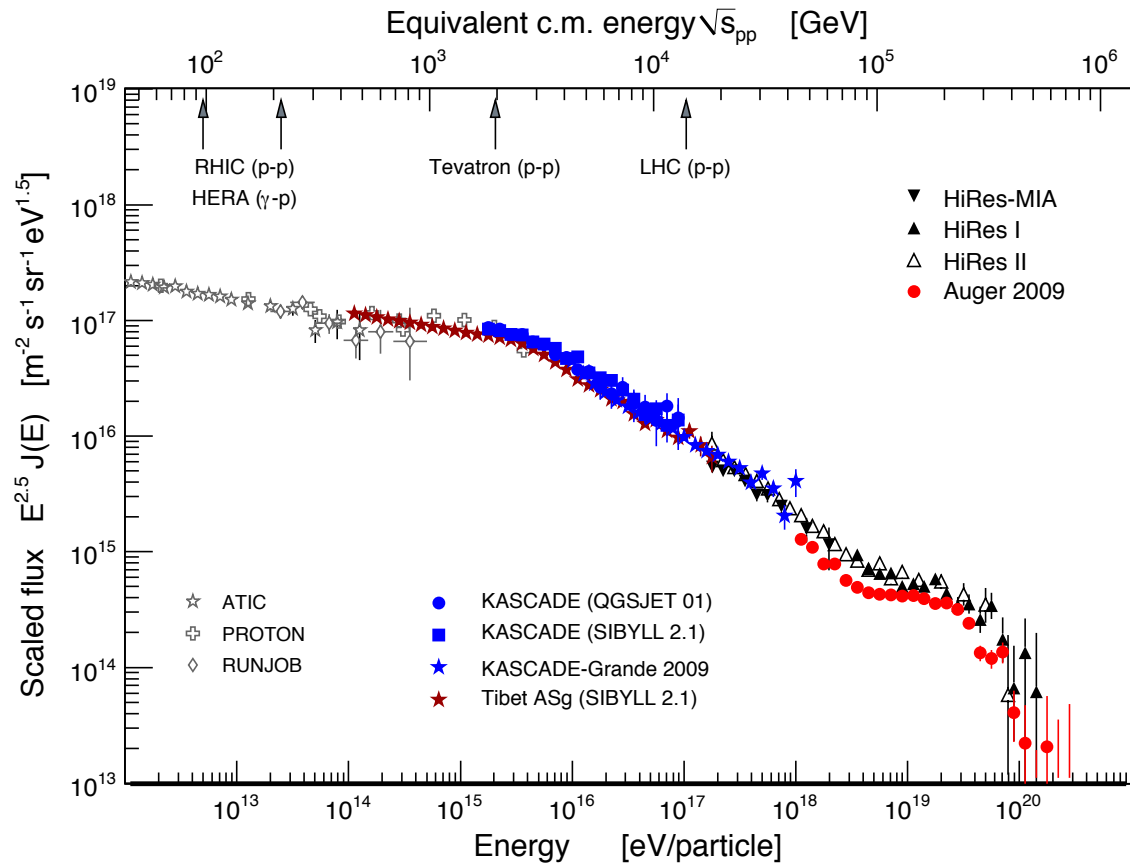
Effektive Energieverlustlänge für Kerne

Verlustlänge definiert als
Entfernung nach welcher
25% der Energie verloren
gegangen ist

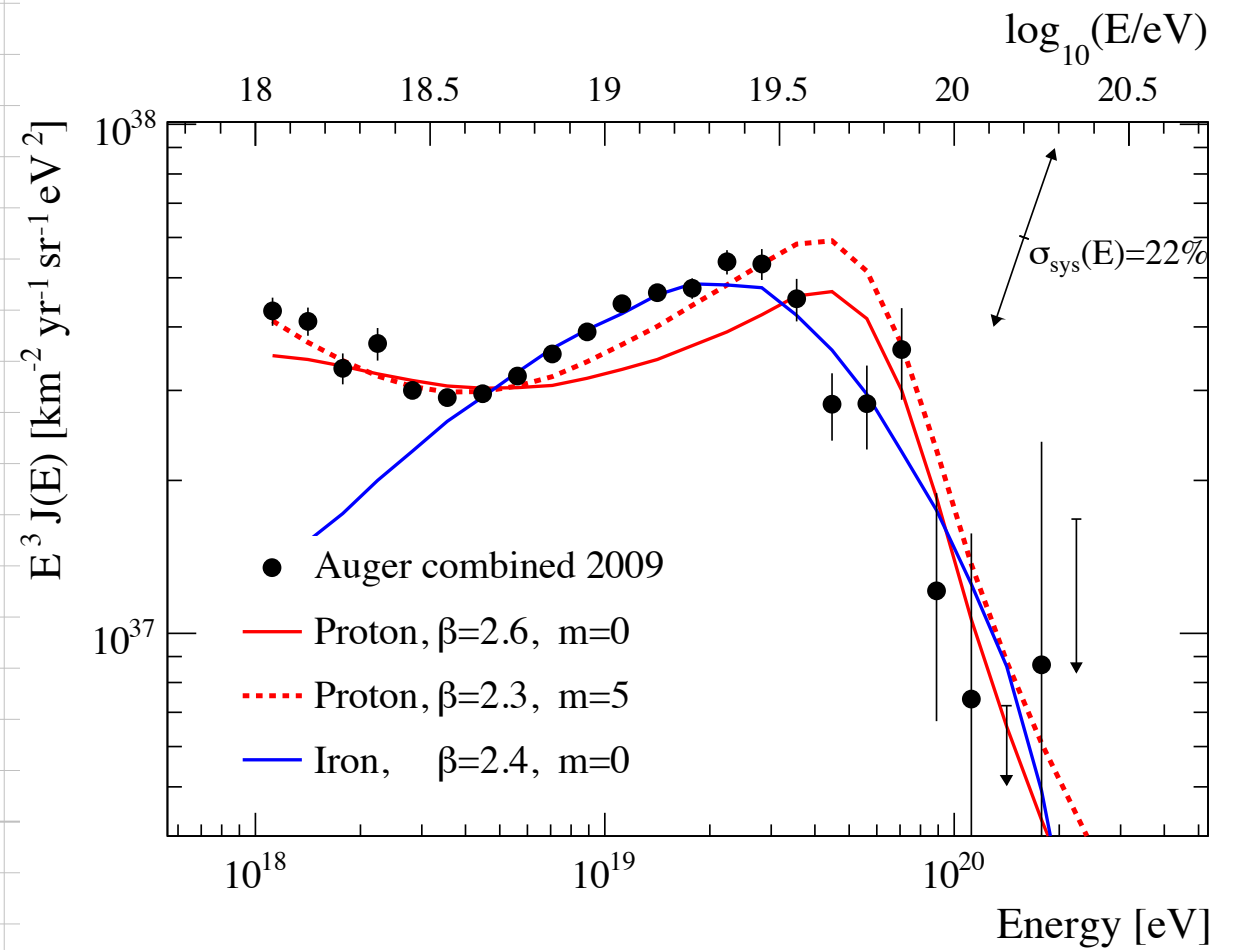


Eisen und Protonen haben ähnliche Energieverlustlängen

GZK-Unterdrückung des oberen Ende des Spektrums



$$\frac{dN_{\text{inj}}}{dE} \sim (1+z)^m E^{-\beta}$$



Stoßwellen

Materie des Mediums nahe der Störungsquelle kann nicht schnell genug reagieren, um der Störung auszuweichen.

Die Zustandsgrößen des Mediums

- Dichte,
- Druck,
- Temperatur,
- Geschwindigkeit usw.

verändern sich daher nahezu momentan, um sich der Störung anzupassen.

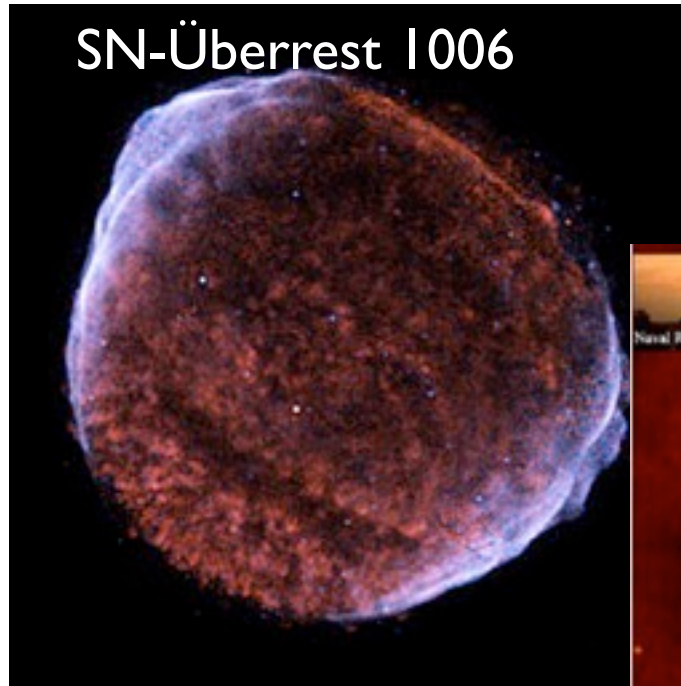


N.B.: Cherenkov-Effekt beruht auf Stoßwelleneffekt

Astrophysikalische Schockwellen (Stoßwellen)

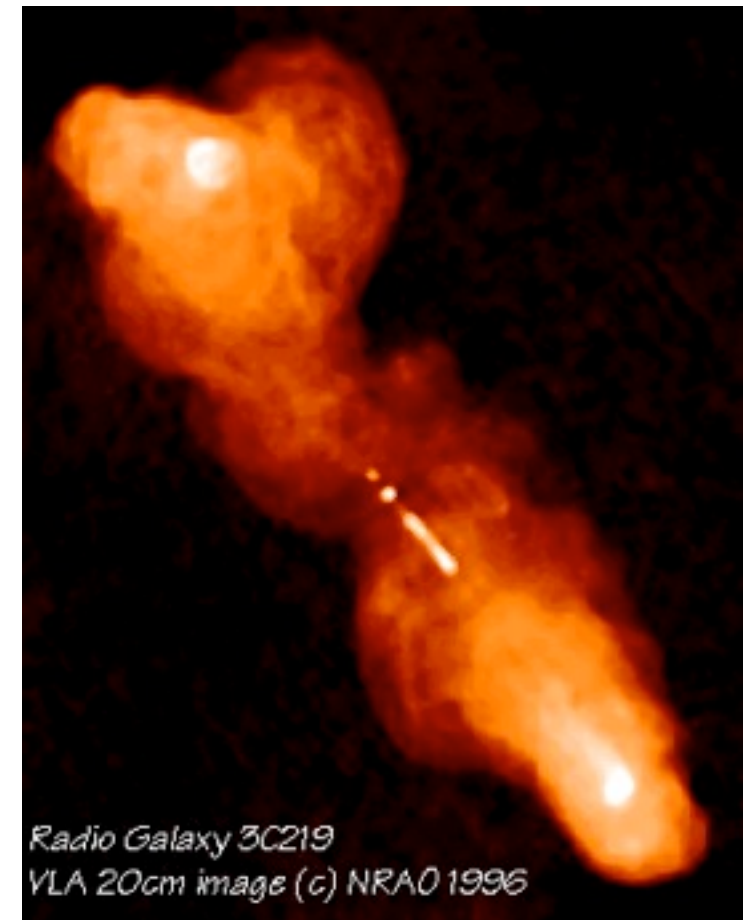
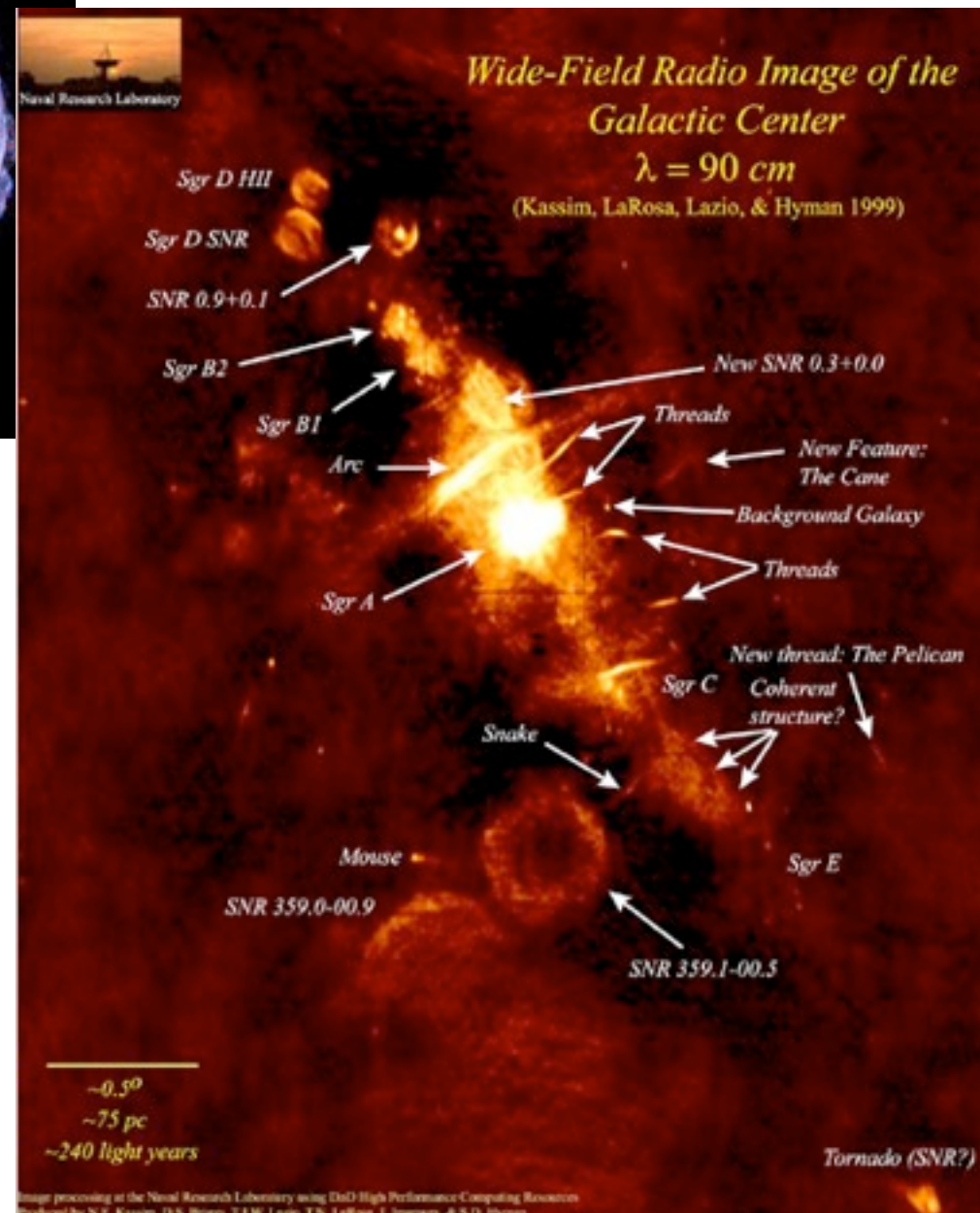
Entfernung: ~ 2.2 kpc

SN-Überrest 1006



20 pc

Radio-Bild des galaktischen Zentrums



Radio Galaxy 3C219
VLA 20cm image (c) NRAO 1996

Aktiver Galaktischer Kern
(AGN)