

Einführung in die Elementarteilchenphysik

Masterclass

Sven Menke, MPP München

27. Februar 2013, Korbinian-Aigner-Gymnasium Erding

- ▶ Teilchenphysik
- ▶ Beschleuniger
- ▶ Detektoren

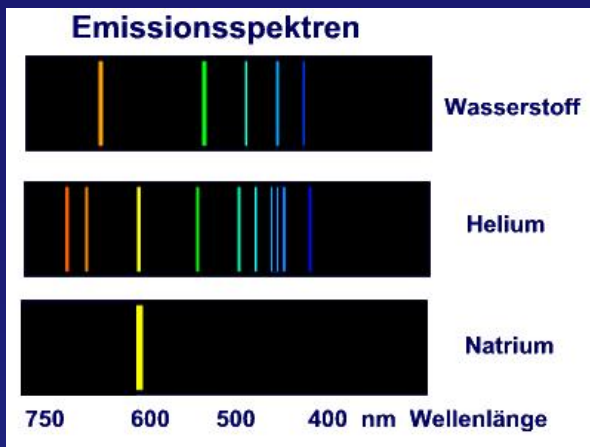
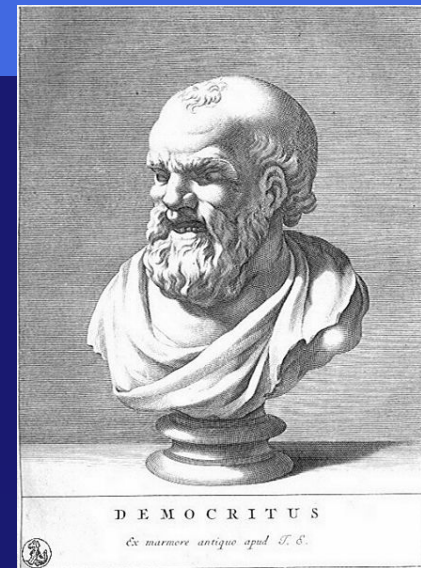
- ▶ ATLAS und der LHC
- ▶ Eine Analyse mit ATLAS Daten
- ▶ W-Boson Produktion

Simulation eines LHC Ereignisses ATLAS/CERN



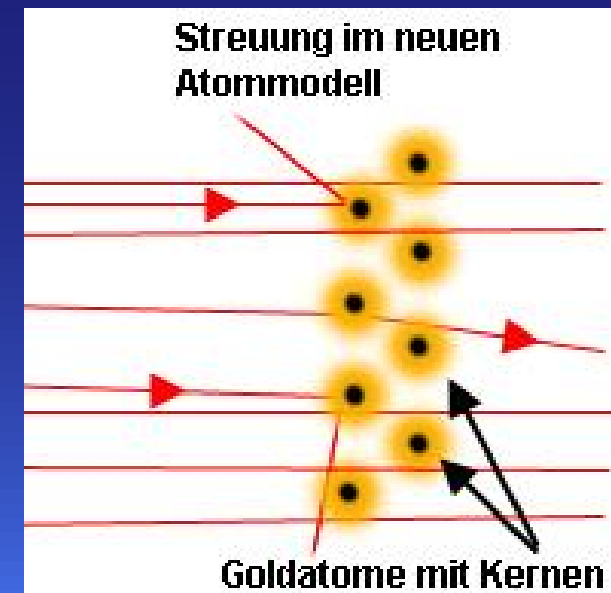
Was ist Gegenstand der Elementarteilchenphysik?

- ▶ antike Naturphilosophie Demokrits (ca. 460-400 v.Chr.):
 - ▶ „Nur scheinbar hat ein Ding eine Farbe, nur scheinbar ist es süß oder bitter; in Wirklichkeit gibt es nur Atome im leeren Raum.“



- ▶ Atomphysik (19. Jahrhundert):
 - ▶ Spektroskopie erlaubte die Zuordnung chemischer Eigenschaften zu physikalischen Ordnungsmerkmalen
 - ▶ Elemente werden unterschieden

- ▶ Kernphysik (Anfang 20. Jahrhundert):
 - ▶ Streuexperimente (Rutherford) belegen, dass Atome im wesentlichen leer sind (Atomhülle mit wenigen Elektronen) und einen dichten Kern (Nukleus) besitzen:
 - ▶ „Es ist, als ob man eine 15-Zoll-Granate auf Seidenpapier schießt, sie zurückgeschleudert wird und einen selbst trifft!“



Was ist Gegenstand der Elementarteilchenphysik?

- ▶ Entdeckung der Kernspaltung (30er Jahre des 20. Jahrhundert):
 - ▶ Atomkerne sind auch nicht elementar, sondern bestehen aus Bausteinen – den Nukleonen
 - ▶ bekannte Elementarteilchen sind nun Proton, Neutron und Elektron, aus denen die gesamte uns bekannte „normale“ Materie aufgebaut ist und das Photon als Träger der elektromagnetischen Wechselwirkung

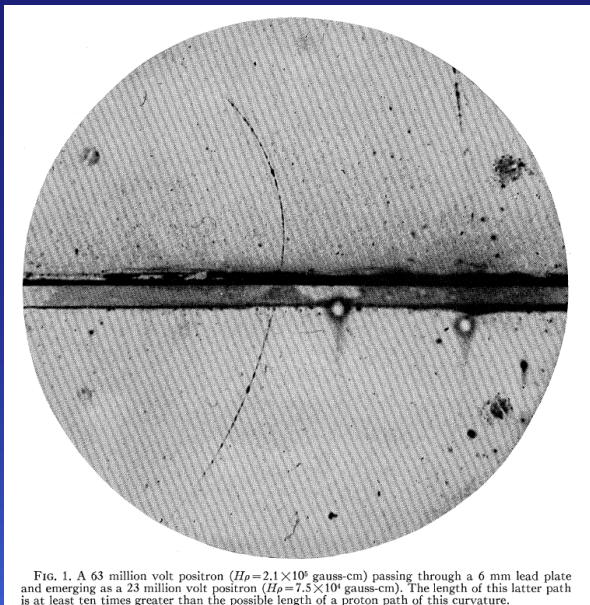
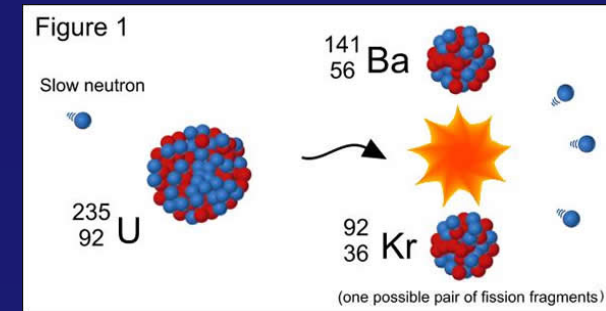


FIG. 1. A 63 million volt positron ($H\rho=2.1\times 10^6$ gauss-cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging as a 23 million volt positron ($H\rho=7.5\times 10^4$ gauss-cm). The length of this latter path is at least ten times greater than the possible length of a proton path of this curvature.

- ▶ Andersen entdeckt das Positron (Carl D. Andersen, *The Positive Electron*, Phys. Rev. **43**, 491-494 (1933))
- ▶ Dirac hatte Antielektronen bereits vorhergesagt (Paul A.M. Dirac, *The Quantum Theory of the Electron*, Proc. R. Soc. Lond. **A117**, 610-624 (1928))
 - ▶ plötzlich ist das Tor zu viel mehr Elementarteilchen (Antiteilchen) offen

Fermionen, Mesonen, Bosonen

- ▶ Heute umfasst das Standardmodell der Teilchenphysik 30 „elementare“ Teilchen (18 wenn man Anti-Teilchen nicht mitrechnet)
- ▶ 3 elektronartige Teilchen:
 - ▶ Elektron (e^-), Myon (μ^-), Tau (τ^-)
- ▶ 3 Antil-Teilchen zu diesen:
 - ▶ Positron (e^+), Anti-Myon (μ^+), Anti-Tau (τ^+)
- ▶ Zu jedem elektronartigen Teilchen und Anti-Teilchen ein Neutrino:
 - ▶ 3 Neutrinos ν_e, ν_μ, ν_τ ; 3 Anti-Neutrinos $\bar{\nu}_e, \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_\tau$
- ▶ Mesonen und Baryonen sind aus 2 bzw. 3 Quarks aufgebaut, die in 6 verschiedenen Sorten vorkommen:
 - ▶ Down (d), Up (u), Strange (s), Charm (c), Bottom (b), Top (t)
- ▶ Zu diesen 6 Quarks gibt es auch je ein Anti-Quark:
 - ▶ Anti-Down (\bar{d}), Anti-Up (\bar{u}), Anti-Strange (\bar{s}), Anti-Charm (\bar{c}), Anti-Bottom (\bar{b}), Anti-Top (\bar{t})
- ▶ Die Kräfte zwischen diesen Fermionen (halbzahliger Spin) werden durch 6 Bosonen (ganzzahliger Spin) ausgetauscht:
 - ▶ Photon (γ), Gluon (g), schwache Eichbosonen (Z^0, W^+, W^-), und **vielleicht?** dem Higgs (H^0)

Das „Periodensystem“ der Teilchenphysik

Drei Generationen
der Materie (Fermionen)

| | I | II | III | |
|----------|--|--|--|--------------------------------------|
| Masse → | 2,4 MeV | 1,27 GeV | 171,2 GeV | 0 |
| Ladung → | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | $\frac{2}{3}$ | 0 |
| Spin → | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| Name → | u up | c charm | t top | γ Photon |
| Quarks | 4,8 MeV | 104 MeV | 4,2 GeV | 0 |
| | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | $-\frac{1}{3}$ | 0 |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| | d down | s strange | b bottom | g Gluon |
| Leptonen | <2,2 eV | <0,17 MeV | <15,5 MeV | 91,2 GeV |
| | 0 | 0 | 0 | 0 |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| | ν_e Elektron-Neutrino | ν_μ Myon-Neutrino | ν_τ Tau-Neutrino | Z^0 Z-Boson |
| | 0,511 MeV | 105,7 MeV | 1,777 GeV | 80,4 GeV |
| | -1 | -1 | -1 | ± 1 |
| | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | $\frac{1}{2}$ | 1 |
| | e Elektron | μ Myon | τ Tau | W^\pm W-Boson |
| | | | | >114 GeV |
| | | | | 0 |
| | | | | 0 |
| | | | | H^0? Higgs |

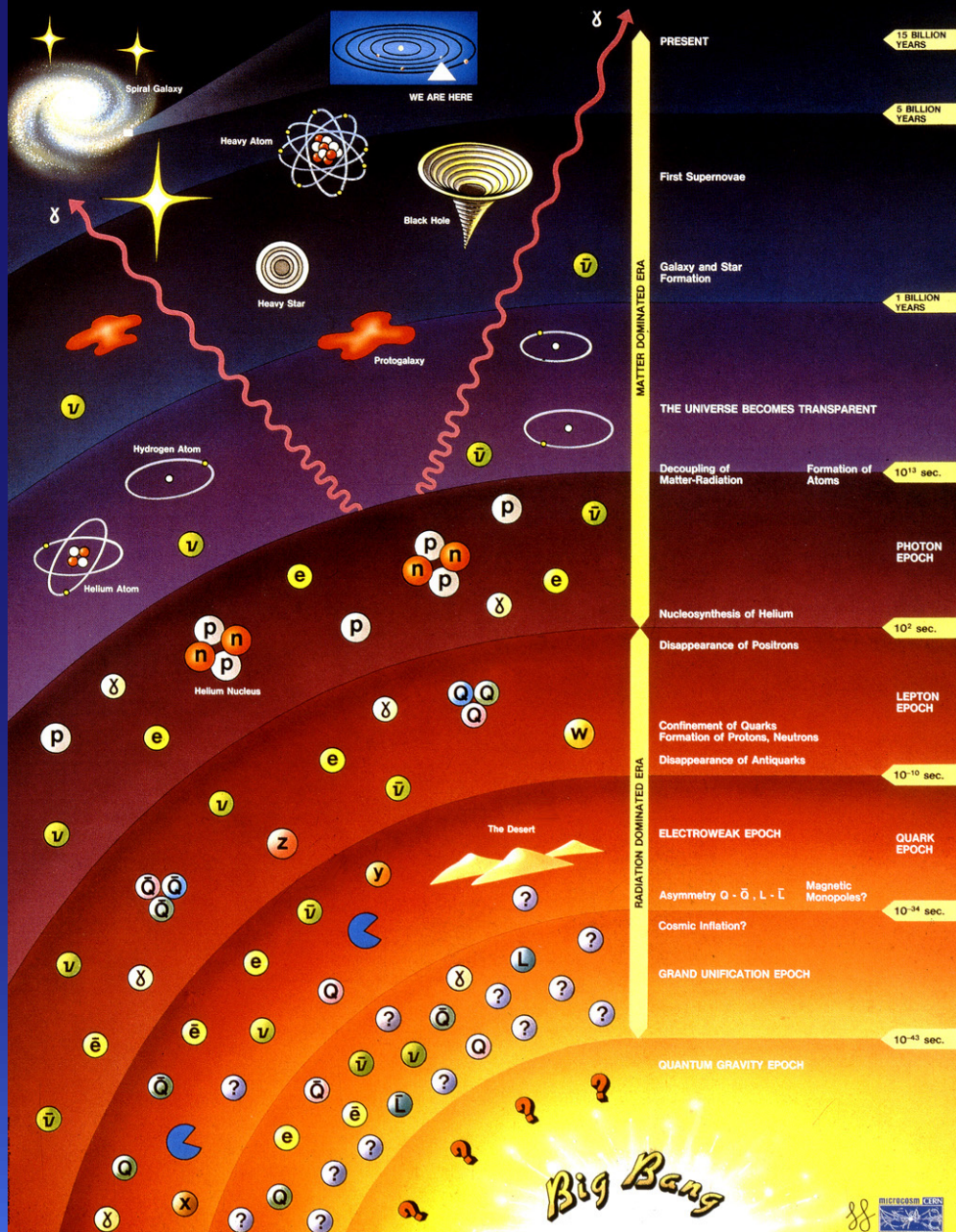
Bosonen (Kräfte)

modifiziertes Bild basierend auf Standard_Model_of_Elementary_Particles.svg von MissMJ (wikipedia.org)

Anzahl der Parameter des Standardmodells

- ▶ Im Standardmodell sind 18 Parameter nötig, die nicht von der Theorie vorhergesagt werden
 - 9 Quark und Lepton Massen
 - 4 Parameter der Mischungsmatrix der Quarks (3 Winkel und 1 \mathcal{CP} -verletzende Phase)
 - 3 Kopplungskonstanten (α_{QED} , G_{F} , α_{s})
 - 2 Parameter des Higgs-Potentials (μ^2, λ)
- ▶ Dazu kommen ≥ 7 Parameter aus dem Neutrino Sektor
 - ≥ 3 Massen
 - ≥ 4 Parameter der Neutrinomischungsmatrix
- ▶ Und interne Konstanten des Standardmodells, die zwar nicht als Parameter gelten, aber doch das Modell ausmachen:
 - Drittelzahlige Ladung der Quarks
 - Gleiche Anzahl von Lepton- und Quarkgenerationen
 - Anzahl der Generationen
- ▶ Mögliche Vereinigung der 3 (oder aller 4) Wechselwirkungen?

History of the Universe



► Rückwärts in der Zeit; Aufwärts in der Energie

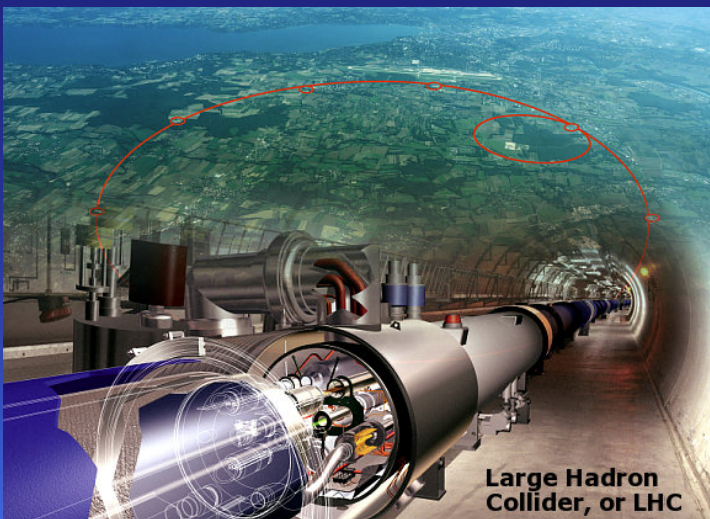
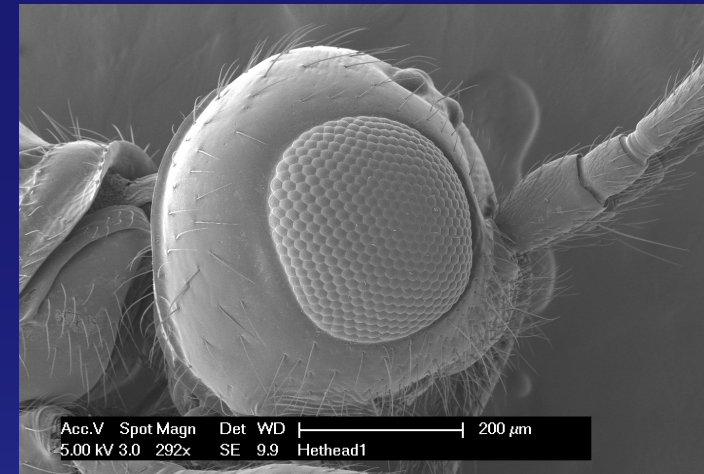
- 13.7×10^9 Jahre: Menschen beobachten das sich ausdehnende Universum
- 1×10^6 Jahre: Galaxien entstehen
- 360×10^3 Jahre: Atome entstehen – Photonen entkoppeln von Materie
 - Mikrowellenhintergrund
- 10^{-34} Sekunden: *CP*-Verletzung sorgt für Materie Überschuß – Antimaterie vollständig zerstrahlt
- Bereich „Neuer Physik“? – z.B. Produktion von Leptoquarkpaaren X, \bar{X}, Y, \bar{Y} ?
- $< 10^{-43}$ Sekunden: ??????

Warum Beschleuniger?



- ▶ Um immer näher an den Urknall heranzurücken, bauen wir Beschleuniger, die immer höhere Energien erreichen können
 - Das Prinzip ist ähnlich wie bei einem Mikroskop
 - Sichtbares Licht ($f = 375 - 750$ THz) entspricht einer Energie von $E = hf = 1.55 - 3.1$ eV und kann Strukturen bis etwa der halben Wellenlänge ($\lambda = c/f = 400 - 800$ nm) auflösen

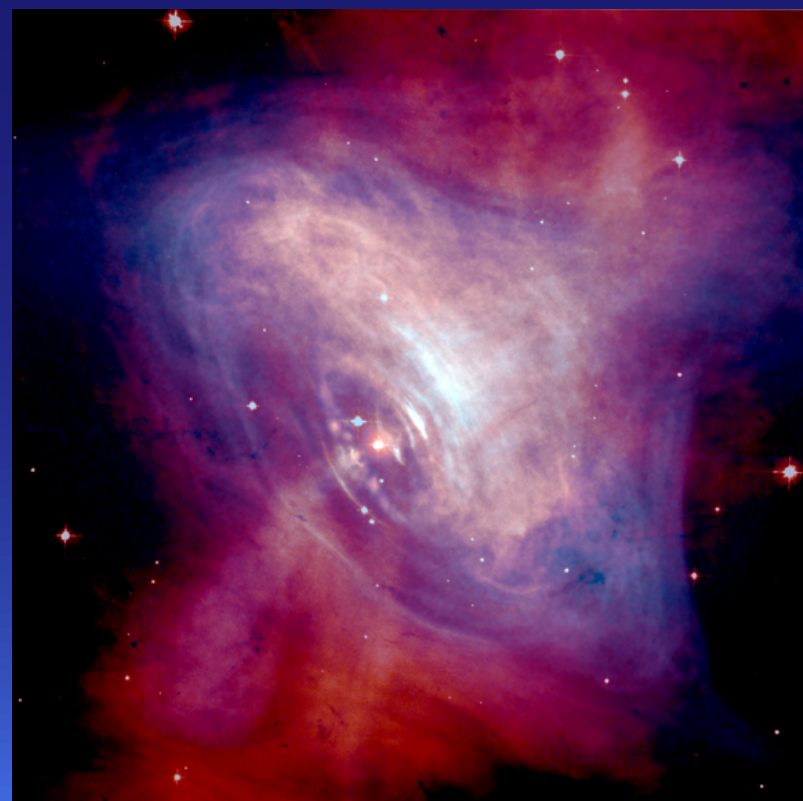
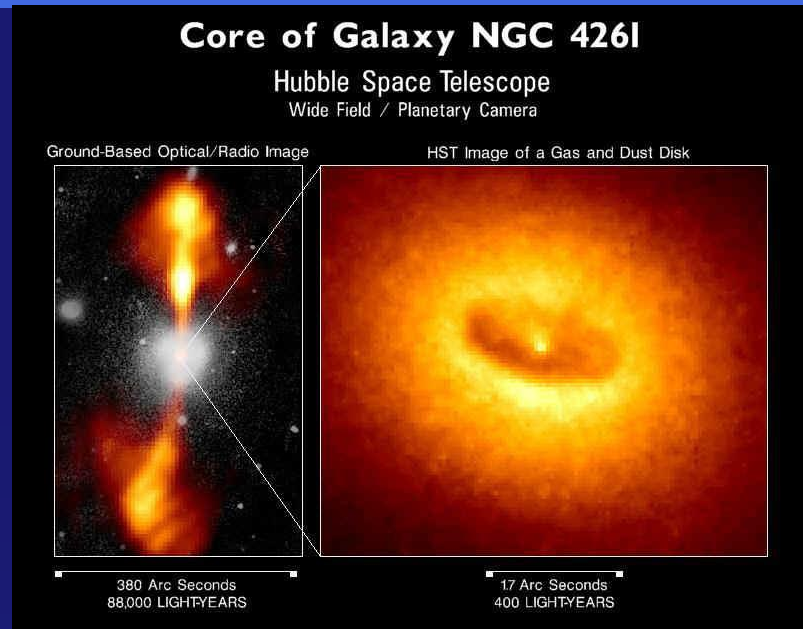
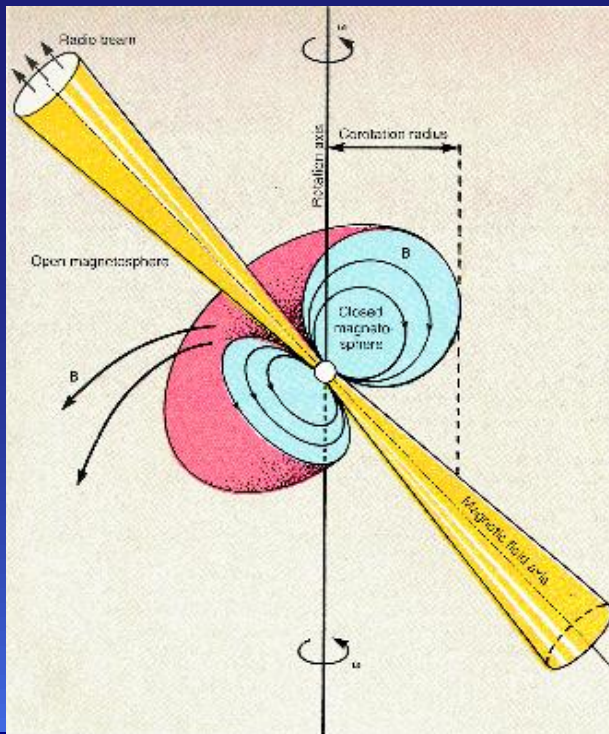
- Elektronenmikroskop (Materiewelle $E_{\text{kin}} = 1 - 100$ keV)
- Theoretische Auflösung bis $\lambda = h/p = 0.04 - 0.004$ nm
($p = \sqrt{(E_{\text{kin}} + mc^2)^2 - m^2c^4}/c$)



- LHC: Protonen werden auf $p = 7$ TeV/c beschleunigt
- Theoretische Auflösung bis $\lambda = h/p = 1.8 \times 10^{-10}$ nm

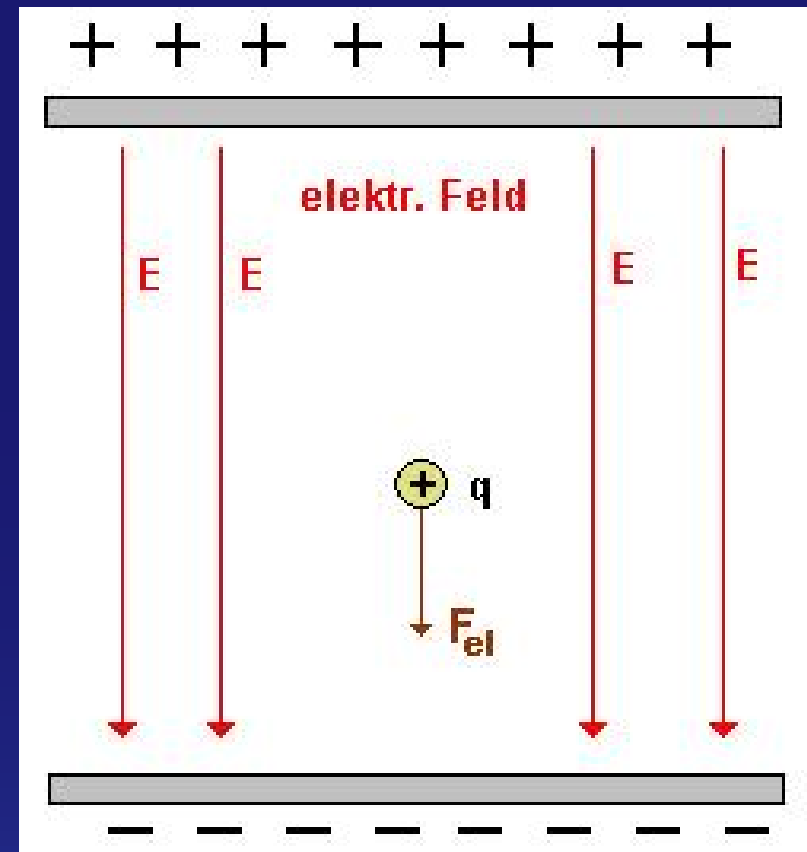
Kosmische Beschleuniger

- ▶ Es gibt noch stärkere Beschleuniger als den LHC ...
 - Allerdings nicht auf der Erde
 - Die stärksten bekannten Beschleuniger sind aktive galaktische Kerne und Pulsare
 - Geladene Teilchen werden auf über 100 TeV beschleunigt
 - Auf der Erde sieht man die Bremsstrahlung der Teilchen

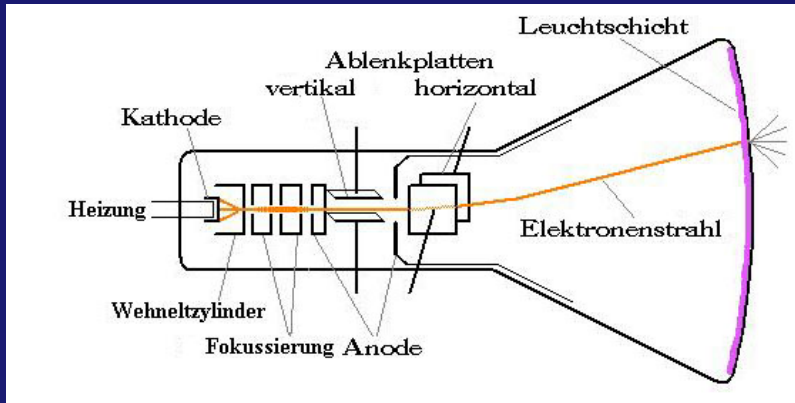


Wie funktioniert ein (irdischer) Beschleuniger

- ▶ Ein einfach geladenes Teilchen, das die Spannung 1 V durchläuft erhält 1 eV kinetische Energie:
 $E = 1 \text{ V} \times q = 1.602 \times 10^{-19} \text{ J}$
- ▶ Beim LHC erhält jedes Proton
 $7 \text{ TeV} = 7 \times 10^{12} \text{ eV} \simeq 1 \times 10^{-6} \text{ J}$
kinetische Energie
- ▶ Dafür bräuchte man pro Strahl 4666 Milliarden 1.5 V Batterien in Serie ...

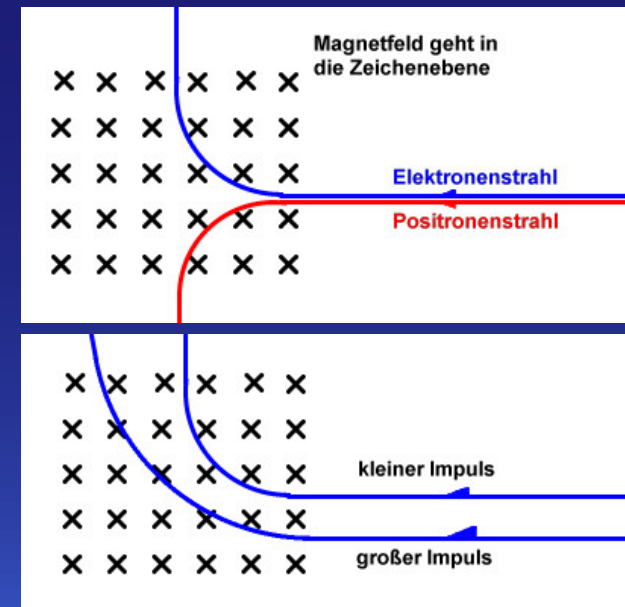


Wie funktioniert ein (irdischer) Beschleuniger



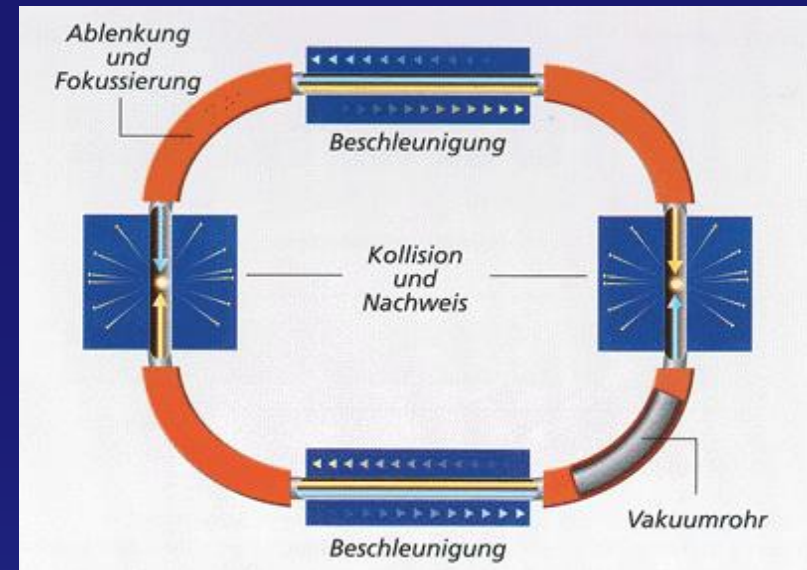
- ▶ Viele hatten früher (manche heute noch) einen Linearbeschleuniger im Wohnzimmer
- ▶ Der Röhrenfernseher enthält eine Hochspannungskathode (5 – 30 kV) mit der Elektronen auf 5 – 30 keV beschleunigt werden

- ▶ Ein Magnetfeld lenkt geladene Teilchen senkrecht zu Flugrichtung und Feldrichtung und proportional zur Ladung sowie umgekehrt proportional zum Impuls ab



Wie funktioniert ein (irdischer) Beschleuniger

- ▶ Kombiniert man Beschleunigerstrecken (Hochspannung) mit Magneten, kann man die Hochspannung mehrfach durchlaufen
- ▶ Im Prinzip beliebig oft
 - ▶ für beliebig hohe Energien
- ▶ Praktisch ist die Energie begrenzt, da bei der magnetischen Ablenkung Bremsstrahlung entsteht
 - ▶ Energieverlust



- ▶ Alle Teilchendetektoren basieren auf der Messung der Wechselwirkung des Teilchens mit Materie
 - Die Wechselwirkung beeinflußt natürlich auch das Teilchen selbst ▶ wichtiges Kriterium für den Aufbau eines Detektors
- ▶ Ganz grob kann man die meisten Detektoren in drei Klassen aufteilen
 - 1. Ortsdetektoren
 - 2. Energieverlustdetektoren
 - 3. Flugzeitdetektoren
- ▶ Manchmal beherrscht ein Detektor mehr als eine dieser Messungen – aber selten alle gleich gut
 - Eng mit den drei obigen Detektorprinzipien ist die Teilchenidentifikation verknüpft, die z.B. durch Kombination von Orts- und Energiemessung sowie das Hinzufügen von Magnetfeldern erreicht werden kann
 - Ortsmessung im Magnetfeld ist z.B. zugleich eine Impulsmessung
 - Impuls- und Energiemessung zusammen erlauben die Bestimmung der Masse

Spurdefinierende Detektoren

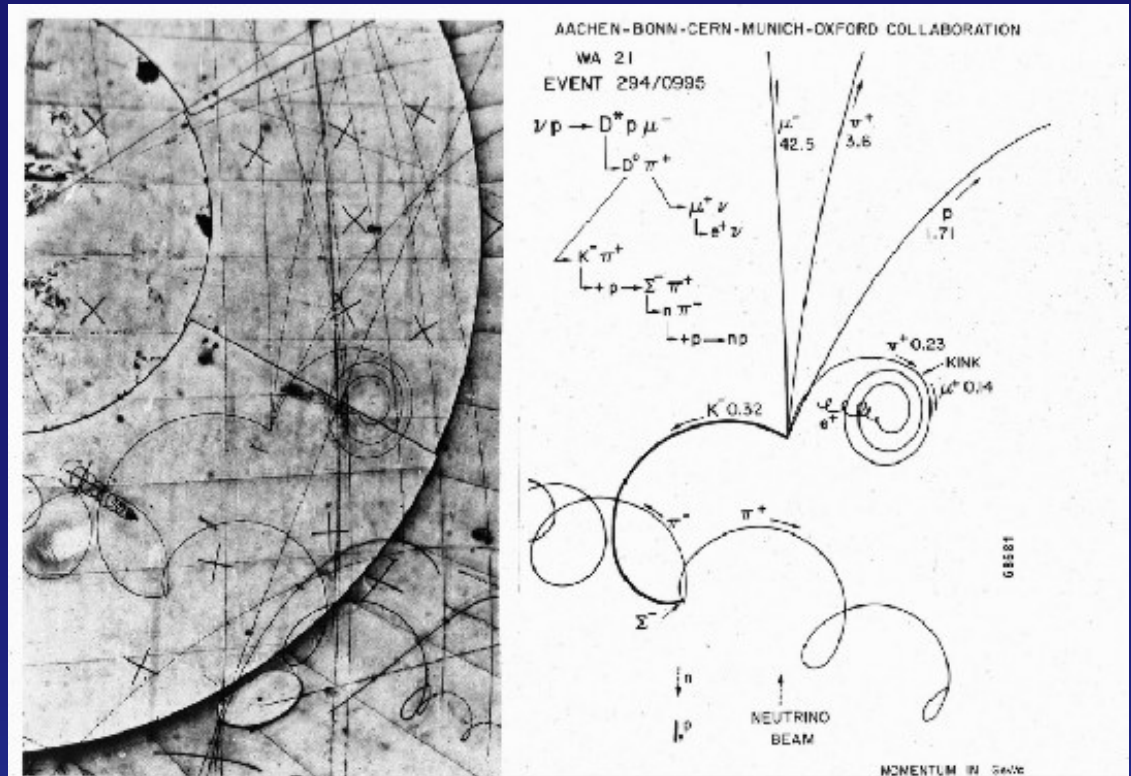
- ▶ Detektoren, die pro Teilchen mehrfach den Ort beim Durchgang des Teilchens durch das sensitive Volumen bestimmen, nennt man spurdefinierende Detektoren

- ▶ Beispiele

- Nebelkammer
- Blaskammer
- Funkenkammer
- Drahtkammer
- Halbleiterdetektoren

- ▶ In allen diesen Fällen nutzt man die ionisierende Wirkung geladener Teilchen beim Durchgang durch die Materie des Detektors

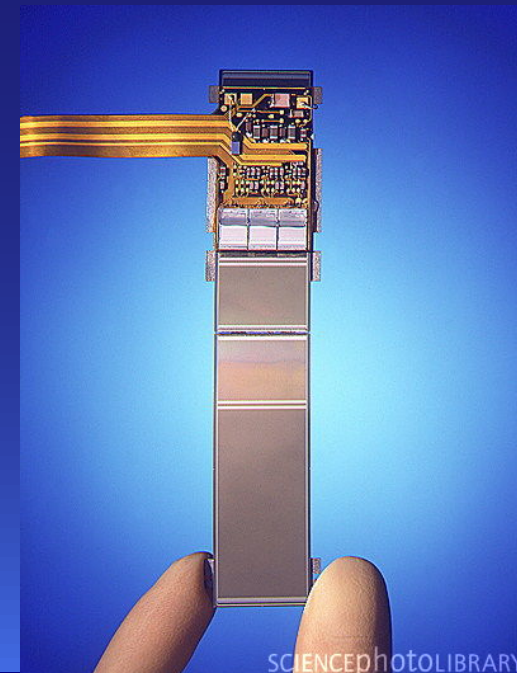
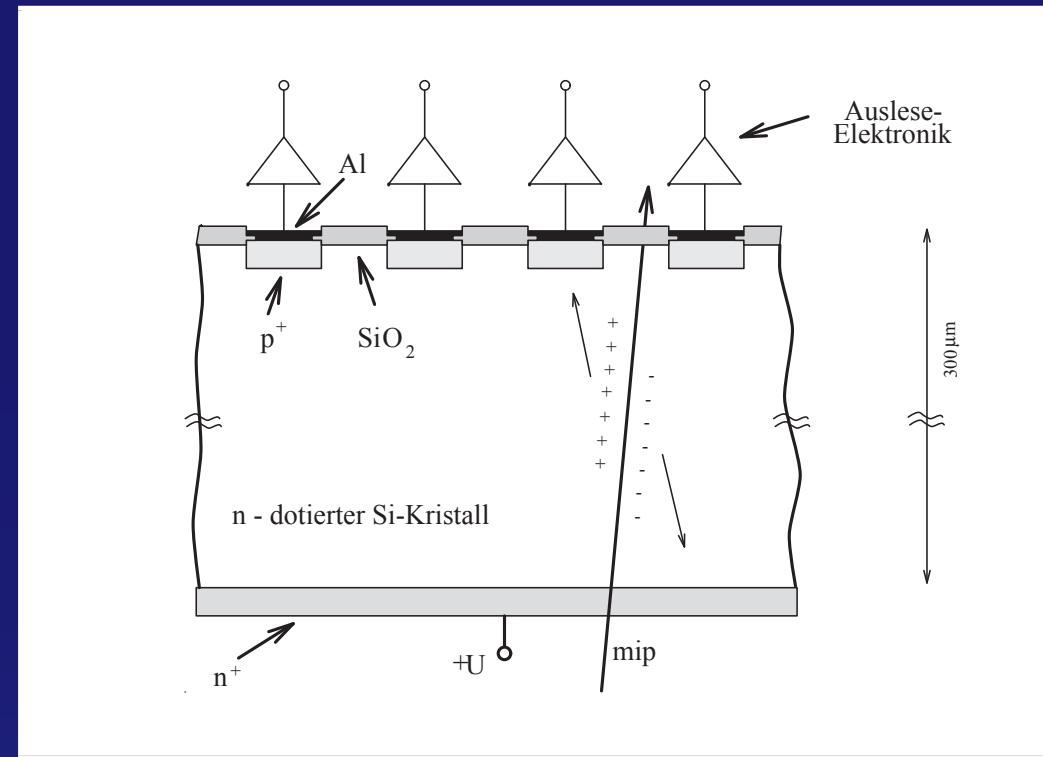
- In der Nebelkammer bilden Luftionen Kondensationskeime ▶ Wassertröpfchen entlang der Spur
- Die überhitzte Flüssigkeit in einer Blaskammer beginnt an den Ionen zuerst zu kochen ▶ Gasblasen entlang der Spur
- Spannungspulse durch primäre Elektron-Ionen-Paare, die durch ein elektrisches Feld beschleunigt wieder Elektron-Ionen-Paare erzeugen ▶ Signale zwischen Elektrodenpaaren entlang der Spur



▶ Prinzip eines Silizium-Detektors

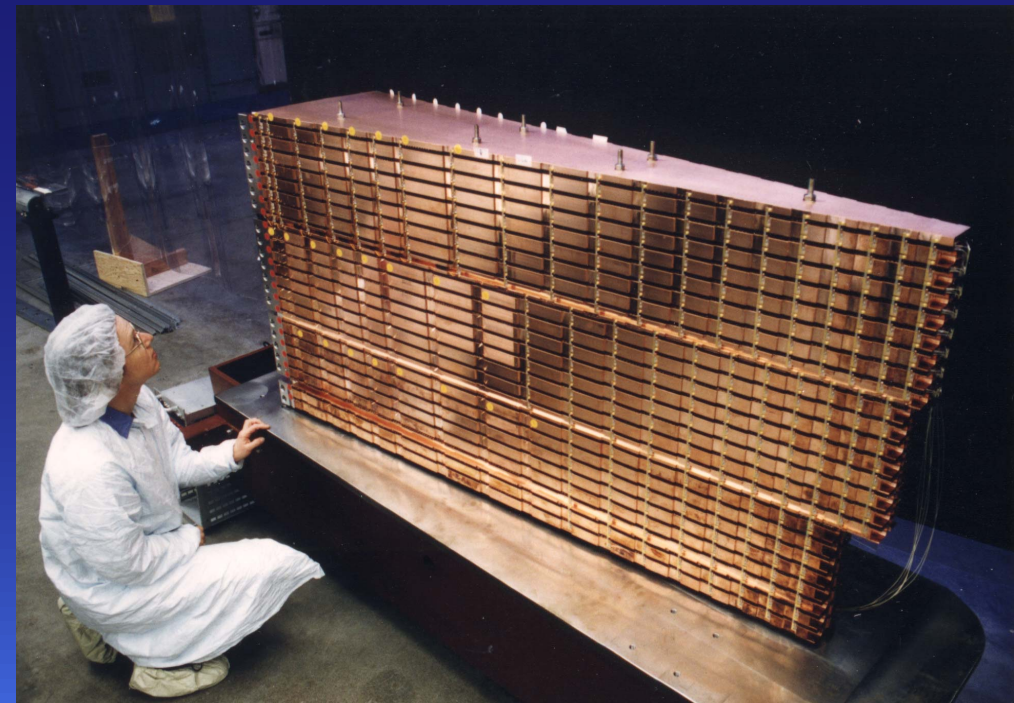
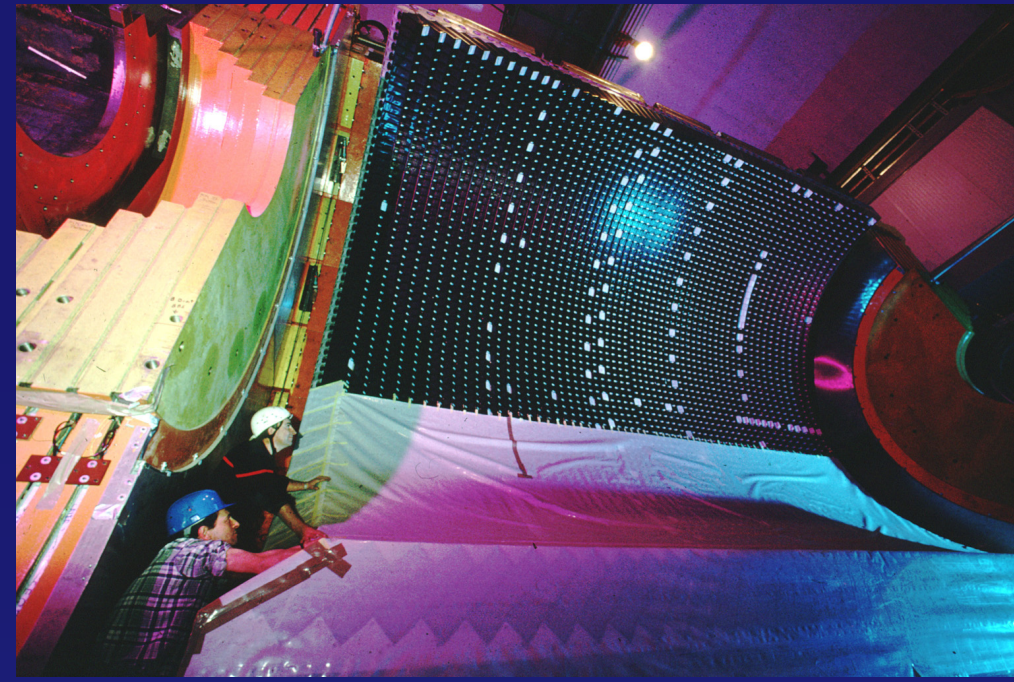
- im Grunde eine dünne (ca. $300\ \mu\text{m}$) Diode, die in Sperrichtung betrieben wird
- geladene Teilchen erzeugen durch Ionisation Elektronen-Loch Paare im Silizium
- Löcher und Elektronen wandern in entgegengesetzte Richtungen
- fein segmentierte (typisch sind $100\ \mu\text{m}$) Streifen oder Pixel ermöglichen sehr genaue ein- oder zweidimensionale Auslese

▶ Beispiel: Ein Modul des D0 Detektors (Fermilab)



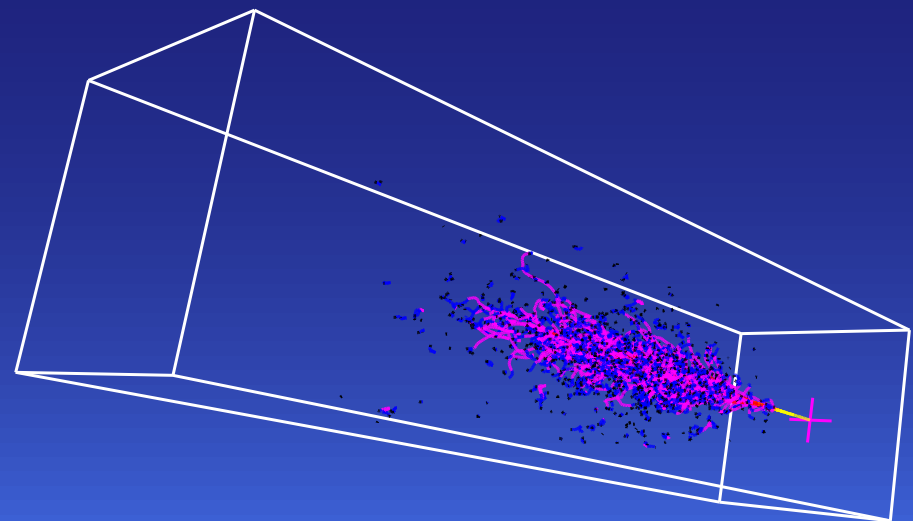
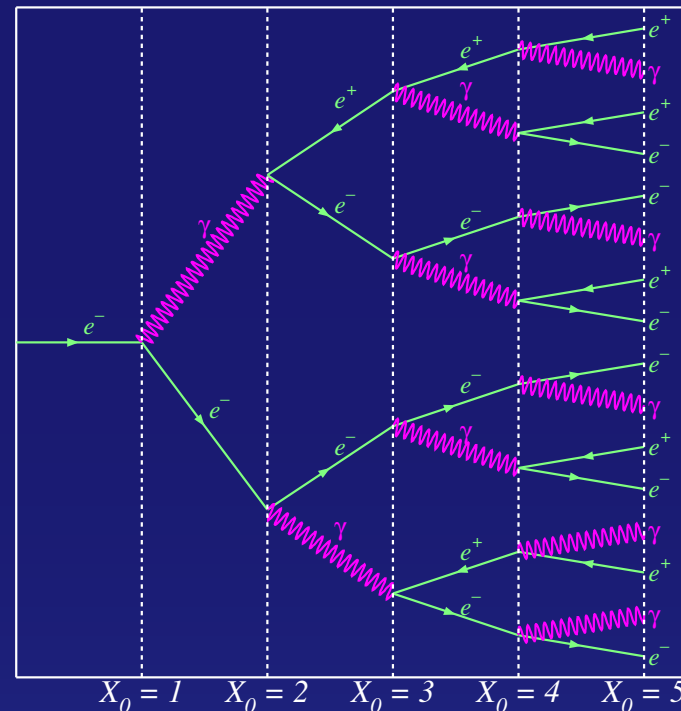
Kalorimeter

- ▶ Detektoren, die die Energie des in das sensitive Volumen einfallenden Teilchens messen, nennt man Kalorimeter
- ▶ Beispiele
 - homogene Kalorimeter
 - Samplingkalorimeter
- ▶ Anwendungen
 - elektromagnetische Kalorimeter (γ , e^\pm) (z.B. OPAL EM Barrel (oben))
 - hadronische Kalorimeter (π^\pm , n , p , ...) (z.B. ATLAS Had Endcap (unten))
- ▶ Signalbildung meist durch Ionisation oder die Ionisation begleitende Effekte (Szintillation, Čerenkov-Licht, etc.) der Teilchen im elektromagnetischen oder hadronischen Schauer



► Vereinfachtes elektromagnetisches Schauermodell (nach Rossi)

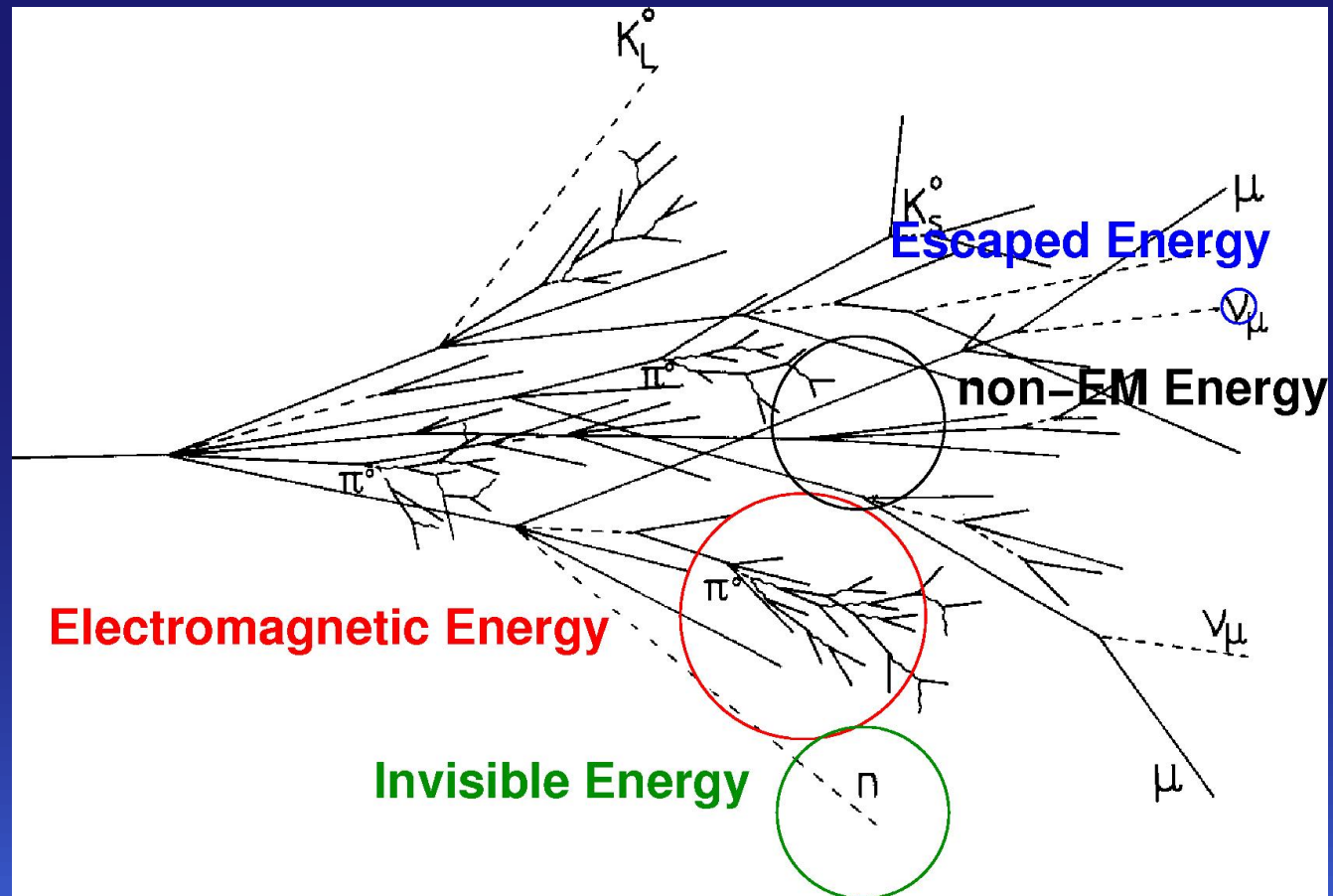
- Elektron mit Energie E_0 trifft auf das Kalorimeter
- Jedes Elektron/Positron strahlt nach genau einer Strahlungslänge ein Bremsstrahlungsphoton mit der halben Energie ab
- Jedes Photon konvertiert nach einer Strahlungslänge in ein $e^+ e^-$ -Paar mit je der Hälfte der Photonenergie
- Nach t Strahlungslängen besteht der Schauer aus 2^t Teilchen (e^+ , e^- , γ zu etwa gleichen Teilen) mit einer Energie von je $E_0/2^t$
- Sobald $E_0/2^t$ unterhalb eine kritische Schwelle sinkt, bricht der Schauer ab
 - $t_{\max} \sim \ln(E_0)$
 - die Schauertiefe skaliert logarithmisch mit der ursprünglichen Energie E_0 ; die Gesamtzahl der geladenen Teilchen mit E_0 .
- Schematische Entwicklung eines Schauers (oben) und etwas realistischer für ein 50 GeV Elektron in Bleiglas (unten)



Kalorimeter ► Hadronische Schauer

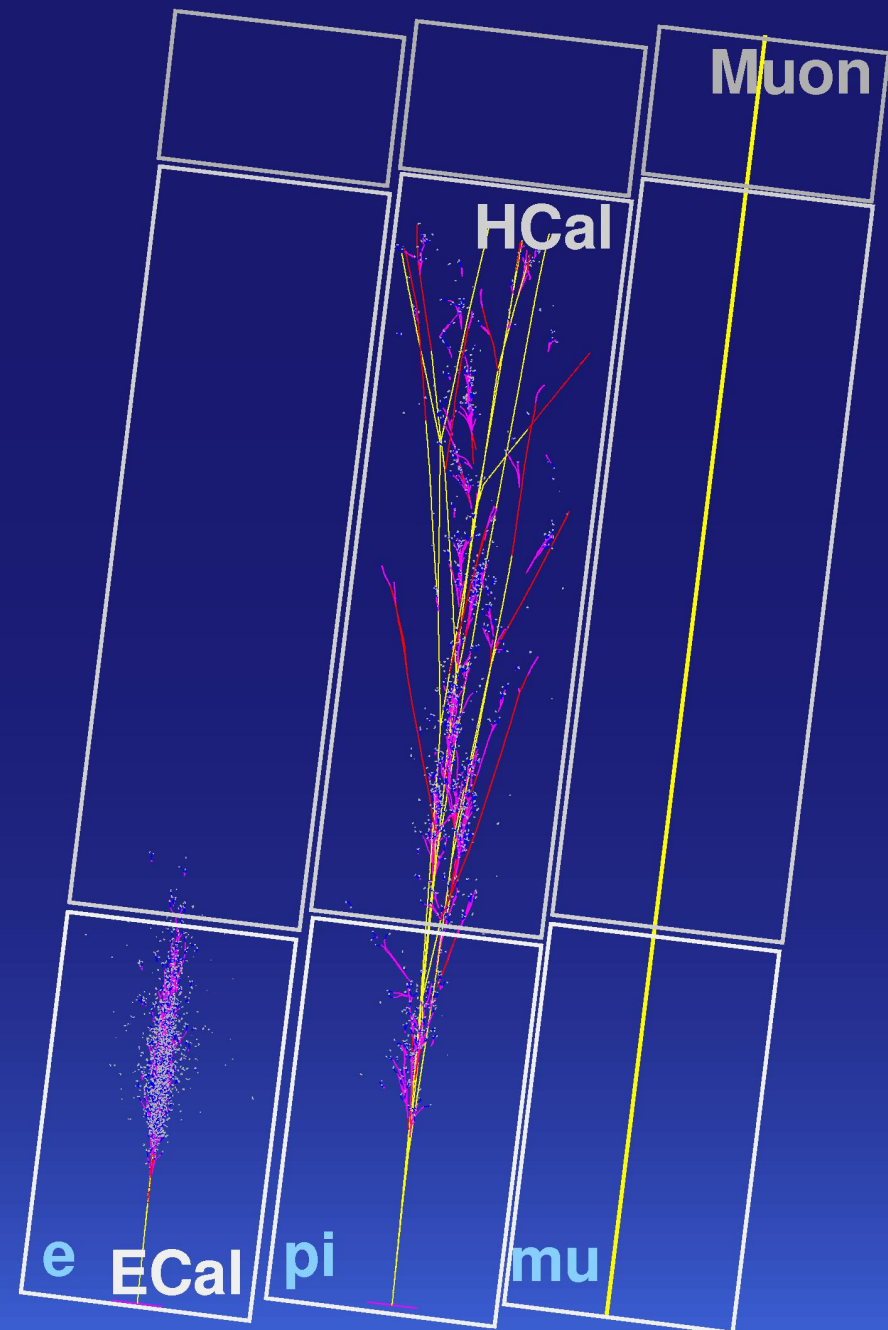
- Hadronische Wechselwirkungen werden durch die nukleare Wechselwirkungslänge λ beschrieben
- Typische Kalorimeter benutzen Materialien mit $\lambda \simeq 10X_0$
 - dabei entstehen im wesentlichen π^+ , π^- und π^0

- Die π^0 zerfallen sofort in $\gamma\gamma$ ► hadronische Schauer haben eine elektromagnetische Komponente mit etwa 1/3 der gesamten Energie für 10 GeV Pionen
- intrinsisches Antwortverhalten der Kalorimeterauslese ist typischerweise schlechter für Hadronen als für Elektronen (z.B. durch Neutronen) ► Das e/h -Verhältnis mißt diesen Unterschied



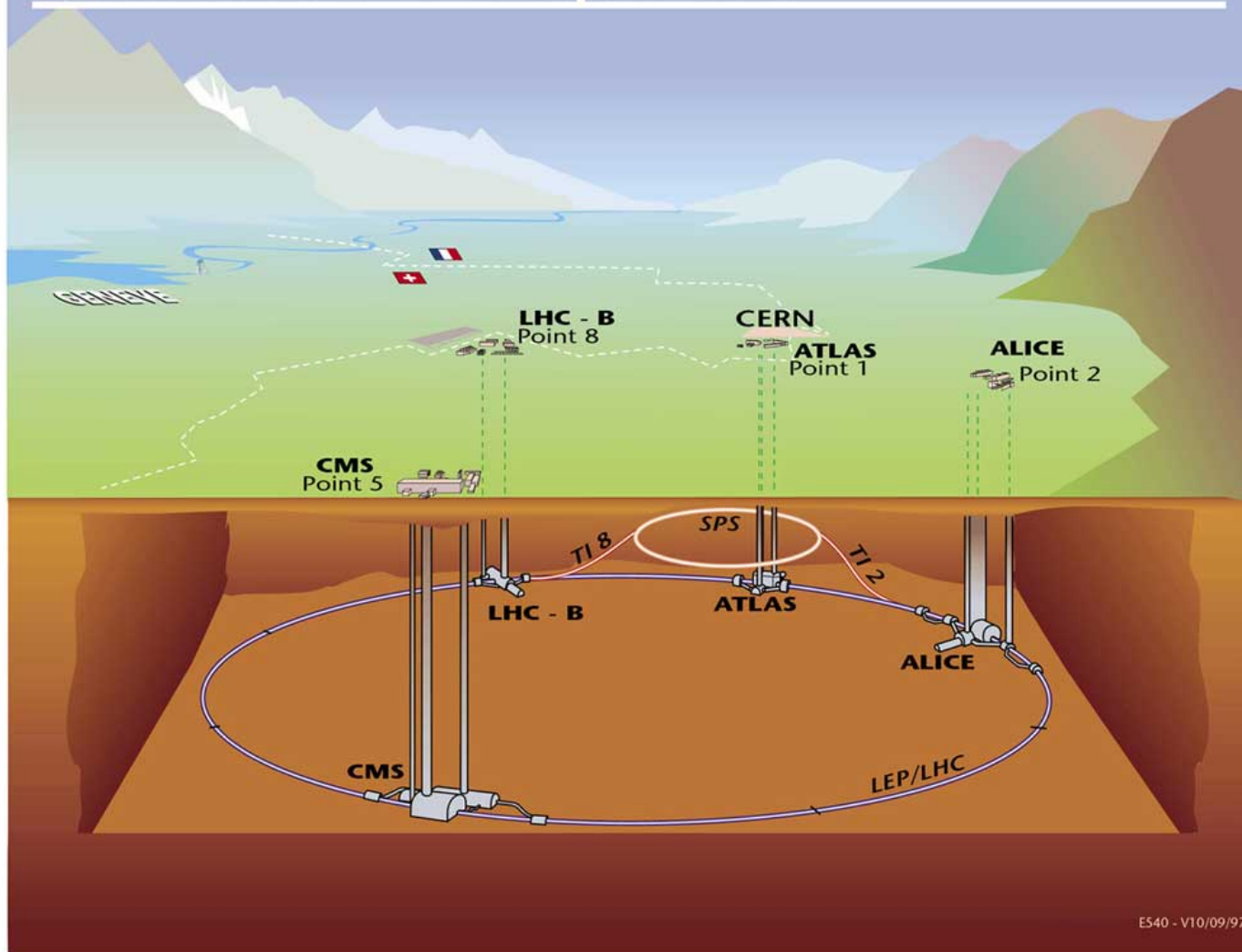
Myon Kammern

- ▶ Elektronen und Photonen werden im vorderen Teil des Kalorimeters (elektromagnetisches Kalorimeter) nachgewiesen
 - Elektronen hinterlassen außerdem eine Spur im inneren Detektor
- ▶ Pionen, Neutronen und Protonen verursachen hadronische Schauer und werden im gesamten Kalorimeter nachgewiesen
 - Pionen und Protonen hinterlassen außerdem eine Spur im inneren Detektor
- ▶ Myonen verursachen keinen Schauer und hinterlassen nur Ionisationsenergie im Kalorimeter
 - und eine Spur im inneren Detektor
 - sowie als einzige Teilchen Spuren im äußeren Detektor (den Myon-Kammern)
- ▶ Neutrinos wechselwirken gar nicht und verlassen daher unbemerkt den Detektor
 - können aber indirekt über den fehlenden Transversalimpuls nachgewiesen werden



Der Large Hadron Collider LHC

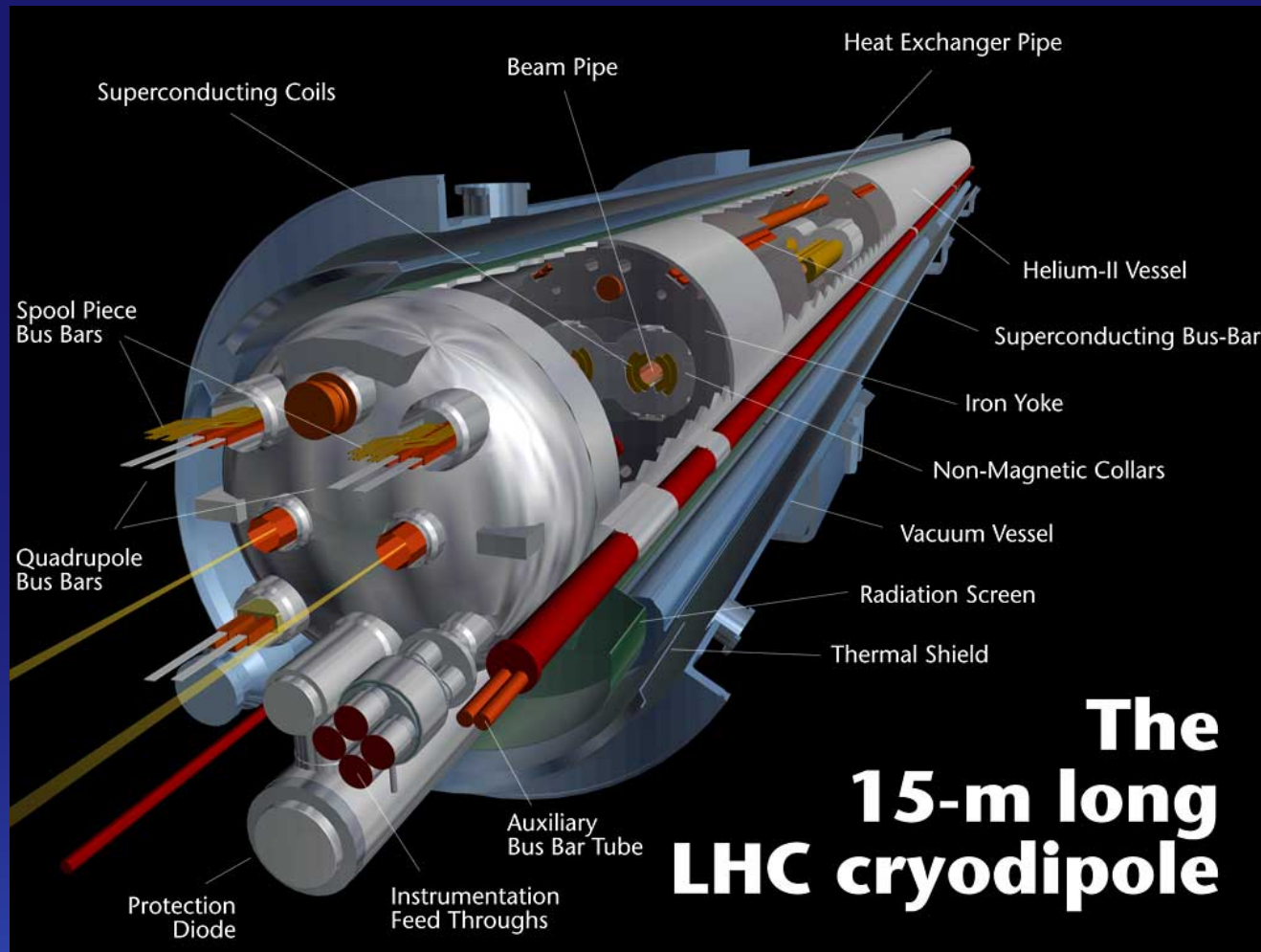
Overall view of the LHC experiments.



- ▶ LHC:
Proton-Proton
Kollisionen bei
Schwerpunkts-
energien
 $\sqrt{s} = 7 \& 8 \text{ TeV}$
seit März 2010
- ▶ Erster Betrieb
September 2008
- ▶ Unfall kurz nach
Inbetriebnahme
▶ Reparatur bis
Ende 2009
- ▶ Ende 2009 -
Anfang 2013
stabiler Betrieb
- ▶ Momentan:
Pause bis 2015,
um auf 14 TeV
umzustellen

Der Large Hadron Collider LHC

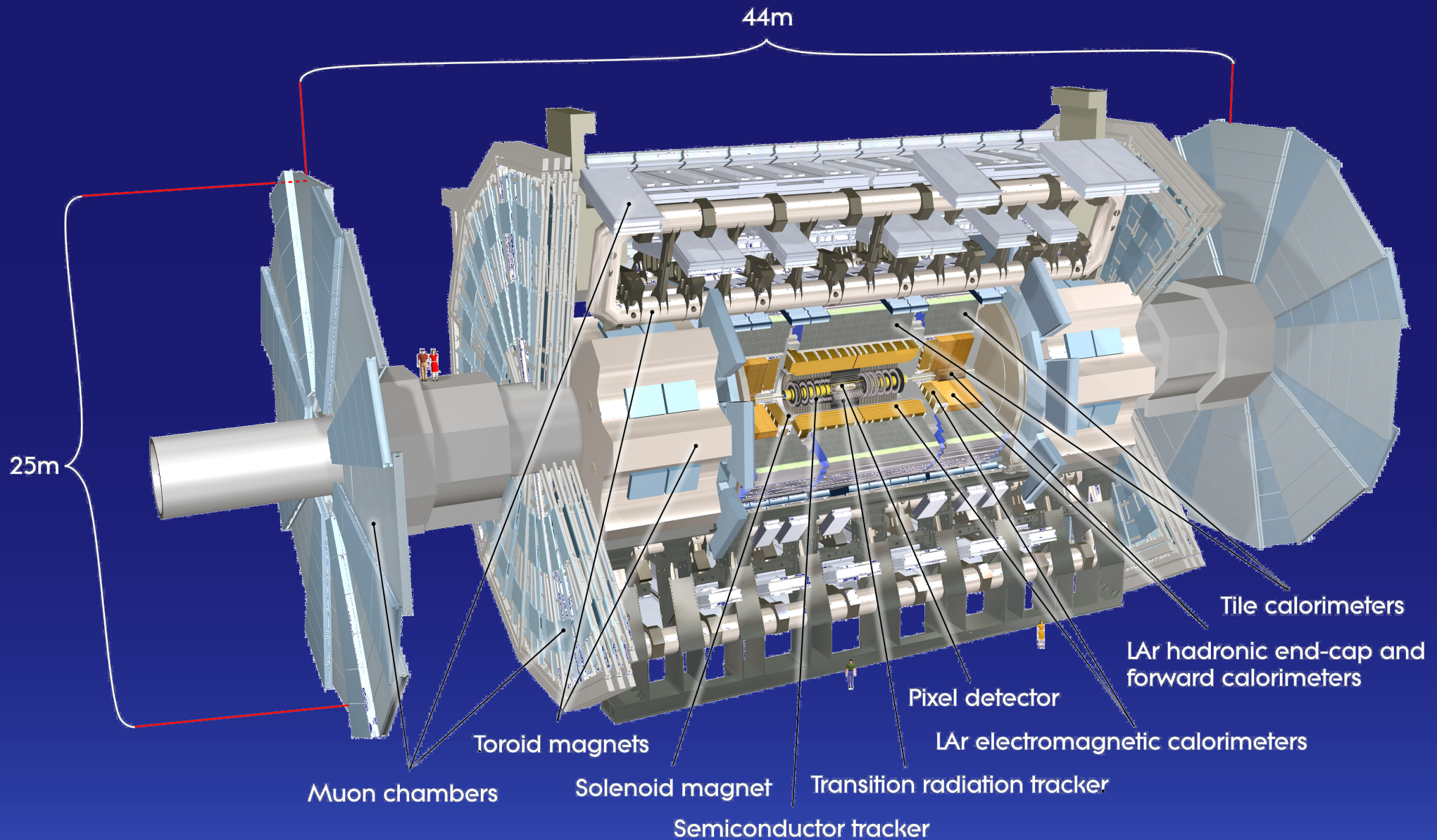
- ▶ 1232 supraleitende Dipole (jeder 15 m lang)



- ▶ 27 km langer Tunnel
- ▶ Protonen kreisen ca. 11000 Mal pro Sekunde
- ▶ Alle 25 ns kollidieren 2 der 2×2800 Protonenpäckchen mit je 10^{11} Protonen
- ▶ Alle Protonen zusammen haben die kinetische Energie eines ICE3 bei 200 km/h

- ▶ Einzelne Stöße haben nur die Energie zweier Mücken, die im Flug zusammenstoßen

Der ATLAS Detektor

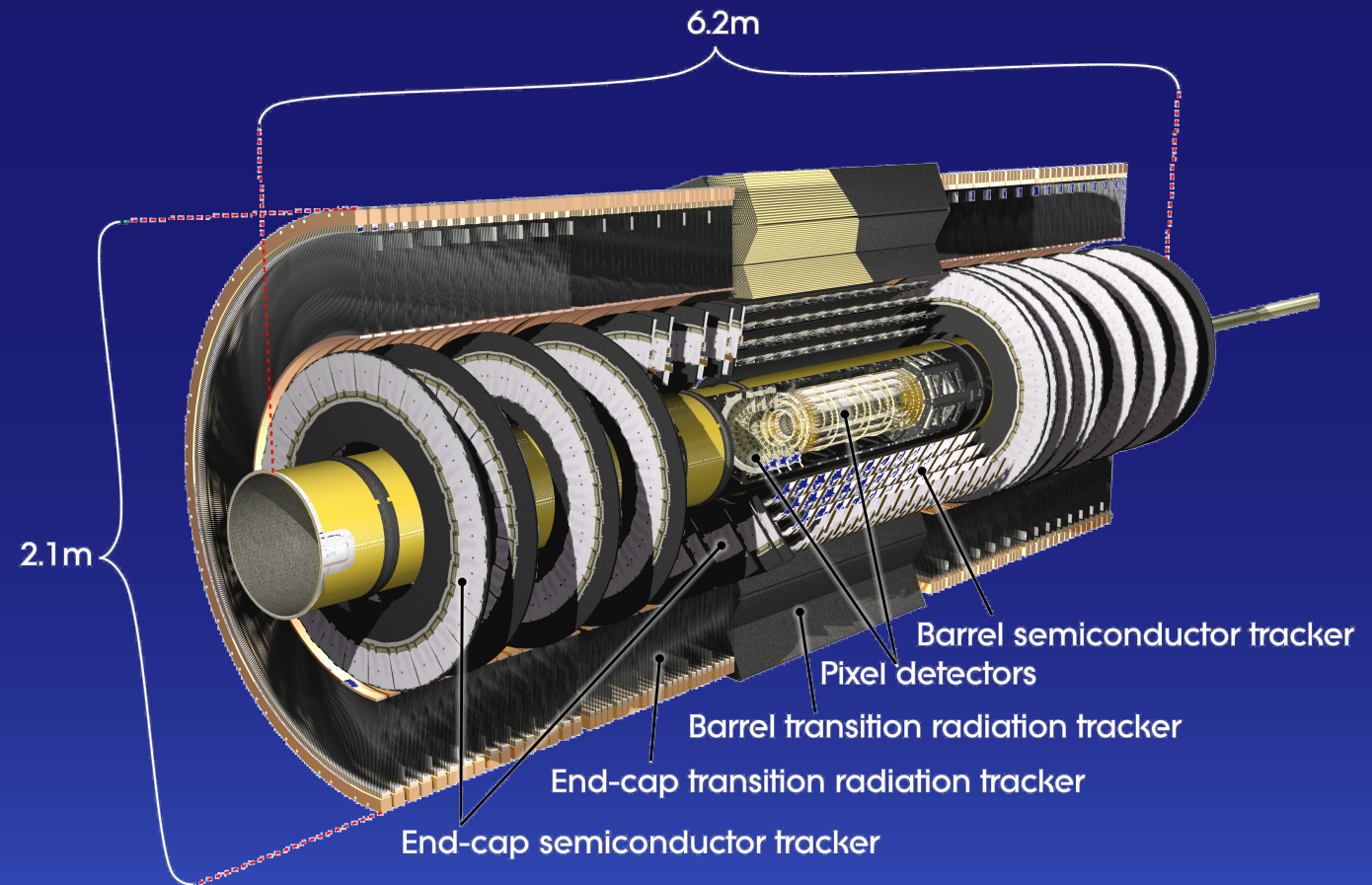


A Torodial LHC AparatuS: 25 m hoch; 44 m lang; 7000 t schwer

Der ATLAS Detektor ▶ Spurdetektor

- ▶ Silizium Detektoren (Pixel und Streifendetektoren)
- ▶ In einem 2 T starken Magnetfeld (Feldrichtung parallel zur Strahlrichtung)

- ▶ 80.4×10^6 Pixel ($50 \times 400 \mu\text{m}^2$)
- ▶ 6.3×10^6 Silizium Streifen ($80 \mu\text{m} \times 2 \times 6.4 \text{cm}$)
- ▶ 351×10^3 „Strohkammern“ messen Übergangsstrahlung zur Teilchenidentifikation



- ▶ Auflösung des Spurdetektors: $\sigma_{p_T}/p_T = 0.038\% p_T(\text{GeV}) \oplus 1.5\%$

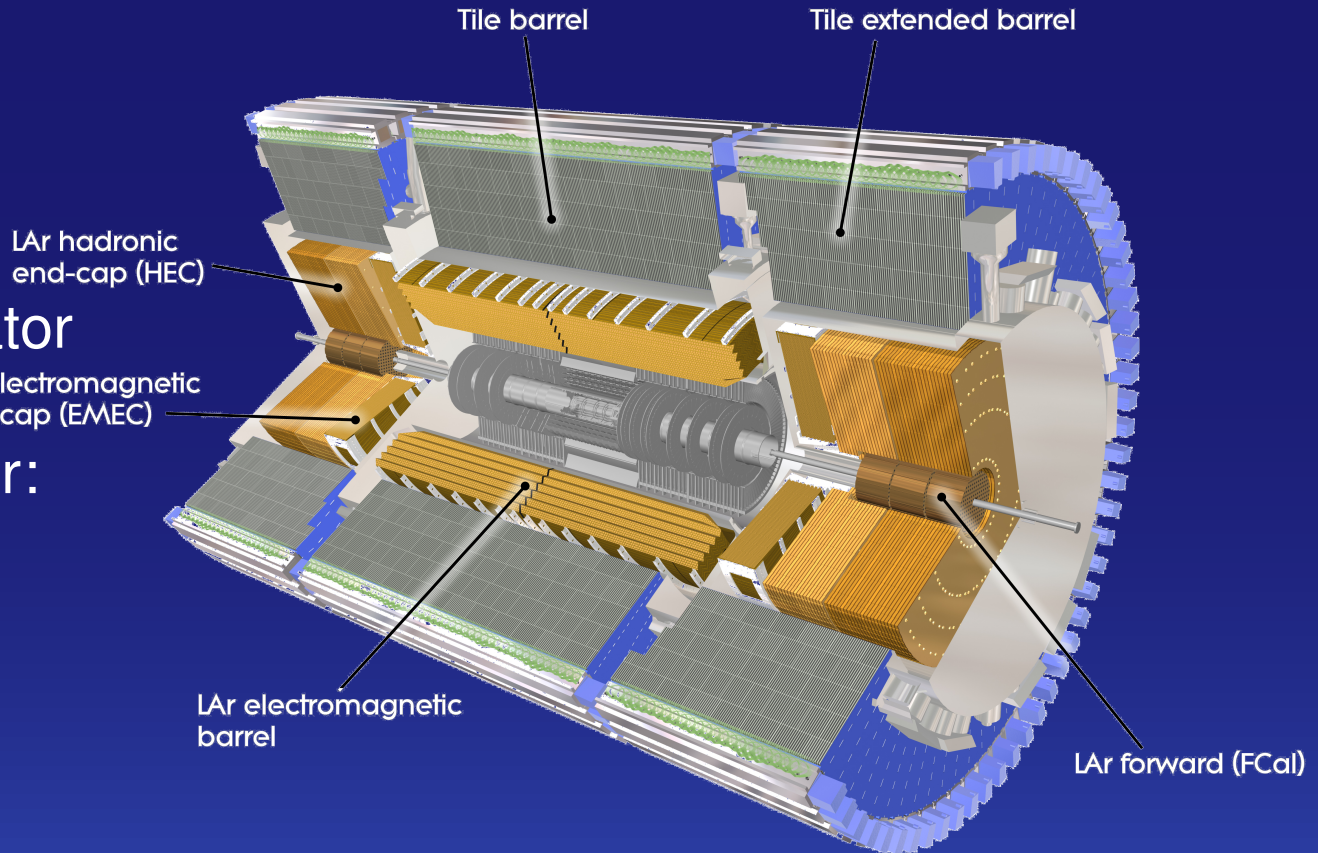
Der ATLAS Detektor ▶ Kalorimeter

- ▶ Elektromagnetisches Kalorimeter: LAr/Pb Akkordion
- ▶ Blei ist der Absorber (produziert die Sekundärteilchen)
- ▶ Flüssiges Argon wird ionisiert und weist das Signal nach

- ▶ Hadronisches Zentralkalorimeter: Eisen/Plastik-Szinitillator

- ▶ Hadronisches Endkappenkalorimeter: LAr/Cu

- ▶ Forwärtskalorimeter: LAr/Cu(W)

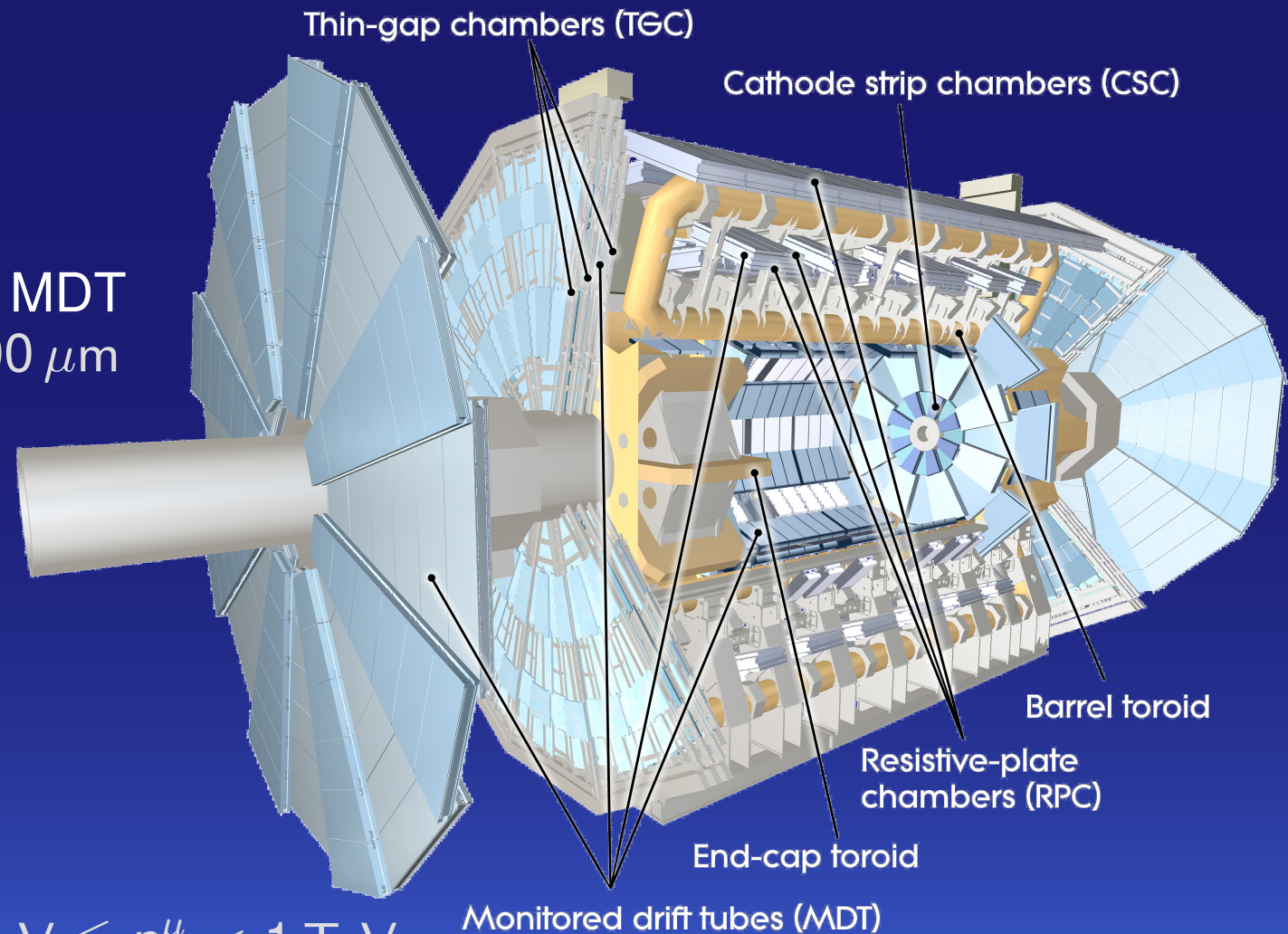


- ▶ 190×10^3 Auslesekanäle
- ▶ Auflösung für e/γ : $\sigma_E/E \simeq 10\%/\sqrt{E}$
- ▶ Für jets: $\sigma_E/E \simeq 50\%/\sqrt{E} \oplus 3\%$

Der ATLAS Detektor ▶ Myon-Kammern

- ▶ Myon-Kammern befinden sich in einem torodialelem Magnetfeld (ringförmig um Detektorachse) mit einer Biegestärke von 2 – 8 Tm

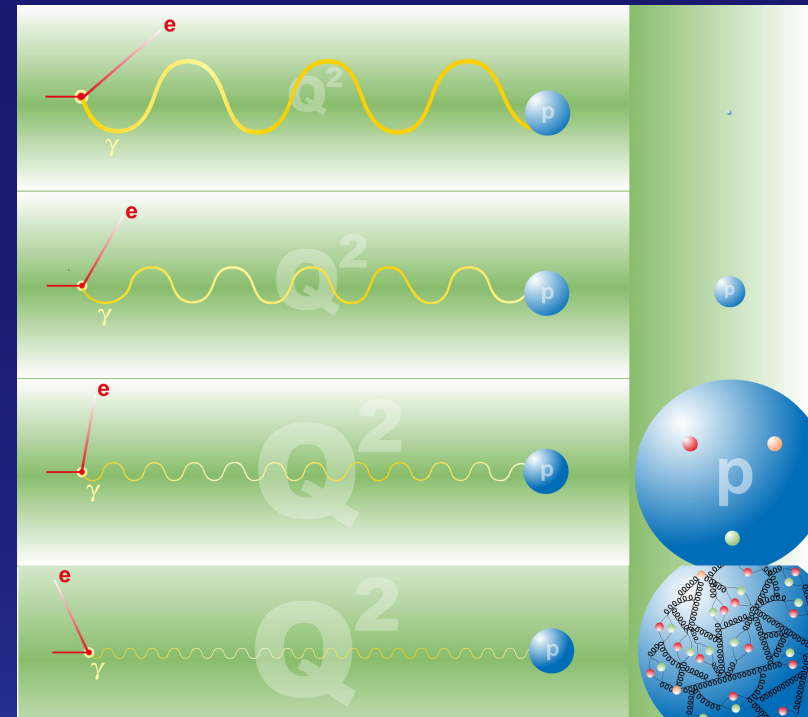
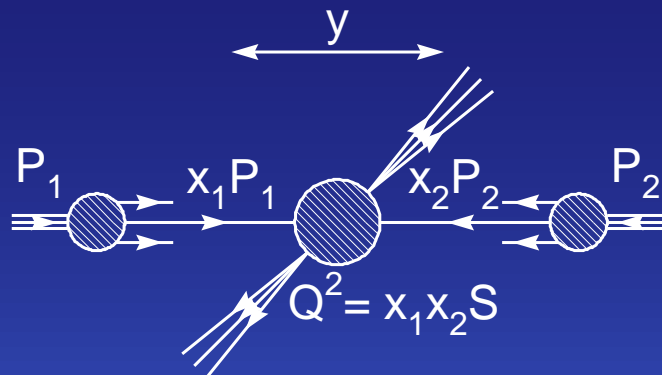
- ▶ Ortsauflösung der MDT Kammern $\sigma_x \simeq 100 \mu\text{m}$



- ▶ $\sigma_{p_T} < 10\%$ für $3 \text{ GeV} \lesssim p_T^\mu < 1 \text{ TeV}$

ATLAS Analyse

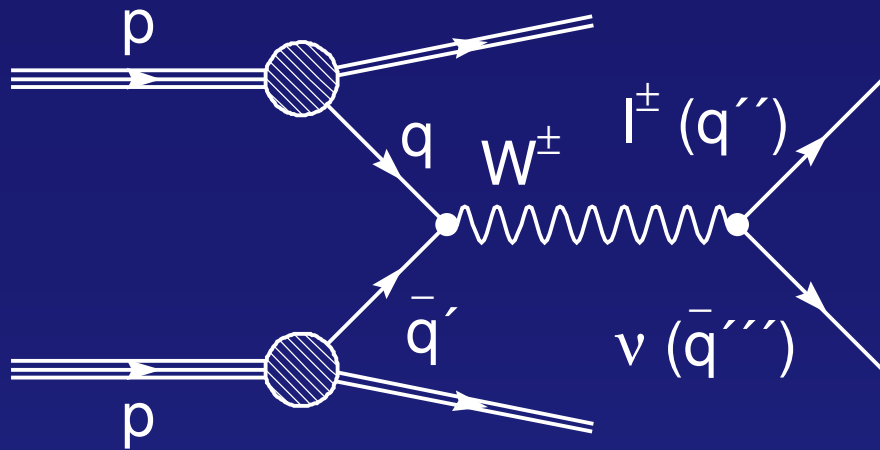
- ▶ Beim LHC kollidieren Protonen mit exakt entgegengesetztem Impuls
- ▶ Je höher die Energie der Protonen, um so mehr Substruktur bekommt man zu sehen
- ▶ Bei ganz niedrigen Energien sieht das Proton wie ein Teilchen aus
- ▶ Bei mittleren Energien sieht man die 3 Valenzquarks des Protons
- ▶ Bei hohen Energien sieht man immer mehr Quark-Antiquark-Paare und Gluonen



- ▶ D.h. beim LHC kollidieren nicht Protonen, sondern einzelne Quarks und Gluonen!

W-Boson Produktion

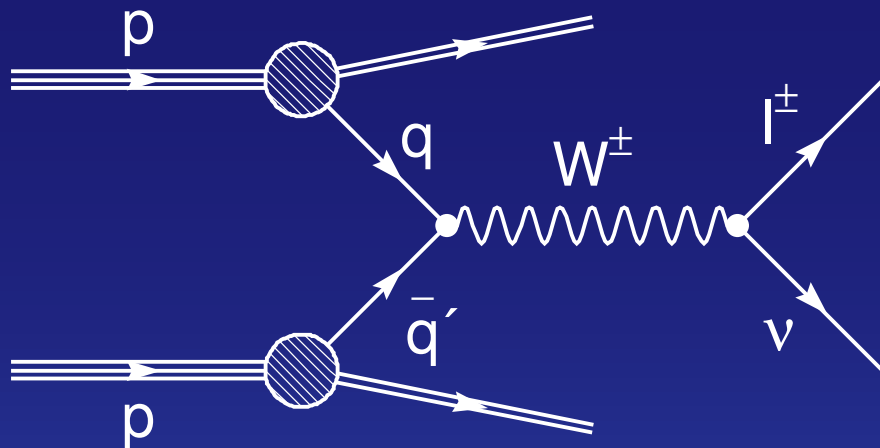
- ▶ In niedrigster Ordnung kollidieren ein Quark (q) und ein Anti-Quark (\bar{q}') aus den Protonen, wobei ein Quark die Ladung $\pm 2/3e$ und das andere die Ladung $\mp 1/3e$ trägt, und bevorzugt beide Quarks aus derselben Familie stammen



- ▶ Die beiden Quarks zerstrahlen zu einem W-Boson
- ▶ Das W-Boson zerfällt sofort in ein Lepton (l) (Elektron, Myon, Tau) und Neutrino (ν) oder in ein Quark (q'') und ein Anti-Quark (\bar{q}''') – wieder bevorzugt aus einer (aber u.U. einer anderen als vorher) Familie
- ▶ Quarks (und τ -Leptonen) sind als Teilchenbündel (Jets) sichtbar
- ▶ Elektronen als isolierte Spur und Kalorimeter-Energie
- ▶ Myonen als isolierte Spur, kaum Kalorimeter-Energie und Myon-Kammer Treffern
- ▶ Neutrinos erkennt man am fehlenden Transversalimpuls (MET: Missing Energy in Transverse Projection)

W-Boson Produktion

- ▶ Das W-Boson ist sehr schwer (80.4 GeV) und daher wird es im wesentlichen in Strahlrichtung erzeugt
- ▶ Die Protonenreste fliegen entlang der Strahlröhre weiter und werden nicht detektiert



- ▶ Die Signatur im leptonischen Kanal ist also:
 - ▶ eine isolierte Spur mit (Elektron) oder ohne (Myon) Energie
 - ▶ große fehlende transversale Energie, die in ϕ etwa einen 180° Winkel zur Leptonspur aufweist
 - ▶ sonst wenig Aktivität im Detektor

- ▶ Genau ein Elektron: $p_{\perp} > 20 \text{ GeV}$, $|\eta| < 1.37$ or $1.52 < |\eta| < 2.47$
- ▶ Oder genau ein Myon: $p_{\perp} > 20 \text{ GeV}$, $|\eta| < 2.4$
- ▶ Fehlende Transversalenergie MET $\cancel{E}_{\perp} > 25 \text{ GeV}$
- ▶ Transverse Masse des Leptonsystems $m_{\perp} > 40 \text{ GeV}$
($m_{\perp} = \sqrt{2p'_{\perp} \cancel{E}_{\perp} (1 - \cos\Delta\varphi)}$)
 - ▶ ungefähr $\Delta\varphi > 125^{\circ}$, falls kein Taschenrechner zur Hand

Mit diesen Selektionskriterien könnt ihr ATLAS Daten untersuchen und das Verhältnis von positiven zu negativen W-Bosonen bestimmen. Welchen Wert erwartet ihr?