

It's not Rocket Science

Im Tunnel: Experimente der Teilchenphysik

U. Husemann, 22.11.2023



Wer bin ich?

Promotion

Siegen 2005

HERA-B-Experiment am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY



UNIVERSITY of
ROCHESTER



Postdoc

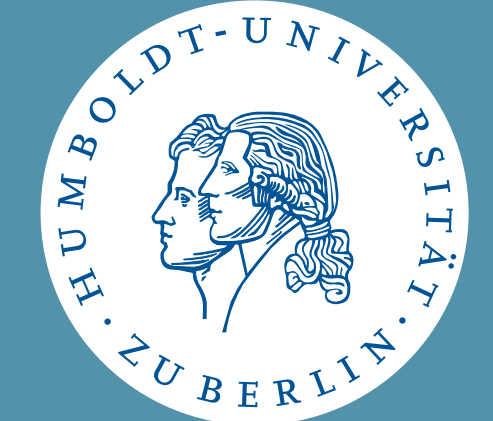
Rochester, Yale (2005–2008)

CDF-Experiment am Fermi National Accelerator Laboratory, Chicago

Nachwuchsgruppenleiter

DESY und HU Berlin (2008–2013)

ATLAS-Experiment am CERN, Genf



Professor

KIT, Experimentelle Teilchenphysik (seit 2011)

CMS-Experiment am CERN, Genf

Genauso spannend wie Rocket Science...

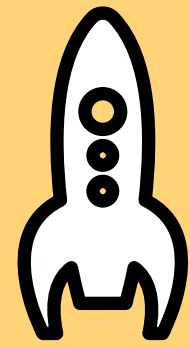


[teepublic.com](https://www.teepublic.com)

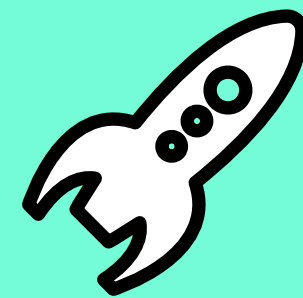
... und ähnlich kompliziert!

- Große Fragen:
wir suchen nach **fundamentalen Teilchen und Kräften** in der Natur
- Große Maschinen:
zur Beantwortung dieser Fragen benötigen wir **riesige Teilchenbeschleuniger und aufwändige Experimente**

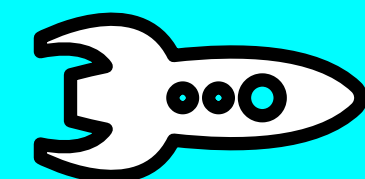
Unsere Mission heute Abend



Was ist Teilchenphysik?

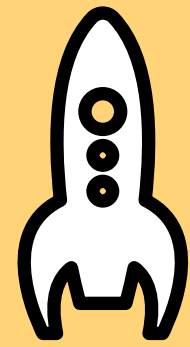


Werkzeuge: Beschleuniger und Detektoren

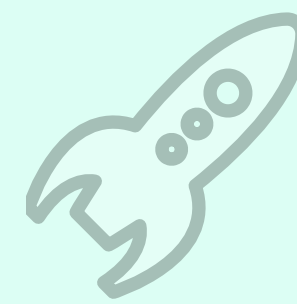


Ergebnisse: Wo stehen wir heute?

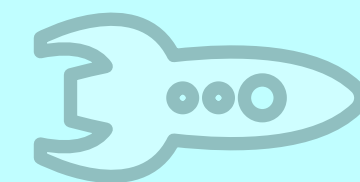
Unsere Mission heute Abend



Was ist Teilchenphysik?

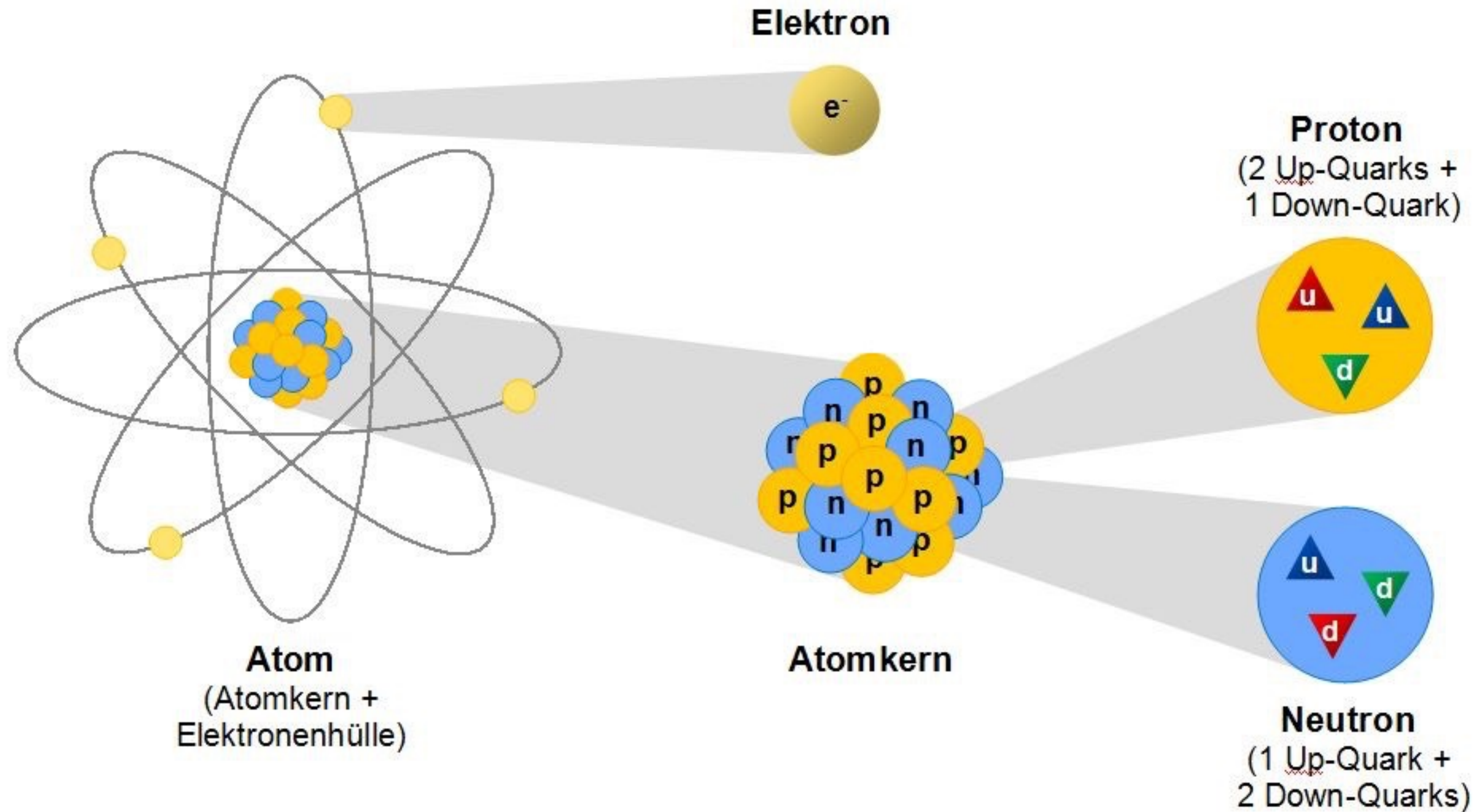


Werkzeuge: Beschleuniger und Detektoren



Ergebnisse: Wo stehen wir heute?

Erforschung des Atoms: Größenskalen



Bildquelle: Netzwerk Teilchenwelt

$1 \text{ \AA} = 10^{-10} \text{ m}$

10^{-14} m

$1 \text{ fm} = 10^{-15} \text{ m}$

Physikalische Grundlagen

- Spezielle Relativitätstheorie (Einstein 1905):
 - **Relativitätsprinzip:** physikalische Gesetze sind in allen Inertialsystemen gleich
 - Universelle **Grenzwgeschwindigkeit:** Lichtgeschwindigkeit in allen Inertialsystemen gleich groß
- Quantenmechanik (Heisenberg, Schrödinger, Dirac, ... 1920er Jahre):
 - **Quantenobjekt:** ununterscheidbar, Wellen- und Teilcheneigenschaften
 - Beschreibung mit **Wahrscheinlichkeiten**



Albert Einstein



Erwin Schrödinger



Paul A. M. Dirac

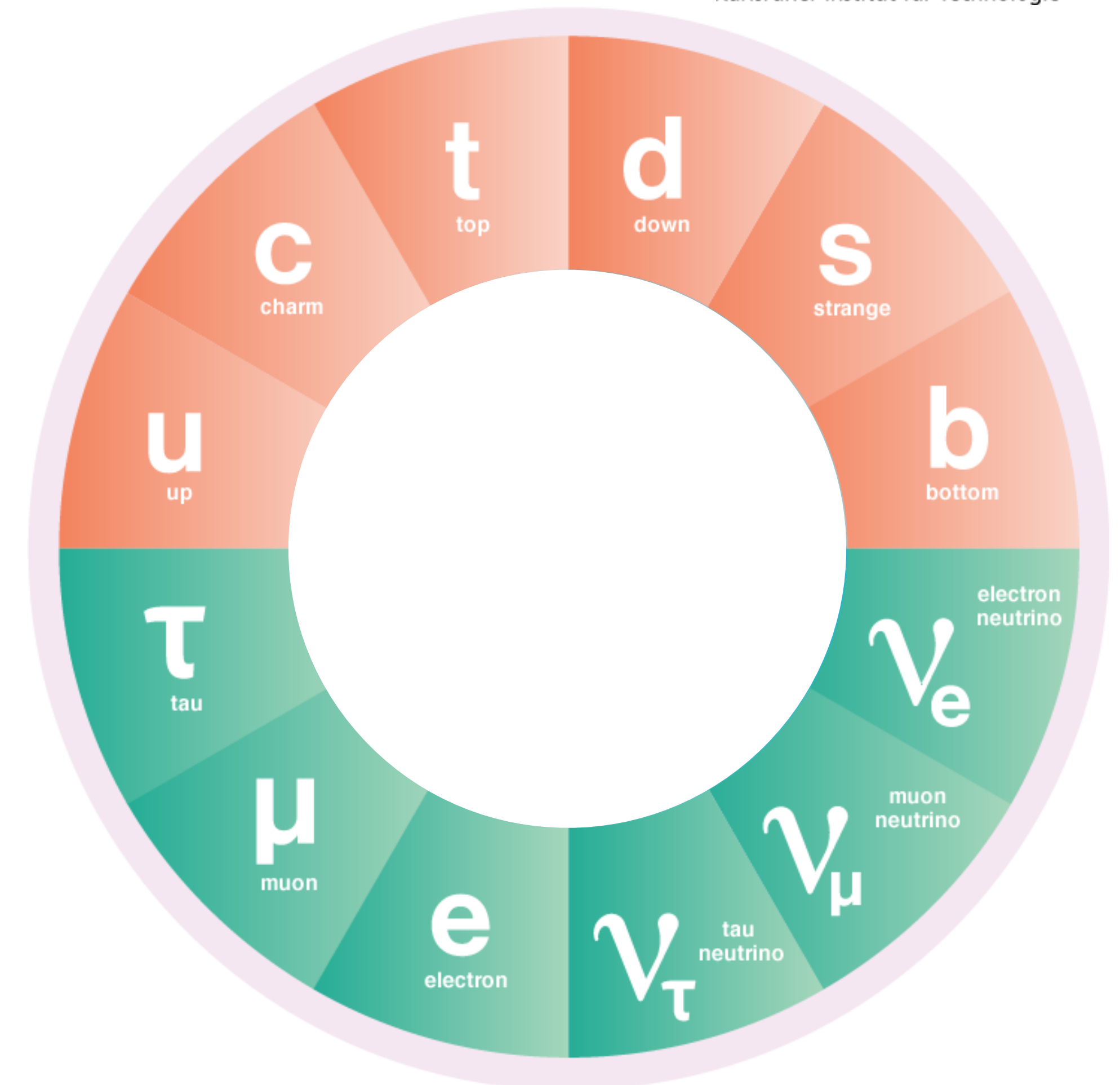


Werner Heisenberg

nobelprize.org

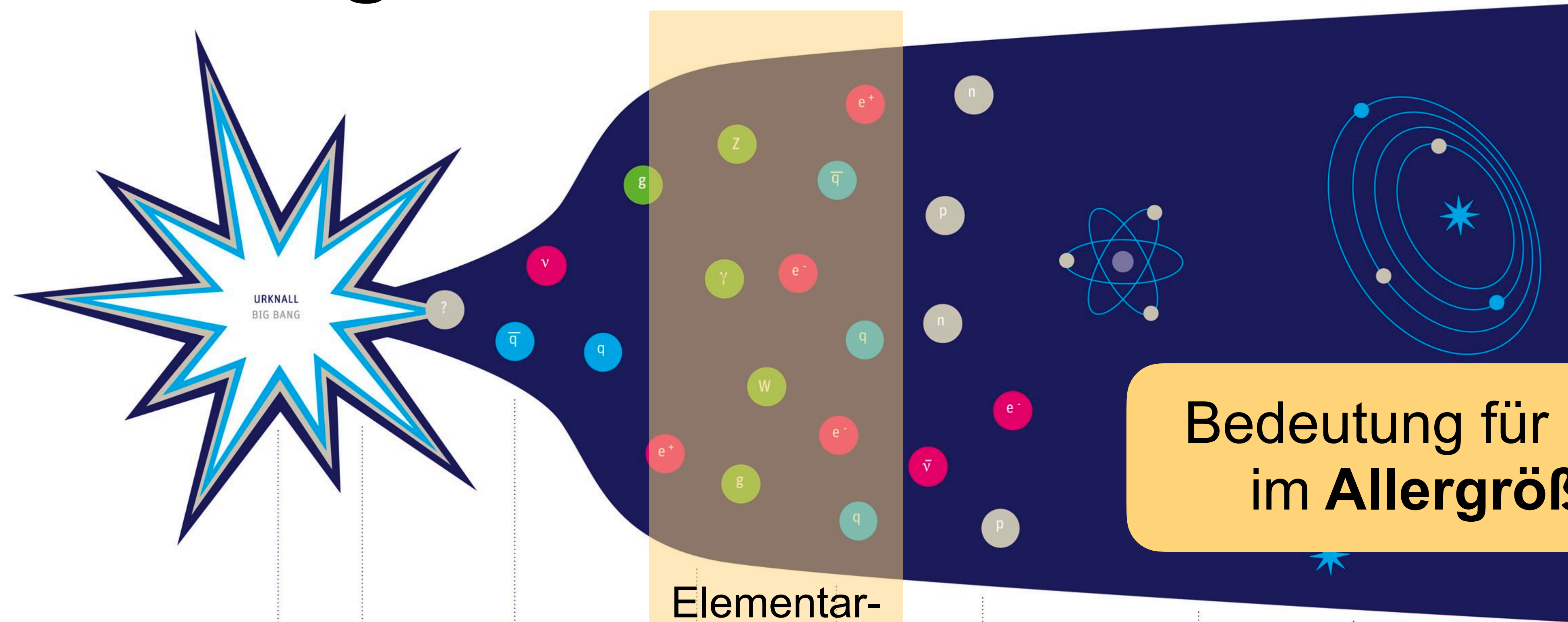
Teilchenzoo 2023

- Heutige Vorstellung von der Natur im **Allerkleinsten** („Standardmodell“):
 - Materie besteht aus 12 fundamentalen Bausteinen: **6 Quarks** und **6 Leptonen** (und deren Antiteilchen)
 - Vier fundamentale Kräfte zwischen fundamentalen Bausteinen, vermittelt durch **Kraftteilchen**
 - **Higgs-Teilchen** (Entdeckung 2012): verantwortlich für Masse aller Bausteine
- Alle Teilchen **entdeckt** und (relativ) **genau vermessen**

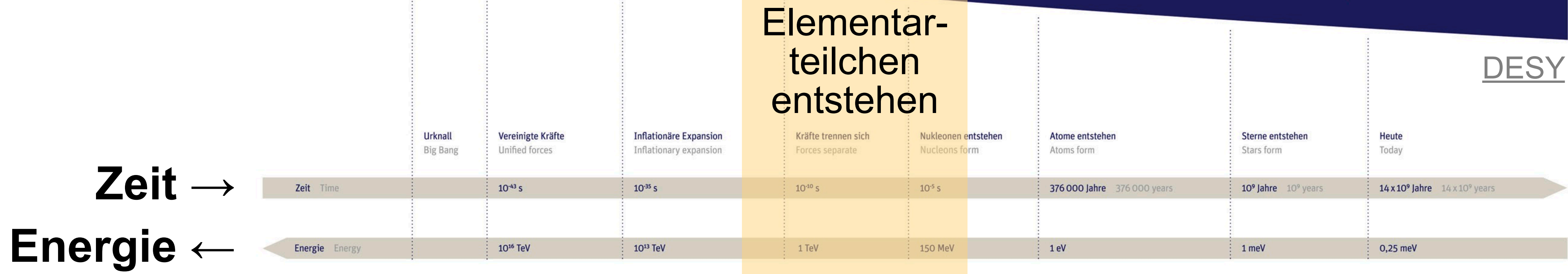


symmetrymagazine.org

Entwicklung des Universums



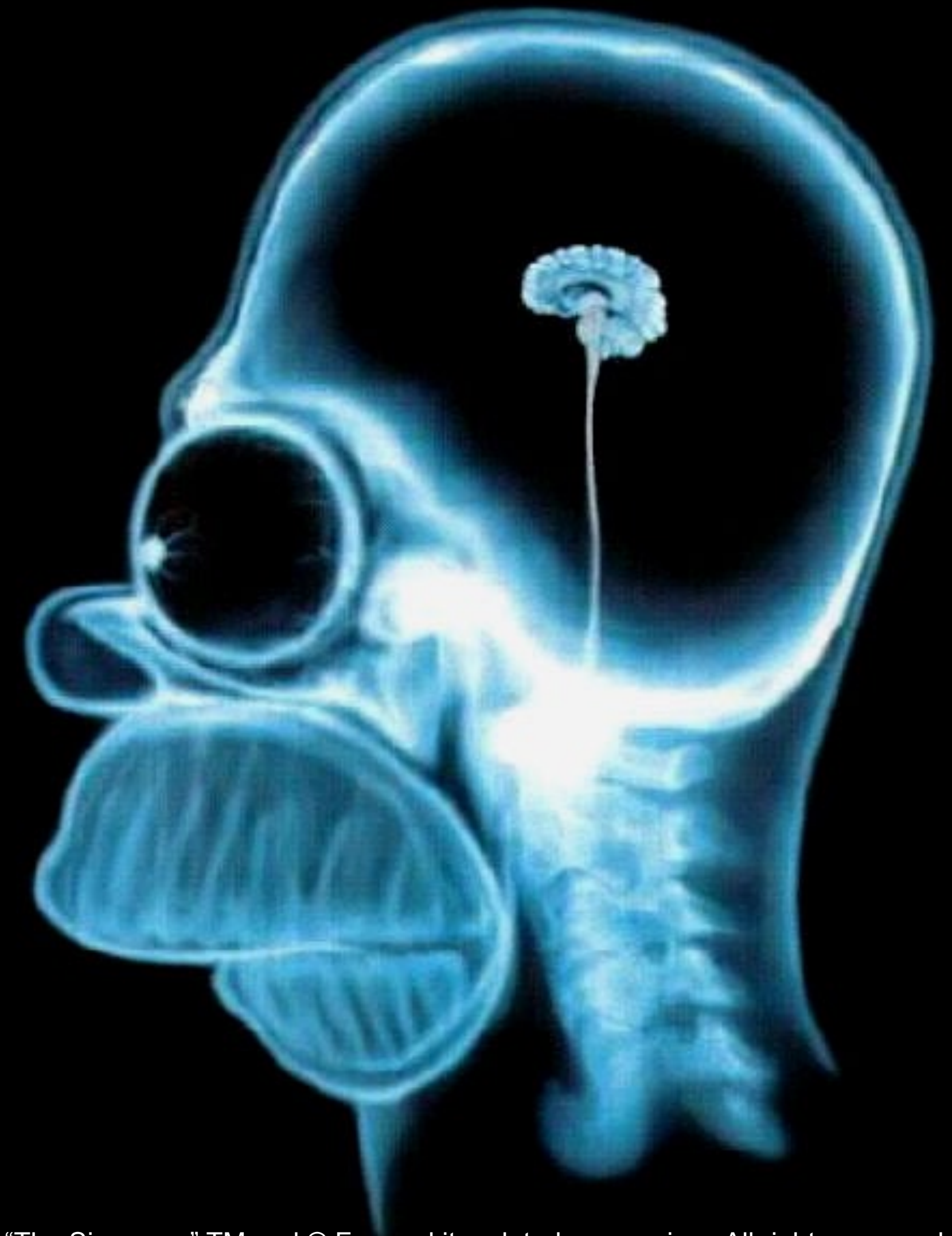
Bedeutung für Physik
im **Allergrößten**



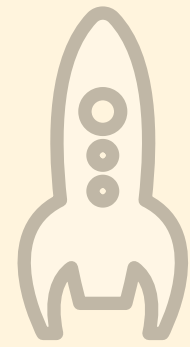
DESY

Big Science – Small Brains?

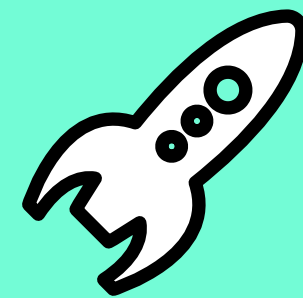
- **Offene Fragen der Teilchenphysik 2023:**
 - Ist es wirklich (nur) das **Higgs-Teilchen**, das allen anderen Teilchen **Masse** verleiht?
 - Lassen sich die fundamentalen Kräfte weiter **vereinheitlichen**?
 - Woraus besteht die **Dunkle Materie**, die wir im Weltraum beobachten?
 - Was ist **Dunkle Energie**?
 - Welche Ursache hat das **Ungleichgewicht zwischen Materie und Antimaterie** im Universum?



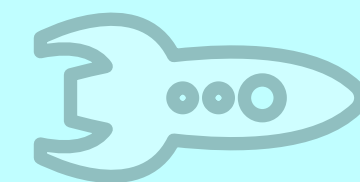
Unsere Mission heute Abend



Was ist Teilchenphysik?



Werkzeuge: Beschleuniger und Detektoren



Ergebnisse: Wo stehen wir heute?

Beschleuniger und Detektoren

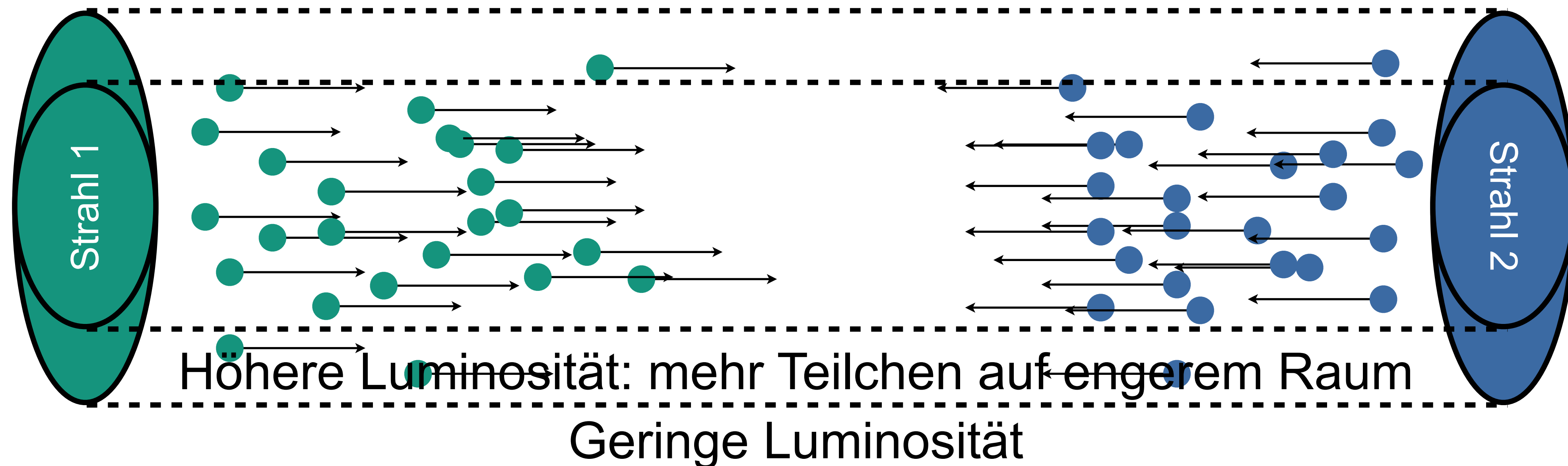
- Rolle von **Teilchenbeschleunigern**:
 - Neue Teilchen in hochenergetischen **Teilchenkollisionen**
 - Relativitätstheorie: $E = mc^2$
→ **Energie** umgewandelt in **Masse**
- Rolle von **Teilchendetektoren**:
 - Schwere Elementarteilchen **sehr kurzlebig**
→ Nachweis der **Zerfallsprodukte**
 - Ziel: möglichst **vollständiger Nachweis** aller Kollisionsprodukte



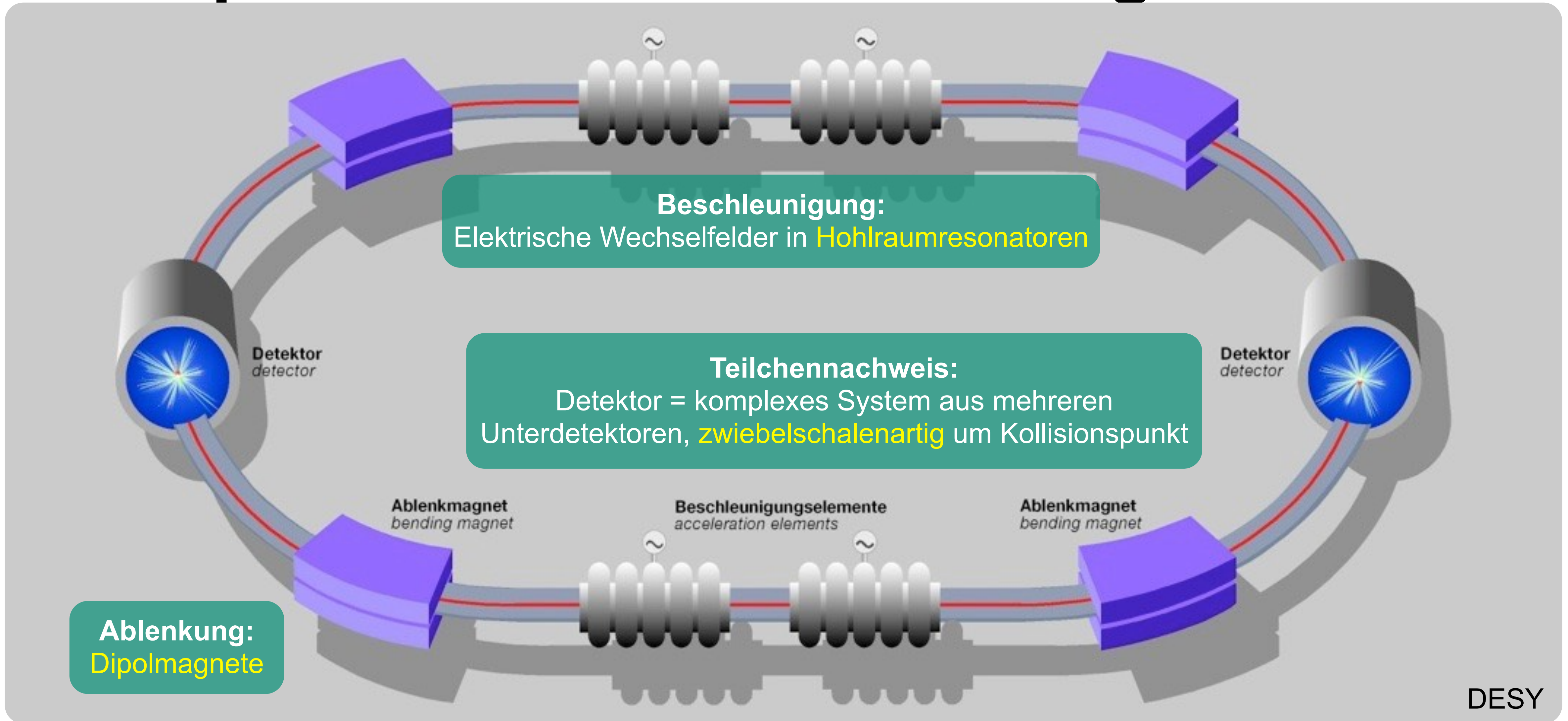
Bildquelle: Netzwerk Teilchenwelt

Höher, schneller, weiter...

- Höhere **Energie** → erzeuge **massivere** neue Teilchen
- Höhere **Luminosität** („Leuchtkraft“) → erhöhe Rate **seltener** Prozesse
→ viele Teilchen treffen sich auf engem Raum



Prinzip des Teilchenbeschleunigers



DESY

Teilchenbeschleuniger

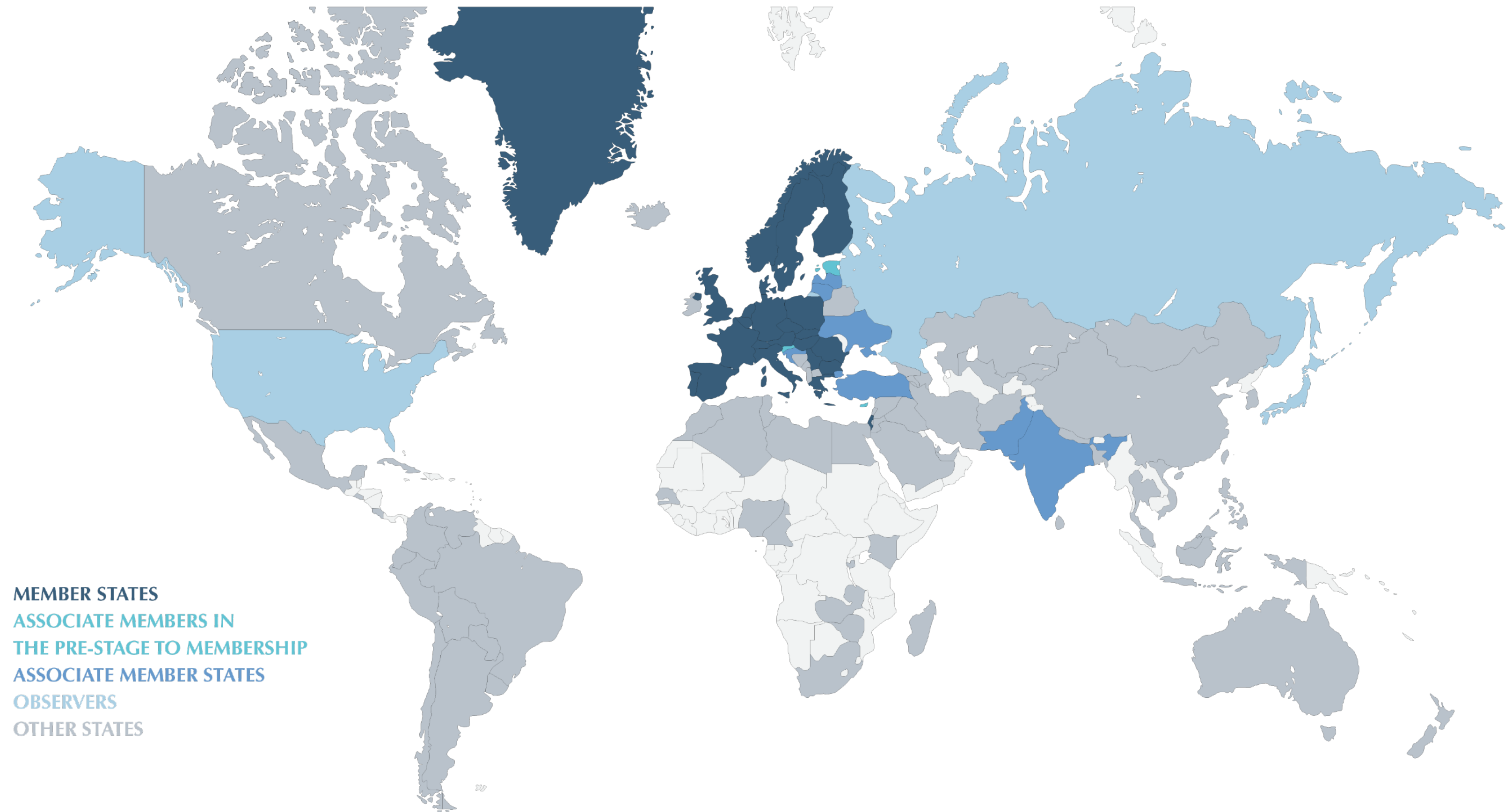


Large Hadron Collider LHC (CERN):

- Weltweit leistungsstärkster Beschleuniger, 27 km Umfang, ca. 100 m unter der Erde
- Protonen auf 6,8 TeV (= 99.9999999% der Lichtgeschwindigkeit) beschleunigt

CERN – Wissenschaft für den Frieden

- Gründung: 1954
- CERN heute:
 - 23 Mitgliedsstaaten
 - ca. 3400 Mitarbeiter
 - ca. 12 200 Nutzer aus 110 Nationen
 - Budget (2023): ca. 1400 Mio. SFR



Kulturschaffende im Tunnel...



<https://cds.cern.ch/images/CERN-PHOTO-201909-233-2>



<https://cds.cern.ch/record/2313014>

außerdem: Slayer, Roger Waters,
Tom Hanks, James Blunt, Will I Am, ...

... und die Politik



A. Berset

F. Gianotti

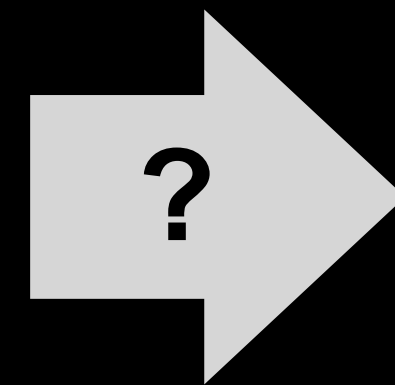
E. Macron

Der Large Hadron Collider



Video: CERN

Unsere Kamera:


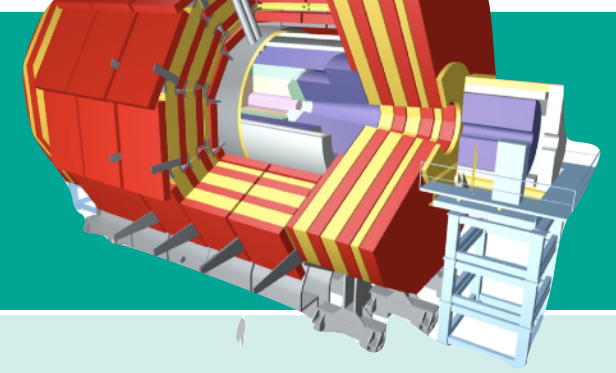


Juhanson, [Rolleiflex_camera.jpg](#), CC BY-SA 3.0

[apple.com](#)

- „Interessante“ Elementarteilchen **sehr selten** produziert
 - **Überlagerung** durch Teilchen aus viel häufigeren „uninteressanten“ Prozessen („Untergrund“)
- Anforderung: hohe räumliche und zeitliche **Auflösung**

Anforderungen

	Handykamera 	Detektor 
Auflösung	48 Megapixel	140 „Megapixel“ <input checked="" type="checkbox"/>
Pixelgröße	ca. $1.2 \times 1.2 \mu\text{m}^2$	$\geq 150 \times 100 \mu\text{m}^2$ <input checked="" type="checkbox"/>
Bilder pro Sekunde	≤ 60	40 Millionen <input type="checkbox"/>
Automatische Selektion der besten Bilder	nein	ja <input type="checkbox"/>
Lebensdauer am LHC	1–2 Monate	10 Jahre <input type="checkbox"/>

→ nur mit speziellen **Eigenentwicklungen** realisierbar

Teilchendetektoren: Messprinzip

Impulsmessung

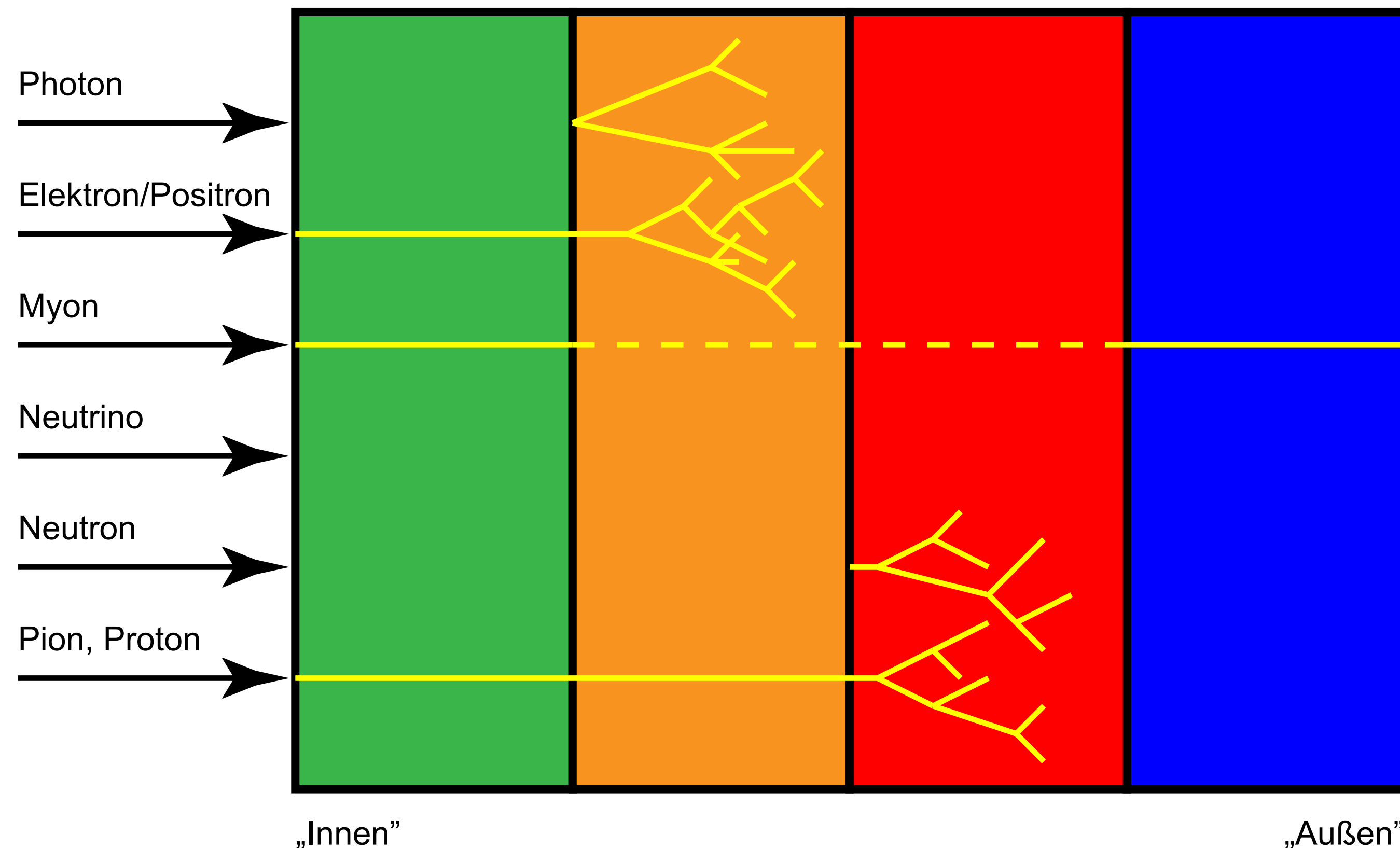
Energiemessung

Teilchenidentifikation

Spurdetektor
(„Tracking“)

Kalorimeter
elektromagnetisch
hadronisch

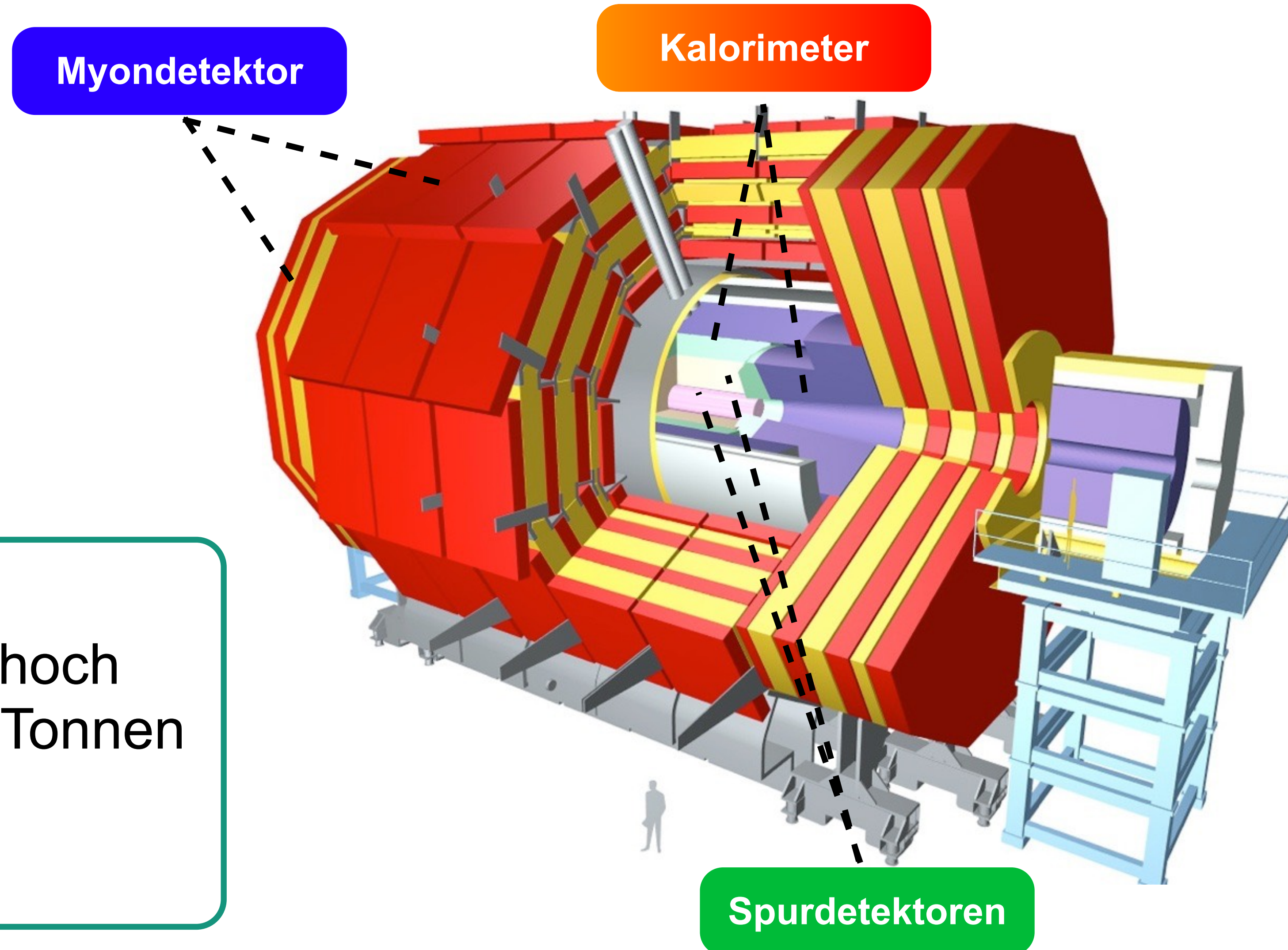
Myondetektor



- Ziel: Energie, Impuls und Identität möglichst aller Kollisionsprodukte
- Aufbau: Schichten („Zwiebelschalen“)

wichtig: wie **reagieren** unterschiedliche Teilchen mit Detektormaterial?

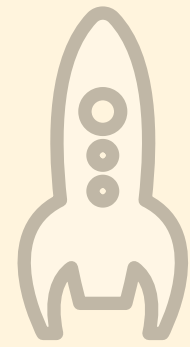
Teilchendetektoren: Beispiel CMS



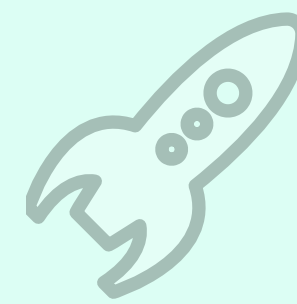
CMS-Fakten:

- * 21 m lang, 15 m hoch
- * Gewicht: 14.000 Tonnen
- * 140 Millionen Elektronikkanäle

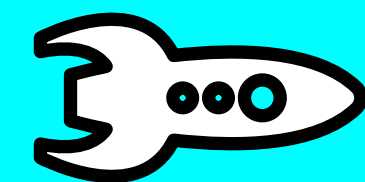
Unsere Mission heute Abend



Was ist Teilchenphysik?



Werkzeuge: Beschleuniger und Detektoren



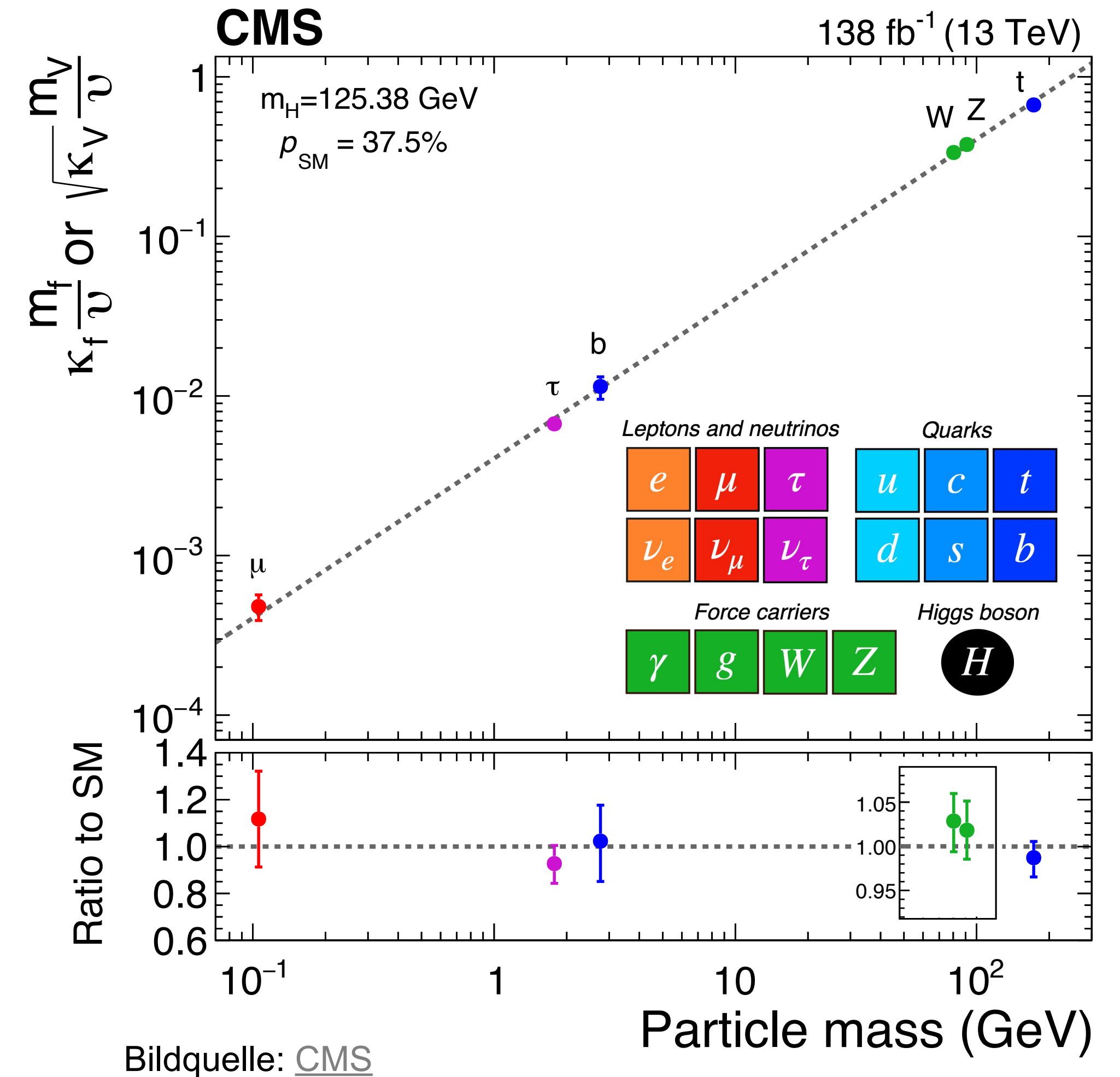
Ergebnisse: Wo stehen wir heute?



- KIT: Beiträge zu **zentralen Aspekten des Großexperiments CMS** am CERN
 - Entwicklung und Bau neuer **Detektorkomponenten**
 - **Betrieb** des Detektors
 - **Verarbeitung und Speicherung** der Daten
 - **Analyse und Interpretation** der Daten

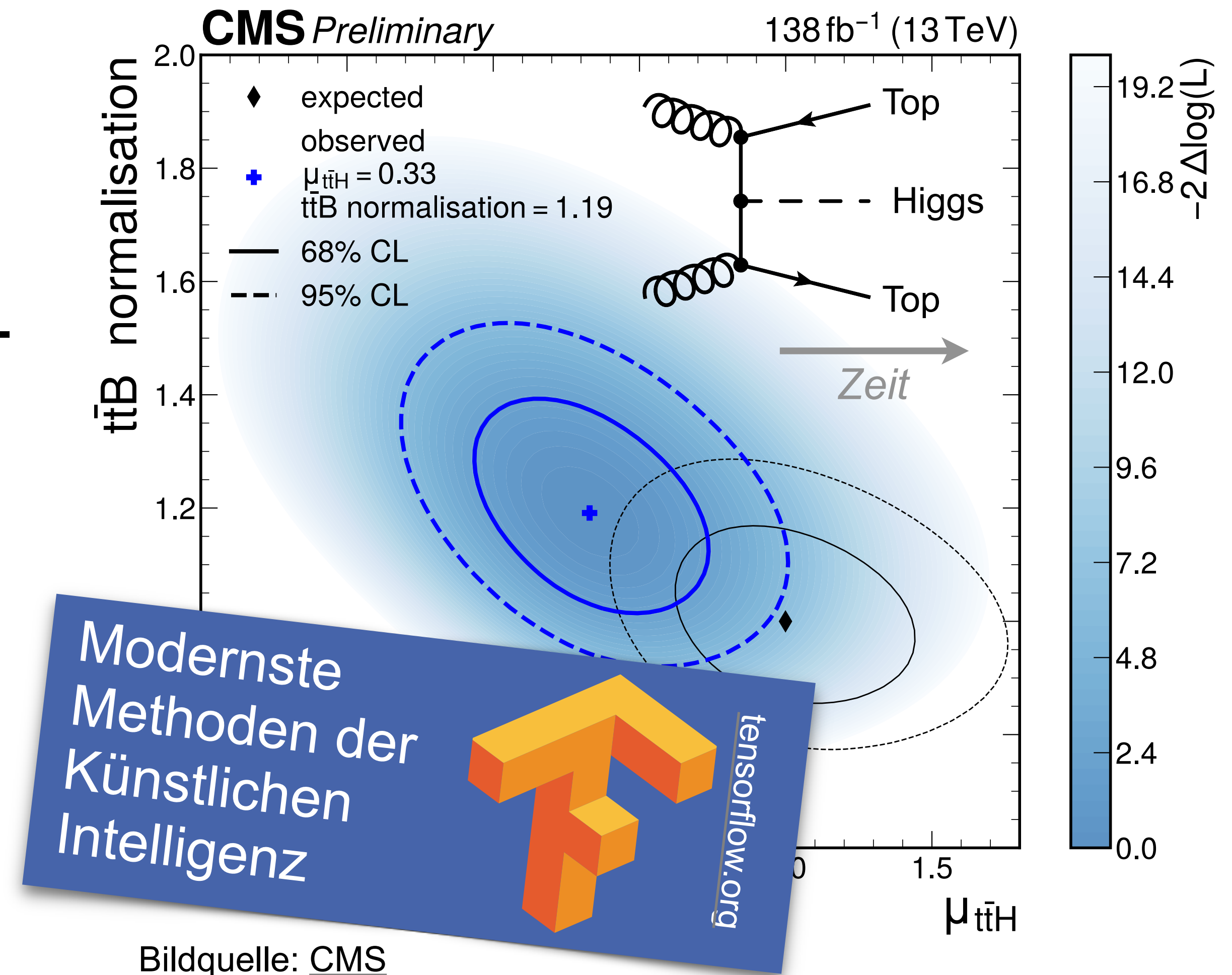
Wissenschaftliche Highlights

- 2016: Das Higgs-Boson koppelt proportional zur Teilchenmasse



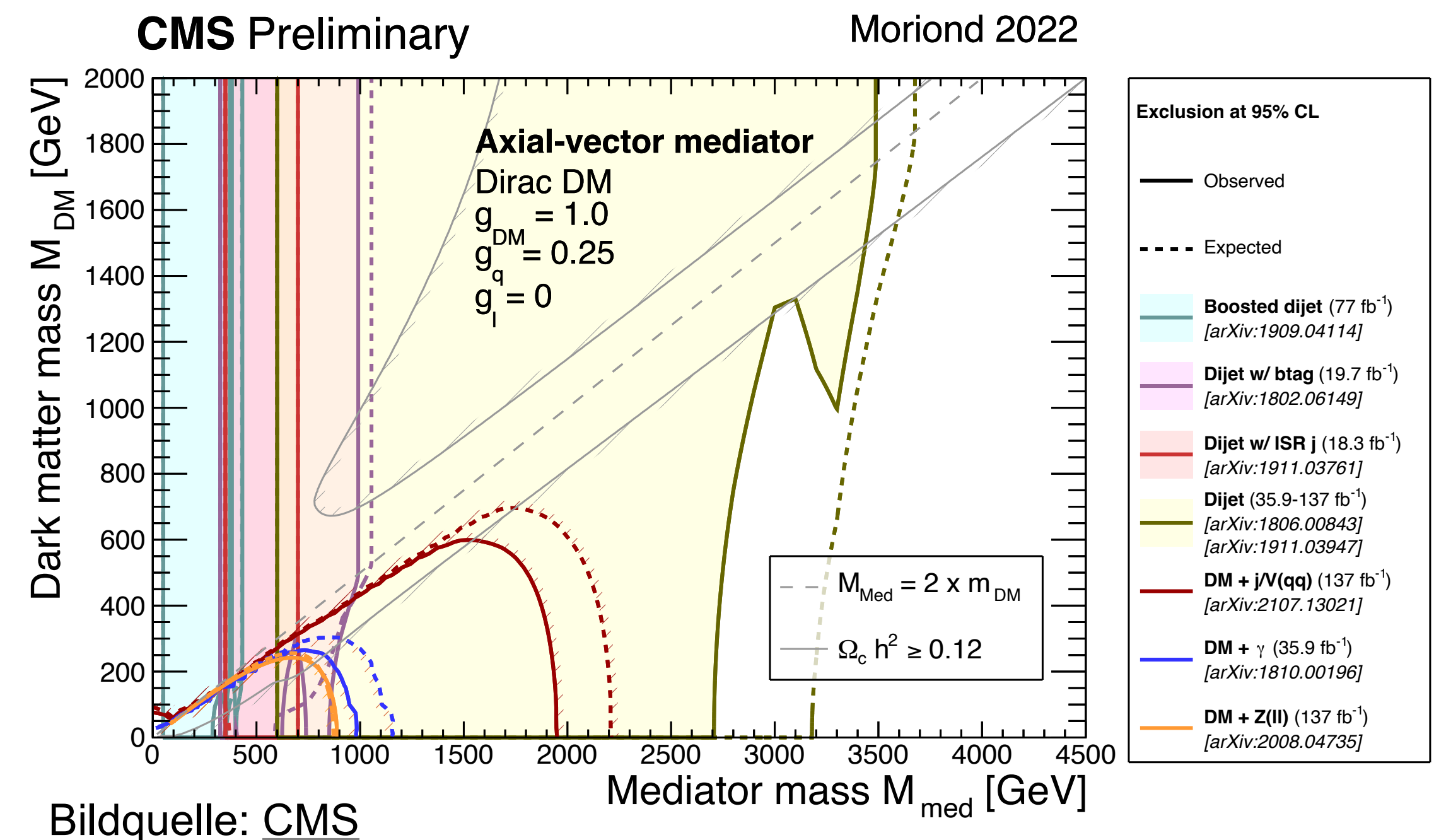
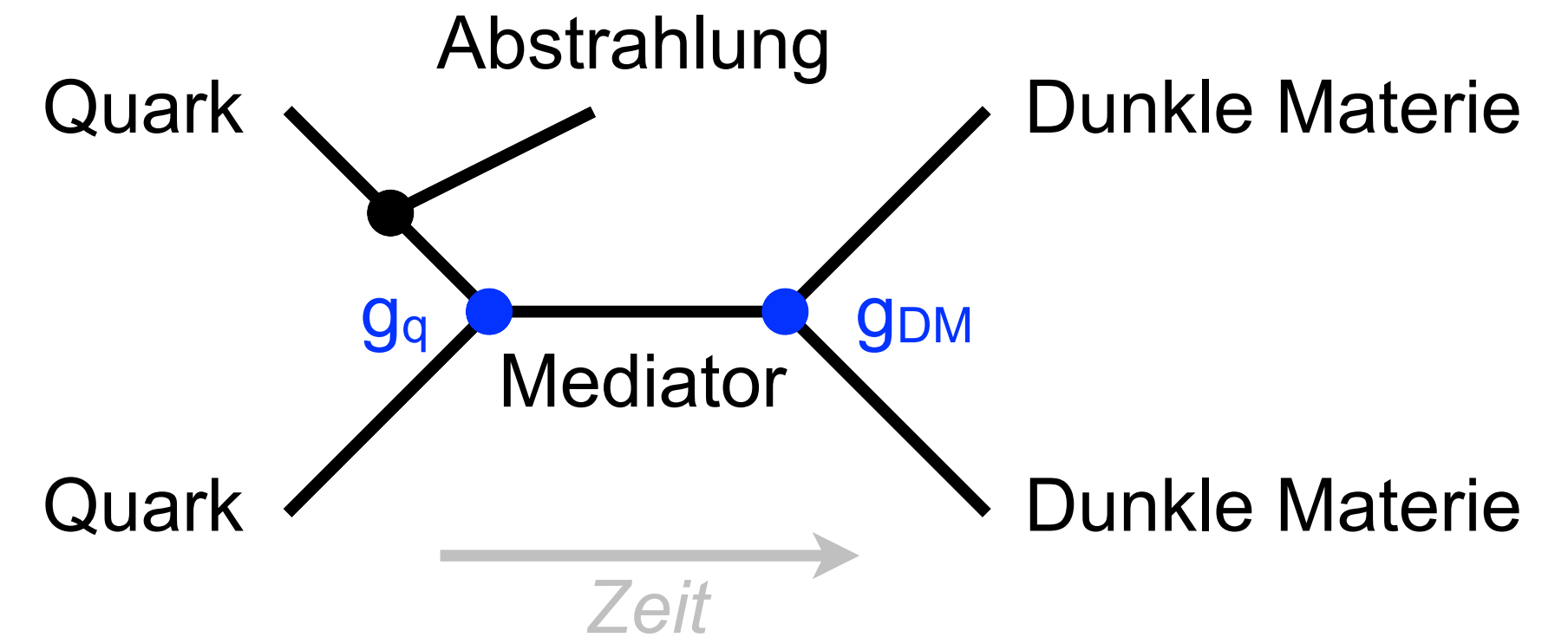
Wissenschaftliche Highlights

- 2016: Higgs-Boson koppelt proportional zur Teilchenmasse
- 2018: direkter Nachweis der Higgs-Wechselwirkung mit Top- und Bottom-Quarks und Tau-Leptonen



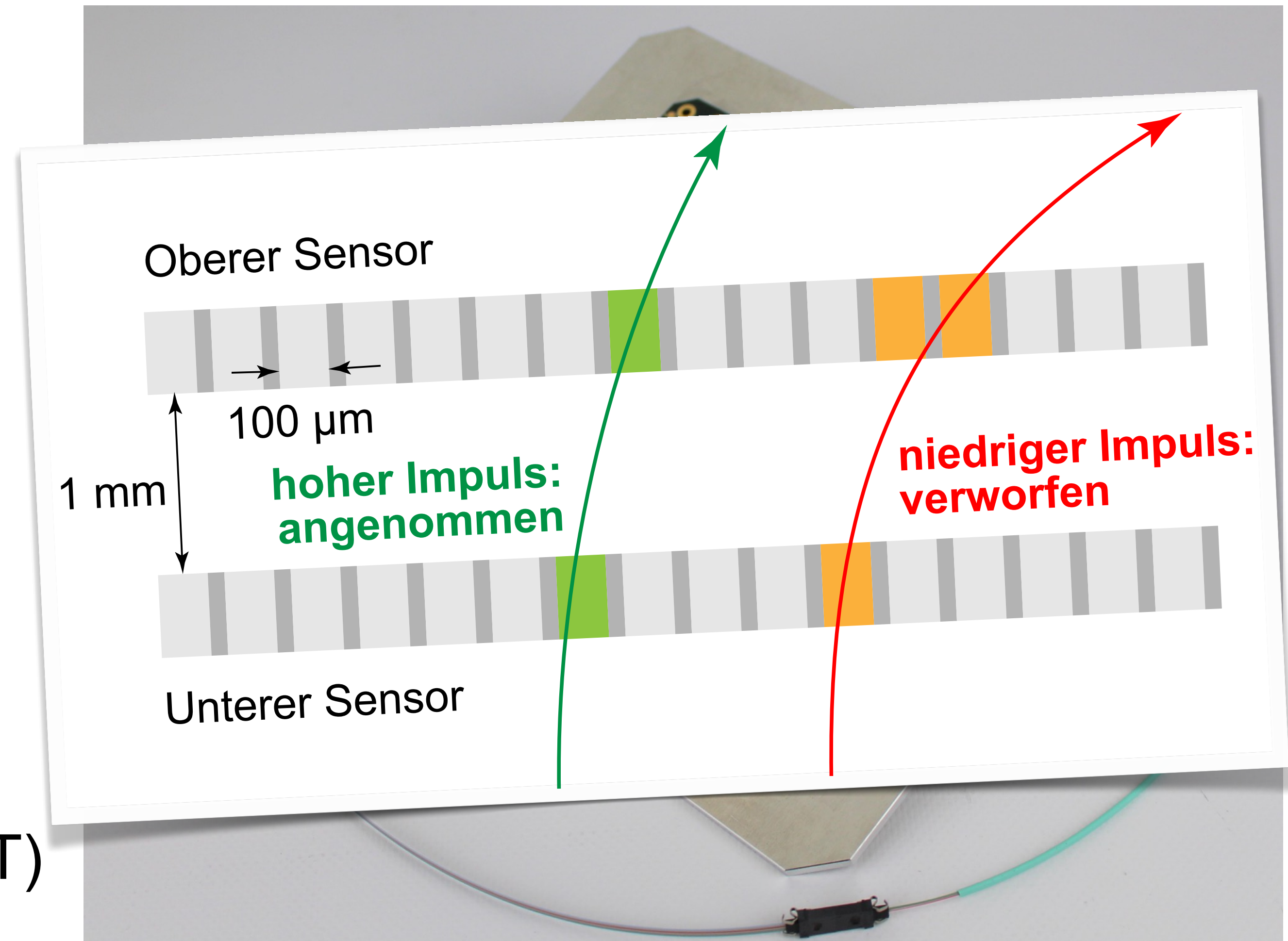
Wissenschaftliche Highlights

- 2016: Higgs-Boson koppelt proportional zur Teilchenmasse
- 2018: direkter Nachweis der Higgs-Wechselwirkung mit Top- und Bottom-Quarks und Tau-Leptonen
- Suche nach Neuer Physik, z. B. Dunkler Materie: große Kreativität, bisher keine signifikanten Signale



Zukunft des LHC

- LHC bei höchster Luminosität:
HL-LHC (ab 2029):
 - Etwas mehr Energie,
viel mehr Luminosität
 - Bis ca. 2040: 20× mehr Daten
als bislang aufgezeichnet
- CMS für den HL-LHC:
 - **Neubau** von Detektoren
 - Innovative Detektorkonzepte,
z. B. **p_T -Module** (→ Bau am KIT)



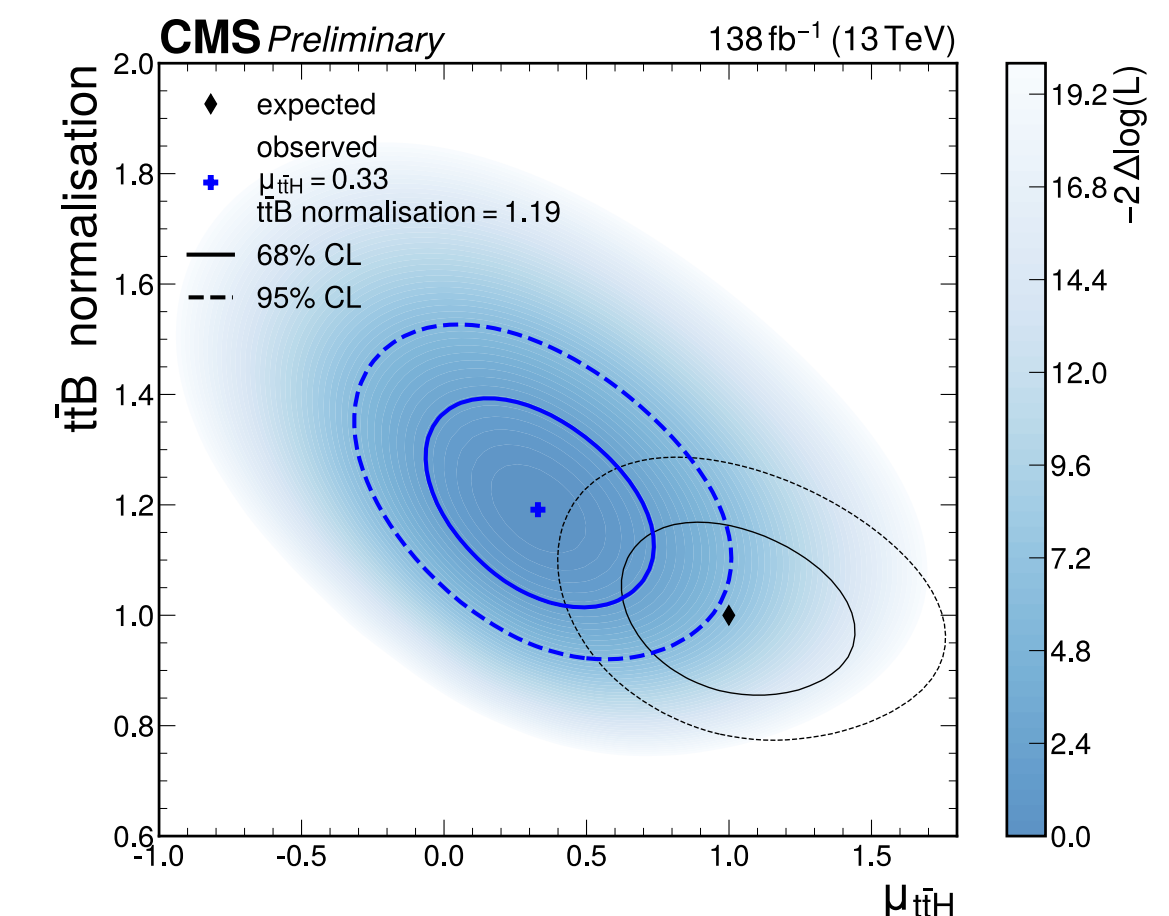
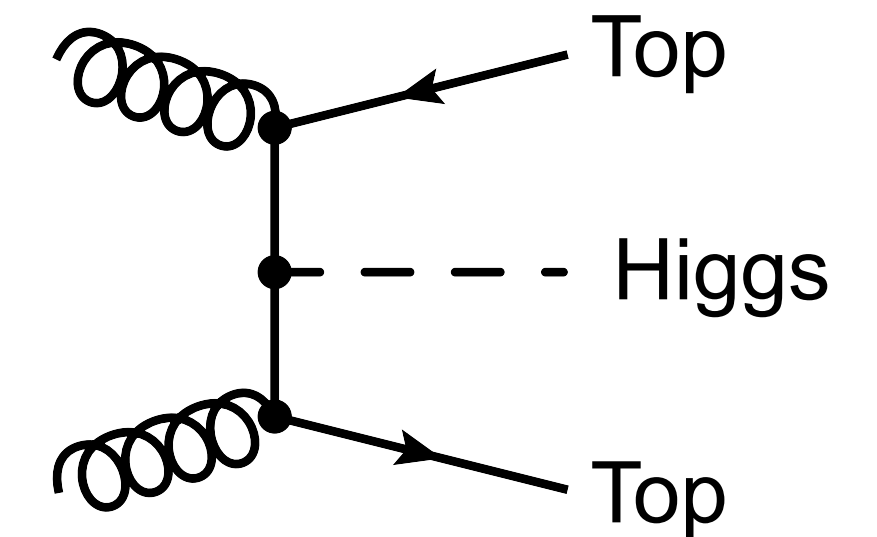
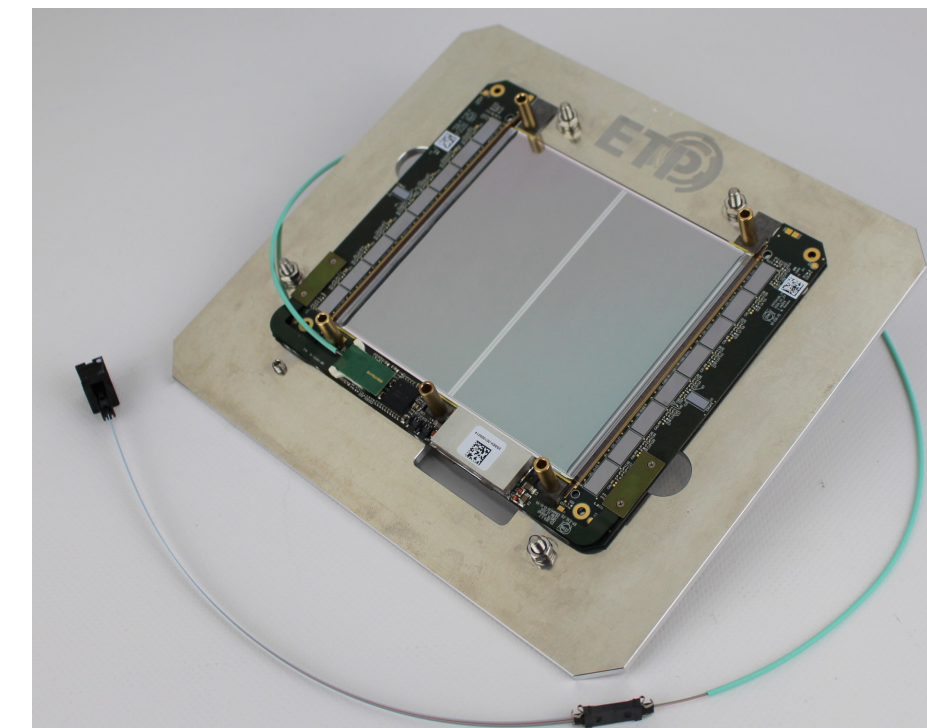
Faszination Teilchenphysik



- **Physik** – wie ist unsere Welt aufgebaut?
 - Fundamentale Bausteine unserer Welt?
- **Technologie** – wie funktioniert das?
 - Riesige Nachweisgeräte, μm -Präzision
 - Verarbeitung der Datenflut
- **Gesellschaft** –
 - ... und wozu ist das alles gut?
 - Neues Weltbild, vgl. Quantenmechanik?
 - Internationale Zusammenarbeit
 - Spin-offs → direkter wirtschaftlicher Nutzen

Vom 1. Semester in die Teilchenphysik

- Physikstudium = **breite Ausbildung** in Grundlagenwissenschaft
- **Relevant** für experimentelle Teilchenphysik: (so ziemlich) **alles!**
 - Verständnis der **Fragestellungen**:
Quantenmechanik, Relativitätstheorie,
Kosmologie, ...
 - Bau und Betrieb von **Detektoren**:
Festkörper- und Molekülphysik,
Mechanik, Elektronik, Chemie,
Strömungslehre, ...
 - Analyse der **Daten**: „Data Science“
(Statistik, angewandte Informatik, ...)



Und nach dem Studium?

... und was können Sie nach dem Studium mit Ihrer Ausbildung anfangen:
(so ziemlich) **alles** und (so ziemlich) **überall**

- Universelle **Problemlöser/innen** mit Kreativität und Durchhaltevermögen
- Erfahrung in **großen internationalen Teams**
- Arbeit mit Technologien an der **Grenze des Machbaren**



Bildquelle: Getty Images

Viel Spaß und viel Erfolg in Ihrem Studium.