

Teilchen aus dem Weltraum und ihre Botschaften

ERLANGEN CENTRE
FOR ASTROPARTICLE
PHYSICS

Uli Katz

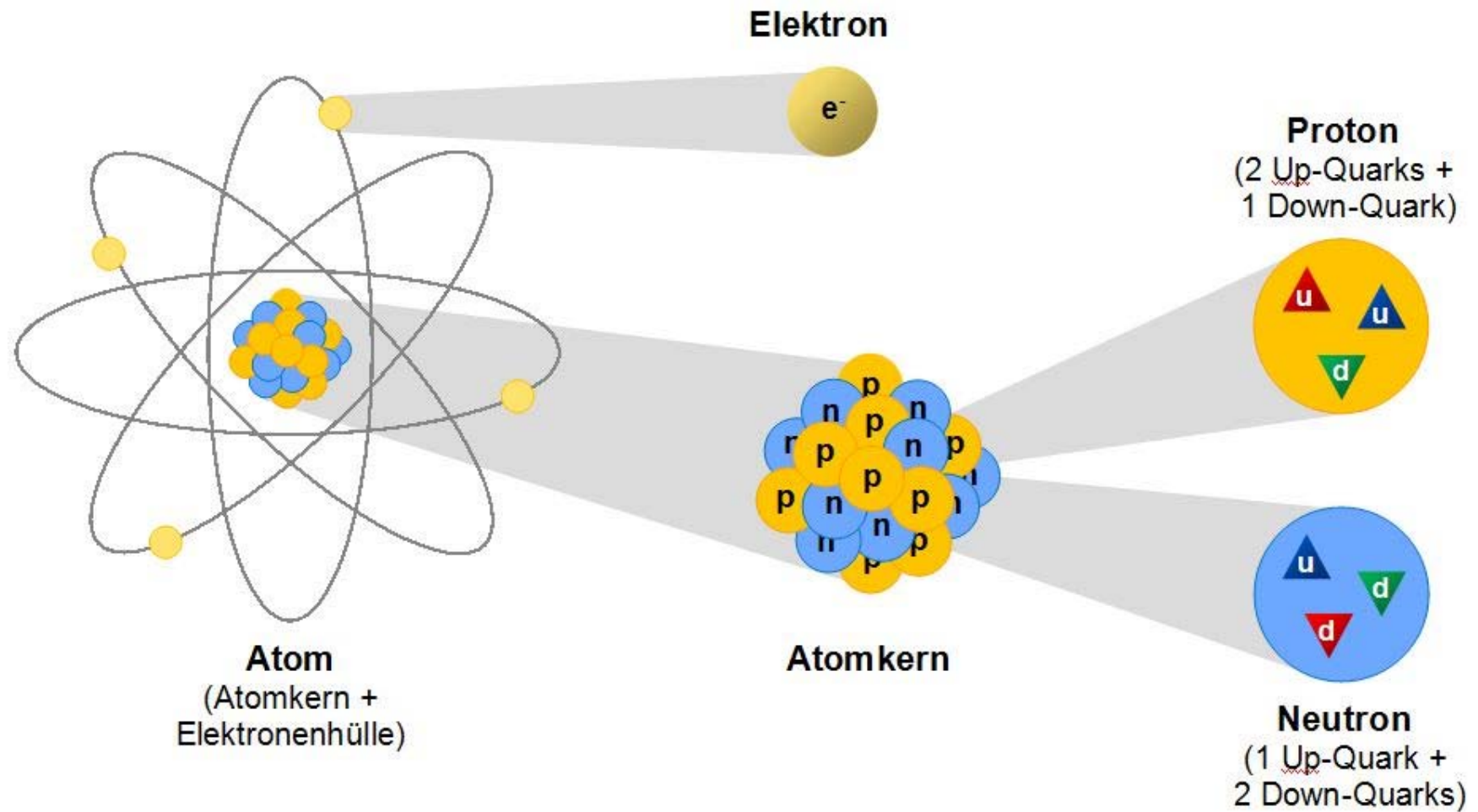
Moderne Physik am Samstagmorgen, 17.01.2015

- Was für Teilchen?
- Teilchen aus dem Weltraum und wie wir sie messen
- Was verraten und Photonen und Neutrinos?
- Ausblick



Teilchen – was für Teilchen?

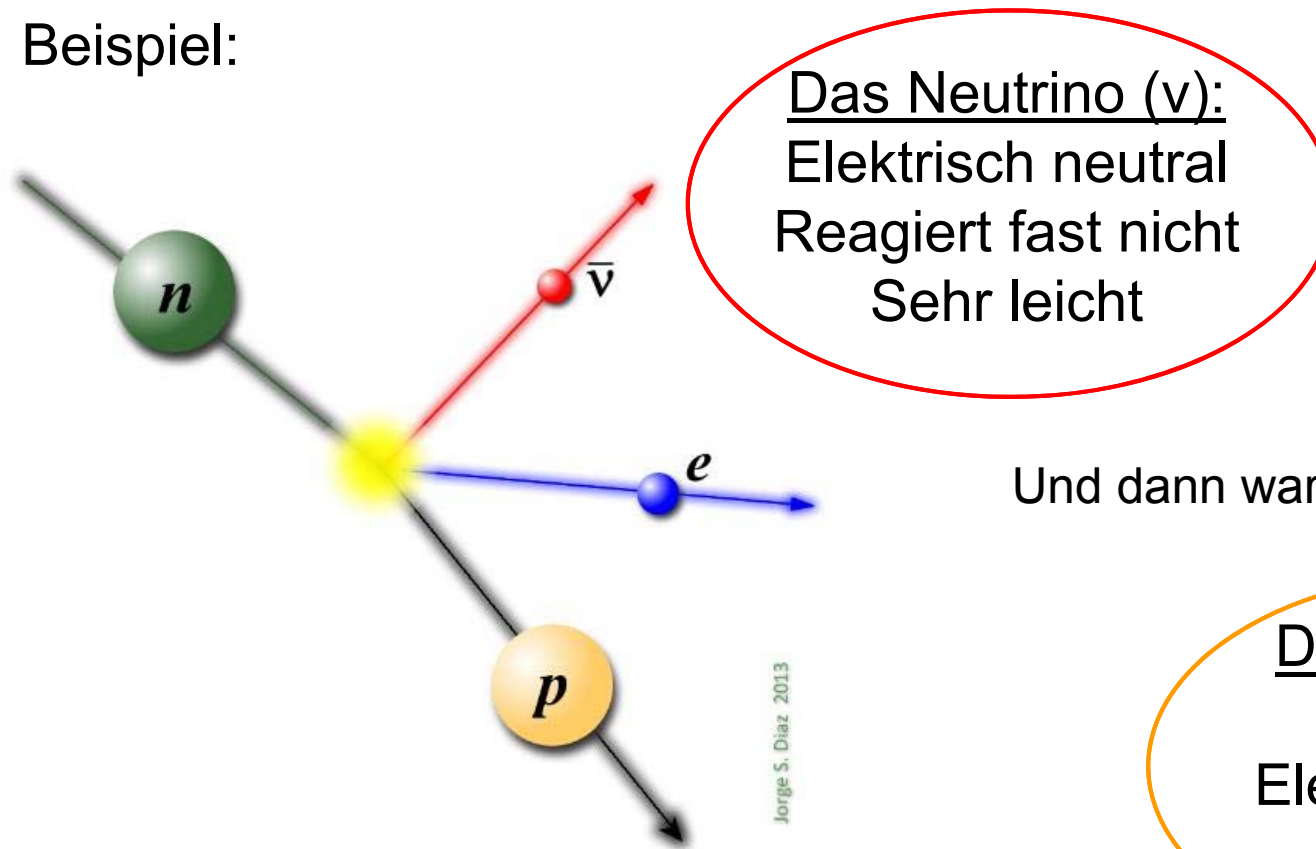
Vom Atom zum Elementarteilchen



http://www.leifiphysik.de/sites/default/files/medien/Ueberblick_Bild_2.jpg

p, n, Kern, Elektron, Quarks – ist das alles?

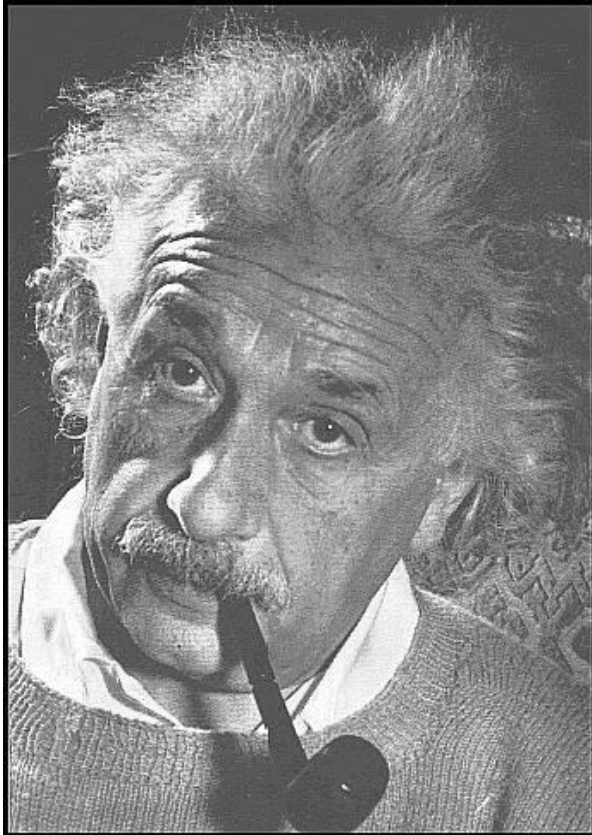
- Nein – es gibt viel mehr Teilchensorten
- Jedes Teilchen hat sein Antiteilchen
- Einige sind instabil, d.h. sie zerfallen
- Beispiel:



Und dann war da noch ...

Das Photon (γ):
Lichtquant
Elektrisch neutral
Masselos

http://www.itp.kit.edu/~jsdiaz/images/neutron_decay0.jpg



- Energie eines Teilchens in Ruhe

$$E = mc^2$$

c = Lichtgeschwindigkeit (300.000 km/s)

- Bewegungsenergie = E_{kin}

$E_{\text{kin}} \ll mc^2 \rightarrow$ Geschwindigkeit $v \ll c$

$E_{\text{kin}} \gg mc^2 \rightarrow$ Geschwindigkeit $v \approx c$

$m = 0 \rightarrow$ Geschwindigkeit $v = c$

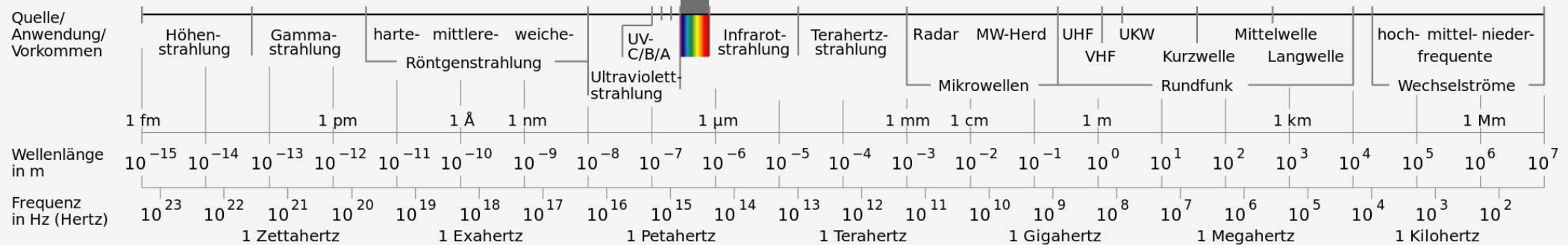
- Teilchenenergien in Elektronenvolt (eV)

$1 \text{ eV} = 1.6 \times 10^{-19} \text{ J}$

$\text{MeV} = 10^6 \text{ eV}$, $\text{GeV} = 10^9 \text{ eV}$, $\text{TeV} = 10^{12} \text{ eV}$

Das elektromagnetische Spektrum und die Photon-Energie

Das für den Menschen sichtbare Spektrum (Licht)




 1 GeV 1 MeV 1 keV 1 eV


 Röntgenstrahlung


 Gammastrahlung

Photon-Energie:

$$E_\gamma = h\nu = hc/\lambda$$

ν = Frequenz

λ = Wellenlänge

c = Lichtgeschwindigkeit

h = Plancksches Wirkungsquantum



Teilchen aus dem Weltraum und wie wir sie messen

Kosmische Botenteilchen

Der Weltraum ist groß (sehr groß)

→ Nur stabile Teilchen schaffen es zu uns:

Protonen, Kerne, Elektronen, Photonen, Neutrinos

kosmischer
Beschleuniger



Protonen und Atomkerne:

- Ablenkung in Magnetfeldern
- Herkunft nicht rekonstruierbar

Kosmische Botenteilchen

Der Weltraum ist groß (sehr groß)

→ Nur stabile Teilchen schaffen es zu uns:

Protonen, Kerne, Elektronen, Photonen, Neutrinos



kosmischer
Beschleuniger

Photonen (elektromagnetische Strahlung):

- Radiowellen, Licht, Röntgen- und Gammastrahlung
- geradlinige Ausbreitung
- Reichweite begrenzt

Kosmische Botenteilchen

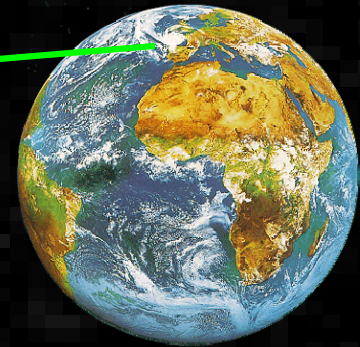
Der Weltraum ist groß (sehr groß)

→ Nur stabile Teilchen schaffen es zu uns:

Protonen, Kerne, Elektronen, Photonen, Neutrinos

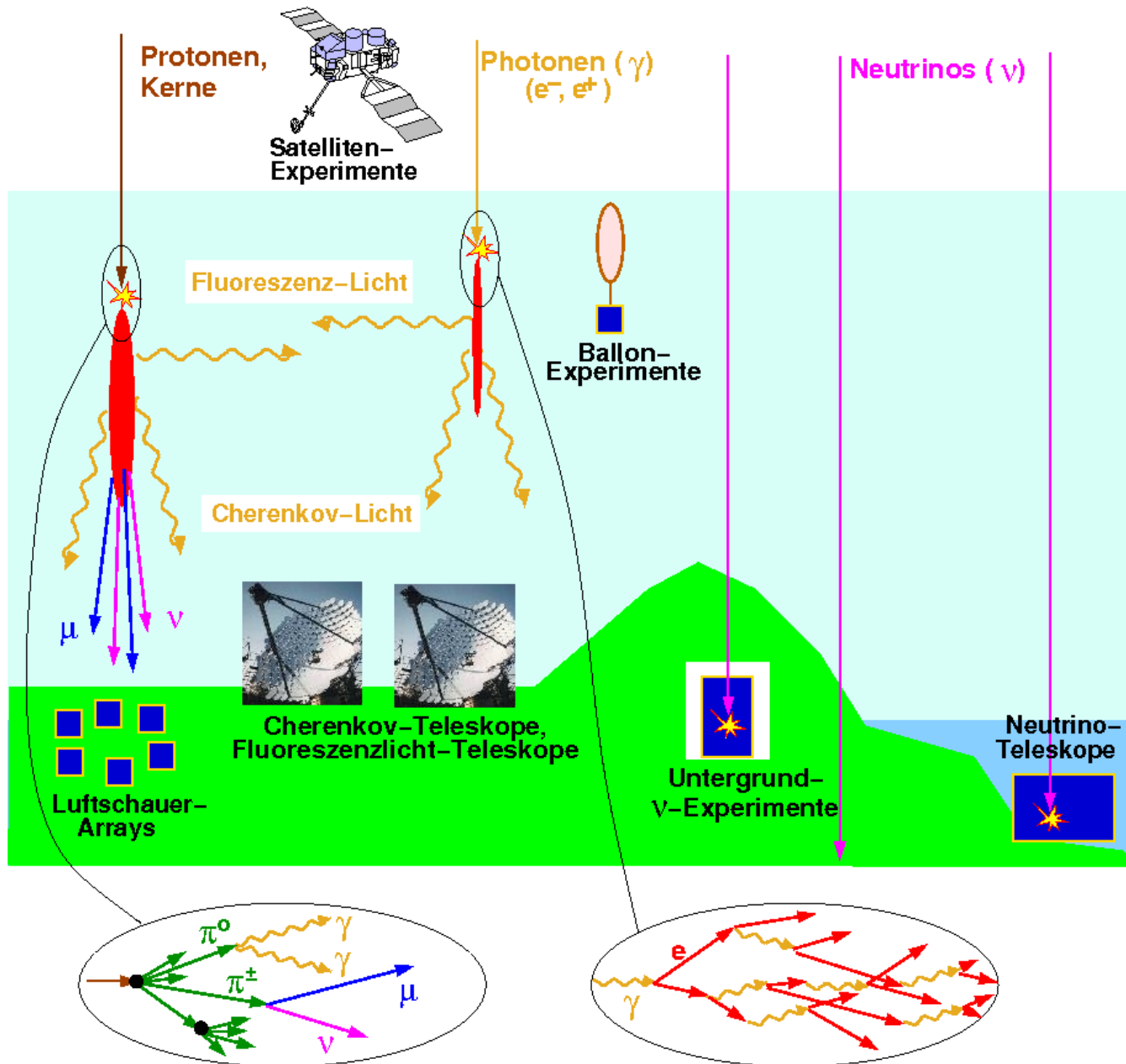


kosmischer
Beschleuniger

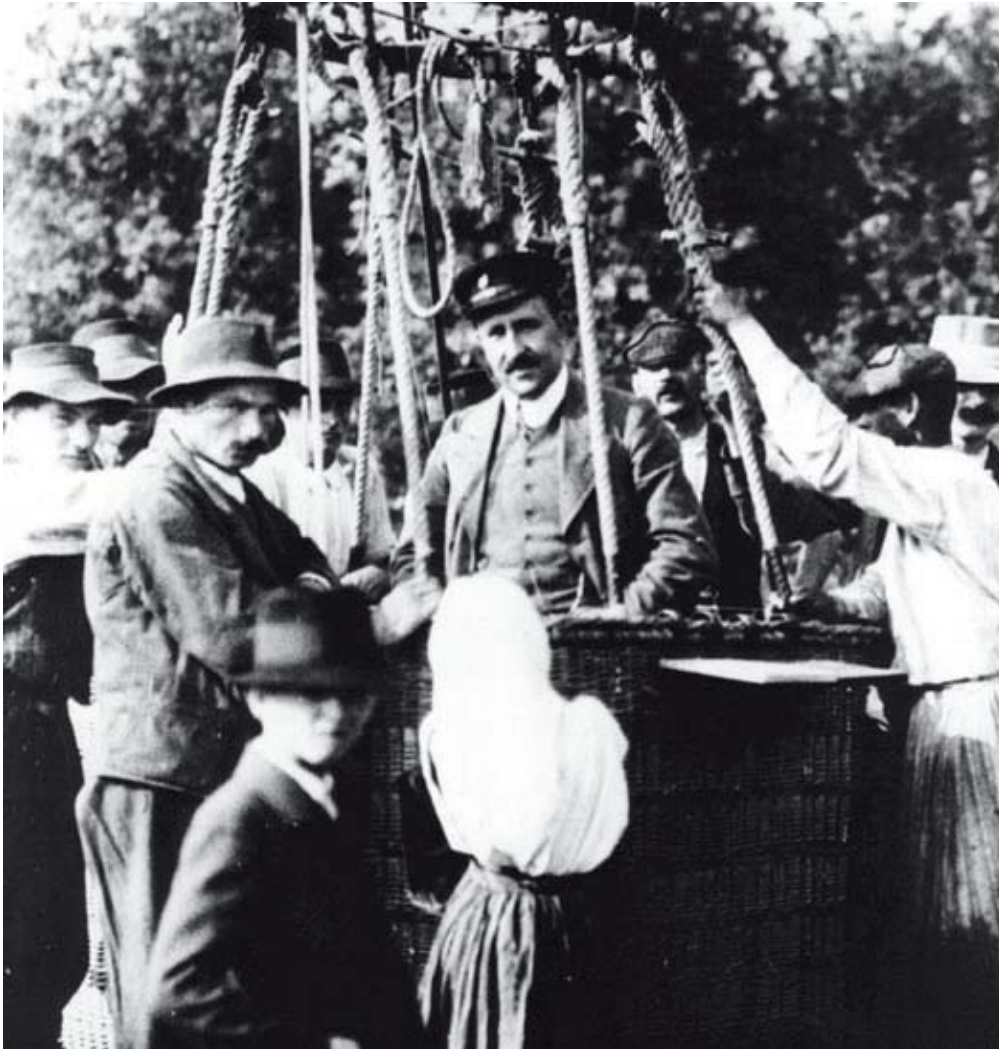


Neutrinos:

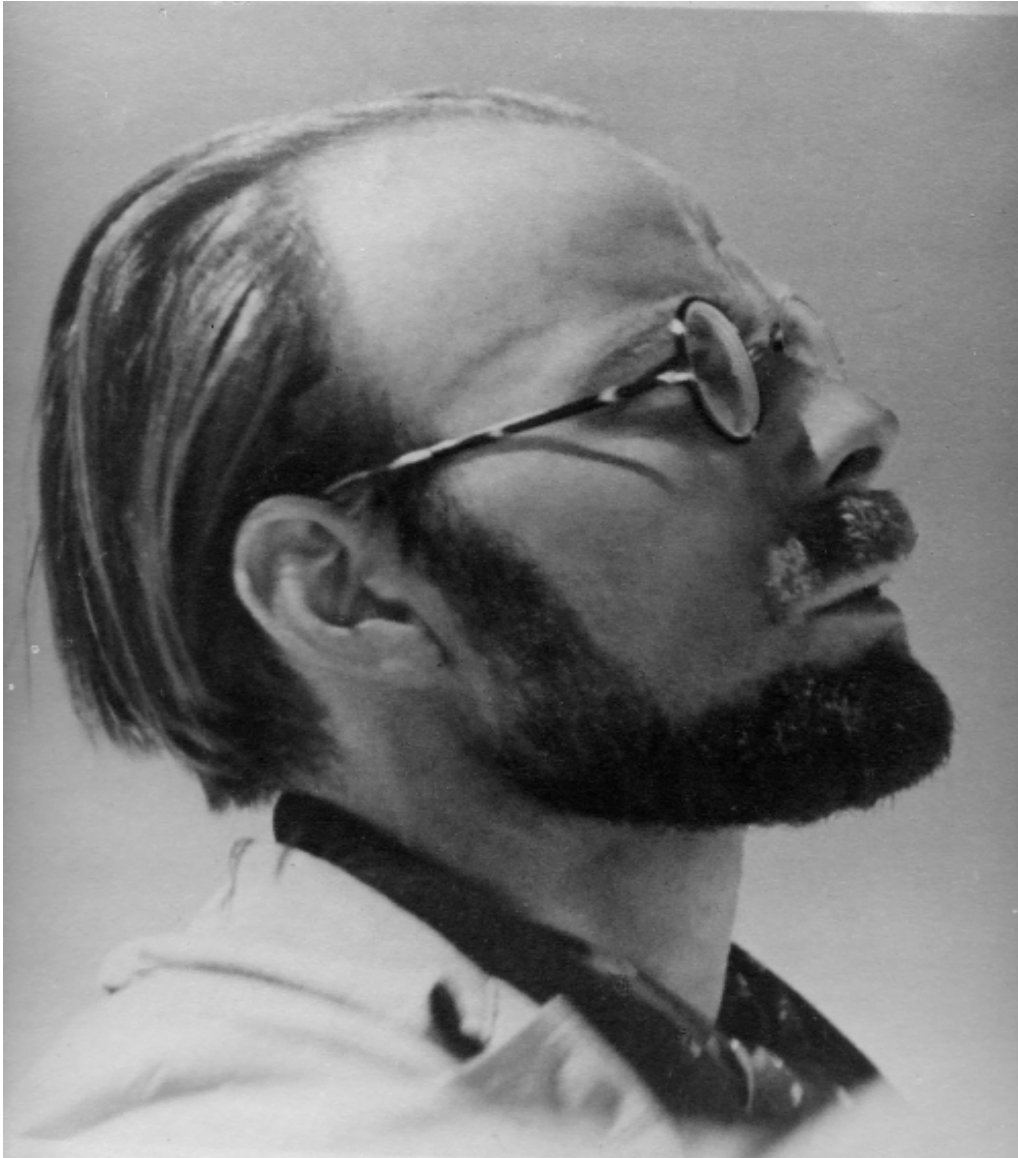
- keine Ablenkung oder Absorption
- entkommen aus dichten Quellen
- Nachweis schwierig



- Satellit, Ballon: direkte Messung, kleine Sammelfläche
- Bodendetektoren: indirekte Messung, große Sammelfläche
- Neutrinos: Die allermeisten gehen einfach durch ...

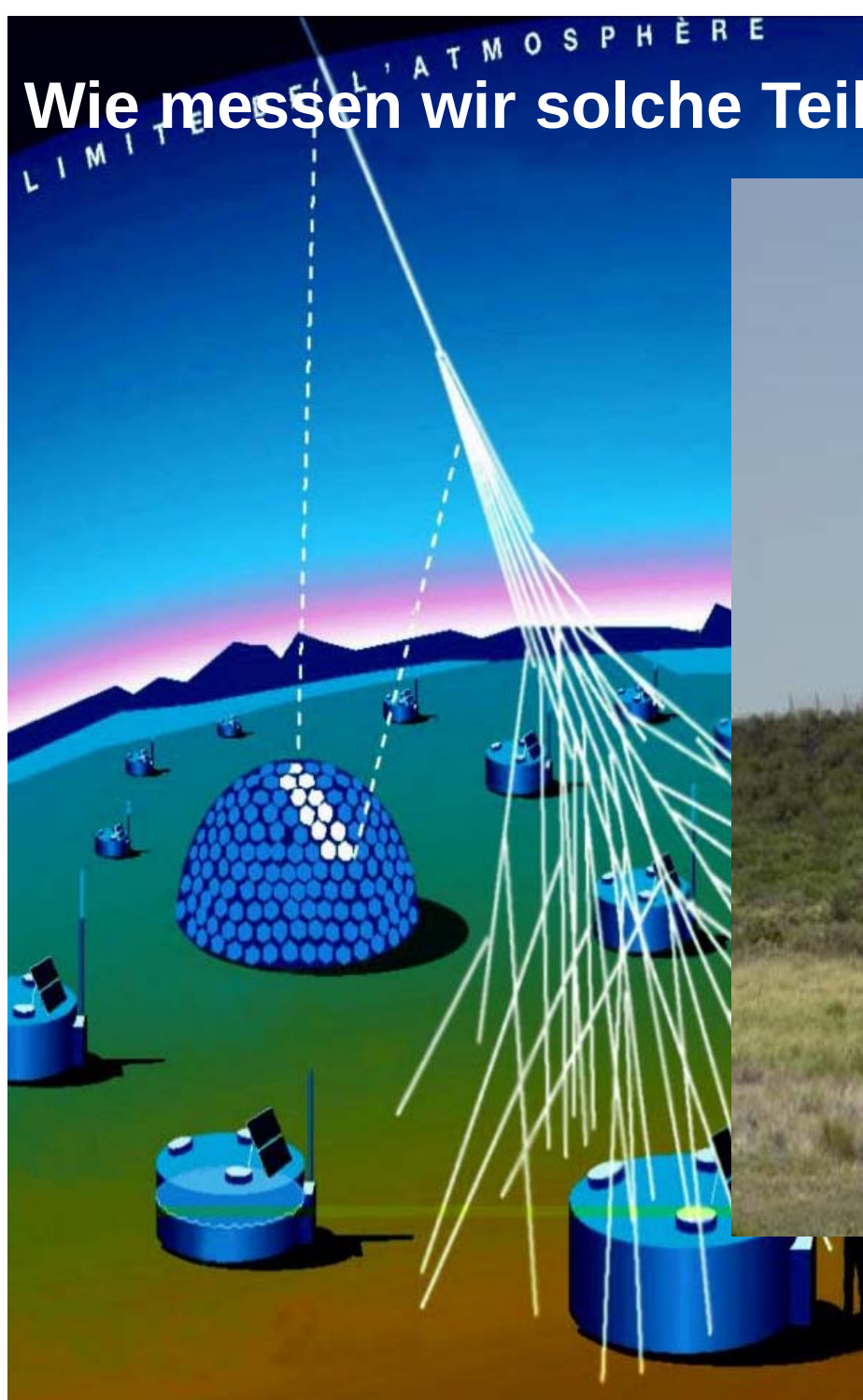


- 1912: Victor Hess entdeckt ionisierende Strahlung aus dem Weltraum

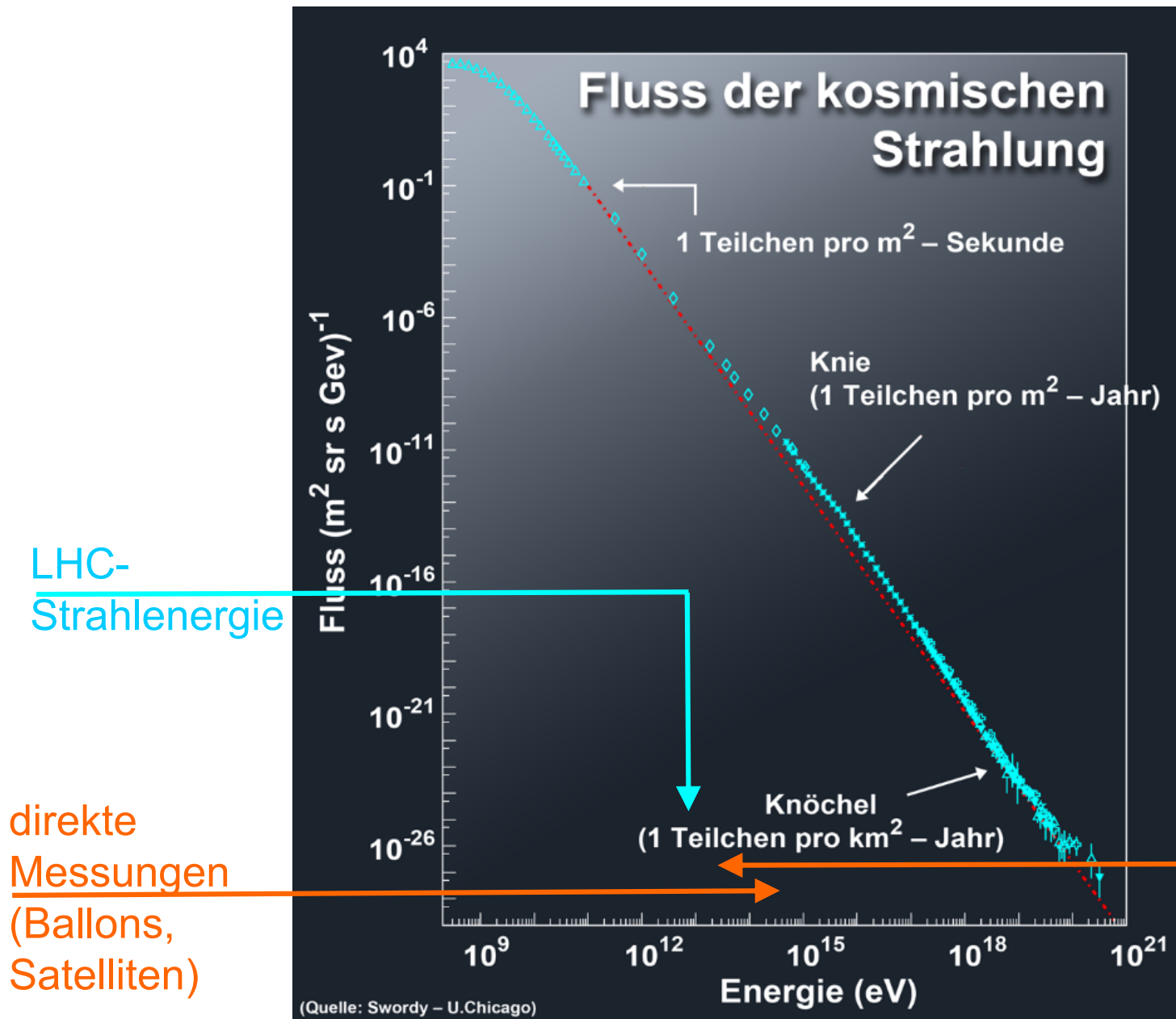


- 1912: Victor Hess entdeckt ionisierende Strahlung aus dem Weltraum
- 1938: Pierre Auger zeigt, dass die Teilchen der kosmischen Strahlung immense Energie haben
 $1.000.000.000.000.000 \text{ eV}$
 $= 10^{15} \text{ eV} = 100 \text{ mal LHC !}$

Wie messen wir solche Teilchen?



Pierre Auger Observatory:
3000 km² in Argentinien
1600 Cherenkov-Detektoren
4 x 6 Fluoreszenz-Teleskope

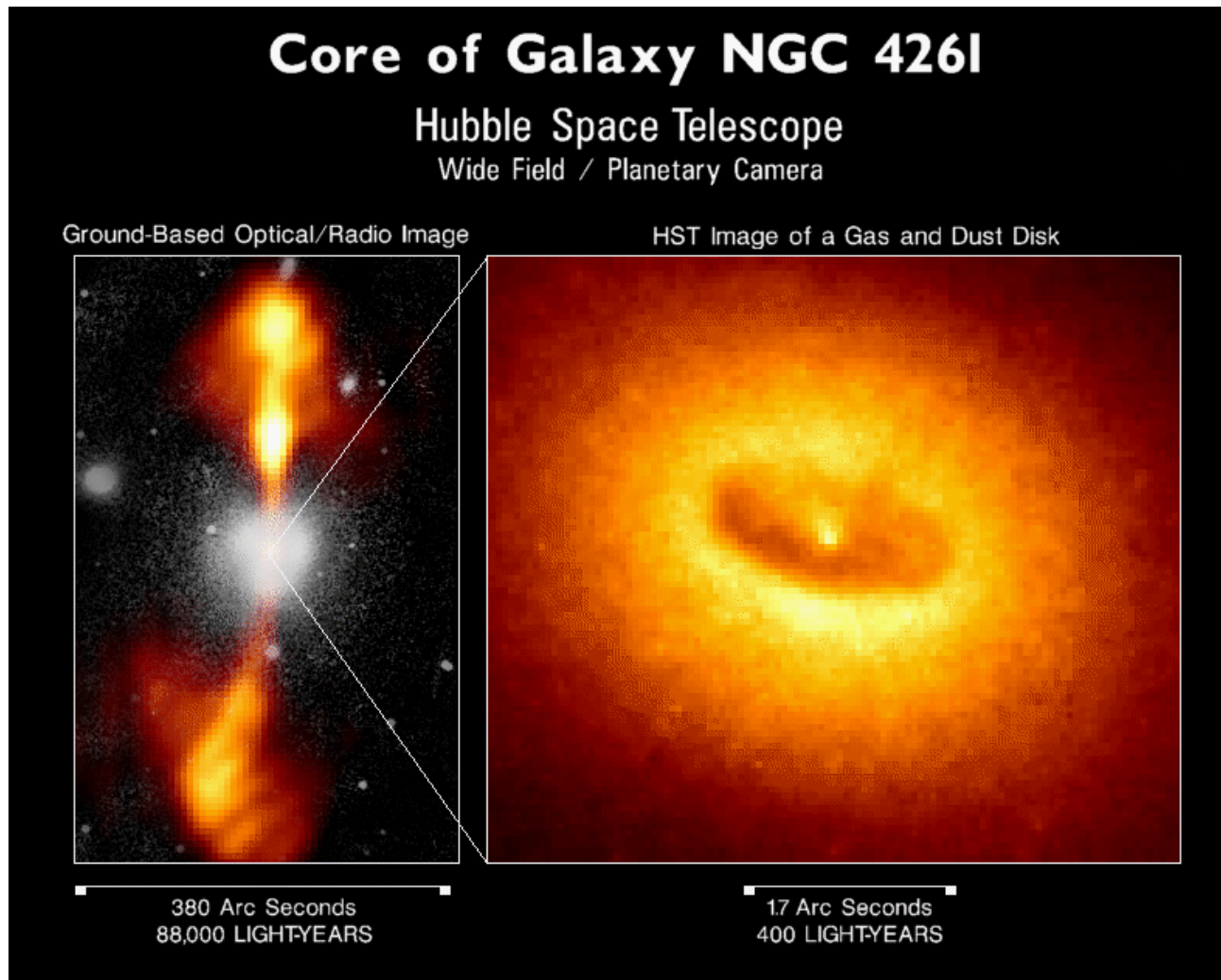


- Protonen und Atomkerne aus dem Weltall haben Energien bis 10^{21} eV
- Die Energie eines Tennisballs beim Profi-Aufschlag vereint in einem Atomkern!
- Davon aber nur einige pro km^2 und Jahrhundert.

... aber bei Weitem nicht alles!

- Wie und wo werden diese Teilchen im Universum beschleunigt?
- Sind es Protonen oder schwerere Kerne? Welche?
- Was verraten sie uns über ihre Quellen?
- Was verraten sie uns über Teilchenphysik bei Energien, die wir an irdischen Beschleunigern nie erreichen werden?

Wir wissen es nicht...
... aber wir haben Vermutungen



<http://aether.lbl.gov/www/projects/neutrino/agn/NGC4261torus.gif>

Aktive Galaxienkerne (AGN)

- Supermassives schwarzes Loch im Zentrum einer Galaxie
- Saugt Materie an → Akkretionsscheibe
- Materieausfluss in Jets senkrecht zu Scheibe
- Extreme elektrische und magnetische Felder, Schockfronten



<http://www.eso.org/public/images/eso0917a/>

Gammastrahlungsausbruch (GRB)

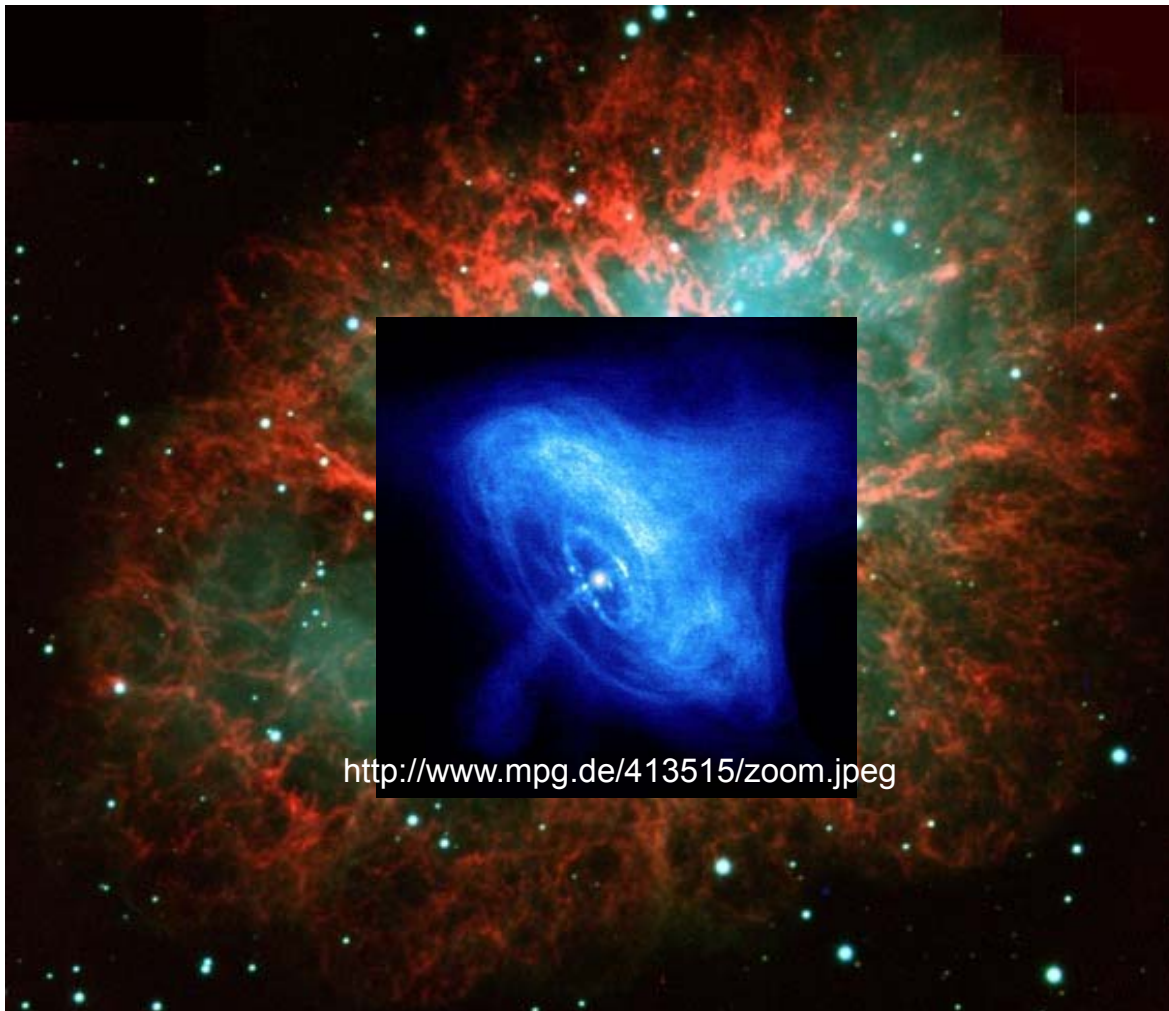
- Sternexplosion und Bildung schwarzes Loch oder Verschmelzen von 2 schwarzen Löchern/Neutronensternen (extragalaktisch)
- Sekunden bis Minuten, energiereichstes uns bekanntes Phänomen
- Materieausfluss in Jets ...



Supernova-Reste

- Verschiedene Typen:
Pulsarwindnebel
(hier: Krebsnebel),
Schalentyp, ...
- Gibt es in unserer Galaxie
- Wieder: elektrische und
magnetische Felder und
Schockfronten ...

<https://fedora.phaidra.univie.ac.at/fedora/get/o%3A28702/bdef:ImageManipulator/boxImage?BOX=570&FORMAT=jpg>



Supernova-Reste

- Verschiedene Typen:
Pulsarwindnebel
(hier: Krebsnebel),
Schalentyp, ...
- Gibt es in unserer Galaxie
- Wieder: elektrische und
magnetische Felder und
Schockfronten ...

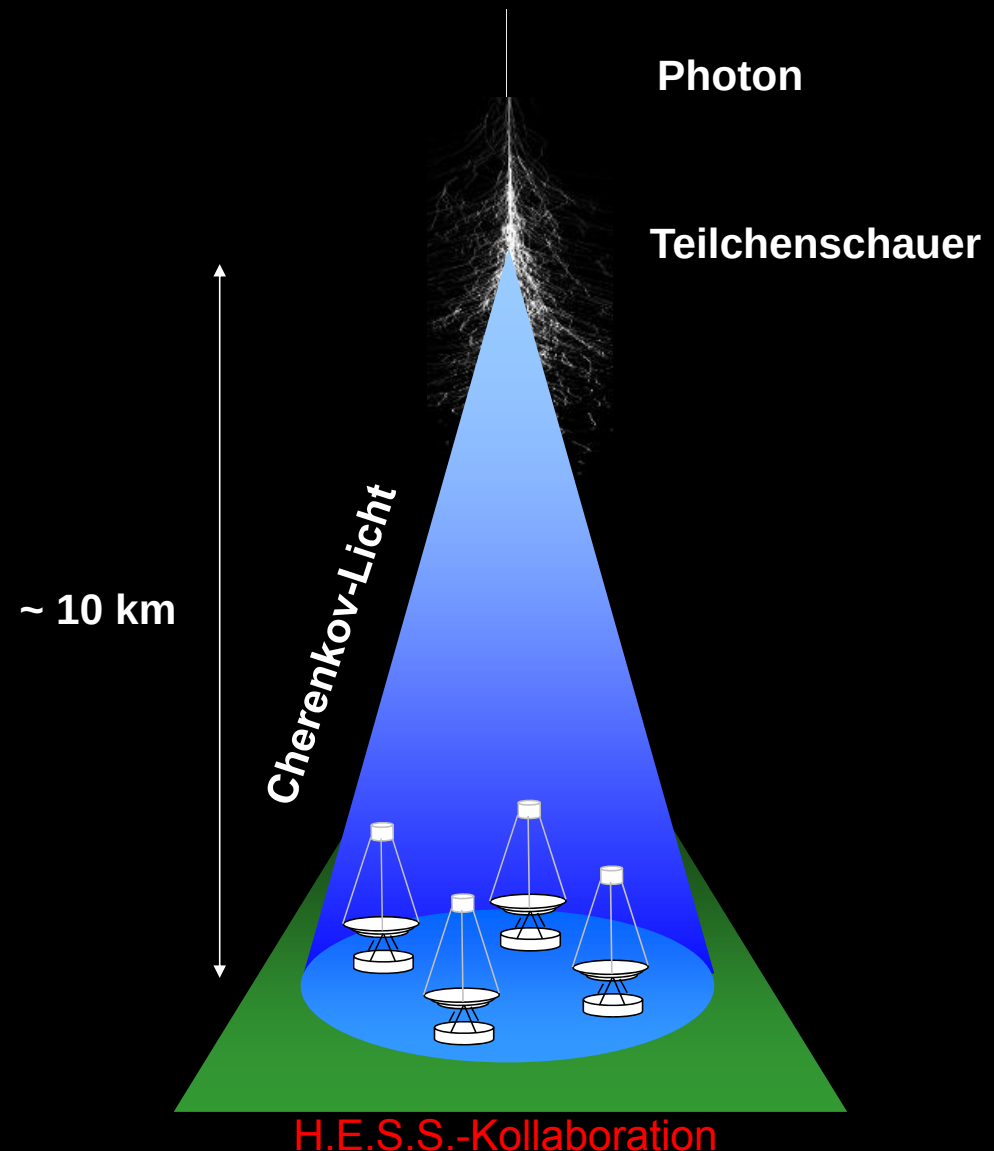
<https://fedora.phaidra.univie.ac.at/fedora/get/o%3A28702/bdef:ImageManipulator/boxImage?BOX=570&FORMAT=jpg>



Was verraten uns Photonen und Neutrinos?

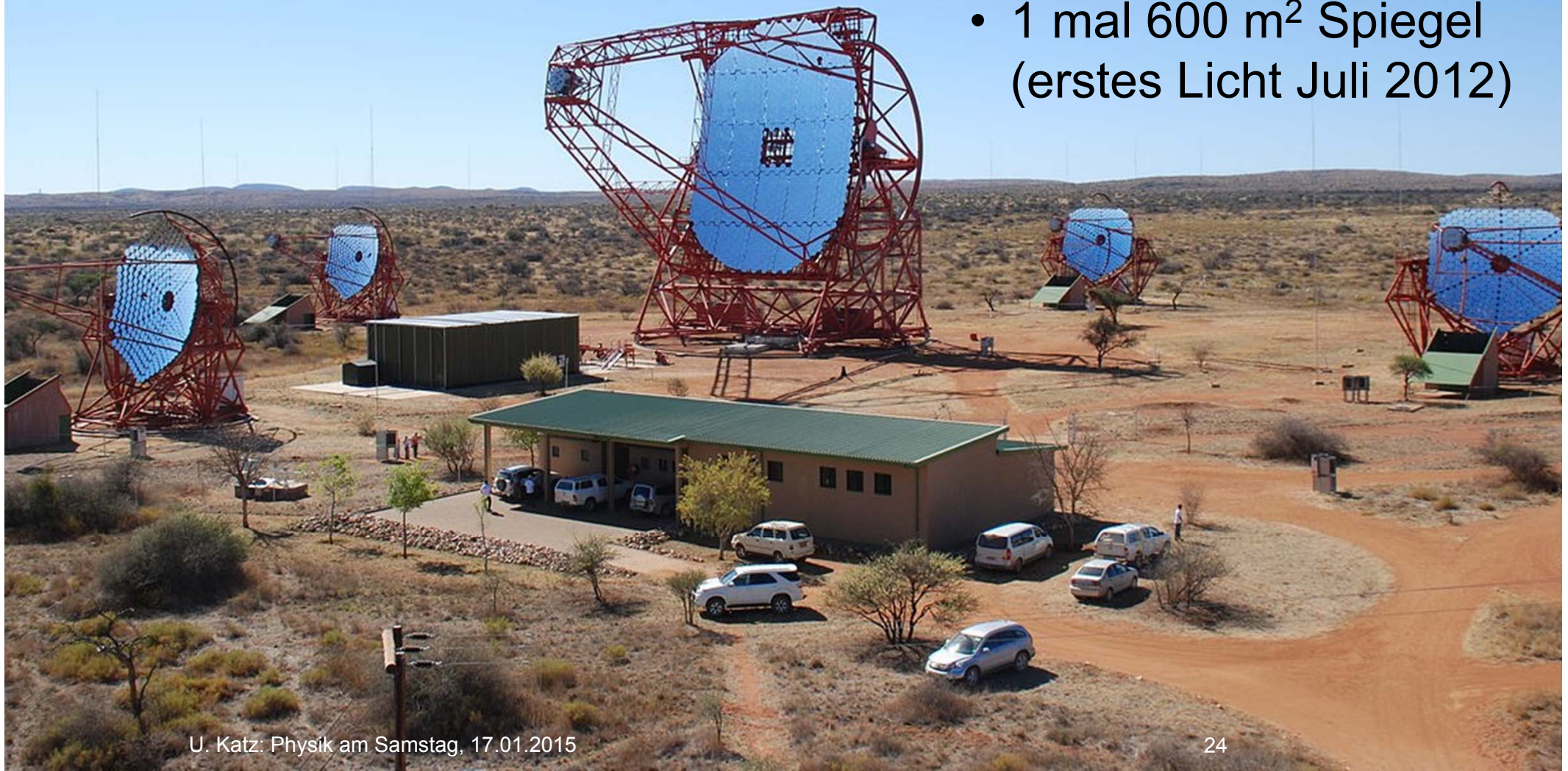
Nachweis von Gammastrahlung

- Nachweis ultrakurzer Lichtblitze
- Mehrere Teleskope verbessern Richtungsbestimmung
- Benötigt dunkle, klare Nächte
- Beobachtung eines kleinen Teils des Himmels

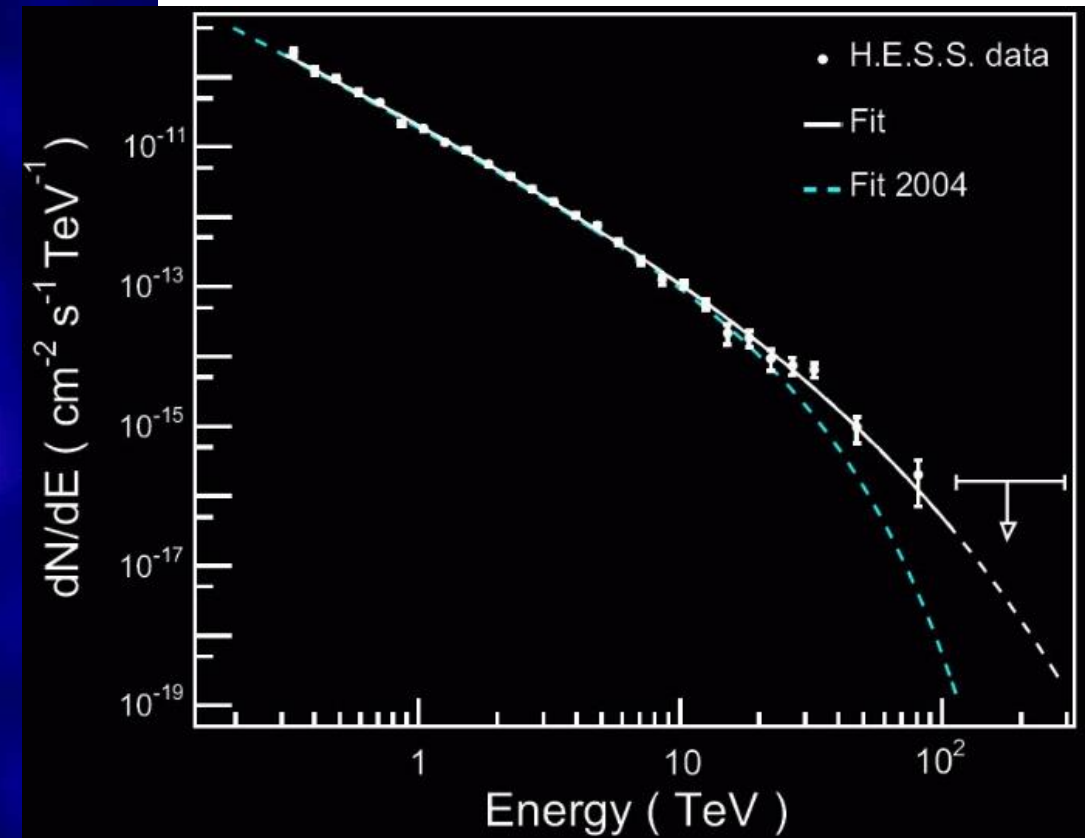
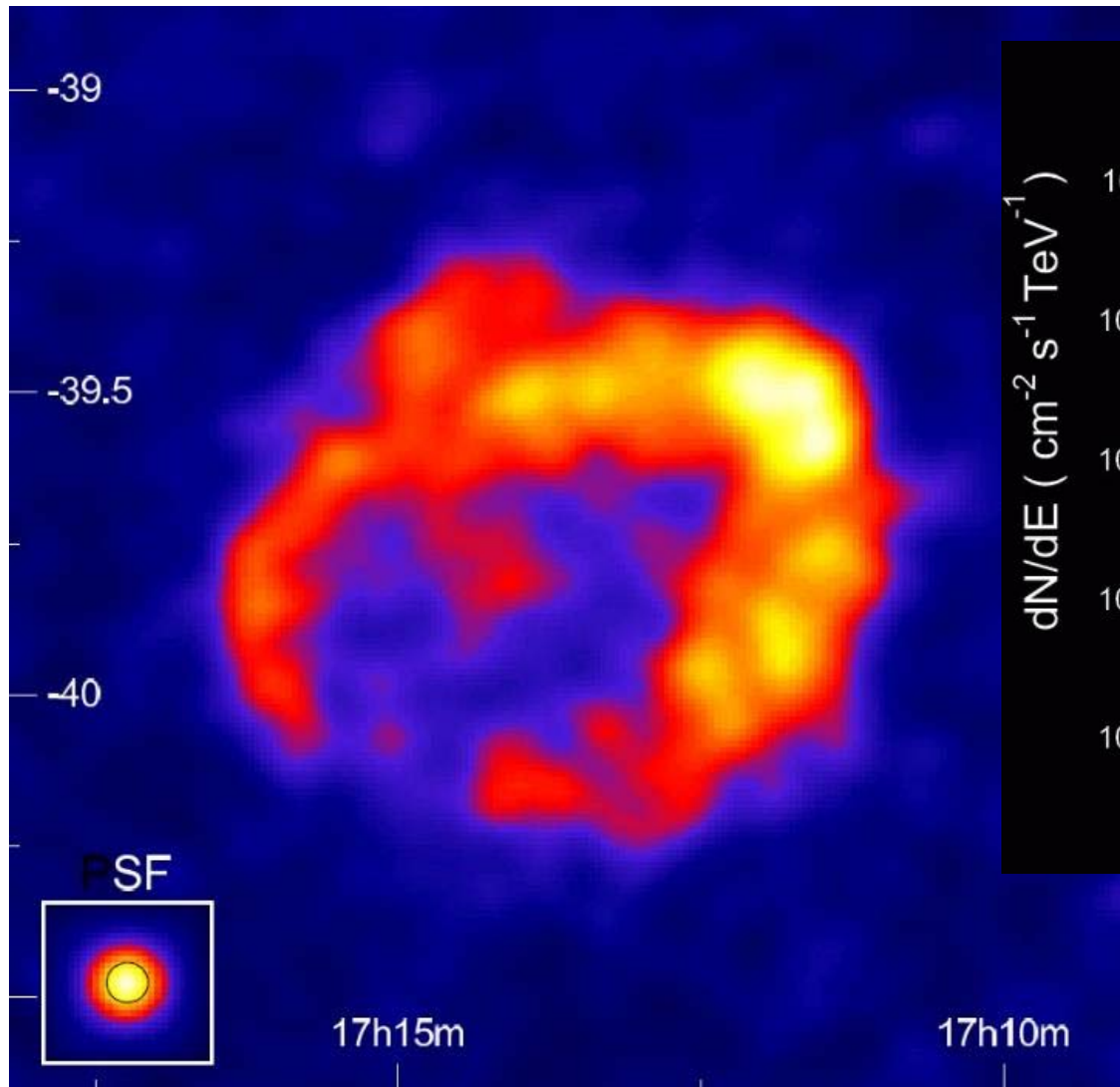


Das H.E.S.S.-Teleskopsystem in Namibia

- 4 mal 108 m² Spiegel
- 1 mal 600 m² Spiegel
(erstes Licht Juli 2012)



Ein eindrucksvolles H.E.S.S.-Ergebnis



H.E.S.S. Collaboration, 2007

RX J1713.7-3946: Ein Supernova-Überrest vom Schalentyp

- Teilchenbeschleunigung ... aber welche Teilchen?

Die Zukunft: Das Cherenkov Telescope Array (CTA)

http://www.isgtw.org/sites/default/files/img_2012/CTA2.jpg



- 2 Standorte (Nord- und Südhalbkugel)
- Verschiedene Teleskopgrößen → breiter Energiebereich
- Viele Teleskope → hohe Empfindlichkeit (10 mal besser als H.E.S.S.)
- Baubeginn 2016 erwartet

Die Zukunft: Das Cherenkov Telescope Array (CTA)

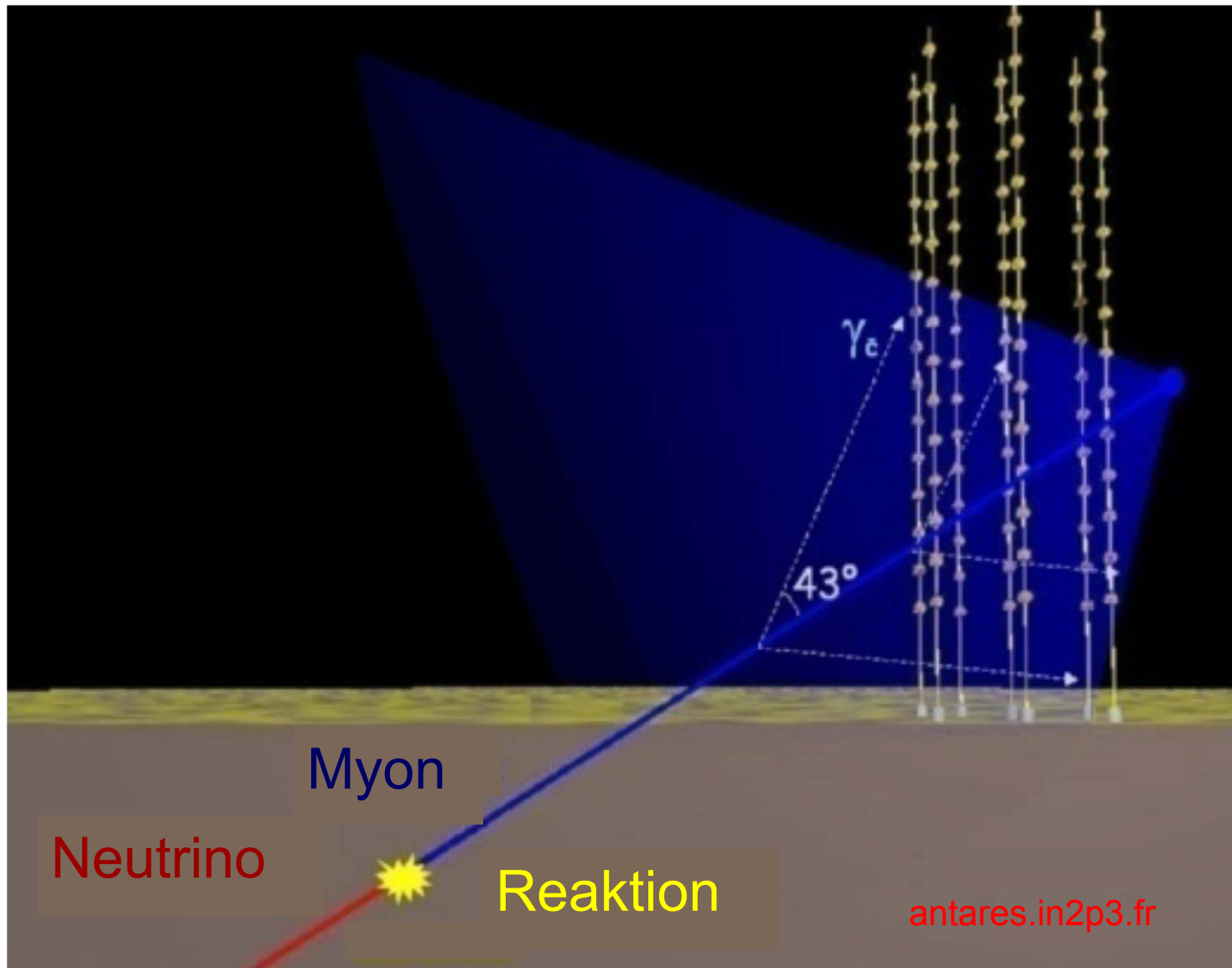
http://www.isgtw.org/sites/default/files/img_2012/CTA2.jpg



http://images.iop.org/objects/ccr/cern/53/6/11/CCnew16_06_13.jpg

- 2 Standorte (Nord- und Südhalbkugel)
- Verschiedene Teleskopgrößen → breiter Energiebereich
- Viele Teleskope → hohe Empfindlichkeit (10 mal besser als H.E.S.S.)
- Baubeginn 2016 erwartet

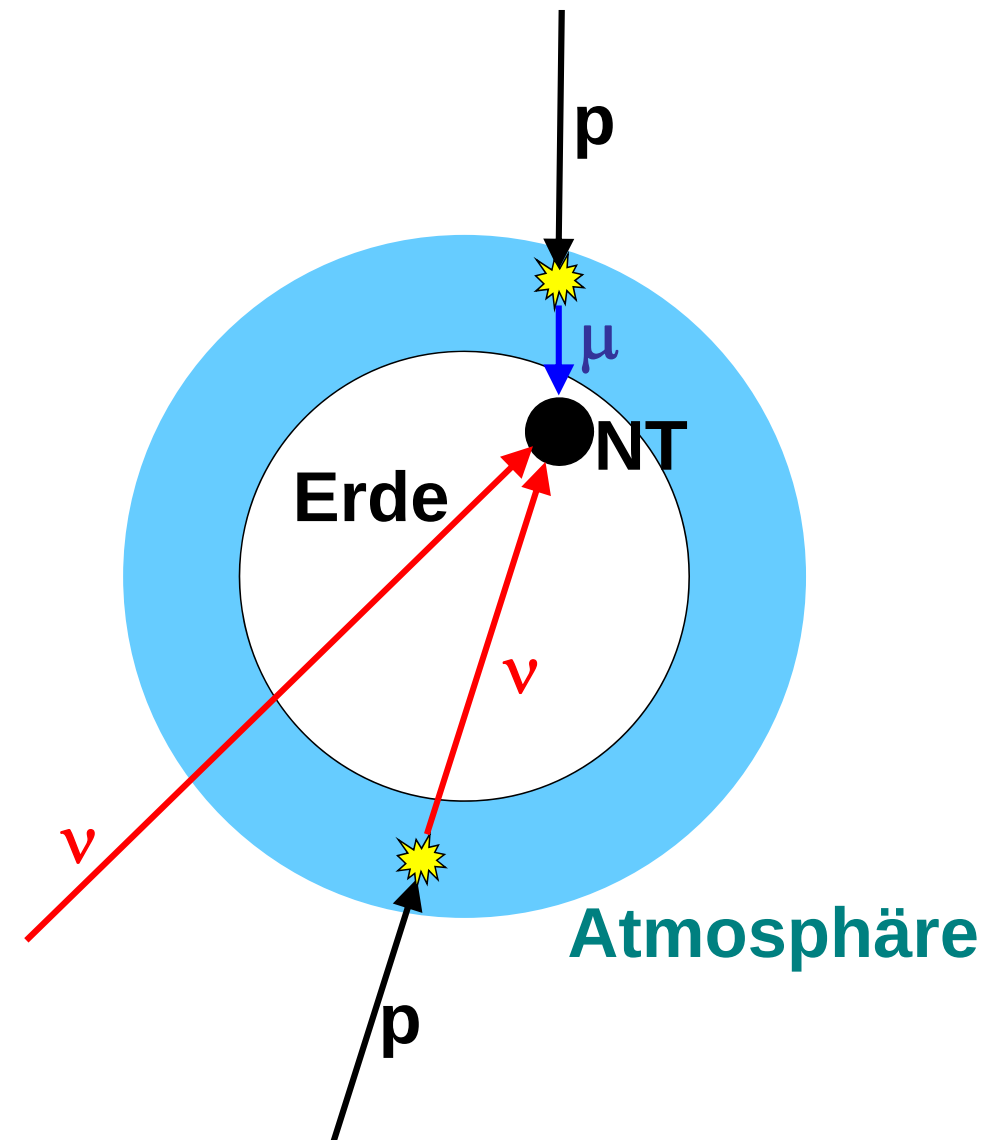
Wie ein Neutrinoteleskop funktioniert



- Neutrino kommt durch Erde
- Neutrino-Reaktion erzeugt Myon
- Myon fliegt bis zu einige km durch Wasser oder Eis
- Erzeugt kurzen blauen Lichtblitz (Cherenkov-Strahlung)
- Messung durch hochempfindliche Licht- Sensoren

Signal und Untergrund

- Atmosphärische Neutrinos aus Wechselwirkung von p/Kernen in Atmosphäre unter NT
→ von kosmischen Neutrinos nicht unterscheidbar
- Atmosphärische Myonen aus Wechselwirkung von p/Kernen in Atmosphäre über NT
→ gefährlich, wenn falsch rekonstruiert
- Signal =
Häufung von Ereignissen aus bestimmten Himmelsrichtungen oder mit sehr hoher Energie



IceCube: Das derzeit größte Neutrino-teleskop

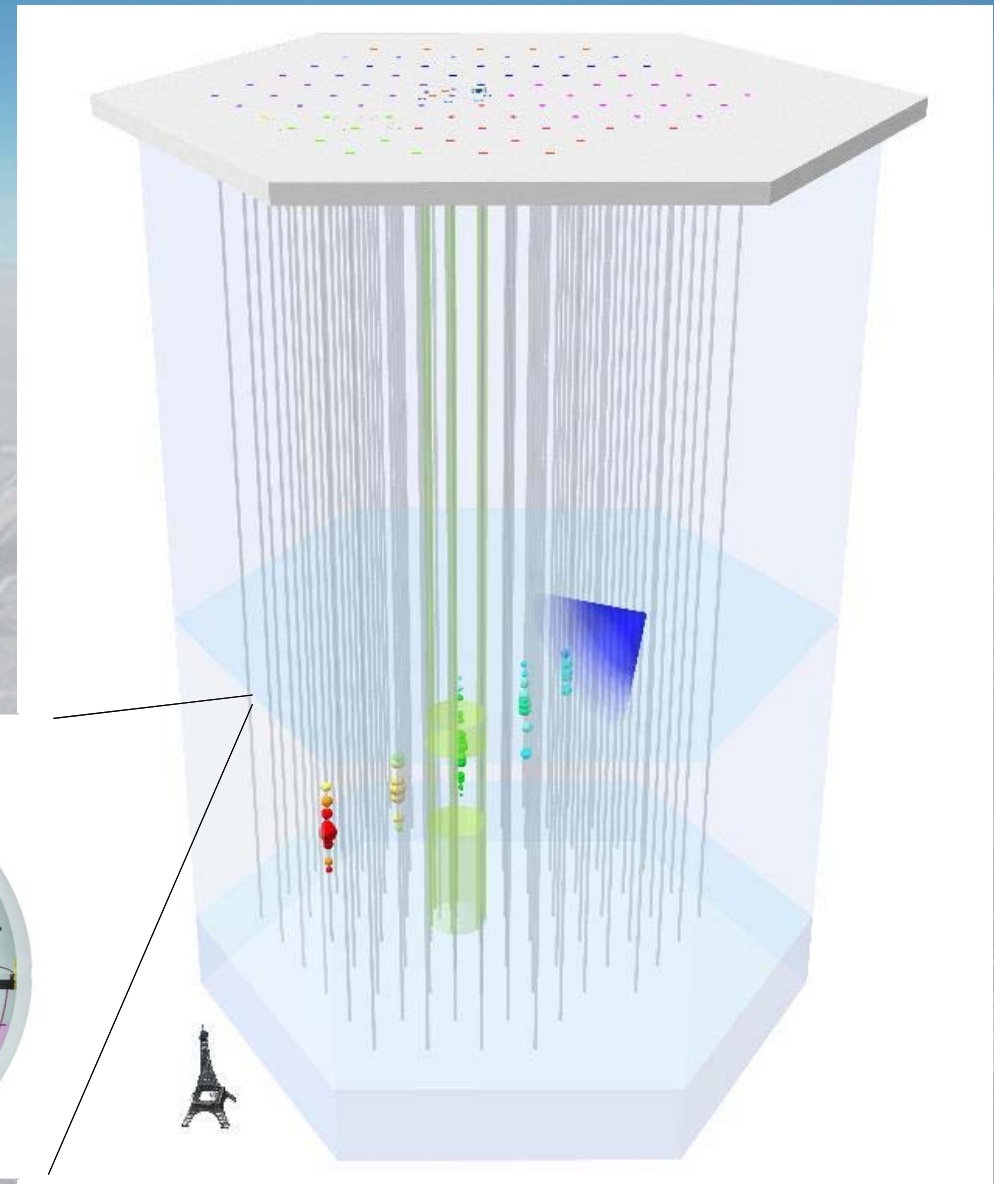
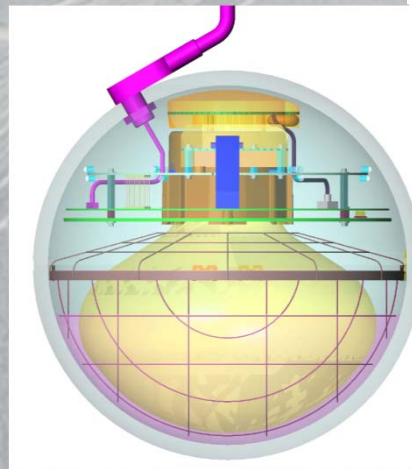
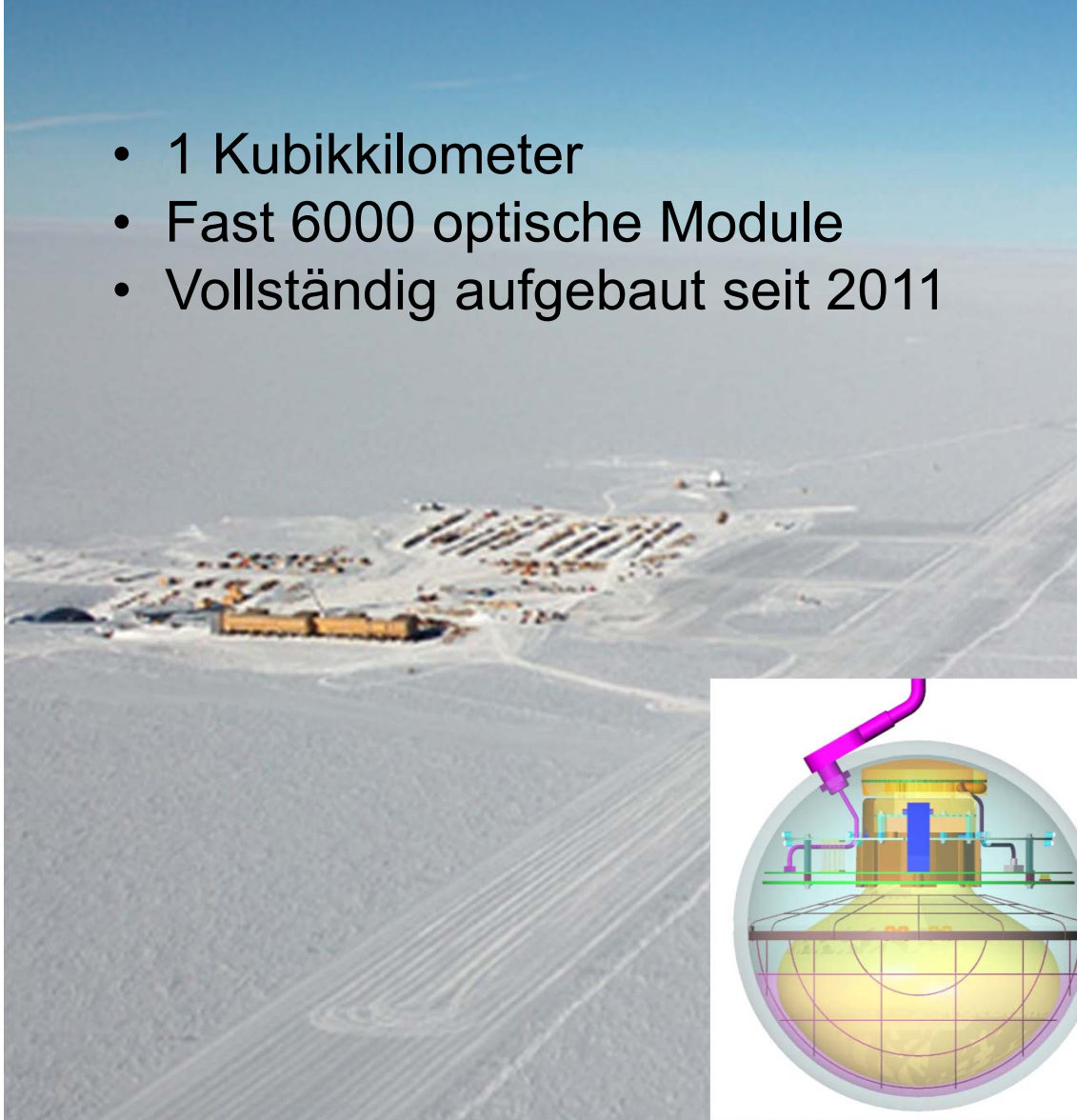
- 1 Kubikkilometer
- Fast 6000 optische Module
- Vollständig aufgebaut seit 2011



http://icestories.exploratorium.edu/dispatches/wp-content/uploads/2008/11/Ice_Cube_Aerial_zoom.jpg

IceCube: Das derzeit größte Neutrino-teleskop

- 1 Kubikkilometer
- Fast 6000 optische Module
- Vollständig aufgebaut seit 2011



http://icestories.exploratorium.edu/dispatches/wp-content/uploads/2008/11/Ice_Cube_Aerial_zoom.jpg

Ein optisches Modul besteht aus ...



Photosensor
(Photomultiplier Tube, PMT)

+

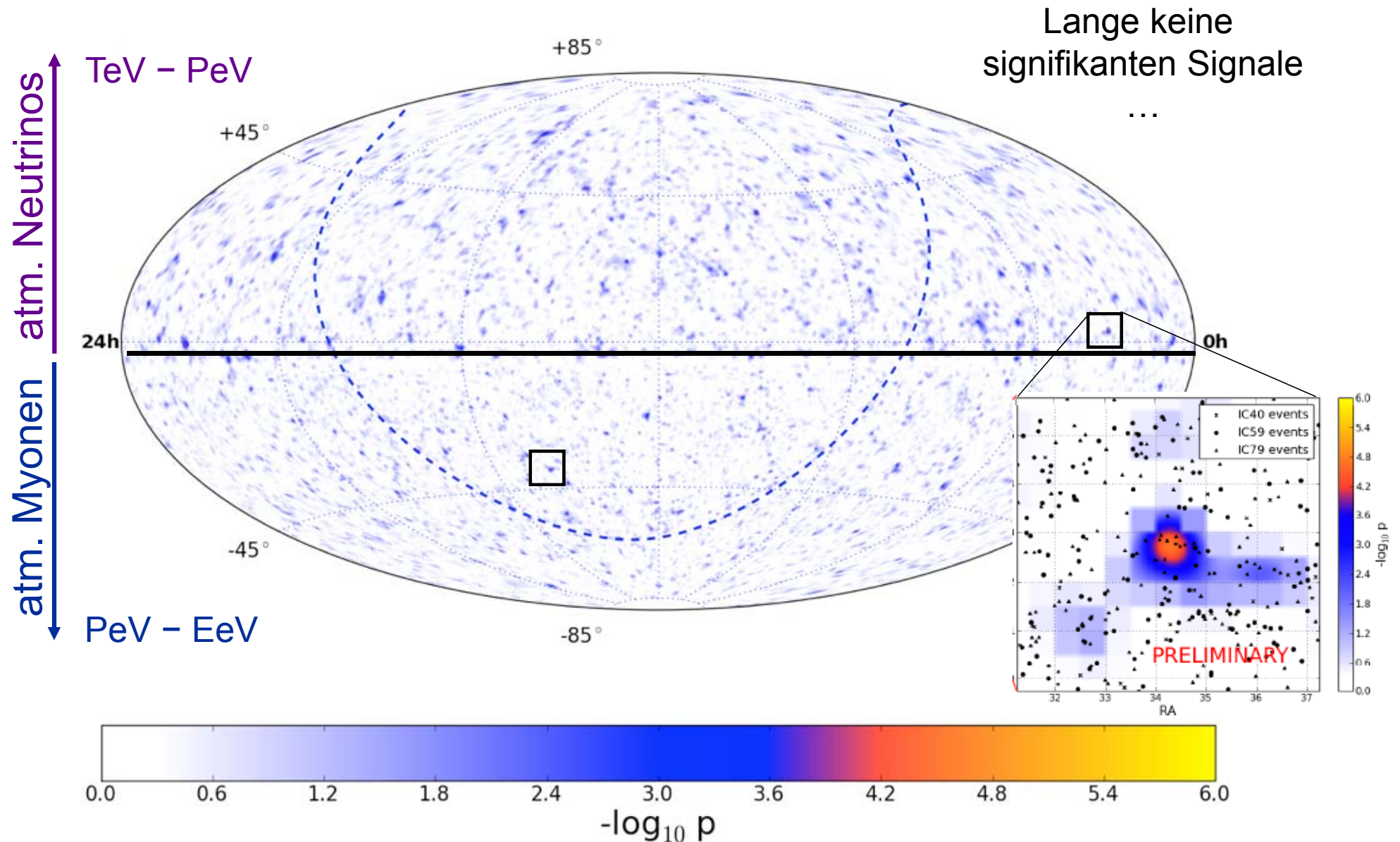
Elektronikkomponenten
Spannungsversorgung
Kalibrationsgeräten



+

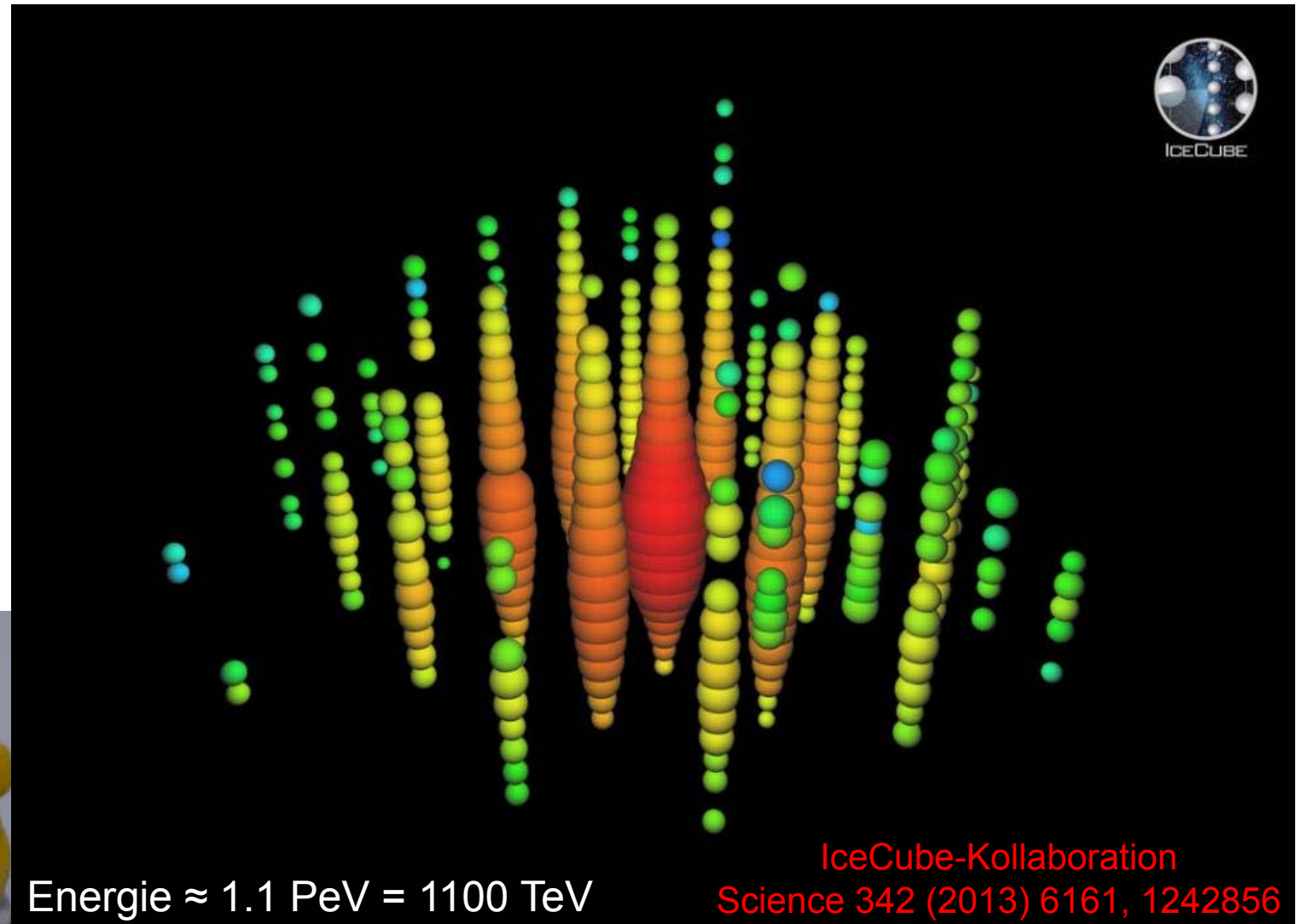
Glaskugel

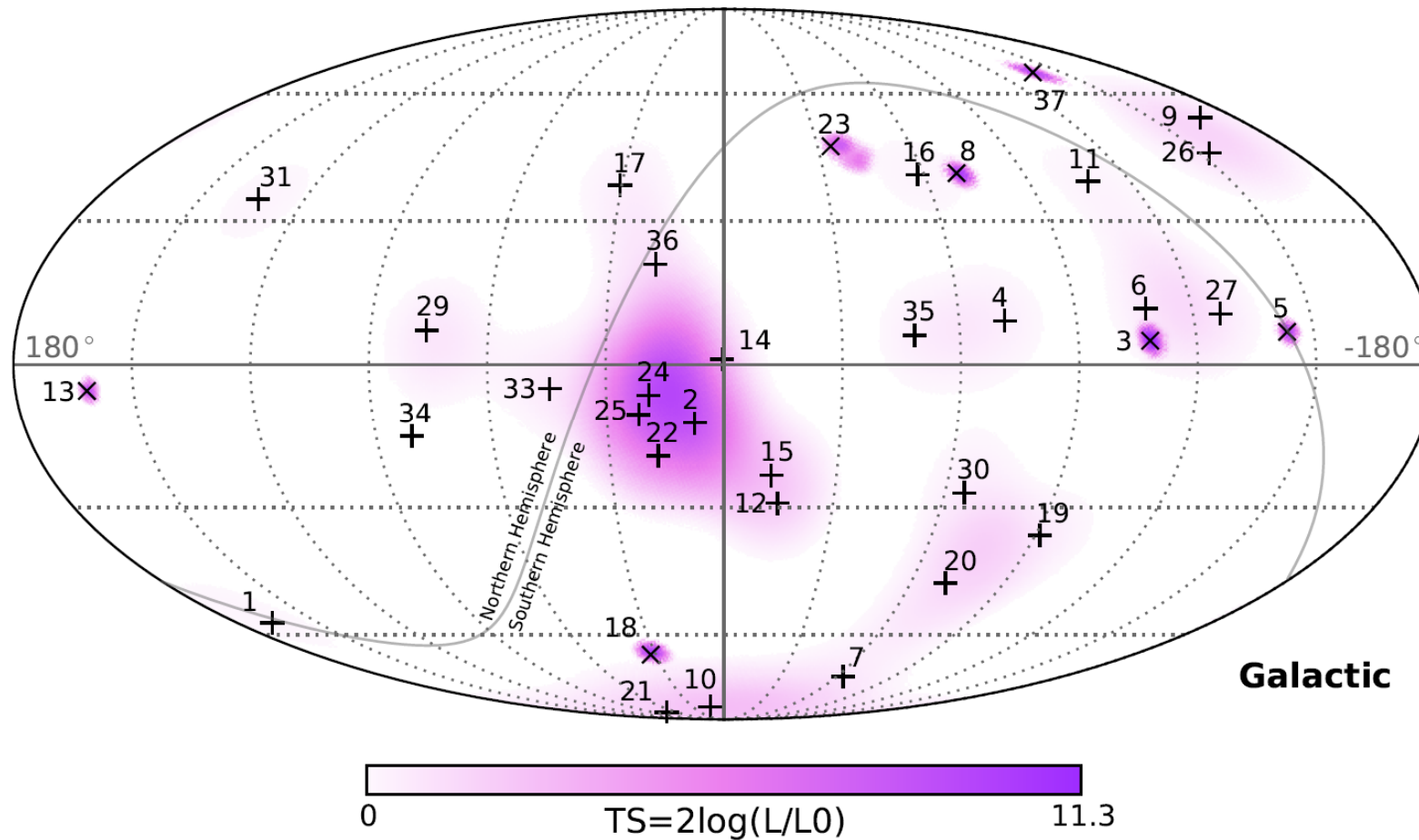
IceCube: Suche nach Neutrino-Quellen



Aber dann: Erste kosmische Neutrinos!

- Anhäufung von Ereignissen bei sehr hohen Energien
- Inzwischen sehr signifikant – keine Zweifel mehr möglich





- Unklar, wo die Quellen sind
- Wir müssen diese Karte mit einem Blick „von Norden“ ergänzen

Im Mittelmeer bei Toulon: ANTARES

- 2500 m Meerestiefe
- Etwa 0.03 km^3
- 900 Photomultiplier
- 2008 fertig gestellt
- ... viele interessante Ergebnisse, aber leider noch keine kosmischen Neutrinos

400 m

200 m

antares.in2p3.fr

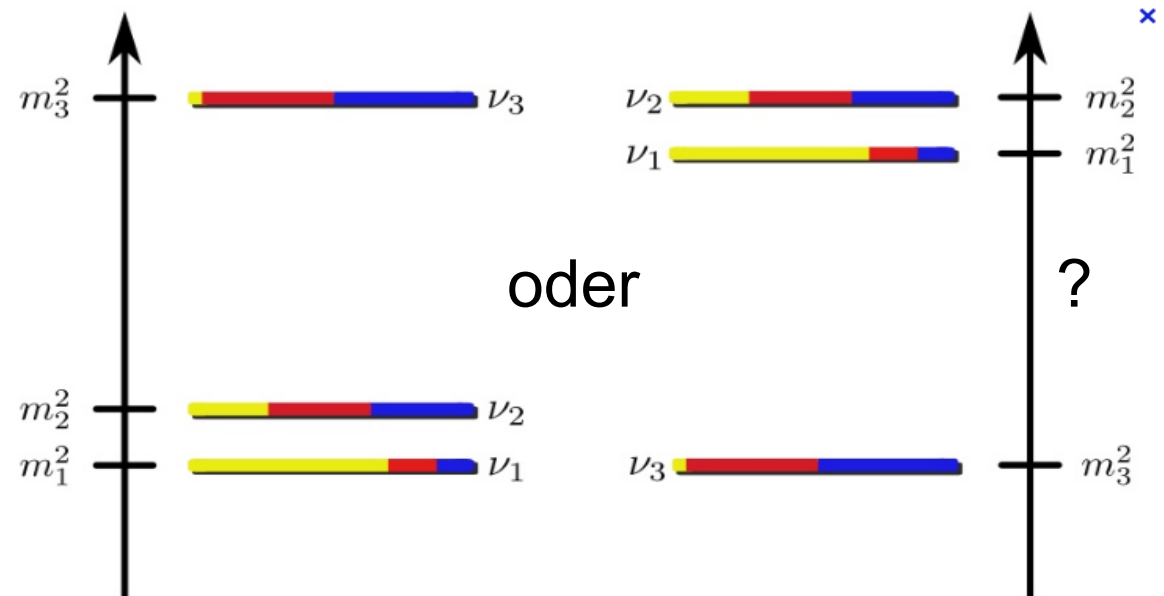
- Mehrere Kubikkilometer instrumentiertes Volumen
- Viele neue technische Entwicklungen, z.B. für Photodetektion
- Bietet Gelegenheiten für Tiefsee- und Geoforschung
- Mehrere Standorte (bei Toulon, Sizilien, zukünftig auch Peleponnes)
- Erste Bauphase läuft

Optische Module

Photomultiplier



- Neutrinos haben winzige Masse (0.2–2eV)
- Es gibt drei Sorten Neutrinos die sich ineinander umwandeln („Neutrinooszillationen“)
- Messungen lassen bisher zwei Möglichkeiten für Neutrinomassen zu
- Messung mit atmosphärischen Neutrinos (5-20 GeV) möglich
- KM3NeT-Technologie für dicht instrumentierten Detektor (ORCA)





Ausblick

- Wir beobachten Teilchen aus dem Weltraum mit riesigen Energien
- Die Messung kosmischer Gammastrahlung und Neutrinos ist der Schlüssel zur Lösung der offenen Fragen
- Die nächsten Jahre werden spannend. Auf ein Neues in ein paar Jahren?

Und: Durchhaltevermögen lohnt sich!