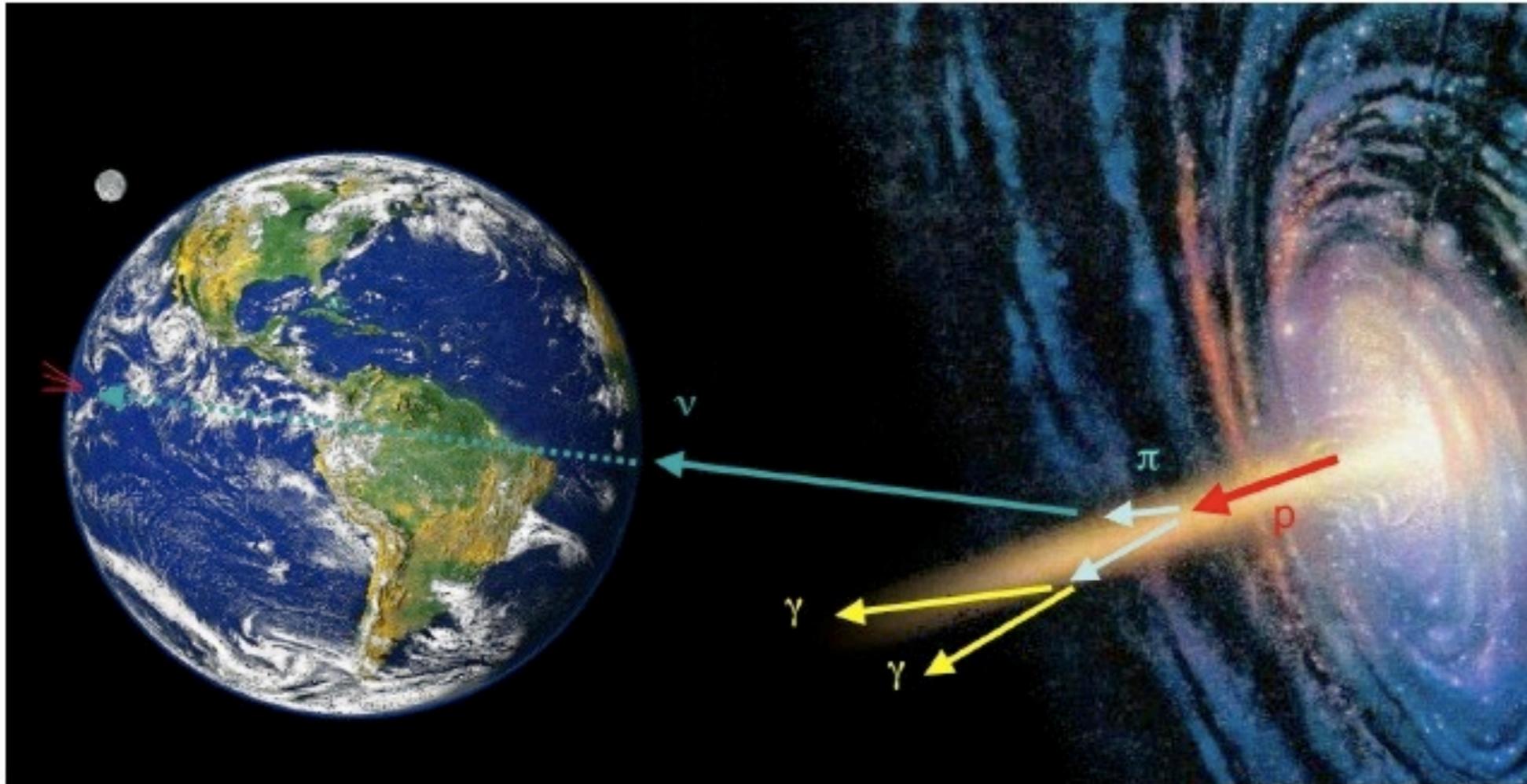


Teilchenphysik mit kosmischen und mit erdgebundenen Beschleunigern



01. Einführung

15.04.2013



Ziel der Vorlesung

- Aktuelle und zukünftige Teilchenbeschleuniger
- Teilchennachweis in der Hochenergie- und Astroteilchen-Physik
- Das Standard-Modell
- Präzisionmessungen in der Teilchenphysik
- Dunkle Materie und dunkle Energie
- Kosmische Beschleunigungsmechanismen
- Physik geladener und neutraler kosmischer Strahlung
- Neutrino-physik

- Was Ihnen sonst noch am Herzen liegt

Organisatorisches

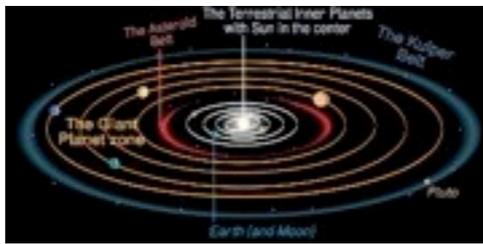
- Zeit: Montags, 14:00 bis 16:00
- Ort: PH 127 , TUM Physik-Departement I
- Vorkenntnisse:
 - muss: Teilchen & Kerne
 - kann: Quantenfeldtheorie, theoretische Teilchenphysik
 - stört nicht: Teilchenphysik mit höchstenergetischen Beschleunigern (Higg & Co)
- Übungen: keine
- Schein/Prüfung: auf Anfrage
- Skript: Die Folien werden auf der MPP-Seite online gestellt:
www.mpp.mpg.de → Veranstaltungen → Vorlesungen
- Laborbesichtigung: Am MPP nach Vereinbarung



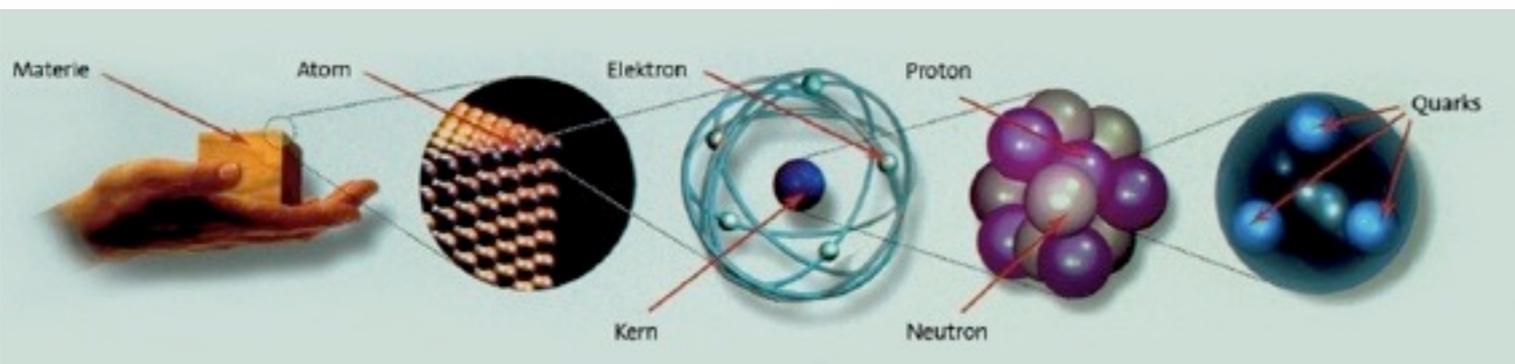
Themenübersicht

15.04.	Einführung
22.04.	Beschleuniger
29.04.	Detektoren in der Nicht-Beschleuniger-Physik
06.05.	Kosmische Beschleuniger
13.05.	Das Standardmodell
20.05.	Pfingsten - Keine Vorlesung!
27.05.	Starke Wechselwirkung
03.06.	Kosmische Strahlung I
10.06.	Kosmische Strahlung II
17.06.	Kosmische Strahlung III / Einführung Neutrinos
24.06.	Neutrinos I
01.07.	Neutrinos II
08.07.	Niederenergie - Präzisionsexperimente
15.07.	Dunkle Materie & Dunkle Energie

Vom Größten zum Kleinsten

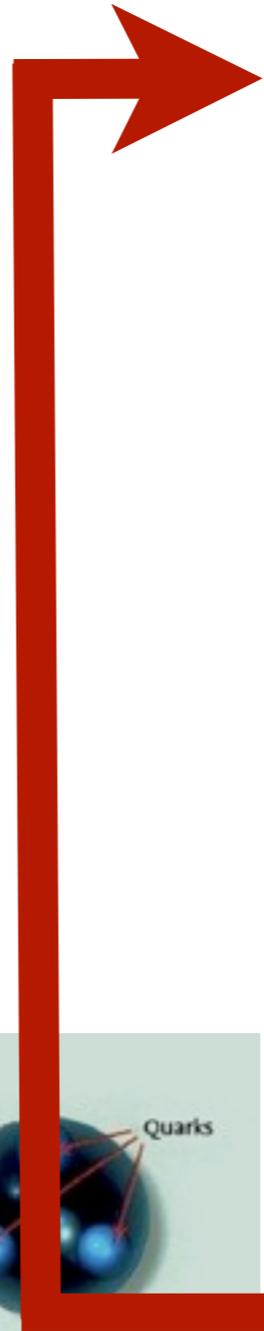
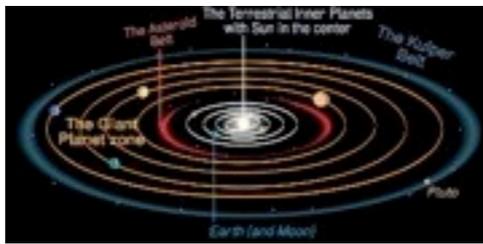


	Größe	Masse
Universum	10^{26} m	10^{52} kg
Galaxie	10^{21} m	10^{41} kg
Sonnensystem	10^{13} m	10^{30} kg
Erde	10^7 m	10^{24} kg
Mensch	10^0 m	10^2 kg
Atom	10^{-10} m	10^{-26} kg
Atomkern	10^{-14} m	10^{-26} kg
Nukleon	10^{-15} m	10^{-27} kg
Quarks, Lepton	$<10^{-18}$ m	10^{-30} kg

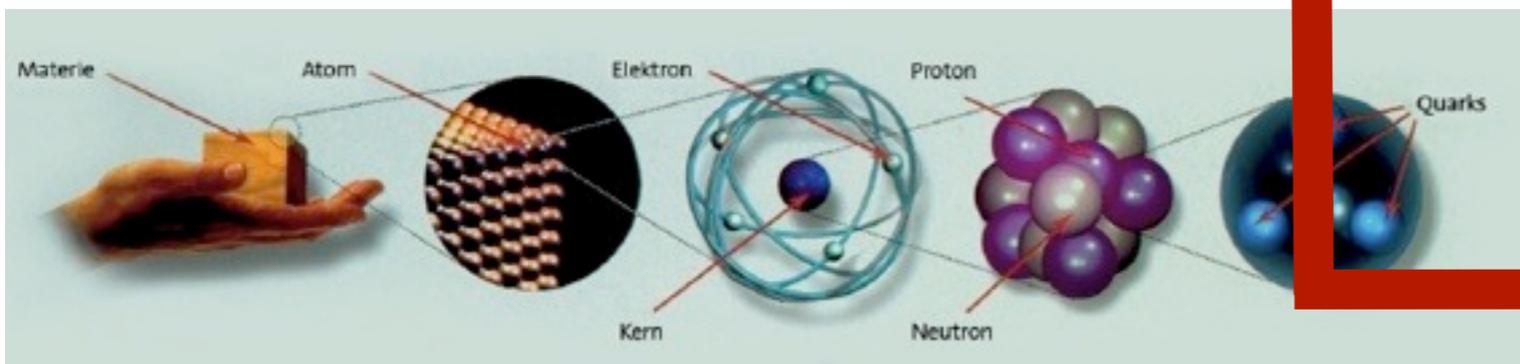


“Astroteilchenphysik in Deutschland”, <http://www.astroteilchenphysik.de/>, und darin angegebene Referenzen

Vom Größten zum Kleinsten

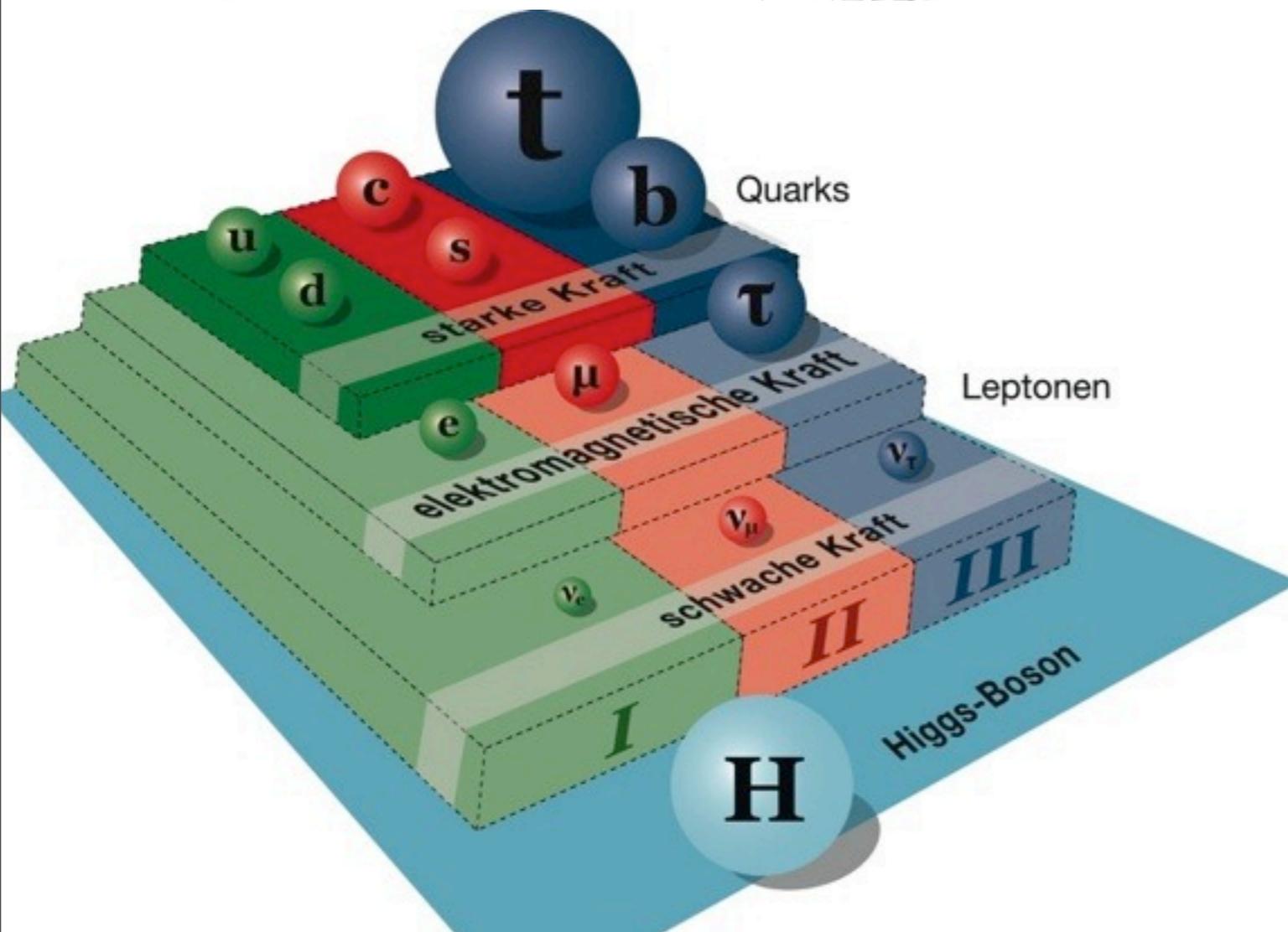


	Größe	Masse
Universum	10^{26} m	10^{52} kg
Galaxie	10^{21} m	10^{41} kg
Sonnensystem	10^{13} m	10^{30} kg
Erde	10^7 m	10^{24} kg
Mensch	10^0 m	10^2 kg
Atom	10^{-10} m	10^{-26} kg
Atomkern	10^{-14} m	10^{-26} kg
Nukleon	10^{-15} m	10^{-27} kg
Quarks, Lepton	$<10^{-18}$ m	10^{-30} kg



“Astroteilchenphysik in Deutschland”, <http://www.astroteilchenphysik.de/>, und darin angegebene Referenzen

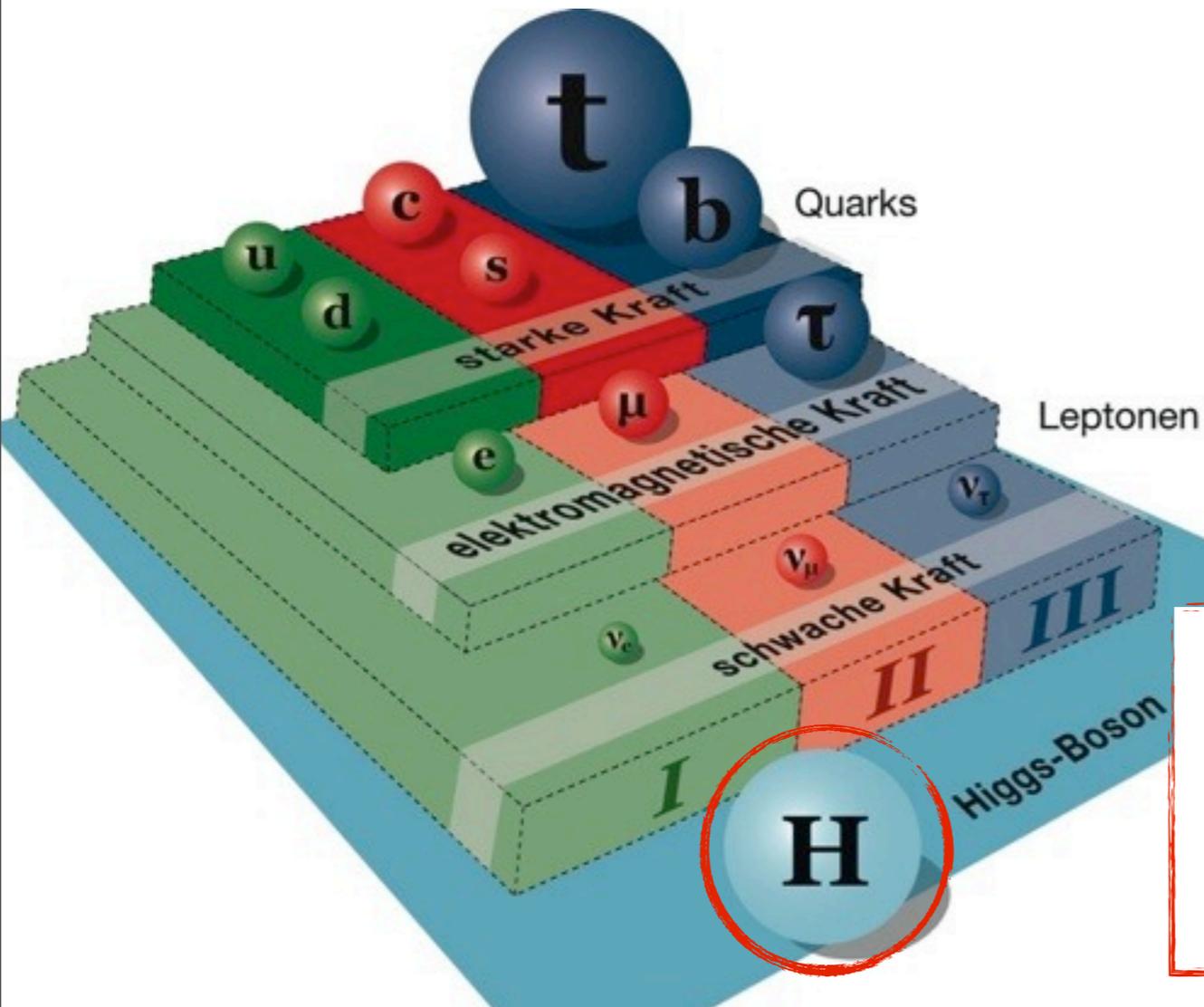
Das Standard-Modell der Teilchenphysik



Wechselwirkung	Reichweite	relative Stärke
Stark	subatomar	1
Elektro-magnetisch	unendlich	1/137
Schwach	subatomar	10^{-14}
Gravitation	unendlich	10^{-40}

Gravitation	elektromag. Kraft	schwache Kraft	starke Kraft
	1 Photon 	3 Bosonen Z^0 W^+ W^-	8 Gluonen

Das Standard-Modell der Teilchenphysik

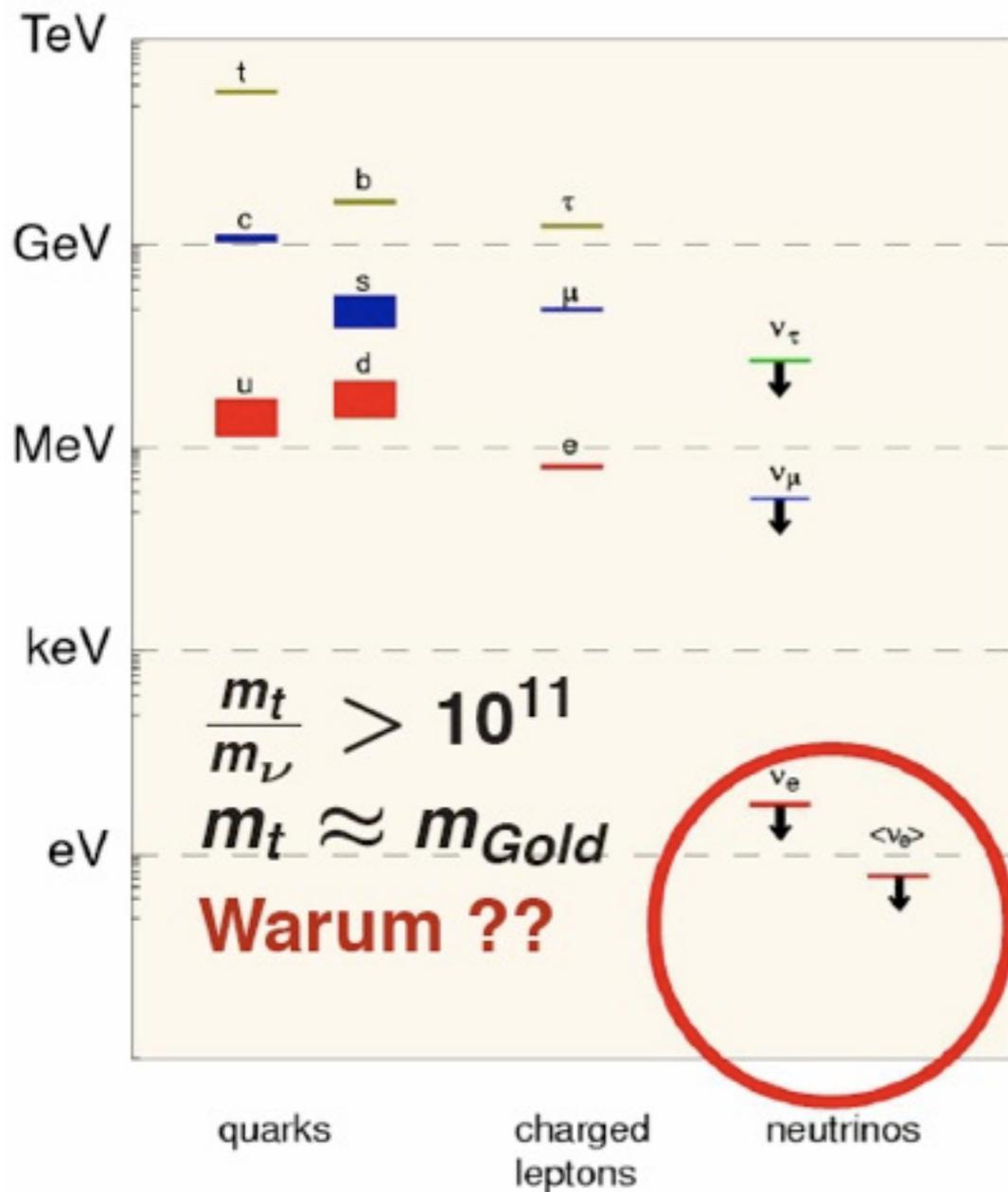


Wechselwirkung	Reichweite	relative Stärke
Stark	subatomar	1
Elektro-magnetisch	unendlich	1/137
Schwach	subatomar	10^{-14}

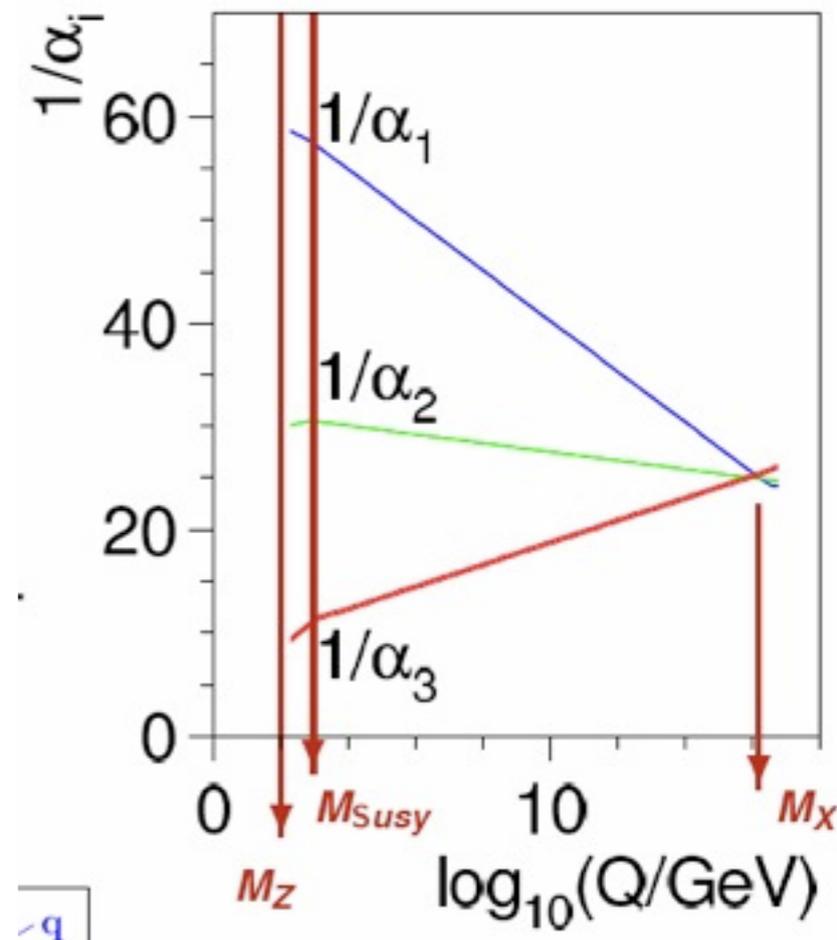
Das letzte fehlende Puzzlestück:
Entdeckt am LHC: 4. Juli 2012

Gravitation	elektromag. Kraft	schwache Kraft	starke Kraft
	1 Photon 	3 Bosonen Z^0 W^+ W^-	8 Gluonen

Das Standard-Modell: Offene Fragen



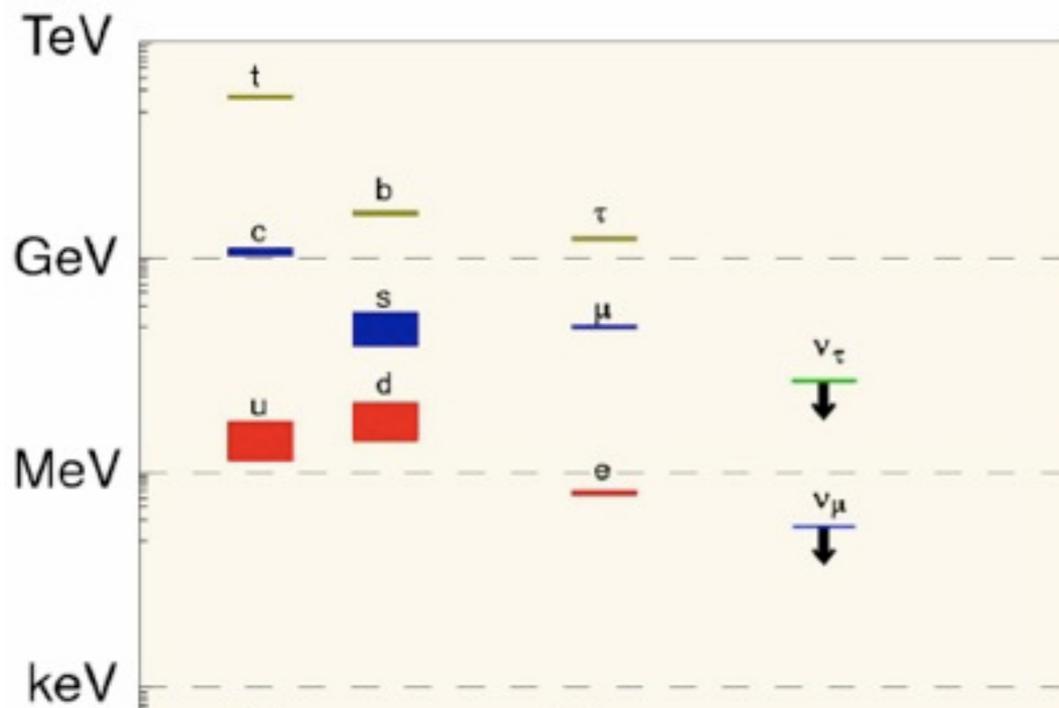
- Woher kommt die Massenhierarchie der Teilchen?
- Warum gibt es genau drei Familien?
 - aus der Messung der Z-Breite: Nur drei leichte Neutrinos, die ans Z koppeln
- Gibt es eine Vereinheitlichung der Kräfte (im SM nicht möglich)?
 - ▶ Super-Symmetrie?
 - ▶ ...



Fragen in Verbindung mit Kosmologie / Astrophysik:

- Was ist Dunkle Materie? Dunkle Energie?
- Woher kommt die Materie / Antimaterie-Asymmetrie?

Das Standard-Modell: Offene Fragen



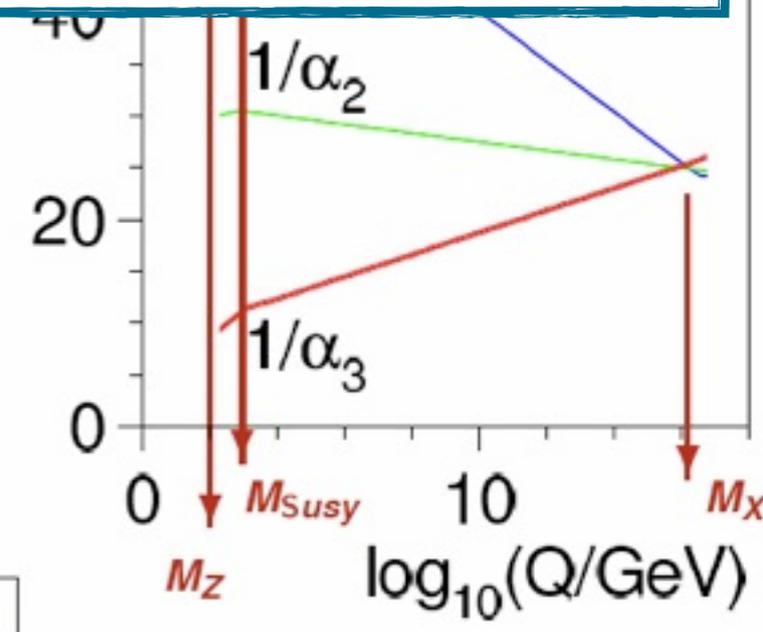
- Woher kommt die Massenhierarchie der Teilchen?
- Warum gibt es genau drei Familien?
 - aus der Messung der Z-Breite: Nur drei leichte Neutrinos, die ans Z koppeln
- Gibt es eine Vereinheitlichung der Kräfte (im

Das Standard-Modell kann nicht die endgültige Antwort sein!

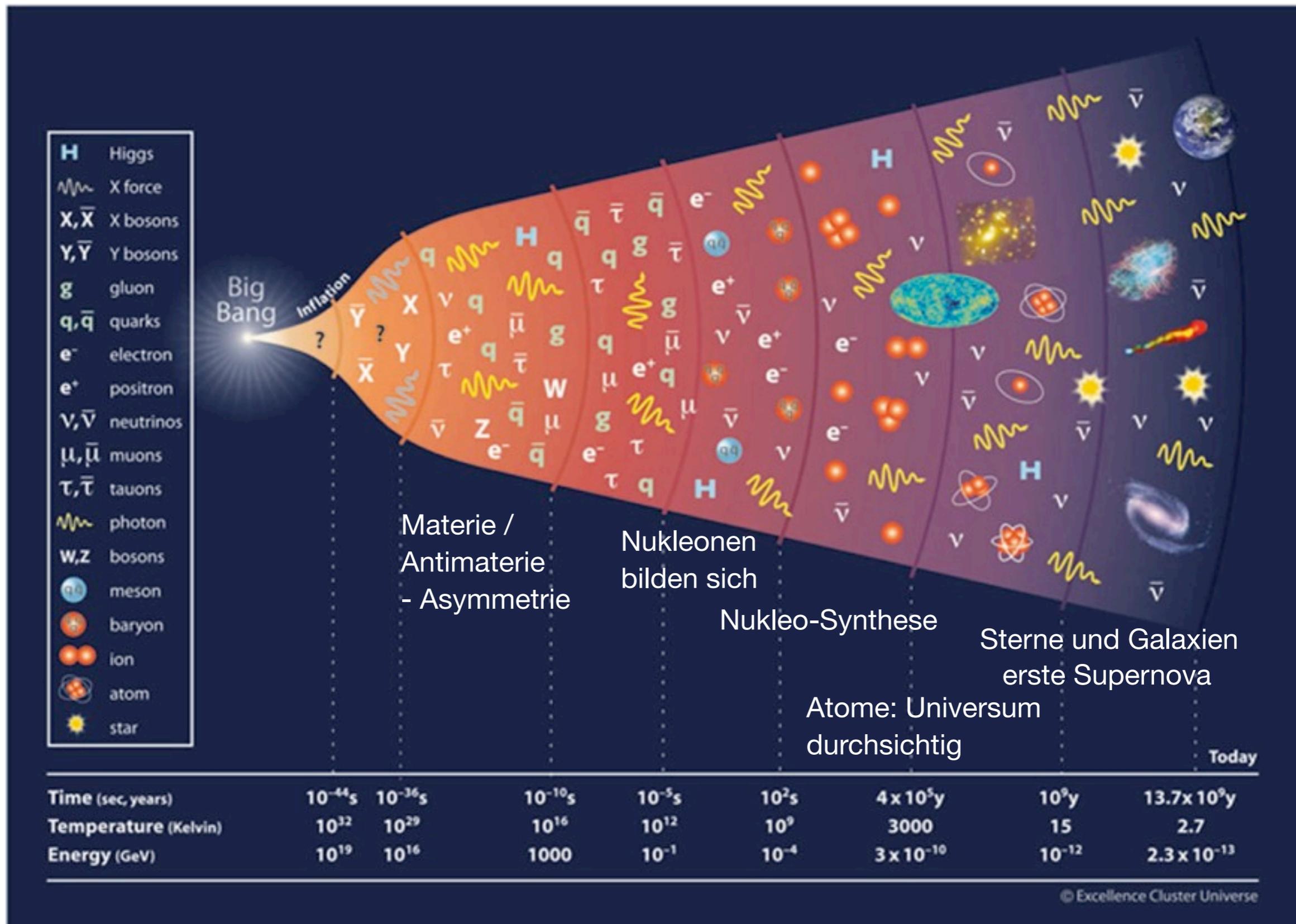


Fragen in Verbindung mit Kosmologie / Astrophysik:

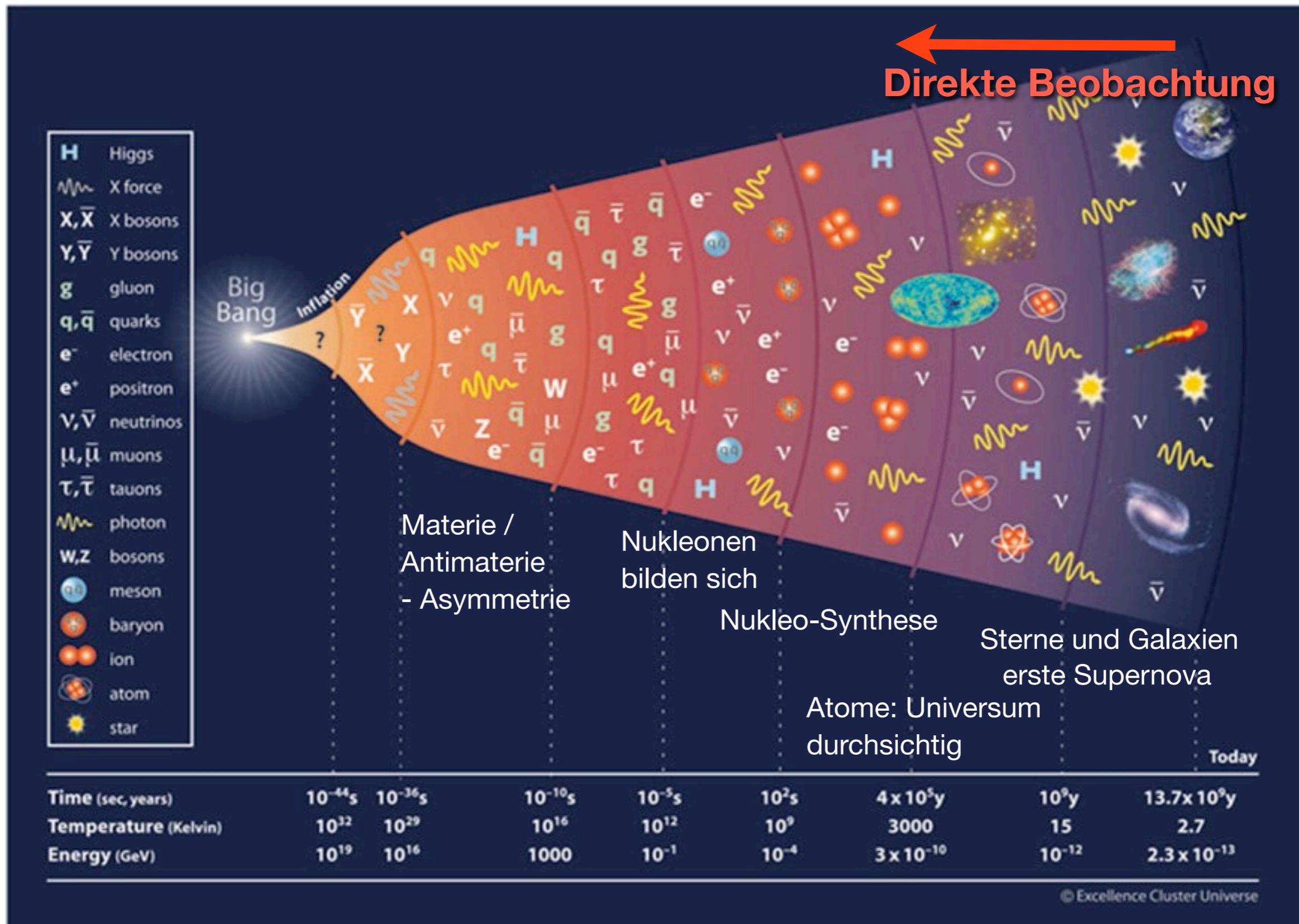
- Was ist Dunkle Materie? Dunkle Energie?
- Woher kommt die Materie / Antimaterie-Asymmetrie?



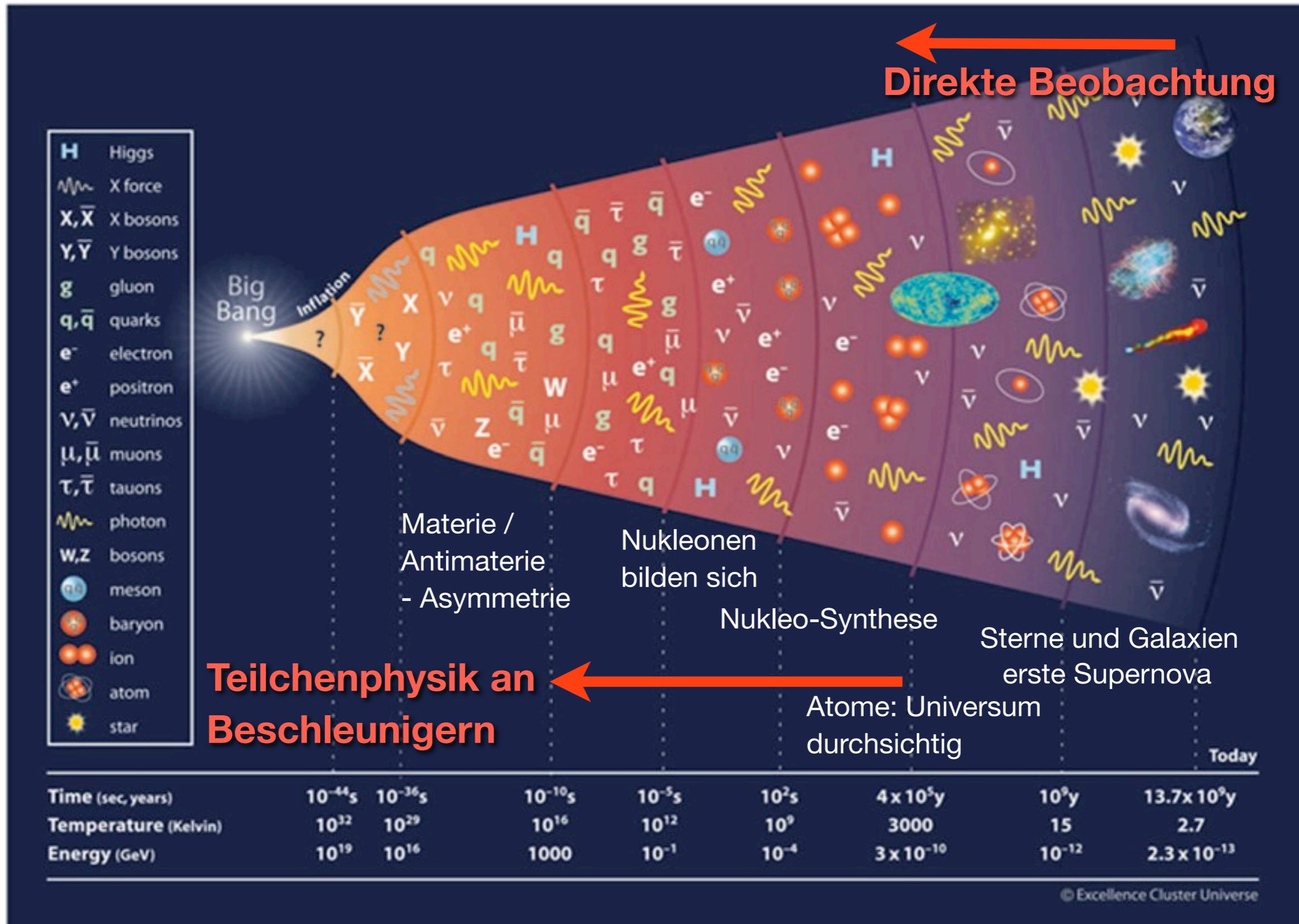
Die Entwicklung des Universums



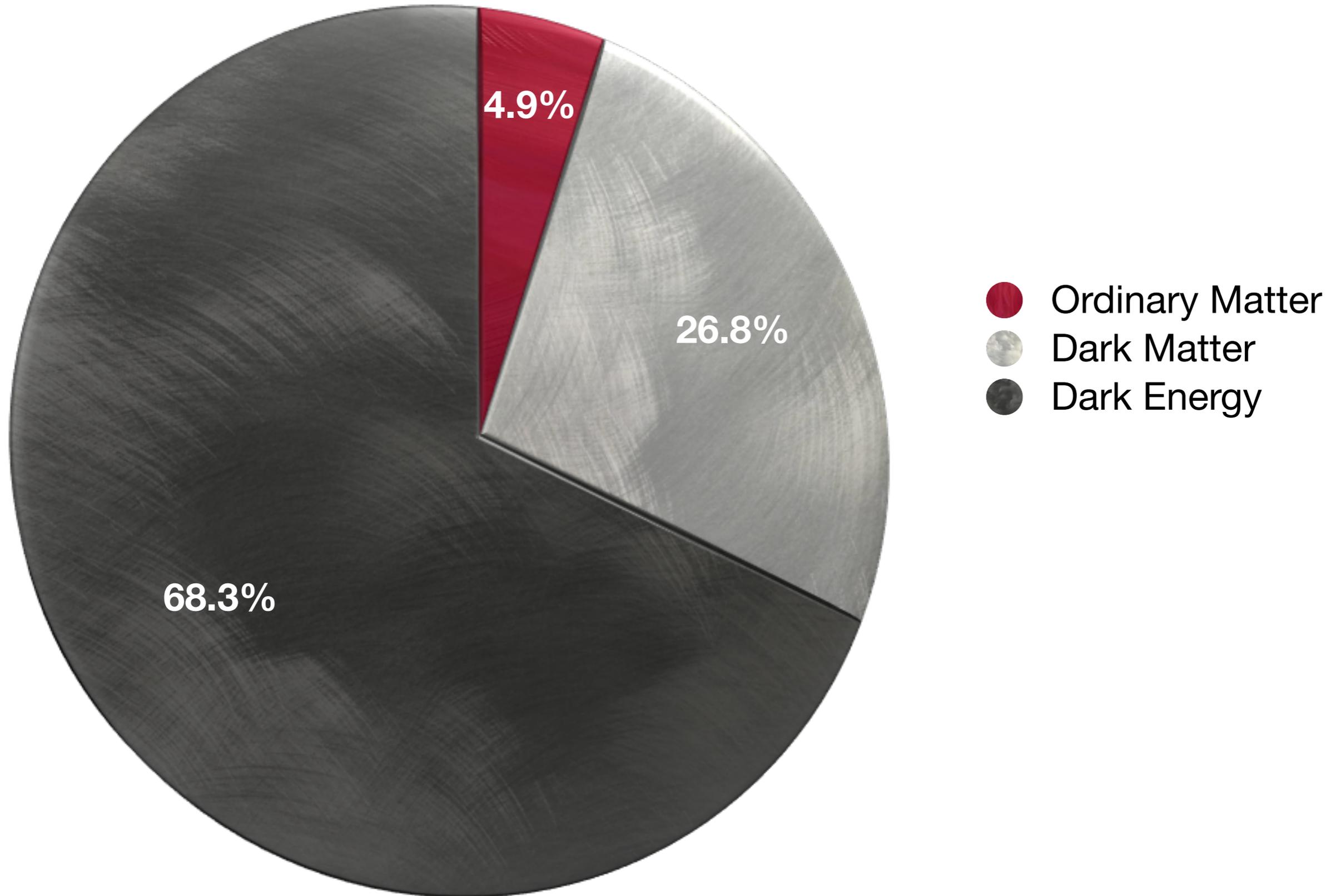
Die Entwicklung des Universums



Die Entwicklung des Universums

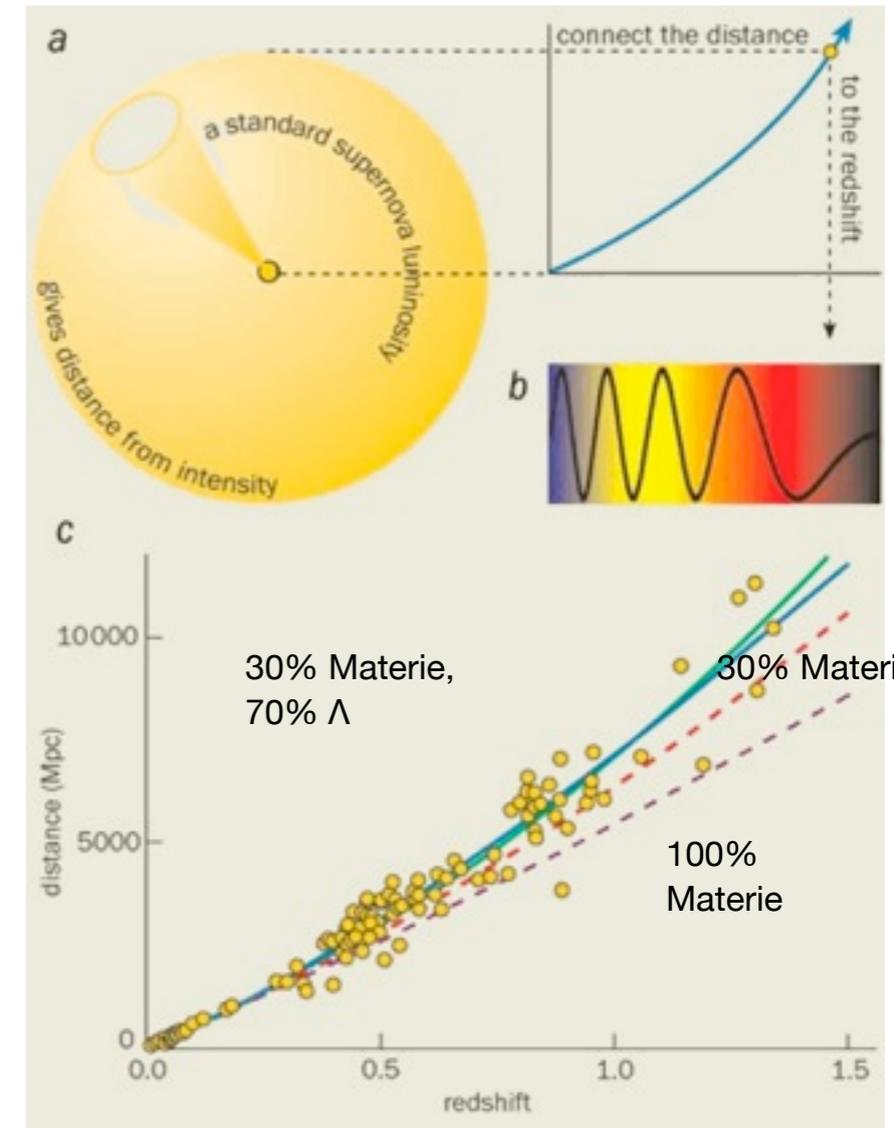
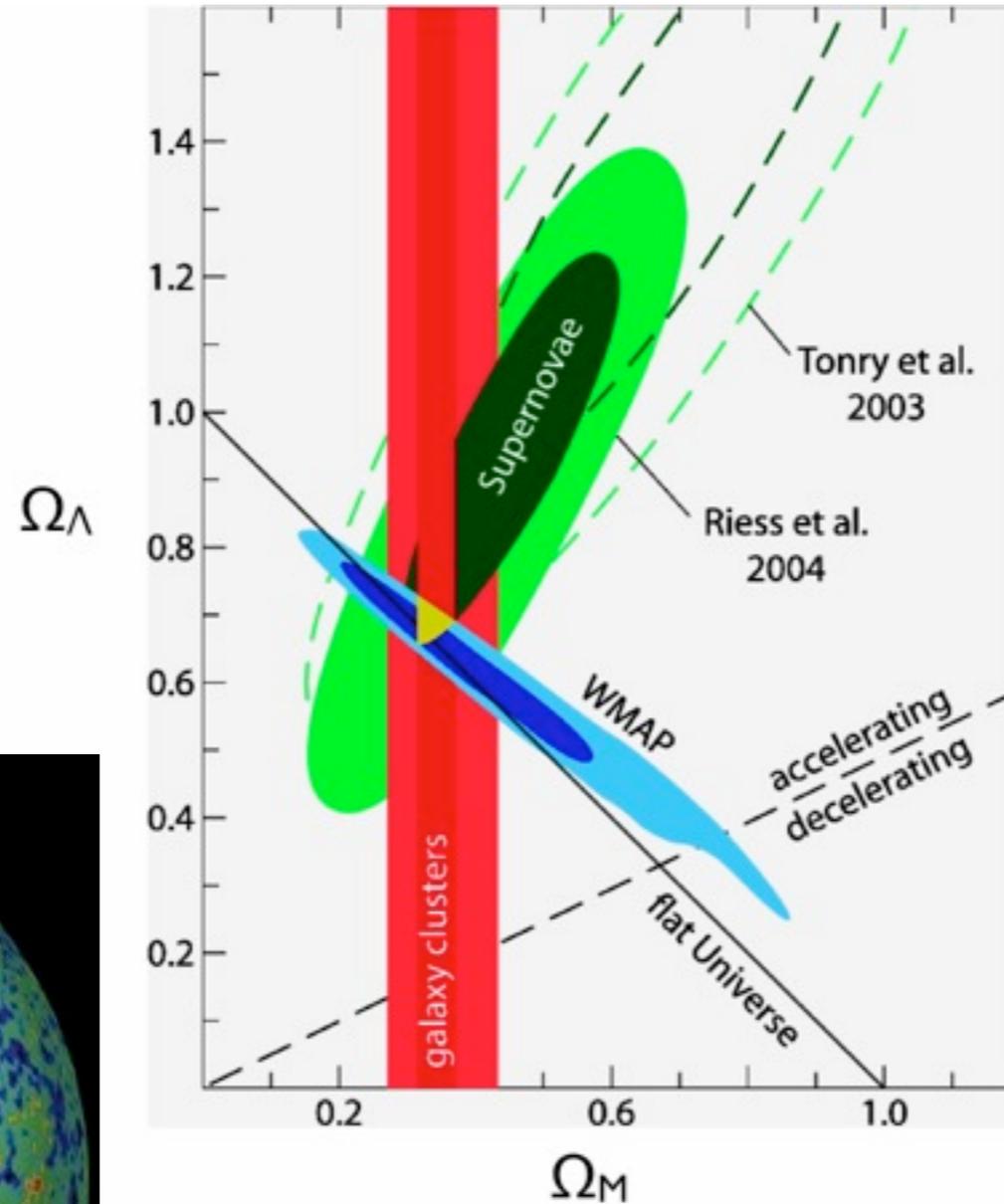


Die Zusammensetzung des Universums



Woher kennen wir die Zusammensetzung?

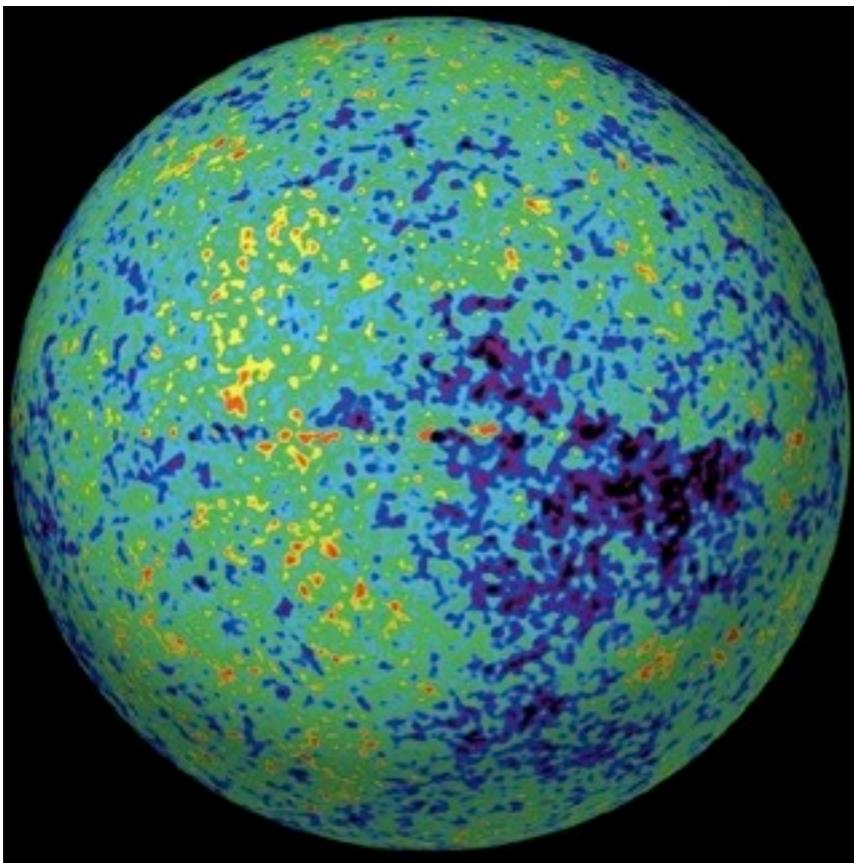
- Bewegung von Galaxie-Clustern zeigt die Materie-Dichte



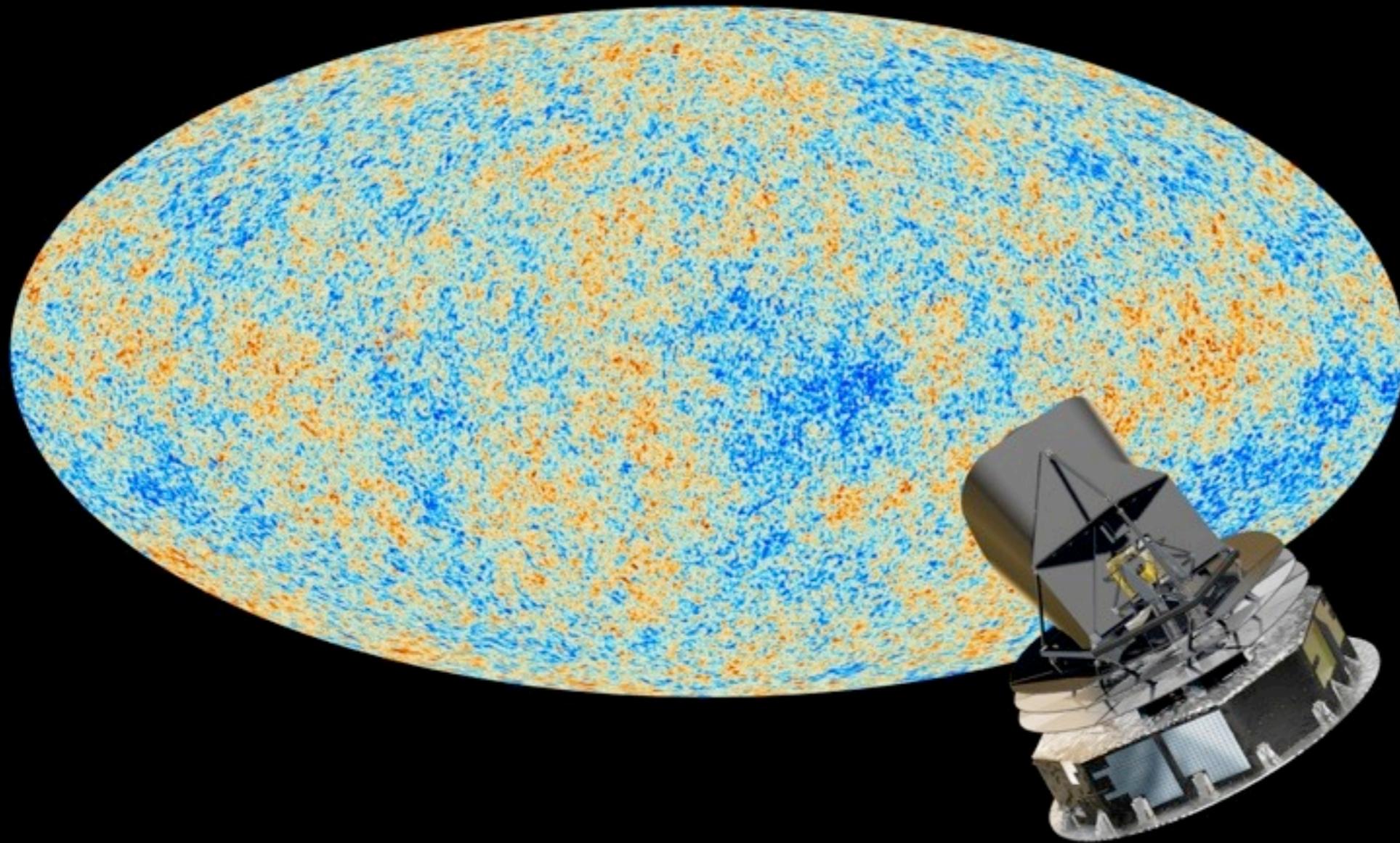
- CMB - Fluktuationen deuten auf ein flaches Universum hin: $\Omega_\Lambda + \Omega_M = 1$

- Supernova-Daten zeugen von einer beschleunigten Expansion

<http://physicsworld.com/cws/article/print/19419>

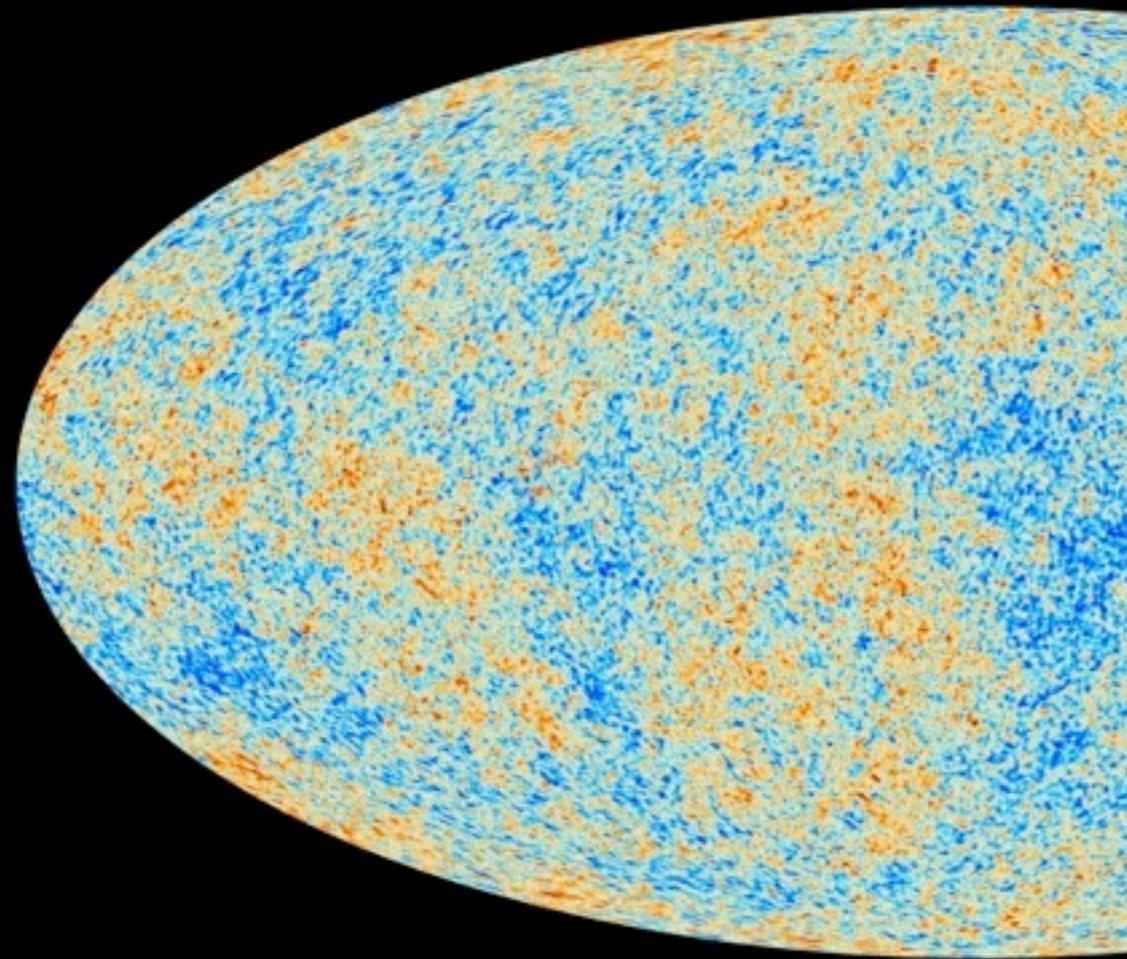


Neue Instrumente - Genauere Ergebnisse

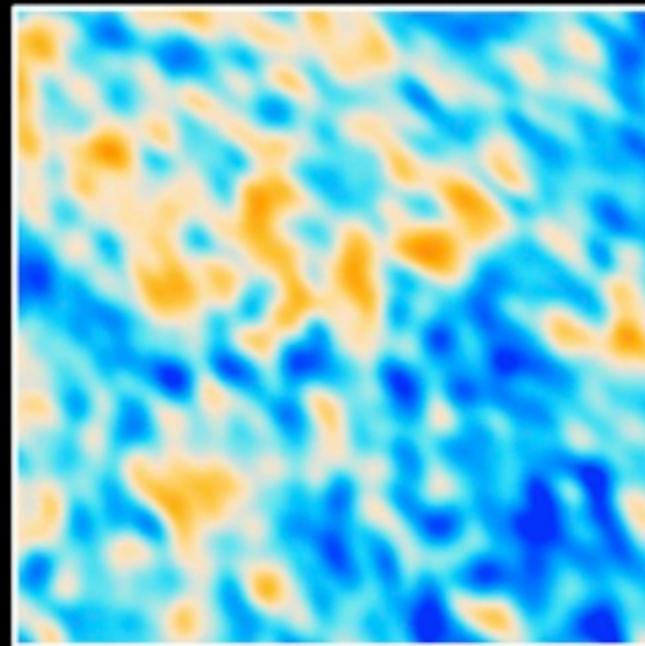
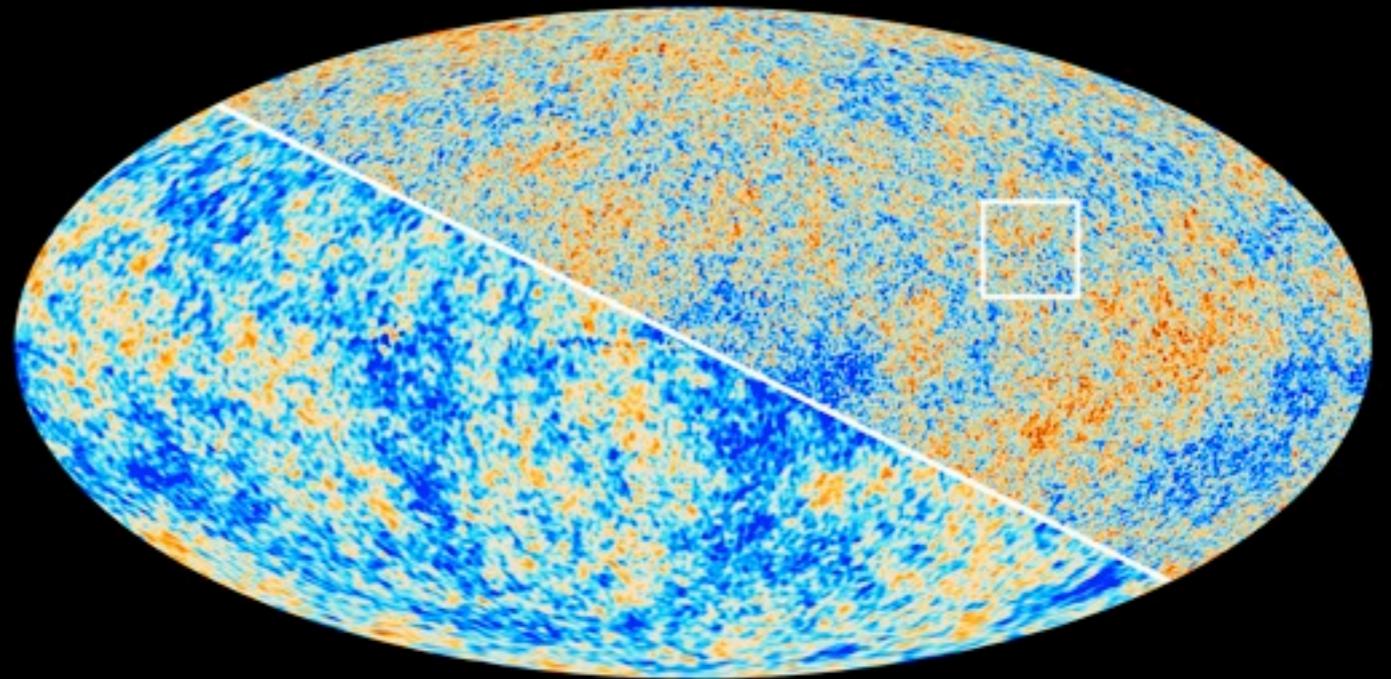


- Planck-Satellit (ESA) - Erste Ergebnisse vor wenigen Wochen

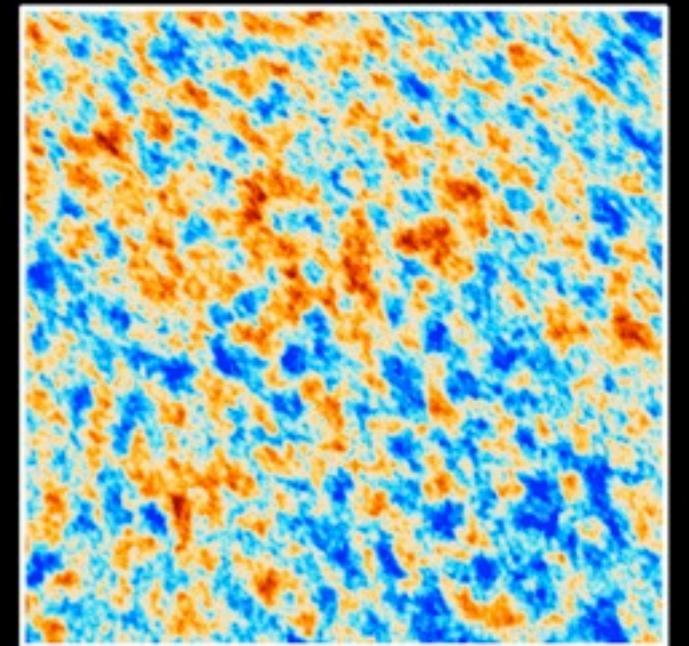
Neue Instrumente - Genauere Ergebnisse



The Cosmic Microwave Background as seen by Planck and WMAP



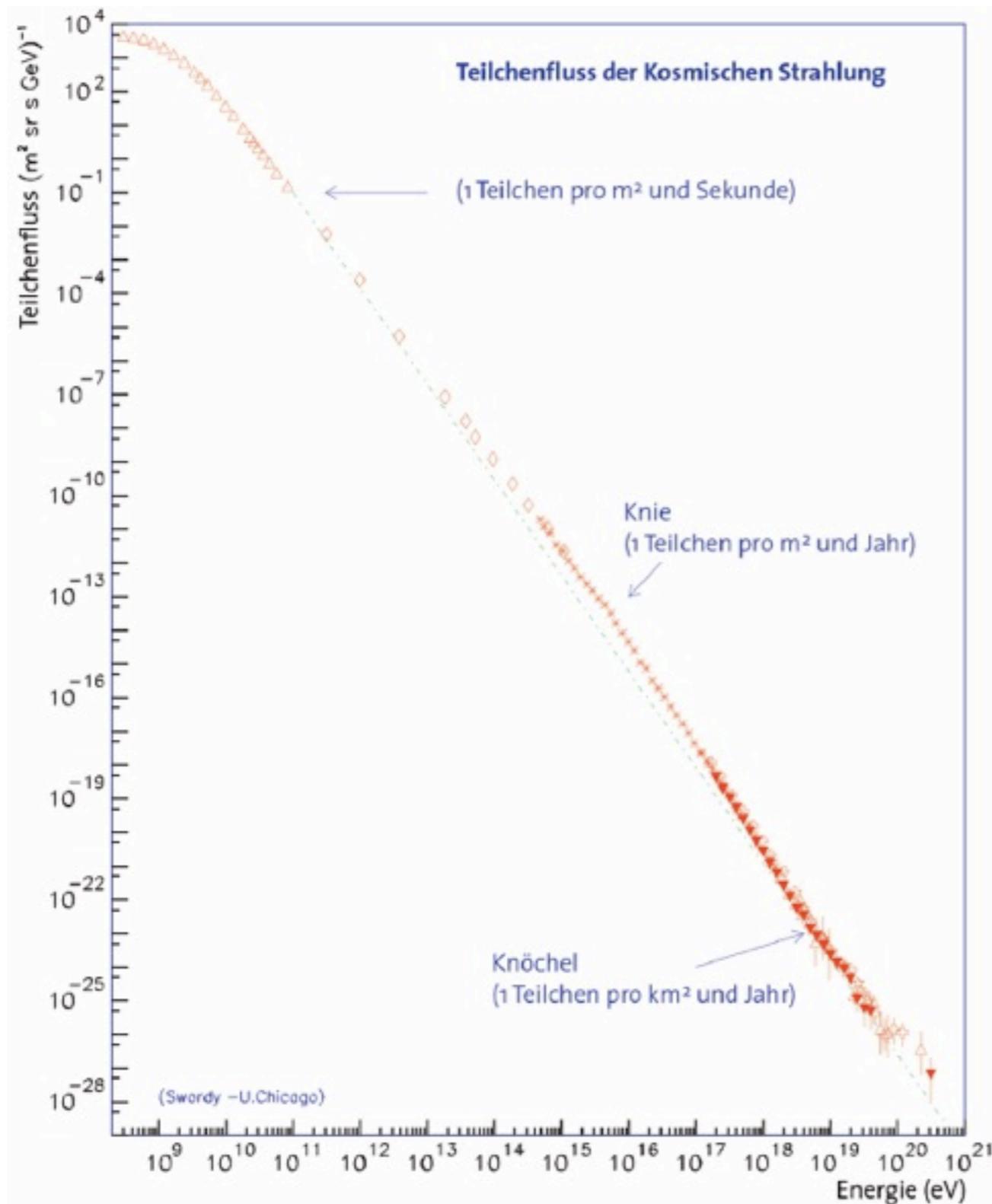
WMAP



Planck

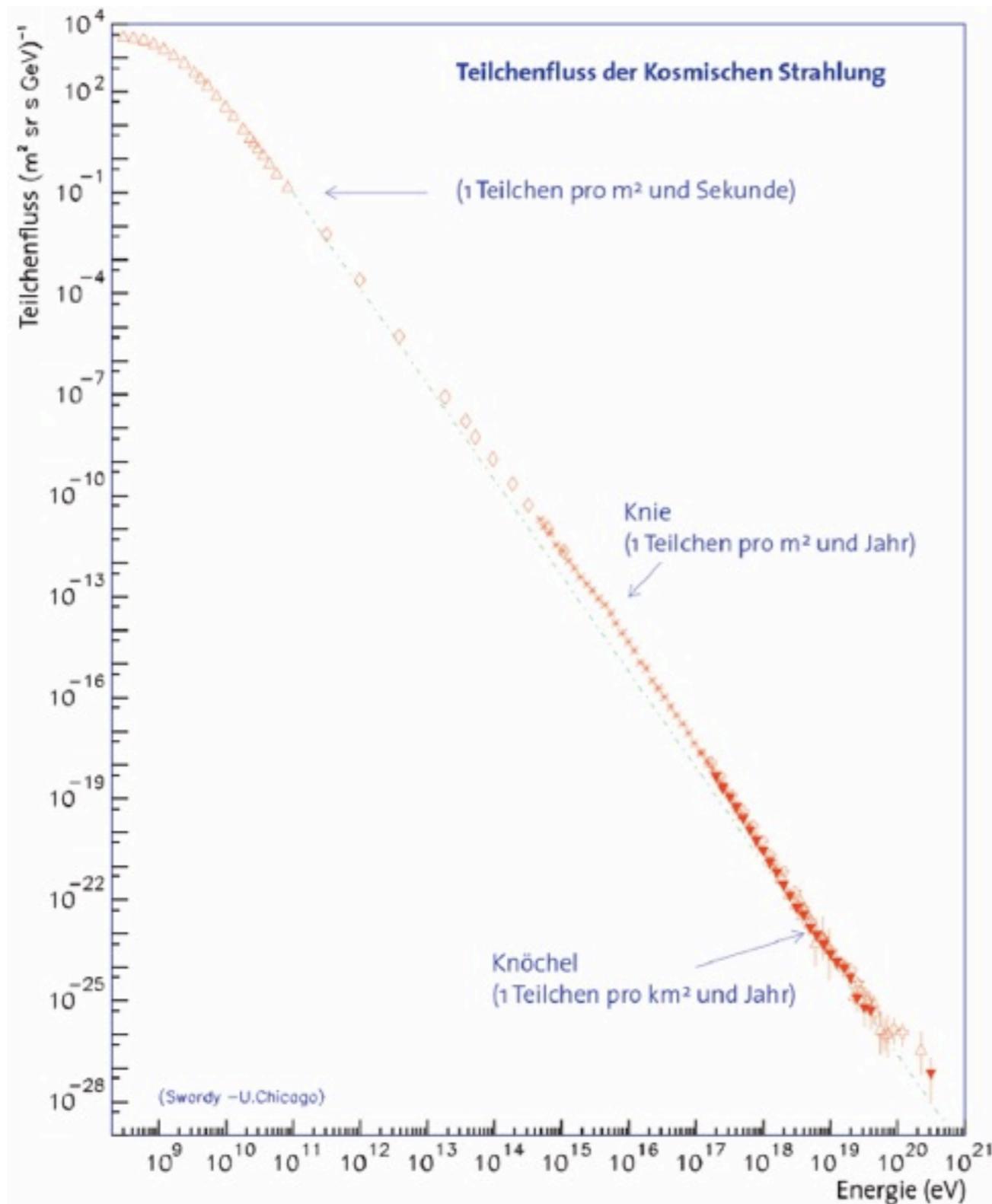
- Planck-Satellit (ESA) - Erste Ergebnisse vor wenigen Wochen

Kosmische Strahlung: Energiespektrum



- Teilchenfluss gehorcht einem Power-law-Spektrum:
 - $\sim E^{-2.7}$ bis $E \sim 10^{15}$ eV
 - $\sim E^{-3}$ darüber
- ▶ Übergang von galaktischen zu extragalaktischen Quellen?

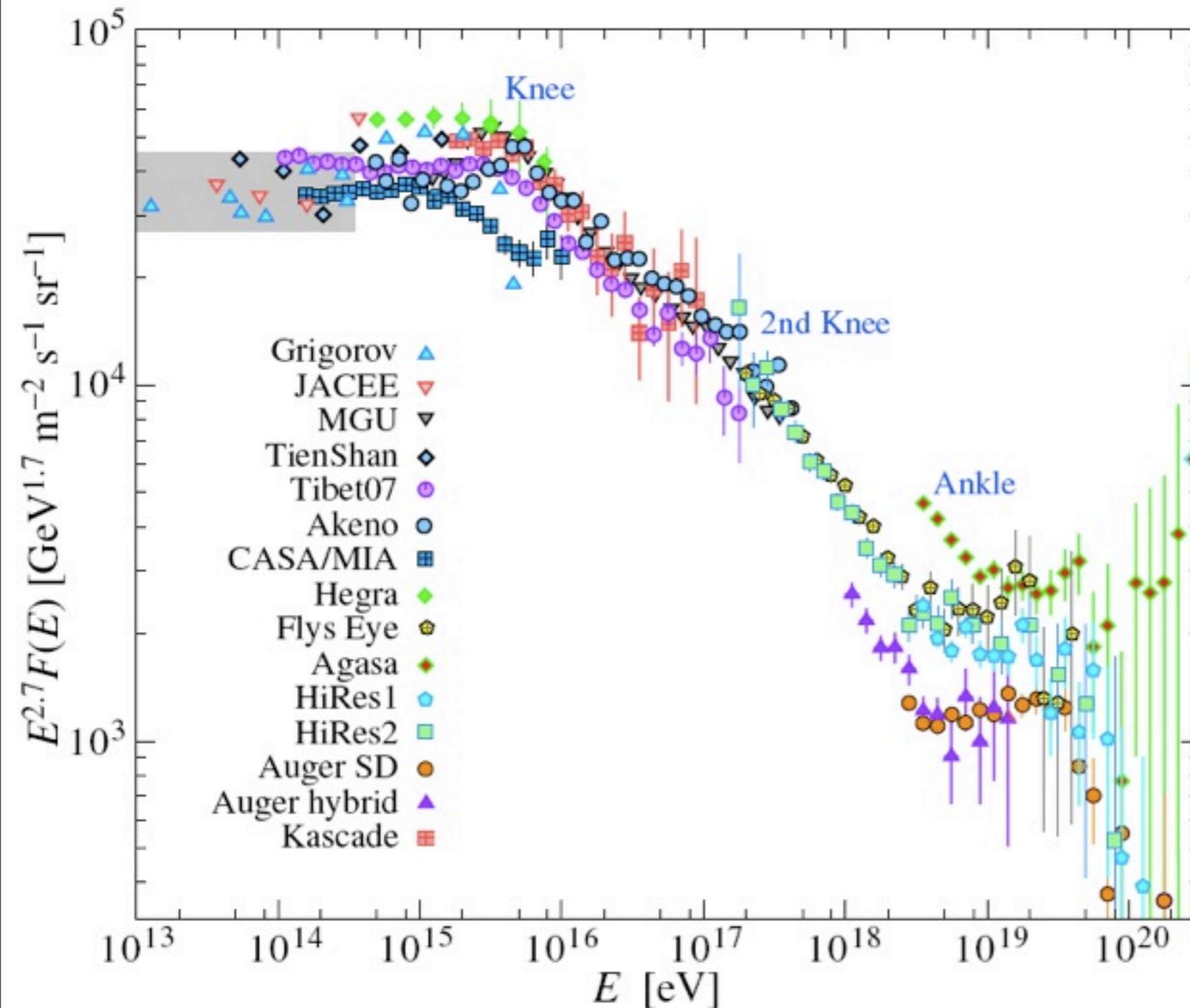
Kosmische Strahlung: Energiespektrum



- Teilchenfluss gehorcht einem Power-law-Spektrum:
 - $\sim E^{-2.7}$ bis $E \sim 10^{15}$ eV
 - $\sim E^{-3}$ darüber
- ▶ Übergang von galaktischen zu extragalaktischen Quellen?

Wie werden die Teilchen beschleunigt?
Welche Objekte sind dafür verantwortlich?

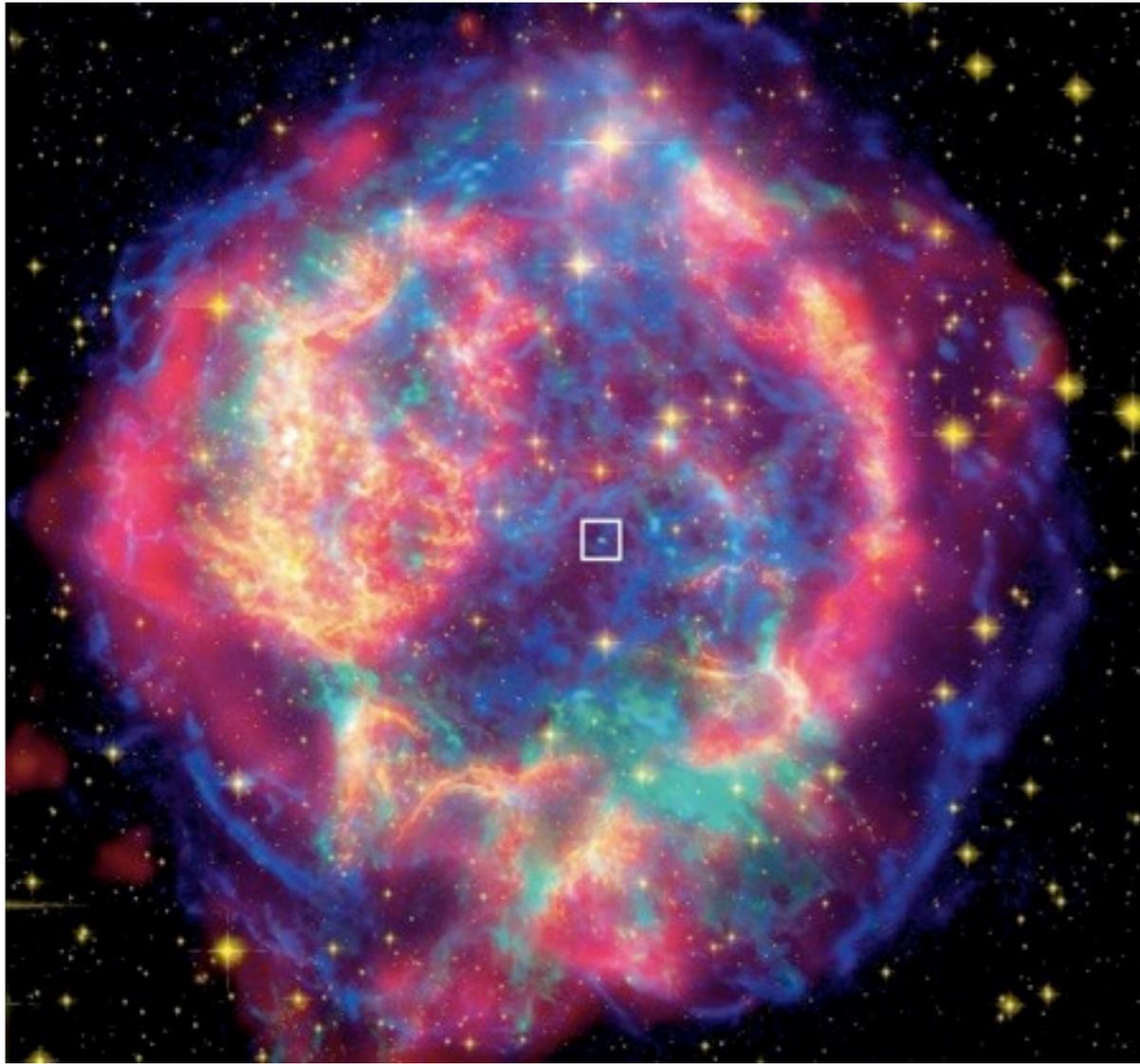
Kosmische Strahlung: Die höchsten Energien



- Große Unsicherheit bei den höchsten Energien
- GZK (Greisen-Zatsepin-Kuzmin) cutoff:
 - Abbruch bei ca 10^{20} eV durch Wechselwirkung mit den Photonen des CMB
 - dadurch: Reichweite auf ca. 50 Mpc (ca. 160 Mly) beschränkt

Wo kommen die höchst-energetischen Teilchen her?

Kosmische Beschleuniger

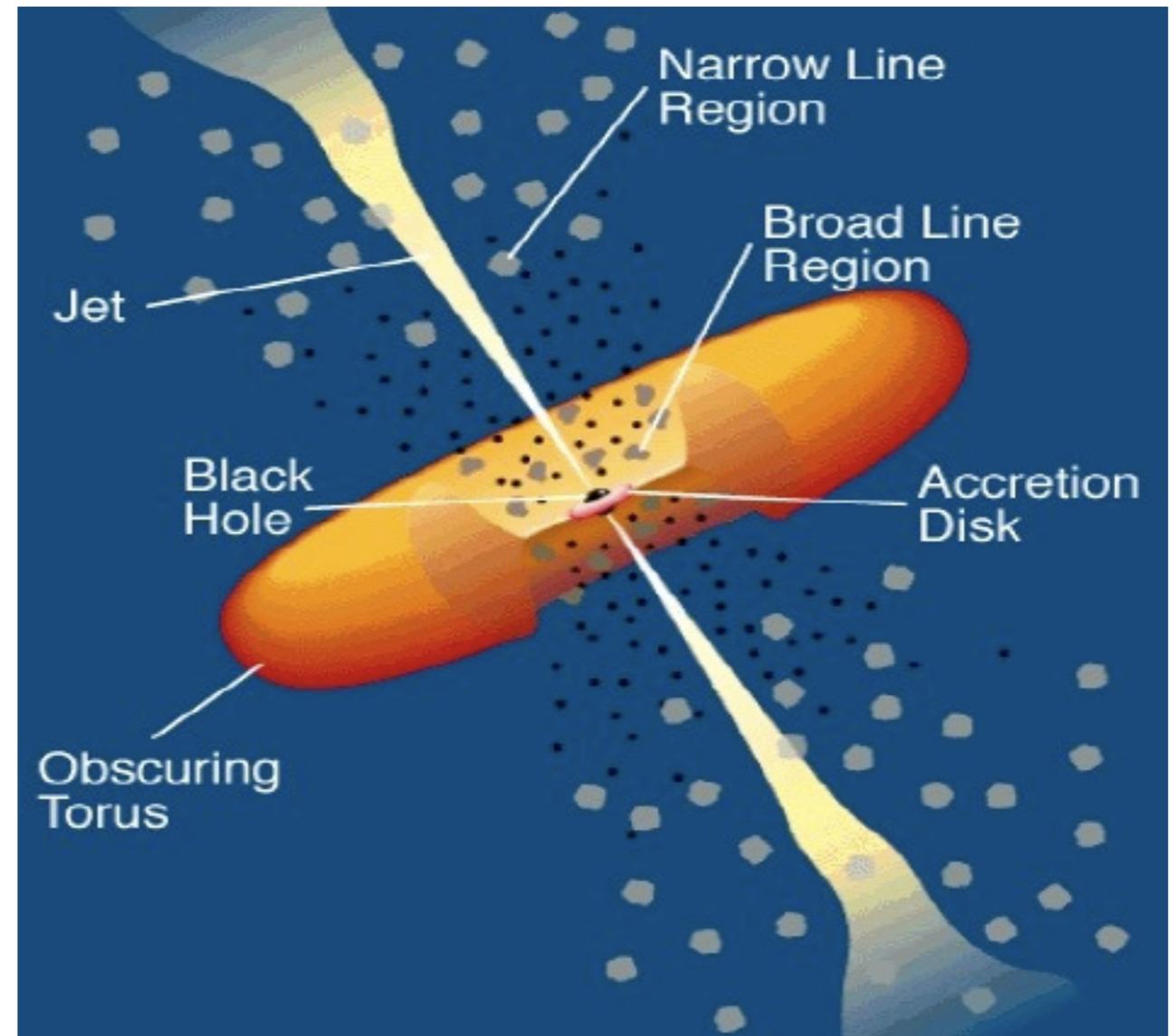
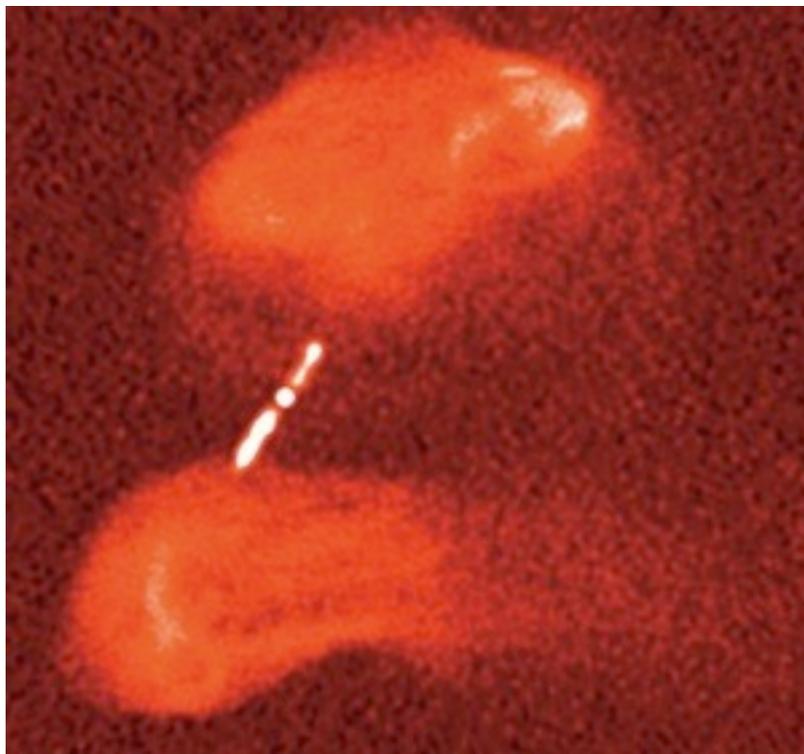
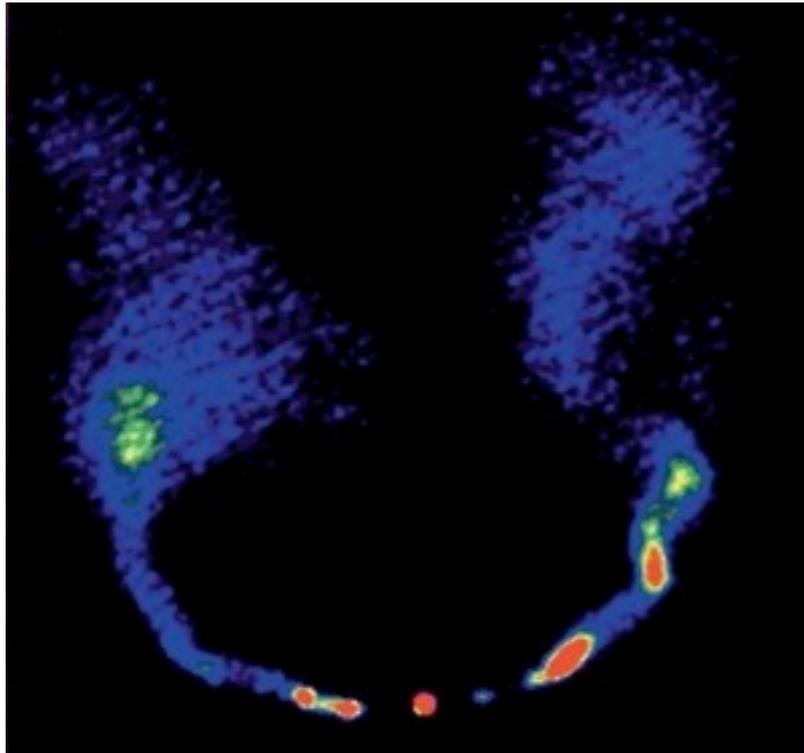


“Astroteilchenphysik in Deutschland”, <http://www.astroteilchenphysik.de/>, und darin angegebene Referenzen

- Supernova-Explosion: Beschleunigung in Schockwellen
- Pulsare: Beschleunigung durch extrem starke Magnetfelder

► Galaktische Quellen für hochenergetische Teilchen

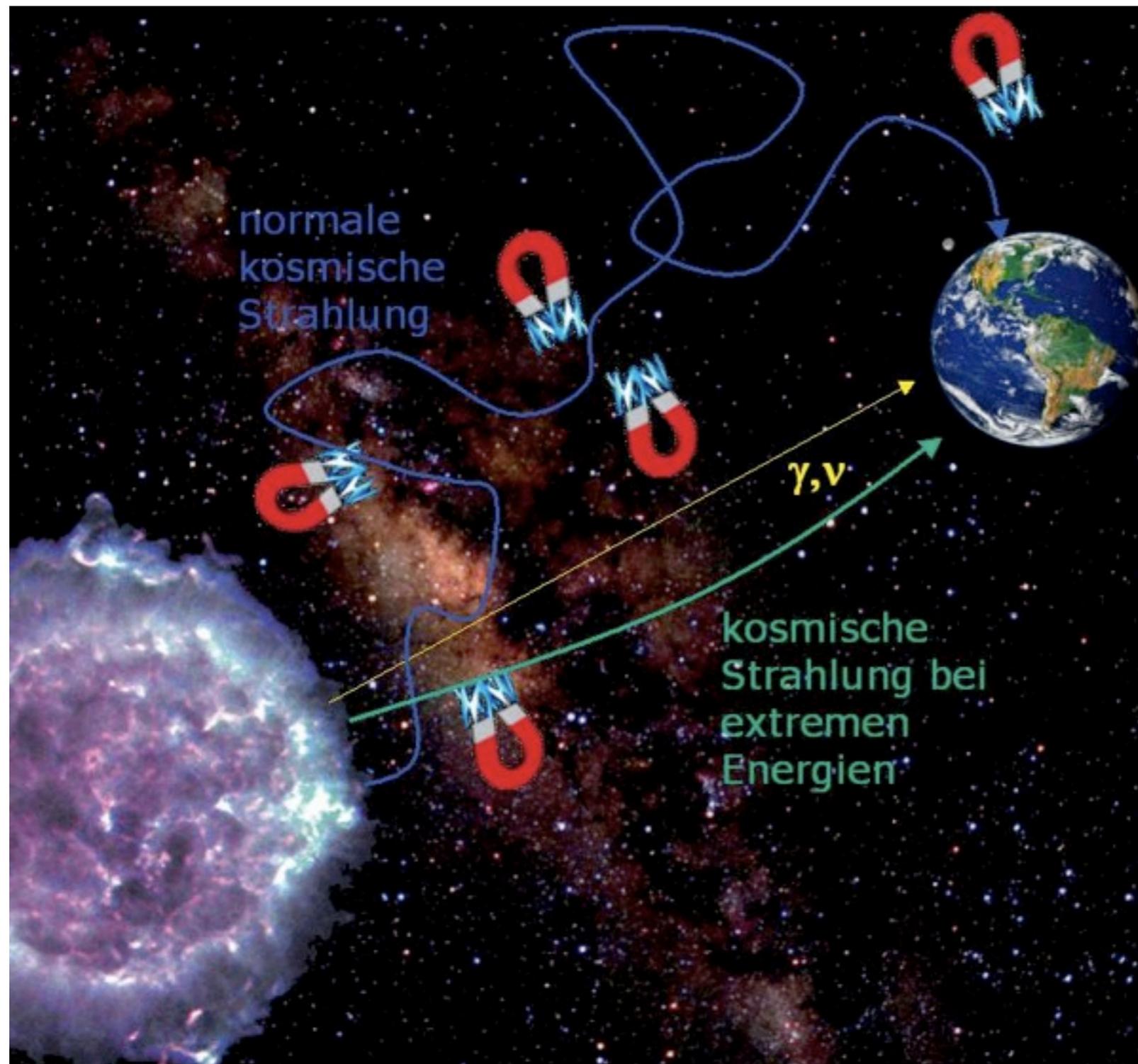
Kosmische Beschleuniger



- Kerne Aktiver Galaxien (AGN)
- ▶ Erste Hinweise, dass die höchst-energetischsten Teilchen aus nahen AGNs kommen

“Astroteilchenphysik in Deutschland”, <http://www.astroteilchenphysik.de/>, und darin angegebene Referenzen

Der Weg zur Erde

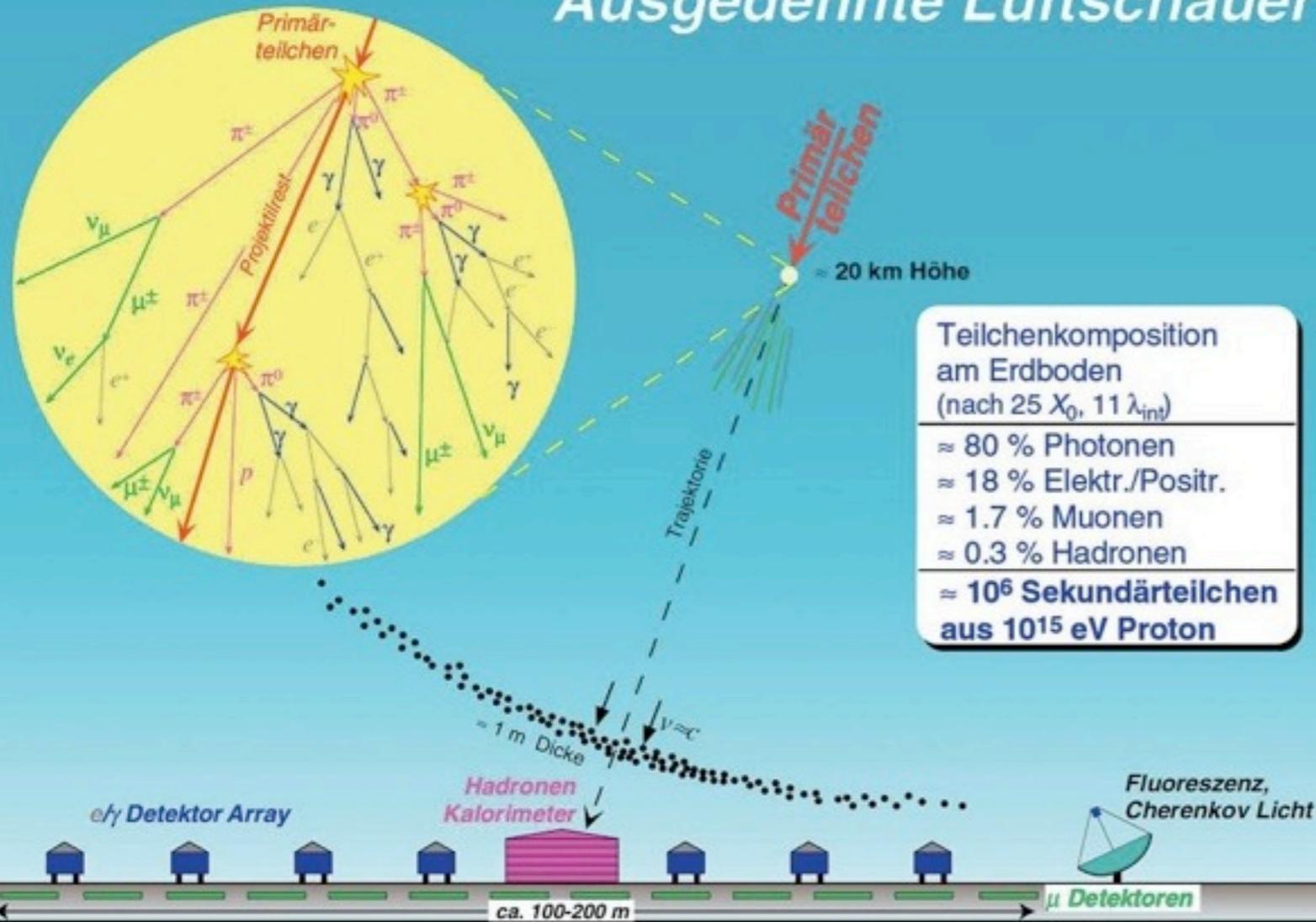


- starke Ablenkung geladener Teilchen durch kosmische Magnetfelder
- ▶ neutrale Teilchen und höchste Energien können etwas über ihre Herkunft sagen
 - ▶ Hochenergetische Photonen und geladene Teilchen haben eine begrenzte Reichweite!

“Astroteilchenphysik in Deutschland”, <http://www.astroteilchenphysik.de/>, und darin angegebene Referenzen

Kosmische Strahlung auf der Erde: Luftschauer

Ausgedehnte Luftschauer

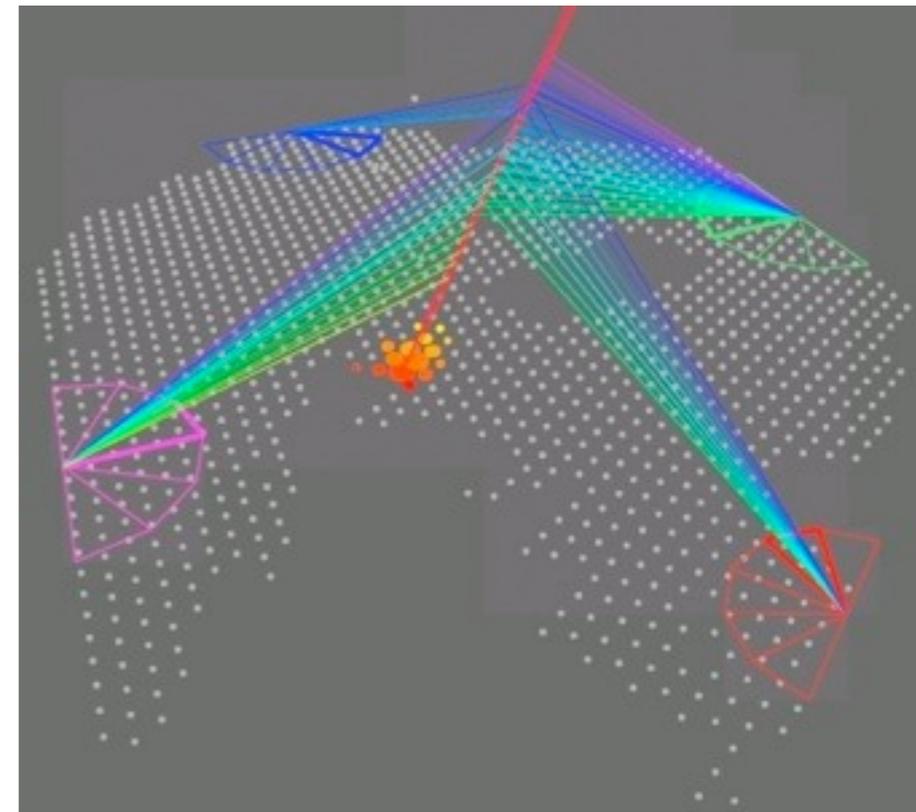
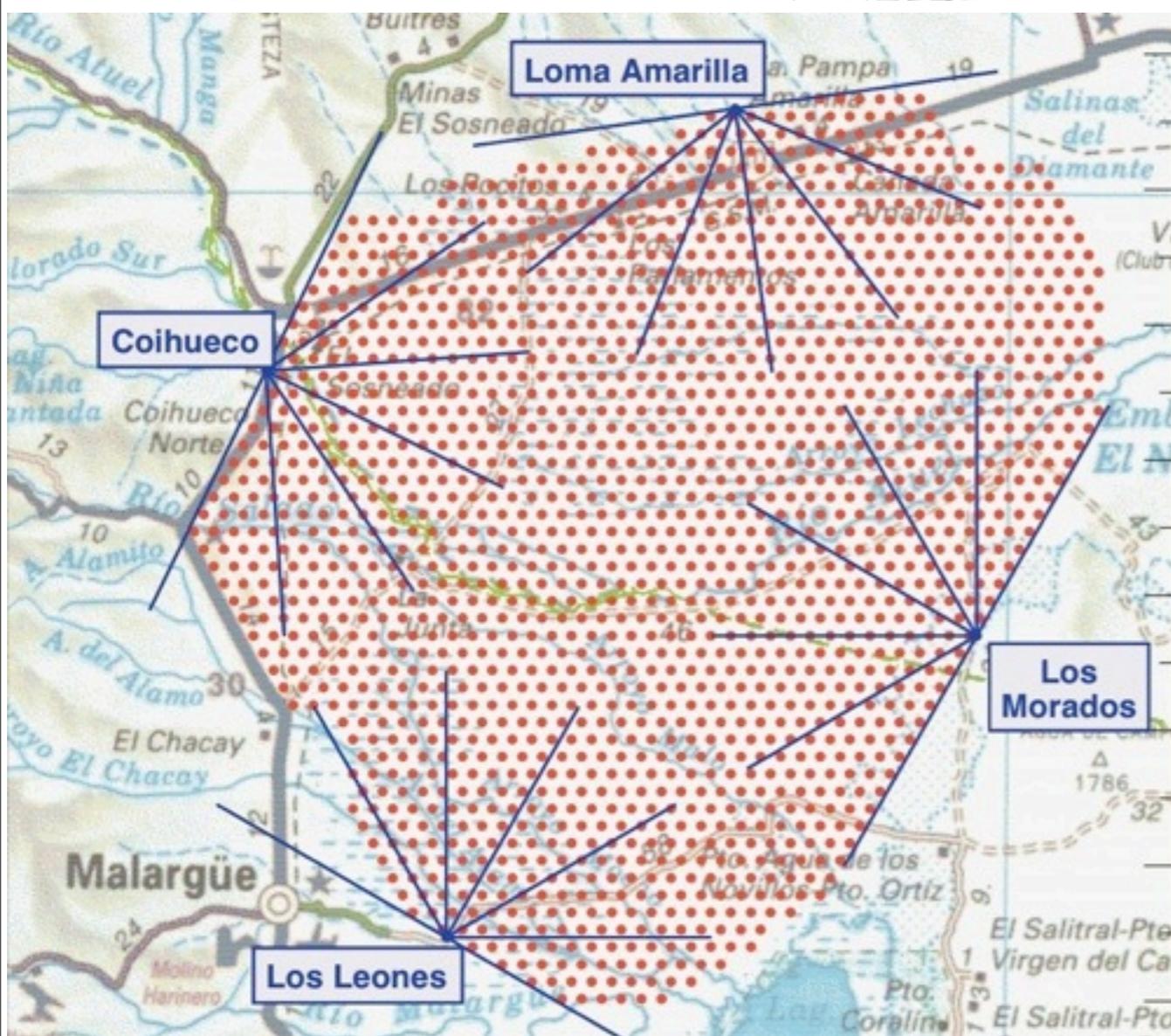


- Hochenergetische Teilchen erzeugen einen ausgedehnten Luftschauer
- zahlreiche Kernreaktionen mit Atomkernen in der Atmosphäre
- Energiemessung durch Nutzung der Atmosphäre als Kalorimeter: Nachweis von geladenen Teilchen und Photonen, Fluoreszenz, Cherenkov-Licht

“Astroteilchen-Physik in Deutschland”, <http://www.astroteilchenphysik.de/>, und darin angegebene Referenzen

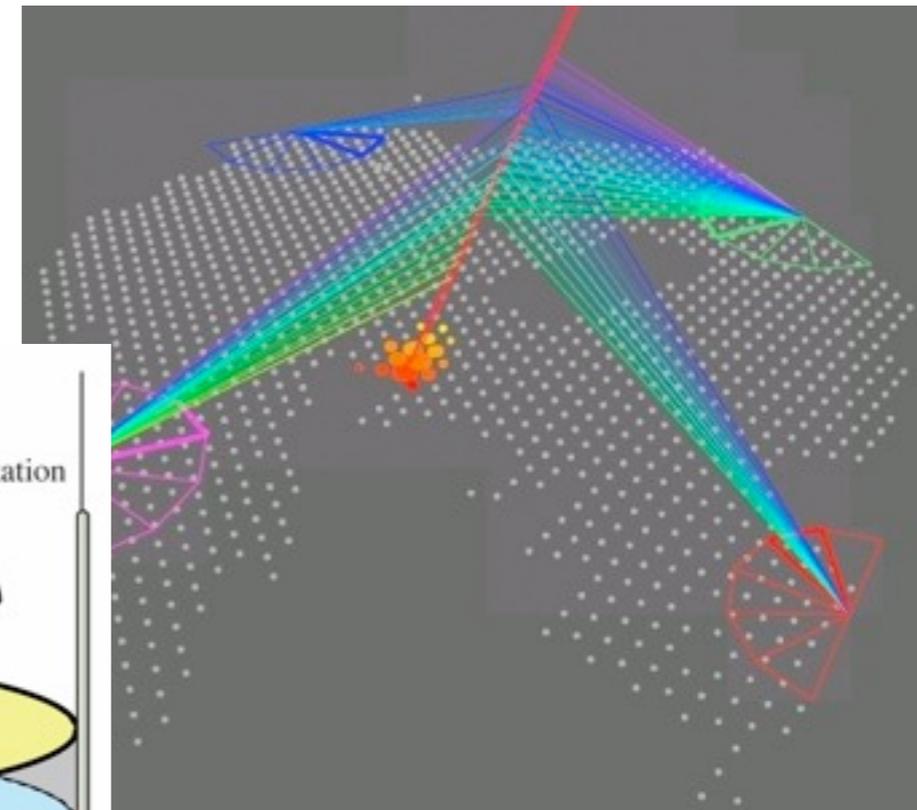
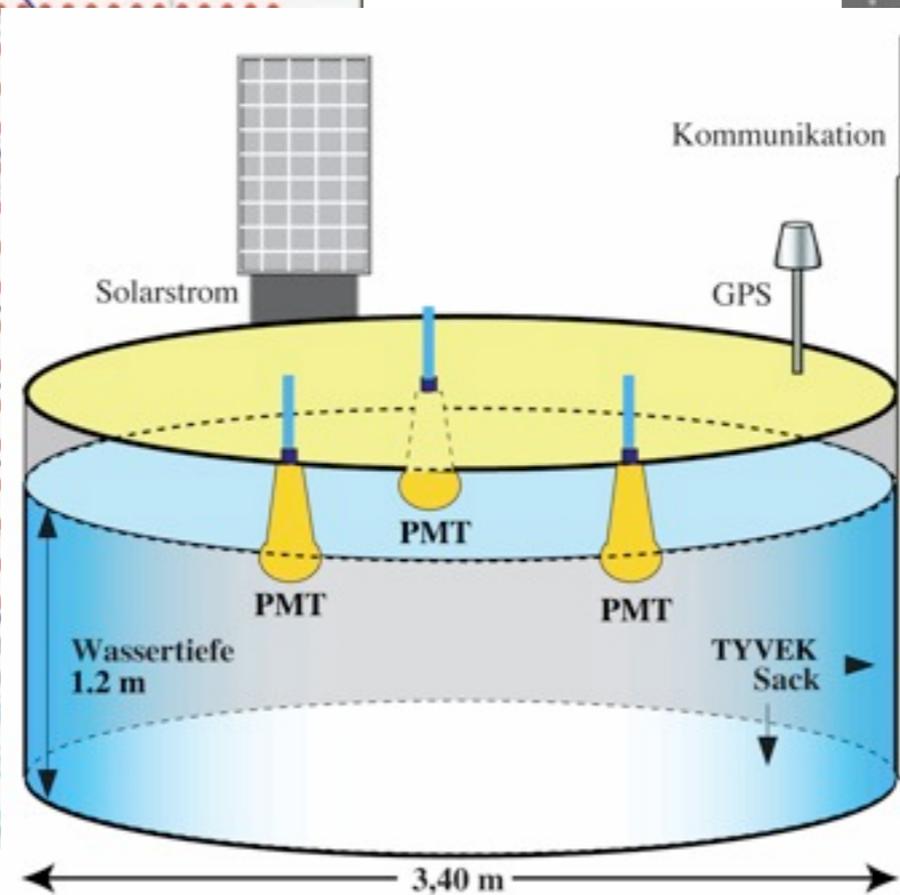
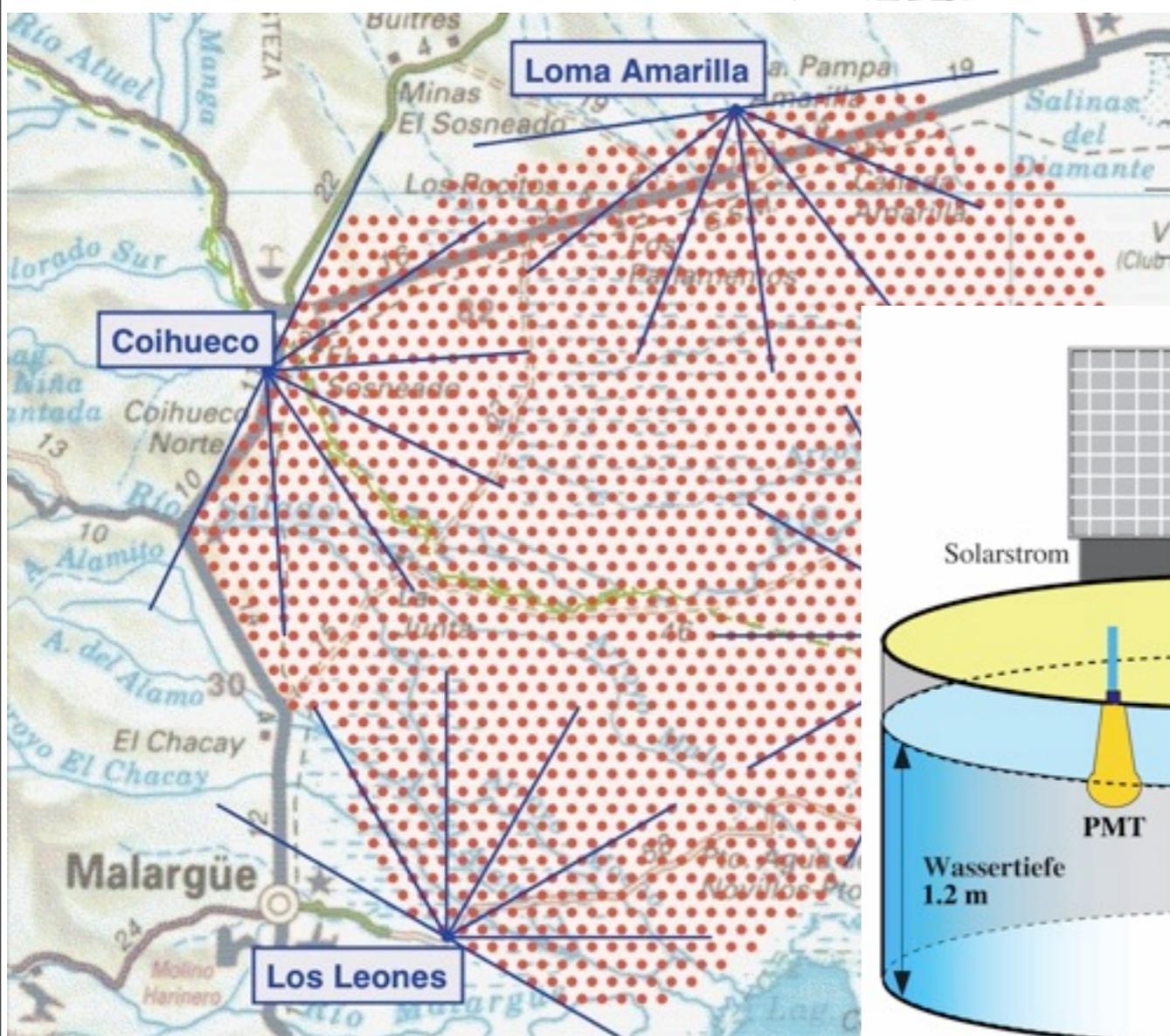
(KASCADE - Experiment, Karlsruhe)

Detektor für höchste Energien: Auger Experiment



- 2 Detektor-Typen:
 - 1600 Schauer-Detektoren (Wasser-Cherenkov)
 - 24 Fluoreszenz-Teleskope
 - Gesamtfläche: 3000 km² (~10 x München)

Detektor für höchste Energien: Auger Experiment



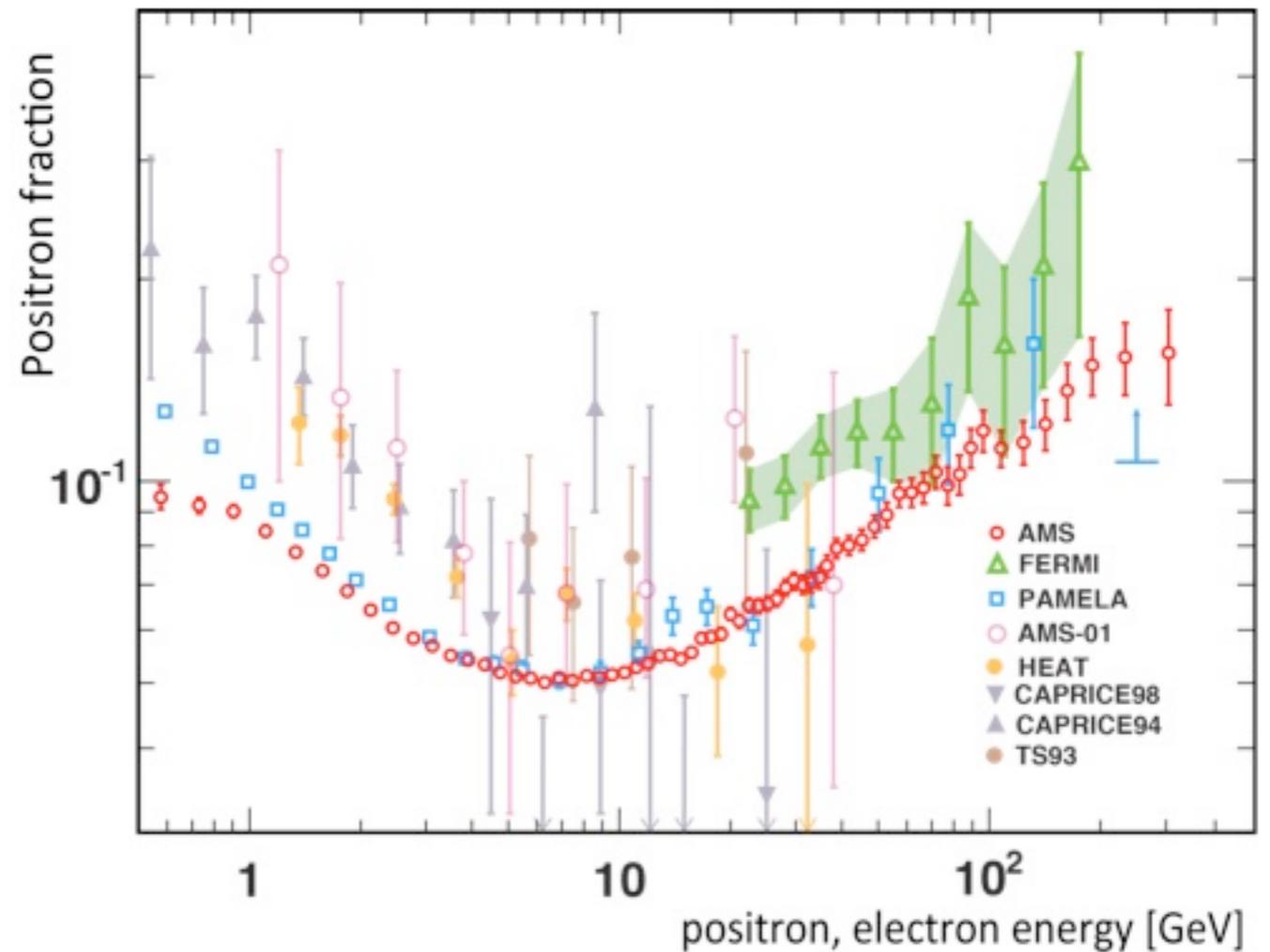
- 2 Detektor-Typen:
 - 1600 Schauer-Detektoren (Wasser-Cherenkov)
 - 24 Fluoreszenz-Teleskope
 - Gesamtfläche: 3000 km² (~10 x München)

Spektakuläre Experimente im All - AMS



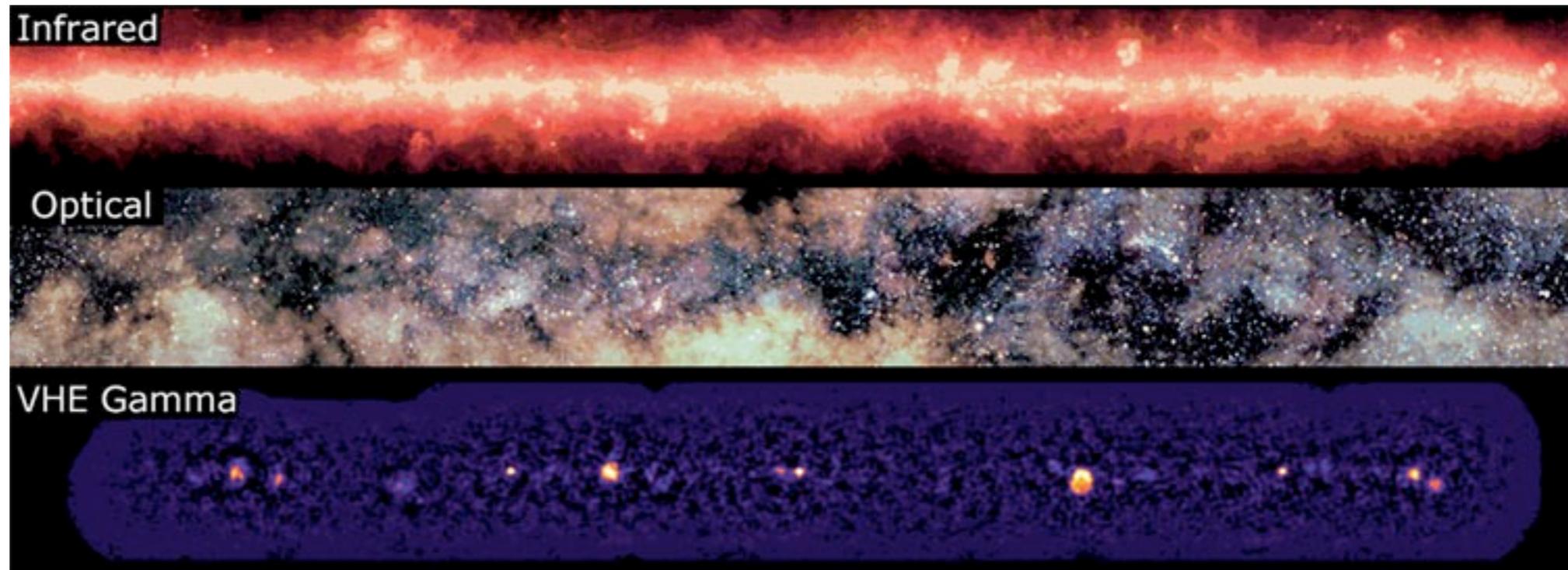
- Ein kompletter Teilchendetektor auf der ISS

- Interessante erste Ergebnisse vor knapp zwei Wochen: Zu viele Positronen!
- Astrophysikalisches Phänomen?
- Neue Physik - Dunkle Materie?



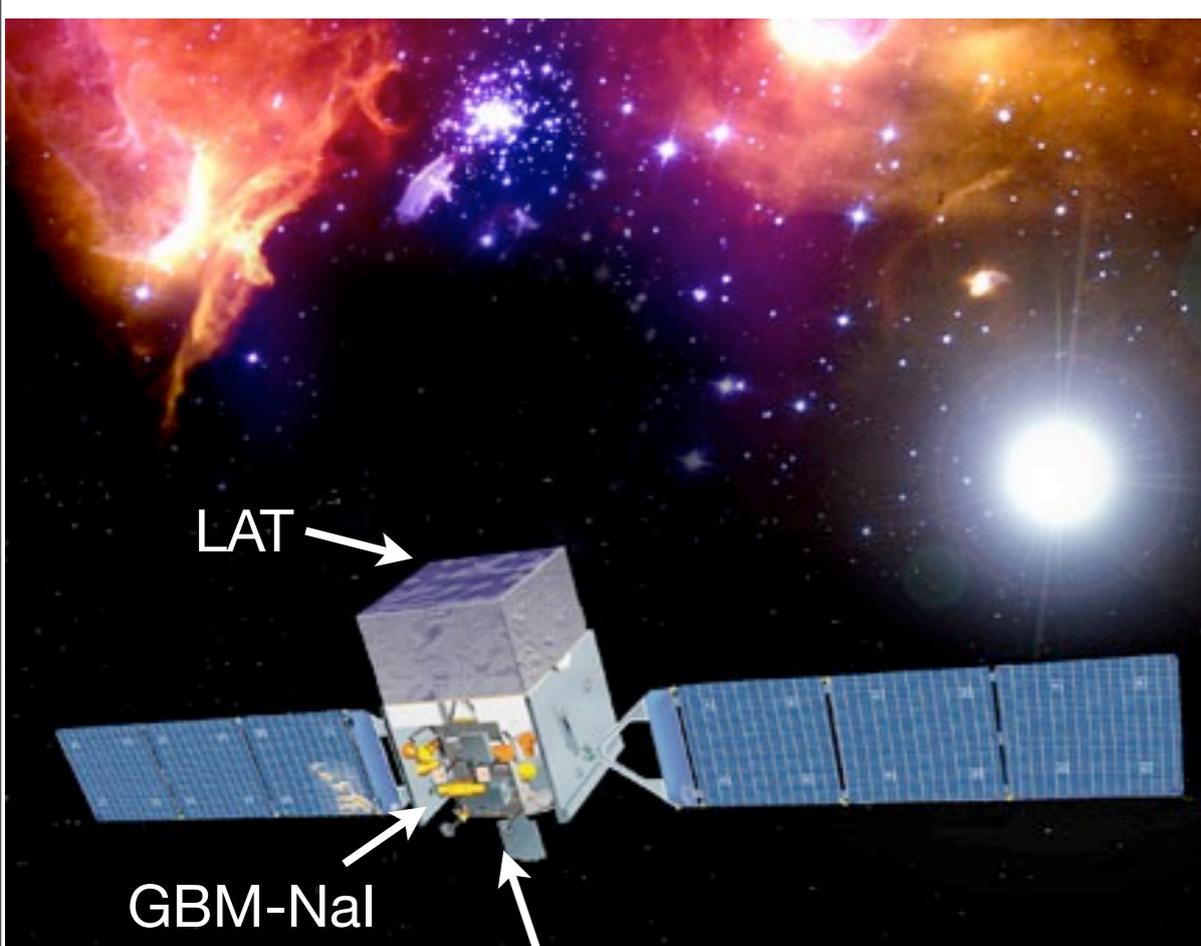
Neutrale kosmische Strahlung

Photonen aus
der
Milchstrasse



- Photonen:
 - Zerfälle neutraler Pionen
 - Schwarze Löcher, AGNs, Supernova-Explosionen
 - Gamma-Ray-Bursts (GRB)
 - Pulsare
- Neutrinos
 - Supernova
 - Pion-Zerfall
 - Atmosphärische Neutrinos in Luftschauern

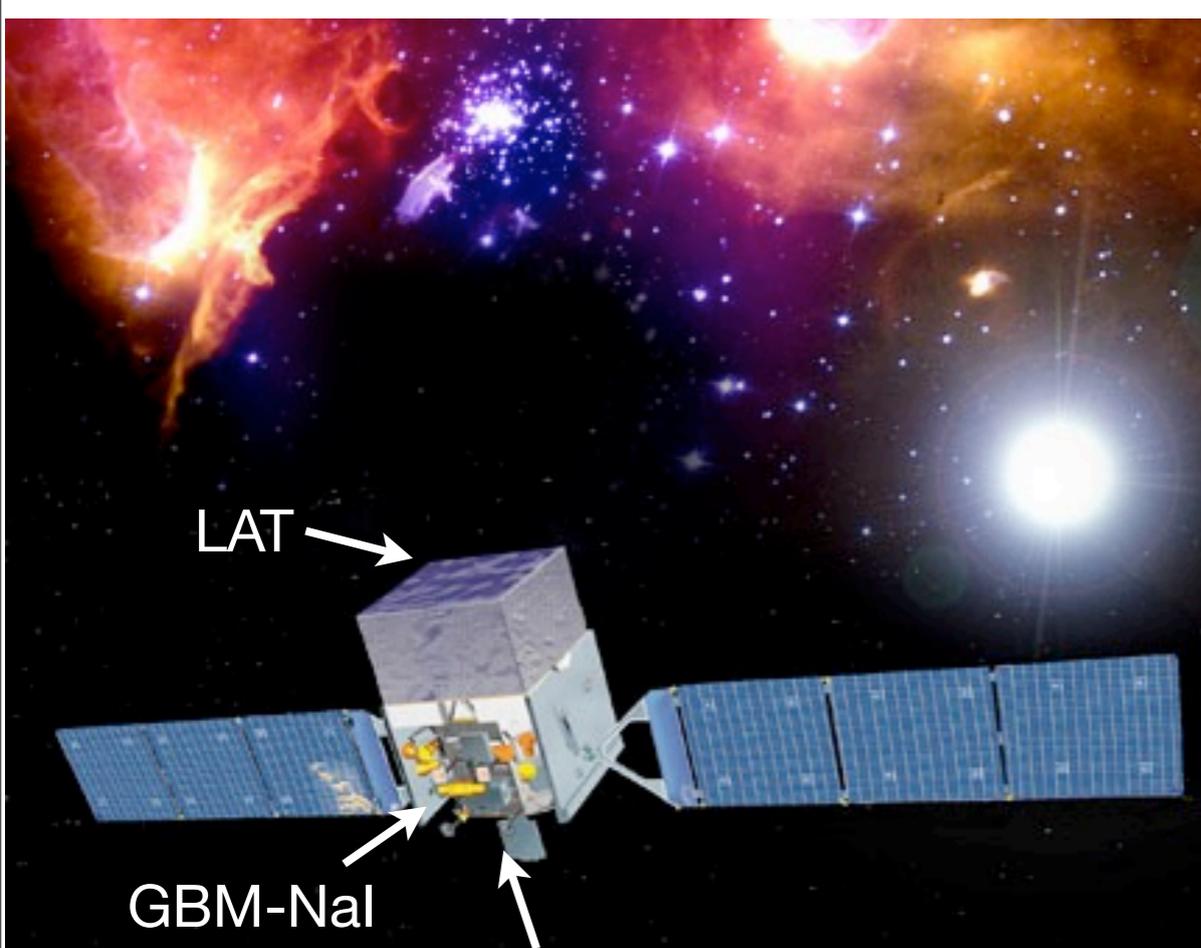
Gamma und Röntgen-Astronomie: Satelliten



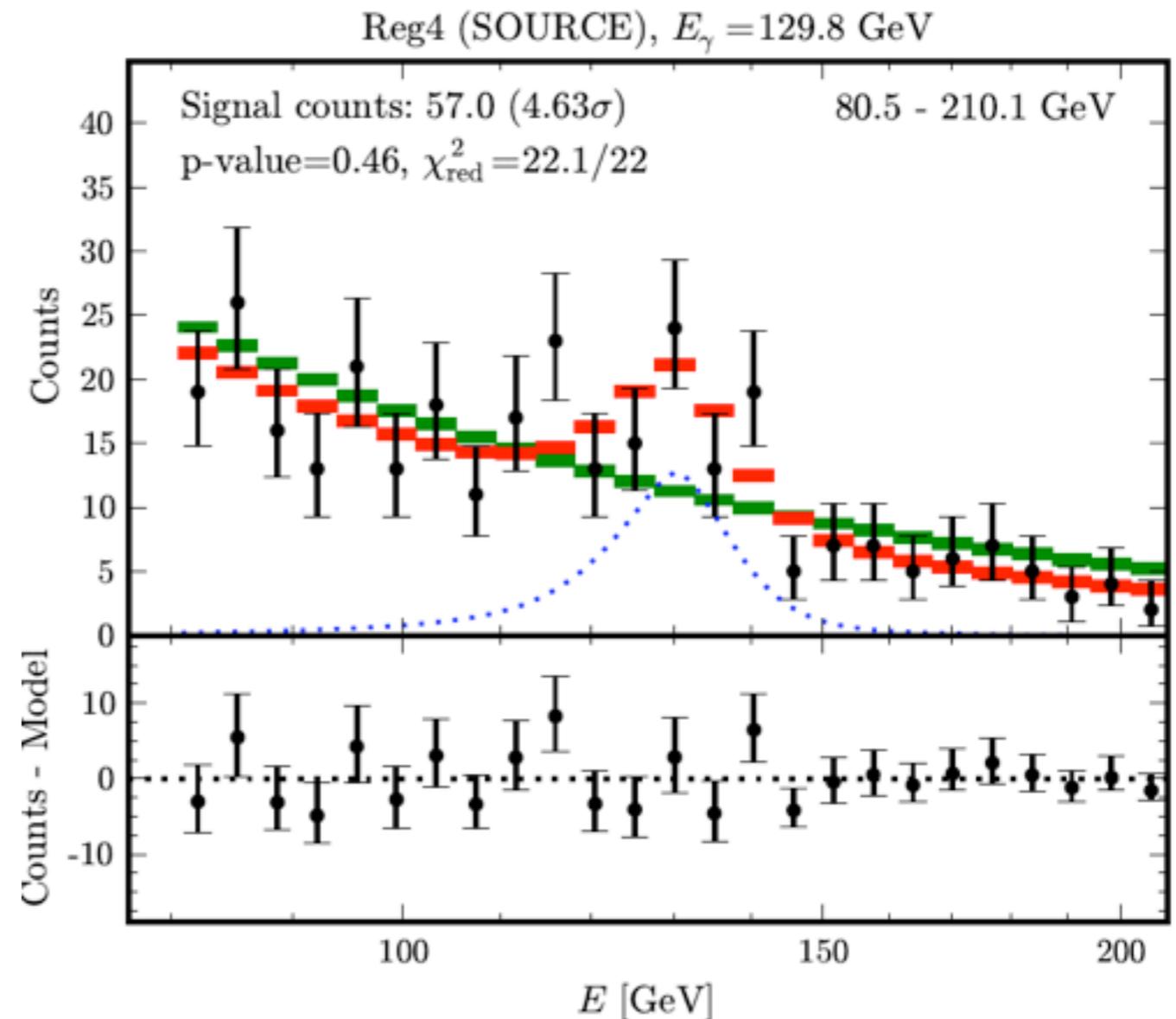
- FERMI - Datennahme seit August 2008
- Energiebereich: 10 keV bis 300 GeV
- Datenkatalog (γ - Spektren, Quellen) verfügbar



Gamma und Röntgen-Astronomie: Satelliten



- FERMI - Datennahme seit August 2008
- Energiebereich: 10 keV bis 300 GeV
- Datenkatalog (γ - Spektren, Quellen) verfügbar

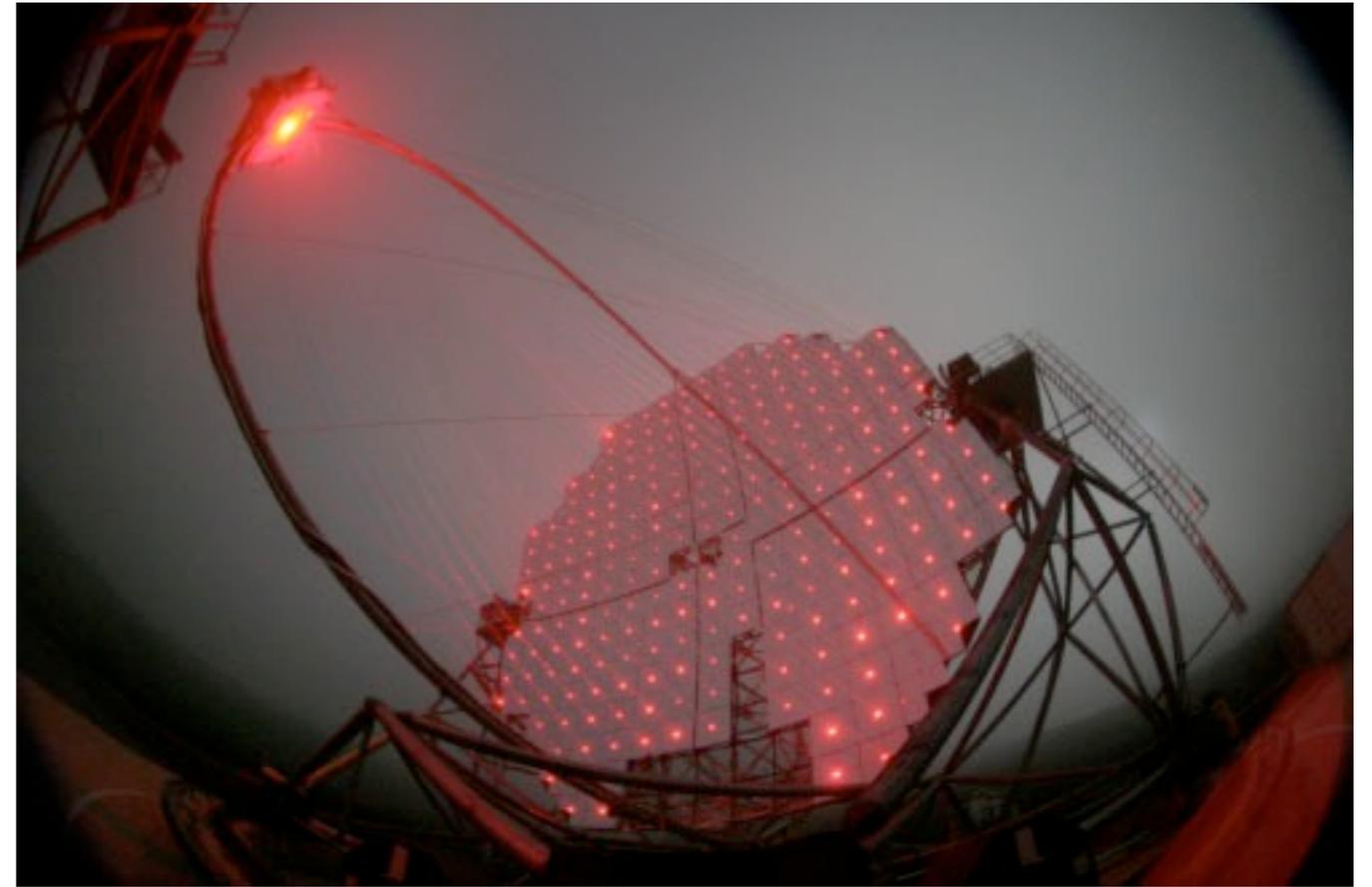


Hinweise auf eine γ -Linie bei 130 GeV
(C. Weniger, JCAP08(2012)007)

Mögliche Interpretation:
Annihilation Dunkler Materie

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

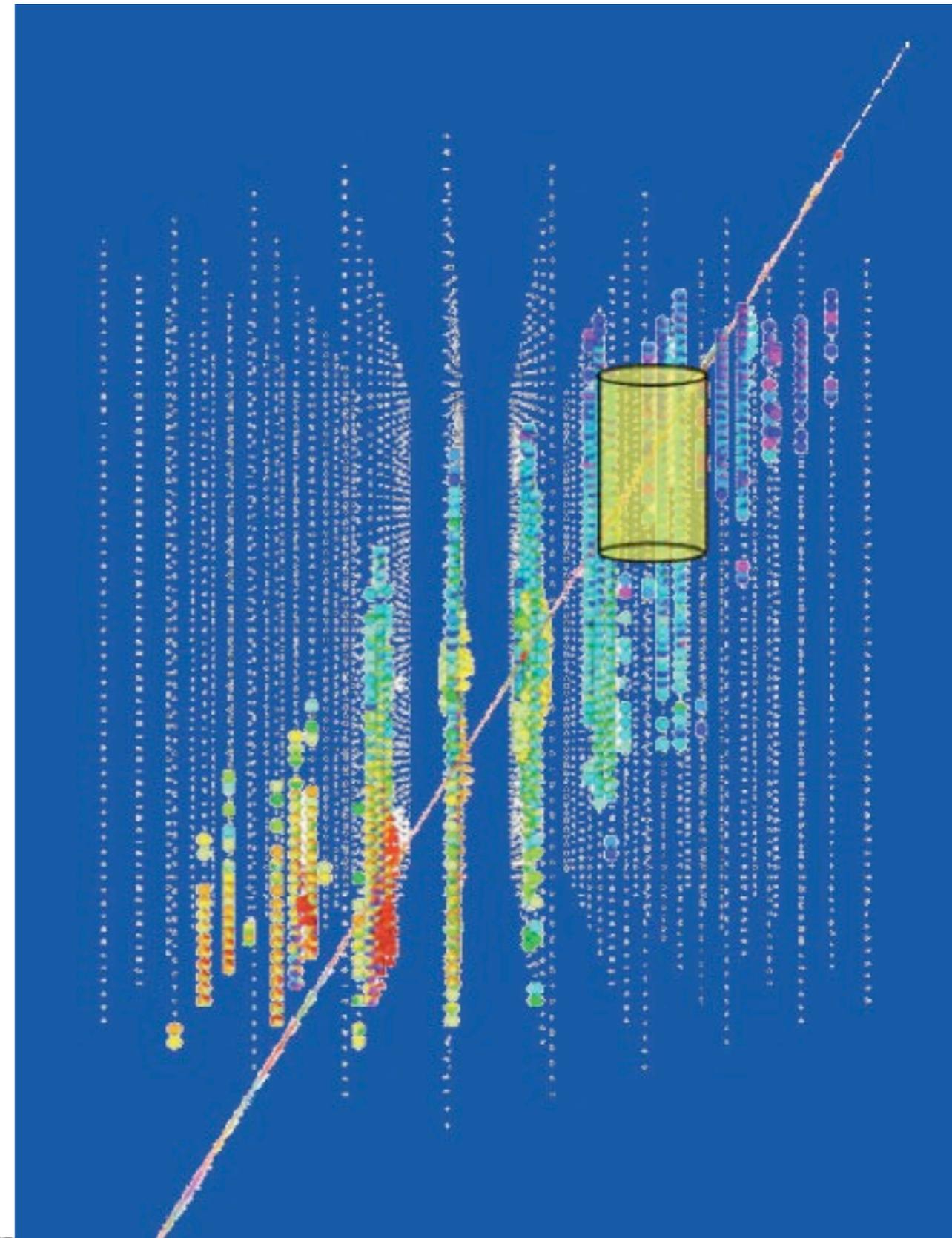
Detektor für kosmische Gammas: MAGIC



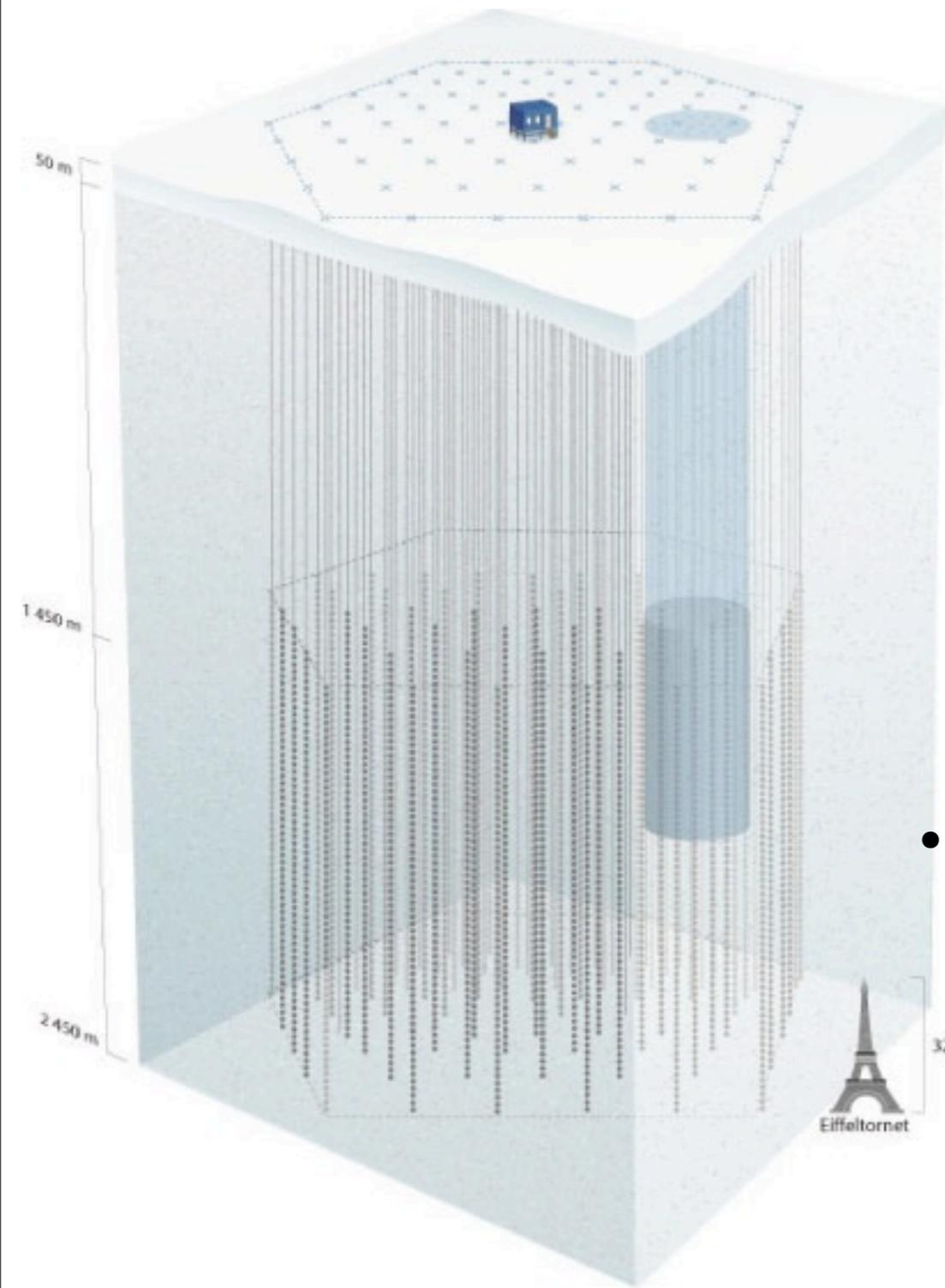
- Nachweis hochenergetischer Photonen über Luftschauder in der Atmosphäre
- Ein Teleskop mit hochauflösender Kamera, 234 m² Spiegelfläche
- Leichte Bauweise, schnelle Positionierung möglich

Hochenergetische Neutrinos

- Nachweis in unterirdischen Detektoren über Cherenkov-Licht von Muonen und Elektronen die in Charged-Current-Reaktionen entstehen: Beispiel: Muon in IceCube
- Atmosphärische Neutrinos:
 - Entstehen in Luftschauern durch Muon- und Pion-Zerfall
 - Nachweis von Neutrino-Oszillationen
- Kosmische Neutrinos
 - Supernovae
 - Andere kosmische Quellen?

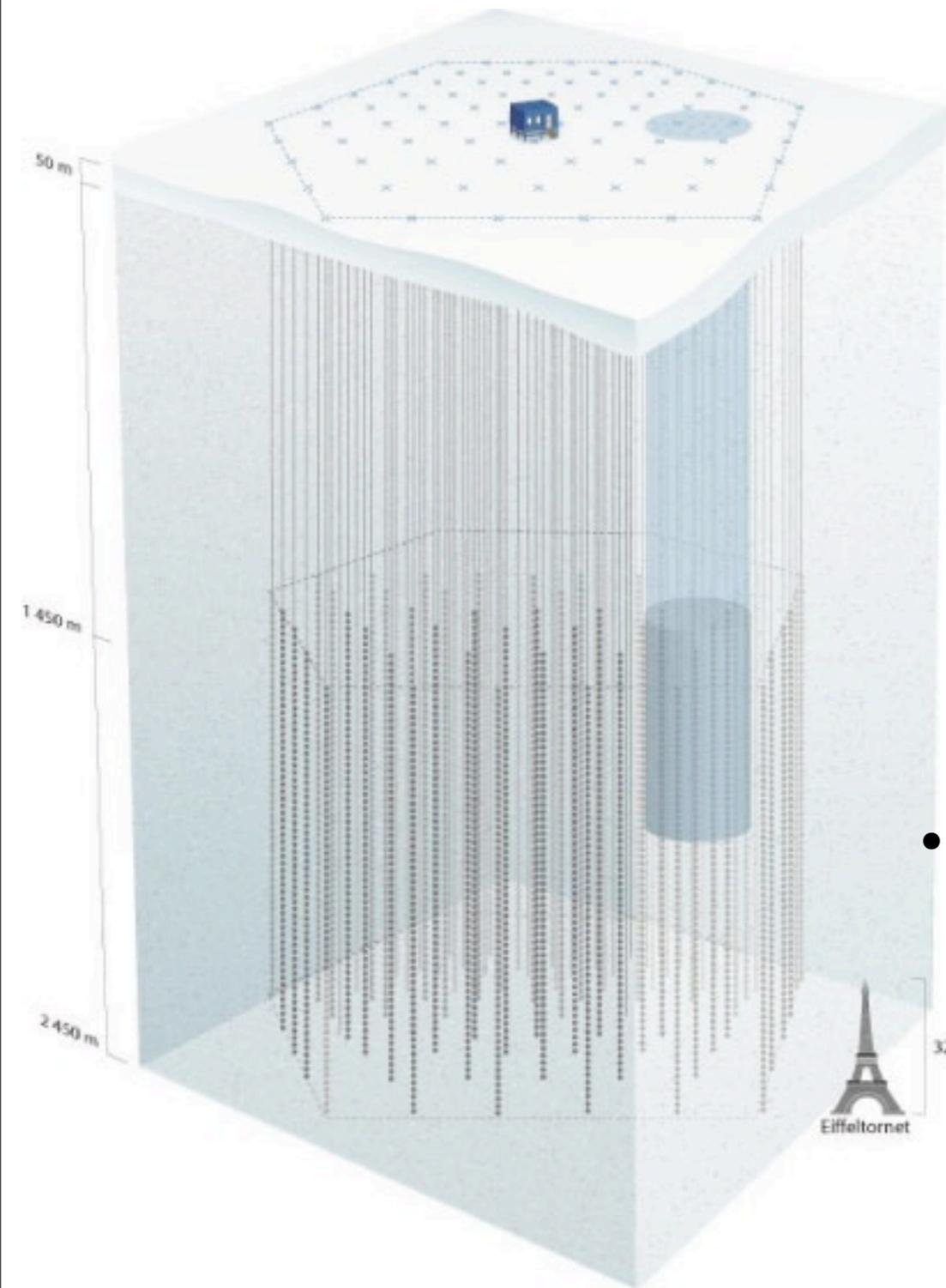


Neutrino-Astrophysik: IceCube



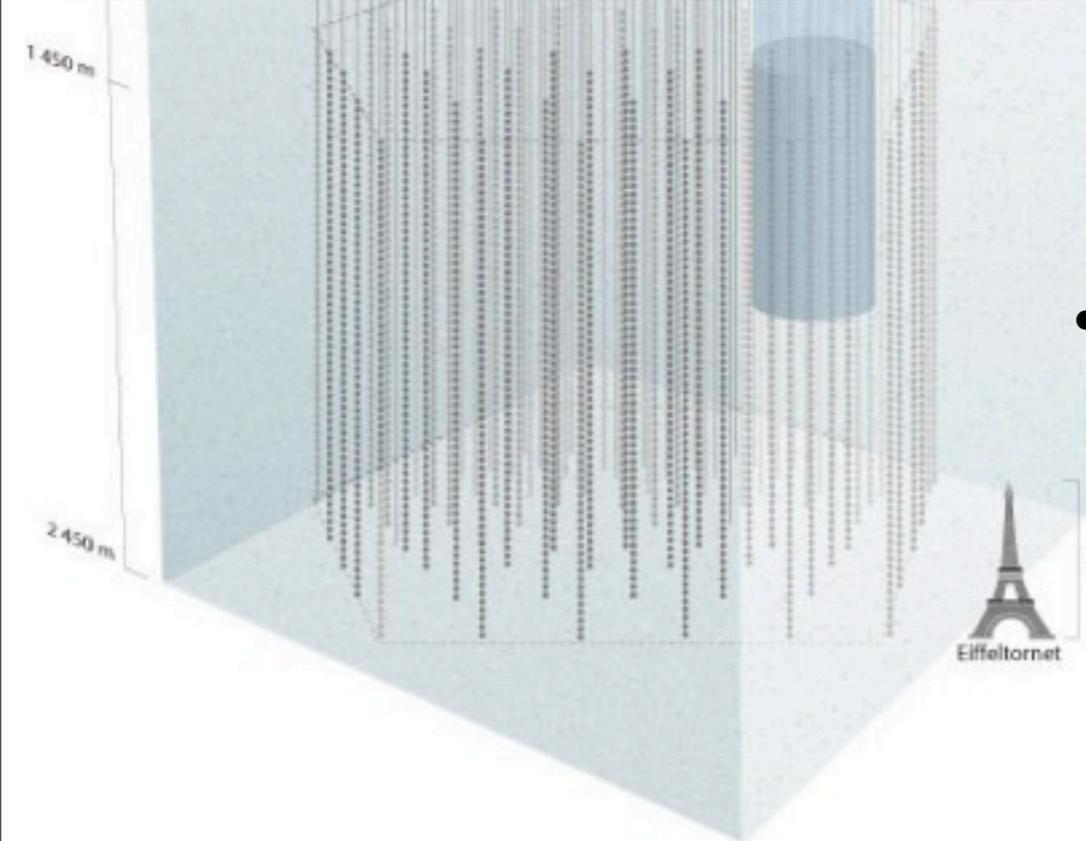
- 1 km³
instrumentiertes
Volumen im Eis am
Südpol

Neutrino-Astrophysik: IceCube

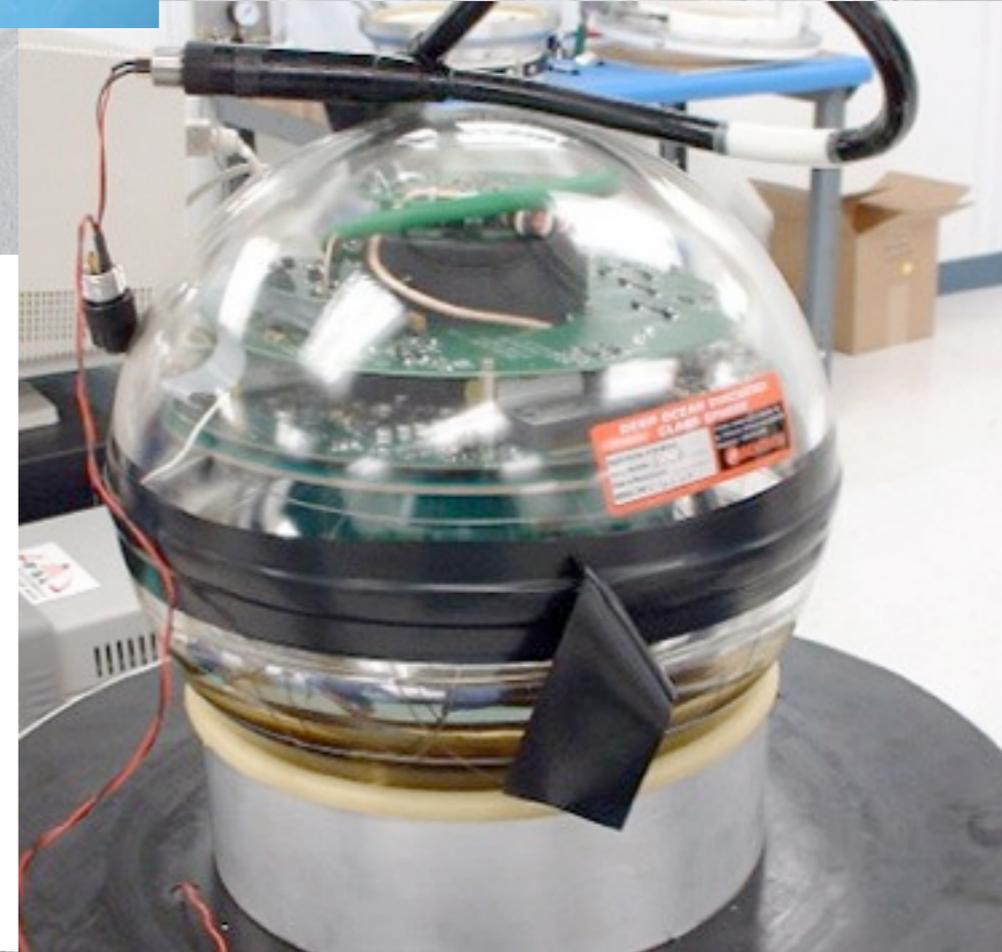


- 1 km³ instrumentiertes Volumen im Eis am Südpol

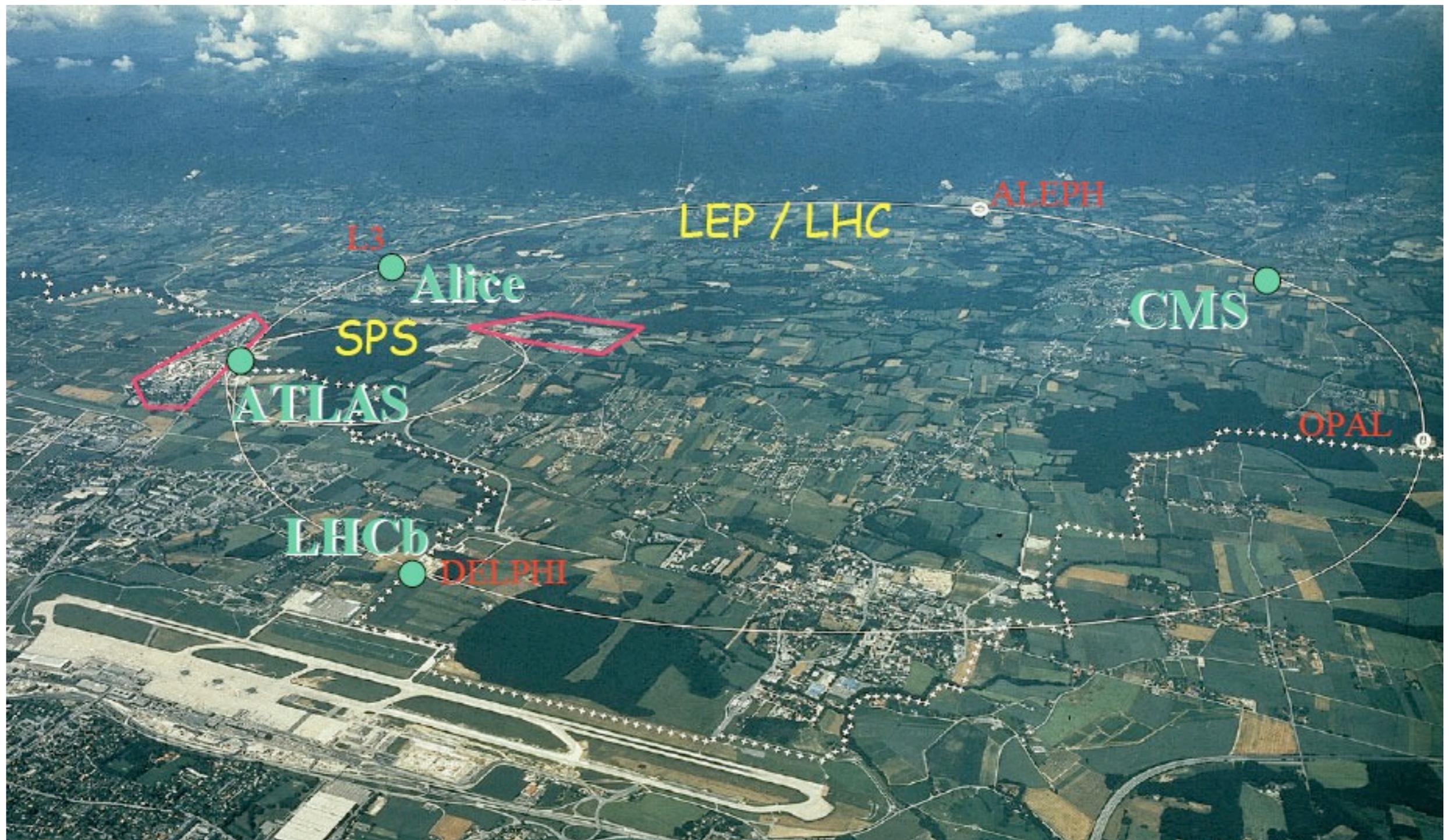
Neutrino-Astrophysik: IceCube



- 1 km³ instrumentiertes Volumen im Eis am Südpol



Beschleuniger: LEP/LHC



- Elektron-Positron Collider (200 GeV, bis 2000),
jetzt: Physik-Daten am LHC bei 8 TeV (aktuell Shutdown für Wartung)

LEP: Kreisbeschleuniger

- Magnete halten die Teilchenstrahlen auf ihrer Bahn:
- Quadrupol: Fokussierung
- Dipol: Kreisbahn

Foto: CERN

LHC: Supraleitende Magnete

- Moderne Beschleuniger:
 - Supraleitende Magnete zur Erreichung hoher Feldstärken
 - Betrieb bei flüssig-Helium Temperaturen



Foto: CERN

Zusammenfassung

- Teilchenphysik mit Beschleunigern und Astroteilchenphysik ergänzen sich
- Beschleuniger-Experimente geben uns detailliertes Verständnis über die elementaren Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkung
- Hochenergetische Teilchen aus dem Kosmos geben Aufschluss über Prozesse im Universum
 - Woher kommen die höchst-energetischen geladenen Teilchen?
 - Photonen und Neutrinos können den Weg zu interessanten Objekten weisen
- Die Kombination verschiedener Messungen kann helfen, die offenen Fragen zu klären

Zusammenfassung

- Teilchenphysik mit Beschleunigern und Astroteilchenphysik ergänzen sich
- Beschleuniger-Experimente geben uns detailliertes Verständnis über die elementaren Bausteine der Materie und ihre Wechselwirkung
- Hochenergetische Teilchen aus dem Kosmos geben Aufschluss über Prozesse im Universum
 - Woher kommen die höchst-energetischen geladenen Teilchen?
 - Photonen und Neutrinos können den Weg zu interessanten Objekten weisen
- Die Kombination verschiedener Messungen kann helfen, die offenen Fragen zu klären

Nächste Vorlesung: 22.04, “Beschleuniger”, S. Bethke