Antares - ein Neutrinoexperiment im Mittelmeer

Jürgen Brunner

Was sind Neutrinos ? (*)
Neutrinoastronomie – erste Schritte (*)
Das Rätsel der kosmischen Strahlen (*)
Wie funktionieren Neutrinoteleskope ?
Aktuelle Projekte → Antares

(*) Thanks for material from Ch. Spiering

Was sind Neutrinos

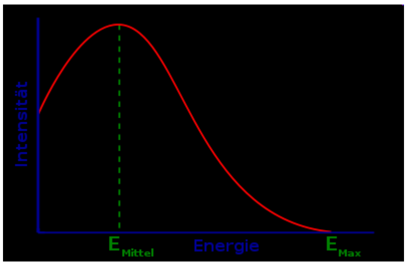
?

Das Postulat des Neutrinos: Pauli, 1930

Wolfgang Pauli, 1930

$$n \rightarrow p + e^-$$

Scheinbare Verletzung der
Energieerhaltung beim Betazerfall



Das Postulat des Neutrinos: Pauli, 1930

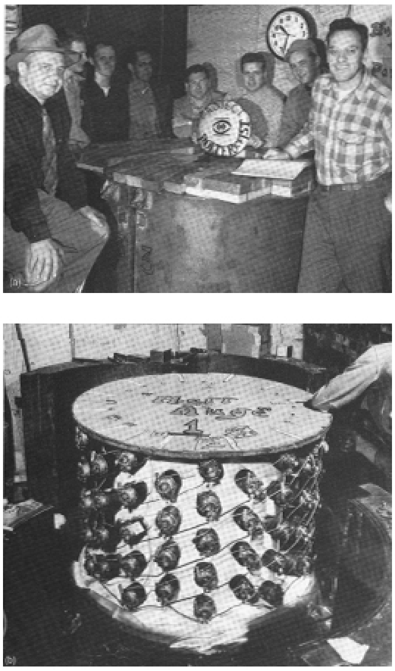
Wolfgang Pauli, 1930

$$n \rightarrow p + e^- + \nu$$

Das Postulat des Neutrinos: Pauli, 1930

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

Wolfgang Pauli, 1930

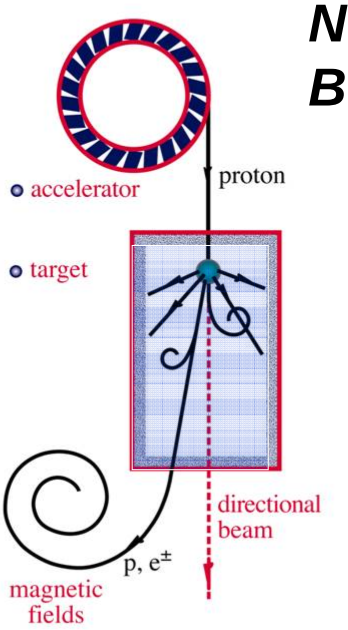


1956: Die Entdeckung des Neutrinos

Cowan und Reines

Nobelpreis 1995

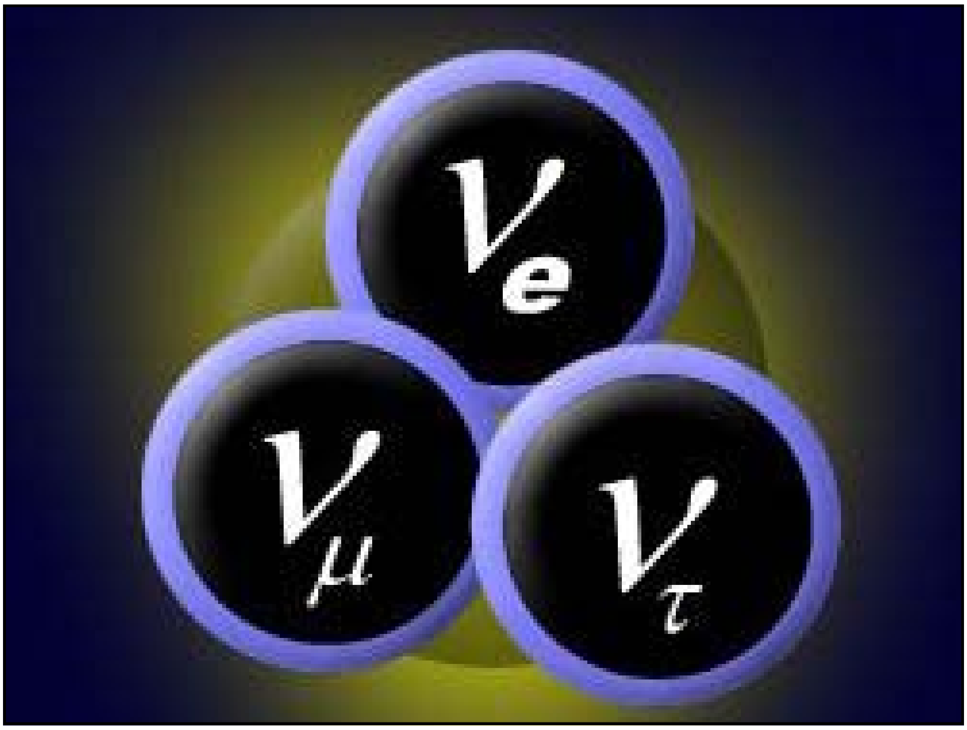
Neutrinostrahlen an Beschleunigern


accelerator
proton
target
directional beam
p, e±
magnetic fields

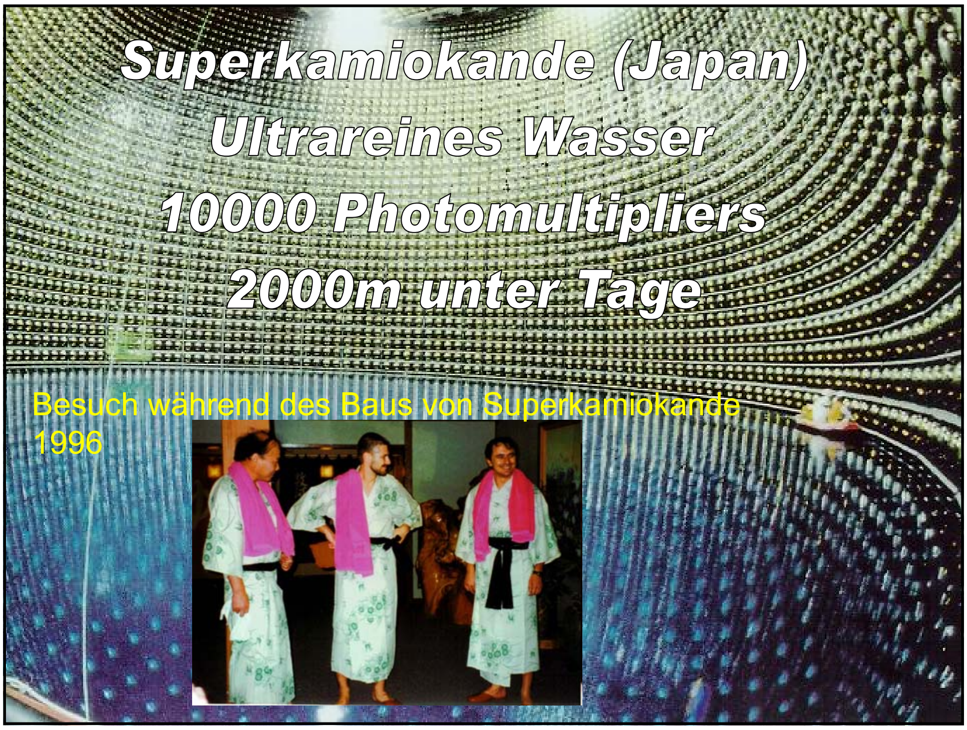
p+target $\rightarrow \pi + \ldots\ldots$

$\rightarrow \mu + \nu$

Nobelpreis 1988


ν_e
ν_μ
ν_τ

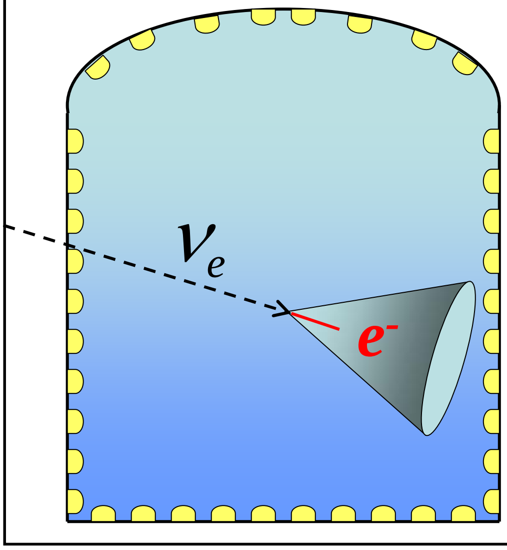
Neutrinoastronomie
Erste Schritte



Superkamiokande (Japan)
Ultrareines Wasser
10000 Photomultipliers
2000m unter Tage

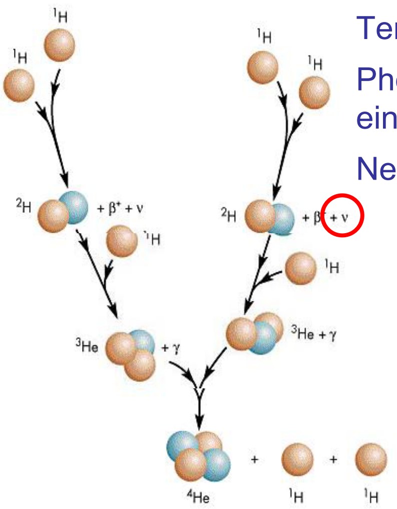
Besuch während des Baus von Superkamiokande 1996

Neutrinos in (Super)Kamiokande



$$\nu_e + e \rightarrow \nu_e + e$$

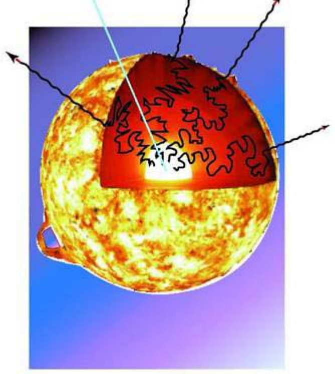
Neutrinos aus der Sonne


^1H
^1H
^2H
$+ \beta^+ + \nu$
^1H
^3He
$+ \gamma$
^1H
^1H
^2H
$+ \beta^+ + \nu$
^1H
$^3He + \gamma$
^4He
+
^1H
+
^1H

Temperatur im Sonnenkern ~ 15 Mio K

Photon-Weg bis zur Sonnenoberfläche: einige Millionen Jahre

Neutrinos: 2 Sekunden



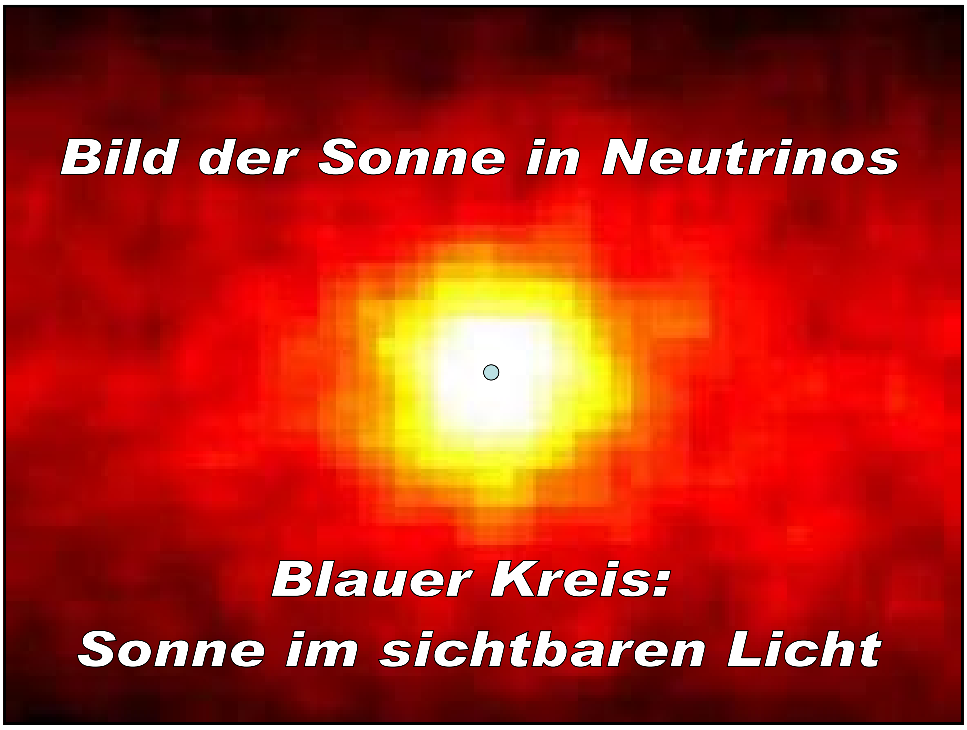
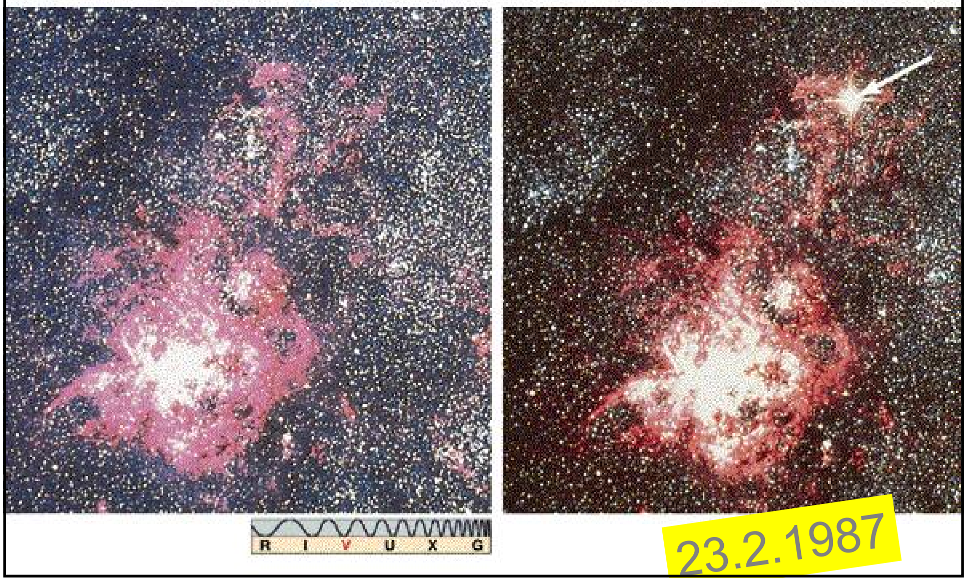


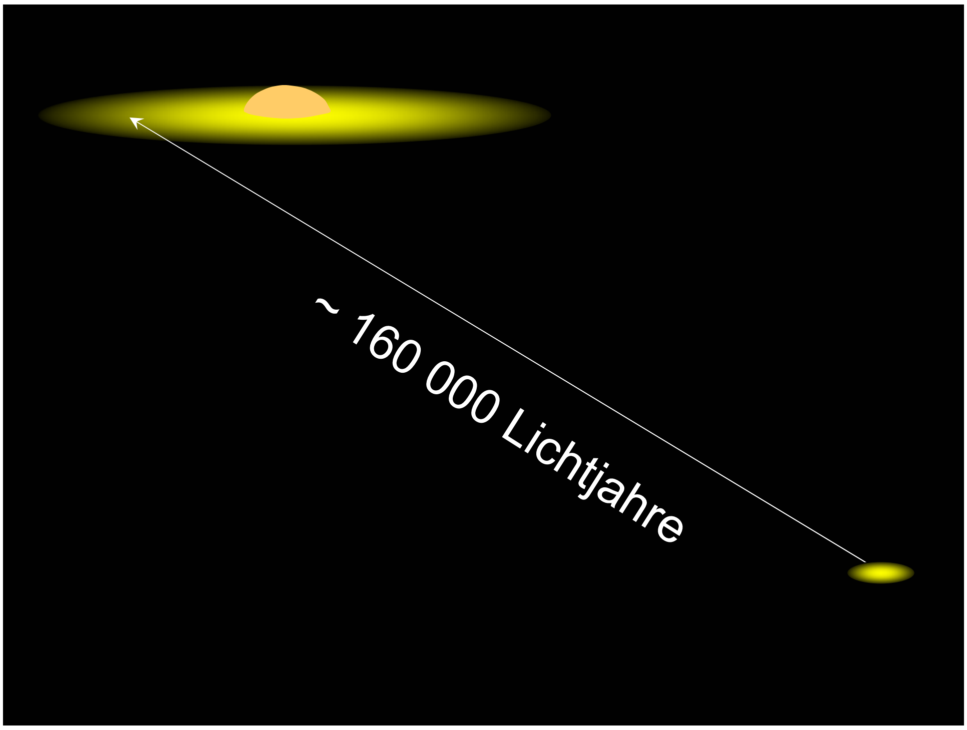
Bild der Sonne in Neutrinos

Blauer Kreis:
Sonne im sichtbaren Licht

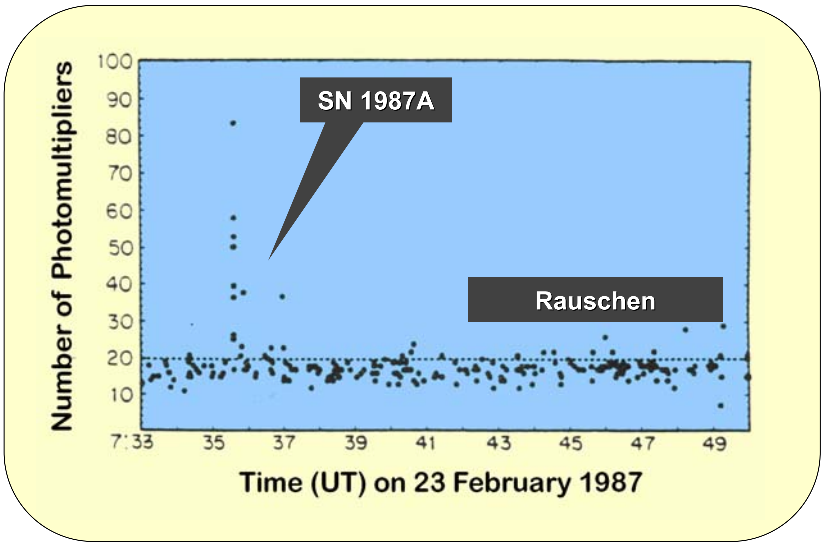
Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke



23.2.1987


~ 160 000 Lichtjahre

Neutrino-Signal von SN-1987A in Kamiokande

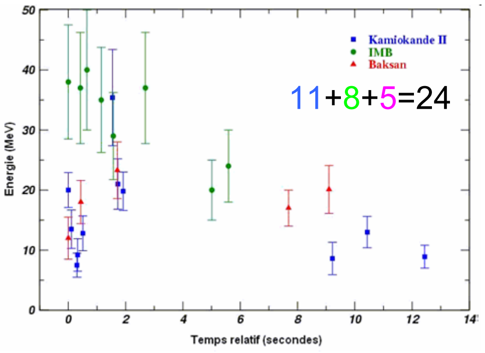


SN 1987A

Rauschen

Neutrinos von SN 1987A weltweit

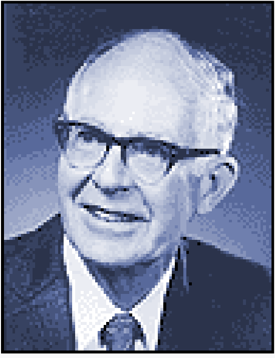
- 24 Neutrinos von 3 Experimenten detektiert
- Weitest entfernte Neutrinos, die jemals nachgewiesen wurden



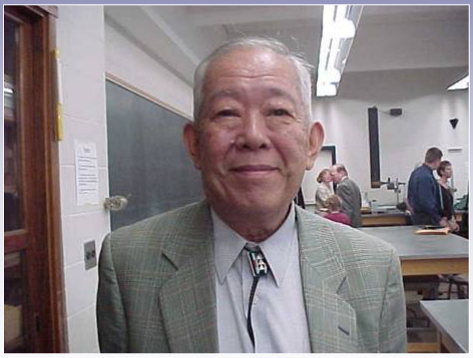
SN 1987A einige Jahre später

Nobelpreis 2002

.. für Öffnung des Neutrino-Fensters zum Universum

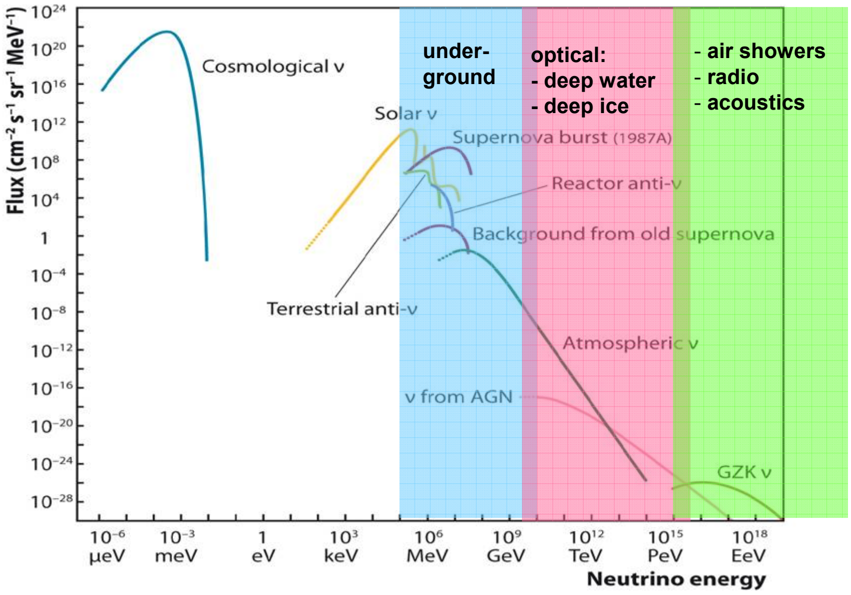


Raymond Davis jr.



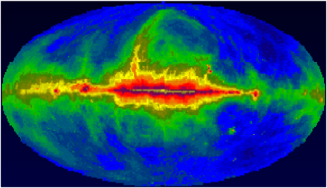
Masatoshi Koshiba

Erwartetes Energiespektrum derNeutrinos

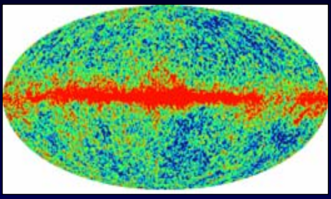


Elektromagnetische Wellen: Bilder des Universums

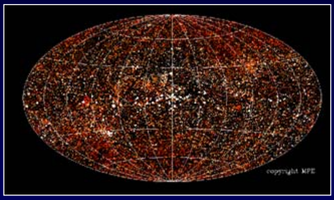
Radio

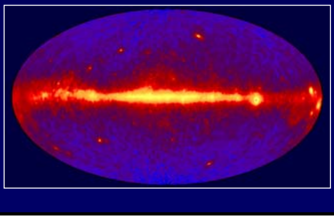


3-Kelvin Strahlung



Röntgen-Strahlen





γ- Strahlen

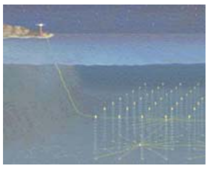
Sichtbares Licht

Neutrino Himmelskarte ?

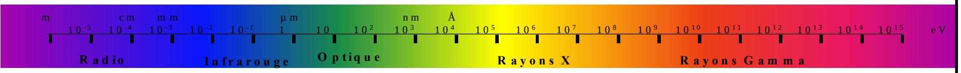
Radio Telescope
(Bonn)

Optical Telescope
(Palomar)

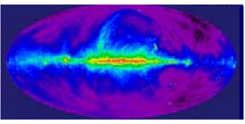
X - ray Satellite
(INTEGRAL/ESA)



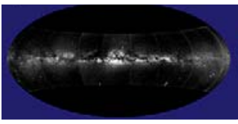
Neutrino Telescope


m
cm
mm
µm
nm
Å
10^{-5}
10^{-4}
10^{-3}
10^{-2}
10^{-1}
1
10
10^{2}
10^{3}
10^{4}
10^{5}
10^{6}
10^{7}
10^{8}
10^{9}
10^{10}
10^{11}
10^{12}
10^{13}
10^{14}
10^{15}
eV
Radio
Infrarouge
Optique
Rayons X
Rayons Gamma

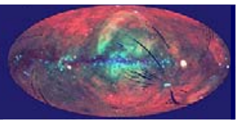
View of sky in Galactic Coordinates in four different photon wavelengths



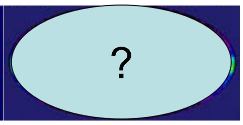
Radio



Visible light



X - rays



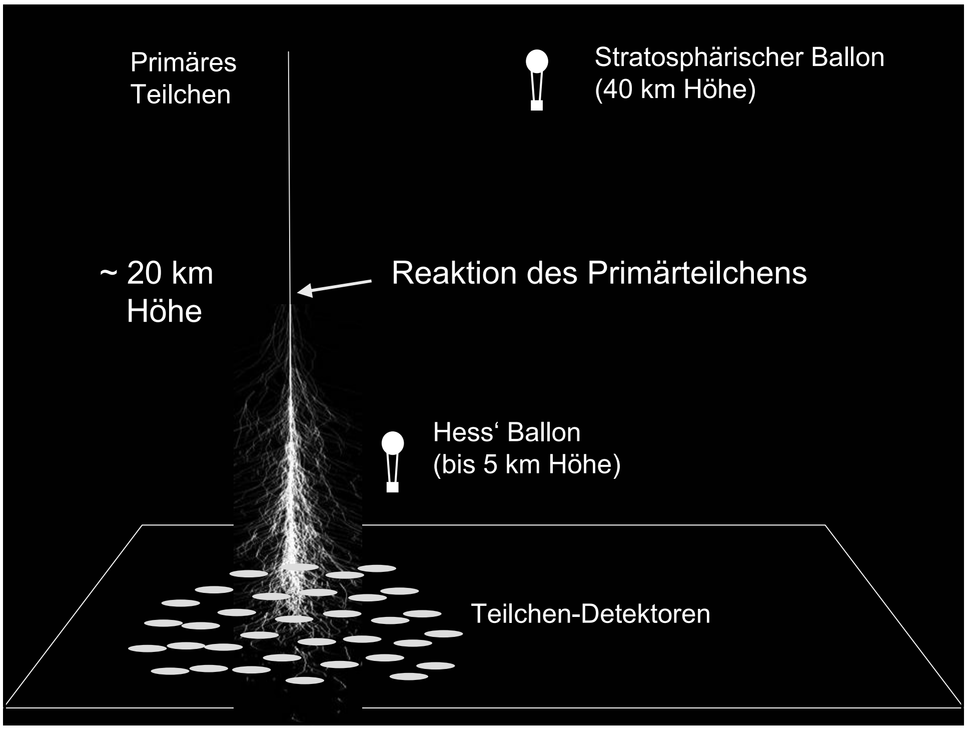
Neutrinos

Das Geheimnis der kosmischen Strahlung

Die Entdeckung der kosmischen Strahlung

Nobelpreis 1936

Sommer 1912



Primäres Teilchen

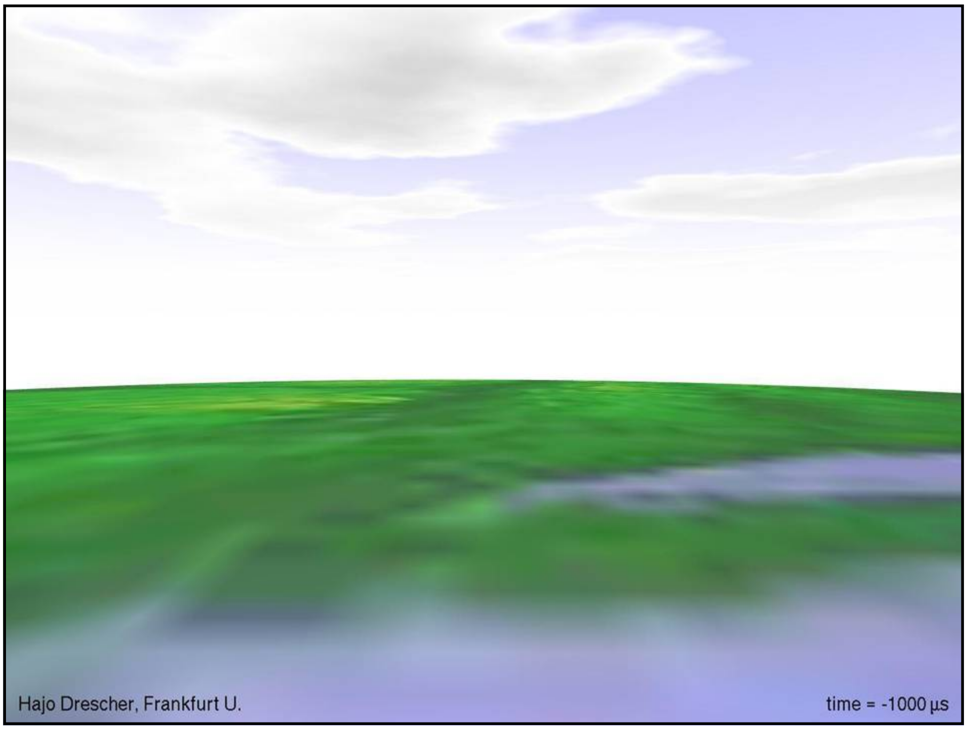
Stratosphärischer Ballon
(40 km Höhe)

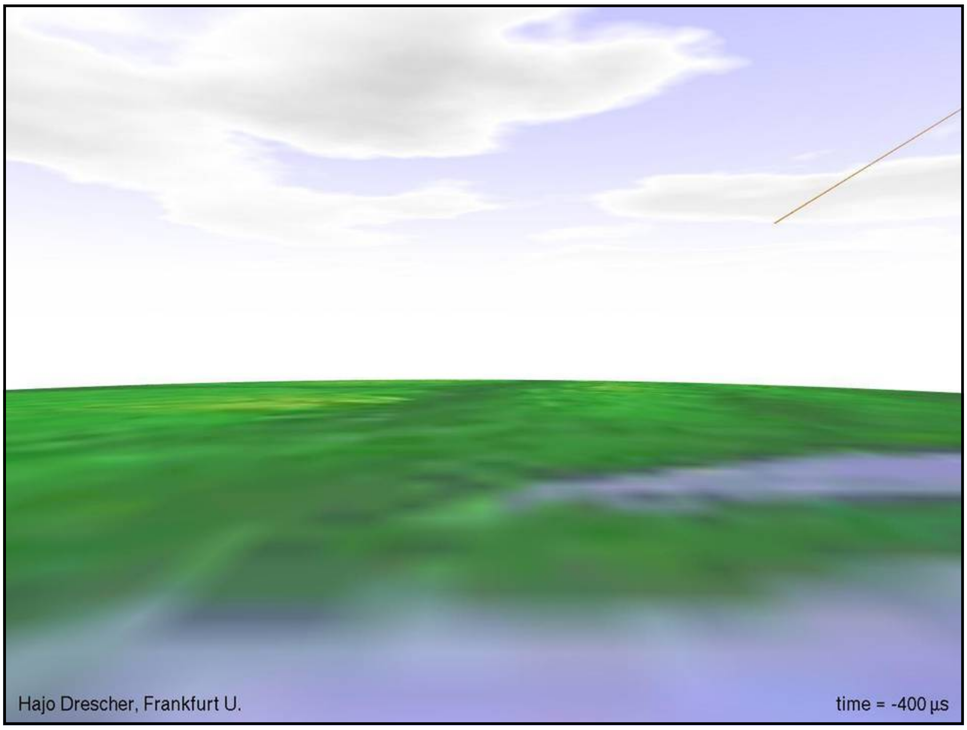
~ 20 km Höhe

Reaktion des Primärteilchens

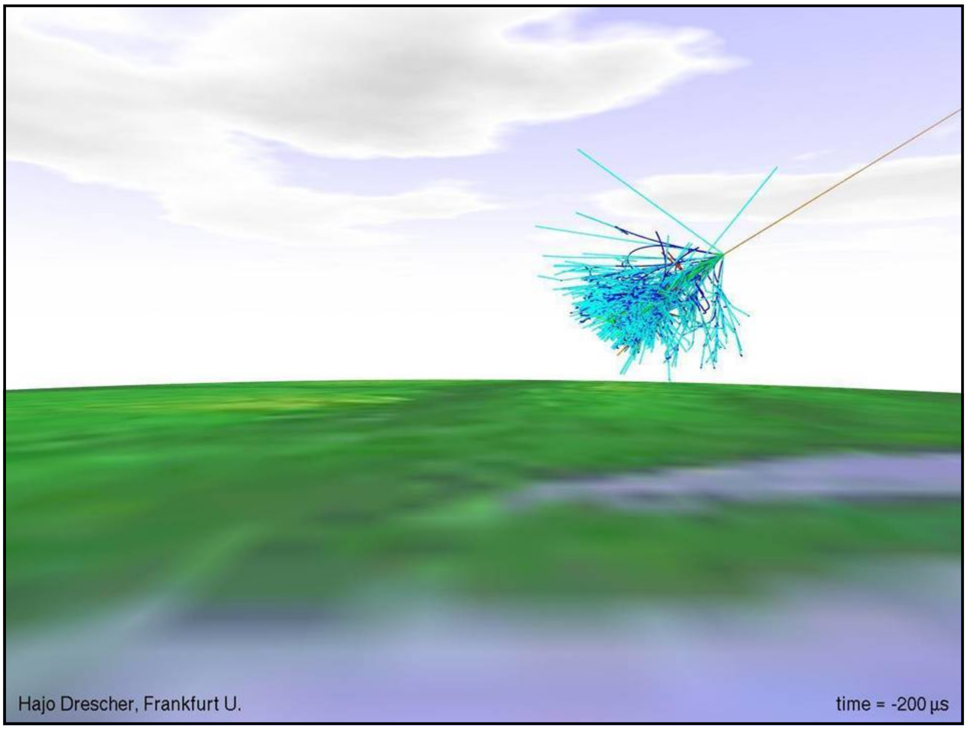
Hess‘ Ballon
(bis 5 km Höhe)

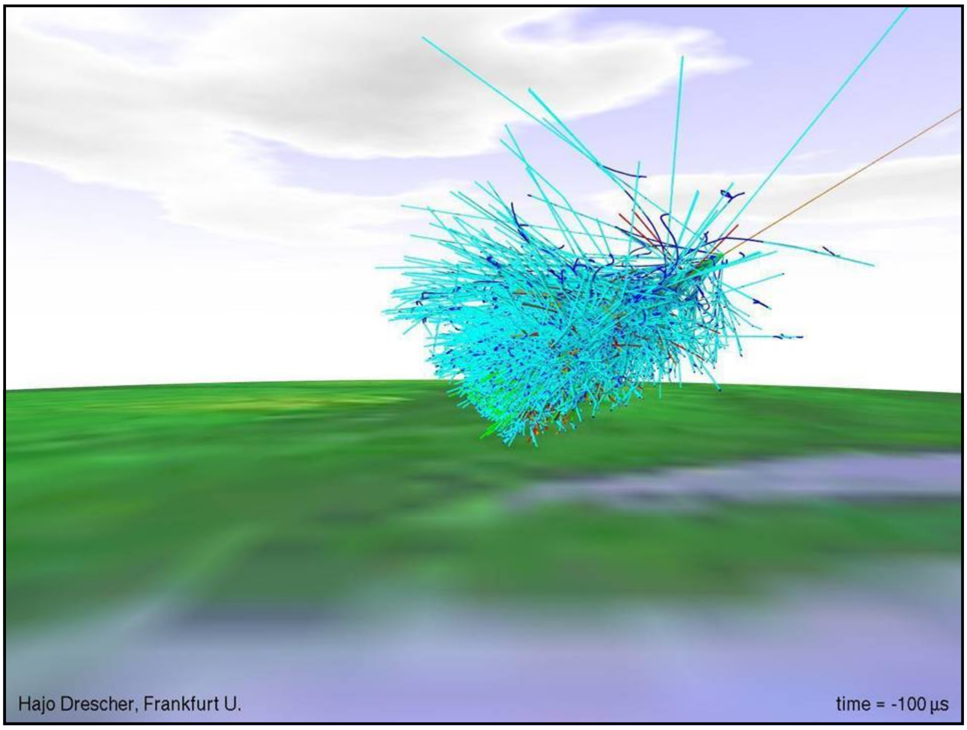
Teilchen-Detektoren

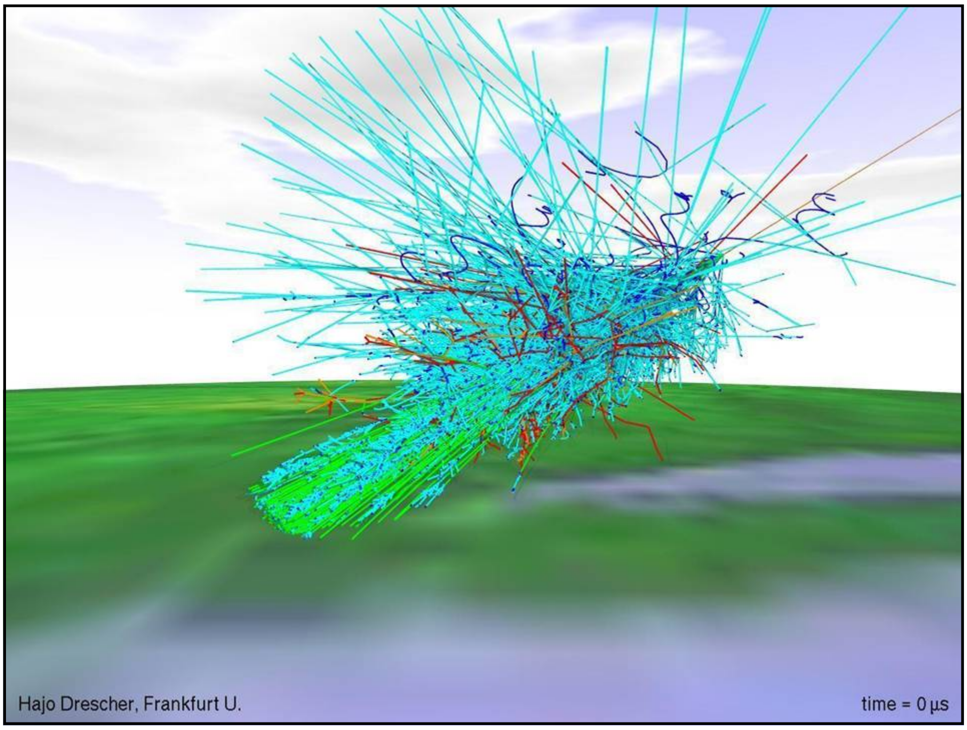

Hajo Drescher, Frankfurt U.
time = -1000 µs

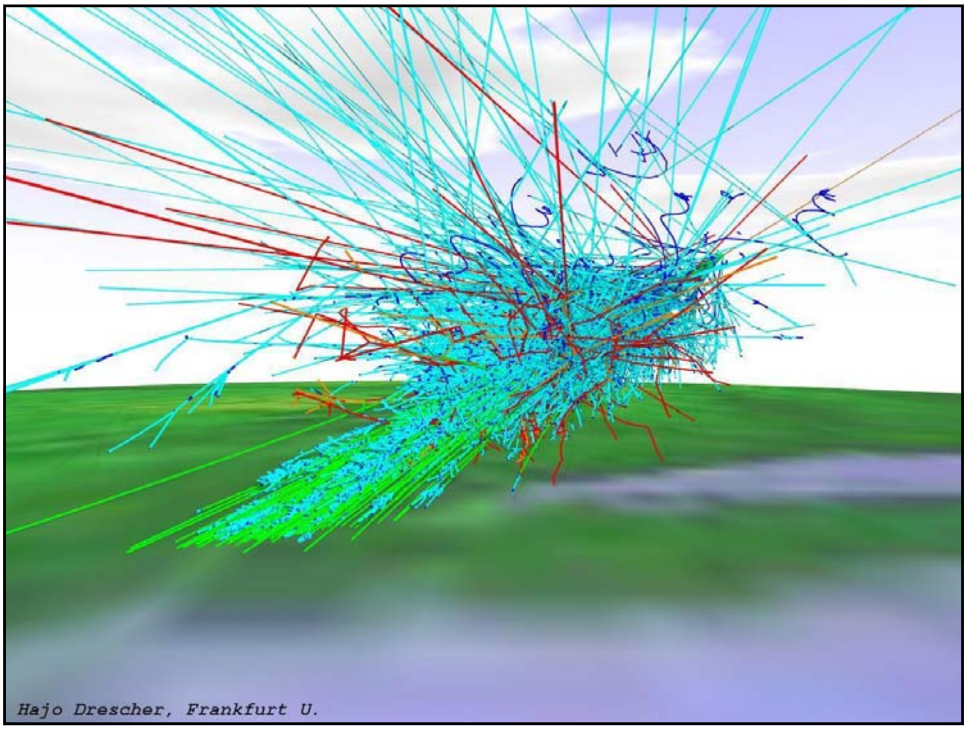

Hajo Drescher, Frankfurt U.
time = -400 µs

Hajo Drescher, Frankfurt U.
time = -300 µs

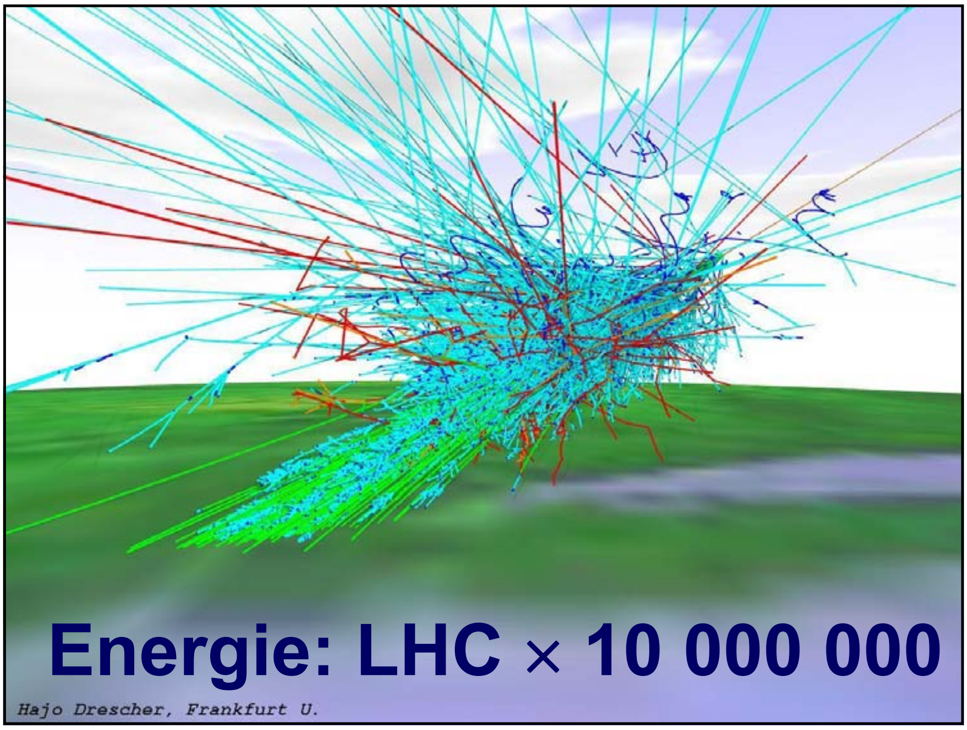

Hajo Drescher, Frankfurt U.
time = -200 µs


Hajo Drescher, Frankfurt U.
time = -100 µs


Hajo Drescher, Frankfurt U.
time = 0 µs



Hajo Drescher, Frankfurt U.



Energie: LHC × 10 000 000

Hajo Drescher, Frankfurt U.

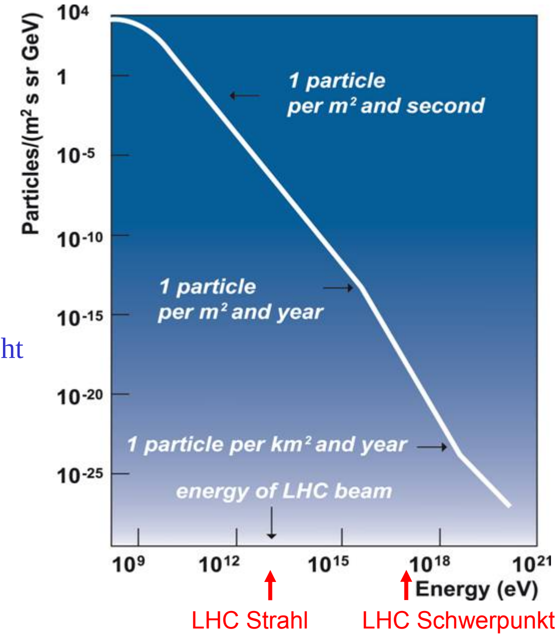
Spektrum der kosmischen Strahlen

Nichtthermisches Spectrum

Kann durch Stosswellenbeschleunigung erklärt werden

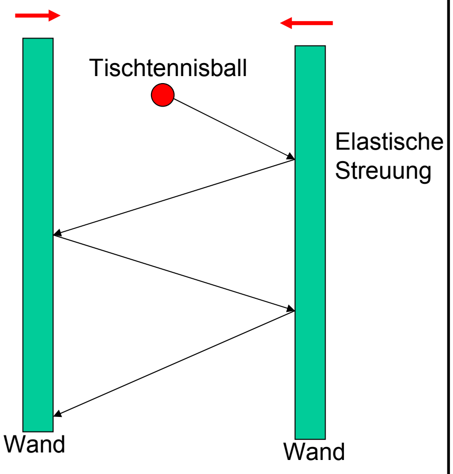
Hypothesen fur Quellen existieren
Direkter Nachweis bisher nicht gelungen

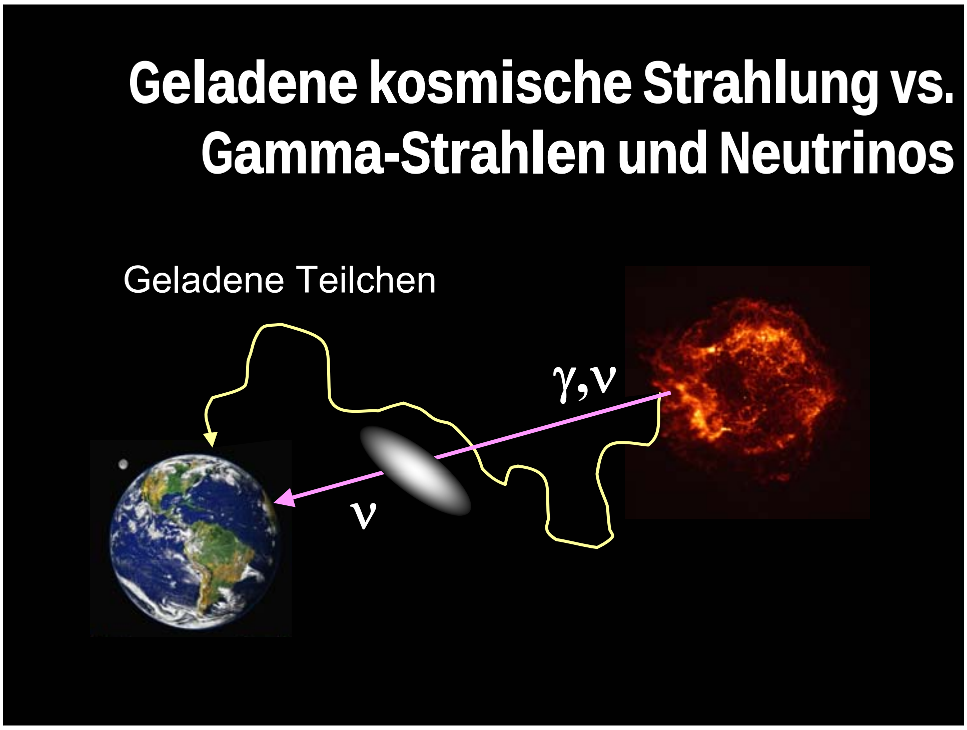
Deutlich höhere Energien als am LHC konnen erreicht werden



Stoßwellenbeschleunigung ?

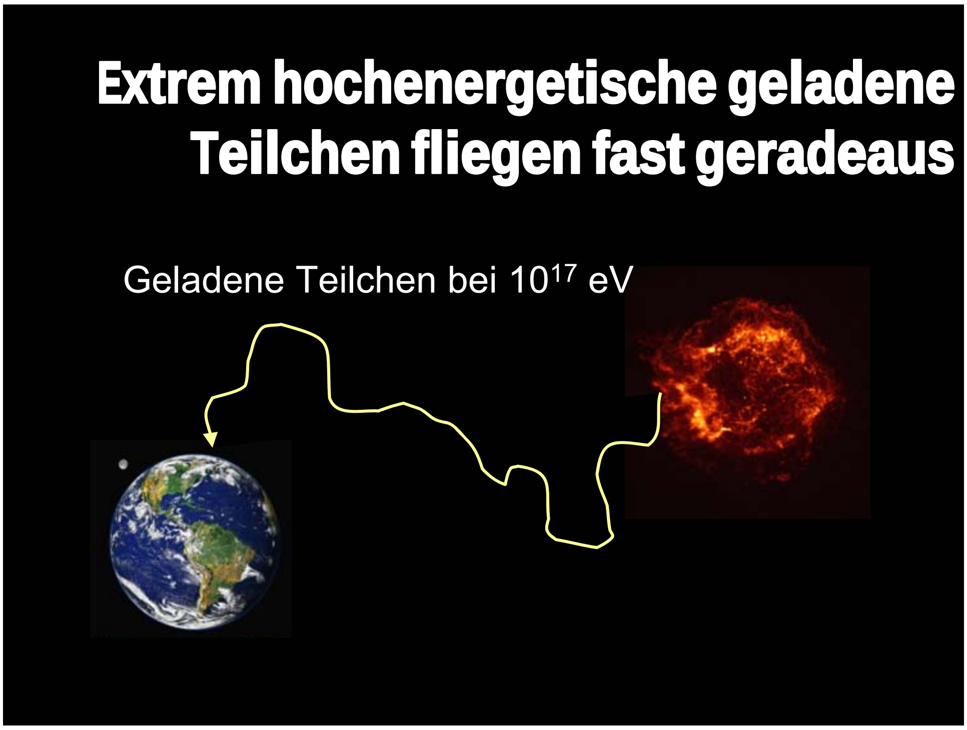
- Bei jedem Rückprall erhält der Ball etwas von der Bewegungsenergie der Wände
- Ball → Elektronen, Protonen
- Wand1: z.B. Explosionswolke einer Supernova
- Wand2: umgebendes Material
- Wände: Magnetfelder





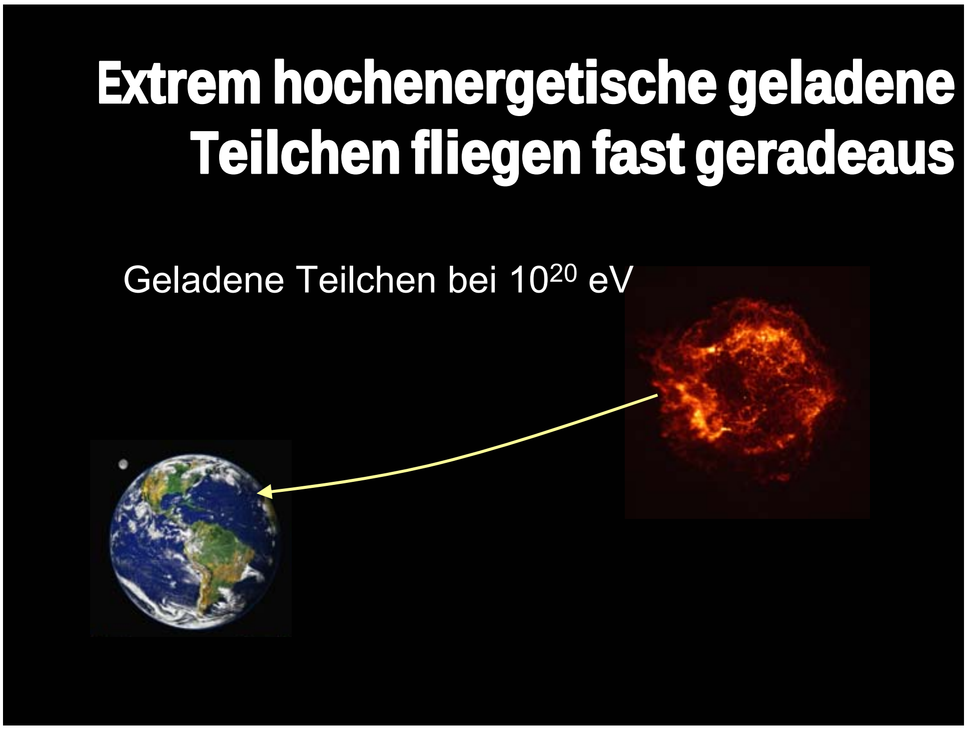
Geladene kosmische Strahlung vs. Gamma-Strahlen und Neutrinos

Geladene Teilchen



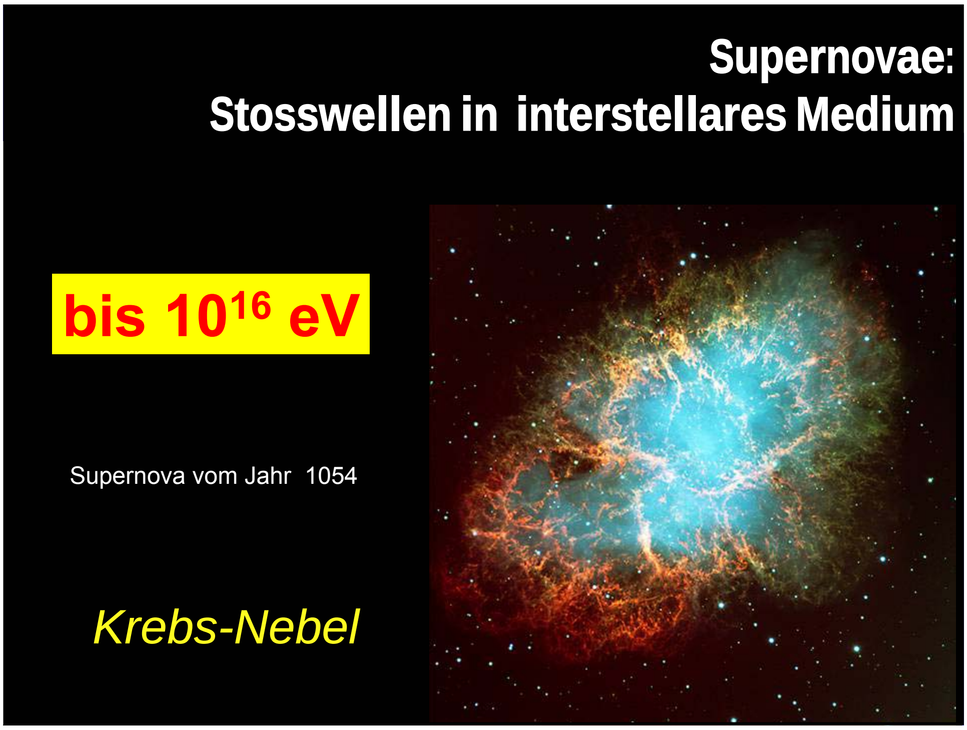
Extrem hochenergetische geladene Teilchen fliegen fast geradeaus

Geladene Teilchen bei 10^{17} eV



Extrem hochenergetische geladene Teilchen fliegen fast geradeaus

Geladene Teilchen bei 10^{20} eV



Supernovae:
Stosswellen in interstellares Medium

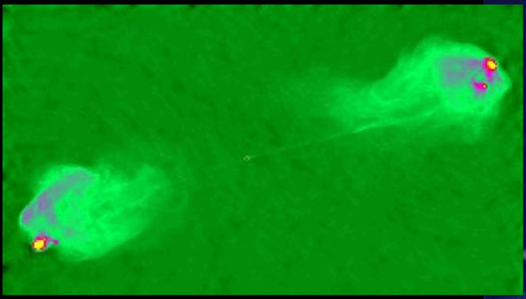
bis 10^{16} eV

Supernova vom Jahr 1054

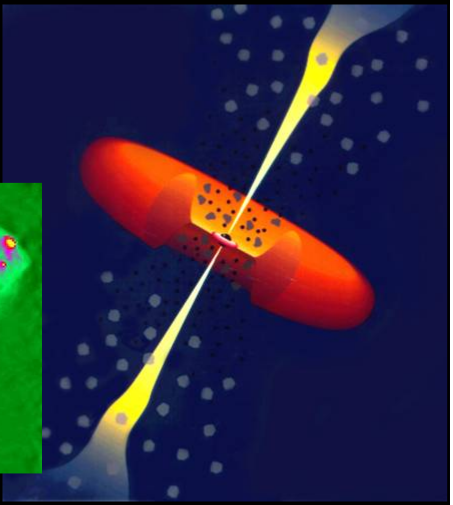
Krebs-Nebel

Aktive Galaxien: Akkretionsscheiben und Jets

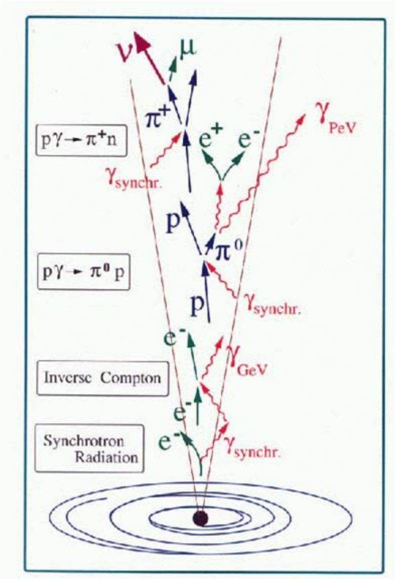
bis 10^{20} eV



Radiobild von Cygnus A



Teilchenbeschleunigung in Jets


ν
μ
π+
e+
e-
γ PeV
pγ → π+n
γ synchr.
p
π0
pγ → π0 p
p
γ synchr.
e-
γ GeV
Inverse Compton
e-
e-
Synchrotron Radiation
γ synchr.

Ch. Spiering

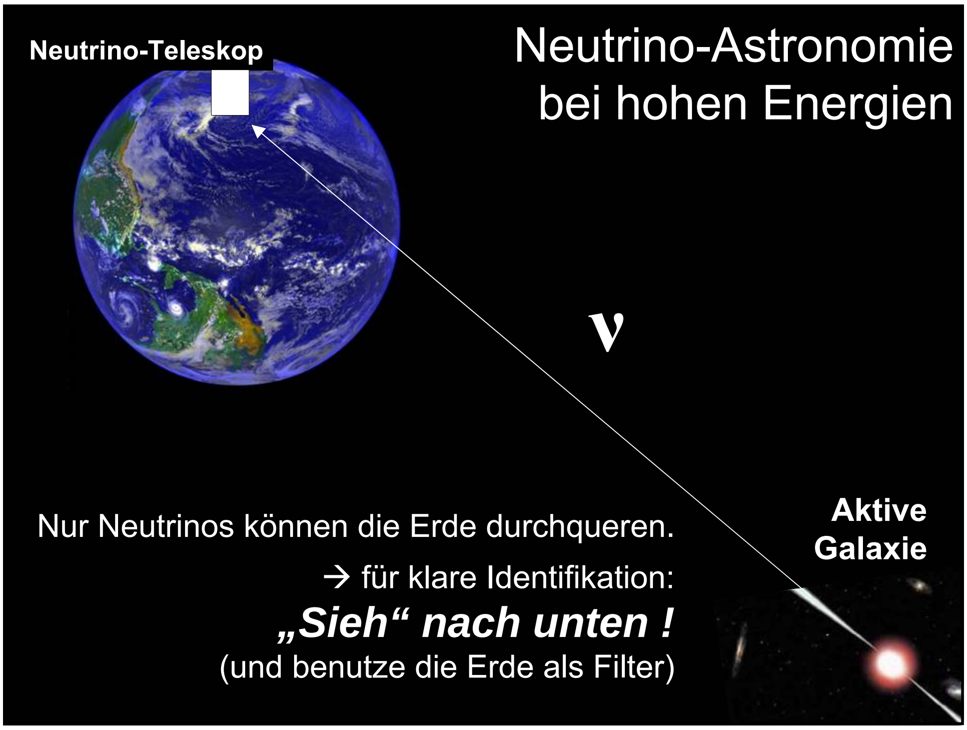
Protonbeschleunigung:
Protons (CR), Gammas
Neutrinos

Nur Neutrinos können zweifelsfrei Protonbeschleuniger nachweisen

Electronbeschleunigung:
Gammas + X-rays

Wie funktionieren Neutrinoteleskope

?



Neutrino-Astronomie bei hohen Energien

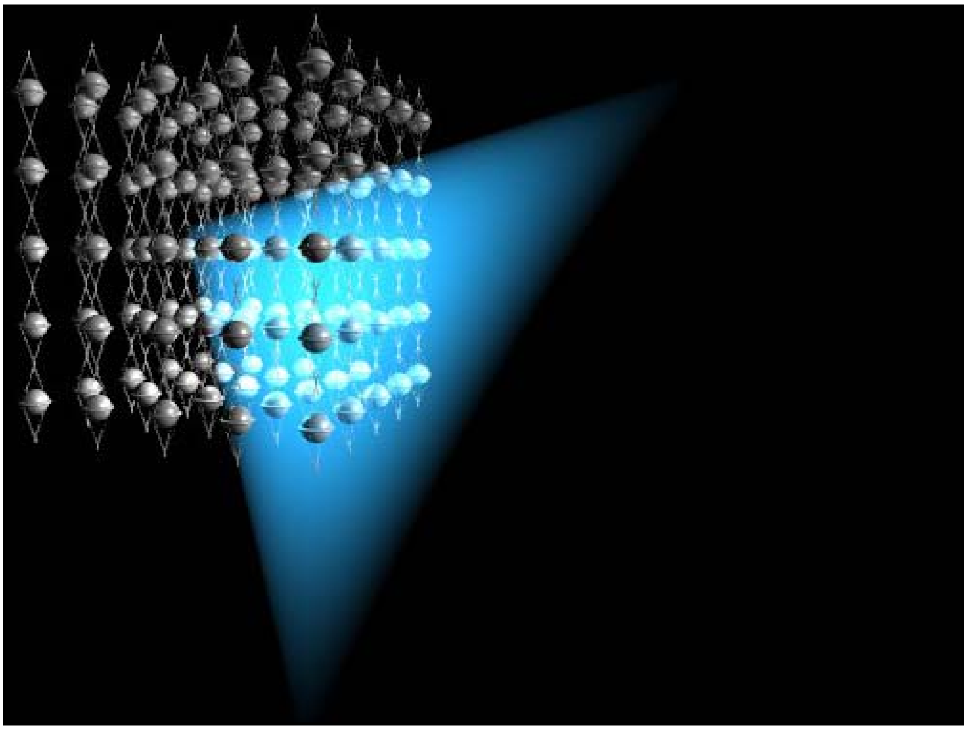
Neutrino-Teleskop
ν
Aktive Galaxie

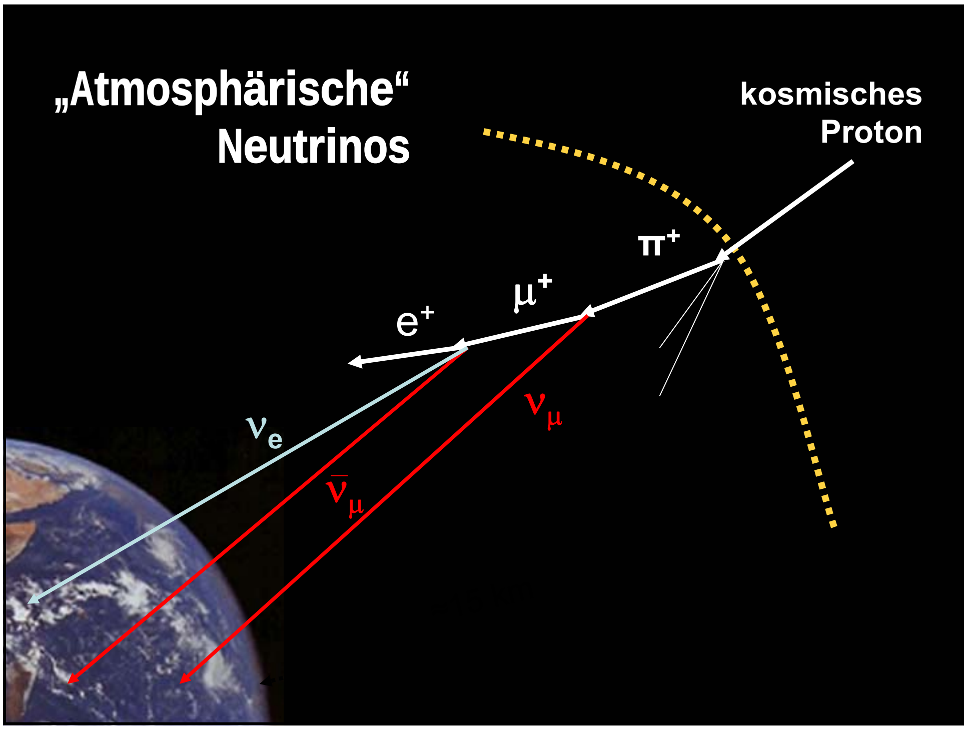
Nur Neutrinos können die Erde durchqueren.

→ für klare Identifikation:

„Sieh" nach unten !

(und benutze die Erde als Filter)

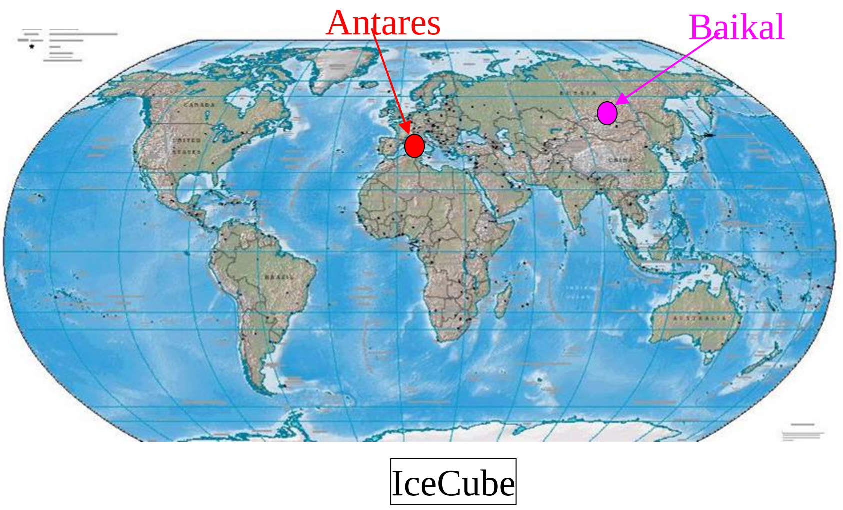




„Atmosphärische“ Neutrinos

kosmisches Proton
π^+
μ^+
e^+
ν_e
$\bar{\nu}_\mu$
ν_μ

Existierende Neutrinoteleskop-Projekte



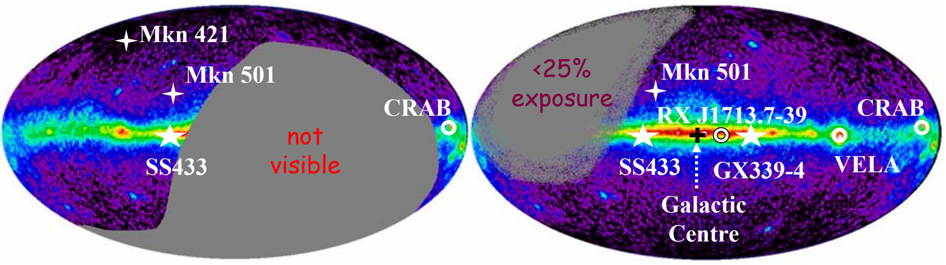
Komplementarität Nord-Süd

IceCube (Südpol)

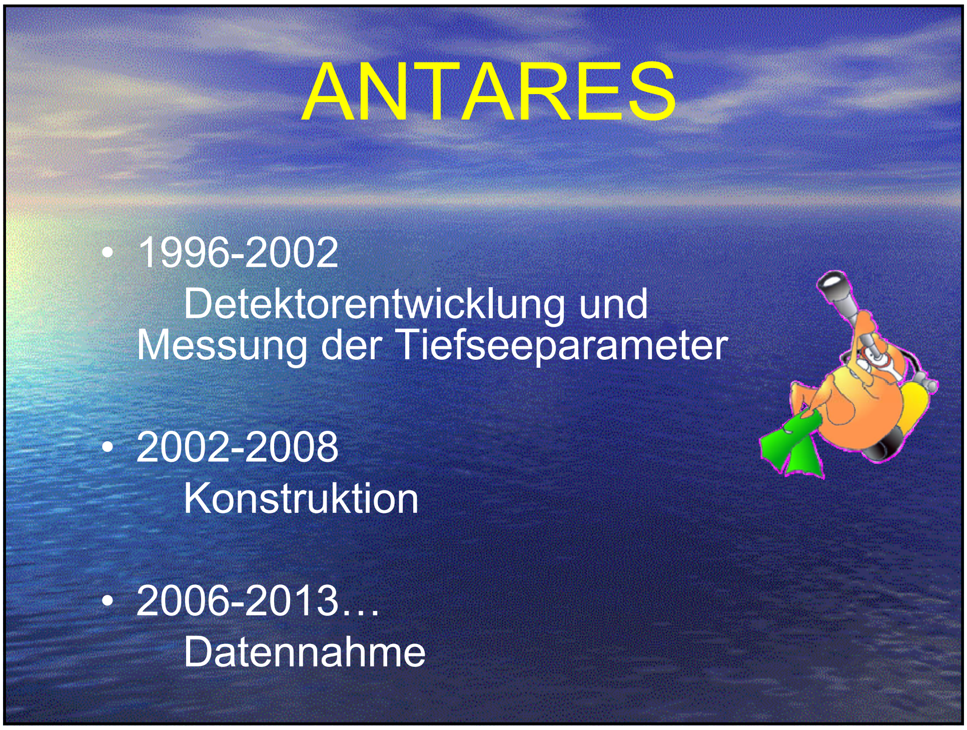
Eis ⟶ Kein optisches Rauschen, steril, sensitiv auch auf niederenergetische Neutrinos

ANTARES (43° Nord)

Wasser ⟶ Weniger Lichtstreuung → bessere Winkelauflösung

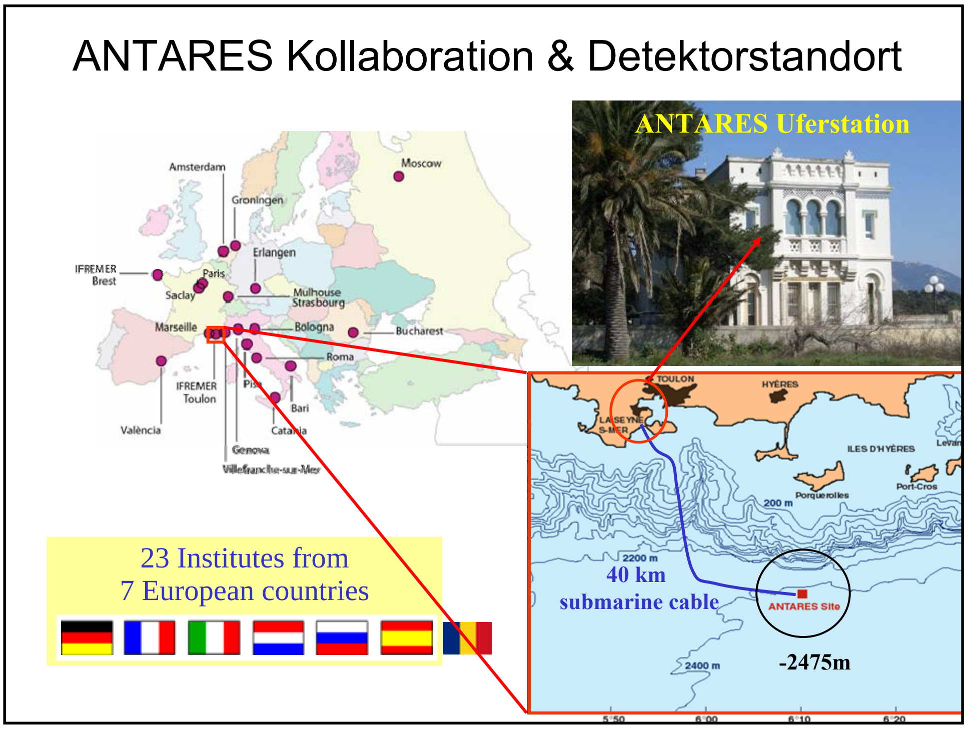


Komplementärer Himmelsausschnitt, wenn nur Signale “von unten“ betrachtet werden



ANTARES

- 1996-2002
  Detektorentwicklung und Messung der Tiefseeparameter
- 2002-2008
  Konstruktion
- 2006-2013…
  Datennahme



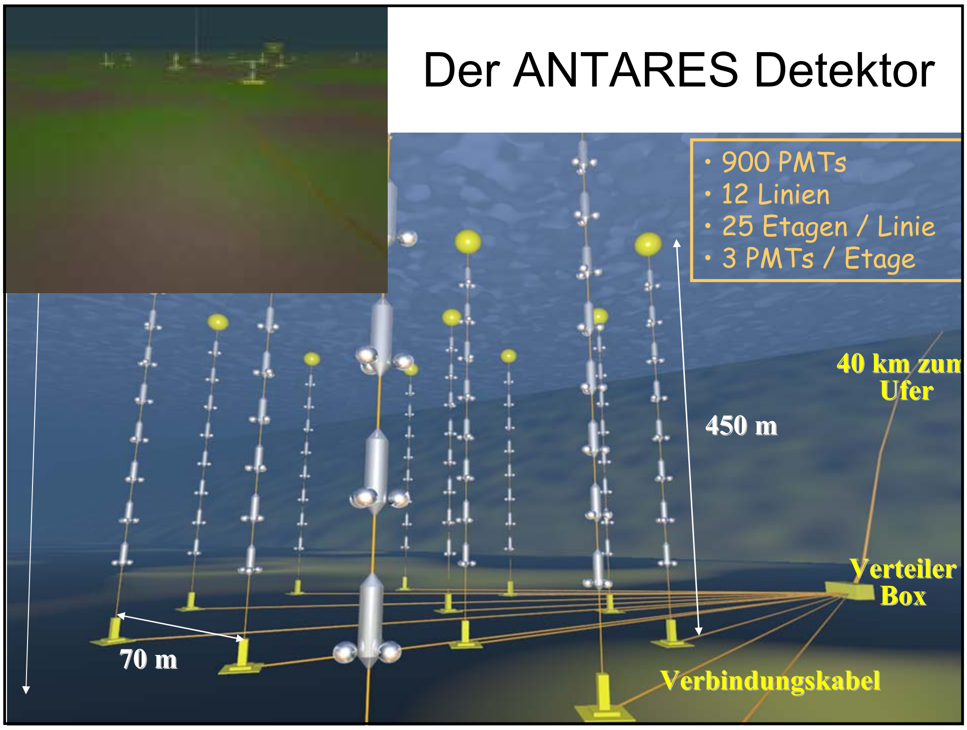
ANTARES Kollaboration & Detektorstandort

ANTARES Uferstation
Amsterdam
Moscow
Groningen
Erlangen
IFREMER Brest
Paris
Saclay
Mulhouse Strasbourg
Marseille
Bologna
Bucharest
Roma
IFREMER Toulon
Pisa
Bari
València
Catania
Genova
Villefranche-sur-Mer
TOULON
HYÈRES
LA SEYNE S-MER
ILES D'HYÈRES
Levant
Porquerolles
Port-Cros
200 m
2200 m
40 km submarine cable
ANTARES Site
2400 m
-2475m
5°50
6°00
6°10
6°20

23 Institutes from
7 European countries

Der ANTARES Standort & Infrastruktur

Uferstation
IFREMER Toulon
FOSELEV Schiffswerft

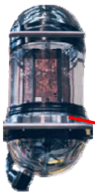


Der ANTARES Detektor

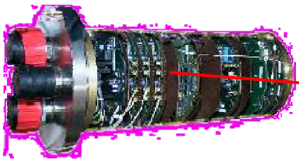
- 900 PMTs
- 12 Linien
- 25 Etagen / Linie
- 3 PMTs / Etage

40 km zun
Ufer
450 m
Verteiler
Box
70 m
Verbindungskabel

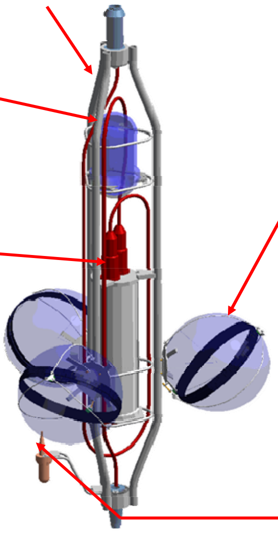
Die Antares-Etage



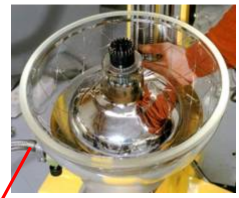
Optische Leuchtfeuer mit blauen LEDs:
Zeiteichung



Lokales Kontrollmodul (im Ti Zylinder):
Digitalisierung der PMT signale
Integrierter Computer (IP Adresse, telnet)



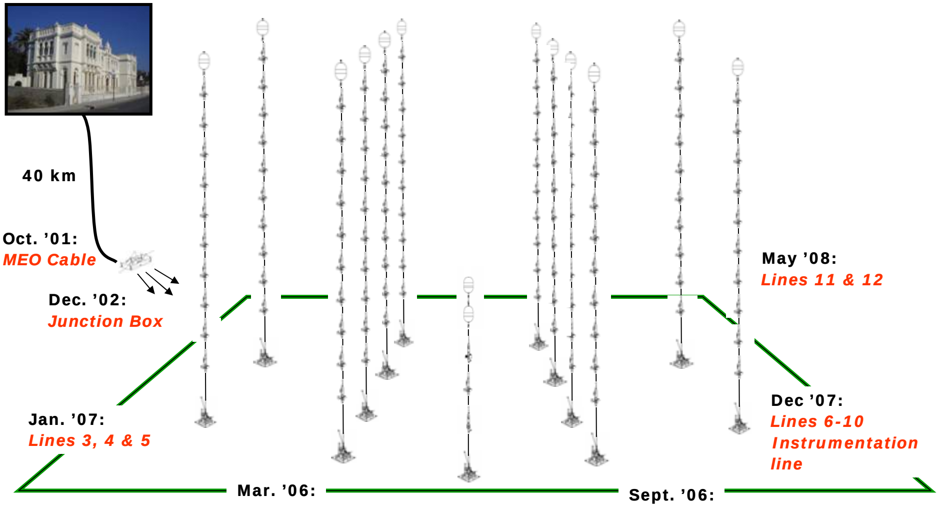
Titaniumrahmen



Optisches Modul:
10” Hamamatsu PMT in 17” Glaskugel
($\sigma_{TTS} \approx 1.3$ ns)
Photonennachweis

Hydrophon
akustische Positionierung

Konstruktion von ANTARES



La Seyne-sur-Mer

40 km

Oct. ’01:
MEO Cable

Dec. ’02:
Junction Box

Jan. ’07:
Lines 3, 4 & 5

Mar. ’06:
Line 1

Sept. ’06:
Line 2

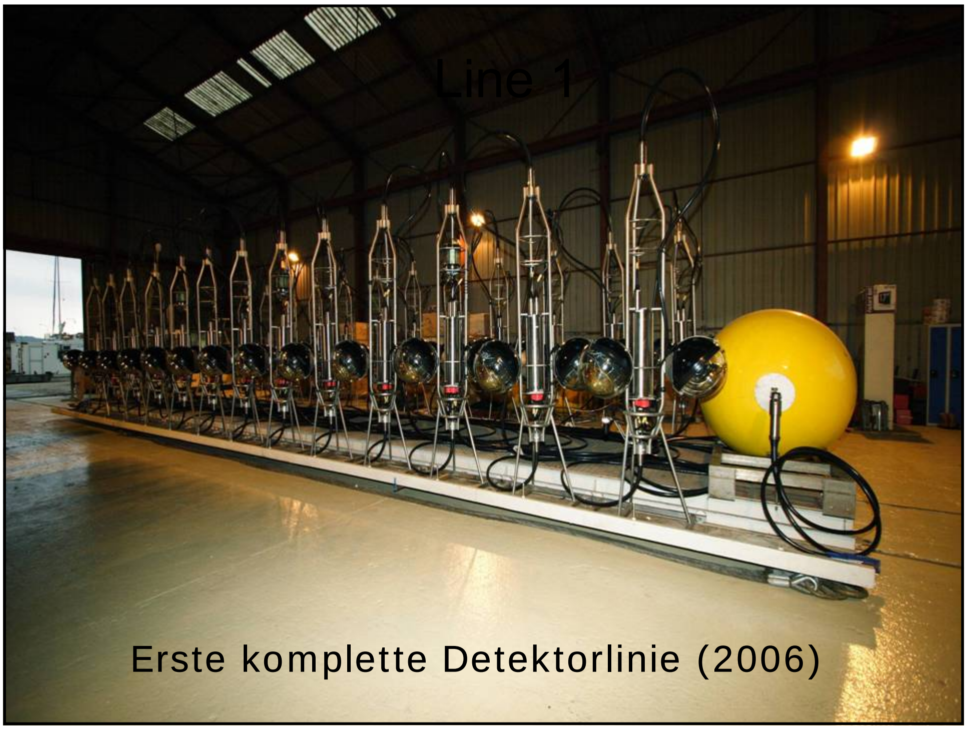
Dec ’07:
Lines 6-10
Instrumentation line

May ’08:
Lines 11 & 12

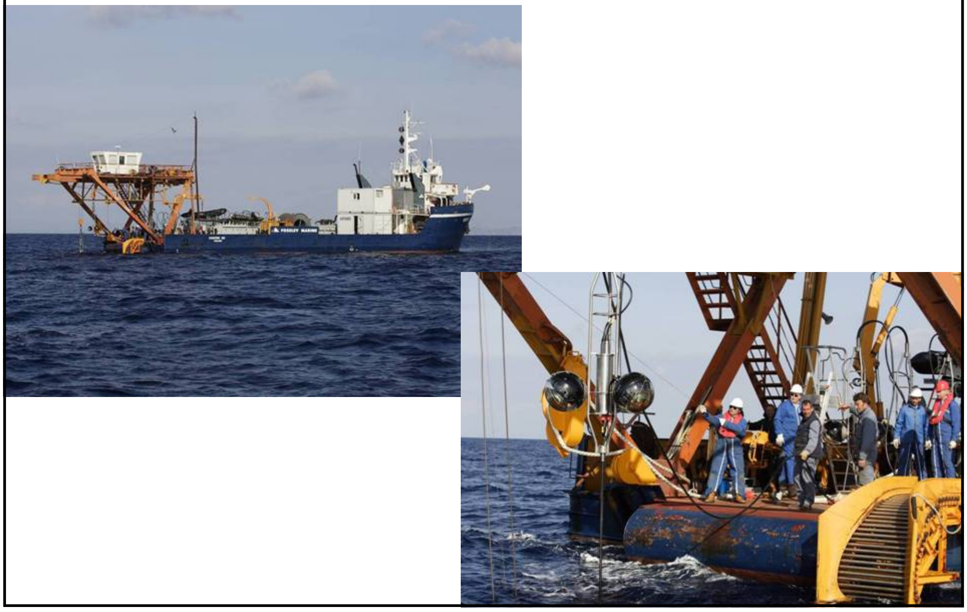
2001: Verlegung des Tiefseekabels

2002: Wasserung der Verteilerbox

Line 1

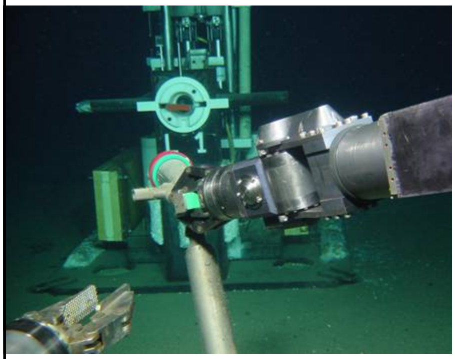

Erste komplette Detektorlinie (2006)

Installation einer Detektorlinie mit der CASTOR

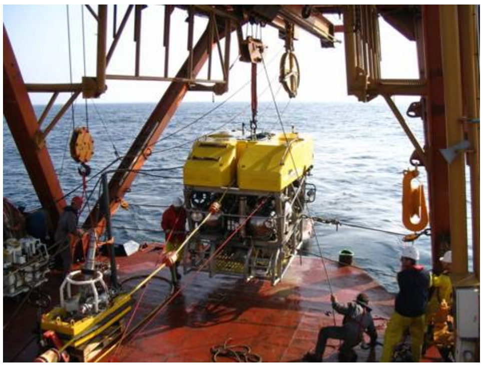


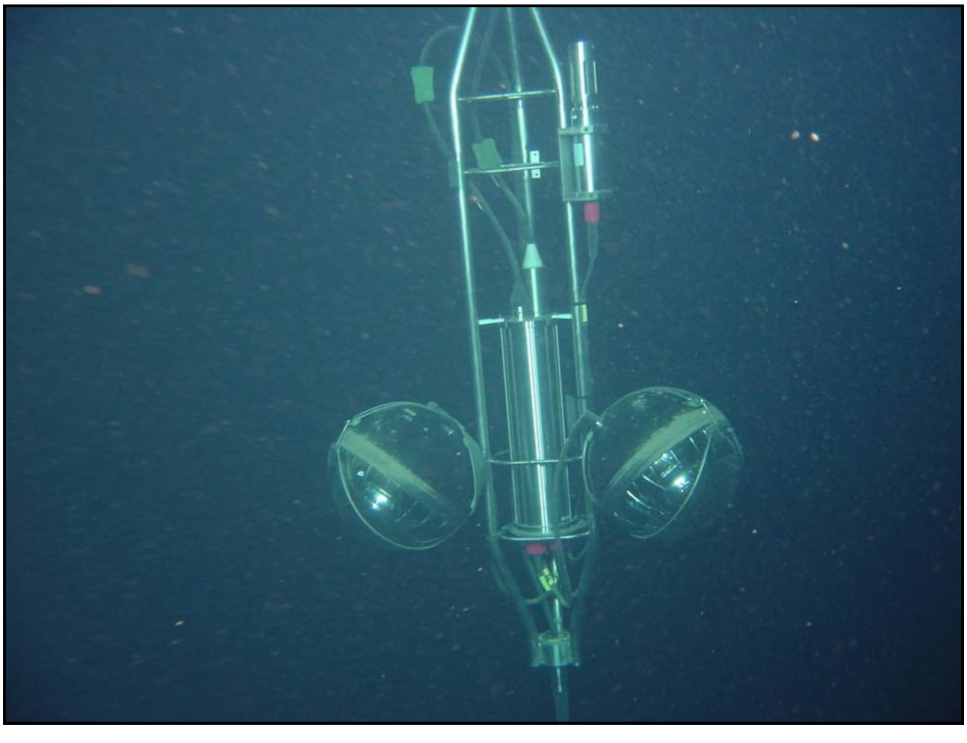
Verbindung der ersten Detektorlinie mit ferngesteuertem U-Boot von IFREMER

Verbindung am Linienfuß

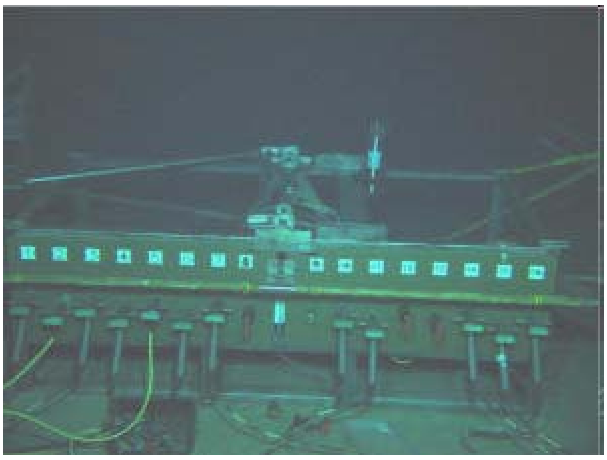


ROV VICTOR



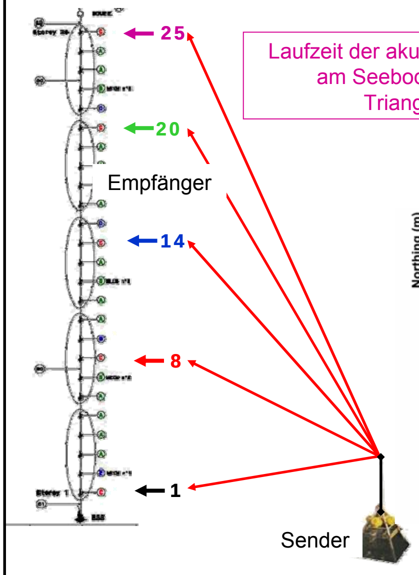


Verteilerbox heute



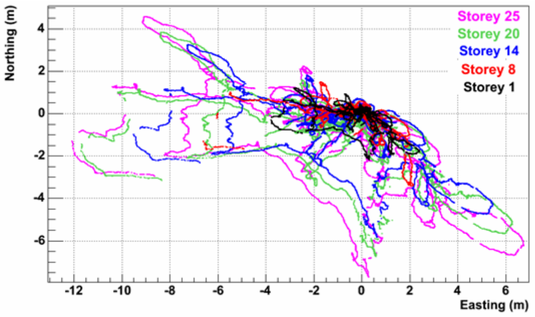
12 + 1 Linie erfolgreich verkabelt
Photo vom U-Boot Mai 2008

Akustisches Positionierungssystem



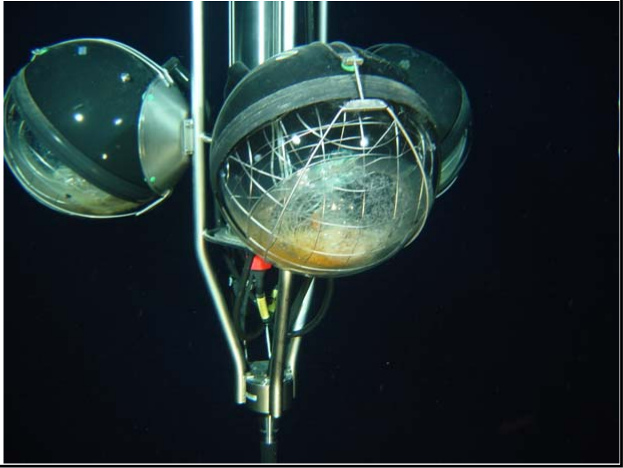
Laufzeit der akustischen Signale (pings) zwischen festen Sendern am Seeboden und Empfängern auf den Linien erlauben Triangulation und Bestimmung der Positionen

Position der Empfänger (Hydrophone) relativ zum Linienfuß

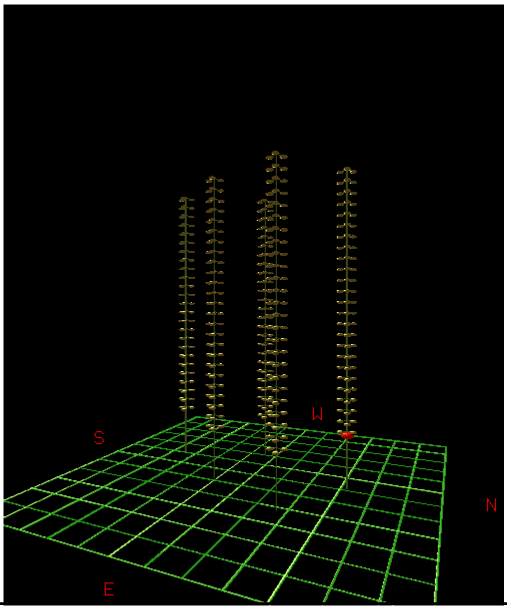


Implosion eines Photomultipliers

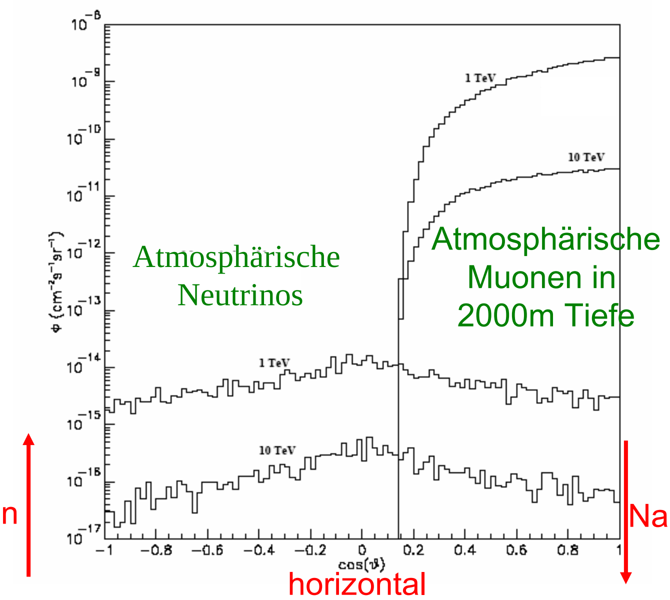
- Etwa ~10 Fälle identifiziert
- Wassereinbruch am Kabeleintritt verantwortlich
- Implosion einer Druckglaskugel nie vorgekommen



Erstes Neutrino März 2007



Erwartete Muonraten im Detektor



Atmosphärische
Neutrinos

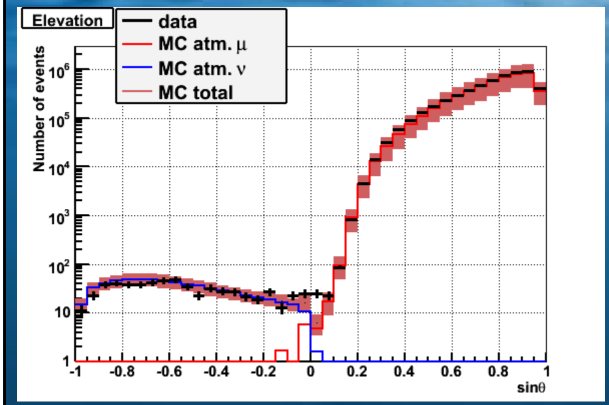
Atmosphärische
Muonen in
2000m Tiefe

Nach oben

Nach unten

horizontal

2008: Neutrinoernte

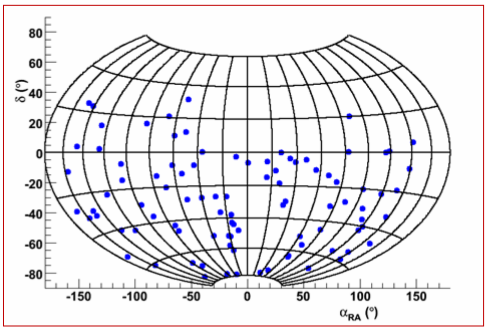


174 aktive Tage
599 Kandidaten

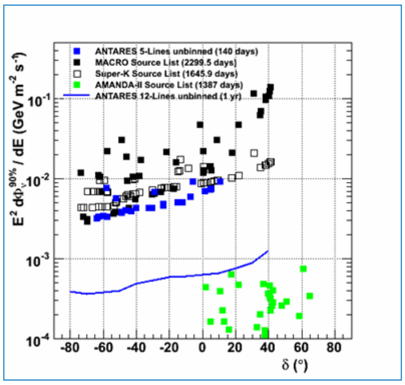
Kosmische Neutrinos ?

- Bisher nichts gefunden
- Himmelskarte kompatibel mit gleichmäßig verteilten atmosphärischen Neutrinos
- Neutrinoflussgrenzwerte für ausgesuchte Quellen

5-Linien Himmelskarte

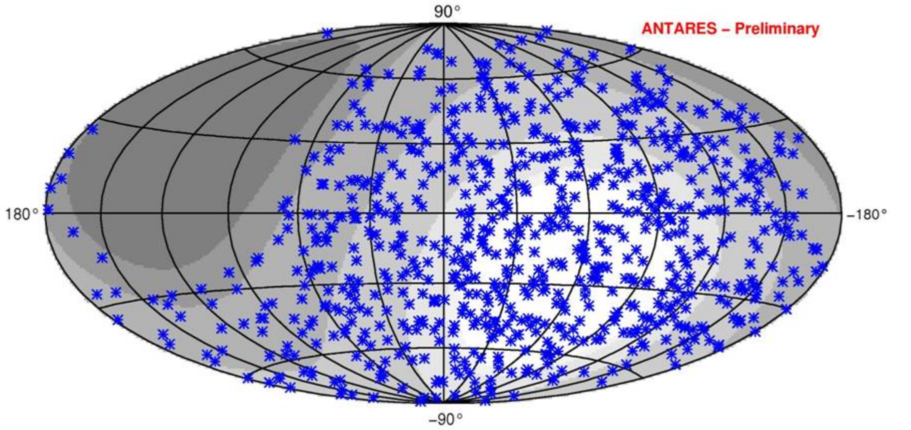

80
60
40
20
0
-20
-40
-60
-80
δ (°)
-150
-100
-50
0
50
100
150
α_{RA} (°)

94 hochenergetische Neutrinokandidaten



Deklination

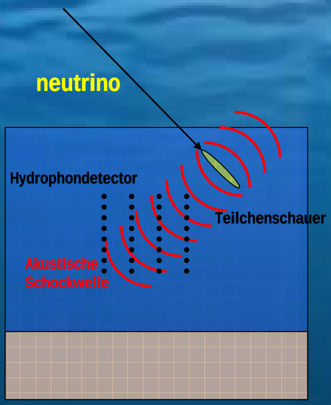
Erwartete Himmelskarte für 2007+2008

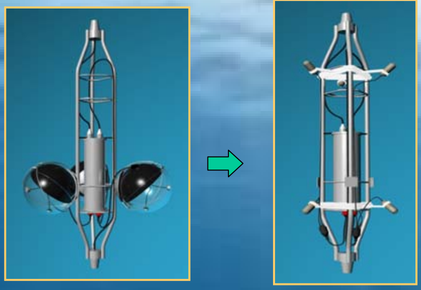

90°
ANTARES – Preliminary
180°
–180°
–90°

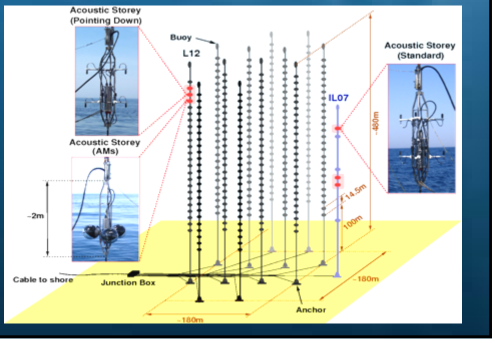
750 Neutrinokandidaten

Analyse noch nicht beendet

Akustischer Neutrinonachweis

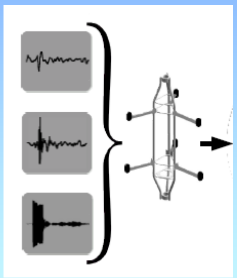

neutrino
Hydrophondetector
Teilchenschauer
Akustische Schockwelle

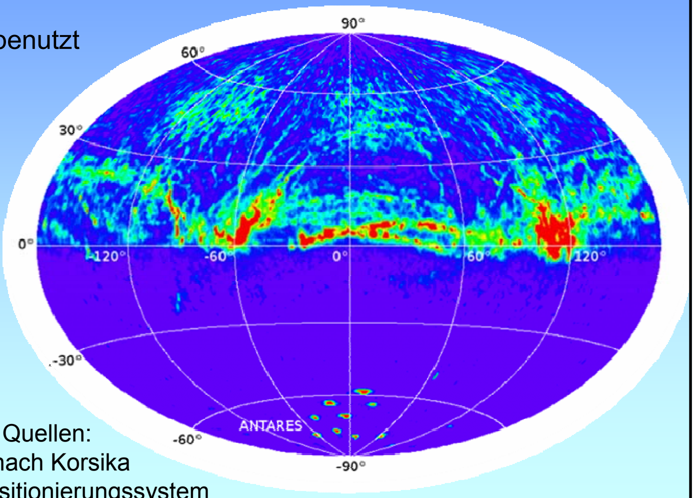



Acoustic Storey (Pointing Down)
Acoustic Storey (AMs)
~2m
Buoy
L12
IL07
Acoustic Storey (Standard)
~480m
14.5m
100m
Cable to shore
Junction Box
Anchor
~180m
~180m

Winkelverteilung von Tiefseegeräuschen

- Richtungsbestimmung von einer einzelnen Etage
- Alle Signalarten benutzt
- Ein Monat Daten

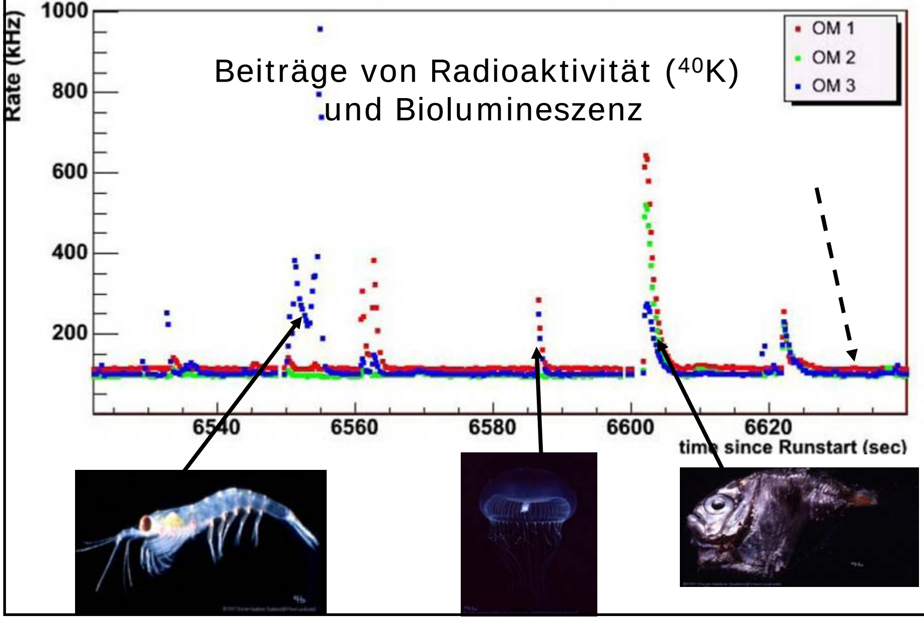



90°
60°
30°
0°
-120°
-60°
0°
60°
120°
-30°
-60°
-90°
ANTARES

Dominante Quellen:
Fährlinien nach Korsika
Antares Positionierungssystem

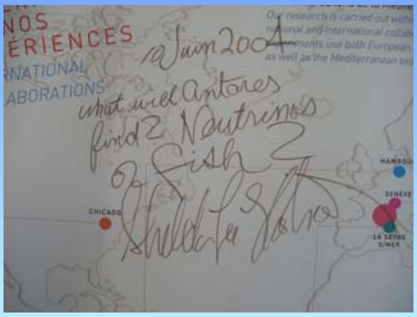
V. Bertin - CPPM - ARENA'08 @ Roma

Optisches Rauschen der Photomultiplier

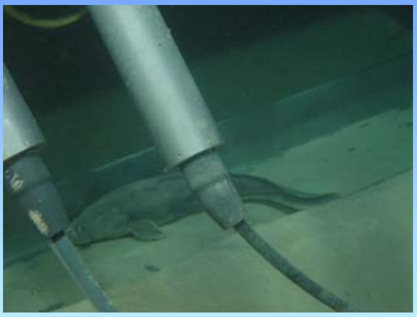


Beiträge von Radioaktivität (^{40}K) und Biolumineszenz

Biolumineszente Tiefseeorganismen



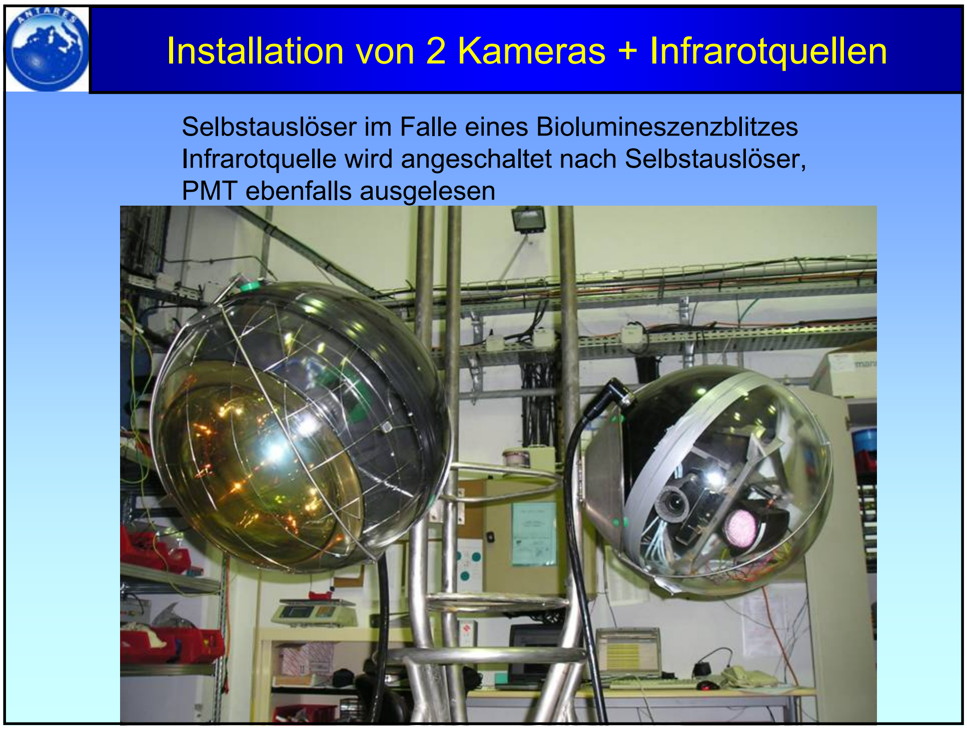
10 Juin 2004
what will Antares find ? Neutrinos or fish ?
Sheldon Glashow



“10. Juni 2004

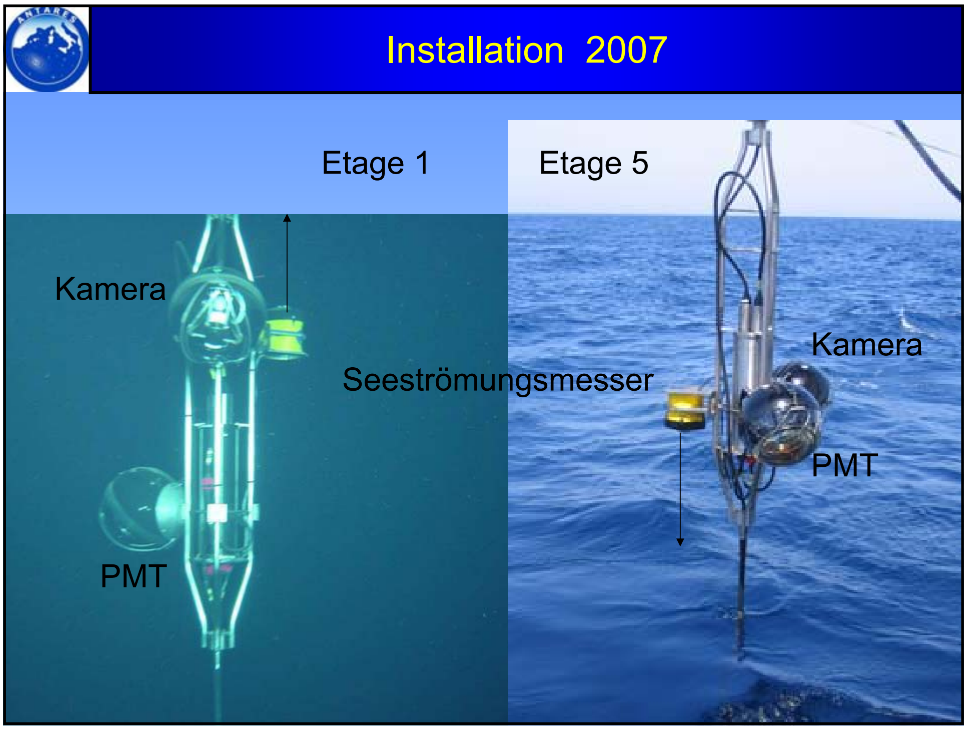
What will Antares find ? Neutrinos or fish ?

Sheldon Glashow”



Installation von 2 Kameras + Infrarotquellen

Selbstauslöser im Falle eines Biolumineszenzblitzes
Infrarotquelle wird angeschaltet nach Selbstauslöser,
PMT ebenfalls ausgelesen

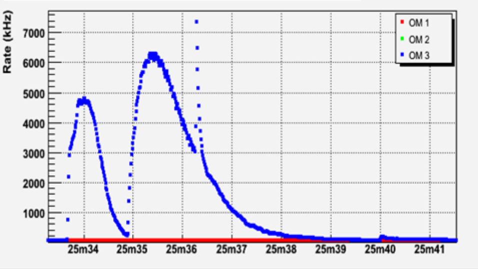


Installation 2007

Etage 1
Etage 5
Kamera
Seeströmungsmesser
Kamera
PMT
PMT

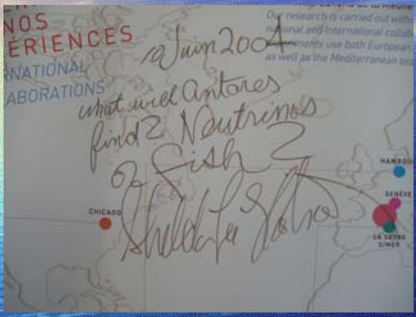
Kontinuierliche Datennahme

- **Mehr als 500 Tage aktive Beobachtungszeit**
- **~250 Biolumineszenz Photos/Filme aufgezeichnet**
- **Verschiedene Signaltypen leicht zu unterscheiden**
- **Noch keine systematische Auswertung durch Meeresbiologen erfolgt**
- **Tiefste online-Kameras der Welt !**

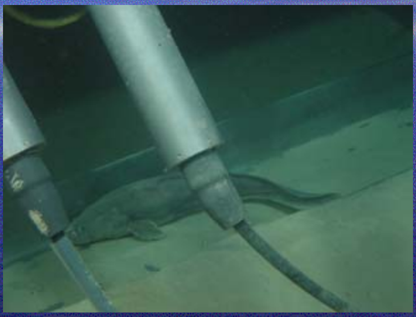


2007-12-10 08:18:01

Antwort an Sheldon Glashow


NOS
ÉRIENCES
RNATIONAL
ABORATIONS
CHICAGO
HAMBOU
GENÈVE
LA SEYNE S/MER

2 Juin 2004
what will Antares
find? Neutrinos
or Fish?
Sheldon Glashow



Antares findet Neutrinos UND Fische
…. aber mehr Neutrinos

ANTARES NIMMT DATEN