

# Das Rätsel der Dunklen Materie

Marc Schumann *Universität Freiburg*

CERN 70, 20.09.2024

[www.app.uni-freiburg.de](http://www.app.uni-freiburg.de)

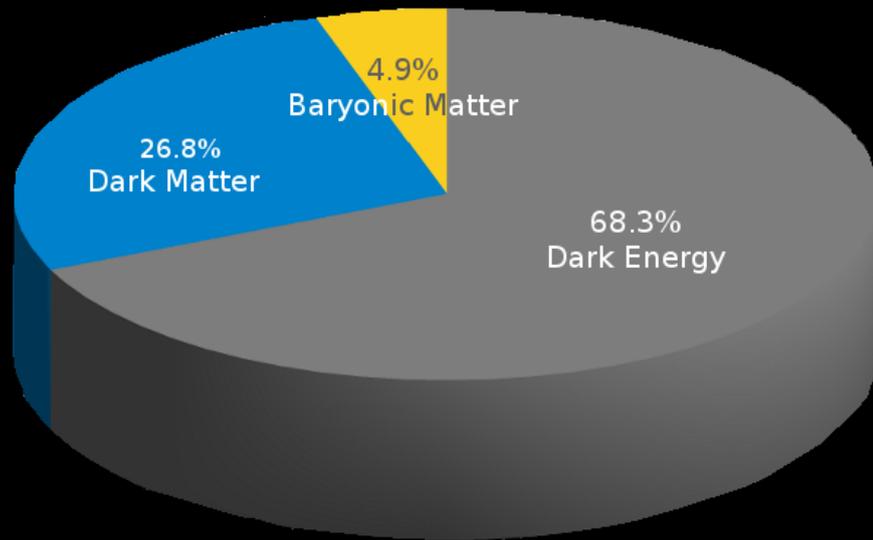


JAHRE CERN 





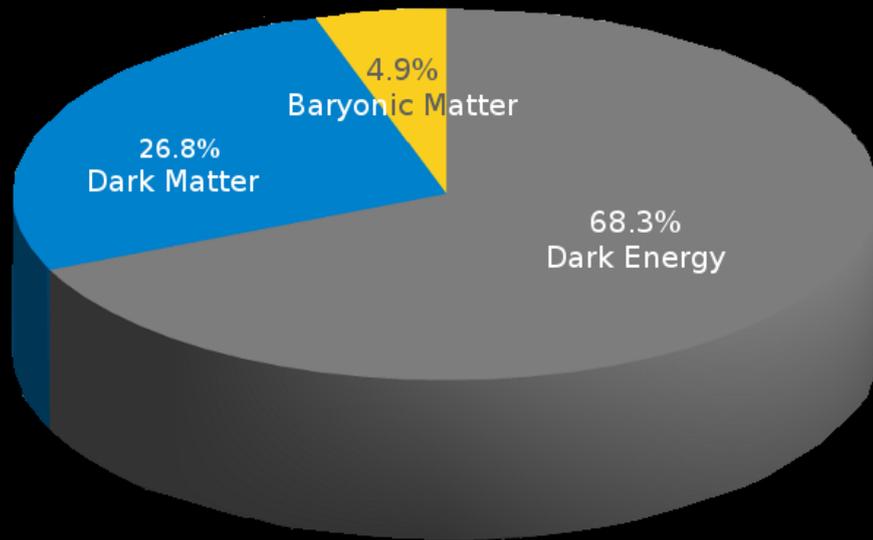




**95% des  
Universums  
ist dunkel!**



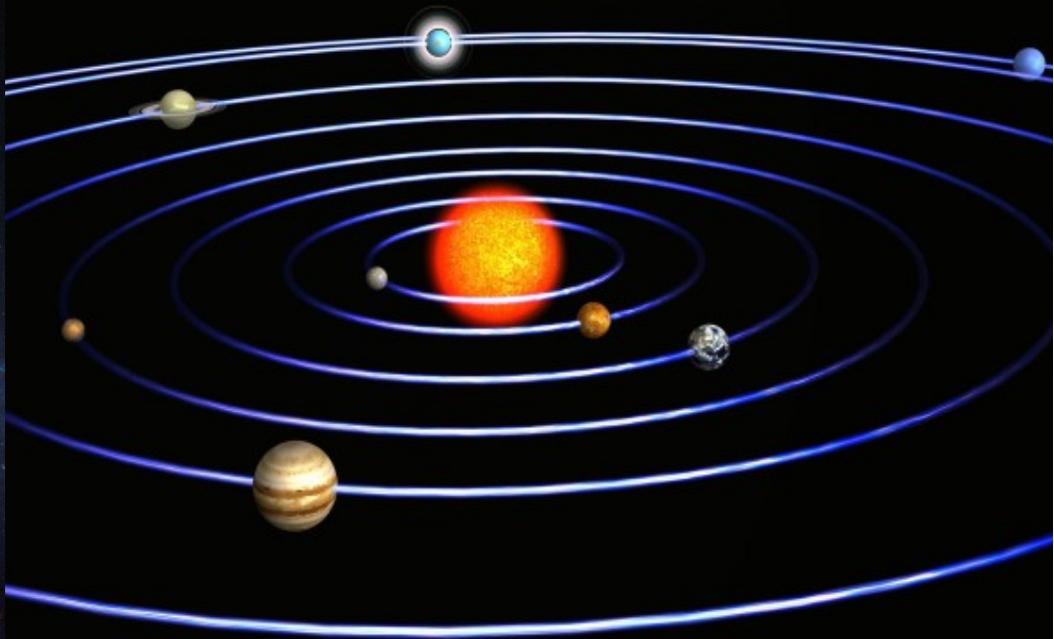
Dunkle Energie????

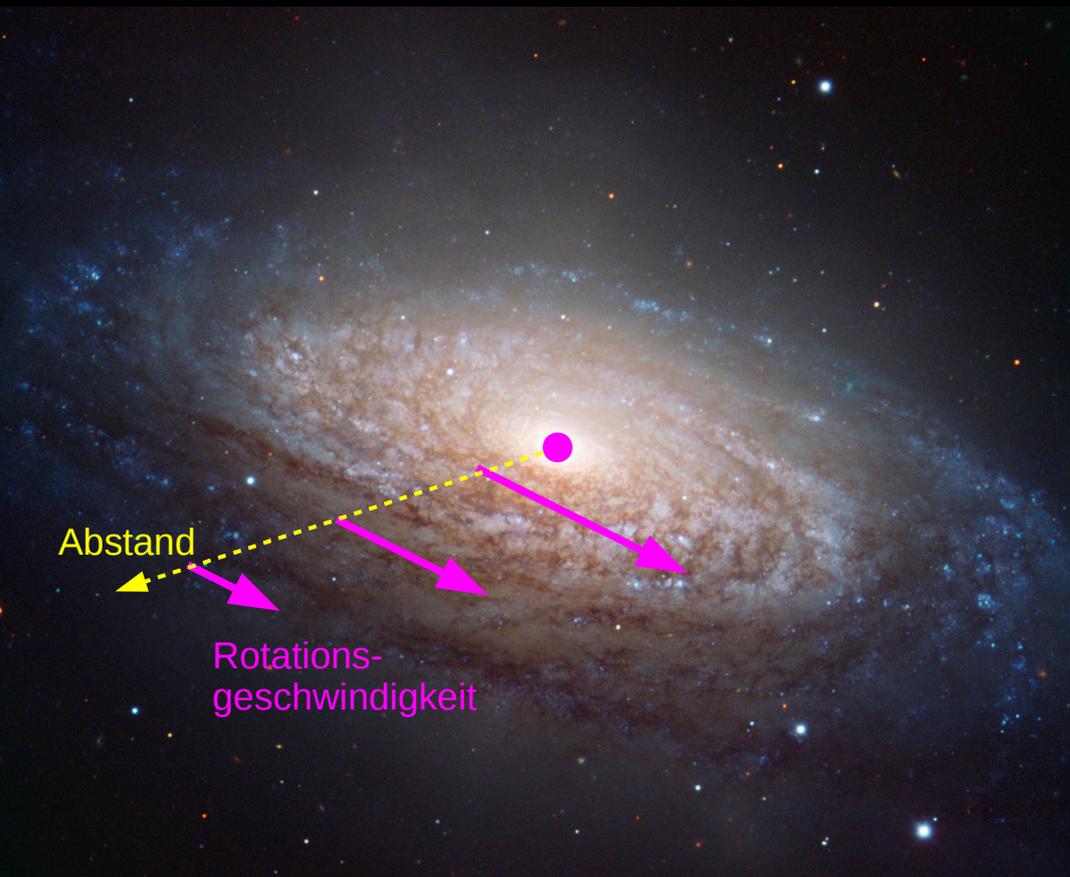


**etwa 100'000 Dunkle Materie Teilchen durchqueren einen  $\text{cm}^2$  pro Sekunde**

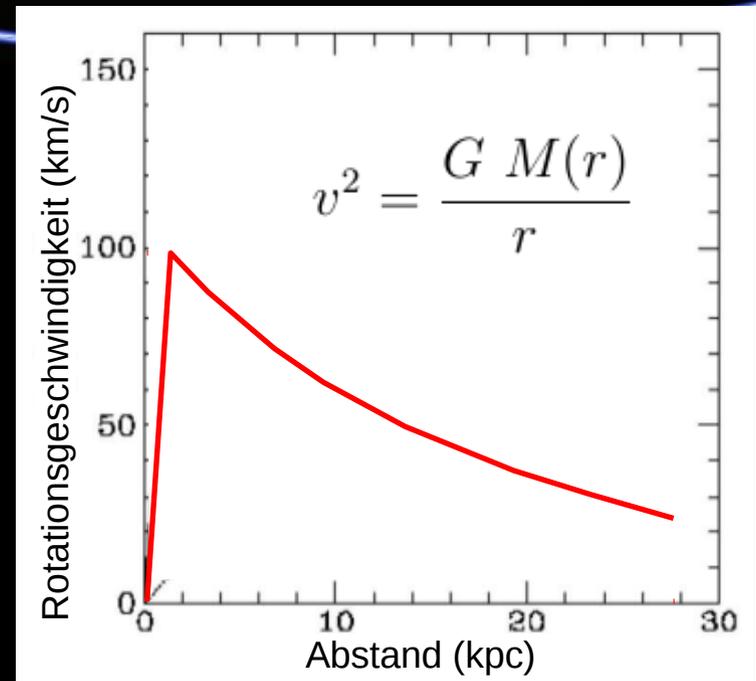
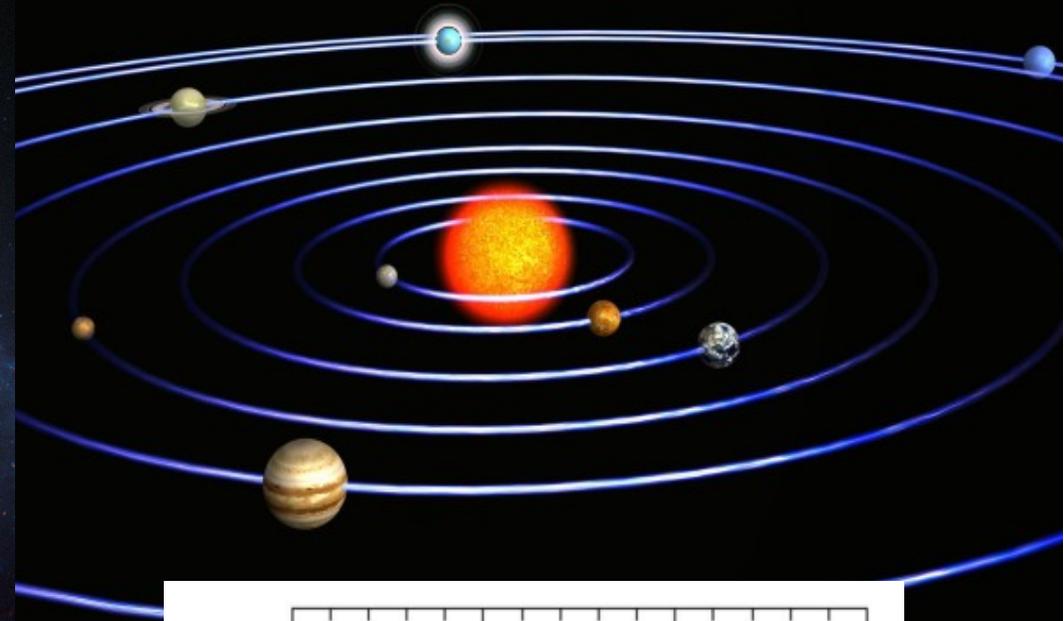


**Woher wissen wir,  
dass es Dunkle Materie gibt?**





## Erwartung: Kepler Rotation (wie im Sonnensystem)





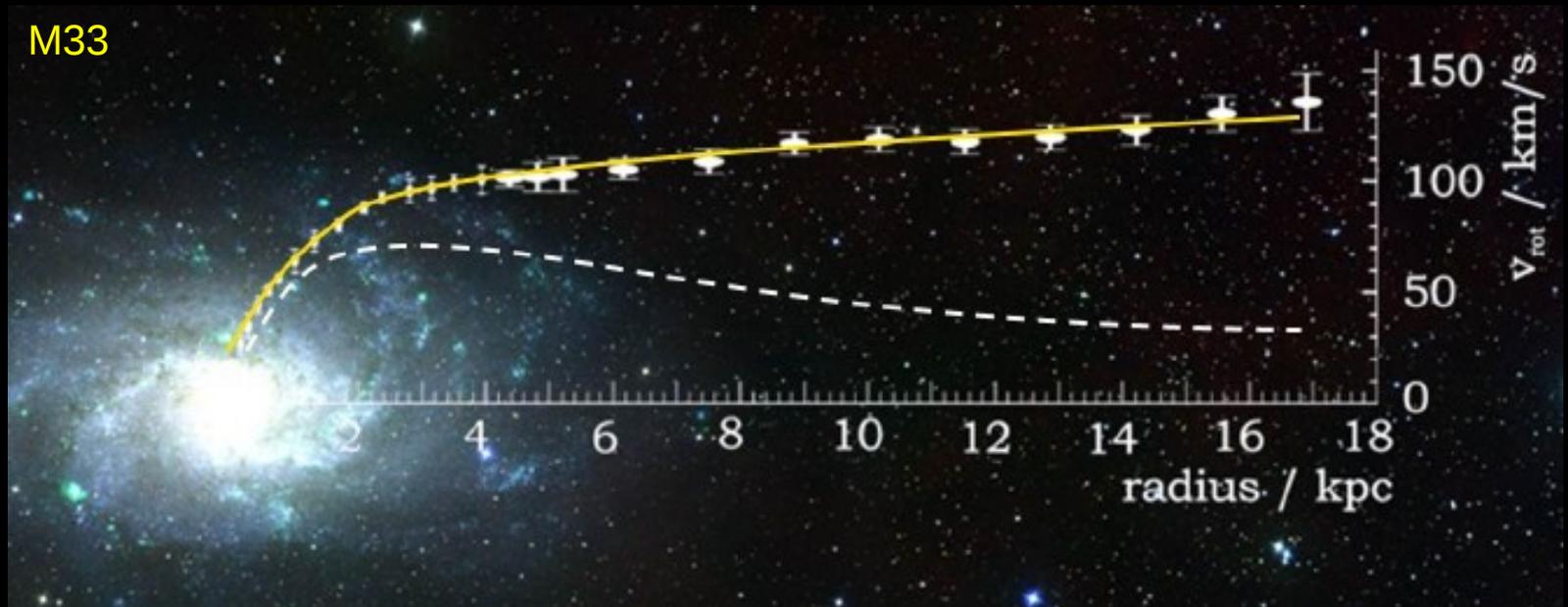
Erwartung



Beobachtung

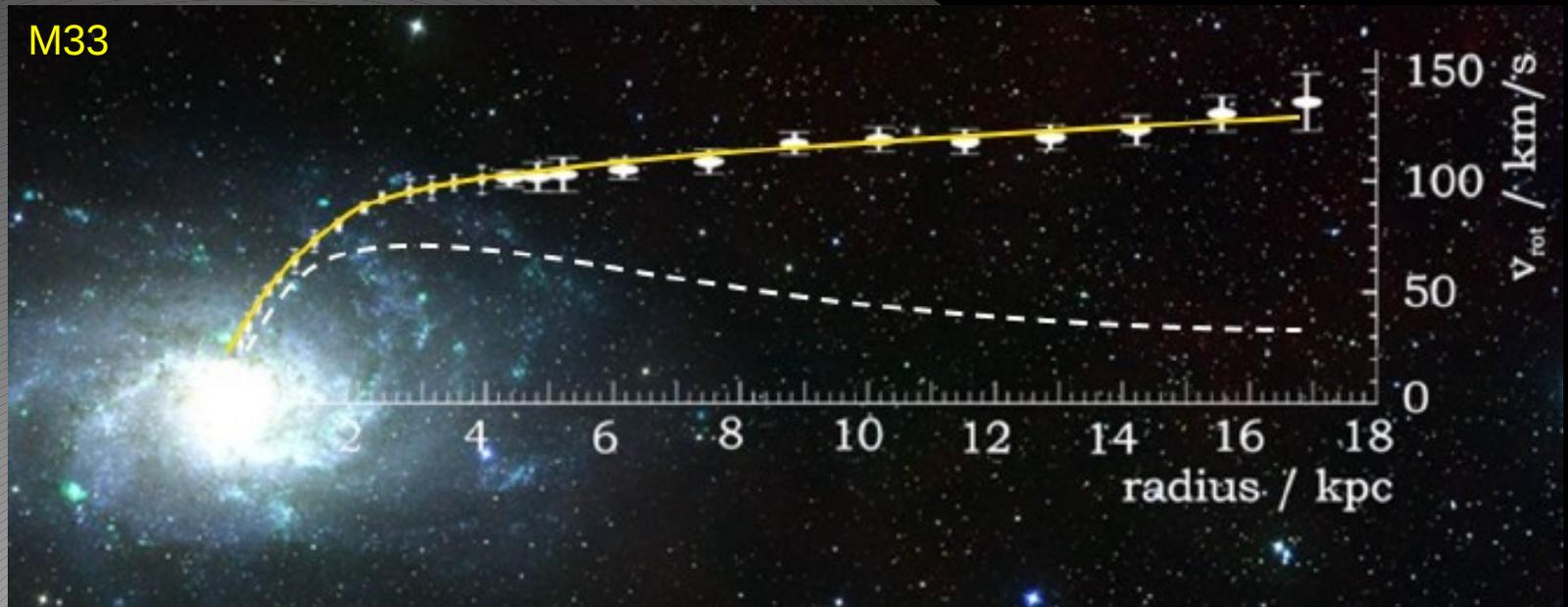
# Galaktische Rotationskurven

Messung: flaches Rotationsprofil... bis weit jenseits der Sterne



# Galaktische Rotationskurven

Messung: flaches Rotationsprofil... bis weit jenseits der Sterne



Galaxie ist in „Halo“  
aus Dunkler Materie  
eingebettet



# Galaxienhaufen Abell 1689

Entfernung: 2.2 Milliarden Lichtjahre



# Gravitationslinsen



# Galaxienhaufen Abell 1689

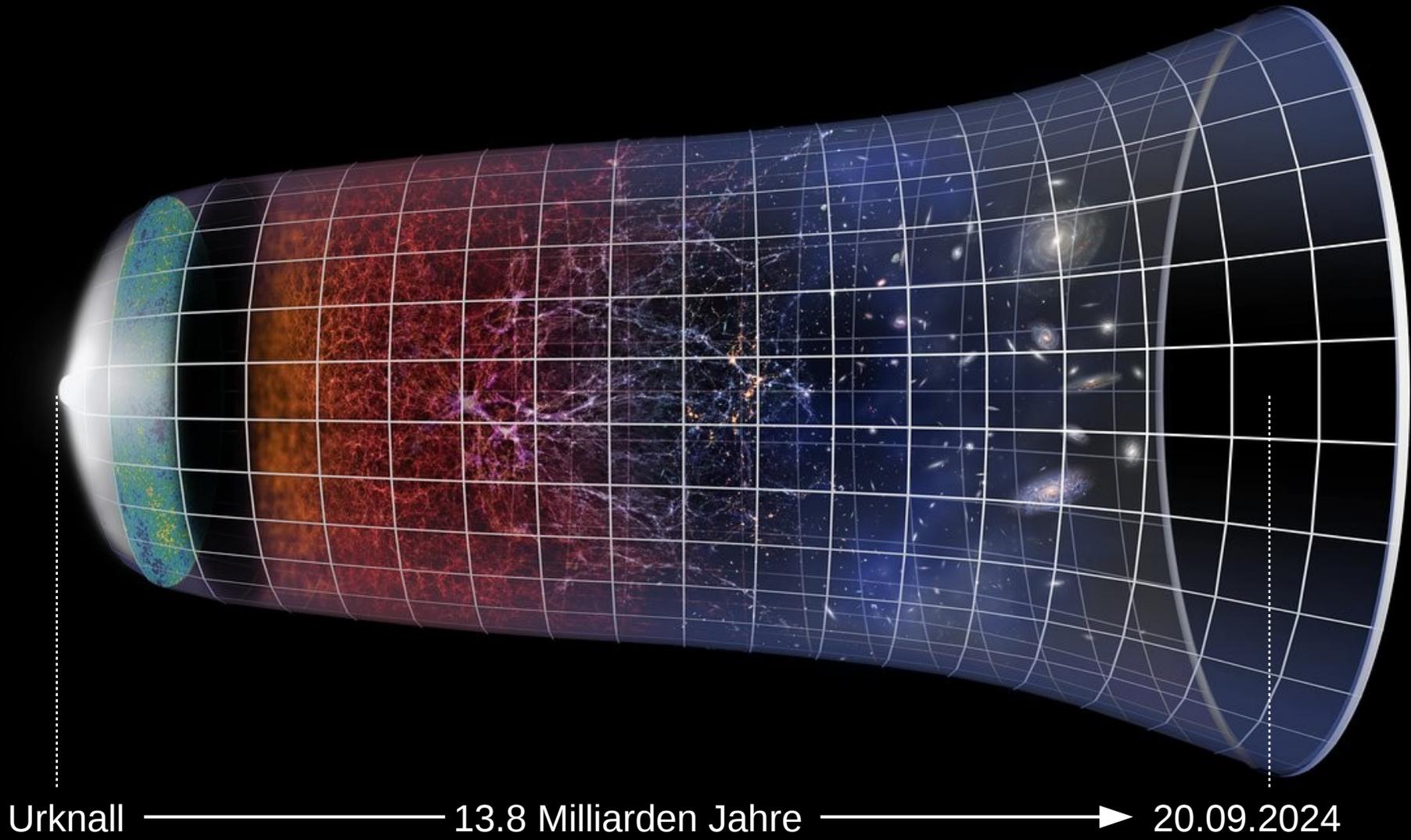
Entfernung: 2.2 Milliarden Lichtjahre

Materie

The word 'Materie' is written in white text on the left side of the image. Four white lines radiate from this text to different locations within the galaxy cluster, pointing towards bright, distorted background galaxies. This visualizes the concept of matter distribution and its gravitational influence on light.

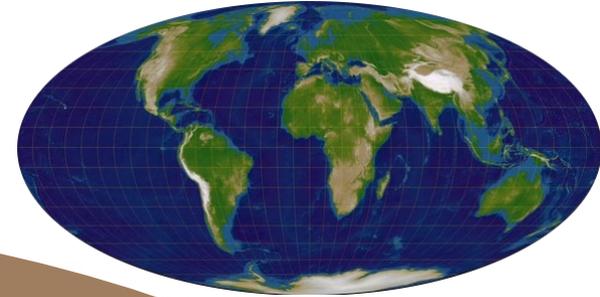
Form und Verteilung  
der gravitativ verzerrten  
Hintergrundgalaxien lassen  
sich nur durch **Dunkle Materie**  
im Galaxienhaufen erklären

# Die Entwicklung des Universums



# Kosmischer Mikrowellenhintergrund: $T=2.7\text{K}$

= Nachleuchten des heißen Urknalls;



Temperatur:  $2.7\text{ K}$  ( $= -270.45\text{ °C}$ )

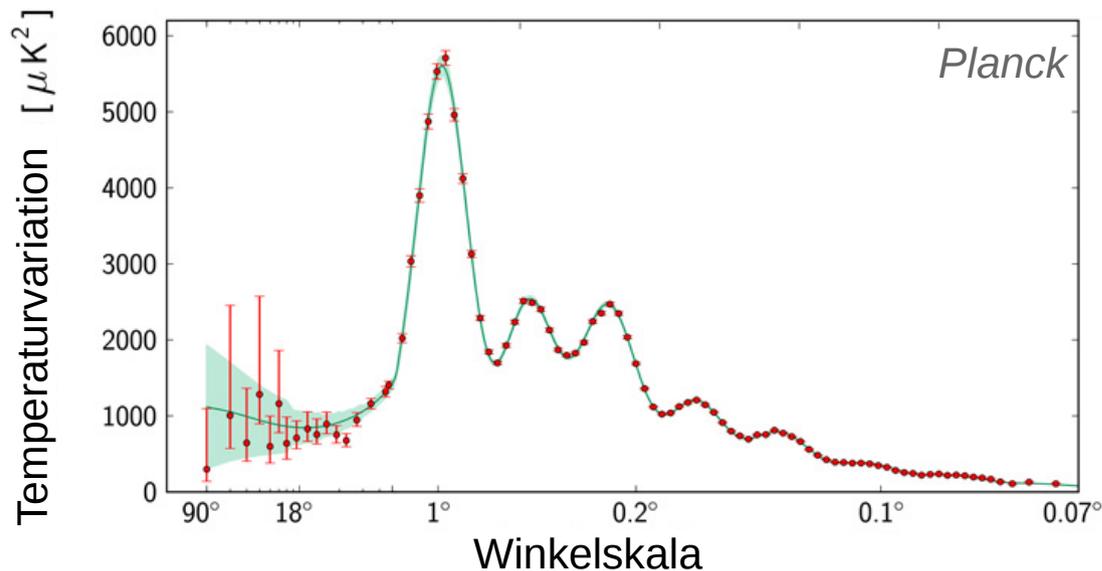
*Planck*

# Kosmischer Mikrowellenhintergrund: $T=2.7\text{K}$

= Nachleuchten des heißen Urknalls; Temperaturunterschiede  $\sim 10^{-5}$

blau – heisser  
rot – kälter

Typische  $T$ -Variation auf typischer Winkelskala



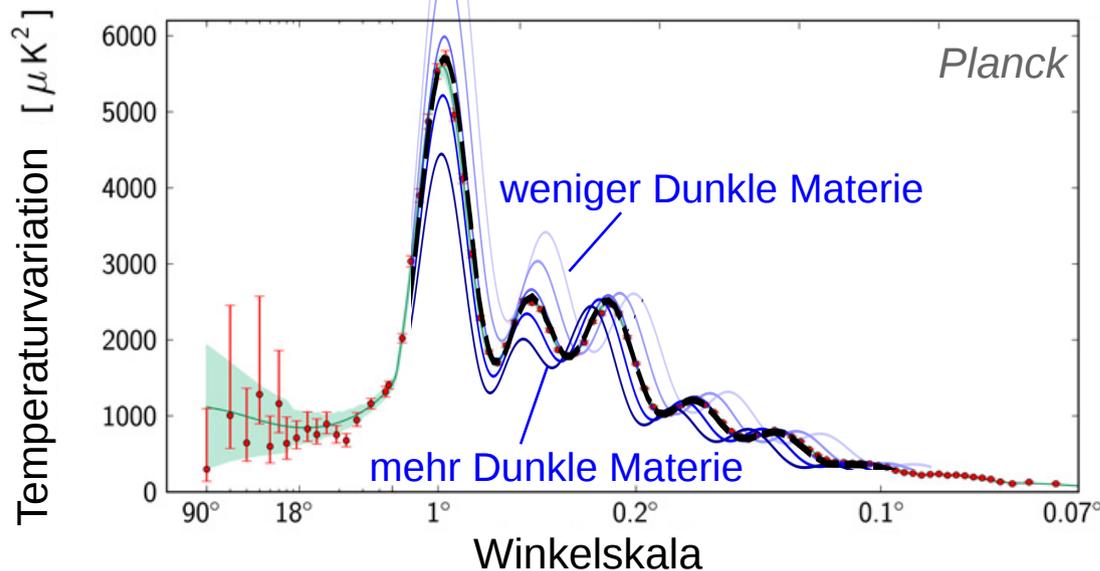
Planck

# Kosmischer Mikrowellenhintergrund: $T=2.7\text{K}$

= Nachleuchten des heißen Urknalls; Temperaturunterschiede  $\sim 10^{-5}$

blau – heißer  
rot – kälter

Typische  $T$ -Variation auf typischer Winkelskala

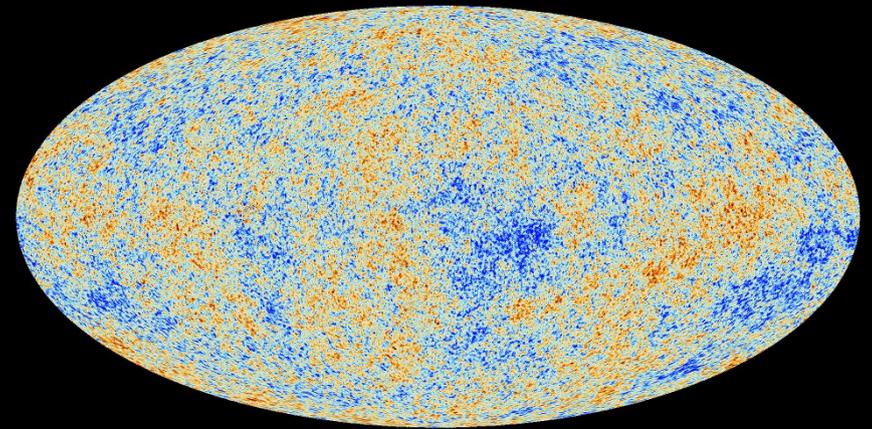
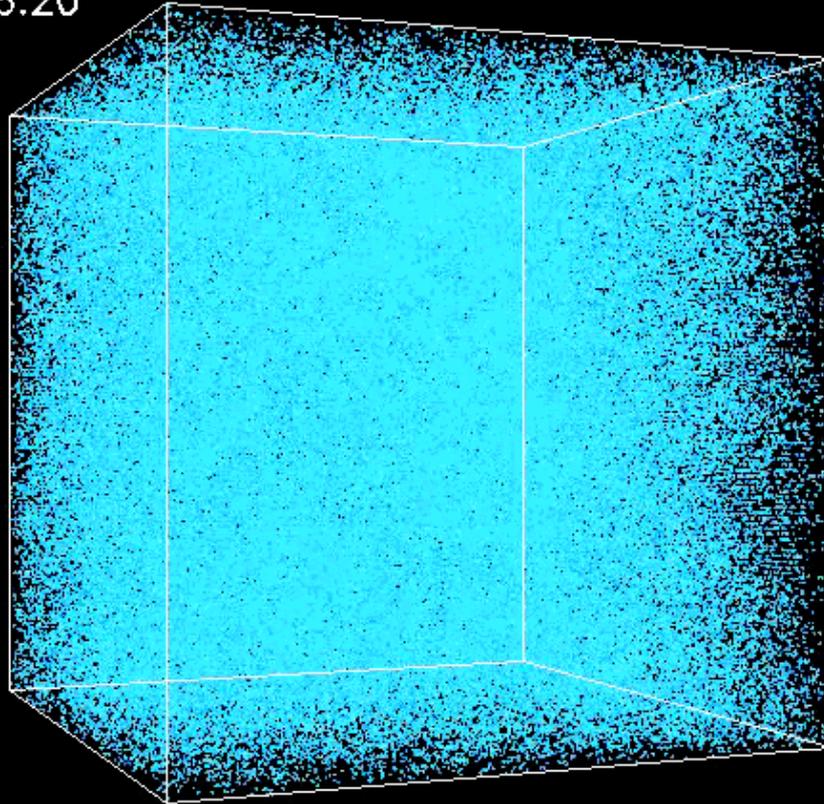


Planck

# Dunkle Materie formt das Weltall

~40M years  
after big bang

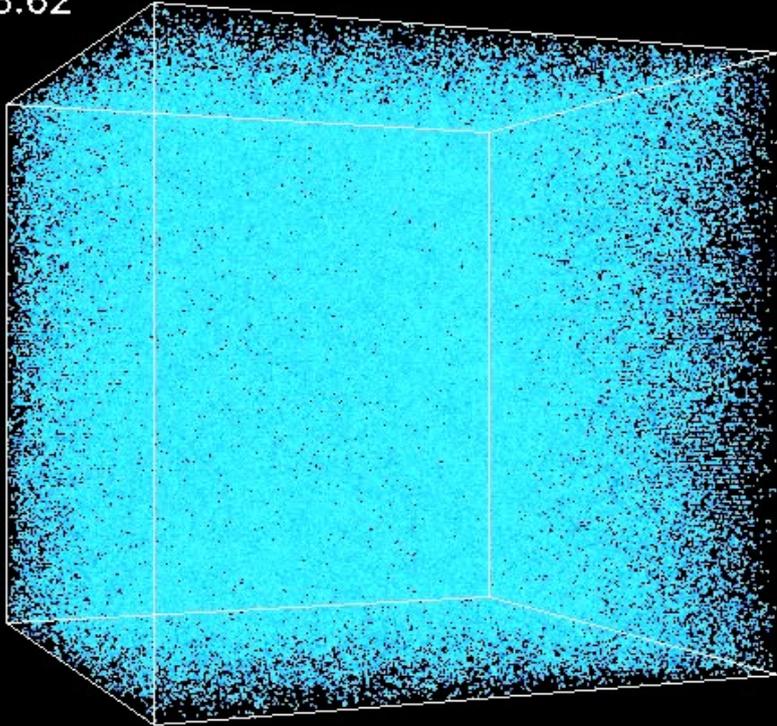
$Z=26.20$



<http://cosmicweb.uchicago.edu>

# Dunkle Materie formt das Weltall

$Z=28.62$

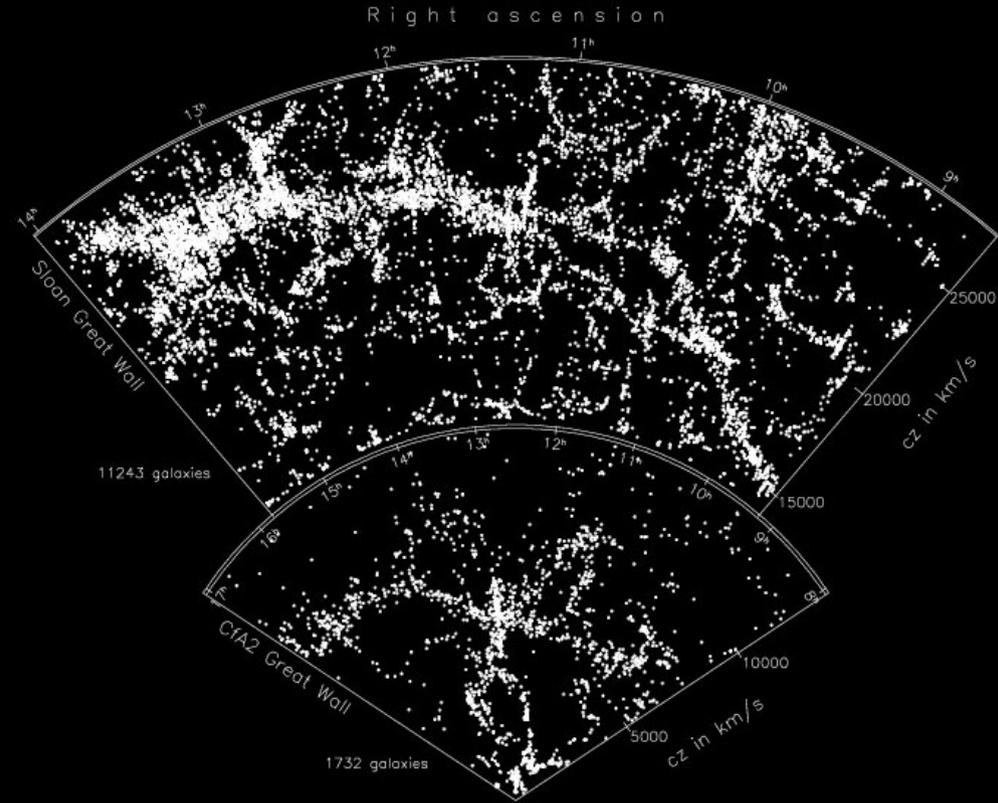
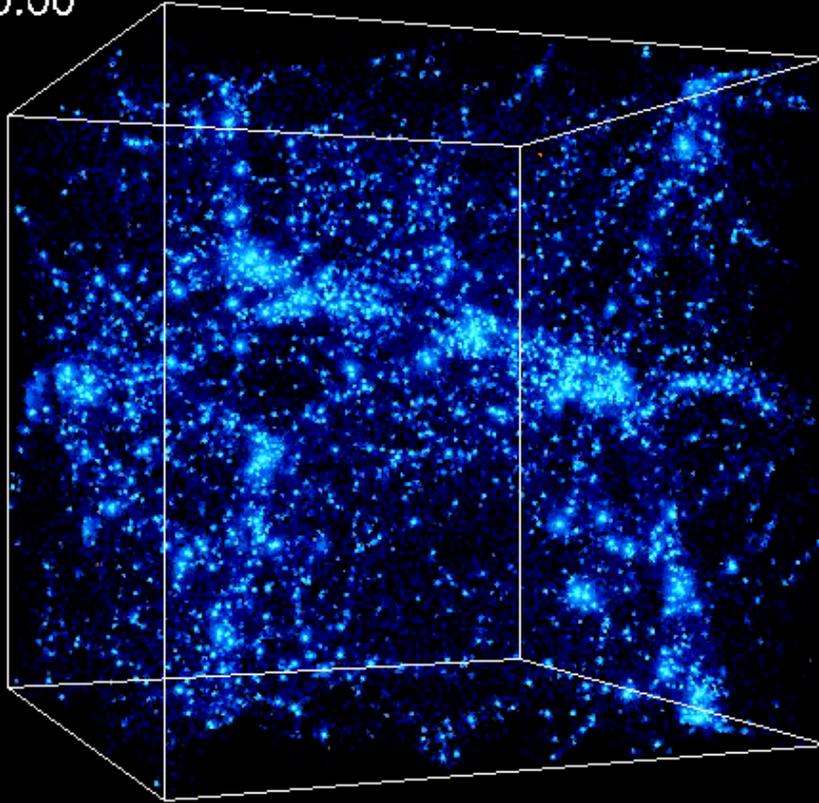


<http://cosmicweb.uchicago.edu>

# Dunkle Materie formt das Weltall

now

$Z = 0.00$

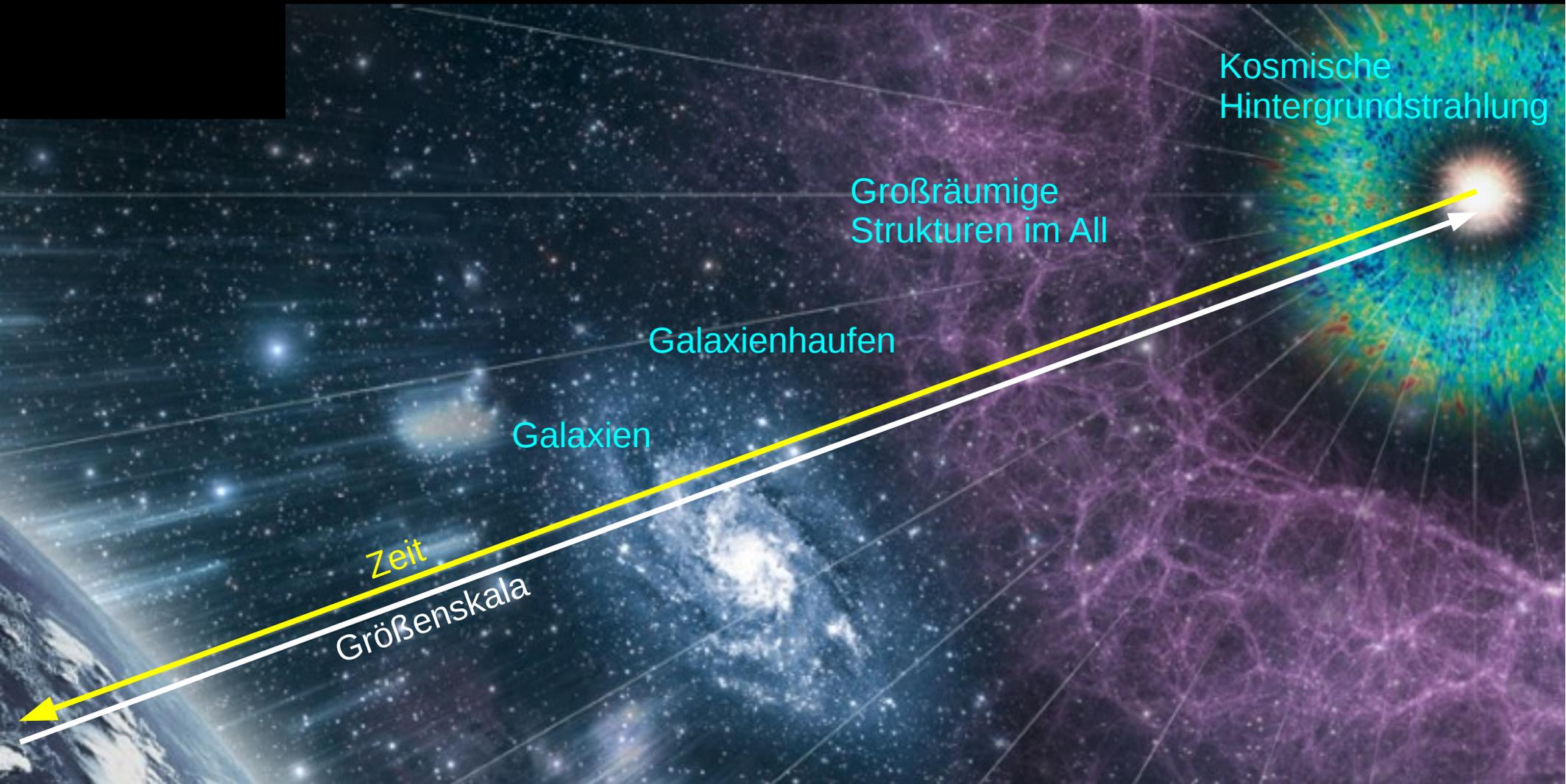


<http://cosmicweb.uchicago.edu>

Simulation

Beobachtung (SDSS)

# Hinweise für DM auf allen Skalen



<http://www.cosmology.ethz.ch>

# WANTED

FOR MOVING THE UNIVERSE

## DARK MATTER

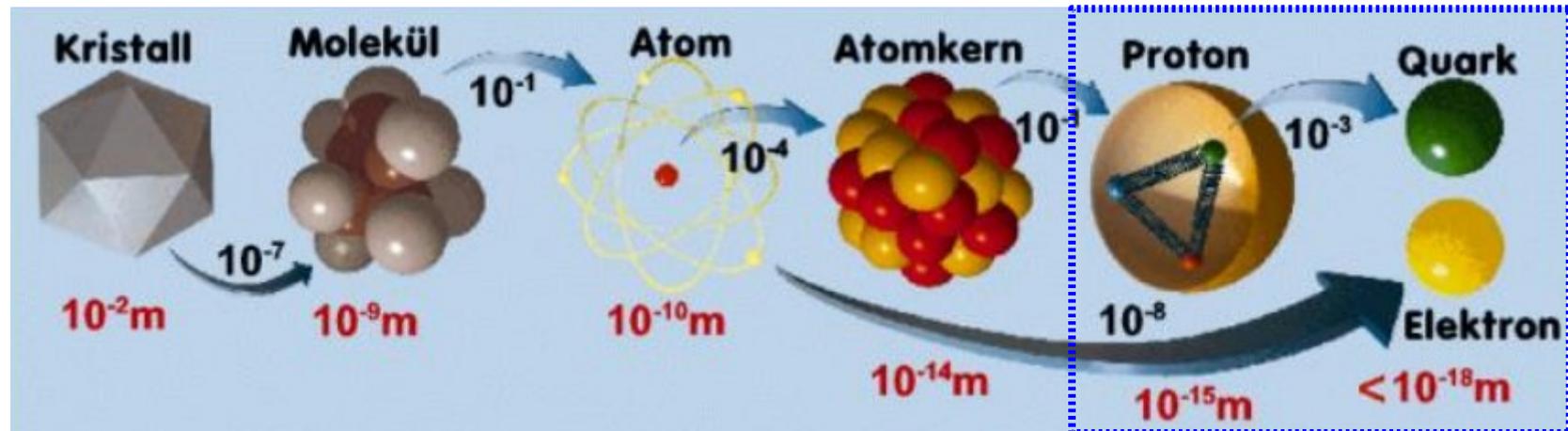
Gesucht: Materie mit diesen Eigenschaften:

- „unsichtbar“
- „kalt“ (= „langsam“)
- kollidiert nicht/kaum
- stabil

REWARD: NOBLE PRICE?

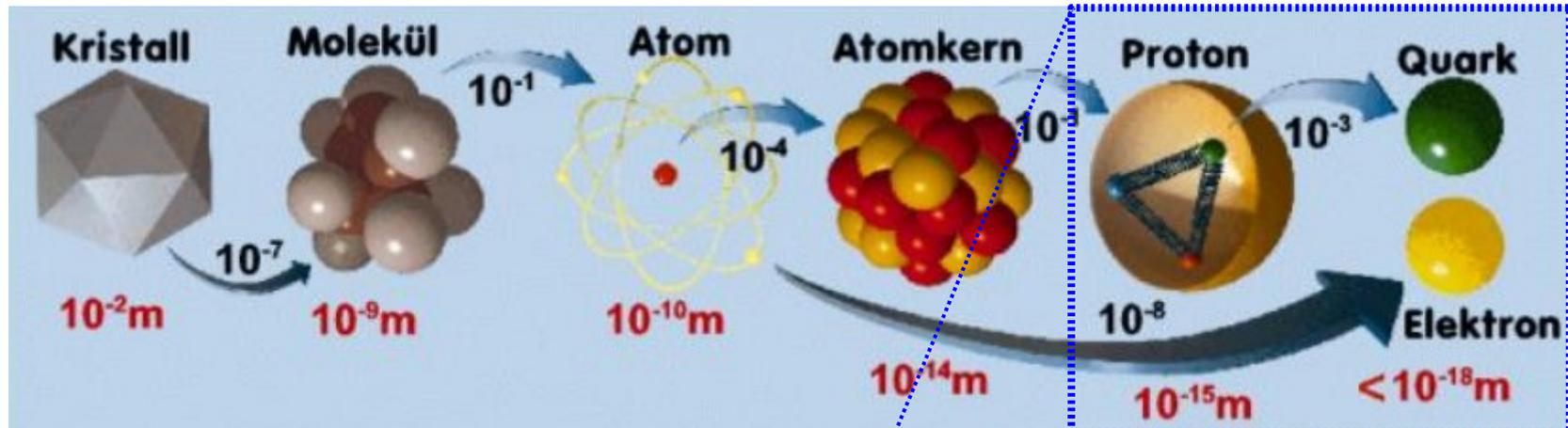


# Materie ist aus Teilchen aufgebaut



Teilchenphysik

# Materie ist aus Teilchen aufgebaut

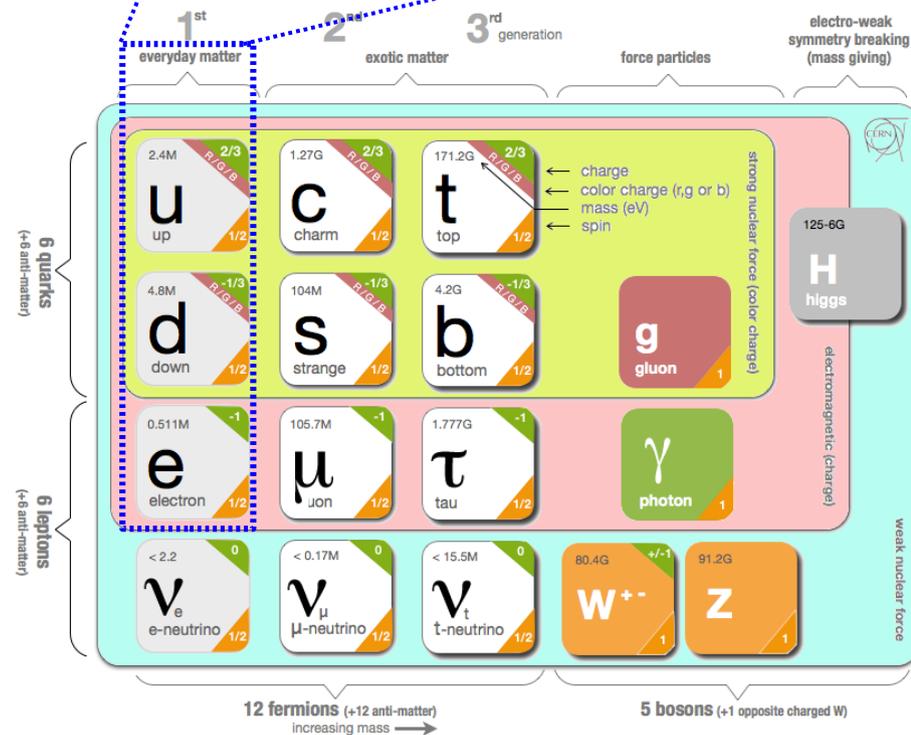


## Teilchenphysik

Erforschung der Welt der Elementarteilchen mit **Teilchenbeschleunigern**.

Das **CERN** ist heute das weltgrößte Beschleunigerlabor.

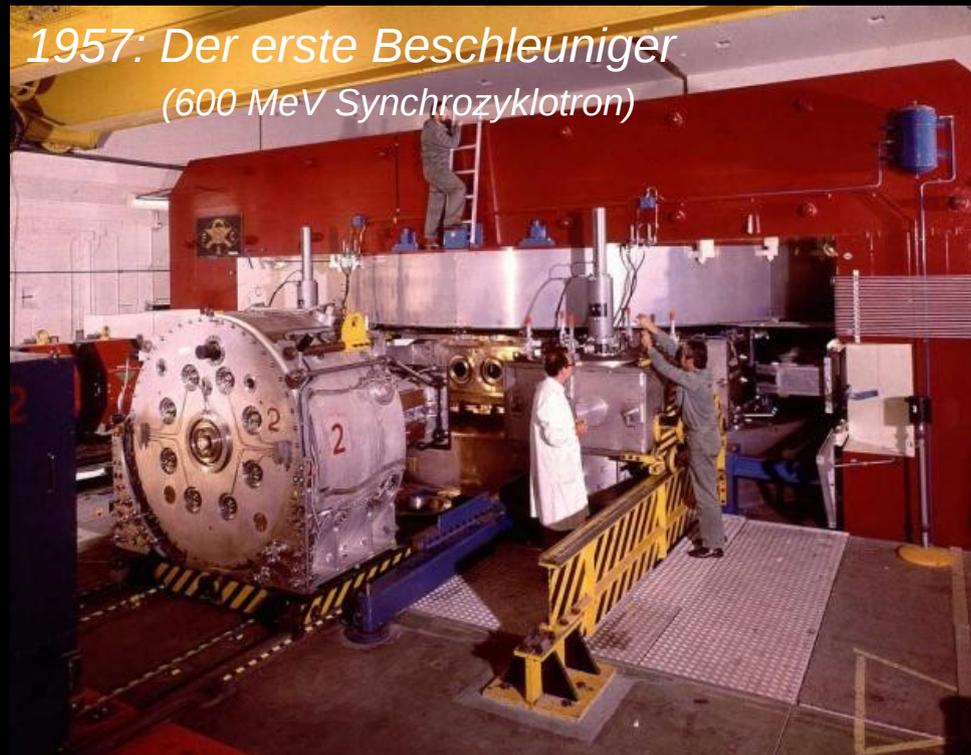
Gründung vor 70 Jahren.



17.03.1954: Baubeginn



1957: Der erste Beschleuniger  
(600-MeV Synchrozyklotron)



29.09.1954: Vertragsunterzeichnung

La sixième session du Conseil fut organisée à Paris du 29 juin au 1<sup>er</sup> juillet 1953. C'est à cette occasion que la Convention établissant l'Organisation fut signée, sous réserve de ratification, par douze Etats membres.

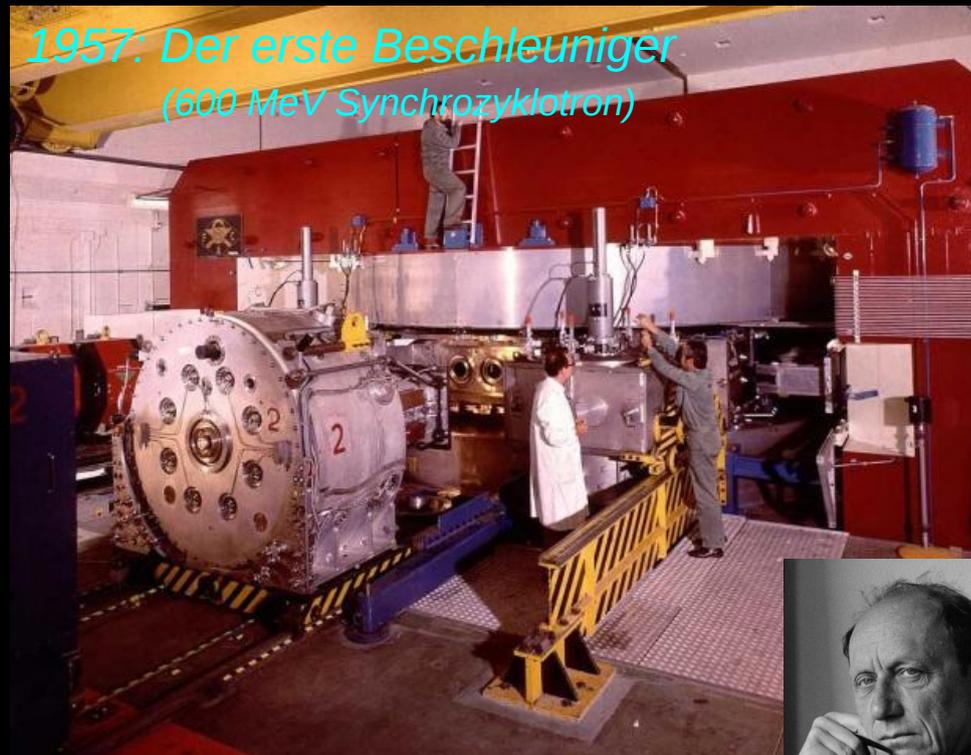
For the Italian Republic <i>For the Italian Republic</i> <i>subject to ratification</i>	For the Kingdom of Belgium <i>For the Kingdom of Belgium</i> <i>sous réserve de ratification</i>	For the Kingdom of Norway <i>For the Kingdom of Norway</i> <i>subject to ratification</i>	For the Kingdom of Sweden <i>For the Kingdom of Sweden</i> <i>subject to ratification</i>
For the Kingdom of Britain <i>For the Kingdom of Britain</i> <i>subject to ratification</i>	For the Kingdom of the Netherlands <i>For the Kingdom of the Netherlands</i> <i>subject to ratification</i>	For the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland <i>For the United Kingdom of Great Britain and Northern Ireland</i> <i>subject to ratification</i>	For the Republic of the Congo <i>For the Republic of the Congo</i> <i>subject to ratification</i>
For the Kingdom of Denmark <i>For the Kingdom of Denmark</i> <i>subject to ratification</i>	For the Kingdom of France <i>For the Kingdom of France</i> <i>subject to ratification</i>	For the Kingdom of Greece <i>For the Kingdom of Greece</i> <i>subject to ratification</i>	For the Kingdom of Spain <i>For the Kingdom of Spain</i> <i>subject to ratification</i>
For the Kingdom of Germany <i>For the Kingdom of Germany</i> <i>subject to ratification</i>	For the Kingdom of the Netherlands <i>For the Kingdom of the Netherlands</i> <i>subject to ratification</i>	For the Kingdom of the Netherlands <i>For the Kingdom of the Netherlands</i> <i>subject to ratification</i>	For the Kingdom of the Netherlands <i>For the Kingdom of the Netherlands</i> <i>subject to ratification</i>
For Italy <i>For Italy</i> <i>subject to ratification</i>	For the Kingdom of the Netherlands <i>For the Kingdom of the Netherlands</i> <i>subject to ratification</i>	For the Kingdom of the Netherlands <i>For the Kingdom of the Netherlands</i> <i>subject to ratification</i>	For the Kingdom of the Netherlands <i>For the Kingdom of the Netherlands</i> <i>subject to ratification</i>

The Sixth Session of the CERN Council took place in Paris on 29 June—1 July 1953. It was here that the Convention establishing the Organization was signed, subject to ratification, by twelve States.

17.03.1954: Baubeginn



1957: Der erste Beschleuniger  
(600 MeV Synchrozyklotron)



29.09.1954: Vertragsunterzeichnung



## universität freiburg

– 1956: Prof. W. Gentner (Freiburg) wird erster Direktor der Synchrozyklotron-Abteilung

– ...

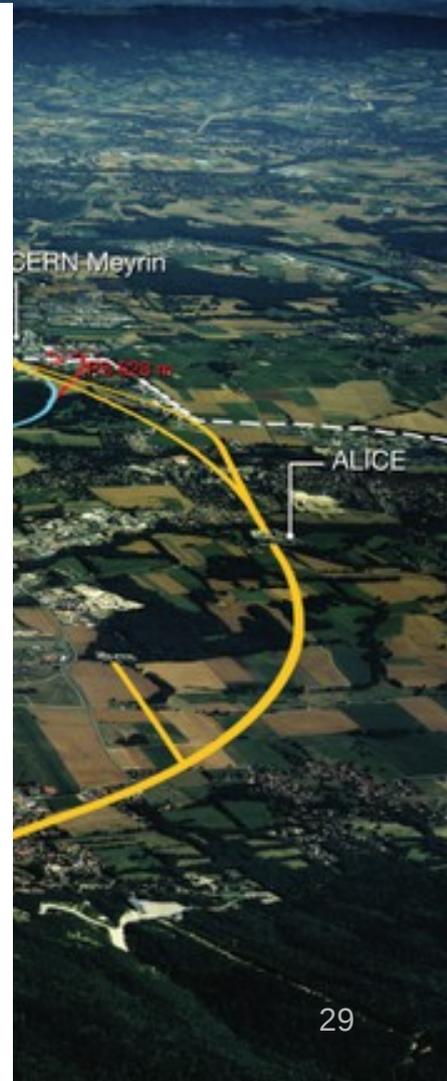
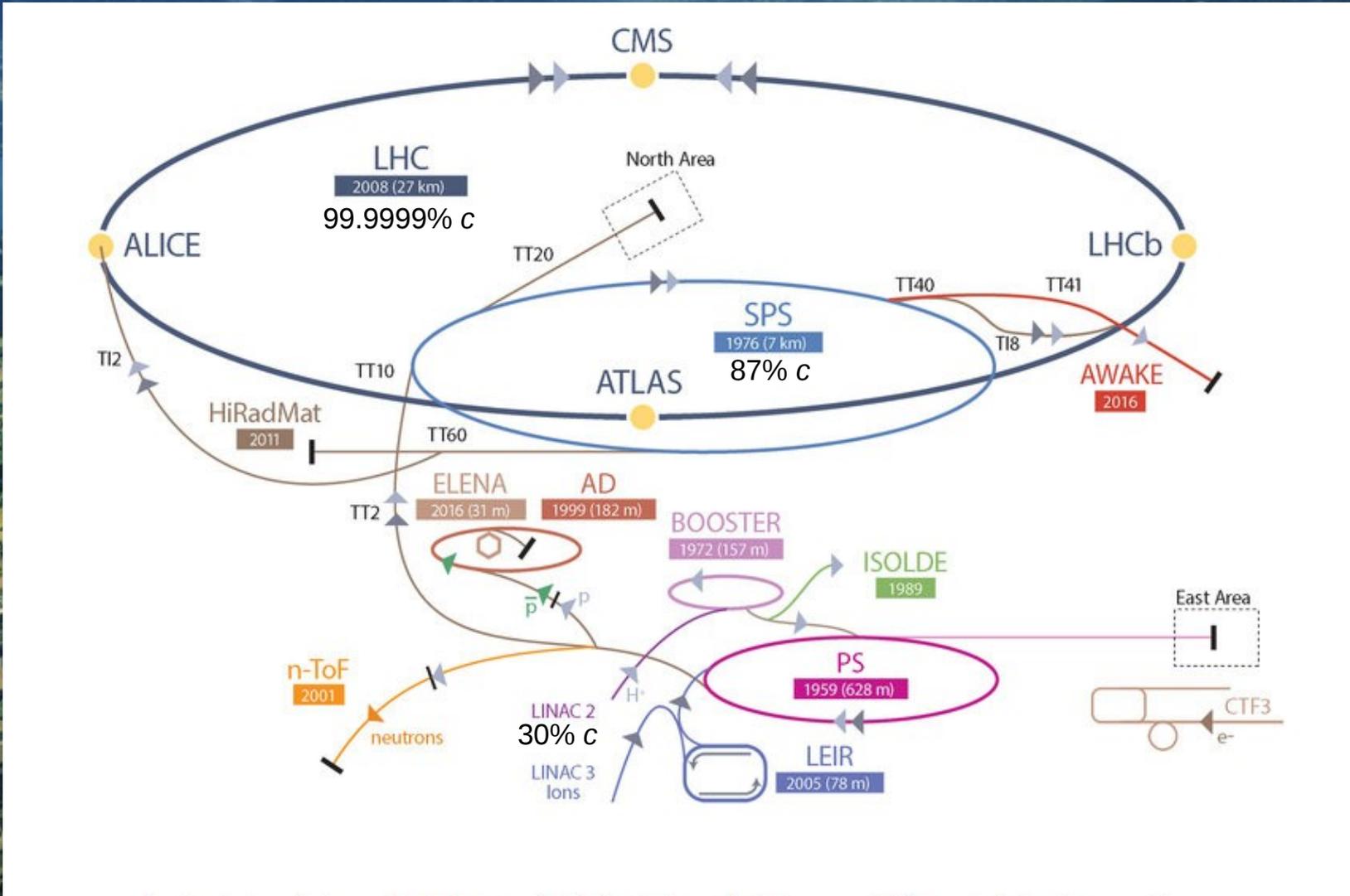
– heute: sechs Freiburger Professuren sind mit etwa **75 Wissenschaftler:innen** an CERN Experimenten beteiligt oder berechnen präzise Vorhersagen für Teilchenprozesse

# Das CERN in Genf



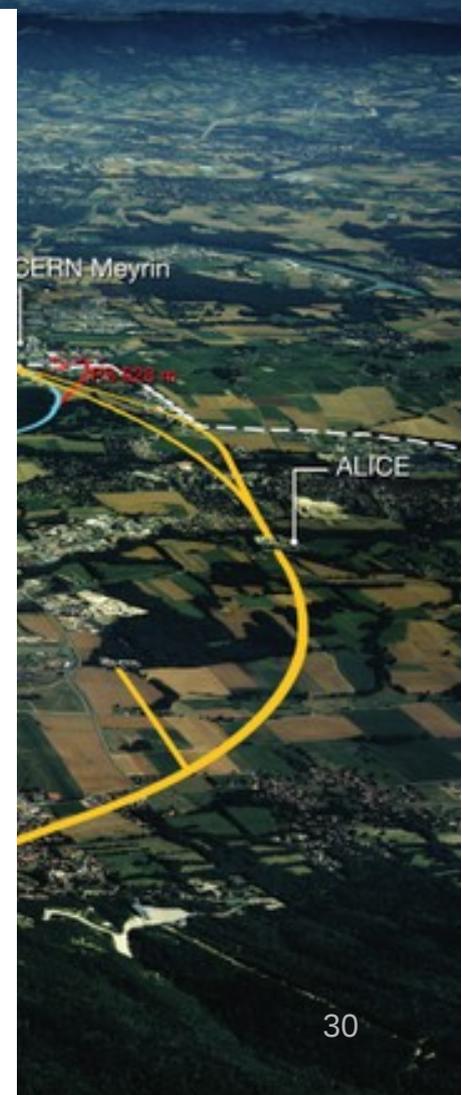
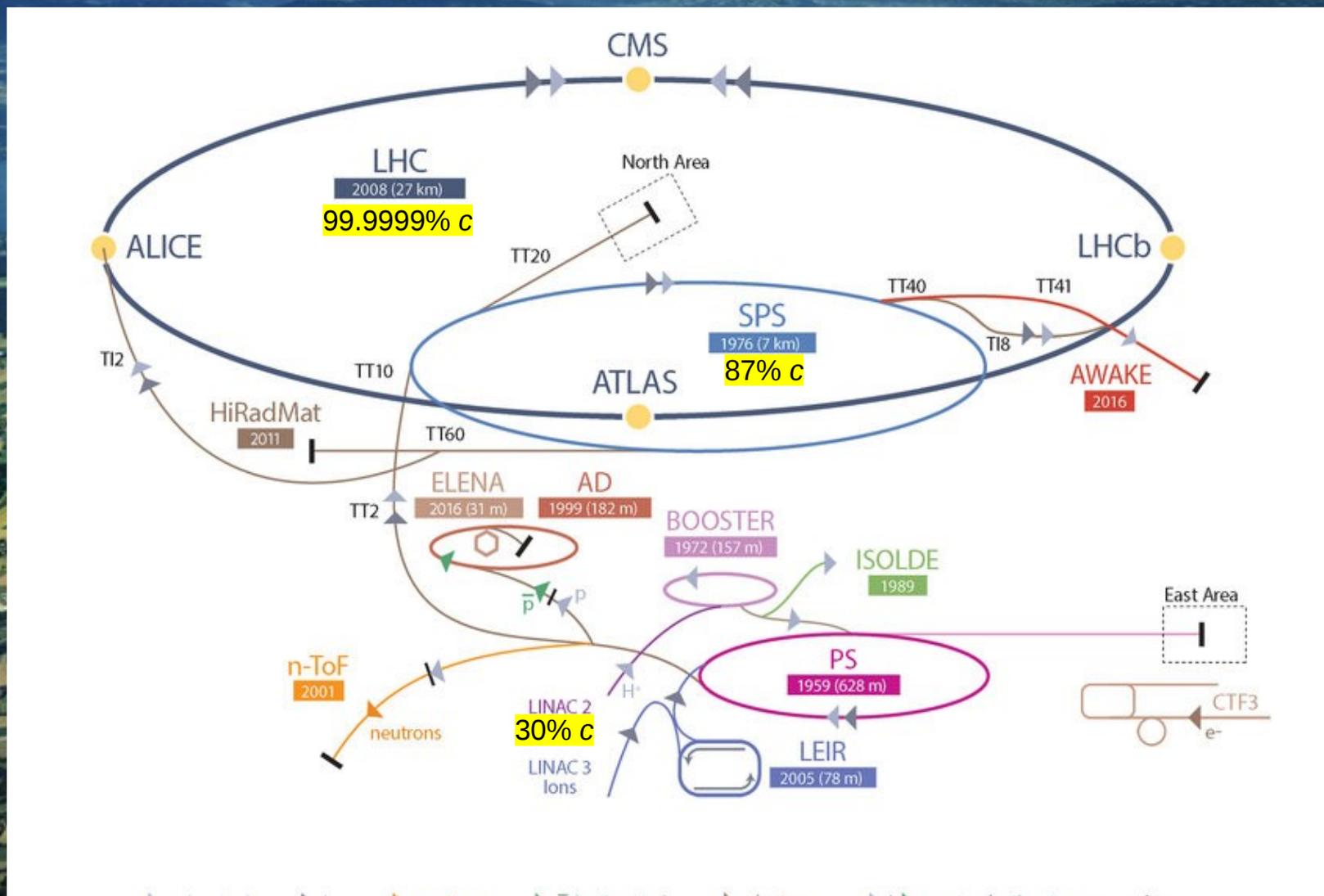
# Das CERN in Genf

→ ein riesiger Beschleunigerkomplex



# Das CERN in Genf

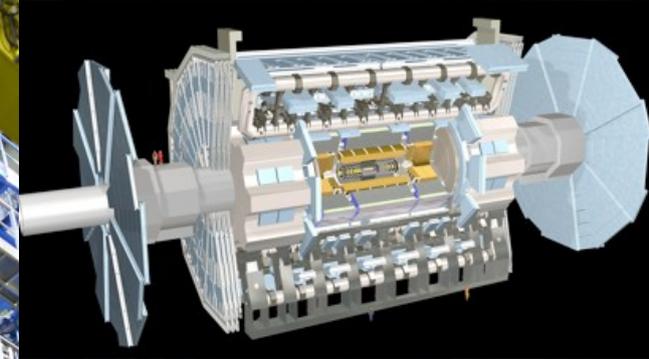
→ ein riesiger Beschleunigerkomplex



# LHC: Der weltgrößte Beschleuniger



# Gigantische Detektoren



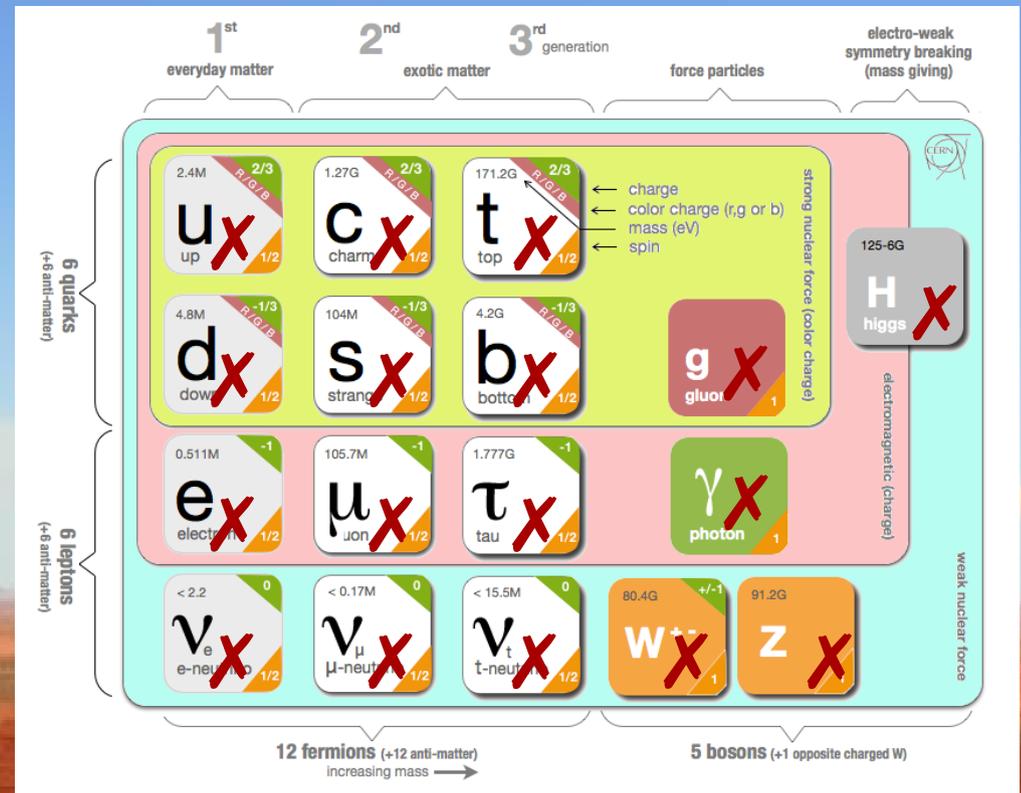
# WANTED

FOR MOVING THE UNIVERSE  
DARK MATTER

Gesucht: Dunkle Materie mit diesen Eigenschaften:

- „unsichtbar“
- „kalt“ (= „langsam“)
- kollidiert nicht/kaum
- stabil

REWARD: NOBLE PRICE?

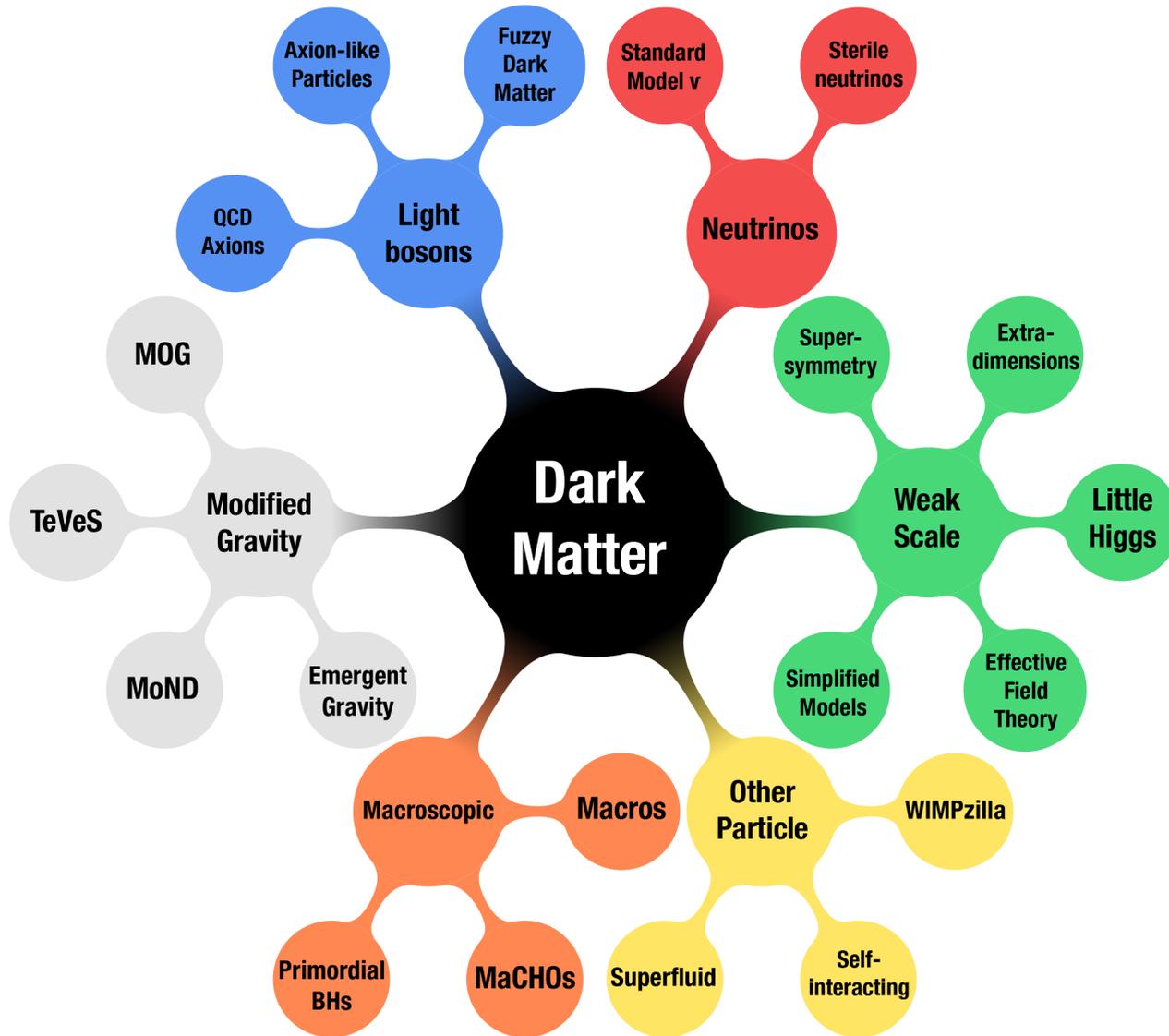


## Problem:

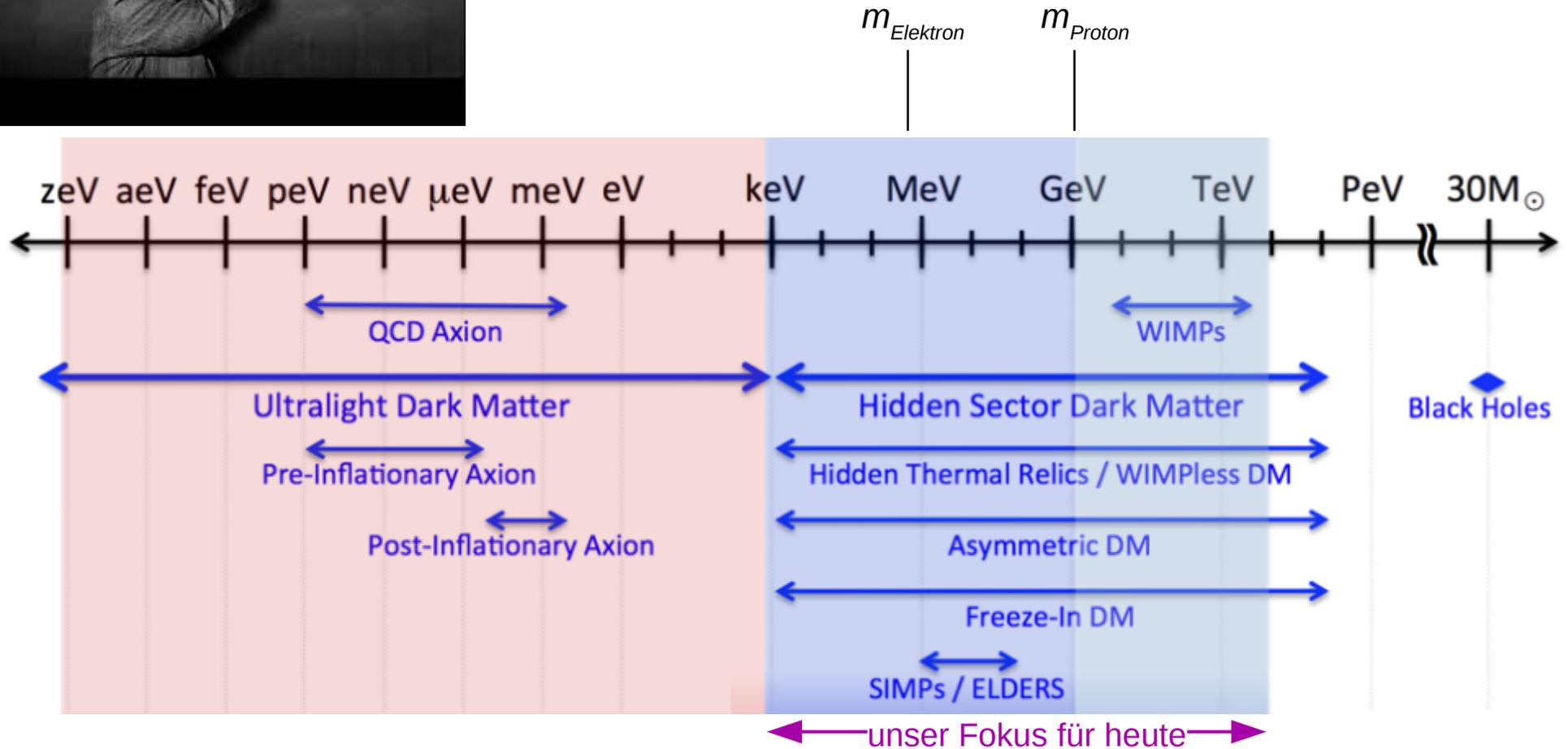
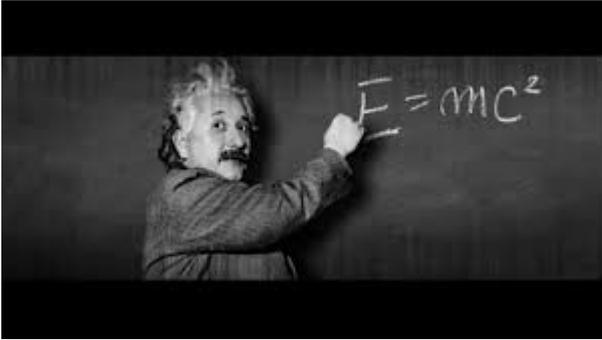
kein bekanntes Teilchen hat die notwendigen Eigenschaften

→ wir benötigen etwas Neues

# Theorien für Dunkle Materie



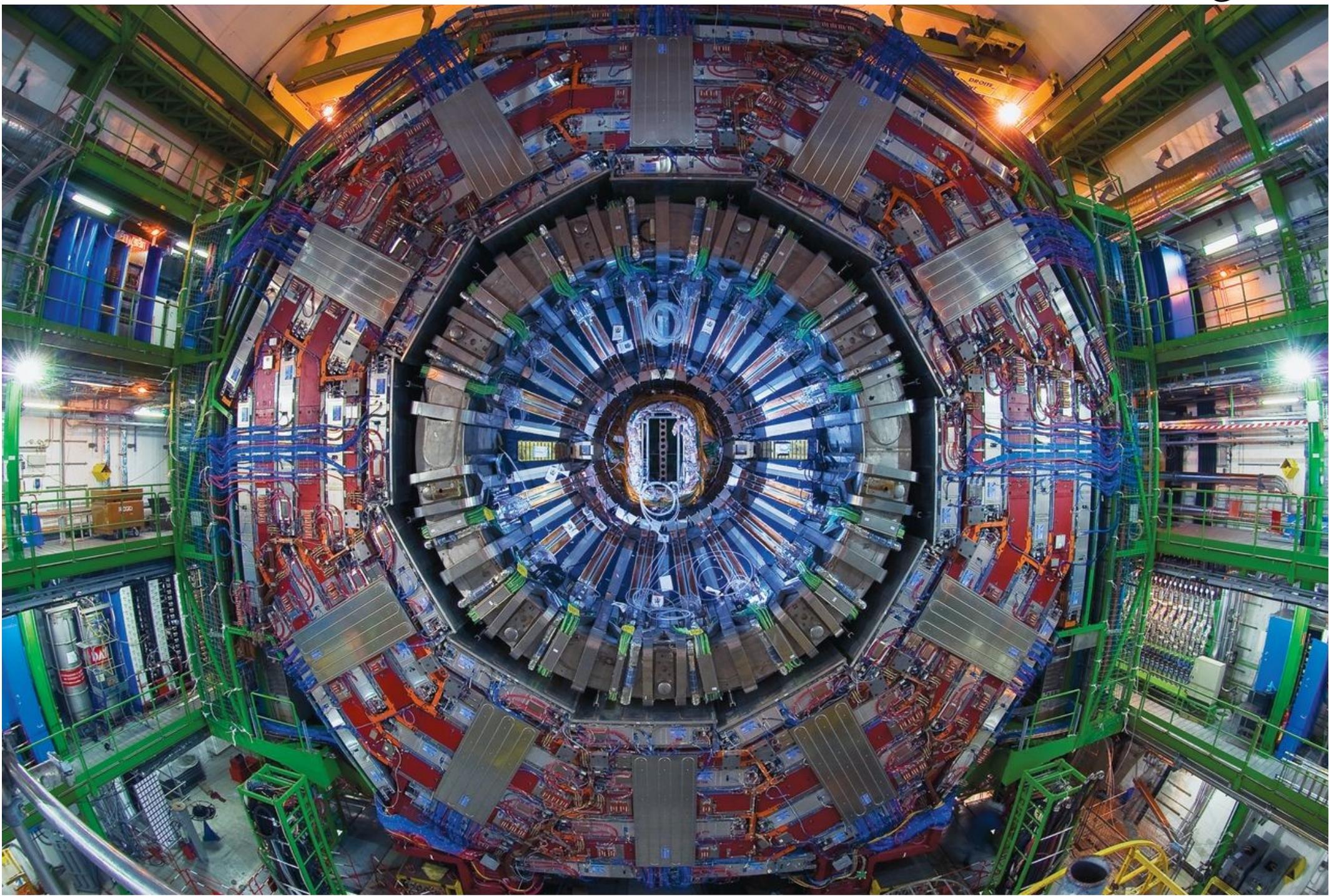
# Dunkle Materie: Kandidaten-Teilchen



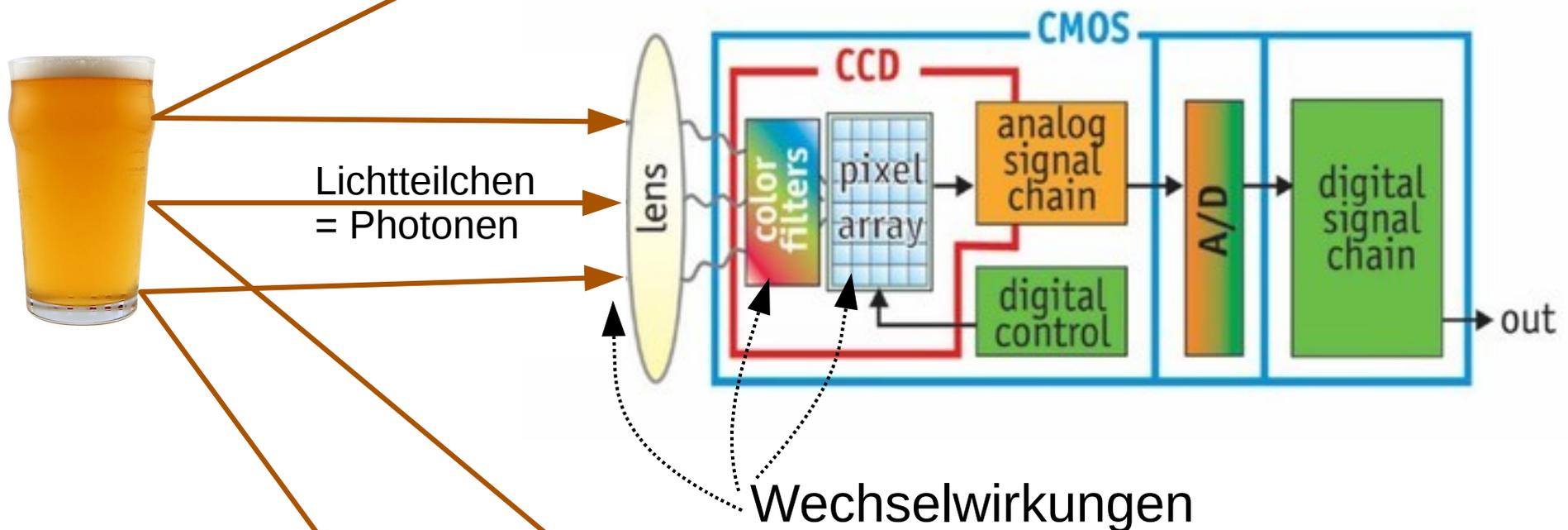
→ keine Vorhersage über Masse und Art. Wir müssen überall suchen.

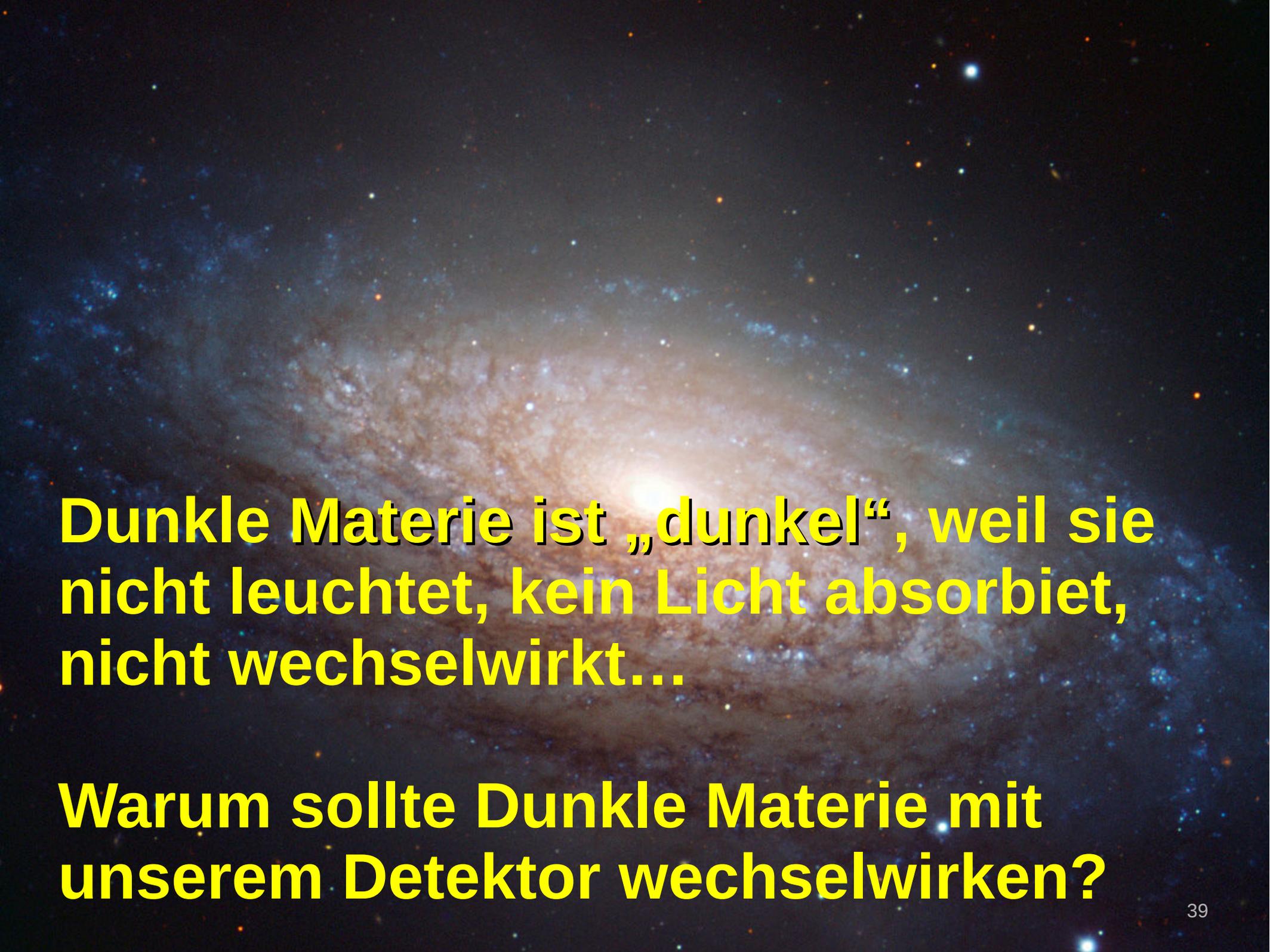


**Wie sucht man nach Dunkler Materie?**



# Was ist ein Teilchendetektor?

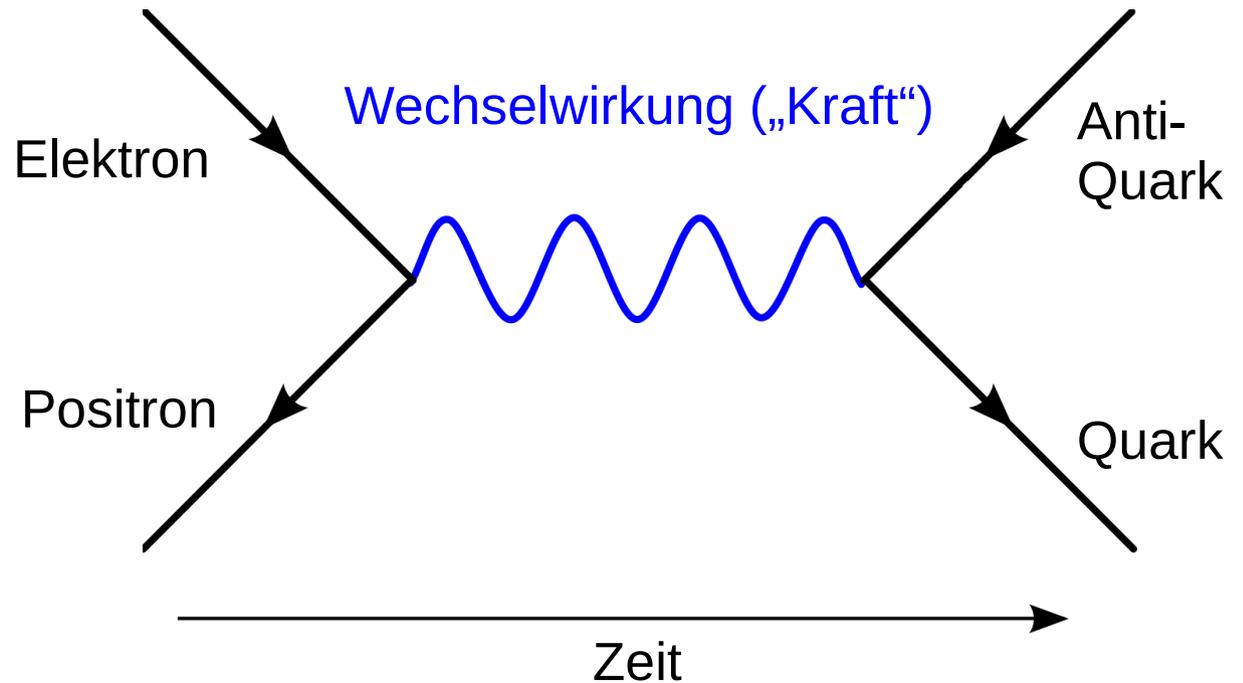
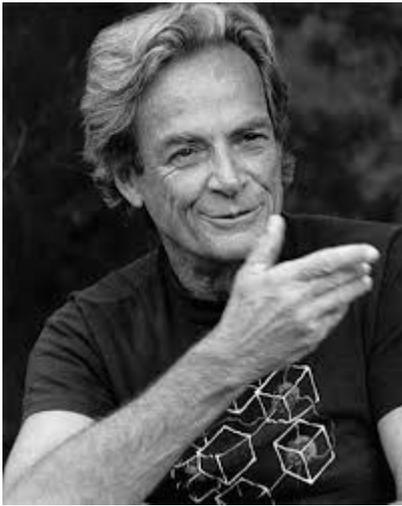




**Dunkle Materie ist „dunkel“, weil sie nicht leuchtet, kein Licht absorbiert, nicht wechselwirkt...**

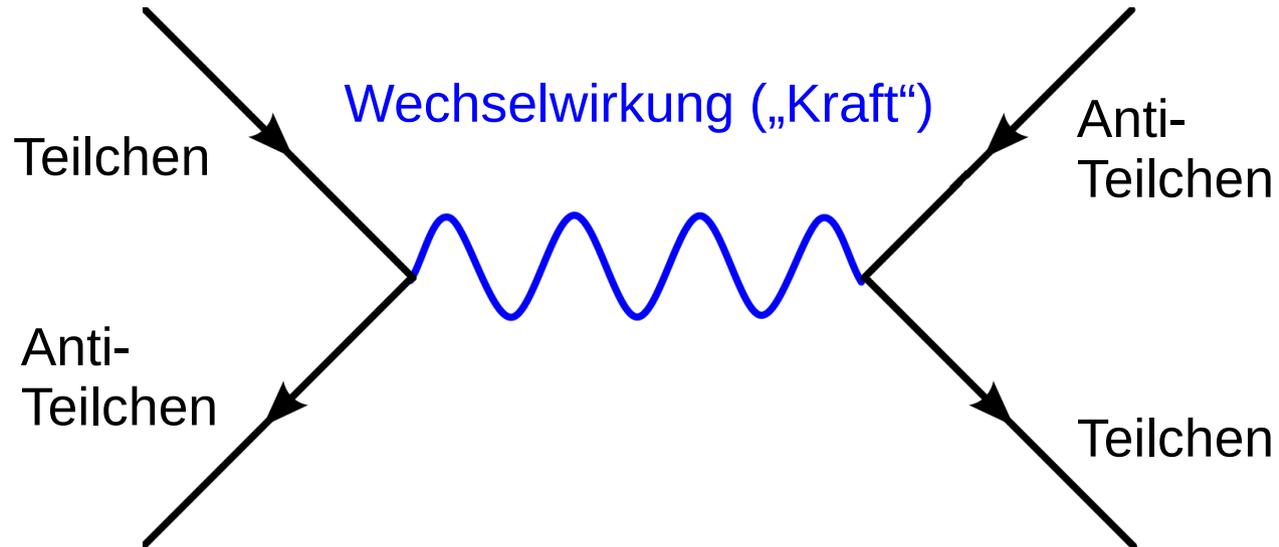
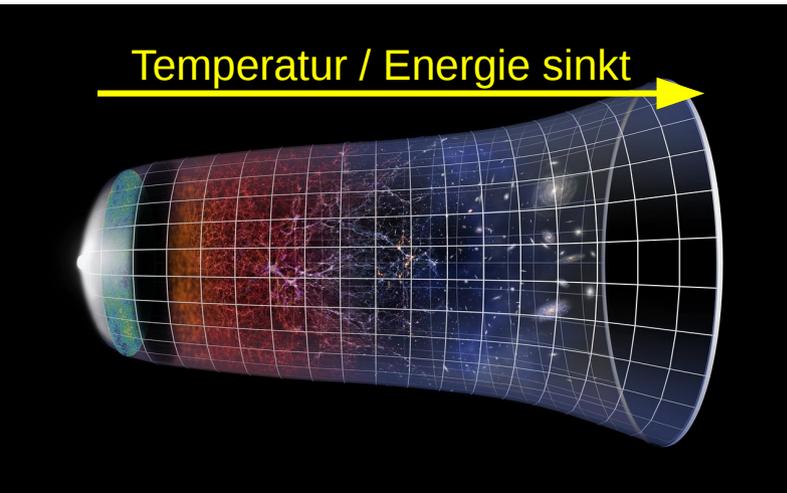
**Warum sollte Dunkle Materie mit unserem Detektor wechselwirken?**

# Teilchenwechselwirkungen



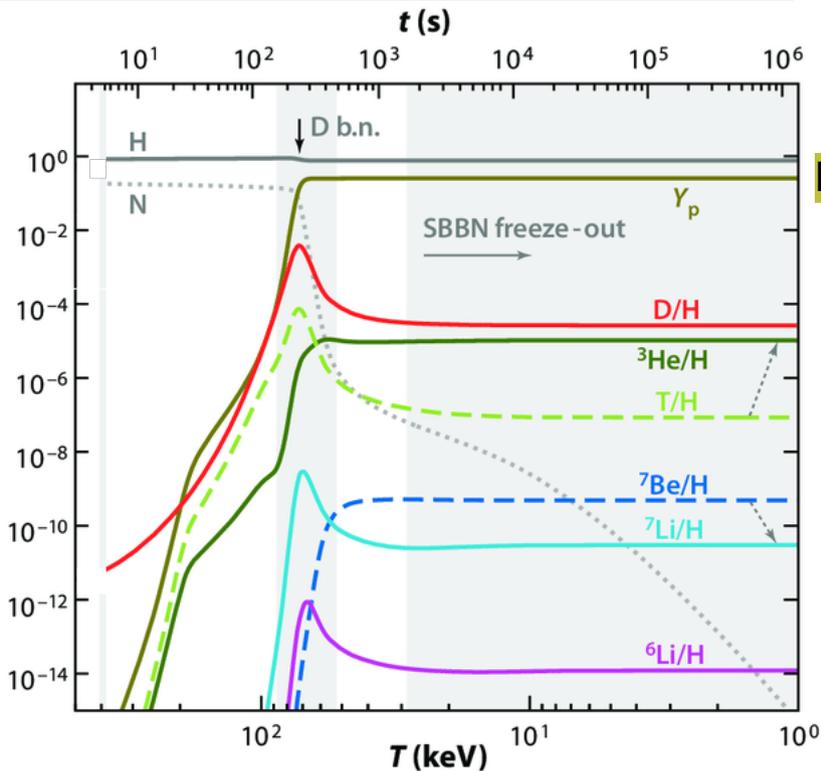
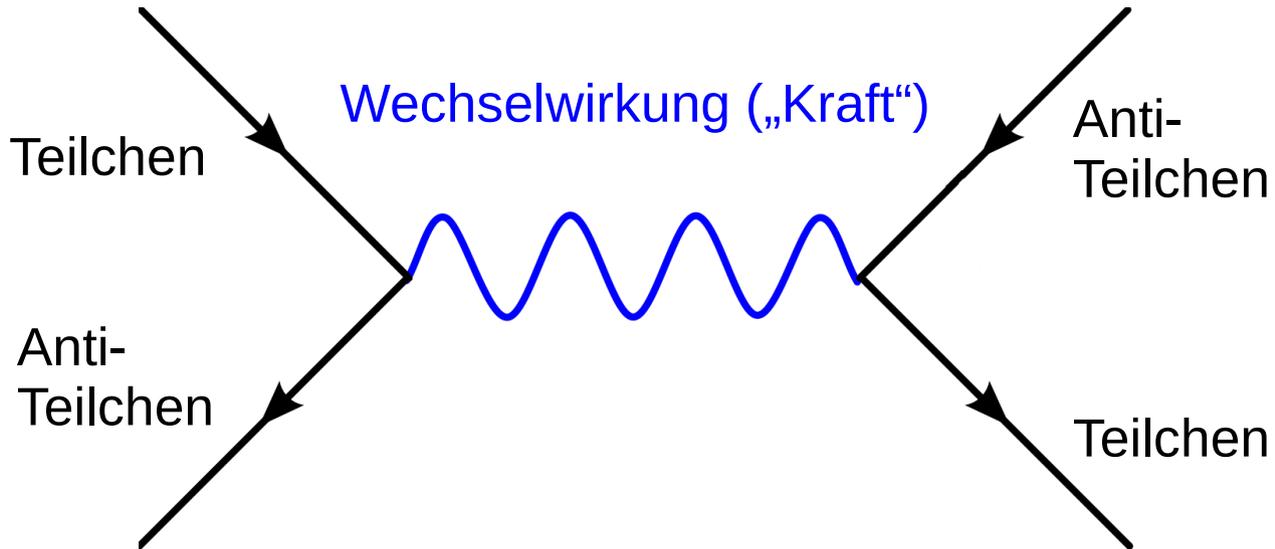
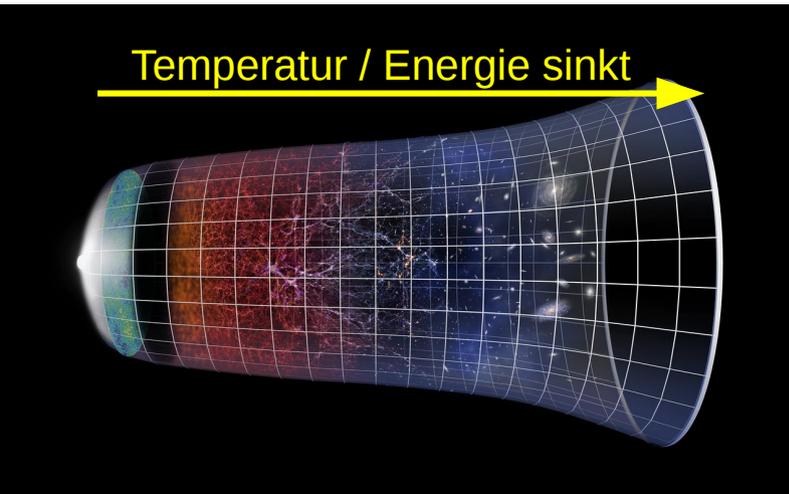
Beschreibung über Feynman-Diagramme  
*graphische Beschreibung komplizierter Rechnungen*

# Im frühen Universum



- Temperatur ( $\sim E$ ) sehr hoch; fällt durch Expansion
- alle Teilchen mit Masse  $m < E$  werden ständig erzeugt und vernichtet
  - **thermisches Gleichgewicht**
  - Teilchenzahl konstant, wenn  $E < m$

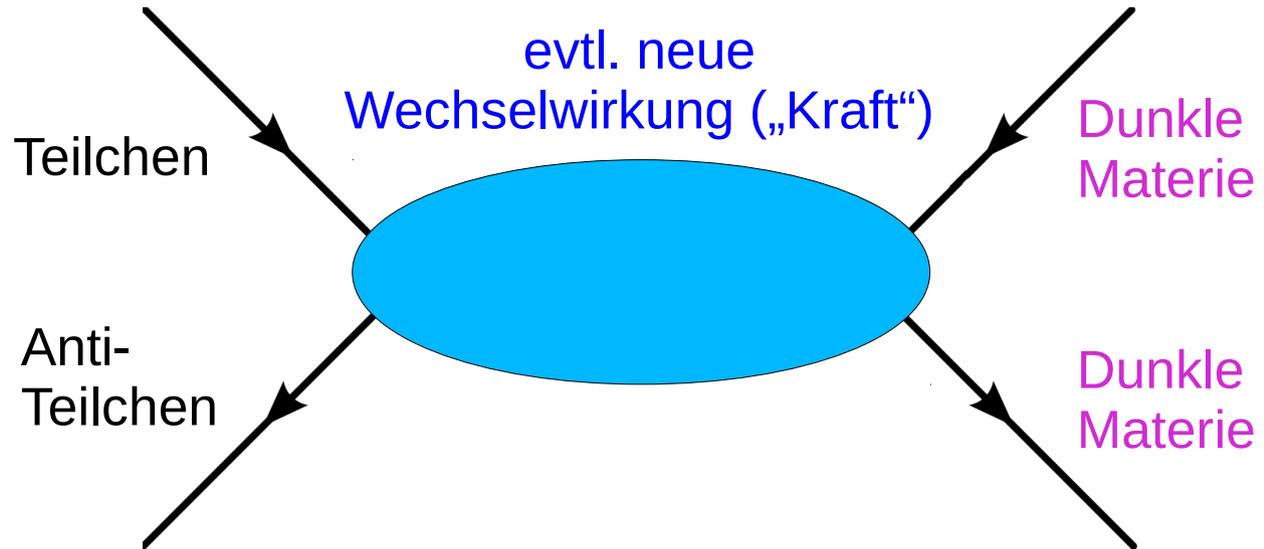
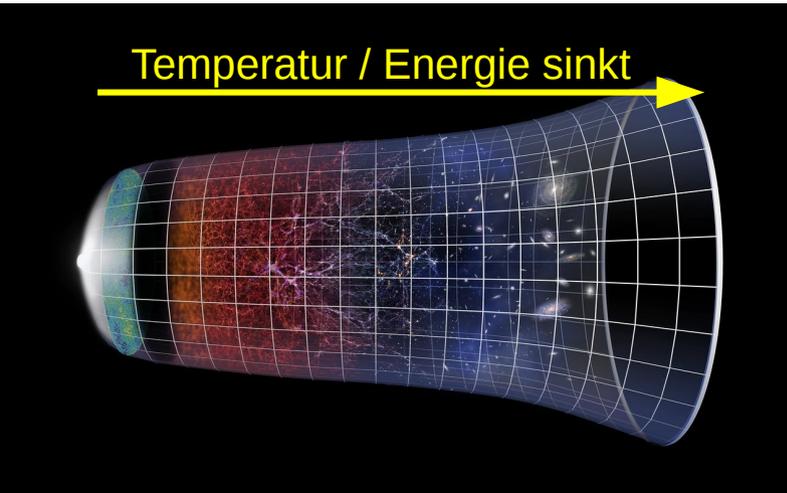
# Im frühen Universum



Massenanteil  ${}^4\text{He}$  ~25%

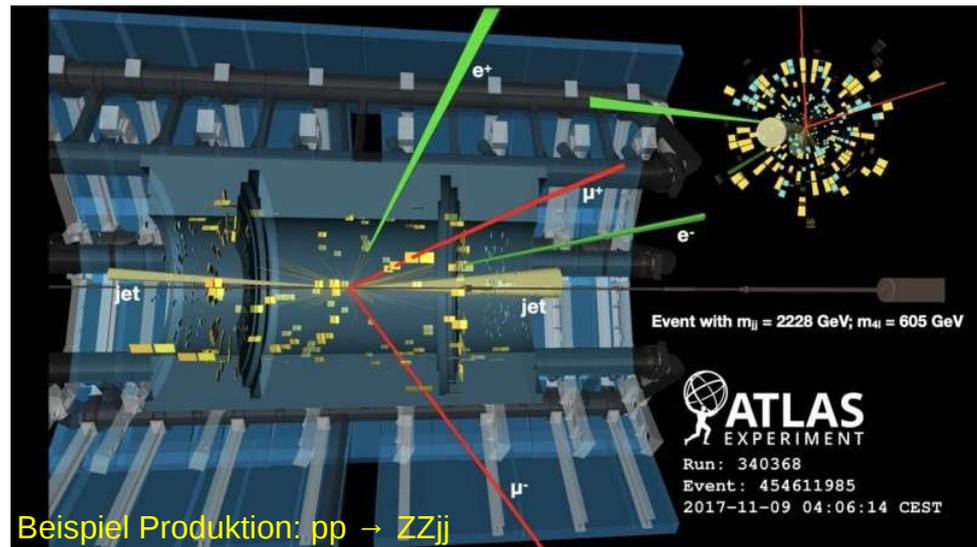
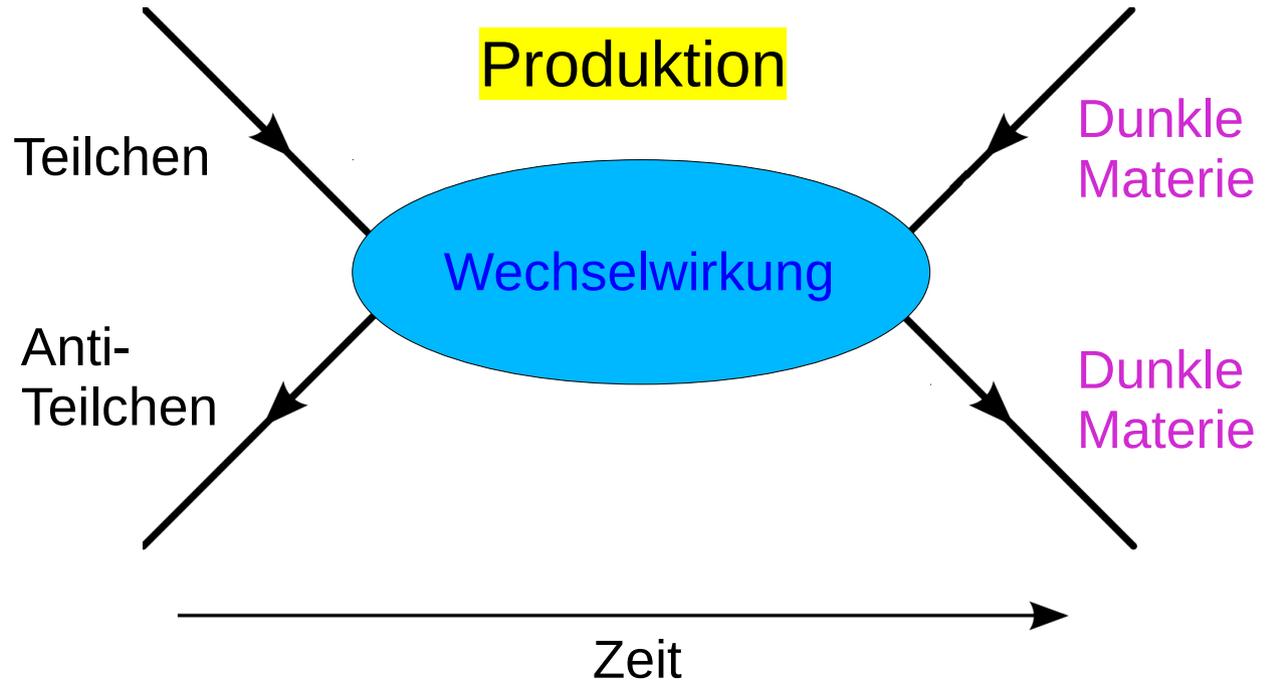
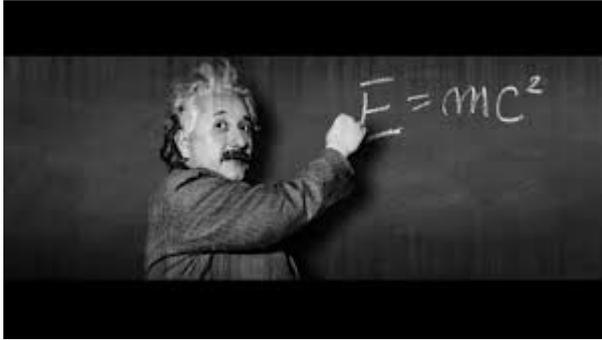
- Temperatur ( $\sim E$ ) sehr hoch; fällt durch Expansion
- alle Teilchen mit Masse  $m < E$  werden ständig erzeugt und vernichtet
  - **thermisches Gleichgewicht**
  - Teilchenzahl konstant, wenn  $E < m$
- die **gemessenen** (!) Anteile aller erzeugten leichten Elemente **stimmen mit der Vorhersage überein**

# Dunkle Materie im frühen Universum

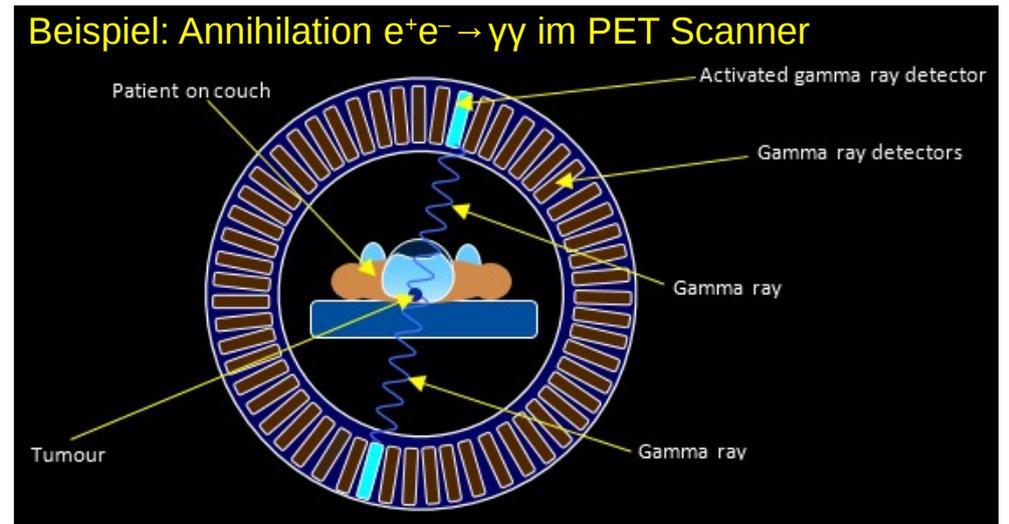
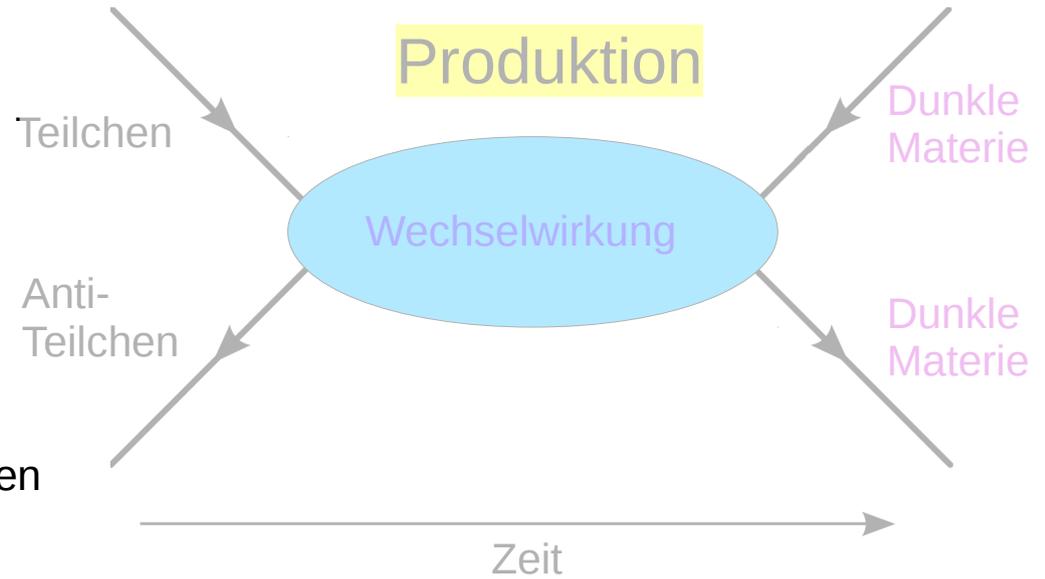
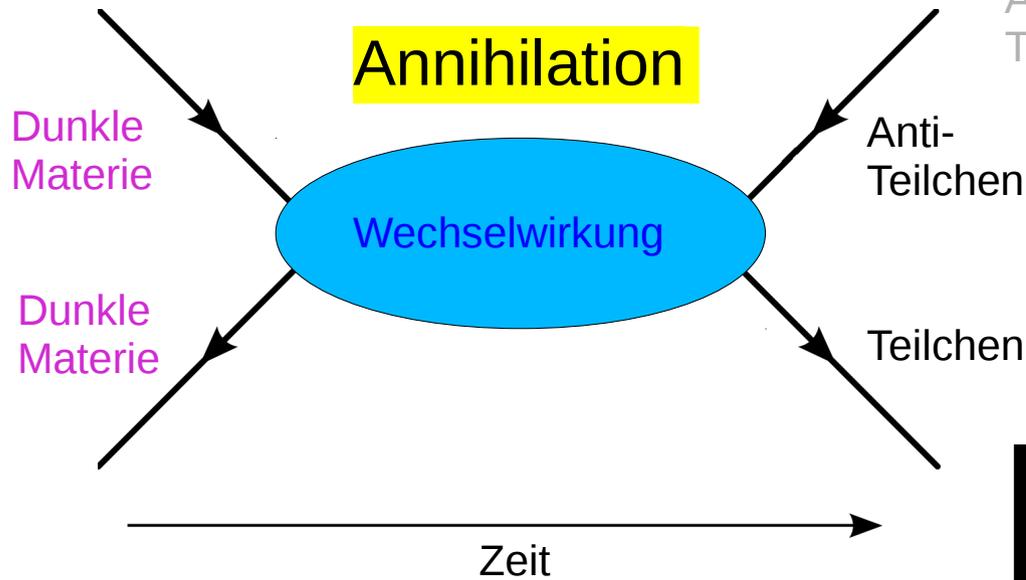


Wenn **Dunkle Materie** genauso aus einem thermischen Gleichgewicht produziert wird, dann muss sie auch mit normaler Materie wechselwirken können.

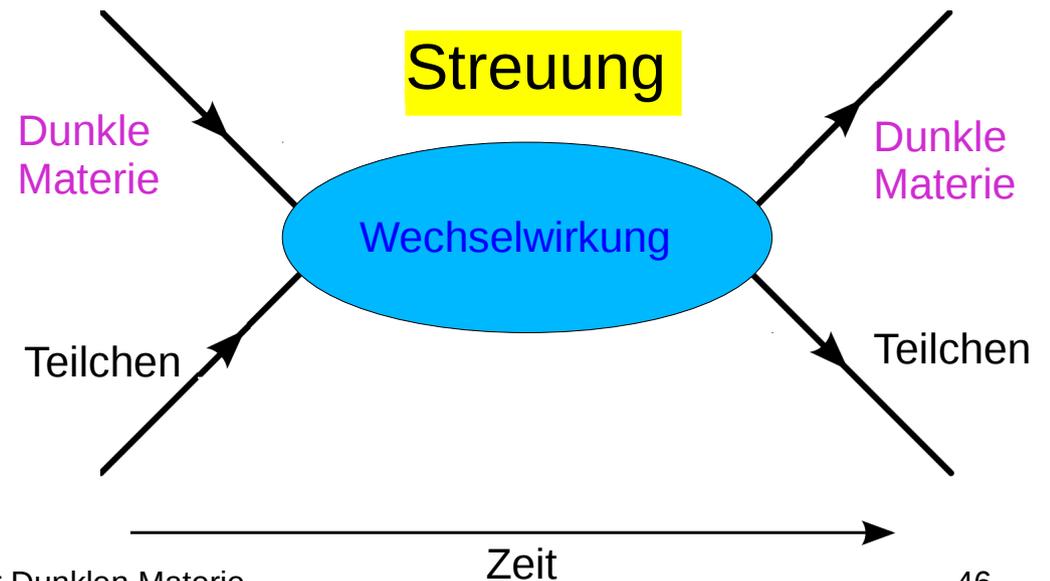
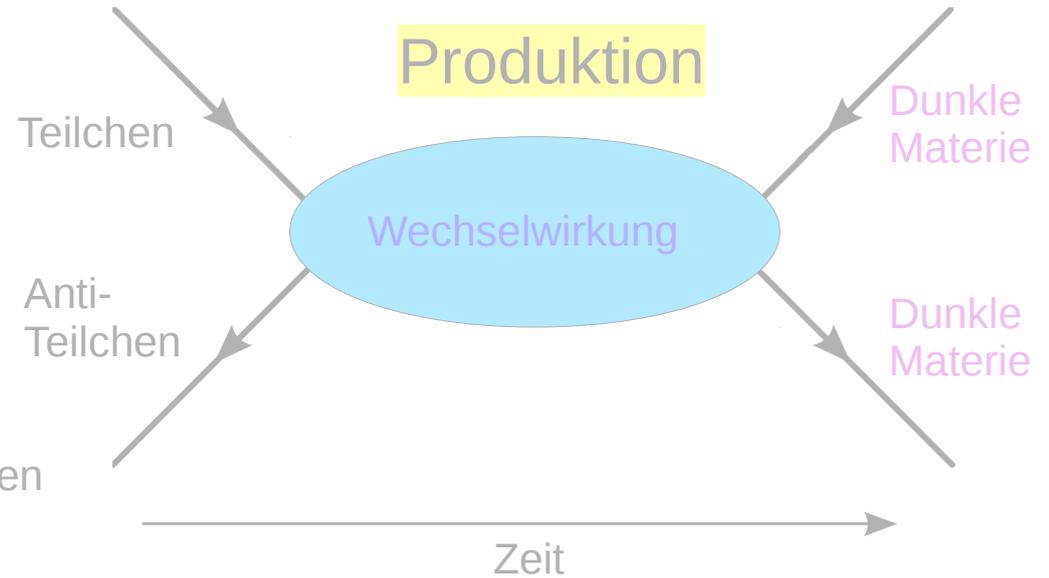
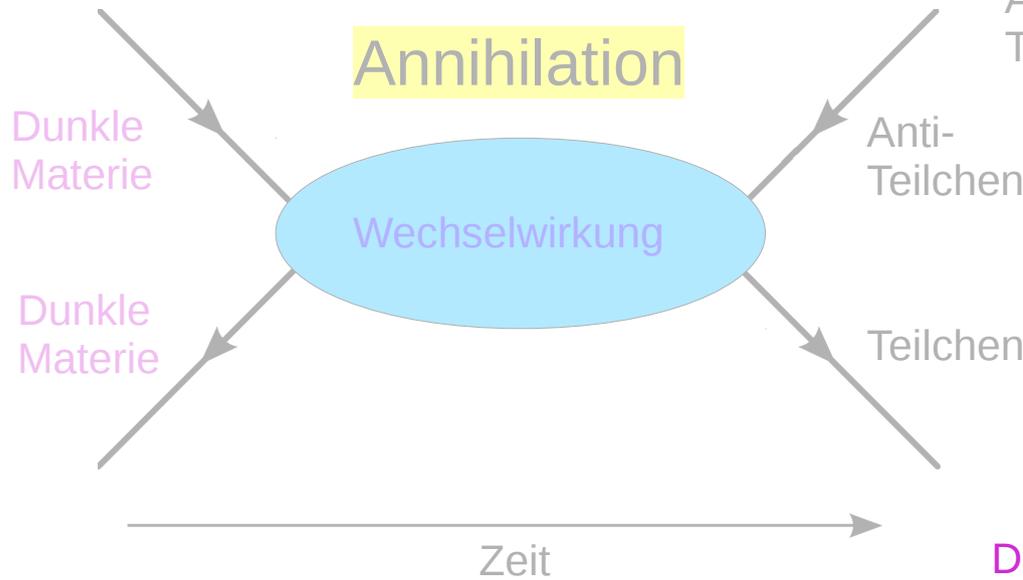
# Dunkle Materie: Suchstrategien



# Dunkle Materie: Suchstrategien



# Dunkle Materie: Suchstrategien





# Suchstrategie I: Streuung

# Streuung: Direkte Suche

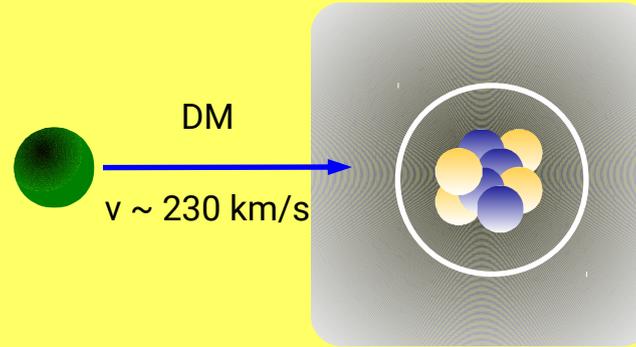


Cygnus Arm

# Streuung: Direkte Suche

Carina-Sagittarius Arm

Elastische  
DM-Atomkern Streuung



Perseus Arm

$v \sim 230 \text{ km/s}$

10 000

20 000

30 000

40 000

<- Our Solar System

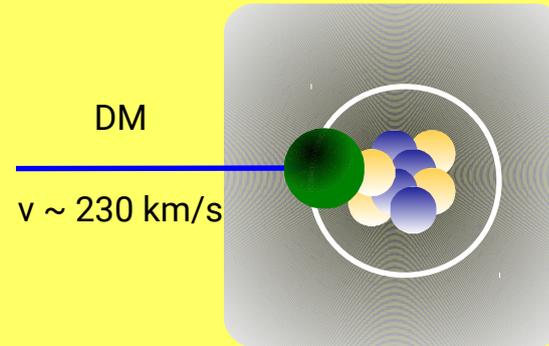
Local or Orion Arm

Cygnus Arm

# Streuung: Direkte Suche

Carina-Sagittarius Arm

Elastische  
DM-Atomkern Streuung



Perseus Arm

$v \sim 230 \text{ km/s}$

10 000

20 000

30 000

40 000

<- Our Solar System

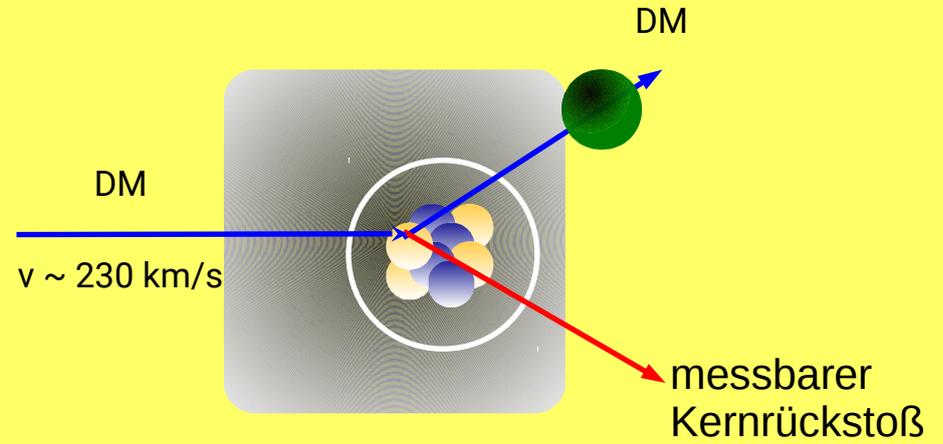
Local or Orion Arm

Cygnus Arm

# Streuung: Direkte Suche

Carina-Sagittarius Arm

Elastische  
DM-Atomkern Streuung  
→ Kernrückstoß



Perseus Arm

$v \sim 230 \text{ km/s}$

← Our Solar System

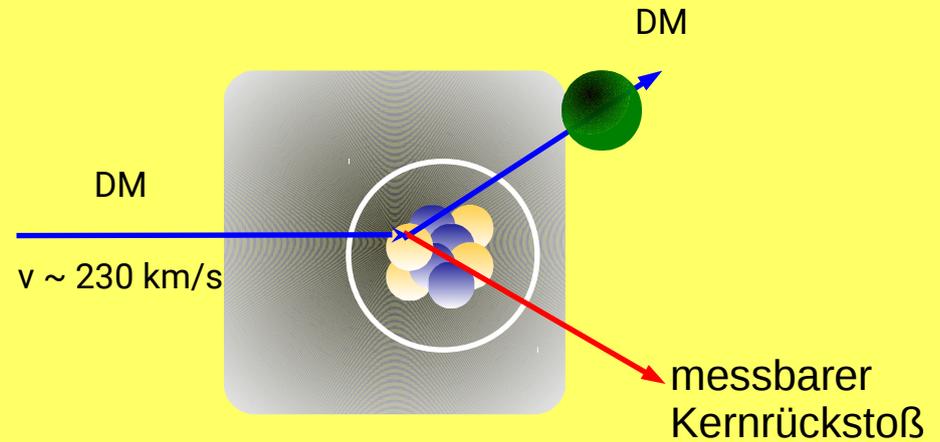
Local or Orion Arm

Cygnus Arm

# Streuung: Direkte Suche

Carina-Sagittarius Arm

Elastische  
DM-Atomkern Streuung  
→ Kernrückstoß



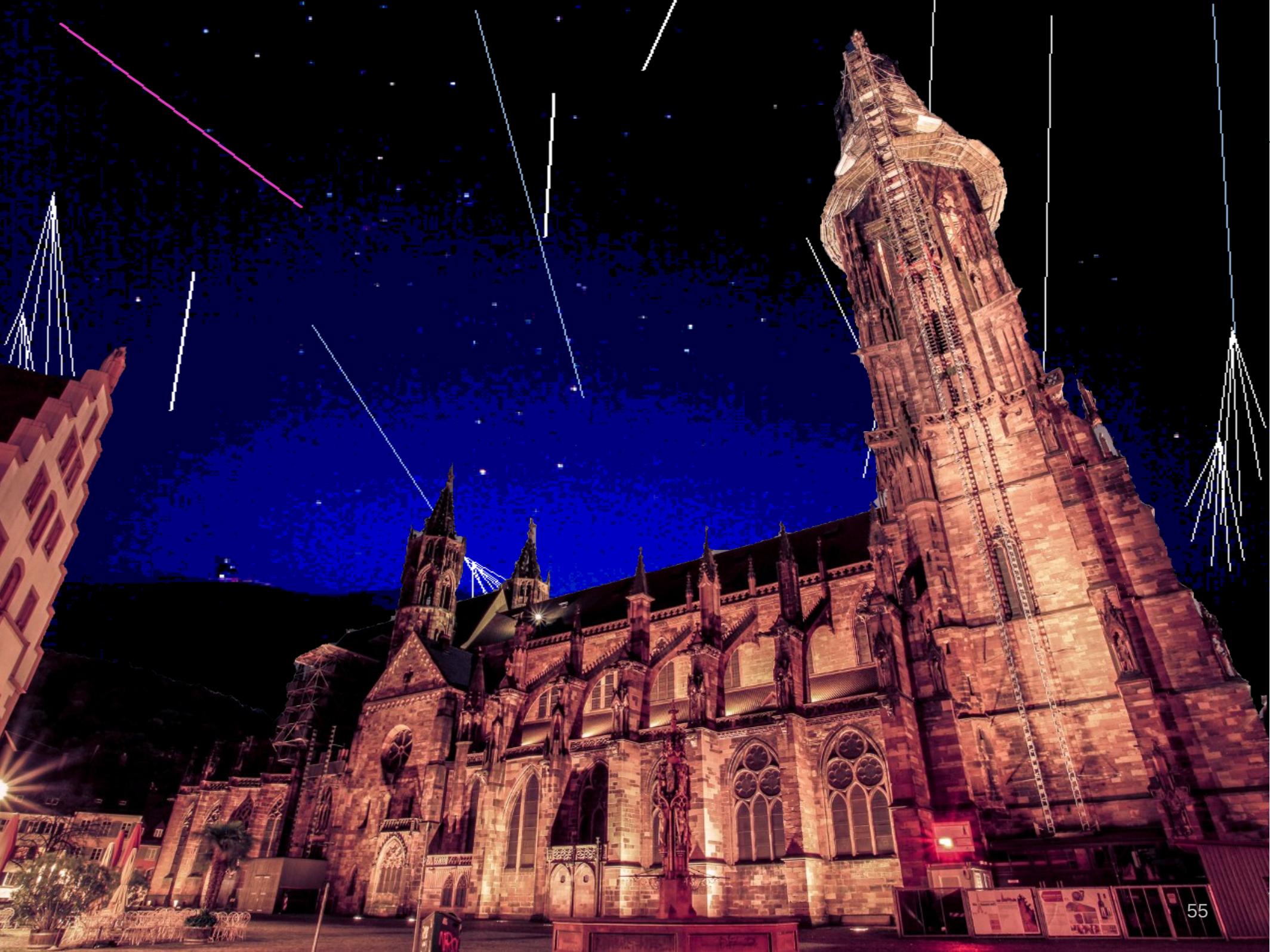
Dunkle Materie wechselwirkt extrem selten:  
– nehme viele Atomkerne (z.B.  $3 \times 10^{28}$  Xenon-Kerne)  
– messe sehr lange (z.B. mehrere Jahre)  
– reduziere Untergrundsignale

Perseus Arm

← Our Solar System

Local or Orion Arm









# Laboratori Nazionali del Gran Sasso





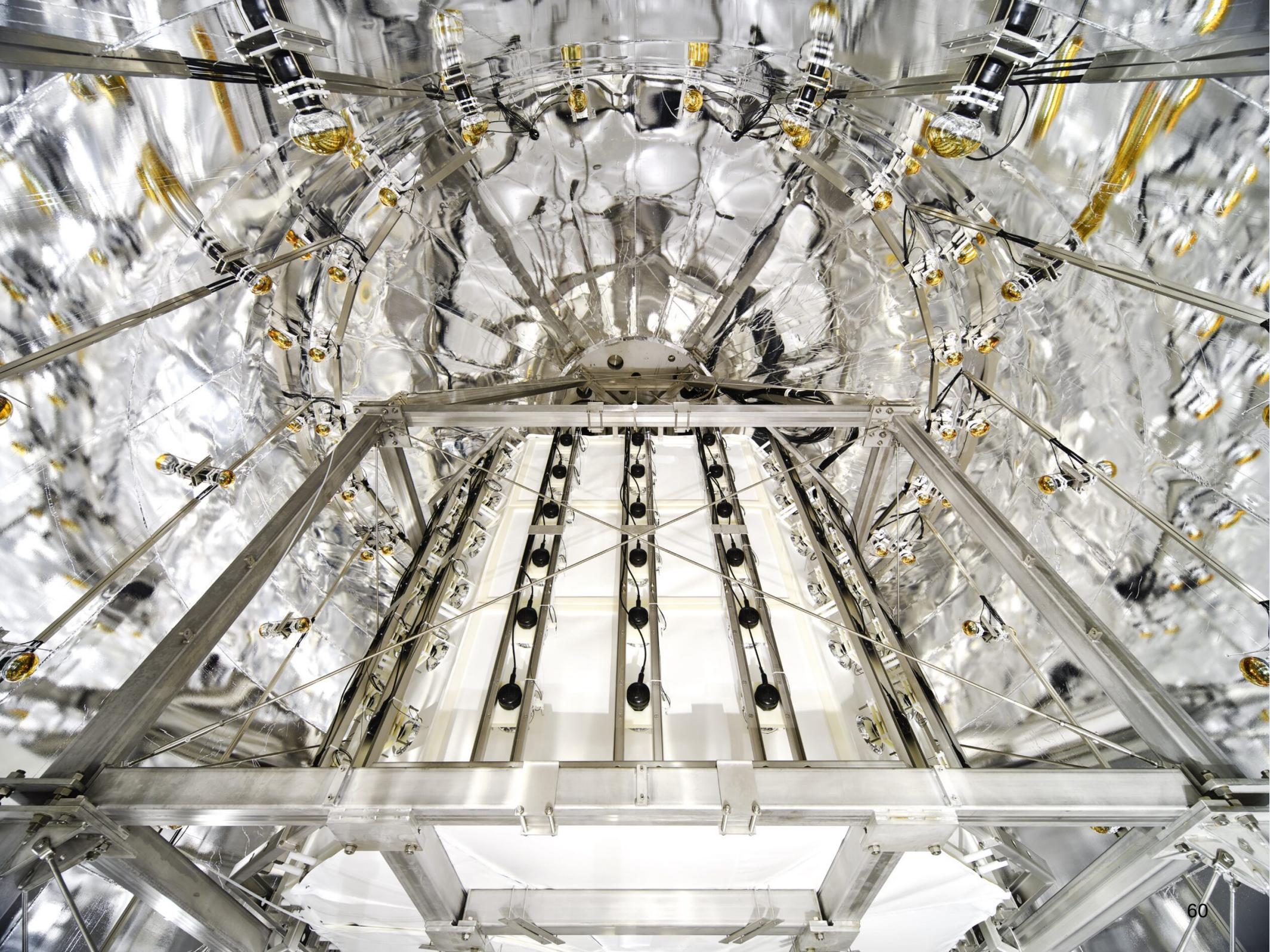
# Laboratori Nazionali del Gran Sasso



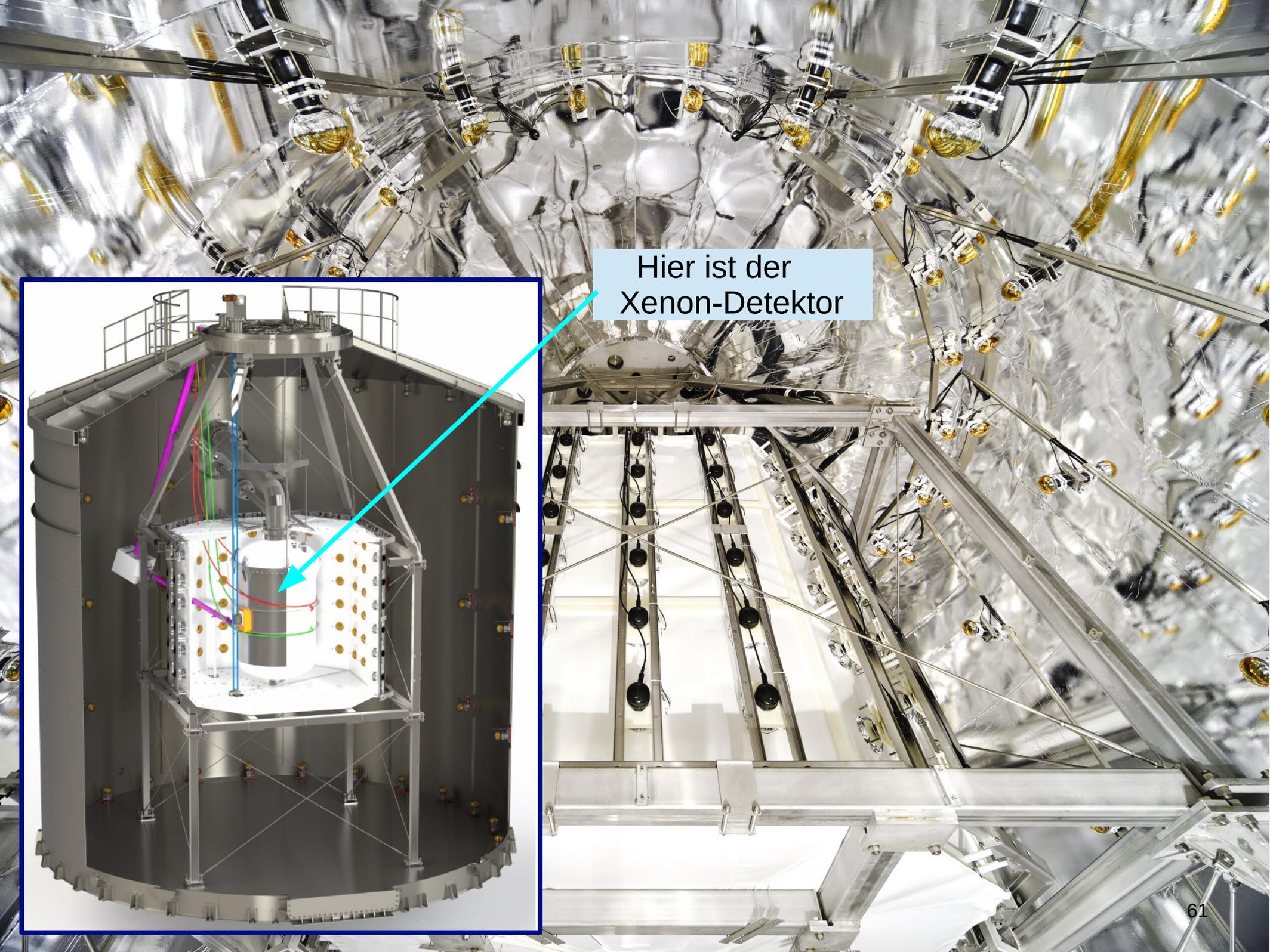
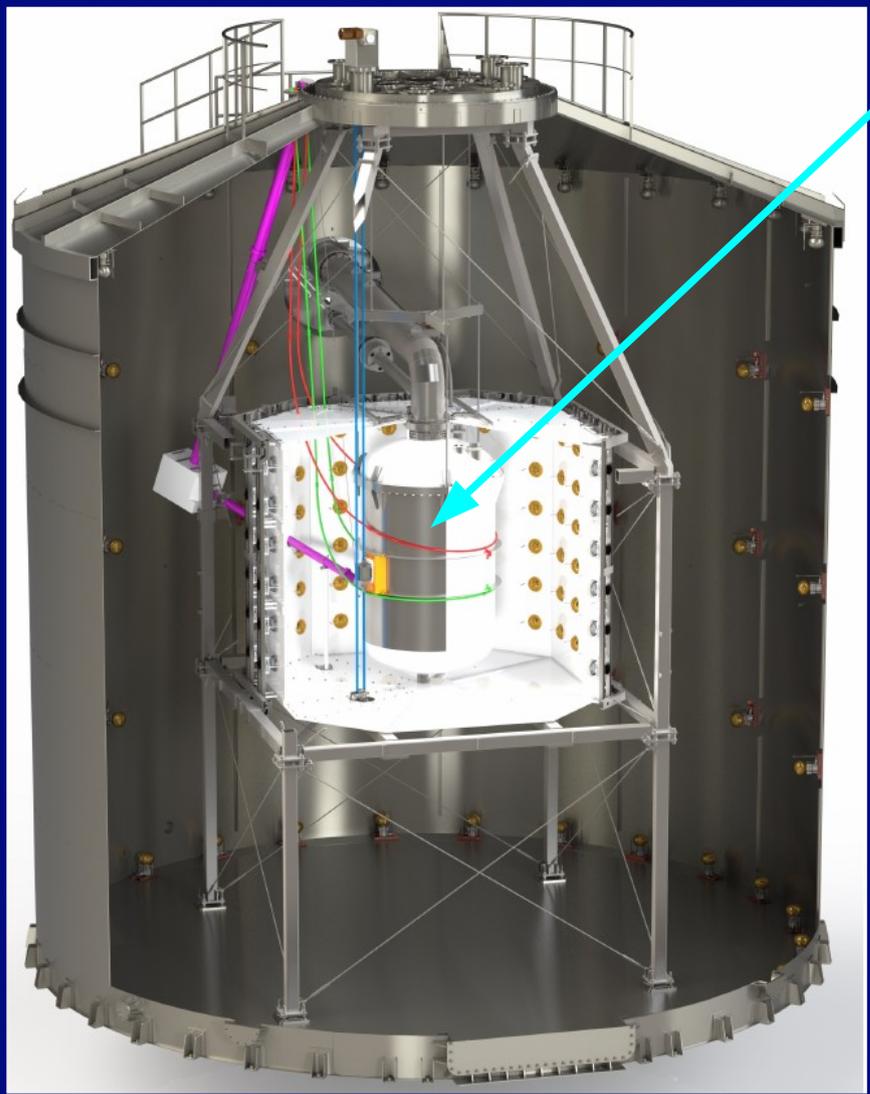


# XENONnT @ LNGS





Hier ist der  
Xenon-Detektor







# XENONnT

universität freiburg

- aktive Xe Masse: 5.9 t
- extrem wenige Störsignale
- Datennahme seit 2020

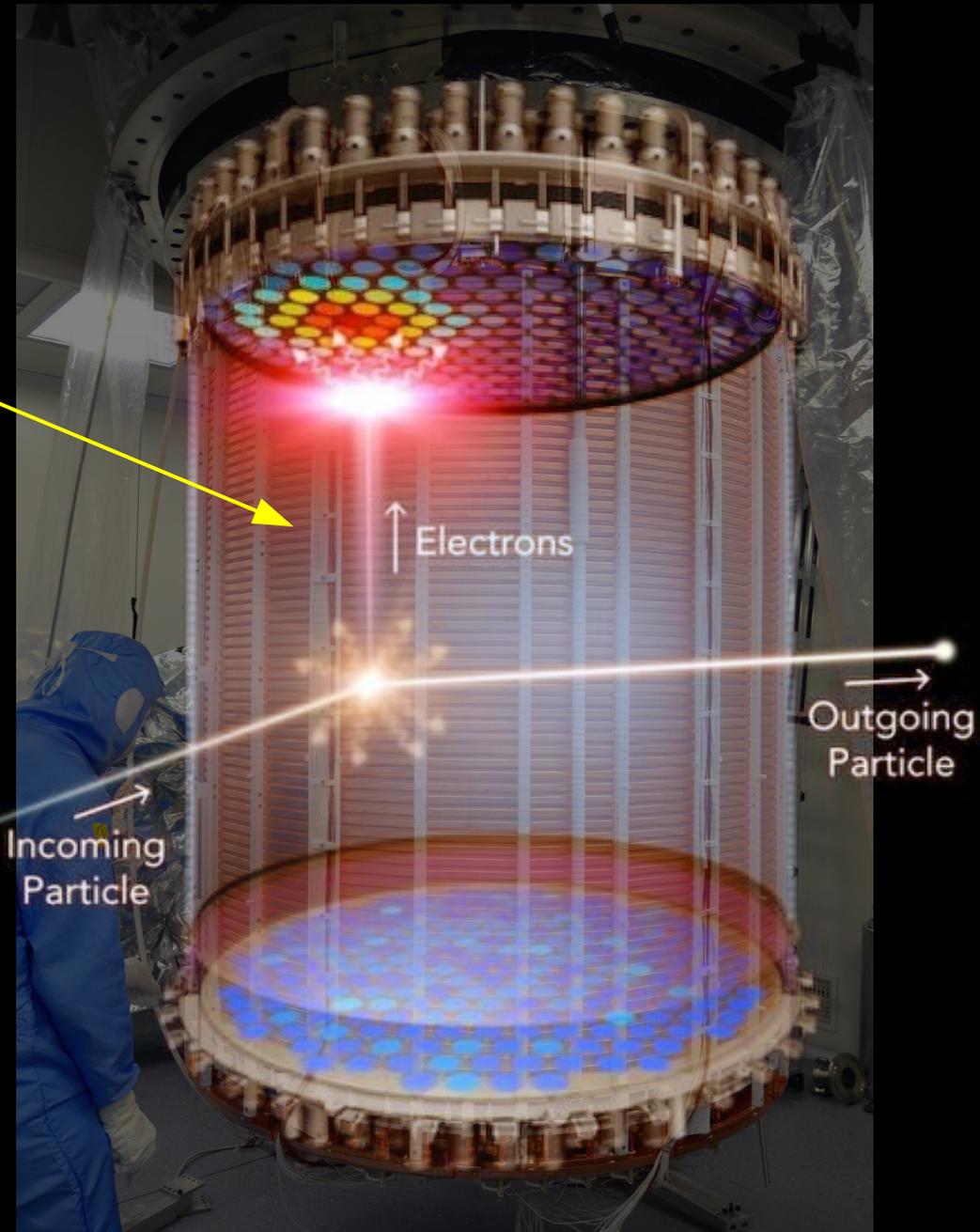


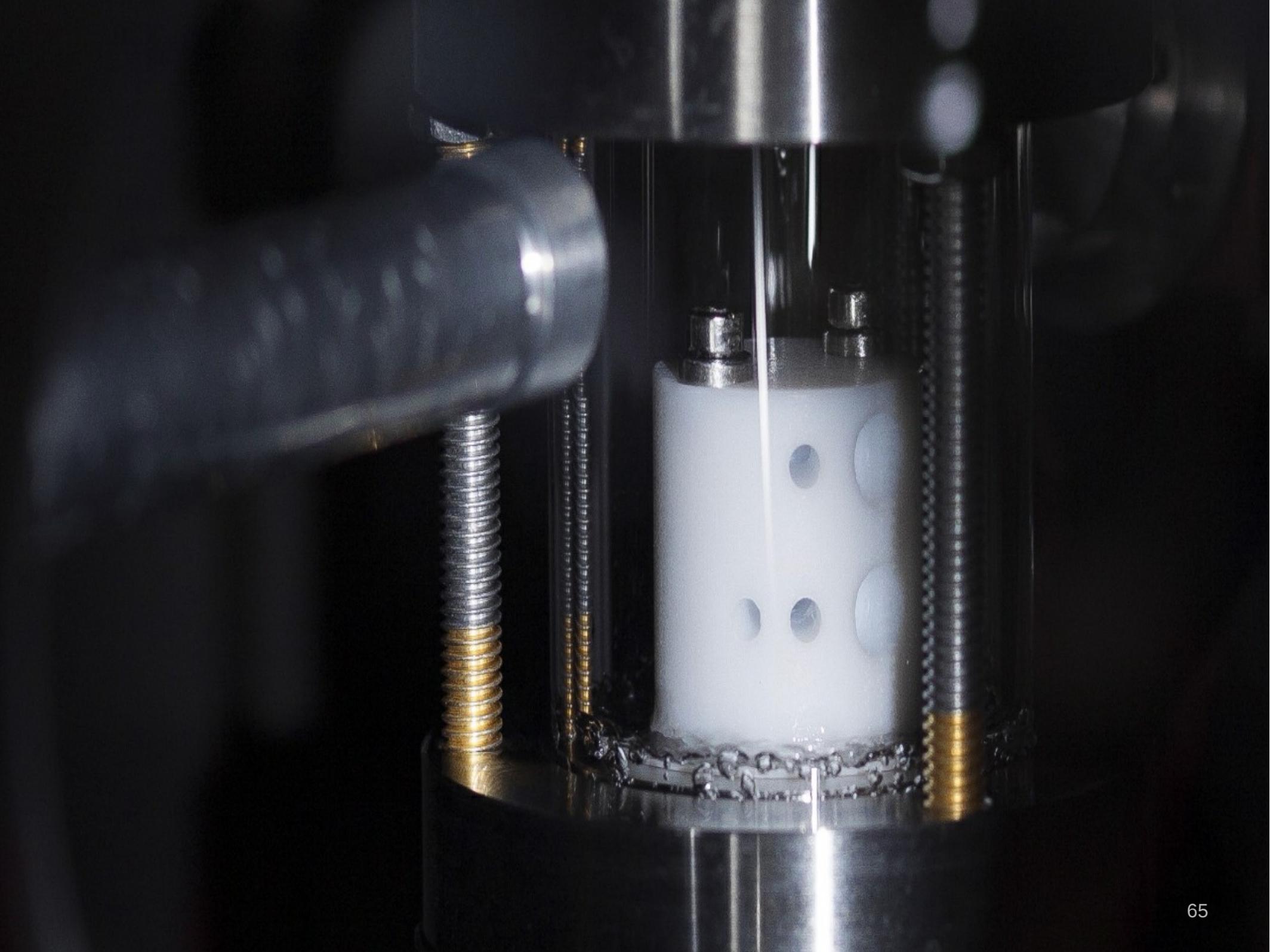
# XENONnT

universität freiburg

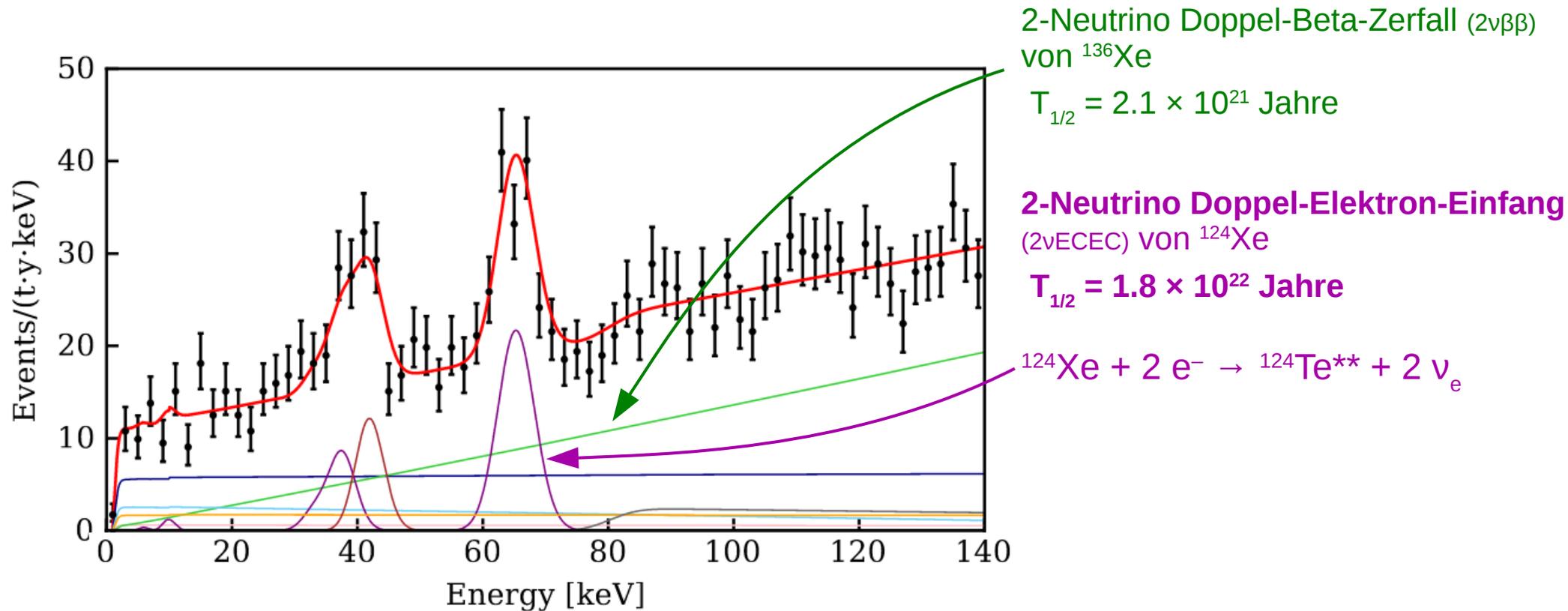
Flüssiges Xenon Gas ist ein exzellenter Szintillator (→ Licht) und lässt sich leicht ionisieren (→ Elektronen).

- aktive Xe Masse: 5.9 t
- extrem wenige Störsignale
- Datennahme seit 2020



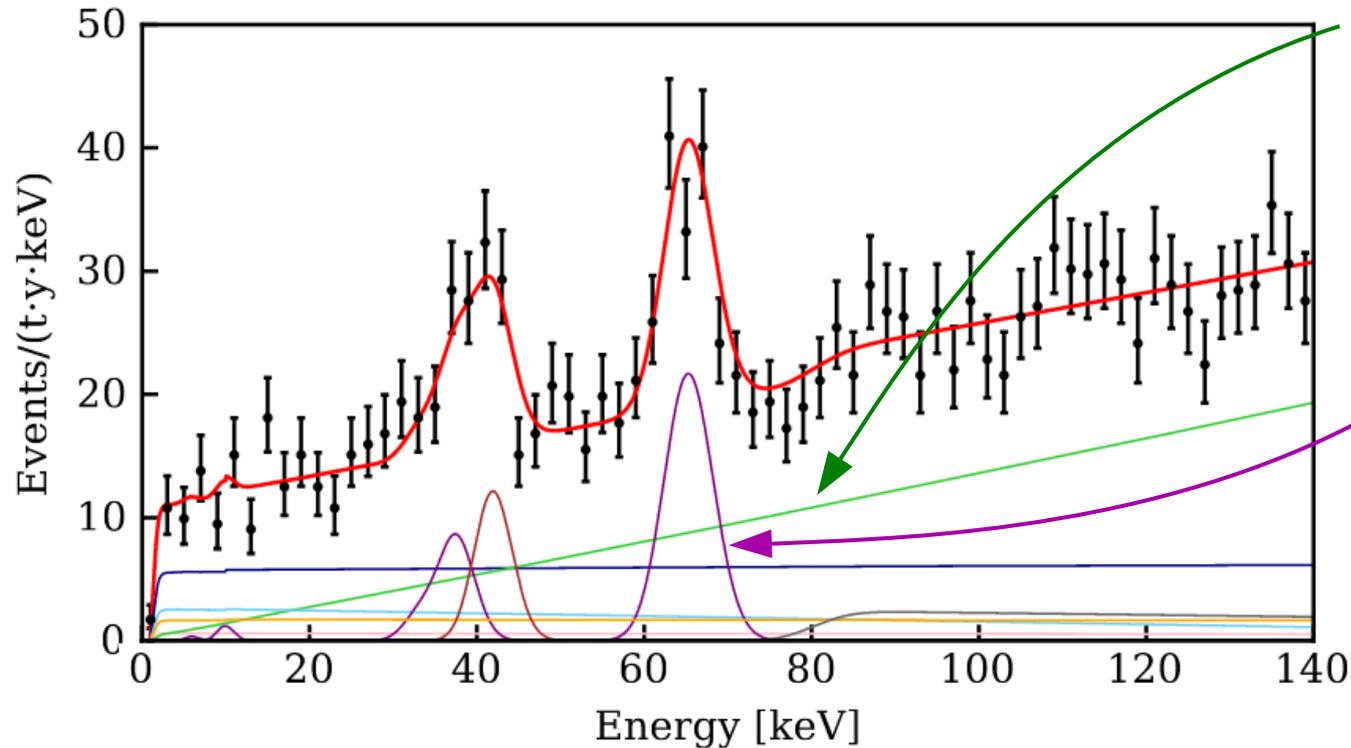


# Weltrekord



Das geringste Niveau an Untergrundereignissen (Störsignalen) aller Dunkle Materie Detektoren

# Weltrekord



2-Neutrino Doppel-Beta-Zerfall ( $2\nu\beta\beta$ )  
von  $^{136}\text{Xe}$

$$T_{1/2} = 2.1 \times 10^{21} \text{ Jahre}$$

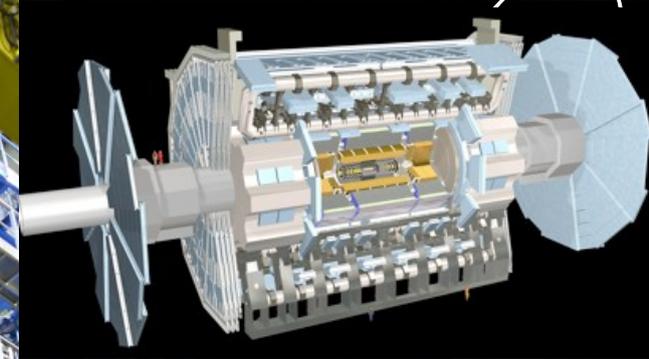
2-Neutrino Doppel-Elektron-Einfang  
( $2\nu\text{ECEC}$ ) von  $^{124}\text{Xe}$

$$T_{1/2} = 1.8 \times 10^{22} \text{ Jahre}$$

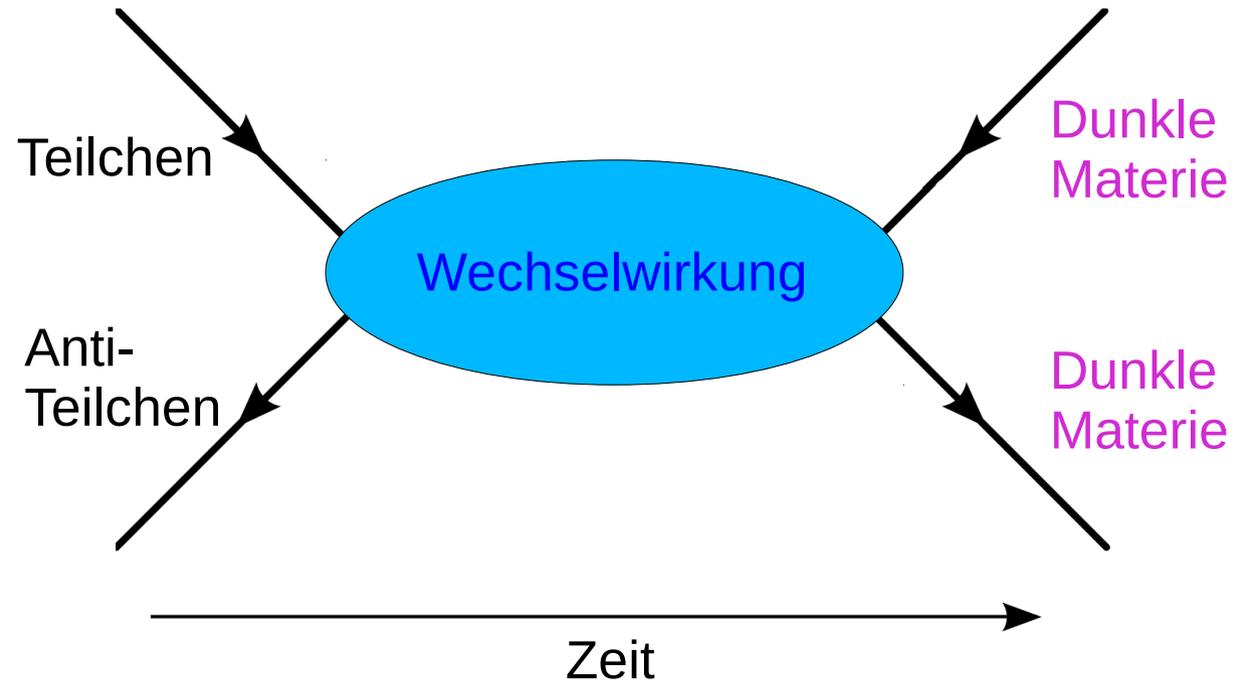


**Aber: Noch kein Signal Dunkler Materie gefunden!**

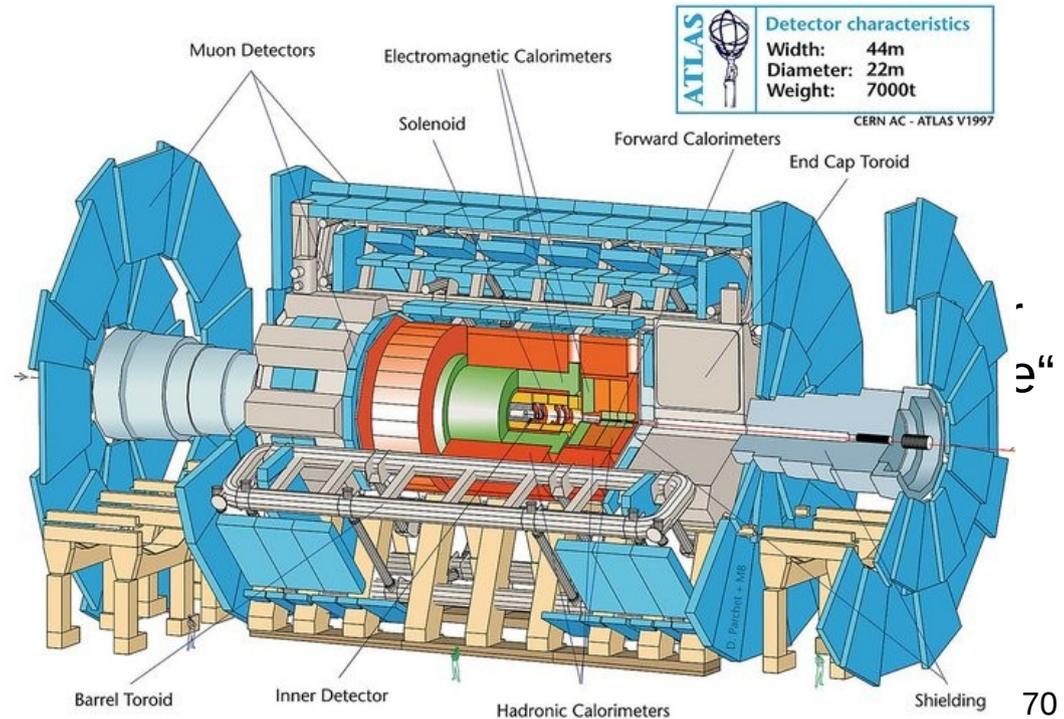
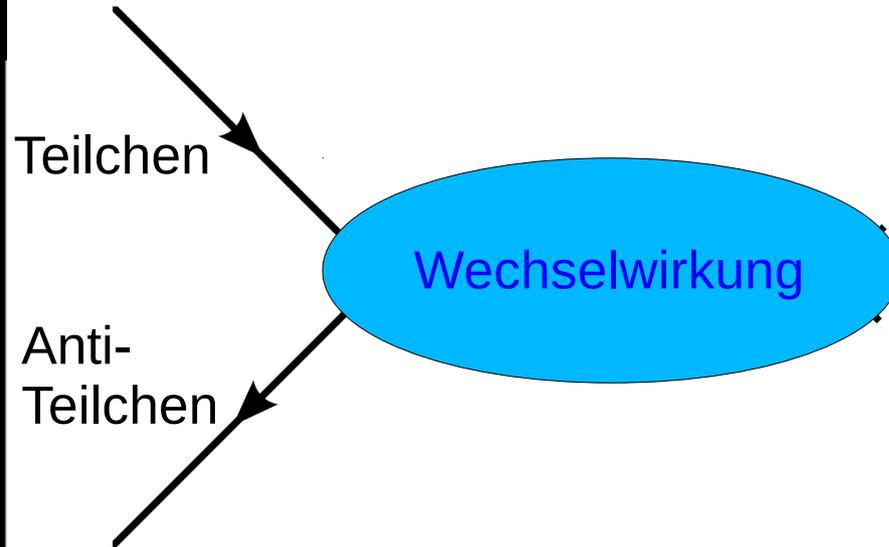
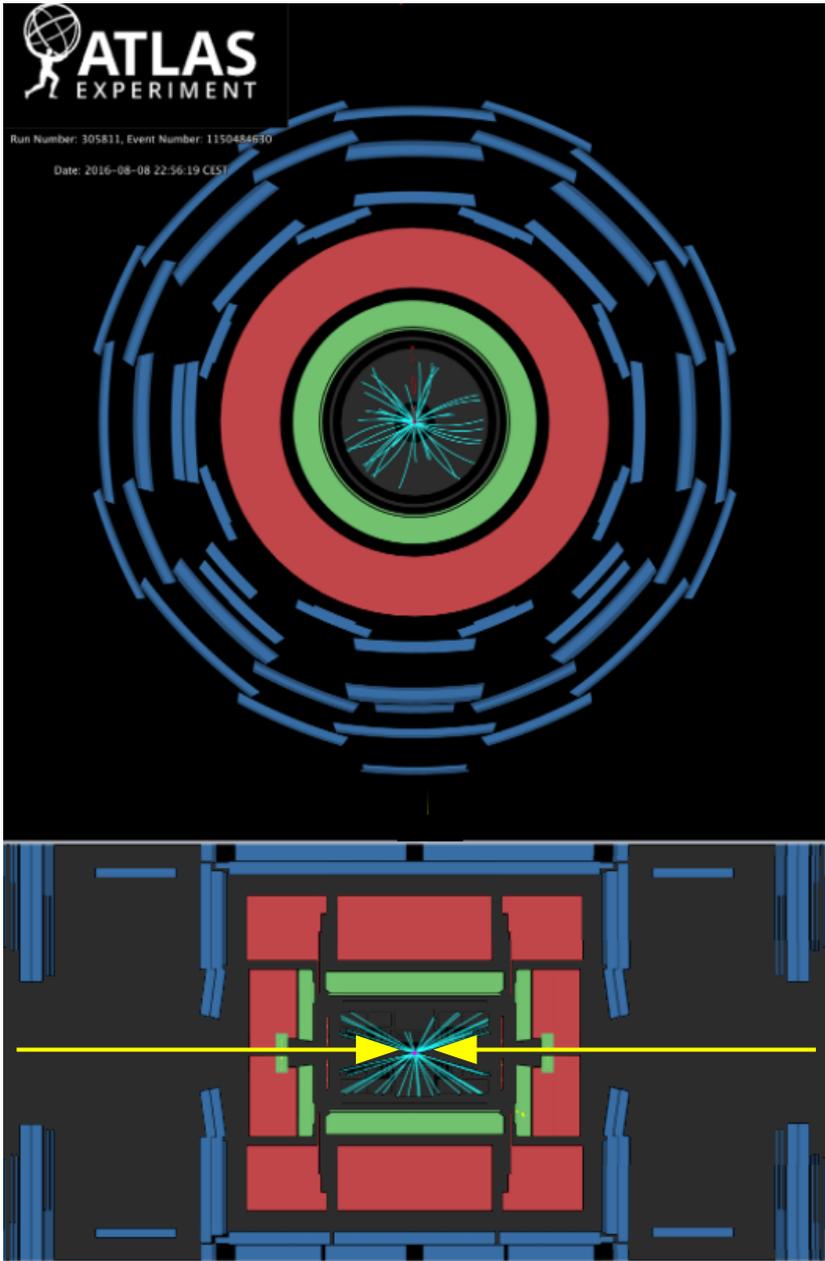
# Gigantische Detektoren



# Strategie II: Produktion



# Strategie II: Produktion



universität freiburg

Muon Spectrometer

Hadronic Calorimeter

Electromagnetic Calorimeter

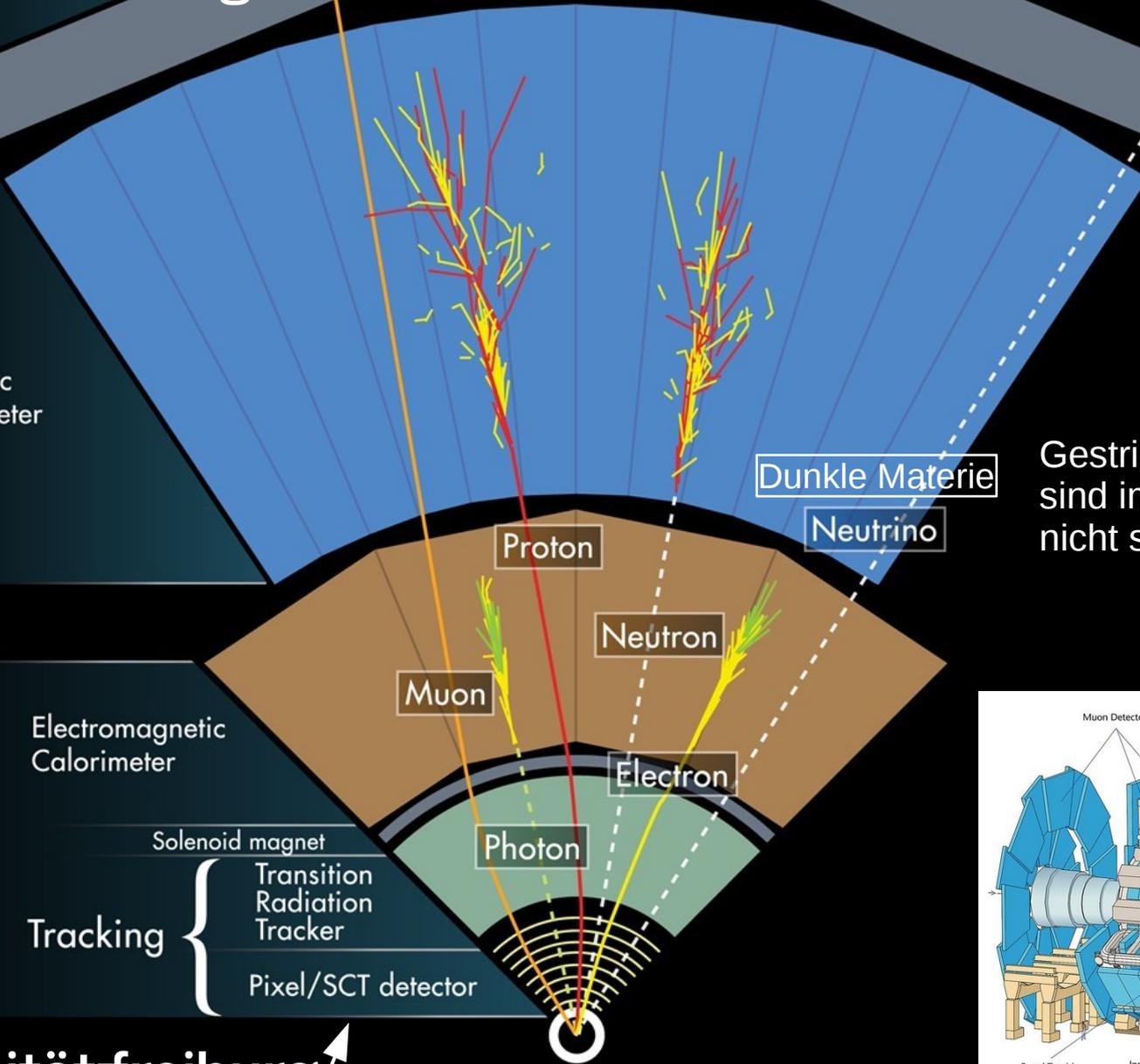
Tracking

Solenoid magnet

Transition Radiation Tracker

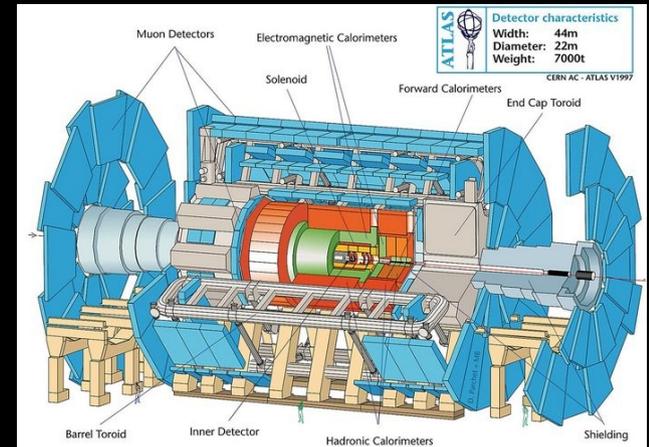
Pixel/SCT detector

universität freiburg

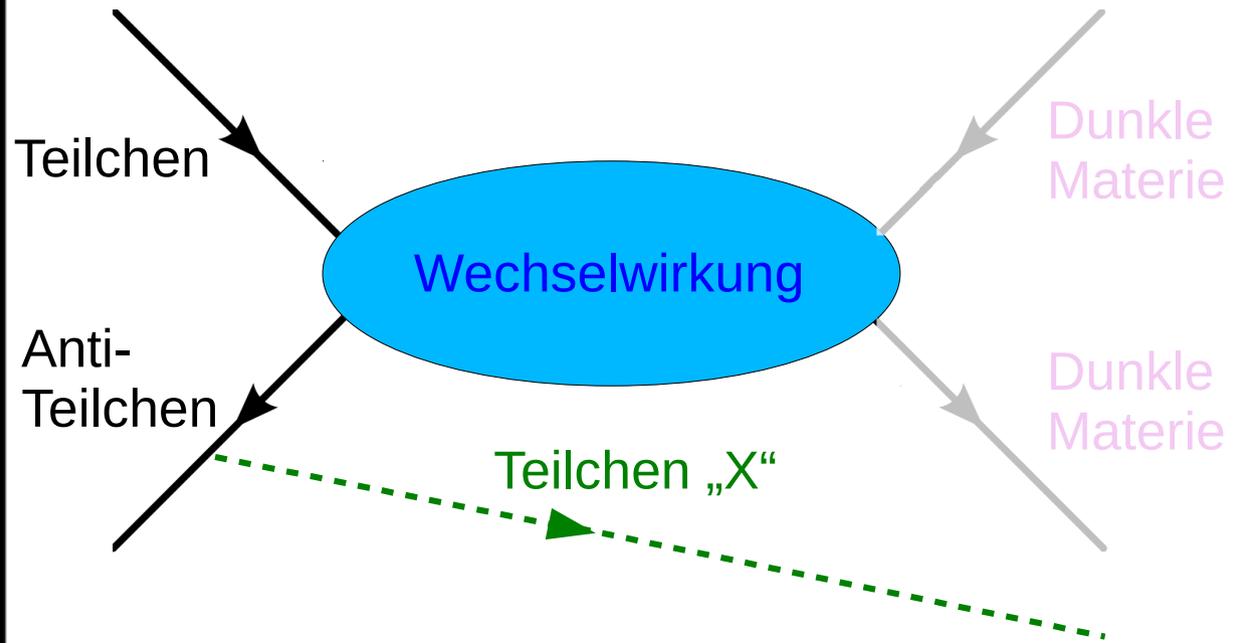
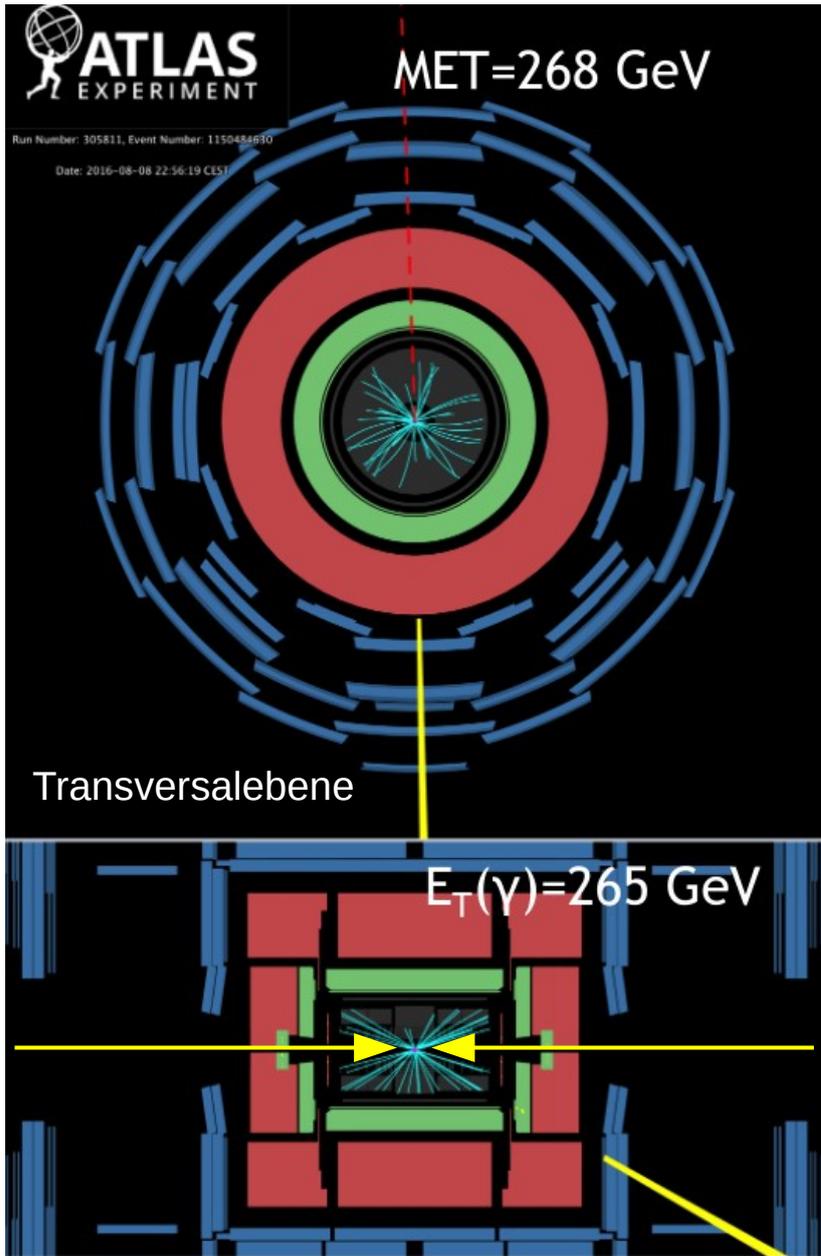


Dunkle Materie  
Neutrino

Gestrichelte Linien sind im Detektor nicht sichtbar



# Strategie II: Produktion



## „Mono-X Suche“

- Dunkle Materie macht sich als **fehlender Impuls/Energie** in der „Transversalebene“ bemerkbar
- Achtung: Untergrundsignale können genauso aussehen

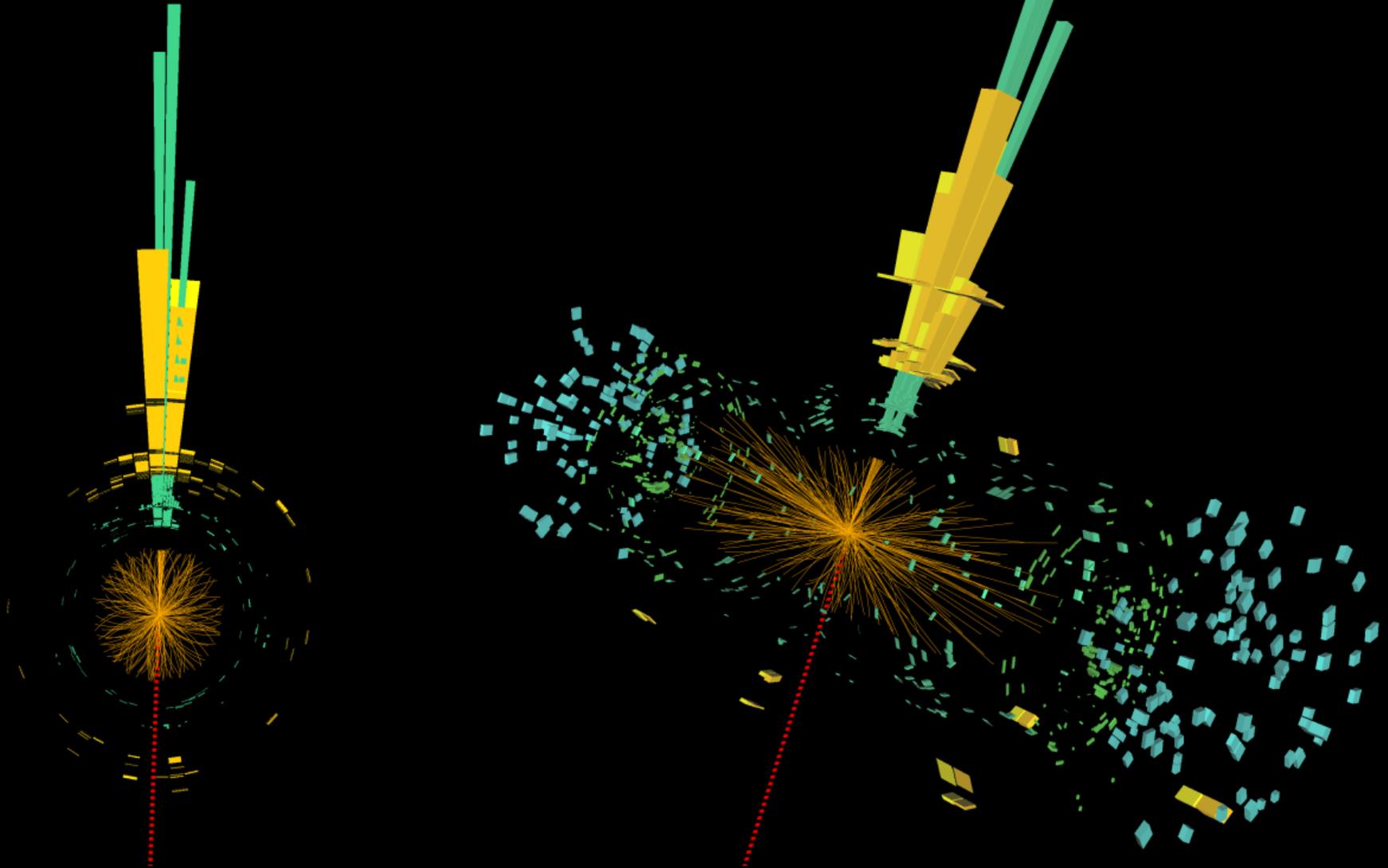
Run: 337215

Event: 2546139368

2017-10-05 10:36:30 CEST

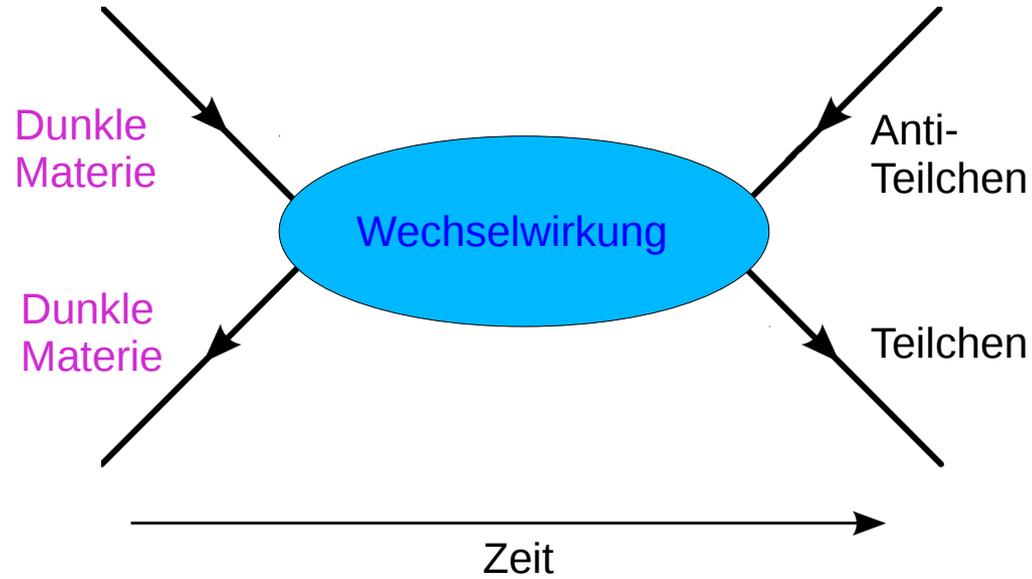
$E_T^{\text{miss}} = 1.9 \text{ TeV}$

jet  $p_T = 1.9 \text{ TeV}$

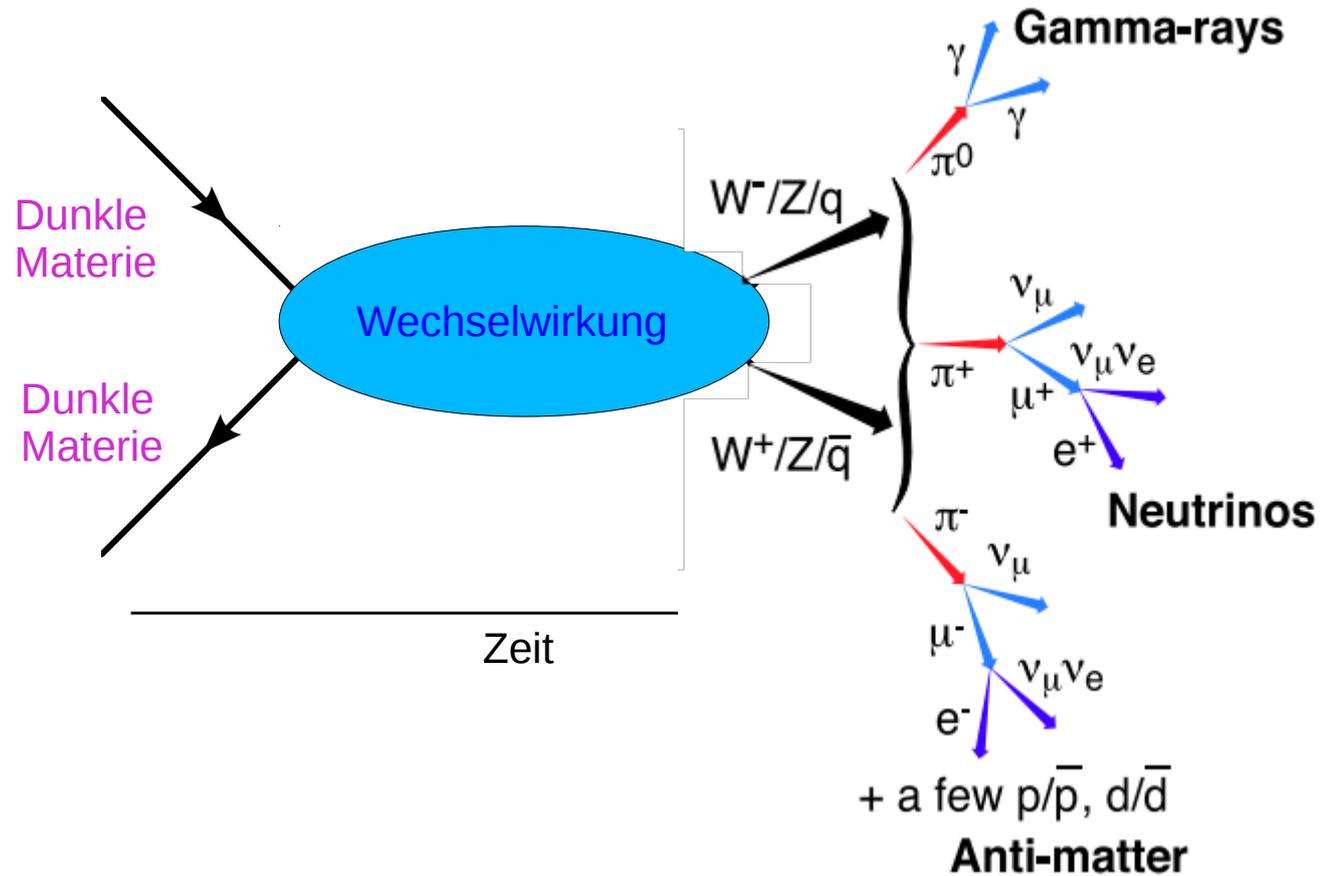


Bislang kein signifikantes Signal von Dunkler Materie gefunden.

# Strategie III: Annihilation

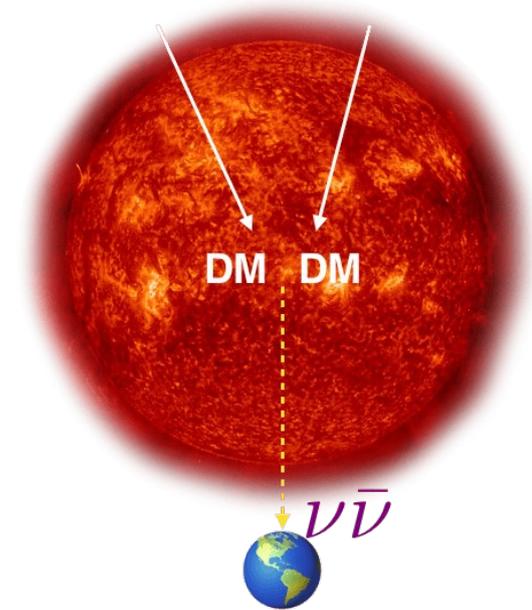
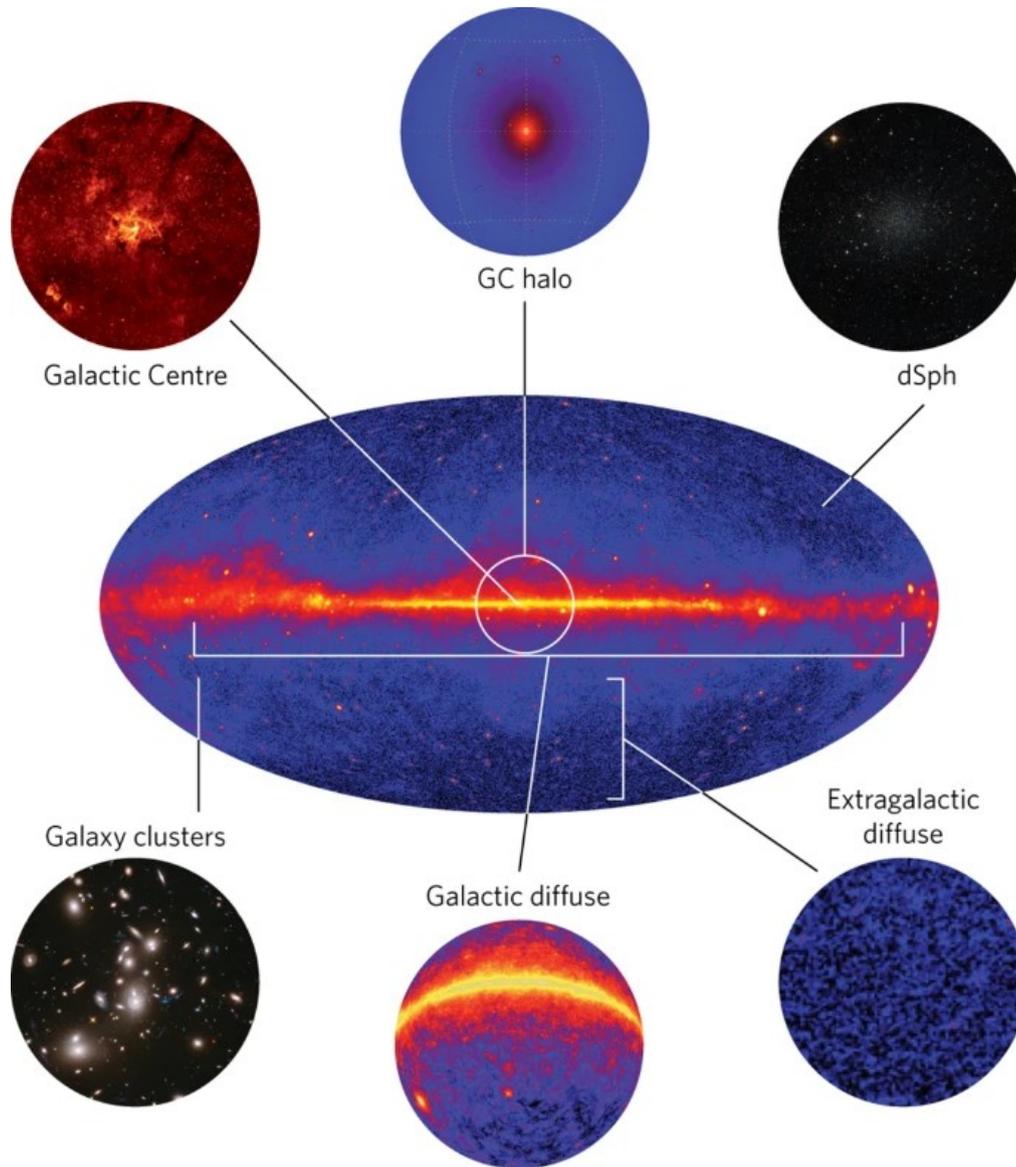


# Strategie III: Annihilation



verschiedene Teilchen sind  
im Endzustand möglich  
→ viele verschiedene Detektoren

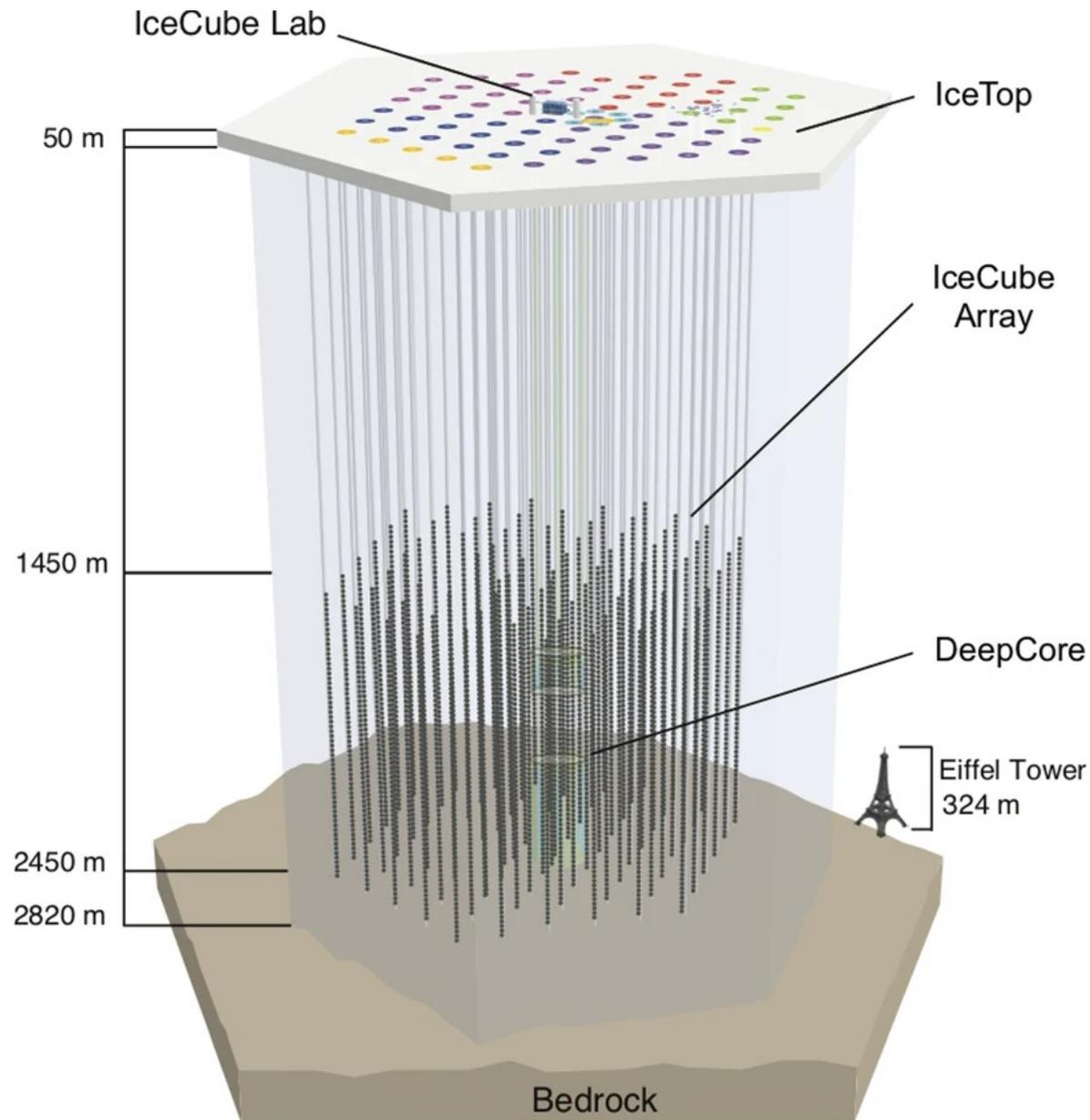
# Mögliche Signalquellen?



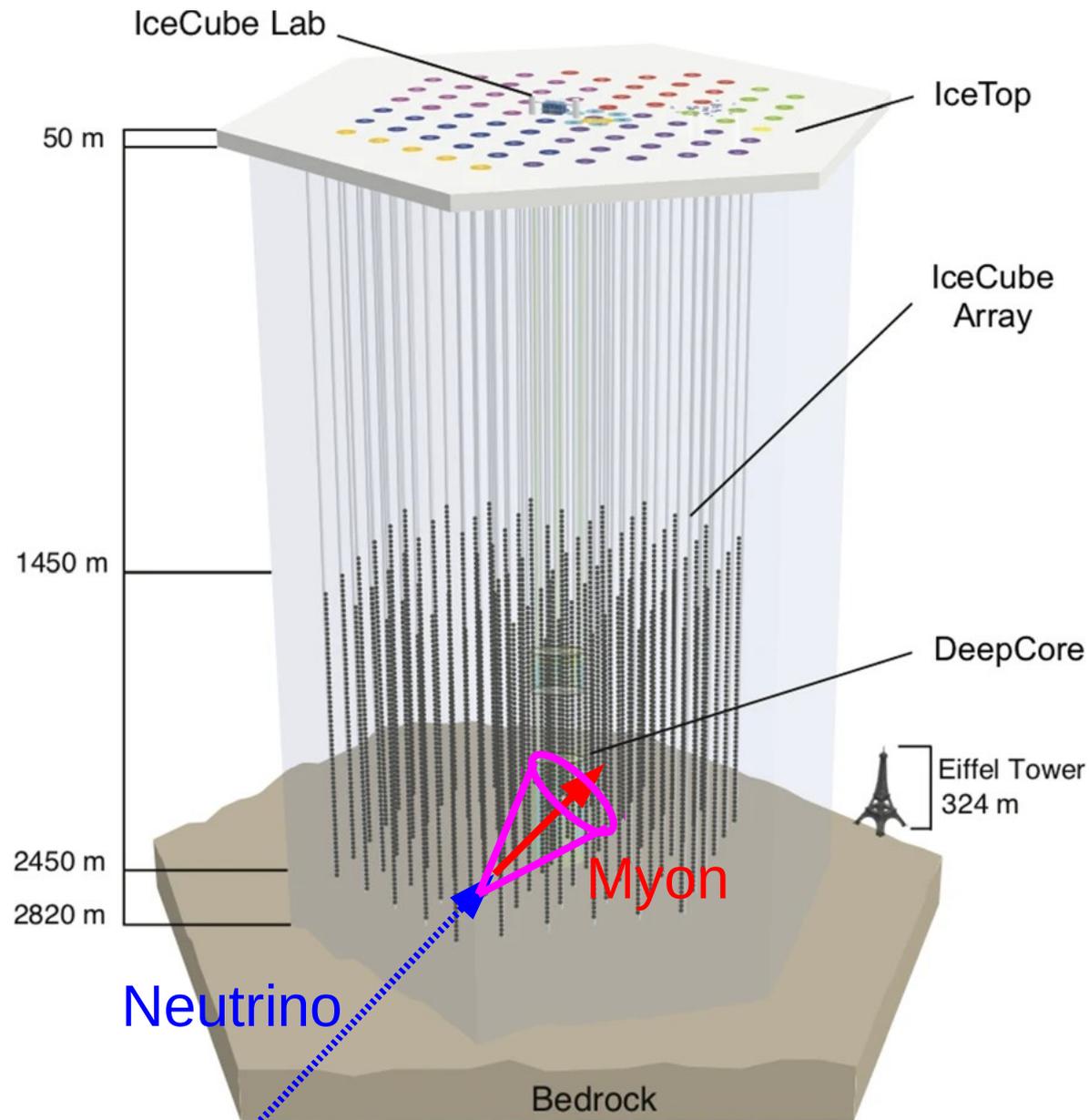
Abwägung: Dunkle Materie Signal ↔ Untergrundsignal



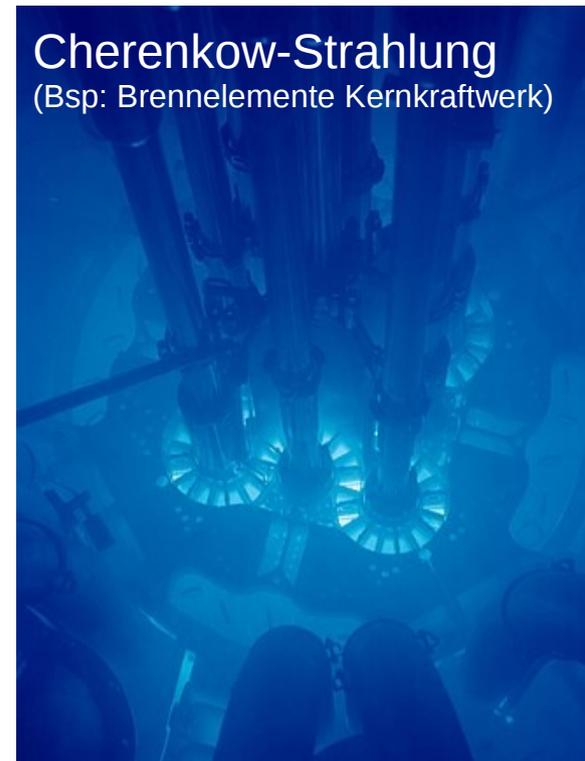
# IceCube am Südpol



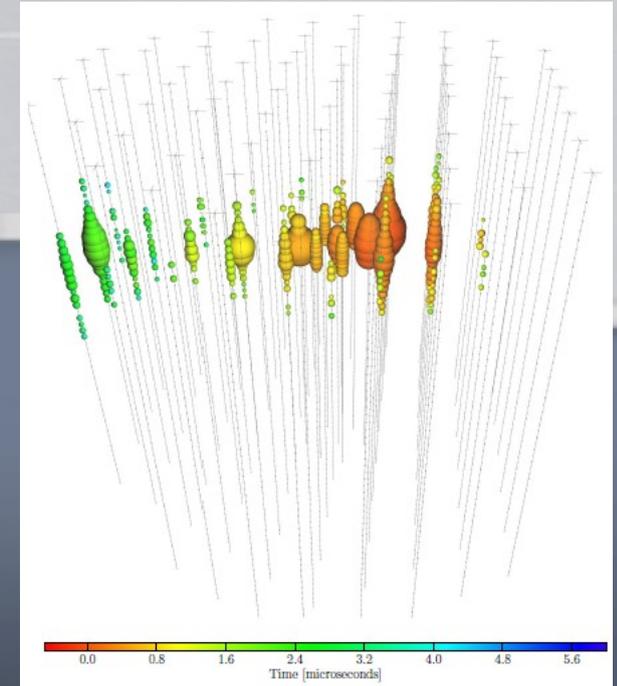
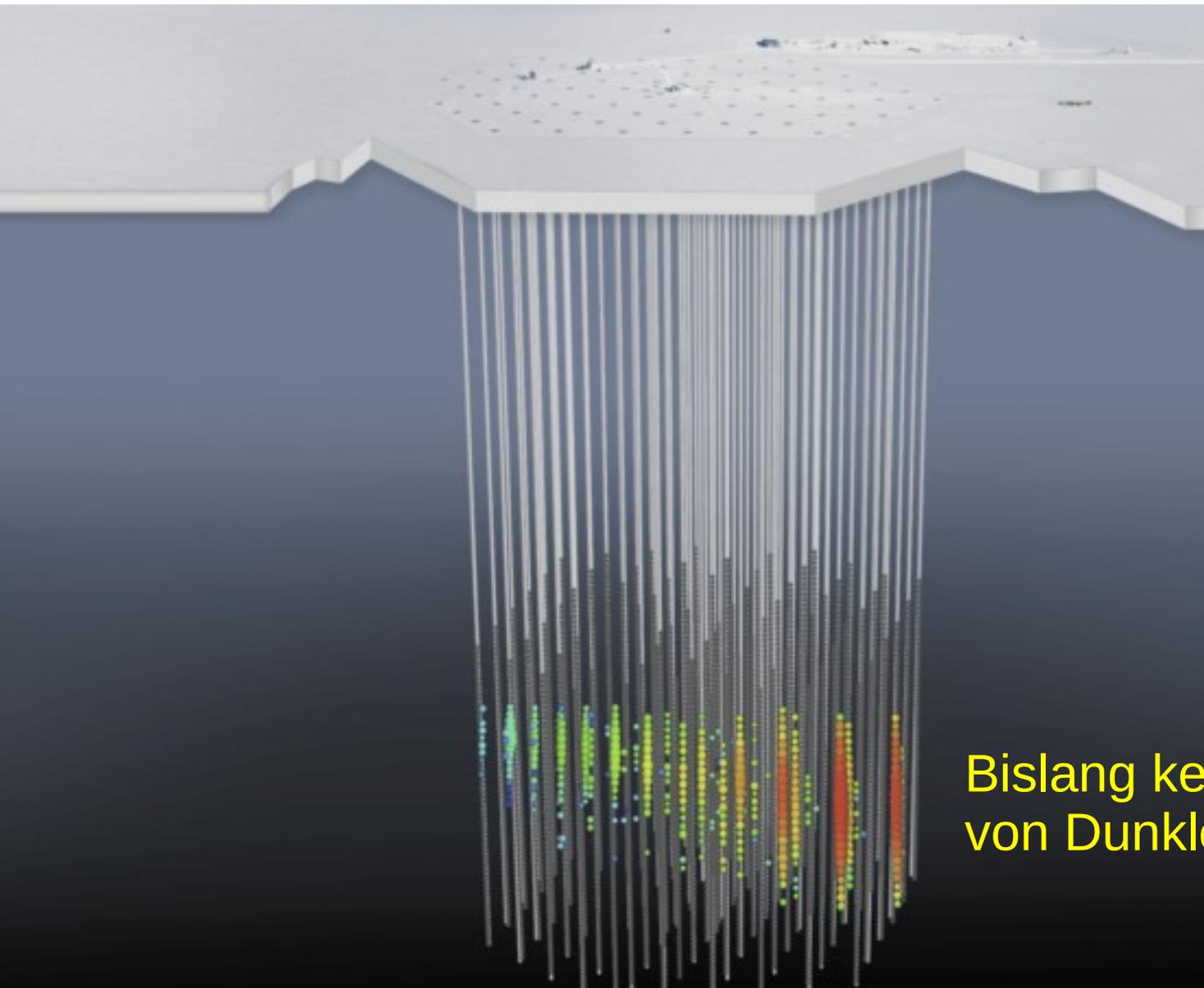
# IceCube am Südpol



Cherenkow-Strahlung  
(Bsp: Brennelemente Kernkraftwerk)



# IceCube am Südpol



Bislang kein signifikantes Signal von Dunkler Materie gefunden.

# Ausblick

Die Existenz Dunkler Materie beweist, dass es bislang **unbekannte Physik geben muss.**

Detektion von DM und Messung ihrer Eigenschaften gehören zu den wichtigsten offenen Fragen der Teilchenphysik.

XLZD (Streuung)

universität freiburg

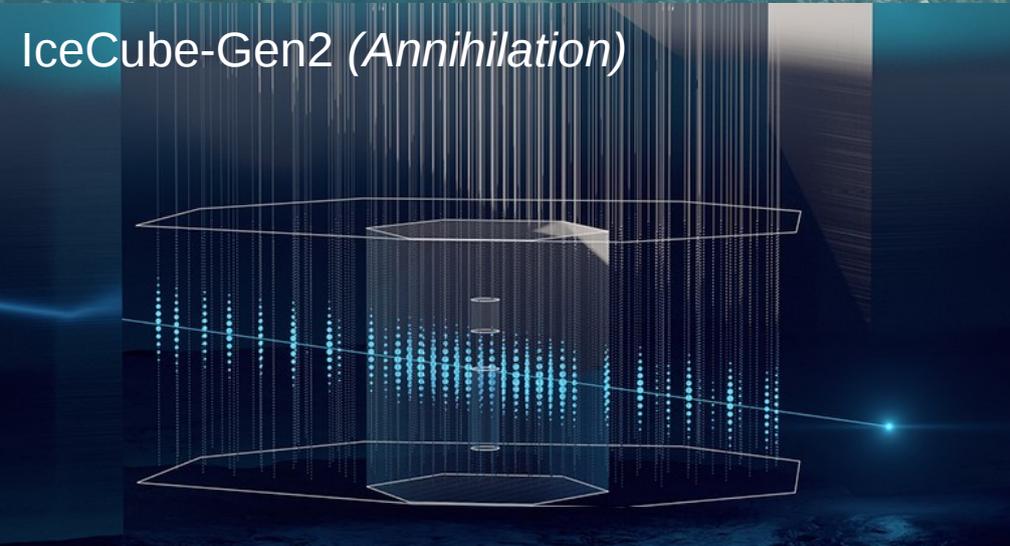


Future Circular Collider @ CERN (Produktion)

universität freiburg



IceCube-Gen2 (Annihilation)



# Ausblick

Die Existenz Dunkler Materie beweist, dass es bislang **unbekannte Physik geben muss.**

Detektion von DM und Messung ihrer Eigenschaften gehören zu den wichtigsten offenen Fragen der Teilchenphysik.

Empfindlichere (größere) Experimente werden bereits geplant.

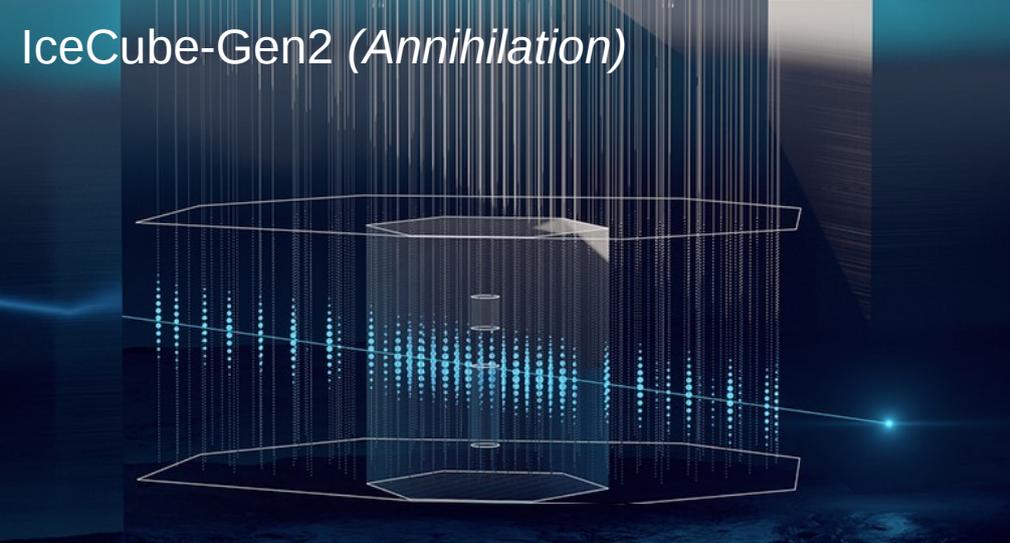
→ **breites wissenschaftliches Programm auch jenseits von Dunkler Materie**



Future Circular Collider @ CERN (Produktion)



IceCube-Gen2 (Annihilation)



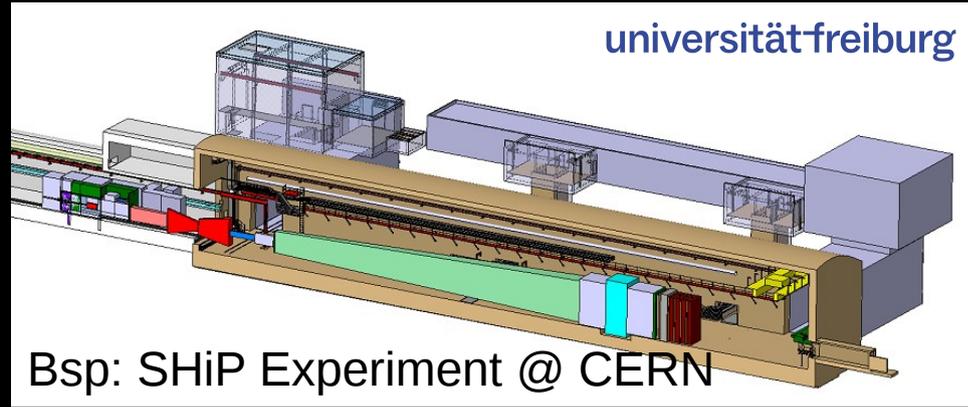
# Ausblick

Die Existenz Dunkler Materie beweist, dass es bislang **unbekannte Physik geben muss.**

Detektion von DM und Messung ihrer Eigenschaften gehören zu den wichtigsten offenen Fragen der Teilchenphysik.

Empfindlichere (größere) Experimente werden bereits geplant.  
→ **breites wissenschaftliches Programm auch jenseits von Dunkler Materie**

Zusätzlich:  
– weitere Dunkle Materie Kandidaten  
– **alternative Ansätze, neue Strategien**



Bsp: SHiP Experiment @ CERN

# Take Home Messages

**95% des Universums ist dunkel**

**27% davon ist Dunkle Materie**

→ absorbiert und emittiert kein Licht

**Wir wissen nicht, was DM ist.**

**Verschiedene Methoden zur Suche:**

- Streuung an Atomkernen
- Produktion am Beschleuniger, z.B. **CERN**
- Suche nach Annihilationsprodukten

**Herausforderung: Untergrundsignale minimieren**

**Bislang wurde Dunkle Materie nicht gefunden.**

universität freiburg



JAHRE CERN 

# Take Home Messages

**95% des Universums ist dunkel**

**27% davon ist Dunkle Materie**

→ absorbiert und emittiert kein Licht

**Wir wissen nicht, was DM ist.**

**Verschiedene Methoden zur Suche:**

- Streuung an Atomkernen
- Produktion am Beschleuniger, z.B. **CERN**
- Suche nach Annihilationsprodukten

**Herausforderung: Untergrundsignale minimieren**

**Bislang wurde Dunkle Materie nicht gefunden.**



**Die Suche  
geht weiter!**

**universität freiburg**



**JAHRE CERN** 