



# IceCube Masterclass 2025

## Teilchennachweis

Carolin Klein  
Erlangen, 10.07.25

# Fragestellung

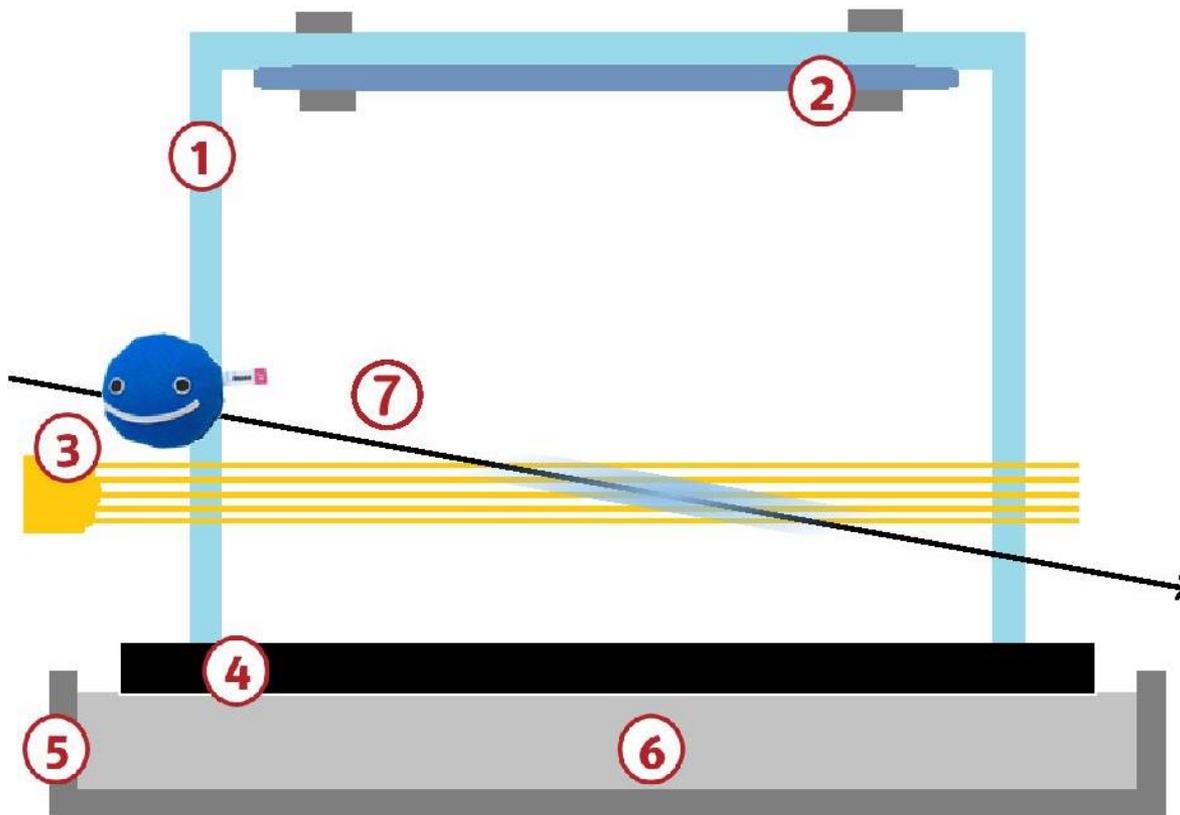
---

- 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

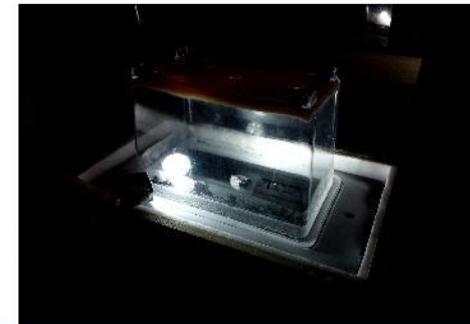
Trockeneis in Styroporkiste füllen und Metallplatte darauf legen



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:  $-78^{\circ}\text{C}$
- **Niemals in den Mund nehmen oder verschlucken!**  
Ausdehnung zu gasförmigen Kohlendioxid im Körper
- **Nur bei ausreichender Belüftung verwenden!**  
Zu viel  $\text{CO}_2$  kann zu Sauerstoffmangel führen
- **Nicht in geschlossenen Behältnissen aufbewahren!**  
Diese können bersten.

**Den Alkohol nicht trinken! Lebensgefahr!**

# Probleme?

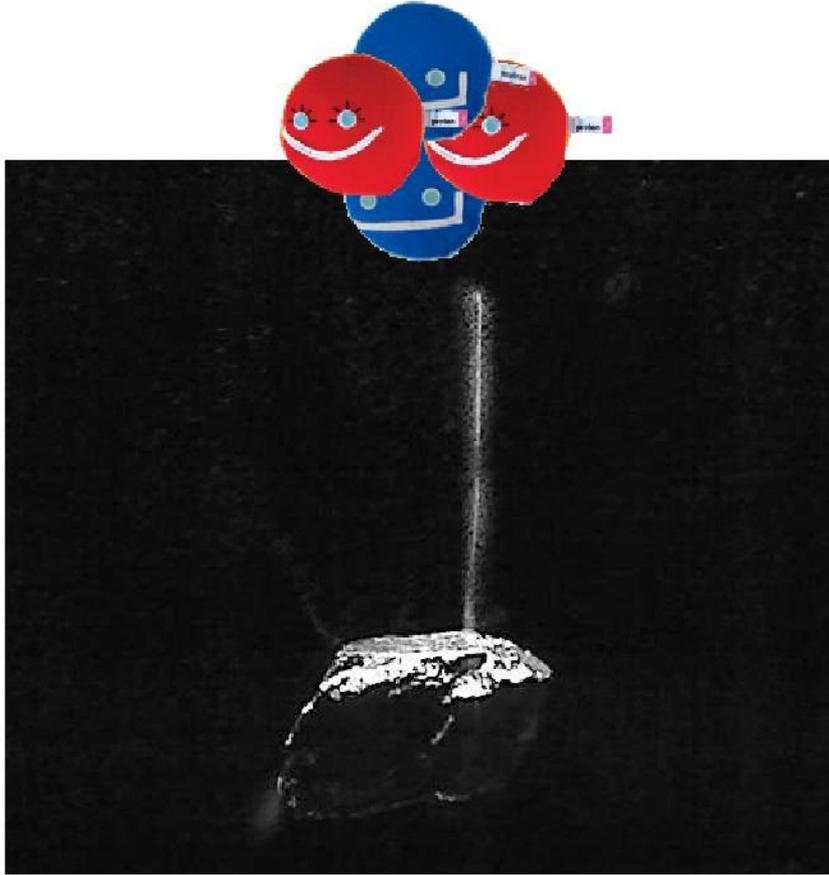
## Ich sehe keine Spuren!

- 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.

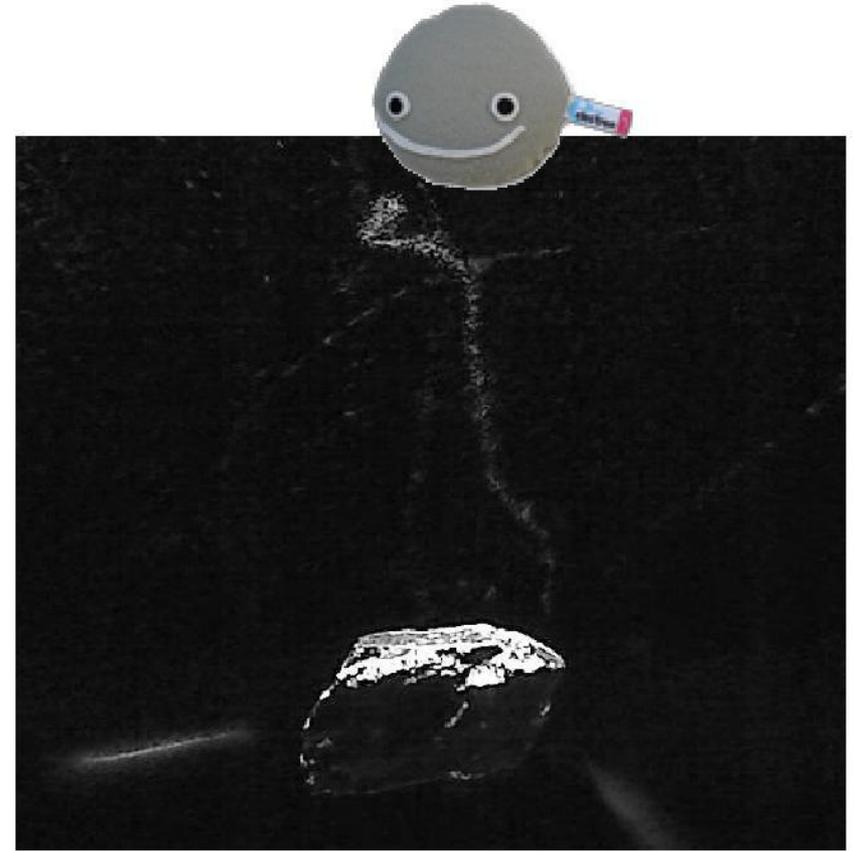
## Ich sehe Wolken in der Kammer.

- Das ist ein Hinweis auf eine undichte Stelle.

# Was kann man in der Nebelkammer sehen?



Spur eines  $\alpha$ -Teilchens aus Columbit



Spur eines Elektrons aus Columbit

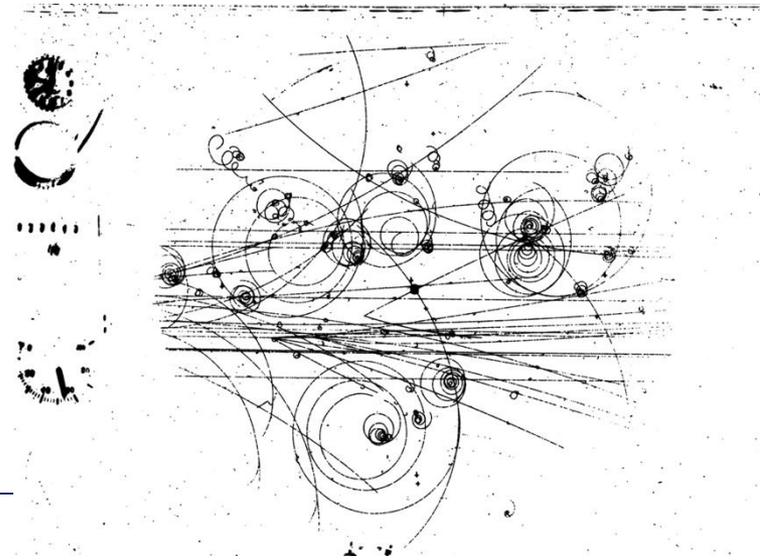


# Blasenkammer

---

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

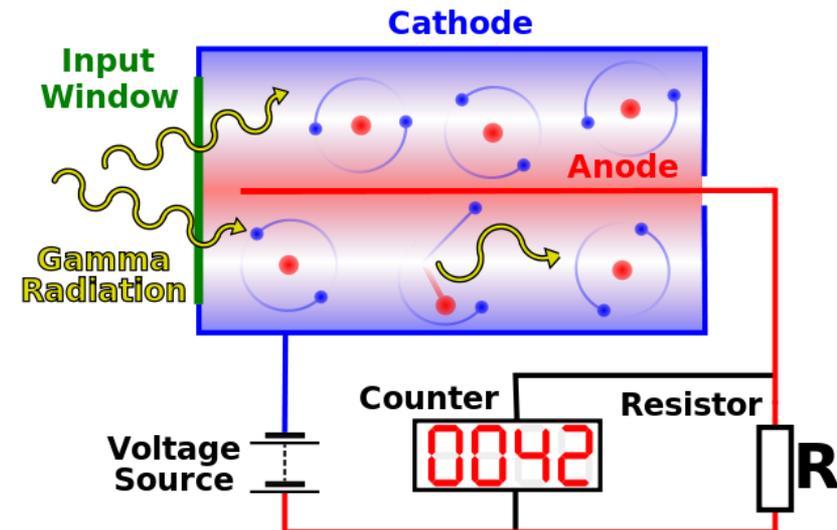
**Bildgebend, langsam**



# Geigerzähler

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

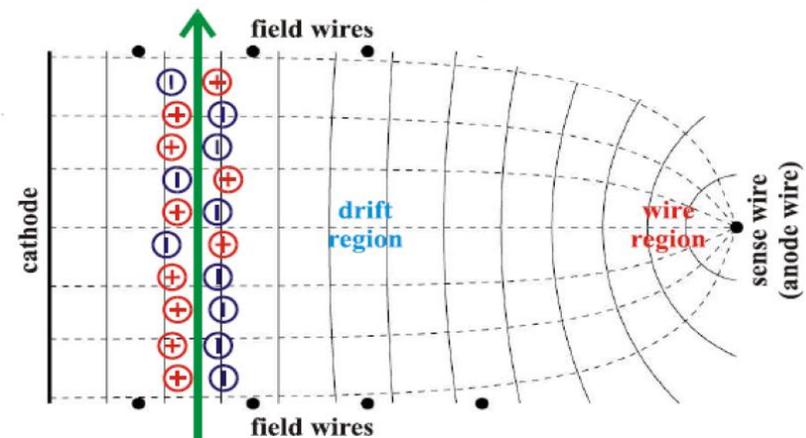
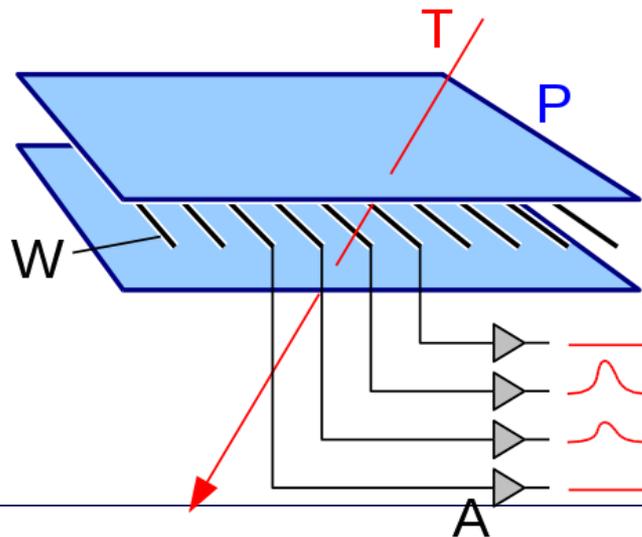
**Zählt nur, schnell**



# Spurkammer

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

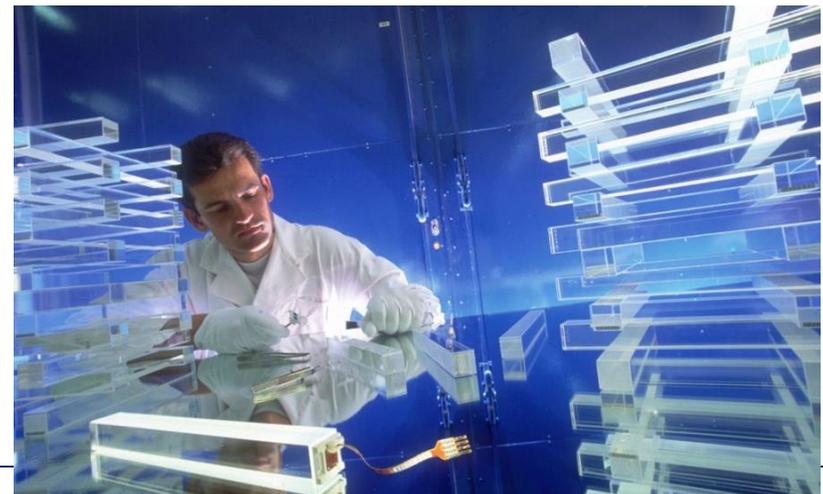
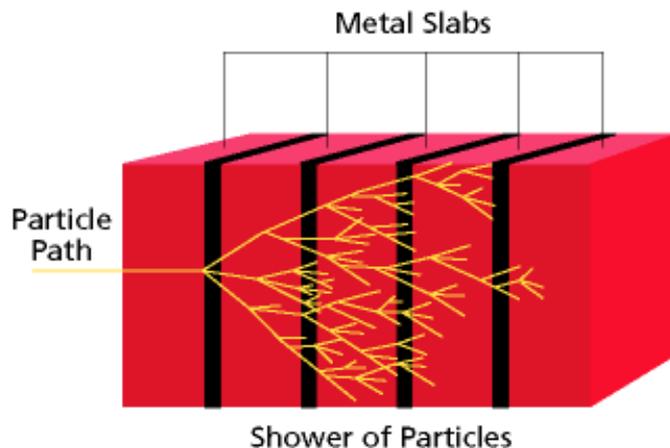
**Gute Ortsauflösung, schlechte Energieauflösung**



# Kalorimeter

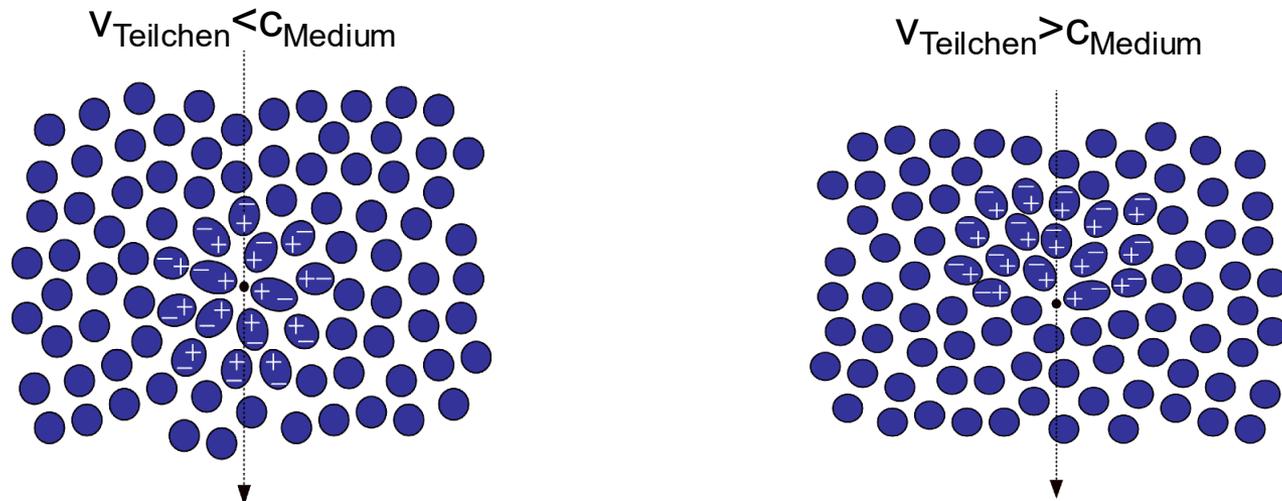
- Reichweite in Absorbern messen  
desto weiter desto höher die Energie
- **ODER Energie in transparentem Medium in Licht umwandeln** und die Lichtmenge messen

**Gute Energieauflösung, schlechte Ortsauflösung**



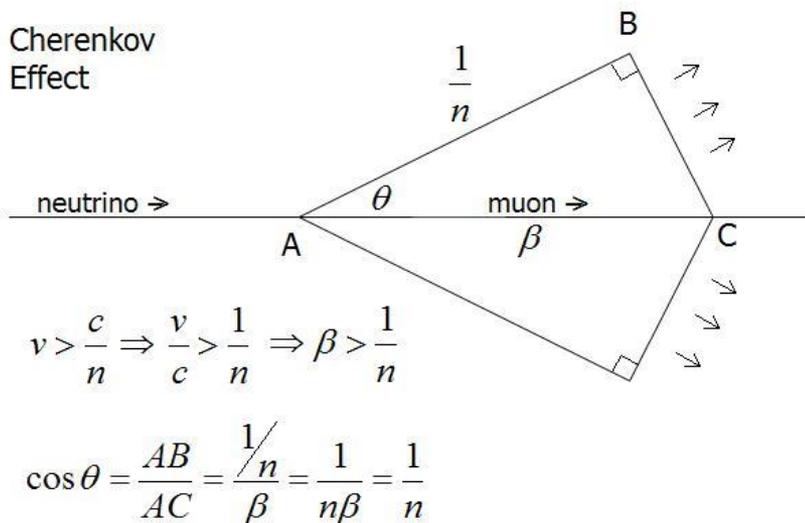
# Der Cherenkov-Effekt

- 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

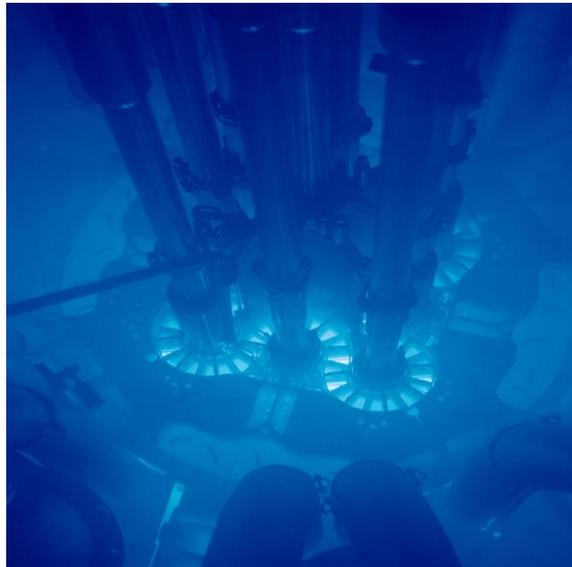
- In Materie ist die Lichtgeschwindigkeit um den Brechungsindex reduziert
- Ein geladenes Teilchen, das mit einer höheren Geschwindigkeit durch das Medium fliegt erzeugt eine “Schockwelle” blauen Lichtes



# Der Cherenkov-Effekt

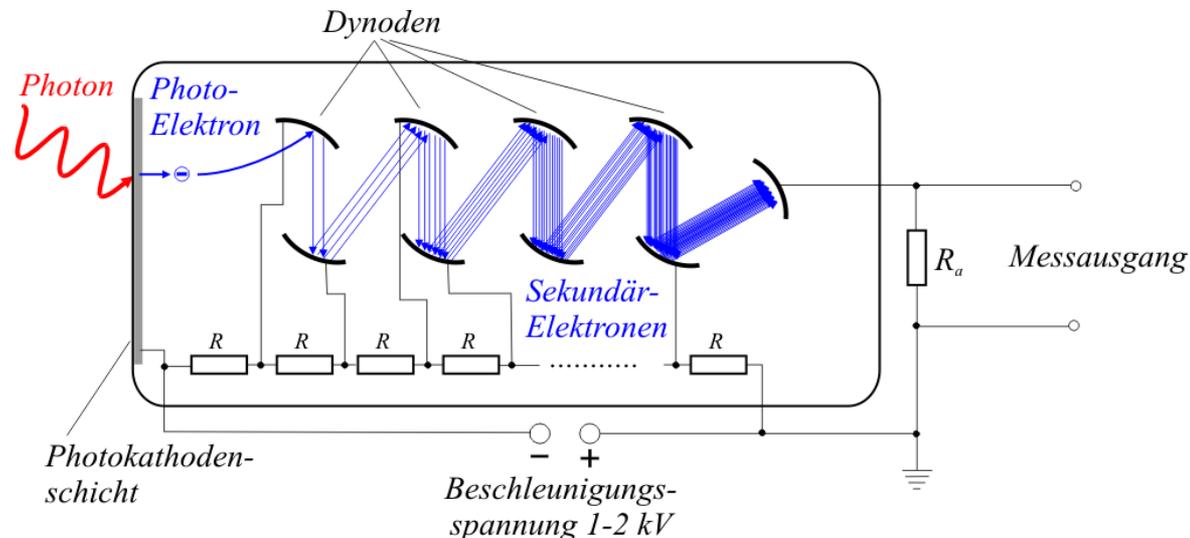
---

- 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 ( $\text{km}^3$ ) Volumen dichten, 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



# Die IceCube Idee

---

- Man suche sich ein großes ( $\text{km}^3$ ) Volumen dichten, 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

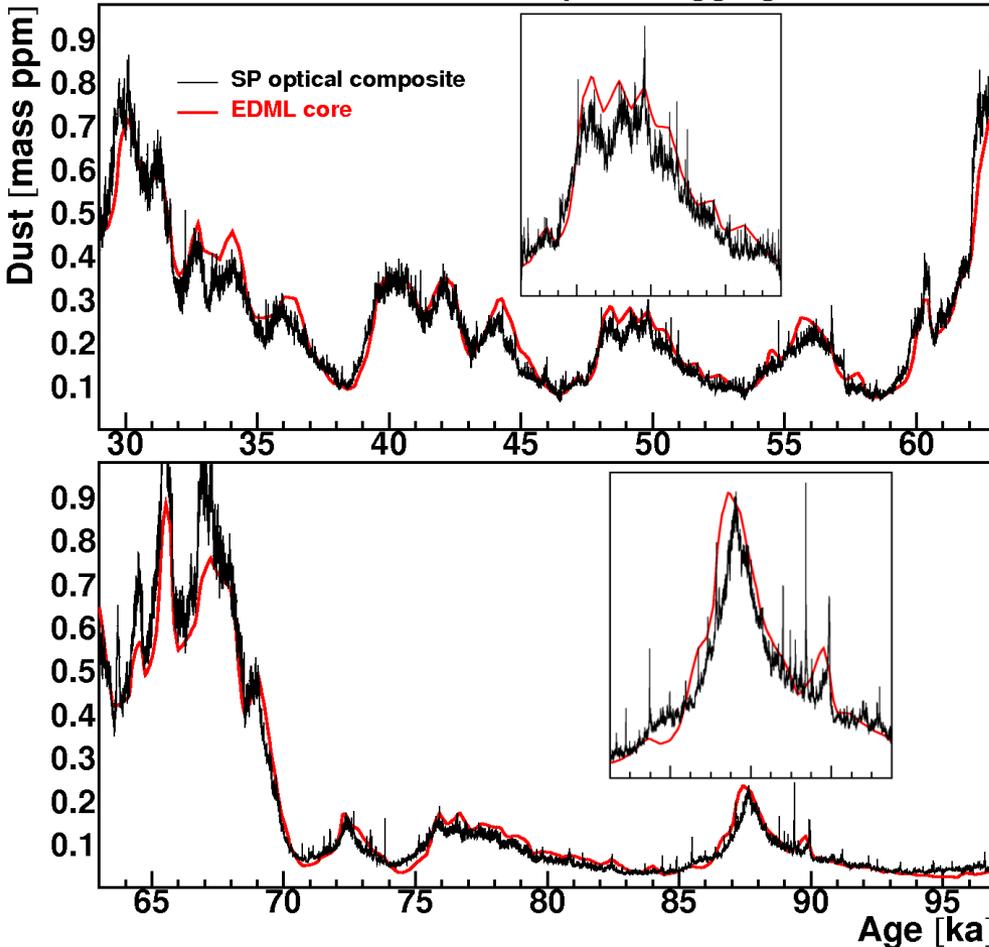
ABER: Es gab/gibt Neutrino  
Teleskope im Mittelmeer  
(ANTARES, KM3NeT)

# Der Südpol



# Das Eis

Core dust vs. Optical logging



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

## Absorptionslänge:

Leitungswasser: 2 m

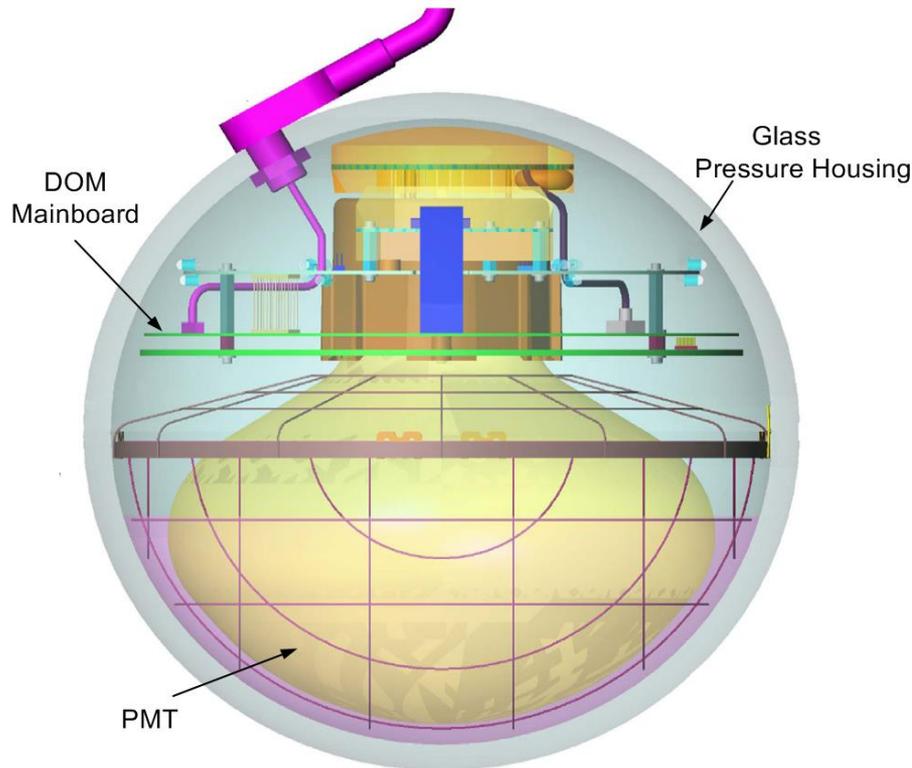
Destilliertes Wasser: 8 m

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

50 m

Ice Top

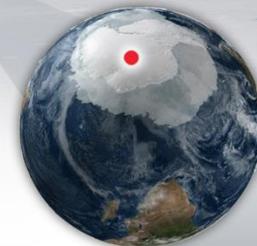


## IceCube Laboratory

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

1450 m

86 strings of DOMs,  
set 125 meters apart



## Amundsen-Scott South Pole Station, Antarctica

A National Science Foundation-managed research facility



## Digital Optical Module (DOM)

5,160 DOMs  
deployed in the ice

2450 m

IceCube  
detector

DeepCore

DOMs  
are 17  
meters  
apart

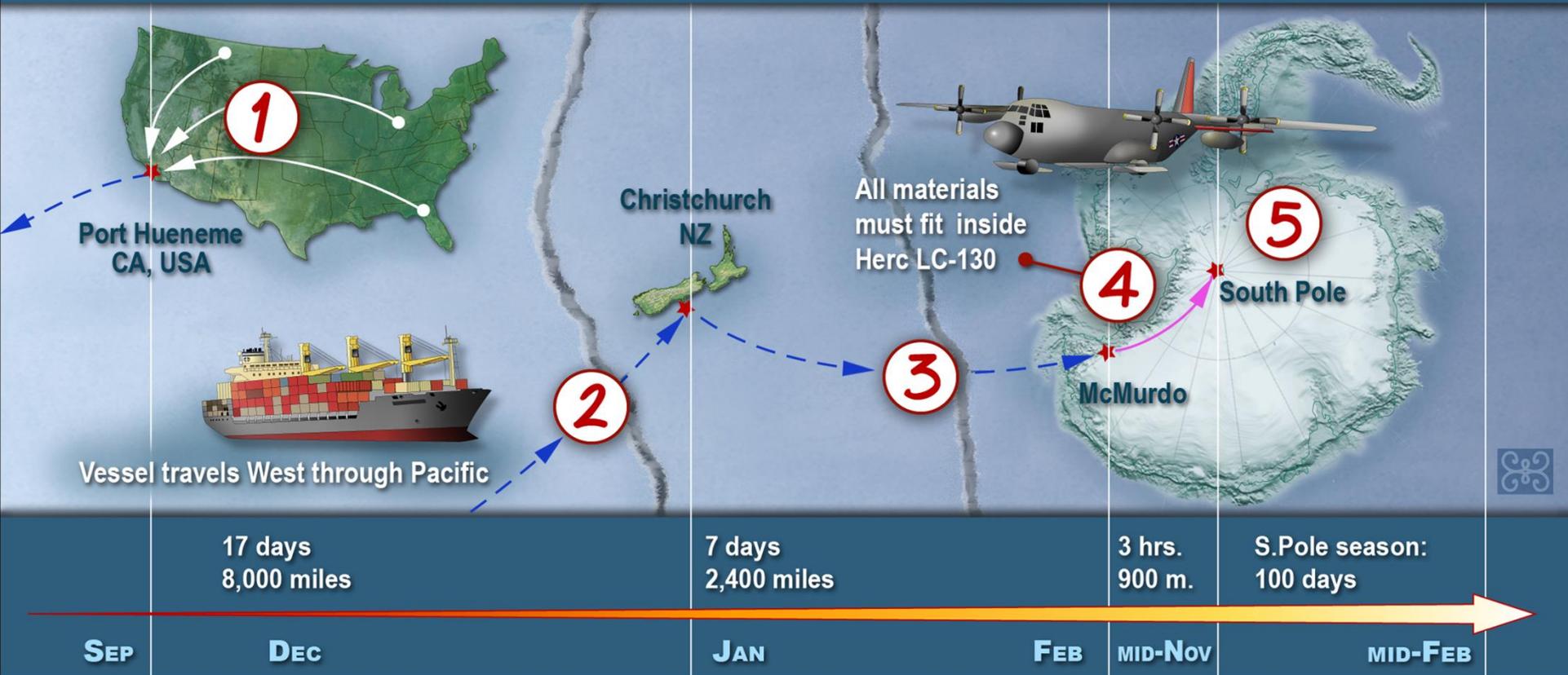
60 DOMs  
on each  
string

Antarctic bedrock



# Der Transport

## TRANSPORTING MATERIALS TO THE SOUTH POLE



# LC130-Hercules

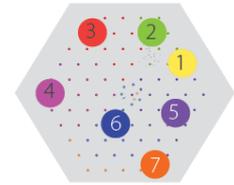
- ~10 aktive Flugzeuge
- Baujahr ~1956





## 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**

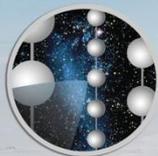




# IceCube Bau

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





**ICECUBE**  
SOUTH POLE NEUTRINO OBSERVATORY

**IceTop**

50 m

IceTop



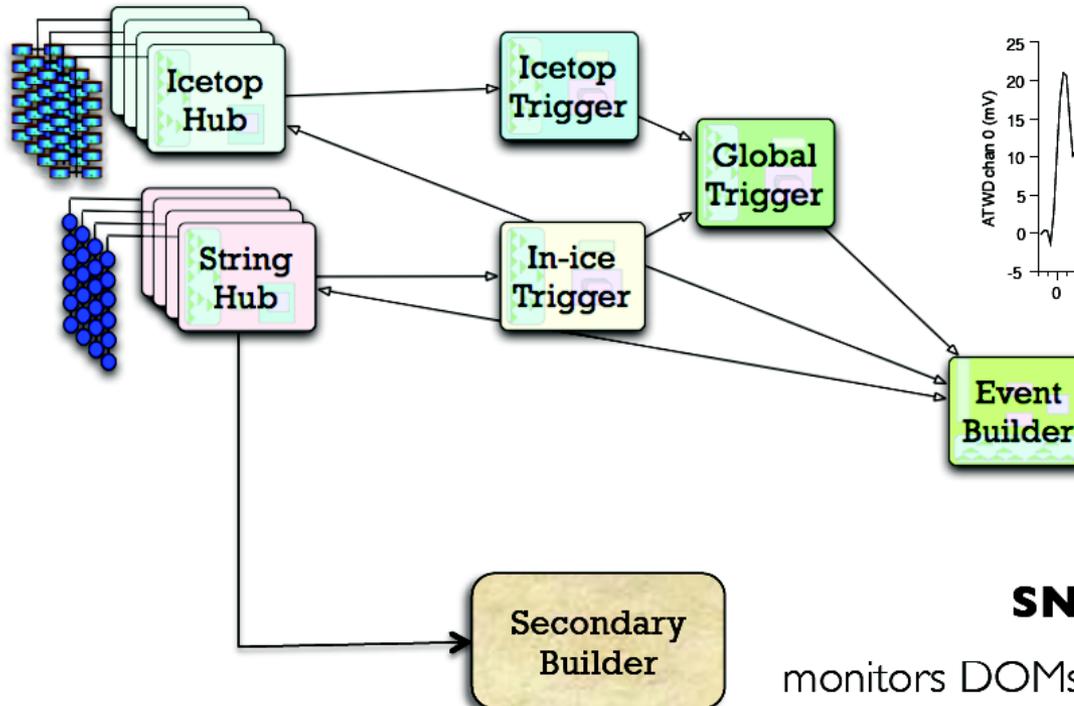
- Oberflächendetektor misst “Fußabdruck” kosmischer Strahlung → Veto?!



# IceCube Betrieb

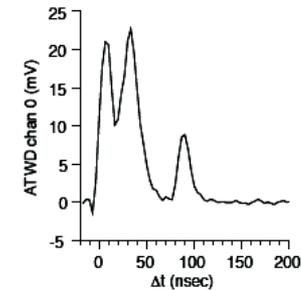


**DOMs**  
n=5404



## pDAQ

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

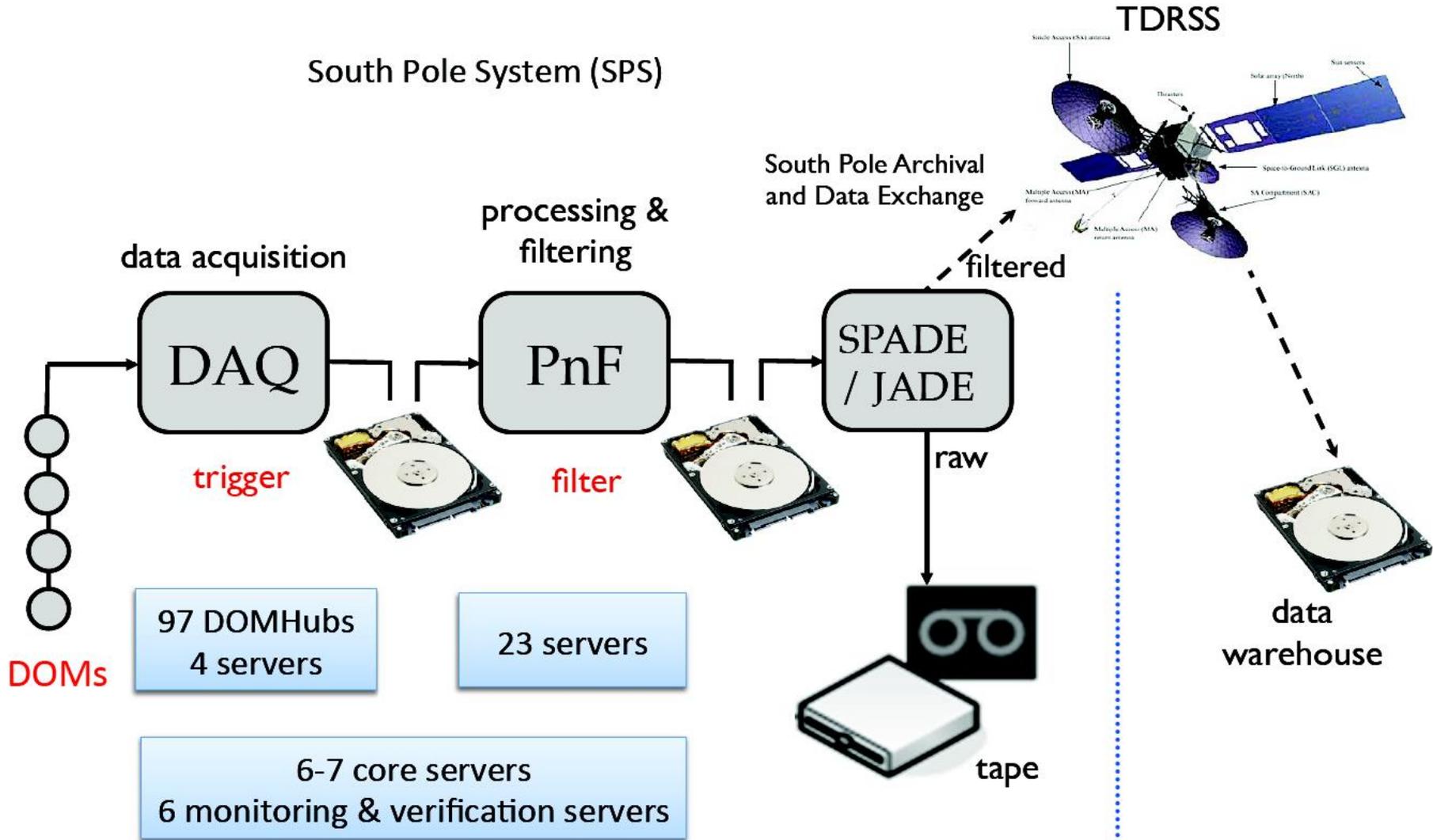


## SNDAQ

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

# Datenstrom

## South Pole System (SPS)



# Die Station

**Sommer (Tag)**  
~3 Monate



**Winter (Nacht)**  
~9 Monate



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



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

# Winterover

---



Joe Baines-Holmes,  
England



Ilya Bodo,  
USA

---

# 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.wisc.edu



# THE ICECUBE COLLABORATION

 **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.wisc.edu