



**Universität
Zürich** ^{UZH}

02. Juli 2018

Die Augen des Teilchenphysikers: Das Unsichtbare sehen

Olaf Steinkamp

Physik-Institut der Universität Zürich
Winterthurerstrasse 190 CH-8057 Zürich
044 635 57 63 olafs@physik.uzh.ch

- geboren in Bremen



- Physikstudium in Bonn

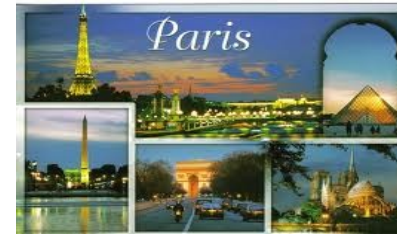
- Promotion am CERN

- PostDoc am CEA Saclay bei Paris



- Mitarbeit an einem CERN Experiment (NA48)

- PostDoc am NIKHEF in Amsterdam

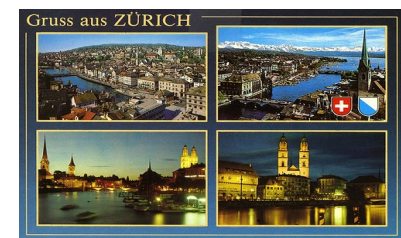


- Mitarbeit bei einem Experiment am DESY in Hamburg

- seit Januar 2000 am Physik-Institut der Universität Zürich



- Mitarbeit beim LHCb Experiment am CERN



- Vorlesungen zu Analysemethoden, Teilchenphysik

EL PAÍS

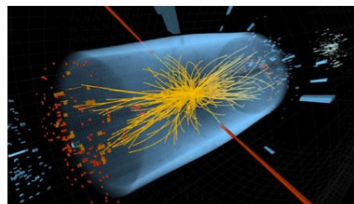
INTERNACIONAL POLÍTICA ECONOMÍA CULTURA SOCI

ESTÁ PASANDO Bosón Higgs Amnistía fiscal Códice Calixtino Incendios Valencia Caso Barclays Caso Bettencourt Volcá

DIRECTO Los científicos del CERN anuncian el descubrimiento de una partícula que podría ser Higgs. Sigue la videoconferencia explicando un avance que, de confirmarse, supondría un paso esencial de la física para explicar el origen de la materia. »

Hallada "la más sólida evidencia" de la existencia del bosón de Higgs

El posible descubrimiento de la partícula es un paso esencial hacia la explicación del origen de la materia



Registro del CMS que pudiera ser la firma de la partícula de Higgs. / CERN

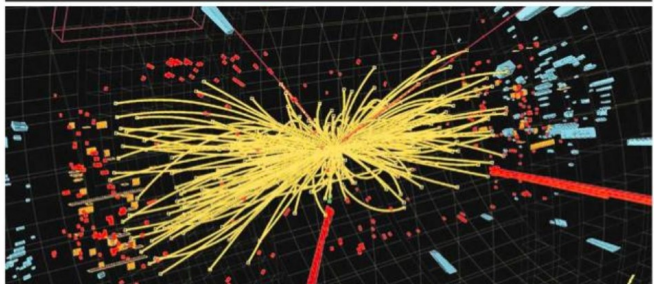
"Puedo confirmar que se ha descubierto una partícula que es consistente con la teoría del bosón de Higgs", dicen los científicos. El descubrimiento de la partícula ayudaría a explicar el origen de la masa. Los físicos del CERN explican en estos momentos sus hallazgos

- **Diccionario para entender en qué consiste el hallazgo**
- **La "caza" del bosón de Higgs, por A. RUIZ JIMENO**
- **VIDEO** Una explicación del bosón de Higgs
- **Sigue en directo la conferencia del CERN**
- **FOTOGALERÍA** Indicios hallados de la 'partícula de Dios'
- **Hacia la partícula de Dios', por JAVIER SAMPEDRO**

NRC HANDELSBLAD

Woensdag 4 juli 2012 - Jaargang 42 no. 233 - Algemeen Handelsblad (1828) en Nieuwe Rotterdamse Courant (1846) - Pagina 42

Kairo is synoniem met seksueel geweld buitenland 10 | Pininfarina gaf Ferrari een gezicht het grote verhaal 12-13 | Afstudeerfilms: lelijke kinderen, dolende zielen film 18-19



Gratieke weergave van de sporen van een proton-protonbotsing in een van de deeltjesdetectoren van CERN, het deeltjesversnellertuinstuif bij Genève. Foto: AFP / CERN

Historische stap in het onderzoek naar de bouwstenen waaruit heelal is opgebouwd

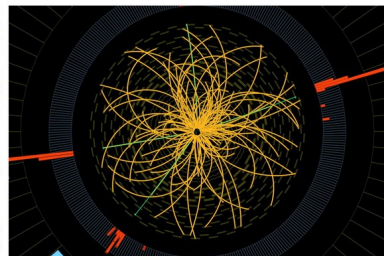
Higgsdeeltje 'vrijwel zeker' ontdekt

DOOR BRUNO VAN WAGENBURG
AMSTERDAM - Na twee uur van gansgelandigheid, spreiden kenners van de deeltjesfysica de handen ineen. Het is het moment van de ontdekking van de Higgs-deeltje, de laatste bouwsteen van het standaardmodel van de natuurkunde. Het Higgs-deeltje, dat ontdekt werd door Peter Higgs en andere natuurkundigen, is een boson dat verantwoordelijk is voor de massa van deeltjes. Het is de laatste bouwsteen van het standaardmodel van de natuurkunde. Het Higgs-deeltje, dat ontdekt werd door Peter Higgs en andere natuurkundigen, is een boson dat verantwoordelijk is voor de massa van deeltjes.

Medizin & Psychologie | Natur | Technik | Geschichte | Weiterbildung | Bildtrecken

«Wir schreiben Weltgeschichte»

Physiker in aller Welt sind ausser sich vor Freude: Cern-Forscher haben heute bekannt, dass sie das lang gesuchte Higgs-Teilchen wohl endlich gefunden hätten. Ein Sprecher des Cern erklärt, was das bedeuten könnte.



Bundesrat Berset gratuliert

Forschungsrat Alain Berset hat heute Mittwoch den Cern-Forschern zur Entdeckung eines neuen Teilchens gratuliert. «Es ist ein historischer Tag für die Teilchenphysik und das Verständnis des Universums», sagte Berset am Rande einer Medienkonferenz.

Dass die Forscher ein neues Teilchen beobachtet hätten, bei dem es sich um das lang gesuchte Higgs-Teilchen handeln könnte, sei bemerkenswert, sagte Berset. Die Entdeckung eröffne neue Forschungsfelder. Möglich gemacht habe all dies der Teilchenbeschleuniger in Genf. (sda)

Artikel zum Thema
«OMG Sie haben das Getostelchen!»

Die Medien schwärmen weltweit von der Entdeckung des Higgs-Bosons, des kleinsten Atomteilchens. Manche wissen zwar noch

7.9 | Bis Juni 2012 haben die Forscher fast doppelt so viele Daten gesammelt wie im ganzen 2011. Eine Grafik des Cerns in Genf zeigt Spuren einer Proton-Proton-Kollision im Compact Muon Solenoid (CMS). (13. Dezember 2011) Bild: AFP

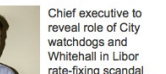
Website of the year | 4 July 2012 | Last updated less than one minute ago

theguardian

News | Sport | Comment | Culture | Business | Money | London 2012 | Life & style | Travel | Environment | Video | A

News | UK | World | Development | US Politics | Media | Education | Society | Science | Tech | Law | Data | TV | Fo
Breaking news: Weather not limitations end Mount McKinley climb - AP

Diamond set to come out fighting as he faces MPs



Chief executive to reveal role of City watchdogs and Whitehall in Libor rate-fixing scandal

- The key questions for MPs to ponder
- The late exchanges that led to Diamond's demise
- Cameron and Miliband clash over inquiry
- Barclays likely to balk at vast severance deal?
- Would you interpret this as guidance to lower rate?
- Datablog: Bank Libor rate submissions 2005-08
- Daughter tweets her support: 'Osborne #HMDF'
- Full coverage of the Libor rate-fixing scandal

The definite particle? Higgs boson discovered? Live coverage



Pakistan ends supply route dispute

Ending of seven-month blockade follows apology from US secretary of state for deaths of Pakistani troops

HOME PAGE | TODAY'S PAPER | VIDEO | MOST POPULAR | U.S. Edition

MARCJACOBS.COM

The New York Times

Wednesday, July 4, 2012 | Last Updated: 4:00 AM ET

TRY A TIMES DIGITAL SUBSCRIPTION: 4 WEEKS FOR 99¢. [CLICK HERE](#)

WORLD U.S. POLITICS NEW YORK BUSINESS DEALBOOK TECHNOLOGY SPORTS SCIENCE HEALTH ARTS STYLE OPINION

Rapid H.I.V. Home Test Wins Federal Approval
By DONALD G. MCNEIL Jr.
The OraQuick test, which uses a cheek swab and gives results in 20 to 40 minutes, is the first chance for Americans to learn in the privacy of their own homes whether they are infected.



New Particle Could Be Physics' Holy Grail
By BEN PROTSESS and MARK
If confirmed to be the elusive Higgs boson, a newly discovered particle would be the last missing piece of the Standard Model of particle physics.

OPINION ▶
Too Quiet, Again, on Health Care
The Obama campaign has not forcefully countered Republican misinformation on the reform law.

• Dowd: Gaelic Guerrilla
• Friedman: Morsi, Israel
• Douthat: Books for Obama
• Fikes: Rwanda's Miracle
• Kurt Andersen: The Downside of Liberty
• Op-Ed: Anderson Cooper

MARKETS ▶
British FTSE 100 6,573.04
German DAX 8,553.19
French CAC 40 3,248.93
-14.80 -26.92 -22.27
-0.26% -0.38% -0.60%

Data delayed at least 15 minutes.

GET QUOTES My Portfolios
Stock, ETFs, Funds

vk.nl de site van de Volkskrant

NIEUWS | OPINIE | CULTUUR | SPORT | ECONOMIE | REIZEN | VKSHOP | SERVICE

BINNENLAND | POLITIEK | BUITENLAND | INTERNET & MEDIA | WETENSCHAP & GEZONDHEID | OPMERKELIJK

Higgs of niet, het is een spectaculaire ontdekking

Door: Pieter Sabel - 04/07/12, 11:29



© EPA. Foto uit 2007 van de supergeleidende magneetkern van de deeltjesversneller van CERN in Genève.

'I think we have it', zei de president-directeur van het Zwitserse onderzoeksinstituut CERN vandaag na afloop van een persconferentie over de zoektocht naar het zogenaamde Higgs-deeltje. Hij sprak van een "historische mijlpaar". Maar met voorzichtigheid omgeven - er is meer onderzoek nodig. Wat is er nu ontdekt?

Wat we in elk geval met voldoende zekerheid kunnen zeggen, is dat er een deeltje is gevonden met een massa, waarvan het bestaan in de natuurkunde nog niet eerder bekend was. En dat deeltje lijkt op het Higgs-deeltje of Higgs-boson, zegt Martijn van Calmthout van de wetenschapsredactie van de Volkskrant.



© anp.

VERWANT NIEUWS

- **'Tranen van geluk, Higgs-boson bestaat'** - 04/07/12
- **Higgs-deeltje 'zeer waarschijnlijk gevonden'** - 04/07/12
- **'Maatschappij heeft nóg niks aan Higgs'** - 04/07/12

MEER OVER

- **Natuurkunde | Wetenschap**
- **Deeltjesfysici wacht spannende dag**
- **Deeltje fysici doen spectaculaire ontdekking**
- **The Guardian over het Higgs-deeltje**
- **Wat is dat Higgs-deeltje?**
- **André Kuipers weer terug op aarde**
- **Eenzame George (+/- 1912 - 2012)**

La Une | Mercredi 4 juillet 2012 | Dernière mise à jour 10:09

Tribune de Genève

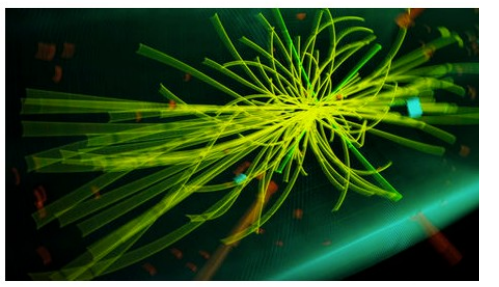
GARNET NOIR
L'acteur de télévision Andy Griffith est mort à 86 ans

CHAMP-1
Pour s'étonner un gardi

GENÈVE | SUISSE | MONDE | ÉCONOMIE | BOURSE | SPORTS | CI

PHYSIQUE

Une nouvelle particule a été découverte



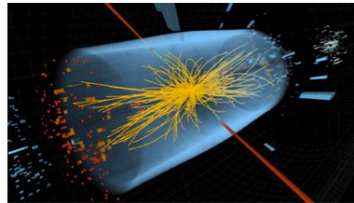
Une nouvelle particule a été découverte par des chercheurs du CERN lancés sur la trace du boson de Higgs. Plus...

Mis à jour il y a 2 minutes

DIRECTO Los científicos del CERN anuncian el descubrimiento de una partícula que podría ser Higgs. Sigue la videconferencia explicando un avance que, de confirmarse, supondría un paso esencial de la física para explicar el origen de la materia. »

Hallada “la más sólida evidencia” de la existencia del bosón de Higgs

El posible descubrimiento de la partícula es un paso esencial hacia la explicación del origen de la materia

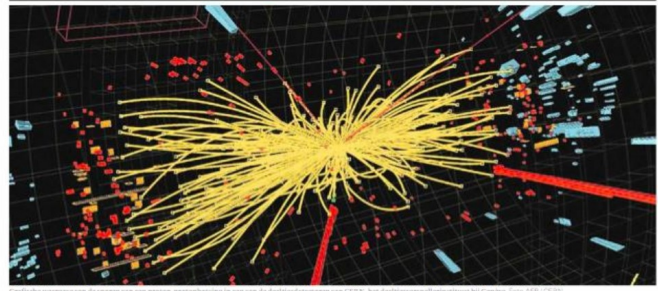


Registro del CMS que pudiera ser la firma de la partícula de Higgs. / CERN

“Puedo confirmar que se ha descubierto una partícula que es consistente con la teoría del bosón de Higgs”, dicen los científicos. El descubrimiento de la partícula ayudaría a explicar el origen de la masa. Los físicos del CERN explican en estos momentos sus hallazgos

- **Diccionario** para entender en qué consiste el hallazgo
- La “caza” del bosón de Higgs, por **A. RUIZ JIMENO**
- **VIDEO** Una explicación del bosón de Higgs
- Sigue en directo la conferencia del CERN
- **FOTOGALERÍA** Indicios hallados de la ‘partícula de Dios’
- ‘Hacia la partícula de Dios’, por **JAVIER SAMPEDRO**

Kairo is synoniem met seksueel geweld buitenland 10
Pininfarina gaf Ferrari een gezicht het grote verhaal 12-13
Afstudeerfilms: leuke kinderen, dolende zielen film 18-19



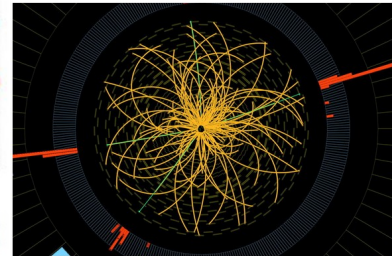
Historische stap in het onderzoek naar de bouwstenen waaruit heelal is gebouwd Higgsdeeltje ‘vrijwel zeker’ ontdekt

Door BRUNO VAN WATENBURG
ANFERSDAM. Na twee jaar onderzoek heeft de Europese Organisatie van Kernonderzoek (CERN) vandaag bekend gemaakt dat het mogelijk is dat de Higgs-deeltjes bestaan. Het Higgs-deeltje dat, het enige deeltje is dat massa aan andere deeltjes geeft, is een van de bouwstenen van het heelal. Het is de laatste van de vier deeltjes die de natuurkunde voorspelt dat er moet zijn. Het is de laatste van de vier deeltjes die de natuurkunde voorspelt dat er moet zijn. Het is de laatste van de vier deeltjes die de natuurkunde voorspelt dat er moet zijn.

Medizin & Psychologie Natur Technik Geschichte Weiterbildung Bildstreifen

«Wir schreiben Weltgeschichte»

Physiker in aller Welt sind ausser sich vor Freude: Cern-Forscher haben heute bekannt, dass sie das lang gesuchte Higgs-Teilchen wohl endlich gefunden hätten. Ein Sprecher des Cern erklärt, was das bedeuten könnte.



Bundesrat Berset gratuliert

Forschungsratier Alan Berset hat heute Mittwoch den Cern-Forschern zur Entdeckung eines neuen Teilchens gratuliert. «Es ist ein historischer Tag für die Teilchenphysik und das Verständnis des Universums», sagte Berset am Rande einer Medienkonferenz.

Dass die Forscher ein neues Teilchen beobachtet hätten, bei dem es sich um das lang gesuchte Higgs-Teilchen handeln könnte, sei bemerkenswert, sagte Berset. Die Entdeckung eröffnete neue Forschungsfelder. Möglich gemacht habe all dies die Teilchenbeschleuniger in Genf. (sda)

Artikel zum Thema

«OMG! Sie haben das Gottesteilchen»
Die Medien schwärmen weltweit von der Entdeckung des Higgs-Bosons, des kleinsten Atomteilchens. Manche wissen zwar noch

Website of the Guardian 2012 | Last updated less than one minute ago

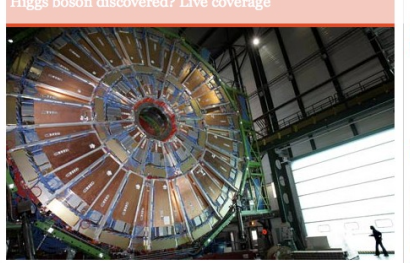
What to come out of the faces MPs

Chief executive to take role of City watchdogs and Whitehall in Labor rate-fixing scandal
... that led to Diamond's demise
... clash over inquiry
... level severance deal
... guidance to lower rate?
... sessions 2005-08
... #HMDF
... scandal

Pakistan ends supply route dispute

Ending of seven-month blockade follows apology from US secretary of state for deaths of Pakistani troops

The definite particle? Higgs boson discovered? Live coverage



Higgs of niet, het is een spectaculaire ontdekking

Door Pieter Sabel - 04/07/12, 11:29



EPA. Foto uit 2007 van de supergeleidende magneten van de deeltjesversneller van CERN in Genève.

‘I think we have it’, zei de president-directeur van het Zwitserse onderzoeksinstituut CERN vandaag na afloop van een persconferentie over de zoektocht naar het zogenaamde Higgs-deeltje. Hij sprak van een ‘historische mijlpaal’. Maar met voorzichtigheid omgeven - er is meer onderzoek nodig. Wat is er nu ontdekt?

Wat we in elk geval met voldoende zekerheid kunnen zeggen, is dat er een deeltje is gevonden met een massa, waarvan het bestaan in de natuurkunde nog niet eerder bekend was. En dat deeltje lijkt op het Higgs-deeltje of Higgs-boson, zegt Martijn van Calmthout van de wetenschapsredactie van de Volkskrant.



© anp.

VERWANT NIEUWS

- Higgs-deeltje gevonden - 04/07/12
- Maatschappij - 04/07/12

MEER OVER

- Natuurkunde Wetenschap
- Deeltjesfysica wacht spannende dag
- Deftse fysici doen spectaculaire ontdekking
- The Guardian over het Higgs-deeltje
- Wat is dat Higgs-deeltje?
- André Kuipers weer terug op aarde
- Eenzame George (+/- 1912 - 2012)

Wie wijzen wir diese Teilchen nach ?

TRY A TIMES DIGITAL SUBSCRIPTION: 4 WEEKS FOR 99¢. CLICK HERE

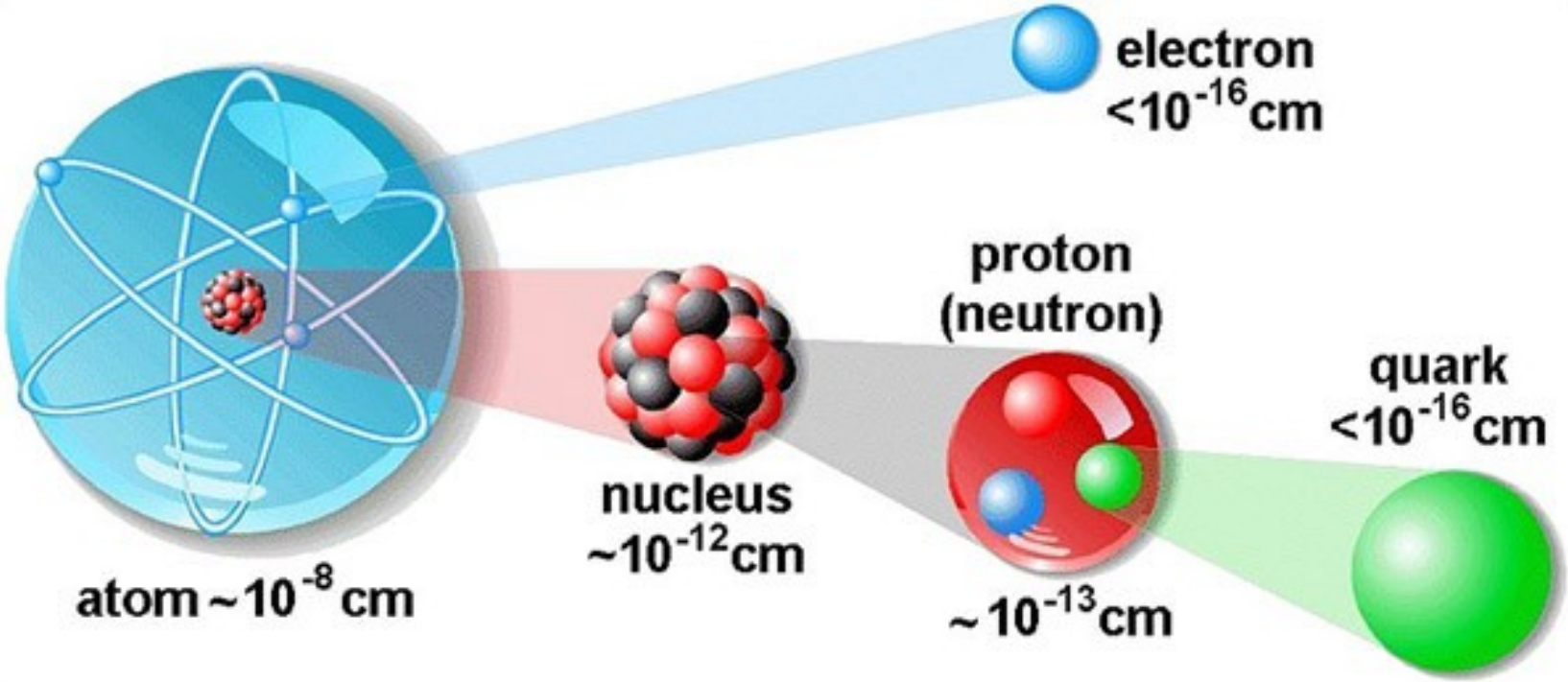
Follow Us on Twitter Facebook Personalize Your Weather

WORLD POLITICS NEW YORK DEALBOOK TECHNOLOGY SPORTS SCIENCE HEALTH ARTS STYLE OPINION

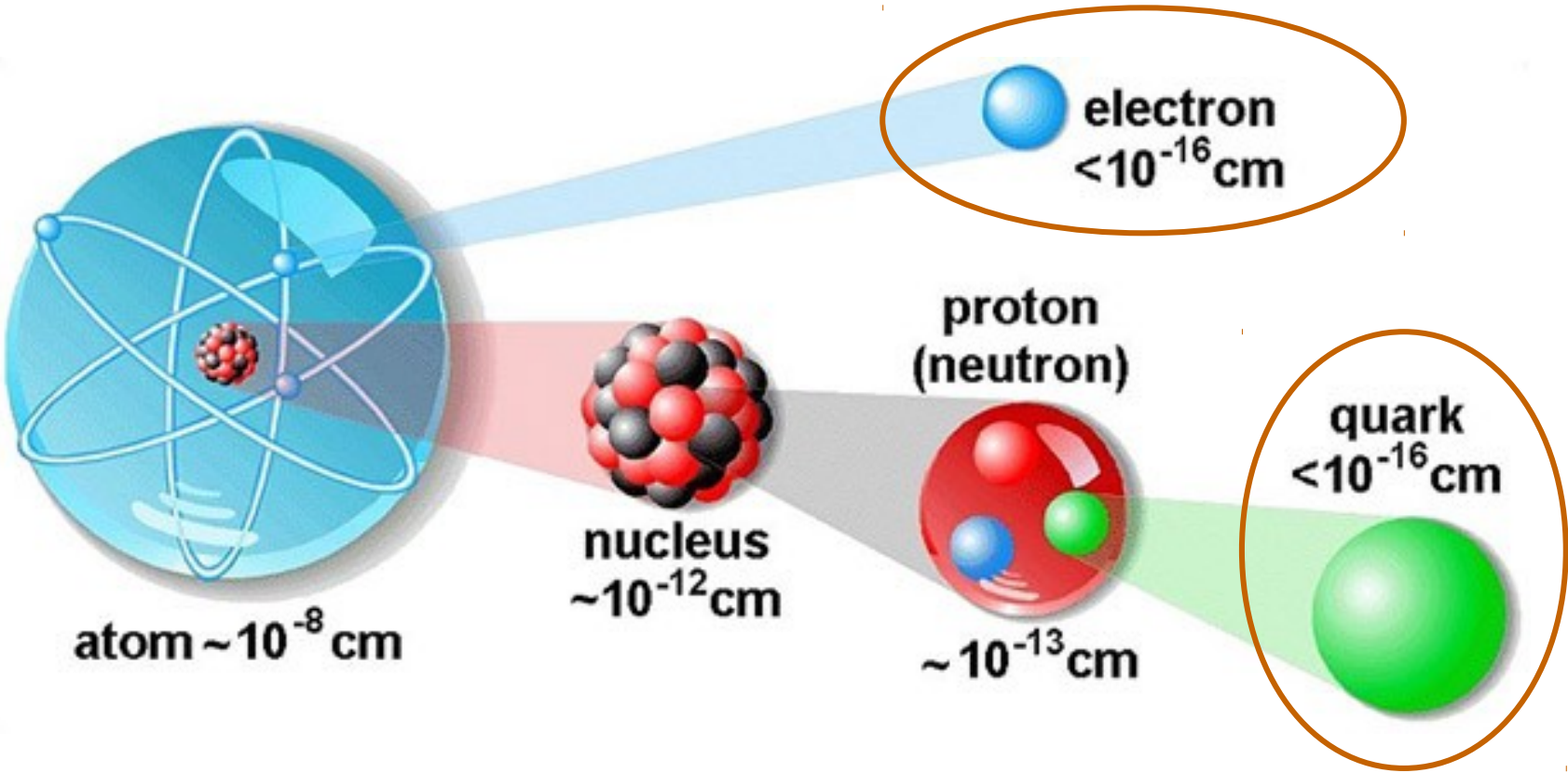
Rapid H.I.V. Home Test Wins Federal Approval
The OraQuick test, which uses a cheek swab and gives results in 20 to 40 minutes, is the first chance for Americans to learn in the privacy of their own homes whether they are infected.

OPINION: Fox Quiet, Again, on Health Care
The Obama campaign has not forcefully countered Republican misinformation on the reform law.
MARKETS: FTSE 100 6,553.19 3,248.93
DAX CAC 40 5,673.04 6,553.19 3,248.93
-14.80 -25.92 -22.27
-0.28% -0.38% -0.80%

Teilchenphysik



Teilchenphysik



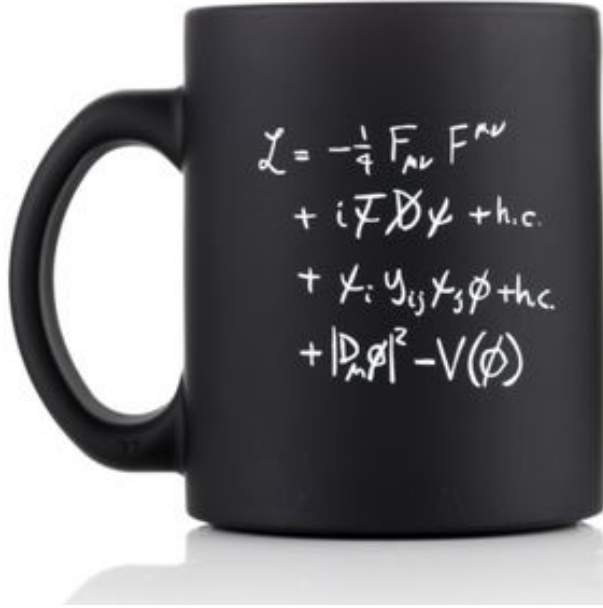
Chemie

Kernphysik

**Elementarteilchen-
physik**

Das Standard-Modell der Teilchenphysik

Standard-Modell der Teilchenphysik

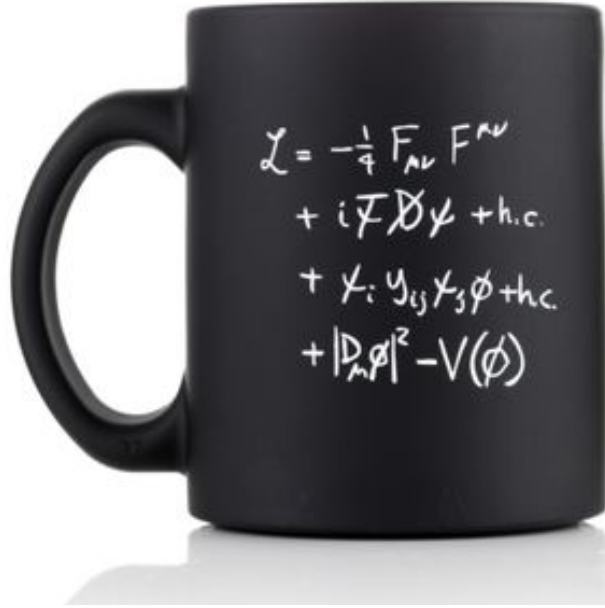


**Mathematische Formulierung
der Wechselwirkungen
zwischen Elementarteilchen**

**Entwickelt in den 1960er
Jahren**

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - ig_{c_w} (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\mu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\nu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\
 & ig_{s_w} (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\mu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- - \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- - \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
 & gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\
 & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\
 & \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H \partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
 & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{2M}{c_w} Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig_{s_w} M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- - \\
 & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig_{s_w} A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
 & \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_s \lambda_{ij}^k (\bar{q}_i^j \gamma^\mu q_j^i) g_\mu^\kappa - \bar{e}^\lambda (\gamma^\mu + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma^\mu + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\mu + \\
 & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\mu + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig_{s_w} A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}{}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep}{}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa - \\
 & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b G^c + \\
 & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + ig_{c_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig_{s_w} W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + ig_{c_w} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig_{s_w} W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + ig_{c_w} Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig_{s_w} A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
 \end{aligned}$$

Standard-Modell der Teilchenphysik

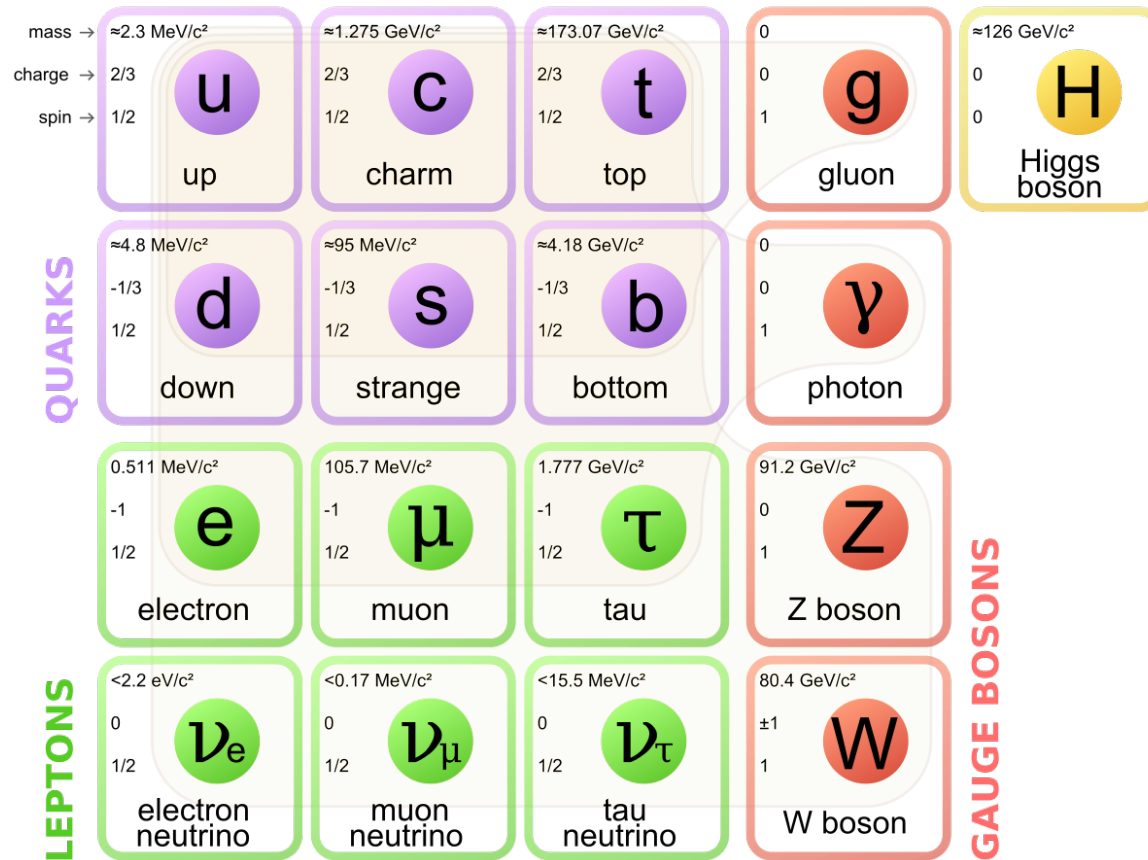


**Hervorragende Uebereinstimmung
zwischen Vorhersagen
und Messungen**

**Aber: kann einige fundamentale
Beobachtungen NICHT erklären**

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L}_{SM} = & -\frac{1}{2}\partial_\nu g_\mu^a \partial_\nu g_\mu^a - g_s f^{abc} \partial_\mu g_\nu^a g_\mu^b g_\nu^c - \frac{1}{4}g_s^2 f^{abc} f^{ade} g_\mu^b g_\nu^c g_\mu^d g_\nu^e - \partial_\nu W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- \\
 & M^2 W_\mu^+ W_\mu^- - \frac{1}{2}\partial_\nu Z_\mu^0 \partial_\nu Z_\mu^0 - \frac{1}{2c_w^2} M^2 Z_\mu^0 Z_\mu^0 - \frac{1}{2}\partial_\mu A_\nu \partial_\mu A_\nu - igc_w (\partial_\nu Z_\mu^0 (W_\mu^+ W_\mu^- \\
 & W_\nu^+ W_\nu^-) - Z_\nu^0 (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + Z_\mu^0 (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \\
 & ig s_w (\partial_\nu A_\mu (W_\mu^+ W_\nu^- - W_\nu^+ W_\mu^-) - A_\nu (W_\mu^+ \partial_\nu W_\mu^- - W_\mu^- \partial_\nu W_\mu^+) + A_\nu (W_\nu^+ \partial_\nu W_\mu^- \\
 & W_\nu^- \partial_\nu W_\mu^+)) - \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- W_\nu^+ W_\nu^- + \frac{1}{2}g^2 W_\mu^+ W_\nu^- W_\mu^- W_\nu^+ + g^2 c_w^2 (Z_\mu^0 W_\mu^+ Z_\nu^0 W_\nu^- \\
 & Z_\mu^0 Z_\nu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w^2 (A_\mu W_\mu^+ A_\nu W_\nu^- - A_\mu A_\nu W_\mu^+ W_\nu^-) + g^2 s_w c_w (A_\mu Z_\nu^0 (W_\mu^+ W_\nu^- \\
 & W_\nu^+ W_\mu^-) - 2A_\mu Z_\mu^0 W_\nu^+ W_\nu^-) - \frac{1}{2}\partial_\mu H \partial_\mu H - 2M^2 \alpha_h H^2 - \partial_\mu \phi^+ \partial_\mu \phi^- - \frac{1}{2}\partial_\mu \phi^0 \partial_\mu \phi^0 - \\
 & \beta_h \left(\frac{2M^2}{g^2} + \frac{2M}{g} H + \frac{1}{2}(H^2 + \phi^0 \phi^0 + 2\phi^+ \phi^-) \right) + \frac{2M^4}{g^2} \alpha_h - \\
 & g\alpha_h M (H^3 + H\phi^0 \phi^0 + 2H\phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{8}g^2 \alpha_h (H^4 + (\phi^0)^4 + 4(\phi^+ \phi^-)^2 + 4(\phi^0)^2 \phi^+ \phi^- + 4H^2 \phi^+ \phi^- + 2(\phi^0)^2 H^2) - \\
 & gM W_\mu^+ W_\mu^- H - \frac{1}{2}g \frac{M}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 H - \\
 & \frac{1}{2}ig (W_\mu^+ (\phi^0 \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^0) - W_\mu^- (\phi^0 \partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu \phi^0)) + \\
 & \frac{1}{2}g (W_\mu^+ (H\partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu H) + W_\mu^- (H\partial_\mu \phi^+ - \phi^+ \partial_\mu H)) + \frac{1}{2}g \frac{1}{c_w} (Z_\mu^0 (H\partial_\mu \phi^0 - \phi^0 \partial_\mu H) + \\
 & M (\frac{1}{c_w} Z_\mu^0 \partial_\mu \phi^0 + W_\mu^+ \partial_\mu \phi^- + W_\mu^- \partial_\mu \phi^+) - ig \frac{2M}{c_w} Z_\mu^0 (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + ig s_w M A_\mu (W_\mu^+ \phi^- \\
 & W_\mu^- \phi^+) - ig \frac{1-2c_w^2}{2c_w} Z_\mu^0 (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) + ig s_w A_\mu (\phi^+ \partial_\mu \phi^- - \phi^- \partial_\mu \phi^+) - \\
 & \frac{1}{4}g^2 W_\mu^+ W_\mu^- (H^2 + (\phi^0)^2 + 2\phi^+ \phi^-) - \frac{1}{8}g^2 \frac{1}{c_w^2} Z_\mu^0 Z_\mu^0 (H^2 + (\phi^0)^2 + 2(2s_w^2 - 1)^2 \phi^+ \phi^-) - \\
 & \frac{1}{2}g^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + W_\mu^- \phi^+) - \frac{1}{2}ig^2 \frac{s_w^2}{c_w} Z_\mu^0 H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}g^2 s_w A_\mu \phi^0 (W_\mu^+ \phi^- + \\
 & W_\mu^- \phi^+) + \frac{1}{2}ig^2 s_w A_\mu H (W_\mu^+ \phi^- - W_\mu^- \phi^+) - g^2 \frac{s_w}{c_w} (2c_w^2 - 1) Z_\mu^0 A_\mu \phi^+ \phi^- - \\
 & g^2 s_w^2 A_\mu A_\nu \phi^+ \phi^- + \frac{1}{2}ig_s \lambda_{ij}^a (\bar{q}_i^a \gamma^\mu q_j^a) g_\mu^a - \bar{e}^\lambda (\gamma^\mu + m_e^\lambda) e^\lambda - \bar{\nu}^\lambda (\gamma^\mu + m_\nu^\lambda) \nu^\lambda - \bar{u}_j^\lambda (\gamma^\mu + \\
 & m_u^\lambda) u_j^\lambda - \bar{d}_j^\lambda (\gamma^\mu + m_d^\lambda) d_j^\lambda + ig s_w A_\mu (-\bar{e}^\lambda \gamma^\mu e^\lambda + \frac{2}{3}(\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu u_j^\lambda) - \frac{1}{3}(\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu d_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{4c_w} Z_\mu^0 \{ (\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{e}^\lambda \gamma^\mu (4s_w^2 - 1 - \gamma^5) e^\lambda) + (\bar{d}_j^\lambda \gamma^\mu (\frac{4}{3}s_w^2 - 1 - \gamma^5) d_j^\lambda) + \\
 & (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 - \frac{8}{3}s_w^2 + \gamma^5) u_j^\lambda) \} + \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^+ ((\bar{\nu}^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) U^{lep}{}_{\lambda\kappa} e^\kappa) + (\bar{u}_j^\lambda \gamma^\mu (1 + \gamma^5) C_{\lambda\kappa} d_j^\kappa)) + \\
 & \frac{ig}{2\sqrt{2}} W_\mu^- ((\bar{e}^\kappa U^{lep}{}_{\kappa\lambda} \gamma^\mu (1 + \gamma^5) \nu^\lambda) + (\bar{d}_j^\kappa C_{\kappa\lambda}^\dagger \gamma^\mu (1 + \gamma^5) u_j^\lambda)) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_e^\kappa (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) e^\kappa) + m_\nu^\lambda (\bar{\nu}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) e^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_e^\lambda (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) \nu^\kappa) - m_\nu^\kappa (\bar{e}^\lambda U^{lep}{}_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) \nu^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} H (\bar{\nu}^\lambda \nu^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} H (\bar{e}^\lambda e^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} \phi^0 (\bar{\nu}^\lambda \gamma^5 \nu^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} \phi^0 (\bar{e}^\lambda \gamma^5 e^\lambda) - \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa - \\
 & \frac{1}{4} \bar{\nu}_\lambda M_{\lambda\kappa}^R (1 - \gamma_5) \bar{\nu}_\kappa + \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^+ (-m_d^\kappa (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 - \gamma^5) d_j^\kappa) + m_u^\lambda (\bar{u}_j^\lambda C_{\lambda\kappa} (1 + \gamma^5) d_j^\kappa) + \\
 & \frac{ig}{2M\sqrt{2}} \phi^- (m_d^\lambda (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 + \gamma^5) u_j^\kappa) - m_u^\kappa (\bar{d}_j^\lambda C_{\lambda\kappa}^\dagger (1 - \gamma^5) u_j^\kappa) - \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} H (\bar{u}_j^\lambda u_j^\lambda) - \\
 & \frac{g}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} H (\bar{d}_j^\lambda d_j^\lambda) + \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} \phi^0 (\bar{u}_j^\lambda \gamma^5 u_j^\lambda) - \frac{ig}{2} \frac{m_\lambda^0}{M} \phi^0 (\bar{d}_j^\lambda \gamma^5 d_j^\lambda) + \bar{G}^a \partial^2 G^a + g_s f^{abc} \partial_\mu \bar{G}^a G^b g_\mu^c + \\
 & \bar{X}^+ (\partial^2 - M^2) X^+ + \bar{X}^- (\partial^2 - M^2) X^- + \bar{X}^0 (\partial^2 - \frac{M^2}{c_w^2}) X^0 + \bar{Y} \partial^2 Y + igc_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{X}^0 X^- - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^+ X^0) + ig s_w W_\mu^+ (\partial_\mu \bar{Y} X^- - \partial_\mu \bar{X}^+ Y) + igc_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- X^0 - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^0 X^+) + ig s_w W_\mu^- (\partial_\mu \bar{X}^- Y - \partial_\mu \bar{Y} X^+) + igc_w Z_\mu^0 (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) + ig s_w A_\mu (\partial_\mu \bar{X}^+ X^+ - \\
 & \partial_\mu \bar{X}^- X^-) - \frac{1}{2}gM (\bar{X}^+ X^+ H + \bar{X}^- X^- H + \frac{1}{c_w^2} \bar{X}^0 X^0 H) + \frac{1-2c_w^2}{2c_w} igM (\bar{X}^+ X^0 \phi^+ - \bar{X}^- X^0 \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2c_w} igM (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + igM s_w (\bar{X}^0 X^- \phi^+ - \bar{X}^0 X^+ \phi^-) + \\
 & \frac{1}{2}igM (\bar{X}^+ X^+ \phi^0 - \bar{X}^- X^- \phi^0) .
 \end{aligned}$$

Standard-Modell der Teilchenphysik

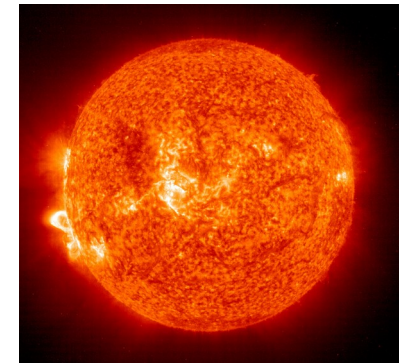


Elementarteilchen

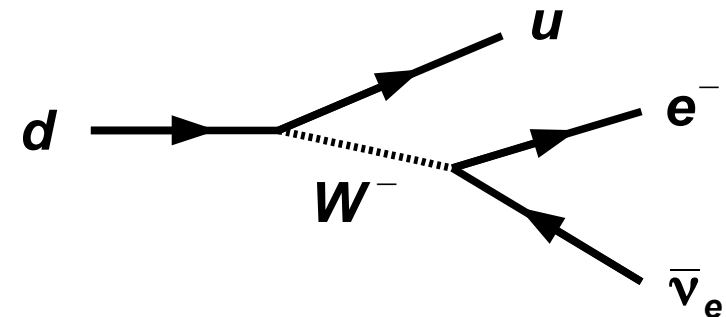
source: <https://en.wikipedia.org/wiki/Standard_Model>

Standard-Modell der Teilchenphysik

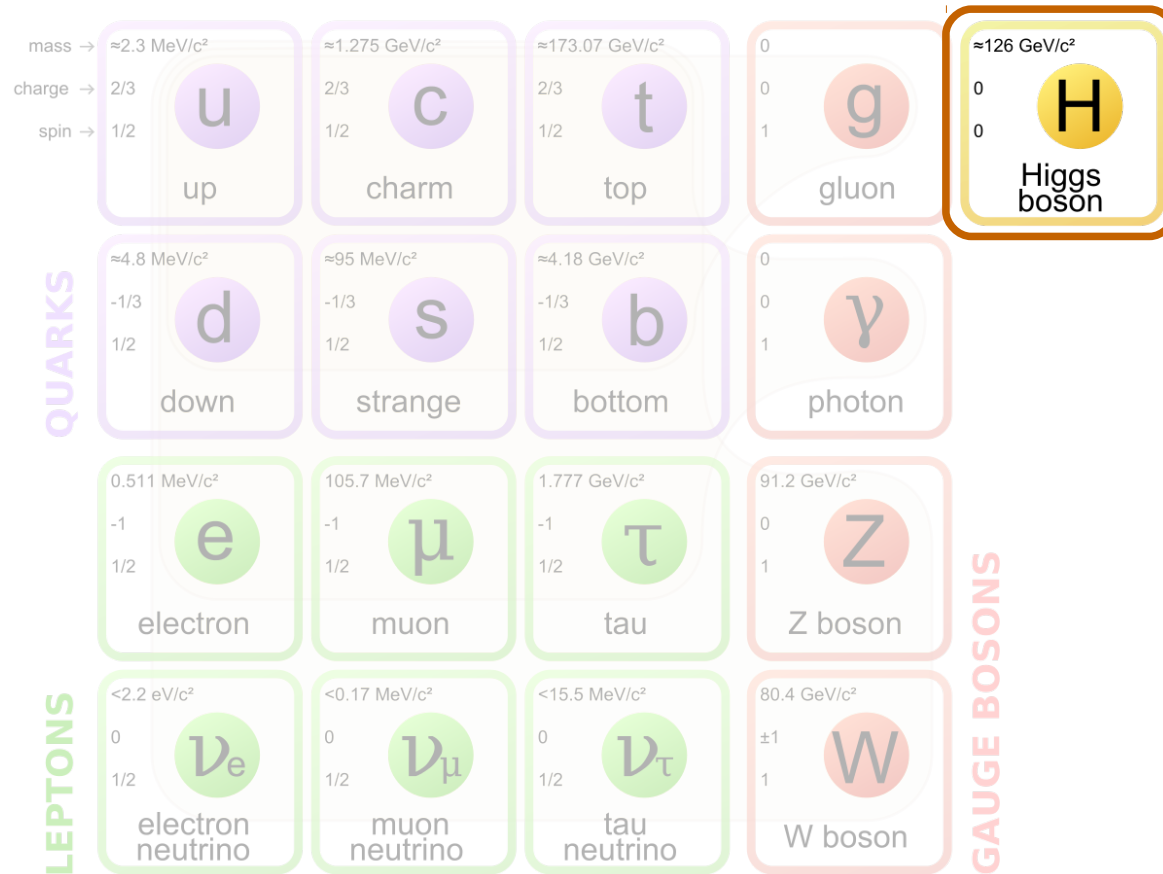
	mass →	charge →	spin →																									
QUARKS	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	u	up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	c	charm	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	t	top	0	0	1	g	gluon	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	0	0	0	H	Higgs boson		
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	d	down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	s	strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	b	bottom	0	0	1	γ	photon								
	$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	e	electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	μ	muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	-1	$1/2$	τ	tau	$91.2 \text{ GeV}/c^2$	0	0	1	Z	Z boson							
	$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$	ν_e	electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_μ	muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	$1/2$	ν_τ	tau neutrino	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	± 1	1	1	W	W boson							
LEPTONS																												



“Eichbosonen”
 → Wechselwirkungen



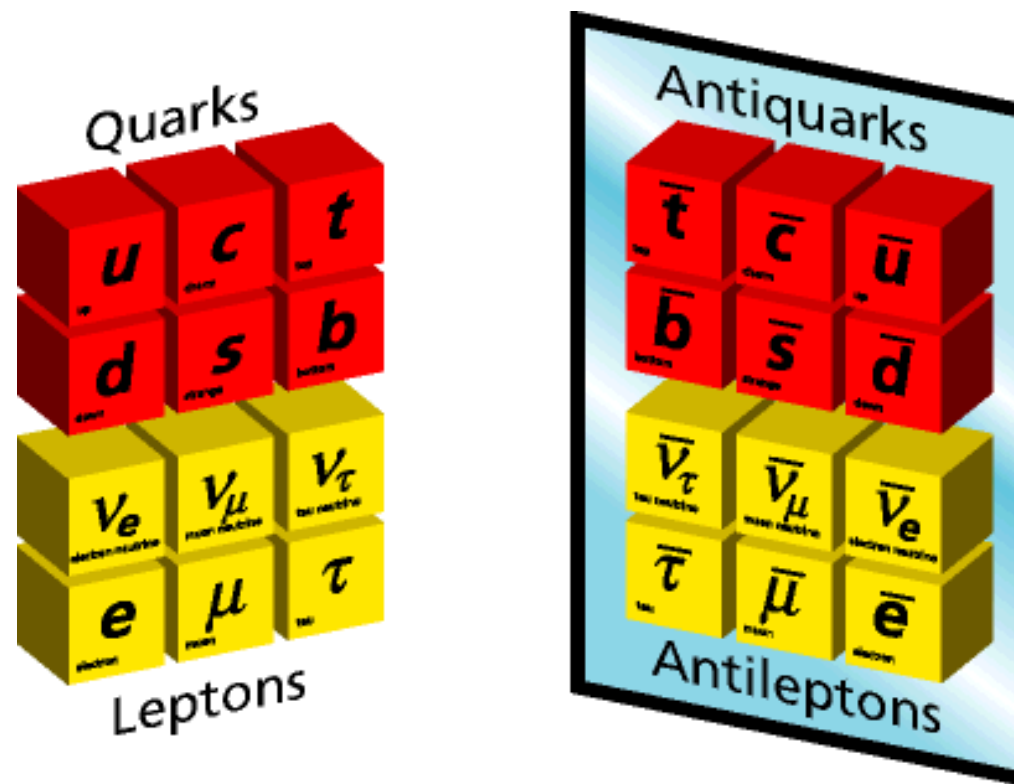
Standard-Modell der Teilchenphysik



Higgs-Boson

→ **Masse**

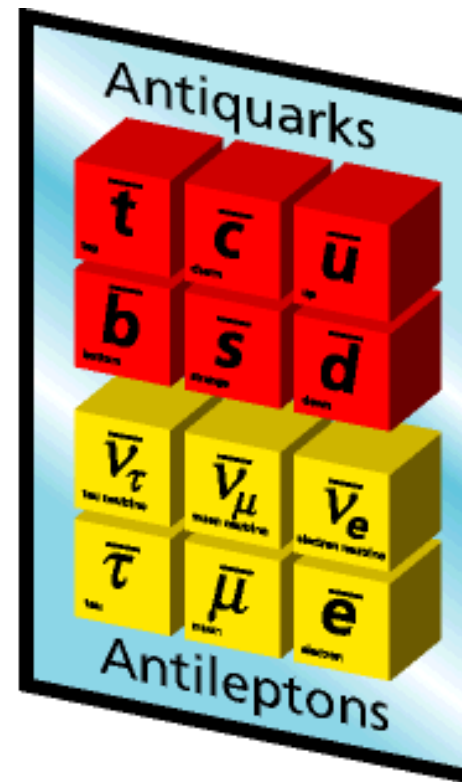
Standard-Modell der Teilchenphysik



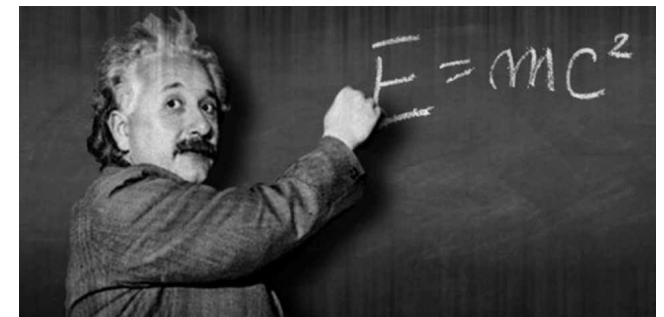
Für jedes Materieteilchen existiert ein Antiteilchen:

**Gleiche Masse wie das Teilchen,
aber entgegengesetzte Ladung**

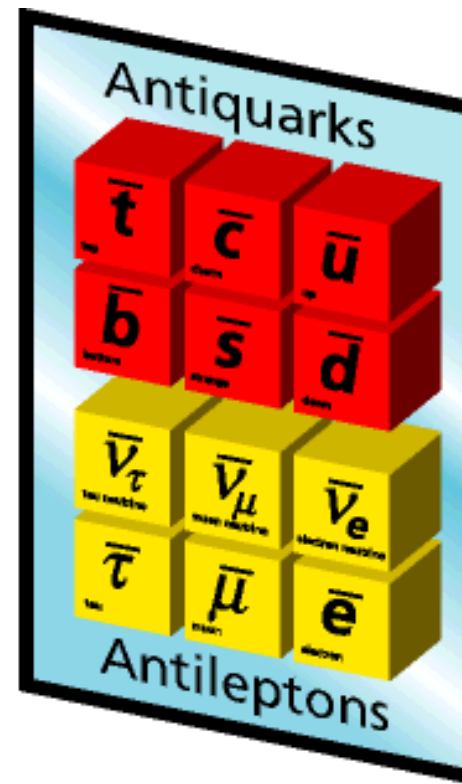
Standard-Modell der Teilchenphysik



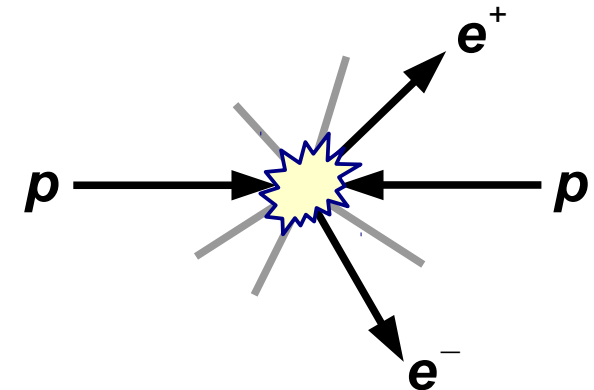
**Teilchen / Antiteilchen – Paare
können aus Energie erzeugt werden**



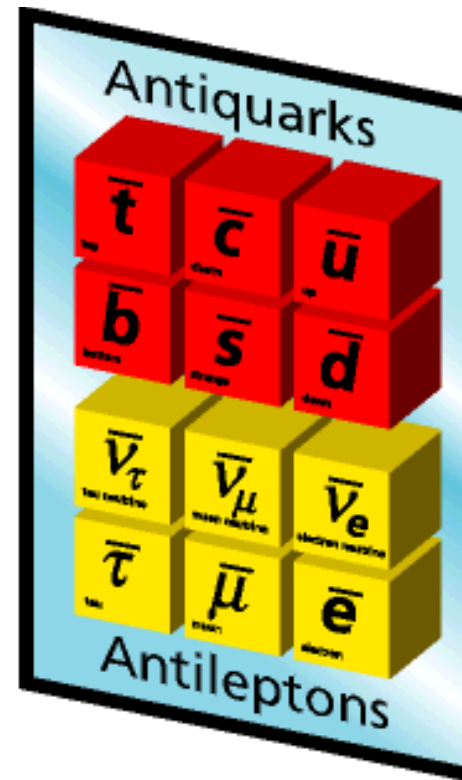
Standard-Modell der Teilchenphysik



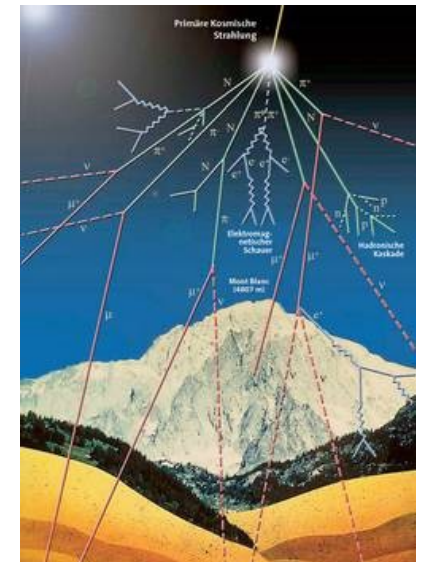
z.B. in Teilchenbeschleunigern



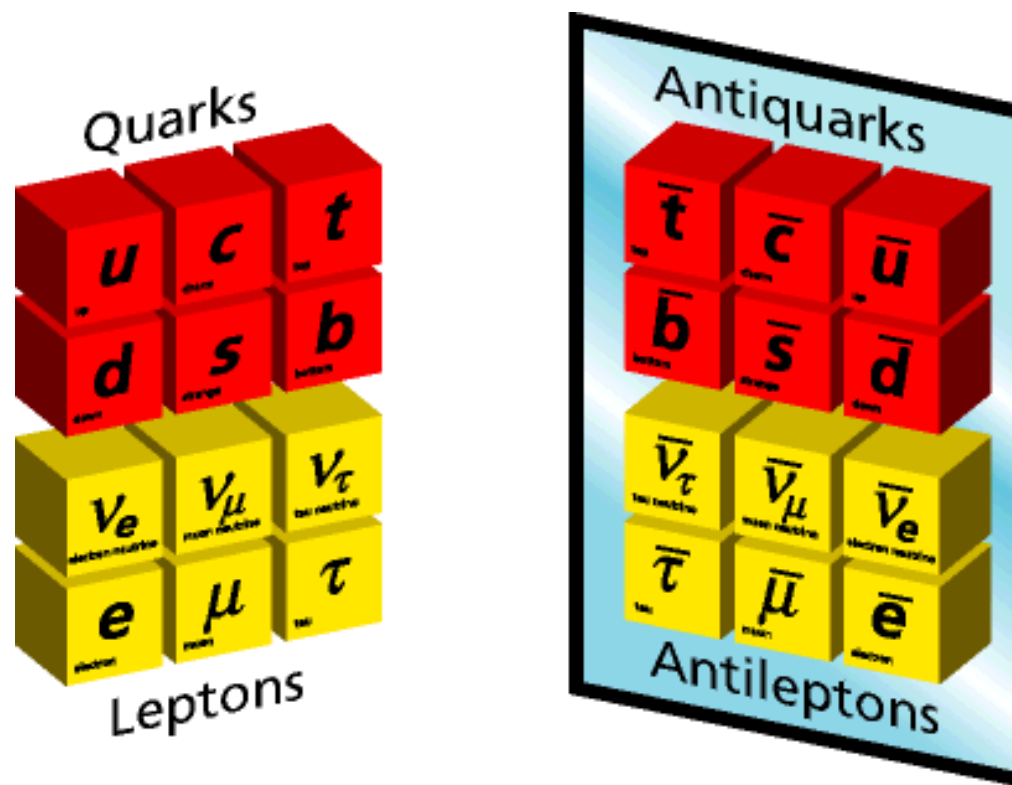
Standard-Modell der Teilchenphysik



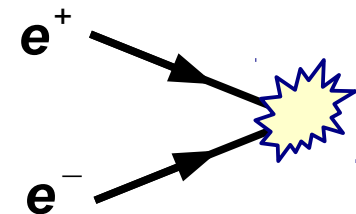
aber auch in “natürlichen” Prozessen
(z.B. kosmischer Strahlung)



Standard-Modell der Teilchenphysik



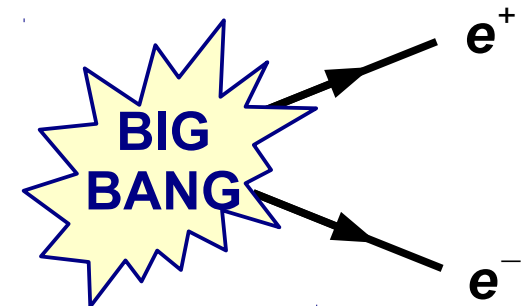
**Teilchen / Antiteilchen – Paare
annihilieren in Energie**
(z.B. hochenergetische Photonen)



Fundamentale Fragen (1)



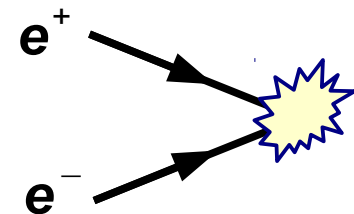
**WARUM SEHEN WIR IM UNIVERSUM SOVIEL
MEHR MATERIE ALS ANTIMATERIE ?**



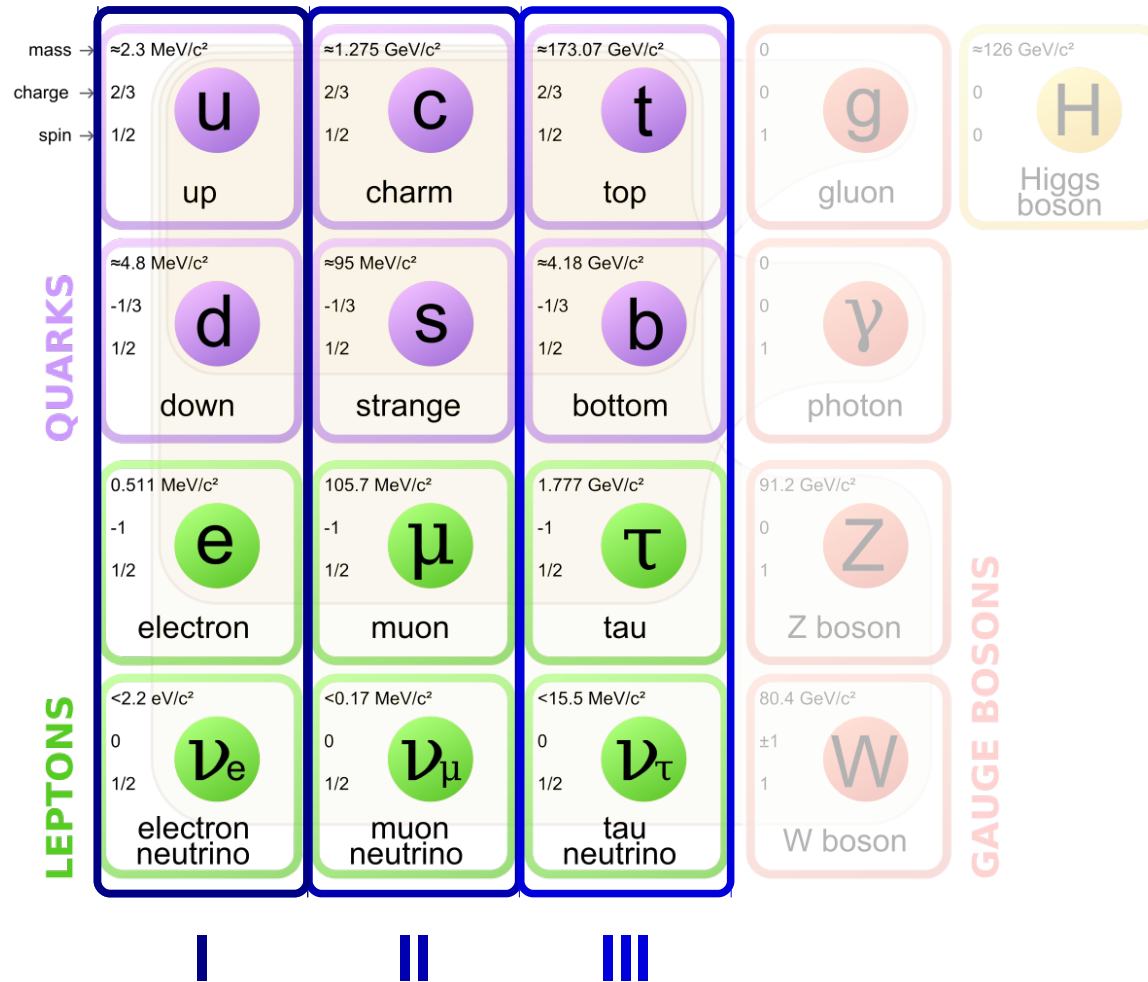
Fundamentale Fragen (2)



**WARUM EXISTIERT ÜBERHAUPT
MATERIE ?**



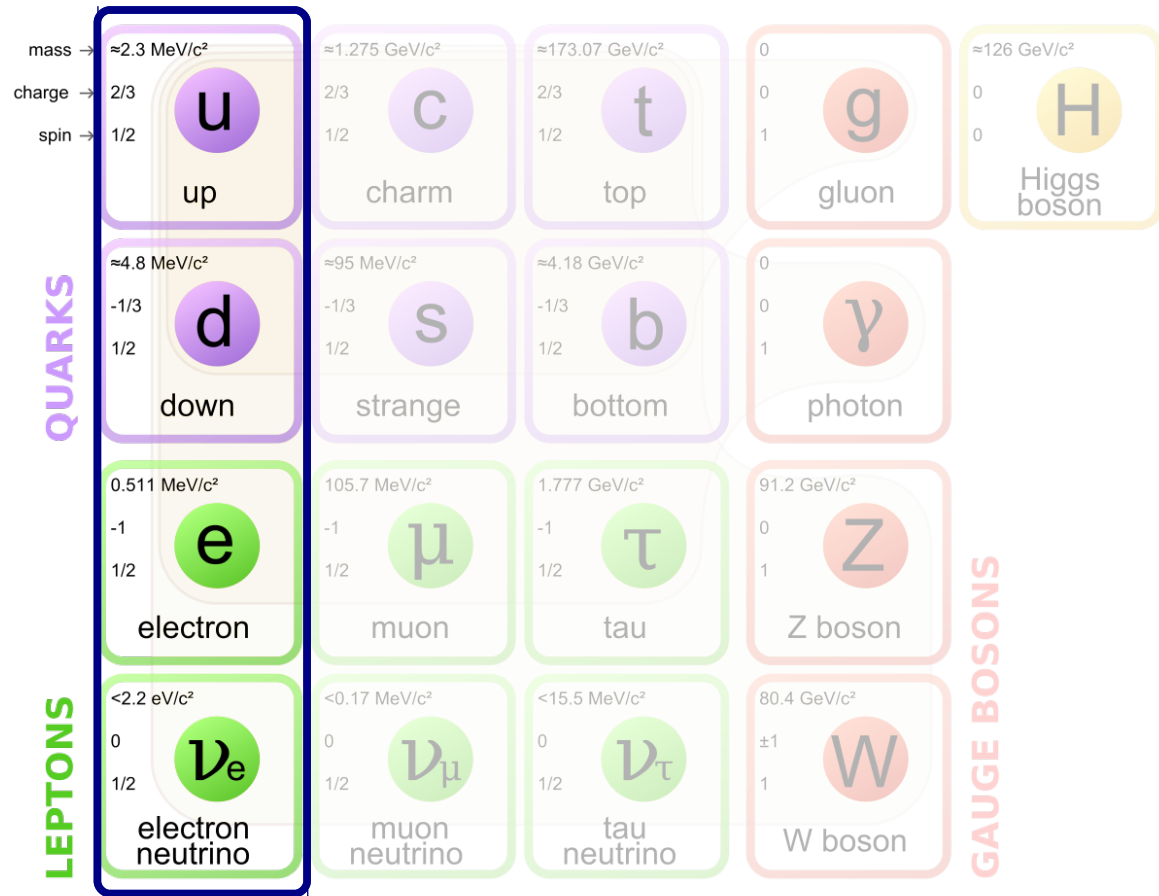
Standard-Modell der Teilchenphysik



Marieteilchen treten in drei “Generationen” auf:

2. und 3. Generation sind schwerere Geschwister der 1. Generation

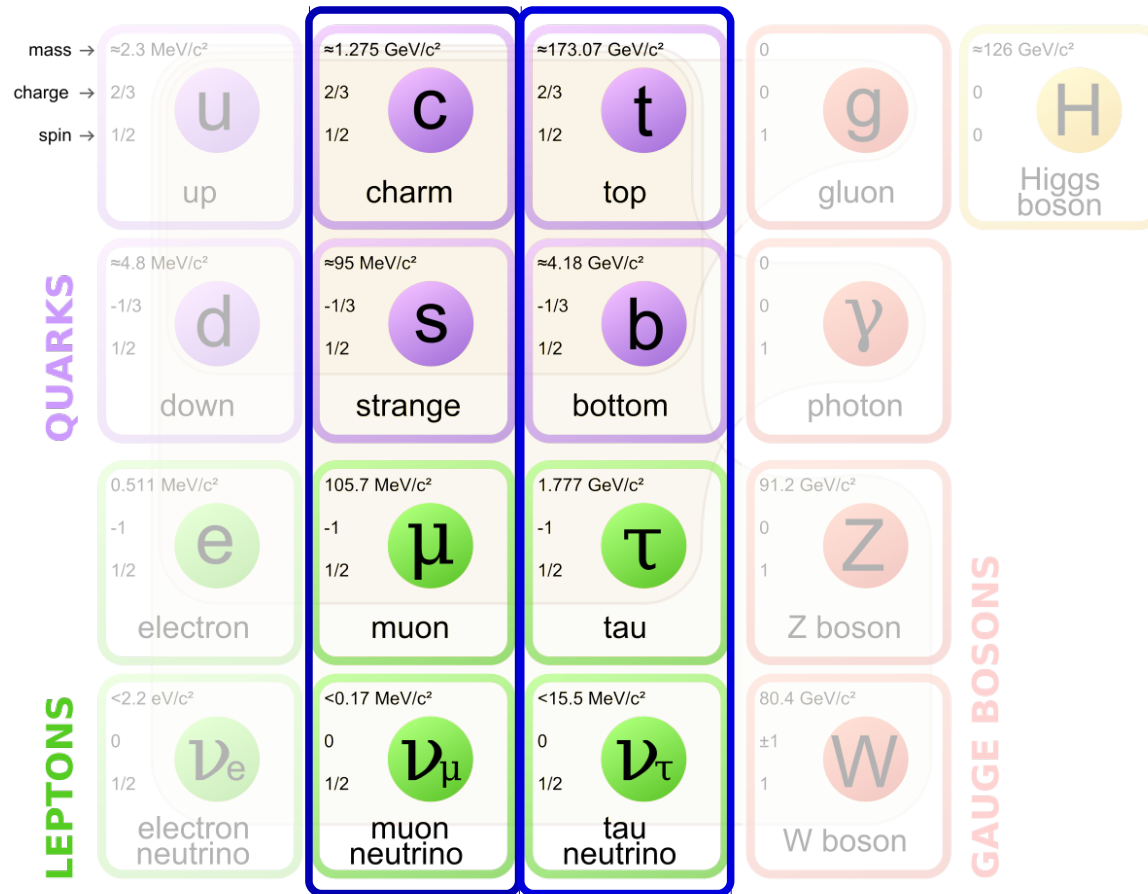
Standard-Modell der Teilchenphysik



I

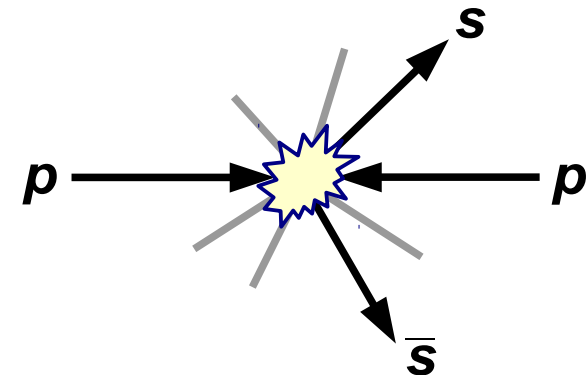
Alle stabile Materie besteht aus Teilchen der 1. Generation

Standard-Modell der Teilchenphysik

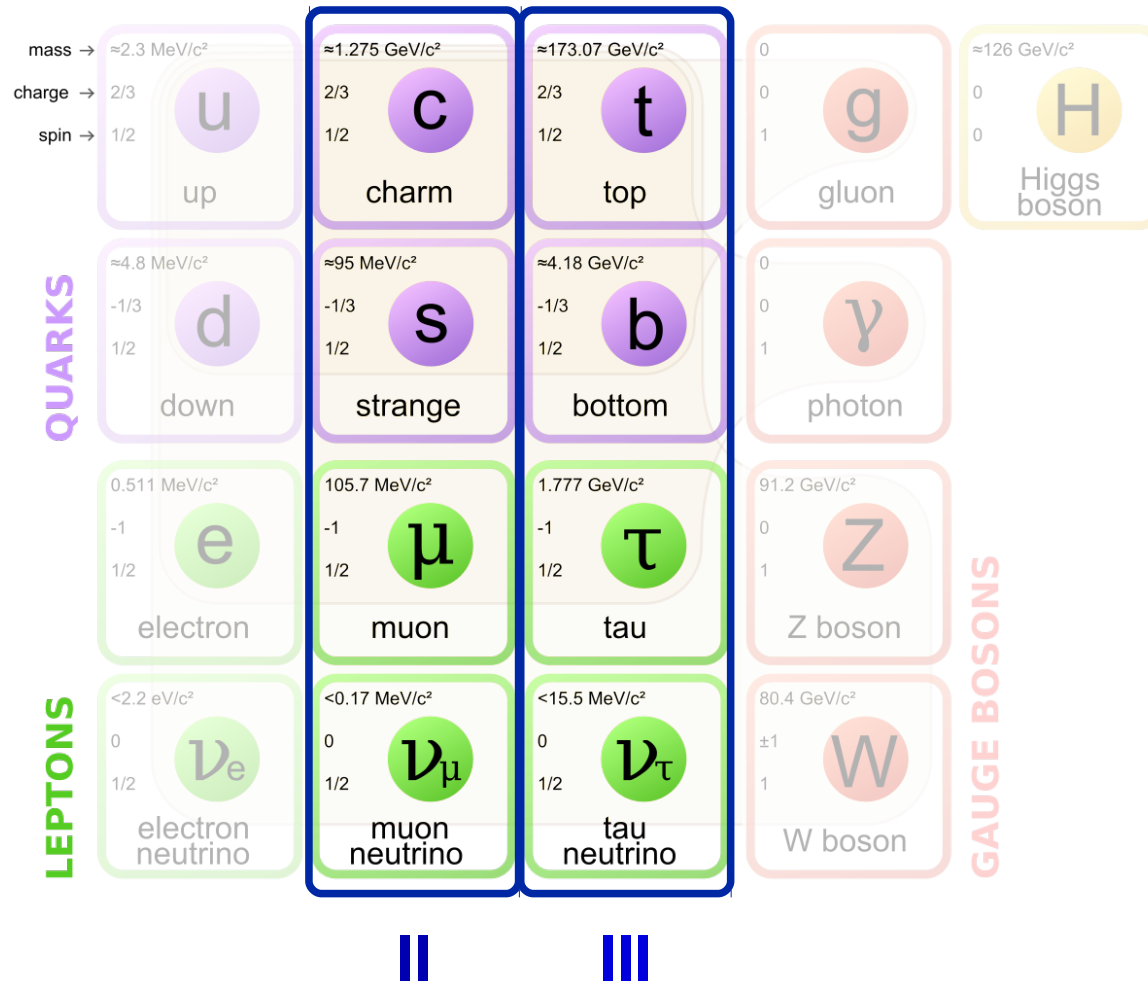


II III

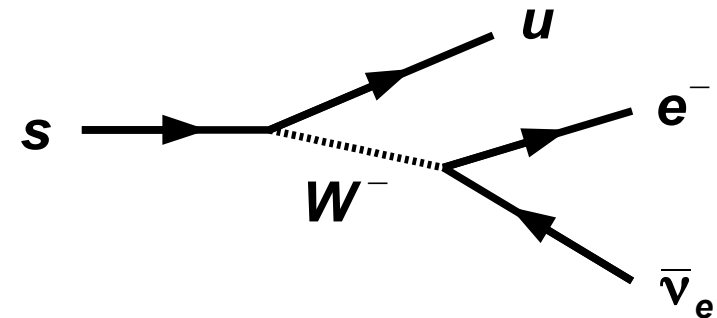
Teilchen / Antiteilchen der 2. und 3. Generation können aus Energie erzeugt werden
 (Teilchenbeschleuniger, kosmische Strahlung)



Standard-Modell der Teilchenphysik



... sind aber sehr kurzlebig und zerfallen in Teilchen der 1. Generation



Fundamentale Fragen (3)

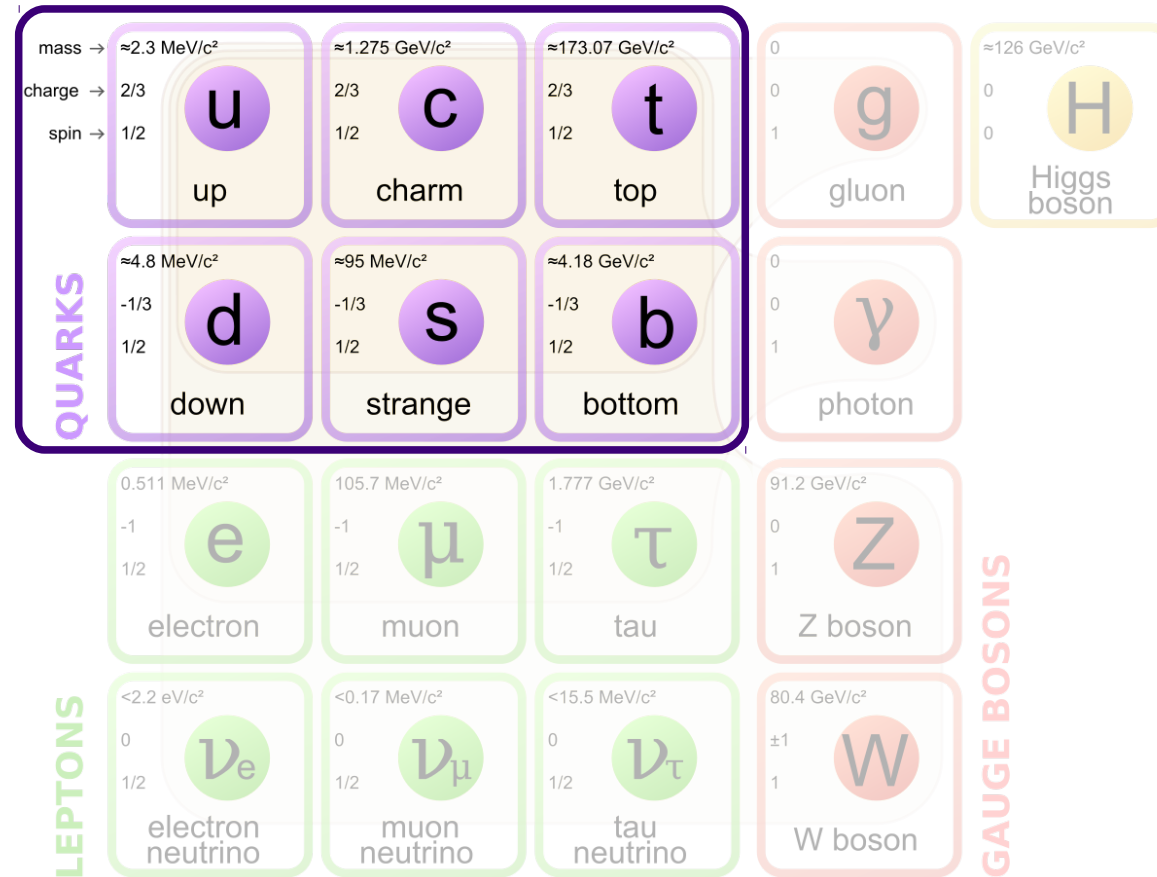


Who ordered THAT ?

(Isidor Isaac Rabi on the discovery of the muon)

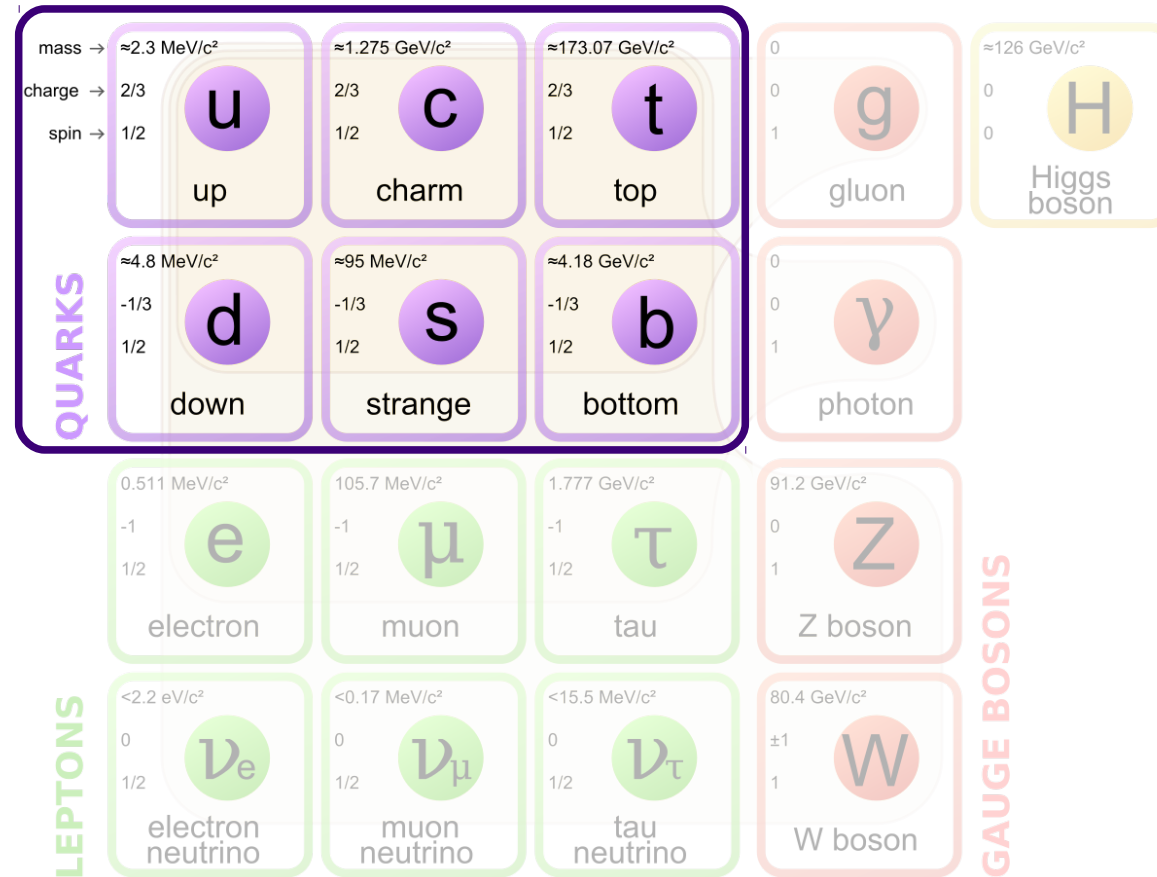
WARUM DREI GENERATIONEN ?

Standard-Modell der Teilchenphysik



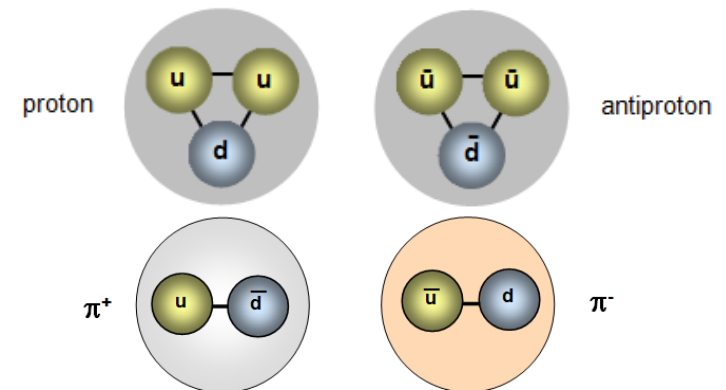
**Quarks werden nicht als freie Teilchen beobachtet:
von der starken Wechselwirkung gebunden**

Standard-Modell der Teilchenphysik

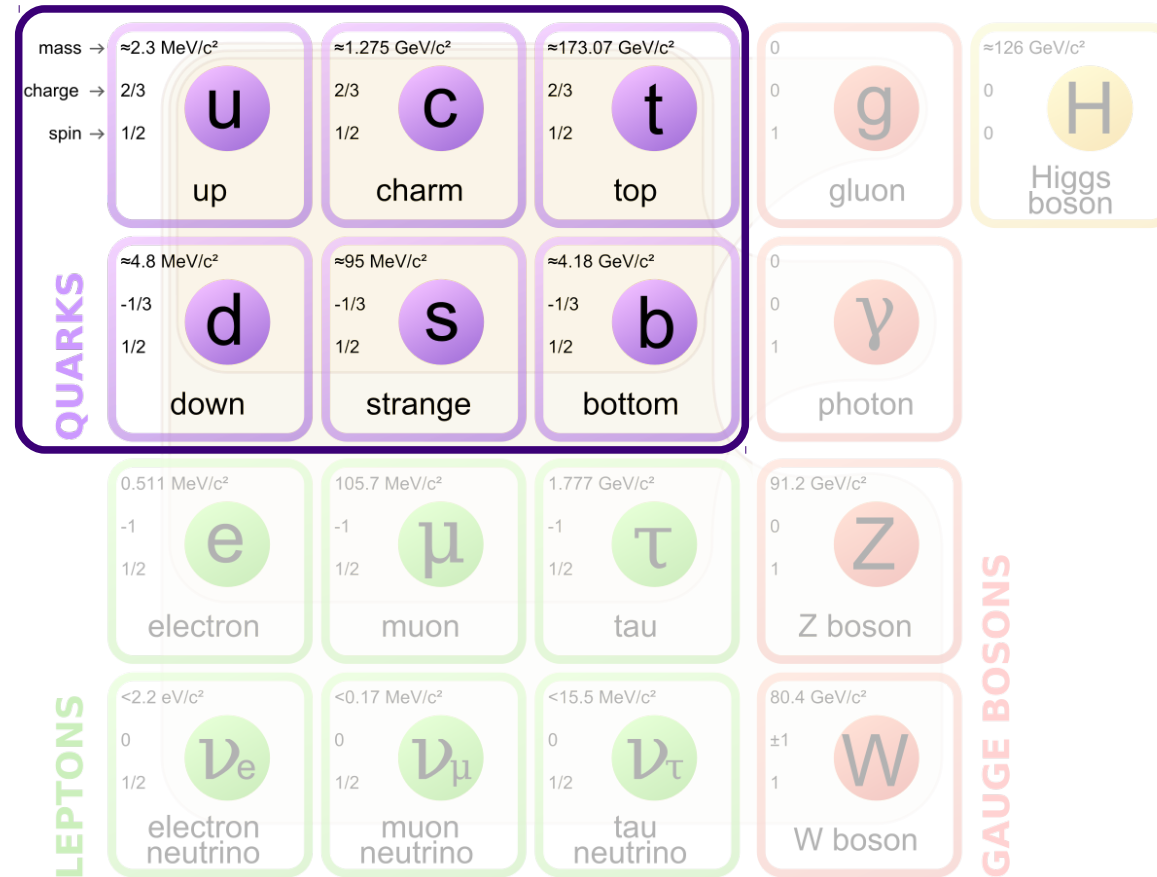


Beobachtete Teilchen bestehen aus

- drei Quarks (“Baryonen”), oder
- Quark und Antiquark (“Mesonen”)



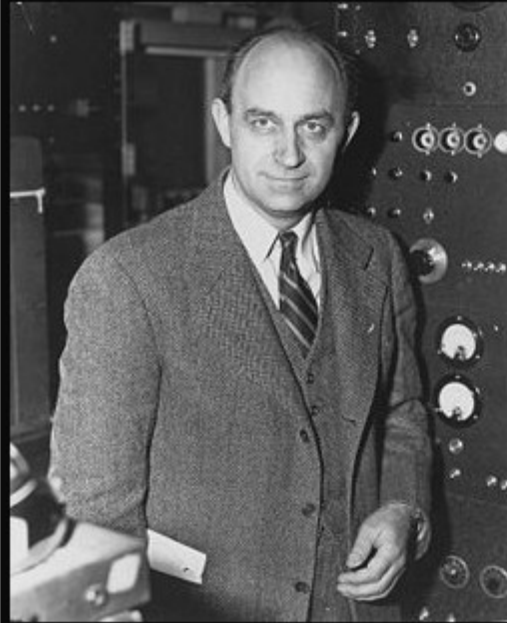
Standard-Modell der Teilchenphysik



Beobachtete Teilchen bestehen aus

- drei Quarks (“Baryonen”), oder
- Quark und Antiquark (“Mesonen”)

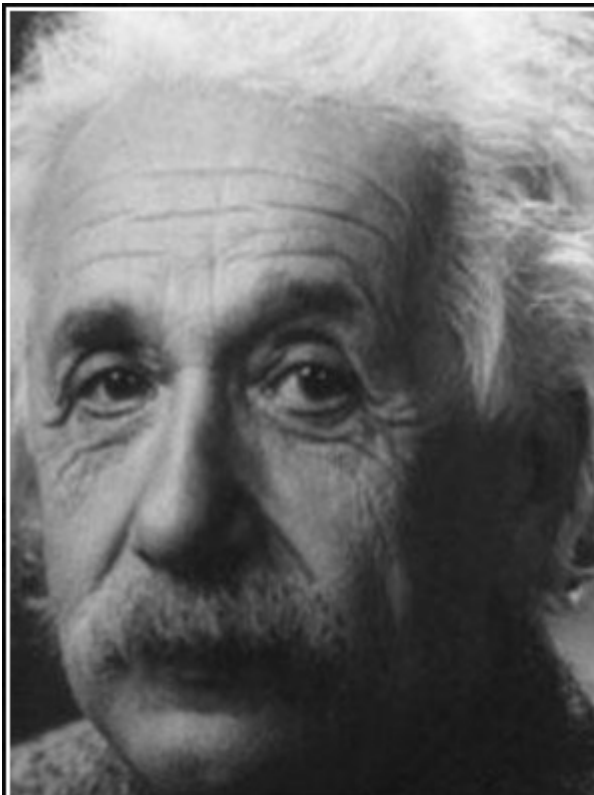
Viele mögliche
Kombinationen:
“Teilchenzoo”



If I could remember the names of all these particles, I would have been a botanist.

(Enrico Fermi)

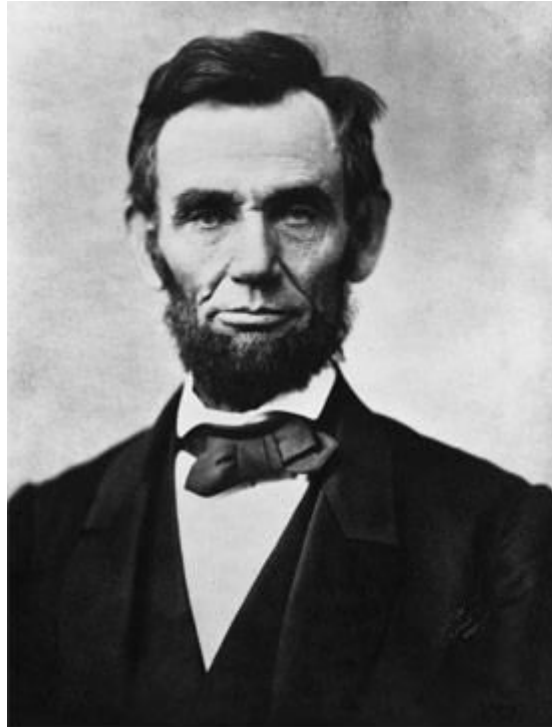
izquotes.com



If I could remember the names of all
these particles, I'd be a botanist.

— *Albert Einstein* —

AZ QUOTES

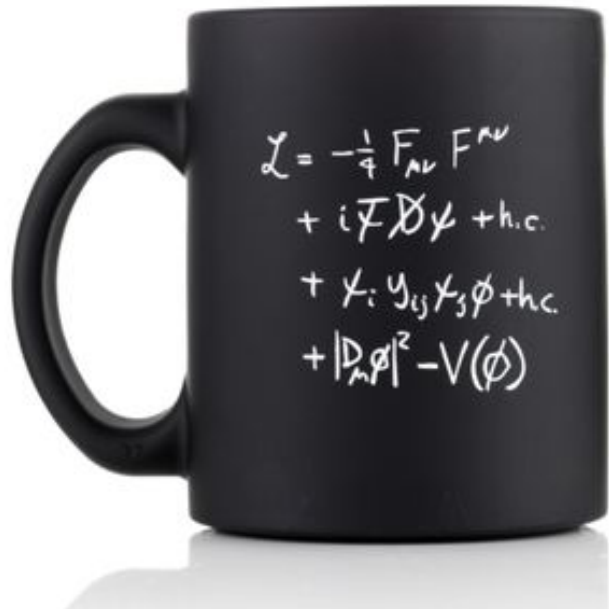


**“Don’t believe
everything you
read on the
Internet just
because there’s
a picture with a
quote next to it.”**

—Abraham Lincoln



Standard-Modell der Teilchenphysik

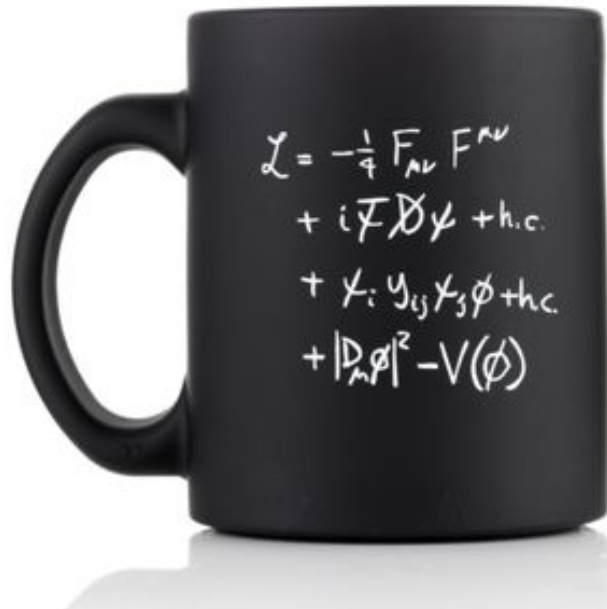


**Standard-Modell beschreibt
Elementarteilchen und ihre
Wechselwirkungen**

**Viele Vorhersagen durch
Messungen bestätigt**

Aber auch wichtige offene Fragen

Standard-Modell der Teilchenphysik



**Standard-Modell beschreibt
Elementarteilchen und ihre
Wechselwirkungen**

**Viele Vorhersagen durch
Messungen bestätigt**

Aber auch wichtige offene Fragen

Warum drei Generationen von Elementarteilchen ?

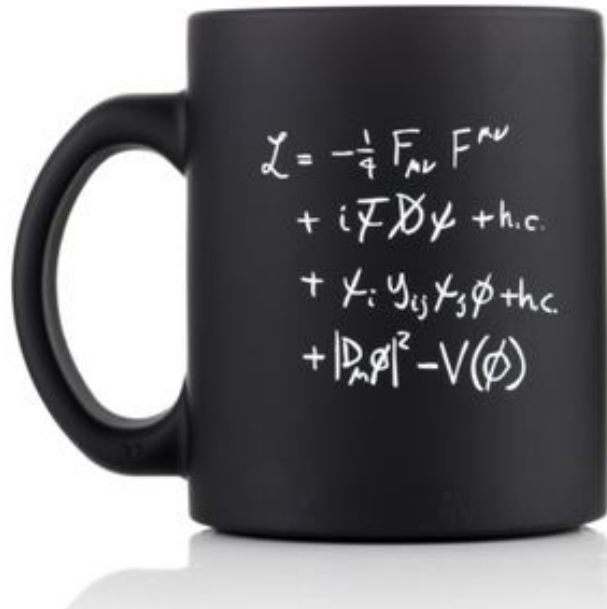
Warum vier verschiedene Wechselwirkungen ?

Was ist mit der Gravitationskraft ?

Warum sehen wir Materie im Universum und keine Antimaterie ?

**Was sind die “dunkle Materie” und die “dunkle Energie”,
die unsere Kollegen im Universum beobachten ?**

Standard-Modell der Teilchenphysik



Standard-Modell beschreibt
Elementarteilchen und ihre
Wechselwirkungen

Viele Vorhersagen durch
Messungen bestätigt

Aber auch wichtige offene Fragen

Suche nach “Physik jenseits des Standard-Modells”

Theoretiker: entwickeln erweiterte Modelle

Experimente: testen die Vorhersagen des Standardmodells
und vorgeschlagener neuer Modelle mit immer besserer Präzision

CMS: INVESTIGATING THE DEEPEST QUESTIONS IN THE UNIVERSE

Experimente der Teilchenphysik

1

AT THE BORDER BETWEEN FRANCE AND SWITZERLAND, THE EUROPEAN CENTER FOR NUCLEAR RESEARCH: CERN.

GENEVA

CERN

CMS

LHC

2

100M UNDERGROUND VAST CATHEDRAL-SIZED CAVERNS HOUSE FOUR GIANT PARTICLE DETECTORS FOR THE WORLD'S BIGGEST SCIENTIFIC TOOL: A MASSIVE PARTICLE ACCELERATOR, 27 KM AROUND, THE LHC: LARGE HADRON COLLIDER.

4

THOUSANDS OF POWERFUL SUPERCONDUCTING MAGNETS STEER THE PROTON BEAMS AROUND THE HUGE RING AND THEN FOCUS THEM TO LESS THAN THE WIDTH OF A HUMAN HAIR... READY TO CRASH AGAINST EACH OTHER. THESE SUPERCONDUCTING MAGNETS RUN AT -27°C : EVEN COLDER THAN OUTER SPACE. THE LHC IS THE BIGGEST CRYOGENIC SYSTEM EVER MADE.

5

THE COLLISION GENERATES SO MUCH ENERGY THAT PARTICLES EXIST SINCE THE BIG BANG (14 BILLION YEARS AGO), LIKE THE HIGGS PARTICLE, REAPPEAR BRIEFLY.

9

CMS HAS BEEN ASSEMBLED IN LAYERS FROM MILLIONS OF PARTS WITH WATCH-MAKING PRECISION. EACH LAYER OF DETECTORS HAS A SPECIAL JOB TO DO: TO IDENTIFY AND MEASURE AS MANY PARTICLES AS POSSIBLE.

10

A TOTAL OF 1 TERABYTE OF DATA IS GENERATED IN CMS EVERY SECOND, EQUIVALENT IN VOLUME TO STORING THE NAMES AND ADDRESSES OF EVERY LIVING HUMAN BEING.

11

TO CRUNCH AND SWALLOW ALL THIS INFORMATION IS JUST NOT POSSIBLE. POWERFUL ELECTRONICS FILTERS THE DATA SIGNALS SO THAT, EVERY SECOND, ONLY THE RESULTS FROM THE 100 MOST INTERESTING COLLISIONS ARE STORED.

8

LOOKING AT A SLICE THROUGH THE DETECTOR.

12

A HUGE COMPUTING NETWORK, THE GRID, SENDS THE CMS DATA OUT ALL OVER THE WORLD...

13

A PHYSICS STUDENT SAT AT THEIR PC ANYWHERE IN THE WORLD CAN HARNESS THE POWER OF THOUSANDS OF PCs OVER THE GRID...

14

TO SEARCH FOR RARE COLLISIONS AND NEW PHYSICS...

7

CMS IS LIKE A 12,500 TONNE DIGITAL CAMERA WITH 100 MILLION PIXELS THAT TAKES A 3D PICTURE OF THE LHC COLLISIONS 40 MILLION TIMES PER SECOND!

6

THESE ANCESTRAL PARTICLES SURVIVE FOR ONLY THE TINIEST FRACTION OF A SECOND BEFORE THEY DISINTEGRATE INTO CASCADES OF MORE FAMILIAR PARTICLES. SCIENTISTS NEED ULTRAFAST, ULTRAPRECISE DETECTORS, AND STATE-OF-THE-ART CUSTOM MADE ELECTRONICS TO SEE THE CASCADE...THEY NEED CMS: THE COMPACT MUON SOLENOID.

PHOTON

ELECTRON

PION

ION



CMS: INVESTIGATING THE DEEPEST QUESTIONS IN THE UNIVERSE

1 AT THE BORDER BETWEEN FRANCE AND SWITZERLAND, THE EUROPEAN CENTER FOR NUCLEAR RESEARCH: CERN.



2 100M UNDERGROUND VAST CATHEDRAL-SIZED CAVERNS HOUSE FOUR GIANTIC PARTICLE DETECTORS FOR THE WORLD'S BIGGEST SCIENTIFIC TOOL: A MASSIVE PARTICLE ACCELERATOR, 27 KM AROUND, THE LHC: LARGE HADRON COLLIDER.

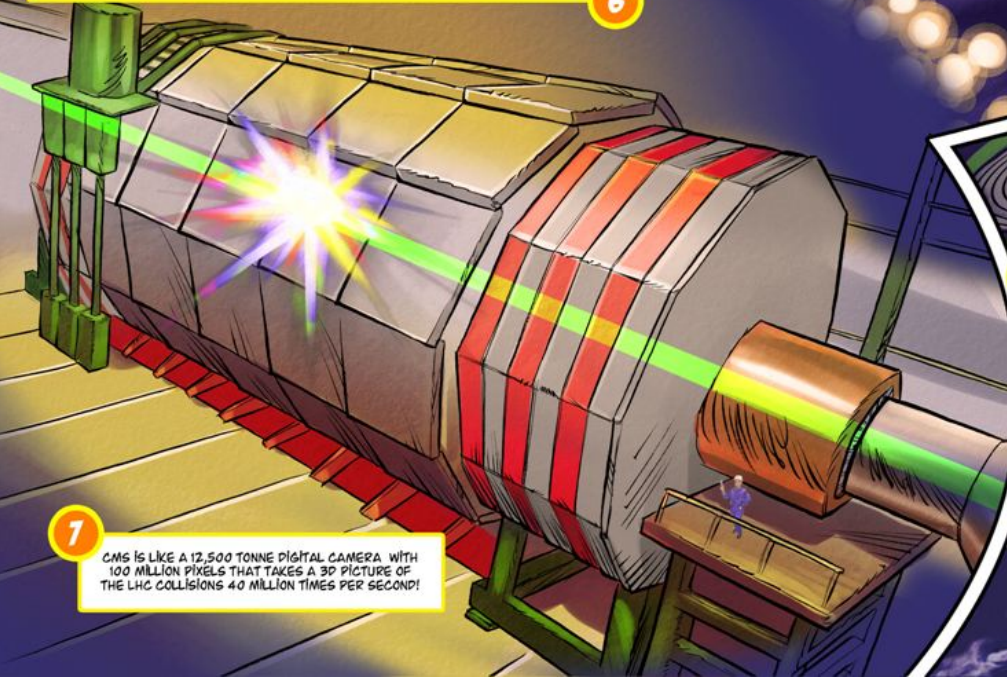
3 THE PROTONS IN THE LHC ARE ACCELERATED TO 99.9998% OF THE SPEED OF LIGHT IN TWO BEAM LINES, MOVING IN OPPOSITE DIRECTIONS.

4 THOUSANDS OF POWERFUL SUPERCONDUCTING MAGNETS STEER THE PROTON BEAMS AROUND THE HUGE RING AND THEN FOCUS THEM TO LESS THAN THE WIDTH OF A HUMAN HAIR... READY TO CRASH AGAINST EACH OTHER. THESE SUPERCONDUCTING MAGNETS RUN AT -271°C: EVEN COLDER THAN OUTER SPACE. THE LHC IS THE BIGGEST CRYOGENIC SYSTEM EVER MADE.

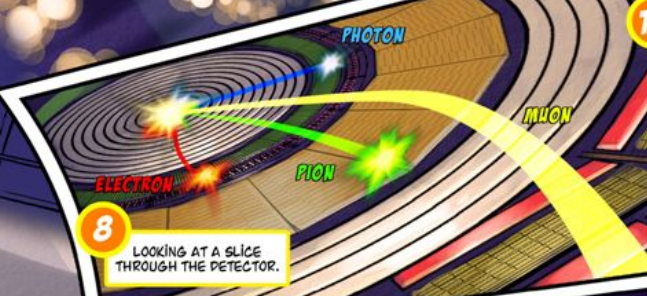
THESE ANCESTRAL PARTICLES SURVIVE FOR ONLY THE TINIEST FRACTION OF A SECOND BEFORE THEY DISINTEGRATE INTO CASCADES OF MORE FAMILIAR PARTICLES. SCIENTISTS NEED ULTRAFAST, ULTRAPRECISE DETECTORS, AND STATE-OF-THE-ART CUSTOM MADE ELECTRONICS TO SEE THE CASCADE...THEY NEED CMS: THE COMPACT MUON SOLENOID.

5 THE COLLISION GENERATES SO MUCH ENERGY THAT PARTICLES EXIST SINCE THE BIG BANG (14 BILLION YEARS AGO), LIKE THE HIGGS PARTICLE, REAPPEAR BRIEFLY.

9 CMS HAS BEEN ASSEMBLED IN LAYERS FROM MILLIONS OF PARTS WITH WATCH-MAKING PRECISION. EACH LAYER OF DETECTORS HAS A SPECIAL JOB TO DO: TO IDENTIFY AND MEASURE AS MANY PARTICLES AS POSSIBLE.



7 CMS IS LIKE A 12,500 TONNE DIGITAL CAMERA WITH 100 MILLION PIXELS THAT TAKES A 3D PICTURE OF THE LHC COLLISIONS 40 MILLION TIMES PER SECOND!



8 LOOKING AT A SLICE THROUGH THE DETECTOR.

10 A TOTAL OF 1 TERABYTE OF DATA IS GENERATED IN CMS EVERY SECOND, EQUIVALENT IN VOLUME TO STORING THE NAMES AND ADDRESSES OF EVERY LIVING HUMAN BEING.

11 TO CRUNCH AND SWALLOW ALL THIS INFORMATION IS JUST NOT POSSIBLE. POWERFUL ELECTRONICS FILTERS THE DATA SIGNALS SO THAT, EVERY SECOND, ONLY THE RESULTS FROM THE 100 MOST INTERESTING COLLISIONS ARE STORED.

12 A HUGE COMPUTING NETWORK, THE GRID, SENDS THE CMS DATA OUT ALL OVER THE WORLD...



13 A PHYSICS STUDENT SAT AT THEIR PC ANYWHERE IN THE WORLD CAN HARNESS THE POWER OF THOUSANDS OF PCs OVER THE GRID...



14 TO SEARCH FOR RARE COLLISIONS AND NEW PHYSICS...

Rekonstruktion von “Ereignissen”

Die meisten Teilchen im Teilchenzoo sind sehr kurzlebig

Nur sehr wenige sind stabil oder leben lang genug,
um eine Spur im Detektor zu hinterlassen

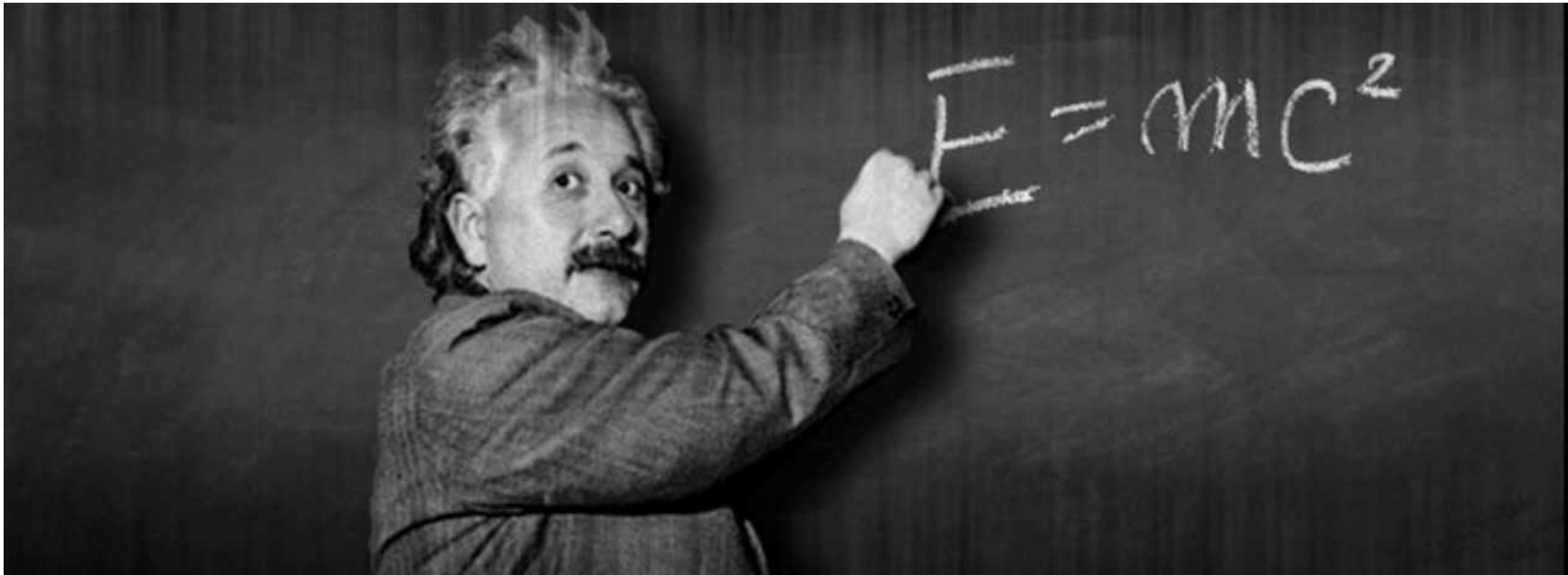


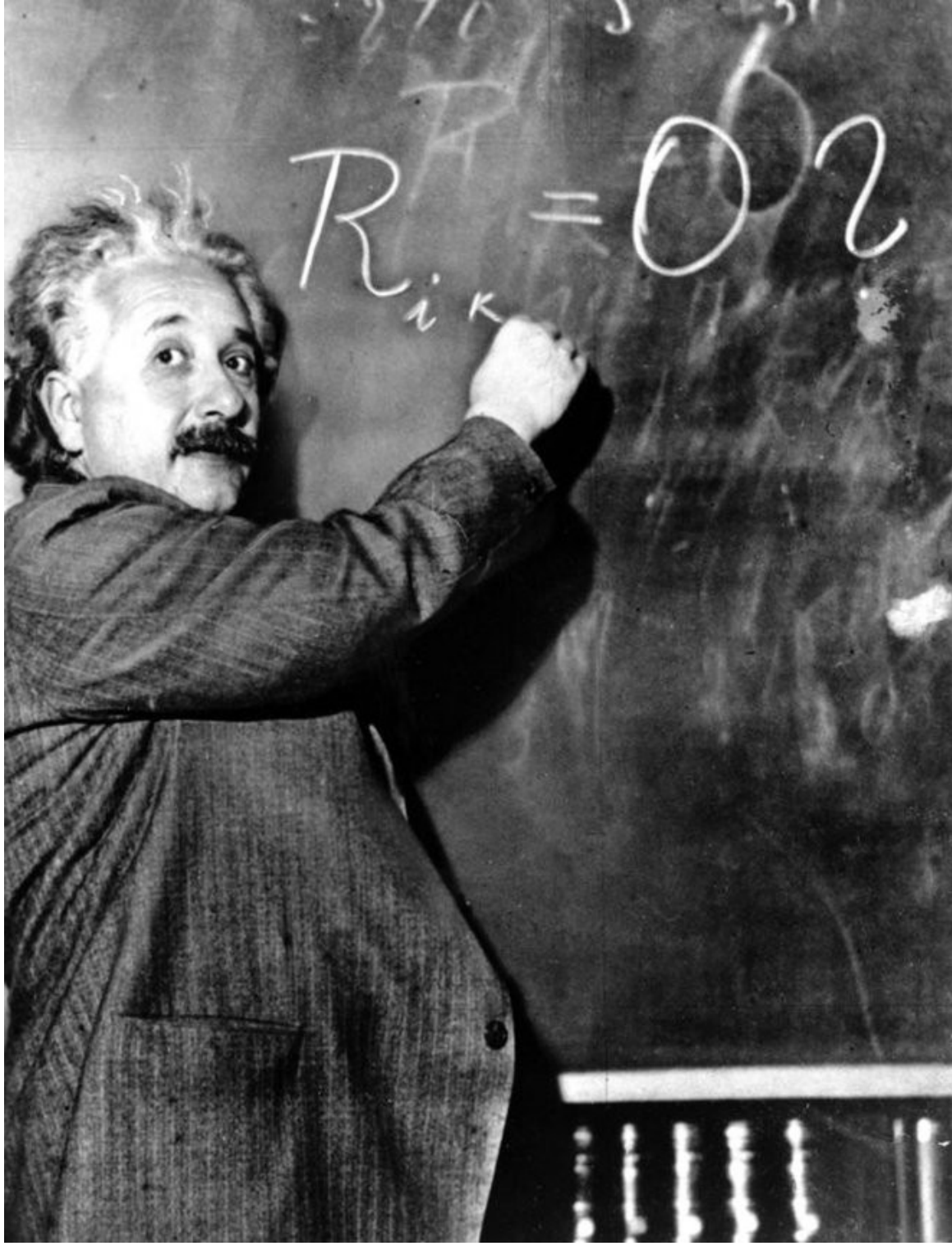
... und ihre Antiteilchen

Rekonstruktion von “Ereignissen”

**Kurzlebige Teilchen können indirekt rekonstruiert werden,
indem man ihre langlebigen Zerfallsprodukte vermisst**

→ Relativistische Kinematik





Rekonstruktion von “Ereignissen”

Kurzlebige Teilchen können indirekt rekonstruiert werden,
indem man ihre langlebigen Zerfallsprodukte vermisst

→ Relativistische Kinematik

$$E = m \cdot c^2$$

Rekonstruktion von “Ereignissen”

Kurzlebige Teilchen können indirekt rekonstruiert werden,
indem man ihre langlebigen Zerfallsprodukte vermisst

→ Relativistische Kinematik

$$E = m$$

“natürliche Einheiten“:
 $c = 1$

Rekonstruktion von “Ereignissen”

Kurzlebige Teilchen können indirekt rekonstruiert werden,
indem man ihre langlebigen Zerfallsprodukte vermisst

→ Relativistische Kinematik

$$E^2 = m^2 + p^2$$

Impuls des
Teilchens



Rekonstruktion von “Ereignissen”

Kurzlebige Teilchen können indirekt rekonstruiert werden,
indem man ihre langlebigen Zerfallsprodukte vermisst

→ Relativistische Kinematik

$$m^2 = E^2 - p^2$$

Rekonstruktion von “Ereignissen”

Kurzlebige Teilchen können indirekt rekonstruiert werden, indem man ihre langlebigen Zerfallsprodukte vermisst

→ Relativistische Kinematik

$$m^2 = E^2 - p^2$$

Energie und Impuls sind beim Zerfall erhalten:

$$M^2 = \left(\sum E_i \right)^2 - \left| \sum \vec{p}_i \right|^2$$

Vor dem Zerfall:

Masse des
zerfallenden Teilchens

Nach dem Zerfall:

Energien und **Impulse**
der erzeugten Teilchen

Rekonstruktion von “Ereignissen”

Kurzlebige Teilchen können indirekt rekonstruiert werden,
indem man ihre langlebigen Zerfallsprodukte vermisst

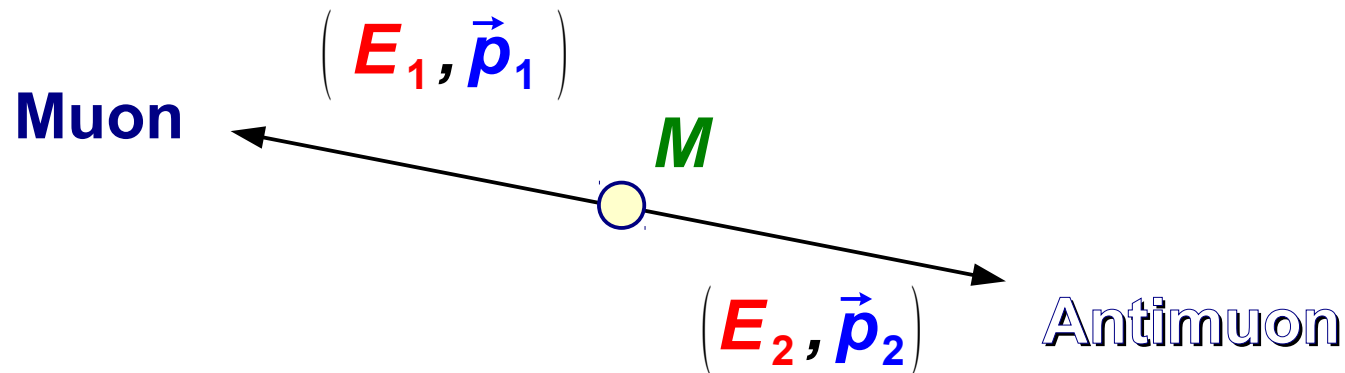
→ Relativistische Kinematik

$$m^2 = E^2 - p^2$$

Energie und Impuls sind beim Zerfall erhalten:

$$M^2 = \left(\sum E_i \right)^2 - \left| \sum \vec{p}_i \right|^2$$

Rekonstruktion von “Ereignissen”



Beispiel: Teilchen zerfällt in ein Muon und ein Antimuon

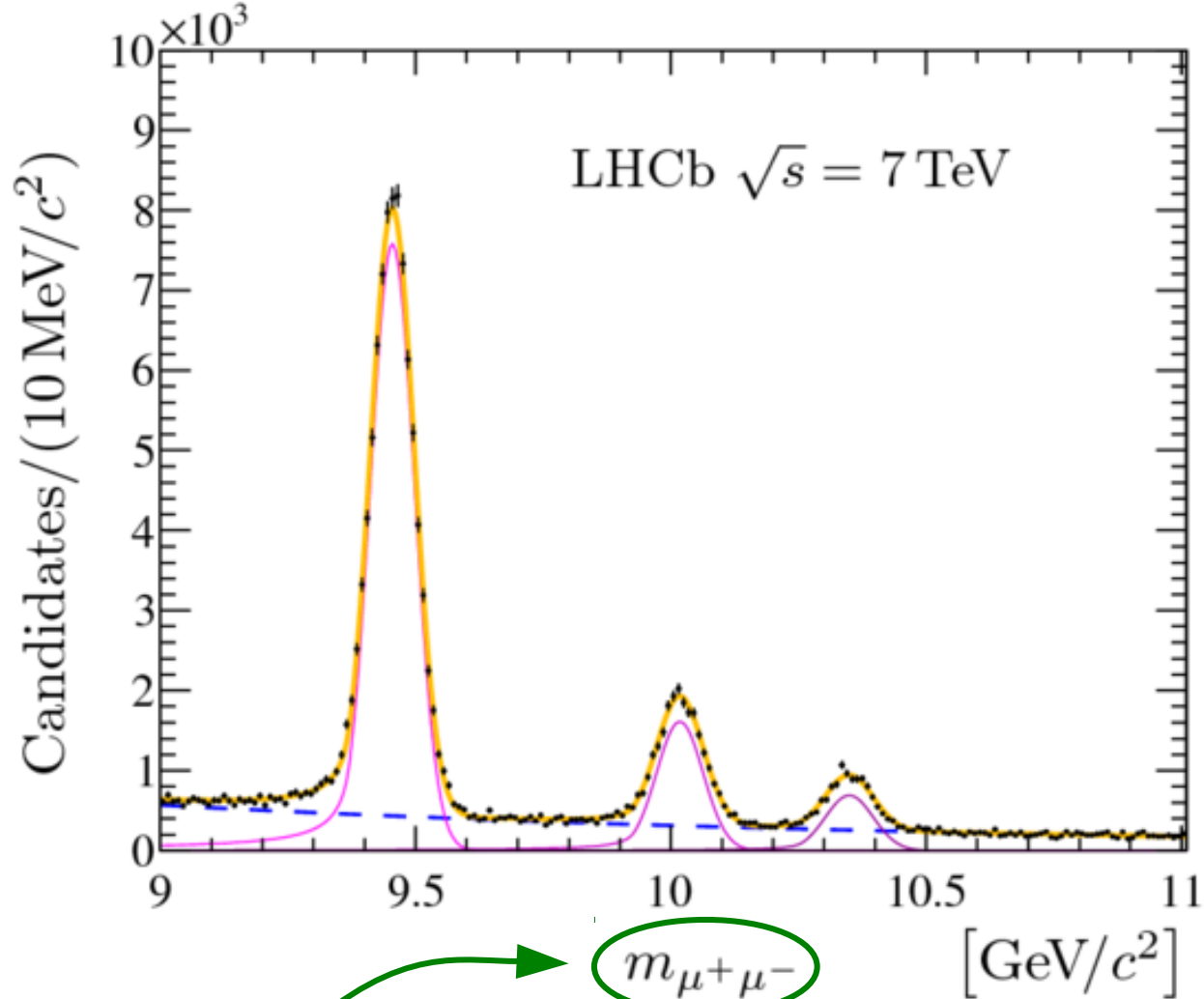
(1) Messe die Impulse des Muons und des Antimuons

(2) Bestimme ihre Energien ($E^2 = m^2 + p^2$)

(3) Berechne die Masse des zerfallenden Teilchens:

$$M^2 = (E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2$$

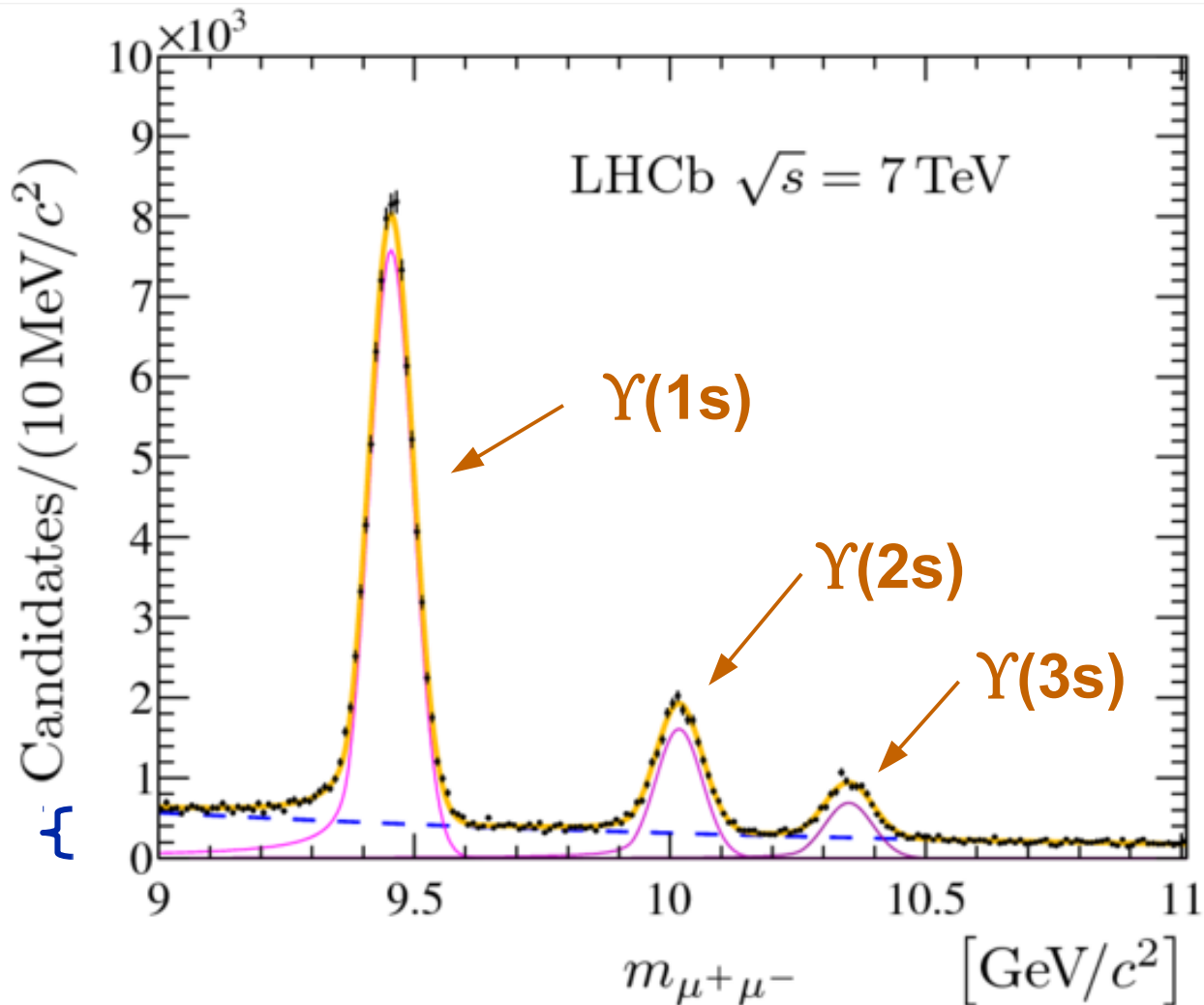
Rekonstruktion von "Ereignissen"



$$M^2 = (E_1 + E_2)^2 - |\vec{p}_1 + \vec{p}_2|^2$$

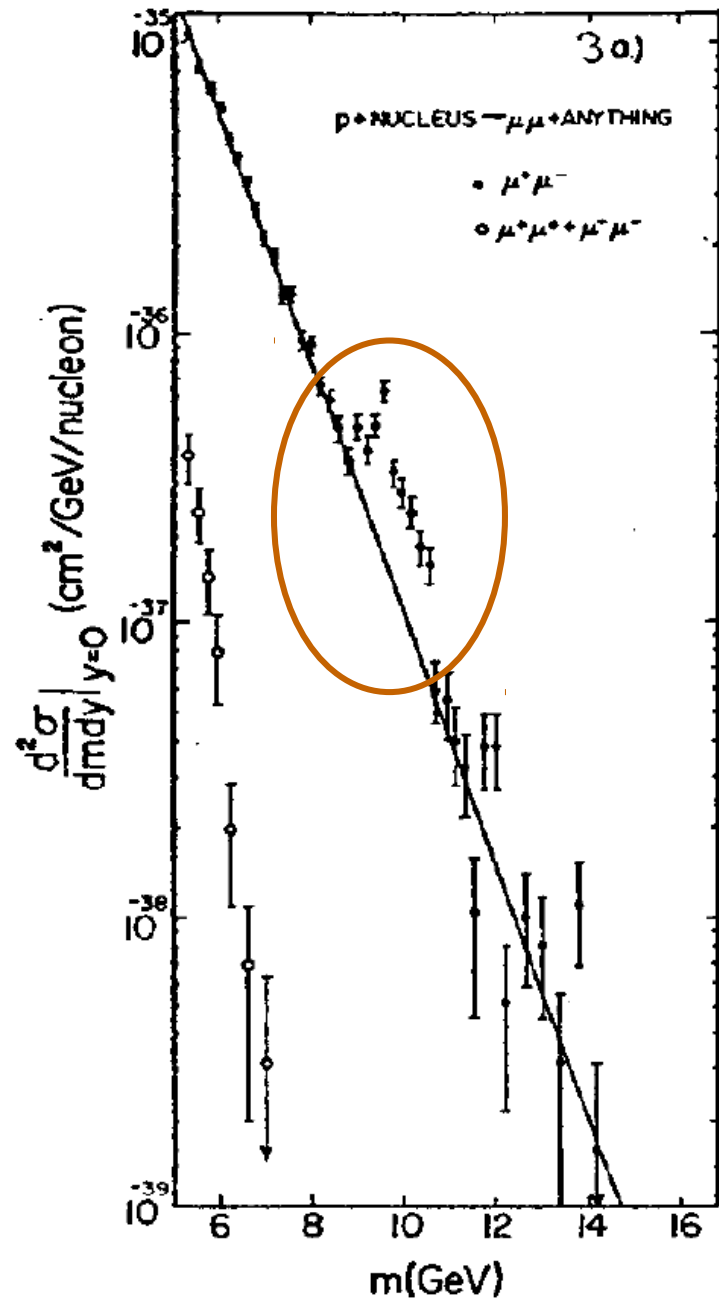
Rekonstruktion von "Ereignissen"

Untergrund:
zufällige
Kombinationen
aus Muon
und Antimuon



Signal:
kurzlebige
Teilchen,
die in ein
Muon
und ein
Antimuon
zerfallen

Entdeckung der Υ -Teilchen 1977



OBSERVATION OF A DIMUON RESONANCE AT 9.5 GeV IN 400 GeV PROTON-NUCLEUS COLLISIONS

S. W. Herb, D. C. Hom, L. M. Lederman,
J. C. Sens, H. D. Snyder, and J. K. Yoh
Columbia University, New York, New York 10027

and

J. A. Appel, B. C. Brown, C. N. Brown
W. R. Innes, K. Ueno, and T. Yamanouchi
Fermi National Accelerator Laboratory, Batavia, Illinois 60510

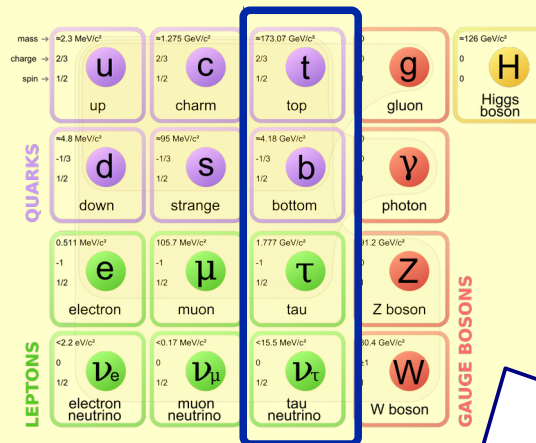
and

A. S. Ito, H. Jöstlein, D. M. Kaplan,
and R. D. Kephart
State University of New York at Stony Brook
Stony Brook, New York 11794

July 1977

Entdeckung der Υ -Teilchen 1977

Erster direkter Beweis für 3. Generation von Quarks

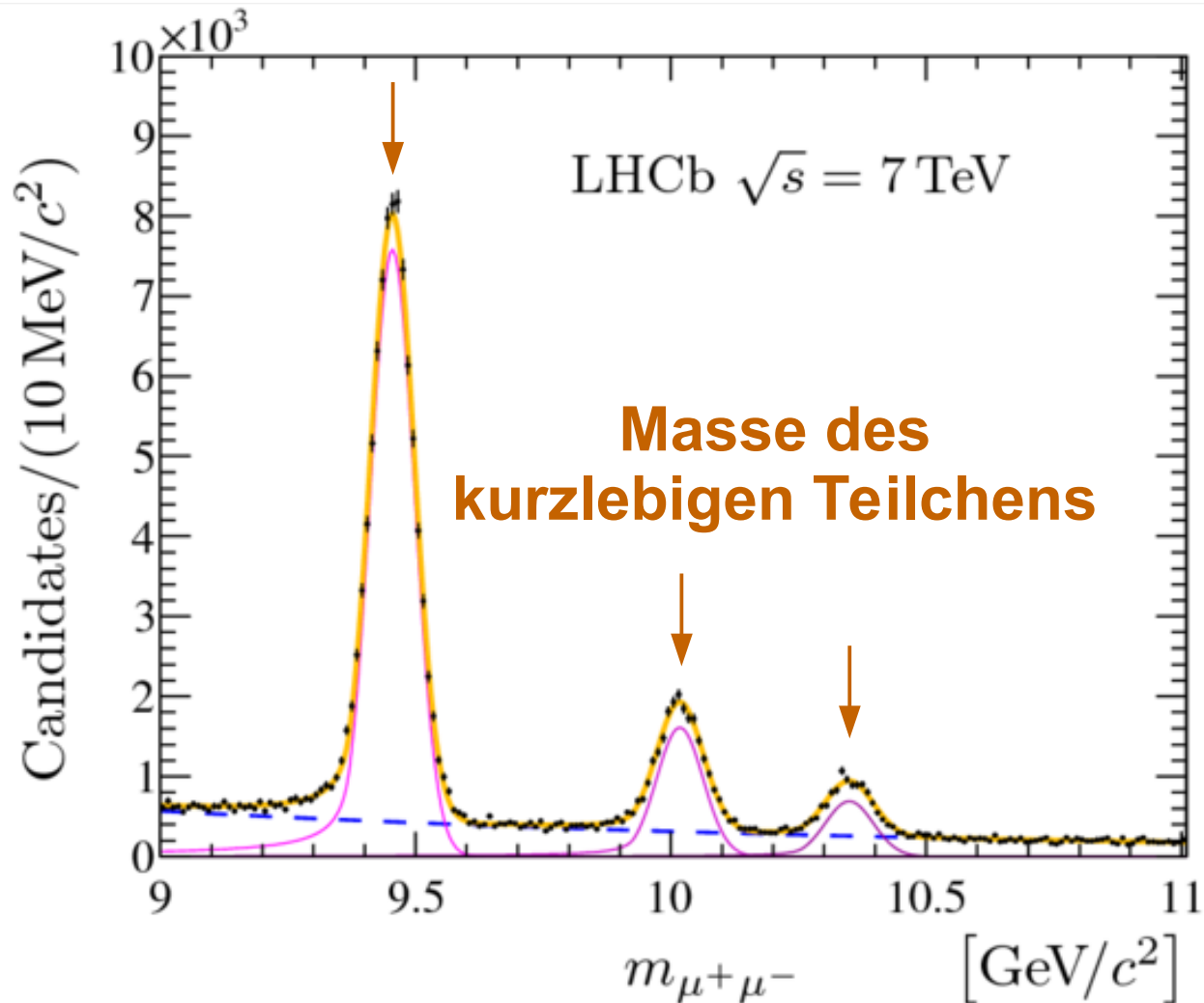




**Yesterday's sensation
is today's calibration channel**

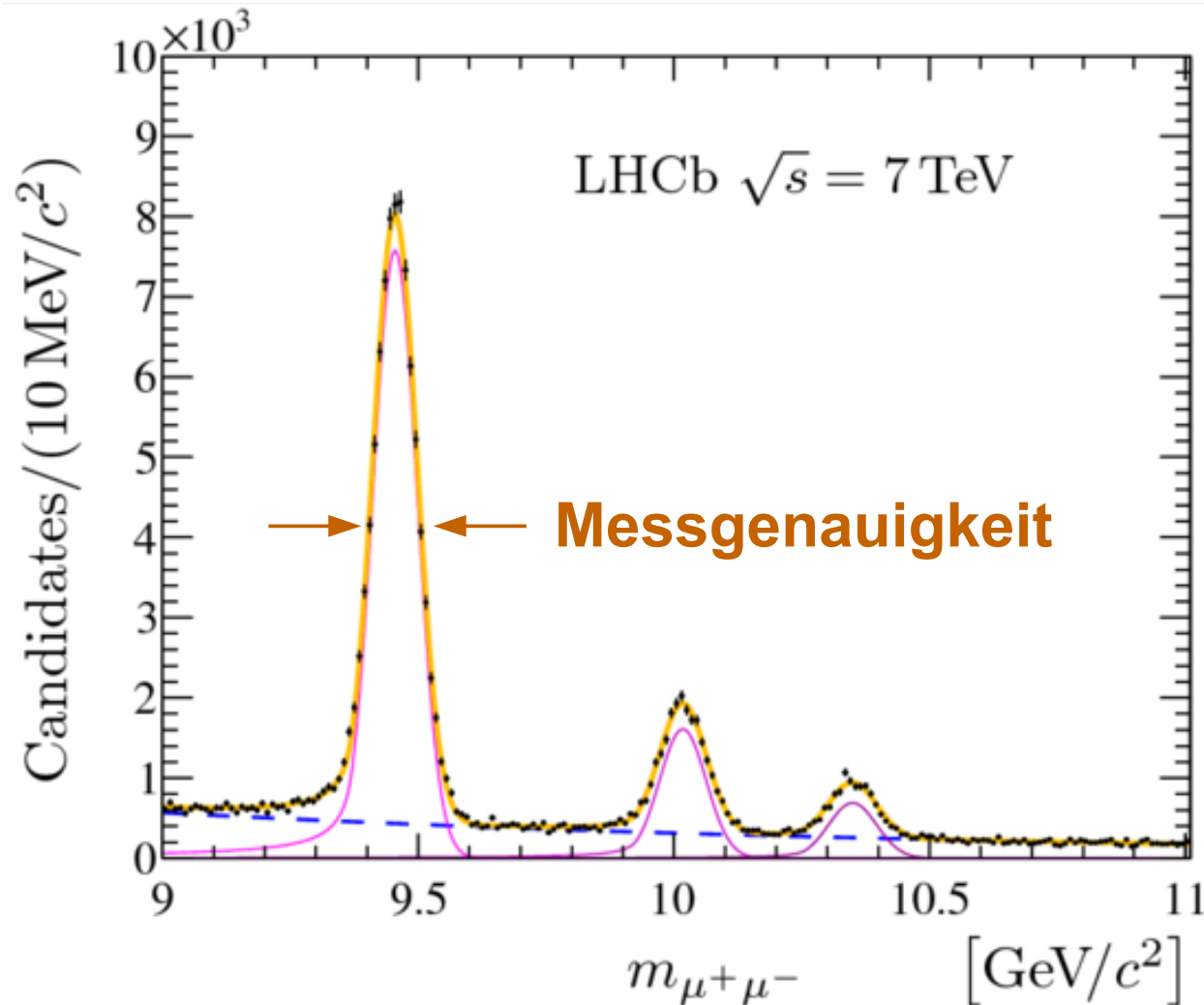
(Richard P. Feynman)

Rekonstruktion von “Ereignissen”



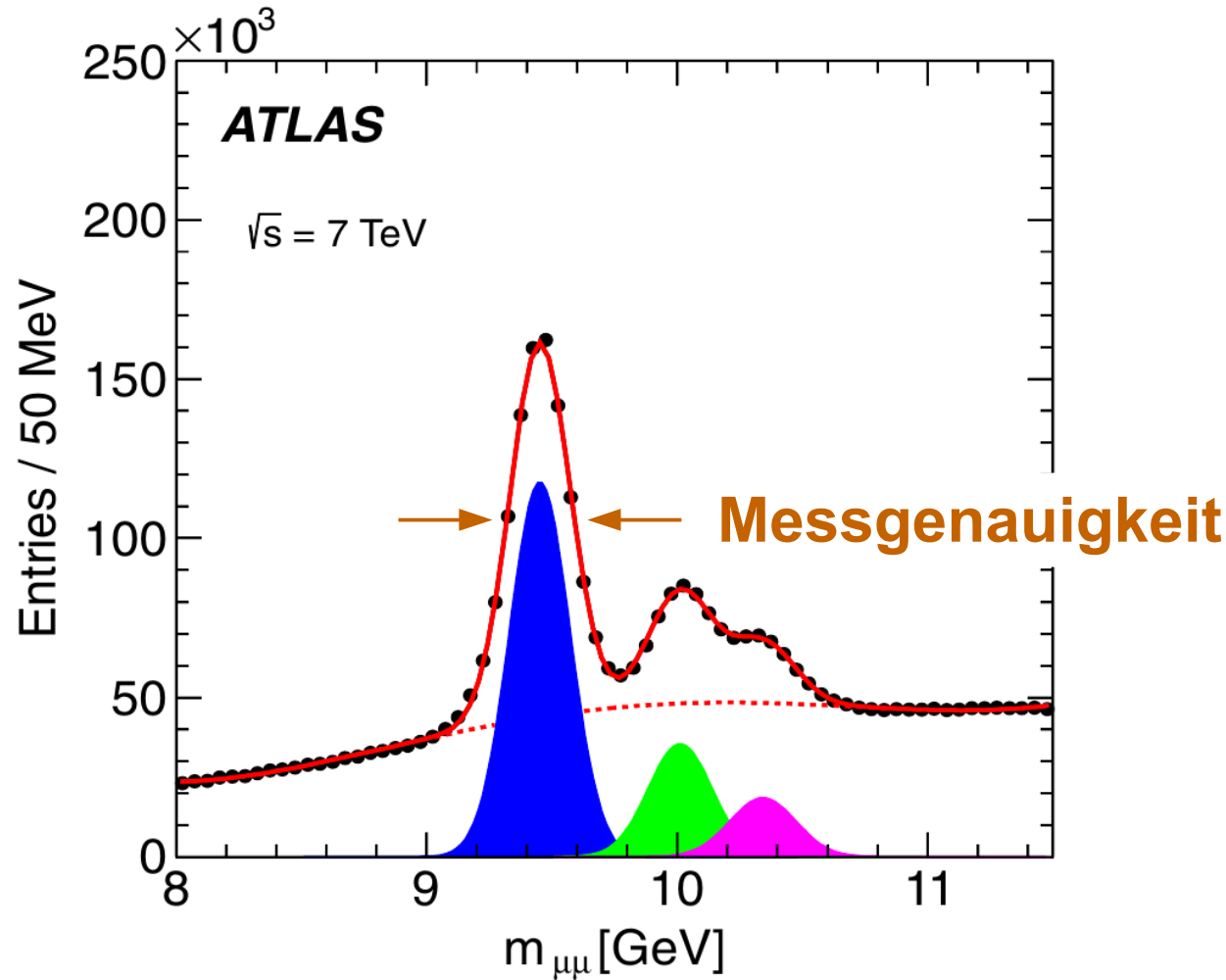
Vgl. Position des Signals mit bekannter Masse des Teilchens
→ kalibriere Impulsmessung

Rekonstruktion von “Ereignissen”



**Breite des Signals durch endliche Präzision der Impulsmessung
→ messe Impulsauflösung des Experiments**

Rekonstruktion von “Ereignissen”



**Breite des Signals durch endliche Präzision der Impulsmessung
→ messe Impulsauflösung des Experiments**

Rekonstruktion von “Ereignissen”

Moderne Teilchenphysik-Experimente haben verschiedene Komponenten, um

→ **die Flugrichtung langlebiger Teilchen zu messen**

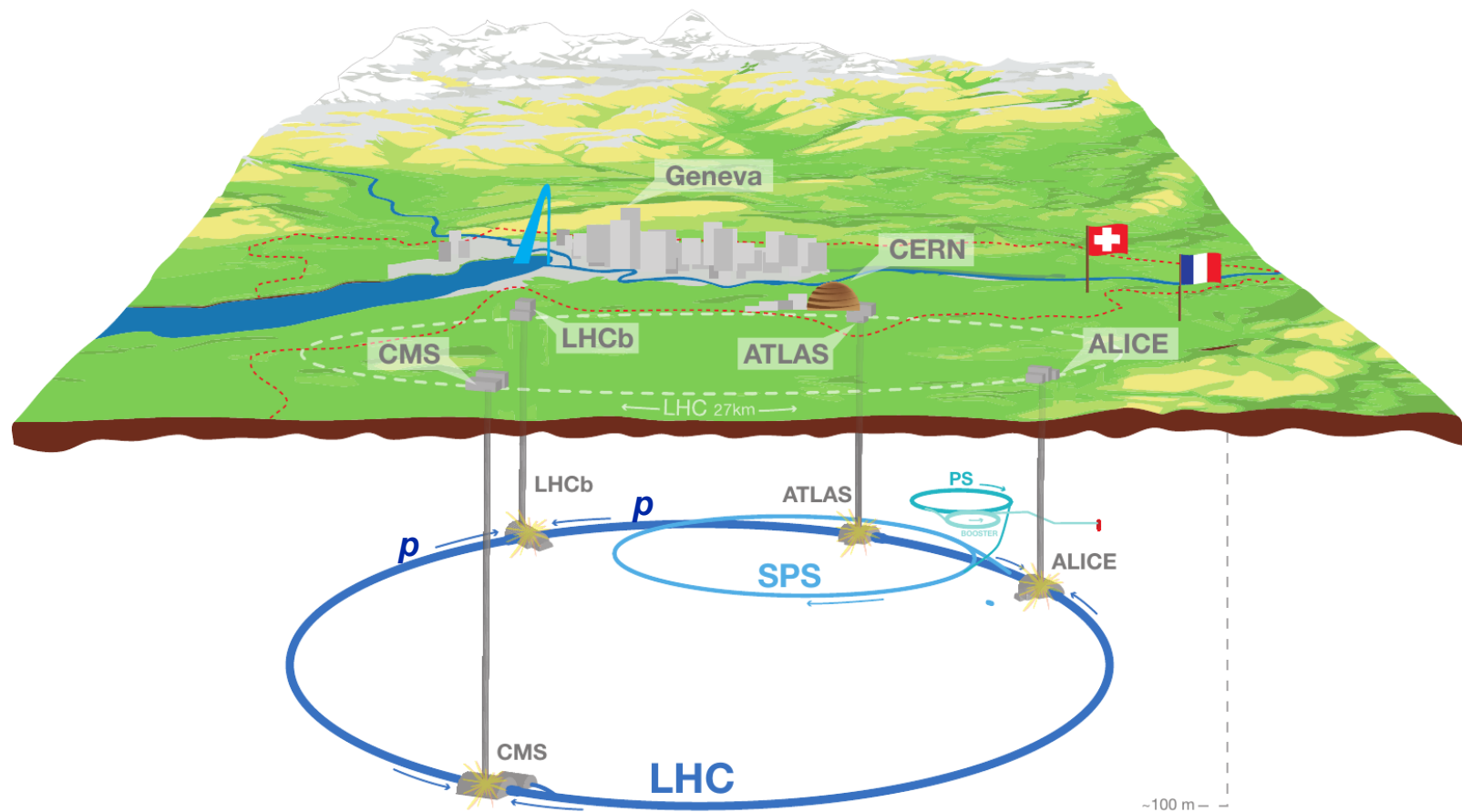
→ **den Absolutbetrag ihres Impulses zu messen**

→ **die Art der Teilchen zu bestimmen**

(um die Masse zu wissen und damit die Energie berechnen zu können)

$$E^2 = m^2 + p^2$$

LHC am CERN



source: <http://cds.cern.ch/record/1708849>

“Large Hadron Collider”: Ringbeschleuniger für Protonen

Zwei Protonenstrahlen: Uhrzeigersinn und Gegenuhrzeigersinn

Vier Kollisionspunkte → Vier Experimente

LHC am CERN

Protonen sind gebündelt

2804 Bündel pro Strahl

Ungefähr 10^{11} Protonen pro Bündel

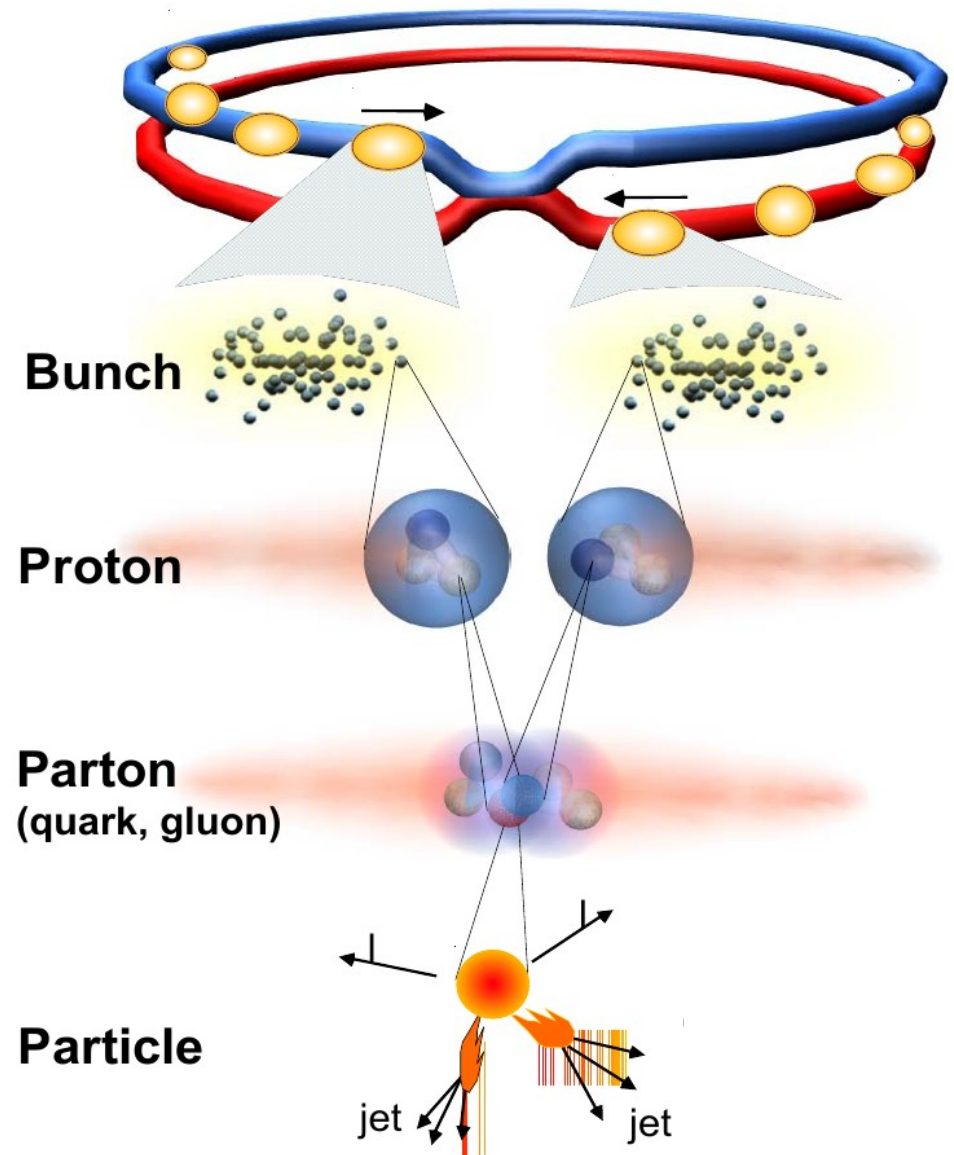
Bündel kollidieren alle 25 ns

→ 40 Million Mal pro Sekunde

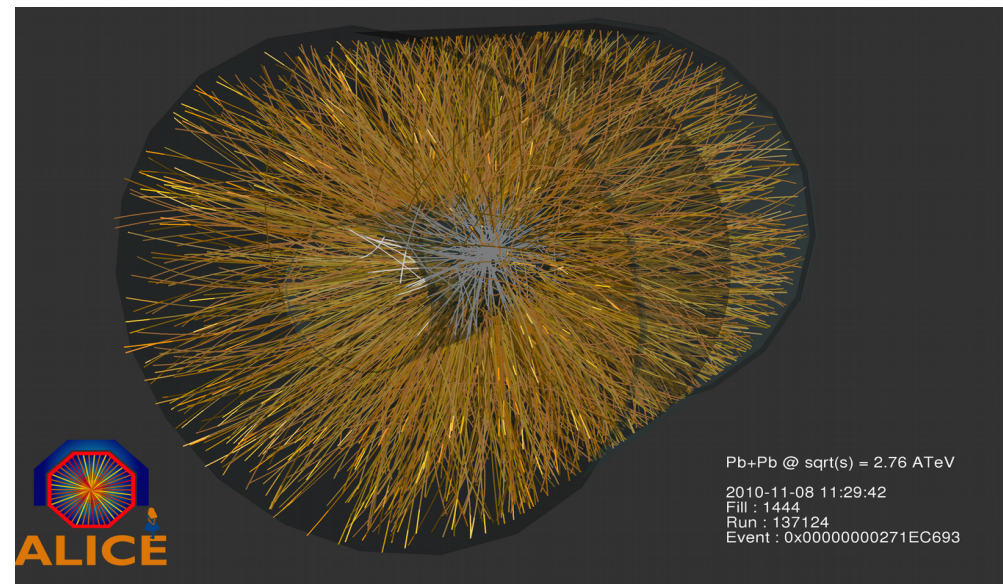
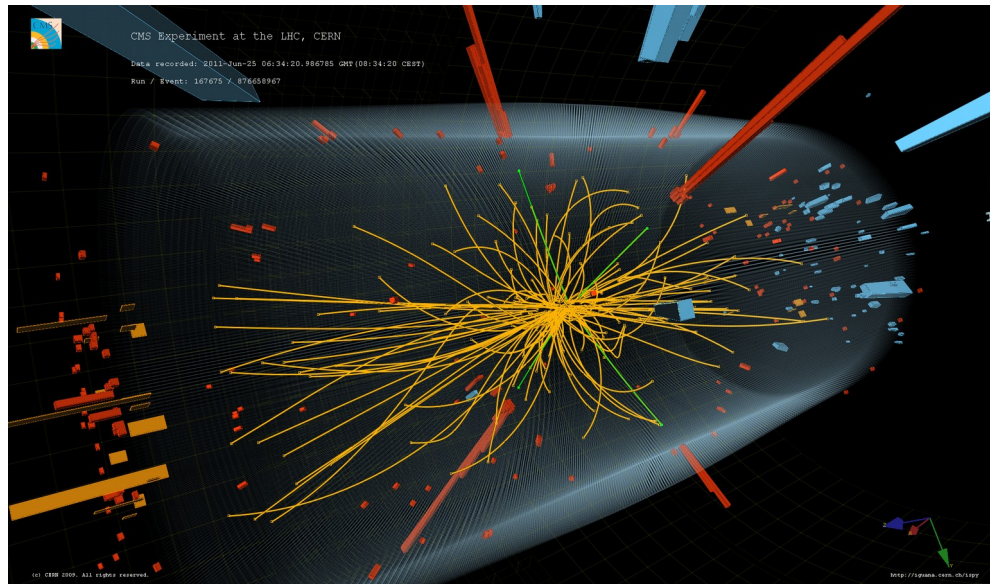
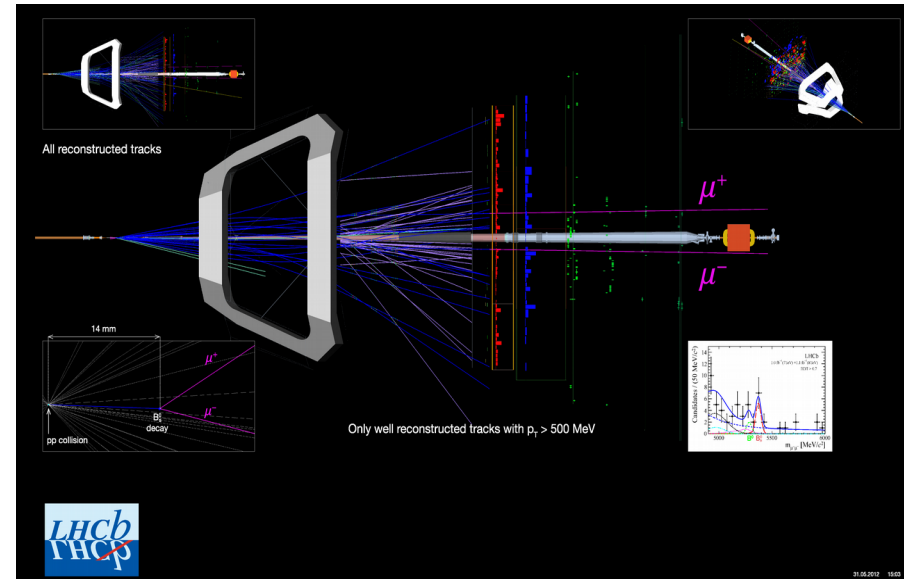
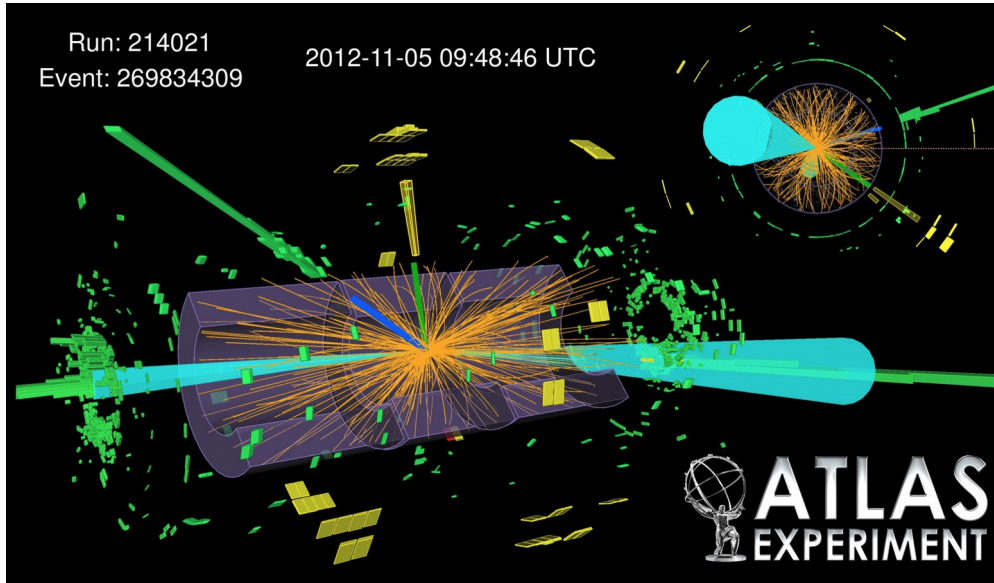
→ im Mittel ~ 35 Proton-Proton
Wechselwirkungen pro Kollision

**Protonen kollidieren mit einer
Energie von 13 TeV**

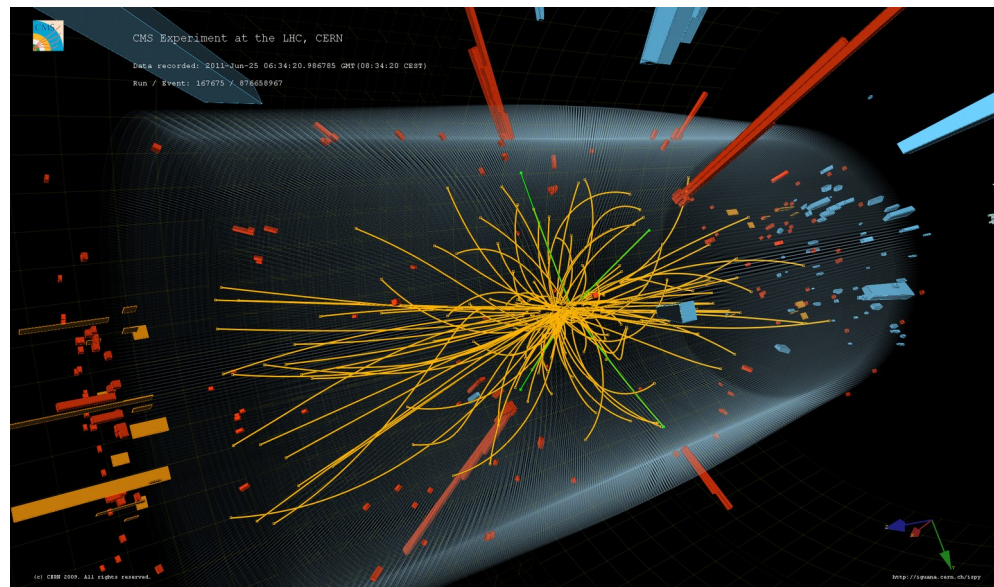
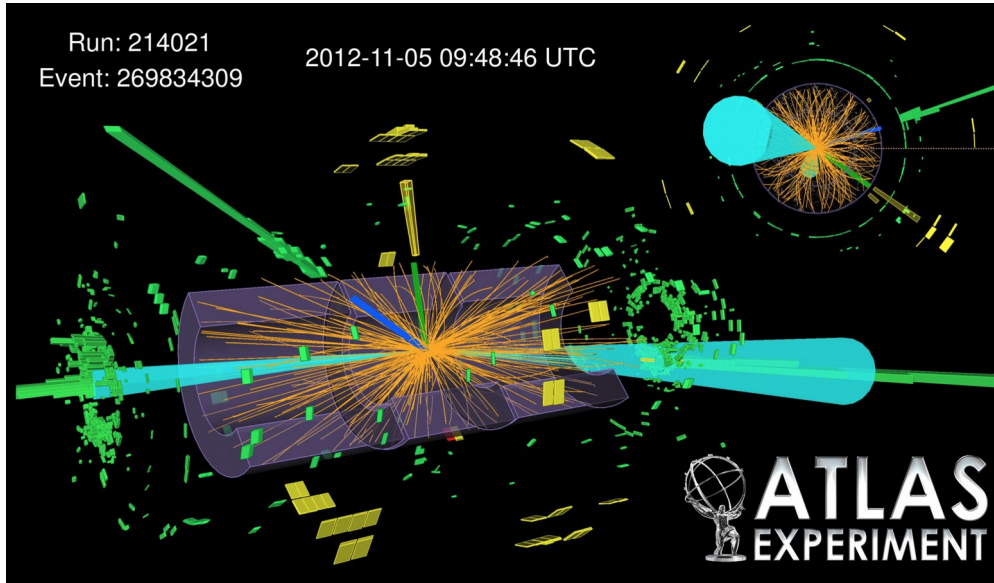
→ 13'000 Mal die Protonenmasse



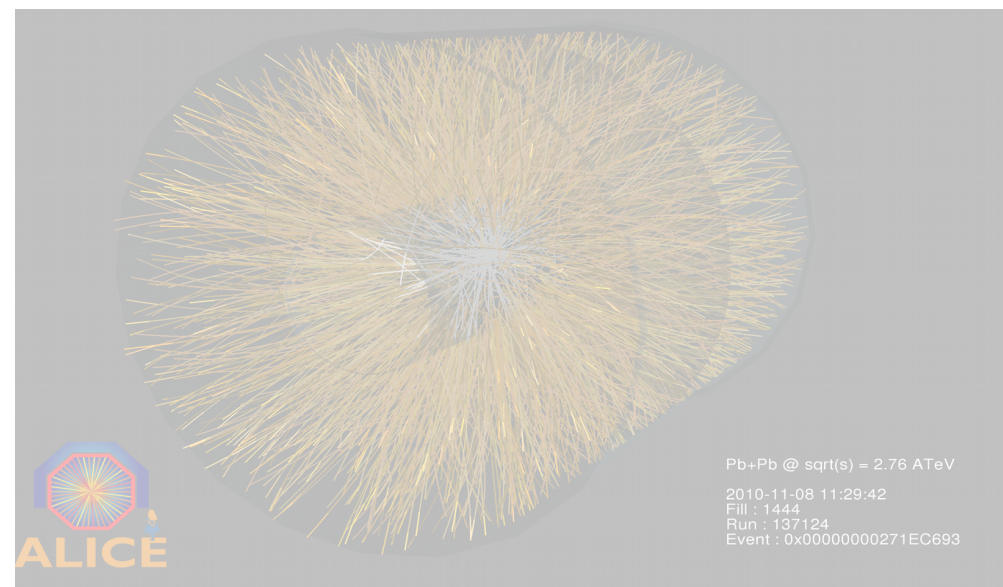
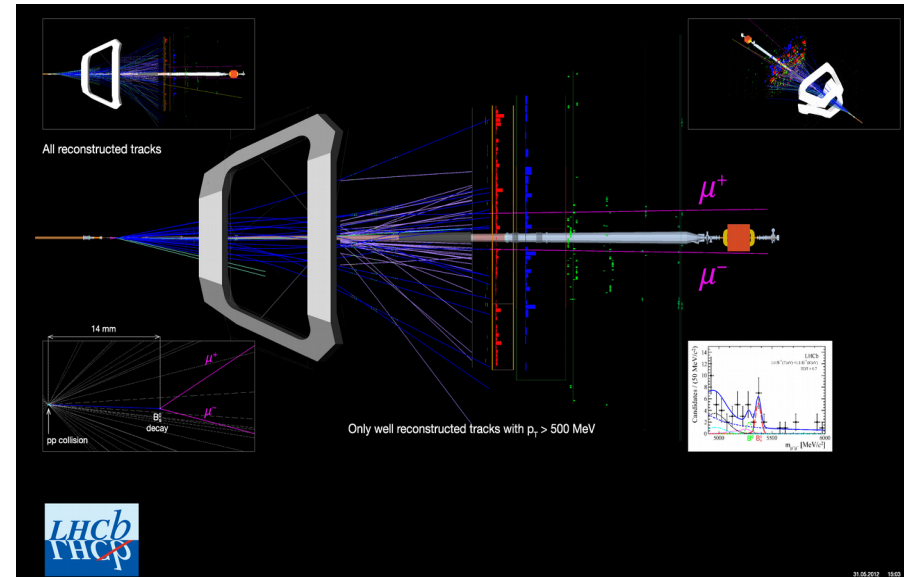
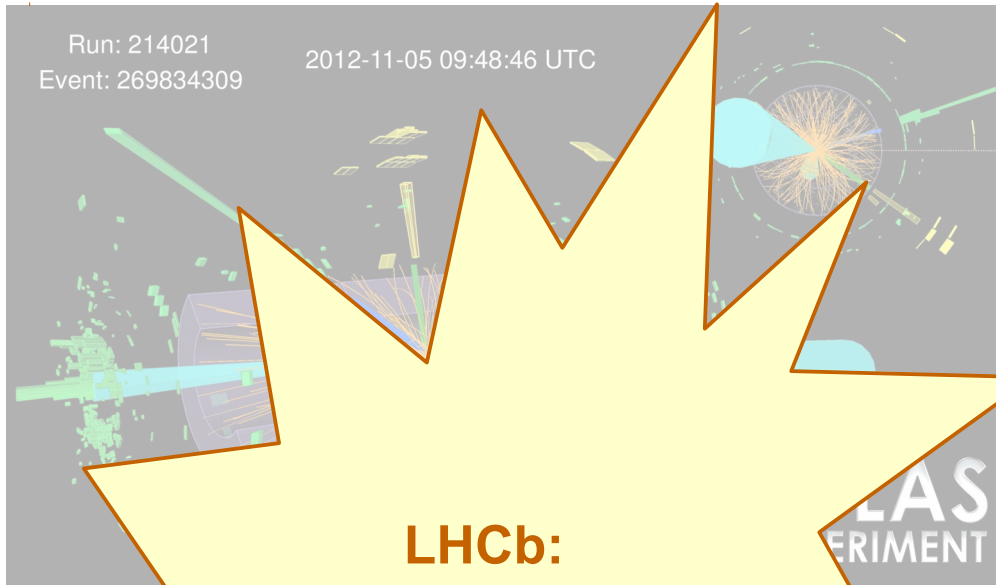
LHC Experimente



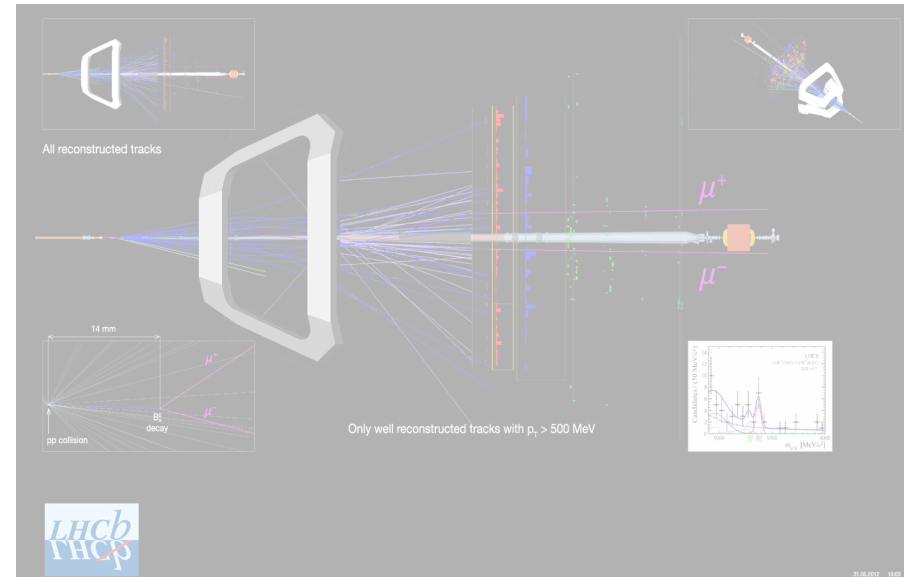
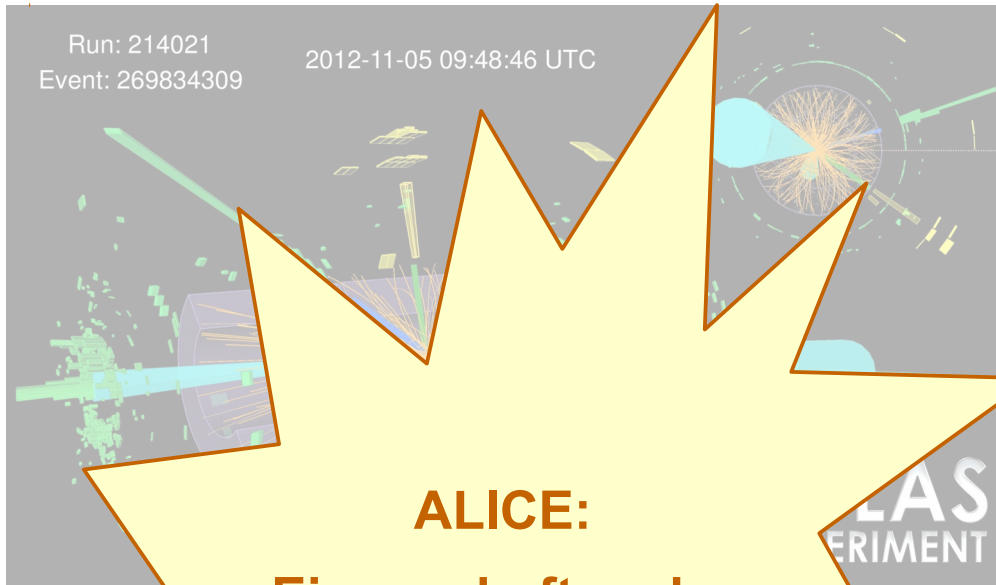
LHC Experimente



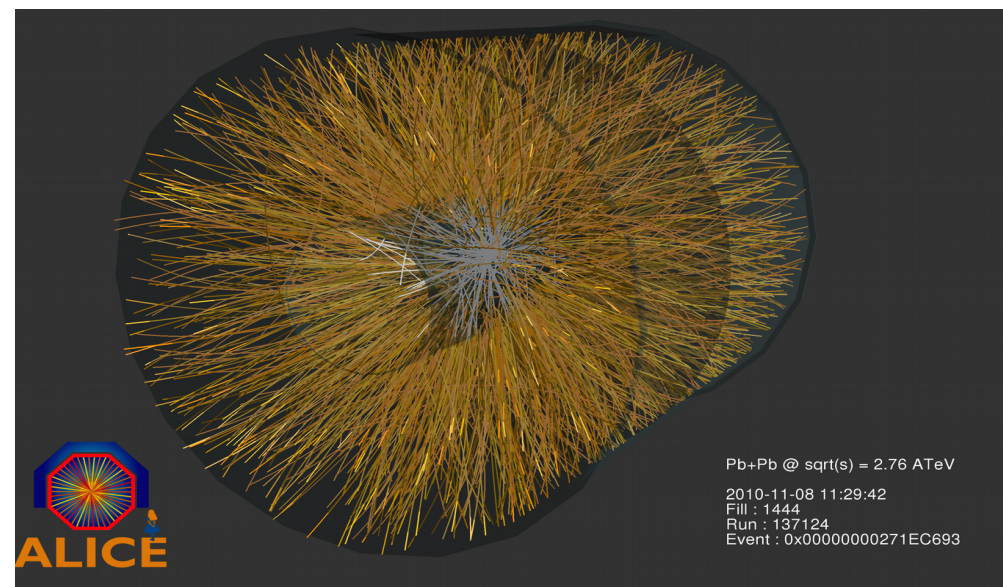
LHC Experimente



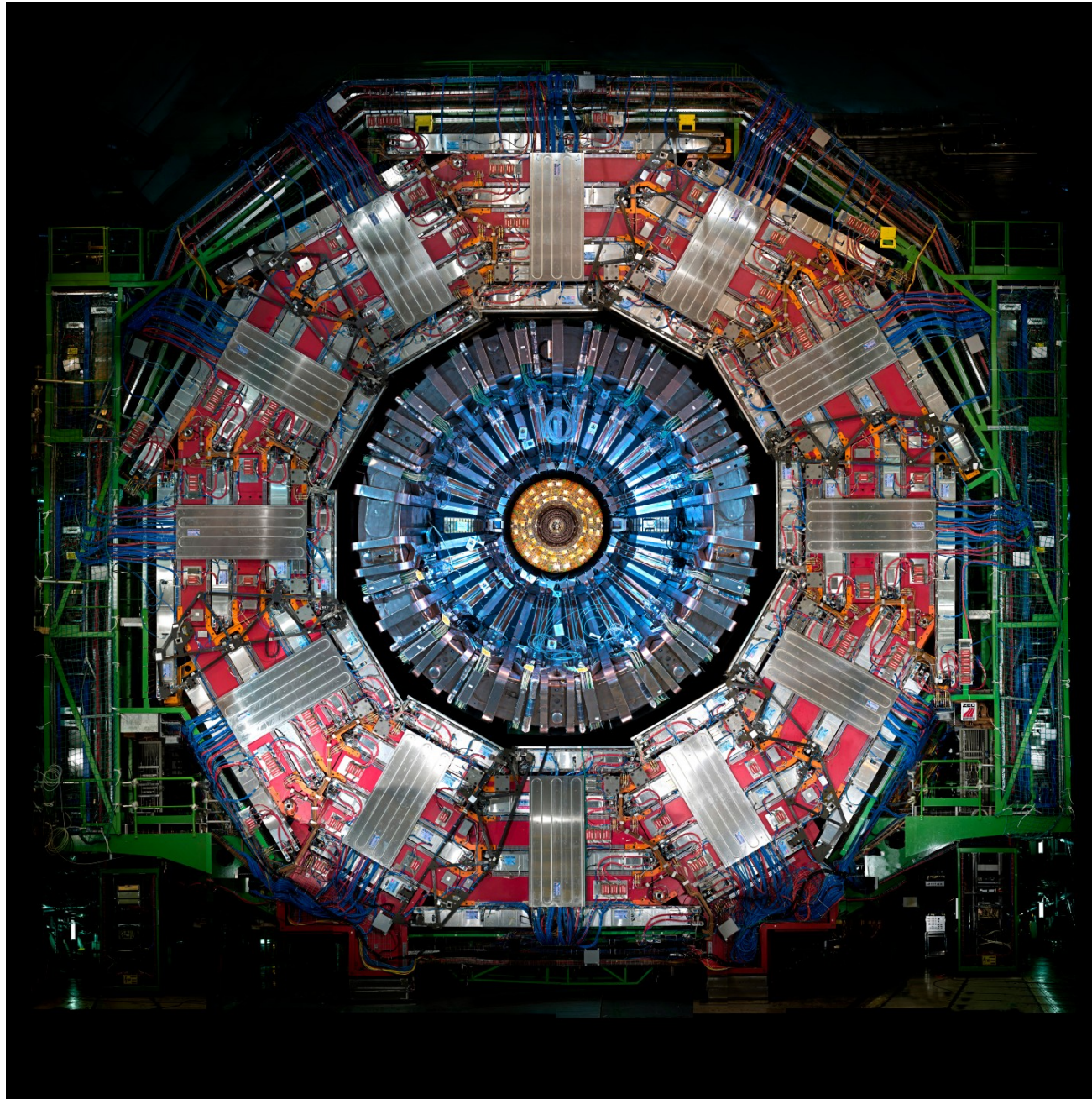
LHC Experimente



**ALICE:
Eigenschaften der
starken
Wechselwirkung**

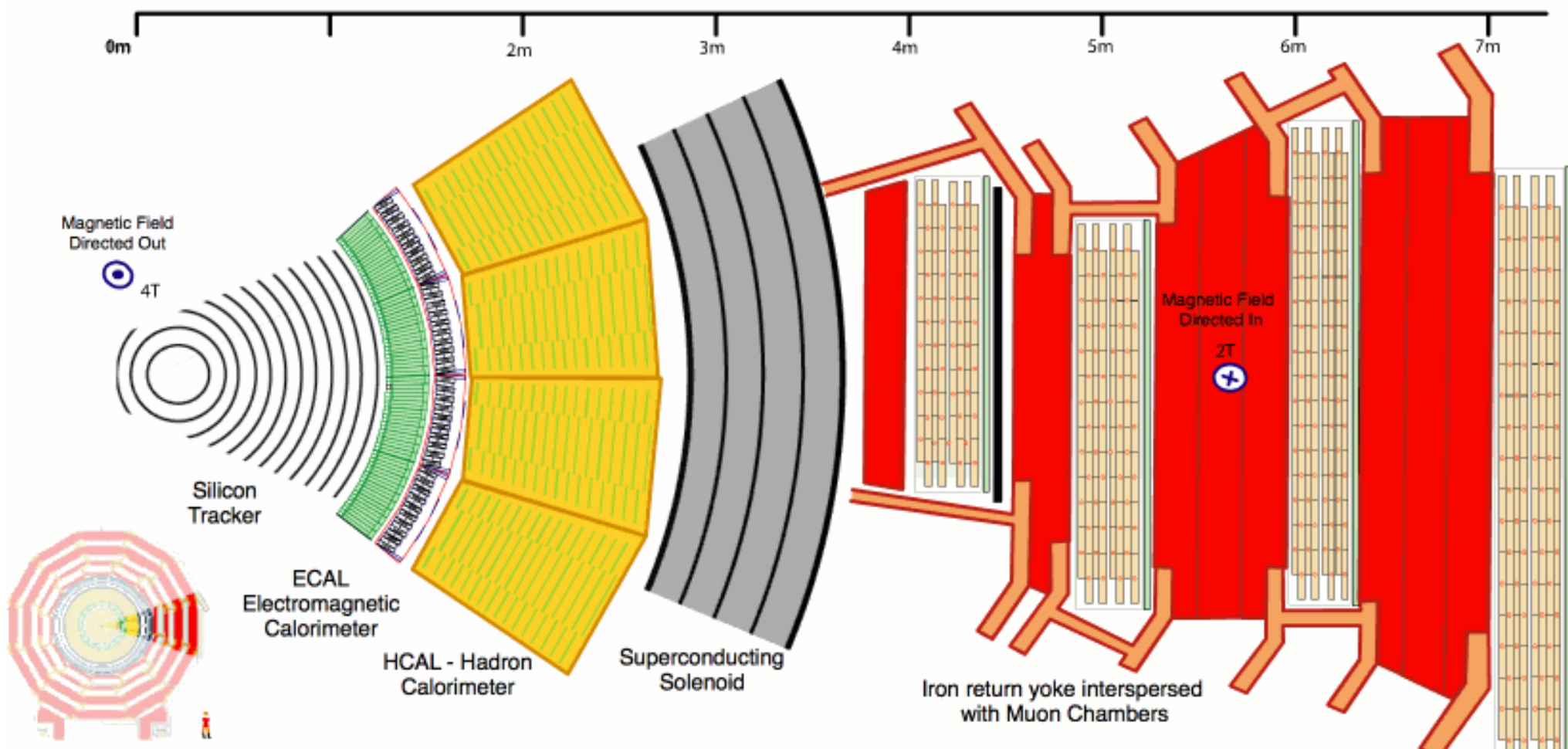


Querschnitt durch das CMS Experiment



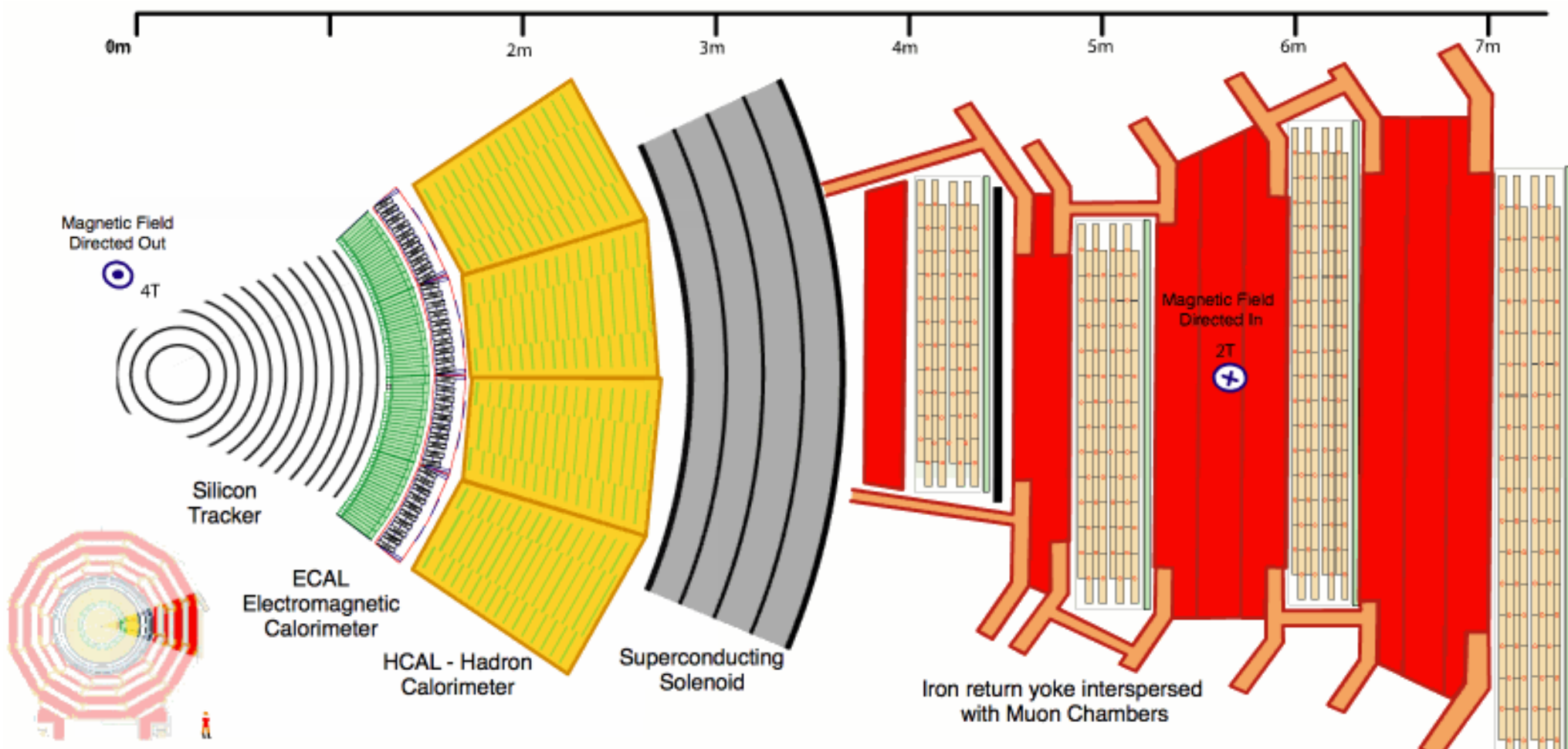
source: <<http://cds.cern.ch/record/1474902>>

Querschnitt durch das CMS Experiment



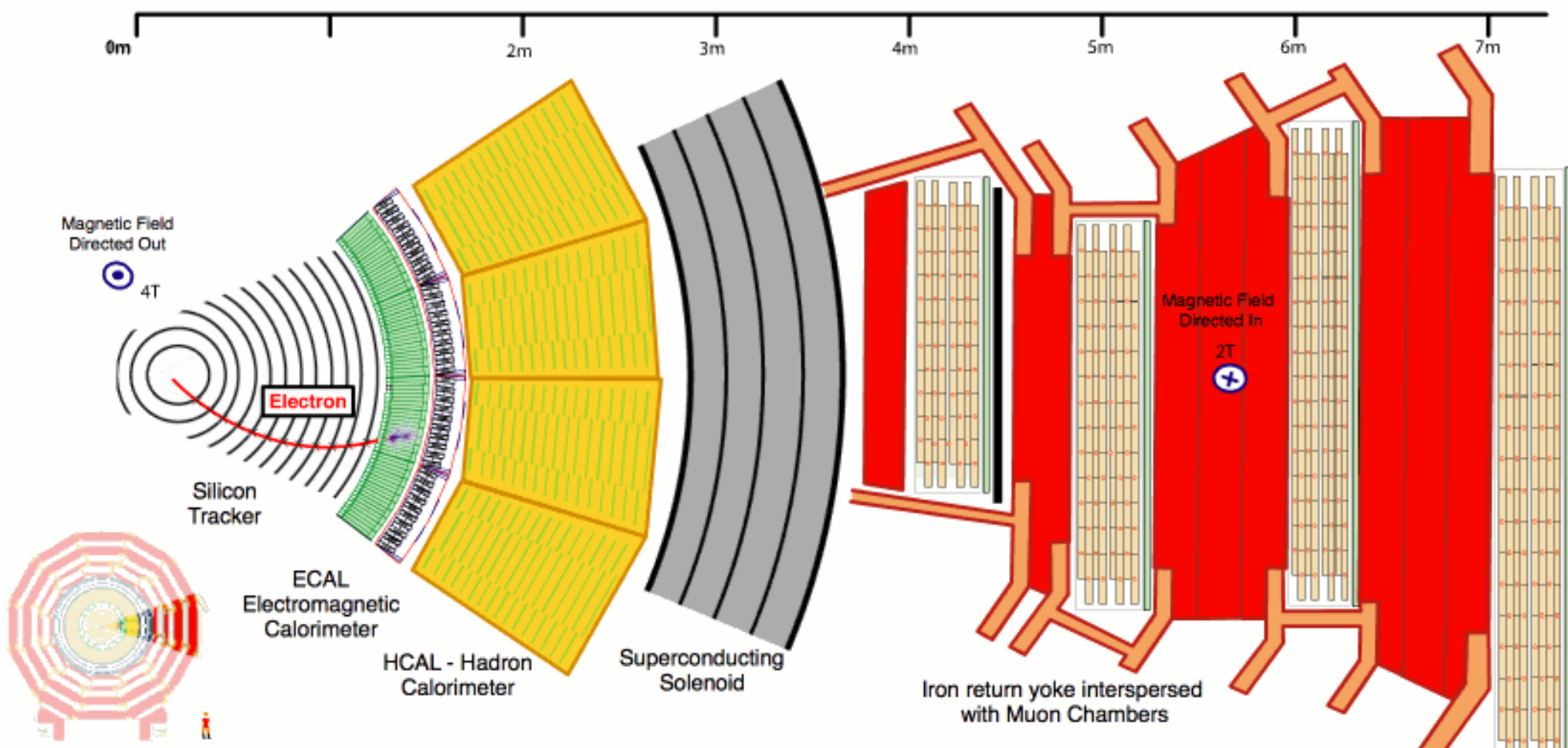
**Verschiedene Detektorkomponenten
zur Messung von Flugbahn, Impuls, Energie**

Querschnitt durch das CMS Experiment



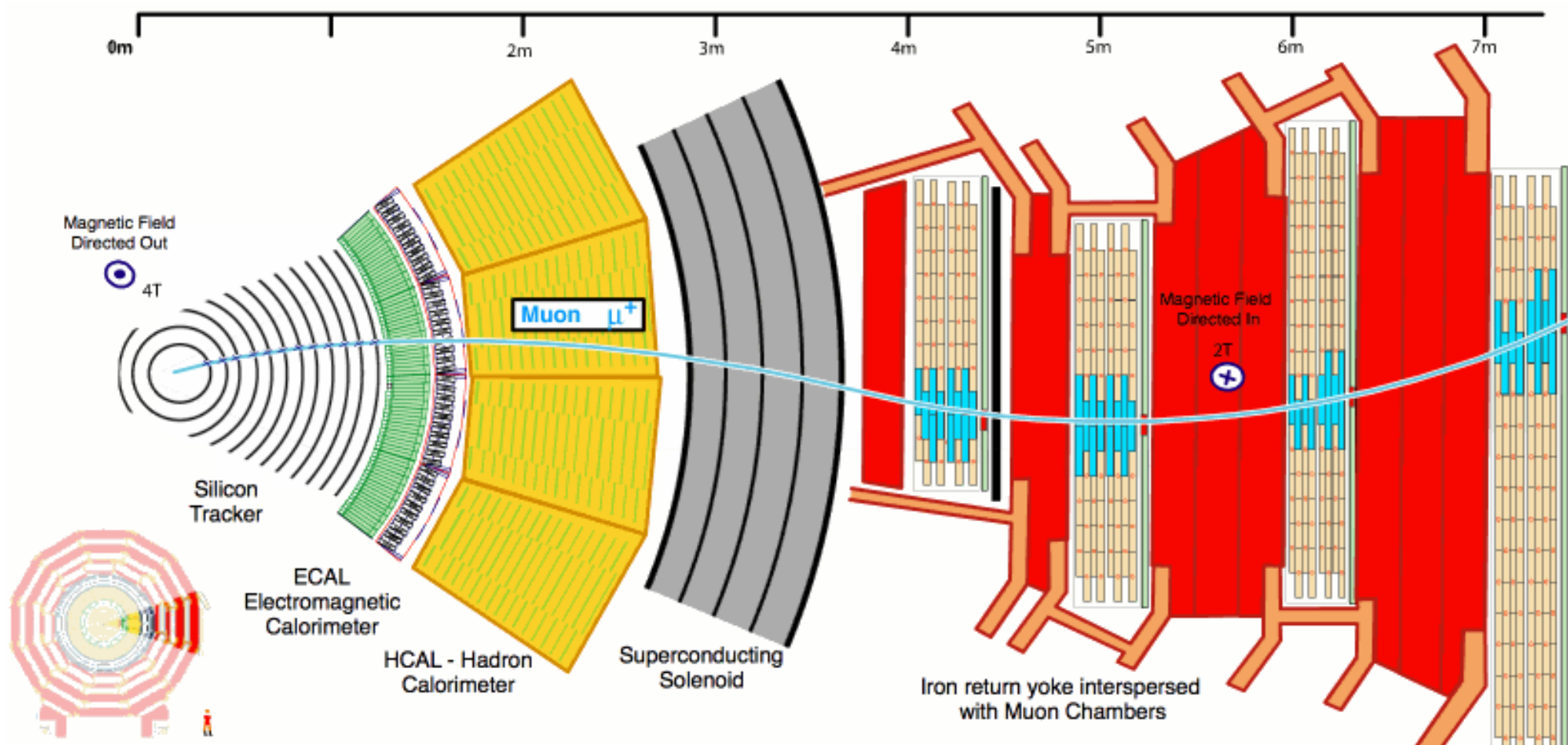
**Jede Teilchenart erzeugt eine für sie typische
Signatur im Detektor**

Querschnitt durch das CMS Experiment



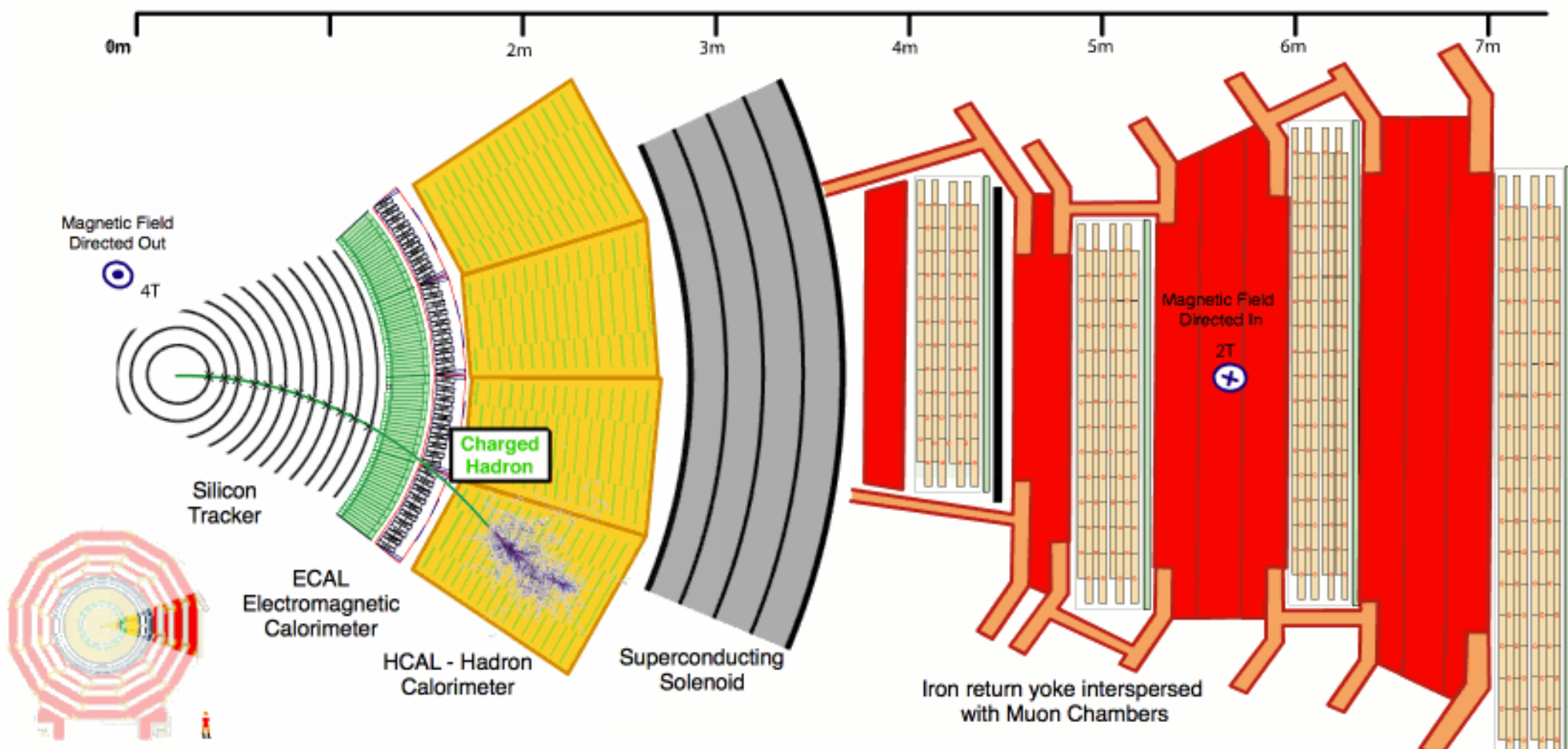
Elektron

Querschnitt durch das CMS Experiment



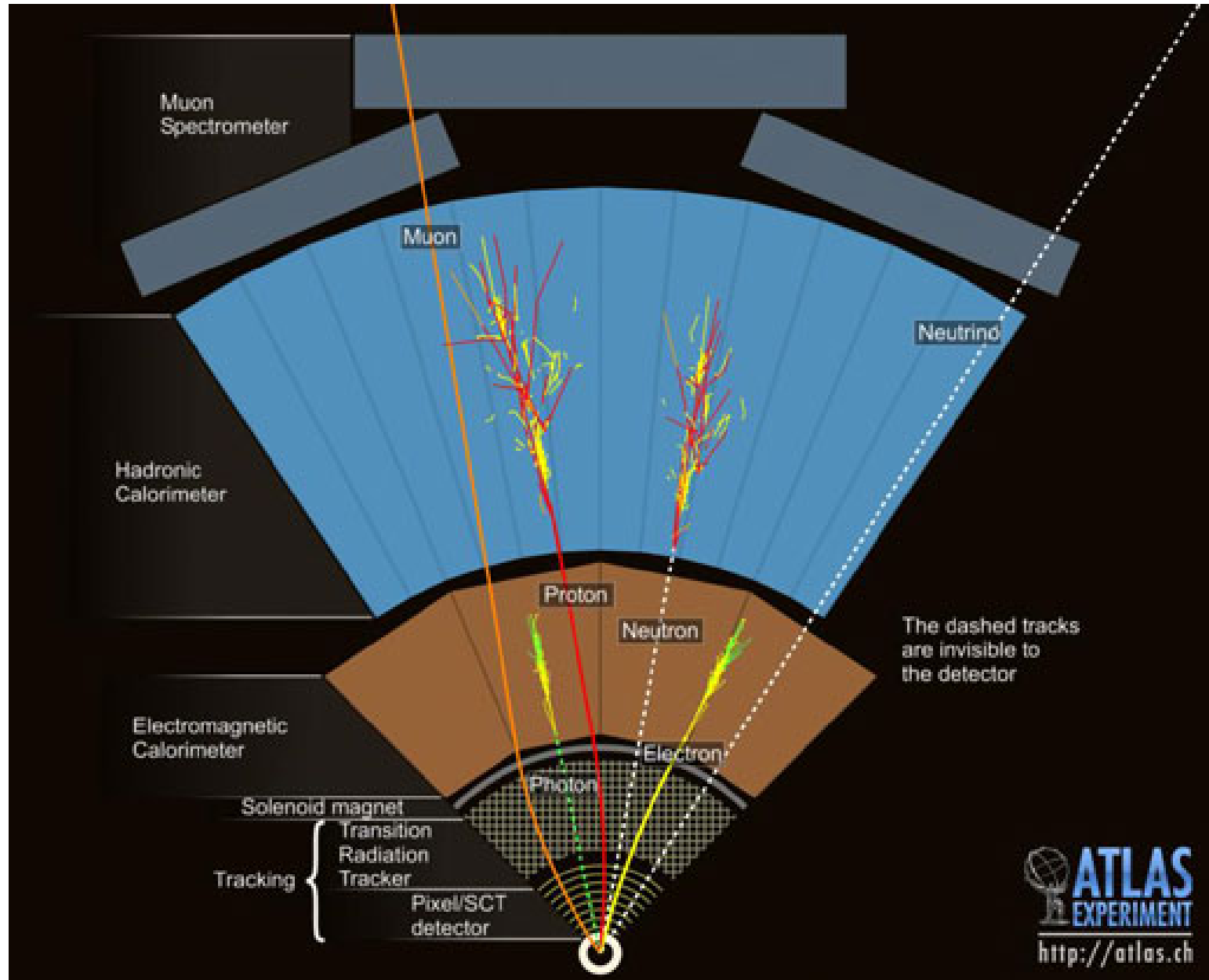
Muon

Querschnitt durch das CMS Experiment

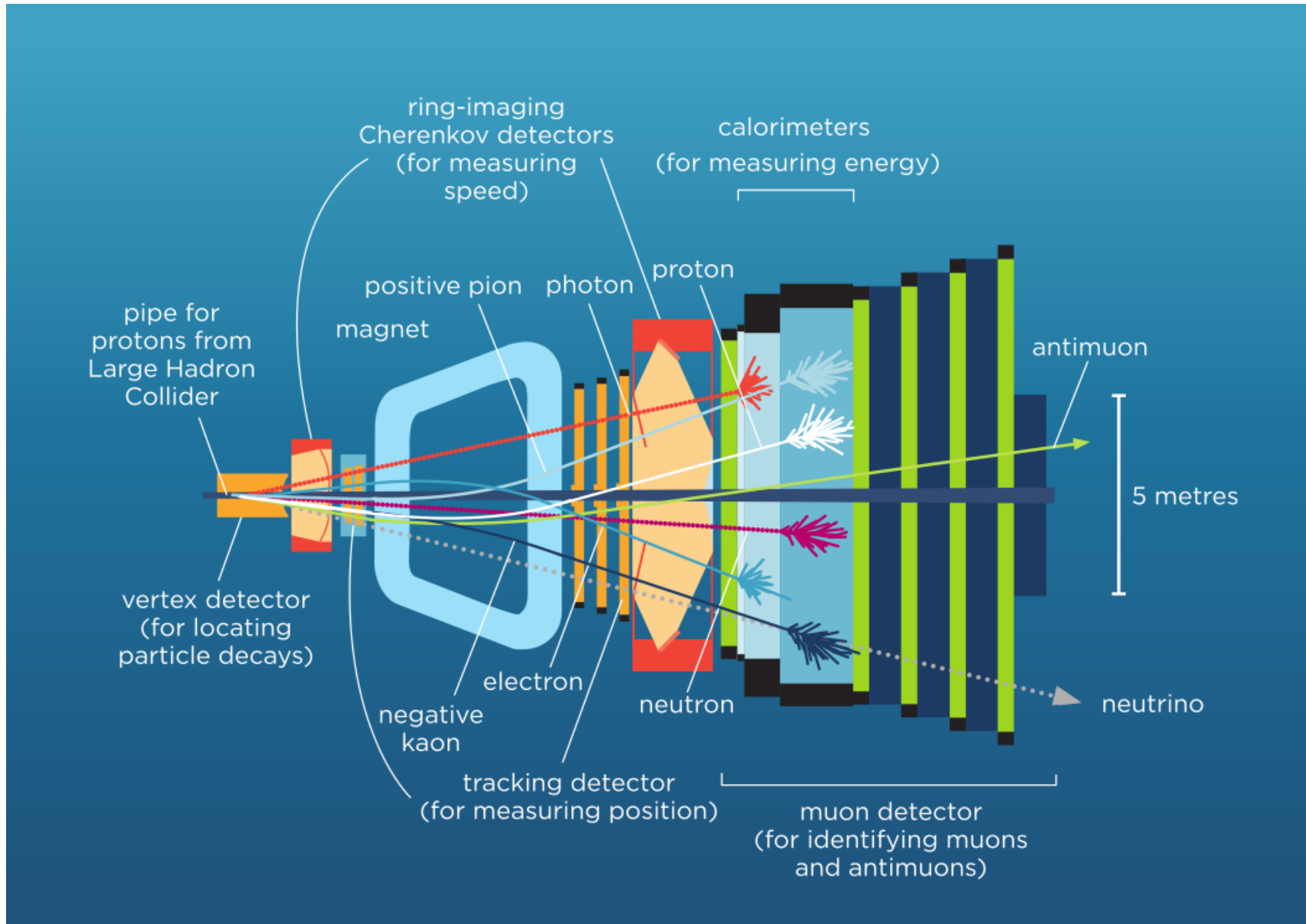


Proton , Pion , Kaon

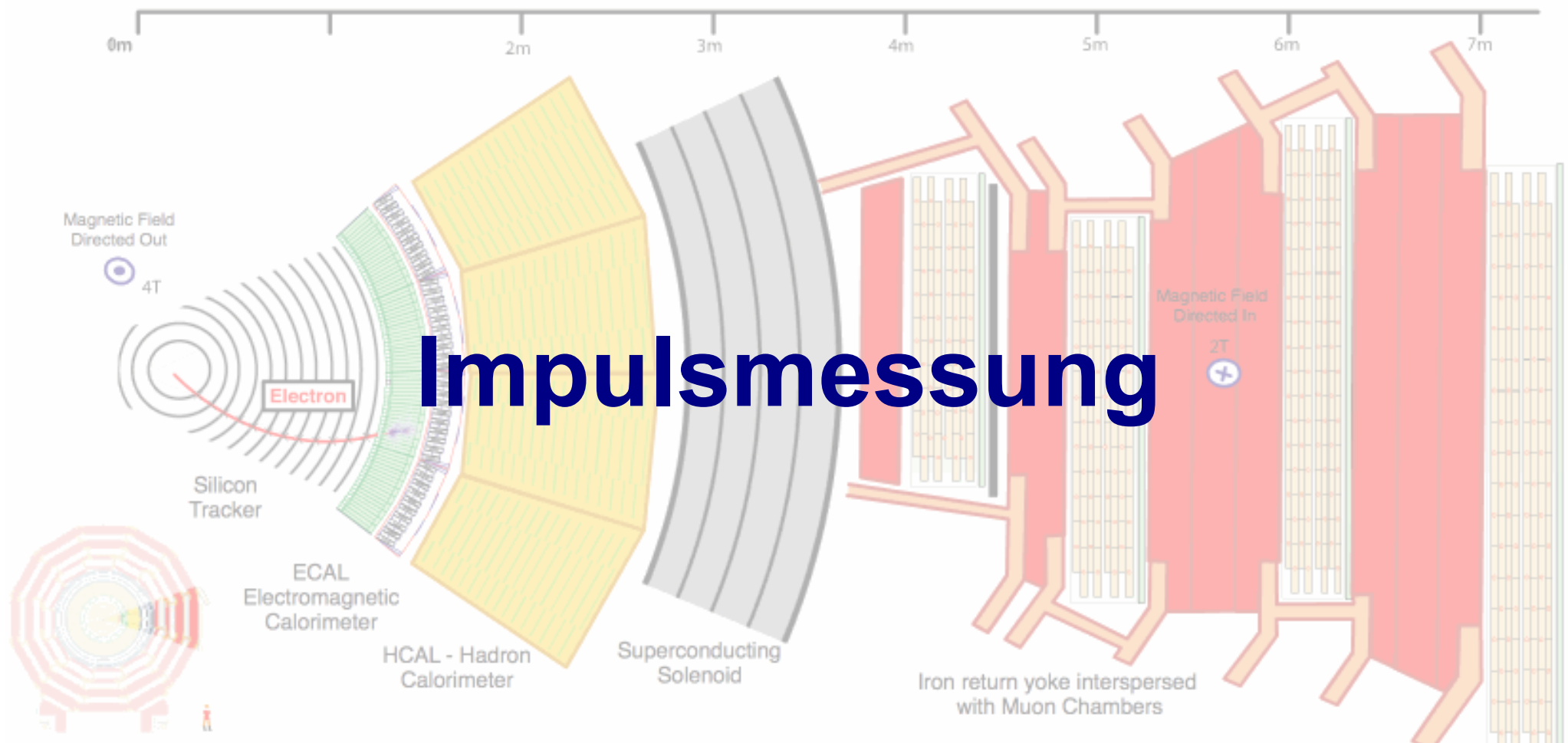
Querschnitt durch das ATLAS Experiment



Querschnitt durch das LHCb Experiment



Impulsmessung



Impulsmessung

Bewegte Ladung in einem Magnetfeld:

The diagram shows the Lorentz force equation $\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$ enclosed in a yellow rounded rectangle. Four arrows point from labels below to the terms in the equation: a red arrow from 'Kraft' to \vec{F} , a green arrow from 'Ladung' to q , a green arrow from 'Geschwindigkeit' to \vec{v} , and a blue arrow from 'Magnetfeld' to \vec{B} .

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Kraft Ladung Geschwindigkeit Magnetfeld

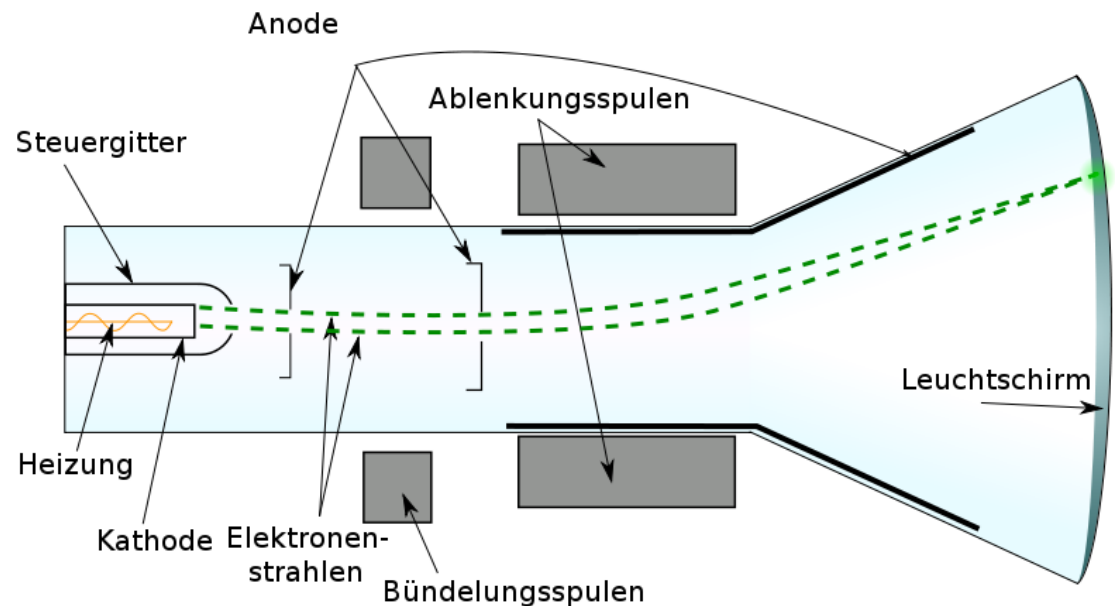
Impulsmessung

Bewegte Ladung in einem Magnetfeld:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Kraft (red arrow pointing to \vec{F})
Ladung (green arrow pointing to q)
Geschwindigkeit (green arrow pointing to \vec{v})
Magnetfeld (blue arrow pointing to \vec{B})

z.B. Prinzip der
Kathodenstrahlröhre



Impulsmessung

Bewegte Ladung in einem Magnetfeld:

$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Kraft (red arrow pointing to \vec{F}) **Ladung** (green arrow pointing to q) **Geschwindigkeit** (green arrow pointing to \vec{v}) **Magnetfeld** (blue arrow pointing to \vec{B})

z.B. Prinzip der
Kathodenstrahlröhre

→ Fernseher und
Computermonitore
des 20. Jahrhunderts



Impulsmessung

Bewegte Ladung in einem Magnetfeld:

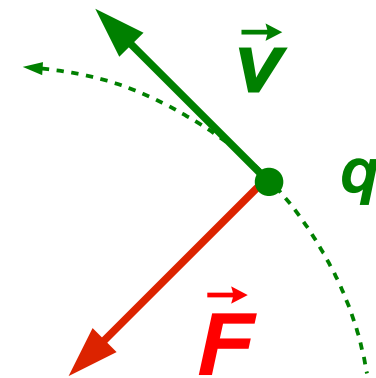
$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Kraft (red arrow pointing to \vec{F}) **Ladung** (green arrow pointing to q) **Geschwindigkeit** (green arrow pointing to \vec{v}) **Magnetfeld** (blue arrow pointing to \vec{B})

Magnetfeld, **Geschwindigkeit**
und **Kraft** haben eine Richtung

Richtung der **Kraft** steht senkrecht
auf der **Bewegungsrichtung**

→ zwingt Teilchen auf Kreisbahn



Impulsmessung

Bewegte Ladung in einem Magnetfeld:

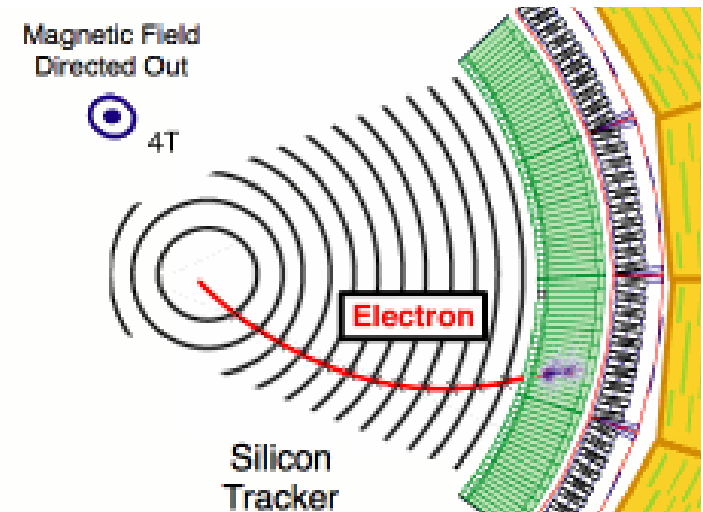
$$\vec{F} = q \cdot \vec{v} \times \vec{B}$$

Kraft (red arrow pointing to \vec{F})
Ladung (green arrow pointing to q)
Geschwindigkeit (green arrow pointing to \vec{v})
Magnetfeld (blue arrow pointing to \vec{B})

Magnetfeld, **Geschwindigkeit**
und **Kraft** haben eine Richtung

Richtung der **Kraft** steht senkrecht
auf der **Bewegungsrichtung**

→ zwingt Teilchen auf Kreisbahn



Impulsmessung

Einfache Rechnung zeigt, dass

$$p = q \cdot B \cdot r$$

Impuls des Teilchens

Radius der Kreisbahn

Impulsmessung

Einfache Rechnung zeigt, dass

$$p = q \cdot B \cdot r$$

- Lege Magnetfeld an
- Messe den Krümmungsradius der Teilchenbahn
- Berechne den Impuls

Impulsmessung

Einfache Rechnung zeigt, dass

$$p = q \cdot B \cdot r$$

→ Lege Magnetfeld an

→ Messe den Krümmungsradius der Teilchenbahn

→ Berechne den Impuls

Aber wie messen wir
die Bahn eines Teilchens,
das zu klein ist als dass
wir es sehen könnten?

Impulsmessung

Einfache Rechnung zeigt, dass

$$p = q \cdot B \cdot r$$

- Lege Magnetfeld an
- Messe den Krümmungsradius der Teilchenbahn
- Berechne den Impuls

Aber wie messen wir die Bahn eines Teilchens, das zu klein ist als dass wir es sehen könnten?



Nebelkammer

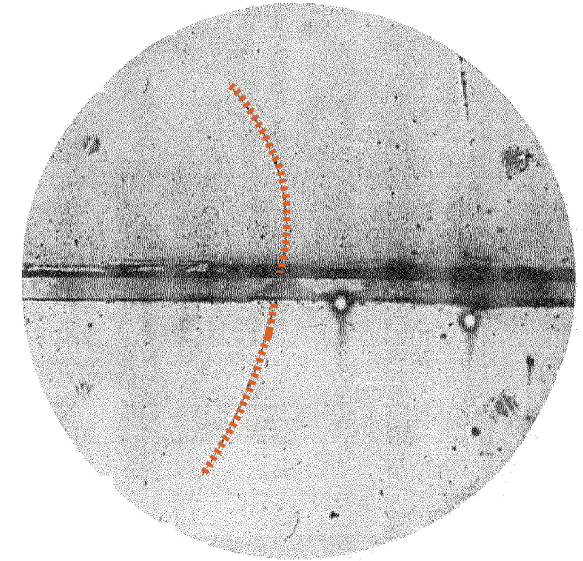
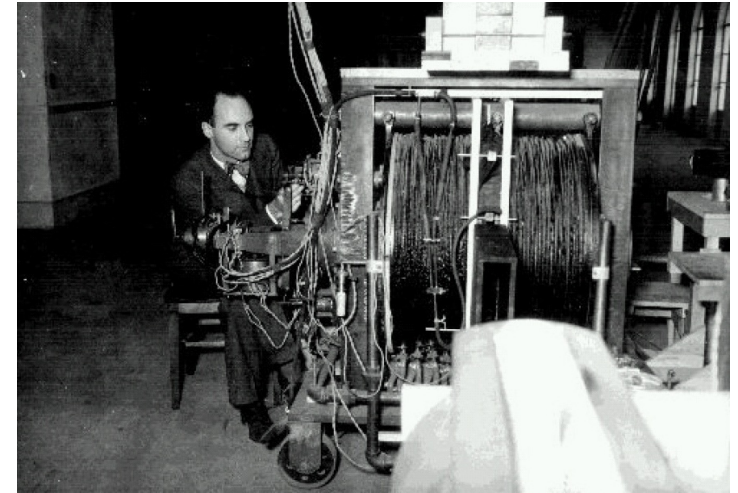
Volumen mit übersättigtem Dampf

**Geladenes Teilchen wechselwirkt
mit Atomen in dem Gas**

→ **Kondensationskerne**

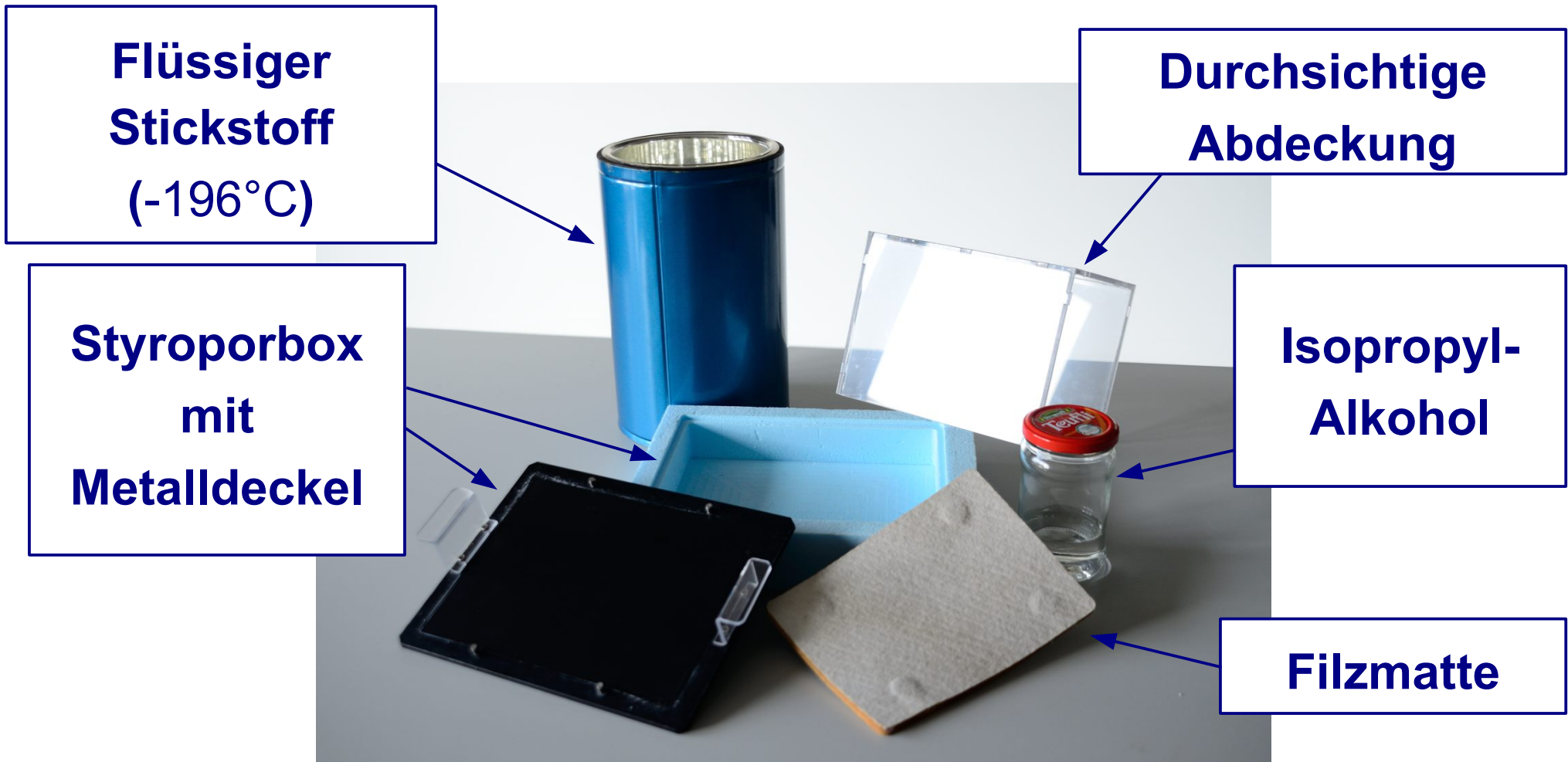
→ **Entstehung von Tröpfchen
entlang der Teilchenspur**

**Mache ein Foto,
nehme ein Lineal
und vermesse die Spur**



Entdeckung des
Antielektrons (1932)

Nebelkammer



+ Schutzhandschuhe, Schutzbrille, helle Taschenlampe

Nebelkammer

Mit Alkohol
getränkter Filz

warm

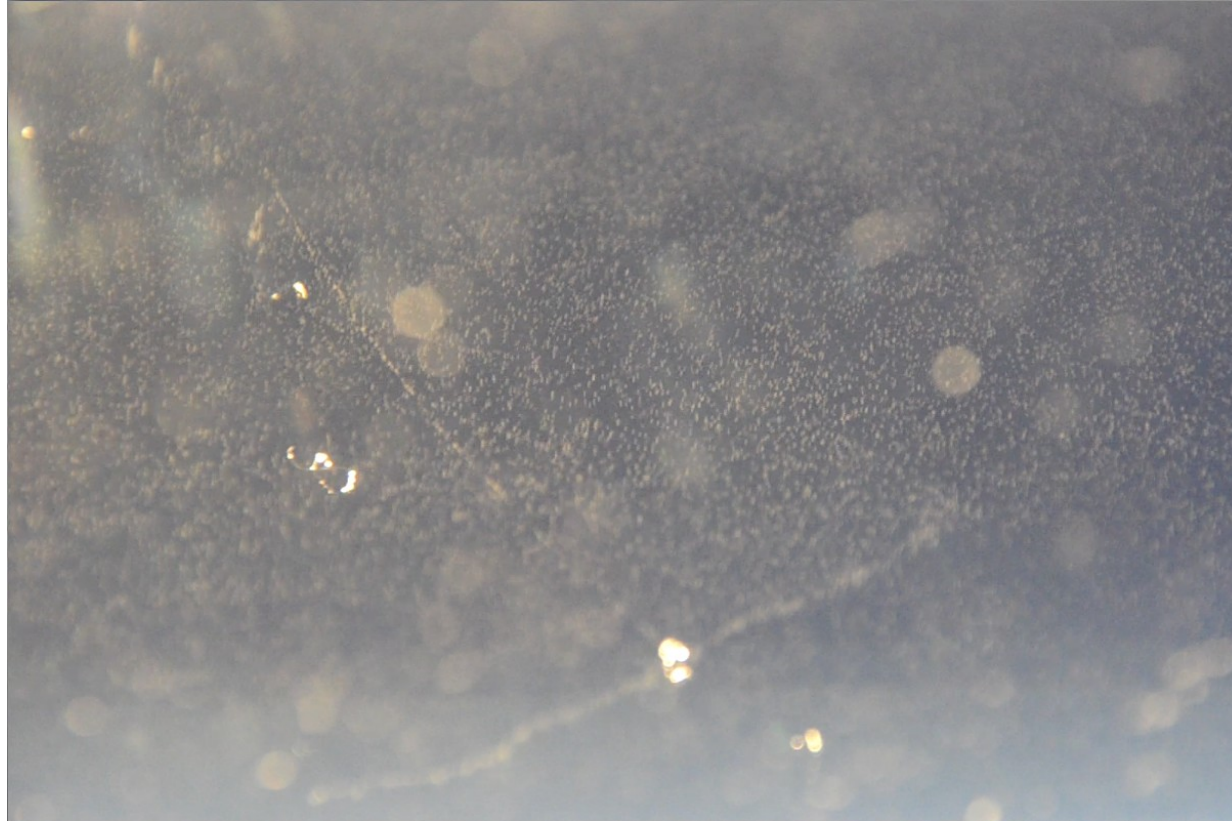
Alkohol-
dampf

kalt

Mit flüssigem
Stickstoff gefüllte
Styroporbox

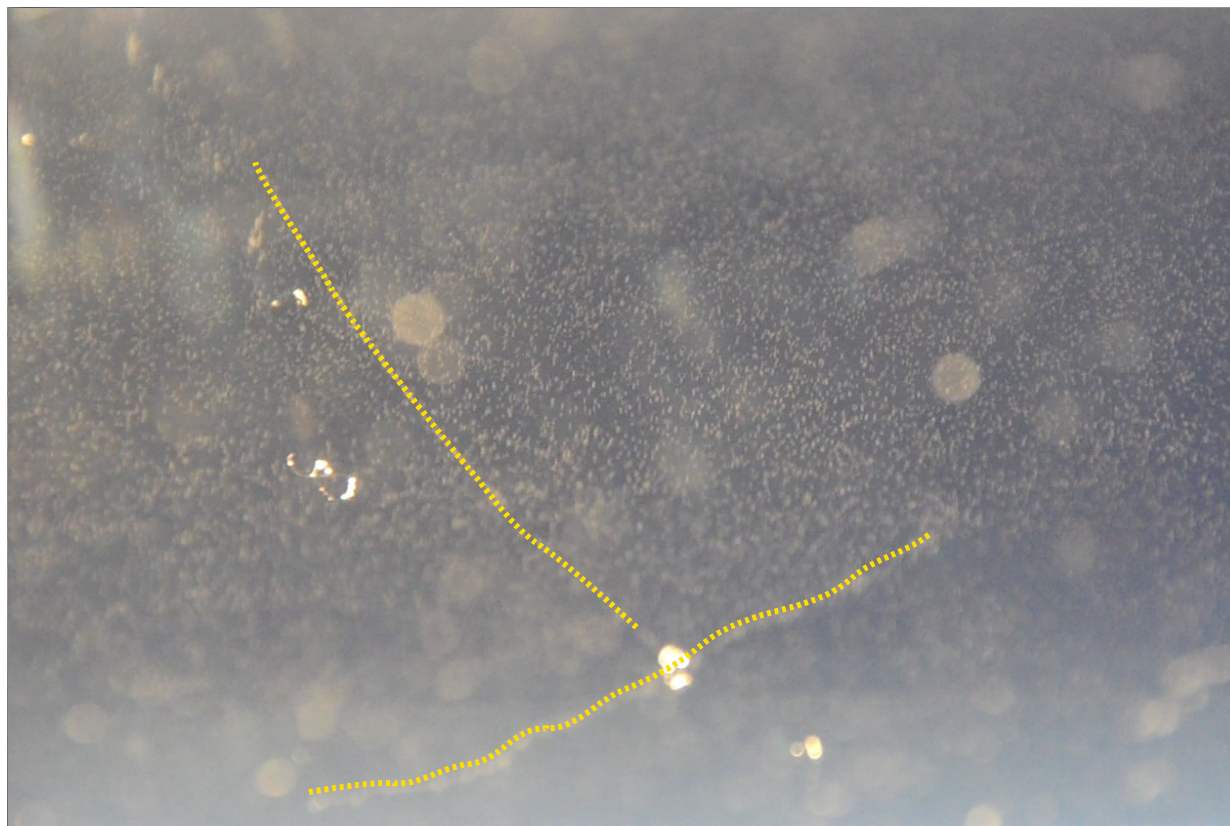
Aufbau: Katharina Müller, UZH Science Lab
(katharina.mueller@sciencelab.uzh.ch)

Nebelkammer



Aufbau: Katharina Müller, UZH Science Lab
(katharina.mueller@sciencelab.uzh.ch)

Nebelkammer



Aufbau: Katharina Müller, UZH Science Lab
(katharina.mueller@sciencelab.uzh.ch)

Moderne Spurdetektoren

Wir suchen und untersuchen immer seltenere Prozesse

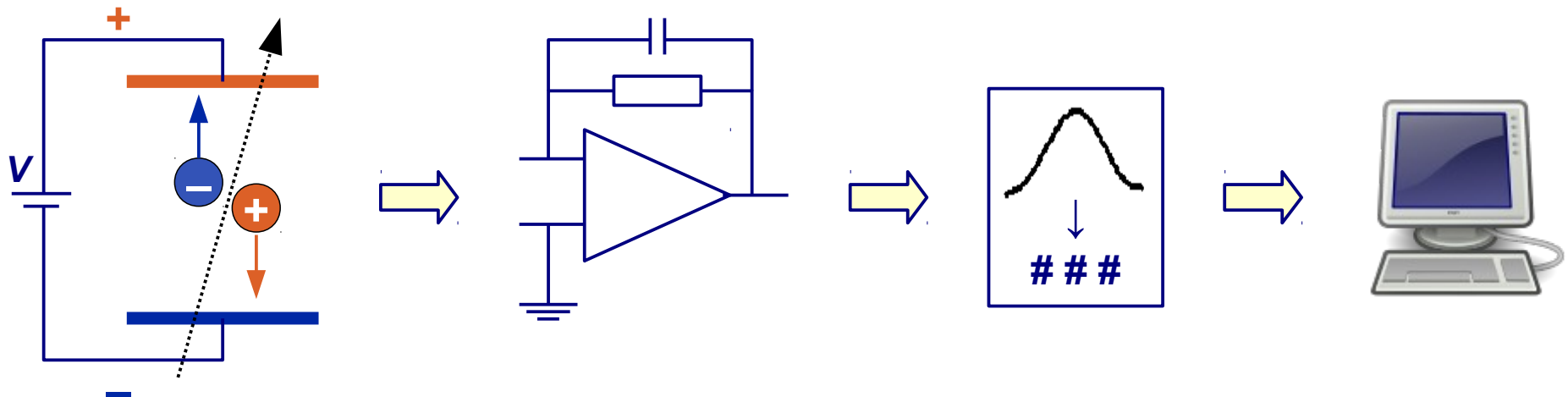
→ **benötigen immer höhere Ereignisraten**

(LHC: 40 Millionen Ereignisse pro Sekunde)

Benötigen Detektoren mit schneller elektronischer Auslese,

Digitalisierung der Detektorsignale,

Auswertung der Daten in riesigen Computerclustern



Moderne Spurdetektoren

Wir suchen und untersuchen immer seltenere Prozesse

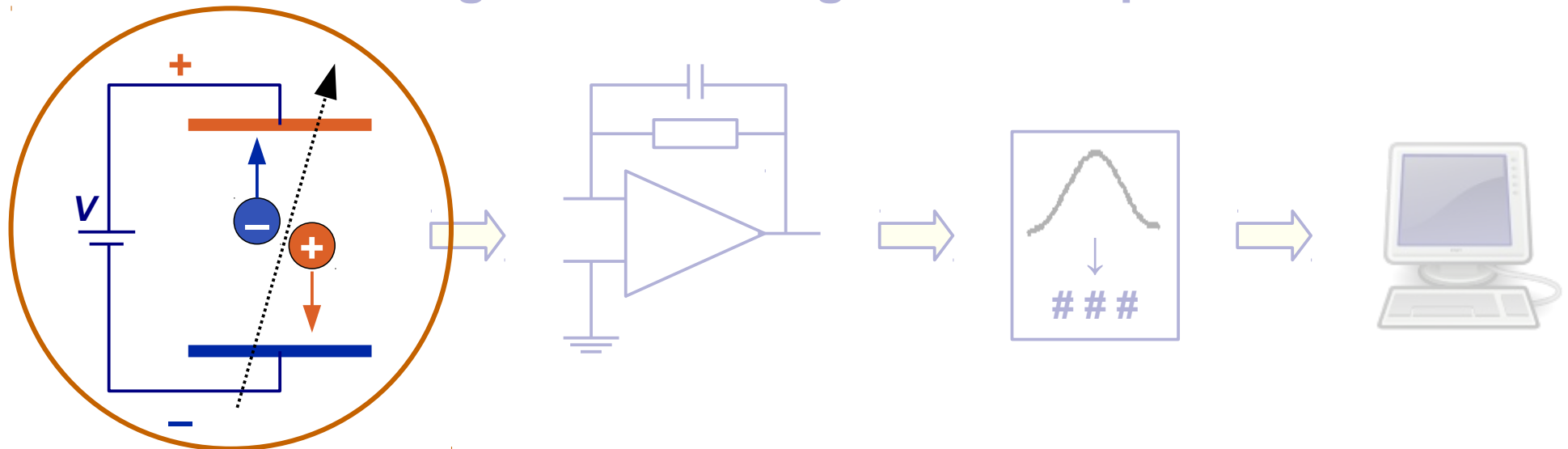
→ **benötigen immer höhere Ereignisraten**

(LHC: 40 Millionen Ereignisse pro Sekunde)

Benötigen Detektoren mit schneller elektronischer Auslese,

Digitalisierung der Detektorsignale,

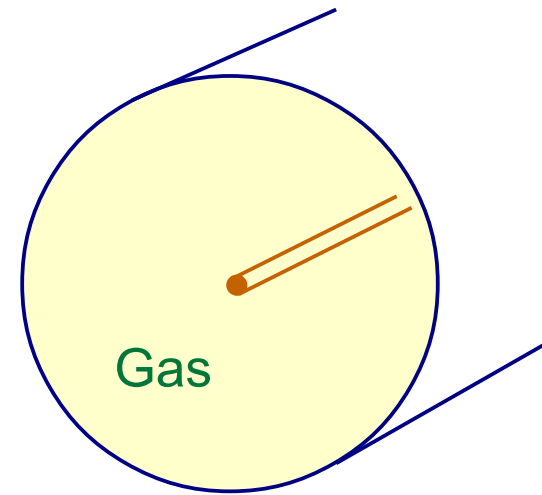
Auswertung der Daten in großen Computerclustern



Gas-basierte Spurdetektoren

**Dünnwandiges, zylindrisches Röhrchen,
gefüllt mit einer geeigneten Gasmischung
(z.B. Ar/CO₂)**

Dünnner Draht im Zentrum des Röhrchens

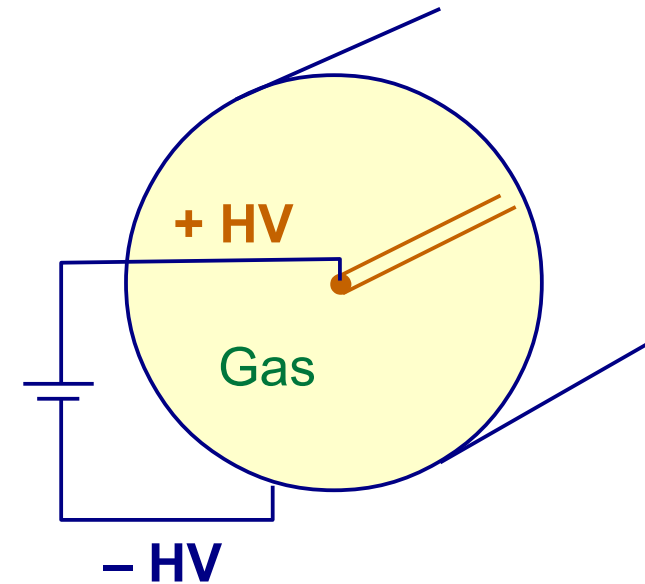


Gas-basierte Spurdetektoren

**Dünnwandiges, zylindrisches Röhrchen,
gefüllt mit einer geeigneten Gasmischung
(z.B. Ar/CO₂)**

Dünnner Draht im Zentrum des Röhrchens

**Hochspannung (typisch 1-2 kV)
zwischen Draht und Aussenwand**



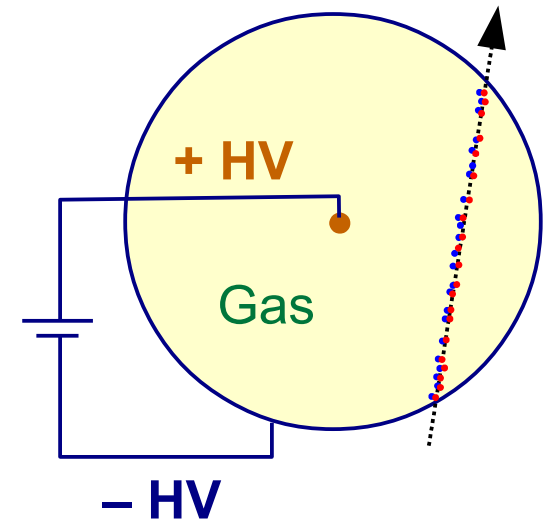
Gas-basierte Spurdetektoren

**Dünnwandiges, zylindrisches Röhrrchen,
gefüllt mit einer geeigneten Gasmischung
(z.B. Ar/CO₂)**

Dünnner Draht im Zentrum des Röhrrchens

**Hochspannung (typisch 1-2 kV)
zwischen Draht und Aussenwand**

Geladenes Teilchen ionisiert Gasatome



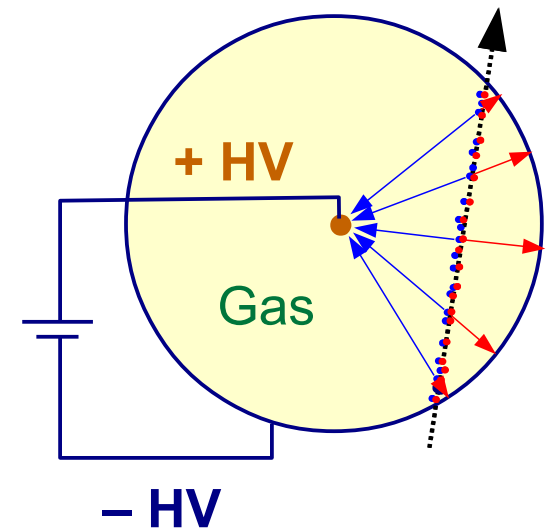
Gas-basierte Spurdetektoren

**Dünnwandiges, zylindrisches Röhrchen,
gefüllt mit einer geeigneten Gasmischung
(z.B. Ar/CO₂)**

Dünnner Draht im Zentrum des Röhrchens

**Hochspannung (typisch 1-2 kV)
zwischen Draht und Aussenwand**

Geladenes Teilchen ionisiert Gasatome
elektrisches Feld: Elektronen driften zum Draht



Gas-basierte Spurdetektoren

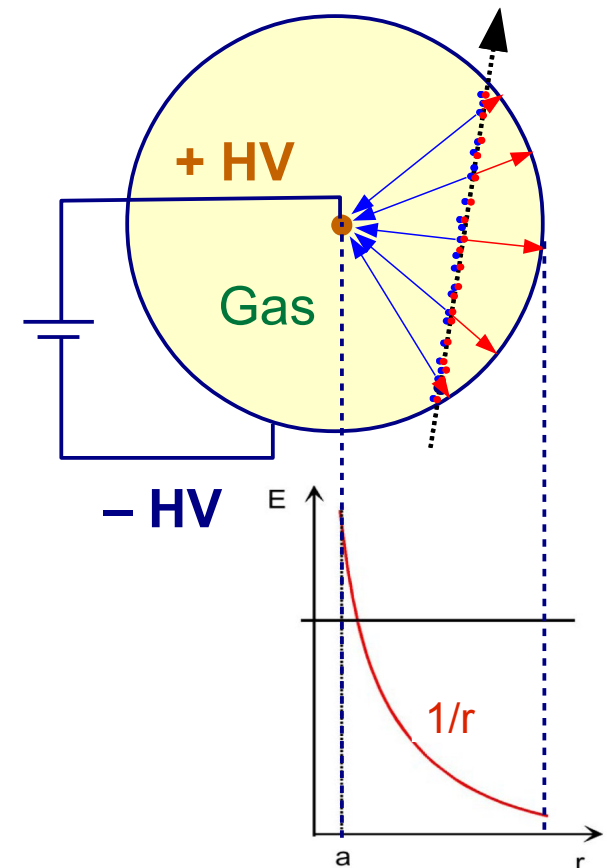
**Dünnwandiges, zylindrisches Röhrchen,
gefüllt mit einer geeigneten Gasmischung
(z.B. Ar/CO₂)**

Dünnere Draht im Zentrum des Röhrchens

**Hochspannung (typisch 1-2 kV)
zwischen Draht und Aussenwand**

Geladenes Teilchen ionisiert Gasatome
elektrisches Feld: Elektronen driften zum Draht

Nahe am Draht sehr hohe Feldstärke



Gas-basierte Spurdetektoren

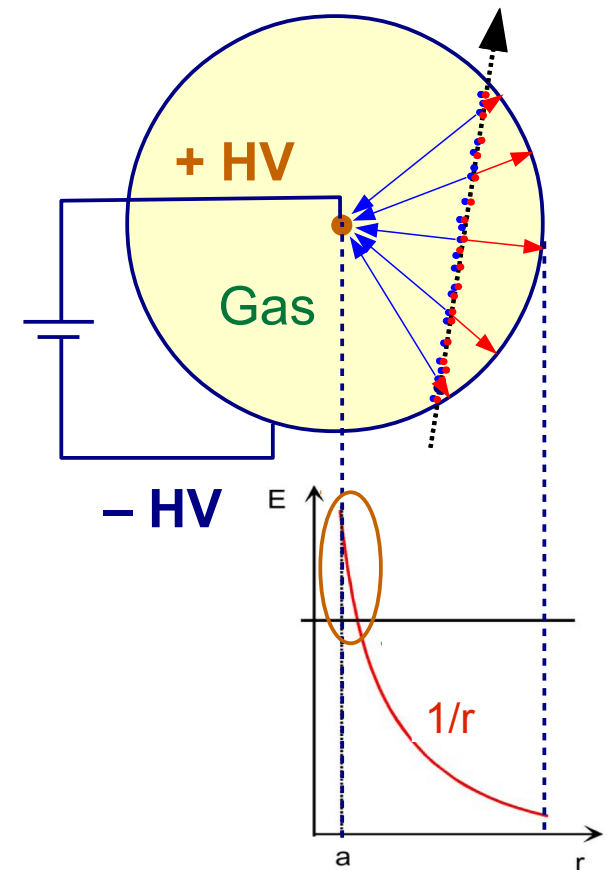
**Dünnwandiges, zylindrisches Röhrchen,
gefüllt mit einer geeigneten Gasmischung
(z.B. Ar/CO₂)**

Dünnere Draht im Zentrum des Röhrchens

**Hochspannung (typisch 1-2 kV)
zwischen Draht und Aussenwand**

Geladenes Teilchen ionisiert Gasatome
elektrisches Feld: Elektronen driften zum Draht

Nahe am Draht sehr hohe Feldstärke



Gas-basierte Spurdetektoren

Dünnwandiges, zylindrisches Röhrchen,
gefüllt mit einer geeigneten Gasmischung
(z.B. Ar/CO₂)

Dünnere Draht im Zentrum des Röhrchens

Hochspannung (typisch 1-2 kV)
zwischen Draht und Aussenwand

Geladenes Teilchen ionisiert Gasatome
elektrisches Feld: Elektronen driften zum Draht

Nahe am Draht sehr hohe Feldstärke

→ Elektronen gewinnen genug Energie,
um selbst wieder Atome zu ionisieren

→ Ladungslawine

→ Spannungspuls auf dem Draht

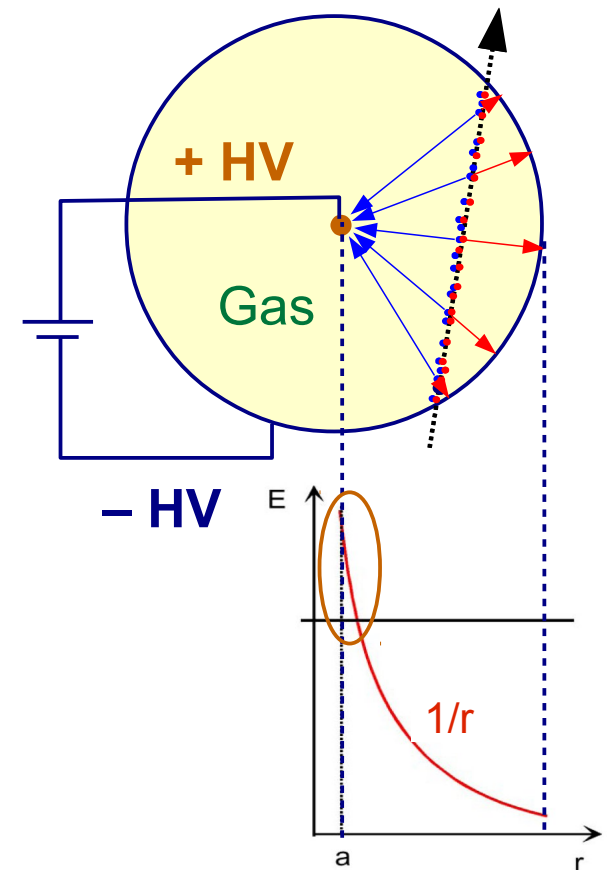
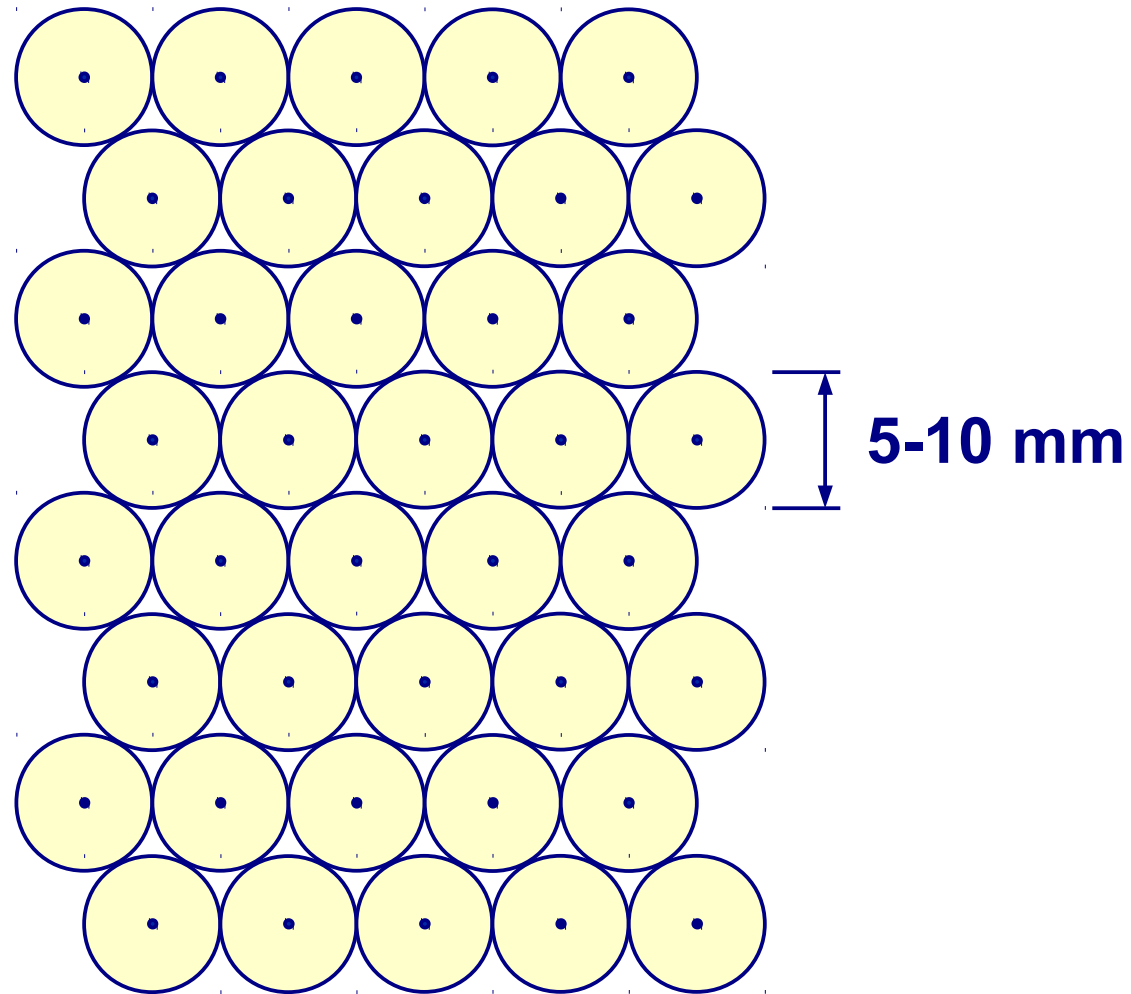


Foto einer
Ladungslawine

Draht

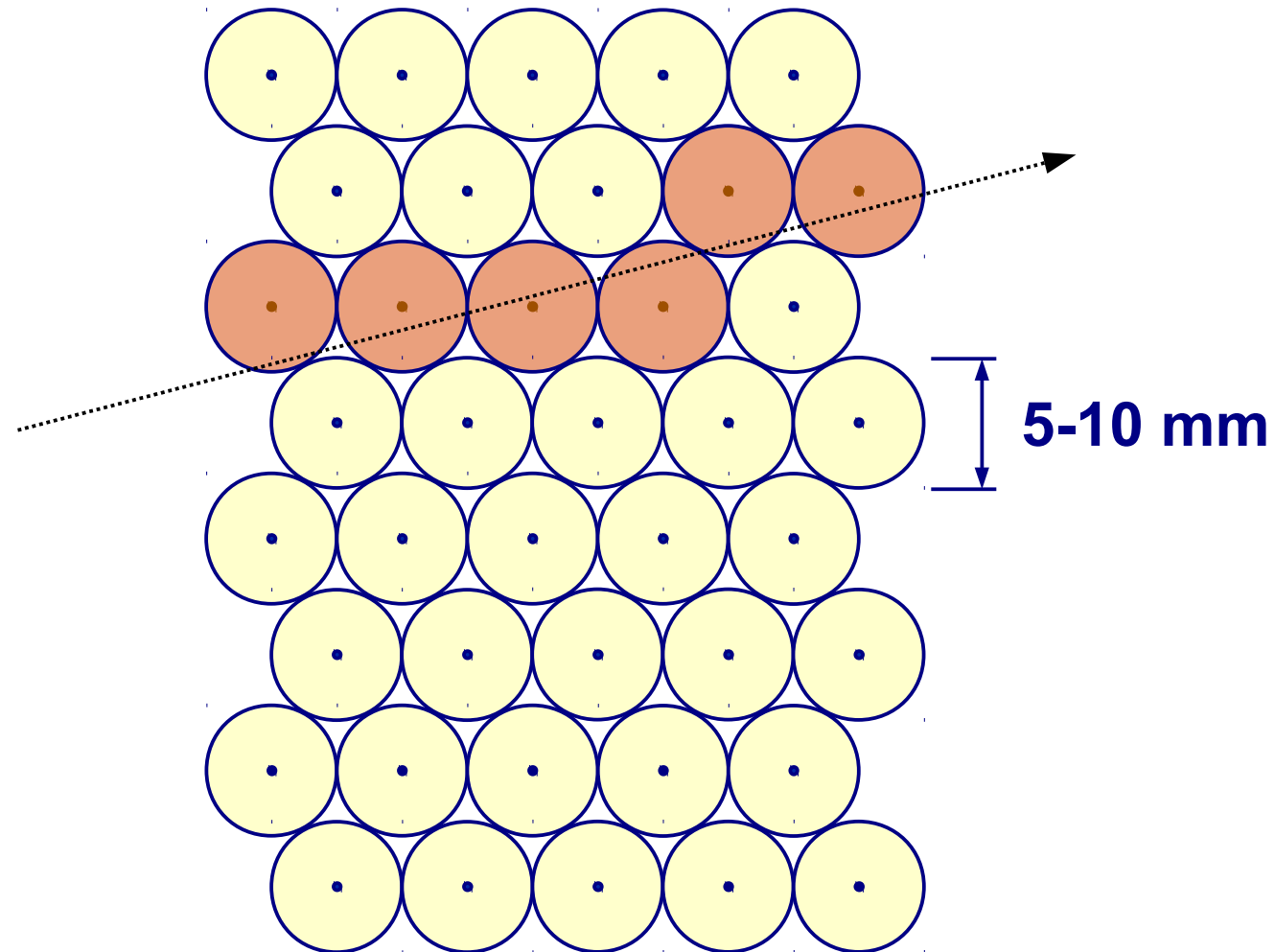
Gas-basierte Spurdetektoren

Spurdetektor: mehrere Lagen solcher Driftröhrchen



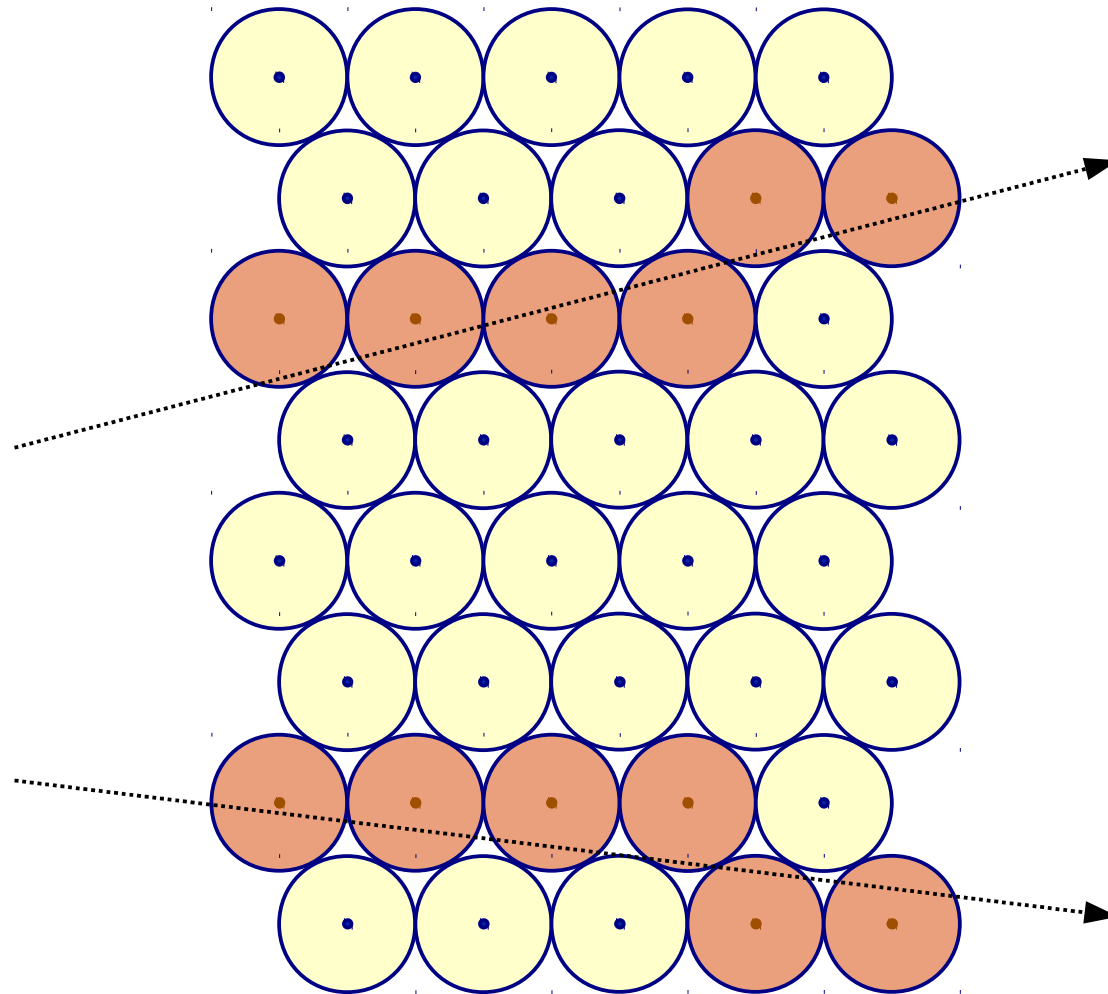
Gas-basierte Spurdetektoren

Spurdetektor: mehrere Lagen solcher Driftröhrchen



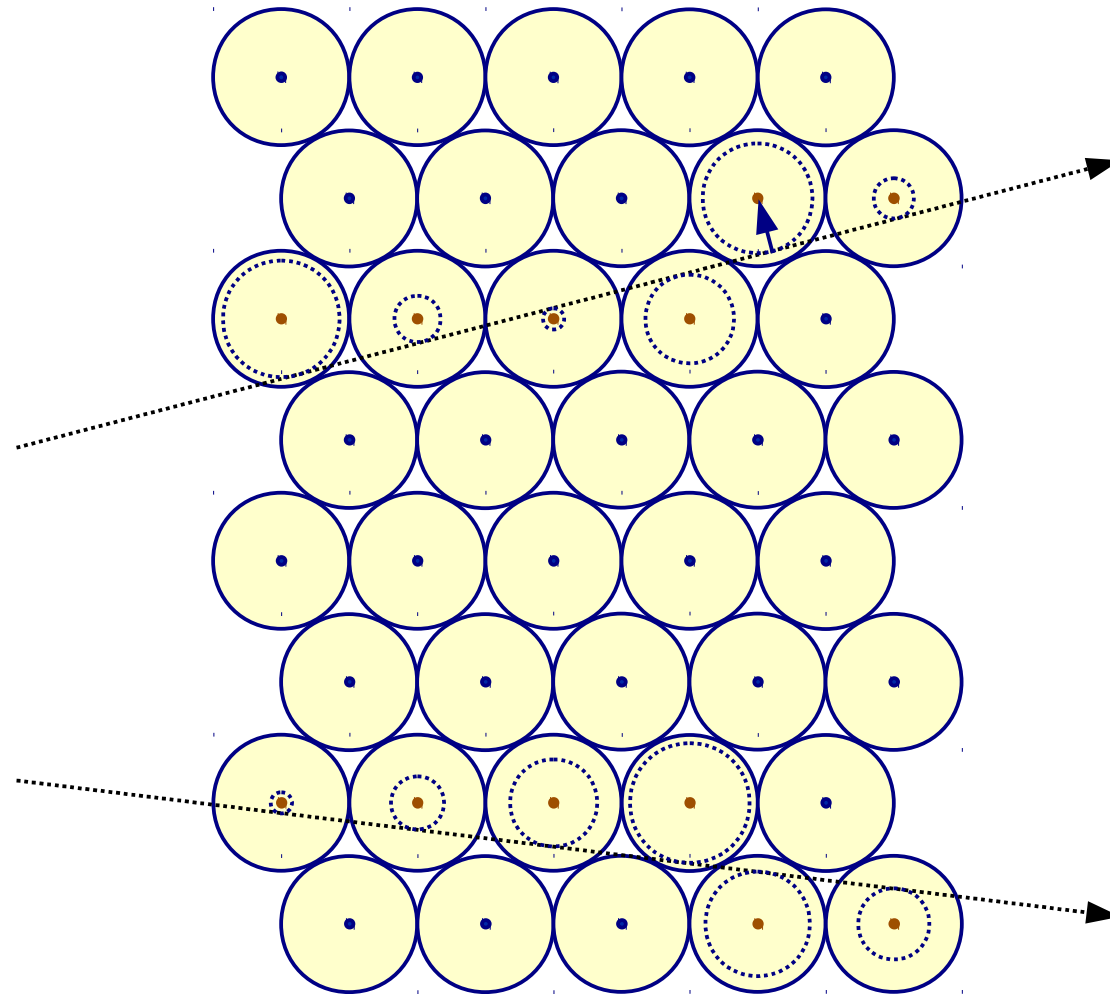
Gas-basierte Spurdetektoren

Spurdetektor: mehrere Lagen solcher Driftröhrchen



Gas-basierte Spurdetektoren

**Für höhere Präzision:
messe die Driftzeit der Elektronen,
berechne Abstand der Spur vom Draht**



Gas-basierte Spurdetektoren

+ Relativ leicht, große Flächen abzudecken

+ Relativ preiswert

+ Ortsauflösung ~ 0.1 mm,
für viele Anwendungen gut genug



Gas-basierte Spurdetektoren

+ Relativ leicht, große Flächen abzudecken

+ Relativ preiswert

+ Ortsauflösung ~ 0.1 mm,
für viele Anwendungen gut genug

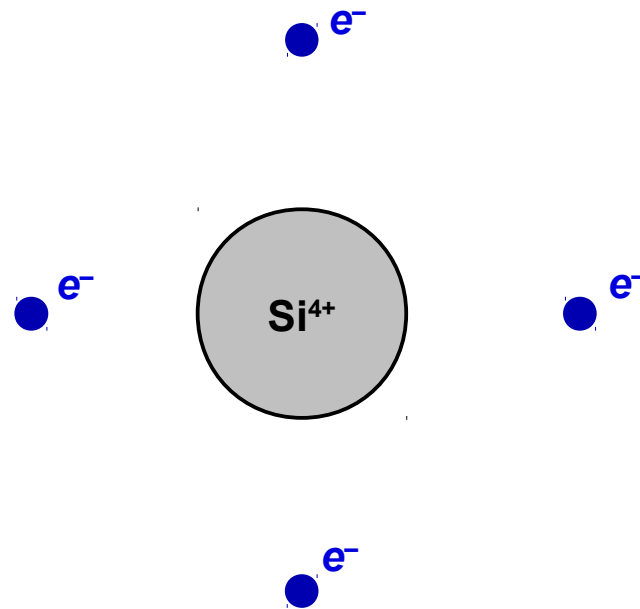


Aber:

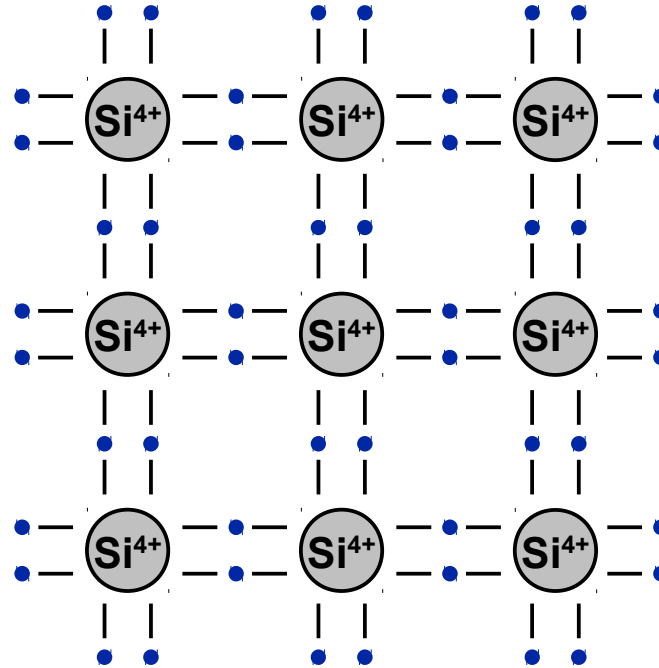
Ratenverträglichkeit stößt beim LHC an Grenzen

→ **Driftzeit für Elektronen typisch 100 ns = 0.0000001 s**
(LHC: neue Kollision alle 25 ns)

Silizium-basierte Spurdetektoren

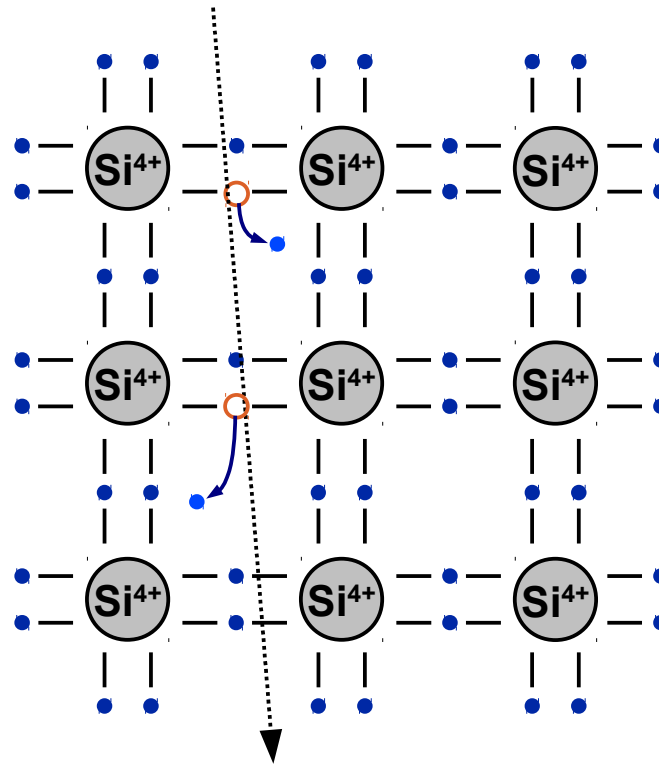


Silizium-basierte Spurdetektoren



**Silizium-Kristall ist ein Halbleiter:
Elektronen sind im Kristallgitter gebunden,
aber nur schwach**

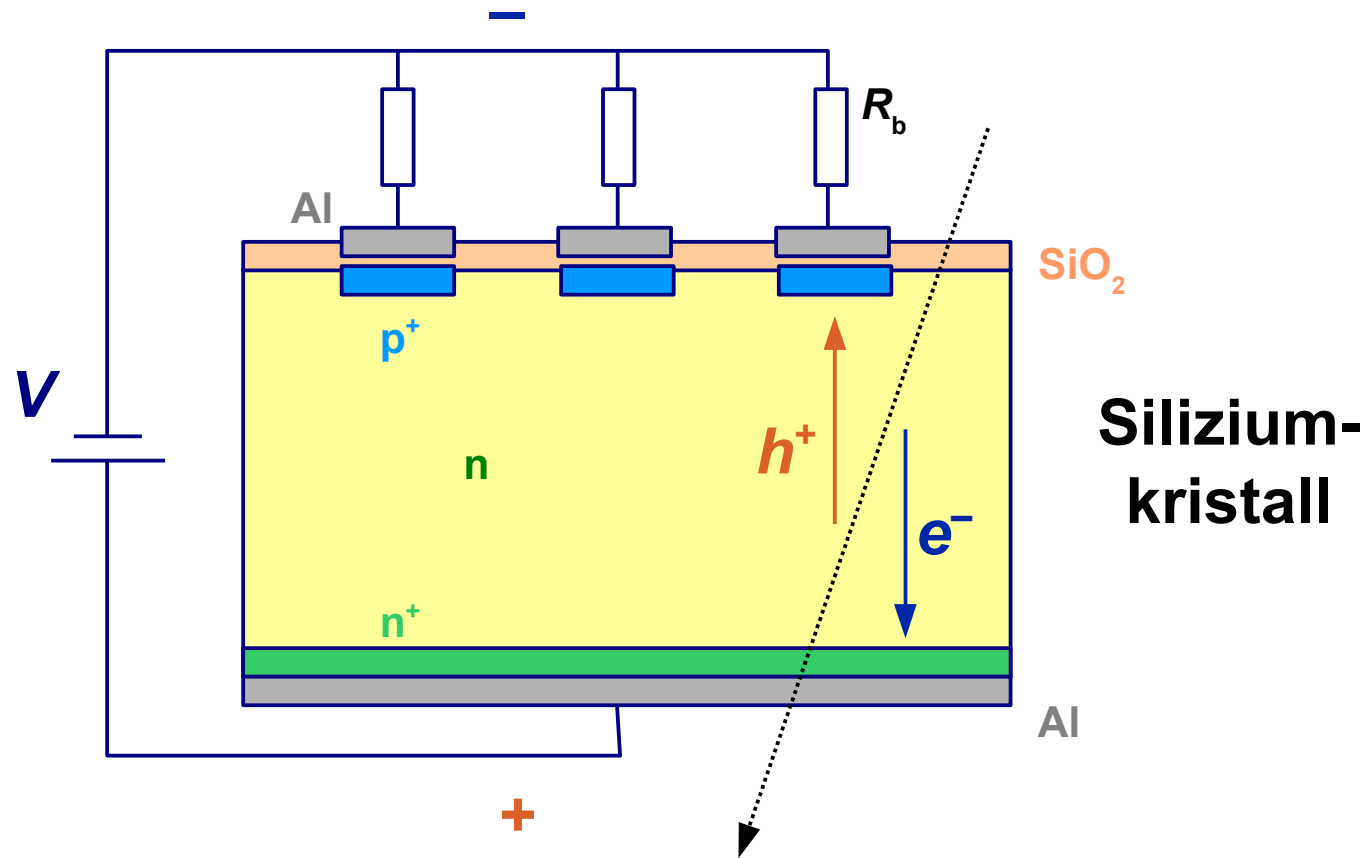
Silizium-basierte Spurdetektoren



**Geladenes Teilchen kann Elektronen aus dem Gitter
herausschlagen \rightarrow ein “Loch” bleibt zurück**

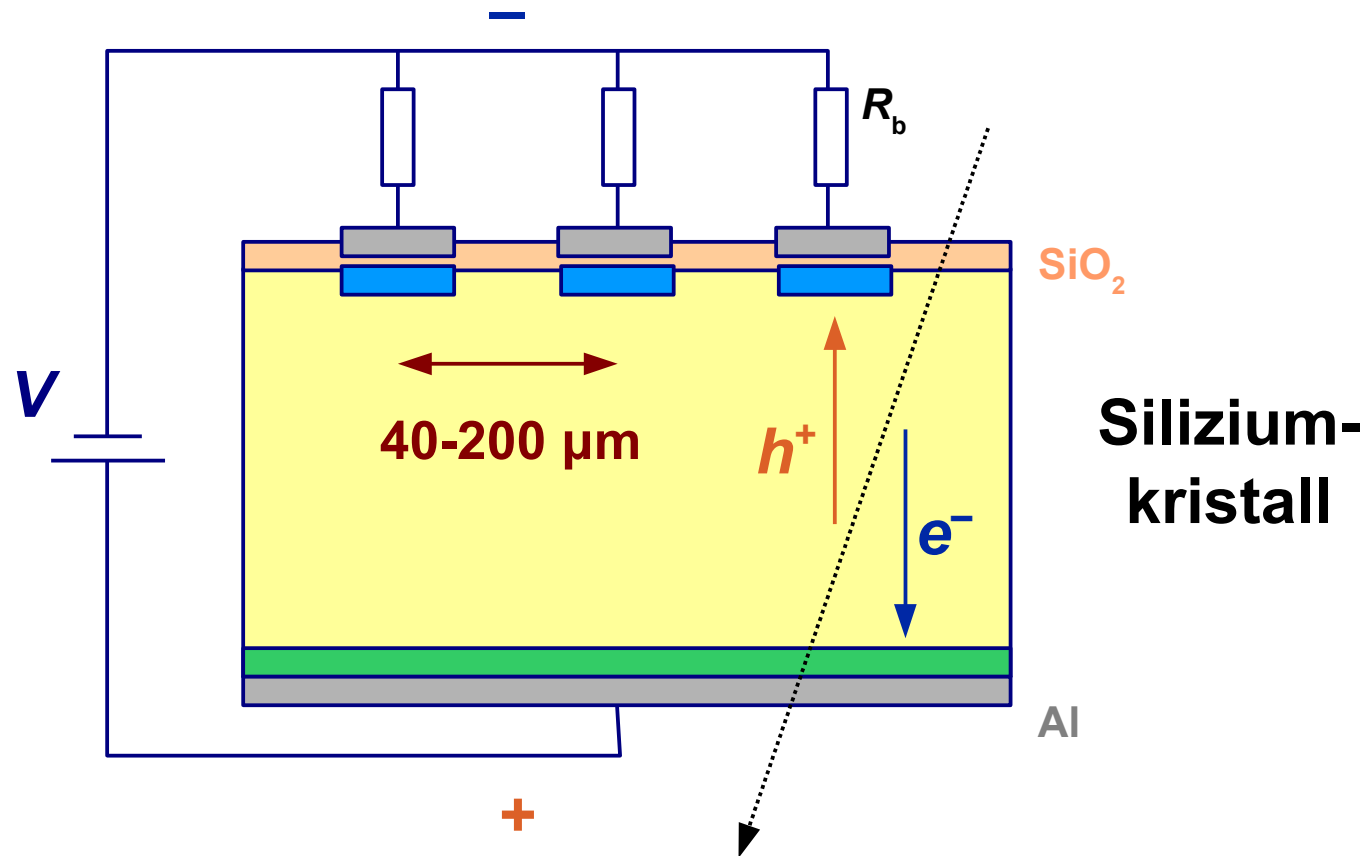
($\sim 30'000$ Elektron/Loch-Paare pro $\frac{1}{2}$ mm Siliziumkristall)

Silizium-basierte Spurdetektoren



Teilchen-Detektor: erzeuge elektrisches Feld durch den Kristall, sammle Elektronen und Löcher an Elektroden an der Oberfläche

Silizium-basierte Spurdetektoren



Teilchen-Detektor: erzeuge elektrisches Feld durch den Kristall, sammle Elektronen und Löcher an Elektroden an der Oberfläche

Silizium-basierte Spurdetektoren

+ bessere Ortsauflösung als Gas-basierte Detektoren

0.01 mm ↔ 0.1 mm

+ bessere Ratenverträglichkeit als Gas-basierte Detektoren

10 ns ↔ 100 ns

+ einige weitere Vorteile

Silizium-basierte Spurdetektoren

+ bessere Ortsauflösung als Gas-basierte Detektoren

0.01 mm ↔ 0.1 mm

+ bessere Ratenverträglichkeit als Gas-basierte Detektoren

10 ns ↔ 100 ns

+ einige weitere Vorteile

Aber:

– teurer als gas-basierte Detektoren

– aufwändig, große Flächen abzudecken



Silizium-basierte Spurdetektoren

+ bessere Ortsauflösung als Gas-basierte Detektoren

0.01 mm 0.1

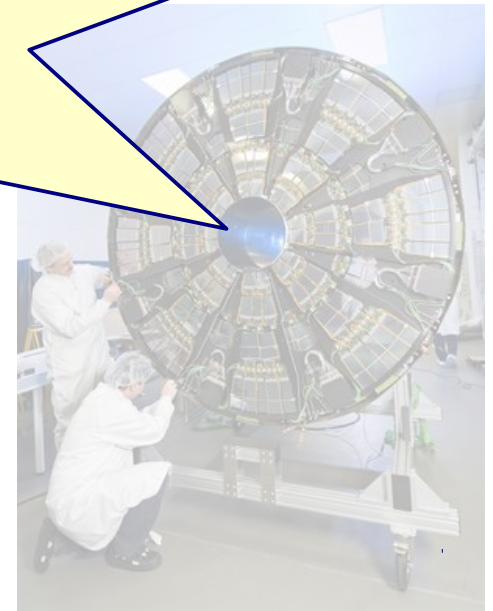
+ bessere Ratenempfindlichkeit als Gas-basierte Detektoren

**SILIZIUM-BASIERTE DETEKTOREN DA
WO ES NOTWENDIG IST,**

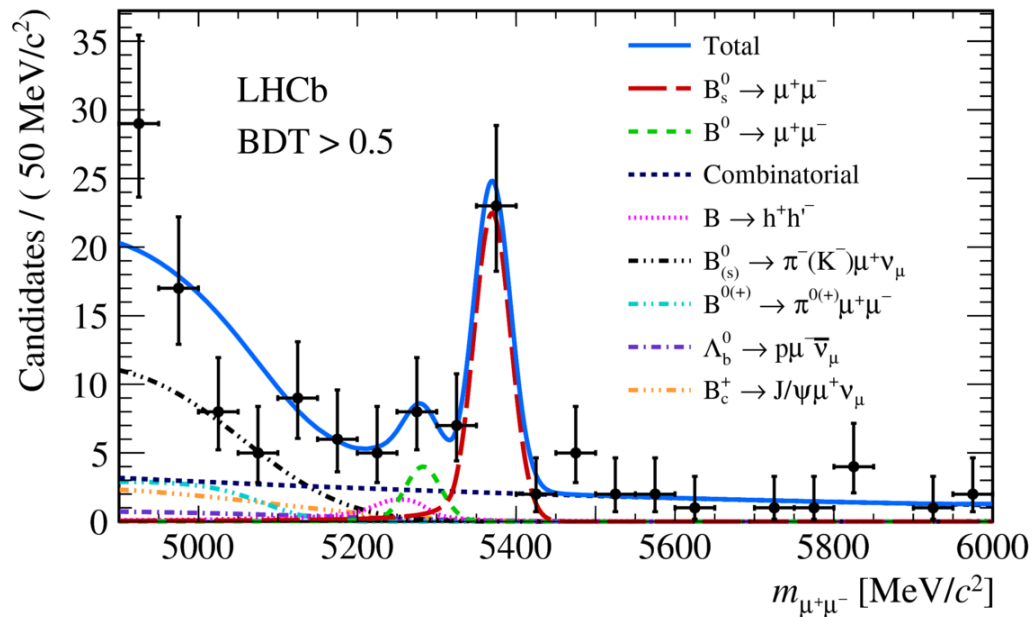
**GAS-BASIERTE DETEKTOREN DA,
WO ES MÖGLICH IST**

– teurer als Gas-basierte Detektoren

– aufwändig, große Flächen abzudecken

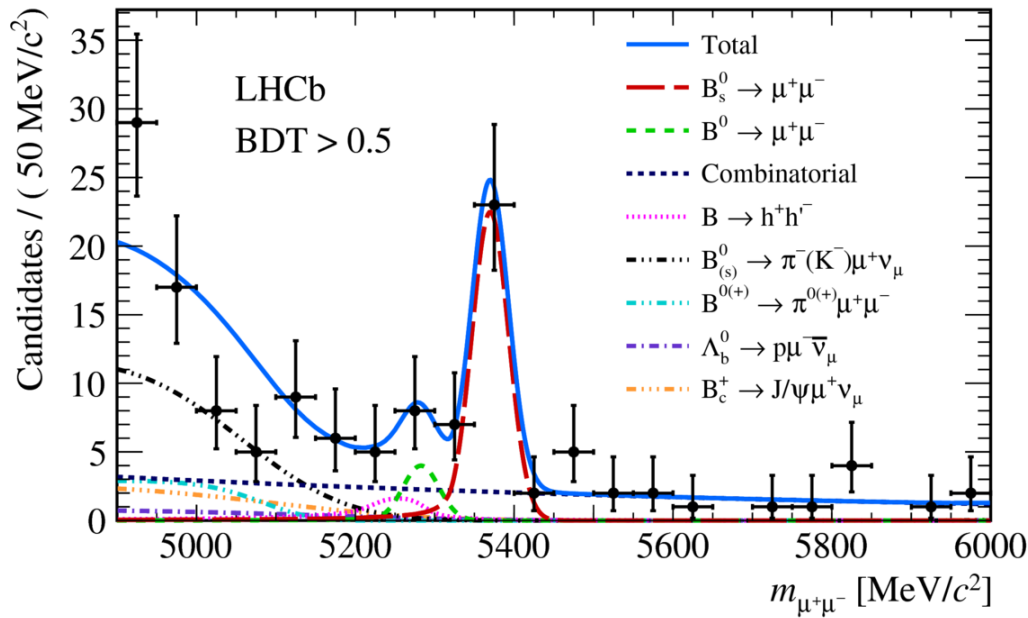


Das Unsichtbare Sehen

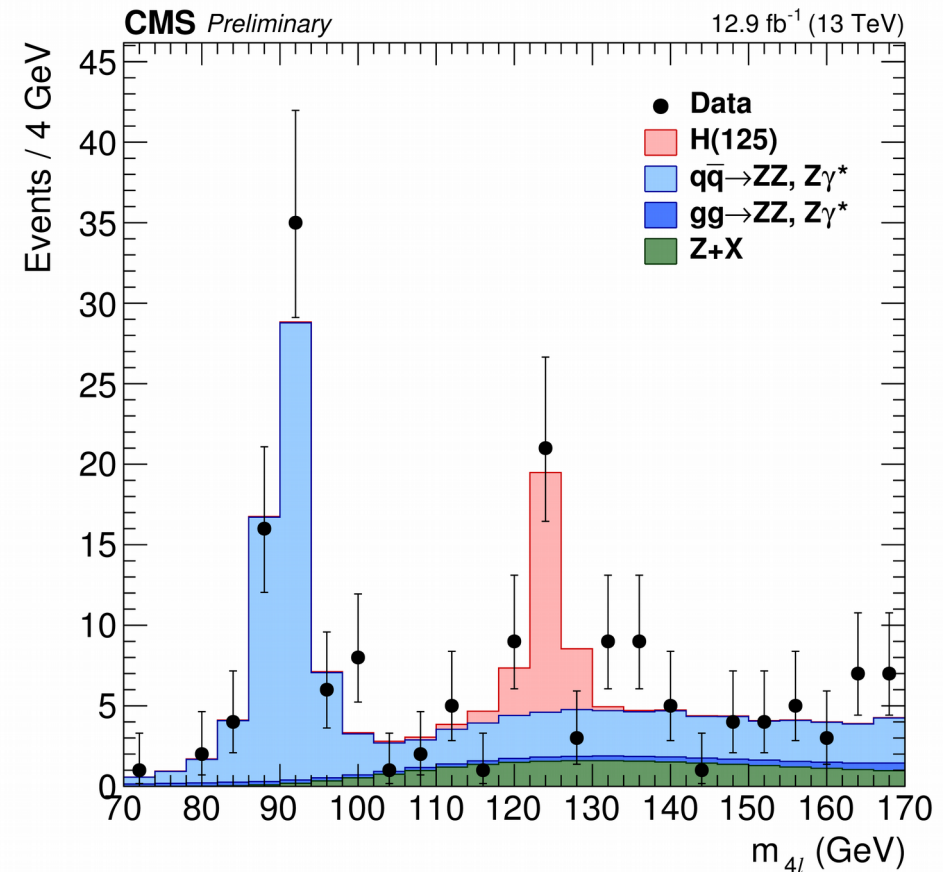


**Beobachtung eines
extrem seltenen Zerfalls
im LHCb experiment**

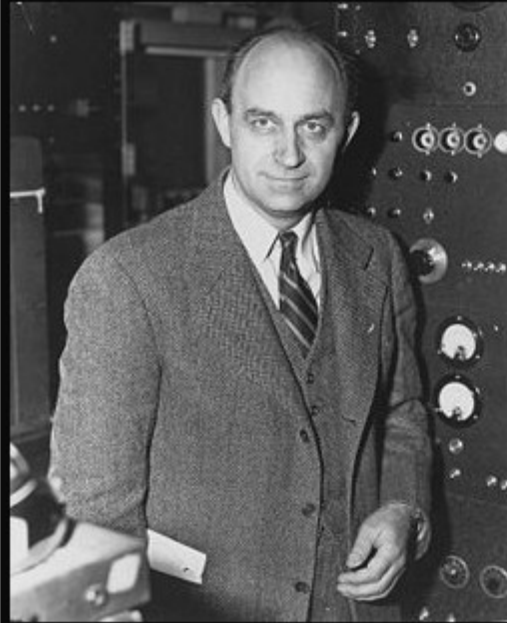
Das Unsichtbare Sehen



**Beobachtung eines
extrem seltenen Zerfalls
im LHCb experiment**



**Nachweis des Higgs-Bosons
in ATLAS und CMS**



**“Before I came here I was
confused about this subject.
Having listened to your lecture
I am still confused.
But on a higher level.”**

(Enrico Fermi)