

# Astrophysik mit Teilchen

Sommersemester 2010



Universität Siegen  
Claus Grupen

# Kosmische Beschleuniger



# Übersicht



## Astroteilchenphysik

**Röntgenastronomie**

**$\gamma$ -Astronomie**

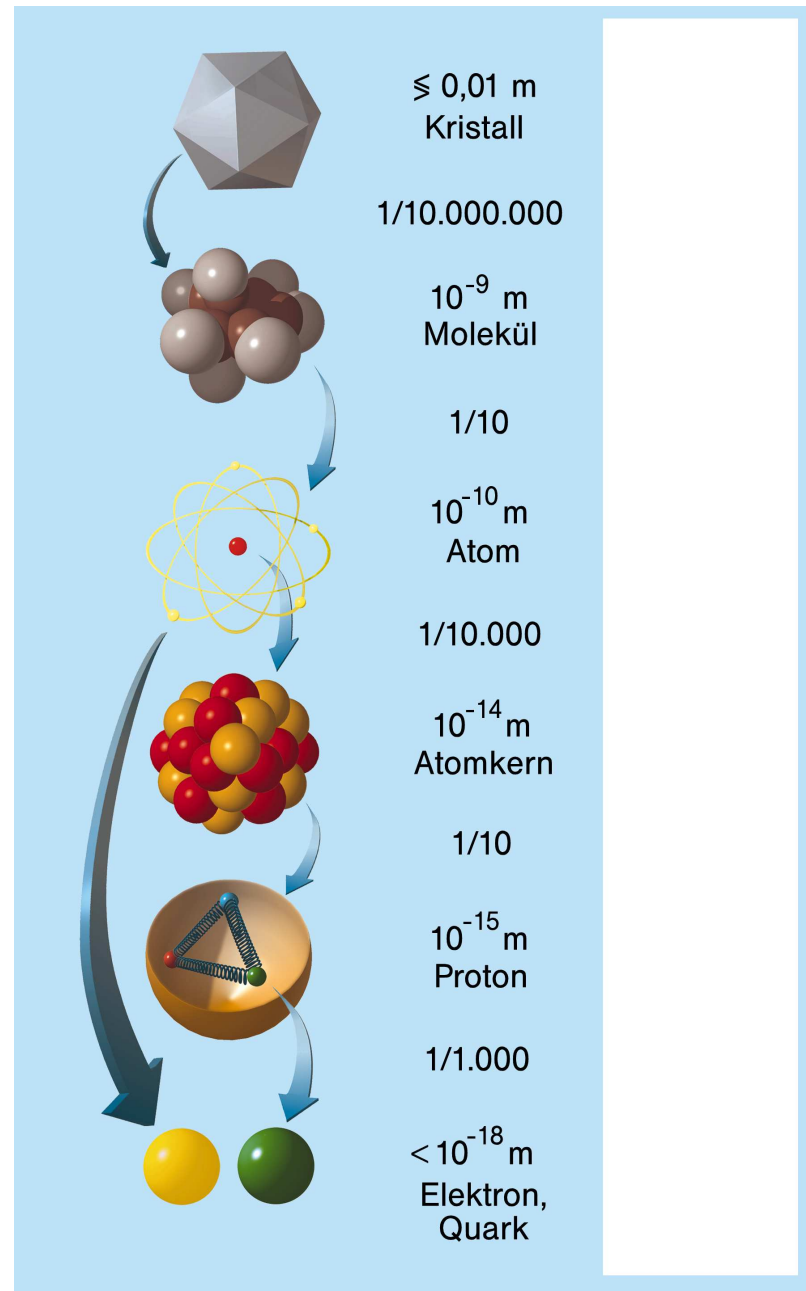
**Neutrinoastronomie**

**Gravitationswellen**

**Dunkle Materie**

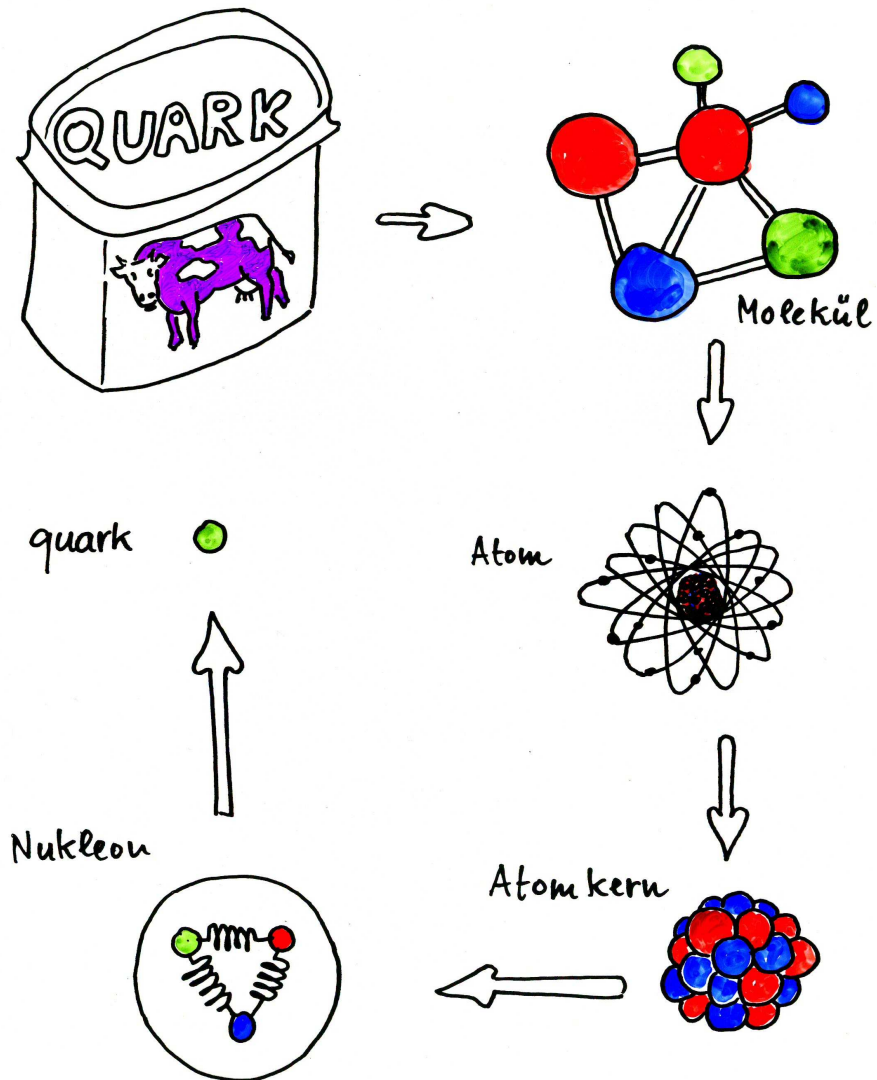
**Kosmische Strahlung**

# Vom Kristall zum Quark

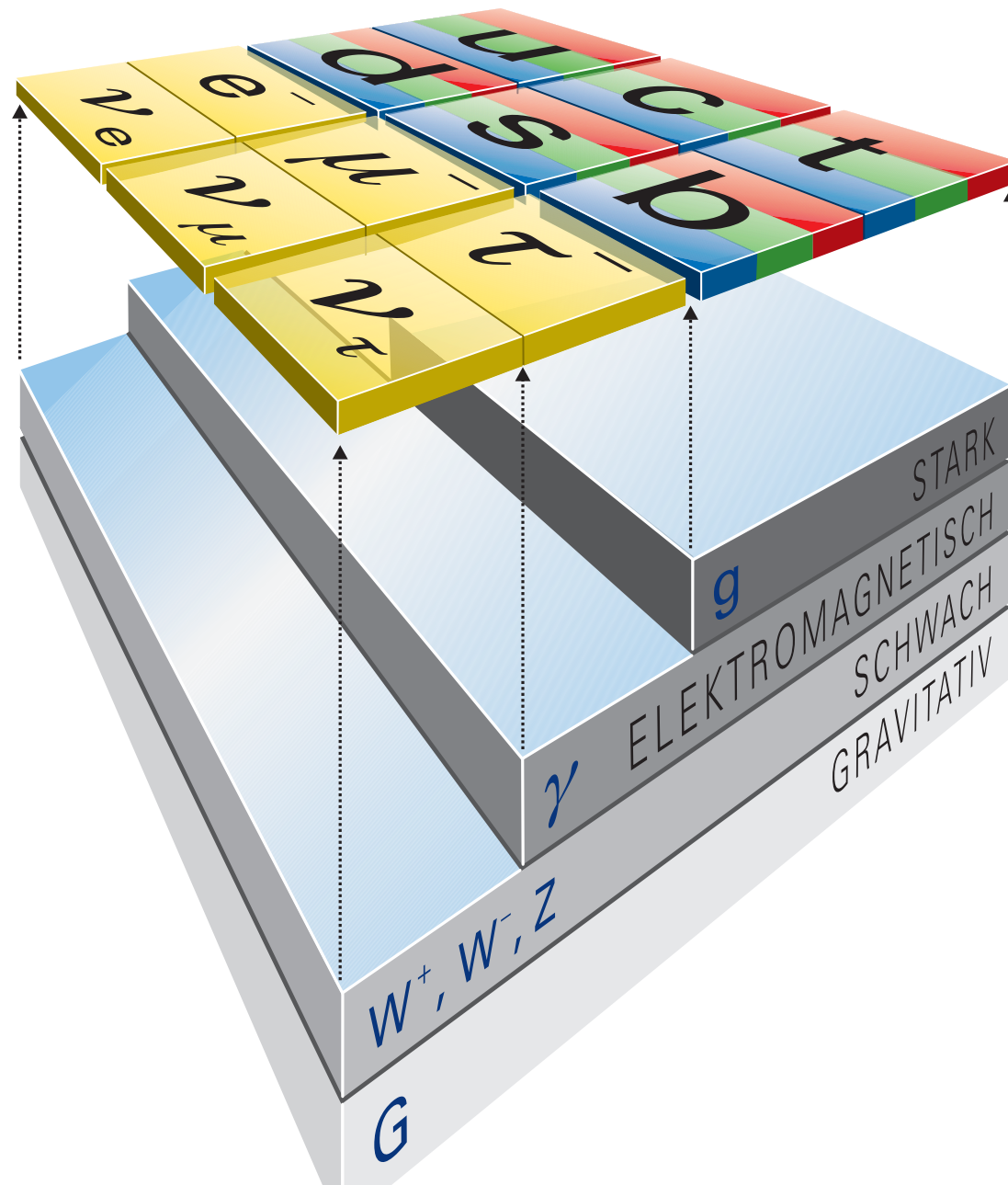


# Quark-Kreislauf

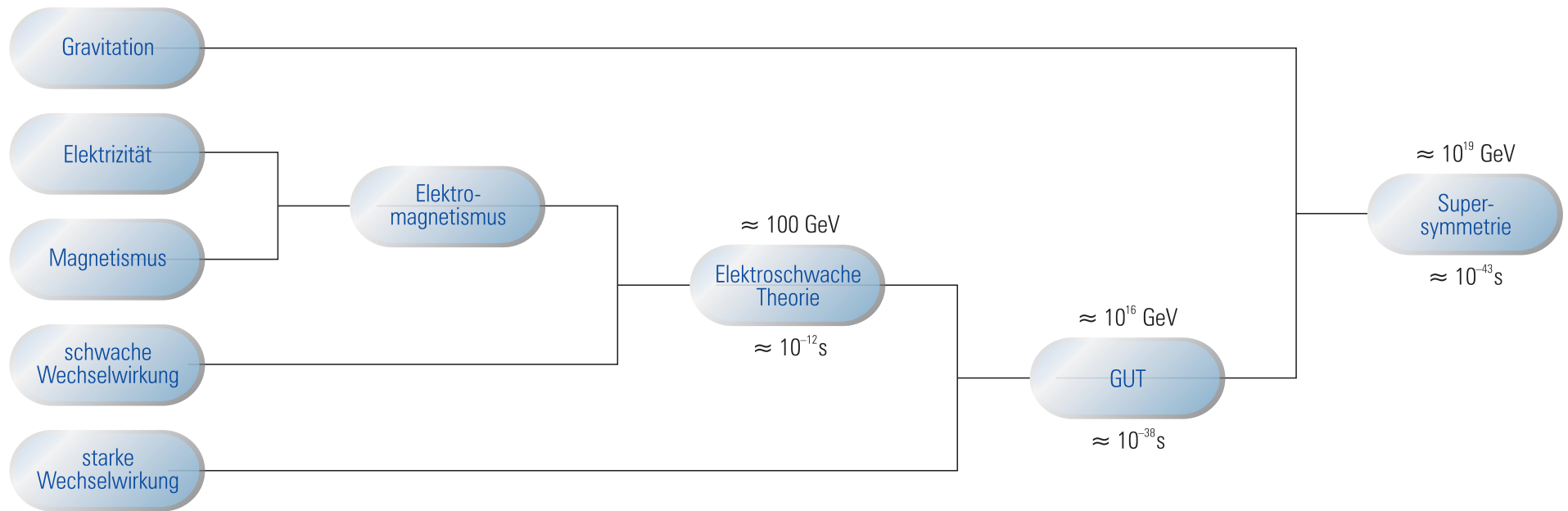
Quark - Metamorphose



# Teilchensorten



# Wechselwirkungen

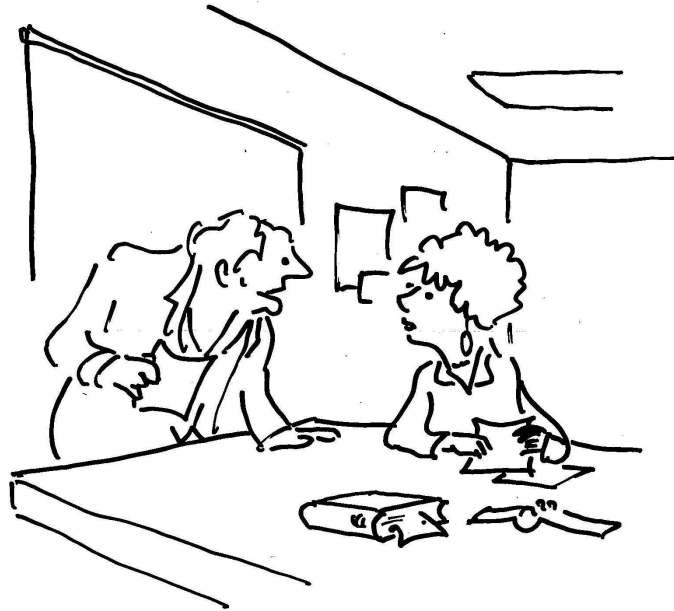


# Wechselwirkungen

- 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

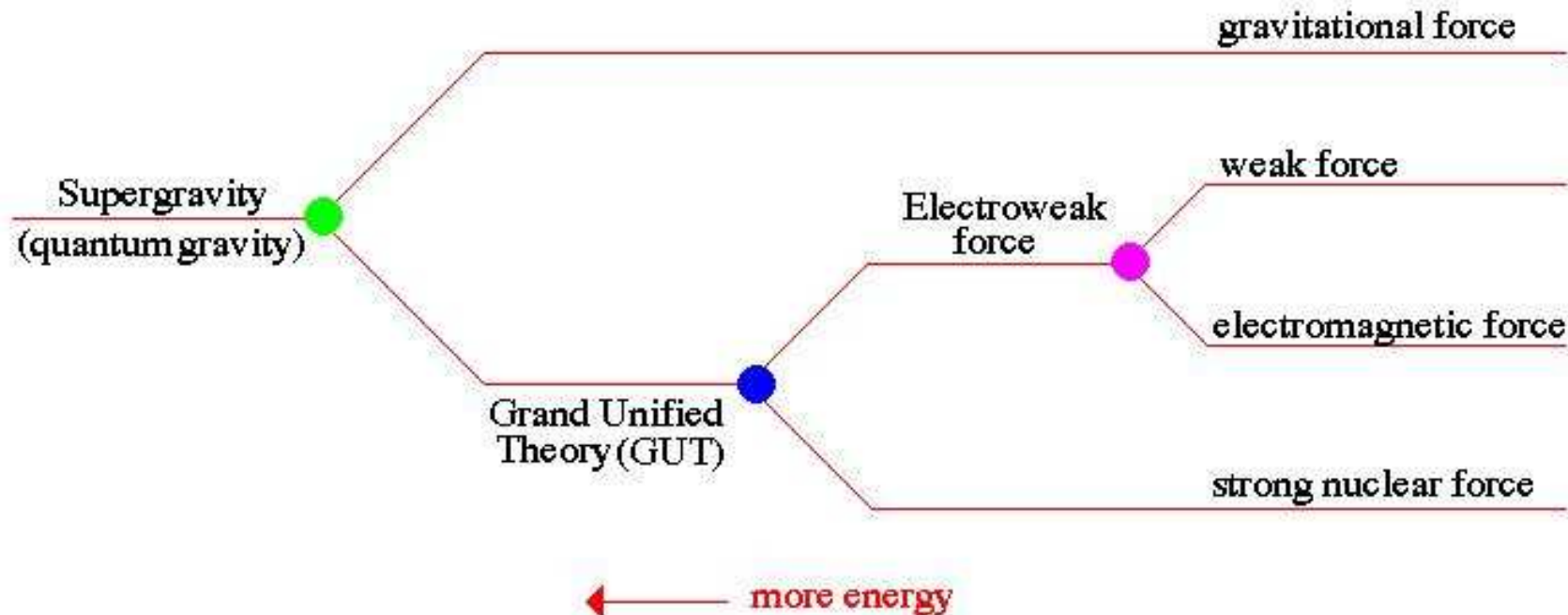


“Es gibt die starke Wechselwirkung, die schwache Kraft, die Gravitation und den Elektromagnetismus und dann ist da noch das gewisse Etwas, das ich spüre, wenn ich Sie sehe.”

# 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

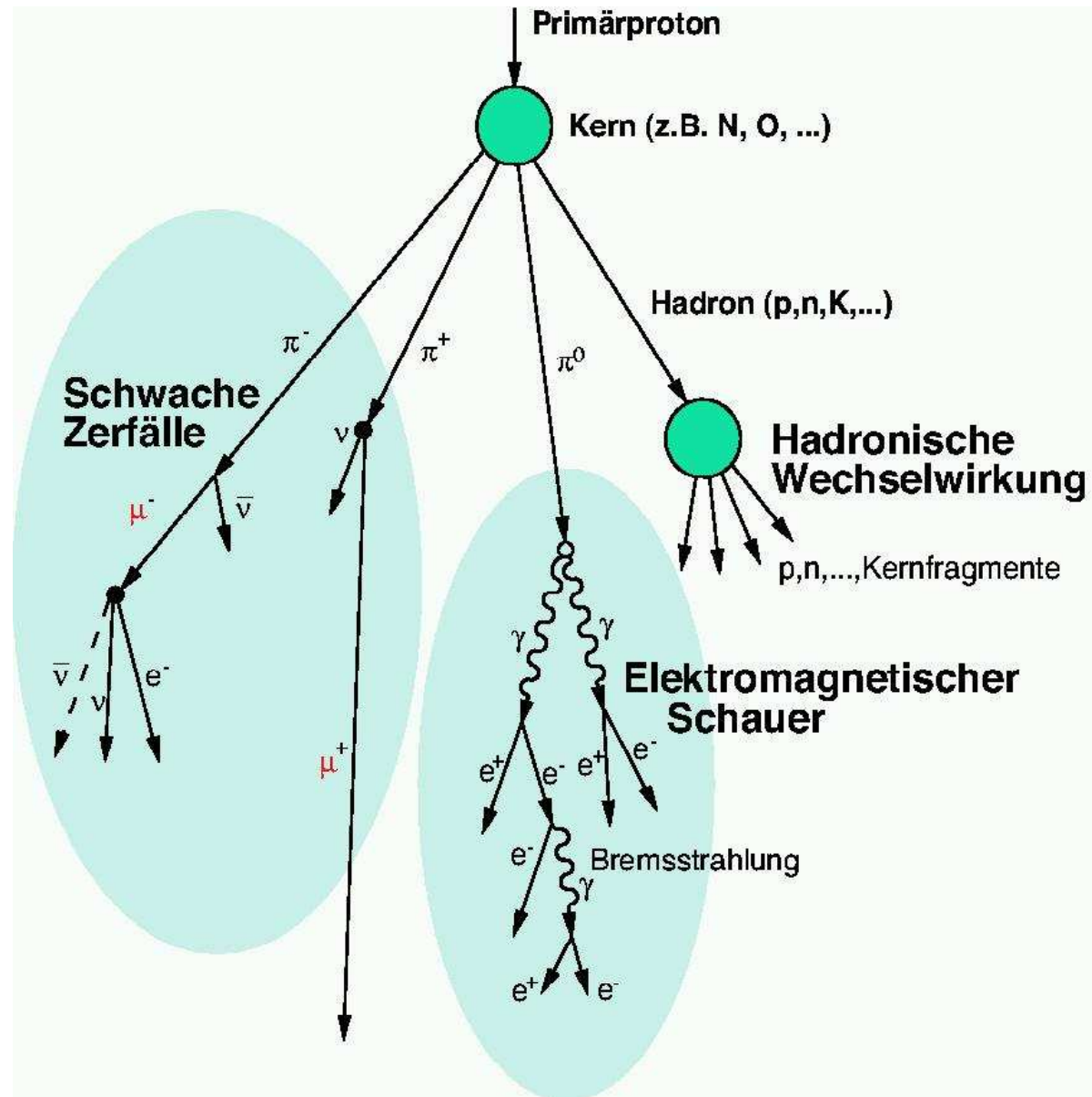


before the unification point, the forces are indistinguishable and have symmetry. After the unification point, the forces act differently and the symmetry is broken.

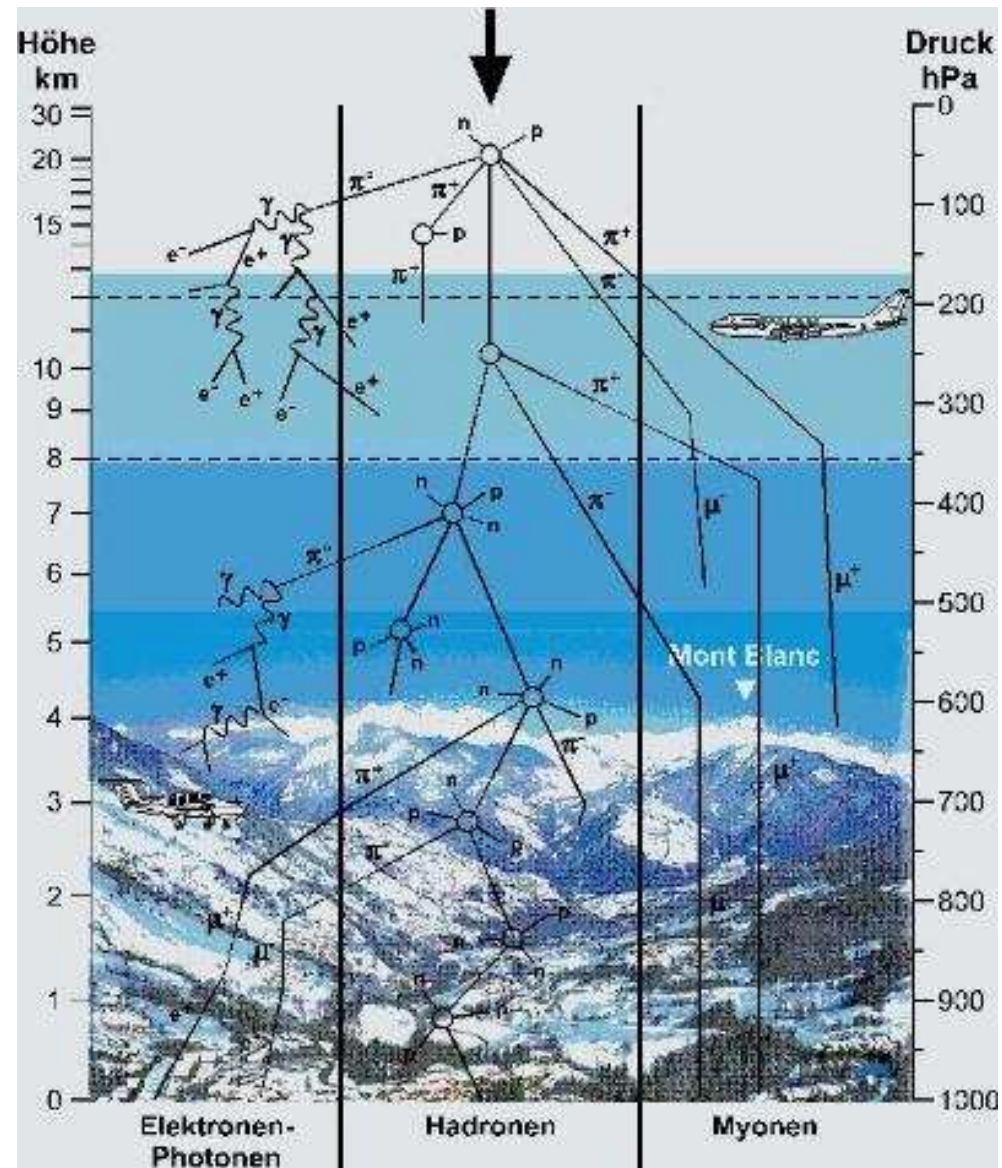
# Kosmische Strahlung



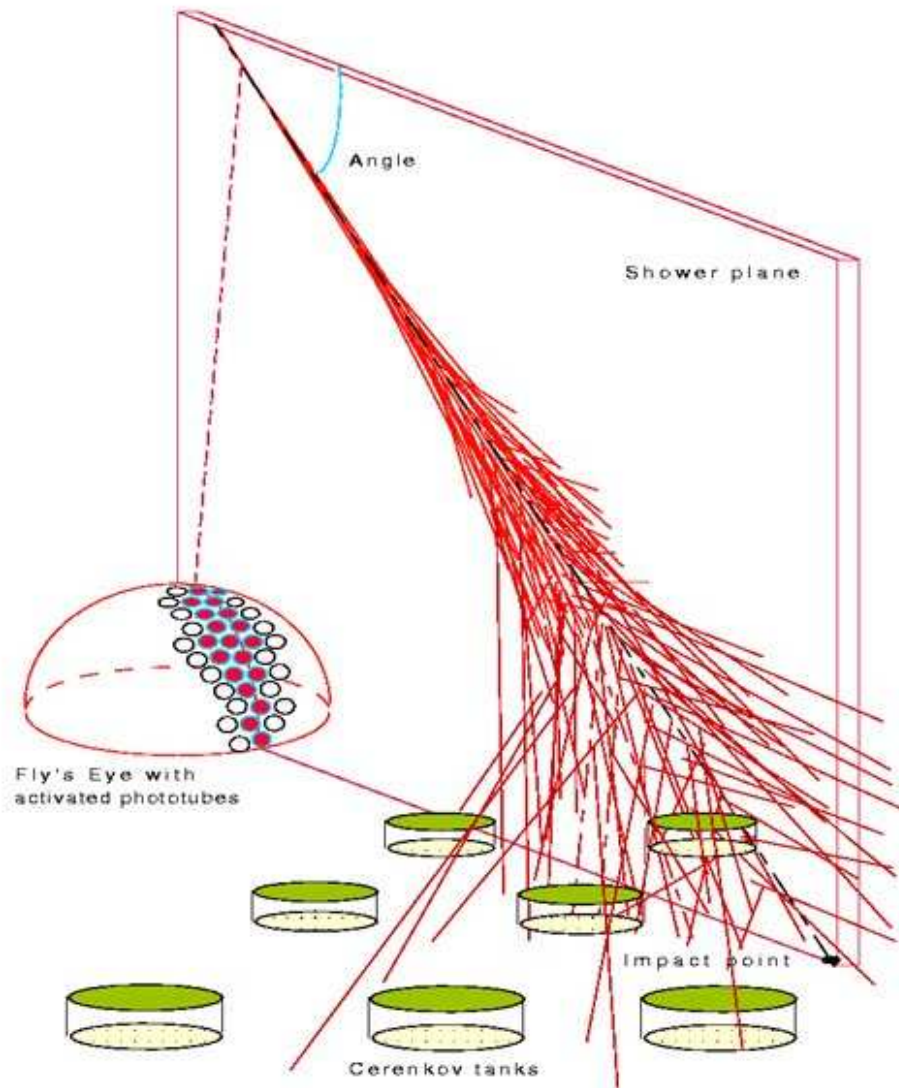
# Kosmische Strahlung



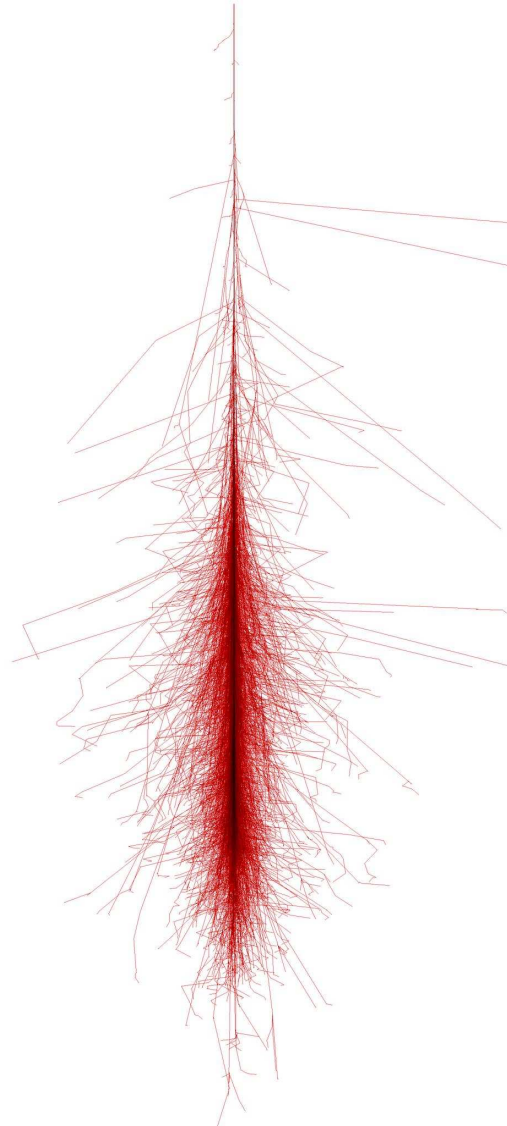
# Kosmische Strahlung



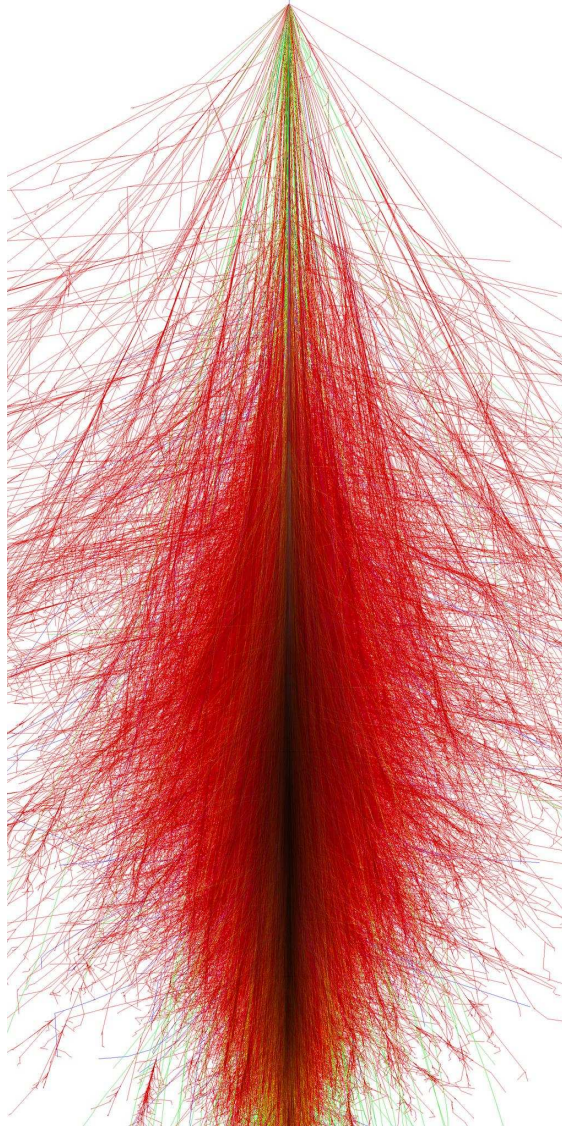
# Luftschauer



# Photon induzierter Schauer

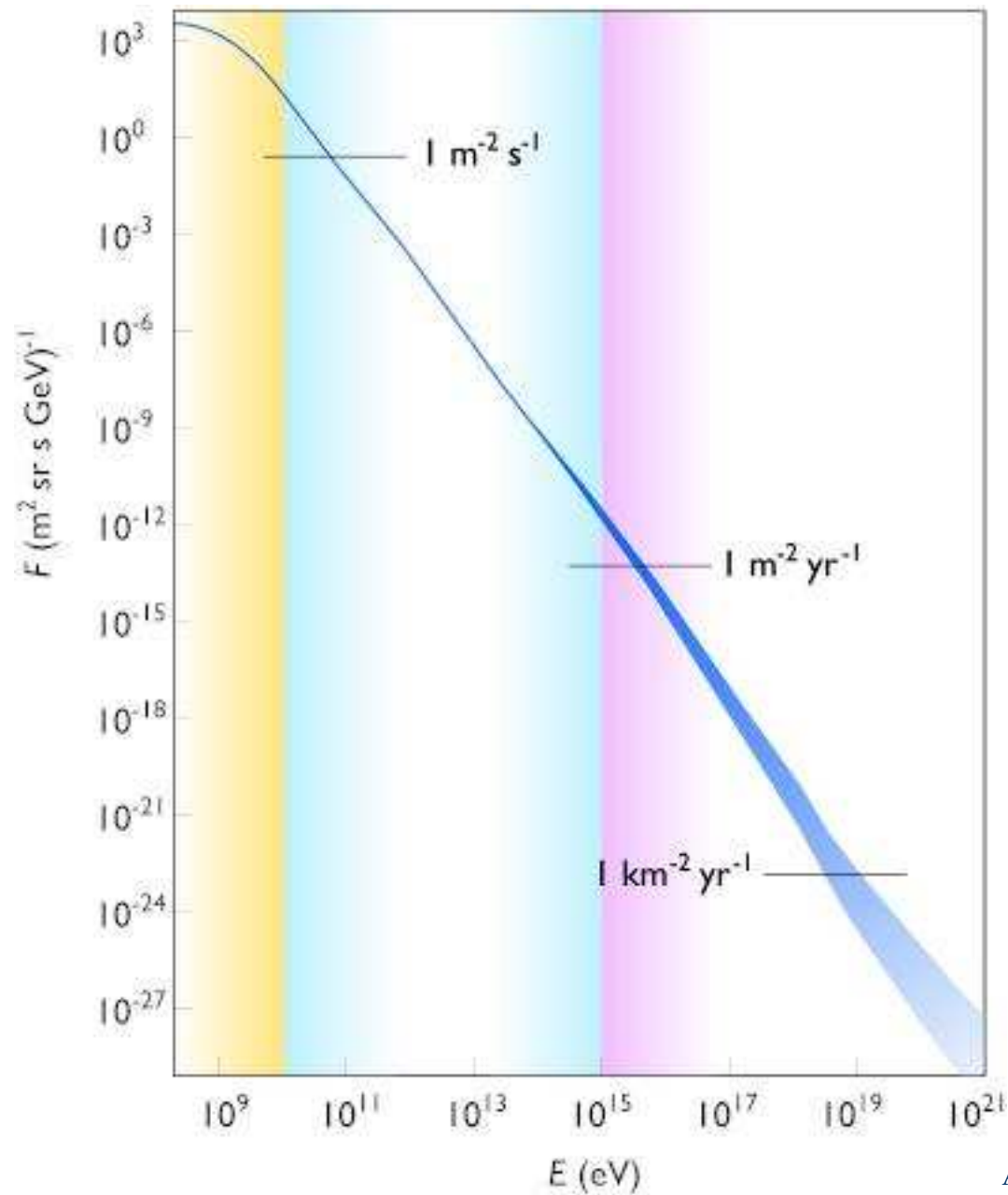


# Eisen induzierter Schauer

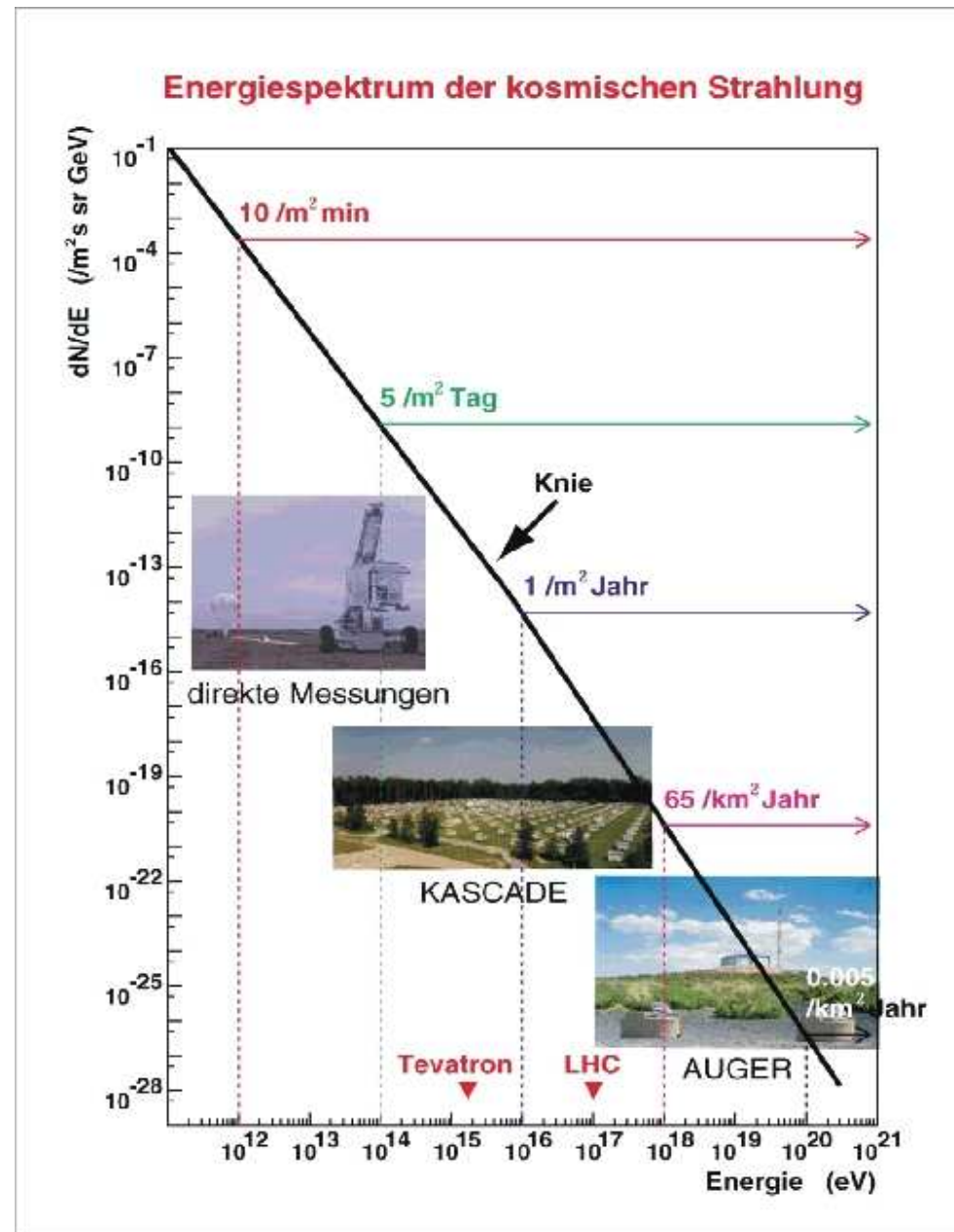




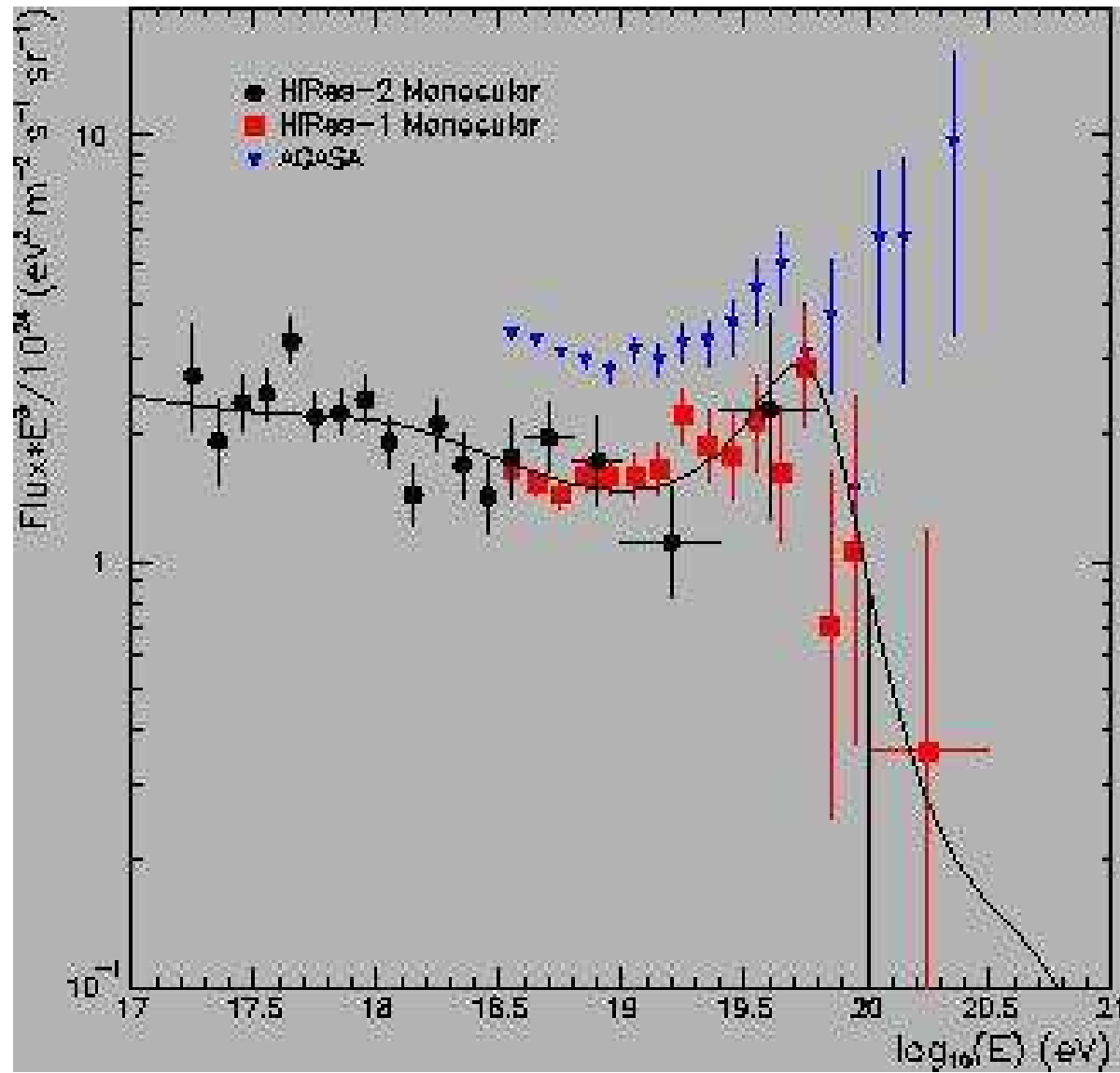
# Primärspektrum



# Primärspektrum

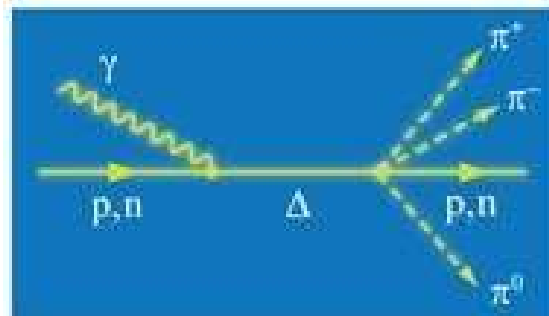


# Primärspektrum



# Greisen-Zatsepin-Kuzmin Cut-off

Energieverlust von hochenergetischen Protonen durch Wechselwirkungen mit der kosmologischen Hintergrundstrahlung



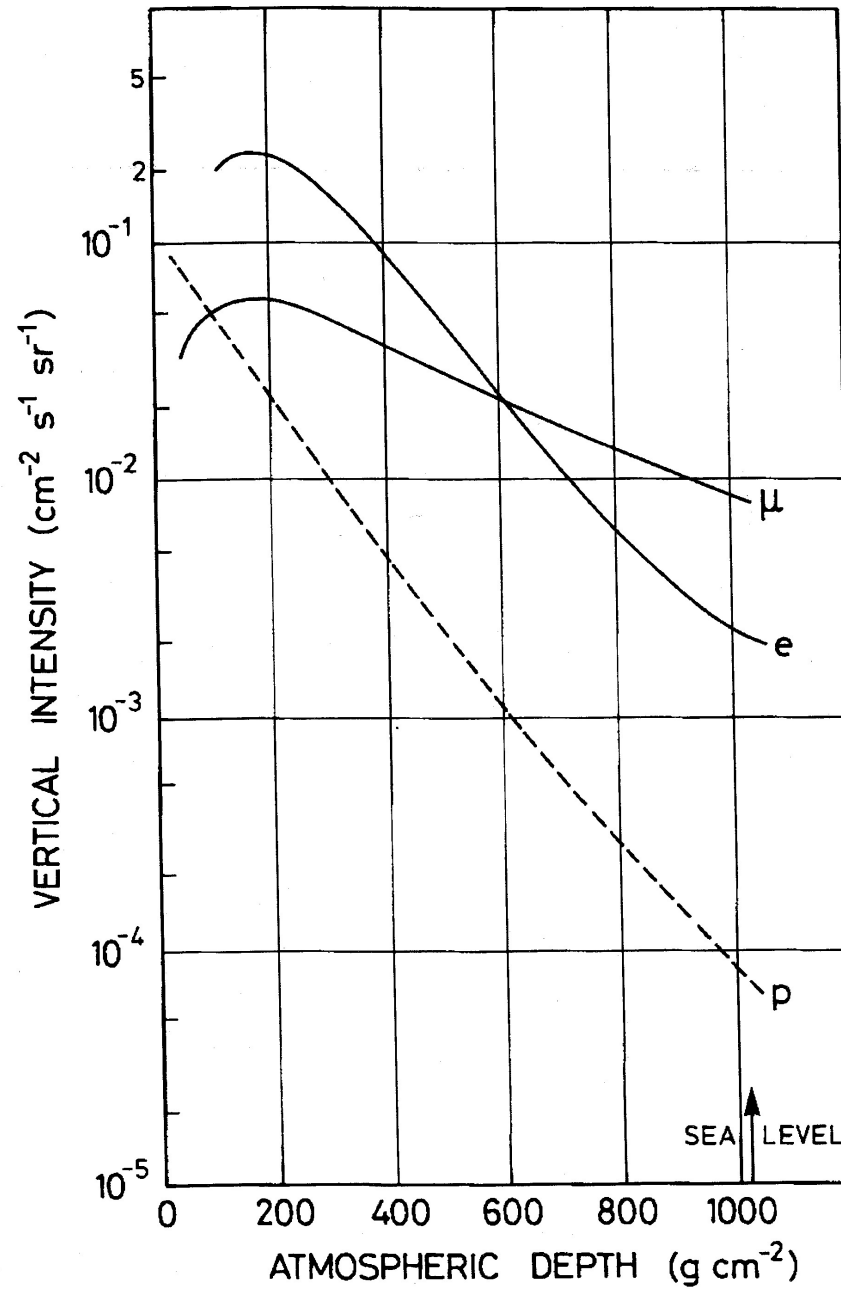
$$\gamma + p \rightarrow \Delta^+ \rightarrow p + \pi^0$$

oder

$$\gamma + n \rightarrow \Delta^0 \rightarrow n + \pi^+ + \pi^- + \pi^0$$

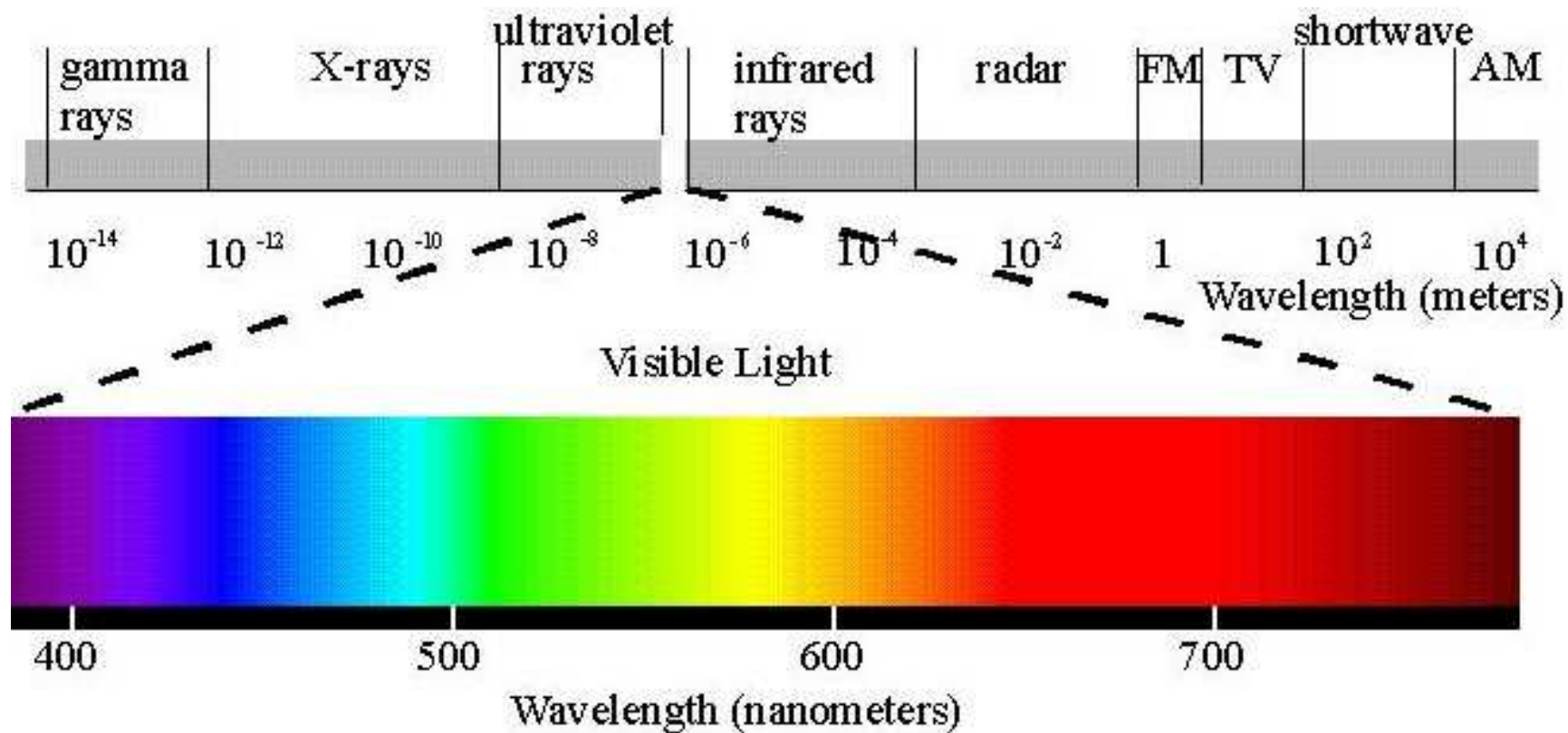
führt zum Abknicken des Primärspektrums

# Atmosphärische Komponenten

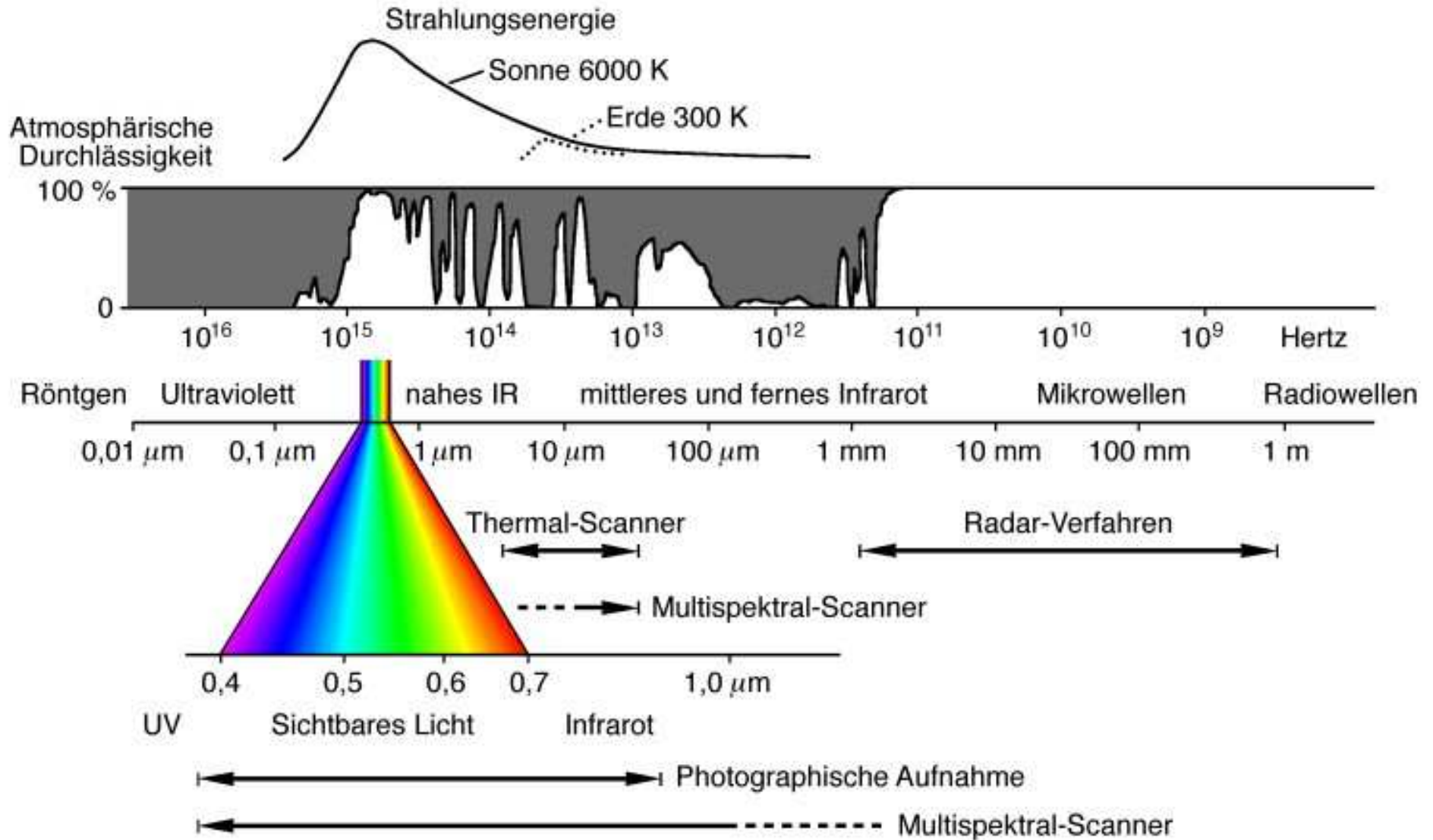


# Elektromagnetisches Spektrum

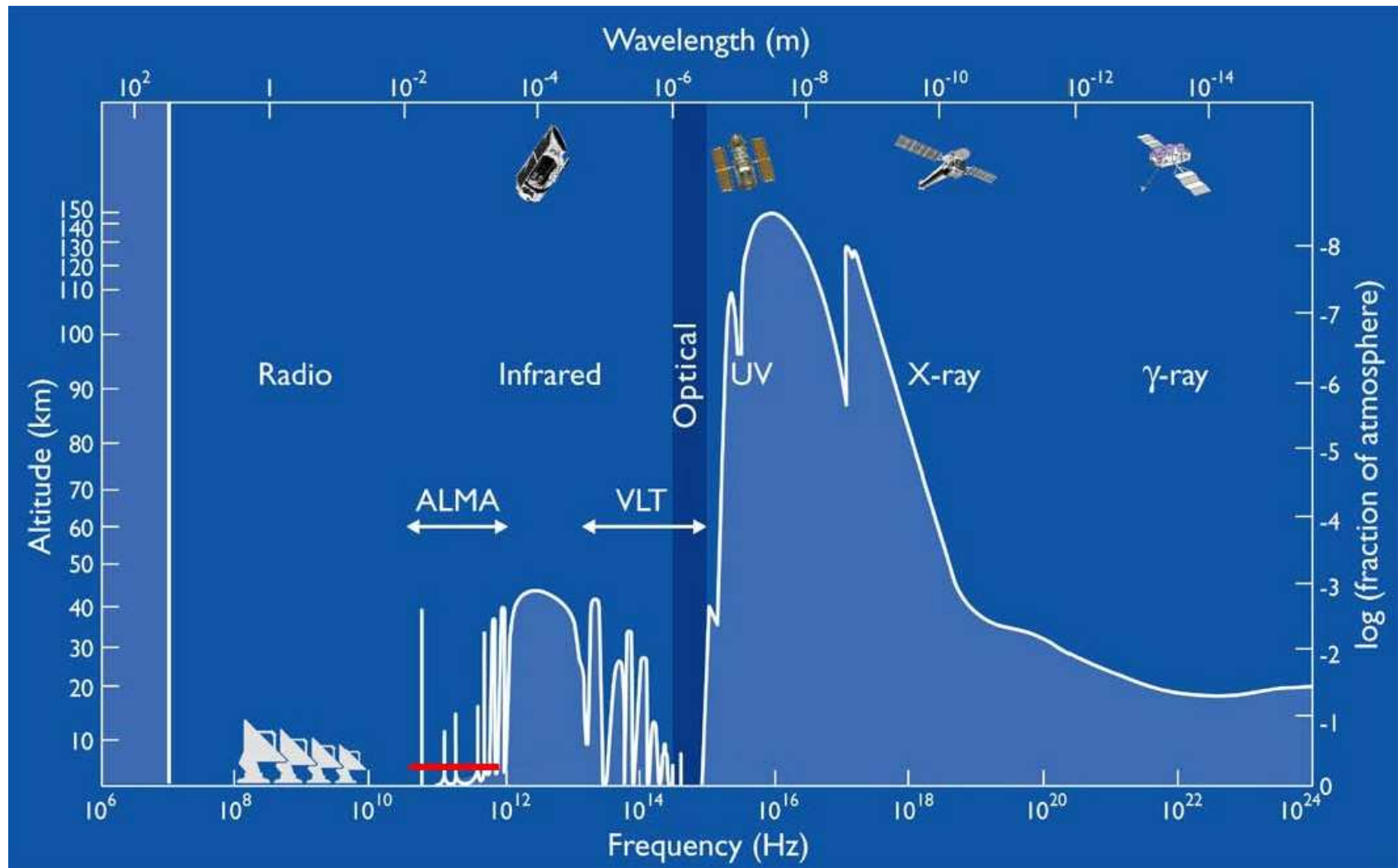
## Röntgenstrahlen und $\gamma$ -Strahlen



# Elektromagnetisches Spektrum

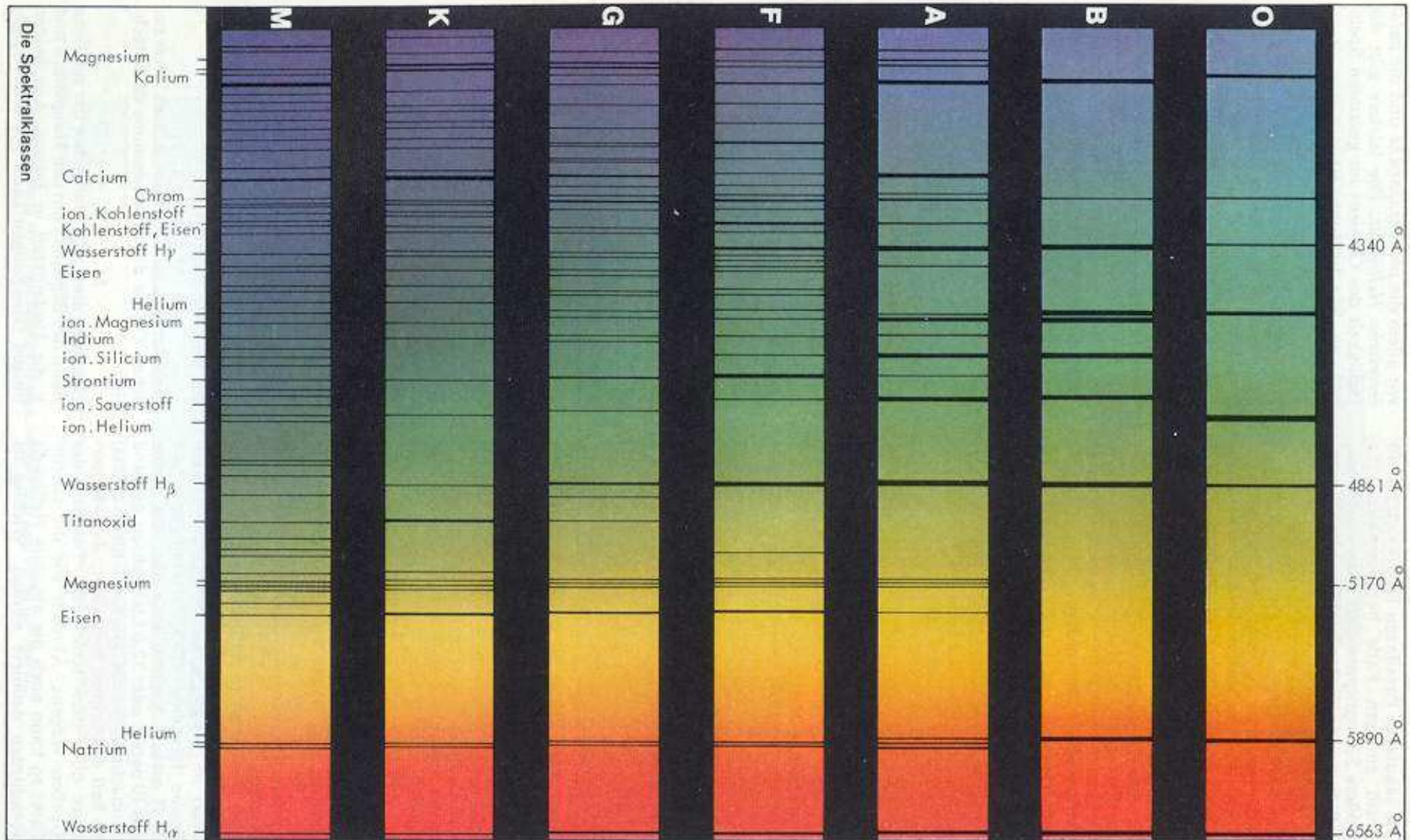


# Fenster zum All





# Fraunhofer Spektren

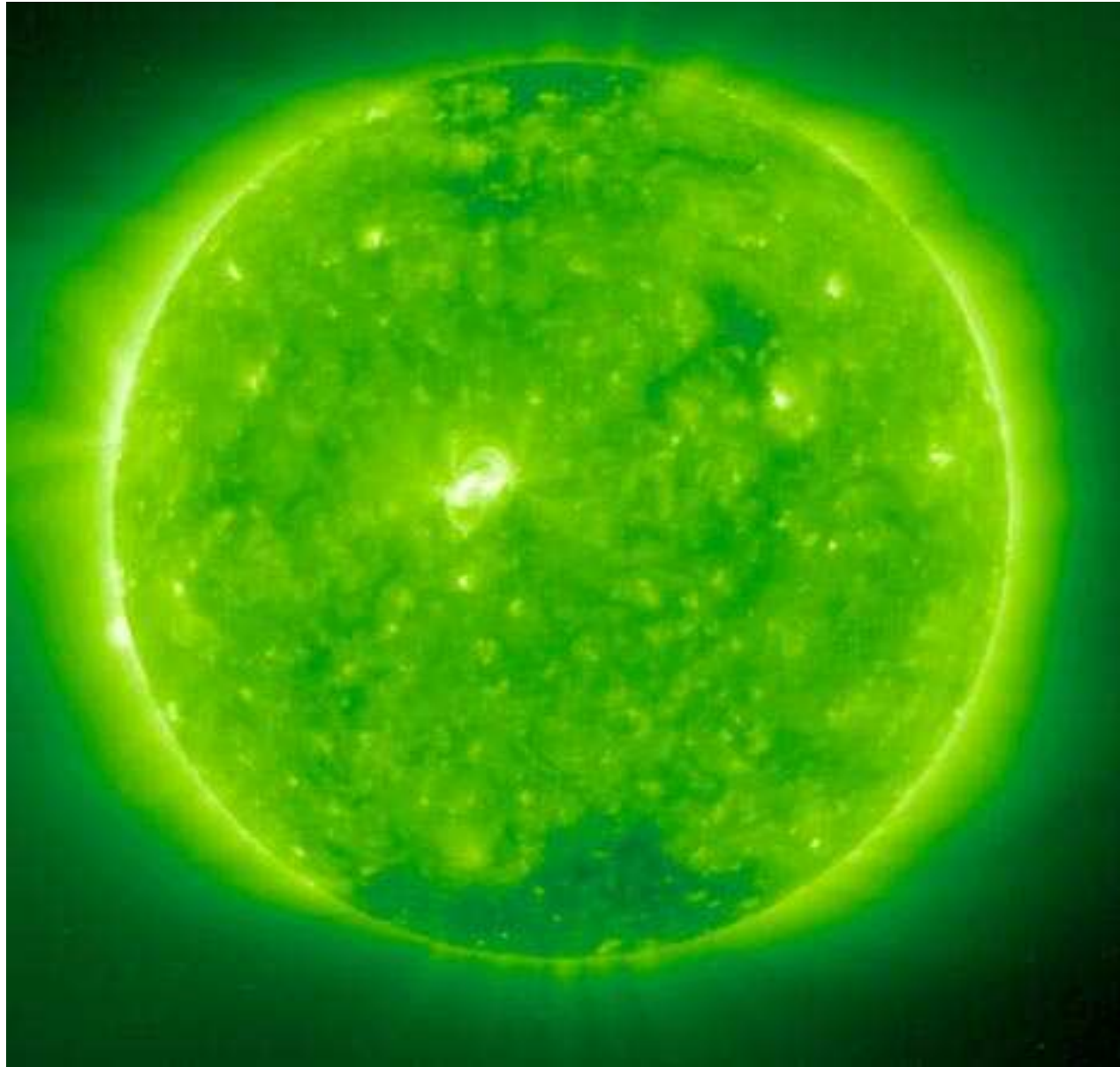


150 Aufbau der Sterne / Zustandsgrößen II

# Fraunhofer Spektrum



# Röntgenstrahlen von der Sonne



# Rayleigh-Streuung



# Wie entsteht Röntgenstrahlung?

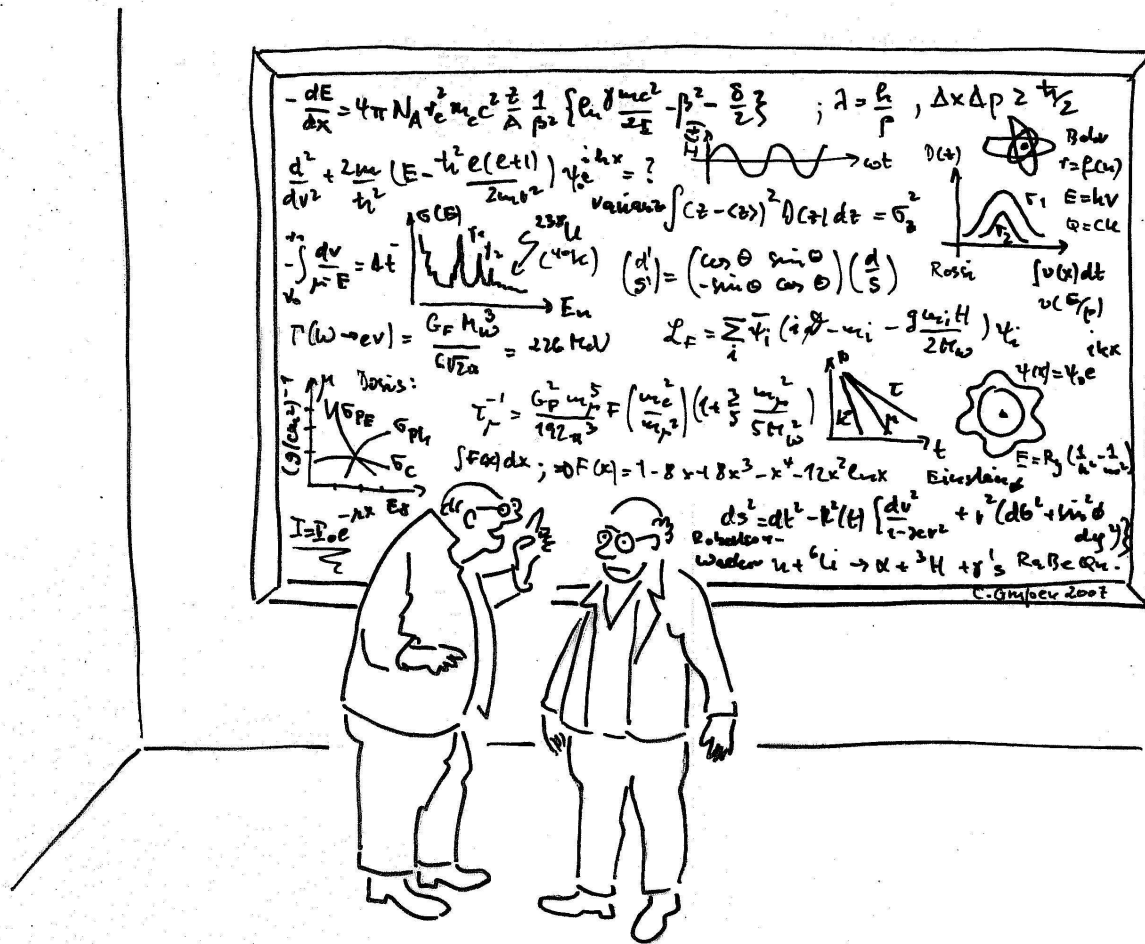
Es gibt verschiedene Mechanismen zur Erzeugung von Röntgenstrahlung

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

# Planck'sches Strahlungsgesetz

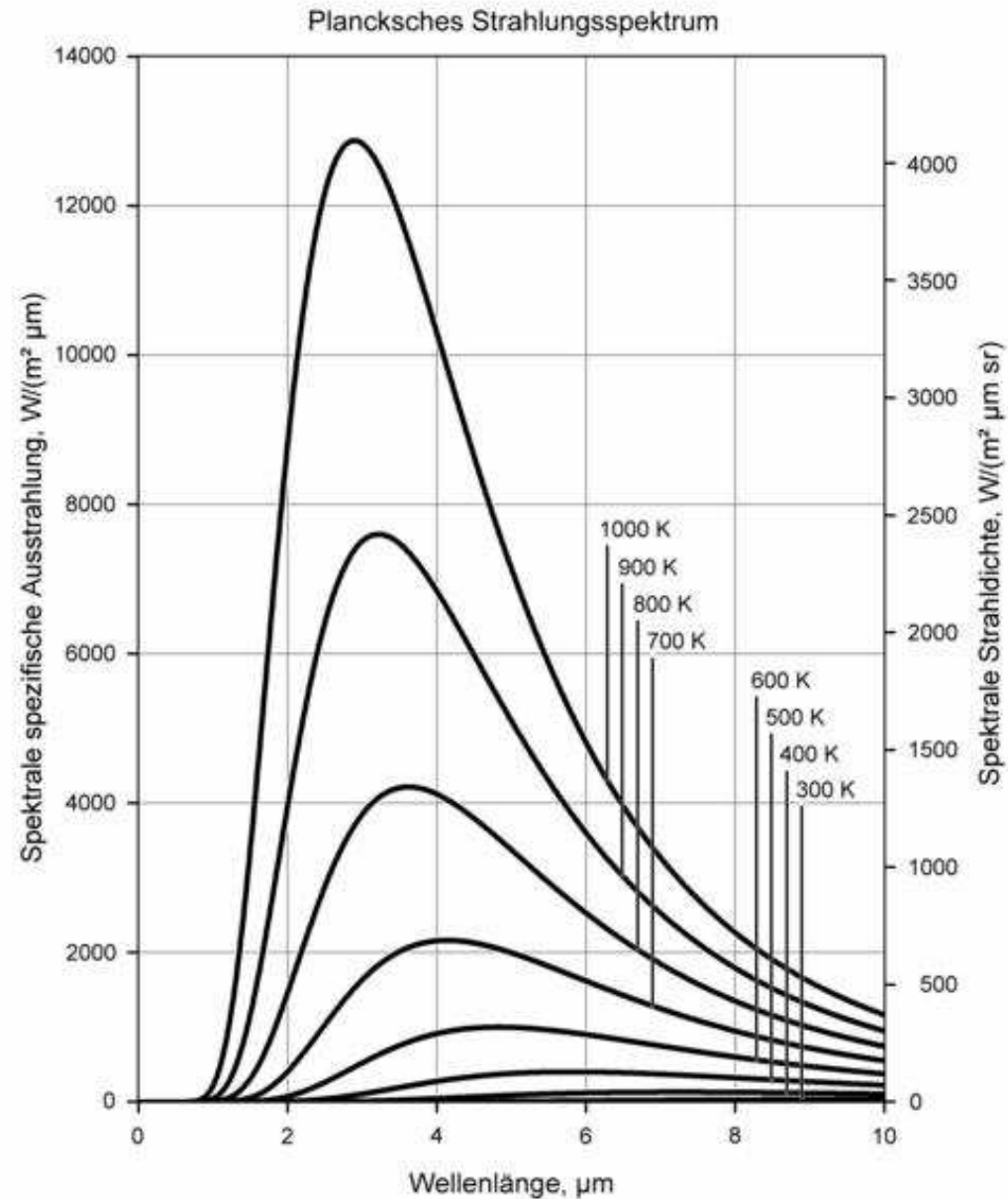
- $P_\lambda(\lambda, T) = \frac{2\pi hc^2}{\lambda^5} \cdot \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1}$
- $P_\lambda(\lambda, T)$  spektrale spezifische Ausstrahlung
- $h$  Planck'sches Wirkungsquantum
- $c$  Lichtgeschwindigkeit
- $k$  Boltzmann-Konstante
- $T$  absolute Temperatur der Strahlerfläche,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

# Formelvereinfachung



“Dies ist die Version für unsere Anfänger!”

# Planck-Verteilung

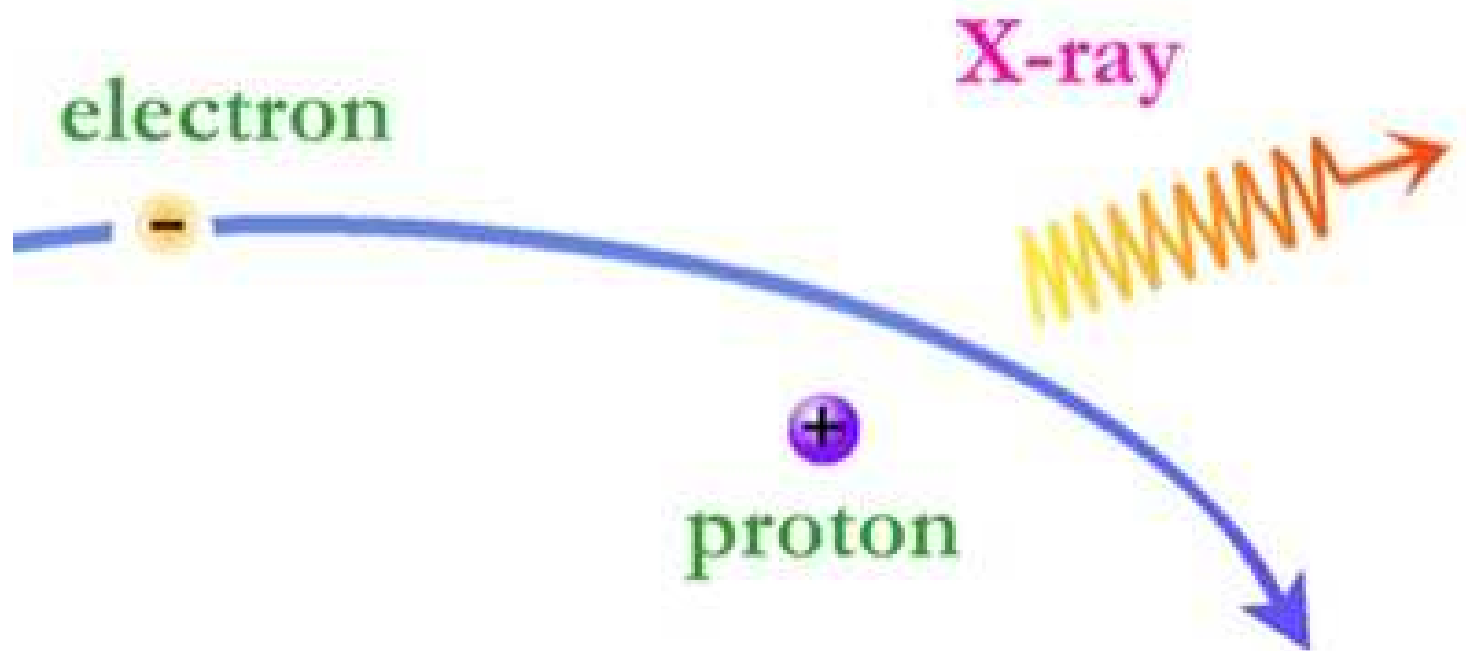




# Wien'sches Verschiebungsgesetz

- → Wiensches Verschiebungsgesetz
- $\lambda_{\max} = \frac{2897,8 \mu m K}{T}$
- $\lambda_{\max}$  Wellenlänge, bei der die größte Strahlungsintensität auftritt, in  $\mu m$
- 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

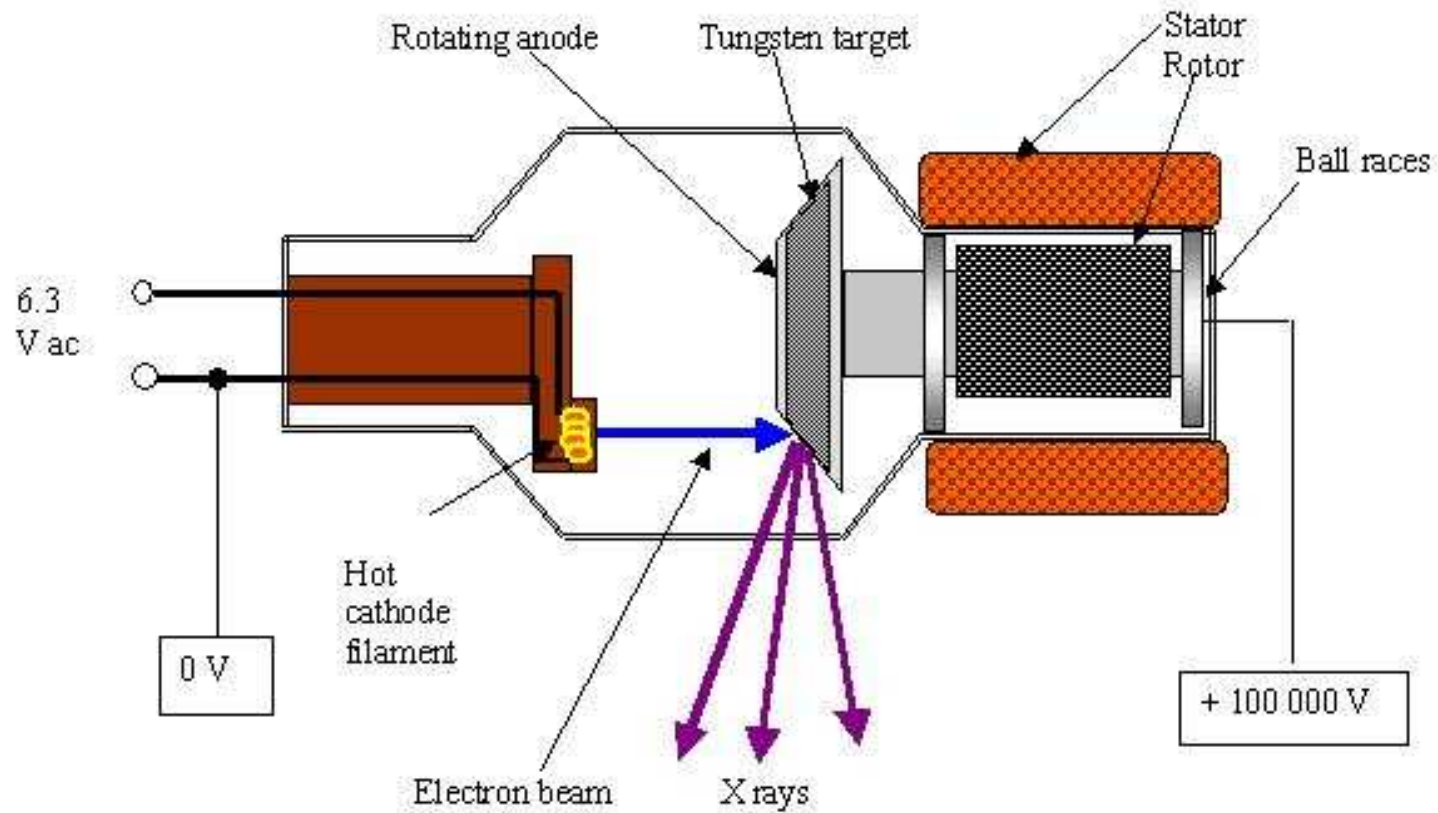
# Bremsstrahlung

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.

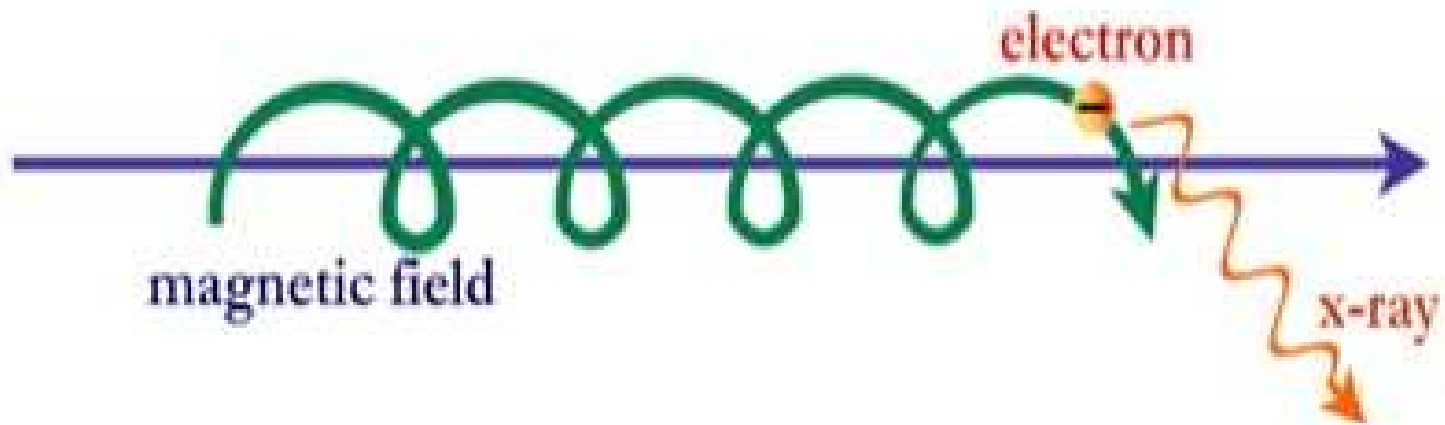
Die Abstrahlung  $P$  von beschleunigten Elektronen ist

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

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





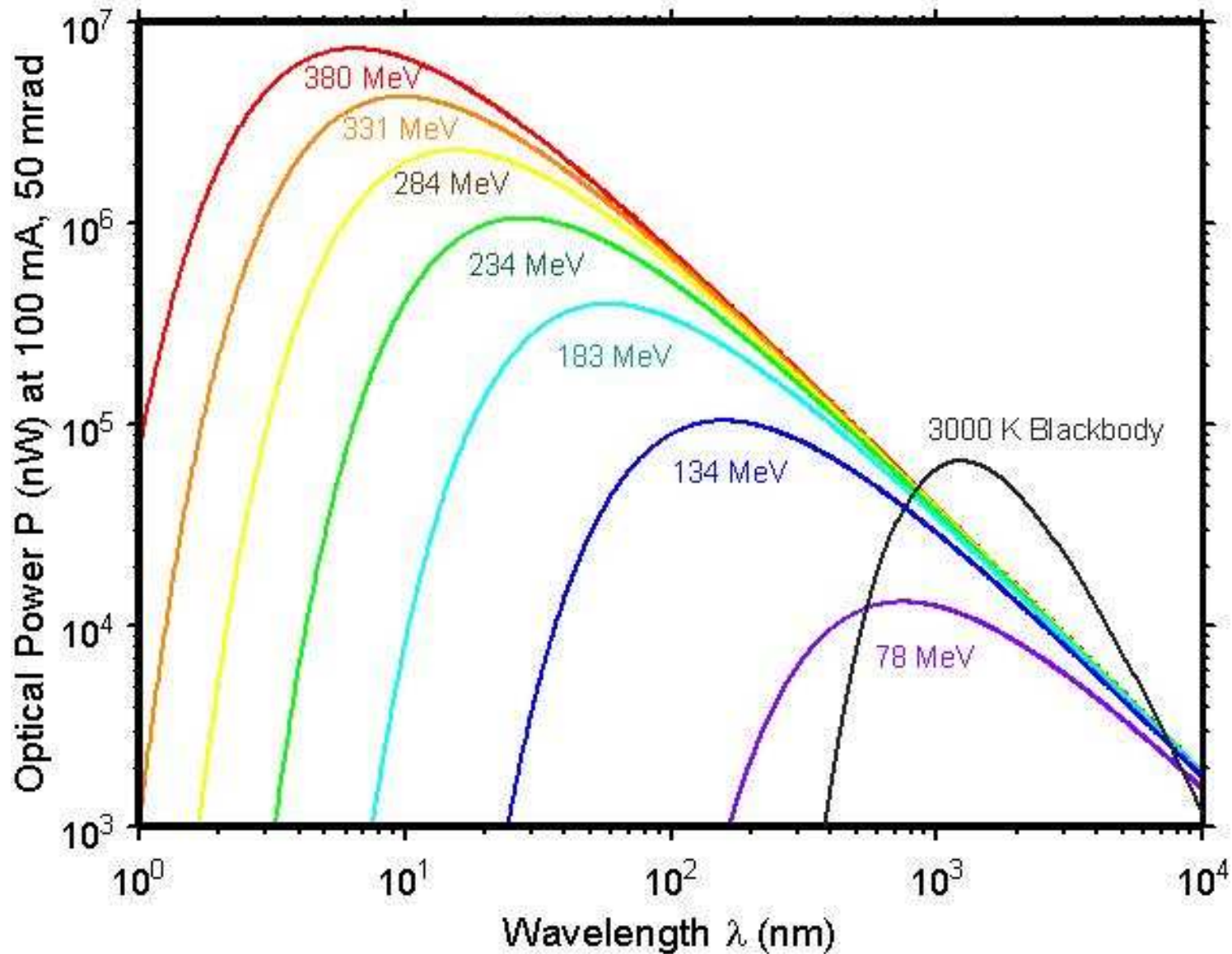
# Synchrotronstrahlung

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

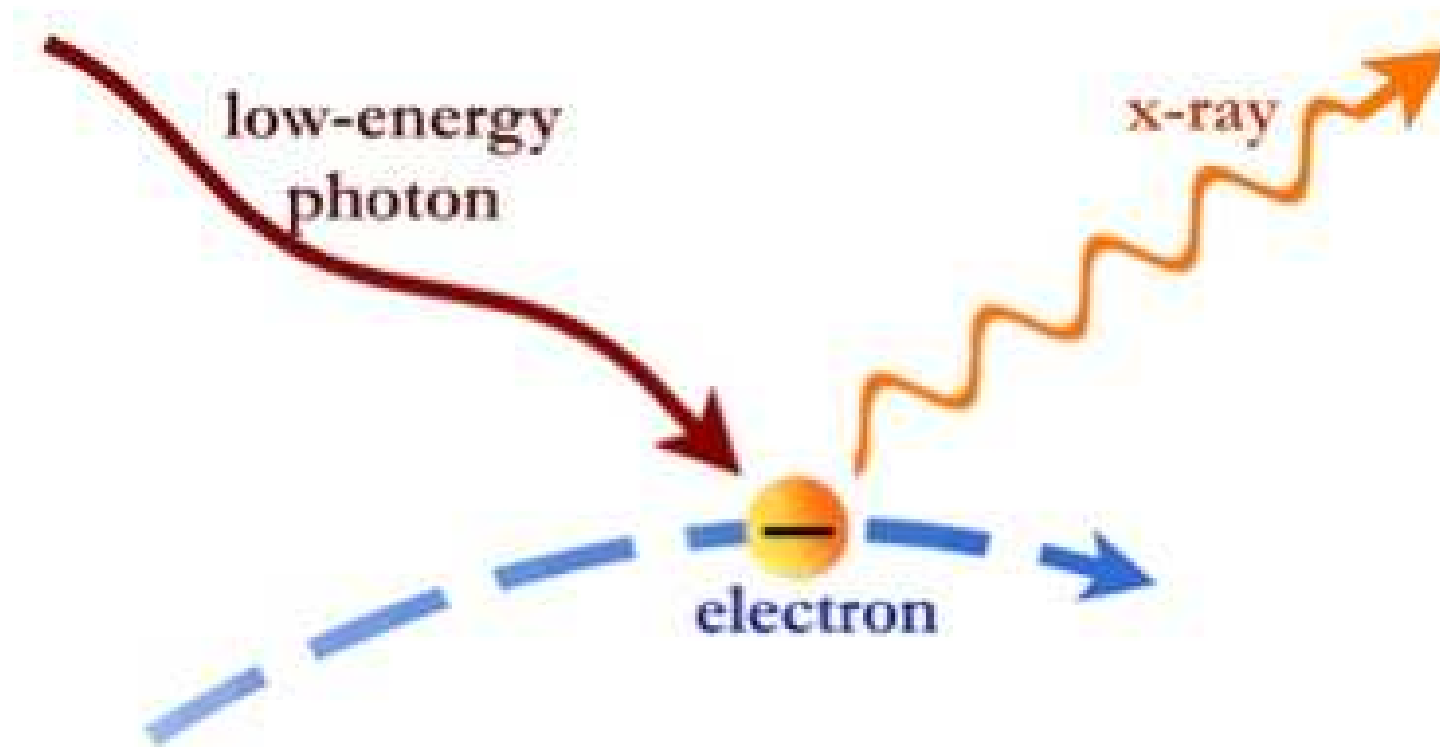
Die Synchrotronphotonen haben ein breites Frequenzspektrum, mit einer charakteristischen Energie  $\sim \gamma^3$

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

# Synchrotronpektrum



# Inverse Compton-Streuung



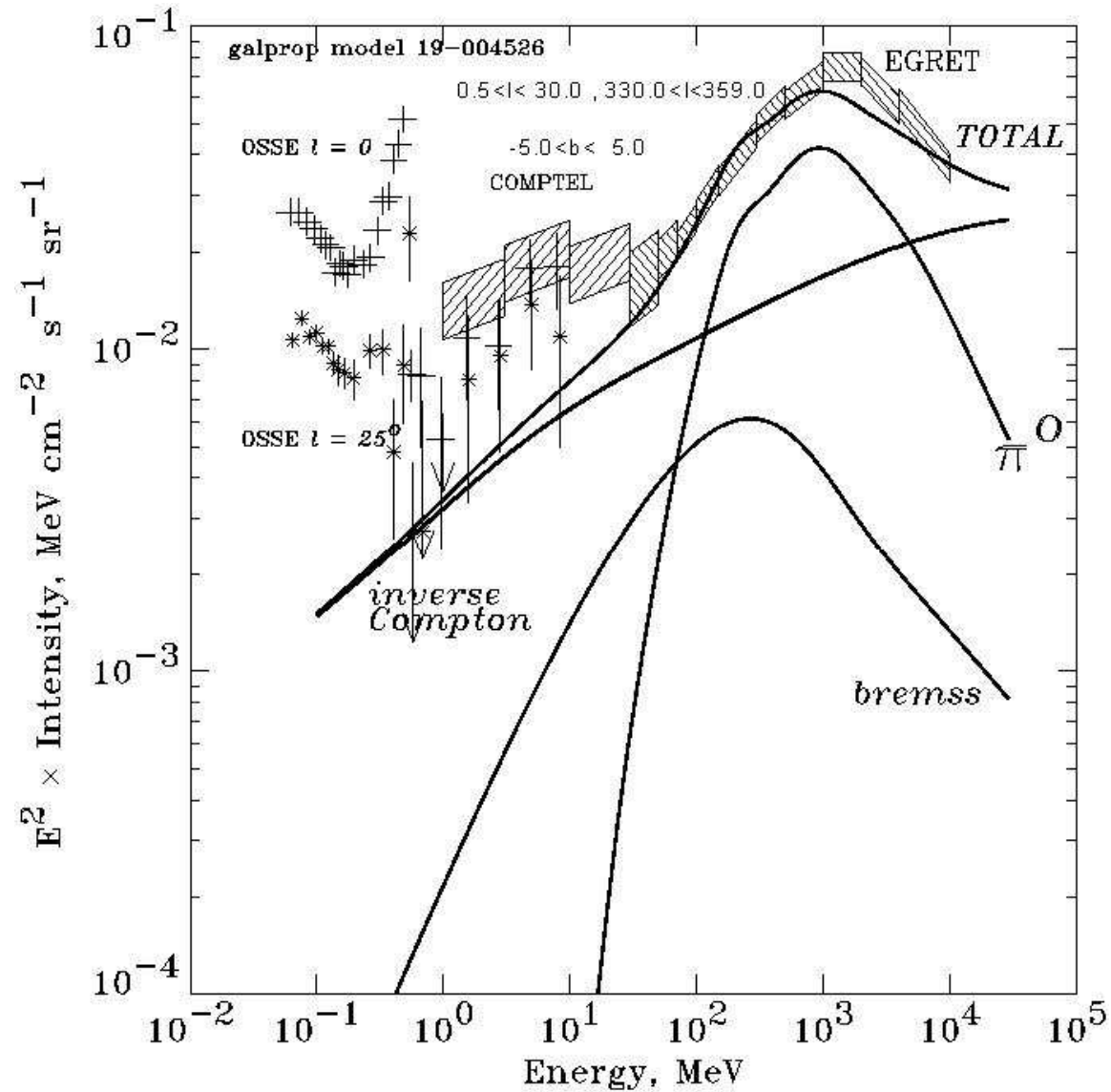
# Inverse Compton-Streuung

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

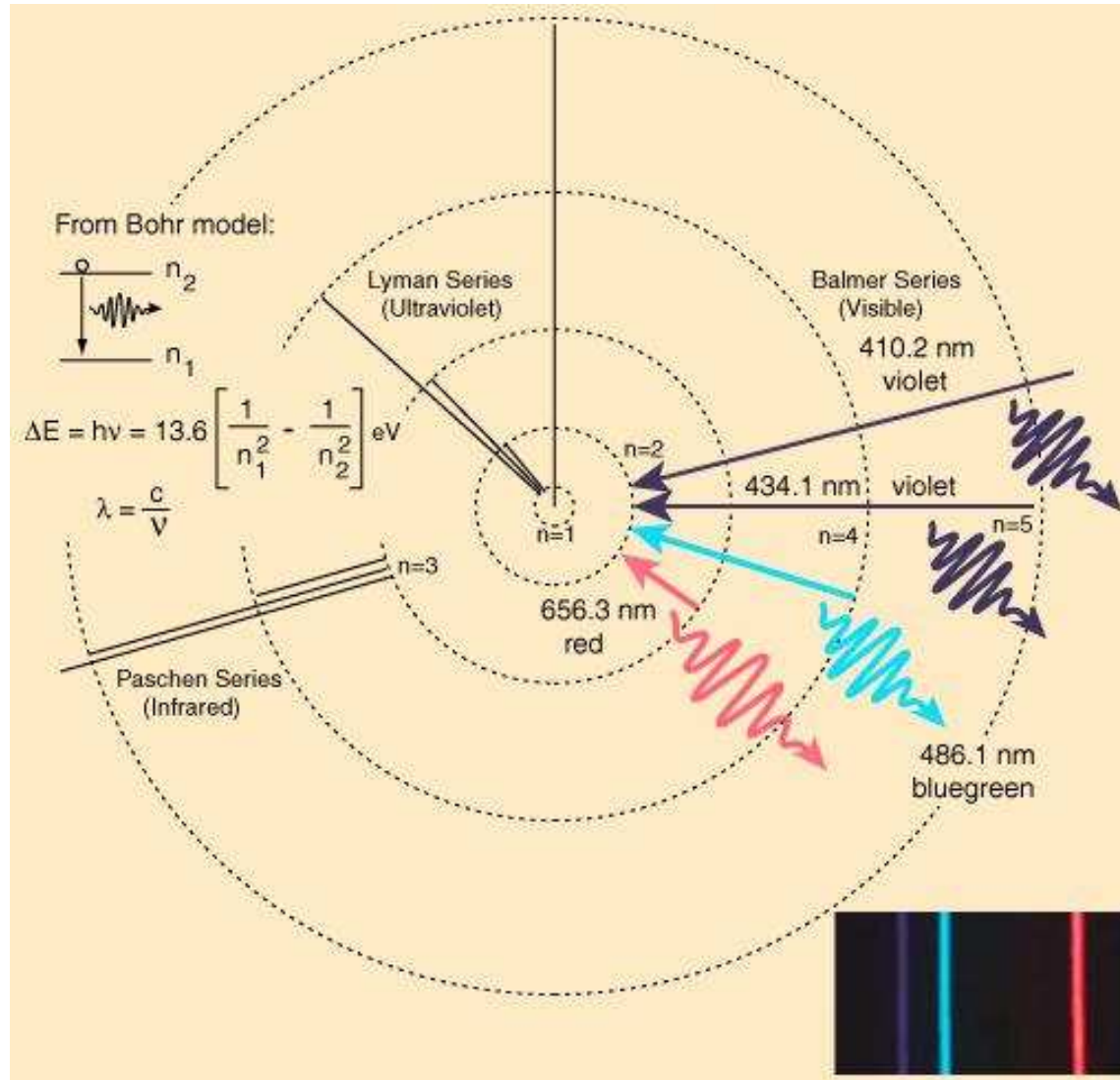
Der Wirkungsquerschnitt für die inverse Compton-Streuung wächst nur schwach mit der Energie ( $\sim \ln E / mc^2$ ).

Der Wirkungsquerschnitt hängt ab von der Photonendichte und Elektronendichte.

# Photonenspektren



# Röntgenspektren



# Charakteristische Röntgenstrahlung

## Anregung von Atomen

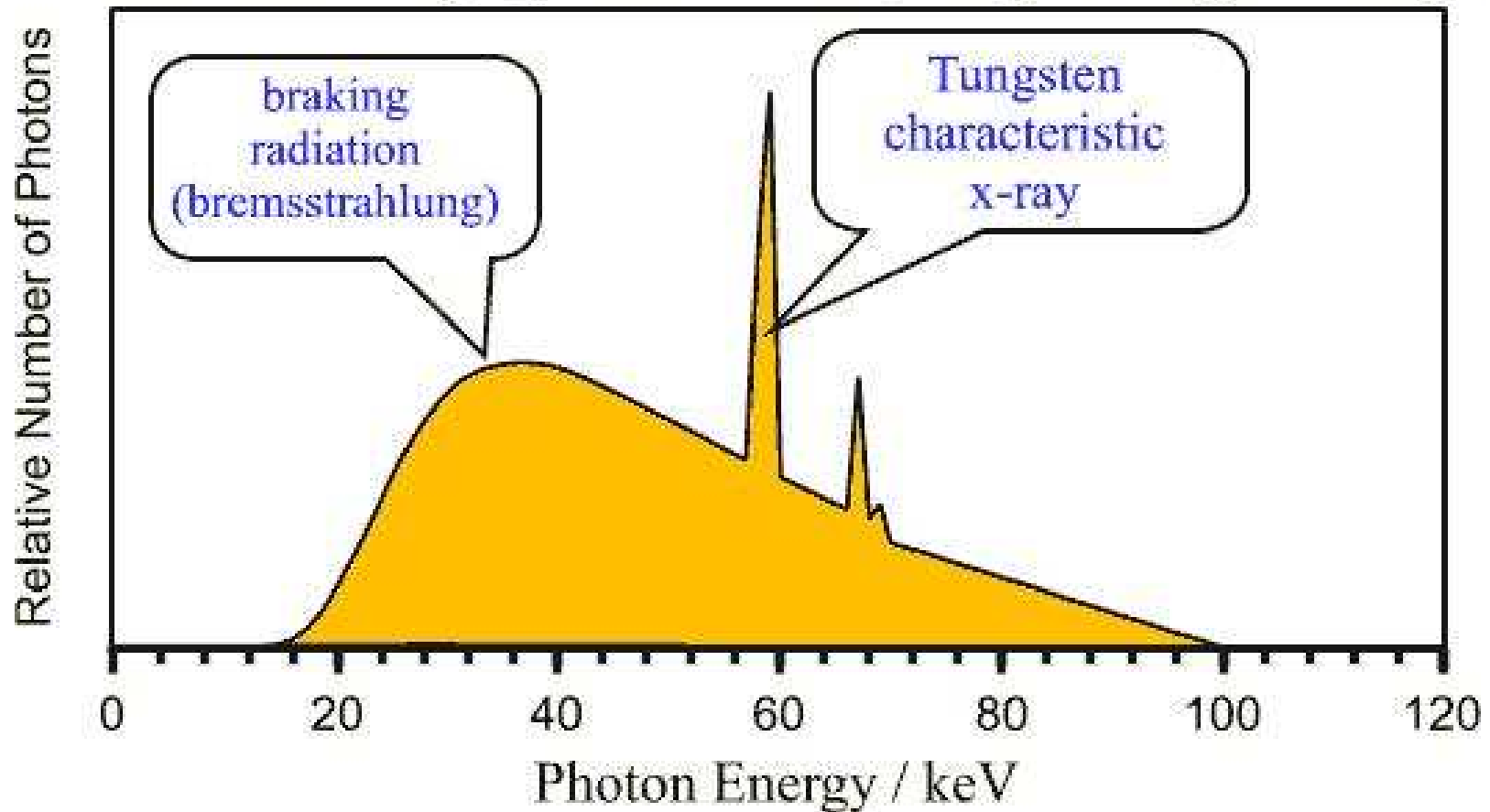
$$|E_a - E_e| = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

wobei

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

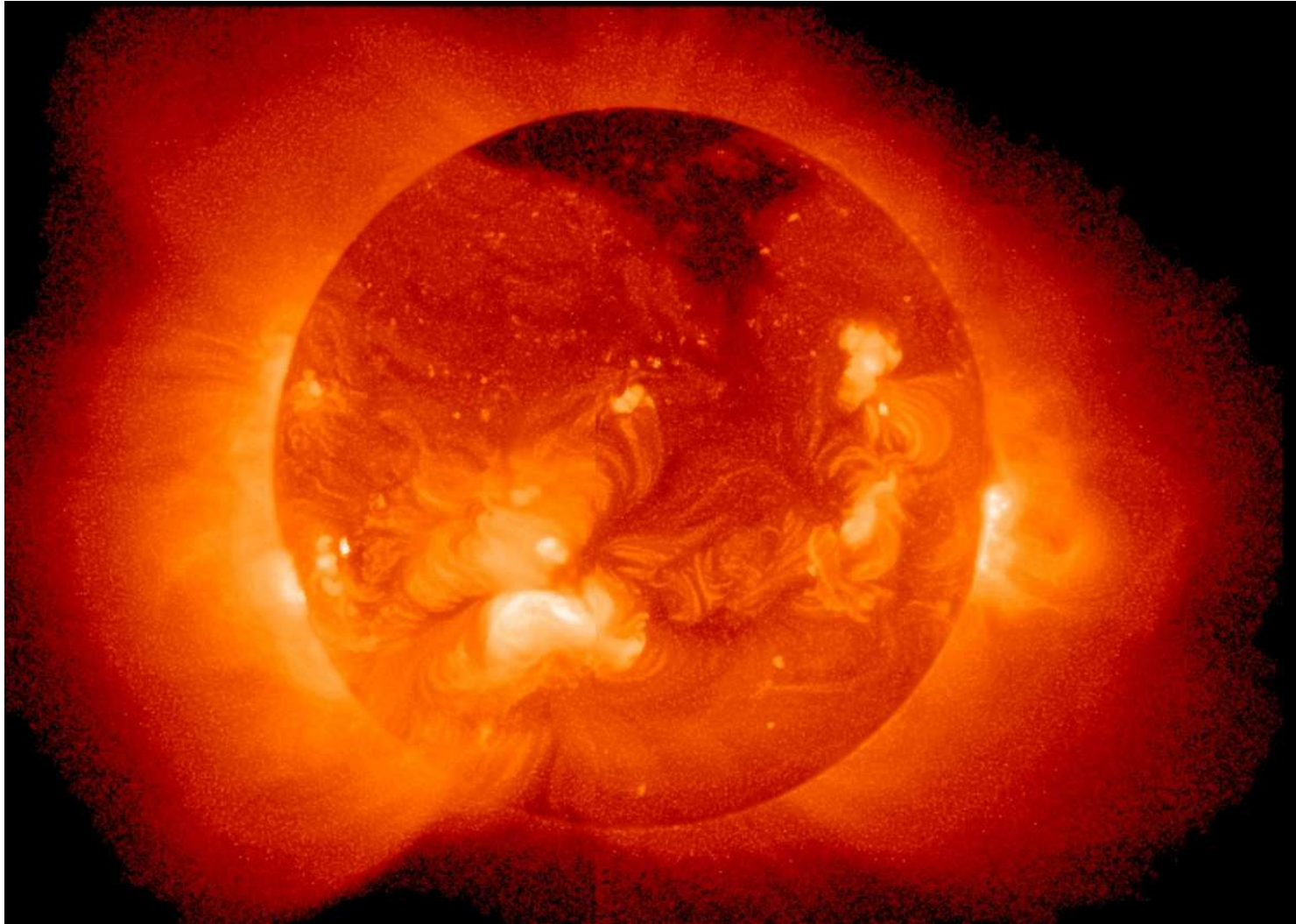
# Röntgenspektren

Calculated X-ray Spectrum 100kV, Tungsten target  $13^\circ$  angle

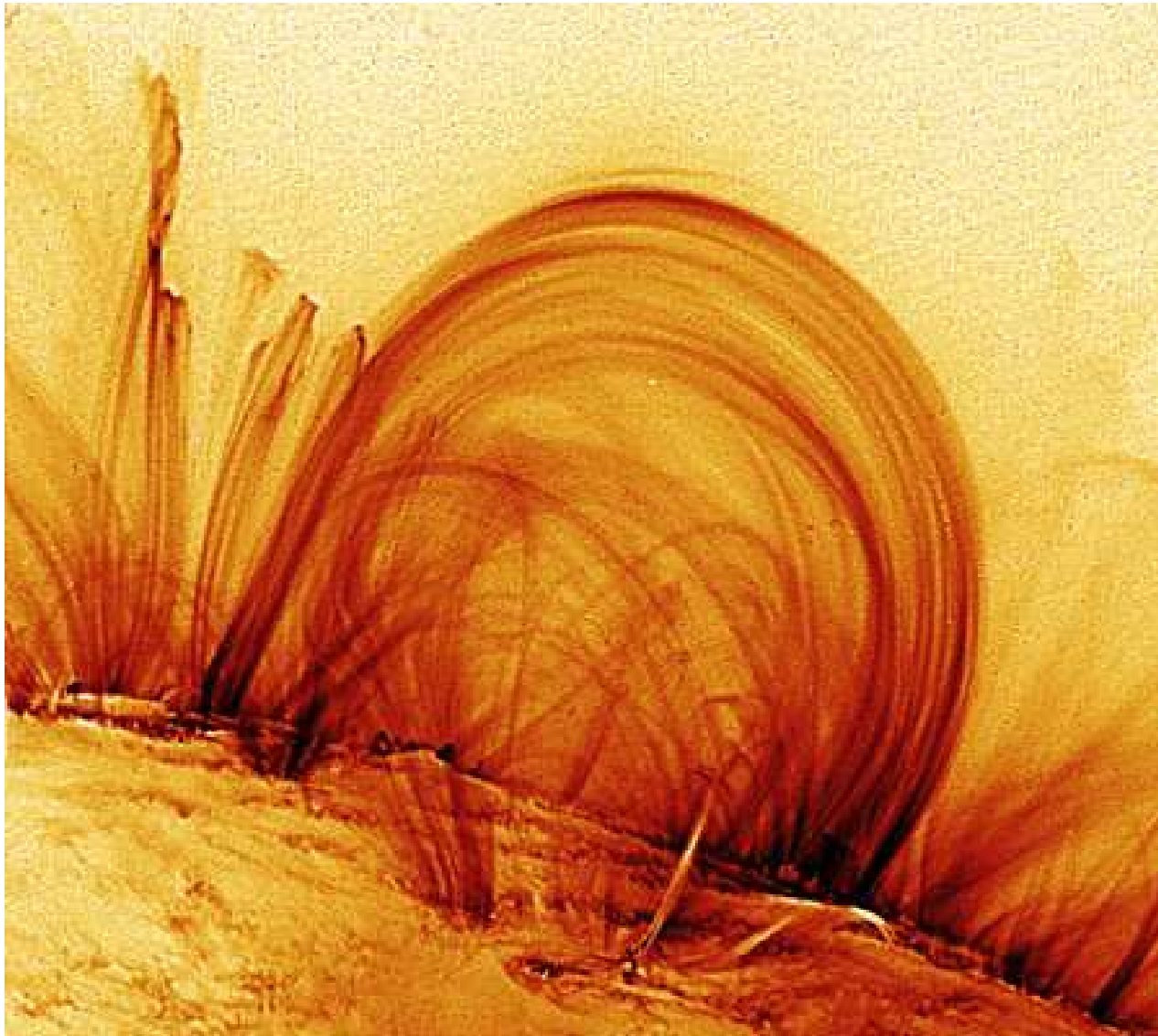




# Röntgenstrahlen von der Sonne

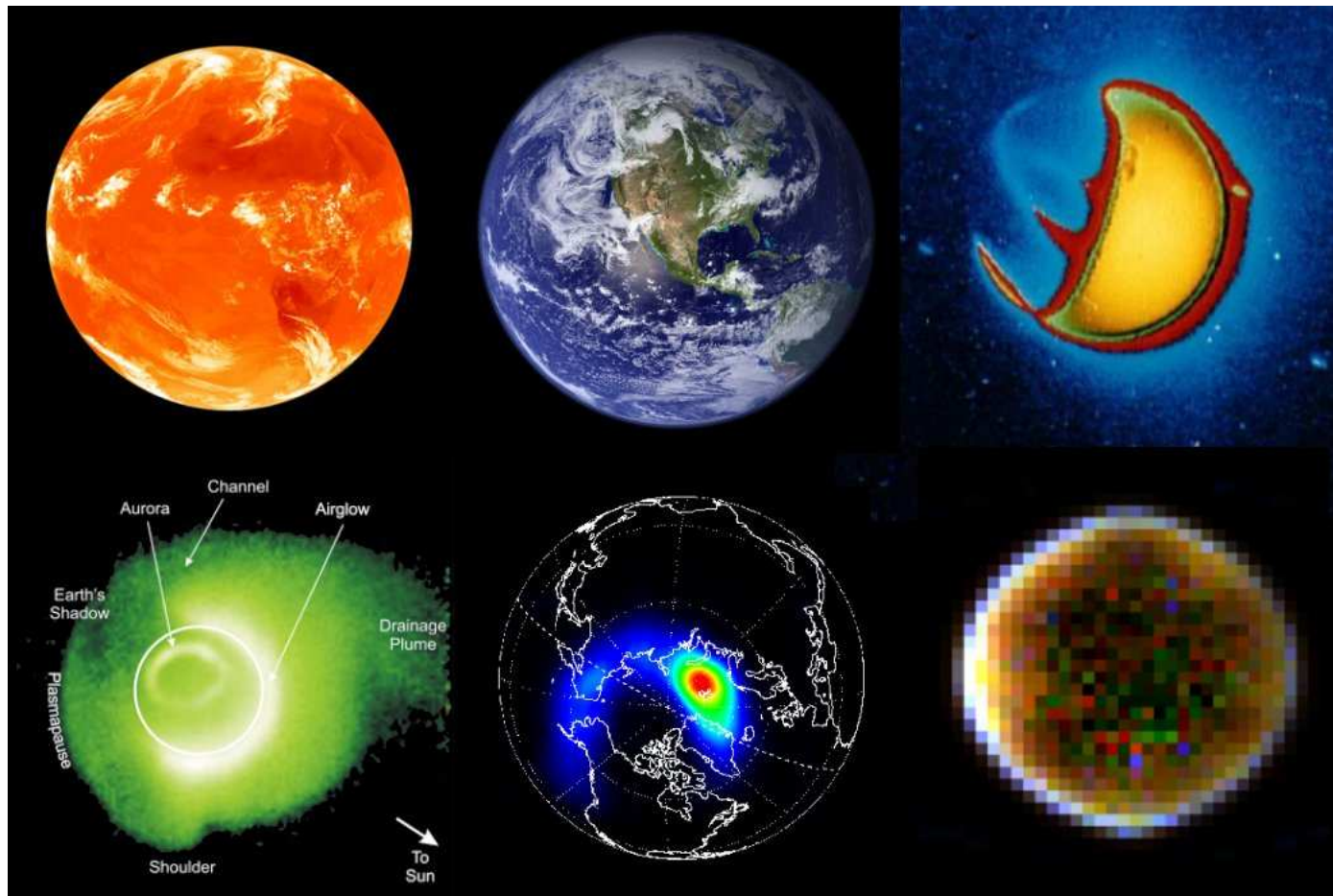


# Röntgenstrahlen von der Sonne



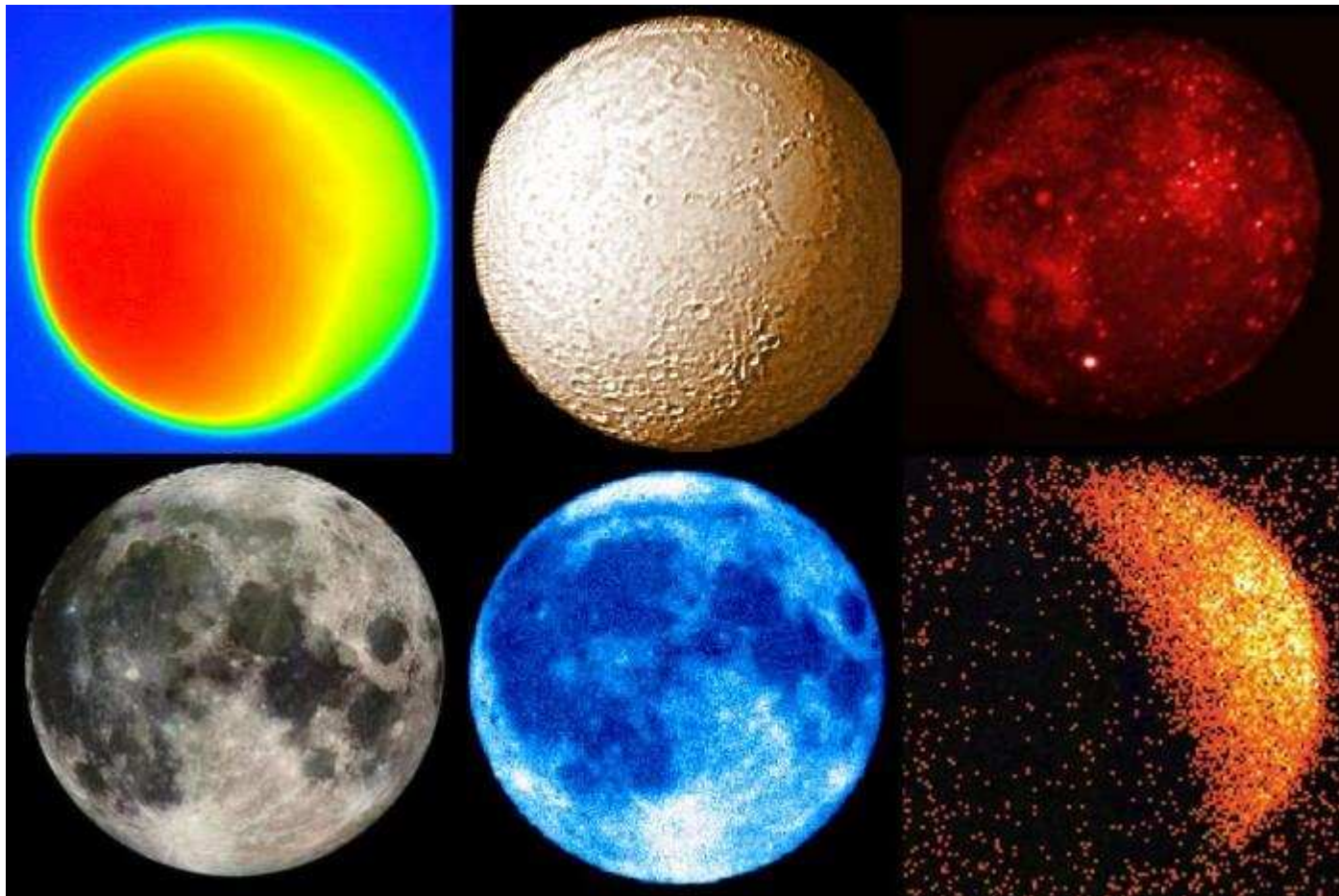
# Erdansichten

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

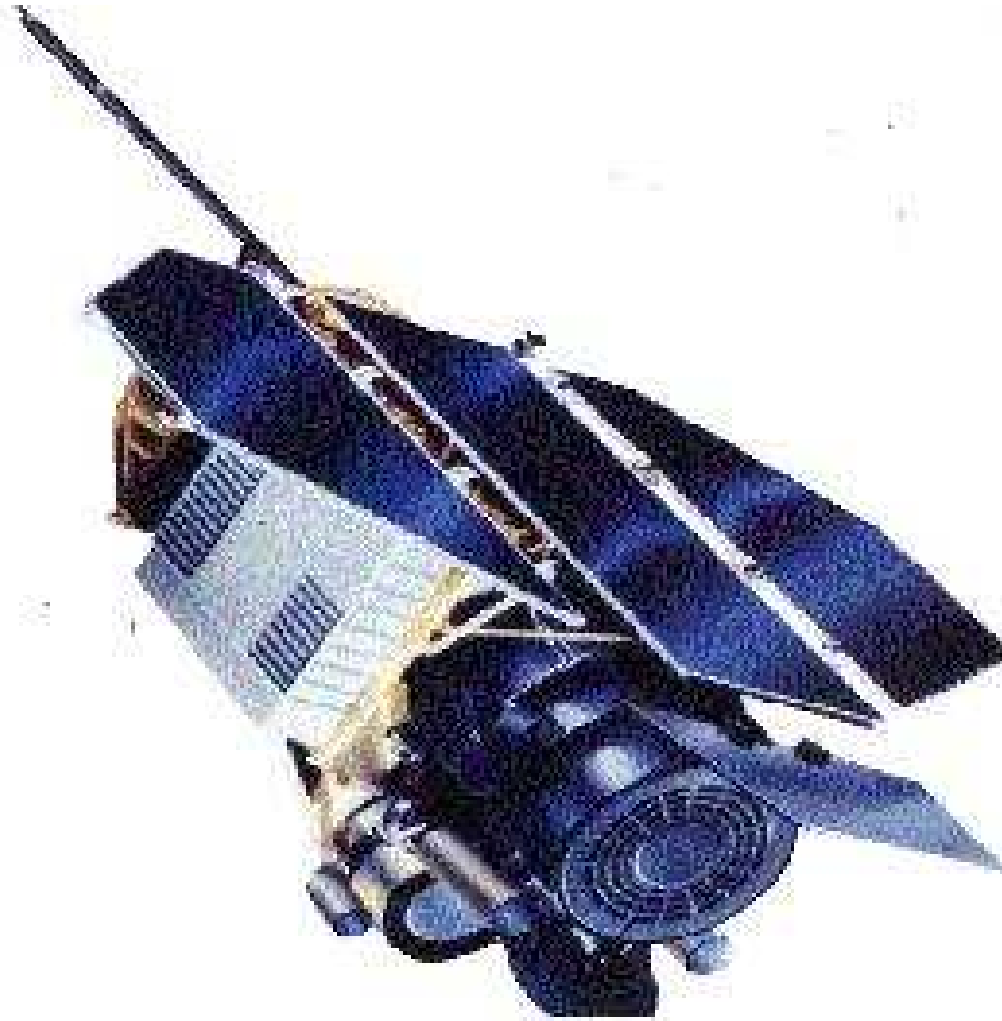


# Mondansichten

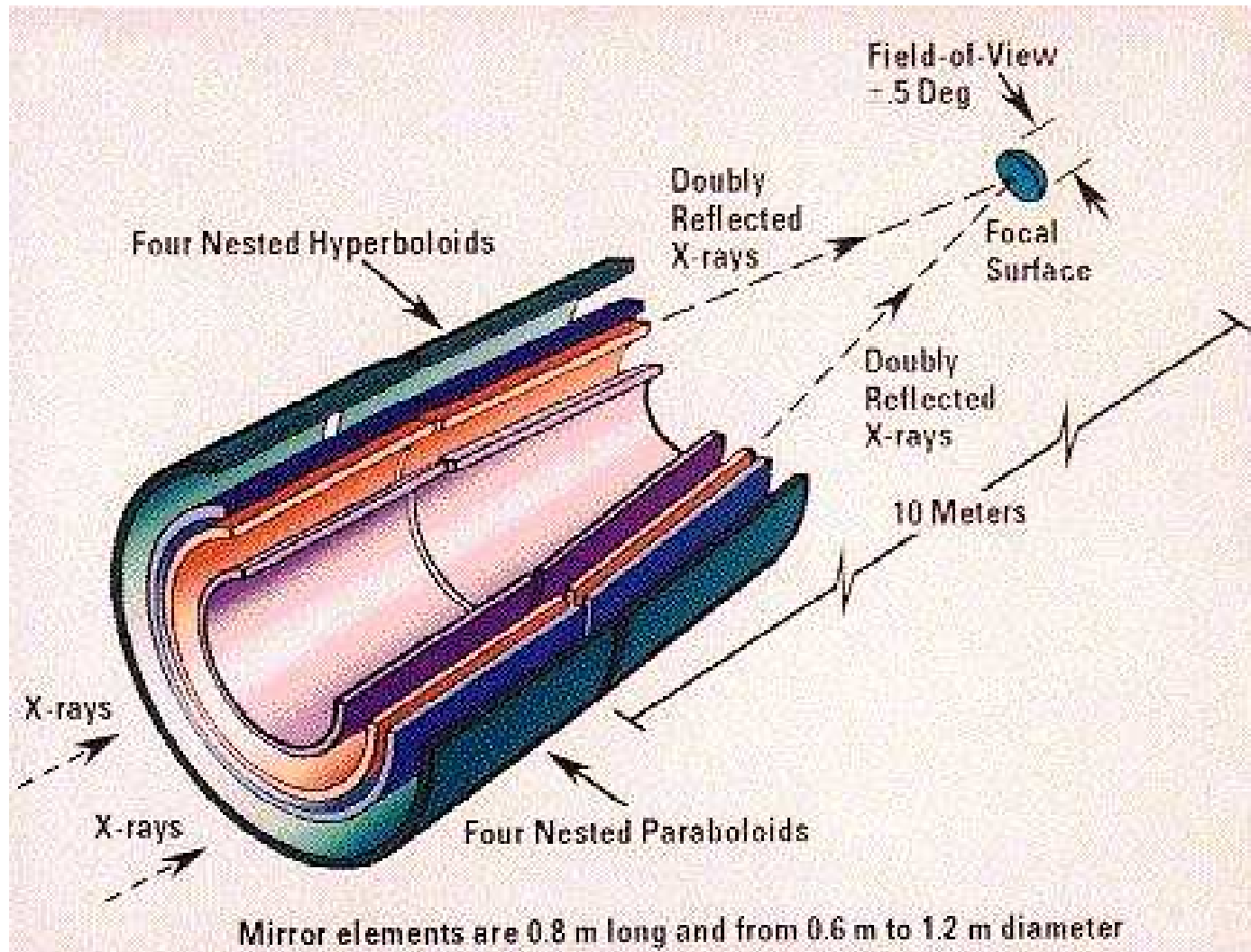
Der Mond im Lichte von Radio-, Mikrowellen-, Infrarot-, sichtbarer, ultravioletter und Röntgenstrahlung.



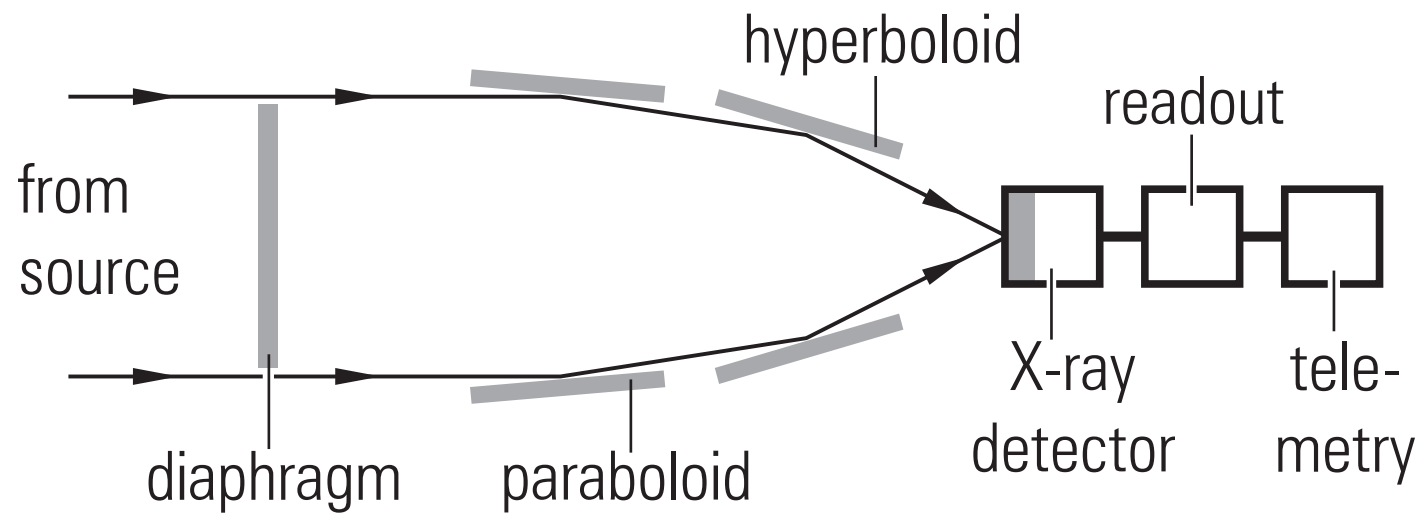
# ROSAT Satellit



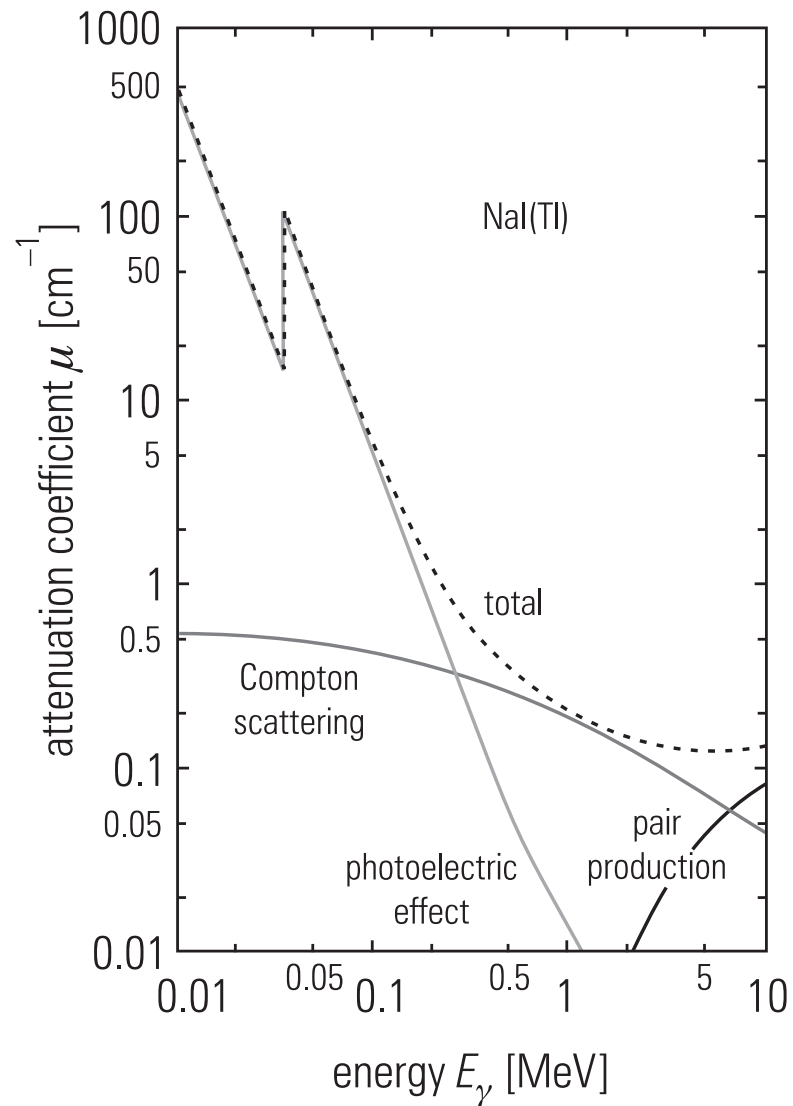
# Wolter-Teleskop



# Wolter-Teleskop-Prinzip

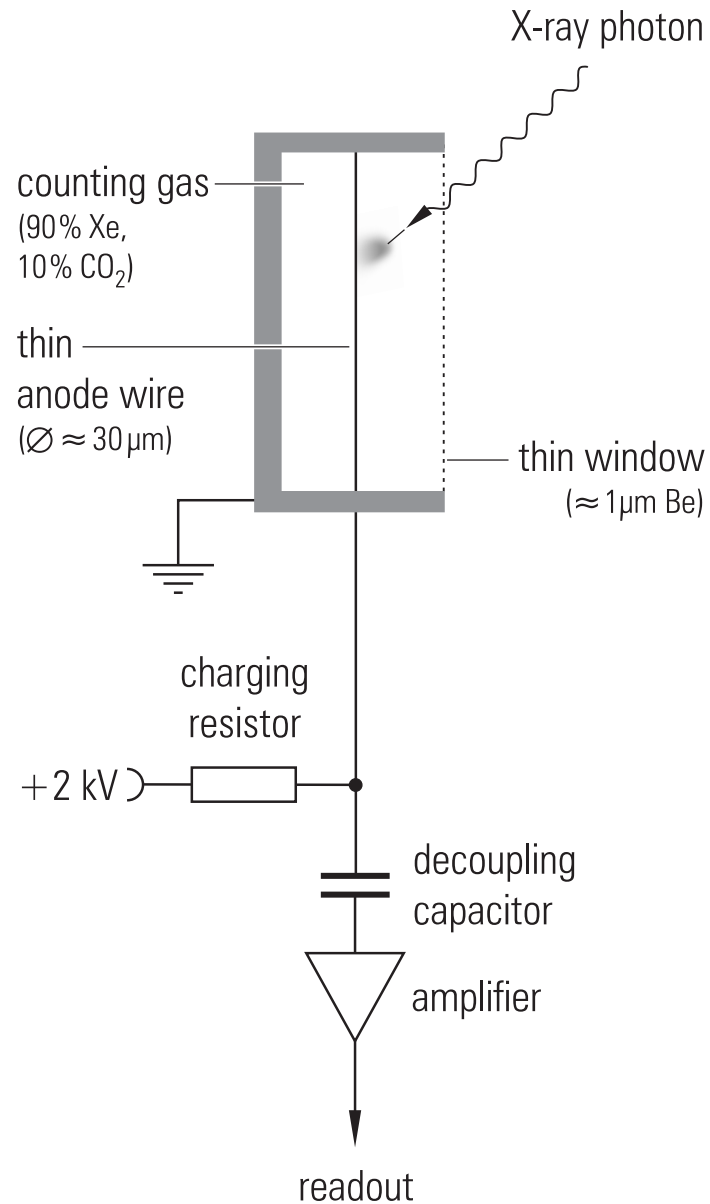


# Röntgenphoton-Nachweis





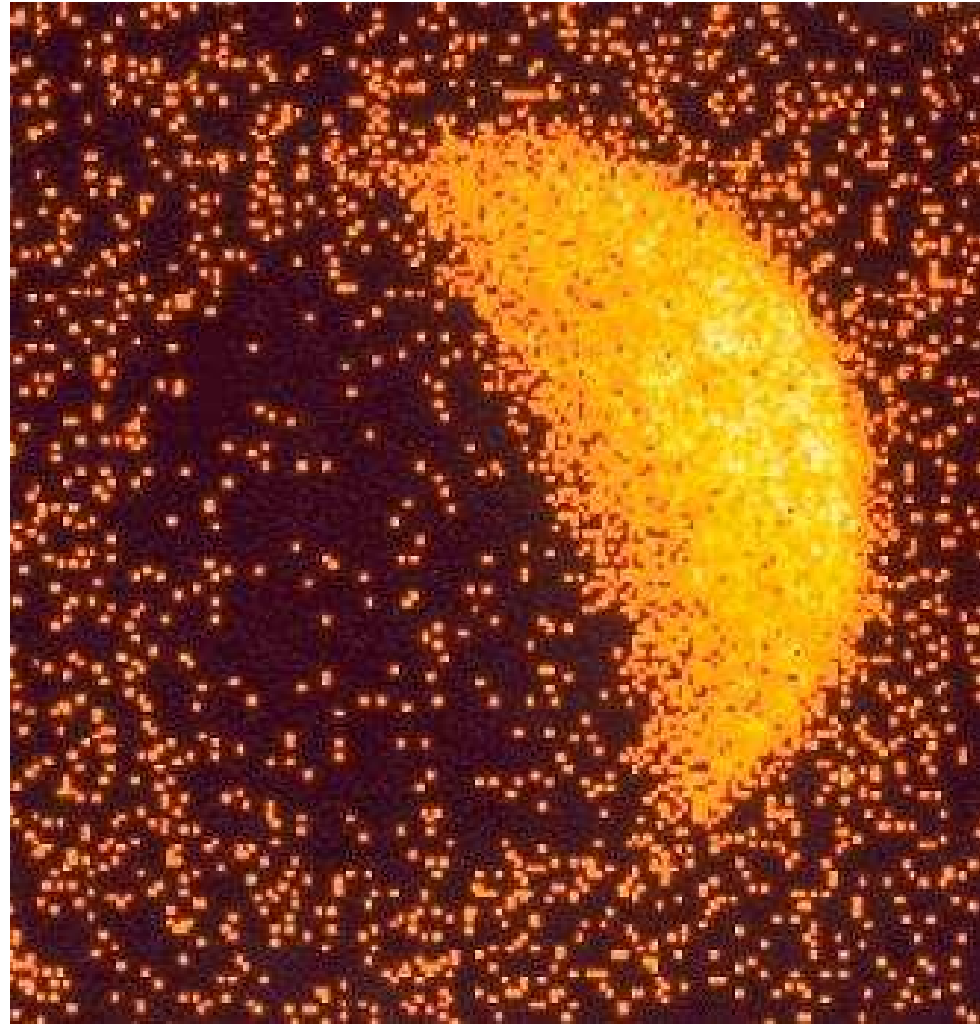
# Röntgendetektor



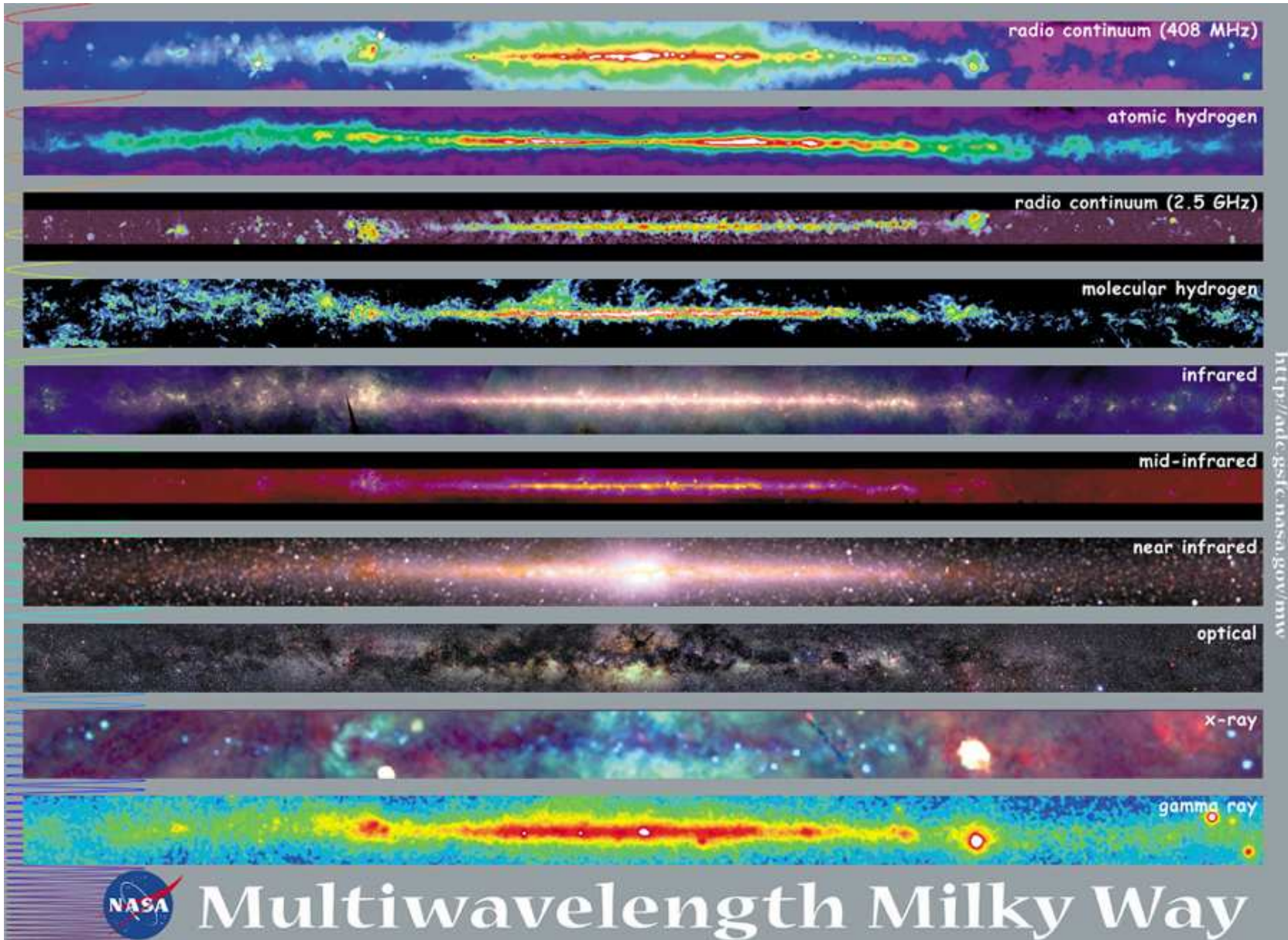
# Newton Observatorium



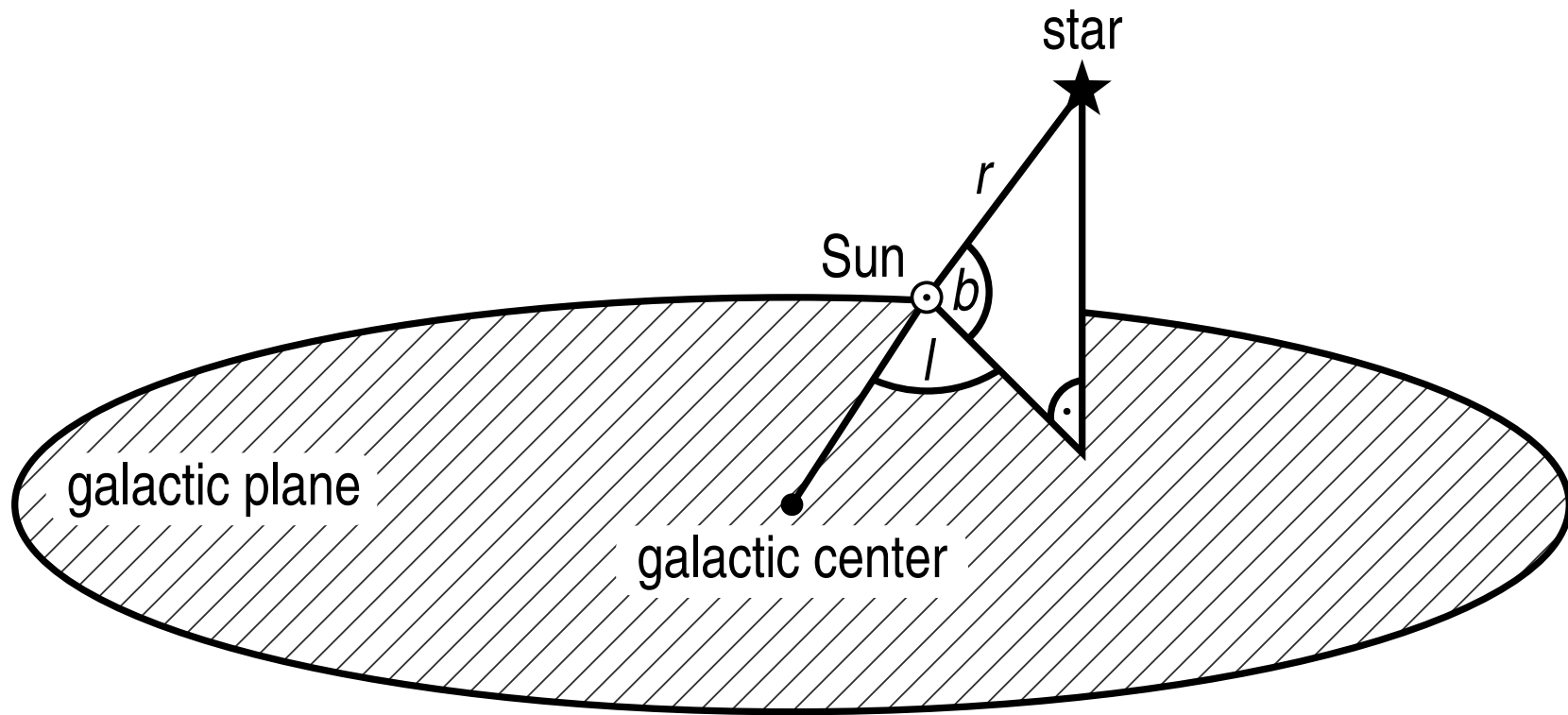
# Röntgenstrahlen vom Mond



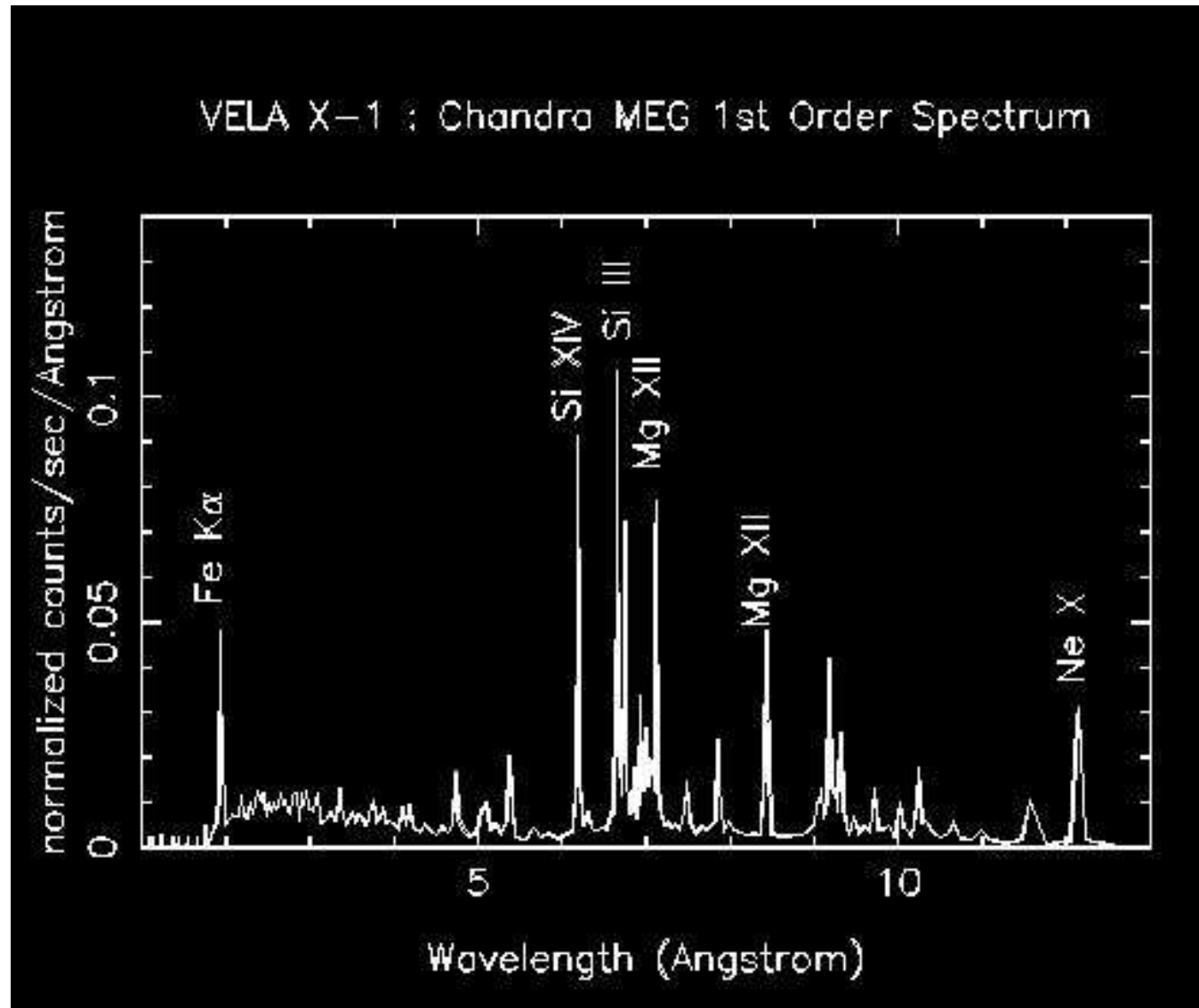
# Strahlung von der Milchstrasse



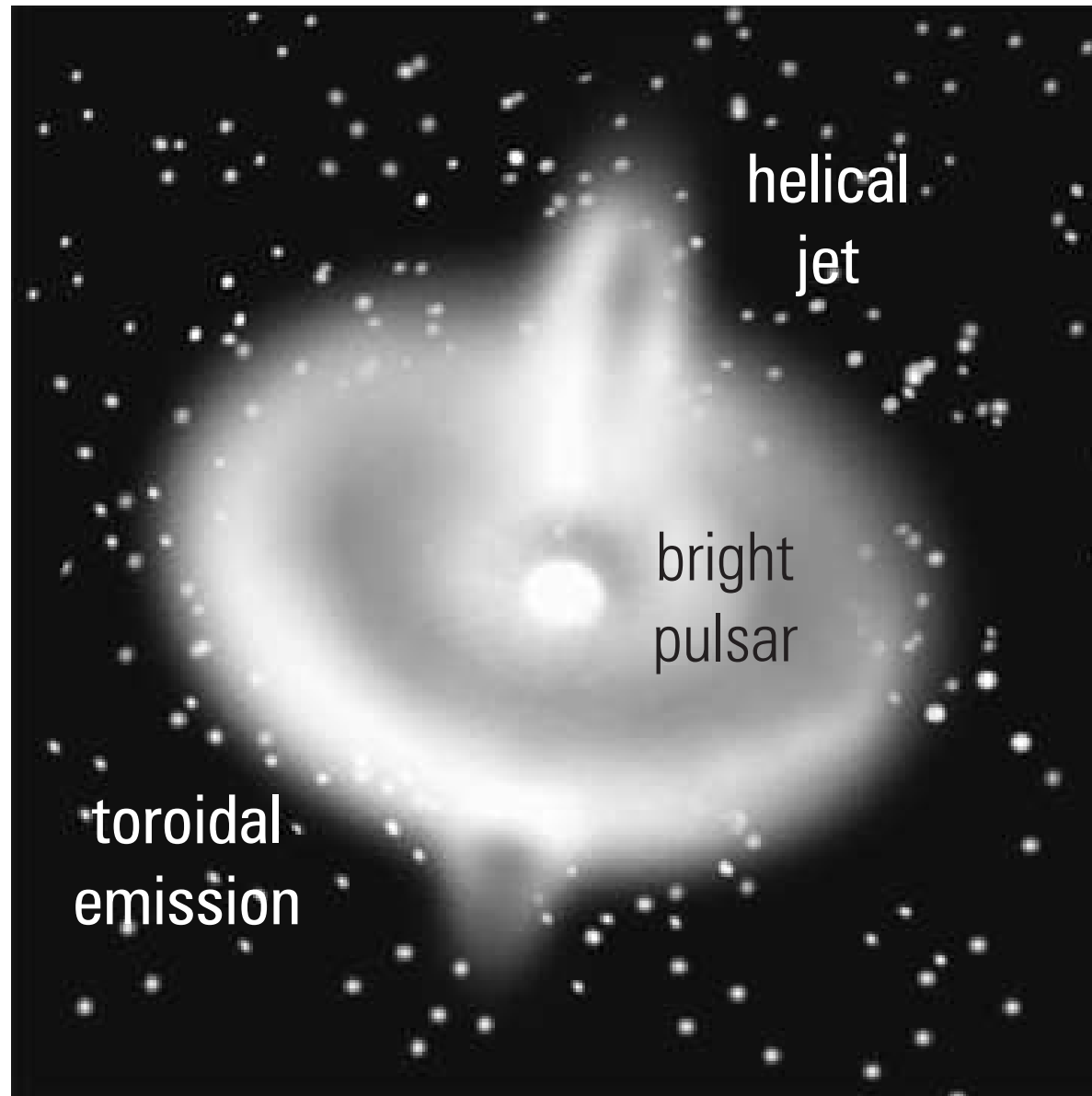
# Galaktische Koordinaten



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

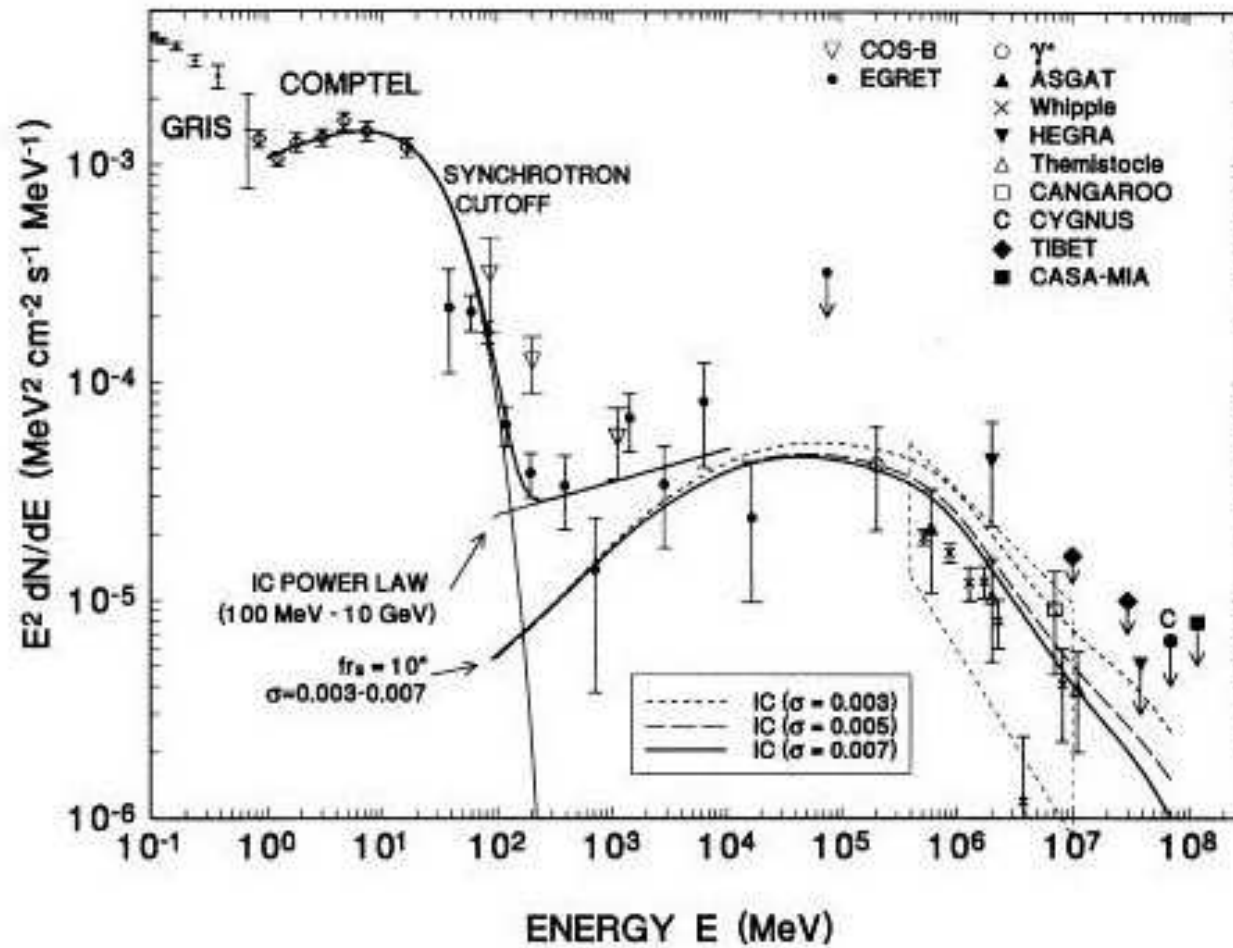
$$\begin{aligned} \rightarrow |\vec{E}| = E &= v \cdot B = 125 \cdot 10^6 m/s \cdot 2,5 \cdot 10^8 \frac{Vs}{m^2} \\ &= 3,14 \cdot 10^{16} V/m \end{aligned}$$

sehr hohe Feldstärken und sehr hohe Energien möglich

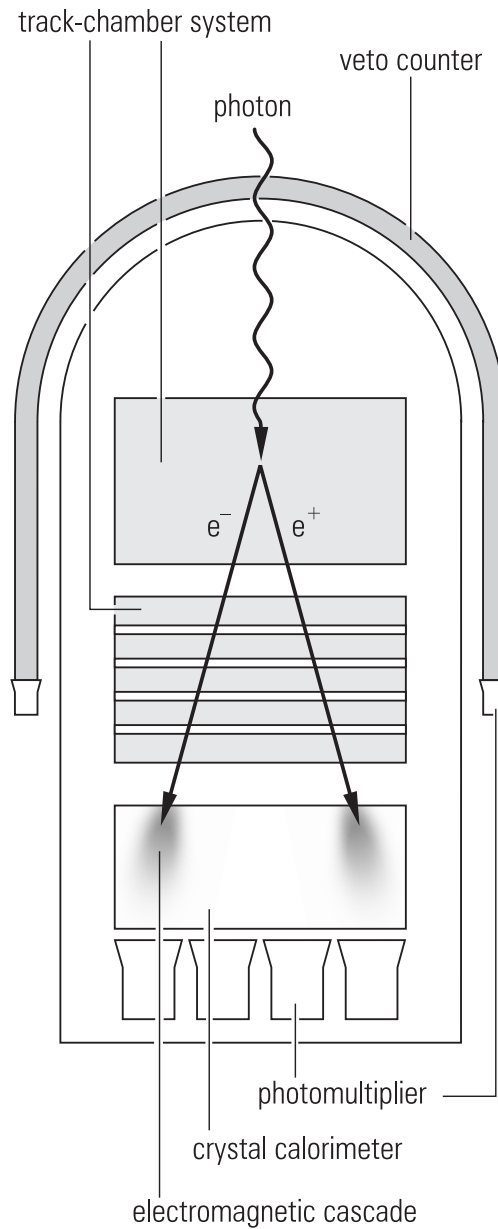
$$E = 3,14 \cdot 10^{16} eV/m$$

# Krebsnebel-Pulsar

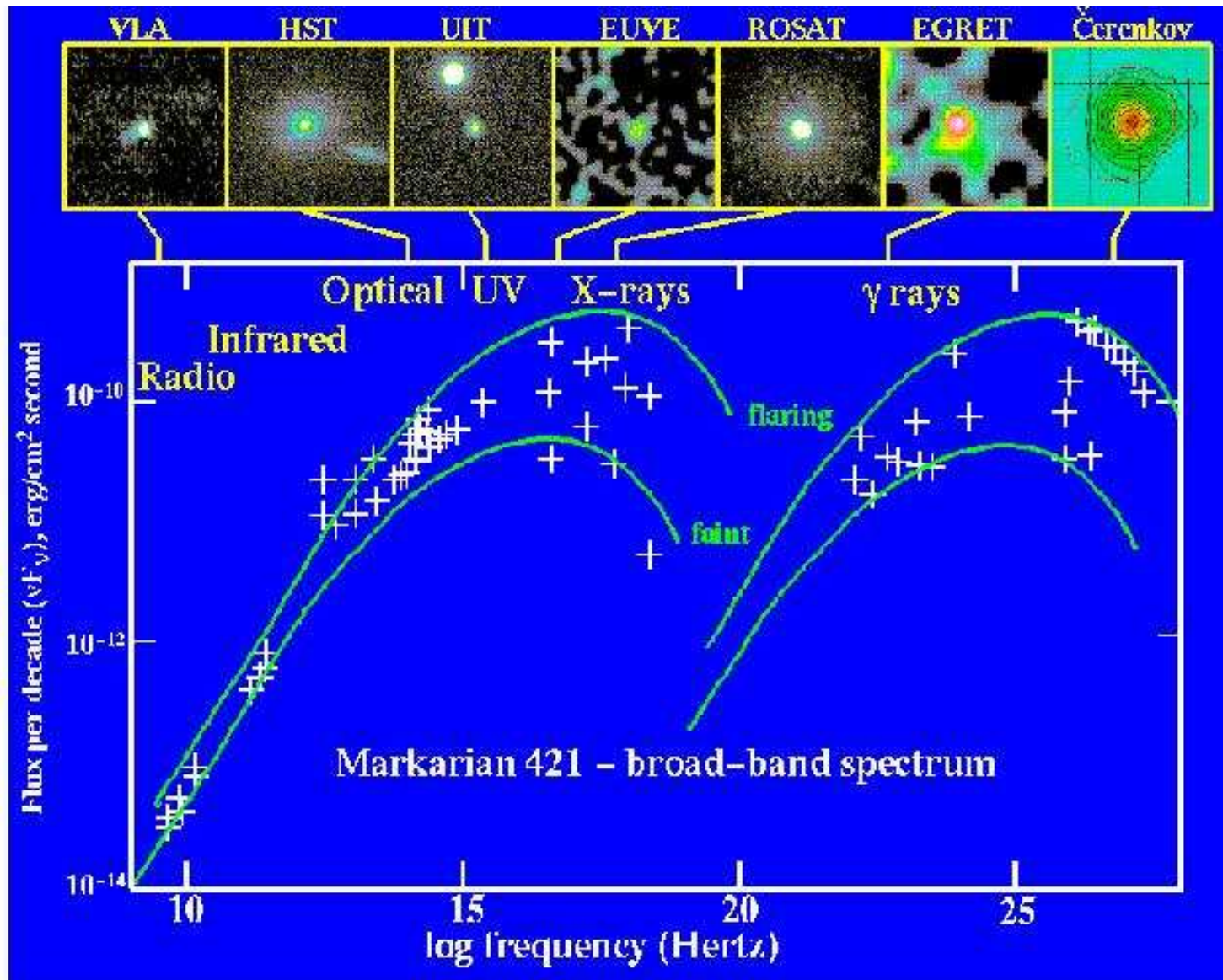
DE JAGER ET AL.



# Gamma-Satellit

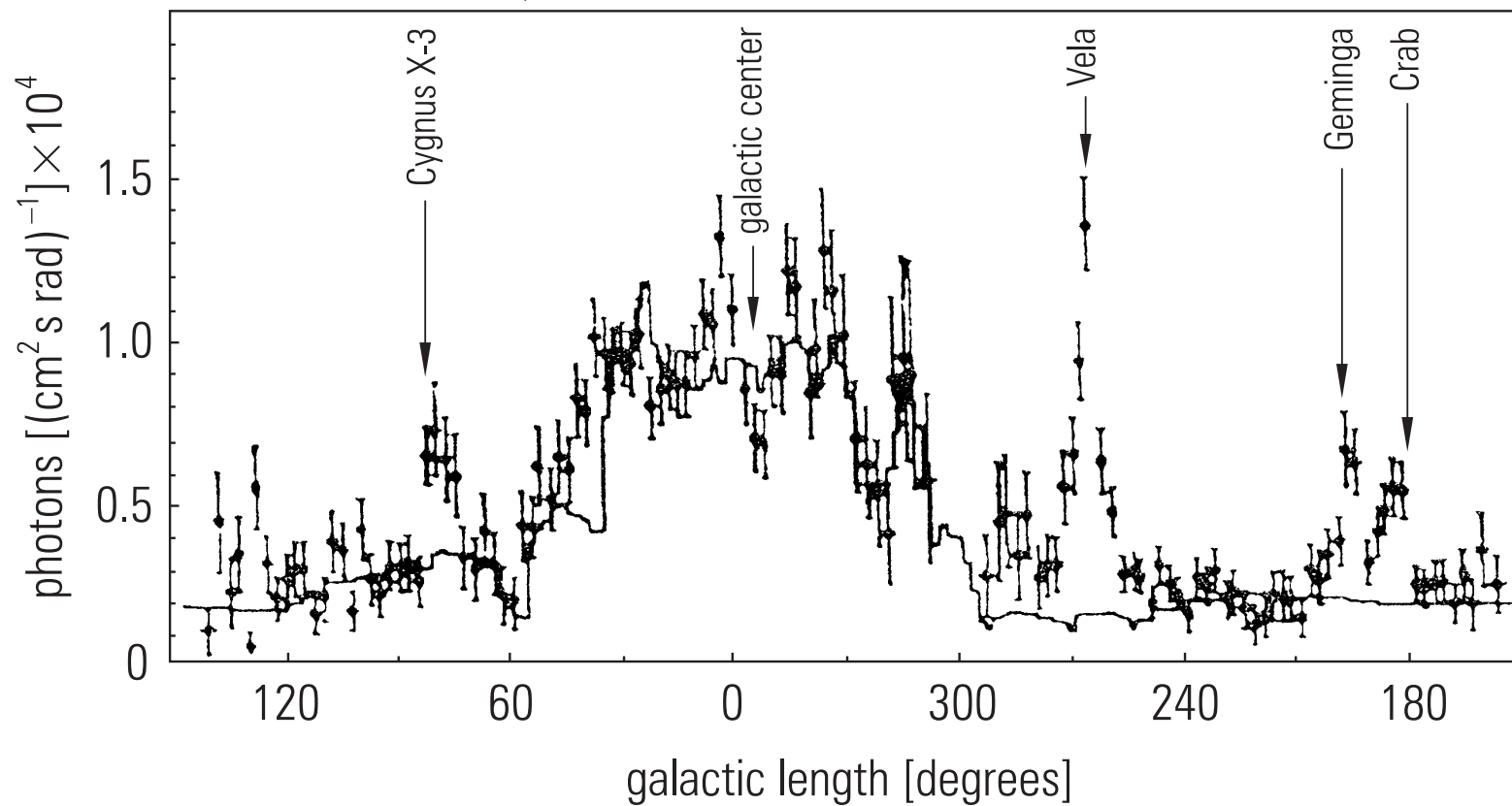


# Markarian 421

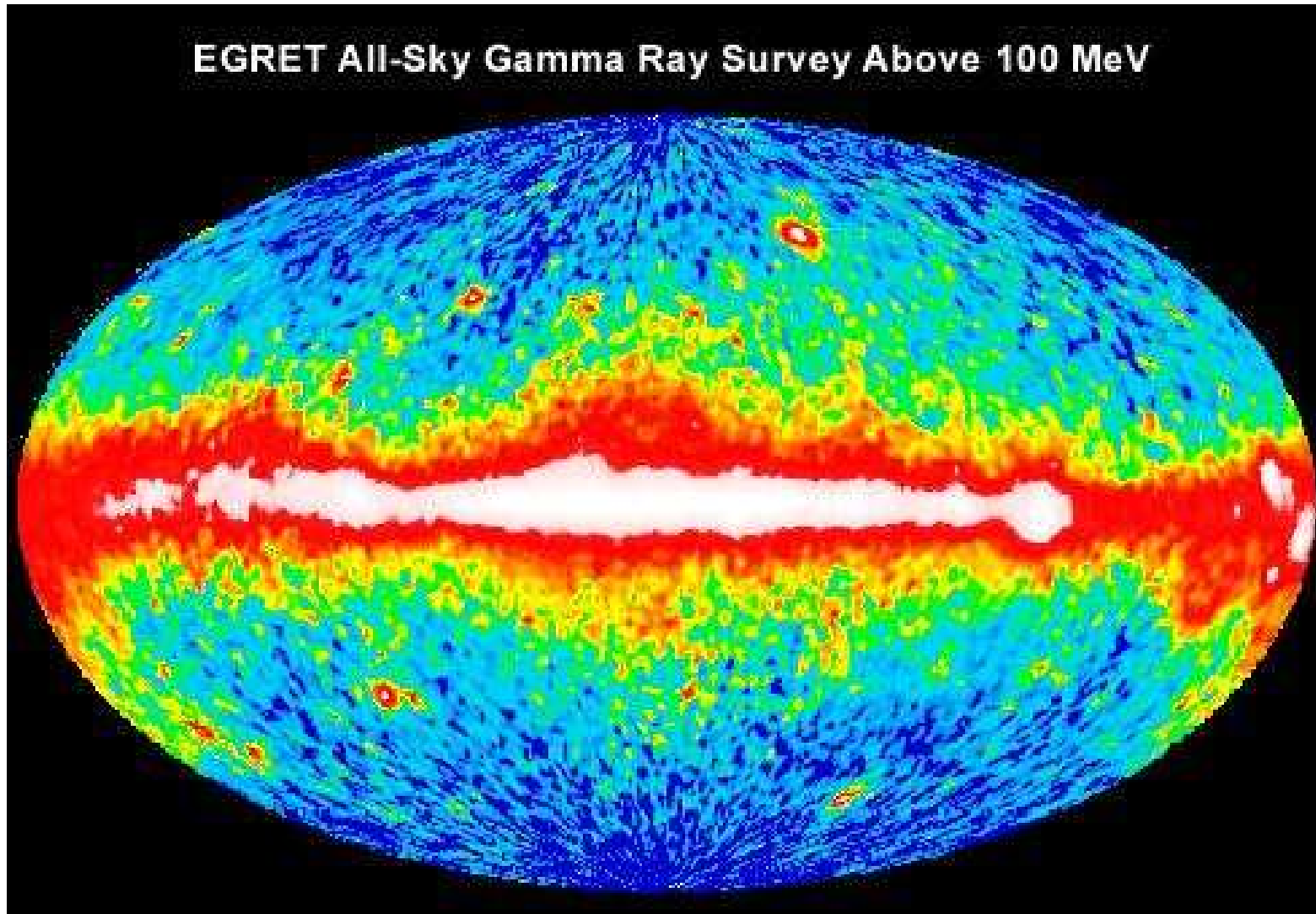


# Der Gamma Himmel

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



# Der Gamma Himmel

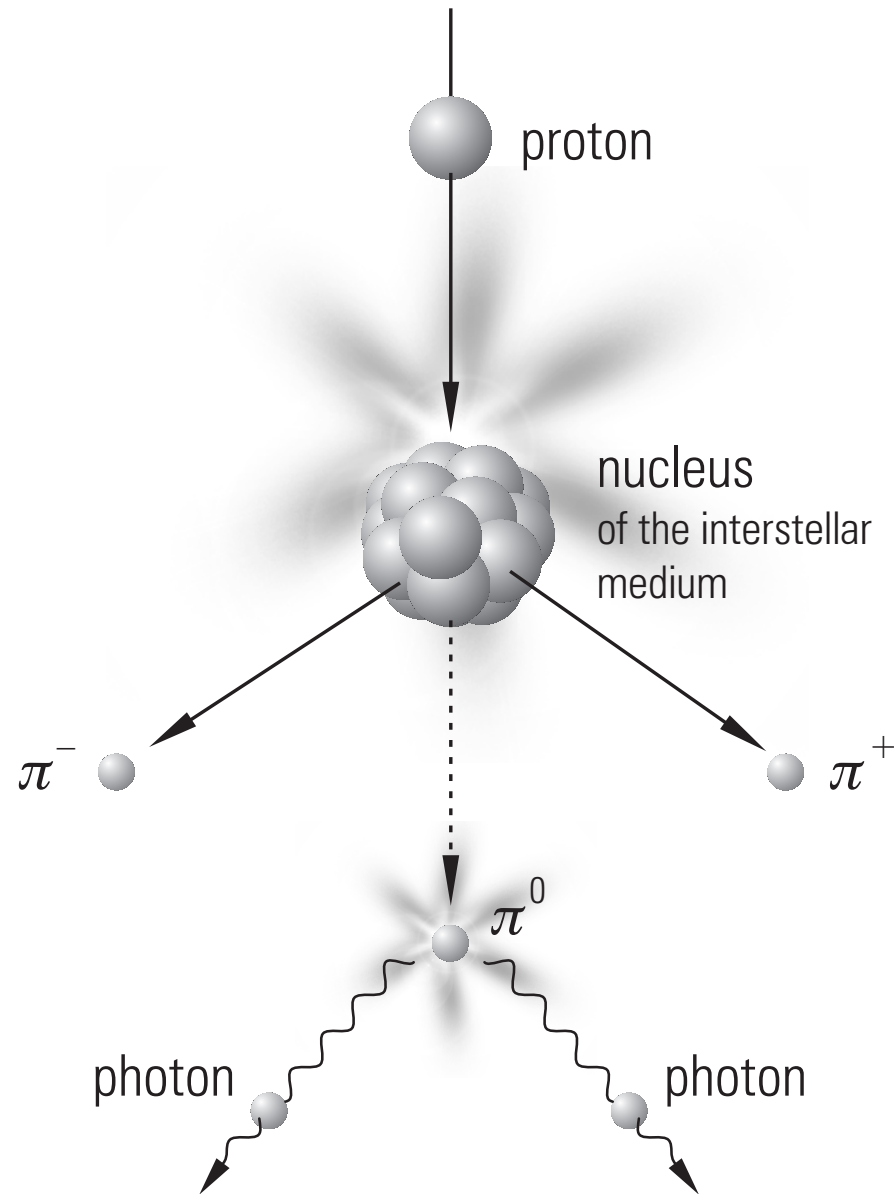




# Quellen von Gammastrahlung

- ähnlich wie Röntgenstrahlung wird auch  $\gamma$ -Strahlung durch Bremsstrahlung, Synchrotronstrahlung und inverse Compton-Streuung erzeugt. Dazu kommen noch folgende Produktionsmechanismen:
- $\pi^0$ -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  $\pi^0 \rightarrow \gamma + \gamma$

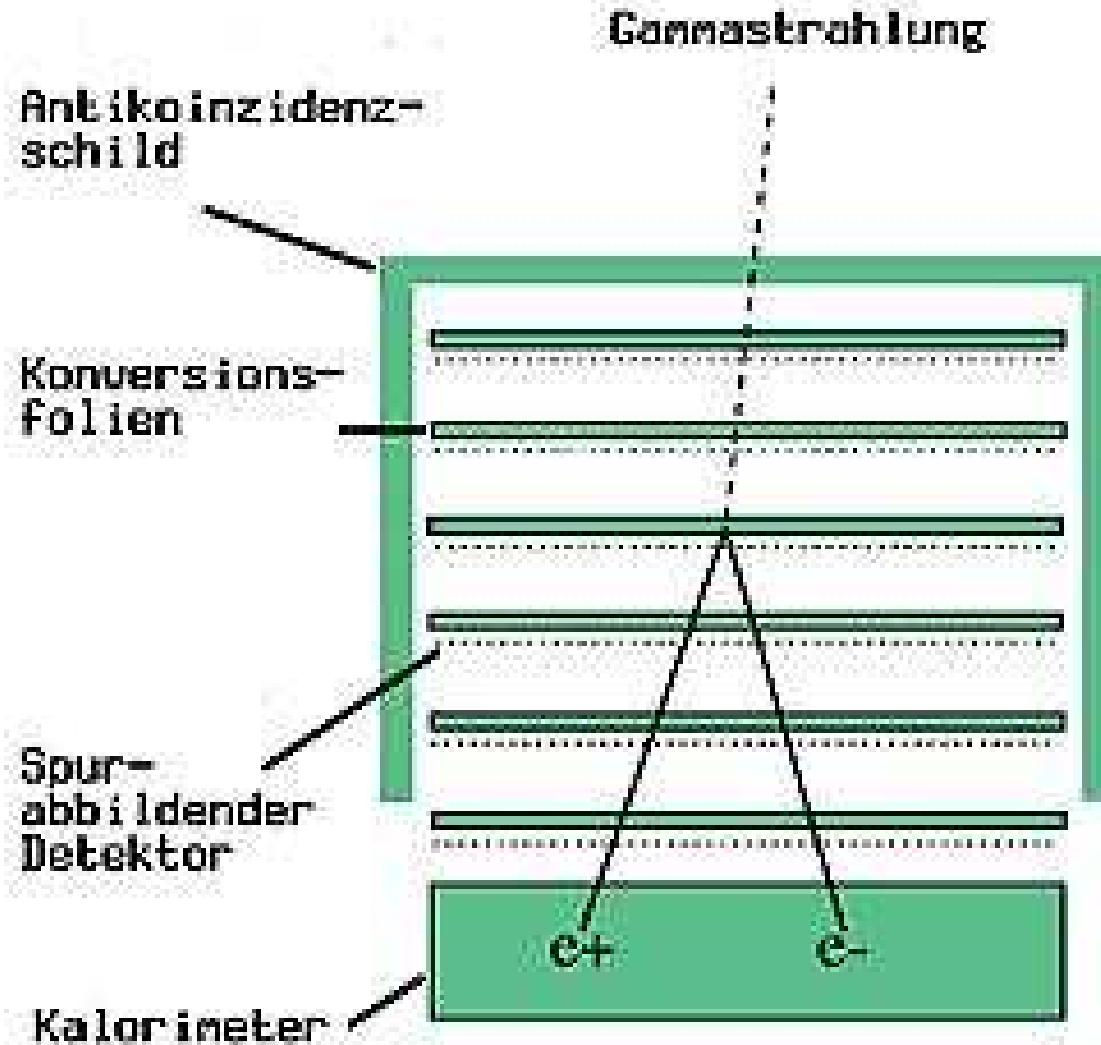
# $\pi^0$ Erzeugung



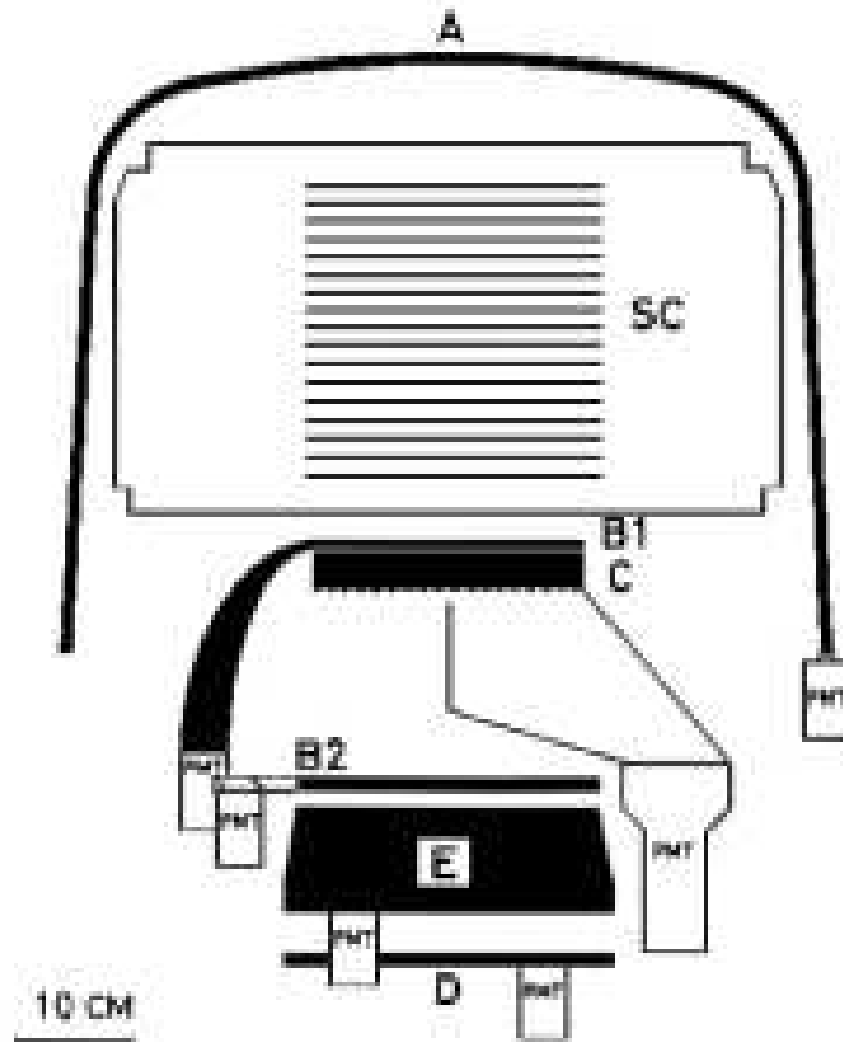
# Quellen von Gammastrahlung

- 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

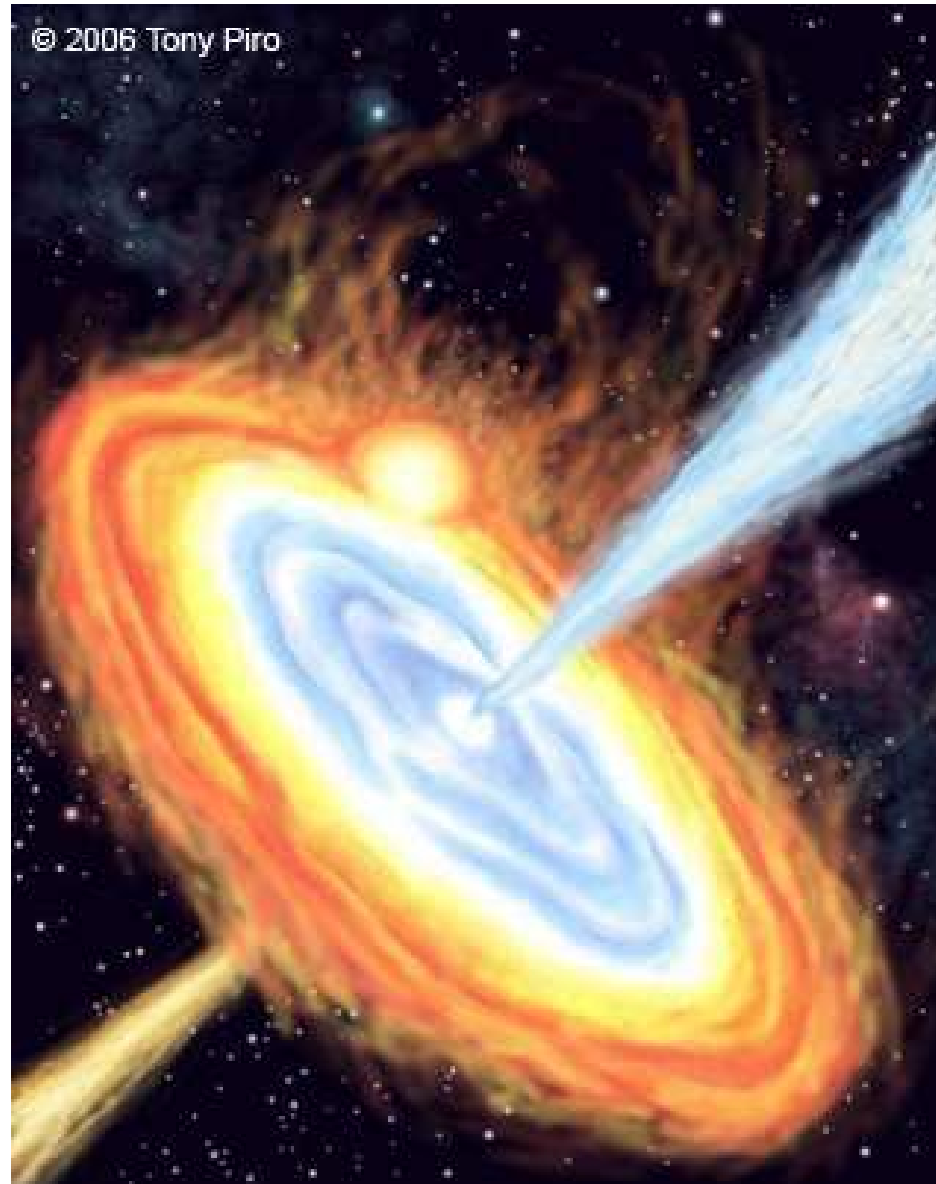
# Gamma-Satellit, Prinzip



# Gamma-Satellit, Cos-B



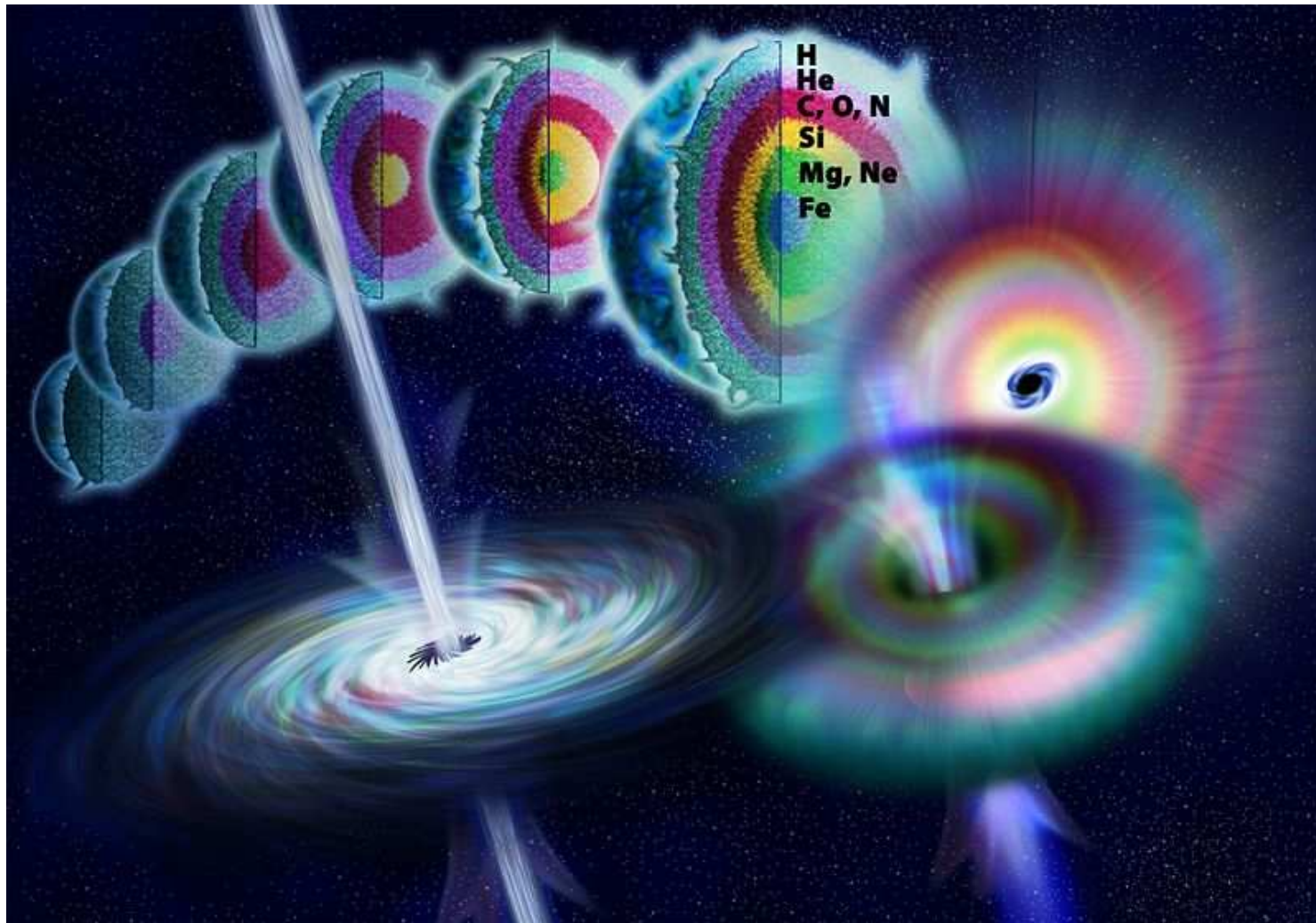
# Kollapsar



# Kollision von Neutronensternen

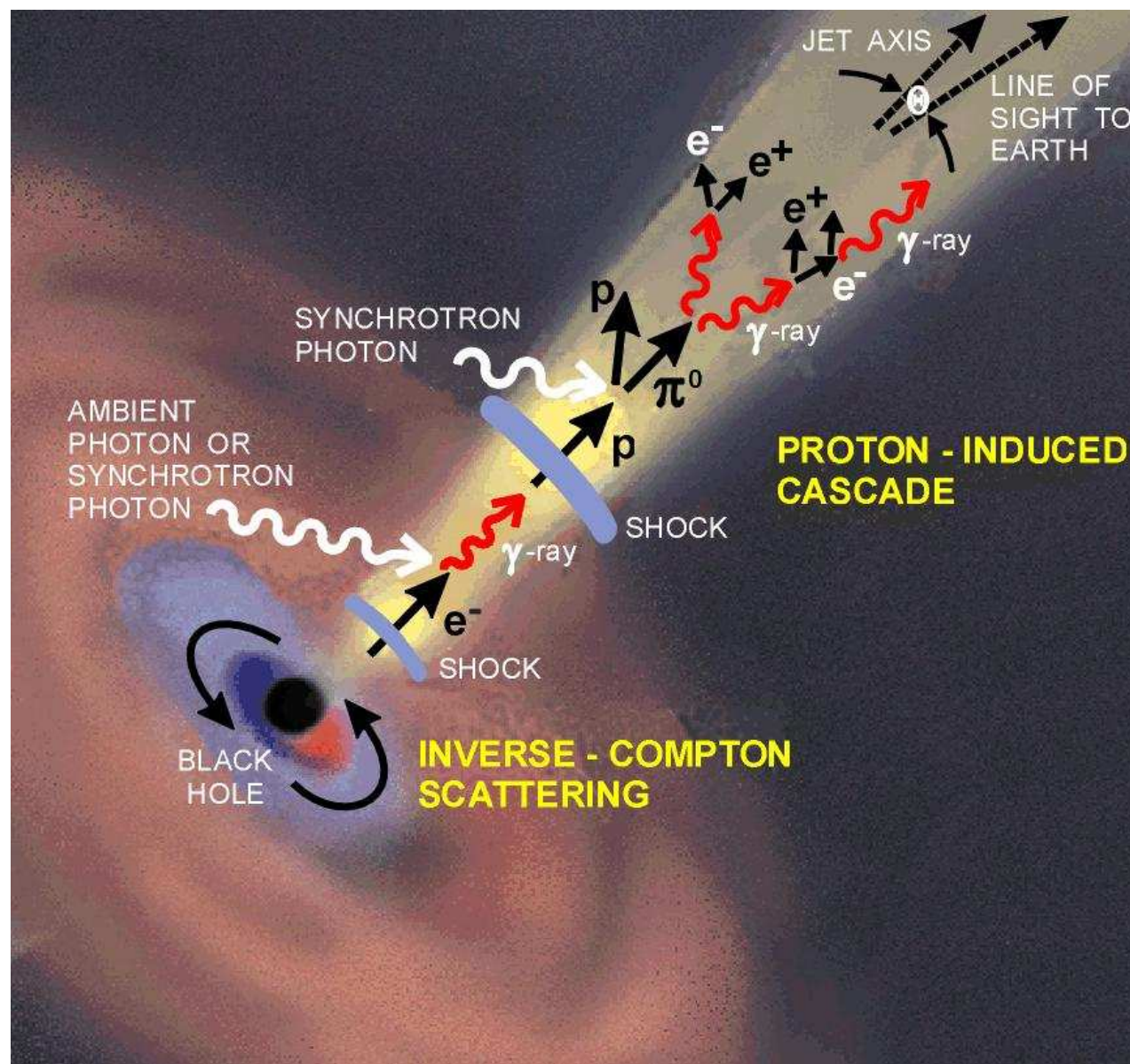


# Endstadien massiver Sterne

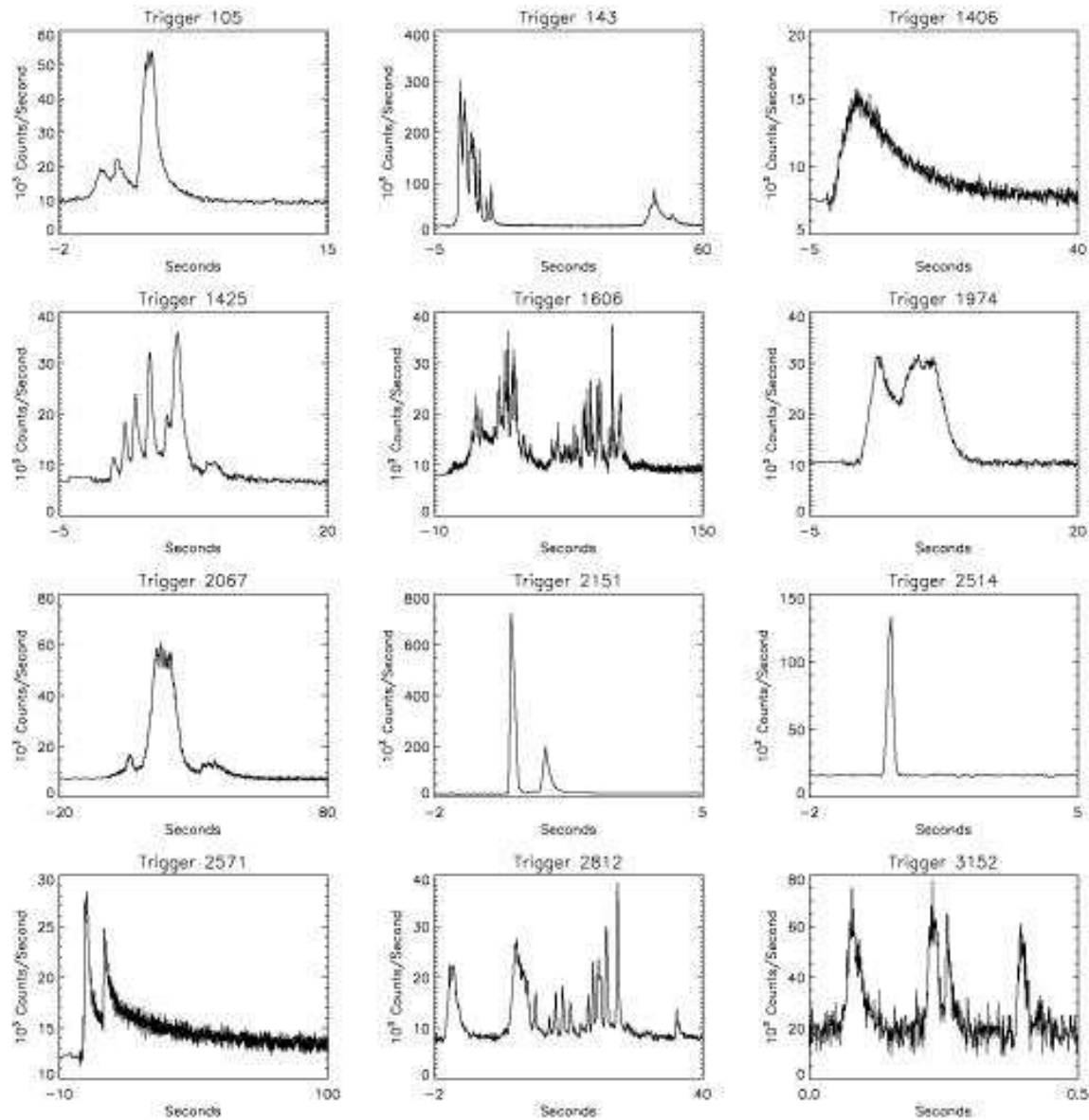




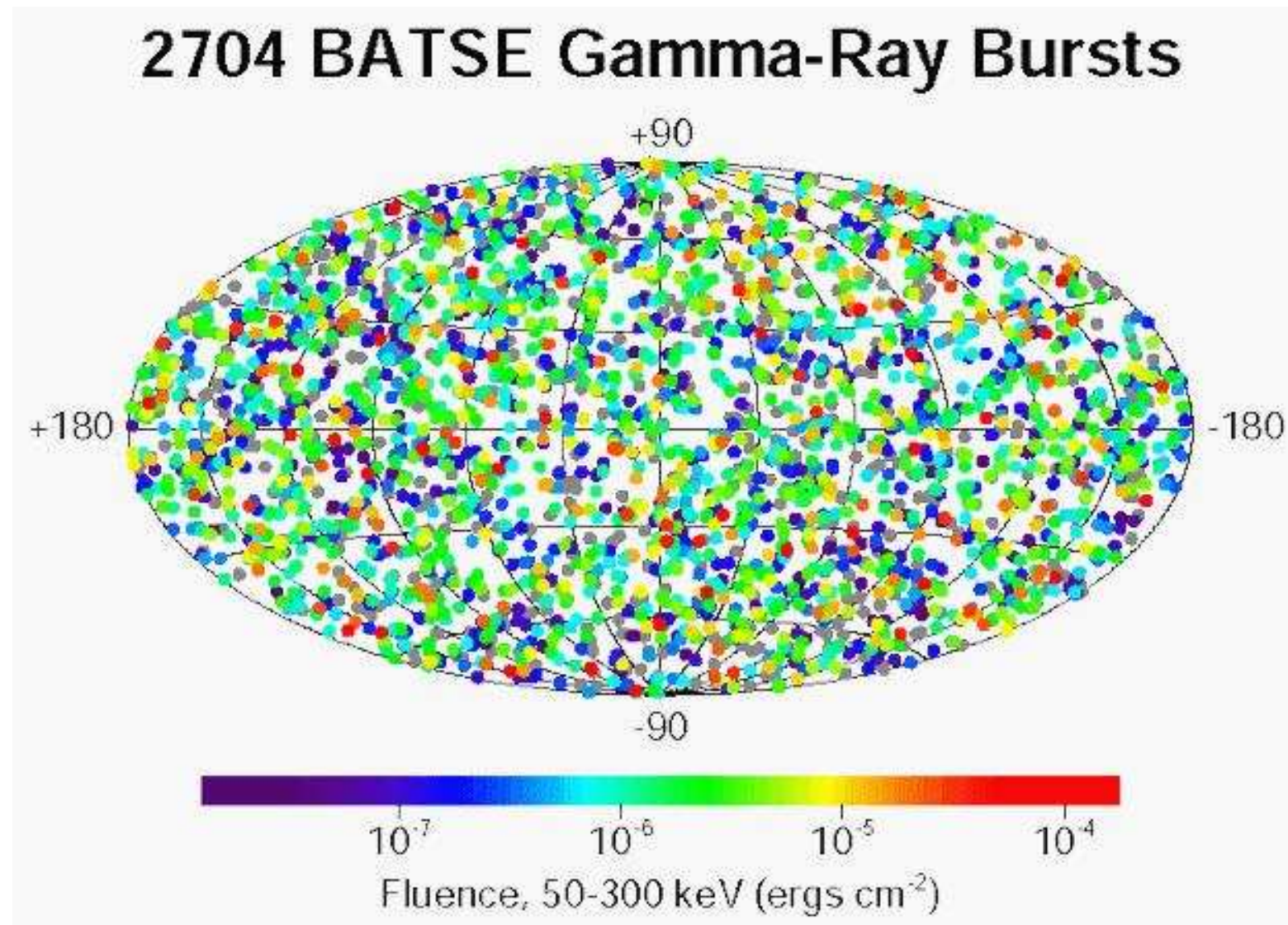
# Beschleunigung in Jets



# GRB-Lichtkurven



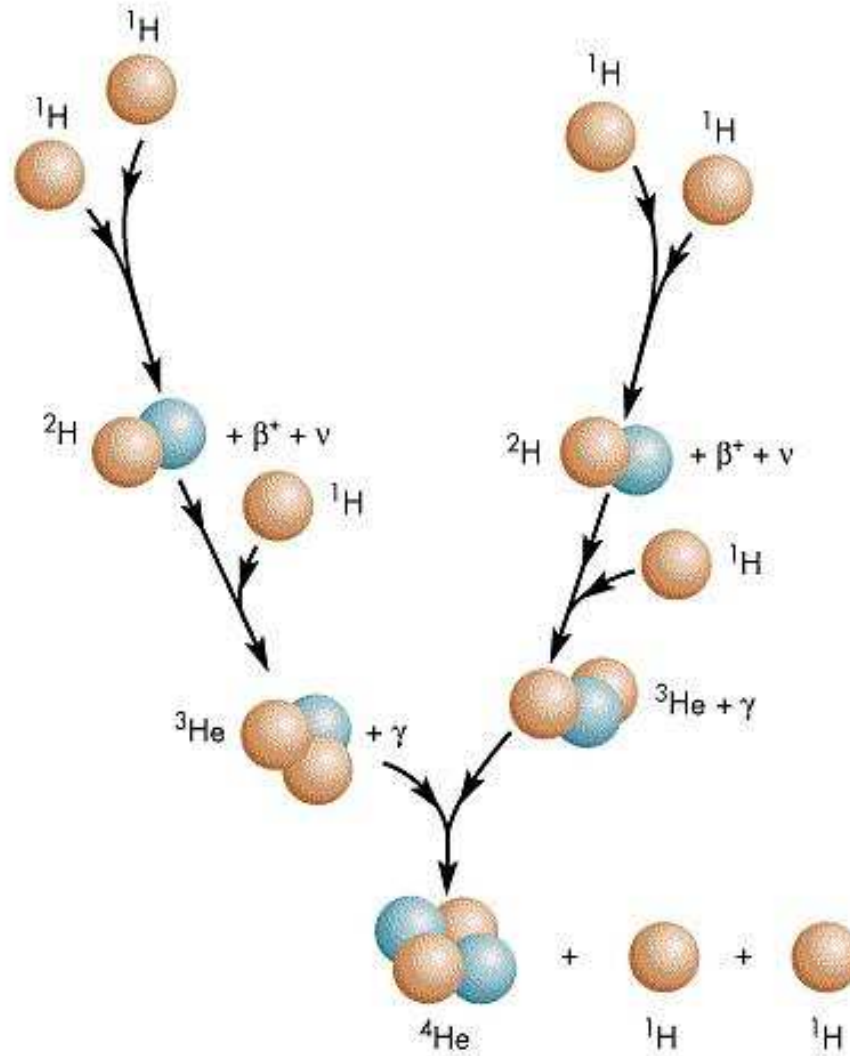
# Ursprünge der GRB's



# Neutrinoastronomie

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

# Solare Neutrinos

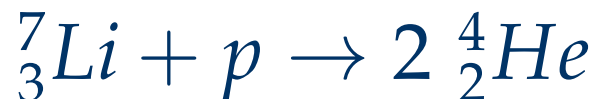


# Proton - Proton Zyklus



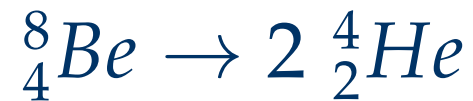
Hauptprozeß: 85% Wahrscheinlichkeit

## Lithium-Brennen



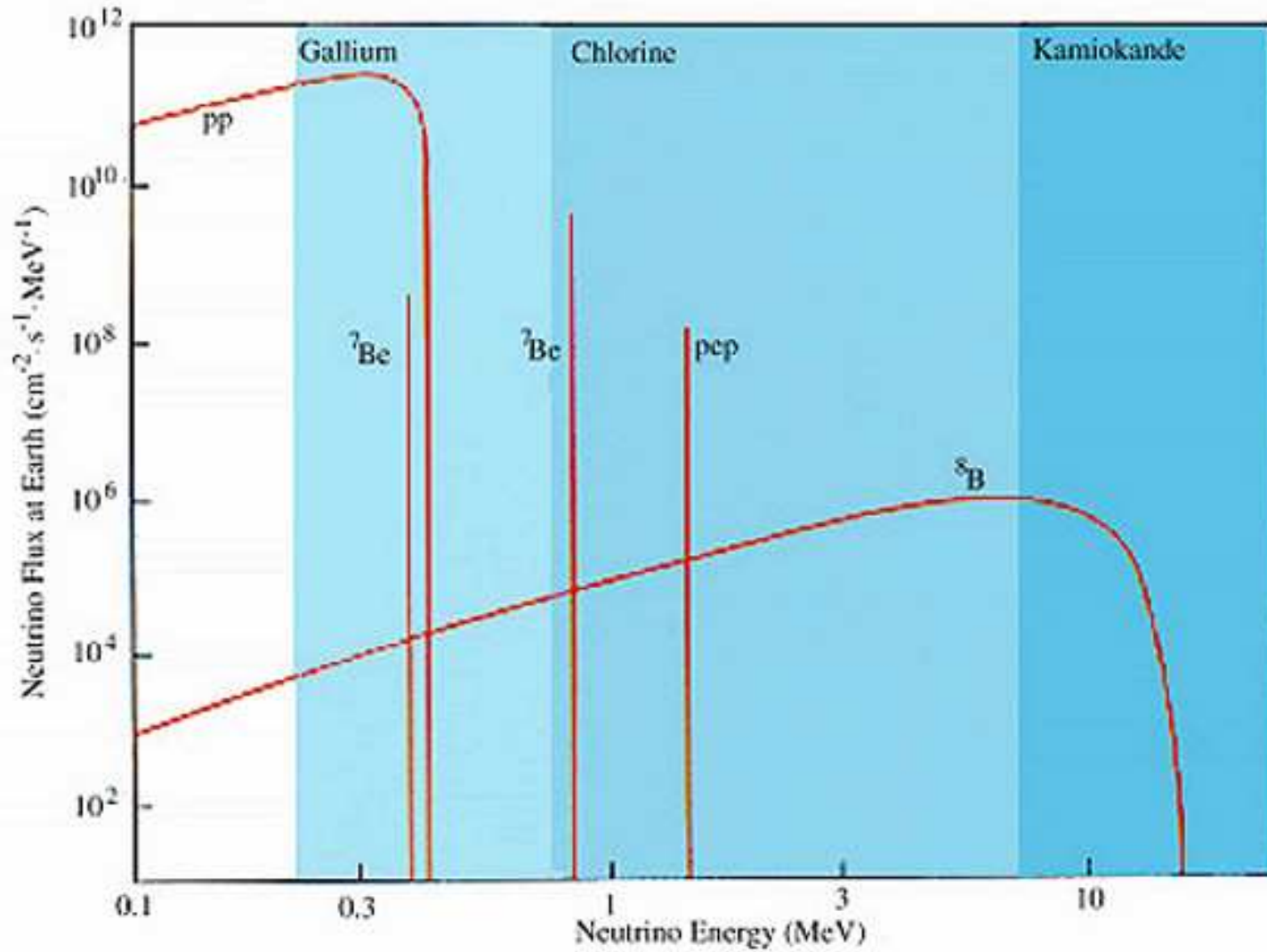
mit 15 % Wahrscheinlichkeit

# Bor-Zweig



mit 0,02 % Wahrscheinlichkeit

# Spektren solarer Neutrinos





# Homestake Experiment



# Neutrino nachweis

Neutrino reaktion im Detektor:



Neutrino nachweis im Detektor



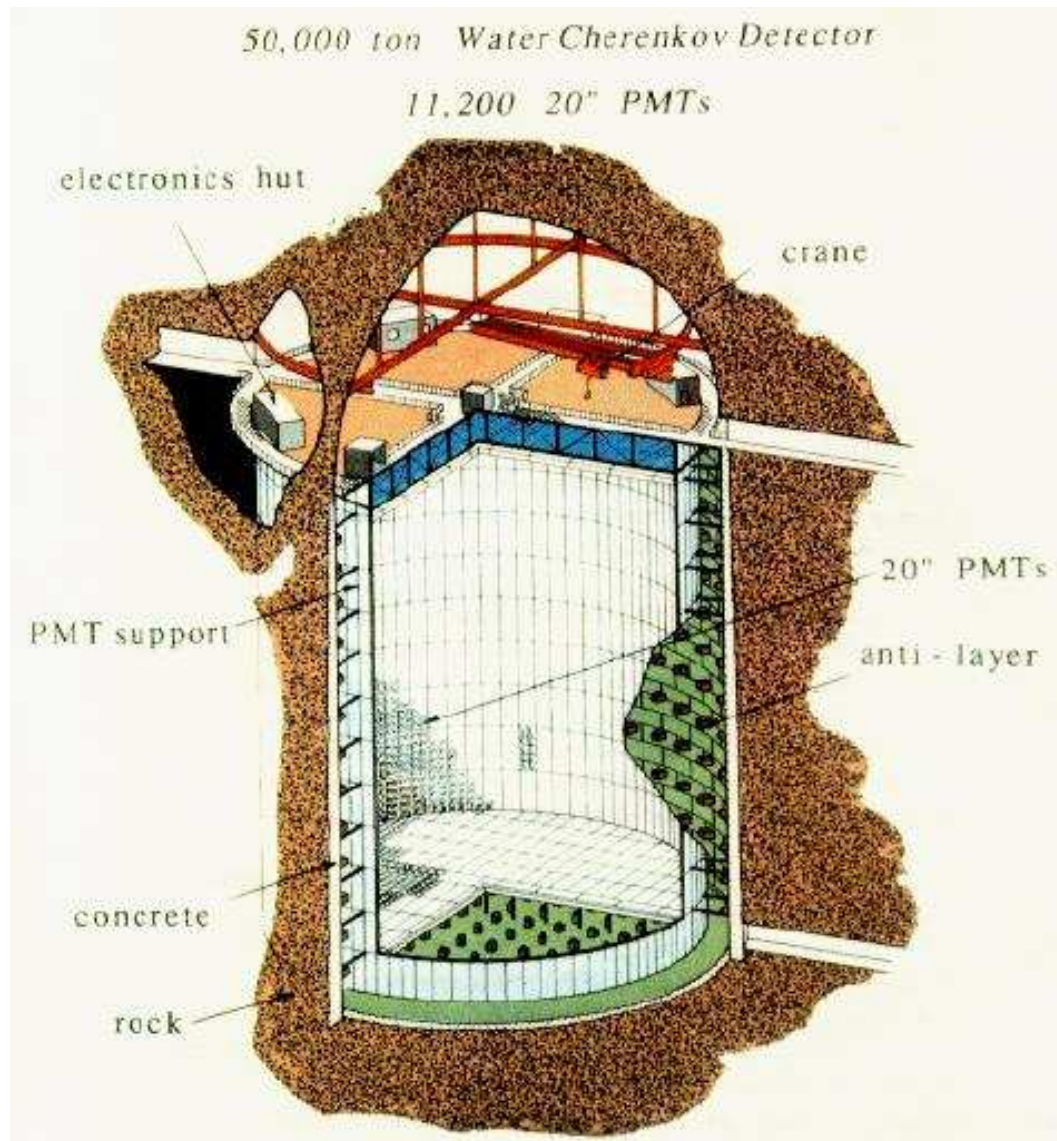
mit nachfolgender Emission charakteristischer

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

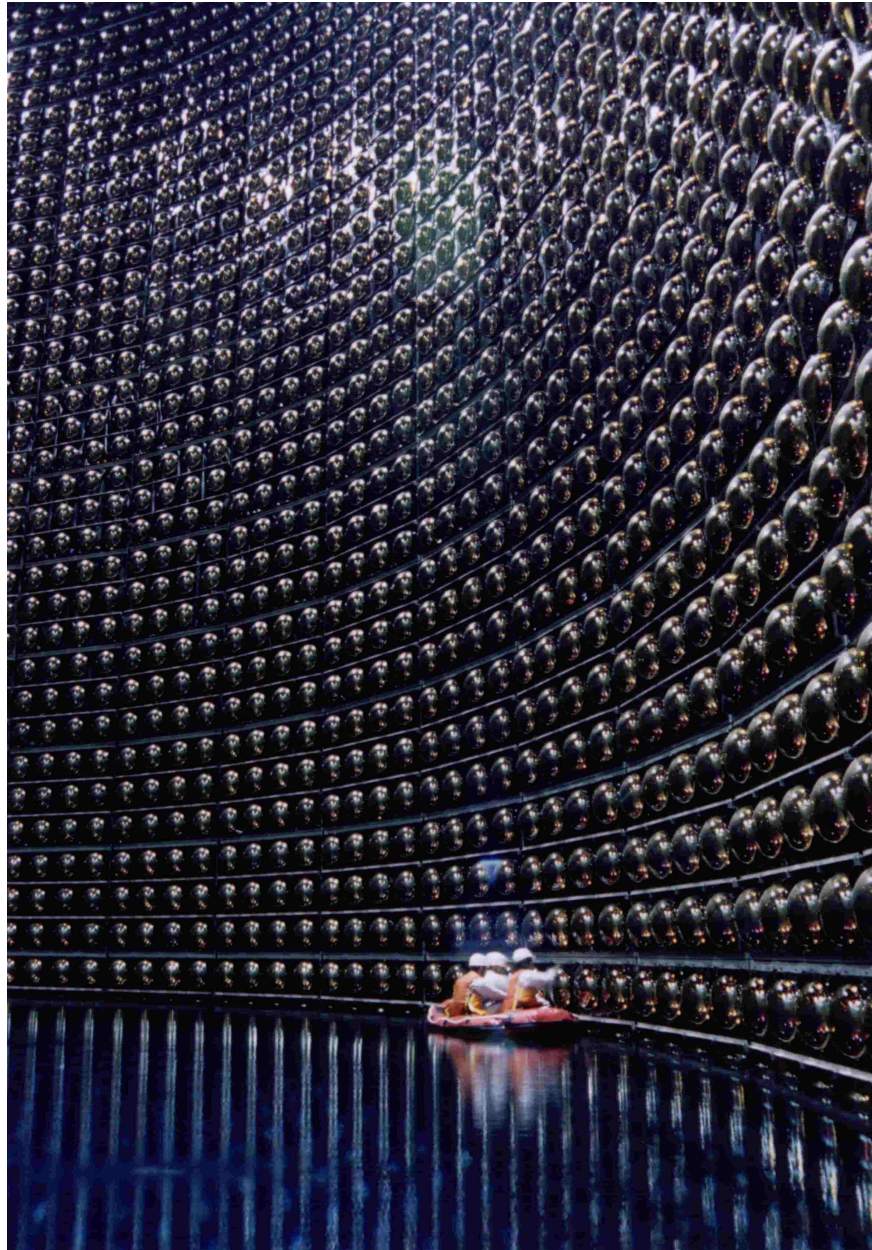
analog in den Gallium-Experimenten



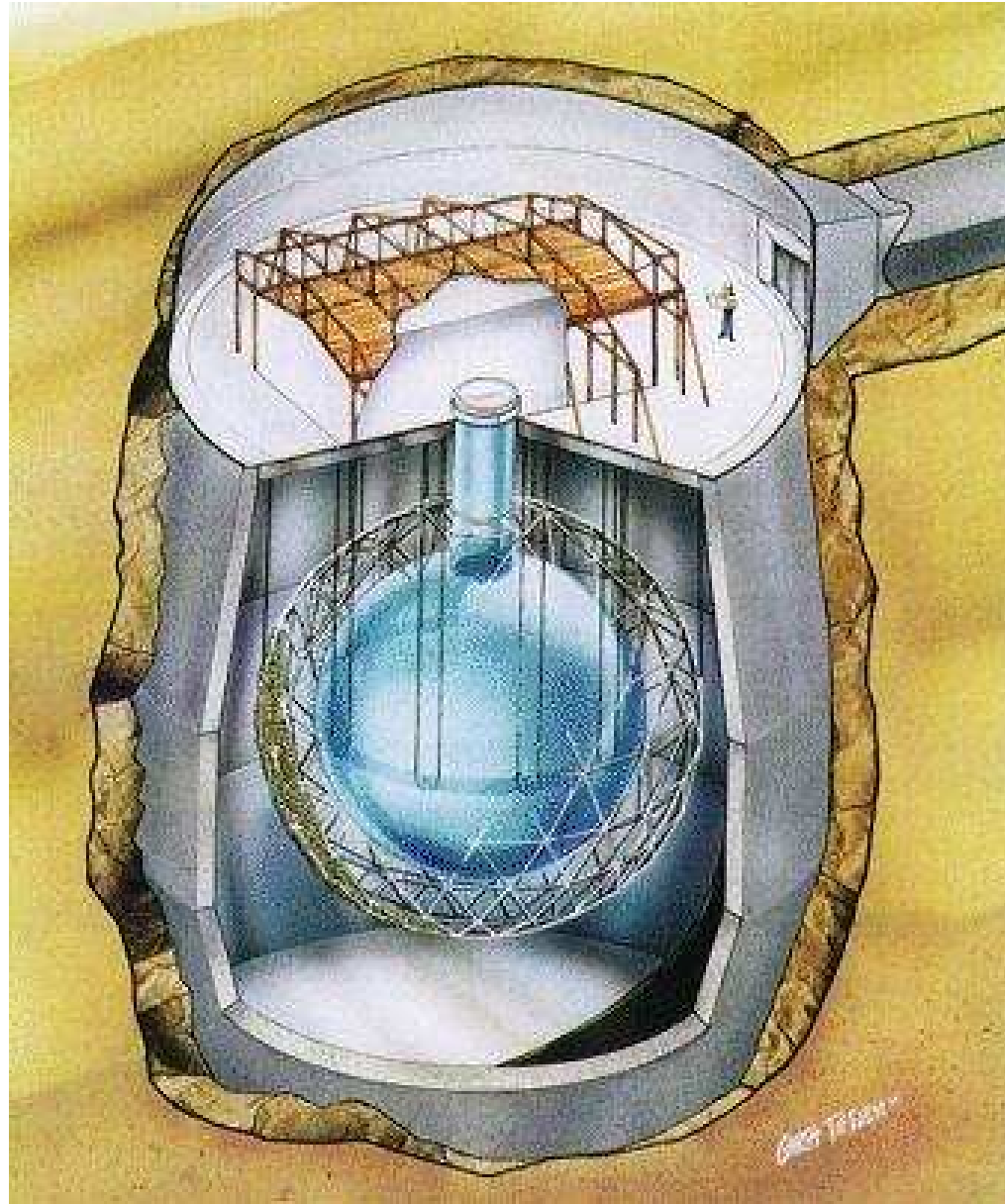
# Superkamiokande



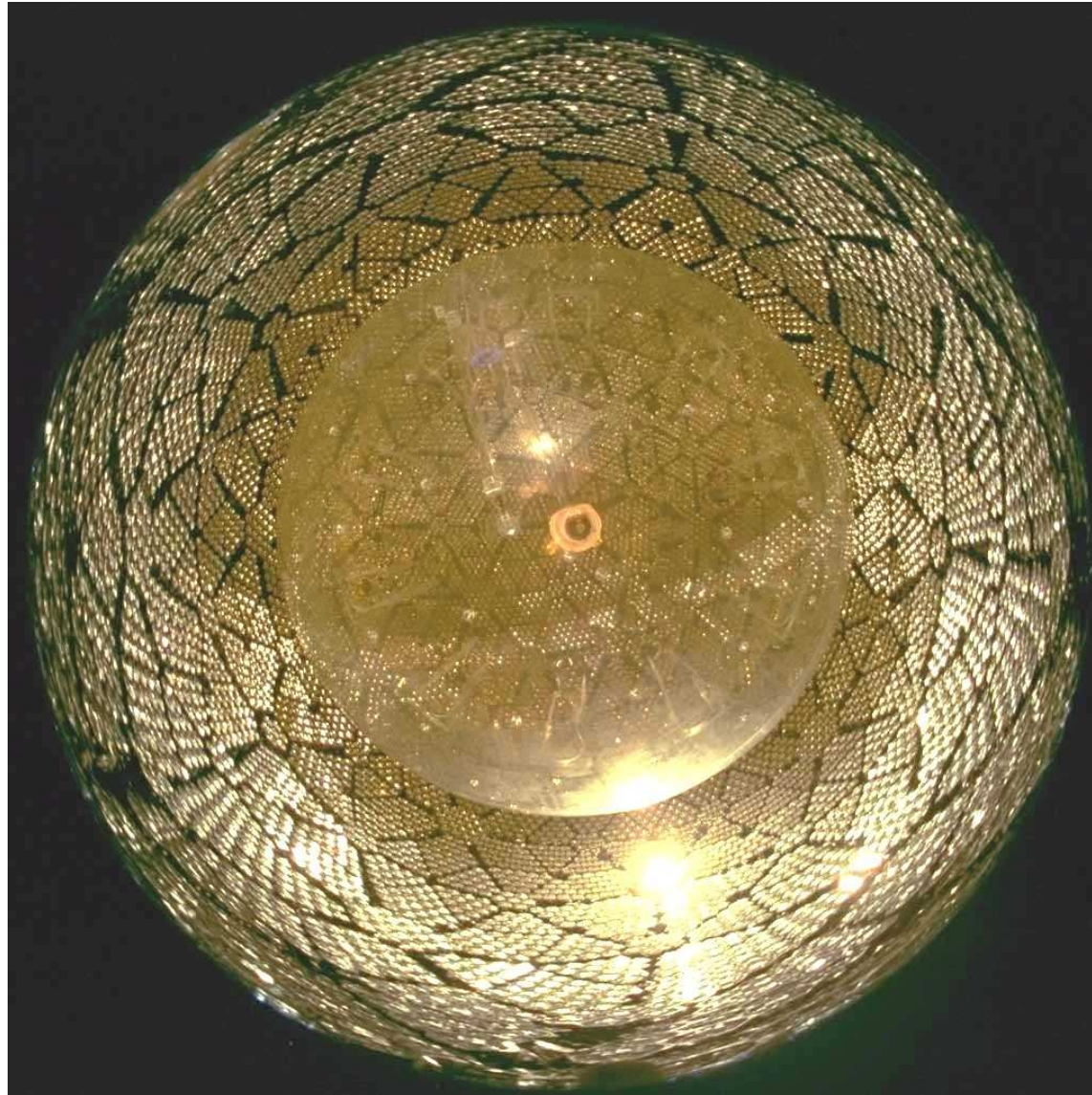
# Superkamiokande



# Sudbury Neutrino Observatory



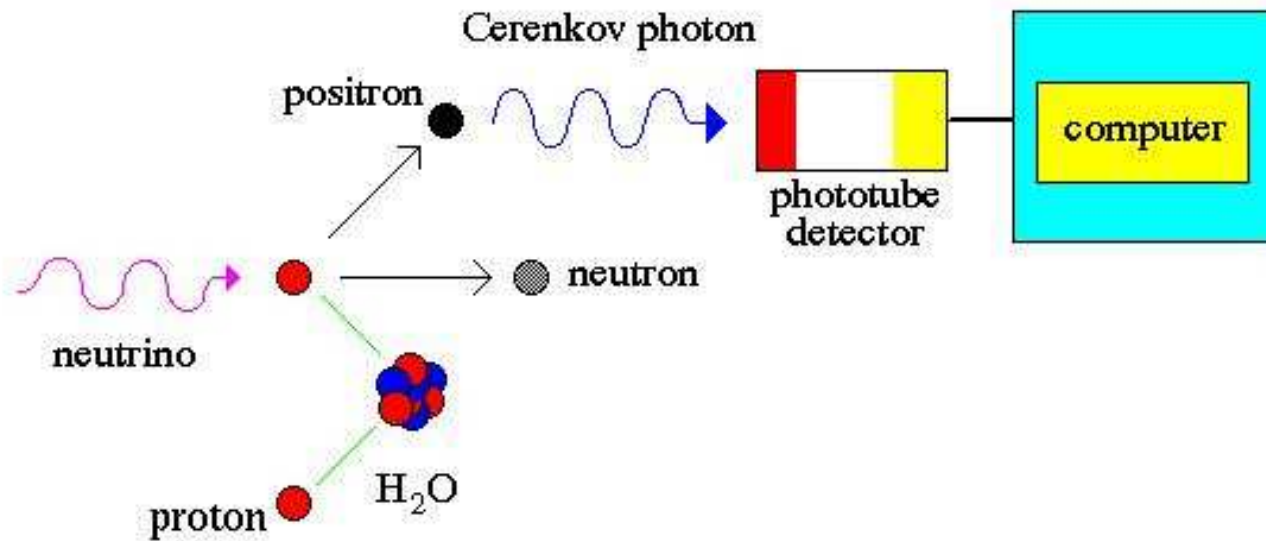
# Subury Neutrino Observatory



# Neutrino nachweisprinzip

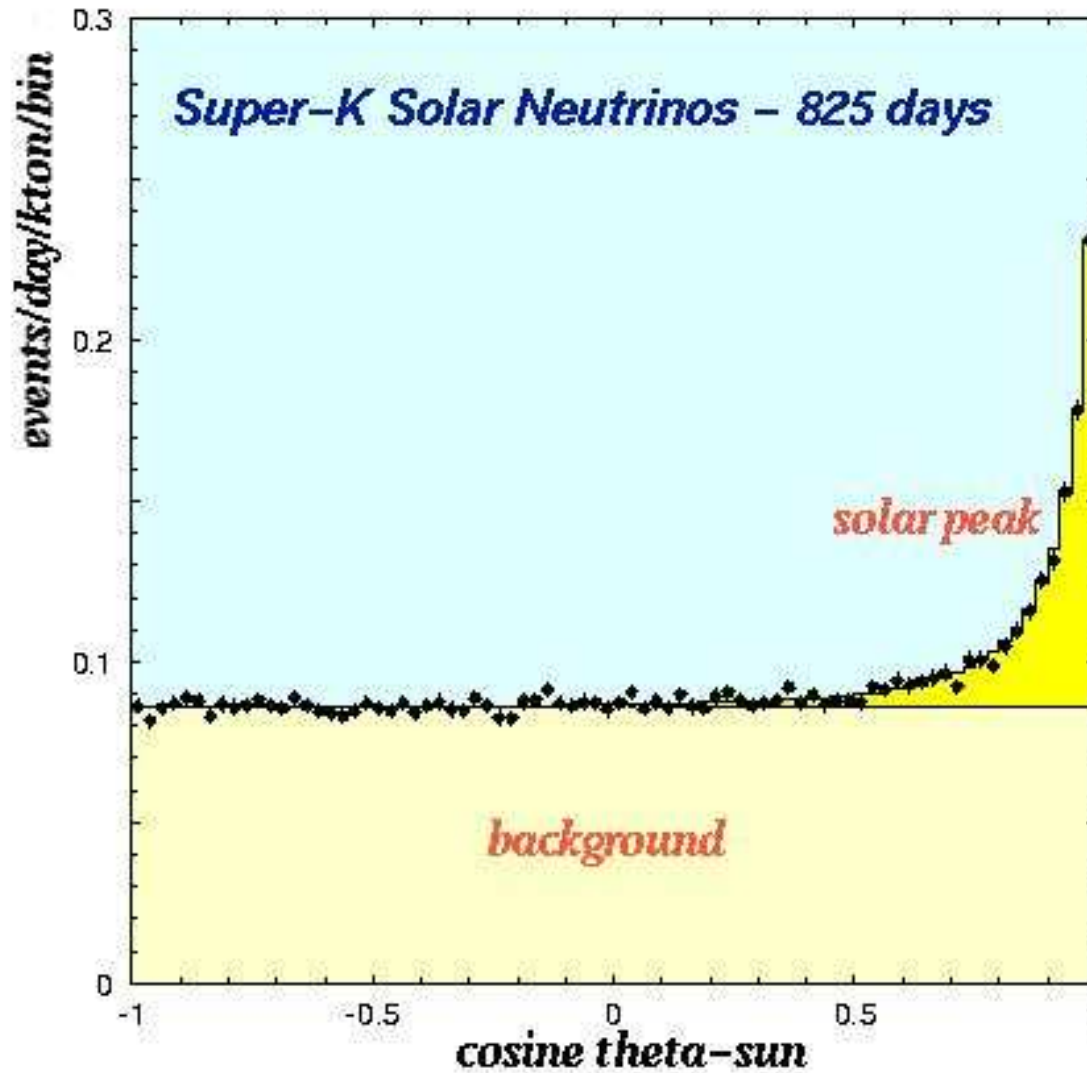


Neutrino Detector



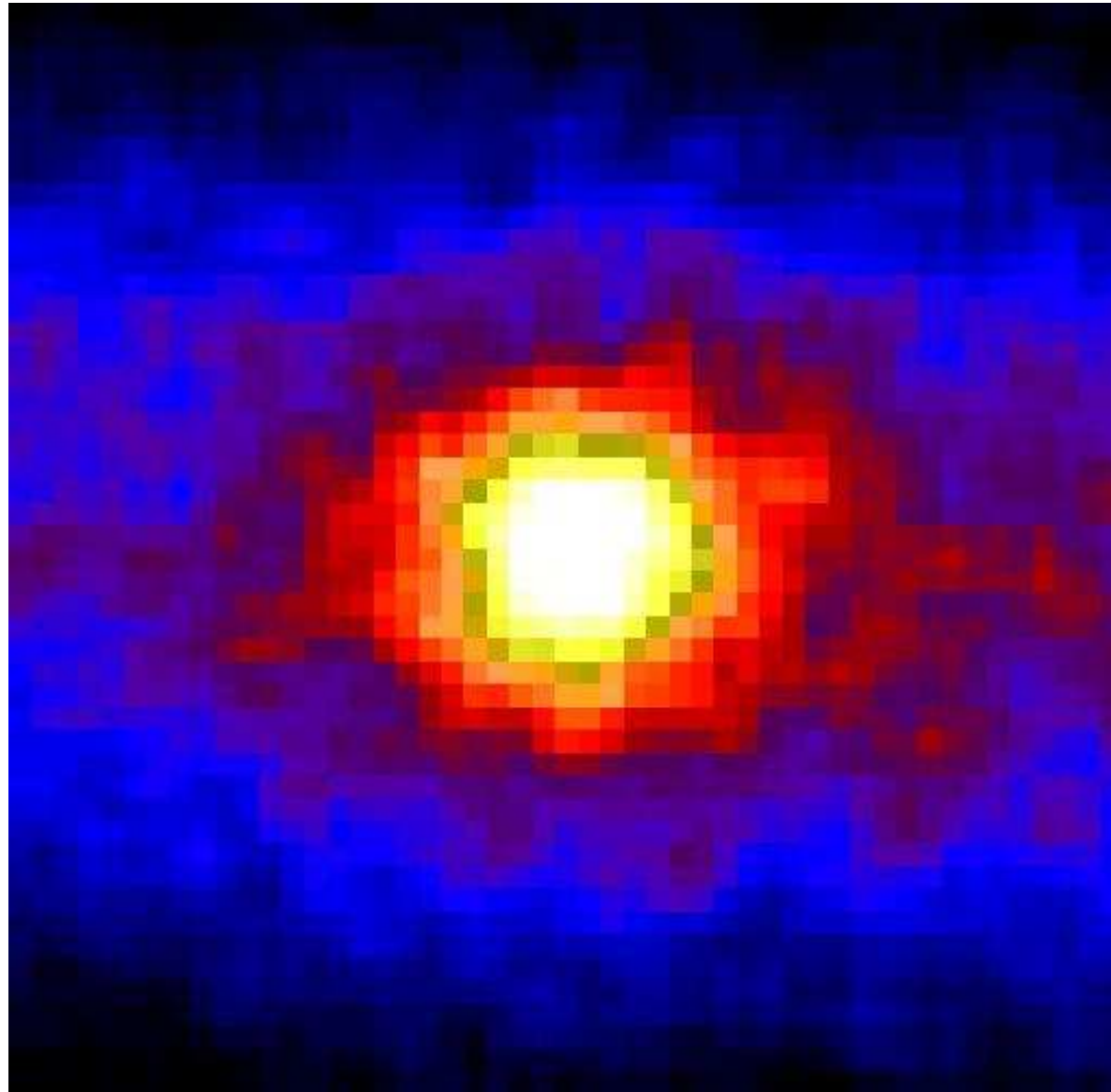
# Neutrinos von der Sonne

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





# 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

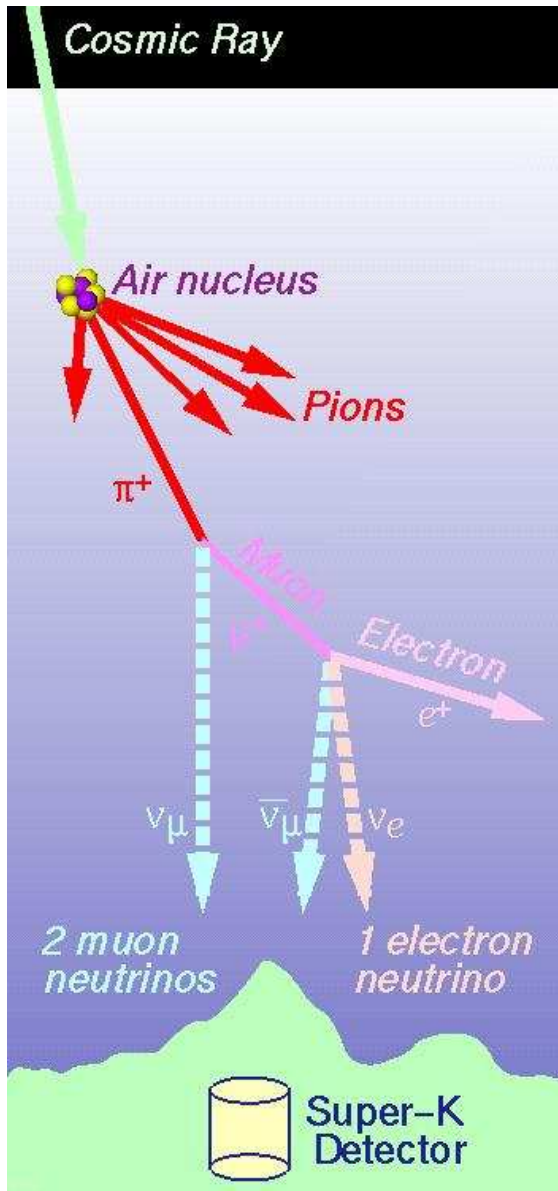
$$\mu^+ \rightarrow e^+ + \nu_e + \bar{\nu}_\mu$$

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

naiverweise erwartet man ein Verhältnis

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

# Superkamiokande



# Nachweis Atmosphärischer $\nu$ '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

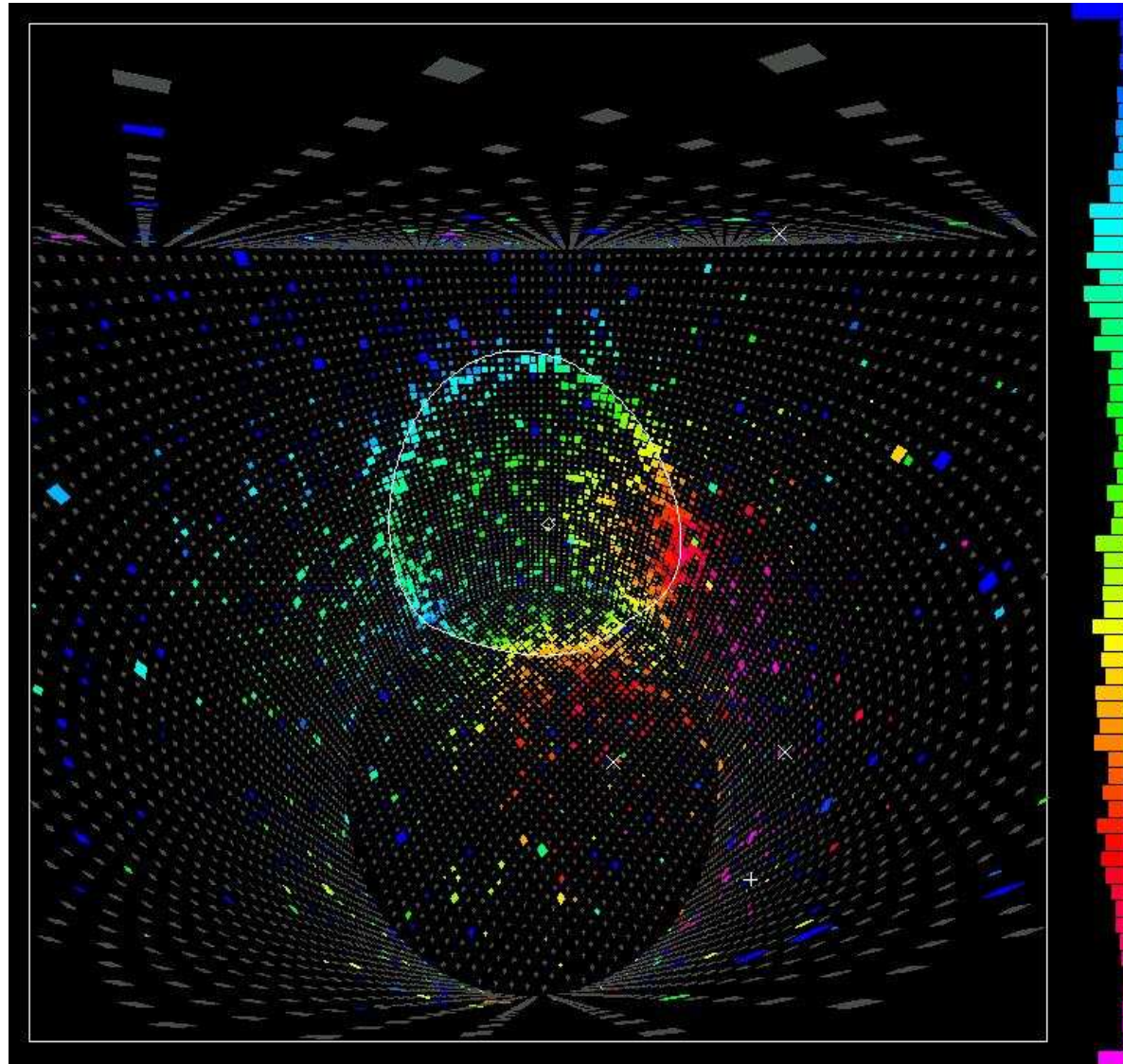
Experimentelle Befund: es werden zu

wenig  $\nu_\mu$ 's gefunden

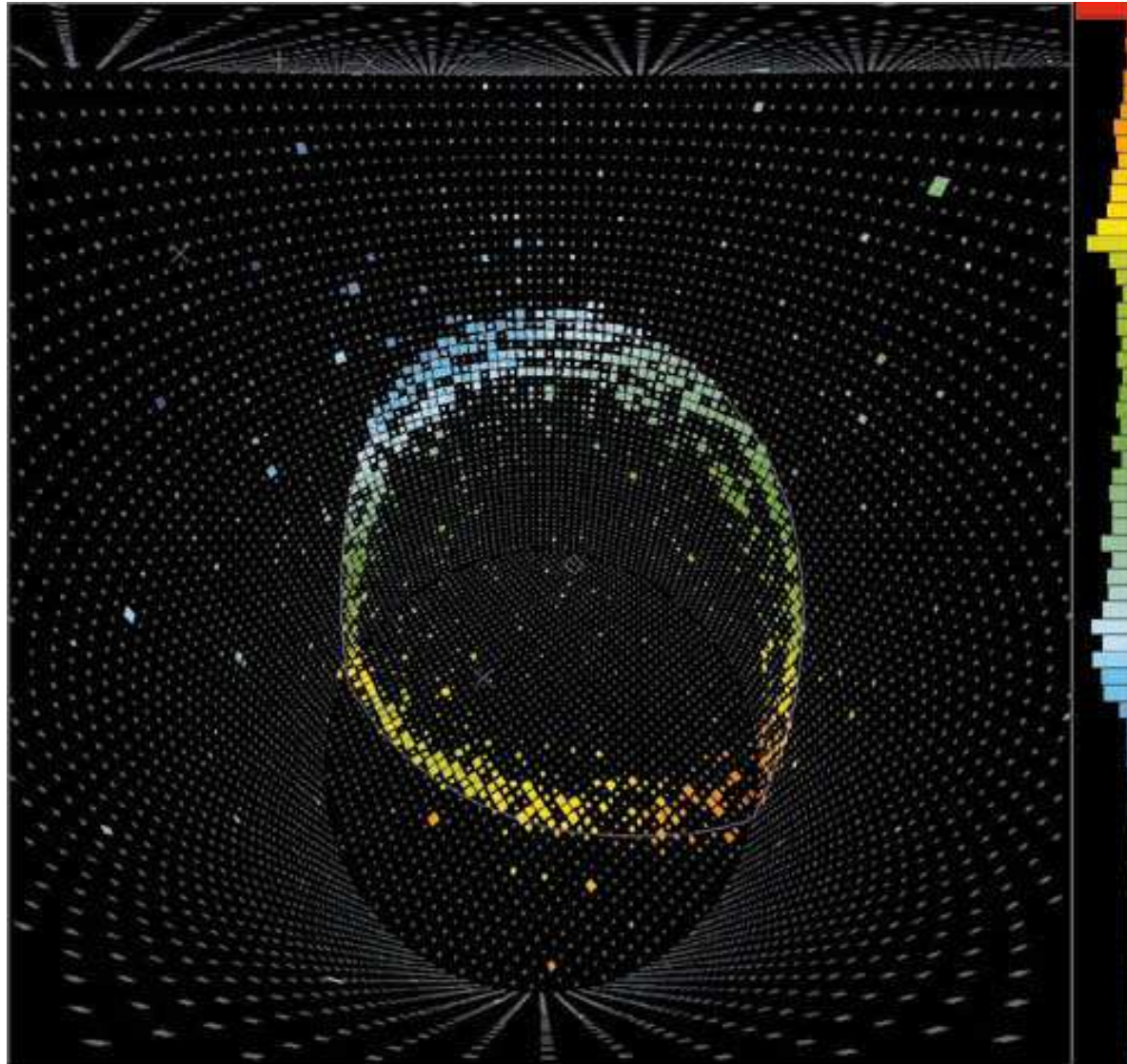
$$\frac{N(\nu_\mu, \bar{\nu}_\mu)}{N(\nu_e, \bar{\nu}_e)} \approx 1,2$$

Lösung: Neutrinooszillationen

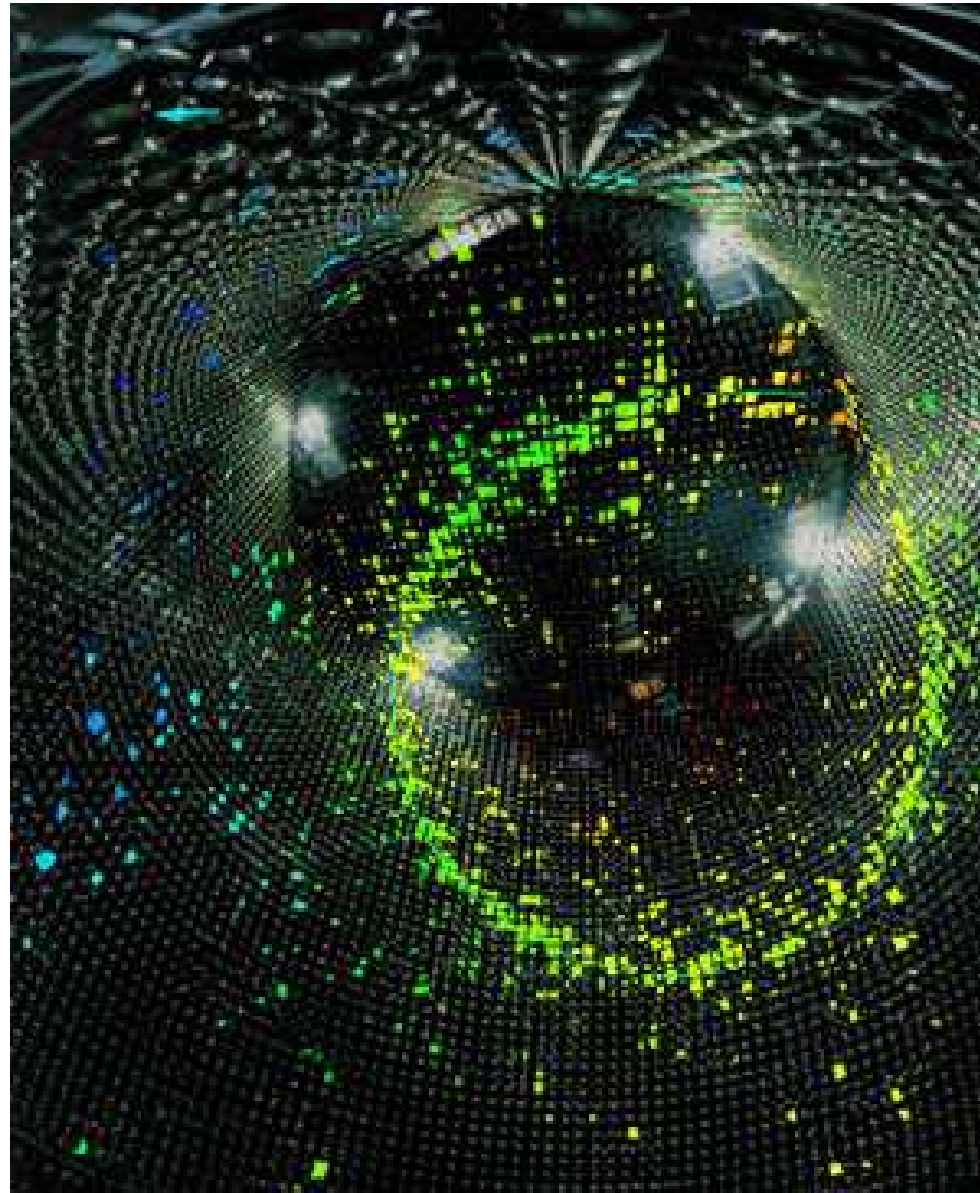
# $\nu$ -Ereignisse



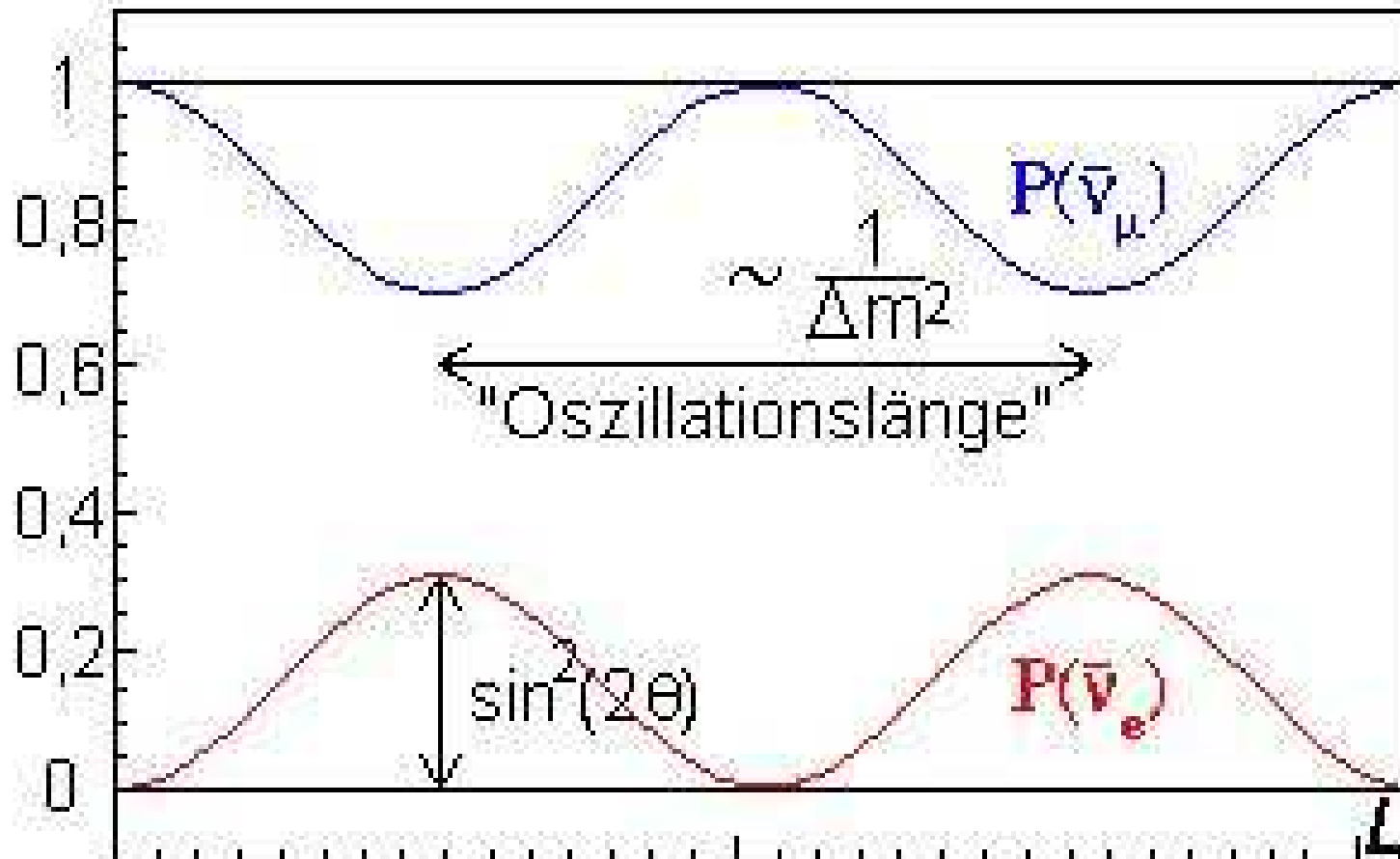
# $\nu$ -Ereignisse



# $\nu$ -Ereignisse

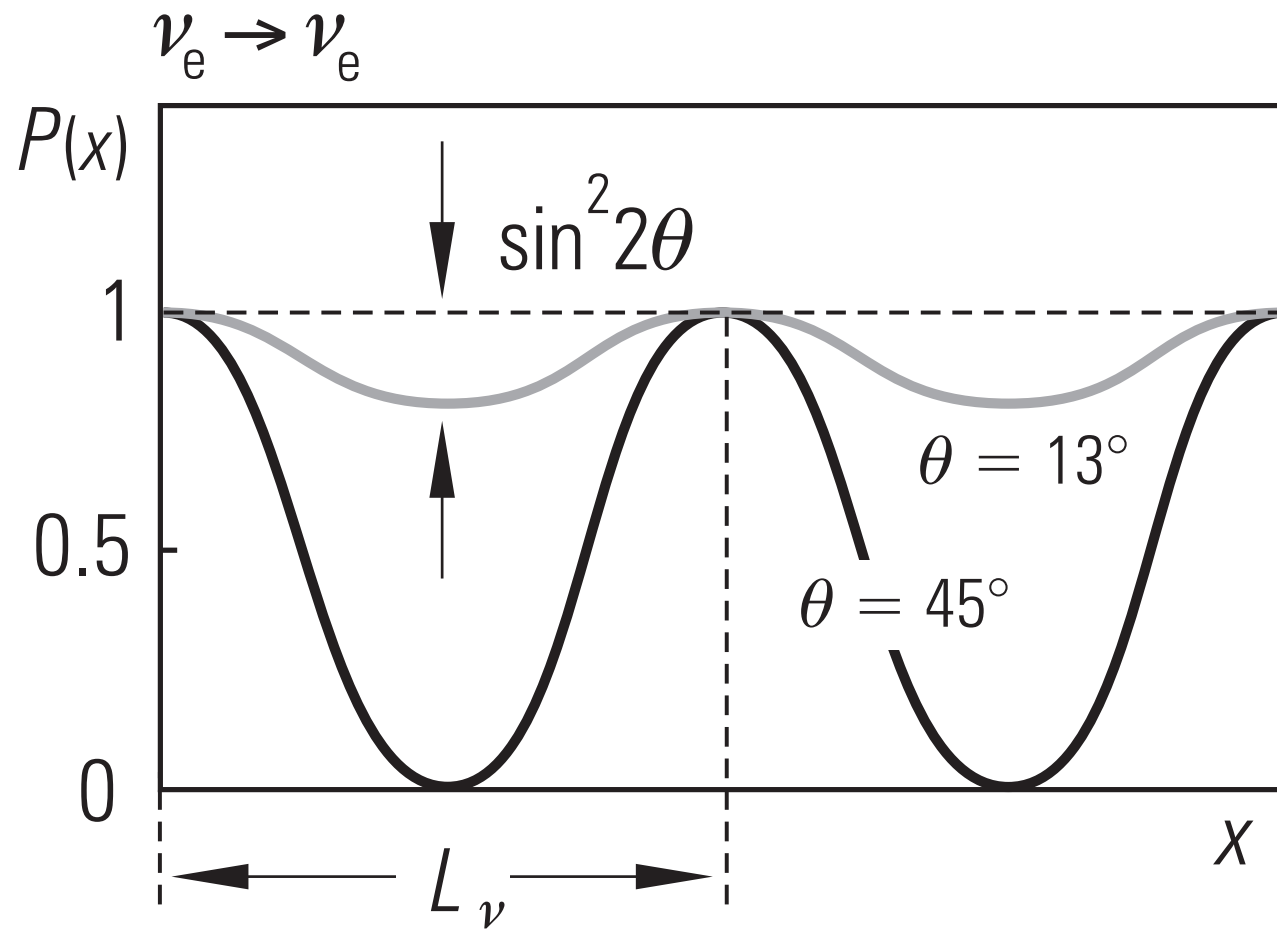


# $\nu$ -Oszillationen



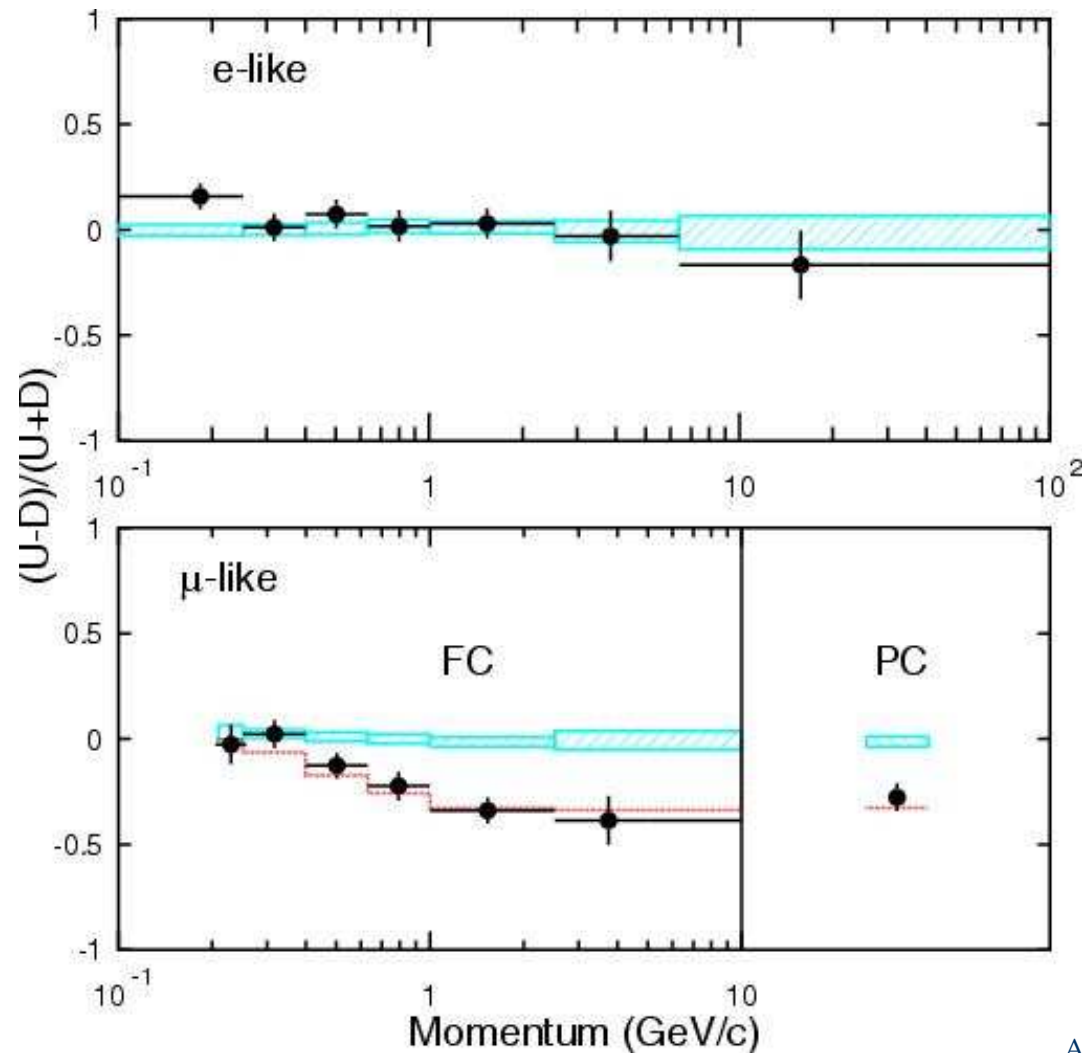


# $\nu$ -Oszillationen



# $\nu$ -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  $\alpha$  für  $\nu_e, \nu_{\mu}$  und  $\nu_{\tau}$  stehen

# Nachweis von Supernova $\nu$ '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  $\nu$ '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

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

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

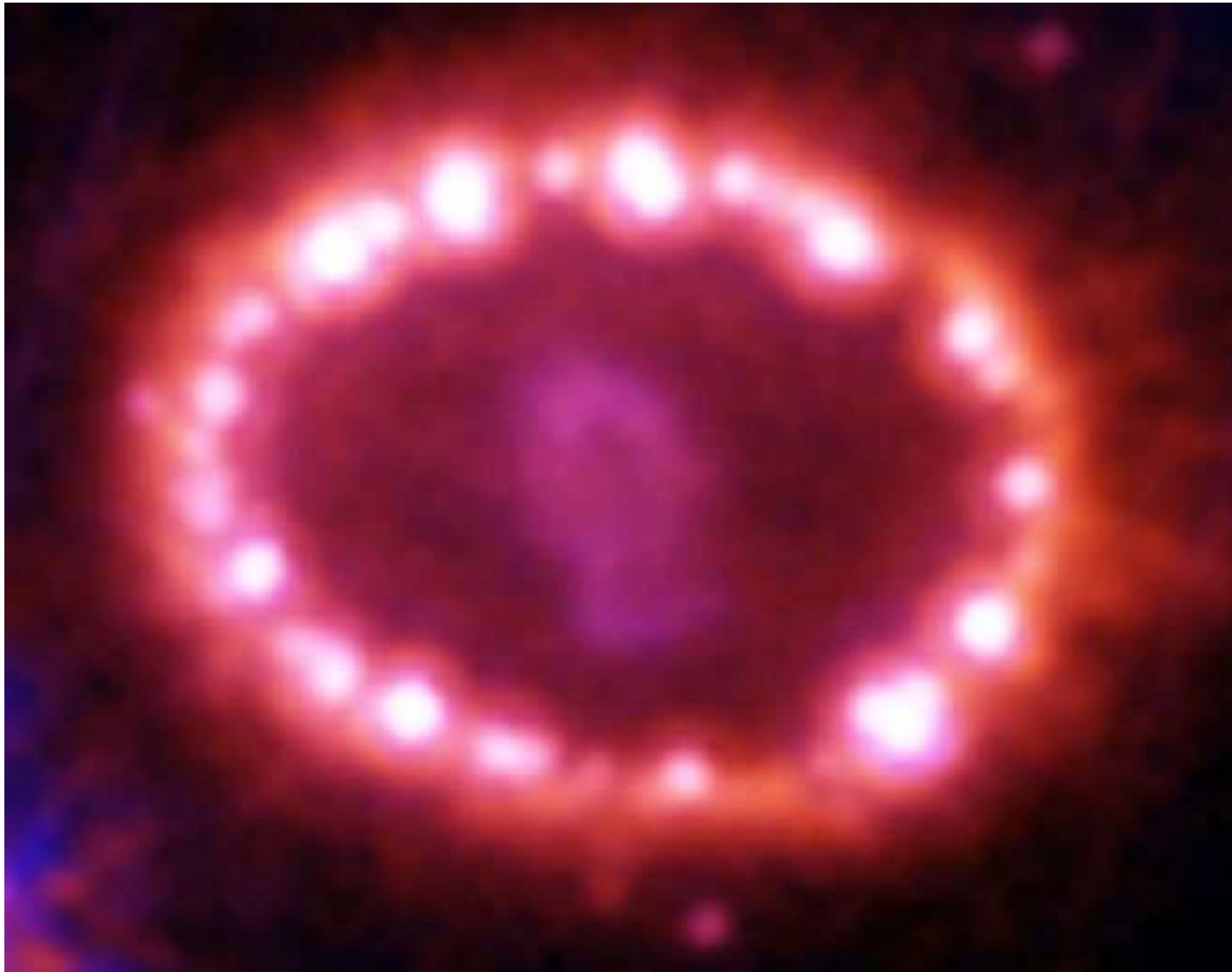
$$m_0 = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta t}{L \cdot c^3} \cdot \frac{E_1^2 \cdot E_2^2}{E_2^2 - E_1^2}}$$

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

# Tarantel-Nebel

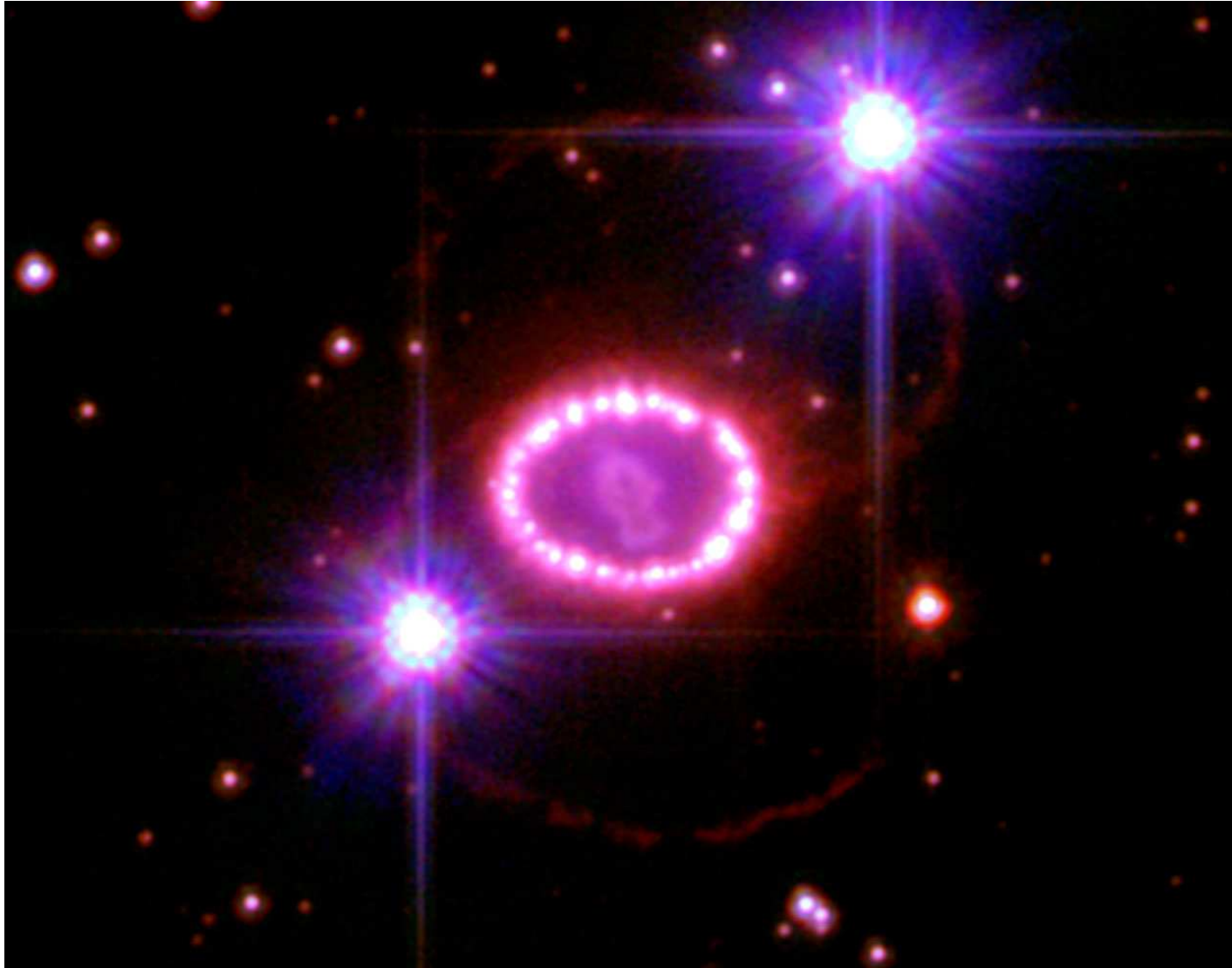


# Supernova 1987A

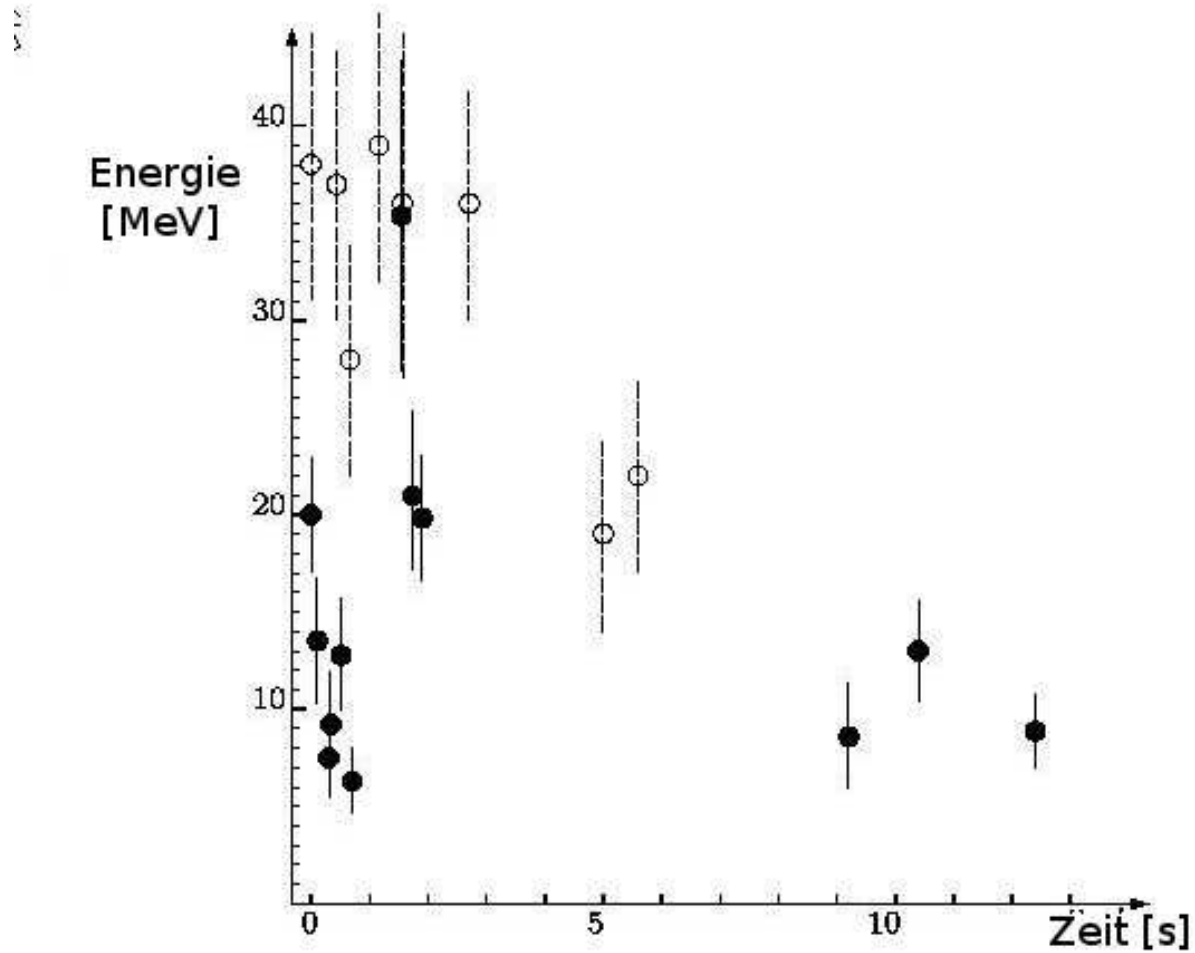




# Supernova 1987A



# Supernova 1987A

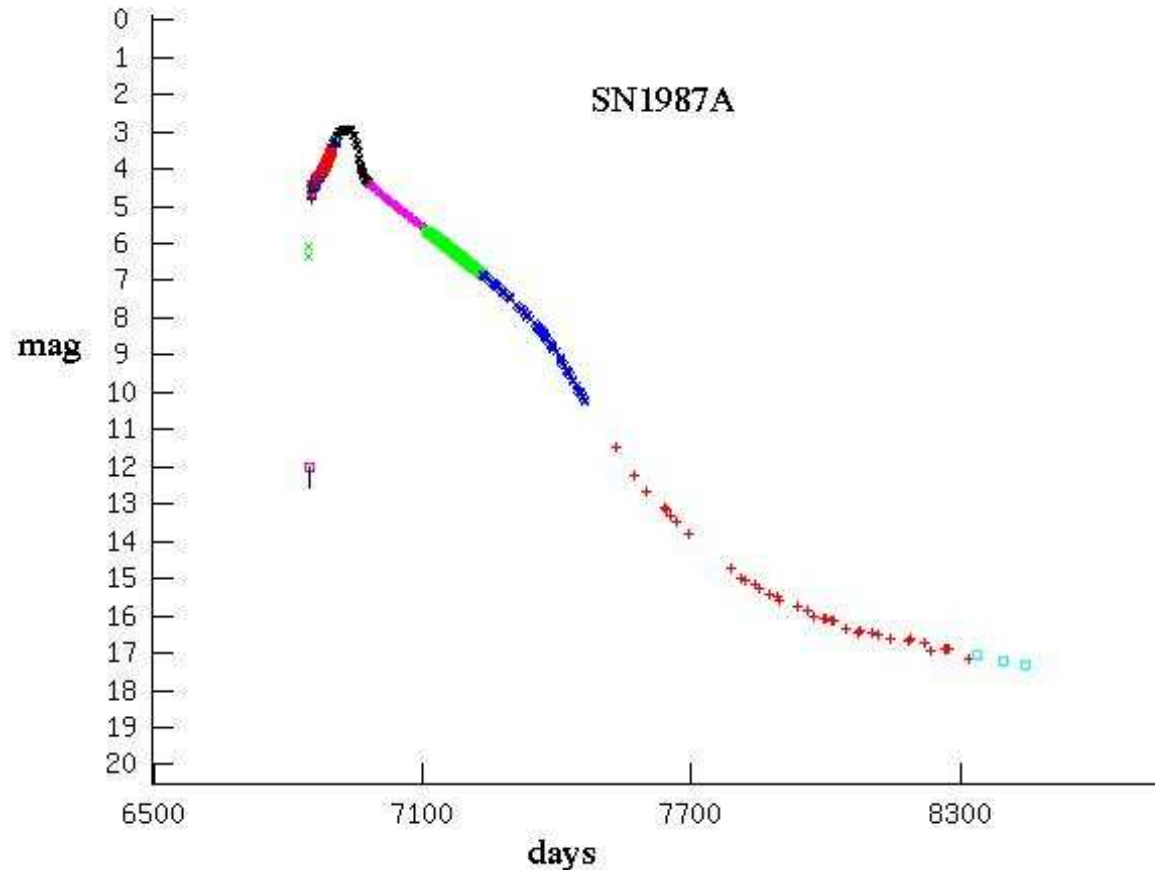


offene Kreise: IMB-Experiment; volle Kreise: Kamiokande

# Energieausstoß

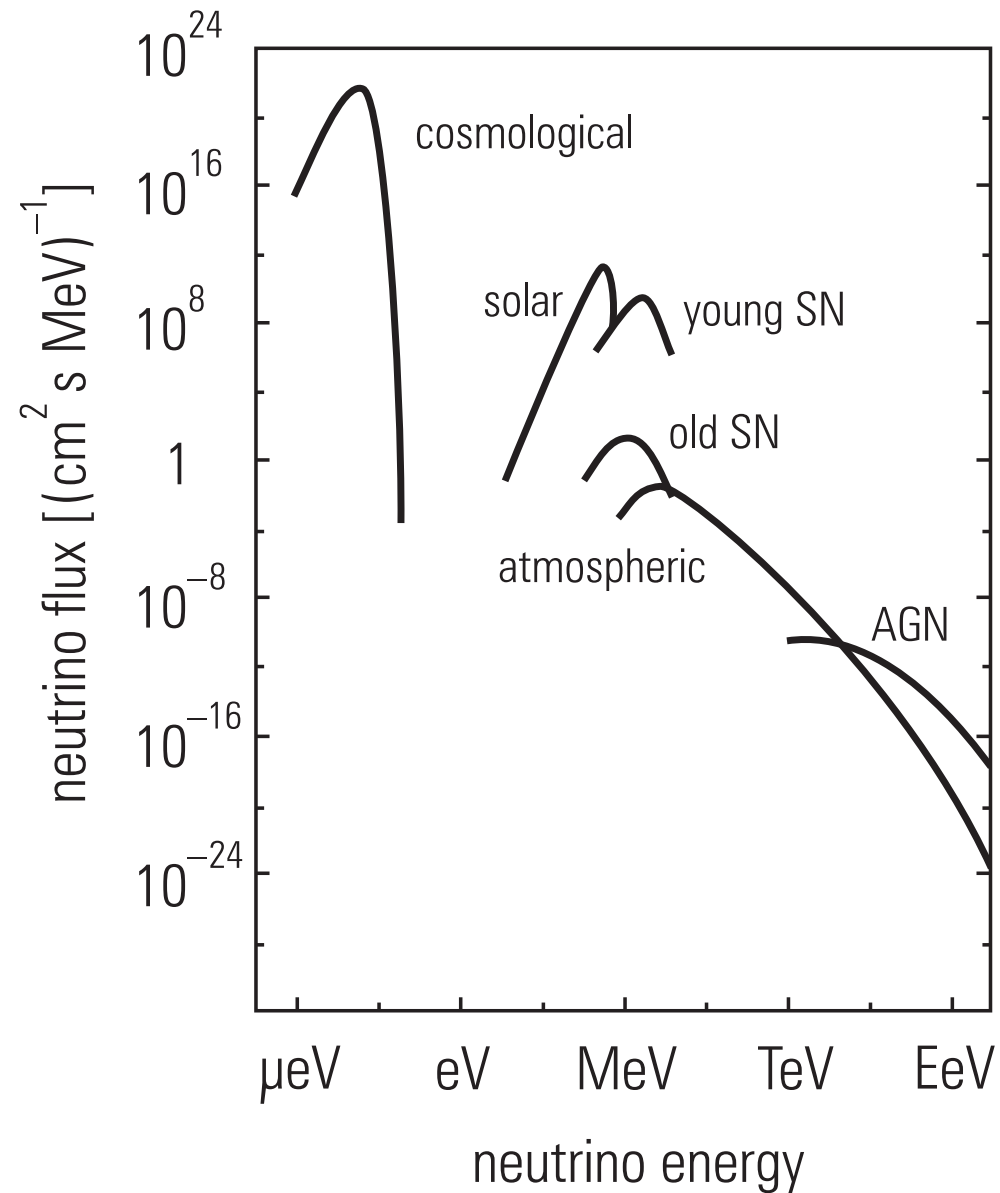
$$E_{total} = \sum_{i=1}^{20} \frac{E_{\nu}^i}{\epsilon_1(E_{\nu}^i) \cdot \epsilon_2(E_{\nu}^i)} \cdot 4 \cdot \pi \cdot r^2 \cdot f(\nu_{\alpha}, \bar{\nu}_{\alpha})$$
$$\approx (6 \pm 2) \cdot 10^{46} \text{ Joule}$$
$$\cong 10^{58} \text{ emittierte Neutrinos}$$

# Lichtkurve 1987A

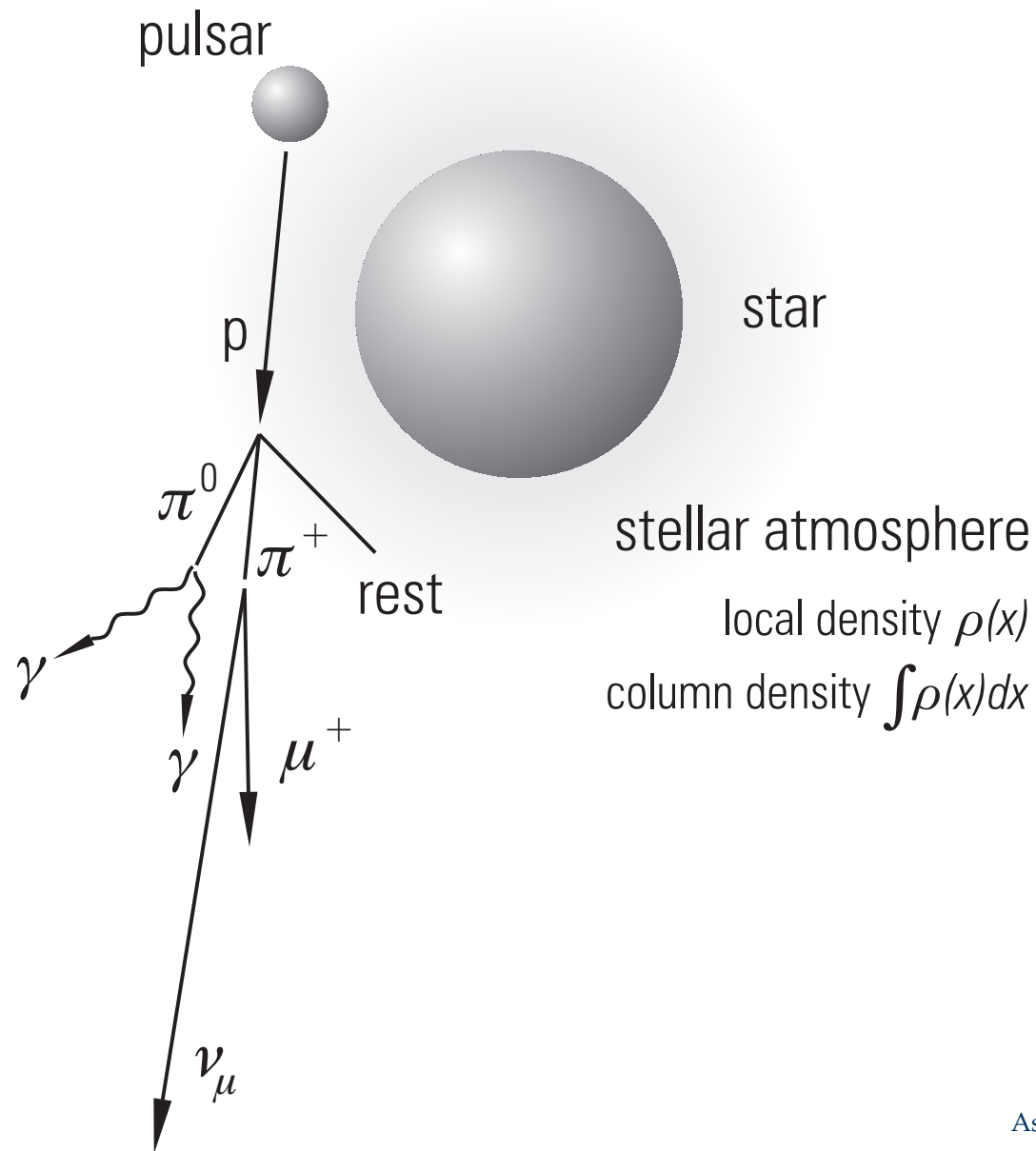


Das Licht im optischen Spektralbereich geht letztlich auf den radioaktiven Zerfall von Kobalt und Nickel zurück.

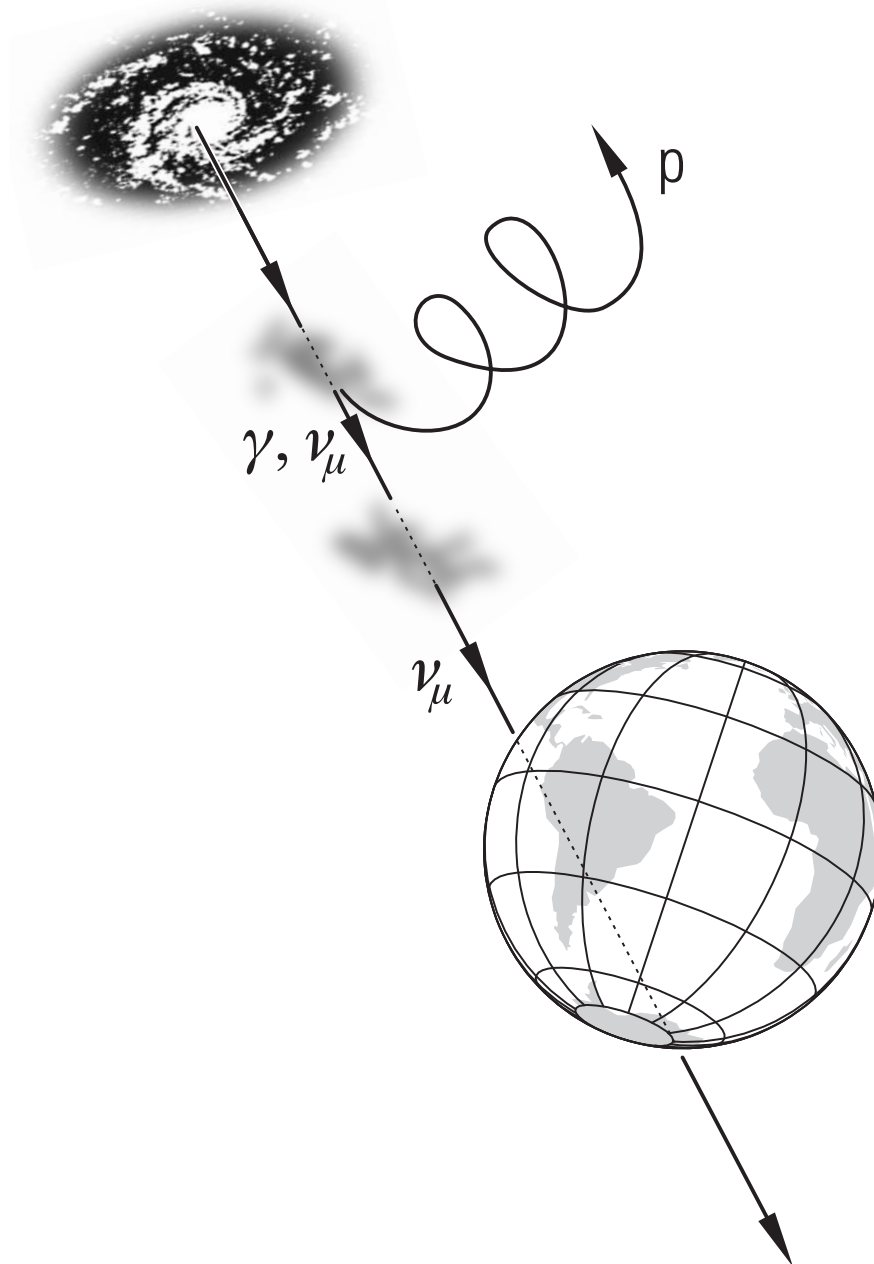
# Neutrino Flüsse-Übersicht



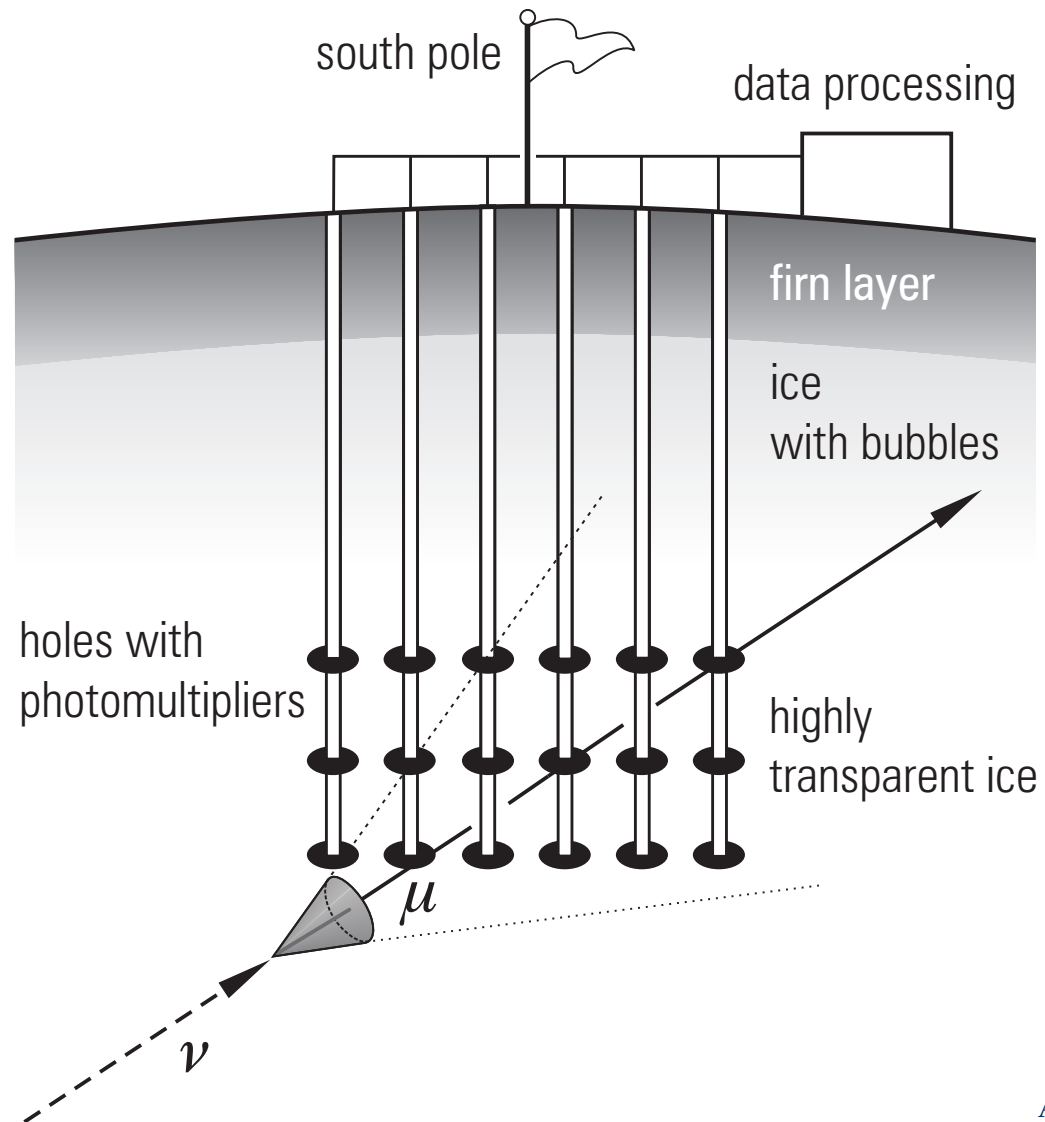
# Galaktische und Extragalaktische $\nu$ 's



# Galaktische und Extragalaktische $\nu$ 's

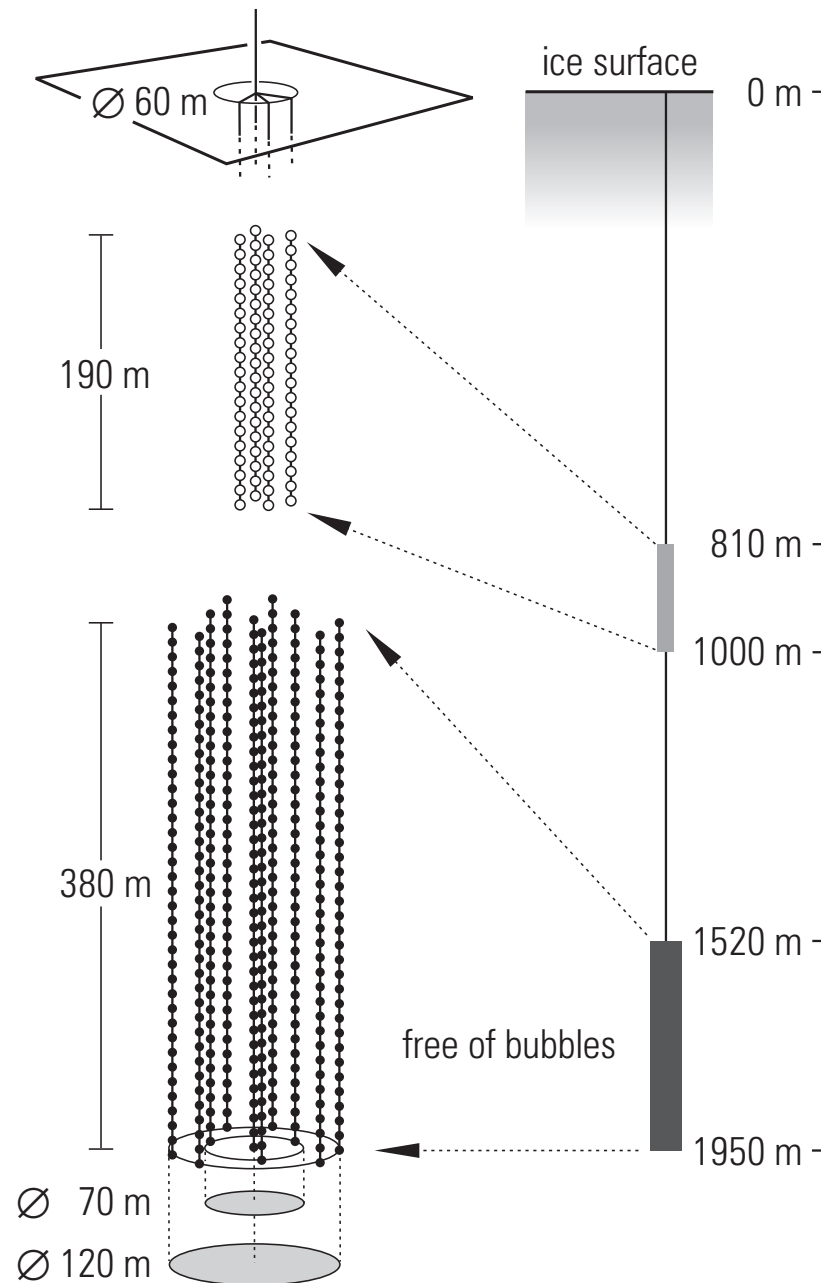


# AMANDA in der Antarktis

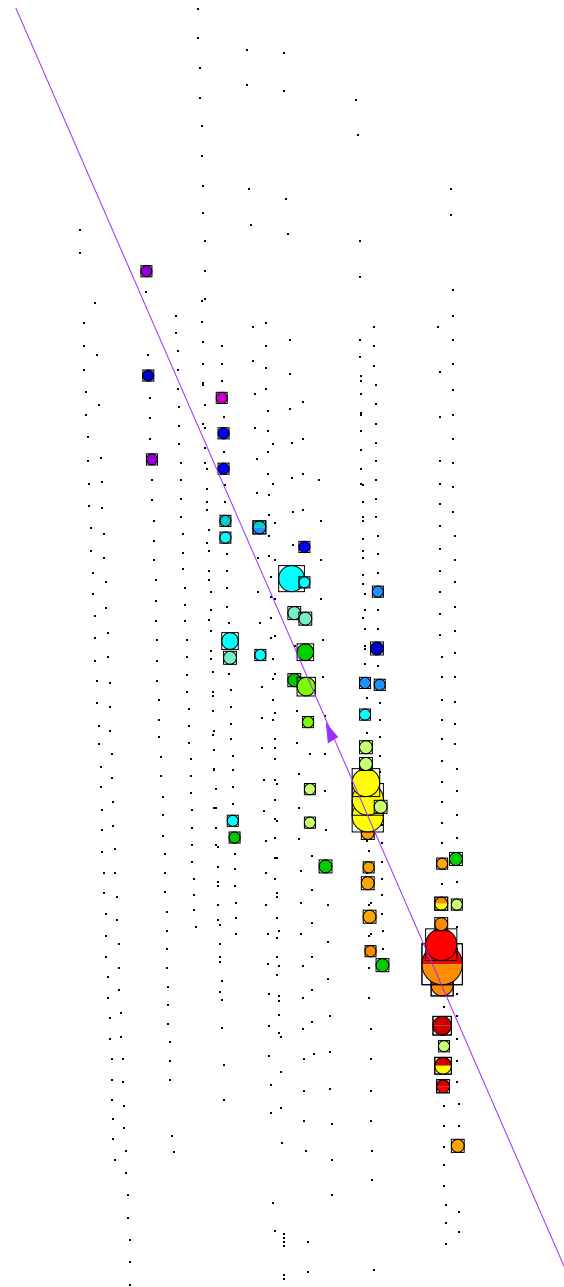




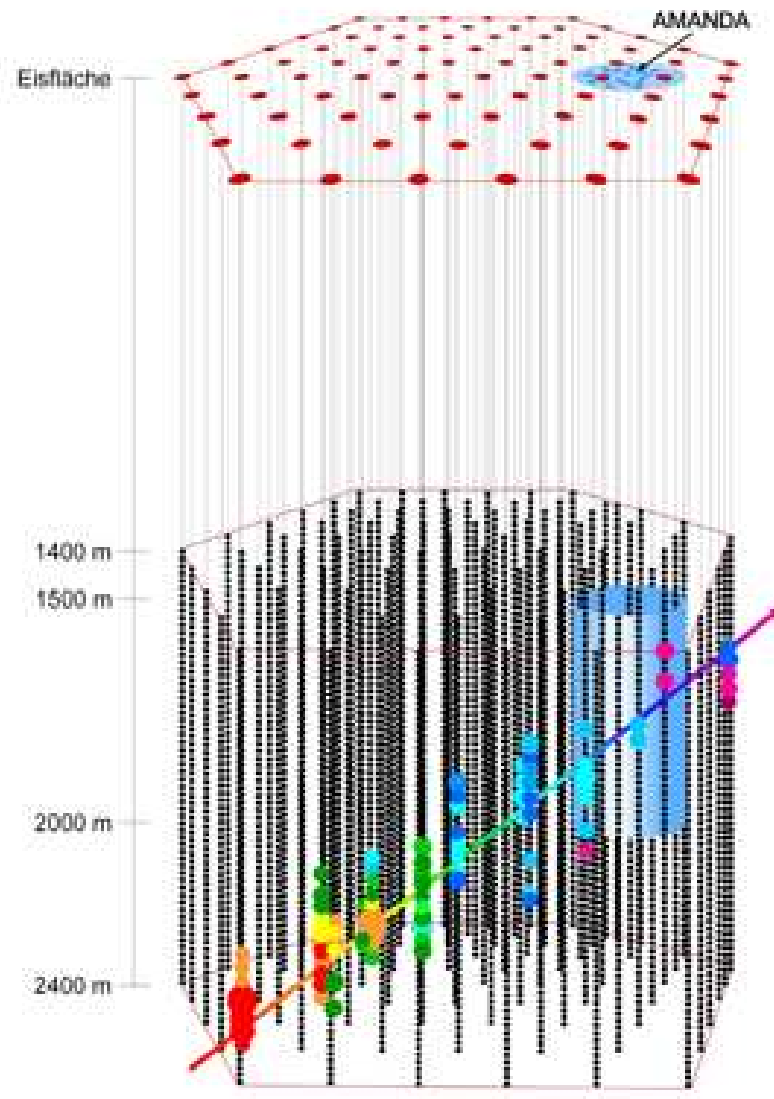
# AMANDA Aufbau



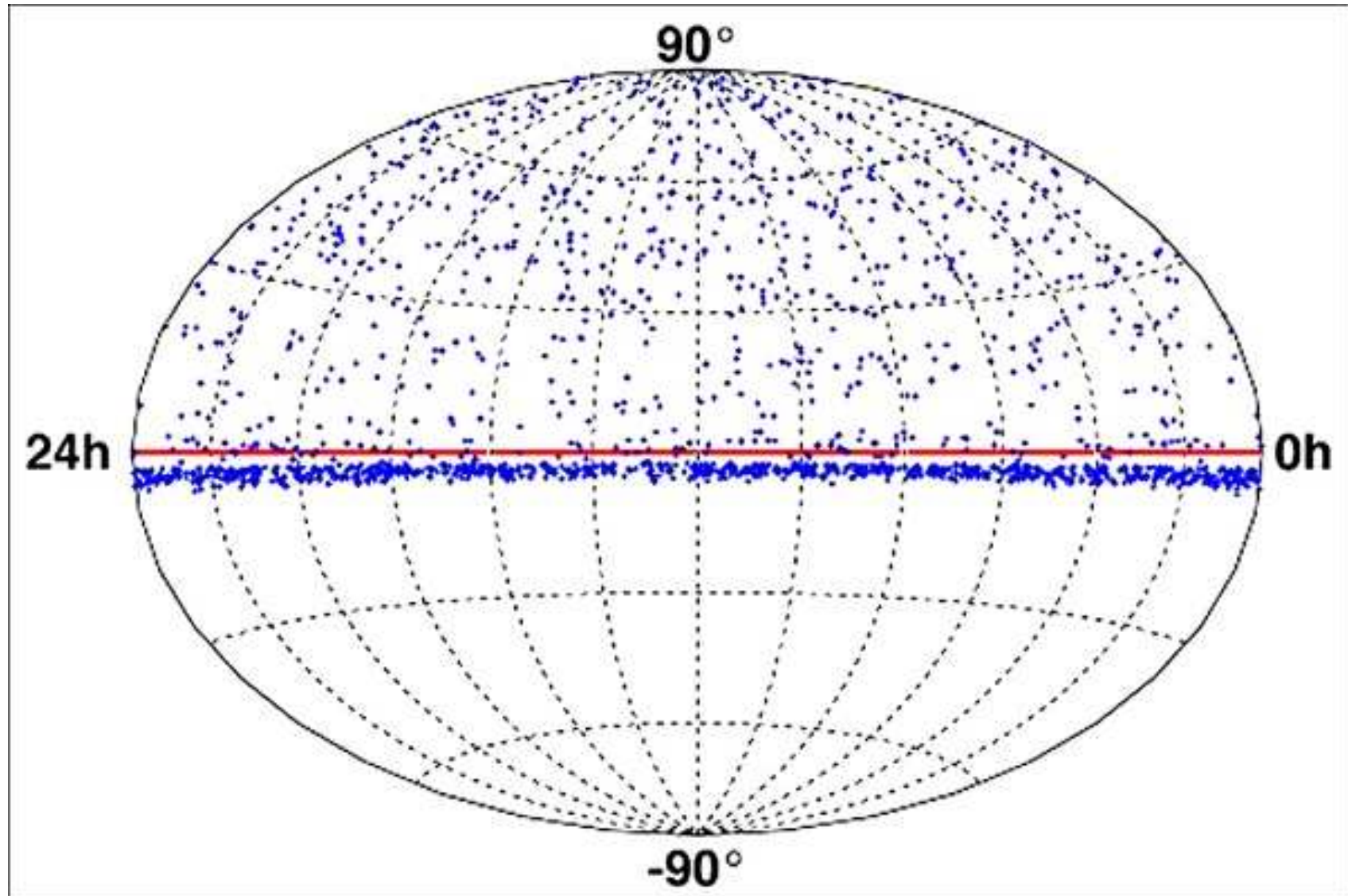
# AMANDA Ereignis



# ICECUBE Aufbau



# Neutrino-Himmel



# Zusammenfassung

- Röntgen-,  $\gamma$  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