



Tage der Forschung
Humboldt-Universität zu Berlin, 25.–26.09.2008



Urknall im Labor

Teilchenphysik am LHC

Ulrich Husemann
Deutsches Elektronen-Synchrotron

Fragen über Fragen...



Fragen über Fragen...

Warum falle ich
nach unten, wenn ich
von der Mauer
springe?

Weil du von der Erde
angezogen wirst.

Fragen über Fragen...

Warum falle ich
nach unten, wenn ich
von der Mauer
springe?

Weil du von der Erde
angezogen wirst.

Warum werde
ich von der Erde
angezogen?

Weil du eine
Masse hast und Massen
sich anziehen.

Fragen über Fragen...

Warum falle ich nach unten, wenn ich von der Mauer springe?

Weil du von der Erde angezogen wirst.

Warum werde ich von der Erde angezogen?

Weil du eine Masse hast und Massen sich anziehen.

Warum habe ich eine Masse?

???

Warum falle ich nach unten, wenn ich von der Mauer springe?

Weil du von der Erde angezogen wirst.

Warum werde ich von der Erde angezogen?

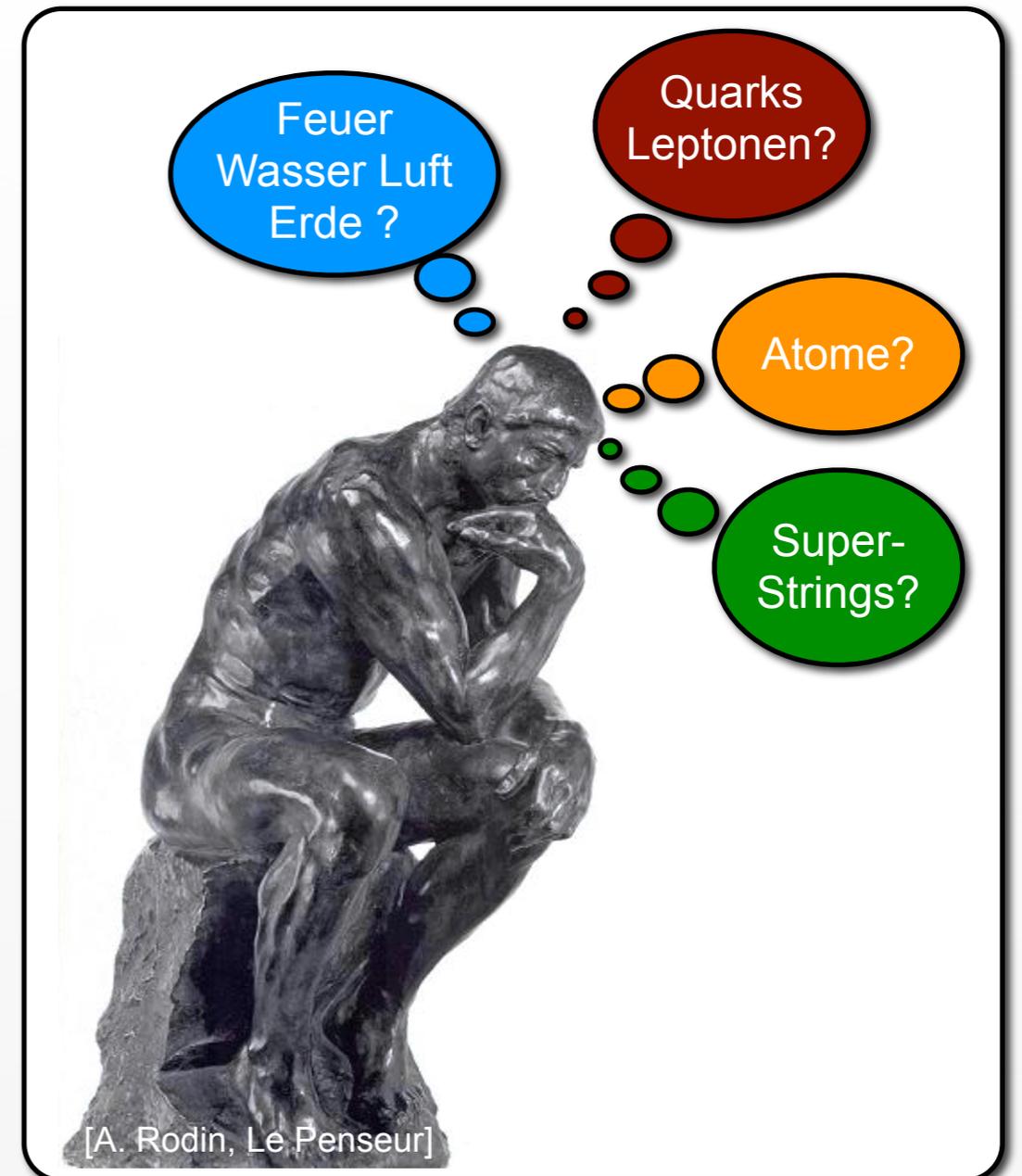
Weil du eine Masse hast und Massen sich anziehen.

Warum habe ich eine Masse?

???

- Menschen sind von Natur aus **neugierig**:
 - Was macht mein Nachbar da...?
 - Kinder fragen: Warum?
 - Forscher fragen: wie funktioniert die Natur?
- Jede beantwortete Frage wirft **neue Fragen** auf
- Haben Sie Fragen zum Vortrag? Jederzeit gerne!

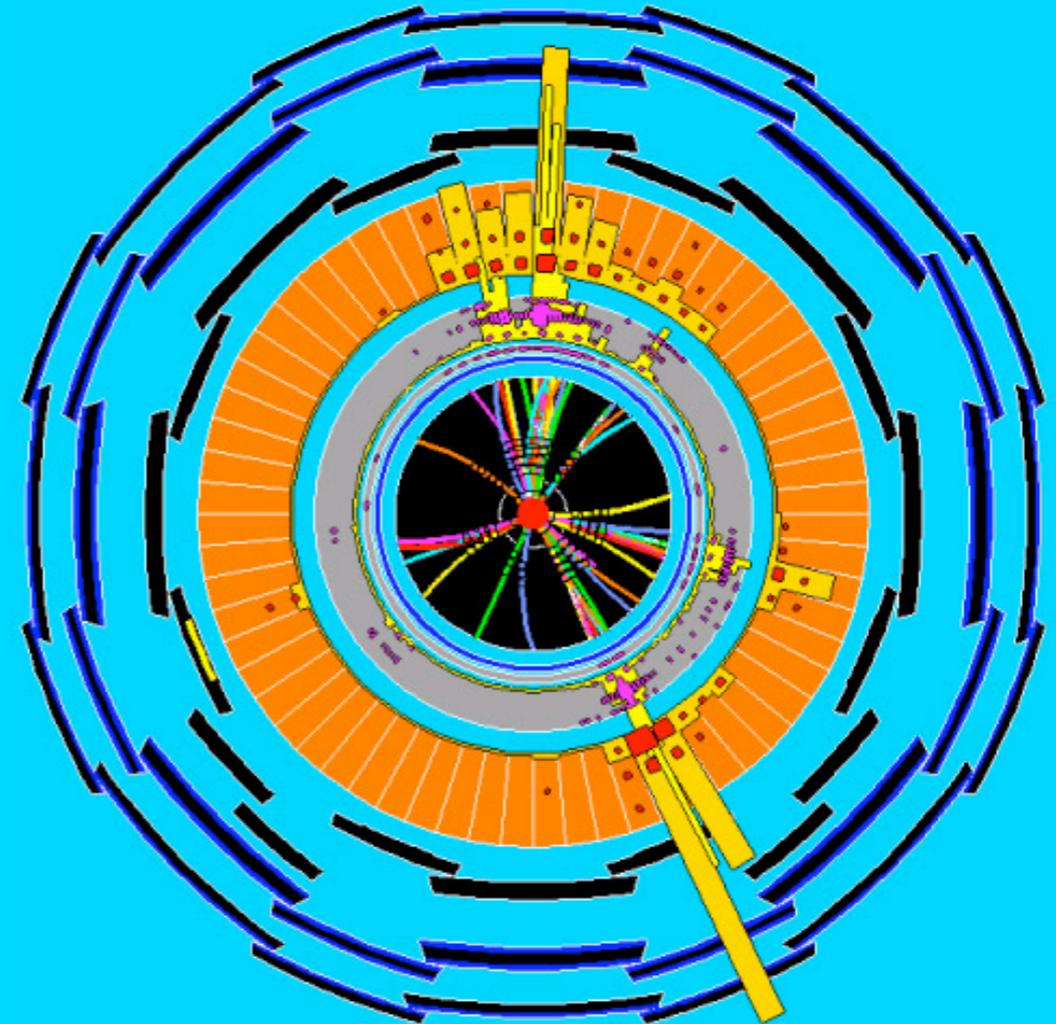
- Elementarteilchenphysik – **grundlegende Fragen** an die Natur:
 - Was sind die fundamentalen **Bausteine** der Materie?
 - Welche **Kräfte** wirken zwischen den fundamentalen Bausteinen?
- **Technische Herausforderungen:**
 - Nachweis der fundamentalen Bausteine mit „**Teilchendetektoren**“ – riesige Maschinen mit Mikrometer-Präzision
 - Verarbeitung der **Datenflut**
- **Internationale Zusammenarbeit:**
 - Institute aus ca. 40 Nationen
 - Tausende Kolleginnen und Kollegen aus aller Welt



- „Urknall im Labor“ heißt:
 - LHC soll Erkenntnisse bringen über **Entwicklung des frühen Universums**
→ enger Zusammenhang
Teilchenphysik – Kosmologie
 - LHC: Energien (=Temperaturen) wie **weniger als 10^{-10} Sekunden** nach dem Urknall
 - **Kontrollierte** Bedingungen:
Teilchenkollisionen inmitten empfindlicher Detektoren
- „Urknall im Labor“ heißt nicht:
 - Künstliche Erzeugung eines neuen Urknalls usw.

Simuliertes Ereignis im ATLAS-Detektor

ATLAS Atlant (Seitenansicht)

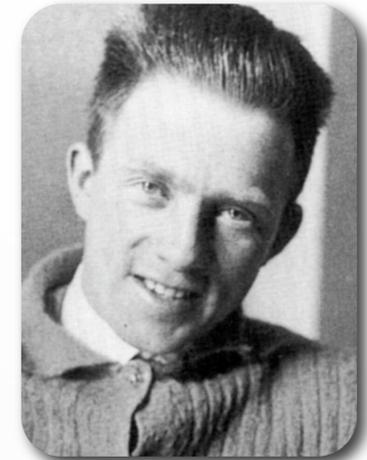


Warum immer höhere Energien?

- Grundpfeiler der Teilchenphysik:
 - Spezielle **Relativitätstheorie** (A. Einstein)
 - **Quantenmechanik** (E. Schrödinger, W. Heisenberg, ...)
- Relativitätstheorie: $E = mc^2$
 - Masse ist eine Form von Energie
 - Mehr Energie → Produktion **schwererer Teilchen**
- Quantenmechanik: $\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$
 - Heisenberg'sche Unschärferelation: Ort (Δx) und Impuls (Δp) nicht gleichzeitig beliebig genau bekannt
 - Größerer Impulsübertrag → Auflösung **kleinerer Strukturen**



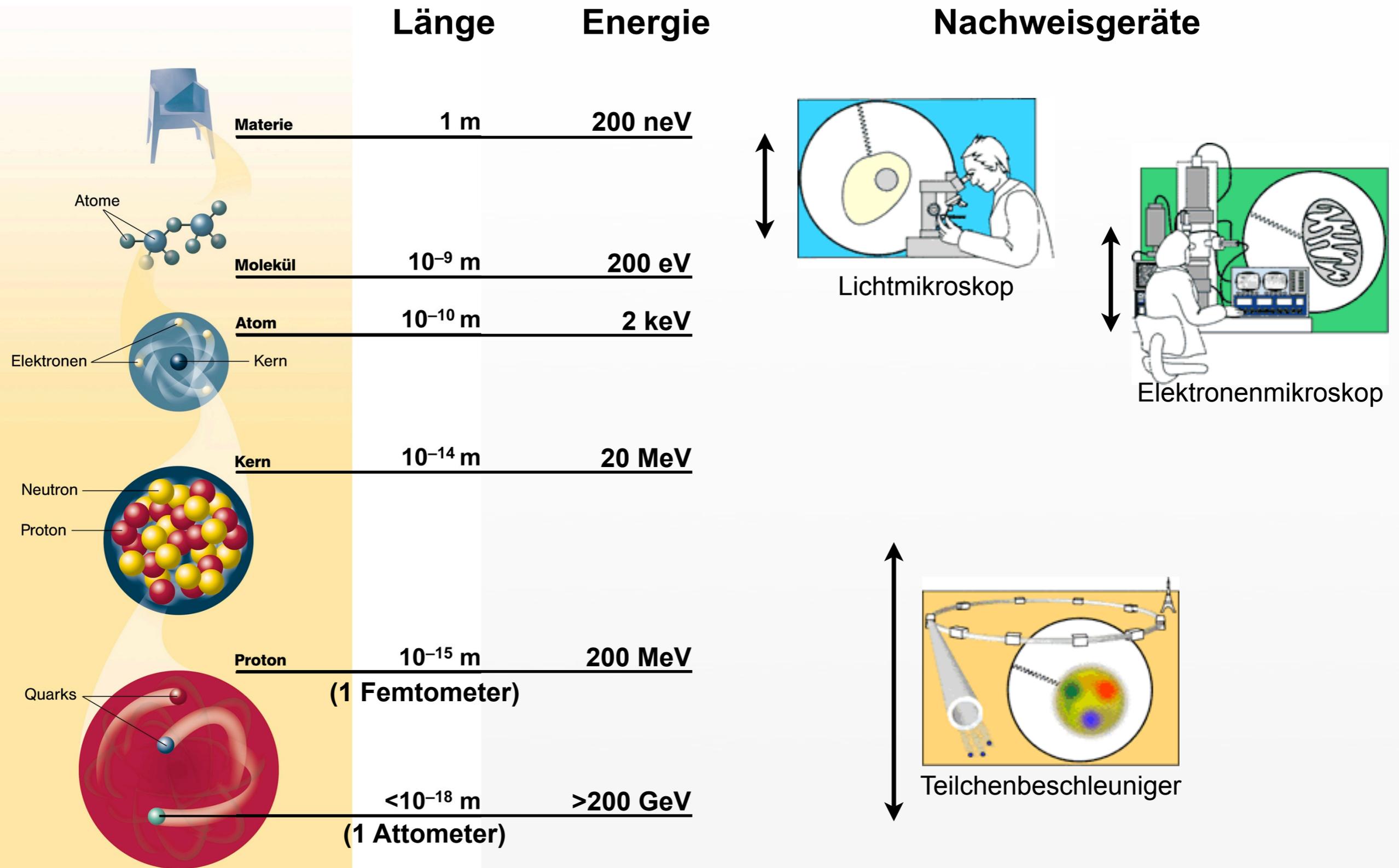
A. Einstein



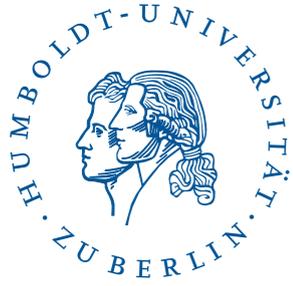
W. Heisenberg



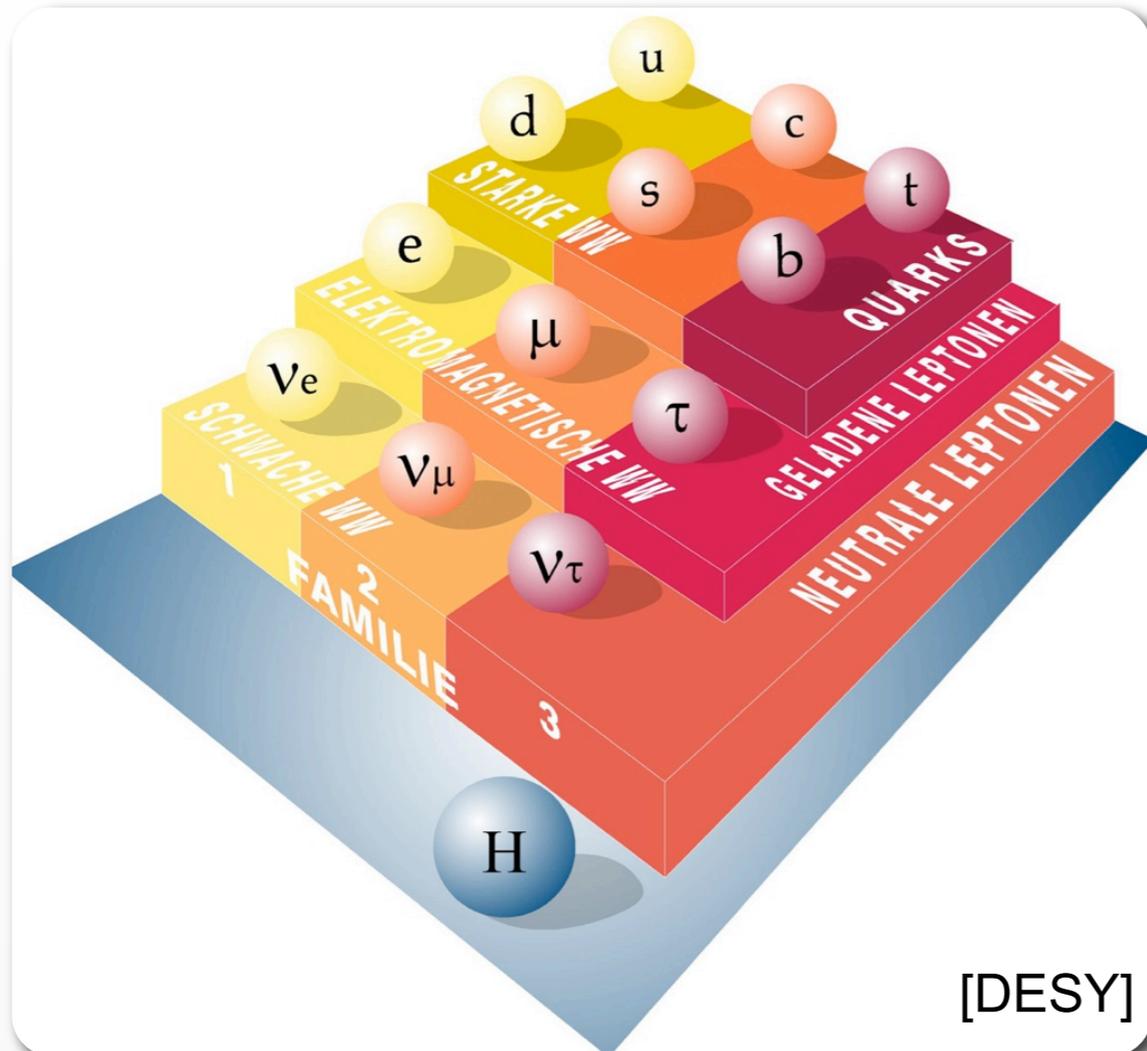
Größenordnungen



[DESY]

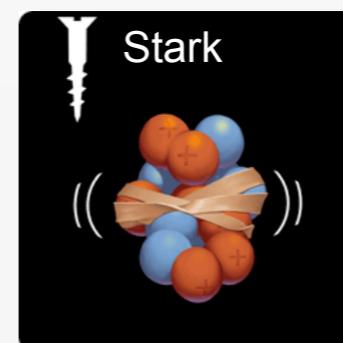
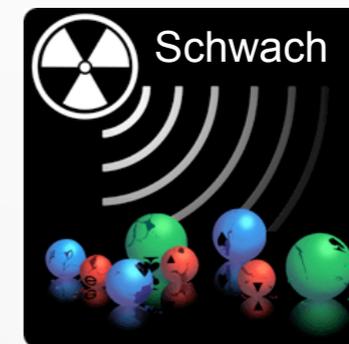
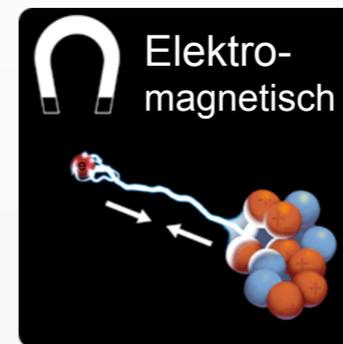


Teilchenphysik: was wir wissen und was wir nicht wissen



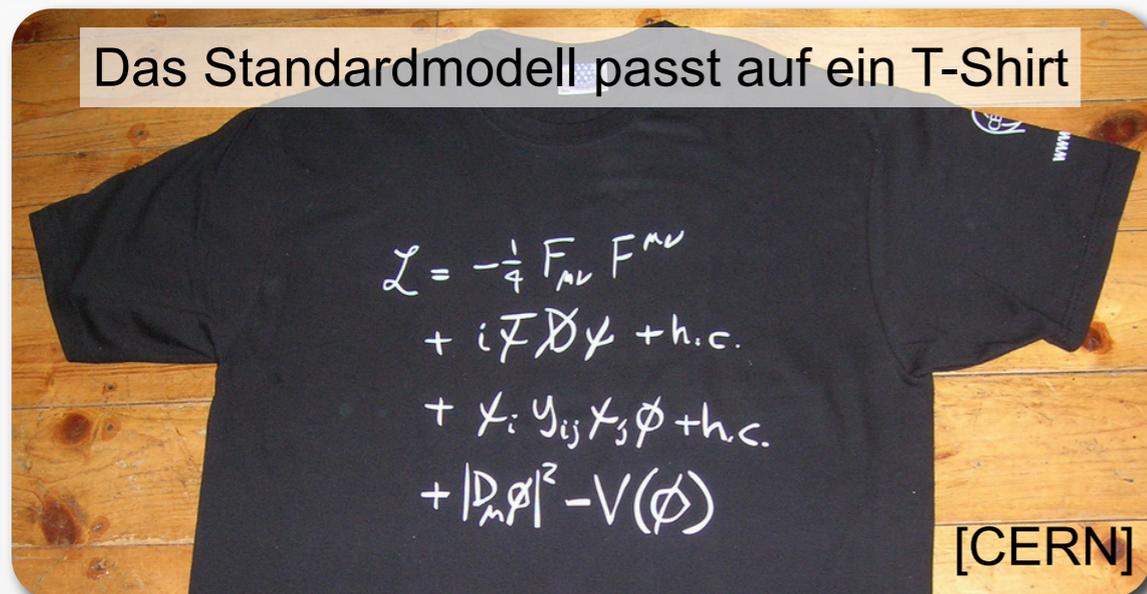
[DESY]

- **Teilchen** im „Standardmodell der Teilchenphysik“
- **12 Elementarteilchen**, jedes mit Antiteilchen
- 6 Quarks und 6 Leptonen
- Anordnung in **3 Familien** mit unterschiedlichen Massen
- **Kräfte** im Standardmodell

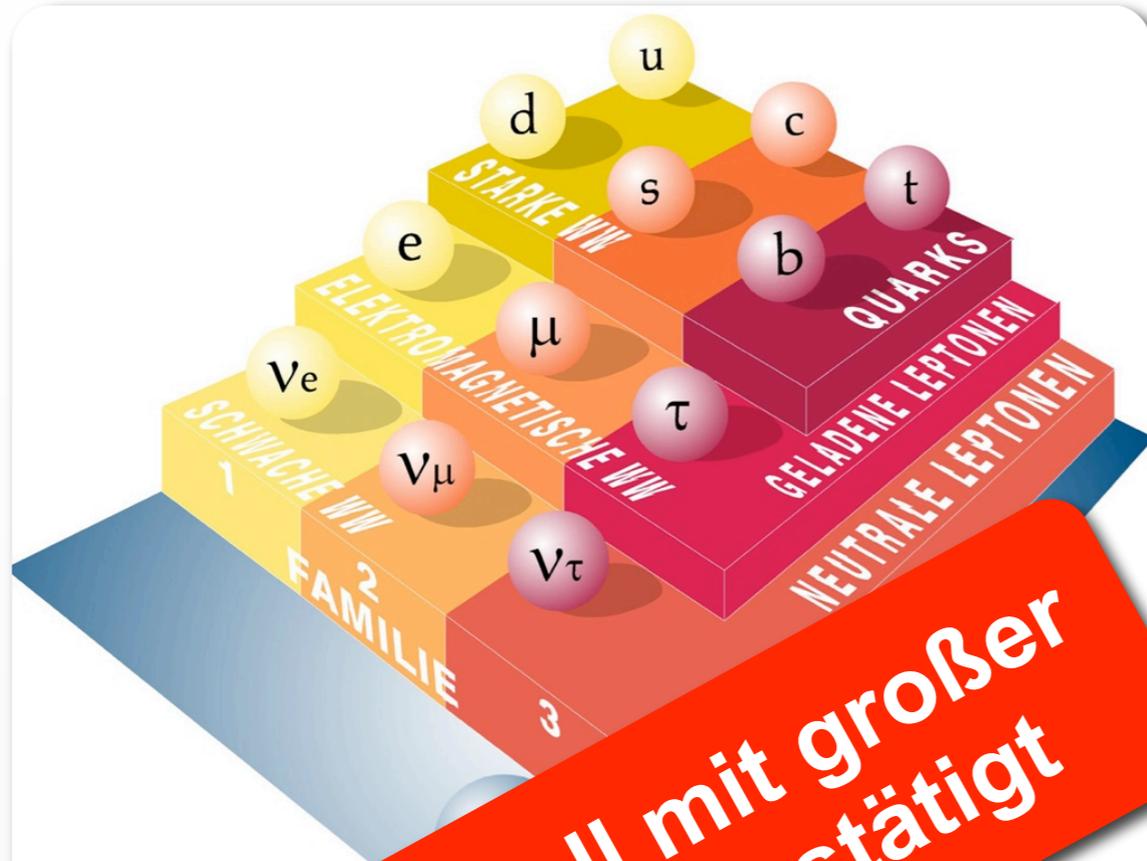


[<http://www.particlephysics.ac.uk/>]

Das Standardmodell passt auf ein T-Shirt



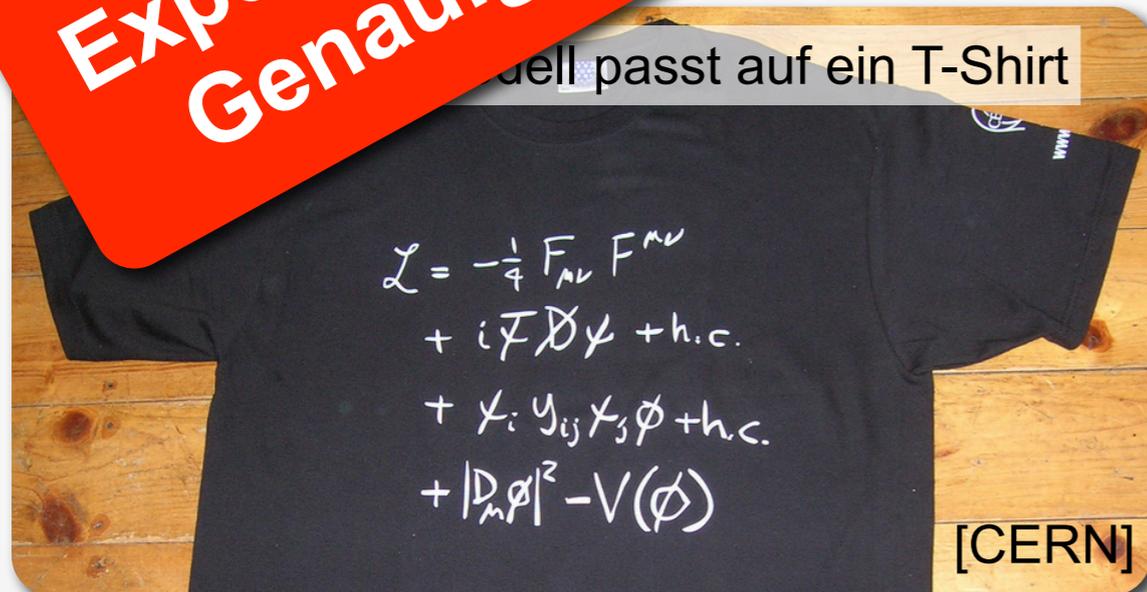
[CERN]



[DESY]

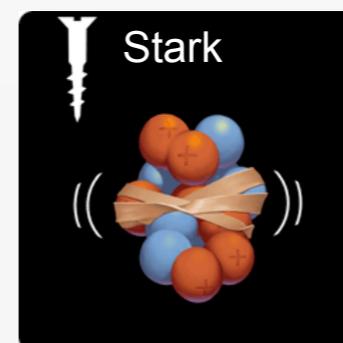
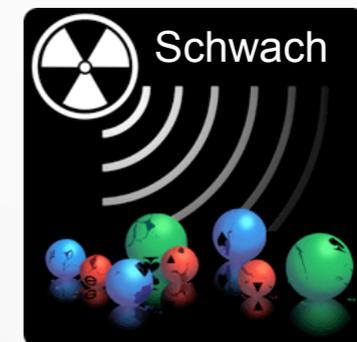
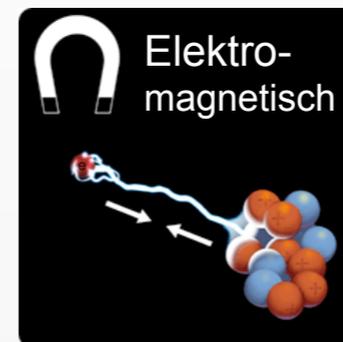
Experimentell mit großer Genauigkeit bestätigt

Das Modell passt auf ein T-Shirt



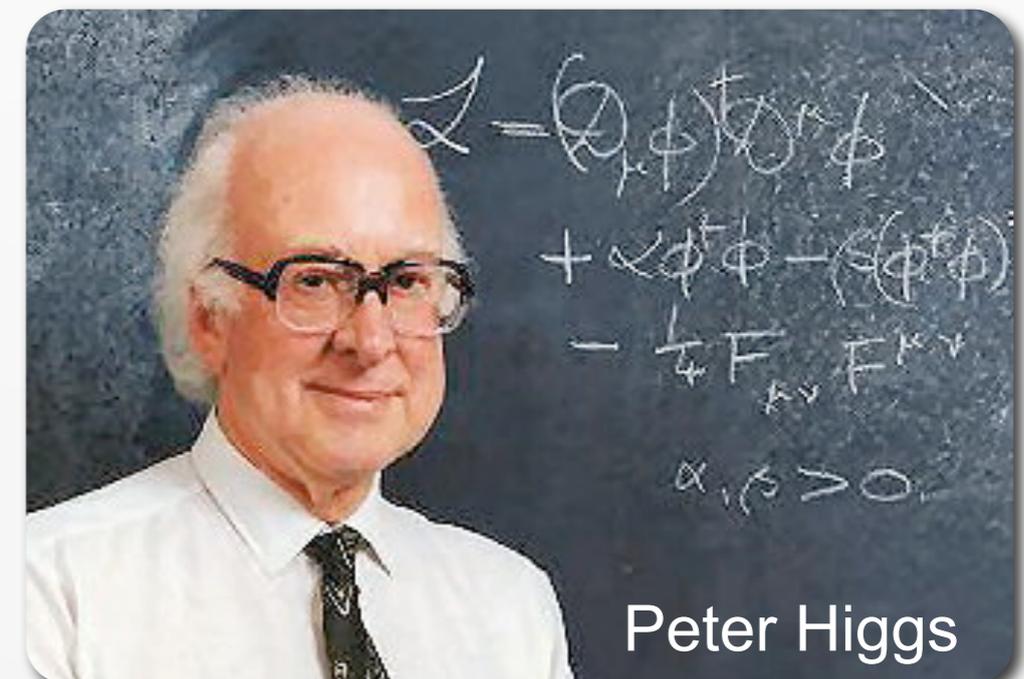
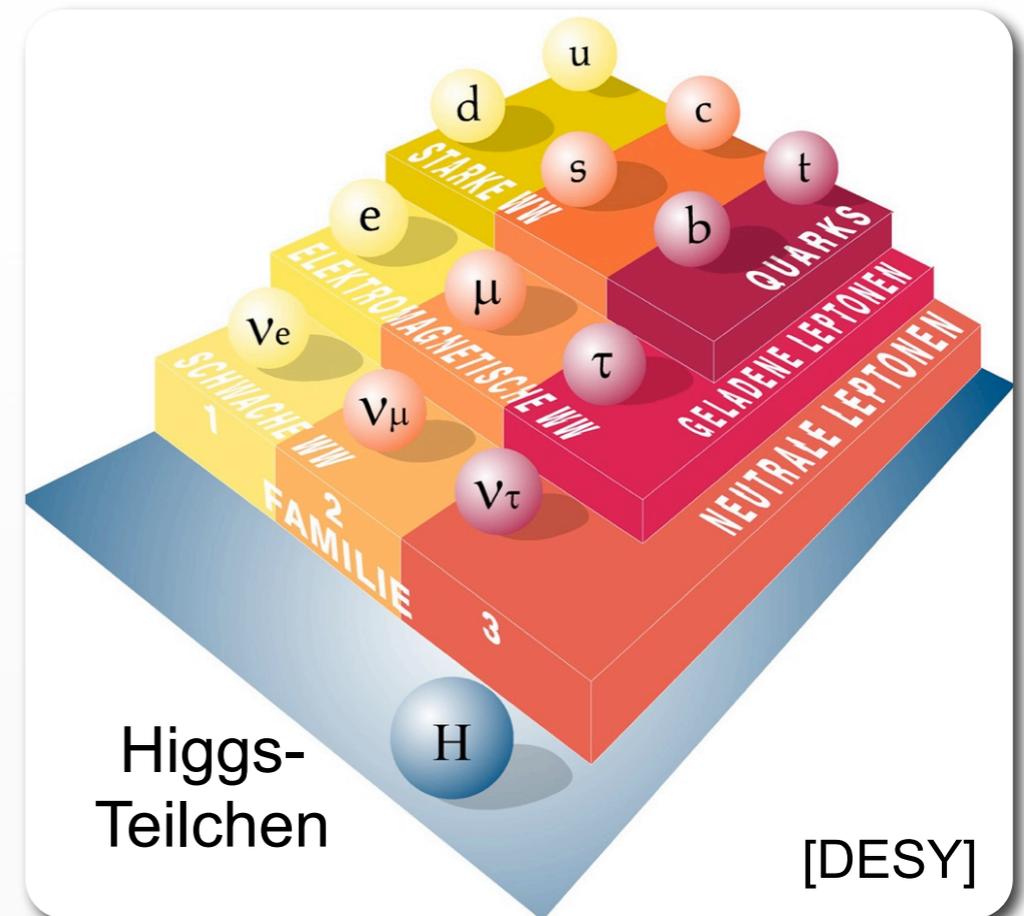
[CERN]

- **Teilchen** im „Standardmodell der Teilchenphysik“
- **12 Elementarteilchen**, jedes mit Antiteilchen
- 6 Quarks und 6 Leptonen
- Anordnung in **3 Familien** mit unterschiedlichen Massen
- **Kräfte** im Standardmodell



[<http://www.particlephysics.ac.uk/>]

- Die **Massenfrage**:
 - Warum unterscheiden sich die Massen der Elementarteilchen in den drei Familien?
 - Warum haben die Elementarteilchen überhaupt Masse?
- Lösung: das „**Higgs-Teilchen**“
 - Postuliert von britischem Physiker **Peter Higgs** (und anderen) im Jahr 1964
 - Funktion: Higgs-Teilchen „gibt“ allen Teilchen Masse
 - Fieberhafte Suche, aber noch **nicht experimentell nachgewiesen**



Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party
(= Higgs-Feld)

Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party
(= Higgs-Feld)



Prominenter betritt den Raum
(= Teilchen)

Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party
(= Higgs-Feld)



Prominenter betritt den Raum
(= Teilchen)



Prominenter kommt
schwer voran
(Trägheit = Masse)

Wie Teilchen Masse bekommen:



Gäste bei einer Party
(= Higgs-Feld)



Prominenter betritt den Raum
(= Teilchen)



Prominenter kommt
schwer voran
(Trägheit = Masse)

Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:



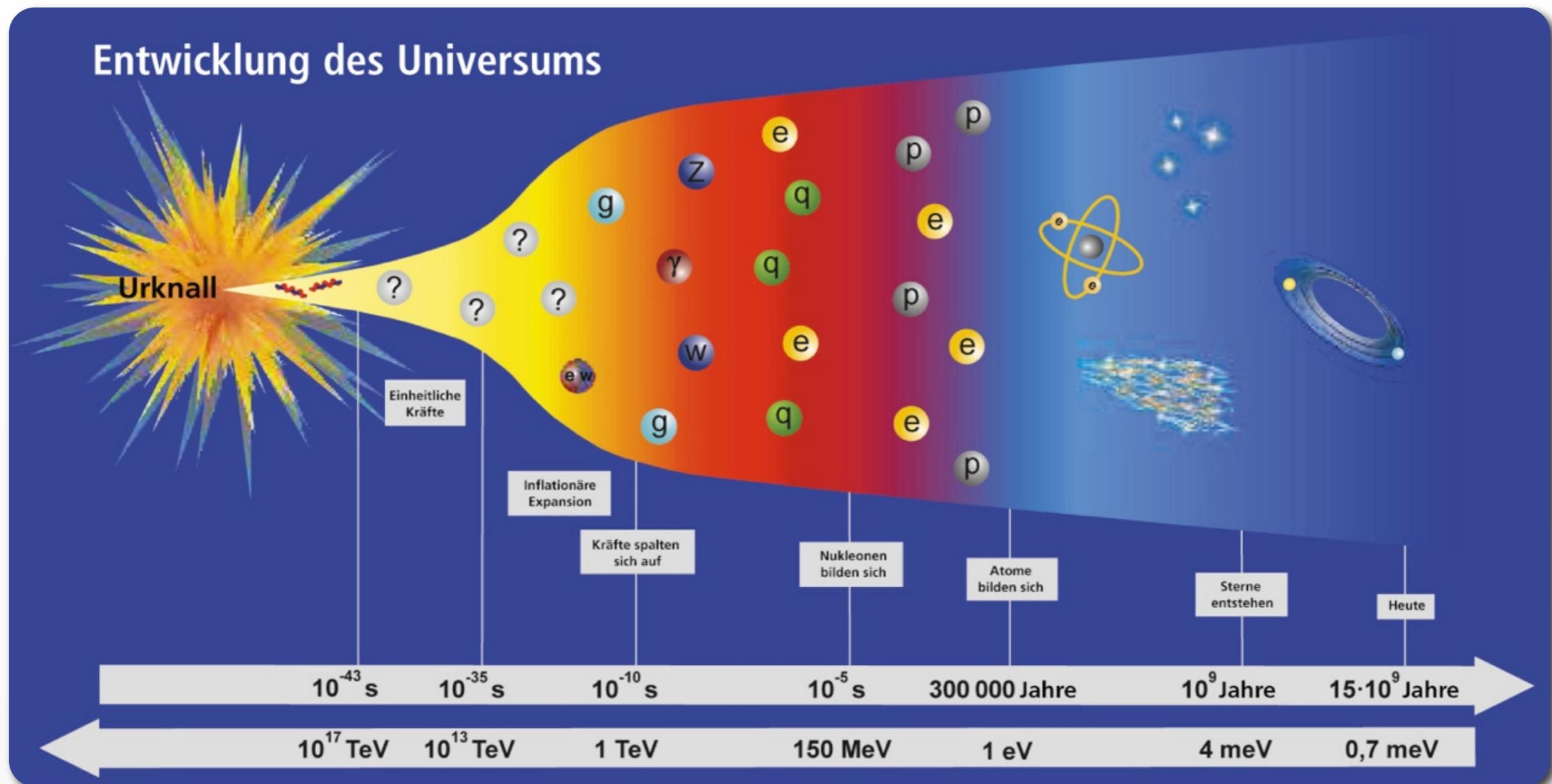
Jemand streut ein Gerücht
(= Anregung des Higgs-Felds)



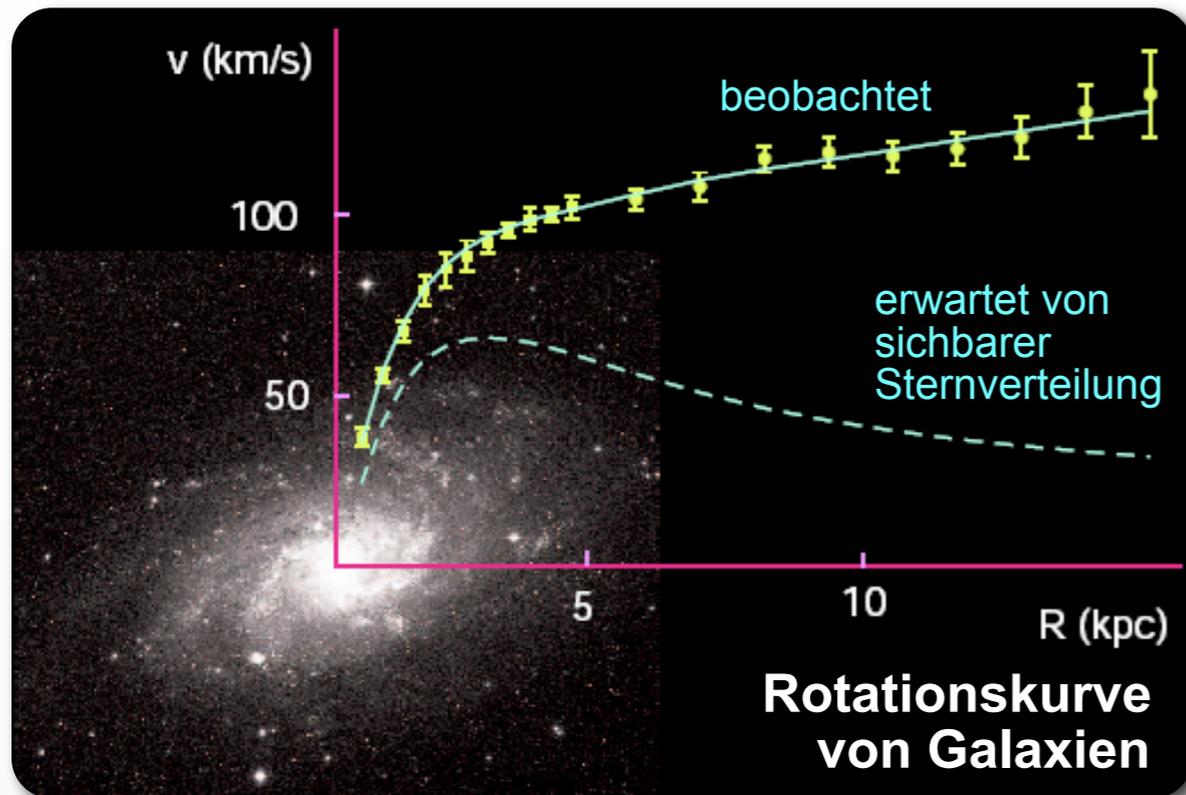
Gerücht verbreitet sich
(= massives Higgs-Teilchen)

[D. Miller]

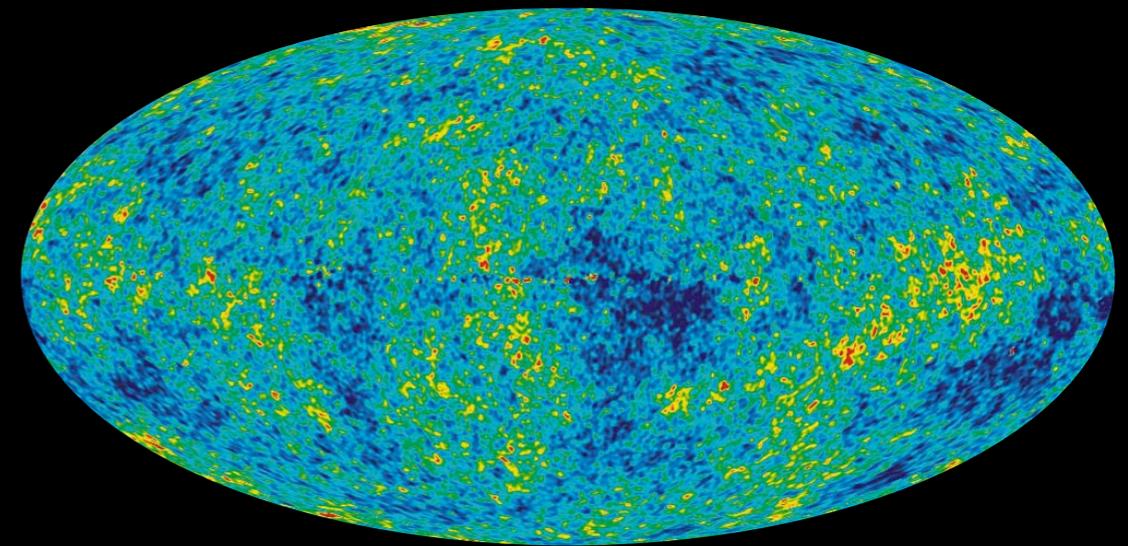
Standardmodell der Kosmologie



- Seit ca. 10 Jahren: konsistentes Modell von der Entwicklung des Universums seit dem Urknall → „Standardmodell der Kosmologie“
- Passen Teilchenphysik und Kosmologie zusammen?

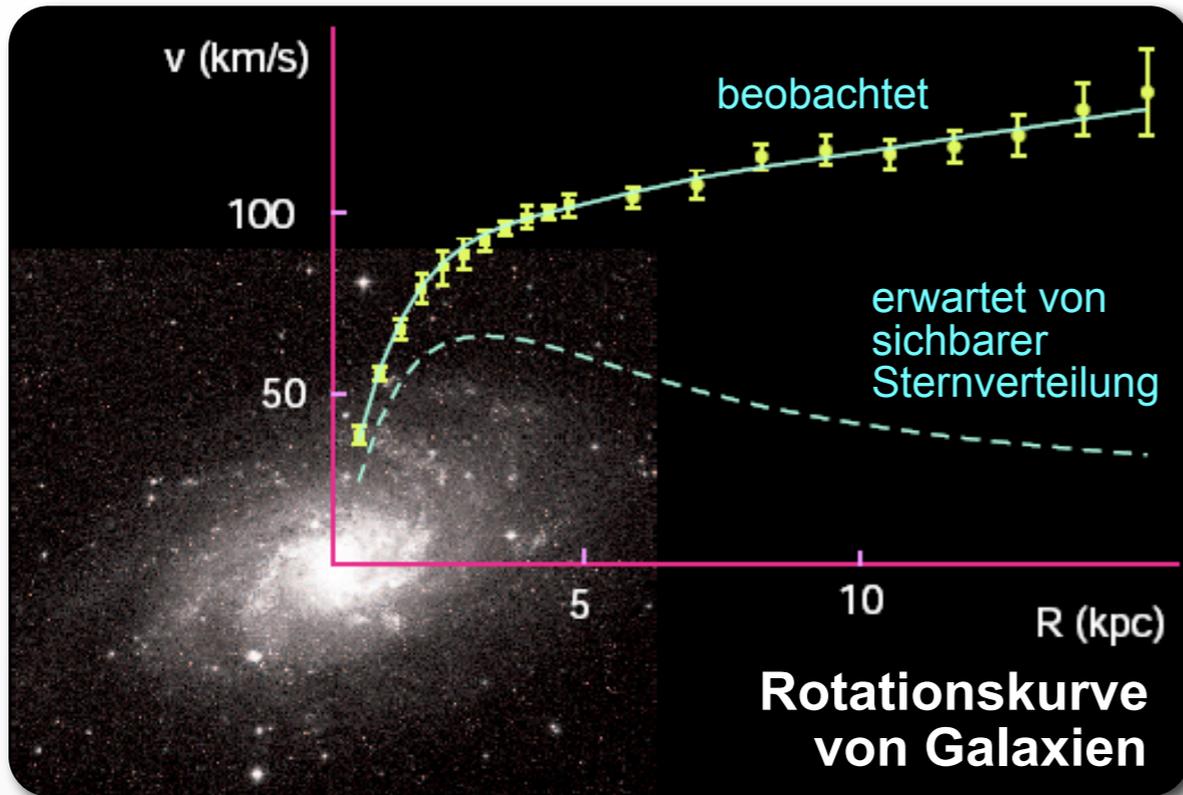


Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

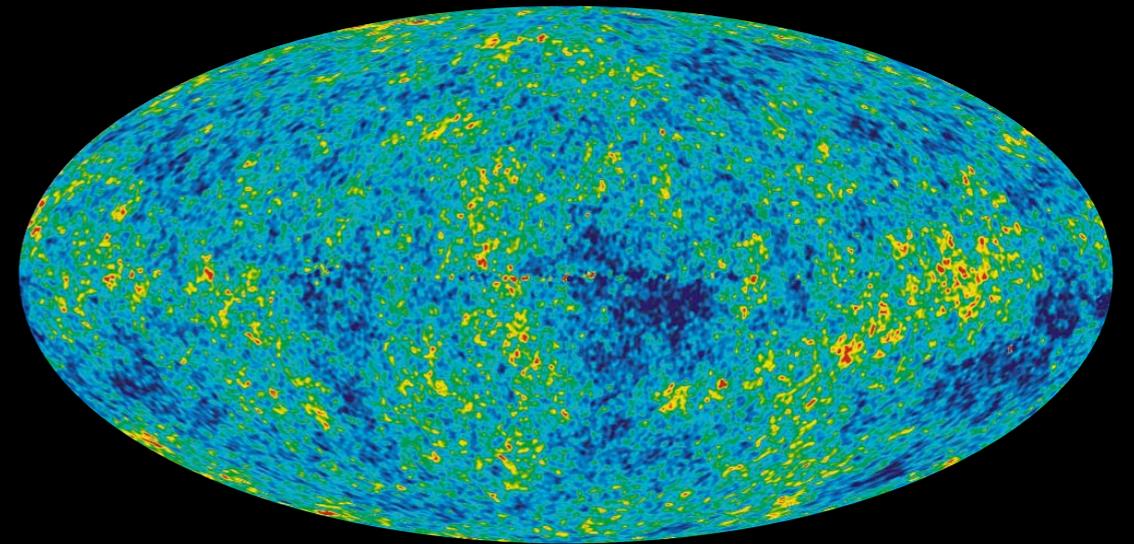


[WMAP-Satellit]

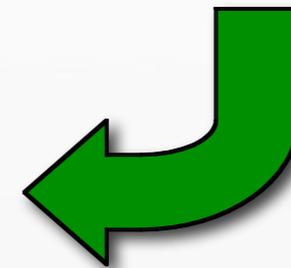
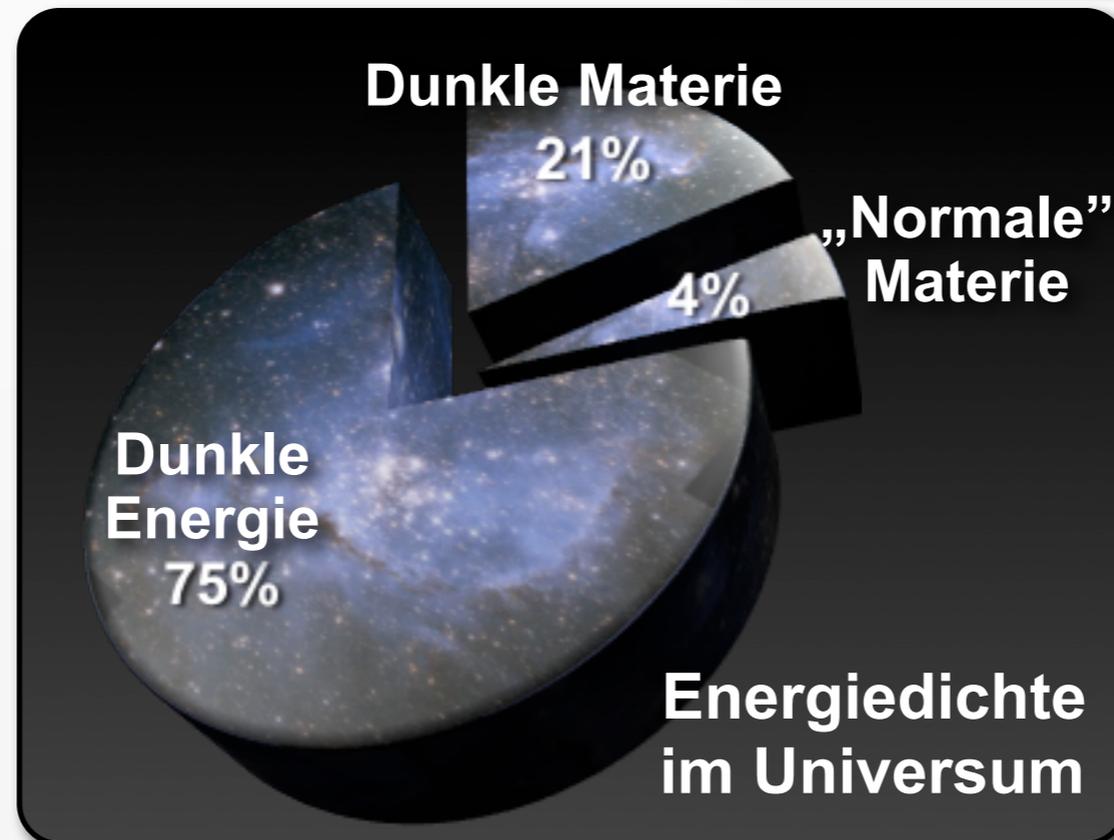
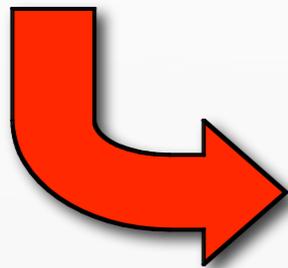
Dunkle Materie und Dunkle Energie



Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

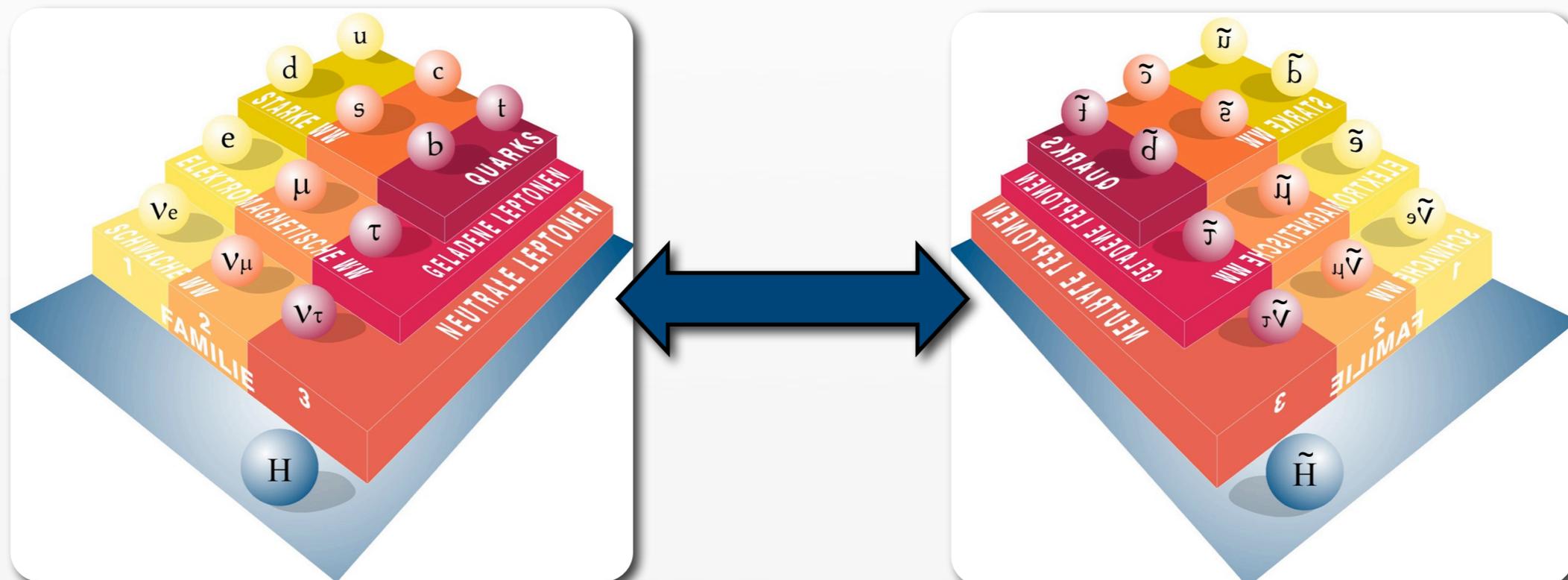


[WMAP-Satellit]



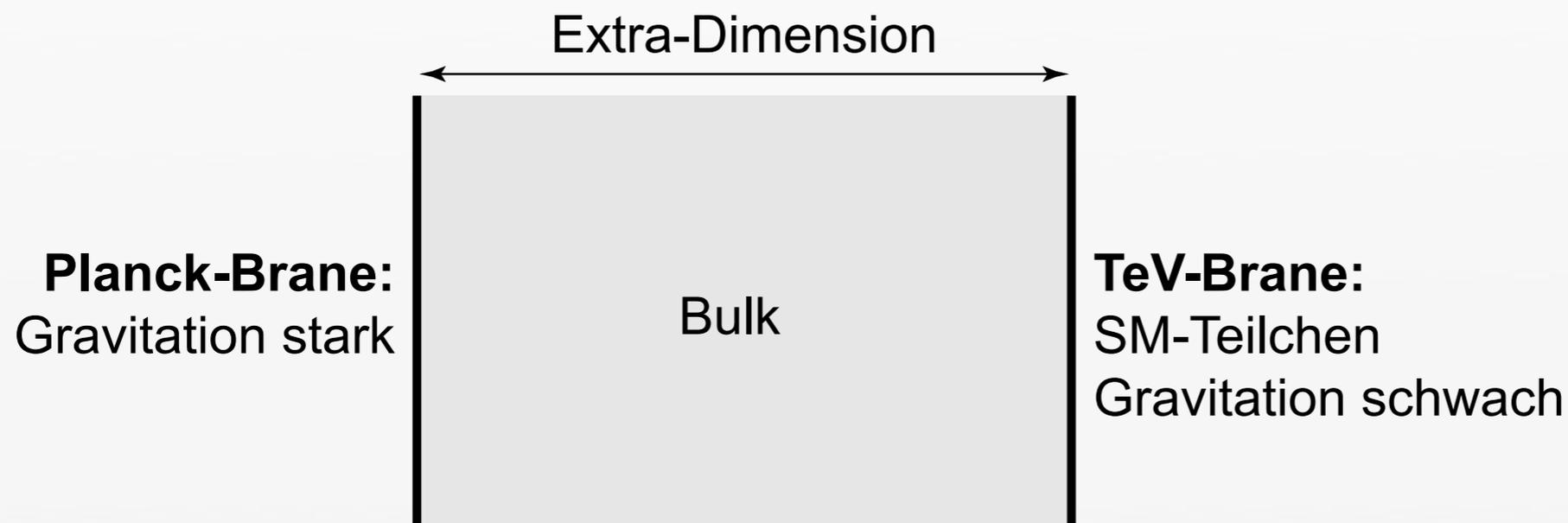
Supersymmetrie?

- Das Standardmodell der Teilchenphysik erklärt nicht alles:
 - Teilchen des Standardmodells: nur 4% der Energiedichte im Universum
 - Standardmodell funktioniert nicht gut für Energien oberhalb 1 TeV
- Lösungsidee: **Supersymmetrie** („SUSY“)
 - Zu jedem Teilchen im Standardmodell gibt es ein (schwereres) **Spiegelteilchen**
 - Dunkle Materie = leichteste Spiegelteilchen (häufig: „Neutralino“)



Extra-Dimensionen?

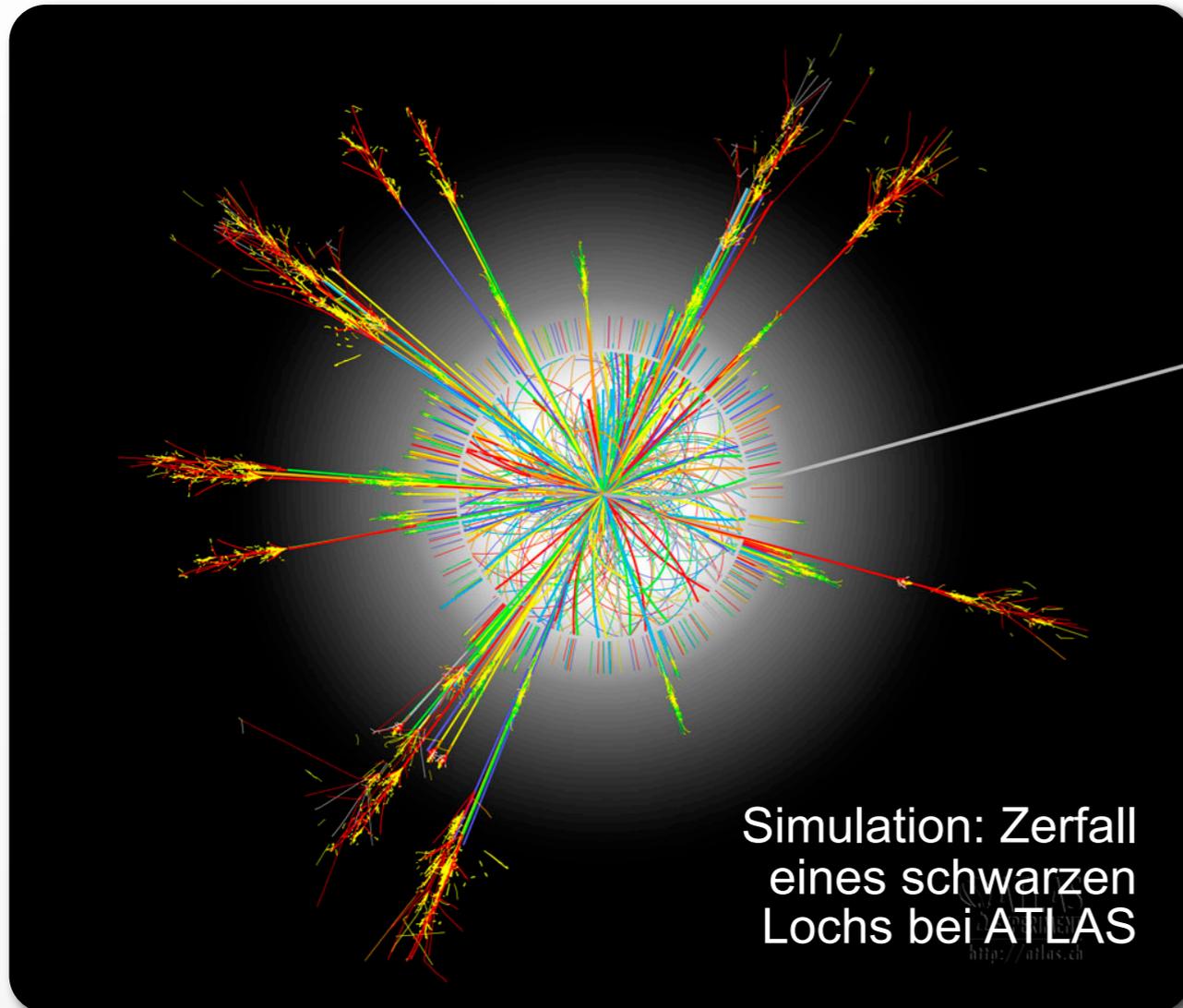
- Noch ein Problem: **keine Gravitation** im Standardmodell
 - Gravitation funktioniert nicht „einfach so“ als Quantentheorie
 - Wasserstoffatom: Gravitationskraft zwischen Proton und Elektron 10^{42} mal **schwächer** als elektromagnetische Kraft → „**Hierarchieproblem**“
- Spekulative Lösungsidee: **zusätzliche Raumdimensionen**
 - Gravitation breitet sich in mehr als 3 Raumdimensionen aus
 - Z.B. Randall-Sundrum-Modell
 - wir leben auf vierdimensionaler Membran (“TeV-Brane”)
 - Gravitation kommt durch Extra-Dimension zu uns



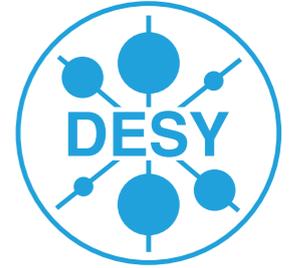
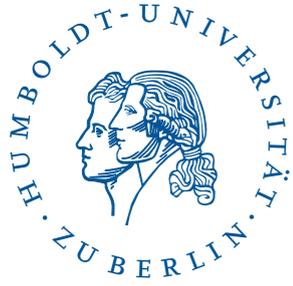
L. Randall



R. Sundrum



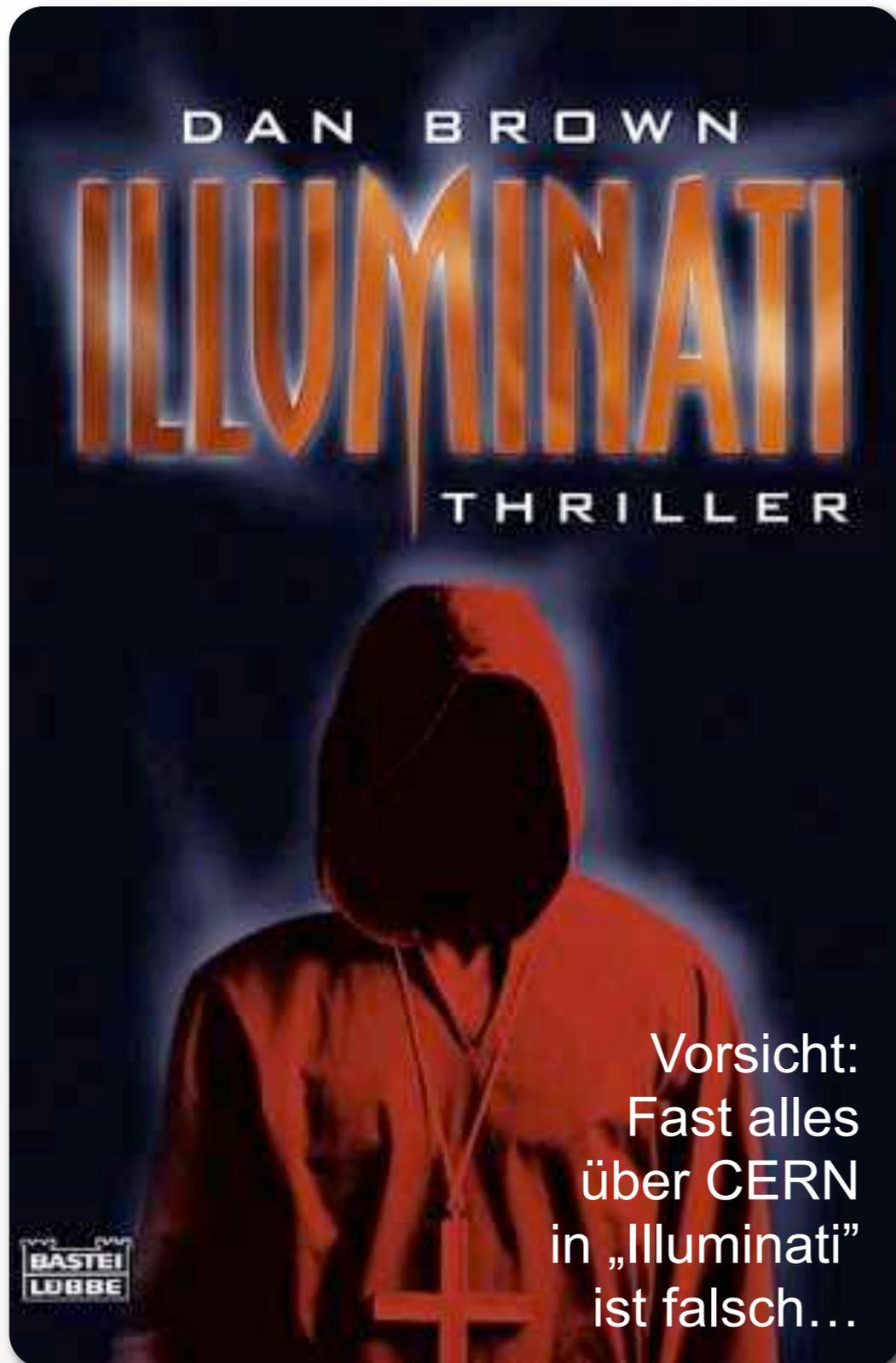
- Theorien mit Extra-Dimensionen:
 - Gravitation in Extra-Dimensionen stark genug zur Erzeugung **mikroskopischer schwarzer Löcher** am LHC (\neq Einstein'sches astronomisches schwarzes Loch)
 - Zerfall in $< 10^{-25}$ Sekunden durch **Hawking-Strahlung** \rightarrow spektakuläre Signatur im Detektor
 - (Wilde) Spekulation: schwarzes Loch zerfällt nicht, sondern frisst Erde auf
- Der LHC ist **sicher**:
 - Kosmischer Strahlung: jede Sekunde Kollisionen äquivalent zu $>10^{14}$ Jahren LHC-Betrieb
 - Keine Zerstörung von Sonnen oder Neutronensternen durch schwarze Löcher beobachtet



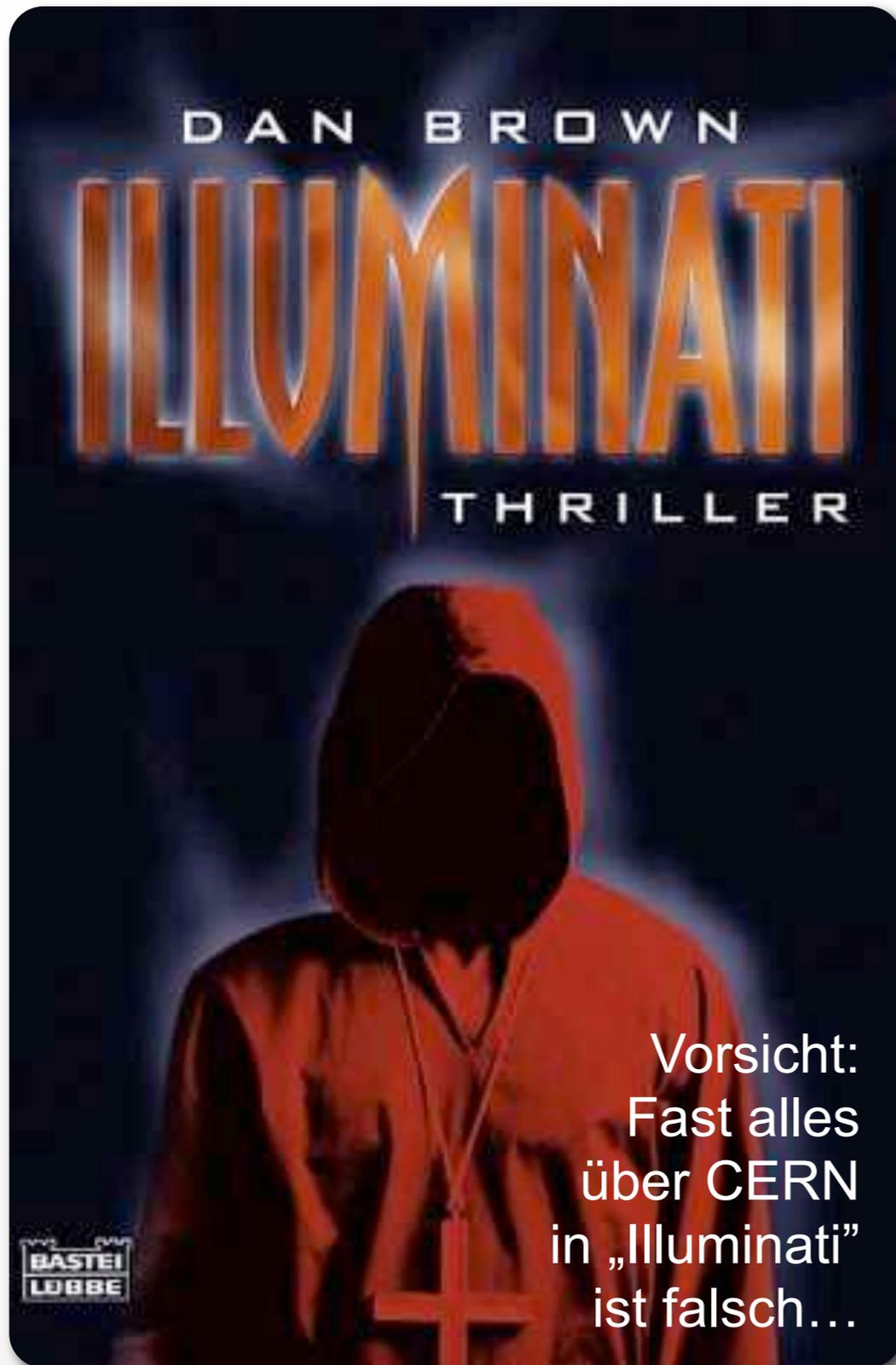
CERN und der Large Hadron Collider

CERN – Habe ich schonmal gehört...





Vorsicht:
Fast alles
über CERN
in „Illuminati“
ist falsch...



CERN – where the web was born...

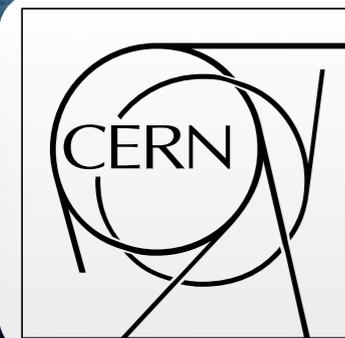


Tim Berners-Lee
(1990)

Der erste
Webserver
(1990)



Was ist CERN?



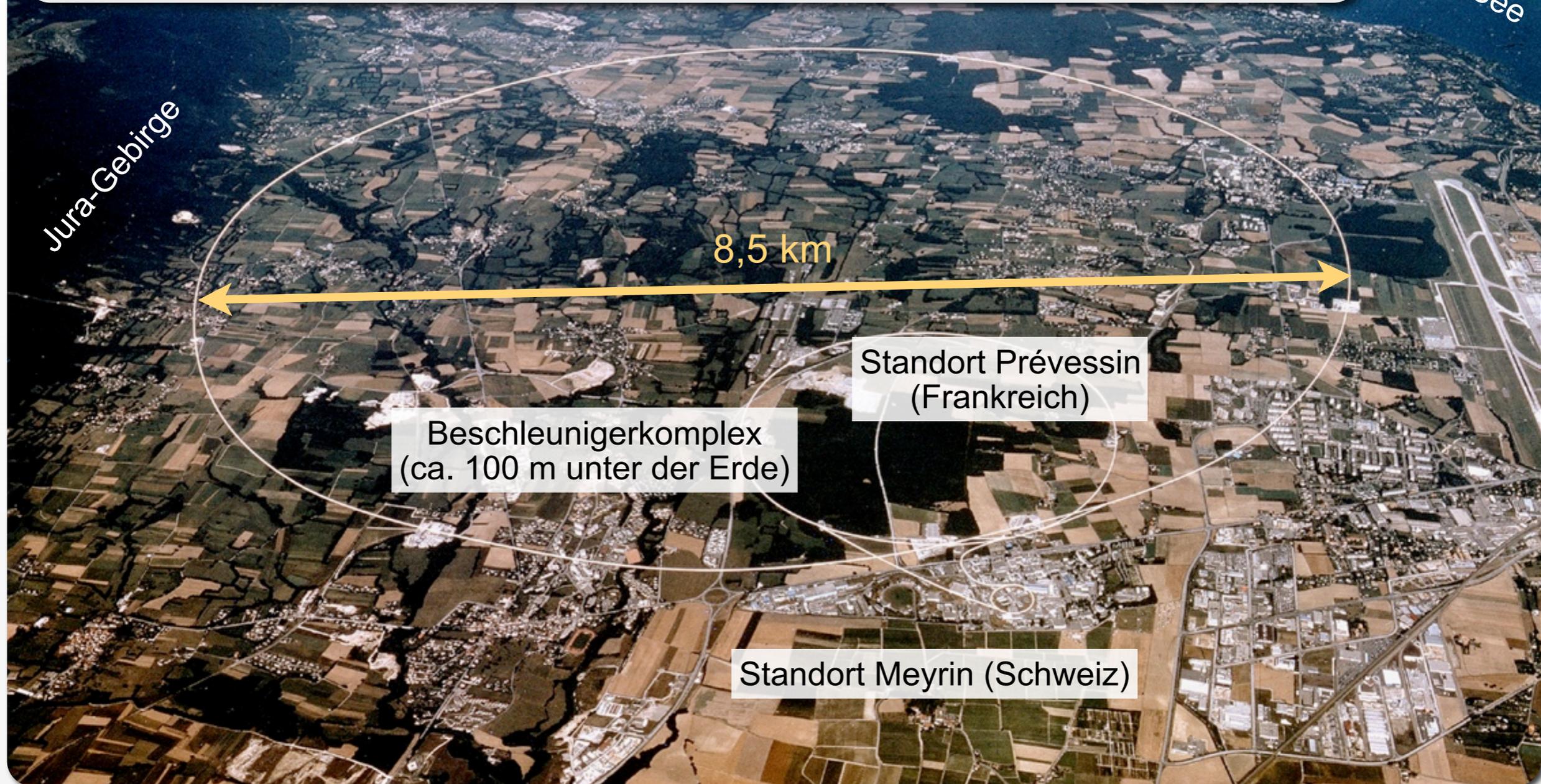
CERN = Europäisches Teilchenphysiklabor

Weltweit **größtes Labor für Teilchenphysik**, gegründet 1954

Historischer Name: „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire“

2500 Angestellte, ca. 8000 Gäste (85 Nationalitäten)

Genfer See



LHC – der Large Hadron Collider



LHC – der Large Hadron Collider

LHC-Beschleuniger:
Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen



LHC – der Large Hadron Collider

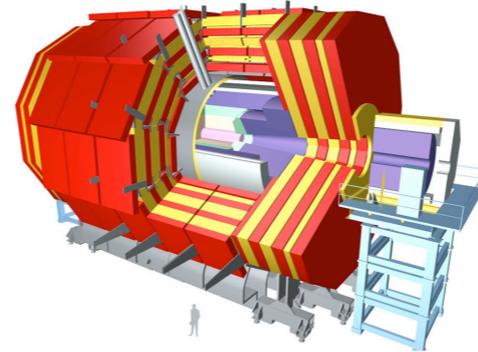
LHC-Beschleuniger:

Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen



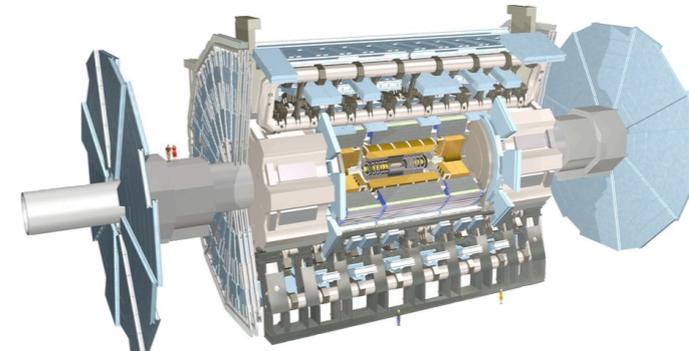
CMS-Experiment:

Vielzweckexperiment



ATLAS-Experiment:

Vielzweckexperiment



LHC – der Large Hadron Collider

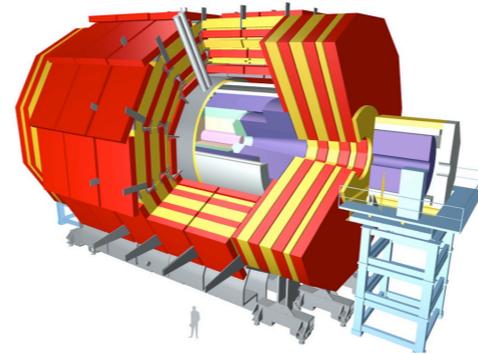
LHC-Beschleuniger:

Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen



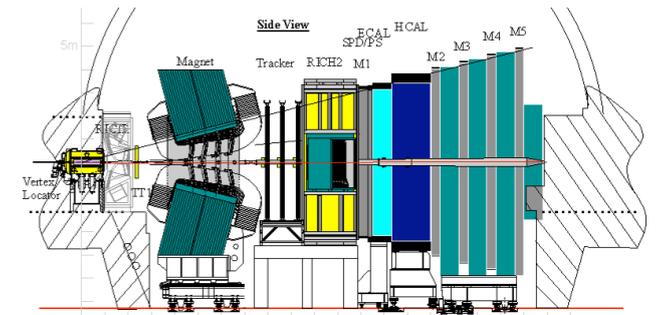
CMS-Experiment:

Vielzweckexperiment



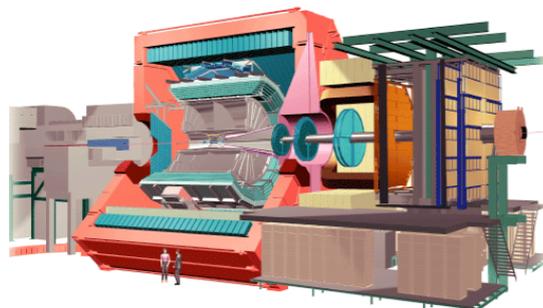
LHCb-Experiment:

B-Physik und CP-Verletzung



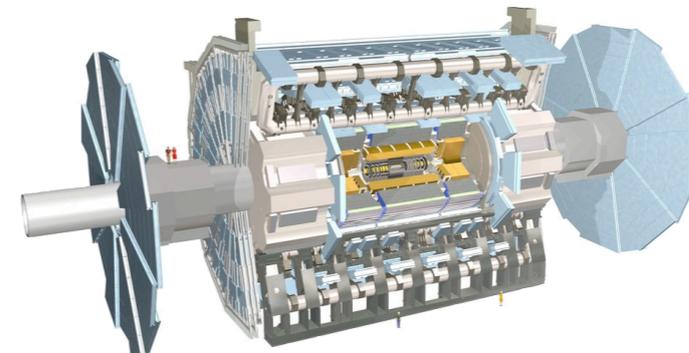
ALICE-Experiment:

Schwerionenphysik

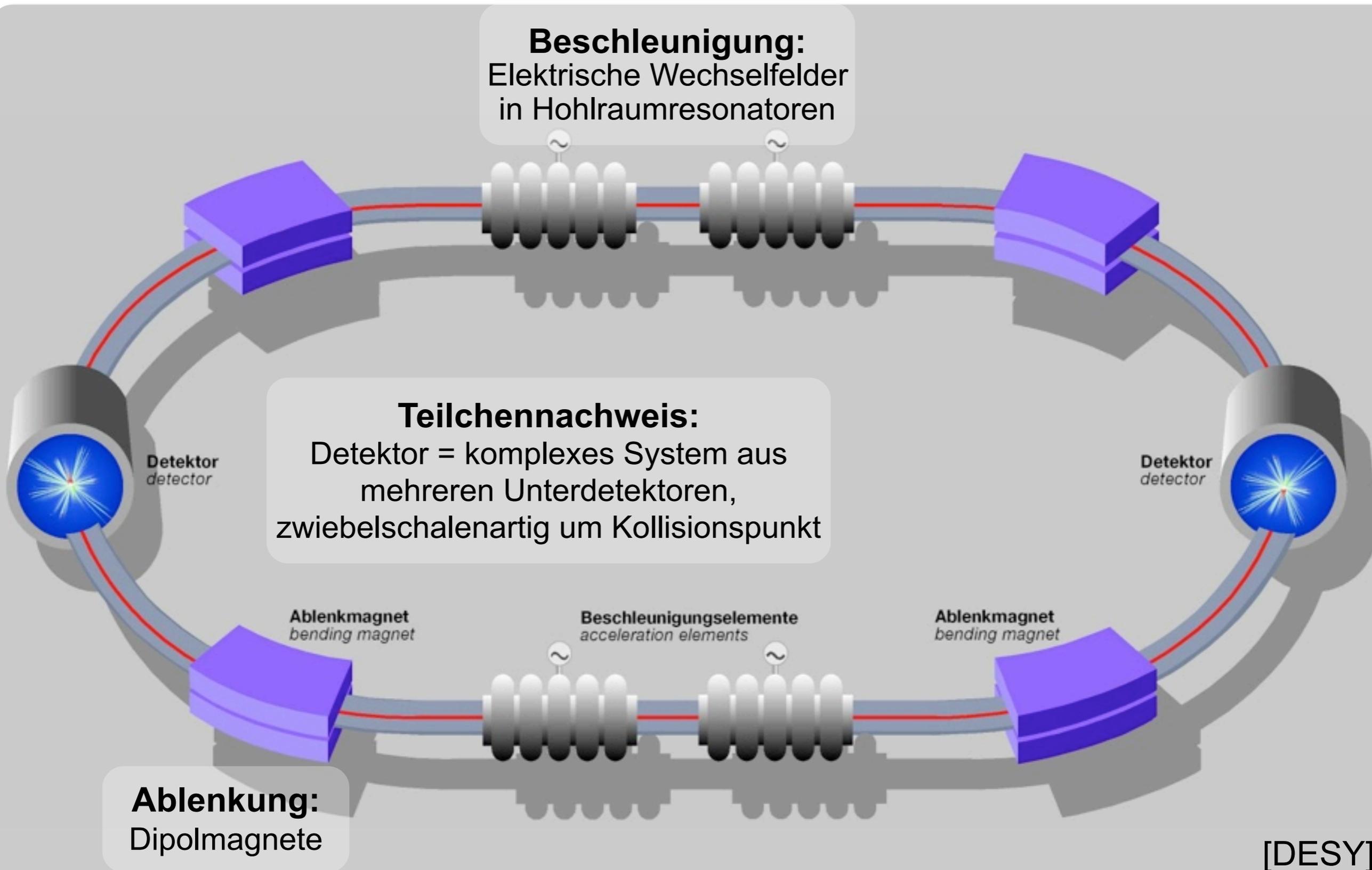


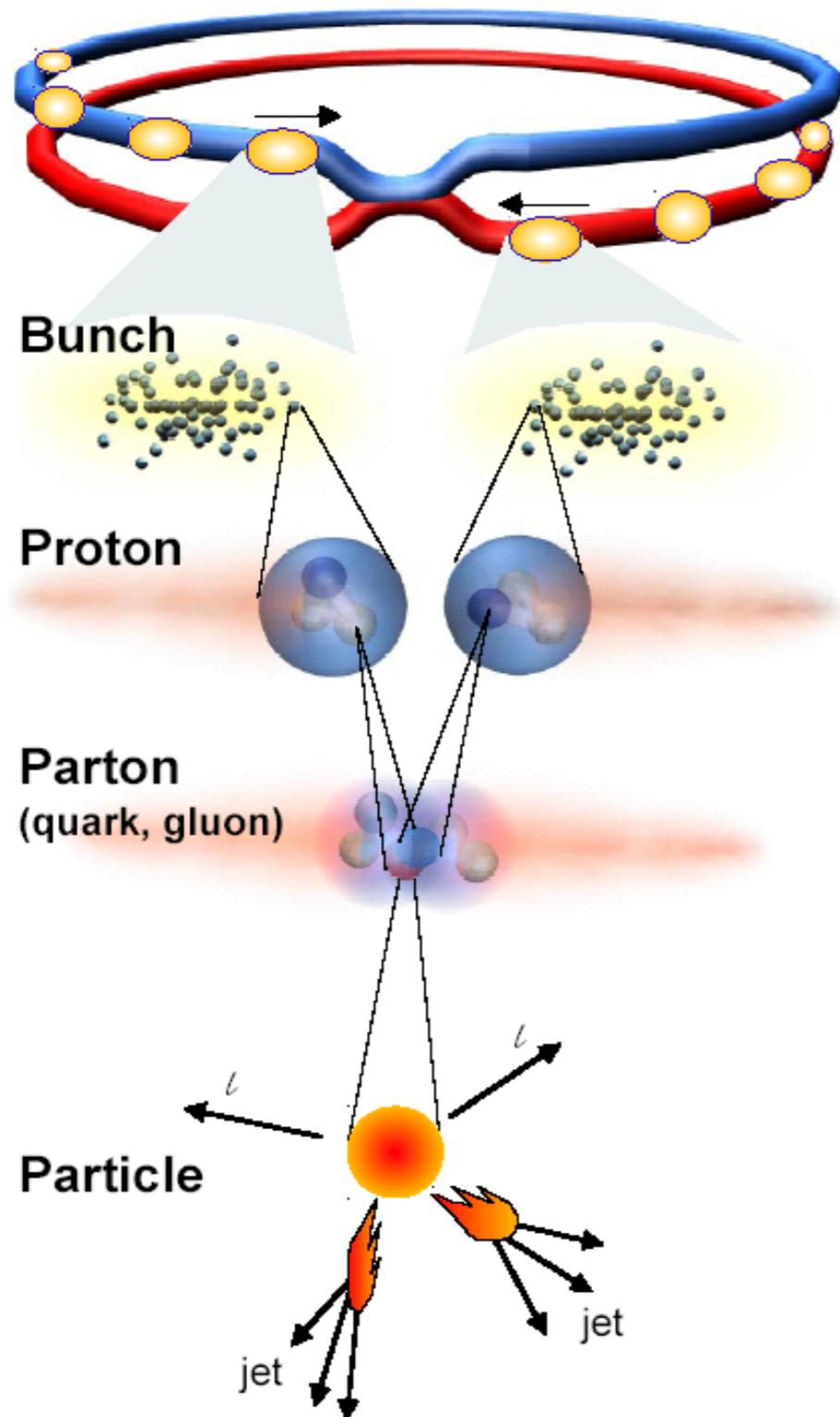
ATLAS-Experiment:

Vielzweckexperiment



Prinzip des Teilchenbeschleunigers





- **Magnete** halten Strahl auf Kreisbahn:
 - 1232 supraleitende Dipolmagnete (8.33 T)
 - Betriebstemperatur: 1.9 K
- **Strahlparameter:**
 - Ca. 2800 Pakete mit jeweils ca. 100 Milliarden Protonen
 - Gespeicherte Strahlenergie: 700 MJ (kinetische Energie \approx TGV mit 200 km/h)
- **Wechselwirkungsrate (ATLAS)**
 - 40 Millionen mal 25 Proton-Proton-Kollisionen pro Sekunde
→ **1 Milliarde Ereignisse pro Sekunde**
 - $> 99.9999\%$ dieser Ereignisse sind „uninteressant“ (bekannte Teilchen)
 - Im Schnitt: ein Higgs-Boson in jedem 10.000.000.000sten Ereignis

Teilchennachweis

Impulsmessung

Energiemessung

Teilchenidentifikation

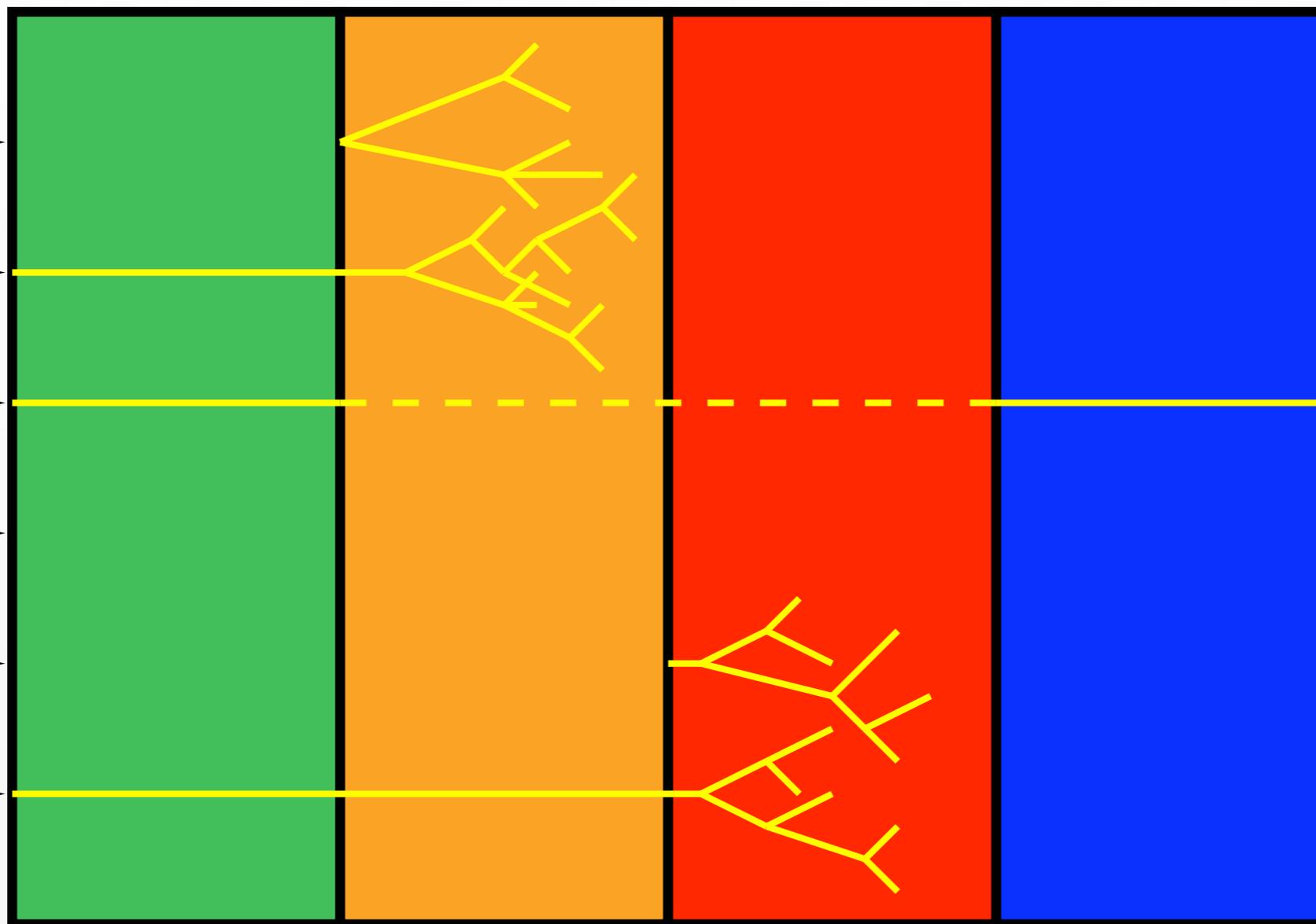
Spurdetektor
(„Tracking“)

Kalorimeter
elektromagnetisch hadronisch

Myondetektor

Zerfallsprodukte der Kollision

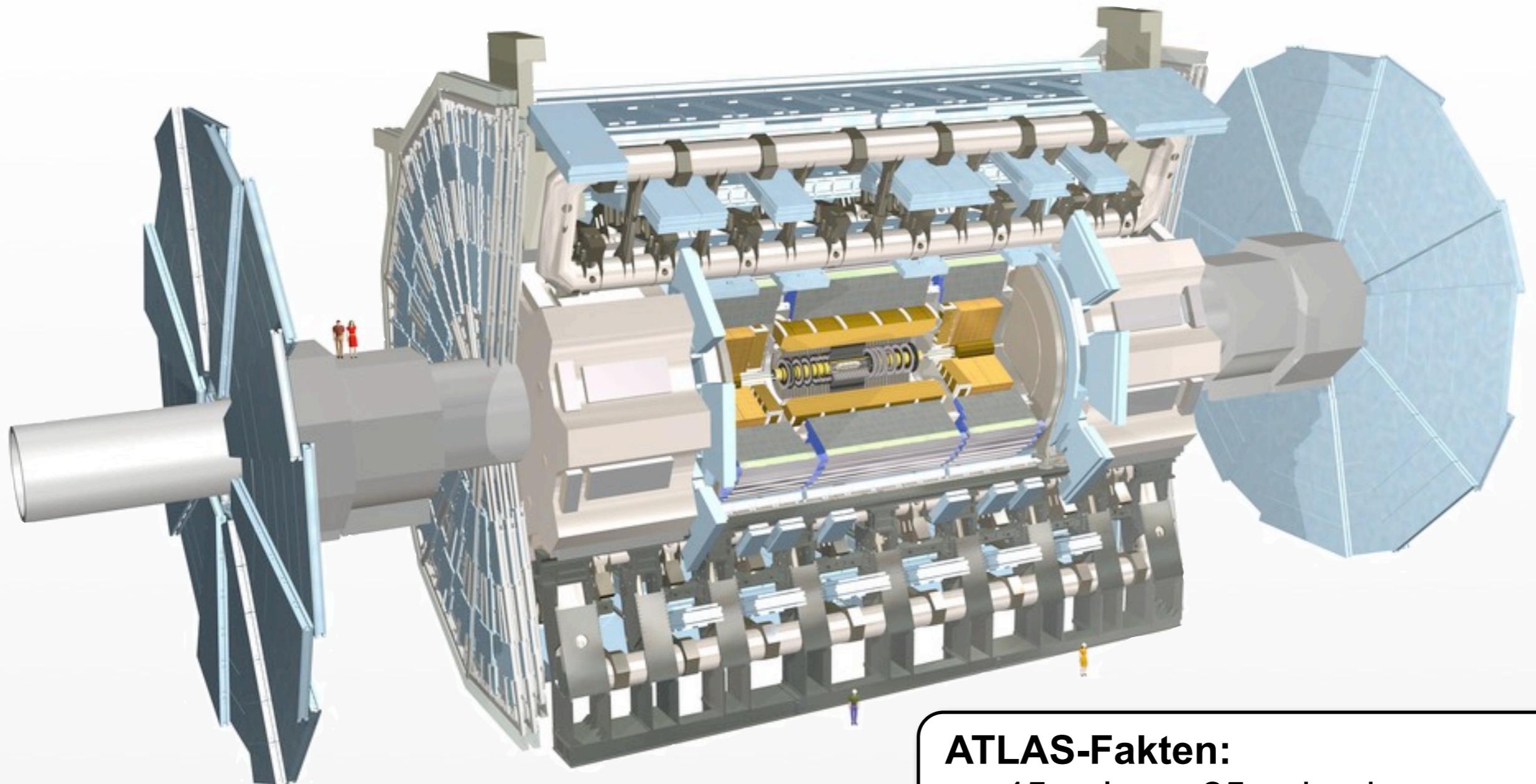
Photon
Elektron/Positron
Myon
Neutrino
Neutron
Pion, Proton



„Innen“

„Außen“

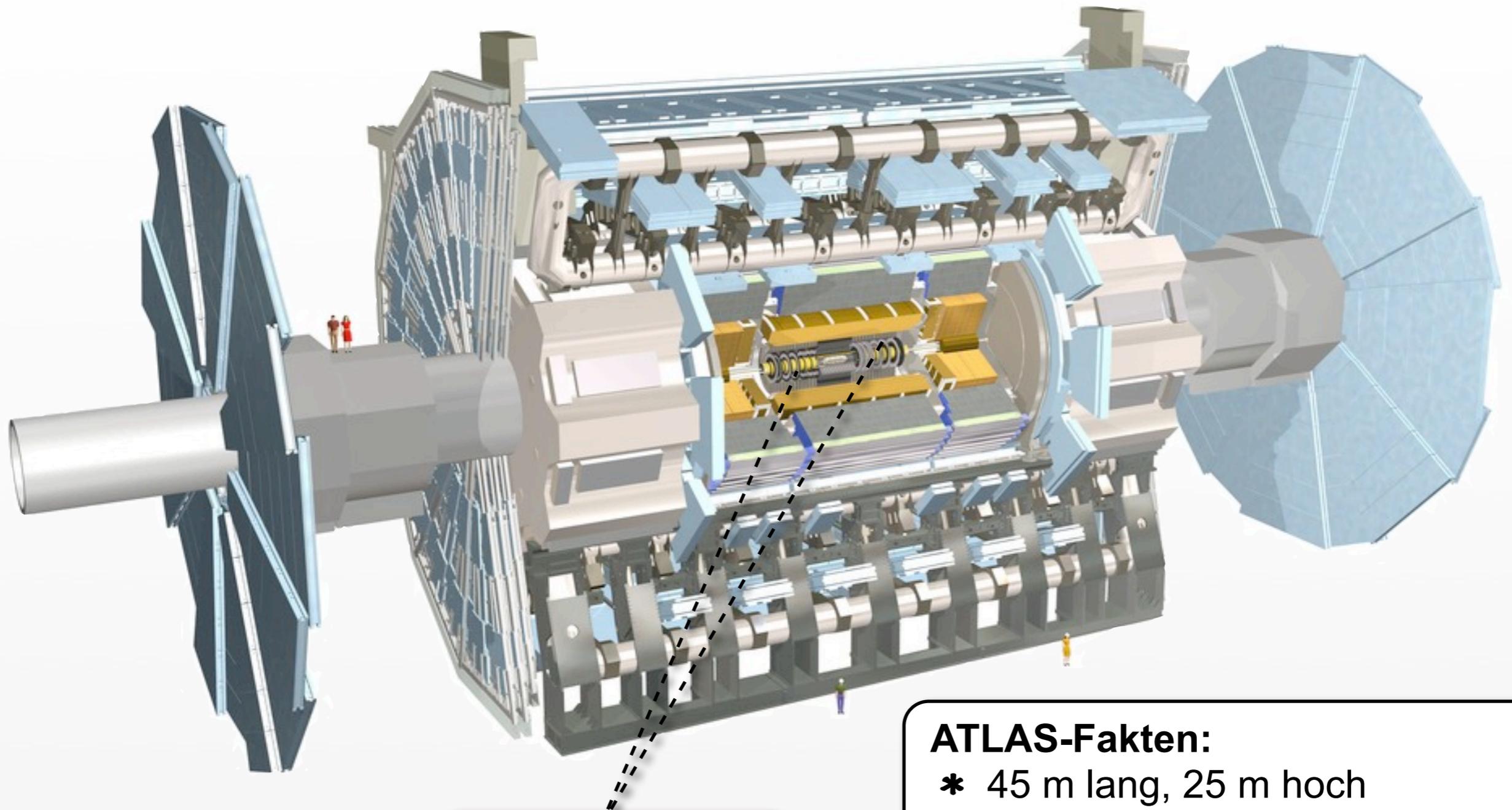
Beispiel: der ATLAS-Detektor



ATLAS-Fakten:

- * 45 m lang, 25 m hoch
- * Gewicht: 7000 Tonnen
- * 100 Millionen Elektronikkanäle

Beispiel: der ATLAS-Detektor



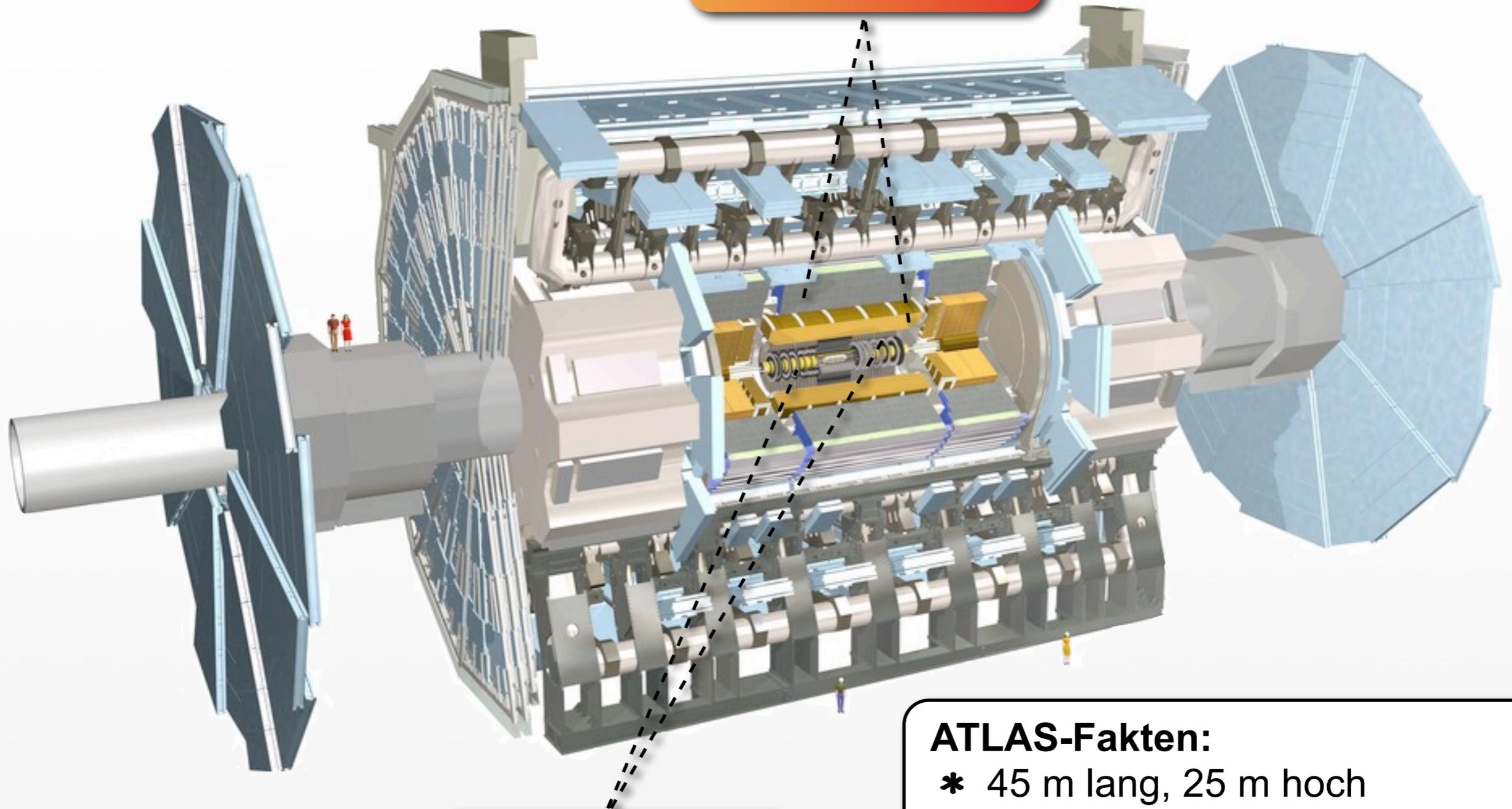
Spurdetektoren

ATLAS-Fakten:

- * 45 m lang, 25 m hoch
- * Gewicht: 7000 Tonnen
- * 100 Millionen Elektronikkanäle

Beispiel: der ATLAS-Detektor

Kalorimeter



Spurdetektoren

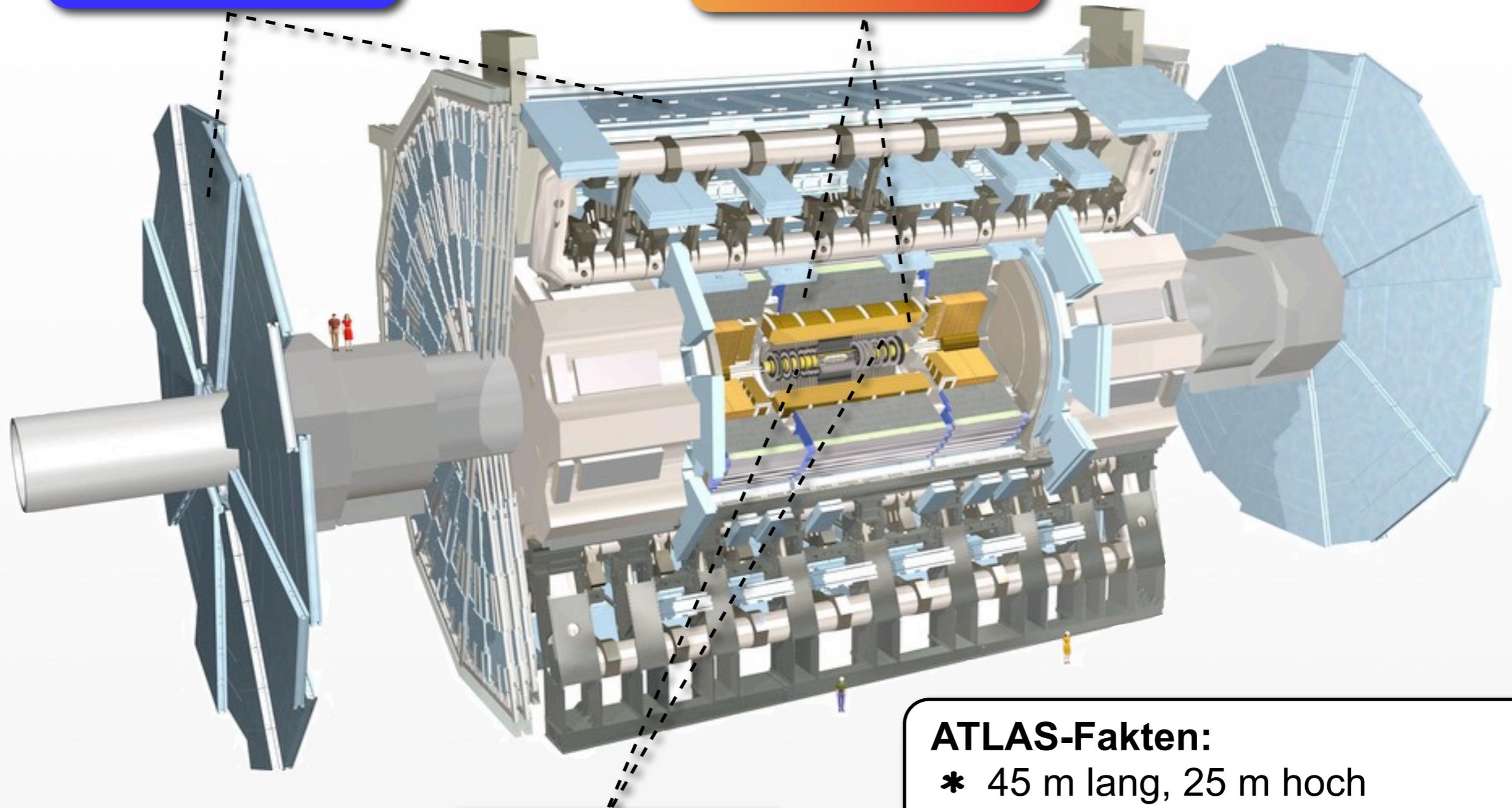
ATLAS-Fakten:

- * 45 m lang, 25 m hoch
- * Gewicht: 7000 Tonnen
- * 100 Millionen Elektronikkanäle

Beispiel: der ATLAS-Detektor

Myon-Detektor

Kalorimeter

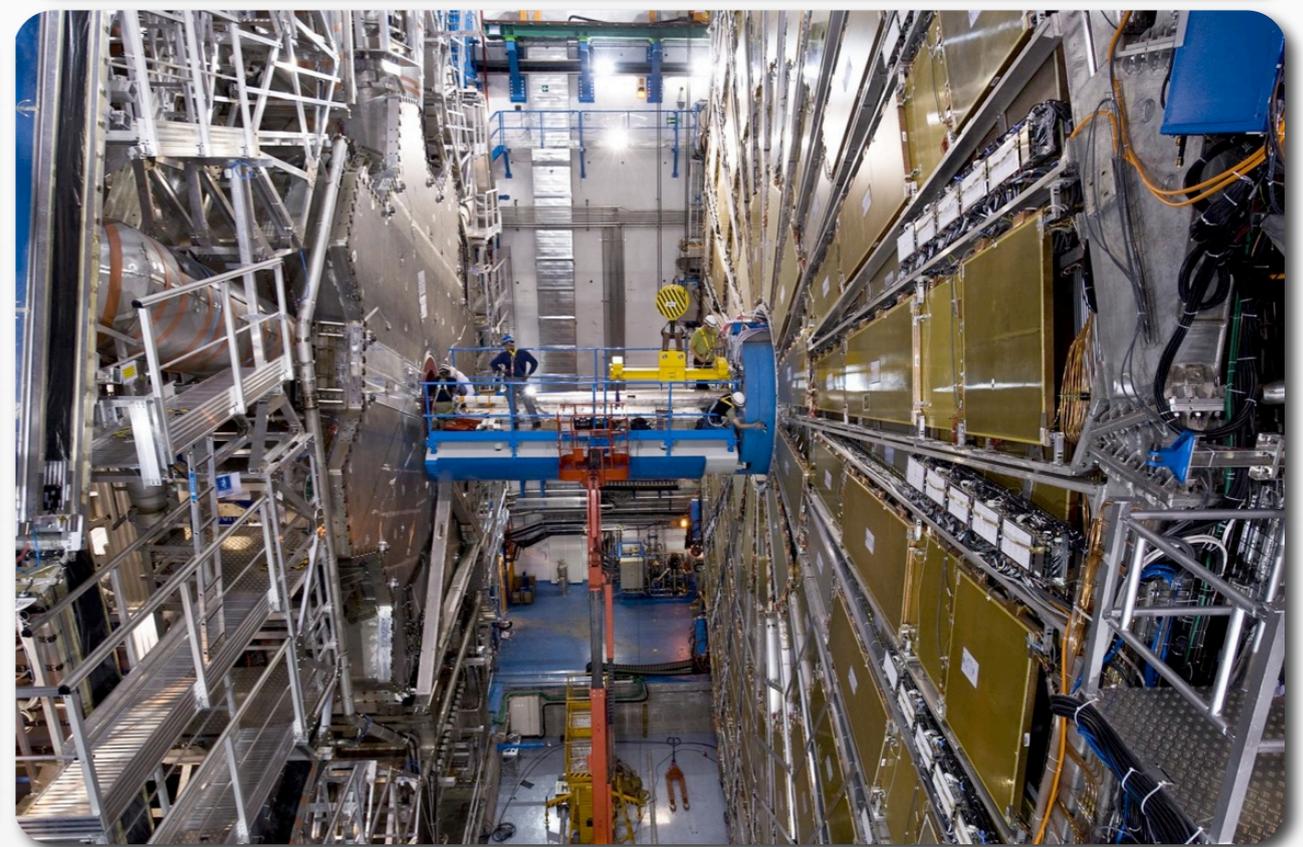
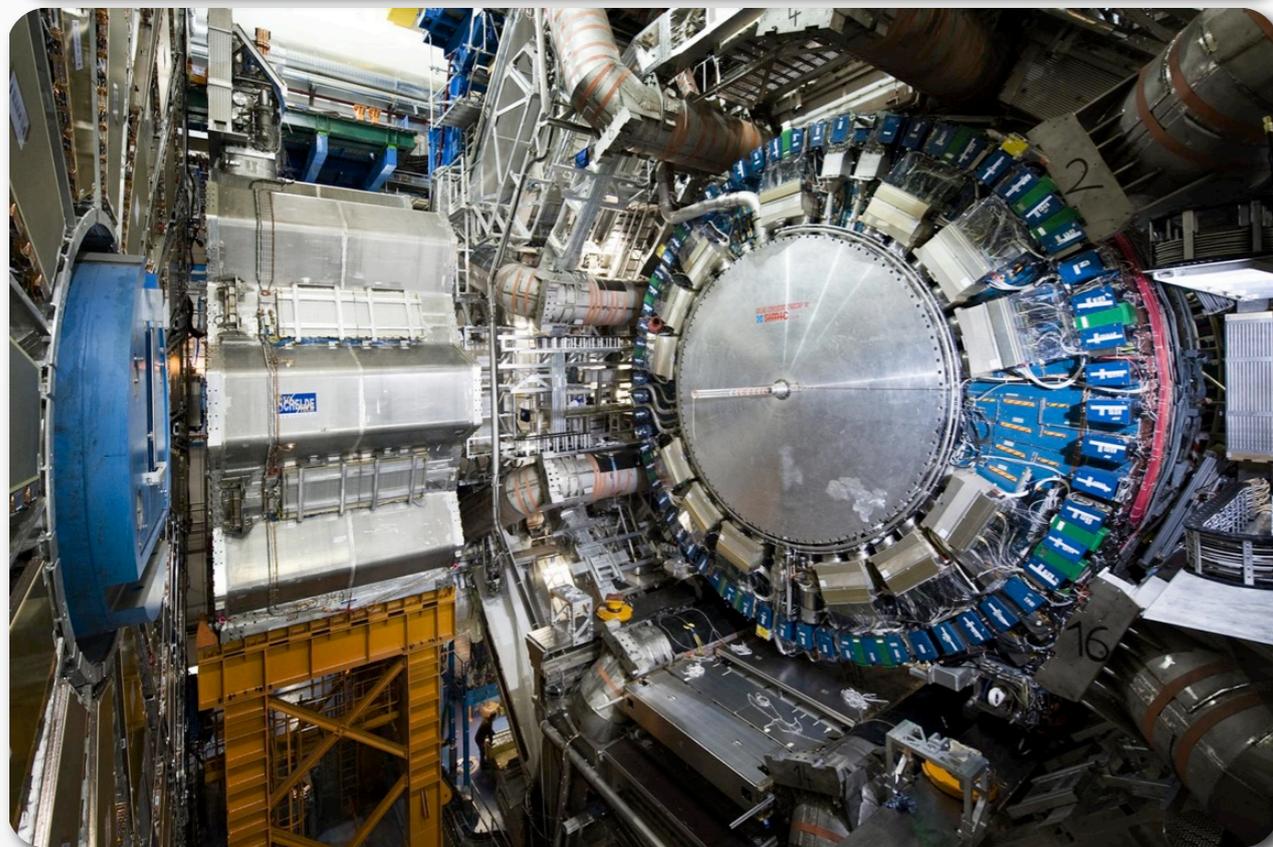
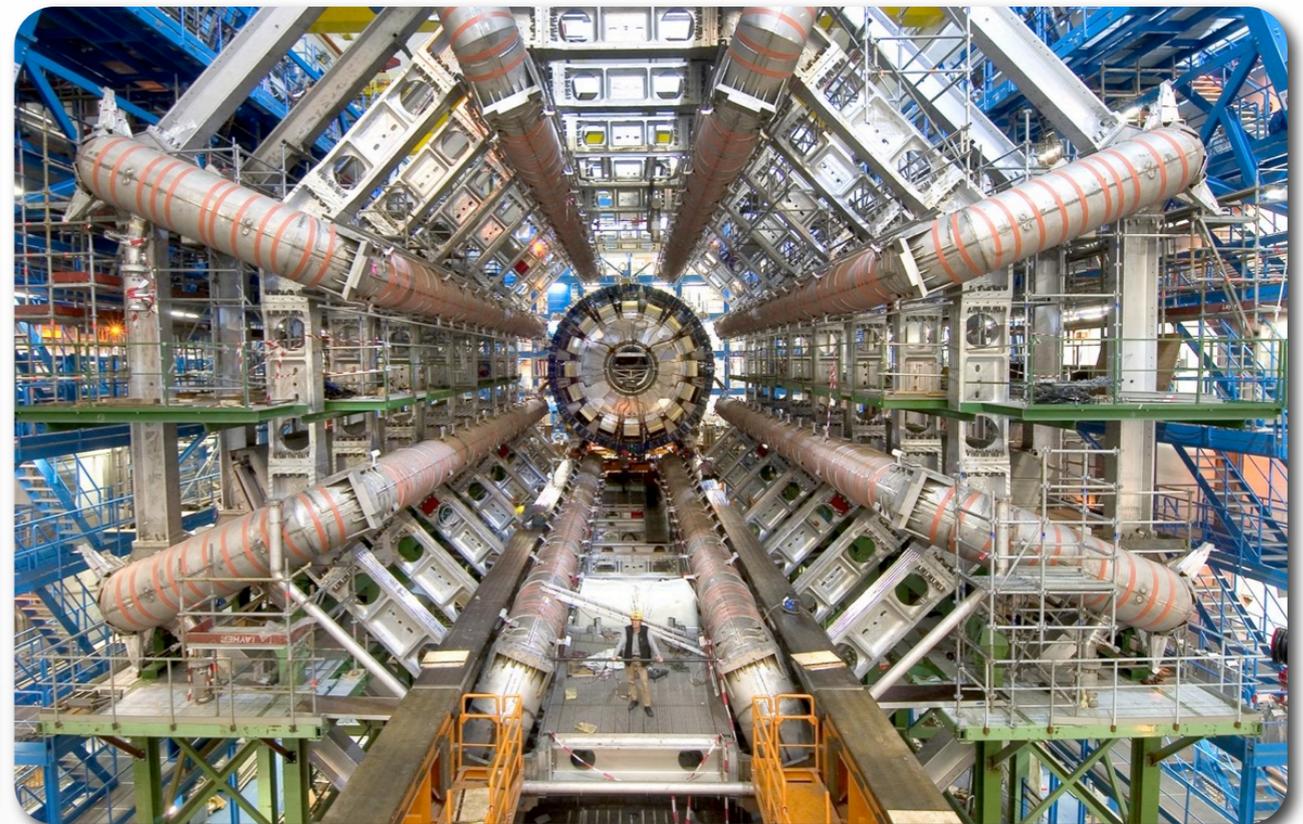
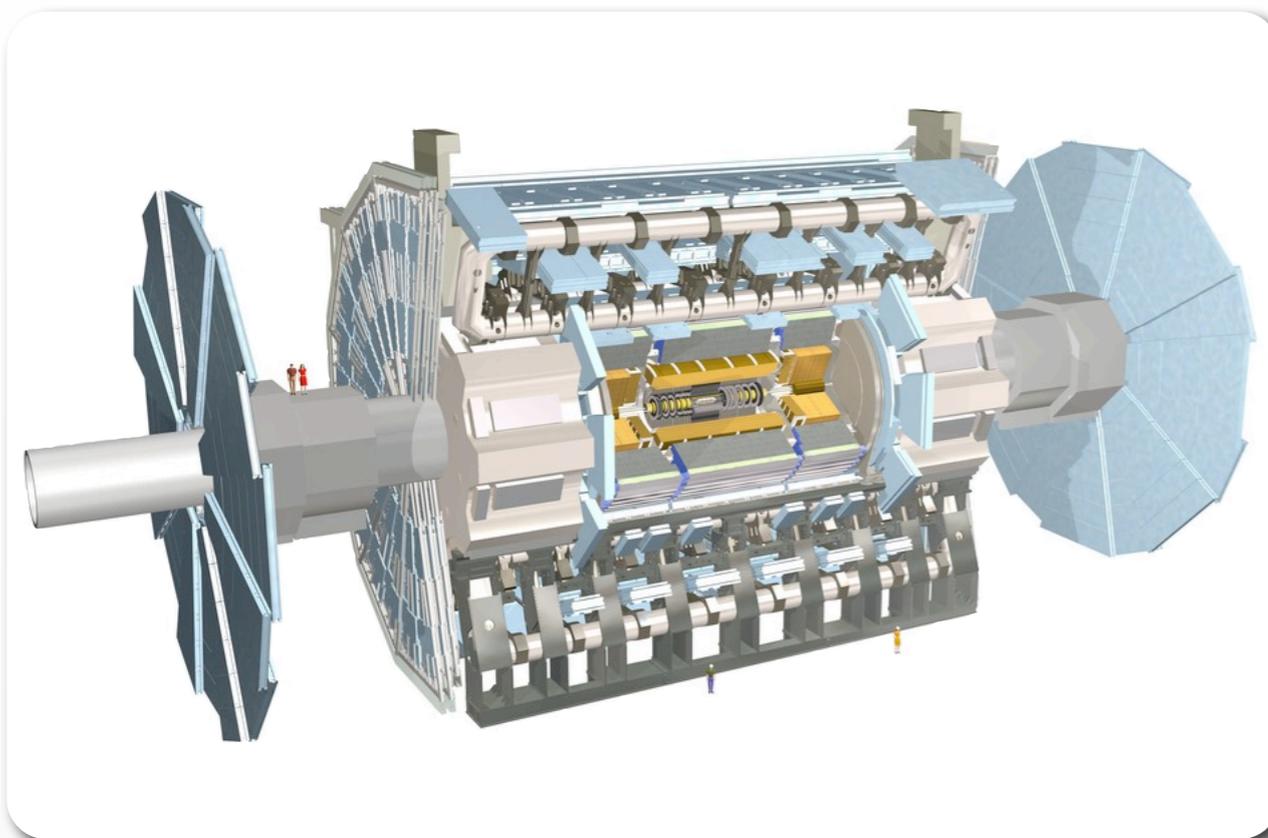


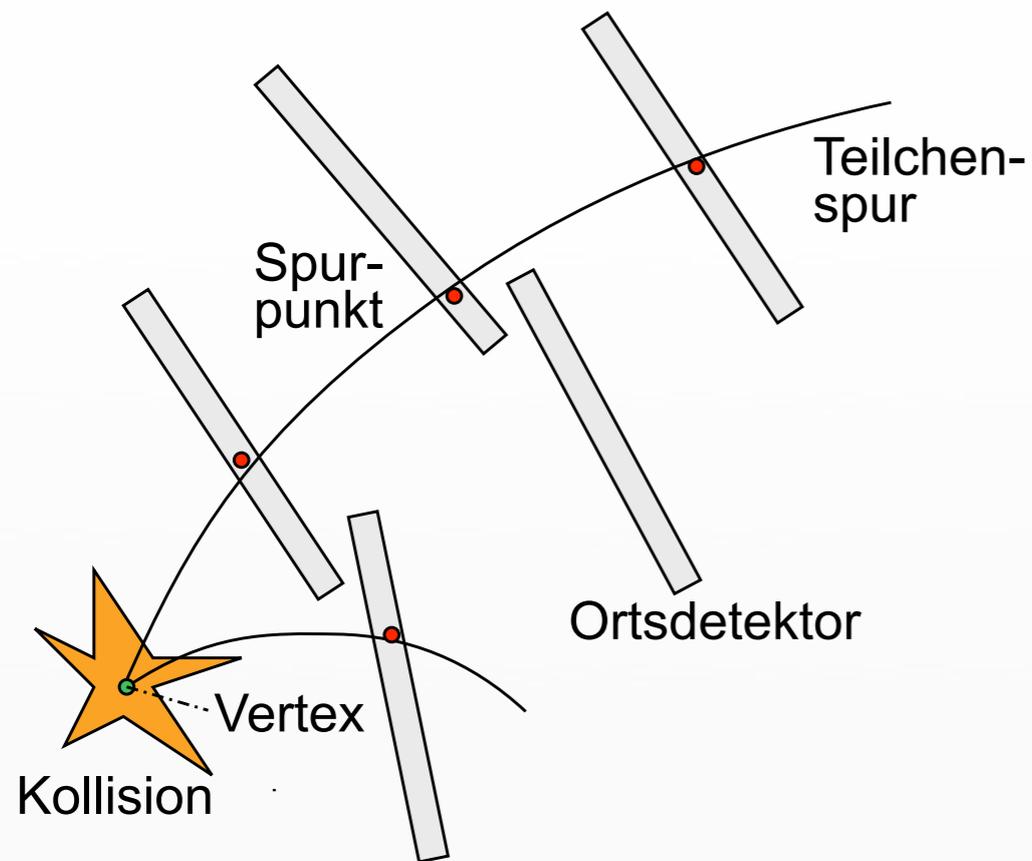
Spurdetektoren

ATLAS-Fakten:

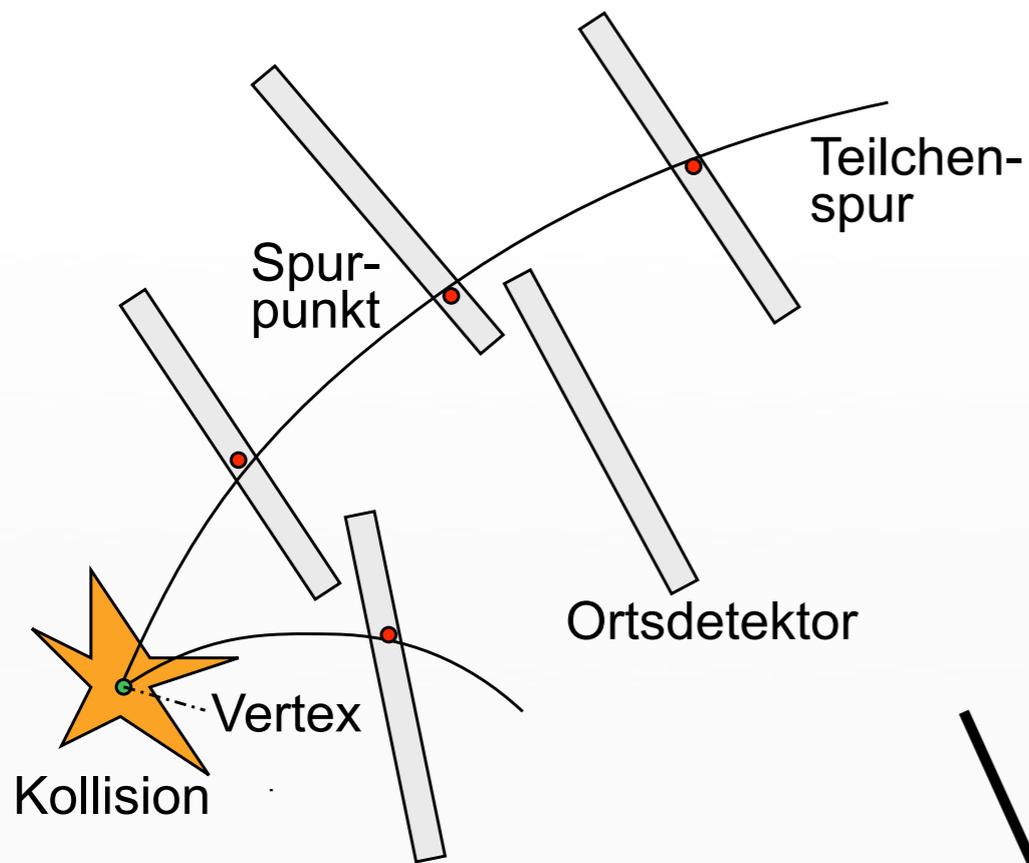
- * 45 m lang, 25 m hoch
- * Gewicht: 7000 Tonnen
- * 100 Millionen Elektronikkanäle

Zusammenbau des ATLAS-Detektors





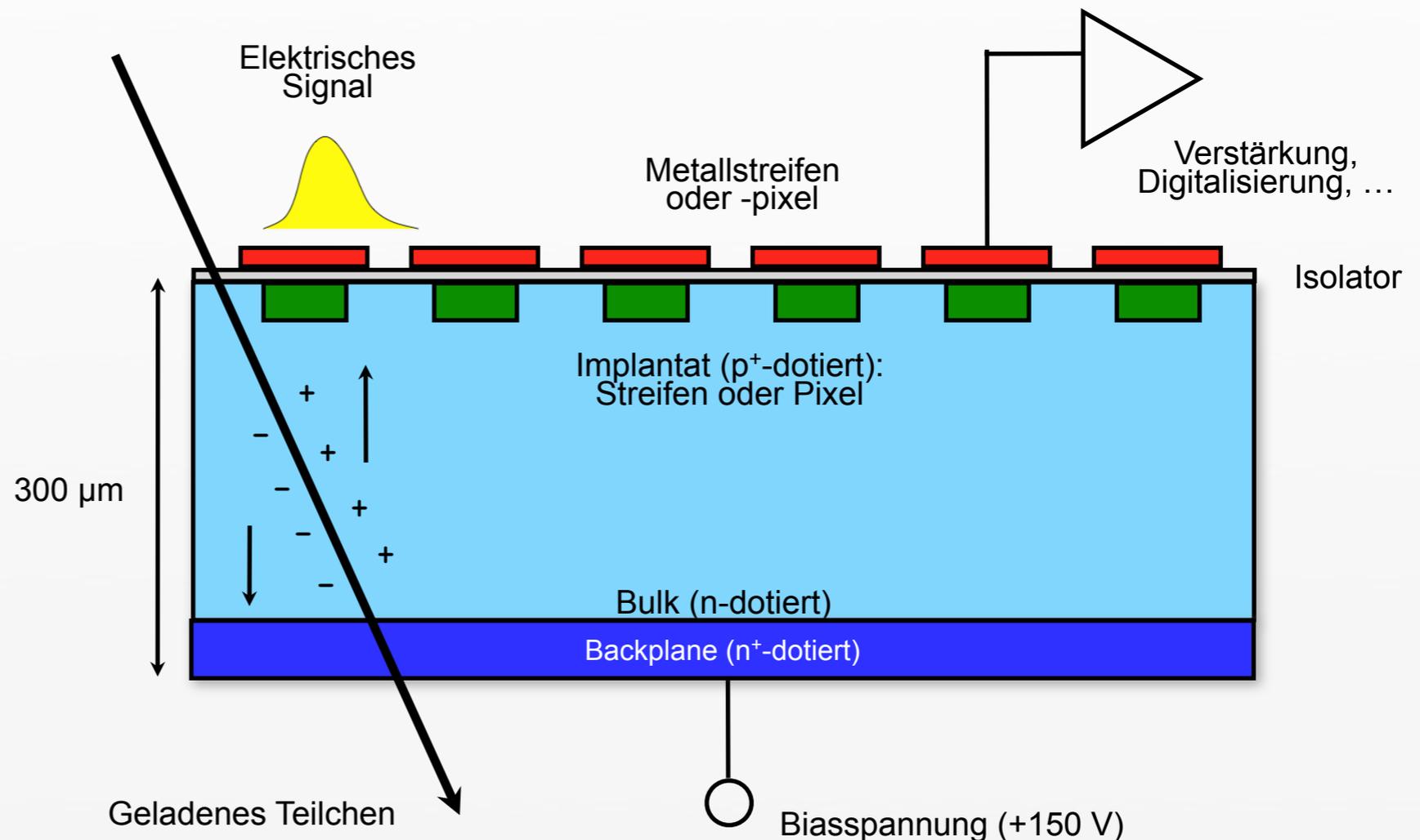
- Idee der Impulsmessung:
- Bestimme Spuren geladener Teilchen aus **Spurpunkten**
- **Ablenkung in Magnetfeld** umgekehrt proportional zu Impuls des Teilchens (Masse × Geschwindigkeit)



- Idee der Impulsmessung:
 - Bestimme Spuren geladener Teilchen aus **Spurpunkten**
 - **Ablenkung in Magnetfeld** umgekehrt proportional zu Impuls des Teilchens (Masse \times Geschwindigkeit)

- **Spurpunkte: z. B. Siliziumdetektor**

- Detektor = Diode in Sperrrichtung
- Geladenes Teilchen ionisiert Detektor \rightarrow elektrisches Signal



- Herausforderung **Datenrate**:
 - „Nadel im Heuhaufen“: jede Sekunde **1 Milliarde Kollisionen**, aber nur ca. 100 interessante Ereignisse
 - Überschlagsrechnung:
 10^9 Kollisionen/s \times 10^6 aktive Kanäle
= **1 TB/s** \rightarrow mit heutiger Technologie nicht speicherbar



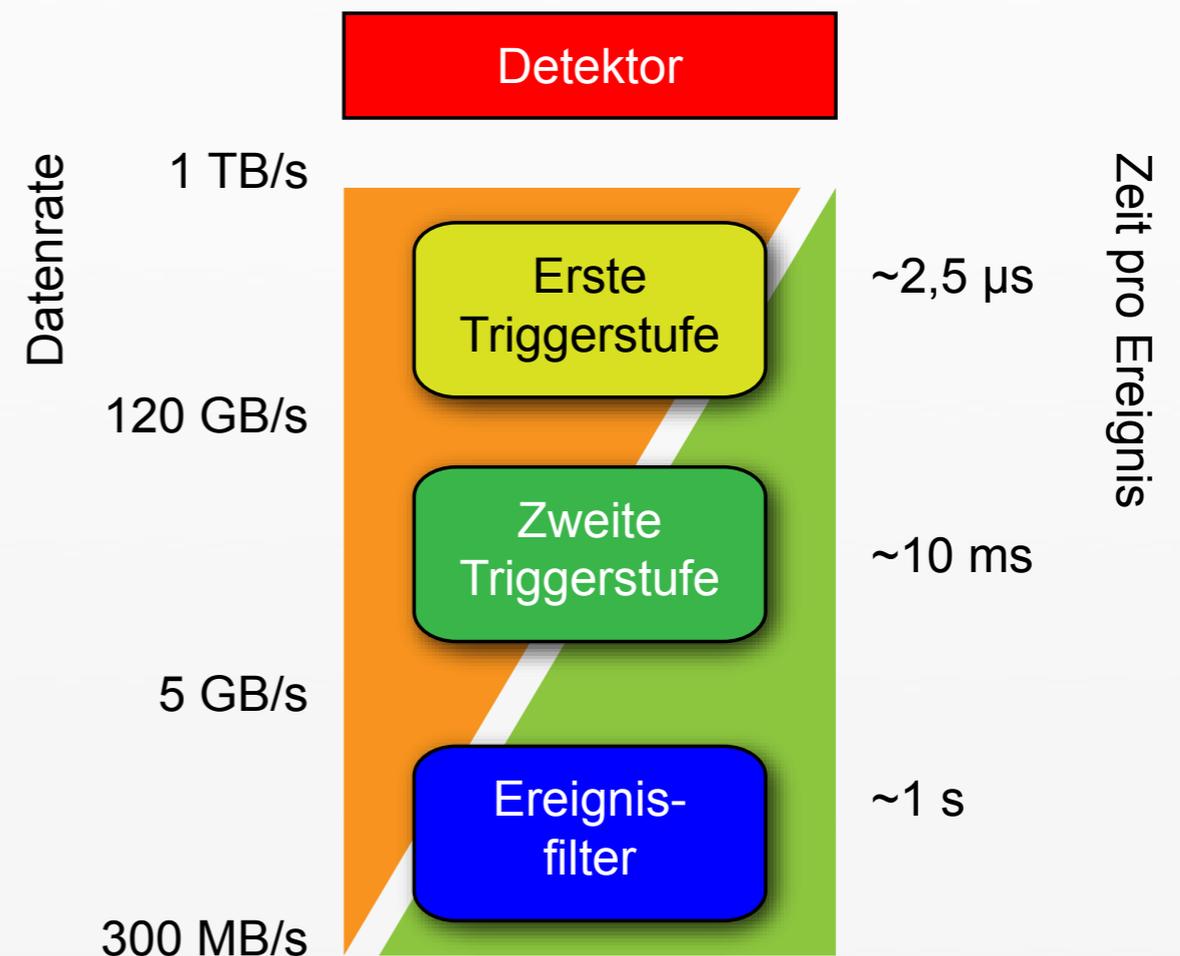
- Herausforderung **Datenrate**:

- „Nadel im Heuhaufen“: jede Sekunde **1 Milliarde Kollisionen**, aber nur ca. 100 interessante Ereignisse
- Überschlagsrechnung:
 10^9 Kollisionen/s \times 10^6 aktive Kanäle
= **1 TB/s** \rightarrow mit heutiger Technologie nicht speicherbar

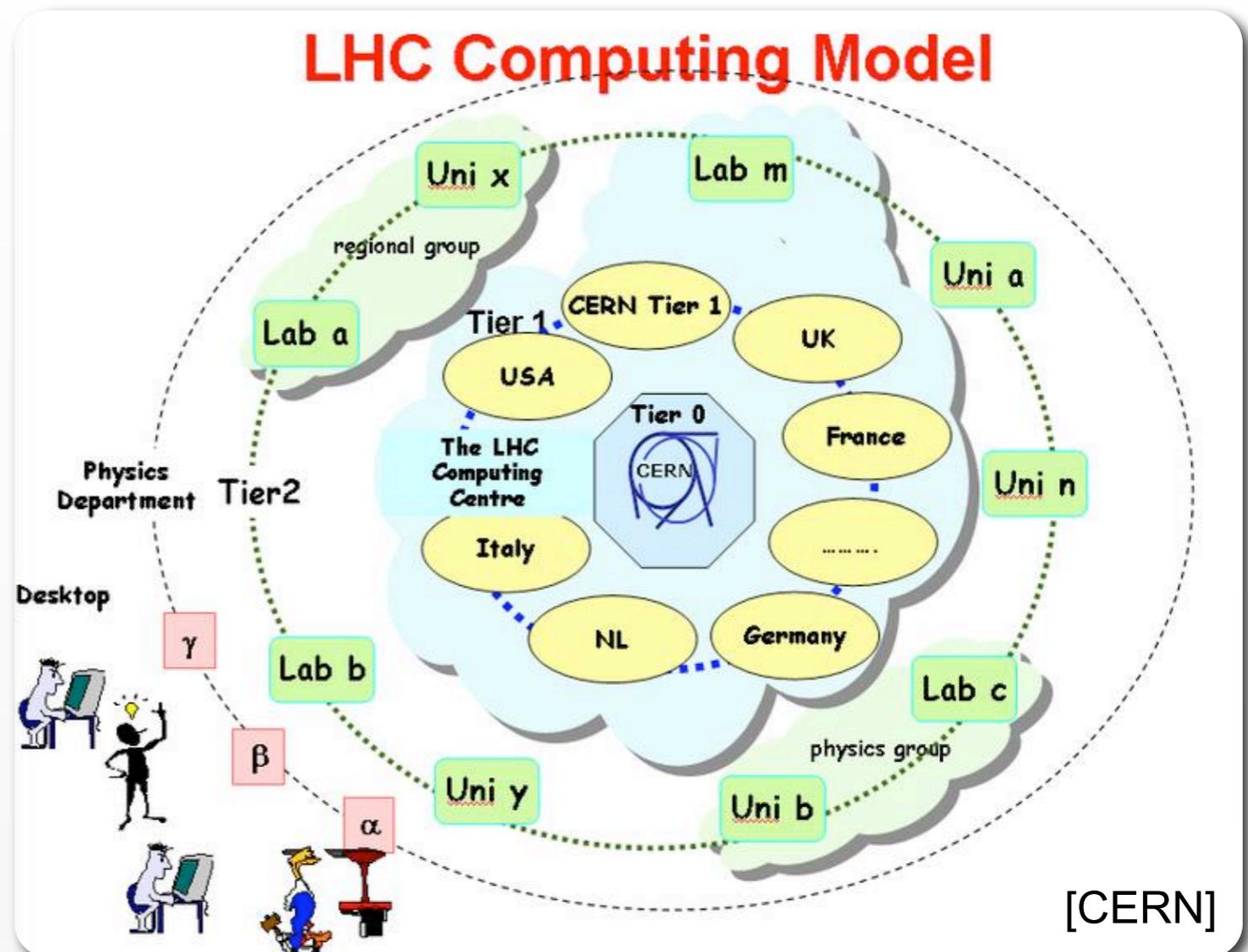


- Lösung: mehrstufige **Datenfilterung** („Trigger“):

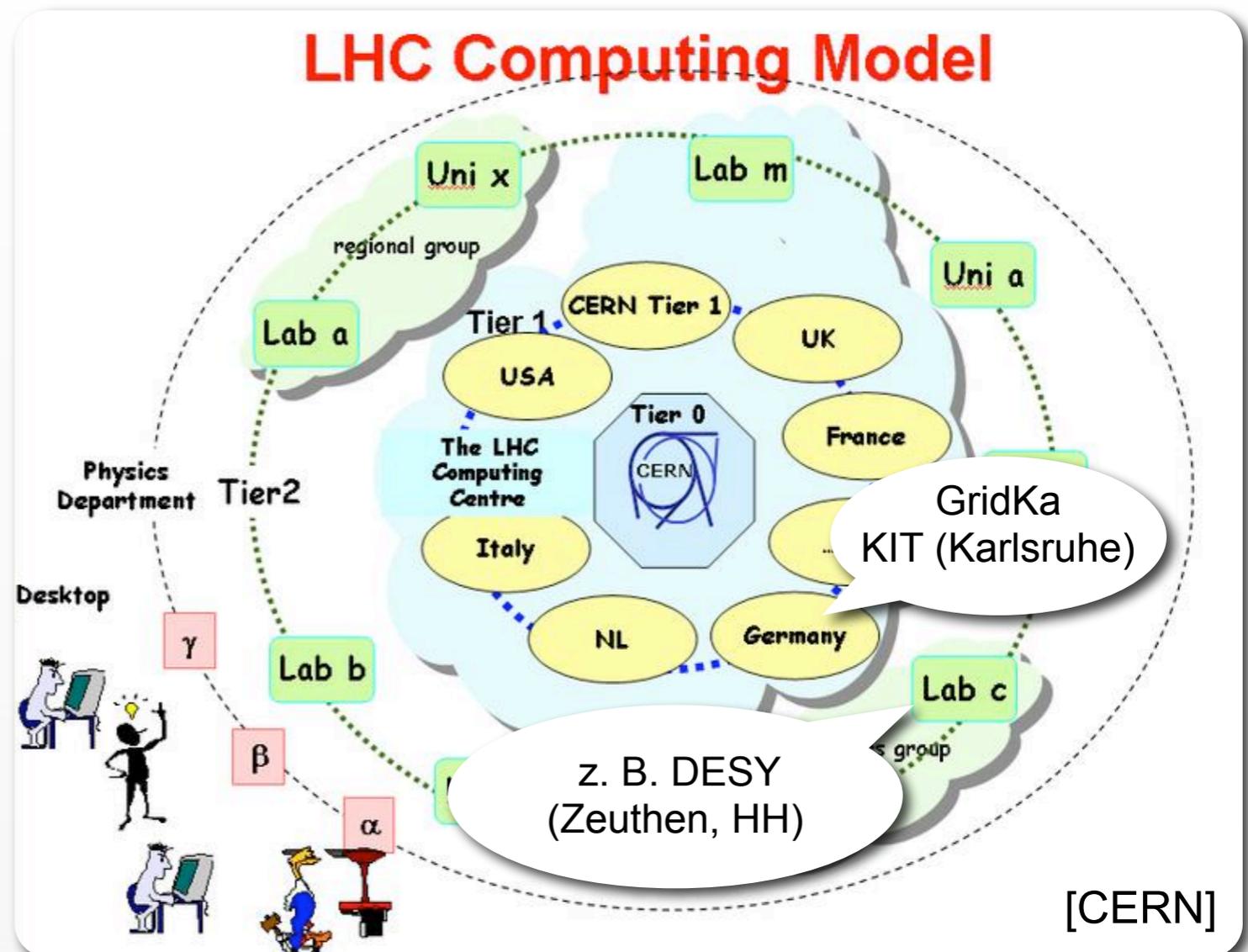
1. **Einfache** Signale, geringer Auflösung, z. B. ein hochenergetisches Myon \rightarrow spezielle Trigger-**Hardware**
2. Größere Auflösung in **Teilen** des Detektors, z. B. Kegel um Myon \rightarrow Software, **Computerfarm**
3. Information von **Gesamtdetektor** \rightarrow Software, Computerfarm



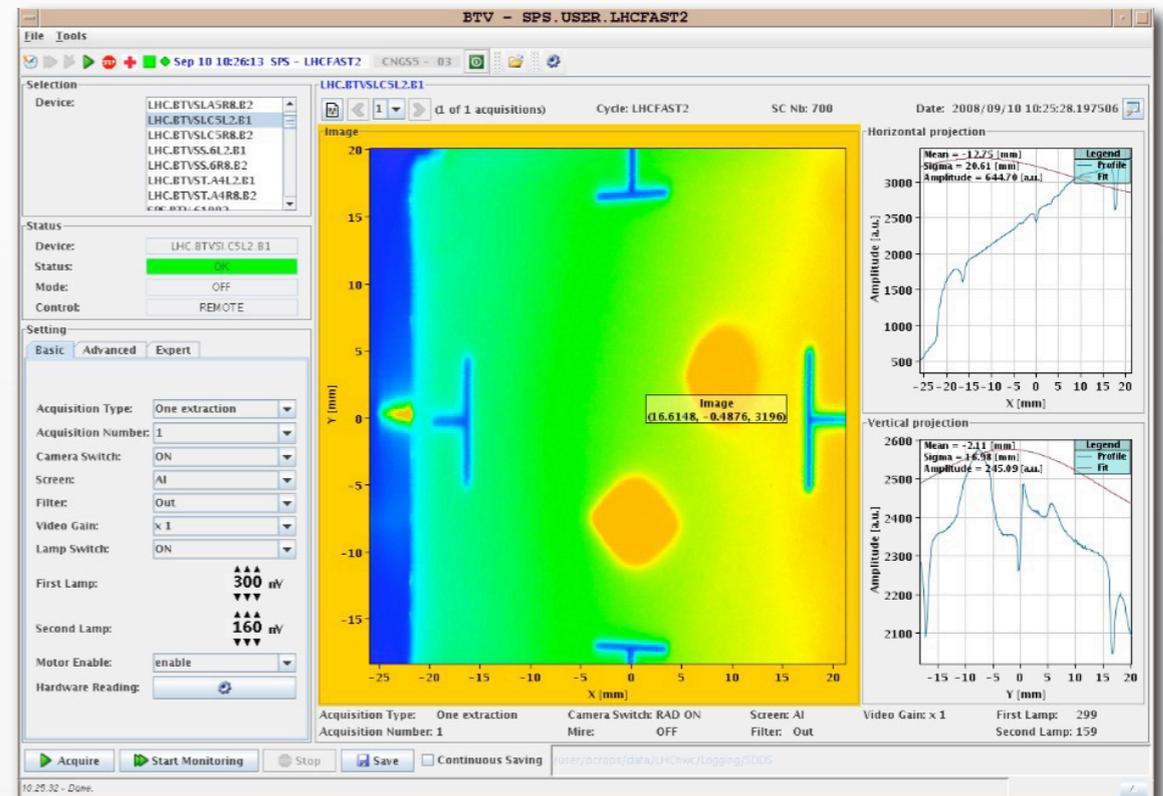
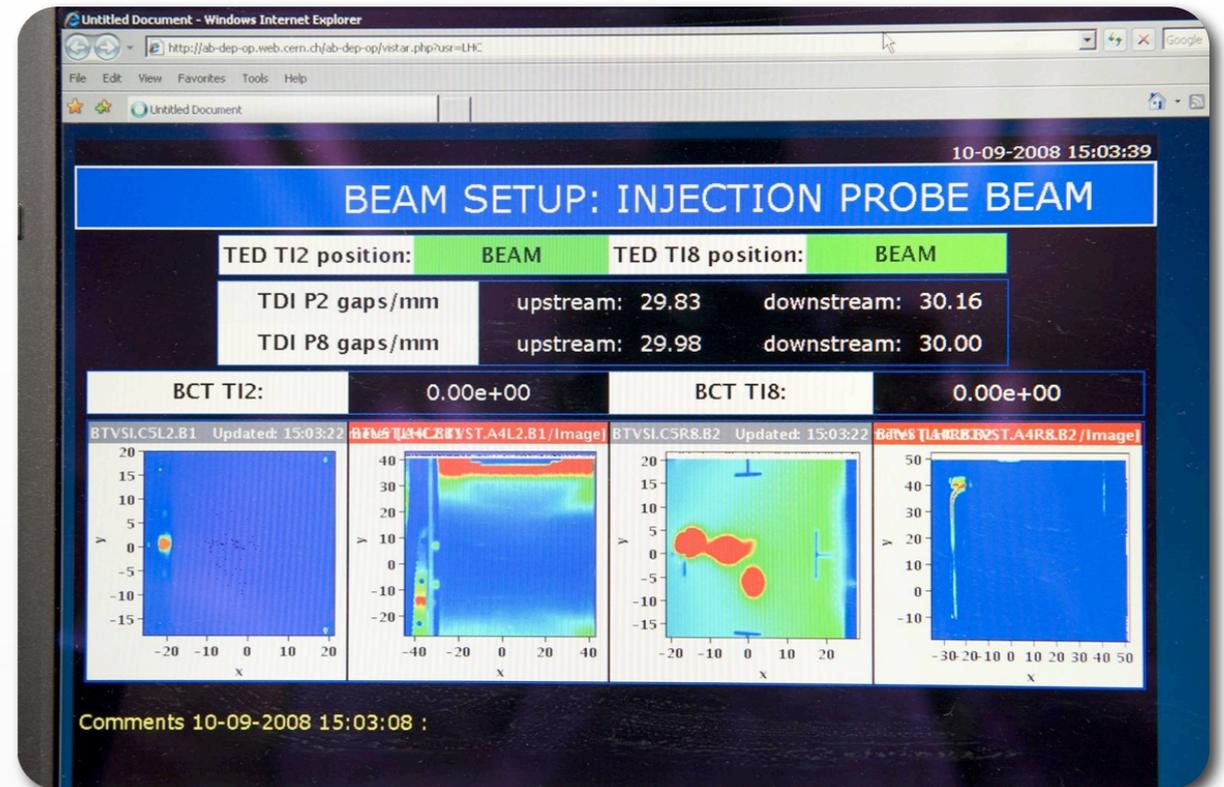
- Herausforderungen:
 - **Datenrate**: ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (CD-Stapel von 20 km Höhe)
 - **Prozessierung** (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: **Grid-Computing**
 - Rechenleistung und Speicherplatz **weltweit verteilt**
 - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die **Anwendung zu den Daten**
 - Name „Grid“: Analogie zu Stromnetz („power grid“)
 - LHC: Mehrstufiger („Multi-Tier“) Zugang



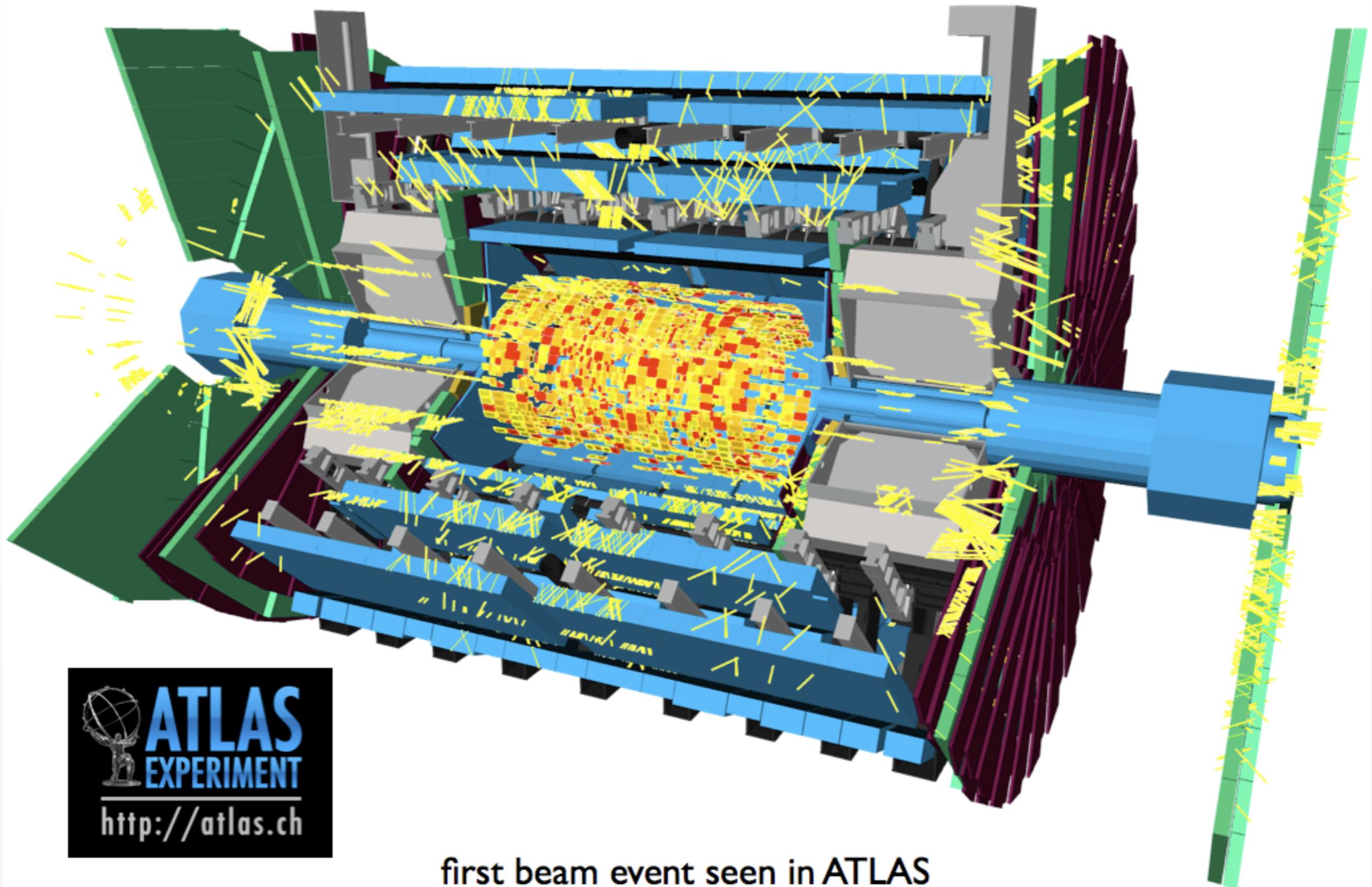
- Herausforderungen:
 - **Datenrate**: ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (CD-Stapel von 20 km Höhe)
 - **Prozessierung** (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: **Grid-Computing**
 - Rechenleistung und Speicherplatz **weltweit verteilt**
 - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die **Anwendung zu den Daten**
 - Name „Grid“: Analogie zu Stromnetz („power grid“)
 - LHC: Mehrstufiger („Multi-Tier“) Zugang



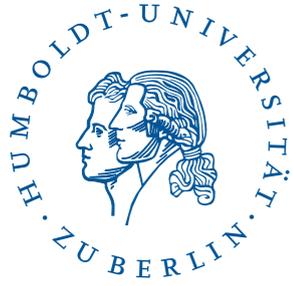
10. September 2008: Erster Strahl



10. September 2008: Erster Strahl



first beam event seen in ATLAS



Menschen am LHC

ATLAS: Über **2500 Mitarbeiter** von 169 Instituten in 37 Ländern
(davon ca. 700 Studierende/Doktoranden)



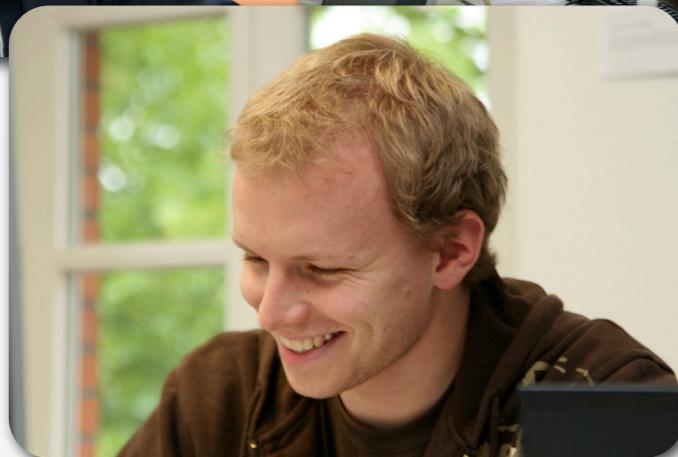
Faszination Internationalität

ATLAS: Über **2500 Mitarbeiter** von 169 Instituten in 37 Ländern
(davon ca. 700 Studierende/Doktoranden)



Argentina	Morocco
Armenia	Netherlands
Australia	Norway
Austria	Poland
Azerbaijan	Portugal
Belarus	Romania
Brazil	Russia
Canada	Serbia
Chile	Slovakia
China	Slovenia
Colombia	Spain
Czech Republic	Sweden
Denmark	Switzerland
France	Taiwan
Georgia	Turkey
Germany	UK
Greece	USA
Israel	CERN
Italy	JINR
Japan	

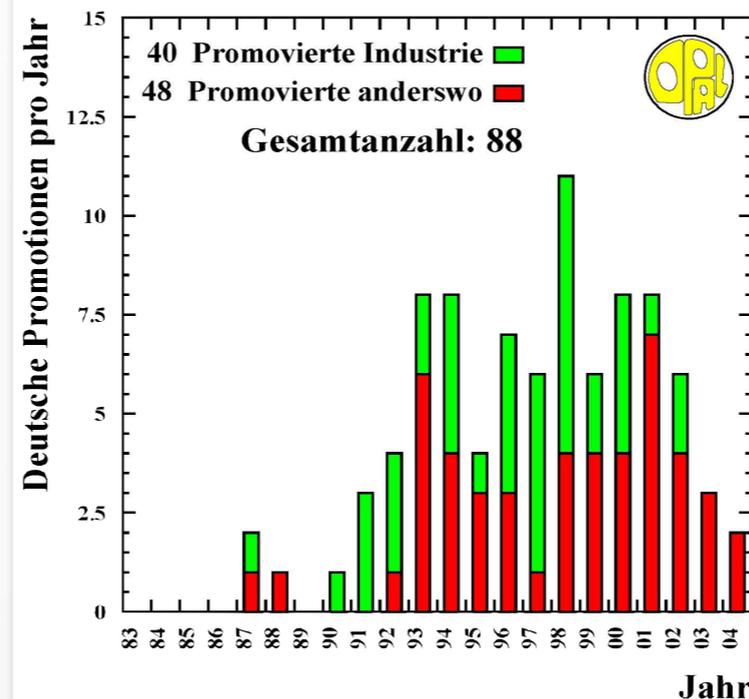
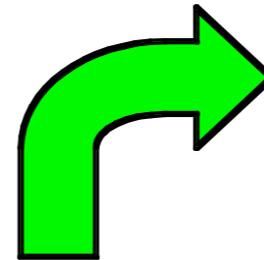




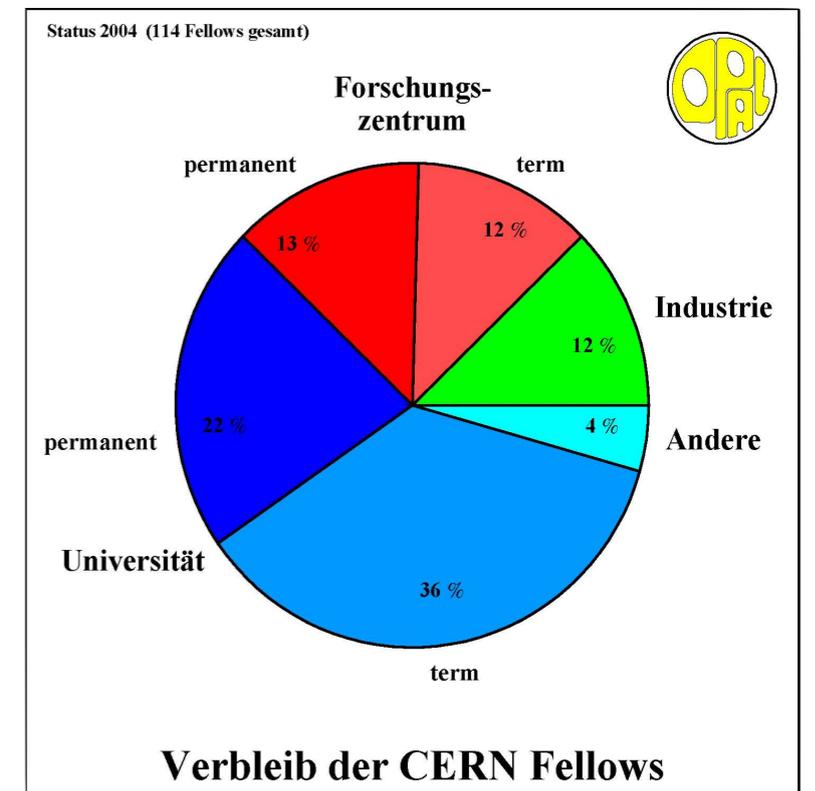
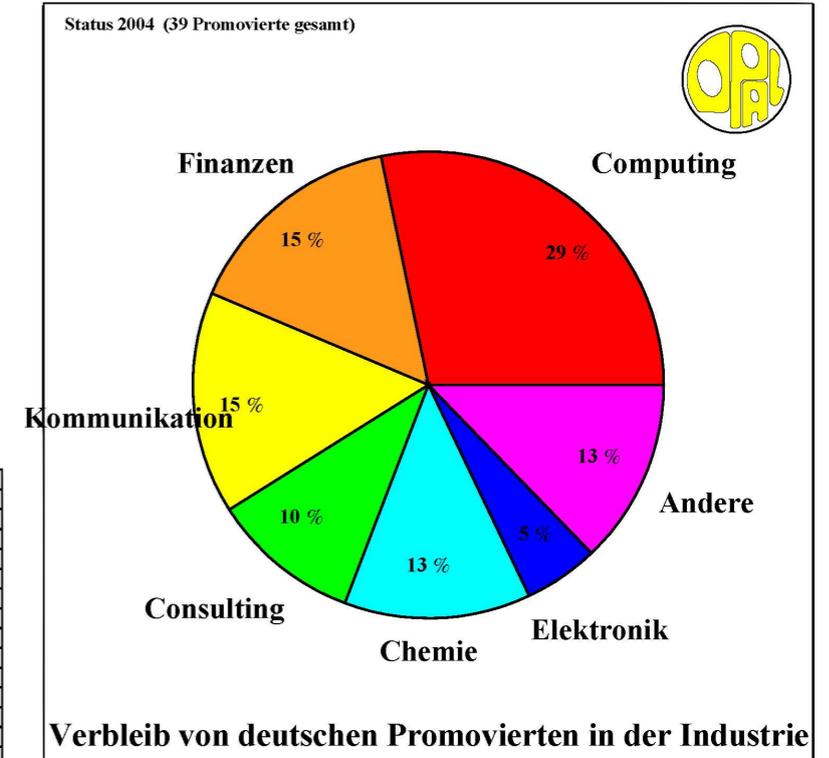
- Studierende bei ATLAS: nur eine/r unter 2500?
- Teil eines der **größten Forschungsprojekte** der Menschheit
- Komplexes System, Verantwortung für Teilgebiet → **Sichtbarkeit**
- Breite Ausbildung:
 - **Hardware**: Planung, Bau, Tests...
 - **Software**: Datenbanken, objektorientierte Programmierung, Simulationen, statistische Methoden...
 - **Schlüsselqualifikationen**: Teamarbeit, Zusammenarbeit mit Menschen aus unterschiedlichen Kulturkreisen, englischsprachige Kommunikation, konstruktive Konkurrenzsituation, ...

- **Hervorragende Berufsaussichten!**
- Absolventinnen und Absolventen begehrt in Industrie und Forschung
- Arbeitslosigkeit <2%, vgl. Durchschnitt 2007: 8.5%)
- **Schlüsselqualifikationen** auch in der Industrie begehrt:
 - Problemlösung
 - Team- und Kommunikationsfähigkeit
 - Internationalität/ Fremdsprachen
 - EDV-Kenntnisse

50% Industrie



50% Unis oder Forschungszentren, z.B. CERN Fellows





- Teilchenphysik und Kosmologie: viele Antworten, aber noch mehr Fragen:
 - Warum ist die Gravitation so schwach?
 - Woraus besteht Dunkle Materie?
 - Warum gibt es im Universum Materie, aber fast keine Antimaterie?
- LHC: Anbruch einer neuen Ära der Teilchenphysik
 - Unerreichte Kollisionsenergien
 - Teilchendetektoren: präzise Vermessung der Kollisionen
 - 2008: erster Strahl