Karlsruher Institut für Technologie

Die Vermessung der Atto-Welt

Elementarteilchen und ihr Nachweis am Large Hadron Collider

Lehrerfortbildung der Fakultät für Physik des KIT
Karlsruhe, 4. Juli 2012

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik, Karlsruher Institut für Technologie

Wer bin ich?

Promotion
Siegen 2005
HERA-B-Experiment am Deutschen Elektronen-Synchrotron DESY

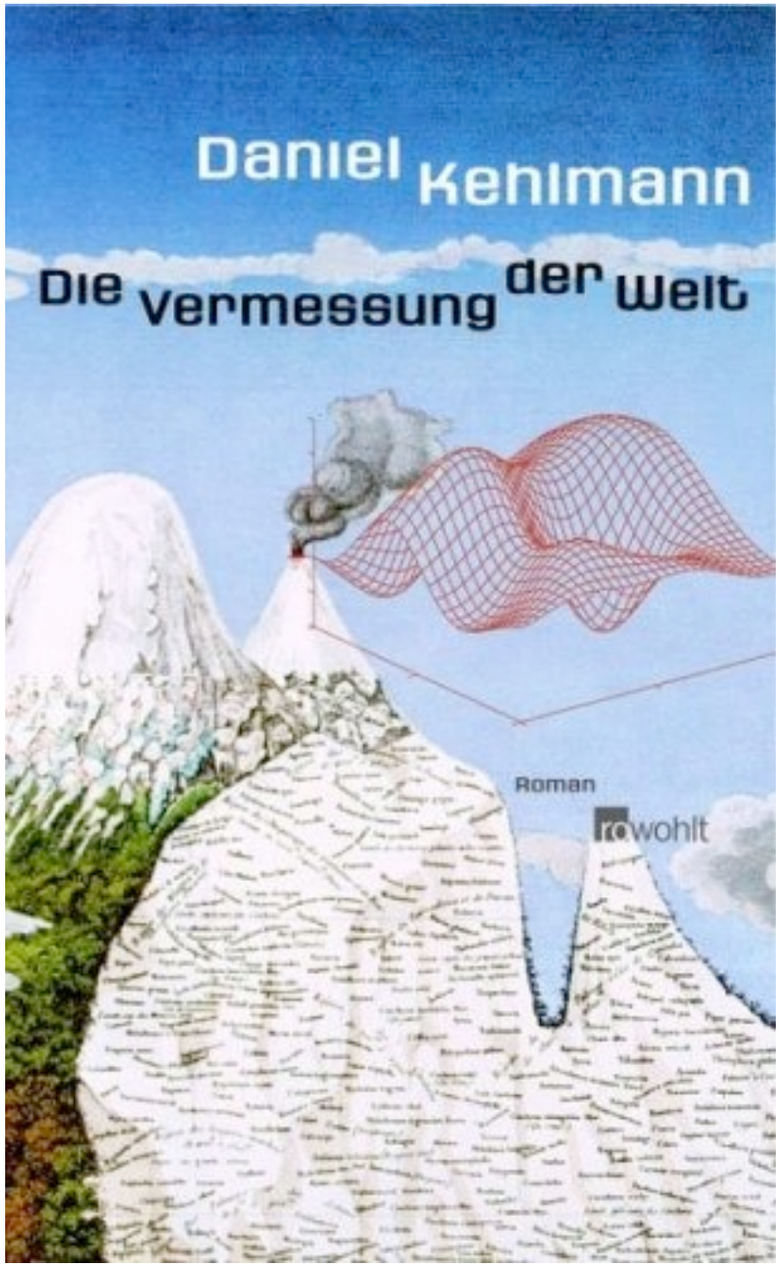
Postdoc
Rochester, Yale (2005–2008)
CDF-Experiment am Fermi National Accelerator Laboratory, Chicago

Nachwuchsgruppenleiter
DESY und HU Berlin (seit 2008)
ATLAS-Experiment am CERN, Genf

Professor
Karlsruher Institut für Technologie, Experimentelle Kernphysik (seit Juli 2011)
CMS-Experiment am CERN, Genf

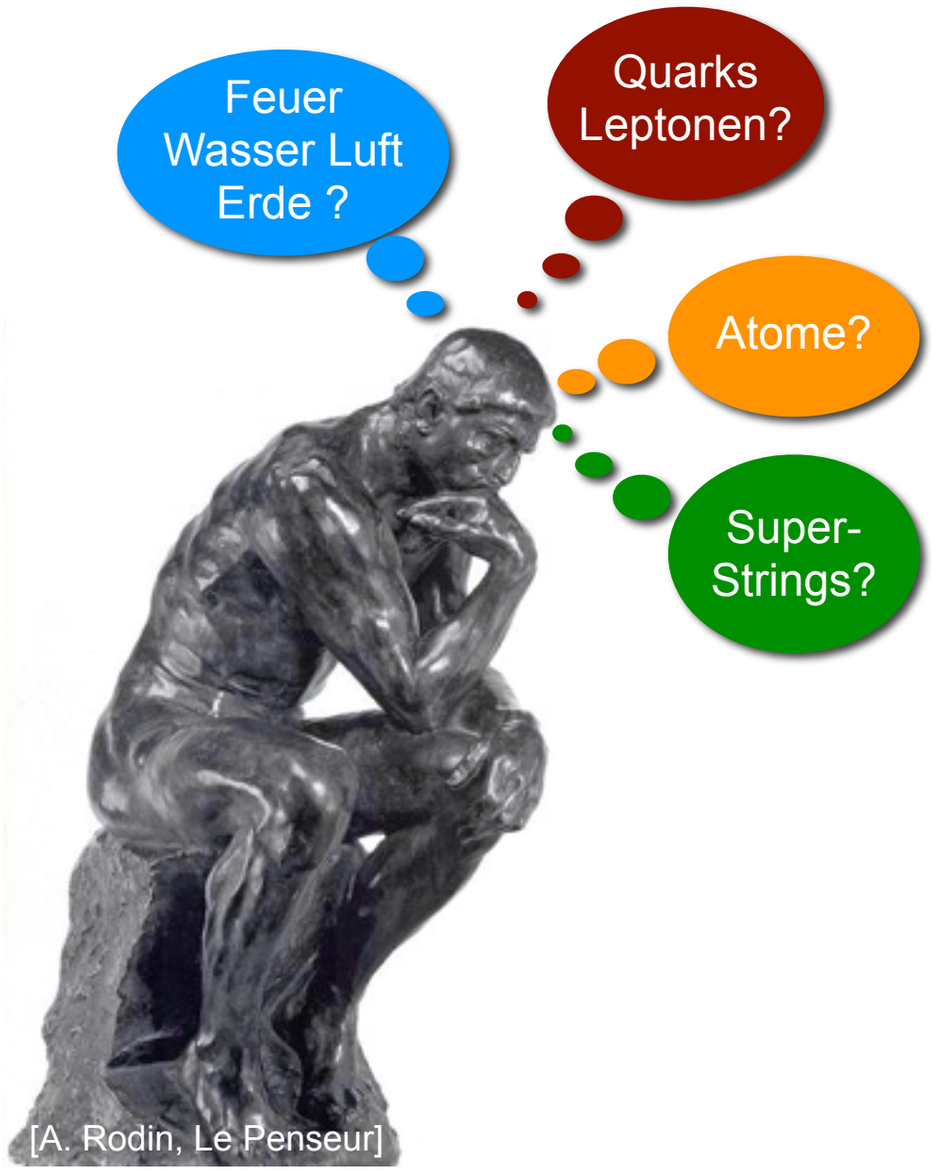
Von Gauß und Humboldt zum LHC

- Im echten Leben wie im Roman von Daniel Kehlmann
  - C. F. Gauß: lebte nur im Königreich Hannover
  - A. v. Humboldt: große Südamerikareise
  - Beide haben unser Wissen über die Welt signifikant vorangebracht
- Physik am Large Hadron Collider (LHC)
  - Theoretische Physiker: komplizierte Berechnungen → Vorhersagen der physikalischen Prozesse am LHC
  - Experimentalphysiker: Aufbau und Betrieb großer Teilchenbeschleuniger und Experimente
  - Erst im Zusammenspiel: physikalische Resultate und ihre Interpretation



Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Faszination Teilchenphysik



[A. Rodin, Le Penseur]

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

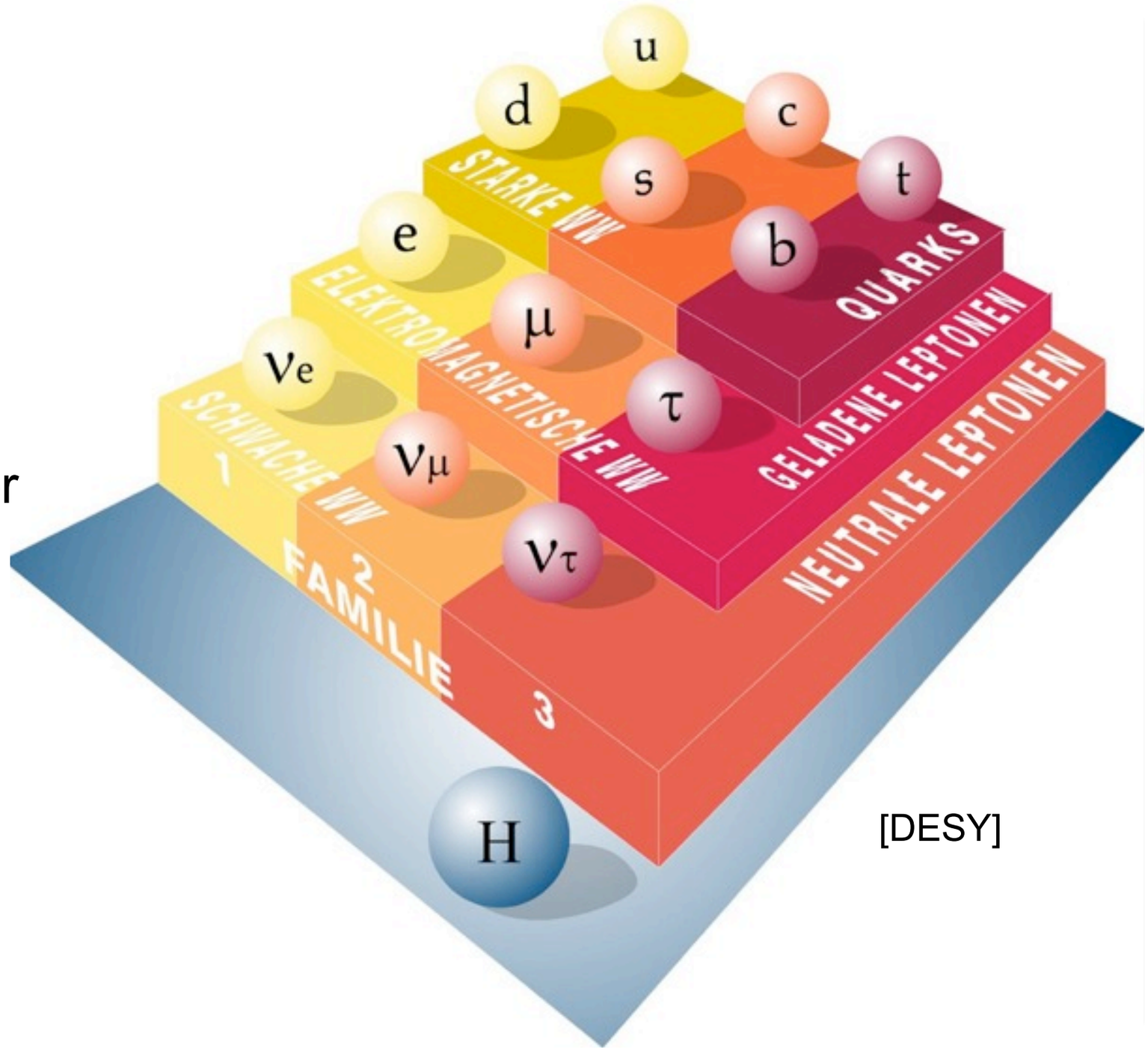
Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Teilchenphysik: Stand der Dinge 2012

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Das Standardmodell der Teilchenphysik

- Seit 1960er Jahren: „Standardmodell der Teilchenphysik”
  - 12 Elementarteilchen in drei Familien
  - Drei Kräfte
- Experimentell mit großer Genauigkeit bestätigt

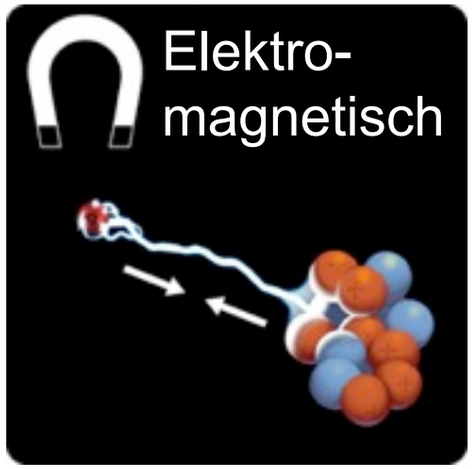


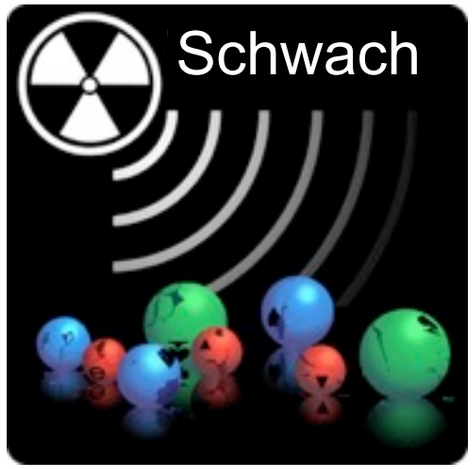
[DESY]

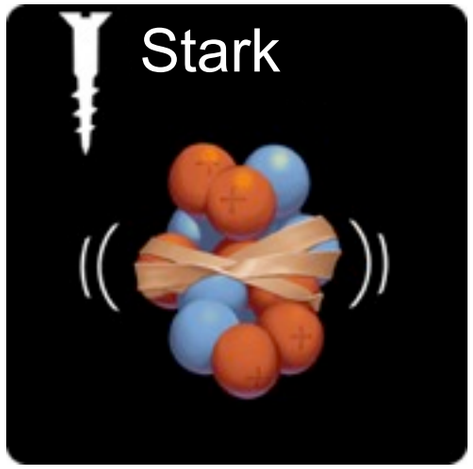
Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Kräfte im Standardmodell

- Kräfte („Wechselwirkungen”): Austausch von Überträgerteilchen mit Spin 1 („Eichbosonen”)
  - Starke Wechselwirkung
    → Eichbosonen: 8 Gluonen
  - Elektromagnetische Wechselwirkung
    → Eichboson: Photon
  - Schwache Wechselwirkung
    → Eichbosonen: $W^{\pm}$-, Z-Bosonen
- Vereinigung der elektromagnetischen und schwachen Wechselwirkung: elektroschwache Wechselwirkung



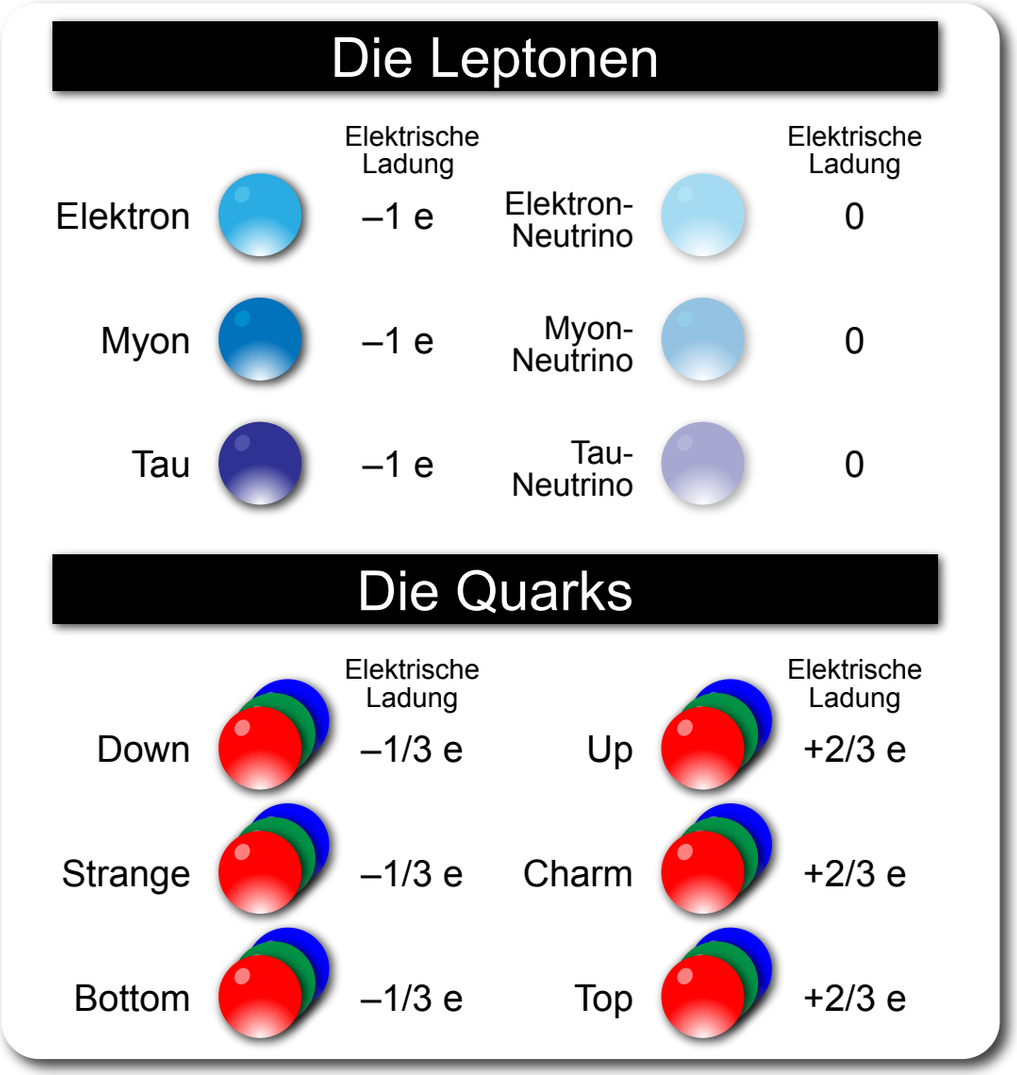


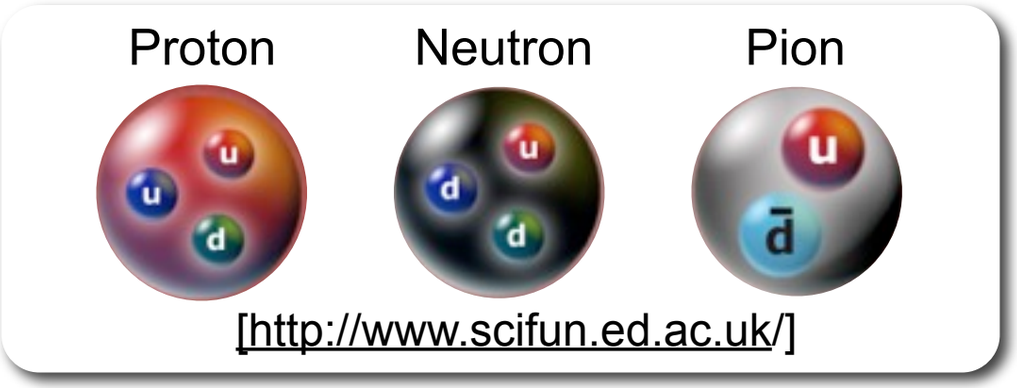


[http://www.particlephysics.ac.uk/]

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Teilchen im Standardmodell





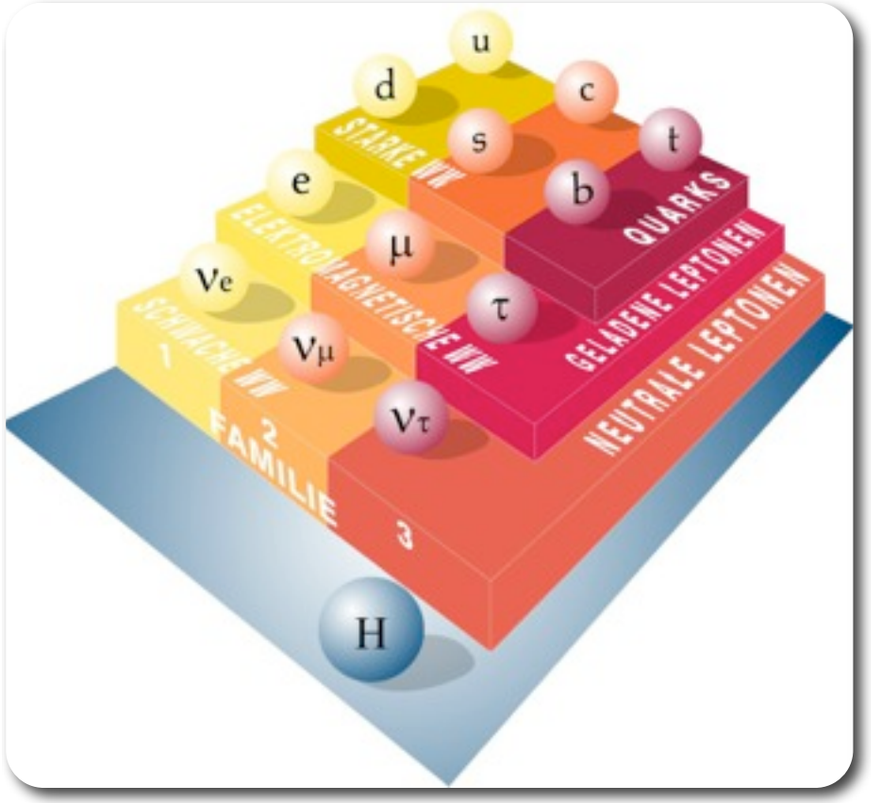
[http://www.scifun.ed.ac.uk/]

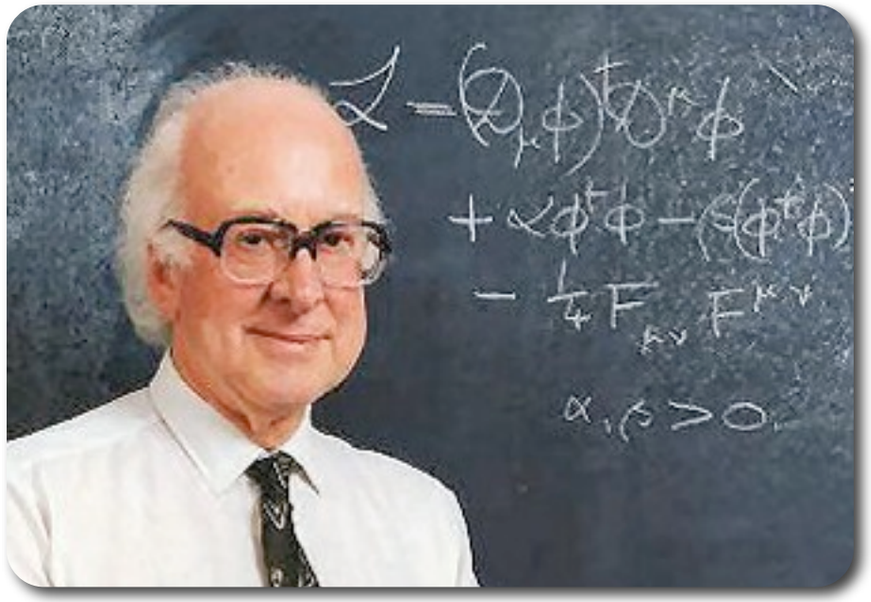
- Alle Teilchen: Fermionen (Spin 1/2)
- Elektrische Ladung:
  - Leptonen: ganzzahlig
  - Quarks: gebrochenzahlig
- Starke Kraft: „Confinement"
  - Keine freien Quarks, Bindung zu Hadronen = Baryonen + Mesonen
  - Baryonen: Quark + Quark + Quark
  - Mesonen: Quark-Antiquark-Paar
- Vorkommen in der Natur:
  - Alle Materie auf der Erde: Teilchen der 1. Familie
  - 2. und 3. Familie dennoch wichtig: z. B. kosmische Strahlung, Quantenkorrekturen

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Offene Fragen 2012: Das Higgs-Teilchen

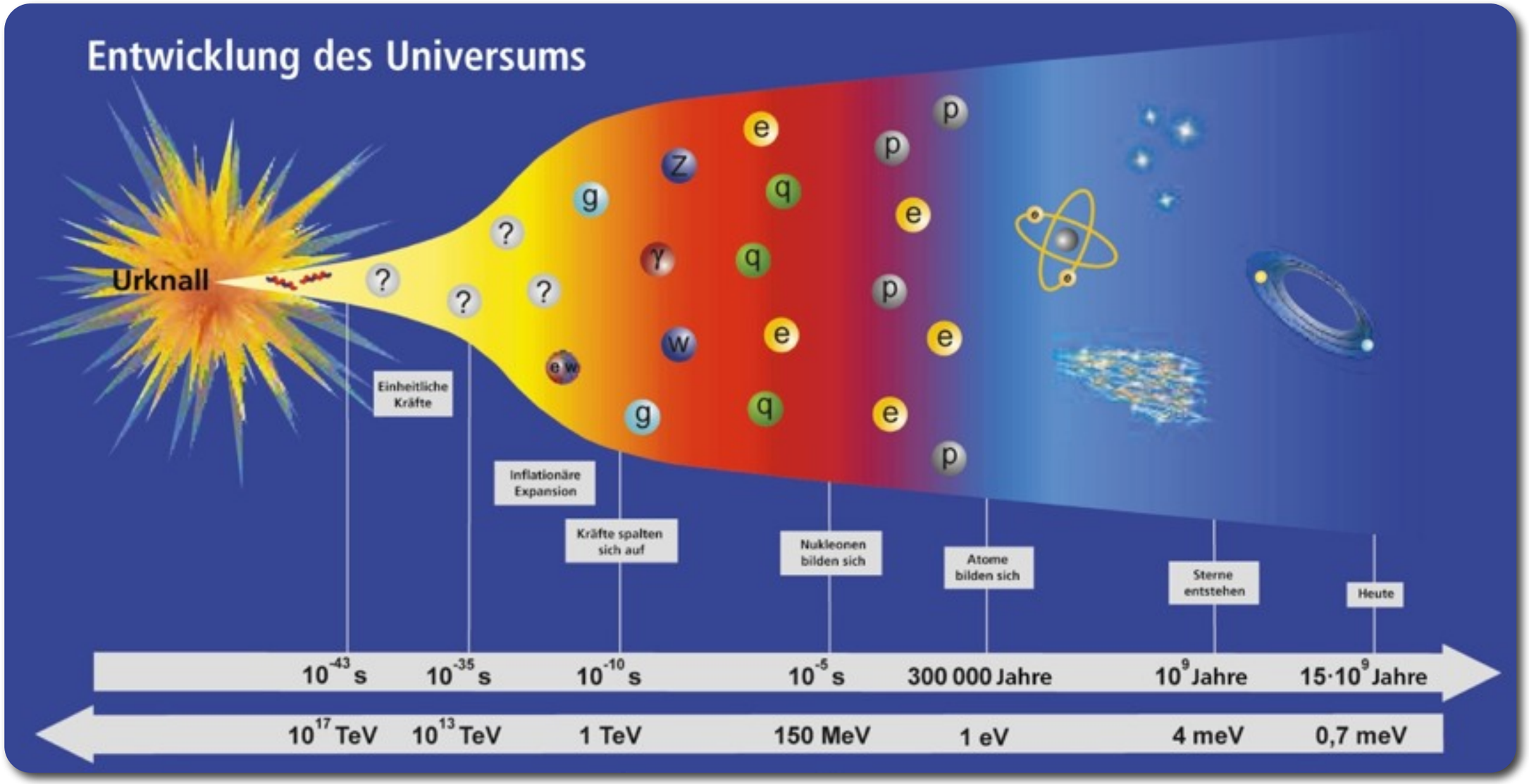
- Woher kommt die Masse?
  - Masse = relativistisch invariante Masse („Ruhemasse”) der Teilchen
  - Woher kommt Massenunterschied zwischen Elementarteilchen der drei Familien?
- Lösung im Standardmodell: Higgs-Teilchen
  - Postuliert von Peter Higgs (und unabhängig von 2 weiteren Forschergruppen) im Jahr 1964
  - Funktion: Higgs-Teilchen „gibt” allen Elementarteilchen Masse (die Masse zusammengesetzter Teilchen ist komplizierter!)
- Parallel zu dieser Veranstaltung (4. Juli 2012, 9:00): Vorstellung neuer Resultate zum Higgs-Teilchen am CERN





Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

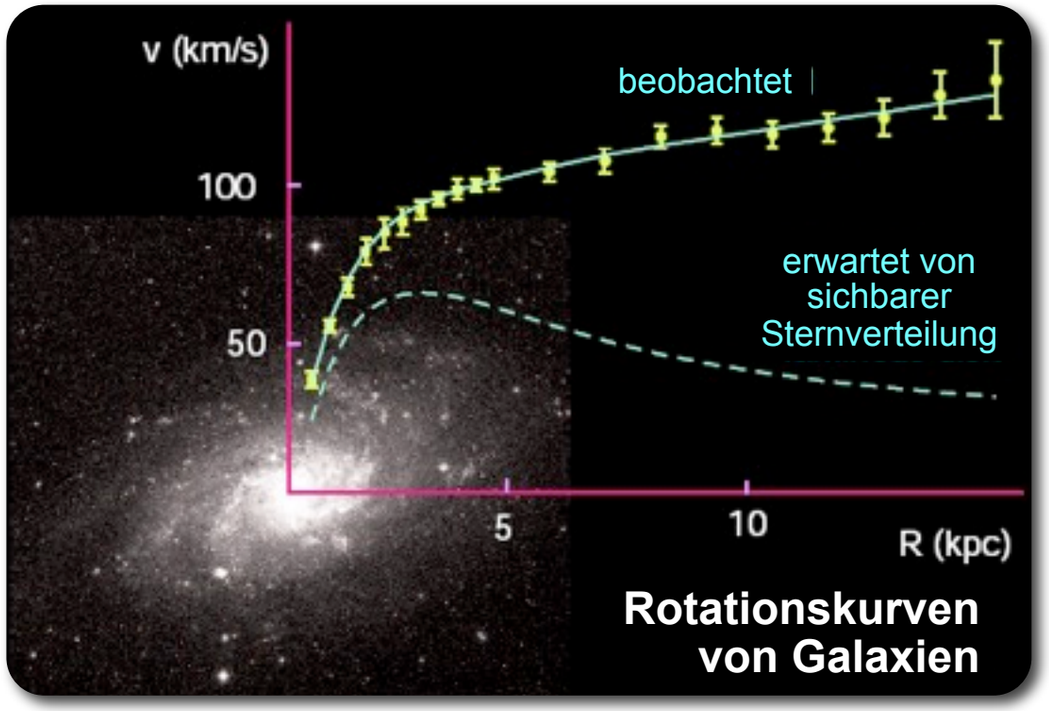
Das Standardmodell der Kosmologie



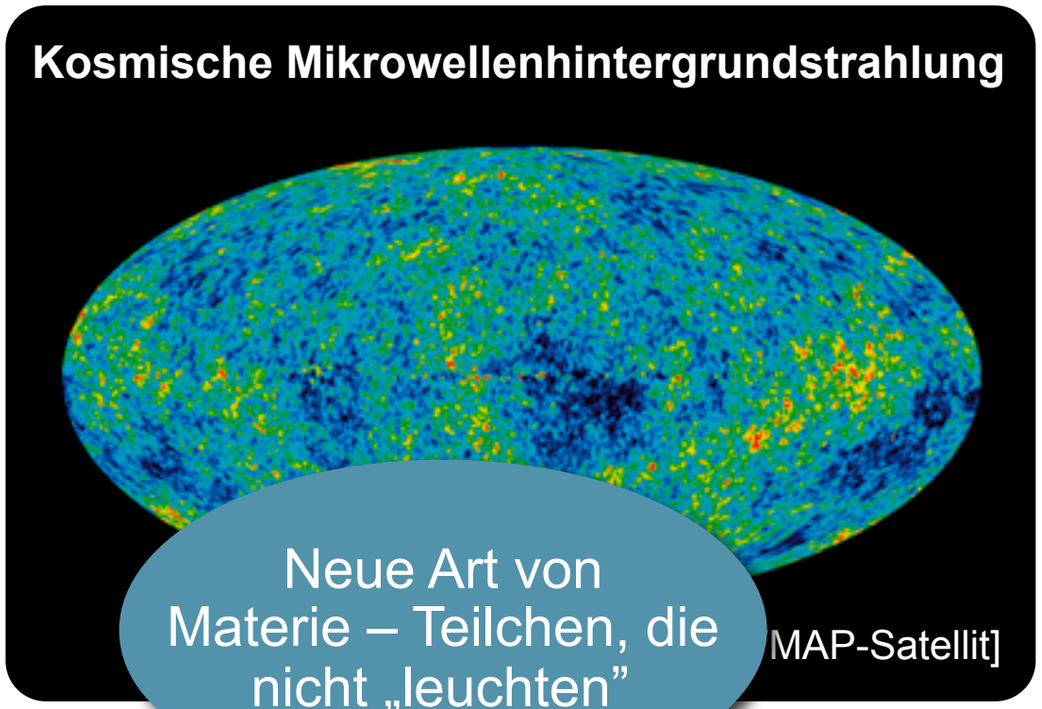
- Seit 10–15 Jahren: konsistentes Modell von der Entwicklung des Universums seit dem Urknall → „Standardmodell der Kosmologie”
- Passen Teilchenphysik und Kosmologie zusammen?

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

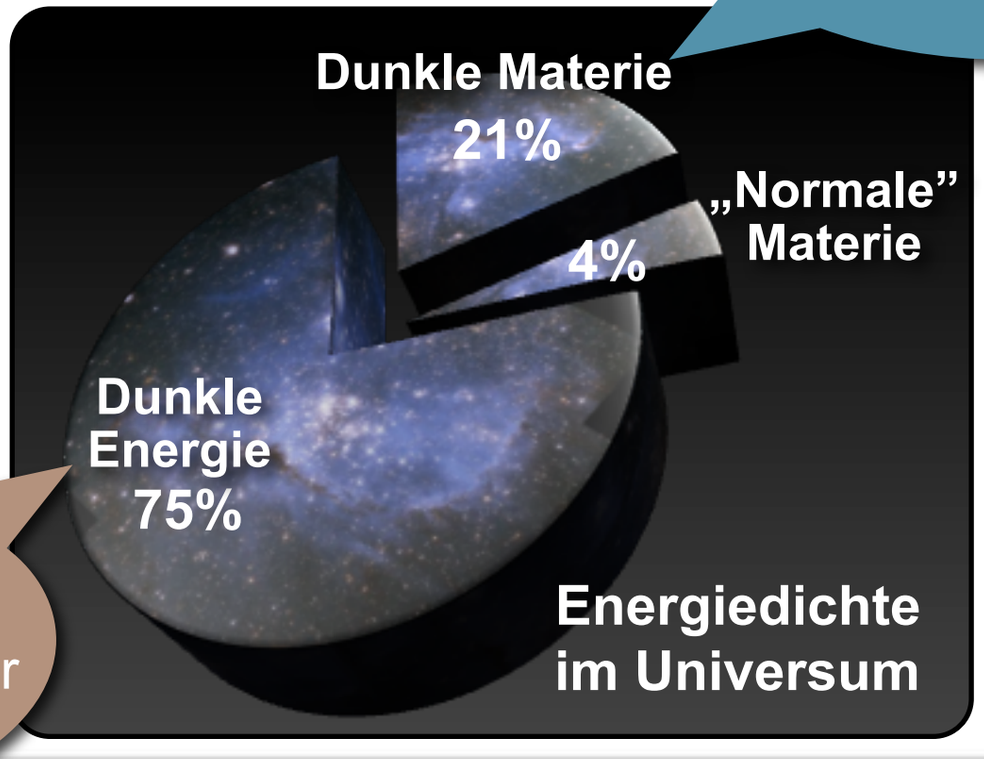
Dunkle Materie und Dunkle Energie



Rotationskurven von Galaxien



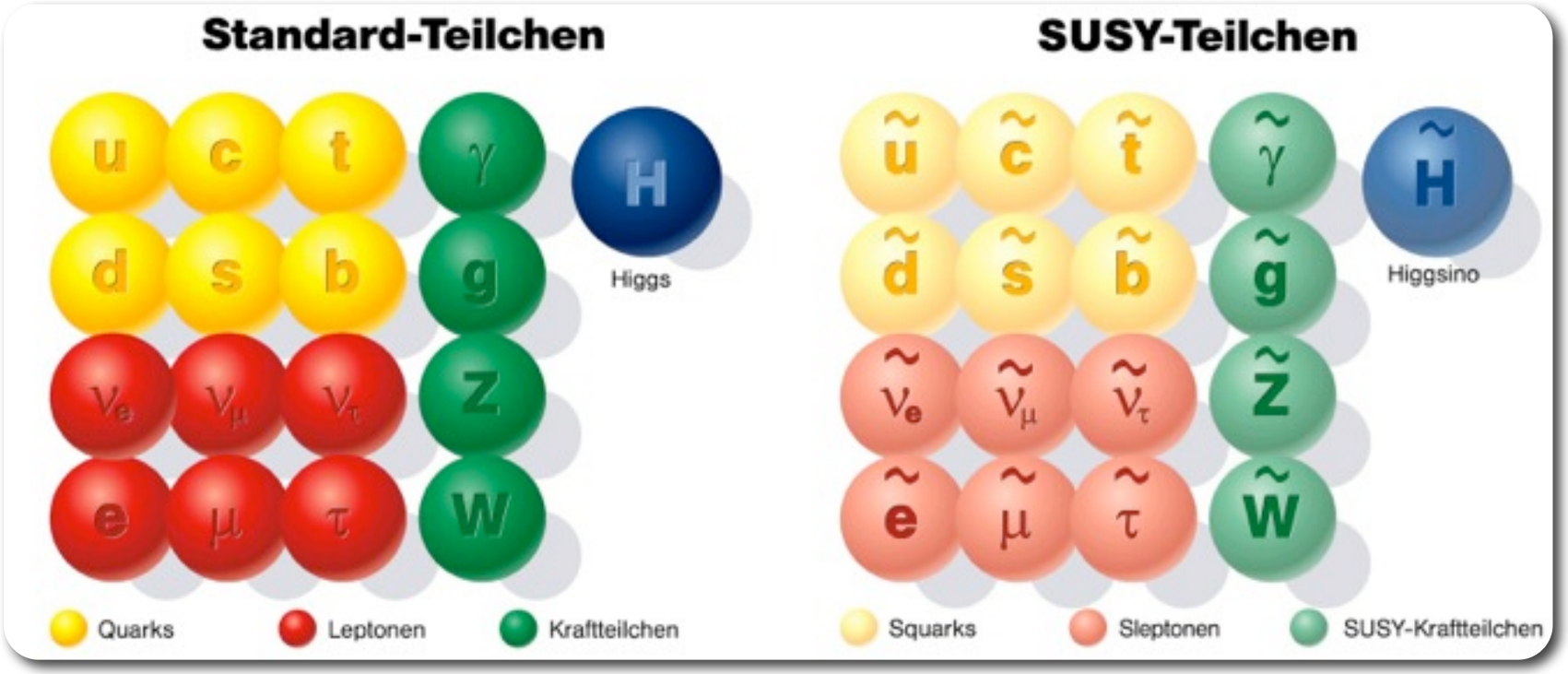
Neue Art von Materie – Teilchen, die nicht „leuchten"



Unbekannte Energieform, die das Universum auseinander treibt

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Lösungsideen?



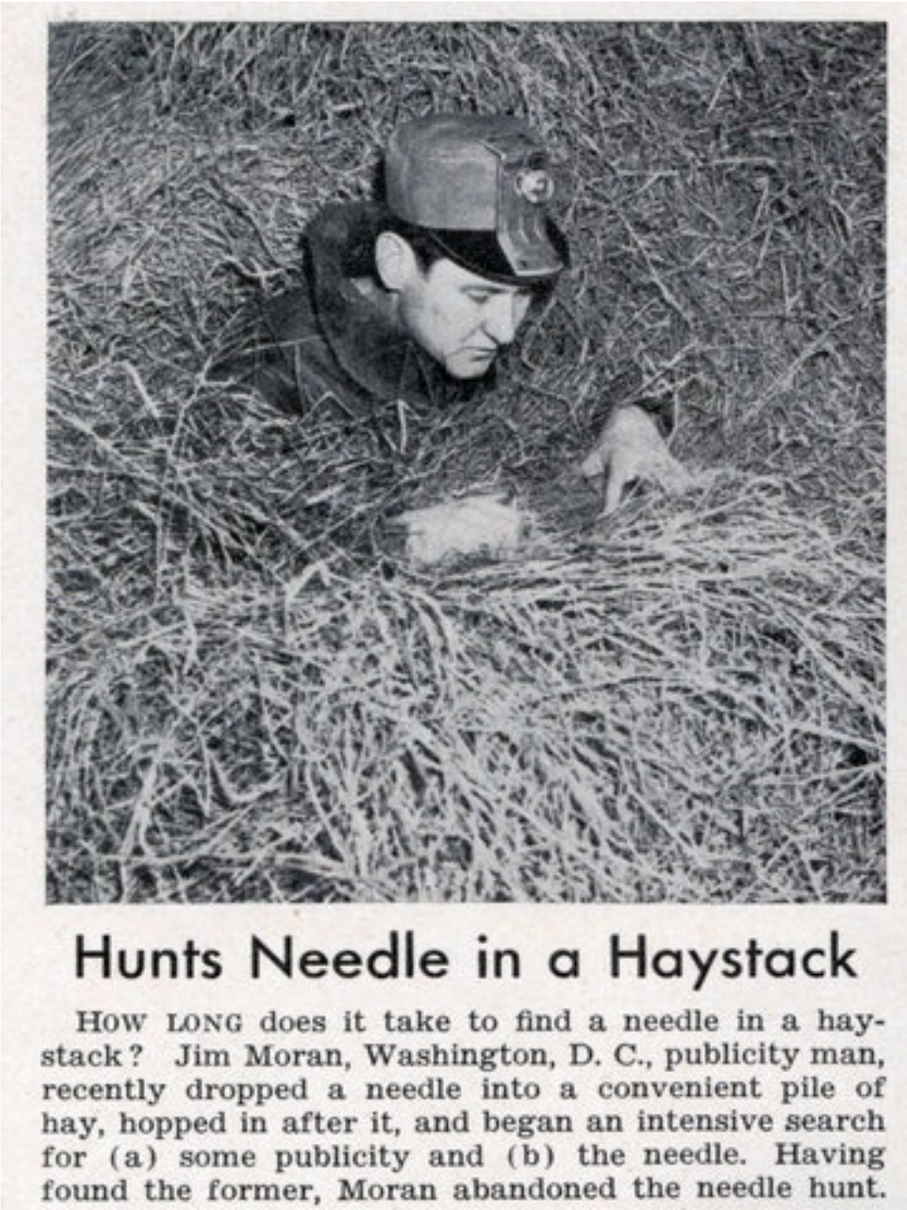
[DESY]

- Supersymmetrie („SUSY”)?
  - Die „letzte noch fehlende Symmetrie” in der Natur: Spiegelteilchen zu jedem Teilchen im Standardmodell
  - Keine Hinweise auf SUSY, einfachste Formen bereits von LHC ausgeschlossen
- Zusätzliche Raumdimensionen?
  - Keine Hinweise am LHC (z. B. mikroskopische schwarze Löcher)

Der Large Hadron Collider

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Die Nadel im Heuhaufen



- Ziel: Erzeugung und Nachweis neuer Elementarteilchen in Kollisionen bekannter Elementarteilchen „im Labor”
  - Neue Elementarteilchen vermutlich sehr schwer (>100 Protonmassen)
  - Prozesse mit neuen Elementarteilchen sehr selten, z. B. ein Higgs-Boson alle 3,5 Mrd. Kollisionen (produziert, nicht gemessen)
- Lösungen: Experimente an Teilchenbeschleunigern
  - Beschleuniger: höchste mögliche Energie und Kollisionsrate
  - Experimente: effizienter Filter für seltene neue Prozesse

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

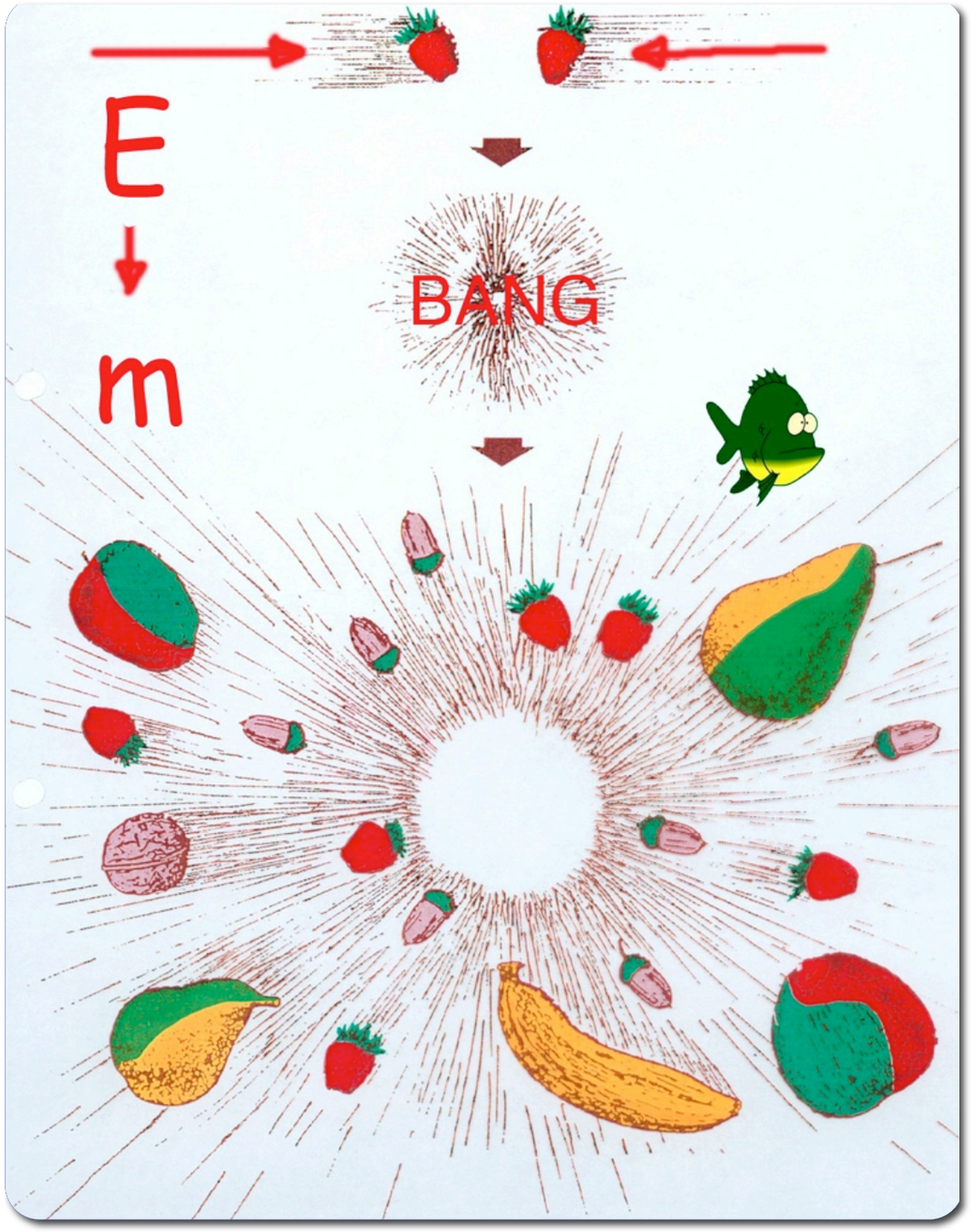
Warum immer höhere Energien?

- Grundpfeiler der Teilchenphysik:
  - Spezielle Relativitätstheorie
    (A. Einstein)
  - Quantenmechanik
    (E. Schrödinger, W. Heisenberg, …)

A. Einstein

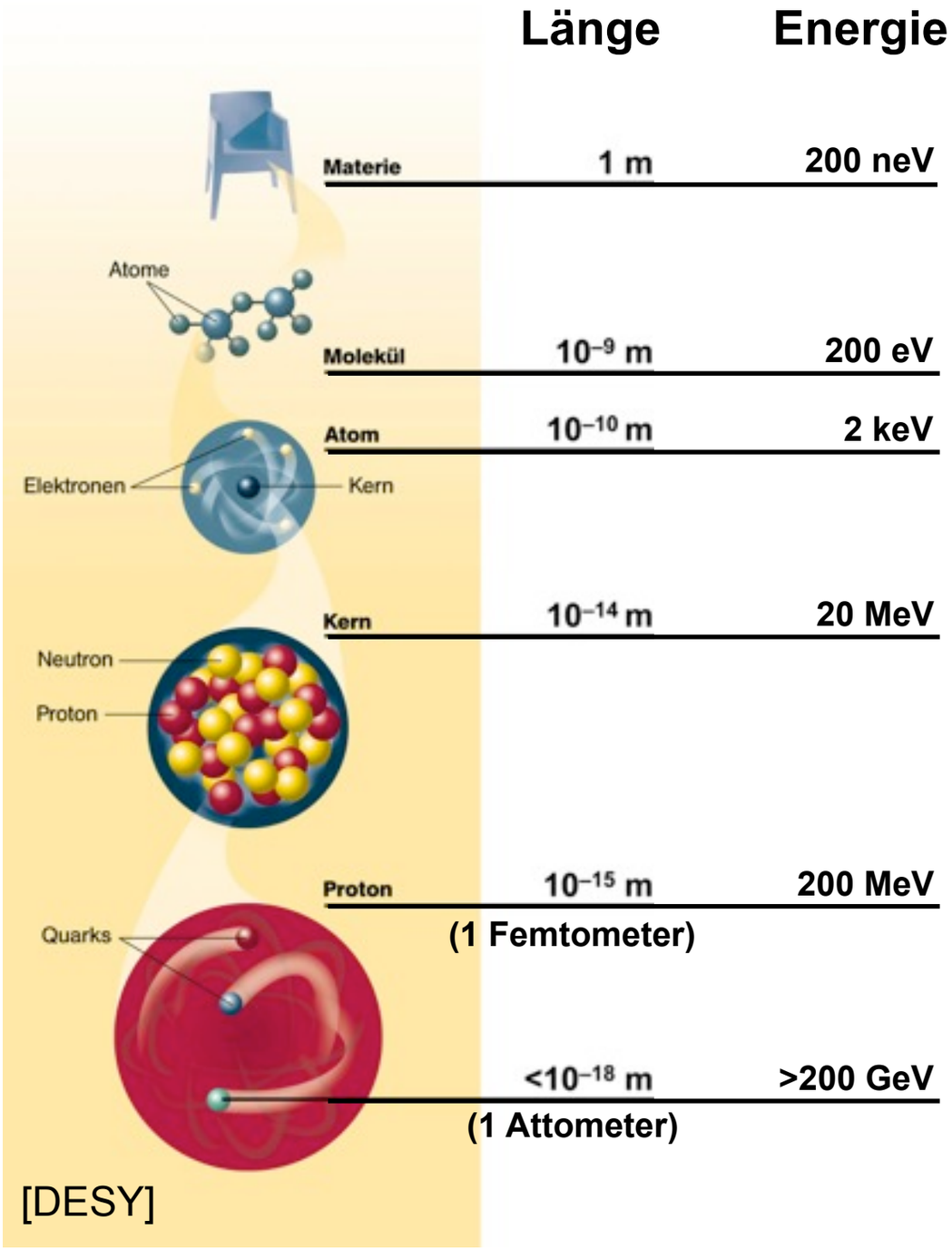
W. Heisenberg

- Relativitätstheorie: $E = mc^2$
  - Masse ist eine Form von Energie
  - Kollisionen von Elementarteilchen mit hoher Energie → Produktion neuer schwerer Teilchen



Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Warum immer höhere Energien?



[DESY]

- Unschärferelation (Heisenberg)
  - Ort (Δx) und Impuls (Δp) nicht gleichzeitig beliebig genau bekannt:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

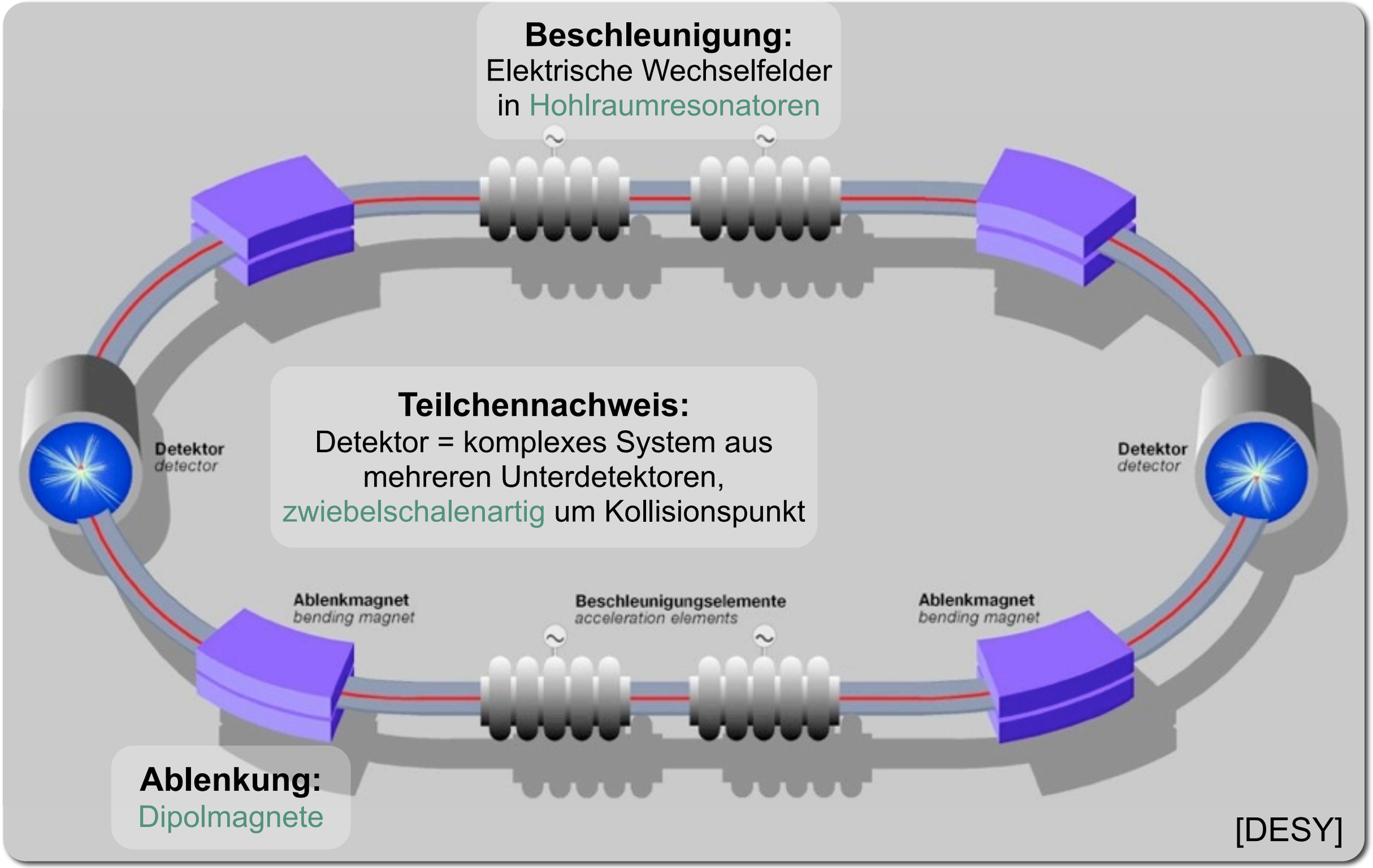
  - Größerer Impulsübertrag → Auflösung kleinerer Strukturen
- Materiewellen (de Broglie):
  - Wellenlänge eines Teilchens mit Impuls p:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

  - Größerer Impuls → kleinere Wellenlänge → höhere Auflösung

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

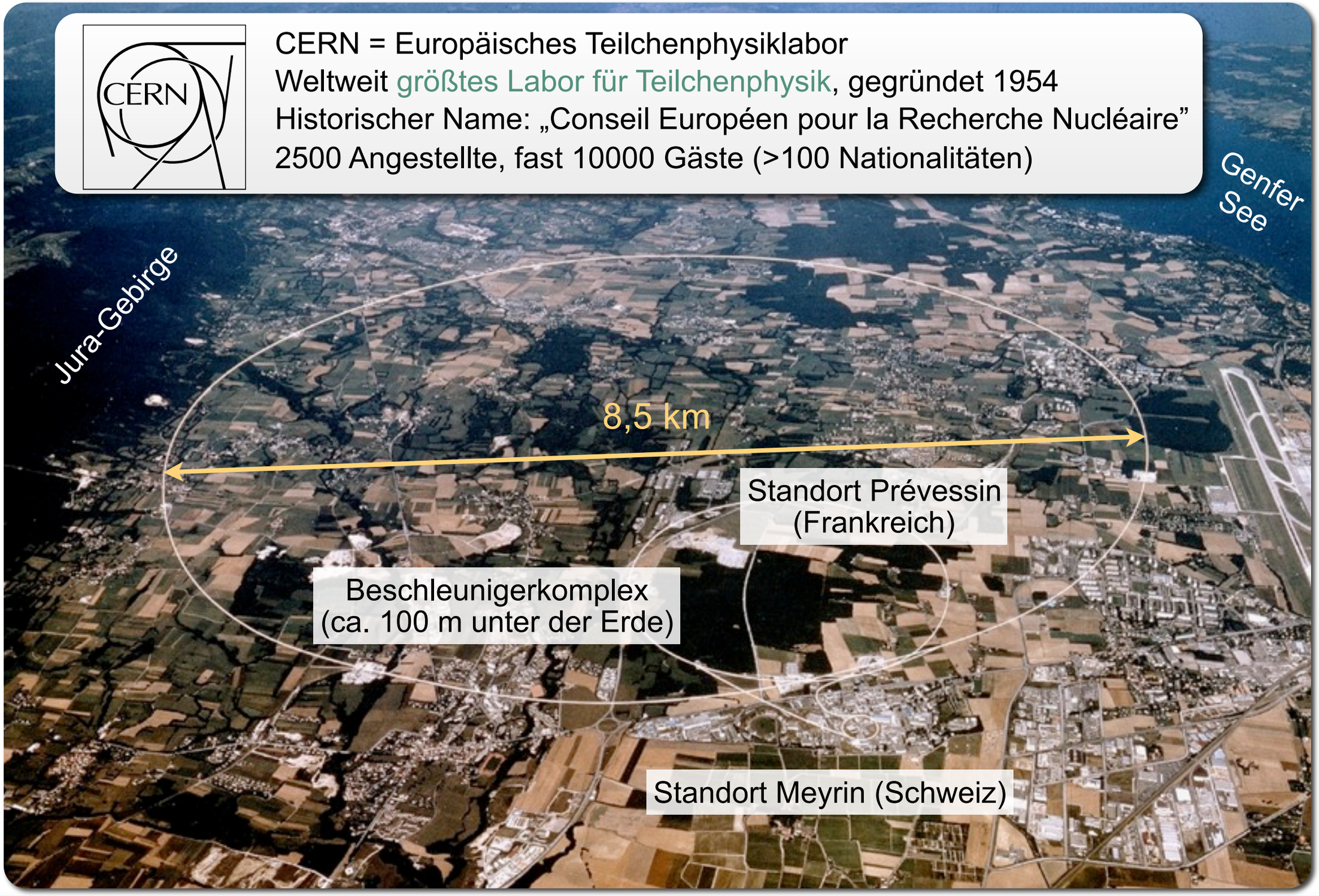
Prinzip des Teilchenbeschleunigers



Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Was ist CERN?

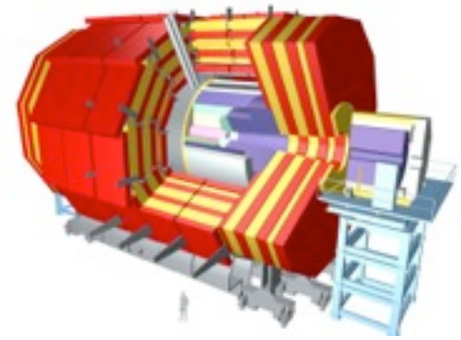
CERN = Europäisches Teilchenphysiklabor
Weltweit größtes Labor für Teilchenphysik, gegründet 1954
Historischer Name: „Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire"
2500 Angestellte, fast 10000 Gäste (>100 Nationalitäten)



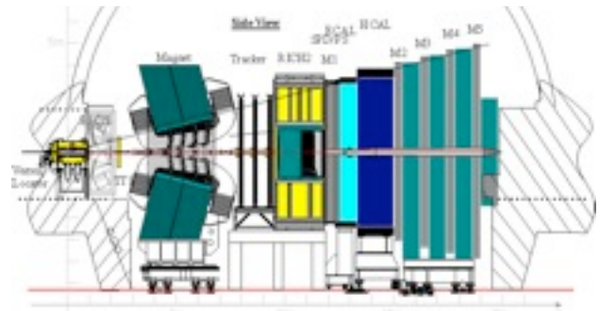
Hac

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

CMS-Experiment:
Vielzweckexperiment

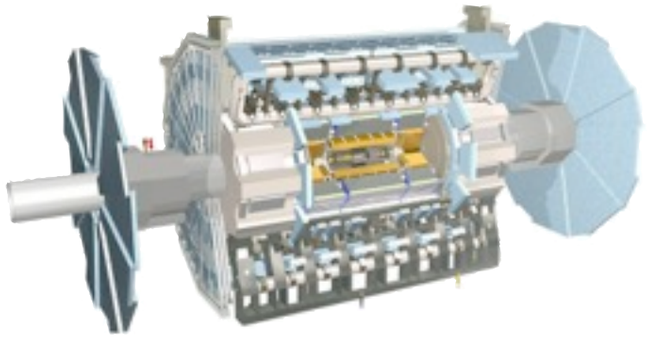


LHCb-Experiment:
Symmetrie Materie/Antimaterie



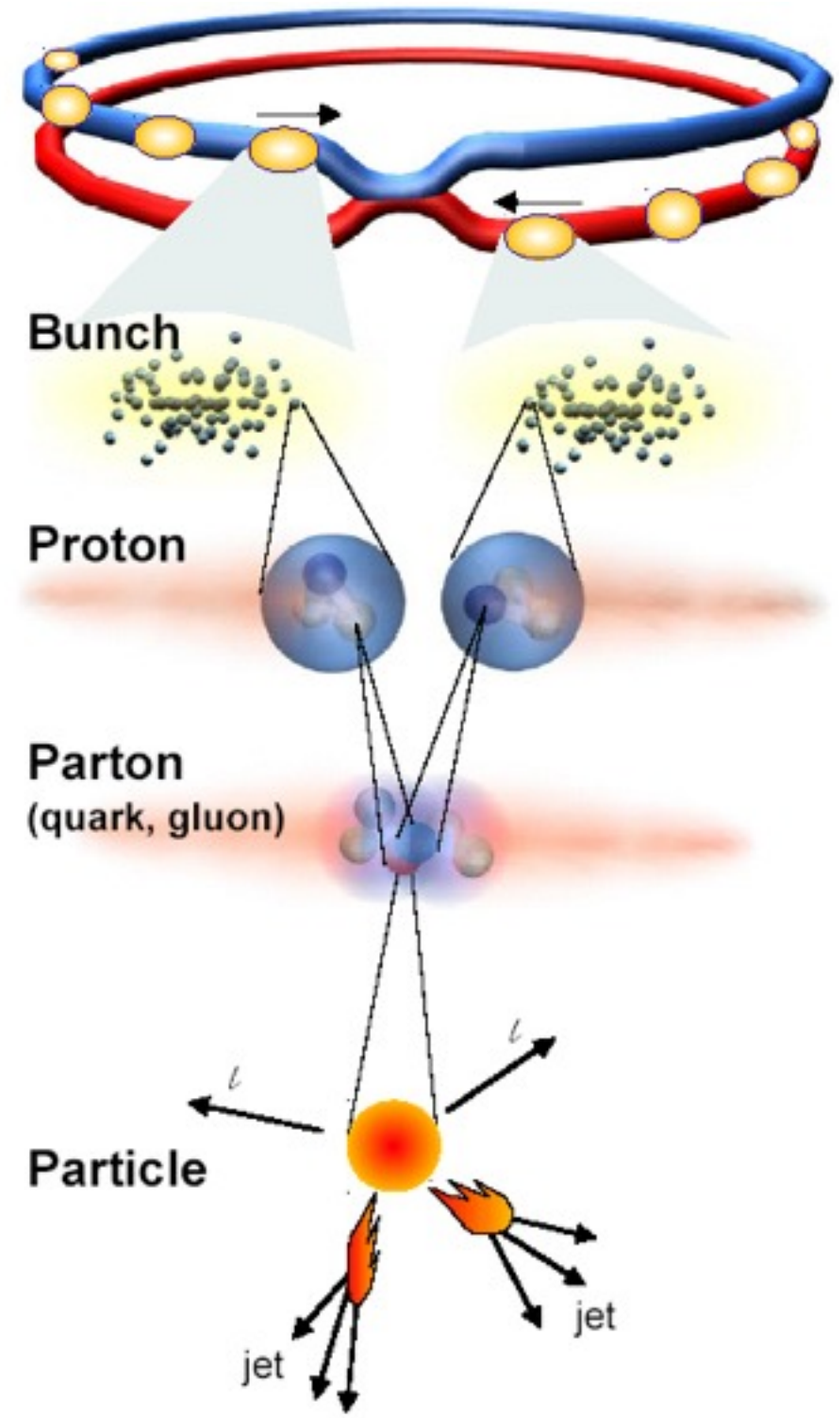
ALICE-Experiment:
Schwerionenphysik

ATLAS-Experiment:
Vielzweckexperiment



Höchste Energien und Kollisionsraten

- Hohe Energie → starke Dipolmagnete
  - Zwingen Protonen auf Kreisbahn (Lorentzkraft)
  - Magnetfelder bis zu 8,3 Tesla
  - Supraleitende Magnete: Kühlung mit supraflüssigem Helium bei 1,9 Kelvin
- Hohe Kollisionsraten: viele Protonen
  - Protonenstrahlen: 1380 Protonenpakete pro Strahl, >100 Mrd. Protonen pro Paket
  - Jede Sekunde: 40 Millionen mal 25–30 Kollisionen → mehr als 1 Mrd. „Ereignisse”
  - Nur eines von 5 Mio. Ereignisse wird aufgezeichnet, ca. 200 pro Sekunde

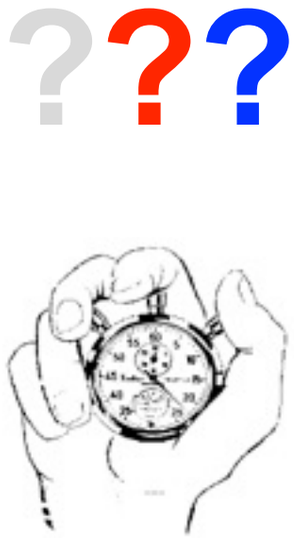


Teilchennachweis am LHC

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

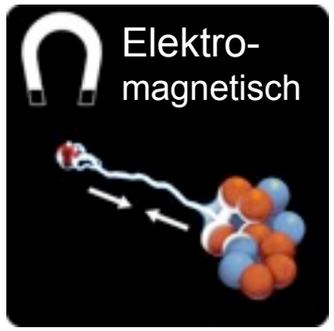
Vorüberlegungen zum Detektordesign

- Fragen:
  - Wie baue ich einen Detektor für die Suche nach noch unbekannten Teilchen?
  - Welche Teilcheneigenschaften mit welcher Präzision?



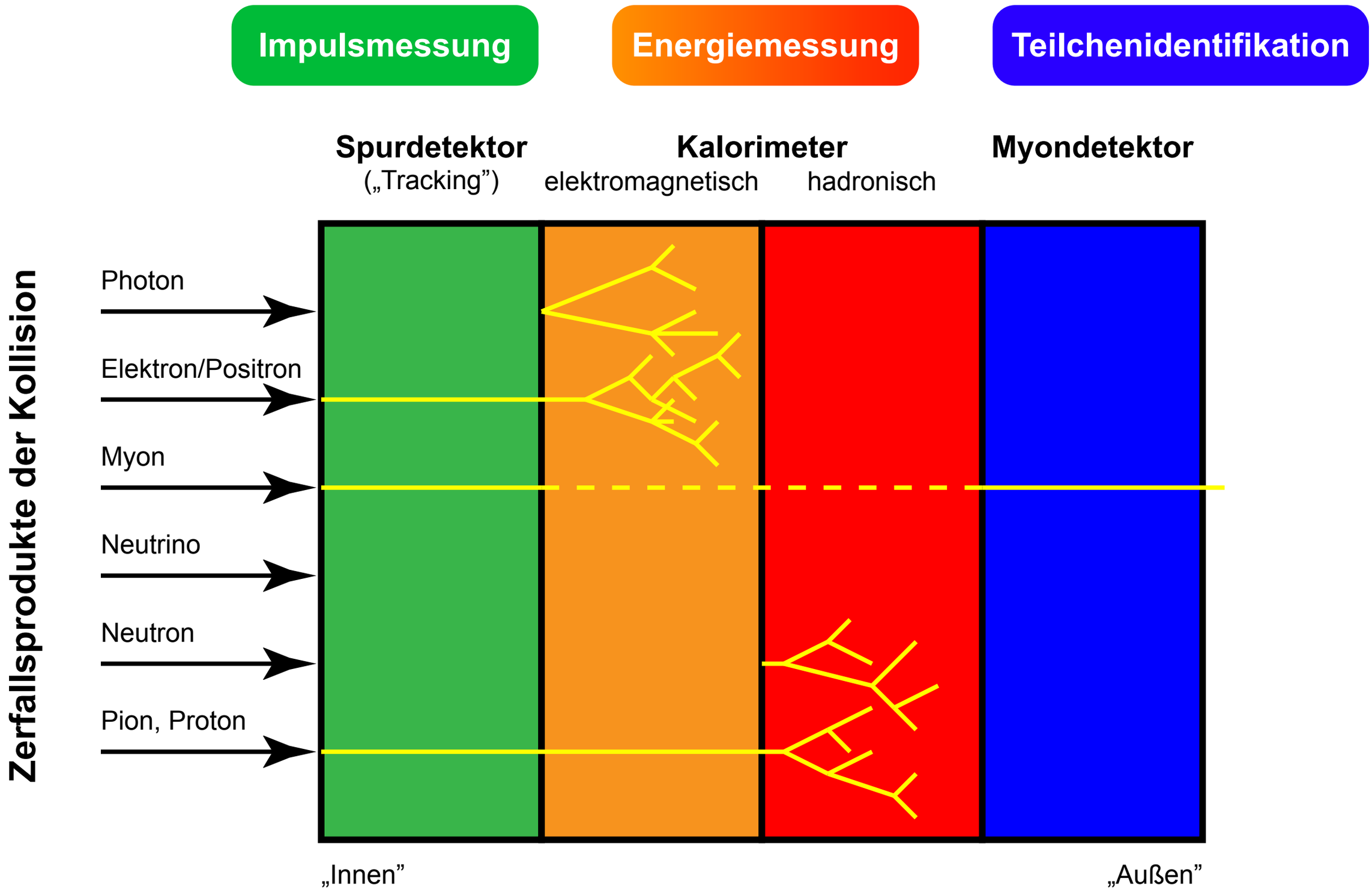
- Erwartung: neue Teilchen sehr kurzlebig ($\ll 10^{-12}$ s)
  → Nachweis (bereits bekannter) Zerfallsprodukte

- Anforderungen an Detektor:
  - Weise möglichst alle Teilchen nach: hermetischer Detektor
  - Teilchen müsen elektrisches Signal im Detektor hinterlassen
    → Messung beruht auf elektromagnetischer Kraft
  - Messe alle Eigenschaften: Energie, Impuls, Teilchensorte



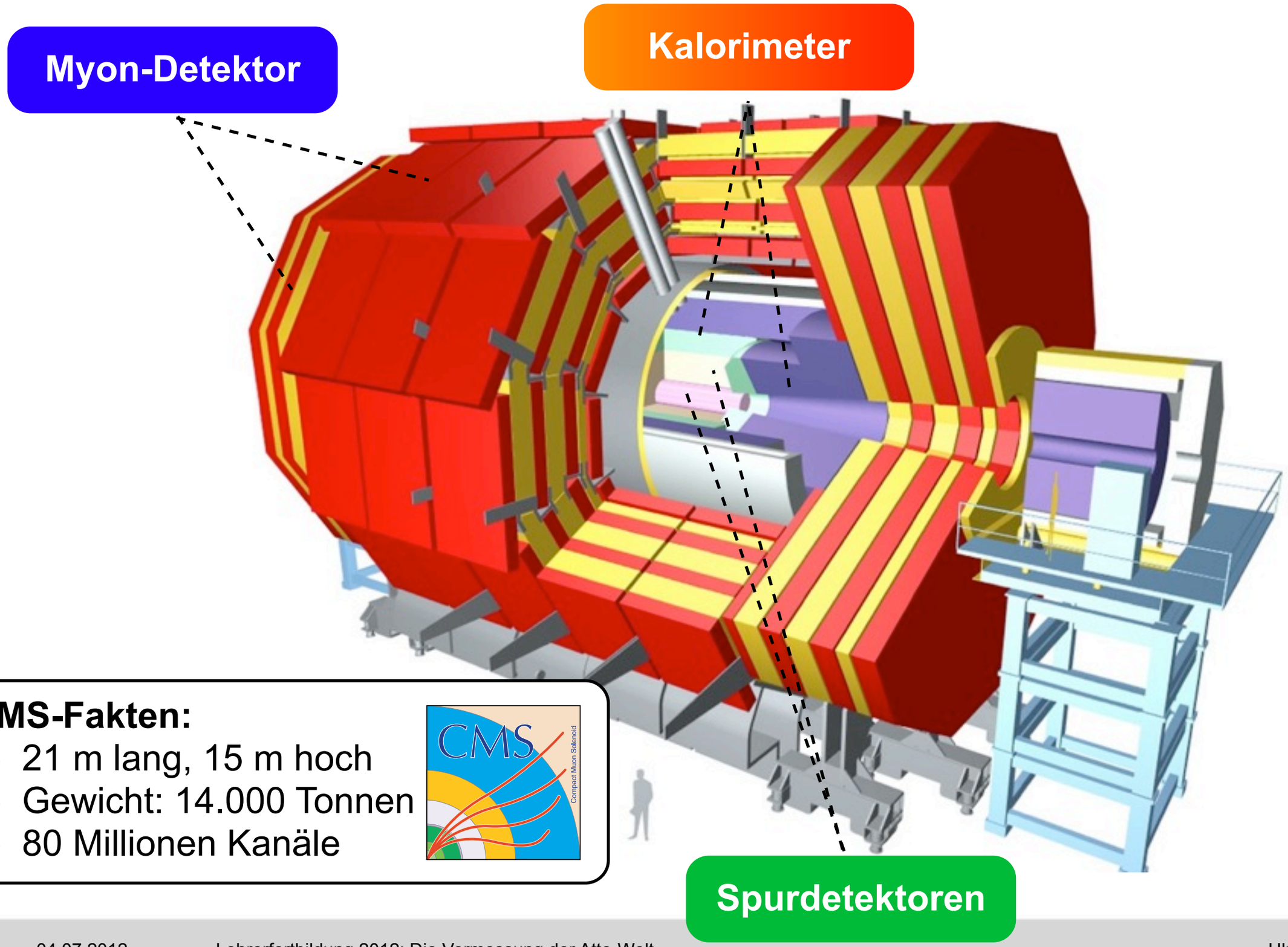
Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Teilchennachweis



Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

CMS – Der Compact Muon Solenoid

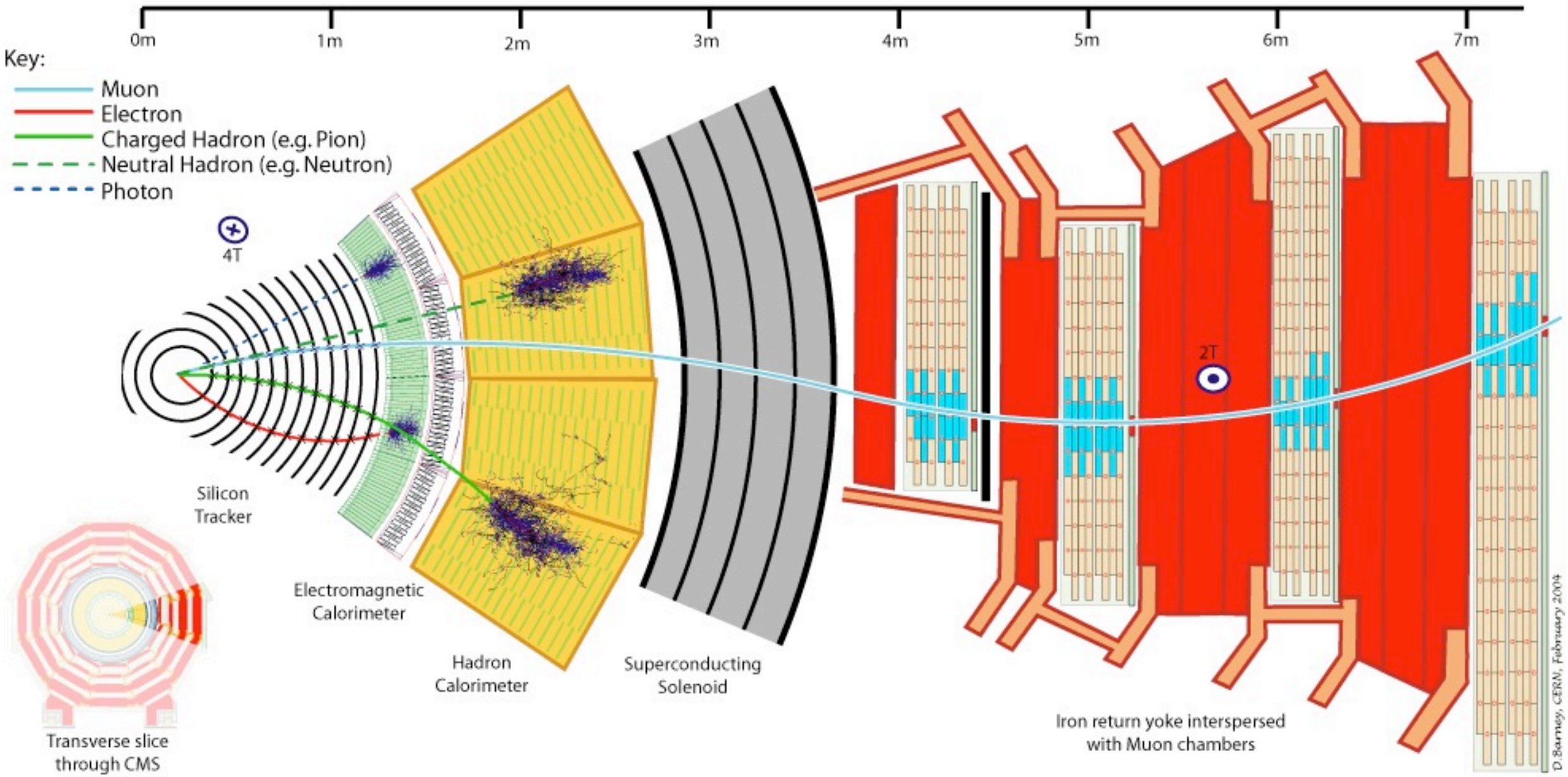


CMS-Fakten:

- 21 m lang, 15 m hoch
- Gewicht: 14.000 Tonnen
- 80 Millionen Kanäle

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

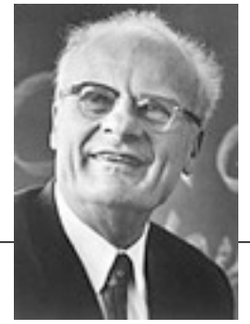
Teilchennachweis im CMS-Detektor



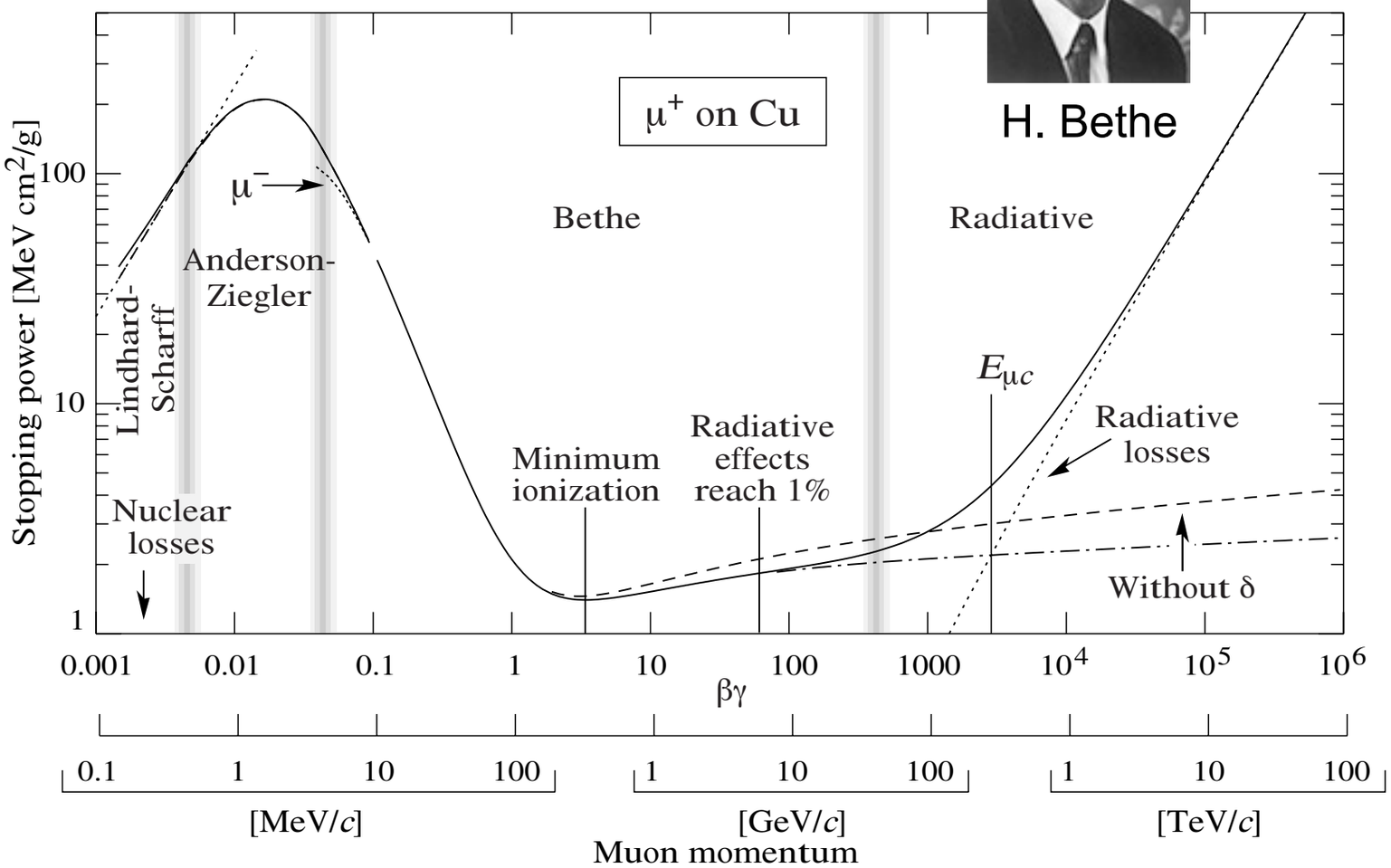
Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Geladene Teilchen in Materie

- Semiklassisches Modell („Bethe-Formel"): elektromagnetische Wechselwirkung der Teilchen mit Atomen
- Energieverlust pro Längeneinheit d*E*/d*x* („stopping power")
  - Niedrige Energien: Ionisation
  - Höhere Energien: Abstrahlung von Photonen



H. Bethe

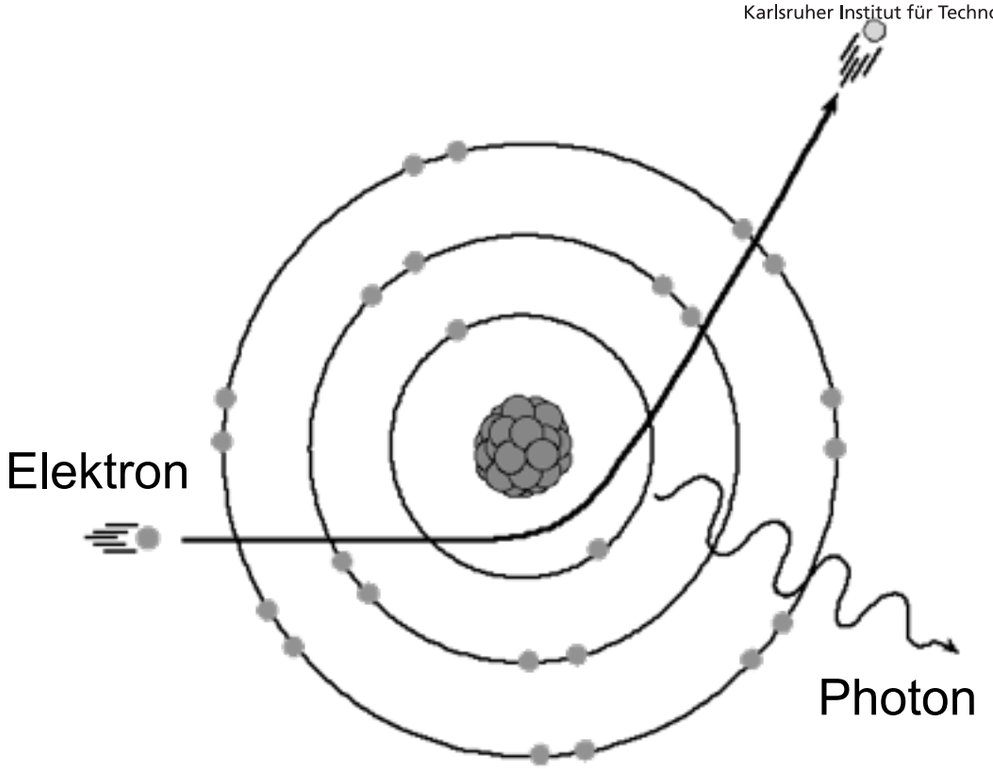


[Particle Data Group]

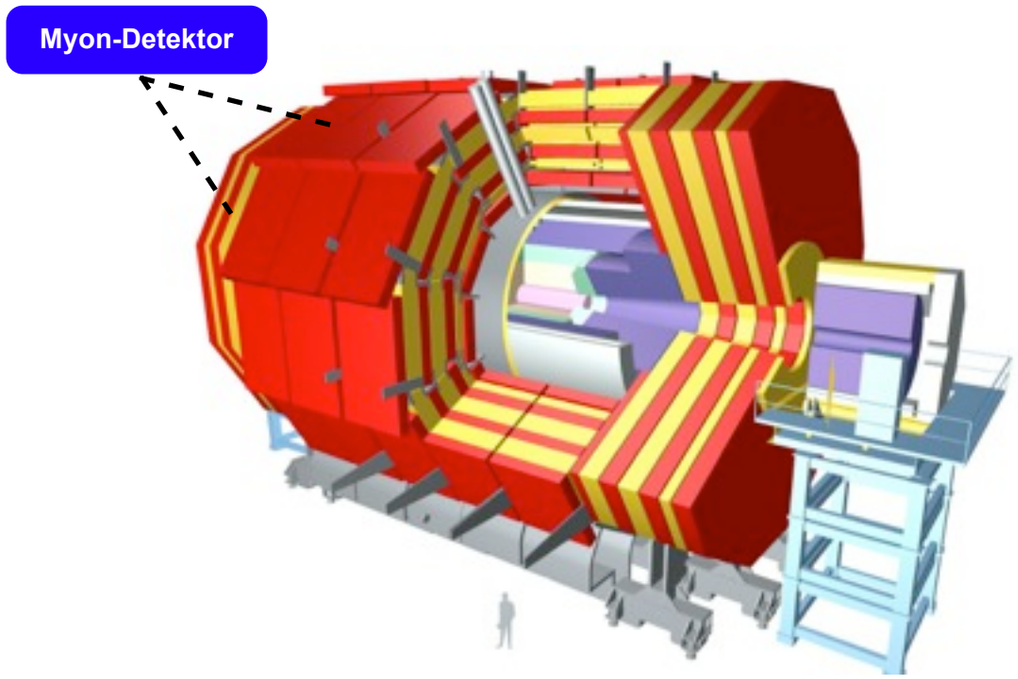
Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Elektronen und Myonen

- Energieverlust von Elektronen
  - Geringe Masse:
    $m_e = (1/200)\ m_\mu = (1/1800)\ m_p$
  - Wichtigster Mechanismus für Energieverlust: Bremsstrahlung (~ $1/m^4$) (Emission von Photonen im Coulombfeld des Atomkerns)

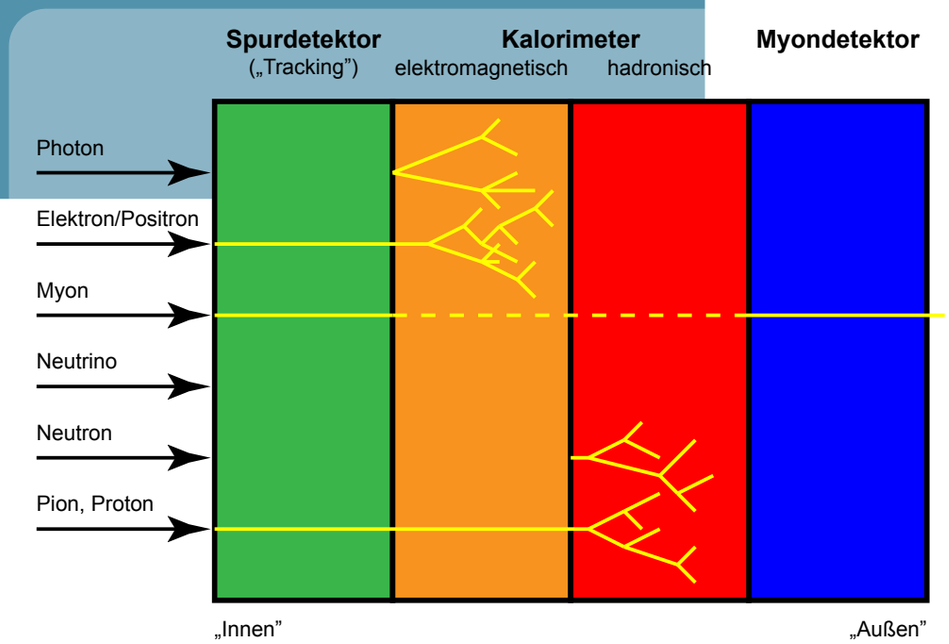


- Myonen durchdringen mehr Materie als andere geladene Teilchen
  → Nachweis in äußeren Detektorlagen
  - Myonen sind Leptonen: keine starke Wechselwirkung
  - Myonen sind schwer: Bremsstrahlung vernachlässigbar



Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Impulsmessung mit Spurdetektoren



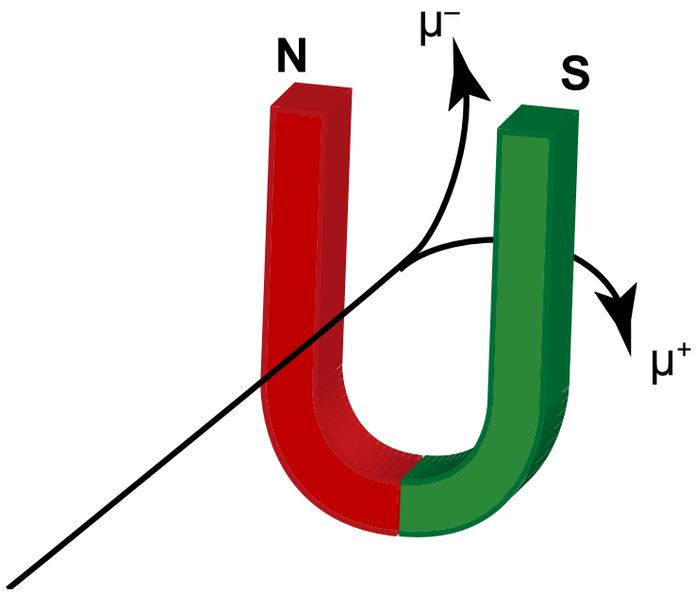
Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Impulsmessung

- Messprinzip: Ablenkung in Magnetfeld
  - Bewegte geladene Teilchen: Lorentzkraft

$$e\,\vec{v} \times \vec{B} = \frac{mv^2}{r} \cdot \frac{\vec{r}}{r}$$

  - Homogenes Magnetfeld B: Teilchen auf Helixbahn

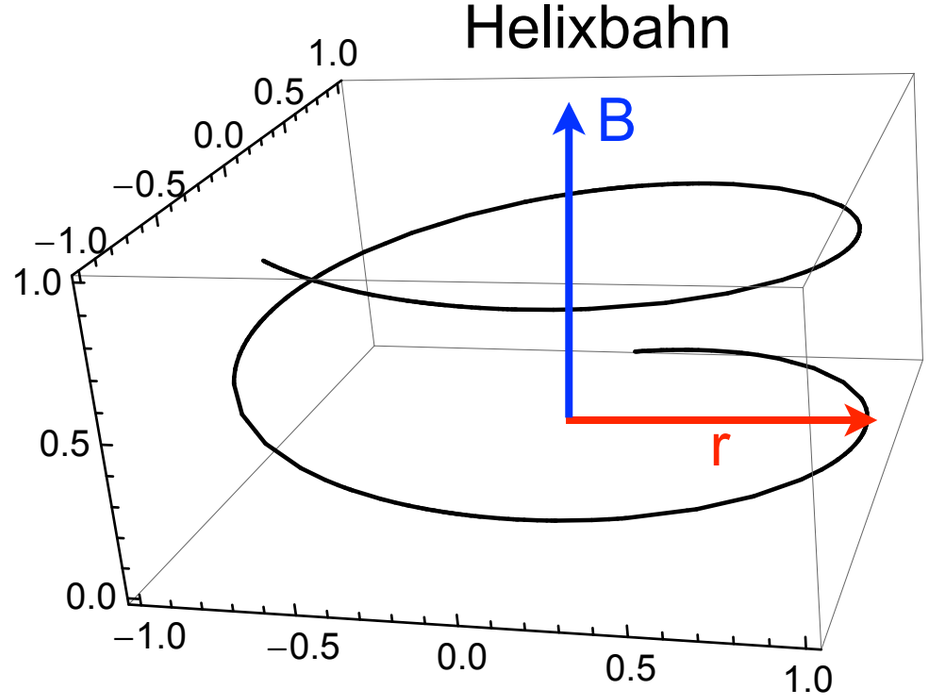


- Impulsbestimmung:
  - Impuls senkrecht zu Magnetfeld B („Transversalimpuls" p_T) bestimmt aus Krümmungsradius r der Teilchenspur

$$p_T\,[\mathrm{GeV}/c] = 0.3\,B\,[\mathrm{T}] \cdot r\,[\mathrm{m}]$$

  - Ladungsvorzeichen aus Krümmungsrichtung

Helixbahn

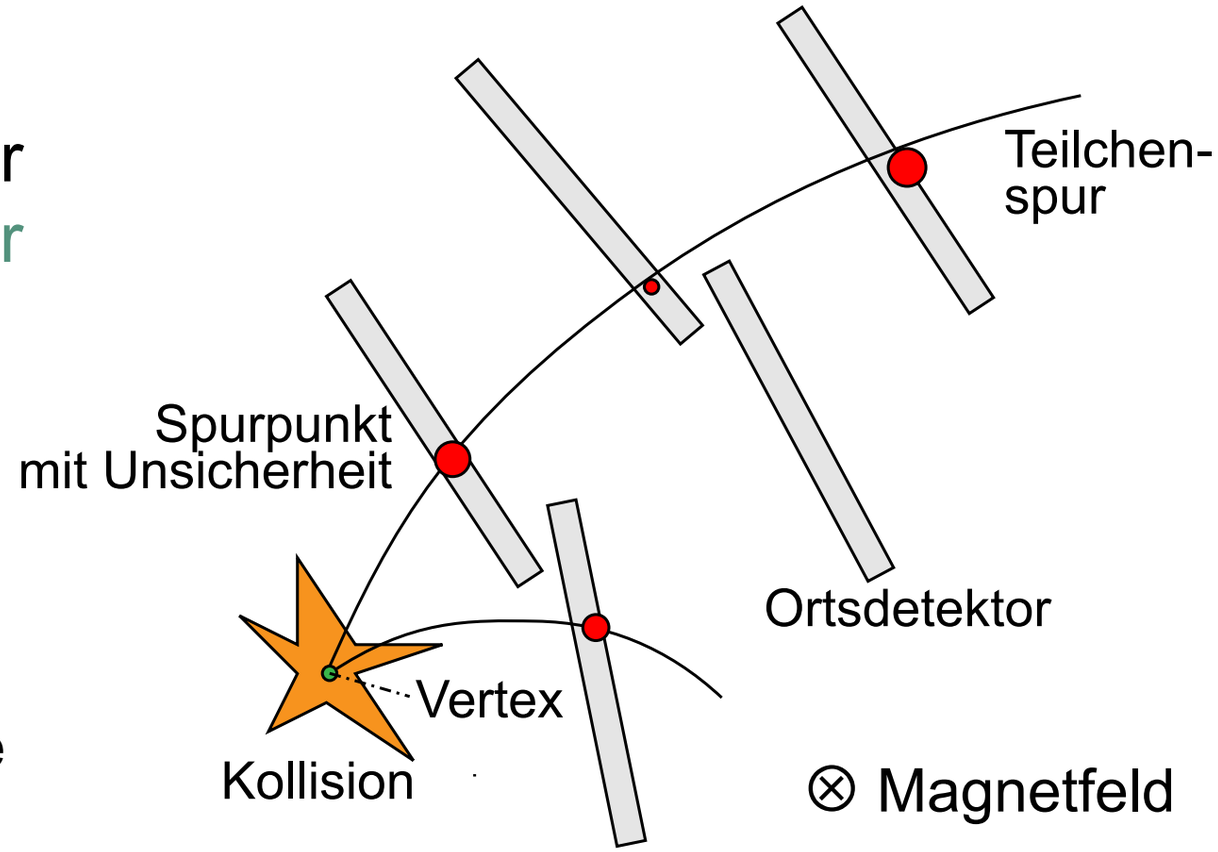


- Benötigt: Detektoren zur genauen Vermessung von Teilchenspuren

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Spur- und Vertexrekonstruktion

- Vermessung der Spuren geladener Teilchen: mehrlagiger Spurdetektor
- Elektrische Signal in jeder Detektorlage → Spurpunkte
- Spuranpassung:
  - Mustererkennung: liegen Spurpunkte auf gemeinsamer Helixbahn?
  - Spurfit: Anpassung der Helixparameter (Krümmungsradius, …)
- Vertexanpassung: zeigen Spuren auf gemeinsamen Ursprungsort („Vertex”)?



Spuranpassung: minimiere

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

x_i Messung

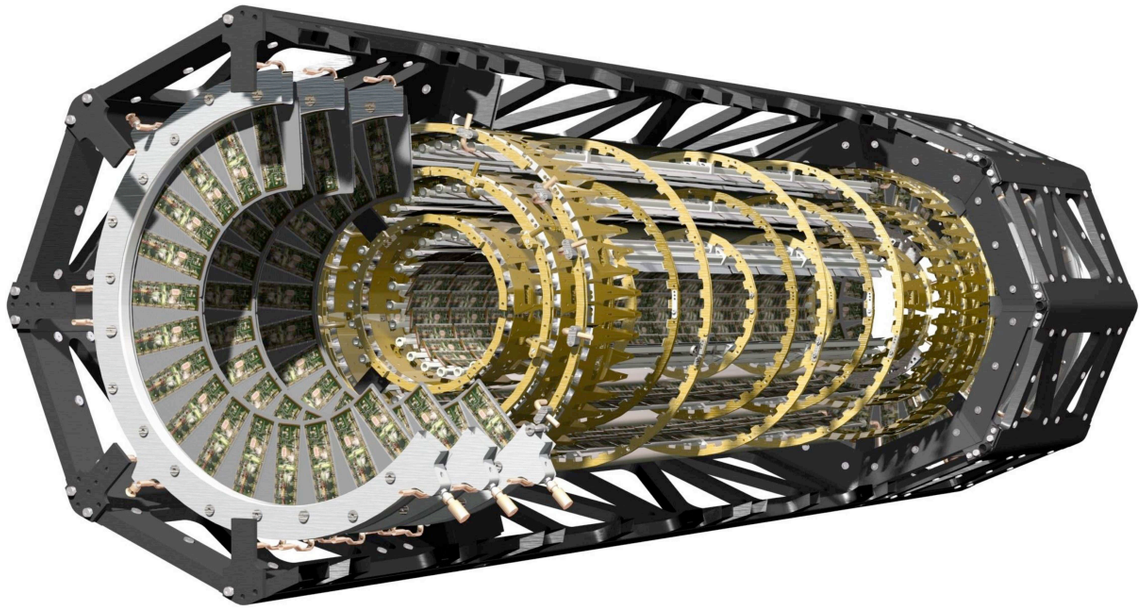
σ_i Unsicherheit

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Spurdetektoren am LHC

- Frühere Experimente: gasgefüllte Detektoren (z. B. Driftkammern)
- Spurdetektoren aller LHC-Experimente: Halbleiterdetektoren

ATLAS-Siliziumpixeldetektor

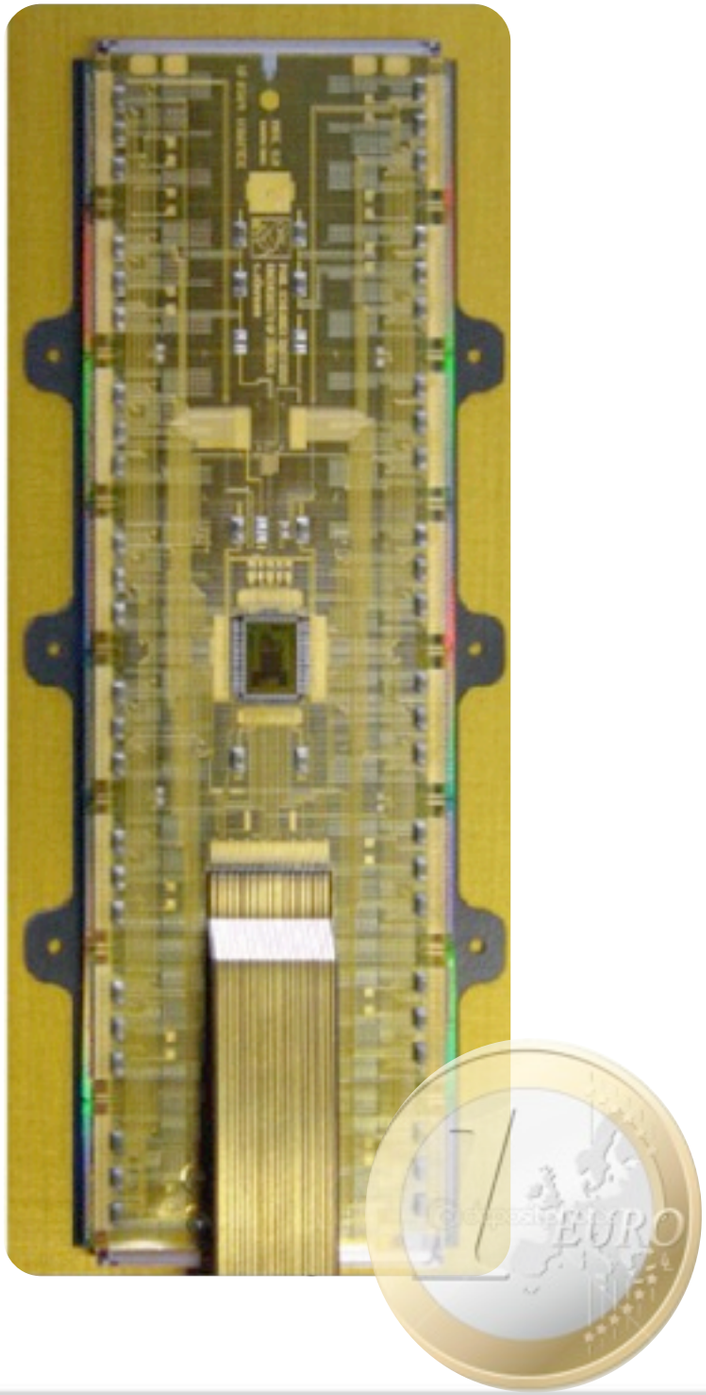


- Messprinzip:
  - Teilchendurchgang: Bildung von „Elektron-Loch-Paaren” in dotiertem Halbleiter
  - Fein segmentierte Auslese → hohe Auflösung der Spurpunkte

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Siliziumdetektoren im CMS-Experiment

Einzelnes Modul des CMS-Pixeldetektors (ca. 64000 Pixel)

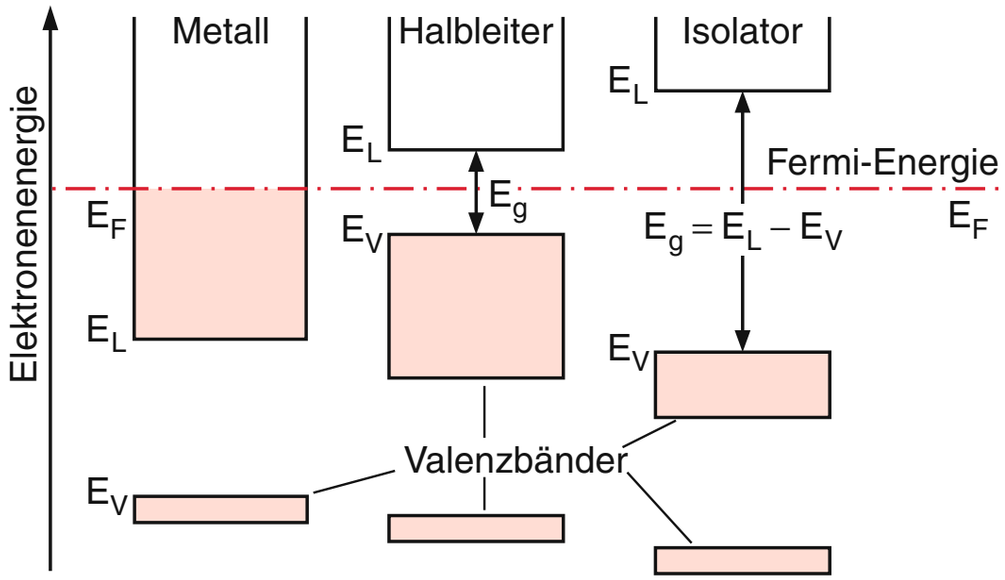


- CMS-Experiment: gesamter Spurdetektor aus Silizium
  - Mehr als 200 m^2 Detektorfläche, mehr als 60 Milionen Auslesekanäle
  - Innere Lagen: Pixeldetektoren → hohe Auflösung
  - Äußere Lagen: Streifendetektoren → große Abdeckung
- KIT: signifikante Beteiligung an Forschung und Entwicklung sowie Bau des CMS-Spurdetektors

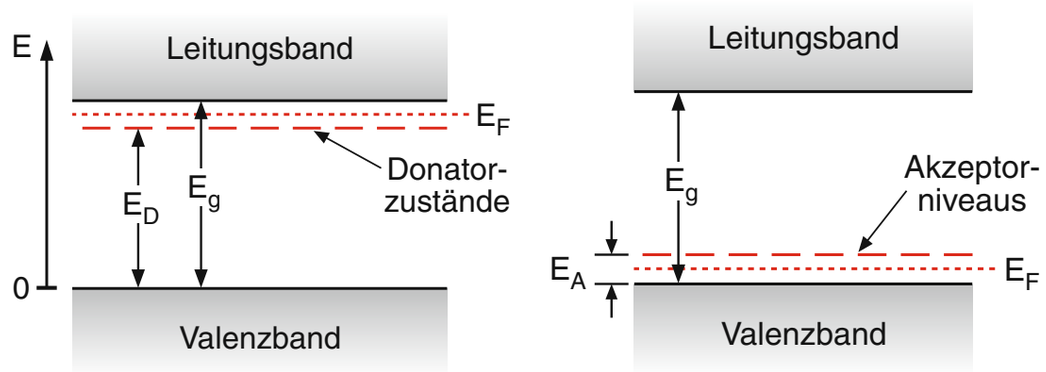
Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Dotierte Halbleiter

- Physikalische Grundlagen von Halbleiterdetektoren
  - Kristallgitter: 4 Valenzelektronen pro Atom
  - Negative Ladungsträger: freie Elektronen
  - Positive Ladungsträger: Elektronen wandern zwischen freien Positionen im Kristallgitter („Löcher”)



- Bändermodell der Energiezustände
  - Halbleiter: Bandlücke zwischen Valenz- und Leitungsband
  - Dotierung: Veränderung der Eigenschaften
    - n-Dotierung: Atome mit 5 Valenzelektronen → zusätzliche Elektronen: „Donatoren”
    - p-Dotierung: Atome mit 3 Valenzelektronen → zusätzliche Löcher: “Akzeptoren”

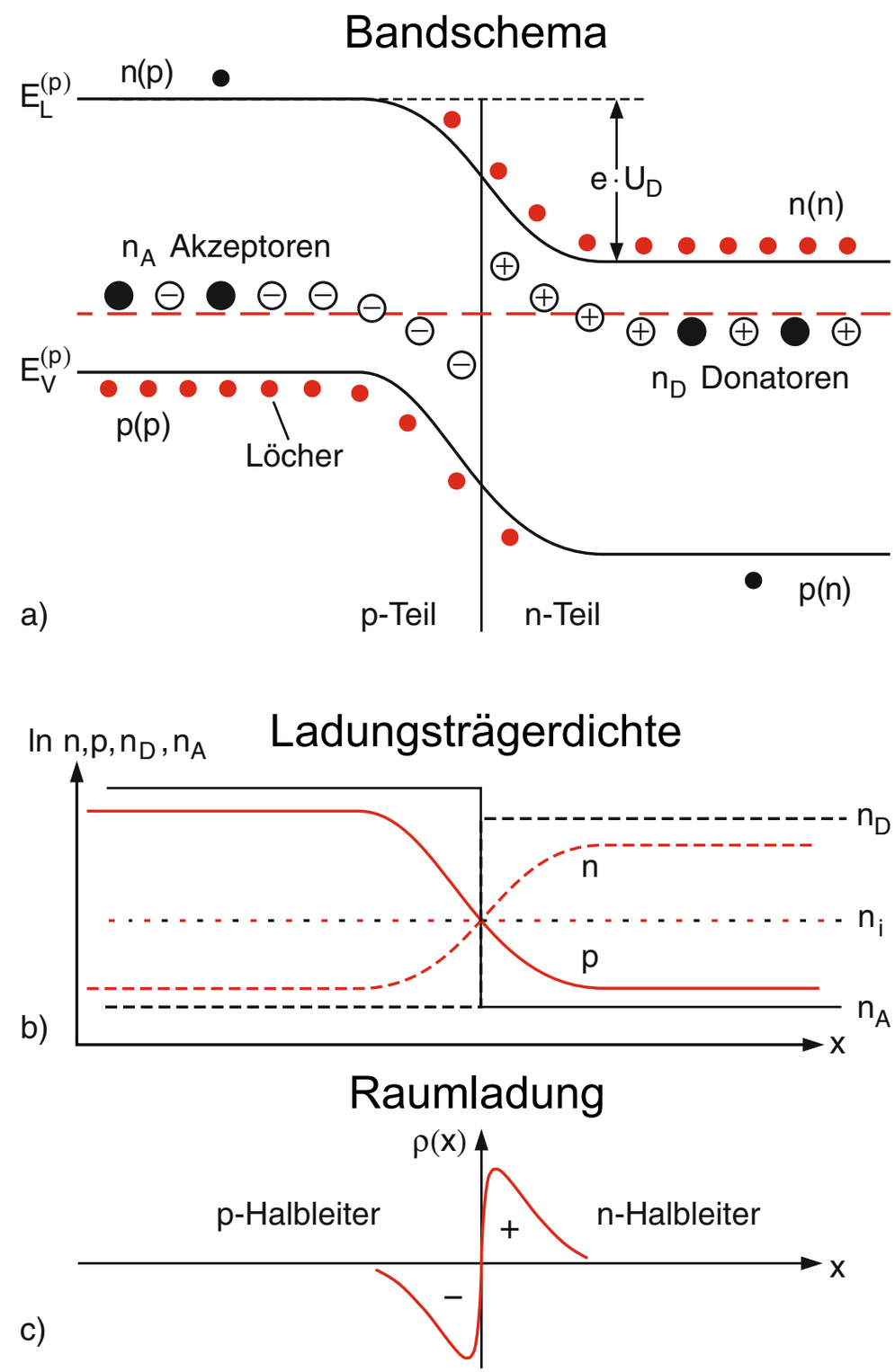


[Demtröder, Experimentalphysik 3]

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

pn-Übergang

- Übergang zwischen p-dotiertem und n-dotiertem Halbleiter
  - Diffusion von Ladungsträgern → Rekombination Elektronen und Löcher → Verarmungszone ohne freie Ladungsträger
  - Bändermodell: Ferminiveau auf beiden Seiten gleich → Bänder „verbogen" → Diffusionsspannung U_D
- Umgekehrte Biasspannung an pn-Übergang
  - Vergrößerung der Verarmungszone
  - Ionisation durch Teilchendurchgang messbar → Verwendung als Detektor

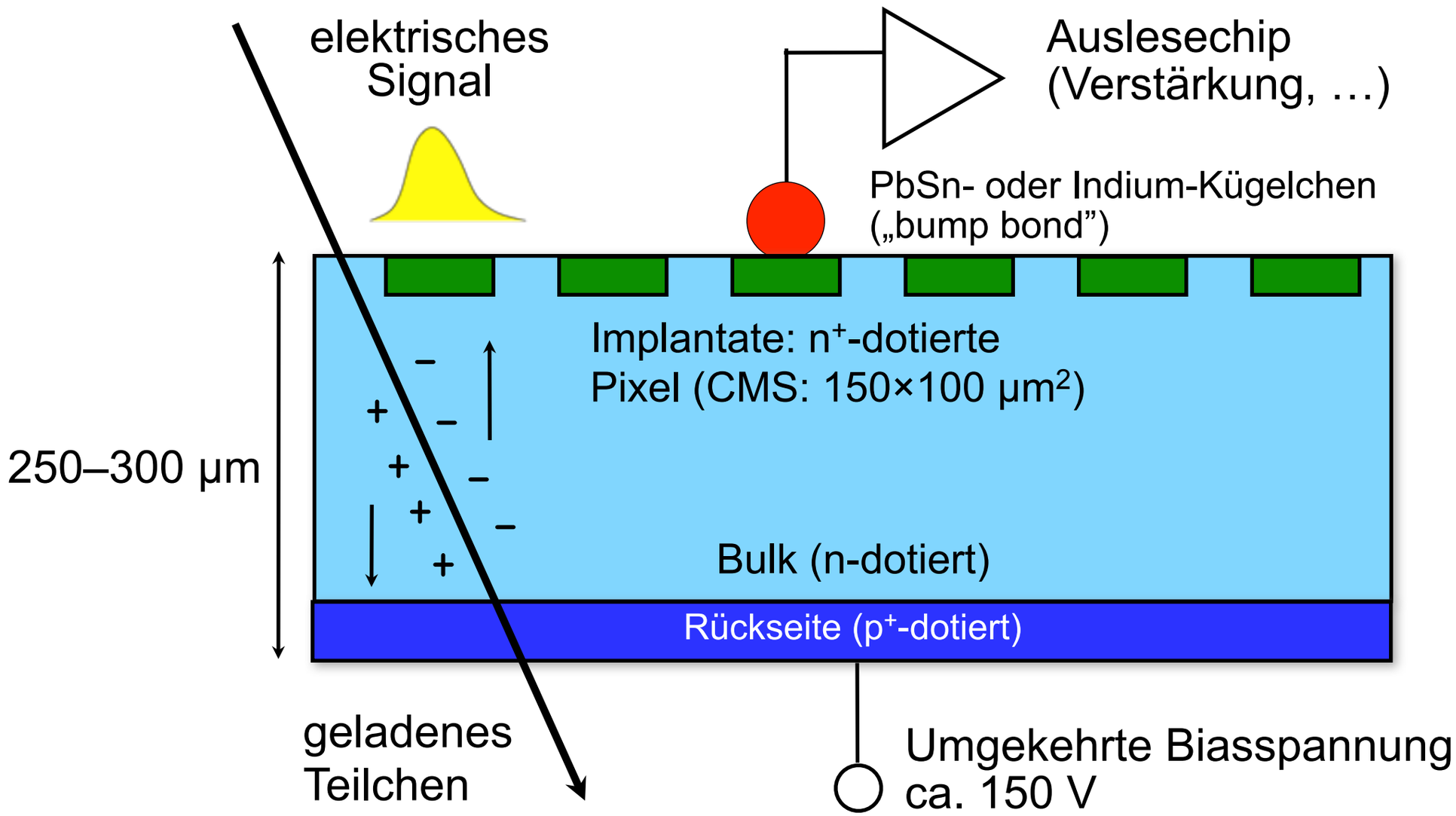


[Demtröder, Experimentalphysik 3]

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Siliziumdetektor: Funktionsweise

- Detektor: Halbleiterdiode mit pn-Übergang in Sperrrichtung
- Ionisierung des Detektormaterials: Elektron-/Loch-Paare



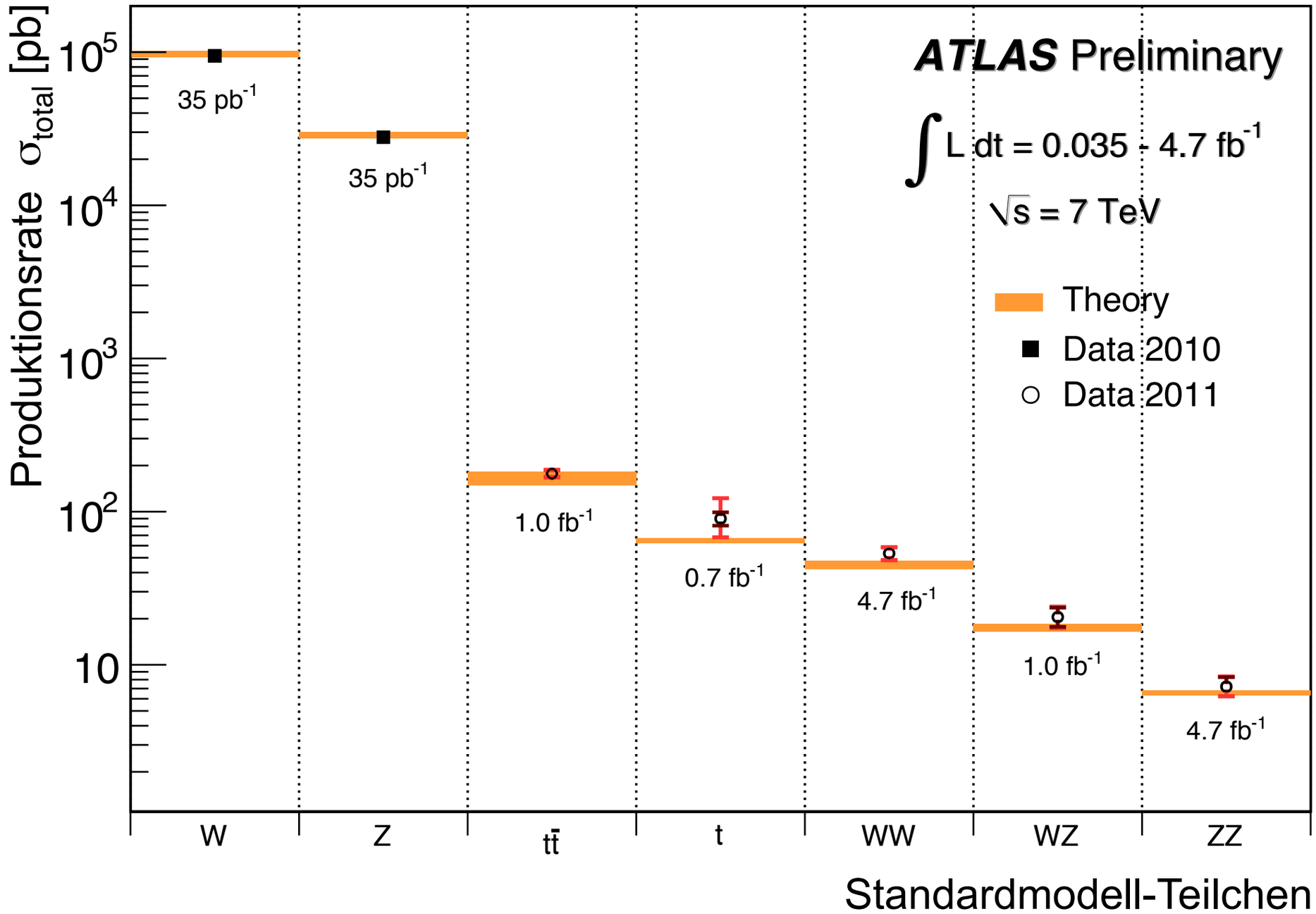
Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

… und wie sieht sie aus, diese Atto-Welt?

[C. Grupen]

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

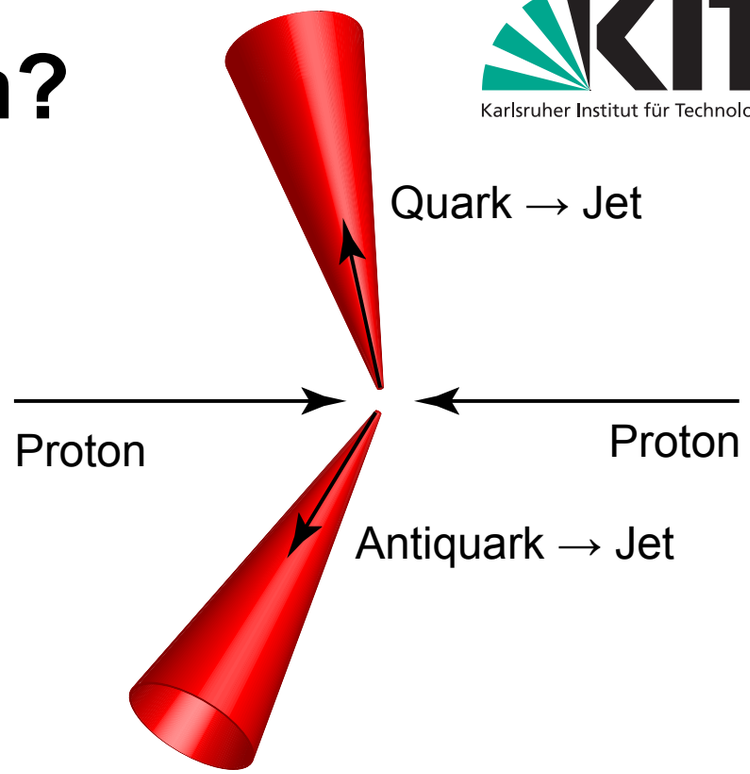
Wie gut passt das Standardmodell am LHC?



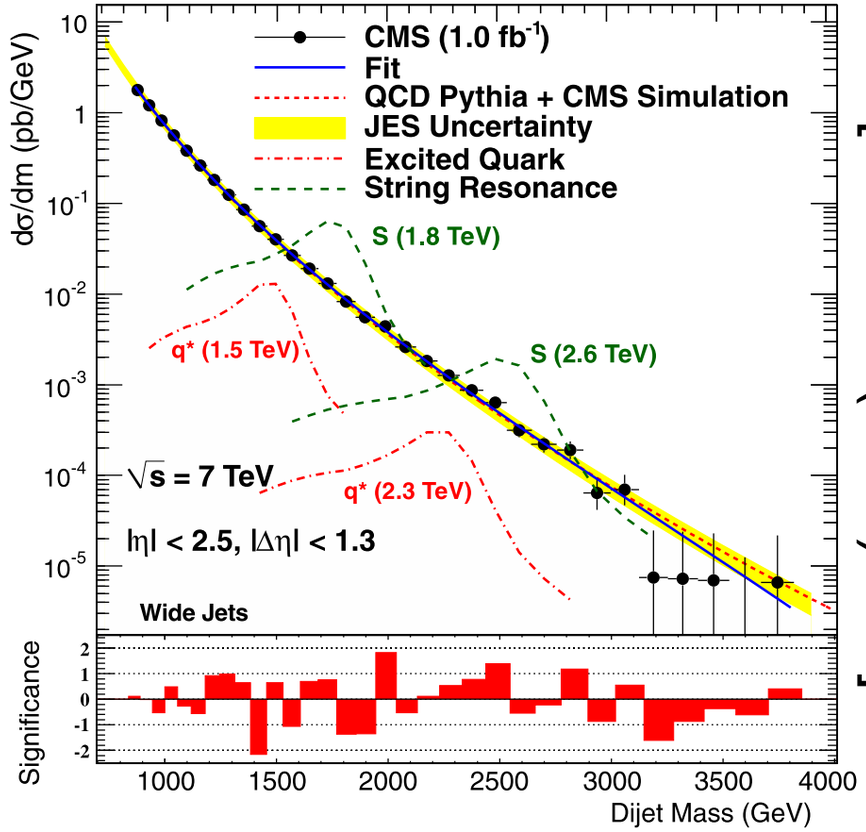
viel zu gut …

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Quarks: zusammengesetzte Teilchen?



- Einer der einfachsten Prozesse am LHC: Produktion eines Quark-Antiquark-Paares
- Keine freien Quarks wegen Confinement: Bündel von Teilchen („Jets”)
- Standardmodell: Quarks elementar und punktförmig
  - Falls Quarks nicht elementar: sichtbare „Buckel” im Spektrum der relativistisch invarianten Masse der Jetpaare
  - Jetpaar-Massen bis ca. 4 TeV: keine Abweichungen beobachtet
    → Quarks „kleiner als” < 0.1 Attometer

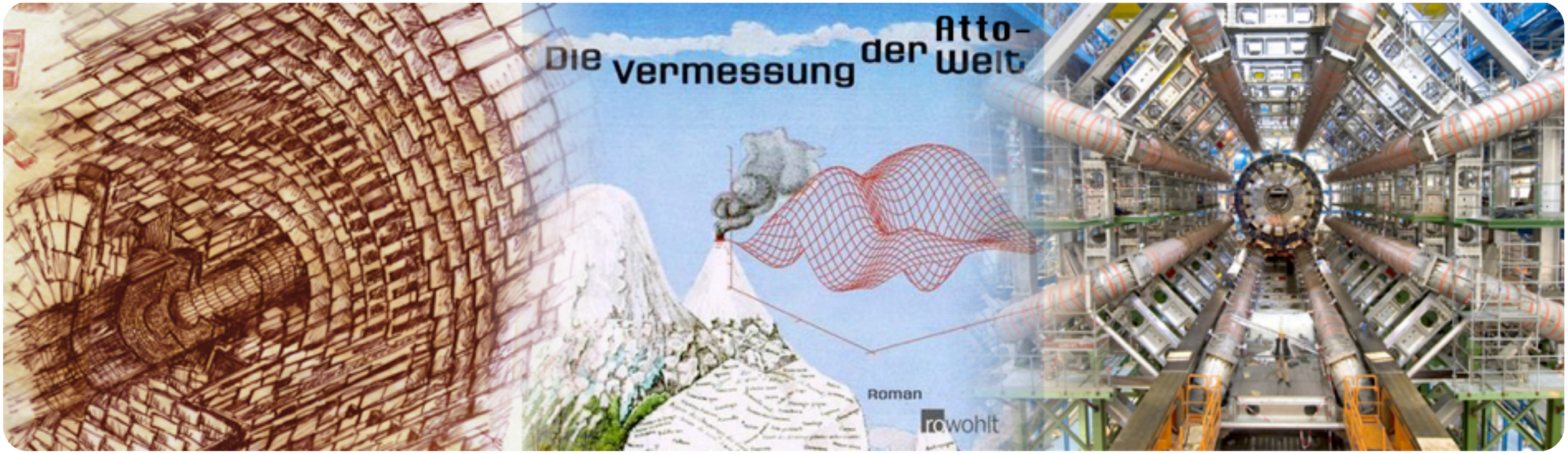


[PLB 704 (2011) 123]

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

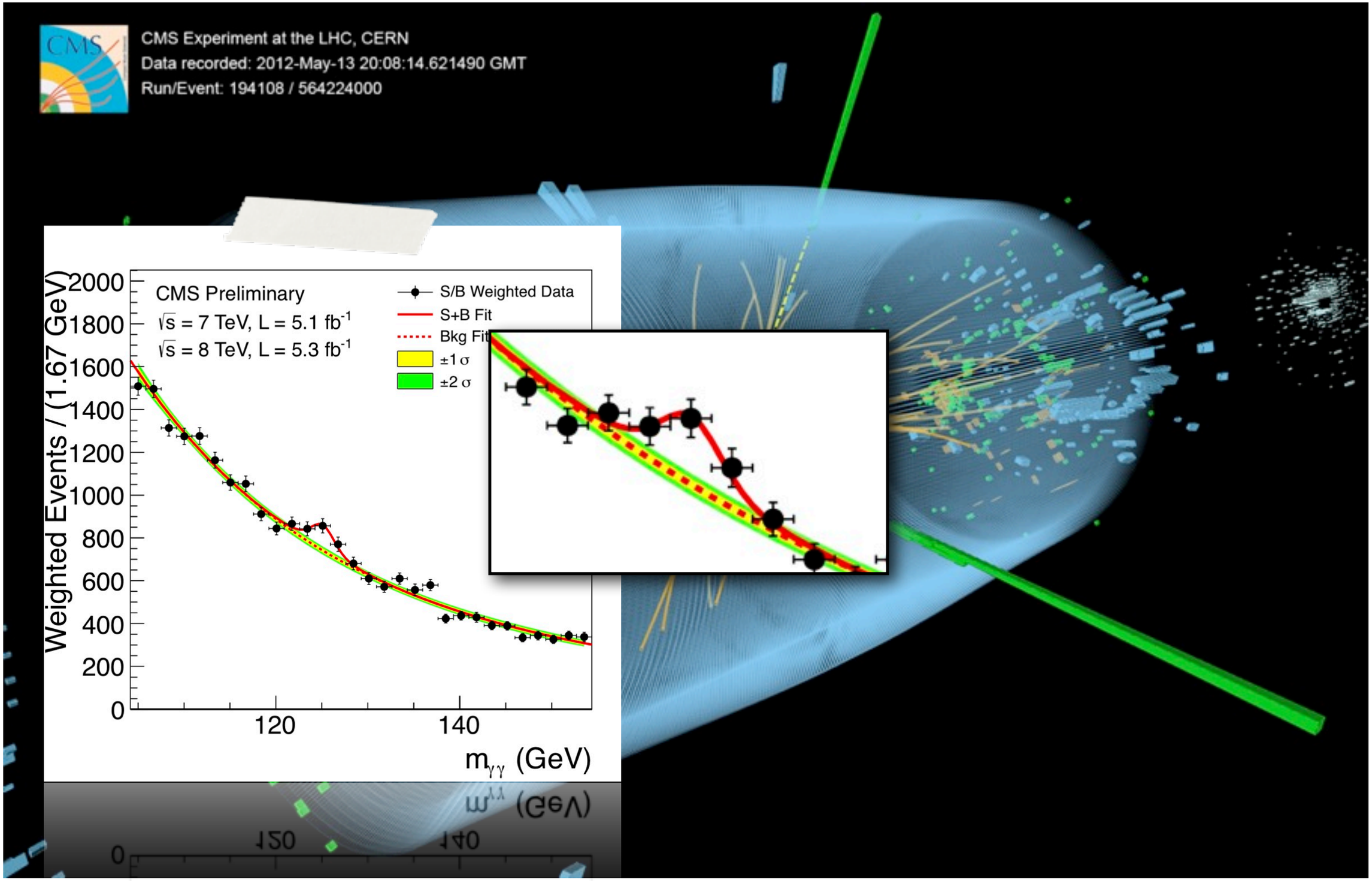
Zusammenfassung

- Teilchenphysik am LHC
  - Beschleunigung von Protonen zu höchsten im Labor erreichbaren Energien
  - Teilchennachweis in hochpräzisen Detektoren, z. B. Siliziumdetektoren
  - LHC-Datennahme seit 2010: sehr erfolgreich
- Resultate der LHC-Experimente
  - Keine starken Hinweise für „neue Physik” jenseits des Standardmodells
  - Jetzt: Neues zum Higgs-Teilchen



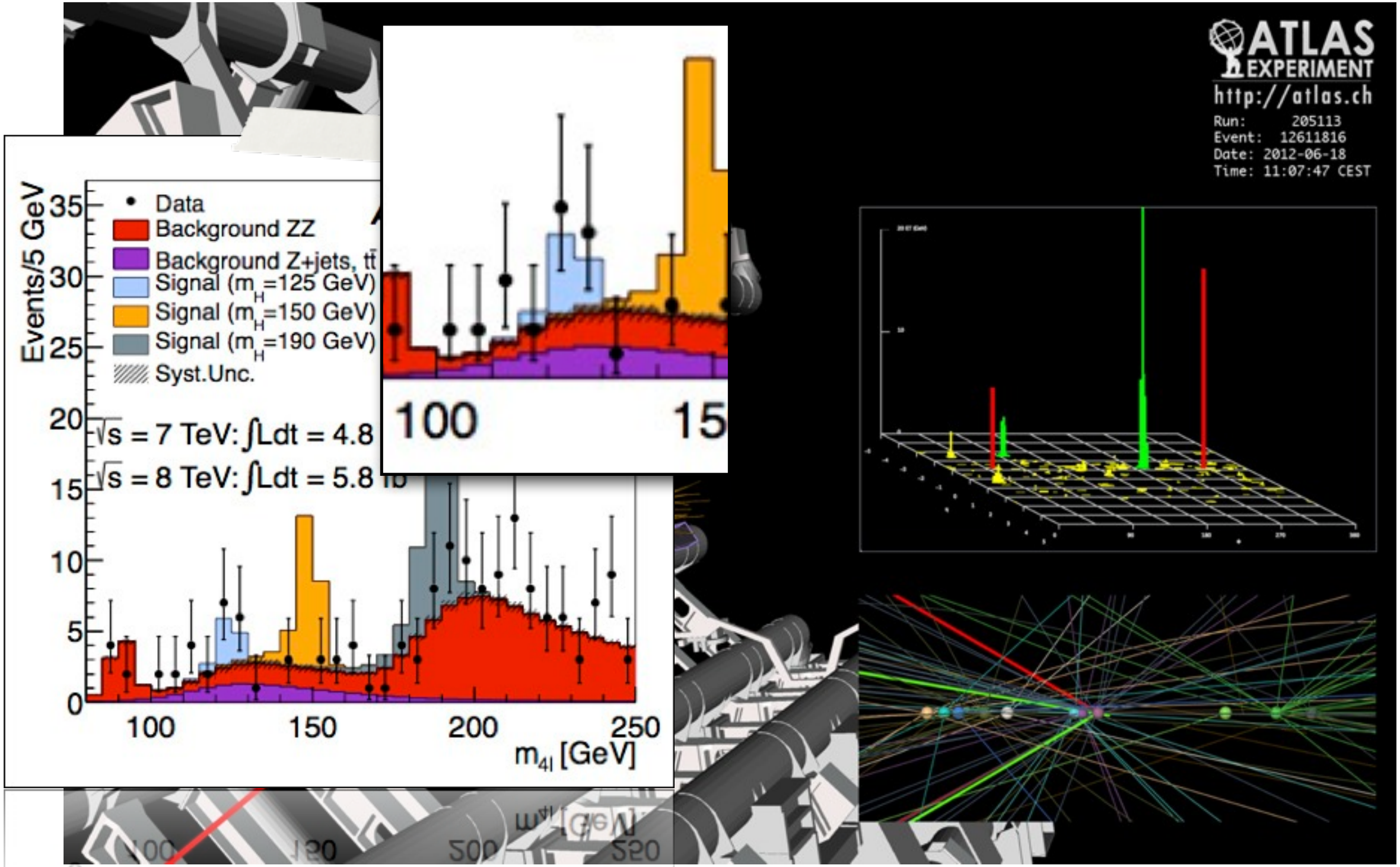
Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Kandidat für Higgszerfall in zwei Photonen



Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

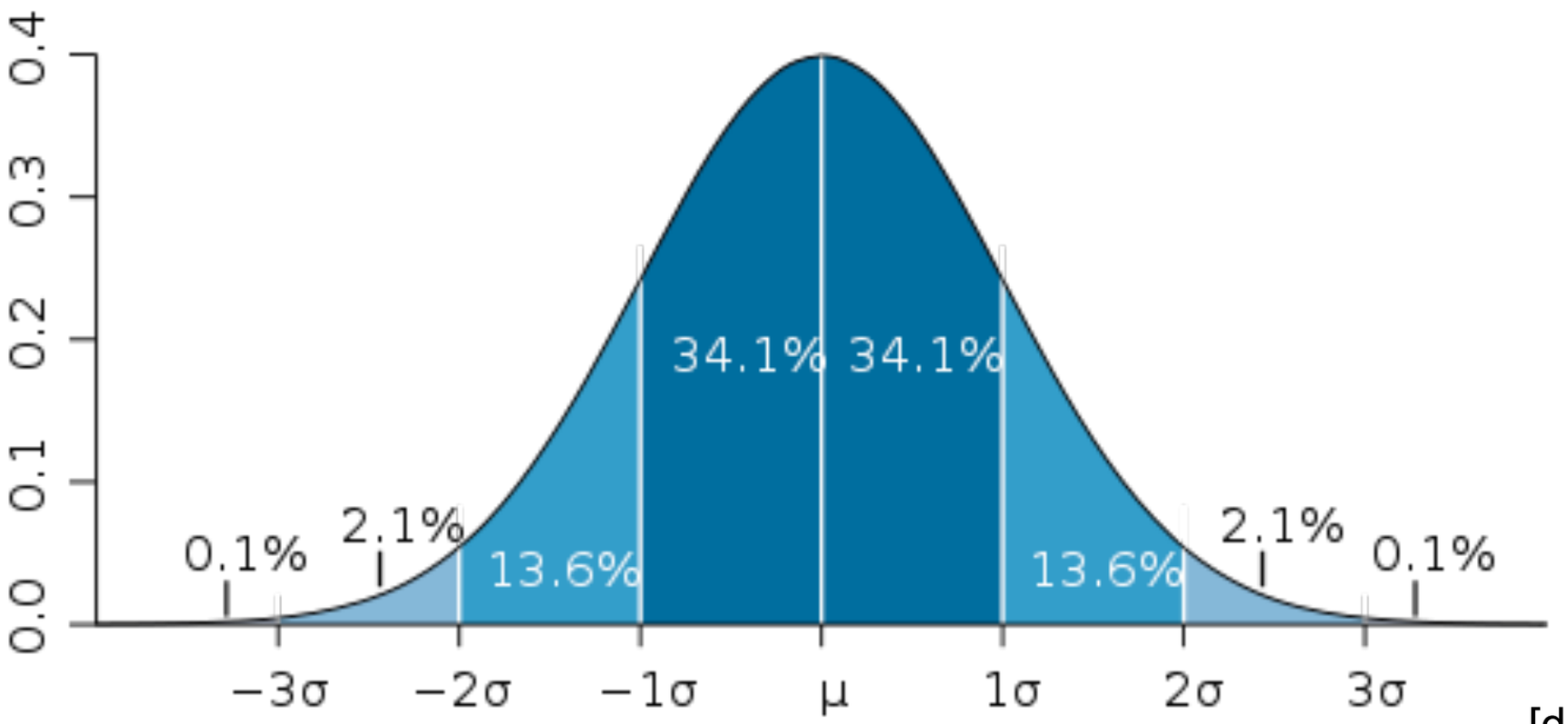
Kandidat für Higgszerfall in zwei Z-Bosonen



Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Was ist ein p-Wert?

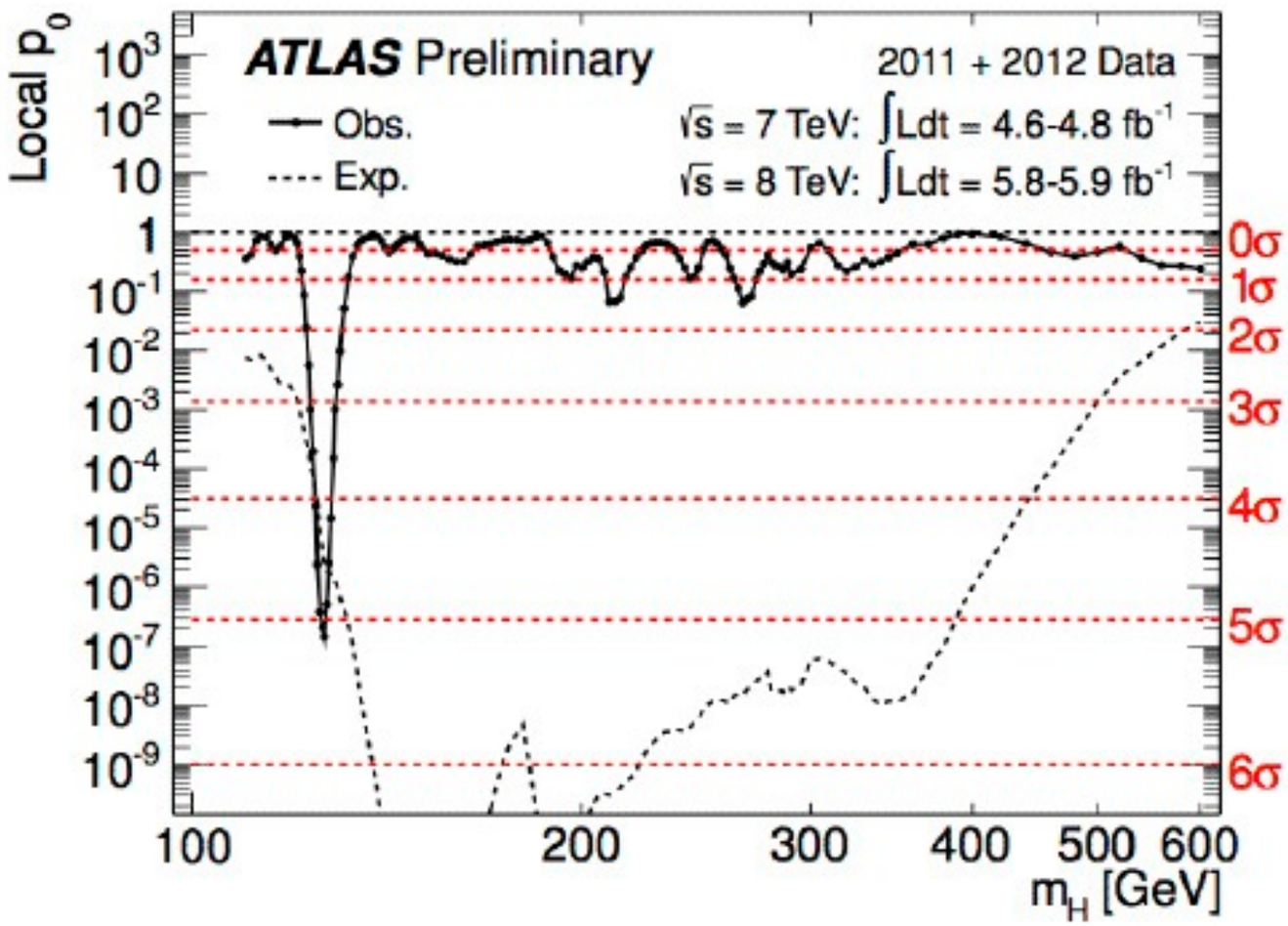
- p-Wert: Maß für „SignifikanzWahrscheinlichkeit, dass beobachtetes Signal (oder noch größeres Signal) aus statistischer Fluktuation des Untergrundes stammt
- p-Wert ist nicht: (1 –Wahrscheinlichkeit) für Entdeckung, …
- Kriterium für „Entdeckung”: 5σ der Gaußkurve → $p = 2{,}9 \cdot 10^{-7}$

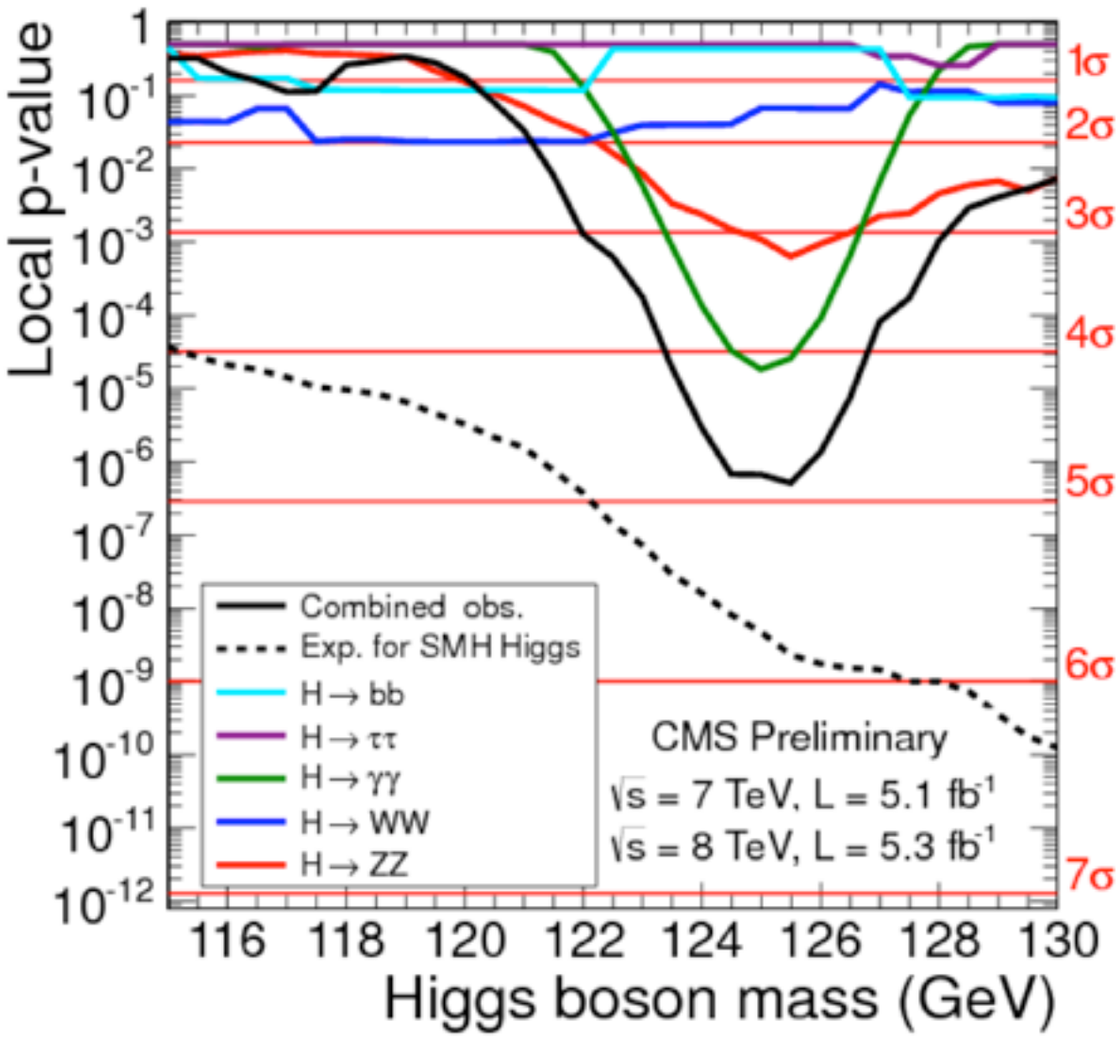


[de.wikipedia.org]

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)

Resultate: ATLAS und CMS





ATLAS und CMS haben mit einer Signifikanz von jeweils 5σ ein neues Boson mit einer Masse 125–126 GeV entdeckt

Ulrich Husemann
Institut für Experimentelle Kernphysik (IEKP)