Friedrich-Alexander-Universität
Erlangen-Nürnberg

ERLANGEN CENTRE FOR ASTROPARTICLE PHYSICS

FAU



IceCube Masterclass 2026
Teilchennachweis

Anna Eimer
FAU, 03.11.2026

Fragestellung

- Welche Teilchen?
- Mit welcher Energie?
- Woher?
- Wie oft?

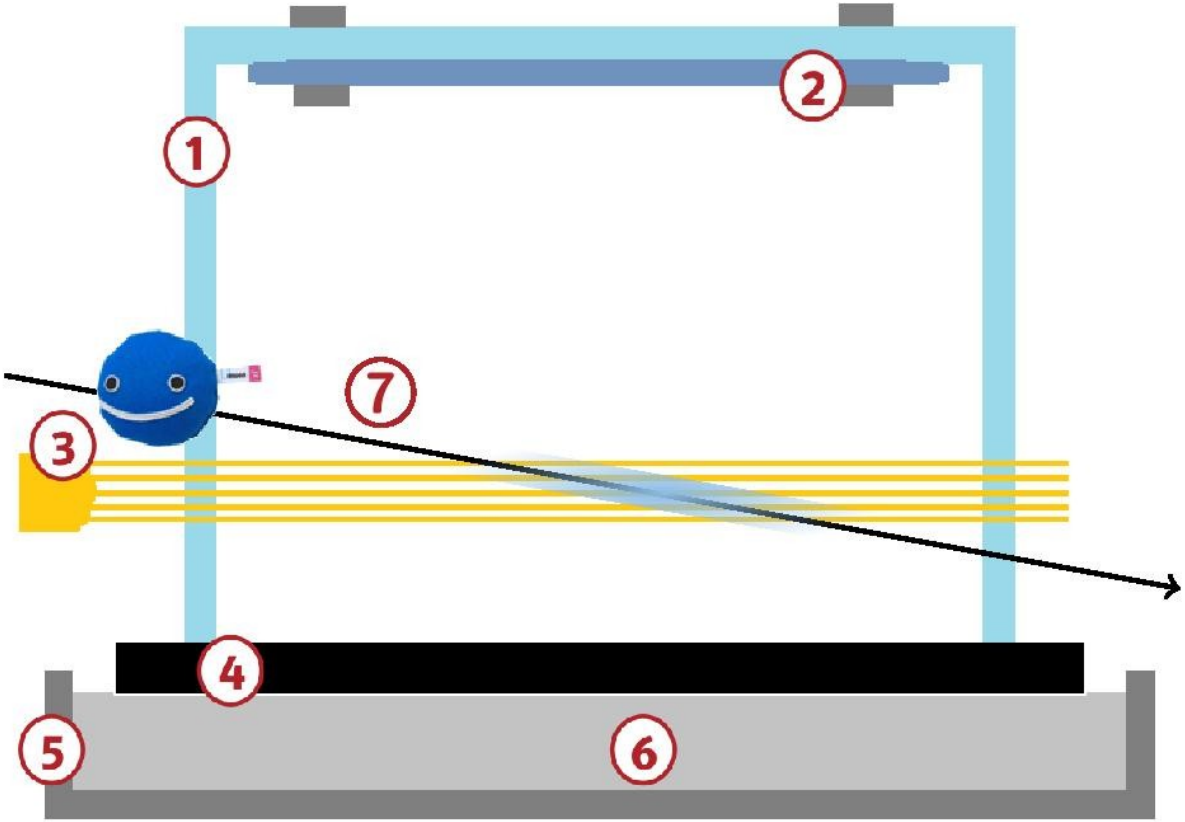


Wir können Teilchen nur durch ihre Wechselwirkung mit Materie nachweisen.

Nebelkammer



Nobelpreis
1927/1948



1. Durchsichtige Kunststoff- oder Glasbox
2. Mit Alkohol getränkter Filz und Magnete zum Befestigen
3. Taschenlampe
4. Schwarze Metallplatte
5. Styroporkiste
6. Trockeneis
7. Teilchenspur

Bau Nebelkammer



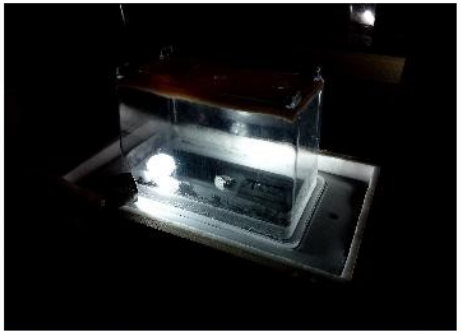
Filz mit Magneten in der Kunststoffbox befestigen und mit Alkohol tränken



Trockeneis in Styroporkiste füllen und Metallplatte darauf legen



Kunststoff auf die Metallplatte stellen und 10 Minuten warten



Mit der Taschenlampe den Nebel beleuchten und Spuren beobachten

Informationen zu Trockeneis

Trockeneis ist festes Kohlendioxid und als solches kein Gefahrstoff. ABER:

- Schutzhandschuhe und Schutzbrille tragen!
  Temperatur: -78°C
- Niemals in den Mund nehmen oder verschlucken!
  Ausdehnung zu gasförmigen Kohlendioxid im Körper
- Nur bei ausreichender Belüftung verwenden!
  Zu viel CO_2 kann zu Sauerstoffmangel führen
- Nicht in geschlossenen Behältnissen aufbewahren!
  Diese können bersten.

Den Alkohol nicht trinken! Lebensgefahr!

Probleme?

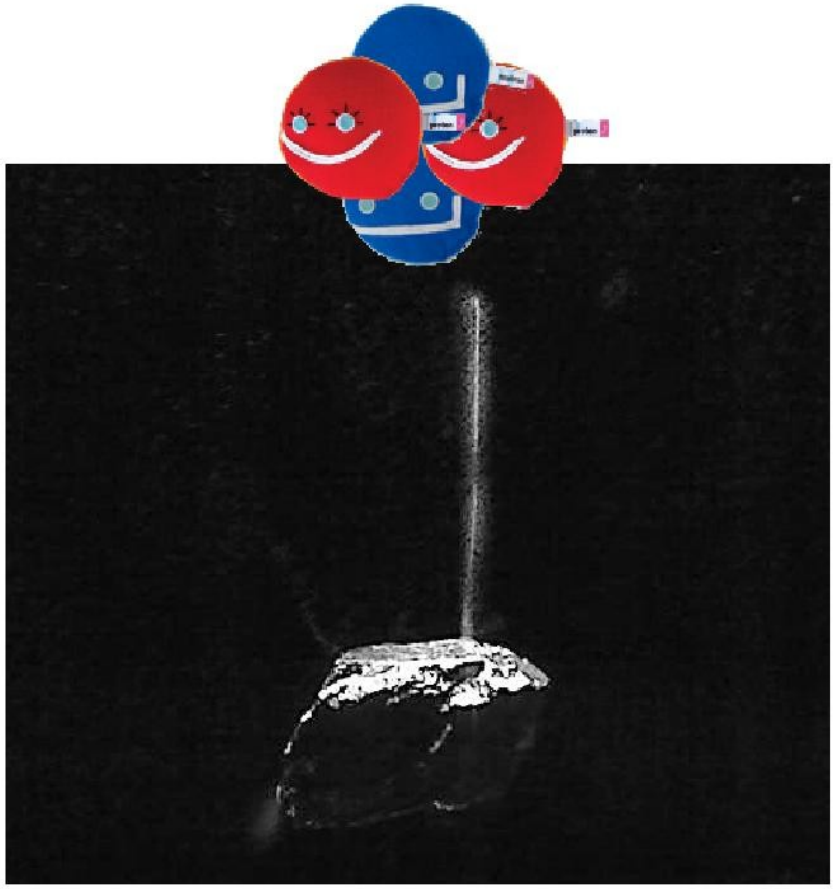
Ich sehe keine Spuren!

- Abwarten. Es dauert 5-10 Minuten, bis die Kammer ausreichend abgekühlt ist.
- Ändere deinen Blickwinkel. Die Spuren sind nicht von jedem Ort aus gleich gut zu sehen.
- Achte darauf, dass der Raum dunkel ist und dass die Lampe hell genug und richtig platziert ist. Die Spuren sind am besten direkt über der Metallplatte zu sehen.
- Überprüfe, ob die ganze Metallplatte direkt auf dem Eis aufliegt. Nur so wird es in der Nebelkammer kalt genug.
- Füge mehr Alkohol hinzu, falls der Alkoholvorrat im Filz nicht ausreichend war. Führe dazu alle Schritte der Bauanleitung noch einmal durch.

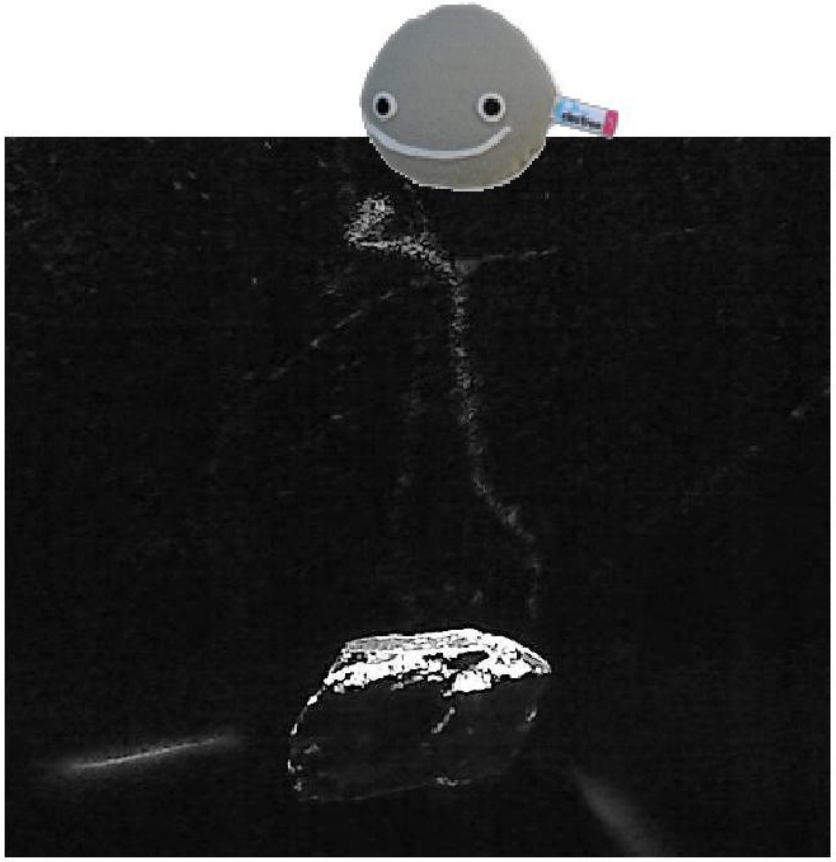
Ich sehe Wolken in der Kammer.

- Das ist ein Hinweis auf eine undichte Stelle.

Was kann man in der Nebelkammer sehen?



Spur eines α-Teilchens aus Columbit



Spur eines Elektrons aus Columbit



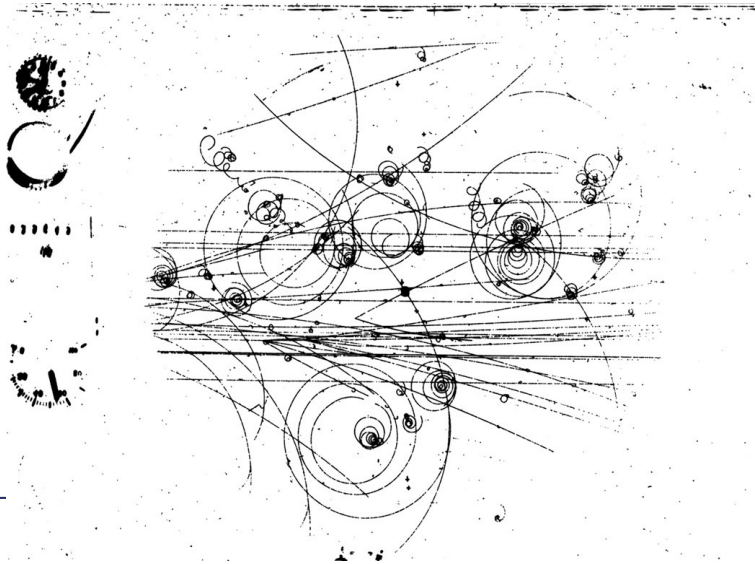
Blasenkammer



Nobelpreis
1968

- Selbes Prinzip nur mit überhitzter Flüssigkeit
- Anlegen eines Magnetfeldes erlaubt **Energierekonstruktion** und **Ladungsunterscheidung** (Lorentzkraft)
- Eingesetzt bis zum Ende der 80er

Bildgebend, **langsam**

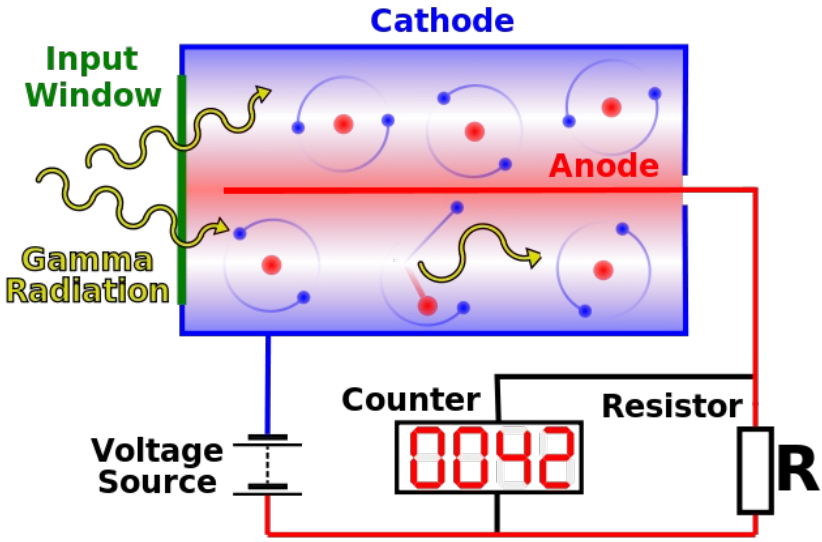


Geigerzähler

- Gasgefüllte Röhre mit Hochspannung
- Ionisierendes Teilchen erzeugt Elektronen / Ionen
- Durch Hochspannung entsteht eine Teilchenkaskade
- Elektronik zählt Strompulse

Zählt nur, schnell

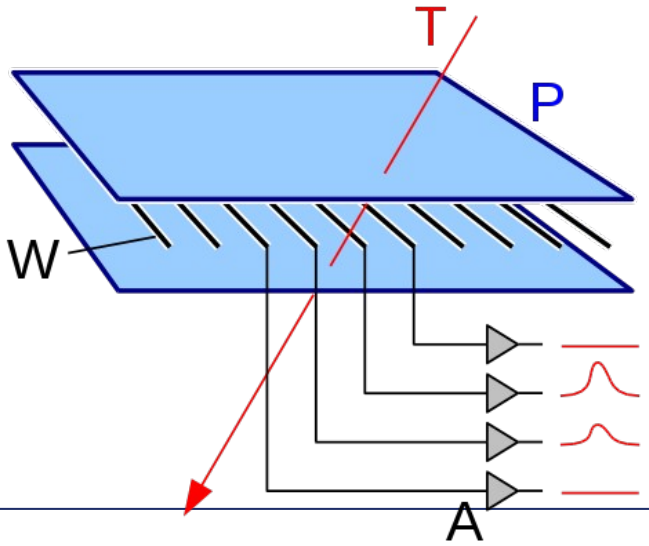


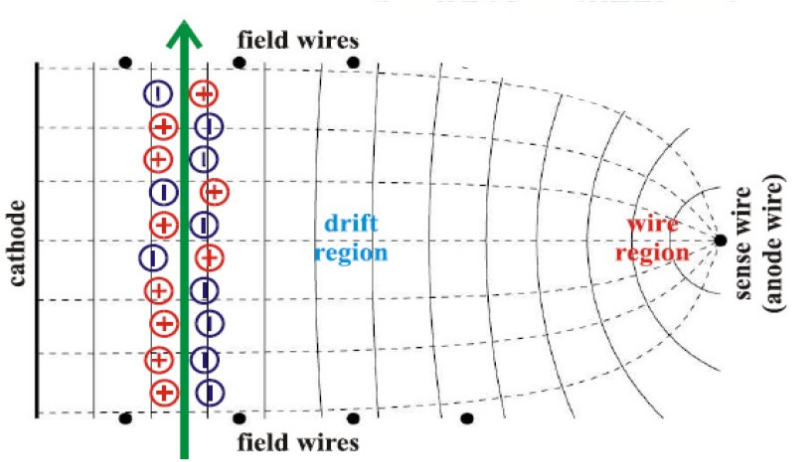


Spurkammer

- Selbes Prinzip aber mit **geringerer Spannung** (Verstärkung) und **segmentierter Anode** → Ortsauflösung
- Alternativ auch auf Halbleiterbasis

Gute Ortsauflösung, schlechte Energieauflösung

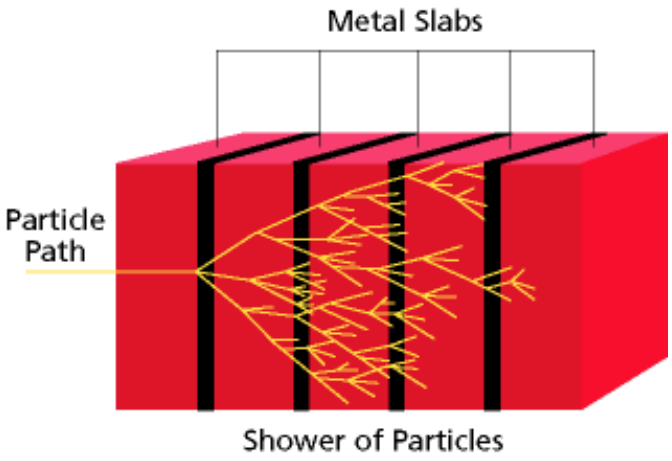


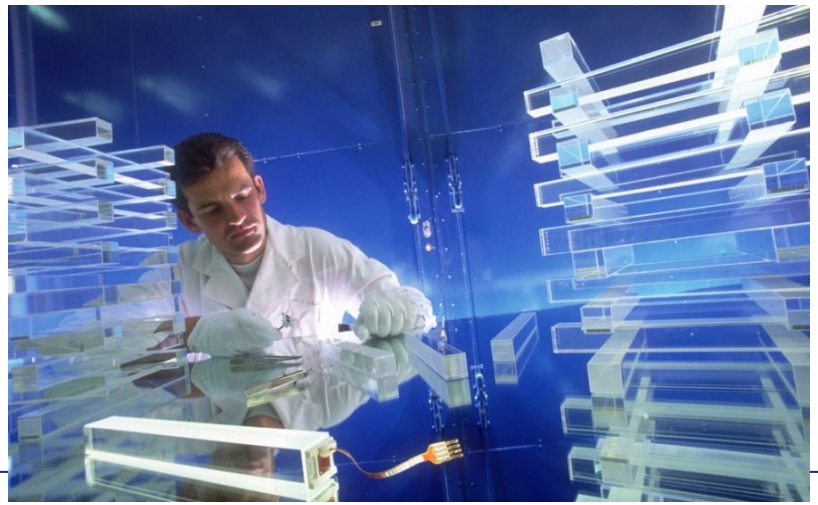


Kalorimeter

- Reichweite in Absorbern messen
  desto weiter desto höher die Energie
- ODER **Energie in transparentem Medium in Licht umwandeln** und die Lichtmenge messen

Gute Energieauflösung, schlechte Ortsauflösung



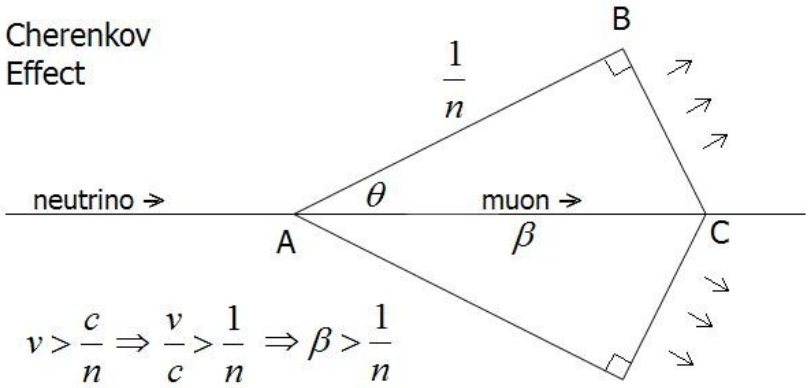


Der Cherenkov-Effekt



Nobelpreis
1958

- In Materie ist die Lichtgeschwindigkeit um den Brechungsindex reduziert
- Ein geladenes Teilchen das mit einer höheren Geschwindigkeit durch das Medium fliegt erzeugt eine “Schockwelle” blauen Lichtes



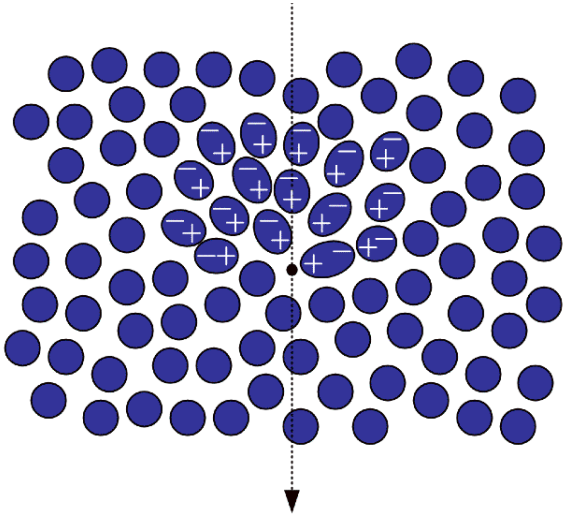
$$v > \frac{c}{n} \Rightarrow \frac{v}{c} > \frac{1}{n} \Rightarrow \beta > \frac{1}{n}$$

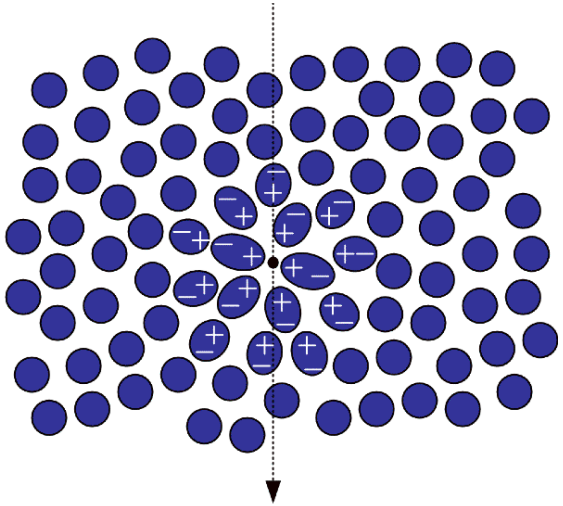
$$\cos\theta = \frac{AB}{AC} = \frac{1/n}{\beta} = \frac{1}{n\beta} = \frac{1}{n}$$

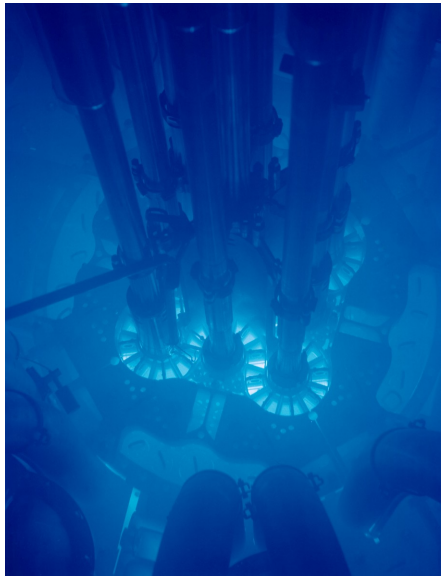


Der Cherenkov-Effekt

- Die Lichtmenge ist proportional zur Spurlänge (und damit der Energie)
- Nur etwa 500 Photonen/cm, Energieverlust vernachlässigbar im Vergleich zu Ionisation

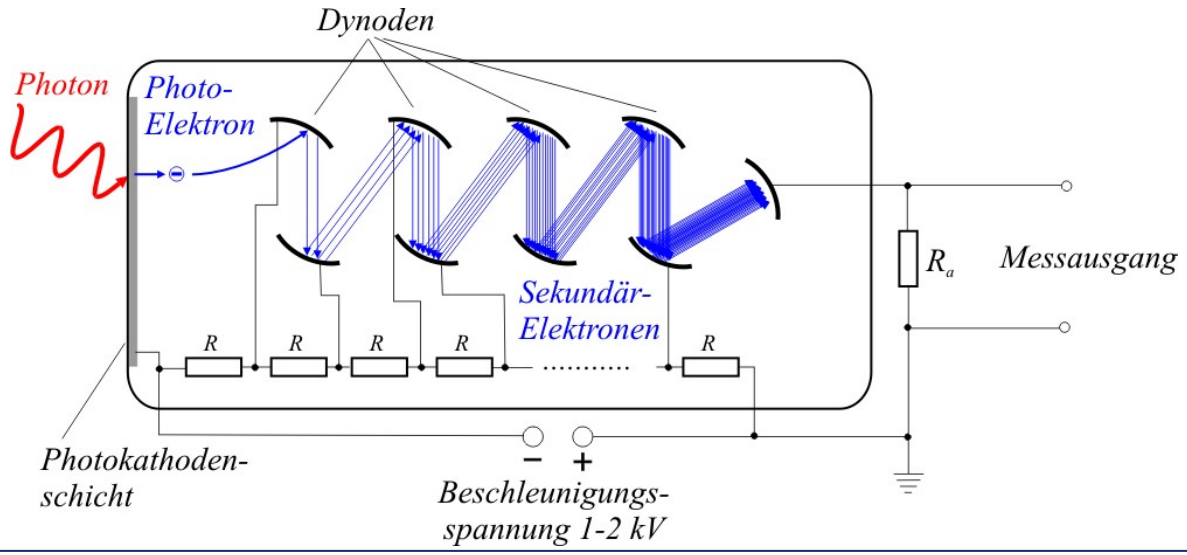






Photomultiplier

- Photoeffekt wandelt Photon in Elektron um
- Hochspannung verstärkt Ladung um ~10^7
- Strompuls gibt Zeit und Photonenanzahl an
- Effizienz ~25% **(ein gemessenes Photon wird Photoelektron genannt)**





Nobelpreis
2026

Die IceCube Idee

- Man suche sich eine großes (km^3) Volumen schweren, transparenten Material
- Man versenke eine große Zahl an Photomultipliern
- Hin und wieder interagiert ein Neutrino und produziert geladene Sekundärteilchen deren Licht man misst



Wasser ist nass, man kann nicht drauf laufen und Algen leuchten

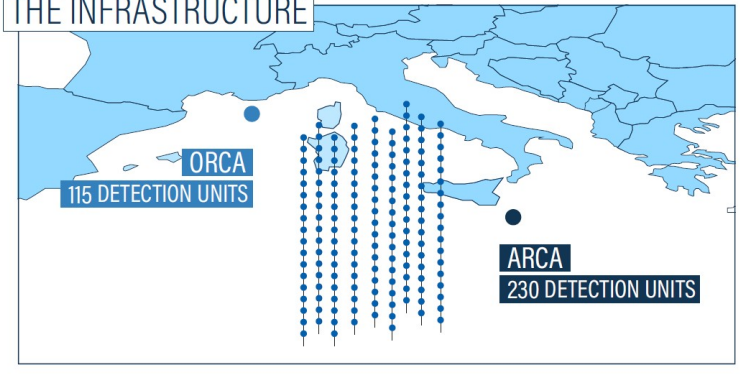


KM3NeT

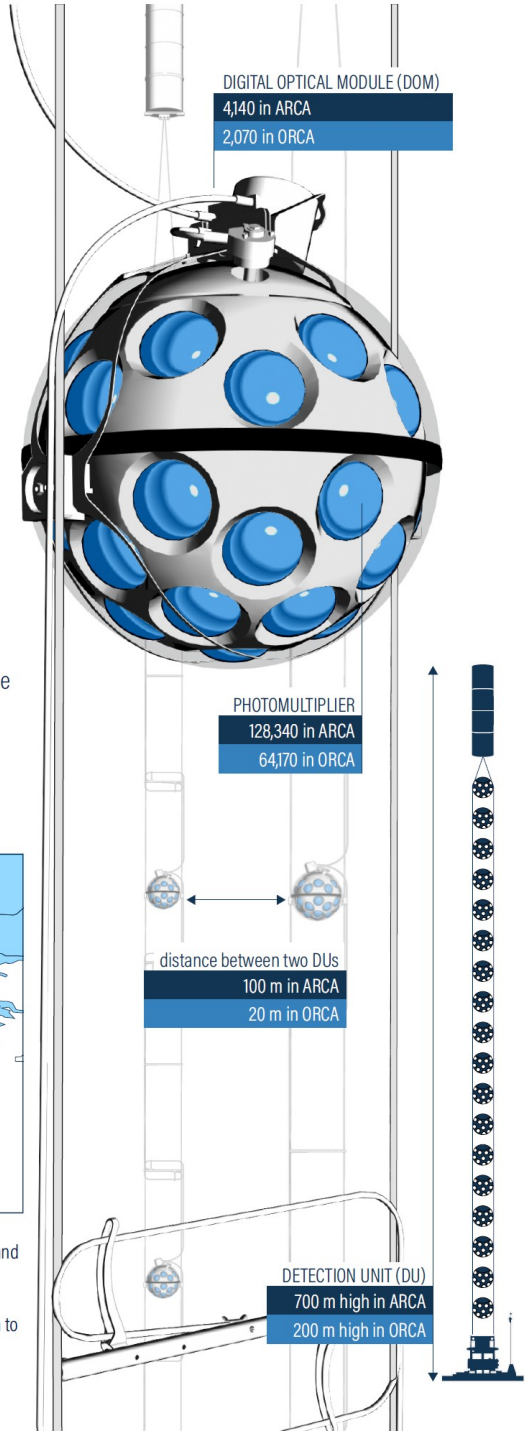
A GIANT DEEP-SEA NEUTRINO TELESCOPE

KM3NeT, once completed, will be one of the largest astronomical telescopes in the world. Located at the bottom of the Mediterranean Sea, it comprises two detectors: ARCA off the coast of Sicily, in Italy, and ORCA off the coast of Toulon, in southern France. Its main goal is to detect and study neutrinos: extremely light, fast and hard-to-catch elementary particles. The ARCA detector is optimised for the study of high energy cosmic neutrinos, which carry with them valuable information about the most energetic phenomena in the universe.
The ORCA detector is optimised to measure the fundamental properties of the neutrino itself using atmospheric neutrinos.

THE INFRASTRUCTURE

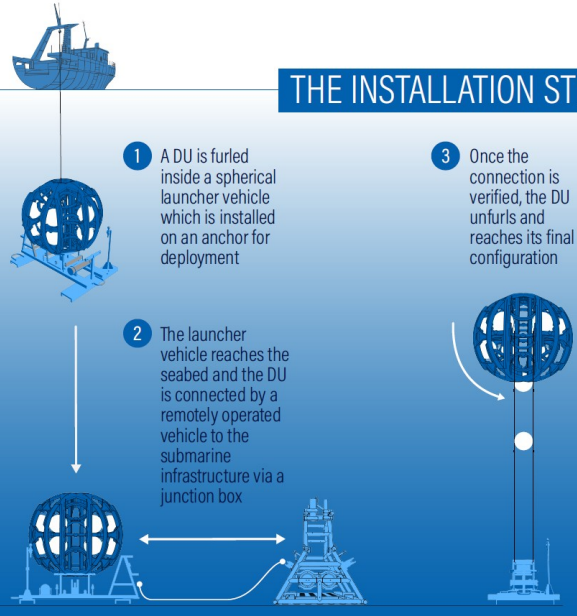


The KM3NeT infrastructure consists of an array of hundreds of detection lines, "detection units", which stand on the sea bottom and are equipped with thousands of hi-tech eyes. Its final configuration will occupy a volume of over 1 km^3, hence its name.
The detection units are connected to a submarine network of cables and junction boxes. The connection to shore is via a submarine cable of many tens of kilometres long.
KM3NeT is also a valuable multidisciplinary laboratory for Earth and Ocean Sciences.



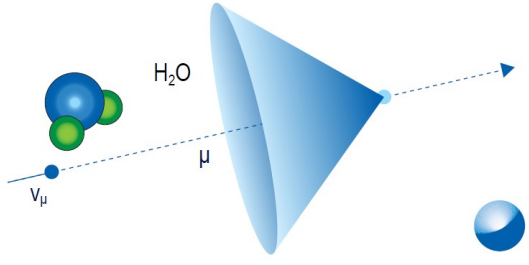
KM3NET IS A LARGE INTERNATIONAL COLLABORATION THAT INVOLVES OVER **360** SCIENTISTS, ENGINEERS, TECHNICIANS AND STUDENTS OF **68** INSTITUTIONS FROM **21** COUNTRIES.

THE INSTALLATION STEPS



NEUTRINO DETECTION

KM3NeT uses sea water as interaction medium. Neutrino interactions generate charged particles that propagate at a speed higher than the speed of light in sea water, producing a faint bluish glow called "Cherenkov light". The Cherenkov radiation is emitted at a characteristic angle with respect to the trajectory of the particle. This glow is detected by KM3NeT's hi-tech eyes. Analysis of these signals provides fundamental information on the neutrinos direction, energy and nature.



KM3NeT

Co-funded by the European Union

Der Südpol




ANTARCTICA
West of Greenwich 0° East of Greenwich
SOUTHERN OCEAN
King Haakon VII Sea
Orcadas (Argentina)
South Orkney Islands (UK)
Antarctic Circle
Novolazarevskaya (Russia)
Neumayer (Germany)
Sanave (South Africa)
Maitri (India)
Syowa (Japan)
Queen Maud Land
Molodezhnaya (Russia)
Enderby Land
Kemp Land
Weddell Sea
Halley (UK)
Coats Land
Prime Meridian
Brasfield Strait
South Shetland Islands (UK)
Antarctic Peninsula
Larsen Ice Shelf
Palmer (US)
Belgrano II (Argentina)
Adelaide
Rothera (UK)
Valkyrie Dome 3807 m
Mac Robertson Land
Mawson (Austr
Berkner
Ronne Ice Shelf
Alexander
Palmer Land
Korff Ice Rise
Henry Ice Rise
Amery Ice Shelf
Zhongshan (China)
Progress (Russ
Davis (Austr
Princess Elizabeth Land
Bellingshausen Sea
Polar Plateau
Dome Argus 4030 m
EAST ANTARCTICA
INDIAN OCEAN
Mt. Tyree 4852 m
Vinson Massif 4897 m
South Pole
Amundsen-Scott (US)
Kaiser Wilhelm II Land
Peter I
Ellsworth Land
WEST ANTARCTICA
Transantarctic Mountains
Hercules Dome
Geomagnetic South Pole
Mirny (Russia)
Queen Mary Land
Thurston
Antarctic Circle
Amundsen Sea
Marie Byrd Land
Mt. Kirkpatrick 4528 m
Mt. Markham 4351 m
Ross Ice Shelf
Vostok (Russia)
Roosevelt
Casey (Australia)
Wilkes Land
Getz Ice Shelf
Scott Base (NZ)
McMurdo (US)
Ross Sea
Adélie Land
Victoria Land
Dumont d'Urville (France)
International Date Line
0 500 1000 Km
0 500 Miles
Copyright © 2013 www.mapsofworld.com
(Created on 22nd January, 2013)
LEGEND
Mountain Peak
Research Station
West of Greenwich
East of Greenwich

Die Station

- Sommer (Tag)
  Winter (Nacht)



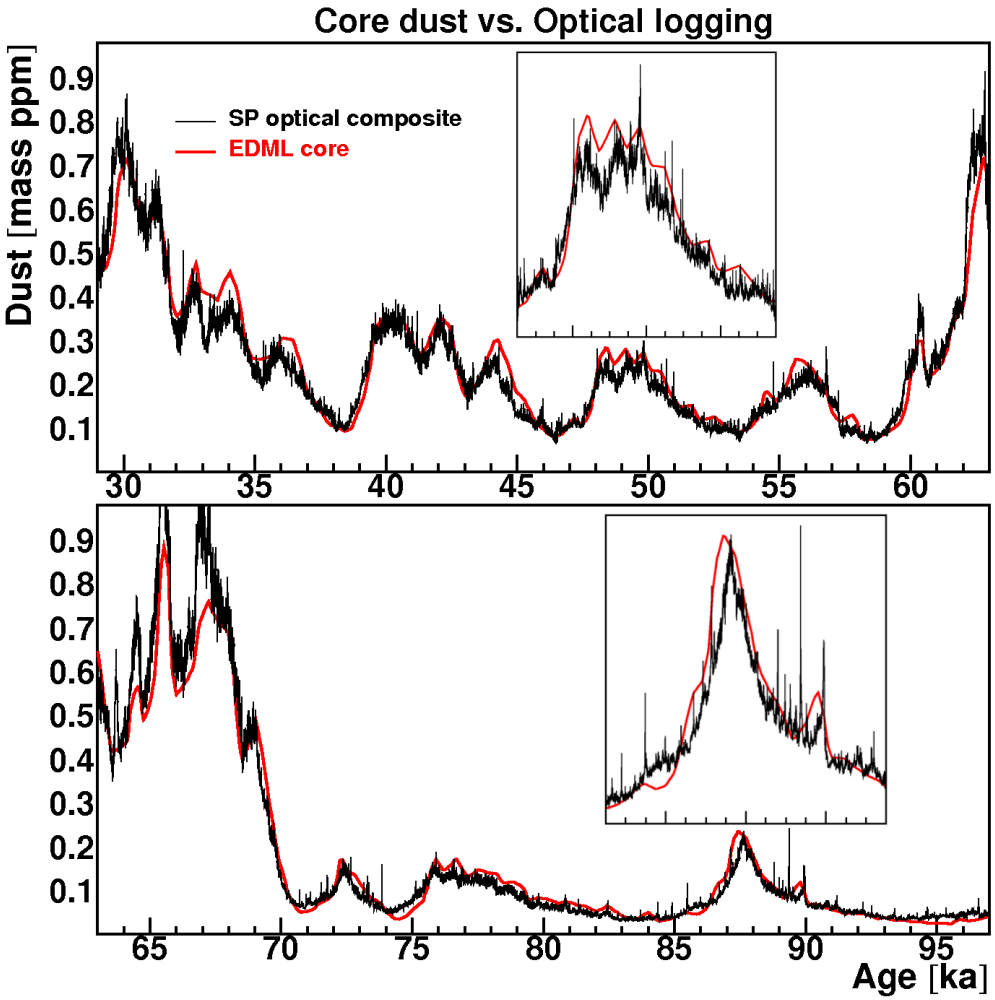




- Bevölkerung ~300
- Tägliche Flüge
- ~ -20°C

- Bevölkerung ~30
- Kein Kontakt nach Außen
- ~ -70°C

Das Eis



- Hoher Druck im tiefen Eis garantiert gute Qualität
- Verunreinigungen durch vulkanische Asche

Absorptionslänge:

Leitungswasser: 2 m

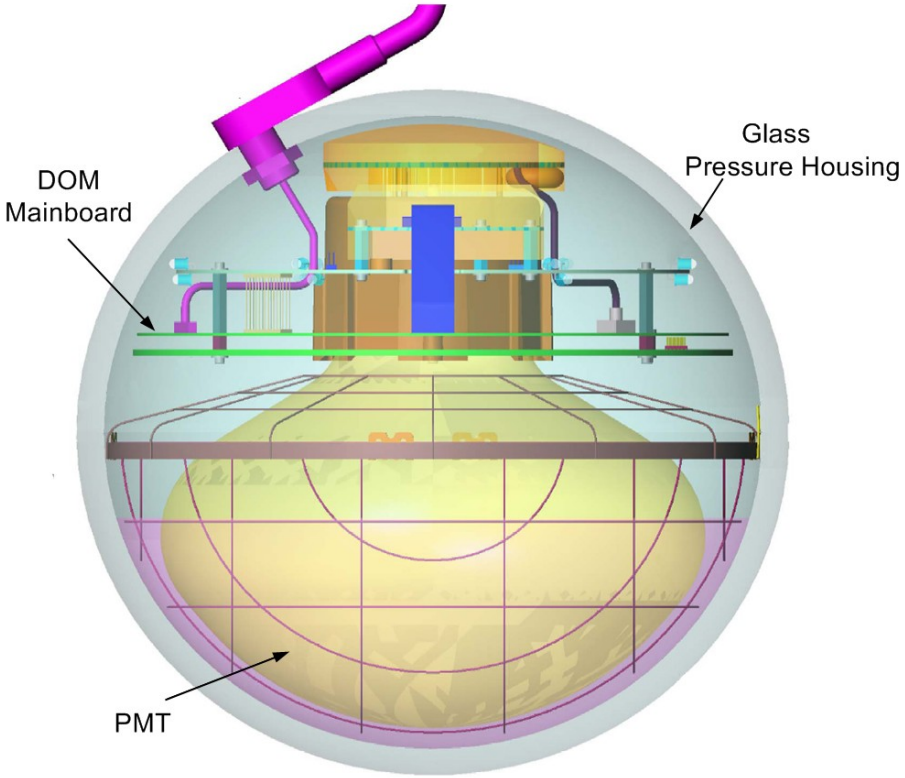
Destilliertes Wasser: 8 m

Südpoleis: 125 m

Besser als die meisten optischen Gläser

Der DOM

Digitales **O**ptisches **M**odul – Der Grundbaustein von IceCube



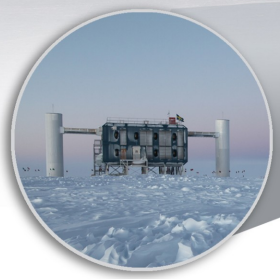
- Photomultiplier
- Spannungsversorgung
- Digitalisierung, Triggerlogik und Zeitnahme (2ns)
- Kommunikation

- In einem Druckcontainer aus Glas

60cm ~ 2ns

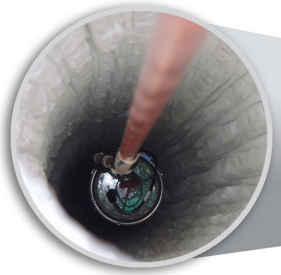
IceCube

South Pole Neutrino Observatory



IceCube Laboratory

Data is collected here and sent by satellite to the data warehouse at UW–Madison



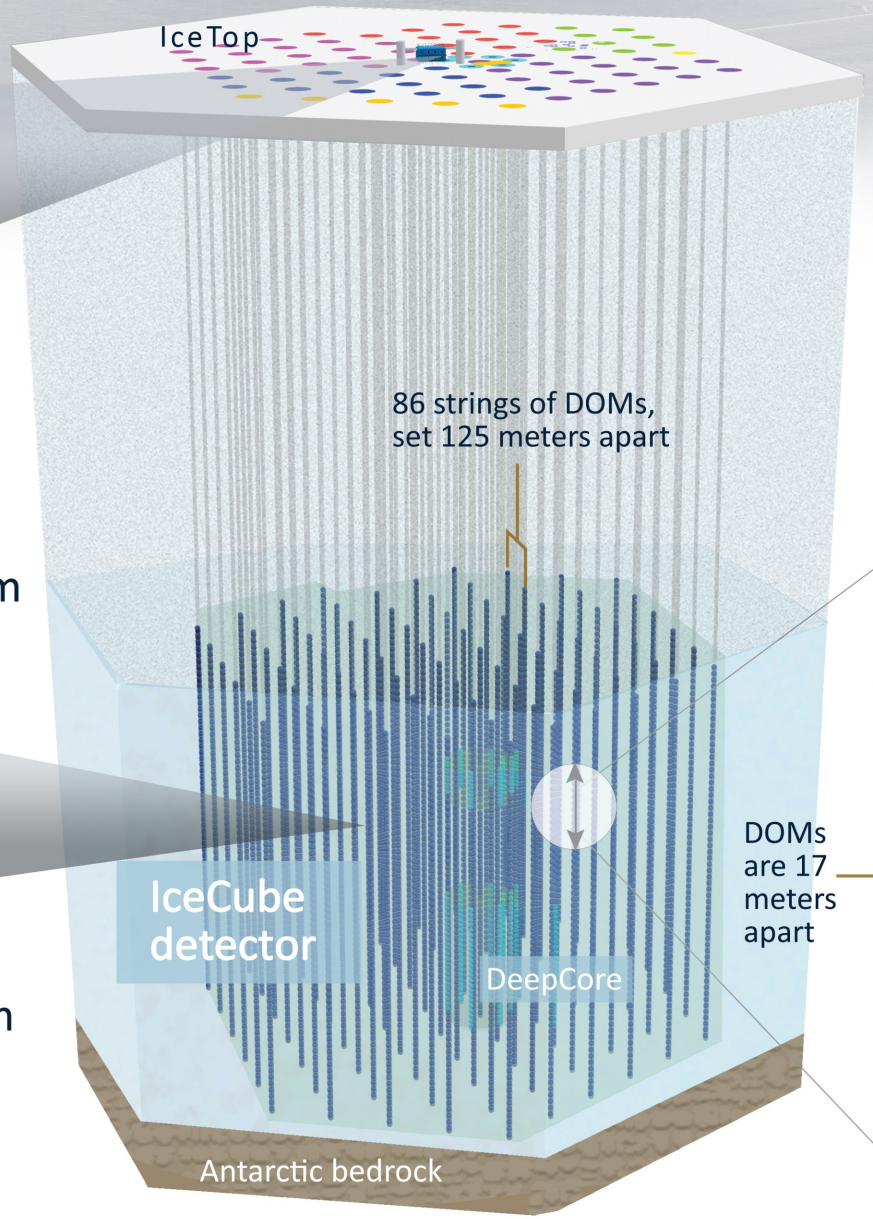
Digital Optical Module (DOM)

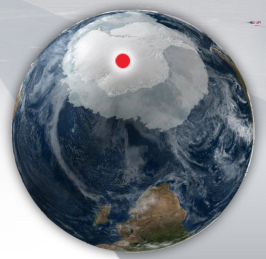
5,160 DOMs deployed in the ice

50 m

1450 m

2450 m



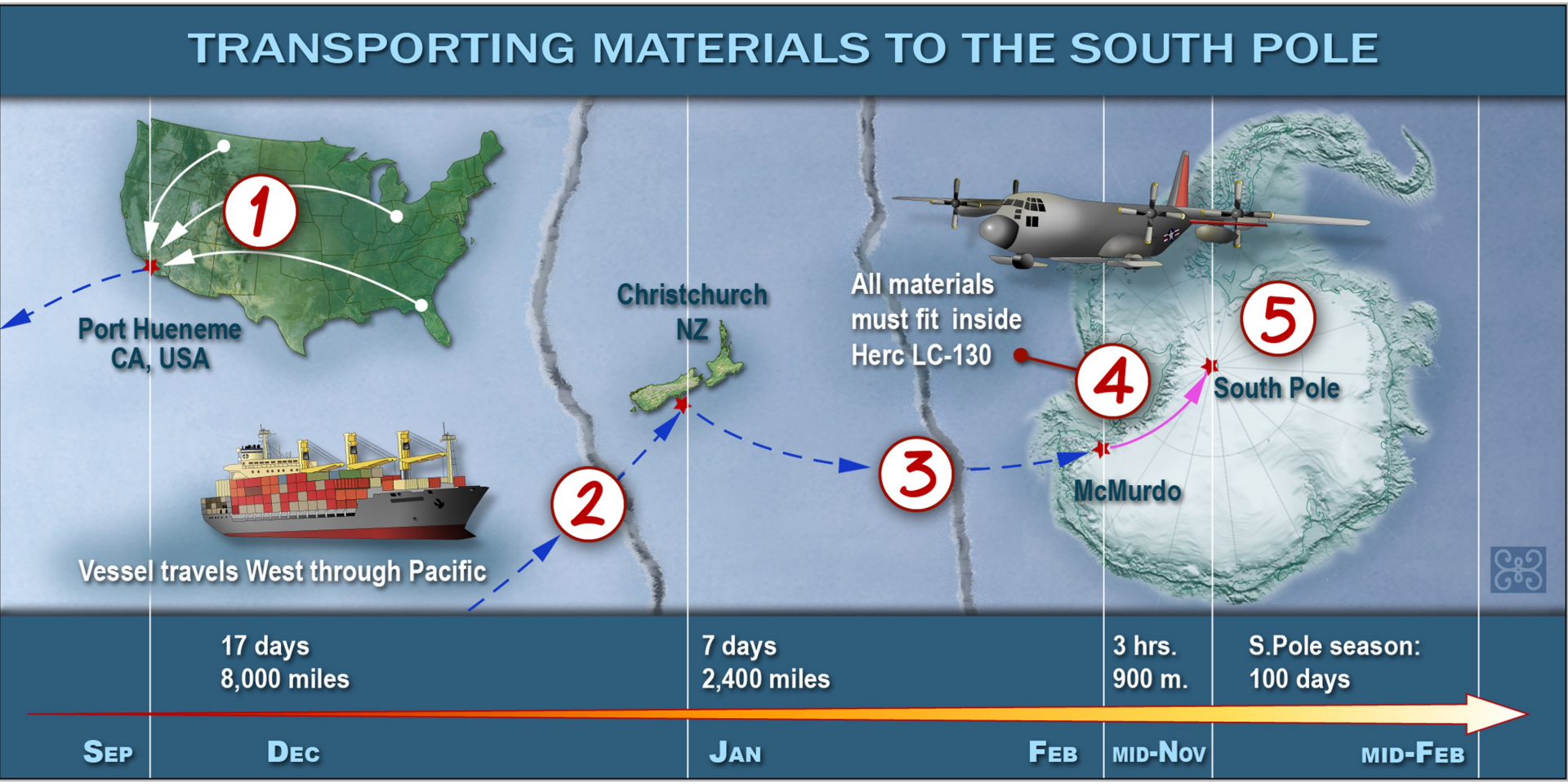


Amundsen–Scott South Pole Station, Antarctica

A National Science Foundation-managed research facility



Der Transport



LC130-Hercules

- ~10 aktive Flugzeuge
- Baujahr ~1956






Detector Construction
7 seasons of construction, 2004-2011
3
2
1
4
5
6
7
28,000 person-days to complete construction, or 77 years of continuous work
2.1 million kilograms of cargo was shipped, 0.5 million of which was the drill
48 hours to drill and 11 hours to deploy sensors per hole
4.7 megawatts of drill thermal power with 760 liters of water per minute delivered at 88 °C and 7,600 kilopascals
IceCube footprint


GRACELAND

IceCube Bau

~20 2,5 km tiefe Löcher pro Jahr,
mit je 60 DOMS + Verkabeln

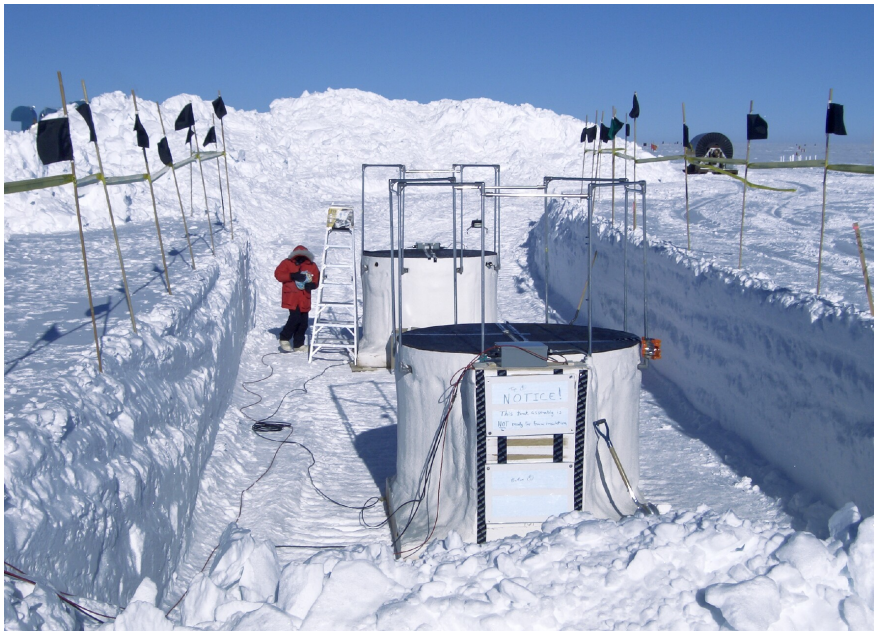






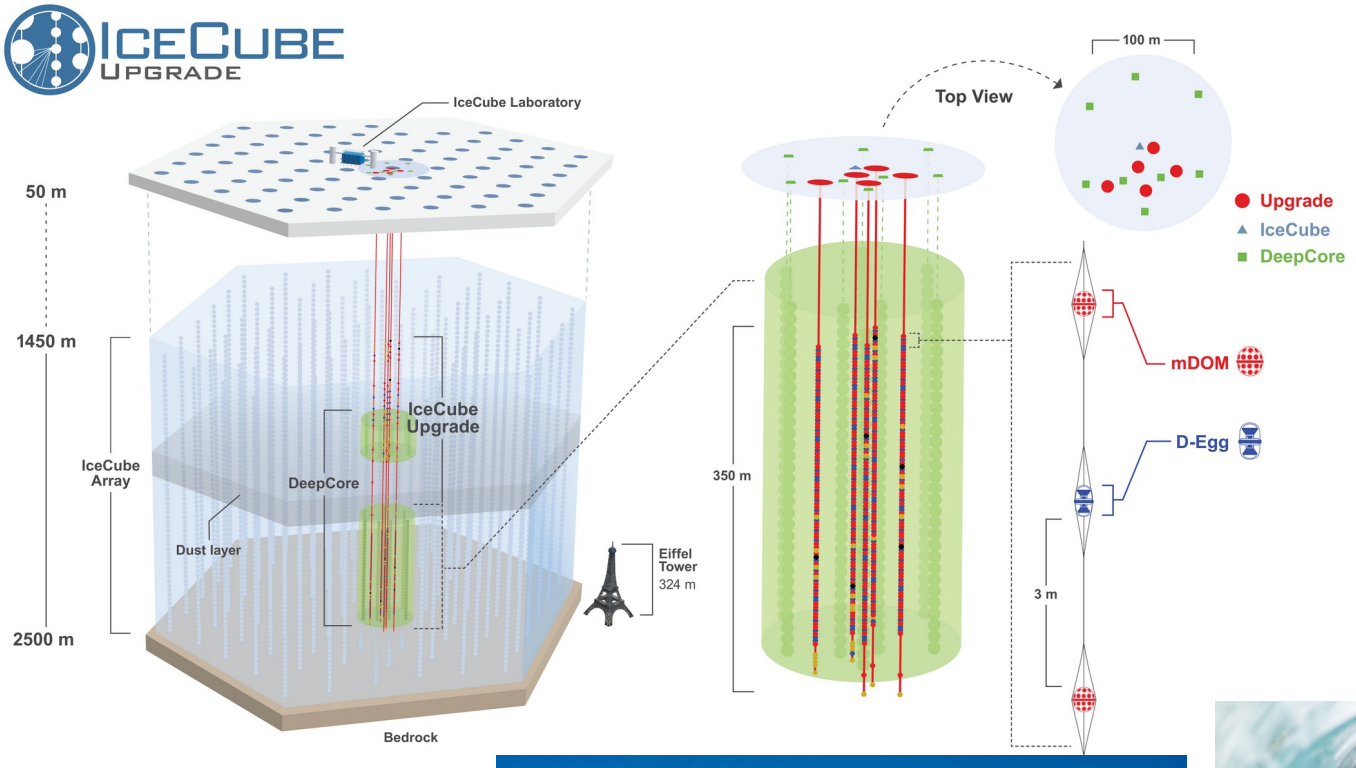


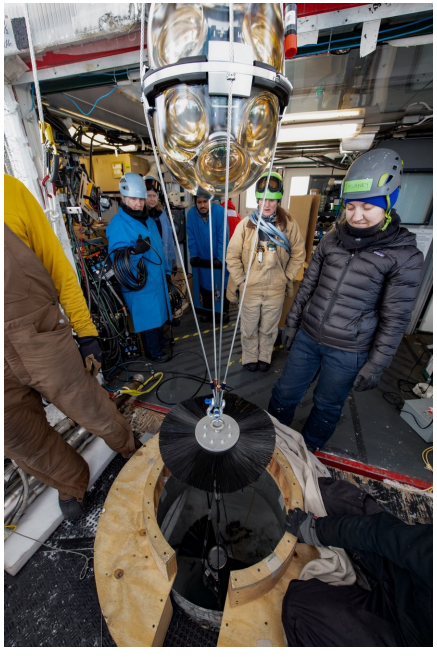
- Oberflächendetektor misst “Fußabdruck” kosmischer Strahlung → Veto?!



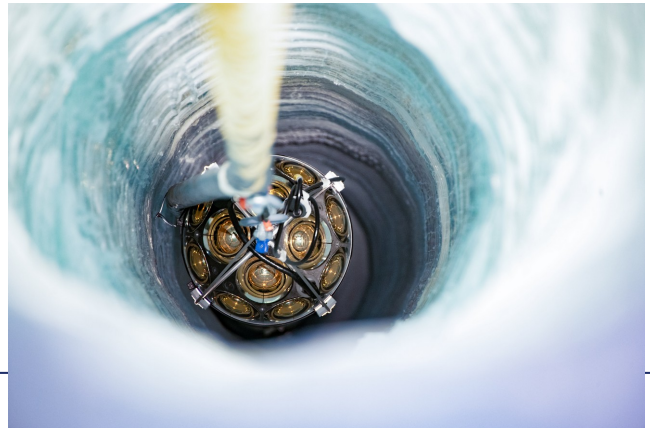


Das IceCube Upgrade

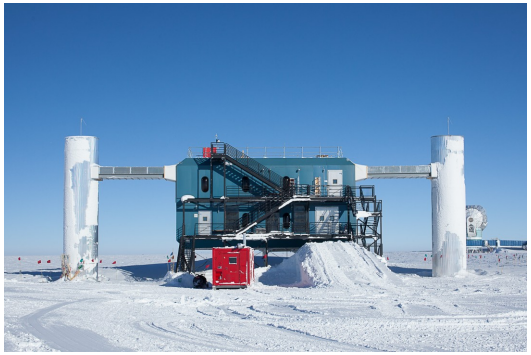








IceCube Betrieb

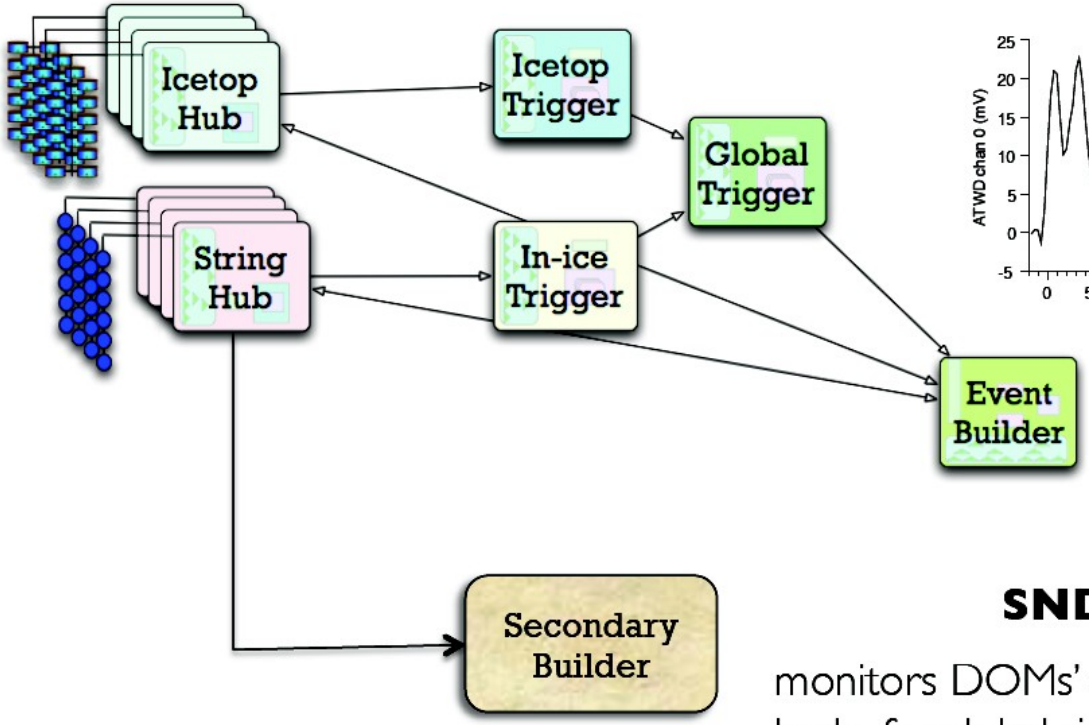


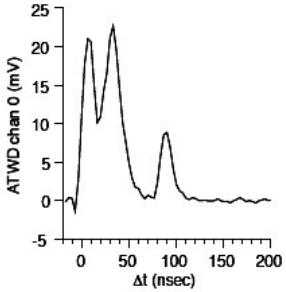
pDAQ

forms triggers (e.g. 8-fold multiplicity)
stores DOM waveforms + hit times

DOMs
n=5404



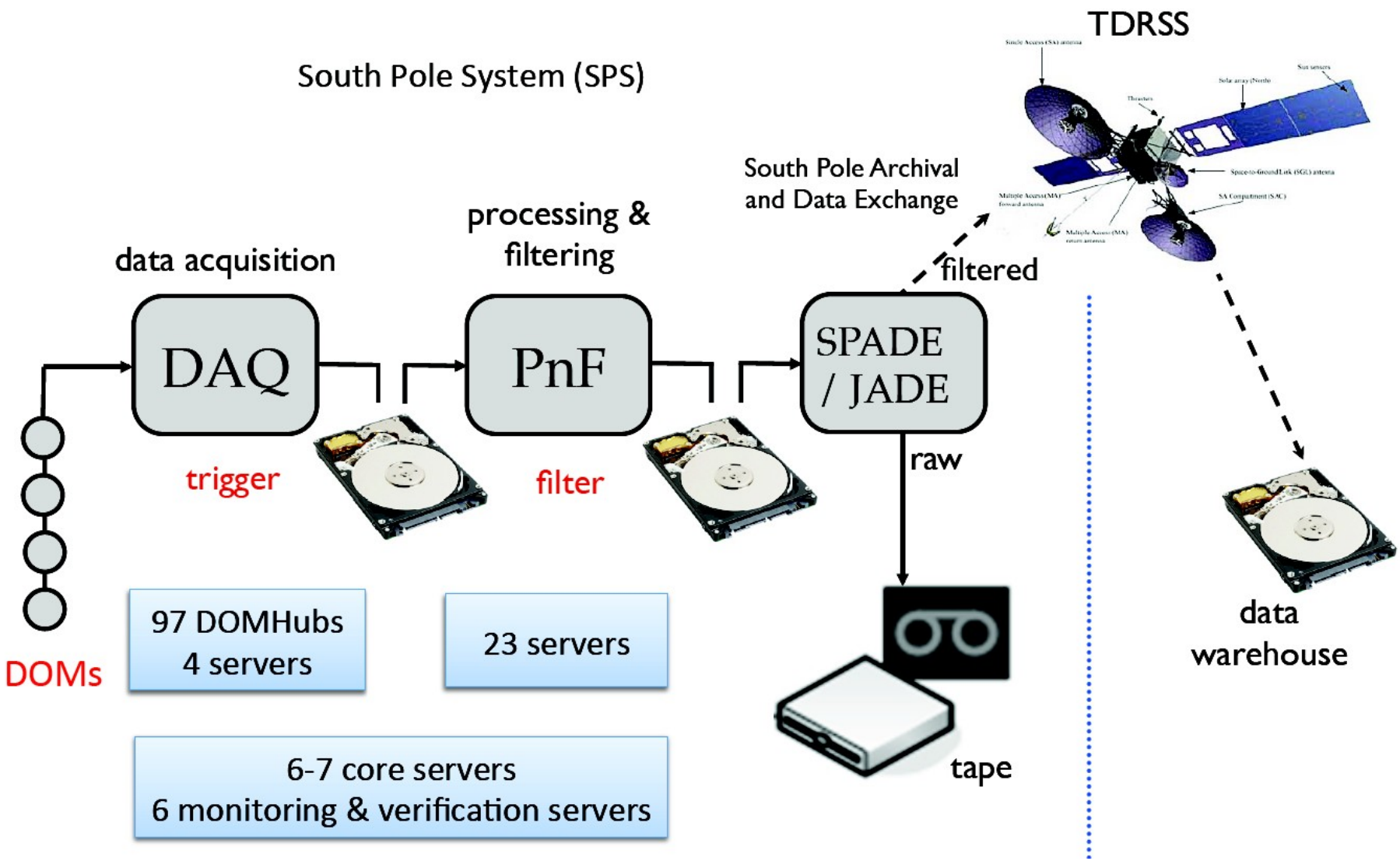




SNDAQ

monitors DOMs' dark noise rates
looks for global rise on short time scale

Datenstrom


TDRSS
South Pole System (SPS)
South Pole Archival
and Data Exchange
processing &
filtering
data acquisition
filtered
DAQ
PnF
SPADE
/ JADE
trigger
filter
raw
DOMs
97 DOMHubs
4 servers
23 servers
6-7 core servers
6 monitoring & verification servers
tape
data
warehouse

Winterover



Alicia Fattorini,
Germany (Münster)



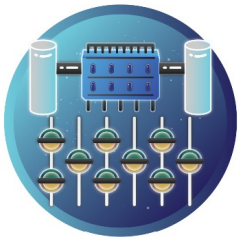
Camille Parisel,
Frankreich

Geschichte von IceCube



1988

TELESCOPE IN THE ICE
ENVISIONED



2011

ICECUBE
COMPLETED



2013

ASTROPHYSICAL NEUTRINOS
DISCOVERED



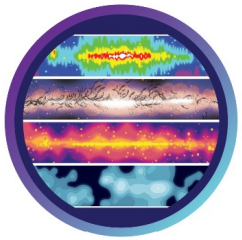
2018

BLAZAR TXS 0506+056
NEUTRINO EMISSION IDENTIFIED



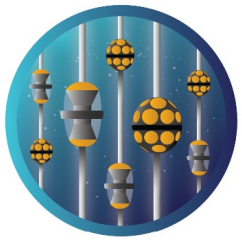
2022

ACTIVE GALAXY NGC 1068
NEUTRINO EMISSION IDENTIFIED



2023

MILKY WAY
NEUTRINO EMISSION IDENTIFIED

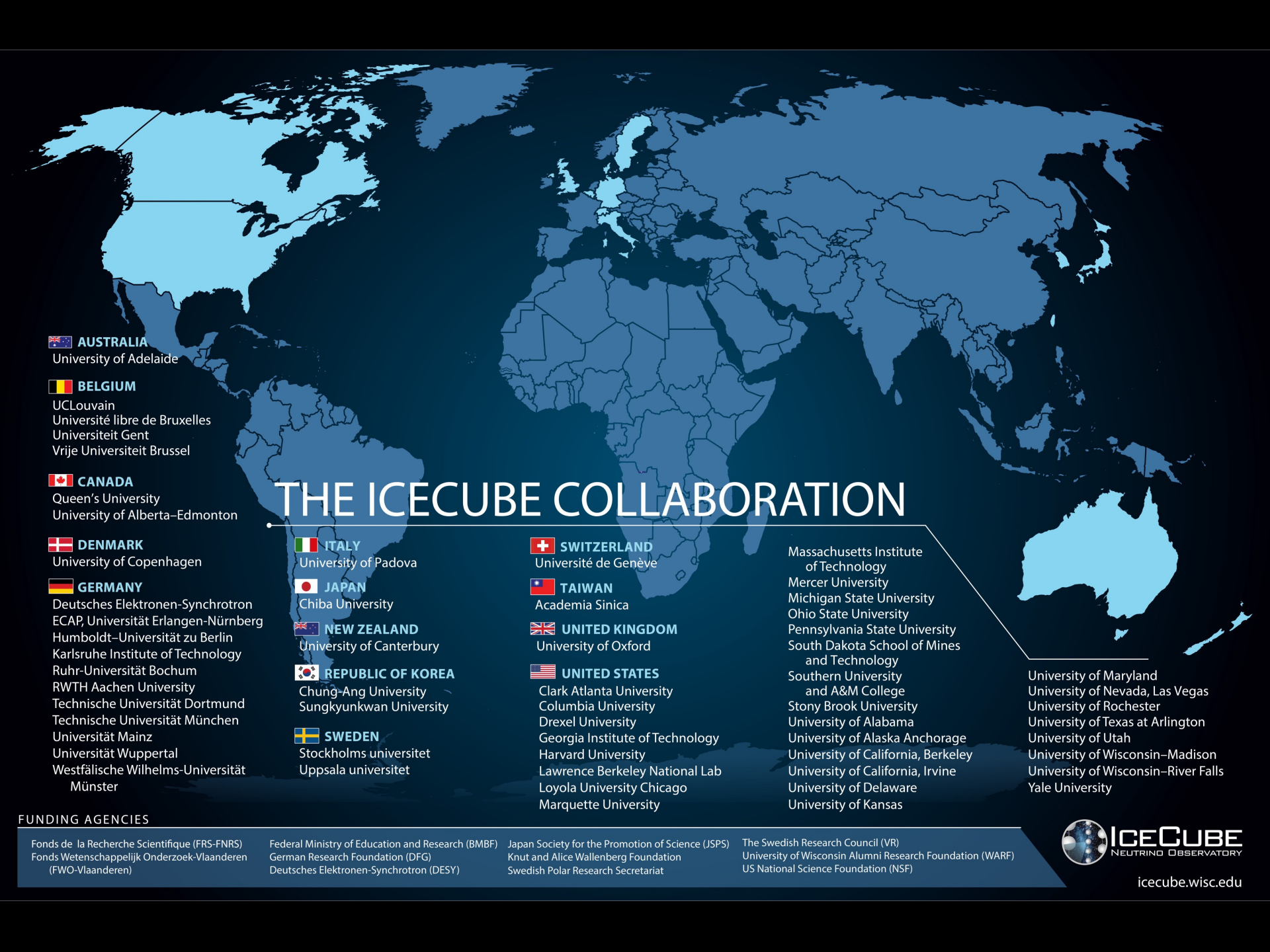


2026

ICECUBE UPGRADE
COMPLETED



Nobelpreis 2026



THE ICECUBE COLLABORATION

AUSTRALIA
University of Adelaide

BELGIUM
UCLouvain
Université libre de Bruxelles
Universiteit Gent
Vrije Universiteit Brussel

CANADA
Queen's University
University of Alberta–Edmonton

DENMARK
University of Copenhagen

GERMANY
Deutsches Elektronen-Synchrotron
ECAP, Universität Erlangen-Nürnberg
Humboldt–Universität zu Berlin
Karlsruhe Institute of Technology
Ruhr-Universität Bochum
RWTH Aachen University
Technische Universität Dortmund
Technische Universität München
Universität Mainz
Universität Wuppertal
Westfälische Wilhelms-Universität Münster

ITALY
University of Padova

JAPAN
Chiba University

NEW ZEALAND
University of Canterbury

REPUBLIC OF KOREA
Chung-Ang University
Sungkyunkwan University

SWEDEN
Stockholms universitet
Uppsala universitet

SWITZERLAND
Université de Genève

TAIWAN
Academia Sinica

UNITED KINGDOM
University of Oxford

UNITED STATES
Clark Atlanta University
Columbia University
Drexel University
Georgia Institute of Technology
Harvard University
Lawrence Berkeley National Lab
Loyola University Chicago
Marquette University
Massachusetts Institute of Technology
Mercer University
Michigan State University
Ohio State University
Pennsylvania State University
South Dakota School of Mines and Technology
Southern University and A&M College
Stony Brook University
University of Alabama
University of Alaska Anchorage
University of California, Berkeley
University of California, Irvine
University of Delaware
University of Kansas
University of Maryland
University of Nevada, Las Vegas
University of Rochester
University of Texas at Arlington
University of Utah
University of Wisconsin–Madison
University of Wisconsin–River Falls
Yale University

FUNDING AGENCIES

Fonds de la Recherche Scientifique (FRS-FNRS)
Fonds Wetenschappelijk Onderzoek-Vlaanderen (FWO-Vlaanderen)
Federal Ministry of Education and Research (BMBF)
German Research Foundation (DFG)
Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)
Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)
Knut and Alice Wallenberg Foundation
Swedish Polar Research Secretariat
The Swedish Research Council (VR)
University of Wisconsin Alumni Research Foundation (WARF)
US National Science Foundation (NSF)

IceCube Neutrino Observatory

icecube.wisc.edu



THE ICECUBE COLLABORATION

BELGIUM
UCLouvain
Université libre de Bruxelles
Universiteit Gent
Vrije Universiteit Brussel

CANADA
Queen's University
University of Alberta–Edmonton

DENMARK
University of Copenhagen

GERMANY
Deutsches Elektronen-Synchrotron
ECAP, Universität Erlangen-Nürnberg
Humboldt–Universität zu Berlin
Karlsruhe Institute of Technology
Ruhr-Universität Bochum
RWTH Aachen University
Technische Universität Dortmund
Technische Universität München
Universität Mainz
Universität Wuppertal
Westfälische Wilhelms-Universität Münster

ITALY
University of Padova

JAPAN
Chiba University

NEW ZEALAND
University of Canterbury

REPUBLIC OF KOREA
Chung-Ang University
Sungkyunkwan University

SWEDEN
Stockholms universitet
Uppsala universitet

SWITZERLAND
Université de Genève

TAIWAN
Academia Sinica

UNITED KINGDOM
University of Oxford

UNITED STATES
Clark Atlanta University
Columbia University
Drexel University
Georgia Institute of Technology
Harvard University
Lawrence Berkeley National Lab
Loyola University Chicago
Marquette University
Massachusetts Institute of Technology
Mercer University
Michigan State University
Ohio State University
Pennsylvania State University
South Dakota School of Mines and Technology
Southern University and A&M College
Stony Brook University
University of Alabama
University of Alaska Anchorage
University of California, Berkeley
University of California, Irvine
University of Delaware
University of Kansas
University of Maryland
University of Nevada, Las Vegas
University of Rochester
University of Texas at Arlington
University of Utah
University of Wisconsin–Madison
University of Wisconsin–River Falls
Yale University

FUNDING AGENCIES

Fonds de la Recherche Scientifique (FRS-FNRS)
Fonds Wetenschappelijk Onderzoek-Vlaanderen (FWO-Vlaanderen)
Federal Ministry of Education and Research (BMBF)
German Research Foundation (DFG)
Deutsches Elektronen-Synchrotron (DESY)
Japan Society for the Promotion of Science (JSPS)
Knut and Alice Wallenberg Foundation
Swedish Polar Research Secretariat
The Swedish Research Council (VR)
University of Wisconsin Alumni Research Foundation (WARF)
US National Science Foundation (NSF)

IceCube Neutrino Observatory

icecube.wisc.edu