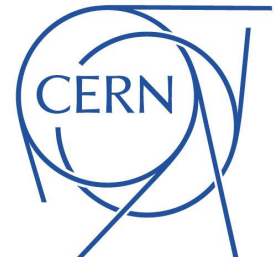


# Neue Physik

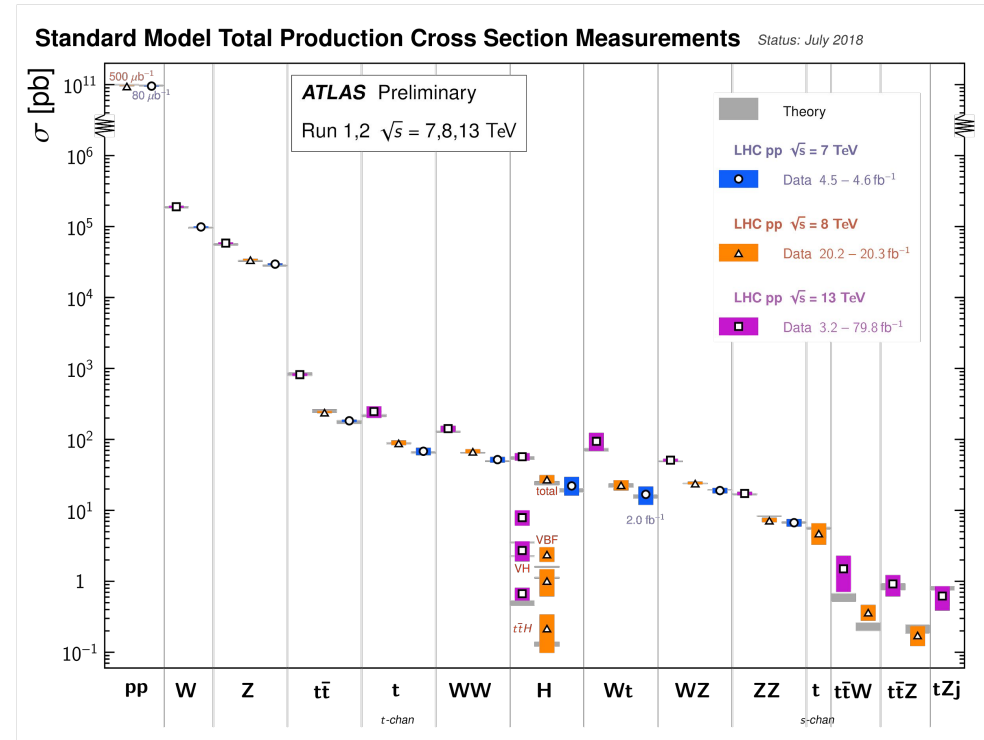
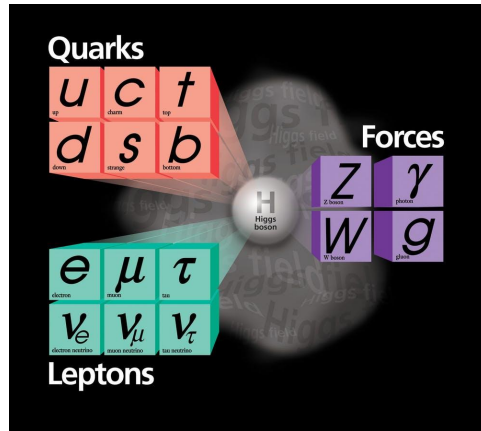
## Warum brauchen wir sie?

14. Juni 2022  
German Teacher Program



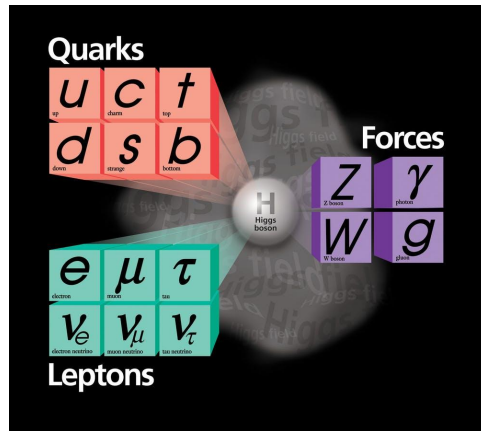
# Das Standardmodell

- Das **Standardmodell (SM)** beschreibt alle bekannten **Elementarteilchen** und deren **Wechselwirkungen**.
- Es wurde am LHC und an anderen Experimenten getestet.
- Wir können jedoch nicht alle bekannten Phänomene damit beschreiben.



# Das Standardmodell

- Das **Standardmodell (SM)** beschreibt alle bekannten **Elementarteilchen** und deren **Wechselwirkungen**.
- Es wurde am LHC und an anderen Experimenten getestet.
- Wir können jedoch nicht alle bekannten Phänomene damit beschreiben...



## Materieteilchen (Fermionen)

- Quarks [(u,d), (s,c), (b,t)]
- Leptonen [(e,  $\nu_e$ ), ( $\mu$ ,  $\nu_\mu$ ), ( $\tau$ ,  $\nu_\tau$ )]

## Austauschteilchen (Bosonen)

- Gluonen g
  - Starke Wechselwirkung
- $W^\pm, Z^0$  Bosonen
  - Schwache Wechselwirkung
- Photonen  $\gamma$ 
  - Elektromagnetische Wechselwirkung
- Higgs  $H$

# Was sind die offenen Fragen?

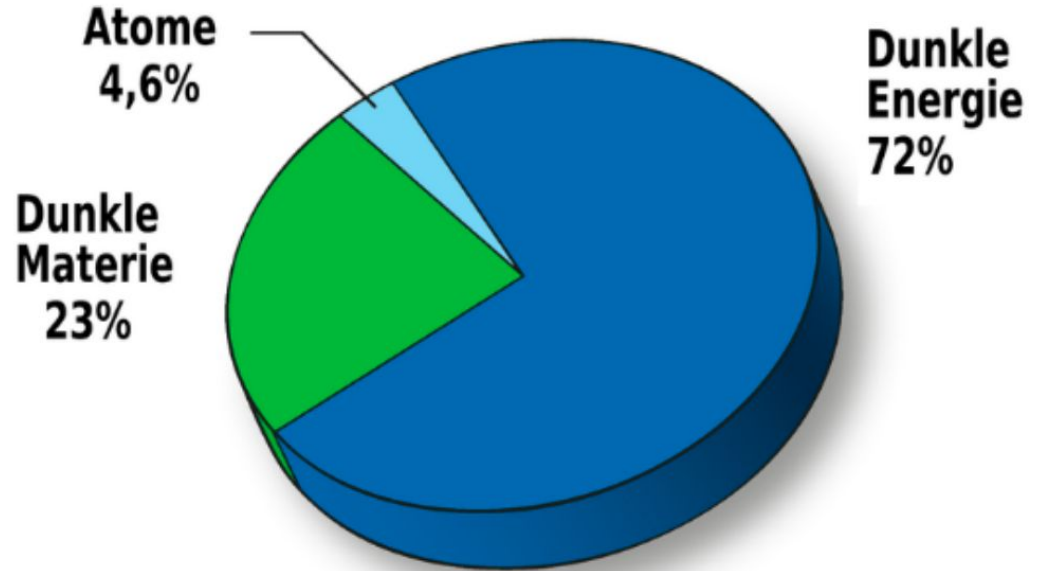
---

- Wieso ist die Gravitation nicht im SM enthalten?
- Dunkle Materie?
- Dunkle Energie?
- Antimaterie
- Neutrinomassen
- Vereinigung der Kräfte bei hohen Energien
- ....

Warum glauben wir, dass es sie gibt?

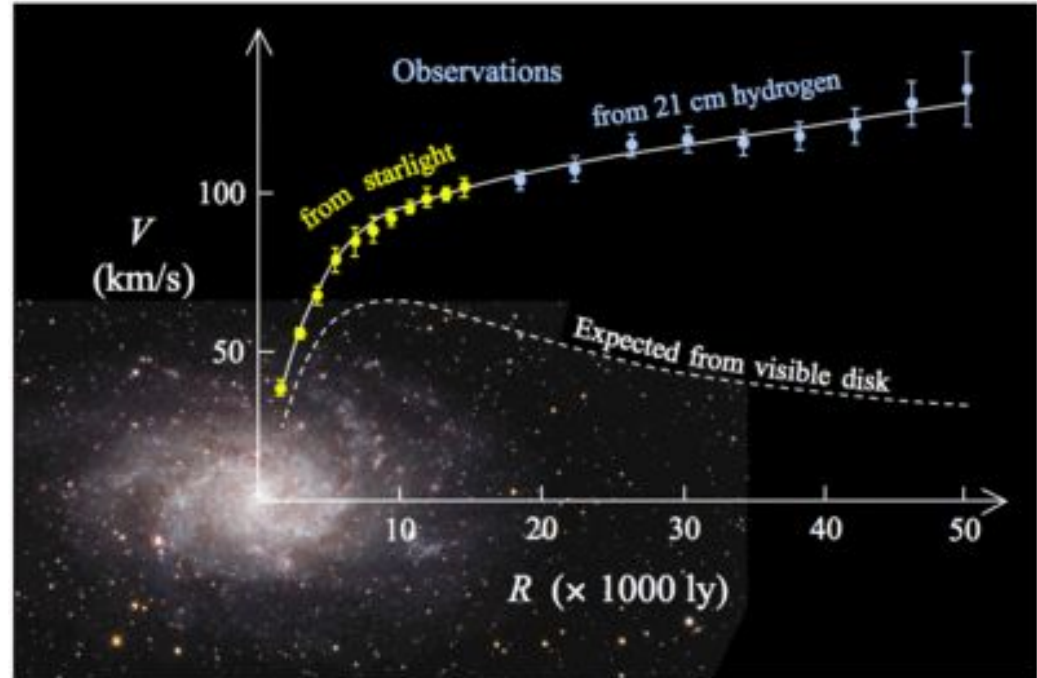
- 1933: Fritz Zwicky beobachtete, dass ein Vielfaches der beobachtbaren Masse des COMA Galaxienhaufens notwendig wäre, um ihn zusammenzuhalten.

→ **Dunkle (kalte) Materie**

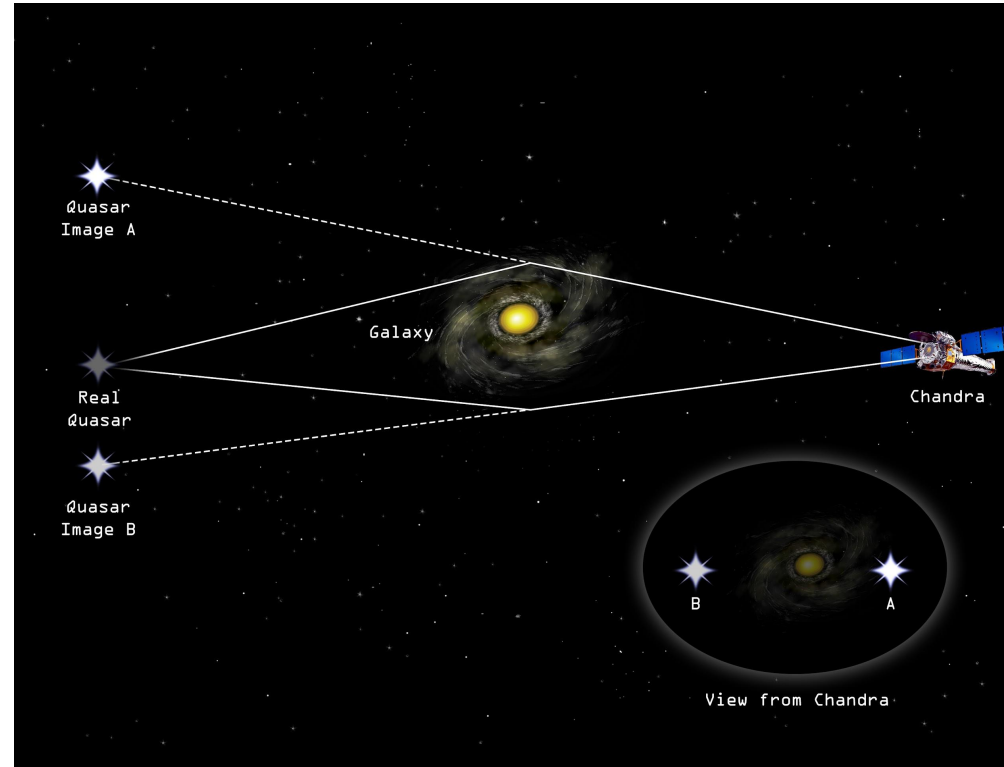


- **Berechnete und beobachtete Rotationsgeschwindigkeit** von Galaxien sind verschieden.

⇒ Der Großteil der Masse ist **unsichtbar** für uns.

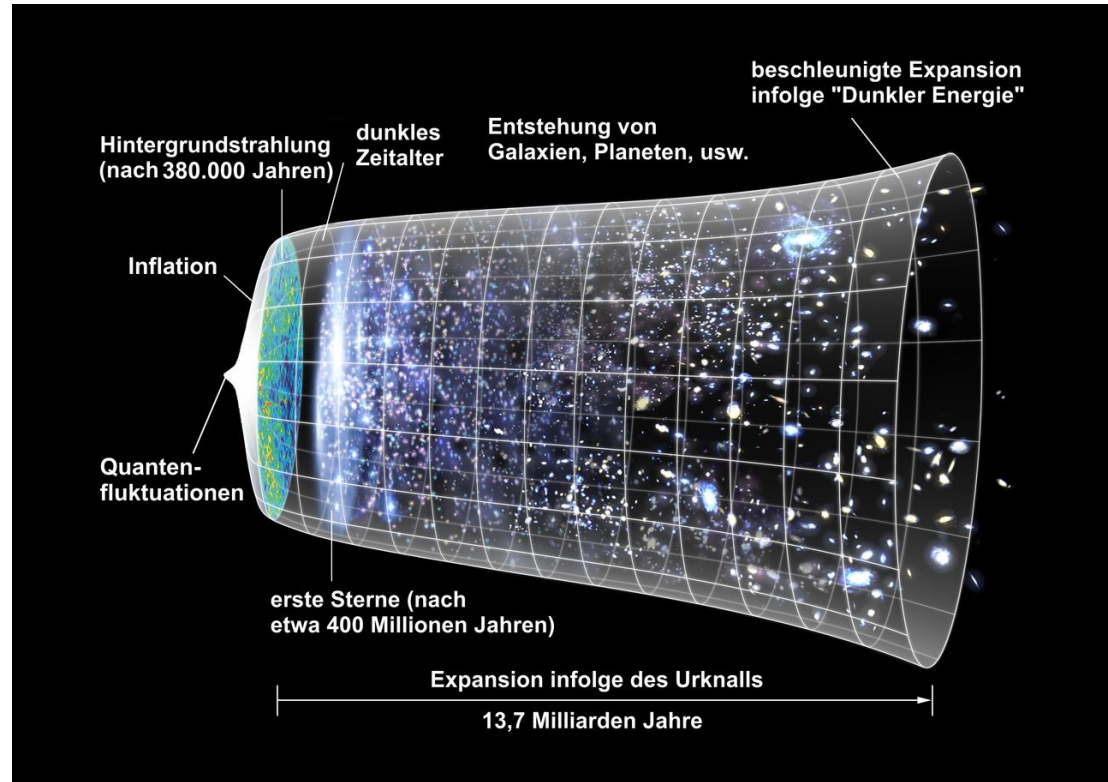


- Große Anhäufung von Materie kann **Lichtwege krümmen**.
  - Die Wirkung beruht auf der **allgemeinen Relativitätstheorie** (große Masse oder Energie krümmt die **Raumzeit**).
  - Die beobachtete Masse der Galaxien reicht nicht aus, um die Krümmung zu rechtfertigen.
- Sie muss durch **für uns nicht direkt beobachtbare Materie** verursacht werden.



Warum glauben wir, dass es sie gibt?

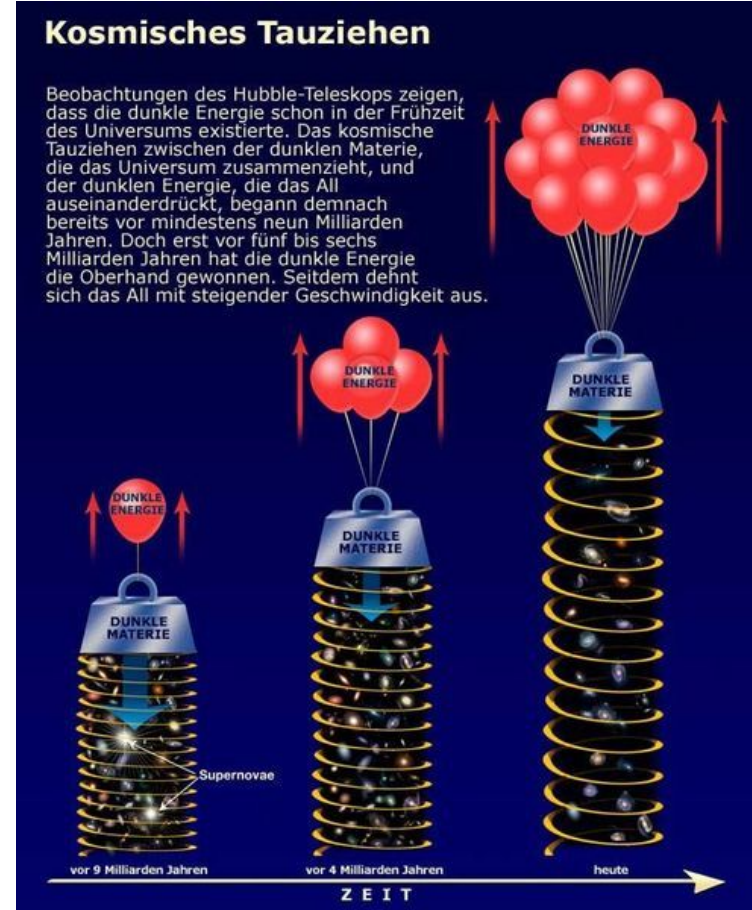
- Beobachtungen der Ausdehnung des Universums zeigen, dass die **Ausdehnungsgeschwindigkeit zunimmt**.
- Wir haben allerdings keine Vorstellung davon, was dunkle Materie ist!





Warum glauben wir, dass es sie gibt?

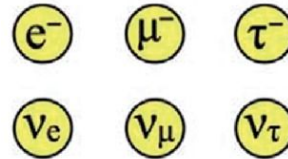
- Beobachtungen der Ausdehnung des Universums zeigen, dass die **Ausdehnungsgeschwindigkeit zunimmt**.
- Wir haben allerdings keine Vorstellung davon, was dunkle Materie ist!



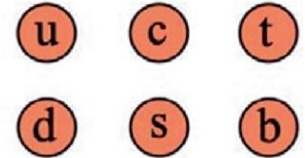
# Antimaterie

- Zu jedem Teilchen gibt es ein **Antiteilchen** mit **gleicher Masse**, aber **entgegengesetzter Ladung**.
- Sie entstehen in der Natur beispielsweise in der **Höhenstrahlung** und beim **Beta-Plus-Zerfall**.
- Antiatome sind in der Natur nicht bekannt und können nur in Experimenten hergestellt werden.

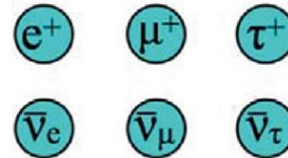
leptons



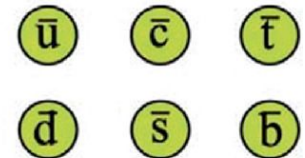
quarks



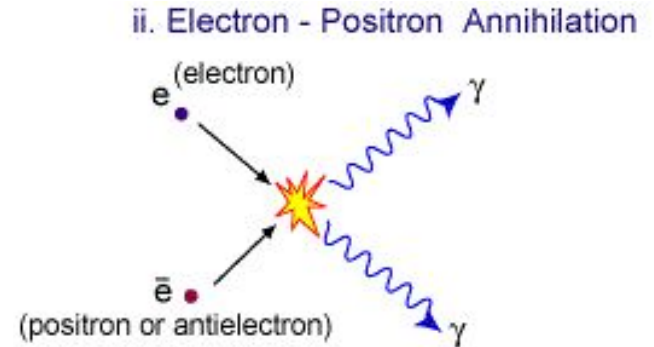
antileptons



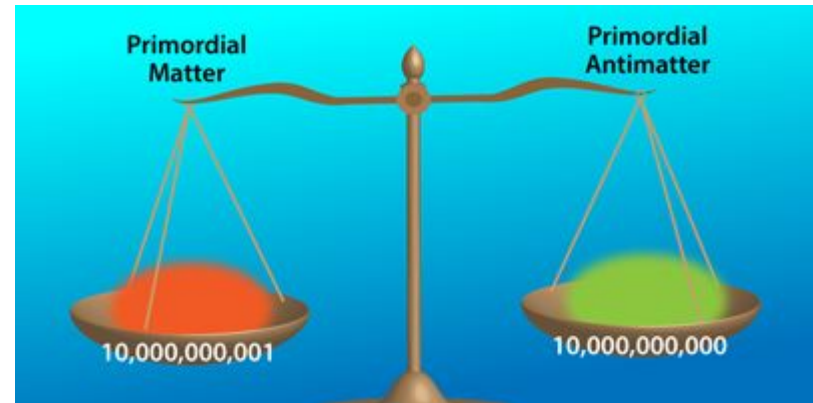
antiquarks



- Trifft ein Teilchen auf ein Antiteilchen, zerstrahlen sie in **Photonen**.
- **Wie kommt es, dass nicht alle Materie des Universums zerstrahlt ist?**

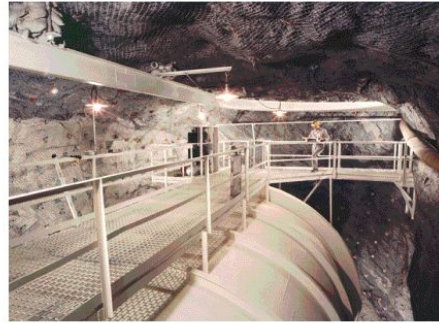


- Trifft ein Teilchen auf ein Antiteilchen, zerstrahlen sie in **Photonen**.
  - **Wie kommt es, dass nicht alle Materie des Universums zerstrahlt ist?**
- **Symmetriebrechung:**  
Es kommen 10.000.000.001 Teilchen auf 10.000.000.000 Antiteilchen!



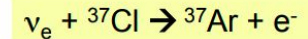
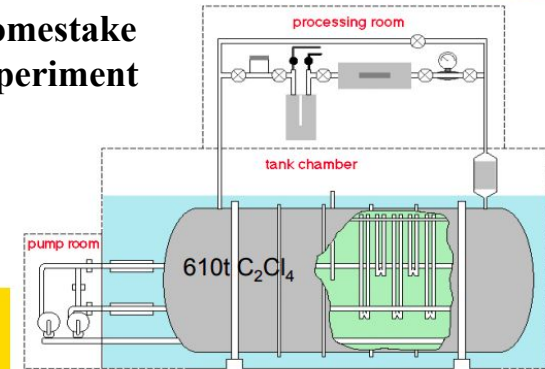
- Warum gibt es mehr **Materie** als **Antimaterie** im Universum?
- Was ist **dunkle Energie**?
- Was ist **dunkle Materie**?

- Neutrinos ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) im SM sind masselos und können nicht von einem in das andere Neutrino übergehen.
- Solar neutrino problem
  - Entdeckt am **Homestake experiment**.
  - **Neutrinofluss** von der Sonne kleiner als erwartet!
  - Wo sind die fehlenden Neutrinos?



**Result:**  
**Measured flux:** 2.56 SNU  
**Expected:** 8.5 SNU

## Homestake experiment

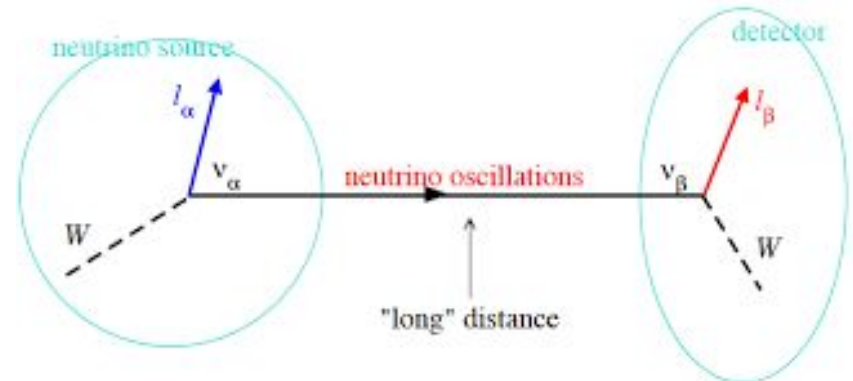


- Neutrinos ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ) im SM sind

**ANTWORT:  
NEUTRINOOSZILLATIONEN!**

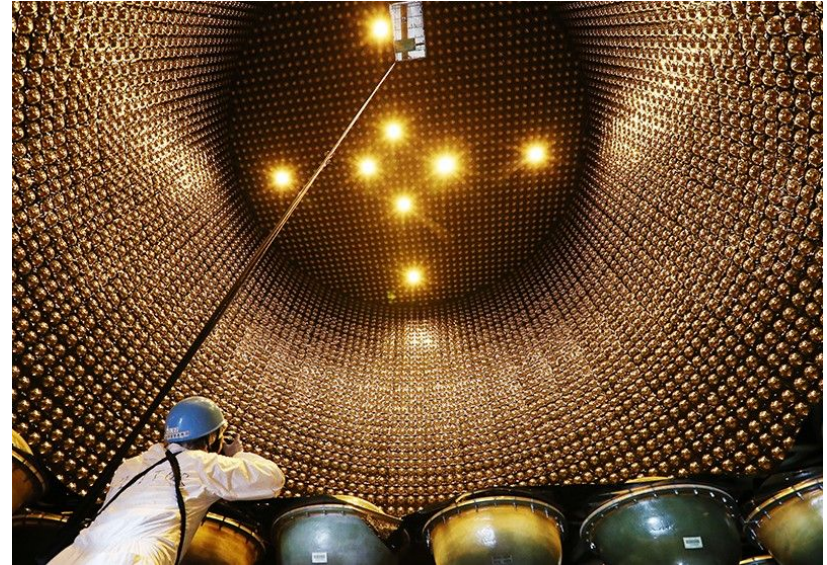
# Neutrinooszillationen

- **Neutrinooszillationen** = Umwandlung von Neutrinos mit einem Lepton-flavor in Neutrinos mit anderem Lepton-flavor.
  - Zumindest zwei der SM Neutrinos haben eine Masse  $> 0$ !
- Zum ersten Mal beim **Super-Kamiokande** Experiment nachgewiesen.





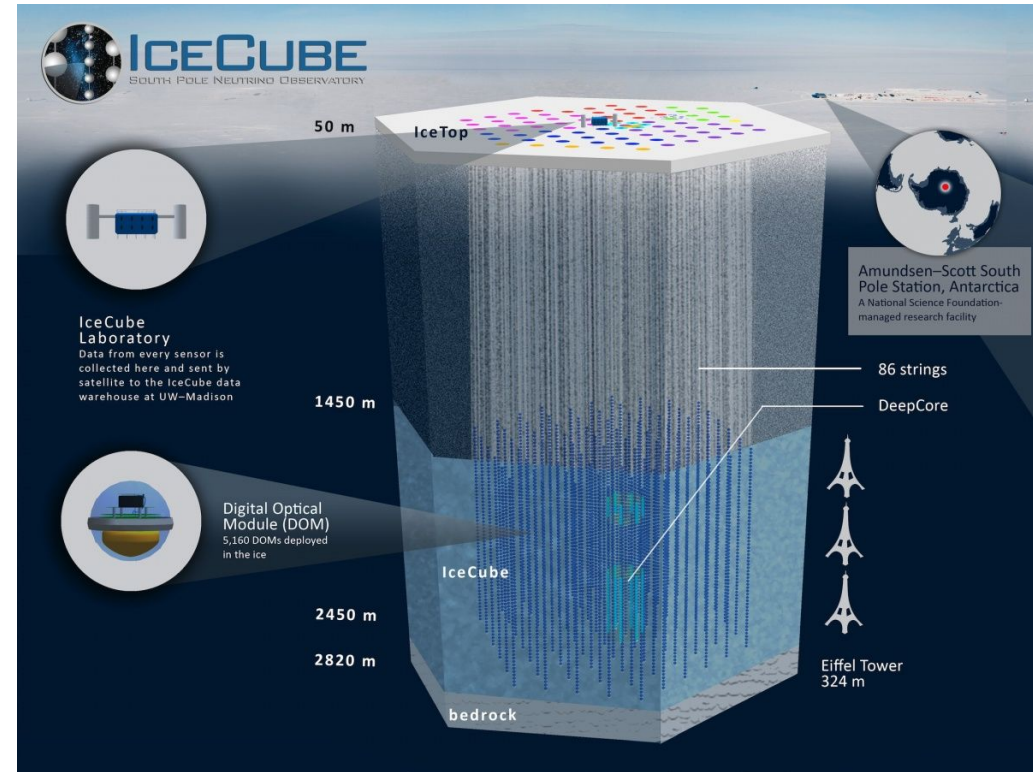
- **Experiment befindet sich 1000m unter der Erde.**
- Tank gefüllt mit hochreinem Wasser. An den Wänden befinden sich **Photomultiplier** mit denen man die folgenden Reaktionen nachweisen kann:
  - $\nu_e + N \rightarrow e + X$
  - $\nu_\mu + N \rightarrow \mu + X$
  - $\nu_\tau + N \rightarrow \tau + X$
- **Diskrepanz zwischen gemessenem und erwartetem Myon-Neutrinofluss** wurde nachgewiesen!
- Beweis für **Neutrinooszillationen**



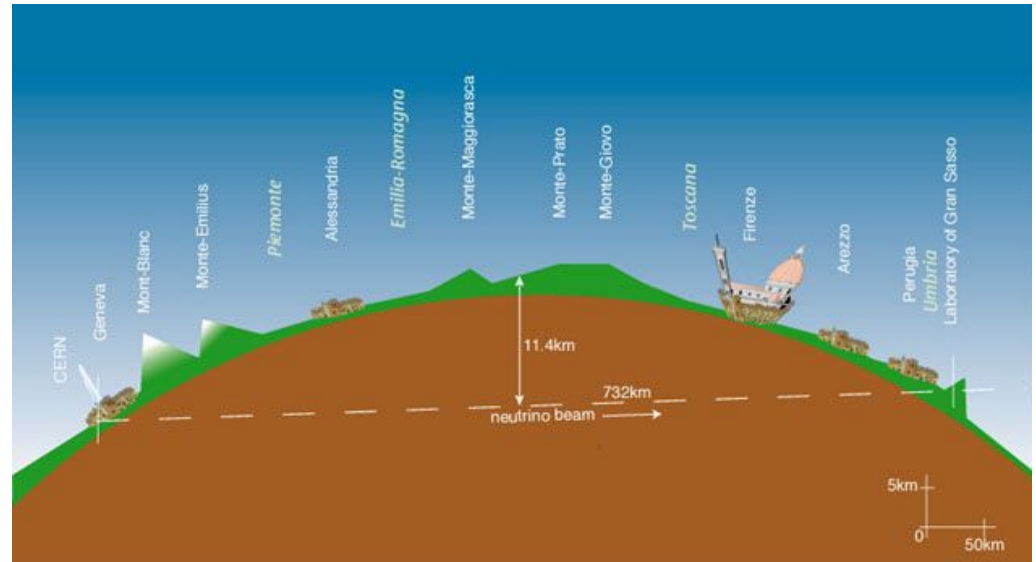
# Ice cube



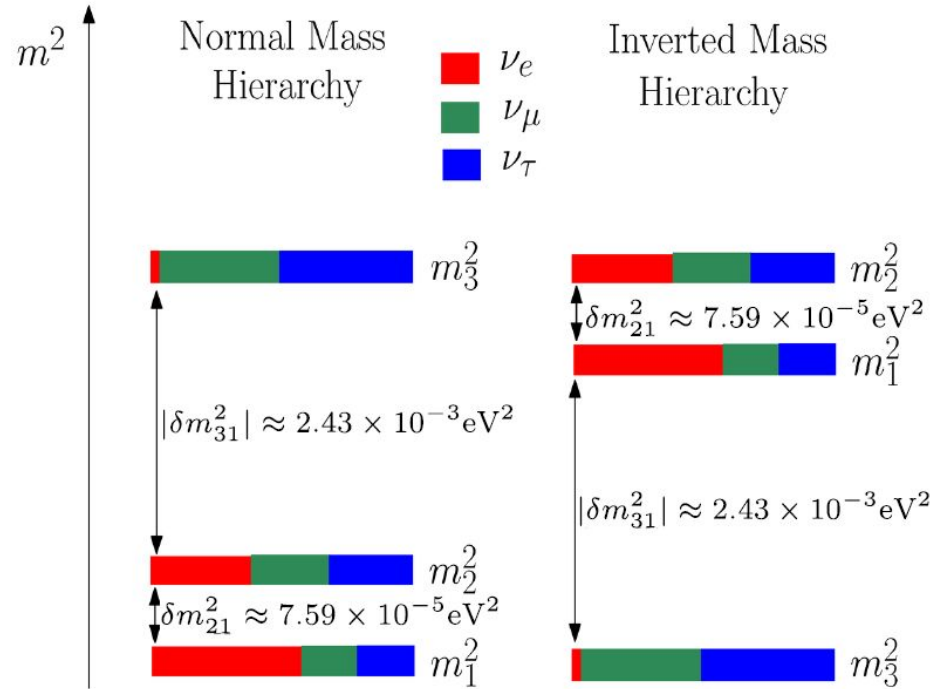
- Suche nach **hochenergetischen Neutrinos** die **nicht aus unserem Solarsystem** stammen.
- 2018 wurde erstmals ein **hochenenergetisches Neutrino (290 TeV)** von einem 4,5 Milliarden Lichtjahre entfernten aktiven Galaxienkern nachgewiesen.
- Insgesamt wurden 28 “extraterrestrial” Neutrinos nachgewiesen.



- **CNGS - CERN Neutrinos to Gran Sasso**
- **Myon-Neutrinostrahl** vom CERN Richtung Gran Sasso gerichtet.
- In Gran Sasso zwei Experimente:
  - **OPERA**
  - **ICARUS**
- Beide wurden zum **Nachweis von Neutrinooszillationen von  $\nu_\mu$  nach  $\nu_\tau$**  verwendet.



- In allen Experimenten rund um Neutrinooszillationen messen wir immer nur die **Massenunterschiede** zwischen den verschiedenen Neutrinos
- Eigentlich messen wir die **Masse zum Quadrat!** Deswegen wissen wir nicht, welches Neutrino die größte Masse hat und können die Ordnung beliebig umkehren.



- Warum sind Neutrinomassen so klein?
  - Es gibt mehrere Theorien! Eine der populärsten ist der “**Seesaw mechanism**”.
  - **Seesaw mechanism:**  
Ein schweres Neutrino  $N$  (Masse  $m_N$ ) wird postuliert, das die kleinen Massen  $m_\nu$  der anderen Neutrinos erklärt.
    - $m_\nu \sim y_\nu^2 v^2 / m_N$
    - $y_\nu$  Yukawa Kopplungskonstante,  $v$  Higgs Vakuumerwartungswert
- Man erhält ein schweres und ein leichtes Neutrino!



# Absolute Neutrinomassenmessung: Katrin

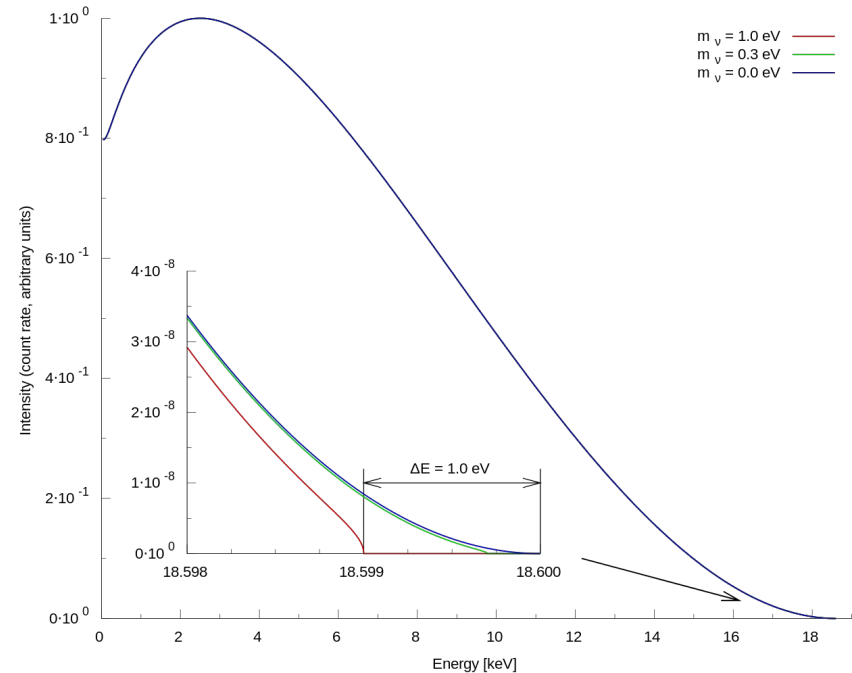


- **KATRIN** - Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment  
Messungen werden seit 2018 durchgeführt.
- Experiment zur **Bestimmung der Masse des Elektron-Antineutrinos**.
- Das **Betaspektrum des Zerfalls von Tritium** mit einer Empfindlichkeit von **0.2 eV** wird gemessen.
- Eines der wenigen Experimente, das die **absolute Neutrinomasse** zu messen versucht.



# Absolute Neutrinomassenmessung: Katrin

- **KATRIN** - Karlsruhe Tritium Neutrino Experiment  
Messungen werden seit 2018 durchgeführt.
- Experiment zur **Bestimmung der Masse des Elektron-Antineutrinos**.
- Das **Betaspektrum des Zerfalls von Tritium** mit einer Empfindlichkeit von **0.2 eV** wird gemessen.
- Eines der wenigen Experimente, das die **absolute Neutrinomasse** zu messen versucht.

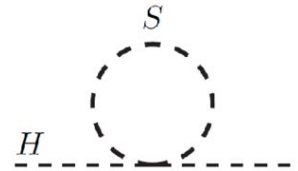
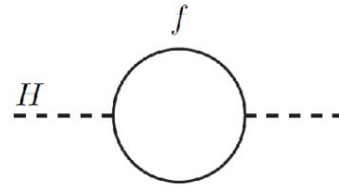


# Hierarchieproblem

- Bei der Higgsmasse sind sehr **große Korrekturen** von jedem Teilchen das an das Higgsfeld koppelt notwendig.  
Das sind beispielsweise **Scheifekorrekturen** von **Fermionen  $f$**  oder **Skalaren  $S$** .

- Die Korrekturen eines Fermions sind proportional zu:

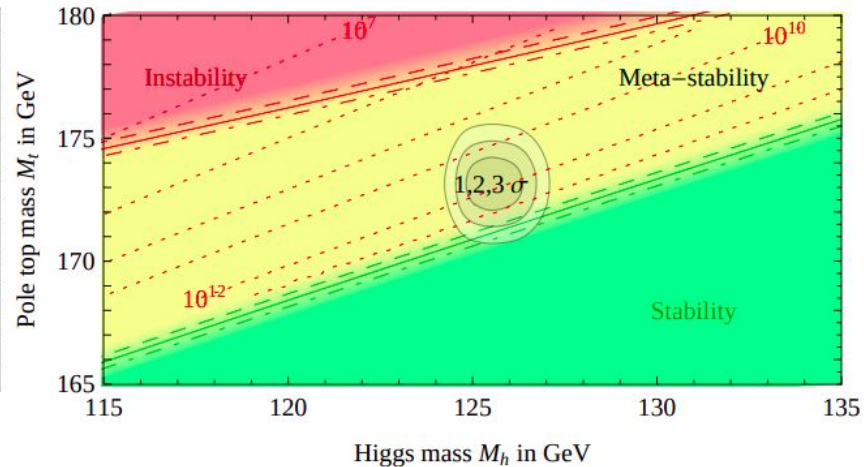
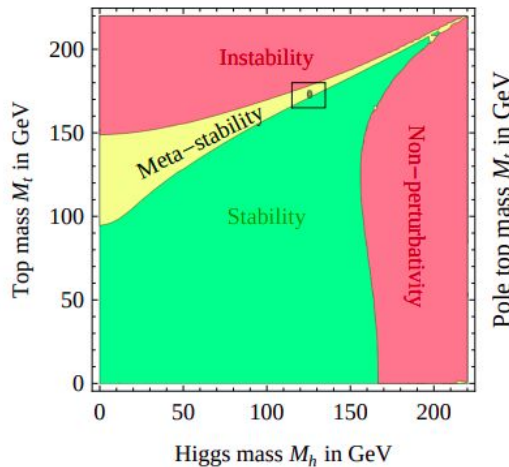
$$\Delta m_H^2 = -\frac{|\lambda_f|^2}{8\pi^2} \Lambda_{UV} + \dots$$



- Falls das SM für alle Energien stimmen würde, wäre die Higgsmasse **unendlich**:  $\Lambda_{UV} = \infty$ ,  $m_H = \infty$
- Da das offensichtlich nicht der Fall ist, kann das SM nicht für alle Energien stimmen!

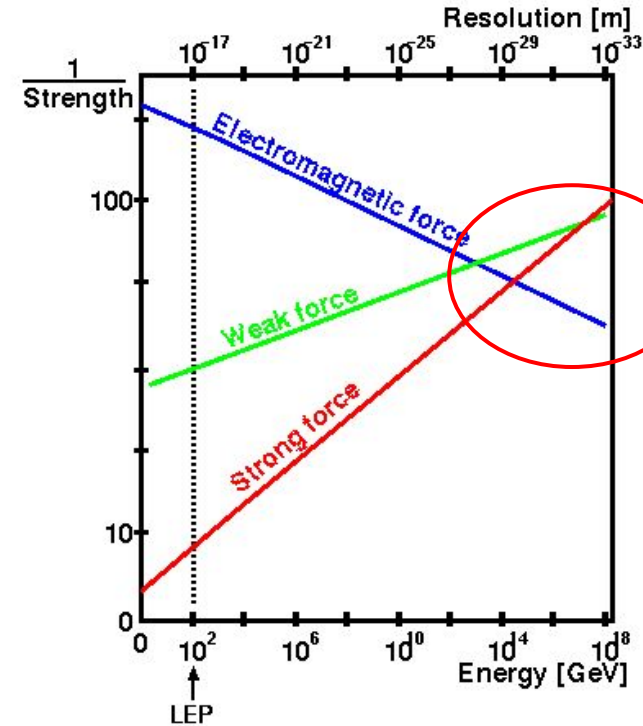


- Um den Zustand des Universums zu erklären, ist für viele Naturkonstanten eine genaue **Abstimmung** ihrer Größe notwendig.
- Entweder es befindet sich alles in einem sehr labilen Gleichgewicht oder (wahrscheinlicher) **uns fehlt das notwendige Verständnis** für neue Physik!

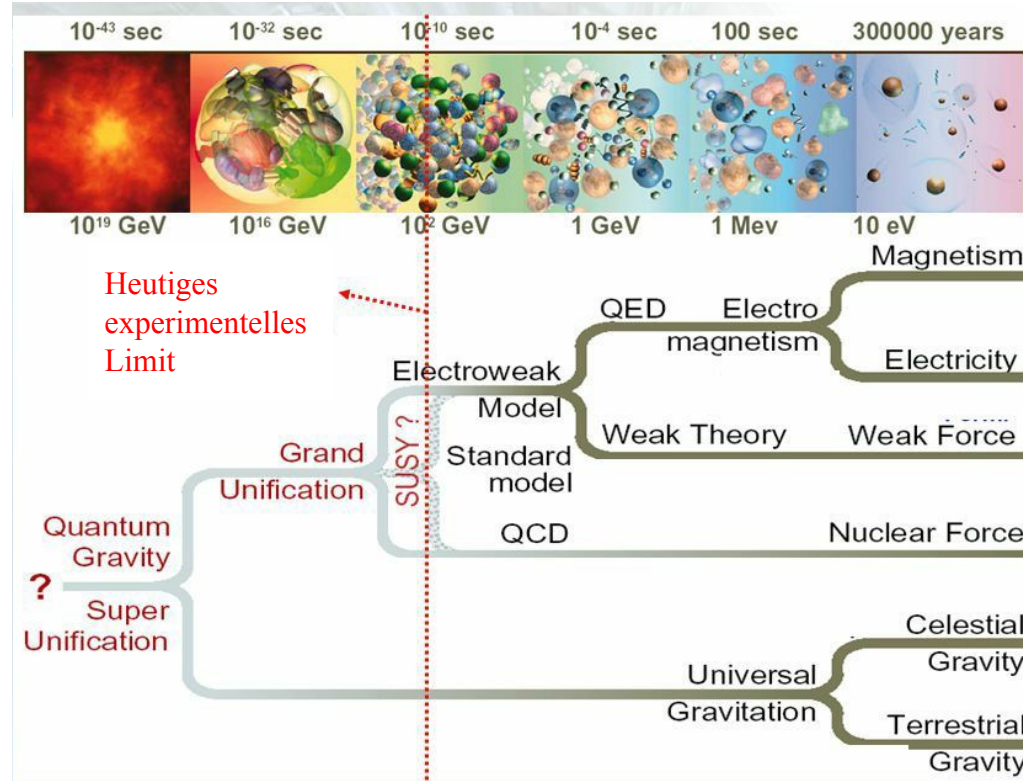


# Vereinigung (?) der Kopplungskonstanten

- Falls die elektromagnetische und starke Kraft vereint sind, können Leptonen und Quarks ineinander übergehen.
- Die Masse, bei der sie sich vereinen, muss groß genug sein, um **mit der Halbwertszeit des Protons kompatibel** zu sein (derzeit  $> 10^{31}$  years).
- Vereinigung aller Kräfte wird als **Grand Unified Theory (GUT)** bezeichnet.

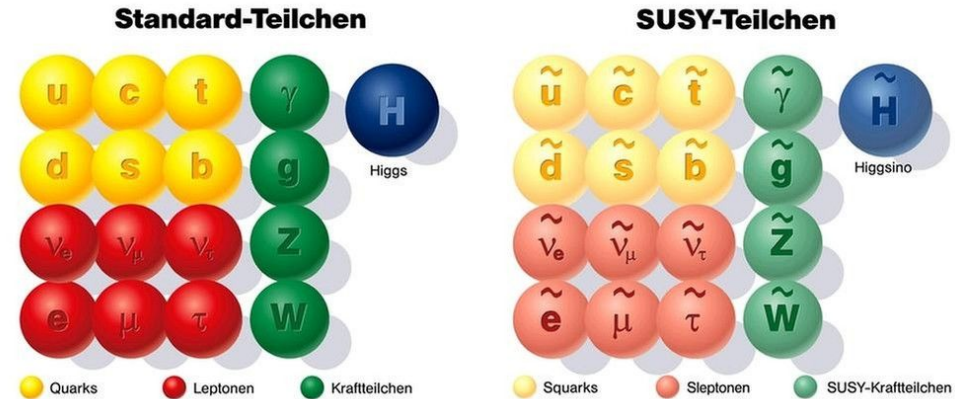


# Grand Unified Theory (GUT)

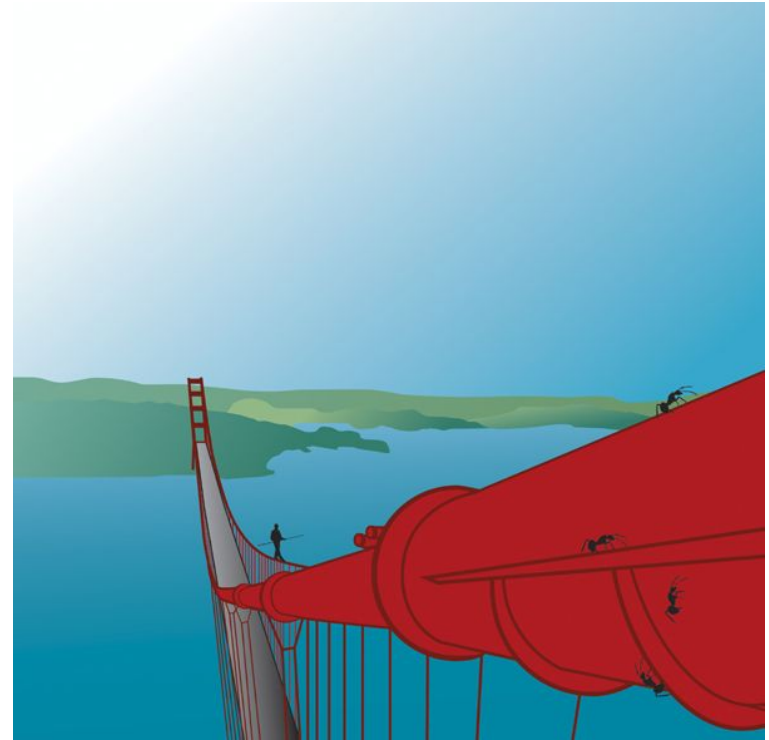


# Supersymmetrie (SUSY)

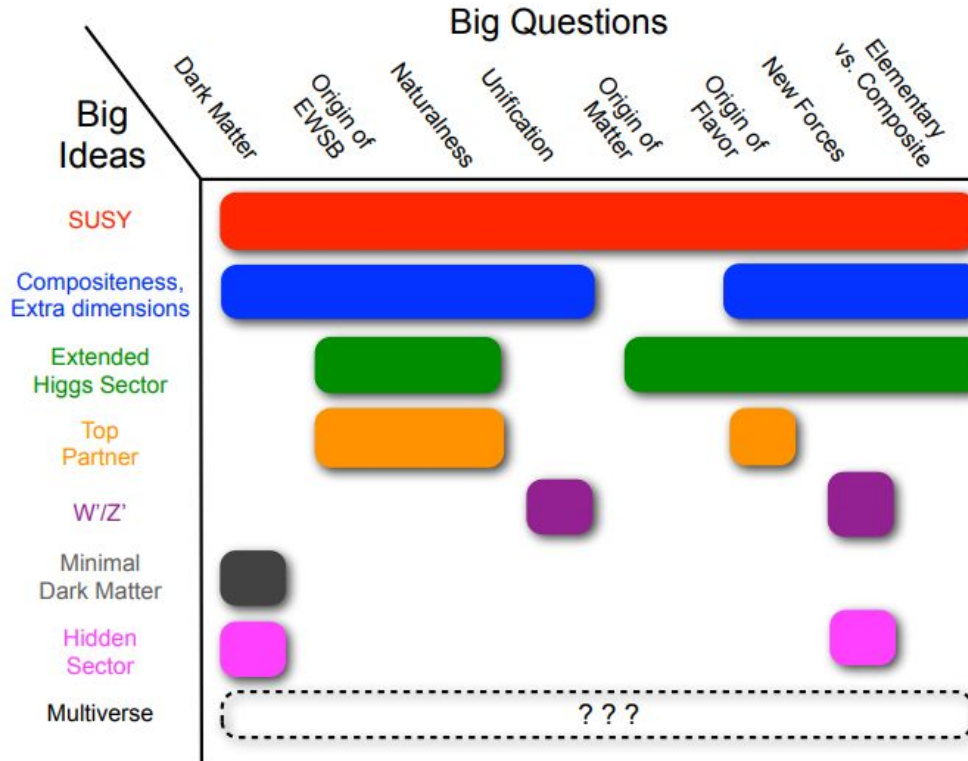
- Die Gravitationskraft ist  $10^{-38}$  schwächer als die schwache Kraft! Warum?
- Mögliche Erklärungen liefert die **Supersymmetrie (SUSY)**.
- Jedes Teilchen hat ein **supersymmetrisches Partnerteilchen**.
- SUSY erklärt dunkle Materie, die Vereinigung aller Kräfte bei hohen Energien, etc.



- Die Gravitationskraft ist  $10^{-38}$  schwächer als die schwache Kraft! Warum?
- Mögliche Erklärungen liefern Theorien mit **Extradimensionen**, z.B. Stringtheorie.
  - Wir und alle bekannten Teilchen befinden uns auf einem **3+1 dimensionalem Subraum**.
  - Der gesamte Raum hat  $3+1+d$  Dimensionen. Das **Graviton** hat auch Zugang zu den zusätzlichen Dimensionen!



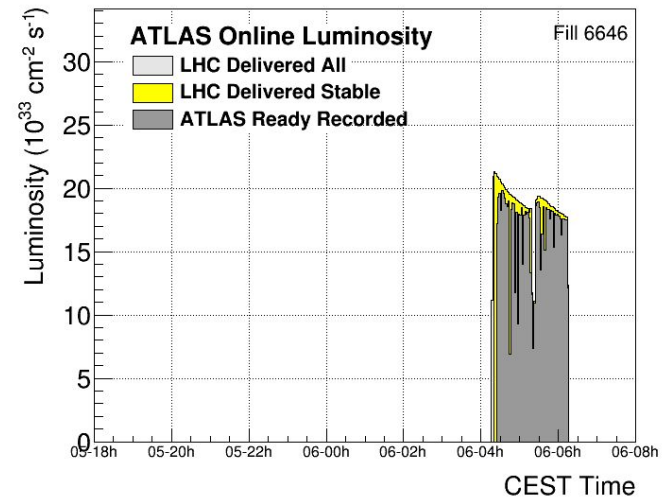
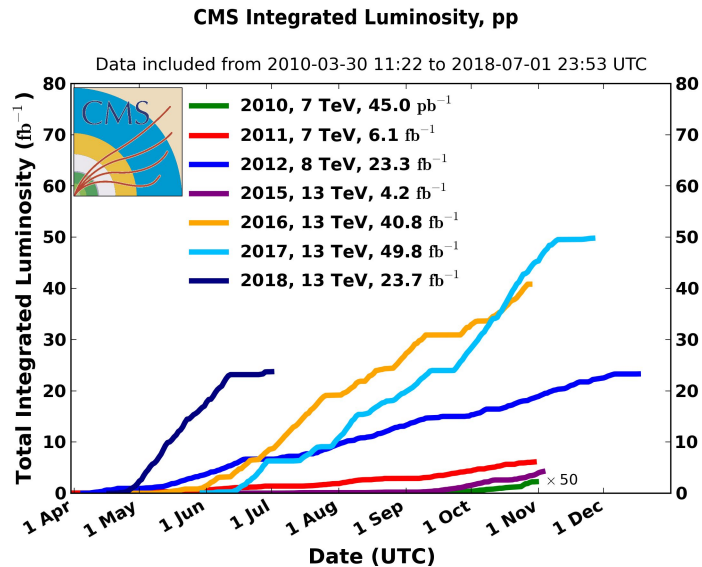
# Was sind die offenen Fragen?



# Backup

# How to look for new particles: The LHC

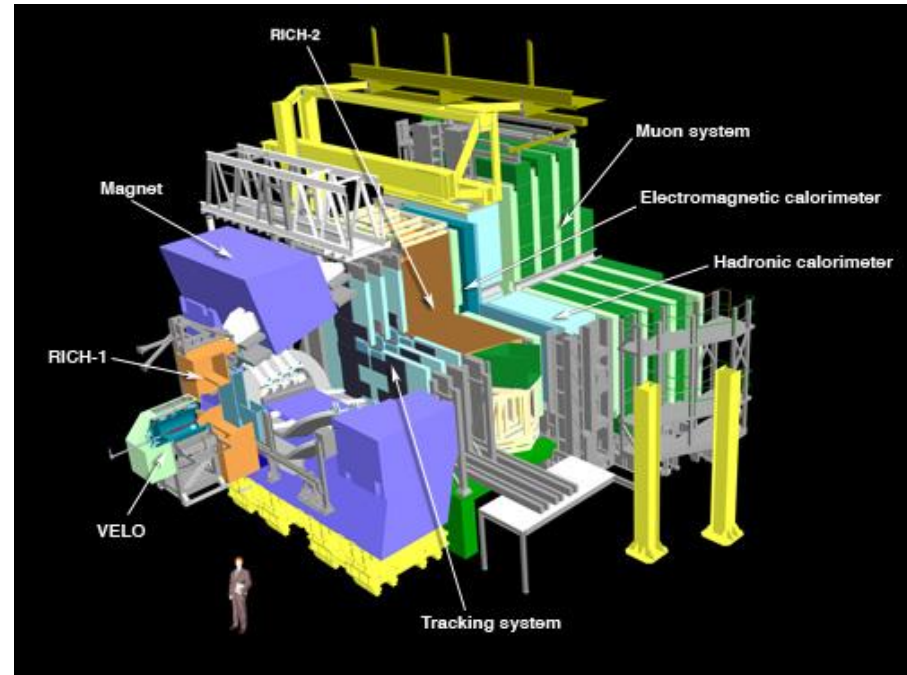
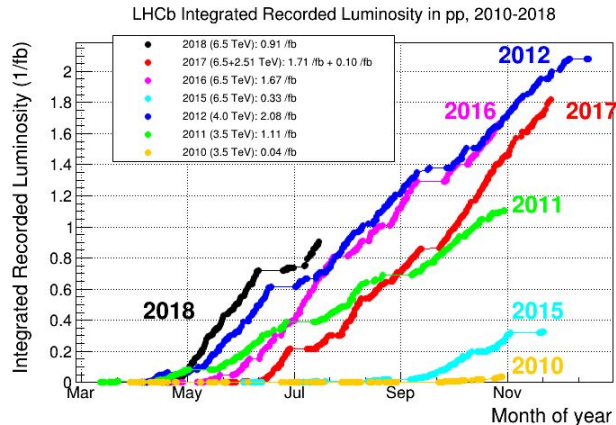
- The Large Hadron Collider (LHC) **collides protons and heavy ions**.
- 2010 - 2012:  $\sqrt{s}$  (proton-proton collisions) of 7-8 TeV, ATLAS and CMS collected  $\sim 30 \text{ fb}^{-1}$  of data
- 2015 - 2018:  $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ , accumulated data (as of  $\sim$ July 2018): CMS  $\sim 113 \text{ fb}^{-1}$ , ATLAS  $136 \text{ fb}^{-1}$
- Target luminosity  $\sim 150 \text{ fb}^{-1}$





# How to look for new particles: Experiments

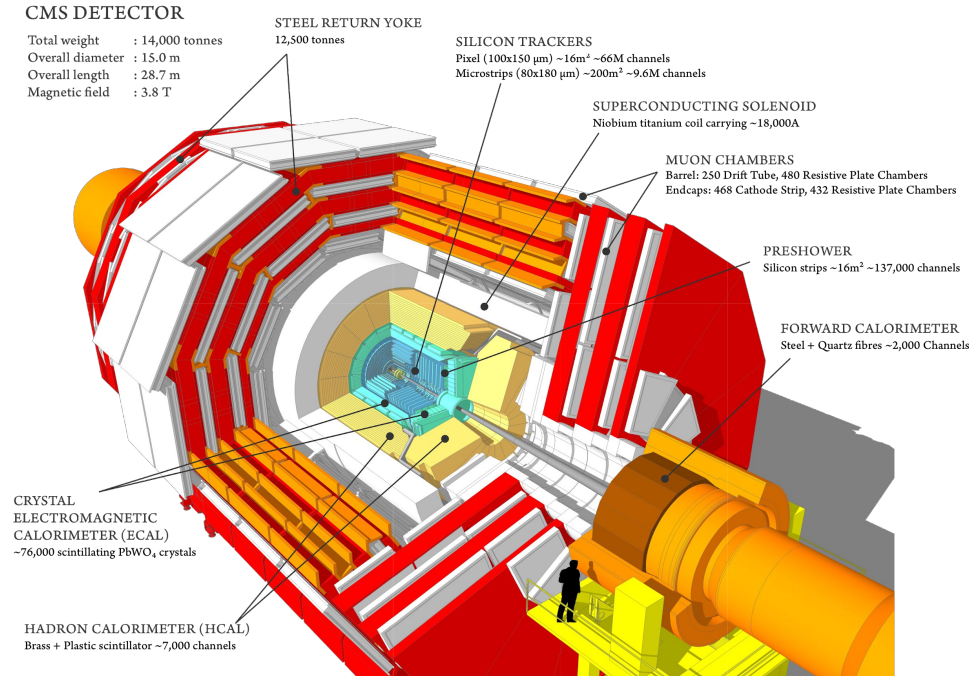
- LHCb is a **specialized b-physics experiment** for primarily investigating CP violation in b-hadron interactions.
- 2010 - 2012:  $\sim 3.23 \text{ fb}^{-1}$  at  $\sqrt{s} = 3.5/4 \text{ TeV}$
- 2015 - 2018:  $\sim 4.62 \text{ fb}^{-1}$  at  $\sqrt{s} = 6.5 \text{ TeV}$



# How to look for new particles: Experiments

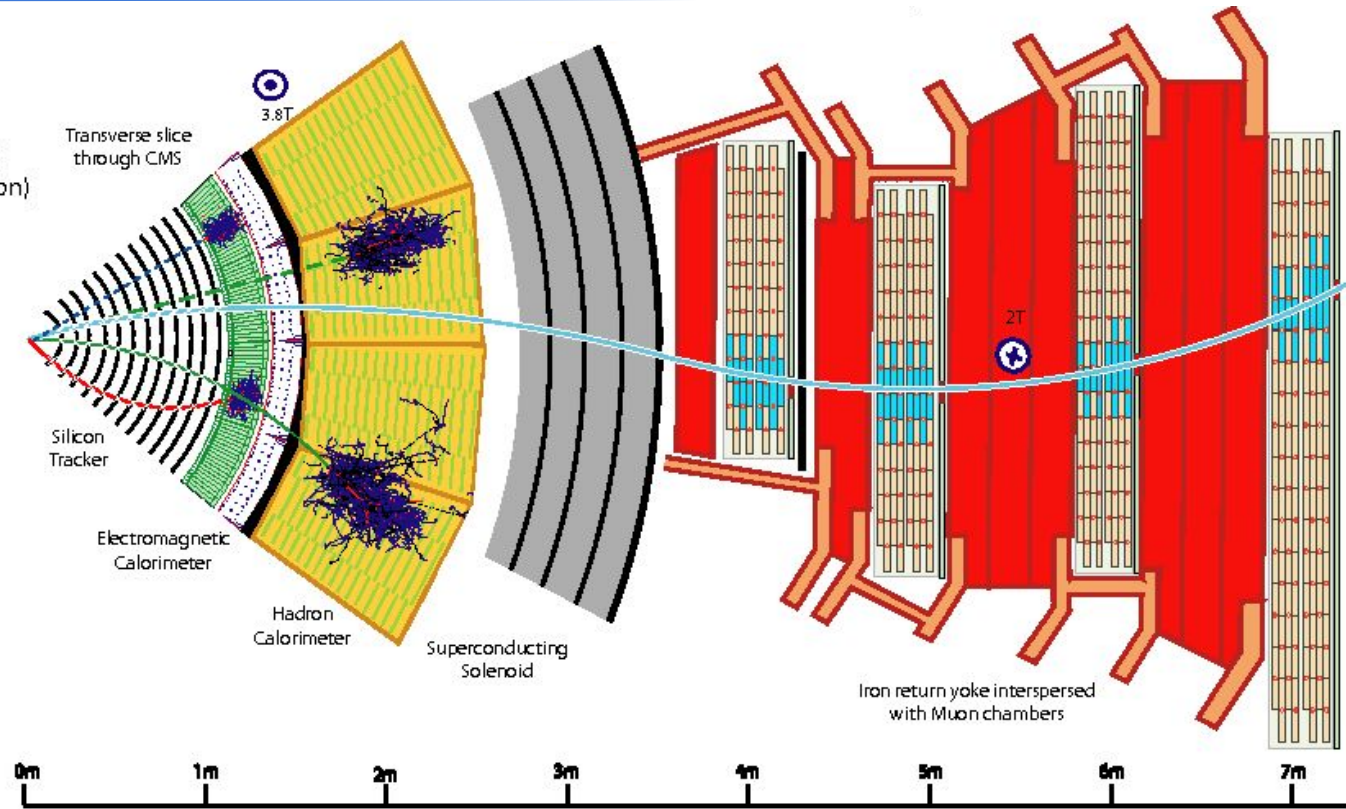


- ATLAS and CMS are **general-purpose detectors**, both consisting of several subsystems, designed to exploit the physics potential at the LHC.

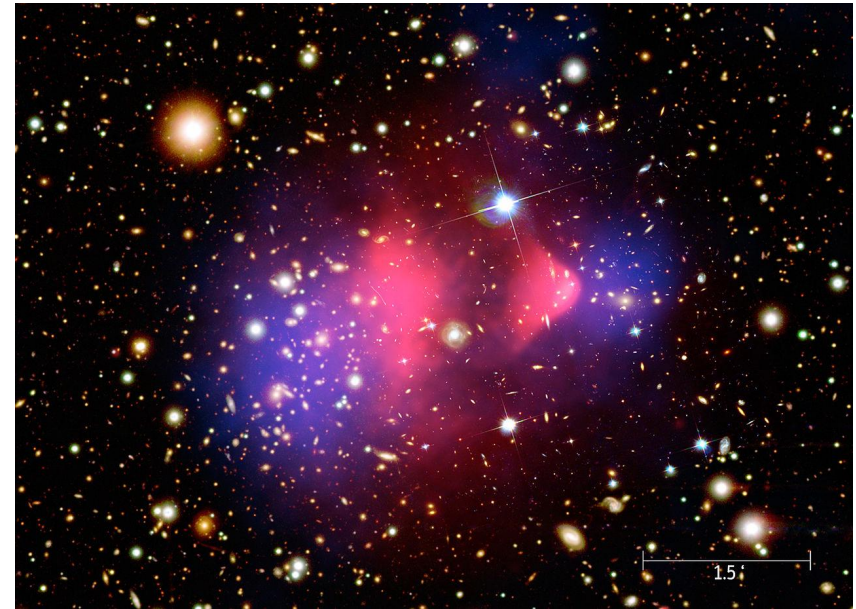


# How to look for new particles: Particle reconstruction

- Key:
- Muon
  - Electron
  - Charged Hadron (e.g. Pion)
  - - - Neutral Hadron (e.g. Neutron)
  - Photon



- **Zwei Galaxienhaufen kollidieren (der kleinere der beiden = bullet cluster)**
- **Sterne** verändern ihre Laufbahn kaum und werden nur durch die Gravitationskraft abgelenkt.
- Großteil der **baryonischen Materie sind Gase (rot)**. Sie wechselwirken auch **elektromagnetisch** und werden um ein Vielfaches mehr abgebremst als Sterne.
- **Dunkle Materie** beobachtbar durch den **Gravitationslinseneffekt (blau)**. Wechselwirkt wahrscheinlich nur durch die Gravitation und durch die schwache Kraft.



**Bullet-cluster “1E 0657-558”**