



ERLANGEN CENTRE
FOR ASTROPARTICLE
PHYSICS



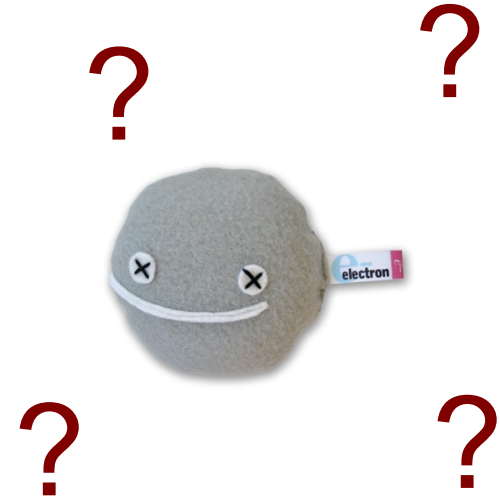
IceCube Masterclass 2026

Teilchennachweis

Anke Mosbrugger
Nürnberg, 30.09.2026

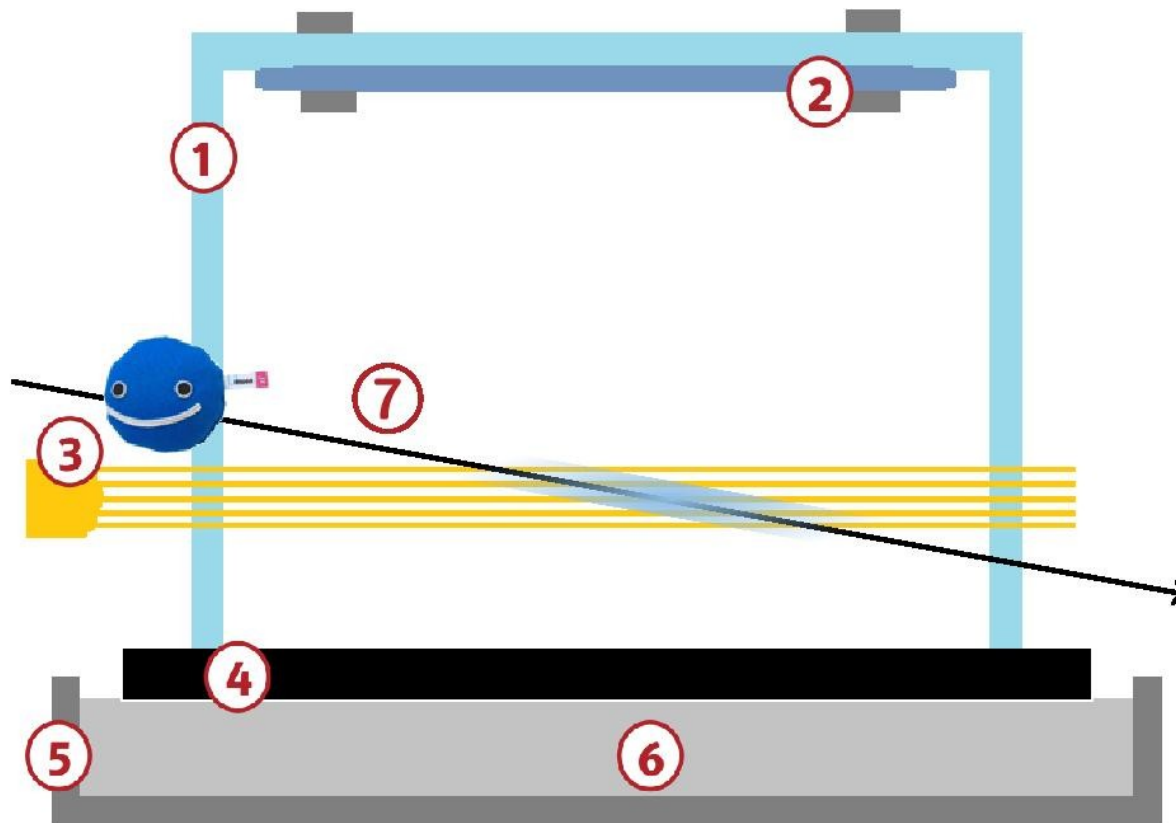
Fragestellung

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



Wir können Teilchen nur durch ihre Wechselwirkung mit Materie nachweisen.

Nebelkammer



- 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

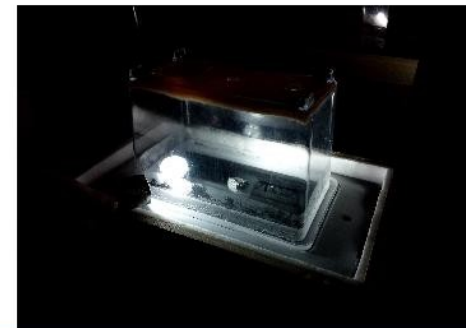
Trockeneis in Styroporkiste füllen und Metallplatte darauf legen



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?

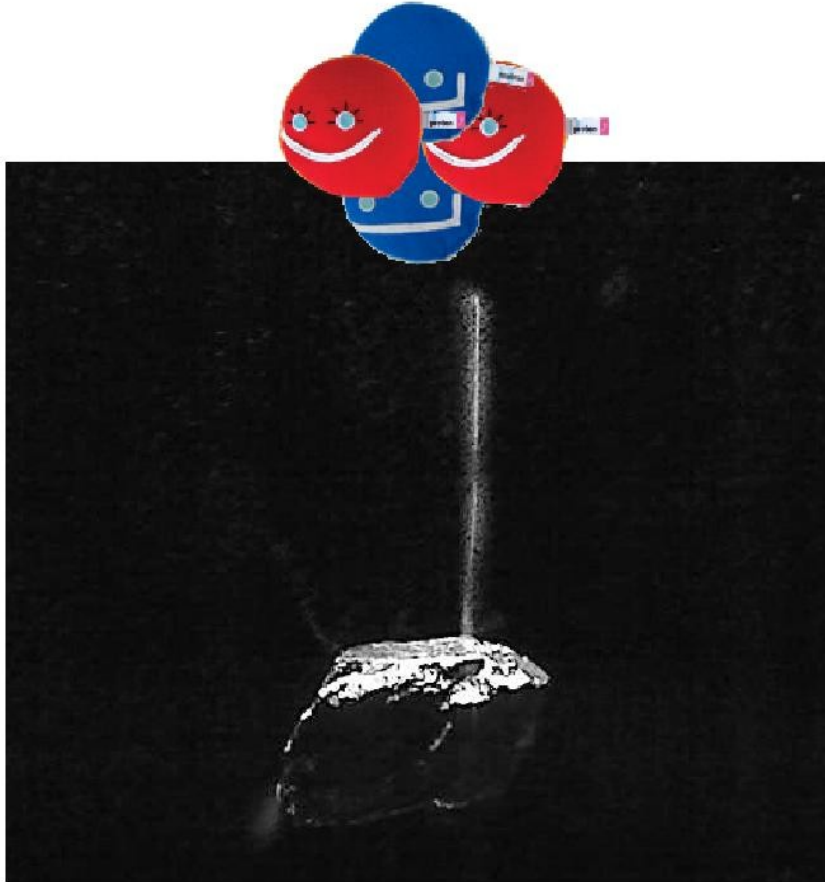
Ich sehe keine Spuren!

- 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.

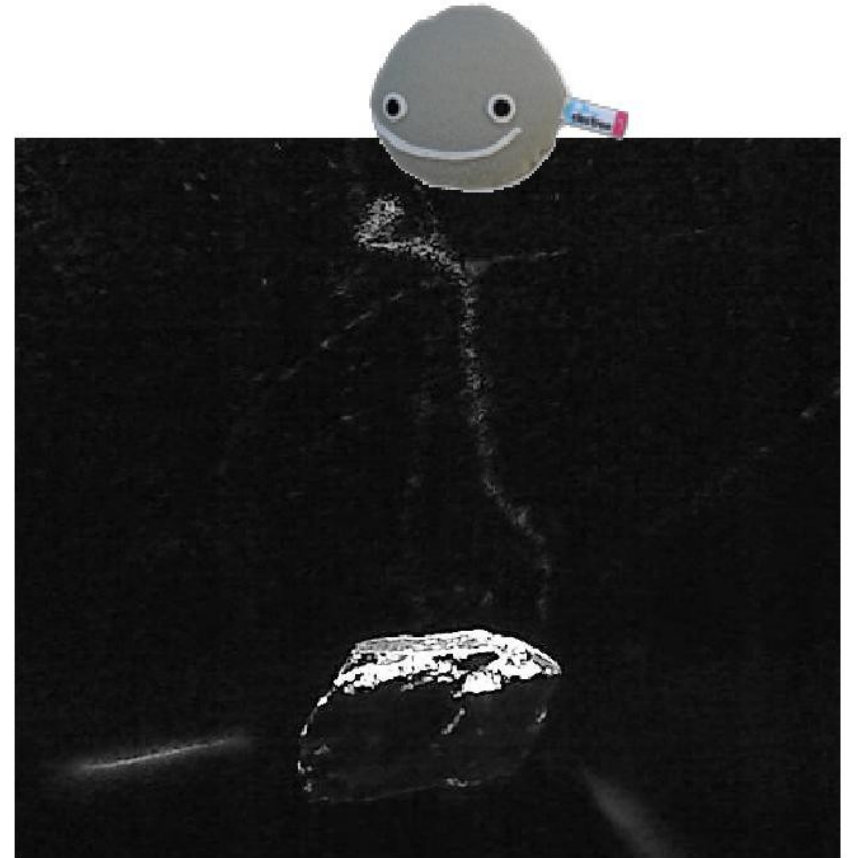
Ich sehe Wolken in der Kammer.

- Das ist ein Hinweis auf eine undichte Stelle.

Was kann man in der Nebelkammer sehen?



Spur eines α -Teilchens aus Columbit



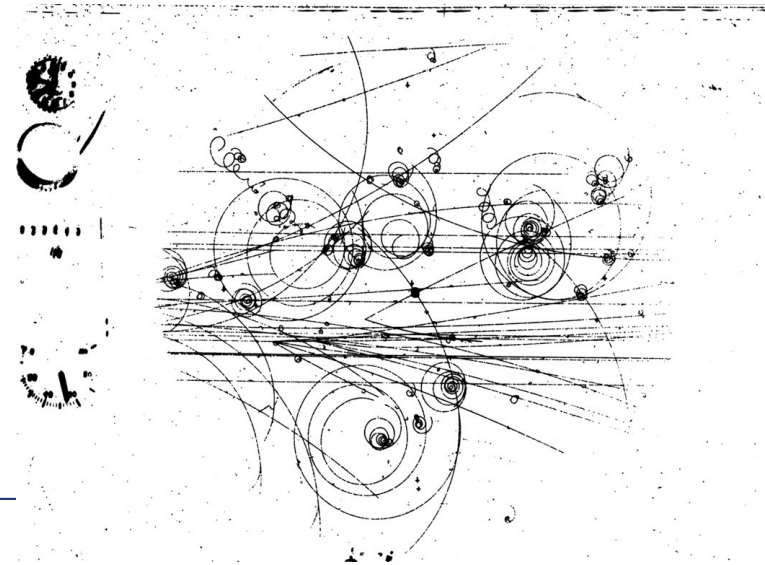
Spur eines Elektrons aus Columbit



Blasenkammer

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

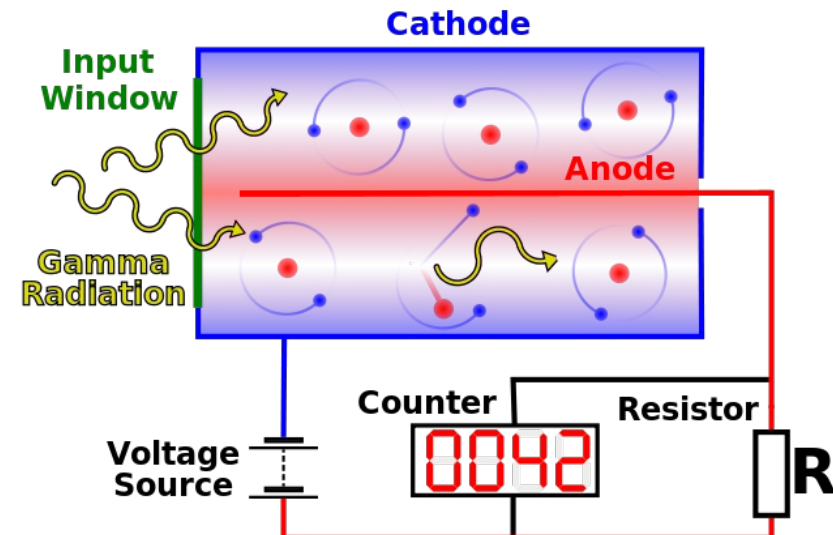
Bildgebend, langsam



Geigerzähler

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

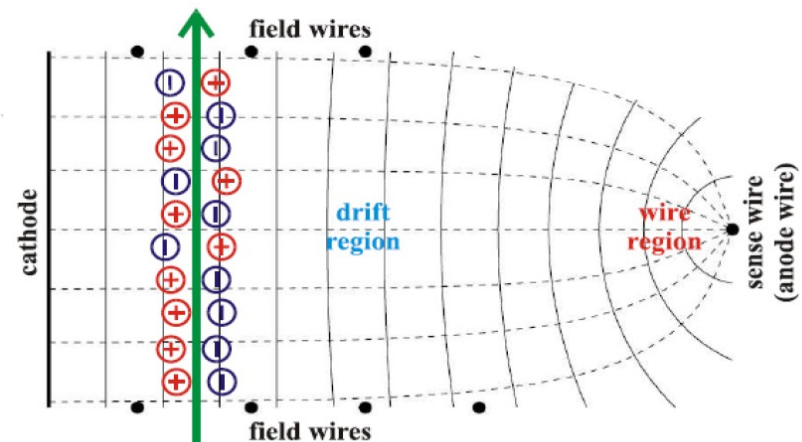
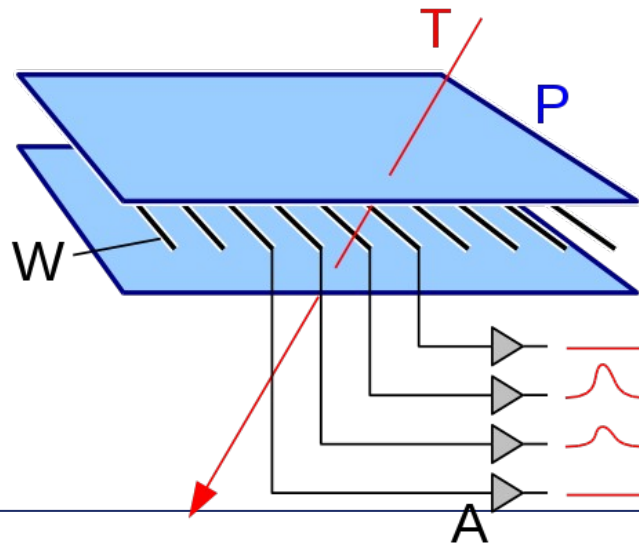
Zählt nur, schnell



Spurkammer

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

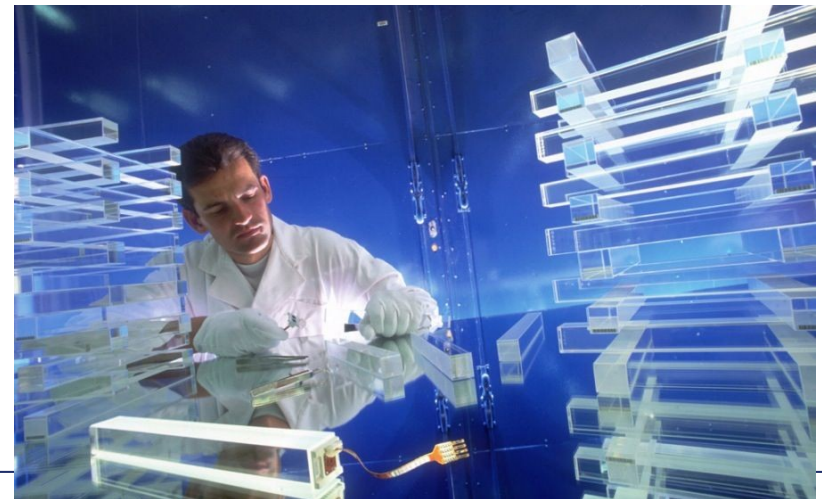
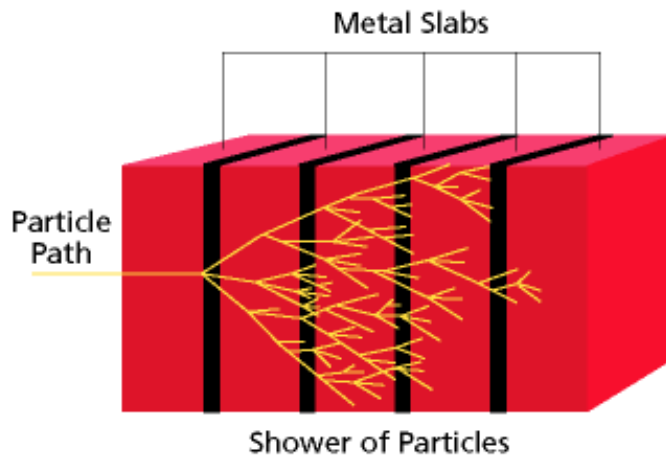
Gute Ortsauflösung, schlechte Energieauflösung



Kalorimeter

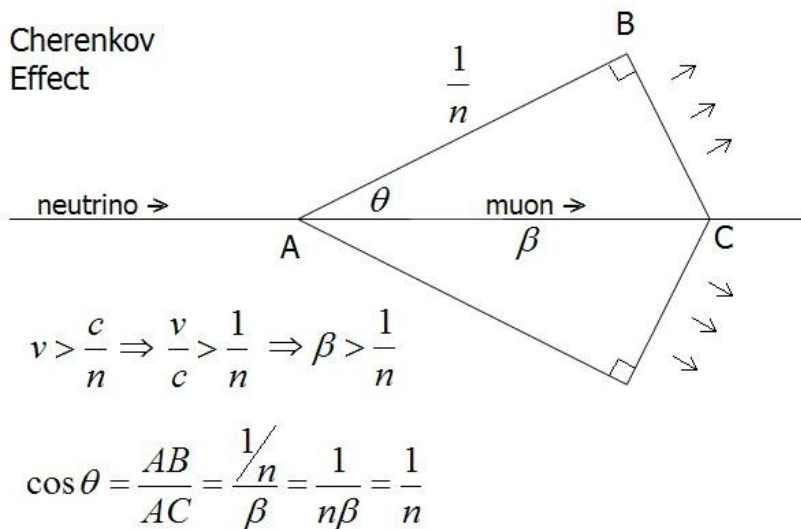
- Reichweite in Absorbern messen
desto weiter desto höher die Energie
- **ODER Energie in transparentem Medium in Licht umwandeln** und die Lichtmenge messen

Gute Energieauflösung, schlechte Ortsauflösung



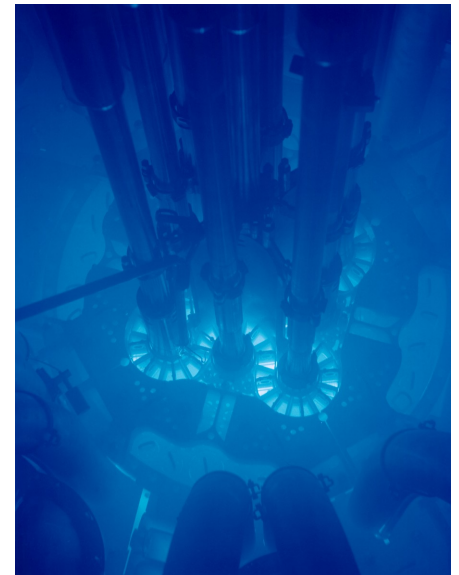
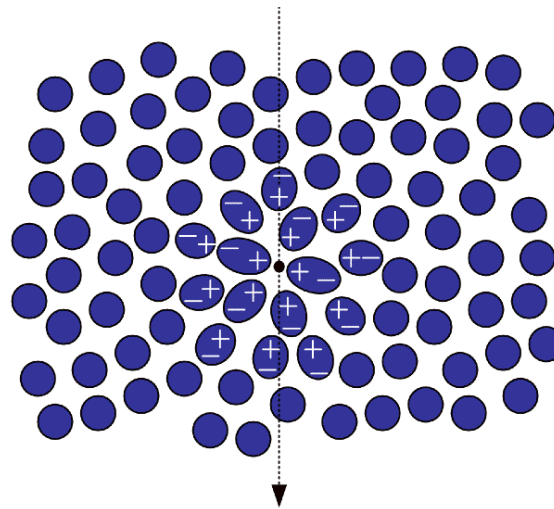
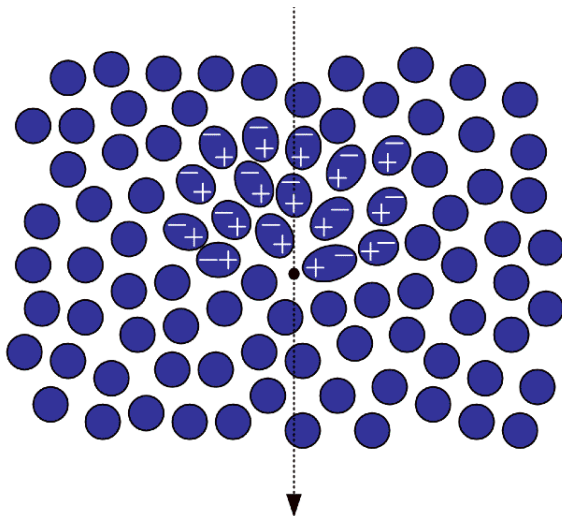
Der Cherenkov-Effekt

- 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



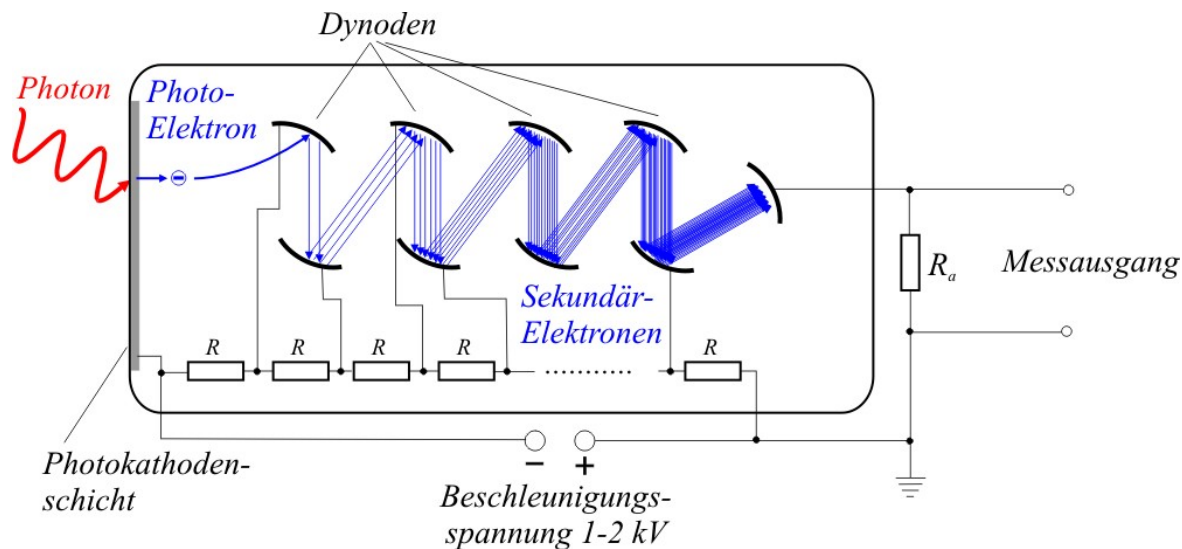
Der Cherenkov-Effekt

- 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 $\sim 10^7$
- Strompuls gibt Zeit und Photonenanzahl an
- Effizienz $\sim 25\%$ (ein gemessenes Photon wird Photoelektron genannt)



Die IceCube Idee

- Man suche sich ein 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

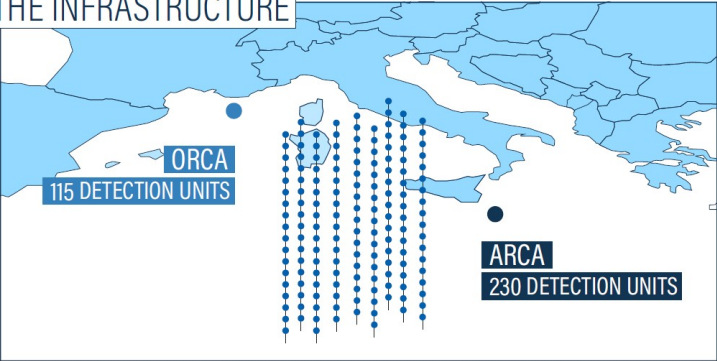


KM3NeT

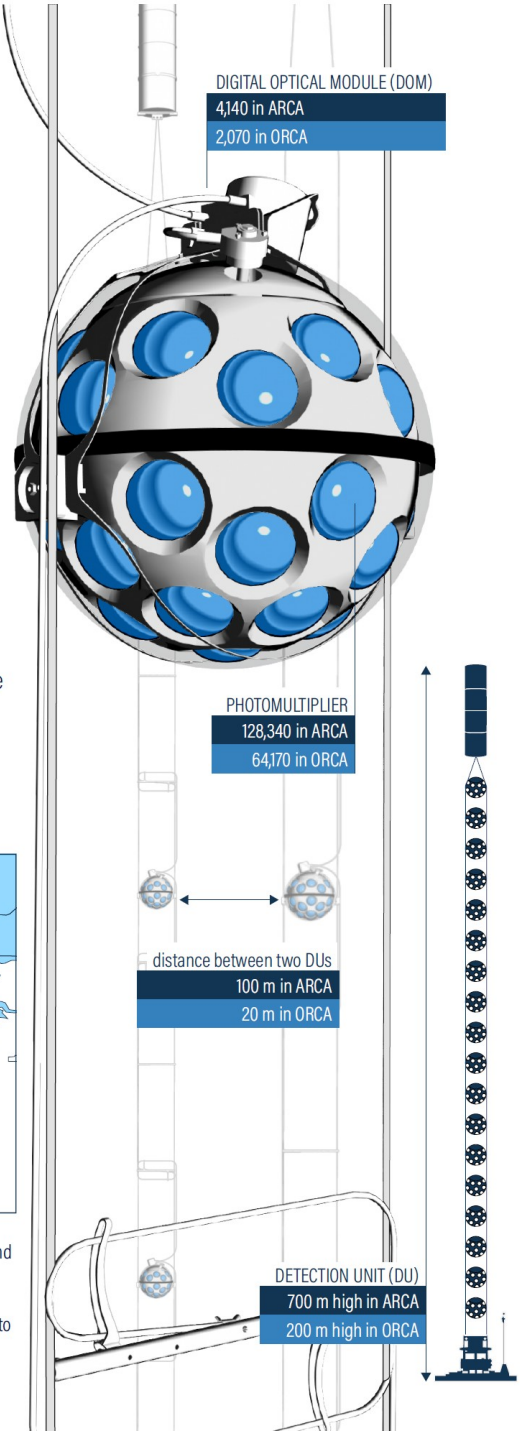
A GIANT DEEP-SEA NEUTRINO TELESCOPE

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

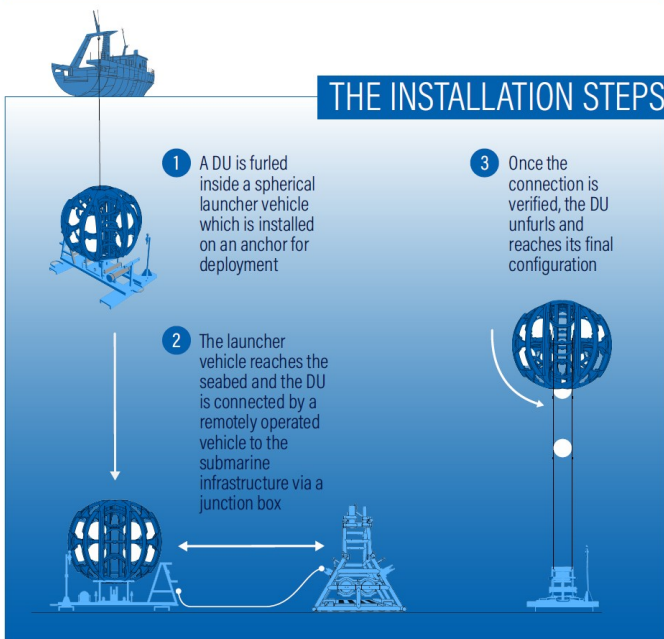


The KM3NeT infrastructure consists of an array of hundreds of detection lines, "detection units," which stand on the sea bottom and are equipped with thousands of hi-tech eyes. Its final configuration will occupy a volume of over 1 km³, hence its name. The detection units are connected to a submarine 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.



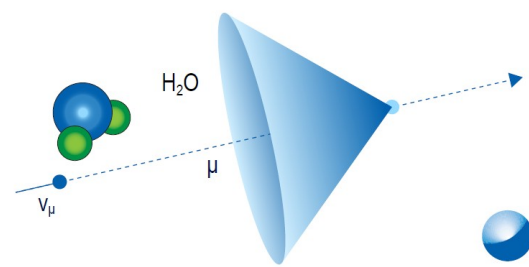
KM3NeT IS A LARGE INTERNATIONAL COLLABORATION THAT INVOLVES OVER **360** SCIENTISTS, ENGINEERS, TECHNICIANS AND STUDENTS OF **68** INSTITUTIONS FROM **21** COUNTRIES.

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.



Der Südpol



Die Station

- Sommer (Tag)
Winter (Nacht)

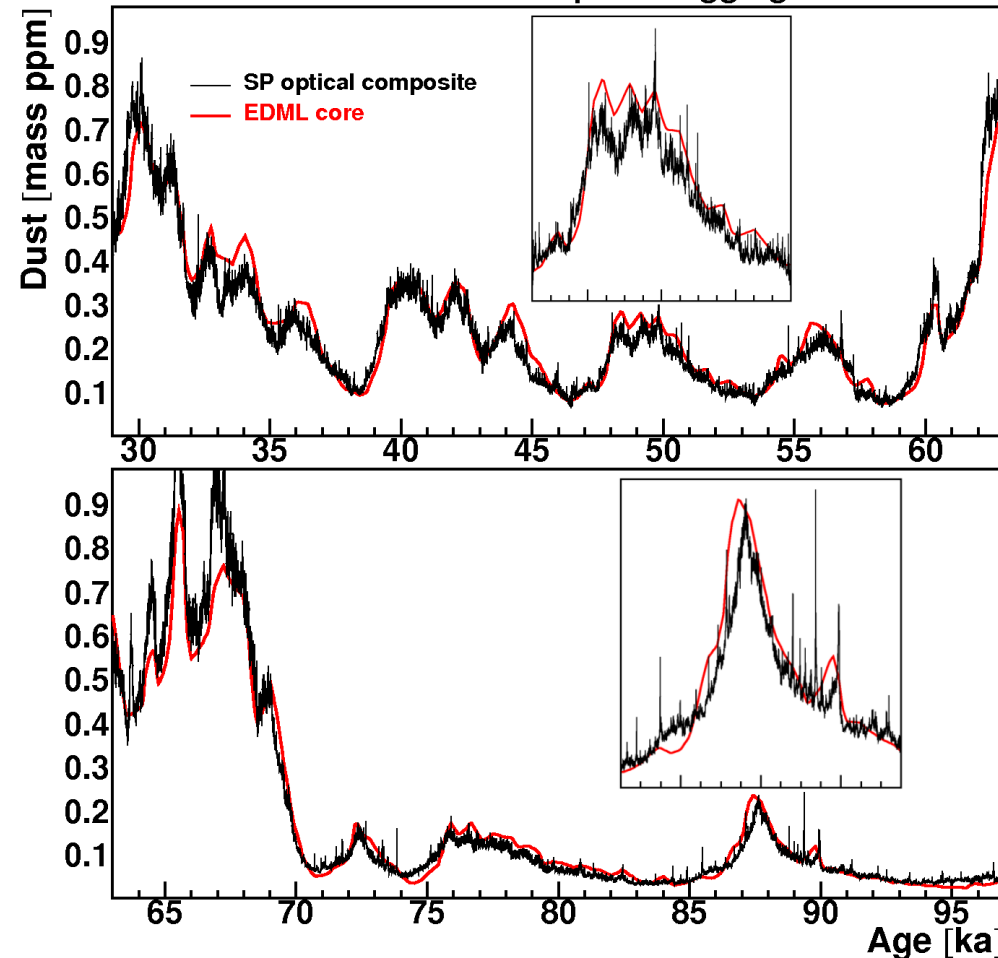


- Bevölkerung ~300
- Tägliche Flüge
- ~ -20°C

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

Das Eis

Core dust vs. Optical logging



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

Absorptionslänge:

Leitungswasser: 2

m

Destilliertes Wasser: 8

m

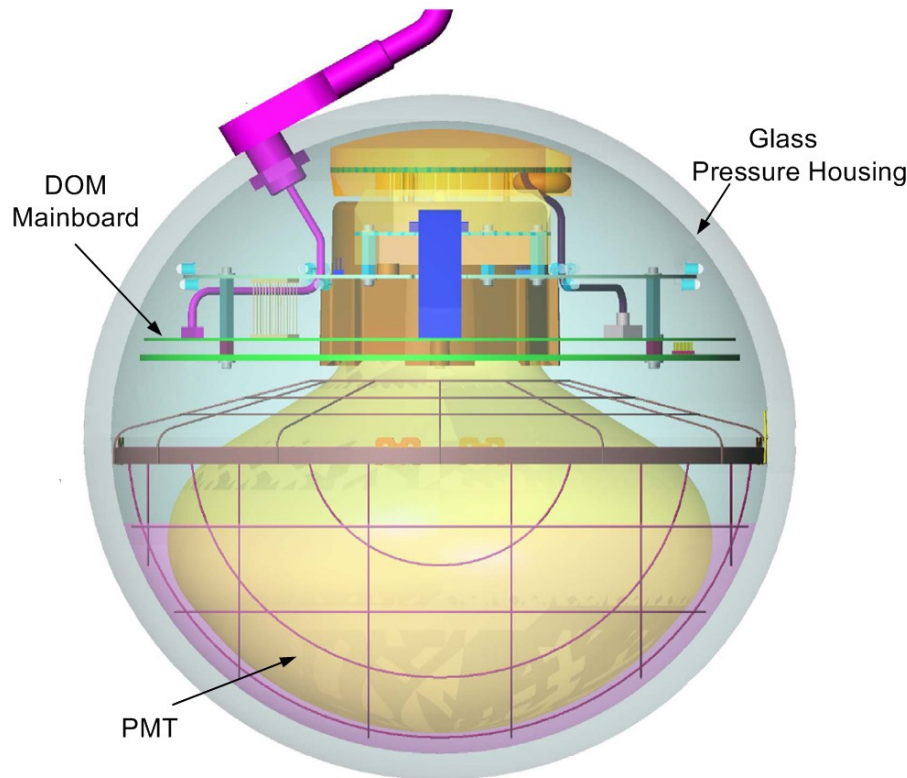
Südpoleis: 125

m

Besser als die meisten optischen Gläser

Der DOM

Digitales Optisches Modul – Der Grundbaustein von IceCube



- Photomultiplier
 - Spannungsversorgung
 - Digitalisierung, Triggerlogik und Zeitnahme (2ns)
 - Kommunikation
-
- In einem Druckcontainer aus Glas

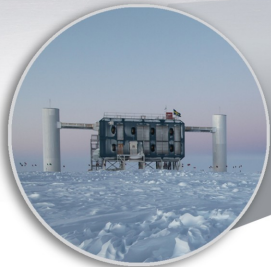
60cm ~ 2ns





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

Ice Top

1450 m

2450 m

IceCube detector

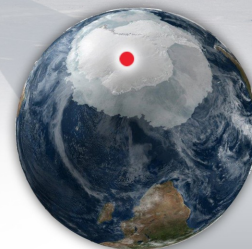
86 strings of DOMs,
set 125 meters apart

DeepCore

Antarctic bedrock

Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica

A National Science Foundation-managed research facility



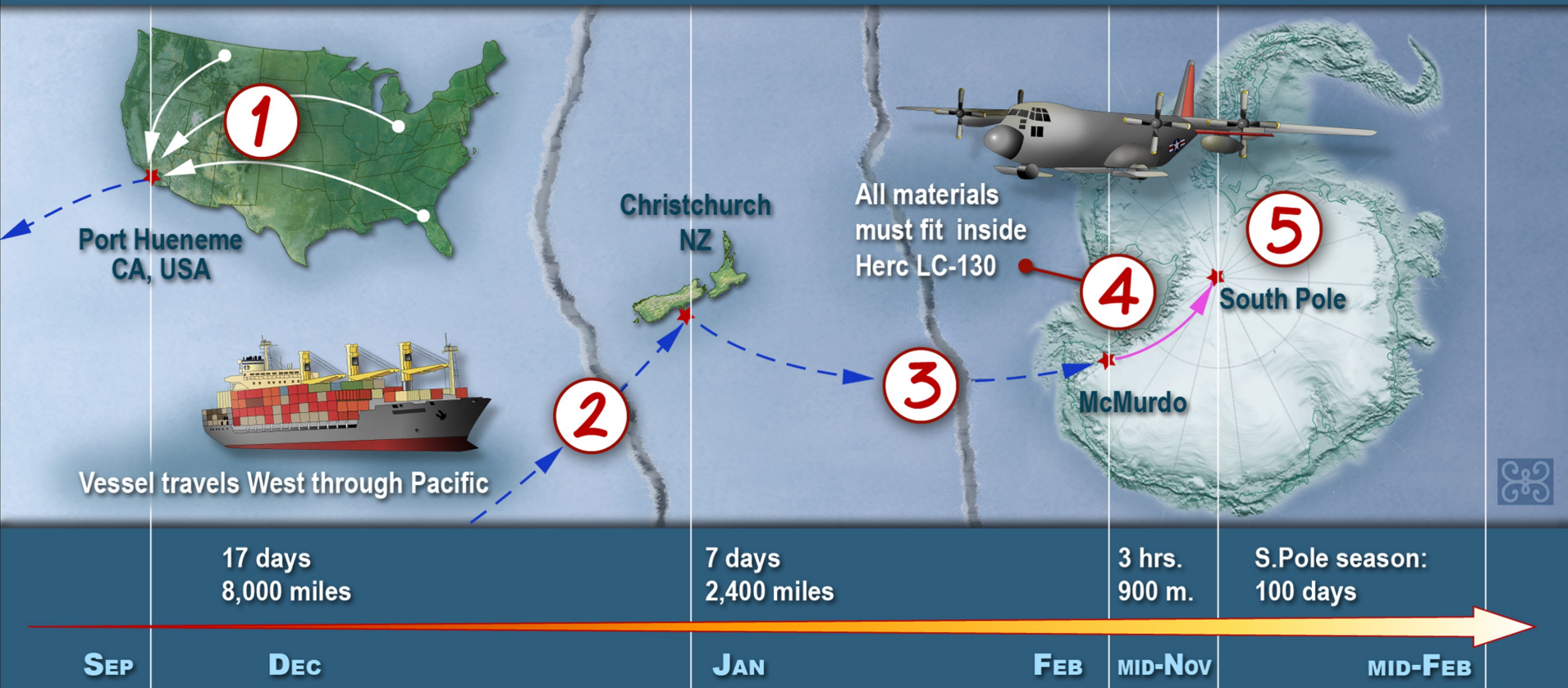
60 DOMs
on each
string

DOMs
are 17
meters
apart



Der Transport

TRANSPORTING MATERIALS TO THE SOUTH POLE



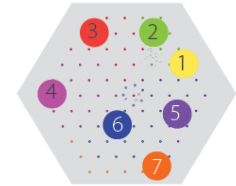
LC130-Hercules

- ~10 aktive Flugzeuge
- Baujahr ~1956



Detector Construction

7 seasons of construction, 2004-2011



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



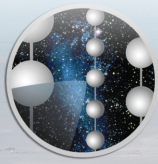


IceCube Bau

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



© AFP/Getty Images

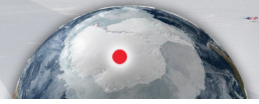


ICECUBE
SOUTH POLE NEUTRINO OBSERVATORY

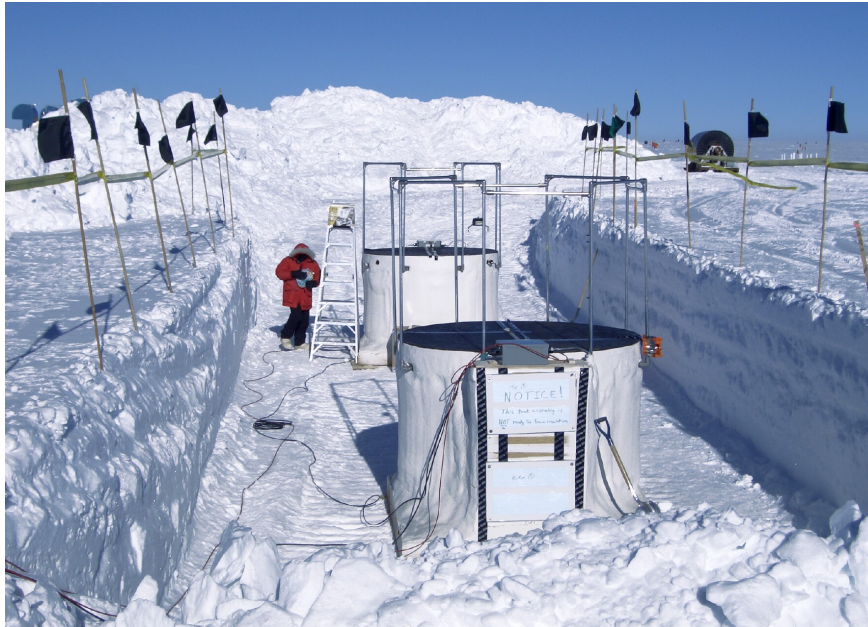
IceTop

50 m

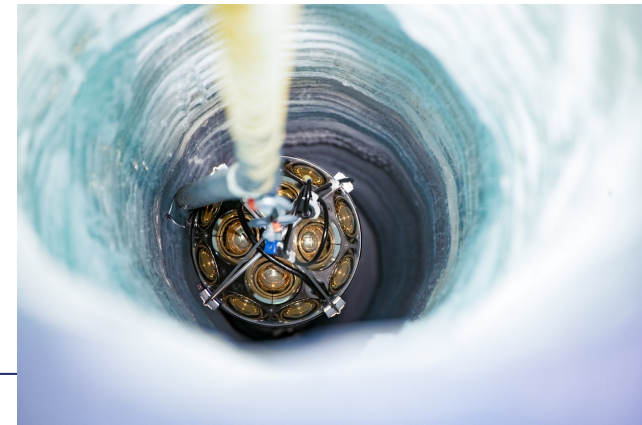
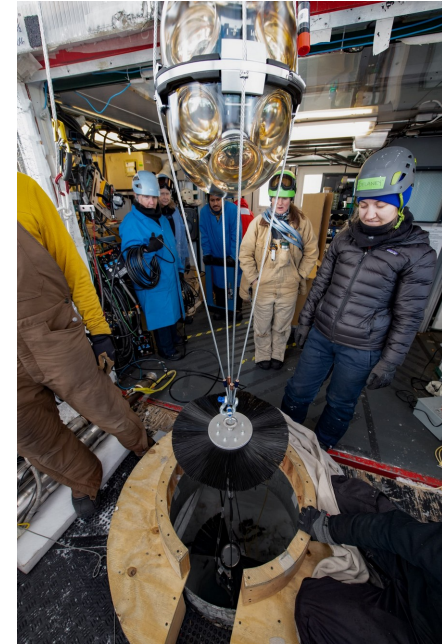
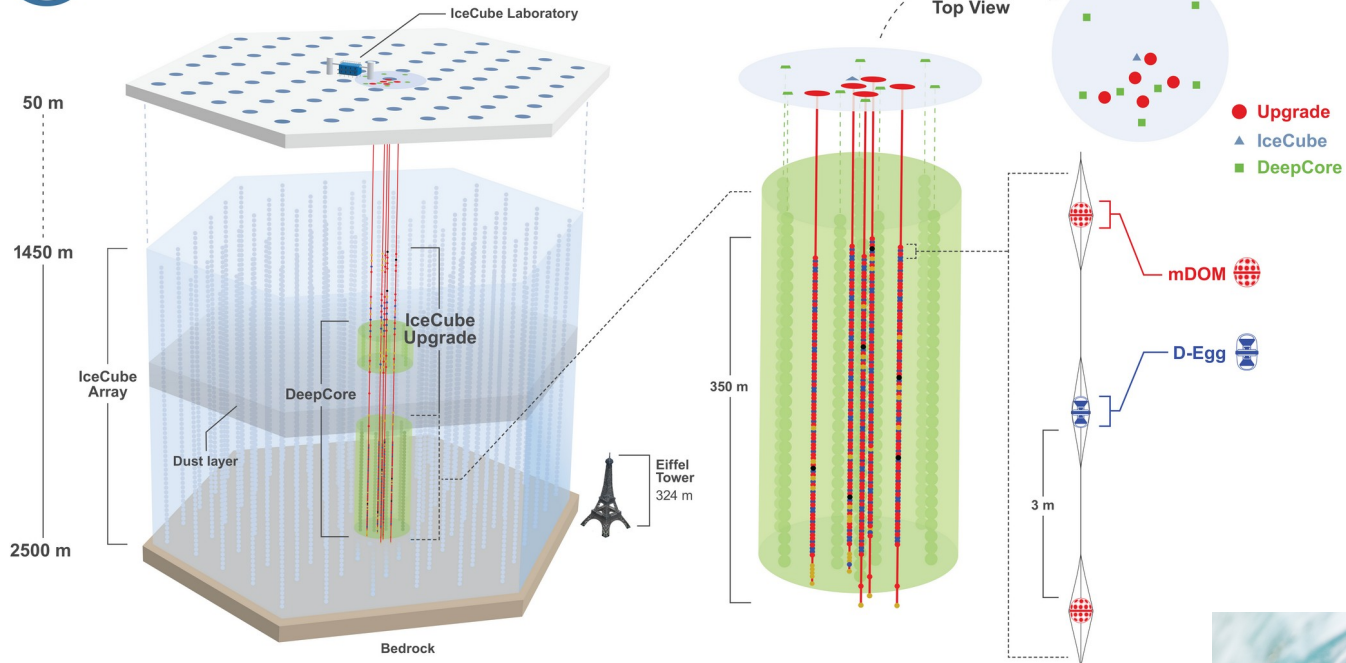
IceTop



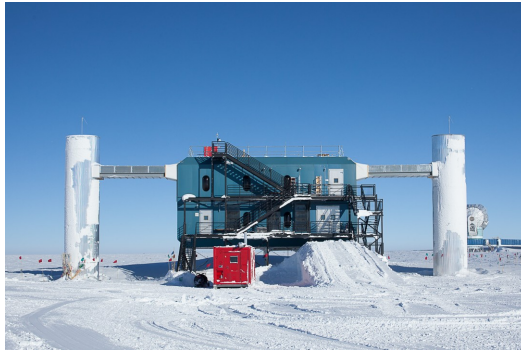
- Oberflächendetektor misst “Fußabdruck” kosmischer Strahlung → Veto?!



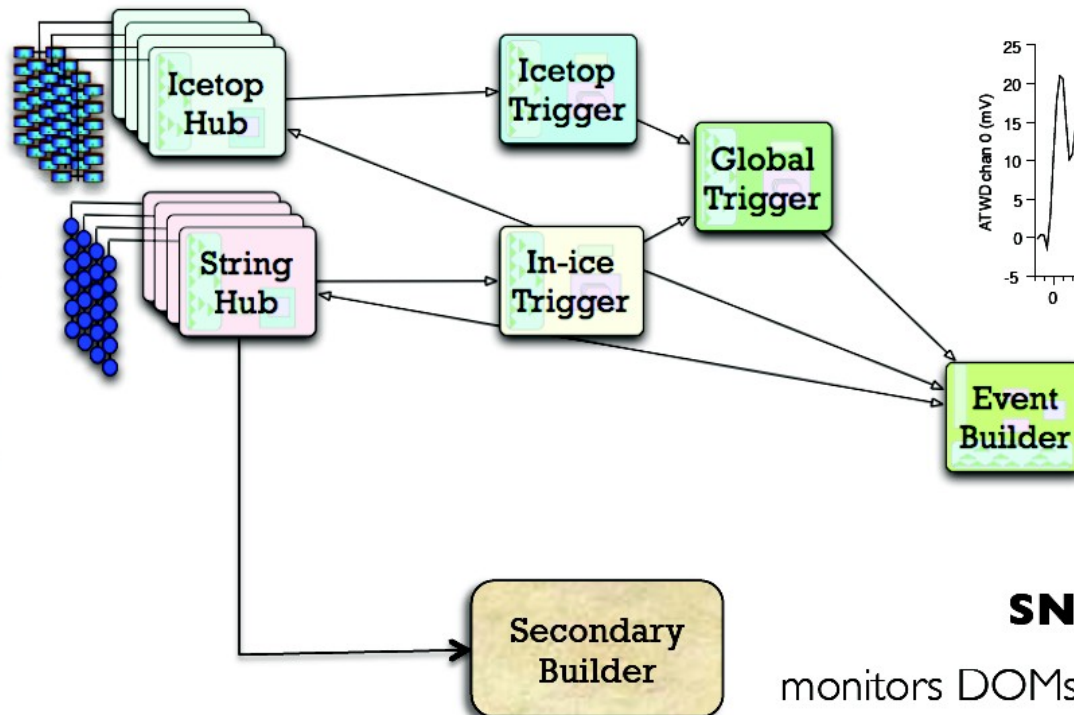
Das IceCube Upgrade



IceCube Betrieb

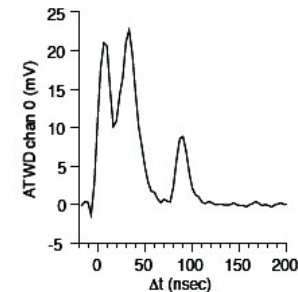


DOMs
n=5404



pDAQ

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

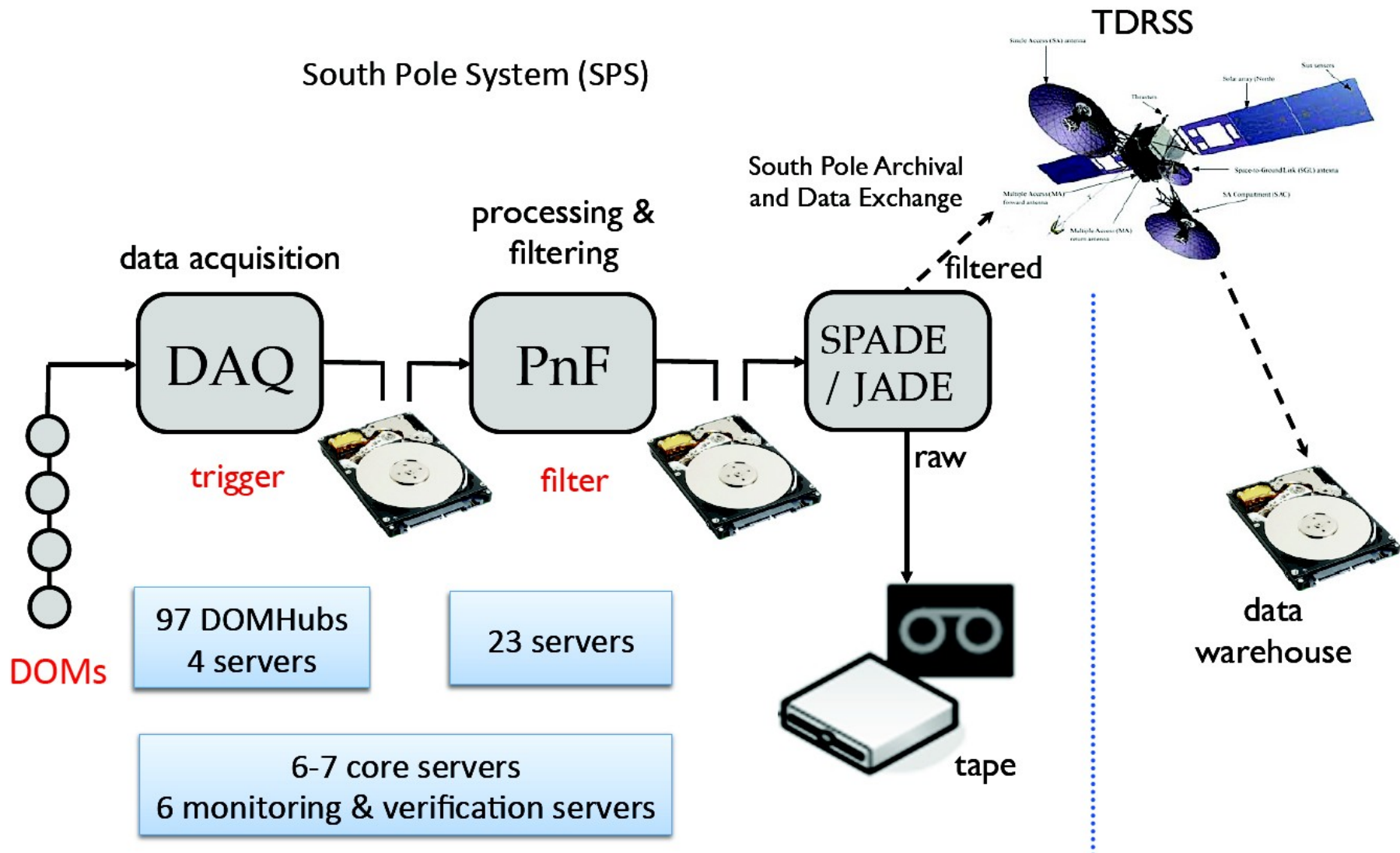


SNDAQ

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

Datenstrom

South Pole System (SPS)



Winterover



Alicia Fattorini,
Germany (Münster)



Camille Parisel,
Frankreich

 **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

THE ICECUBE COLLABORATION

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.wisc.edu



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

THE ICECUBE COLLABORATION

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.wisc.edu