

Astrophysik mit Teilchen

Wintersemester 2013/14



Universität Siegen
Claus Grupen

Kosmische Beschleuniger



Übersicht



Astroteilchenphysik

Röntgenastronomie

γ -Astronomie

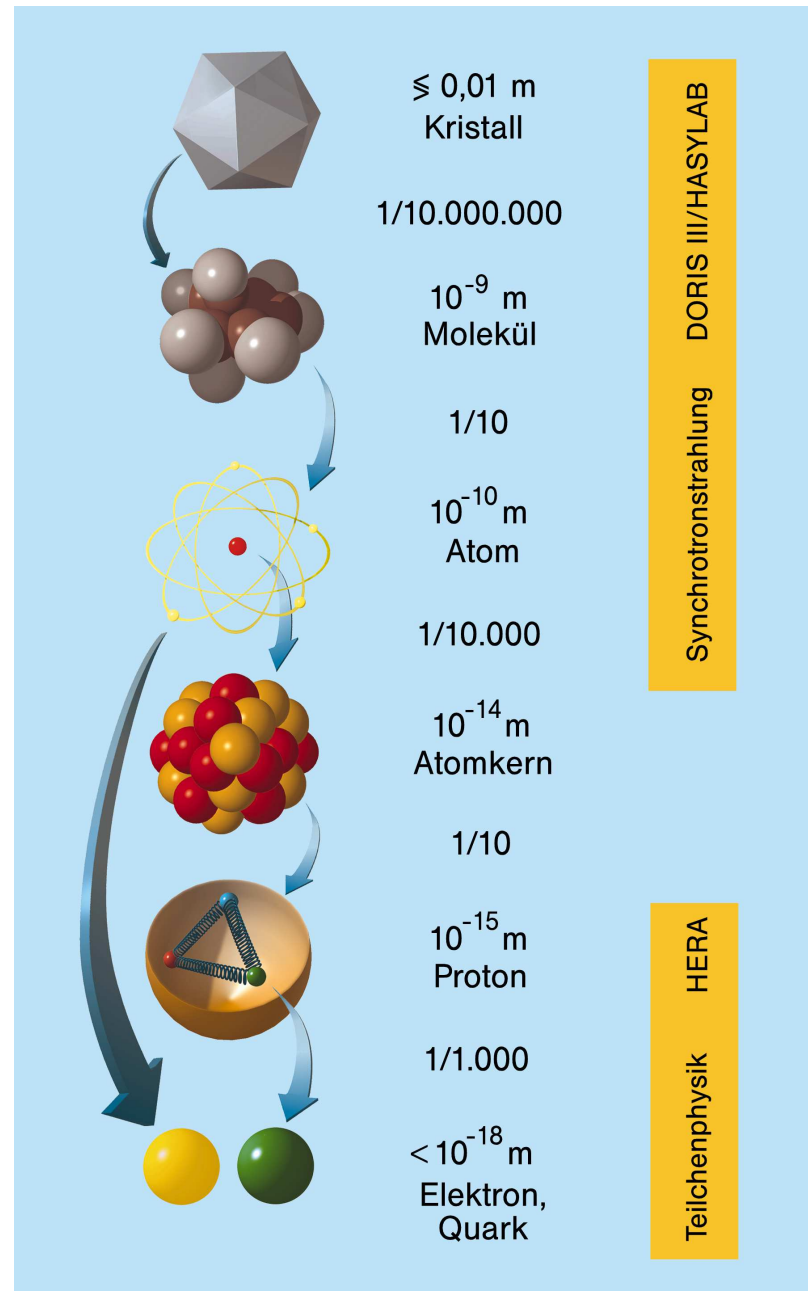
Neutrinoastronomie

Gravitationswellen

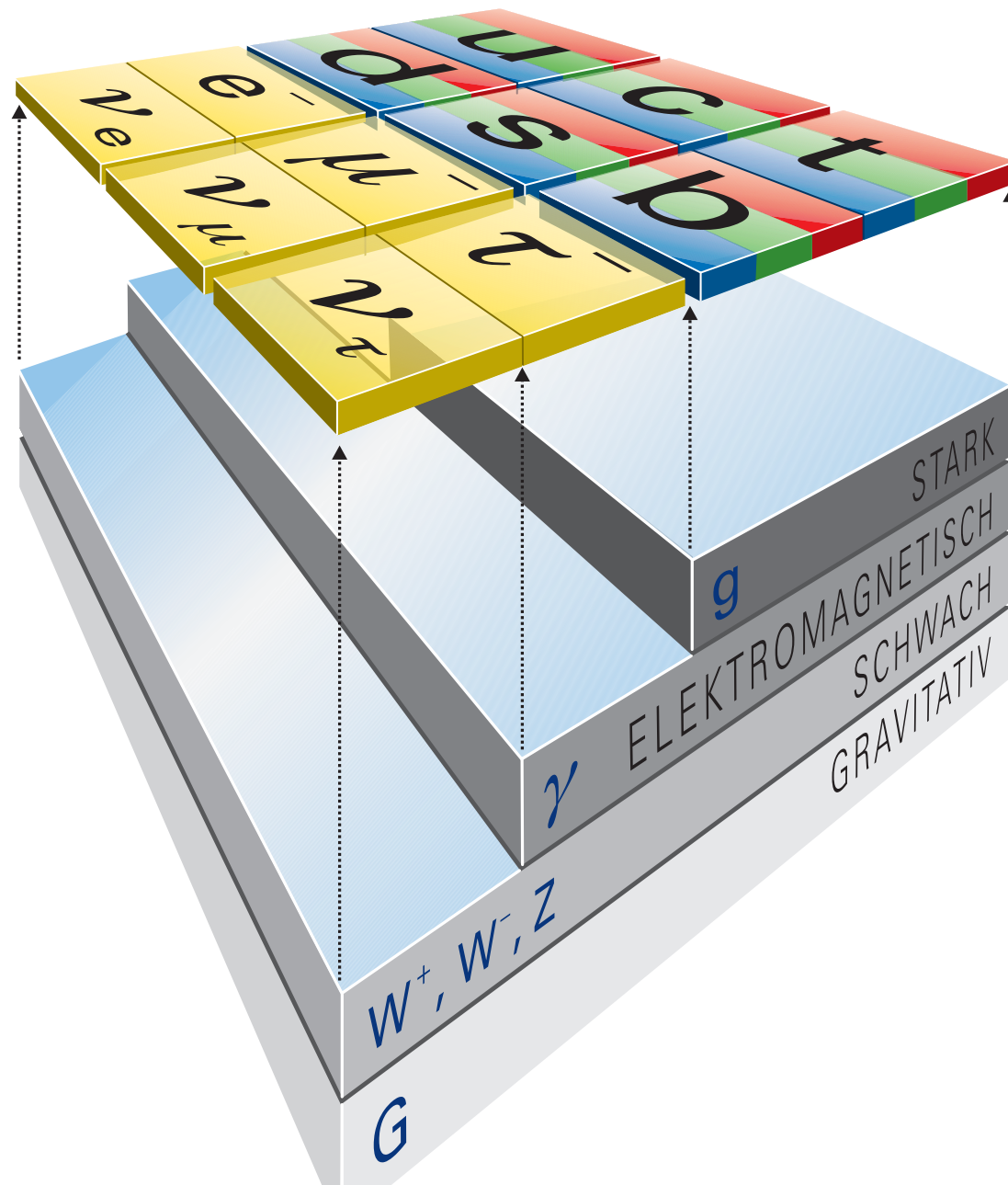
Dunkle Materie

Kosmische Strahlung

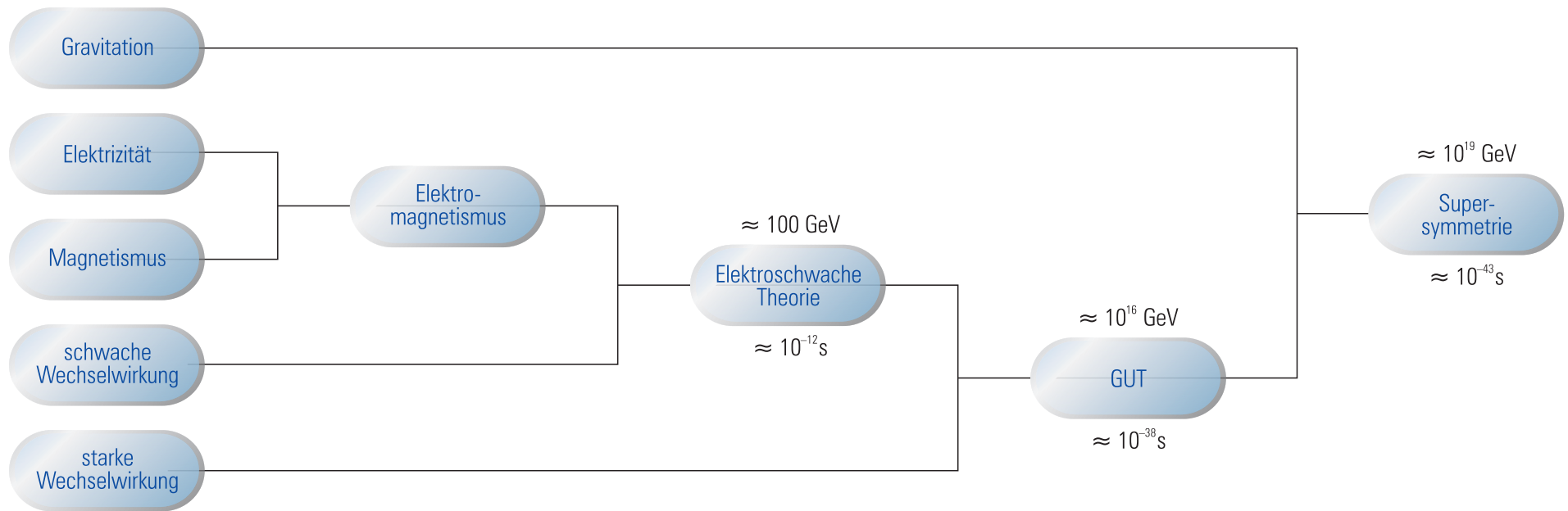
Vom Kristall zum Quark



Teilchensorten



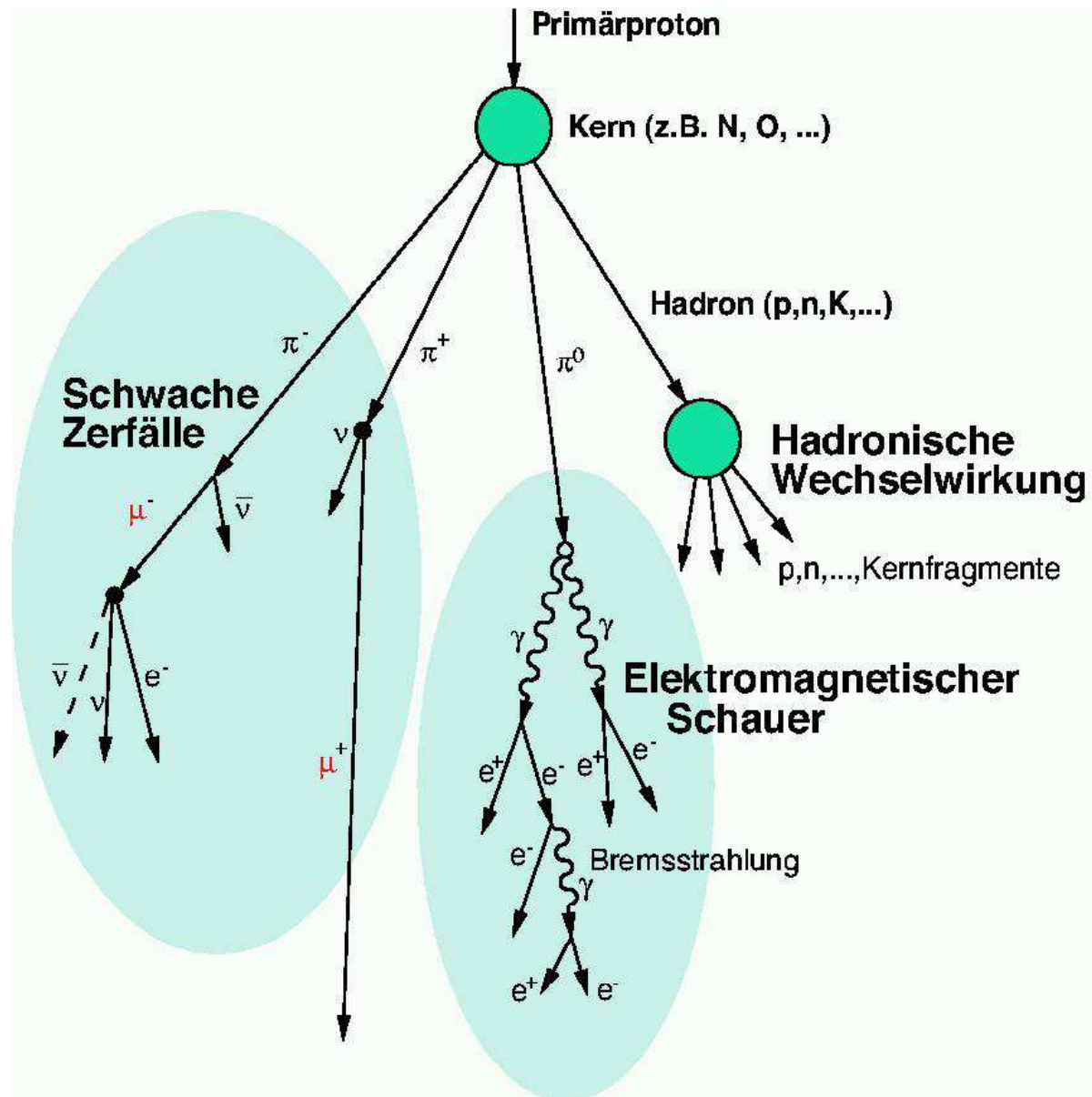
Wechselwirkungen



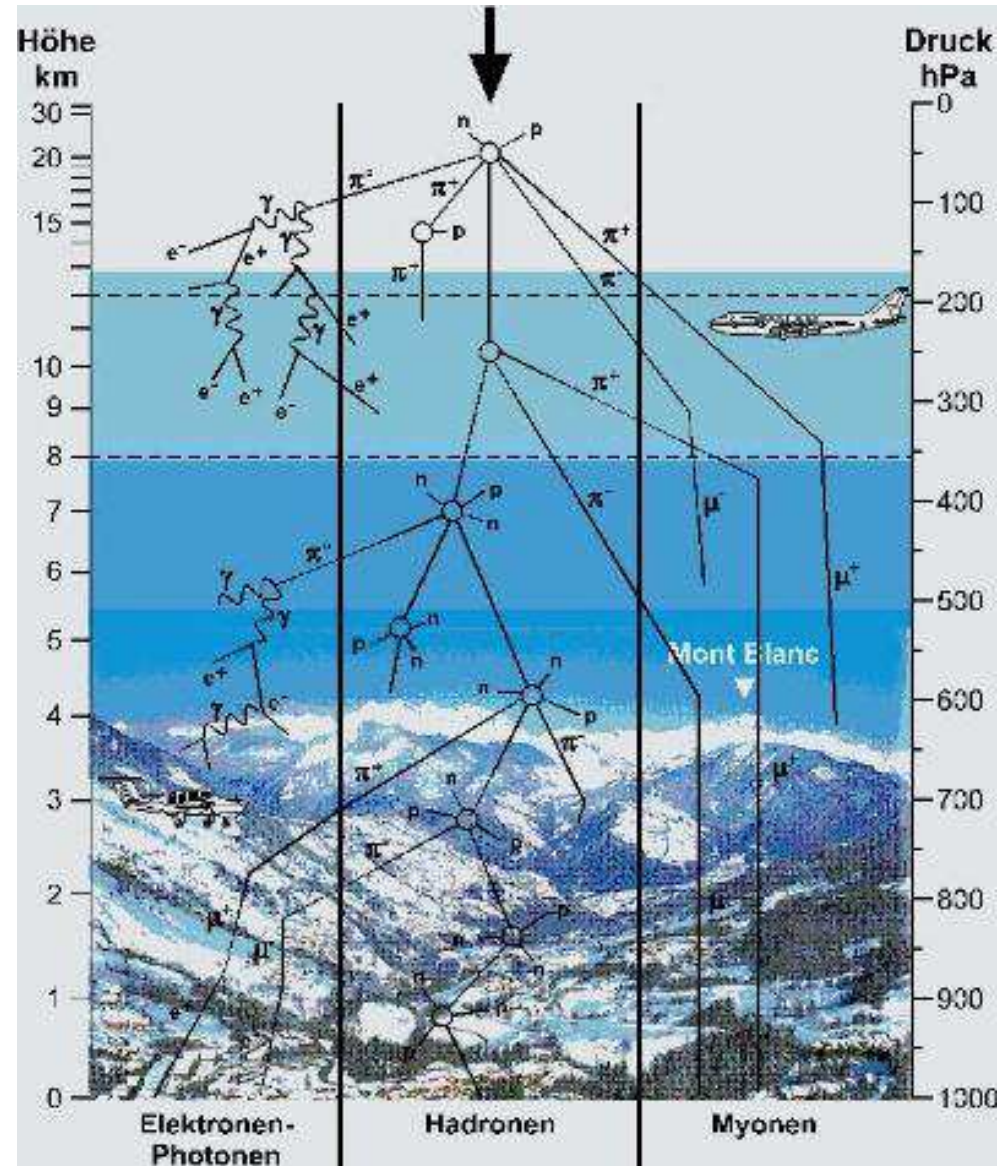
Kosmische Strahlung



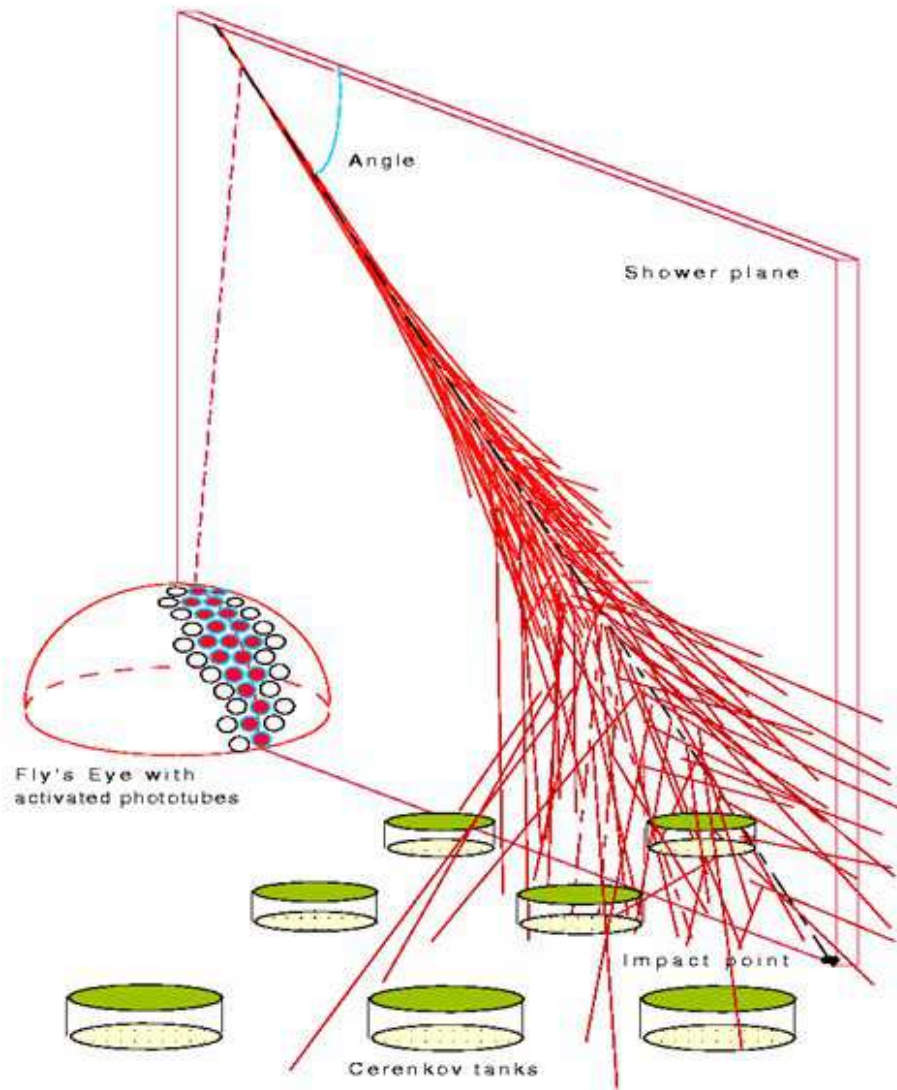
Kosmische Strahlung



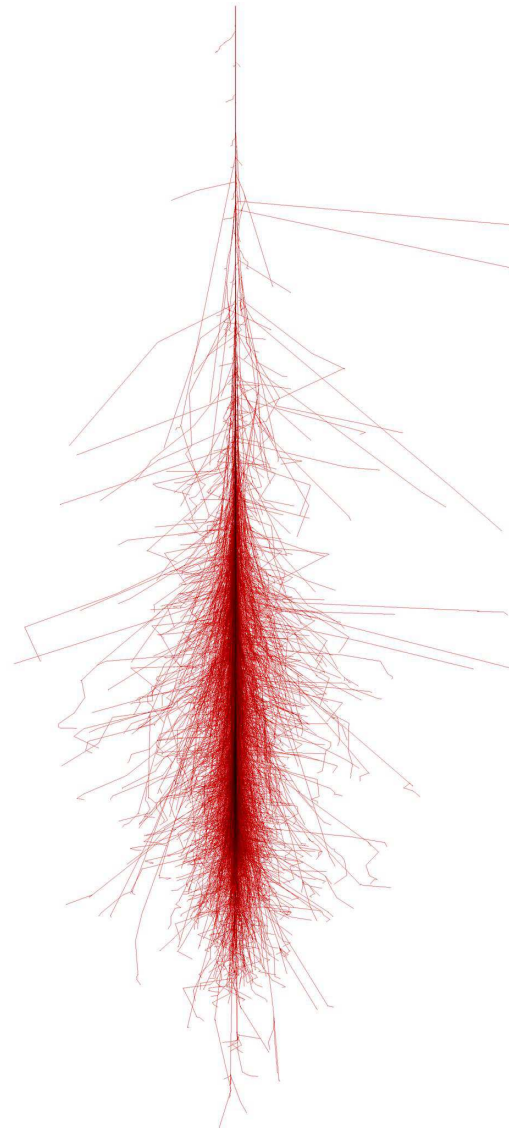
Kosmische Strahlung



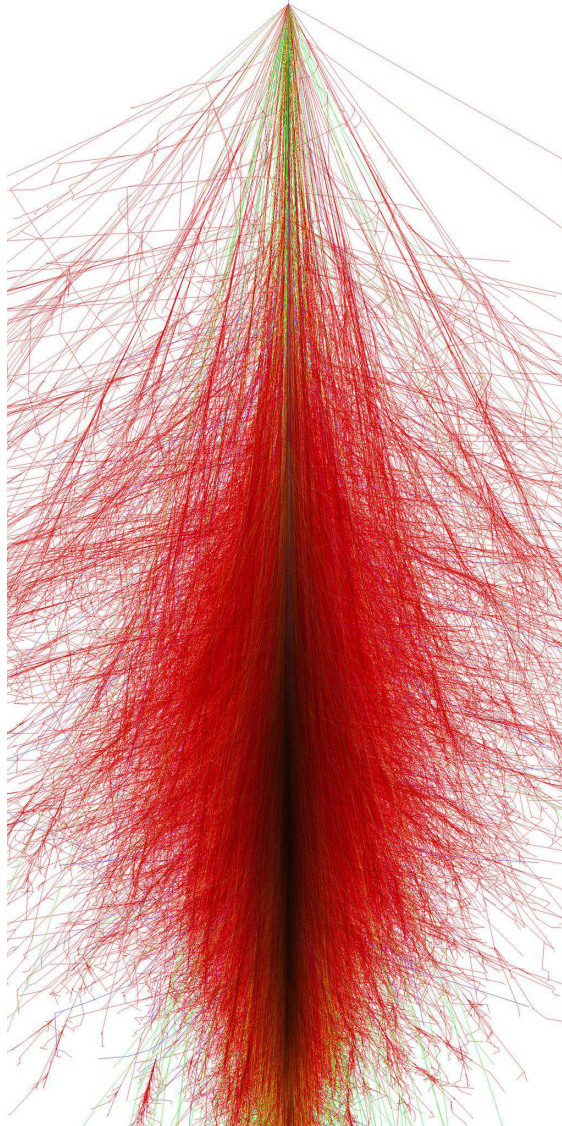
Luftschauer



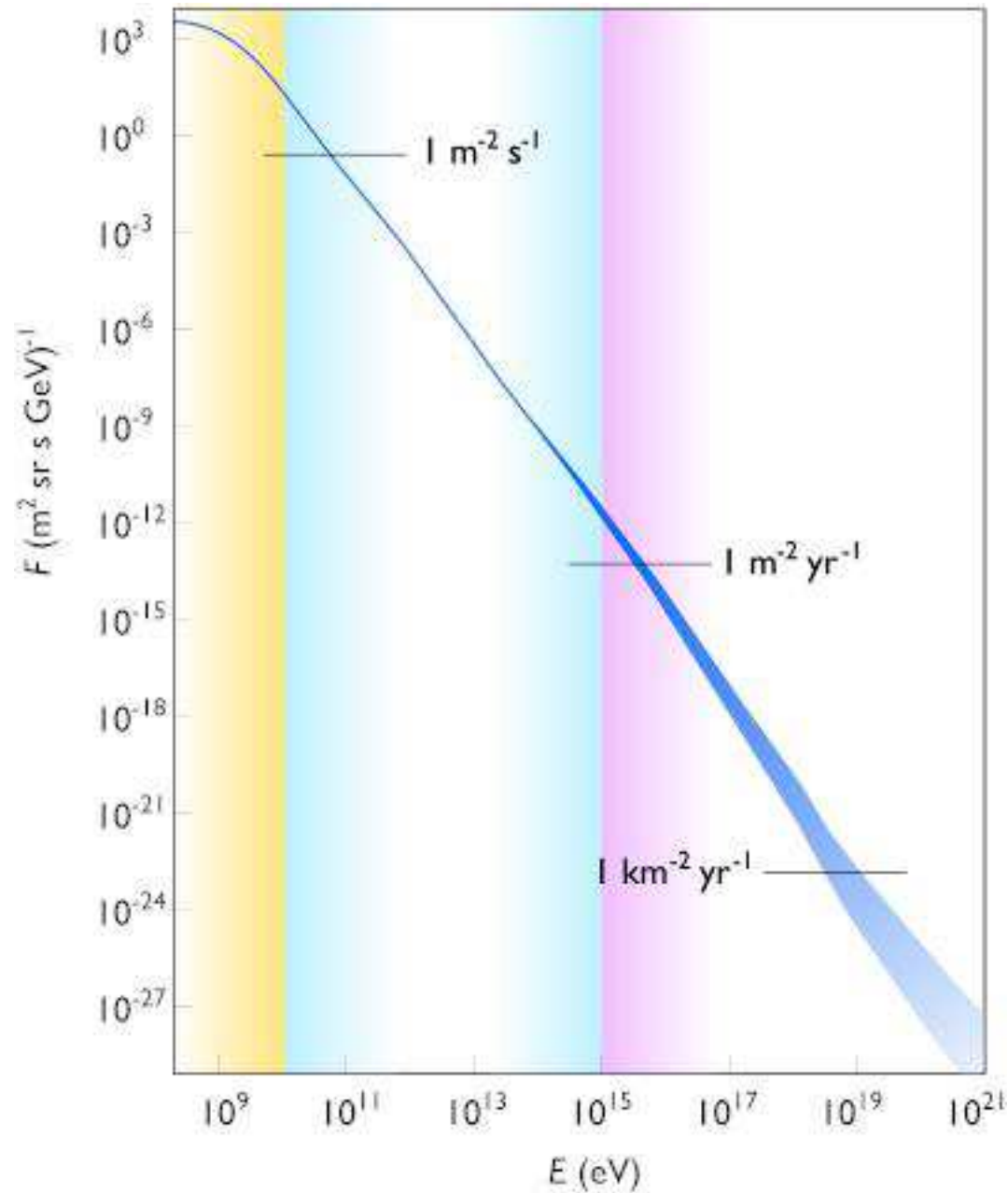
Photon induzierter Schauer



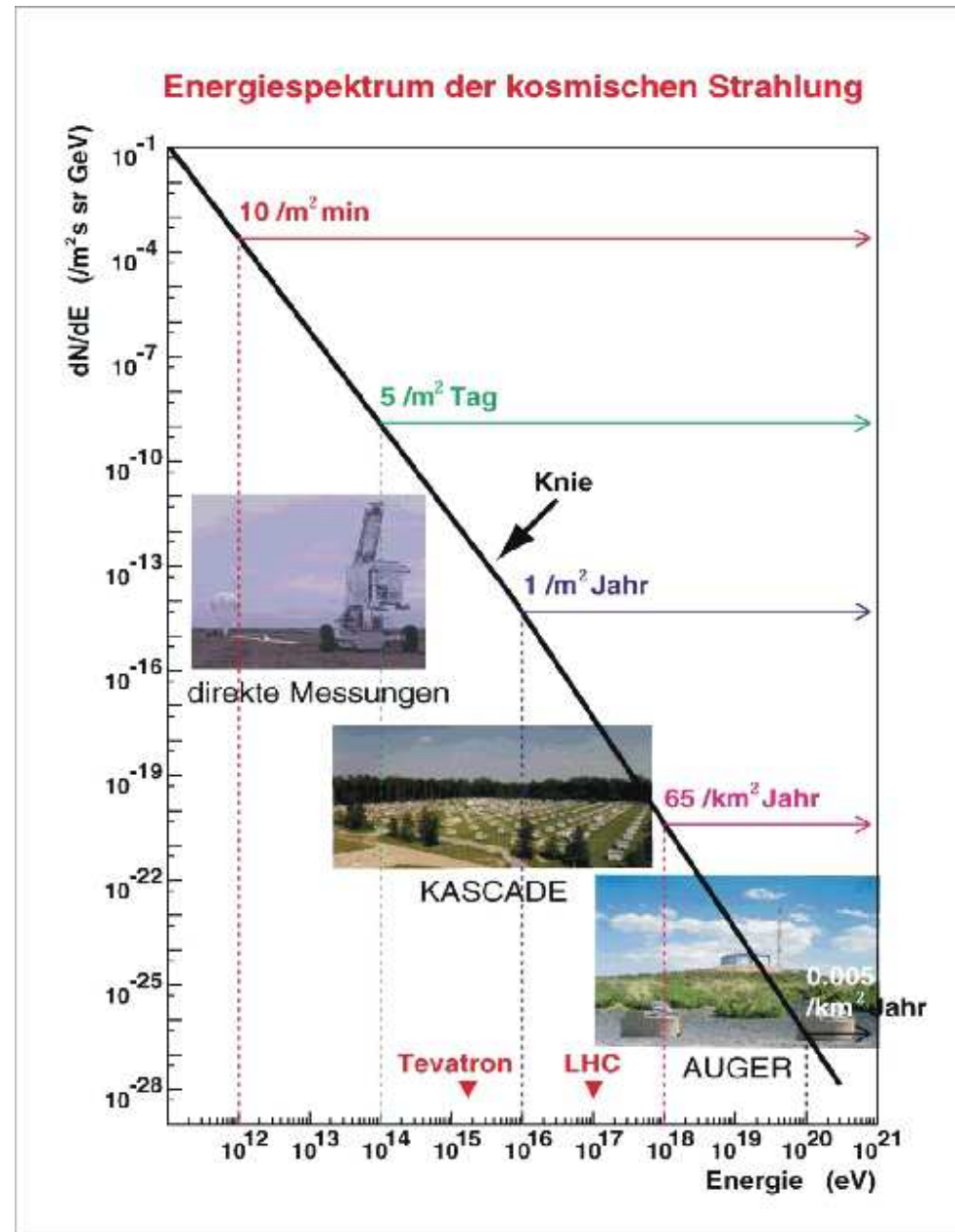
Eisen induzierter Schauer



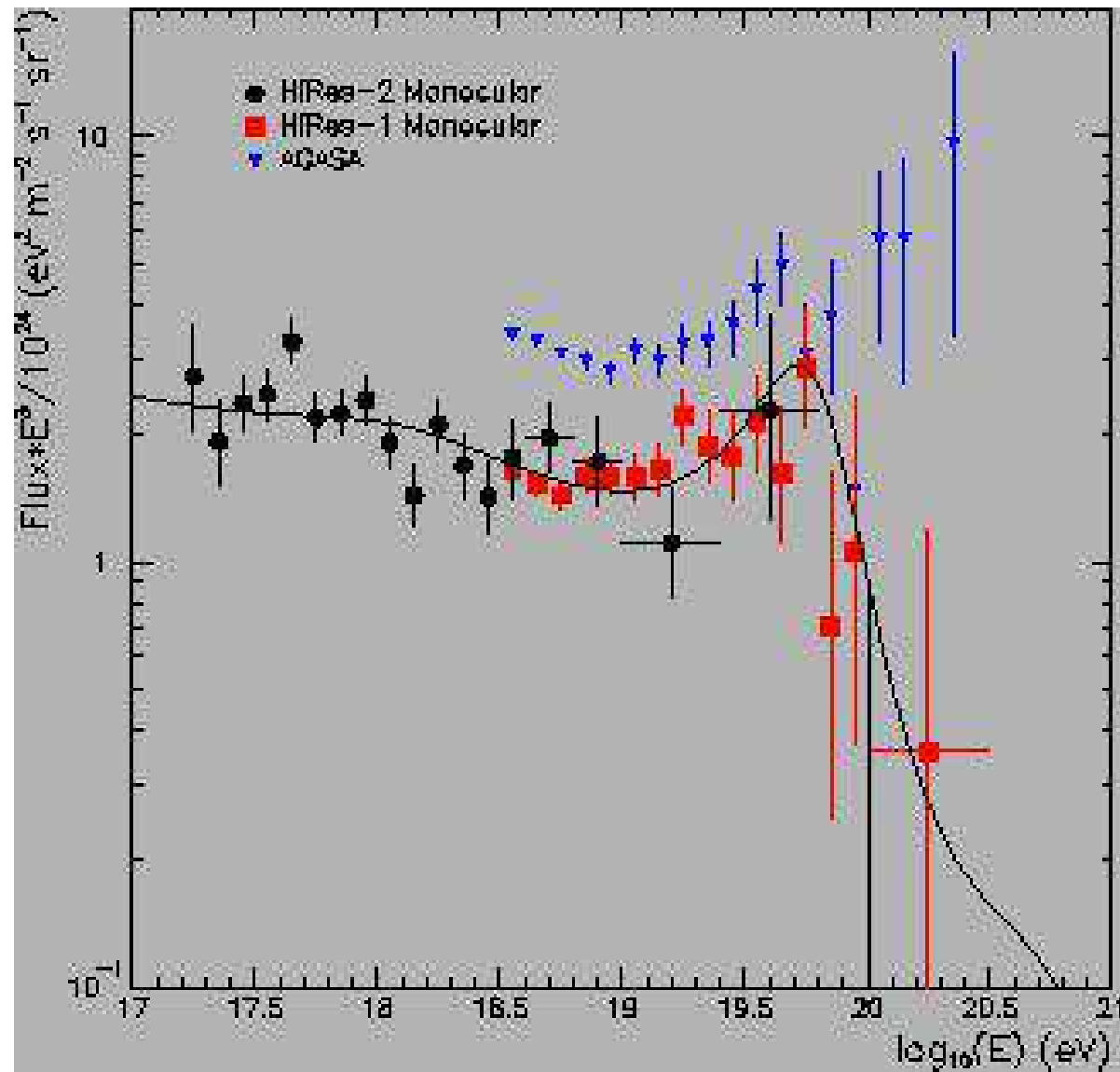
Primärspektrum



Primärspektrum

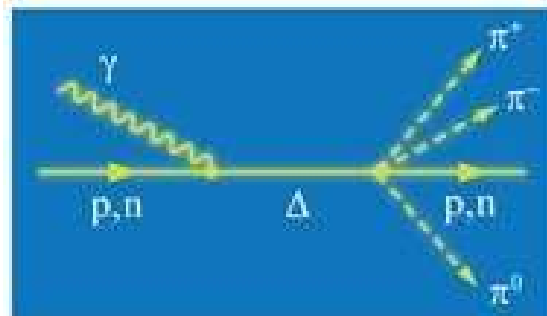


Primärspektrum

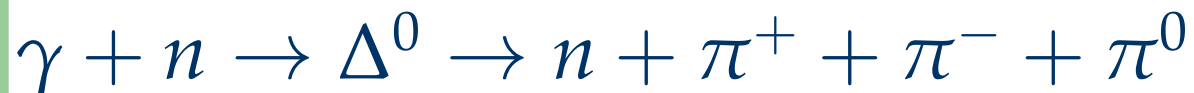


Greisen-Zatsepin-Kuzmin Cut-off

Energieverlust von hochenergetischen Protonen durch Wechselwirkungen mit der kosmologischen Hintergrundstrahlung

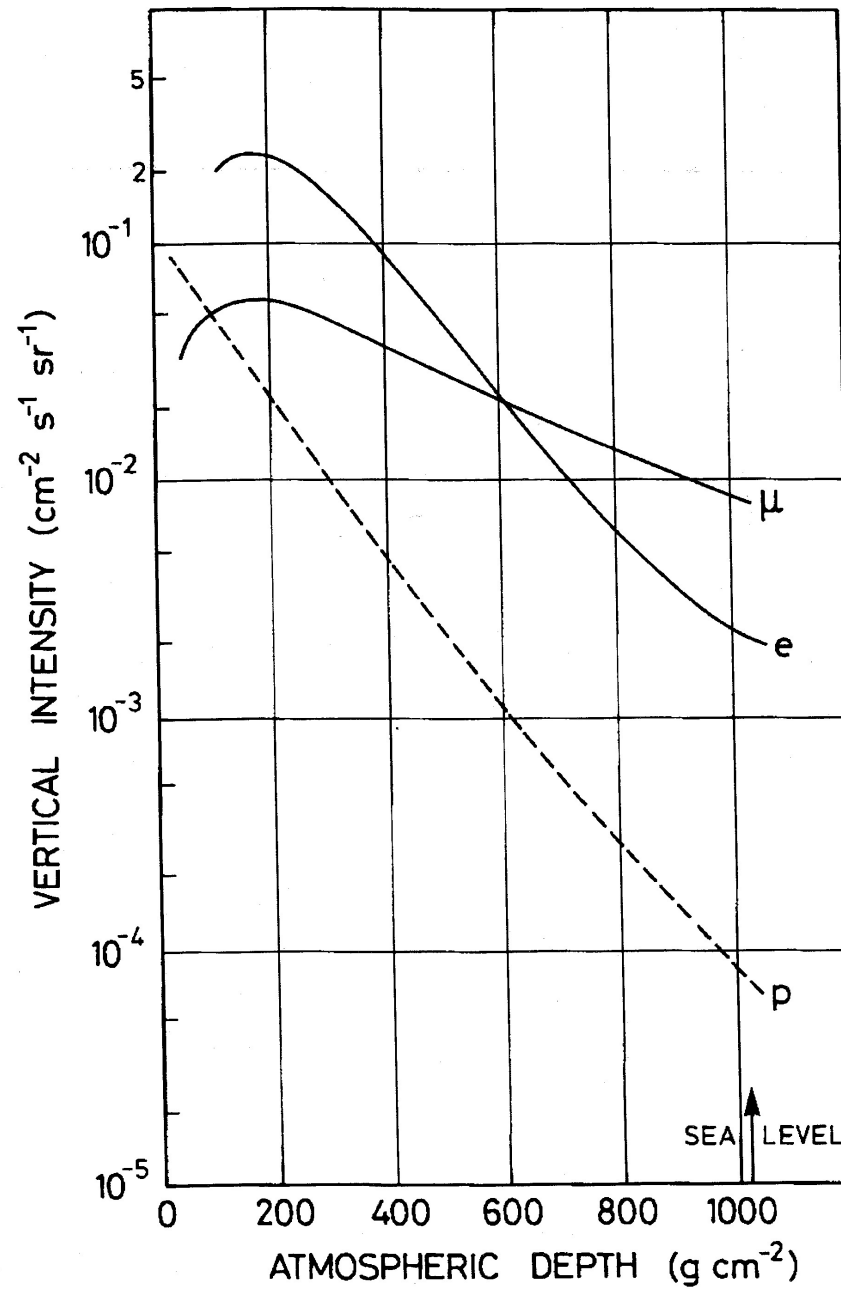


oder



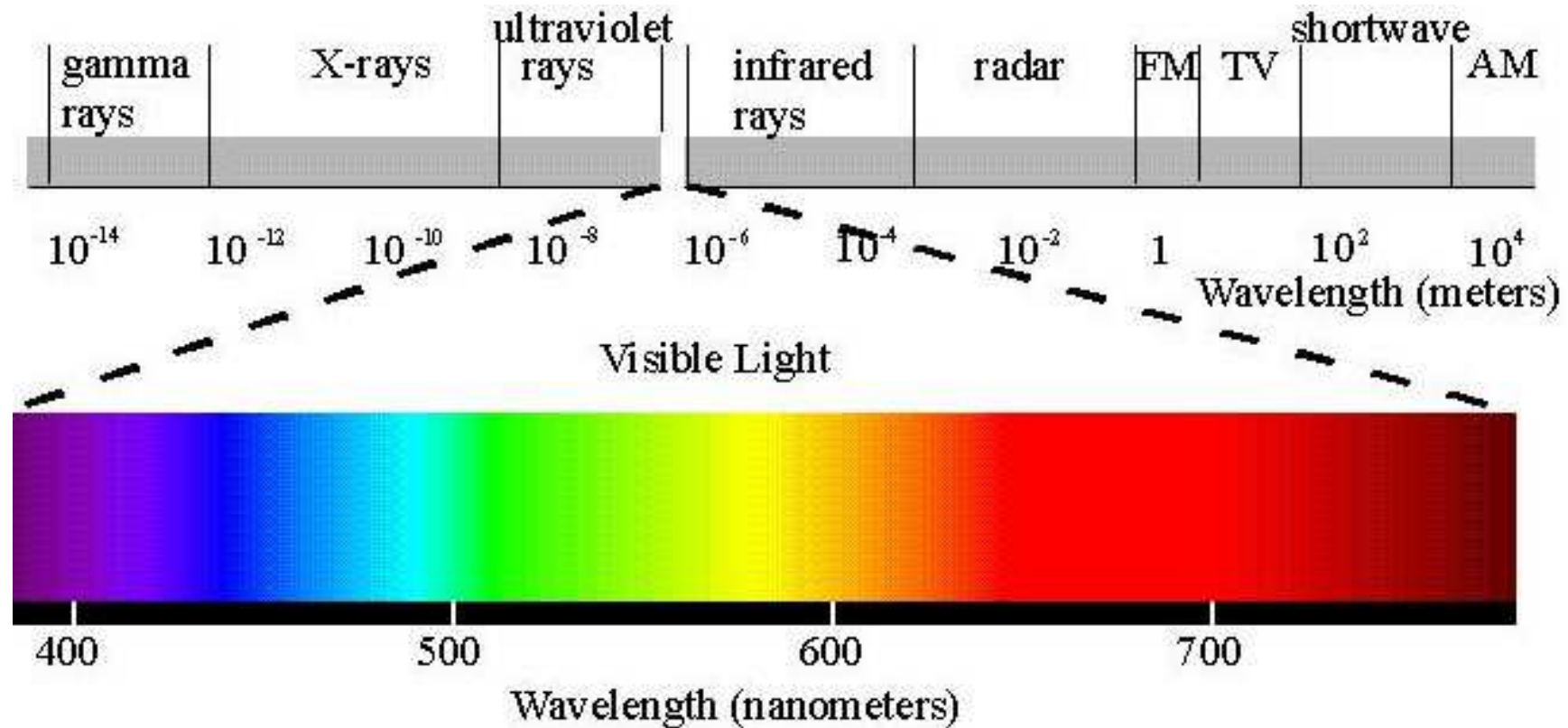
führt zum Abknicken des Primärspektrums

Atmosphärische Komponenten

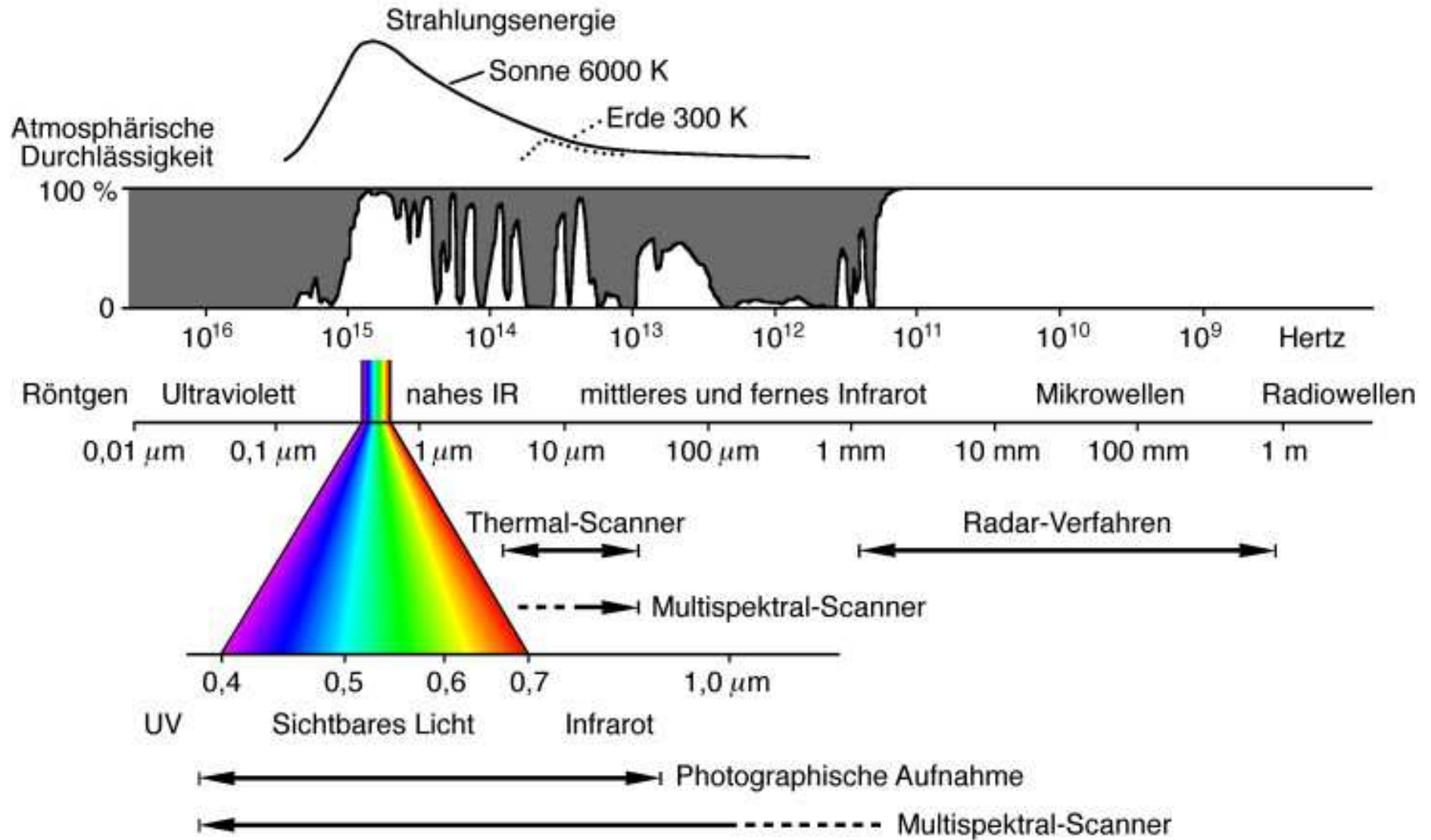


Elektromagnetisches Spektrum

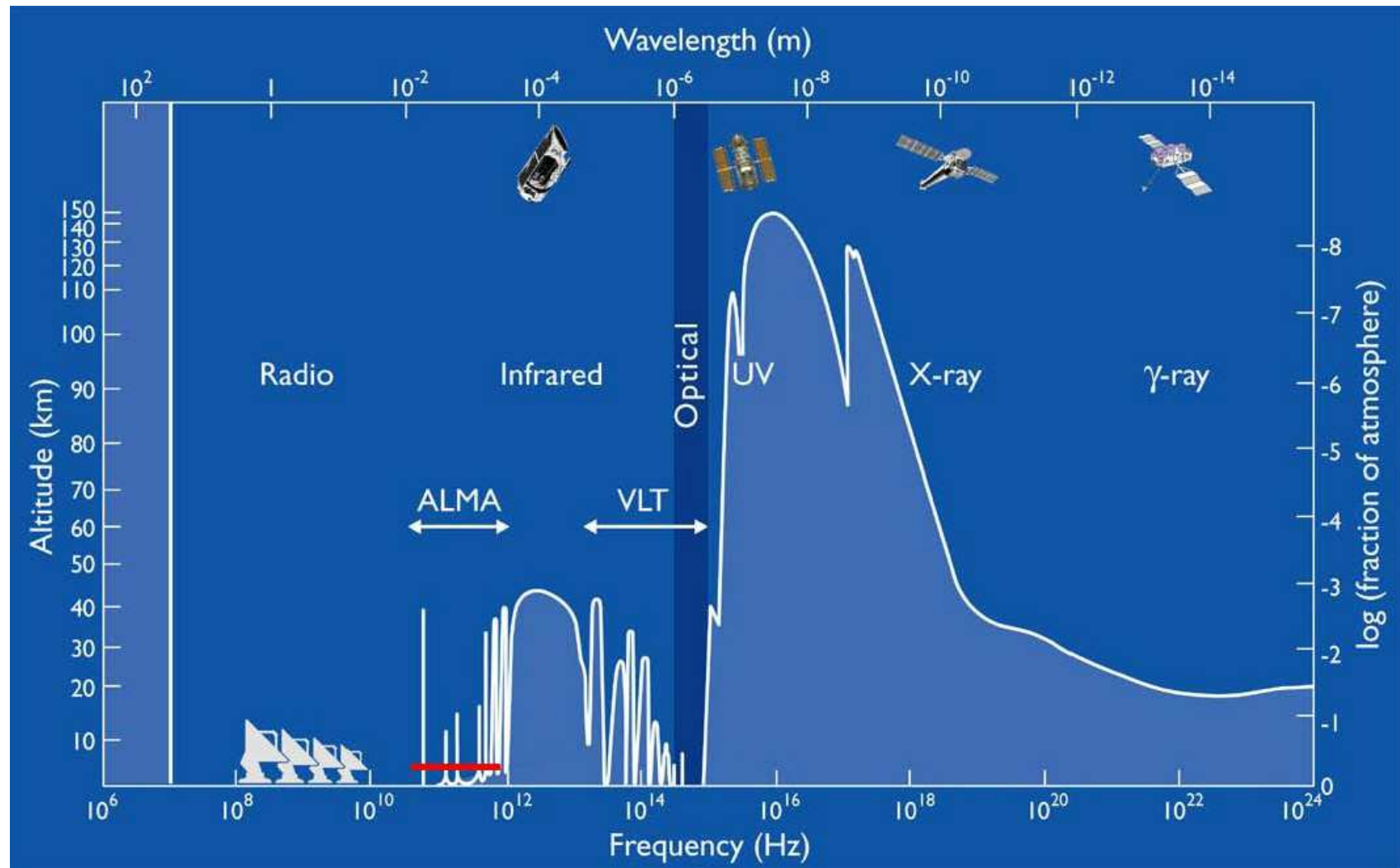
Röntgenstrahlen und γ -Strahlen



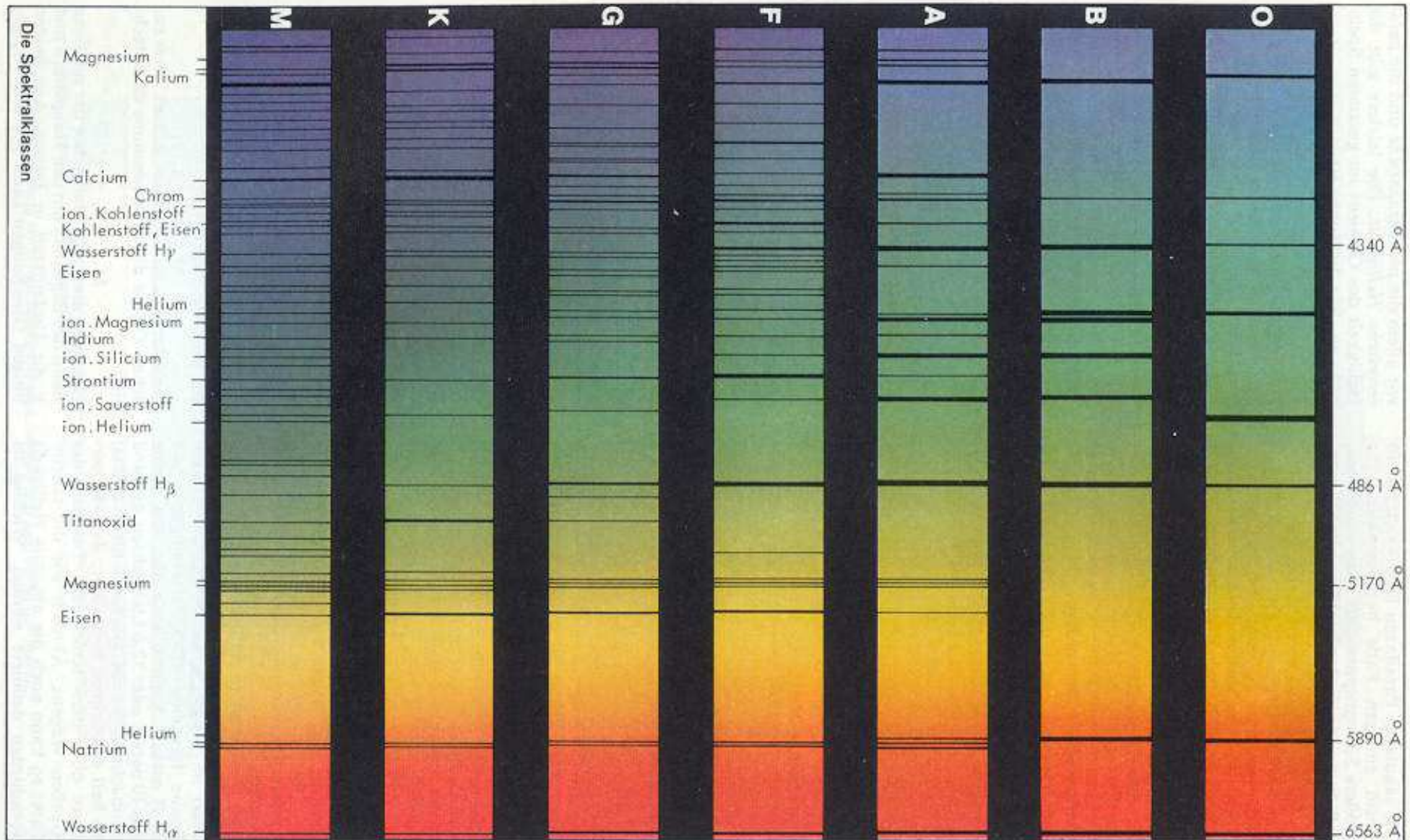
Elektromagnetisches Spektrum



Fenster zum All



Fraunhofer Spektren

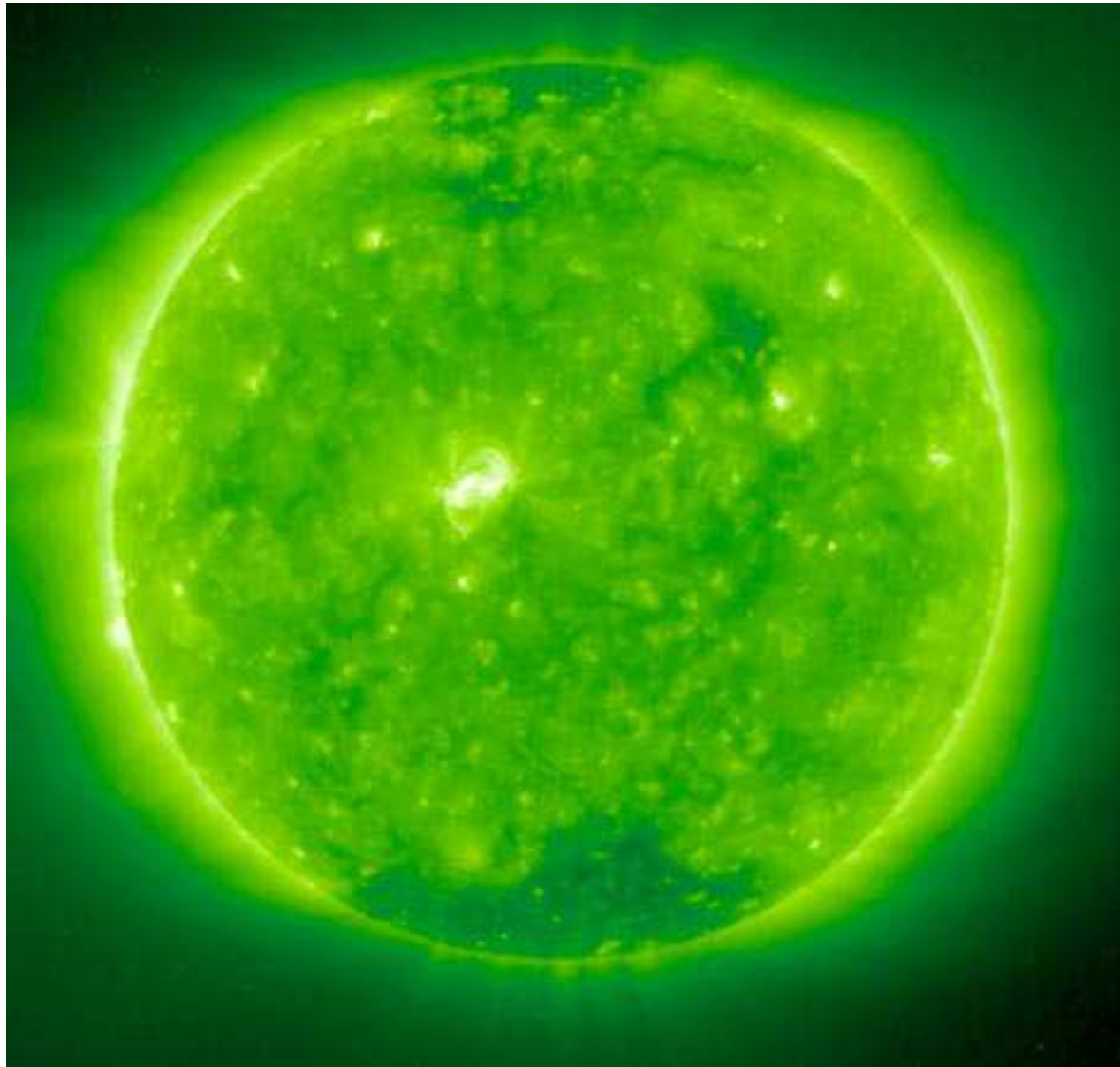


150 Aufbau der Sterne / Zustandsgrößen II

Fraunhofer Spektrum



Röntgenstrahlen von der Sonne



Rayleigh-Streuung



Wie entsteht Röntgenstrahlung?

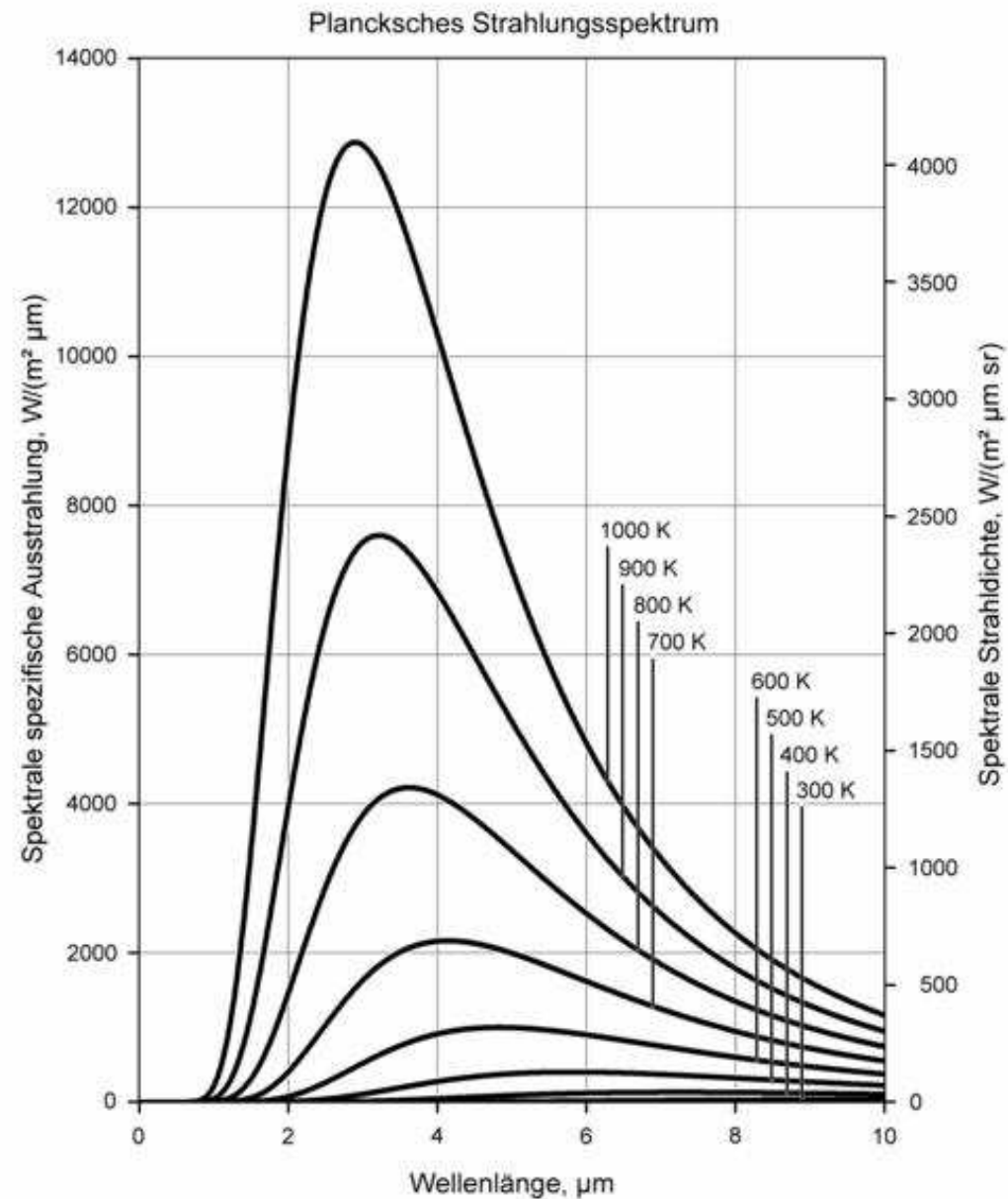
Es gibt verschiedene Mechanismen zur Erzeugung von Röntgenstrahlung

- Thermische Strahlung eines heißen Plasmas
- Bremsstrahlung
- Synchrotronstrahlung von Elektronen
- Inverser Compton-Effekt
- Charakteristische Röntgenstrahlung von Atomen

Planck'sches Strahlungsgesetz

- $P_\lambda(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$
- $P_\lambda(\lambda, T)$ spektrale spezifische Ausstrahlung
- h Planck'sches Wirkungsquantum
- c Lichtgeschwindigkeit
- k Boltzmann-Konstante
- T absolute Temperatur der Strahlerfläche, in K
- λ betrachtete Wellenlänge

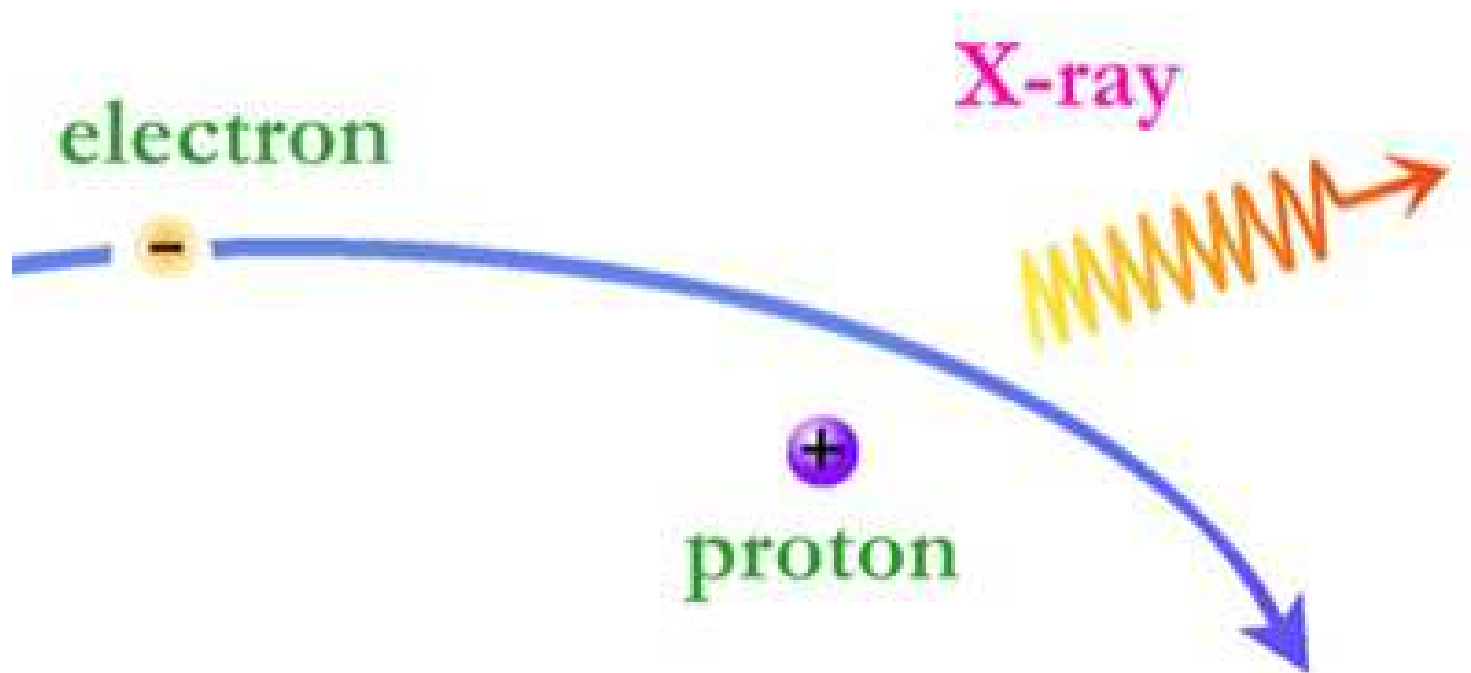
Planck-Verteilung



Wien'sches Verschiebungsgesetz

- → Wiensches Verschiebungsgesetz
- $\lambda_{\max} = \frac{2897,8 \mu m K}{T}$
- λ_{\max} Wellenlänge, bei der die größte Strahlungsintensität auftritt, in μm
- T absolute Temperatur der strahlenden Fläche, in K
- Beispiel: $\lambda_{\max} \cdot T \approx 3000 \mu m K$
- mit Zahlen: T = 6000 Kelvin (Sonne) → $\lambda = 0,5 \mu m$
- mit Zahlen: T = 300 Kelvin (Mensch) → $\lambda = 10 \mu m$
- sehr heiße Sterne ⇒ Röntgenstrahlung

Bremsstrahlungsmechanismus



Bremsstrahlung

Bremsstrahlung entsteht bei der Ablenkung geladener Teilchen im Coulombfeld von Atomkernen.

- Der Wirkungsquerschnitt gibt die Wahrscheinlichkeit für Bremsstrahlung an. Das Teilchen verliert dabei einen Teil seiner Energie.
- $\sigma \sim z^2 \cdot \frac{Z^2}{A} \cdot \frac{1}{m^2} \cdot E$
- Dabei sind: z - Ladung des Bremsstrahlung erzeugenden Teilchens
- Z und A - Ladung und Masse des Targets
- m - Masse des Bremsstrahlung erzeugenden Teilchens
- E - Energie des einfallenden Teilchens

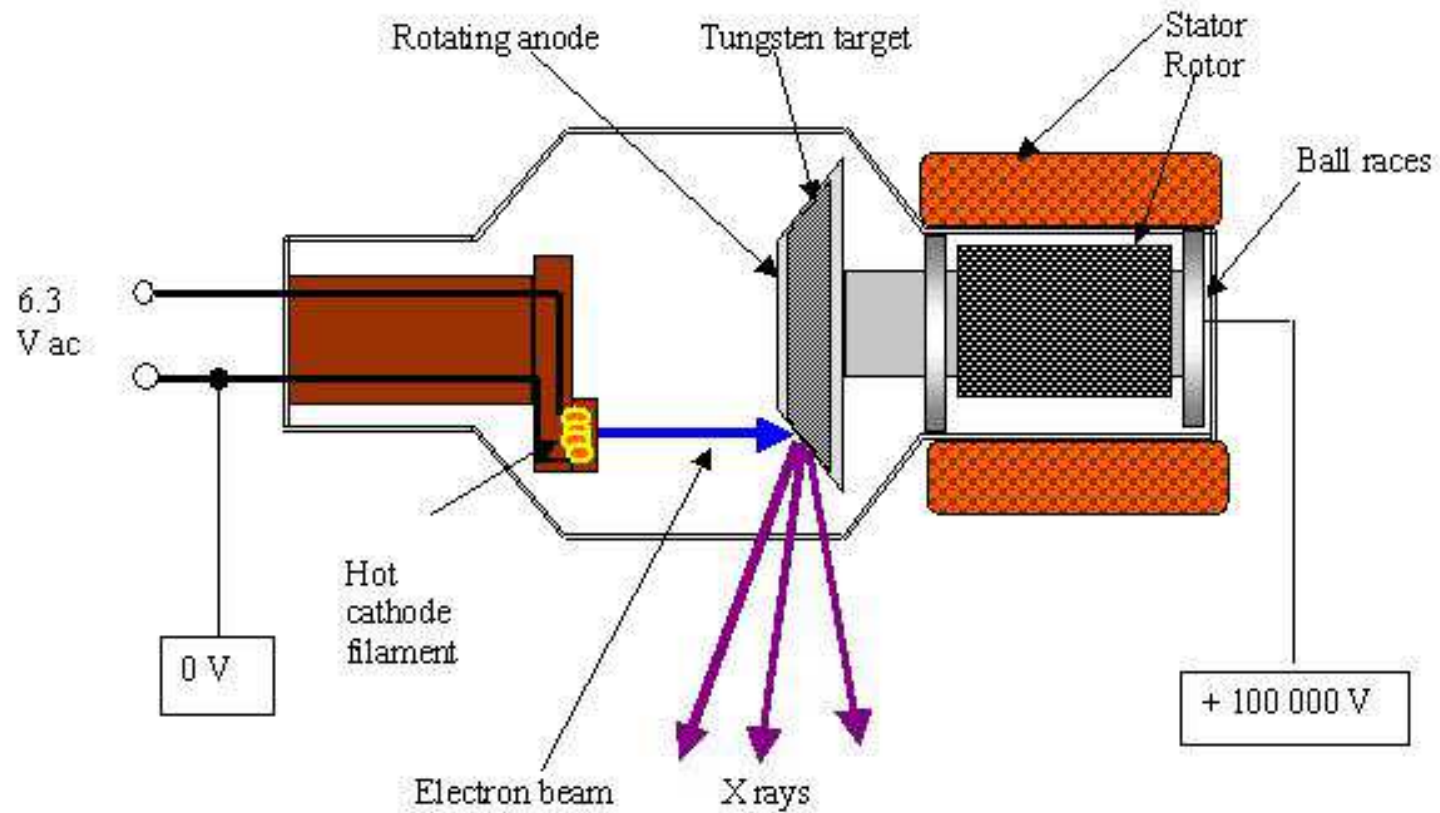
Bremsstrahlung

Wegen der $\frac{1}{r^2}$ Abhängigkeit ist Bremsstrahlung nur für Elektronen interessant.

Bremsstrahlung ist auch der Erzeugungsmechanismus für Röntgenstrahlung in Röntgenröhren in der Medizin.

Bei sehr hohen Energien tritt auch Röntgenstrahlung von Myonen und Protonen auf.

Röntgenröhre



Röntgenröhre



Synchrotronstrahlung

Synchrotronstrahlung entsteht bei der Ablenkung von geladenen Teilchen im Magnetfeld (“magnetische Bremsstrahlung”).

In der Astroteilchenphysik ist wiederum nur die Synchrotronstrahlung von Elektronen relevant.

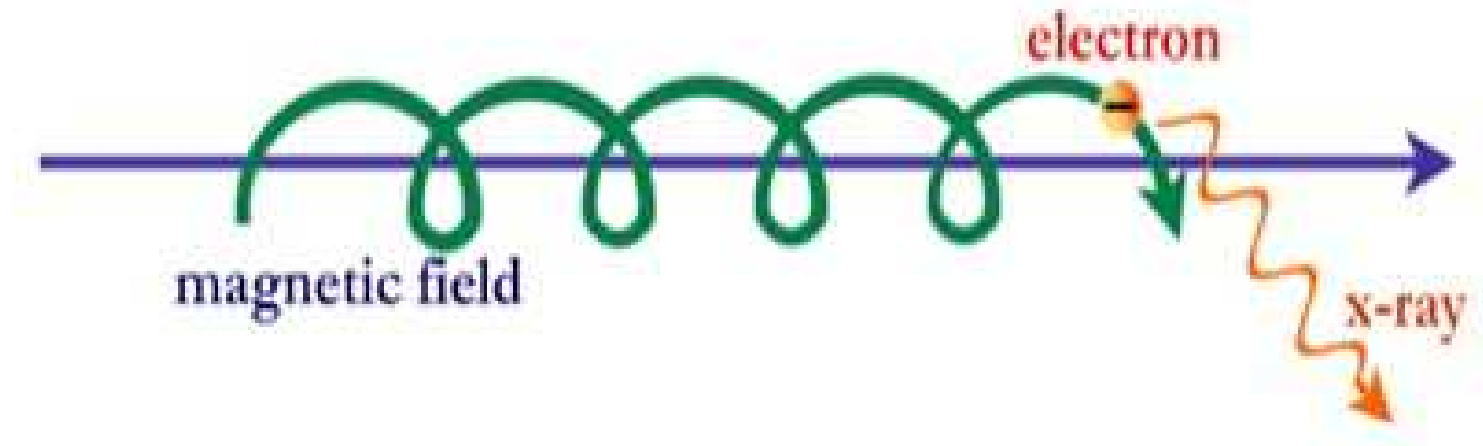
Die Abstrahlung P von beschleunigten Elektronen ist

$$P \sim \frac{\gamma^4}{r^2}, \text{ wobei } \gamma = \frac{E}{m \cdot c^2}$$

der bekannte Lorentz-Faktor und r der Ablenkradius sind.

$$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}; \beta = v/c \text{ mit } c - \text{Lichtgeschwindigkeit}$$

Synchrotronmechanismus



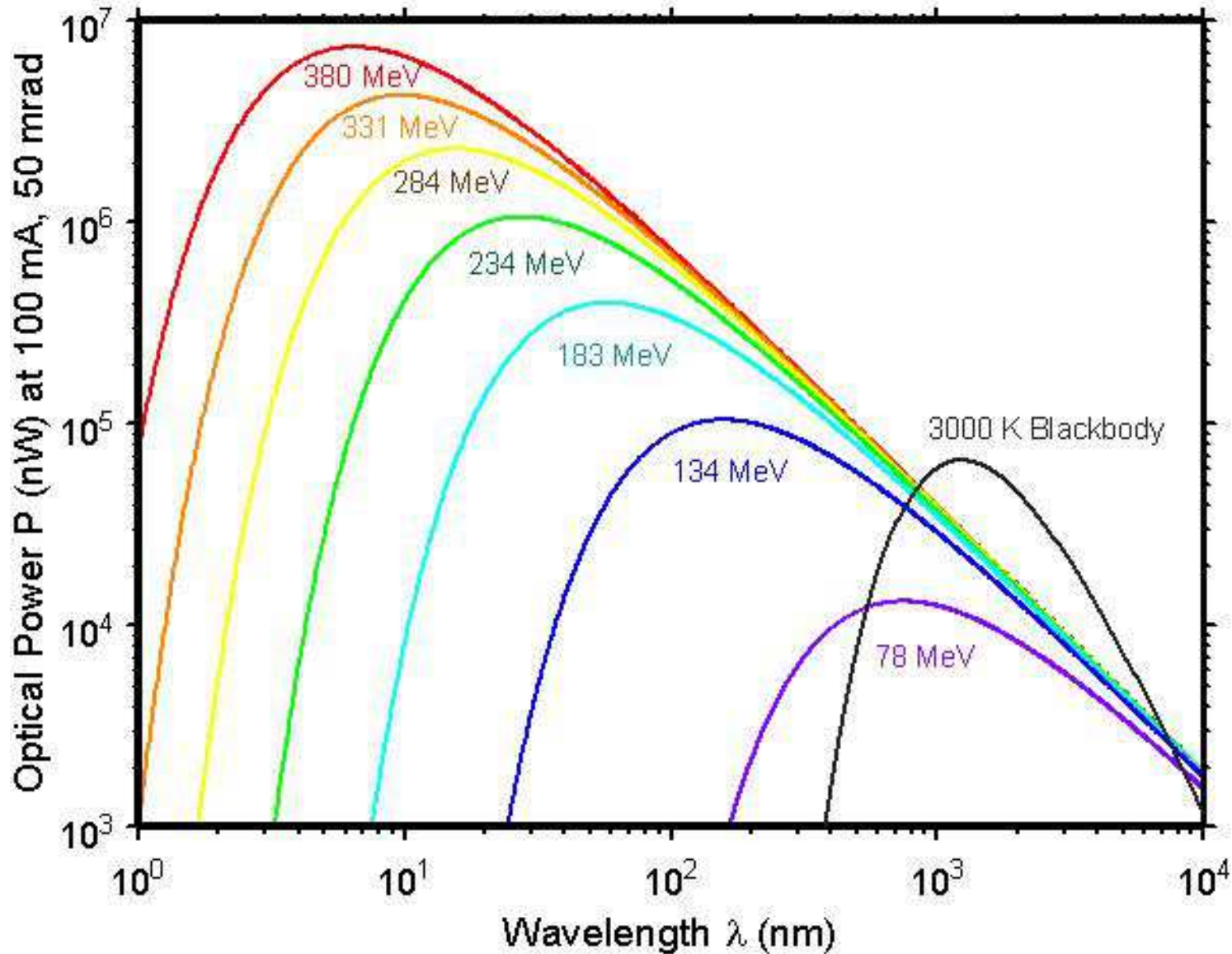
Synchrotronstrahlung

Die erzeugten Photonen werden in einen engen Vorwärtsbereich mit Öffnungswinkel $\sim \frac{1}{\gamma}$ emittiert.

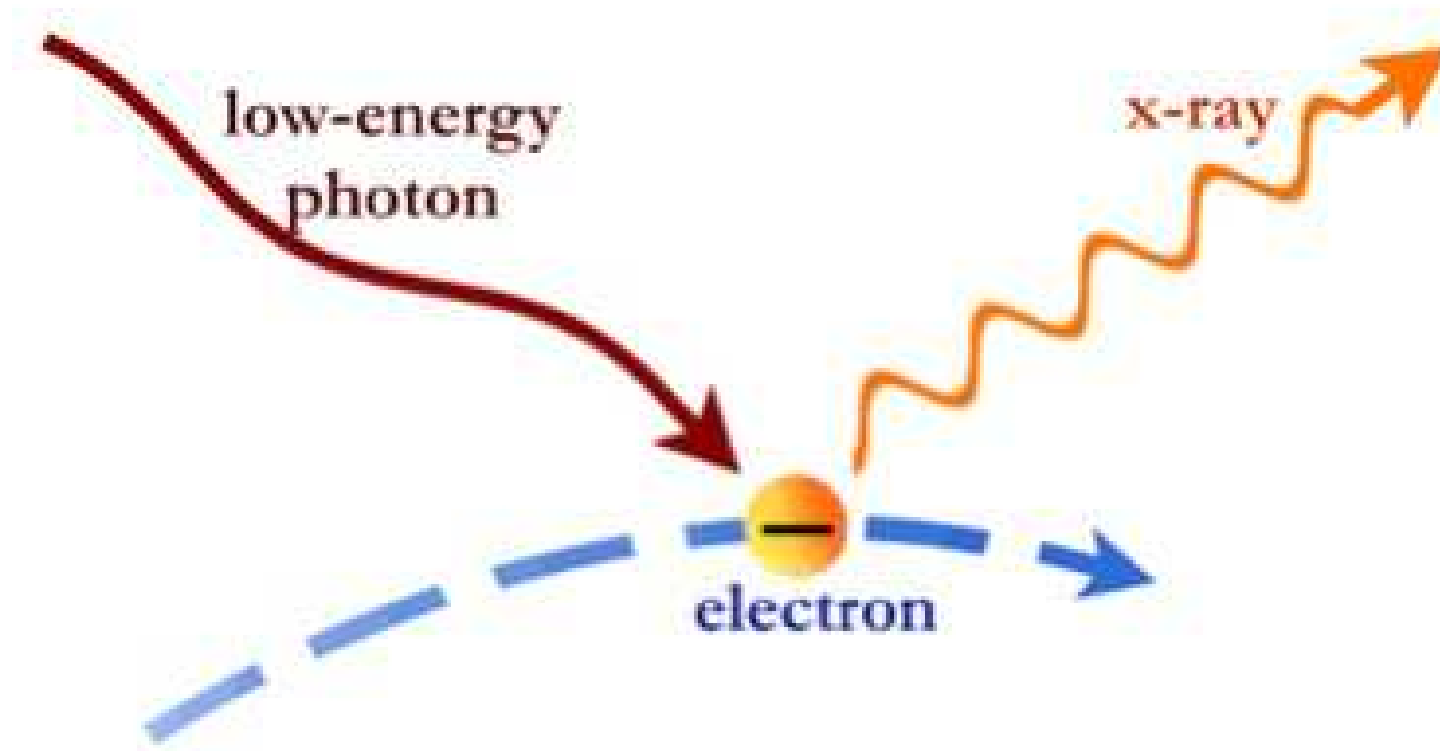
Die Synchrotronphotonen haben ein breites Frequenzspektrum, mit einer charakteristischen Energie $\sim \gamma^3$

Für 10 GeV Elektronen und einen Ablenkradius von 1000 m ist die charakteristische Energie der Photonen 2,2 keV.

Synchrotronpektrum



Inverse Compton-Streuung



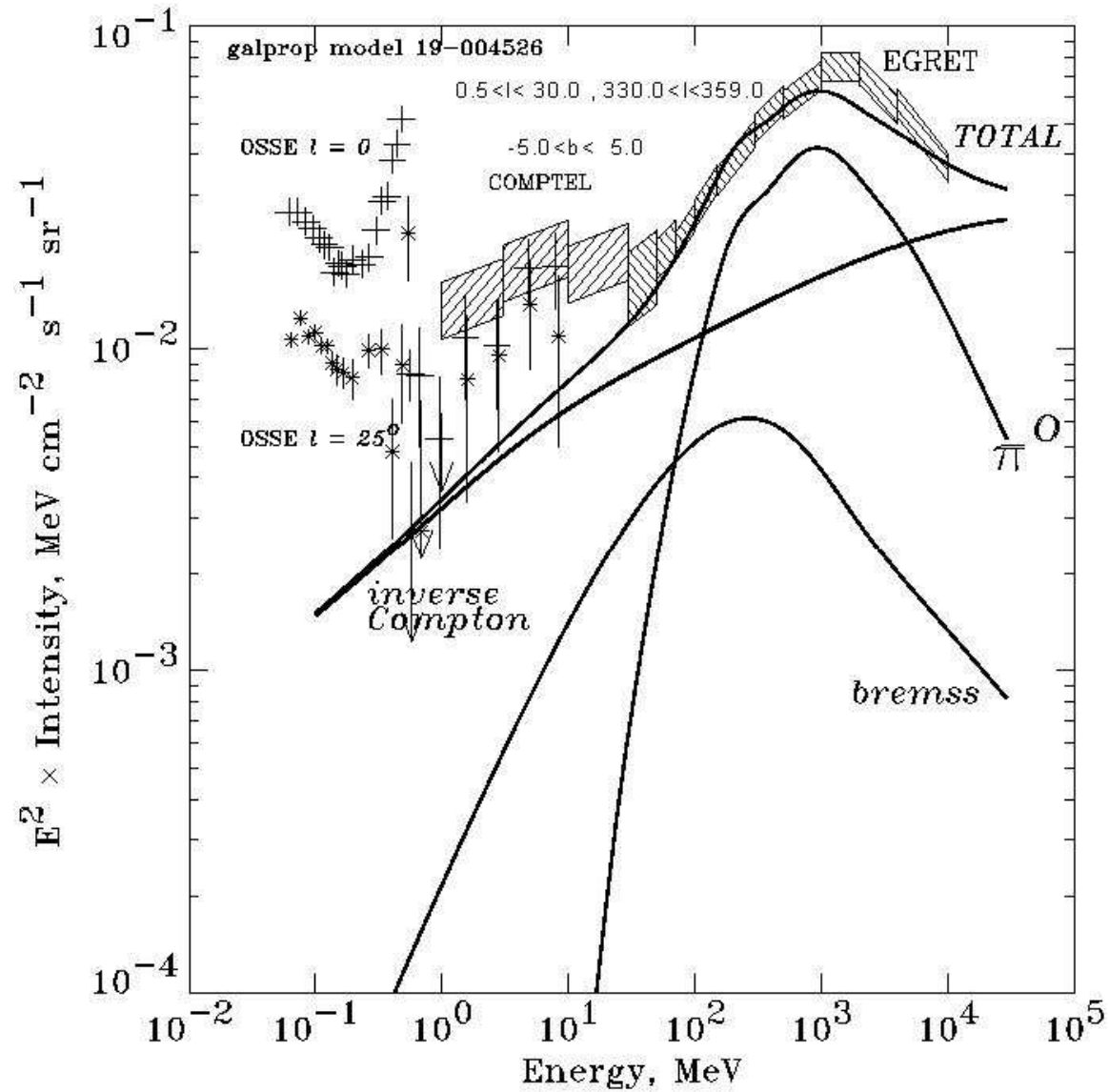
Inverse Compton-Streuung

Durch den Prozeß der inversen Compton-Streuung werden in billiardartigen Stößen ein Teil der Elektronenenergie auf Photonen übertragen.

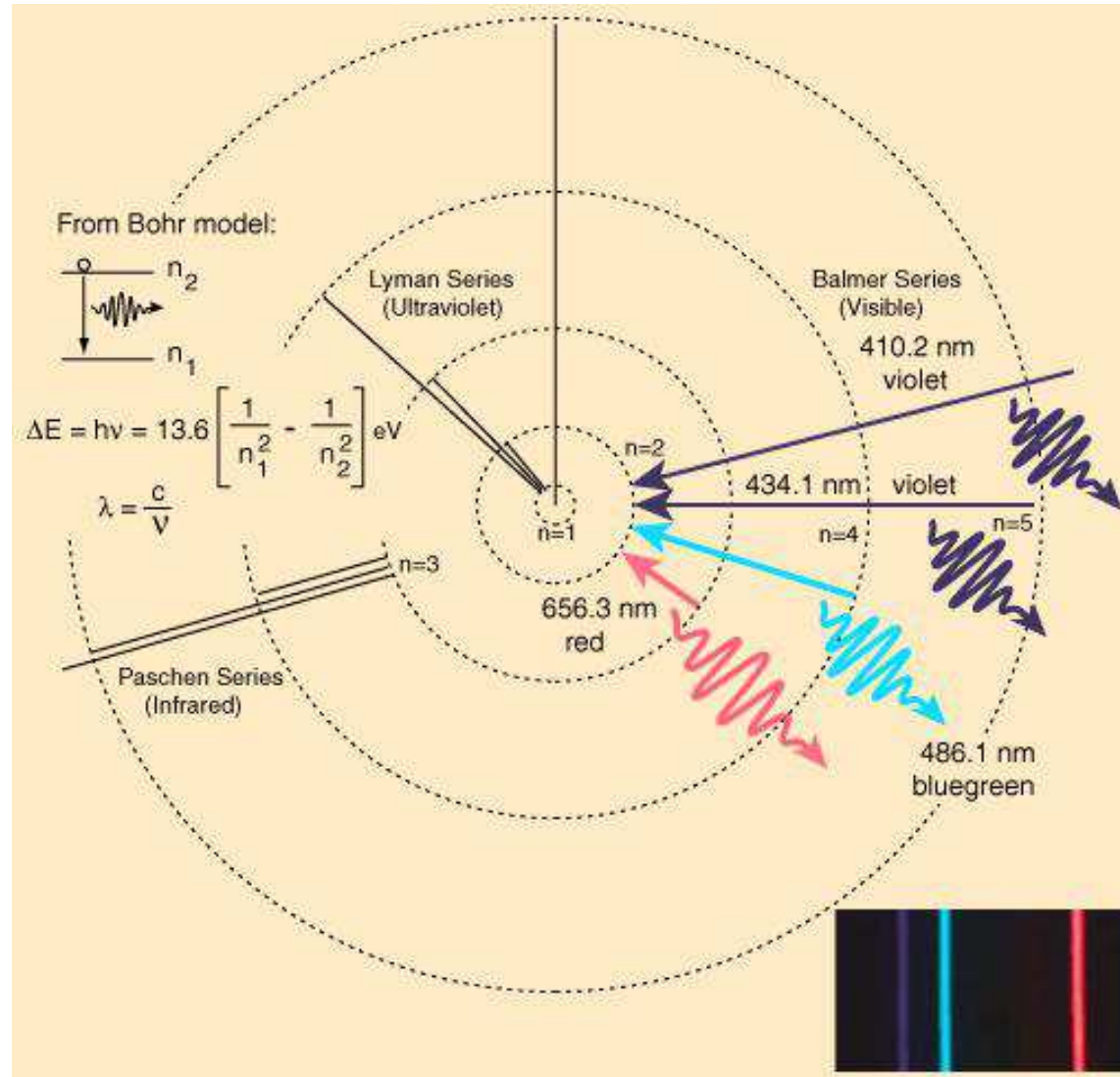
Der Wirkungsquerschnitt für die inverse Compton-Streuung wächst nur schwach mit der Energie ($\sim \ln E$).

Der Wirkungsquerschnitt hängt ab von der Photonendichte und Elektronendichte.

Photonenspektren



Röntgenspektren



Charakteristische Röntgenstrahlung

Anregung von Atomen

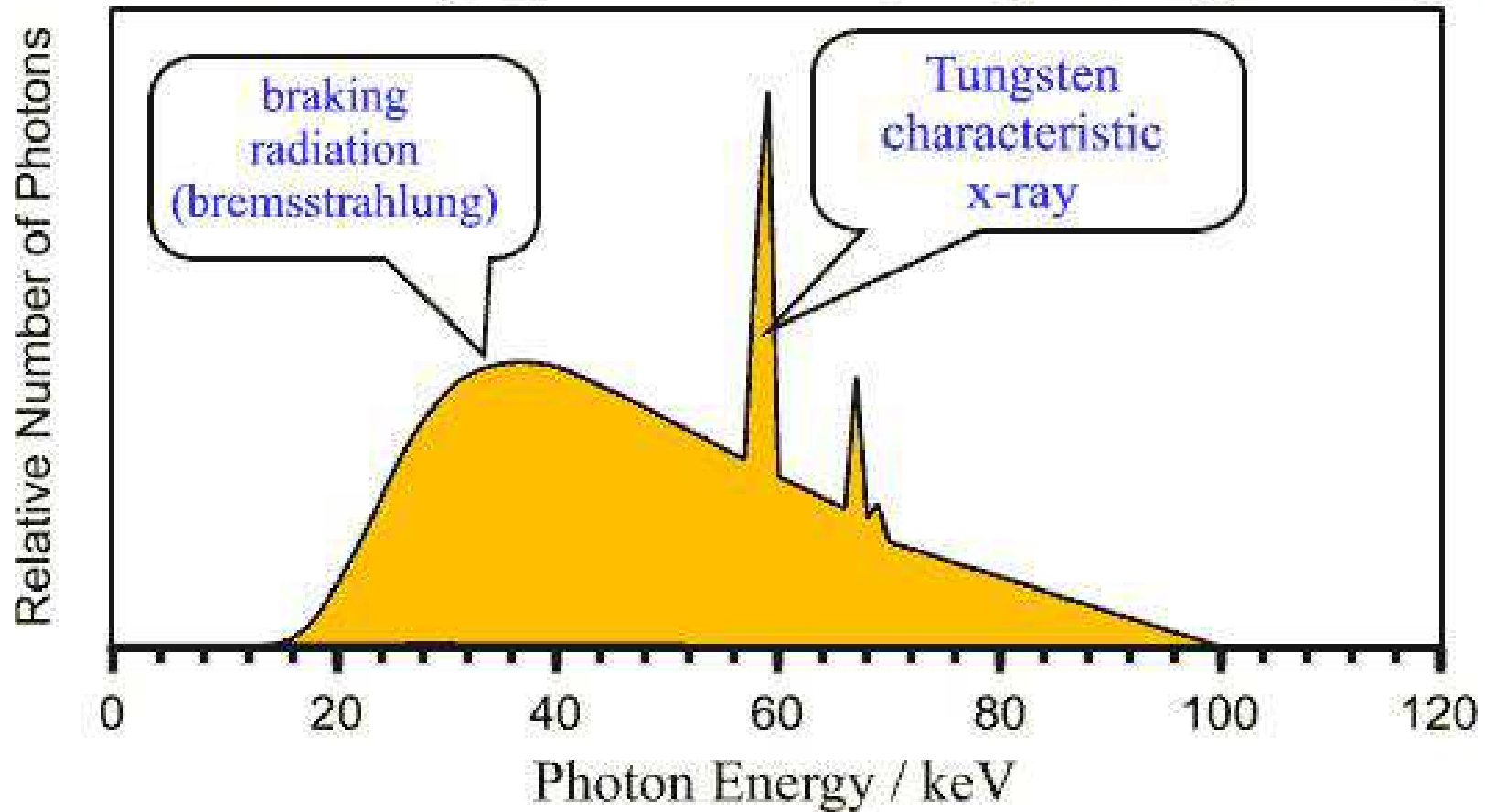
$$|E_a - E_e| = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

wobei

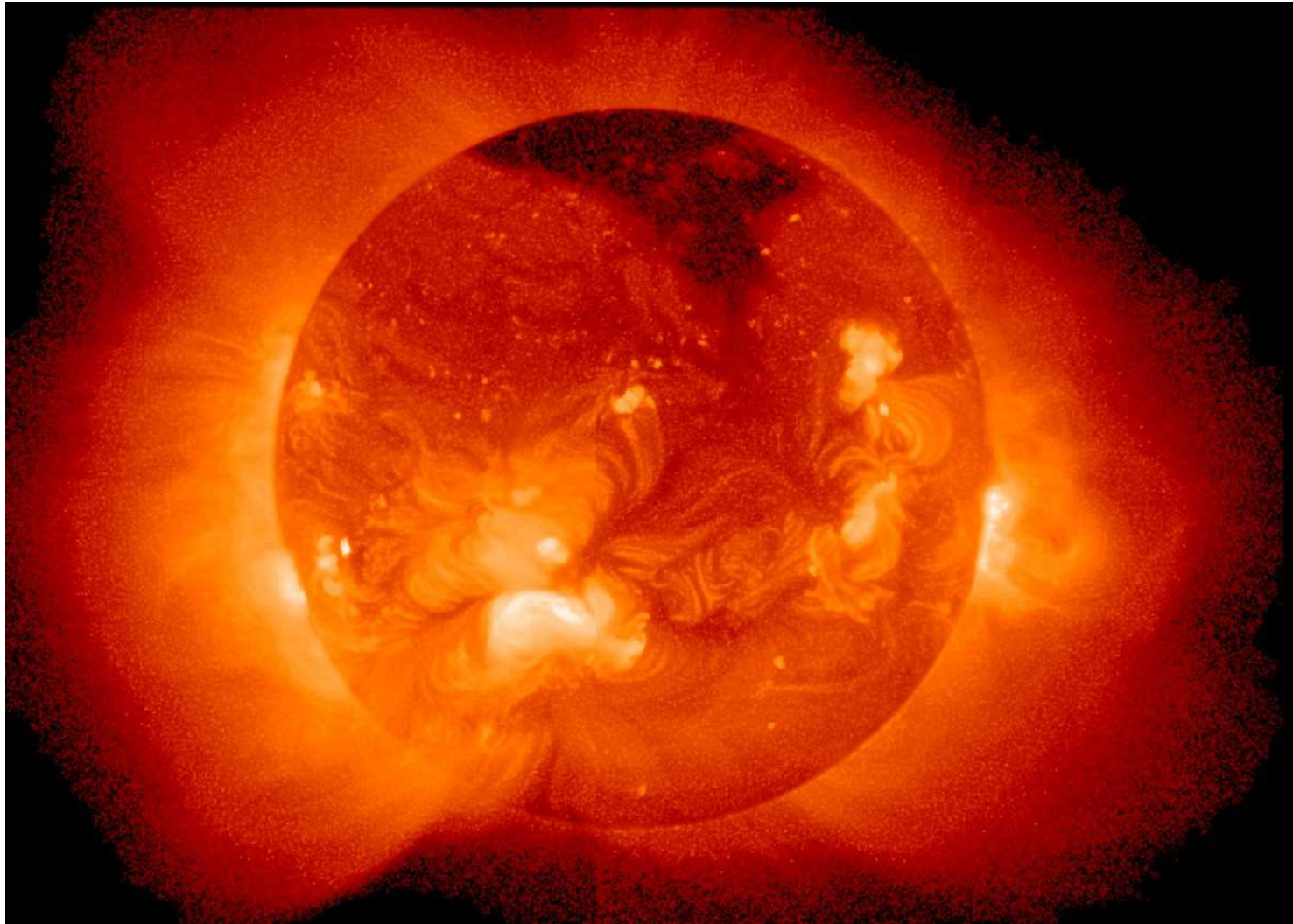
- * E_a - der Energie des Anfangszustandes,
- * E_e - der Energie des Endzustandes,
- * ν - Frequenz des Lichtes ($\nu = \frac{c}{\lambda}$)
- * h - Plancksches Wirkungsquantum ($6,626 \cdot 10^{-34}\text{Js}$)

Röntgenspektren

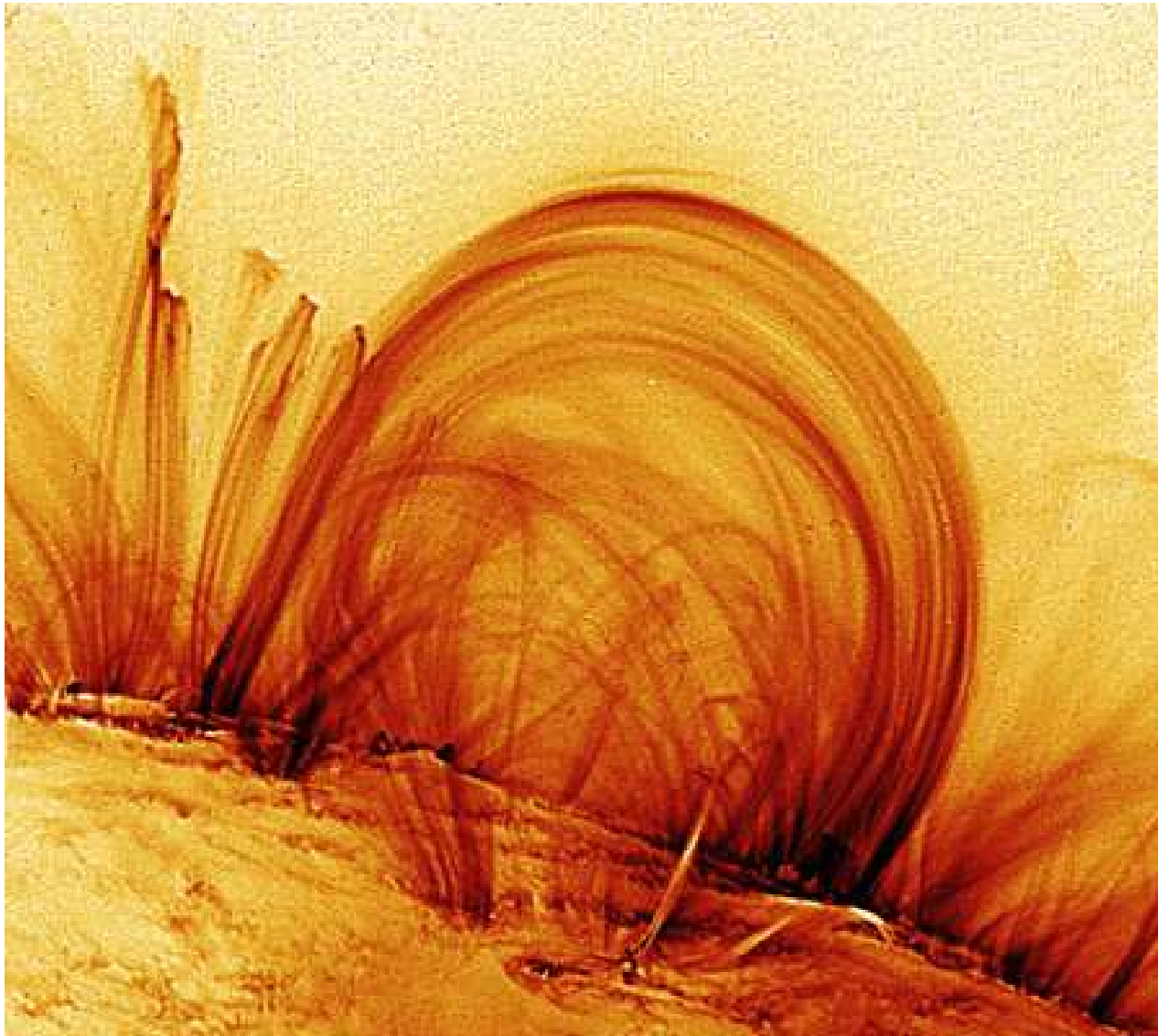
Calculated X-ray Spectrum 100kV, Tungsten target 13° angle



Röntgenstrahlen von der Sonne

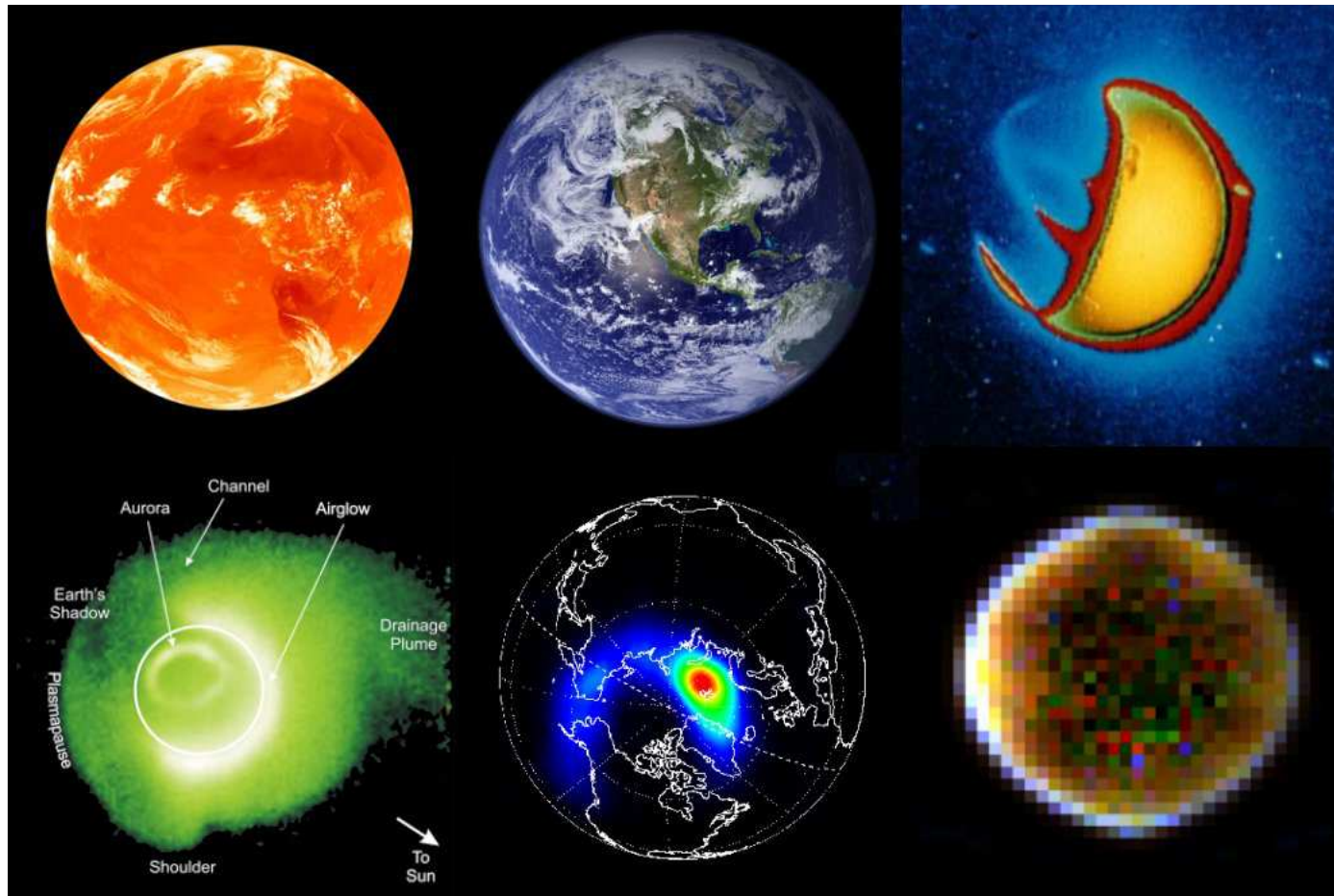


Röntgenstrahlen von der Sonne



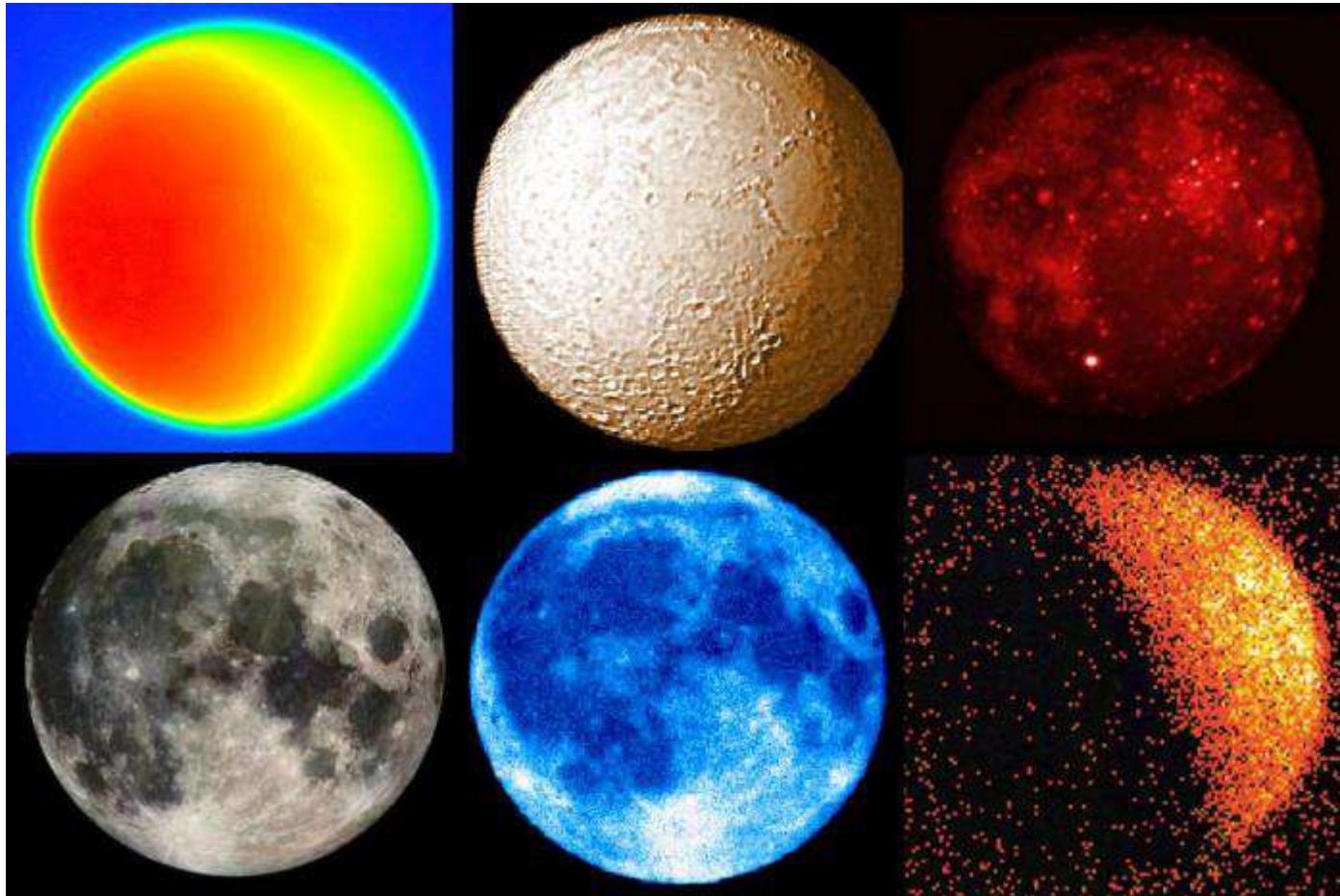
Erdansichten

Die Erde im Lichte von Infrarot-, sichtbarer, ultravioletter, extrem UV, Röntgen- und Gammastrahlung.



Mondansichten

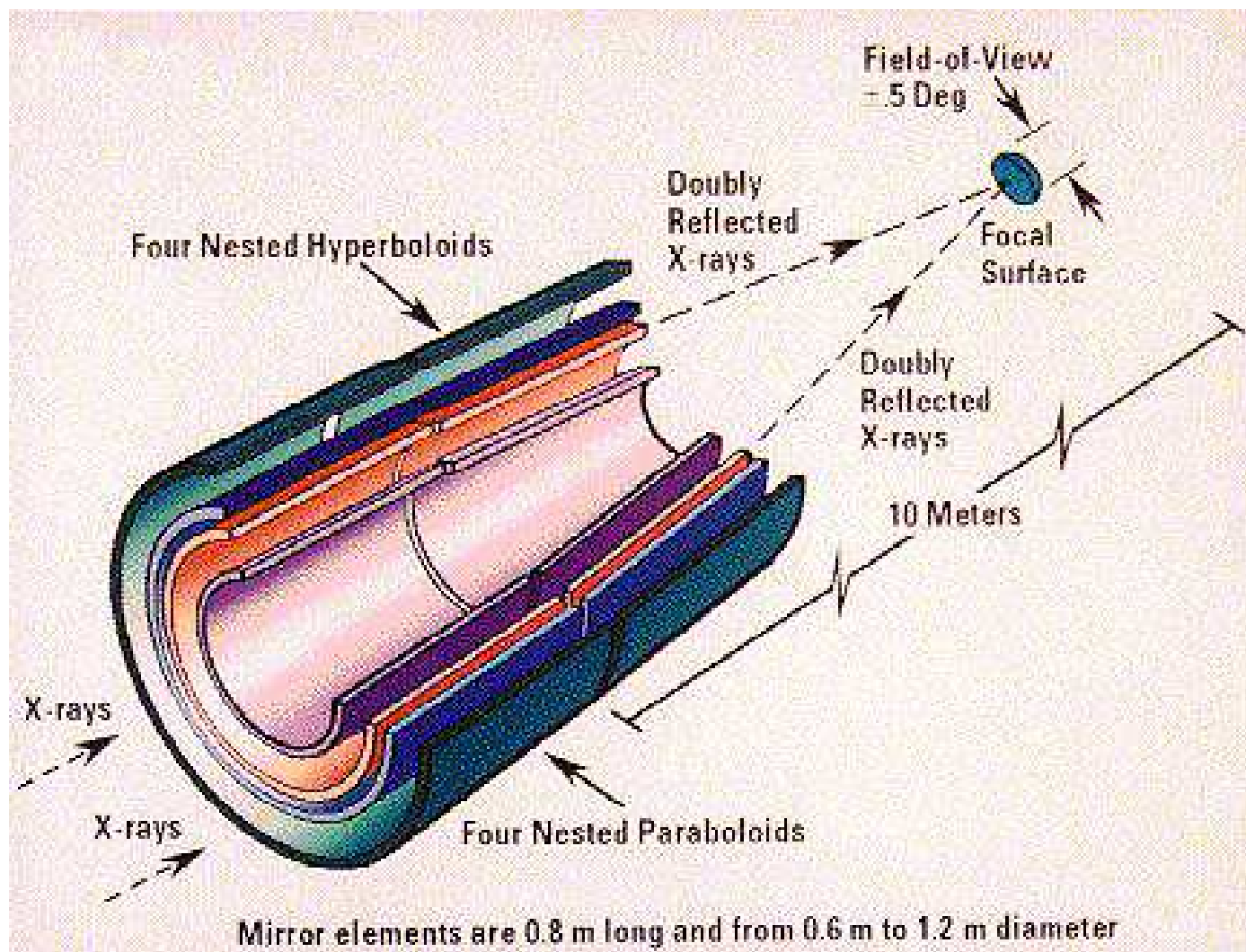
Der Mond im Lichte von Radio-, Mikrowellen-, Infrarot-, sichtbarer, ultravioletter und Röntgenstrahlung.



ROSAT Satellit



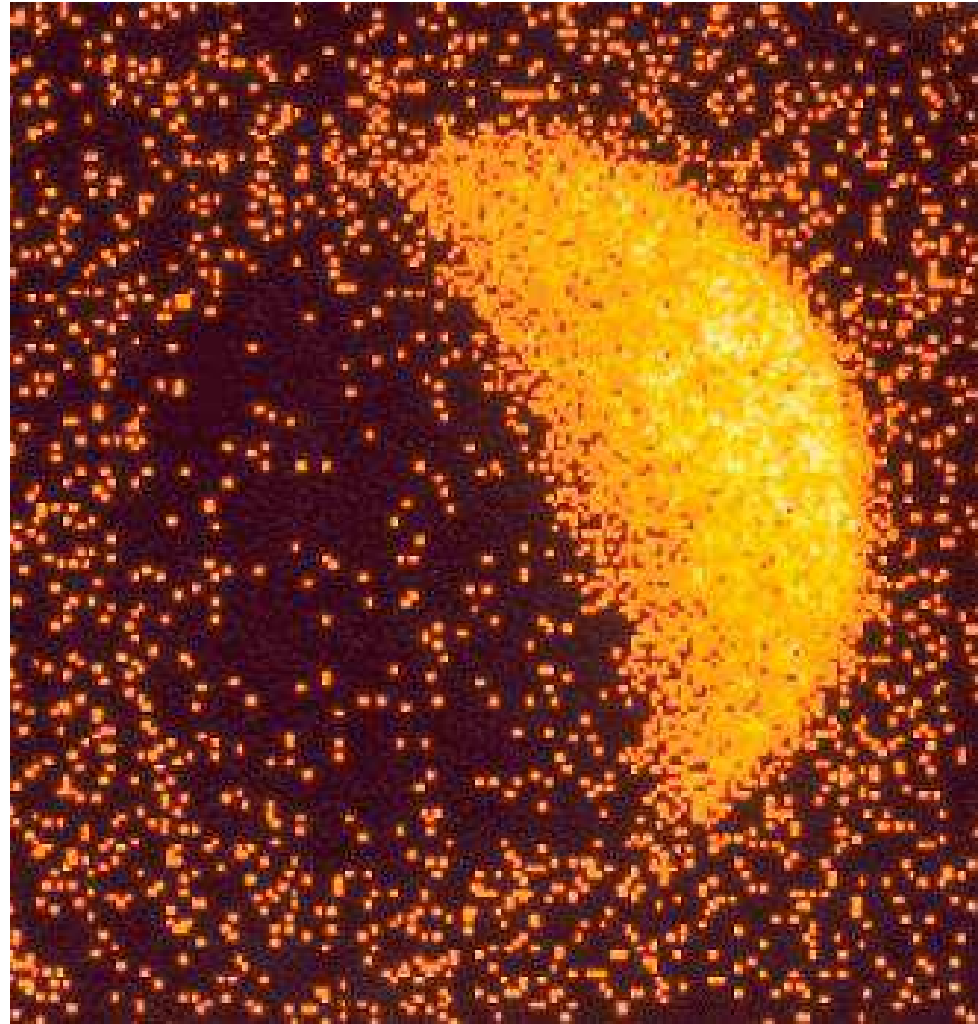
Wolter-Teleskop



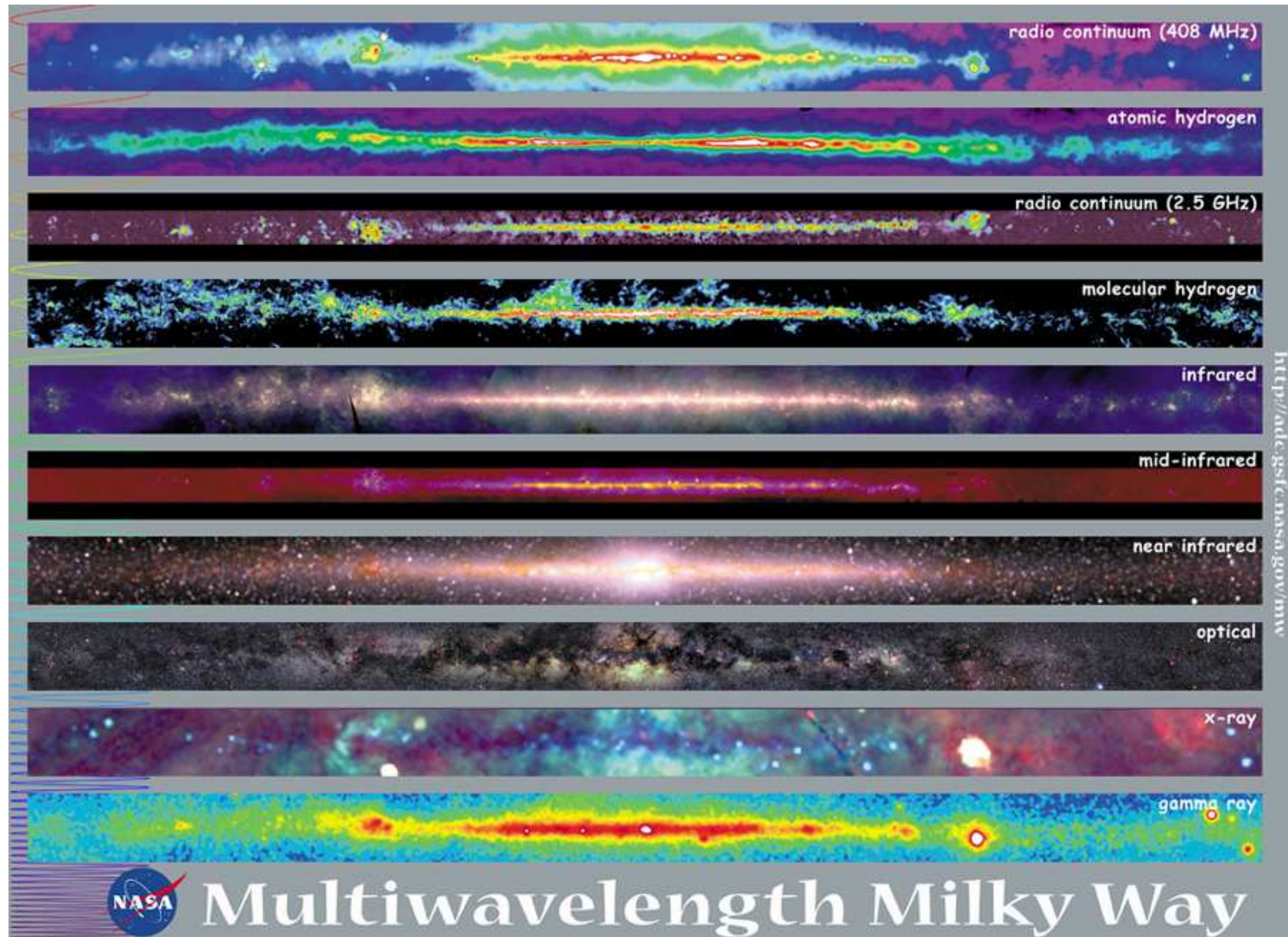
Newton Observatorium



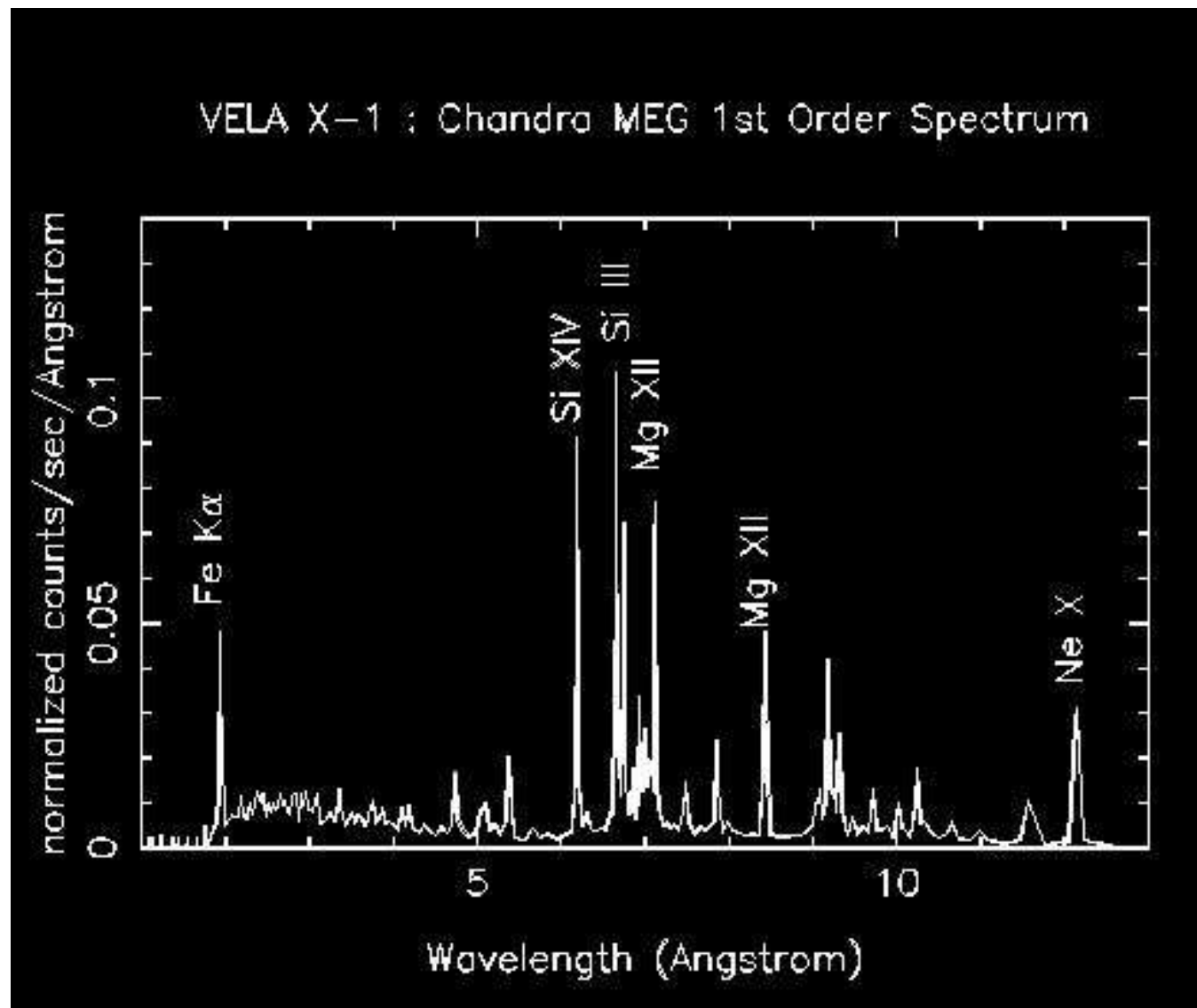
Röntgenstrahlen vom Mond



Strahlung von der Milchstrasse



Spektrum von Vela X1



Krebsnebel-Pulsar



Pulsare

Perioden: Drehimpulserhaltung

$$\Theta_{\text{Stern}} \cdot \omega_{\text{Stern}} = \Theta_{\text{Pulsar}} \cdot \omega_{\text{Pulsar}}$$

$$\omega_{\text{Pulsar}} = \frac{\Theta_{\text{Stern}}}{\Theta_{\text{Pulsar}}} \cdot \omega_{\text{Stern}}$$

$$\text{Wegen } \Theta = m \cdot R^2 \text{ und } \omega = \frac{2 \cdot \pi}{T}$$

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

Mit $R_{\text{Stern}} = 10^6 \text{ km}$, $R_{\text{Pulsar}} = 20 \text{ km}$, $T_{\text{Stern}} = 1 \text{ Monat}$ wird

$$T_{\text{Pulsar}} = \left(\frac{20}{10^6}\right)^2 \cdot 86400 \cdot 30 = 1 \text{ msec}$$

Pulsare und Magnetare

Riesige Magnetfelder

$$\int_{\text{Stern}} B_{\text{Stern}} \cdot dA_{\text{Stern}} = \int_{\text{Pulsar}} B_{\text{Pulsar}} \cdot dA_{\text{Pulsar}}$$

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

$$= 0,1 \text{ Tesla} \cdot \left(\frac{10^6}{20}\right)^2 = 2,5 \cdot 10^8 \text{ Tesla}$$

$$= 2,5 \cdot 10^{12} \text{ Gauss}$$

zum Vergleich: Erdmagnetfeld $\approx 500 \text{ mGauss} = 50 \mu\text{Tesla}$

Pulsare als Beschleuniger

Rotationsgeschwindigkeiten

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{Pulsar}}{T_{Pulsar}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 10^3 \text{ m}}{10^{-3} \text{ s}} = 125,7 \cdot 10^6 \text{ m/s}$$

elektrisches Feld aus der Lorentzkraft

$$q \cdot \vec{E} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

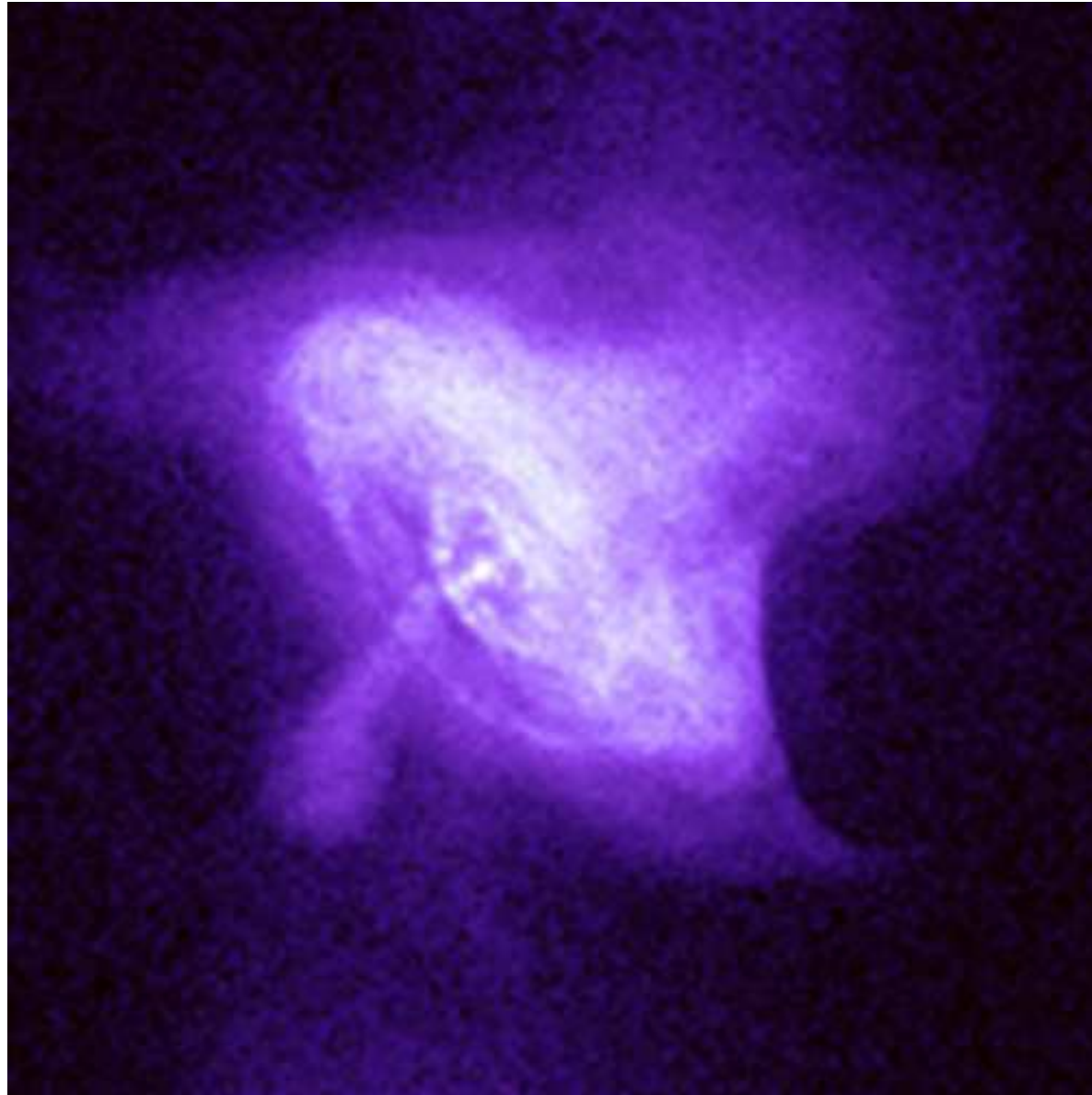
Annahme: $\vec{v} \perp \vec{B}$

$$\begin{aligned} \rightarrow |\vec{E}| = E &= v \cdot B = 125 \cdot 10^6 \text{ m/s} \cdot 2,5 \cdot 10^8 \frac{\text{Vs}}{\text{m}^2} \\ &= 3,14 \cdot 10^{16} \text{ V/m} \end{aligned}$$

sehr hohe Feldstärken und sehr hohe Energien möglich

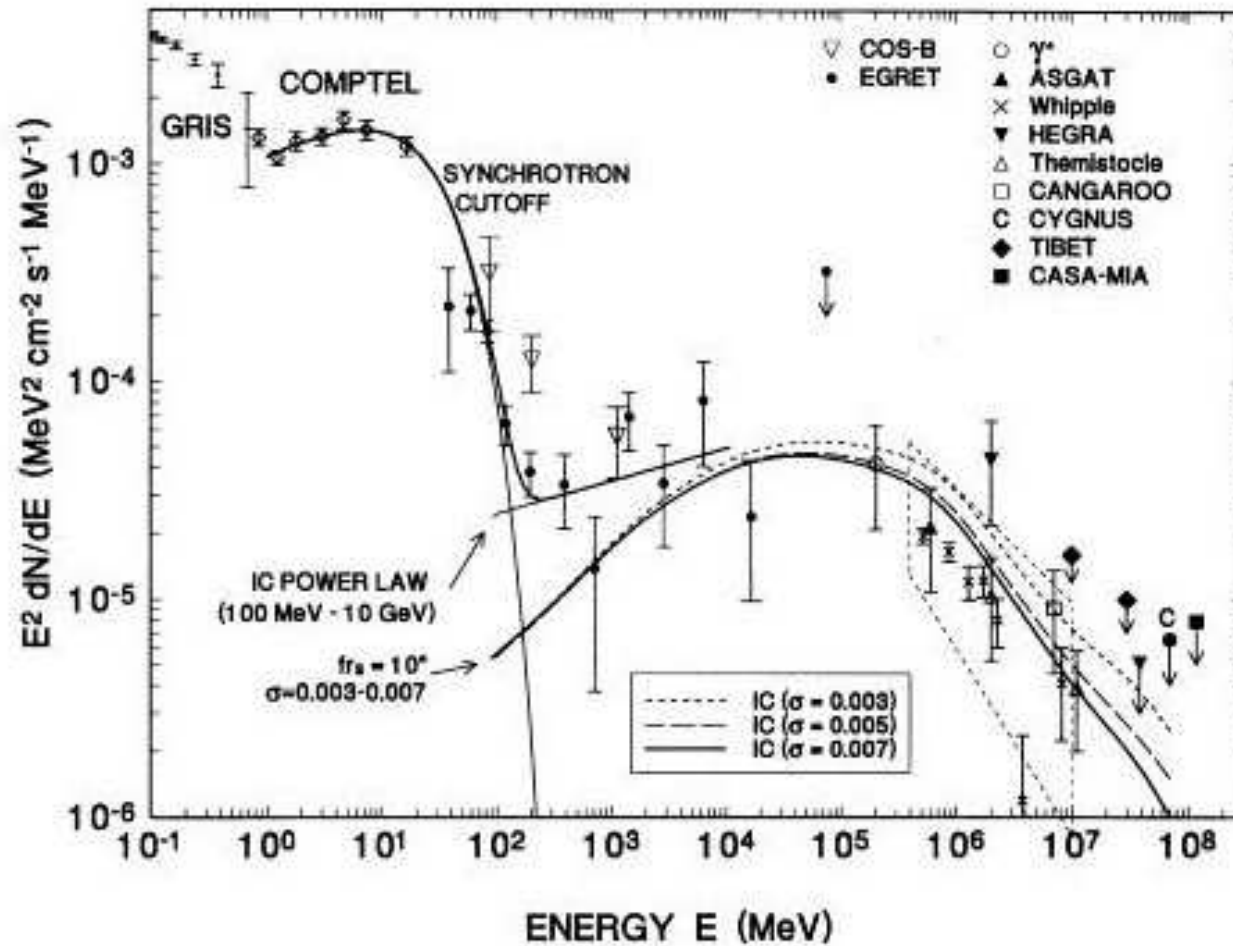
$$E = 3,14 \cdot 10^{16} \text{ eV/m}$$

Krebsnebel-Pulsar

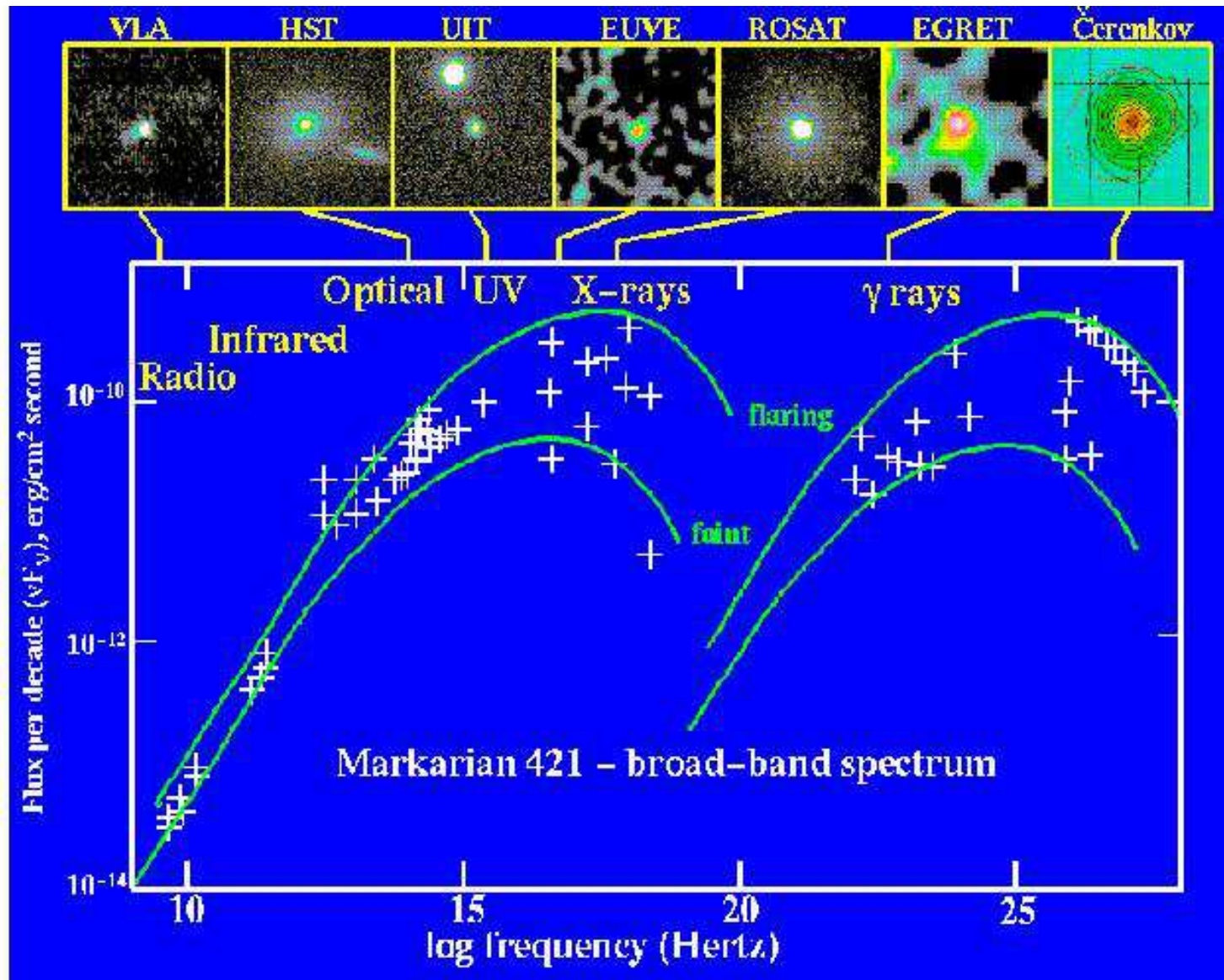


Krebsnebel-Pulsar

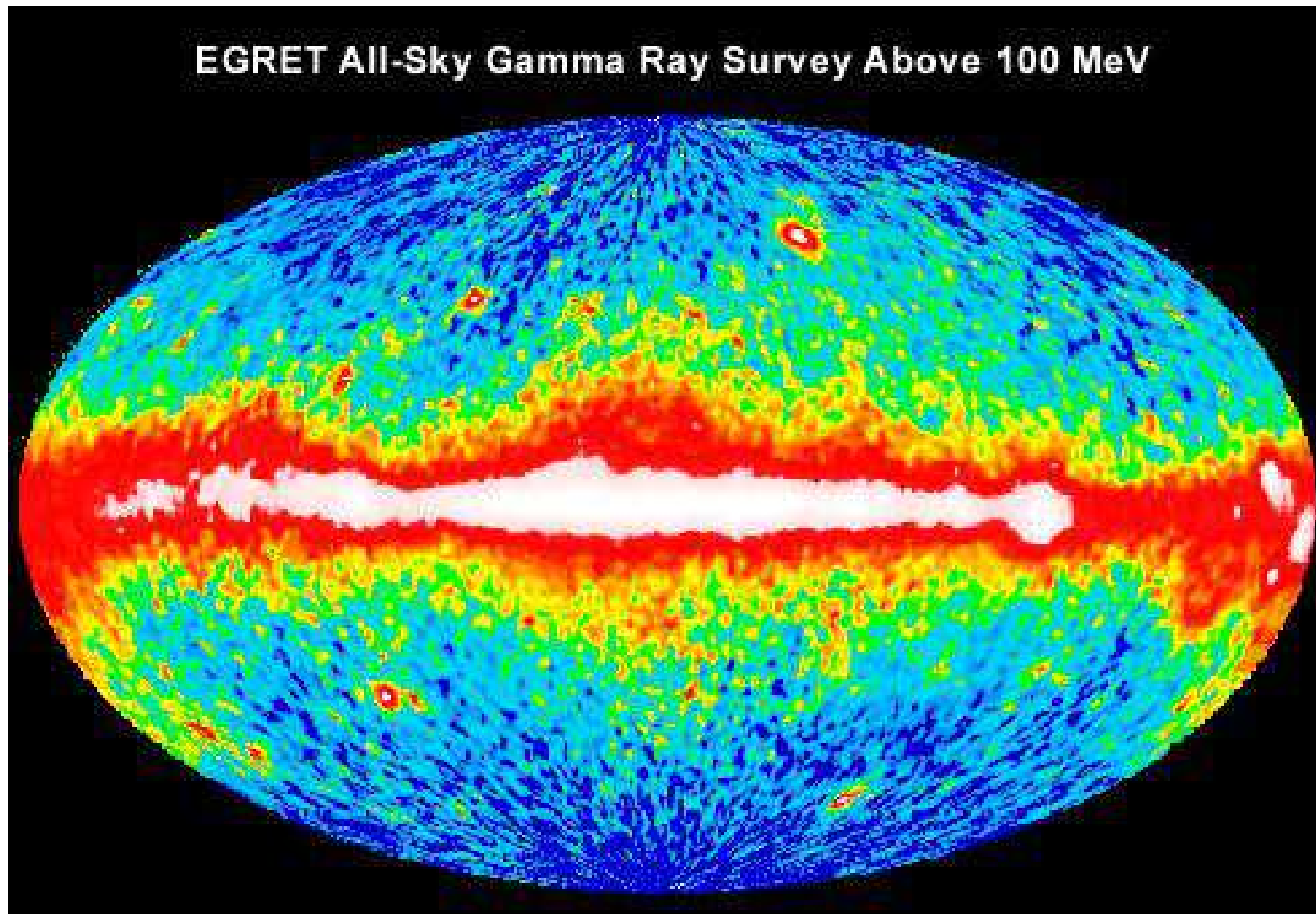
DE JAGER ET AL.



Markarian 421



Der Gamma Himmel



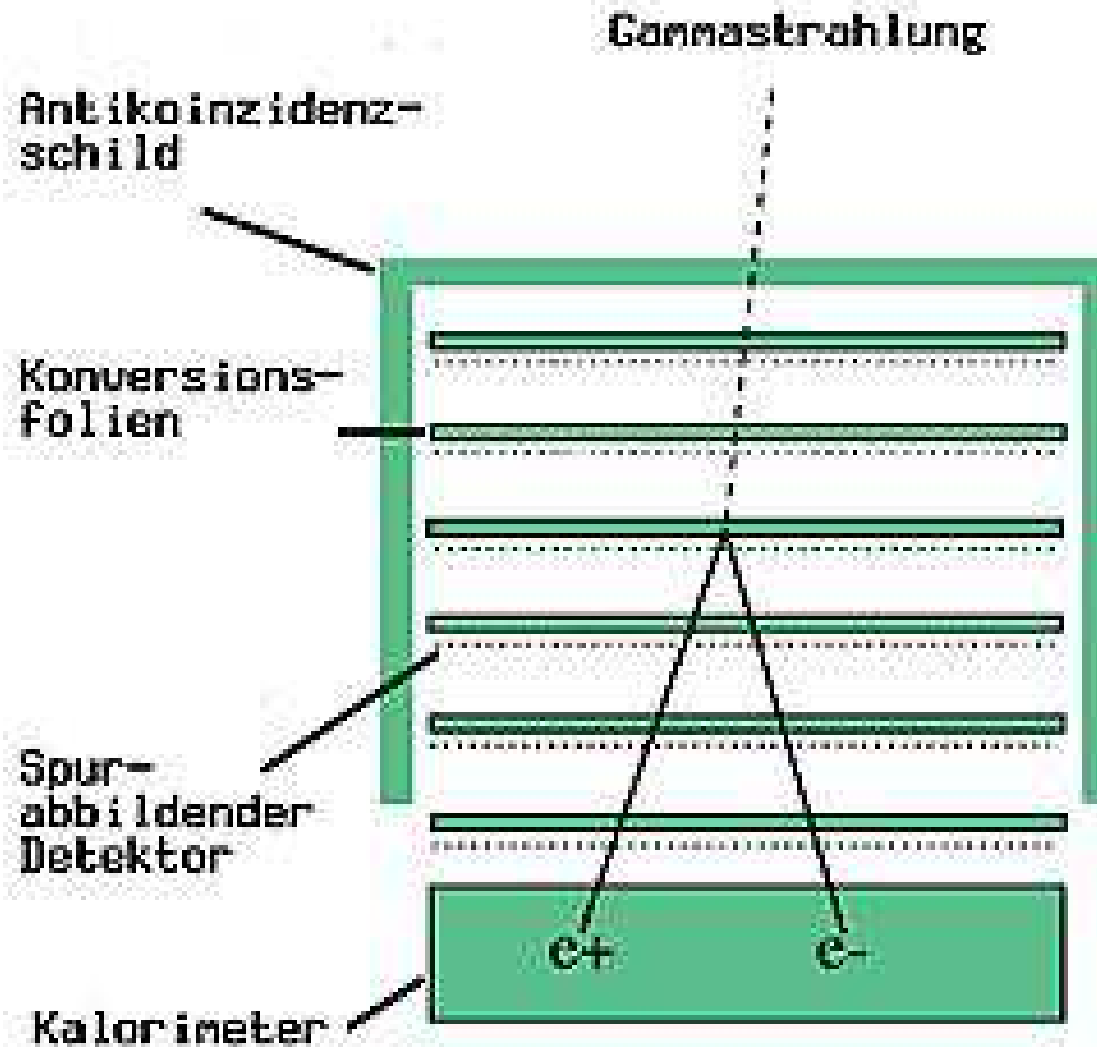
Quellen von Gammastrahlung

- ähnlich wie Röntgenstrahlung wird auch γ -Strahlung durch Bremsstrahlung, Synchrotronstrahlung und inverse Compton-Streuung erzeugt. Dazu kommen noch folgende Produktionsmechanismen:
- π^0 -Zerfall: Neutrale Pionen werden in starken Wechselwirkungen erzeugt; z.B.
 $p + p \rightarrow p + n + \pi^0$ oder allgemein:
 $p + \text{Kern} \rightarrow p' + \text{Kern}' + \pi^+ + \pi^- + \pi^0$
- anschließend $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

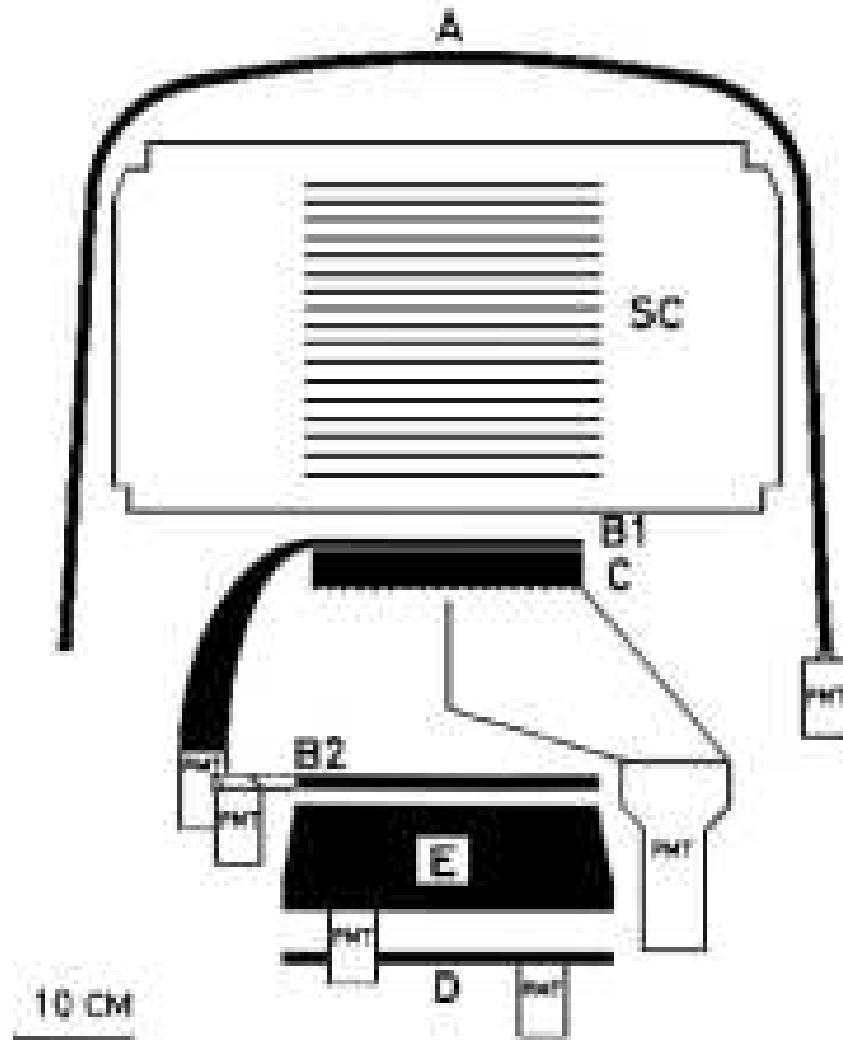
Quellen von Gammastrahlung

- weitere Quellen: Materie-Antimaterie Annihilationen:
- $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$ oder
- $p + \bar{p} \rightarrow \pi^+ + \pi^- + \pi^0$
- und Photonen aus Kernübergängen, etwa
- ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni}^{**} + e^- + \bar{\nu}_e$
- mit anschließendem Zerfall
- ${}^{60}\text{Ni}^{**} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + \gamma + \gamma$
- exotische Quellen: Annihilation von Neutralinos

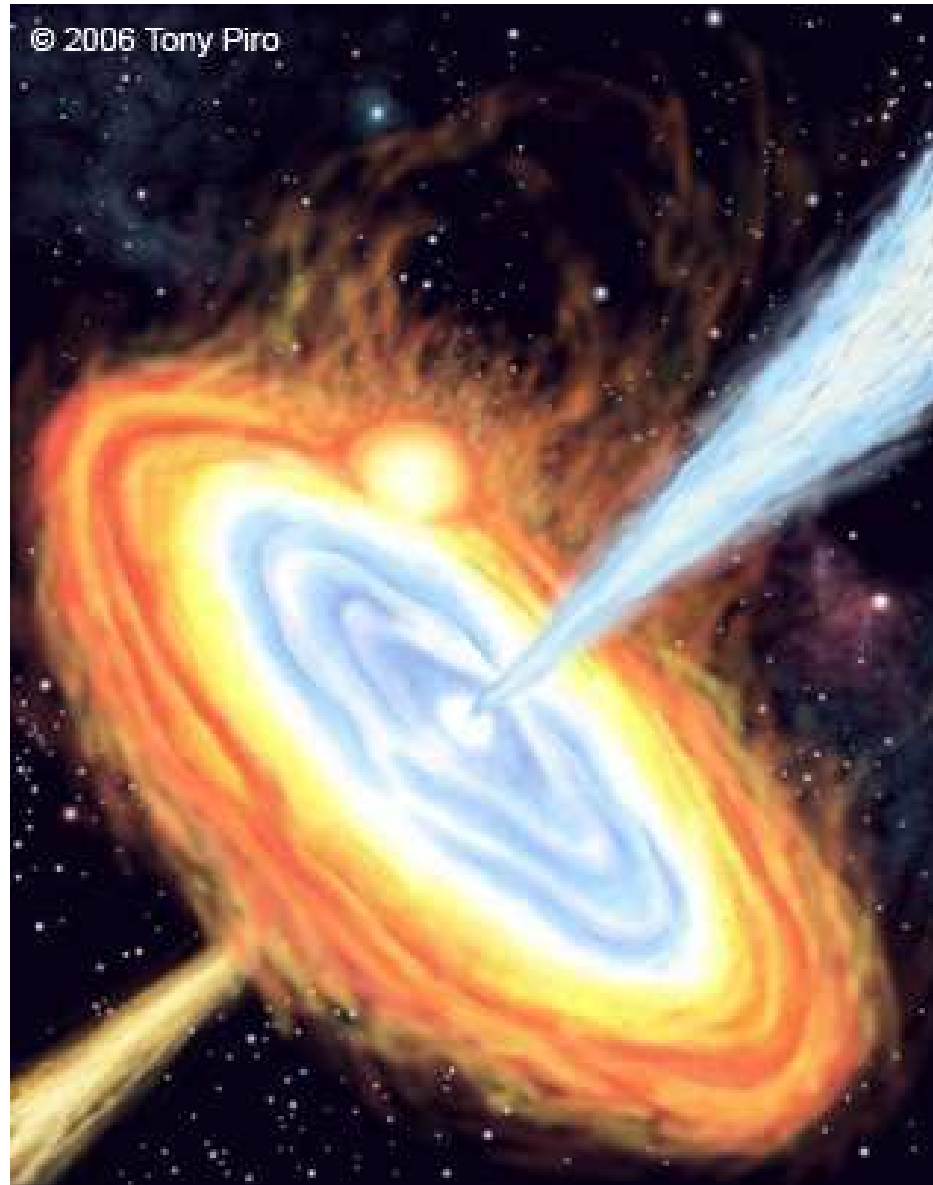
Gamma-Satellit, Prinzip



Gamma-Satellit, COSB



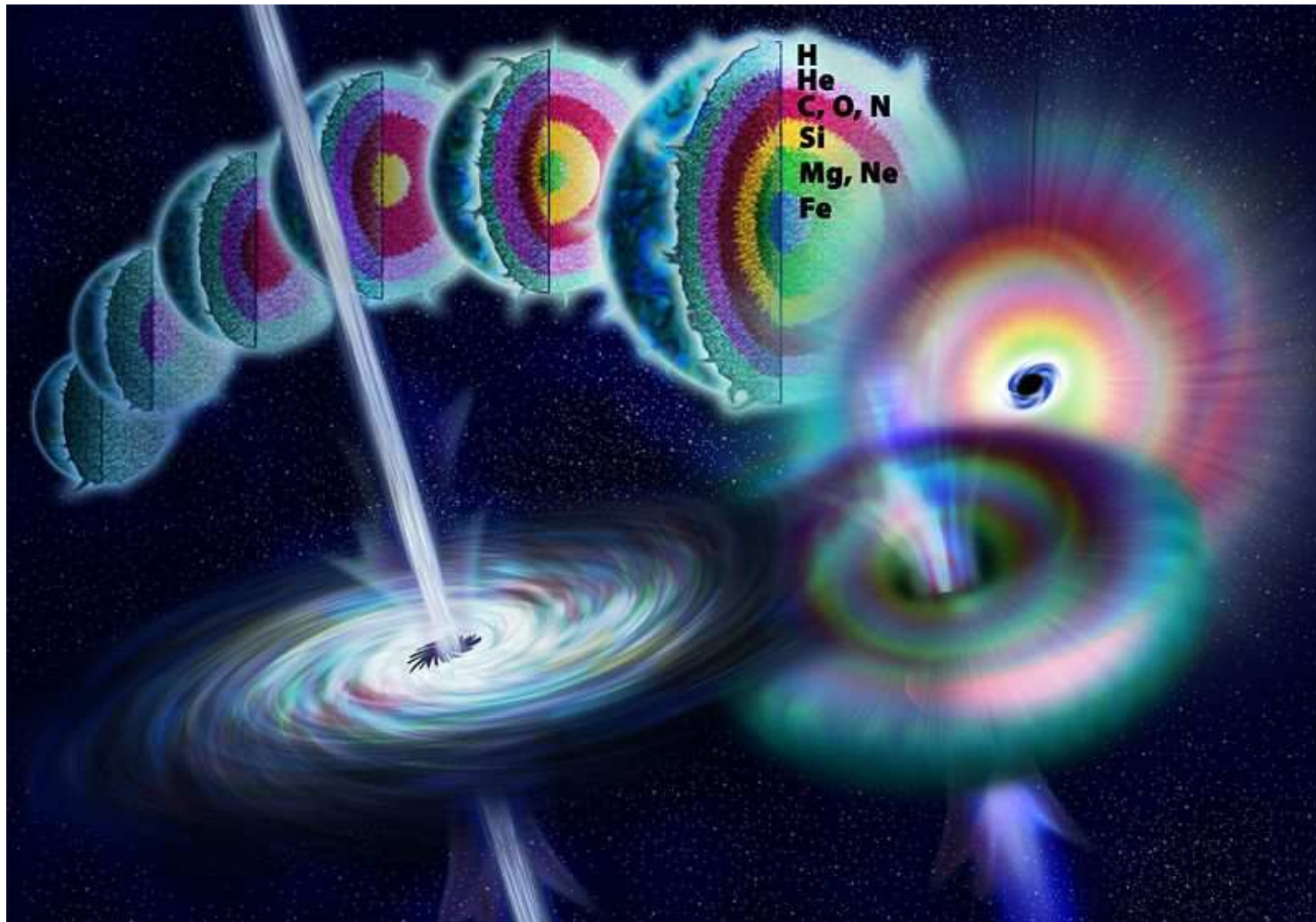
Kollapsar



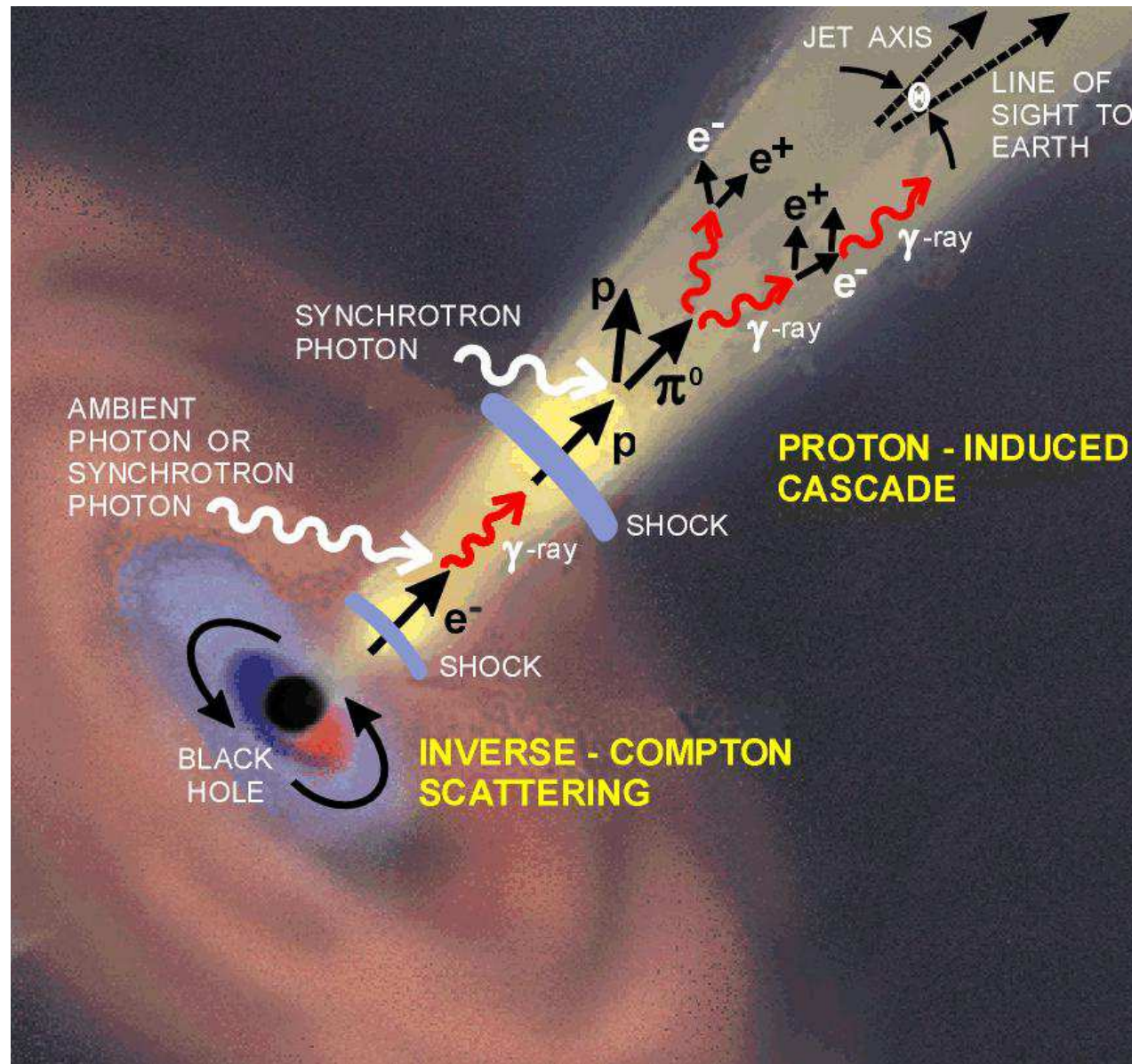
Kollision von Neutronensternen



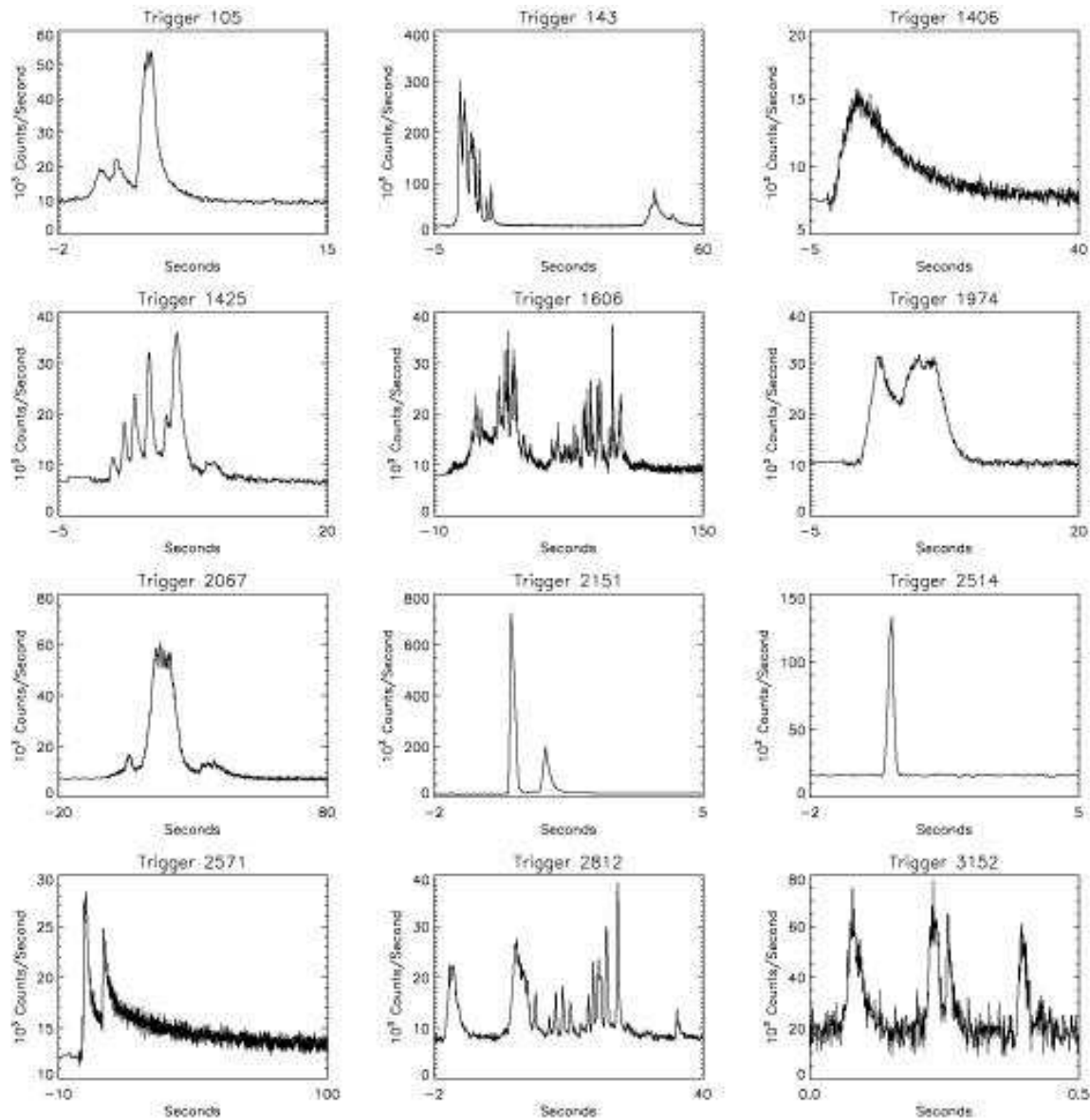
Endstadien massiver Sterne



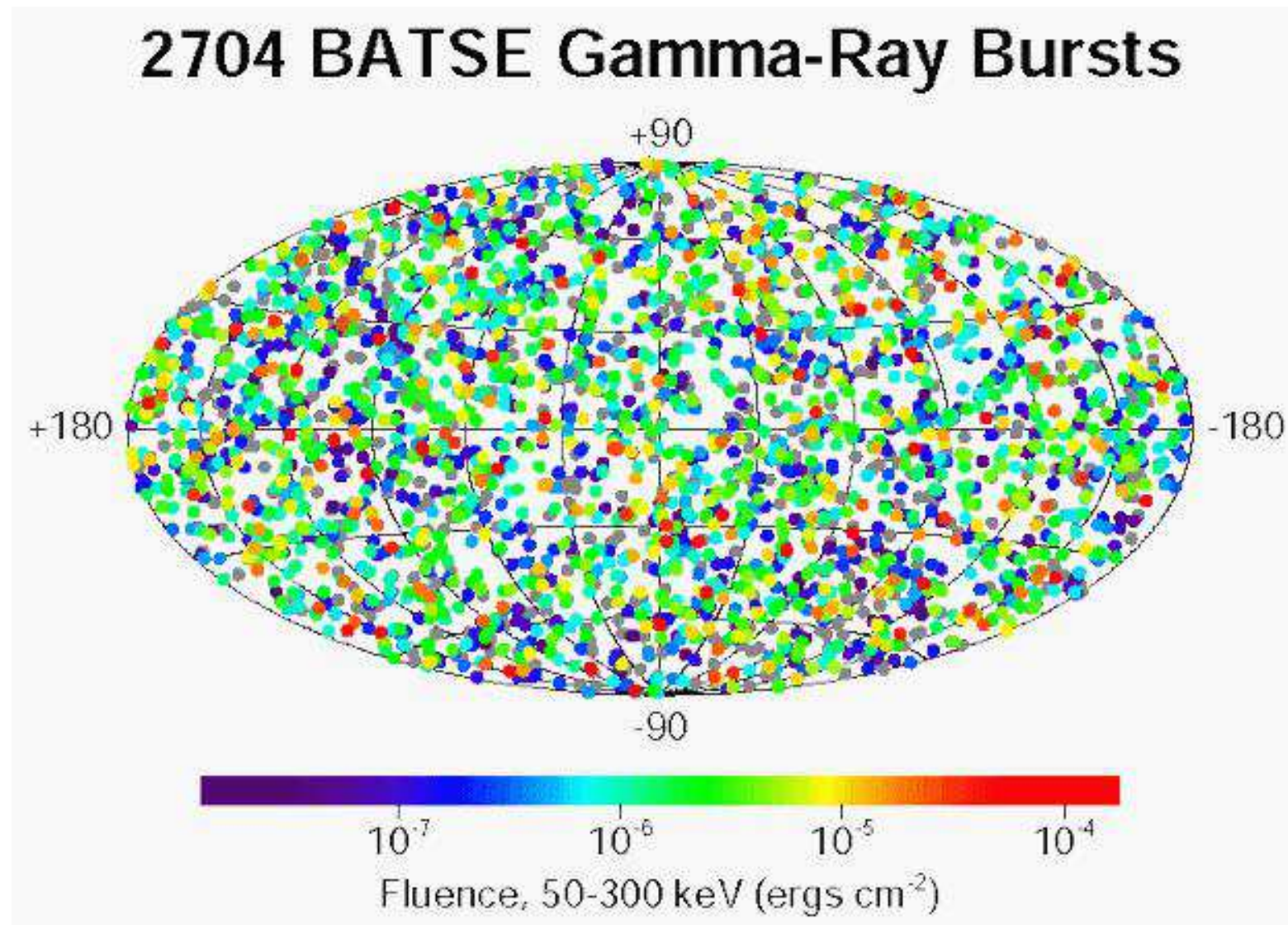
Beschleunigung in Jets



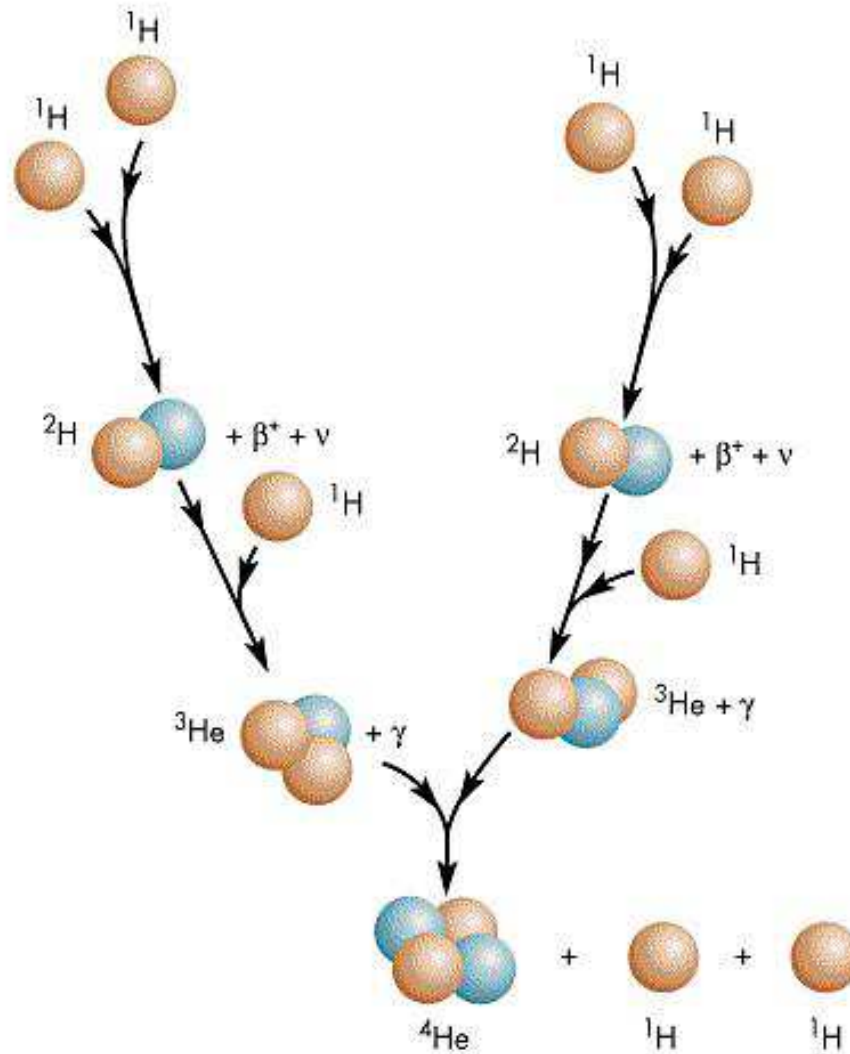
GRB-Lichtkurven



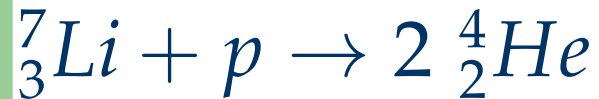
Ursprünge der GRB's



Neutrinoastronomie

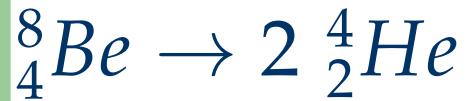
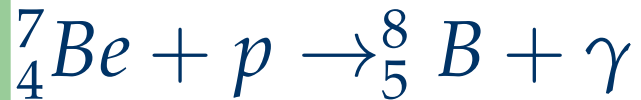


Proton - Proton Zyklus



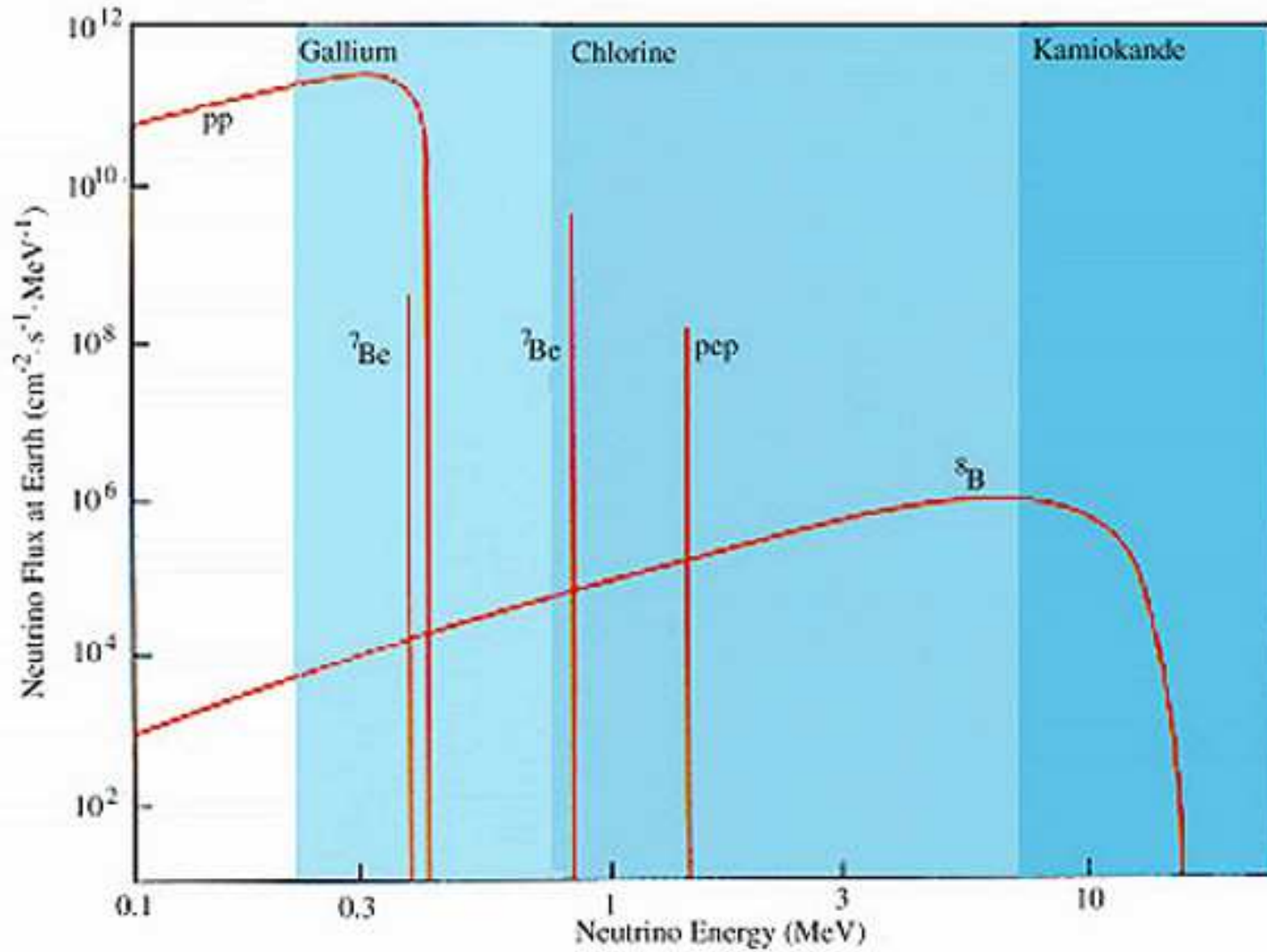
mit 15 % Wahrscheinlichkeit

Bor-Zweig



mit 0,02 % Wahrscheinlichkeit

Neutrinoastronomie



Neutrinoastronomie

