

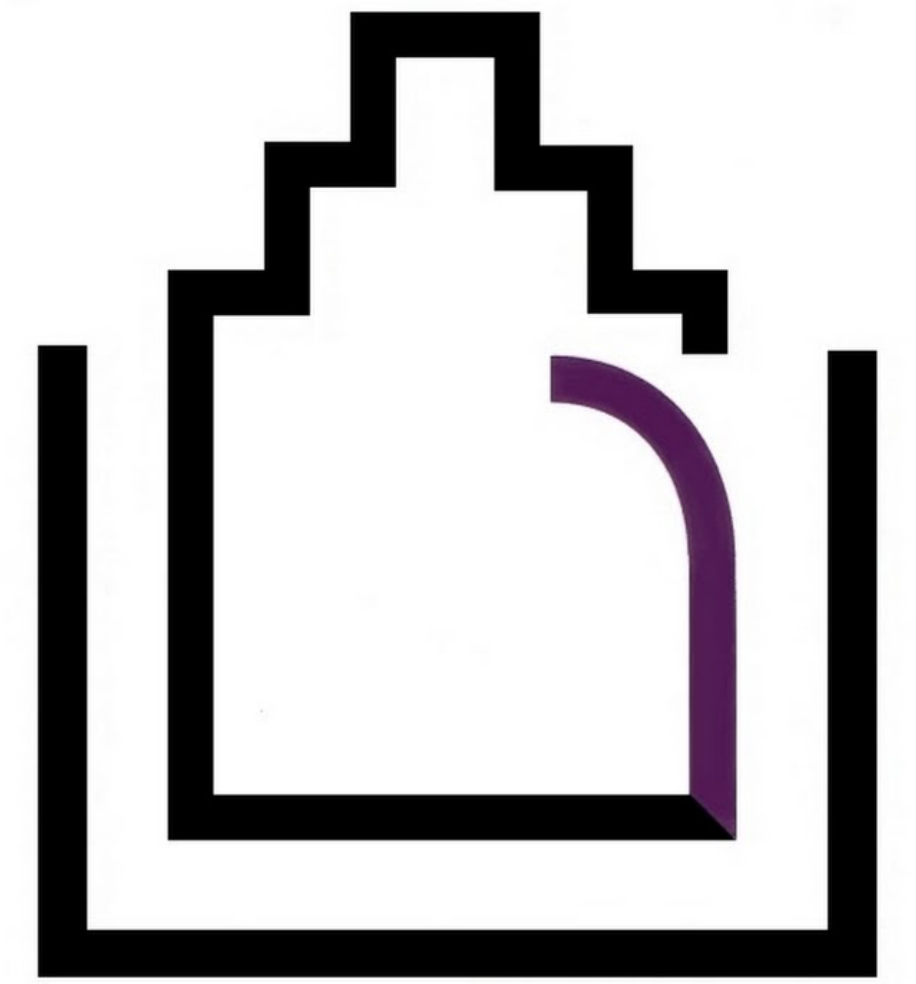
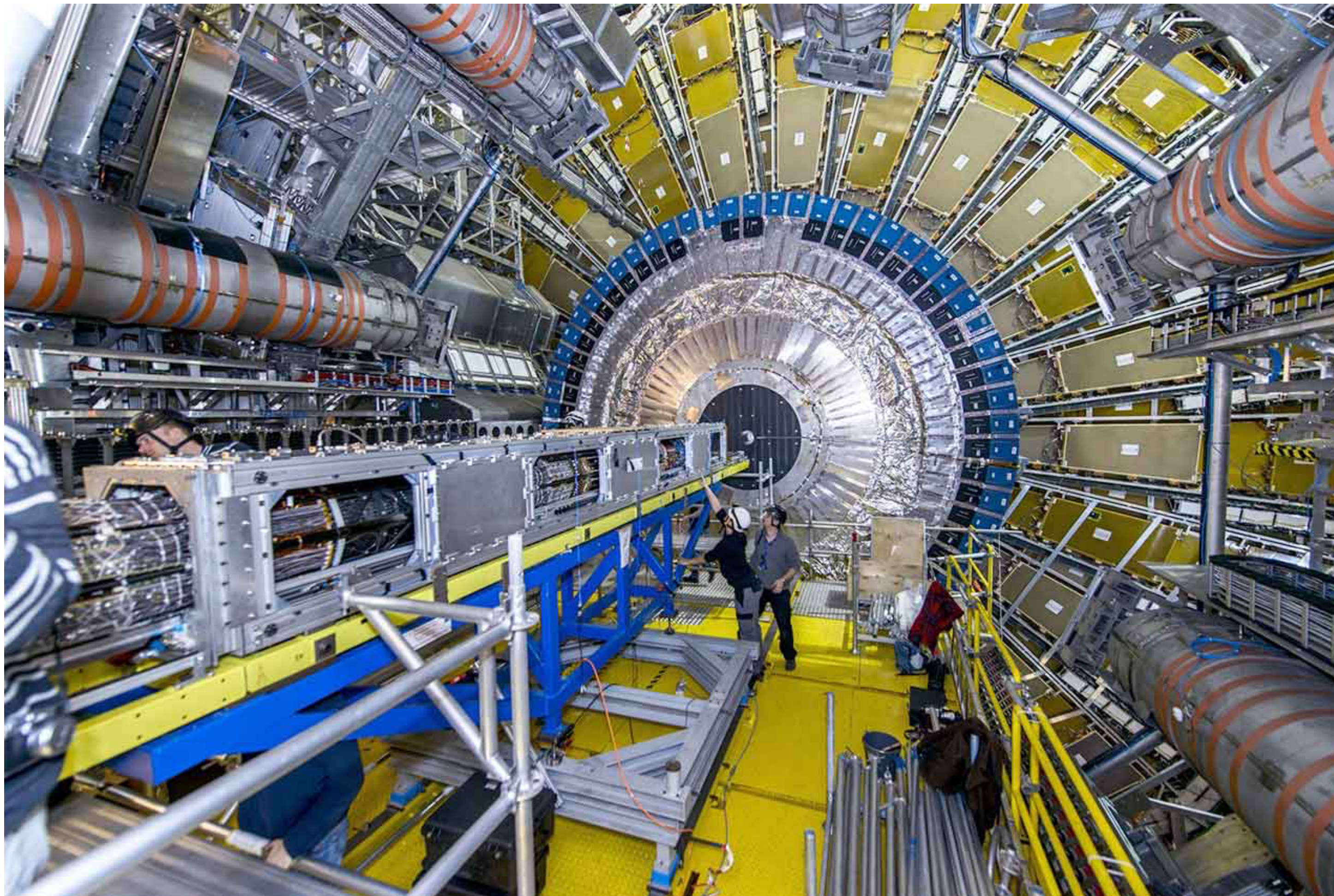
Das ATLAS-Experiment am LHC

Besuch der Landesschule Pforta am DESY

Serhat Ördek
DESY, Hamburg

2. Juni 2025

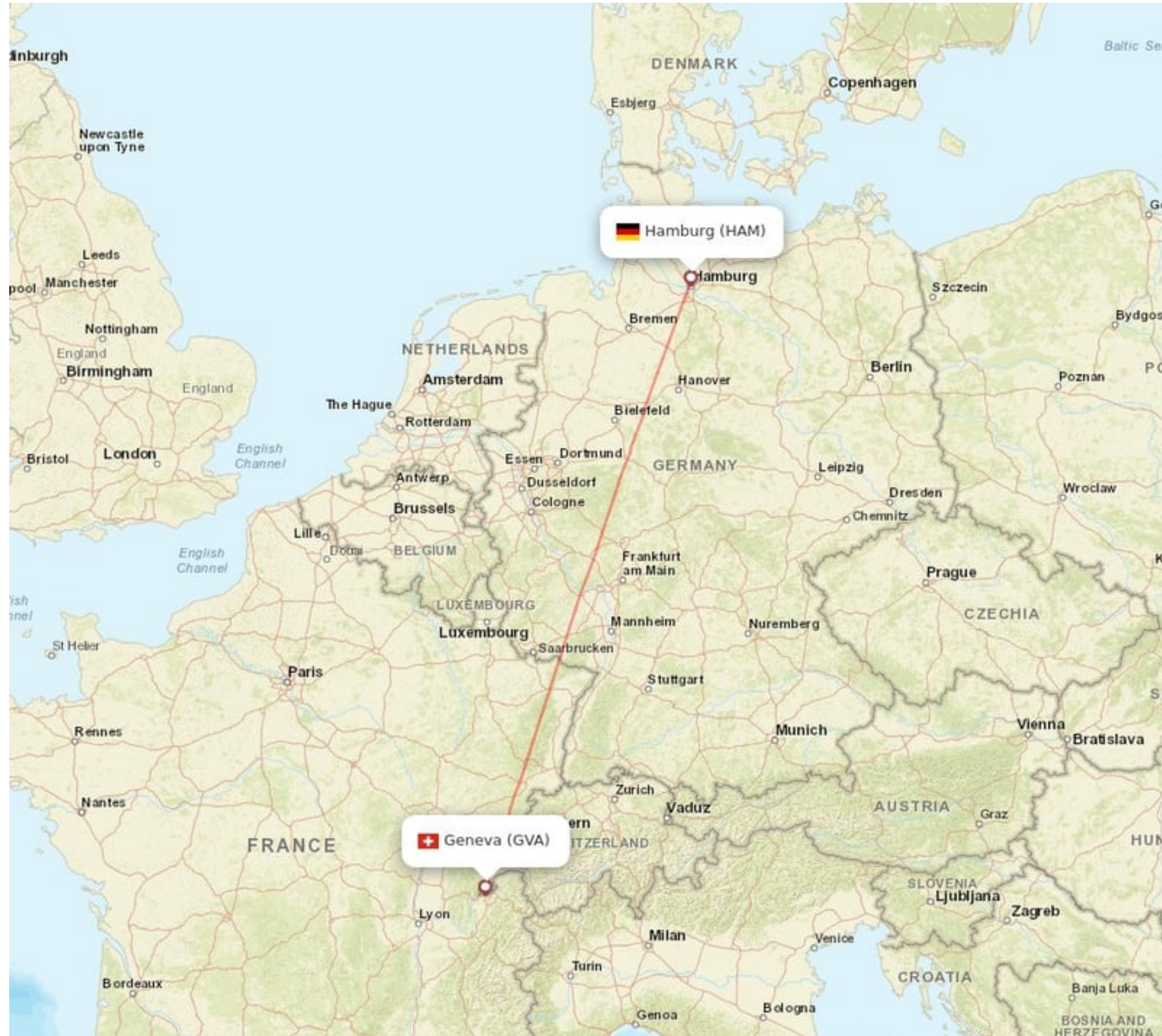
HELMHOLTZ



LANDESSCHULE
PFORTA



Der Lageplan

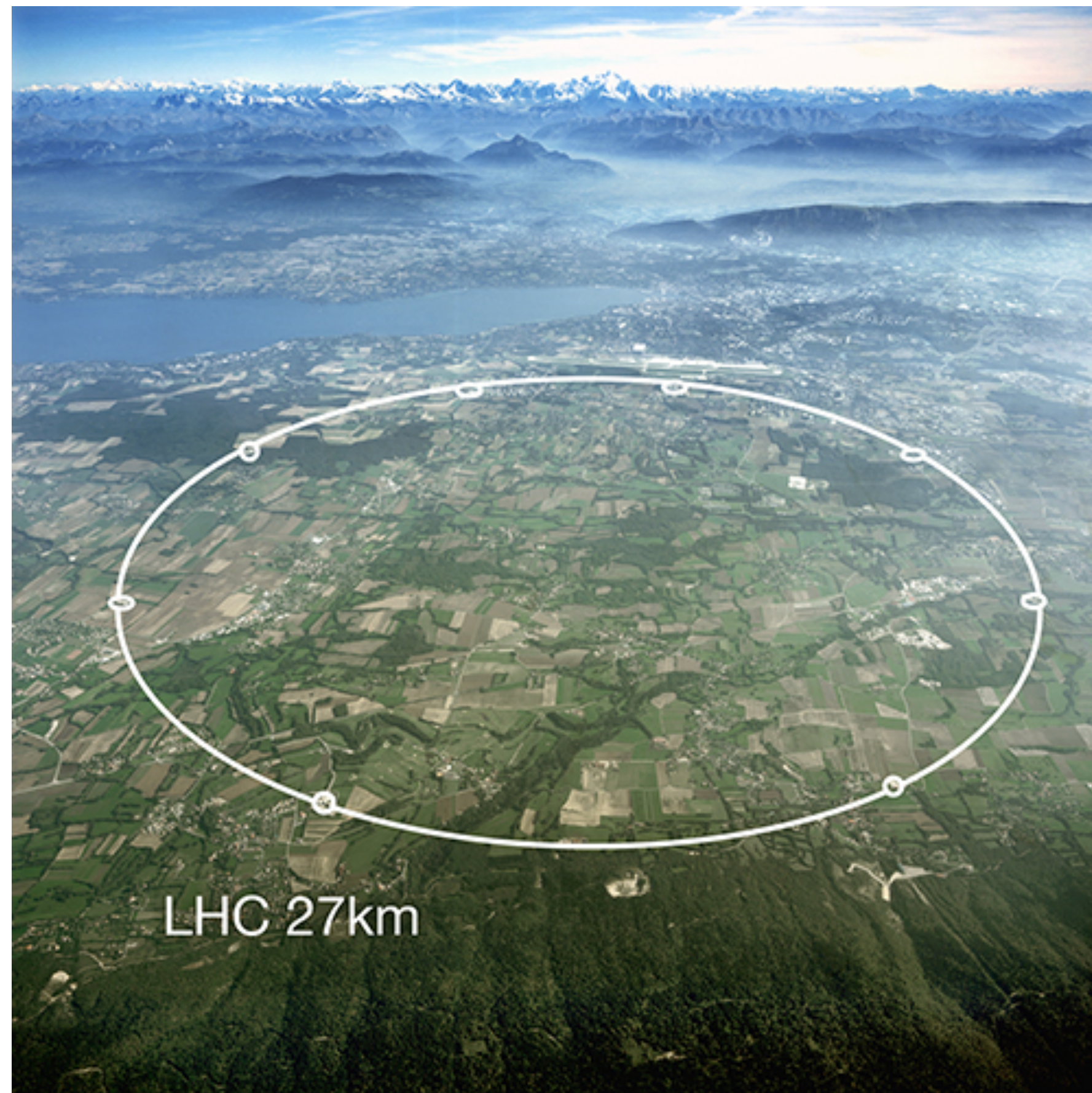


- Genf in der Schweiz, ca. 11 Stunden Zugfahrt entfernt
- Attraktionen für Touristen: Genfer See, Alpen
- Und die Heimat des Large Hadron Collider (LHC)



Der Large Hadron Collider

- Projekt des "europäischen Kernforschungszentrums" CERN
- Größte Maschine, die je gebaut wurde! Leistungstärkster Teilchenbeschleuniger der Welt

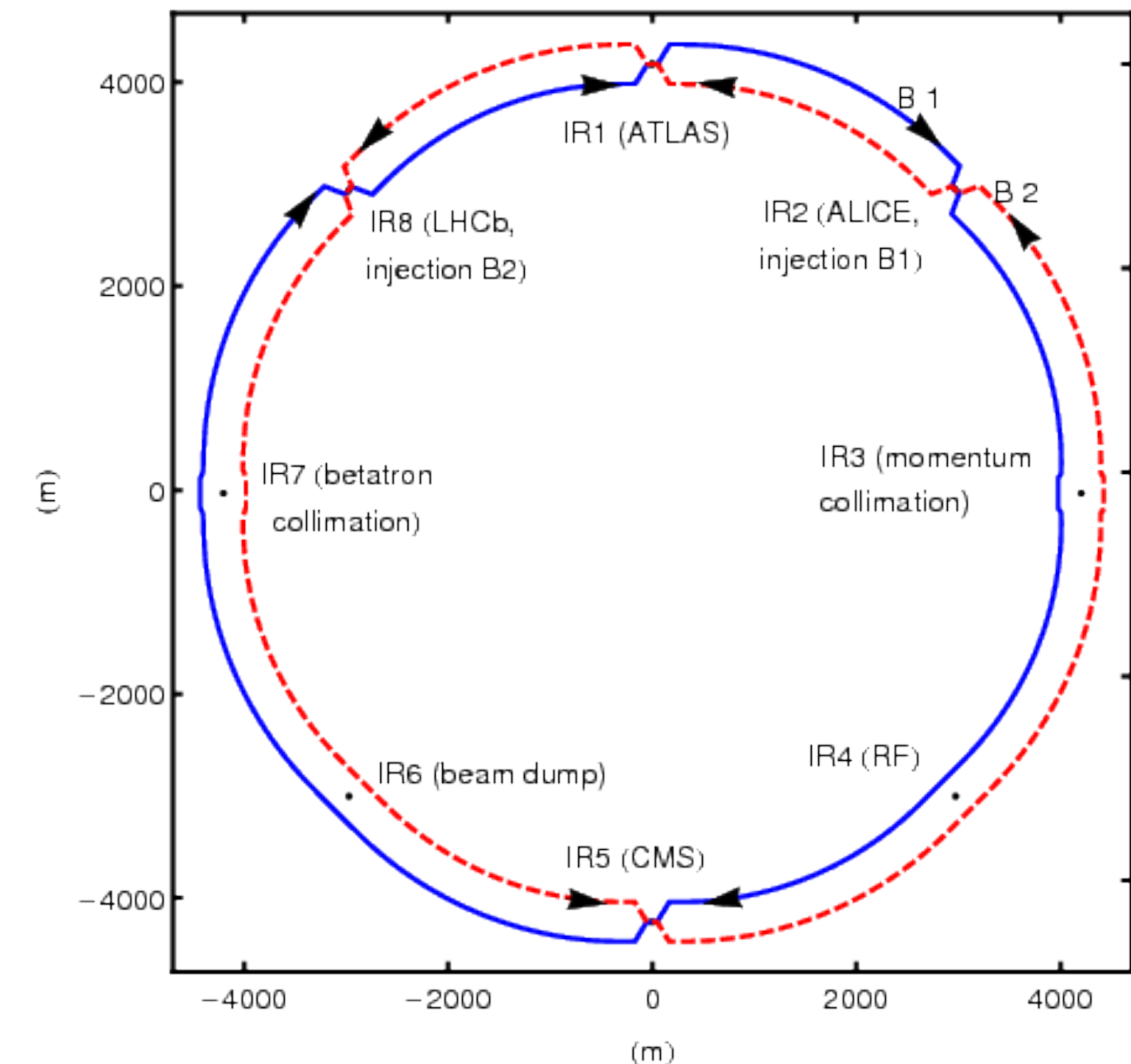


Und was tut der LHC?



- Elektrische Felder zur Beschleunigung
- **Magnetfelder** zum Halten auf Kreisbahn
- Strahlen werden an einigen Stellen **gekreuzt!**

- Beschleunigt Protonen auf mehr als 99,99% der Lichtgeschwindigkeit (Energie eines ICE auf Höchstgeschwindigkeit)
- Zwei entgegengerichtete Strahlen, die im Kreis verlaufen

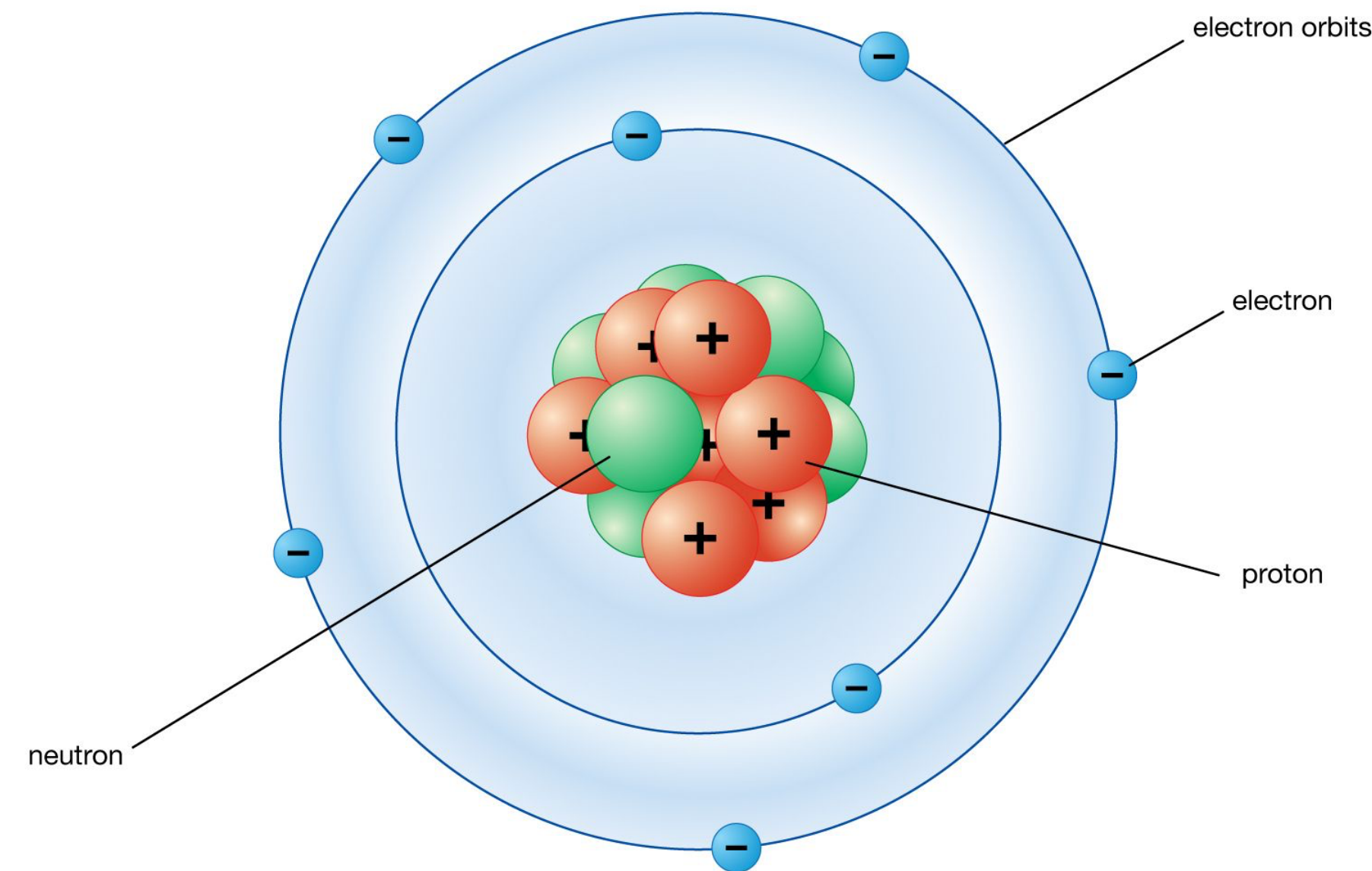


Die große Frage: Warum das alles?

- Wenn wir morgens wissen wollen, wie unser Wecker funktioniert
⇒ Wecker auf den Boden schlagen bis er zerspringt, schauen was drin ist
- Exakte Vorgehensweise der Spitzenforscher am LHC!



- Protonen sind Bausteine aller bekannten Materie, jedoch selbst zusammengesetzt
- Mit dem LHC möglichst heftig zerschmettern, um Grundbausteine zu verstehen!

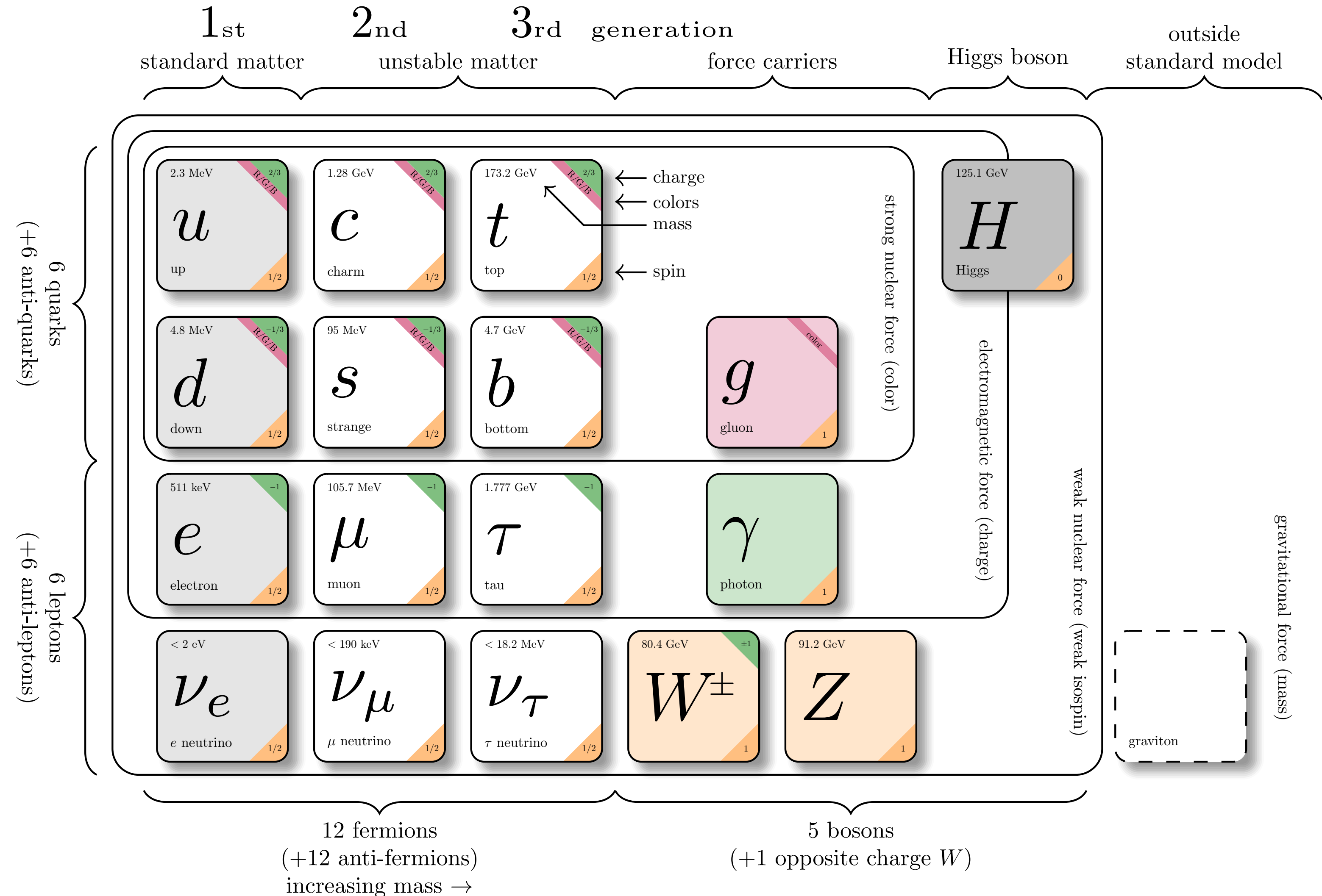


Zentrale Themen:

- Woraus sind wir gemacht?
- Was gibt es sonst noch?
- Verstehen, "was die Welt im Innersten zusammenhält"

Das Standardmodell der Teilchenphysik

- Liste unterschiedlicher Elementarteilchen nicht lang!
- Und viele "Kopien", z.B. Myon " μ " ist exakt das gleiche wie ein Elektron, nur schwerer
- Gewöhnliche Materie: u , d , e
- Licht/elektromagnetische Wellen: γ
- Andere Teilchen "unsichtbar" (Neutrinos ν) und/oder instabil (der Rest)



Wie wird daraus "normale Materie"?



- Proton besteht aus "up" + "up" + "down" Quarks
- Zusammengehalten durch "Gluonen"
- Ladung: $\frac{2}{3} + \frac{2}{3} - \frac{1}{3}$



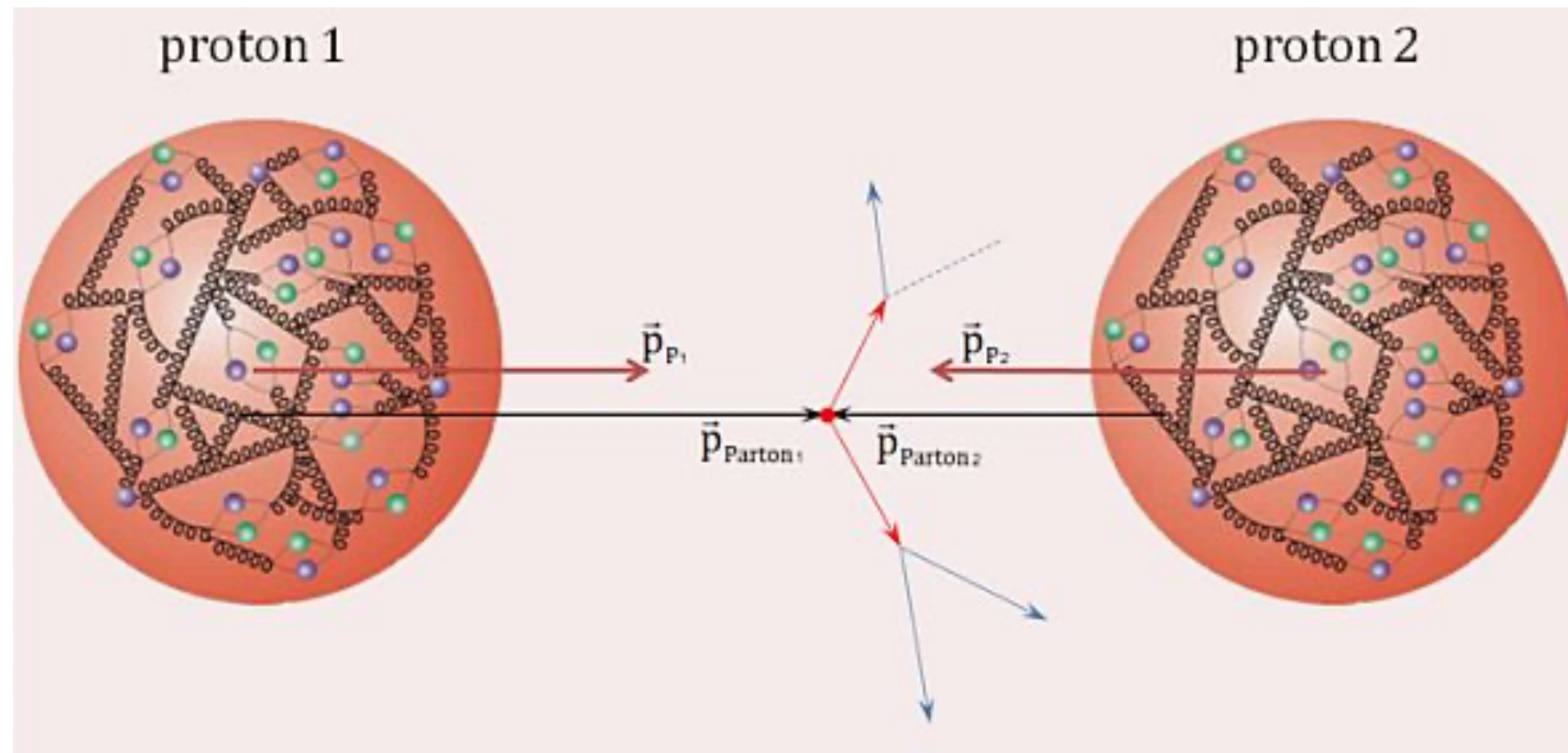
- Ähnlich: Neutron besteht aus "up" + "down" + "down" Quarks
- Ladung: $\frac{2}{3} - \frac{1}{3} - \frac{1}{3}$



- Elektronen sind nach aktuellem Wissensstand bereits elementar

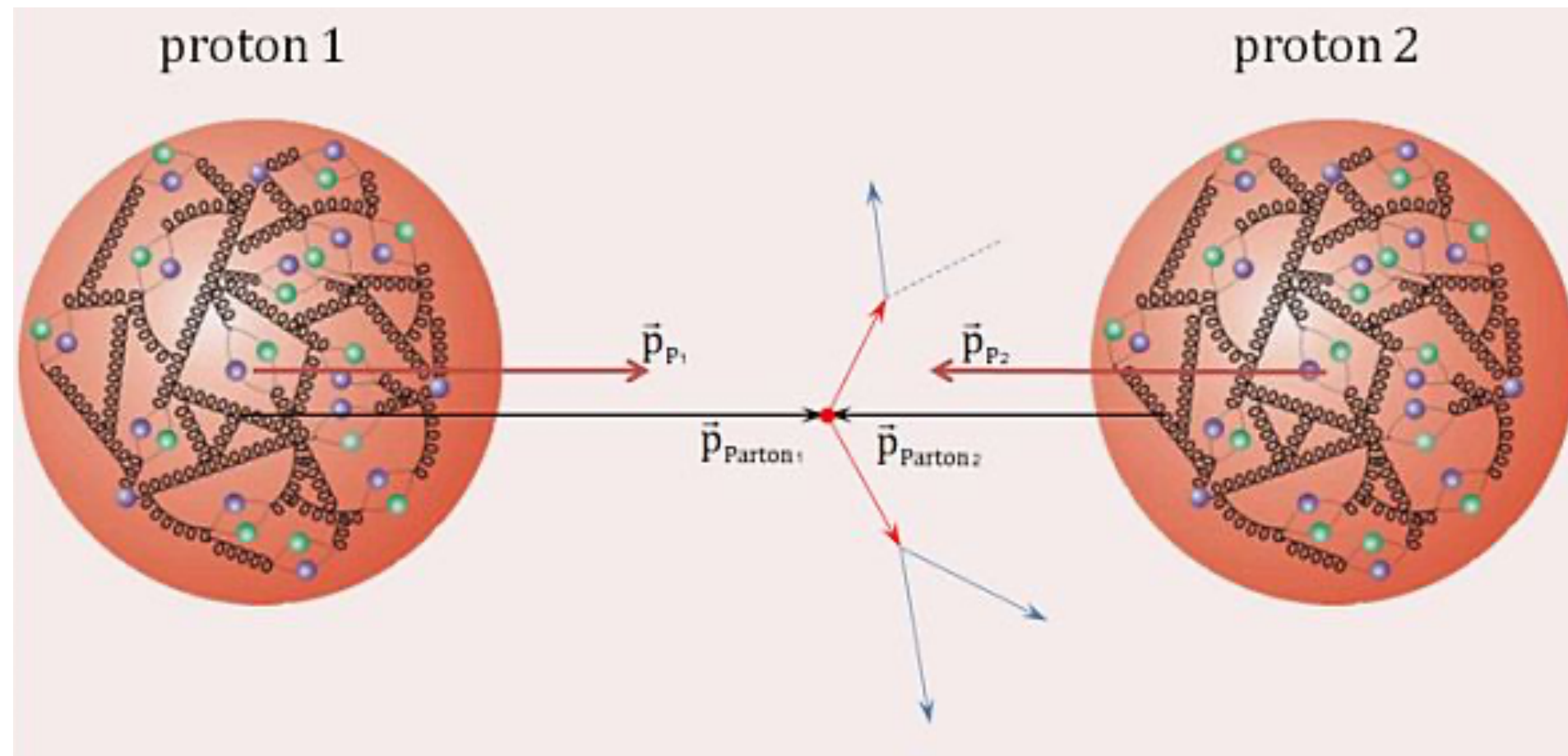
⇒ Diese Elementarteilchen reichen aus, um beliebige Atome zu bilden

Proton-Kollisionen



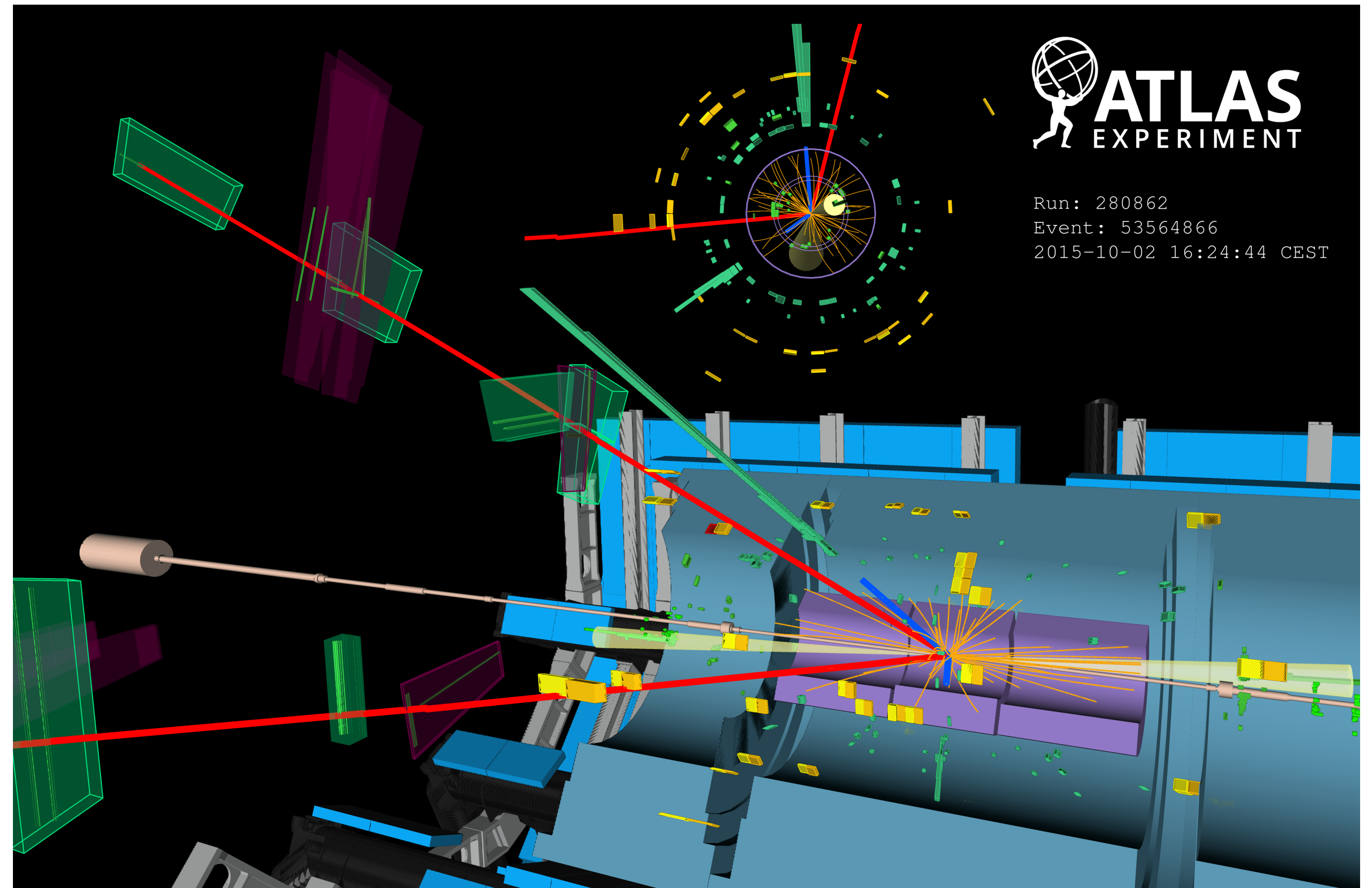
- Der LHC beschleunigt Protonen, damit diese mit möglichst viel Wucht in einander rasen
- Da Protonen nicht elementar sind, können hier viele verschiedene Interaktionen hervorgerufen werden!
⇒ "Kartoffelsäcke statt Billardkugeln"

Proton-Kollisionen

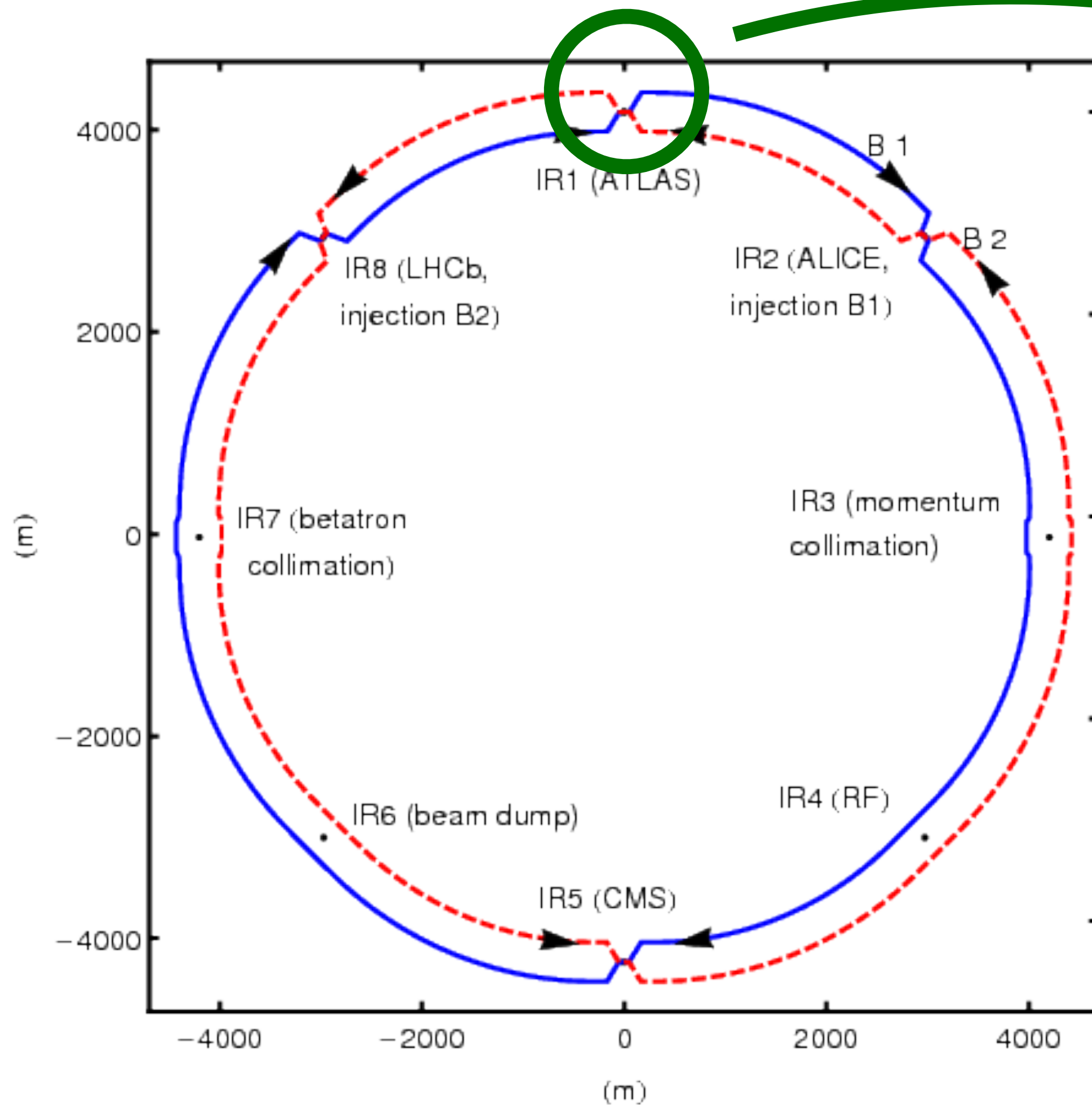


- Der LHC beschleunigt Protonen, damit diese mit möglichst viel Wucht in einander rasen
- Da Protonen nicht elementar sind, können hier viele verschiedene Interaktionen hervorgerufen werden!
⇒ "Kartoffelsäcke statt Billardkugeln"

- Nicht nur viele verschiedene Arten von Interaktionen, sondern auch viele gleichzeitig
- Um zu rekonstruieren, was passiert ist, benötigt man einen komplexen Versuchsaufbau ⇒ **ATLAS-Detektor**

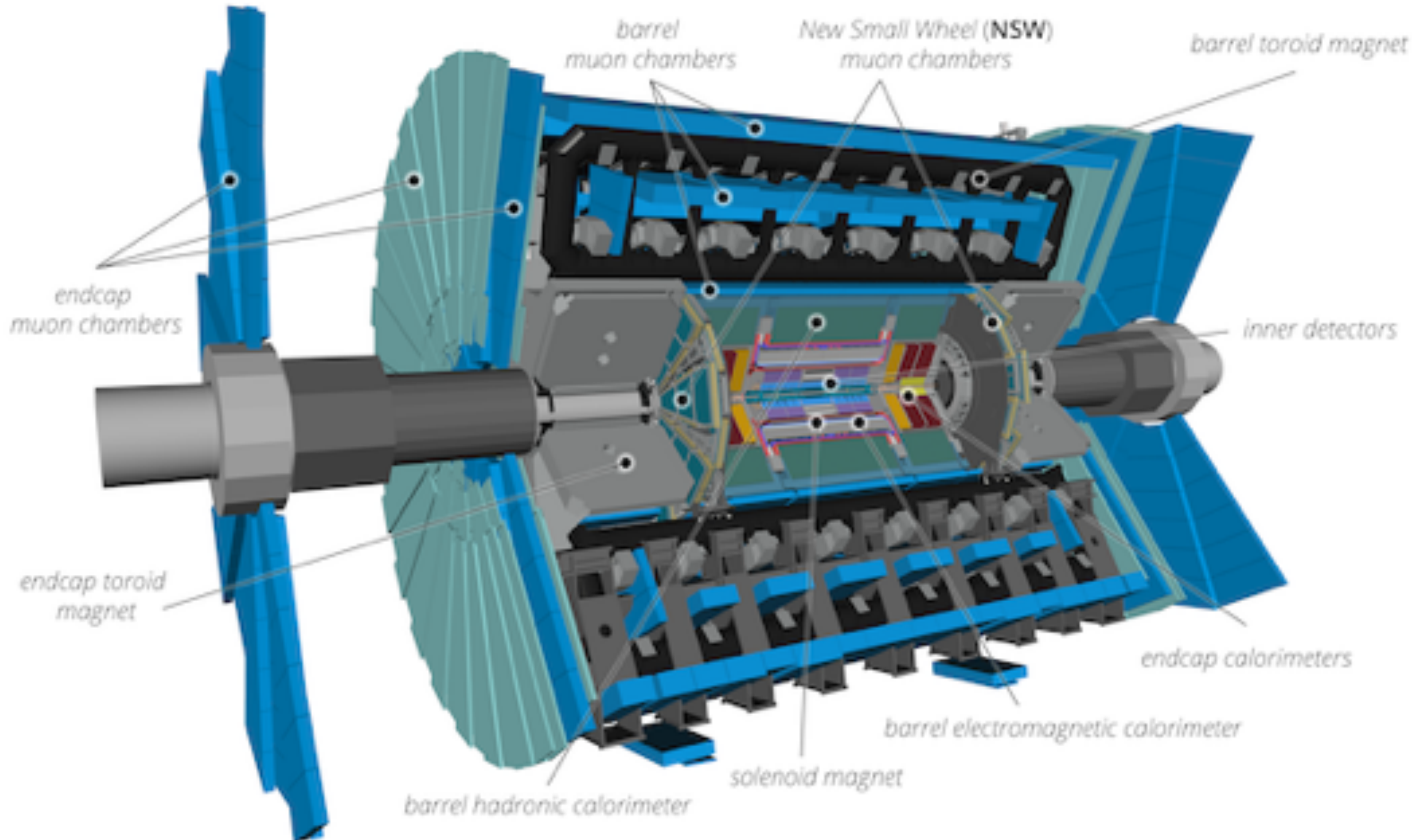


Zurück am LHC, "interaction point 1"



Der Eingang ist hier

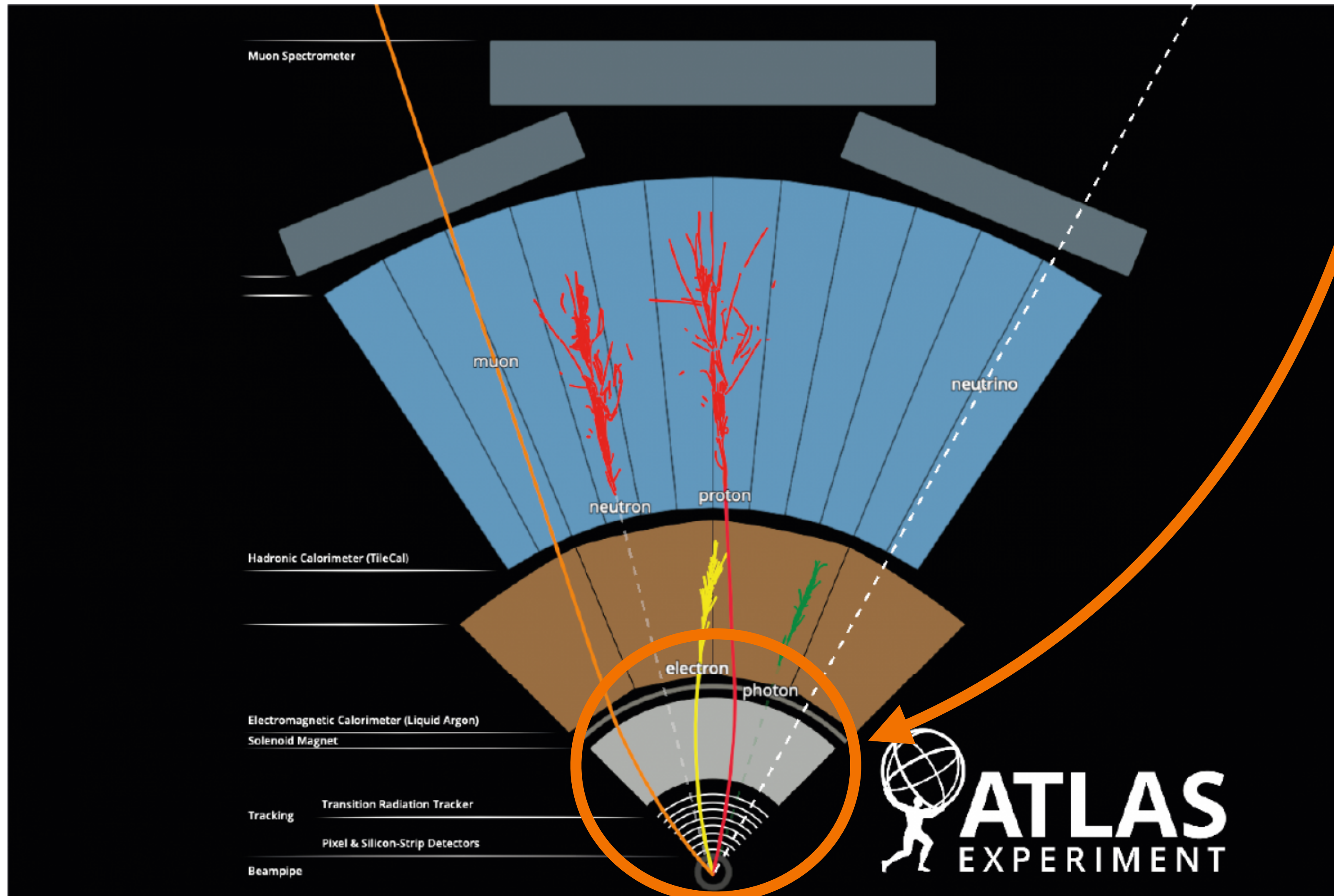
Aufbau des ATLAS-Detektors



- Um einen der Interaktionspunkte des LHC herum gebaut
- Viele Sub-Detektoren, die verschiedene Aufgaben erfüllen
- Angeordnet wie Zwiebelschalen um den Kollisionspunkt der Protonen

Funktionsweise der Sub-Detektoren

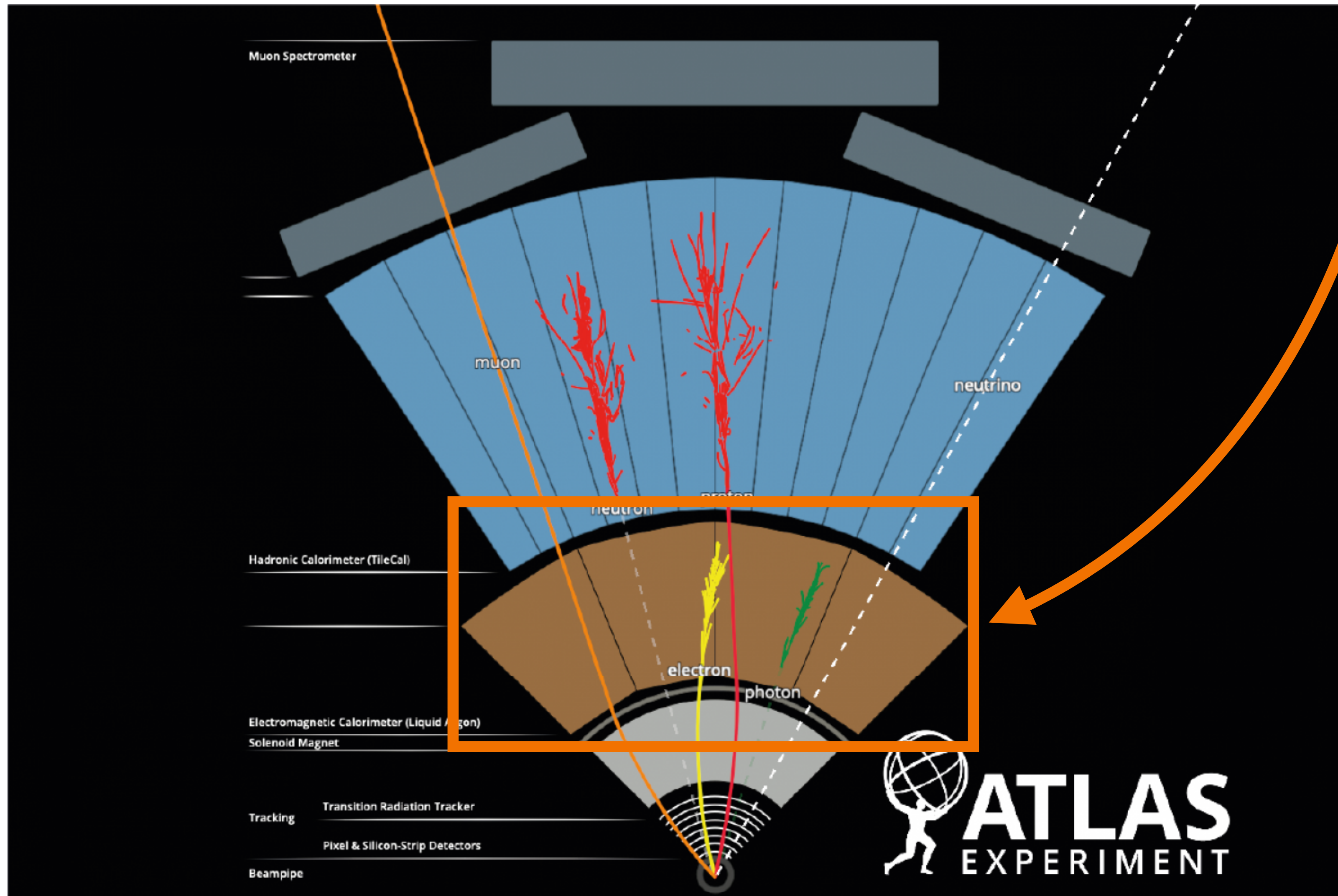
Spurdetektor



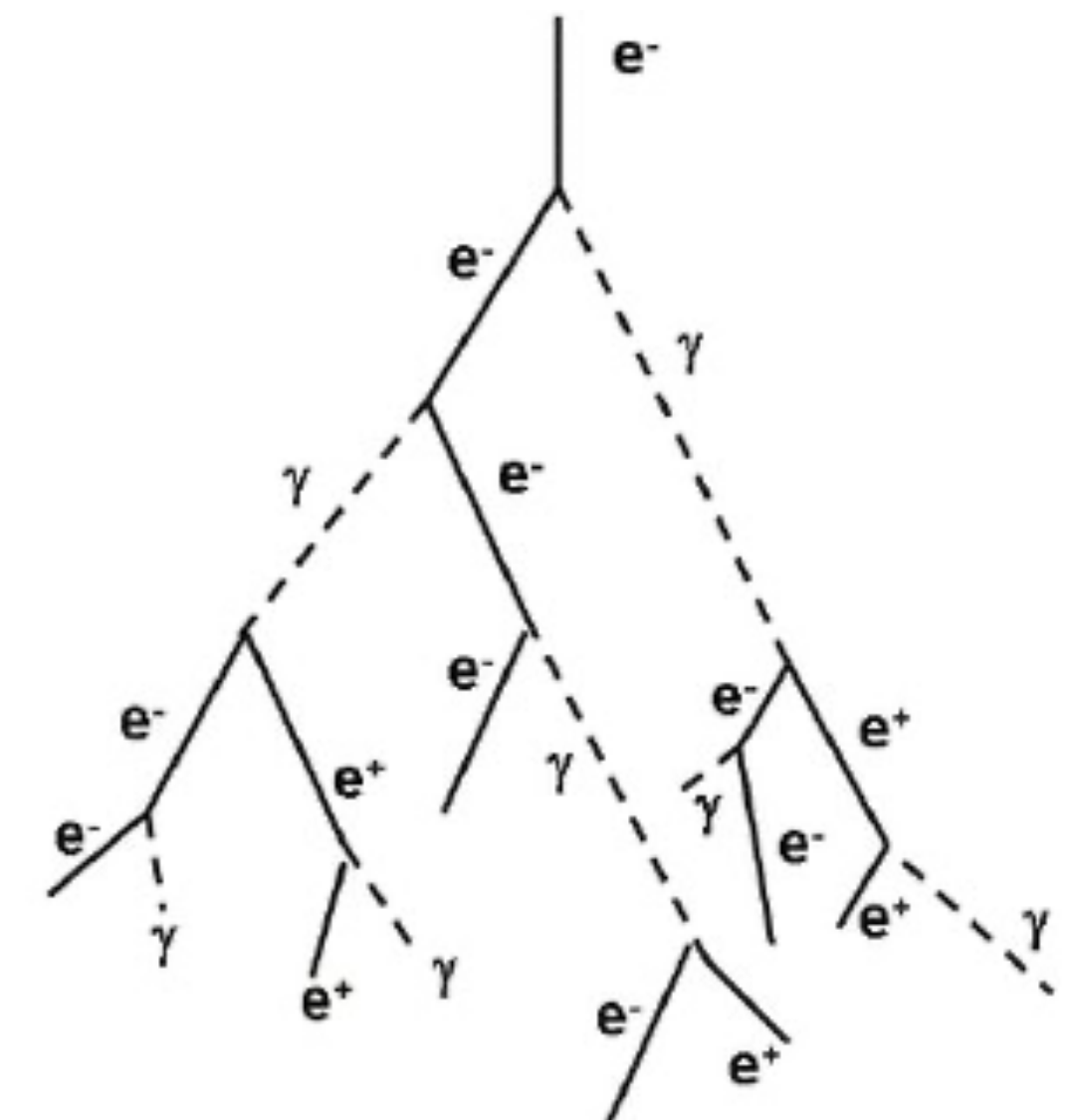
- Leicht ionisierbares Material wird verwendet, z.B. Silizium
- Prinzip Nebelkammer
⇒ Geladene Teilchen, die bei der Kollision erzeugt werden, hinterlassen eine Spur der Ionisation
- Magnetfeld, um die Flugbahn der Teilchen zu krümmen
- Krümmung stärker, je langsamer das Teilchen
⇒ Aus Krümmungsradius kann der Impuls bestimmt werden

Funktionsweise der Sub-Detektoren

Elektromagnetisches Kalorimeter

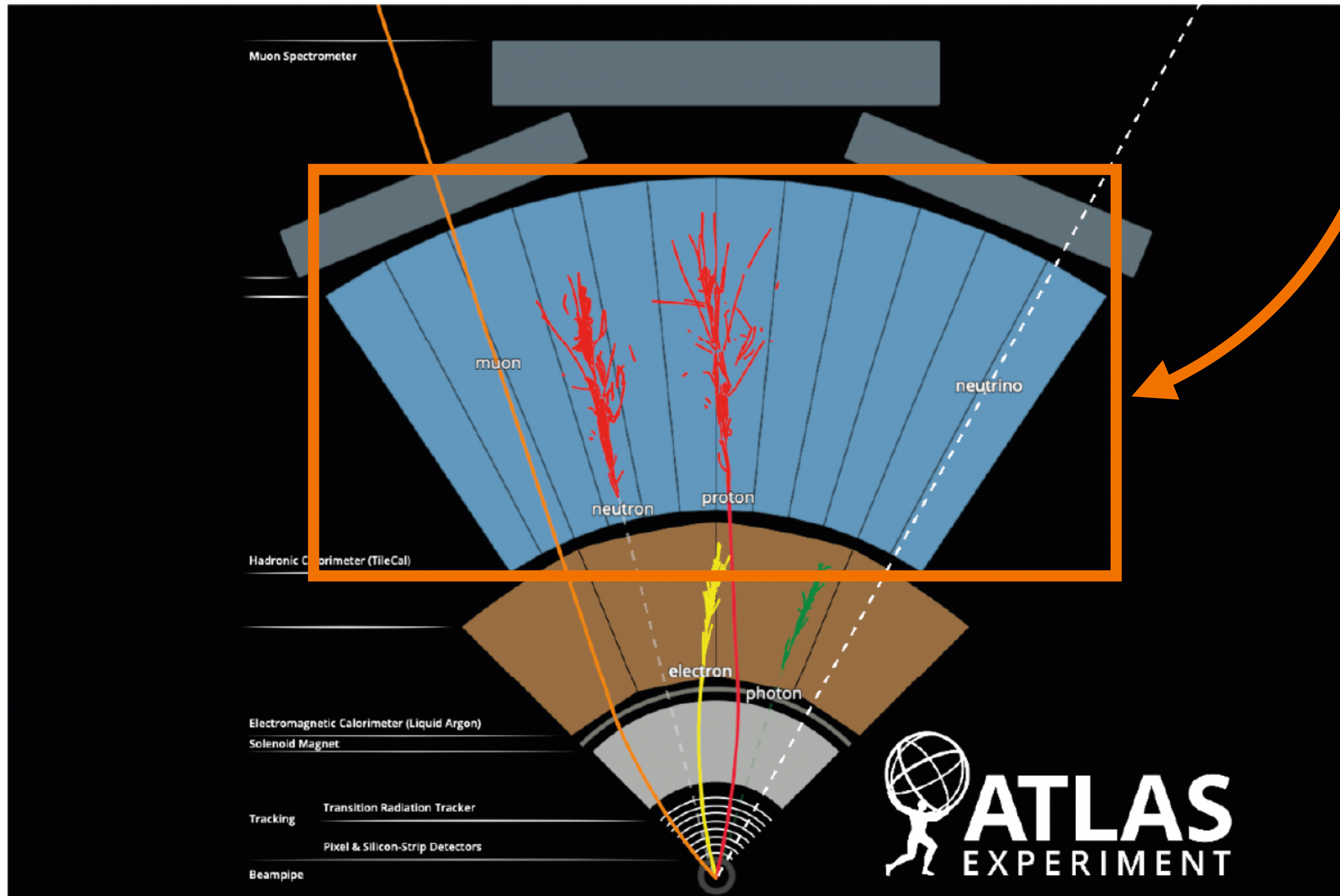


- Grundidee: Bremsstrahlung + Paarherzeugung
- Elektronen stoßen an Atome, strahlen Photonen ab (Bremsstrahlung)
- Photonen spalten sich in Elektron + Positron (Antimaterie) $\Rightarrow$ Teilchenkaskade

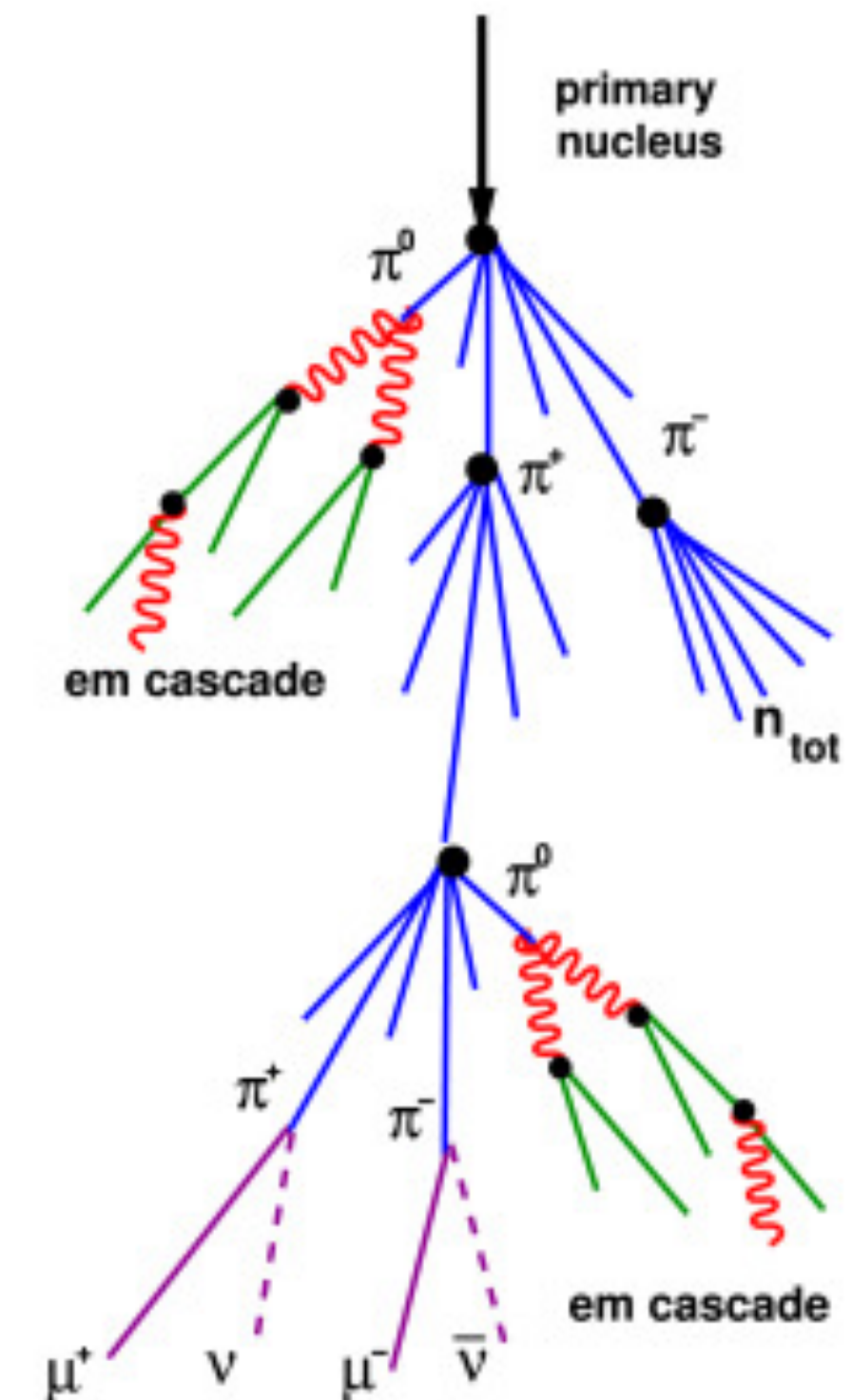


Funktionsweise der Sub-Detektoren

Hadronisches Kalorimeter

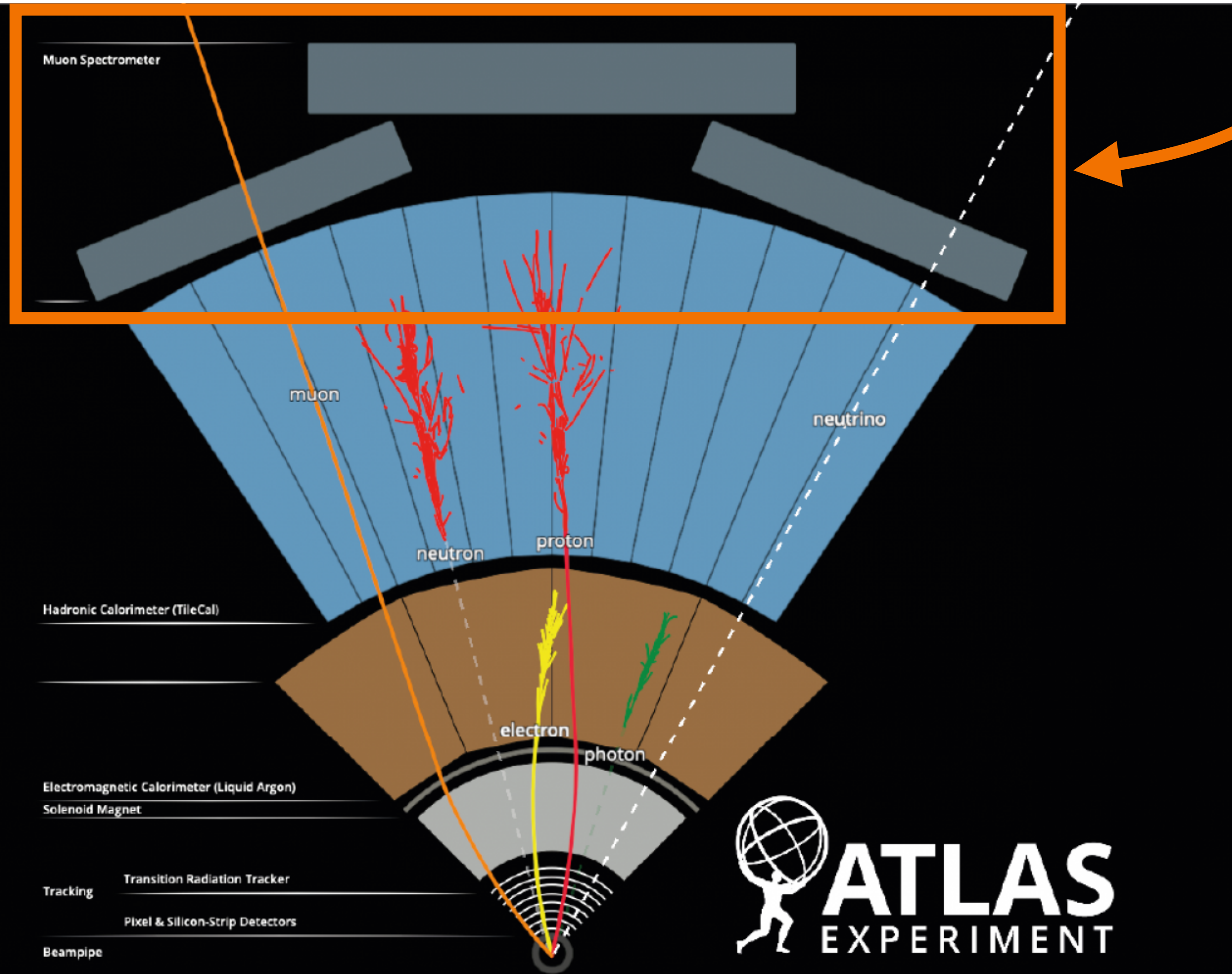


- Gleicher Grundgedanke, aber dichteres Material
- Führt vermehrt zu hadronischen Wechselwirkungen



Funktionsweise der Sub-Detektoren

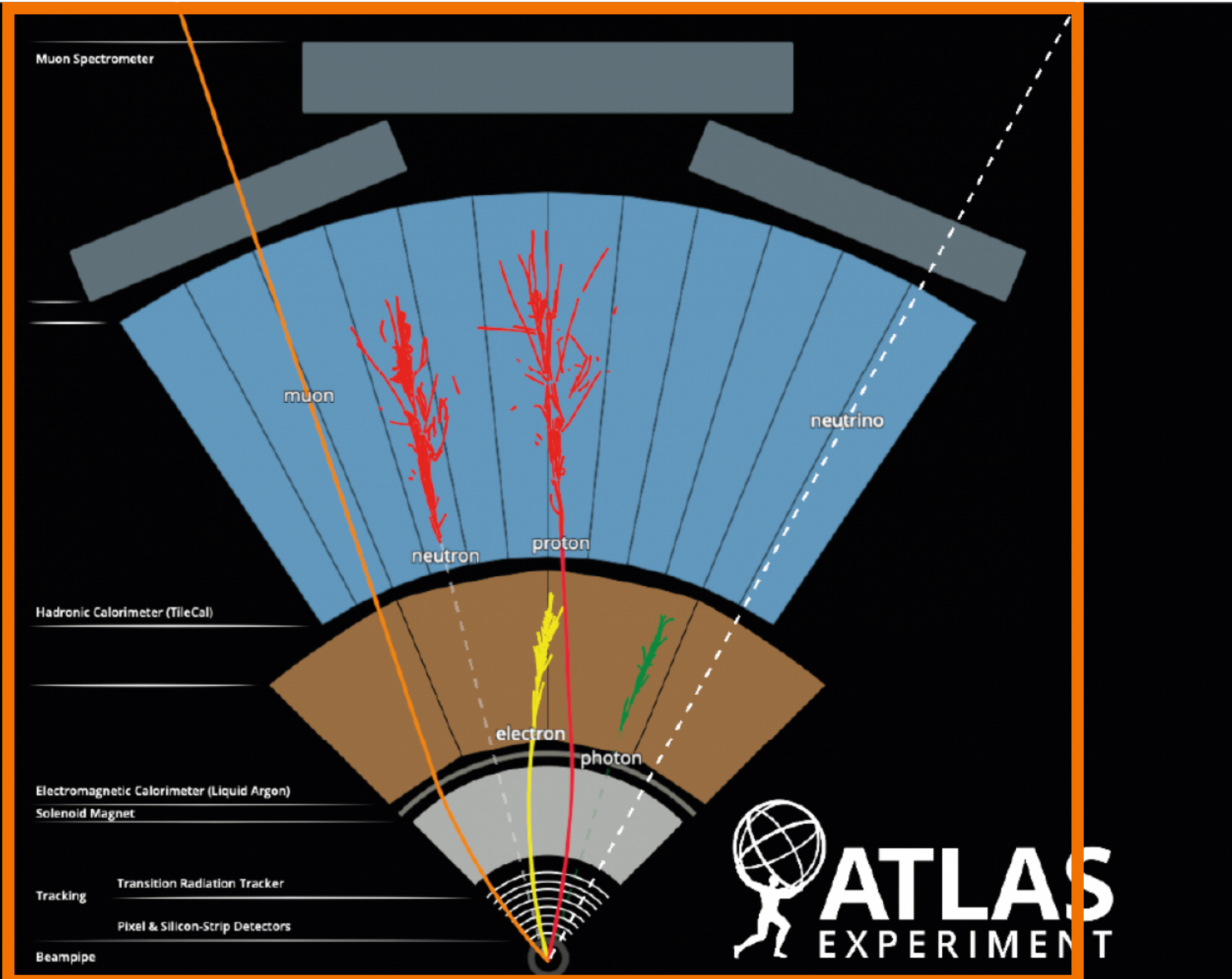
Myonkammern



- An sich nur ein weiterer, deutlich größerer Spurdetektor
- Interessant wird es durch den Gesamtaufbau des Detektors
- Kalorimeter sind "destruktive Messgeräte", absorbieren die Energie der Teilchen
- Das einzige $\approx$ stabile Teilchen, das nicht absorbiert wird: Myon
- Ist auch geladen, also ionisiert es einen Spurdetektor

Funktionsweise der Sub-Detektoren

Teilchenidentifikation

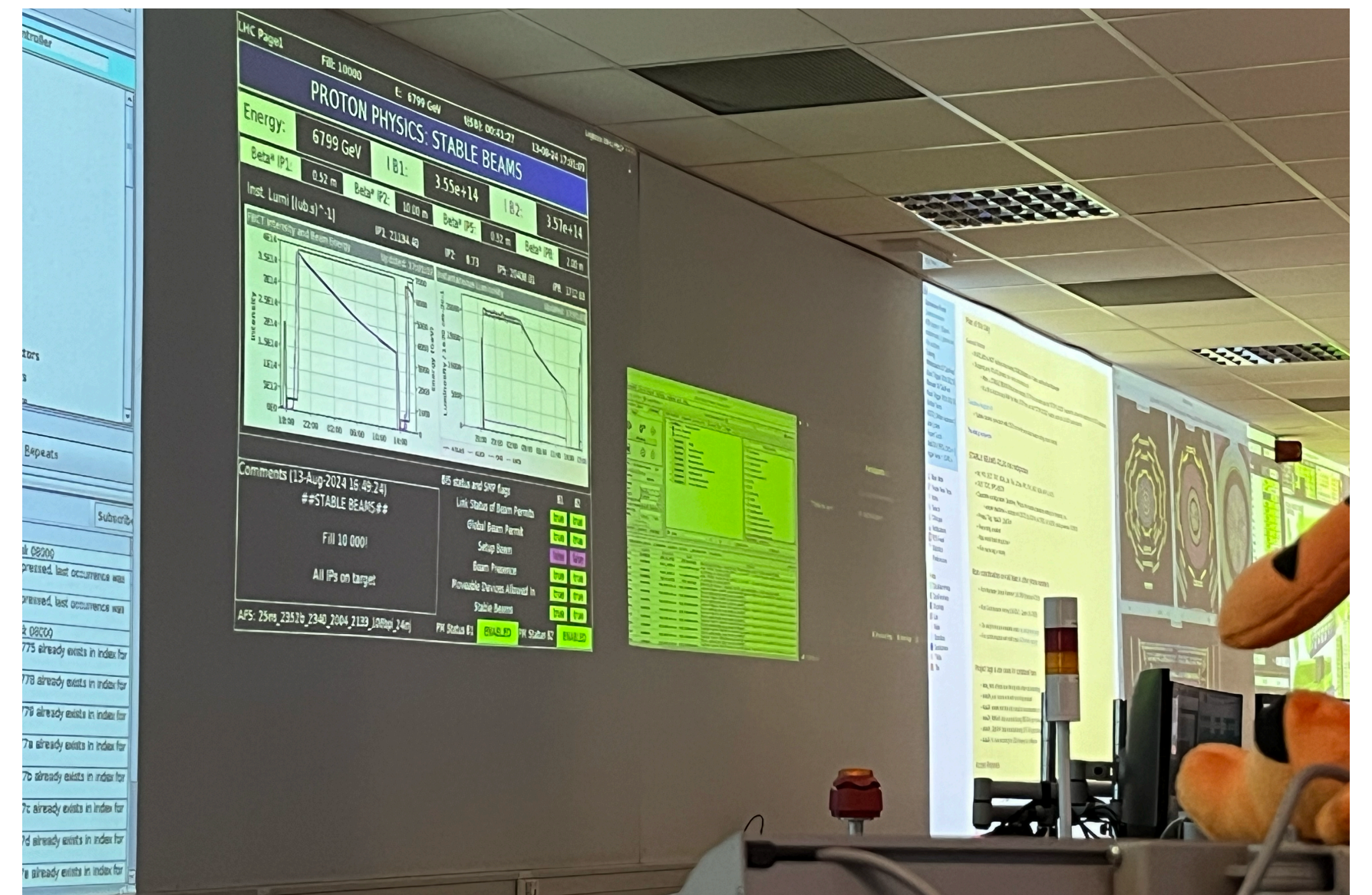


- Das war viel Gerede!
- Aber: können nun anhand des Detektorausschlags Teilchensorten von einander unterscheiden!
- Hier aufgeführt für 6 verschiedene Teilchen:
 $\mu, n, e, p, \gamma, \nu$

Moment... was hat das alles mit DESY zu tun?

- CERN-Gelände bei Genf in der Schweiz
- Aber: ATLAS ist globale Vereinigung!
- Viele Gründe für weitreichende Zusammenarbeit:
 - Sehr teures Experiment!
 - Aufwendige Inbetriebnahme der großen Maschinen: Schichtdienst
 - Konstruktion der Detektoren
 - Extrem komplexe Datenanalyse
- DESY ist eine der größten Institutionen in ATLAS, mit wichtigen Beiträgen in allen Bereichen

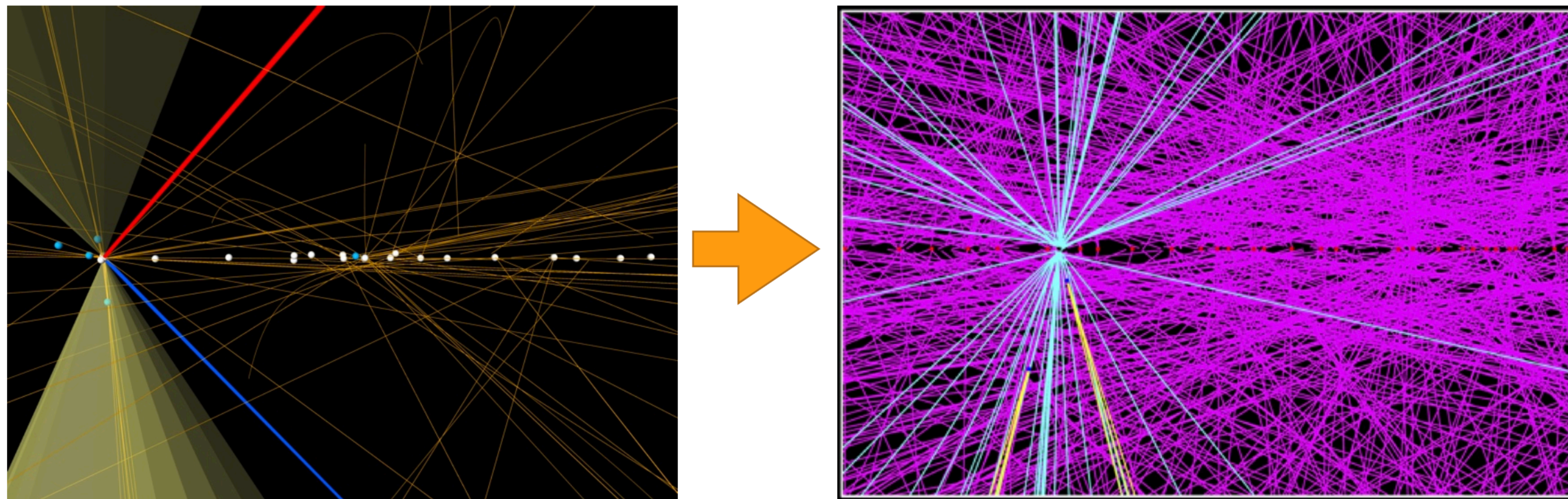
Im ATLAS-Kontrollraum



DESY-Aktivitäten, Beispiel 1: Detektor-Upgrade

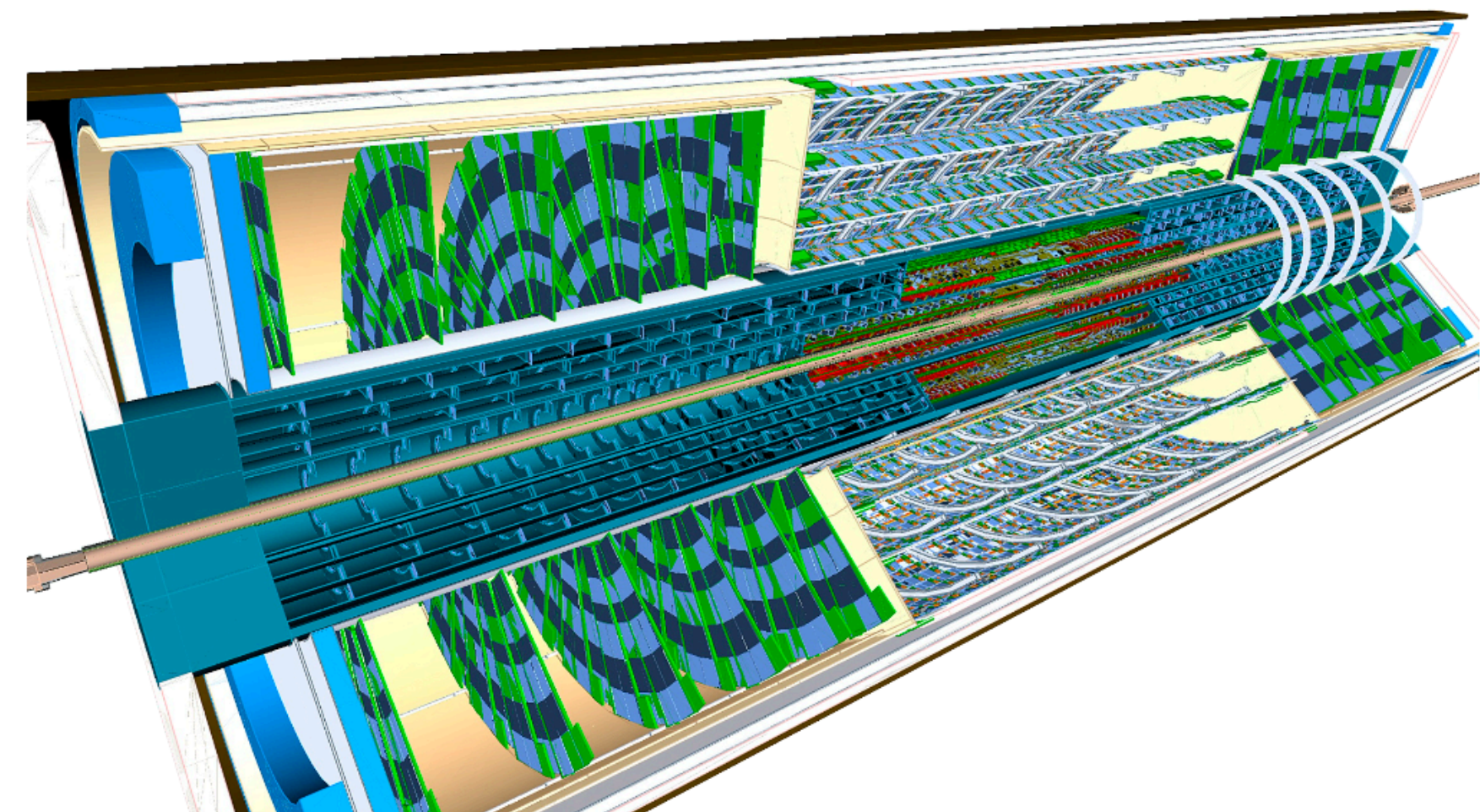
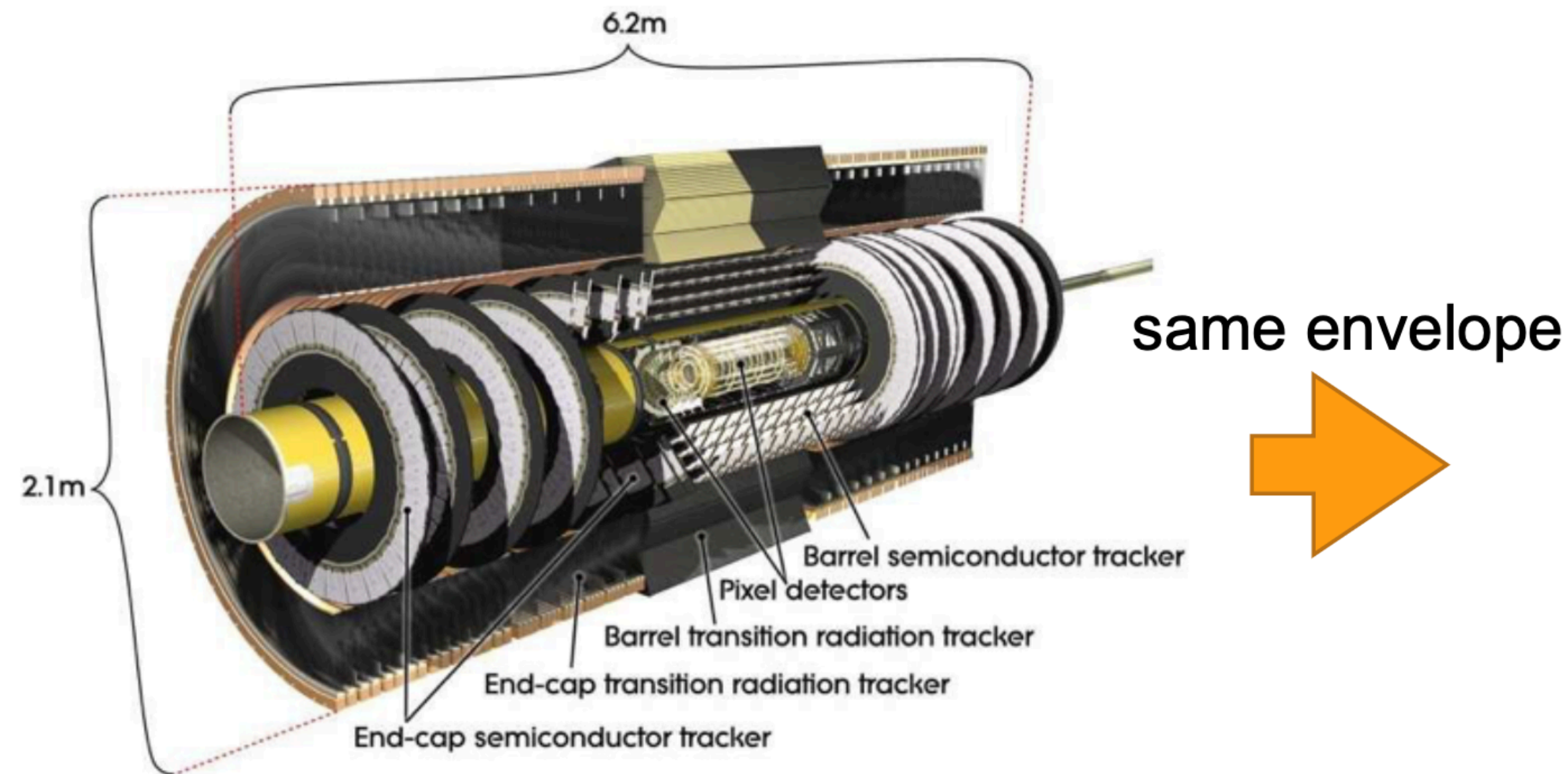
Der arme Spurdetektor 🙄

- Aktueller Spurdetektor ist sein ≈ 15 Jahren in Betrieb
- Innerste Schicht der ATLAS-“Zwiebel” $\Rightarrow$ direkt den Protonenstrahlen ausgesetzt
- Ist nun teilweise durchgebrannt, nicht mehr so präzise wie ursprünglich
- Außerdem: “High-Luminosity” Upgrade des LHC ab 2030 $\Rightarrow$ stärkere Strahlen
- Bedeutet mehr Strahlungsschäden und mehr Kollisionen, auch zur selben Zeit



DESY-Aktivitäten, Beispiel 1: Detektor-Upgrade

Der neue Spurdetektor 😊

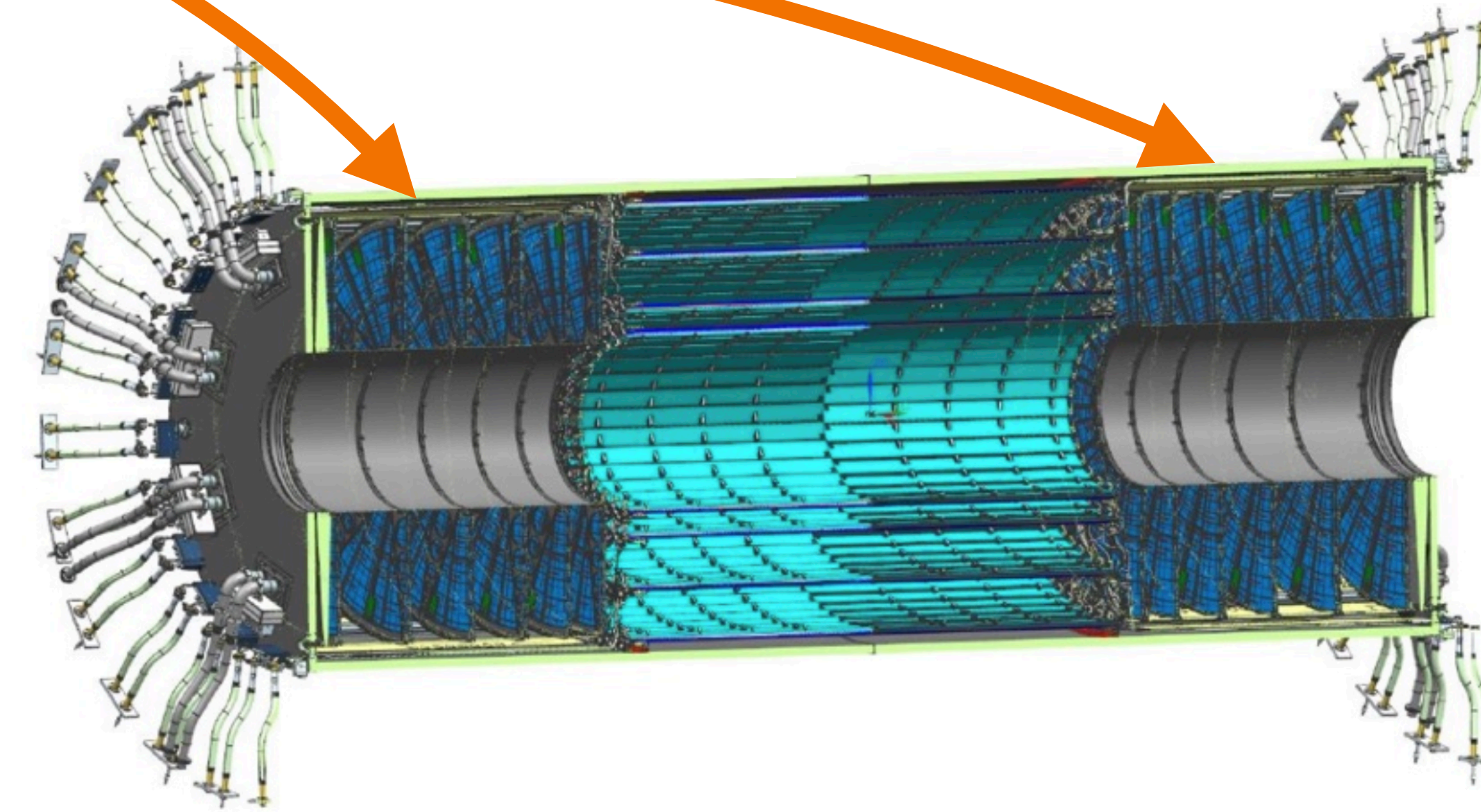
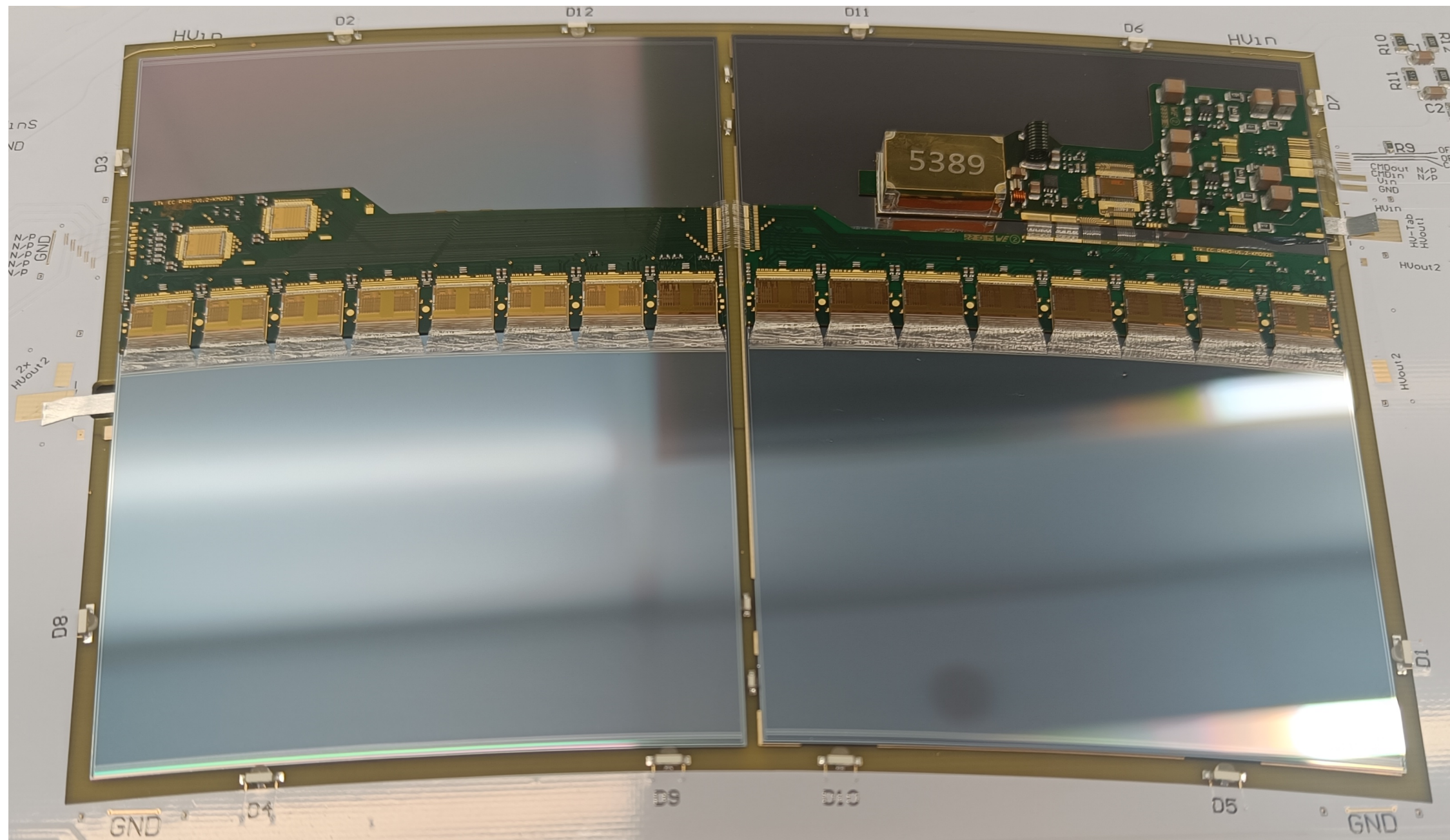


- Also tauschen wir das ganze Ding aus! Mit einem besseren Detektor, der genau in die Lücke passt
- Das ist der **Inner Tracker**, oder ITk
- Strahlungsresistenter, schnellere Auslese, höhere Präzision, weniger Material, größere Abdeckung
- Aber: den ITk muss auch irgendwer bauen $\Rightarrow$ u.a. DESY!

DESY-Aktivitäten, Beispiel 1: Detektor-Upgrade

Konstruktion von Streifenmodulen am DESY

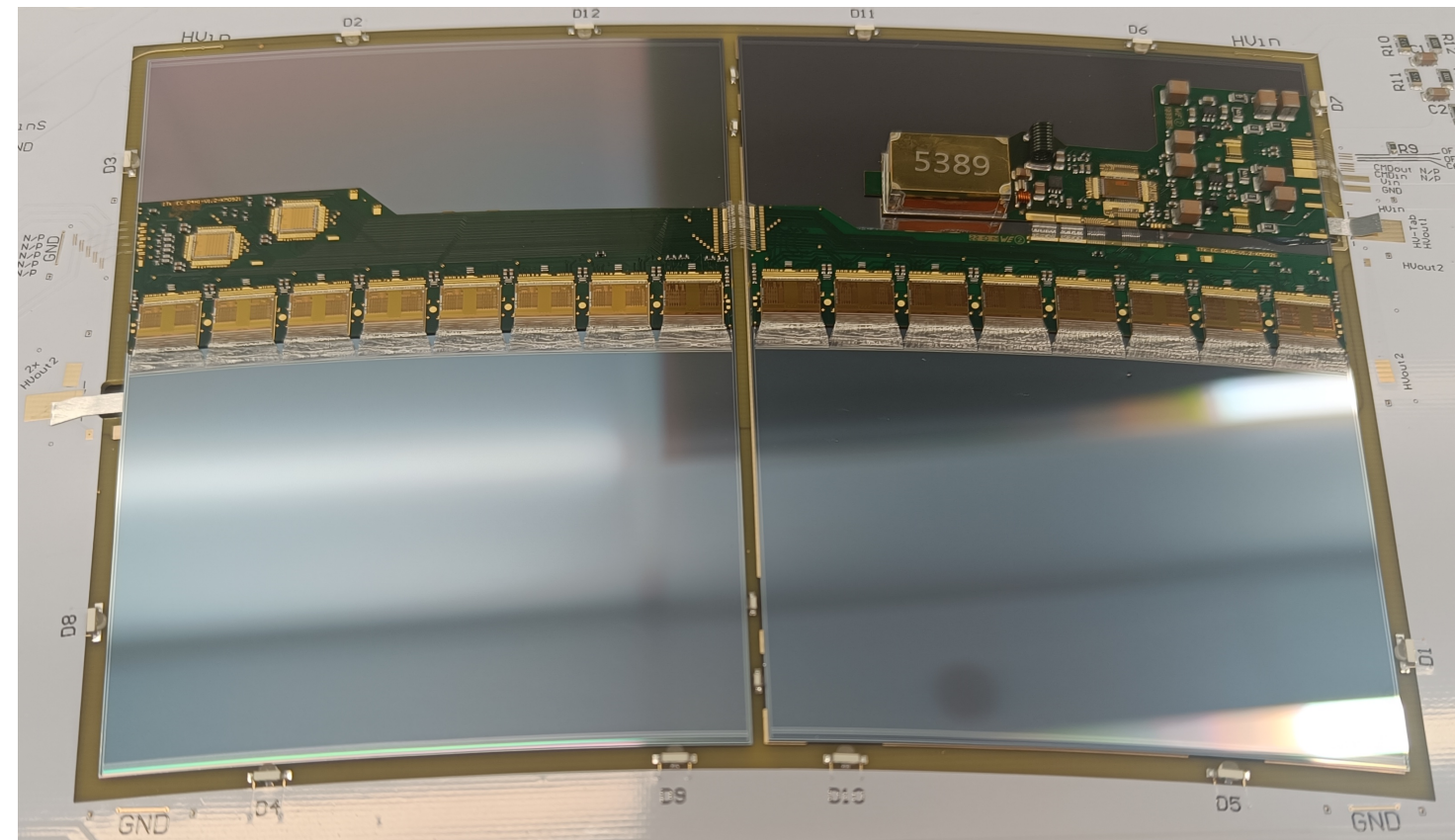
- DESY (Zeuthen + Hamburg) baut den äußersten Teil des ITk mit: die End-Kappen des Streifendetektors
- Hierfür werden zunächst Silizium-Sensoren mit Auslese-Elektronik verklebt
- Elektrische Verbindungen mit dünnen Drähten



“R4-Modul”, gebaut in Hamburg

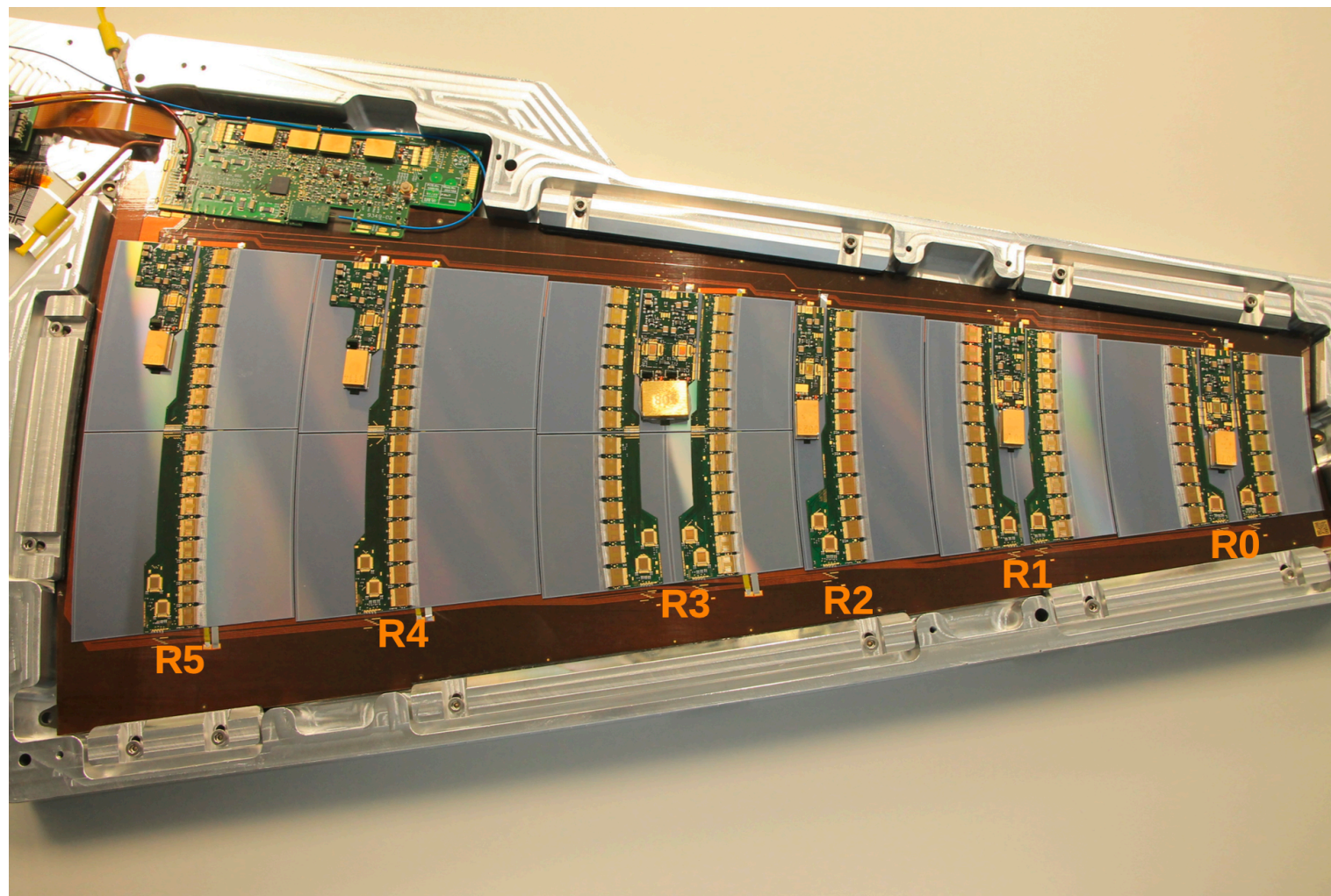
DESY-Aktivitäten, Beispiel 1: Detektor-Upgrade

Zusammensetzung der End-Kappe und Transport



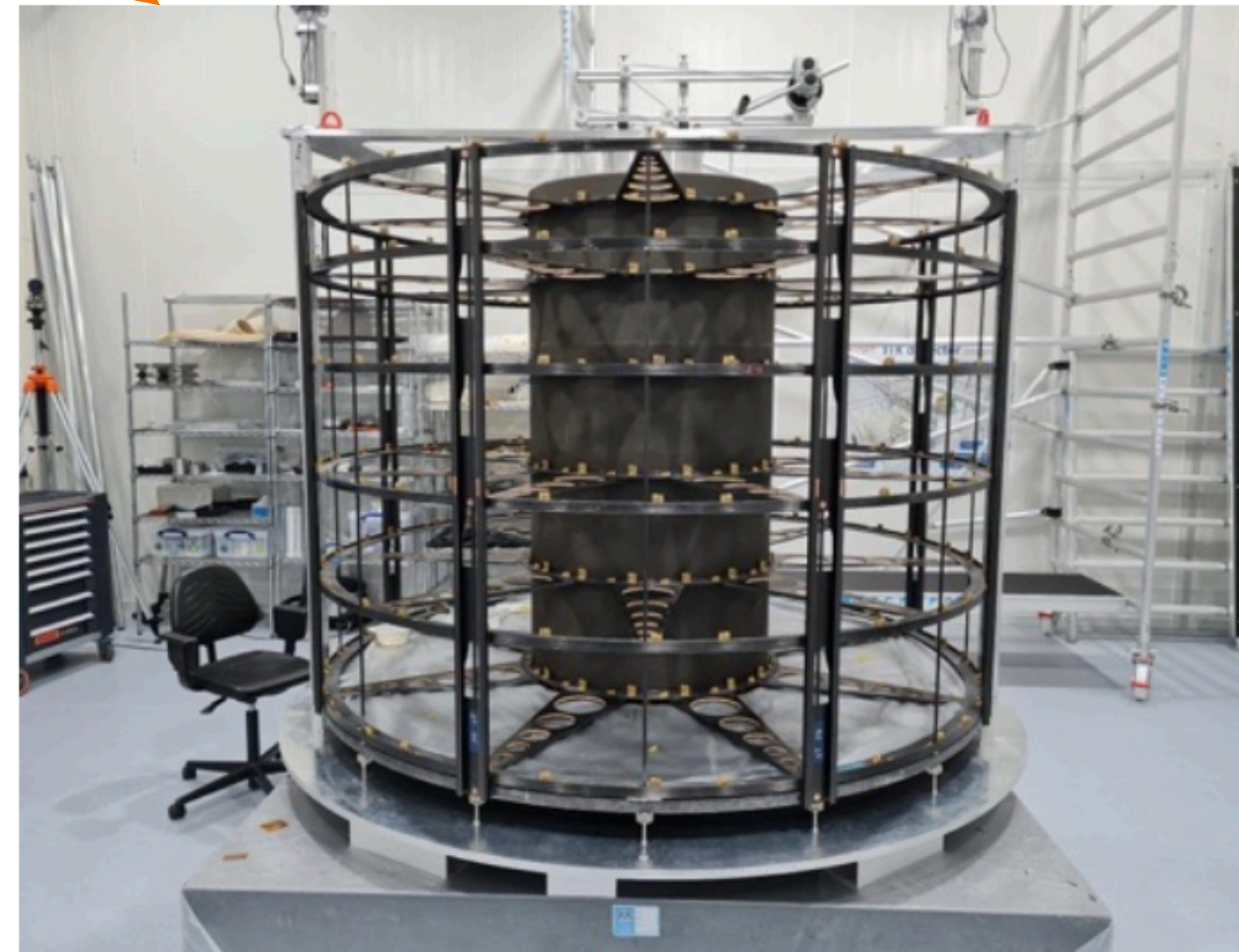
Räder der End-Kappe
zusammenfügen

“Petals”
zusammen-
fügen



CERN

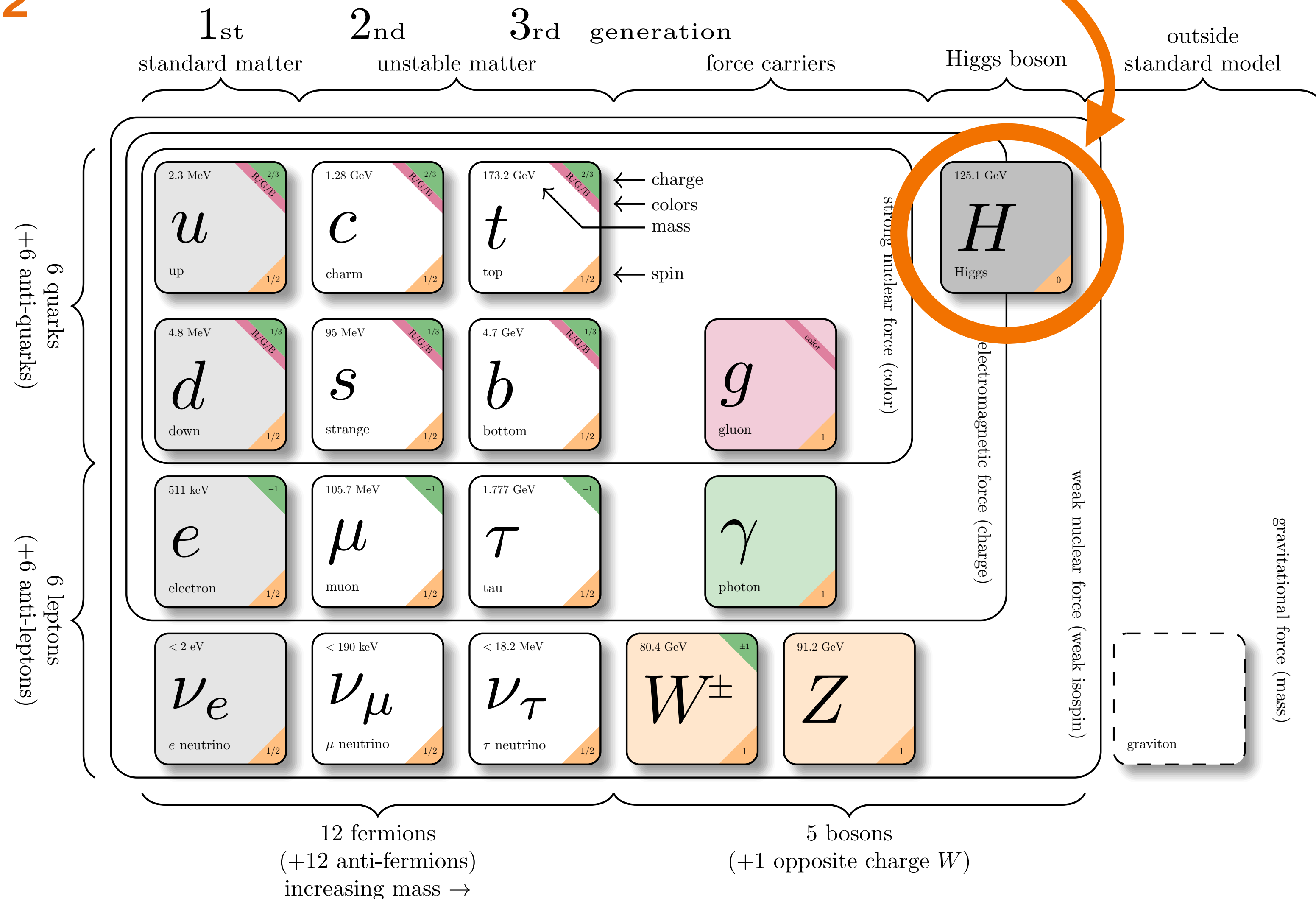
Schockresistenter
Spezialtransporter



DESY-Aktivitäten, Beispiel 2: Das Higgs-Boson

Historisch: Die Entdeckung 2012

- Eine der wichtigsten Messungen am ATLAS-Experiment: Entdeckung des Higgs-Bosons
- Instabiles Teilchen, tritt im Alltag nicht auf
- Von zentraler Bedeutung für Validität unserer Theorien zur Natur von Elementarteilchen
- 1964 erkannt, dass es existieren müsste: Massive Teilchen sonst unmöglich in unserem Modell
- 2012 die experimentelle Bestätigung — auch dank DESY

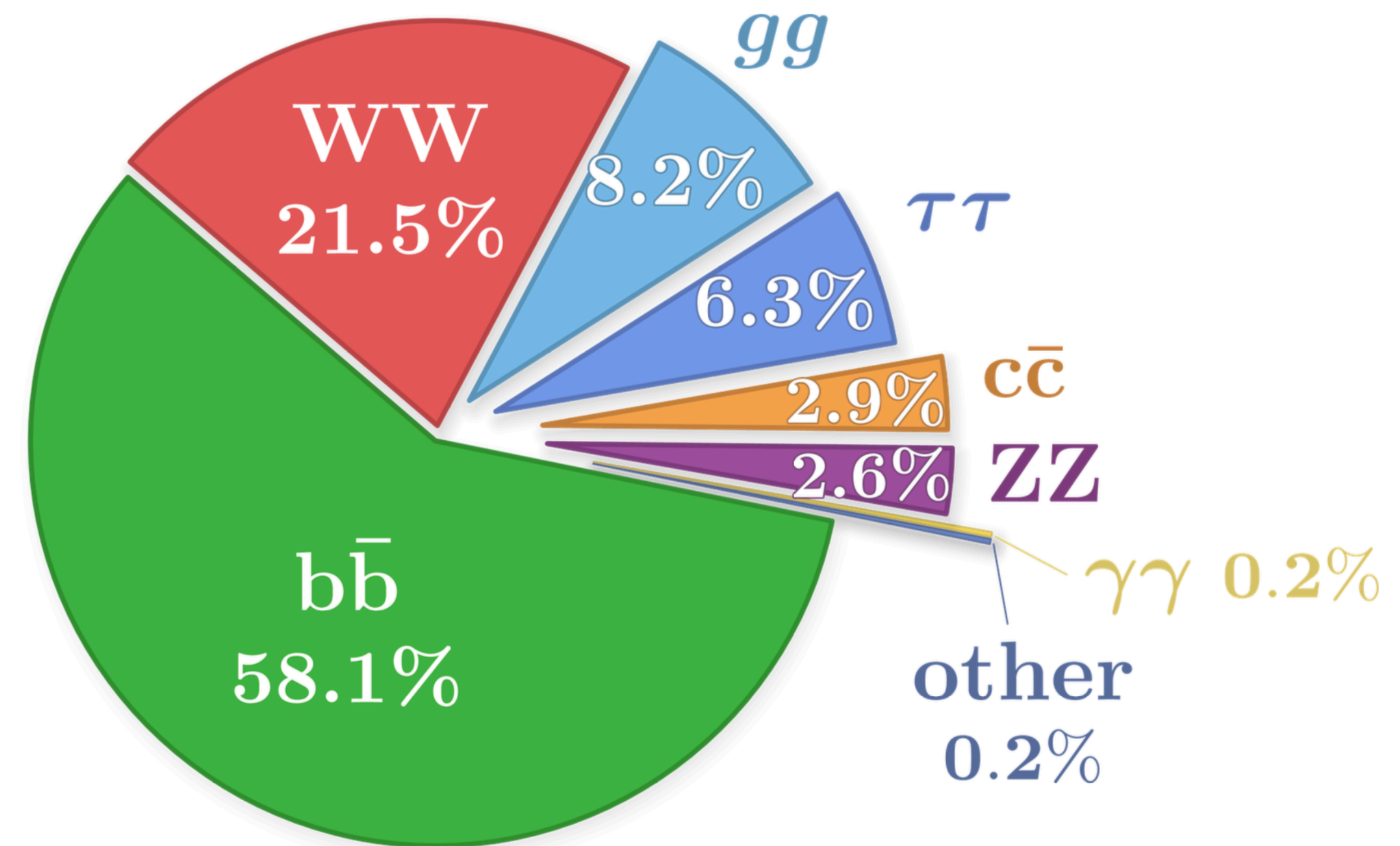


DESY-Aktivitäten, Beispiel 2: Das Higgs-Boson

Und was ist dieses Higgs-Boson?

- Theorie: Anregungen des Higgs-Quantenfeldes
- Nur durch Interaktion mit diesem Feld können Massen für Teilchen definiert werden, ohne dass sich die Gleichungen selbst widersprechen
- $\Rightarrow$ Masse $\approx$ "Ladung" für Higgs-Wechselwirkungen
- Teilchen schwerer = stärkere "Higgs-Kopplung"
- Higgs-Boson = **Beweis, dass das Feld existiert!**
- Hauptattraktion des LHC, kann nirgendwo sonst erzeugt werden (zu schwer)

Higgs-Zerfall ist sicher — nur die Zerfallsprodukte nicht

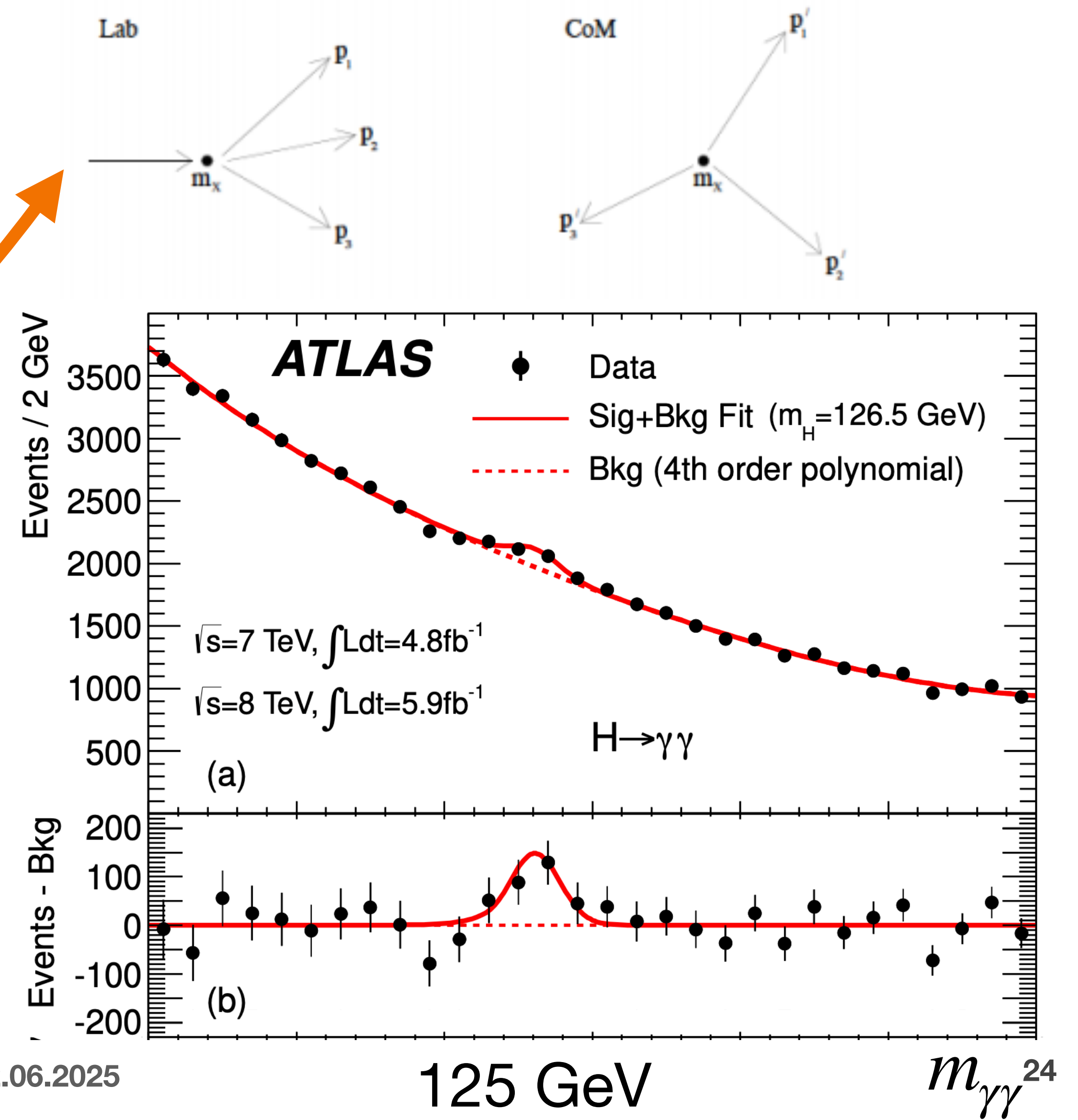


Warum $b\bar{b}$? Schwerstes Teilchen mit $2m < m_H$

DESY-Aktivitäten, Beispiel 2: Das Higgs-Boson

Wie entdeckt man ein neues Teilchen?

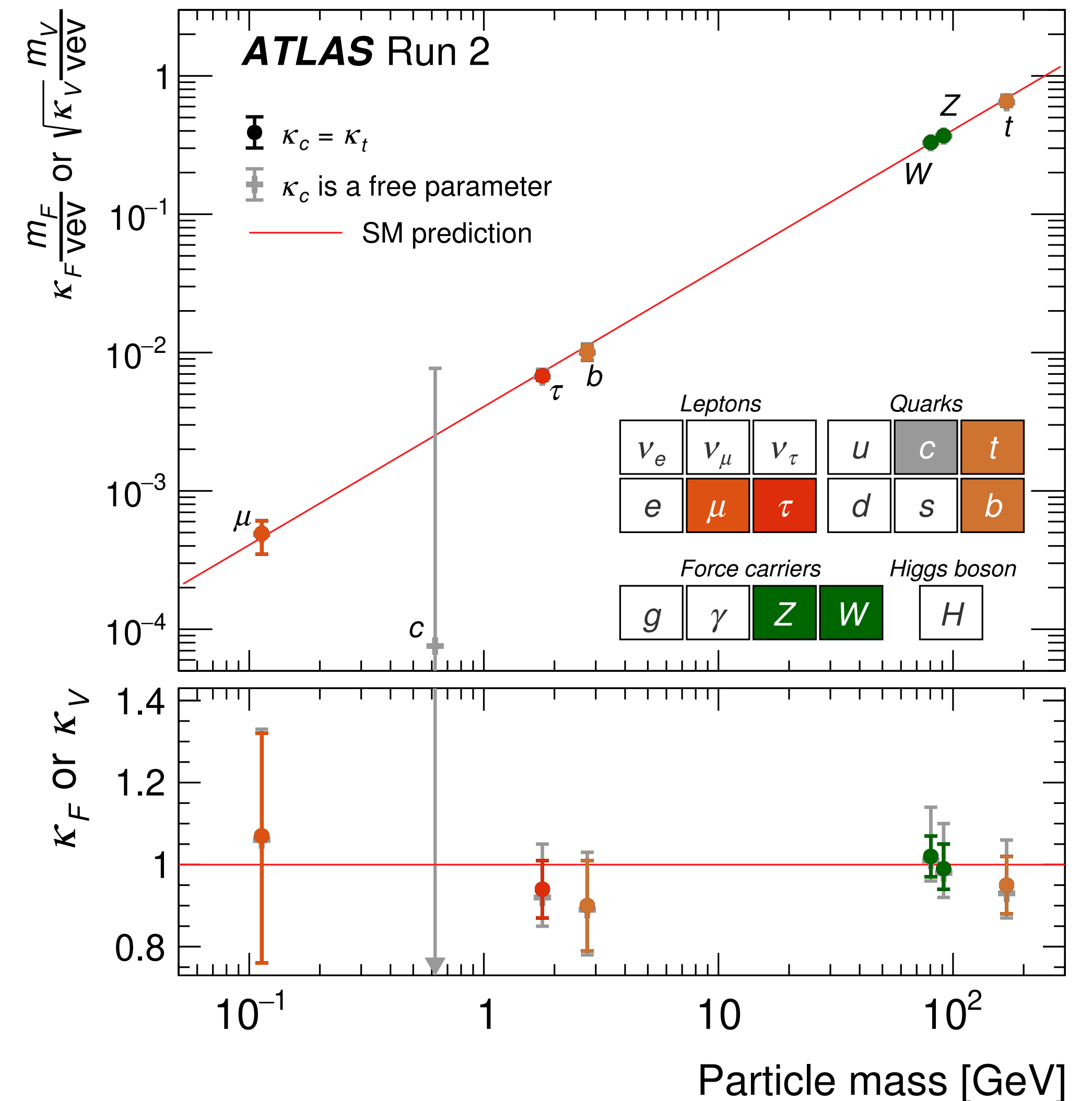
- Strategie basiert auf den theoretisch vorhergesagten Annahmen:
- Higgs-Boson zerfällt $\approx$ instantan, u.a. in ein Photon-Paar
- Dieses Paar sollte bei jedem Zerfall dieselbe Schwerpunktsenergie besitzen: die Masse des Higgs-Bosons (wegen Energieerhaltung)
- Photon-Paare aus anderen Quellen haben breite, abfallende Schwerpunktsenergieverteilung
- Suchen einen kleinen "Hügel" in den Daten



Ist der Hügel in $m_{\gamma\gamma}$ wirklich das Higgs-Boson?

Überprüfen der vorhergesagten Eigenschaften

- Elektrische Ladung: Offensichtlich 0, weil...?
- Masse: ca 125 GeV, entspricht theoretischer Erwartung
- Stärke der Kopplung an verschiedene Teilchensorten?
- Gemessen für einige Teilchen, so weit sehr gute Übereinstimmung mit der Vorhersage
- Für fehlende Teilchen ist Kopplung experimentell schwer zugänglich: zu klein und/oder zu viele Untergründe

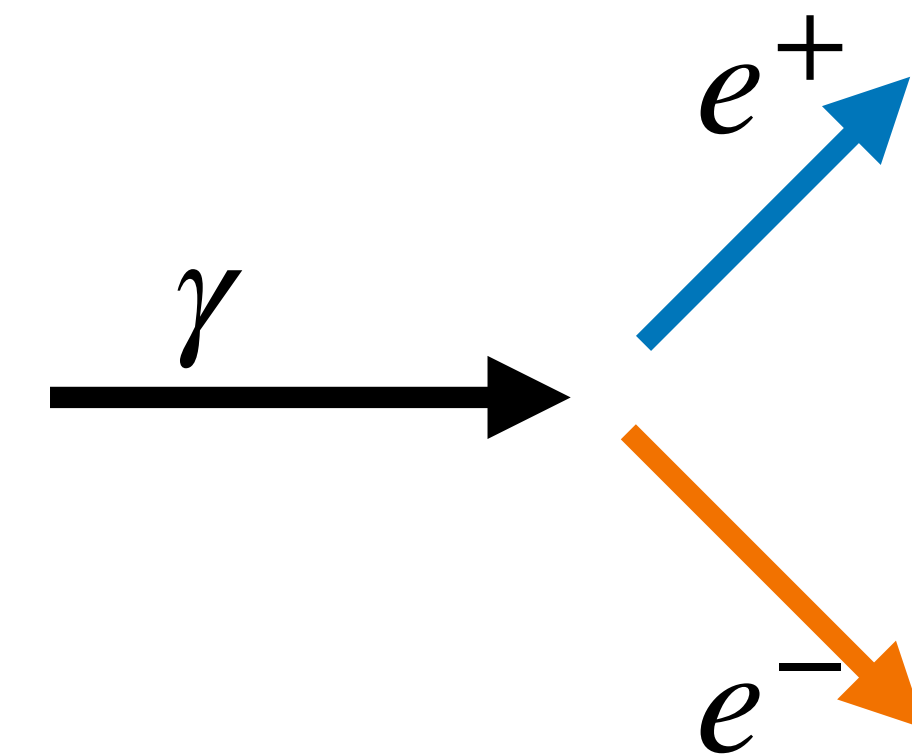


Weitere Messungen mit Higgs-Bosonen

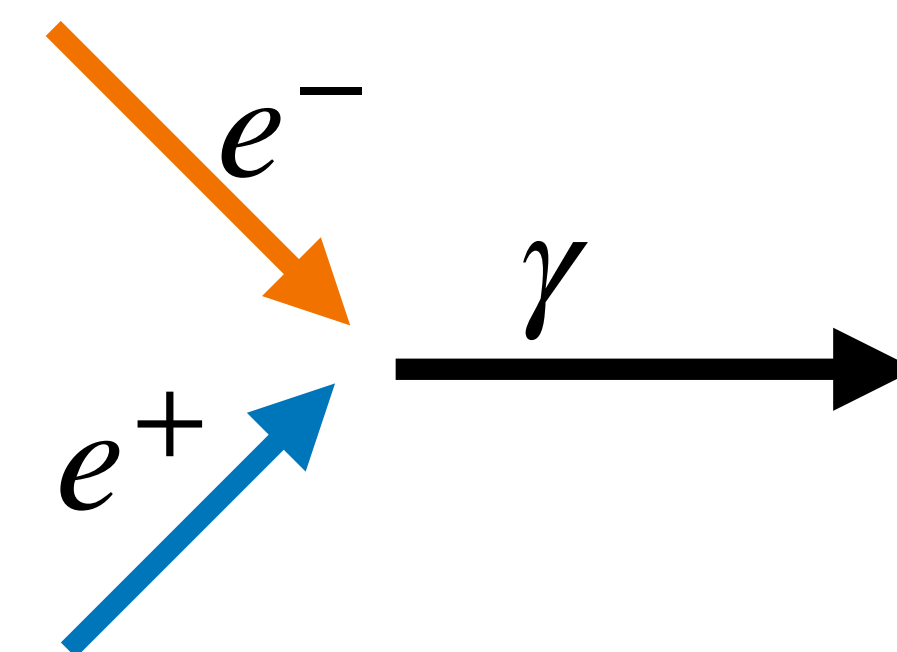
Grundlegendes Problem: CP-Verletzung

- Antimaterie ist: Exakt wie Materie, aber z.B. elektrische Ladung umgekehrt
- Elektron $e^- \leftrightarrow$ Positron e^+
- Beobachtung: Man kann nicht e^- produzieren ohne e^+ , und diese haben gespiegelte Impulse*
- Das wird CP-Symmetrie genannt
- ABER: Wenn das wirklich immer so ist, warum sehen wir dann keine Antimaterie?
- Astronomische Messungen bestätigen: Mehr Materie als Antimaterie im Universum!

Paarerzeugung



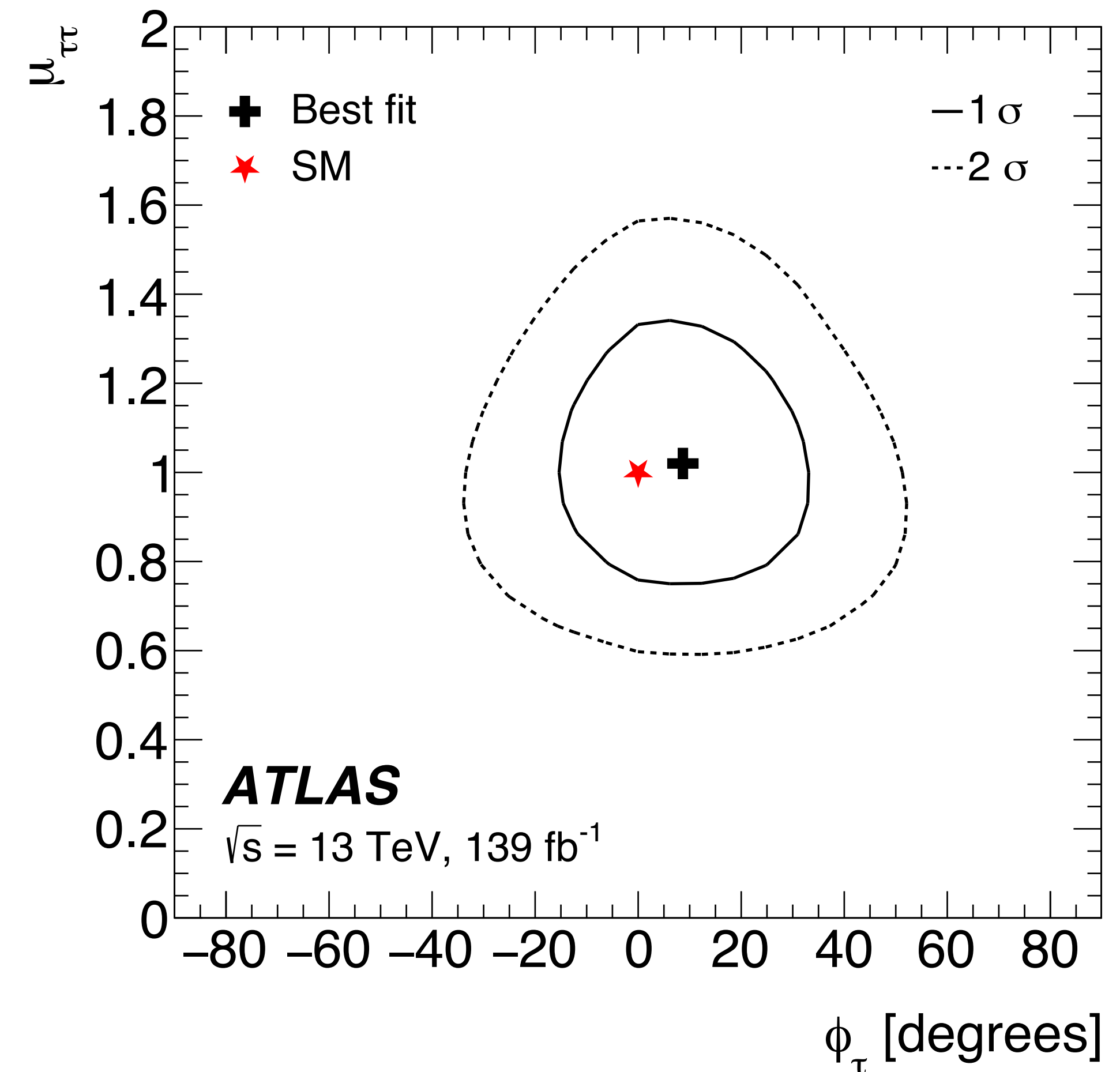
Paarvernichtung



Weitere Messungen mit Higgs-Bosonen

Ist das Higgs-Boson verantwortlich für CP-Verletzung?

- Higgs-Boson erst kürzlich entdeckt
⇒ Möglich, dass die fehlende CP-Verletzung in Higgs-Interaktionen versteckt ist
- Messung von Winkelverteilungen und Ladung von Higgs-Boson-Zerfallsprodukten
- Beispielmessung in $H \rightarrow \tau^+ \tau^-$ -Zerfällen
- τ^- : Schwerste Kopie des Elektrons (warum?)
- y-Achse: 1 = Anzahl Higgs-Bosonen stimmt mit Vorhersage überein
- x-Achse: 0° = keine CP-Asymmetrie im Zerfall

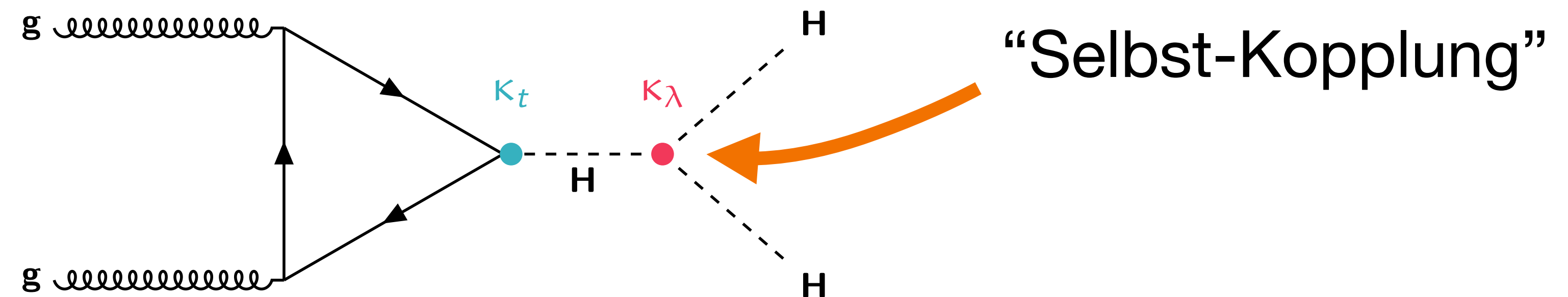


⇒ (noch) kein Hinweis auf CP-Verletzung

Higgs-Boson-Paarerzeugung

Das große Ziel für die kommenden Jahre

- Higgs-Bosonen nicht masselos
- D.h., müssen auch mit anderen Higgs-Bosonen interagieren können!
- Bis jetzt nicht experimentell bestätigt $\Rightarrow$ Paarerzeugung

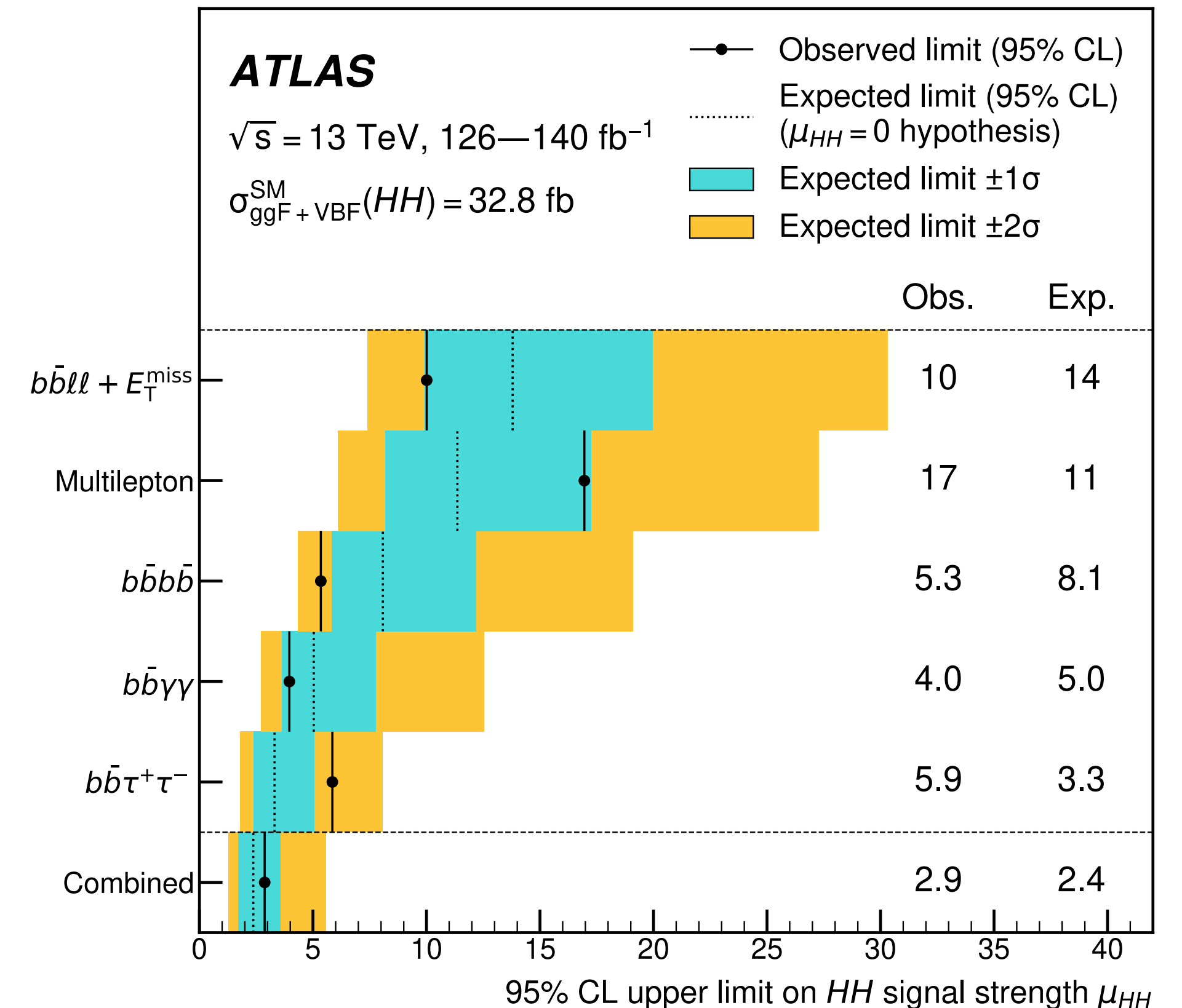


“Feynman-Diagramm” für Produktion von zwei Higgs-Bosonen

Higgs-Boson-Paarerzeugung

Aktueller Stand der Messungen

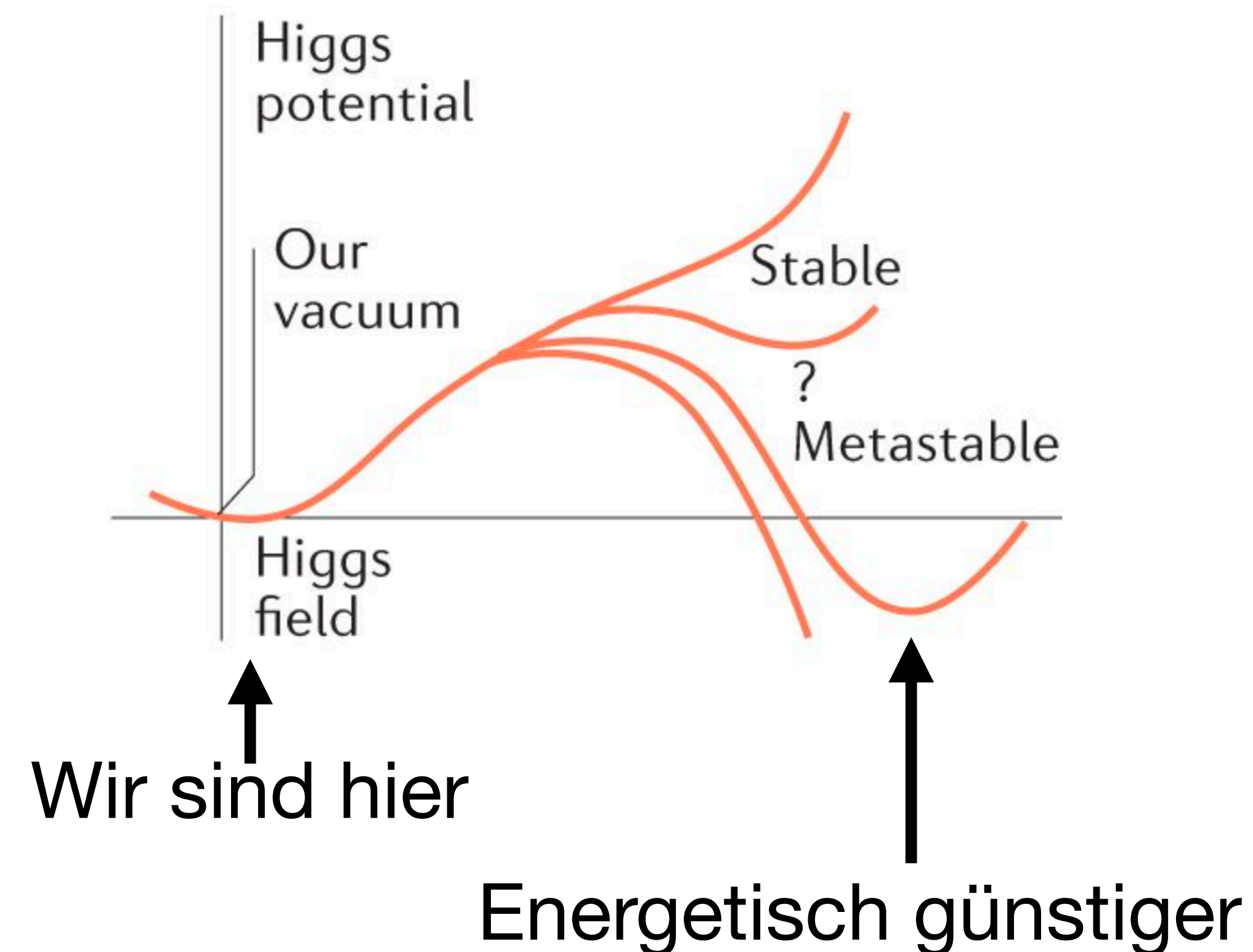
- “Messung” ist fast euphemistisch, eher “Suche”
- Higgs-Boson hat viele mögliche Zerfälle
⇒ Paare haben mehr!
- Gezielte Suche nach Paarproduktion in verschiedenen Endzuständen
- Weiterhin nicht bestätigt, dass sie existiert
- Stattdessen: obere Schranken, oder Limits
- Lesen wie “Wenn es dreimal häufiger passieren würde als die Theorie vorhersagt, dann würden wir was sehen”
⇒ wir kommen in Reichweite, aber es dauert noch!



Higgs-Boson-Paarerzeugung

Implikationen der Messung

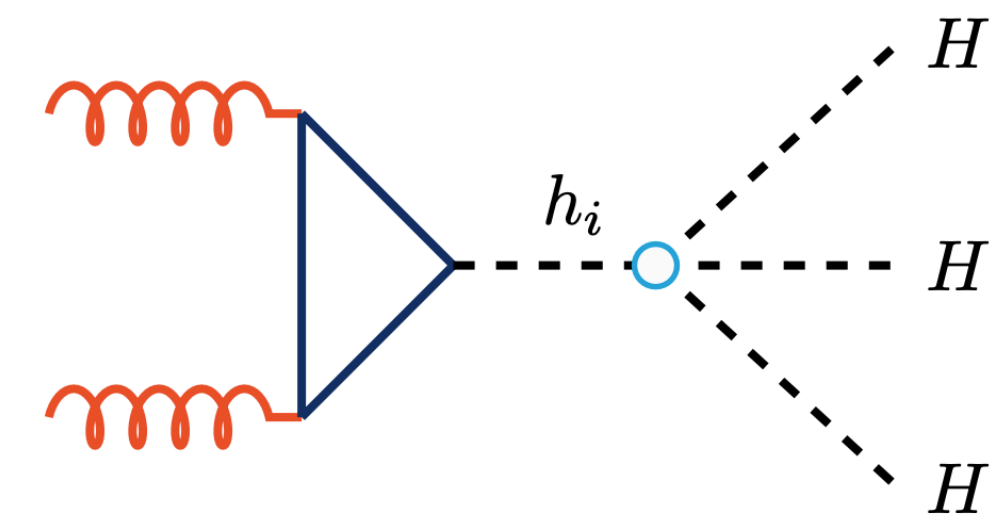
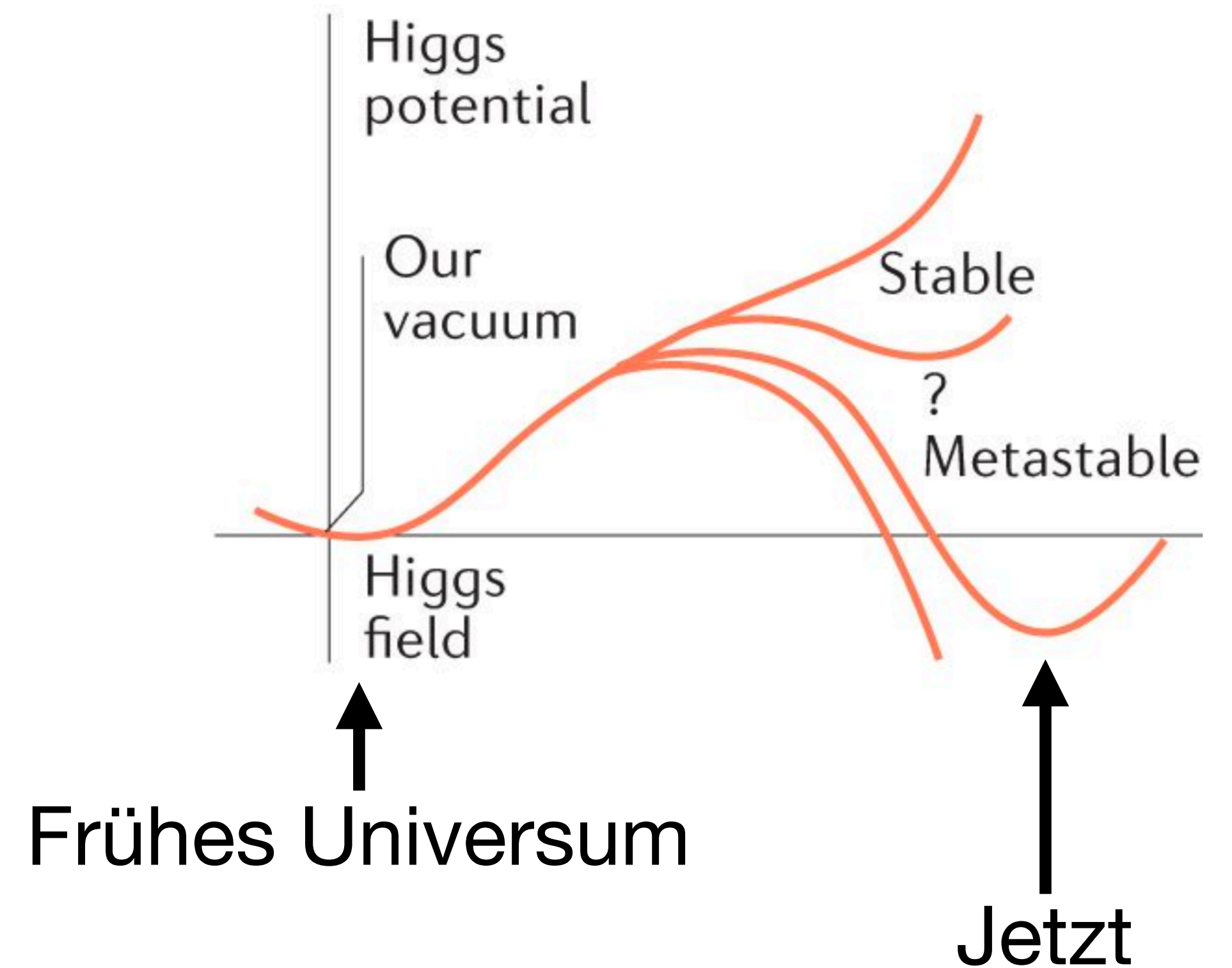
- Zentrale Frage: Hat unser Universum einen zeitlich stabilen "Vakuum-Zustand"?
- Kann man sich vorstellen wie eine Kugel zwischen Hügeln
- Sollte sich der Vakuum-Zustand ändern: ("Phasenübergang")
 - Andere Teilchenmassen
 - Andere Wechselwirkungen ($\Rightarrow$ Atomkerne instabil?)
- Es ist schwer vorherzusagen, aber Leben wäre vermutlich von einem Moment auf den nächsten unmöglich
 $\Rightarrow$ Gut zu wissen, ob das passieren kann
- Entscheidend hierfür: Die Form der orangenen Linie
- Selbstkopplungsstärke = 3. Ableitung am Minimum



Higgs-Boson-Paarerzeugung

Quelle des Materie-Überschusses?

- Variation des Phasenübergangs-Gedanken
- Was, wenn der Übergang schon passiert ist?
- Bei hohen Energien (z.B. frühes Universum) sind Vorgänge möglich, bei denen Materie $\neq$ Antimaterie produziert wird
- Problem: Diese müssten sich mit der Zeit ausgleichen
- Lösung: Abrupte Änderung des Vakuumzustands, die CP-Verletzung unmöglich macht
⇒ Unser Materie-Überschuss ist "Momentaufnahme" von zufälligen Schwankungen der Symmetrie
- Paarerzeugung würde Hinweise liefern, nicht restlos klären
- Dreifacherzeugung? Nicht in den nächsten 50 Jahren 🤔



Zusammenfassung

LHC, das ATLAS-Experiment und DESY

- ATLAS ist ein sehr ambitioniertes Projekt!
- Forschung zu den vielleicht grundlegendsten naturwissenschaftlichen Fragen:
 - Was ist Materie?
 - Warum gibt es das Zeug überhaupt?
 - Wie können wir diese Dinge noch besser messen als bisher?
- DESY ist hierbei ein Institut von vielen auf der ganzen Welt, aber eins der größten

Contact

DESY. Deutsches
Elektronen-Synchrotron

www.desy.de

Serhat Ördek

ATLAS

E-mail: serhat.oerdek@desy.de

Telefon: 2002

Leere Folie

Mit Untertitel