

Astrophysik mit Teilchen

Jahr der Astronomie 2009



Universität Siegen
Claus Grupen

Kosmische Beschleuniger



Übersicht



Astroteilchenphysik

Röntgenastronomie

γ -Astronomie

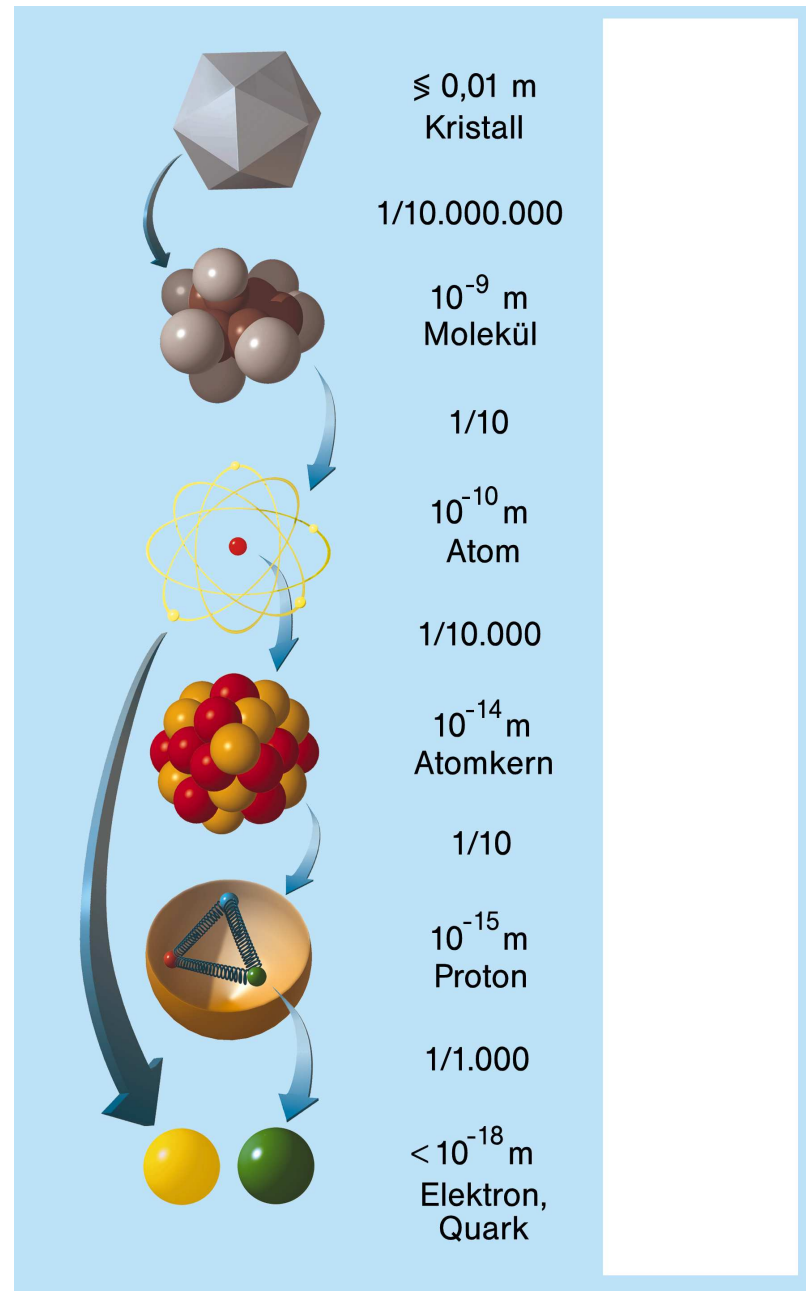
Neutrinoastronomie

Gravitationswellen

Dunkle Materie

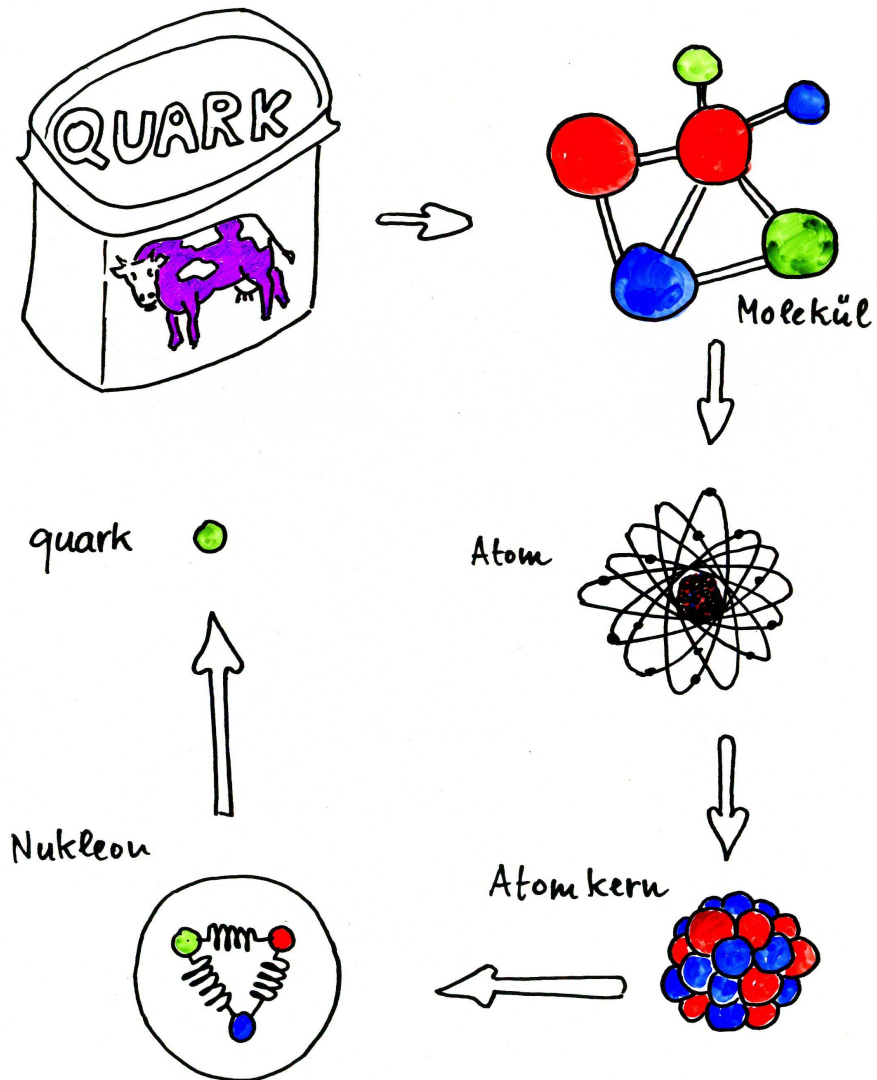
Kosmische Strahlung

Vom Kristall zum Quark

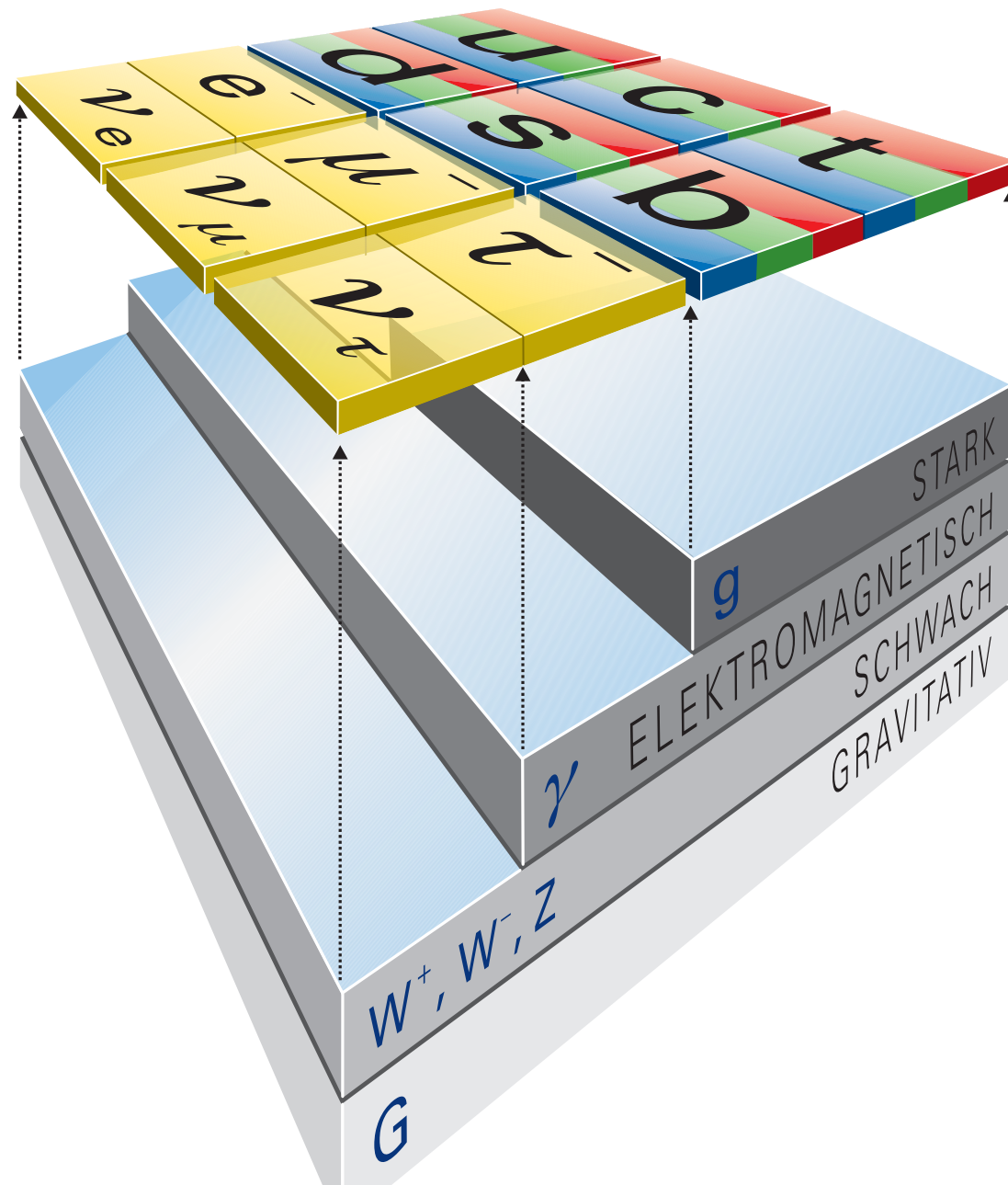


Quark-Kreislauf

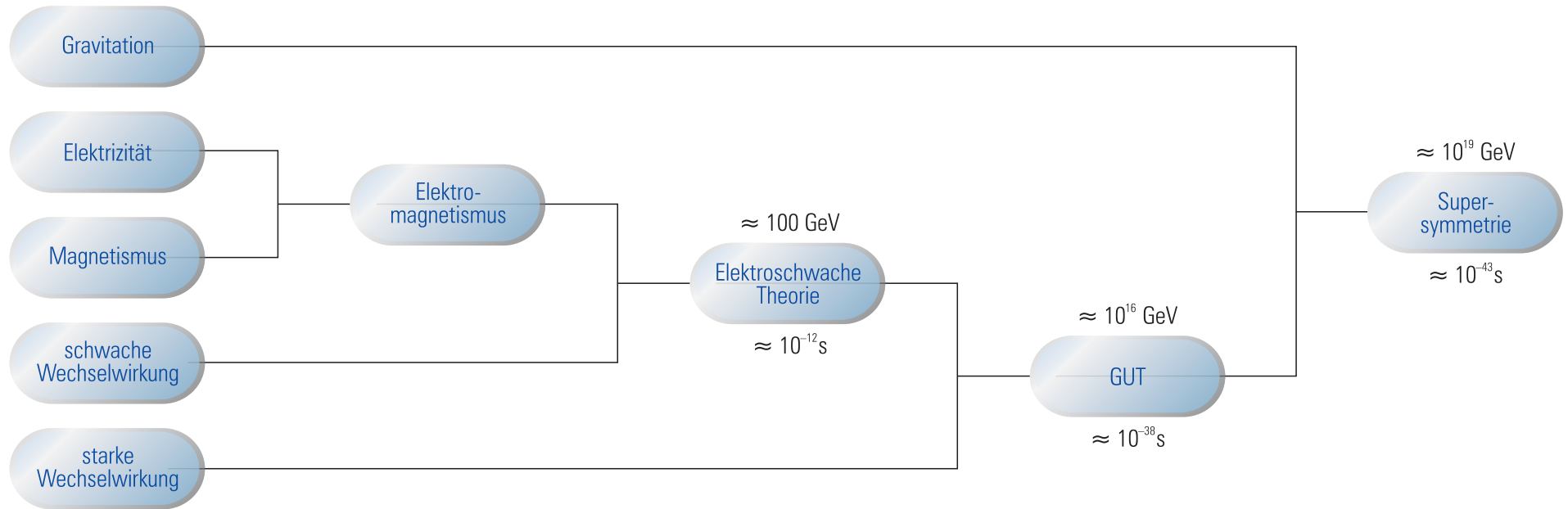
Quark - Metamorphose



Teilchensorten



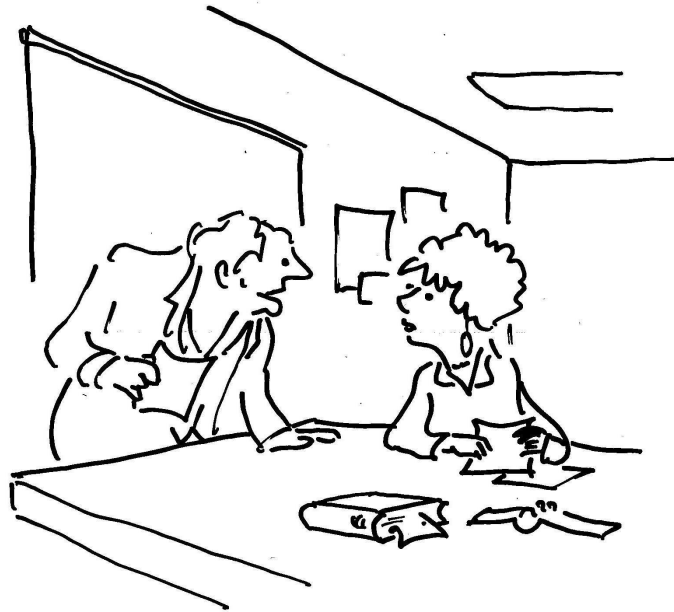
Wechselwirkungen



Wechselwirkungen

- Es gibt vier grundlegende Wechselwirkungen:
- starke Wechselwirkung; Stärke 1
- elektromagnetische Wechselwirkung; Stärke 10^{-2}
- schwache Wechselwirkung; Stärke 10^{-5}
- Gravitation; Stärke 10^{-39}

Die fünfte Kraft

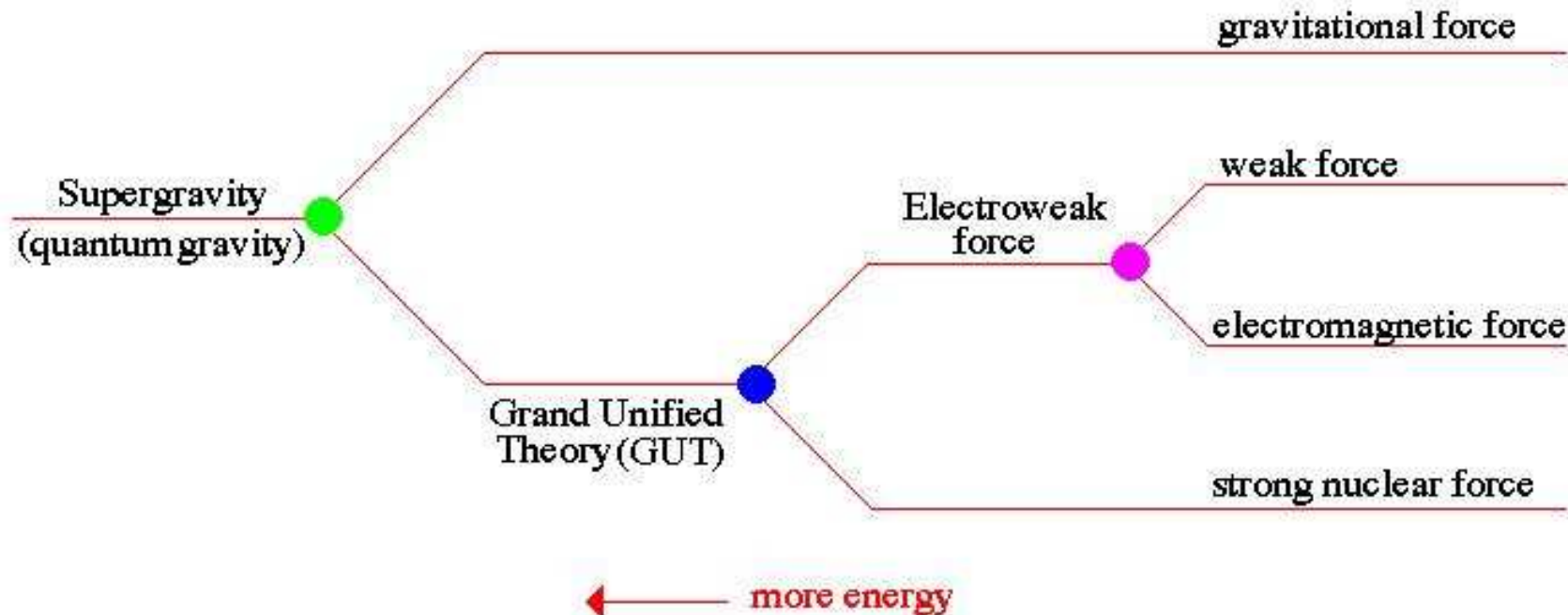


“Es gibt die starke Wechselwirkung, die schwache Kraft, die Gravitation und den Elektromagnetismus und dann ist da noch das gewisse Etwas, das ich Spüle, wenn ich Sie sehe.”

Energieskalen

Unification

all the forces of Nature should be capable of being described by a single theory. But only at high energies should the behavior of the forces combine, this is called unification

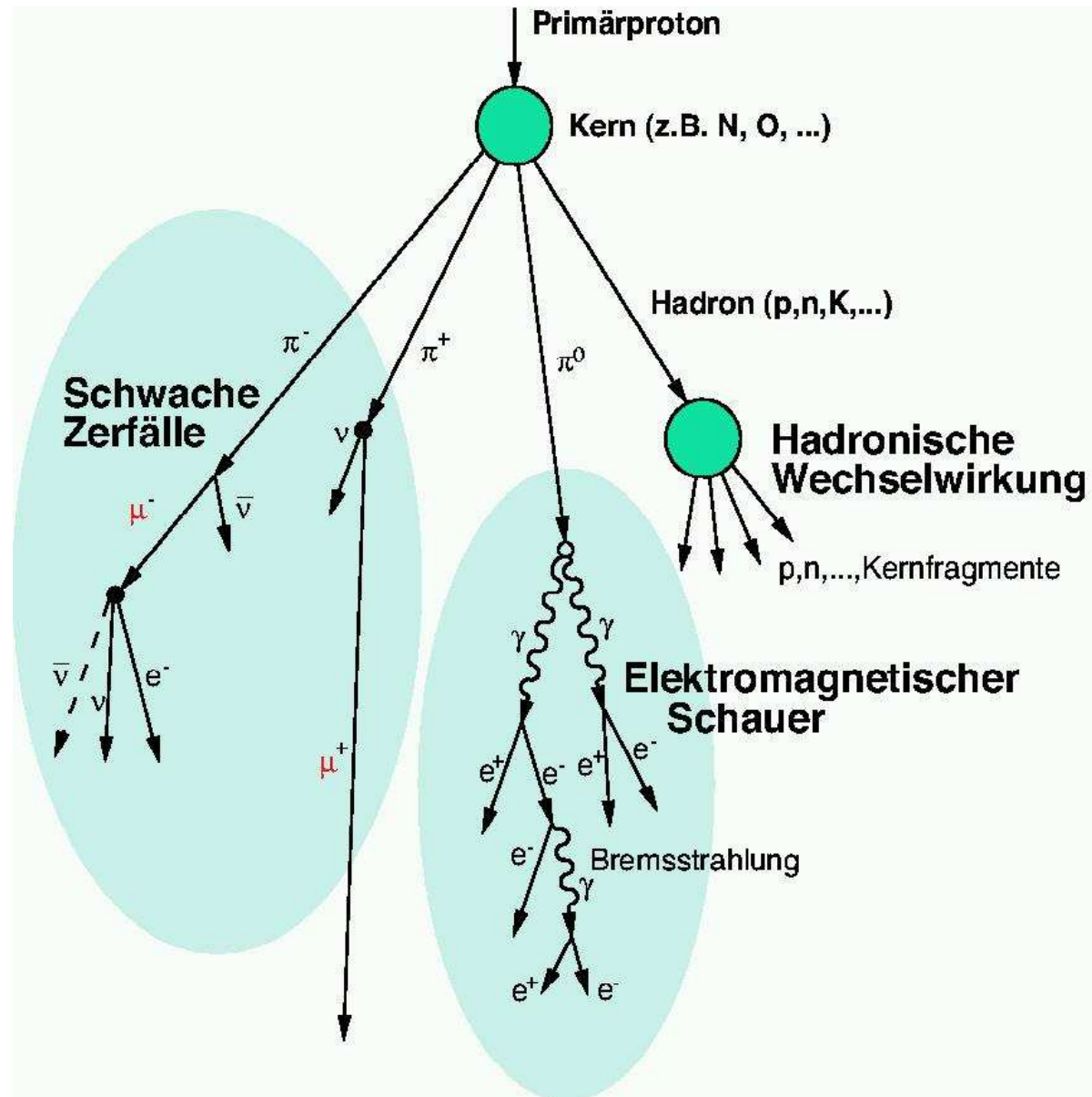


before the unification point, the forces are indistinguishable and have symmetry. After the unification point, the forces act differently and the symmetry is broken.

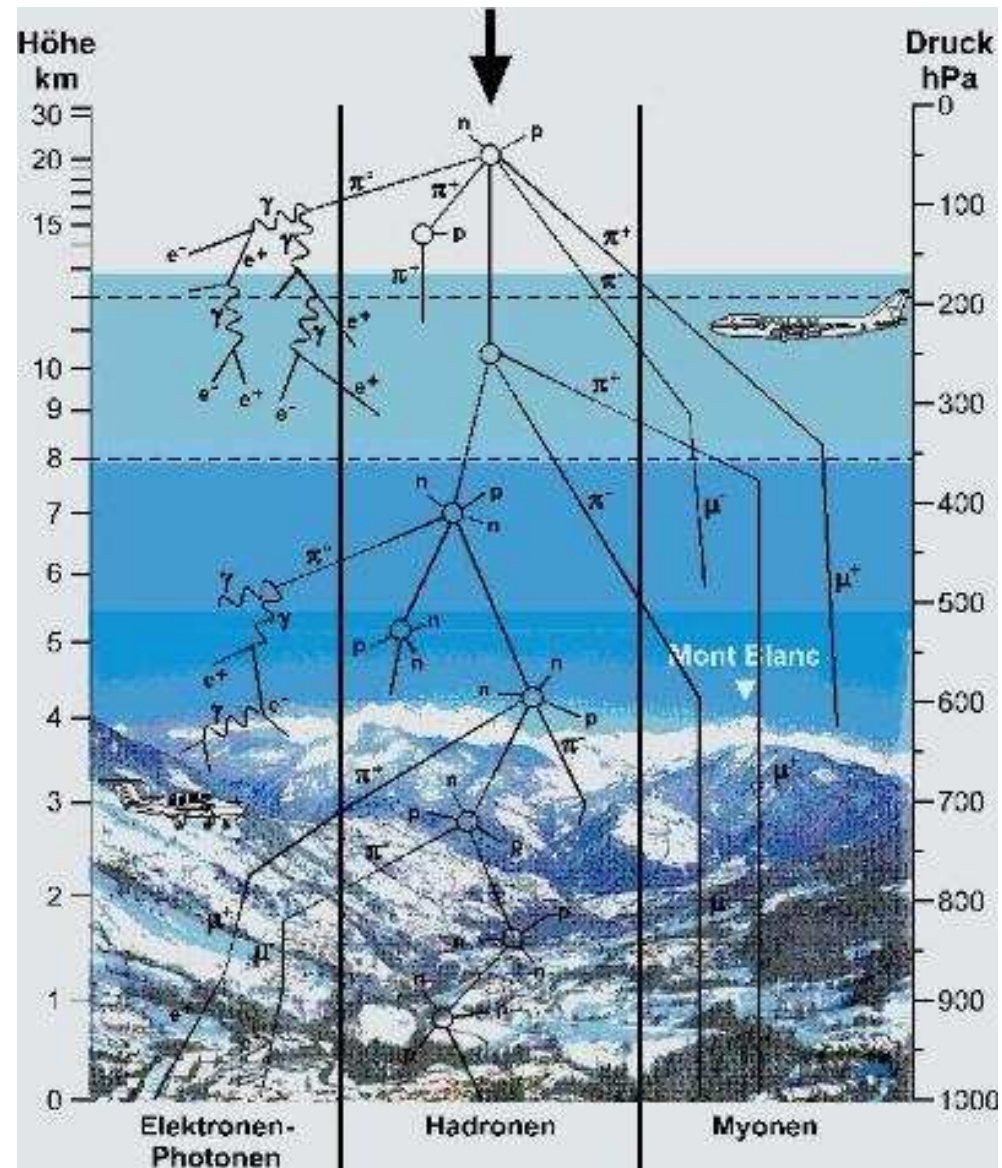
Kosmische Strahlung



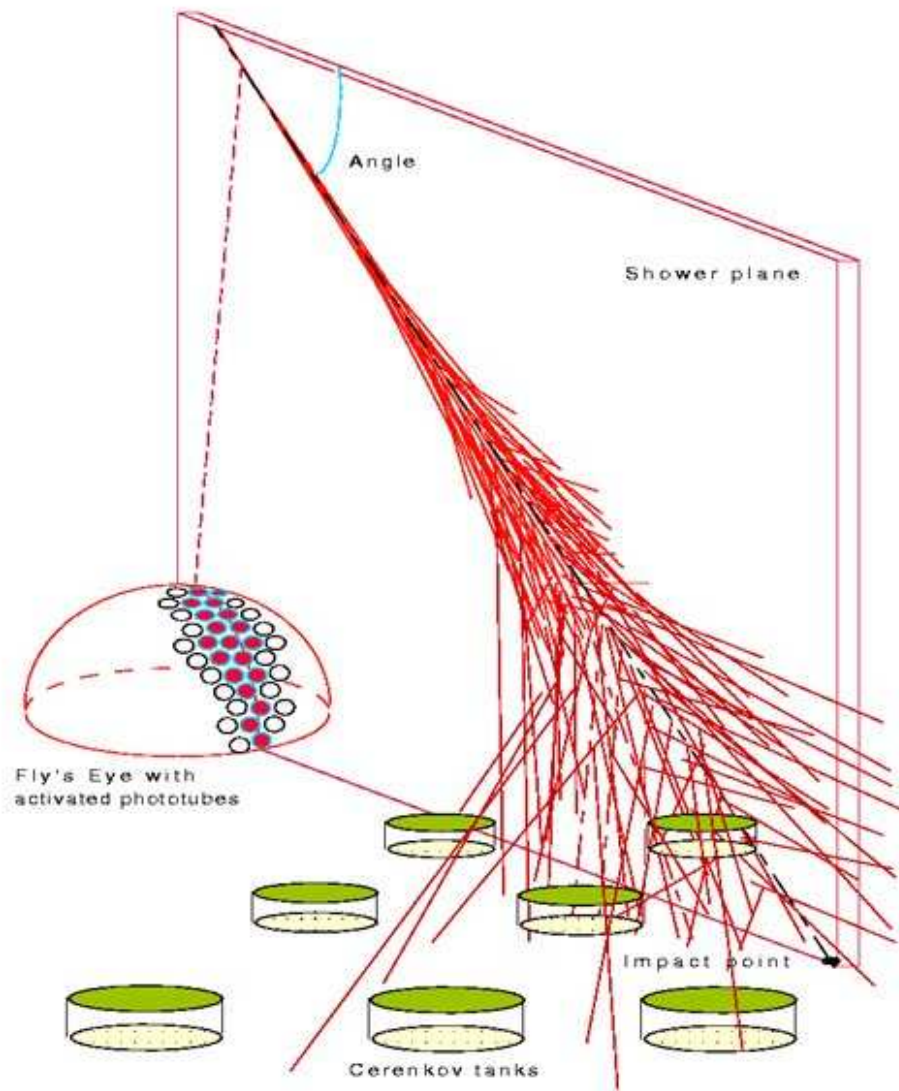
Kosmische Strahlung



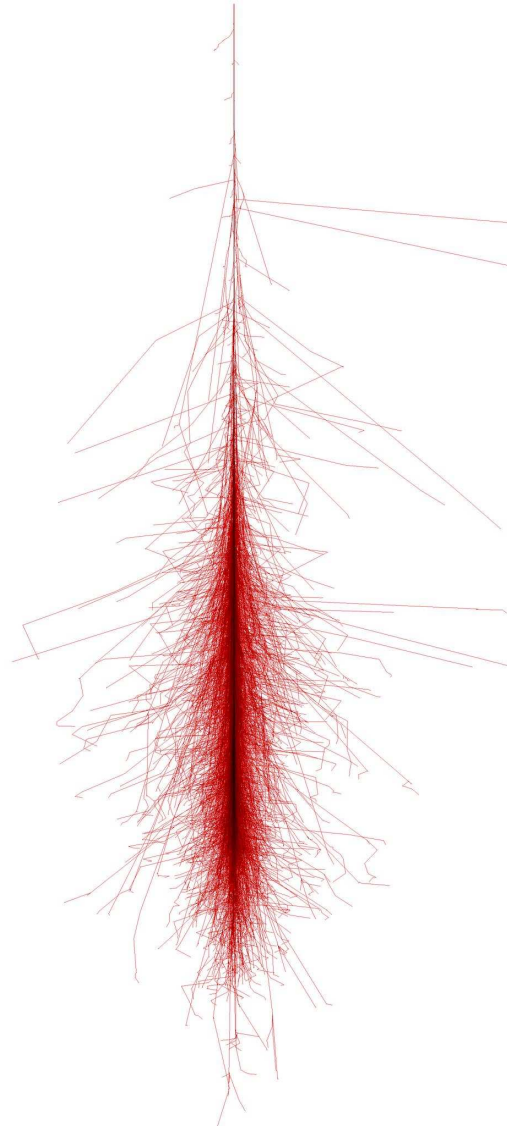
Kosmische Strahlung



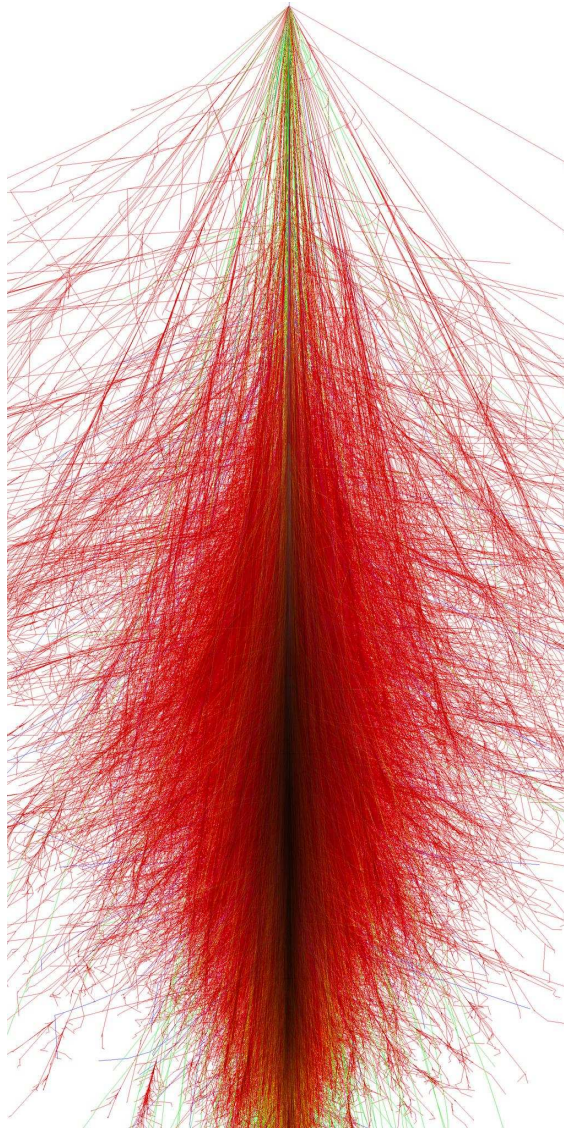
Luftschauer



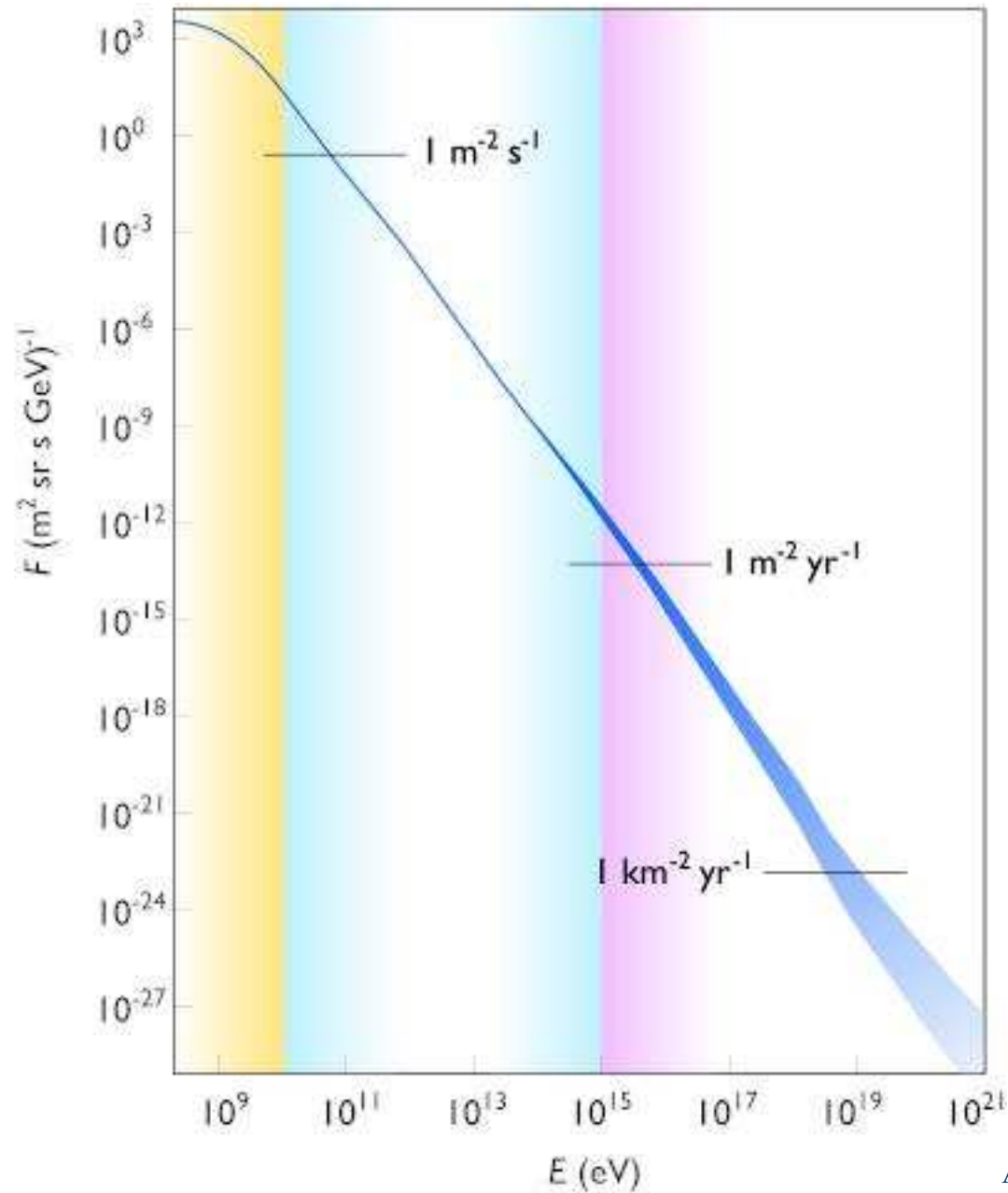
Photon induzierter Schauer



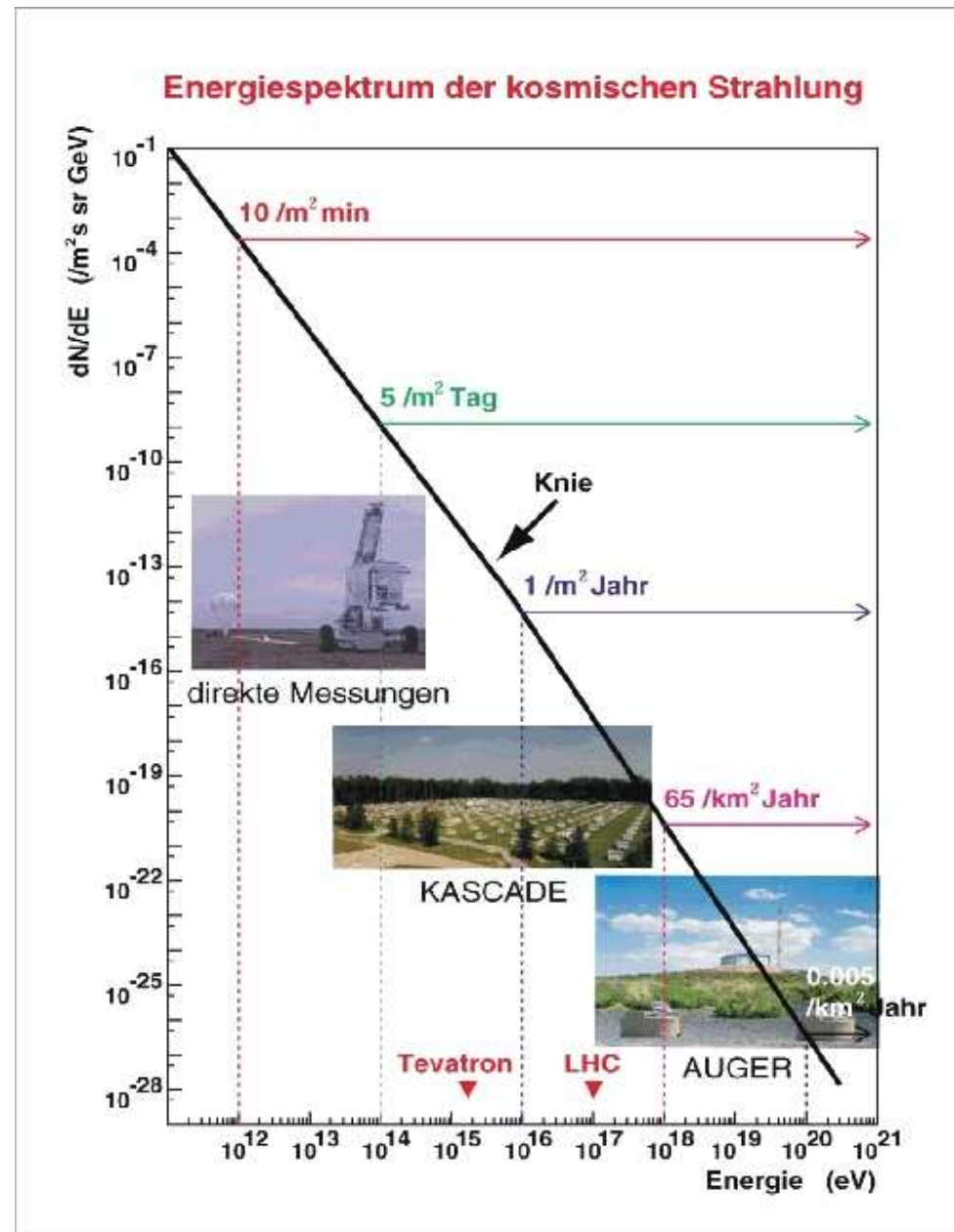
Eisen induzierter Schauer



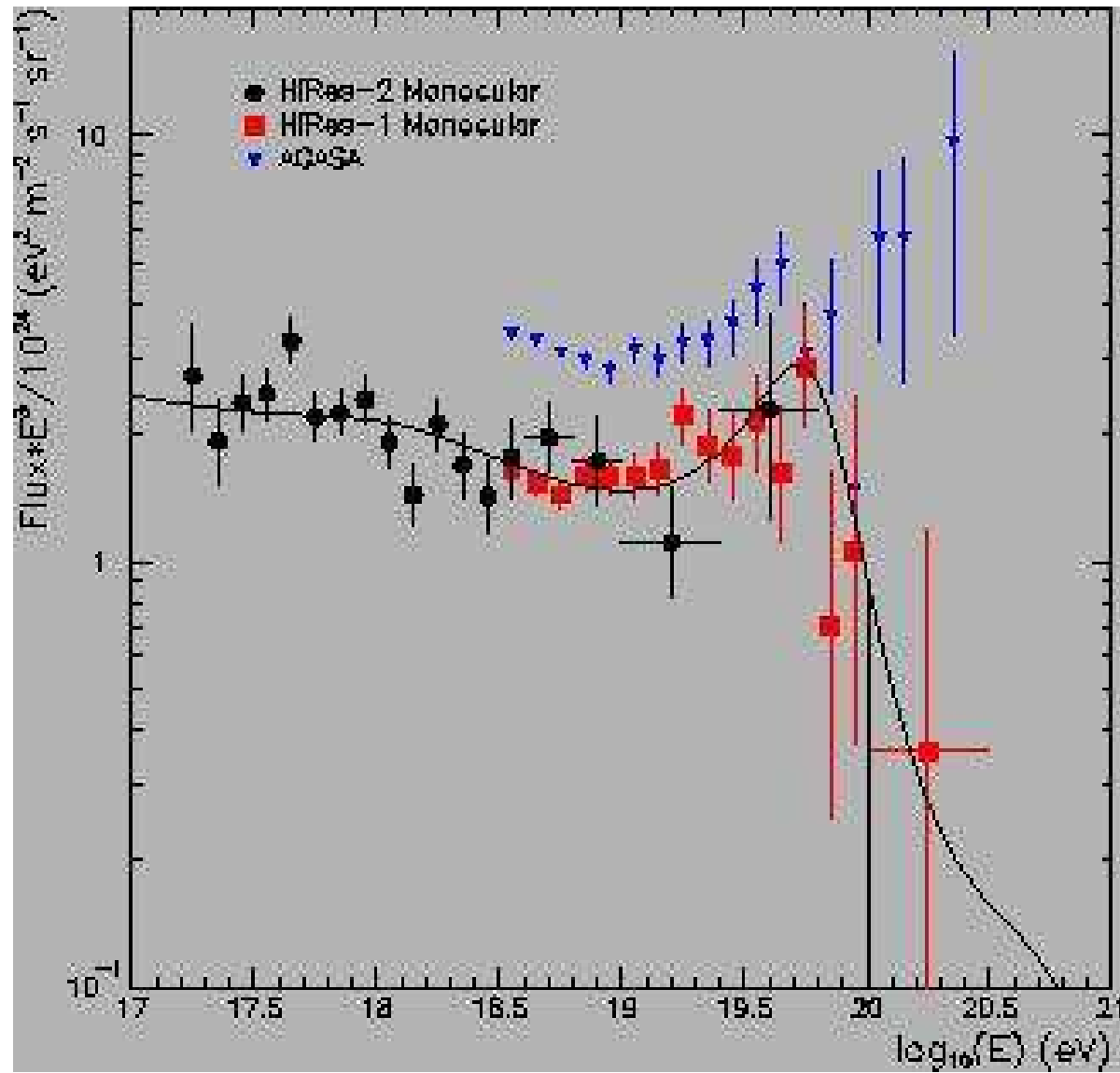
Primärspektrum



Primärspektrum

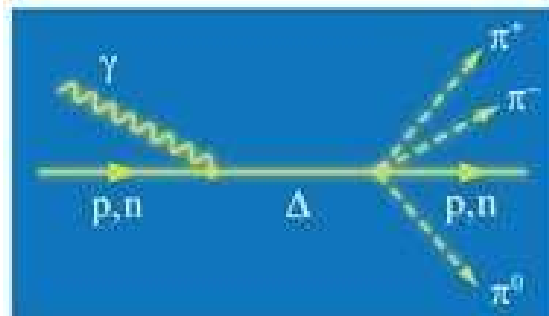


Primärspektrum

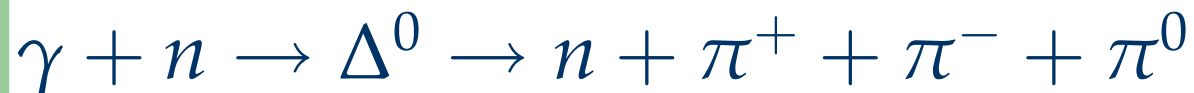


Greisen-Zatsepin-Kuzmin Cut-off

Energieverlust von hochenergetischen Protonen durch Wechselwirkungen mit der kosmologischen Hintergrundstrahlung

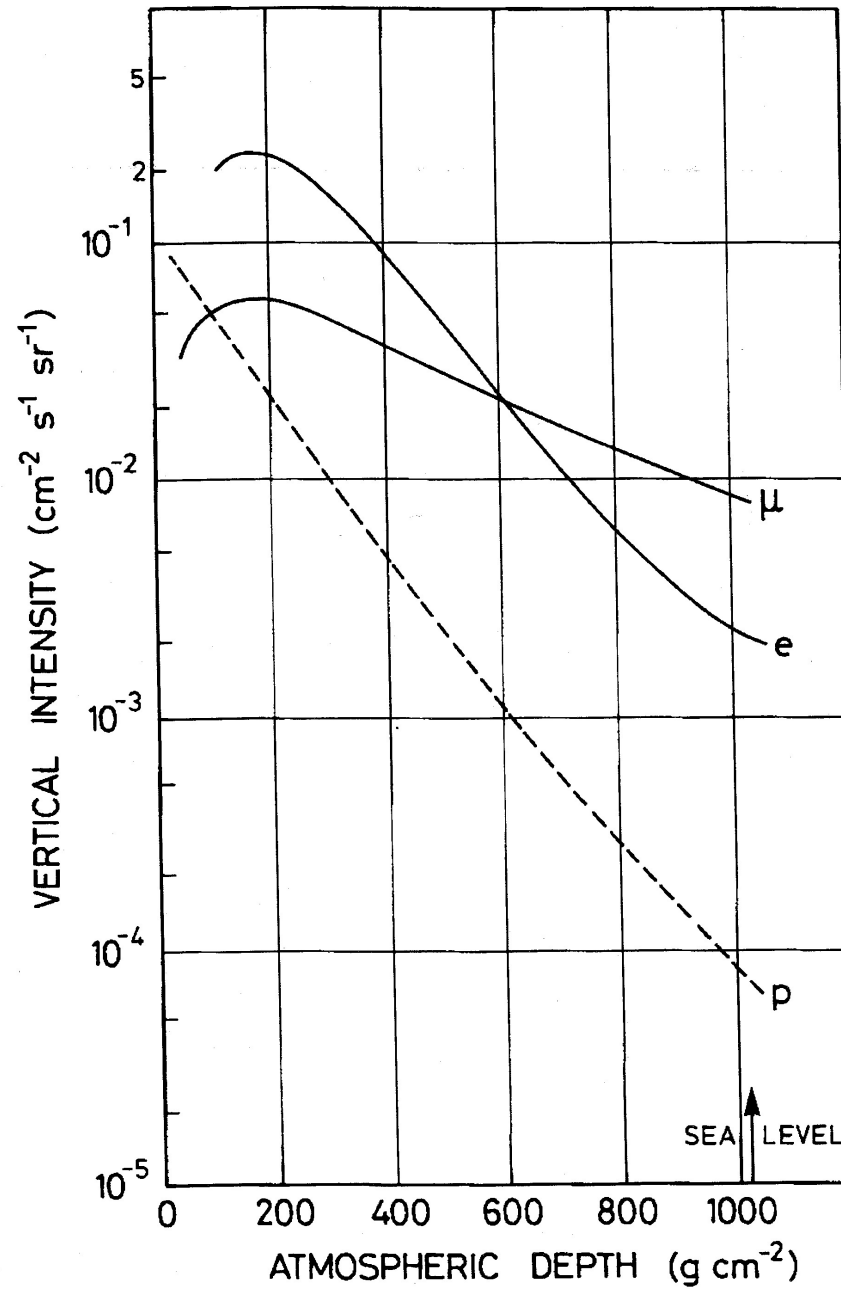


oder



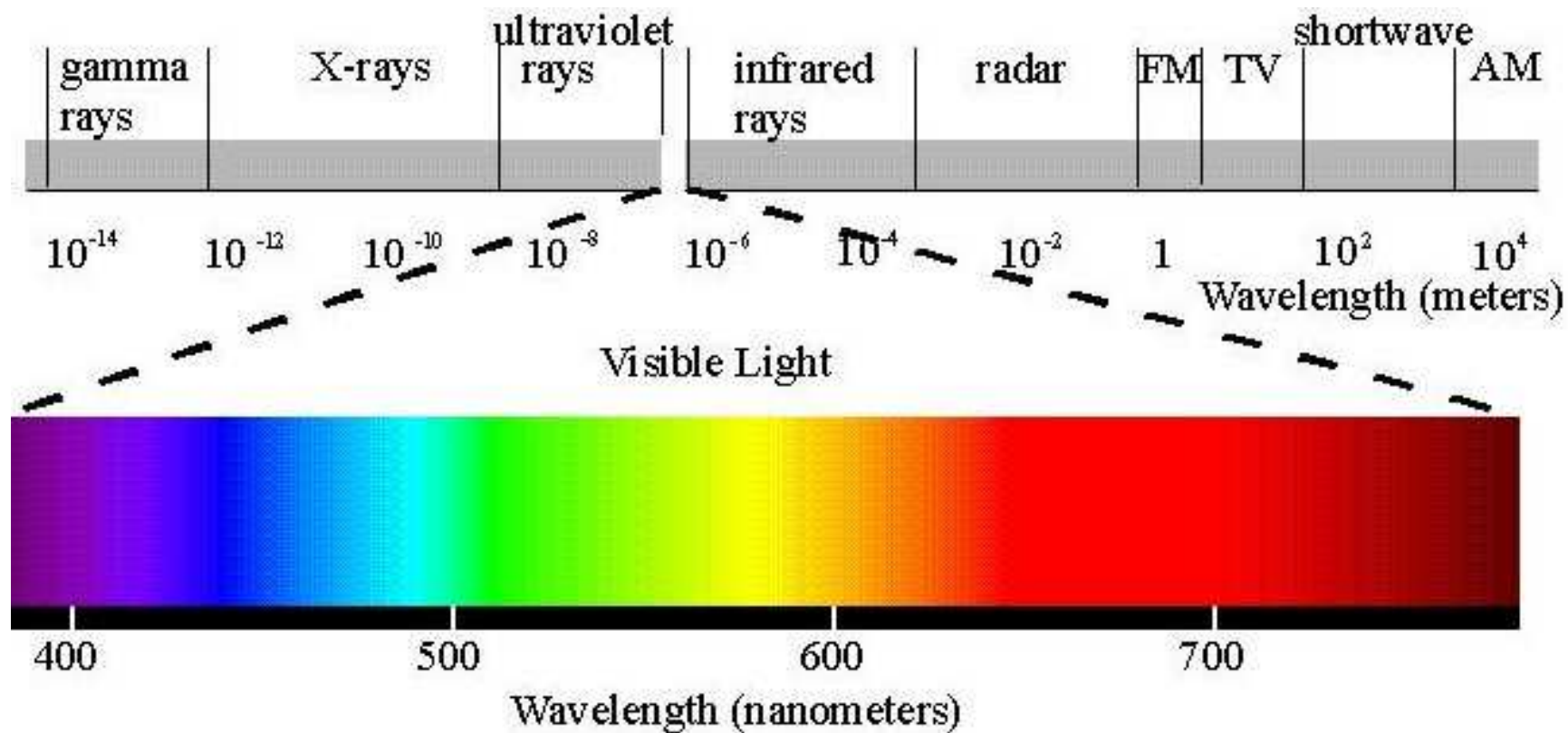
führt zum Abknicken des Primärspektrums

Atmosphärische Komponenten

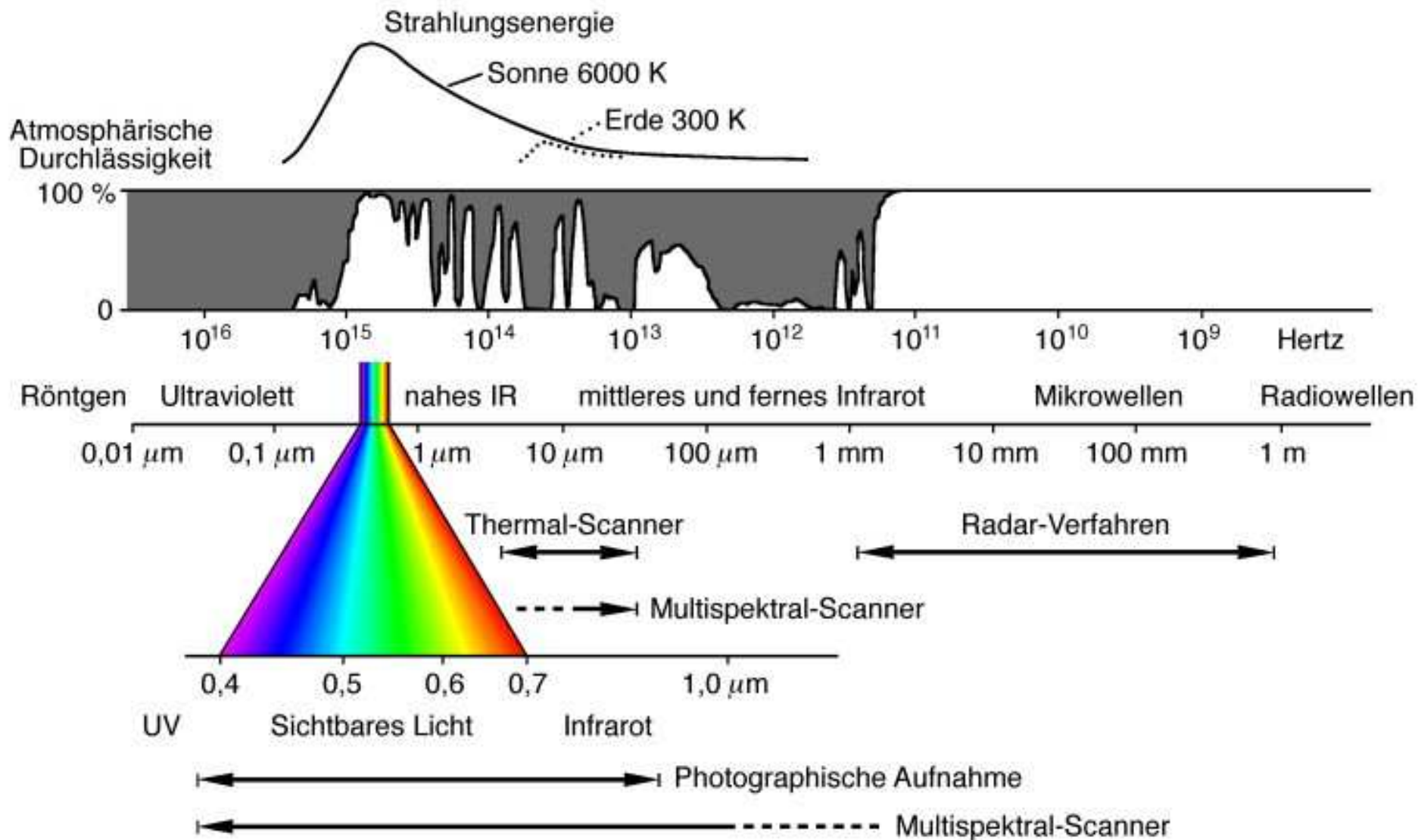


Elektromagnetisches Spektrum

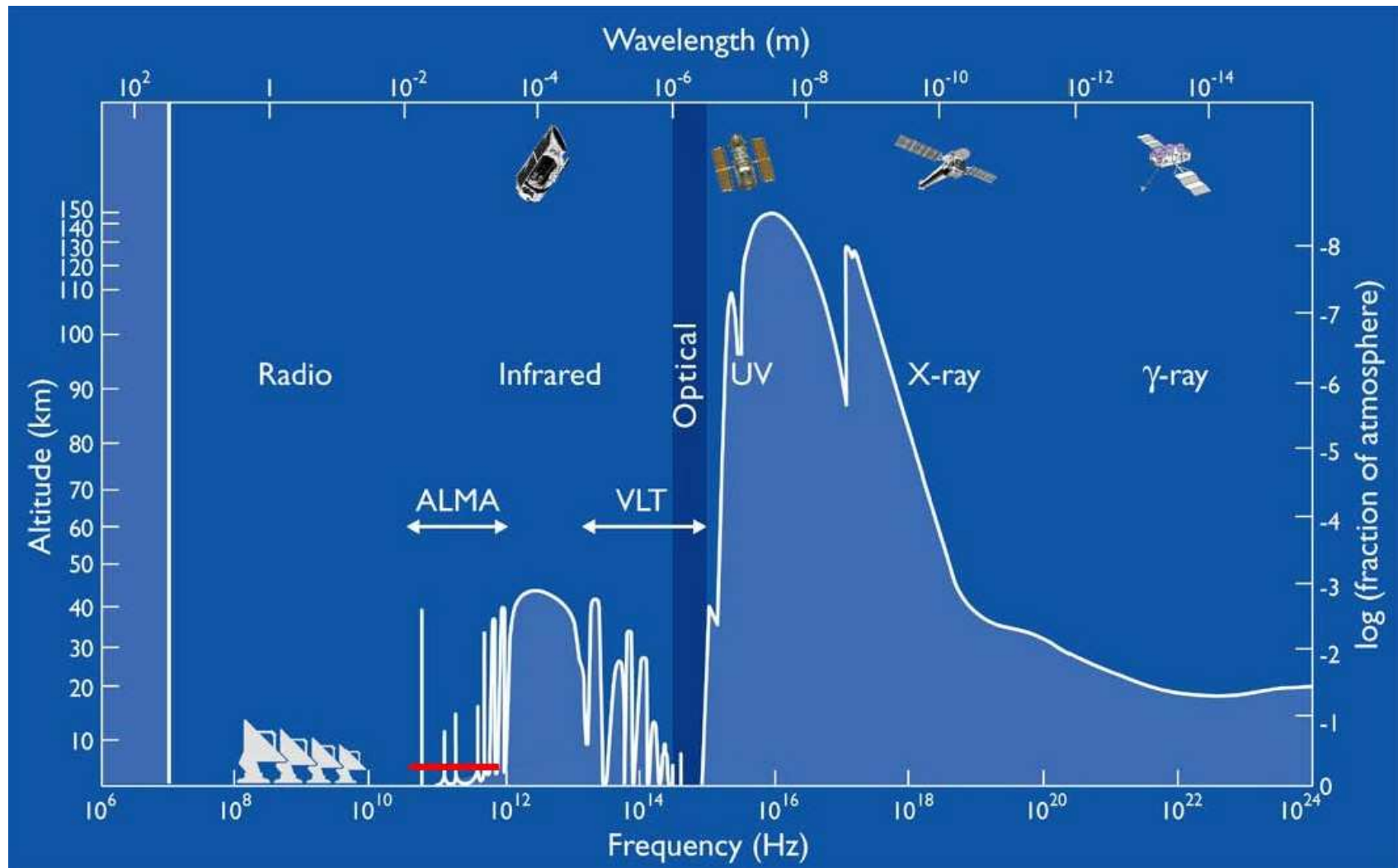
Röntgenstrahlen und γ -Strahlen



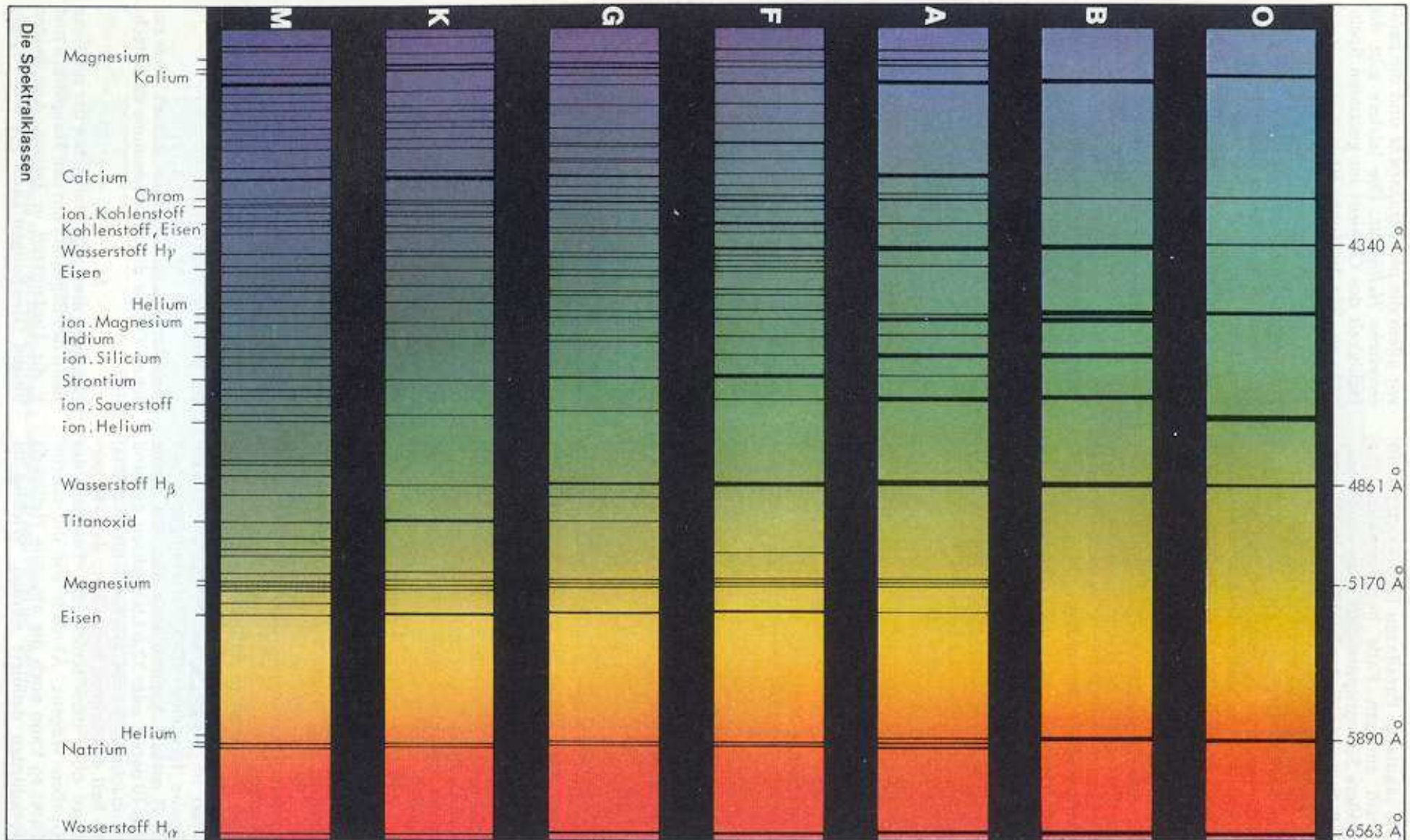
Elektromagnetisches Spektrum



Fenster zum All



Fraunhofer Spektren

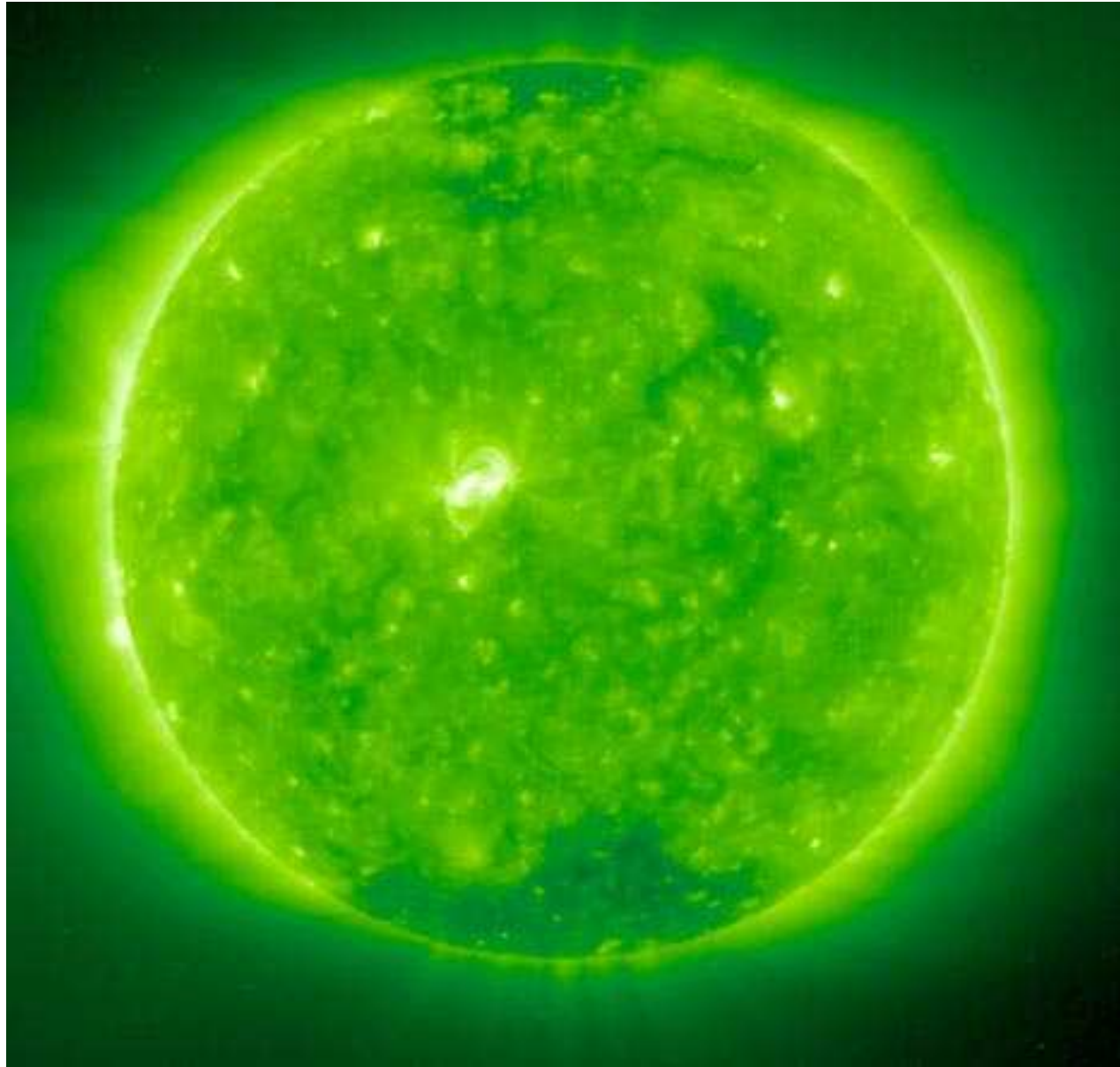


150 Aufbau der Sterne / Zustandsgrößen II

Fraunhofer Spektrum



Röntgenstrahlen von der Sonne



Rayleigh-Streuung



Wie entsteht Röntgenstrahlung?

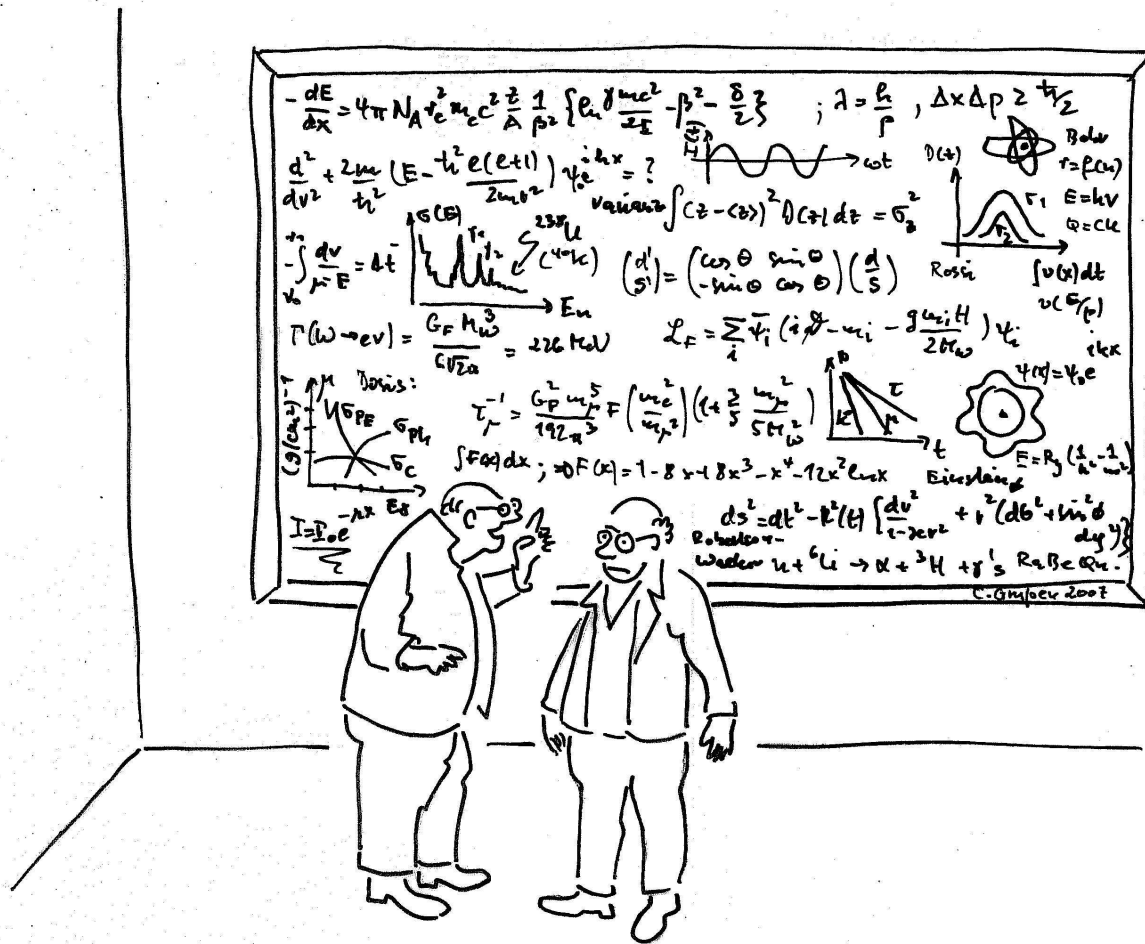
Es gibt verschiedene Mechanismen zur Erzeugung von Röntgenstrahlung

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

Planck'sches Strahlungsgesetz

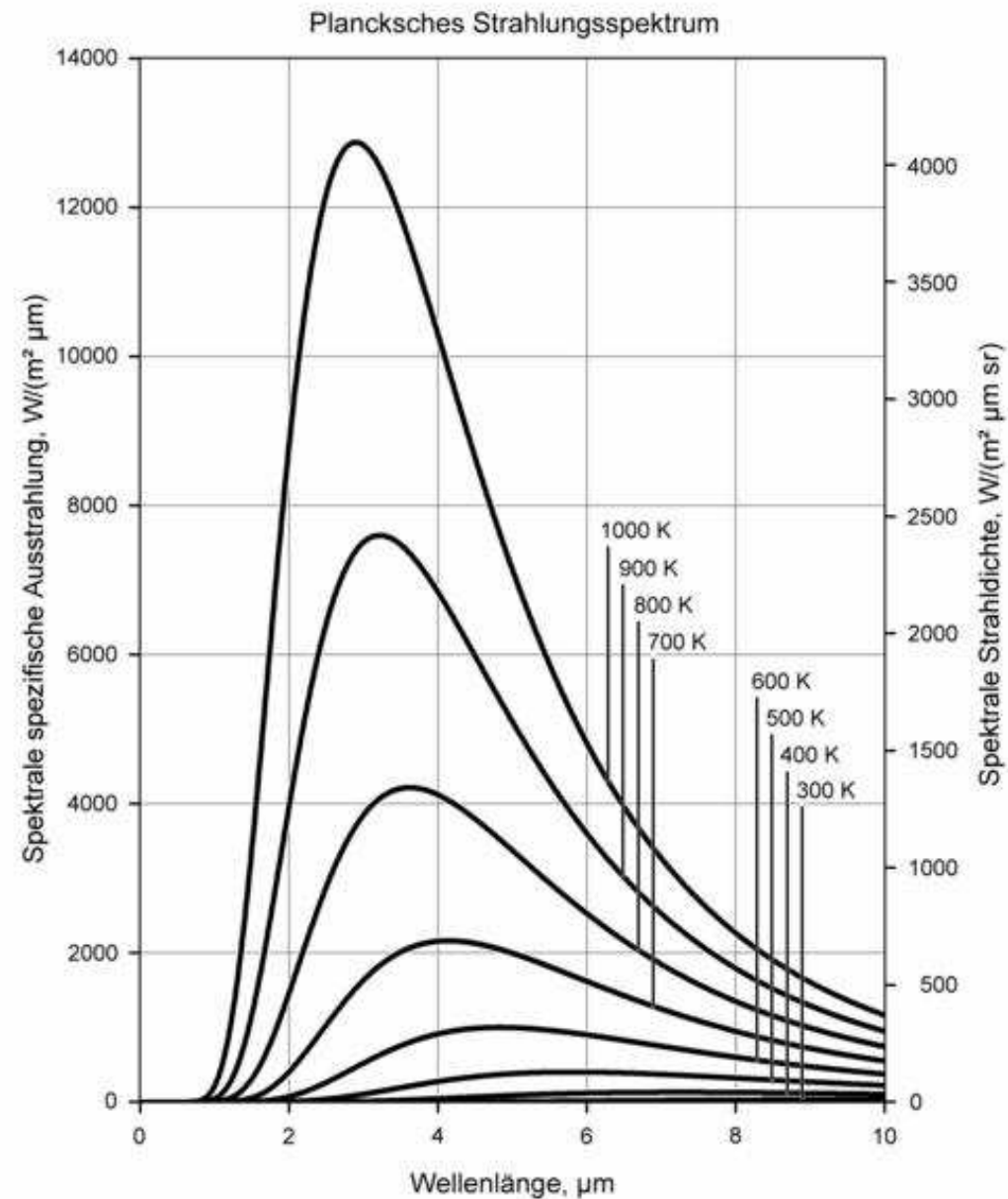
- $P_\lambda(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$
- $P_\lambda(\lambda, T)$ spektrale spezifische Ausstrahlung
- h Planck'sches Wirkungsquantum
- c Lichtgeschwindigkeit
- k Boltzmann-Konstante
- T absolute Temperatur der Strahlerfläche, in K
- λ betrachtete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

Formelvereinfachung



“Dies ist die Version für unsere Anfänger!”

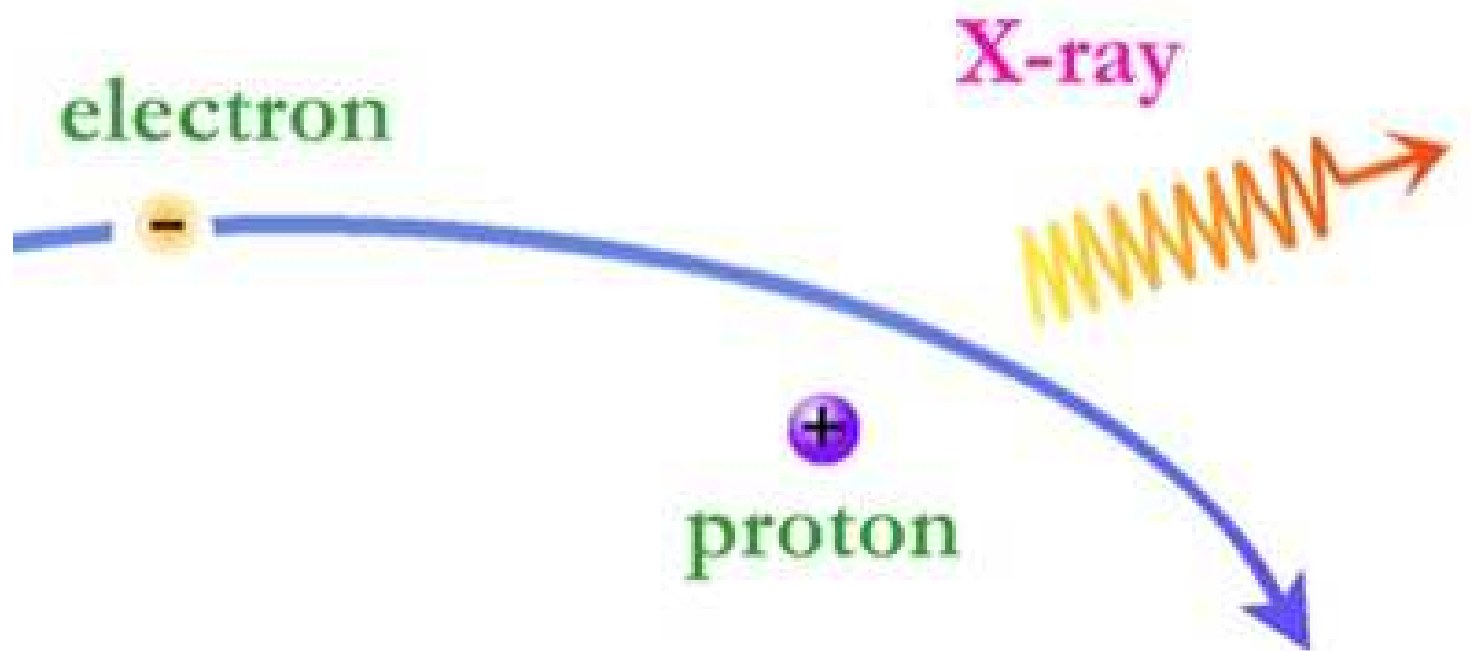
Planck-Verteilung



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

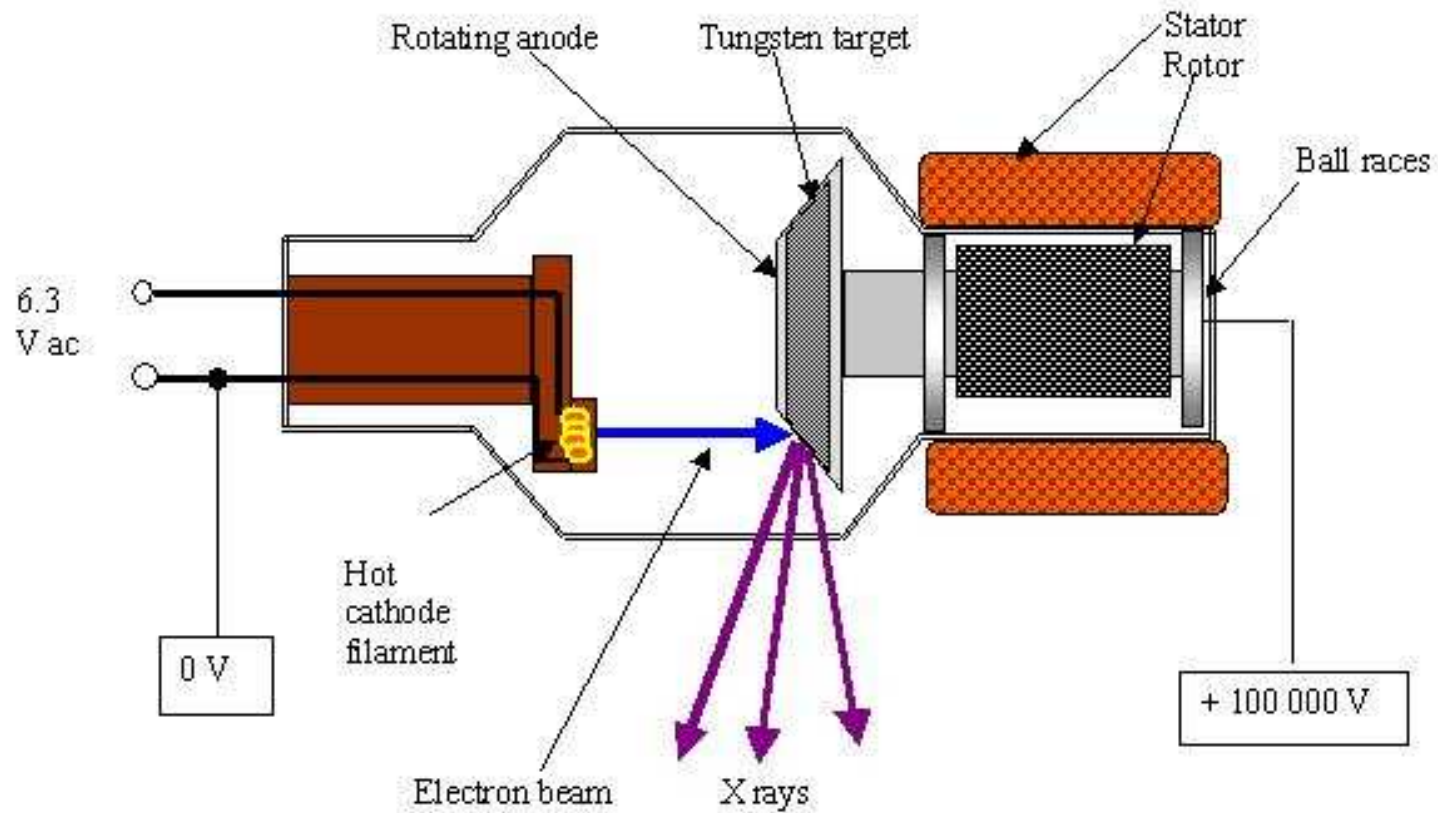
Bremsstrahlung

Wegen der $\frac{1}{m^2}$ 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.

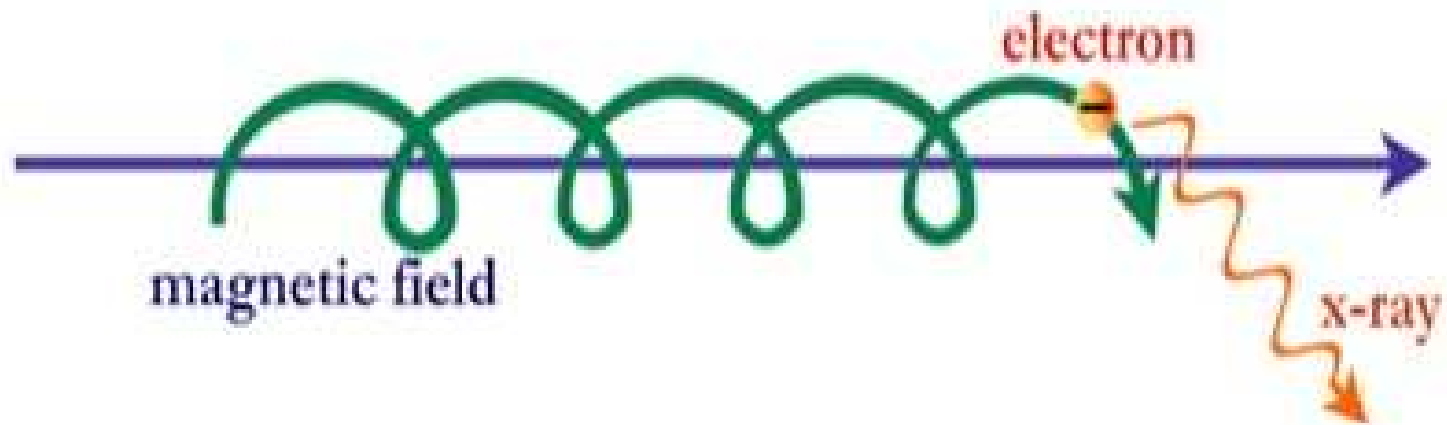
Die Abstrahlung P von beschleunigten Elektronen ist

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

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



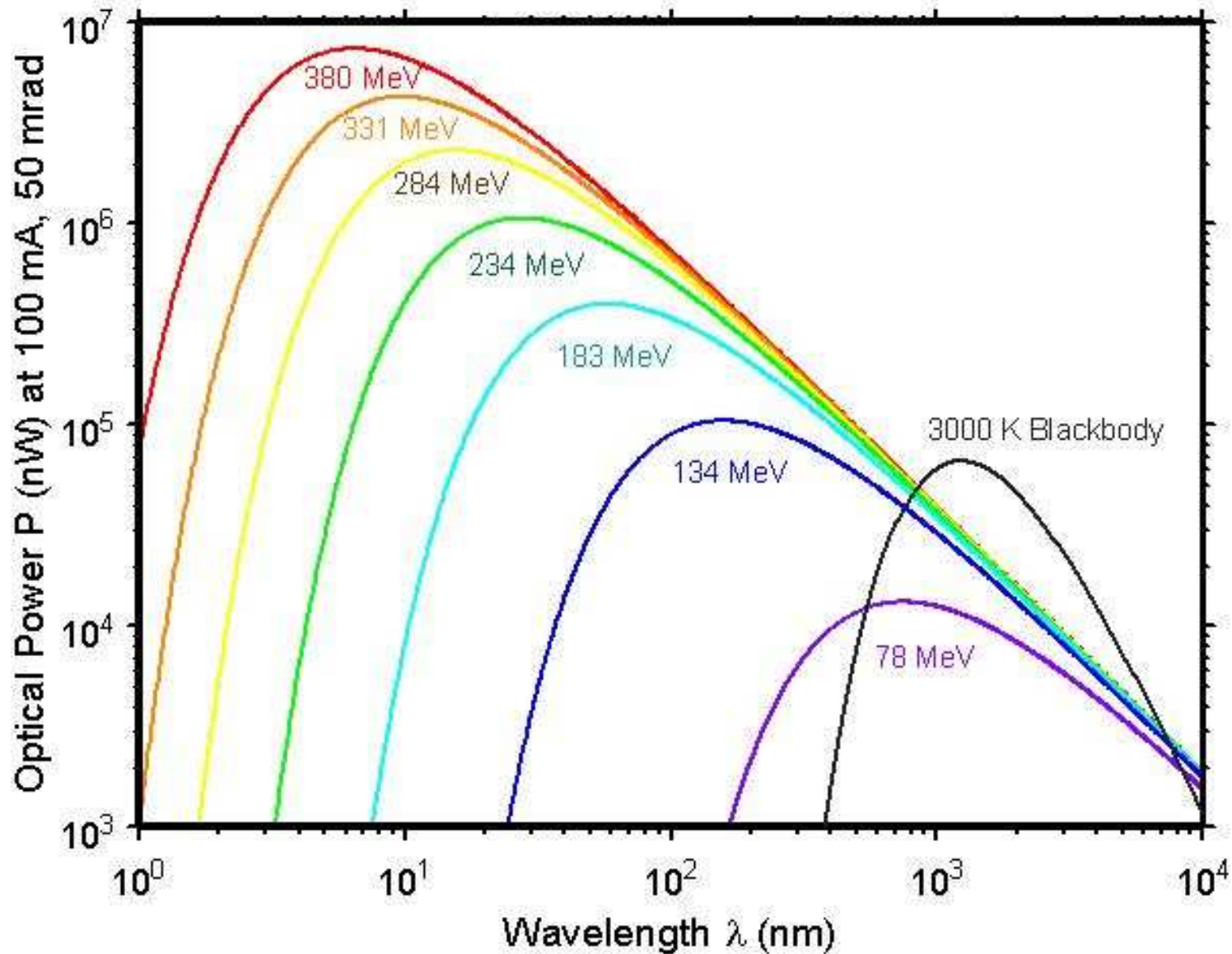
Synchrotronstrahlung

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

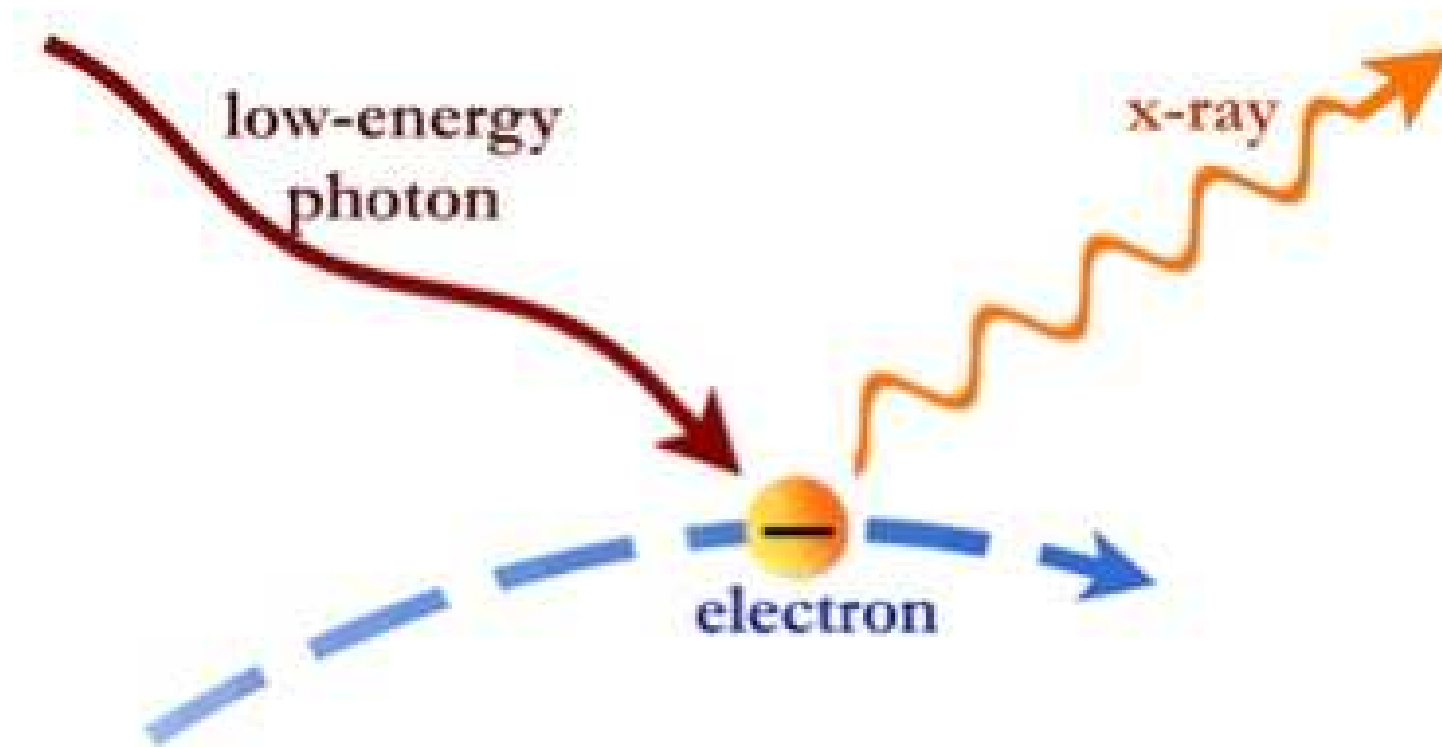
Die Synchrotronphotonen haben ein breites Frequenzspektrum, mit einer charakteristischen Energie $\sim \gamma^3$

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

Synchrotronpektrum



Inverse Compton-Streuung



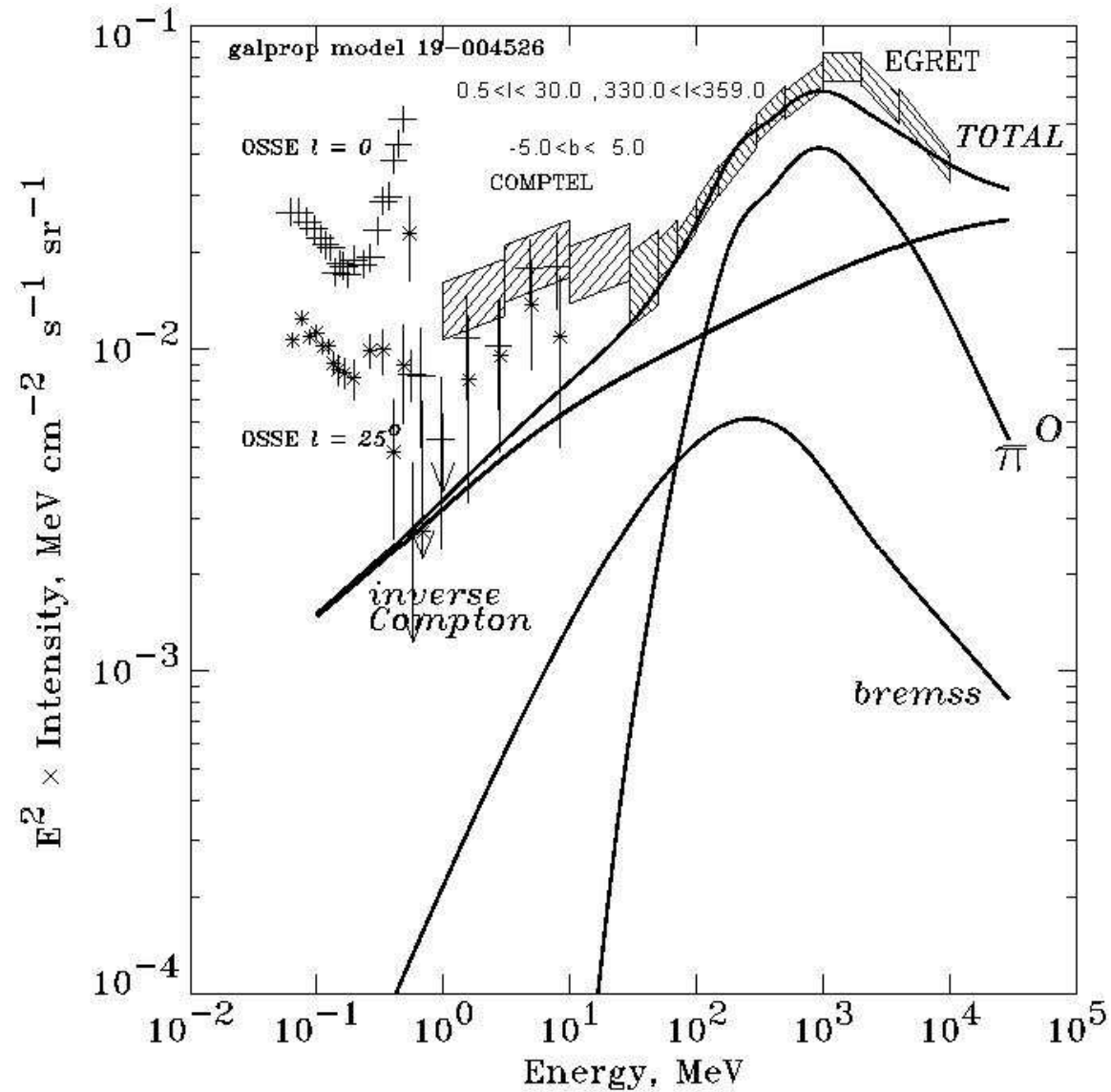
Inverse Compton-Streuung

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

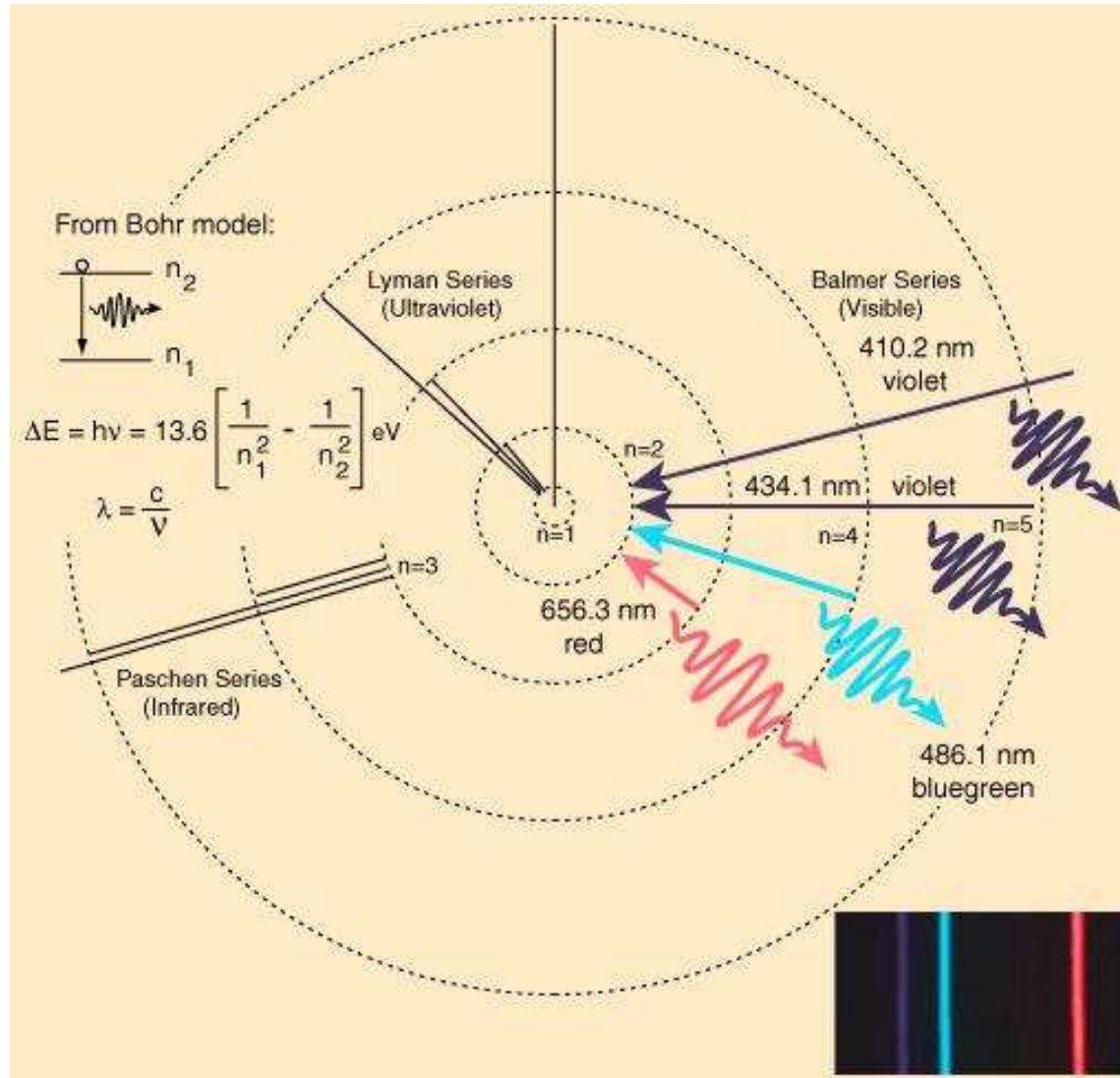
Der Wirkungsquerschnitt für die inverse Compton-Streuung wächst nur schwach mit der Energie ($\sim \ln E / mc^2$).

Der Wirkungsquerschnitt hängt ab von der Photonendichte und Elektronendichte.

Photonenspektren



Röntgenspektren



Charakteristische Röntgenstrahlung

Anregung von Atomen

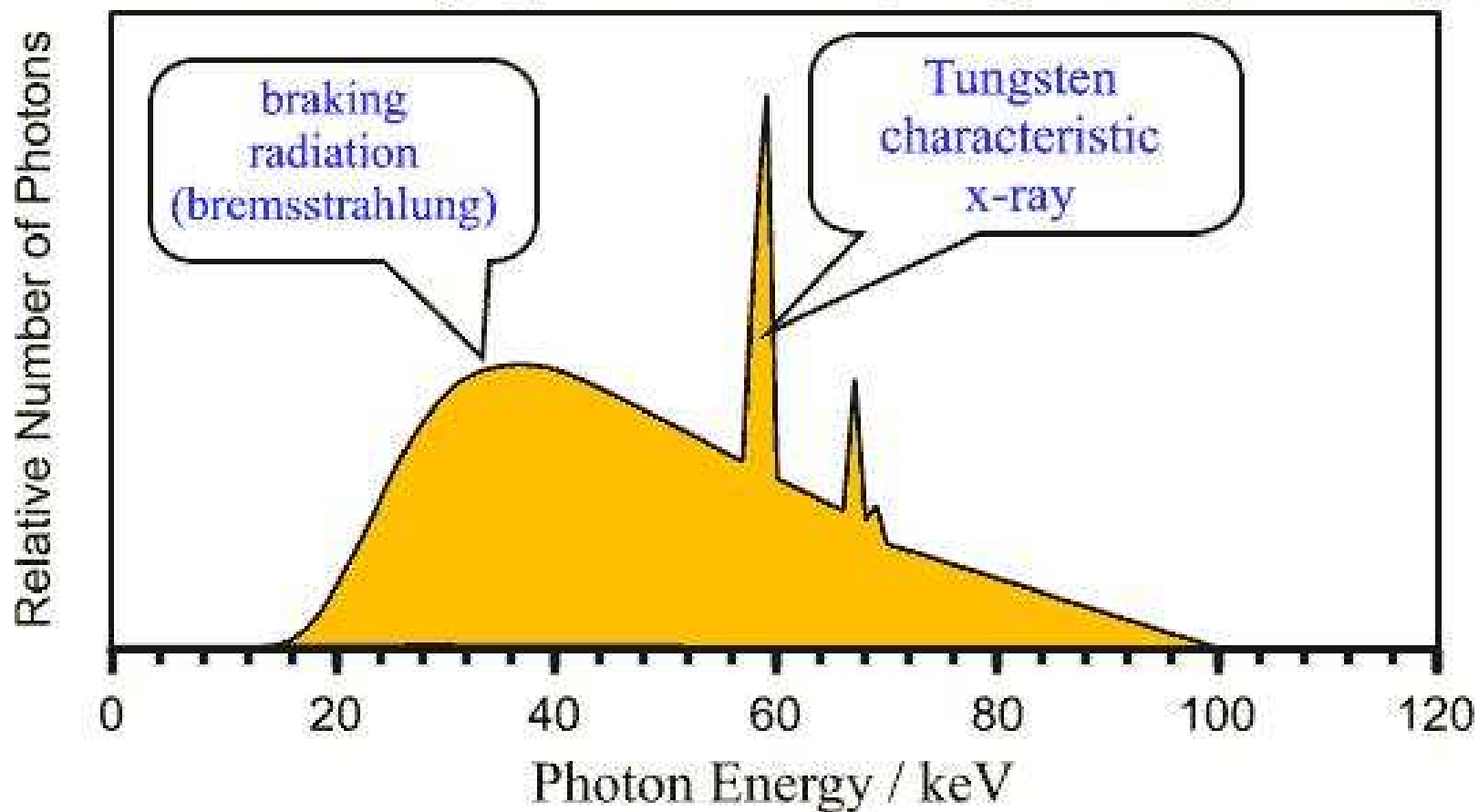
$$|E_a - E_e| = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

wobei

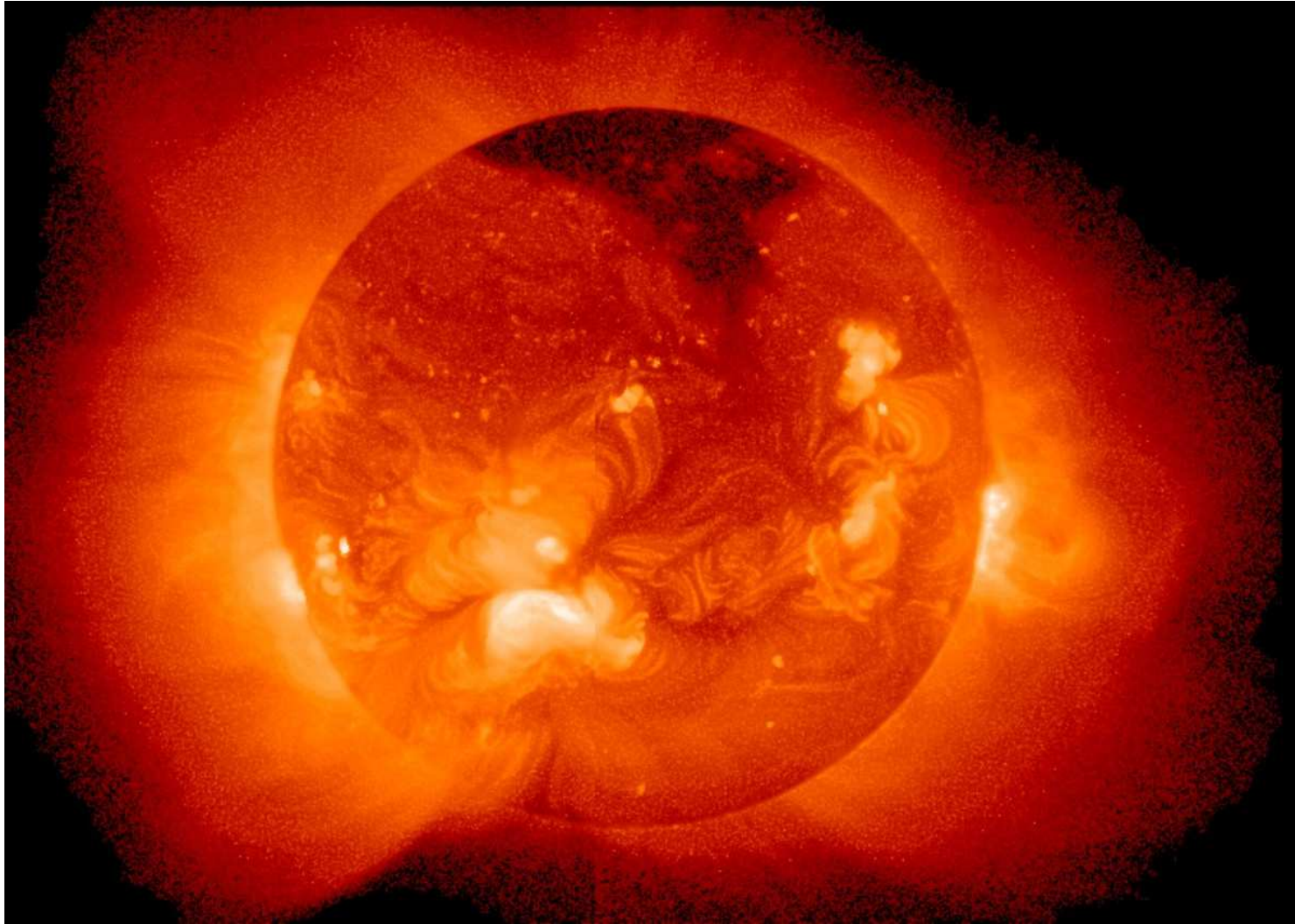
- * E_a - der Energie des Anfangszustandes,
- * E_e - der Energie des Endzustandes,
- * ν - Frequenz des Lichtes ($\nu = \frac{c}{\lambda}$)
- * h - Plancksches Wirkungsquantum ($6,626 \cdot 10^{-34}$ J \cdot s)

Röntgenspektren

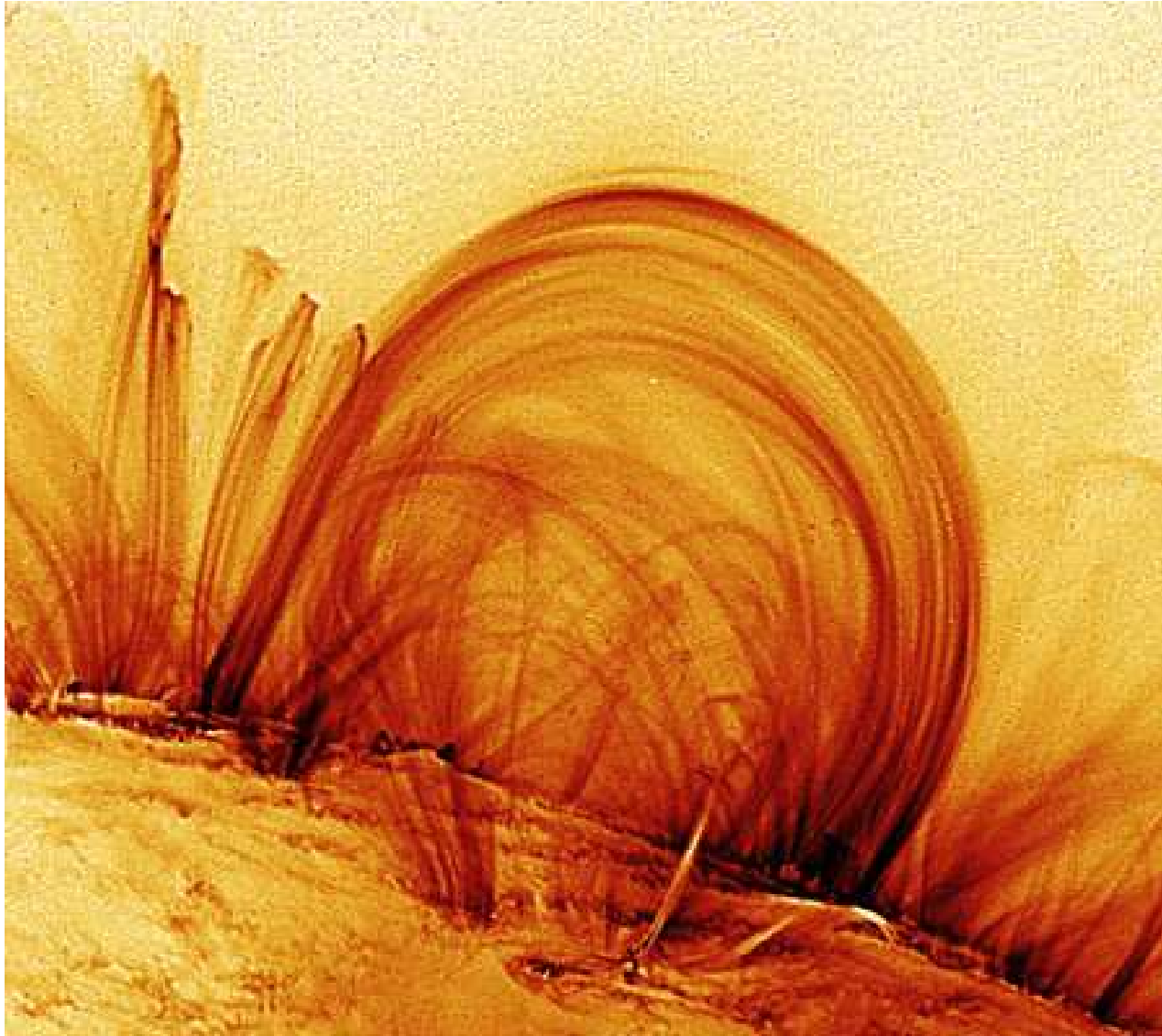
Calculated X-ray Spectrum 100kV, Tungsten target 13° angle



Röntgenstrahlen von der Sonne

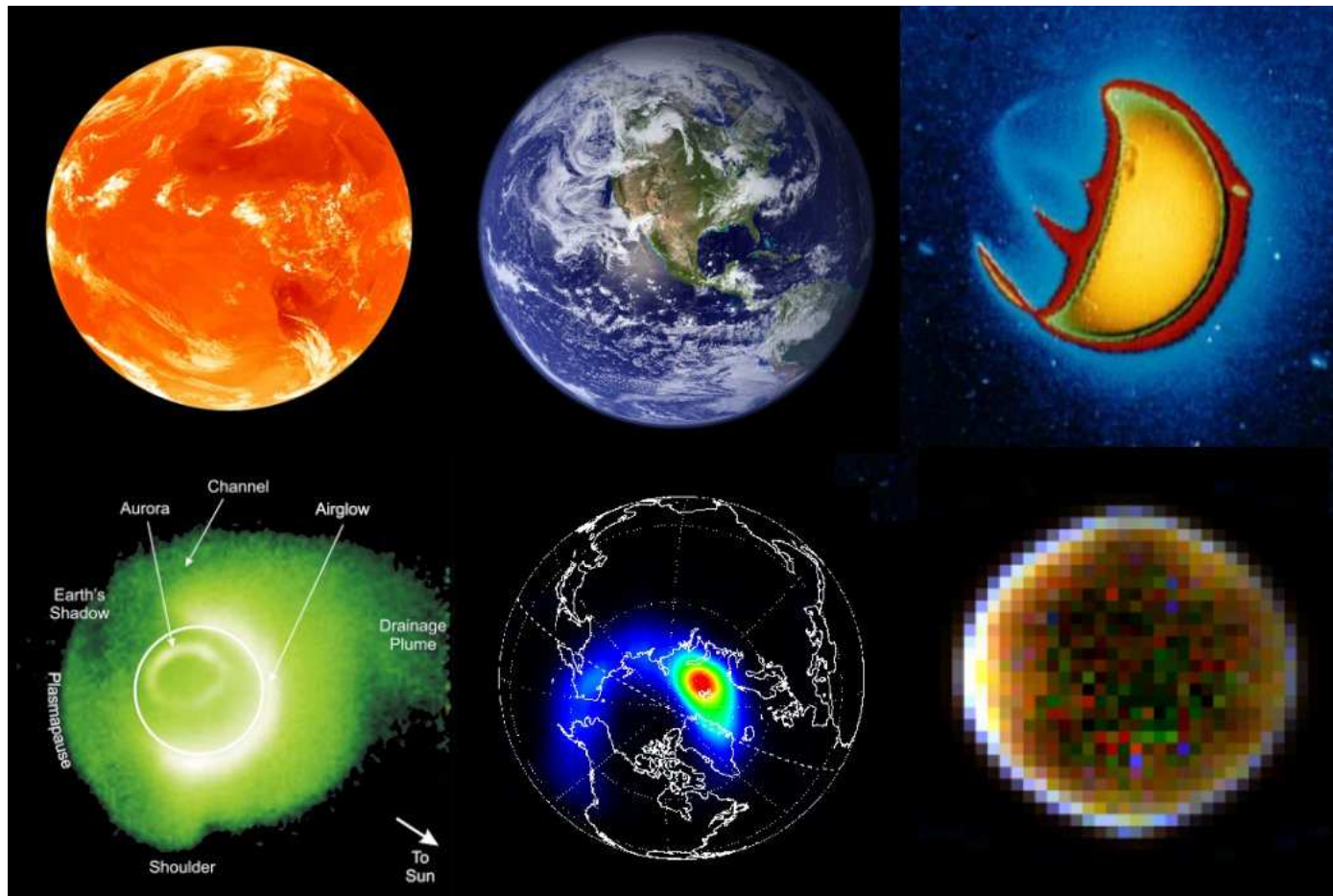


Röntgenstrahlen von der Sonne



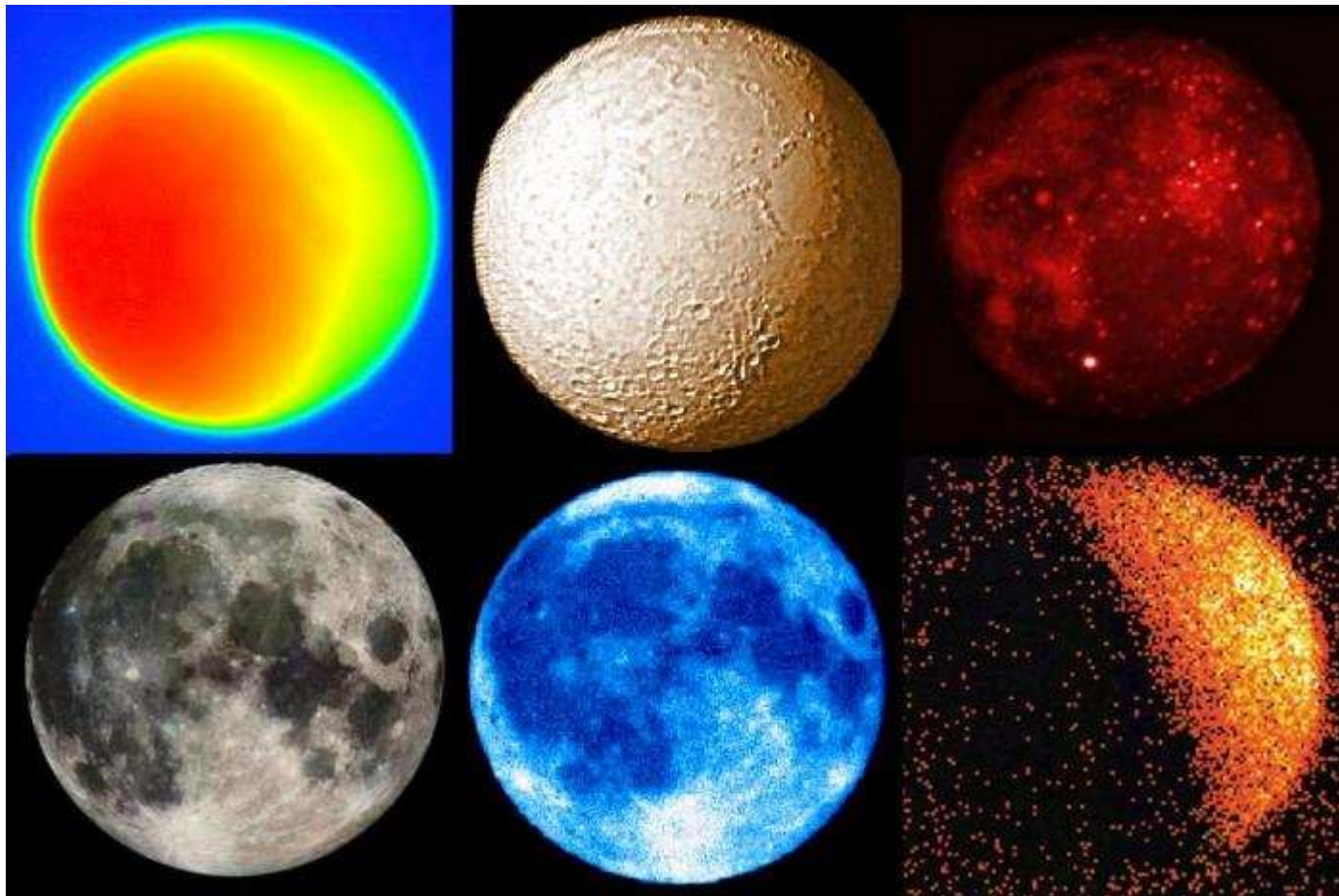
Erdansichten

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

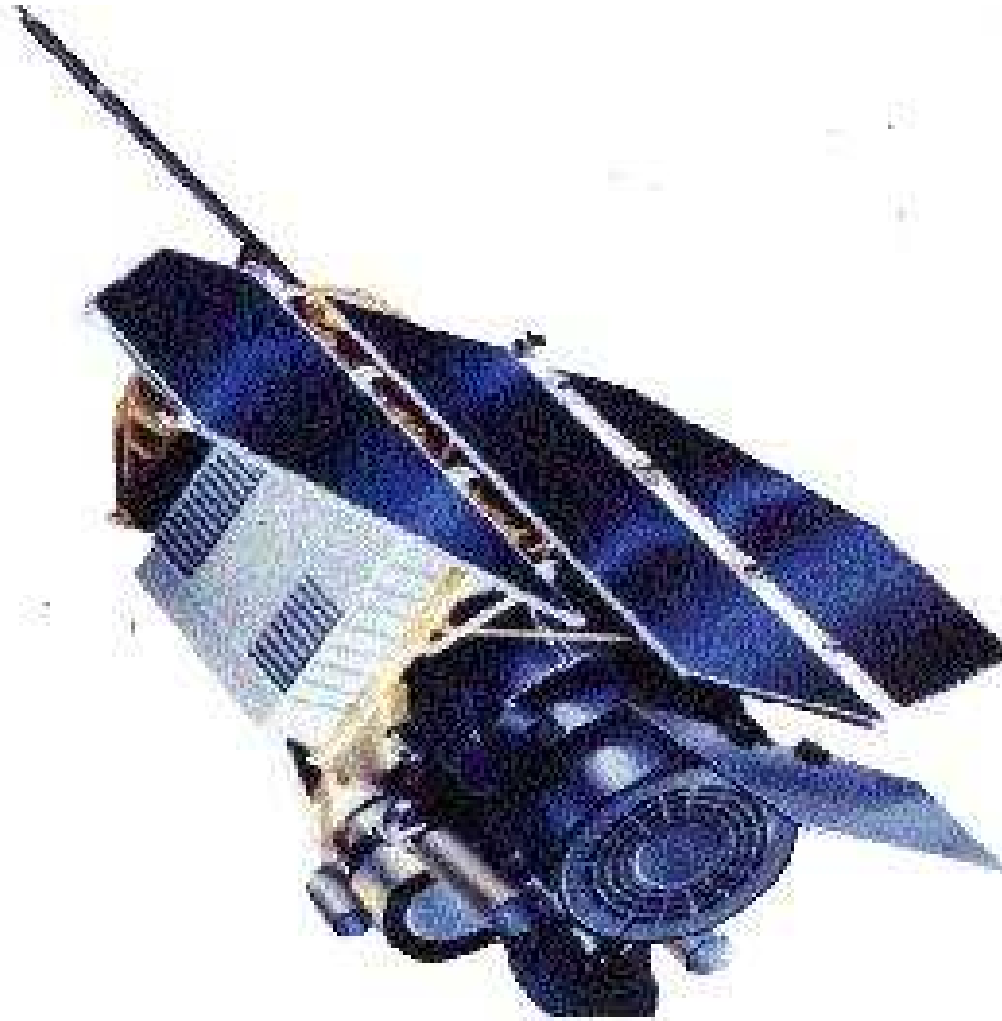


Mondansichten

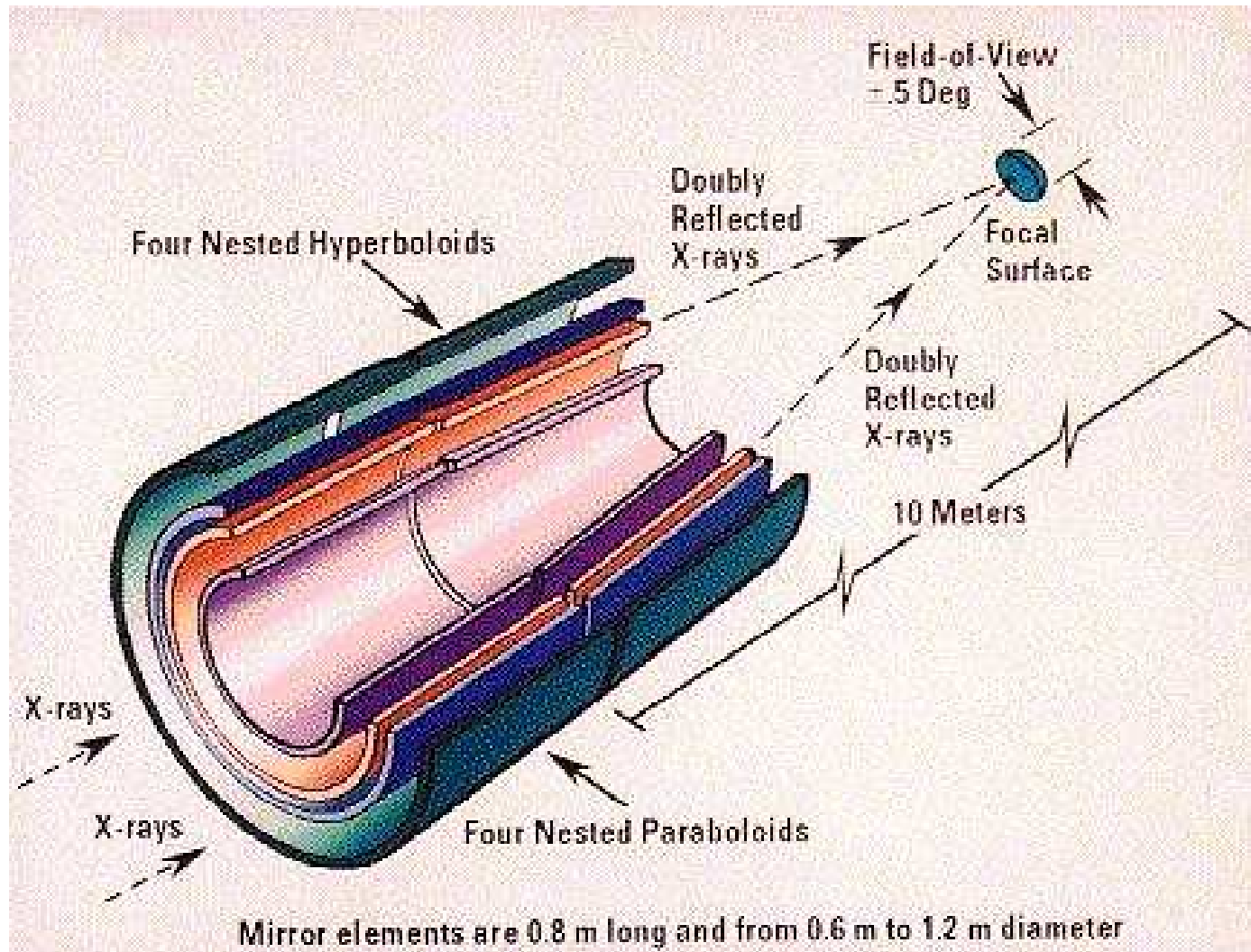
Der Mond im Lichte von Radio-, Mikrowellen-, Infrarot-, sichtbarer, ultravioletter und Röntgenstrahlung.



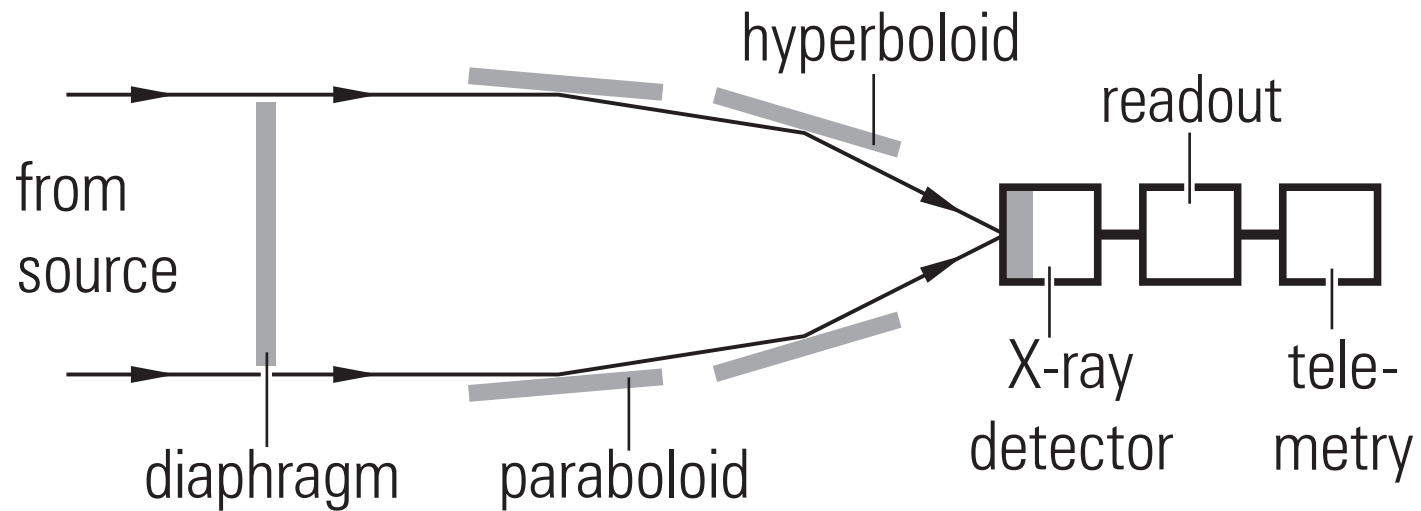
ROSAT Satellit



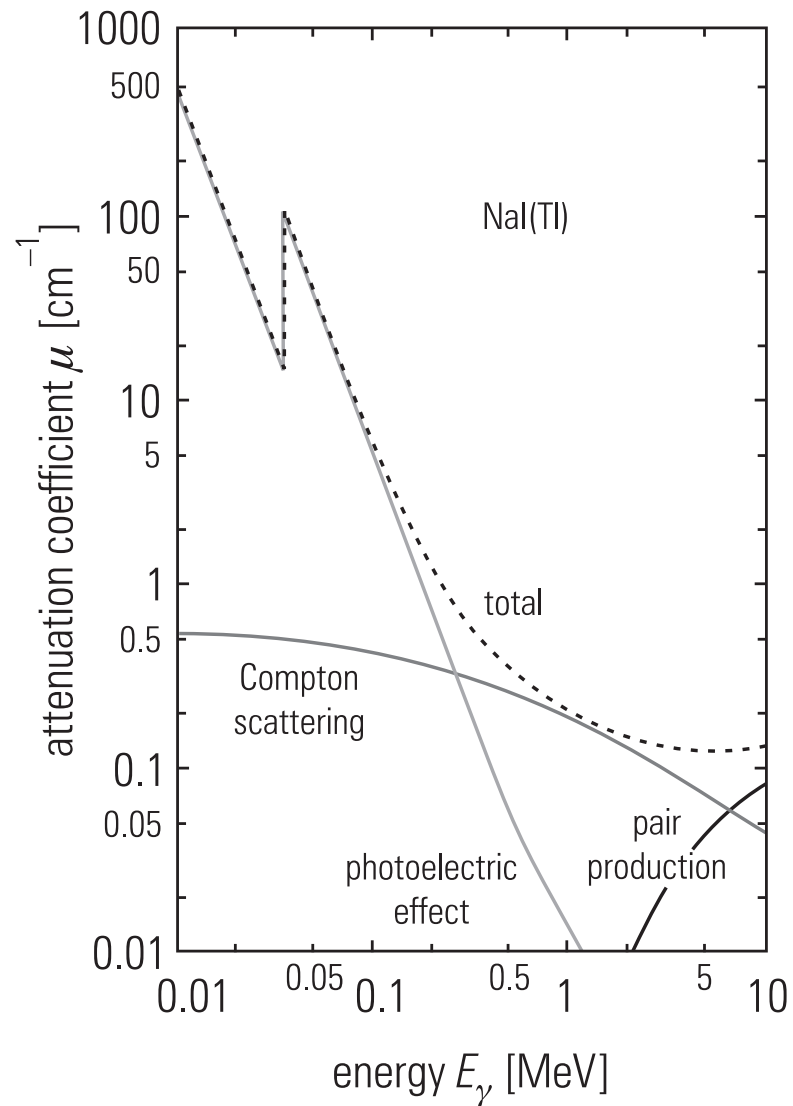
Wolter-Teleskop



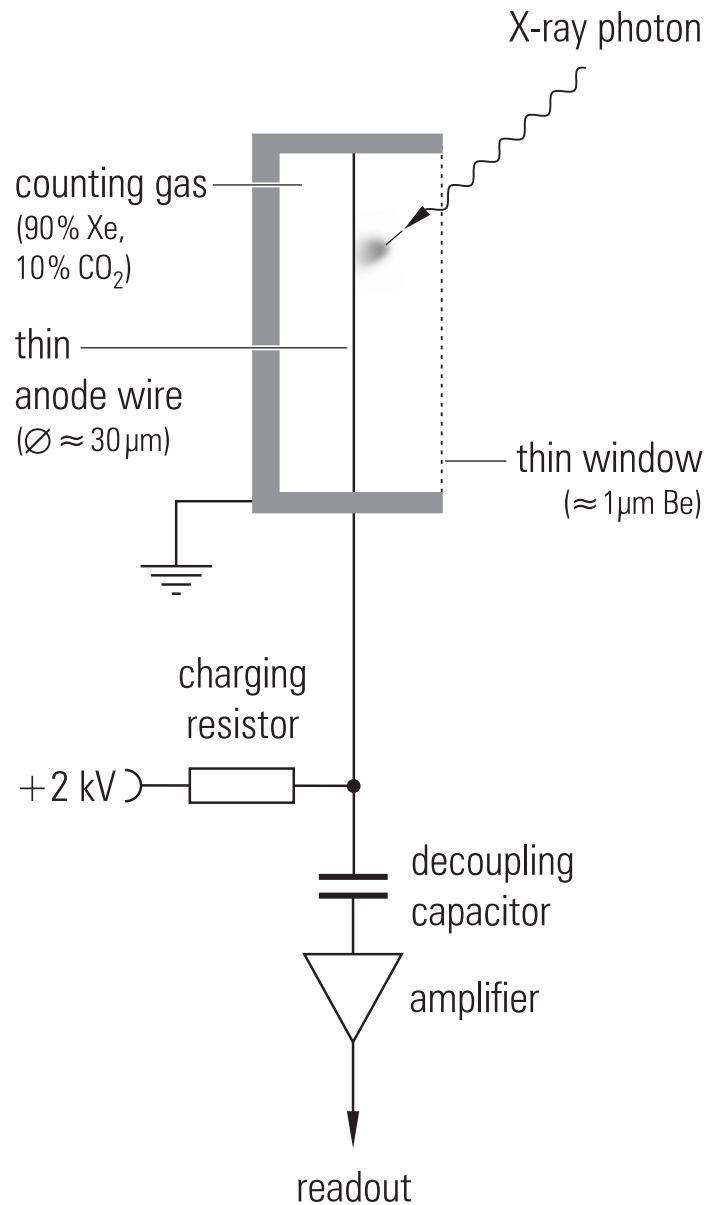
Wolter-Teleskop-Prinzip



Röntgenphoton-Nachweis



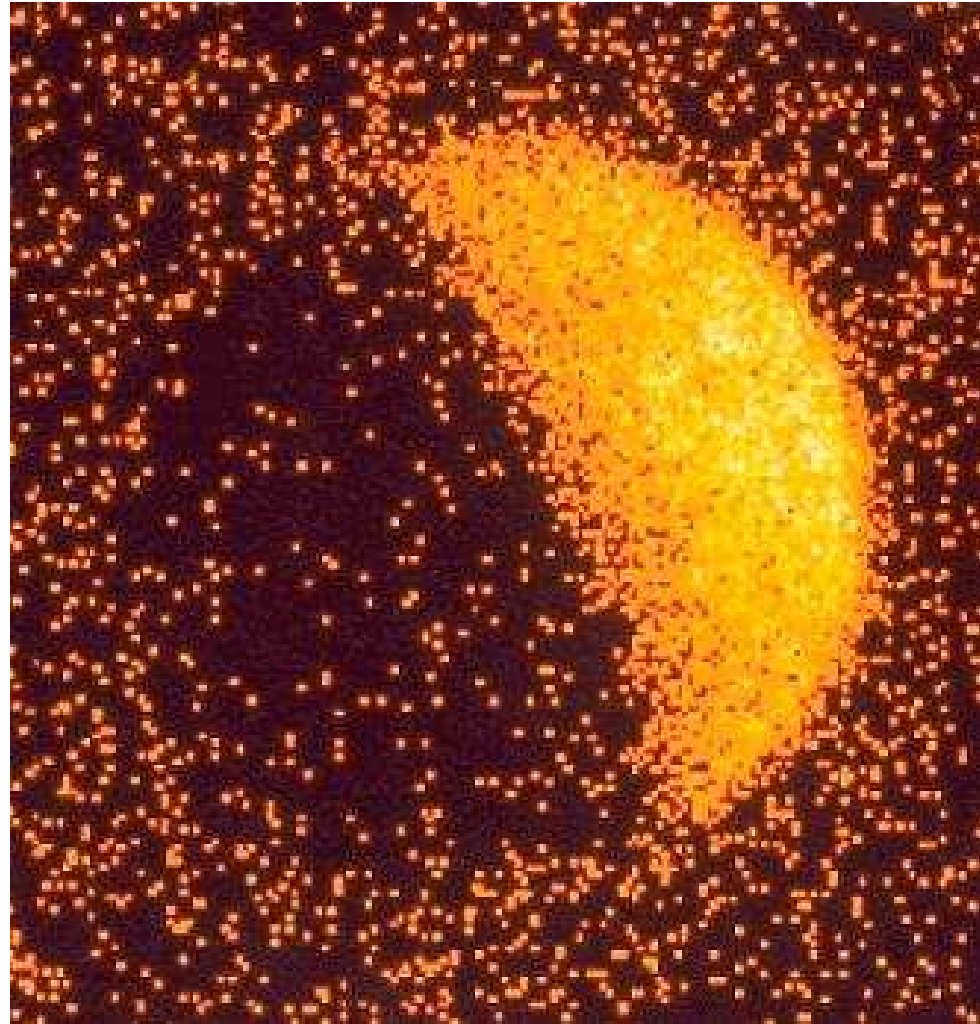
Röntgendetektor



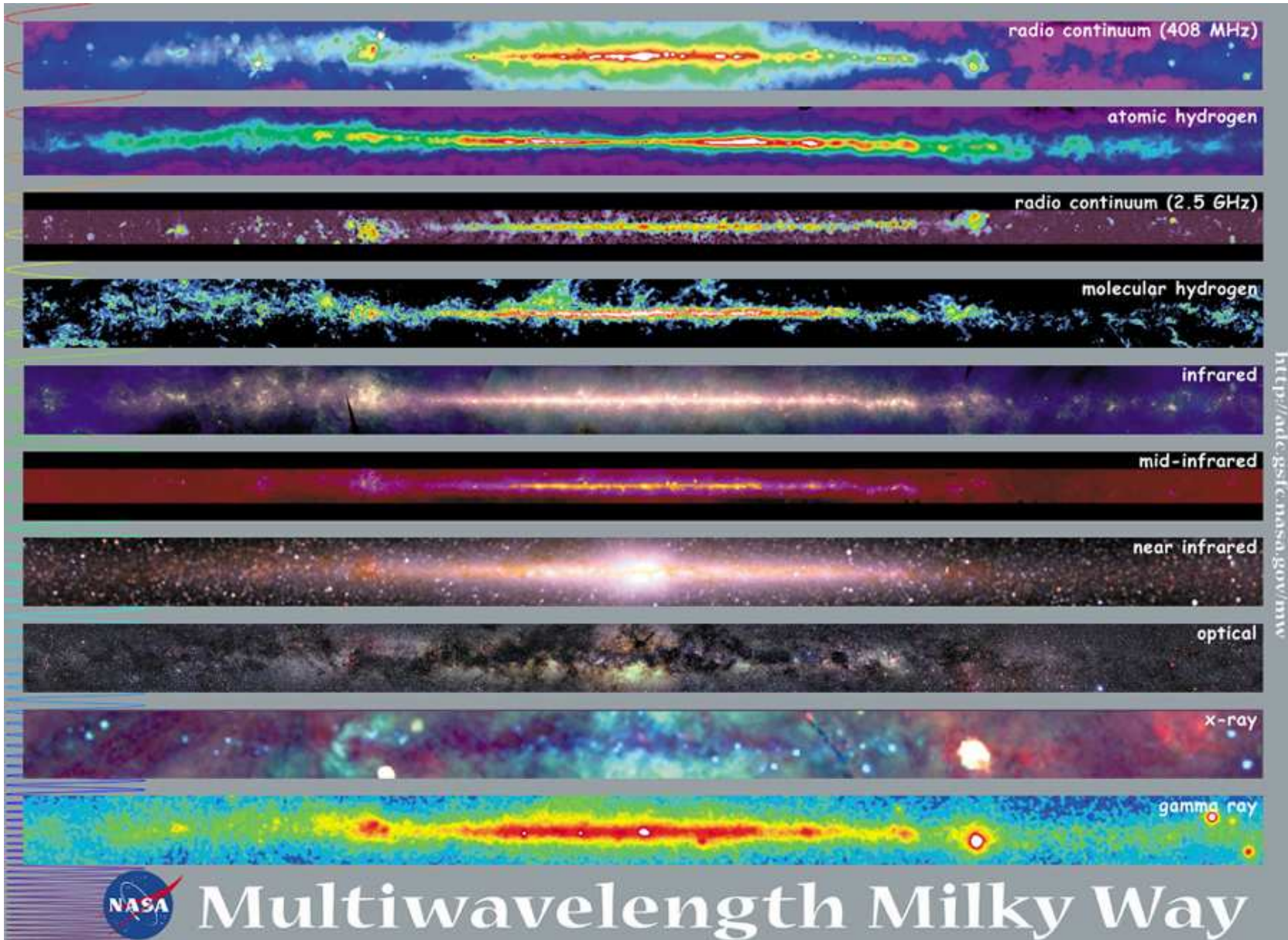
Newton Observatorium



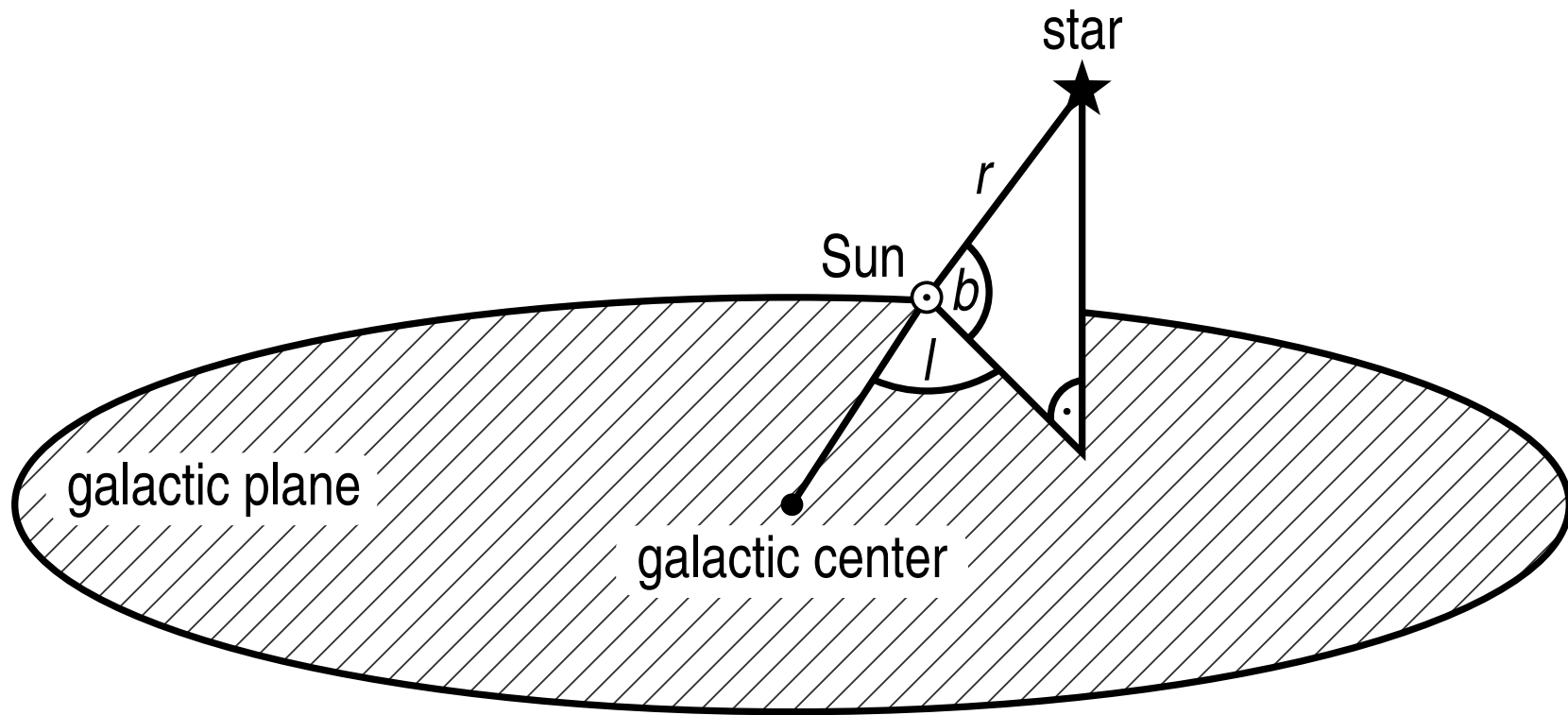
Röntgenstrahlen vom Mond



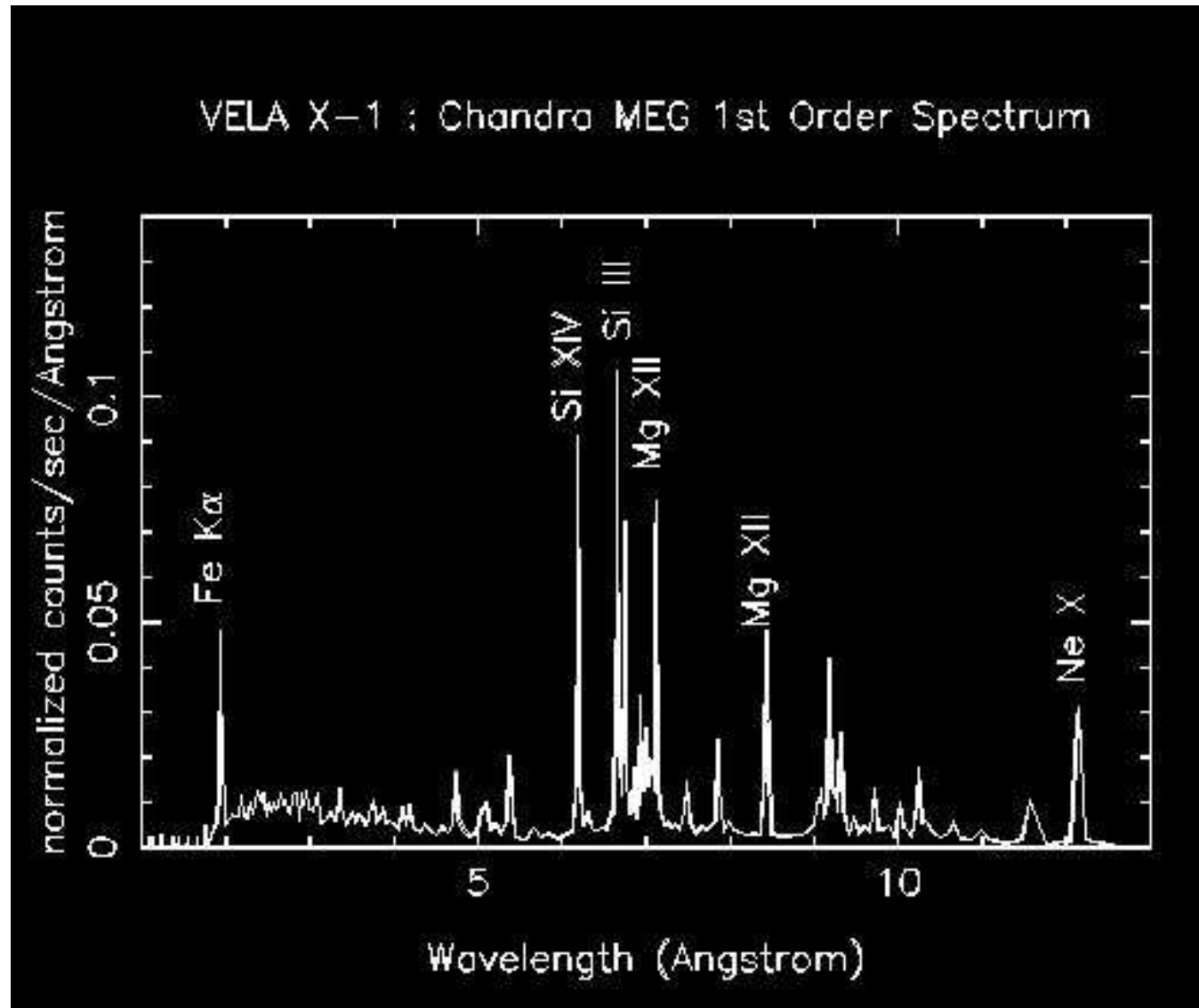
Strahlung von der Milchstrasse



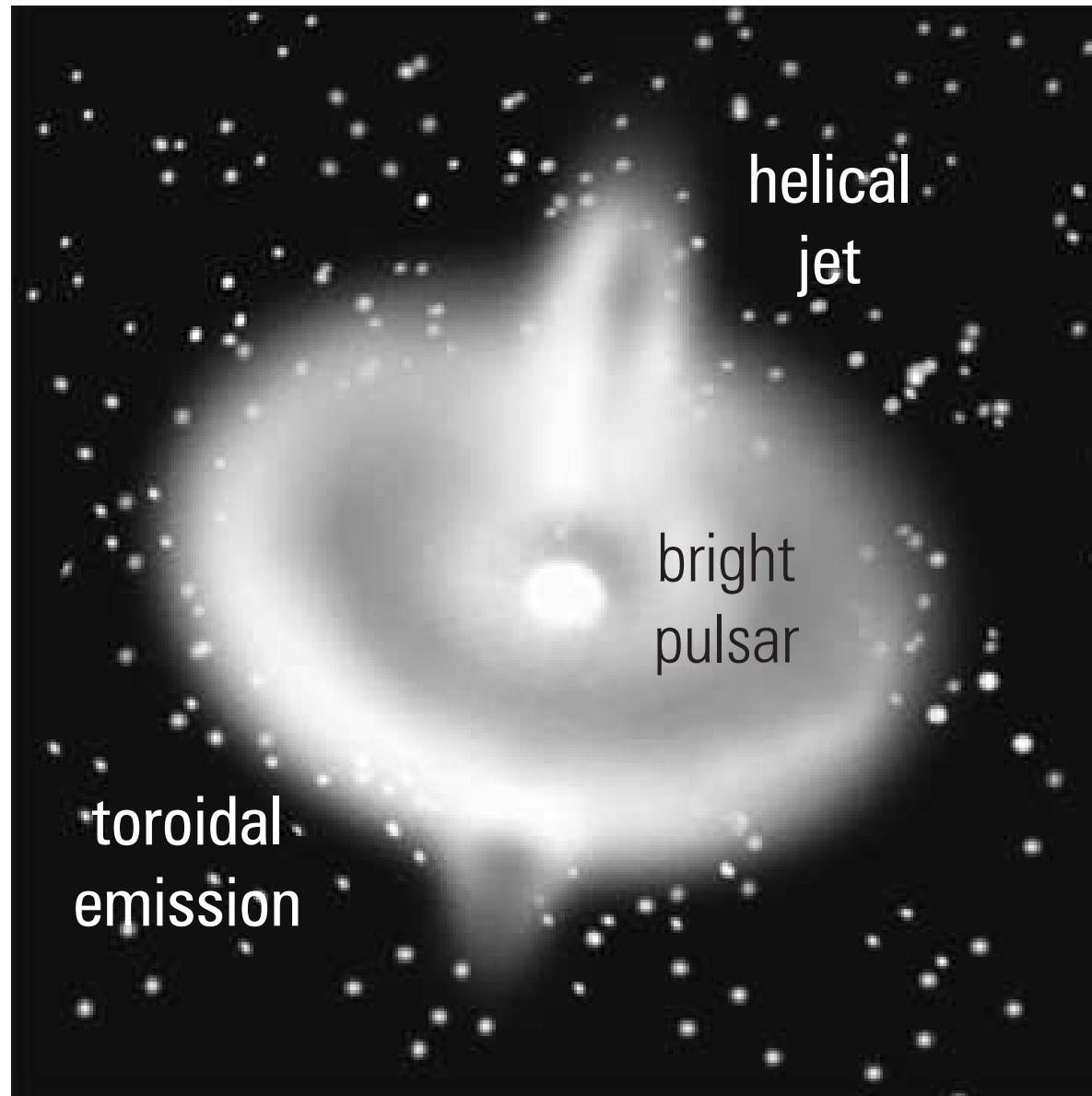
Galaktische Koordinaten



Spektrum von Vela X1



Krebsnebel-Pulsar



Krebsnebel-Pulsar



Pulsare

Perioden: Drehimpulserhaltung

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

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

Wegen $\Theta \sim m \cdot R^2$ 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

$$v = \frac{2 \cdot \pi \cdot R_{Pulsar}}{T_{Pulsar}} = \frac{2 \cdot \pi \cdot 20 \cdot 10^3 m}{10^{-3} s} = 1,257 \cdot 10^8 m/s \approx 0,4 \cdot c$$

elektrisches Feld aus der Lorentzkraft

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

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

$$\rightarrow |\vec{E}| = E = v \cdot B = 125 \cdot 10^6 m/s \cdot 2,5 \cdot 10^8 \frac{Vs}{m^2}$$

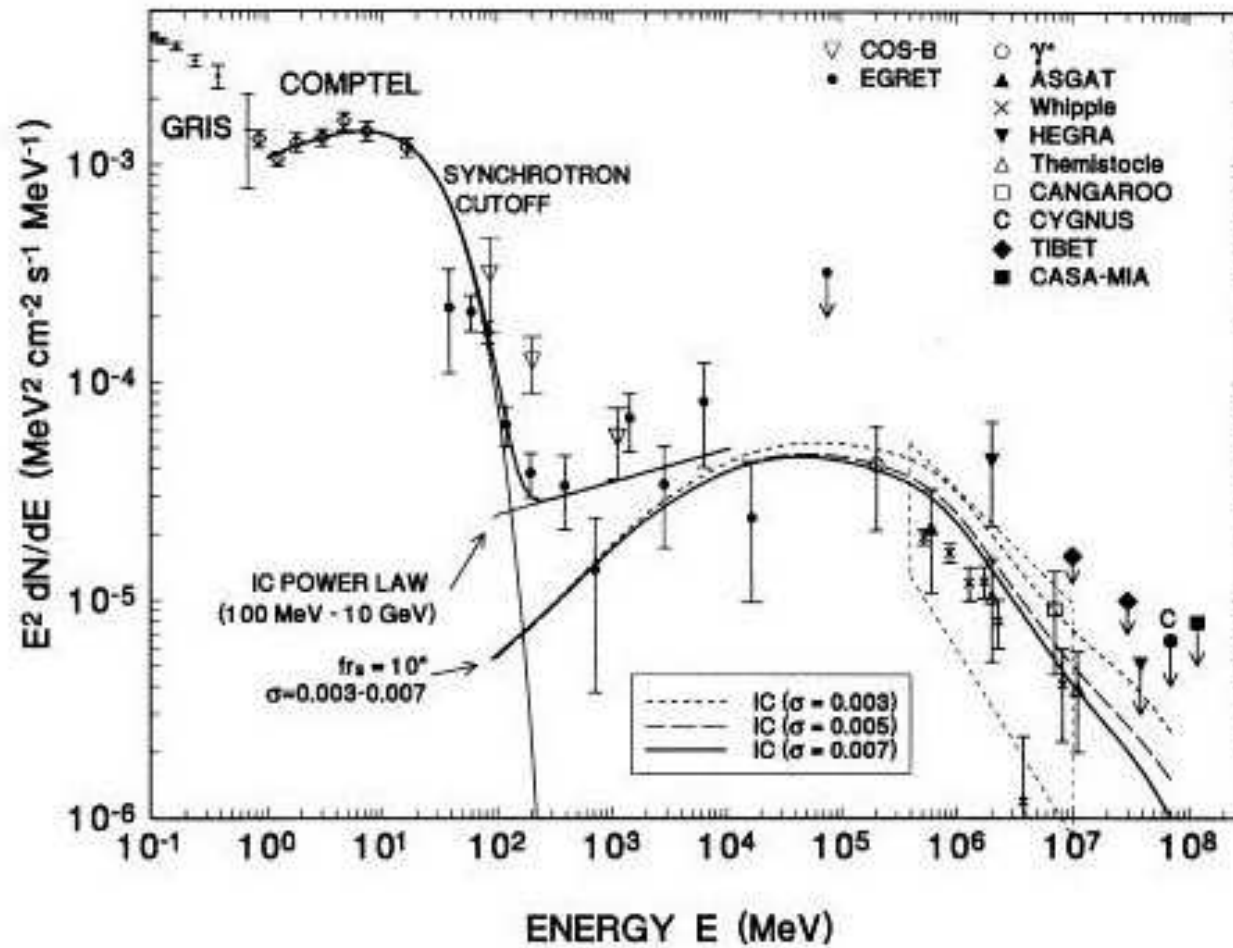
$$= 3,14 \cdot 10^{16} V/m$$

sehr hohe Feldstärken und sehr hohe Energien möglich

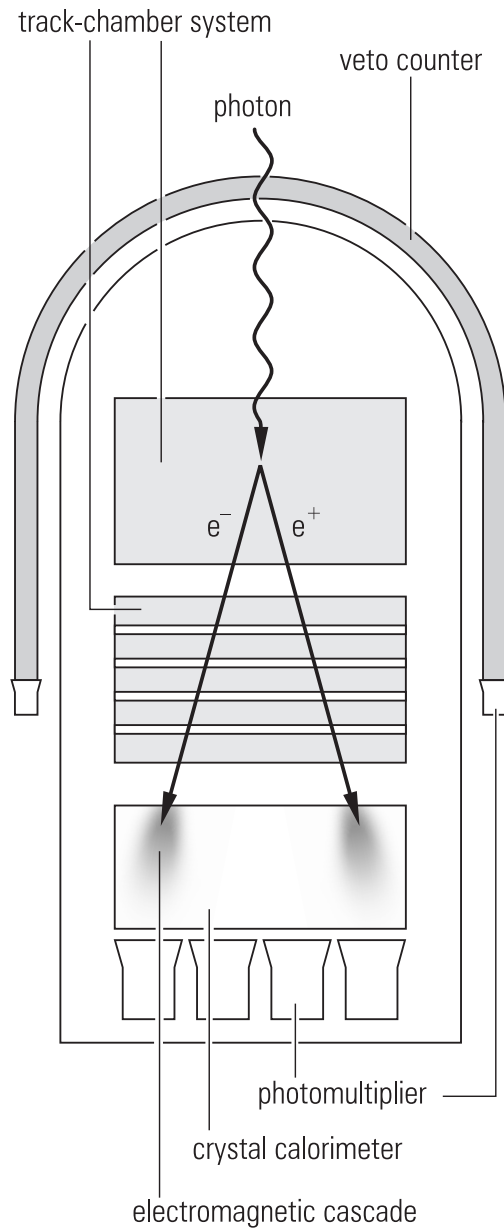
$$E = 3,14 \cdot 10^{16} eV/m$$

Krebsnebel-Pulsar

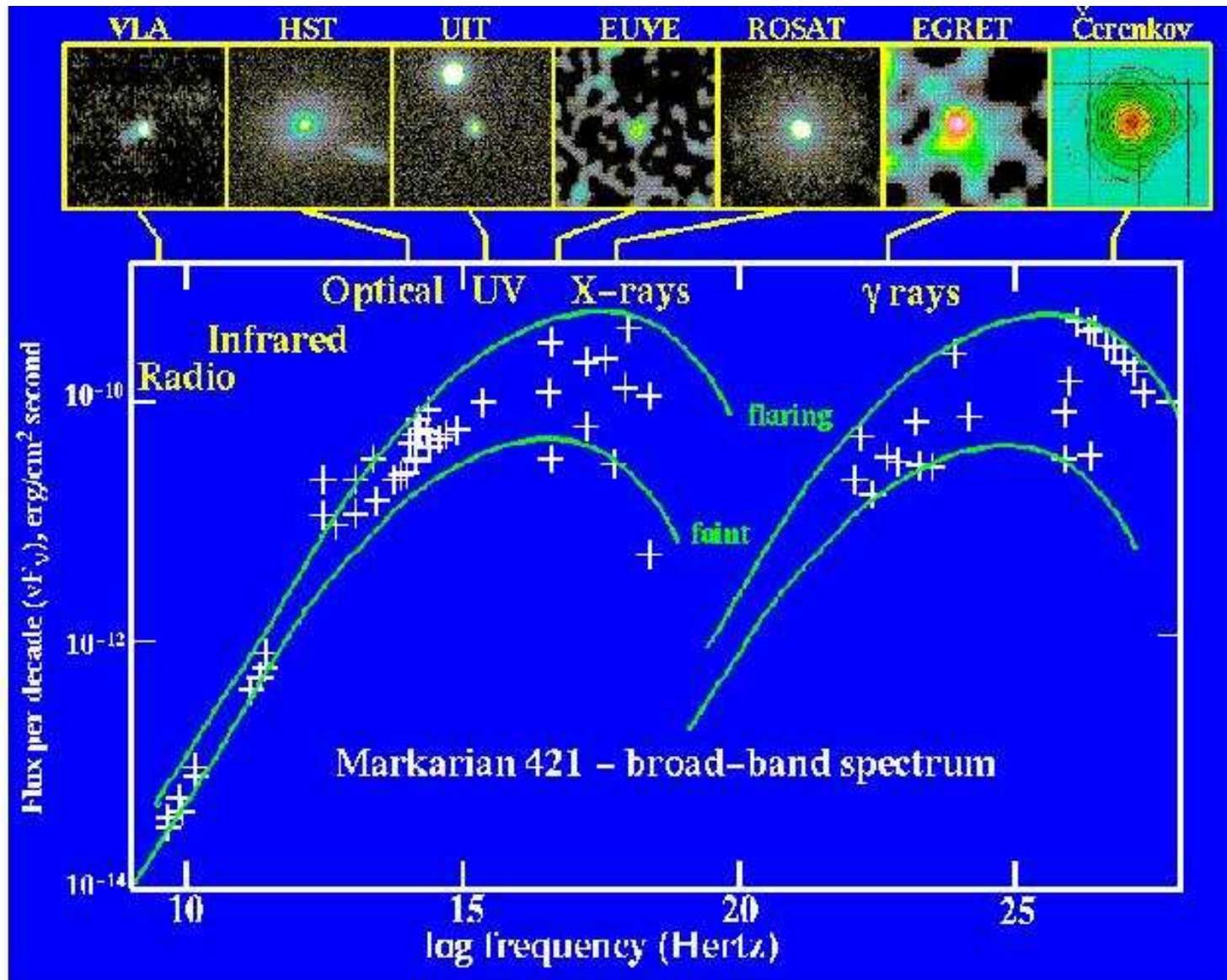
DE JAGER ET AL.



Gamma-Satellit

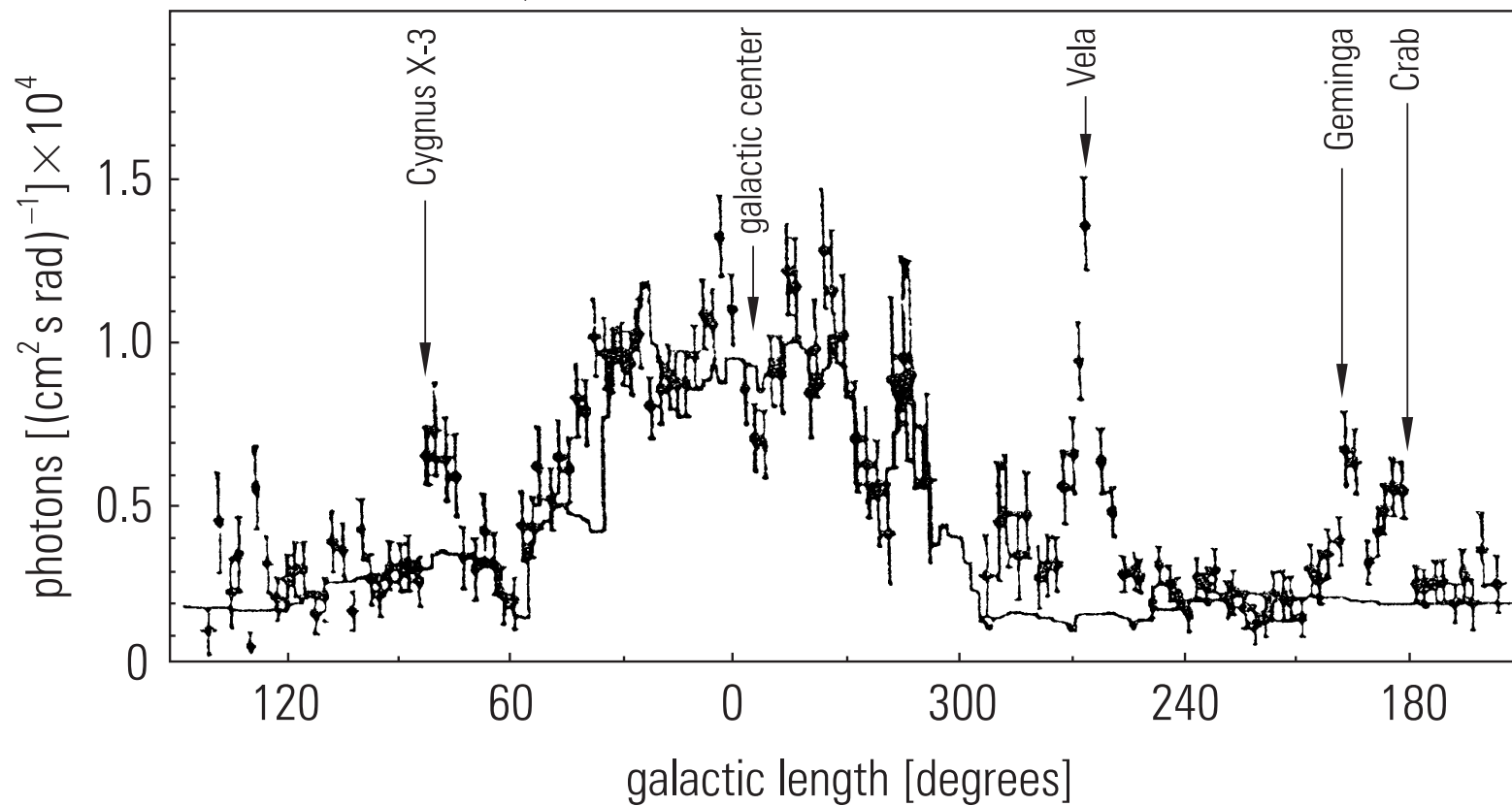


Markarian 421

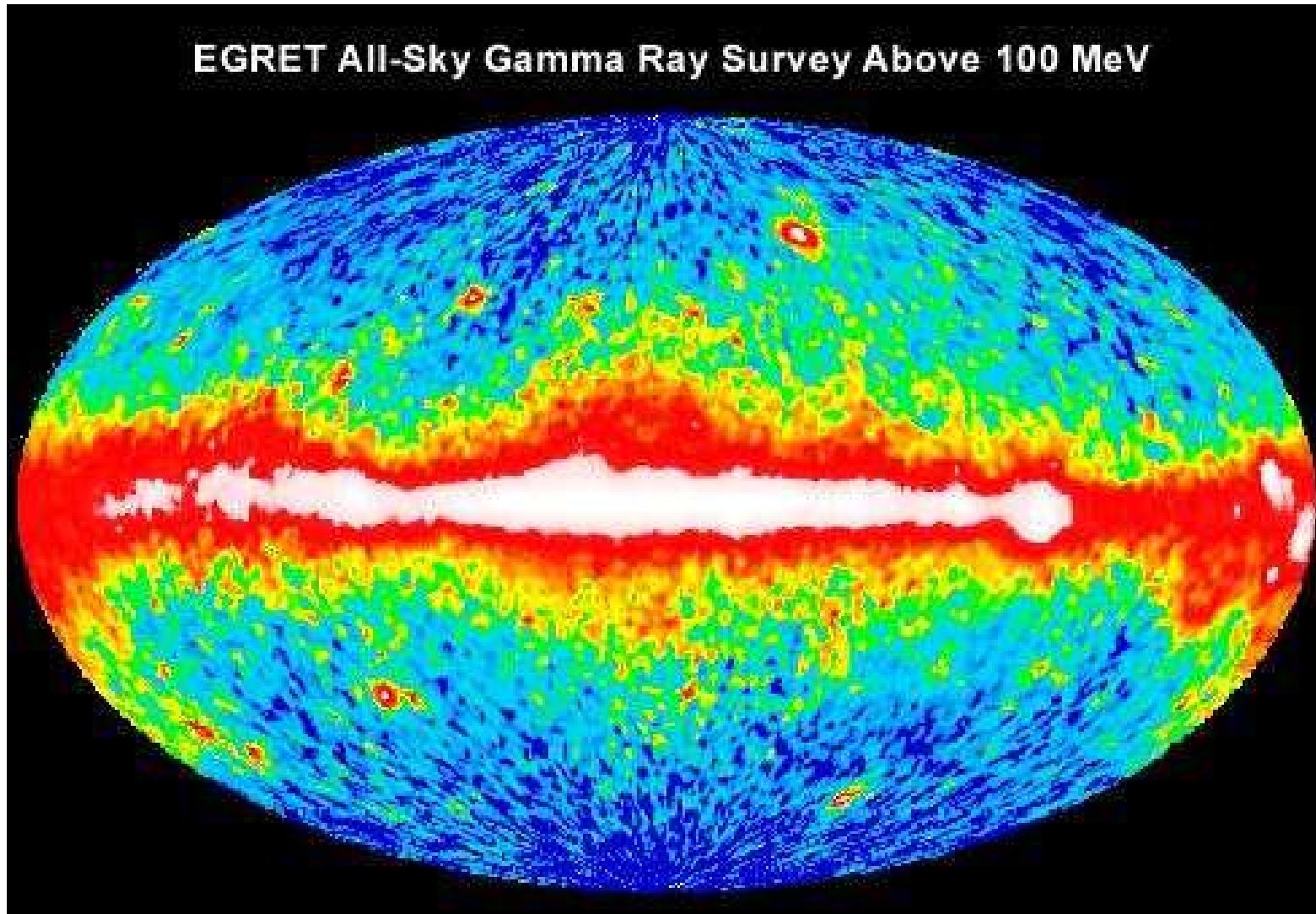


Der Gamma Himmel

photons with $E_\gamma > 100$ MeV within ± 10 degrees galactic latitude



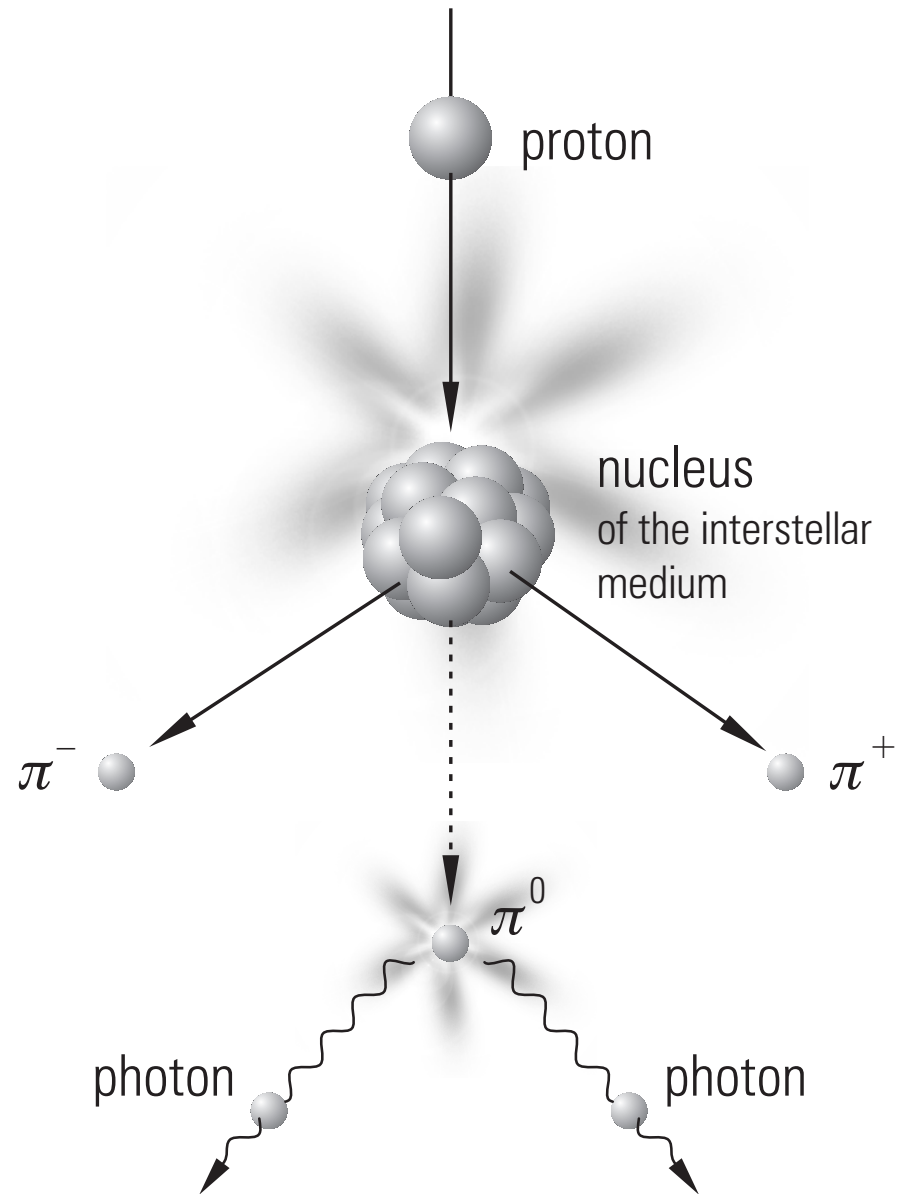
Der Gamma Himmel



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 $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

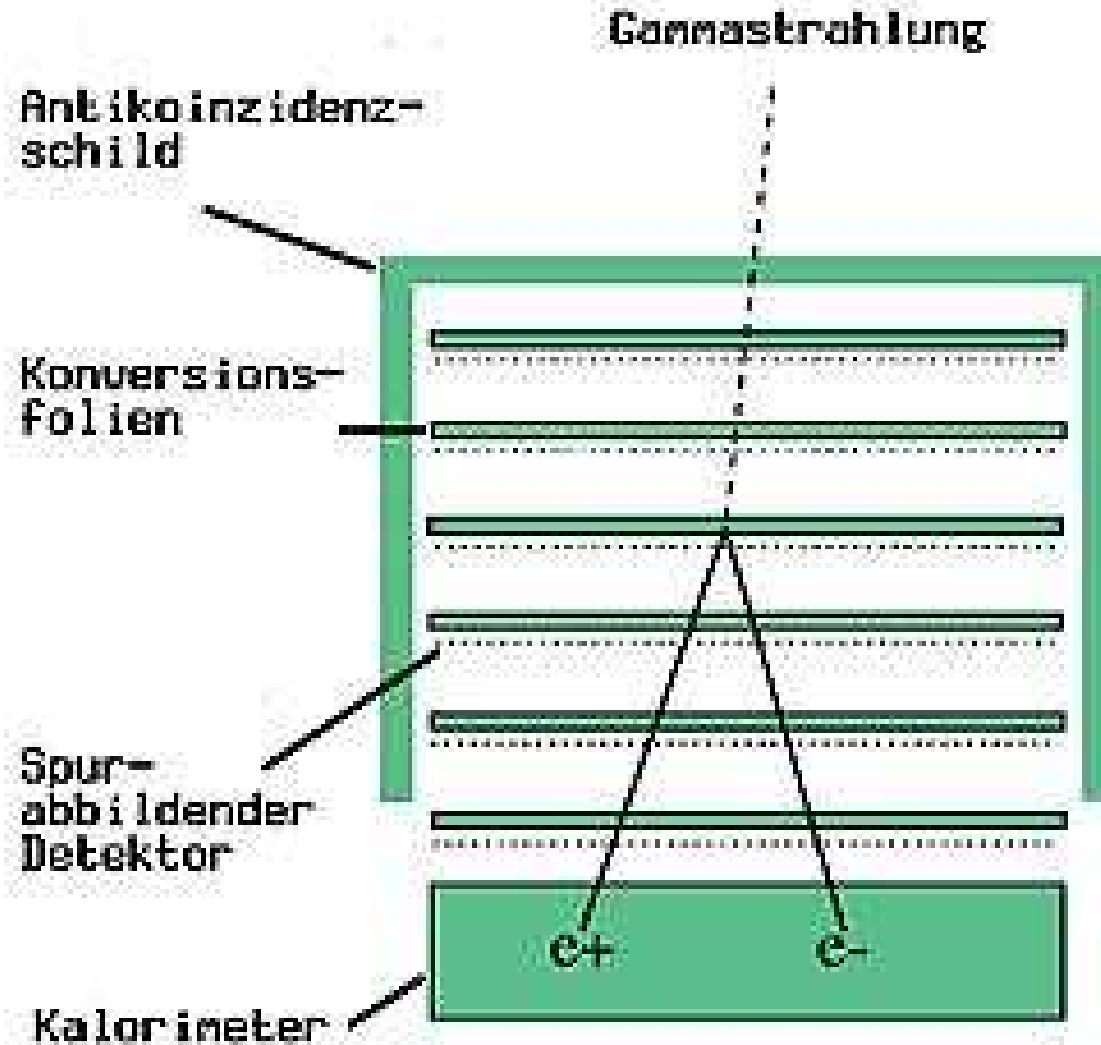
π^0 Erzeugung



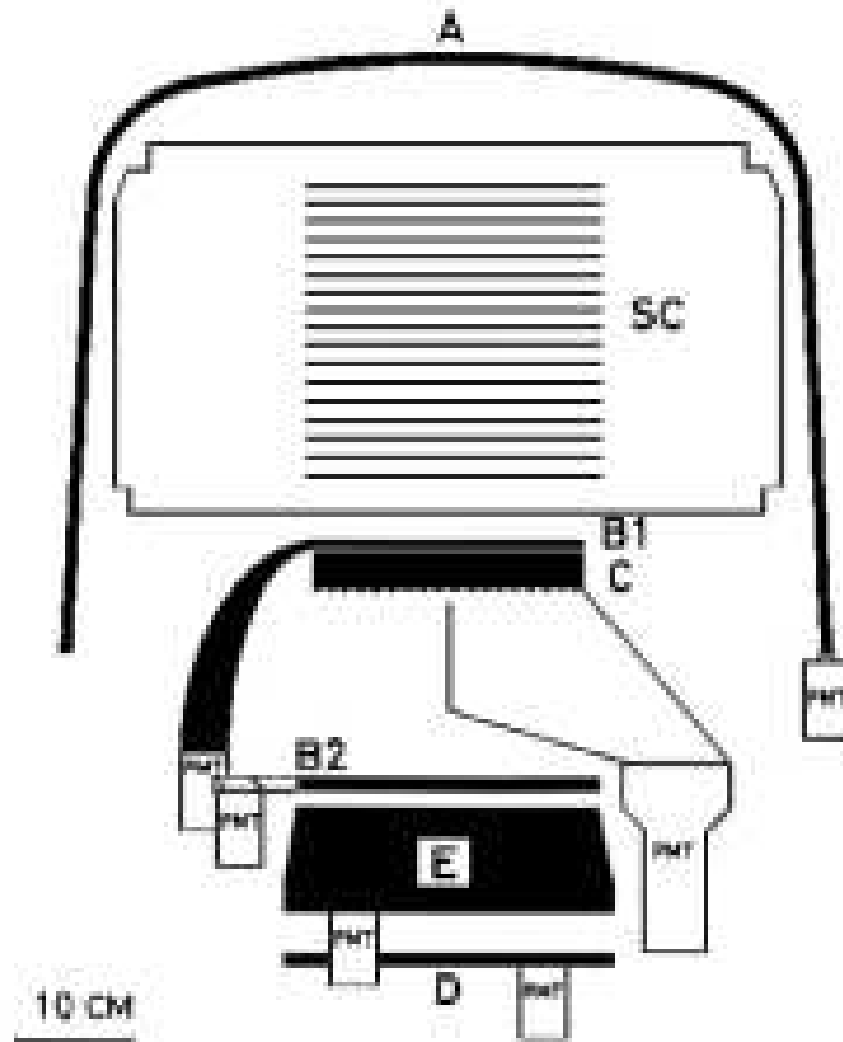
Quellen von Gammastrahlung

- 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

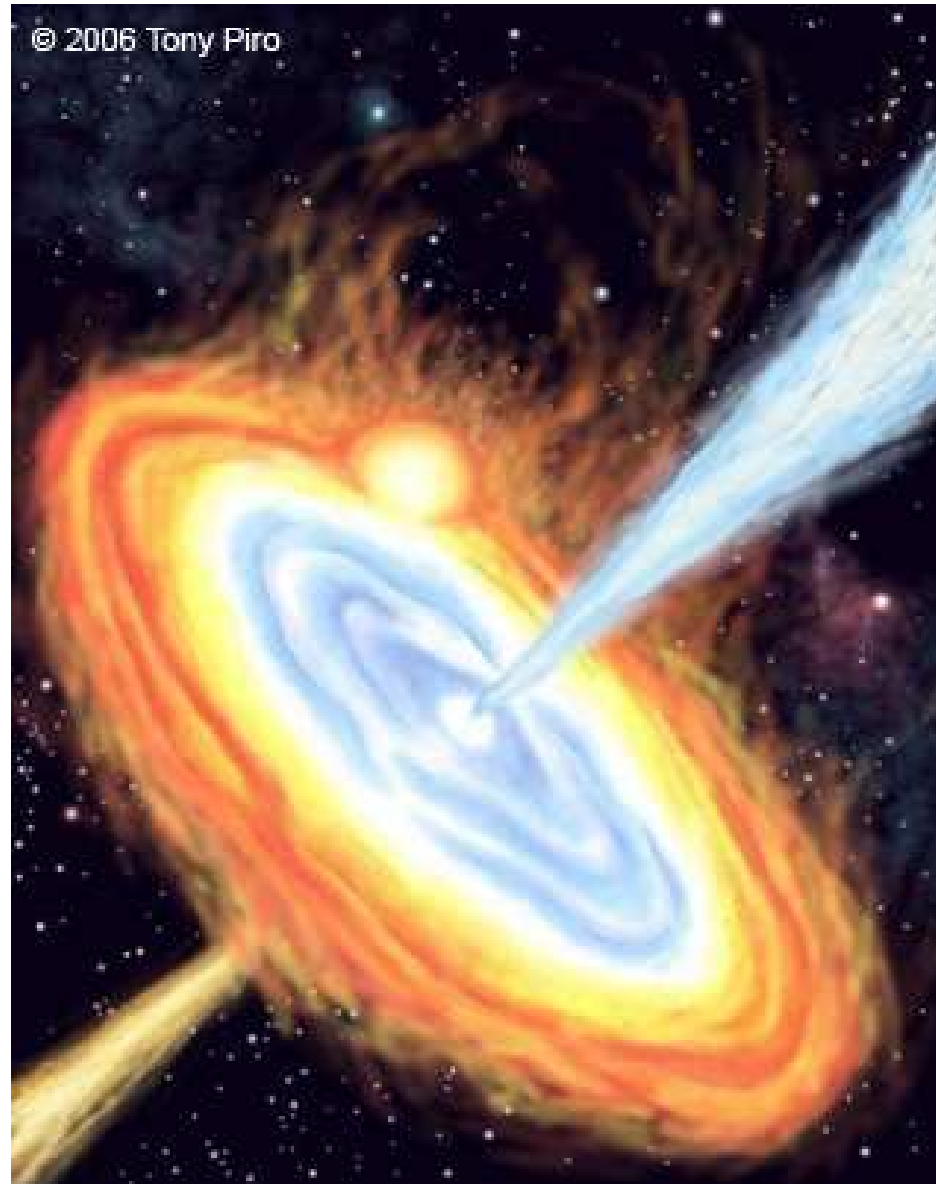
Gamma-Satellit, Prinzip



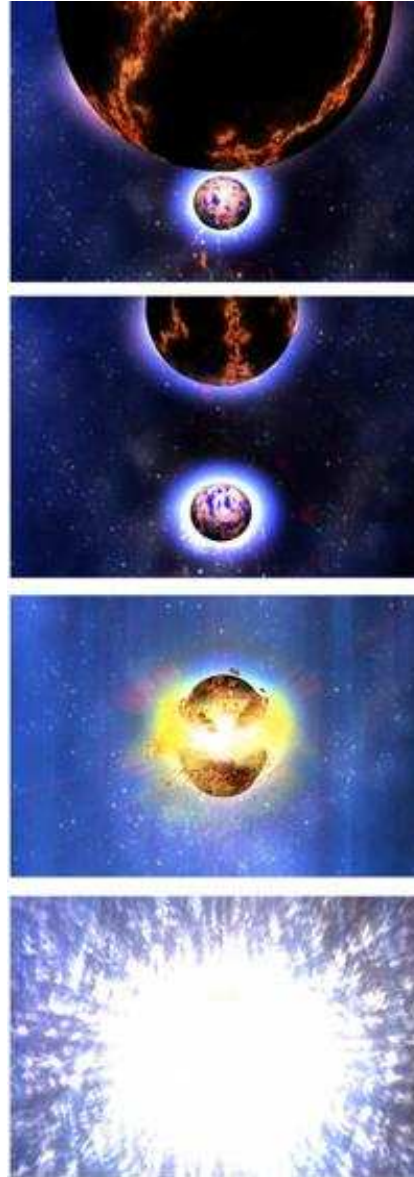
Gamma-Satellit, Cos-B



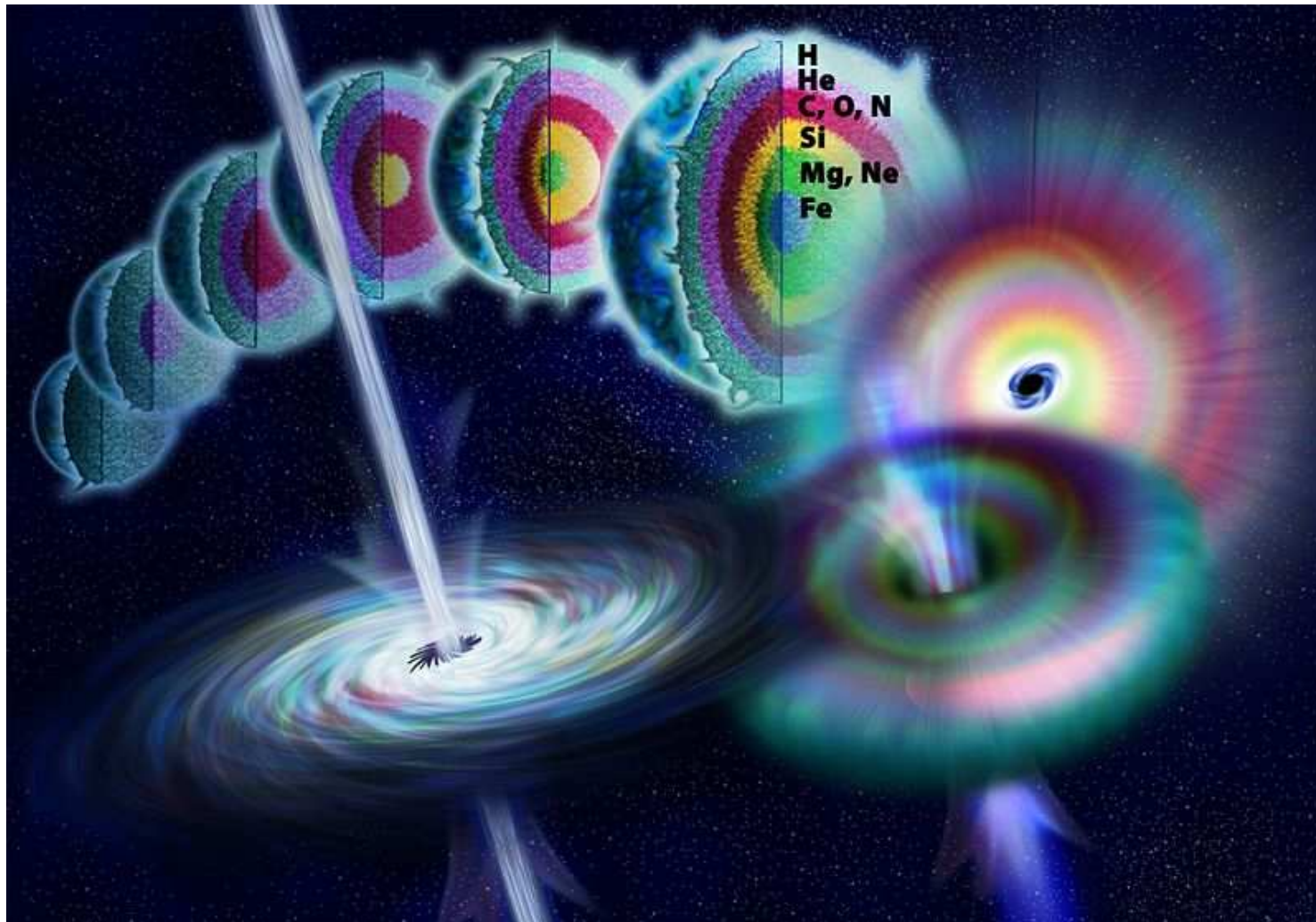
Kollapsar



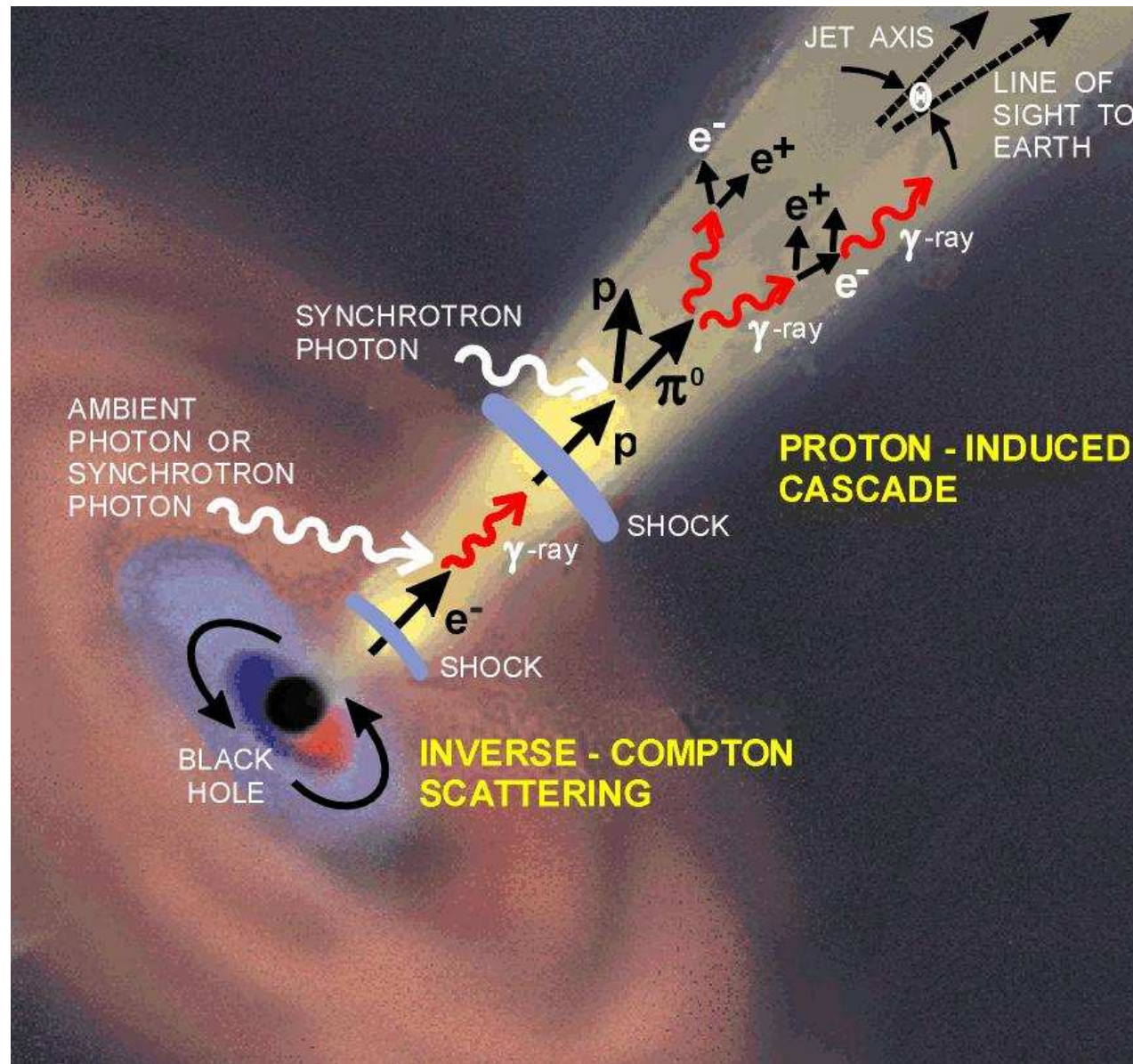
Kollision von Neutronensternen



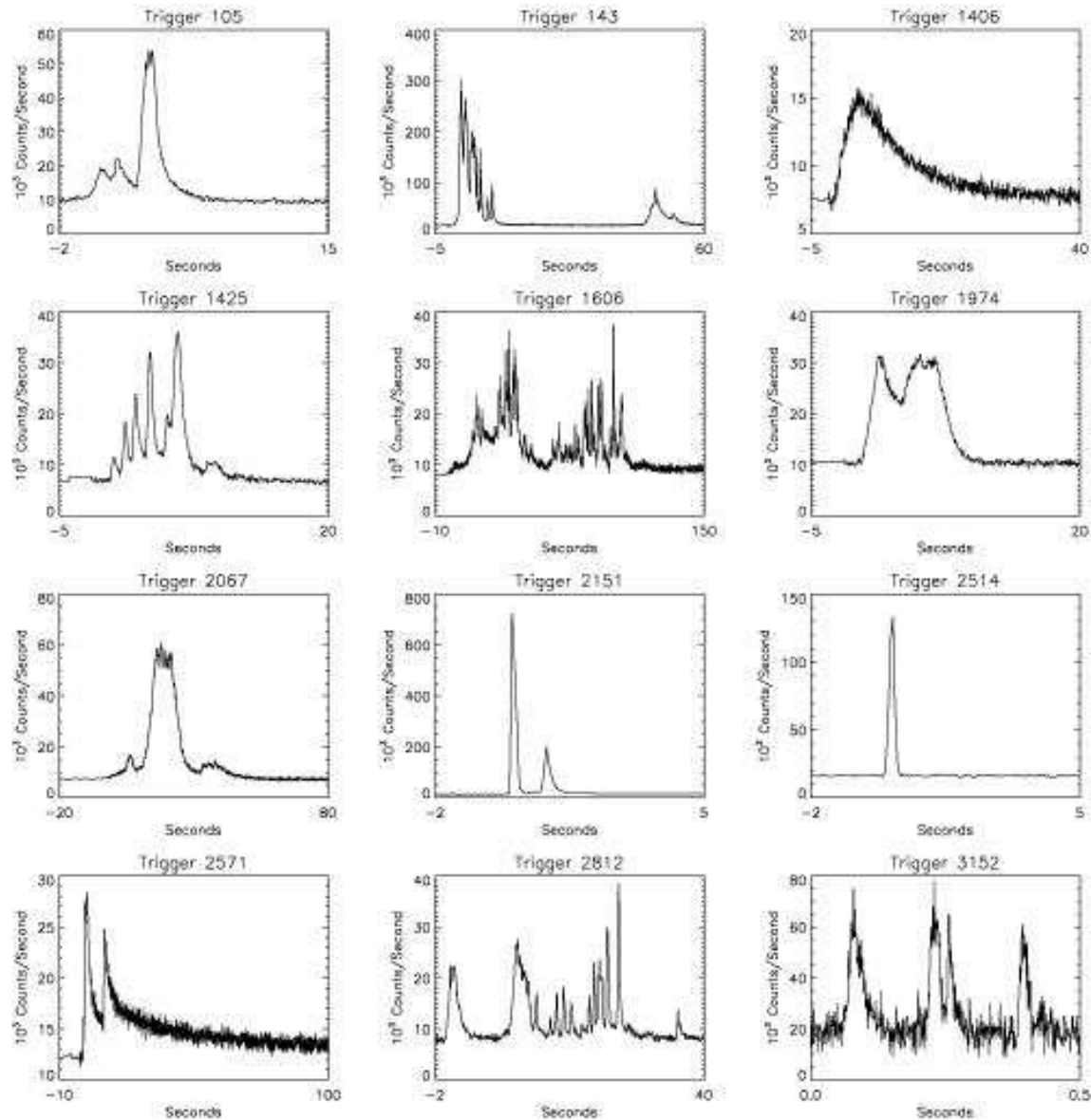
Endstadien massiver Sterne



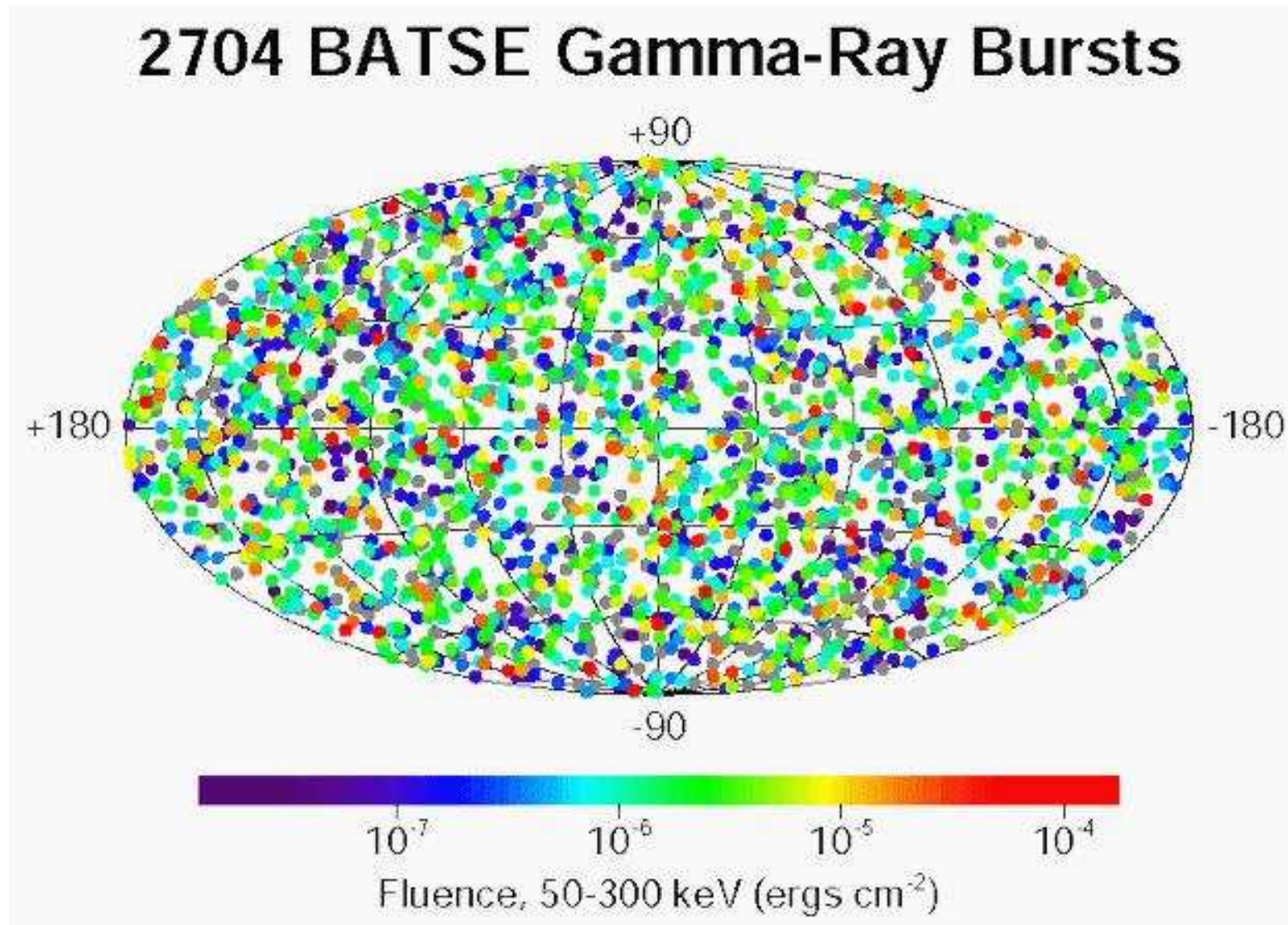
Beschleunigung in Jets



GRB-Lichtkurven



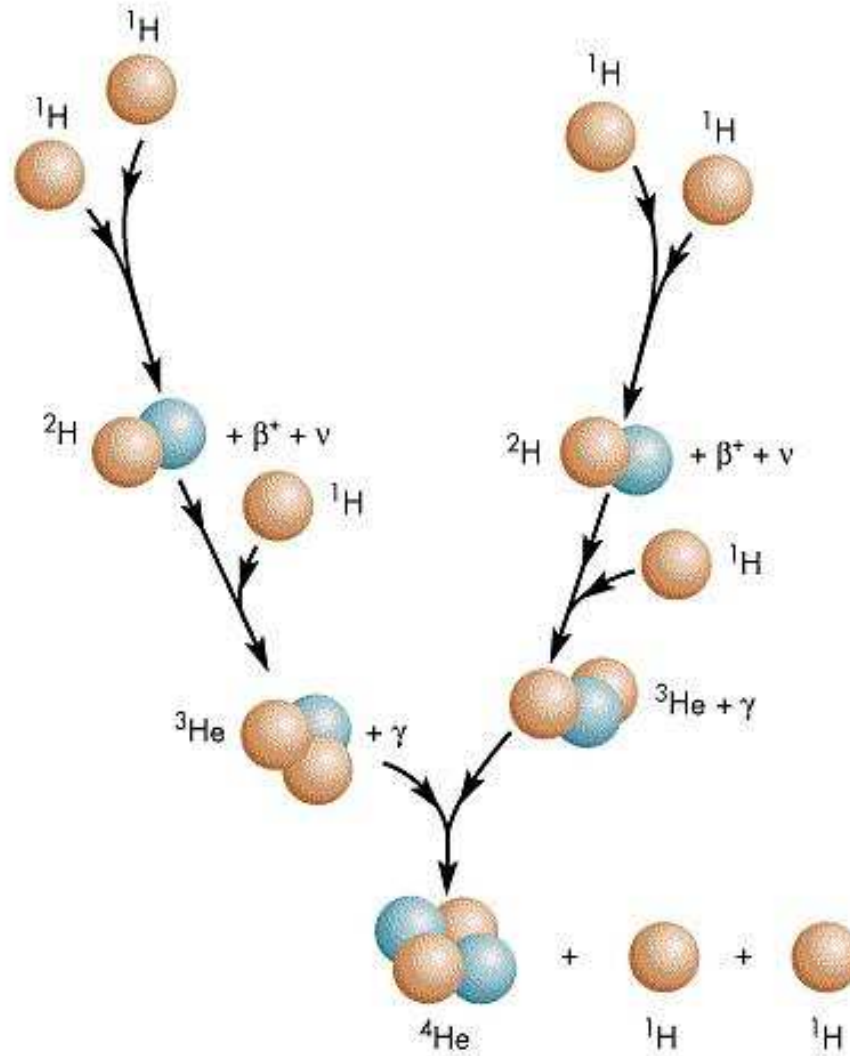
Ursprünge der GRB's



Neutrinoastronomie

- Solare Neutrinos (MeV-Bereich)
- Atmosphärische Neutrinos (GeV-Bereich)
- Neutrinooszillationen
- Supernova-Neutrinos (MeV-Bereich)
- Galaktische und extragalaktische Neutrinos (TeV-Bereich)

Solare Neutrinos



Proton - Proton Zyklus



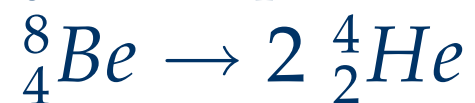
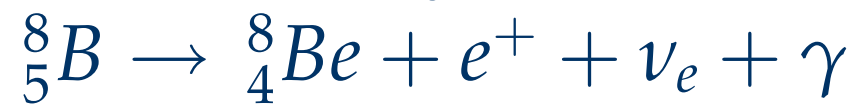
Hauptprozeß: 85% Wahrscheinlichkeit

Lithium-Brennen



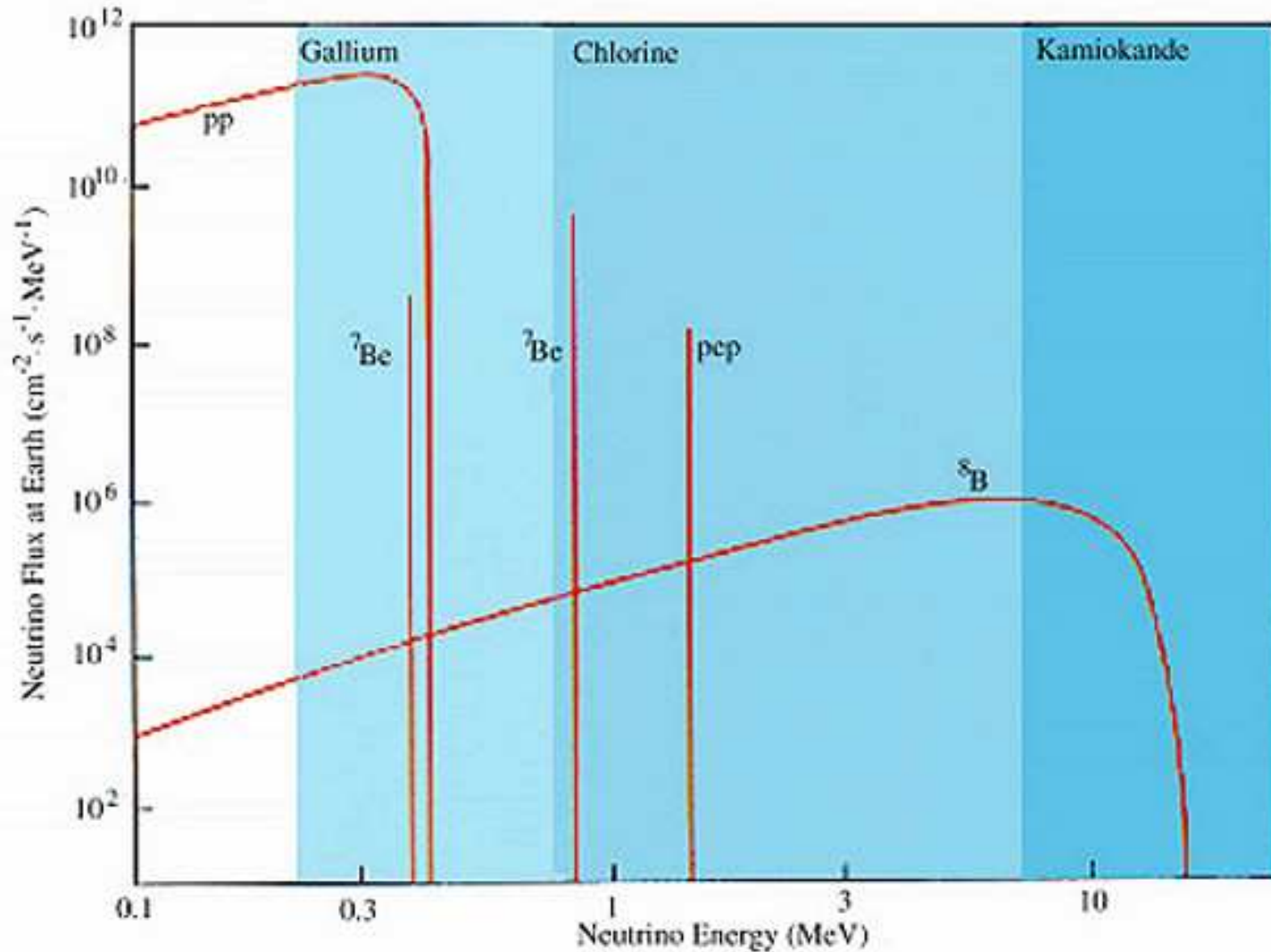
mit 15 % Wahrscheinlichkeit

Bor-Zweig



mit 0,02 % Wahrscheinlichkeit

Spektren solarer Neutrinos



Homestake Experiment



Neutrino nachweis

Neutrino reaktion im Detektor:



Neutrino nachweis im Detektor



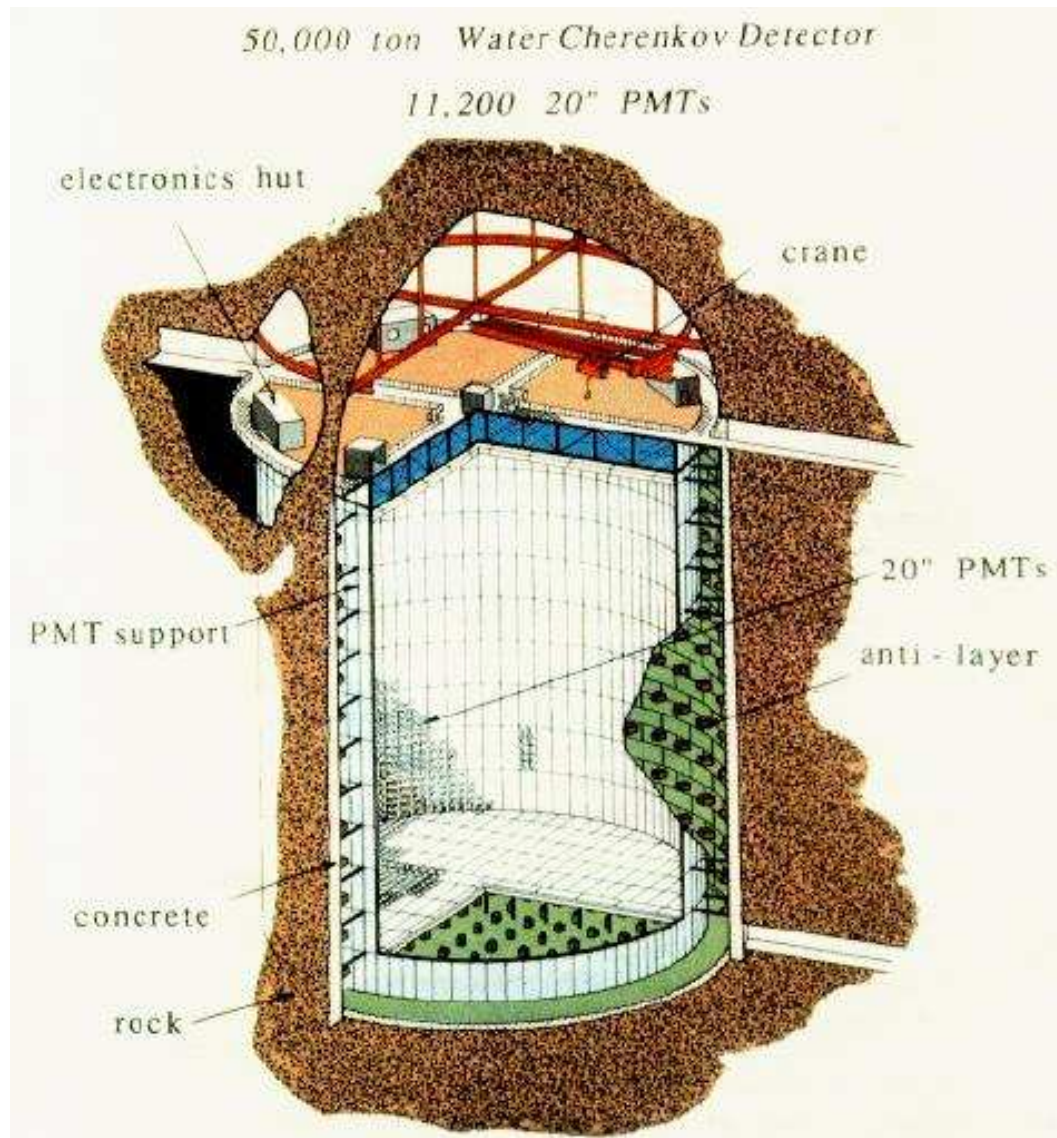
mit nachfolgender Emission charakteristischer

Röntgenstrahlung vom ${}^{37}\text{Cl}^*$

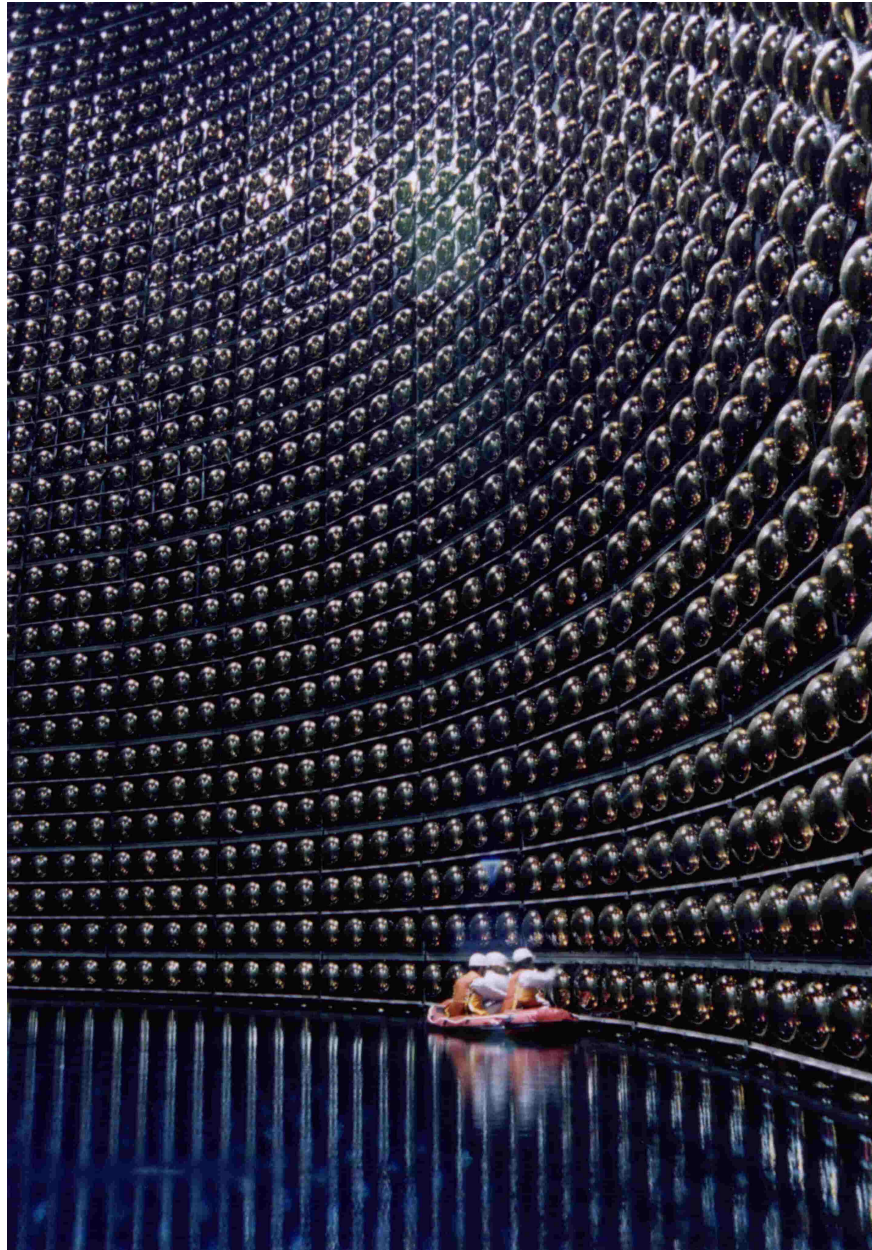
analog in den Gallium-Experimenten



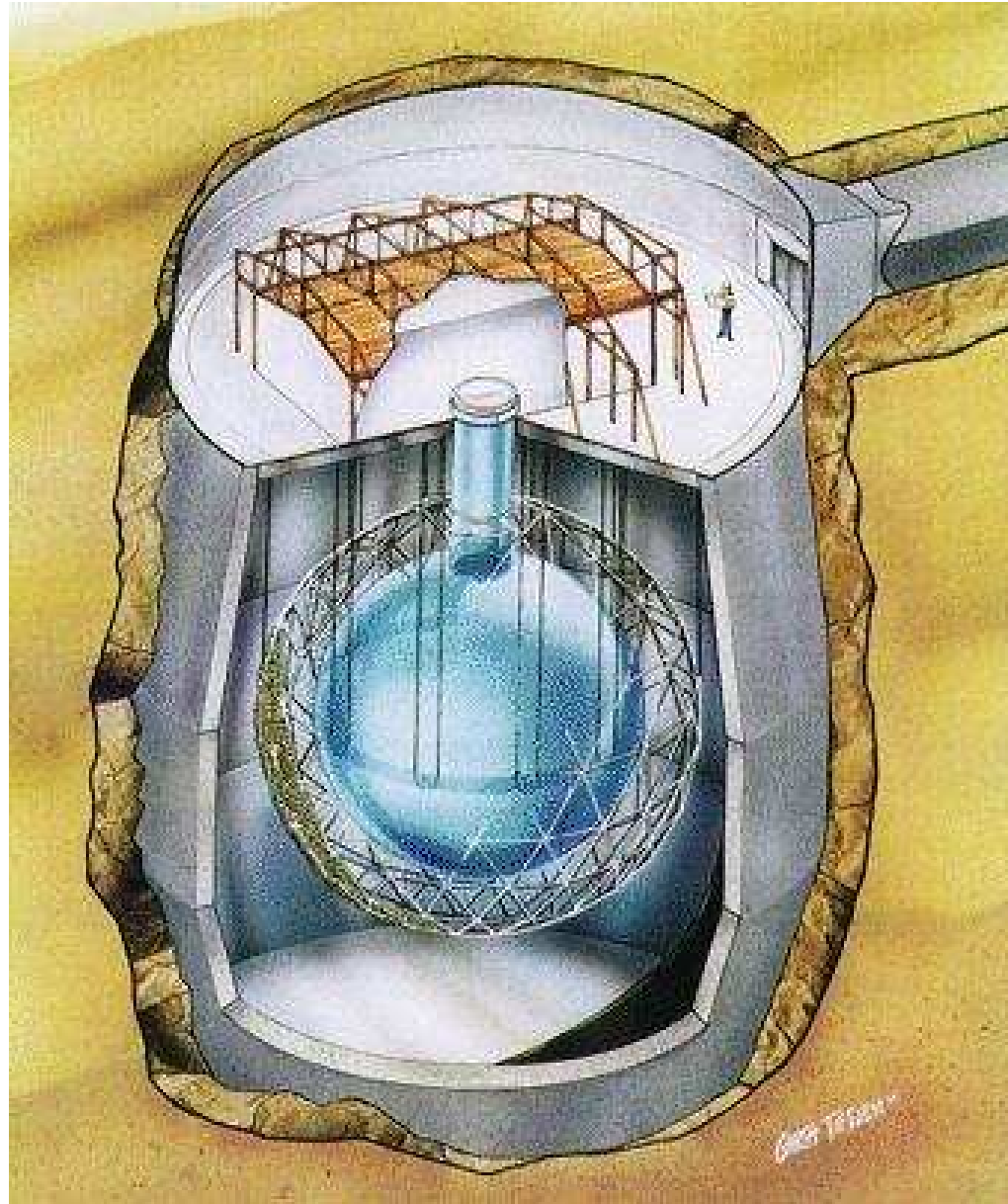
Superkamiokande



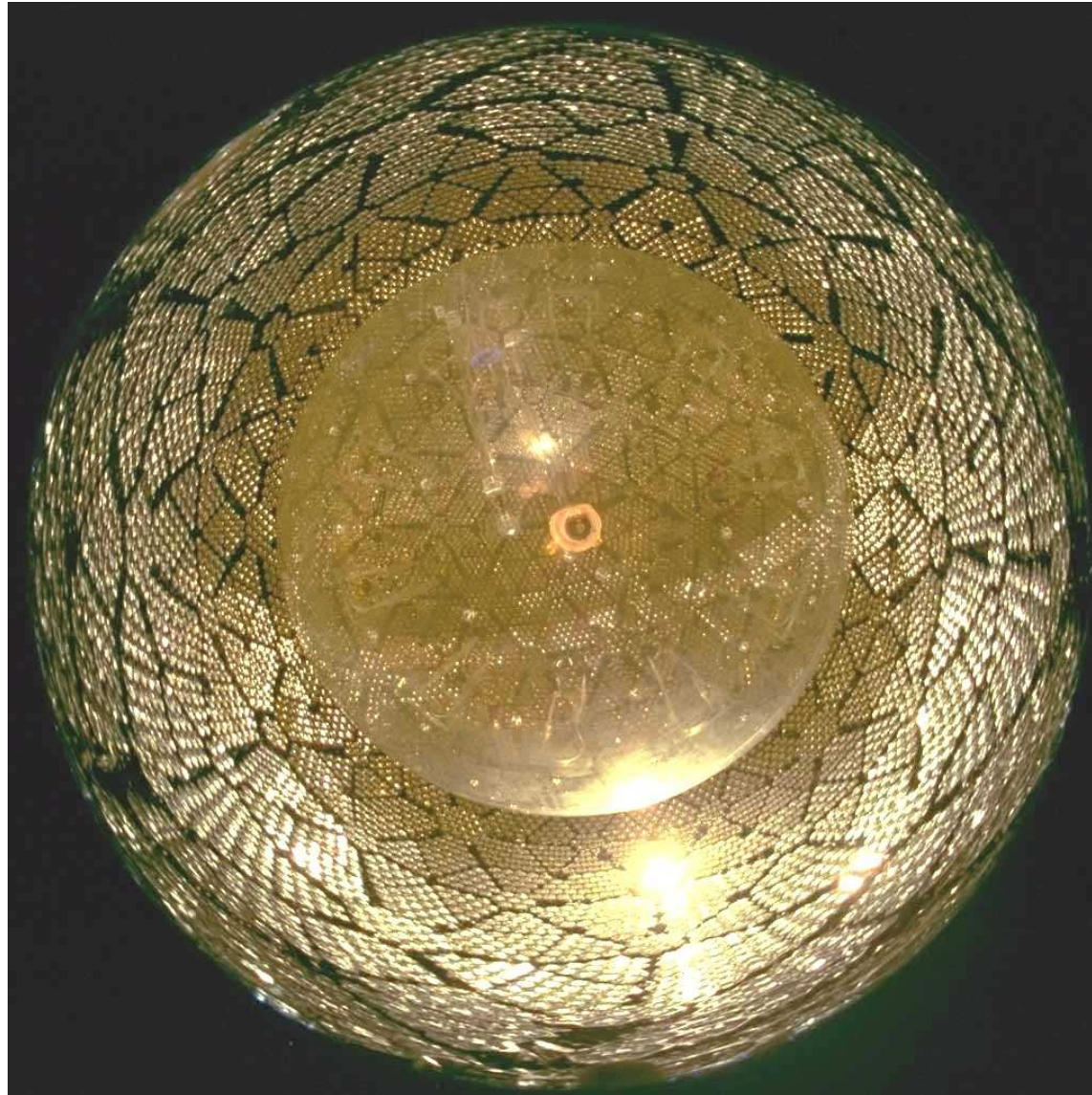
Superkamiokande



Sudbury Neutrino Observatory



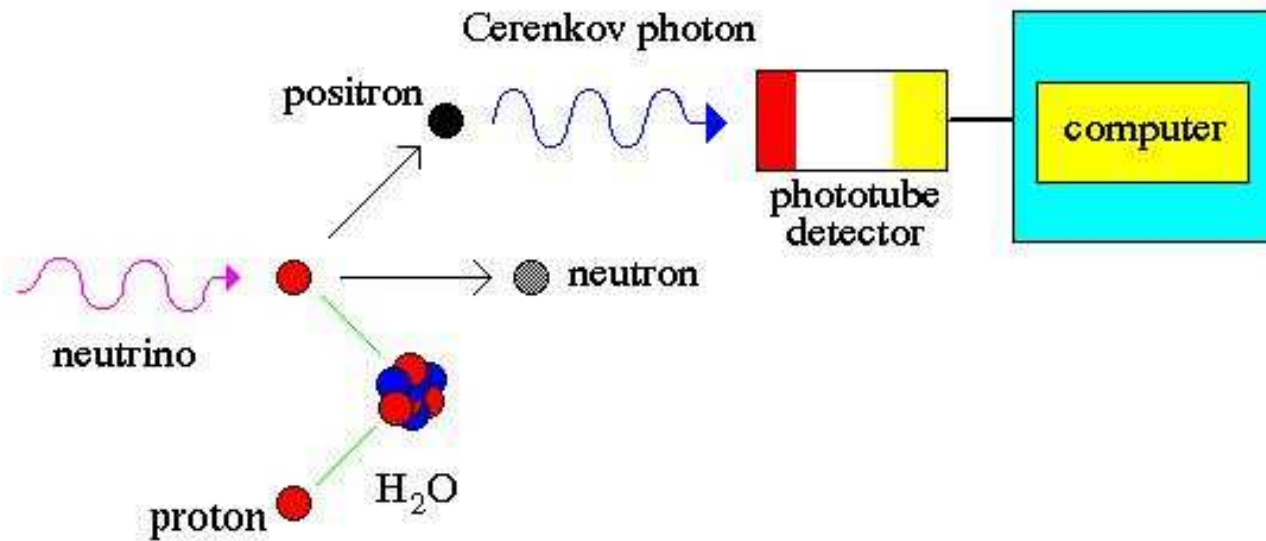
Subury Neutrino Observatory



Neutrino nachweisprinzip

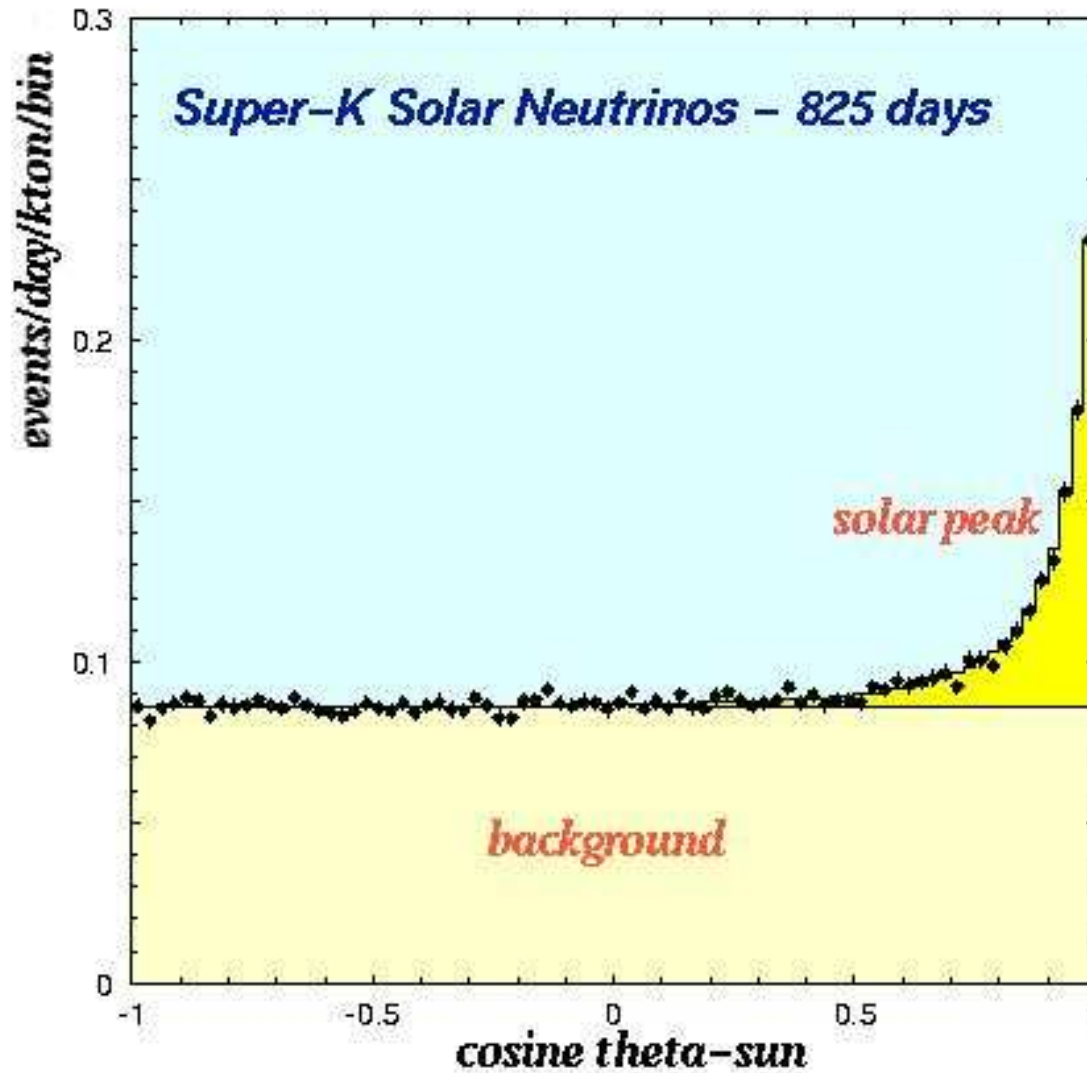


Neutrino Detector

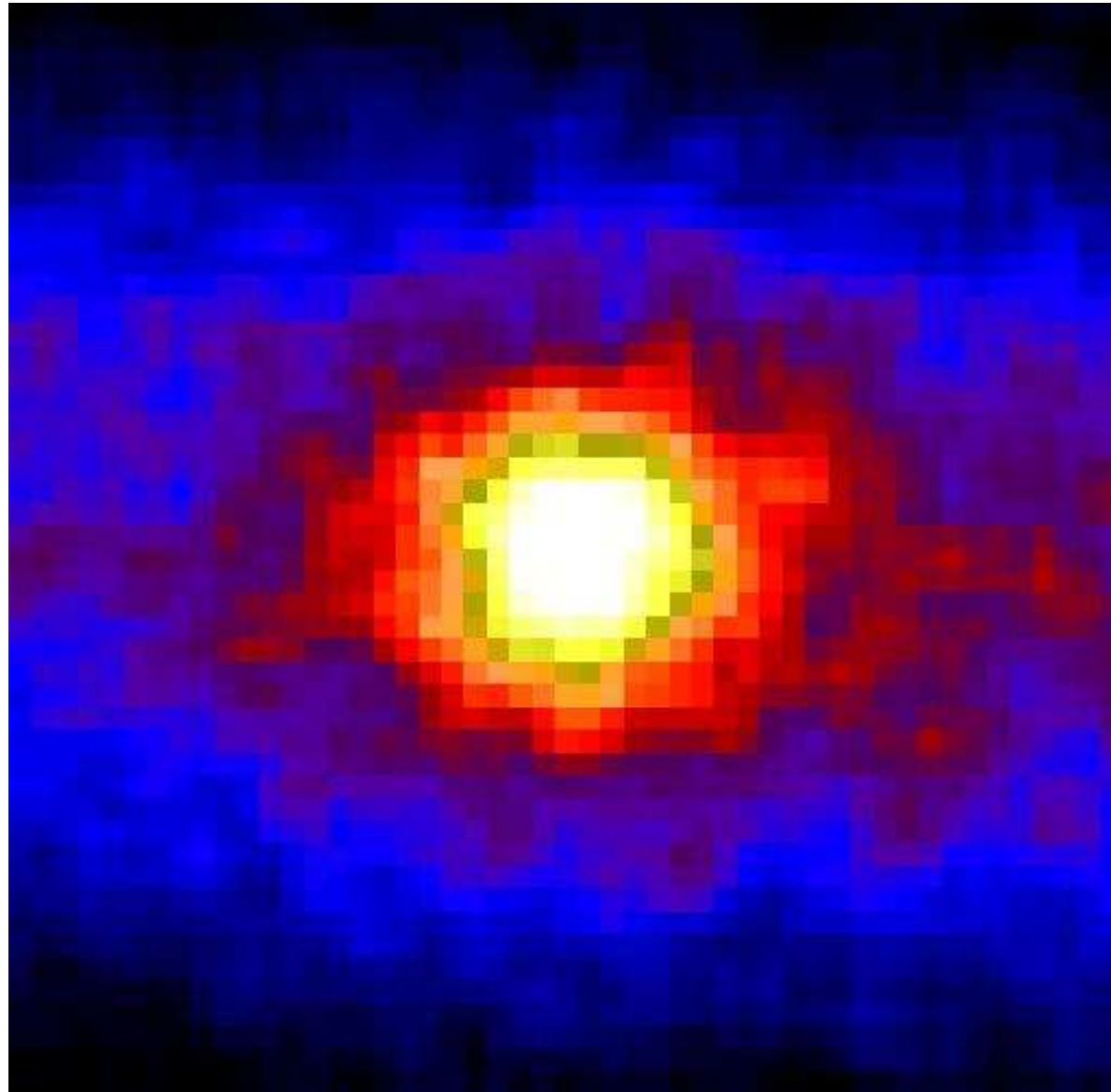


Neutrinos von der Sonne

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$



Sonne im Licht von Neutrinos



Atmosphärische Neutrinos

Atmosphärische Neutrinos stammen hauptsächlich aus Zerfällen geladener Pionen

$$\pi^+ \rightarrow \mu^+ + \nu_\mu$$

$$\pi^- \rightarrow \mu^- + \bar{\nu}_\mu$$

und dem anschließenden Zerfall der Myonen

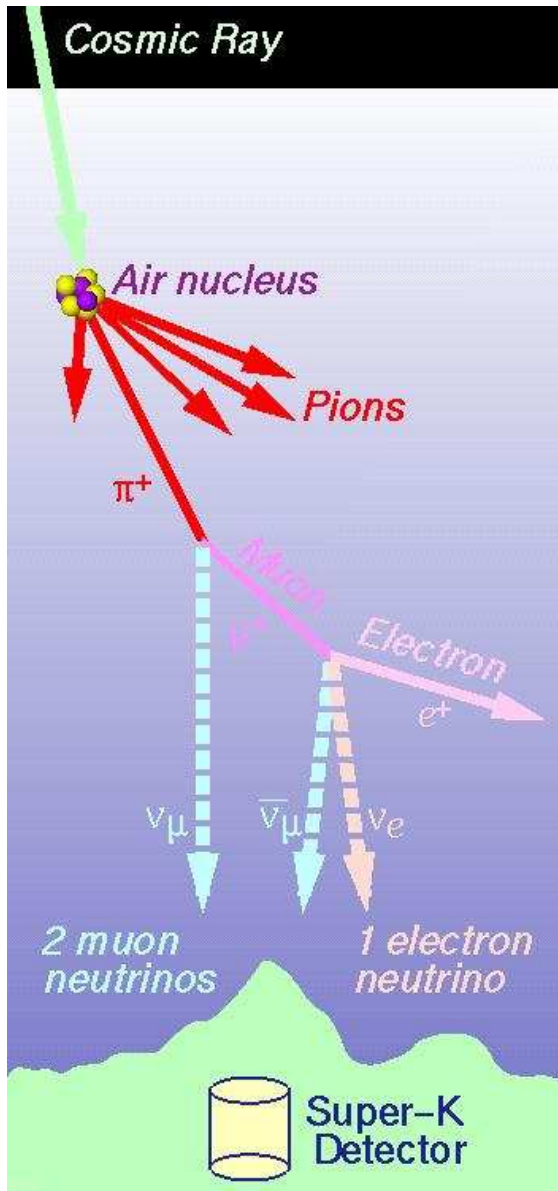
$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

$$\mu^- \rightarrow e^- + \bar{\nu}_e + \nu_\mu$$

naiverweise erwartet man ein Verhältnis

$$\frac{N(\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu)}{N(\nu_e, \bar{\nu}_e)} \approx 2$$

Superkamiokande



Nachweis Atmosphärischer ν 's

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$

$$\nu_e + N \rightarrow e^- + N'$$

$$\nu_\mu + N \rightarrow \mu^- + N'$$

Nachweis in speziellen Cherenkov-Zählern

RICH - Ring Imaging Cherenkov Counters

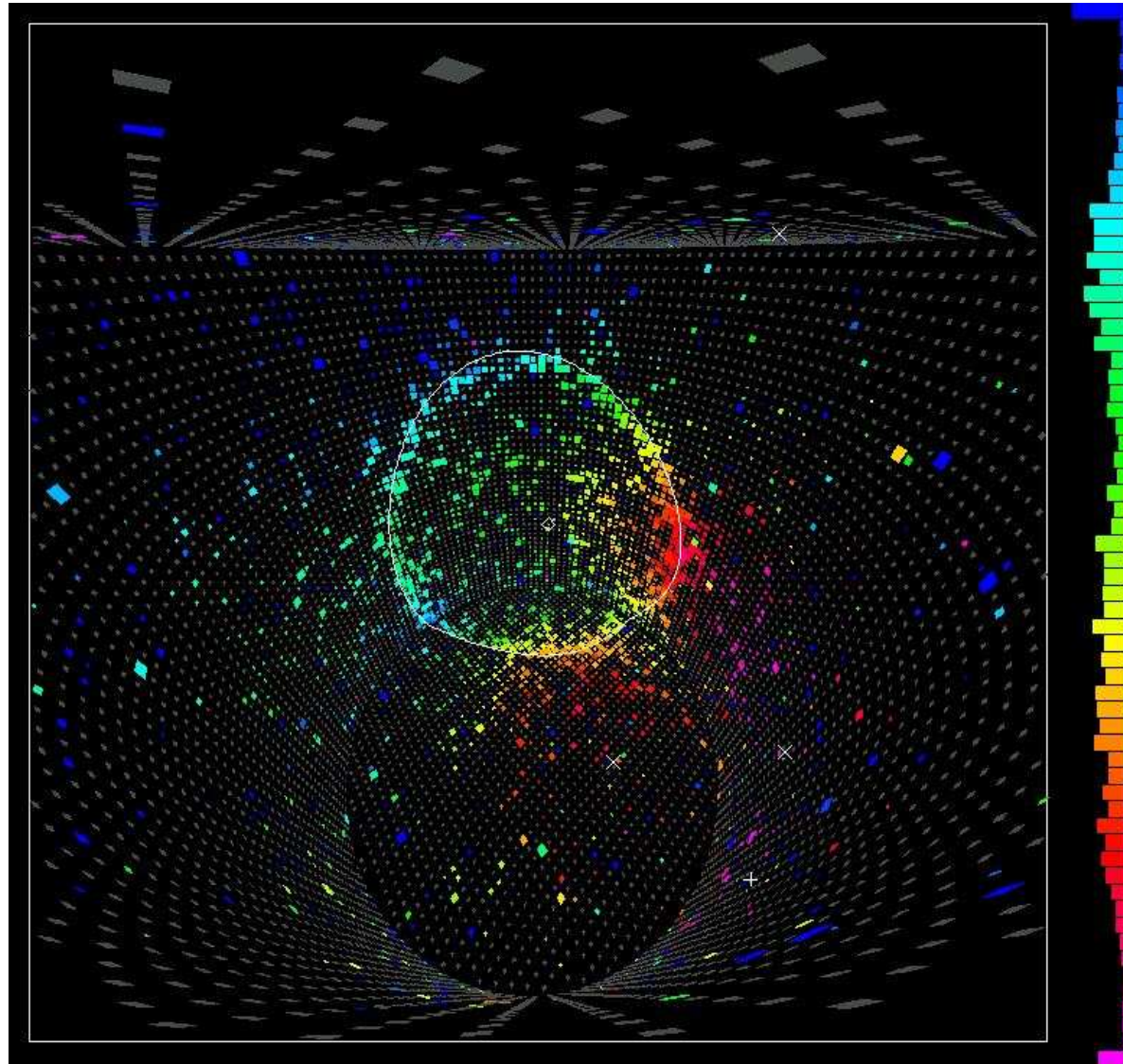
Experimentelle Befund: es werden zu

wenig ν_μ 's gefunden

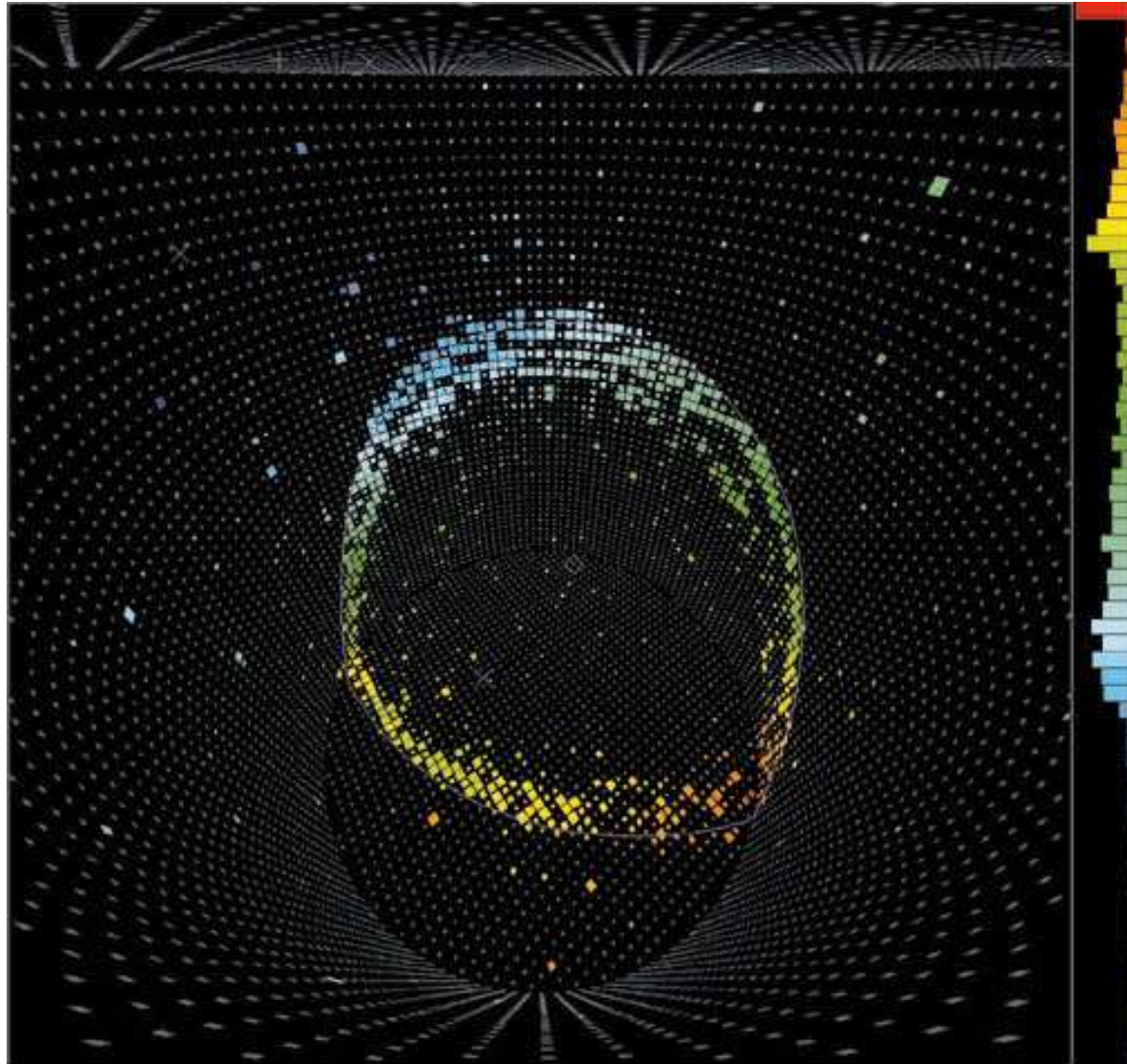
$$\frac{N(\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu)}{N(\nu_e, \bar{\nu}_e)} \approx 1,2$$

Lösung: Neutrinooszillationen

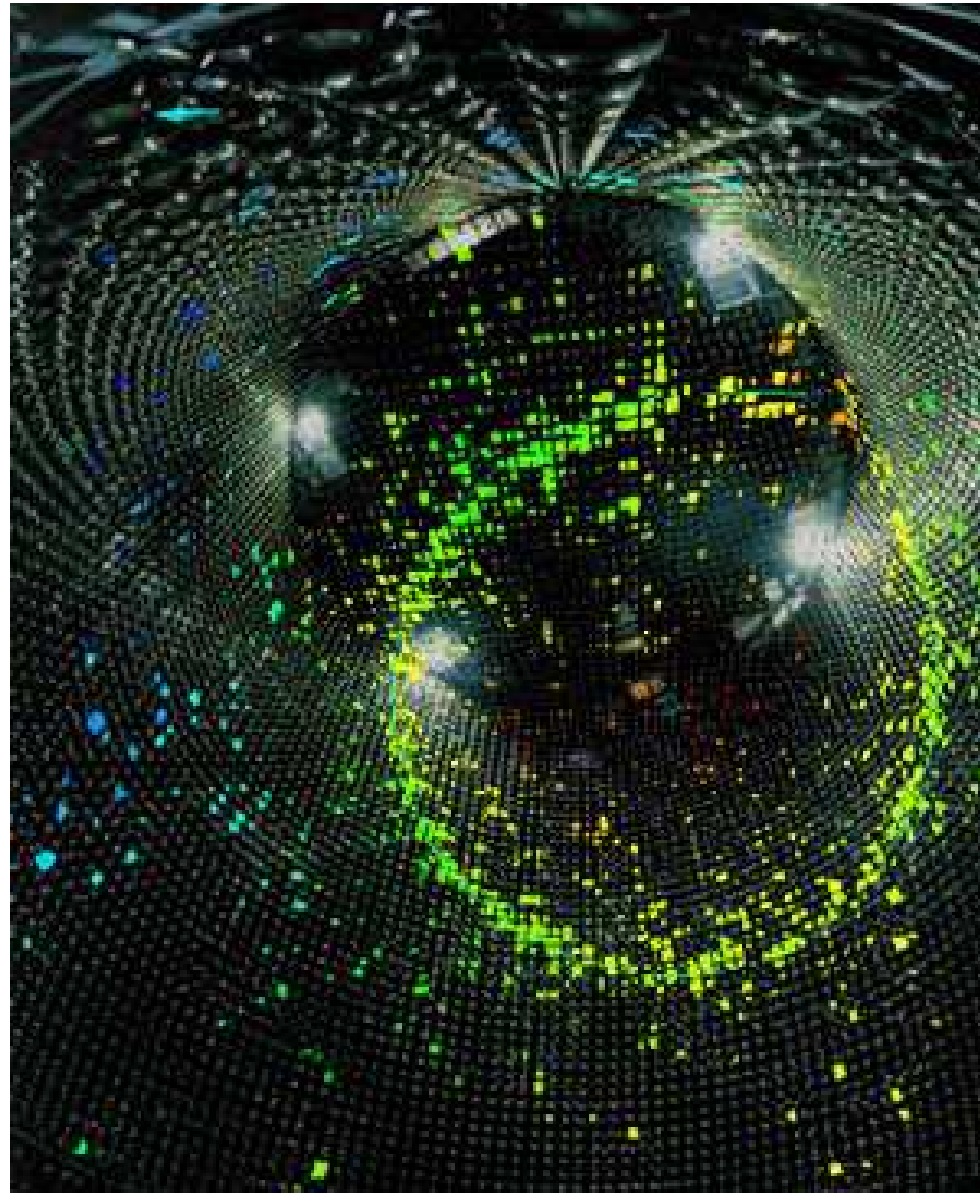
ν -Ereignisse



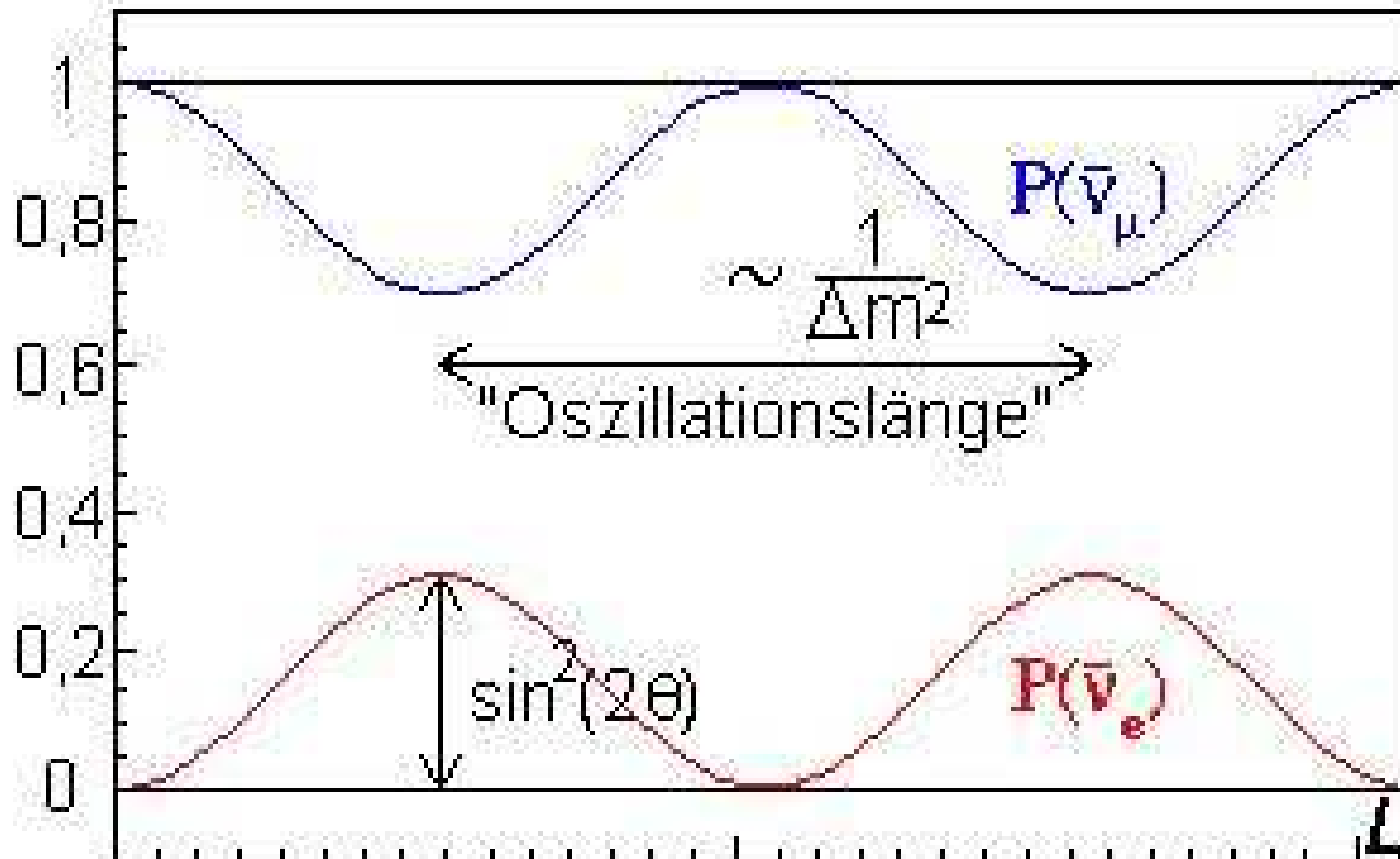
ν -Ereignisse



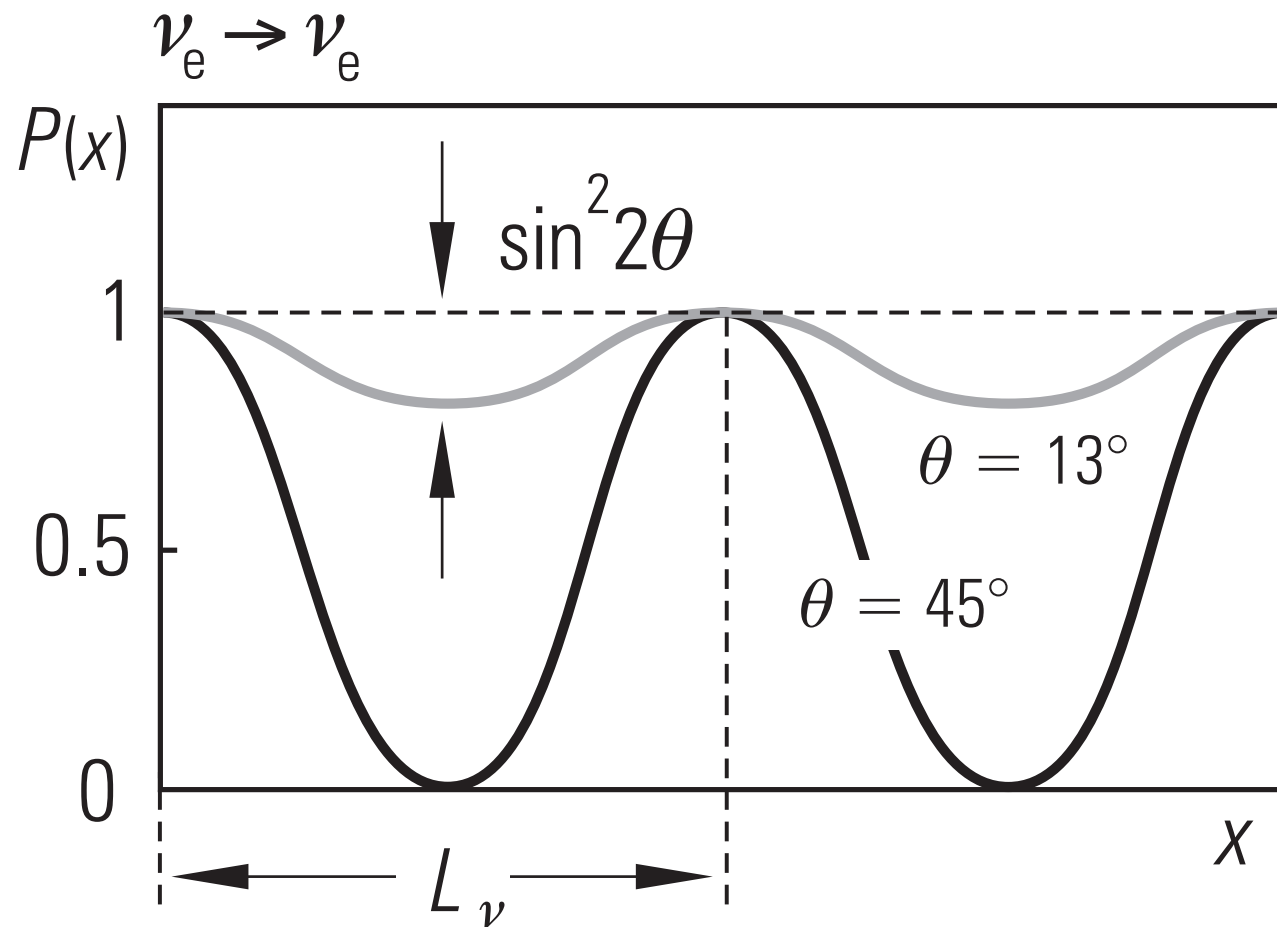
ν -Ereignisse



ν -Oszillationen

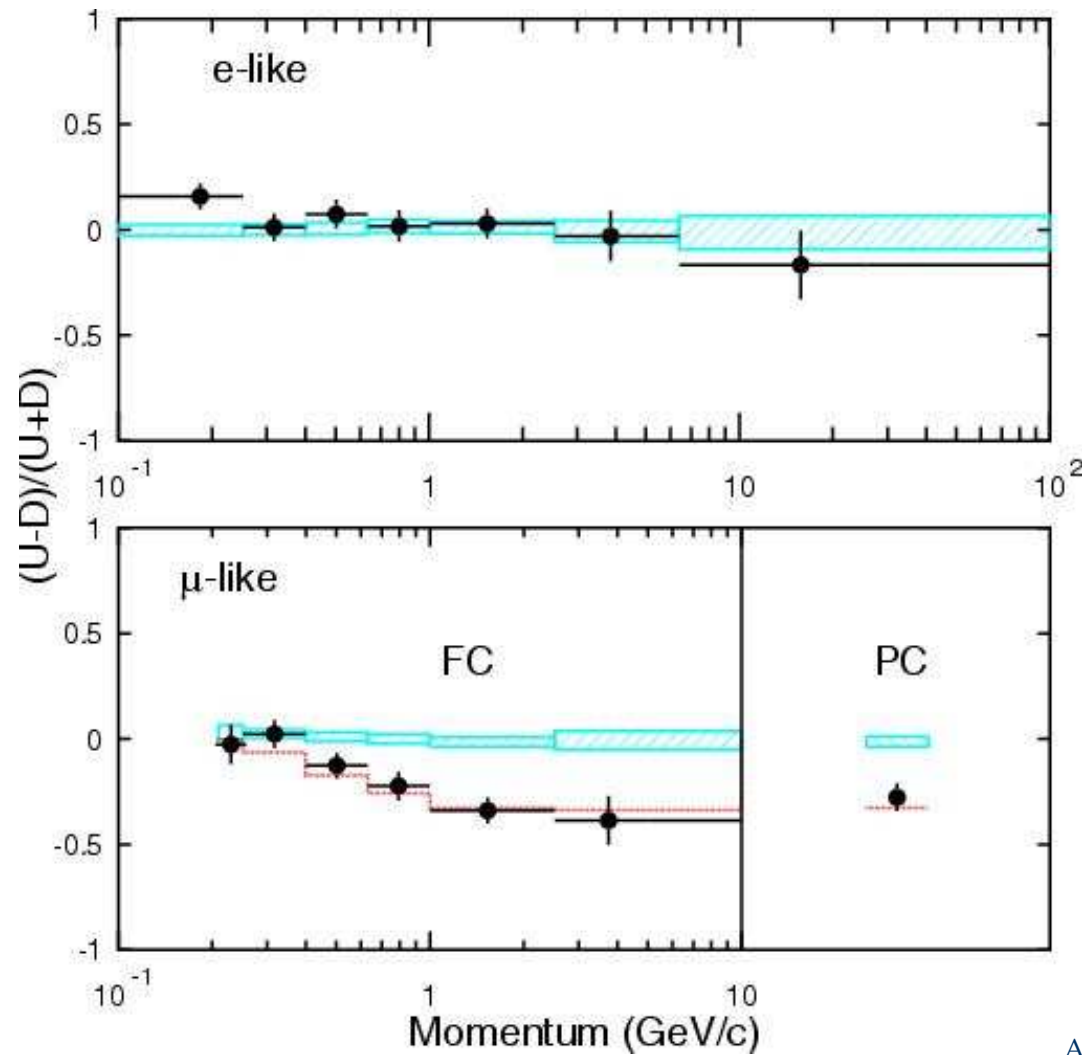


ν -Oszillationen



ν -Oszillationen

$$P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu) = \sin^2 \left(\frac{\Delta(m^2)L}{4E_\nu} \right) \cdot \sin^2 (2\Theta_m)$$



Supernova-Neutrinos

aus der Deleptonisation



⇒ Neutronenstern

‘thermische’ Neutrinos



wobei α für ν_e, ν_{μ} und ν_{τ} stehen

Nachweis von Supernova ν 's

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$

$$\bar{\nu}_e + e^- \rightarrow \bar{\nu}_e + e^-$$

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^-$$

d.h. es werden Elektronen und/oder Positronen gemessen

Myonen und Taus können von SN ν 's nicht erzeugt werden.

Neutrinomassen

$$\Delta t = L \left(\frac{1}{v_1} - \frac{1}{v_2} \right) = \frac{L}{c} \left(\frac{1}{\beta_1} - \frac{1}{\beta_2} \right), \quad L - \text{Flugstrecke}$$

$$\Delta t = \frac{L}{c} \left\{ \sqrt{\frac{\gamma_1^2}{\gamma_1^2 - 1}} - \sqrt{\frac{\gamma_2^2}{\gamma_2^2 - 1}} \right\}$$

$$= \frac{L}{c} \left\{ \sqrt{\frac{(E_1/m_0c^2)^2}{(E_1/m_0c^2)^2 - 1}} - \sqrt{\frac{(E_2/m_0c^2)^2}{(E_2/m_0c^2)^2 - 1}} \right\}$$

$$\approx \frac{L}{c} \left\{ \sqrt{1 + \left(\frac{m_0c^2}{E_1} \right)^2} - \sqrt{1 + \left(\frac{m_0c^2}{E_2} \right)^2} \right\}$$

$$= \frac{L}{c} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{m_0^2c^4}{E_1^2} + \dots - \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_0^2c^4}{E_2^2} + \dots \right) \right\}$$

Neutrinomassen

$$\Delta t = \frac{L}{c} \left\{ 1 + \frac{1}{2} \frac{m_0^2 c^4}{E_1^2} + \dots - \left(1 + \frac{1}{2} \frac{m_0^2 c^4}{E_2^2} + \dots \right) \right\}$$

$$\Delta t = \frac{L}{2 \cdot c} \cdot m_0^2 c^4 \left\{ \frac{1}{E_1^2} - \frac{1}{E_2^2} \right\}$$

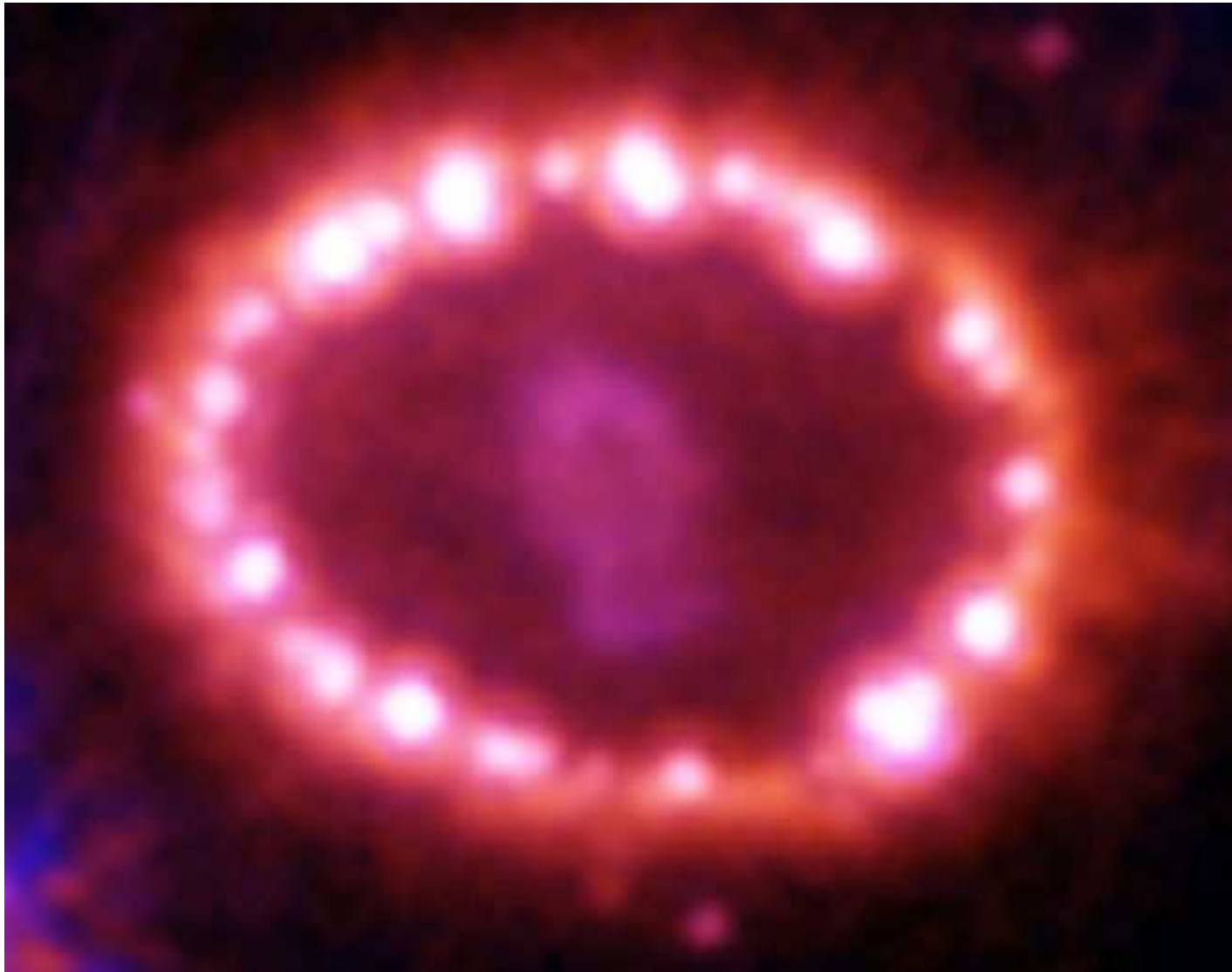
$$m_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta t}{L \cdot c^3} \cdot \frac{E_1^2 \cdot E_2^2}{E_2^2 - E_1^2}}$$

mit den SN-Neutrinodaten $\Rightarrow m_0 \leq 10 \text{ eV} / c^2$

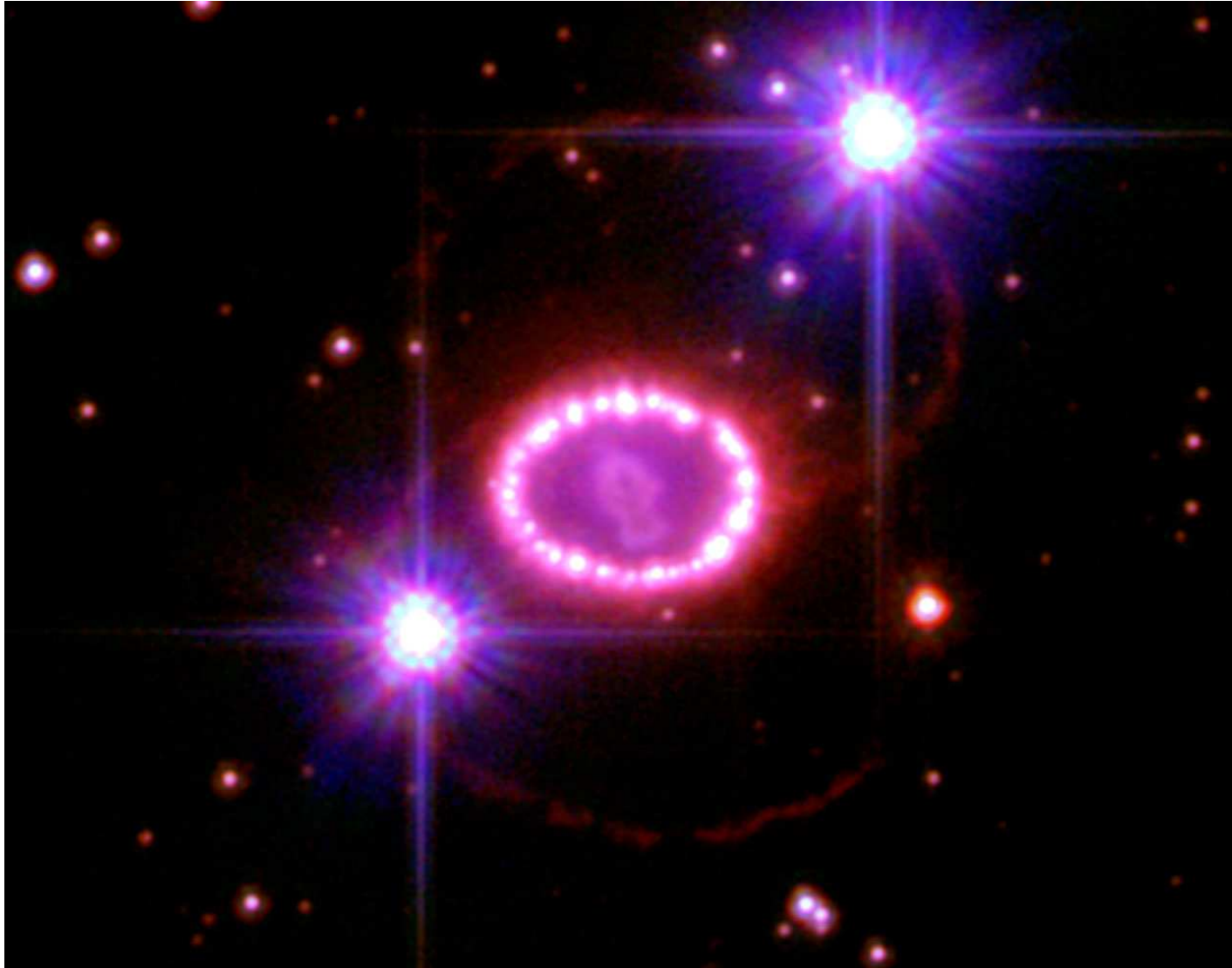
Tarantel-Nebel



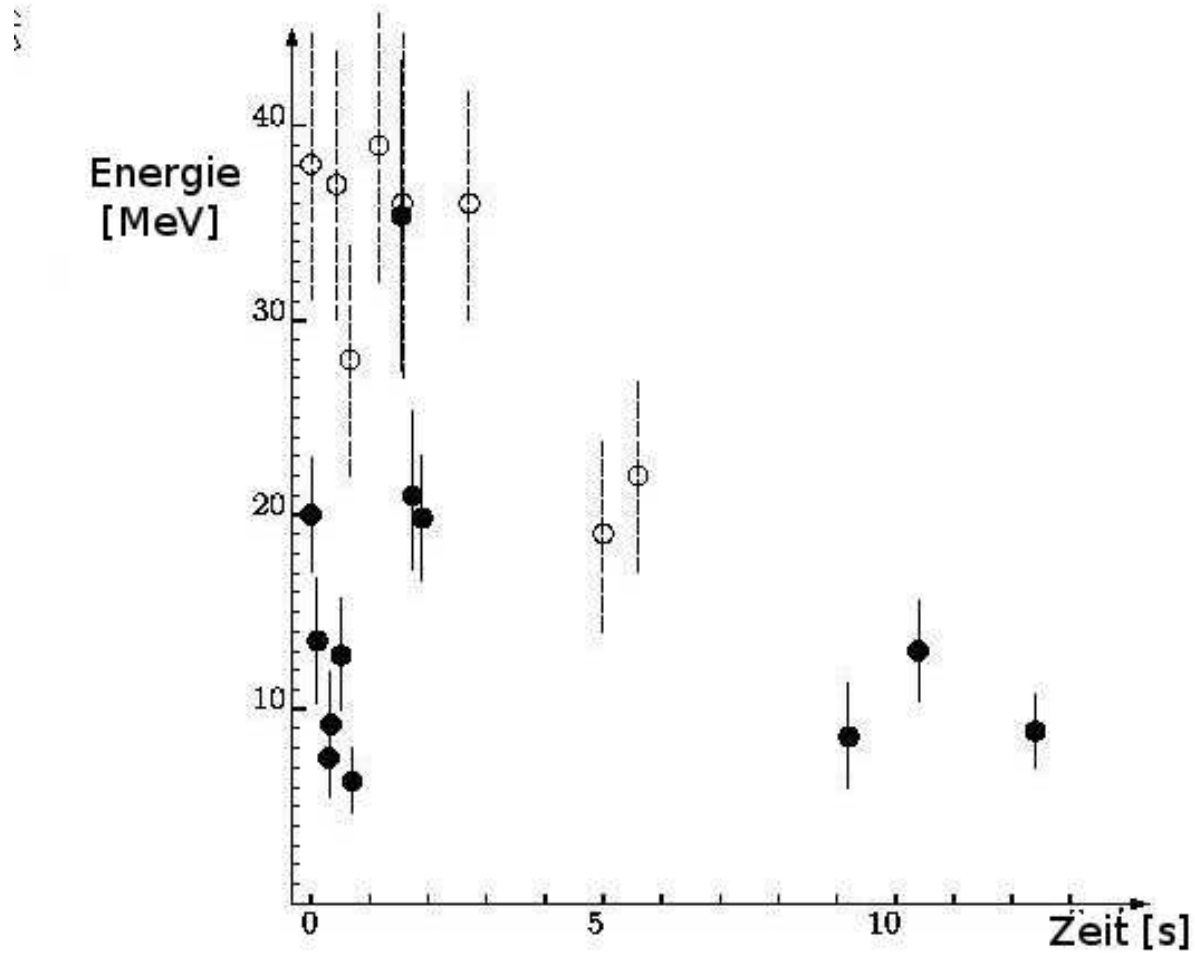
Supernova 1987A



Supernova 1987A



Supernova 1987A

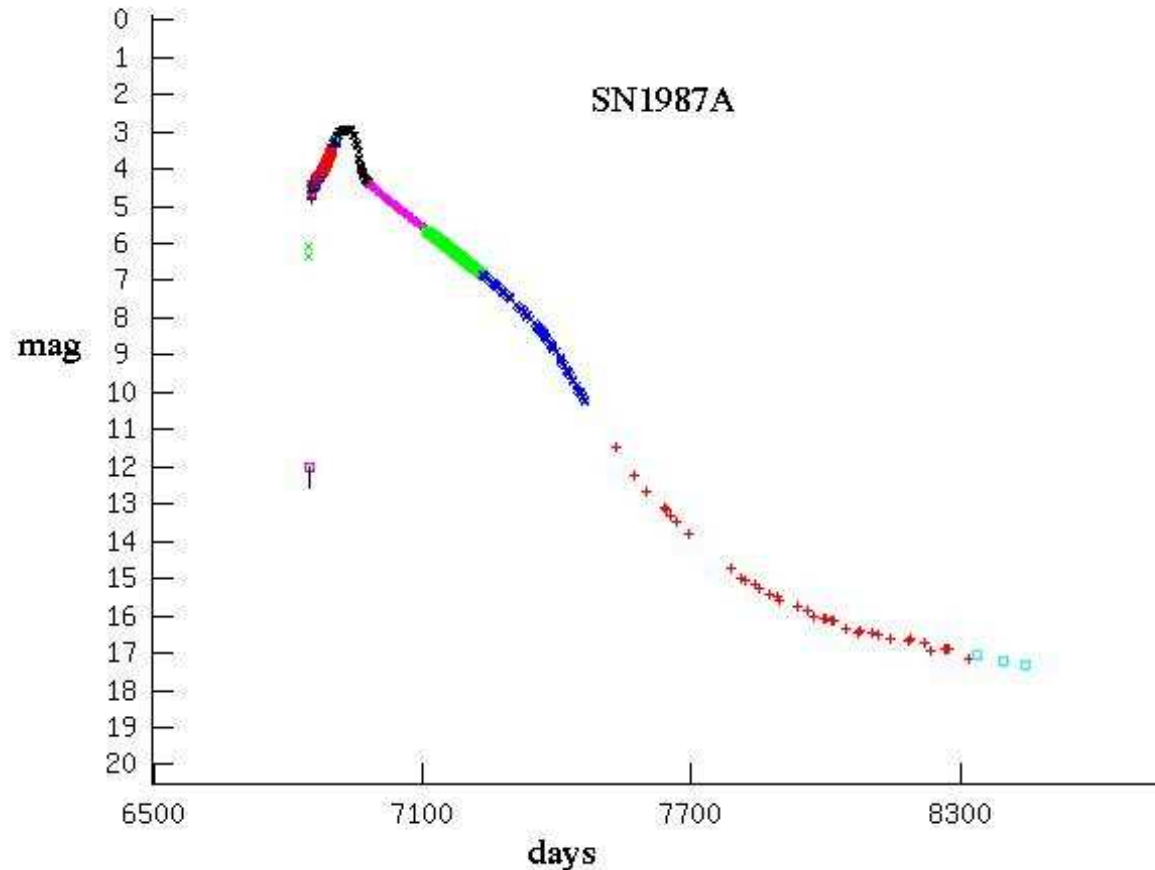


offene Kreise: IMB-Experiment; volle Kreise: Kamiokande

Energieausstoß

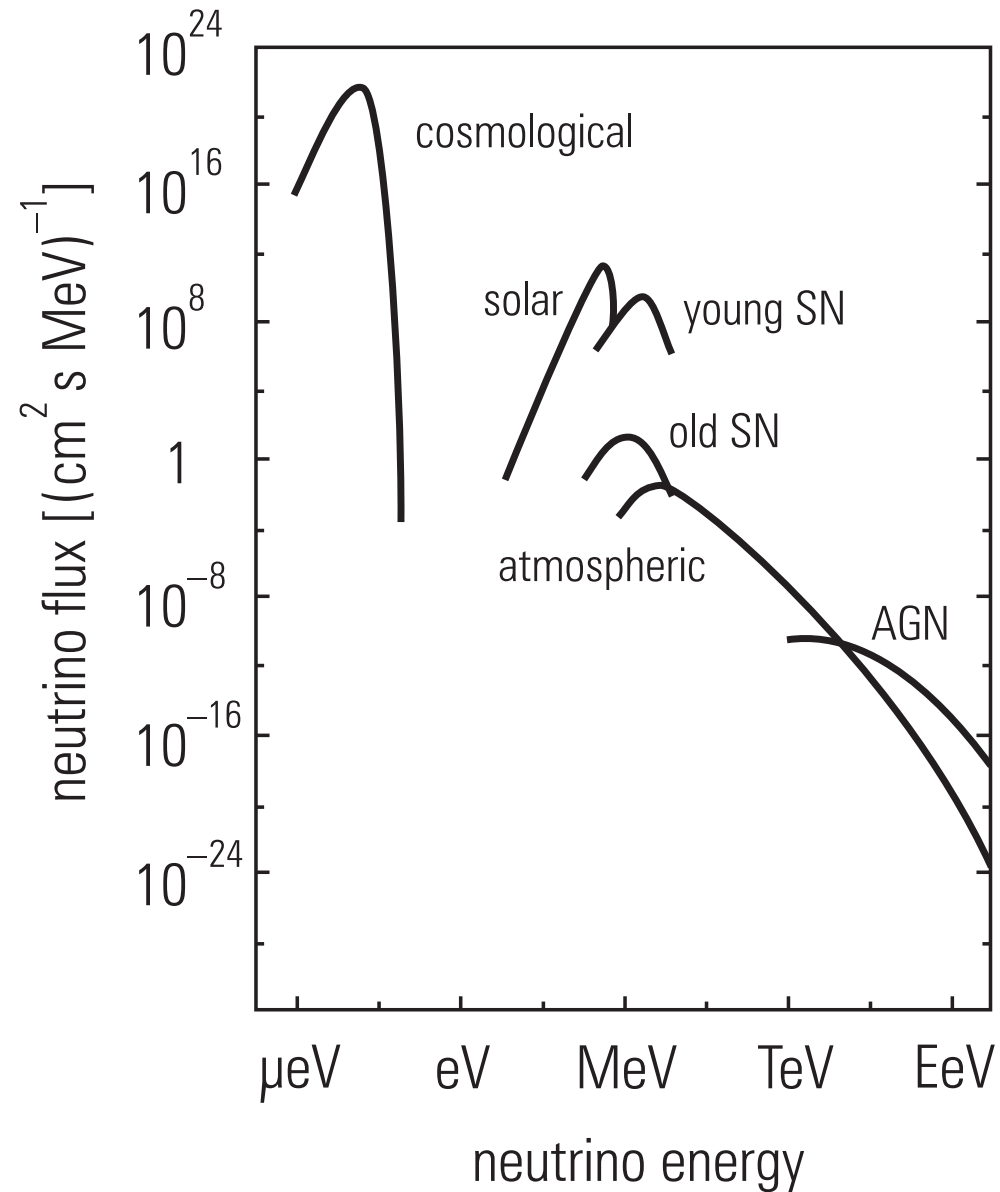
$$E_{total} = \sum_{i=1}^{20} \frac{E_{\nu}^i}{\epsilon_1(E_{\nu}^i) \cdot \epsilon_2(E_{\nu}^i)} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot f(\nu_{\alpha}, \bar{\nu}_{\alpha})$$
$$\approx (6 \pm 2) \cdot 10^{46} \text{ Joule}$$
$$\cong 10^{58} \text{ emittierte Neutrinos}$$

Lichtkurve 1987A

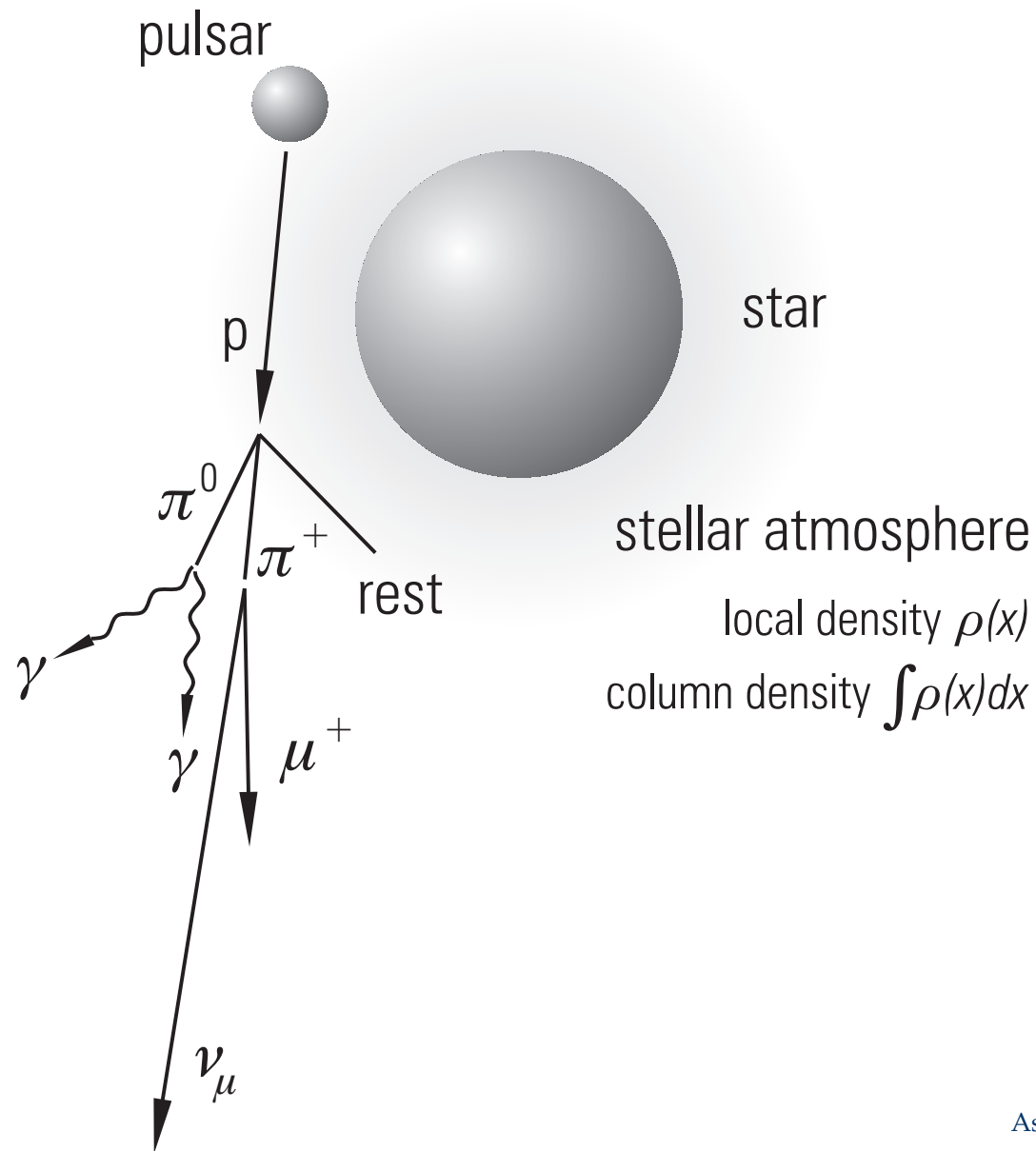


Das Licht im optischen Spektralbereich geht letztlich auf den radioaktiven Zerfall von Kobalt und Nickel zurück.

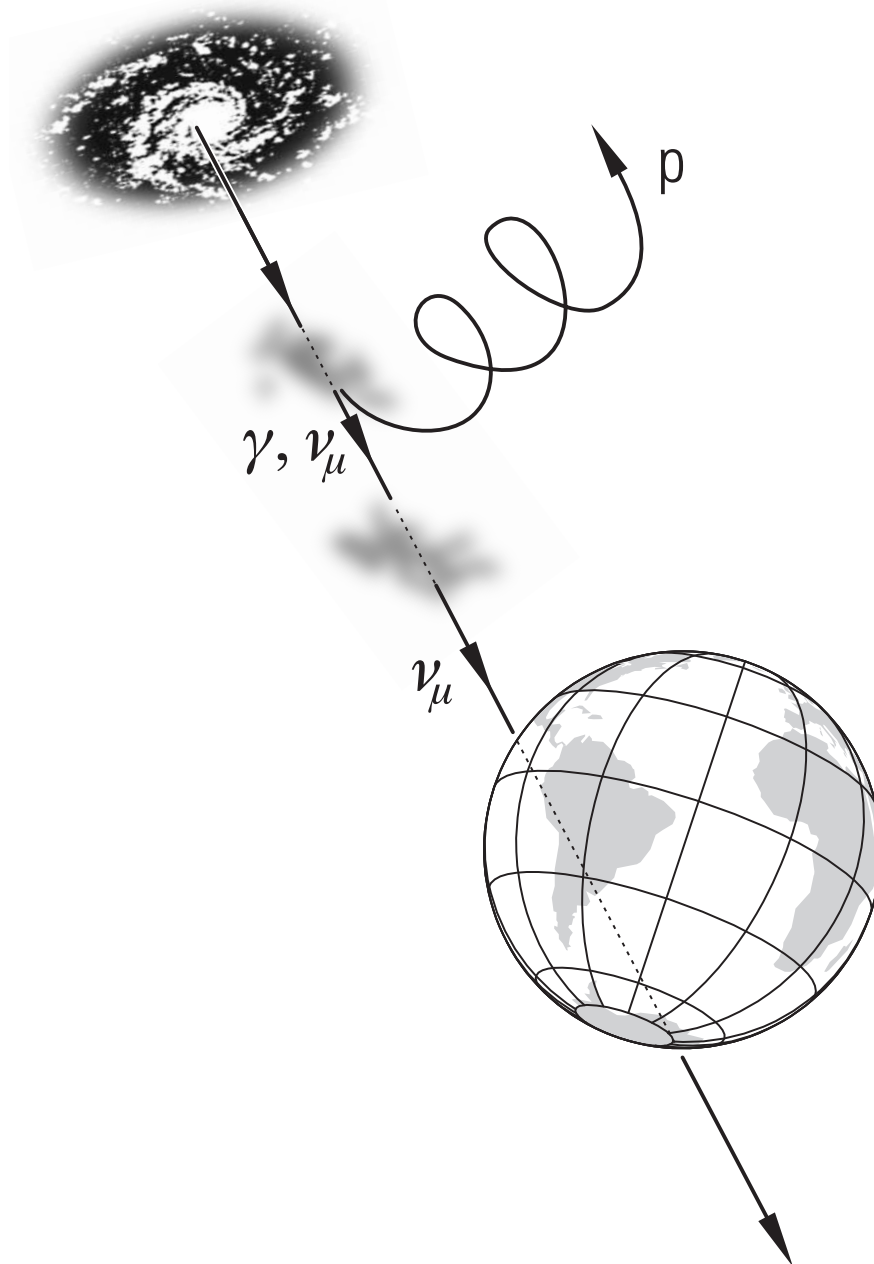
Neutrino Flüsse-Übersicht



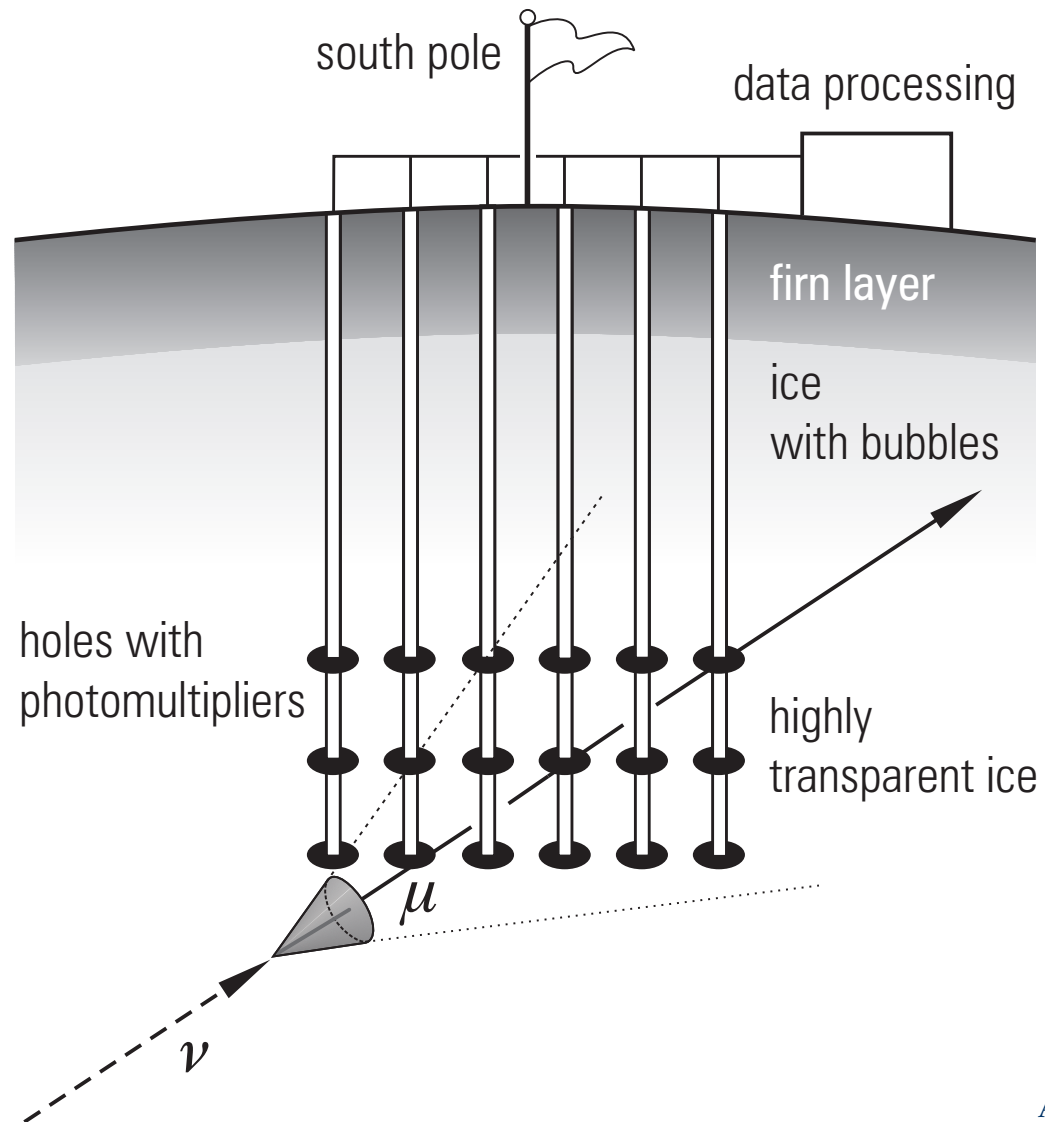
Galaktische und Extragalaktische ν 's



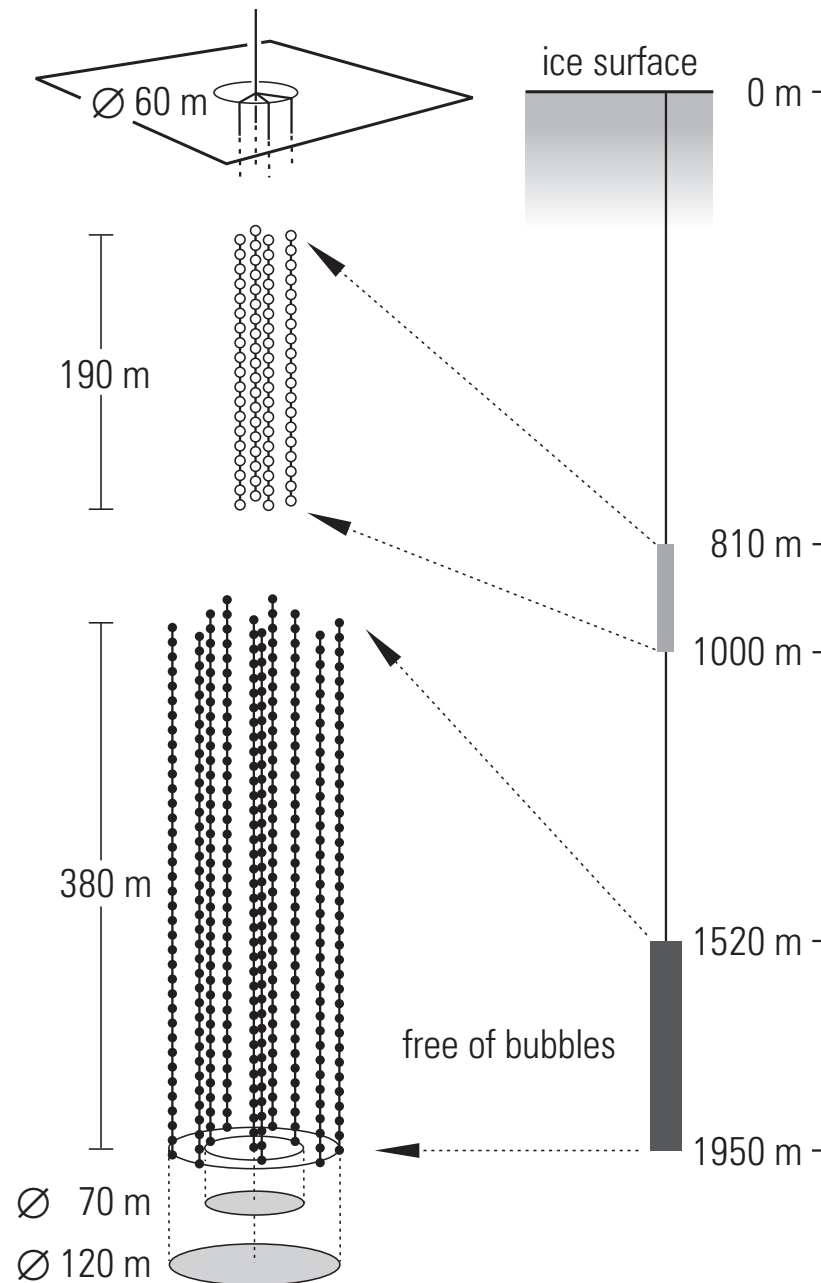
Galaktische und Extragalaktische ν 's



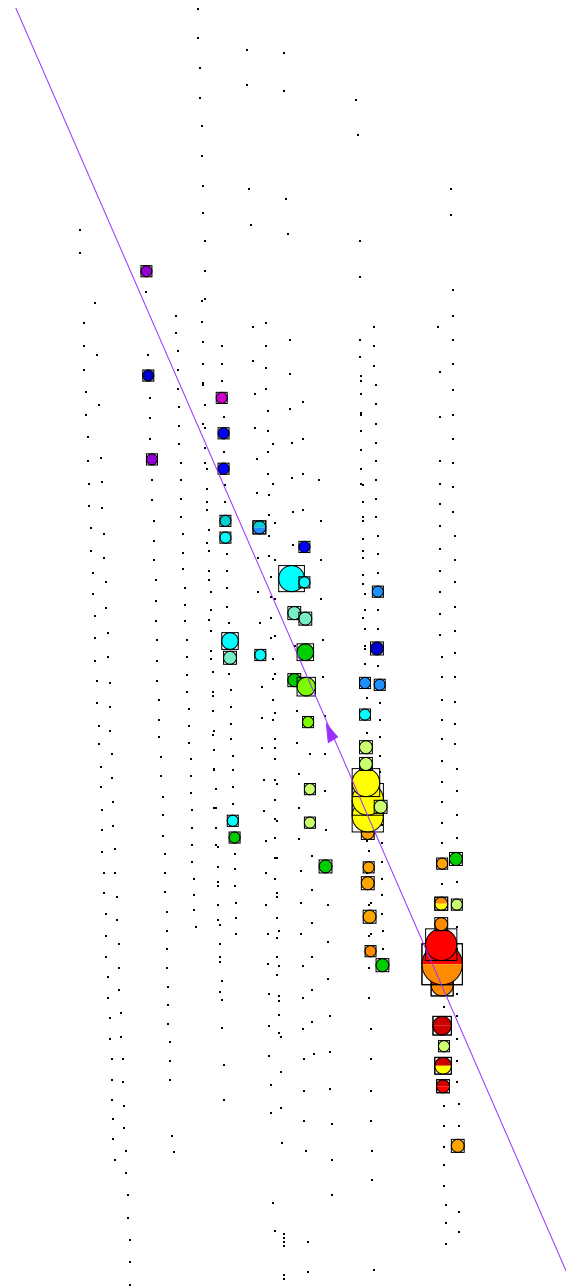
AMANDA in der Antarktis



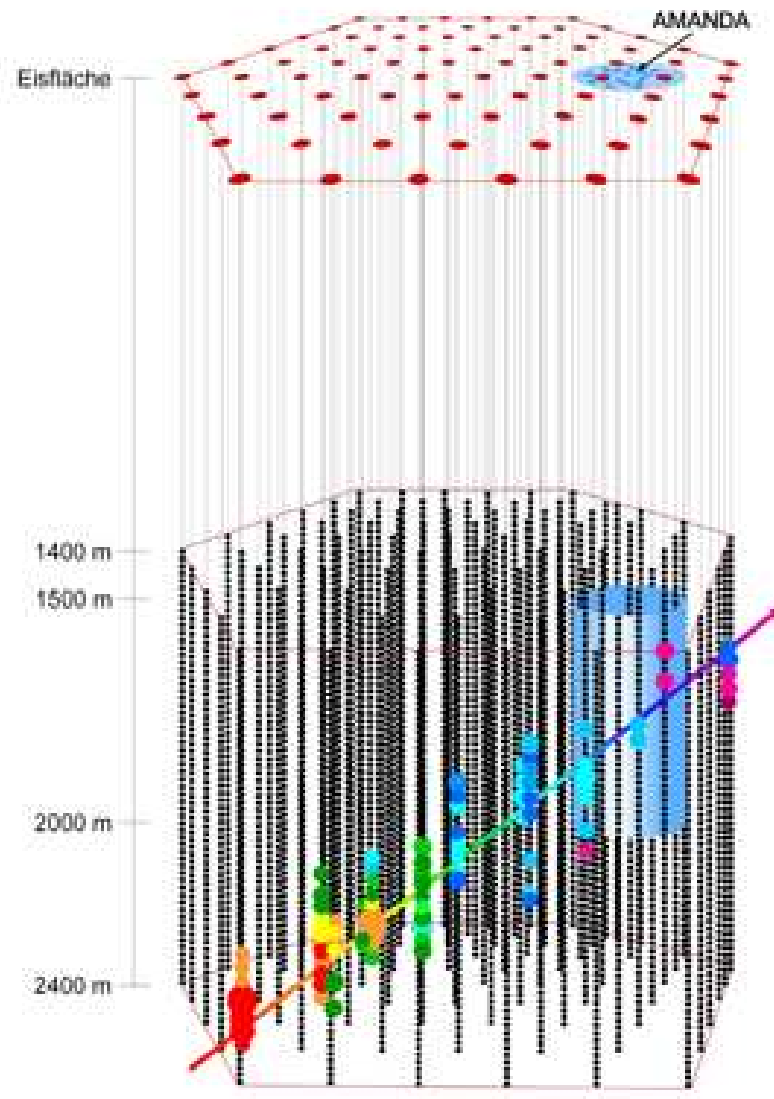
AMANDA Aufbau



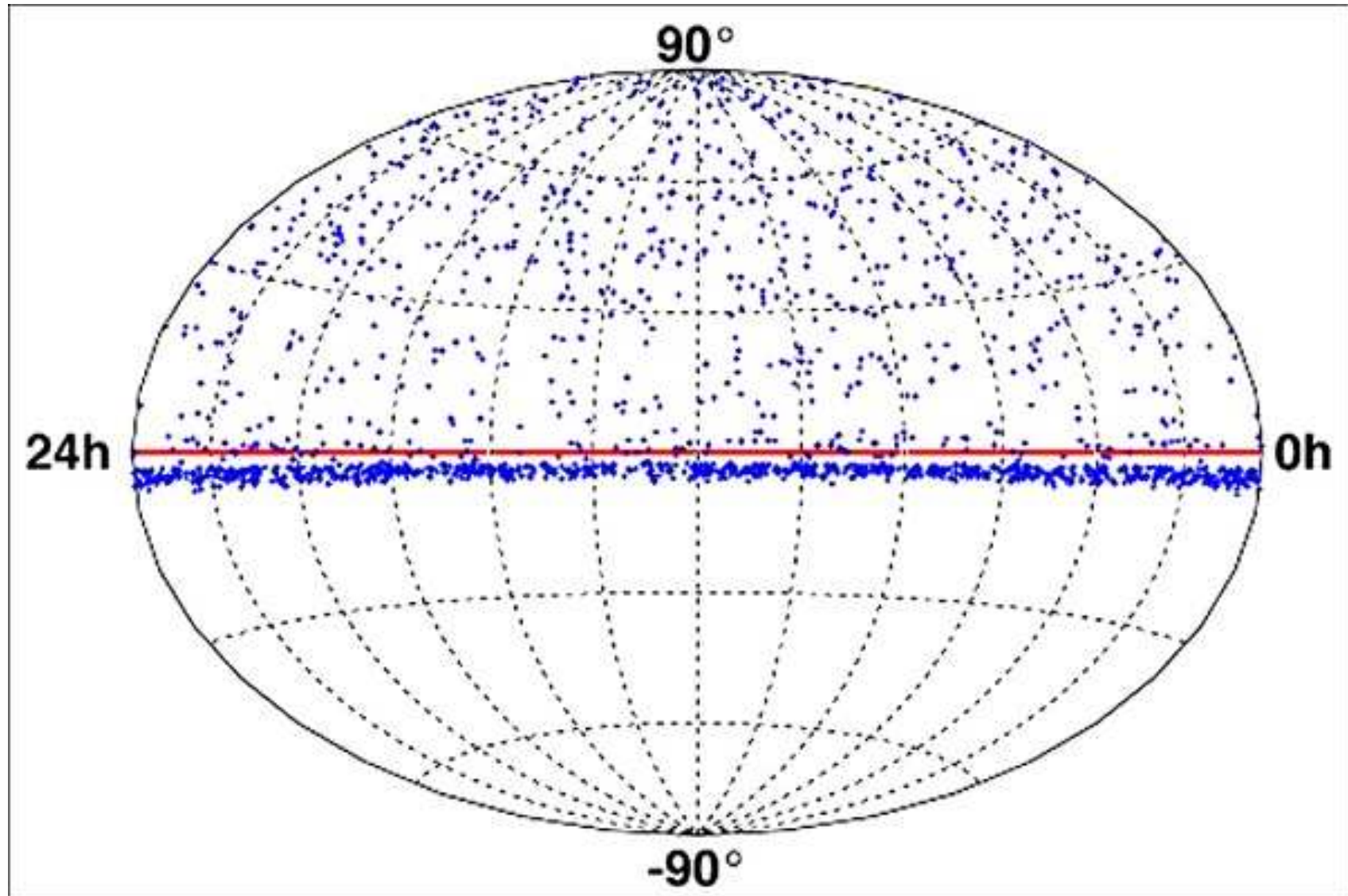
AMANDA Ereignis



ICECUBE Aufbau



Neutrino-Himmel



Zusammenfassung

- Röntgen-, γ und Neutrinoastronomie stellen ein neues Fenster zum All dar
- Neutrinos von der Sonne erlauben die Messung nuklearer Prozesse
- Neutrinos gestatten einen Blick in das Innere von Sternen und galaktischen Kernen
- Suche nach den Quellen kosmischer Strahlung
- Verständnis der Beschleunigung kosmischer Strahlung
- Untersuchung extremer Materiezustände