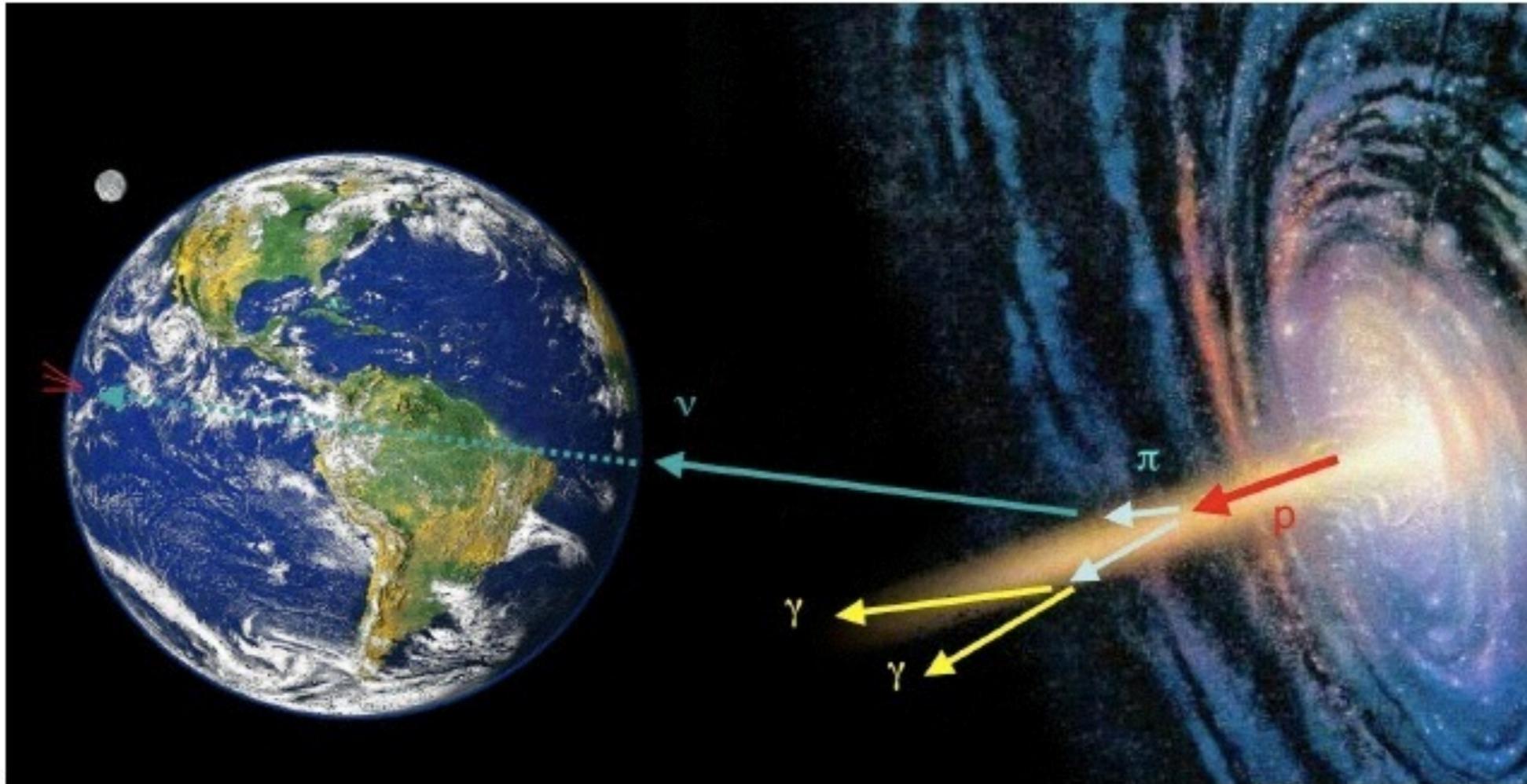


# Teilchenphysik mit kosmischen und mit erdgebundenen Beschleunigern



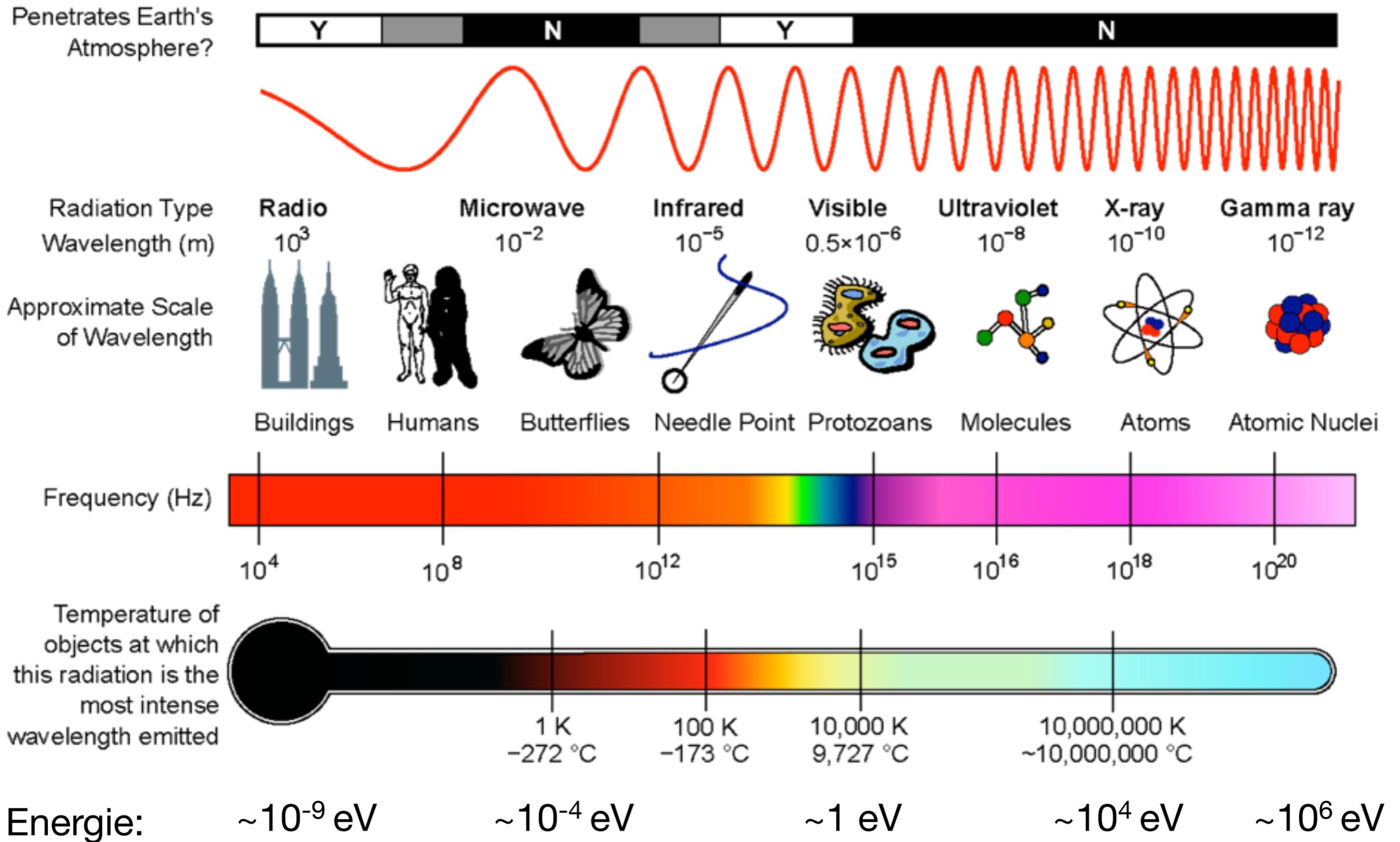
## 10. Kosmische Strahlung II

23.06.2014



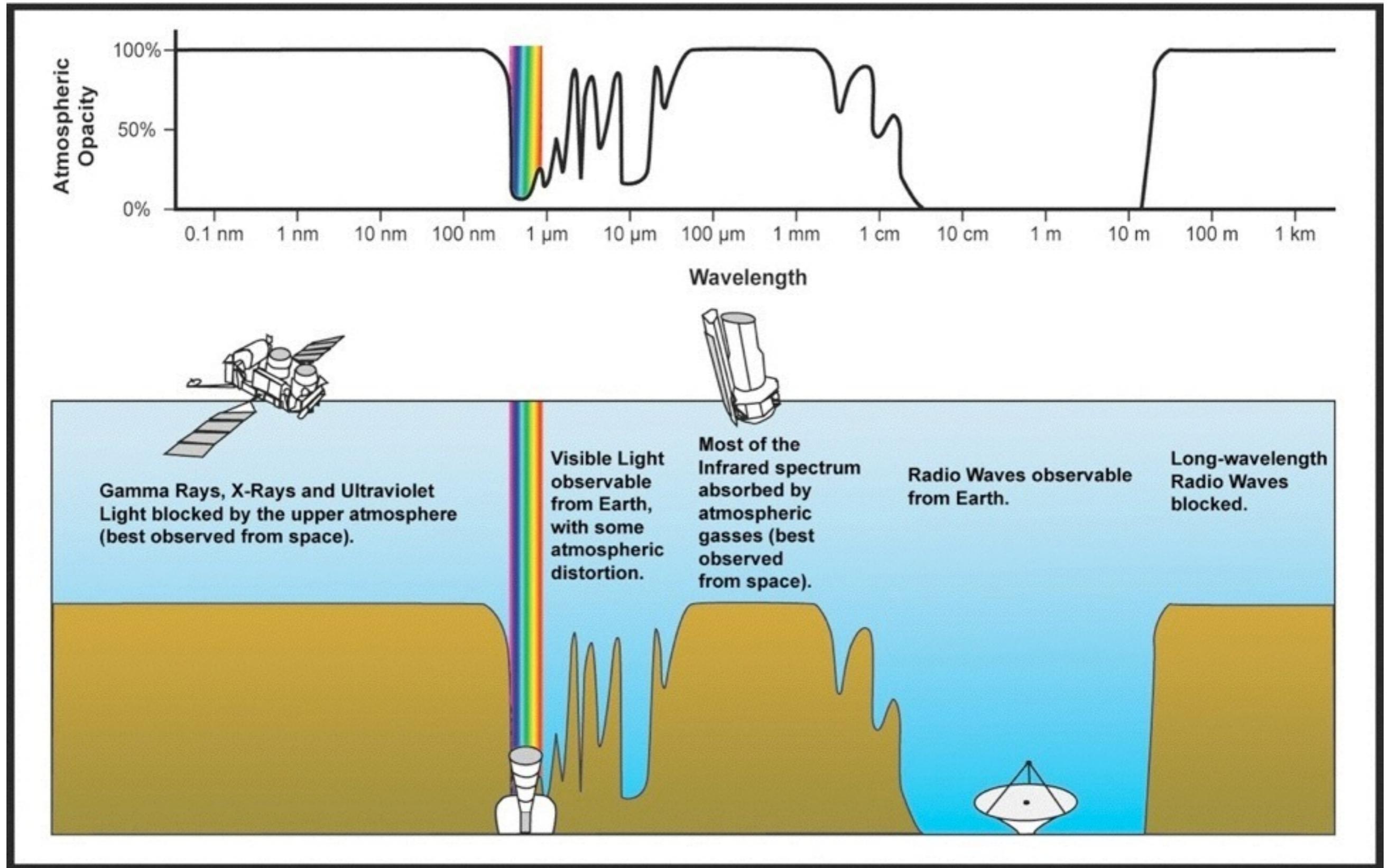
# Neutrale Kosmische Strahlung

# Elektromagnetische Strahlung



$$E = h\nu = \nu \times 4.14 \times 10^{-15} \text{ eVs}$$

# Elektromagnetische Strahlung & Atmosphäre



# Elektromagnetische Strahlung von Materie

- Thermische Strahlung:
  - z.B. Sonne: Emittiert bei 5700 K (Oberflächentemperatur der Sonne)
  - Zwei-Teilchen-Wechselwirkungen sorgen für thermisches Gleichgewicht

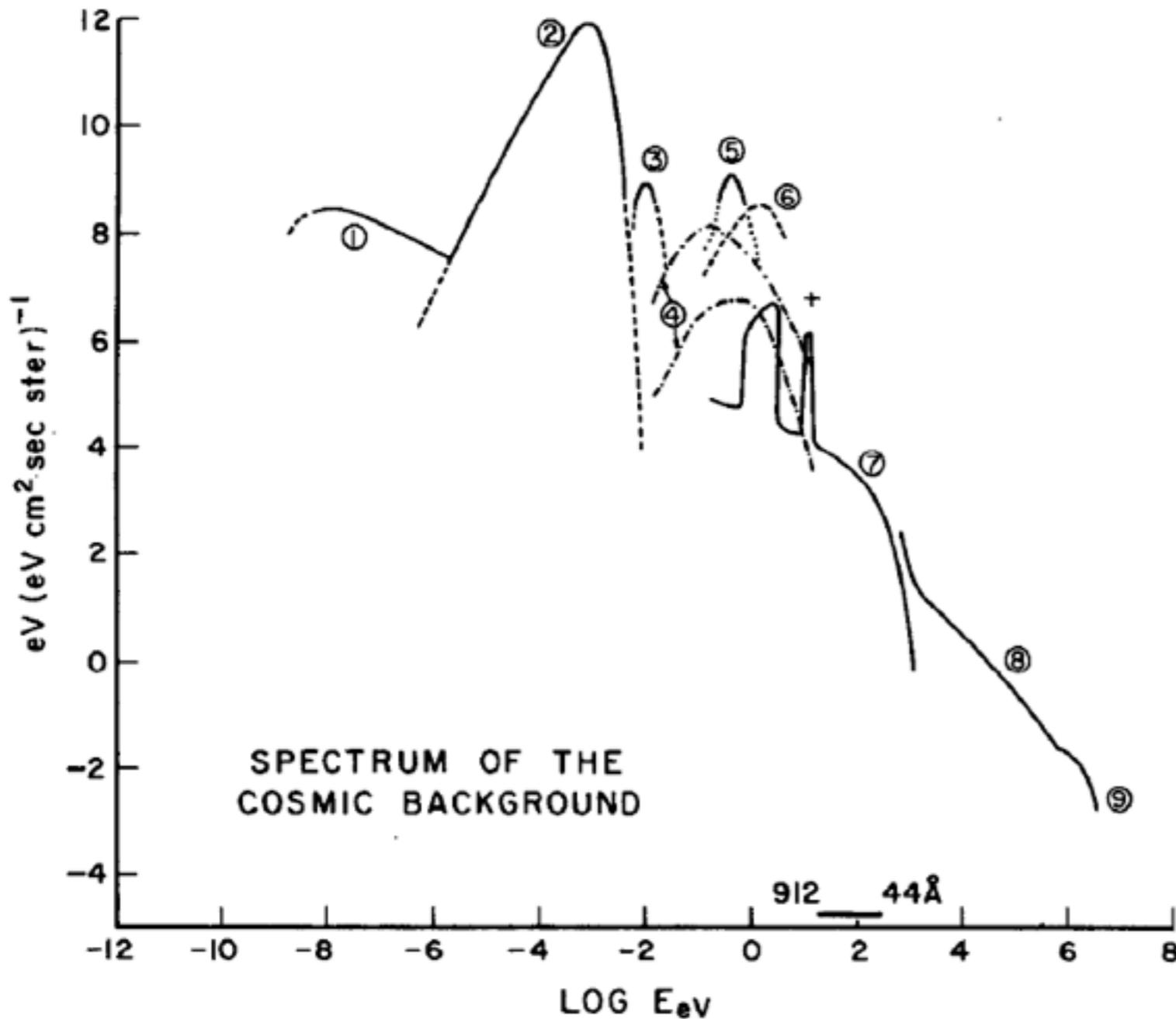
$$\propto e^{-\frac{E}{kT}}$$

- Nicht-Thermische Strahlung:
  - geringe Dichte von Plasma-Teilchen
  - einige wenige Teilchen können in Wechselwirkungen sehr hohe Energien erreichen

$$\propto E^{-\gamma}$$

- Thermische und nicht-thermische Komponenten eines Gases können parallel existieren und auch miteinander wechselwirken

# Kosmischer Untergrund



Annu. Rev. Astron. Astrophys. 9, 89 (1991)

1. Radio-Untergrund, Synchrotron-strahlung von  $e^-$  in galakt. B-Feld
2. Mikrowellen-Hintergrund, 2.7 K
3. Emissionen von kalten interstellaren Staub
4. Emission weit entfernter Galaxien
5. Heisser interstellarer Staub
6. Optischer Untergrund: Streuung von Sonnenlicht an interplanetarem Staub
7. Ionisiertes intergalaktisches Medium

# Beobachtung bei verschiedenen Wellenlängen

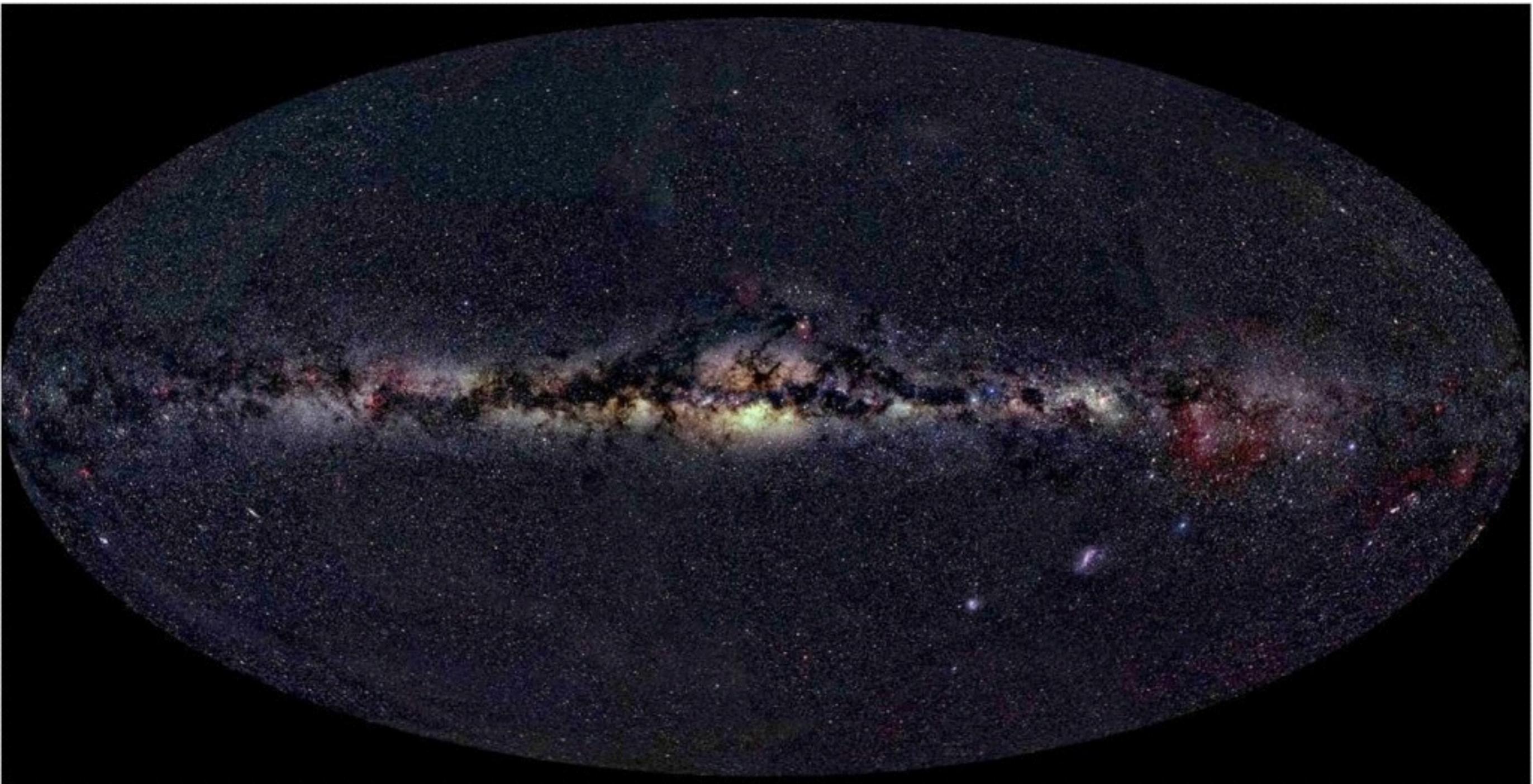
Radio ( $10^{-6}$  eV)

IR ( $10^{-2}$  eV)

sichtbar (1 eV)

X-Ray ( $10^3$  eV)

Gamma ( $10^9$  eV)



- Zentrale Regionen der Galaxie durch Staub verborgen

# Beobachtung bei verschiedenen Wellenlängen

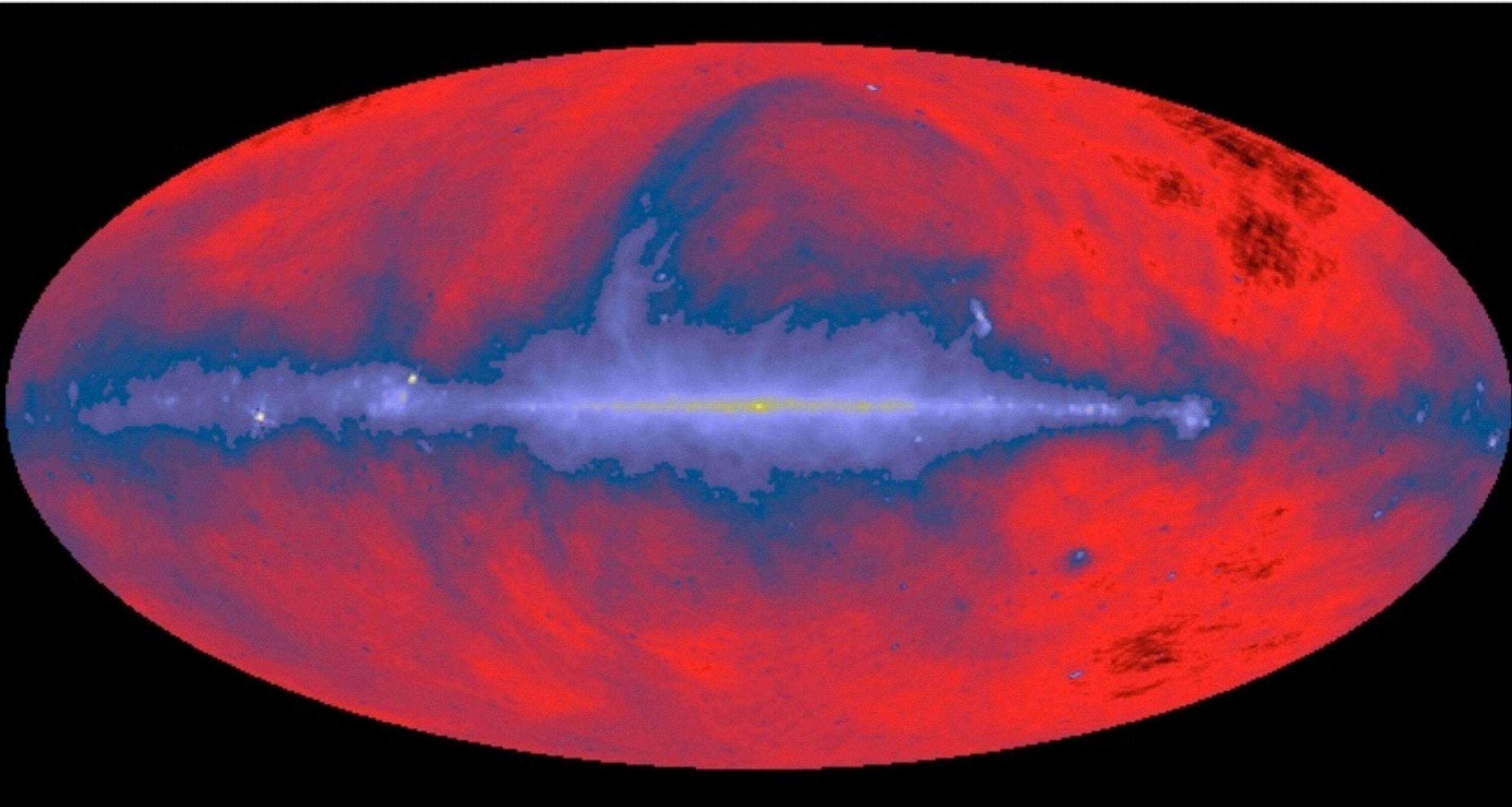
Radio ( $10^{-6}$  eV)

IR ( $10^{-2}$  eV)

sichtbar (1 eV)

X-Ray ( $10^3$  eV)

Gamma ( $10^9$  eV)



# Beobachtung bei verschiedenen Wellenlängen

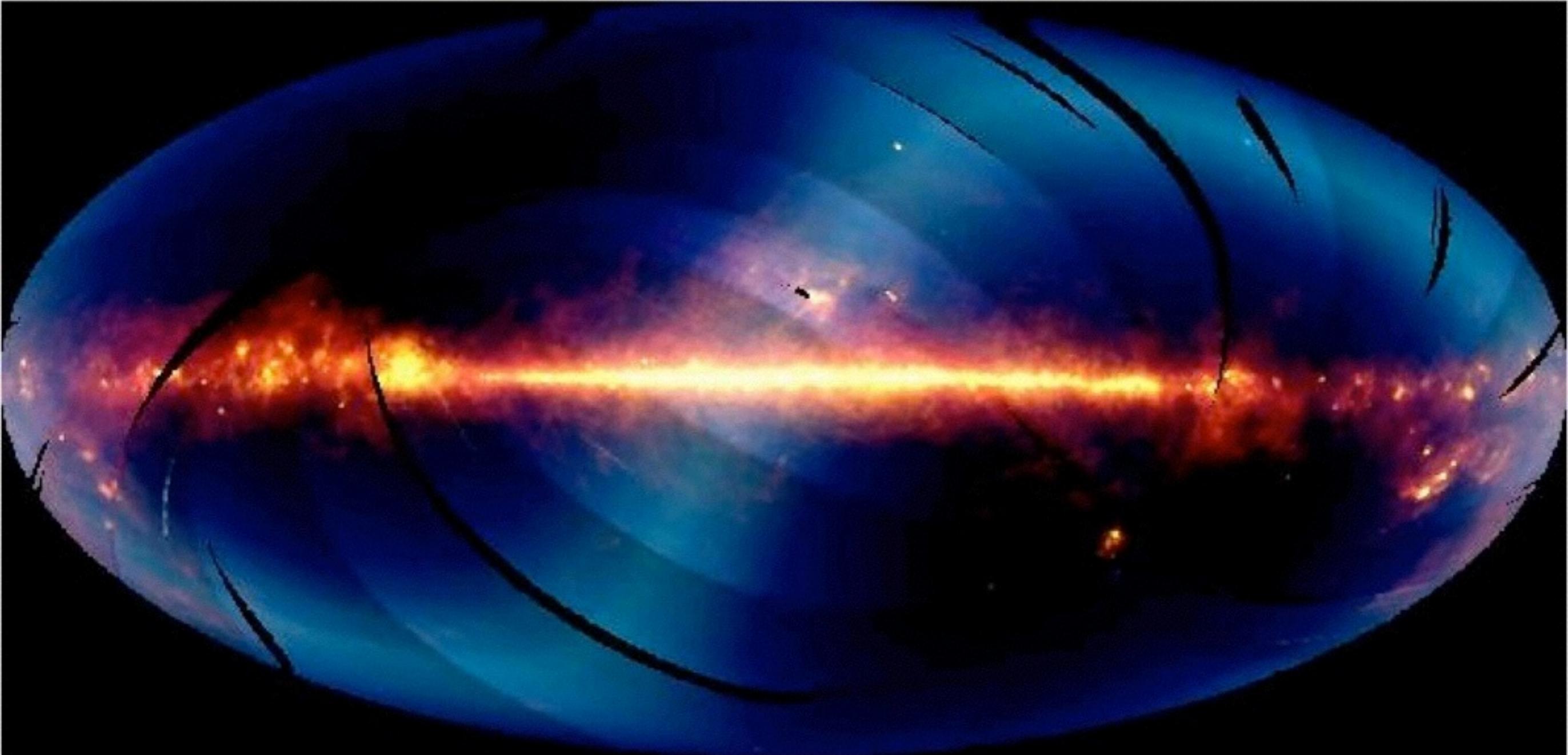
Radio ( $10^{-6}$  eV)

IR ( $10^{-2}$  eV)

sichtbar (1 eV)

X-Ray ( $10^3$  eV)

Gamma ( $10^9$  eV)



- Staub in der Milchstrasse für IR durchlässig: Beobachtung des galaktischen

# Beobachtung bei verschiedenen Wellenlängen

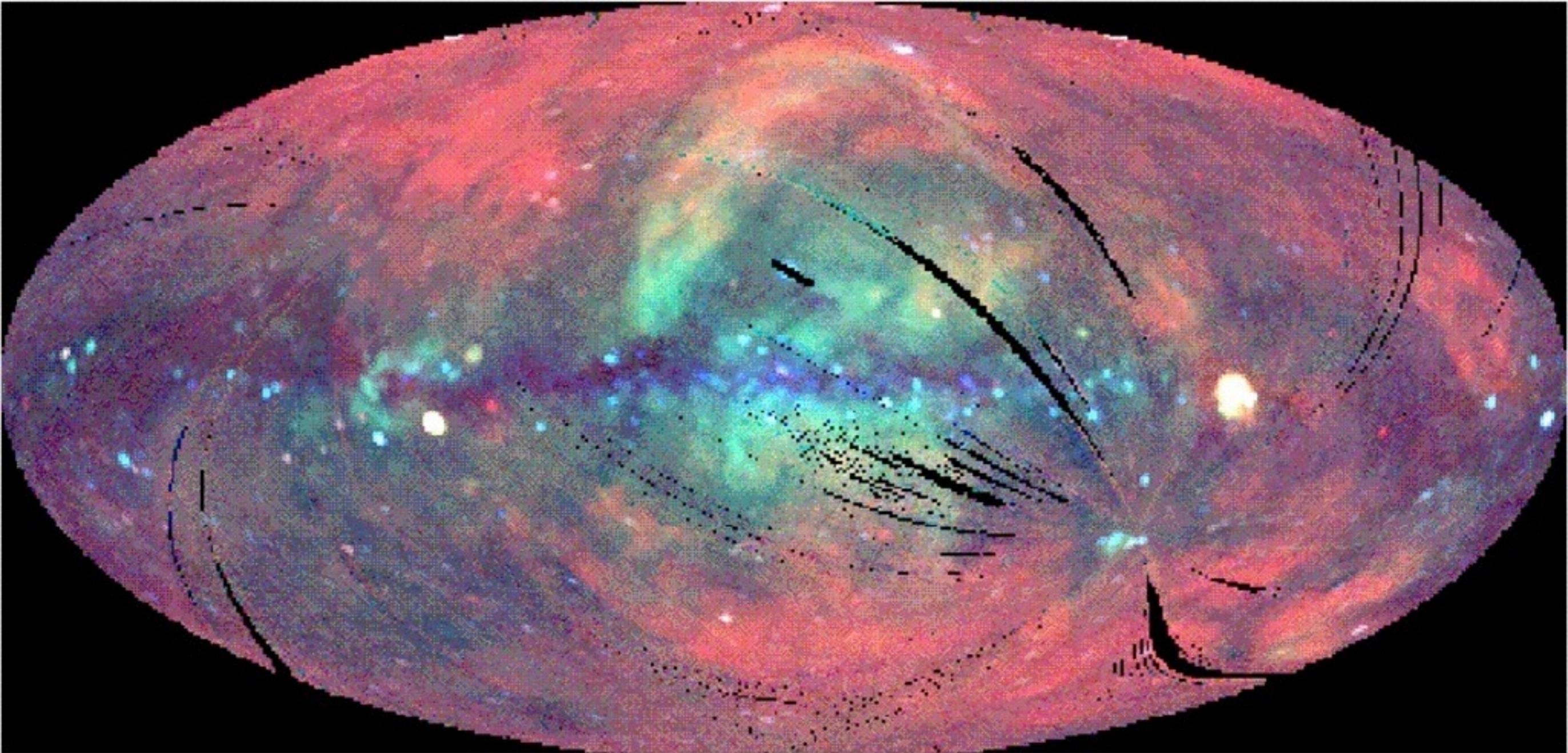
Radio ( $10^{-6}$  eV)

IR ( $10^{-2}$  eV)

sichtbar (1 eV)

X-Ray ( $10^3$  eV)

Gamma ( $10^9$  eV)



# Beobachtung bei verschiedenen Wellenlängen

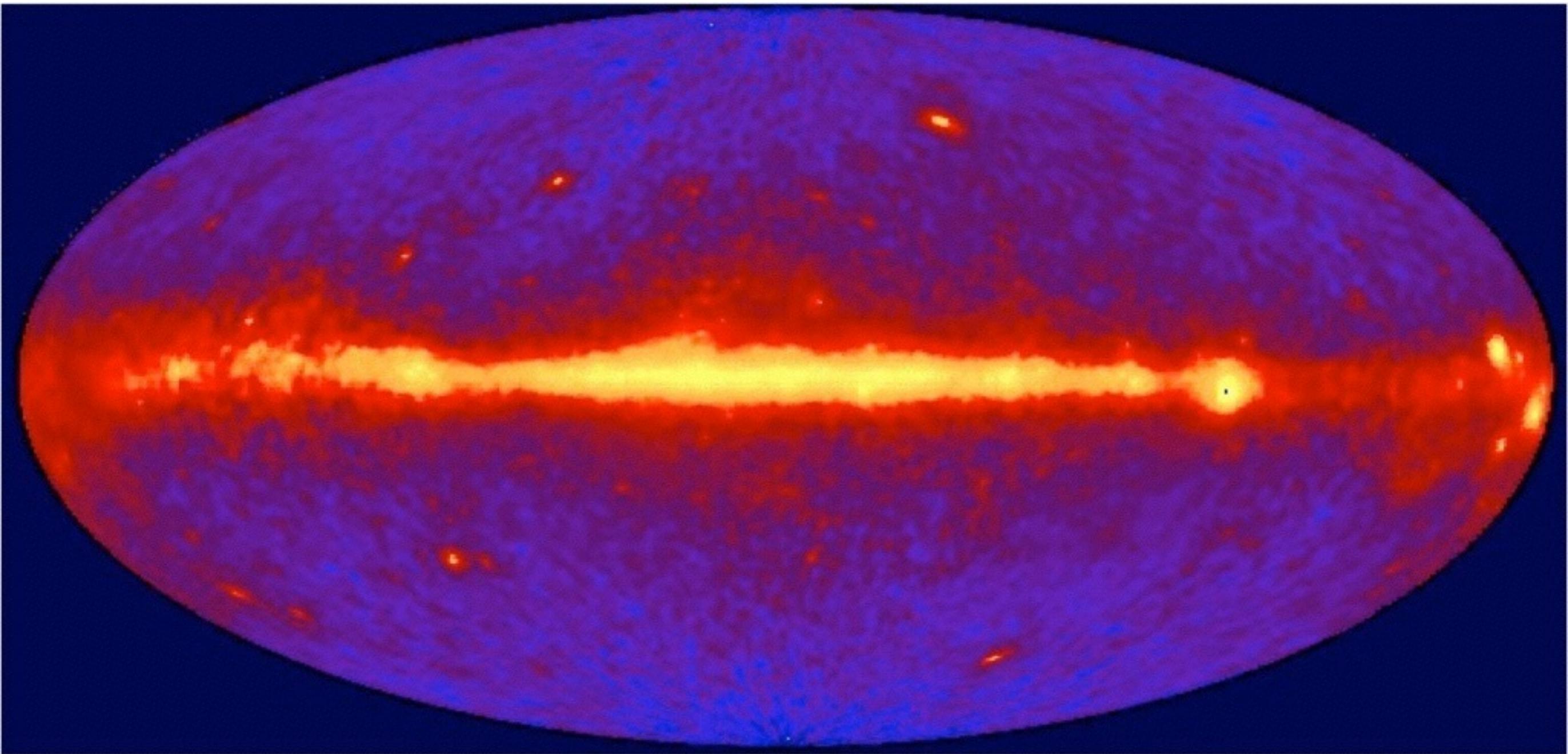
Radio ( $10^{-6}$  eV)

IR ( $10^{-2}$  eV)

sichtbar (1 eV)

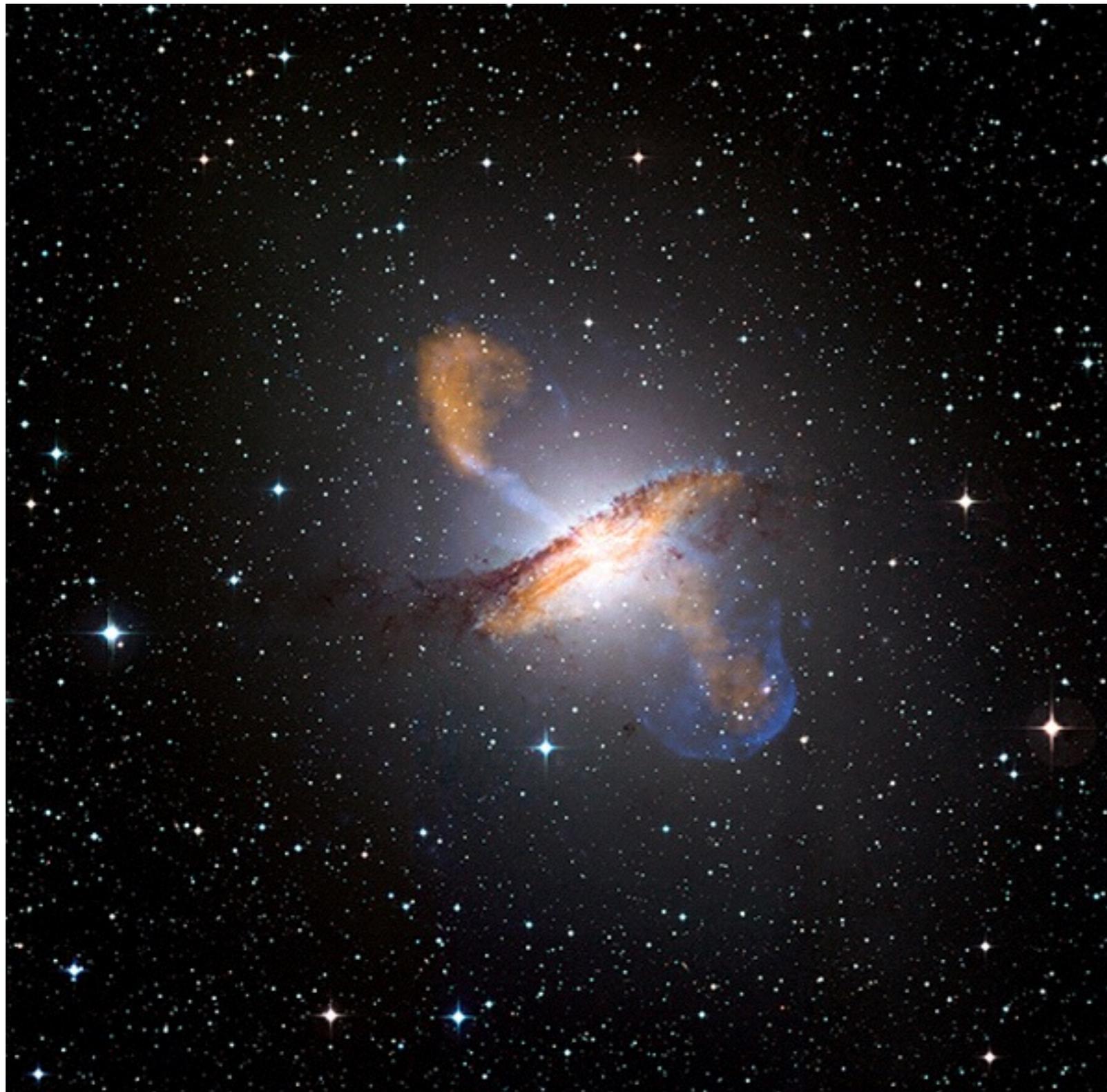
X-Ray ( $10^3$  eV)

Gamma ( $10^9$  eV)



- Kombination aller Wellenlängen liefert ein umfassendes Bild

# Ein Beispiel



- Kombinierte Aufnahme von Centaurus A, einer aktiven Galaxie in 10 Mlyr Entfernung
  - sichtbares Licht
  - sub-mm: orange
  - x-ray: blau

Credit: X-ray: NASA/CXC/CfA/R.Kraft et al.; Submillimeter: MPIfR/ESO/APEX/A.Weiss et al.; Optical: ESO/WFI

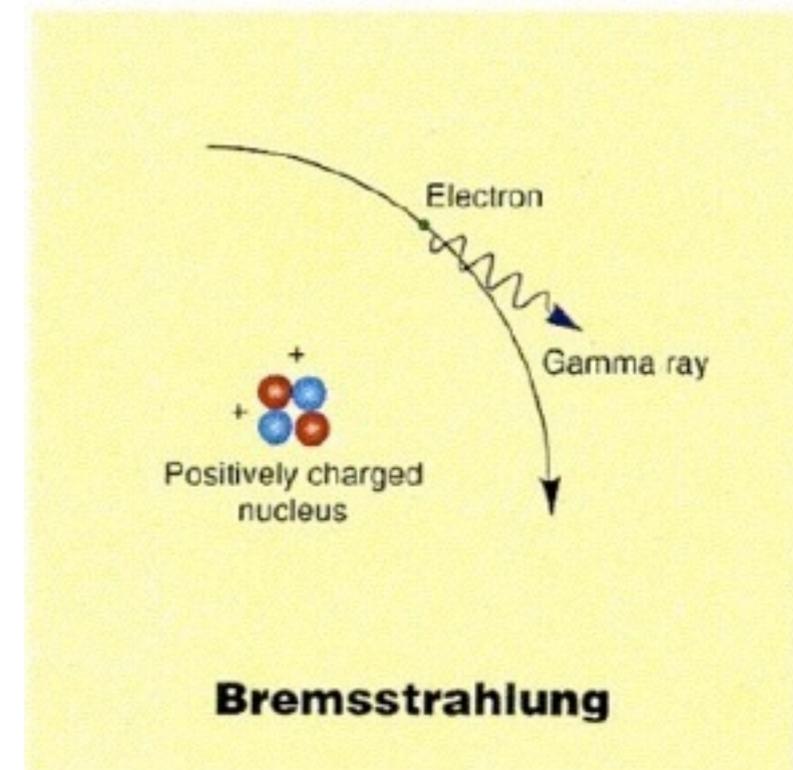
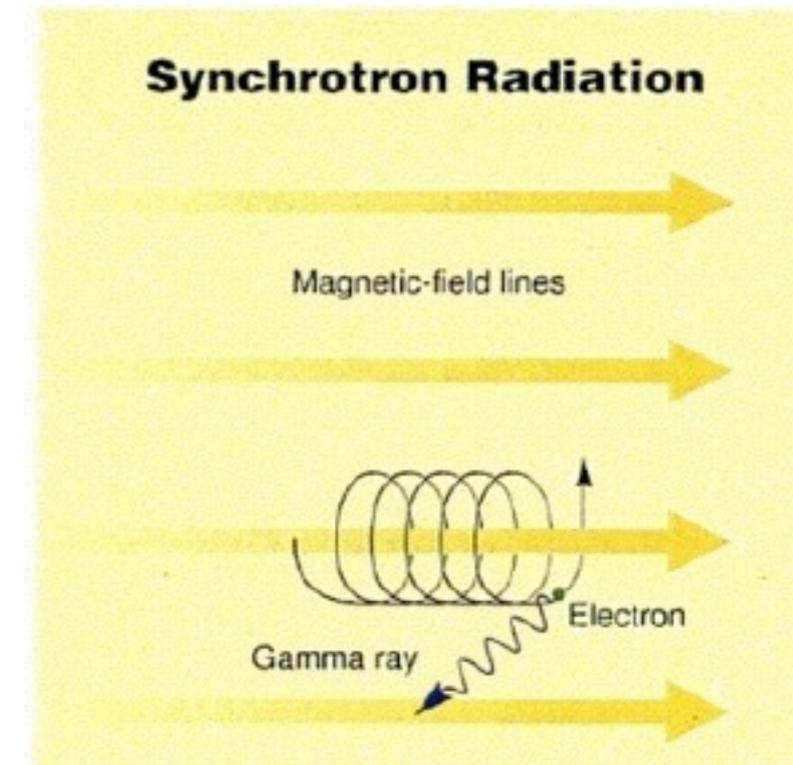
# Photonen: “Beschleunigung”

---

- Photonen selbst werden nicht beschleunigt, da sie ungeladen sind
  - ▶ Energie kommt aus geladenen Teilchen
  - ▶ Beschleunigung geladener Teilchen zB durch Schockfronten
  - ▶ Umwandlung in Photonen durch verschiedene Prozesse
  
- ▶ Die Photonen bekommen nur einen Bruchteil der Energie des geladenen Primärteilchens
- ▶ Photonen gegenüber Hadronen bei gleicher Energie deutlich unterdrückt
  
- Im Bereich von TeV Photonen gilt:  
$$\text{Fluss}(\gamma) \sim 10^{-4} \times \text{Fluss}(\text{Hadronen})$$
  
- ▶ Herausforderung für Experimente: Gute Photon/Hadron - Trennung nötig

# Photon-Erzeugung I

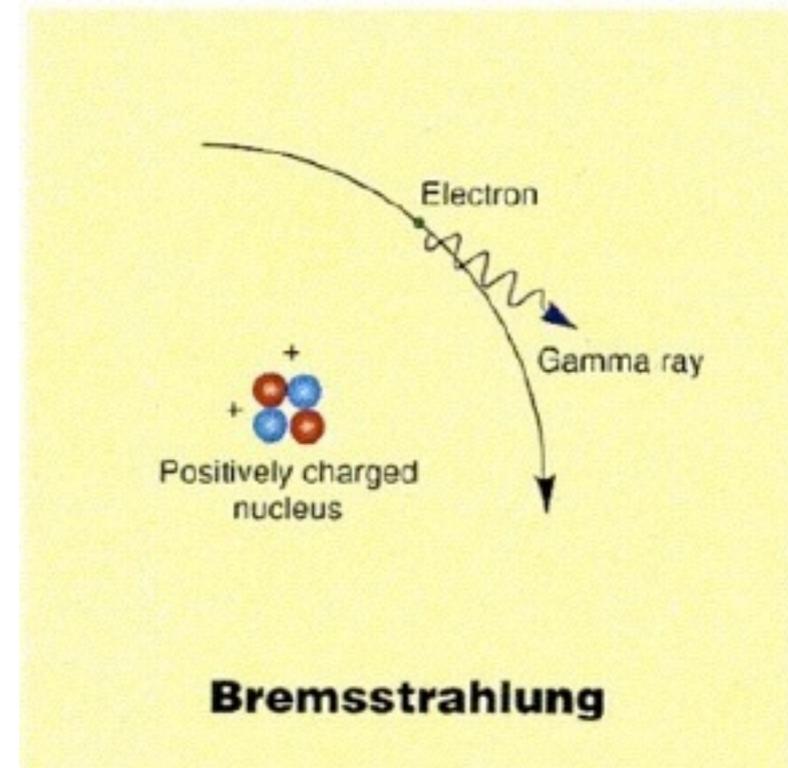
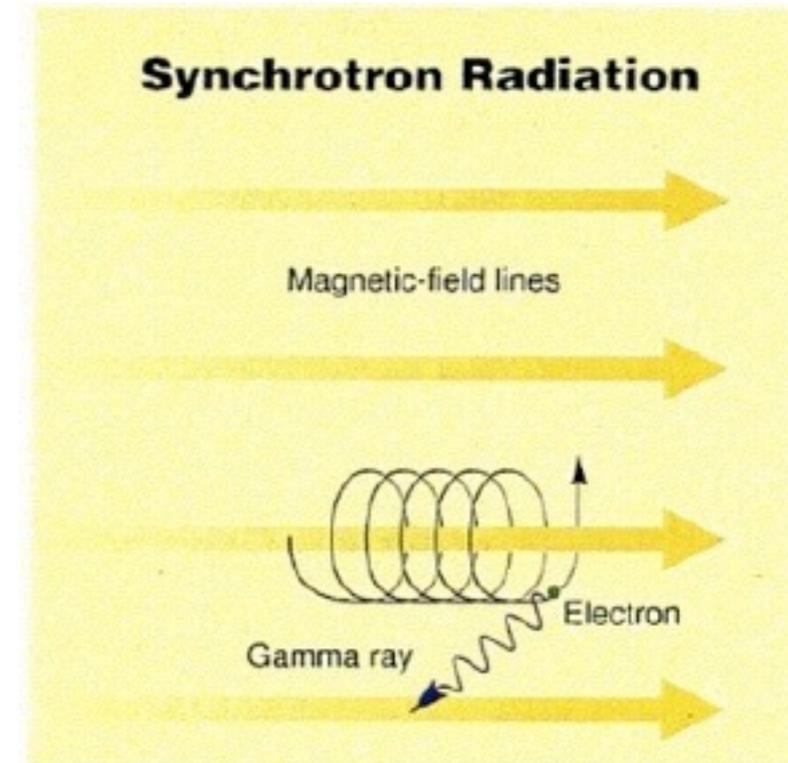
- Beschleunigte Ladungen emittieren Strahlung
- Auf Kreisbahn in magnetischen Feldern:  
Synchrotron-Strahlung  
entdeckt an Synchrotron-Beschleunigern
- Beschleunigung (Abbremsen!) in starken  
elektrischen Feldern an Atomkernen:  
Bremsstrahlung



# Photon-Erzeugung I

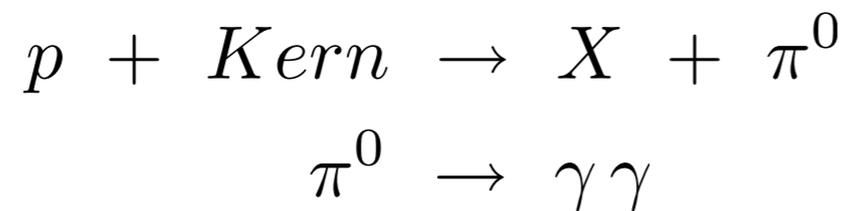
- Beschleunigte Ladungen emittieren Strahlung
- Auf Kreisbahn in magnetischen Feldern:  
Synchrotron-Strahlung  
entdeckt an Synchrotron-Beschleunigern
- Beschleunigung (Abbremsen!) in starken  
elektrischen Feldern an Atomkernen:  
Bremsstrahlung

Ausserdem natürlich: Thermische Strahlung!

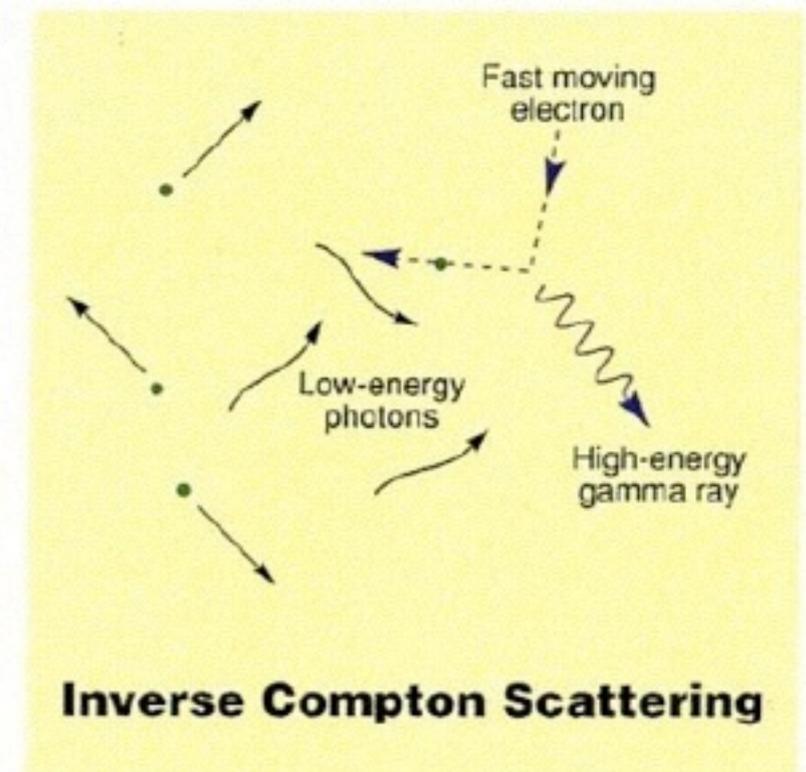
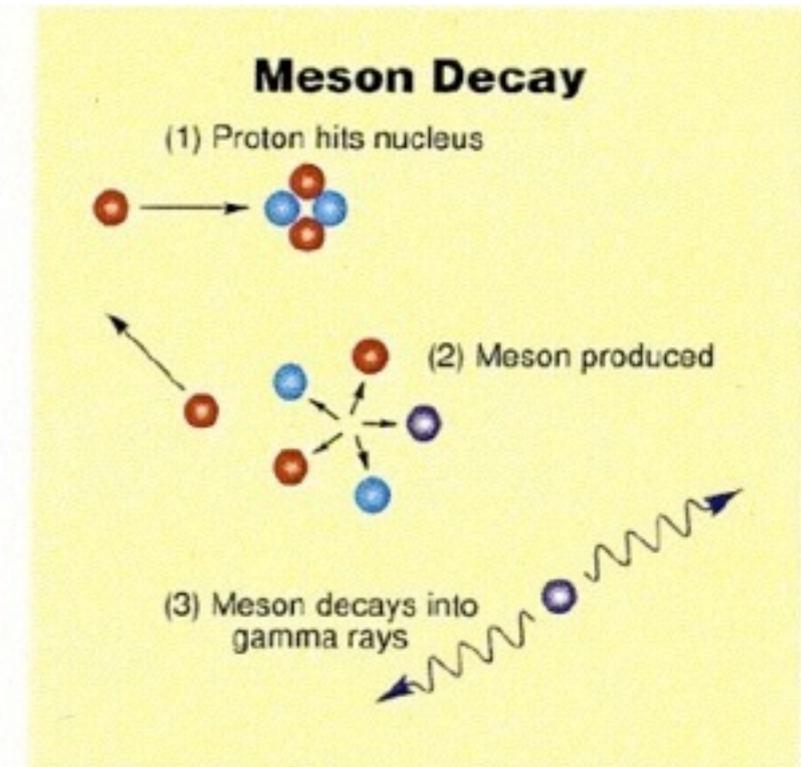
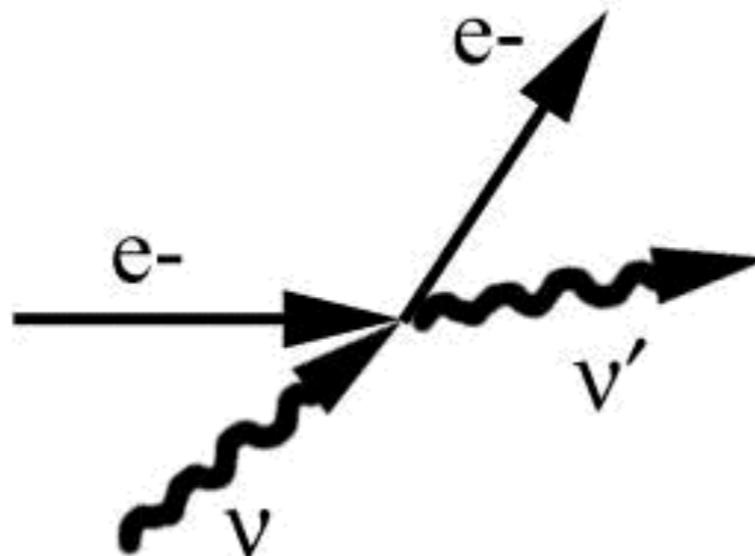


# Photon-Erzeugung II

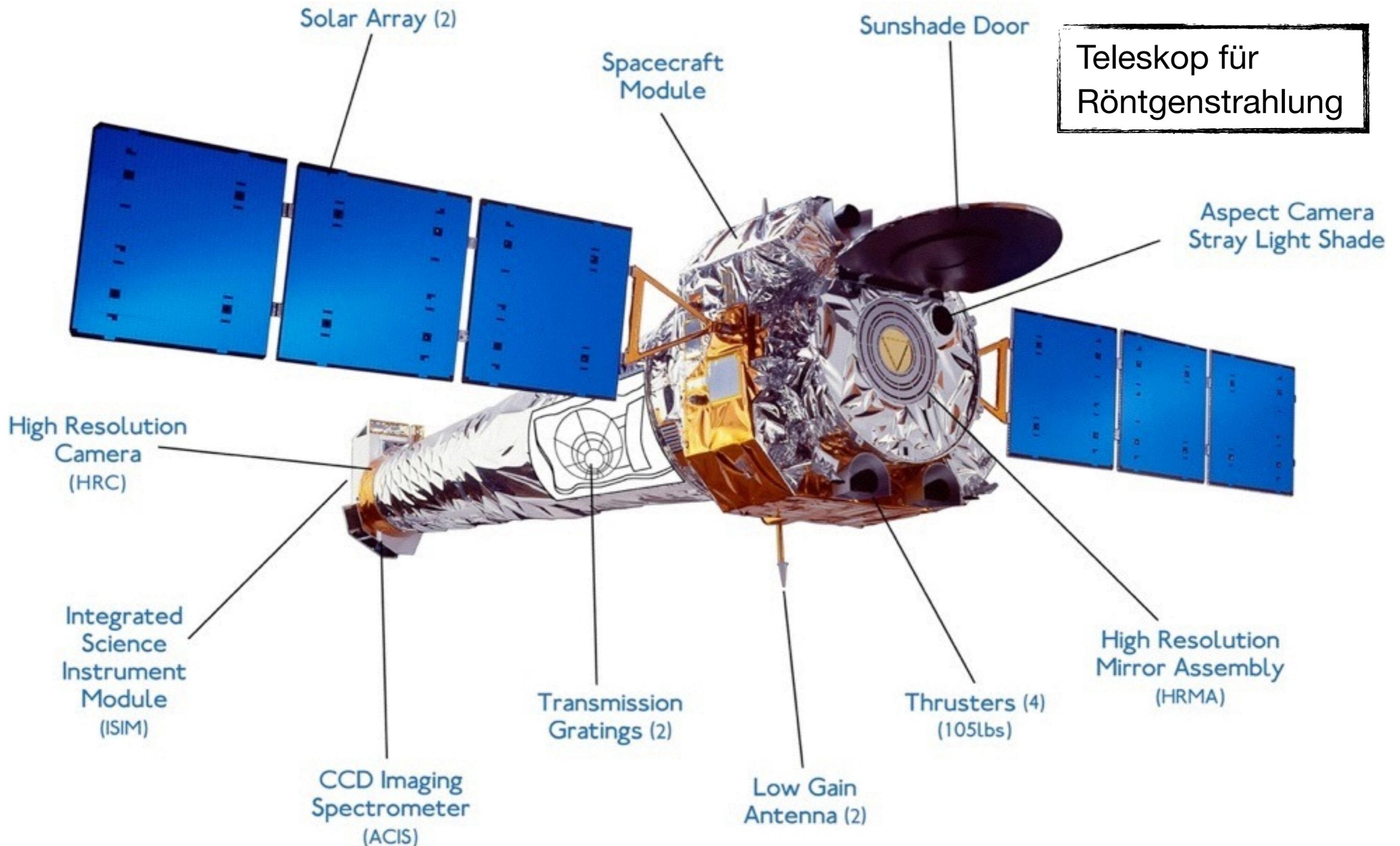
- Hadronische Erzeugung von Photonen durch Mesonerzeugung in hadronischen Reaktionen und anschliessendem Zerfall



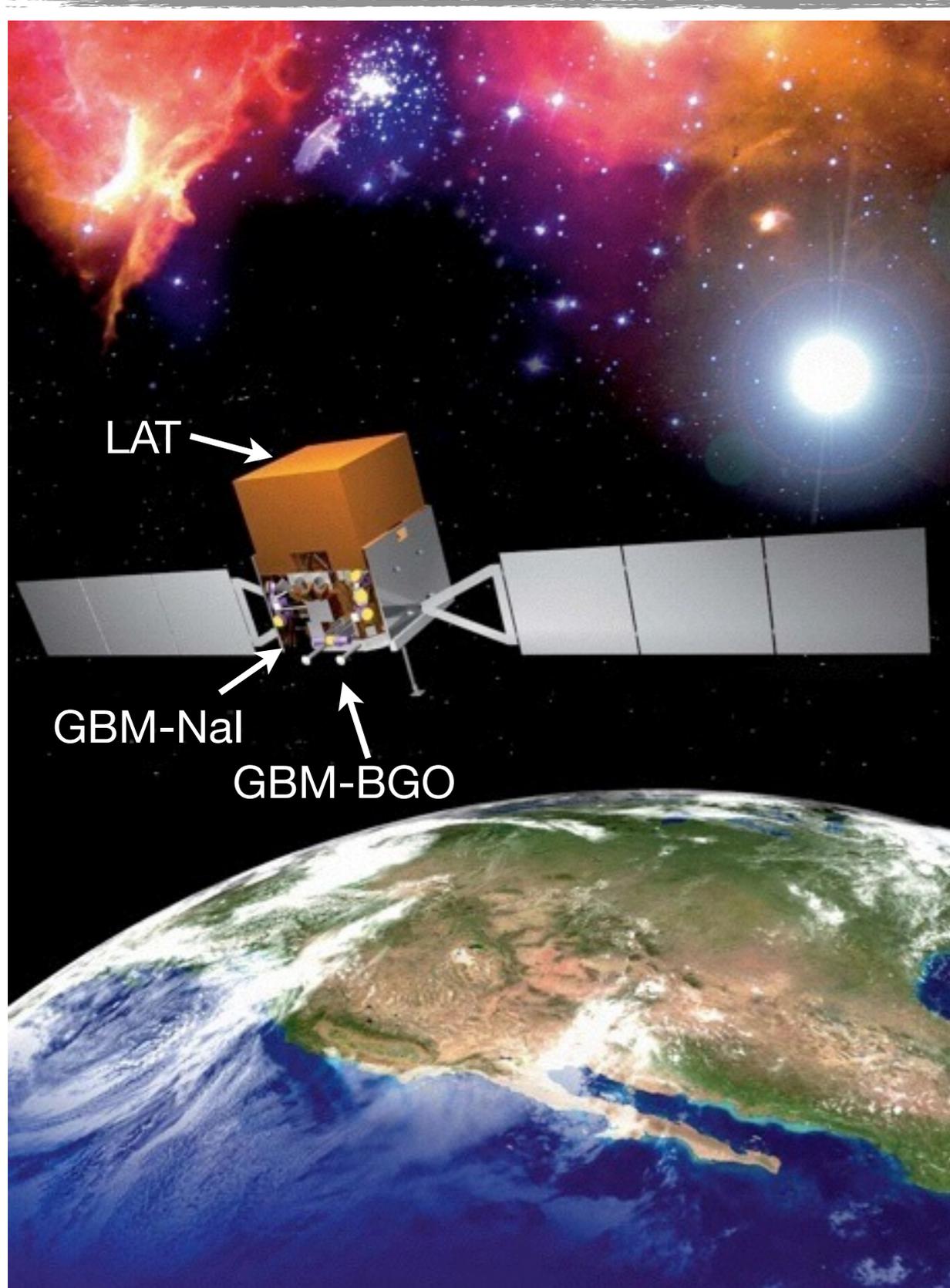
- Energieerhöhung eines Photons durch Streuung an hochenergetischen Elektronen (inverser Compton-Prozess)



# Direkte Messung: Satelliten: Chandra

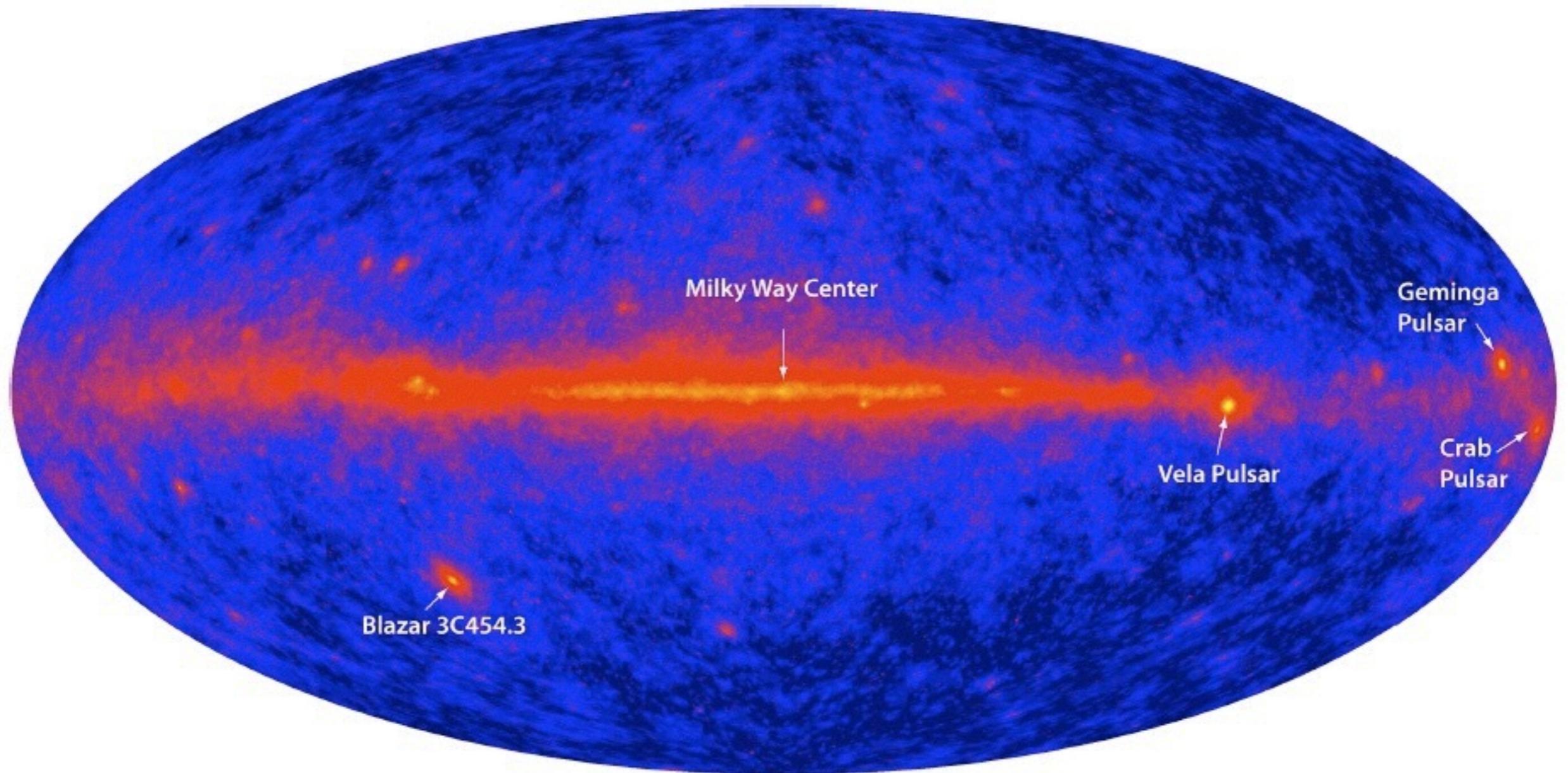


# Direkte Messung: Satelliten: Fermi



- Satelliten können den gesamten Himmel abdecken
- Gute Auflösung bei relativ niedrigen Energien
- Das neueste Instrument:  
Fermi (ehemals GLAST (Gamma-ray Large Area Telescope))
  - gestartet am 11.06.2008

# Der Fermi-Himmel



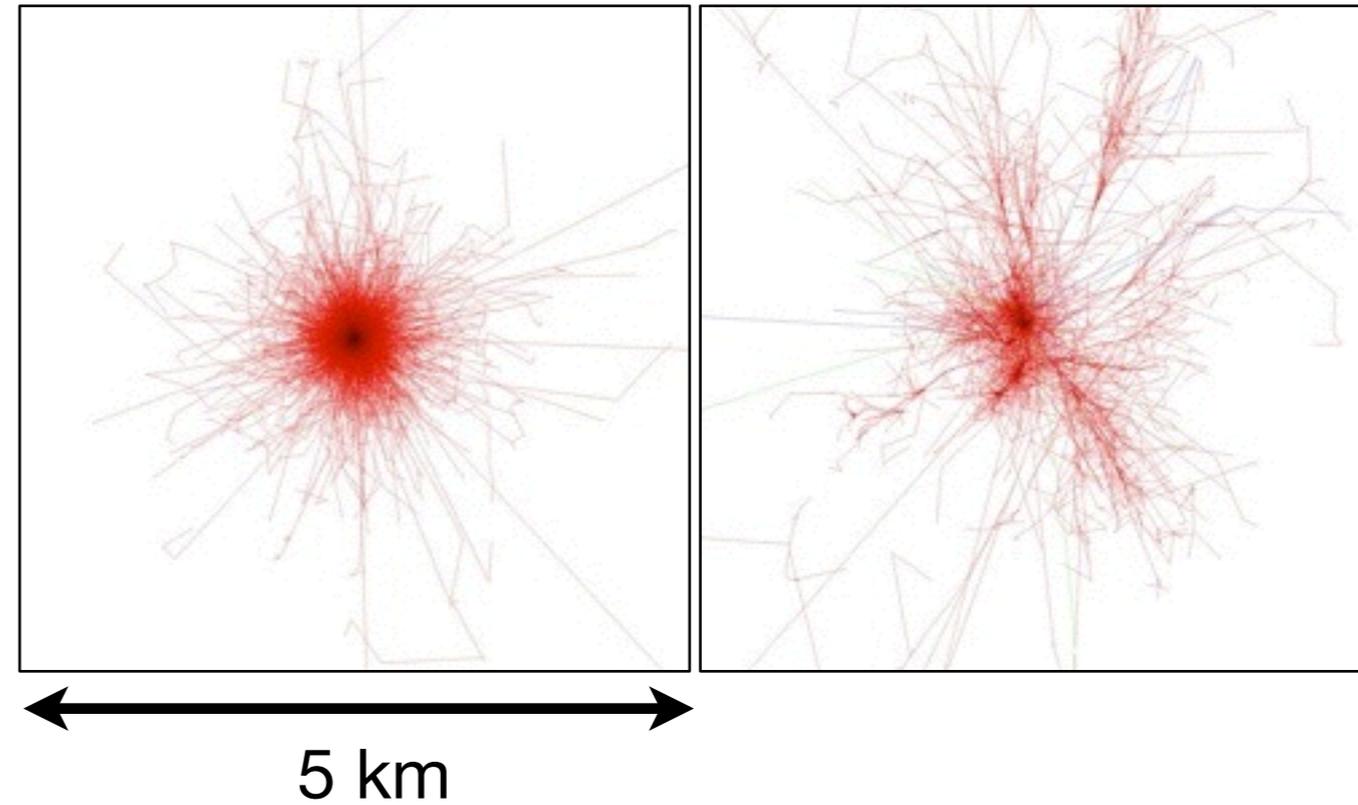
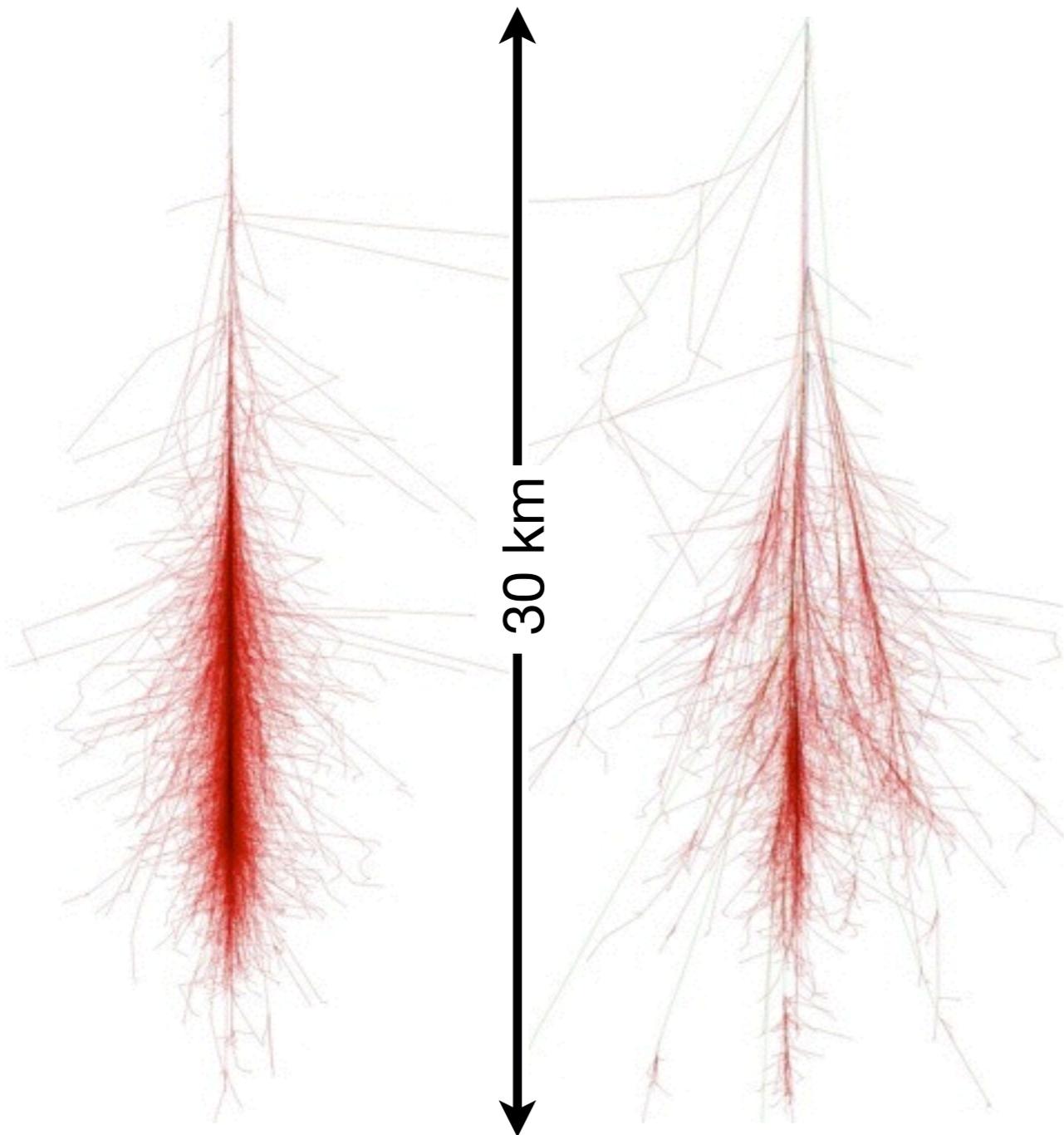
# Photon und Hadron - induzierte Luftschauer

100 GeV Photon

100 GeV Proton

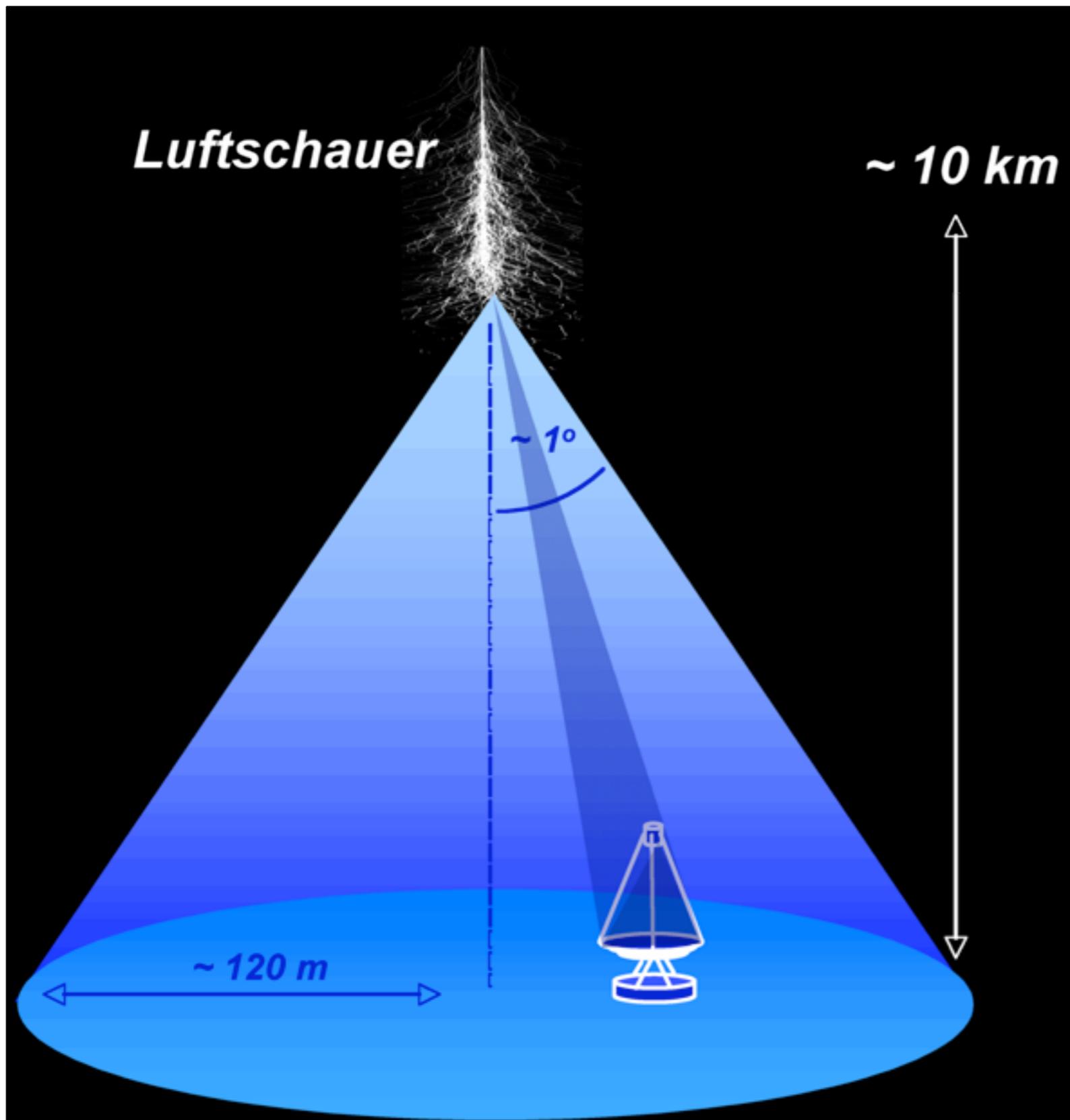
100 GeV Photon

100 GeV Proton



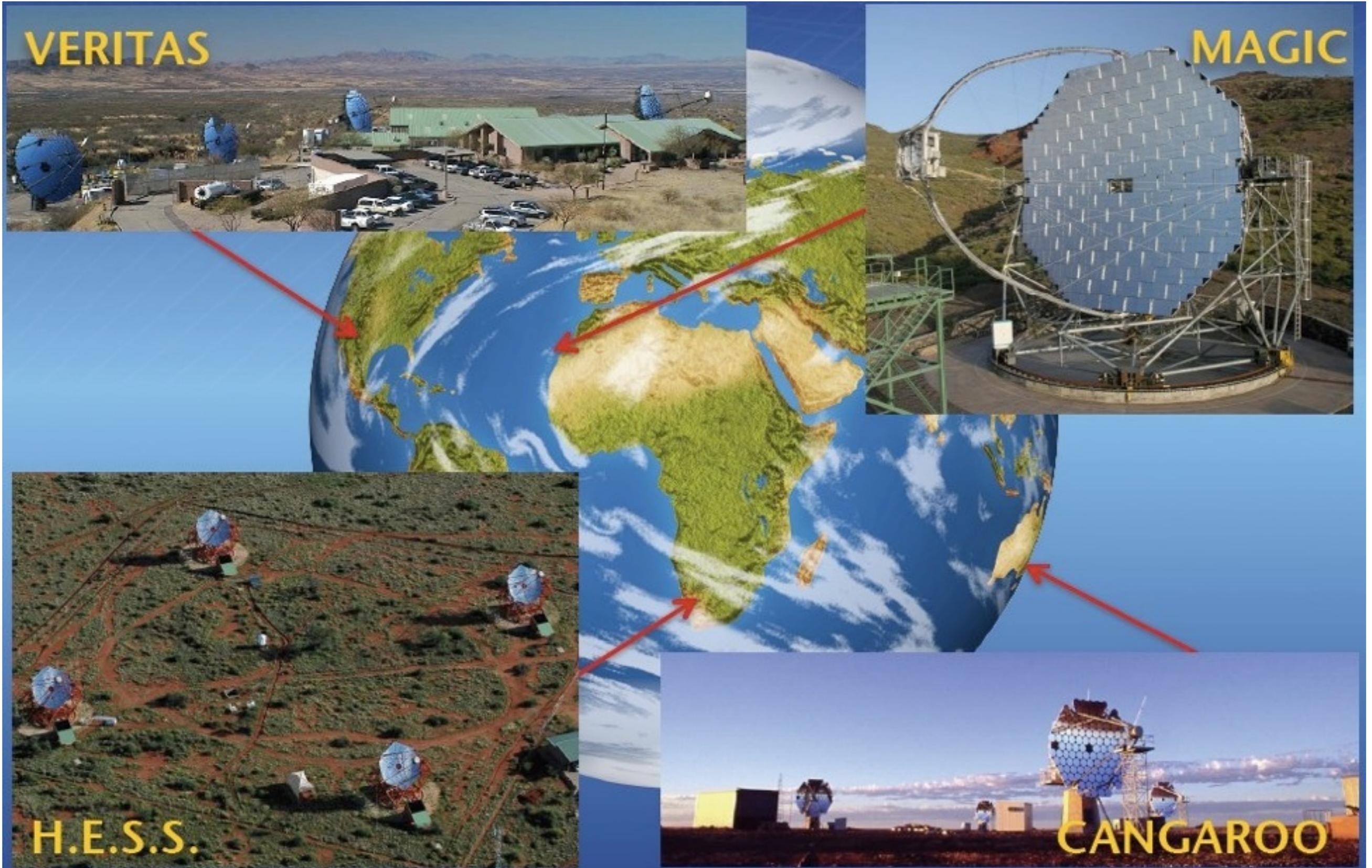
- Trennung nach Form der Schauer möglich:
  - Hadronschauer deutlich ausgedehnter und “zerfranster”

# Airshower Cherenkov Teleskope



- Cherenkov-Licht wird durch Elektronen im Schauer in etwa 10 km Höhe erzeugt
- ▶ Am Erdboden wird eine Fläche mit Radius  $\sim 120 \text{ m}$  beschienen
- ▶ Nachweis mit einem Teleskop innerhalb dieser Fläche möglich

# Die grossen IACTs der Welt



# MAGIC: Ein grosses Cherenkov-Teleskop

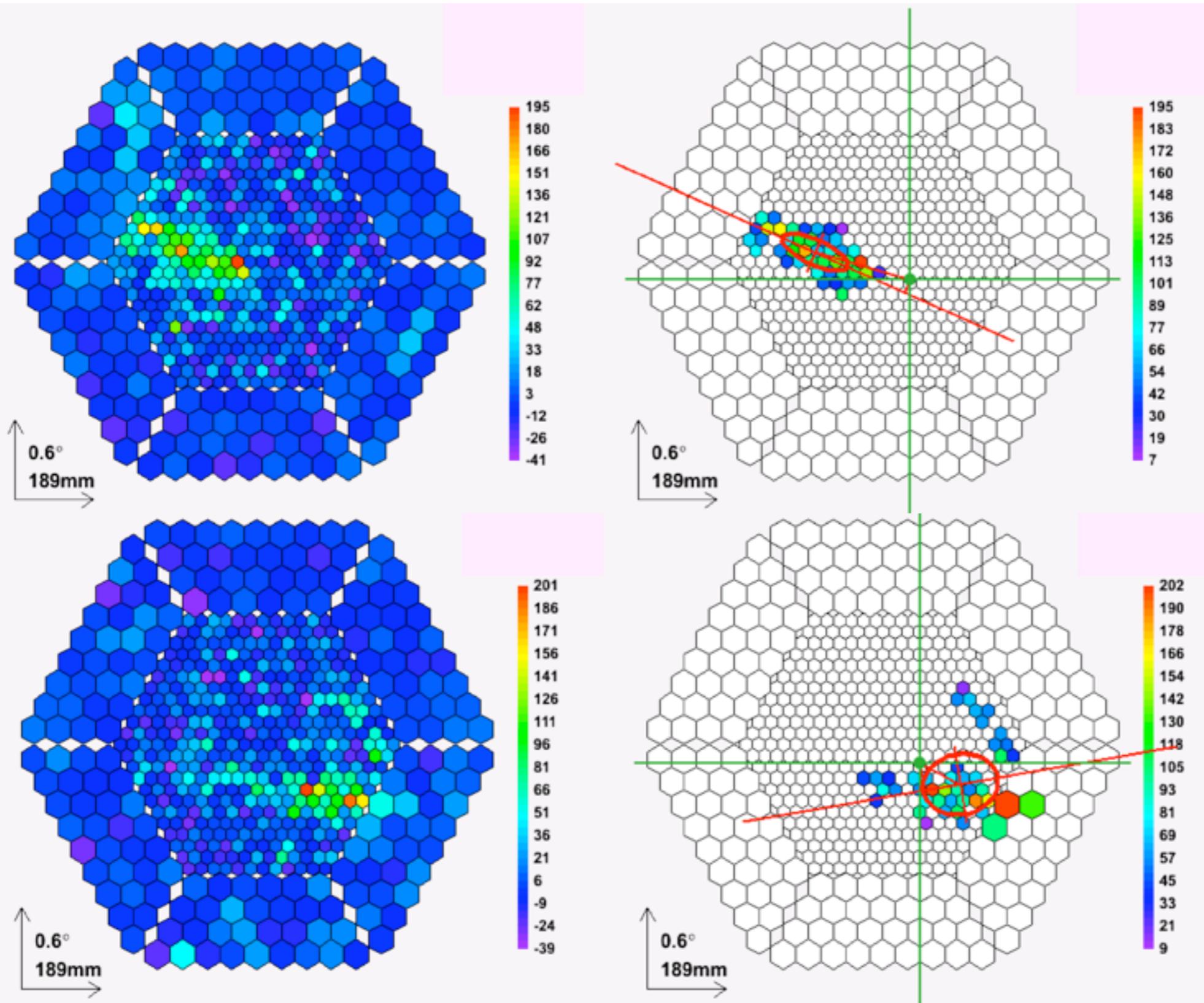


- 17 m Spiegeldurchmesser ( $240 \text{ m}^2$ )
- Leichtbauweise (Kohlefaser)
- Aktive Spiegelsteuerung: Korrektur von mechanischen Verzerrungen



- Lasersystem zur Justierung der Spiegel

# MAGIC: Trennung von Photonen und Hadronen



Photon (Signal)

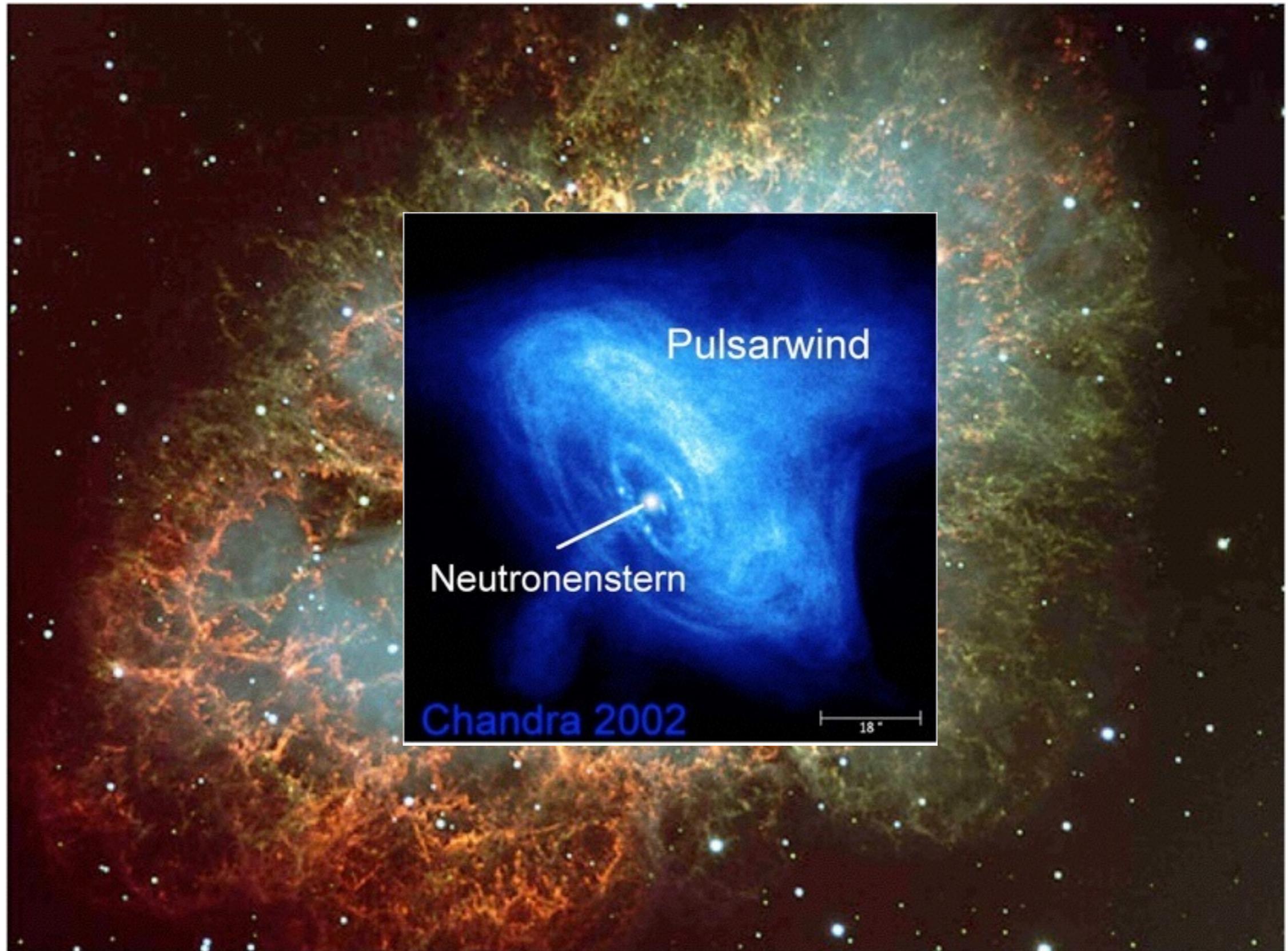
- Unterdrückung des Hadronen-Untergrundes besser als  $10^{-4}$

Hadron (Untergrund)

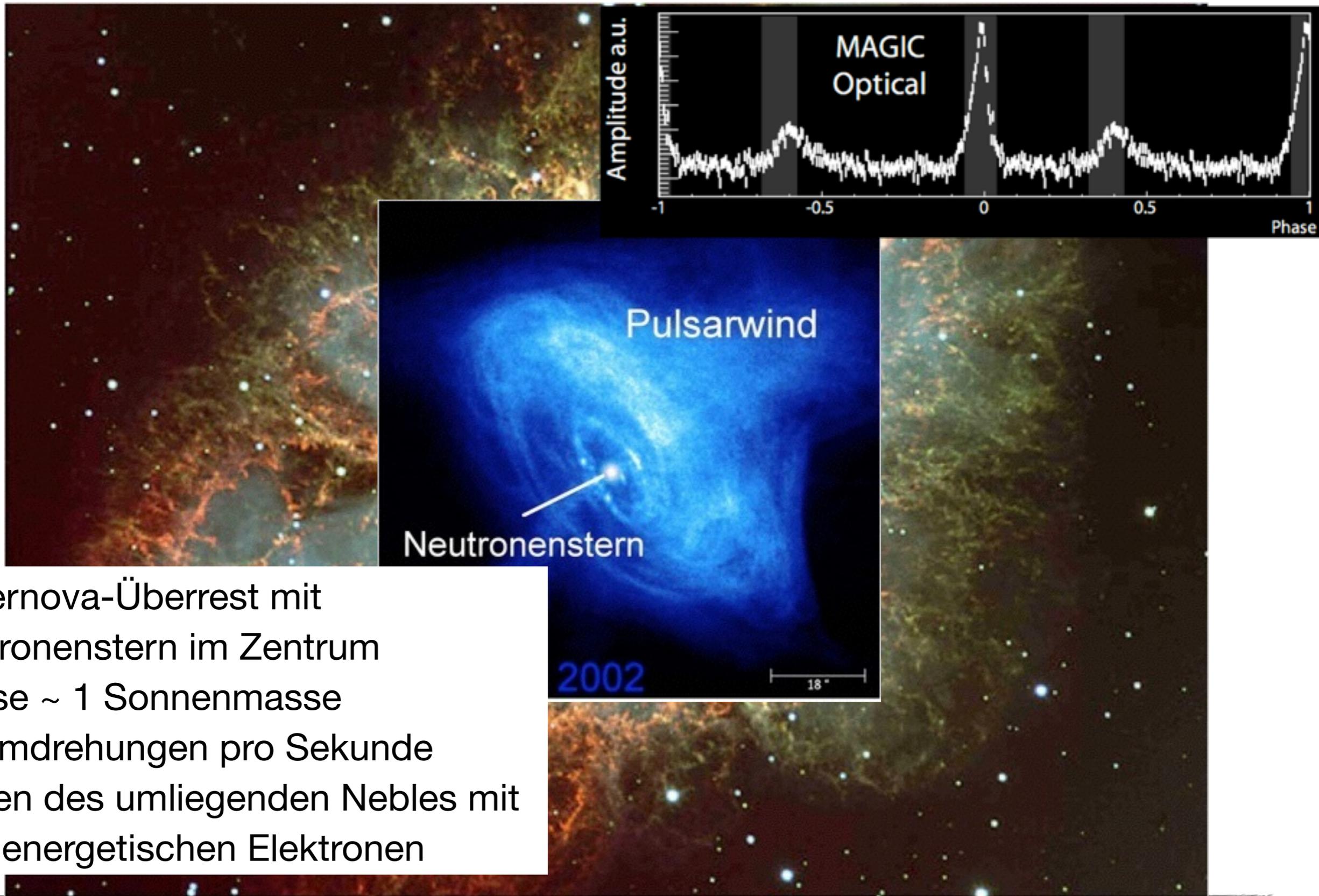
# Der Krebsnebel: Pulsar in unserer Galaxie



# Der Krebsnebel: Pulsar in unserer Galaxie



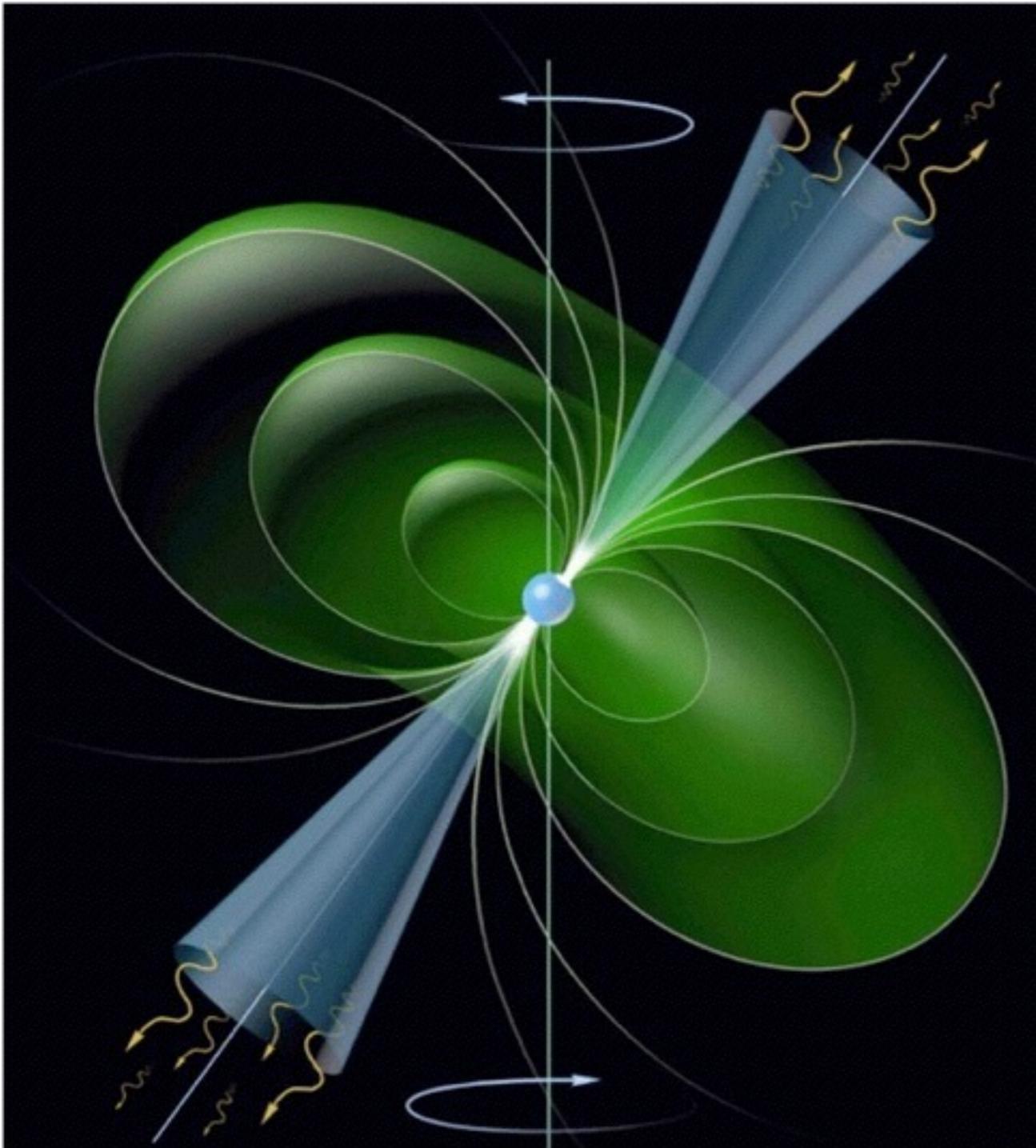
# Der Krebsnebel: Pulsar in unserer Galaxie



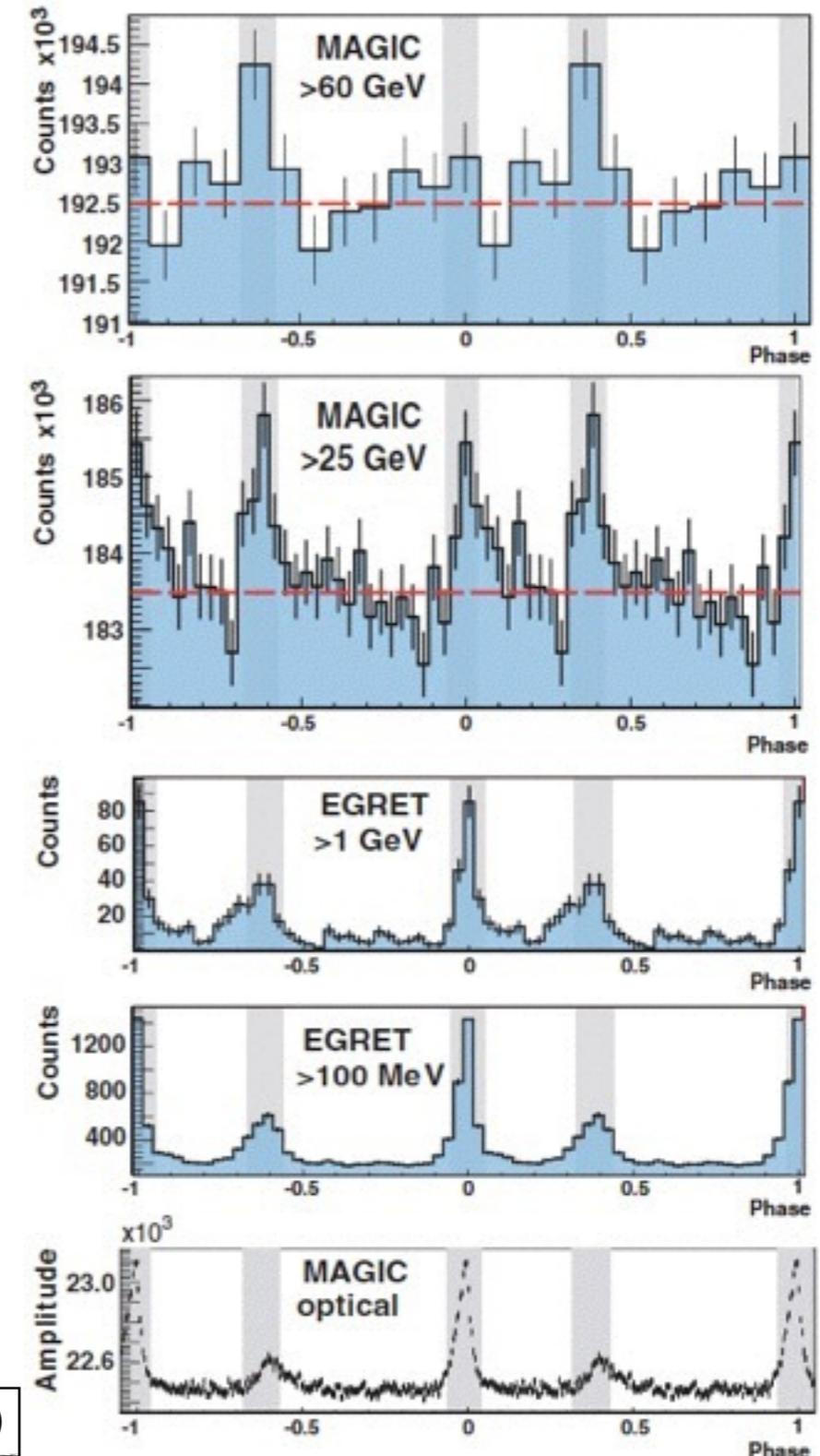
- Supernova-Überrest mit Neutronenstern im Zentrum
- Masse  $\sim 1$  Sonnenmasse
- 30 Umdrehungen pro Sekunde
- Heizen des umliegenden Nebels mit hochenergetischen Elektronen

# Pulsare als Gamma-Quellen

- Nachweis hochenergetischer Gamma-Strahlung vom Krebs-Pulsar durch MAGIC: Pulsieren bei hohen Energien beobachtet!



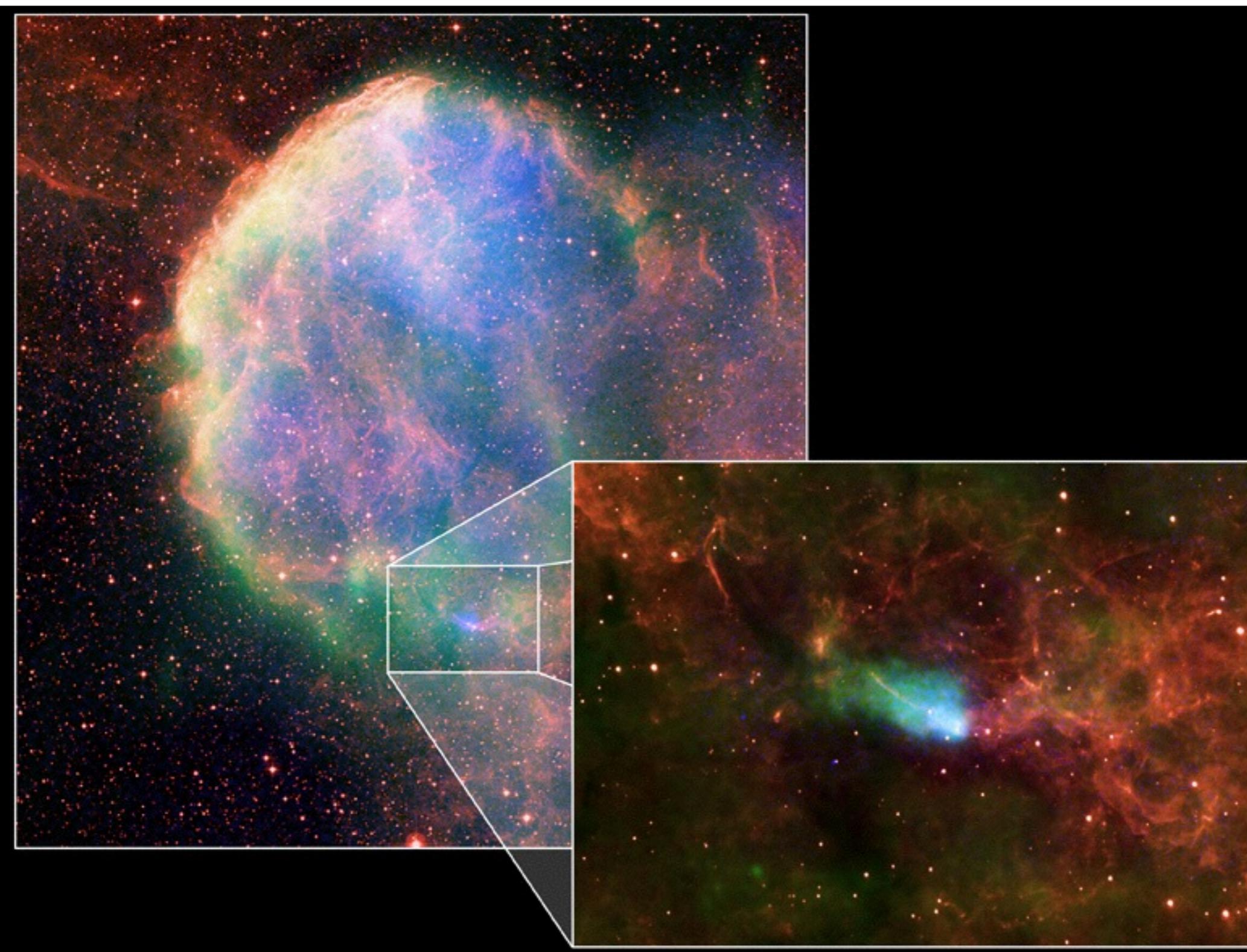
Science 322, 1221 (2008)



blau: X-ray  
grün: Radio  
rot: Optisch

Neutronen-Stern

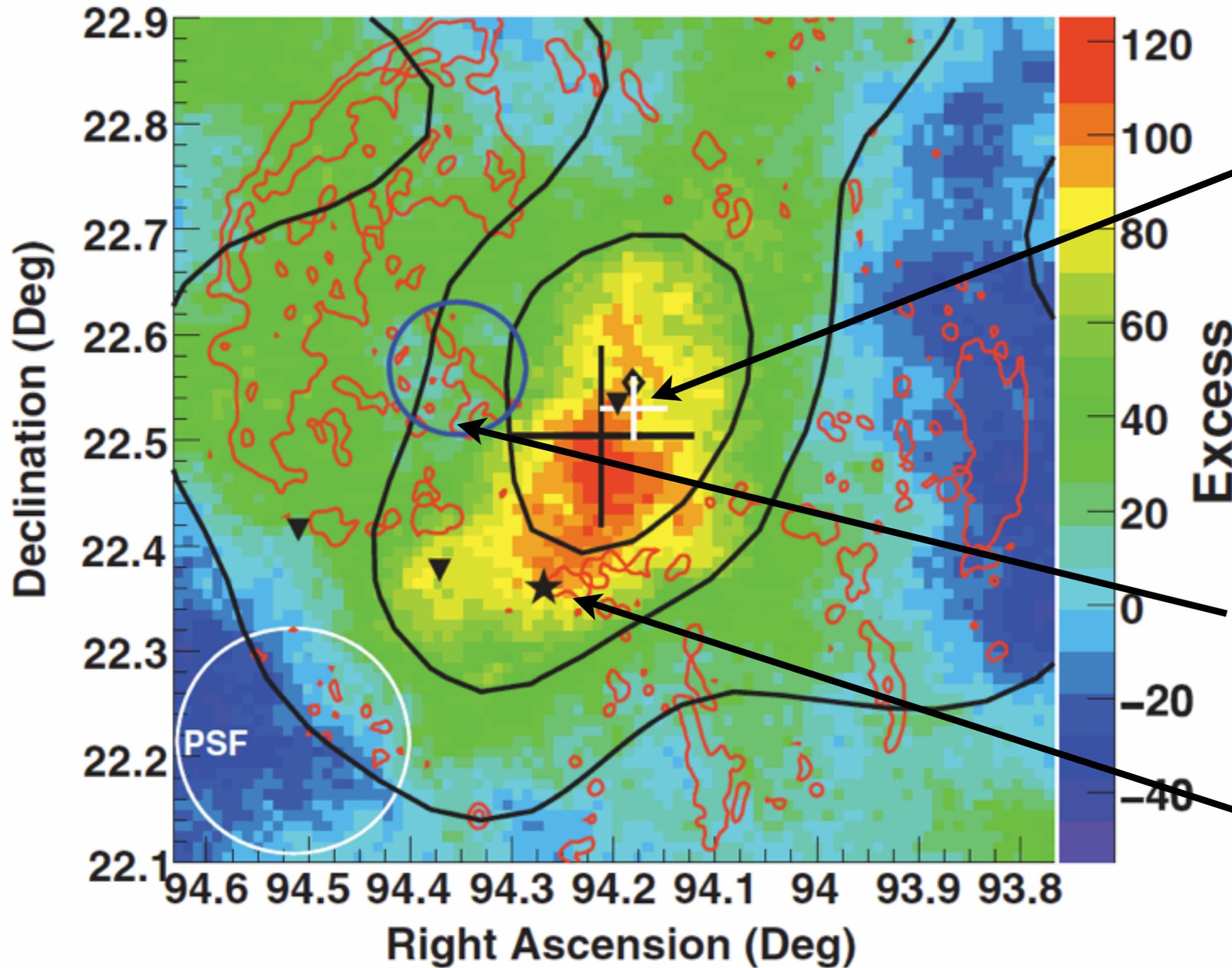
Supernova-  
Überrest, 3000 bis  
30 000 Jahre alt,  
1.5 kpc entfernt



Credit: Chandra X-ray: NASA/CXC/B.Gaensler et al; ROSAT X-ray: NASA/ROSAT/Asaoka & Aschenbach; Radio Wide: NRC/DRAO/D.Leahy; Radio Detail: NRAO/VLA; Optical: DSS



# SNR IC 443 bei hochenergetischen Gammas



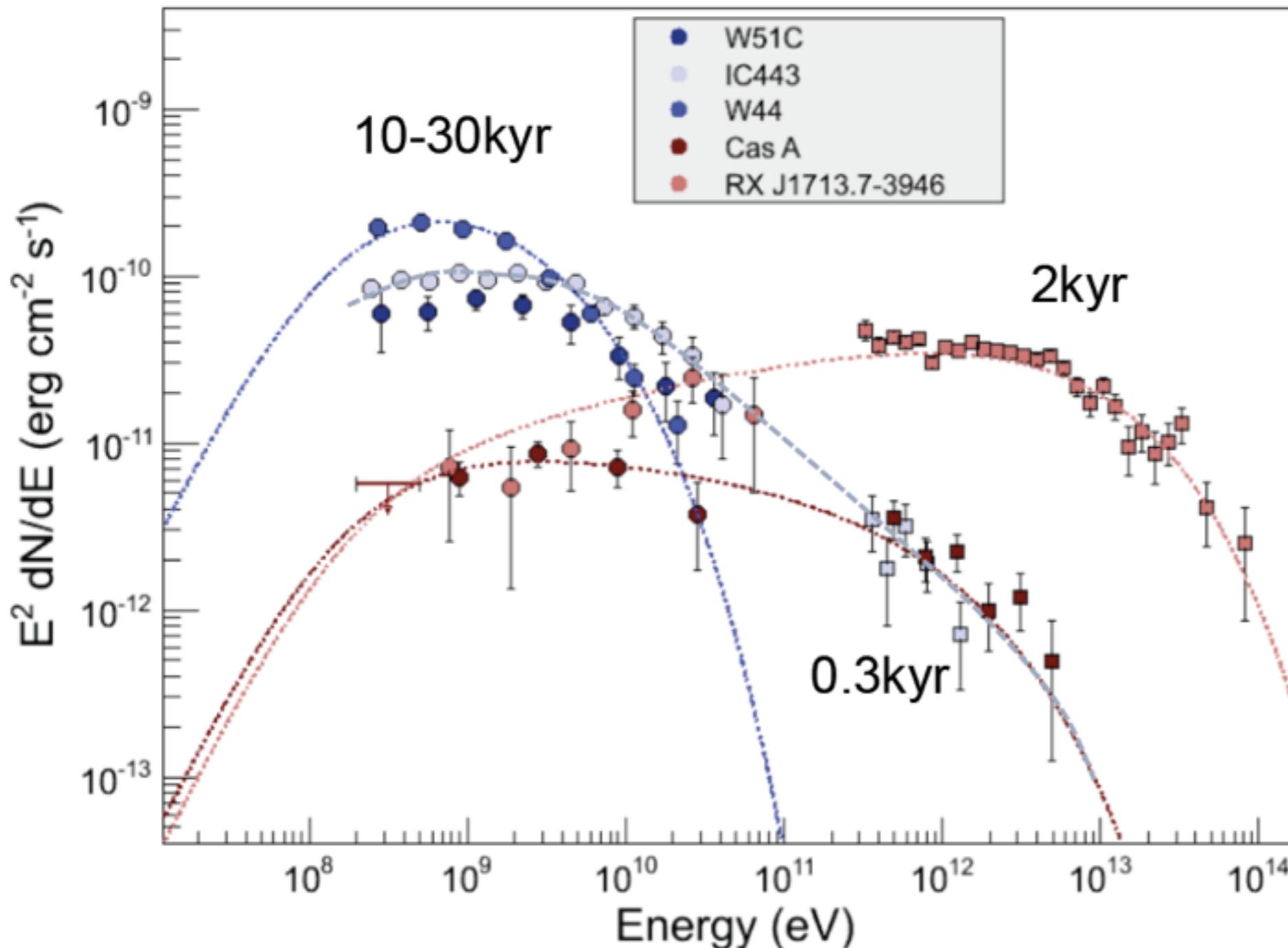
Quelle von TeV  
Gammas: MAGIC  
und VERITAS  
Hochenergetische  
Elektronen or  
Hadronen, in einer  
dichten Wolke  
eingefangen?

>100 MeV Gammas,  
Fermi LAT

Position des  
Neutronensterns

# Supernova-Beschleunigung: Energie & Alter

- Wie verhalten sich die kosmischen Beschleuniger mit dem Alter?



~ 1000 Jahre, um maximale Energie zu erreichen (siehe Vorlesung 4)

Abschwächung der Schockwelle und der Magnetfelder mit zunehmendem Alter

S. Funk, Stanford

# Aktive Galaktische Kerne: AGNs

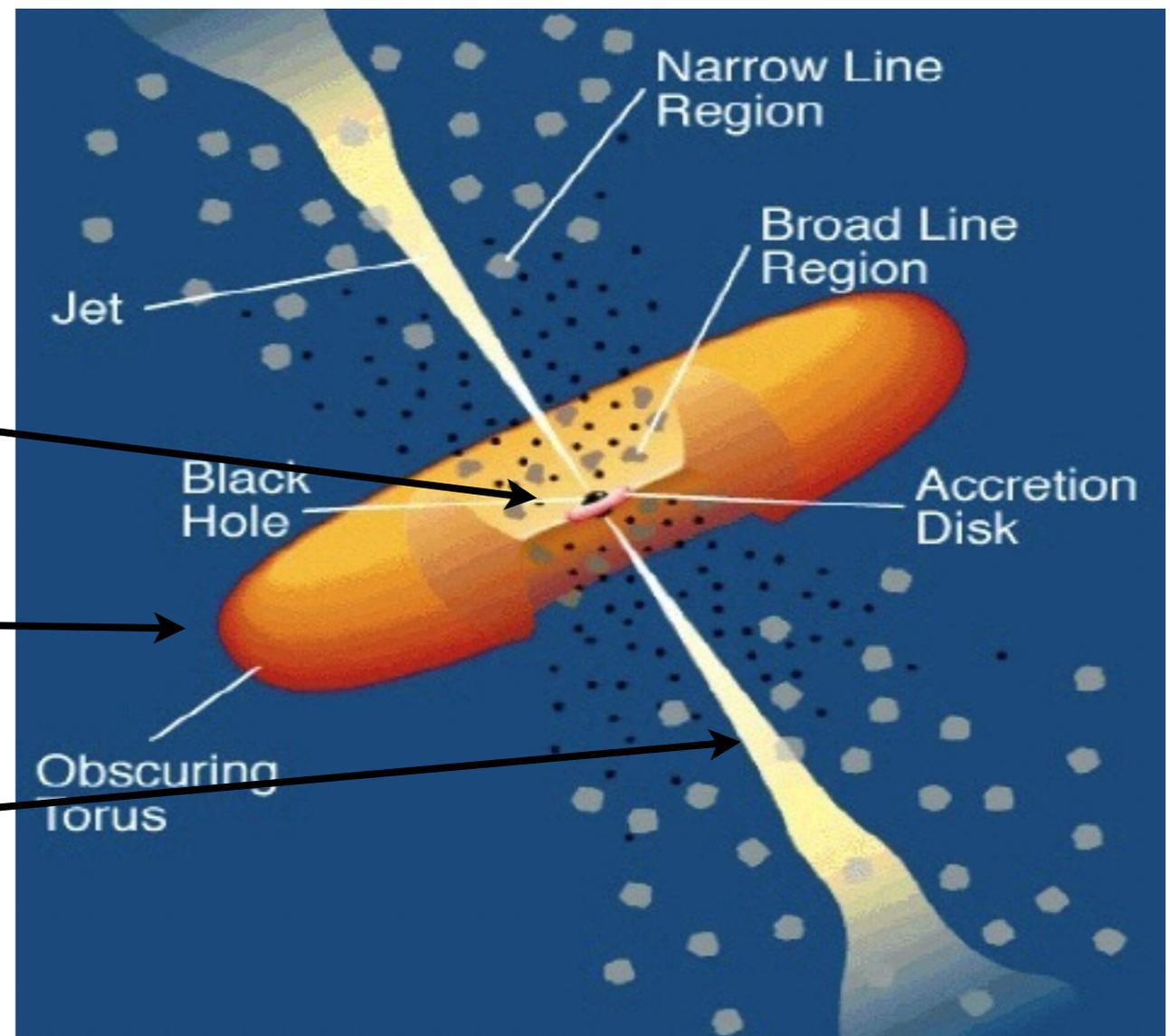
- Supermassive Schwarze Löcher ( $10^7 - 10^{10}$  Sonnenmassen) im Zentrum von Galaxien
- Akkretion von Materie
  - je nach Konfiguration kann sich ein Jet ausbilden
  - ca 5% aller Galaxien sind aktiv

Elektromagnetische Strahlung aus AGNs:

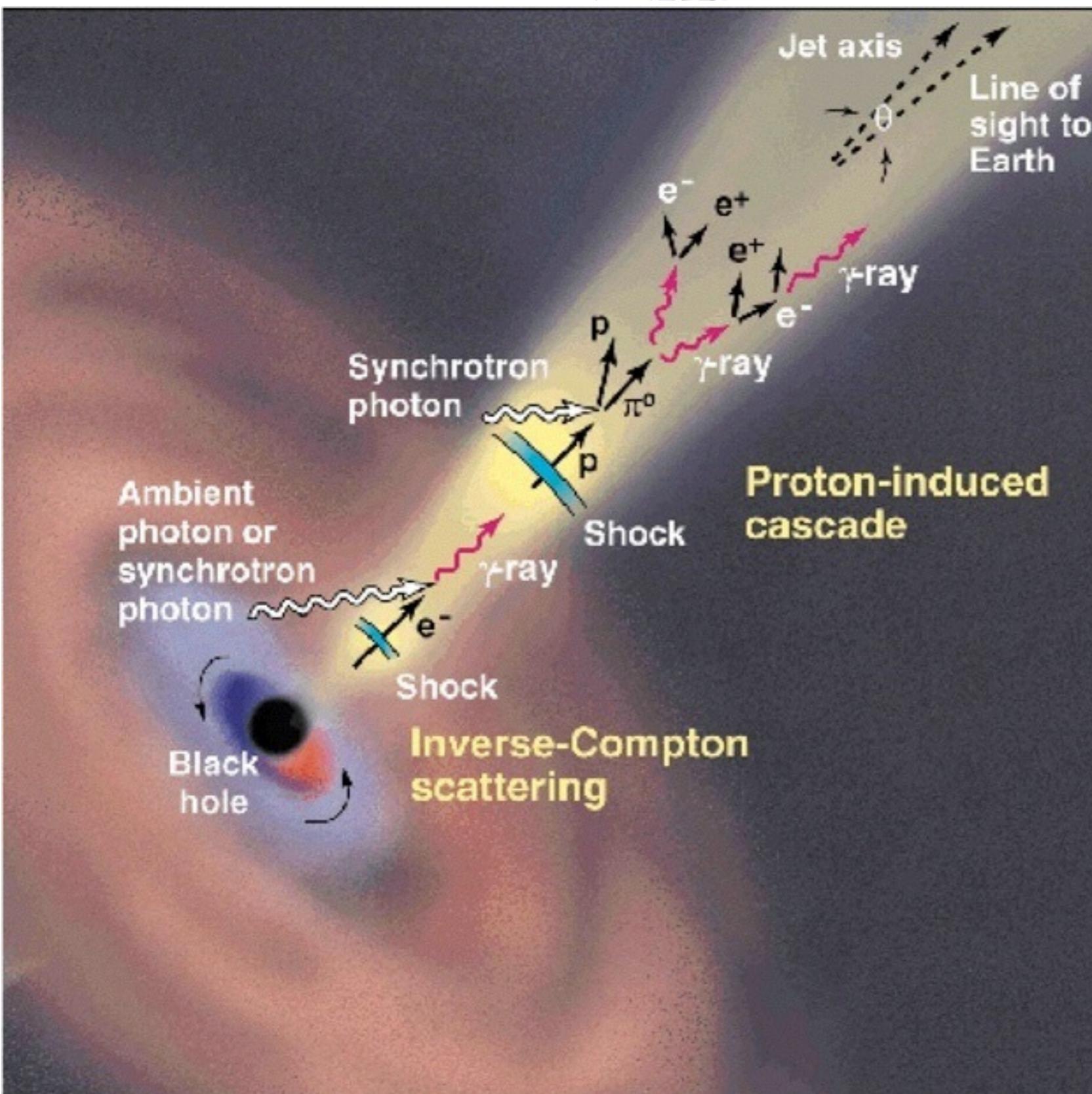
Infrarot bis X-Ray

Infrarot

Radio, Gamma (nicht thermisch)

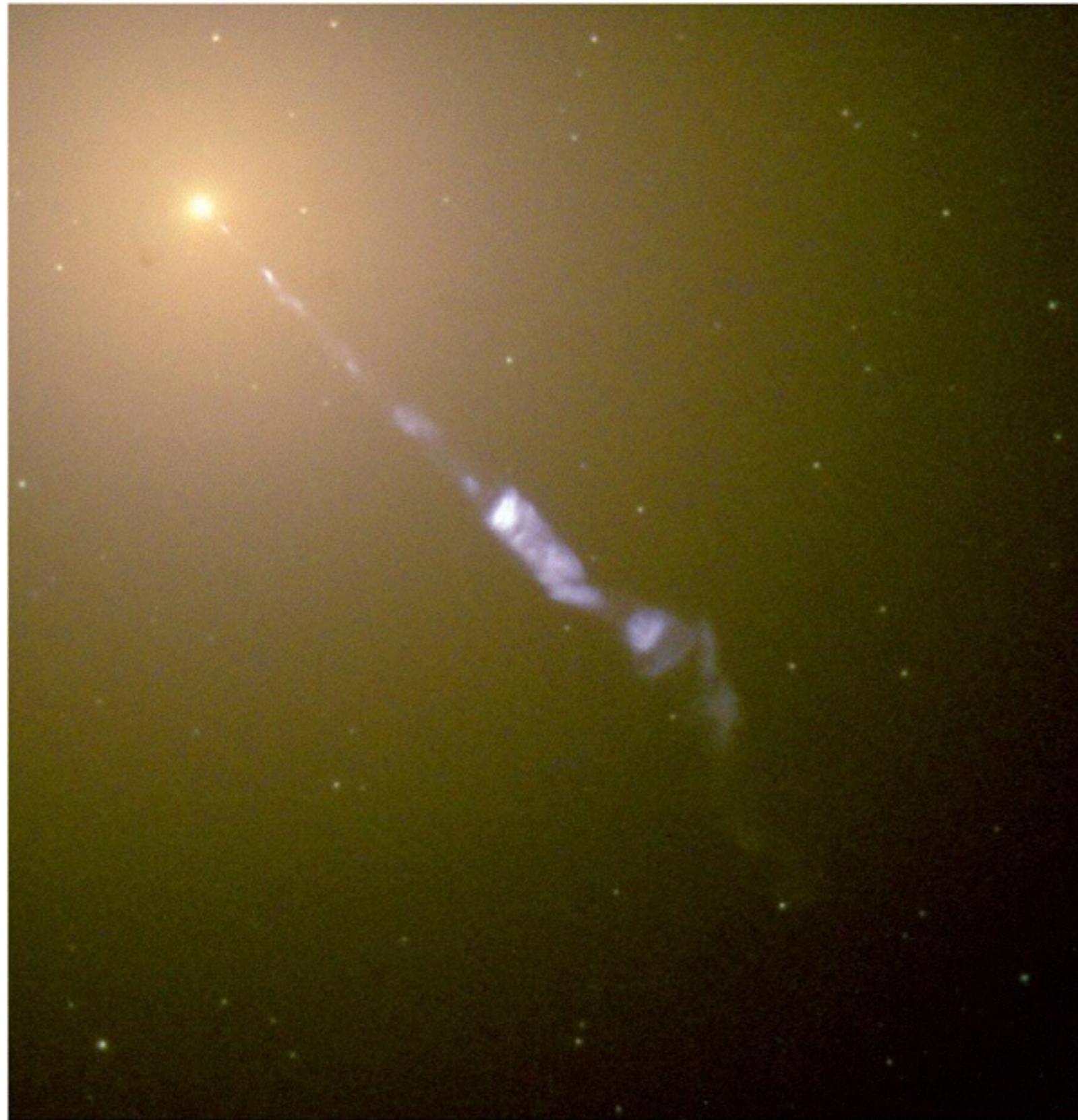


# Entstehung von Gammas in Jets

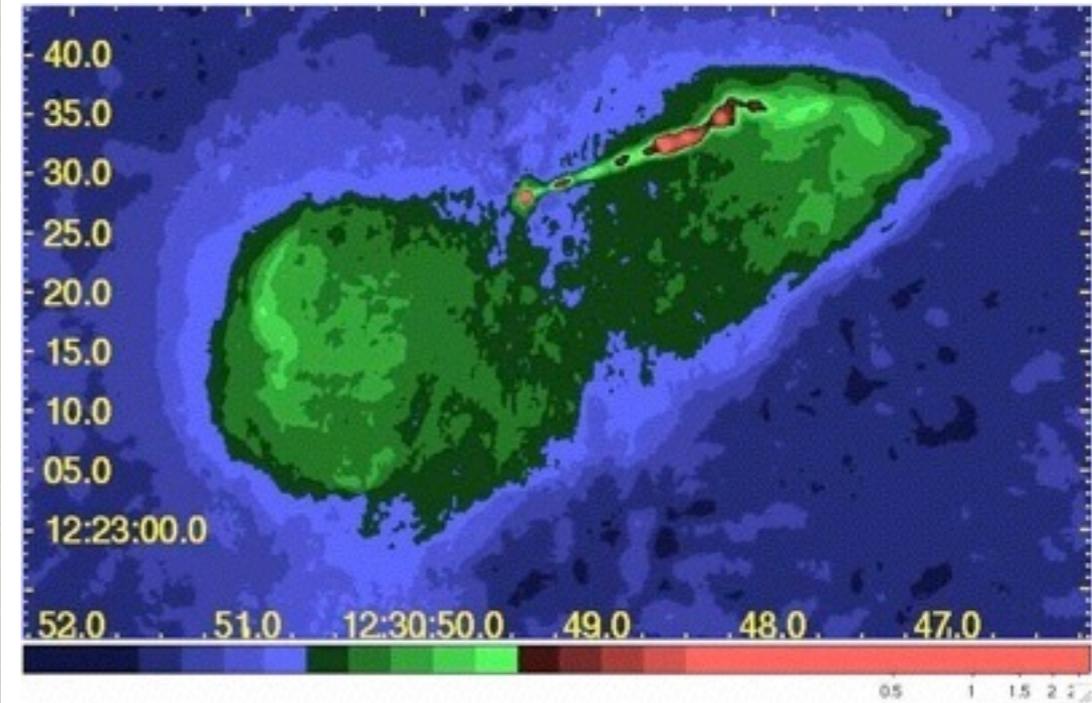


- Elektronen und Protonen werden in den Schockfronten beschleunigt
- Synchrotronstrahlung im Magnetfeld
- Inverse-Compton-Prozesse
- Proton-induzierte Kaskade mit Photonen aus neutralen Pionen

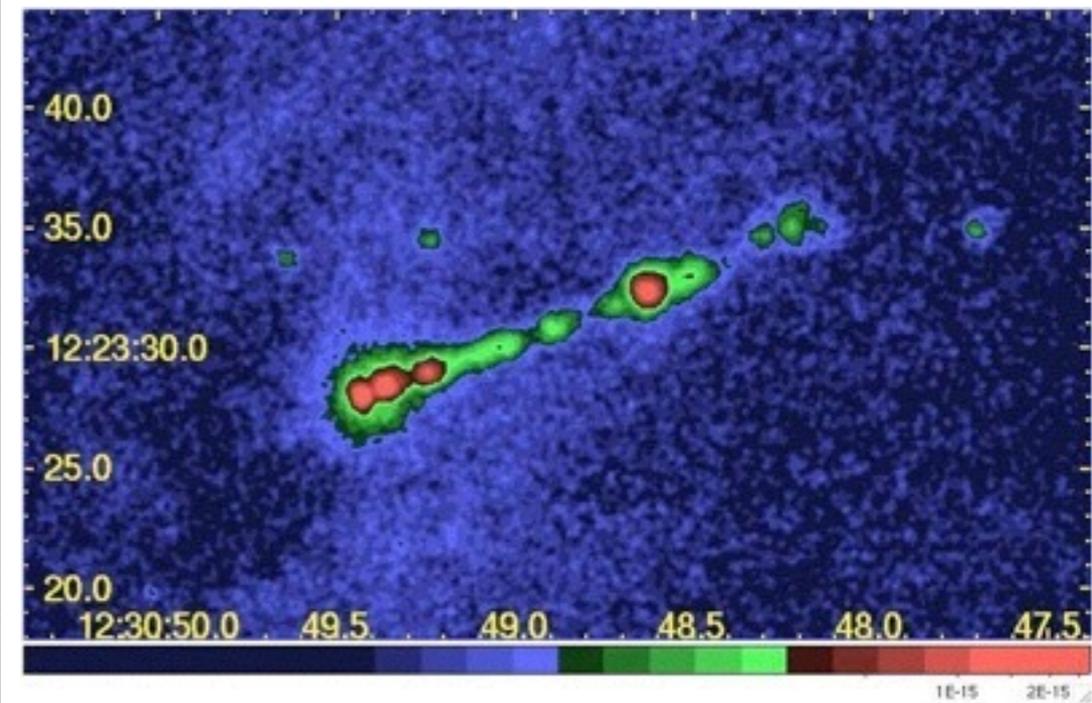
# AGN M87



X-Ray:

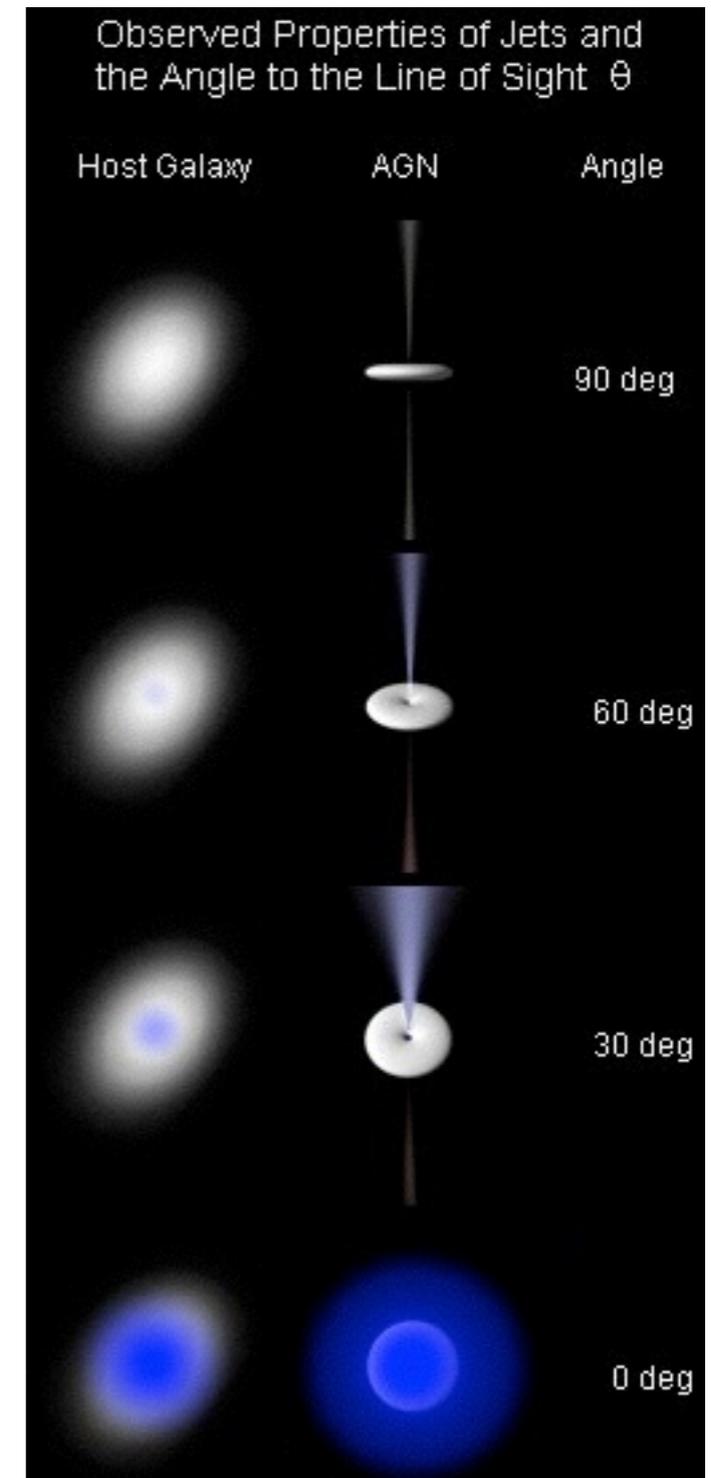


Gamma:

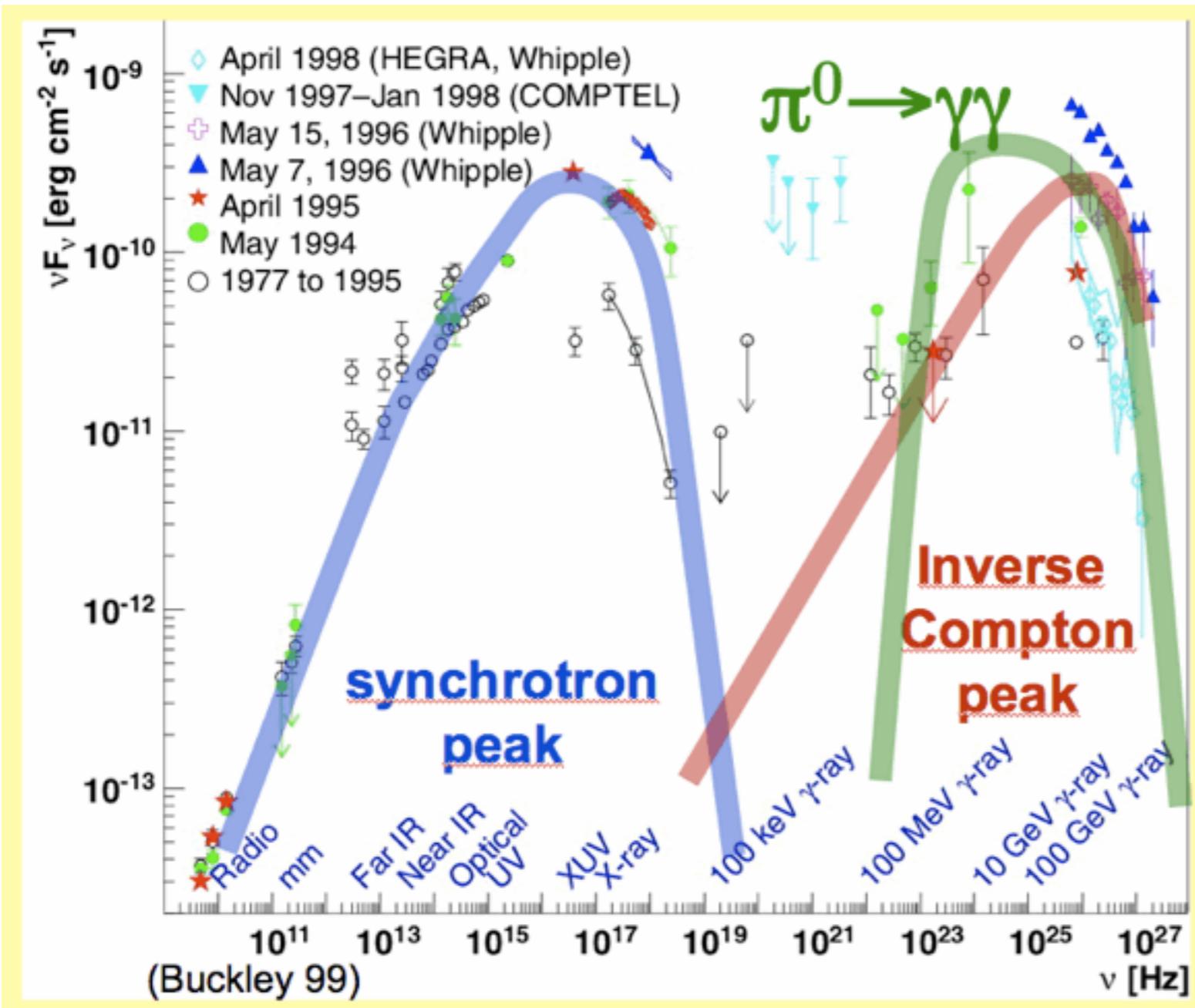


# Blazare: Spezielle AGNs

- Eine Klasse von Objekten, die starke Gamma-Emissionen mit starken zeitlichen Variationen zeigt
  - erste Beobachtung bei BL Lacertae (BL Lac)
- Aktiver Galaktischer Kern, mit einem Jet der fast genau auf die Erde zeigt
  - Zusätzlicher Intensitätsgewinn durch relativistische Effekte
  - Zeitliche Variation zum Beispiel durch Schockfronten, die sich überholen, die durch Materie-Regionen laufen, ...



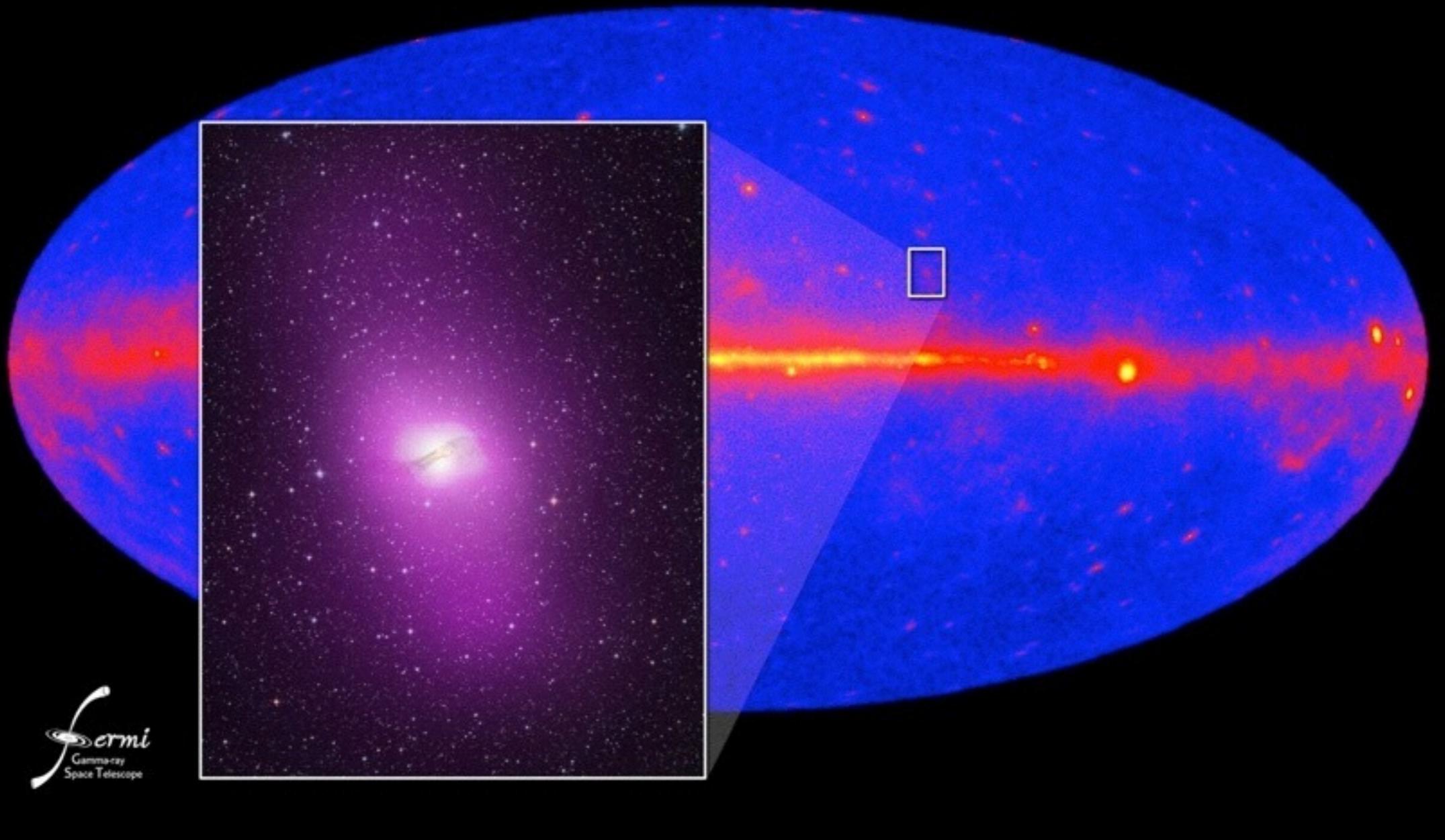
# AGNs: Photon-Spektrum



- Typische “Double Hump” Struktur
- Beiträge von Synchrotronstrahlung und Inverse Compton von Elektronen, Hadronische Komponenten
- Inverse Compton hauptsächlich mit Synchrotron-Photonen

# Gamma-Emissionen auch weit ab vom Kern

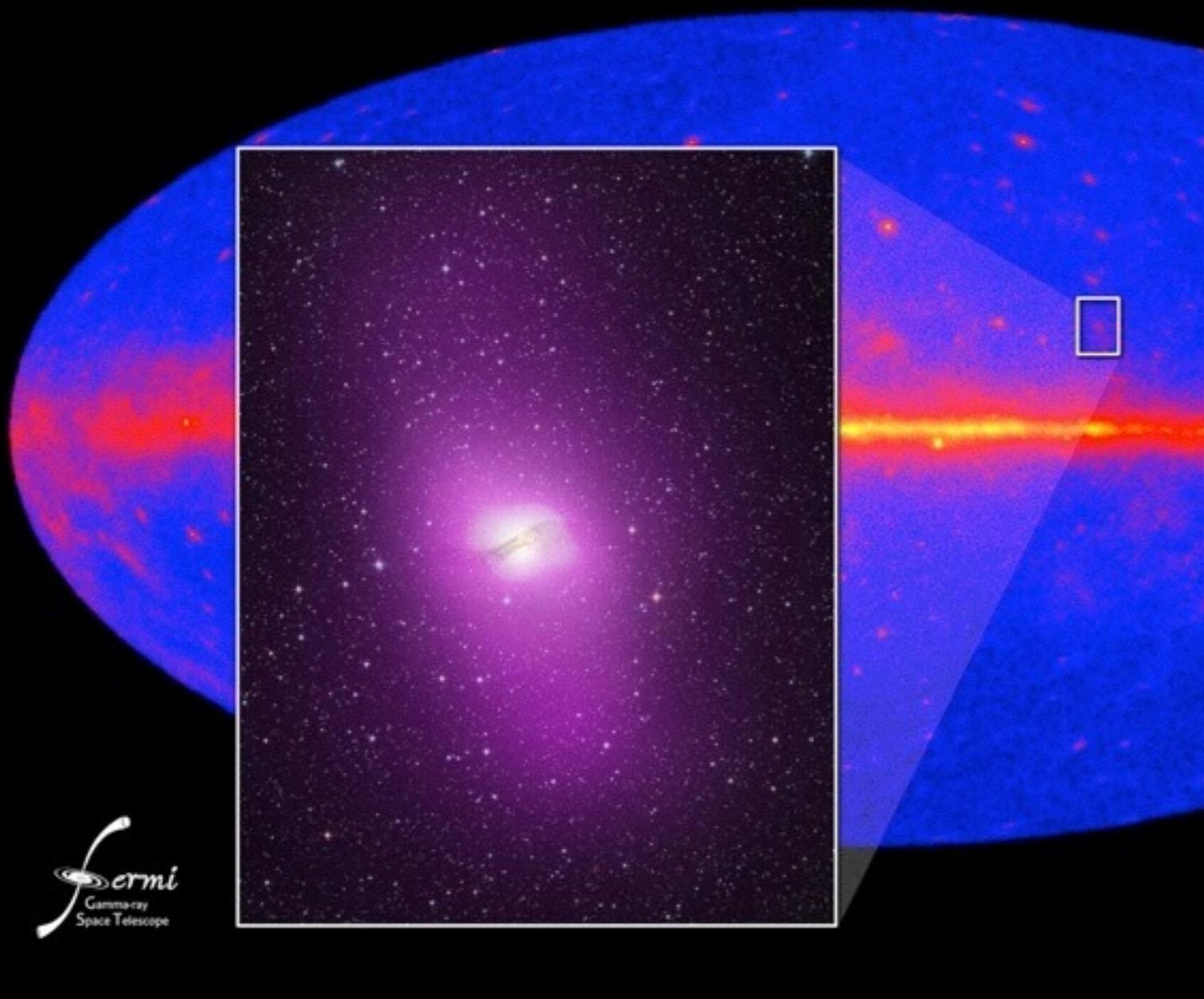
NASA's Fermi telescope resolves radio galaxy Centaurus A



- Fermi hat kürzlich starke Gamma-Emission von CenA beobachtet

# Gamma-Emissionen auch weit ab vom Kern

NASA's Fermi telescope resolves radio galaxy Cen



- Fermi hat kürzlich starke Gamma-Emission von Cen A beobachtet  
⇒ Gamma-Emission in den ausgestossenen Wolken (“Radio Lobes”)

# Niederenergetische Kosmische Strahlung



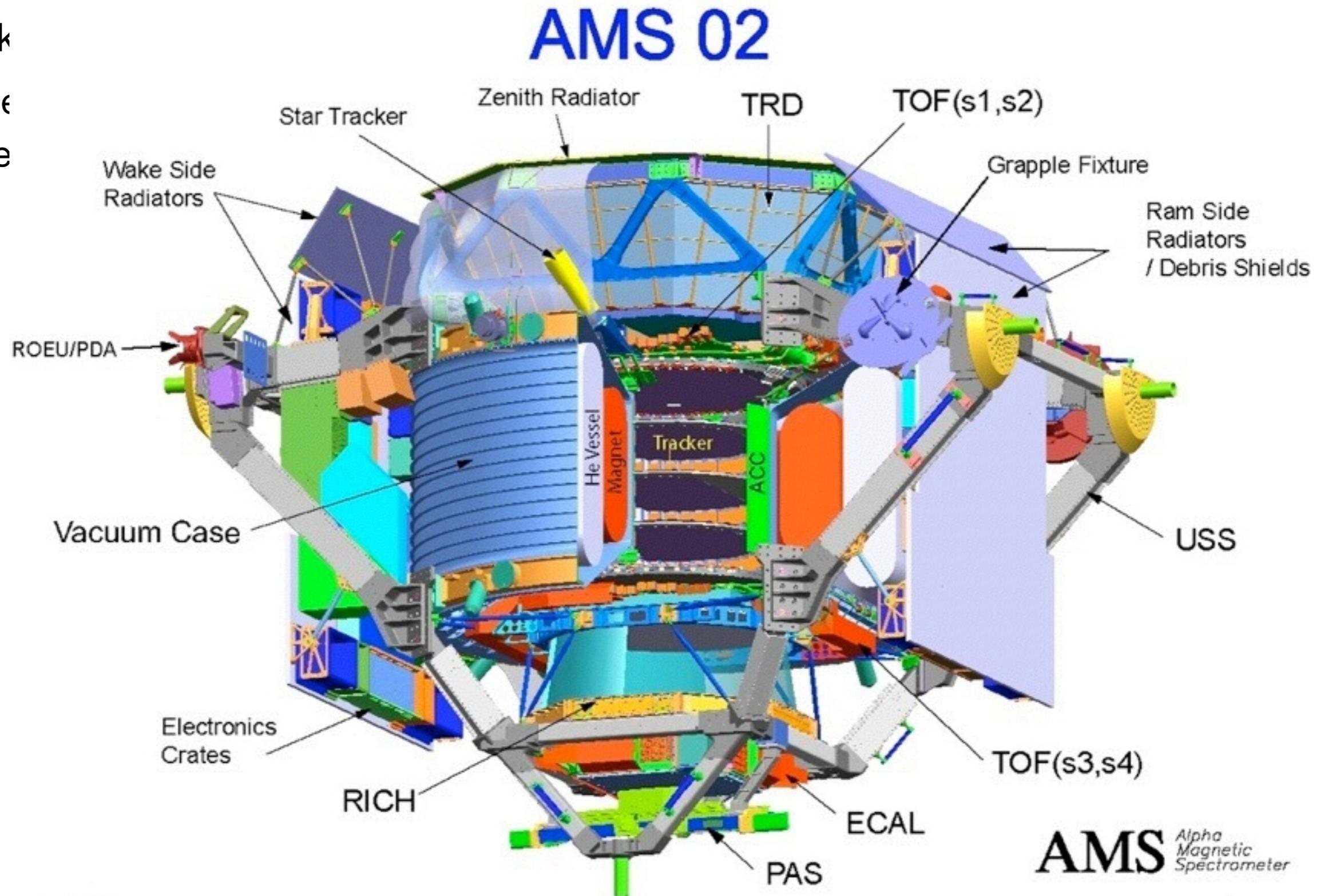
# AMS - Das Flaggschiff

---

- Ein kompletter Teilchenphysik-Detektor im Weltraum
  - Ziel: Suche nach Antimaterie in der kosmischen Strahlung, genaue Untersuchung der Zusammensetzung der kosmischen Strahlung

# AMS - Das Flaggschiff

- Ein k
- Zi
- de



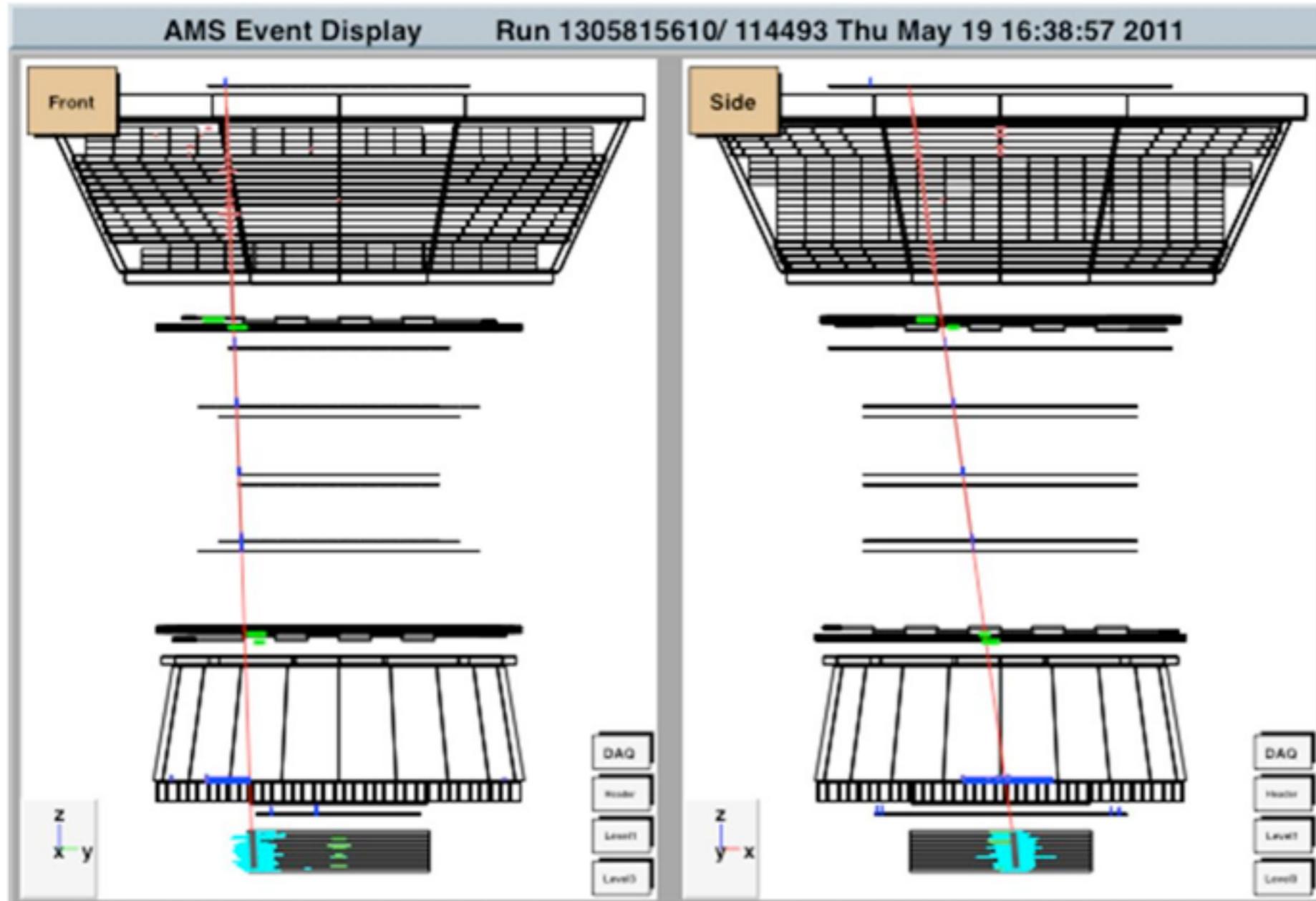
# AMS - Seit 3 Jahren auf der ISS

- Erfolgreicher Start am 16. Mai 2011 - Inzwischen 3 Jahre Datennahme



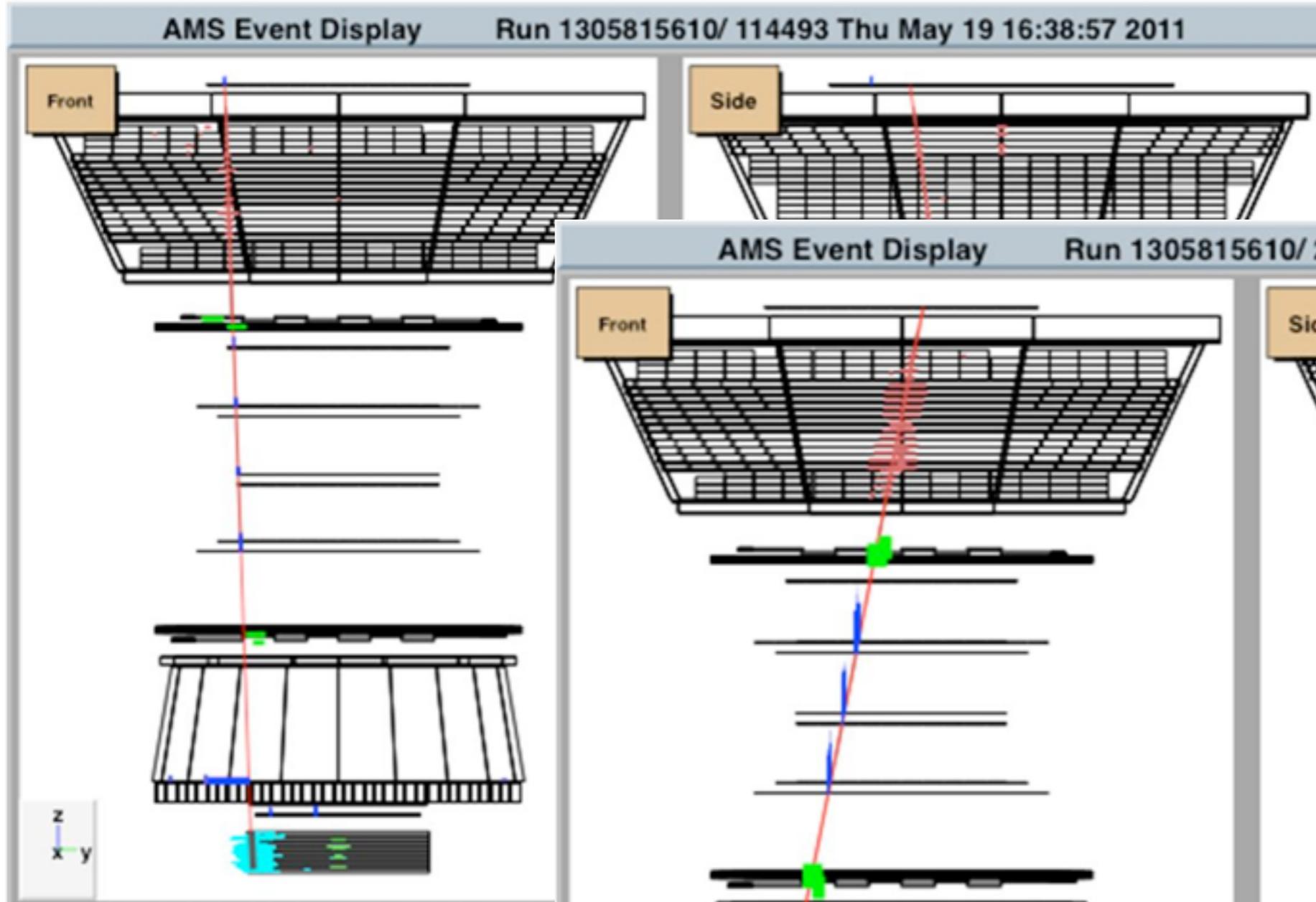
Erste  
Ergebnisse  
wurden im  
April 2013  
präsentiert

# AMS - Erste Ergebnisse



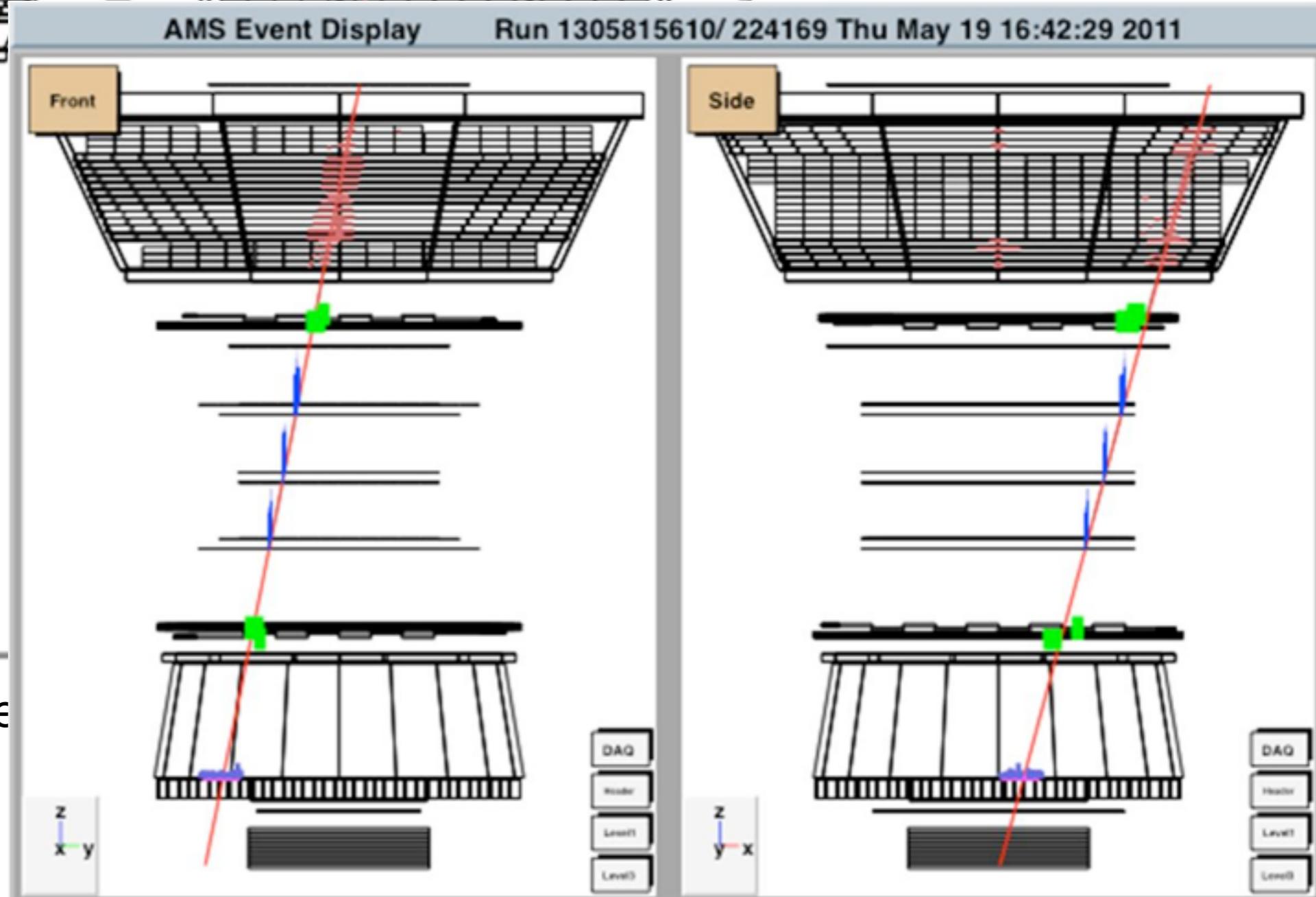
20 GeV electron

# AMS - Erste Ergebnisse



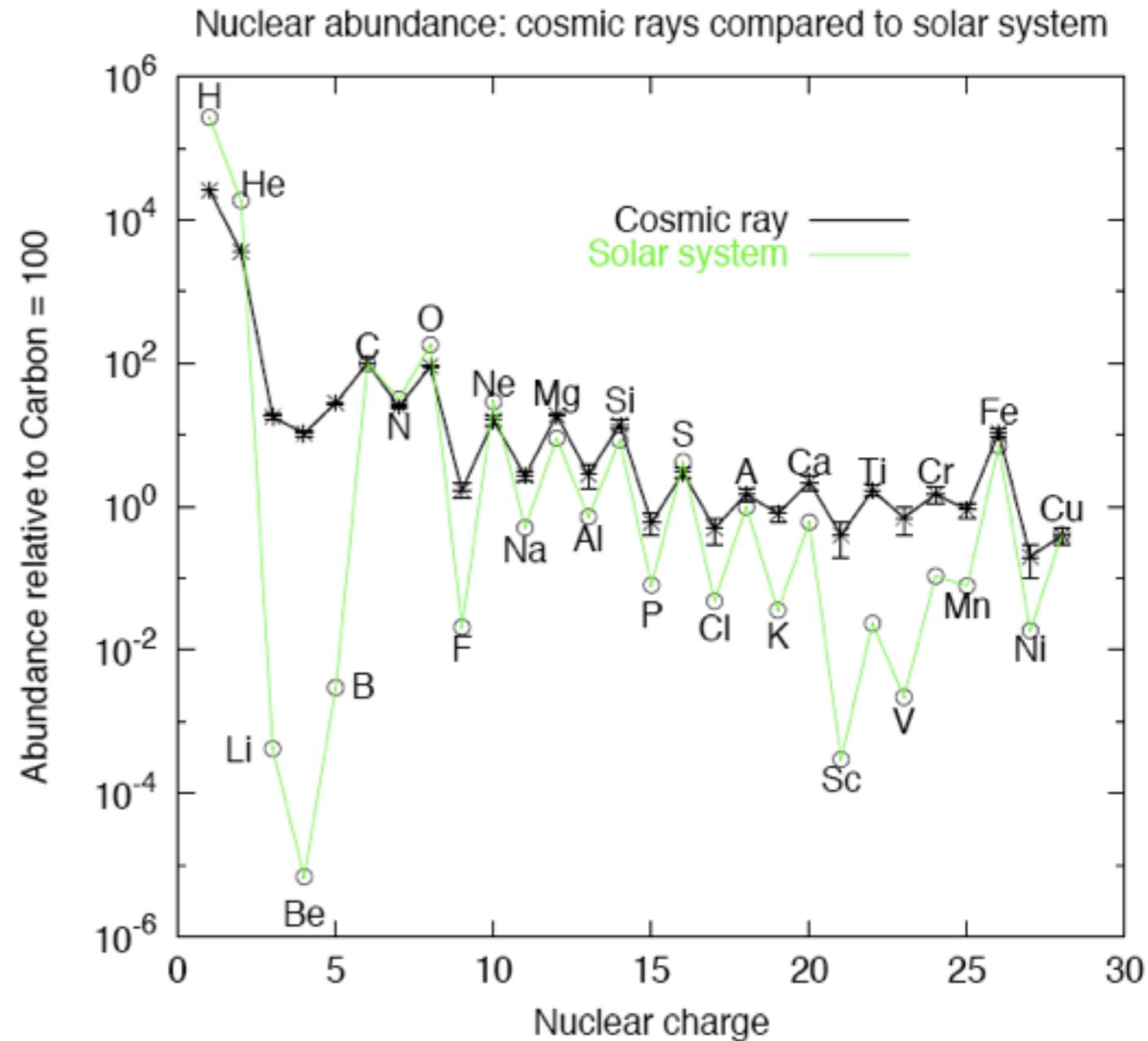
20 GeV  $e^-$

42 GeV carbon ion



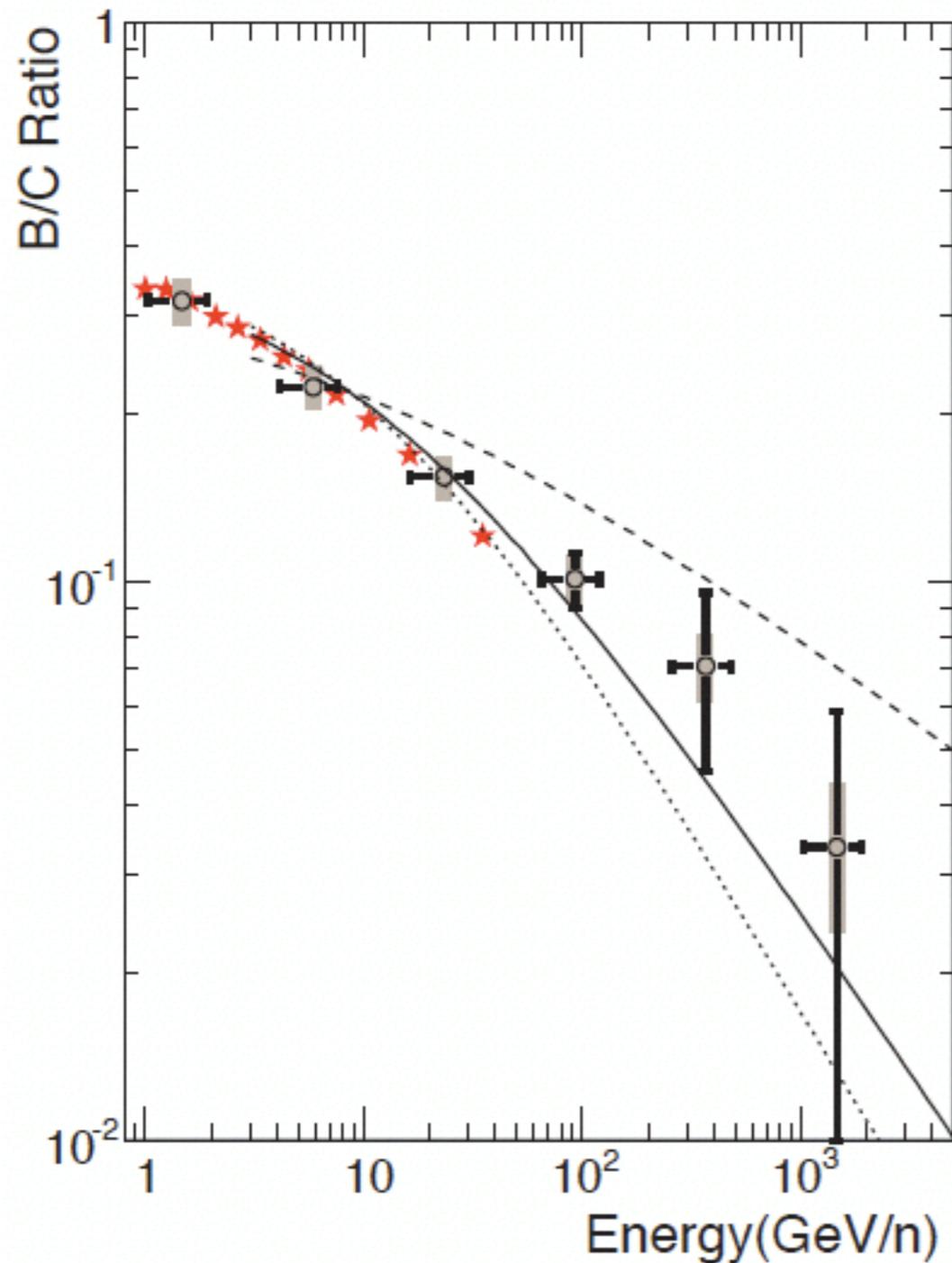
# Zusammensetzung der Kosmischen Strahlung

- Vergleich mit Sonnensystem (bestimmt aus Absorptionslinien der Sonne, Meteoritengestein)
- Übereinstimmung bei mittelschweren Kernen: Maxima bei geradem  $Z$ ,  $A$ : stabile Kerne bei Fusionsreaktionen in Sternen bevorzugt
- Abweichung bei leichten Kernen: Beschleunigung für  $H$ ,  $He$  nicht so effizient
- $Li$ ,  $Be$ ,  $B$  werden in Sternen sofort verbrannt
  - Elemente schwerer als  $Li$  kommen nicht primordial vor
  - werden in der KS durch Spallation von schwereren Kernen erzeugt



# Energieabhängigkeit der Zusammensetzung

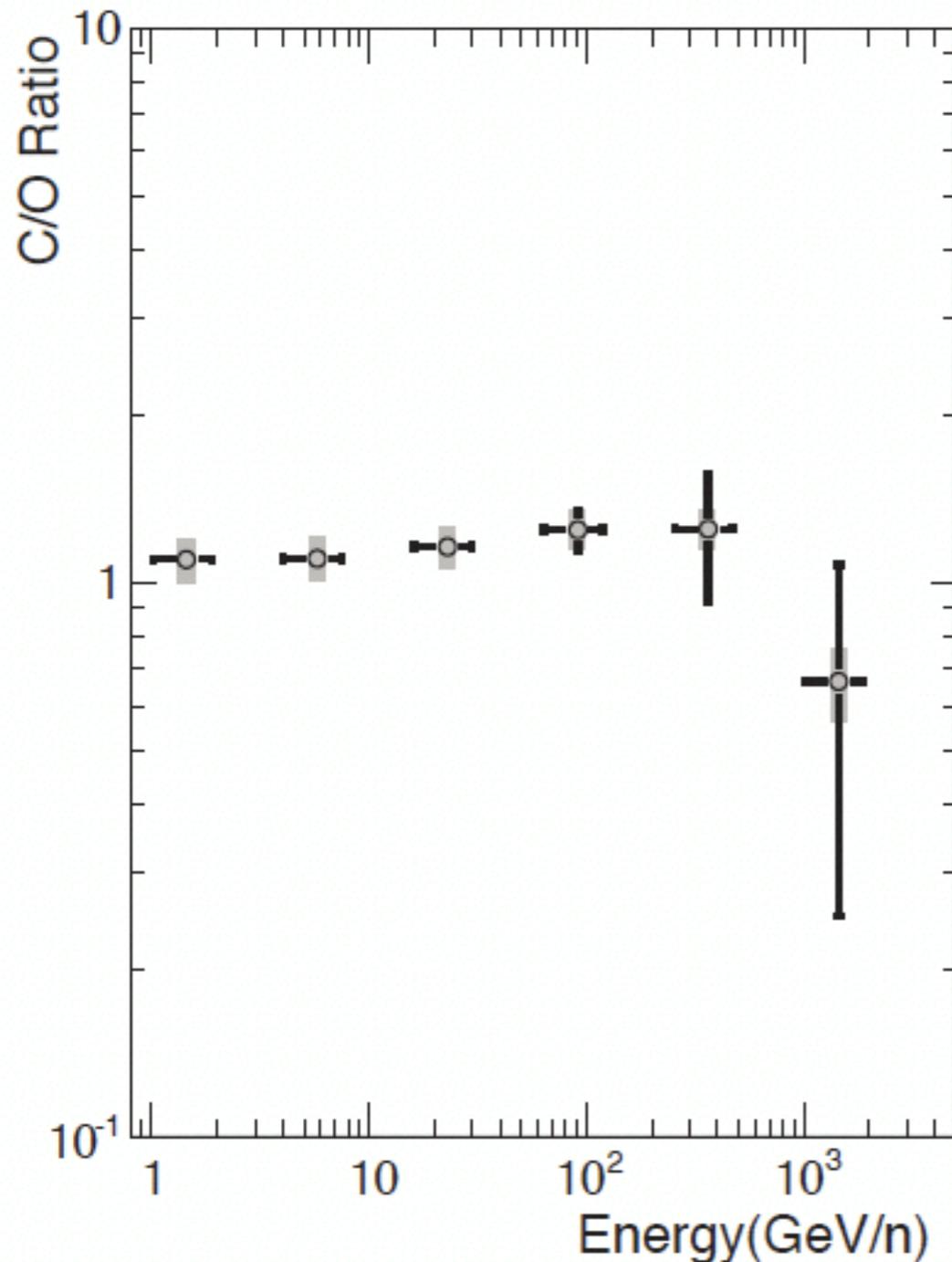
CREAM 2008



Bor kommt in primären kosmischen Teilchen nicht vor, Erzeugung durch Spallation, Kohlenstoff ist primär  
⇒ Vor allem bei niedrigen Energien wird B beobachtet!

# Energieabhängigkeit der Zusammensetzung

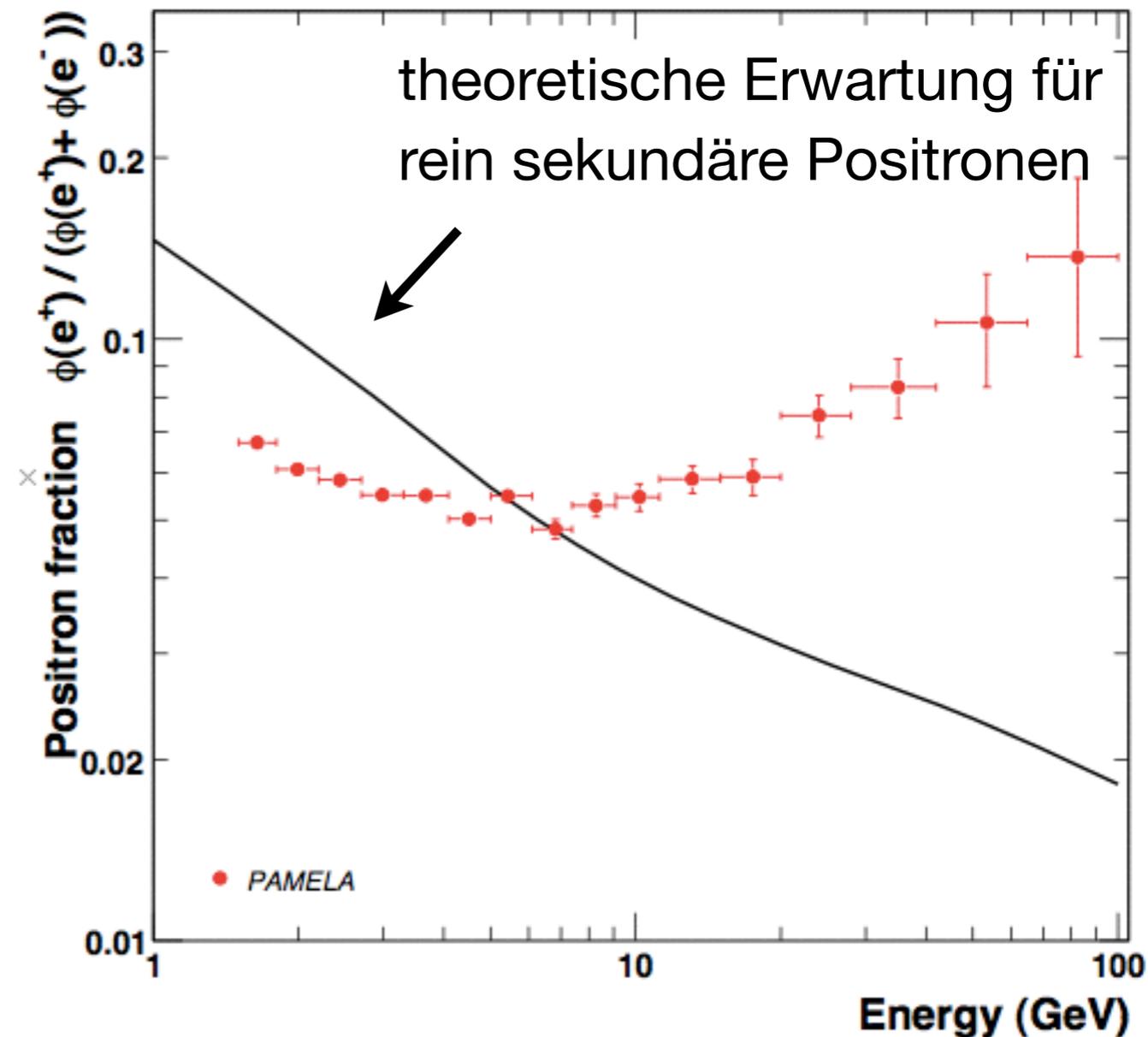
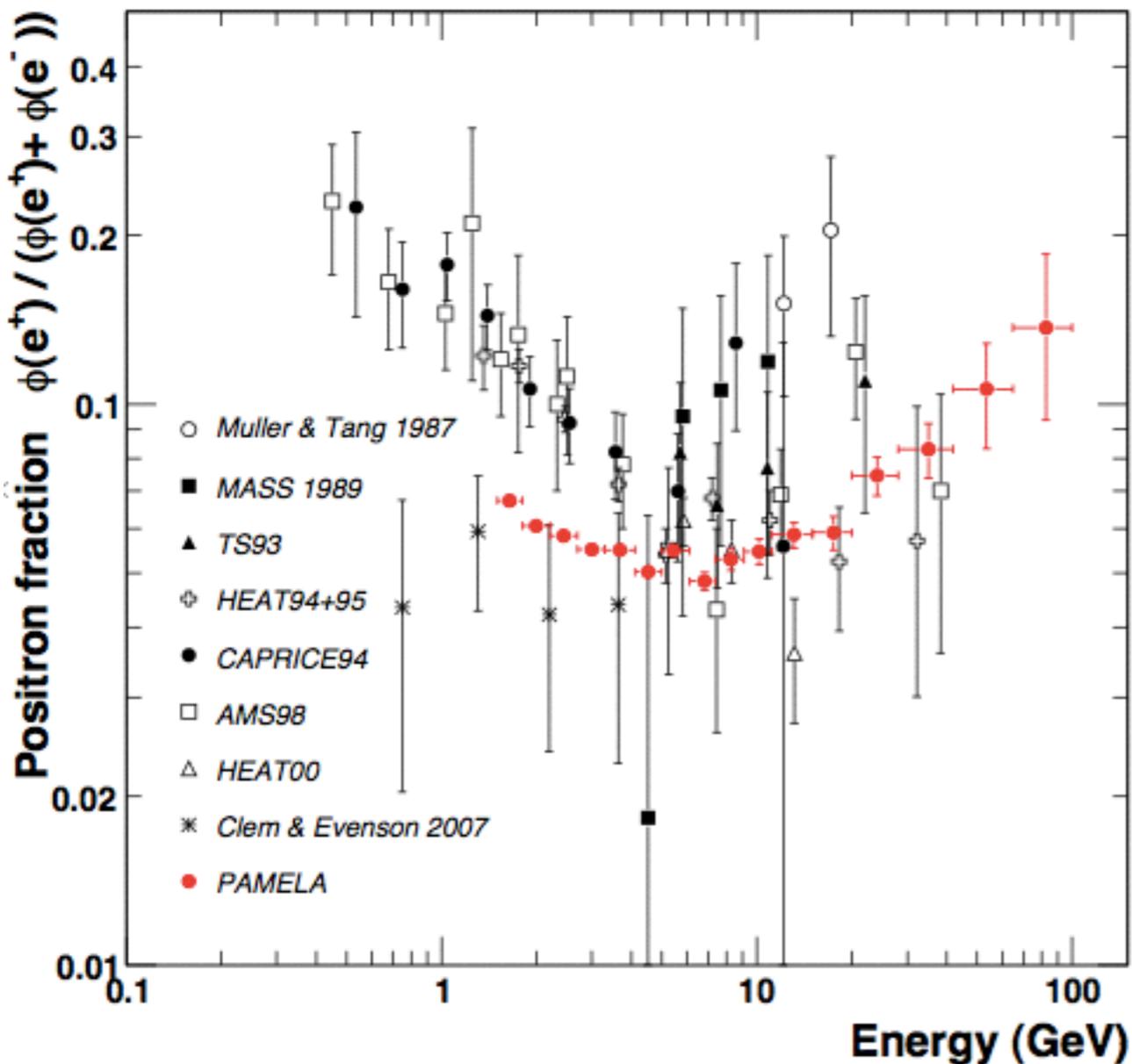
CREAM 2008



Sowohl Sauerstoff als auch Kohlenstoff sind primäre Teilchen der kosmischen Strahlung, beide haben  $Z/A = 0.5$ : gleiches Energiespektrum!

# Positronen in der kosmischen Strahlung

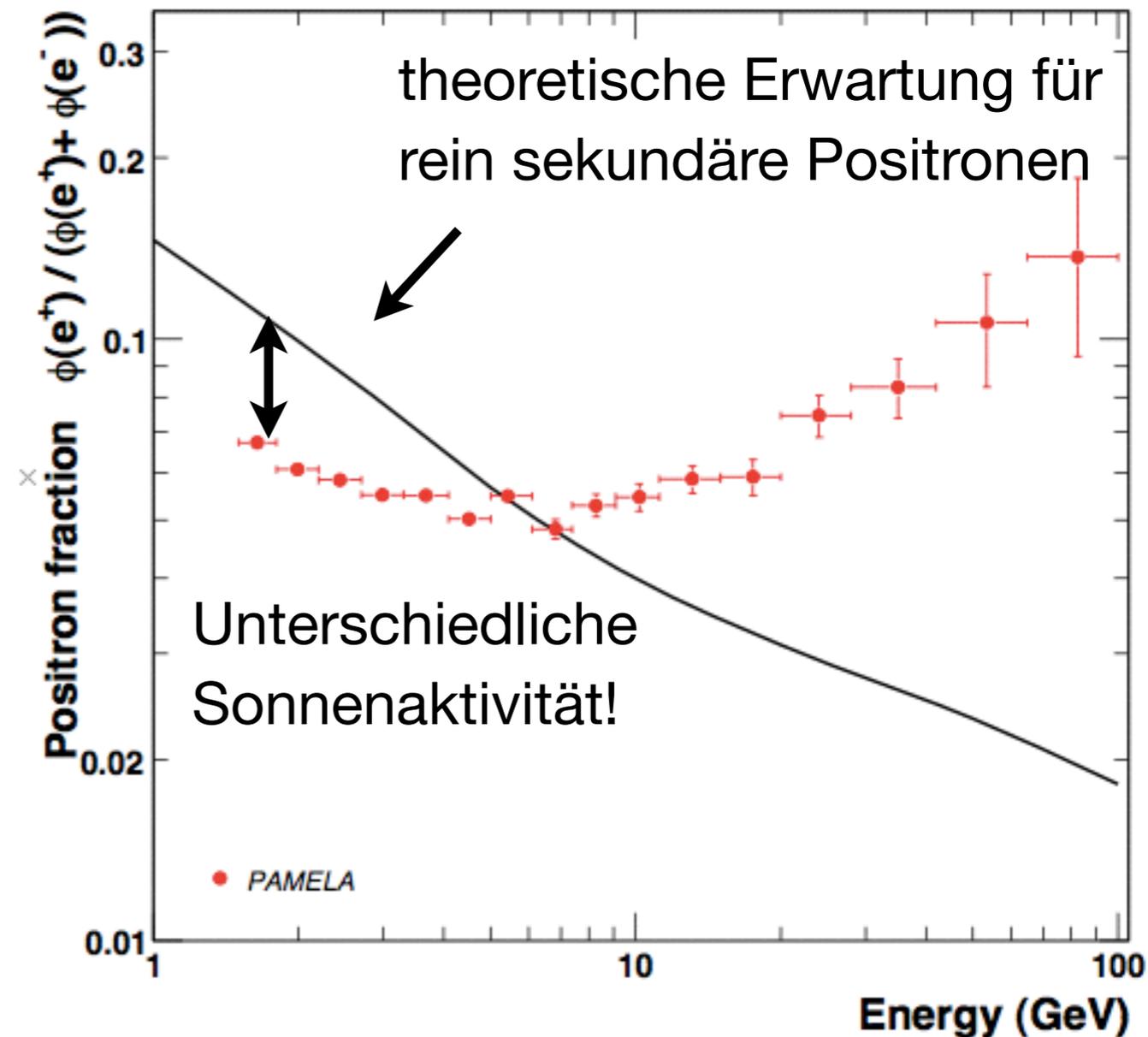
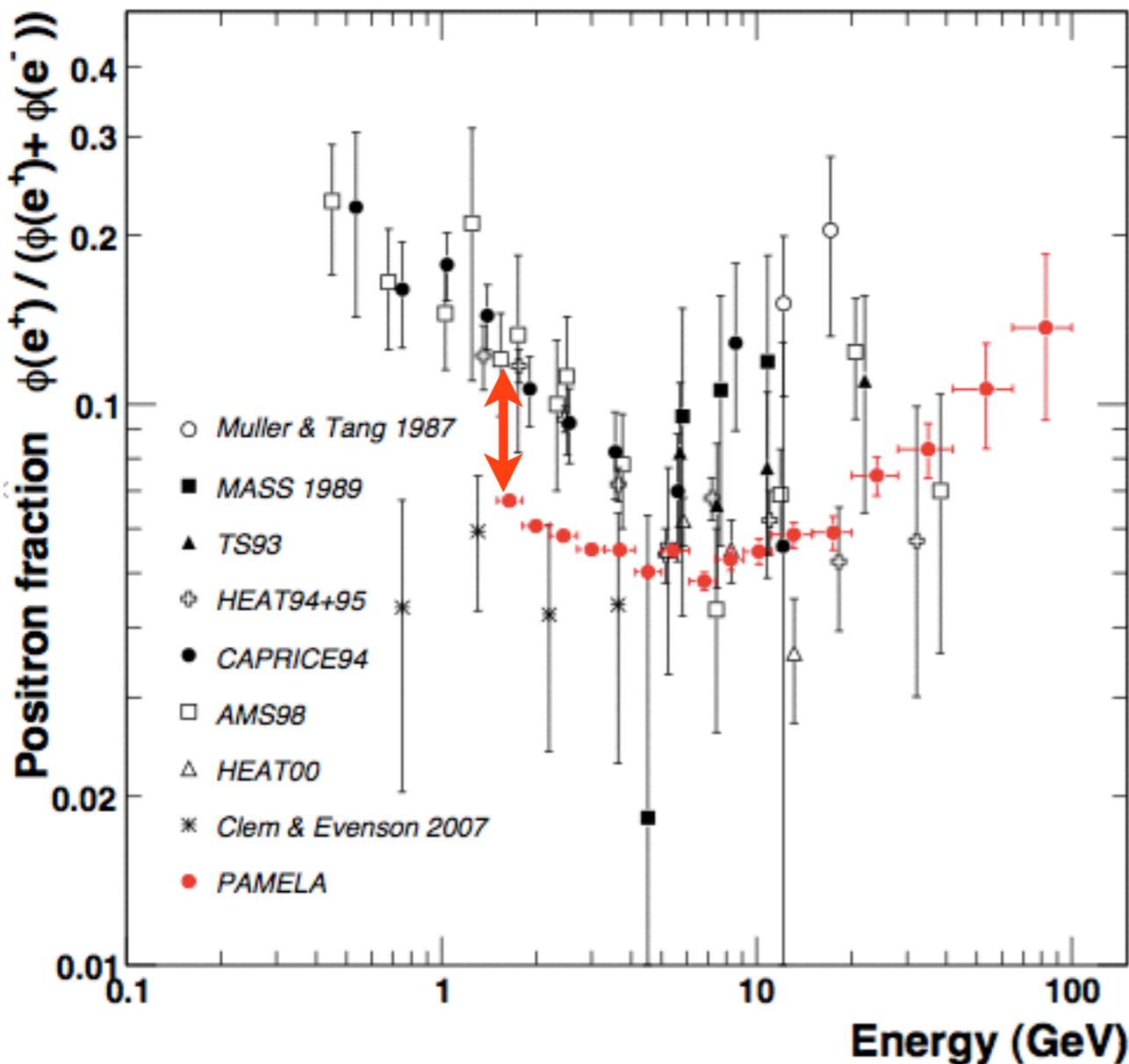
- Interessante Ergebnisse von Pamela (Nature, April 2009):



arXiv:0810.4995

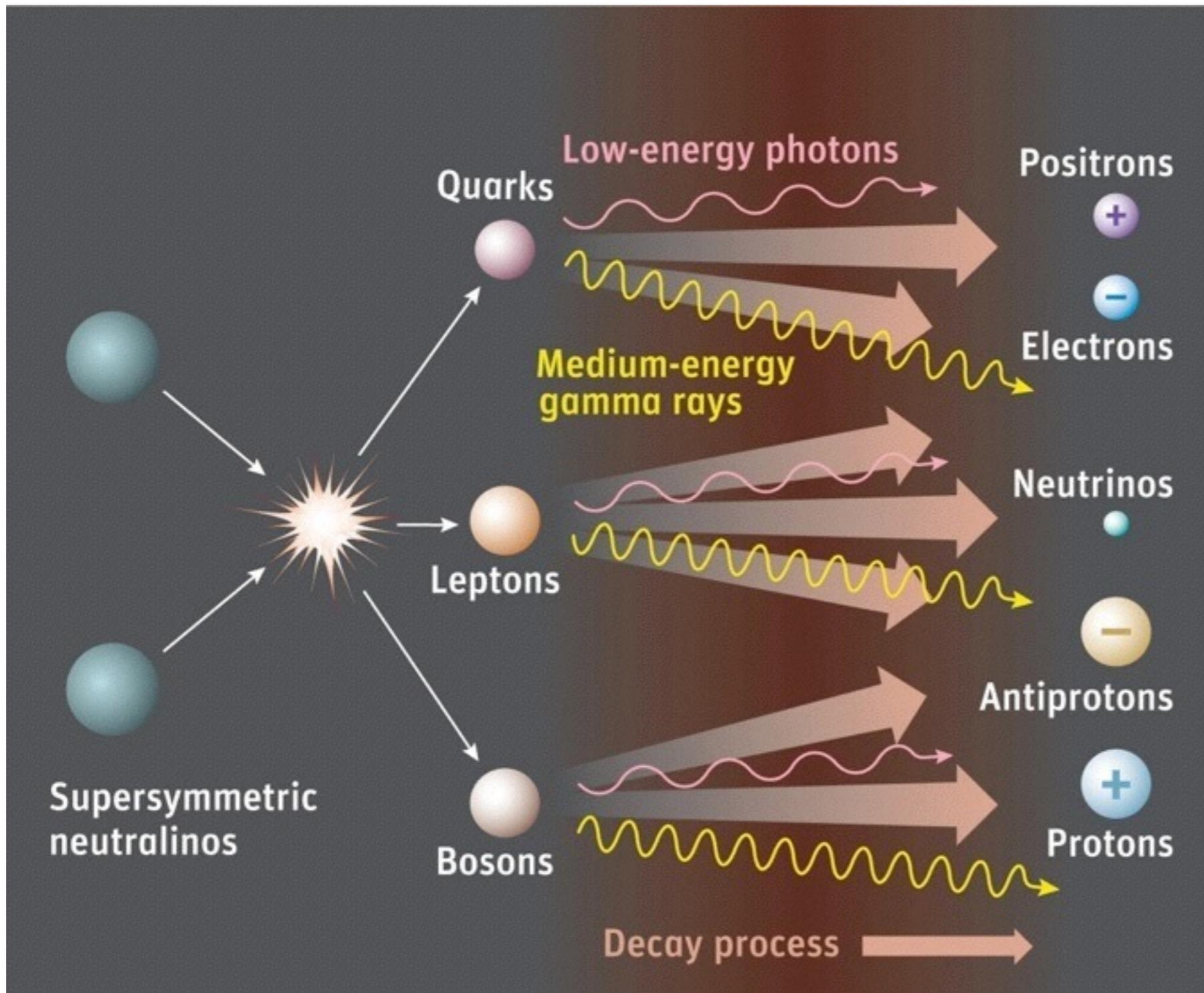
# Positronen in der kosmischen Strahlung

- Interessante Ergebnisse von Pamela (Nature, April 2009):



arXiv:0810.4995

# Mögliche Erklärung: Dunkle Materie

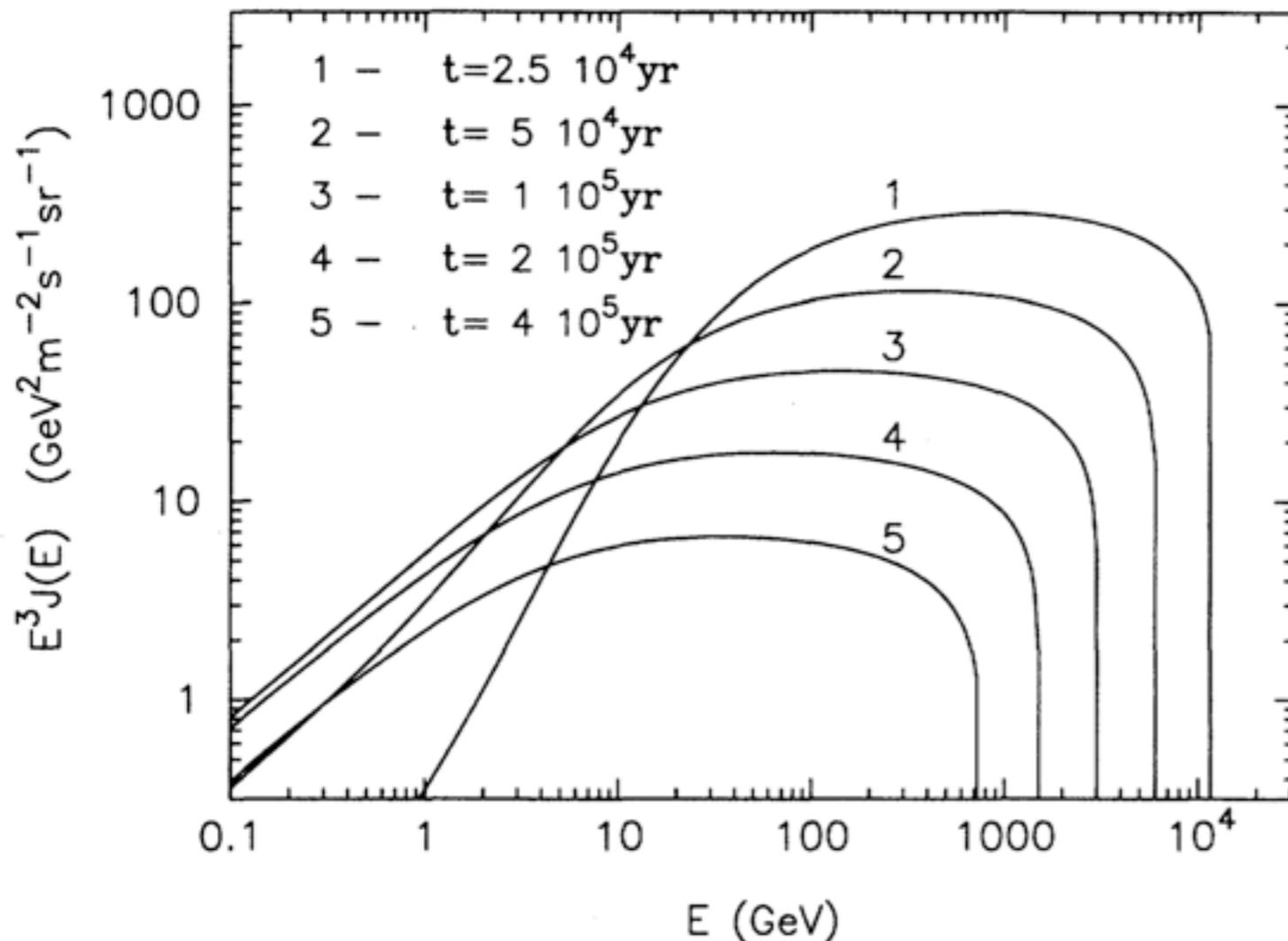


- Viel Diskussion:  
Mehrere hundert Papers  
über mögliche Dark-  
Matter Interpretation der  
Pamela-Daten innerhalb  
weniger Monate

Würde für einen "Peak" bei  
den Positronen sorgen, bei  
höheren Energien sollten  
sie dann wieder auf der  
erwarteten Kurve liegen

# Weniger spektakuläre Erklärungen

- Es muss eine andere primäre Komponente von Positronen in der KS geben!
  - Beschleunigung auch von Positronen, zB in einem nahegelegenen Pulsar: Aus hochenergetischer Gamma-Strahlung werden  $e^+e^-$  Paare erzeugt

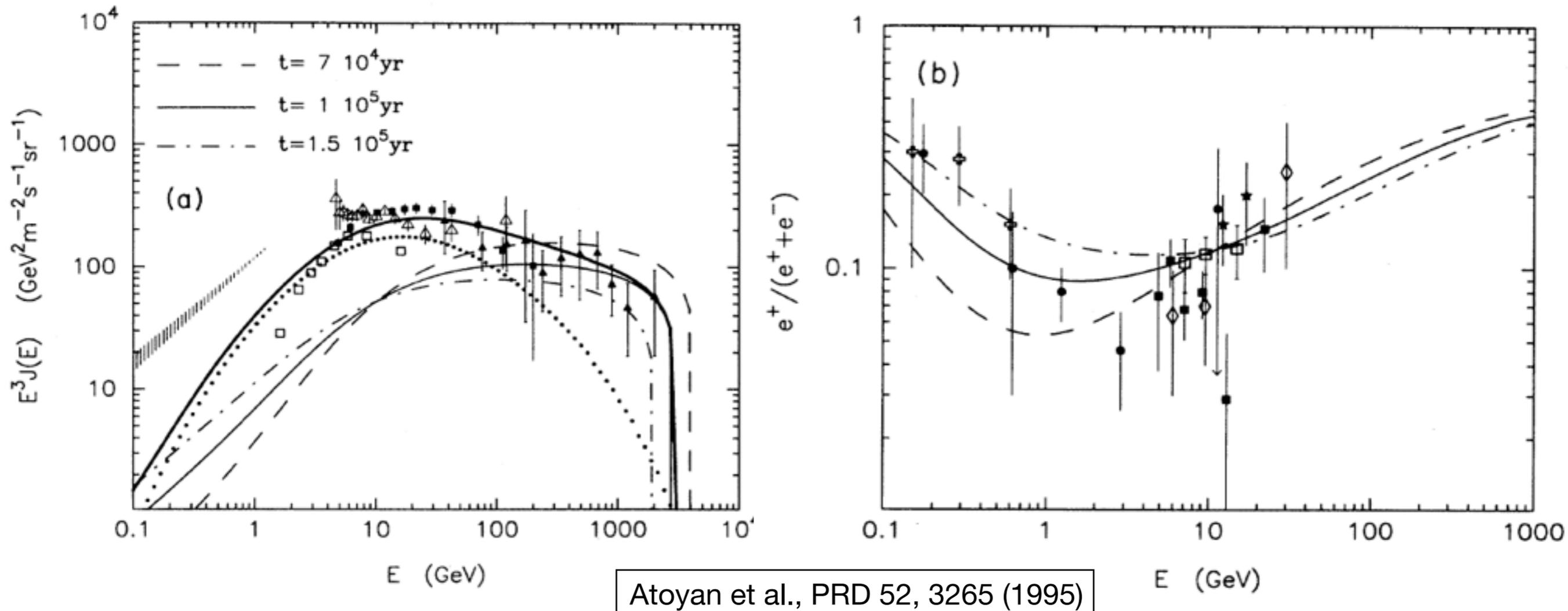


Elektronen (und Positronen) verlieren im ISM schnell an Energie durch Compton-Streuung und Synchrotron-Strahlung

⇒ Quellen hochenergetischer Elektronen müssen nah sein!

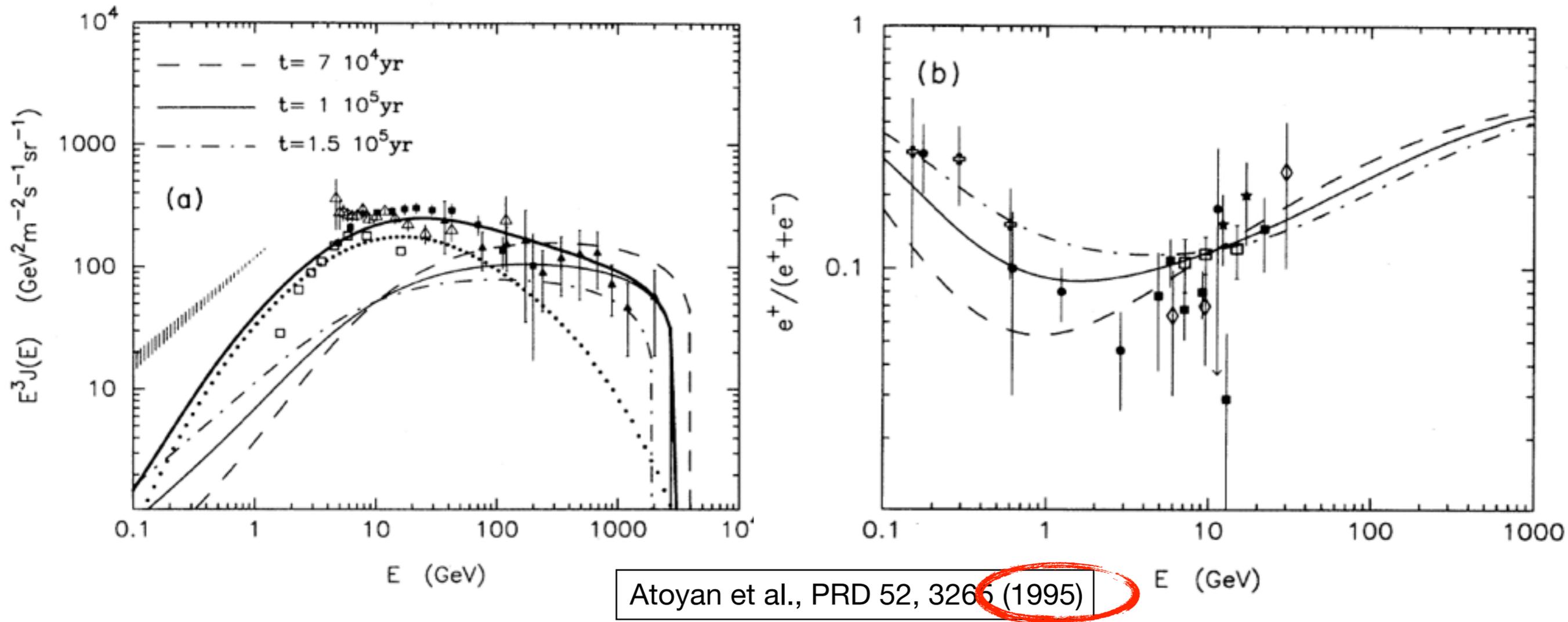
Atoyan et al., PRD 52, 3265 (1995)

# Elektronen und Positronen aus Pulsaren



⇒ PAMELA-Daten können auch durch wenige (oder einen einzigen) nahen Pulsar erklärt werden, es gibt tatsächlich dafür Kandidaten!

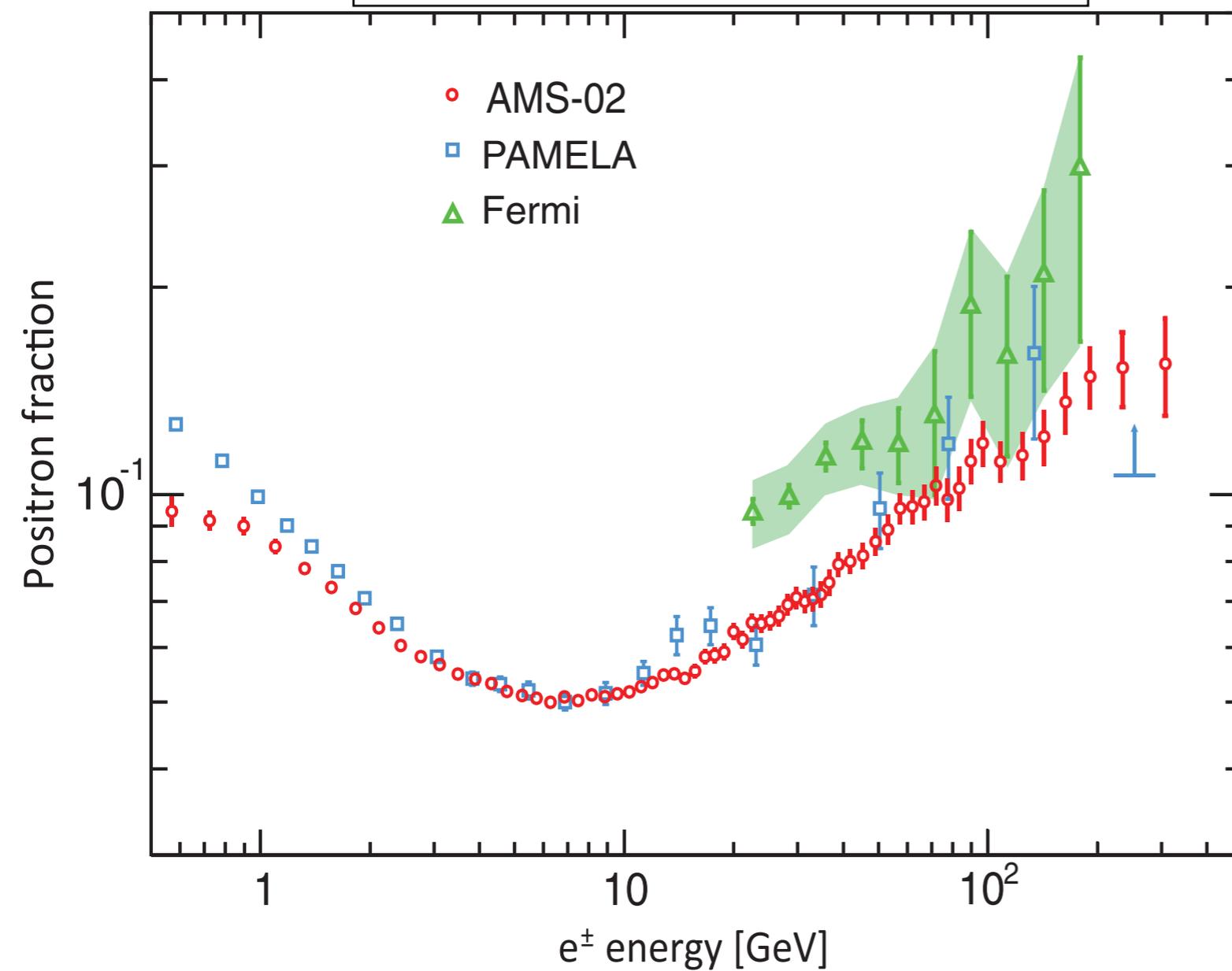
# Elektronen und Positronen aus Pulsaren



⇒ PAMELA-Daten können auch durch wenige (oder einen einzigen) nahen Pulsar erklärt werden, es gibt tatsächlich dafür Kandidaten!

# Bestätigt von AMS & Fermi

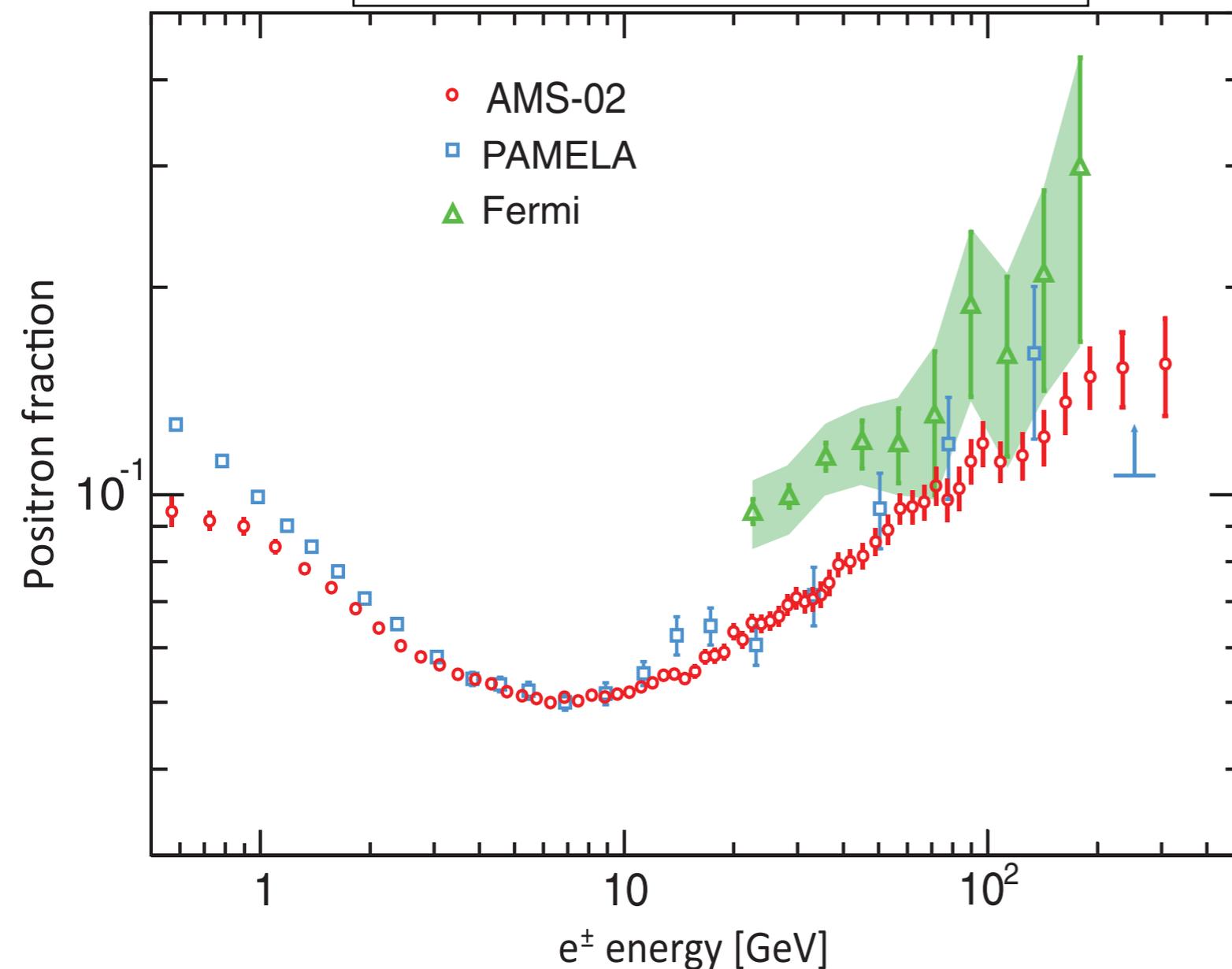
Phys. Rev. Lett. 110, 141102 (2013)



- AMS beweist: Der Effekt ist real - auch unterstützt von Fermi-Ergebnissen
- Detailliertere Analysen zeigen (bis jetzt) keine Anisotropie in der Verteilung des Positronen-Überschusses - keine ausgezeichnete Richtung

# Bestätigt von AMS & Fermi

Phys. Rev. Lett. 110, 141102 (2013)



- AMS beweist: Der Effekt ist real - auch unterstützt von Fermi-Ergebnissen
- Detailliertere Analysen zeigen (bis jetzt) keine Anisotropie in der Verteilung des Positronen-Überschusses - keine ausgezeichnete Richtung

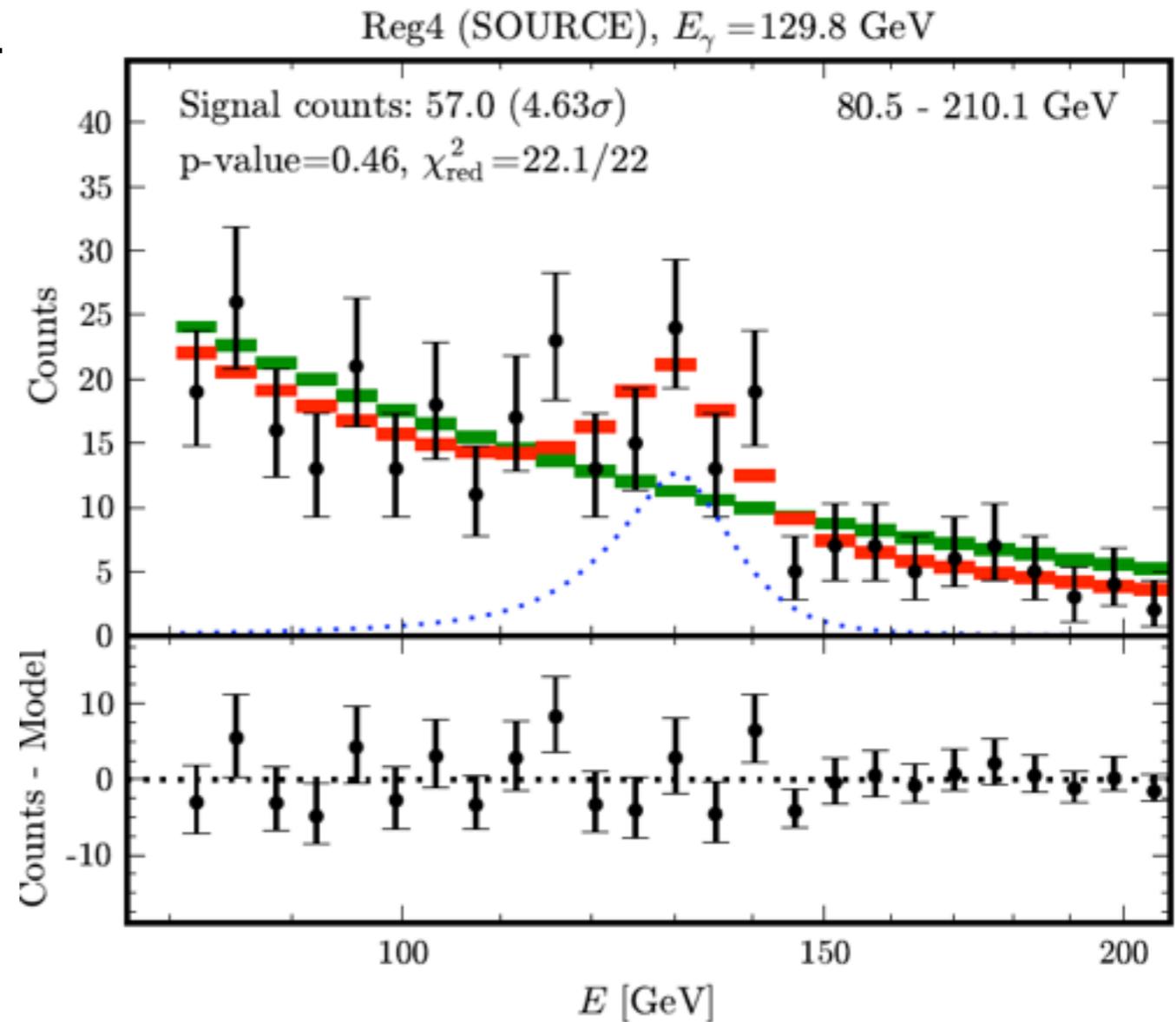
⇒ Verträglich mit “teilchenphysikalischem Ursprung” (Dark Matter), aber andere Erklärungen können nicht ausgeschlossen werden: Pulsare, mögliche Fehler in den aktuellen Propagationsmodellen...

# Ähnliche Situation bei Photonen

- In einer “privaten” Analyse der Fermi-Daten (C. Weniger, JCAP08(2012)007) wurde ein Peak bei 130 GeV gefunden:
- Mögliche Interpretation

$$\chi_0\chi_0 \rightarrow \gamma\gamma$$

Allerdings: In der offiziellen Analyse der Fermi-Kollaboration wurde kein Hinweis auf die Linie gefunden - Es hängt an der Analysetechnik, im Moment kein überzeugender Hinweis auf Neue Physik (oder andere Phänomene)



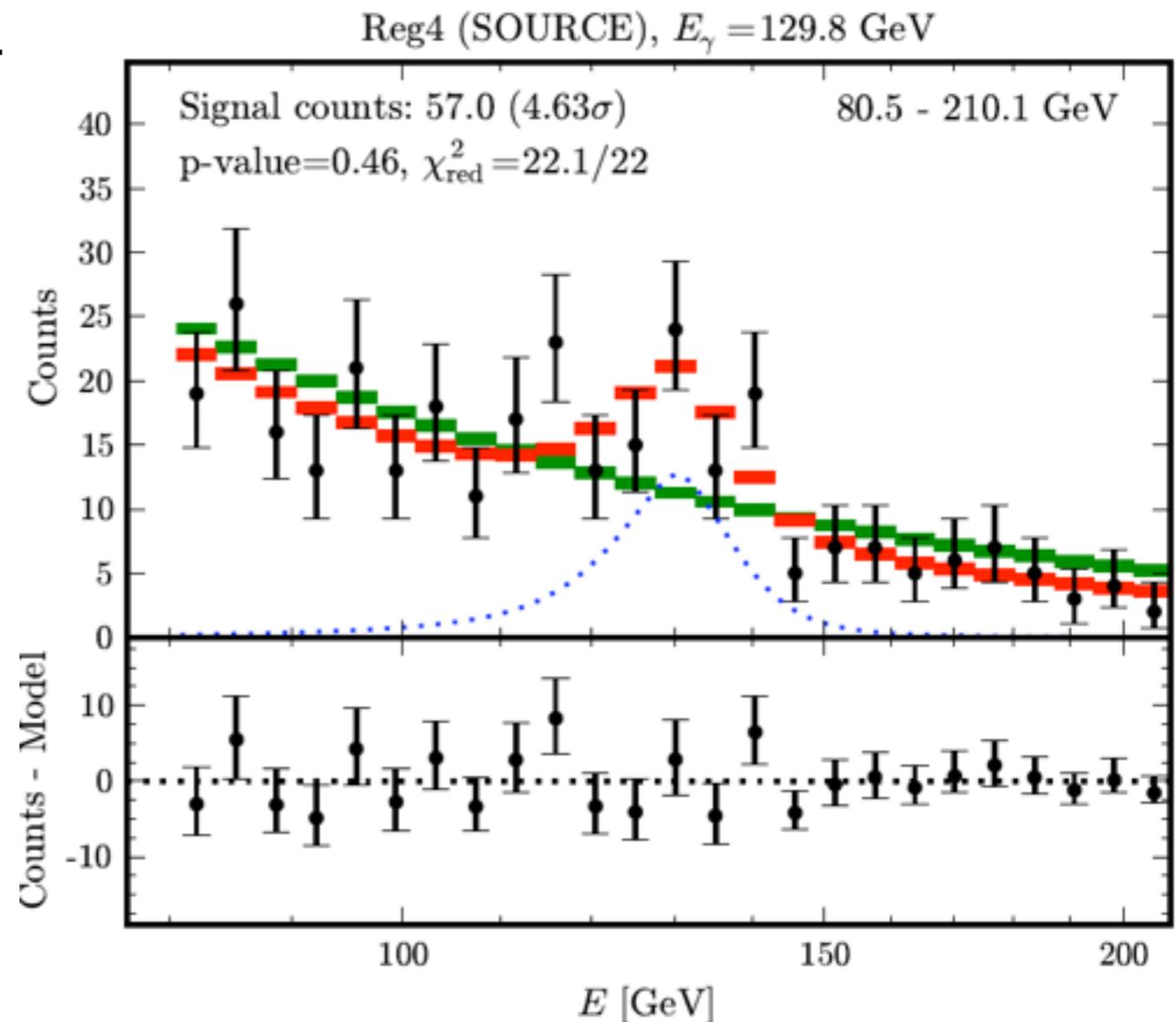
# Ähnliche Situation bei Photonen

- In einer “privaten” Analyse der Fermi-Daten (C. Weniger, JCAP08(2012)007) wurde ein Peak bei 130 GeV gefunden:
- Mögliche Interpretation

$$\chi_0\chi_0 \rightarrow \gamma\gamma$$

Allerdings: In der offiziellen Analyse der Fermi-Kollaboration wurde kein Hinweis auf die Linie gefunden - Es hängt an der Analysetechnik, im Moment kein überzeugender Hinweis auf Neue Physik (oder andere Phänomene)

⇒ Es bleibt spannend - noch viel Potential für Entdeckungen & Überraschungen



# Zusammenfassung

---

- Elektromagnetische Strahlung spielt eine grosse Rolle: Die Kombination verschiedener Spektralbereiche ermöglicht genaue Untersuchungen von Quellen
- Beobachtung hochenergetischer Photonen mit Cherenkov-Teleskopen
  - Erzeugung durch Synchrotronstrahlung und Inverse-Compton-Streuung
  - Erlaubt besseres Verständnis der Beschleunigungsmechanismen
- Gamma-Quellen in unserer Galaxie und extragalaktisch:
  - Pulsare
  - Aktive Galaktische Kerne, Blazare
- Zusammensetzung der Strahlung bei niedrigen Energien gut verstanden - Primäre und Sekundäre Komponenten
- Spannende Beobachtungen: Positronen-Überschuss - Ein Hinweis auf Neue Physik, auf Pulsare oder noch fehlendes Verständnis der Teilchenpropagation in der Galaxie?

# Zusammenfassung

---

- Elektromagnetische Strahlung spielt eine grosse Rolle: Die Kombination verschiedener Spektralbereiche ermöglicht genaue Untersuchungen von Quellen
- Beobachtung hochenergetischer Photonen mit Cherenkov-Teleskopen
  - Erzeugung durch Synchrotronstrahlung und Inverse-Compton-Streuung
  - Erlaubt besseres Verständnis der Beschleunigungsmechanismen
- Gamma-Quellen in unserer Galaxie und extragalaktisch:
  - Pulsare
  - Aktive Galaktische Kerne, Blazare
- Zusammensetzung der Strahlung bei niedrigen Energien gut verstanden - Primäre und Sekundäre Komponenten
- Spannende Beobachtungen: Positronen-Überschuss - Ein Hinweis auf Neue Physik, auf Pulsare oder noch fehlendes Verständnis der Teilchenpropagation in der Galaxie?

Nächste Vorlesung: 30.06., “Neutrinos I”, F. Simon



# Themenübersicht

07.04.	Einführung
14.04.	Beschleuniger
28.04.	Detektoren in der Nicht-Beschleuniger-Physik
05.05.	Kosmische Beschleuniger
12.05.	Das Standardmodell
19.05.	Starke Wechselwirkung
26.05.	Niederenergie - Präzisionsexperimente
02.06.	Dunkle Materie & Dunkle Energie
09.06.	<b>Pfingsten - Keine Vorlesung!</b>
16.06.	Kosmische Strahlung I
23.06.	Kosmische Strahlung II
30.06.	Neutrinos I
07.07.	Neutrinos II