



Astroteilchenphysik

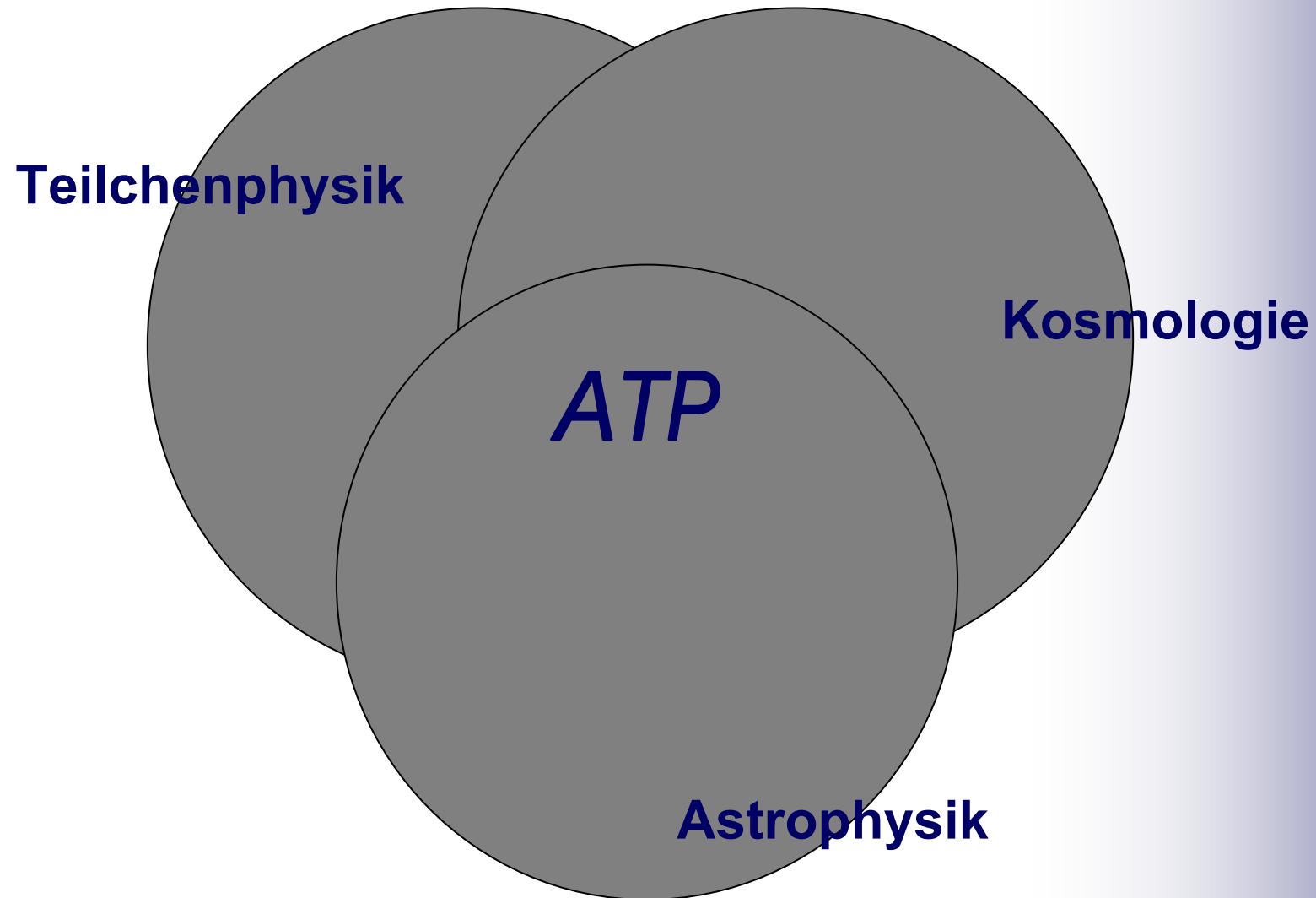
Neutrinos, dunkle Materie,
kosmische Beschleuniger

Zeuthen, 16.11.2010

Christian Spiering
DESY



Astroteilchenphysik





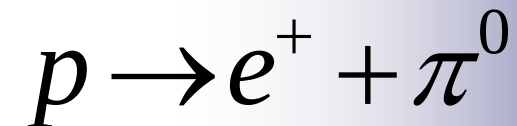
Der Zerfall des Protons

70er Jahre:

Grand Unified Theories
sagen Protonzerfall
voraus.

Lebensdauer
in einfachsten GUTs
 10^{29} - 10^{32} Jahre

Bevorzugter
Zerfallsmodus



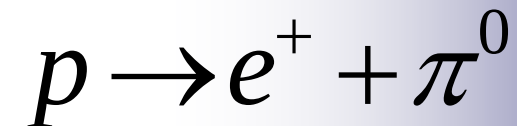


Der Zerfall des Protons

3000 Tonnen Wasser
(10^{33} Protonen)

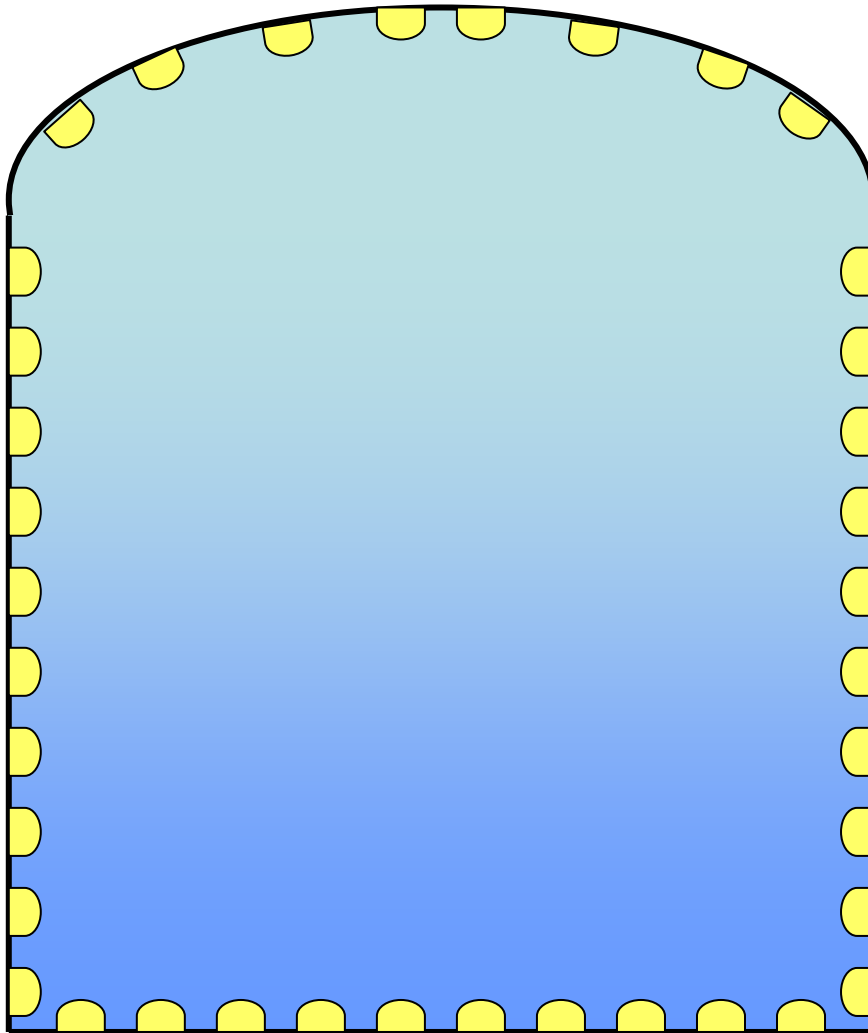
Lebensdauer
in einfachsten GUTs
 10^{29} - 10^{32} Jahre

Bevorzugter
Zerfallsmodus





Der Zerfall des Protons



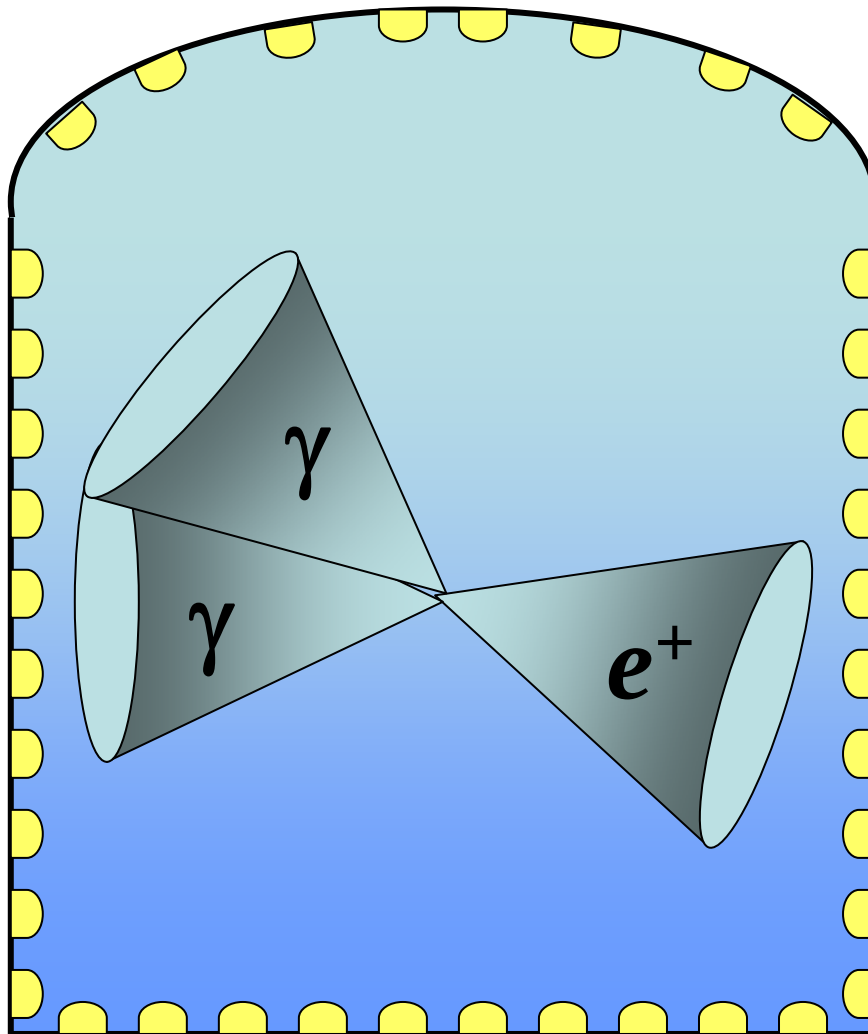
Lebensdauer
in einfachsten GUTs
 10^{29} - 10^{32} Jahre

Bevorzugter
Zerfallsmodus

$$p \rightarrow e^+ + \pi^0$$

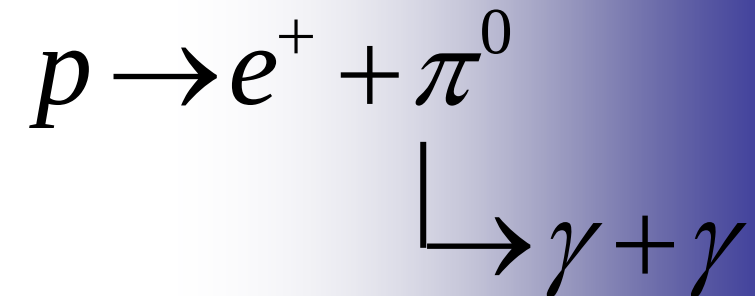


Der Zerfall des Protons



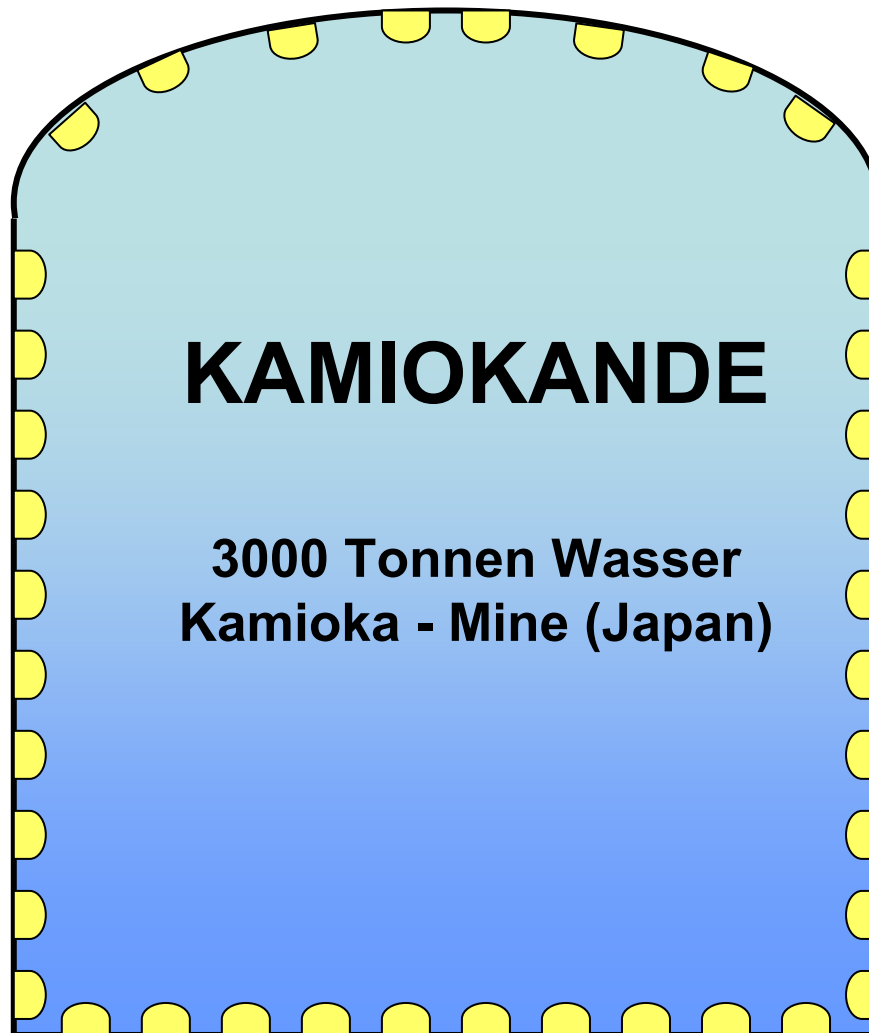
Lebensdauer
in einfachsten GUTs
 10^{29} - 10^{32} Jahre

Bevorzugter
Zerfallsmodus



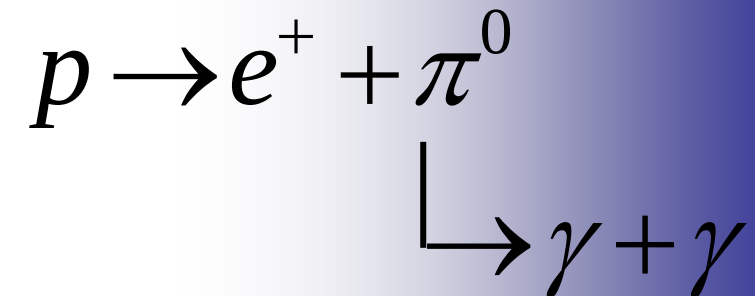


Der Zerfall des Protons



Lebensdauer
in einfachsten GUTs
 10^{29} - 10^{32} Jahre

Bevorzugter
Zerfallsmodus



Super-Kamiokande

The image shows the interior of the Super-Kamiokande detector. It features a large, cylindrical structure with many concentric rings of photomultiplier tubes (PMTs) lining the walls. The center of the detector is filled with water. The lighting is dim, with some bright spots from the PMTs.

Super-Kamiokande:
Lebensdauer des Protons $> 5 \times 10^{33}$ Jahre

The background image shows the interior of the Super-Kamiokande detector, a large cylindrical structure with many concentric rings of photomultiplier tubes. The lighting is dim, with a bright light source visible at the top center, creating a dramatic effect. The text is overlaid on this image.

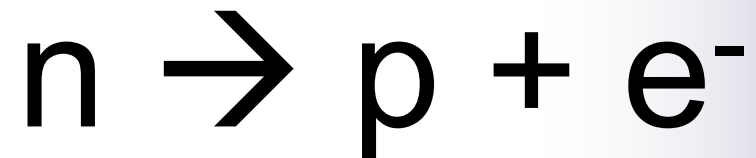
Super-Kamiokande
Stattdessen:
Grundlegende Entdeckungen
auf dem Gebiet der
Neutrinoastronomie



Das Postulat des Neutrinos: Pauli, 1930



Wolfgang Pauli, 1930





Das Postulat des Neutrinos: Pauli, 1930



Wolfgang Pauli, 1930

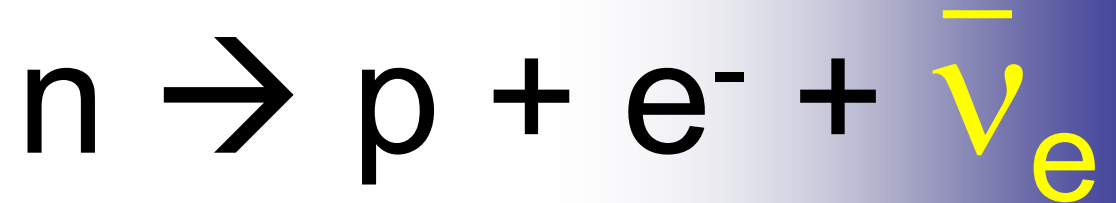




Das Postulat des Neutrinos: Pauli, 1930



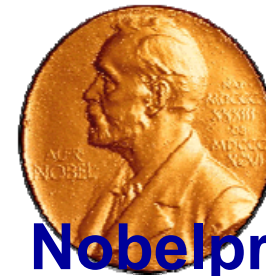
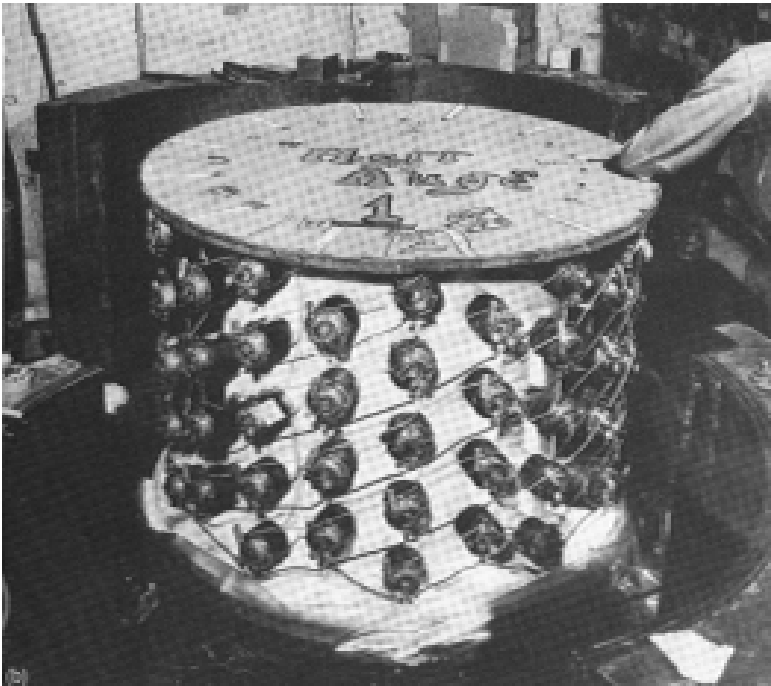
Wolfgang Pauli, 1930



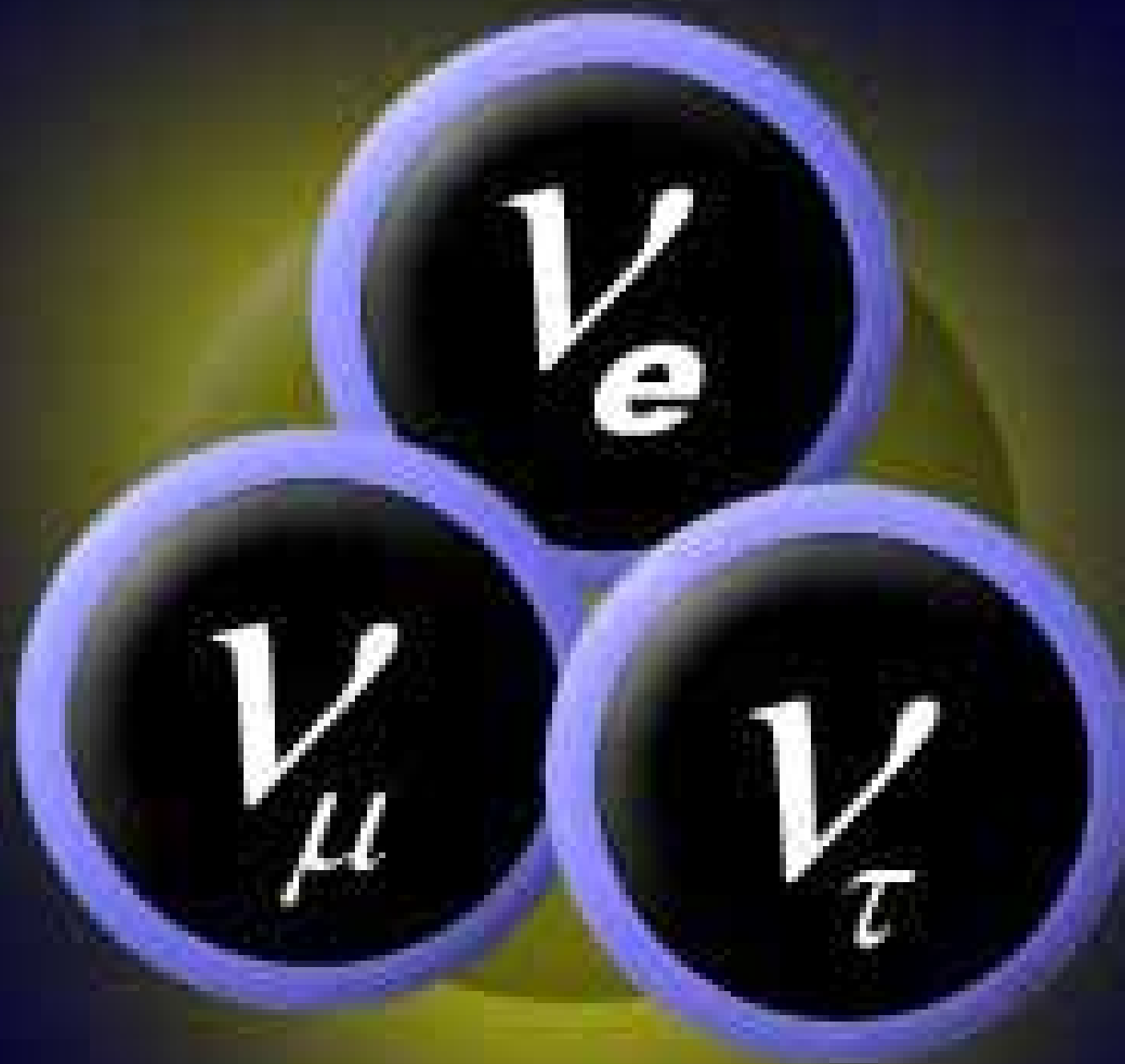


1956: Die Entdeckung des Neutrinos

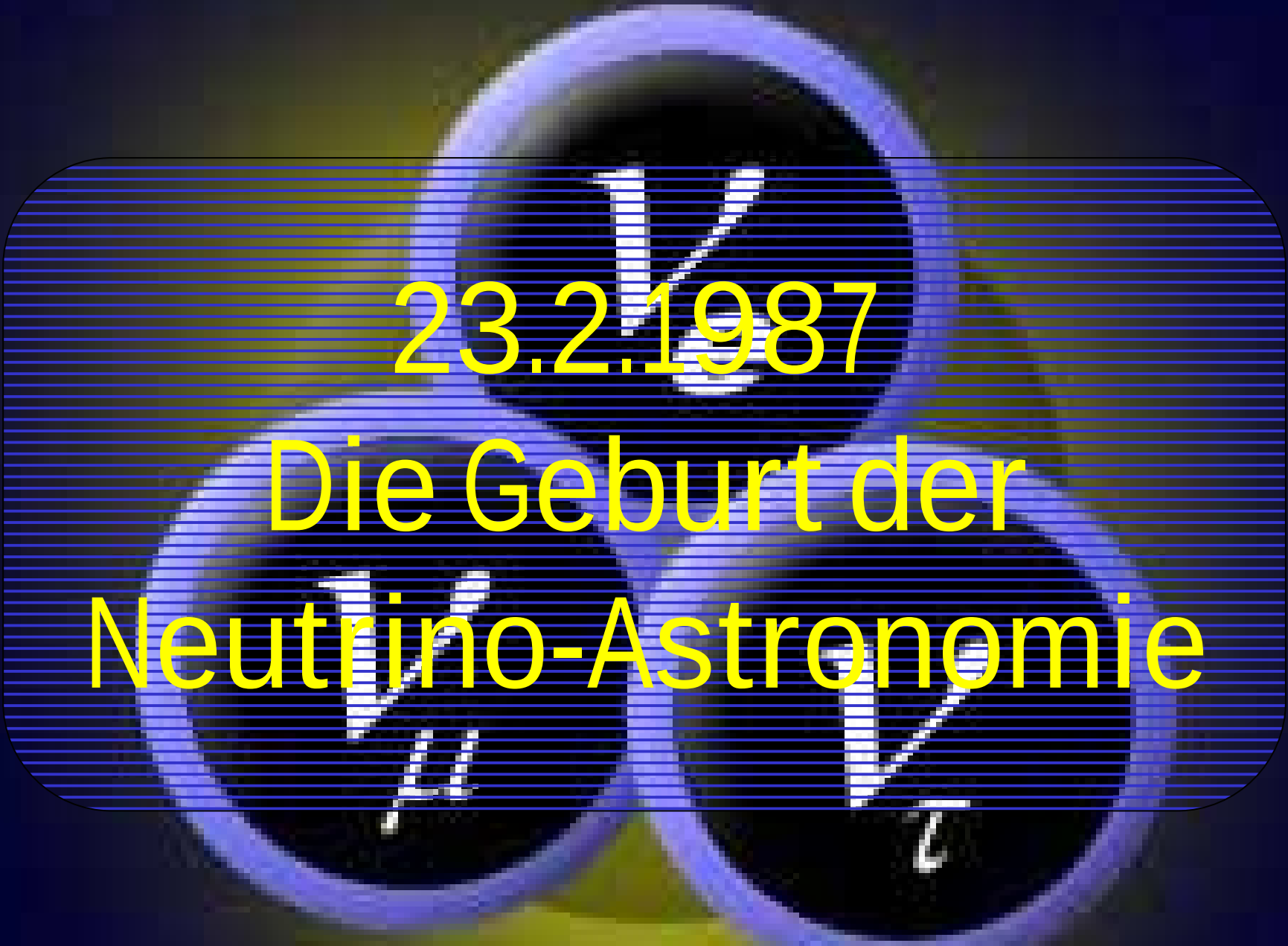
Cowan und Reines



Nobelpreis 1995



- 
- Masse (fast) Null
 - Extrem schwach reagierend



23.2.1987

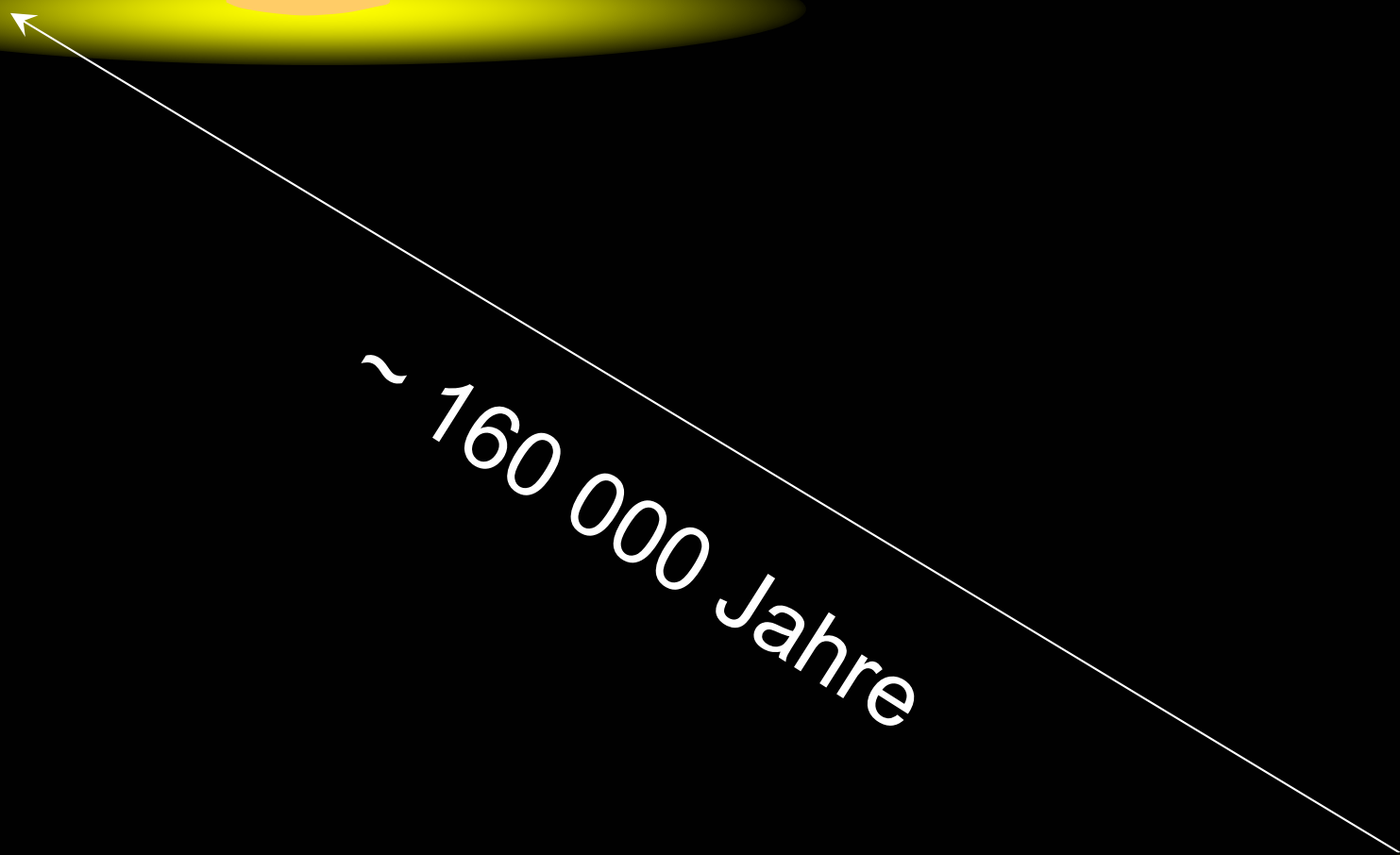
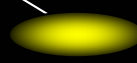
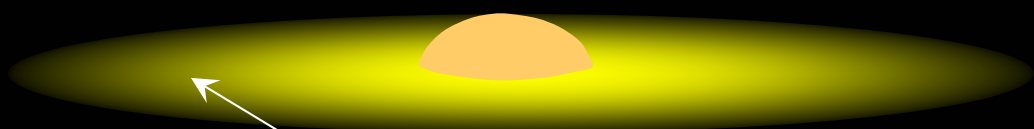
Die Geburt der Neutrino-Astronomie



Supernova 1987A in der Großen Magellanschen Wolke



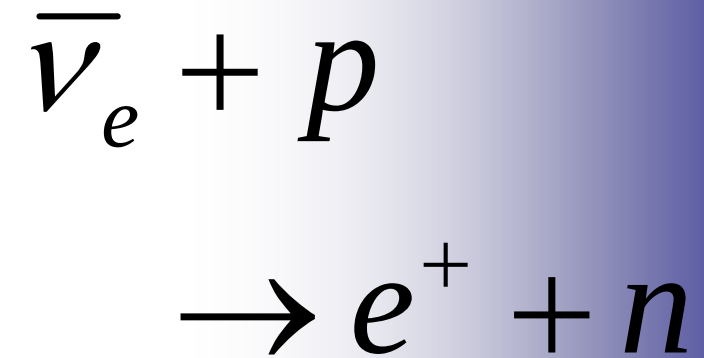
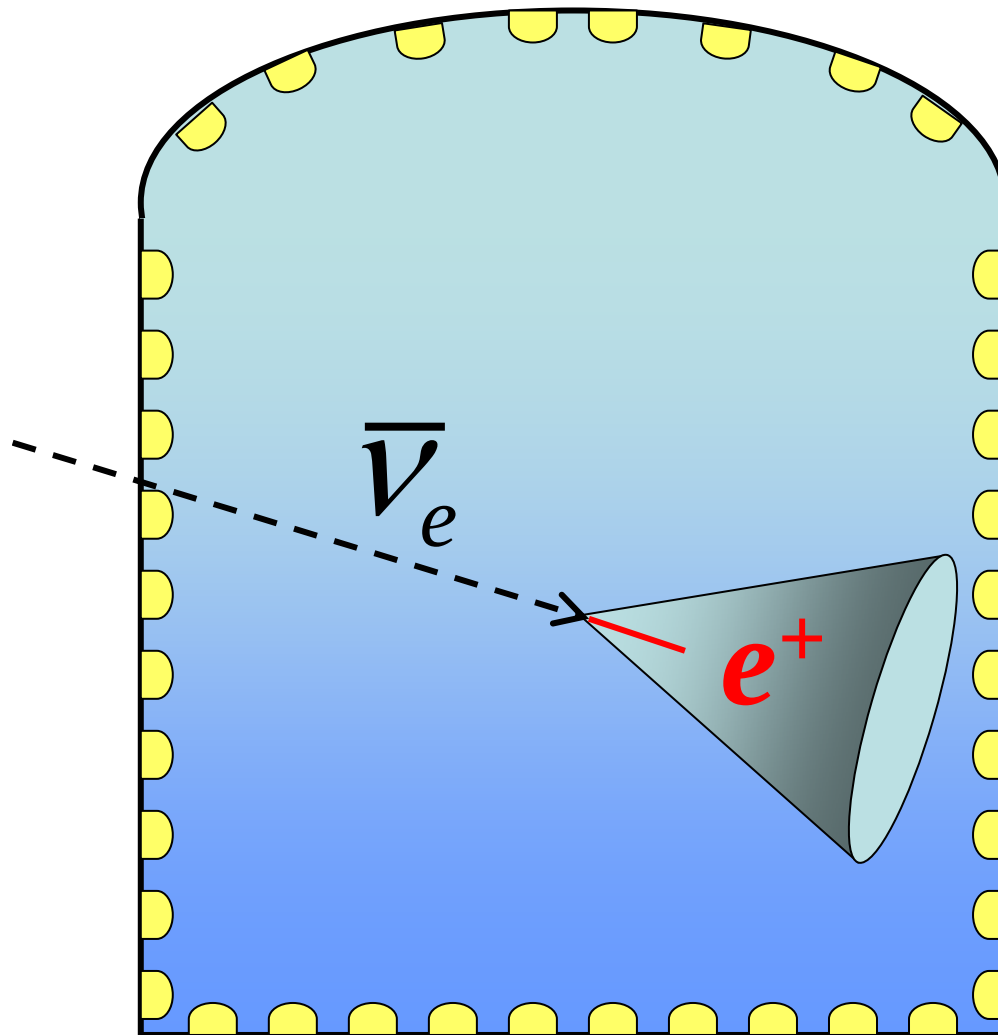
23.2.1987



~ 160 000 Jahre

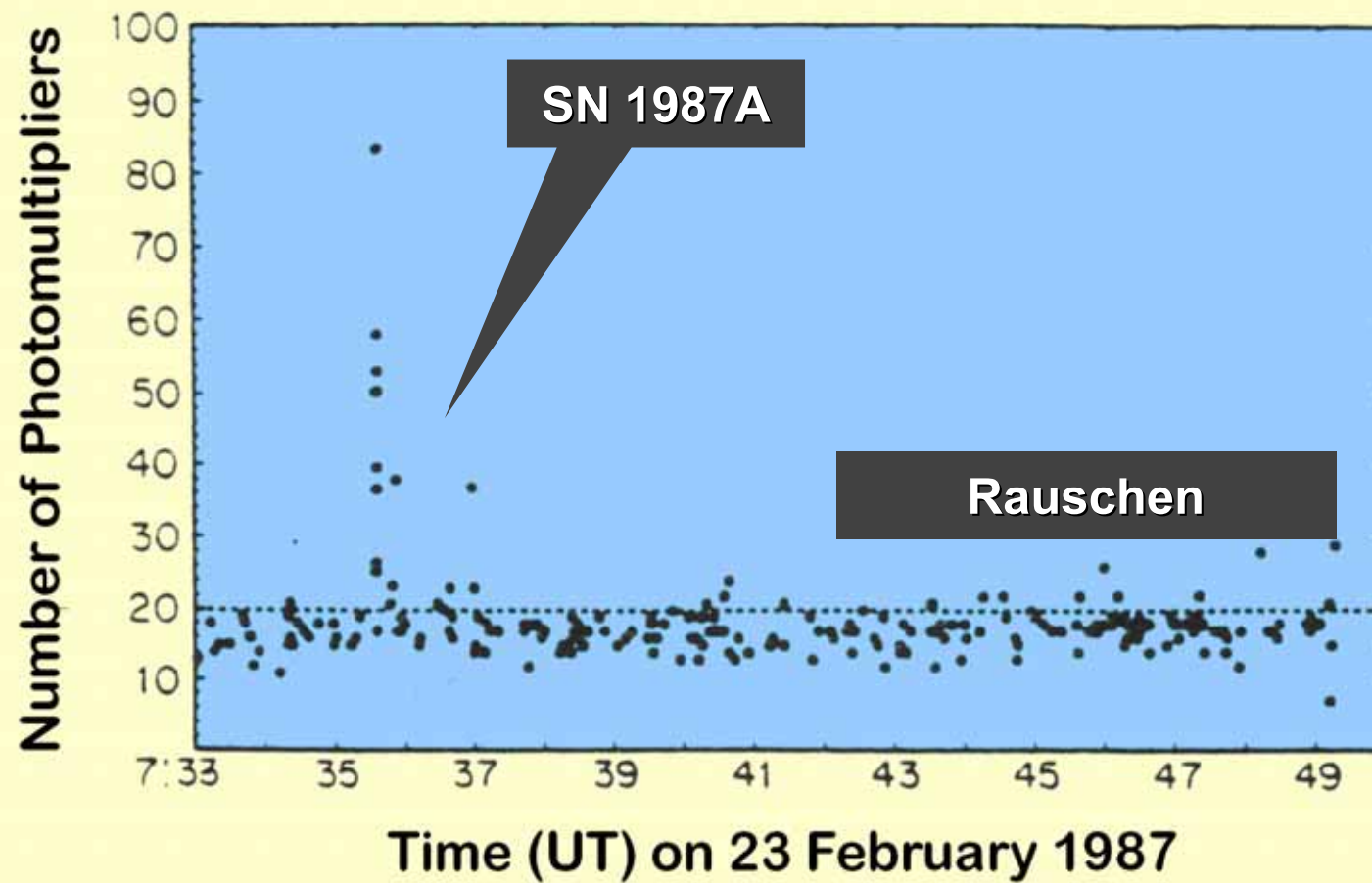


Neutrinos in Kamiokande





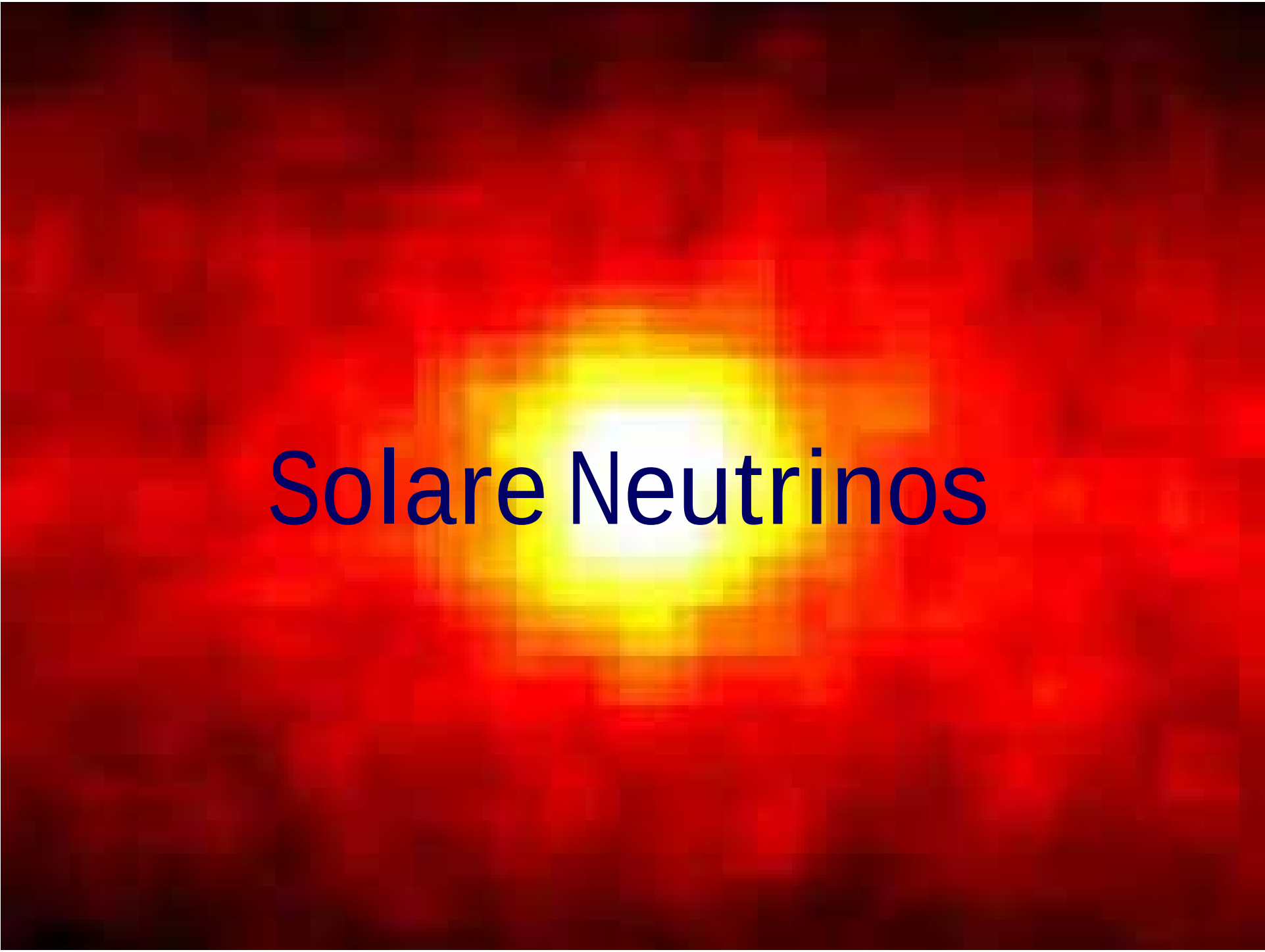
Neutrino-Signal von SN-1987A in Kamiokande





Neutrino-Signal von SN-1987A in Kamiokande

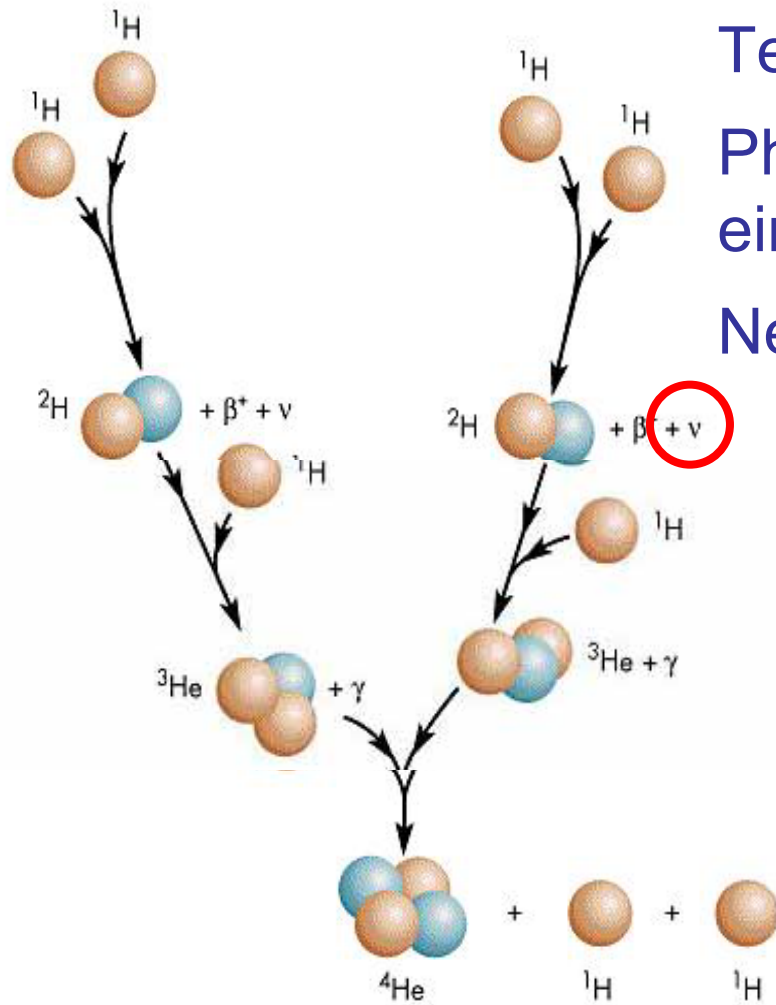
- ❑ Temperatur im frischen Neutronenstern
30-40 Milliarden Kelvin
- ❑ Neutrinomasse < 20 eV
- ❑



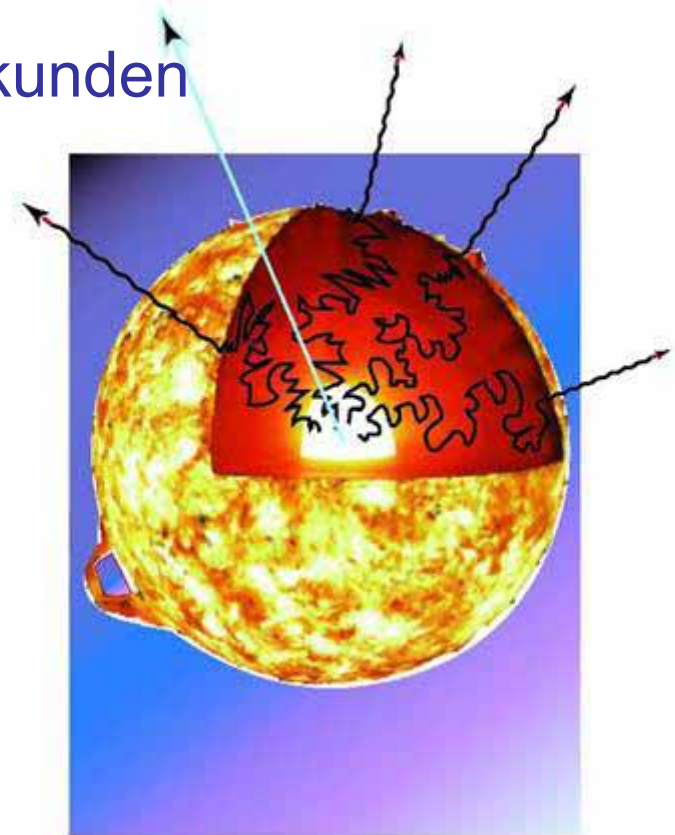
Solare Neutrinos

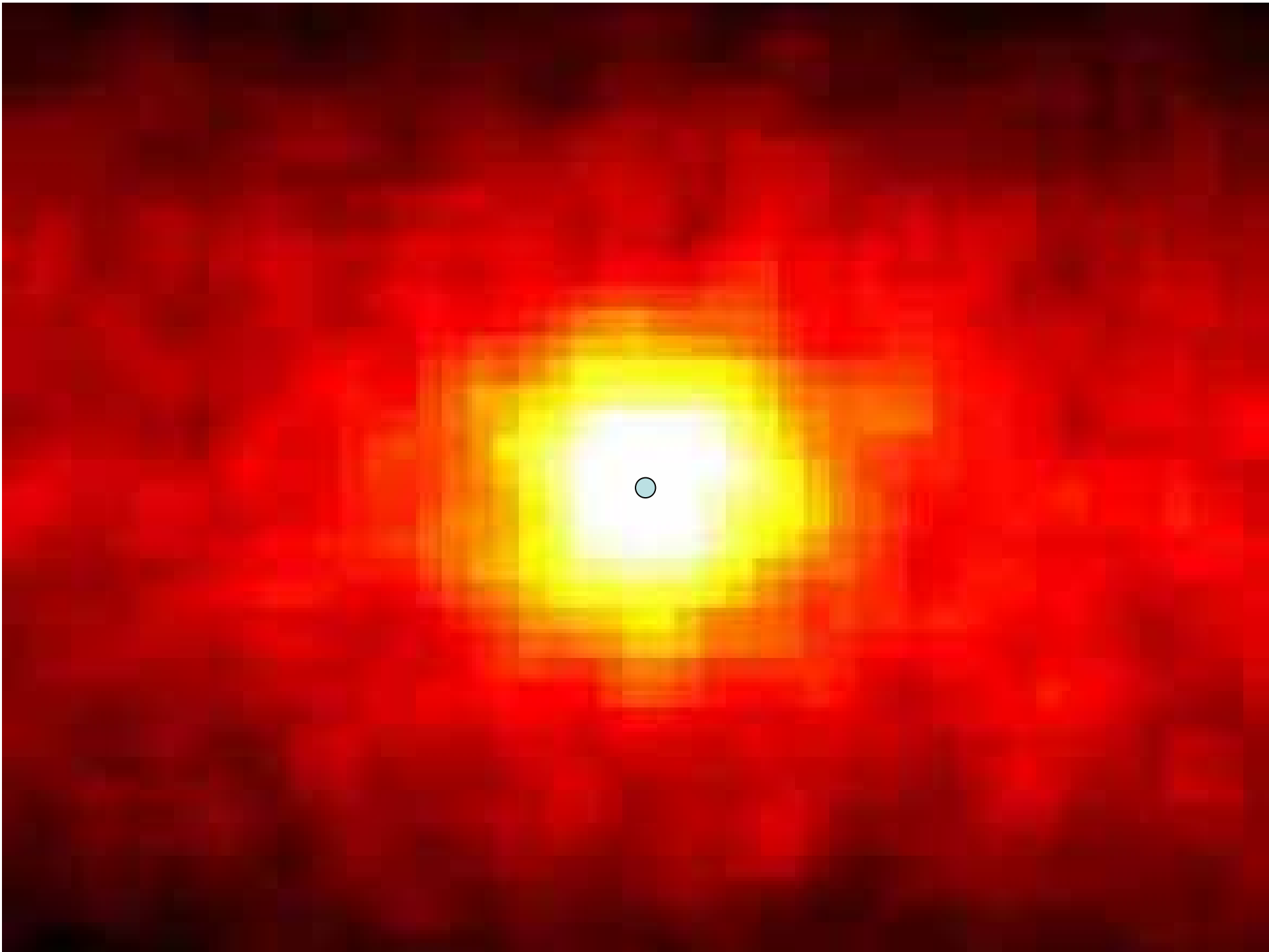


Neutrinos aus der Sonne



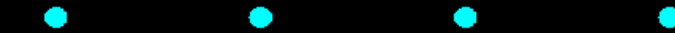
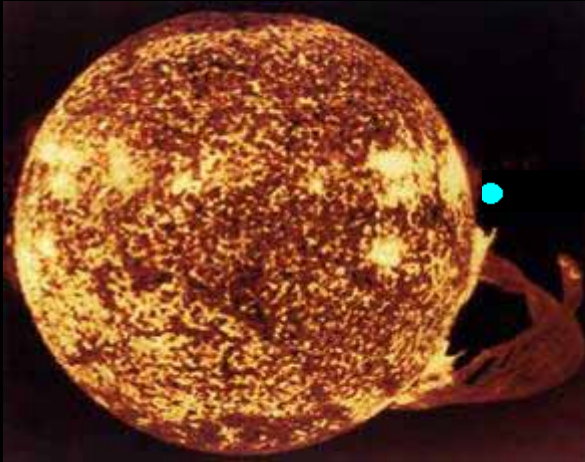
Temperatur im Sonnenkern ~ 15 Mio K
Photon-Weg bis zur Sonnenoberfläche:
einige Millionen Jahre
Neutrinos: 2 Sekunden







Neutrino-Oszillationen



Neutrinos wandeln
sich auf dem Weg
von der Sonne zur
Erde um !

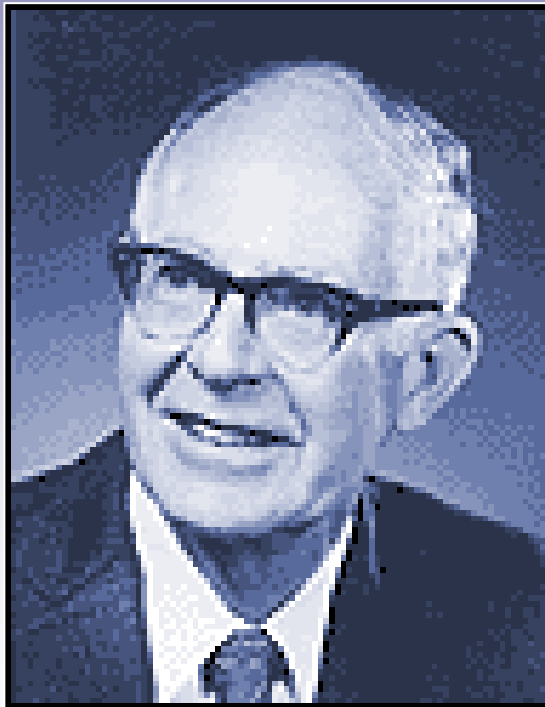


→ Neutrinos haben eine Ruhe-Masse



Nobelpreis 2002

.. für Öffnung des Neutrino-Fensters
zum Universum



Raymond Davis jr.



Masatoshi Koshihara

Pläne für einen Megatonnen Detektor ...

MEMPHYS

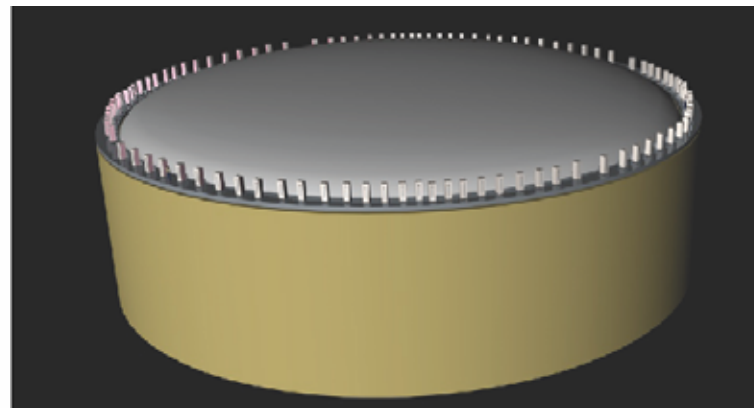
700 kton water



LENA

50 kt scintillator

← 50 m →



GLACIER

100 kton liquid argon



Pläne für einen Megatonnen Detektor ...

MEMPHYS

700 kton water

**Für eine Supernova im Zentrum
unserer Galaxis (10 kpc):**

50 000 - 200 000 Neutrino-Ereignisse

vgl. **LENA** Superkamiokande: 8500 Ereignisse

vgl. SN1987A: weltweit 20 Ereignisse beobachtet

(Entfernung 50 kpc)

Protonzerfall: bis 10^{35} Jahre

GLACIER

100 kton liquid argon



Astroteilchenphysik: die Fragen

- 1) Woraus besteht das Universum ?
Insbesondere: Was ist Dunkle Materie ?**
- 2) Können Protonen zerfallen ?**
- 3) Was sind die Eigenschaften der Neutrinos und was ist ihre Rolle in der kosmischen Evolution?**
- 4) Was lehren uns Neutrinos über das Innere von Sonne und Erde und über Supernova-Explosionen ?**
- 5) Was ist der Ursprung der kosmischen Strahlung?
Wie sieht das Universum bei hohen Energien aus?**
- 6) Was können wir mit Hilfe von Gravitationswellen über kosmische Prozesse lernen?**



Astroteilchenphysik: die Fragen

- 1) Woraus besteht das Universum ?
Insbesondere: **Was ist Dunkle Materie ?**
- 2) **Können Protonen zerfallen ? ✓**
- 3) Was sind die Eigenschaften der Neutrinos und was ist ihre Rolle in der kosmischen Evolution?
- 4) **Was lehren uns Neutrinos über das Innere von Sonne und Erde und über Supernova-Explosionen ? ✓**
- 5) **Was ist der Ursprung der kosmischen Strahlung?
Wie sieht das Universum bei hohen Energien aus?**
- 6) Was können wir mit Hilfe von Gravitationswellen über kosmische Prozesse lernen?



Dunkle Materie





Das komische Inventar

0.1-1 %

Neutrinos

74 %

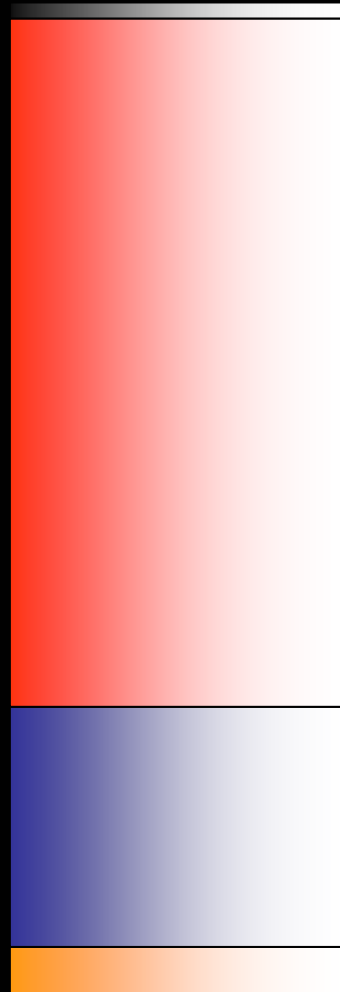
Dunkle Energie

22 %

Dunkle Materie

4 %

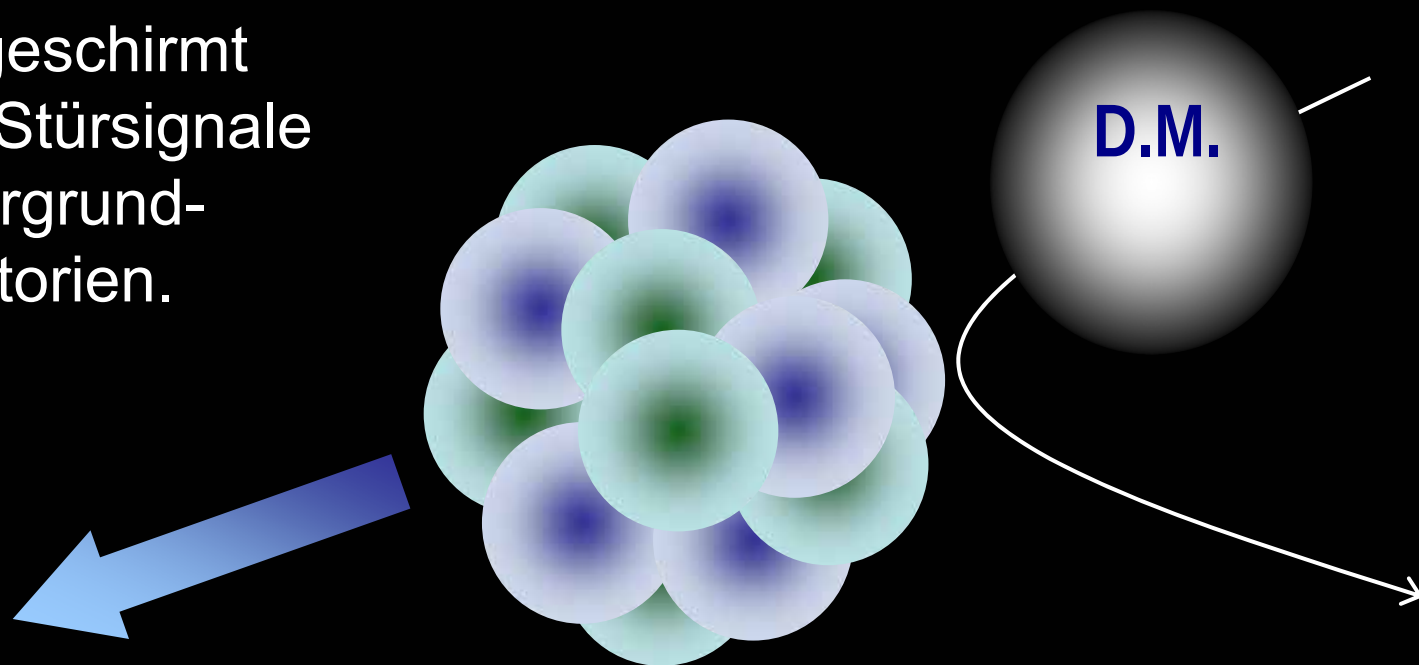
Normale Materie





Nachweis Dunkler Materie

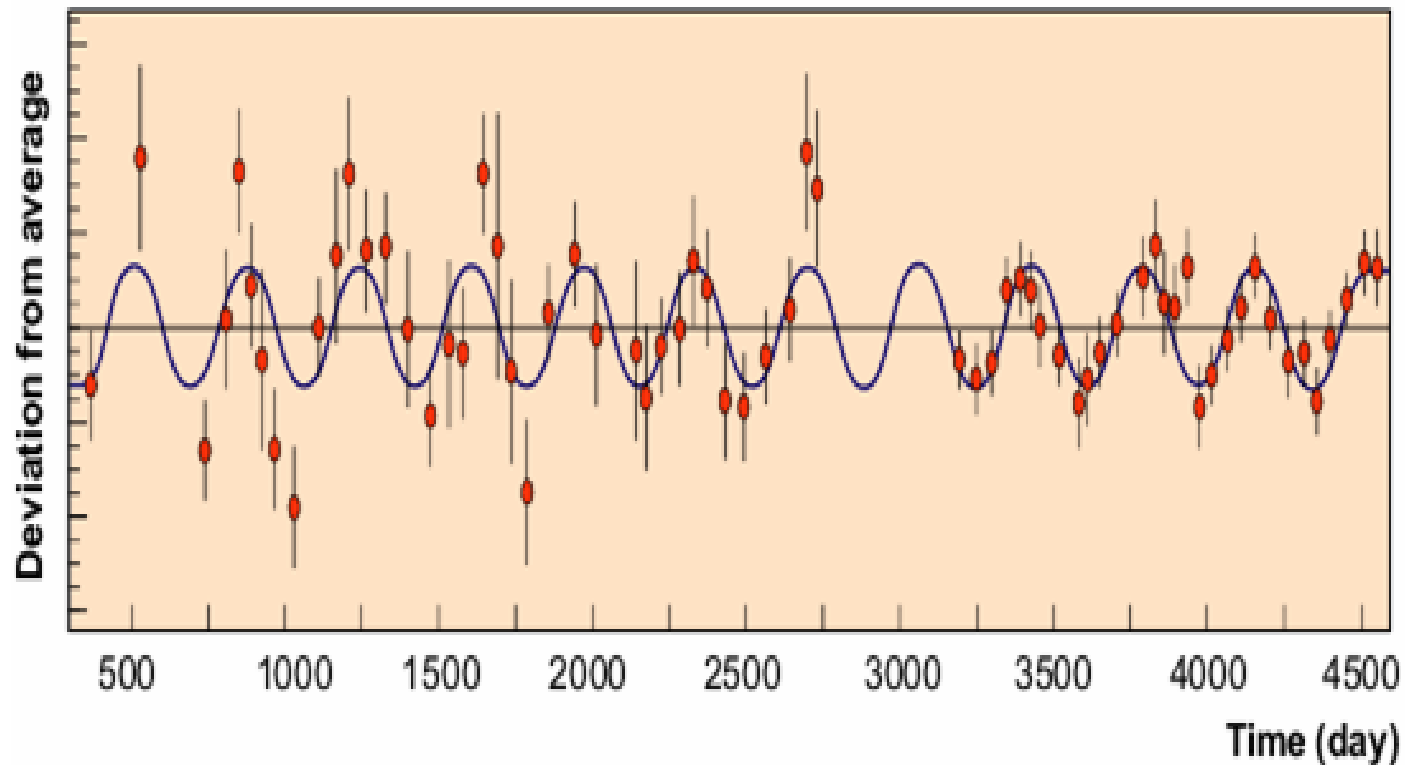
Nachweis von
„Rückstoß“-Kernen
aus D.M.-Stößen
tief abgeschirmt
gegen Störsignale
in Untergrund-
Laboratorien.





Ein erster Hinweis auf Teilchen der dunklen Materie ?

Das DAMA-Experiment im Gran Sasso Tunnel /Italien





Die Masse macht's ...

**... und die Fähigkeit,
Störsignale zu unterdrücken !**

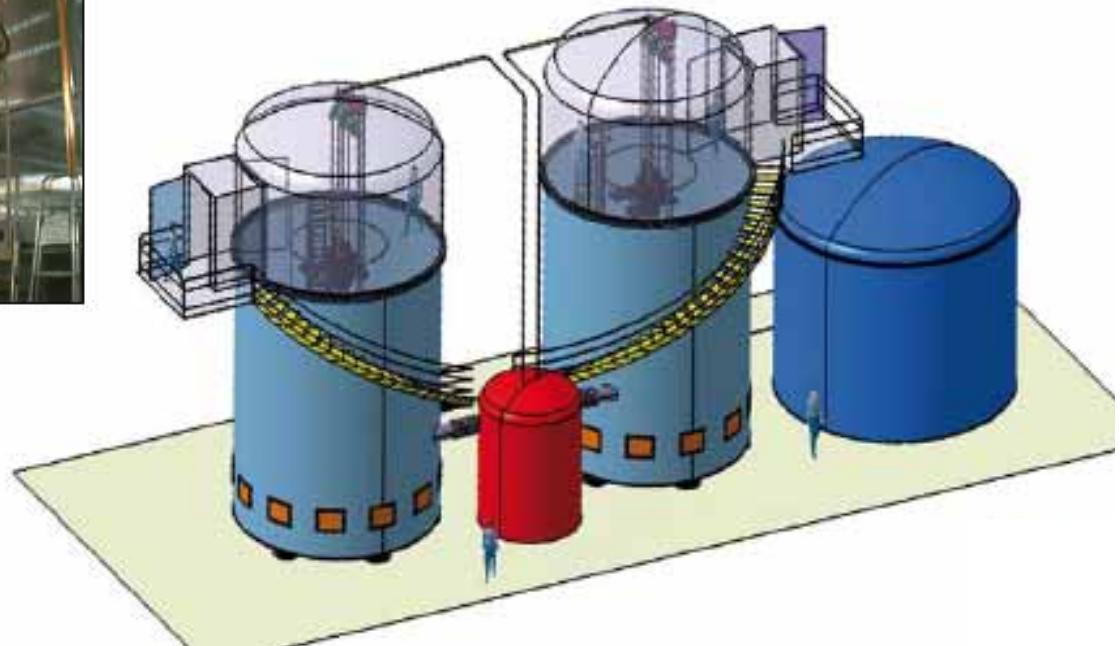


10 kg
(2006 -10)

100 kg
(2009 -12)



1000 kg
(2013-2017)



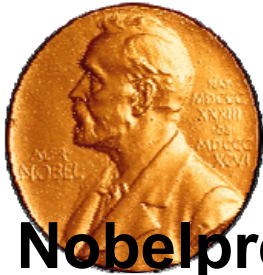


Das Universum bei höchsten Energien





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)



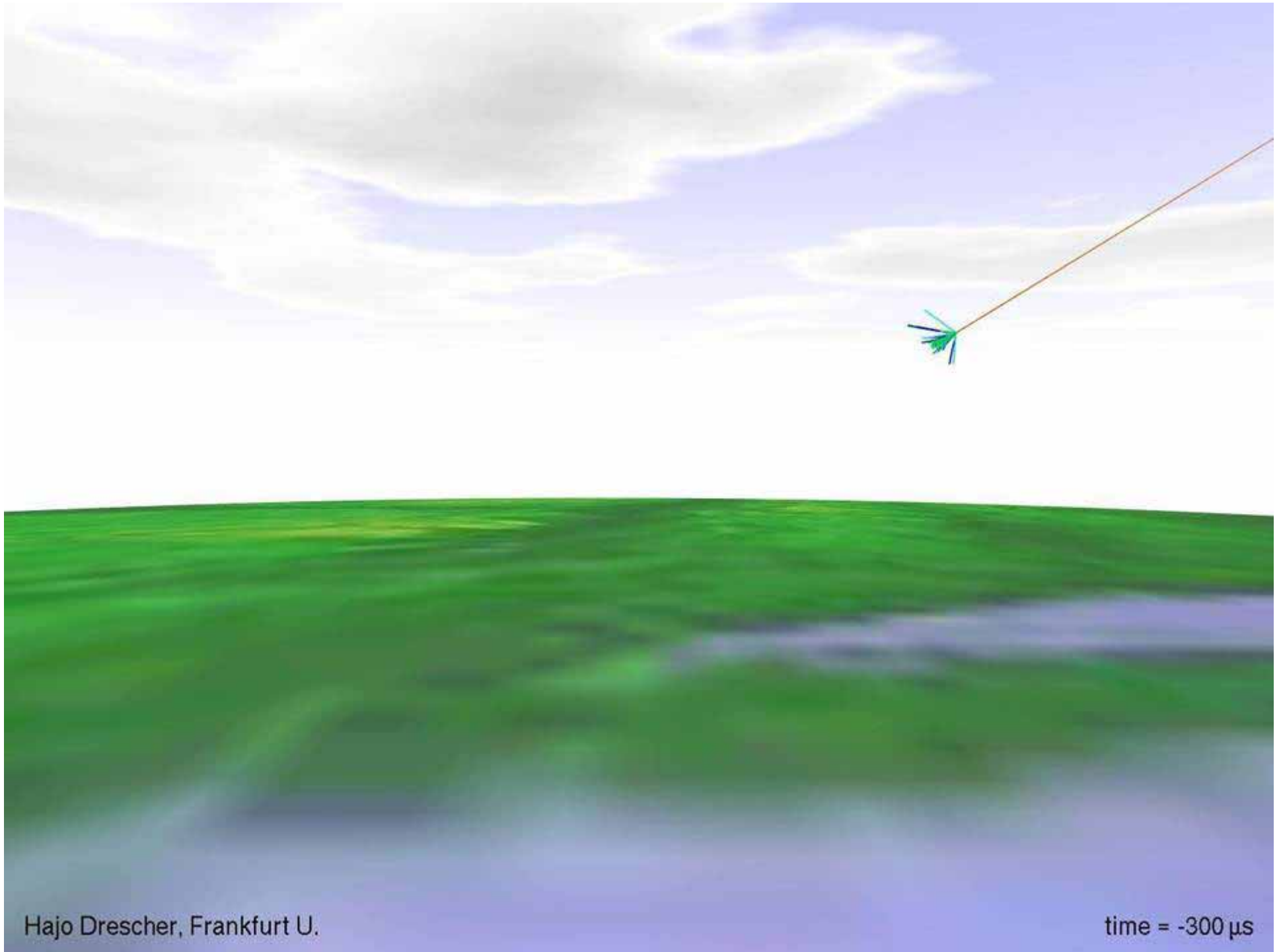
Teilchen-Detektoren

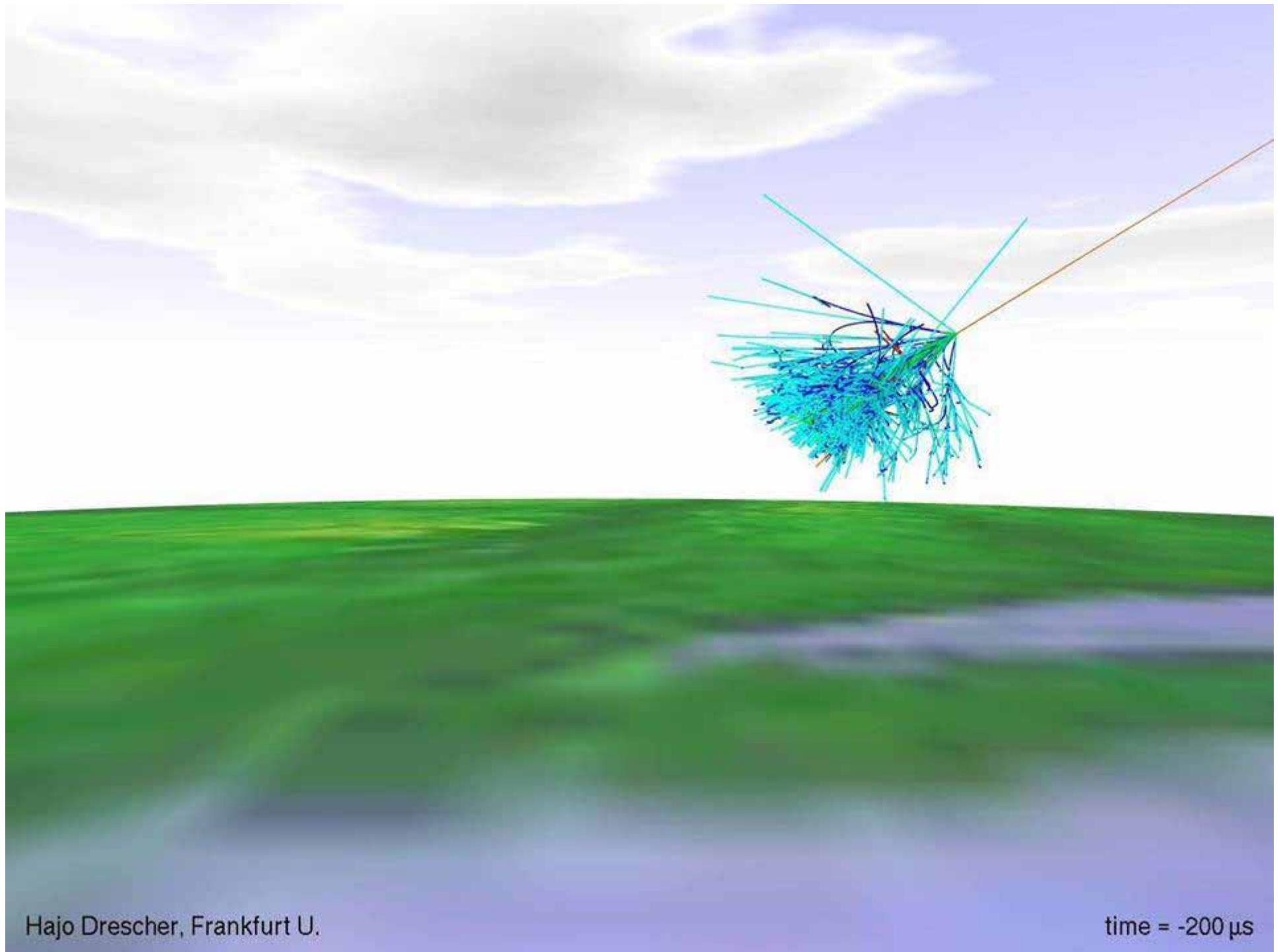


Hajo Drescher, Frankfurt U.

time = -1000 μ s

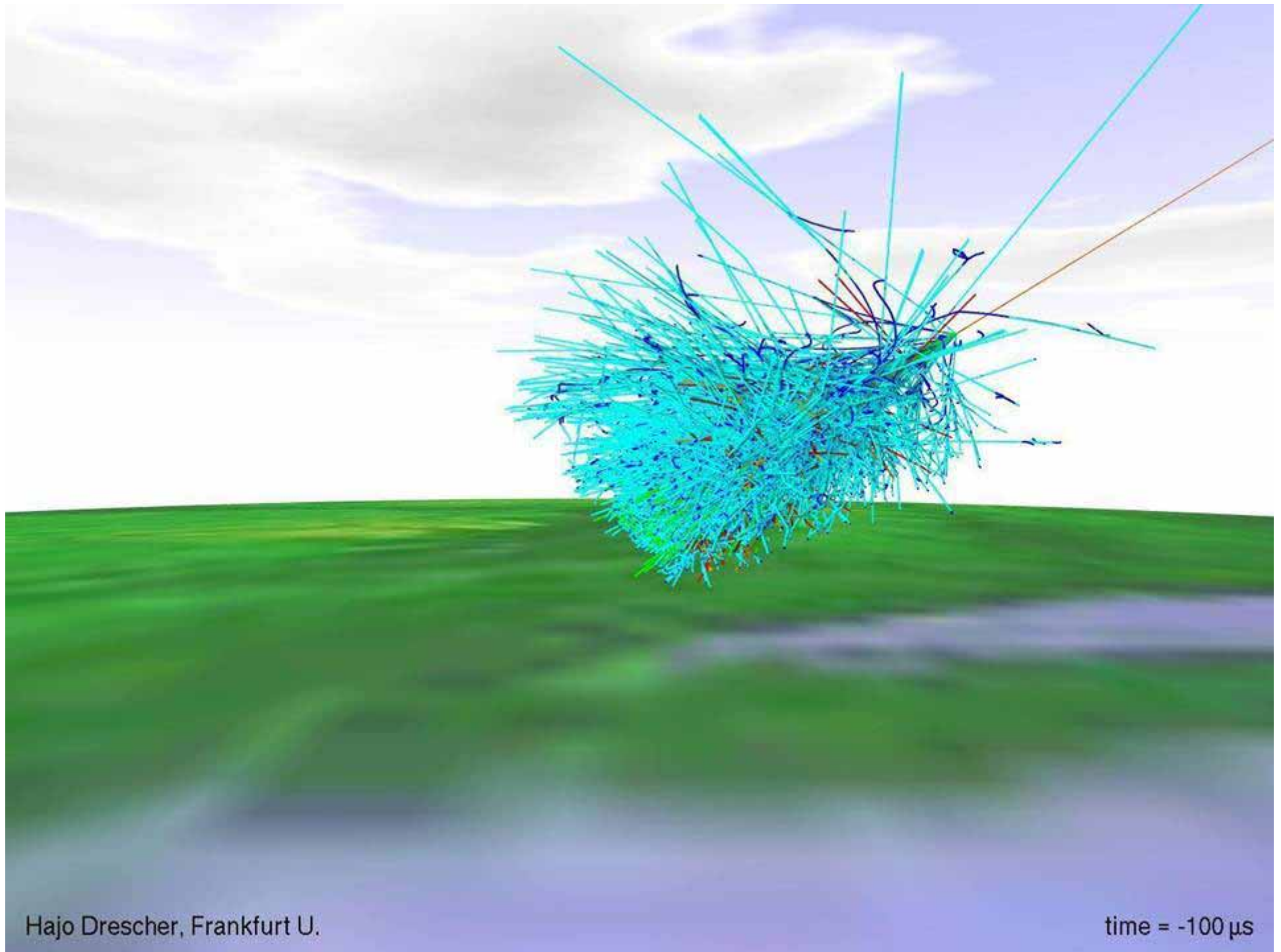


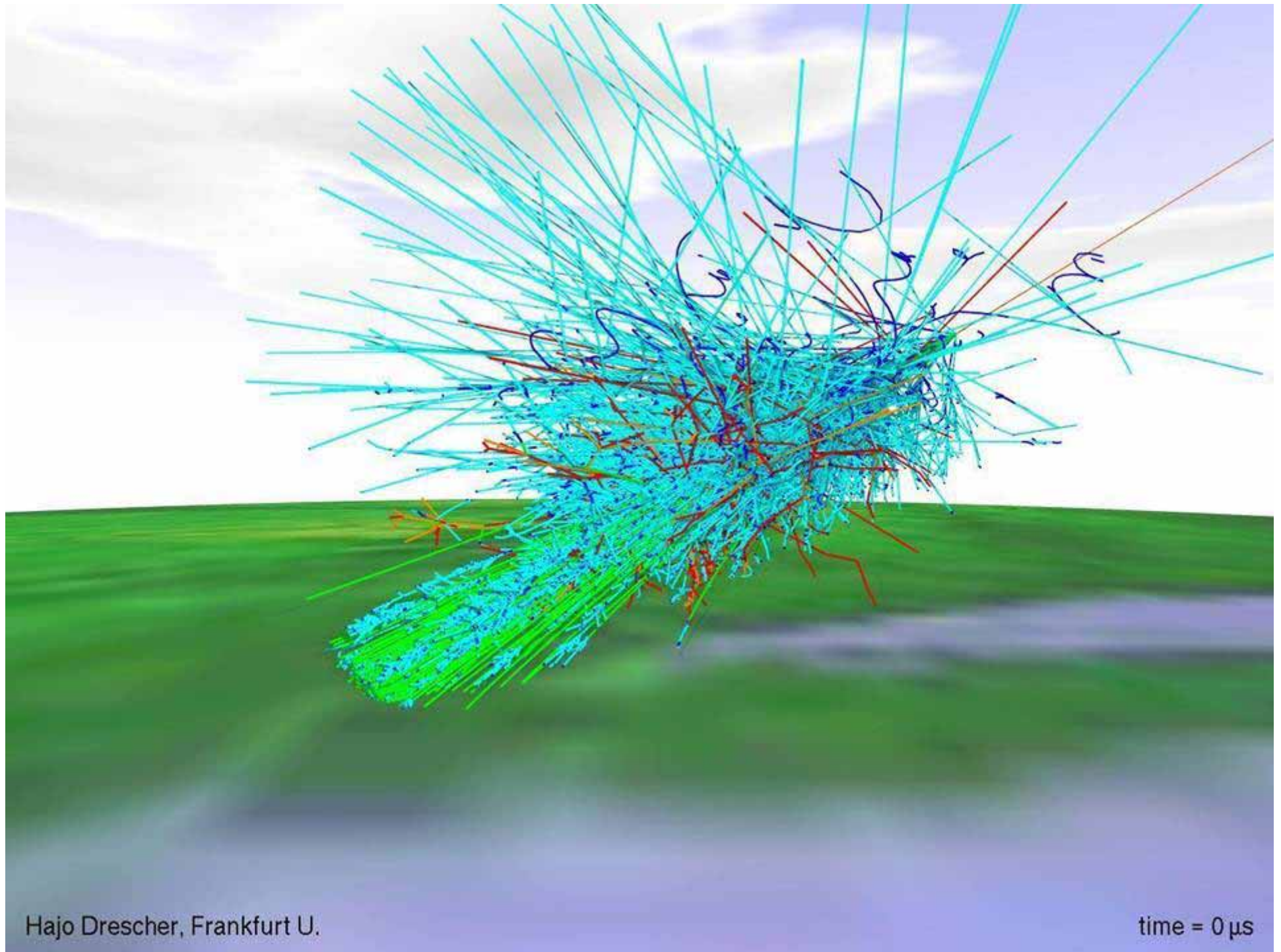


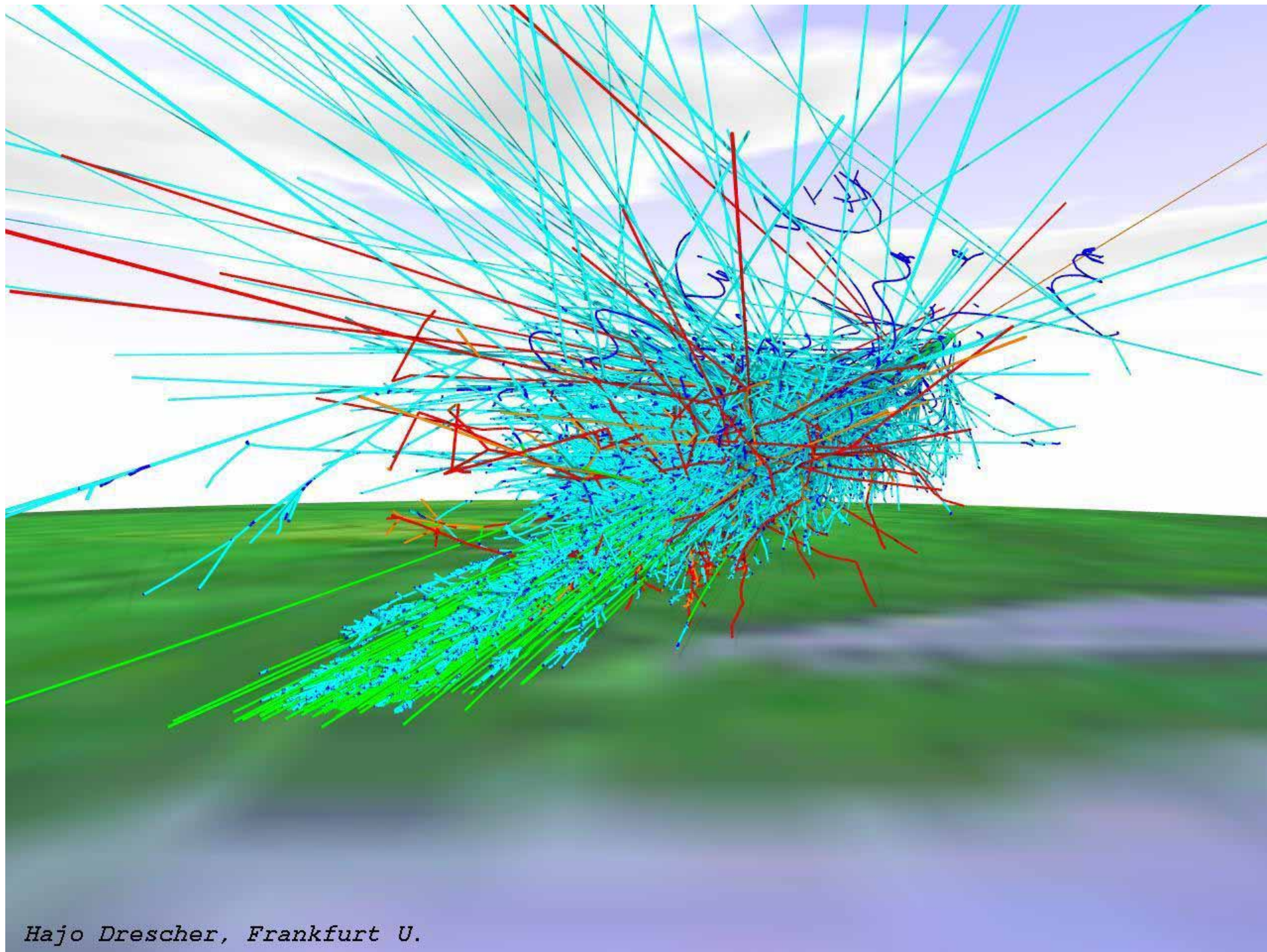


Hajo Drescher, Frankfurt U.

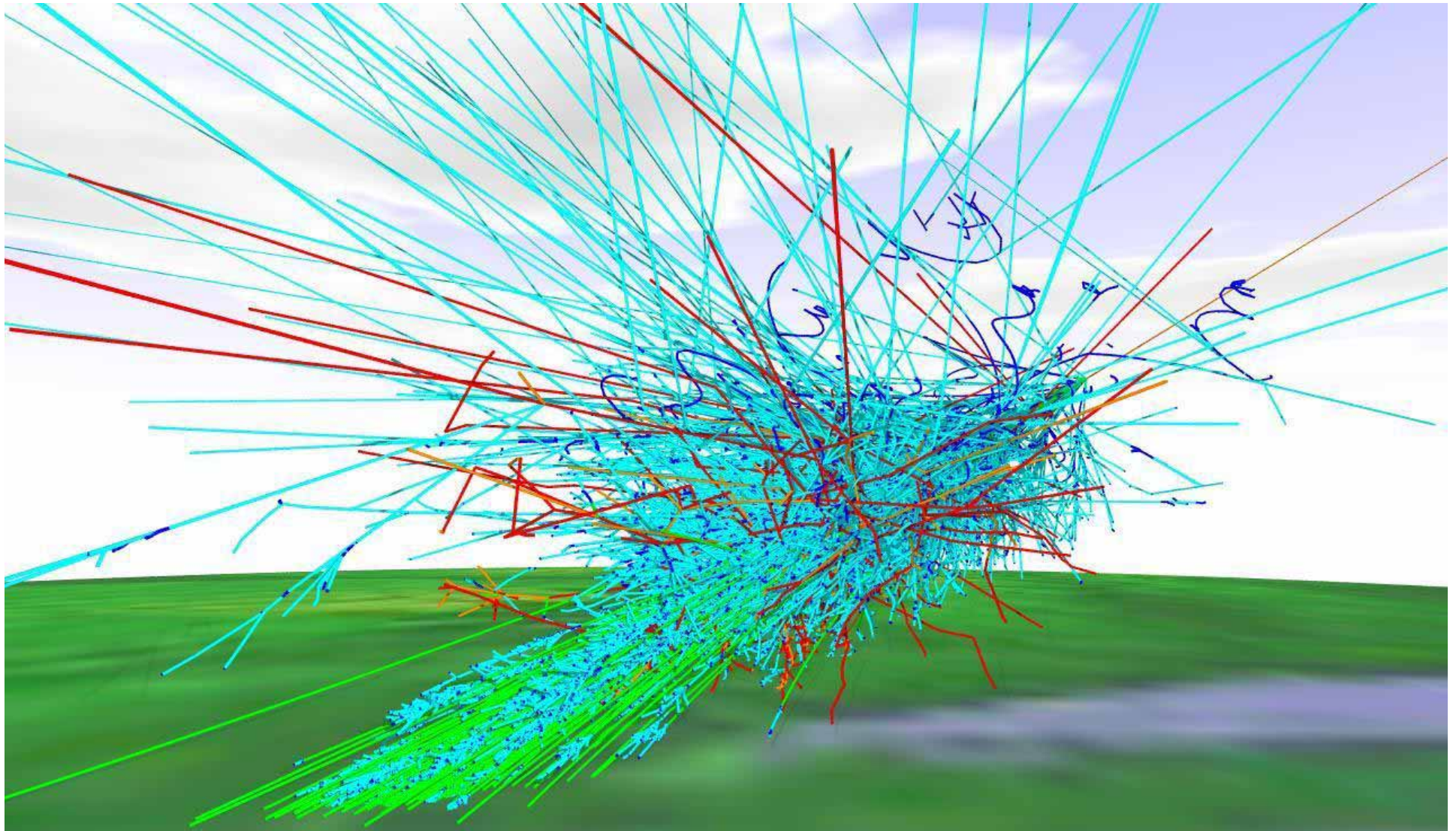
time = -200 μ s







Hajo Drescher, Frankfurt U.



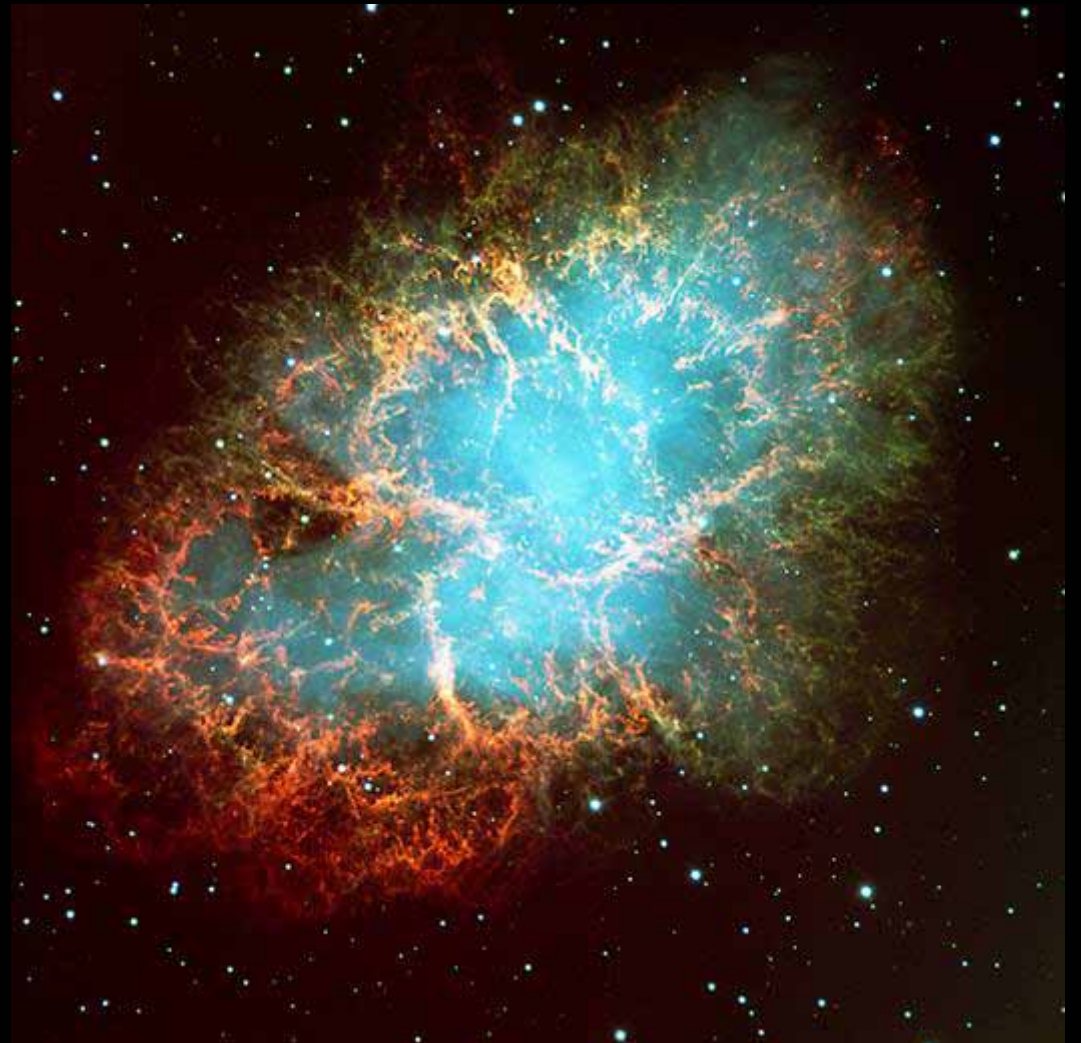
Energie: LHC $\times$ 10 000 000

Hajo Drescher, Frankfurt U.

Supernovae: Stosswellen in interstellares Medium

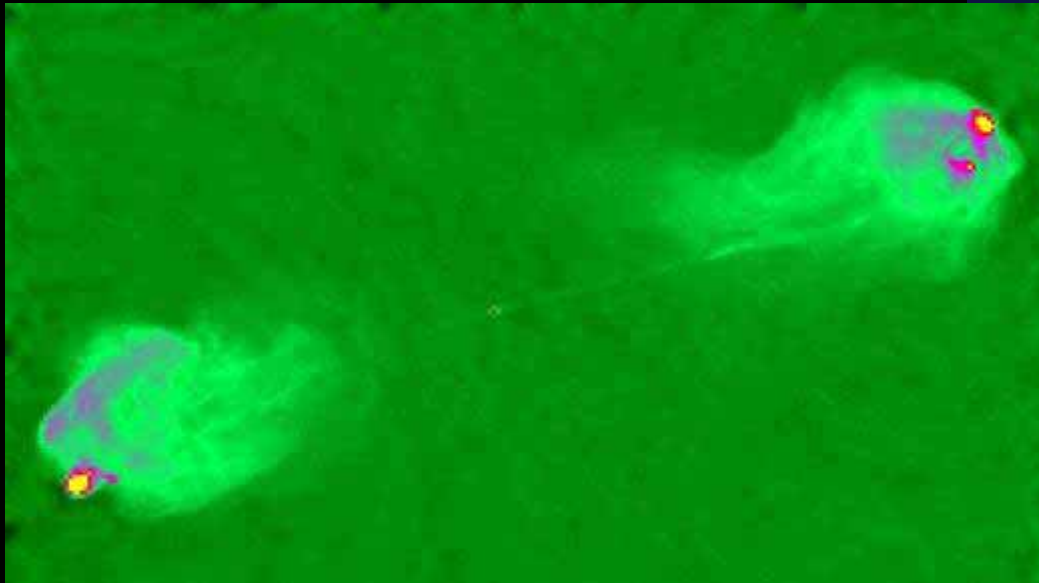
bis 10^{16} eV

Krebs-Nebel

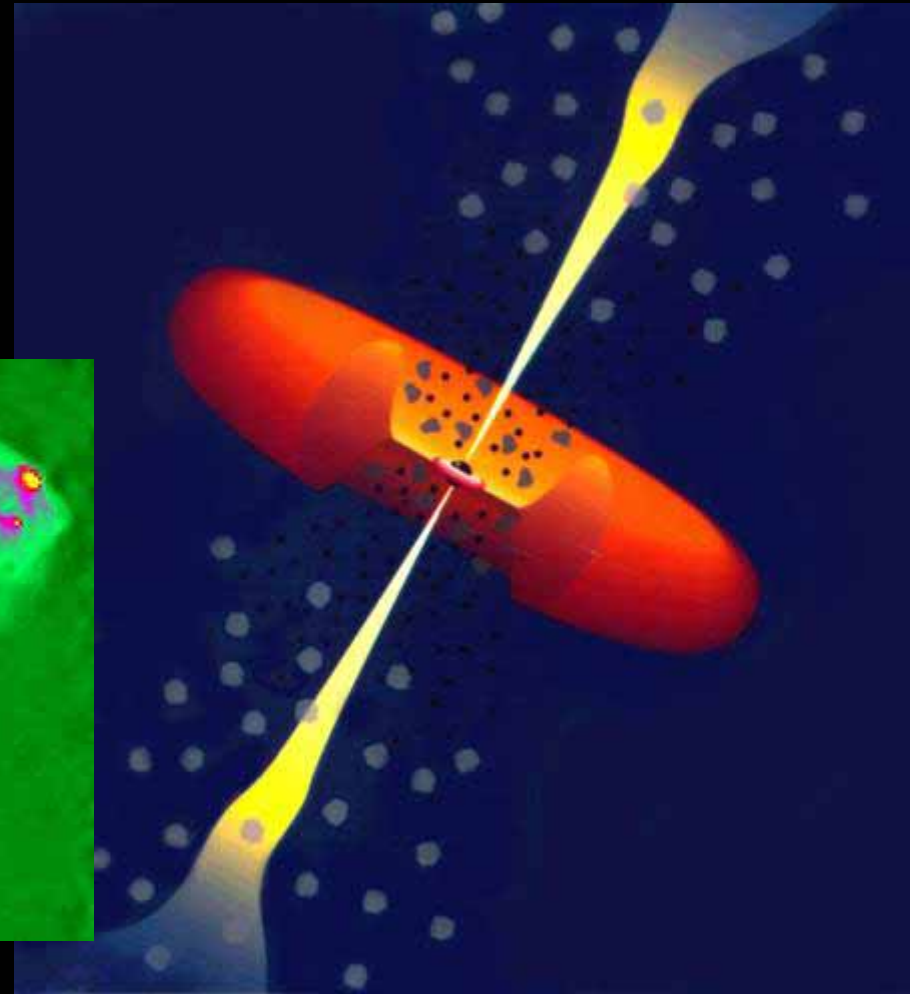


Aktive Galaxien: Akkretionsscheiben und Jets

bis 10^{20} eV

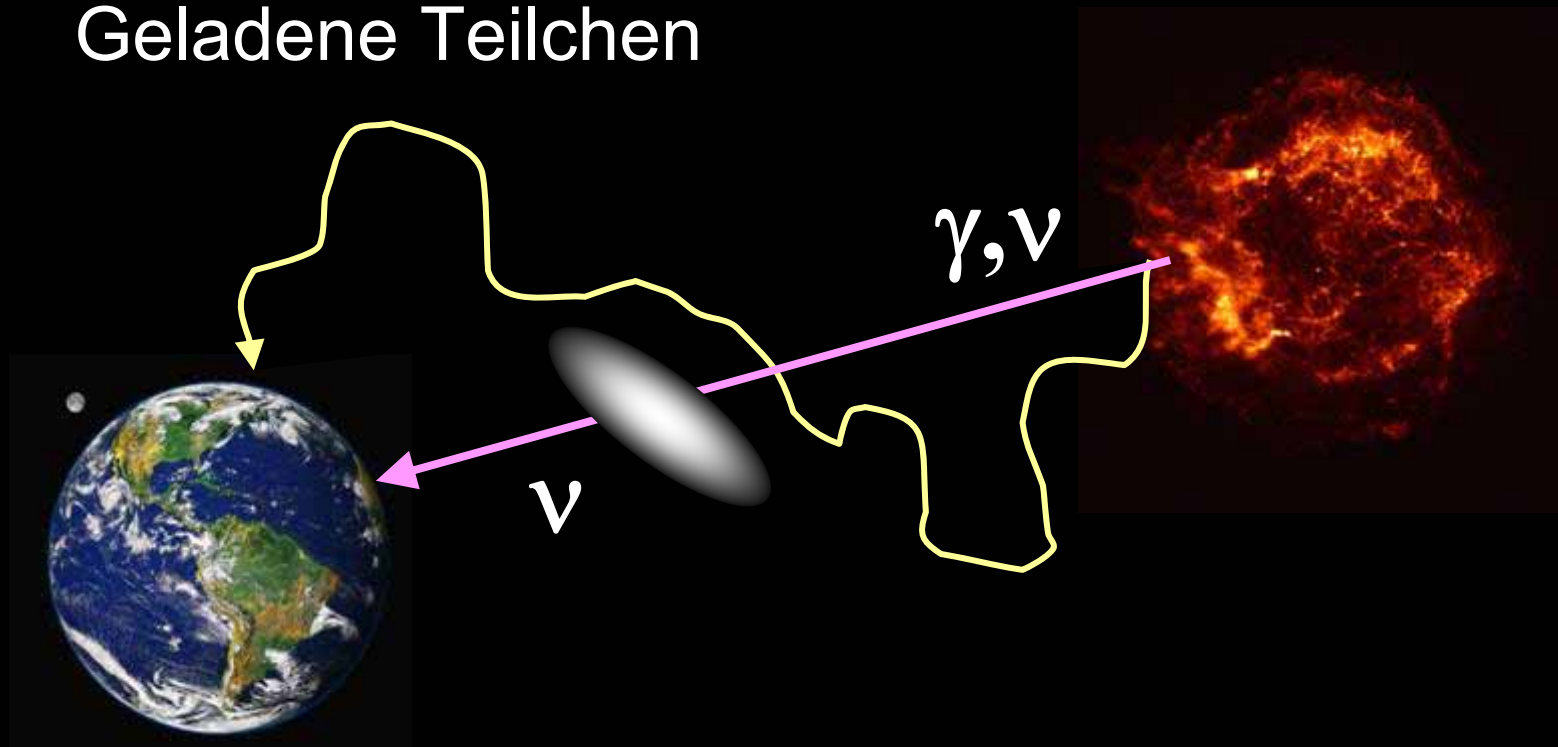


Radiobild von Cygnus A



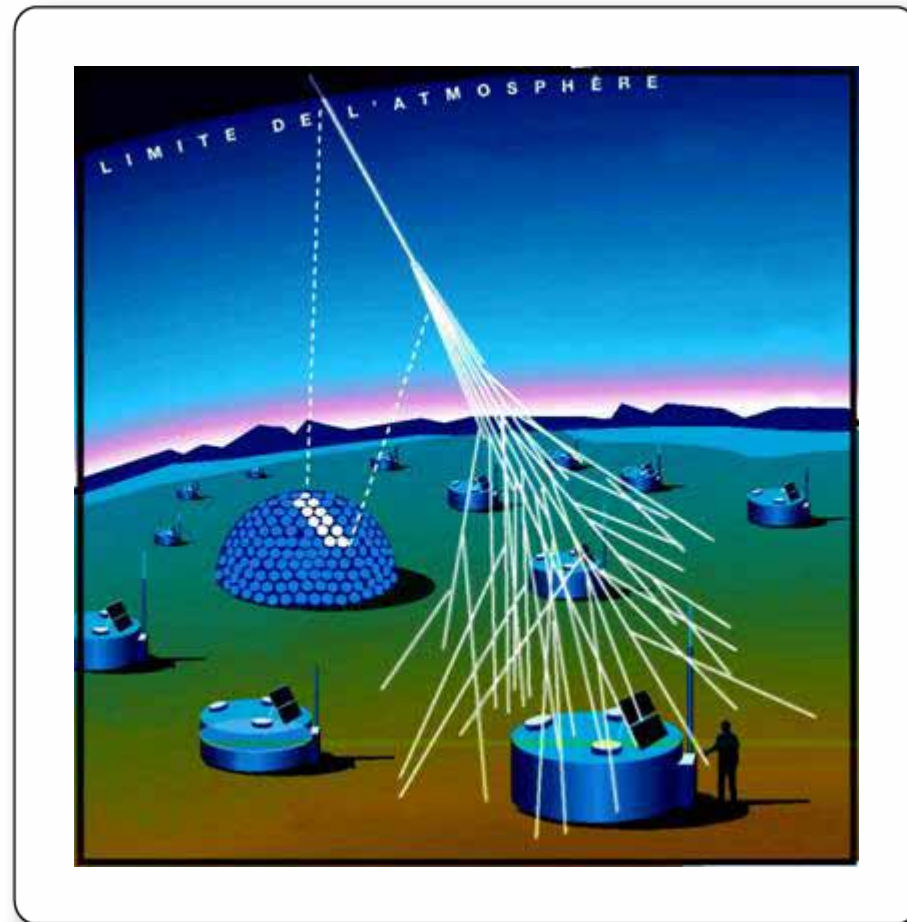
Geladene kosmische Strahlung vs. Gamma-Strahlen und Neutrinos

Geladene Teilchen





Geladene kosmische Strahlung: Auger



- ❑ Oberhalb 10^{19} eV:
 - ❑ Ablenkung in kosmischen Magnetfeldern gering
 - ❑ „Astronomie“ möglich
 - ❑ Aber: Flüsse gering (<1 Teilchen pro km^2 und Jahr)
 - ❑ Luftschauder-Detektor von $\sim 3000 \text{ km}^2$ Fläche nötig
- ❑ Pierre-Auger Observatorium (Argentinien)



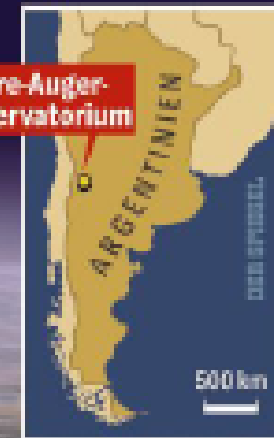
Das Pierre-Auger Observatorium

Partikeljagd in der Pampa

1 Weit entfernte Schwarze Löcher beschleunigen Atomkerne auf höchste Energien. Wenn diese auf die Erdatmosphäre treffen, zertrümmern sie Luftmoleküle und lösen damit leuchtende Teilchenkaskaden aus, sogenannte Luftschauer.

2 Fluoreszenz-Teleskope an vier Standorten rund um die Anlage registrieren bei einer solchen Kollision feinste Lichtblitze.

3 Auf einer Fläche von 3000 Quadratkilometern sind 1600 Messtanks aufgestellt. Trifft ein Teilchenschauer einige der Tanks, löst er in deren Innem Blitze aus, die von Lichtsensoren gemessen werden. Durch Abgleichen der Tankpositionen mit den Lichtblitzen in der Atmosphäre lässt sich der Herkunftsort des kosmischen Teilchens bestimmen.



Pierre-Auger-Campus

Fluoreszenz-Teleskop

Fluoreszenz-Teleskop

Fluoreszenz-Teleskop

Fluoreszenz-Teleskop

Darstellung nicht maßstabsgerecht.
Schattenbild: Google Maps

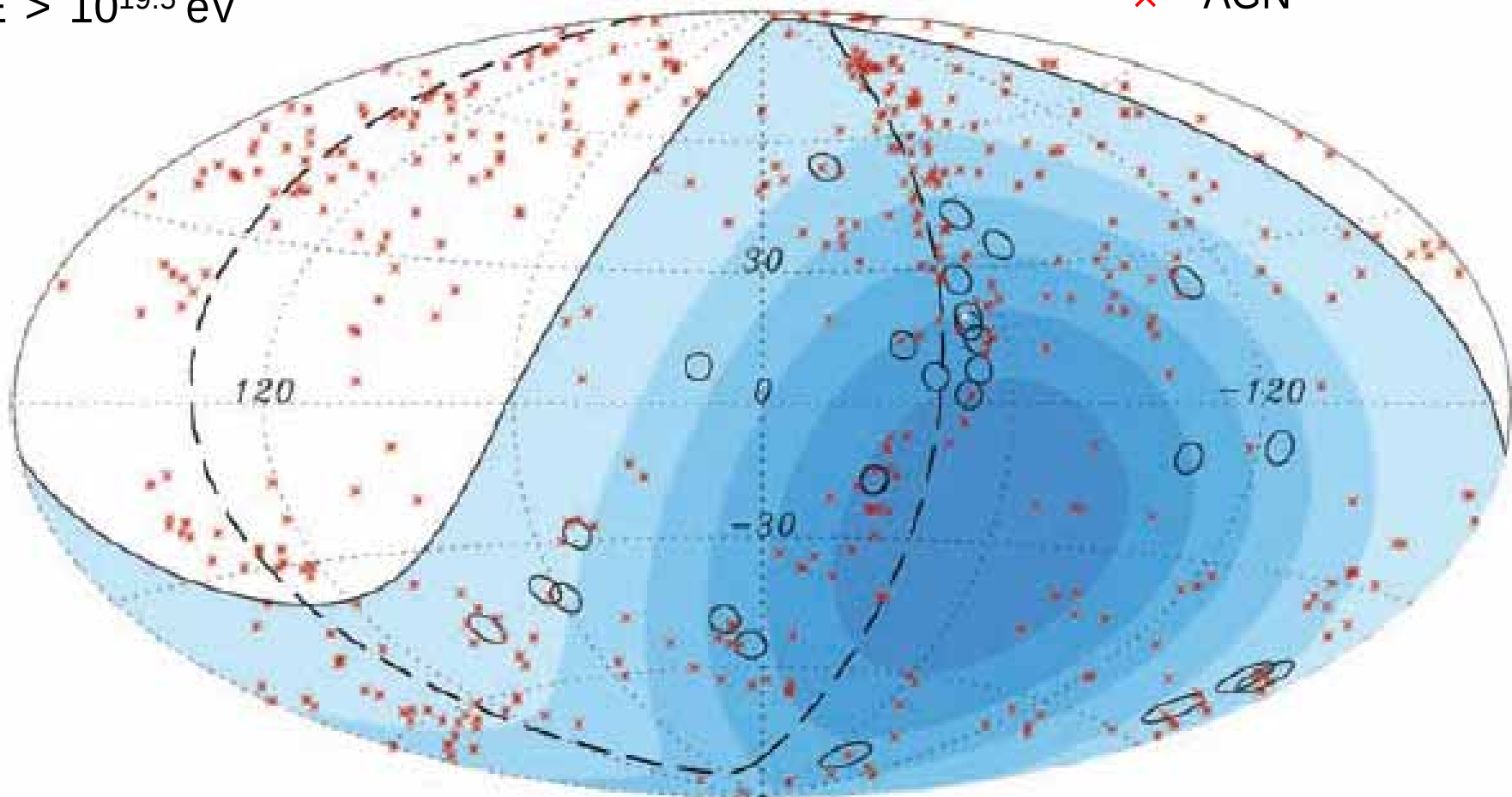
15 km



Der Beginn der Astronomie mit geladenen kosmischen Strahlen?

Auger Himmelskarte
 $E > 10^{19.5} \text{ eV}$

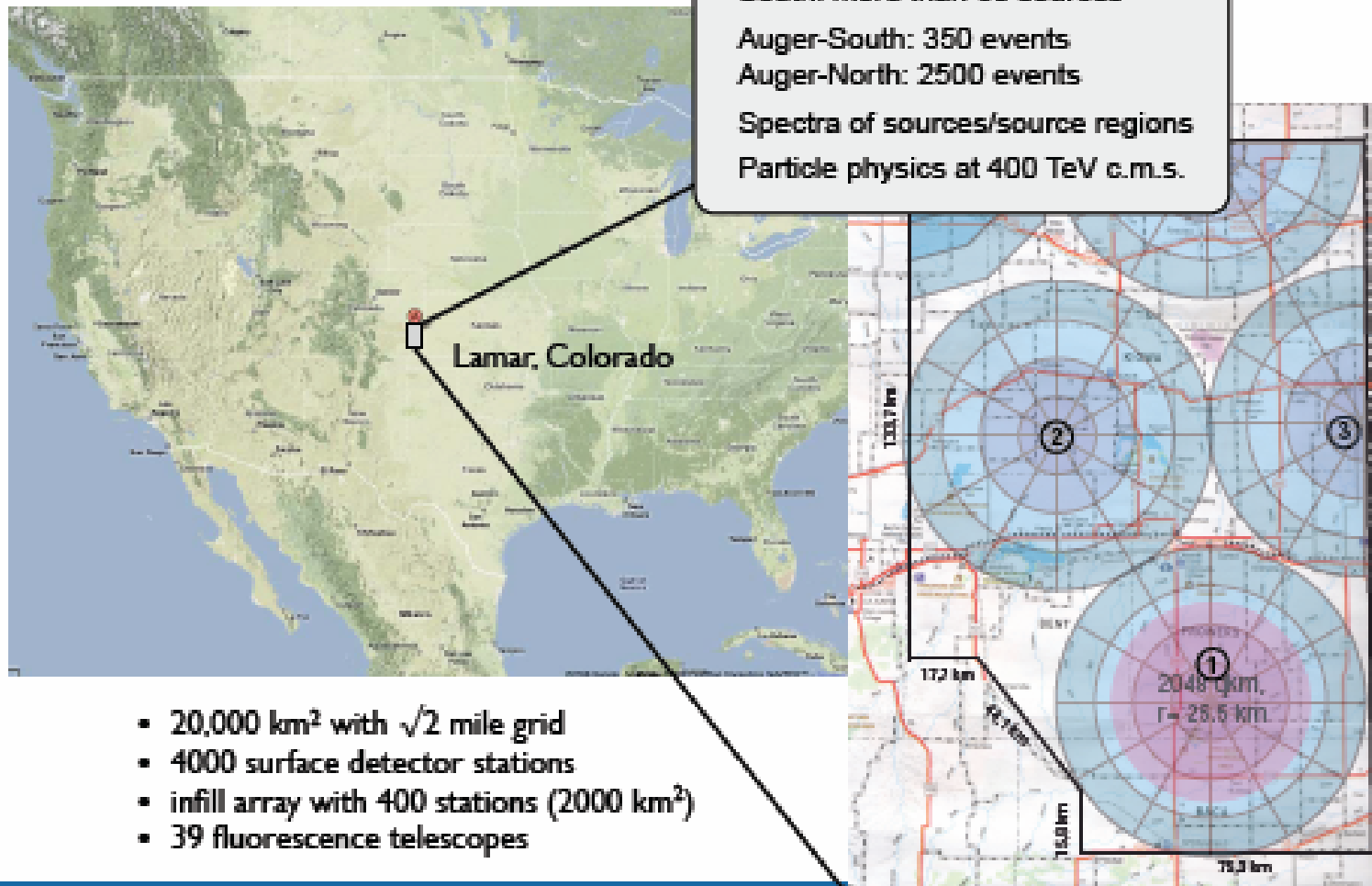
o - Auger-Ereignisse
x - AGN





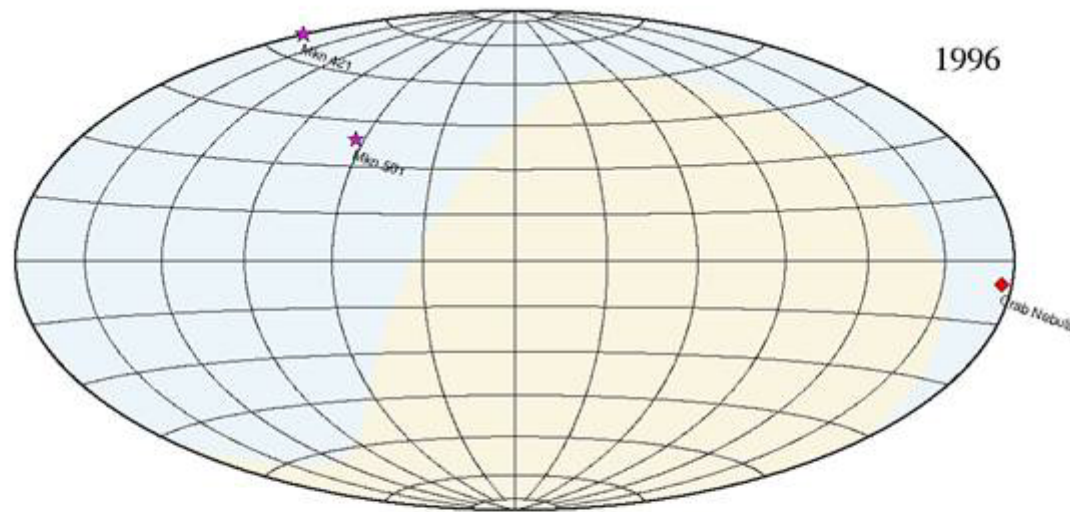
Auger-Nord = 7 x Auger-Süd

Plans – Auger-North

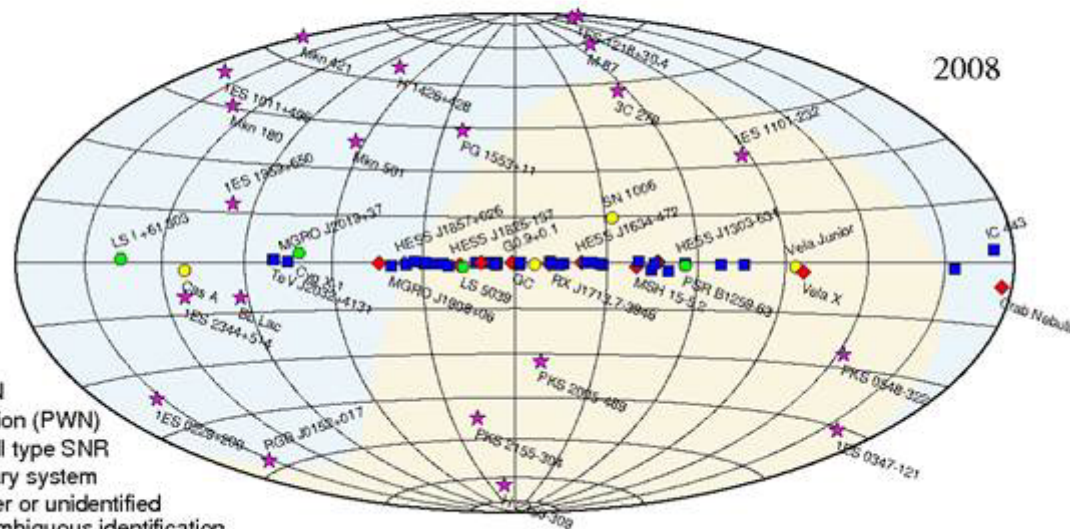




Der TeV Gamma Himmel



1996:
3 Quellen

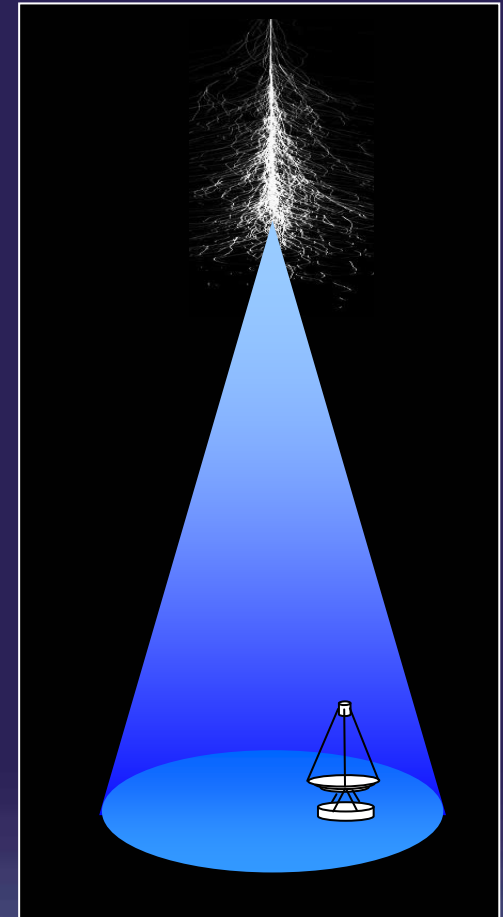
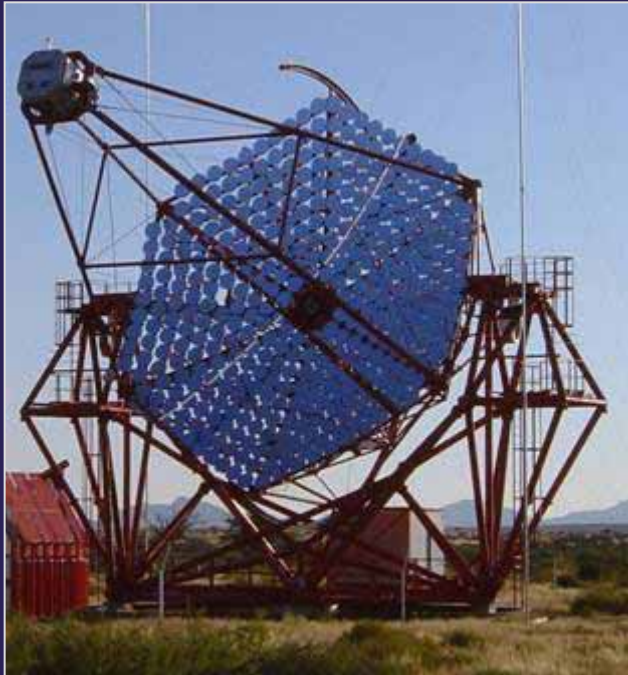


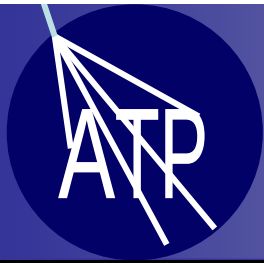
2008:
~ 75 Quellen

- ★ AGN
- ◆ Plerion (PWN)
- Shell type SNR
- Binary system
- Other or unidentified or ambiguous identification

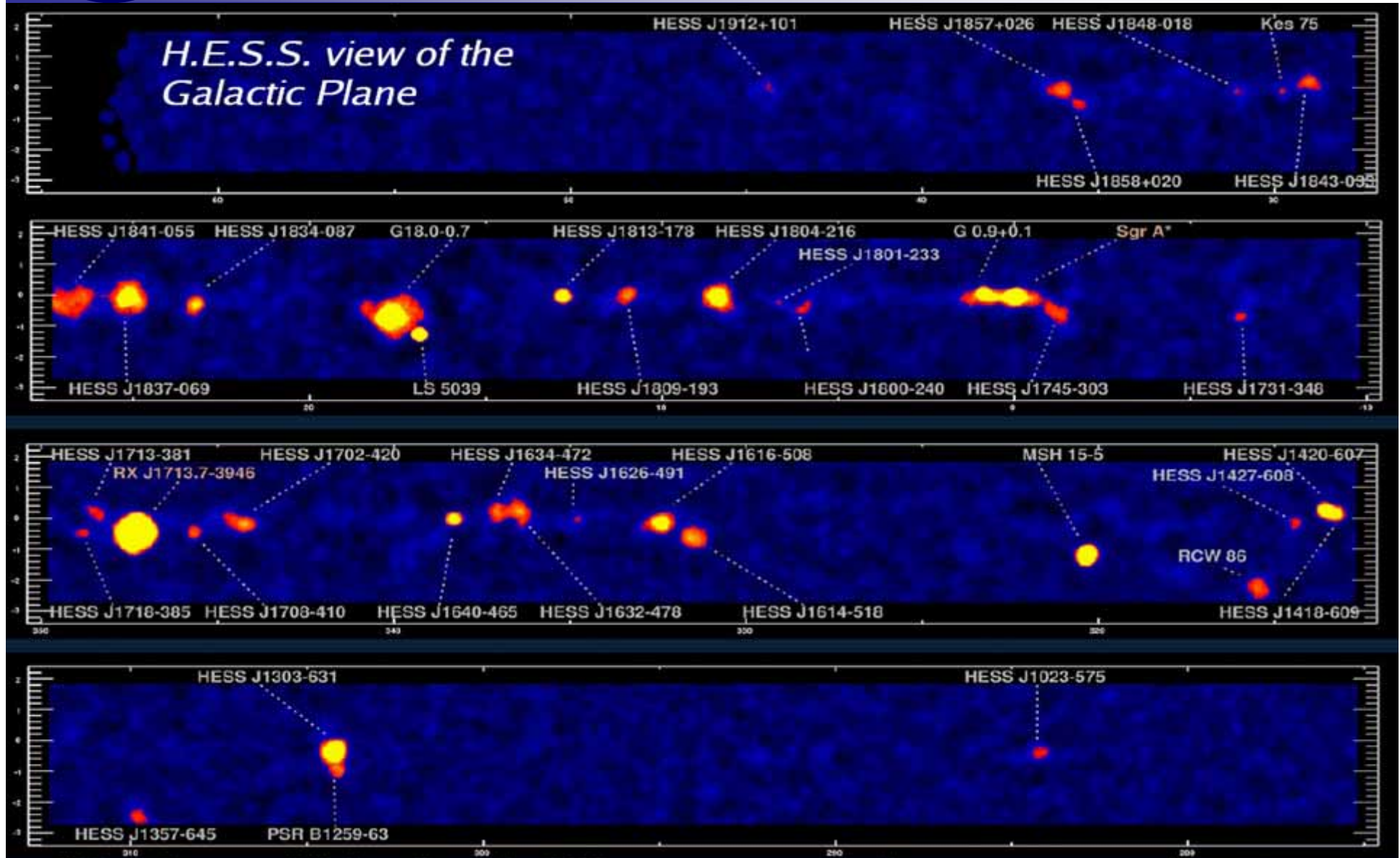


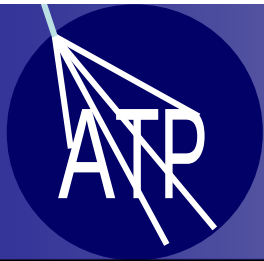
Das H.E.S.S. Teleskop in Namibia





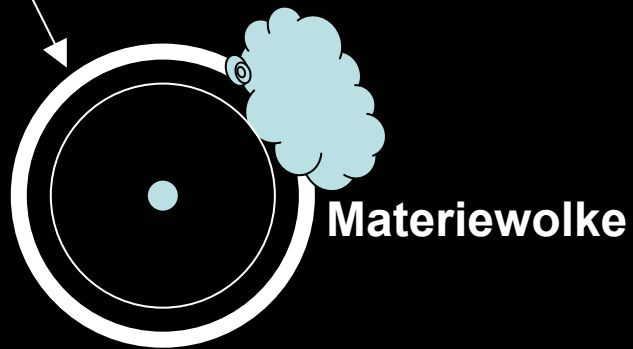
Scan der Galaktischen Ebene



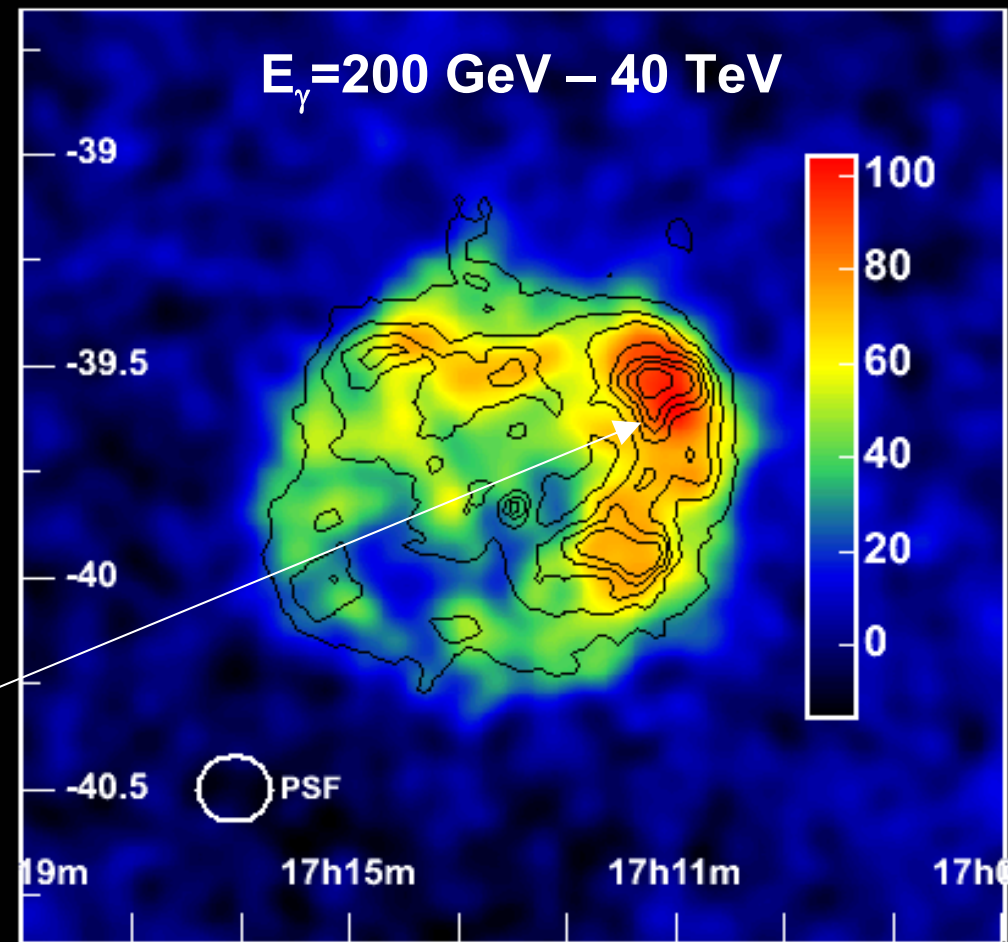
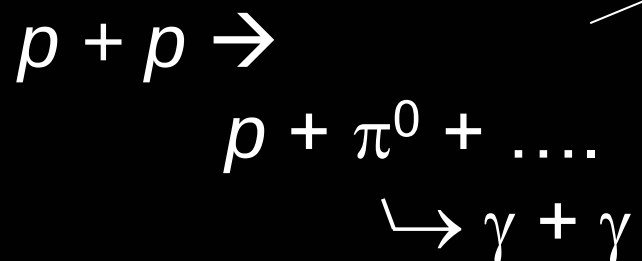


Erste Hinweise auf Protonenbeschleuniger ?

Protonbeschleunigung
an der Stoßwellenfront



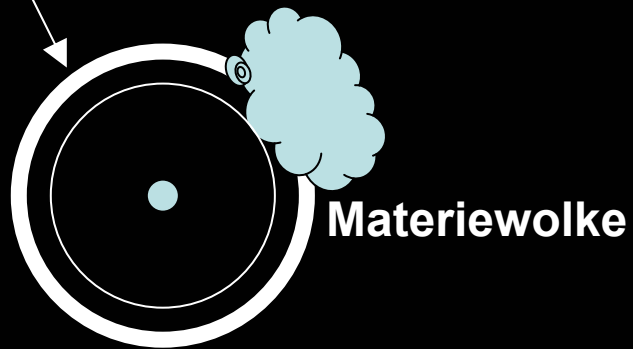
Protonen wechselwirken
mit Materie



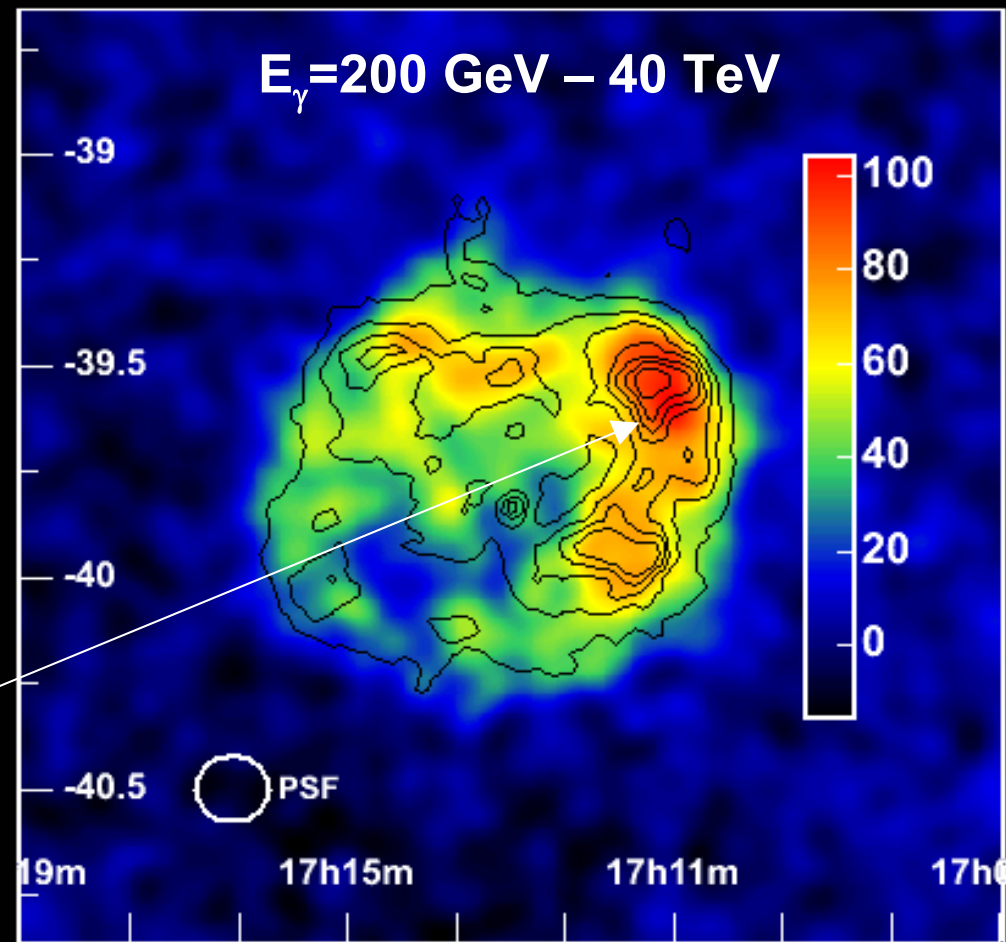
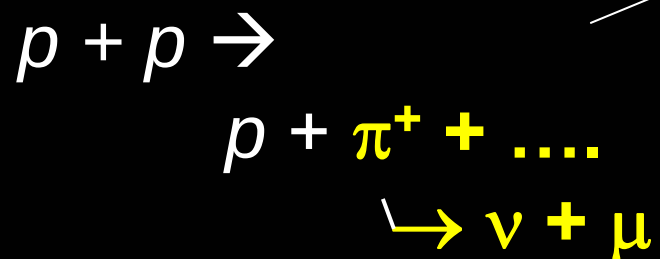


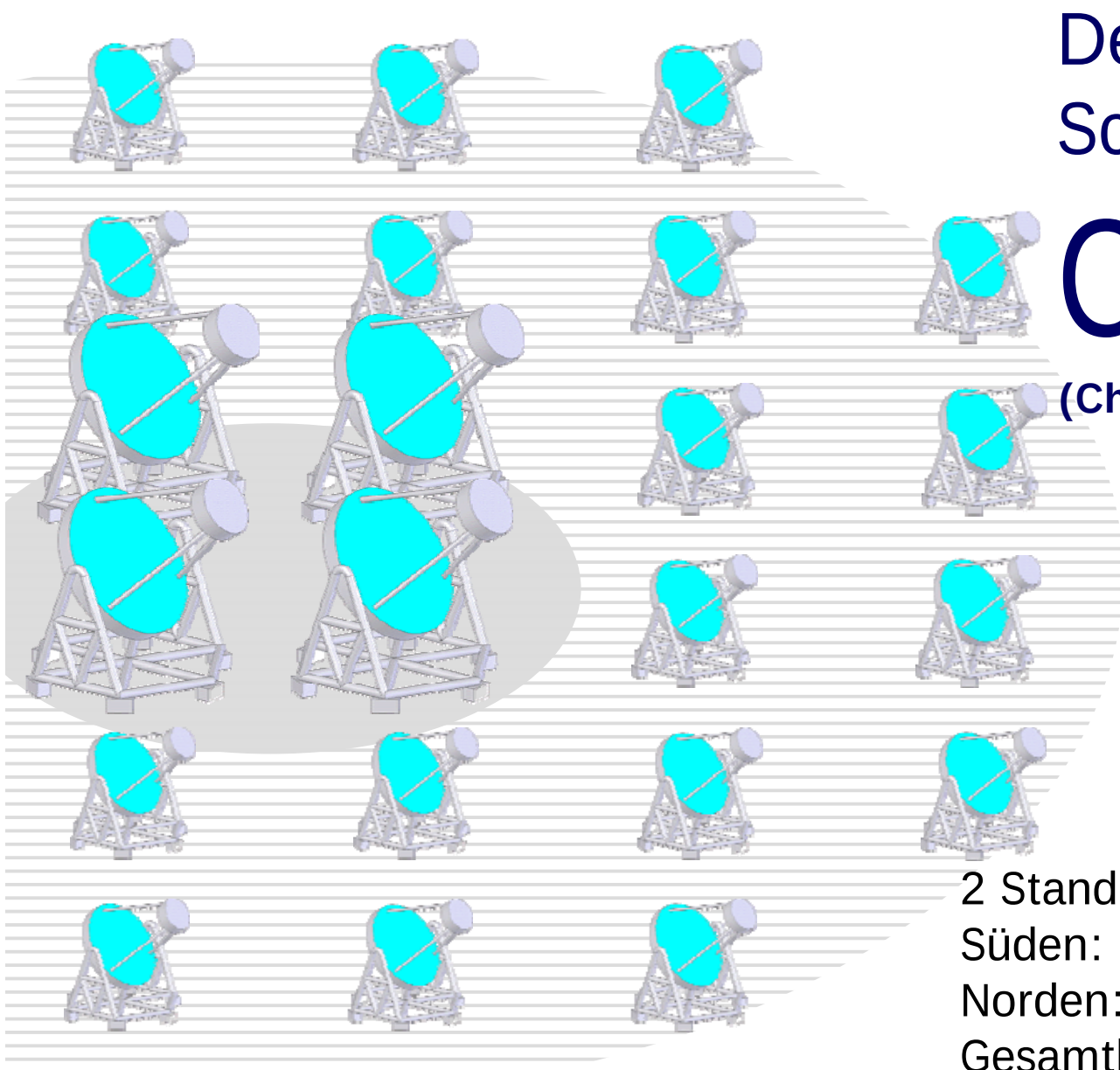
Erste Hinweise auf Protonenbeschleuniger ?

Protonbeschleunigung
an der Stoßwellenfront



Protonen wechselwirken
mit Materie





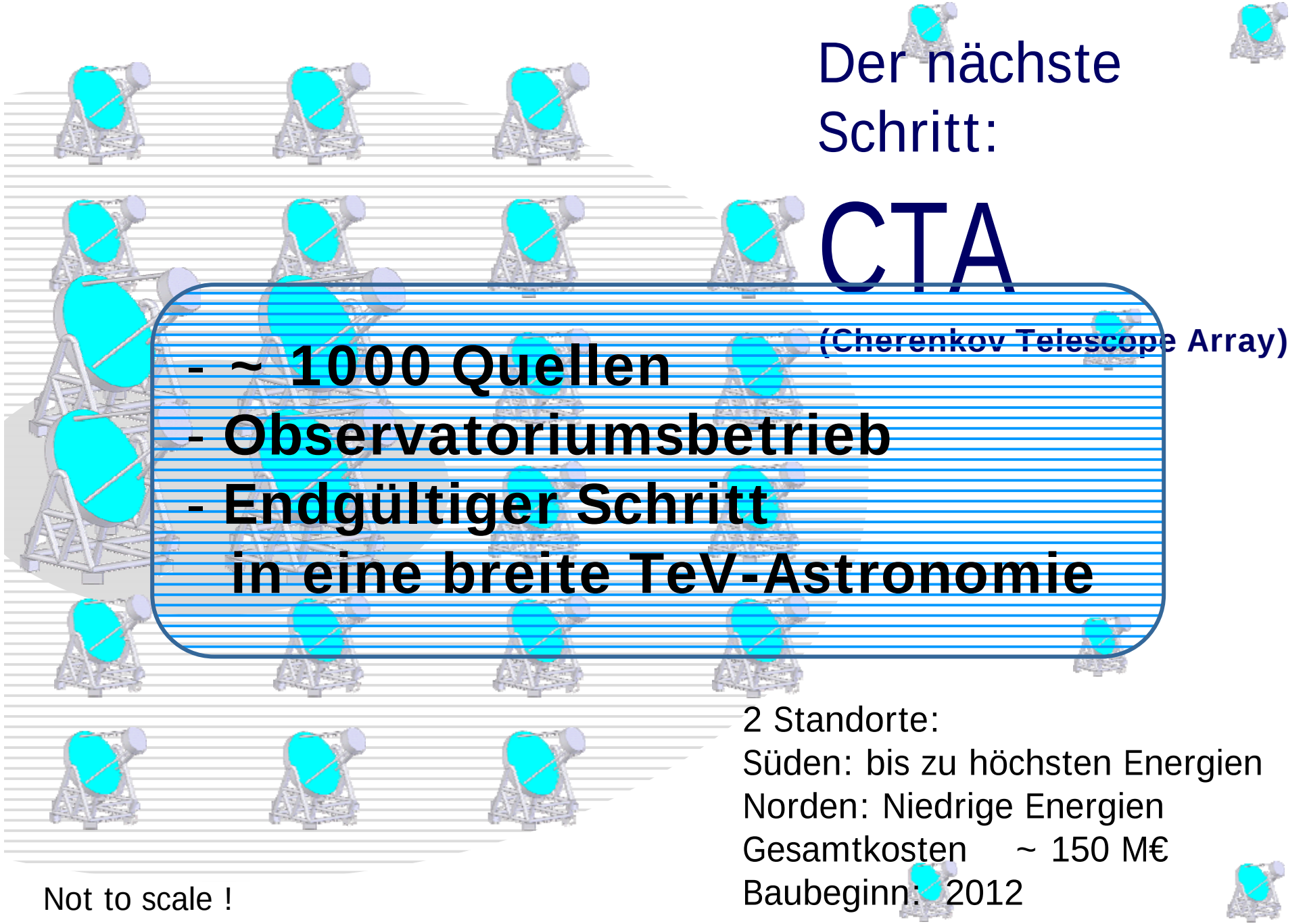
Der nächste
Schritt:

CTA

(Cherenkov Telescope Array)

2 Standorte:
Süden: bis zu höchsten Energien
Norden: Niedrige Energien
Gesamtkosten ~ 170 M€
Baubeginn: 2012

Not to scale !



Der nächste
Schritt:

CTA

(Cherenkov Telescope Array)

- ~ 1000 Quellen
- Observatoriumsbetrieb
- Endgültiger Schritt
in eine breite TeV-Astronomie

2 Standorte:

Süden: bis zu höchsten Energien

Norden: Niedrige Energien

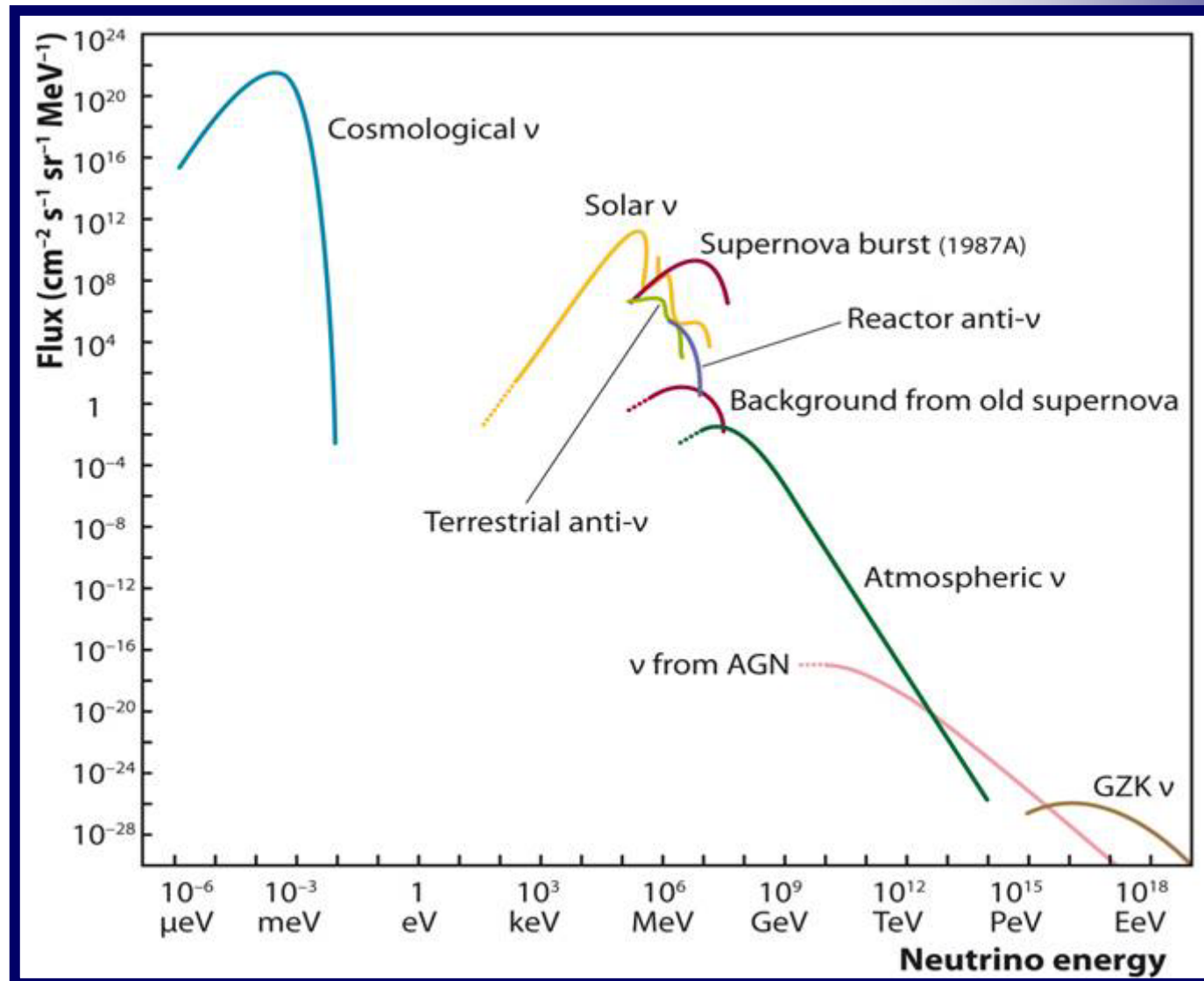
Gesamtkosten ~ 150 M€

Baubeginn: 2012

Not to scale !

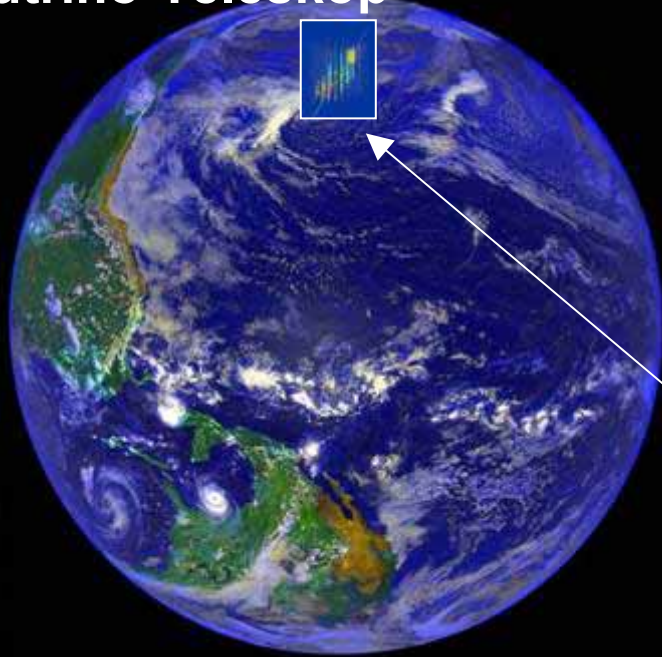


Kosmische Neutrinos



Neutrino-Astronomie bei hohen Energien

Neutrino-Teleskop



ν

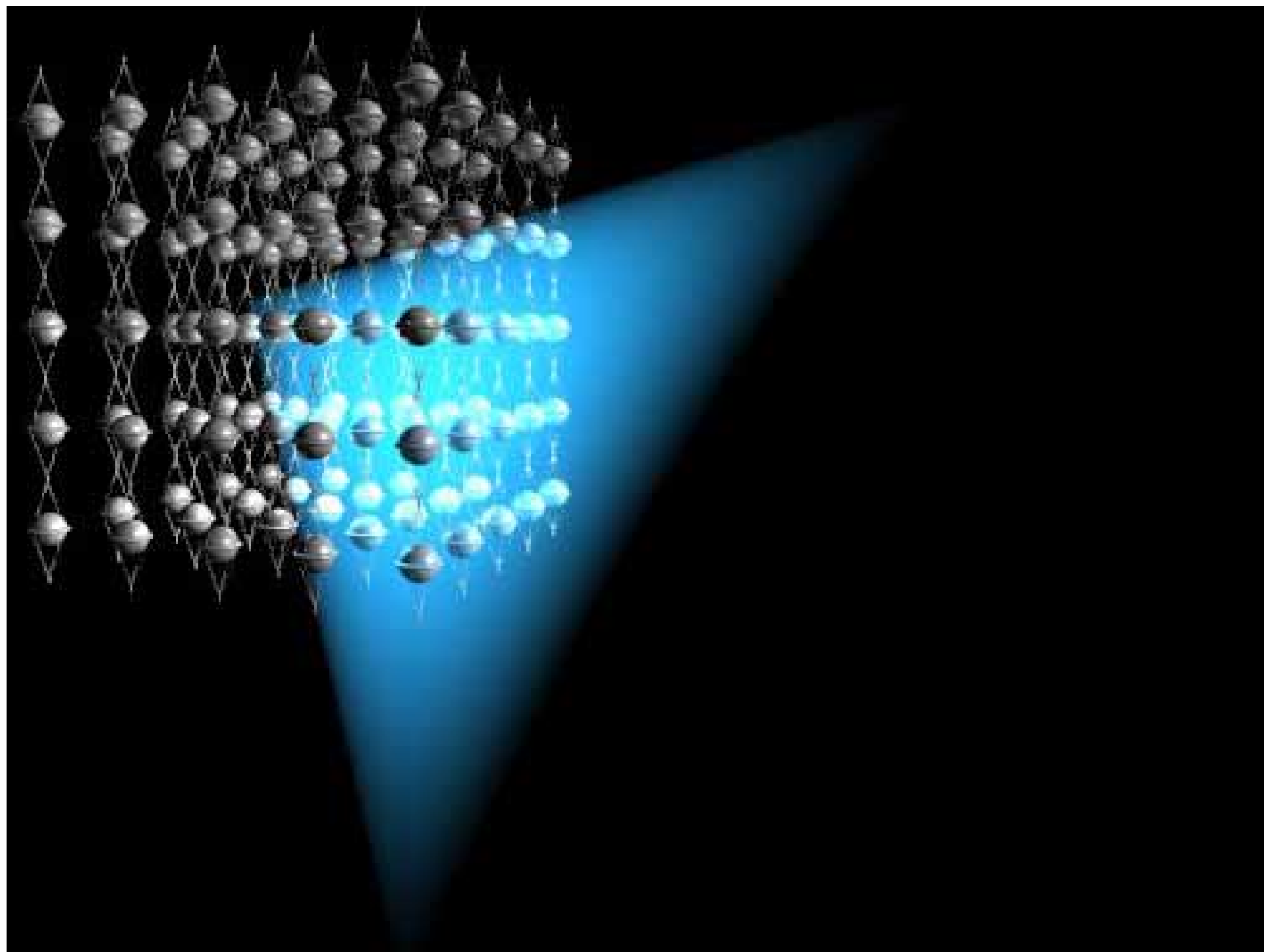
Nur Neutrinos können die Erde durchqueren.

→ für klare Identifikation:

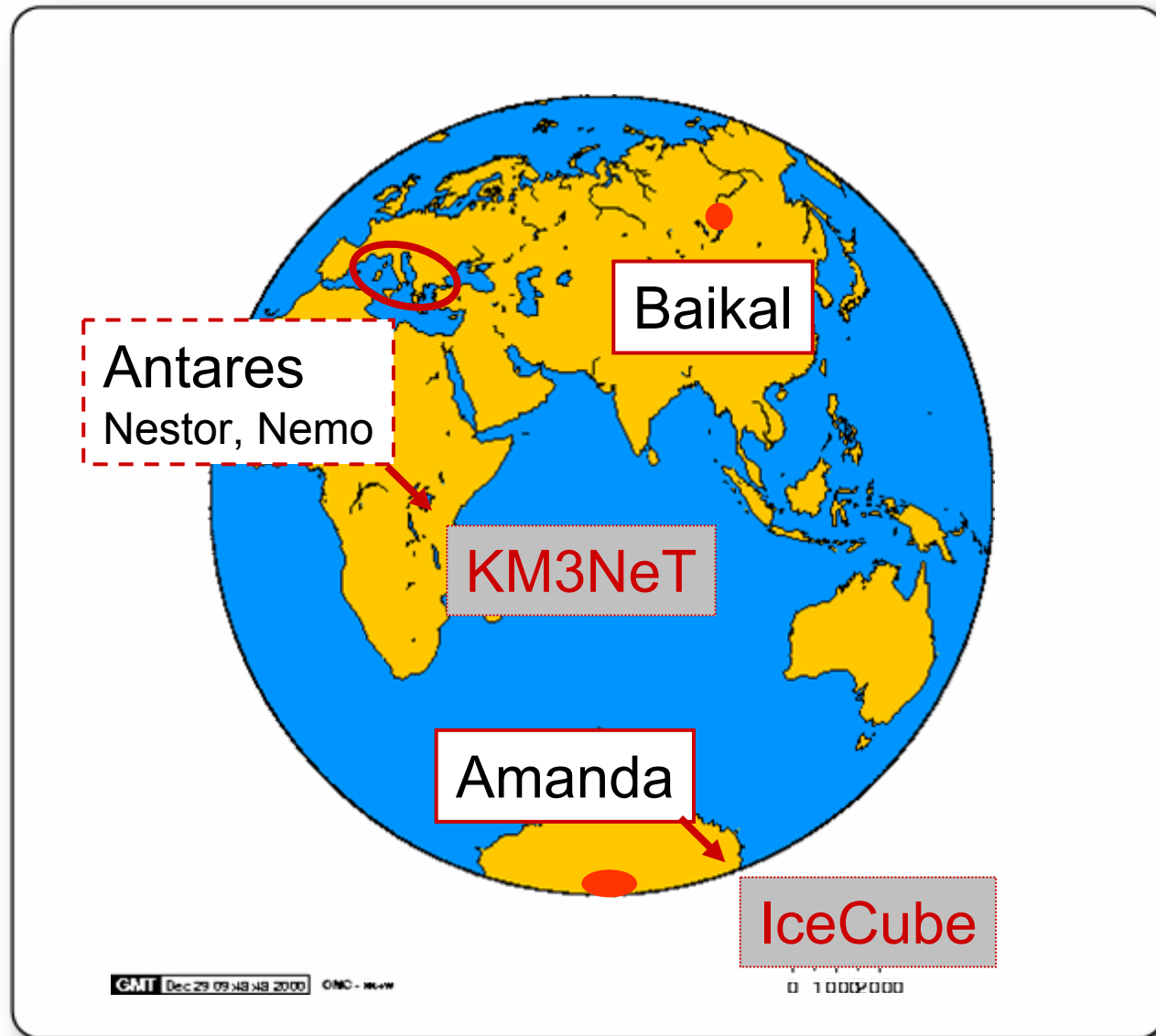
„Sieh“ nach unten !
(und benutze die Erde als Filter)

Aktive
Galaxie





High energy neutrino telescopes





Südpol

Astronomie-Sektor

Landebahn

AMANDA

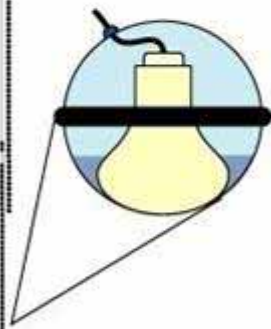
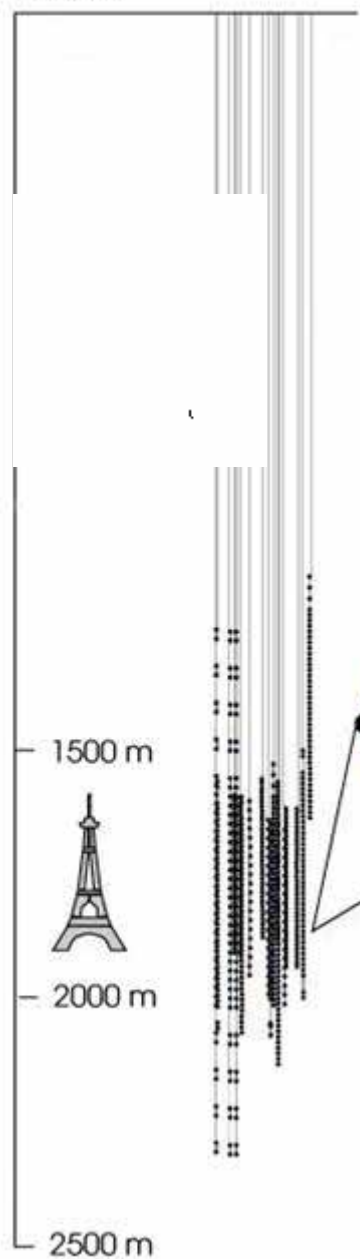
The Dome



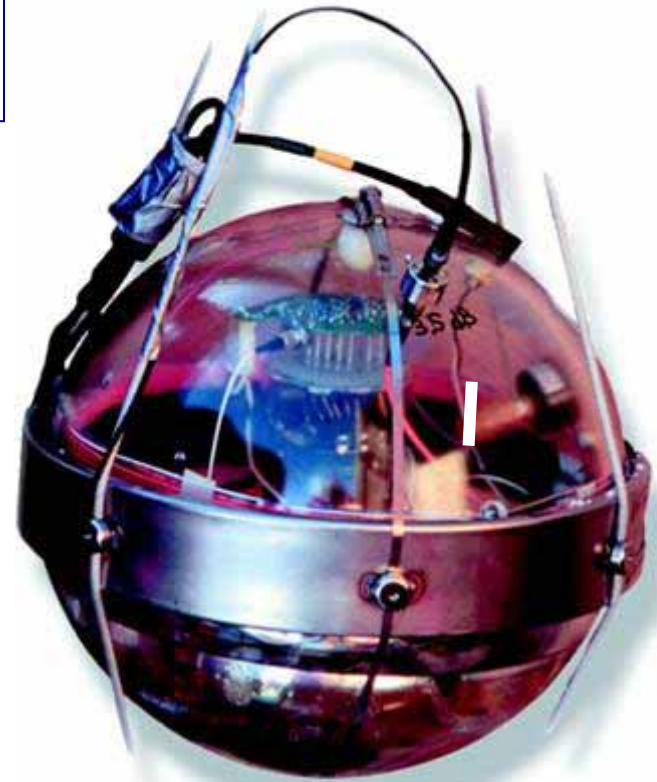
AMANDA

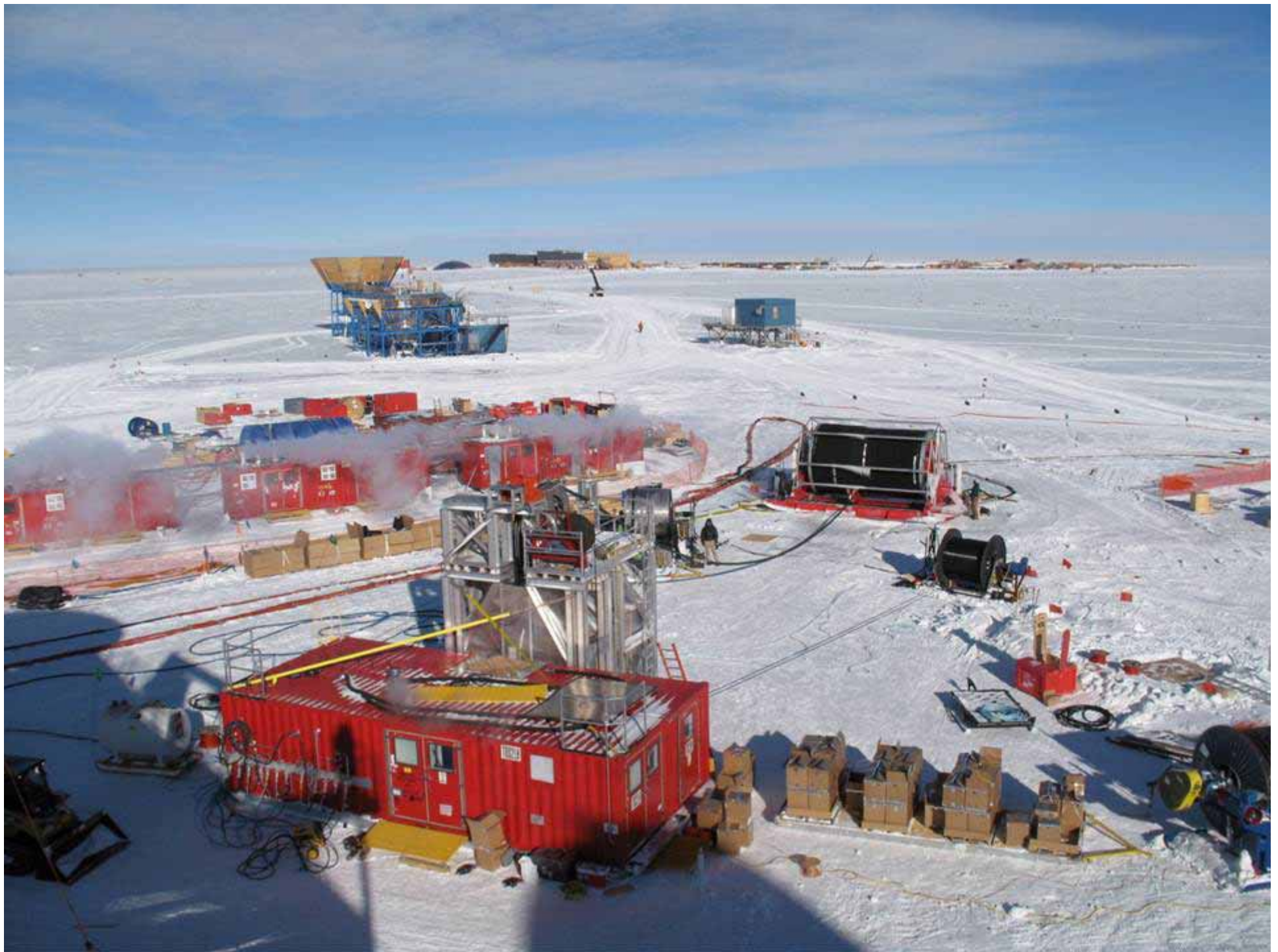
677 optical modules
on 19 strings

Depth

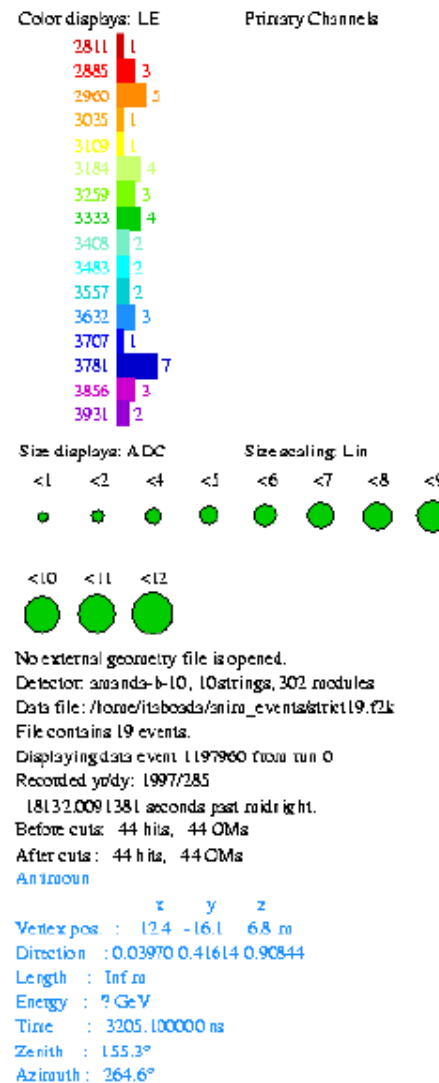


Installation
1996-2000





neutrino event in AMANDA



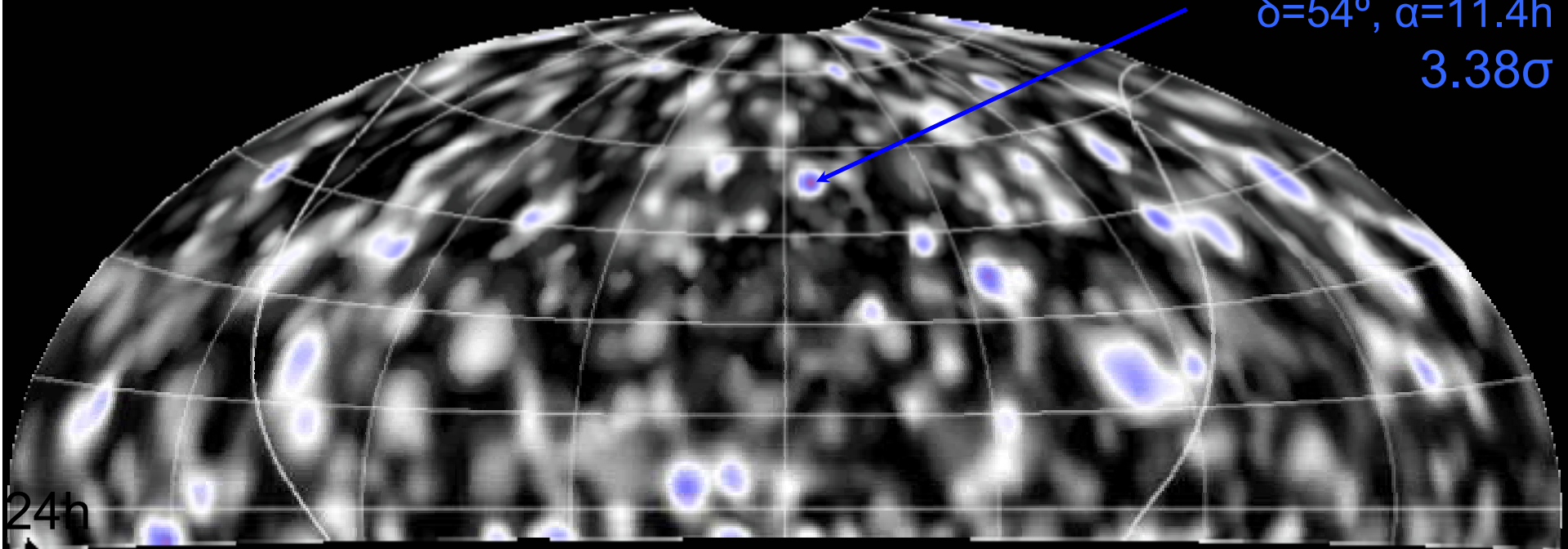
ν + nucleus
 $\rightarrow \mu$ + nucleus





AMANDA Himmelskarte

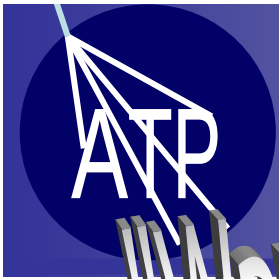
Max Significance
 $\delta=54^\circ$, $\alpha=11.4h$
 3.38σ



24h



7 Jahre, 6595 Neutrinos

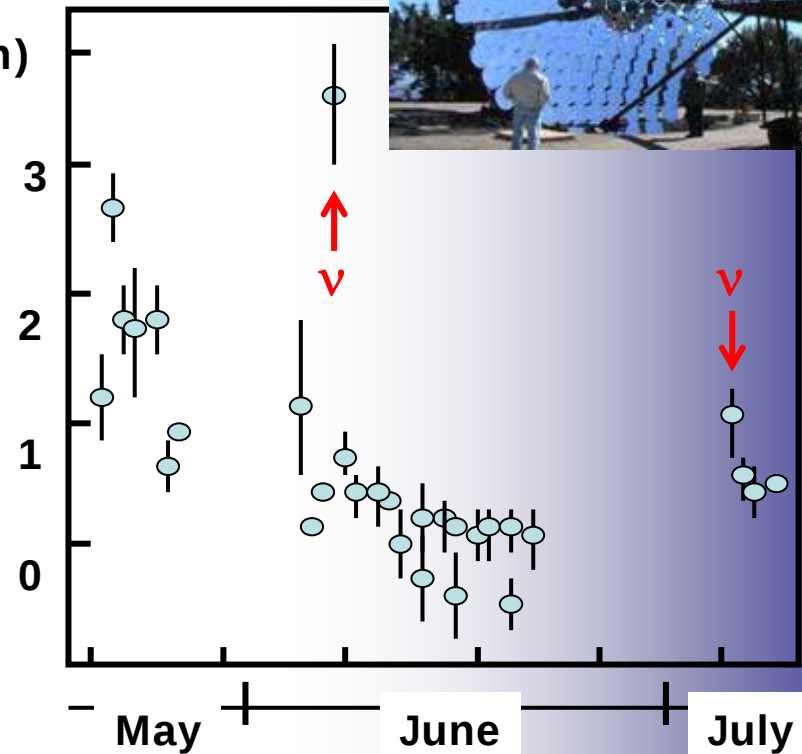
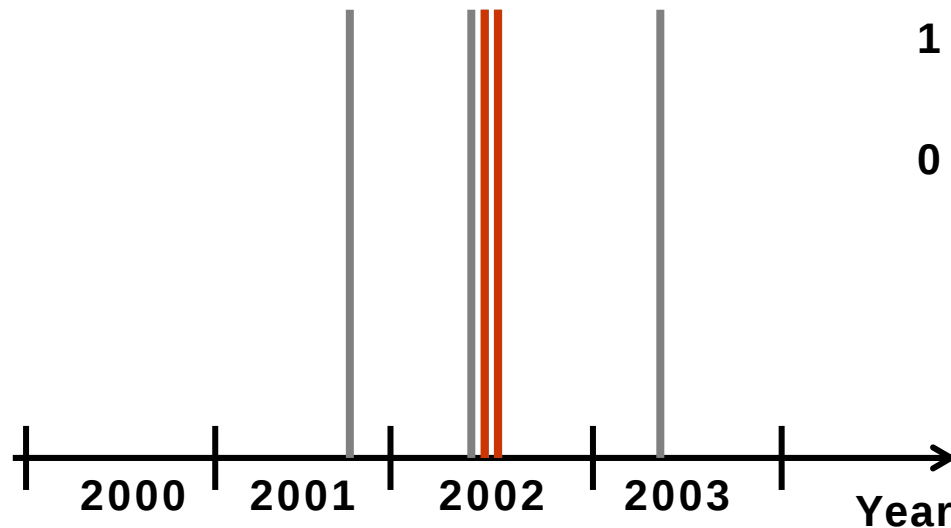


„War das schon Was?“

ES1959+650

Fluss von
TeV Photonen
(willk. Einheiten)

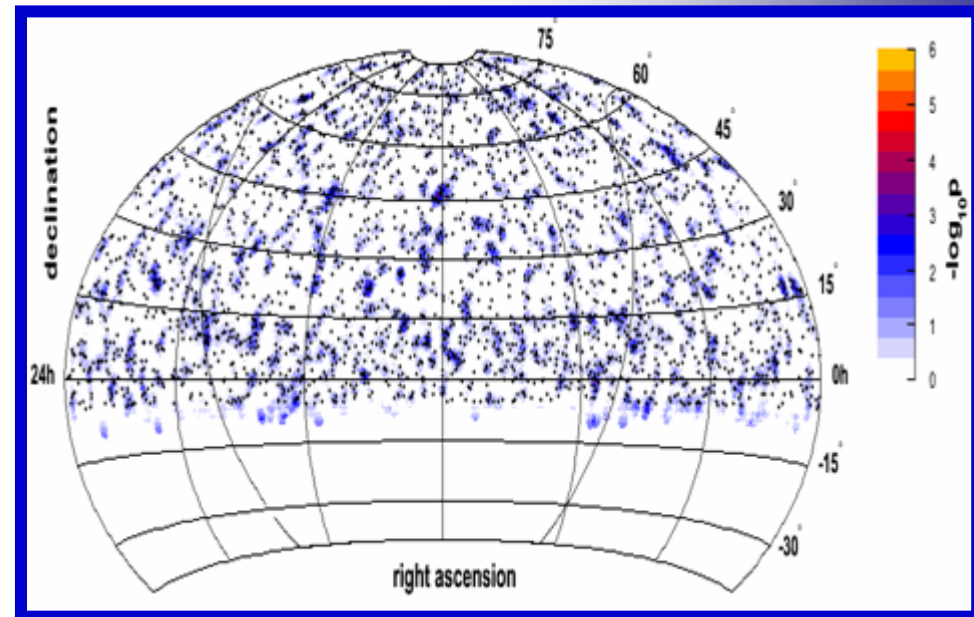
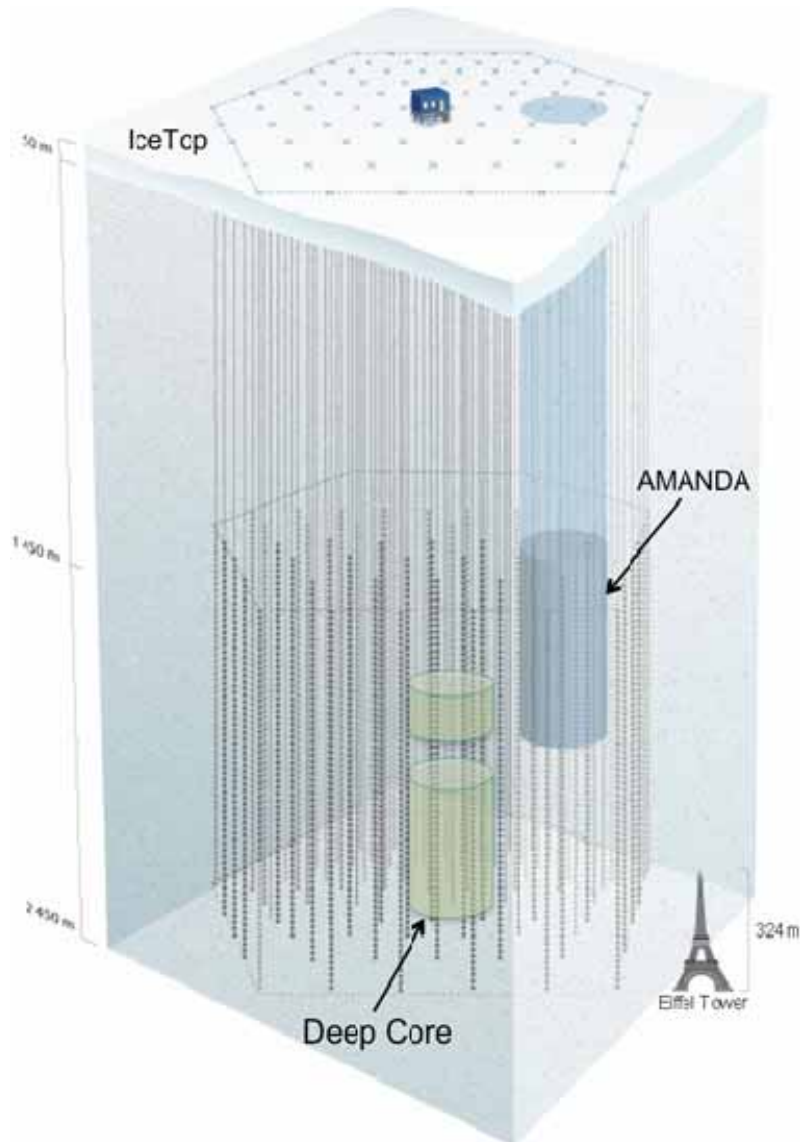
Ankunftszeit von „AMANDA-
Neutrinos“ aus der Richtung der
Aktiven Galaxie ES1959+650



Gamma-Fluss aus der
Richtung ES1959+650 im
WHIPPLE-Teleskop



IceCube

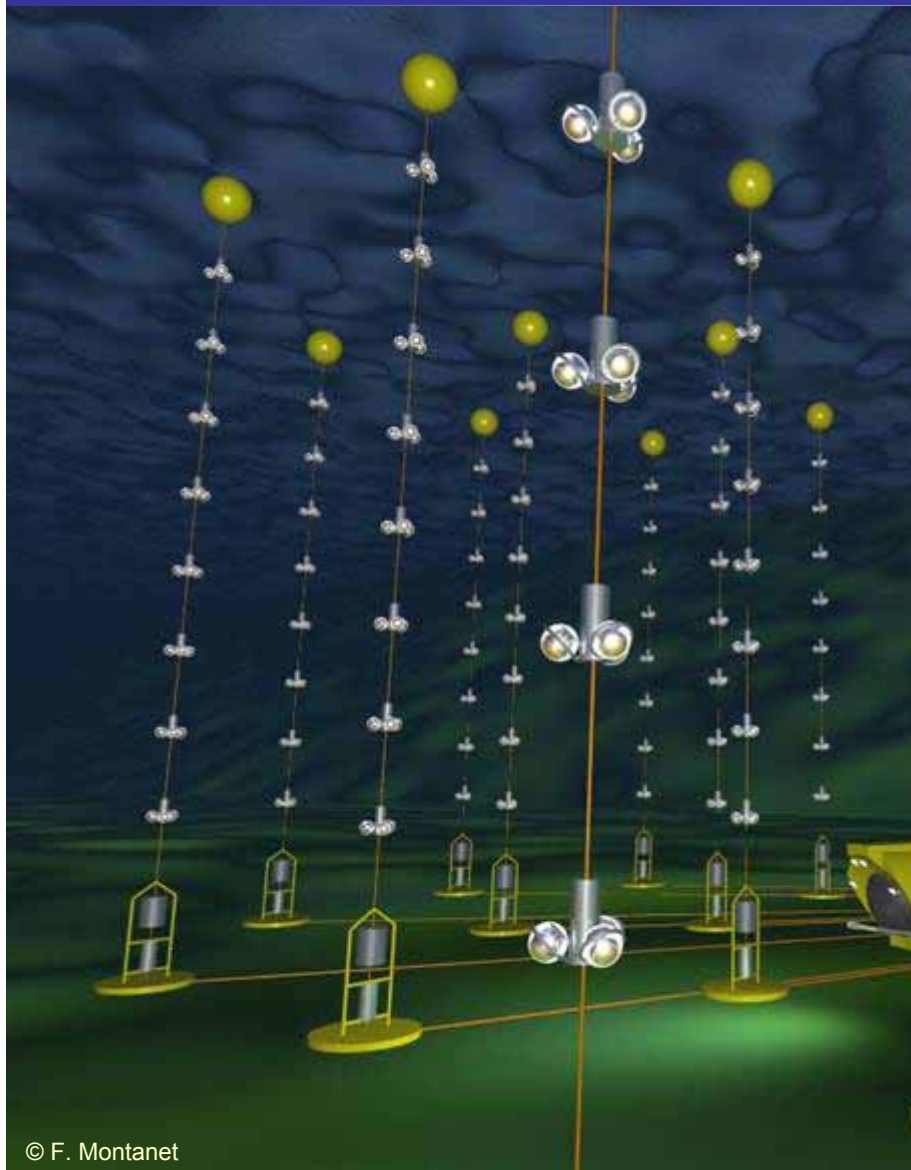


Erste IceCube Himmelskarte
(1/4 IceCube, 10 Monate)

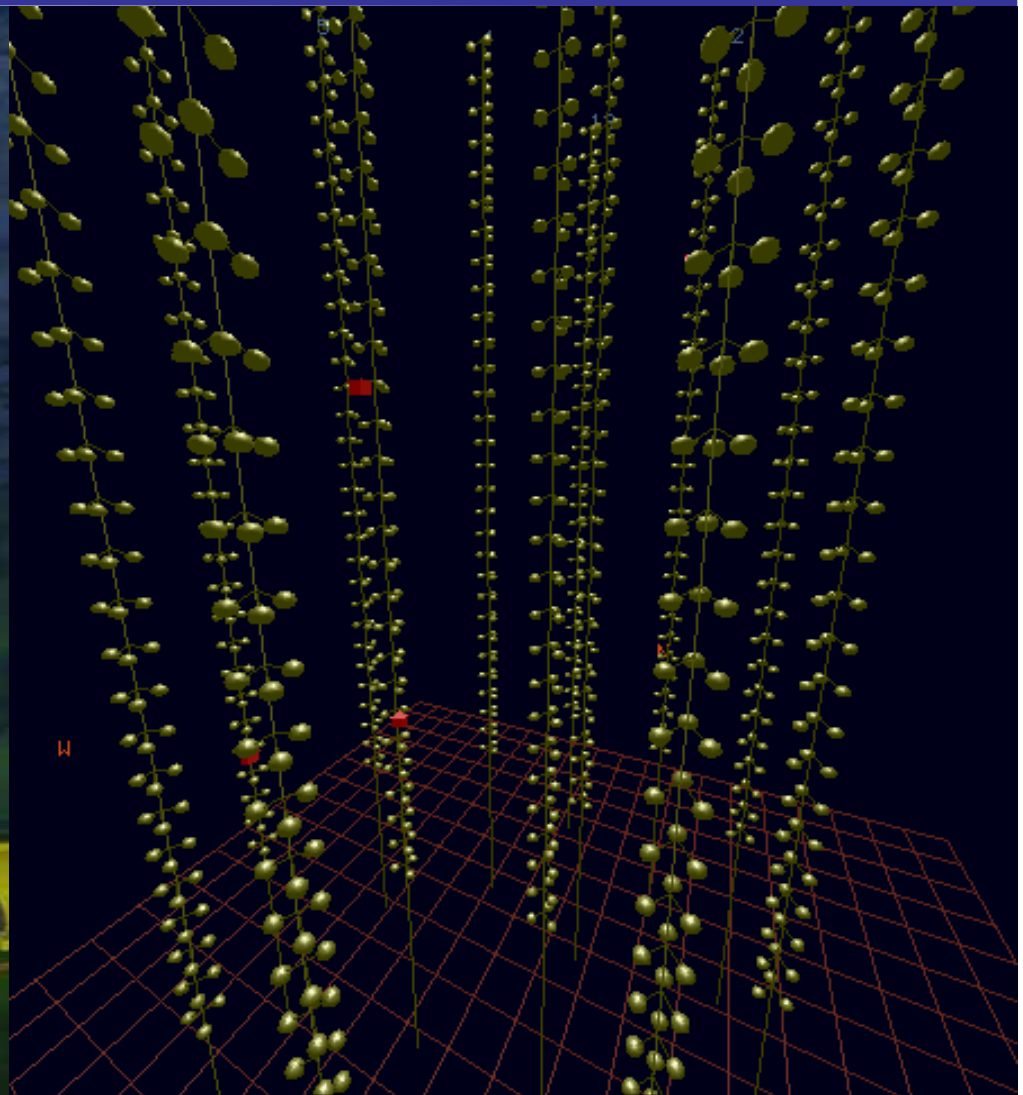
2 x so sensitiv wie 7 Jahre Amada
Schritt in neues Territorium !



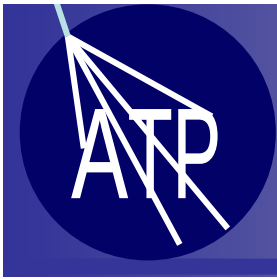
Antares



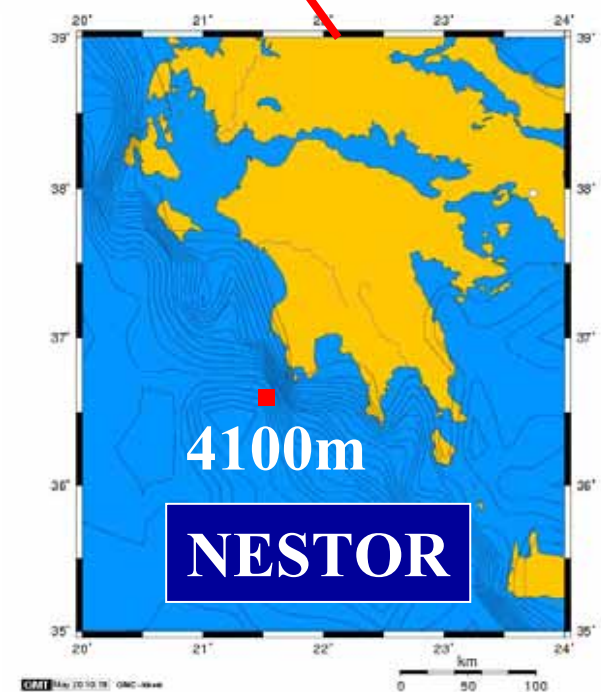
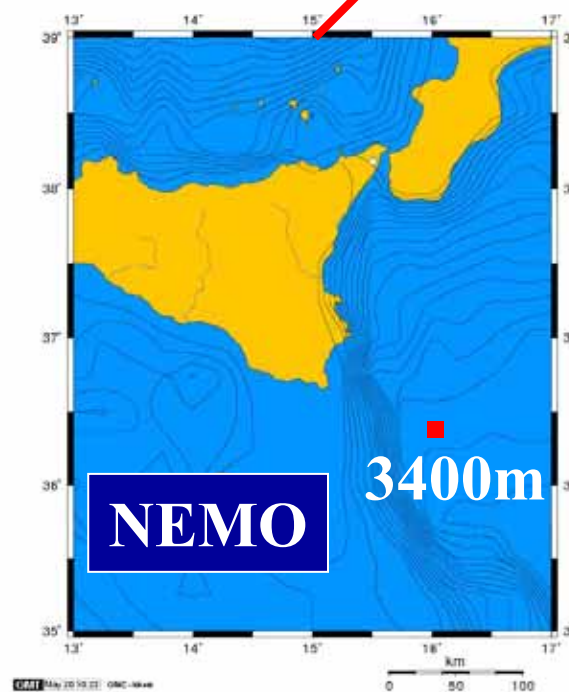
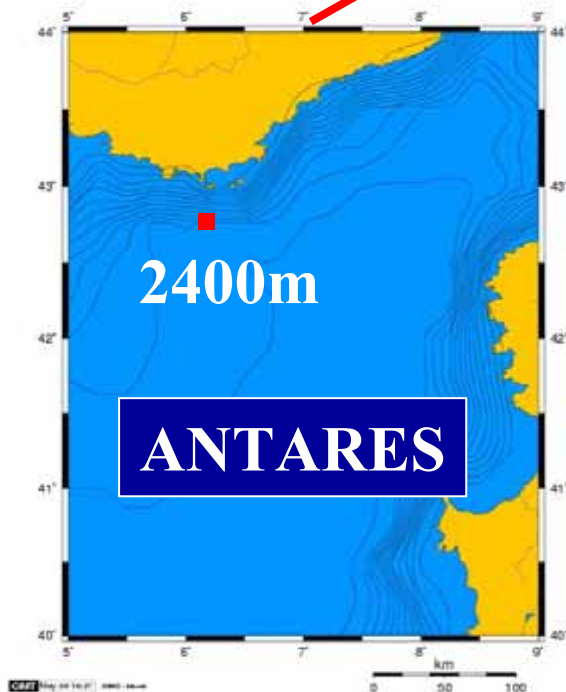
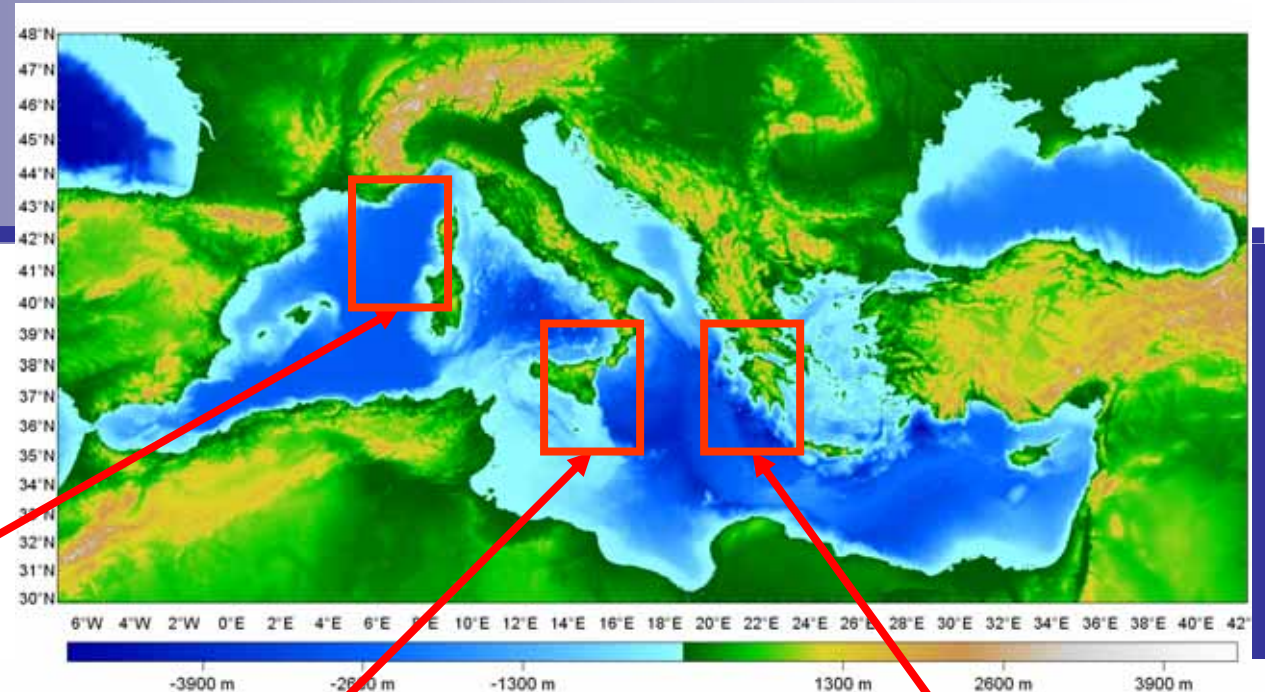
© F. Montanet



MC TeV muon traversing the apparatus



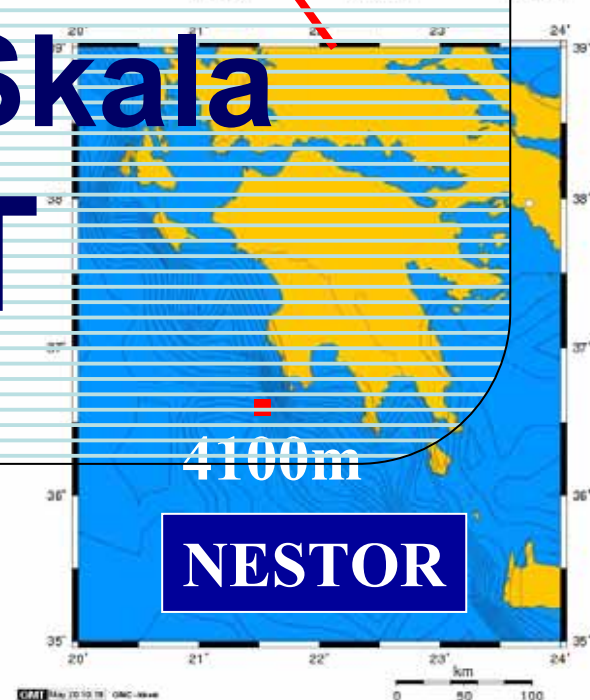
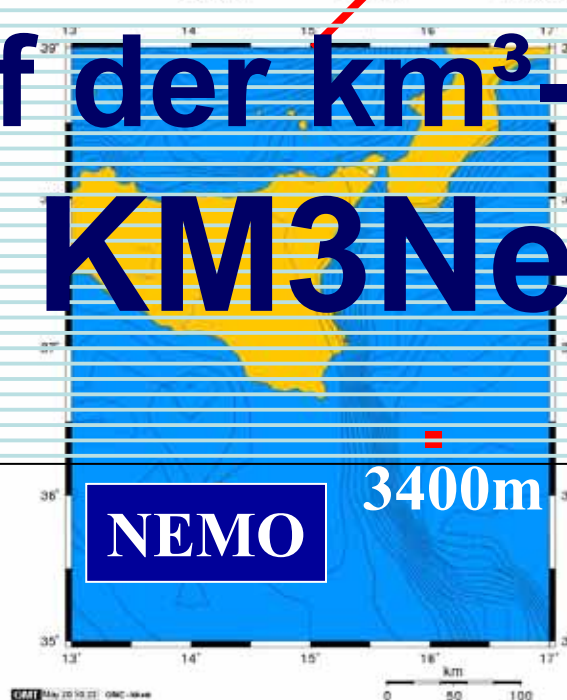
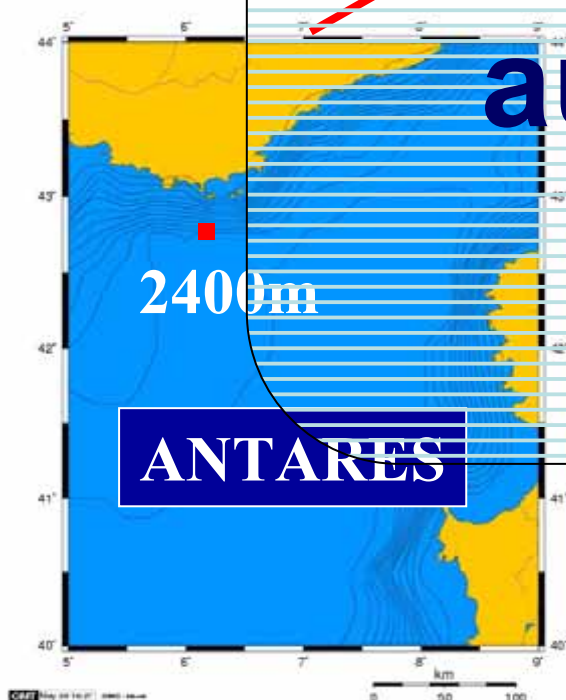
Projekte im Mittelmeer





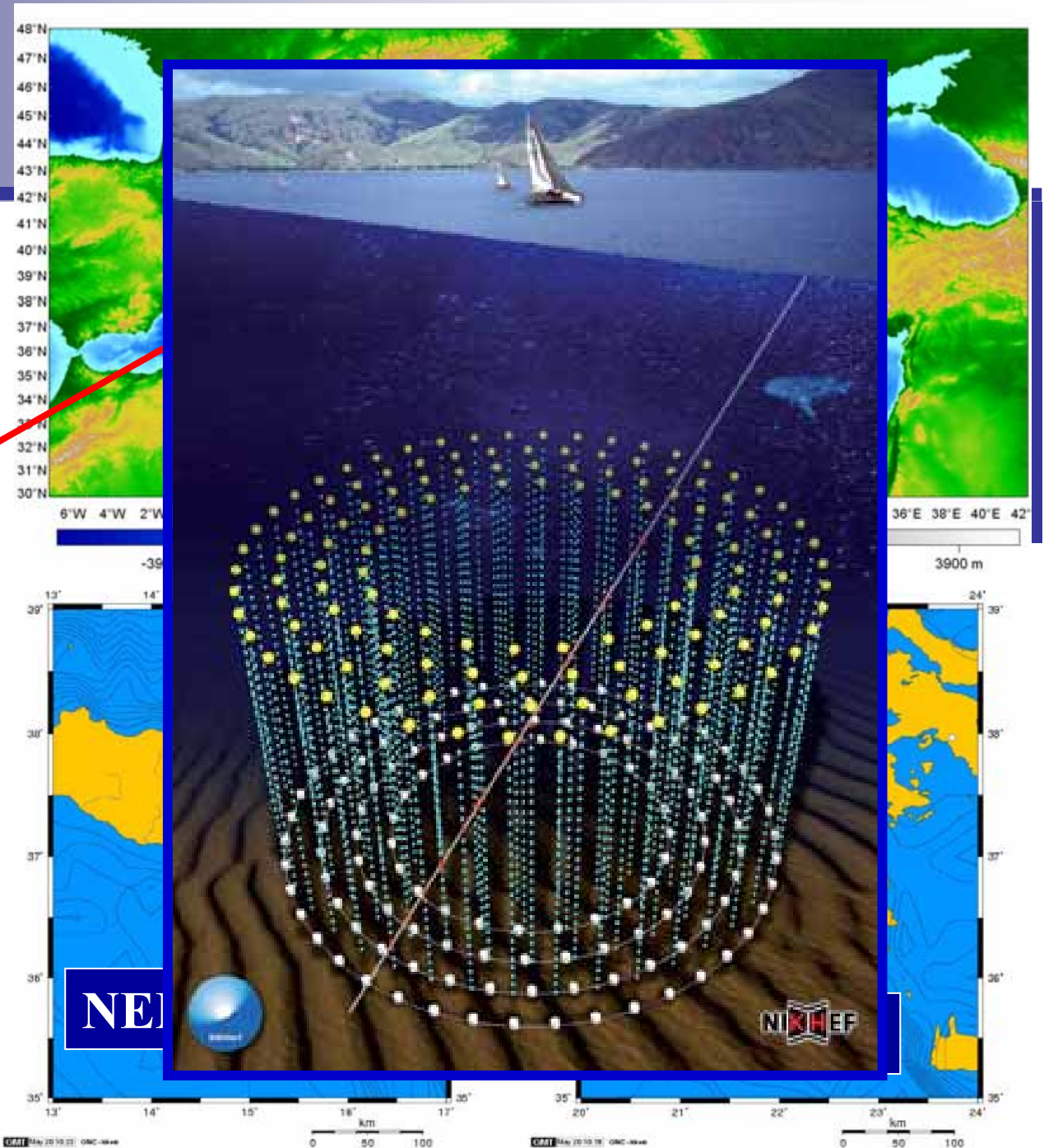
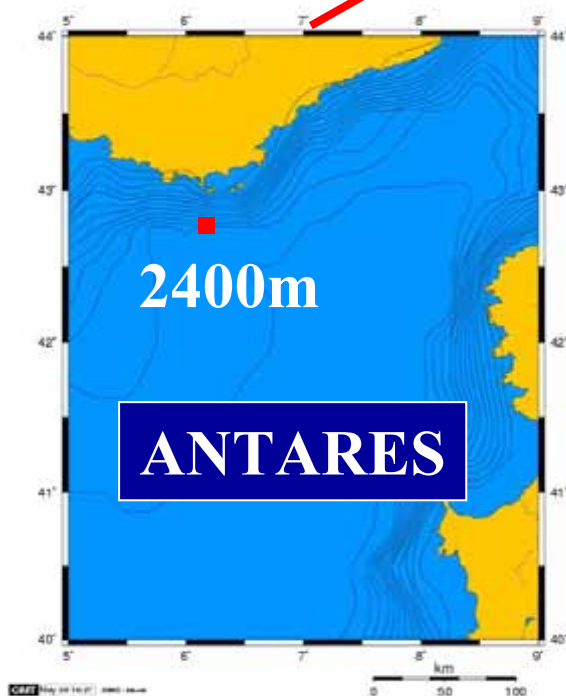
Projekte im
Mittelmeer

Konvergenz zu einem Detektor auf der km^3 -Skala KM3NeT





KM3NeT



Ausblick





Das europäische Siebengestirn der Astroteilchenphysik

„The Magnificent Seven“

Einstein Telescope
E.T.

Ton-scale
Double Beta

Megaton

KM3NeT

CTA

Ton-scale
Dark Matter

Auger-Nord

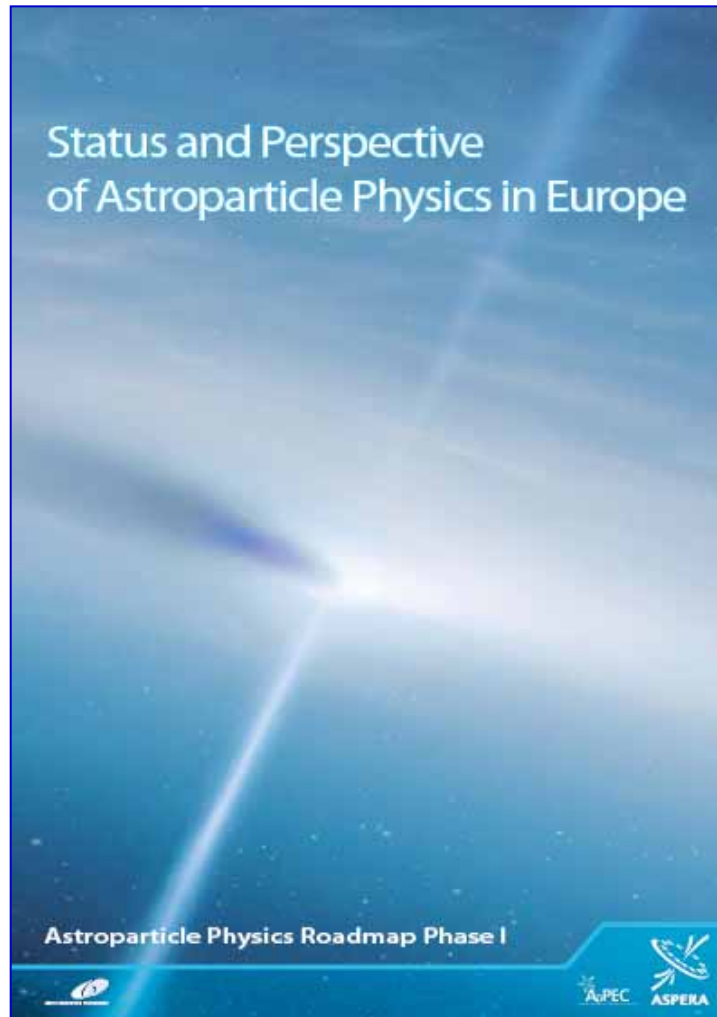


Die nächsten 10 Jahre

- Falls Dunkle Materie aus „Neutralinos“ besteht, haben wir in eine reale Entdeckungschance.
- Megatonnen-Detektor: Test von supersymmetrischen Modellen. Solare und Supernova-Neutrinoastronomie auf völlig neuem Niveau. Eine Supernova in unserer Galaxis würde eine Goldgrube neuer Erkenntnisse für Teilchen- und Astrophysik darstellen.
- Neutrinomassen-Experimente werden auf (kosmologisch relevante) Massen bis zu 0.03 eV hinab sensitiv sein.
- Wir werden das Rätsel der kosmischen Strahlung weitgehend lösen, eine Landkarte des Hochenergie-Universums zeichnen und hoffentlich unerwartete Phänomene entdecken.
- Wir werden Gravitationswellen nachweisen und damit ein völlig neues Fenster zum Universum öffnen.

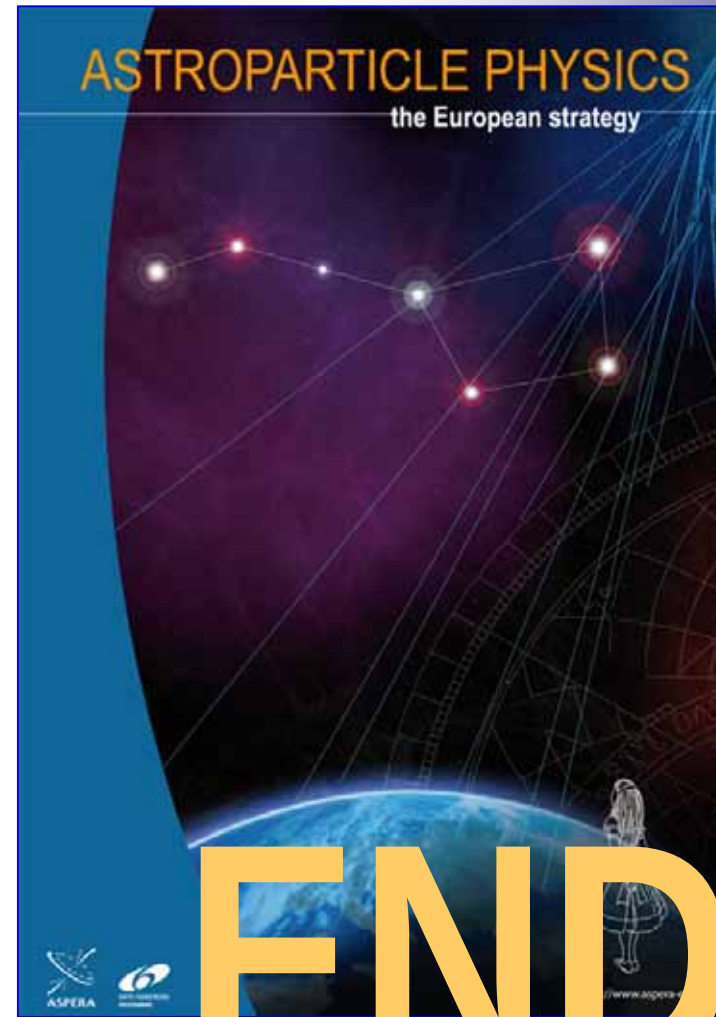
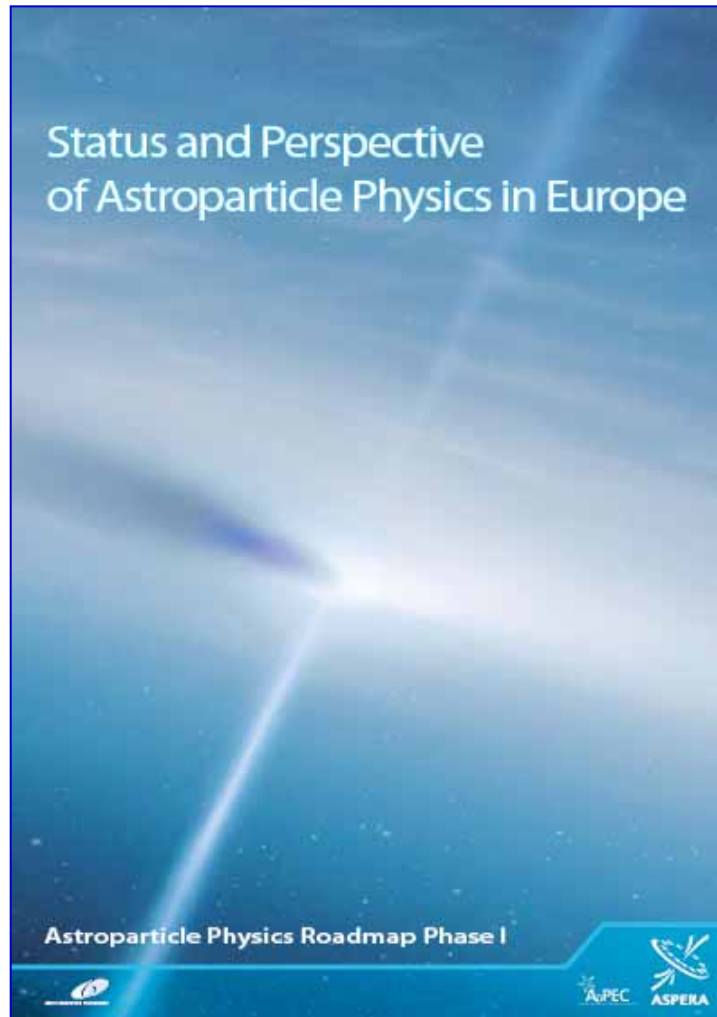


<http://www.aspera-eu.org>





<http://www.aspera-eu.org>



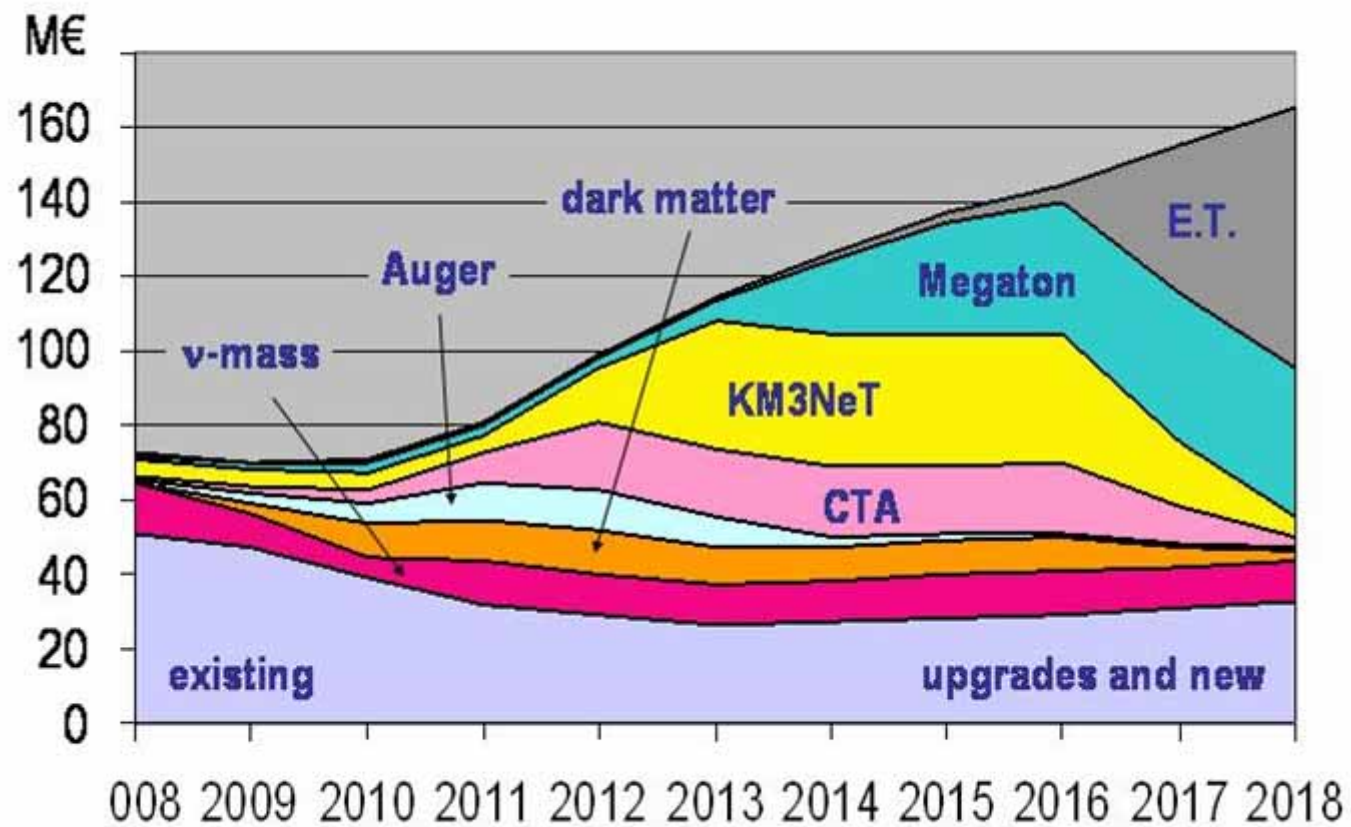
ENDE

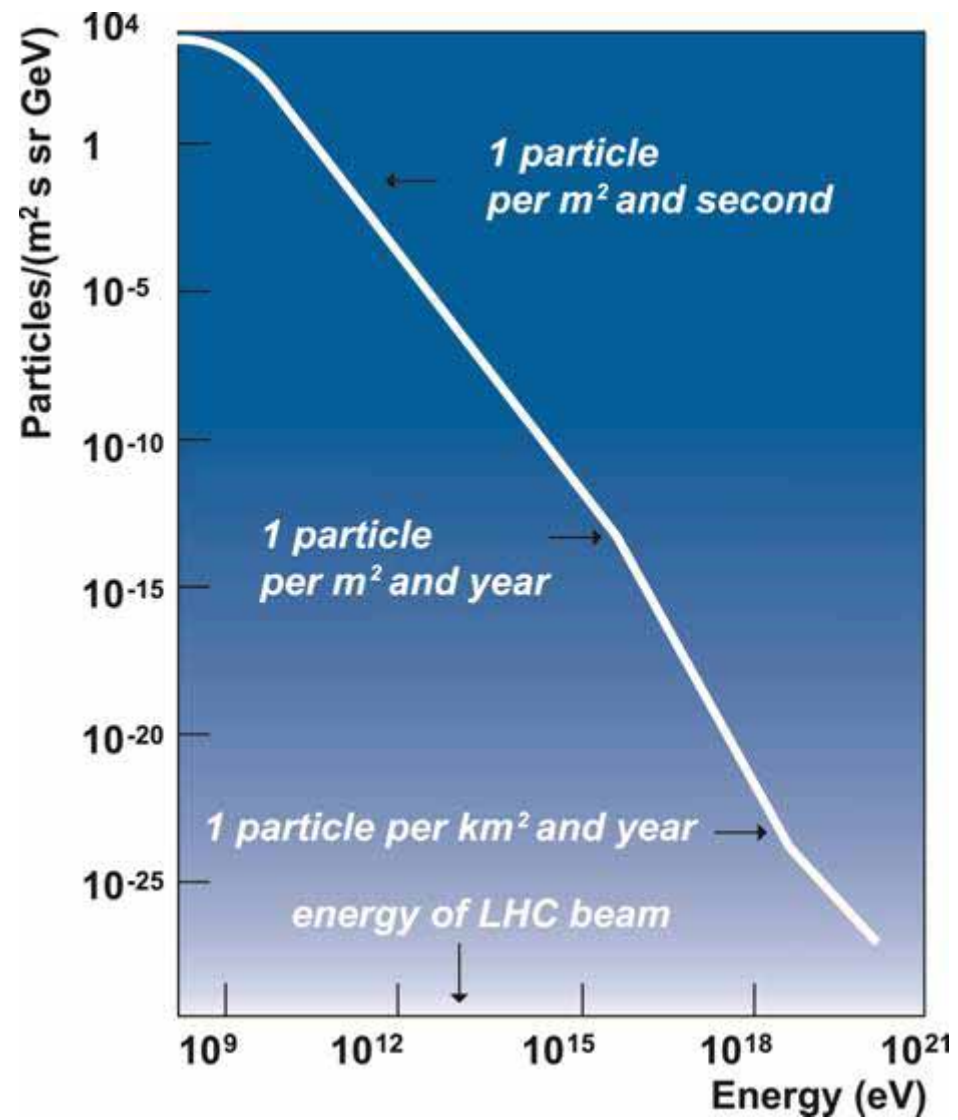


Reserve-Folien



Das europäische Siebengestirn der Astroteilchenphysik





„atmospheric“
neutrinos

cosmic
proton

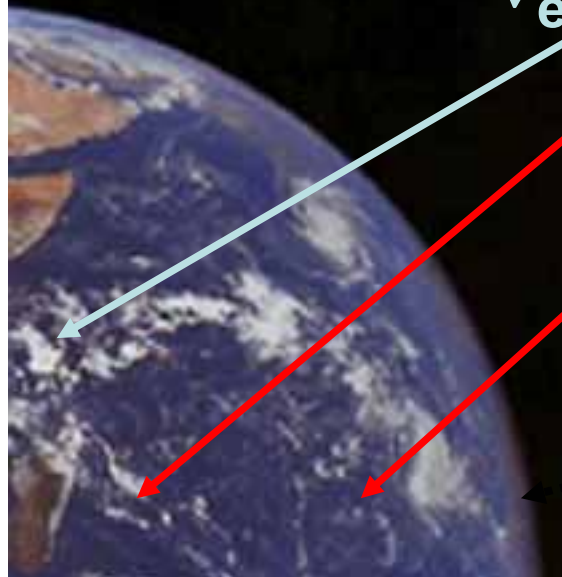
π^+

μ^+

ν_e

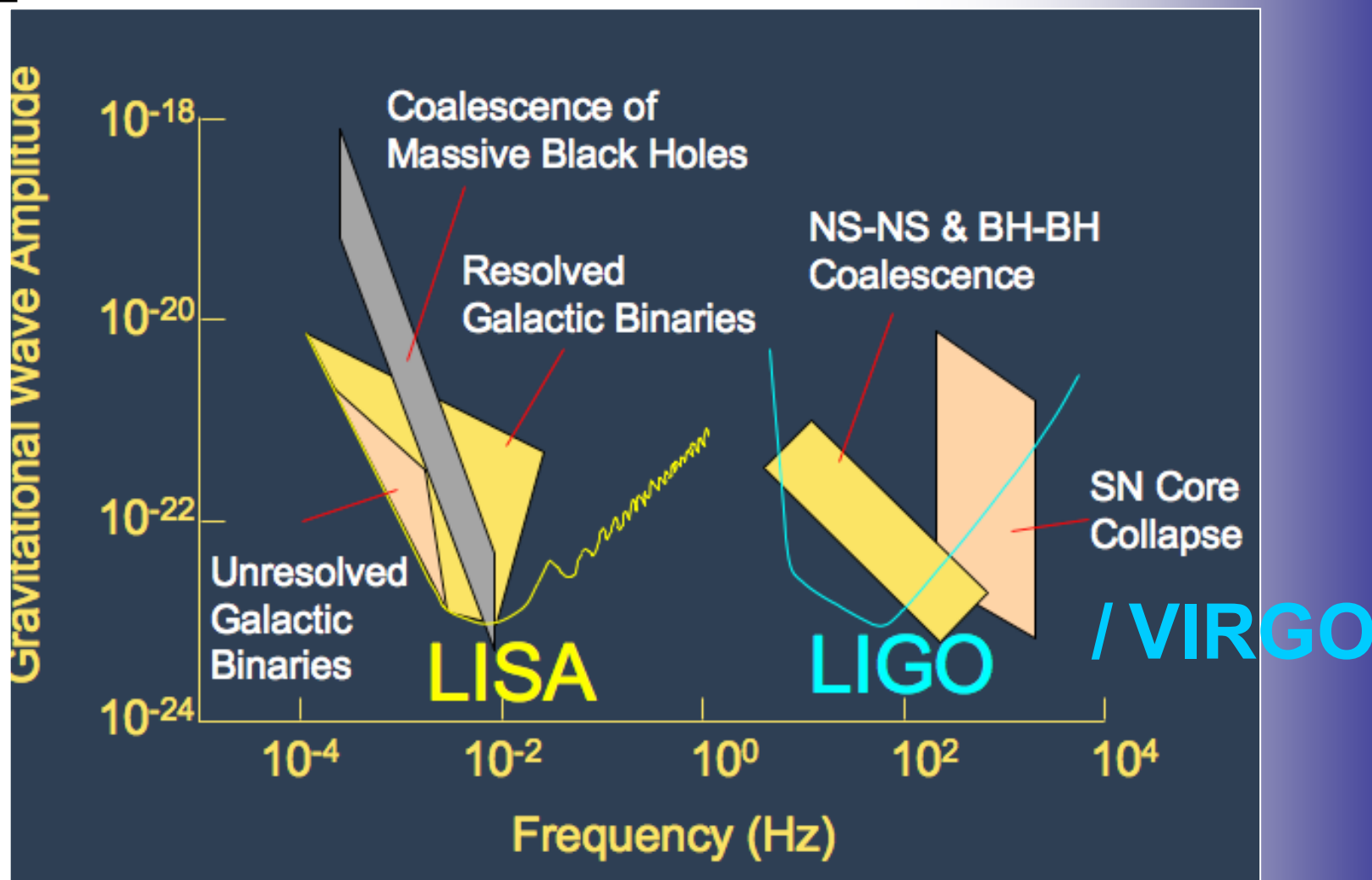
ν_μ

$\bar{\nu}_\mu$





Gravitational Waves

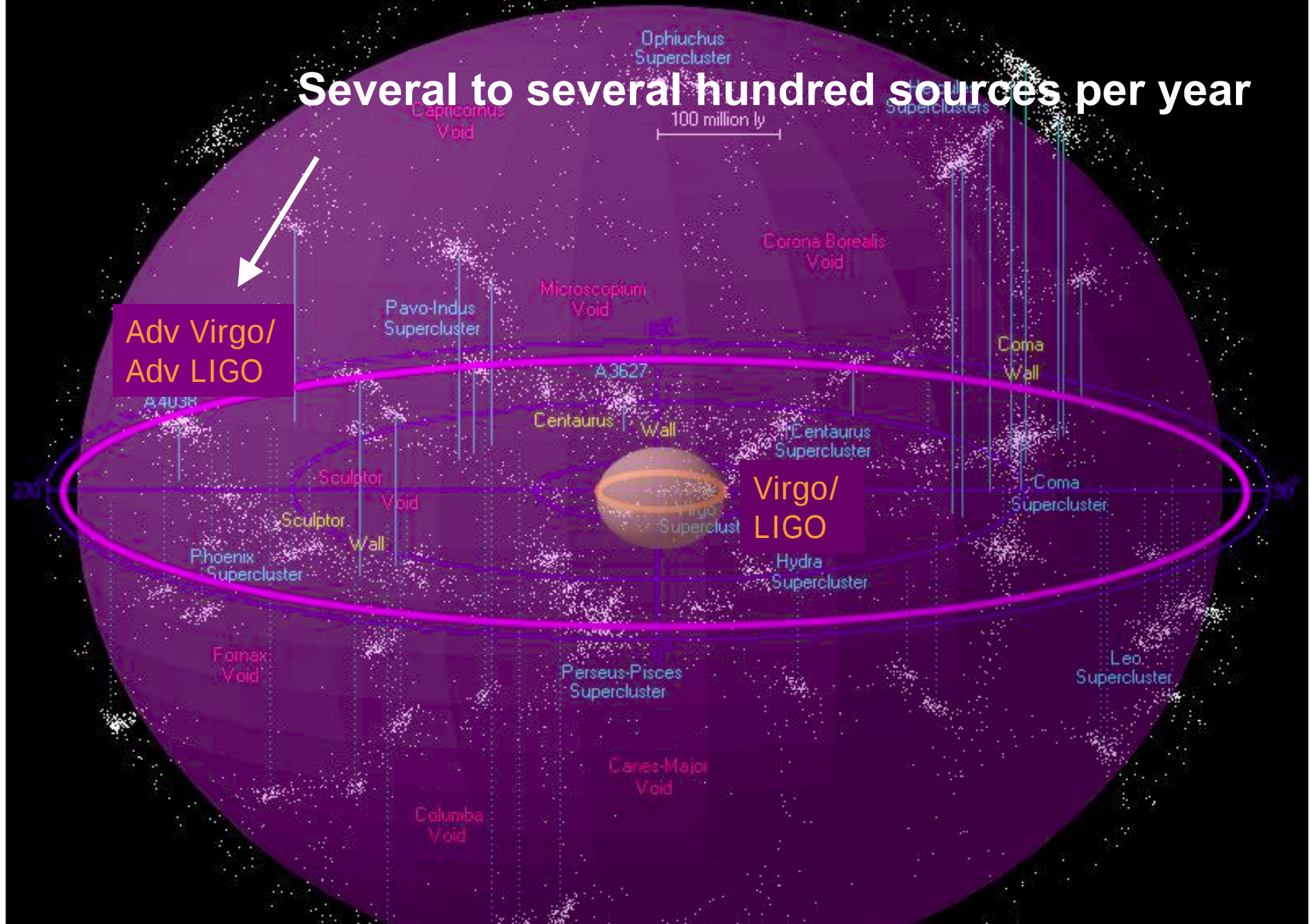




GEO-600

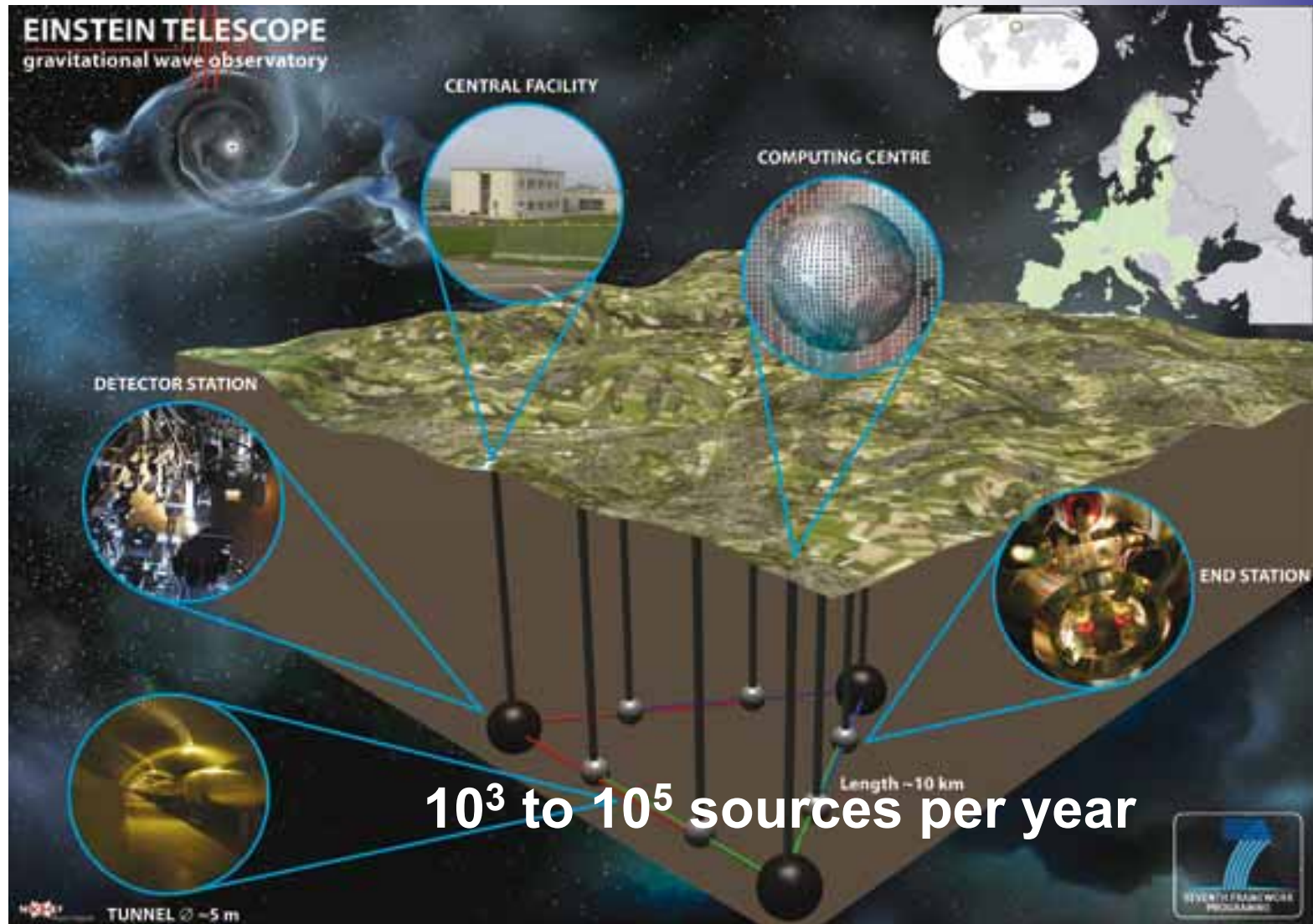


Several to several hundred sources per year





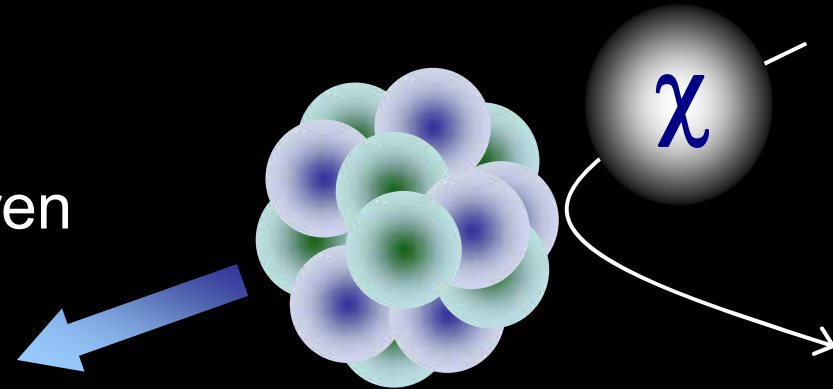
Gravitational Waves



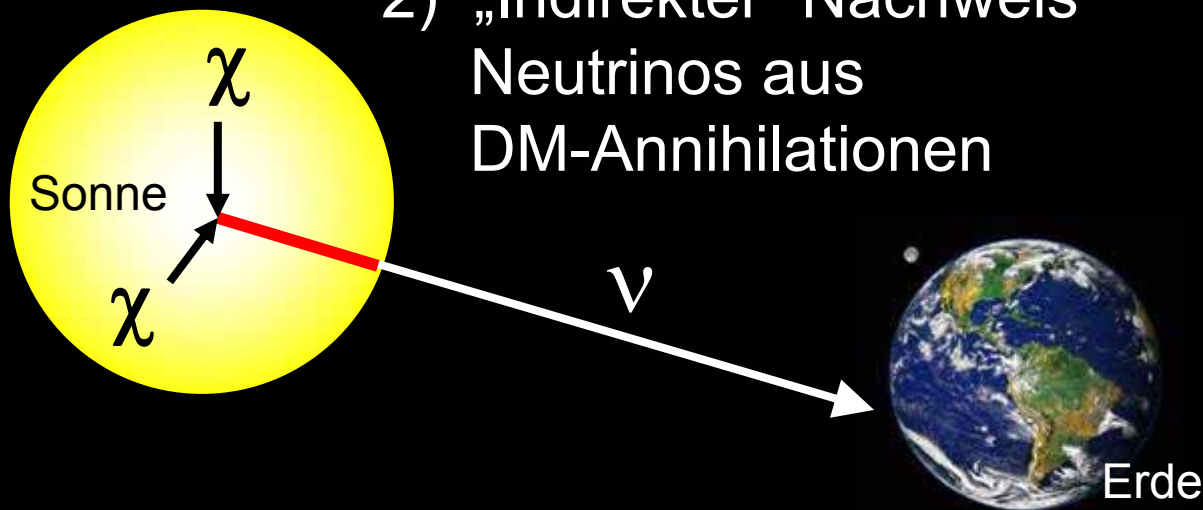


Nachweis Dunkler Materie

- 1) „Direkter“ Nachweis
von DM-Reaktionen
in Untergrunddetektoren



- 2) „Indirekter“ Nachweis
Neutrinos aus
DM-Annihilationen



- 3) Erzeugung von
DM-Teilchen
am LHC
(Large Hadron Collider)



**Elektron- oder
Proton- Beschleuniger**

... oder beides ?

**Eindeutige Antwort
nur durch Neutrinos !**

Particle Generation in AGN Jets

