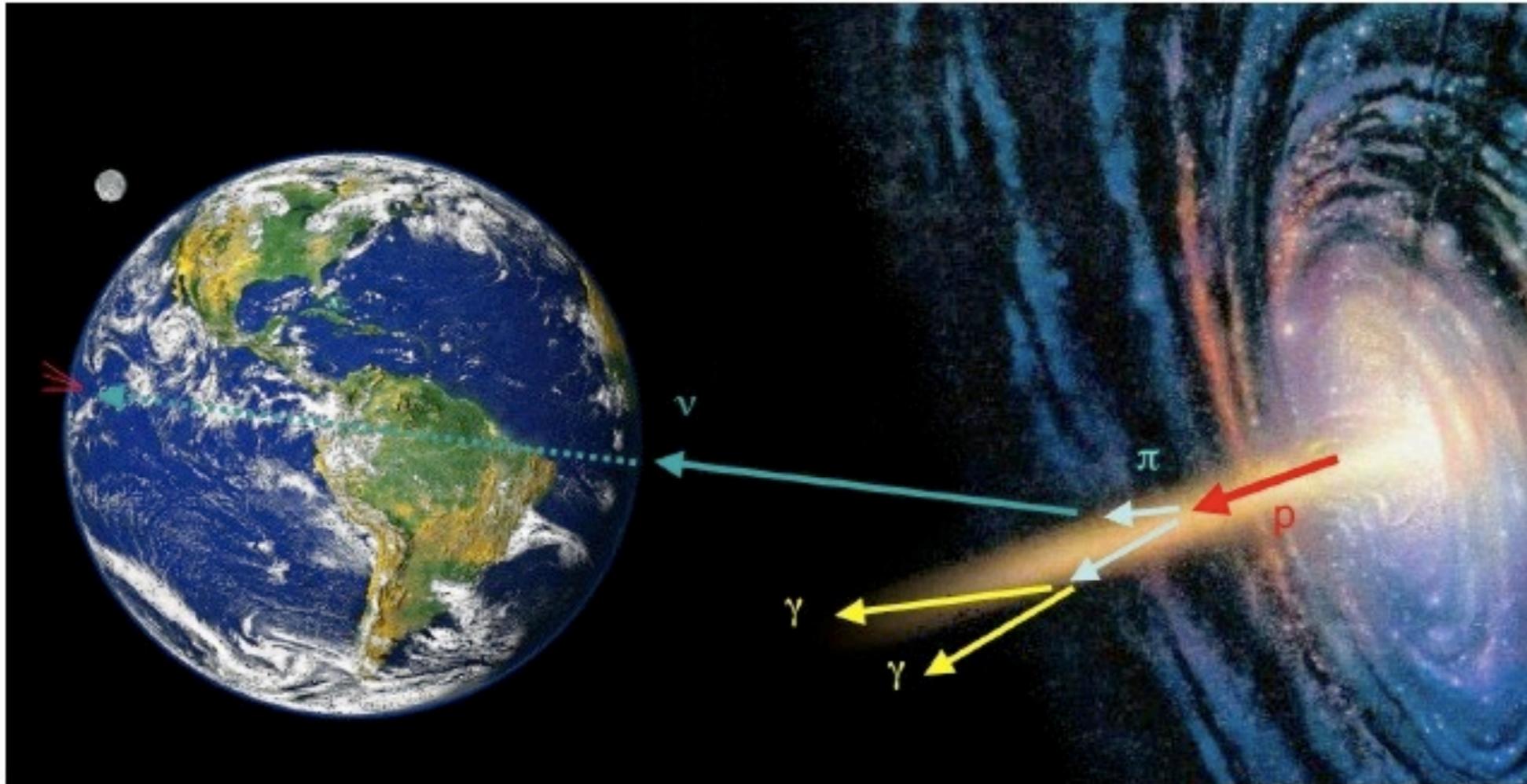


Teilchenphysik mit kosmischen und mit erdgebundenen Beschleunigern



09. Kosmische Strahlung III / Einführung Neutrinos

17.06.2013



Niederenergetische kosmische Strahlung

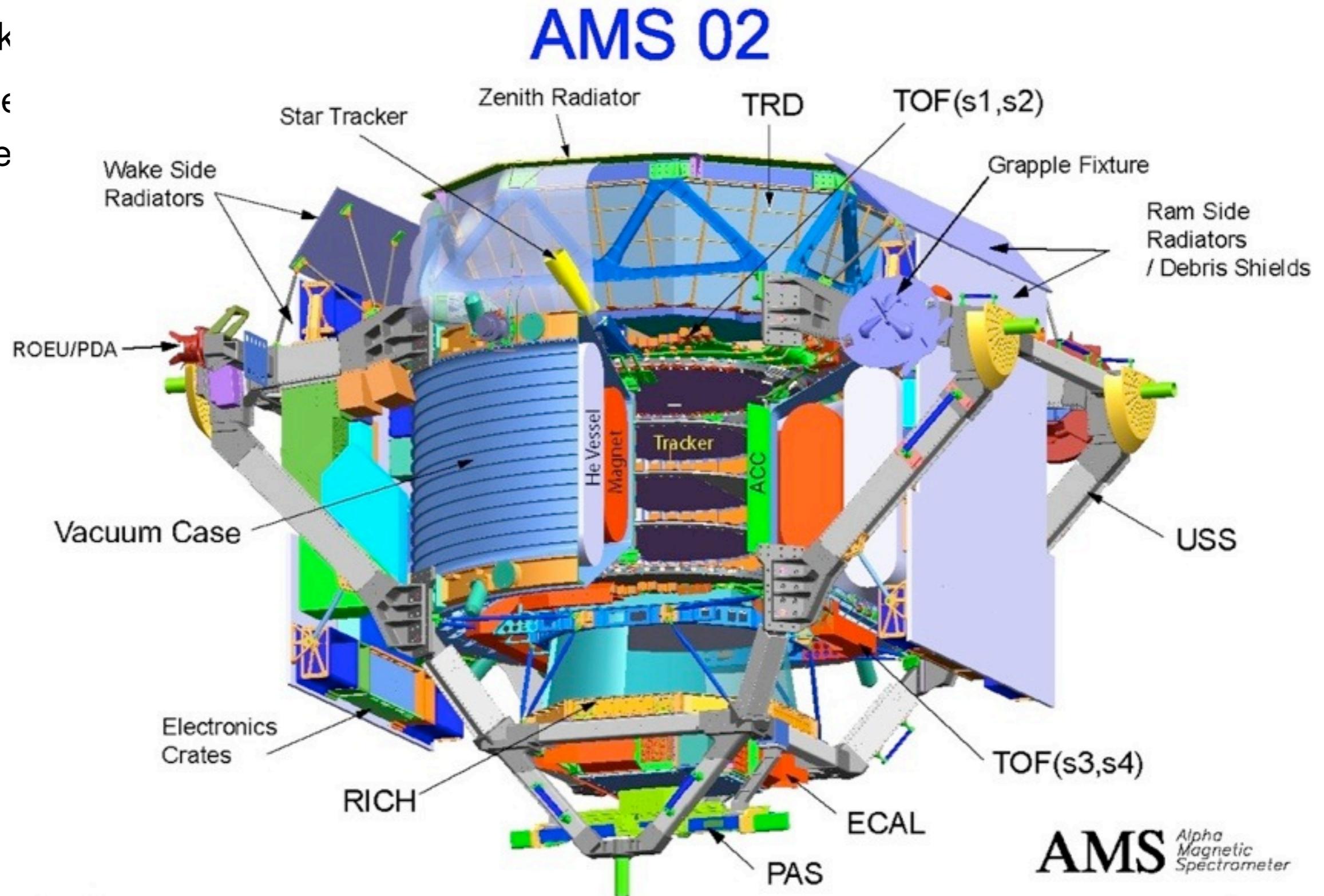


AMS: Das Flaggschiff

- 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



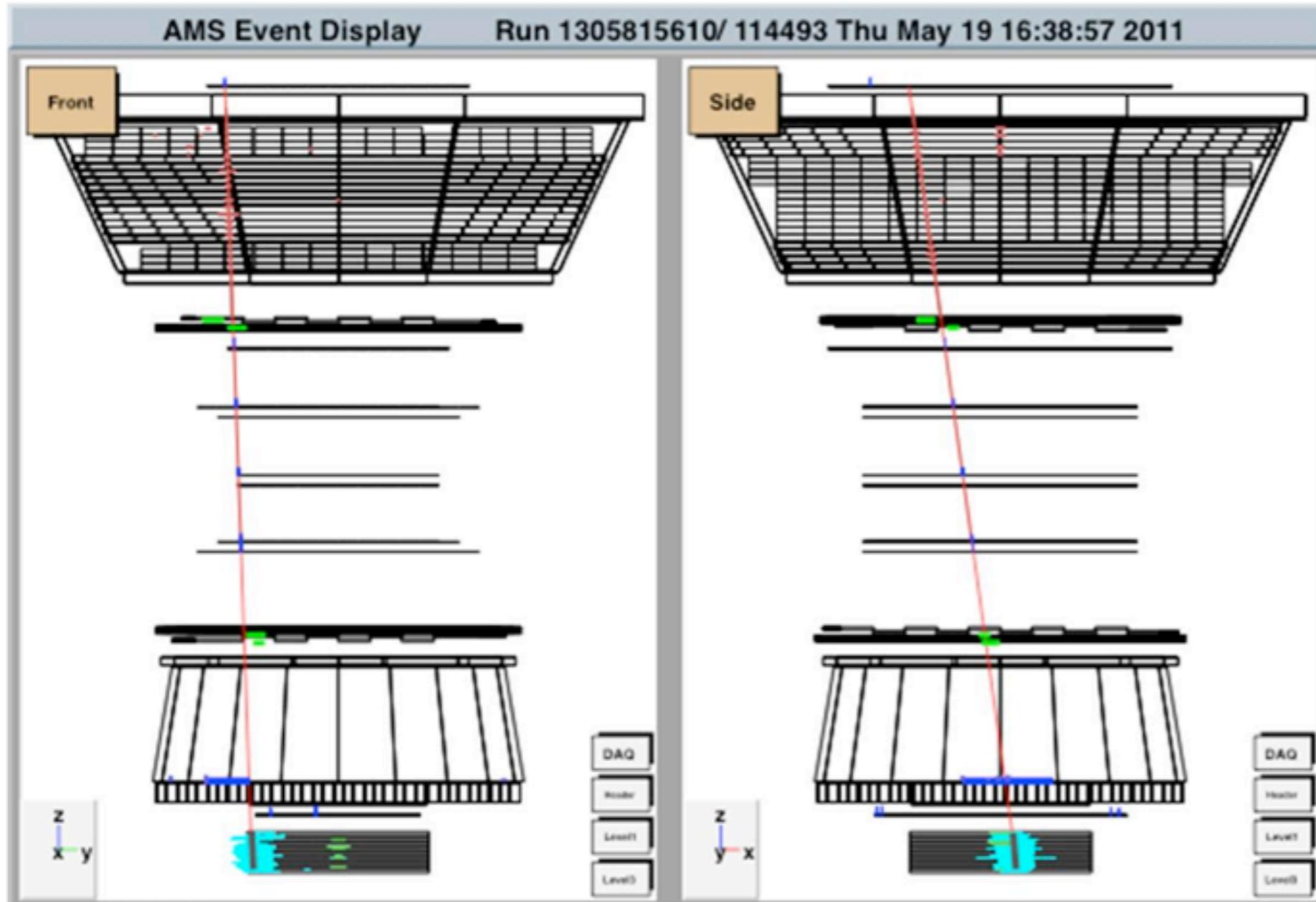
AMS: Seit kurzem auf der ISS

- Erfolgreicher Start am 16. Mai 2011 - Inzwischen 2 Jahre Datennahme



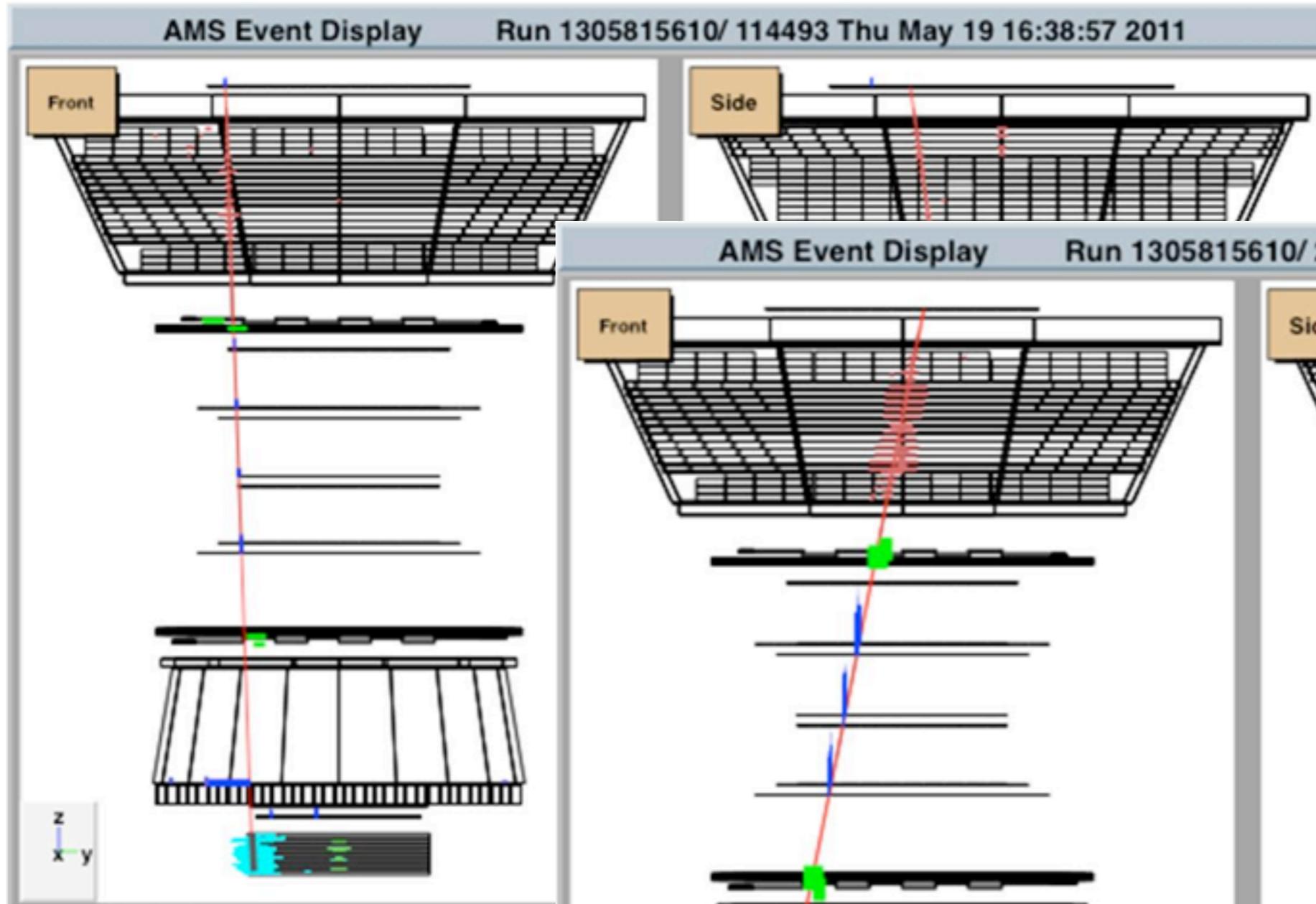
Erste
Ergebnisse
wurden im April
präsentiert

AMS: Erste Ereignisse



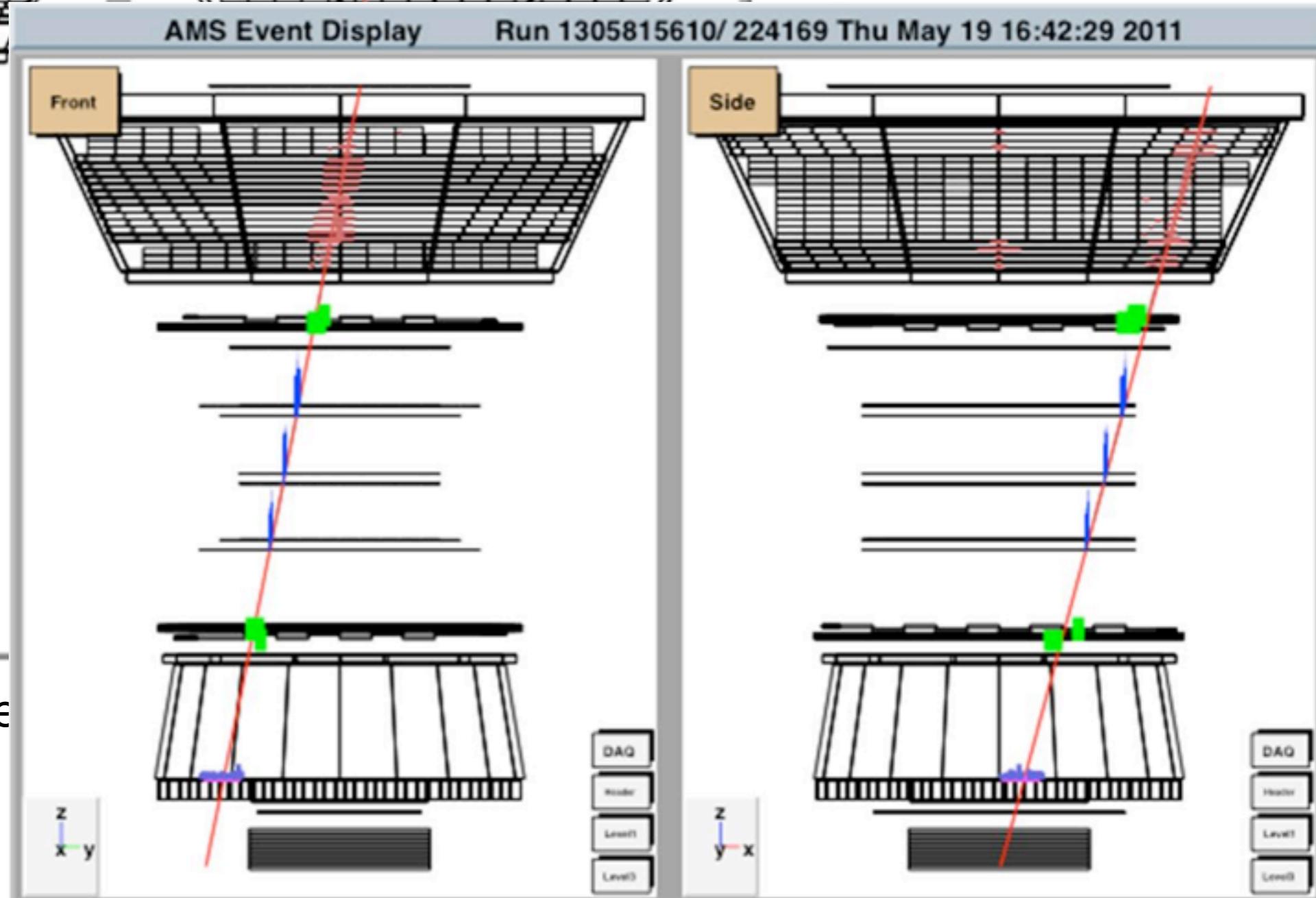
20 GeV electron

AMS: Erste Ereignisse



20 GeV e^-

42 GeV carbon ion



Satelliten: PAMELA als Beispiel

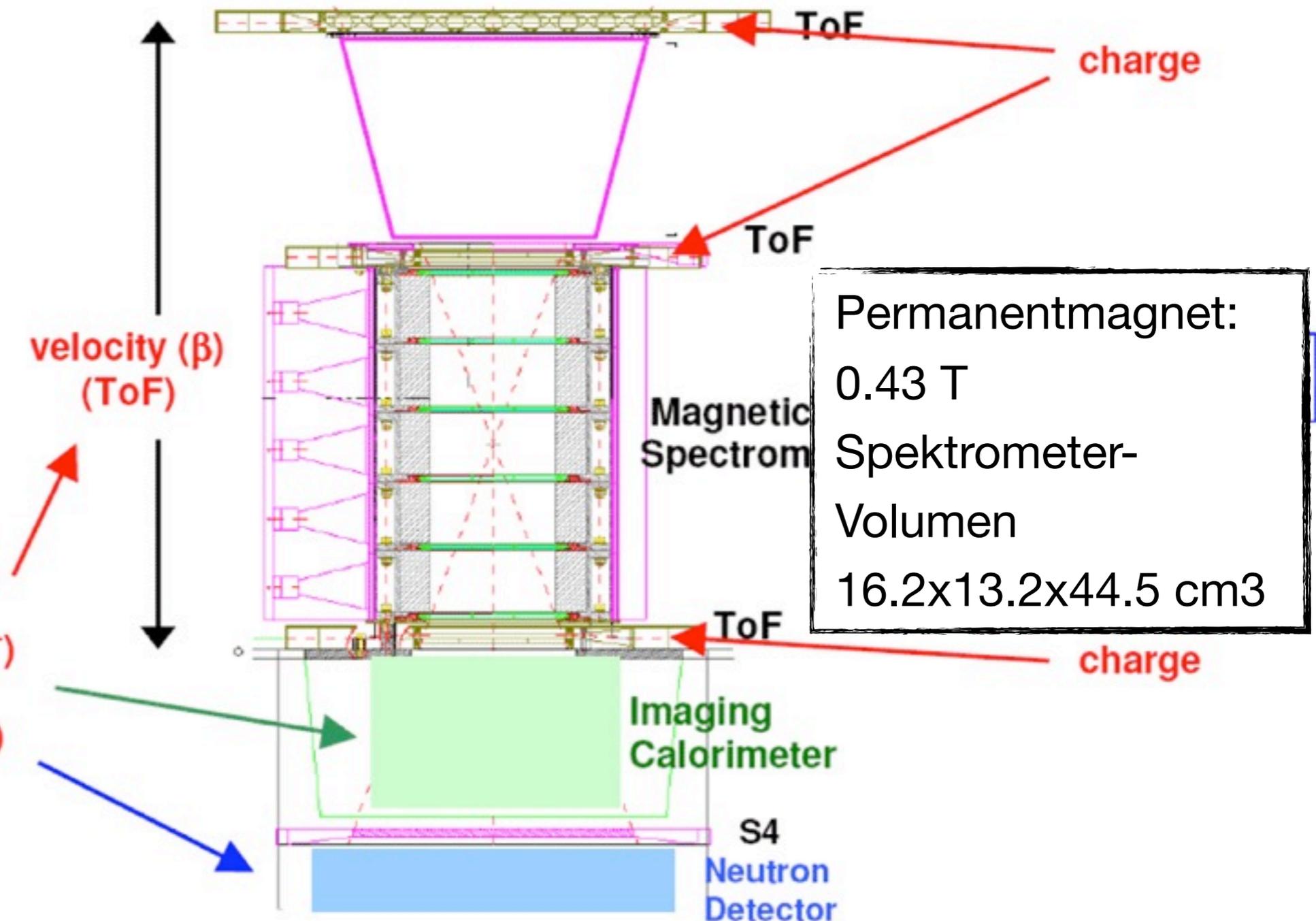
Messinstrument auf einem russischen Satelliten

Größe:

$1.3 \times 0.7 \times 0.7 \text{ m}^3$

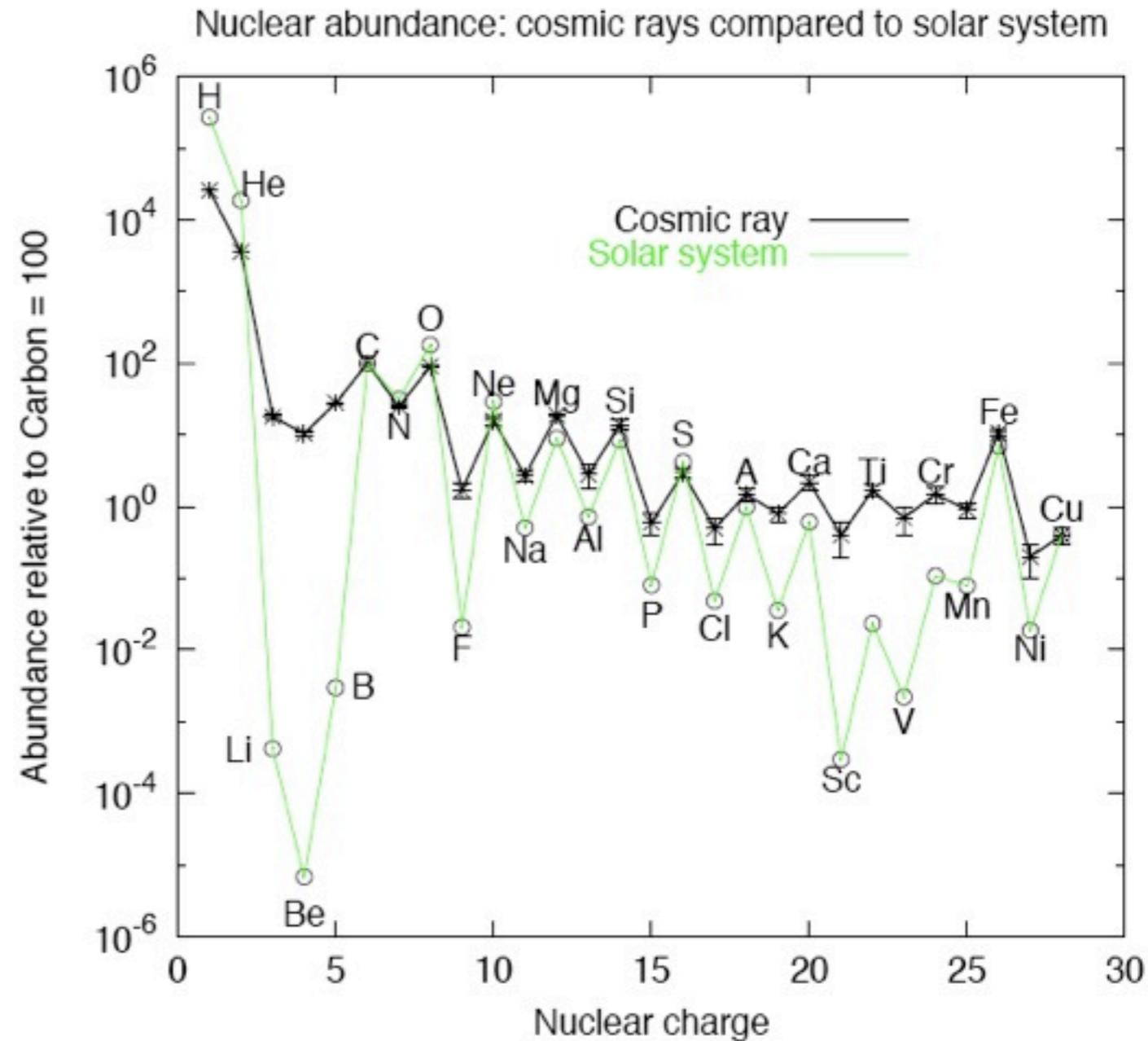
Start 15.06.2006,
umkreist die Erde in
350 - 600 km Höhe

separates
Leptons (e^+ , e^-)
from
Hadrons (p , \bar{p})



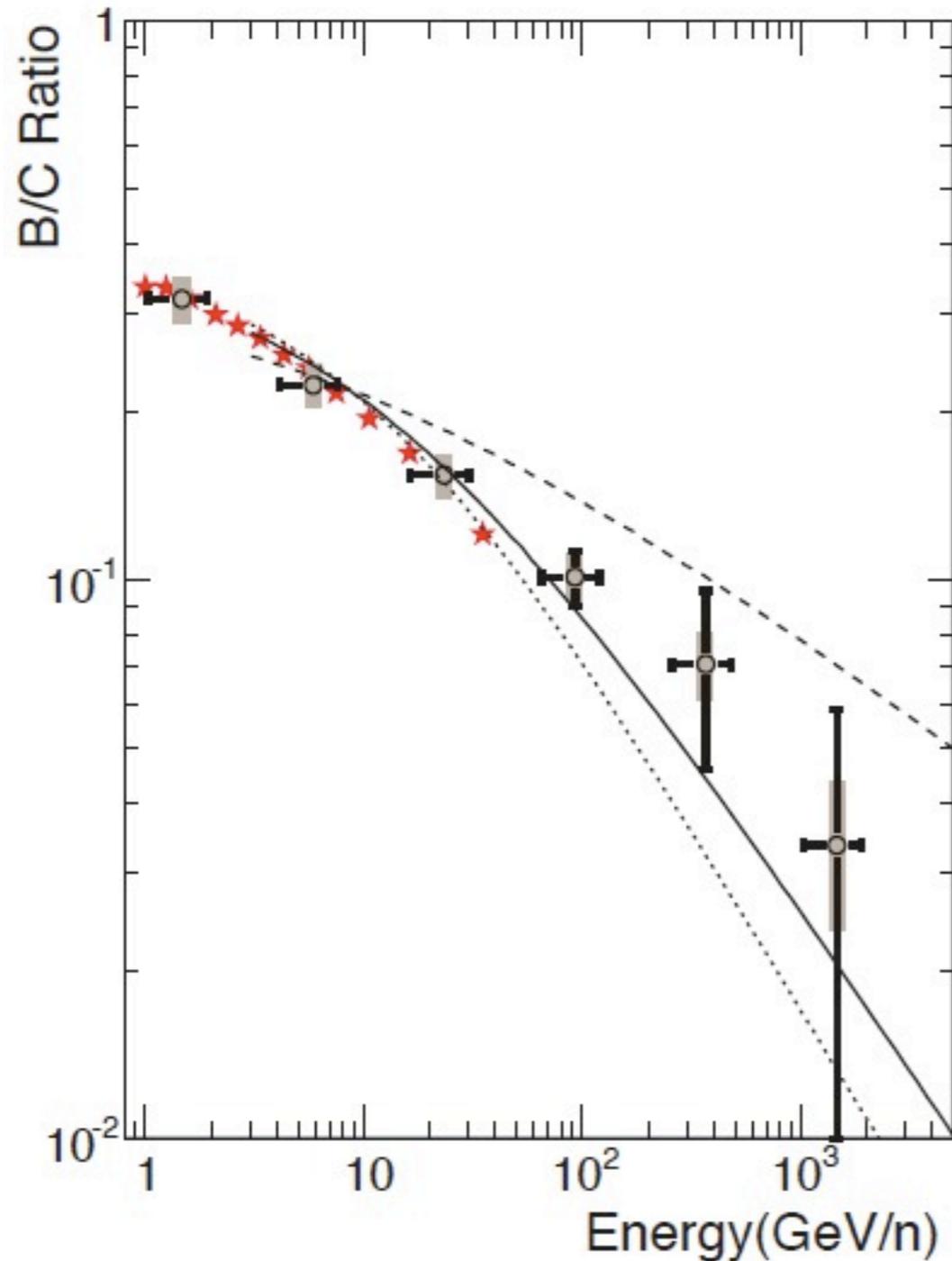
Zusammensetzung Kosmischer Strahlung

- 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

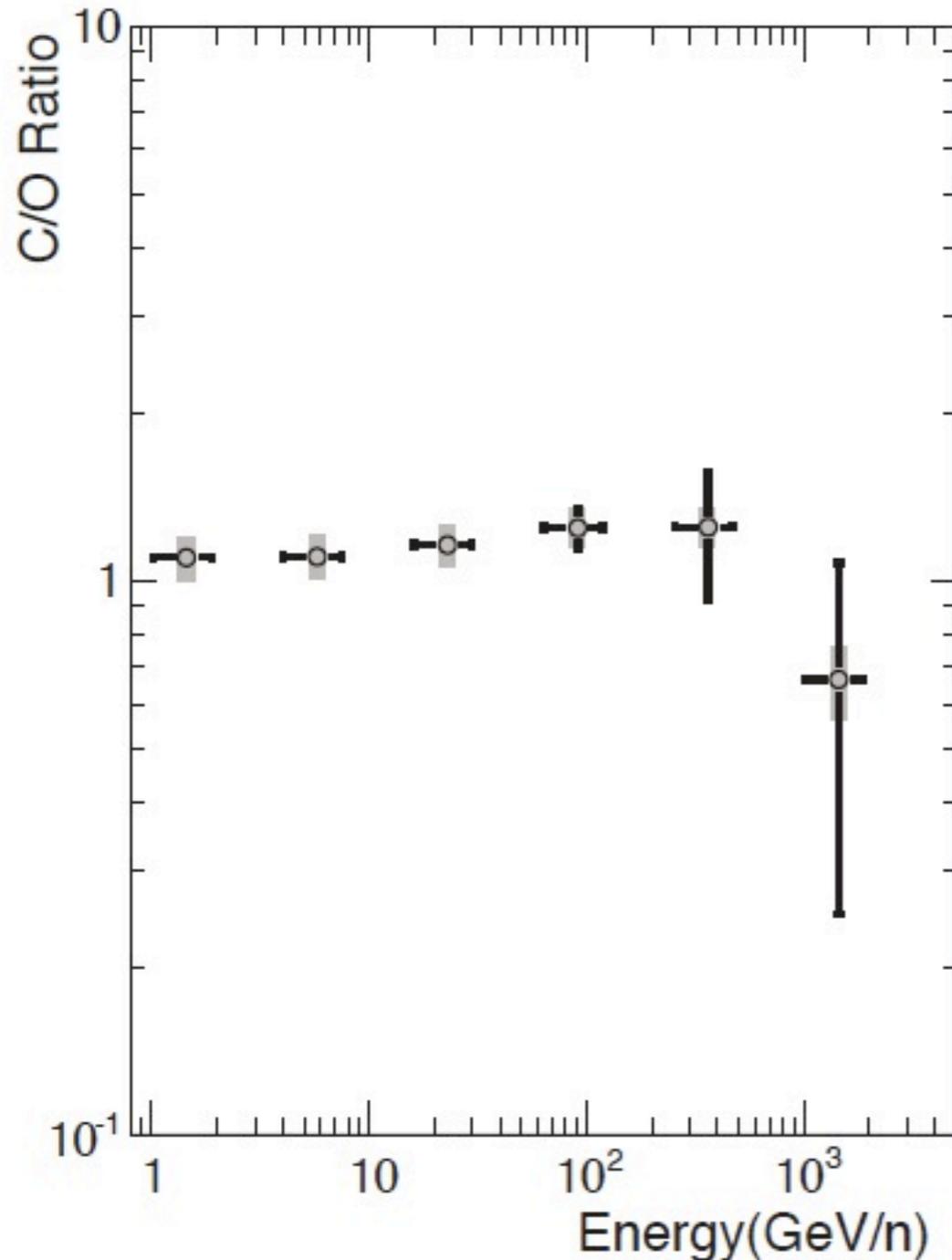
CREAM 2008



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!

Die Suche nach Anti-Kernen

- Antiteilchen haben einen kleinen Anteil an der kosmischen Strahlung:
 - Erzeugung durch Wechselwirkung “primärer” Teilchen mit Atomen des interstellaren Mediums

Die Suche nach Anti-Kernen

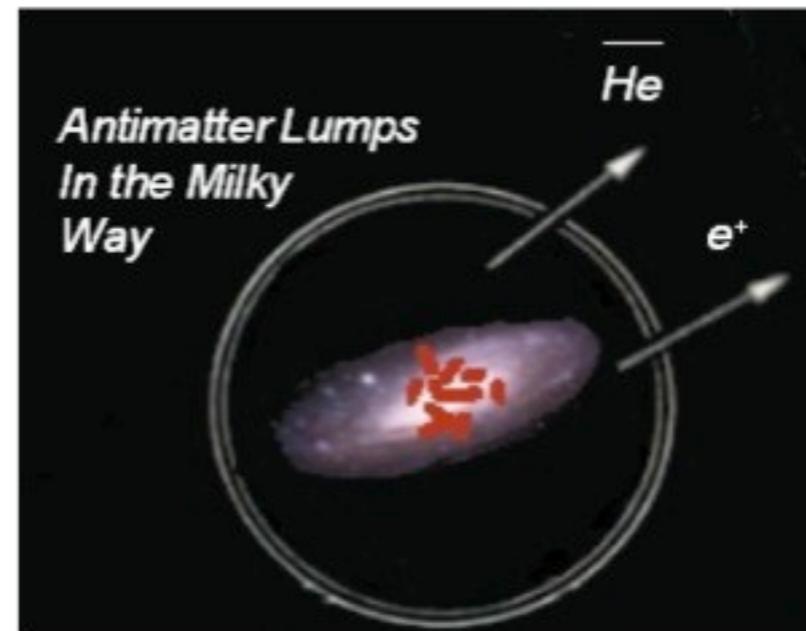
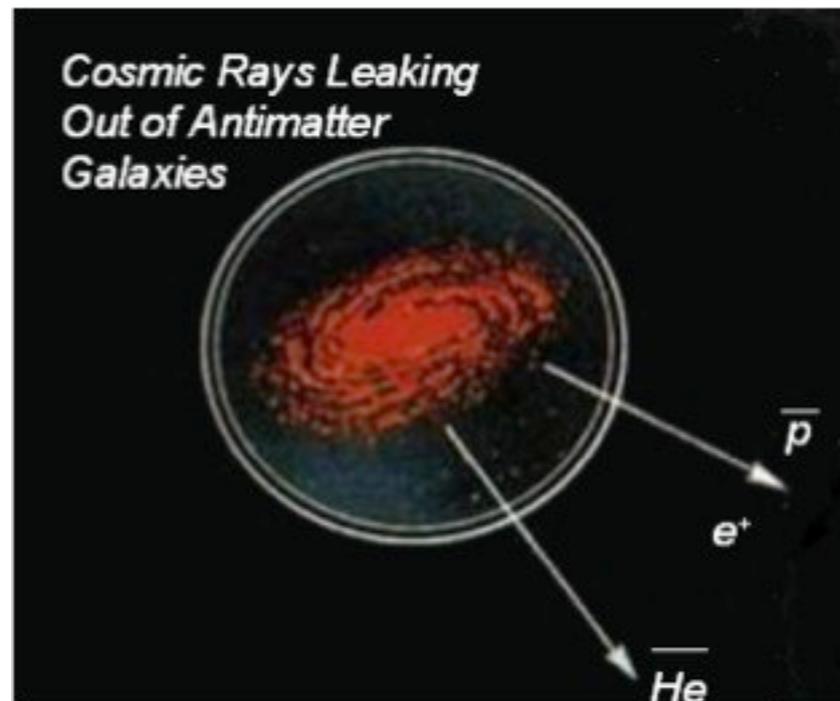
- Antiteilchen haben einen kleinen Anteil an der kosmischen Strahlung:
 - Erzeugung durch Wechselwirkung “primärer” Teilchen mit Atomen des interstellaren Mediums

Alles mit $Z > 1$ kann so nicht erzeugt werden, Entdeckung von Anti-He wäre eine Sensation!

Die Suche nach Anti-Kernen

- Antiteilchen haben einen kleinen Anteil an der kosmischen Strahlung:
 - Erzeugung durch Wechselwirkung “primärer” Teilchen mit Atomen des interstellaren Mediums

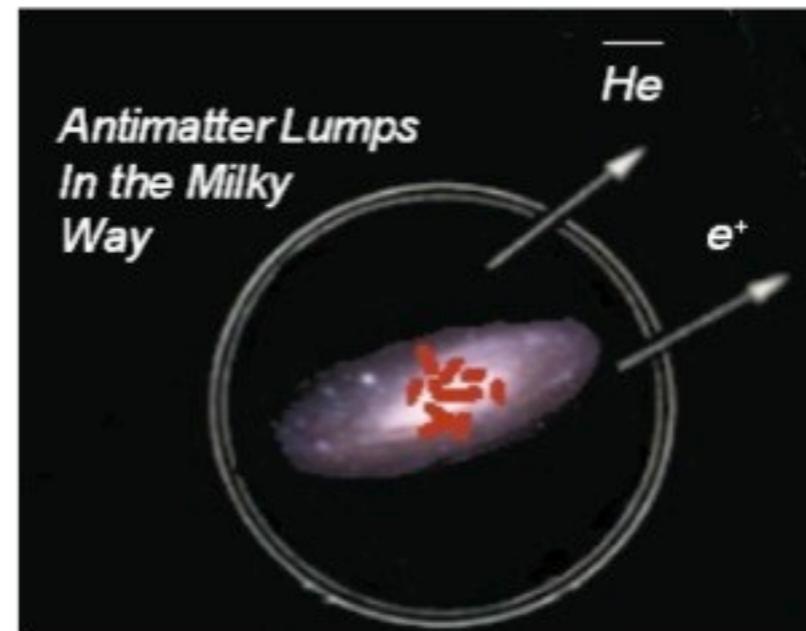
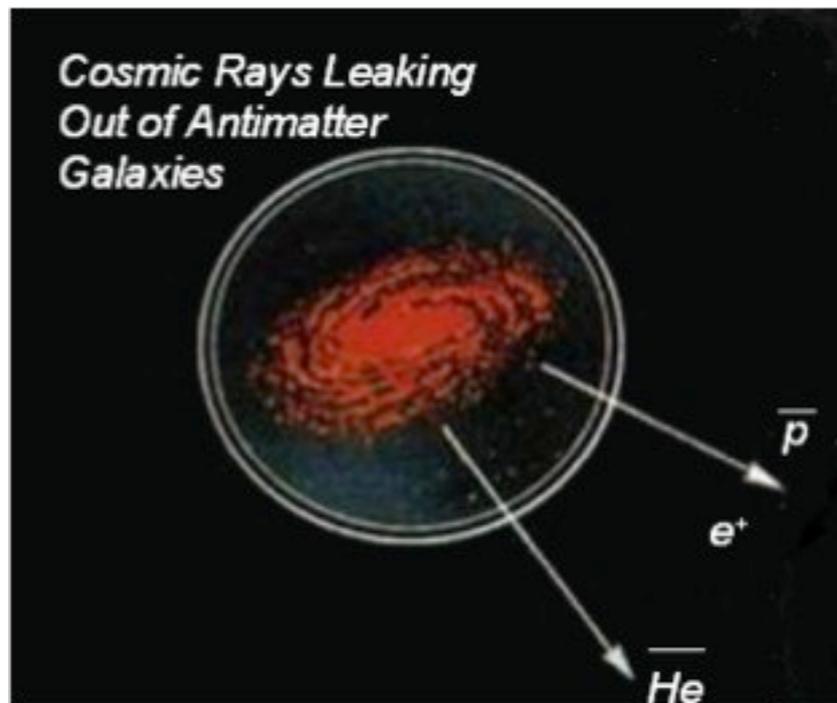
Alles mit $Z > 1$ kann so nicht erzeugt werden, Entdeckung von Anti-He wäre eine Sensation!



Die Suche nach Anti-Kernen

- Antiteilchen haben einen kleinen Anteil an der kosmischen Strahlung:
 - Erzeugung durch Wechselwirkung “primärer” Teilchen mit Atomen des interstellaren Mediums

Alles mit $Z > 1$ kann so nicht erzeugt werden, Entdeckung von Anti-He wäre eine Sensation!

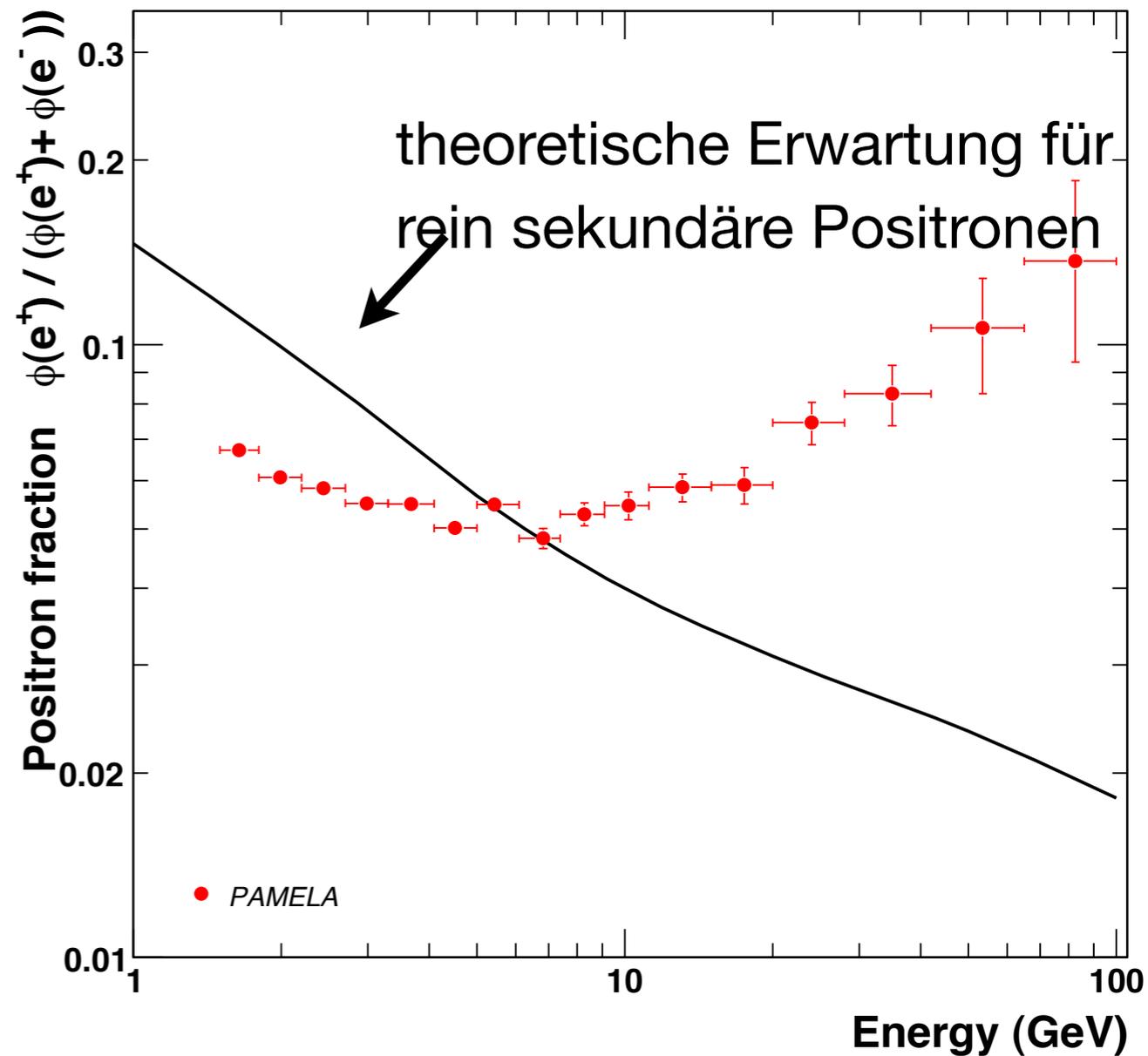
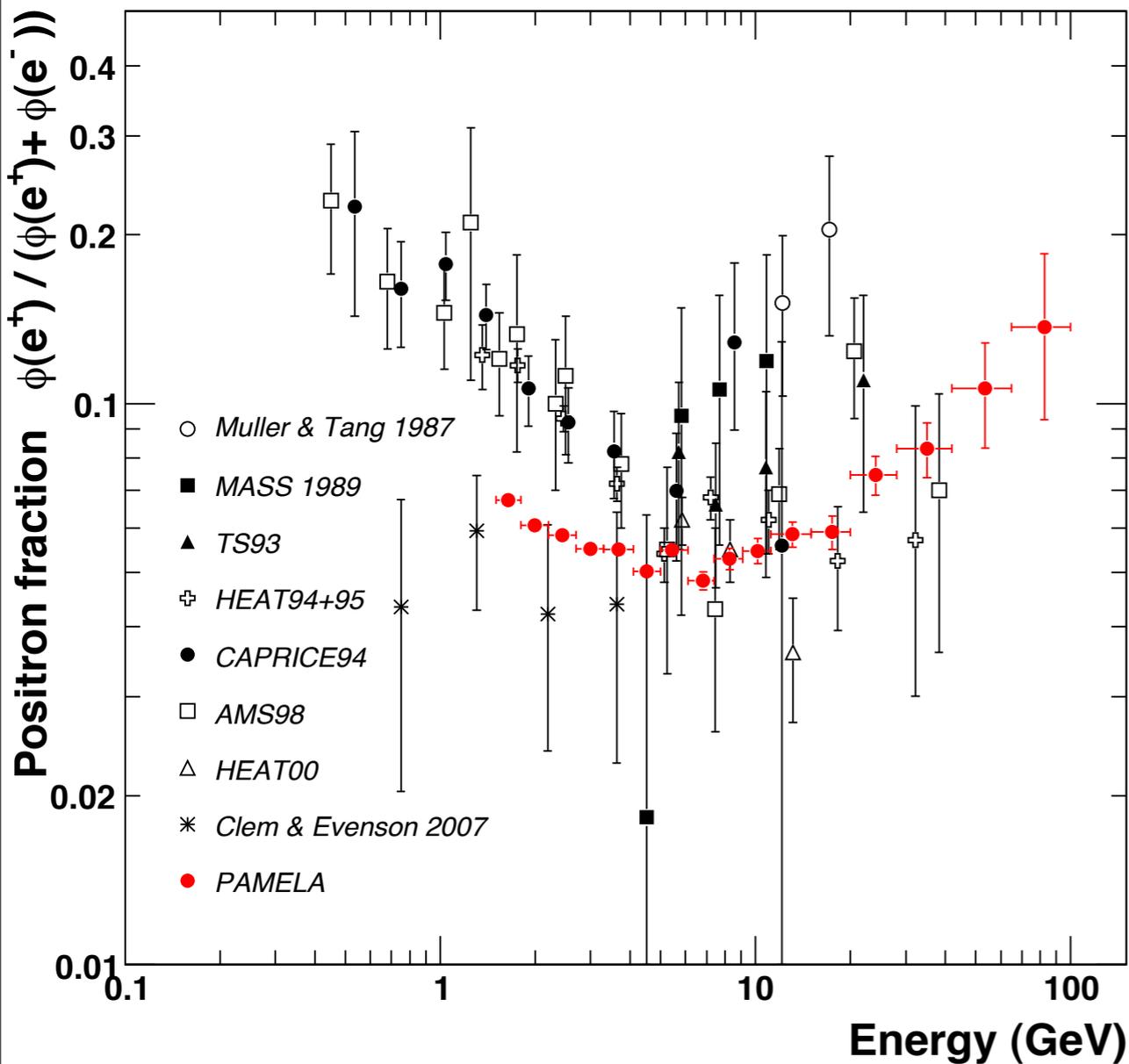


Bis jetzt kein einziger Anti-Kern beobachtet!

Es gibt auch keine anderen Hinweise, wie zum Beispiel Vernichtungsstrahlung an den Materie-Antimaterie Grenzgebieten

Positronen in der Kosmischen Strahlung

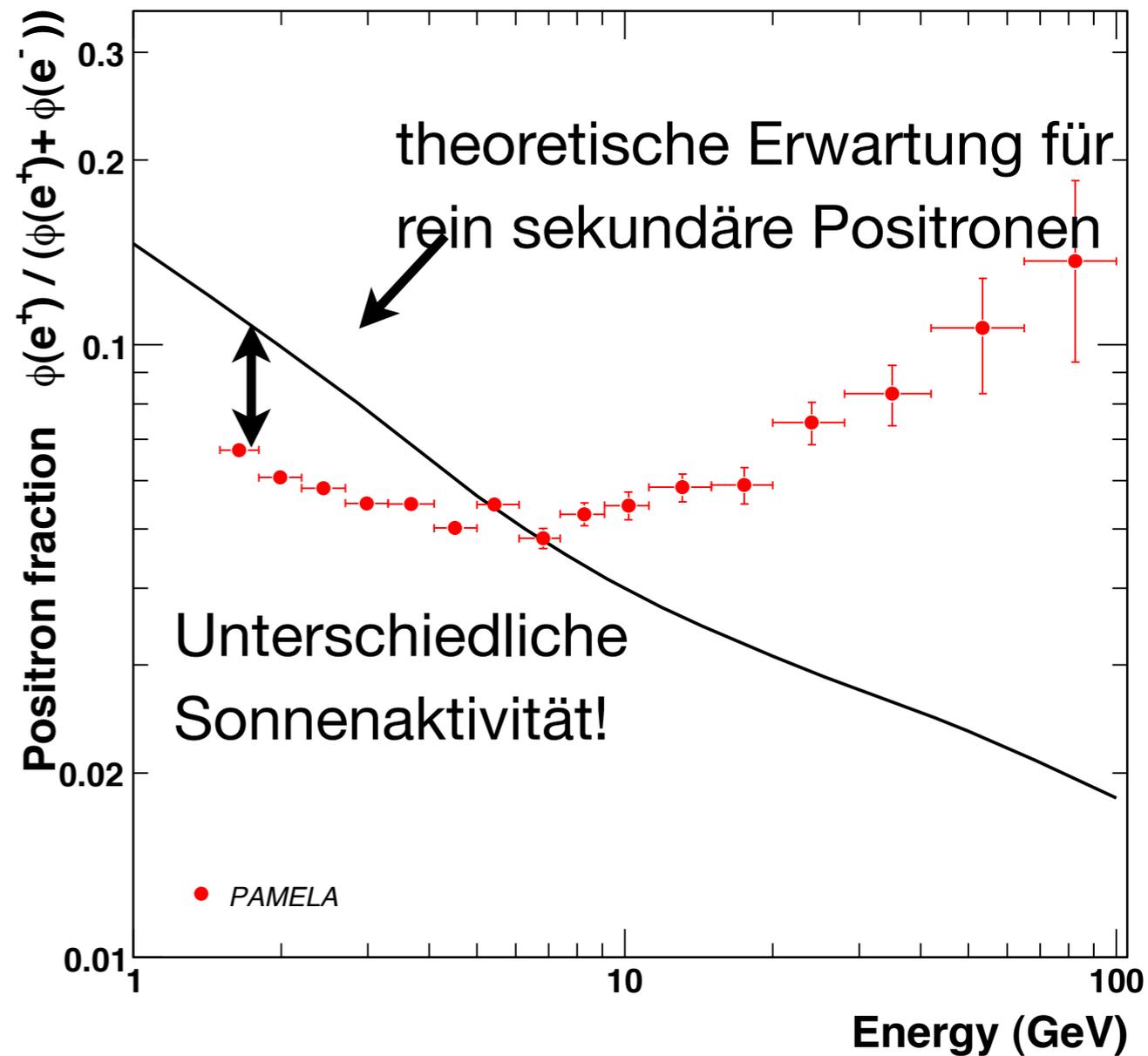
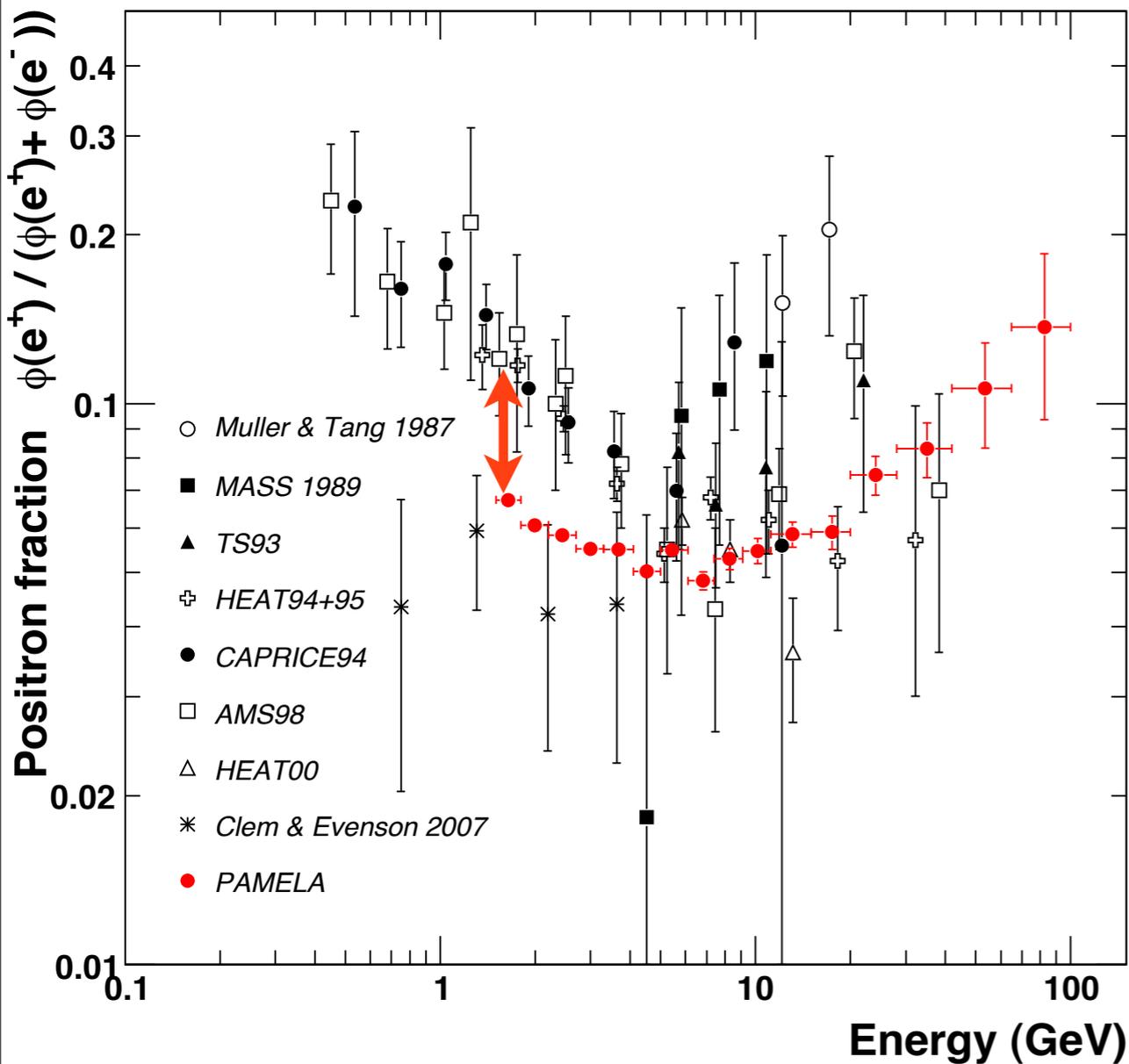
- Interessante Ergebnisse von Pamela (Nature, April 2009):



arXiv:0810.4995

Positronen in der Kosmischen Strahlung

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

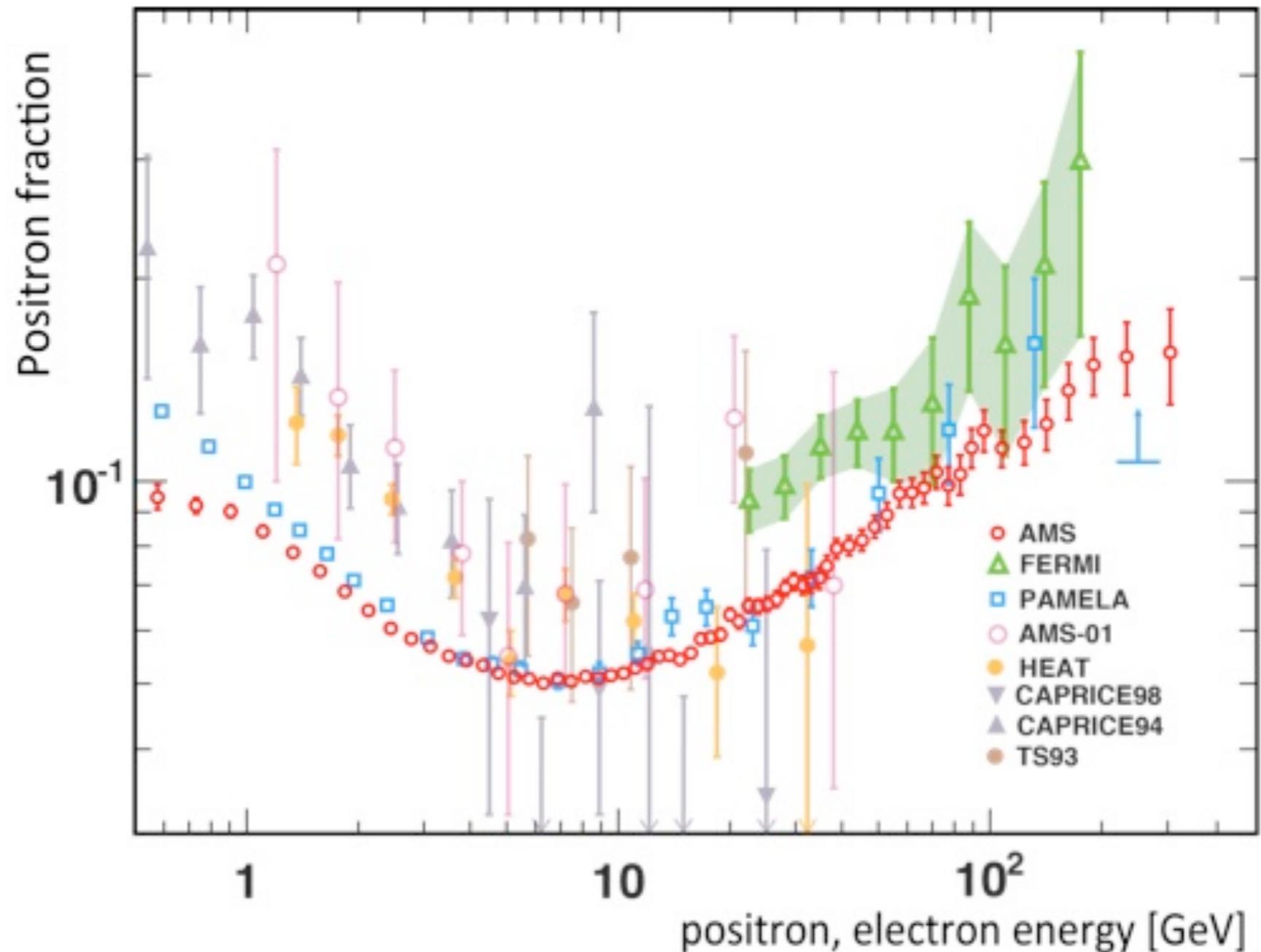


arXiv:0810.4995

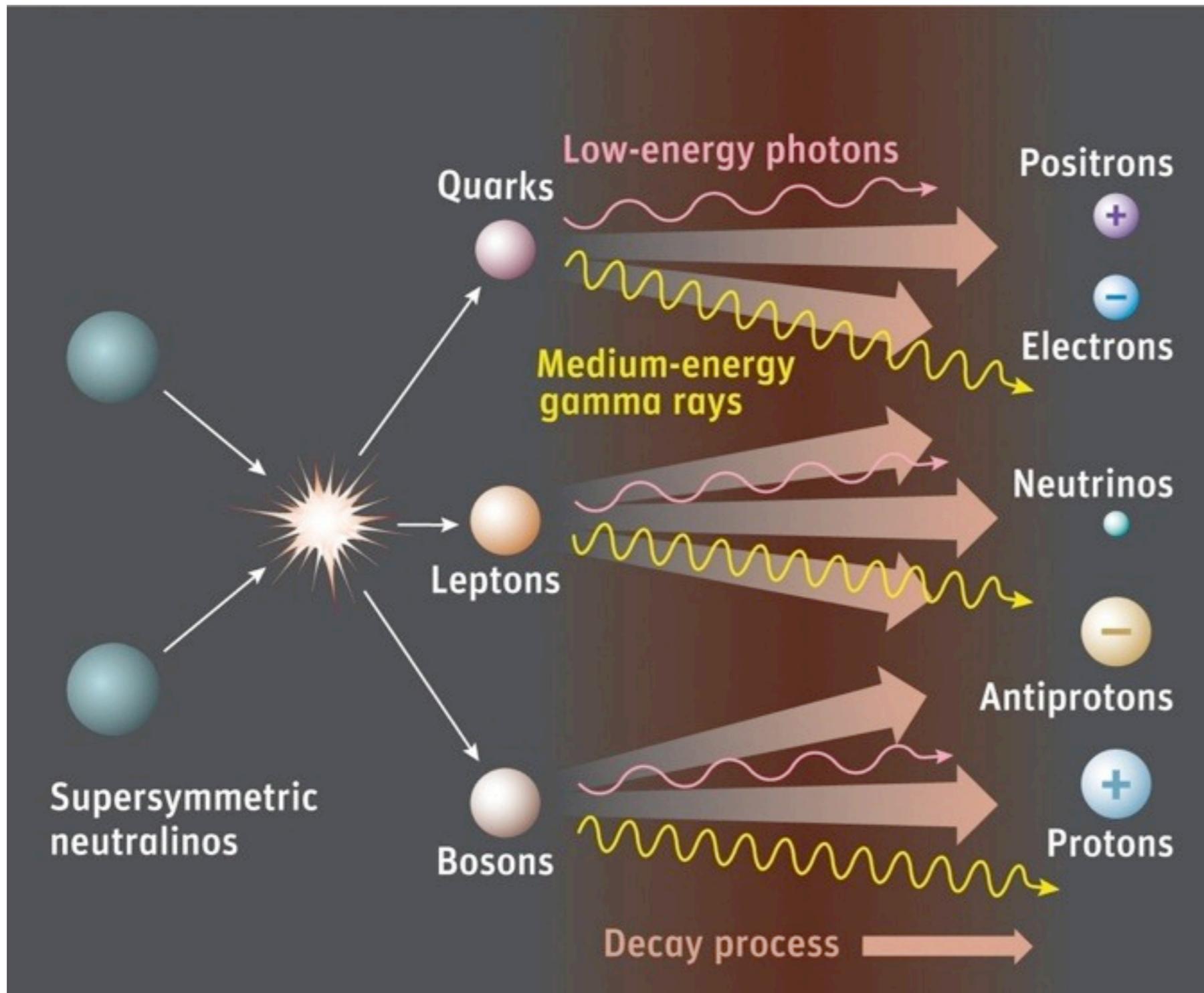


Bestätigung durch AMS

- AMS-Messungen (veröffentlicht im April 2013) bestätigen mit hoher Genauigkeit die Pamela-Ergebnisse: Der Positronen-Überschuss ist real



Mögliche Erklärung: Dunkle Materie

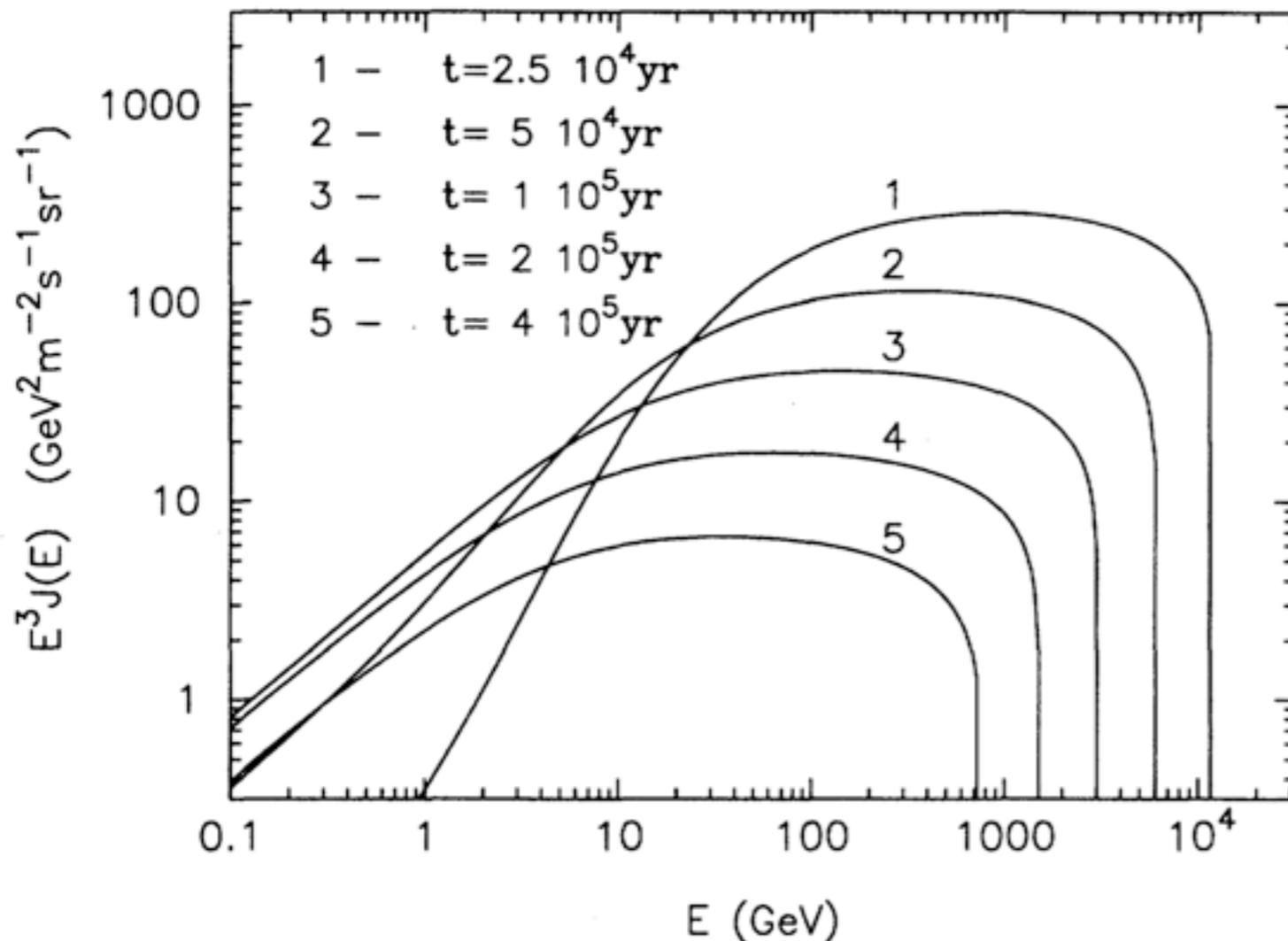


- Viel Diskussion: Mehrere hundert Papers über mögliche Dark-Matter Interpretation der Pamela-Daten innerhalb weniger Monate

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

Weniger spektakuläre Erklärungen

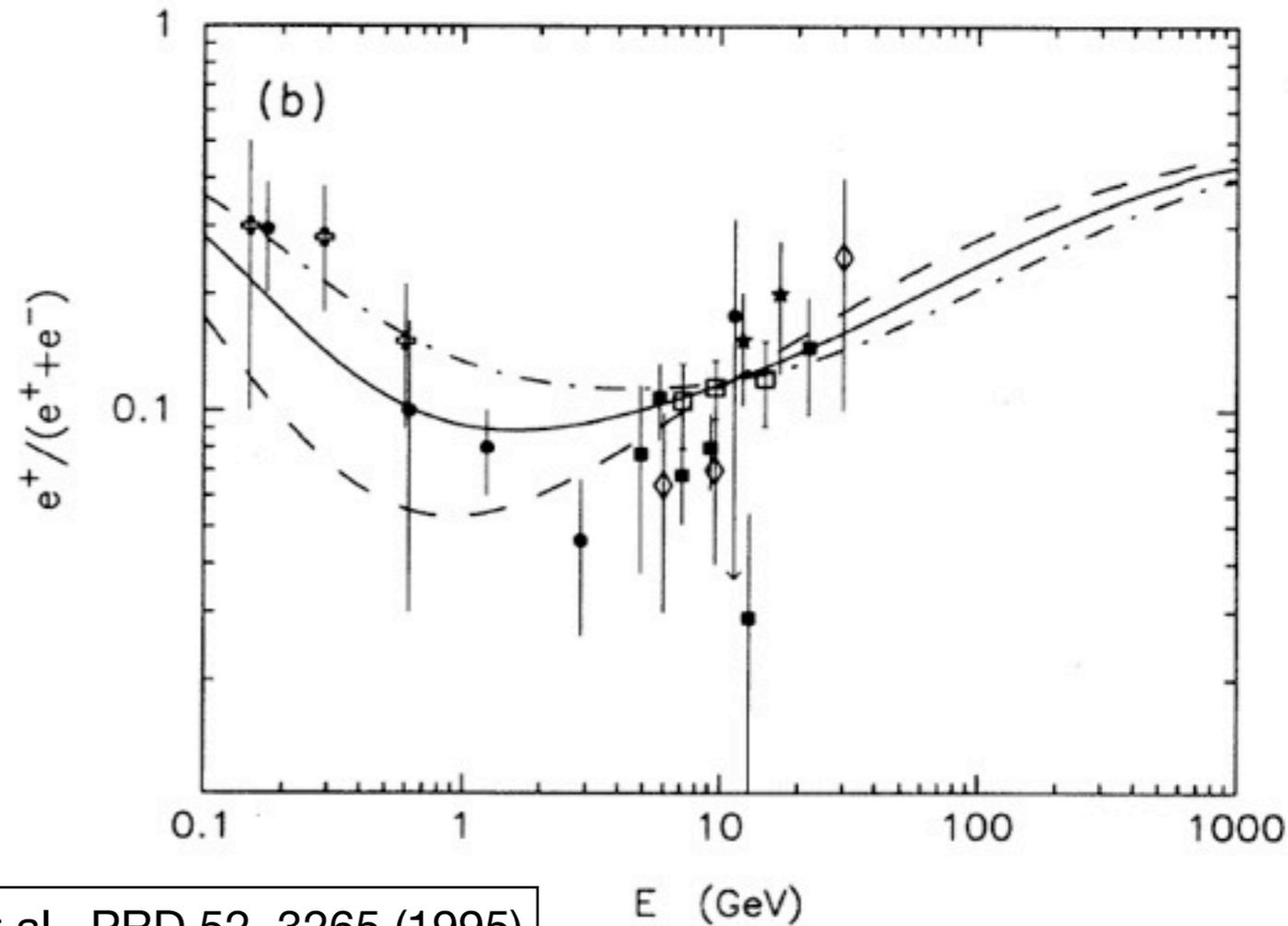
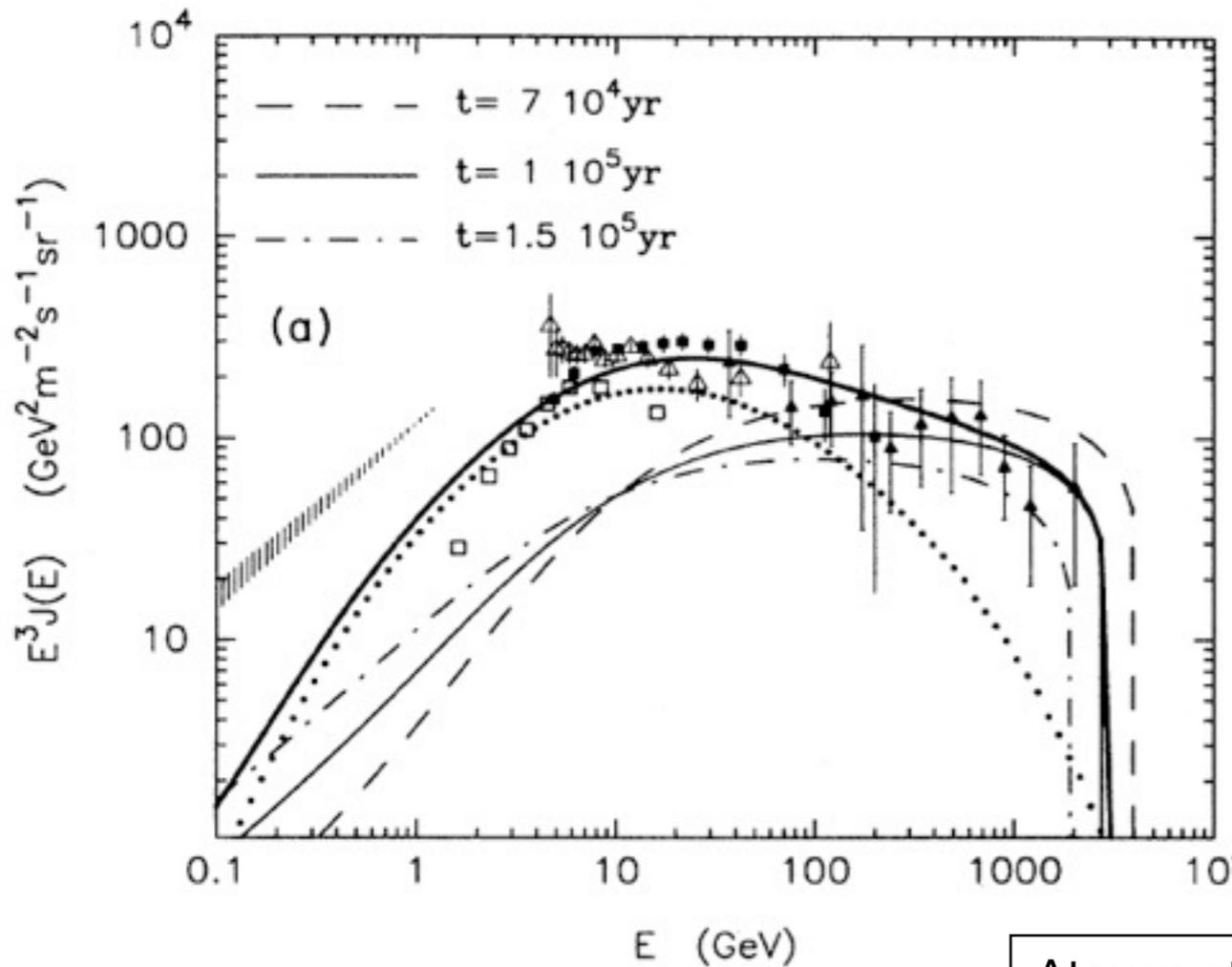
- Es muss eine andere primäre Komponente von Positronen in der KS geben!
 - Beschleunigung auch von Positronen, zB in einem nahegelegenen Pulsar: Aus hochenergetischer Gamma-Strahlung werden e^+e^- Paare erzeugt



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



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

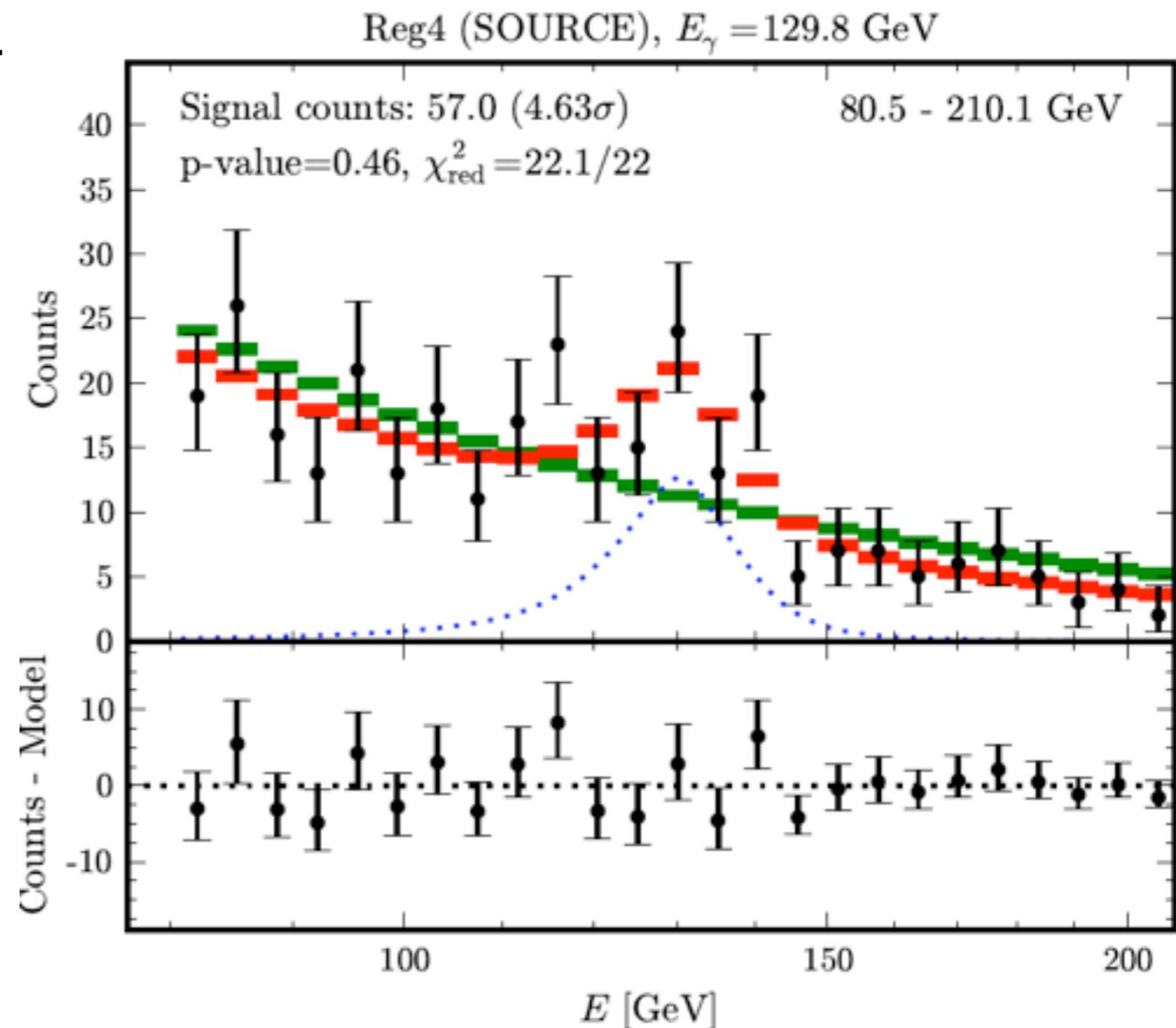
⇒ PAMELA-Daten können auch durch wenige (oder einen einzigen) nahen Pulsar erklärt werden, es gibt tatsächlich dafür Kandidaten!

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)

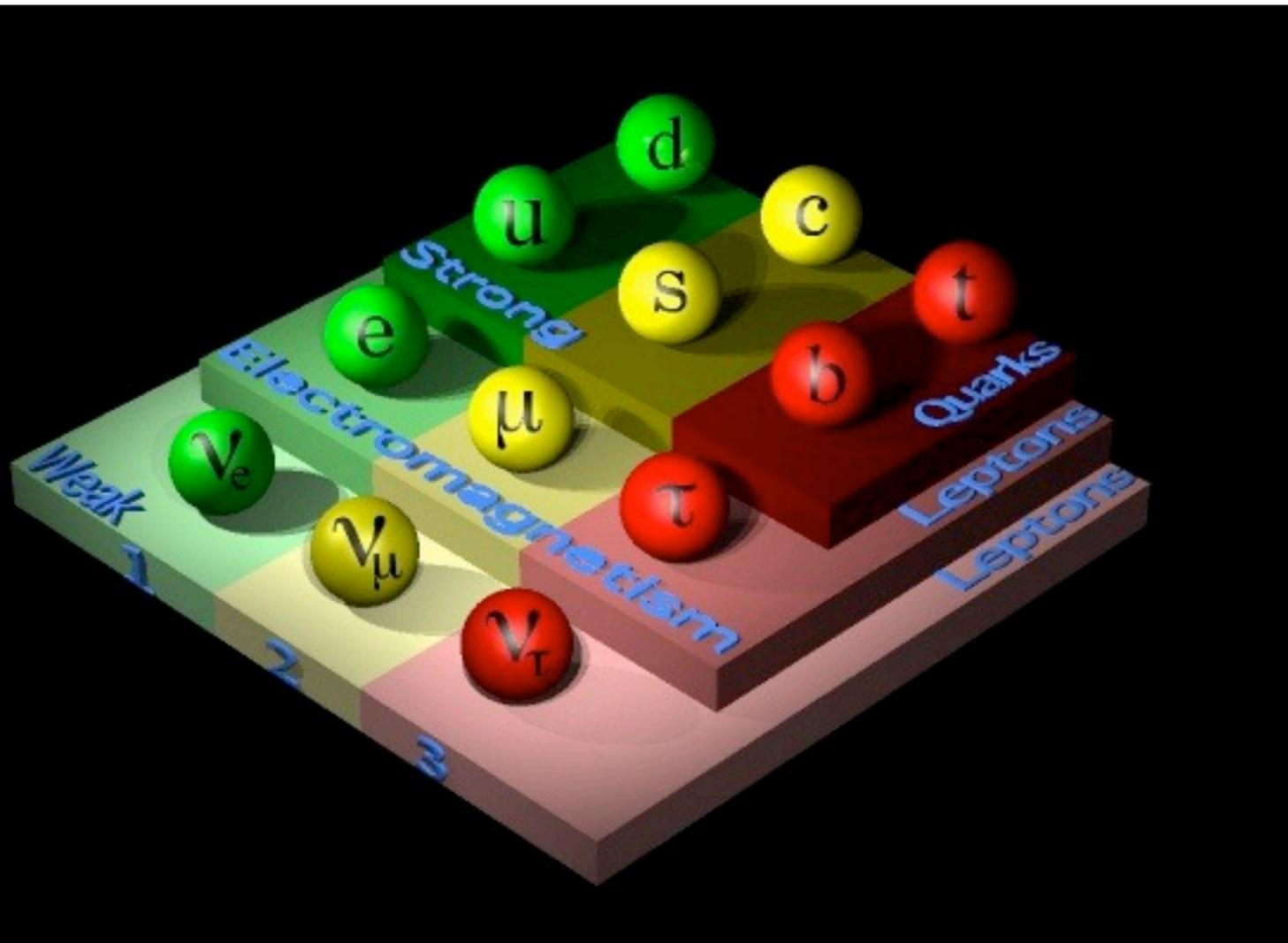


Neutrinos: Einführung

Neutrinos: Zeitleiste

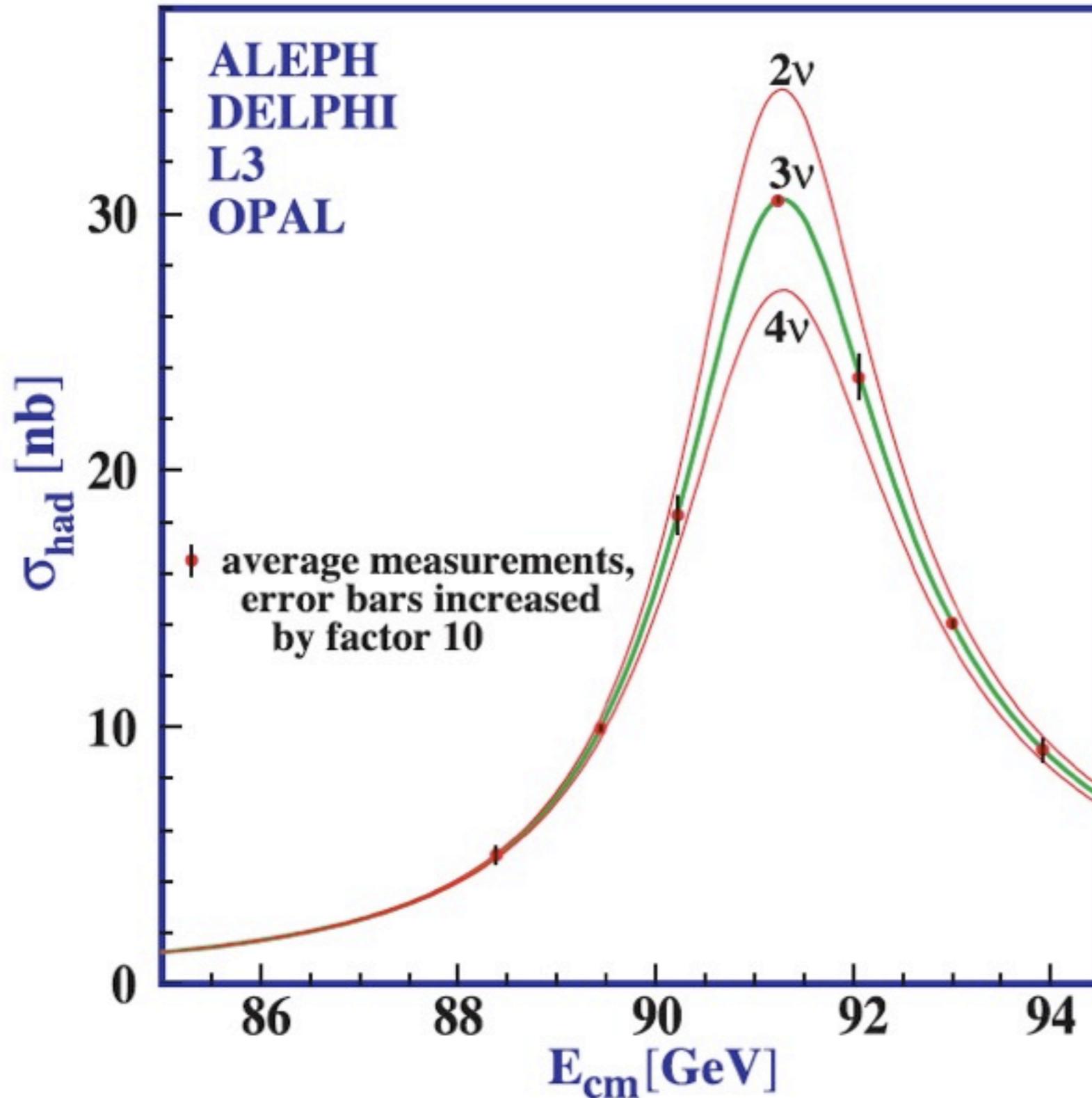
- 1931 W. Pauli postuliert Existenz des Neutrinos in β -Zerfall
- 1934 E. Fermi stellt Theorie des π -Zerfalls vor (inkl. Neutrino)
- 1959 Entdeckung des ν_e (Reines und Cowan; Nobelpreis 1995)
- 1962 Entdeckung des ν_μ
- 1968 Erste Messung der Sonnenneutrinos (ν_e): weniger als 50% der erwarteten Intensität („solares Neutrino-Problem“)
- 1987 Kamiokande und IMB (Protonzerfallexperimente) sehen Neutrinos von SN 1987a
- 1988 Kamiokande sieht nur 60% der erwarteten atmosphärischen ν_μ
- 1990 LEP-Experimente beweisen Existenz von genau 3 Generationen leichter Neutrinos
- 1998 Super-Kamiokande zeigt Evidenz für Neutrino-Oszillationen (ν_μ), -> Neutrinos haben endliche Masse (Nobelpreis an Koshiba 2002)
- 2000 explizite Bestätigung und Beobachtung des ν_τ
- 2001 Bestätigung des solaren ν_e Defizits und der Neutrino-Oszillationen durch SNO
- 2011 Erste Hinweise auf von Null verschiedenes Θ_{13} durch T2K & MINOS

Neutrinos: Allgemein



- 3 bekannte Familien von Elementarteilchen:
 - 3 Neutrinos als Partner zu den geladenen Leptonen
 - Im einfachen Standard-Modell sind Neutrinos masselos
 - Experimentelle Grenzen:
 - $M(\nu_e) < 2 \text{ eV}$
 - $M(\nu_\mu) < 0.19 \text{ MeV}$
 - $M(\nu_\tau) < 18.2 \text{ MeV}$

Zahl der Neutrinos



- Aus Präzisions-Messungen der Z^0 - Resonanz an LEP:
- 3 leichte Neutrinos (leichter als ~ 45 GeV), die der schwachen Wechselwirkung unterliegen

Neutrino-Quellen

- **Solare Neutrinos**

(Entstehen bei den Fusionsreaktionen in der Sonne), ca 2×10^{38} /s,
Fluss auf der Erde $\sim 7 \times 10^{10} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

- **Kosmische Hintergrundneutrinos**

Ausfrieren aus thermischen Gleichgewicht $\sim 1\text{s}$ nach dem Urknall
Temperatur $\sim 1.9 \text{ K}$, $\langle E \rangle \sim 5 \times 10^{-4} \text{ eV}$, $\sim 330/\text{cm}^3$

- **Kosmische Neutrinoquellen**

Supernova-Explosionen, Aktive Galaxien, GRBs...

- **Atmosphärische Neutrinos**

Entstehung in Luftschauern kosmischer Strahlung

- **Geo-Neutrinos**

Radioaktiver Zerfall in der Erde, Gesamt-Leistung $\sim 20 \text{ TW}$, Fluss $\sim 10^7 \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

- **Von Menschen erzeugte Neutrinos**

Reaktor-Neutrinos (MeV-Bereich), Beschleuniger (MeV \rightarrow GeV)

Neutrinos: Allgemein

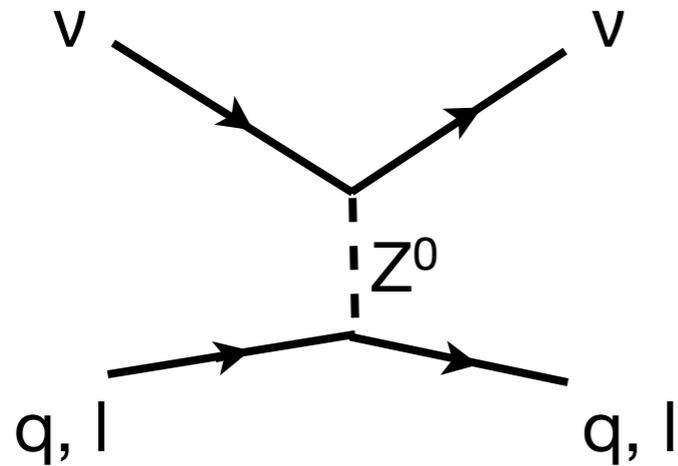
- Neutrinos sind speziell: Sie wechselwirken nur durch die schwache Wechselwirkung
 - Maximale Paritätsverletzung der schwachen WW bedeutet:
Neutrinos sind immer linkshändig (Helizität -1)
Anti-Neutrinos sind immer rechtshändig (Helizität $+1$)

Neutrinos: Allgemein

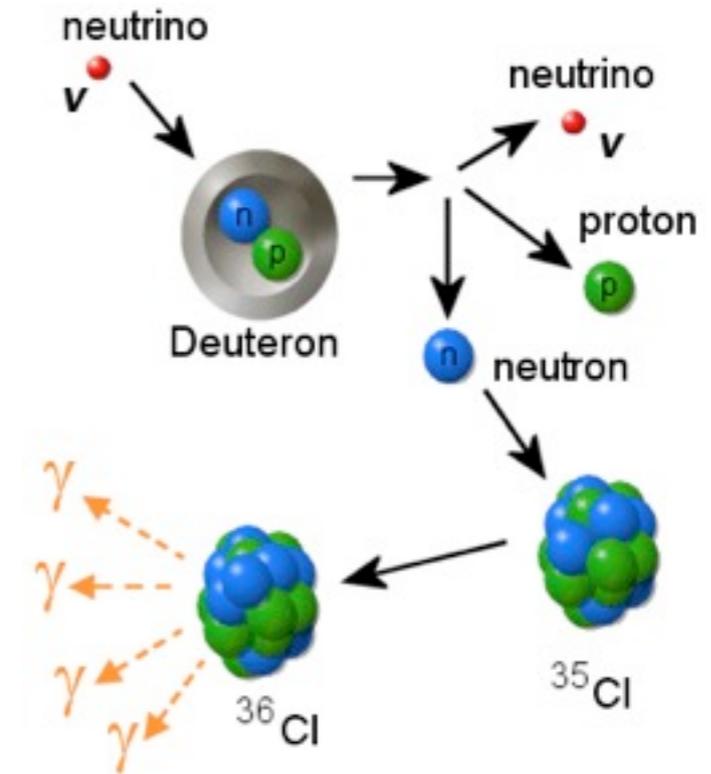
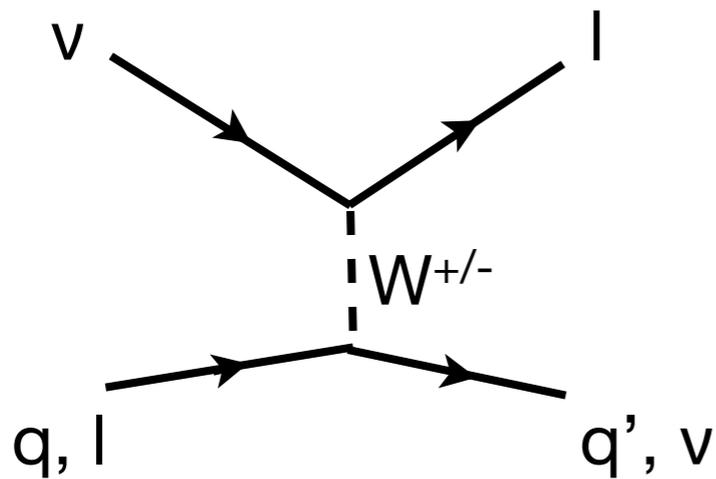
- Neutrinos sind speziell: Sie wechselwirken nur durch die schwache Wechselwirkung
 - Maximale Paritätsverletzung der schwachen WW bedeutet:
Neutrinos sind immer linkshändig (Helizität -1)
Anti-Neutrinos sind immer rechtshändig (Helizität $+1$)
- Mögliche Konsequenz:
 - Neutrinos könnten ihre eigenen Anti-Teilchen sein, sog. Majorana-Teilchen
 - Ein Neutrino wäre dann ein linkshändiges Majorana-Neutrino, ein Anti-Neutrino ein rechtshändiges Majorana-Neutrino
 - ▶ Die Unterscheidung, ob Neutrinos Majorana-Teilchen sind oder nicht ist nur möglich, wenn Neutrinos Masse haben

Neutrinos: Wechselwirkung mit Materie

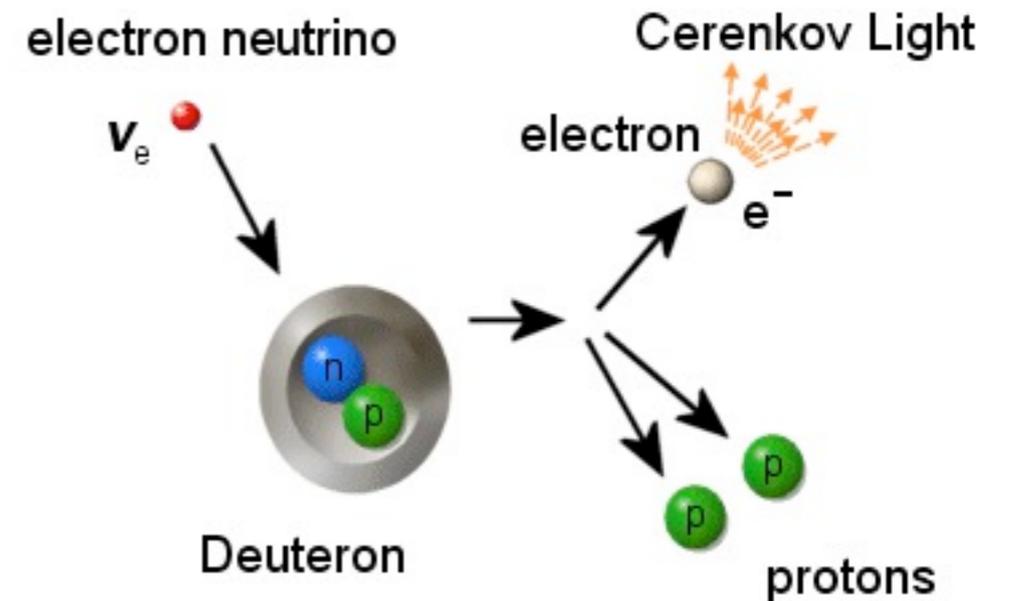
- Neutraler Strom



- Geladener Strom



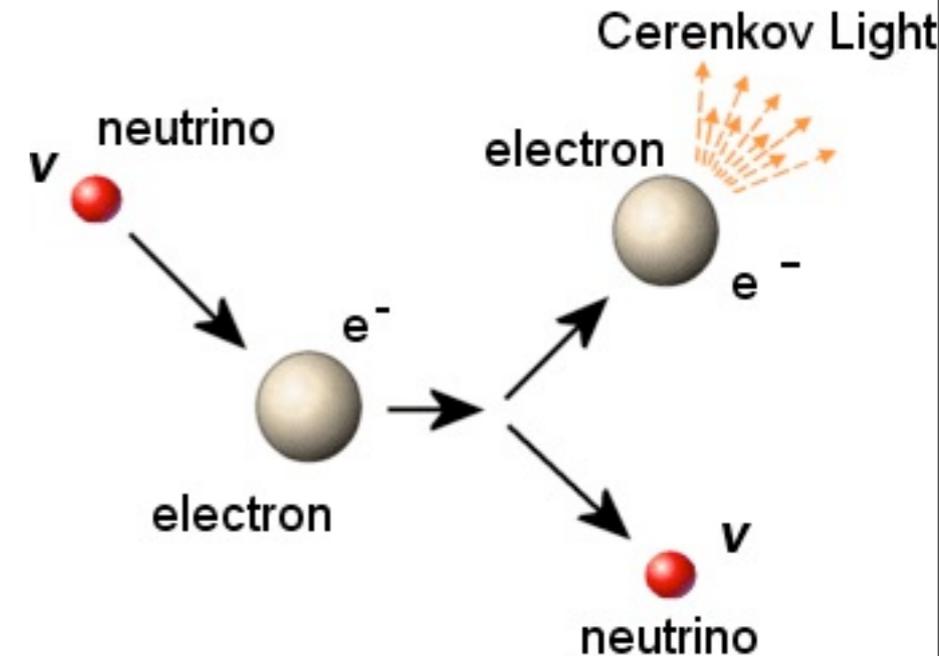
SNO



SNO

Neutrino-Elektron-Streuung

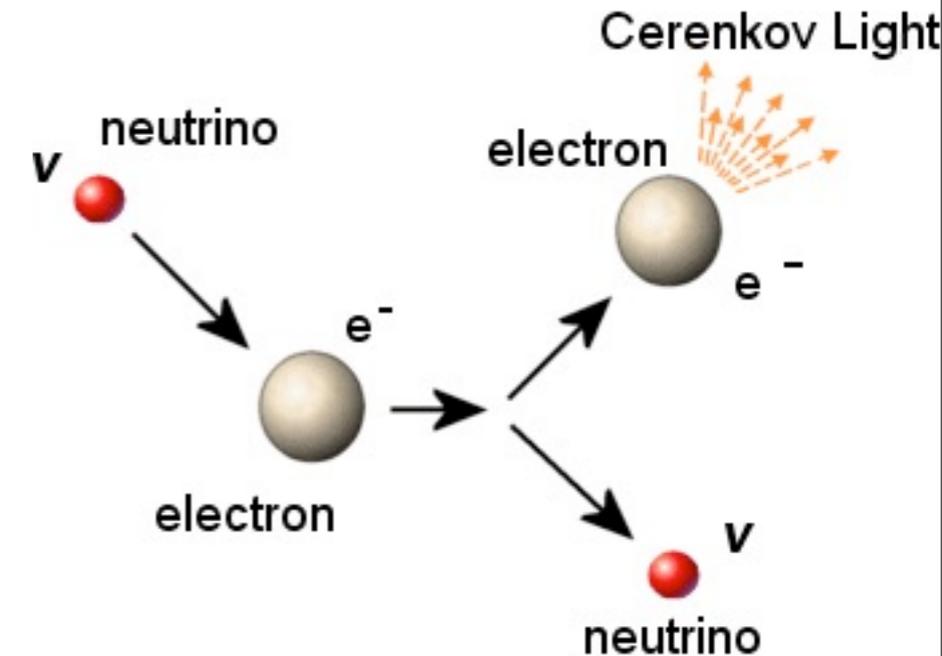
- Spezieller Fall:
 - Für ν_μ und ν_τ läuft dieser Prozess nur über den neutralen Strom
 - Für ν_e trägt sowohl der neutrale als auch der geladene Strom bei
- Wirkungsquerschnitte
 - $\nu_\mu e$: $\sim 1.5 \times 10^{-42} \text{ cm}^2 E_\nu/\text{GeV}$
 - $\nu_e e$: $\sim 10 \times 10^{-42} \text{ cm}^2 E_\nu/\text{GeV}$
- ▶ \sim drei Größenordnung kleiner als Neutrino-Nukleon-Streuung



SNO

Neutrino-Elektron-Streuung

- Spezieller Fall:
 - Für ν_μ und ν_τ läuft dieser Prozess nur über den neutralen Strom
 - Für ν_e trägt sowohl der neutrale als auch der geladene Strom bei
- Wirkungsquerschnitte
 - $\nu_\mu e$: $\sim 1.5 \times 10^{-42} \text{ cm}^2 E_\nu/\text{GeV}$
 - $\nu_e e$: $\sim 10 \times 10^{-42} \text{ cm}^2 E_\nu/\text{GeV}$
- ▶ \sim drei Größenordnung kleiner als Neutrino-Nukleon-Streuung



SNO

Allgemein: Neutrino-
Wechselwirkungsquerschnitte sind
proportional zur Neutrino-Energie!

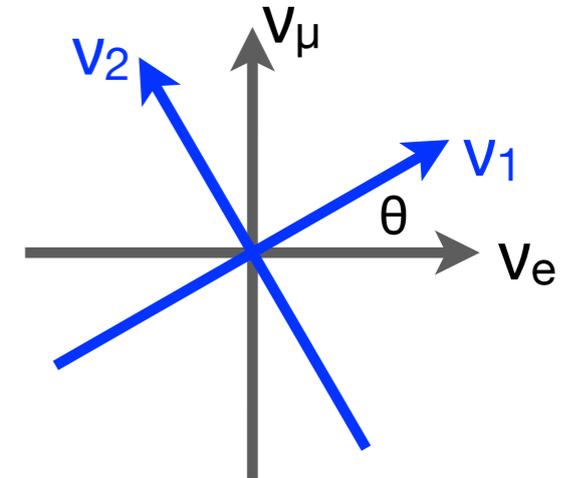
Neutrino-Oszillationen: Grundvoraussetzungen

- Neutrinos müssen Masse haben, damit sie oszillieren können!
 - Massen-Eigenzustände sind nicht gleich Flavor-Eigenzustände

Neutrino-Oszillationen: Grundvoraussetzungen

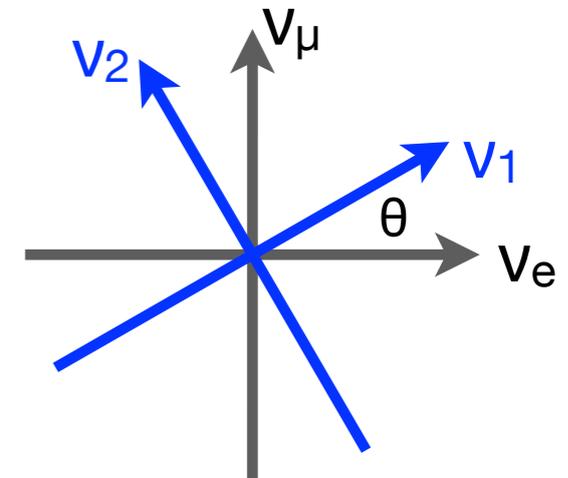
- Neutrinos müssen Masse haben, damit sie oszillieren können!
 - Massen-Eigenzustände sind nicht gleich Flavor-Eigenzustände
- Beispiel: Welt mit 2 Neutrinos:
 - Die Eigenzustände der schwachen WW ν_μ und ν_e sind nicht gleich den Masseneigenzuständen ν_1 und ν_2

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$



Neutrino-Oszillationen: Grundvoraussetzungen

- Neutrinos müssen Masse haben, damit sie oszillieren können!
 - Massen-Eigenzustände sind nicht gleich Flavor-Eigenzustände
- Beispiel: Welt mit 2 Neutrinos:
 - Die Eigenzustände der schwachen WW ν_μ und ν_e sind nicht gleich den Masseneigenzuständen ν_1 und ν_2



$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

- Die Eigenzustände der schwachen WW ν_μ und ν_e (die wir messen und identifizieren können) sind eine Mischung der Masseneigenzustände:

$$|\nu_\mu\rangle = -\sin\theta |\nu_1\rangle + \cos\theta |\nu_2\rangle$$

$$|\nu_e\rangle = \cos\theta |\nu_1\rangle + \sin\theta |\nu_2\rangle$$

Neutrino-Oszillationen: Zwei Neutrinos

- Die Zeitentwicklung im Vakuum wird von den Masseneigenzuständen bestimmt:

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta (|\nu_1\rangle e^{-iE_1t}) + \cos\theta (|\nu_2\rangle e^{-iE_2t})$$

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2p} \approx E + \frac{m_i^2}{2E}$$

Neutrino-Oszillationen: Zwei Neutrinos

- Die Zeitentwicklung im Vakuum wird von den Masseneigenzuständen bestimmt:

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta (|\nu_1\rangle e^{-iE_1t}) + \cos\theta (|\nu_2\rangle e^{-iE_2t})$$

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2p} \approx E + \frac{m_i^2}{2E}$$

- ▶ Haben die beiden Masseneigenzustände unterschiedliche Massen, dann ändert sich die Zusammensetzung mit der Zeit, ein ν_μ kann sich in ein ν_e umwandeln!
- ▶ Die Oszillationswahrscheinlichkeit ist:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2$$

Neutrino-Oszillationen: Zwei Neutrinos

- Die Zeitentwicklung im Vakuum wird von den Masseneigenzuständen bestimmt:

$$|\nu_\mu(t)\rangle = -\sin\theta (|\nu_1\rangle e^{-iE_1 t}) + \cos\theta (|\nu_2\rangle e^{-iE_2 t})$$

$$E_i = \sqrt{p^2 + m_i^2} \approx p + \frac{m_i^2}{2p} \approx E + \frac{m_i^2}{2E}$$

- ▶ Haben die beiden Masseneigenzustände unterschiedliche Massen, dann ändert sich die Zusammensetzung mit der Zeit, ein ν_μ kann sich in ein ν_e umwandeln!
- ▶ Die Oszillationswahrscheinlichkeit ist:

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = |\langle \nu_e | \nu_\mu(t) \rangle|^2$$

- ▶ Die Übergangswahrscheinlichkeit als Funktion der zurückgelegten Strecke ergibt sich zu:

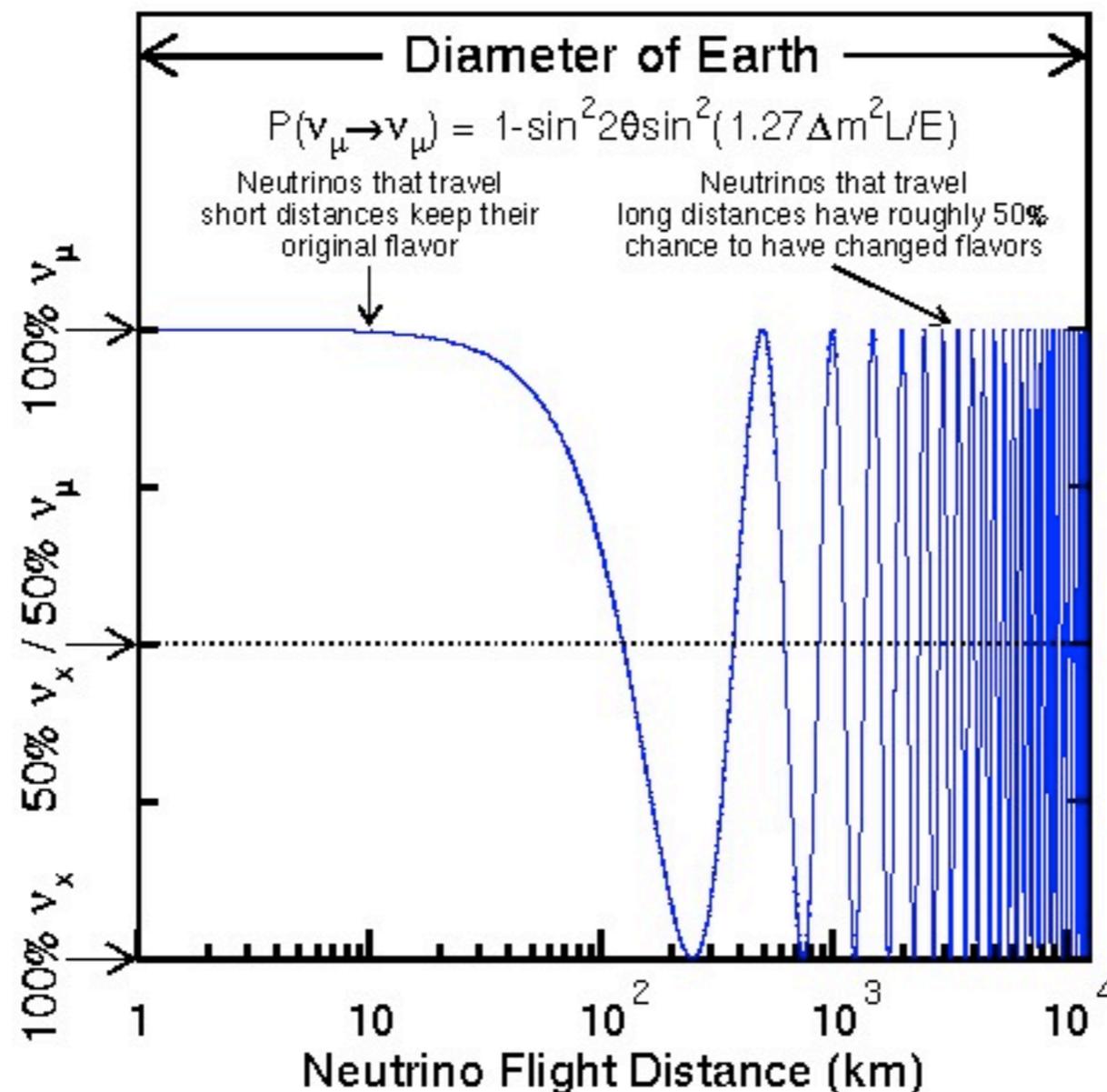
$$P(\nu_\mu \leftrightarrow \nu_e) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(1.27 \frac{\Delta m^2}{\text{eV}^2} \frac{L/\text{m}}{E/\text{MeV}} \right)$$

$$\Delta m^2 = m_1^2 - m_2^2$$

Neutrino-Oszillationen

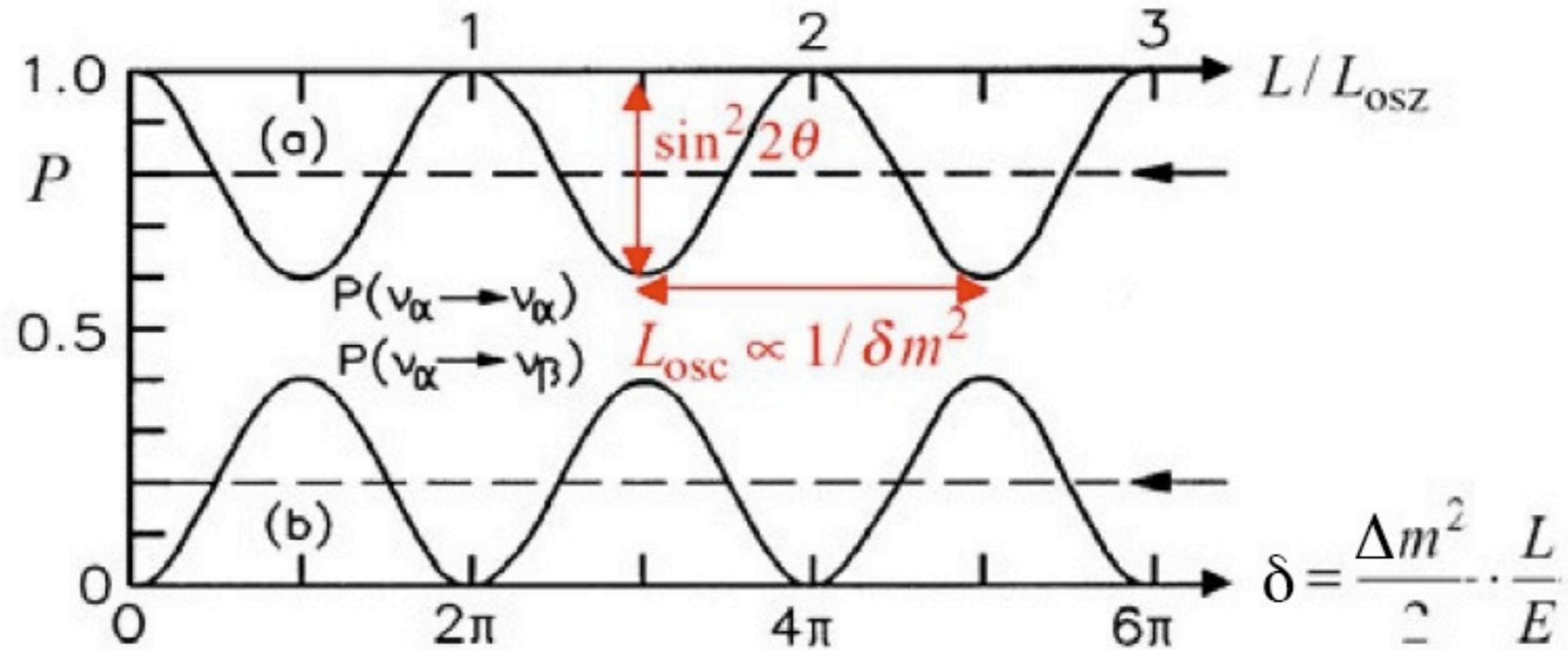
- Neutrino Oszillationen als Funktion des Abstands

$$\Delta m^2 = 0.005 \text{ eV}^2, \quad \sin^2 2\theta = 1, \quad E = 1 \text{ GeV}$$



Neutrino-Oszillationen

- Einfluss des Mischungswinkels:



- Der Mischungswinkel bestimmt die maximale Umwandlung, der Massenunterschied die “Geschwindigkeit” der Oszillation

Neutrino-Oszillationen: Allgemeiner Fall

- n Flavor-Eigenzustände $|\nu_\alpha\rangle$ mit $\alpha = e, \mu, \tau, \dots$
- n Massen-Eigenzustände $|\nu_i\rangle$ mit $i = 1, 2, 3, \dots$
- Die Zustände sind über eine unitäre $n \times n$ Mischungsmatrix verknüpft:

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle$$

- $(n-1)^2$ Unabhängige Parameter der Mischungsmatrix:
 - $n(n-1)/2$ Mischungswinkel
 - $(n-1)(n-2)/2$ CP-verletzende Phasen
- Für $n = 3$:
 - 3 Mischungswinkel: $\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$
 - 1 Phase

Allgemeine Beschreibung des 3-v-Falls

- Beschreibung des 3 - Neutrino-Falls durch eine unitäre 3 x 3 Matrix (Maki-Nakagawa-Sakata-Matrix MNS):
 - 3 Winkel und eine CP-verletzende Phase
- analog dem Quark-Fall, CKM-Matrix

$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix}$$

CP-Verletzung im Bereich von Θ_{13}

$$= \begin{pmatrix} 1 & & \\ & c_{23} & s_{23} \\ & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & & \\ & 1 & \\ & & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} s_{13}e^{-i\delta} & & \\ & & \\ & & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & \\ -s_{12} & c_{12} & \\ & & 1 \end{pmatrix}$$

Zusammenfassung

- Satelliten-Experimente erforschen die Zusammensetzung der Kosmischen Strahlung bei niedrigen Energien: Ergebnisse passen gut zu den Theorien der Beschleunigung und Propagation
 - Interessante Beobachtung von Positronen: Hinweise auf Dunkle Materie, oder doch eine astrophysikalische Erklärung: Pulsare?
 - Aktuelle Kontroverse um eine mögliche Photonen-Linie
 - ▶ Allgemein hohes Entdeckungspotential für Neue Phänomene - Aber noch nichts Überzeugendes.
-
- Neutrinos sind die leichtesten Teilchen im Standard-Modell
 - Neutrinos haben Masse: Sie oszillieren - Es gibt (mindestens) drei verschiedene Massen-Eigenzustände, die nicht mit dem Flavor-Eigenzuständen identisch sind

Zusammenfassung

- Satelliten-Experimente erforschen die Zusammensetzung der Kosmischen Strahlung bei niedrigen Energien: Ergebnisse passen gut zu den Theorien der Beschleunigung und Propagation
 - Interessante Beobachtung von Positronen: Hinweise auf Dunkle Materie, oder doch eine astrophysikalische Erklärung: Pulsare?
 - Aktuelle Kontroverse um eine mögliche Photonen-Linie
 - ▶ Allgemein hohes Entdeckungspotential für Neue Phänomene - Aber noch nichts Überzeugendes.
-
- Neutrinos sind die leichtesten Teilchen im Standard-Modell
 - Neutrinos haben Masse: Sie oszillieren - Es gibt (mindestens) drei verschiedene Massen-Eigenzustände, die nicht mit dem Flavor-Eigenzuständen identisch sind

Nächste Vorlesung: 24.06.,
“Neutrinos I - Reaktor- und Solare Neutrinos”, F. Simon



Gamma Ray Bursts

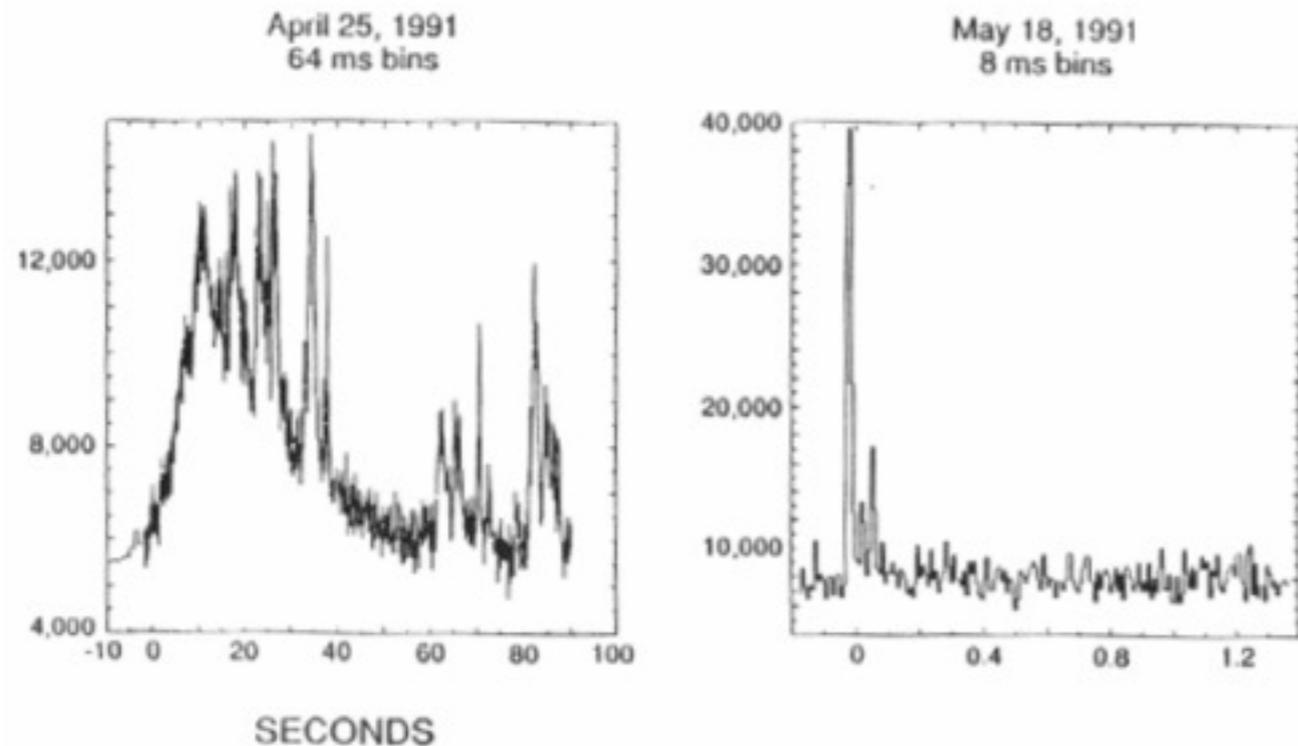


Gamma Ray Bursts



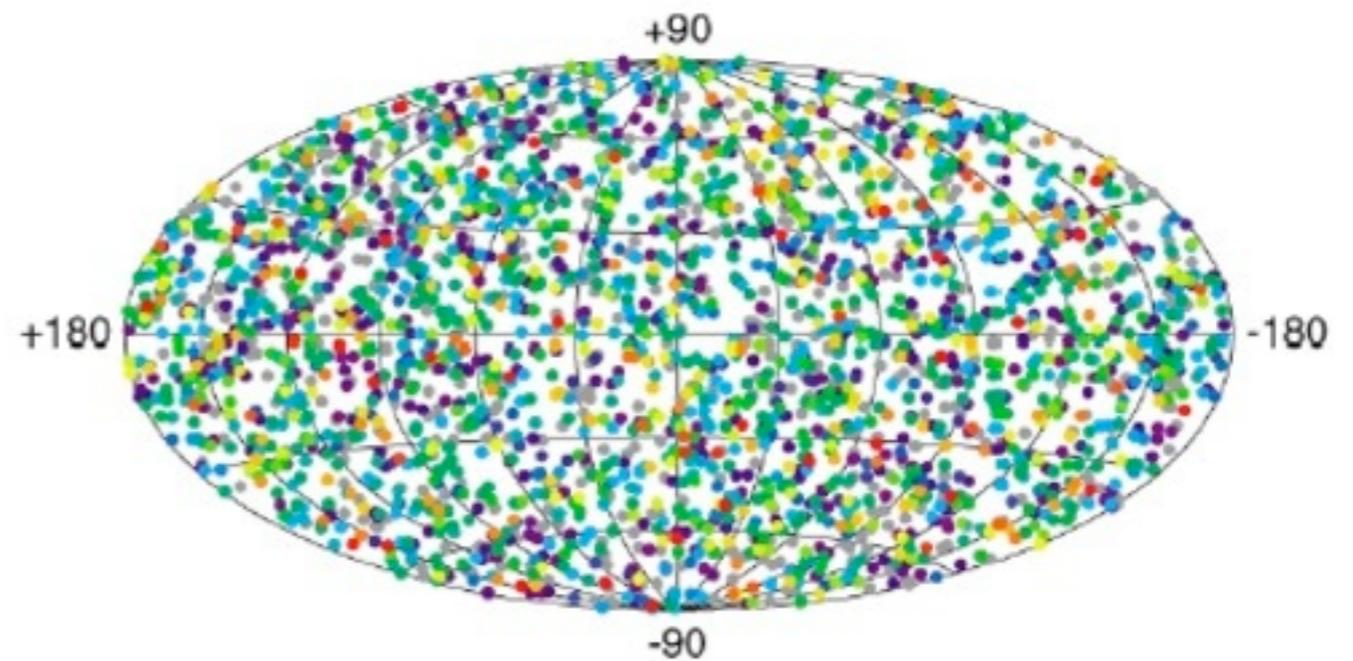
- Hellste bekannte Phänomene am Himmel
- Überstrahlen für kurze Zeit den gesamten Gamma-Himmel
- Ende der 1960er zufällig von Satelliten auf der Suche nach Russischen Atomtests entdeckt

Gamma Ray Bursts

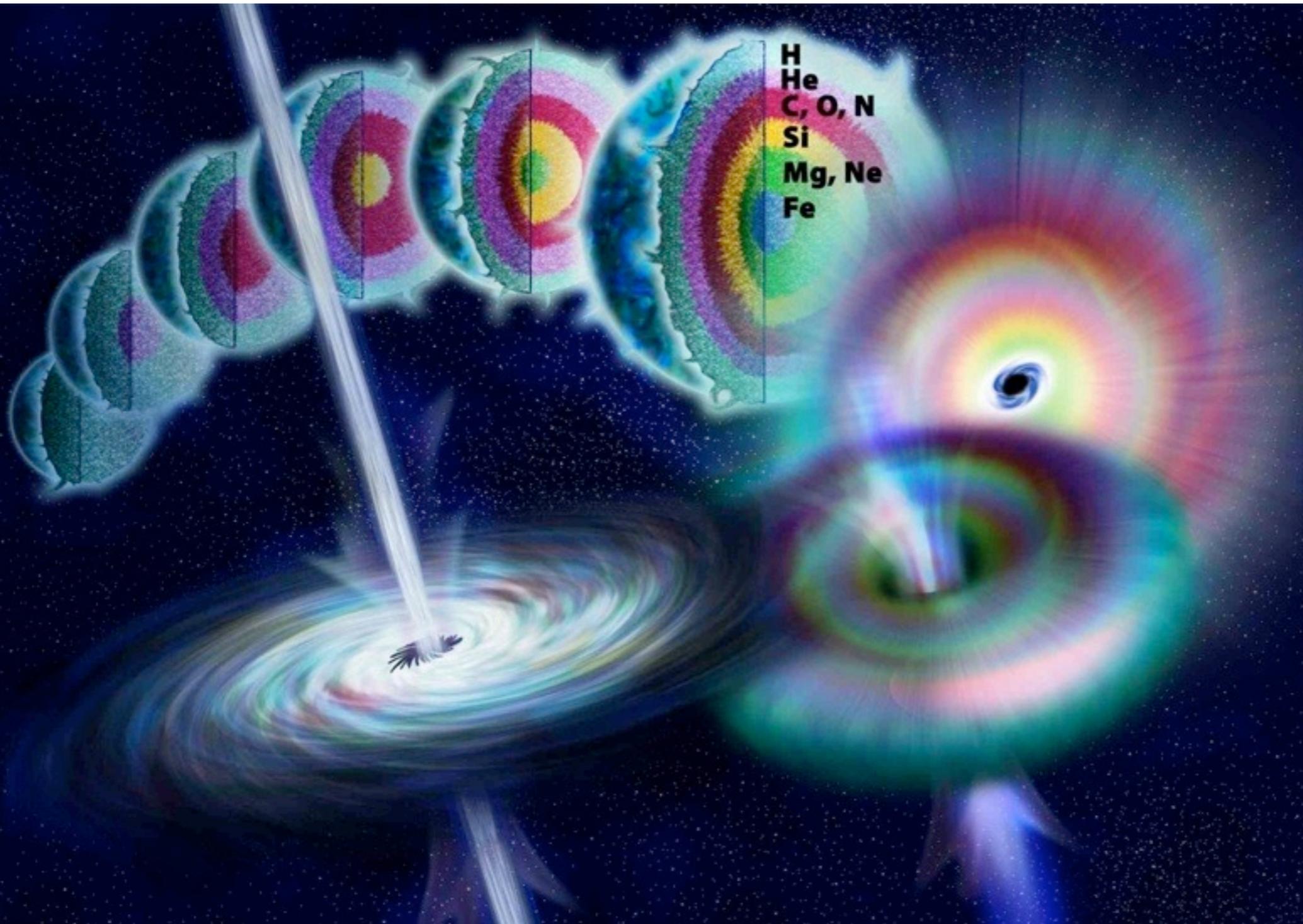


- Kurze, unregelmässige Pulse, von Burst zu Burst verschieden

- Kommen aus allen Richtungen des Himmels, meist aus grosser Entfernung



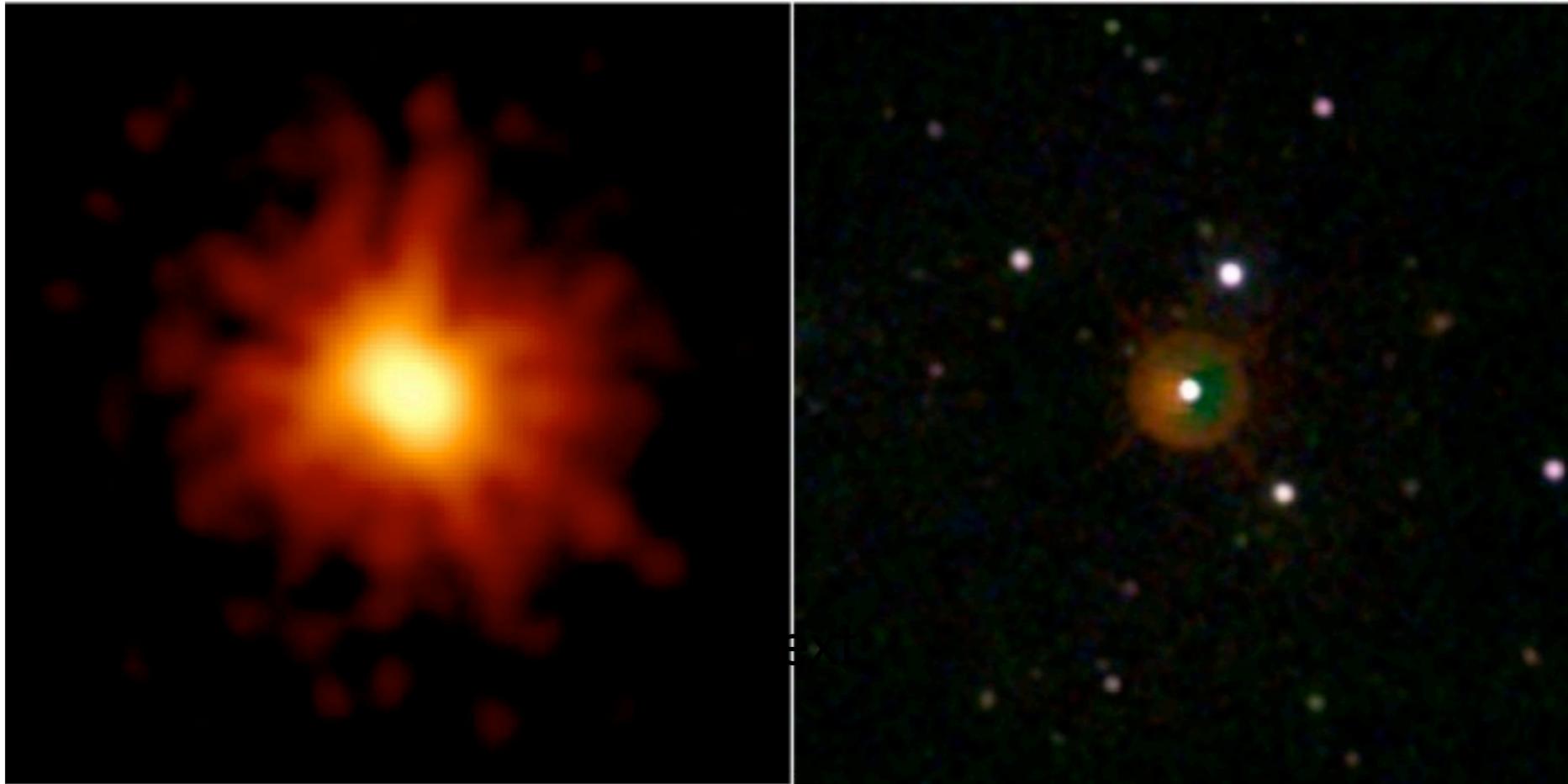
Gamma-Ray-Bursts



credit: Nicolle Rager Fuller/NSF

- Mögliche Quelle: Extreme Supernova-Explosionen (“Hypernova”) im frühen Universum im Fall von langen GRBs (viele Sekunden)

Das hellste jemals beobachtete Objekt



credit: NASA/Swift/Stefan Immler, et al.

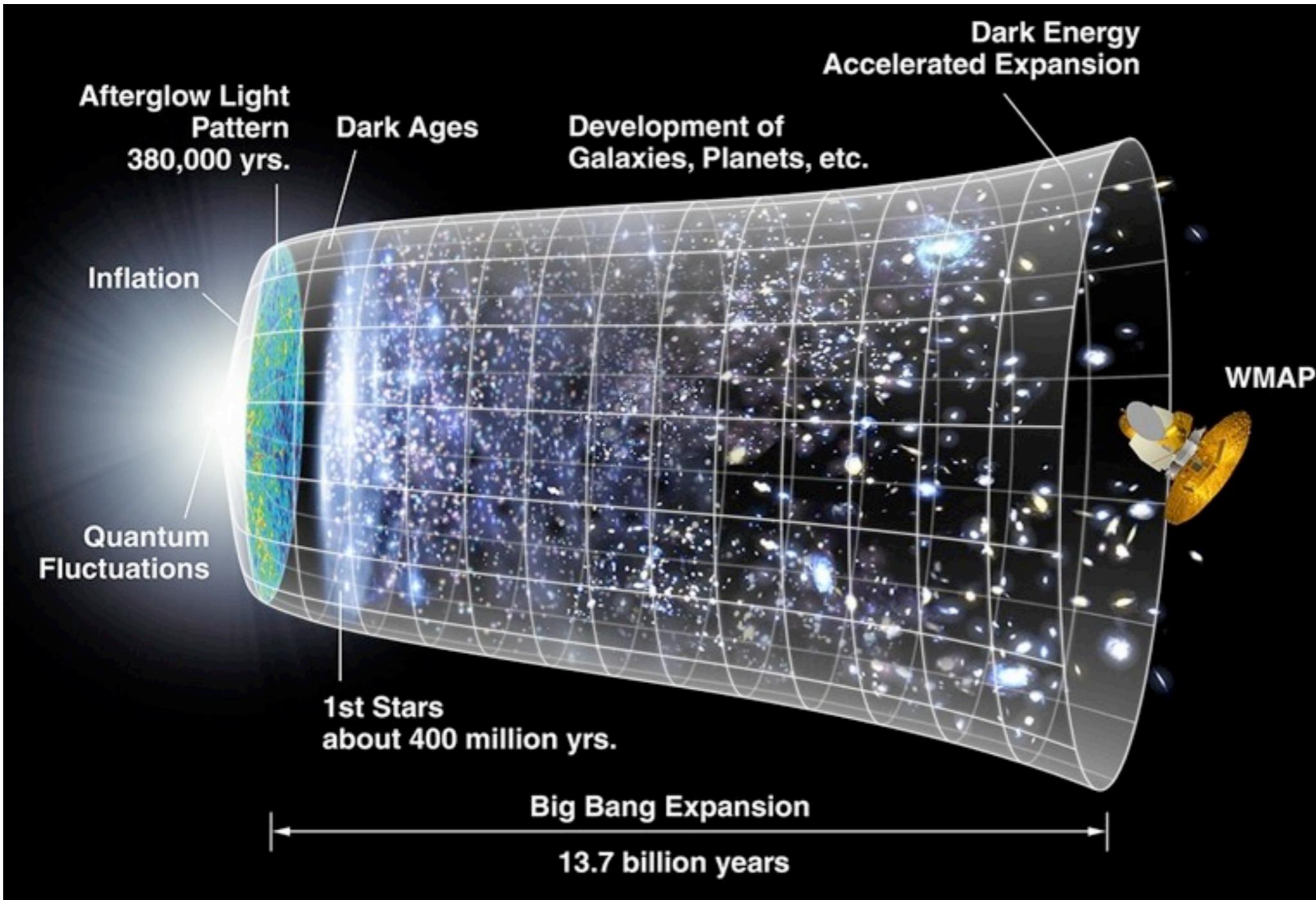
SWIFT X-Ray

SWIFT Optical

- GRB 080319B
- ~ 7.5 GLyr entfernt
- war mit bloßem Auge von der Erde aus sichtbar

Fenster in die Frühzeit des Universums

- Das am weitesten entfernte Objekt, das je gesehen wurde:
GRB 090423 am 23. April 2009: Explosion 625 Millionen Jahre nach dem Urknall!



Damals hatte das Universum ca. 4% seiner heutigen Größe

credit: WMAP Science Team

Fenster in die Frühzeit des Universums

- Das am weitesten entfernte Objekt, das je gesehen wurde:
GRB 090423 am 23. April 2009: Explosion 625 Millionen Jahre nach dem Urknall!

