



*Tag der Wissenschaften
Friedrich-Gymnasium Luckenwalde
15. Februar 2010*



Urknall im Labor

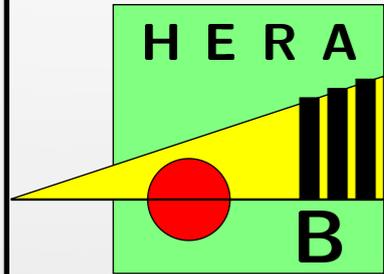
Teilchenphysik am Large Hadron Collider

*Ulrich Husemann
Universität Heidelberg &
Deutsches Elektronen-Synchrotron*

Wer bin ich?



tu technische universität
dortmund



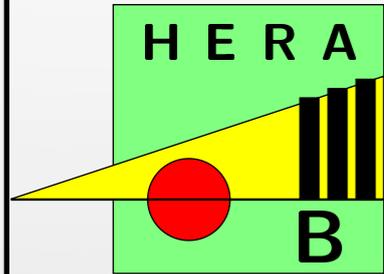
 UNIVERSITÄT
SIEGEN

- Diplomstudium Physik (Dortmund, 1995–2001)
- Promotion Physik (Dortmund und Siegen, 2001–2005)
- Diplom- und Doktorarbeit beim HERA-B-Experiment (DESY)

Wer bin ich?



tu technische universität
dortmund



- Diplomstudium Physik (Dortmund, 1995–2001)
- Promotion Physik (Dortmund und Siegen, 2001–2005)
- Diplom- und Doktorarbeit beim HERA-B-Experiment (DESY)

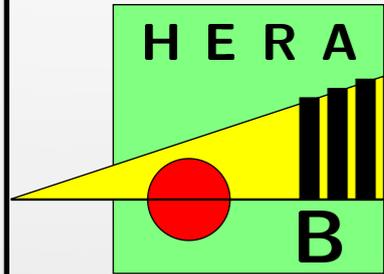
- Postdoc (Rochester und Yale, 2005–2008)
- Forschung am CDF-Experiment (Fermilab, bei Chicago)



Wer bin ich?

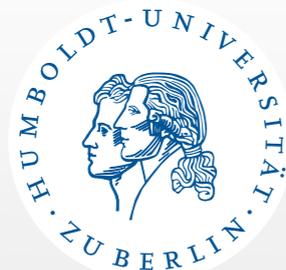


tu technische universität
dortmund



- Diplomstudium Physik (Dortmund, 1995–2001)
- Promotion Physik (Dortmund und Siegen, 2001–2005)
- Diplom- und Doktorarbeit beim HERA-B-Experiment (DESY)

- Postdoc (Rochester und Yale, 2005–2008)
- Forschung am CDF-Experiment (Fermilab, bei Chicago)



- Nachwuchsgruppenleiter bei DESY/HU Berlin (seit 2008), derzeit auf Vertretungsprofessur in Heidelberg
- Forschung am ATLAS-Experiment

Was ist DESY?



- DESY = Deutsches Elektronen-Synchrotron
- Nationales Forschungszentrum in der Helmholtz-Gemeinschaft
- Zwei Standorte: Hamburg (seit 1959) und Zeuthen (seit 1992)
- Zahlen und Fakten
 - Jahresetat: 192 Millionen Euro (90% Bund, 10% Hamburg und Brandenburg)
 - Mitarbeiter: ca. 2000 (davon ca. 650 Wissenschaftler), mehr als 100 junge Menschen in Berufsausbildung
- Forschungsschwerpunkte:
 - Teilchenbeschleuniger
 - Forschung mit Photonen
 - **Elementarteilchenphysik**



Wissenschaft heißt: Fragen stellen!



Wissenschaft heißt: Fragen stellen!



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

Weil du von der Erde
angezogen wirst.

Wissenschaft heißt: Fragen stellen!



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.

Wissenschaft heißt: Fragen stellen!



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?

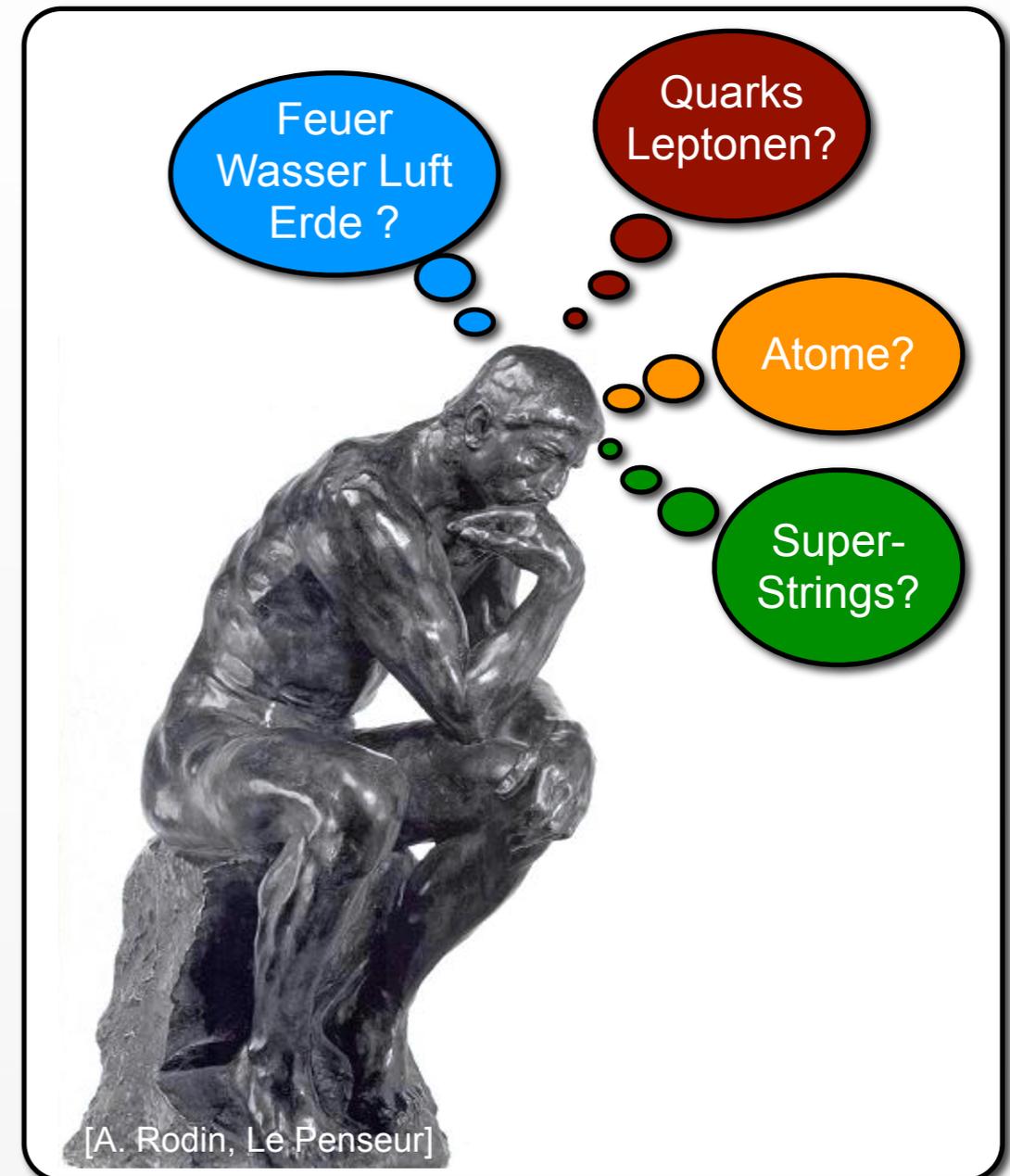
Weil du eine Masse hast und Massen sich anziehen.

Warum habe ich eine Masse?

???

- Wir 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
- Mein Ziel für heute: eure **Neugier auf die Natur** wecken und wachhalten
- Habt ihr 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:**
 - Experimente betrieben zusammen mit Instituten aus ca. 40 Nationen
 - Tausende Kolleginnen und Kollegen aus aller Welt





Was ist der Ursprung der Masse?

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG

In wie vielen Dimensionen leben wir?

Fragen an den Large Hadron Collider am CERN

Wie unterscheiden sich Materie und Antimaterie?

WELT MASCHINE

AUSSTELLUNG DER UNIVERSITÄT HEIDELBERG
28.11. - 20.12.2009 • MO - SO 10 - 18 UHR • KIRCHHOFF-INSTITUT,
IM NEUENHEIMER FELD 227 • WWW.WELTMASCHINE-HEIDELBERG.DE

Bundesministerium für Bildung und Forschung

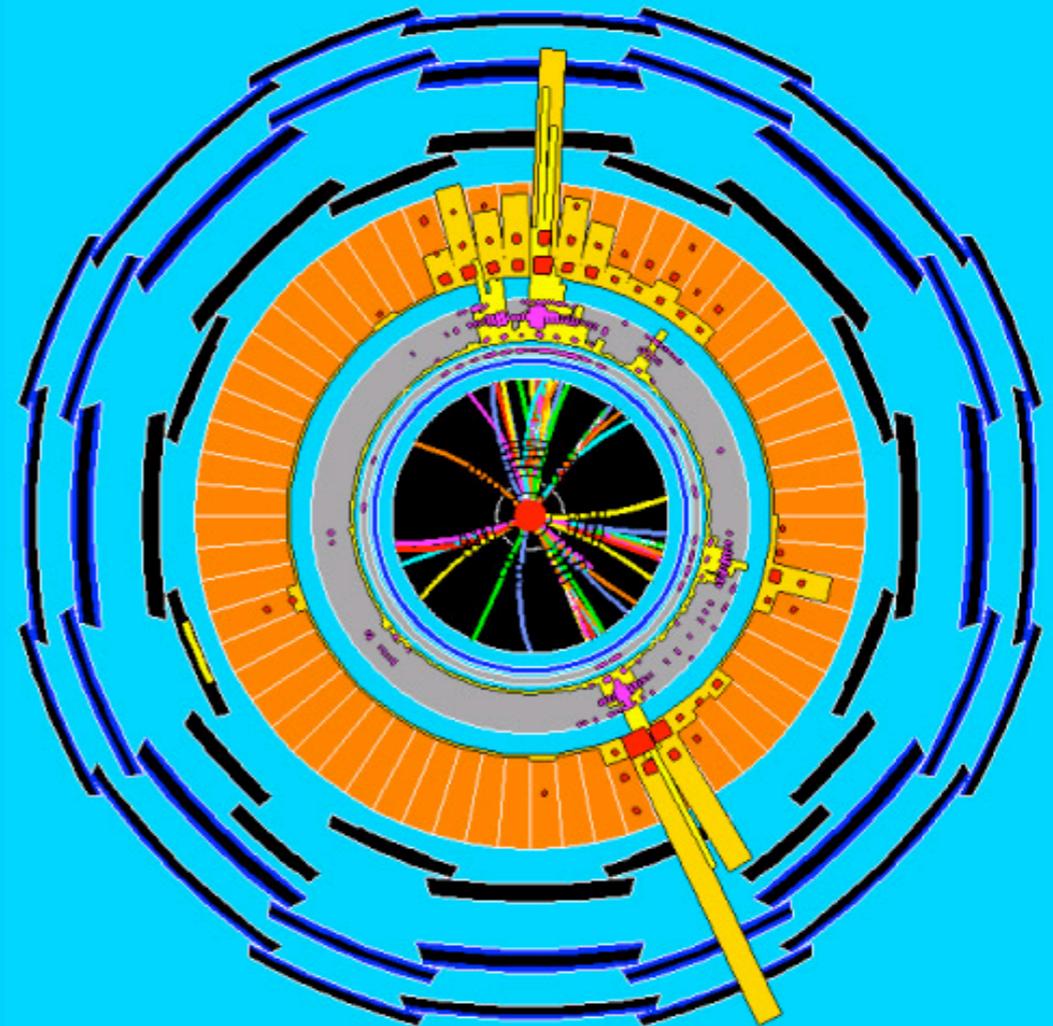
CERN

- **Large Hadron Collider (LHC)** – die „Weltmaschine“
- Protonen werden auf die **höchsten Energien** beschleunigt
- **Kollision** der Protonen inmitten empfindlicher Detektoren
- LHC-Experimente sollen Erkenntnisse bringen über **fundamentale Bausteine und Kräfte** in der Natur
- DESY-Physikerinnen und Physiker nehmen mit Kollegen aus aller Welt aktiv an LHC-Experimenten teil

- „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 Δp → Auflösung **kleinerer Strukturen**



A. Einstein

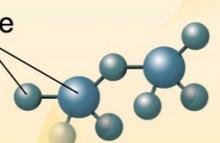
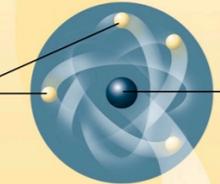
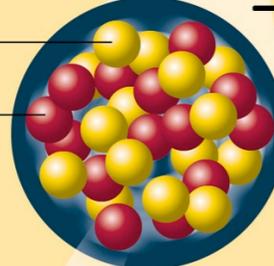
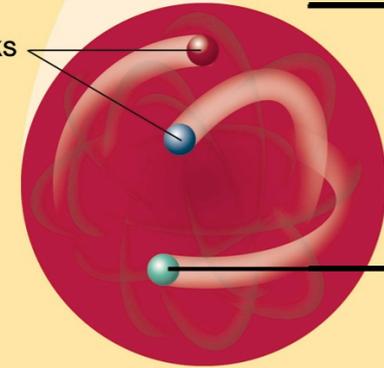
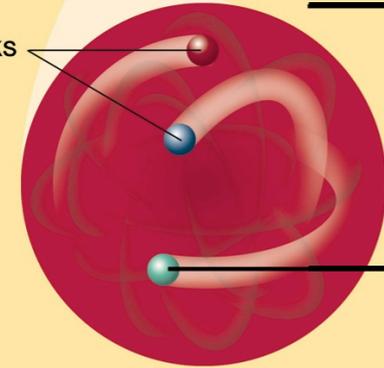


W. Heisenberg



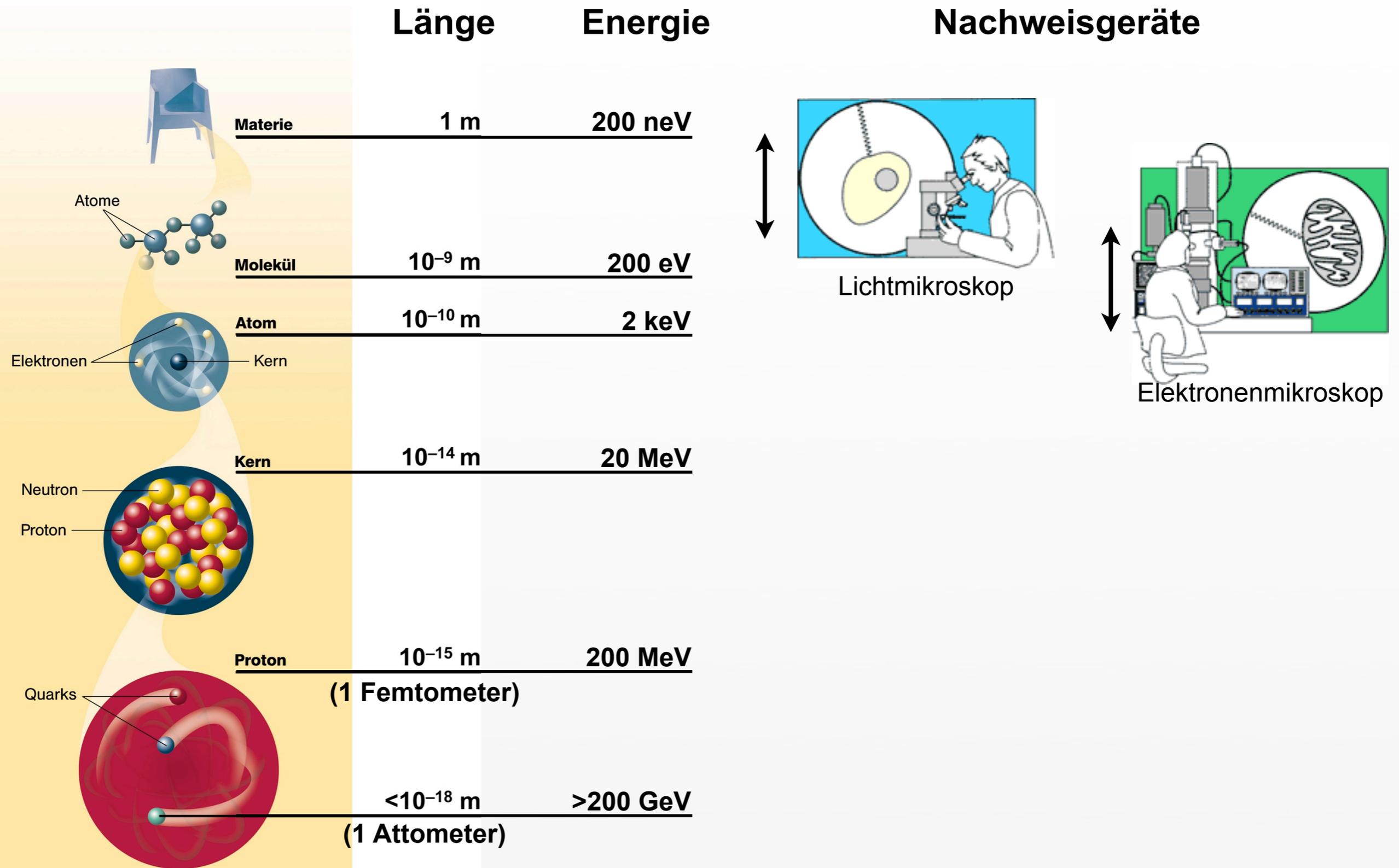
Größenordnungen



| | Länge | Energie |
|--|--------------------------------|----------|
|  Materie | 1 m | 200 neV |
|  Molekül | 10^{-9} m | 200 eV |
|  Atom | 10^{-10} m | 2 keV |
|  Kern | 10^{-14} m | 20 MeV |
|  Proton | 10^{-15} m (1 Femtometer) | 200 MeV |
|  Quarks | $<10^{-18}$ m (1 Attometer) | >200 GeV |

[DESY]

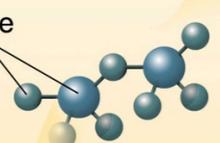
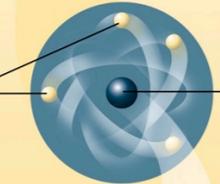
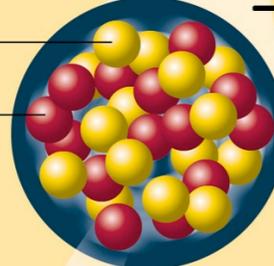
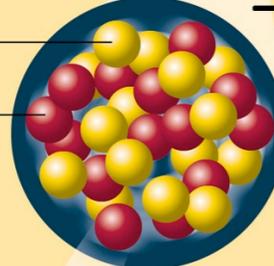
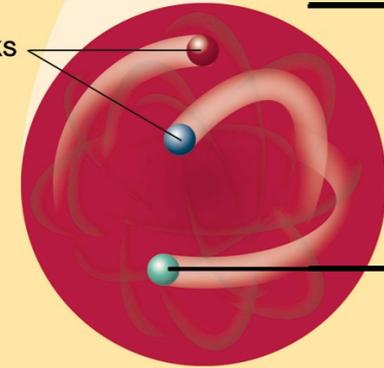
Größenordnungen

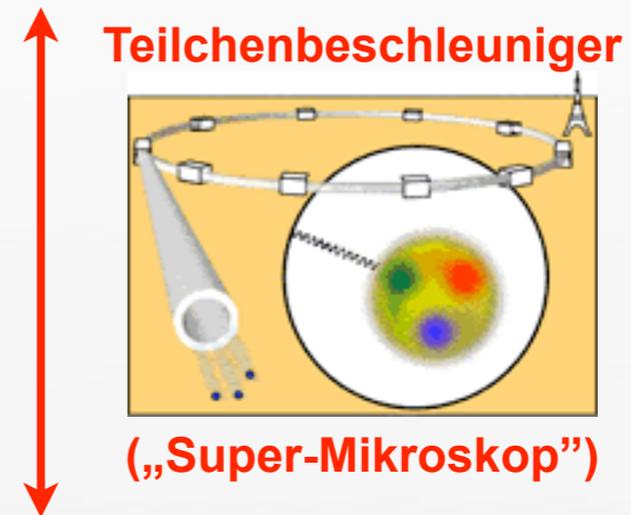
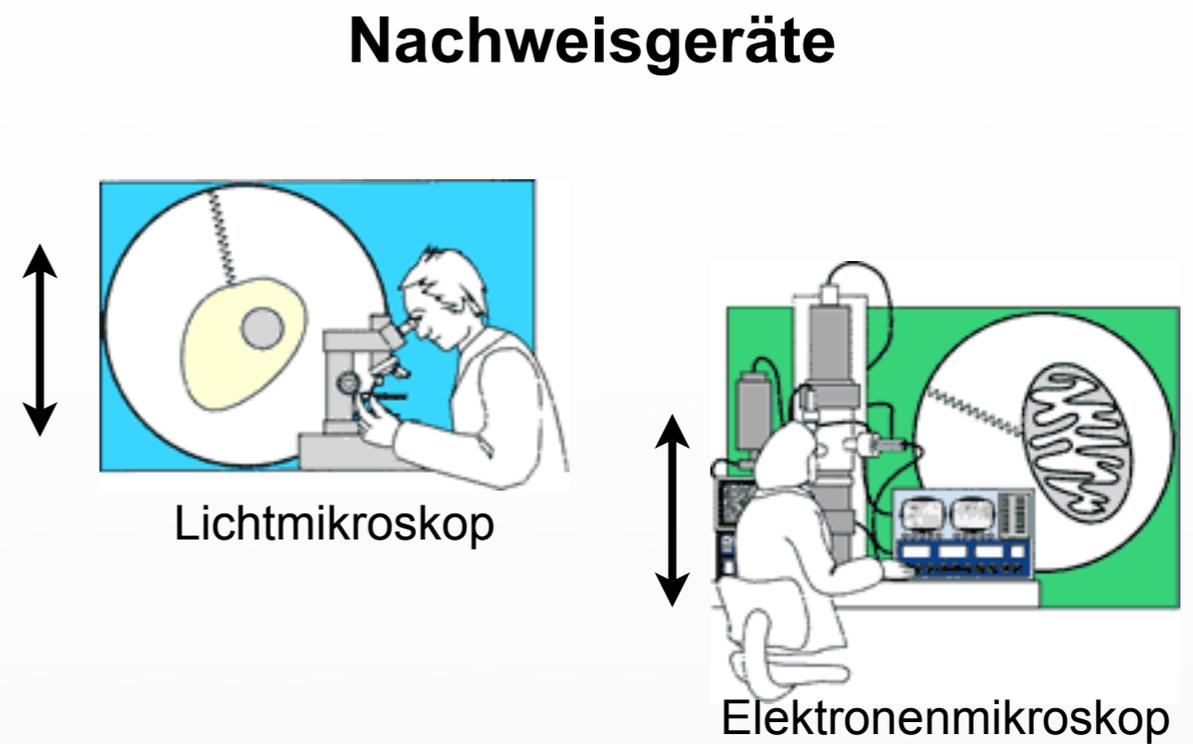


[DESY]

Größenordnungen



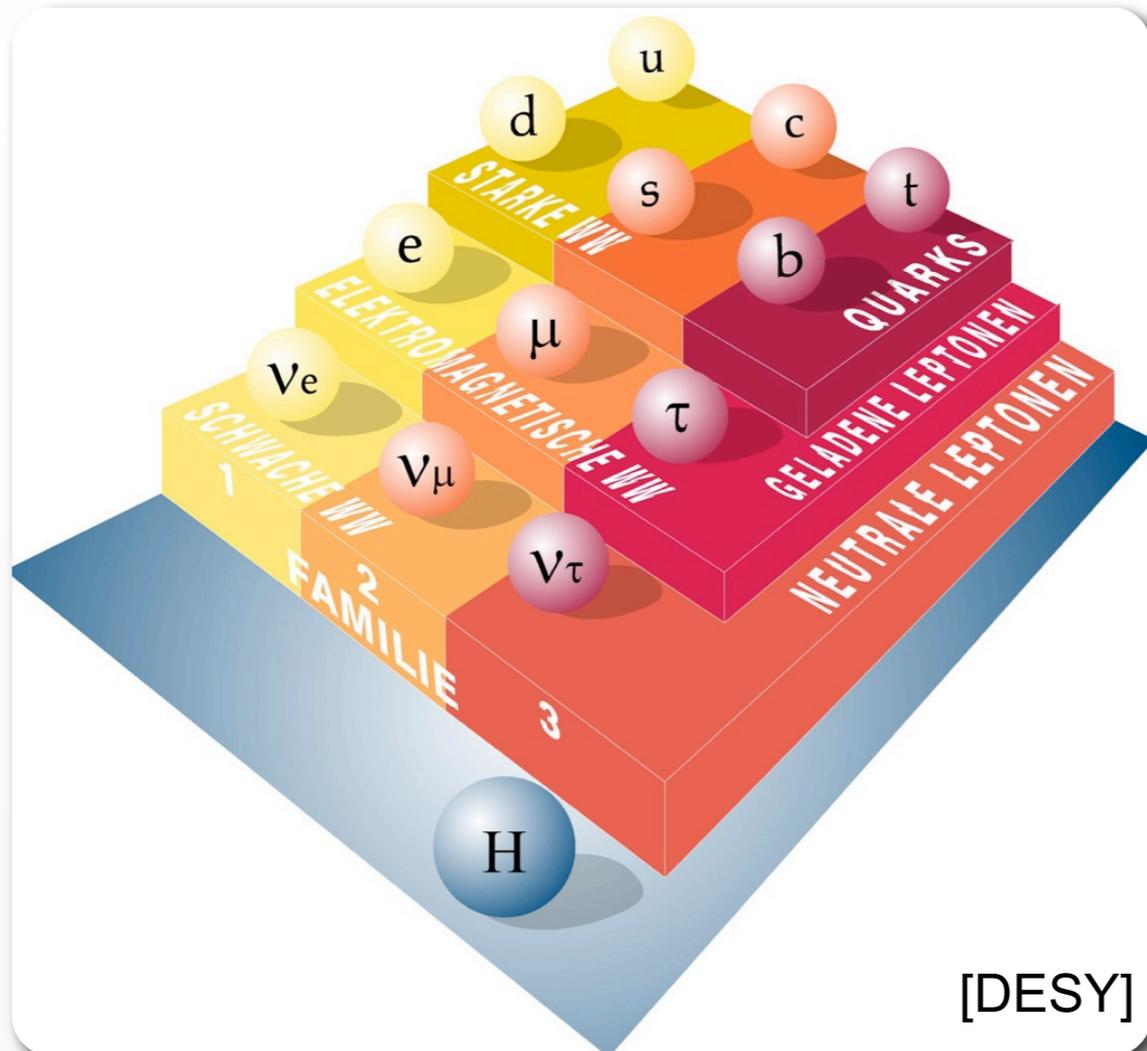
| | Länge | Energie |
|--|--------------------------------|----------|
|  <p>Materie</p> | 1 m | 200 neV |
|  <p>Molekül</p> | 10^{-9} m | 200 eV |
|  <p>Atom</p> | 10^{-10} m | 2 keV |
|  <p>Kern</p> | 10^{-14} m | 20 MeV |
|  <p>Proton</p> | 10^{-15} m (1 Femtometer) | 200 MeV |
|  <p>Quarks</p> | $<10^{-18}$ m (1 Attometer) | >200 GeV |



[DESY]

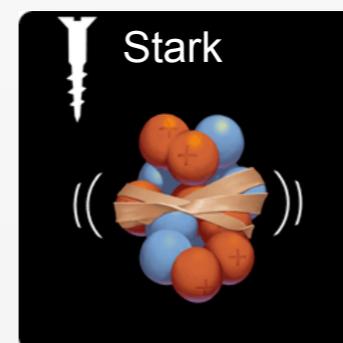
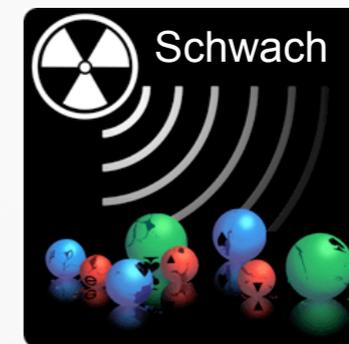
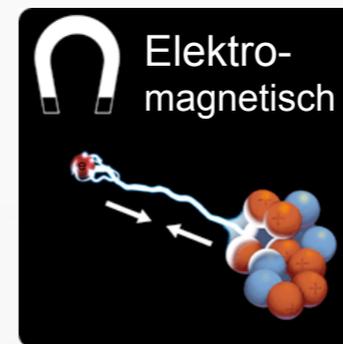


Teilchenphysik: Was wir wissen und was wir nicht wissen

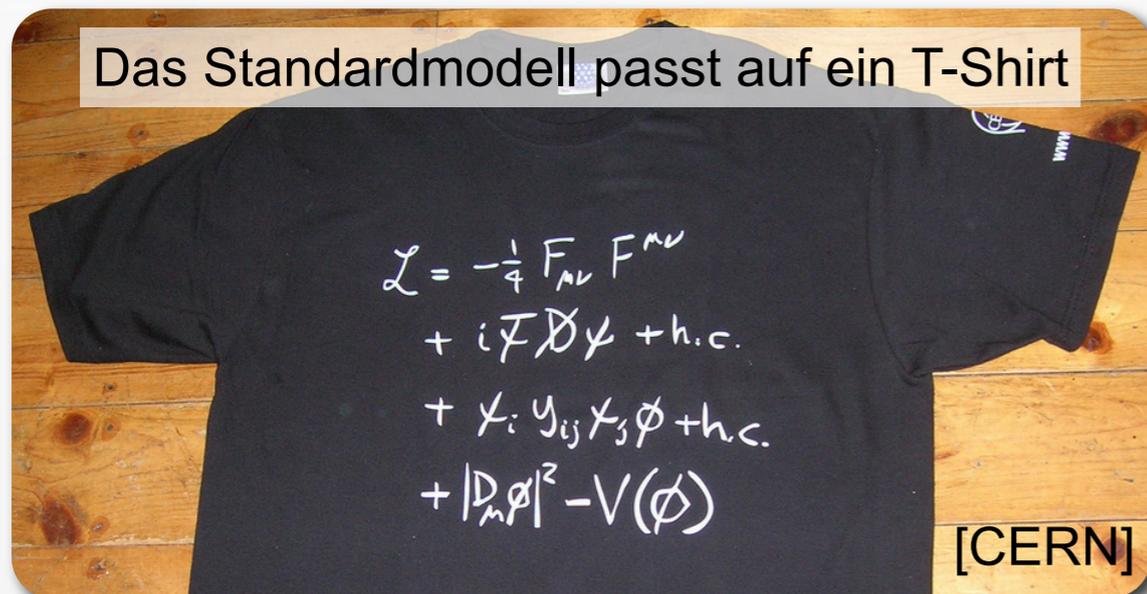


[DESY]

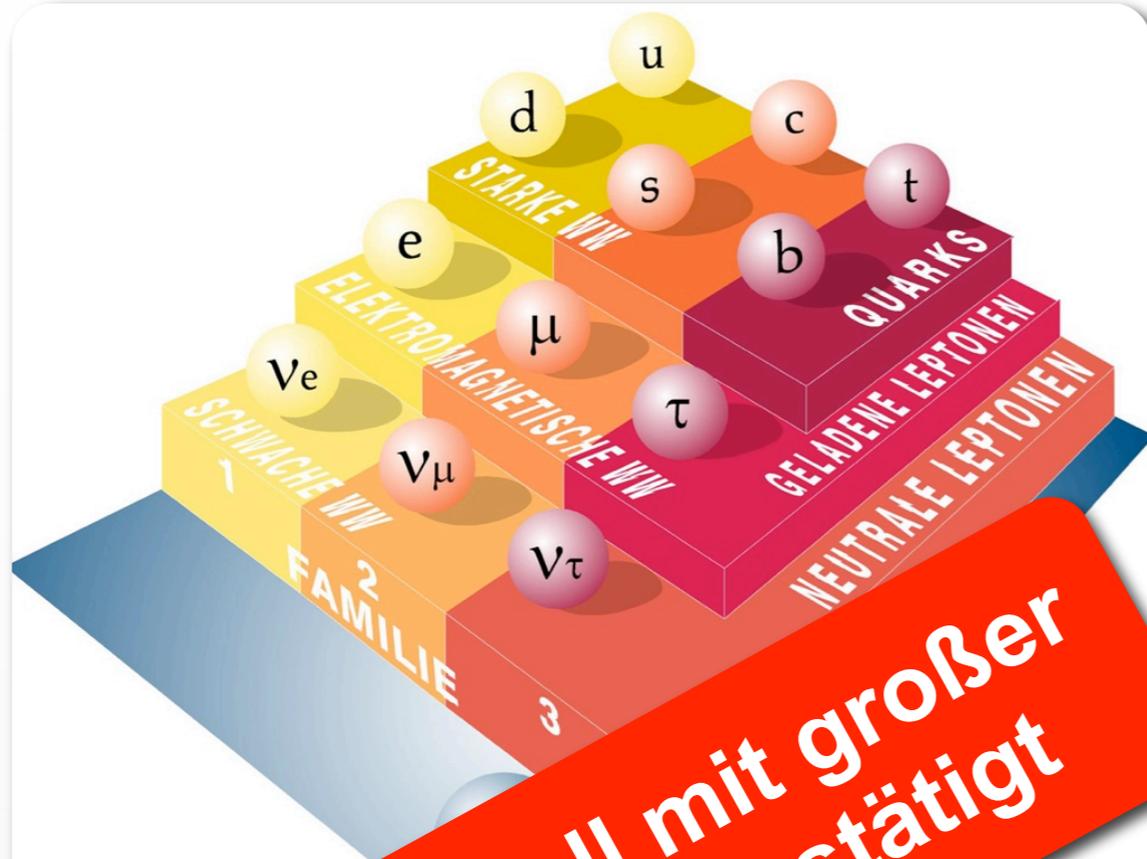
- **Teilchen** im „Standardmodell der Teilchenphysik“
- **12 Elementarteilchen**, jedes mit Antiteilchen
- 6 Quarks und 6 Leptonen
- Anordnung in **3 Familien** mit unterschiedlichen Massen
- **Kräfte** im Standardmodell



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



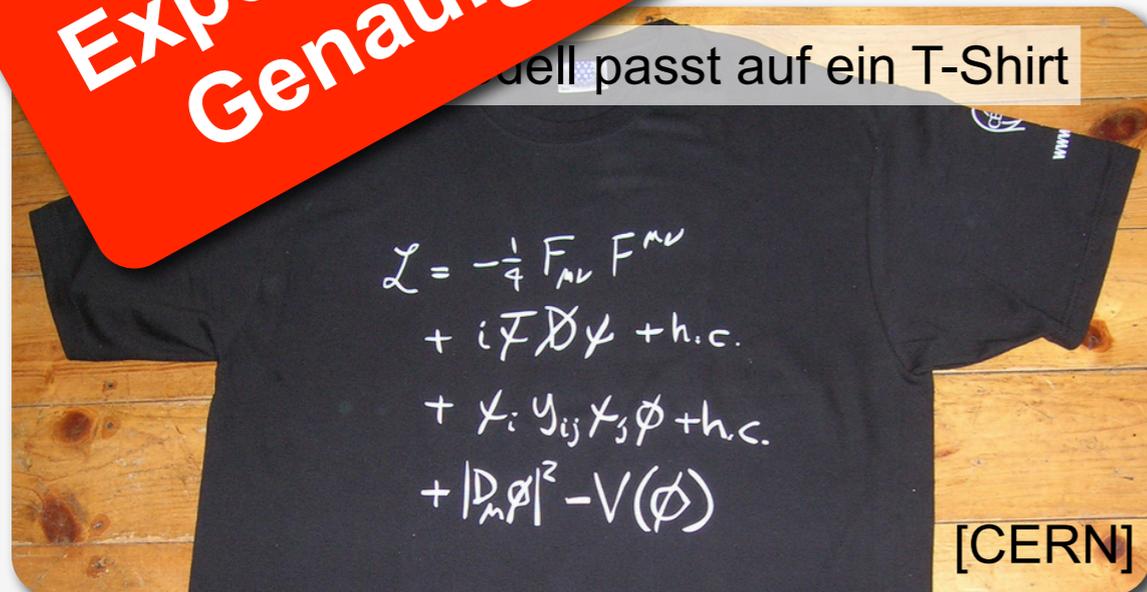
[CERN]



[DESY]

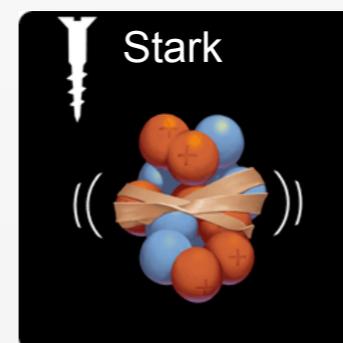
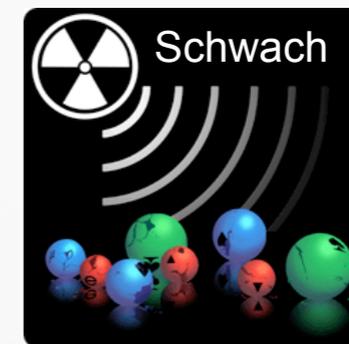
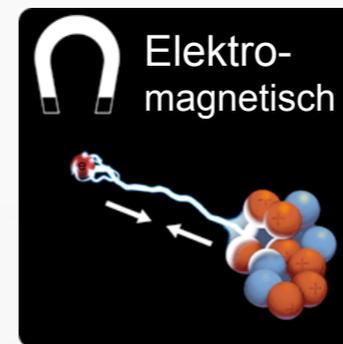
Experimentell mit großer Genauigkeit bestätigt

...modell passt auf ein T-Shirt



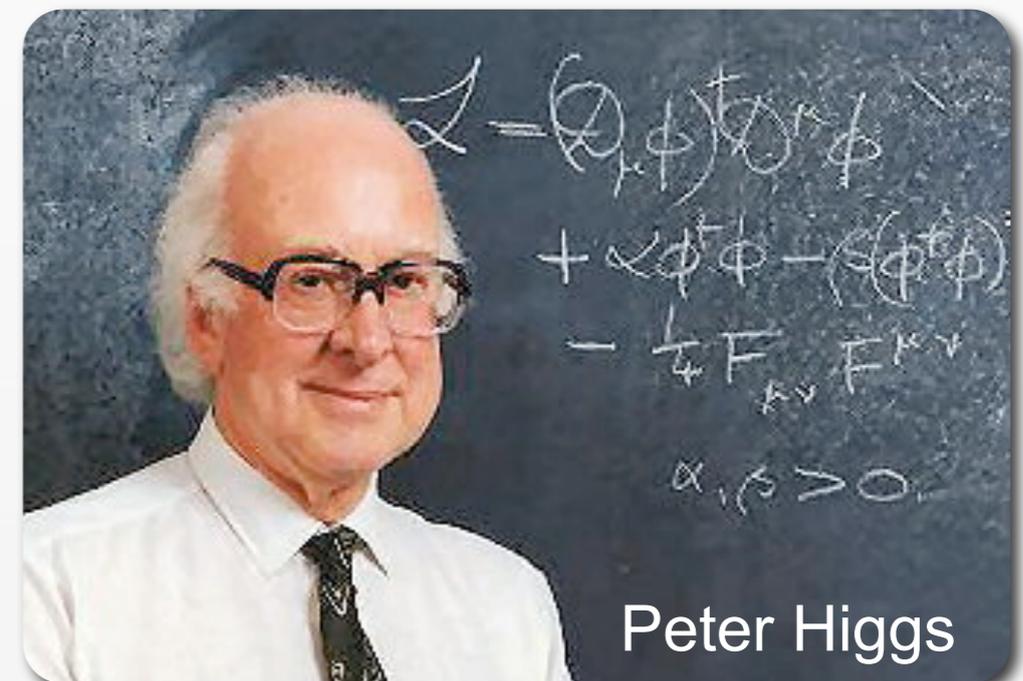
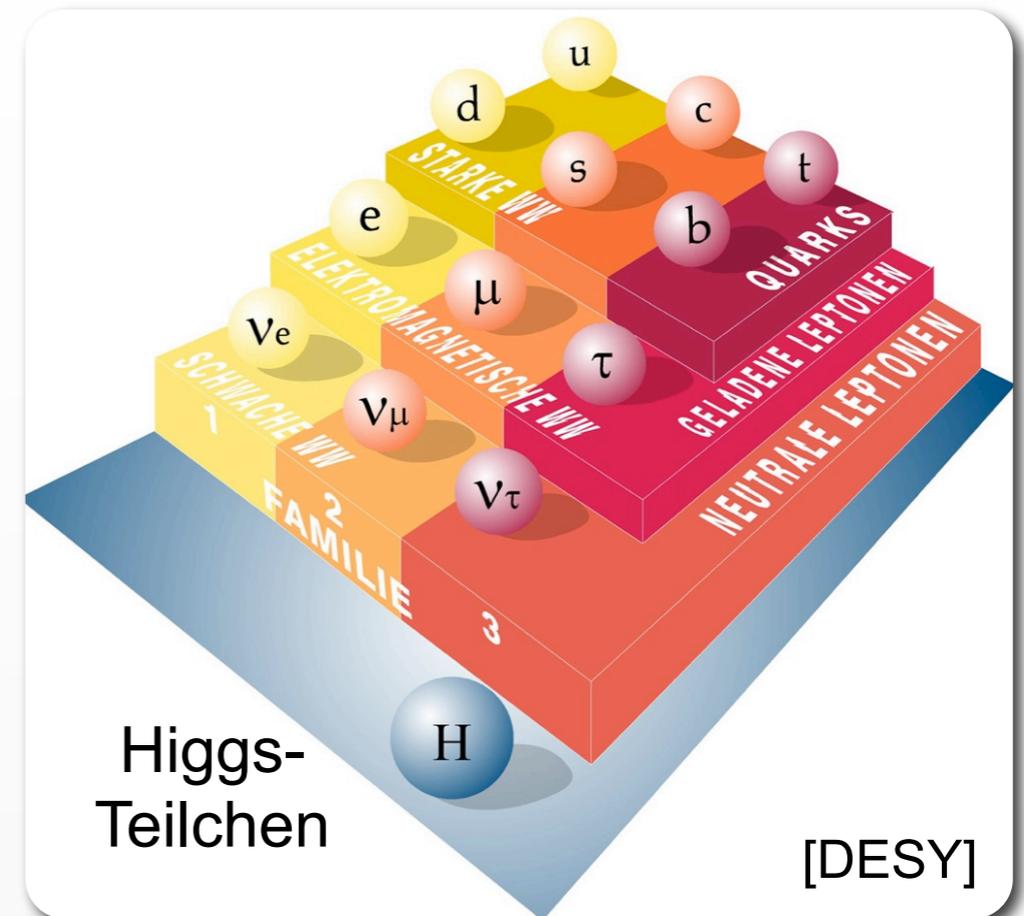
[CERN]

- **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 **Elementarteilchen Masse** (die Masse zusammengesetzter Teilchen ist komplizierter!)
 - Fieberhafte Suche, aber noch **nicht experimentell nachgewiesen**





Wie Elementarteilchen Masse bekommen:

[D. Miller]

Wie Elementarteilchen Masse bekommen:

Gäste bei einer Cocktailparty (=Higgs-Feld)



[D. Miller]

Wie Elementarteilchen Masse bekommen:

Prominente betritt den Raum, wird von Gästen umringt, kommt nur langsam voran → Trägheit = Masse



[D. Miller]



Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:

[D. Miller]

Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:



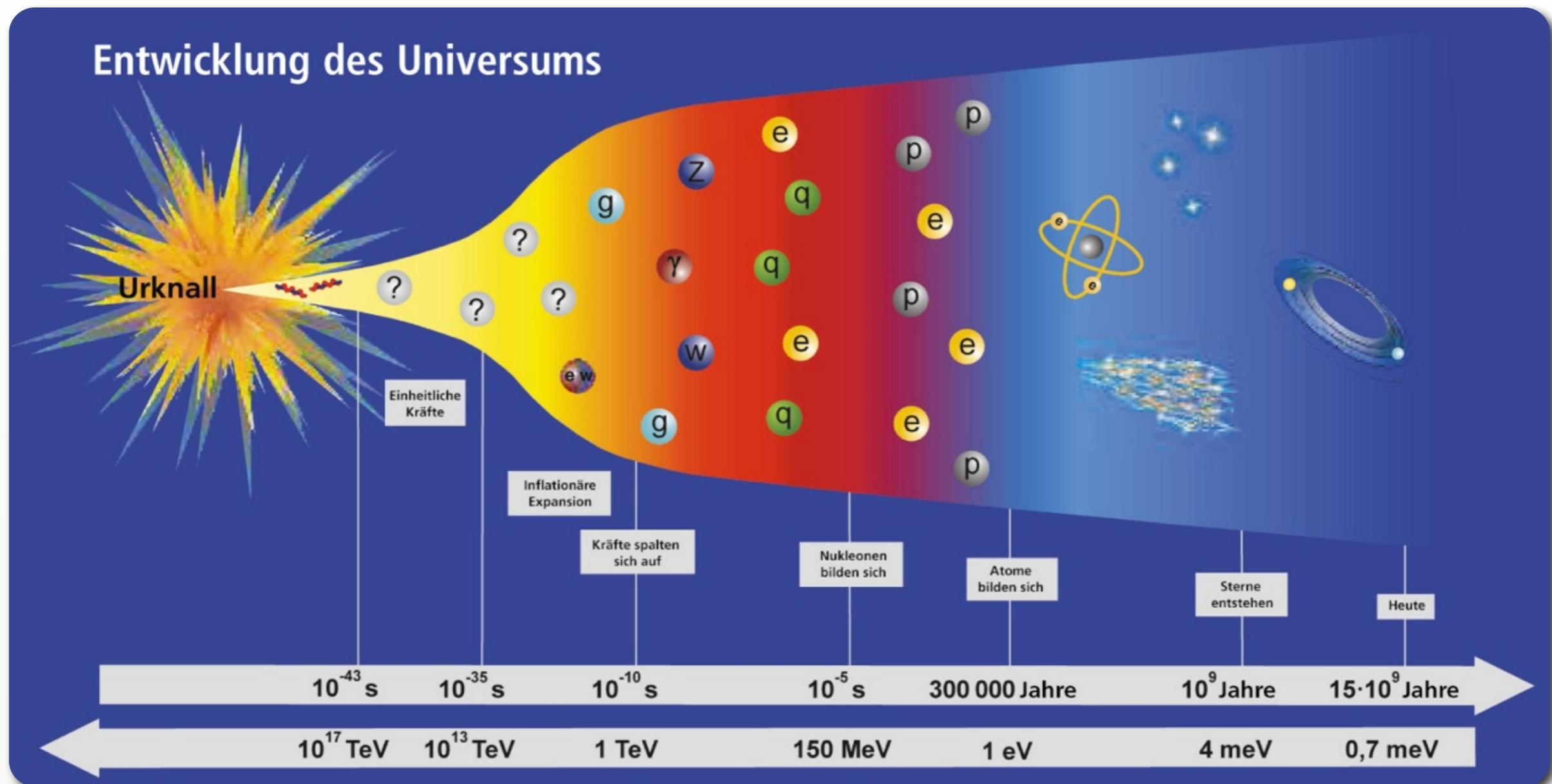
[D. Miller]

Wie das Higgs-Teilchen Masse bekommt:

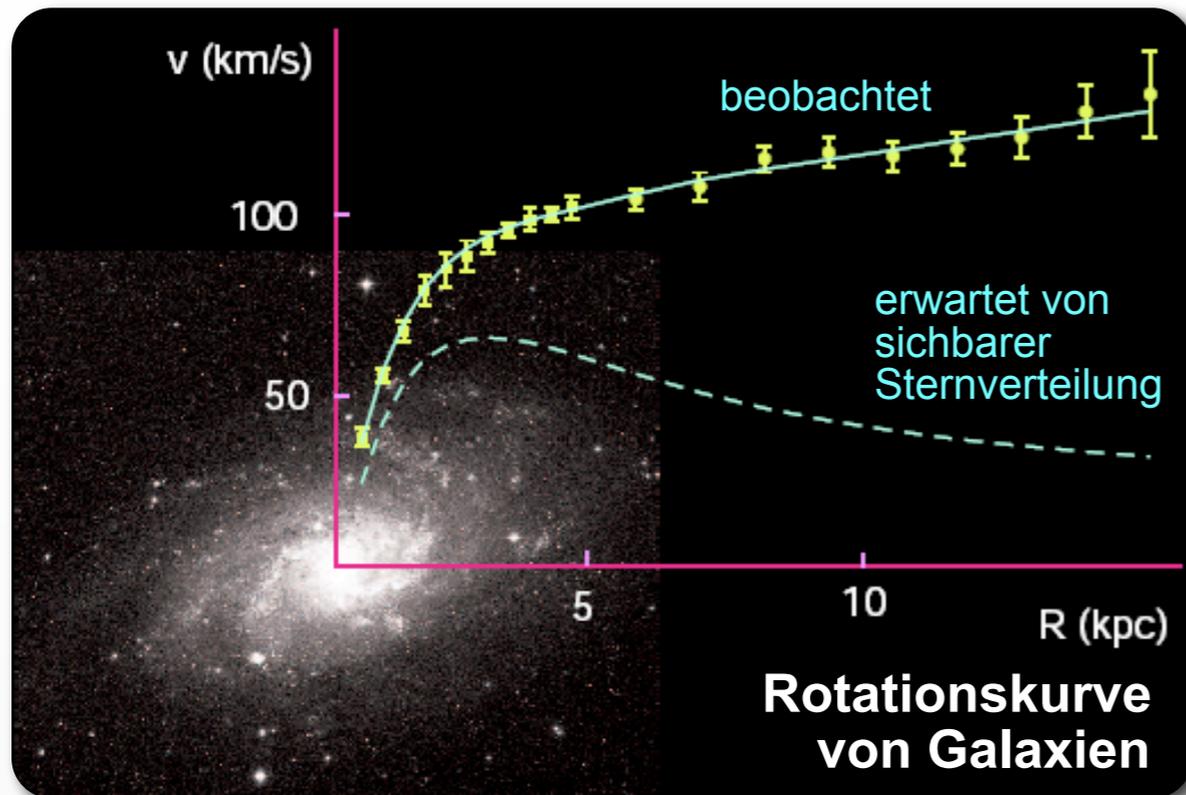
Gerücht verbreitet sich langsam (Trägheit = Higgs-Masse)



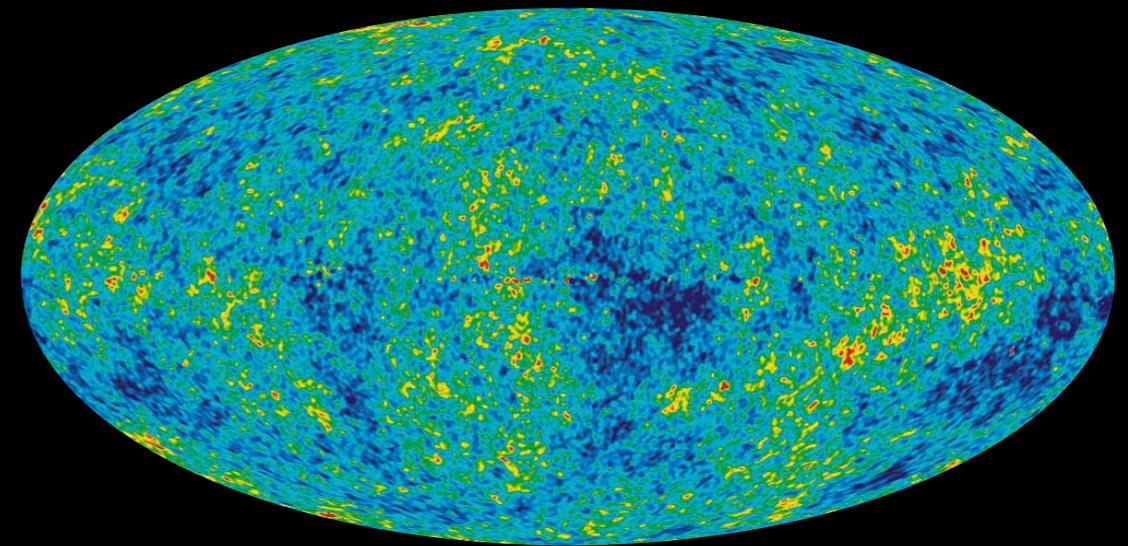
[D. Miller]



- Seit 10–15 Jahren: **Präzisionsmessungen** zur Entwicklung des Universums seit dem Urknall → „Standardmodell der Kosmologie“
- Passen Teilchenphysik und Kosmologie zusammen?

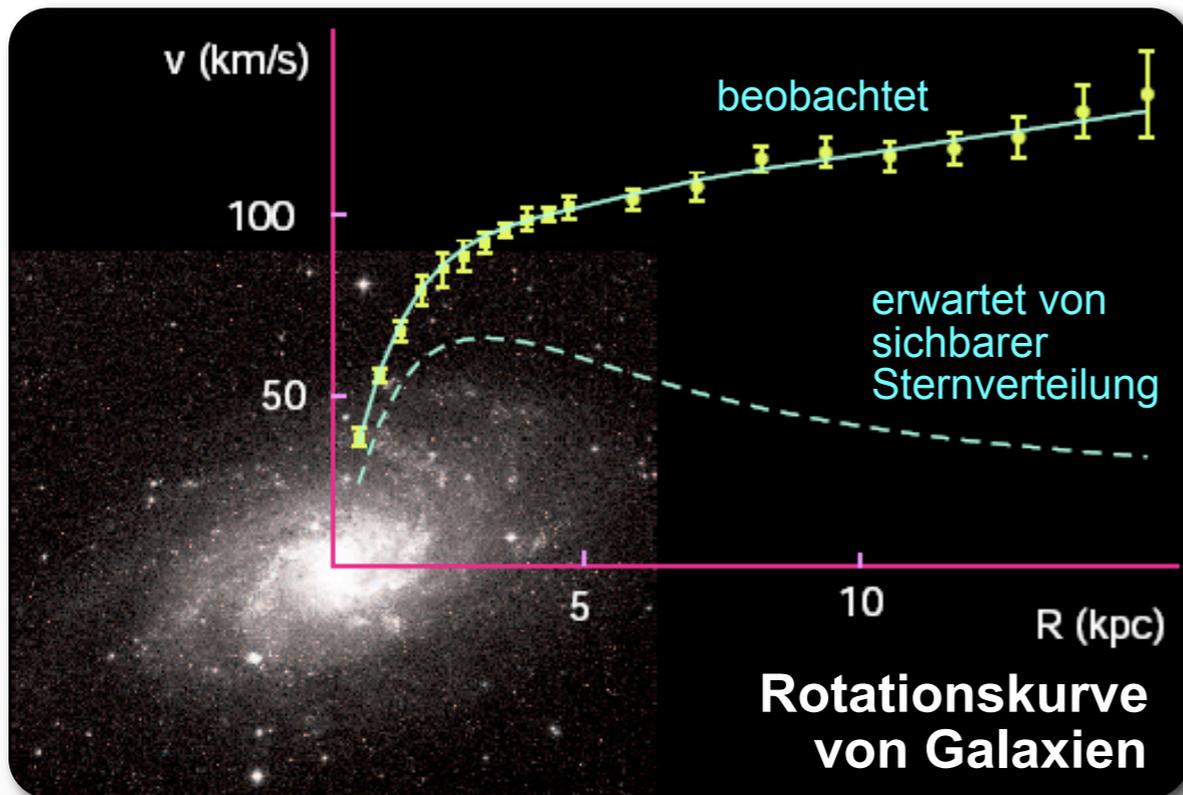


Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

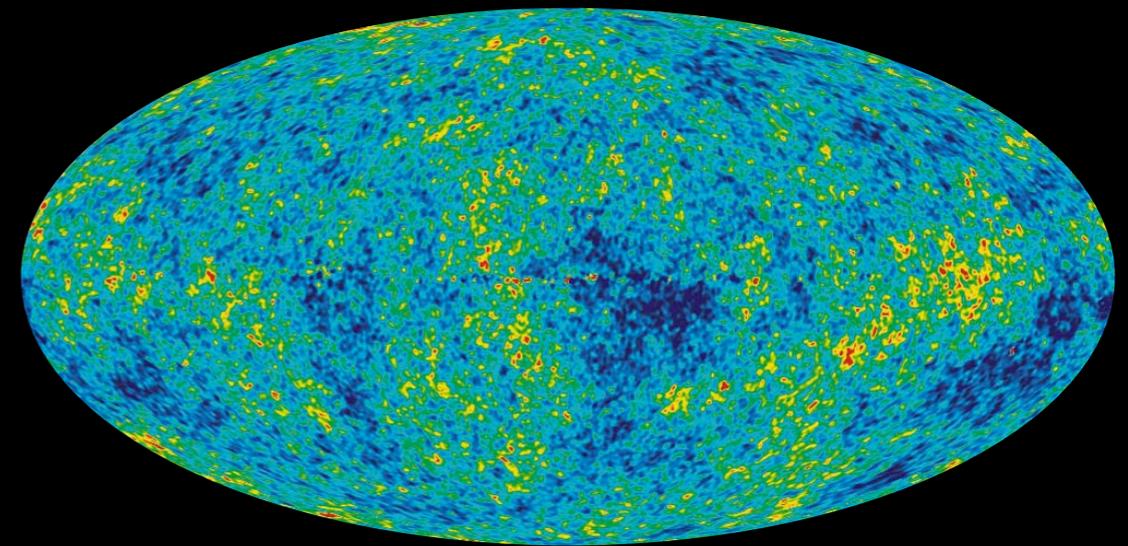


[WMAP-Satellit]

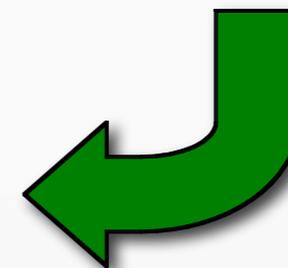
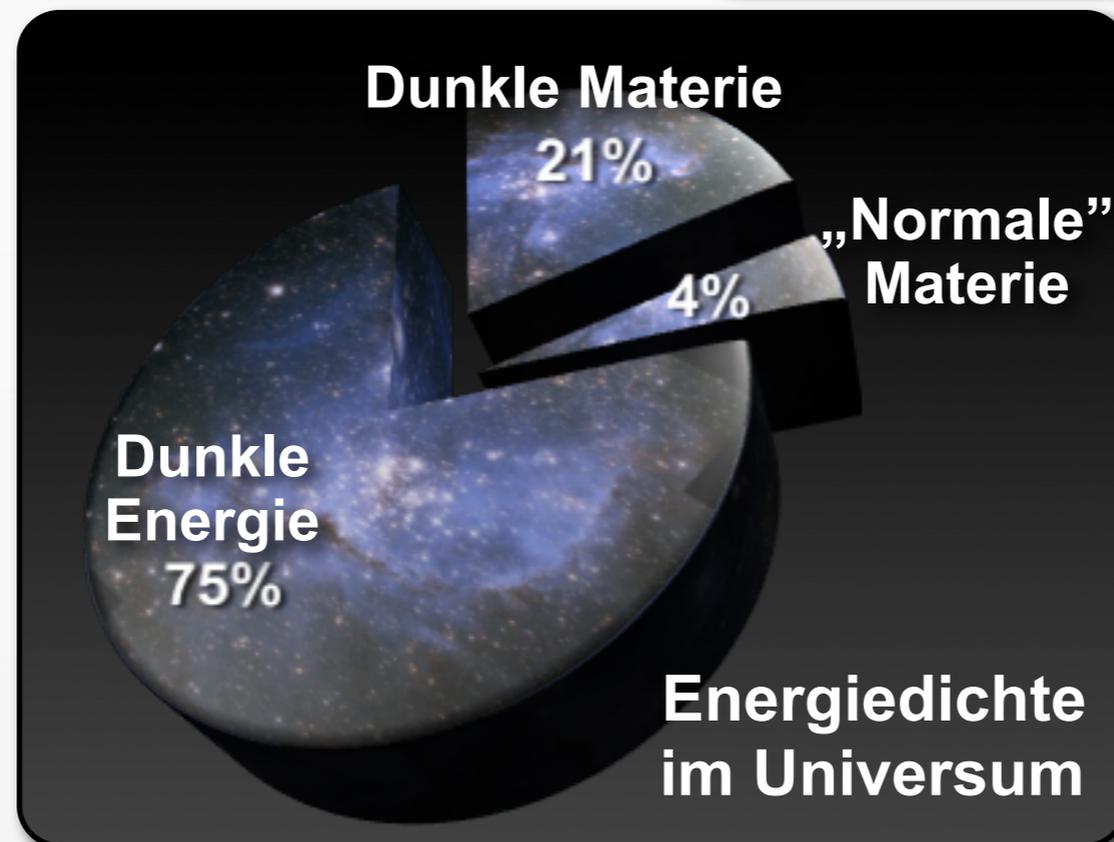
Dunkle Materie und Dunkle Energie



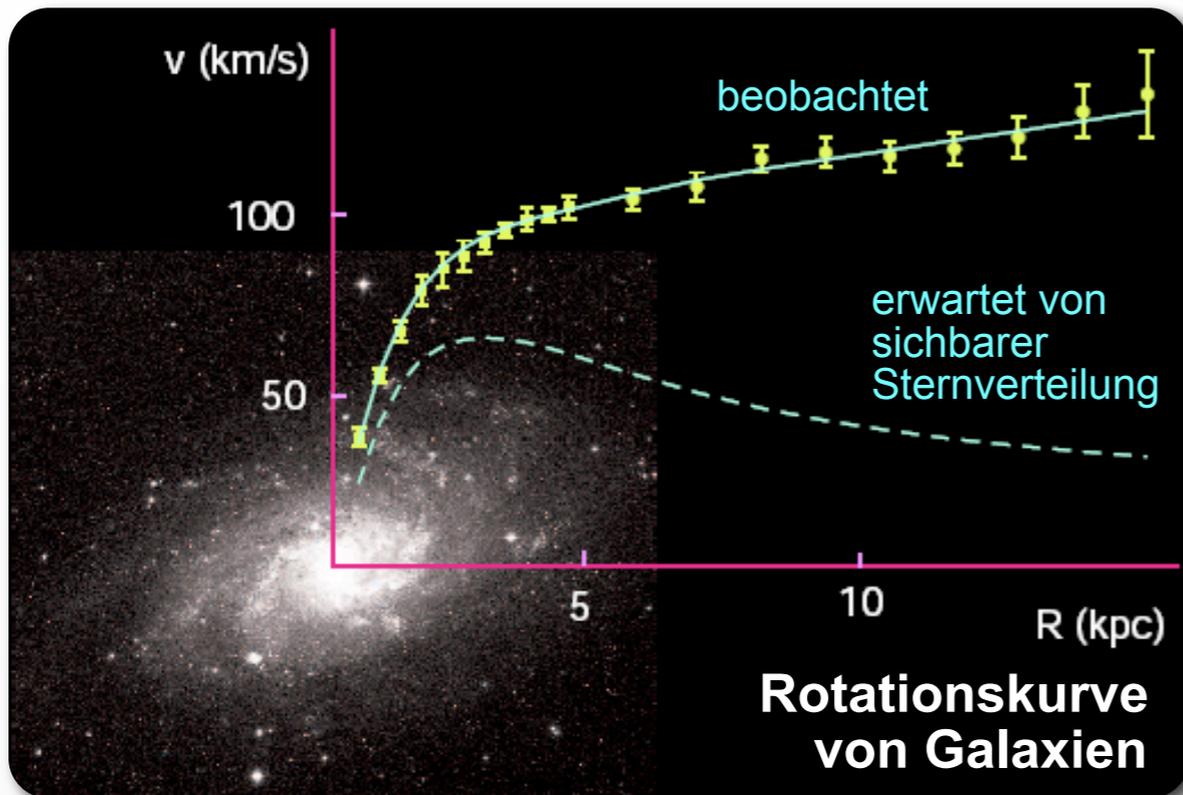
Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung



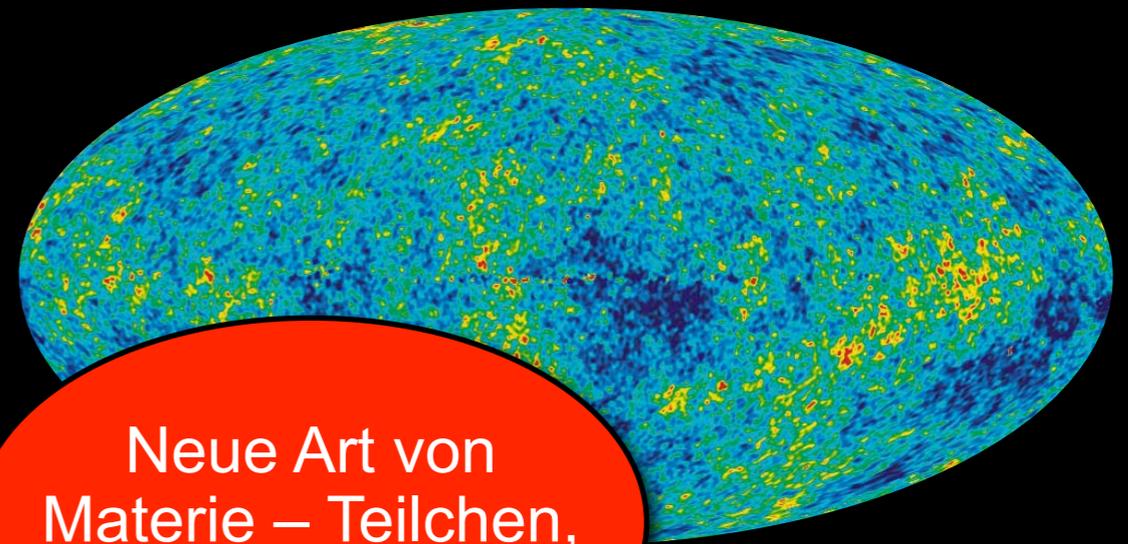
[WMAP-Satellit]



Dunkle Materie und Dunkle Energie

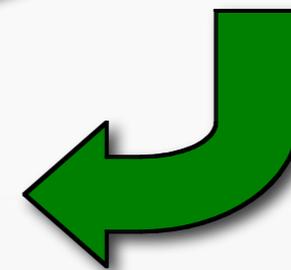
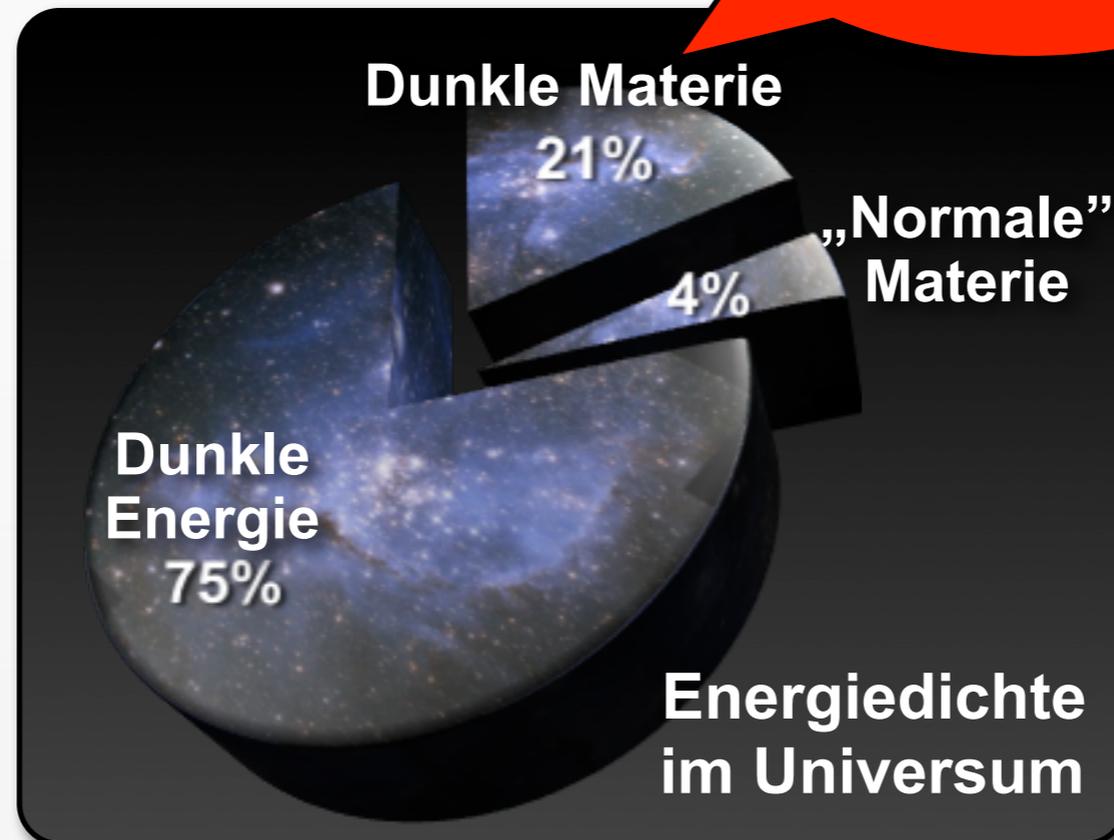


Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

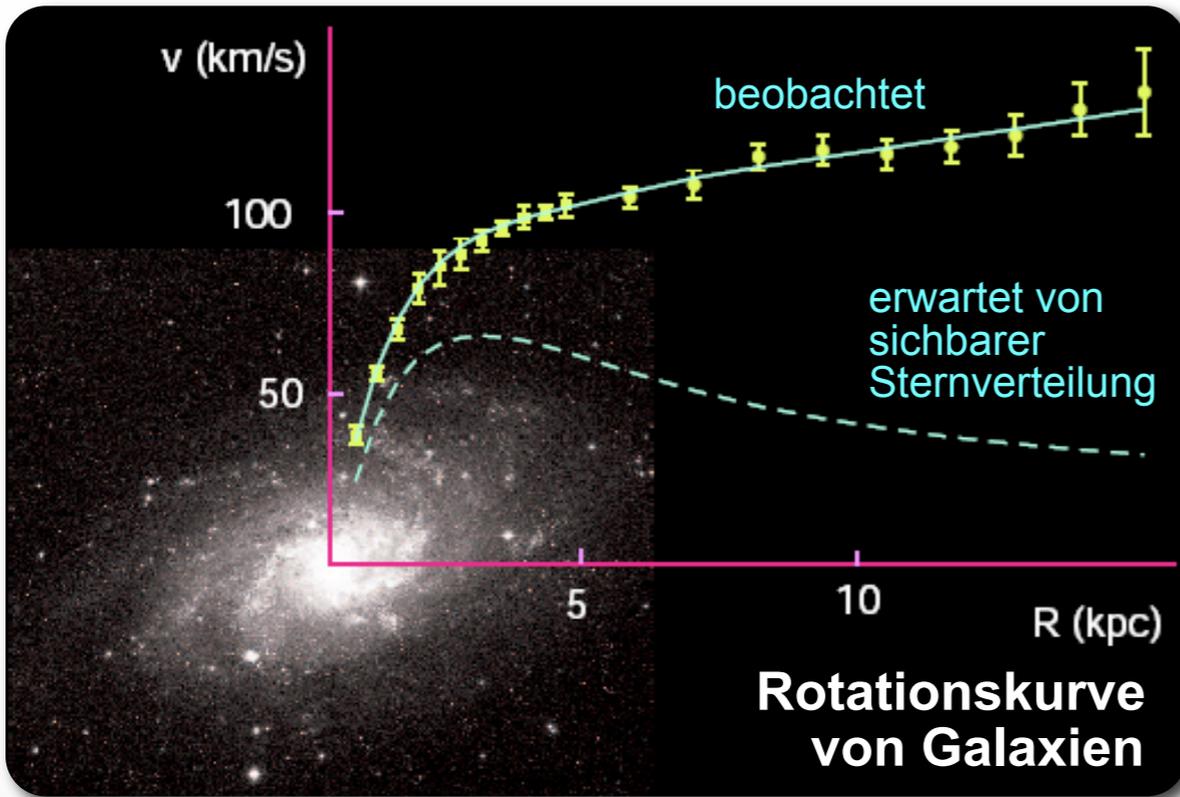


[WMAP-Satellit]

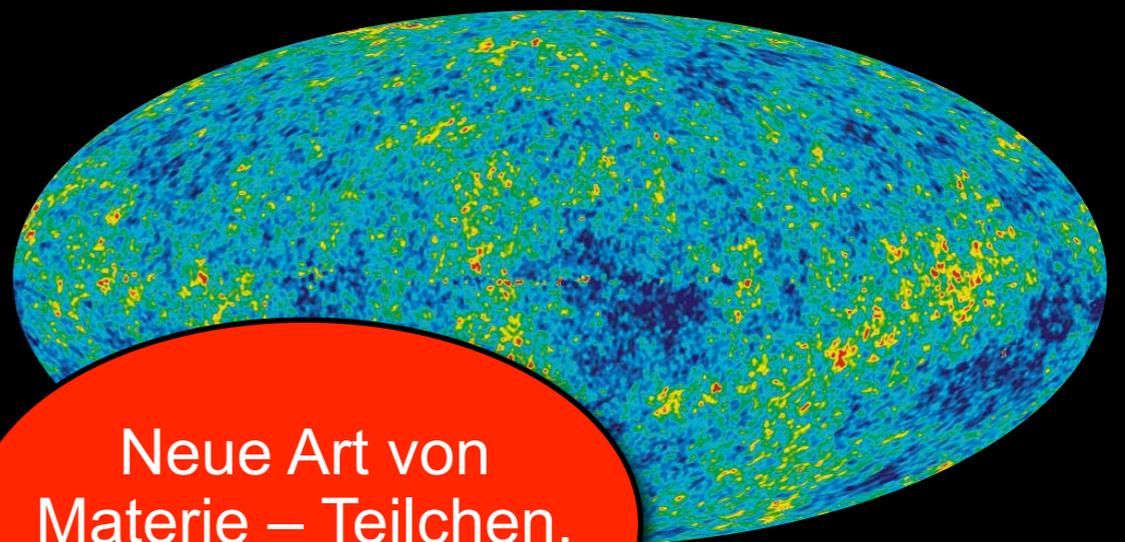
Neue Art von Materie – Teilchen, die nicht „leuchten“



Dunkle Materie und Dunkle Energie

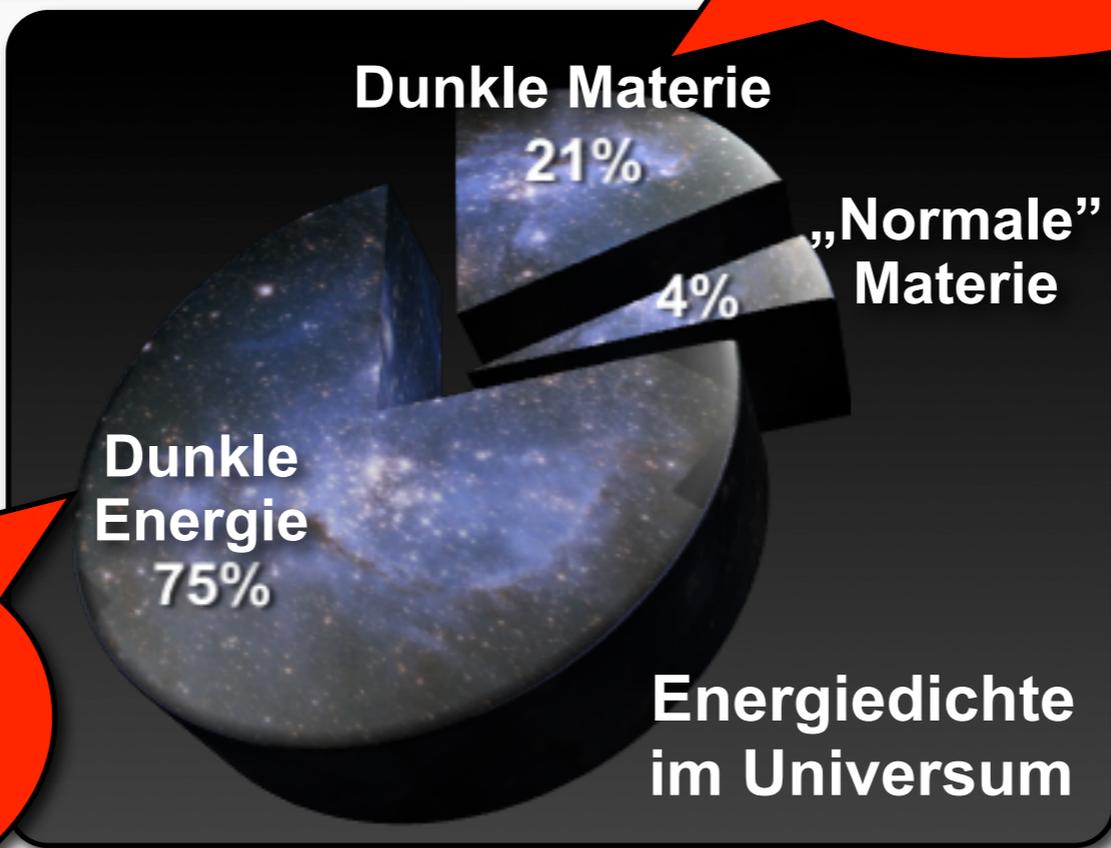


Kosmische Mikrowellenhintergrundstrahlung

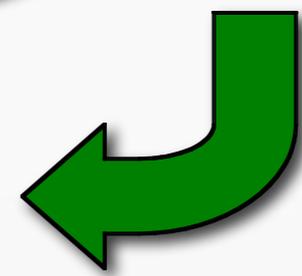
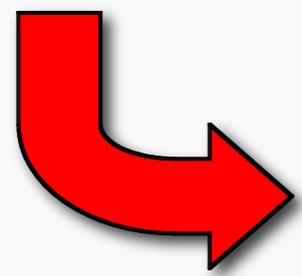


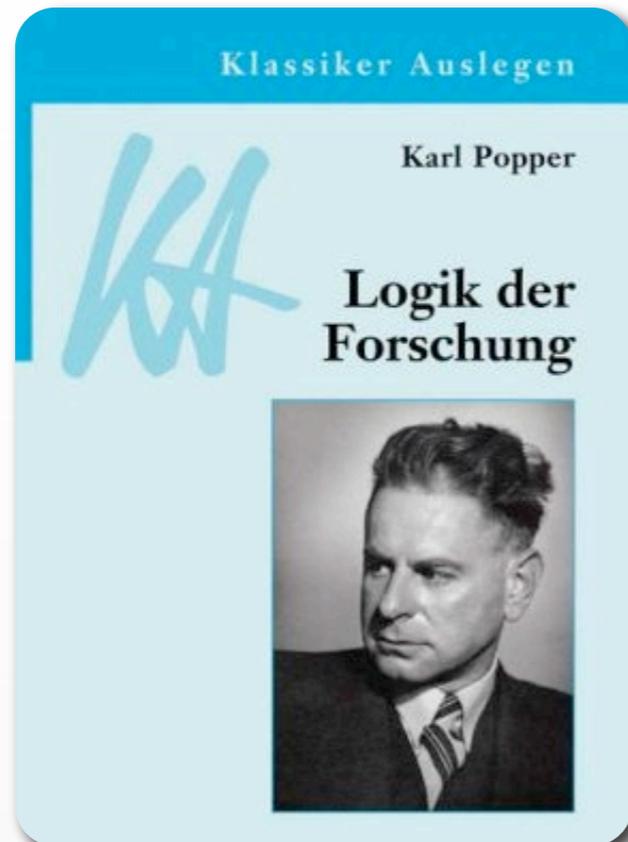
Neue Art von Materie – Teilchen, die nicht „leuchten“

[WMAP-Satellit]

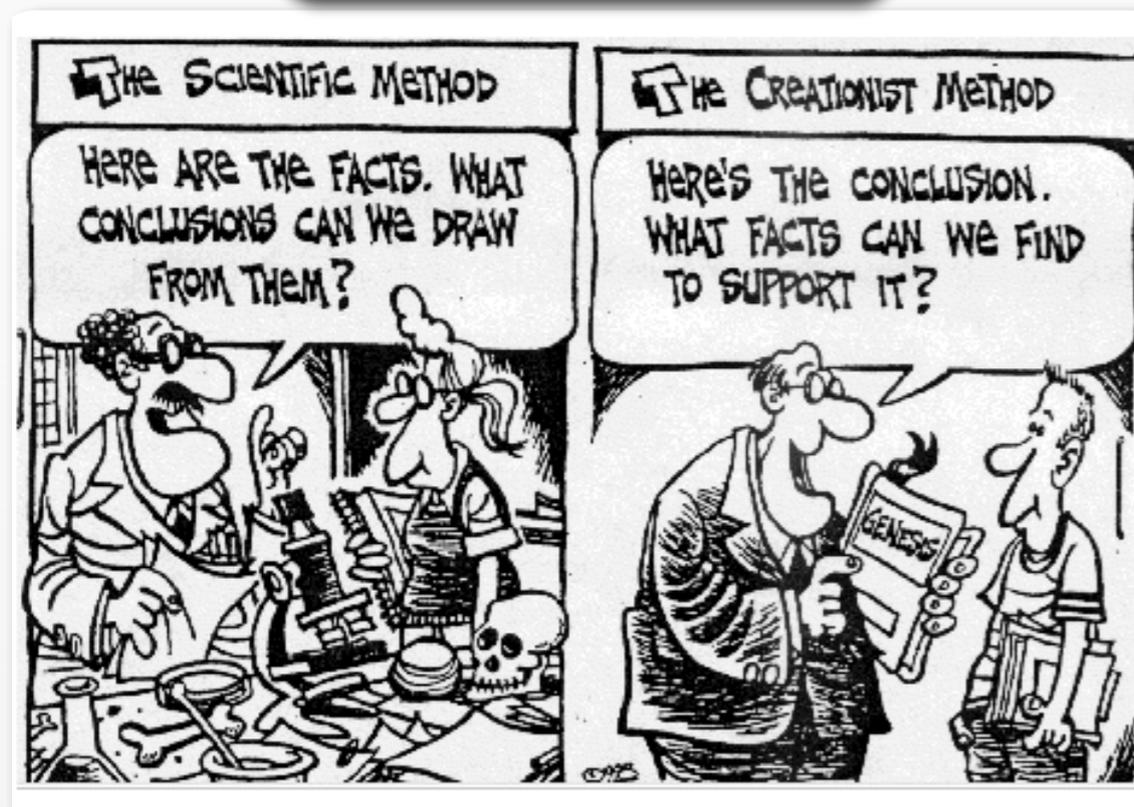


Unbekannte Energieform, die das Universum auseinander treibt





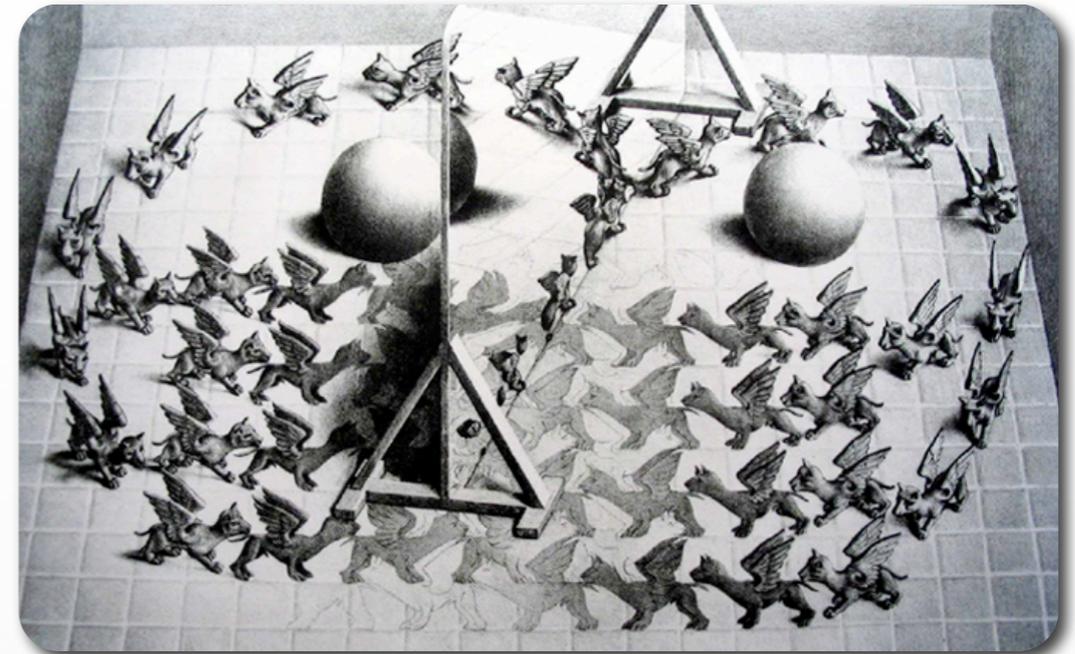
- Elementarteilchenphysik: wo stehen wir im Jahr 2010?
- **Hervorragend funktionierende** Modelle („Standardmodell“) für Elementarteilchen und Universum
- Einige **Widersprüche** zu Messungen und offene Fragen (z. B. Masse) → neue Ideen/Theorien notwendig
- Was ist eine **gute** Idee/Theorie?
 - Theorie kann (jetzt oder in der Zukunft) experimentell überprüft werden: **Falsifizierbarkeit**
 - Theorie widerspricht keiner bekannten Messung
 - Theorie gibt mehr zurück, als man hereingesteckt hat: „**Vorhersagekraft**“



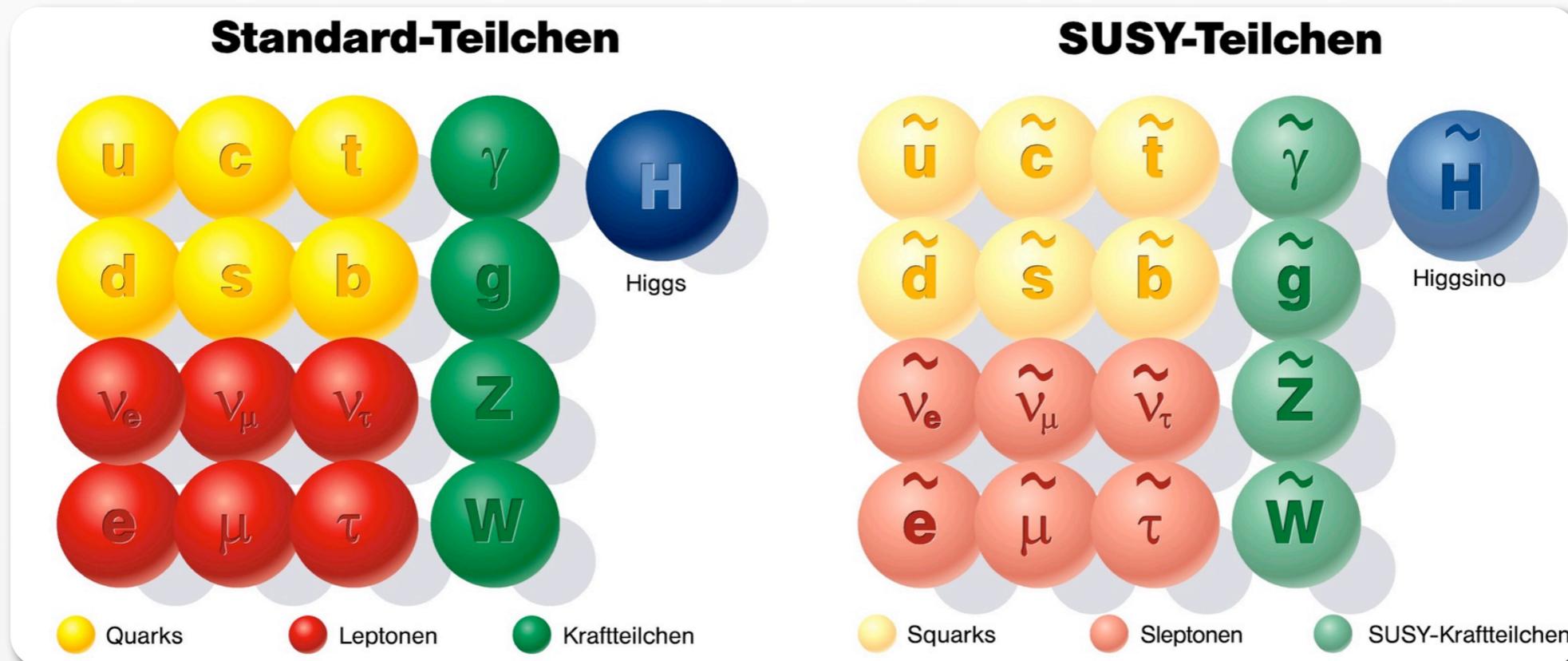
Neue Ideen: Supersymmetrie?



- **Supersymmetrie** („SUSY“)
- Zu jedem Teilchen im Standardmodell gibt es ein (schwereres) **Spiegelteilchen**
- **Dunkle Materie** könnte aus den leichtesten der Spiegelteilchen bestehen (häufig: „Neutralinos“)



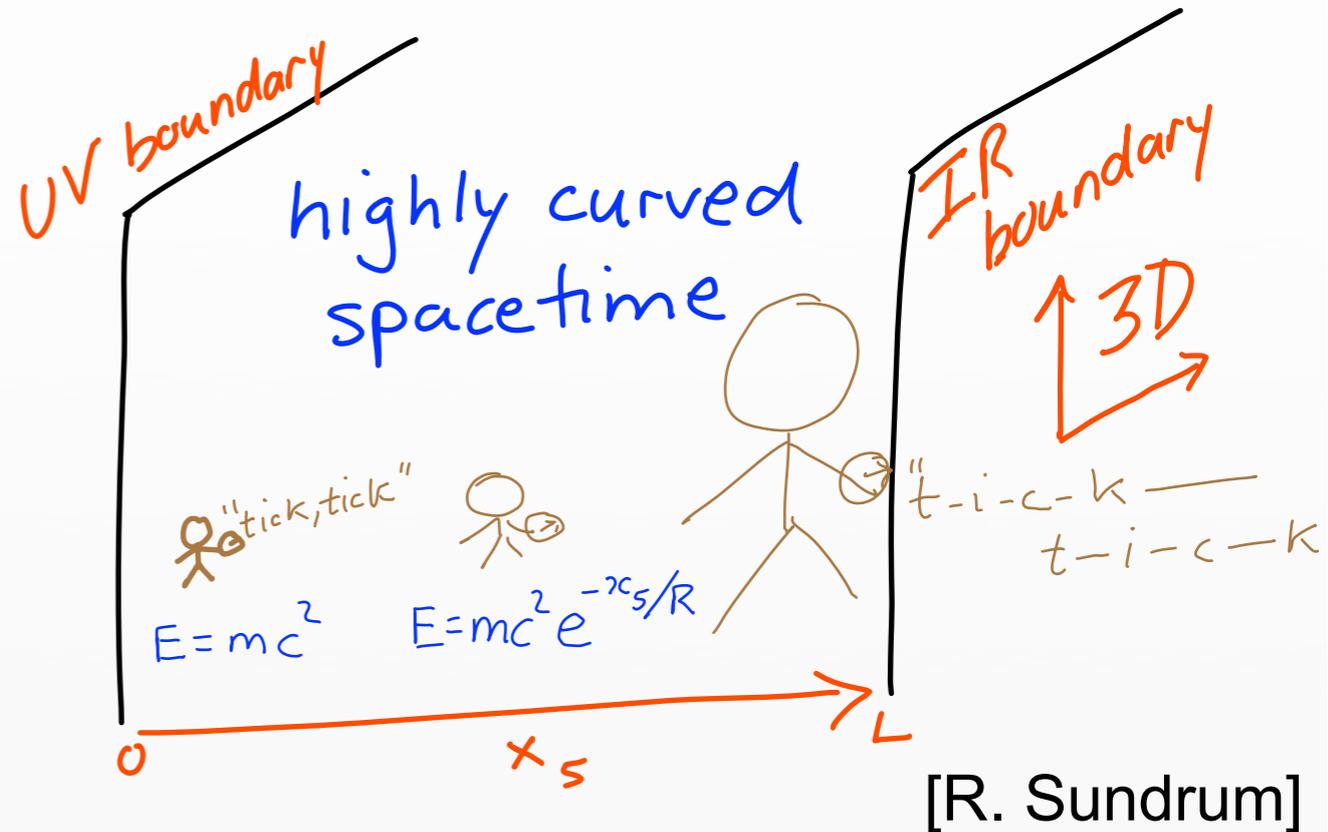
[M.C. Escher: Zauberspiegel (1946)]



[DESY]

- Noch ein Problem: **keine Gravitation** im Standardmodell
 - Gravitation funktioniert nicht „einfach so“ als Quantentheorie
 - Warum ist die Gravitation so schwach (z.B. im Vergleich zur elektrischen Kraft) → „**Hierarchieproblem**“
- Spekulative Lösungsidee: **zusätzliche Raumdimensionen**
→ Gravitation breitet sich in mehr als 3 Raumdimensionen aus
- Beispiel: Randall-Sundrum-Modell
 - Wir leben auf 3-dimensionaler „Membran“ in 4-dimensionalem Raum
 - Gravitation kommt durch (gekrümmte) Extra-Dimension x_5 zu uns

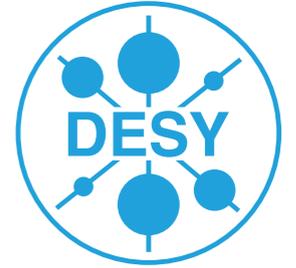
RANDALL-SUNDRUM I MODEL



L. Randall



R. Sundrum

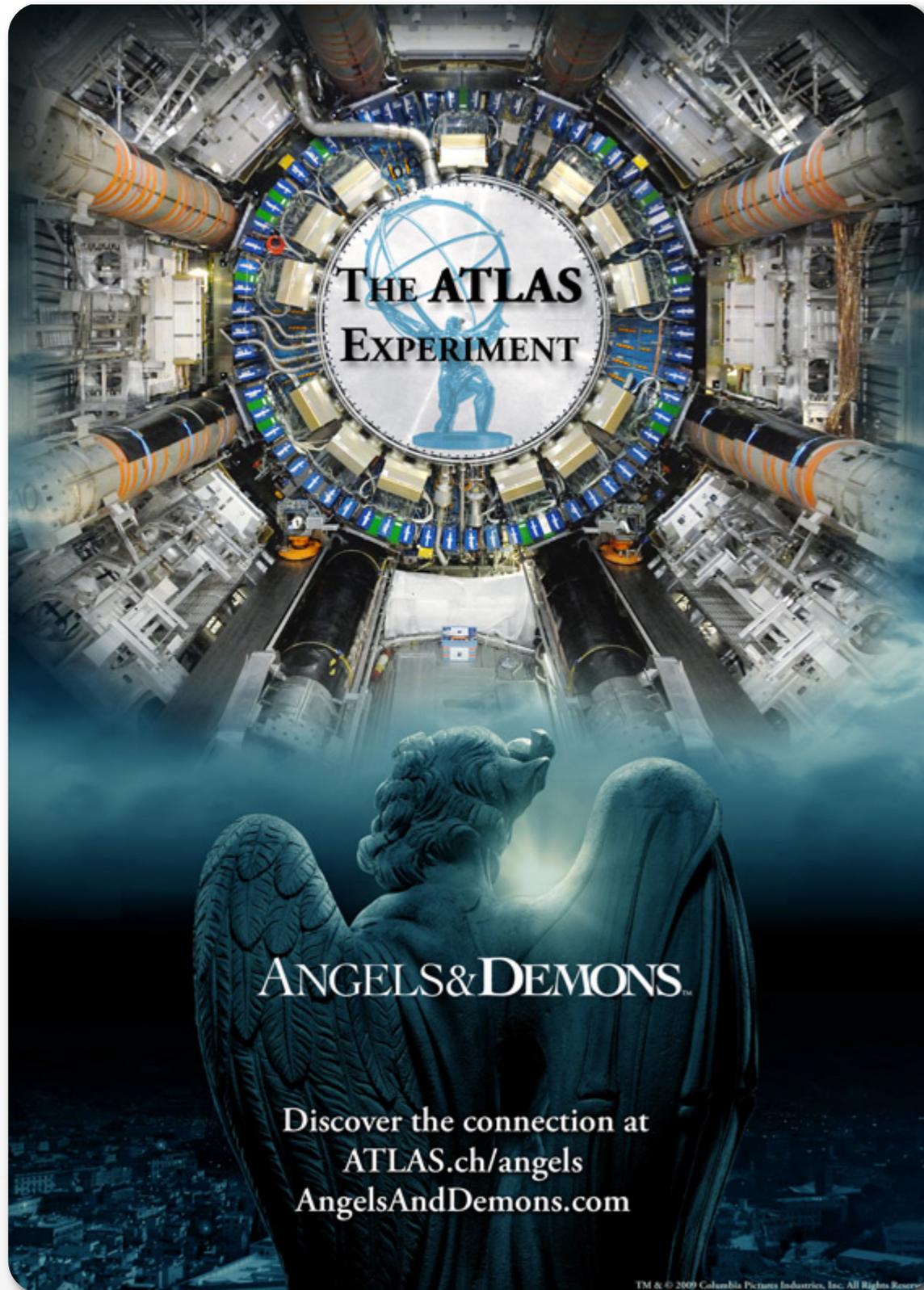


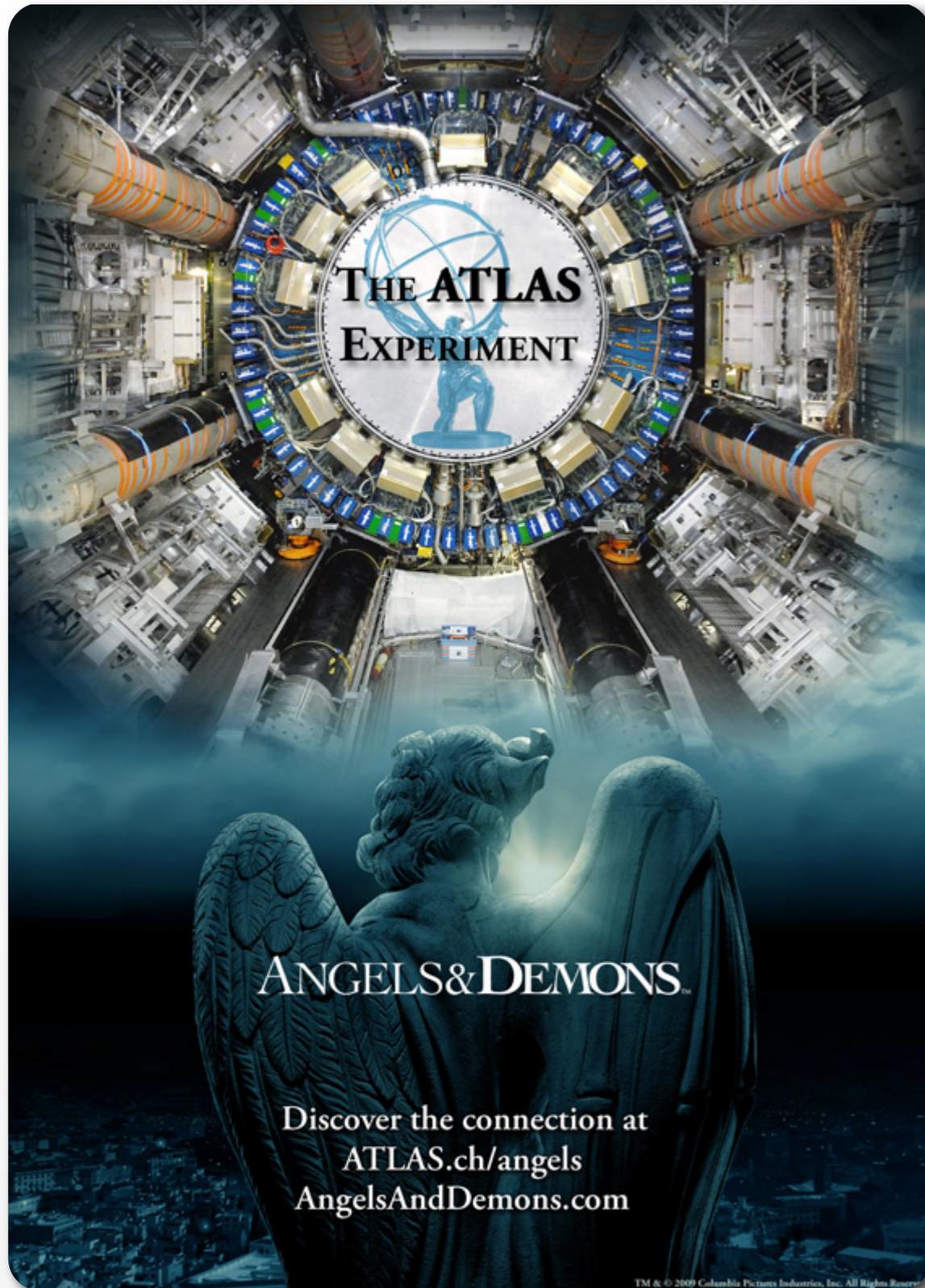
CERN und der Large Hadron Collider

CERN – Habe ich schonmal gehört...



CERN – Habe ich schonmal gehört...





CERN – where the web was born...

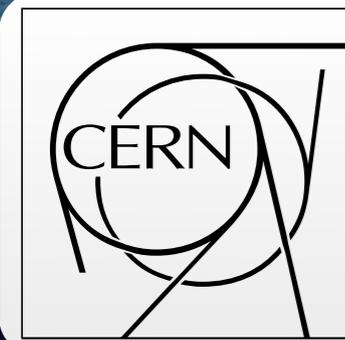


Tim Berners-Lee
(1990)

Der erste
Webserver
(1990)



Was ist CERN?



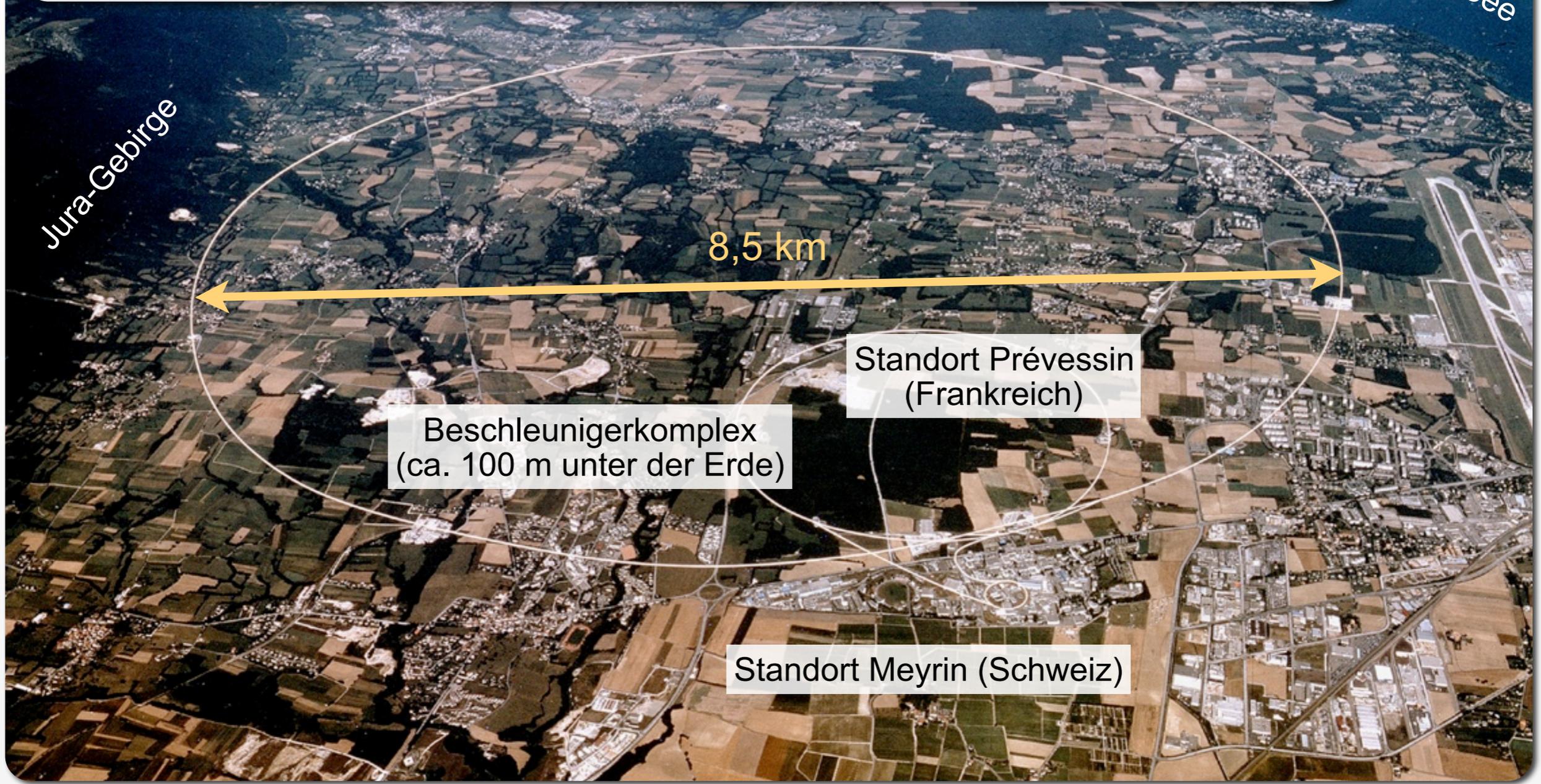
CERN = Europäisches Teilchenphysiklabor

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

Historischer Name: „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire“

2500 Angestellte, etwa 10000 Gäste (85 Nationalitäten)

Genfer See



Jura-Gebirge

8,5 km

Beschleunigerkomplex
(ca. 100 m unter der Erde)

Standort Prévessin
(Frankreich)

Standort Meyrin (Schweiz)

LHC – der Large Hadron Collider



LHC – der Large Hadron Collider



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



LHC – der Large Hadron Collider



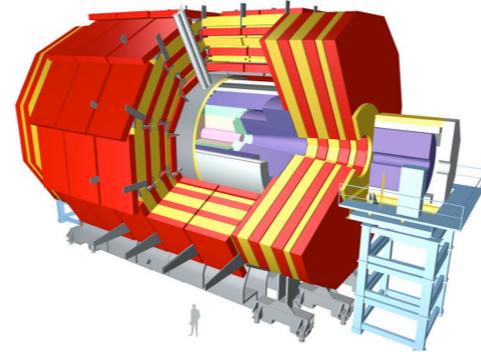
LHC-Beschleuniger:

Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen



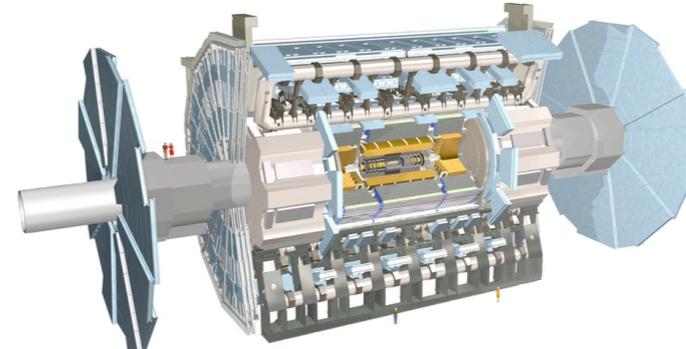
CMS-Experiment:

Vielzweckexperiment



ATLAS-Experiment:

Vielzweckexperiment



LHC – der Large Hadron Collider



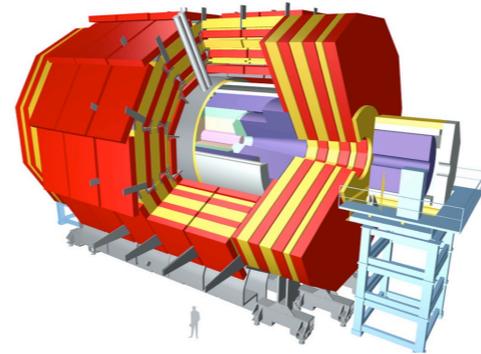
LHC-Beschleuniger:

Proton-Proton- und
Blei-Blei-Kollisionen



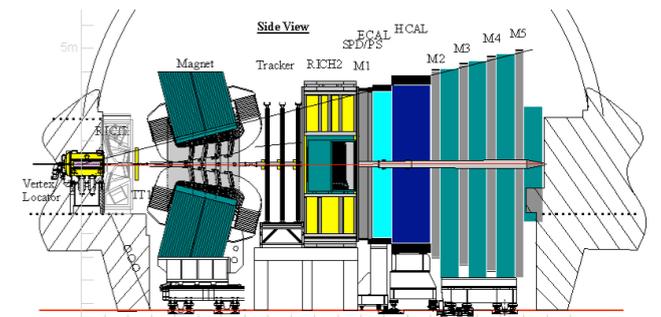
CMS-Experiment:

Vielzweckexperiment



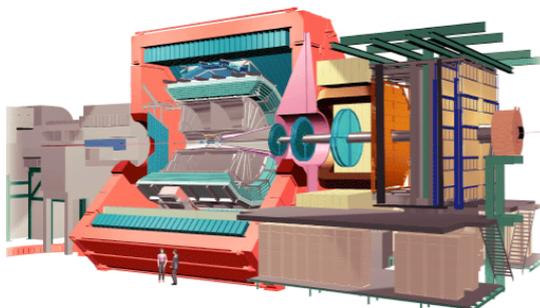
LHCb-Experiment:

Symmetrie Materie/Antimaterie



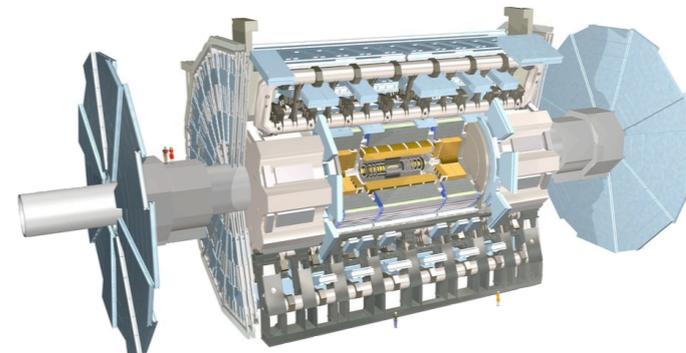
ALICE-Experiment:

Schwerionenphysik

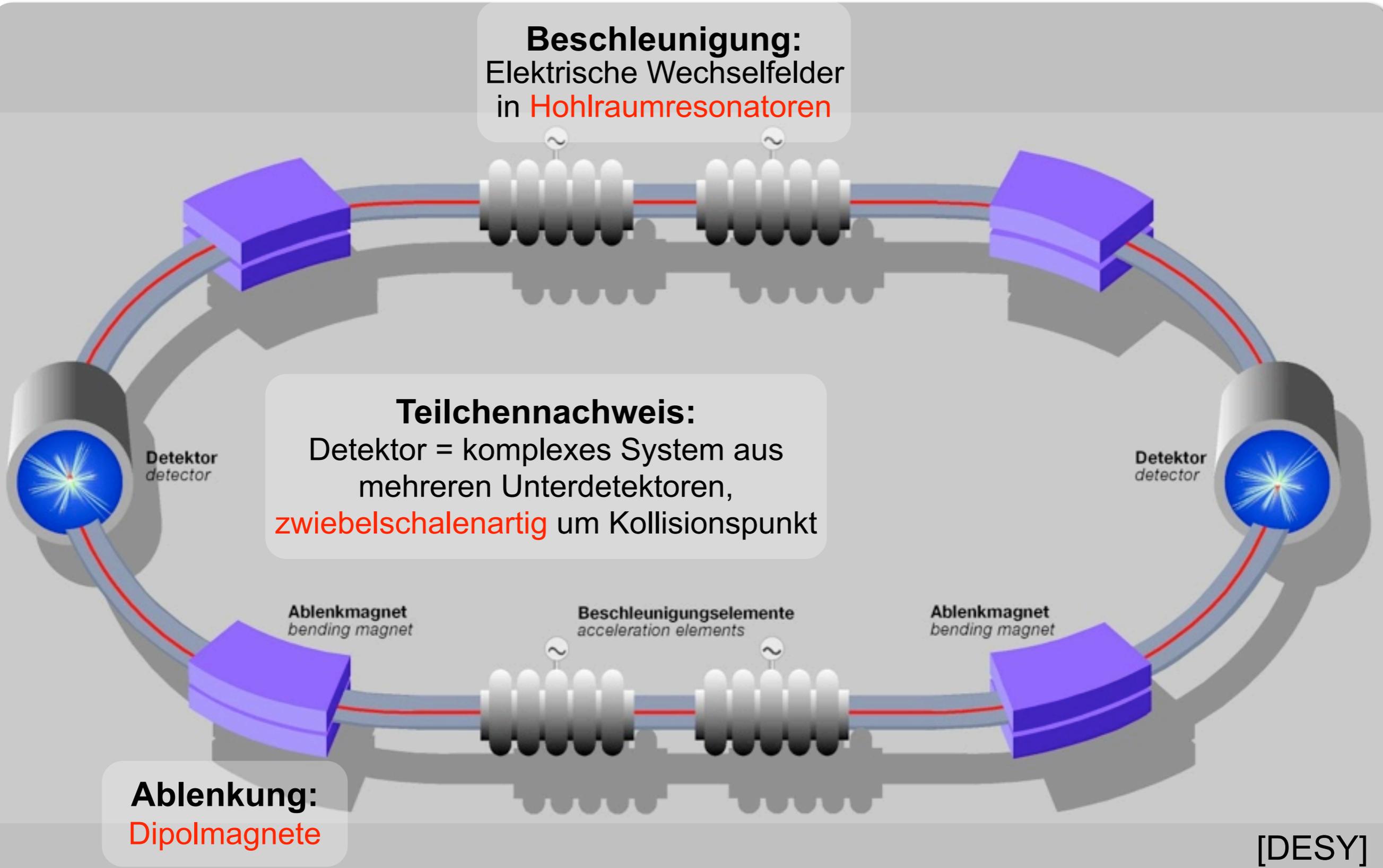


ATLAS-Experiment:

Vielzweckexperiment



Prinzip des Teilchenbeschleunigers



[DESY]

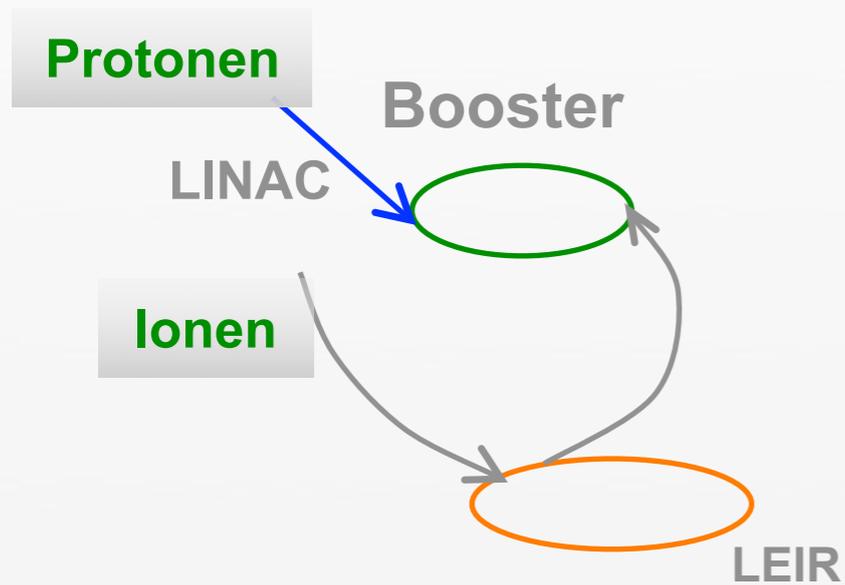
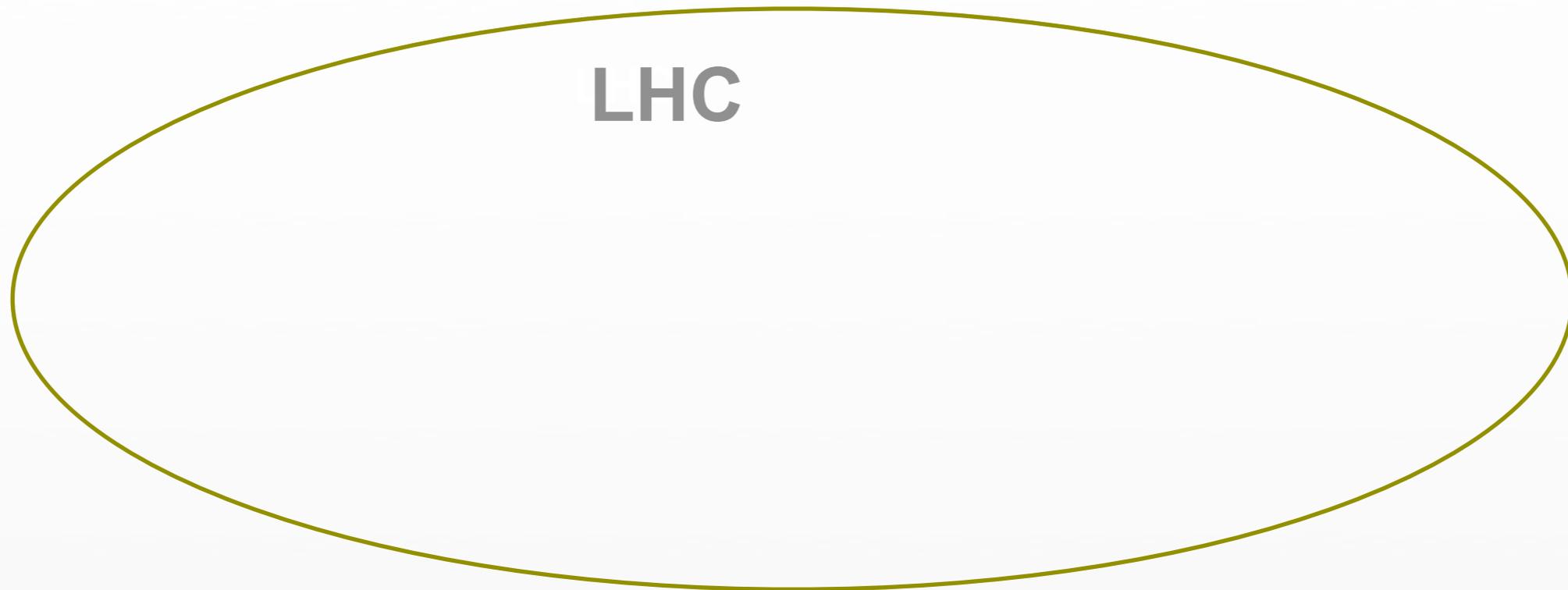
Wie kommen die Protonen in den LHC?



LHC

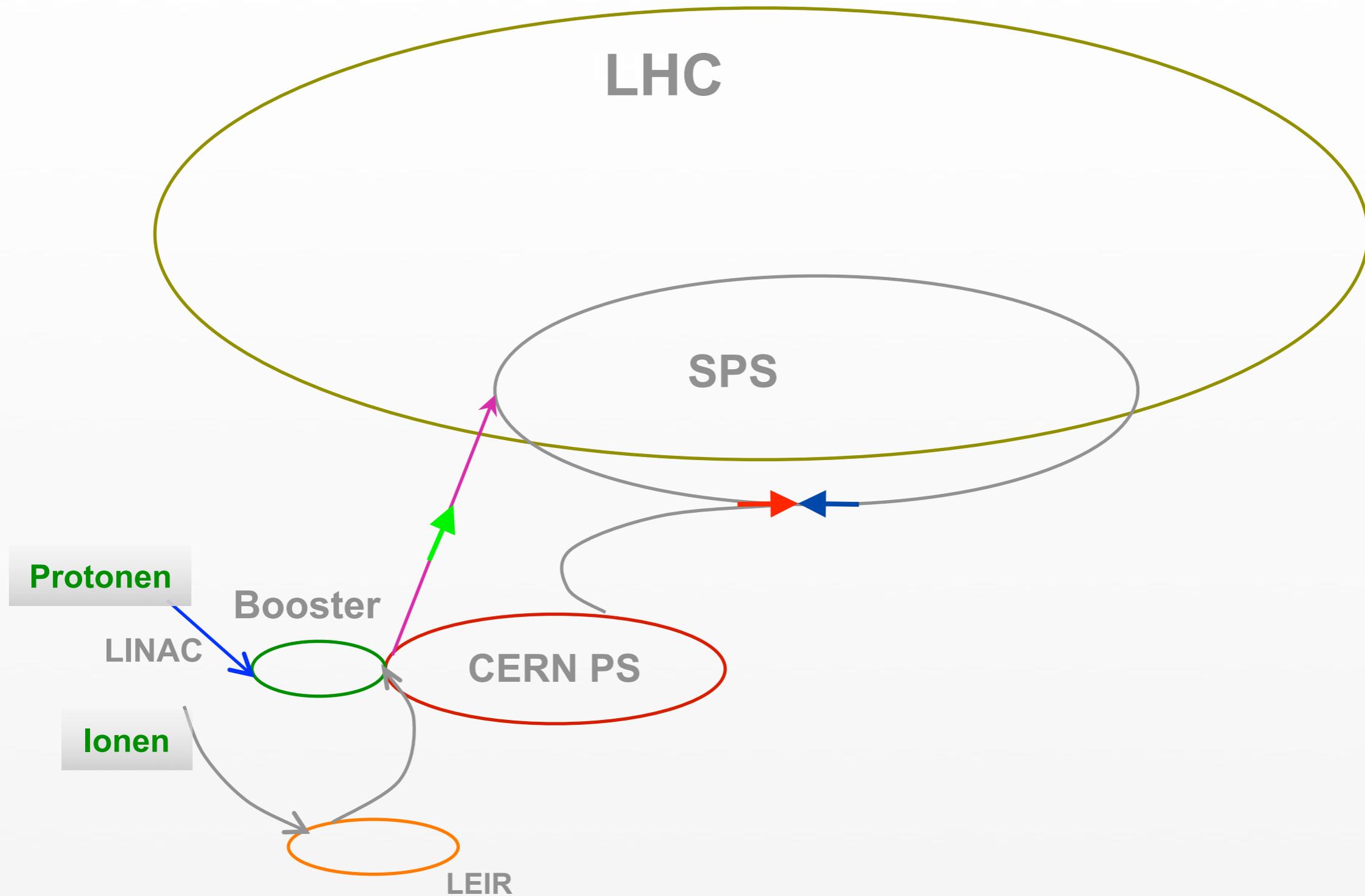
[V. Kain]

Wie kommen die Protonen in den LHC?



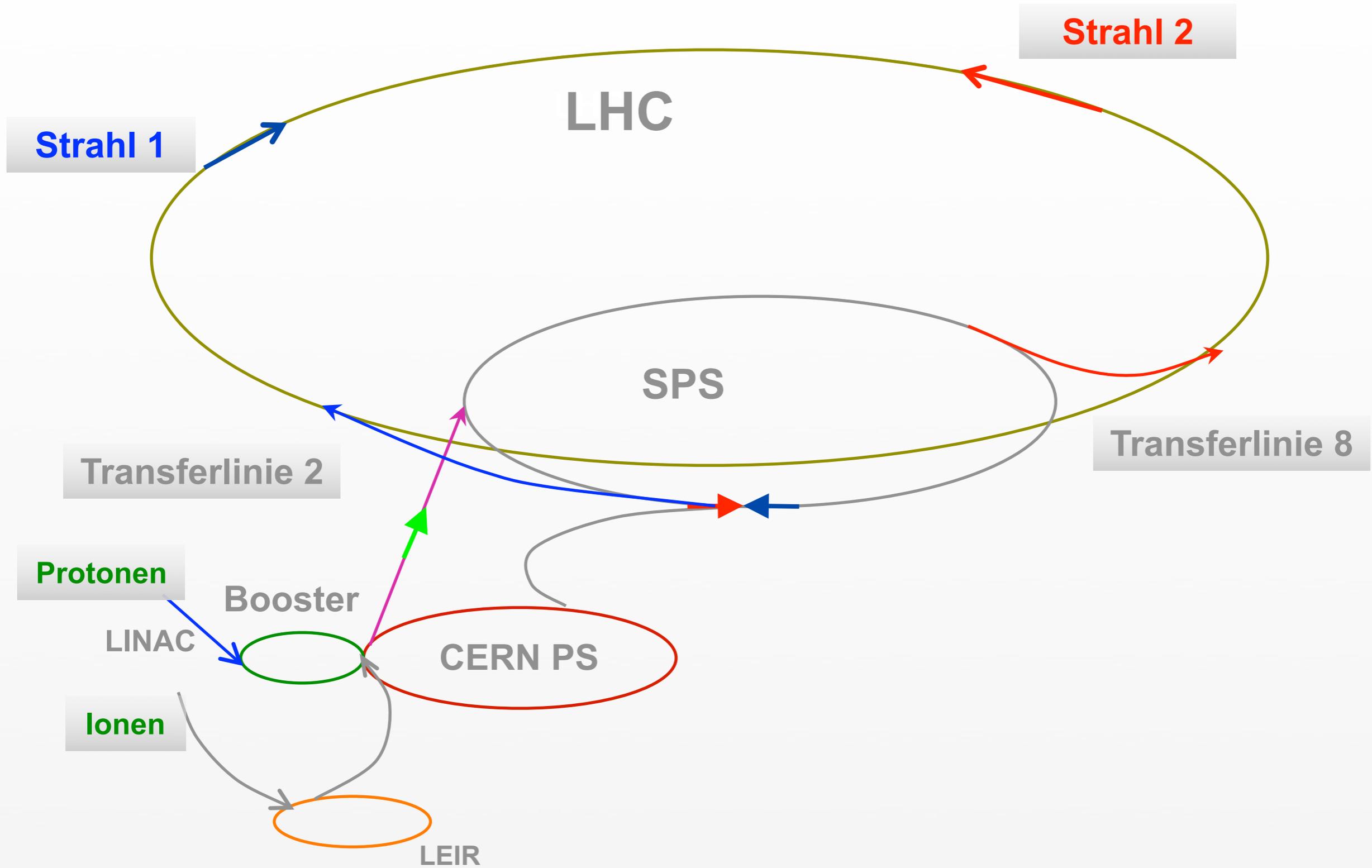
[V. Kain]

Wie kommen die Protonen in den LHC?



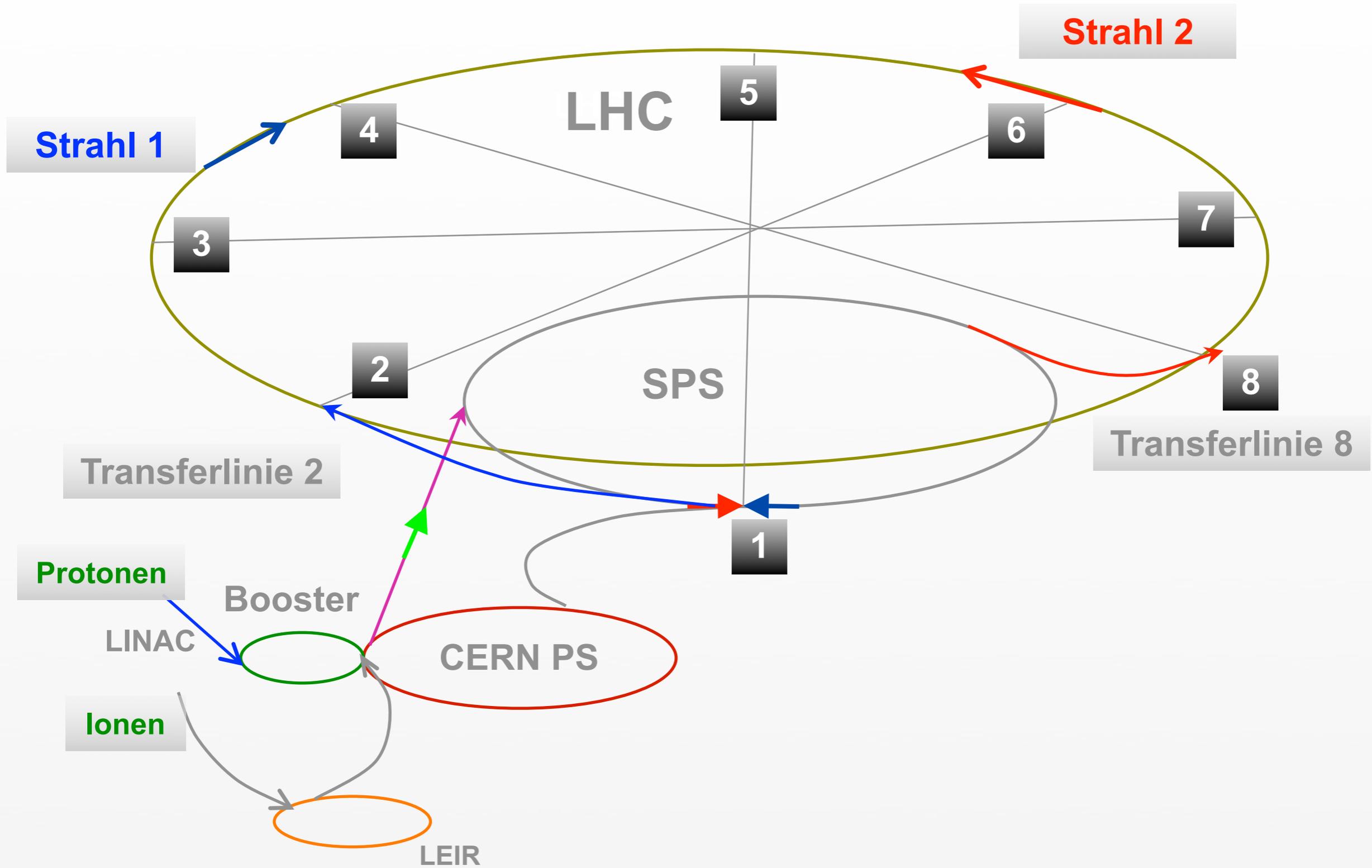
[V. Kain]

Wie kommen die Protonen in den LHC?



[V. Kain]

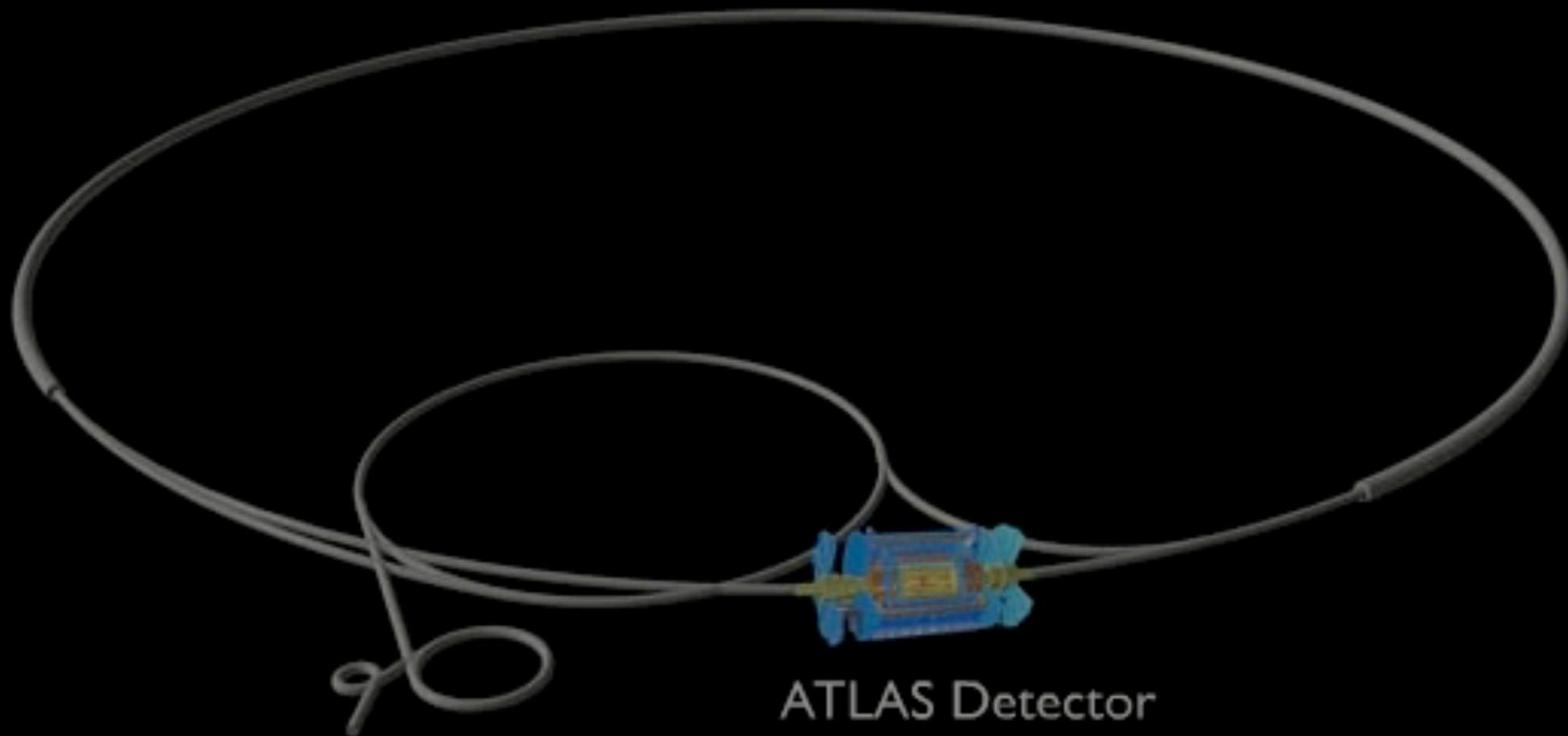
Wie kommen die Protonen in den LHC?



[V. Kain]

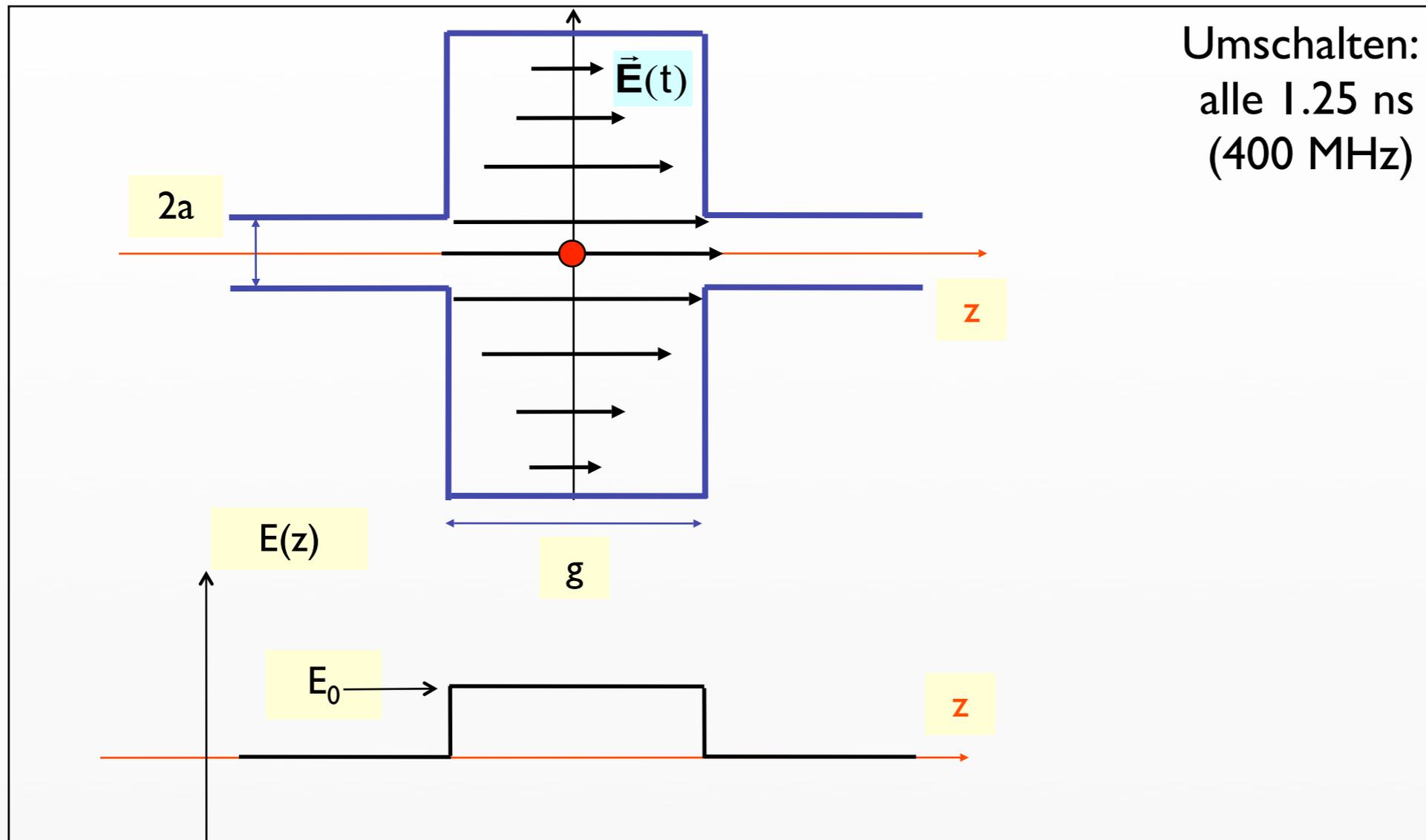
PLAY ▶

Large Hadron Collider



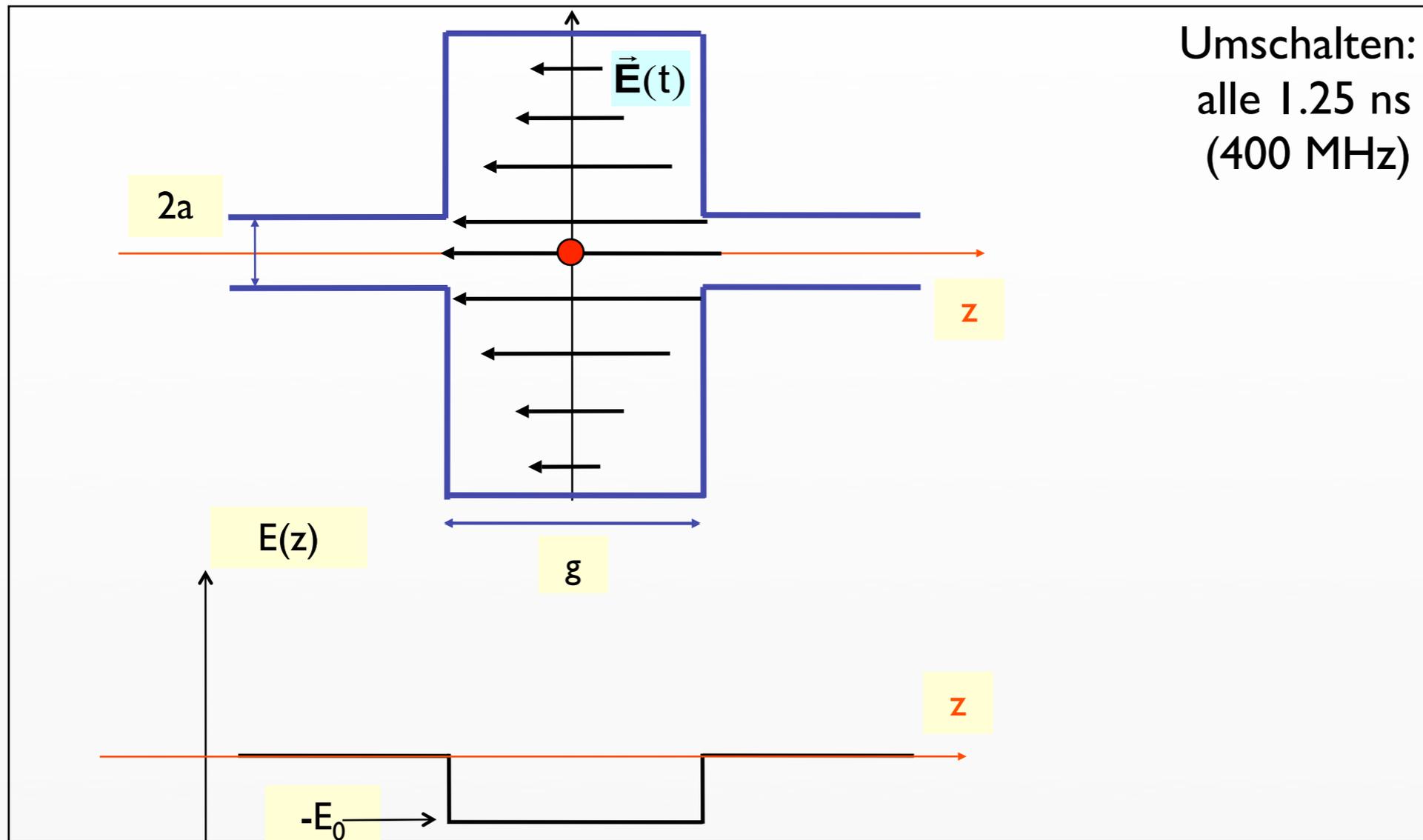
ATLAS Detector

Beschleunigung: Hohlraumresonatoren



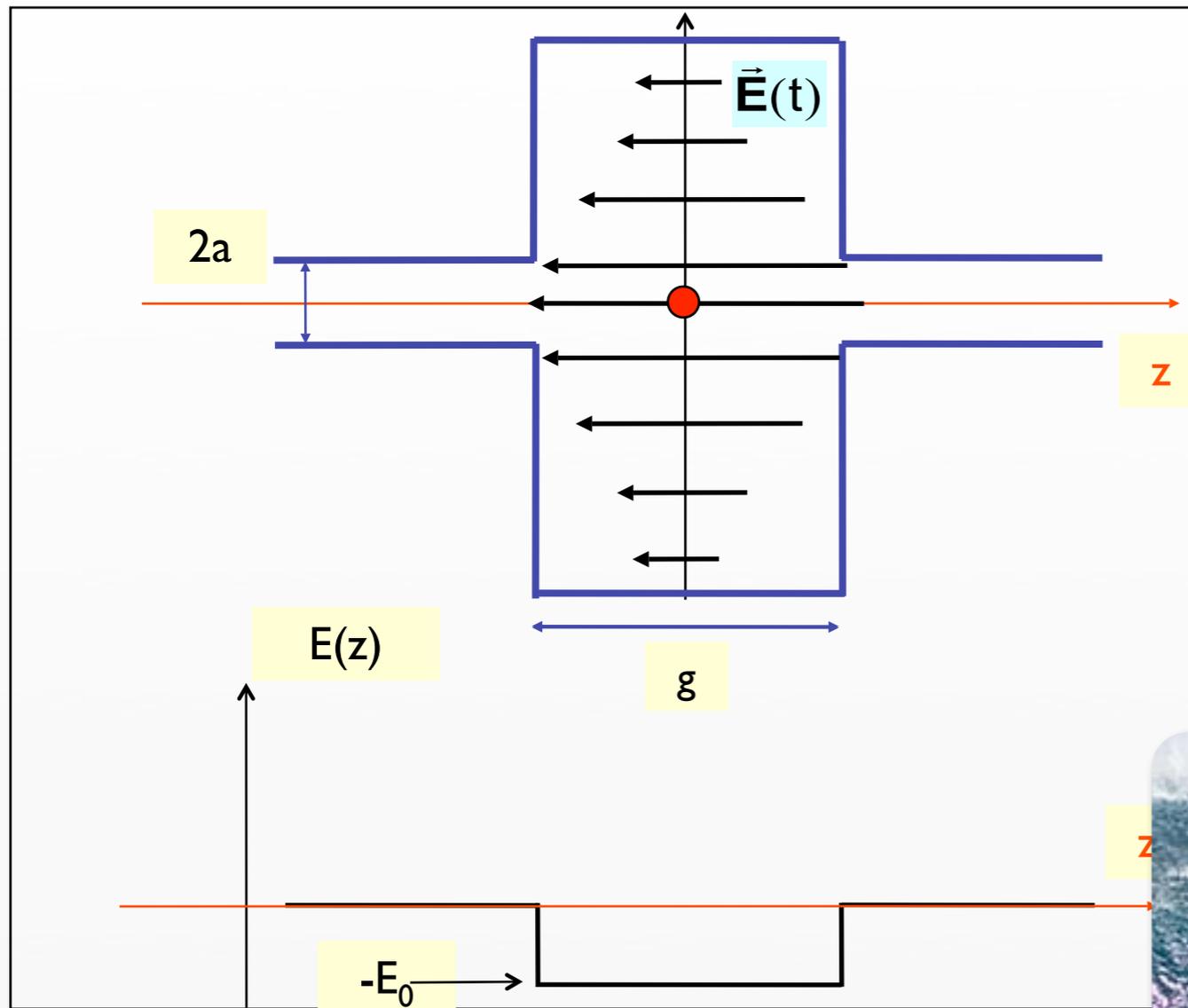
Umschalten:
alle 1.25 ns
(400 MHz)

Beschleunigung: Hohlraumresonatoren



[V. Kain]

Beschleunigung: Hohlraumresonatoren



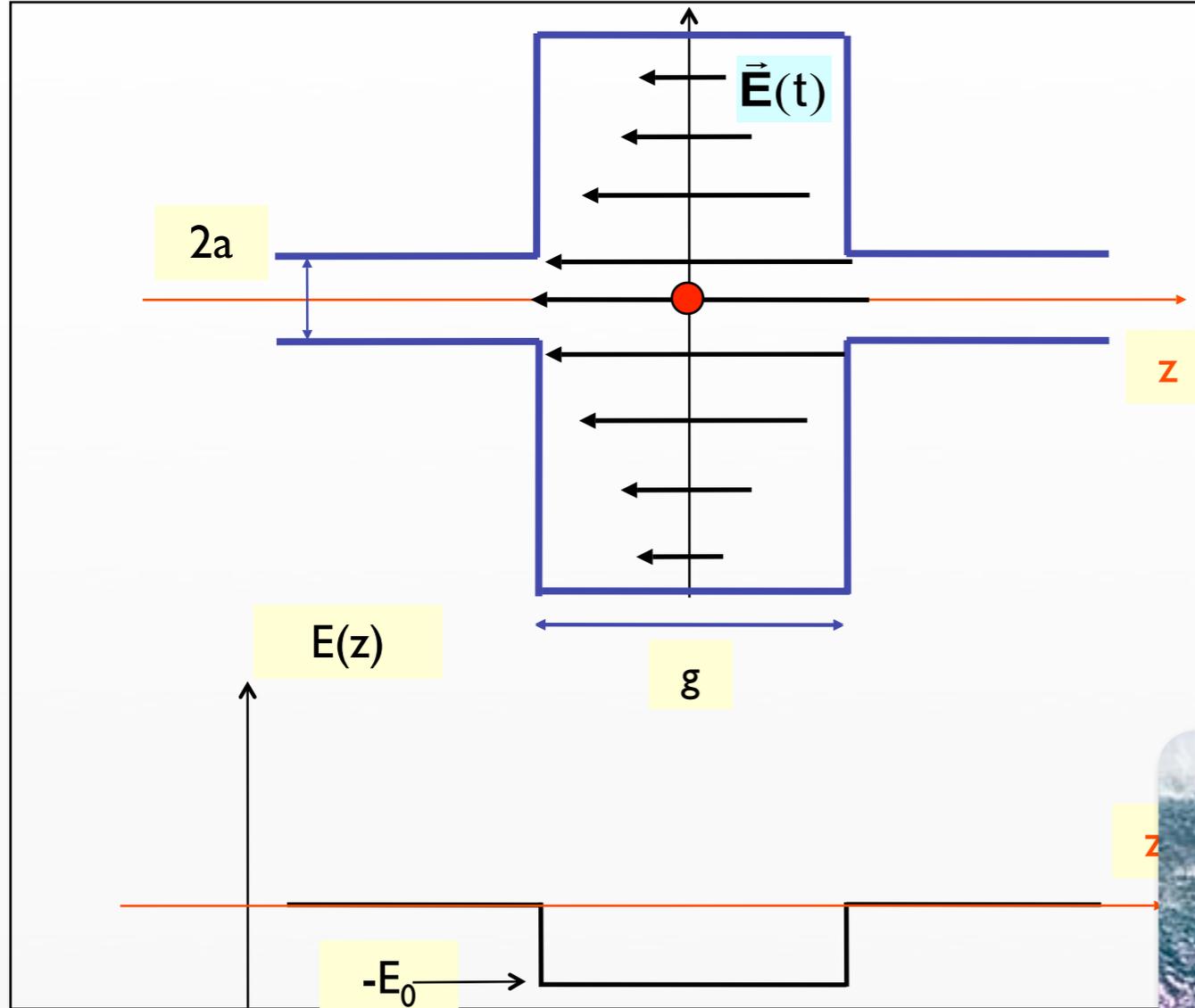
Umschalten:
alle 1.25 ns
(400 MHz)

Analogie: Teilchen „reitet“ auf
elektromagnetischer Welle



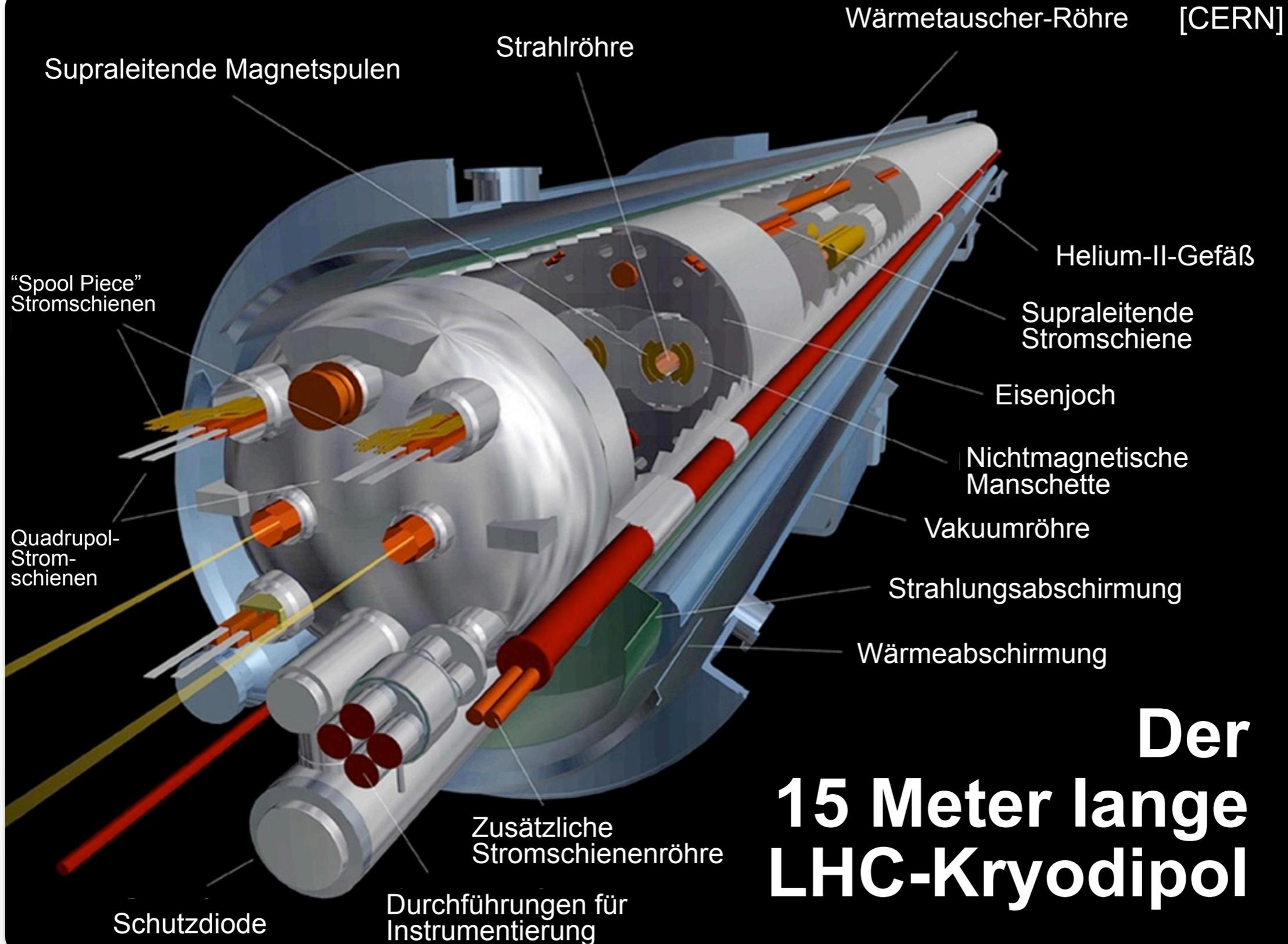
[V. Kain]

Beschleunigung: Hohlraumresonatoren

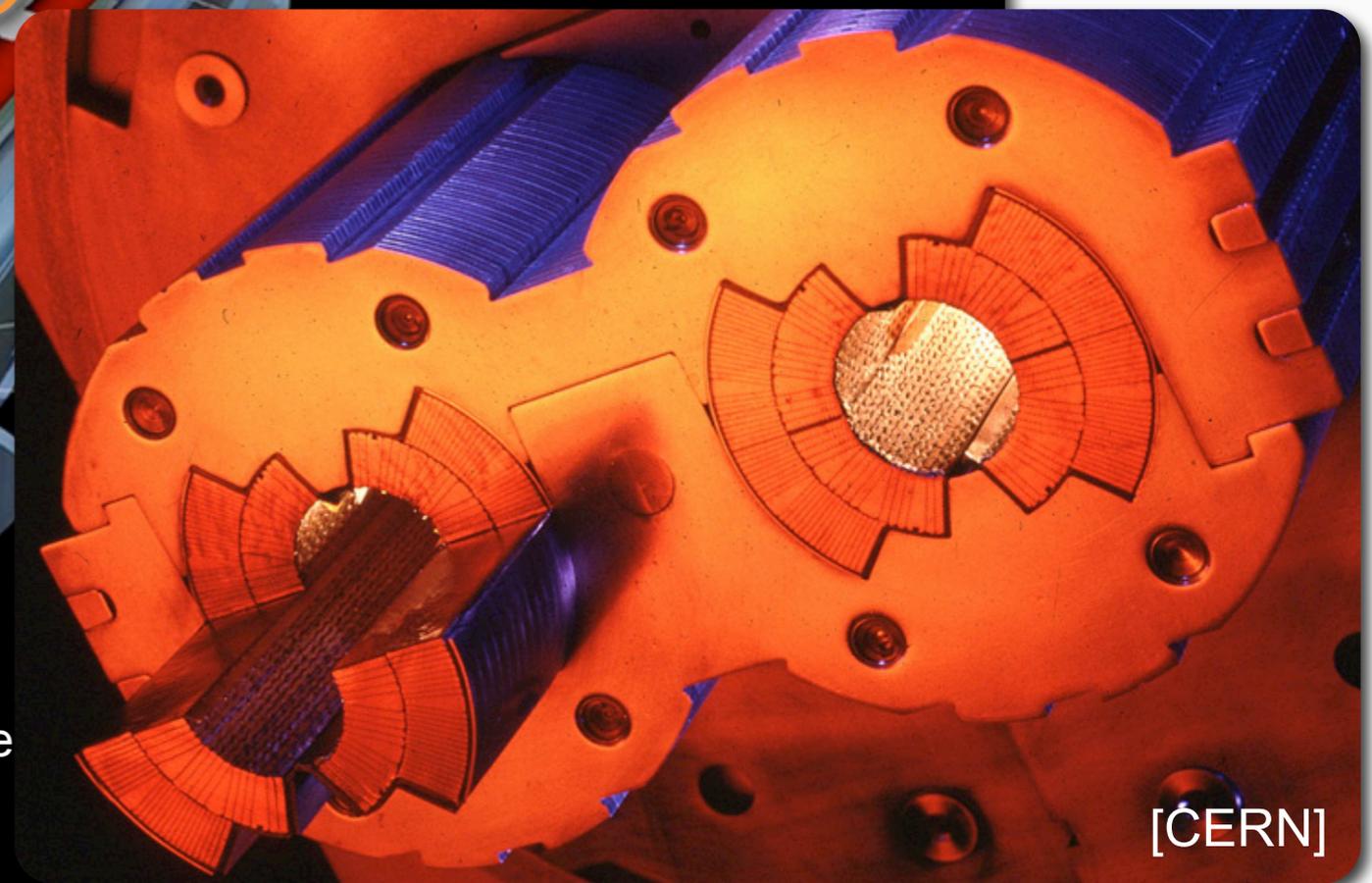
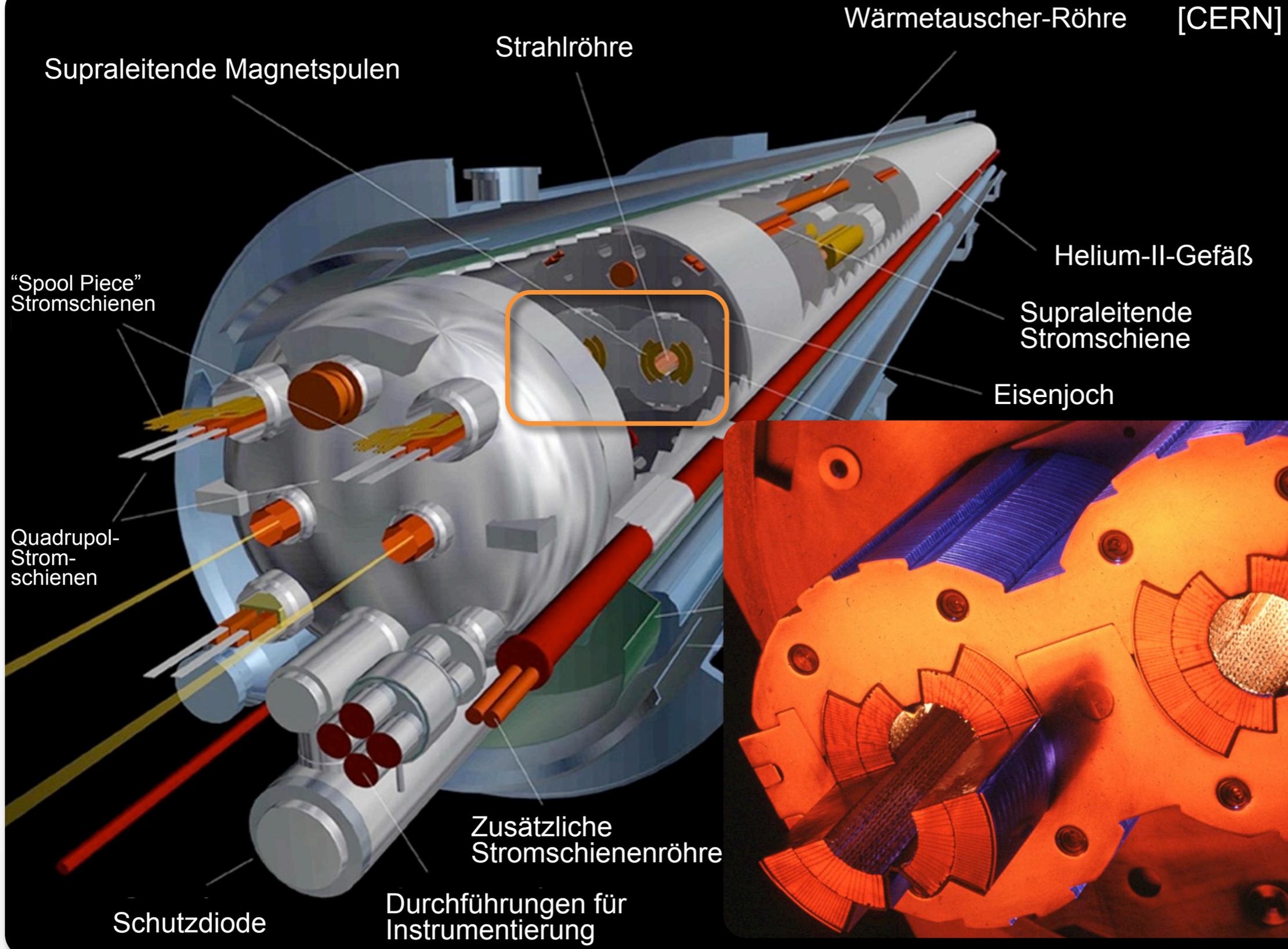


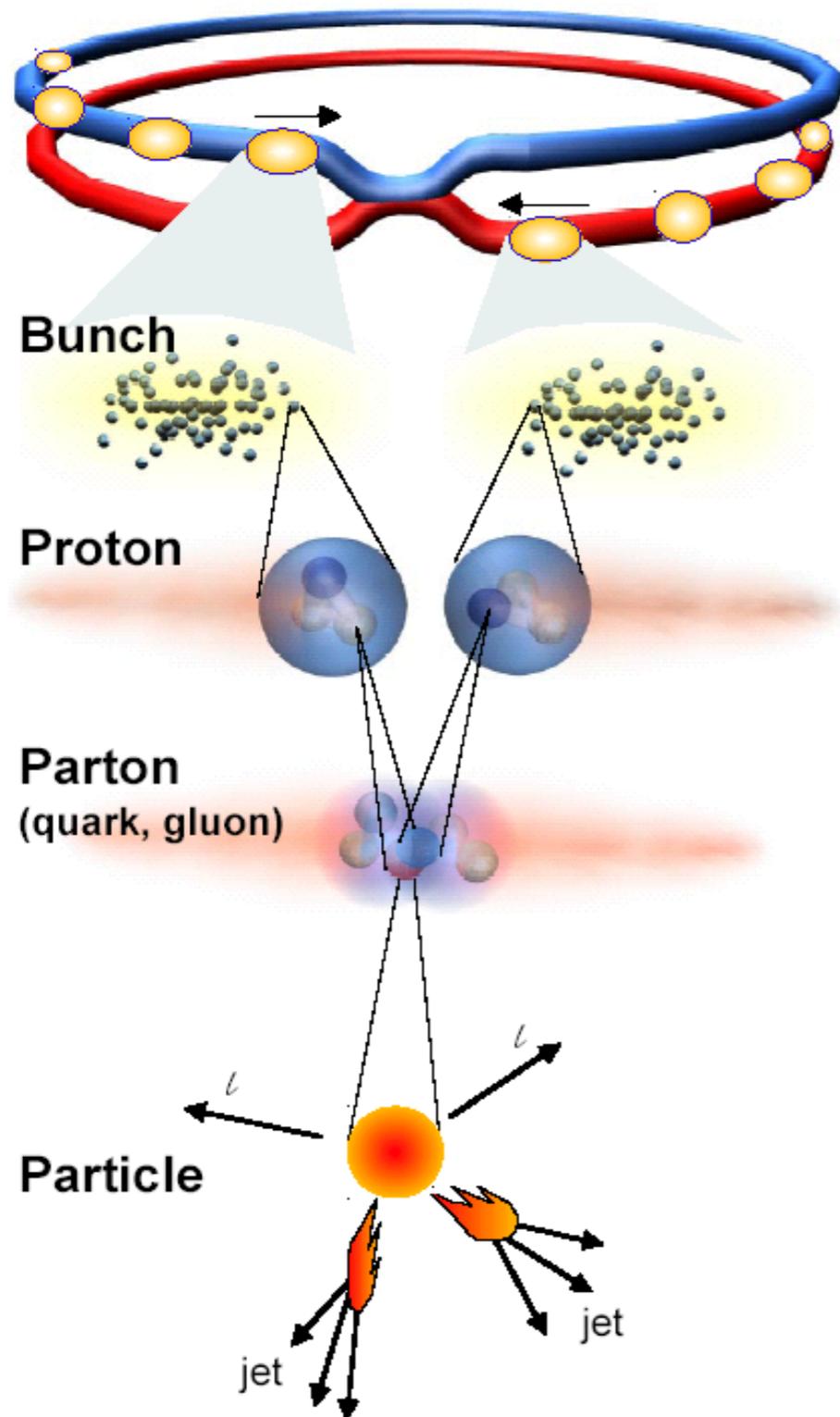
[V. Kain]

Ablenkung: Dipolmagnete



Ablenkung: Dipolmagnete



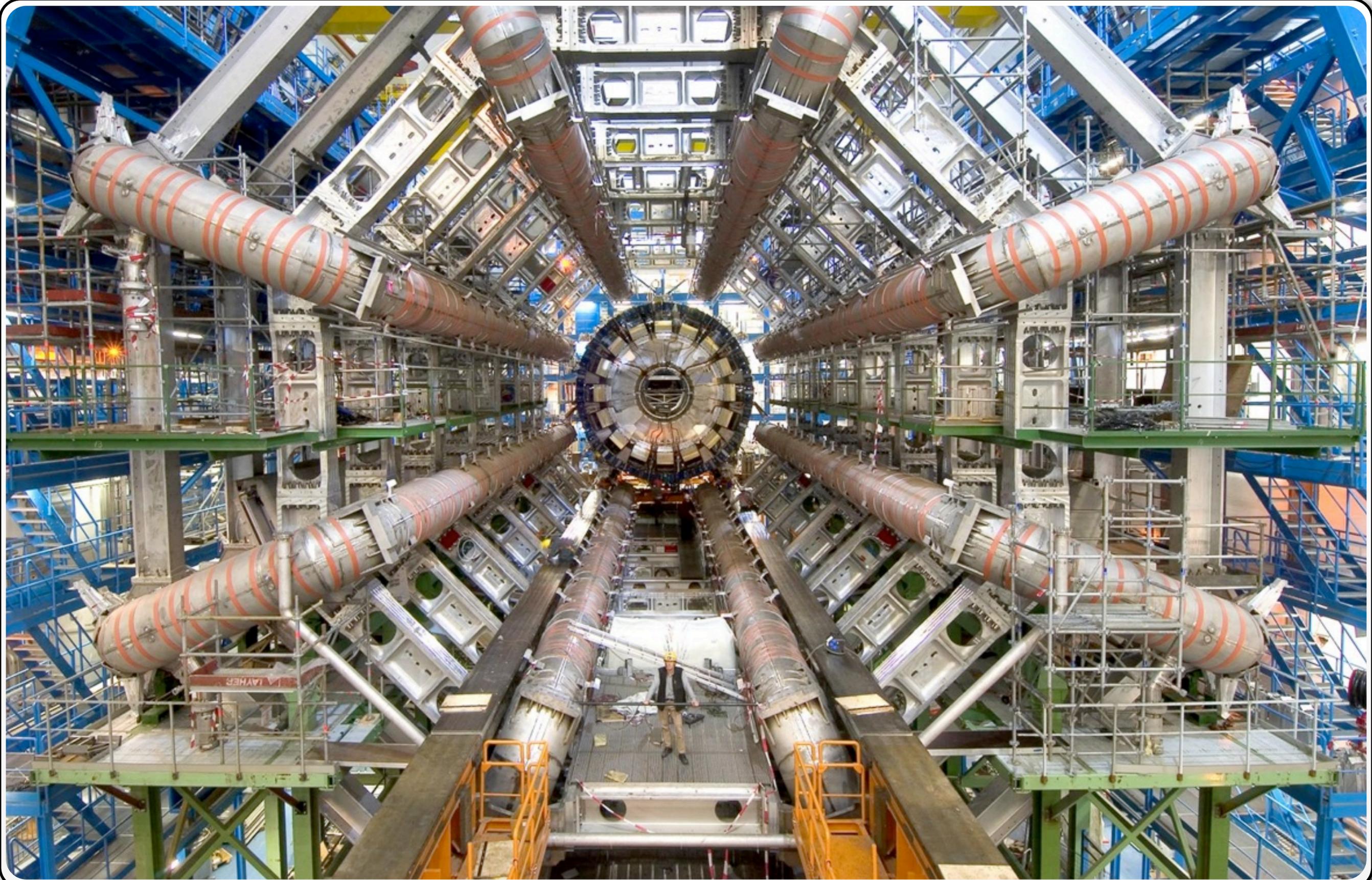


- Protonen durchlaufen LHC als **Pakete** (kein kontinuierlicher Strahl)
- LHC: etwa **2800 Paketen** mit jeweils etwa 100 Milliarden Protonen (vgl. 100 Milliarden Sandkörner $\approx 25 \text{ m}^3$)
- **Starke Dipolmagnete** (8,3 Tesla) halten Strahl auf Kreisbahn
- Protonen bewegen sich mit Lichtgeschwindigkeit minus 10 km/h: ca. 11.000 Umläufe pro Sekunde
- Gespeicherte Strahlenergie: **360 MJ**
- Einzelnes Proton: kinetische Energie einer **Mücke**
- Alle Protonen zusammen: kinetische Energie etwa wie **ICE3** mit 150 km/h

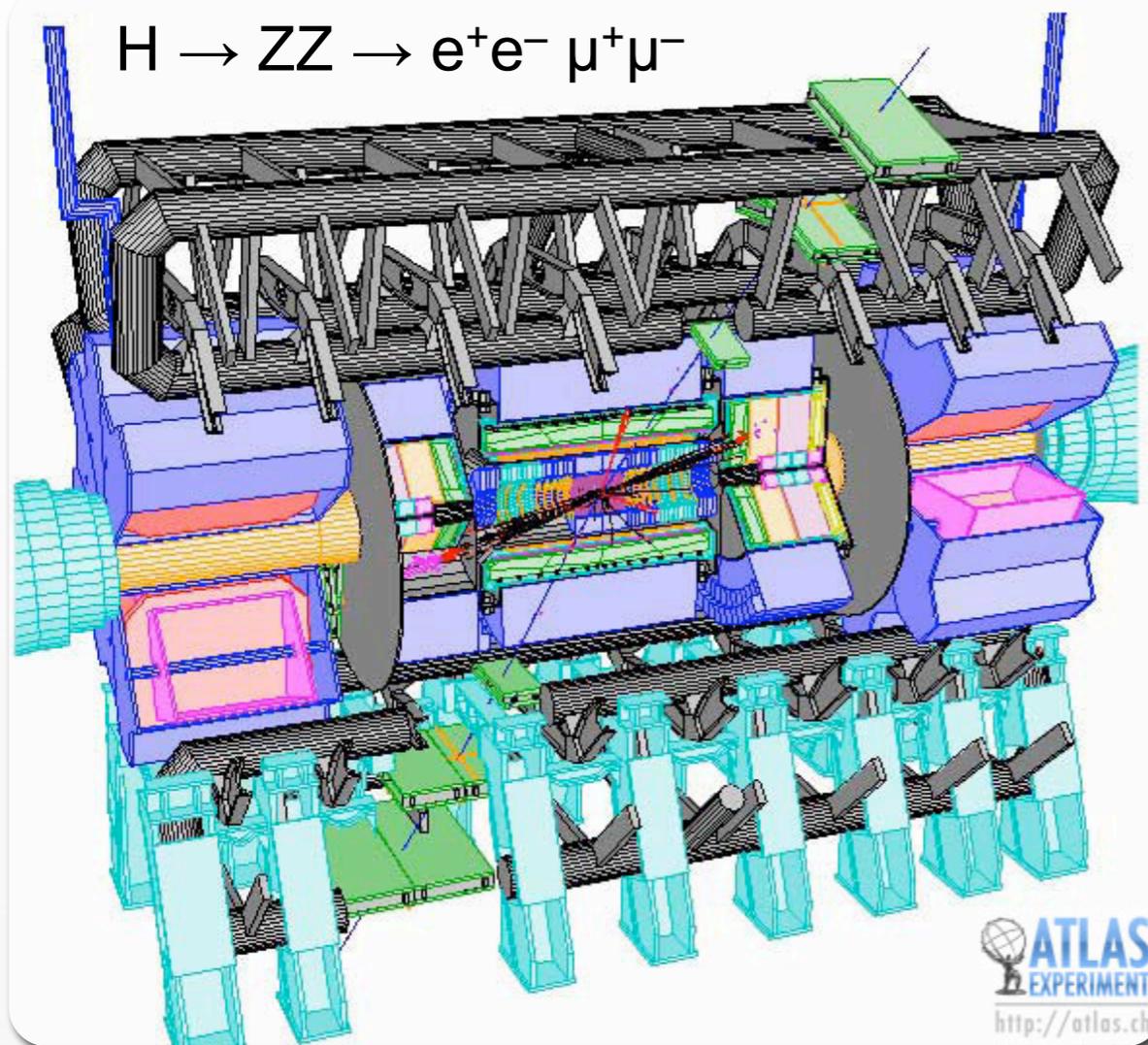


Experimente am LHC

Anforderungen an die LHC-Detektoren

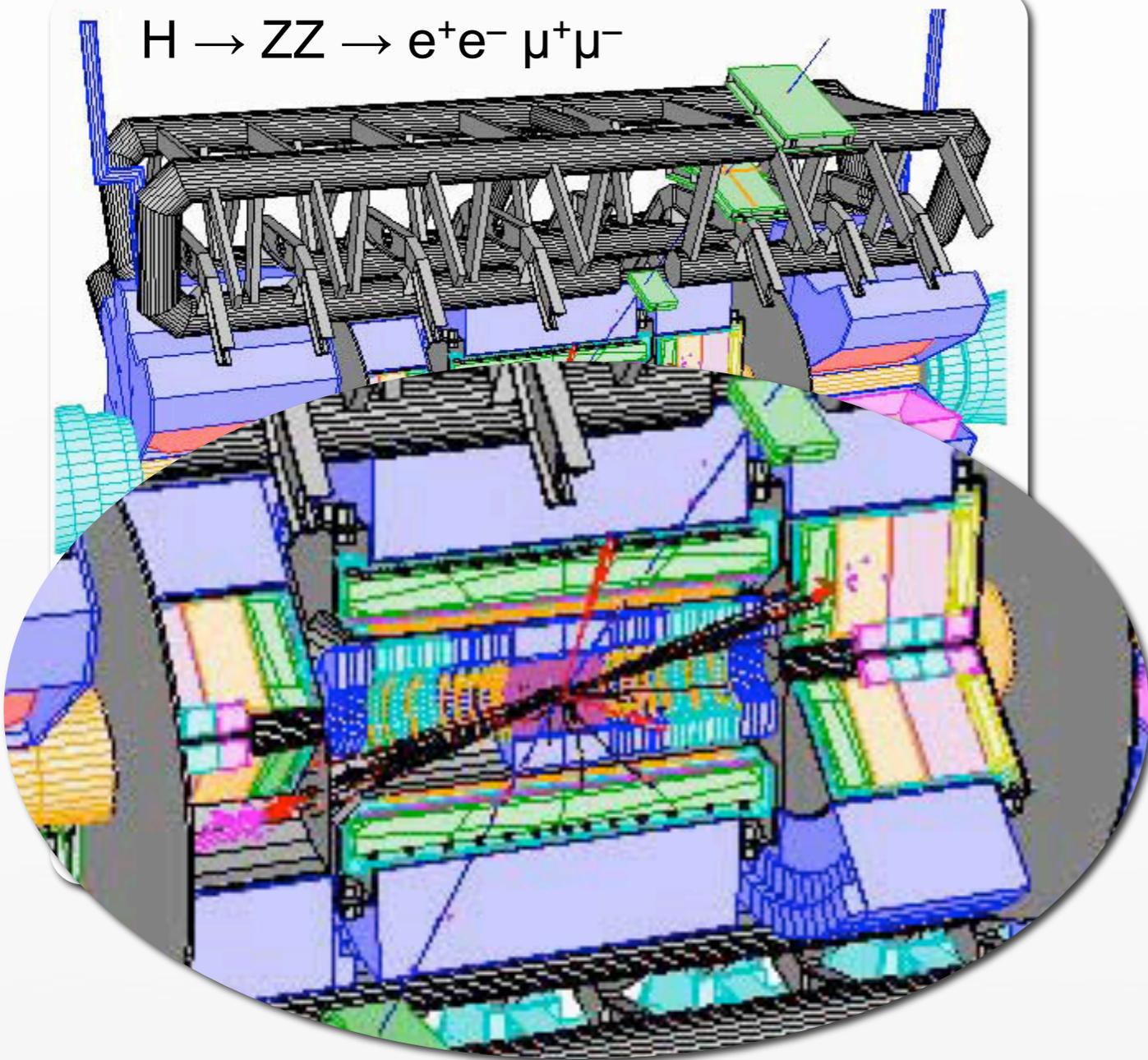


- Ziel: Entdeckung **neuer** Teilchen
 - Neue Teilchen werden **sehr selten** erzeugt
 - Beispiel: ca. ein Higgs-Boson in jeder 33.333.333.333. Kollision (produziert, noch nicht gemessen!)
- Lösung: Experiment **sehr häufig** wiederholen
 - LHC: Protonenstrahlen kreuzen sich 40 Millionen mal pro Sekunde, jedes Mal entstehen einige 100 Teilchen → schnell, viele Auslesekanäle („Digitalkamera mit **100 Mega-Pixeln** – 40 Millionen Bilder pro Sekunde“)
 - Mehr als 99.9999% der Kollisionen: „uninteressant“ (bekannte Teilchen) → Detektor muss **interessante** Kollisionen **auswählen** können



- **Vollständige** Charakterisierung aller Teilchen aus der Kollision:
 - Ort, Impuls, Energie, Teilchenart
 - Verschiedene Detektortypen, **zwiebelschalenartig** um Kollisionspunkt
- Neue Teilchen zerfallen sehr schnell
 - Nachweis von **Zerfallsprodukten**: geladene Leptonen (e, μ, τ), Photonen, Pionen, Protonen, Neutronen, Neutrinos
 - Nachweis **aller** Zerfallsprodukte → möglichst **hermetischer** Detektor

$H \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^- \mu^+\mu^-$



- **Vollständige** Charakterisierung aller Teilchen aus der Kollision:
 - Ort, Impuls, Energie, Teilchenart
 - Verschiedene Detektortypen, **zwiebelschalenartig** um Kollisionspunkt
- Neue Teilchen zerfallen sehr schnell
 - Nachweis von **Zerfallsprodukten**: geladene Leptonen (e, μ, τ), Photonen, Pionen, Protonen, Neutronen, Neutrinos
 - Nachweis **aller** Zerfallsprodukte → möglichst **hermetischer** Detektor

Teilchennachweis



Impulsmessung

Energiemessung

Teilchenidentifikation

Spurdetektor
(„Tracking“)

Kalorimeter
elektromagnetisch hadronisch

Myondetektor

Zerfallsprodukte der Kollision

Photon

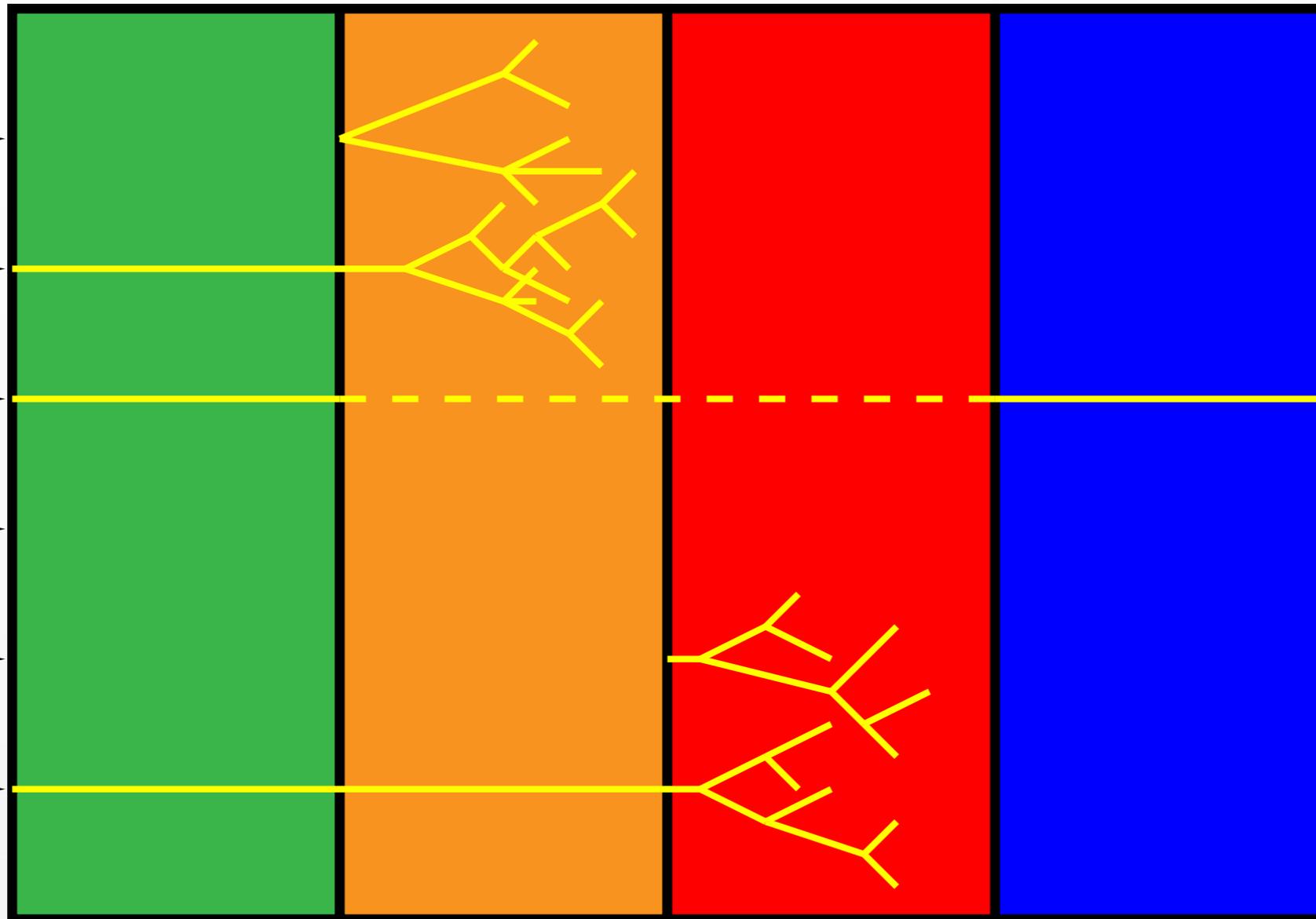
Elektron/Positron

Myon

Neutrino

Neutron

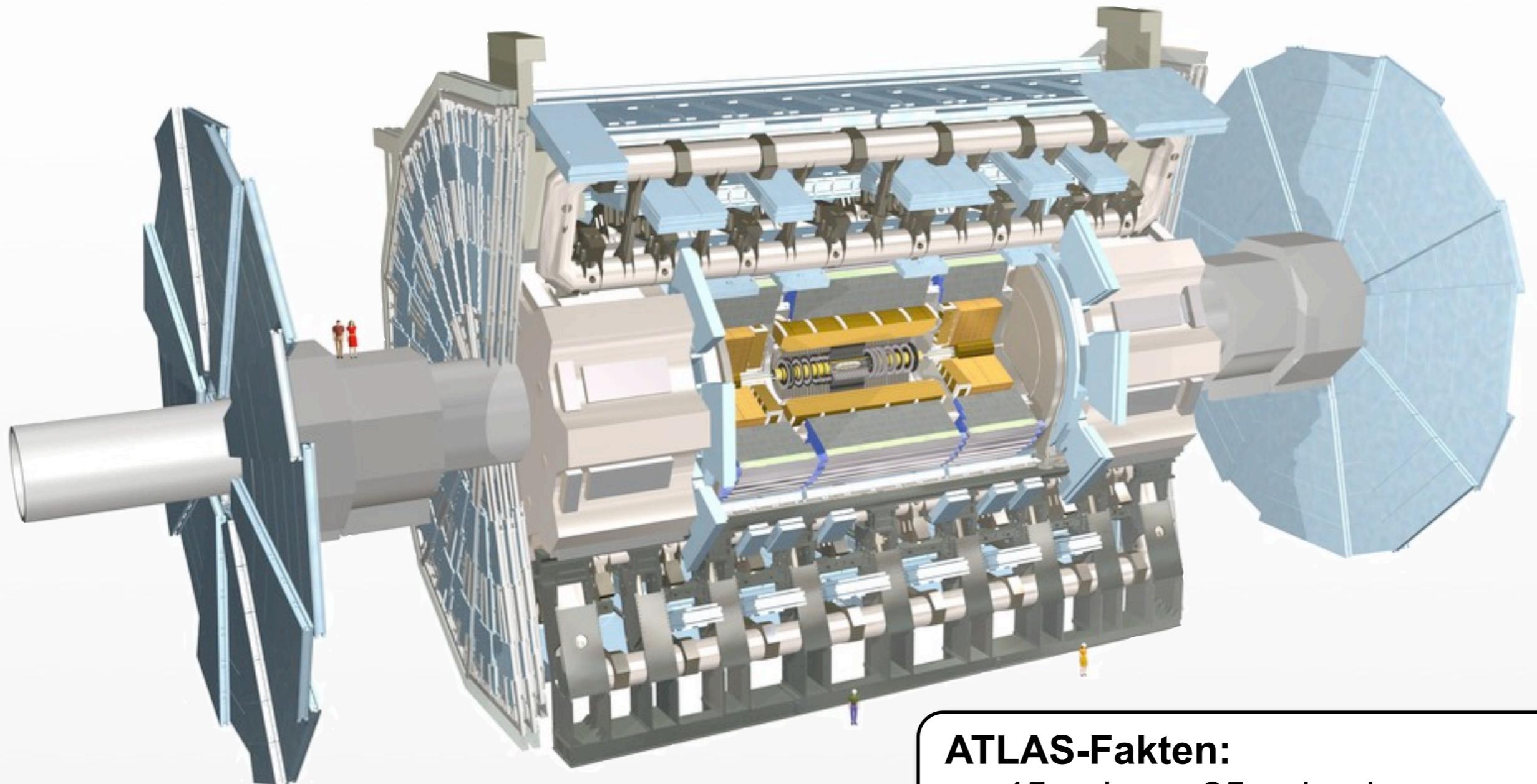
Pion, Proton



„Innen“

„Außen“

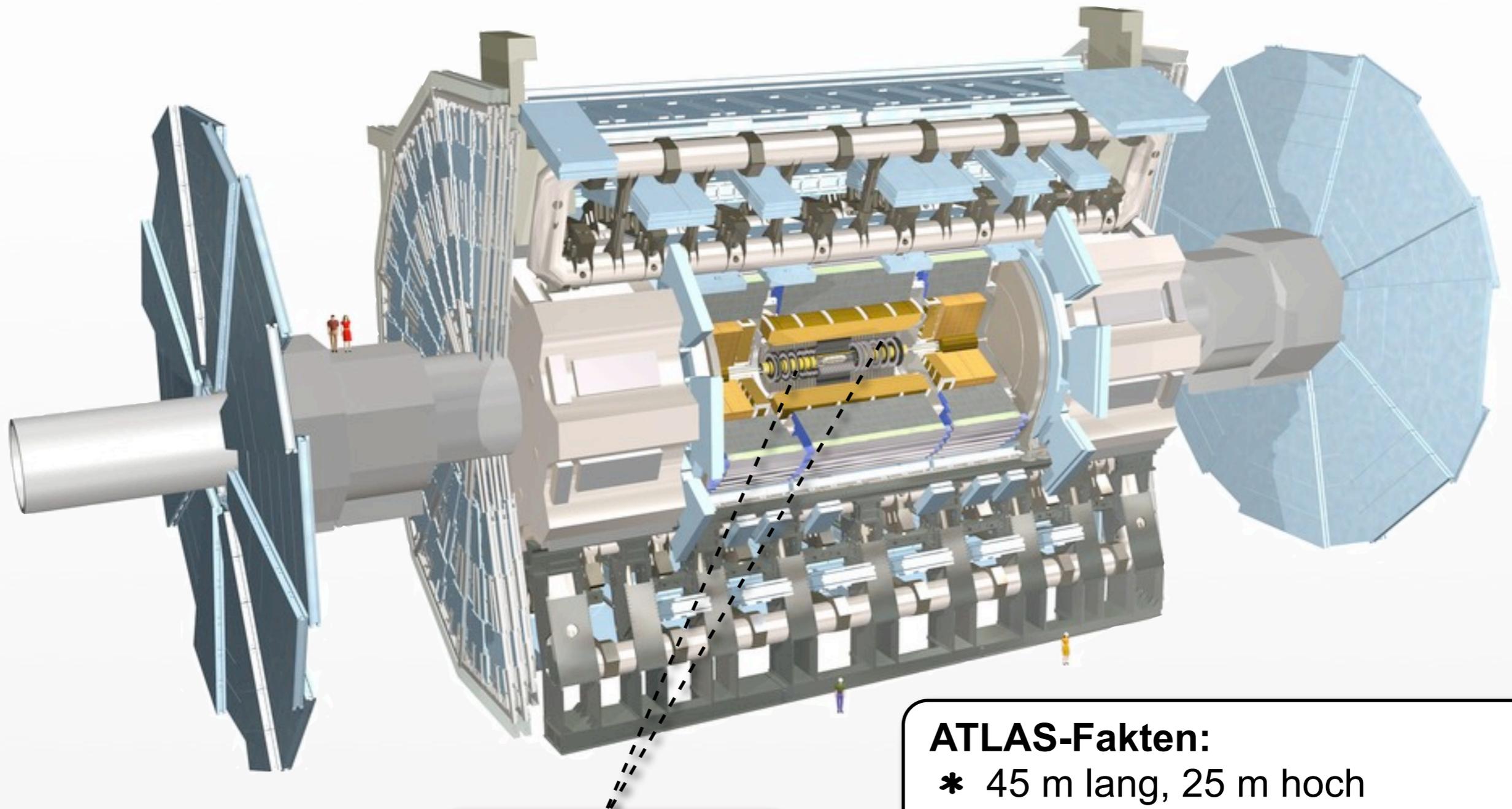
ATLAS – Der Riese



ATLAS-Fakten:

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

ATLAS – Der Riese



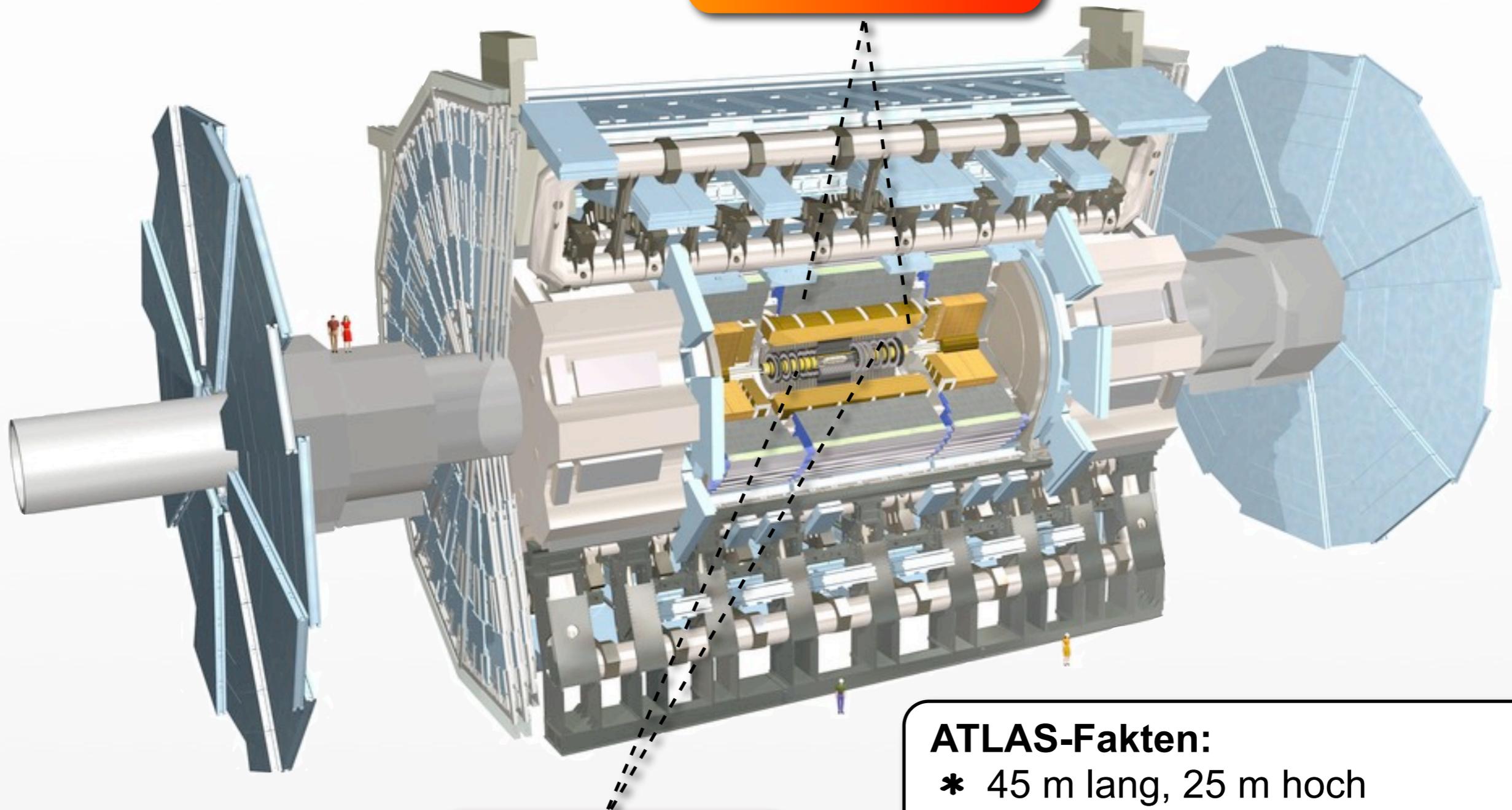
Spurdetektoren

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

ATLAS – Der Riese



Kalorimeter



Spurdetektoren

ATLAS-Fakten:

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

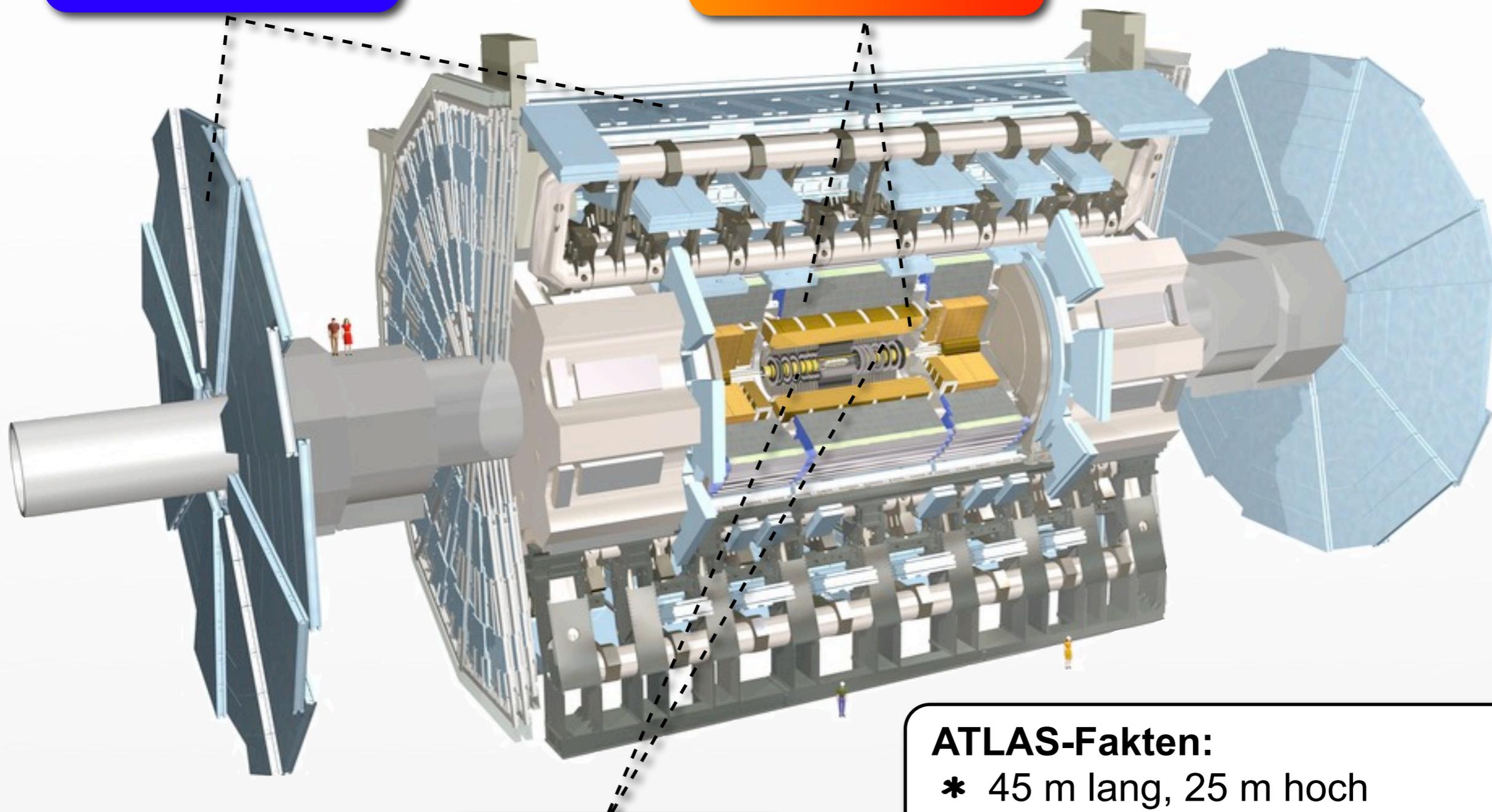
ATLAS – Der Riese



Myon-Detektor

Kalorimeter

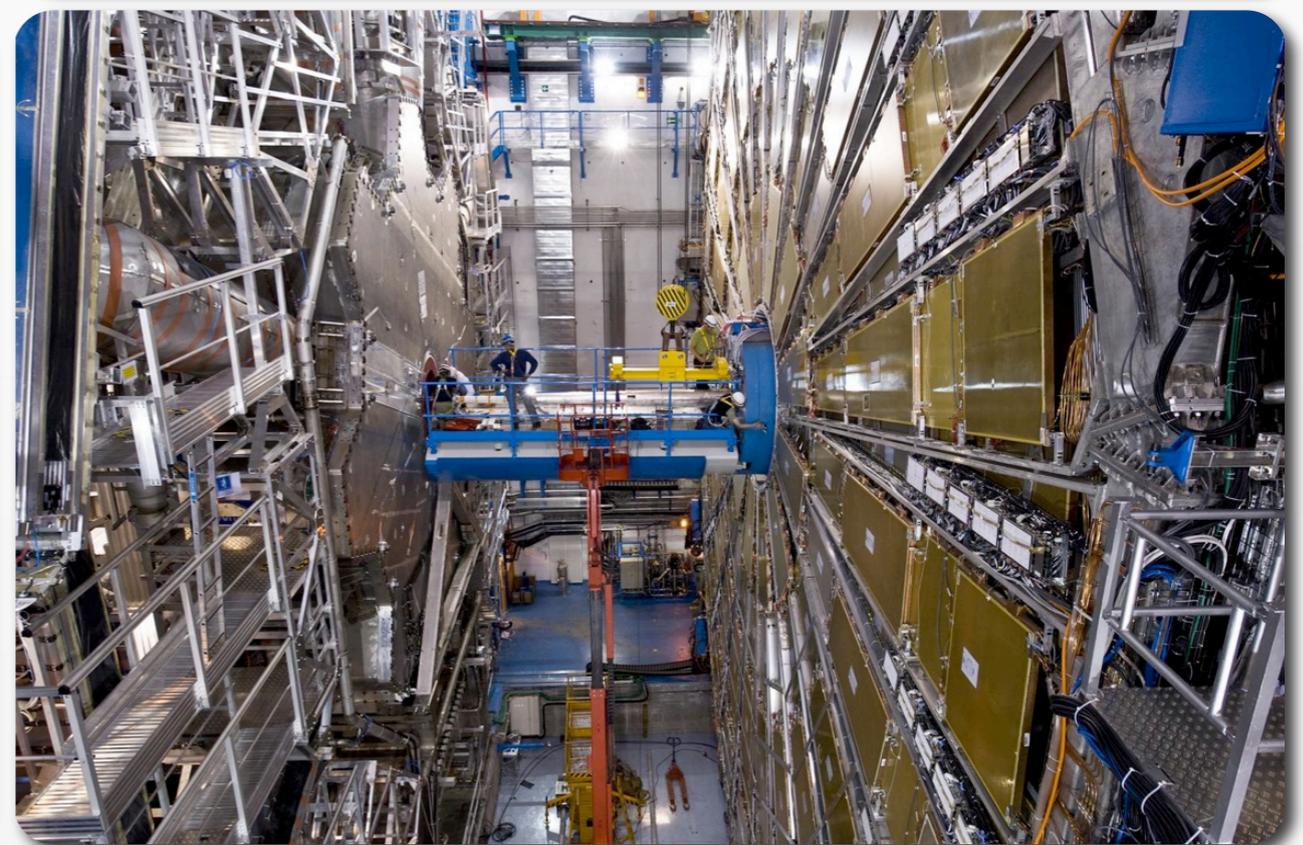
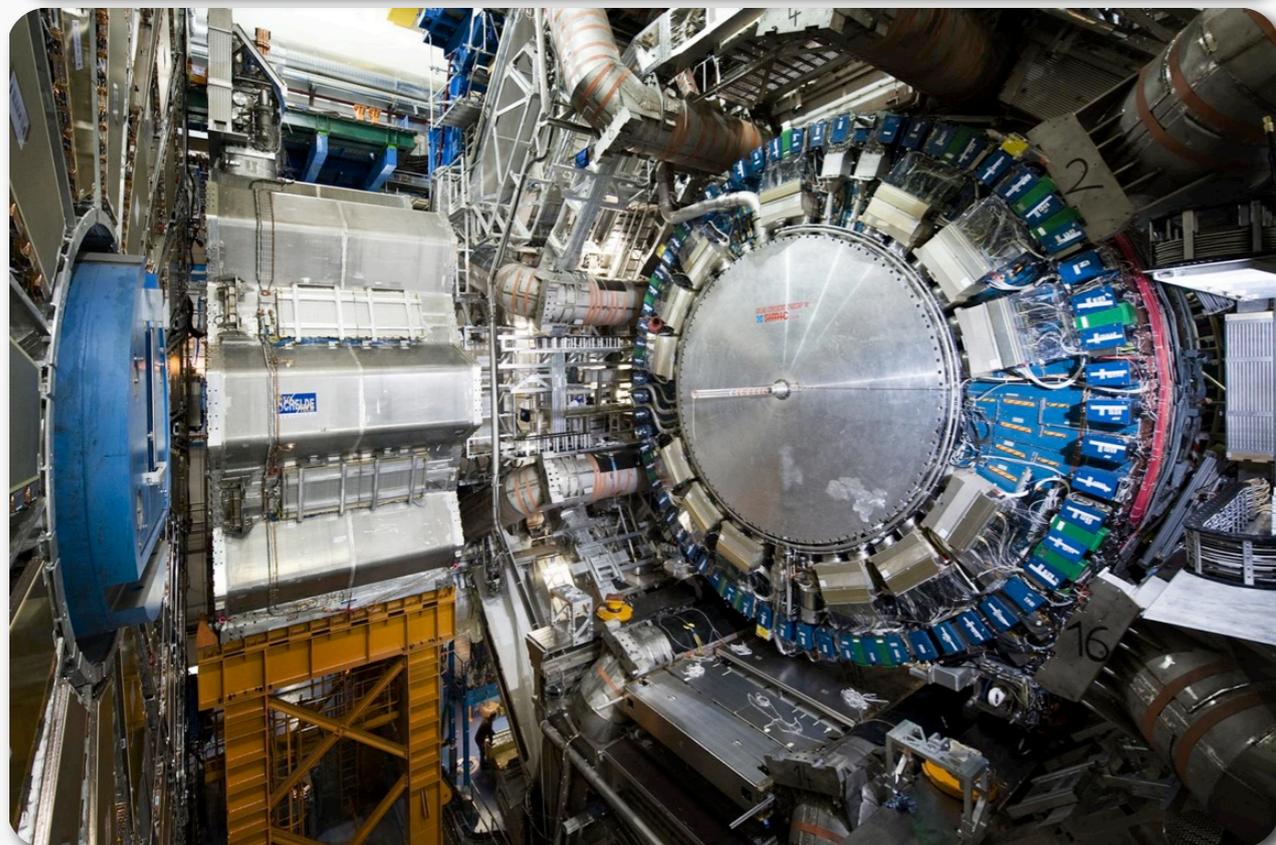
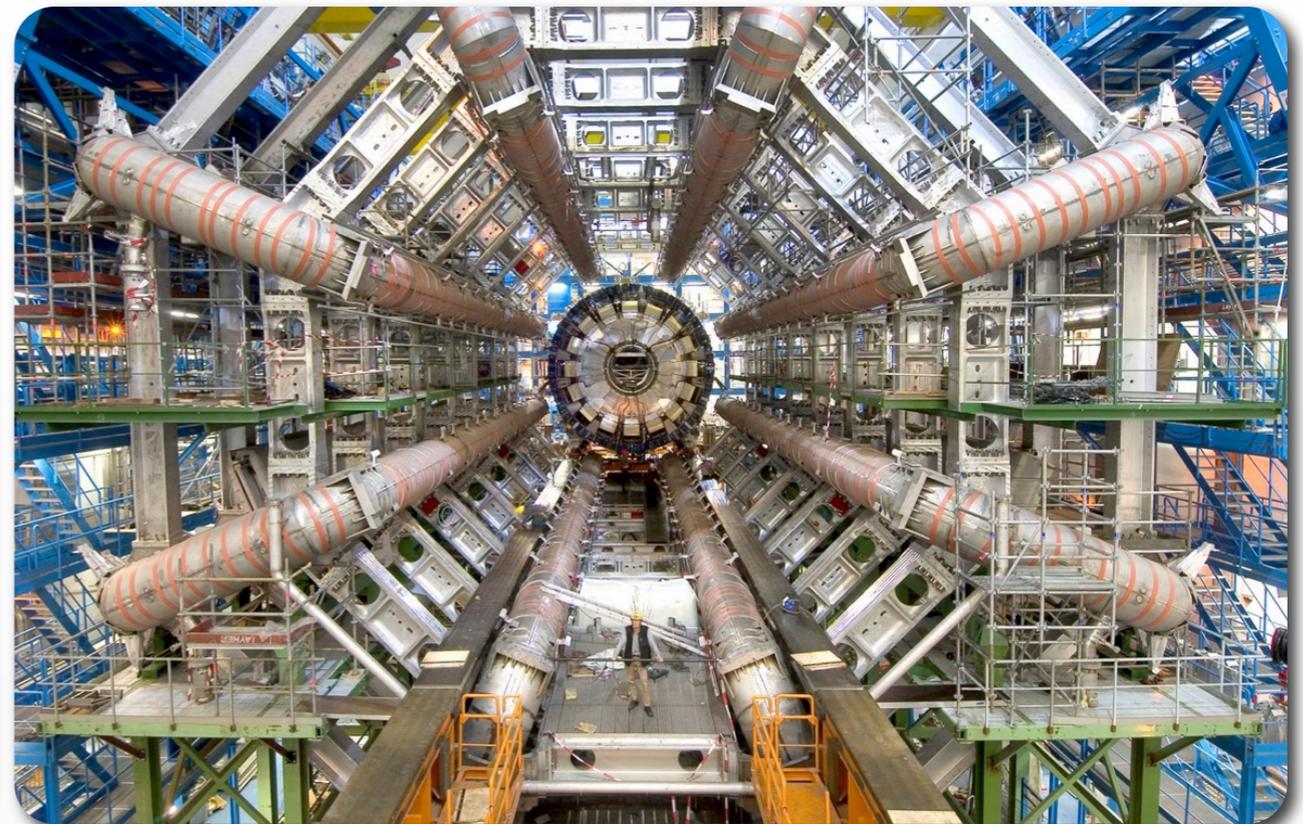
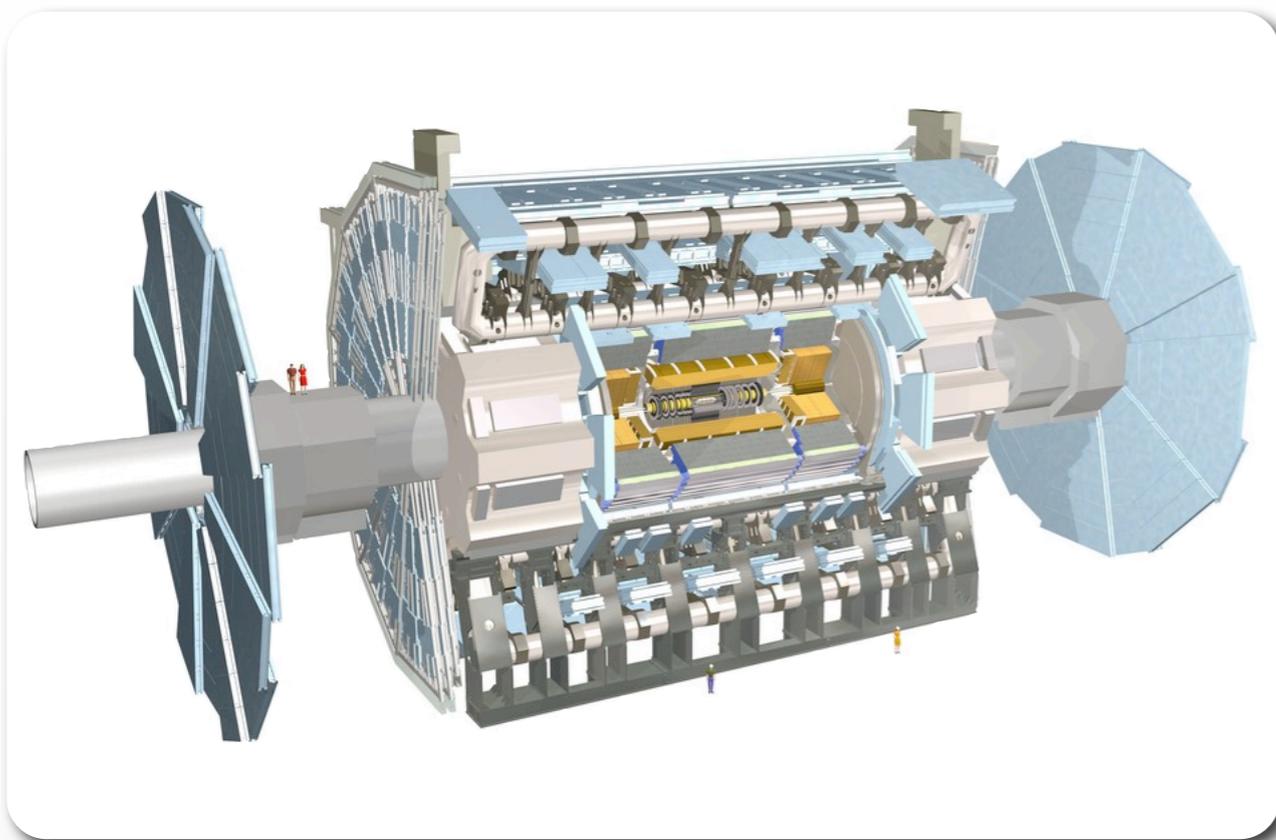
Spurdetektoren



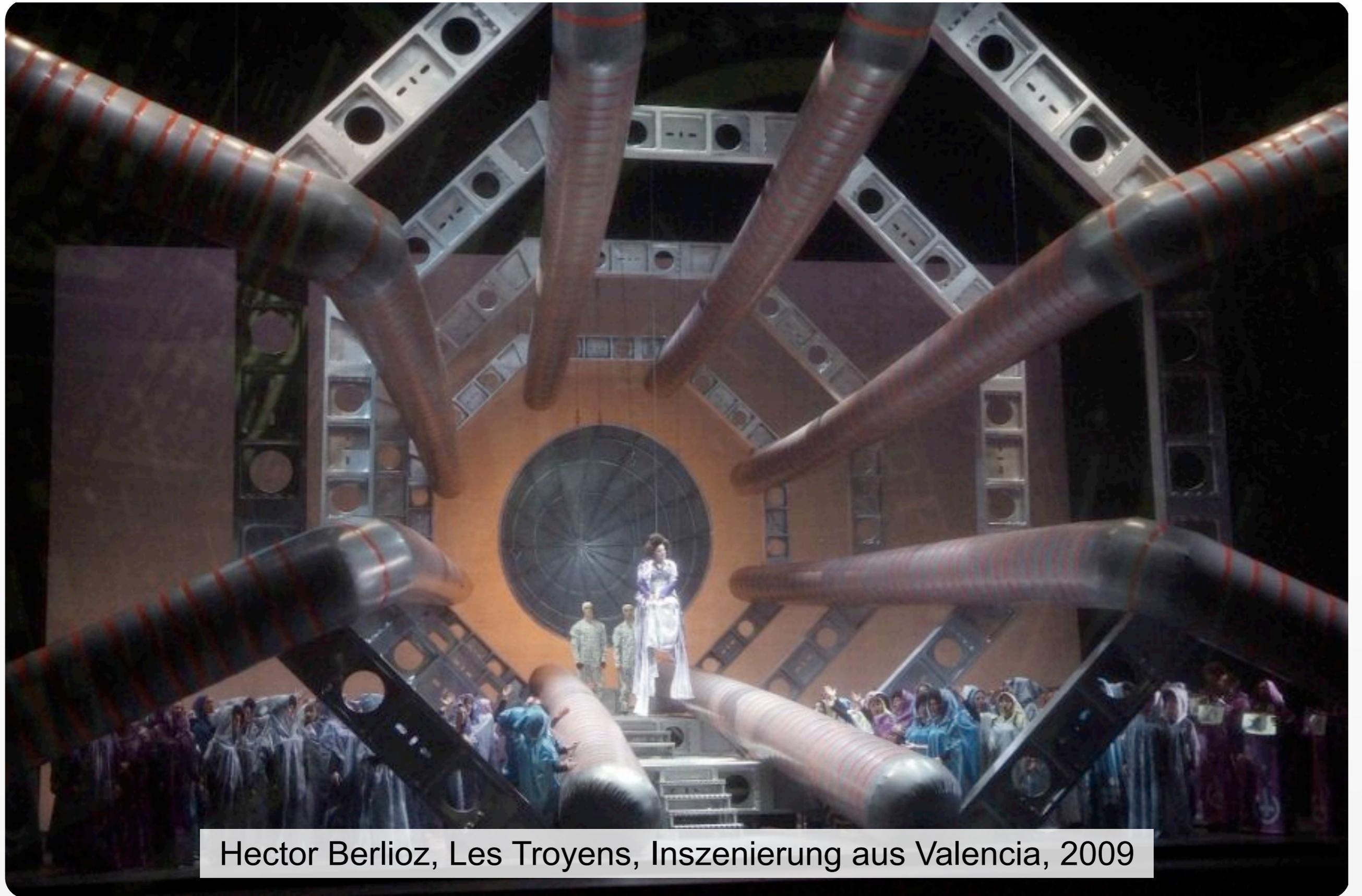
ATLAS-Fakten:

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

Der ATLAS-Detektors in Bildern



ATLAS als Opernbühne



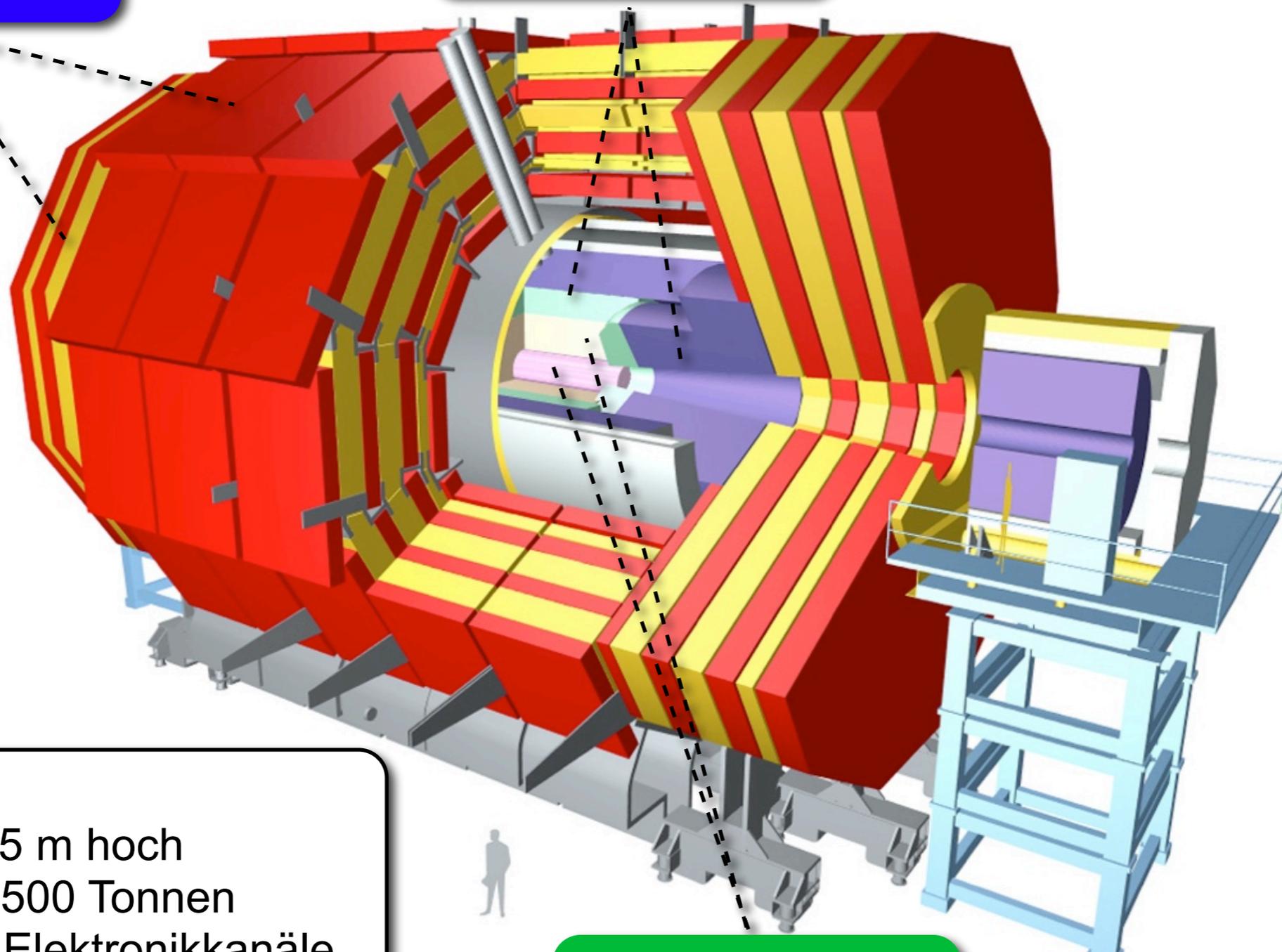
Hector Berlioz, Les Troyens, Inszenierung aus Valencia, 2009

CMS – Der Schwere



Myon-Detektor

Kalorimeter



Spurdetektoren

CMS-Fakten:

- * 21 m lang, 15 m hoch
- * Gewicht: 12.500 Tonnen
- * 80 Millionen Elektronikkanäle
- * Mitarbeiter: ca. 2500

ALICE – Schwerionen & Ursuppe

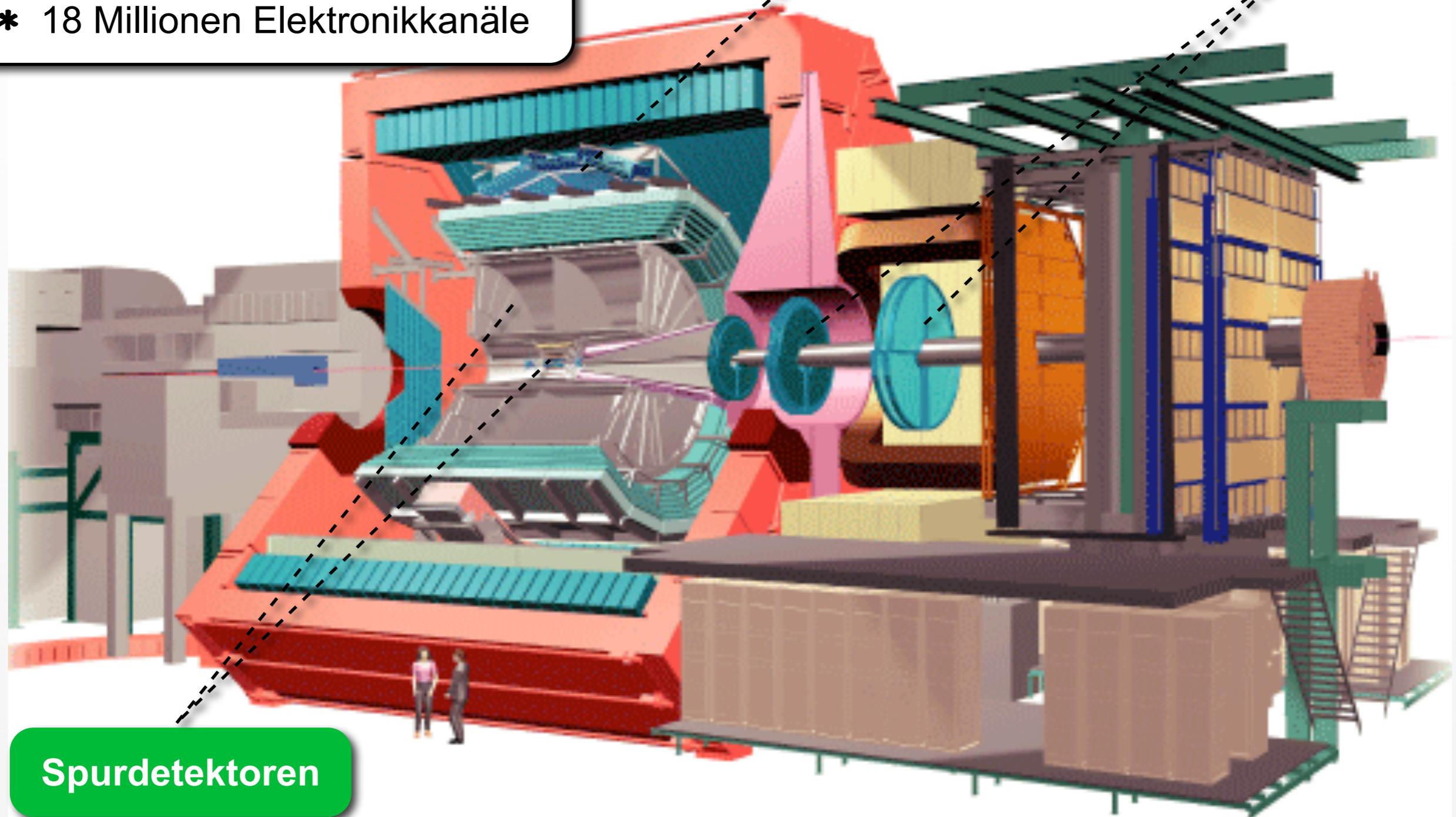


ALICE-Fakten:

- * 26 m lang, 16 m hoch
- * Gewicht: 10.000 Tonnen
- * 18 Millionen Elektronikkanäle

Kalorimeter

Myon-Detektor



Spurdetektoren

LHCb – Symmetrie Materie/Antimaterie

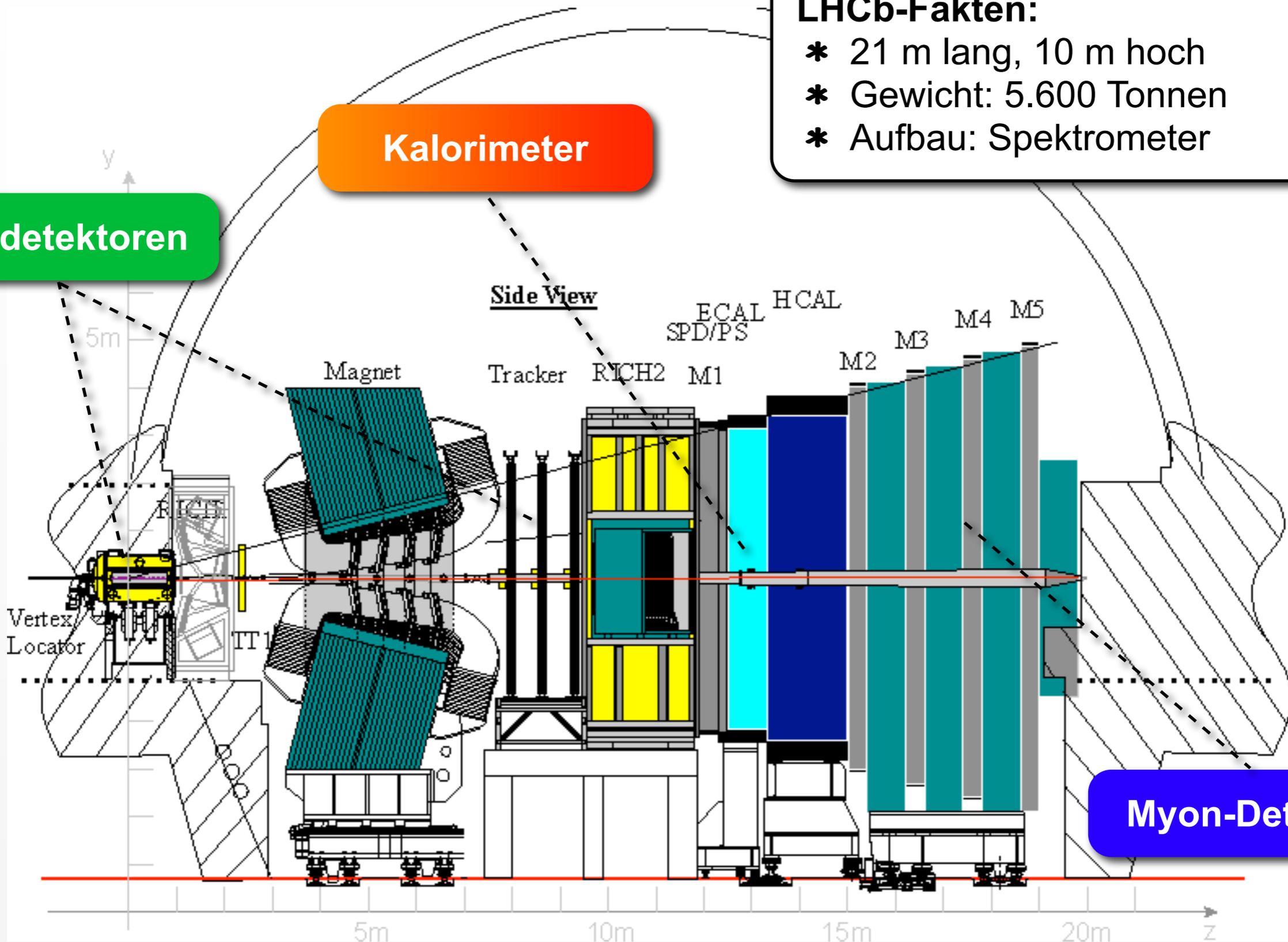


LHCb-Fakten:

- * 21 m lang, 10 m hoch
- * Gewicht: 5.600 Tonnen
- * Aufbau: Spektrometer

Kalorimeter

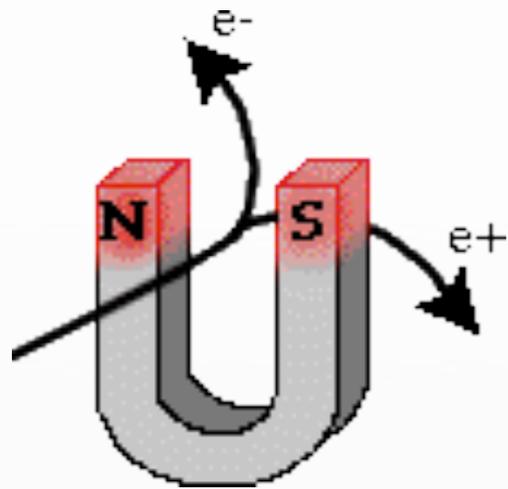
Spurdetektoren



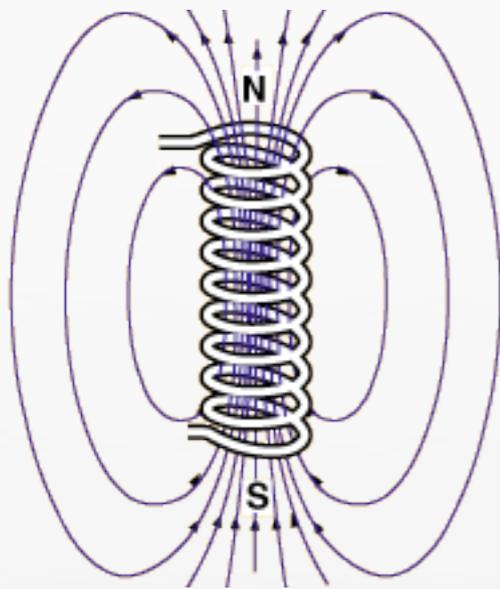
Myon-Detektor



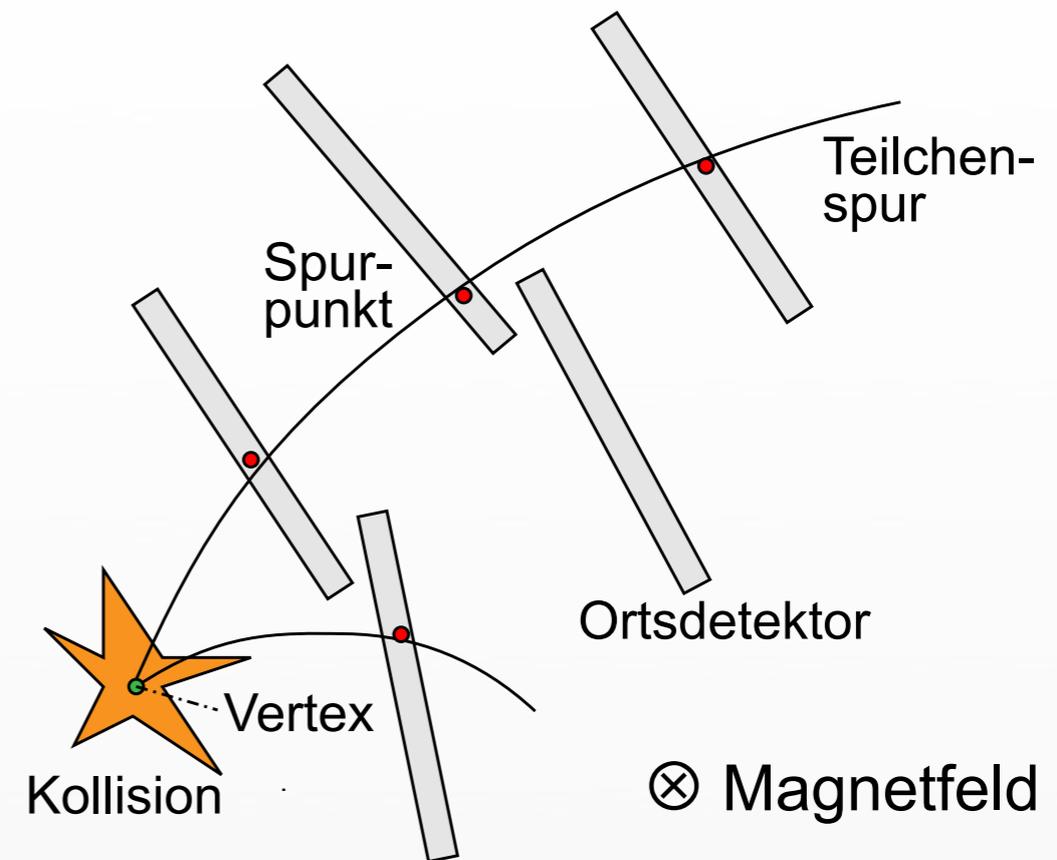
Nachweis von Teilchen



- Geladene Teilchen werden von **Magnetfeldern** abgelenkt
- **Lorentzkraft** als Zentripetalkraft: $e \vec{v} \times \vec{B} = \frac{mv^2}{r} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$
- Typische Magnete in Collider-Detektoren
 - **Solenoidmagnet** (häufig supraleitend) mit Rückflussjoch
 - Ausnahme: LHCb → **Dipolmagnet**
- Homogenes Magnetfeld: **helikale** (= schraubenlinienförmige) Bewegung
 - Senkrecht zu Feldlinien: Kreisbahn
 - Parallel zu Feldlinien: gleichförmig-geradlinig
- Impuls senkrecht zu Magnetfeld aus **Krümmungsradius** der Teilchenspur:
 $p_T [\text{GeV}/c] = 0.3 B[\text{T}] \cdot r[\text{m}]$



- Vermessung der Teilchenspuren: mehrlagiger **Spurdetektor**
- Elektrische Signal in jeder Detektorlage → **Spurpunkte**
- Spuranpassung:
 - **Mustererkennung**: liegen Spurpunkte auf gemeinsamer Helixbahn?
 - **Spurfit**: Anpassung der Helixparameter
- Vertexanpassung: zeigen Spuren auf gemeinsamen Ursprungsort („Vertex“)?



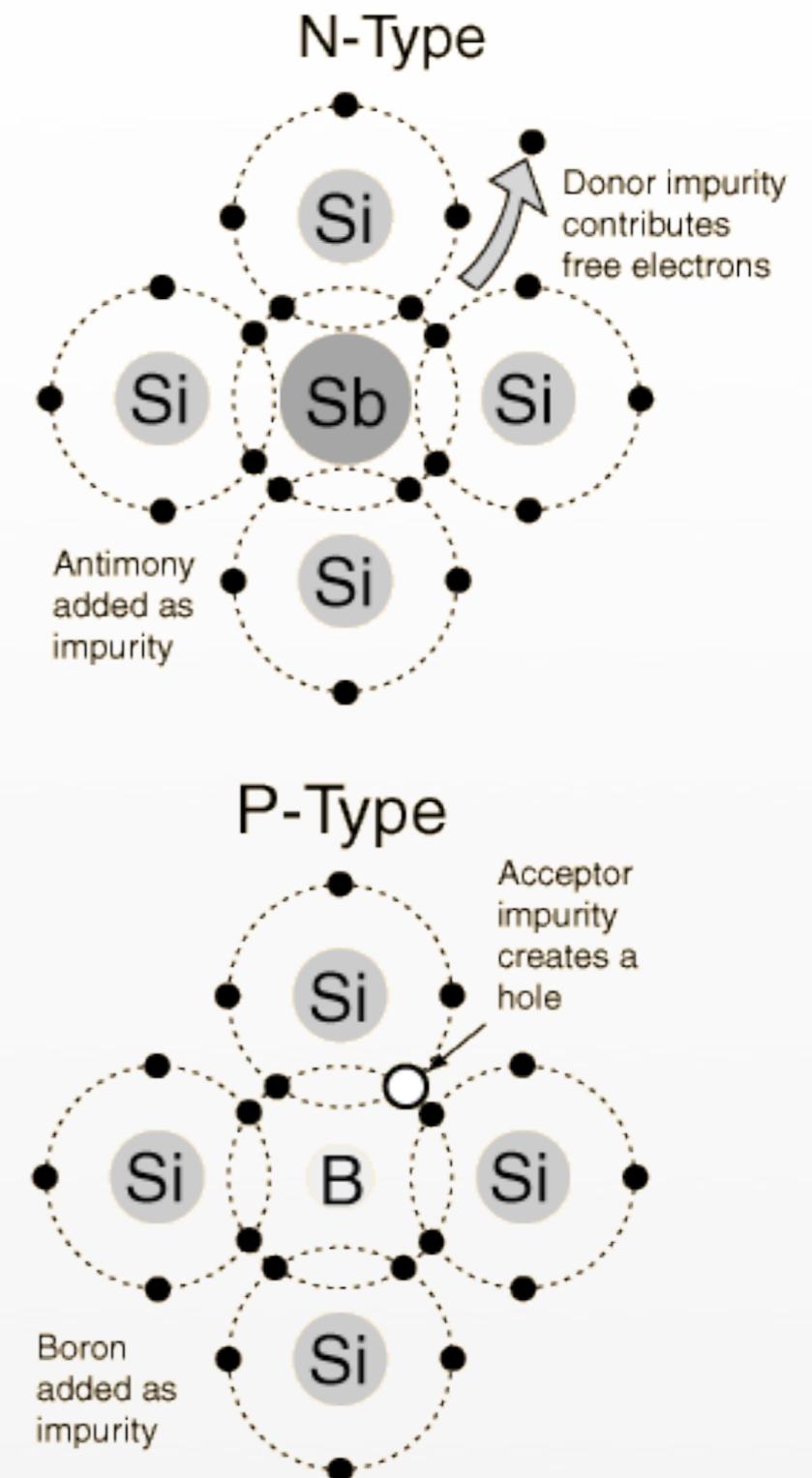
Spuranpassung: minimiere

$$\chi^2 = \sum_i \frac{(x_i - \bar{x})^2}{\sigma_i^2}$$

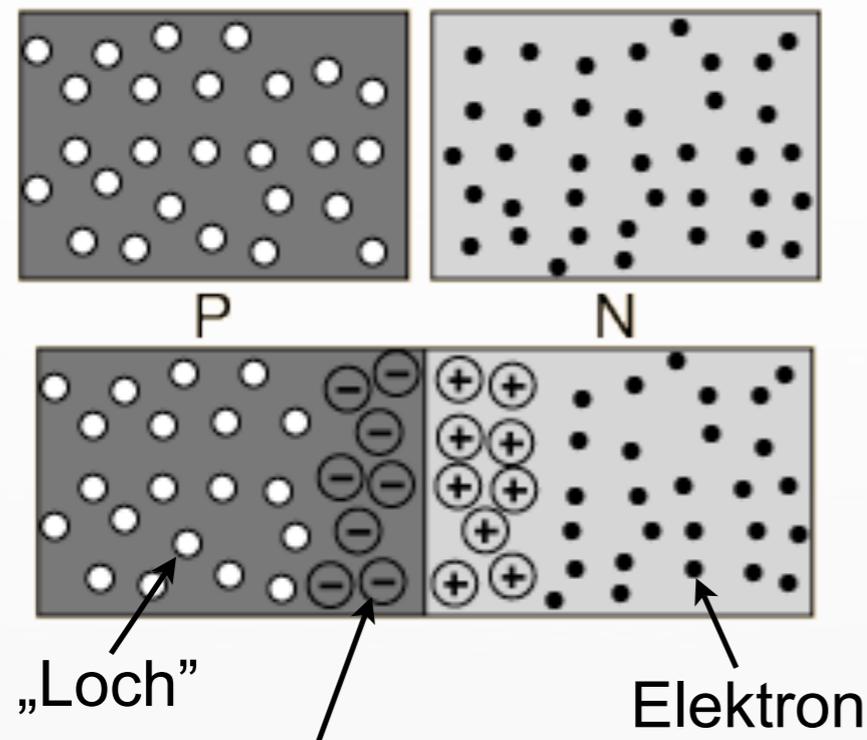
x_i Messung

σ_i Unsicherheit

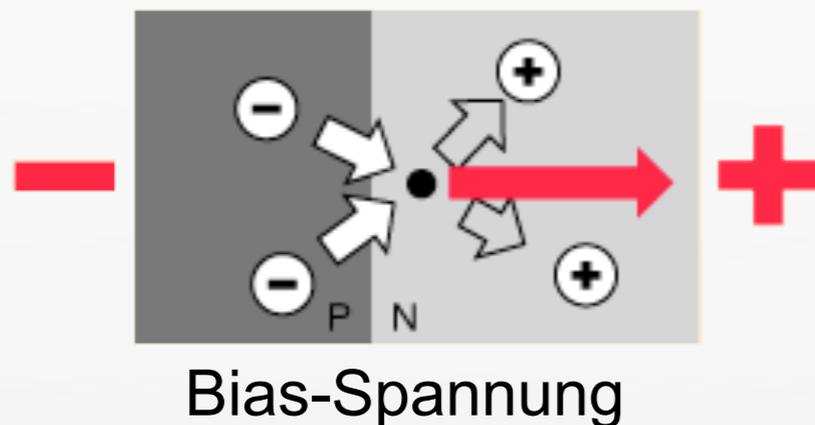
- Heutige Spurdetektoren: **Halbleiter**
- Typische Halbleiter (z.B. Silizium, GaAs)
 - Kristallgitter mit **4 Valenzelektronen**
 - Zwei Arten von **Ladungsträgern**:
 - Negativ – freie Elektronen
 - Positiv – Elektronen wandern zwischen freien Positionen im Kristallgitter („Löcher“)
- Veränderung der Eigenschaften durch **Dotierung**:
 - Füge Atome mit 5 Valenzelektronen hinzu (P, As, Sb): „**n-dotiert**“ (zusätzliche Elektronen)
 - Füge Atome mit 3 Valenzelektronen hinzu (B, Al, Ga, In): „**p-dotiert**“ (zusätzliche Löcher)
- Tieferes Verständnis: Bändermodell



[hyperphysics.phy-astr.gsu.edu]



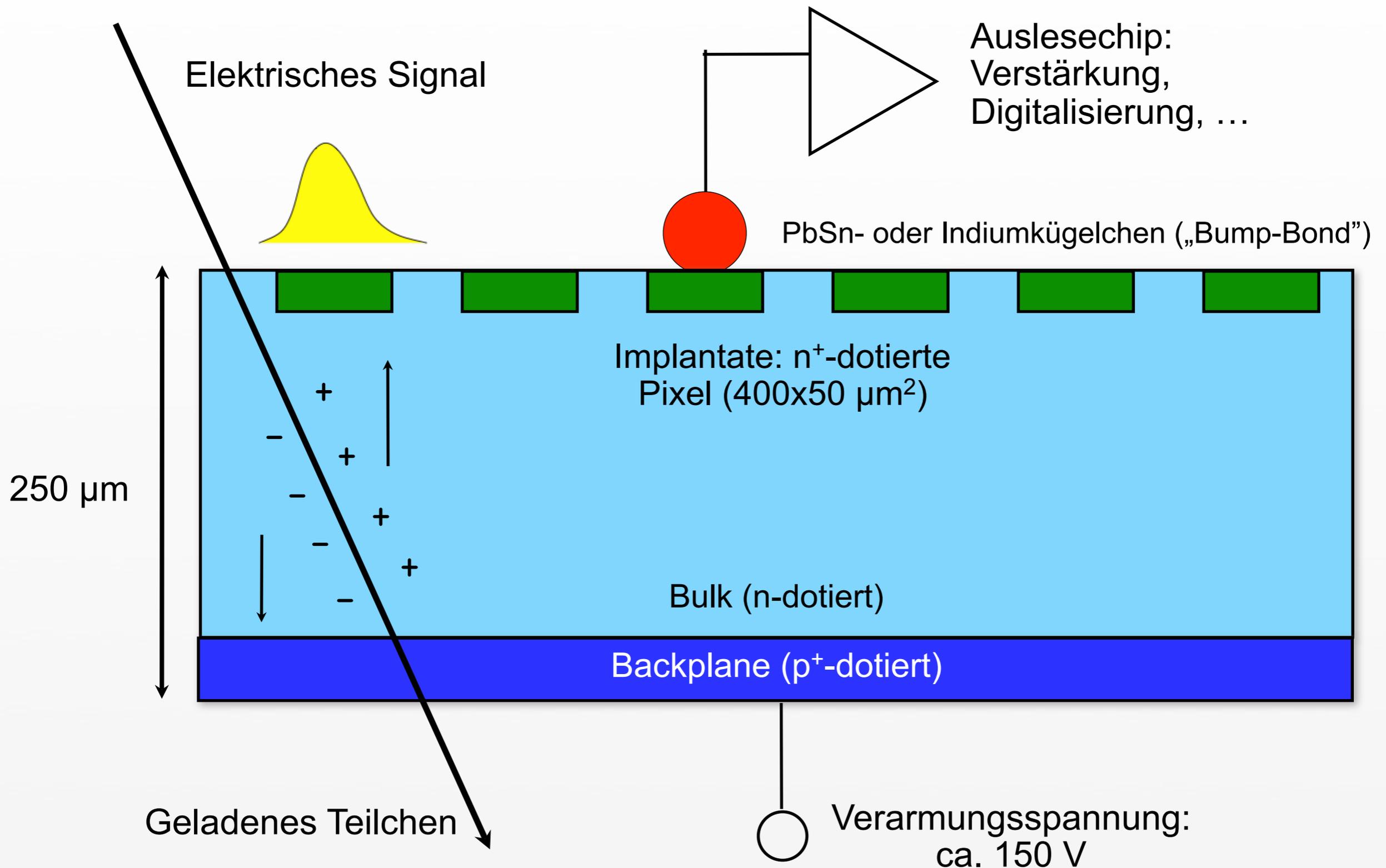
Verarmungszone nach
Rekombination: Ionen



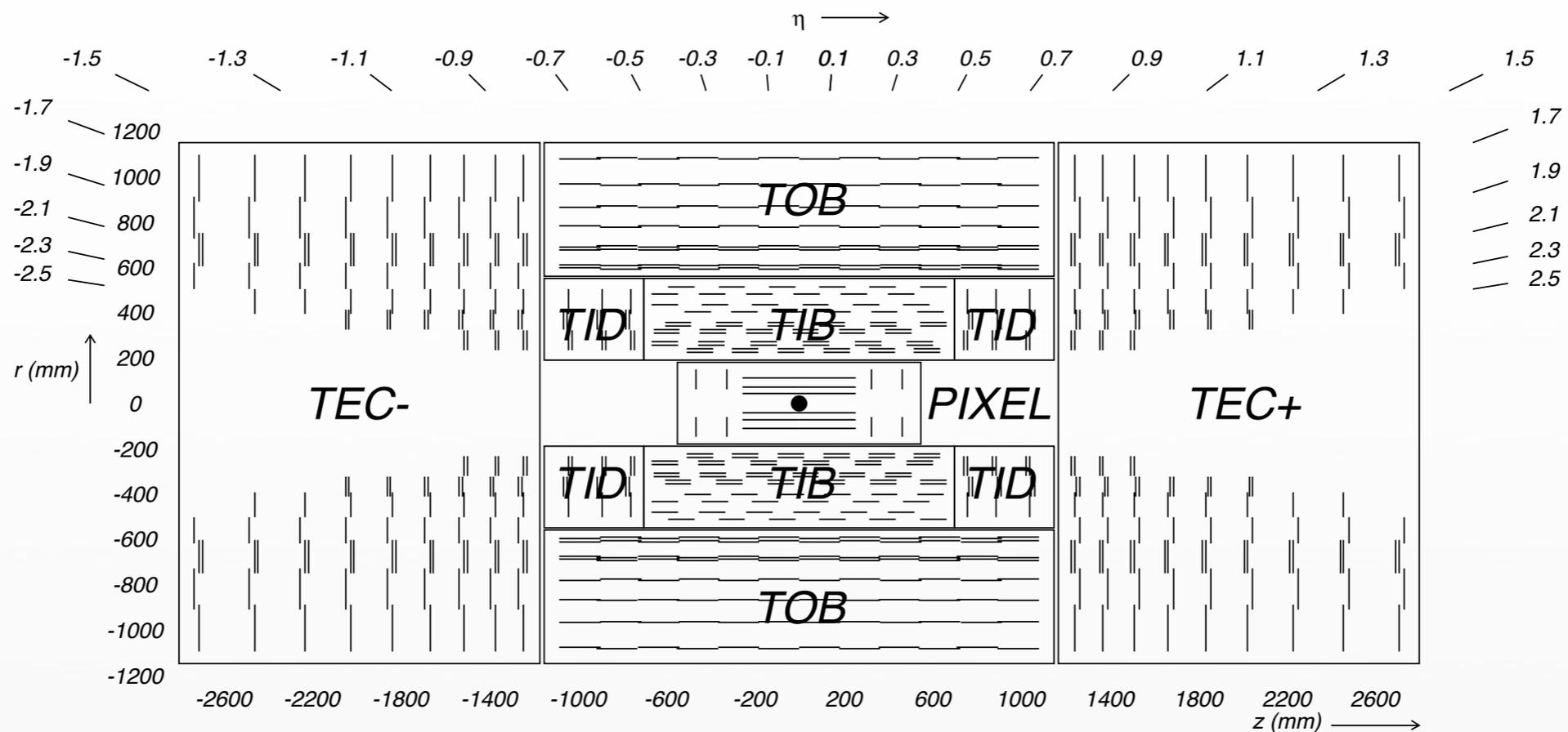
[hyperphysics.phy-astr.gsu.edu]

- Übergang zwischen p -dotiertem und n -dotiertem Halbleiter
- Ladungsträger **diffundieren** zur anderen Seite und **rekombinieren**
- Ausbildung einer nicht-leitenden Schicht („Verarmungszone“)
- (Umgekehrte) Bias-Spannung
 - Entfernung von Ladungsträgern
→ **Vergrößerung** der Verarmungszone
 - Durchgang geladene Teilchen: neue Ladungsträger durch **Ionisierung**
→ elektrisches Signal

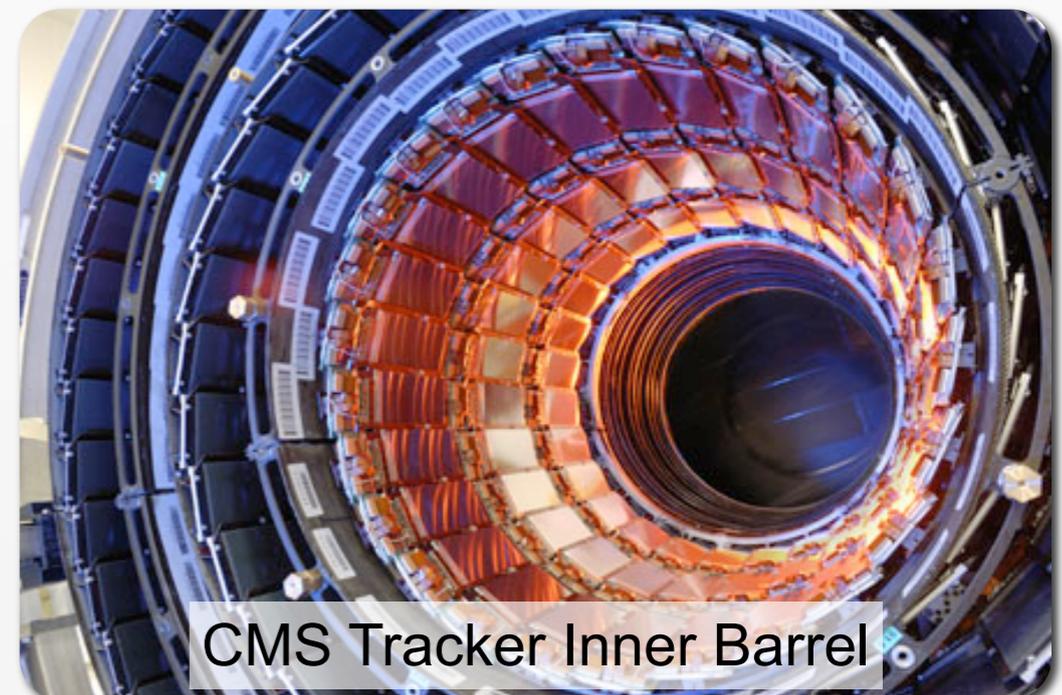
Funktionsprinzip: Siliziumdetektoren



Beispiel: CMS-Spurdetektor

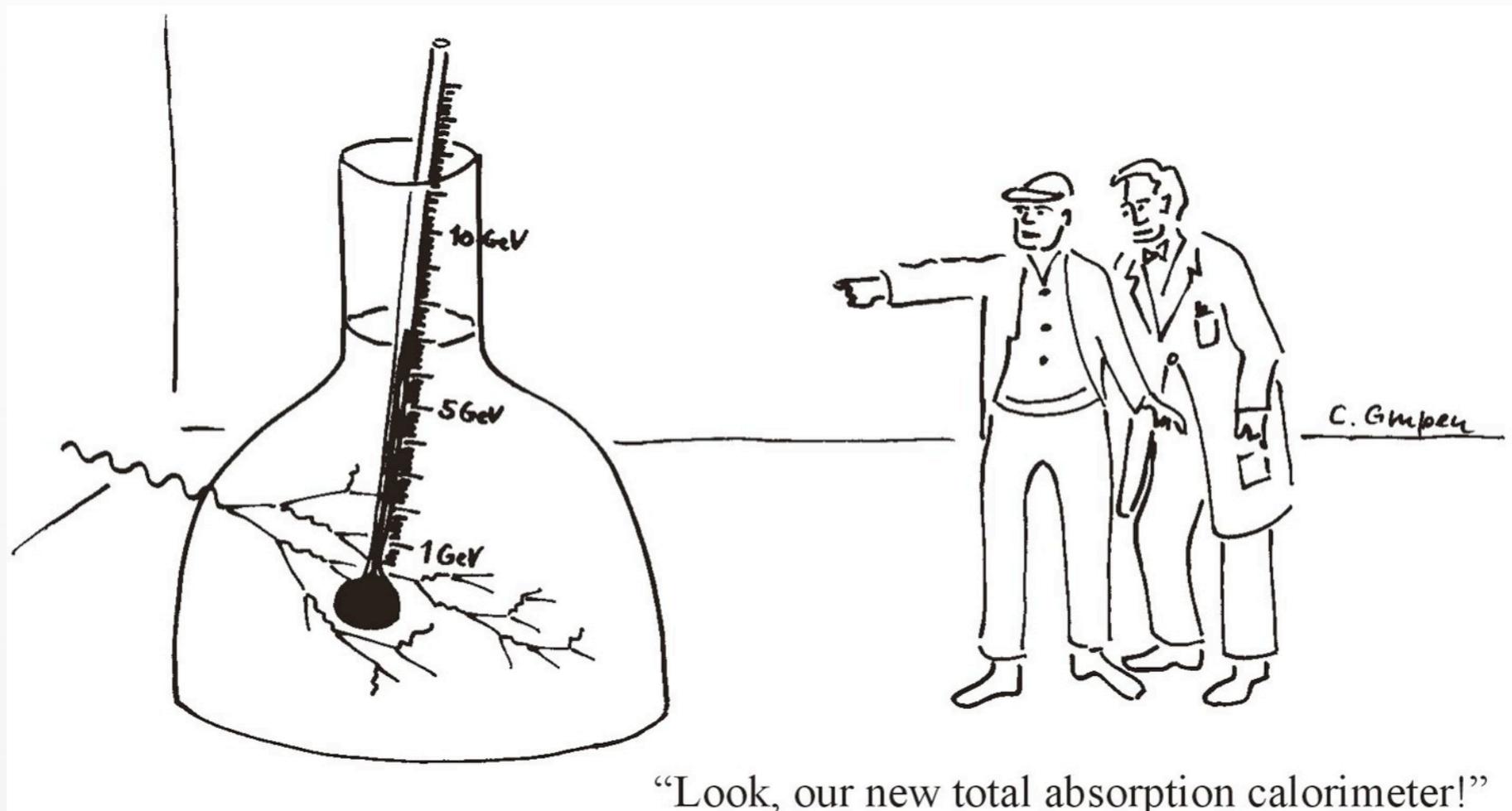


- CMS-Experiment: **gesamter** Spurdetektor aus Silizium
- Mehr als **200 m²** Detektorfläche (≈ Tennisplatz)
- Innere Lagen: **Pixeldetektoren** → hohe Auflösung
- Äußere Lagen: **Streifendetektoren** → große Abdeckung

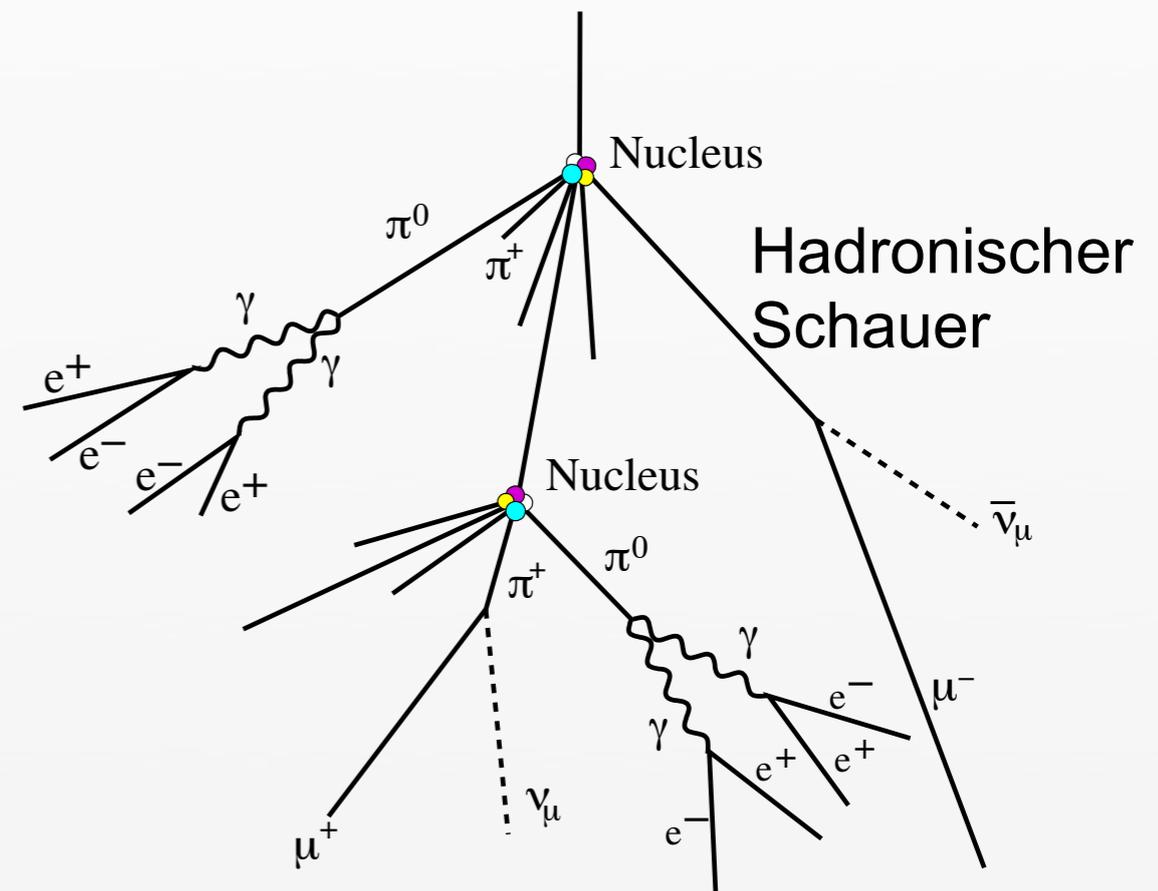
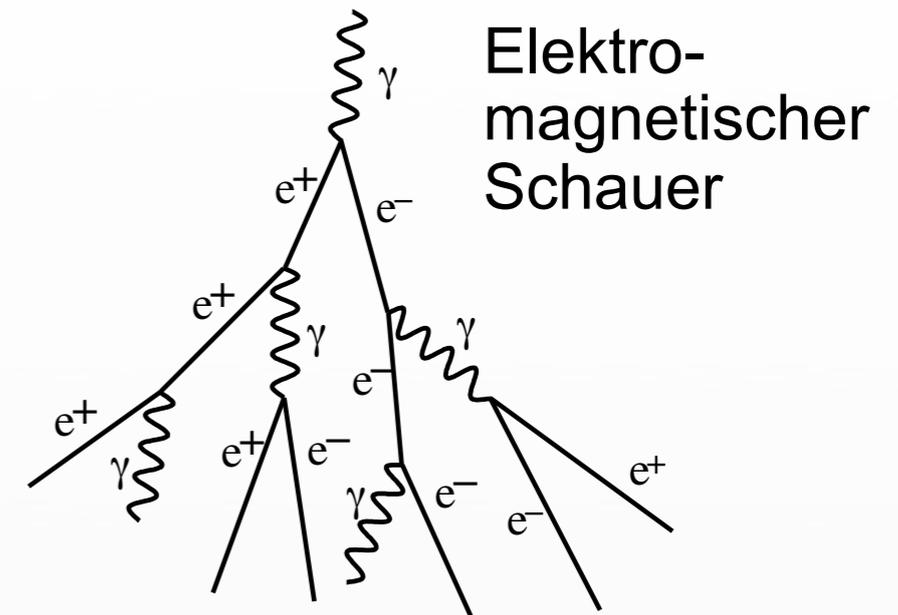


CMS Tracker Inner Barrel

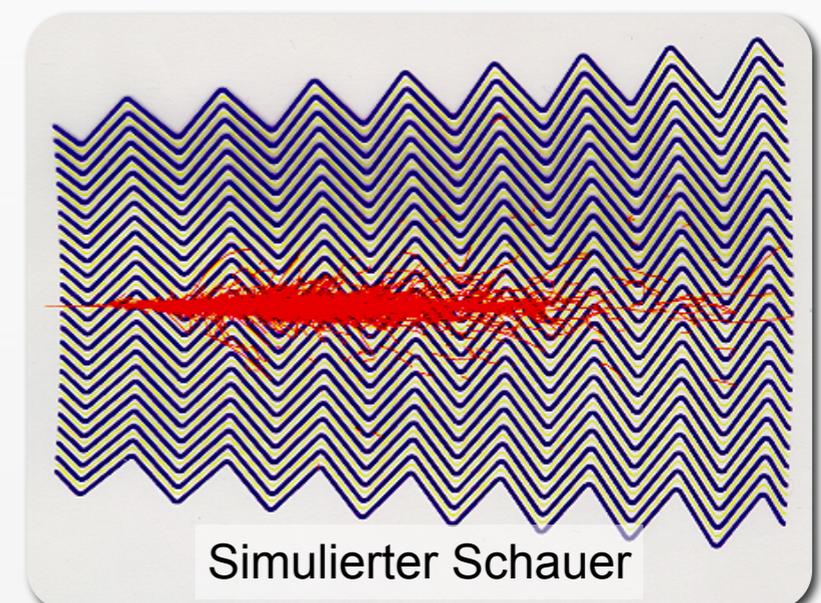
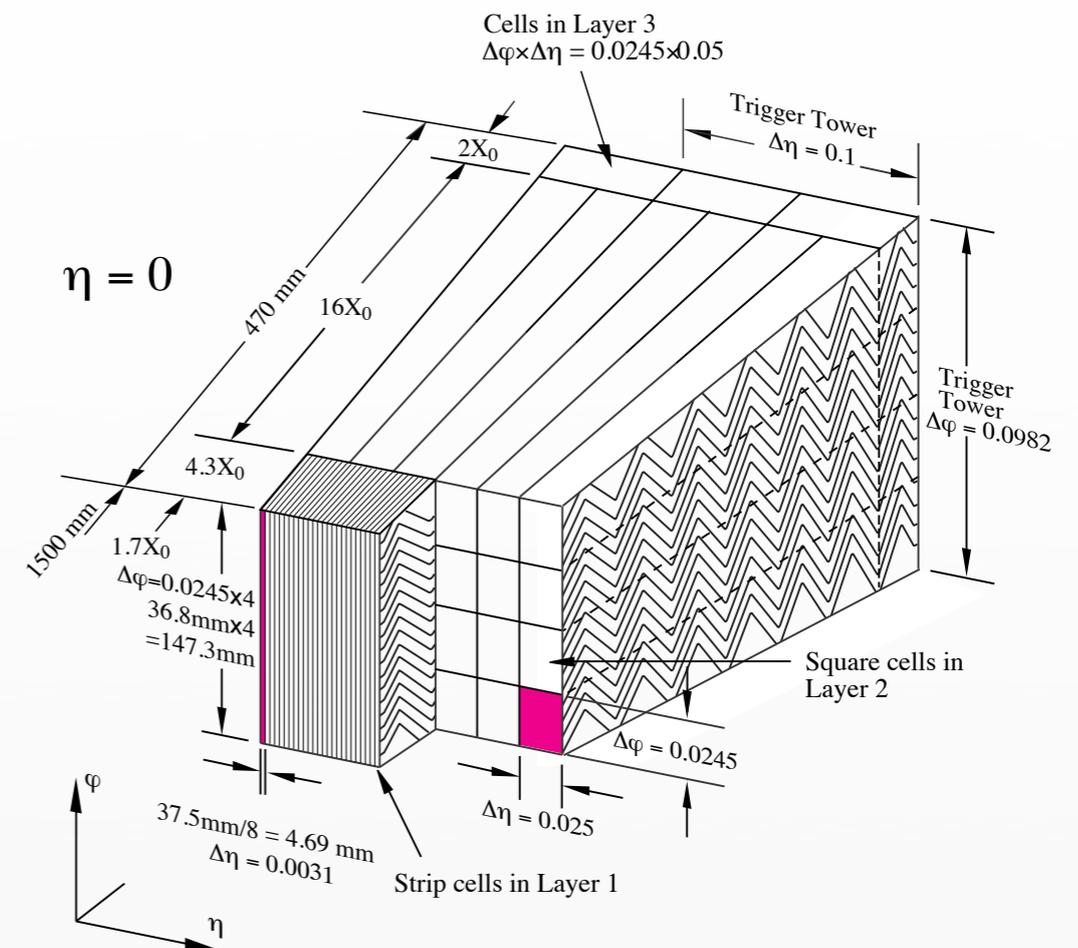
- Historisch: Kalorimeter = „**Wärmemesser**“
- Teilchenphysik: Kalorimeter = „**Energiesmesser**“
- Idee: messe **Teilchenenergie** mittels (teilweiser) **Absorption** in schwerem Detektormaterial



- Teilchen wechselwirken mit Detektormaterial im Kalorimeter: **Schauer** neuer Teilchen
- Wechselwirkungen in Materie: stark unterschiedlich zwischen
 - Elektronen/Photonen
→ **elektromagnetische** Kalorimeter
 - Teilchen, die aus Quarks aufgebaut sind („Hadronen“) → **hadronische** Kalorimeter
- **Gesamtlänge** aller Spuren im Schauer proportional zur **Energie** des Primärteilchens
- Teilchenidentifikation möglich durch Analyse der **Schauerform**



- Flüssigargon-Kalorimeter:
 - Durchgehendes Teilchen **ionisiert** hochreines flüssiges Argon
 - Erzeugte Ionen driften zu Elektroden (Spannung: ca. 2000 V), erzeugen elektrisches Signal
 - Betriebstemperatur: ca. 80 K (flüssiger Stickstoff)
- Elektromagnetisches Kalorimeter bei ATLAS
 - **Absorption** elektromagnetischer Schauer in **Bleiplatten**
 - Besonderheit Akkordeonstruktur: schnelle Auslese, keine Lücken in Detektorabdeckung

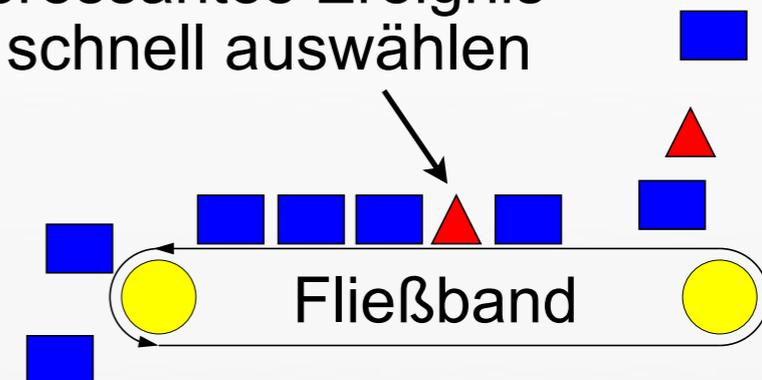


- Herausforderung **Datenrate**:
 - „Nadel im Heuhaufen“: jede Sekunde **1 Milliarde Kollisionen**, aber nur einige 100 interessante Ereignisse
 - Überschlagsrechnung:
 10^9 Kollisionen/s \times 10^6 aktive Kanäle
= **1 TB/s** \rightarrow mit heutiger Technologie nicht speicherbar



Analogie: Fließband

Interessantes Ereignis
 \rightarrow schnell auswählen



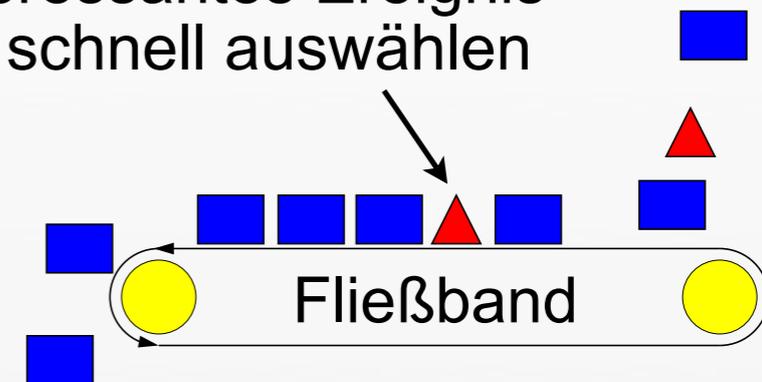
Uninteressante
Ereignisse
 \rightarrow verwerfen

- Herausforderung **Datenrate**:
 - „Nadel im Heuhaufen“: jede Sekunde **1 Milliarde Kollisionen**, aber nur einige 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



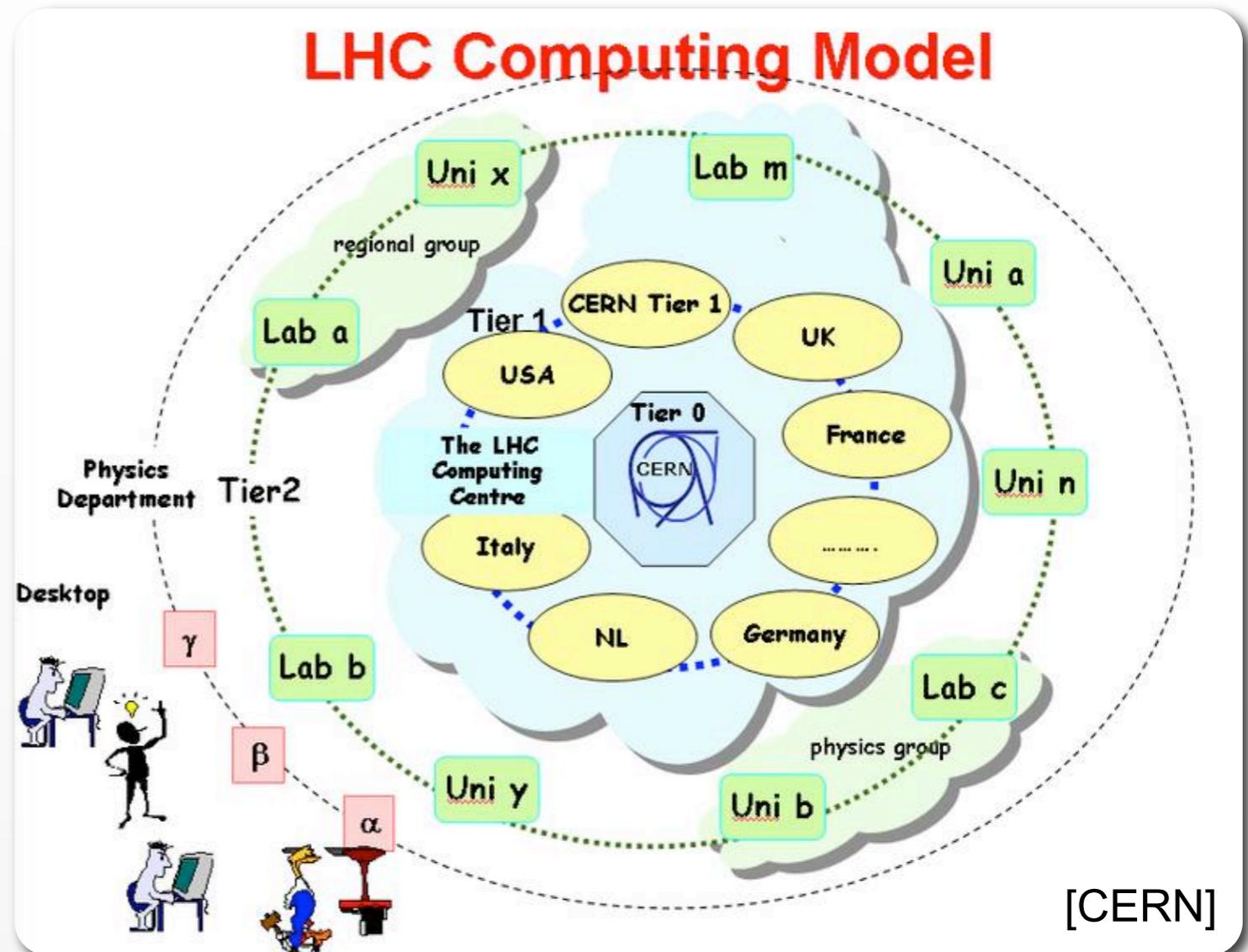
Analogie: Fließband

Interessantes Ereignis
 \rightarrow schnell auswählen

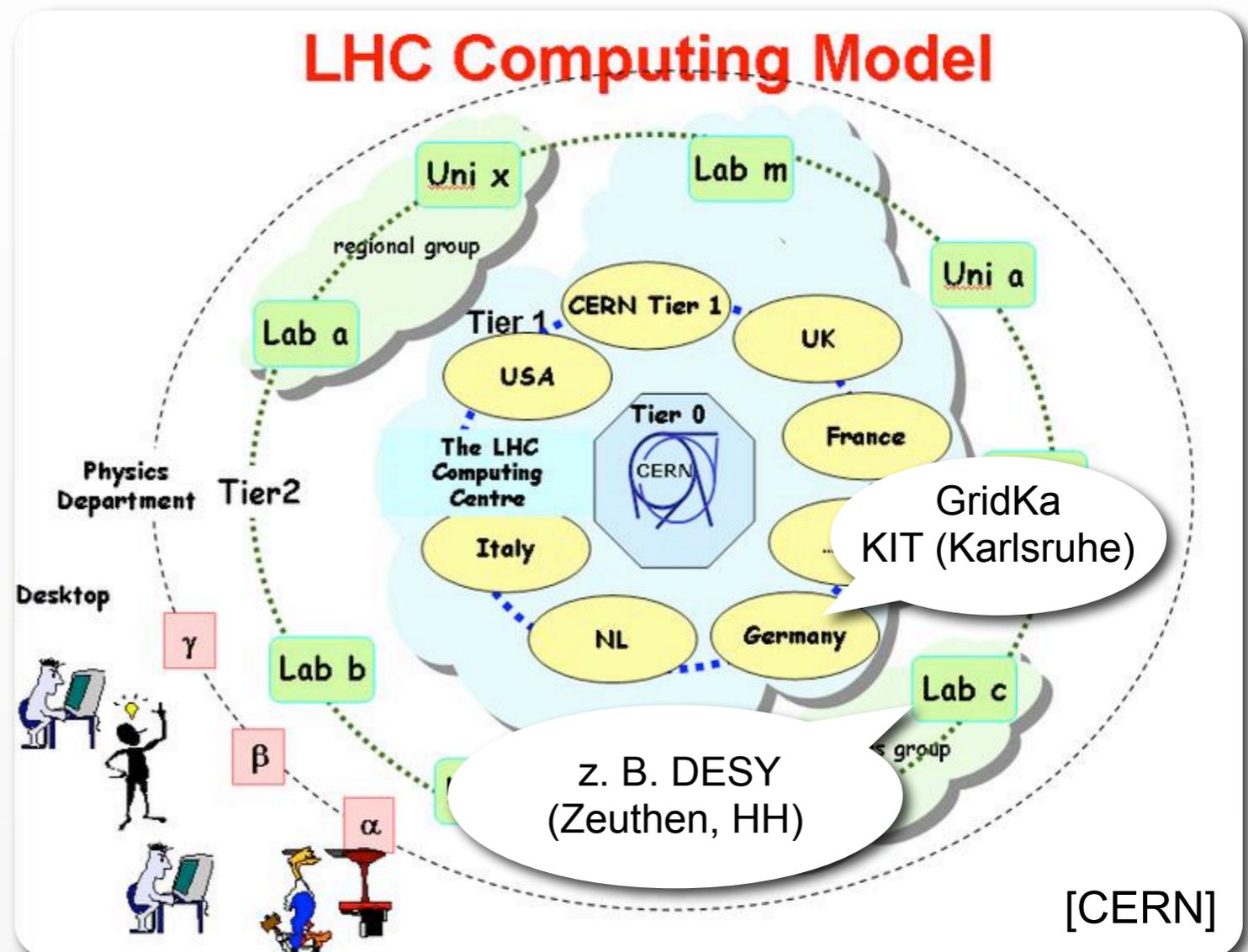


Uninteressante
Ereignisse
 \rightarrow verwerfen

- Herausforderungen:
 - **Datenrate:** ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (3,3 Millionen DVDs!)
 - **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



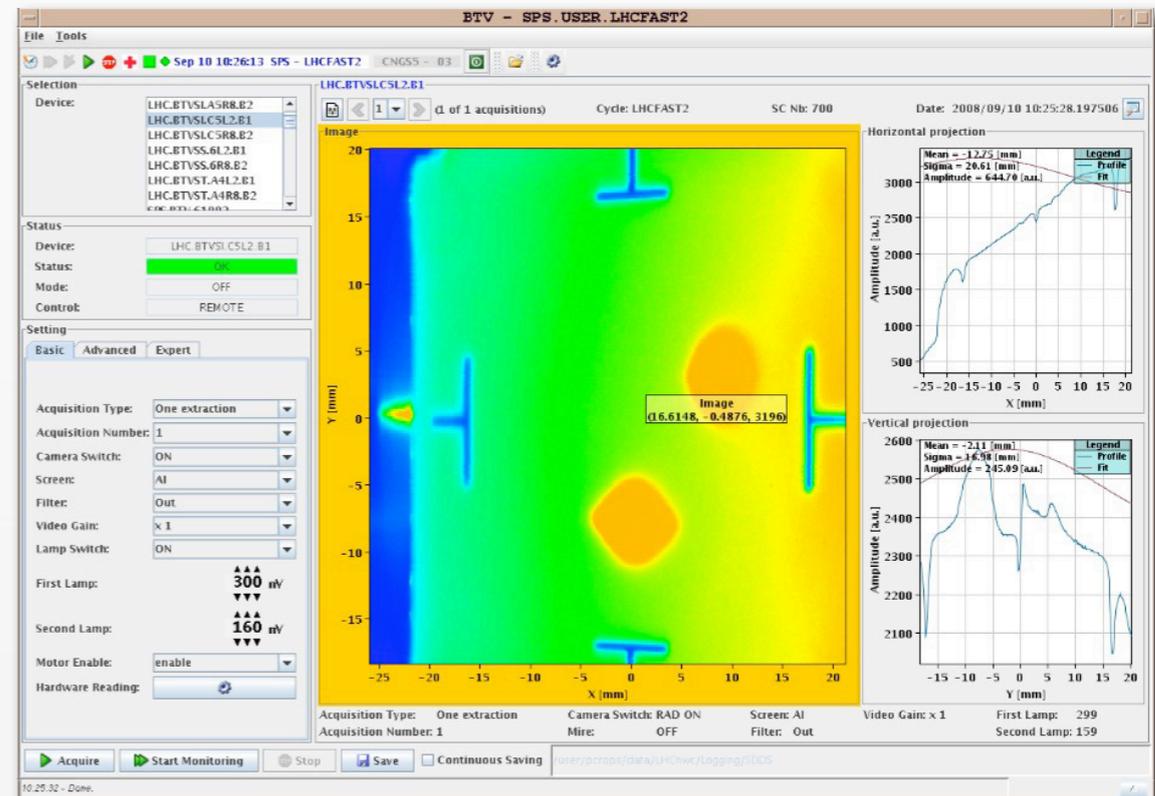
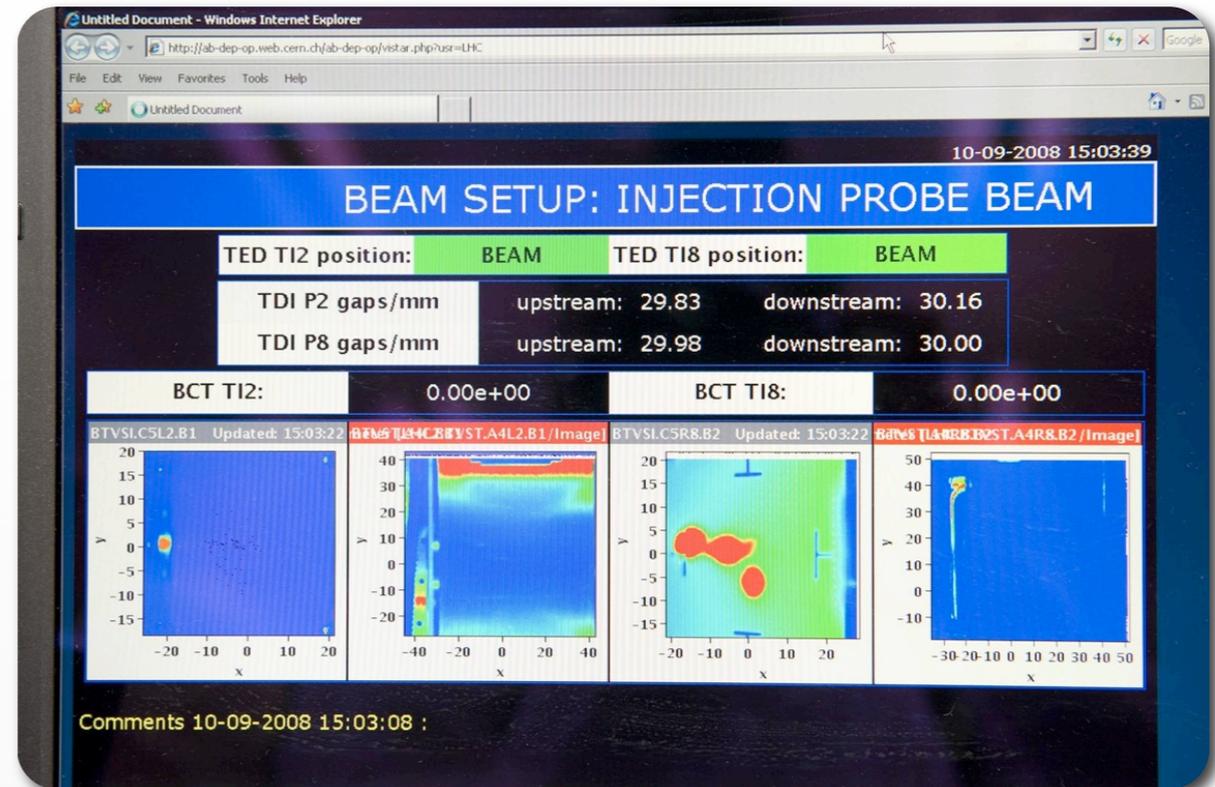
- Herausforderungen:
 - **Datenrate:** ca. 15 PByte/Jahr von allen LHC-Experimenten (3,3 Millionen DVDs!)
 - **Prozessierung** (Rekonstruktion, Simulation etc.): Rechenleistung von 100.000 Computern
- Lösung: **Grid-Computing**
 - Rechenleistung und Speicherplatz **weltweit verteilt**
 - Geschickte Aufteilung der Ressourcen: Bringe die **Anwendung zu den Daten**
 - Name „Grid“: Analogie zu Stromnetz („power grid“)
 - LHC: Mehrstufiger („Multi-Tier“) Zugang

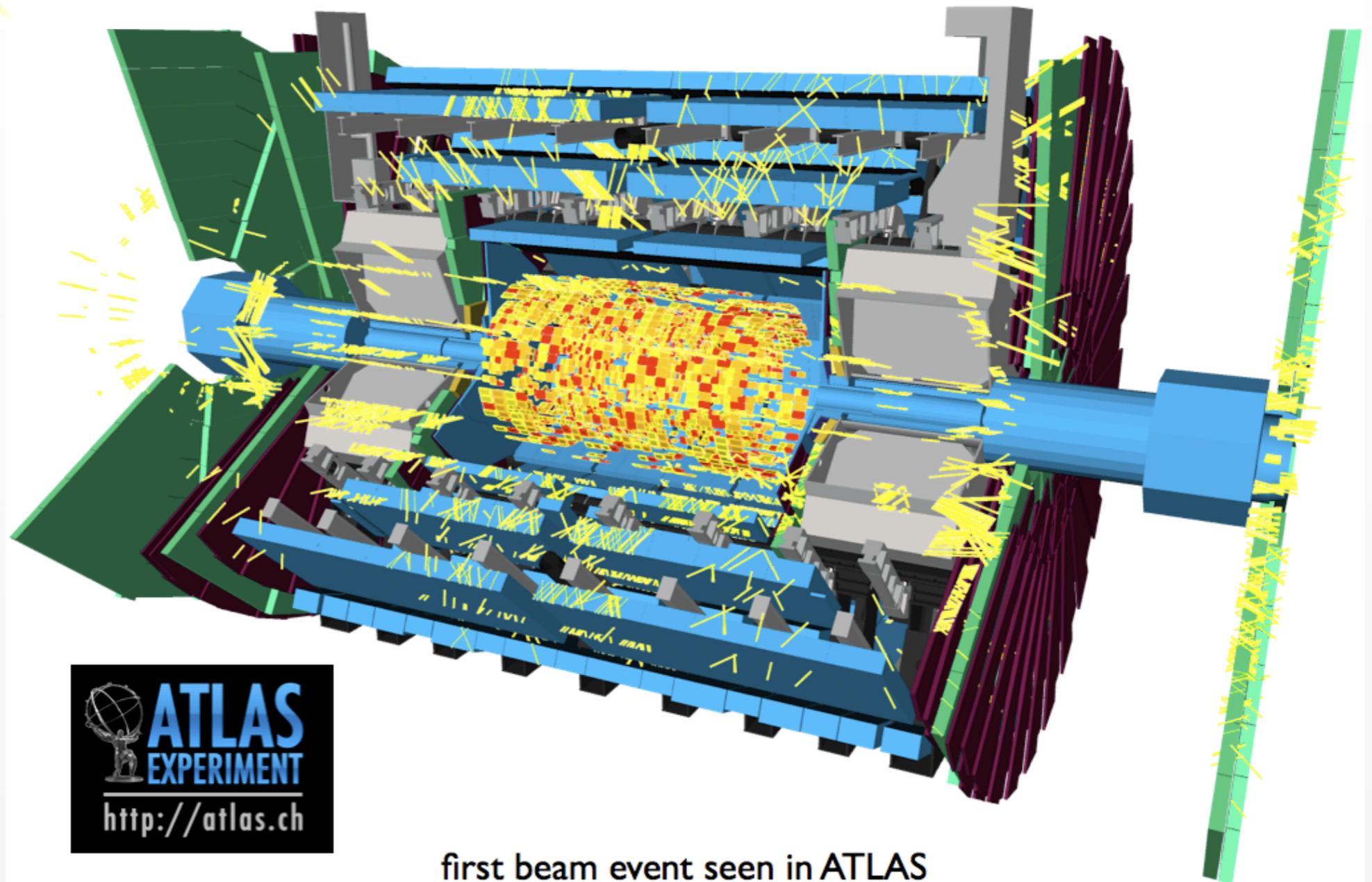
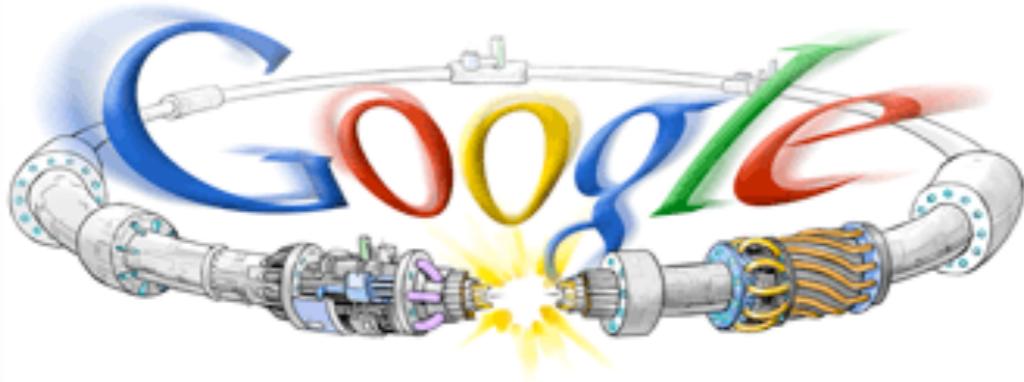




Inbetriebnahme des LHC

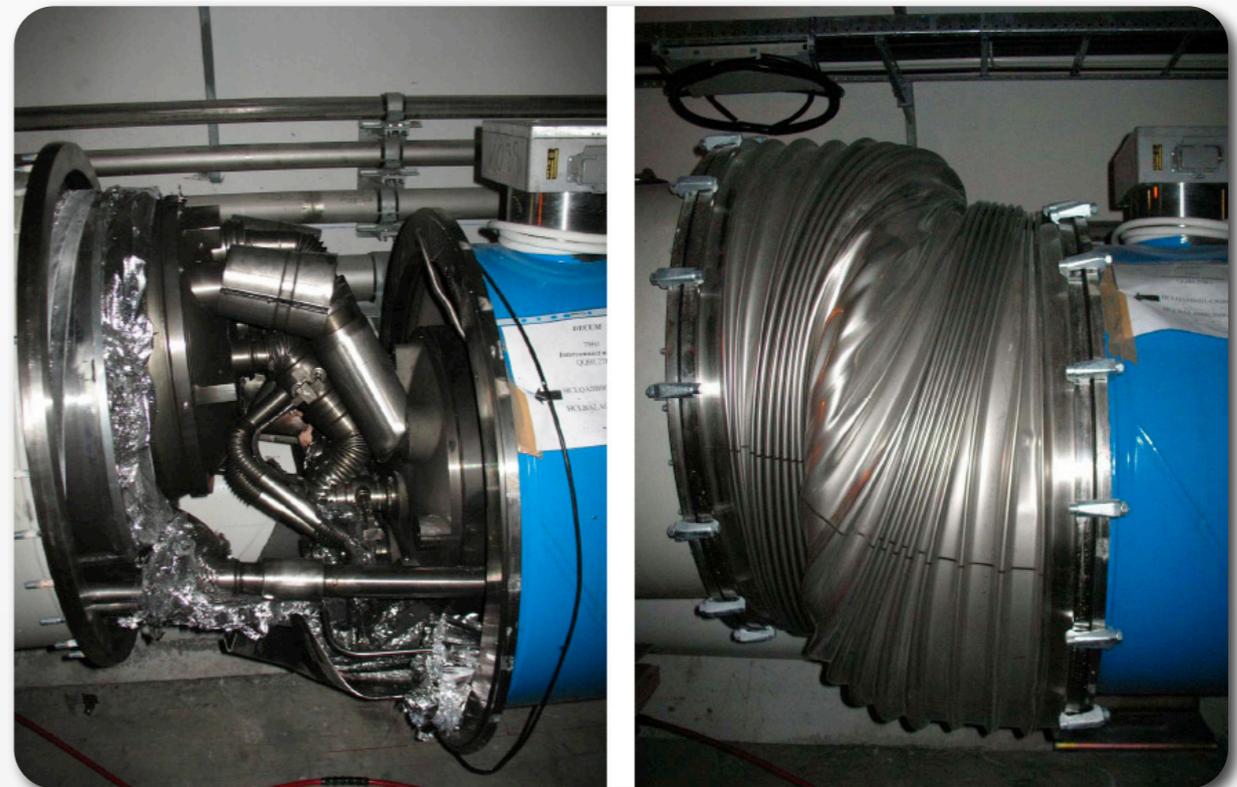
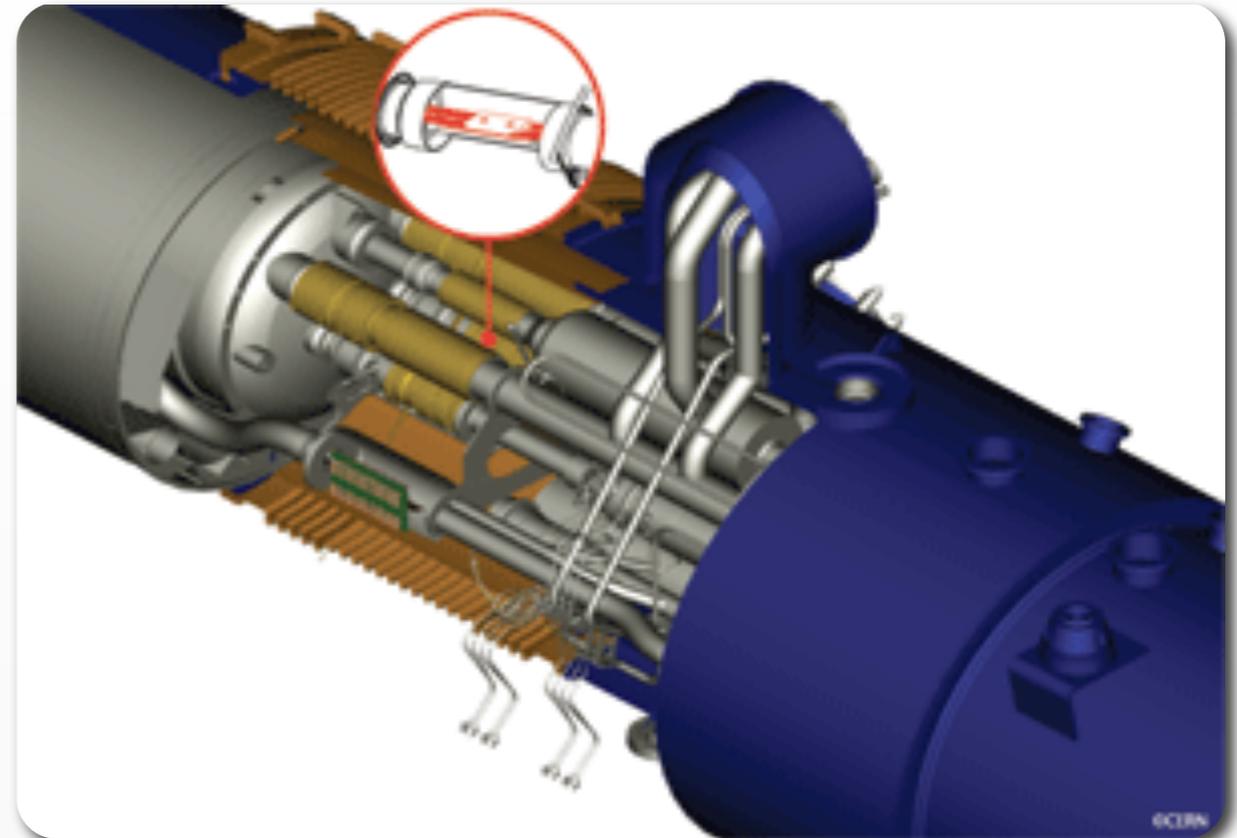
10.09.2008: Erster Strahl am LHC





first beam event seen in ATLAS

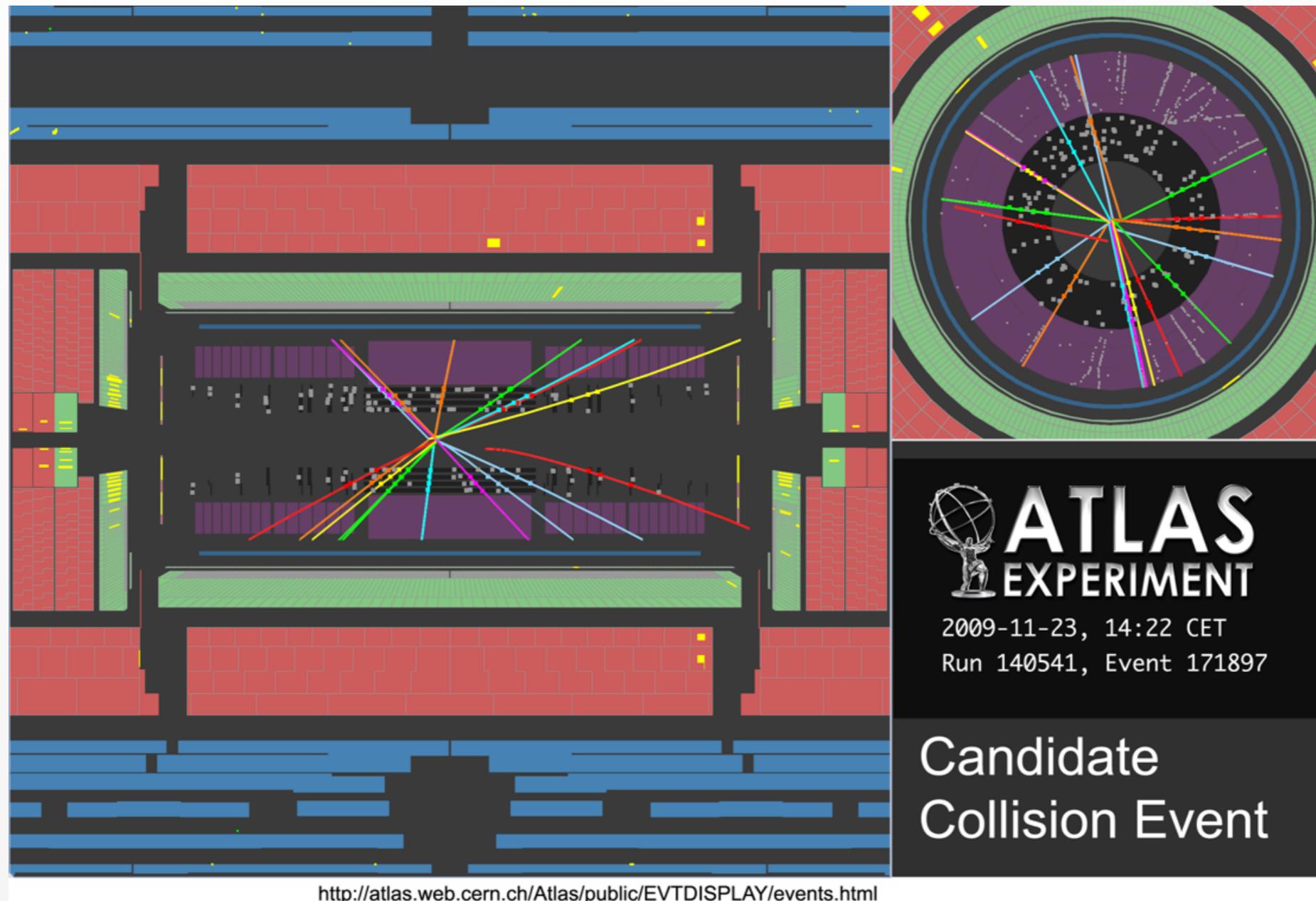
- Was war passiert?
- LHC-Magnete sind mit **Spleißen** elektrisch verbunden (verschweißt)
- Eine Verbindung hatte winzigen **elektrischen Widerstand** ($n\Omega$): Lichtbogen \rightarrow Loch in Heliumsystem
- **Druckwelle** im Heliumsystem beschädigt weitere Magnete
- Konsequenz: **1 Jahr Pause**
 - Alle beschädigten Magneten repariert
 - Bessere Diagnostik und verbessertes Überdrucksystem
 - Neustart: Ende Oktober 2009



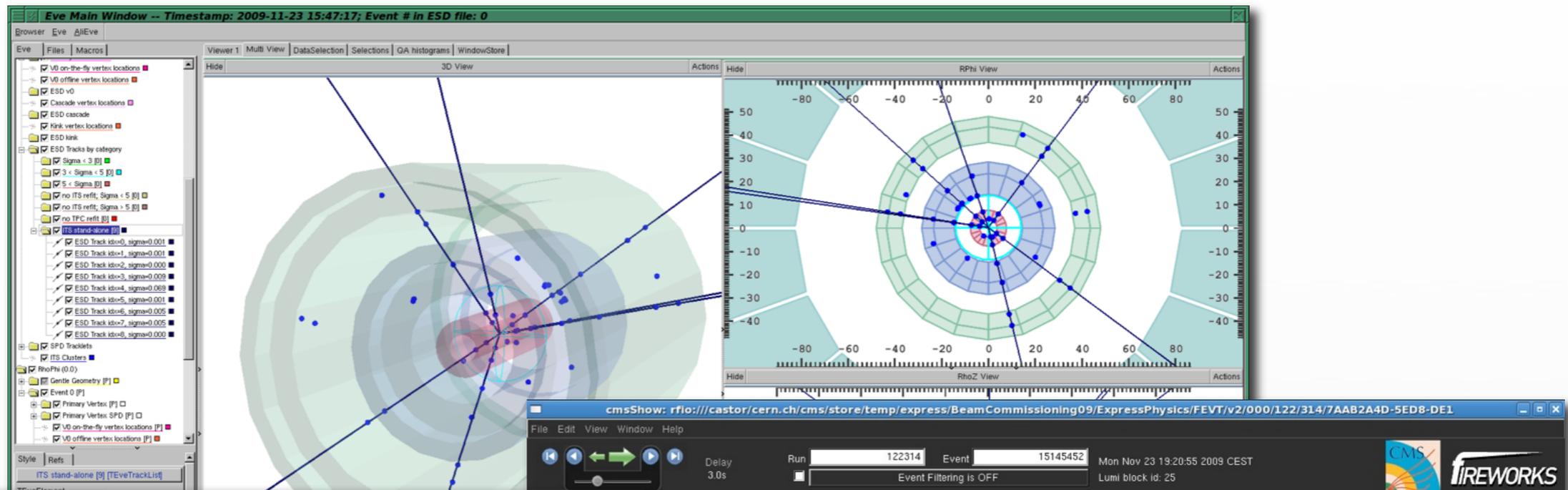
Spätherbst 2009: Der Strahl ist zurück



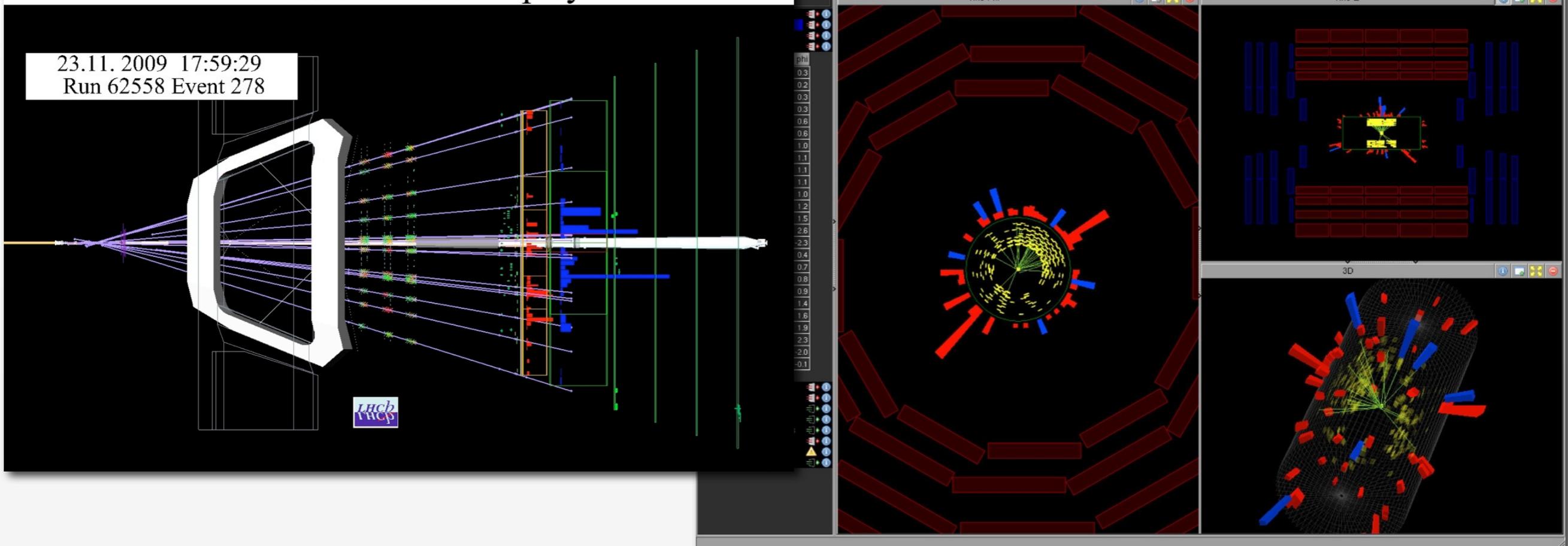
- 26.10.09: Erste Achtelrunde für Protonen und Blei-Ionen im LHC
- 20.11.09: Erste zirkulierende Strahlen
- 23.11.09: Erste Kollisionen bei Injektionsenergie (450 GeV)



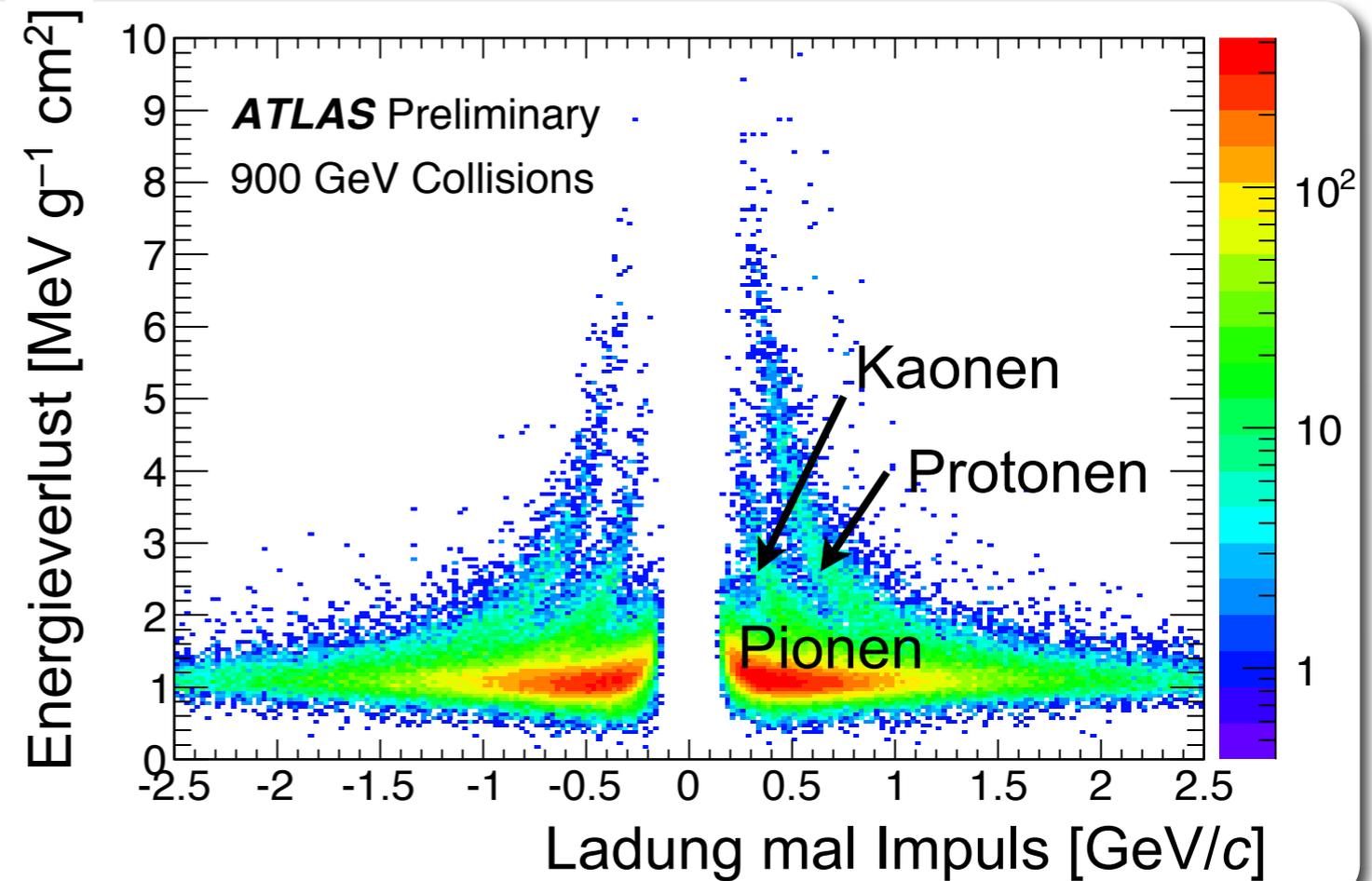
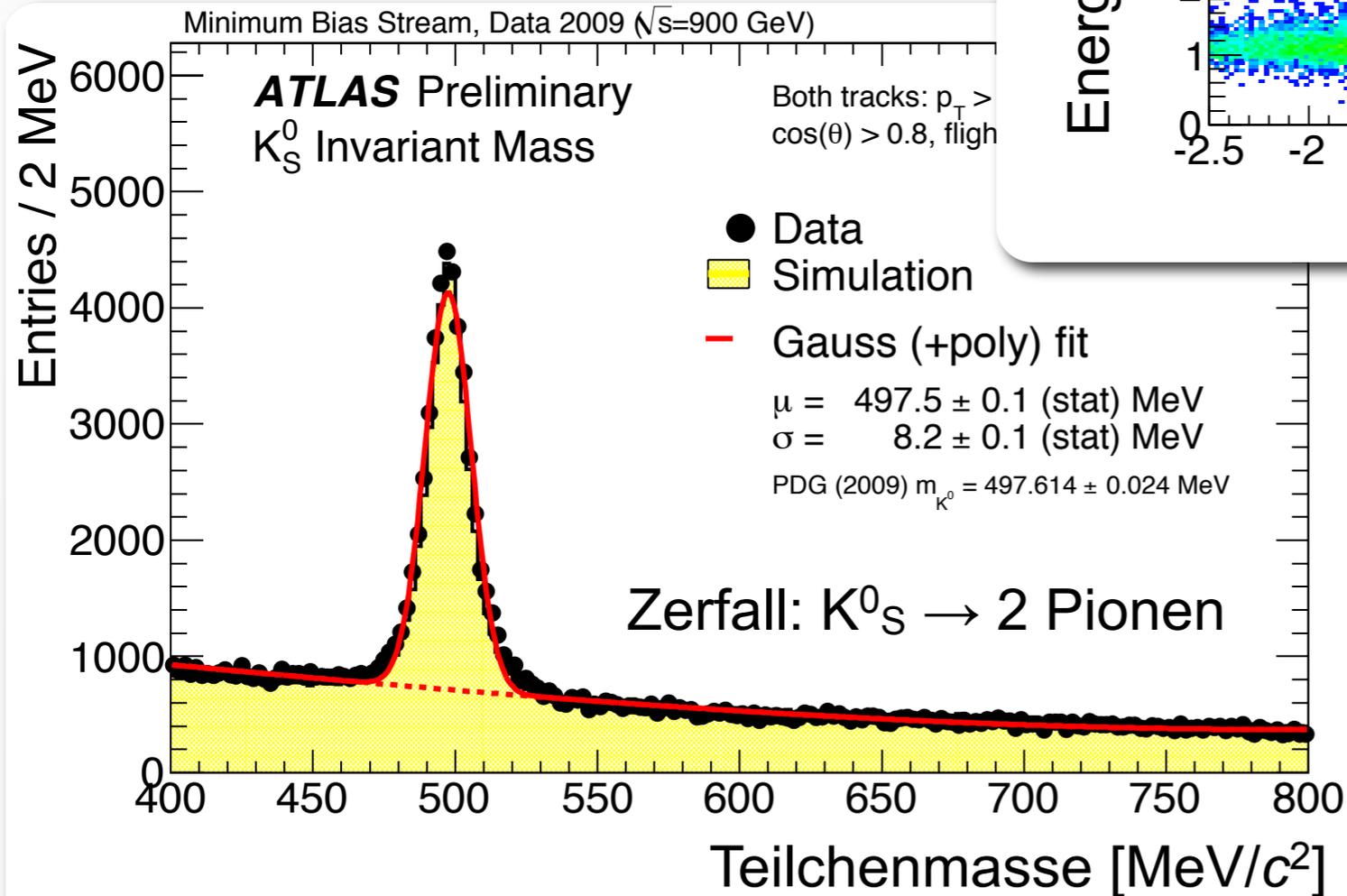
Erste Kollisionen



LHCb Event Display

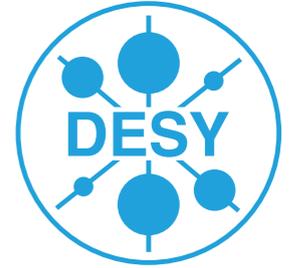


Erste (bekannte) Teilchen





- LHC-Pläne für 2010/2011
 - Letzter Stand: LHC Performance Workshop, Chamonix, 25.–29. Januar 2010
 - Widerstand in Spleißen zwischen Dipolmagneten **limitiert Strahlenergie** vorerst auf 3,5 TeV (Hälfte der Designenergie von 7 TeV)
 - **Erster Strahl 2010 nächsten Montag**, danach ca. 4 Wochen bis zu 3,5 TeV
 - 2010/2011: **Datennahme** mit halber Designenergie → erwarten erstmals Resultate, die über die früherer Beschleuniger hinausgehen
- Nach 2011: alle notwendigen **Reparaturen**, um auf 7 TeV zu kommen (ca. 1 Jahr Pause)



Menschen am LHC

Large Hadron Rap: 5,5 Mio Hits bei YouTube!



Faszination Internationalität



ATLAS: Fast **3000 Mitarbeiter** von 172 Instituten in 37 Ländern
(davon ca. 700 Studierende/Doktoranden)



Faszination Internationalität



ATLAS: Fast **3000 Mitarbeiter** von 172 Instituten in 37 Ländern
(davon ca. 700 Studierende/Doktoranden)

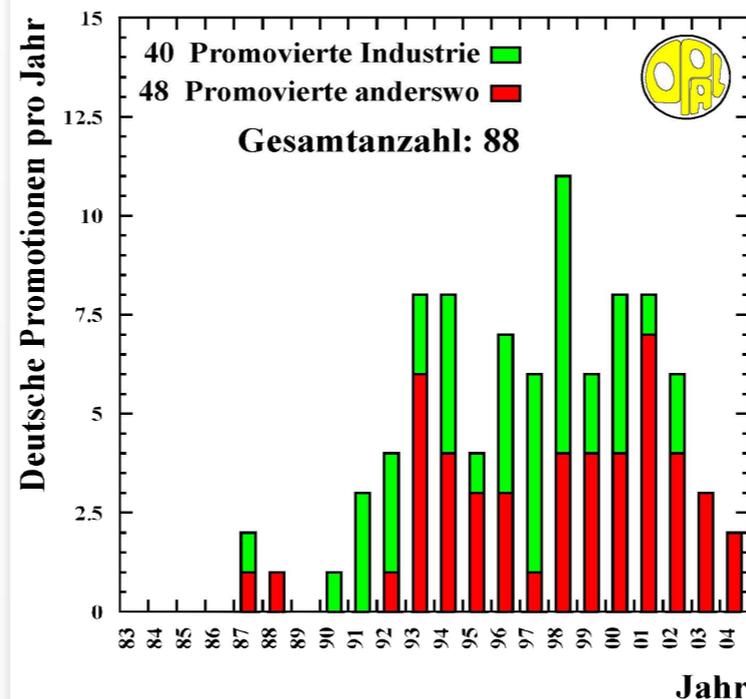
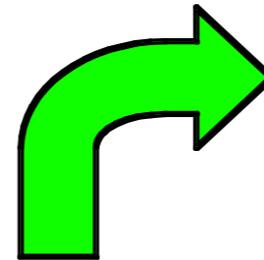




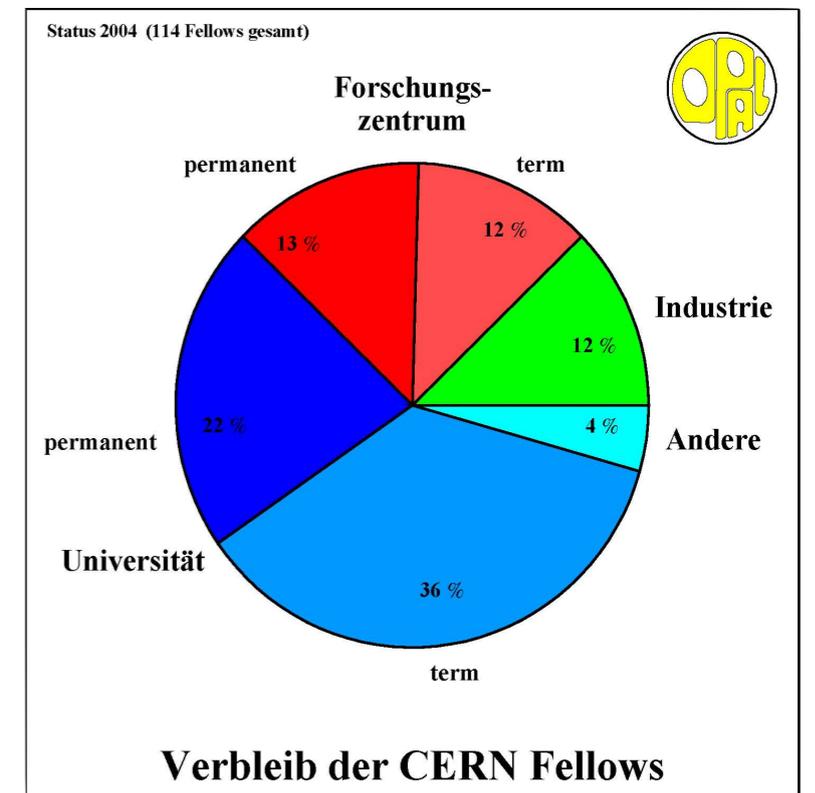
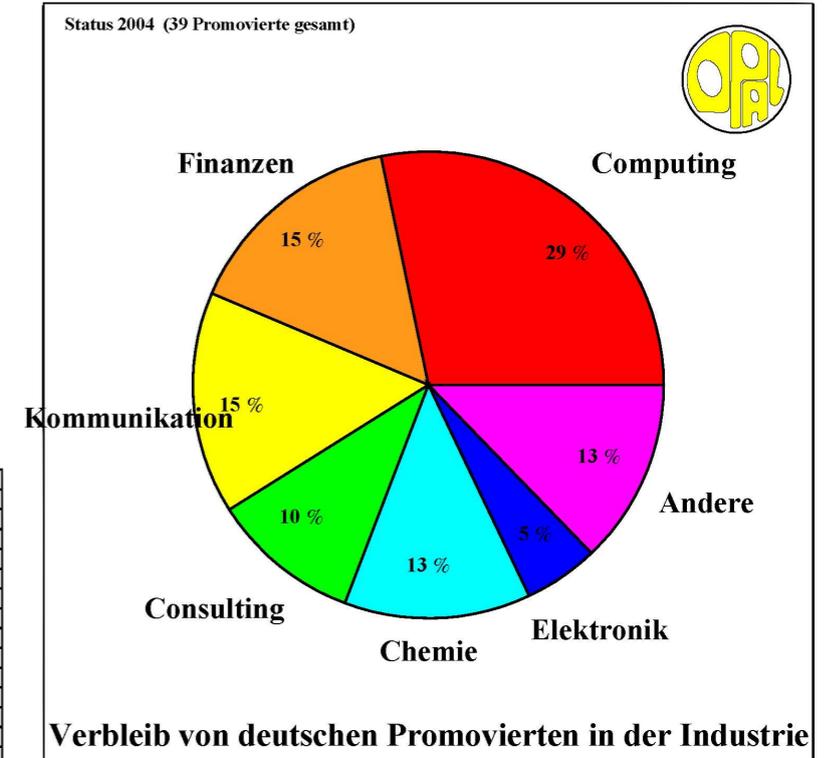
- Studierende bei ATLAS: nur eine/r unter 3000?
- Teil eines der **größten Forschungsprojekte** der Menschheit
- Komplexes System, Verantwortung für Teilgebiet → **Sichtbarkeit**
- Breite Ausbildung:
 - **Hardware**: Planung, Bau, Tests...
 - **Software**: Datenbanken, objektorientierte Programmierung, 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 2–4%, vgl. Durchschnitt 2009: 8.2%
- **Schlüsselqualifikationen** auch in der Industrie begehrt:
 - Problemlösung
 - Team- und Kommunikationsfähigkeit
 - Internationalität/ Fremdsprachen
 - EDV-Kenntnisse

50% Industrie
(heute: 60%)



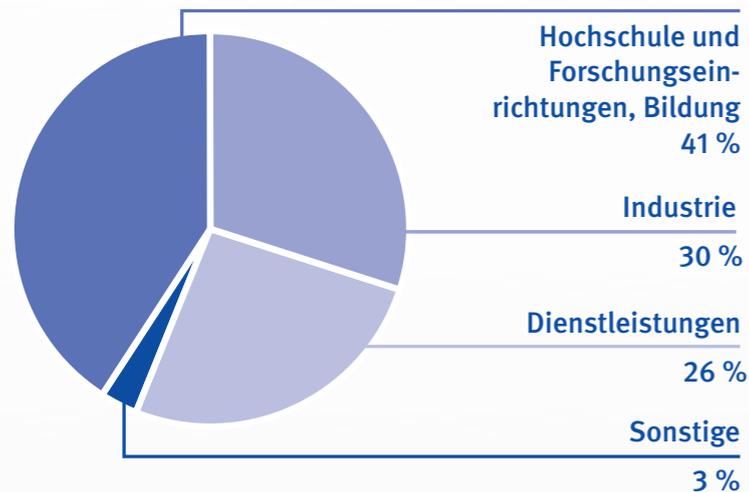
50% Unis oder Forschungs-
zentren, z.B. CERN Fellows
(heute: 40%)



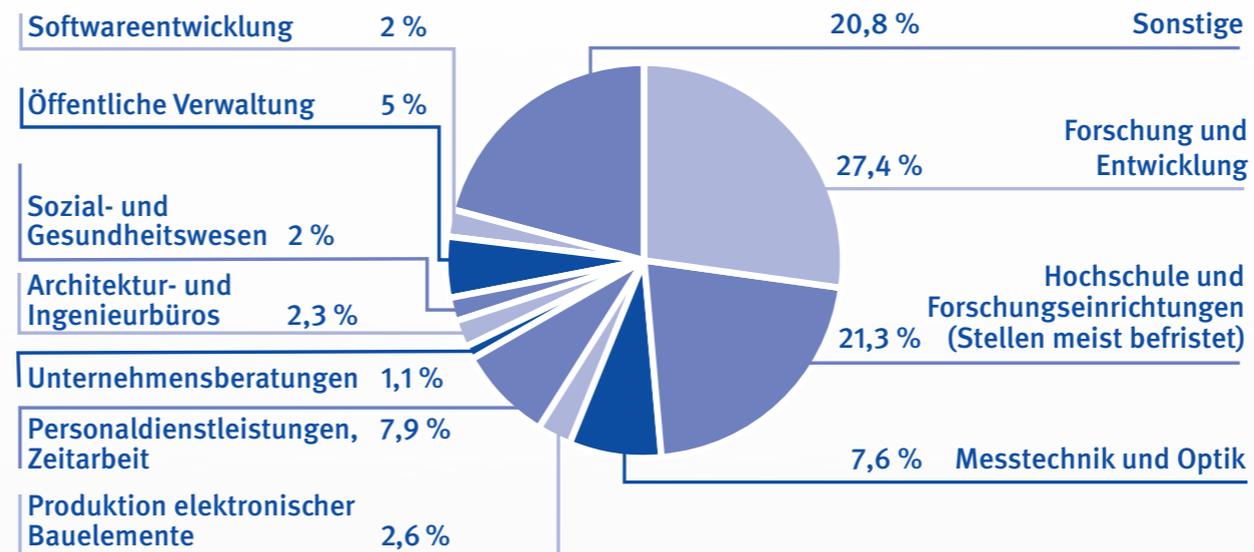
Arbeitsmarkt für Physiker/innen 2008/9



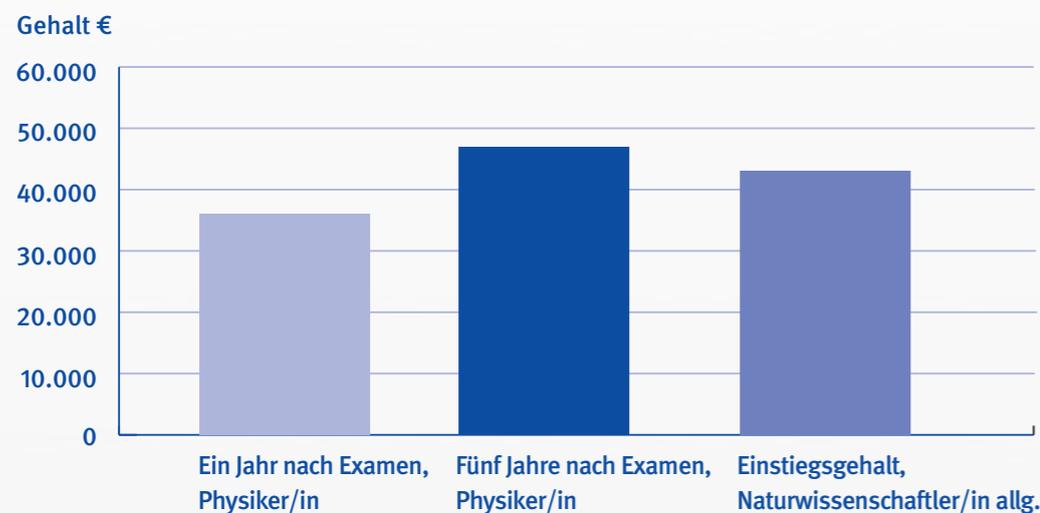
Tätigkeit: Hier arbeiten Physiker/innen ³



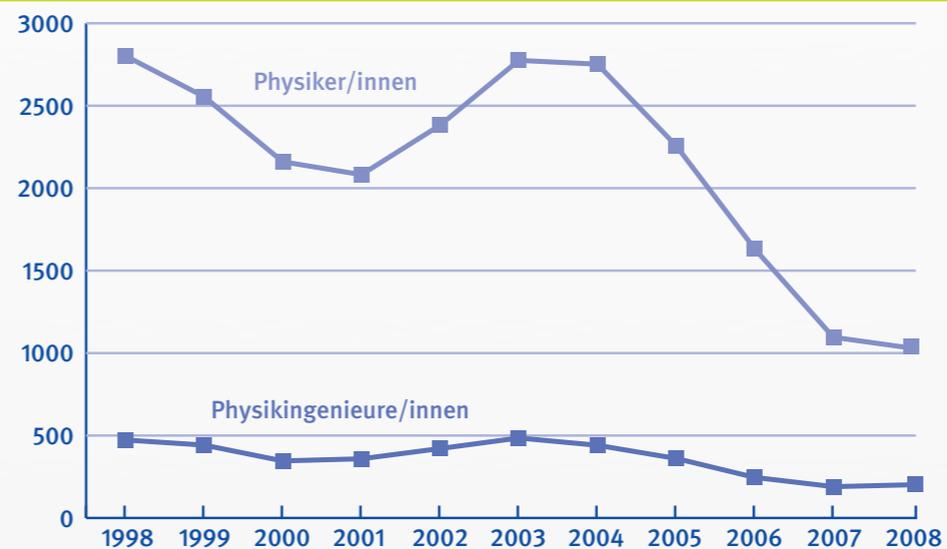
Bedarf: Hier werden Physiker/innen gesucht ⁴



Durchschnittliches Jahreseinkommen ^{3, 5, 6}



Arbeitslose ⁴



[DPG, PHYSIKonkret 12/08]

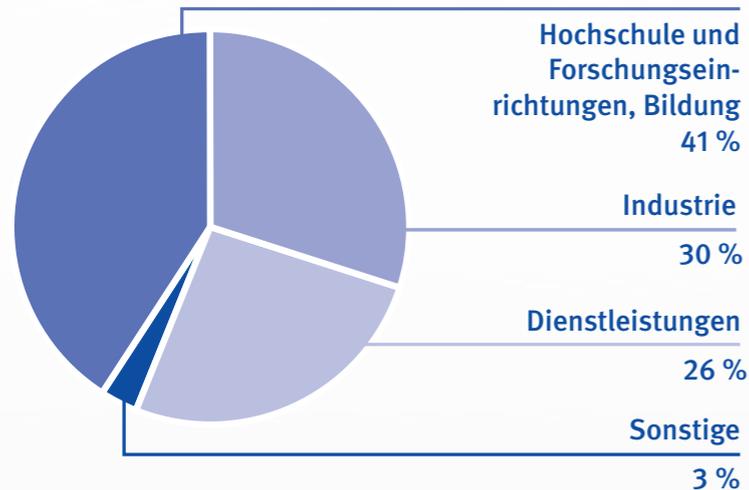
Quellen:

- 3) Hochschul-Informationssystem GmbH (HIS), „Der Absolventenjahrgang 2001/2002 fünf Jahre nach dem Hochschulabschluss“ (2008).
- 4) Bundesagentur für Arbeit.
- 5) Kienbaum Management Consultants GmbH, Gehaltsumfrage 2008.
- 6) HIS, „Zwischen Hochschule und Arbeitsmarkt: Eine Befragung der Hochschulabsolventinnen und Hochschulabsolventen des Prüfungsjahres 2001“ (2004).

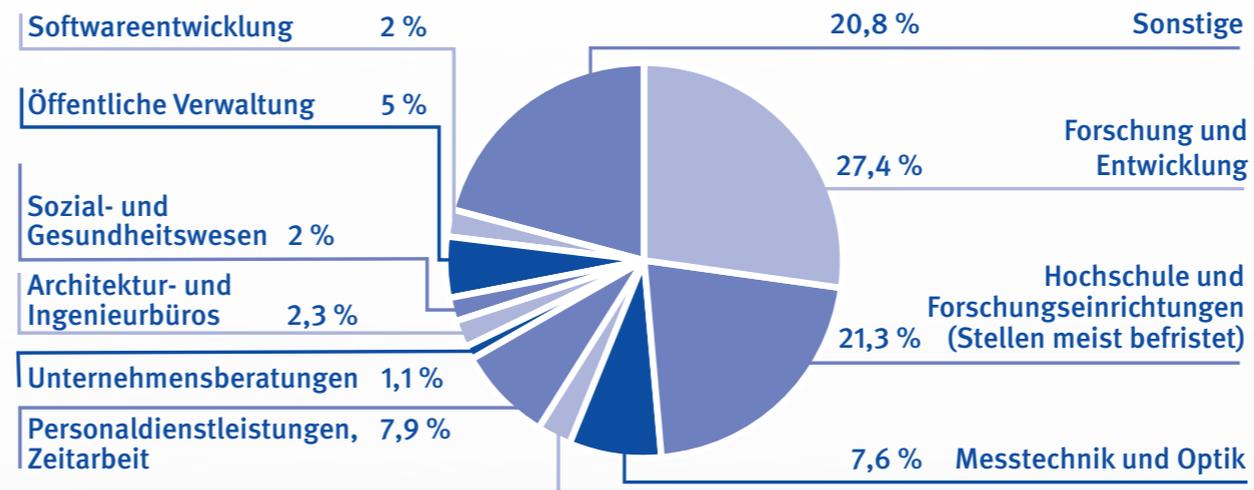
Arbeitsmarkt für Physiker/innen 2008/9



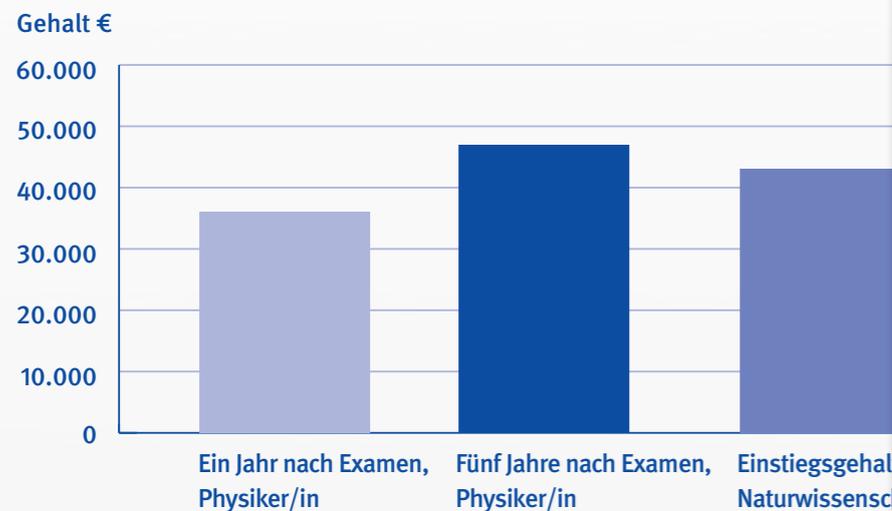
Tätigkeit: Hier arbeiten Physiker/innen ³



Bedarf: Hier werden Physiker/innen gesucht ⁴

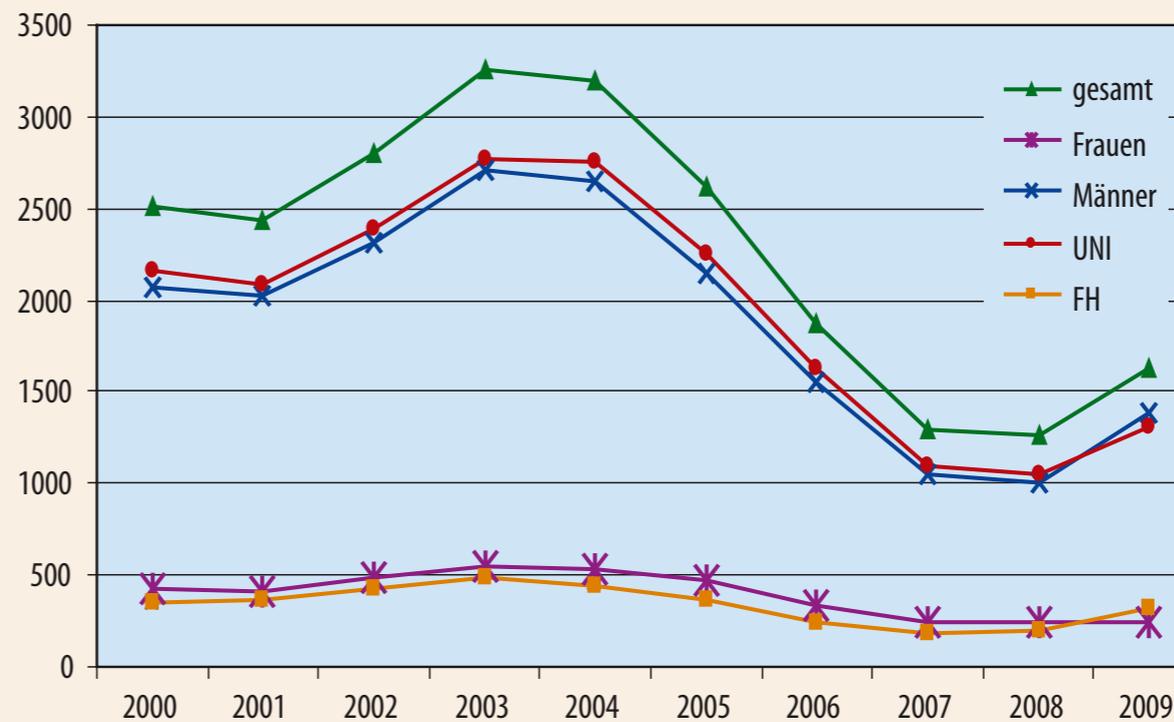


Durchschnittliches Jahreseinkommen ^{3, 5, 6}



[DPG, PHYSIKKonkret 12/08]

Arbeitslosigkeit – Update 2009:



[L. Schröter, Physik Journal 8 (2009) Nr. 12, S. 35]

4) Bundesagentur für Arbeit.

5) Kienbaum Management Consultants GmbH, Gehaltsumfrage 2008.

6) HIS, „Zwischen Hochschule und Arbeitsmarkt: Eine Befragung der Hochschulabsolventinnen und Hochschulabsolventen des Prüfungsjahres 2001“ (2004).



Was ist der Ursprung der Masse?

RUPRECHT-KARLS-UNIVERSITÄT HEIDELBERG

Fragen an den Large Hadron Collider am CERN

In wie vielen Dimensionen leben wir?

Wie unterscheiden sich Materie und Antimaterie

WELT MASCHINE

AUSSTELLUNG DER UNIVERSITÄT HEIDELBERG
28.11. - 20.12.2009 • MO – SO 10 – 18 UHR • KIRCHHOFF-INSTITUT,
IM NEUENHEIMER FELD 227 • WWW.WELTMASCHINE-HEIDELBERG.DE

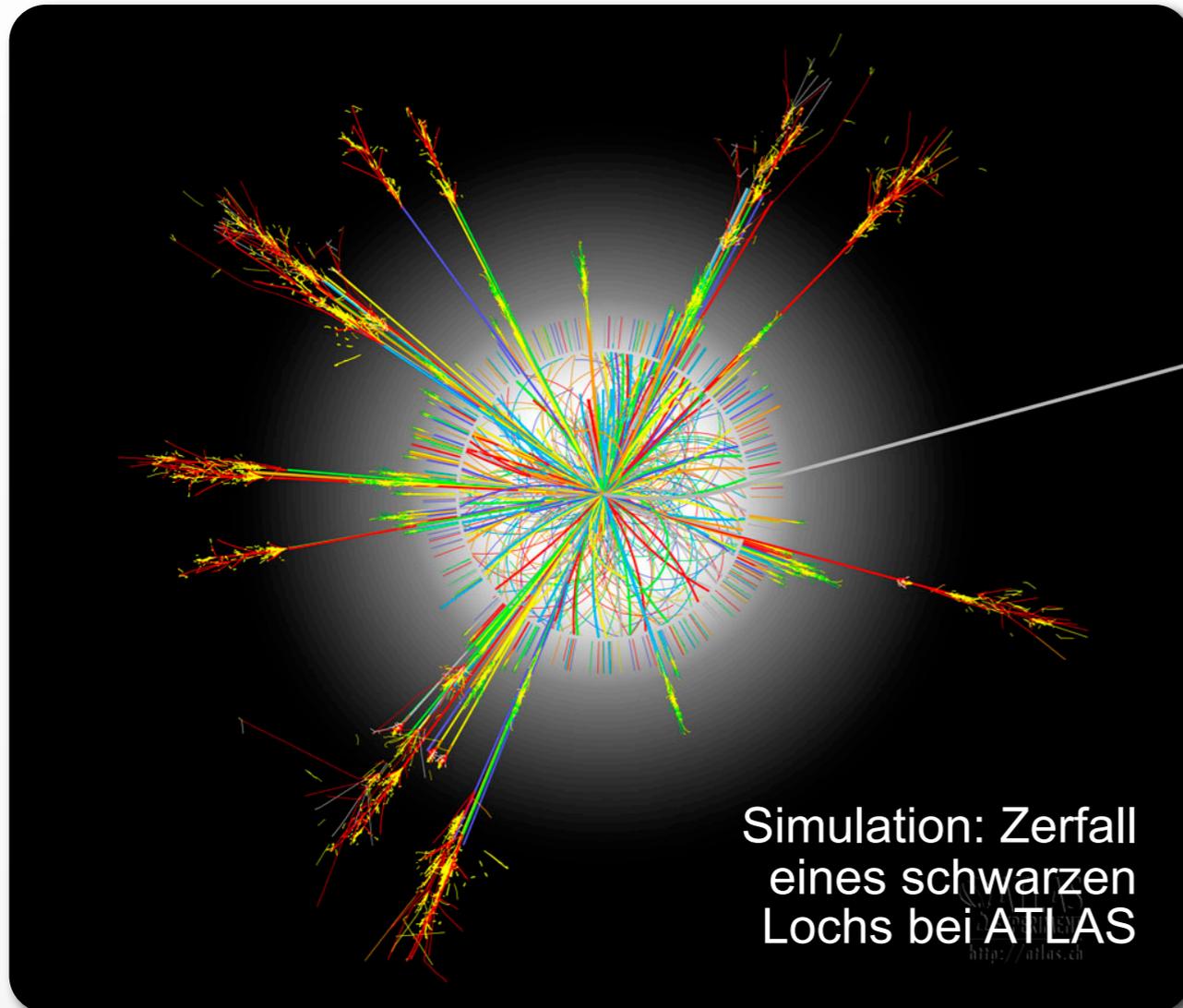
Bundesministerium für Bildung und Forschung

CERN

- Teilchenphysik und Kosmologie: viele Antworten, aber noch mehr Fragen:
 - Was ist der Ursprung der Masse?
 - 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
 - Es geht endlich los! Erste Kollisionen bereits vor Weihnachten 2009, 2010–2011 bei höherer Energie



Backup-Folien



- 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: pro Sekunde finden so viele Kollisionen statt wie bei $> 10^{14}$ Jahren LHC-Betrieb
 - Keine Zerstörung von Sonnen oder Neutronensternen durch schwarze Löcher beobachtet

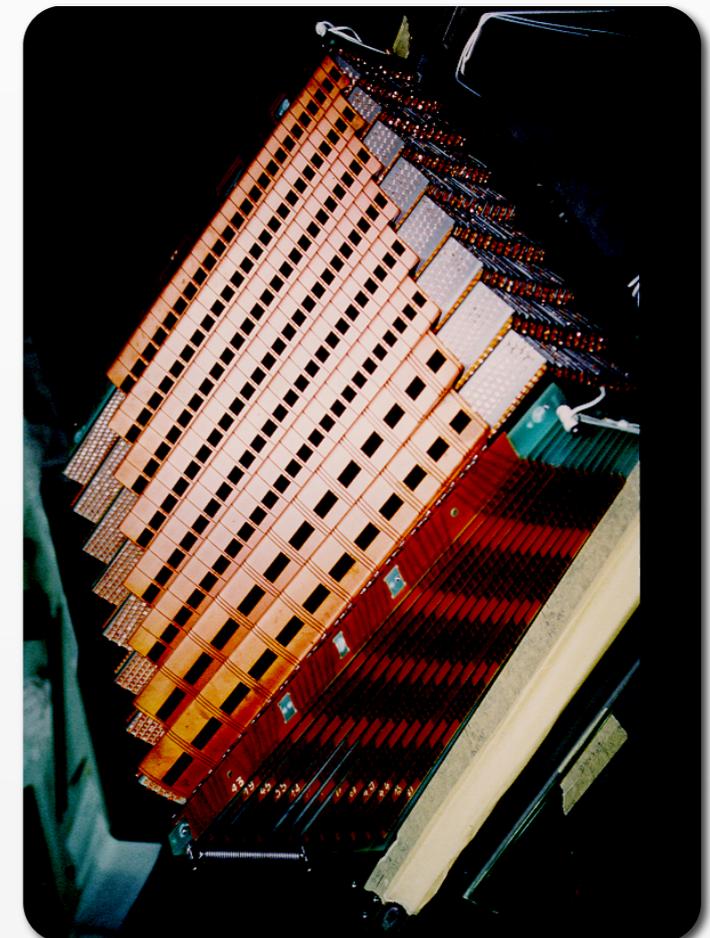
Arten von Kalorimetern



- **Homogene** Kalorimeter:
Schauernachweis in
gesamtem Detektorvolumen
- **Kristalle**: CsI(Tl), PbWO₄, ...
→ durchgehendes Teilchen
erzeugt **Lichtblitz** („Szintillation“)
- **Flüssige Edelgase**: Argon (LAr),
Krypton (LKr) → Ionisation
- **Sampling**-Kalorimeter:
Absorbermaterial und
sensitives Material wechseln
sich ab
- **Metall–Szintillator**: Blei, Eisen,
Uran + Plastiksintillator
- **Metall–Flüssige Edelgase**: Blei,
Kupfer, Messing + LAr



PbWO₄:
Rohmaterial für
elektromagne-
tisches Kalorimeter
bei CMS



Segment des
Flüssigargon-
Kalorimeters
(ATLAS)