



Diese Veranstaltung wird aufgezeichnet und als Medien-Cast über KIT - ILIAS bereit gestellt

Nur zur KIT-internen vorlesungsbegleitenden Nutzung, Weitergabe & anderweitige Verwendung ist untersagt

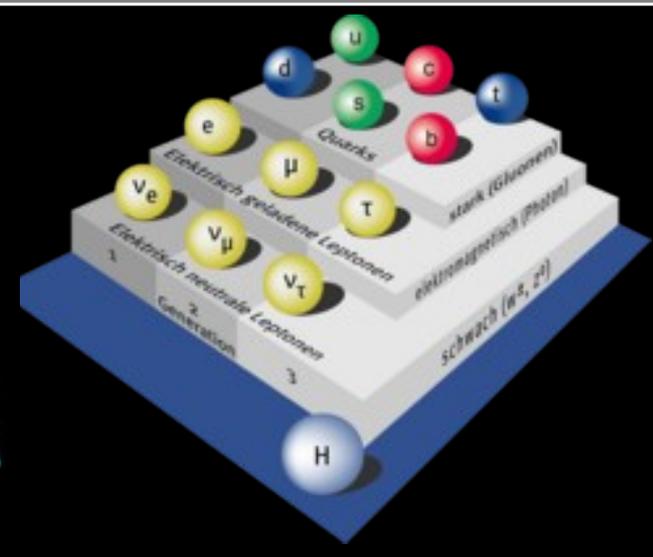
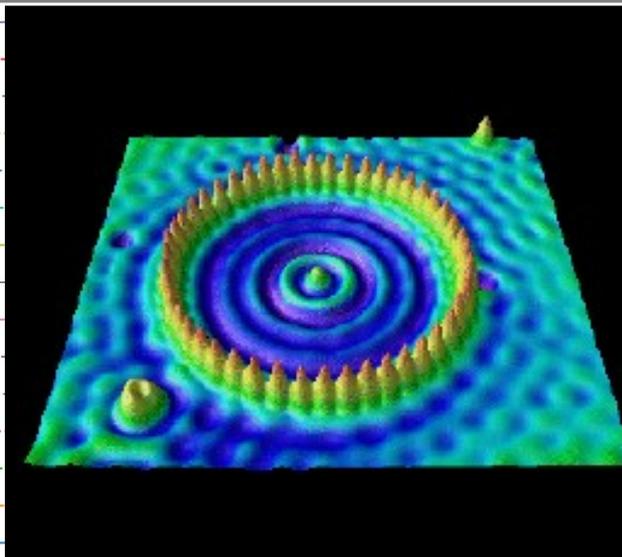
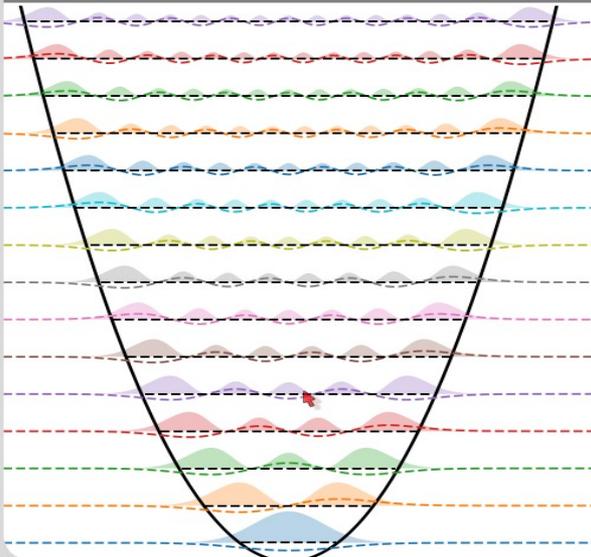
Vorlesung **Moderne Physik (L)**

Einführung in die Teilchenphysik

Günter Quast

Fakultät für Physik
Institut für Experimentelle Teilchenphysik

SS '20



Schriftliche Modulprüfung:

Termin: Mittwoch, 05.08.2020, 9 Uhr,

Physikhochhaus, Seminarräume 3.1 und 6.1

Bearbeitungsdauer: 2 Stunden

Hilfsmittel: Stift, Taschenrechner (nicht programmierbar)

Voraussetzung: bestandene Vorleistung

Ergebnisse: vorläufige Veröffentlichung im Campussystem

Einsichtnahme: Mo. 10.08.2020, 14:00–15:30 Uhr,

Physikhochhaus, Raum 9-1

Mündliche Prüfung

1. Block: 12. - 14. August

2. Block: 1. - 3. September

- Voraussetzung: bestandene Vorleistung,
Anmeldung im Campussystem

Weitere Prüfungstermine Anfang Oktober

Terminvereinbarung via E-Mail an Guenter.Quast@kit.edu

Hauptseminar für Lehramt:

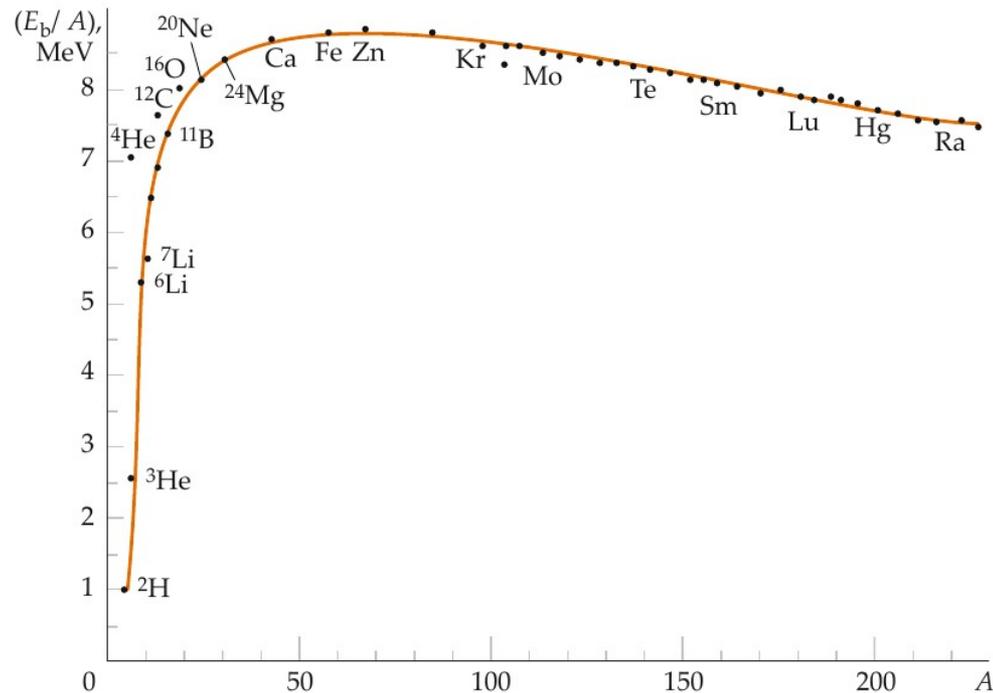
s. Ankündigung im Vorlesungsverzeichnis und

Webseite <http://www.physik.kit.edu/Studium/Lehramt/>

• Energiegewinn durch Kernumwandlungen

Bethe-Weizsäcker-Formel für die Bindungsenergie

$$E_b = a_V \cdot A + a_O \cdot A^2 - a_C \cdot \frac{Z(Z-1)}{A^{1/3}} - a_A \cdot \frac{(A/2 - Z)^2}{A} + a_P \cdot A^{1/2} \cdot \begin{cases} +1 & \text{gg} \\ 0 & \text{gu/ug} \\ -1 & \text{uu} \end{cases}$$



- Schwere Kerne haben eine geringere Bindungsenergie/Nukleon als leichte
 → **Energiegewinn durch Spaltung**
- sehr leichte Kerne haben eine geringere Bindungsenergie/Nukleon als schwerere
 → **Energiegewinn durch Fusion**

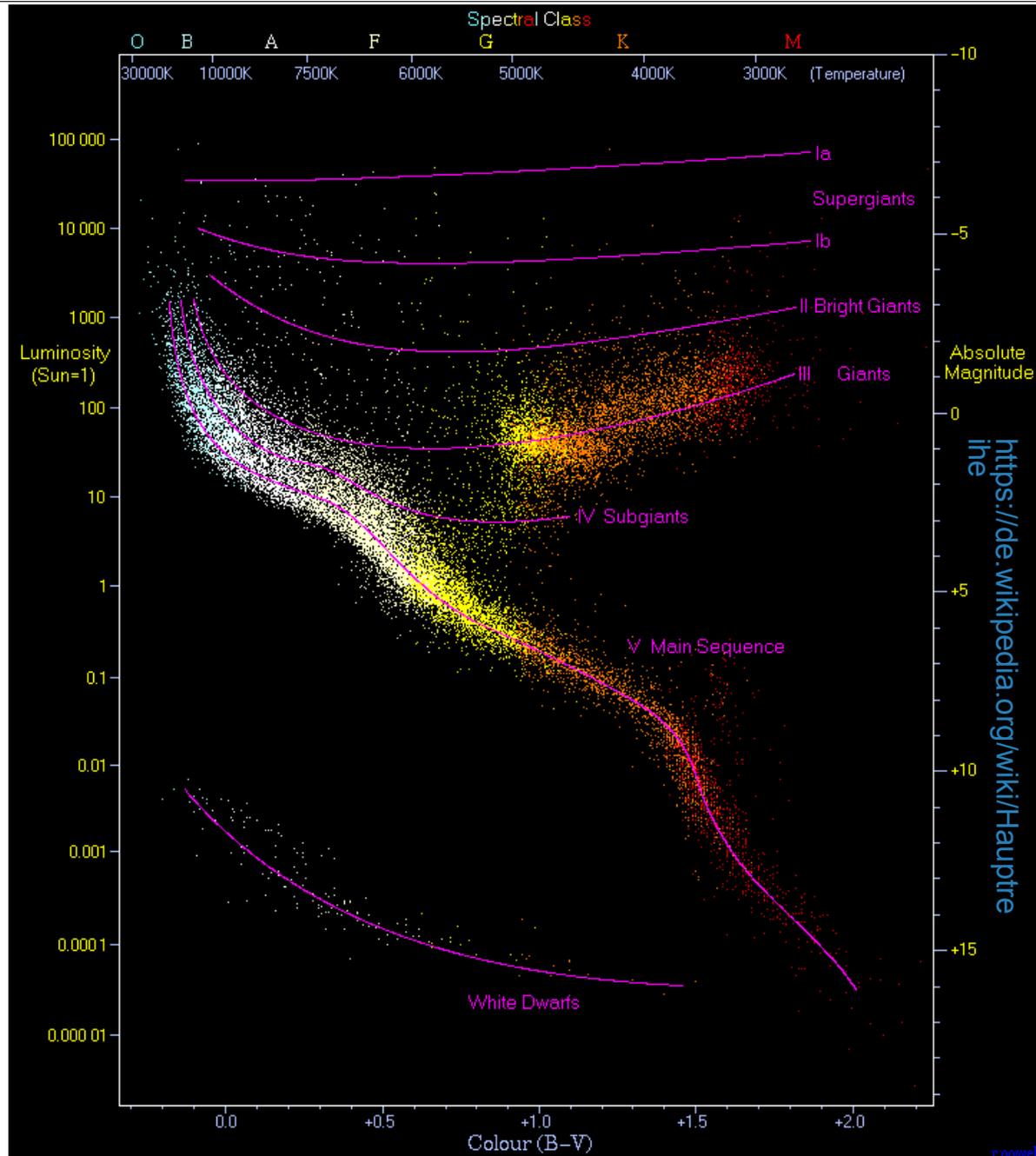
• Sternentwicklung

Helligkeits-Farbdigramm
oder
Hertzsprung-Russel-Diagramm

Oberflächentemperatur gegen
(auf den Abstand korrigierte)
Helligkeit

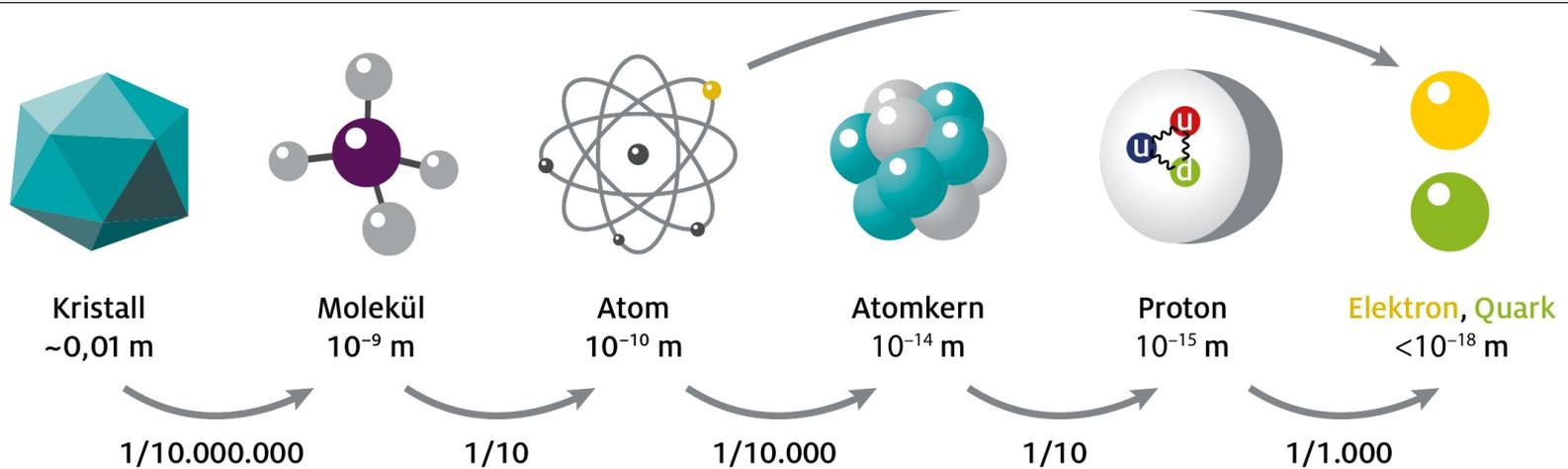
- Sterne auf der „Hauptreihe“
 - „verbrennen“ Wasserstoff
 - Zustand stabil

- Heliumbrennen bzw.
Schalenbrennen
 - Stern wird instabil
 - Masse des Sterns bestimmt
den Verlauf der Entwicklung



Inhaltsübersicht VL Moderne Physik

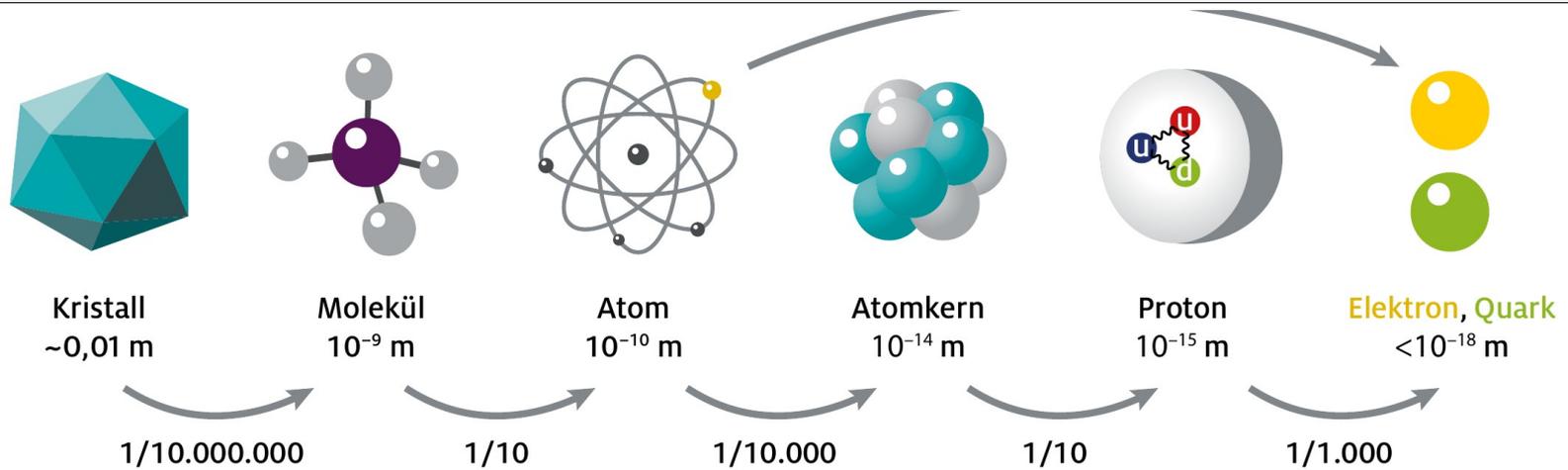
- 1) Einführung
- 2) Wiederholung wichtiger Konzepte der klassischen Physik
- 3) Spezielle Relativitätstheorie
- 4) Schlüsselexperimente und Grundlagen der Quantenphysik
- 5) Die Schrödingergleichung
- 6) Anwendungen der Schrödingergleichung
- 7) Das Wasserstoff-Atom
- 8) Atome mit mehreren Elektronen
- 9) Wechselwirkung von Licht und Materie
- 10) Grundlagen der Festkörperphysik
- 11) Kernphysik
- 12) **Teilchenphysik**
- 13) Astrophysik und Kosmologie



Die **Teilchenphysik** ergründet die Eigenschaften von Elementarteilchen, daher auch der alternative Name „**Elementarteilchenphysik**“

Untersucht werden Größenordnungen, die deutlich kleiner sind als die Größe von Kernen, Protonen oder Neutronen.

Zur Auflösung so kleiner Objekte werden sehr kleine Wellenlängen, d.h. hohe Impulse und damit hohe Energien benötigt; daher rührt ein weiterer alternativer Name für das Forschungsfeld: „**Hochenergiephysik**“

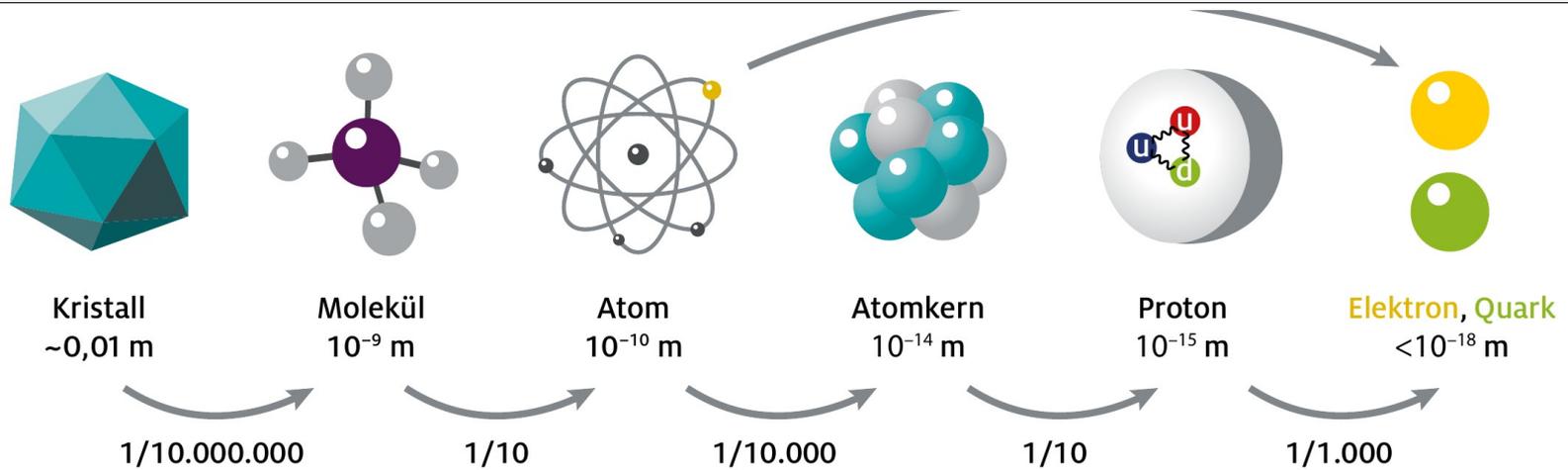


Die **Teilchenphysik** ergründet die Eigenschaften von Elementarteilchen, daher auch der alternative Name „**Elementarteilchenphysik**“

Untersucht werden Größenordnungen, die deutlich kleiner sind als die Größe von Kernen, Protonen oder Neutronen.

Zur Auflösung so kleiner Objekte werden sehr kleine Wellenlängen, d.h. hohe Impulse und damit hohe Energien benötigt; daher rührt ein weiterer alternativer Name für das Forschungsfeld: „**Hochenergiephysik**“

- Ursprung der Teilchenphysik war zunächst die Entdeckung neuer, in der irdischen Materie nicht vorkommender **Teilchen in der kosmischen Strahlung**



Die **Teilchenphysik** ergründet die Eigenschaften von Elementarteilchen, daher auch der alternative Name „**Elementarteilchenphysik**“

Untersucht werden Größenordnungen, die deutlich kleiner sind als die Größe von Kernen, Protonen oder Neutronen.

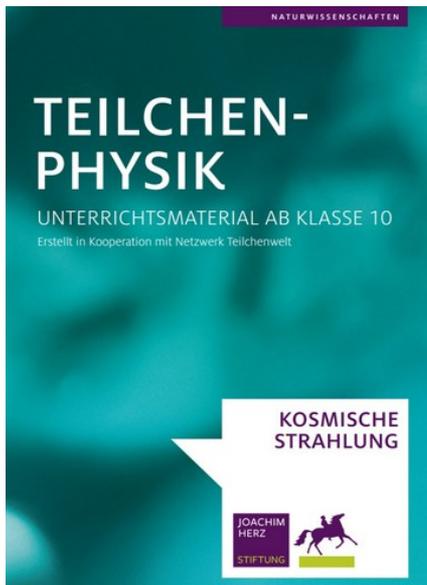
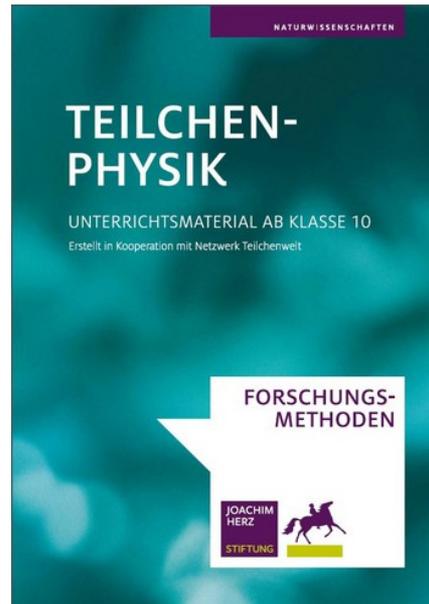
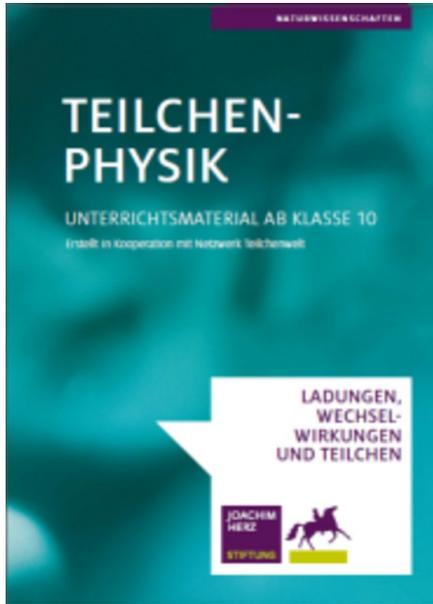
Zur Auflösung so kleiner Objekte werden sehr kleine Wellenlängen, d.h. hohe Impulse und damit hohe Energien benötigt; daher rührt ein weiterer alternativer Name für das Forschungsfeld: „**Hochenergiephysik**“

- Ursprung der Teilchenphysik war zunächst die Entdeckung neuer, in der irdischen Materie nicht vorkommender

Teilchen in der kosmischen Strahlung

- Seit den 50er Jahren des 20. Jhdt. verwendet man zur Suche nach neuen Teilchen und der präzisen Vermessung ihrer Eigenschaften leistungsfähige **Teilchenbeschleuniger**

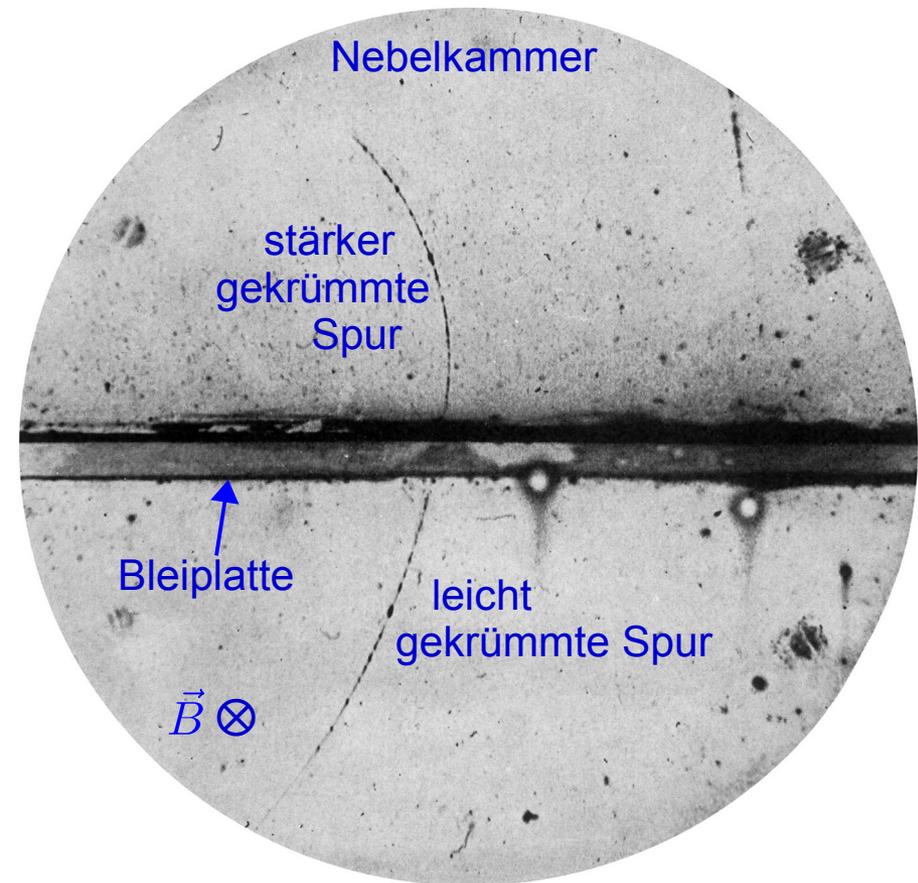
<https://www.teilchenwelt.de/material/materialien-fuer-lehrkraeften/>



Entdeckung der Antimaterie: **das Positron**

Antimaterie wurde 1928 von Paul. A.M. Dirac als Konsequenz der relativistischen Version der Schrödingergleichung postuliert (als Lösungen negativer Energie, ähnlich wie schon bei der Klein-Gordon-Gleichung angesprochen)

1932 von C.D. Anderson in der kosmischen Strahlung gefunden: ein Teilchen mit Eigenschaften wie das Elektron, allerdings mit positiver Ladung
→ **Positron**



Entdeckung der Antimaterie: **das Positron**

Antimaterie wurde 1928 von Paul. A.M. Dirac als Konsequenz der relativistischen Version der Schrödinger-Gleichung postuliert (als Lösungen negativer Energie, ähnlich wie schon bei der Klein-Gordon-Gleichung angesprochen)

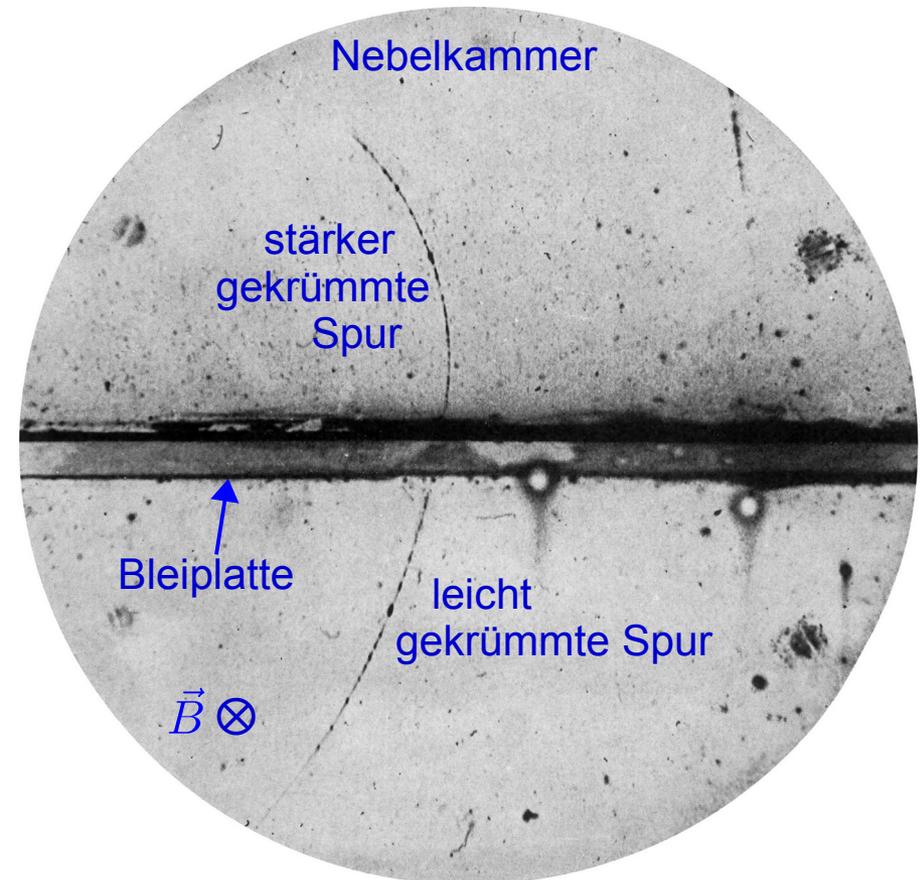
1932 von C.D. Anderson in der kosmischen Strahlung gefunden: ein Teilchen mit Eigenschaften wie das Elektron, allerdings mit positiver Ladung
→ **Positron**

Wir wissen heute:

zu jedem Teilchen

gibt es ein Antiteilchen

das neutrale π -Meson und das Photon sind ihre eigenen Antiteilchen.



Ein weiteres Teilchen wurde 1936 in der kosmischen Strahlung entdeckt:

das **Myon („ μ “)** (S. Neddermeyer und C.D. Anderson)

Die Entdeckung kam völlig unerwartet; zunächst dachte man, das neue Teilchen sei das Yukawa-Teilchen (s. Kernphysik)

Allerdings zeigte das neue Teilchen keinerlei starke Wechselwirkung, sondern die Eigenschaften glichen exakt jenen des Elektrons, bis auf die Masse, die 200 mal größer ist: $m_\mu = 105.7.. \text{ MeV}/c^2$

Myonen sind instabil und zerfallen über die schwache Wechselwirkung mit einer mittleren Lebensdauer von $2.197... \mu\text{s}$ in ein Elektron und zwei Neutrinos

Ein weiteres Teilchen wurde 1936 in der kosmischen Strahlung entdeckt:

das **Myon („ μ “)** (S. Neddermeyer und C.D. Anderson)

Die Entdeckung kam völlig unerwartet; zunächst dachte man, das neue Teilchen sei das Yukawa-Teilchen (s. Kernphysik)

Allerdings zeigte das neue Teilchen keinerlei starke Wechselwirkung, sondern die Eigenschaften glichen exakt jenen des Elektrons, bis auf die Masse, die 200 mal größer ist: $m_\mu = 105.7.. \text{ MeV}/c^2$

Myonen sind instabil und zerfallen über die schwache Wechselwirkung mit einer mittleren Lebensdauer von $2.197... \mu\text{s}$ in ein Elektron und zwei Neutrinos

Wegen der hohen Masse haben Myonen eine besondere Eigenschaft: **sie durchdringen Materie mit minimalem Energieverlust** durch Ionisation; Myonen entstehen hoch in der Atmosphäre und erreichen den Erdboden
(s. Übungsaufgabe zur Relativitätstheorie)

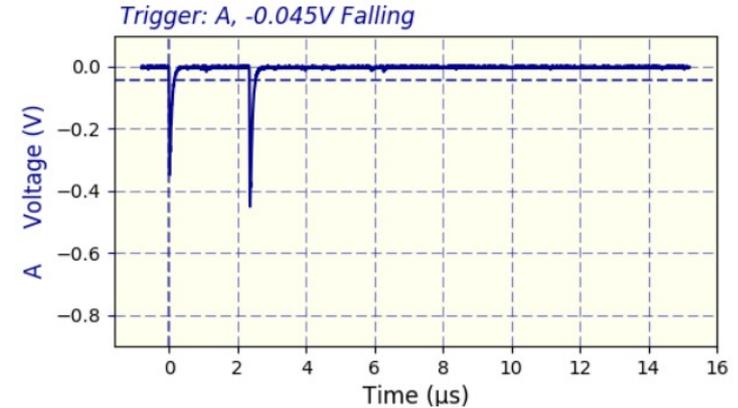
Kaffeekanne mit Wasser als

Wasser-Cherenkov-Zähler

Nachweis geladener Teilchen
aus der kosmischen Strahlung



Aufzeichnung mit PicoScope,
Steuerung, Datenvisualisierung und
Datenauswertung mit Raspberry Pi



Mit PicoScope und SW picoCosmo
aufgezeichnete Pulse aus der „Kamiokanne“

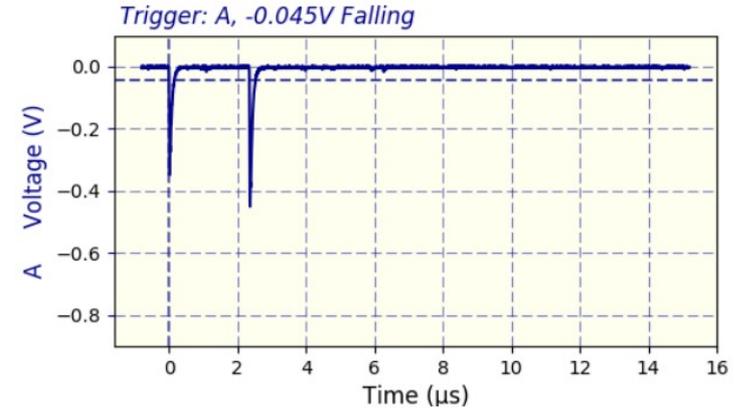
Kaffeekanne mit Wasser als

Wasser-Cherenkov-Zähler

Nachweis geladener Teilchen
aus der kosmischen Strahlung



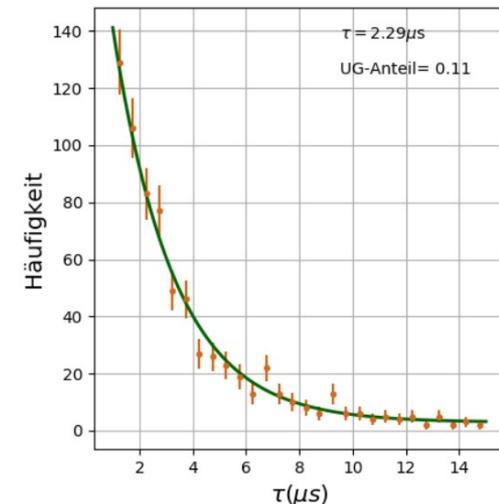
Aufzeichnung mit PicoScope,
Steuerung, Datenvisualisierung und
Datenauswertung mit Raspberry Pi



Mit PicoScope und SW picoCosmo
aufgezeichnete Pulse aus der „Kamiokanne“

Doppelpuls entsteht, wenn ein Myon
nach Durchgang gestoppt und das
Elektron aus dem Zerfall im Detektor
nachgewiesen wird

→ Messung der Myon-Lebensdauer



Bildschirmansicht der laufenden Datennahme

The screenshot displays a VNC viewer window titled 'pi3bgq1 (pi3bgq1) - VNC Viewer'. The main interface is divided into several sections:

- Top Left:** A visualization of 'Primäre kosmische Strahlung' (Primary cosmic radiation) showing particle tracks over a globe. Labels include 'PhyPi' and 'Cosmo'. A red arrow points to a specific track labeled 'Myon aus Luftschauer' (Muon from air shower).
- Top Center:** 'Buffer Manager Information' window showing 'TRun: 10792.7s', 'Triggers: 146031', 'Lifetime: 9321.6s (86.4%)', and 'current rate: 21.5Hz'. It includes a 'rate history' plot and control buttons like 'Pause', 'Resume', 'Stop', and 'EndRun'.
- Top Right:** 'Panel_signals' window showing a signal diagram with two channels, A and B.
- Middle Left:** 'Rate Display' window showing 'Time: 10789.3s', 'Events: 39942', and 'Rate: 3.92Hz'. It features a 'muon rate history' plot.
- Middle Right:** 'Oscilloscope Display' window showing a 'Trigger: A, -0.027V Falling' event. The plot shows 'event rate: 12.8 Hz' and 'Time (μs)' on the x-axis.
- Bottom Right:** 'Filter Histograms' window containing four histograms: 'noise Trg. Pulse (V)' (89190 entries), 'valid Trg. Pulse (V)' (56776 entries), 'Tau (μs)' (81 entries), and 'Pulse Height (V)' (39936 entries).
- Bottom Left:** A photograph of the physical experimental setup. It includes a 'Wasser' (Water) tank, a 'Datenaufnahme' (Data acquisition) unit, and a 'Szintillator' (Scintillator) labeled 'Licht'.

BufferManager Info

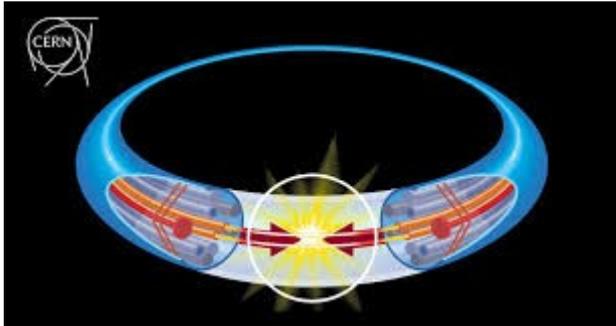
Event-Display

Oszillogramm

Pulshöhen- & Lebensdauervertellungen

In der Teilchenphysik (=Hochenergiephysik) nutzt man Beschleuniger, in denen **zwei Teilchenstrahlen kollidieren** (sog. „**Collider**“)

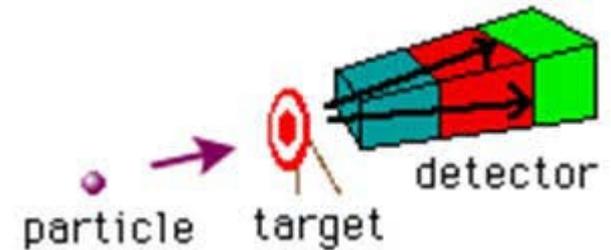
Collider-Prinzip



$$E_{cm} = \sqrt{(E_1 + E_2, \vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2} = 2 \cdot E_{\text{beam}}$$

höhere Energie im Schwerpunktsystem

Fixed-Target

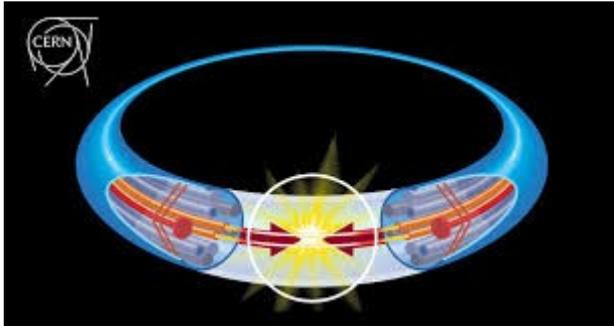


$$= \sqrt{2E_{\text{beam}}m_Tc^2 + m_T^2c^4 + m_p^2c^4}$$

höhere Kollisionsrate

In der Teilchenphysik (=Hochenergiephysik) nutzt man Beschleuniger, in denen **zwei Teilchenstrahlen kollidieren** (sog. „**Collider**“)

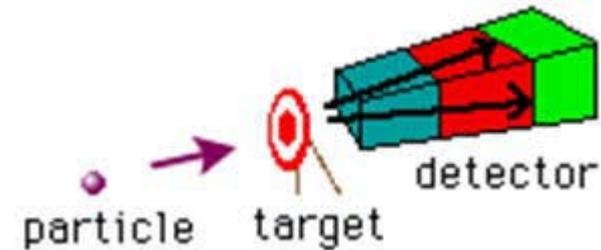
Collider-Prinzip



$$E_{cm} = \sqrt{(E_1 + E_2, \vec{p}_1 + \vec{p}_2)^2} = 2 \cdot E_{\text{beam}}$$

höhere Energie im Schwerpunktsystem

Fixed-Target

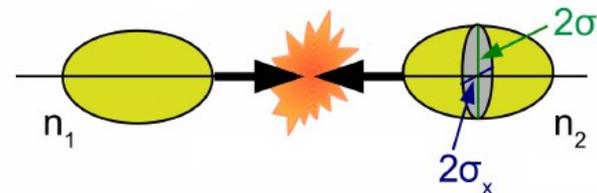


$$= \sqrt{2E_{\text{beam}}m_Tc^2 + m_T^2c^4 + m_p^2c^4}$$

höhere Kollisionsrate

andere wichtige Kenngröße eines Colliders: **die Luminosität**

$$\mathcal{L} = f \cdot n_b \cdot \frac{N_1 \cdot N_2}{4\pi\sigma_x\sigma_y}$$



Zusammenhang zwischen Wirkungsquerschnitt und Luminosität

$$\text{Wechselwirkungsrate} \quad \frac{dN}{dt} = \mathcal{L} \cdot \sigma \quad [\mathcal{L}] = \frac{1}{\text{barn} \cdot \text{s}} \quad (\text{Ereignisse pro barn und s})$$

Entdeckungsmaschine LHC & Experimente

LHCb

ATLAS

CERN

Alice

CMS





LHC-Magnete sind kalt: -271°C



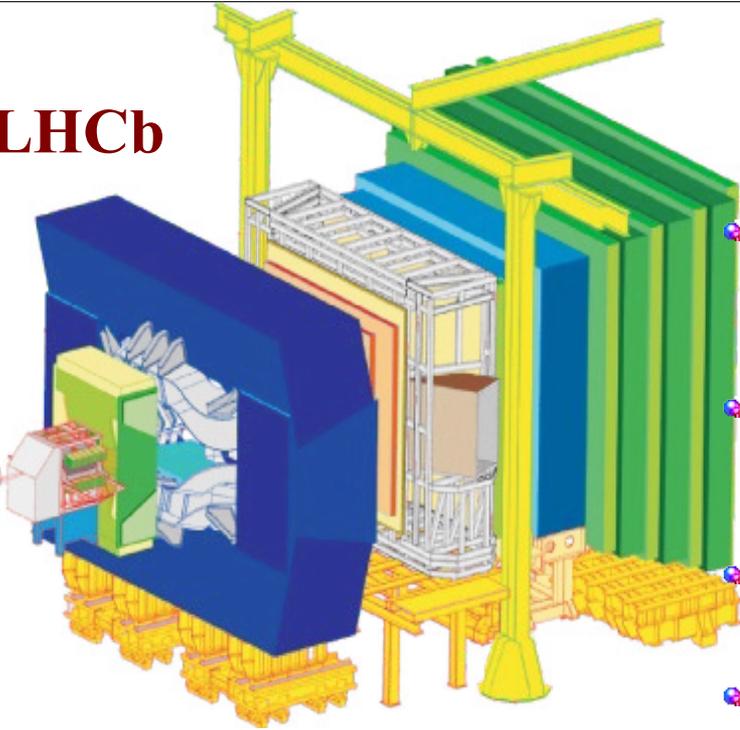
LHC-Magnete sind kalt: -271°C



- Magnetfeld von 8,3 Tesla
 - insgesamt 1232 Stück, 15 m lang
 - 270'000 km Kabelstränge mit 6400 $7\mu\text{m}$ dicken supraleitenden Filamenten
 - Strom von 11'700 A
 - Betriebstemperatur von 1.9 K
- Der coolste Ring im Weltall !

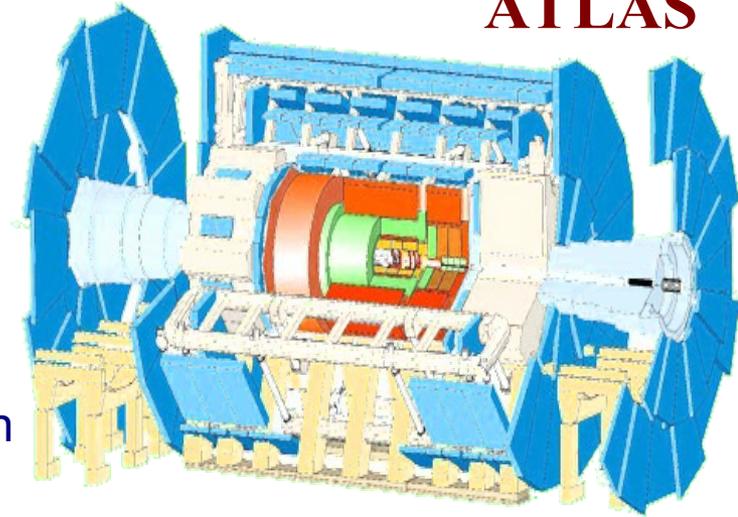
Die vier großen LHC-Detektoren

LHCb

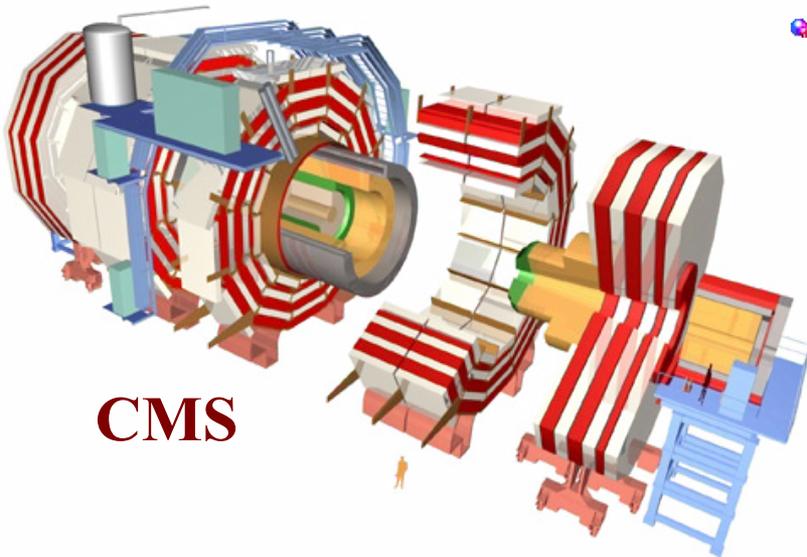


- Gebaut von Instituten in der ganzen Welt
- Jeder hat mehr als 100 Millionen Sensoren
- 40 Millionen Aufnahmen von Kollisionen pro Sekunde
- Insgesamt etwa 10'000 Physiker aus ~70 Ländern
- Spezialisiert auf unterschiedliche Fragestellungen

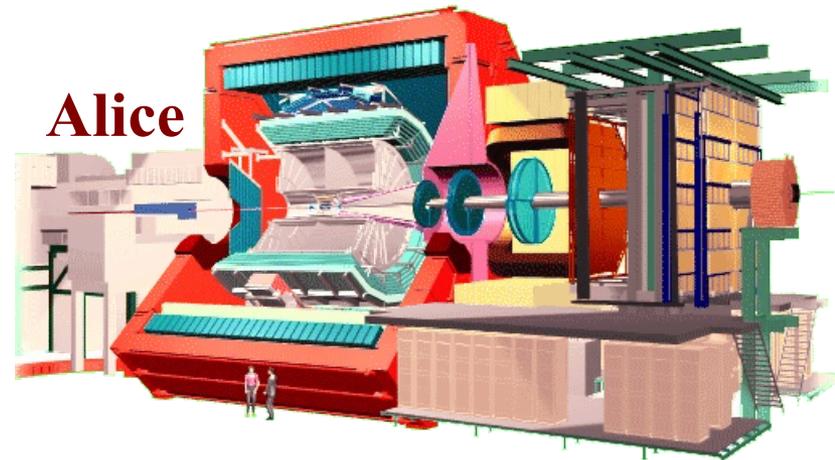
ATLAS



CMS



Alice

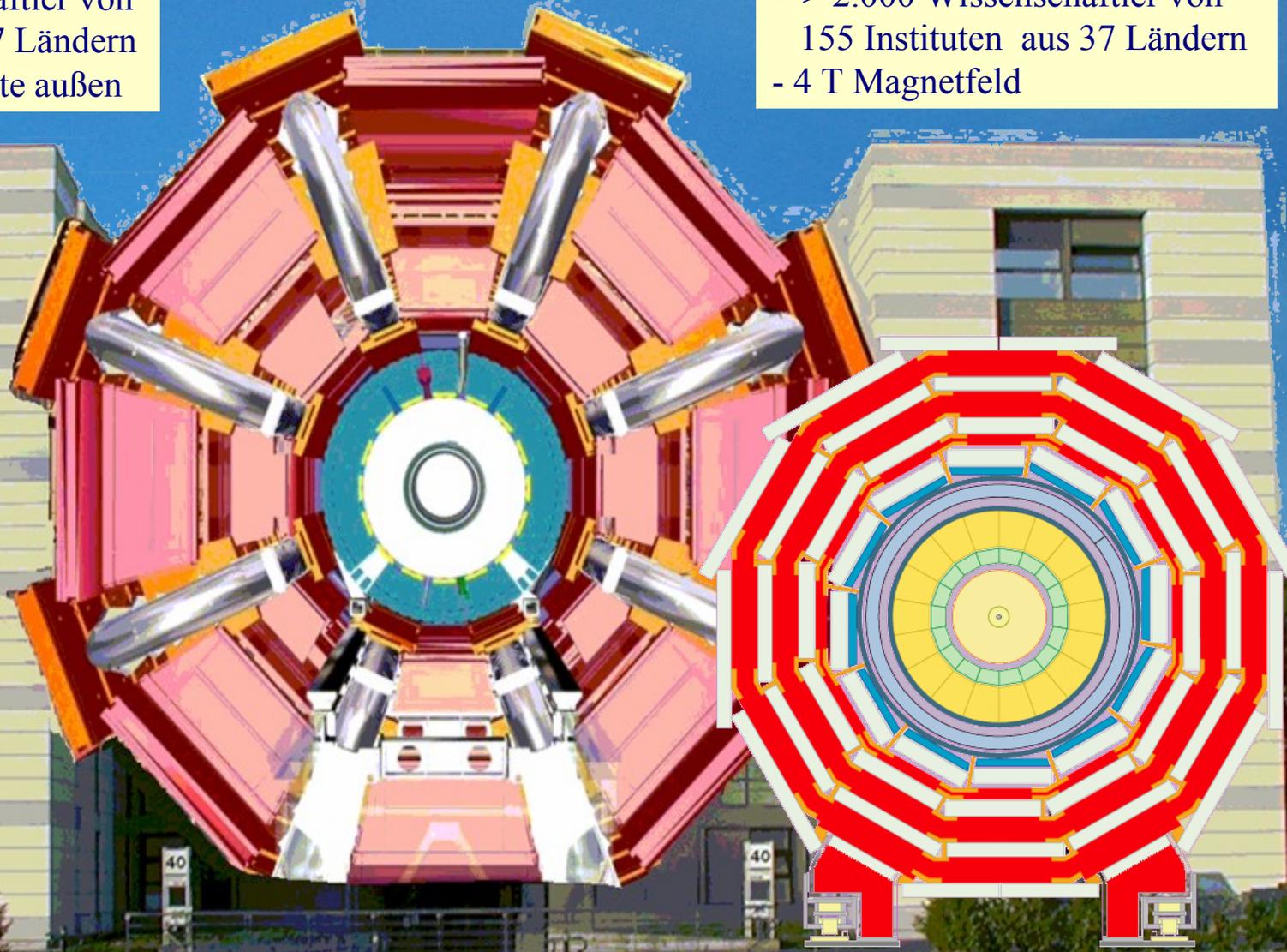


- 25 m hoch, 46 m lang
- 7.000 t schwer
- ca. 2.200 Wissenschaftler von 170 Instituten aus 37 Ländern
- große Toroid-Magnete außen

ATLAS & CMS

- die Universalisten

- 15 m hoch, 21 m lang
- 12.500 t schwer
- > 2.000 Wissenschaftler von 155 Instituten aus 37 Ländern
- 4 T Magnetfeld

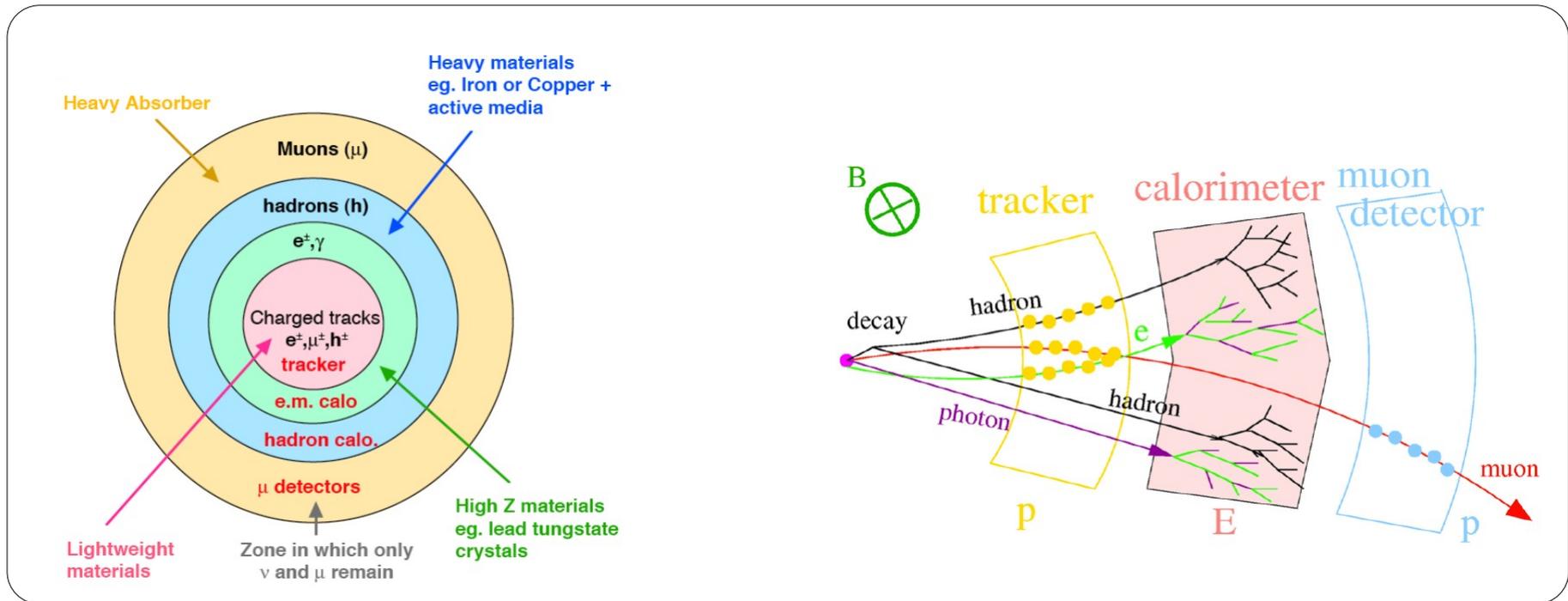


Pause

und Zeit für Fragen ?

Kombination von Detektor-Komponenten

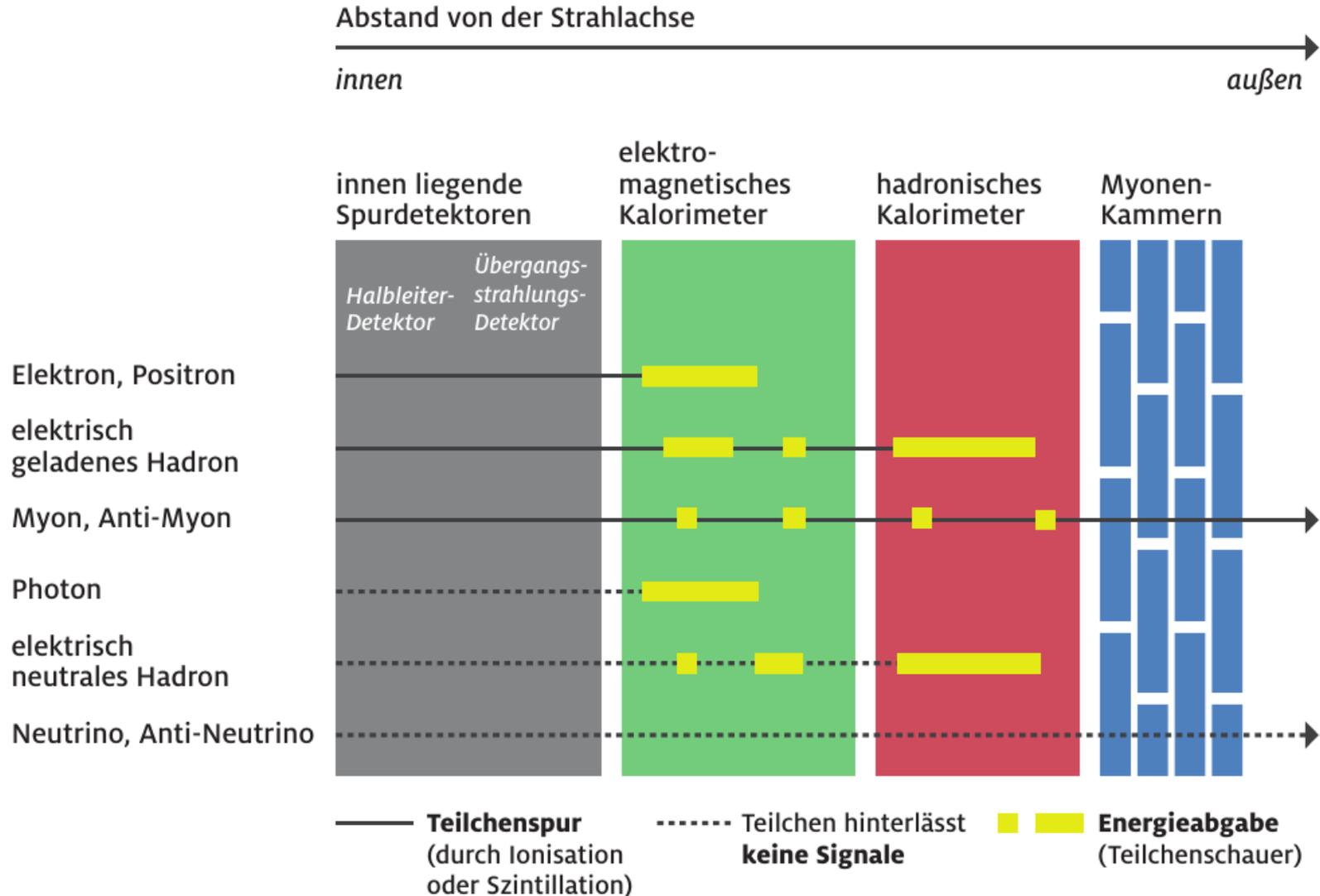
- Vertex- und Spurdetektoren
- elektromagnetisches Kalorimeter
- Hadronkalorimeter
- starkes Magnetfeld zur Impulsmessung
- Myon-System
- evtl. spezielle Systeme zur Teilchenidentifikation



Identifikation und **präzise Vermessung** aller (hinreichend stabilen) Teilchen:
 $e^{\pm}, \gamma, p, n, \mu^{\pm}, \pi^{\pm}, K^{0,\pm}, \Lambda$

Teilchennachweis und -Identifikation

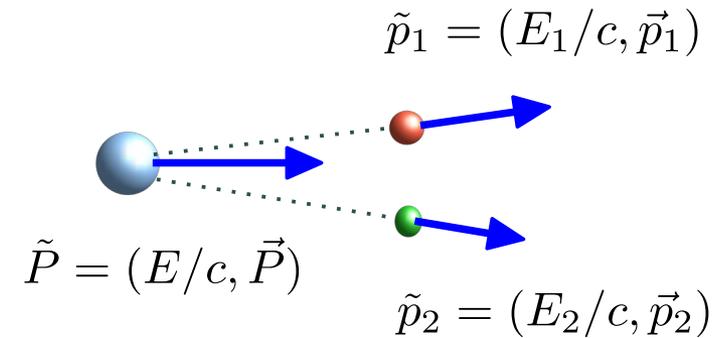
In Detektoren (direkt) nachgewiesen werden können nur Teilchen, die langlebig genug sind, um eine größere Strecke im Detektormaterial zurückzulegen



Netzwerk Teilchenwelt, Teilchenphysik, Band "Forschungsmethoden"

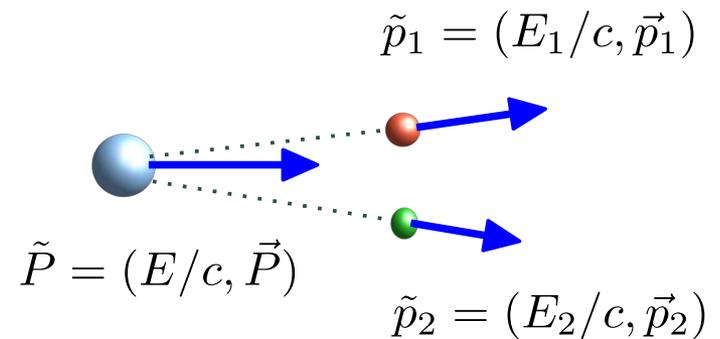
Nachweis kurzlebiger Teilchen

instabile Teilchen werden über die
relativistische invarianten Masse
ihrer Zerfallsprodukte identifiziert



Nachweis kurzlebiger Teilchen

instabile Teilchen werden über die
relativistische invarianten Masse
ihrer **Zerfallsprodukte** identifiziert

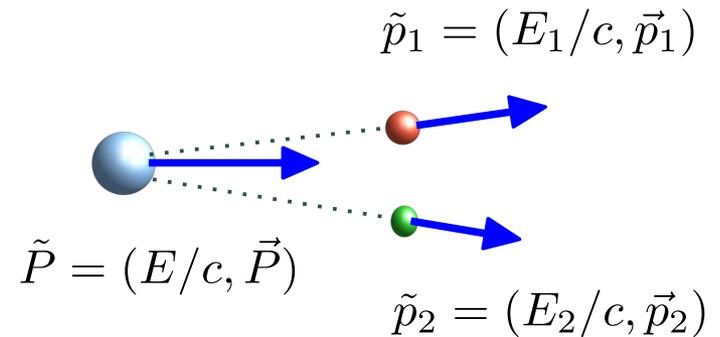


Erinnerung Relativitätstheorie (Vorl. 3. Folien 31 u. 32):

Viererimpulsquadrat der Tochterteilchen = Viererimpulsquadrat d. Mutterteilchens
→ Den Betrag der Summe der Impulse der Tochterteilchen
nennt man „**invariante Masse**“

Nachweis kurzlebiger Teilchen

instabile Teilchen werden über die **relativistische invarianten Masse** ihrer **Zerfallsprodukte** identifiziert



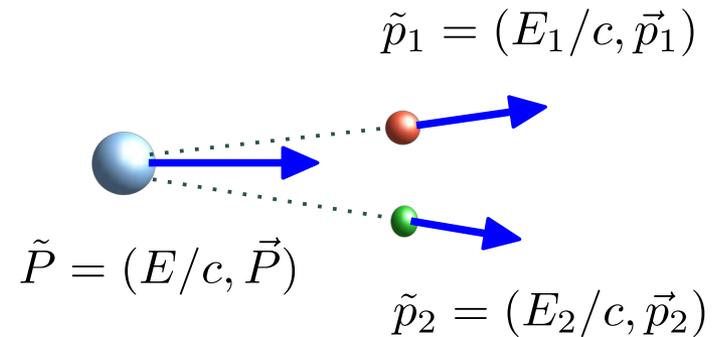
Erinnerung Relativitätstheorie (Vorl. 3. Folien 31 u. 32):

Viererimpulsquadrat der Tochterteilchen = Viererimpulsquadrat d. Mutterteilchens
→ Den Betrag der Summe der Impulse der Tochterteilchen nennt man „**invariante Masse**“

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} E/c \\ \vec{P} \end{pmatrix} = \tilde{p}_1 + \tilde{p}_2 = \begin{pmatrix} E_1/c + E_2/c \\ \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{pmatrix}$$

Nachweis kurzlebiger Teilchen

instabile Teilchen werden über die **relativistische invarianten Masse** ihrer **Zerfallsprodukte** identifiziert



Erinnerung Relativitätstheorie (Vorl. 3. Folien 31 u. 32):

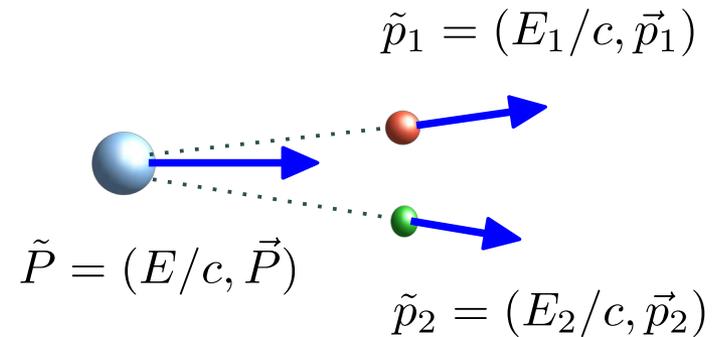
Viererimpulsquadrat der Tochterteilchen = Viererimpulsquadrat d. Mutterteilchens
→ Den Betrag der Summe der Impulse der Tochterteilchen nennt man „**invariante Masse**“

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} E/c \\ \vec{P} \end{pmatrix} = \tilde{p}_1 + \tilde{p}_2 = \begin{pmatrix} E_1/c + E_2/c \\ \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow M^2 c^2 = \tilde{P}^2$$

Nachweis kurzlebiger Teilchen

instabile Teilchen werden über die **relativistische invarianten Masse** ihrer **Zerfallsprodukte** identifiziert



Erinnerung Relativitätstheorie (Vorl. 3. Folien 31 u. 32):

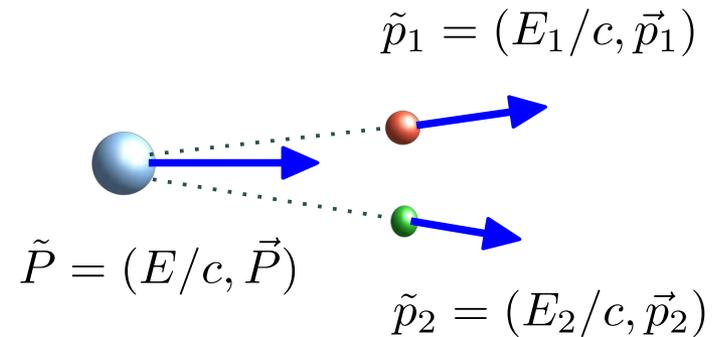
Viererimpulsquadrat der Tochterteilchen = Viererimpulsquadrat d. Mutterteilchens
→ Den Betrag der Summe der Impulse der Tochterteilchen nennt man „**invariante Masse**“

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} E/c \\ \vec{P} \end{pmatrix} = \tilde{p}_1 + \tilde{p}_2 = \begin{pmatrix} E_1/c + E_2/c \\ \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow M^2 c^2 = \tilde{P}^2 = (\tilde{p}_1 + \tilde{p}_2)^2$$

Nachweis kurzlebiger Teilchen

instabile Teilchen werden über die **relativistische invarianten Masse** ihrer **Zerfallsprodukte** identifiziert



Erinnerung Relativitätstheorie (Vorl. 3. Folien 31 u. 32):

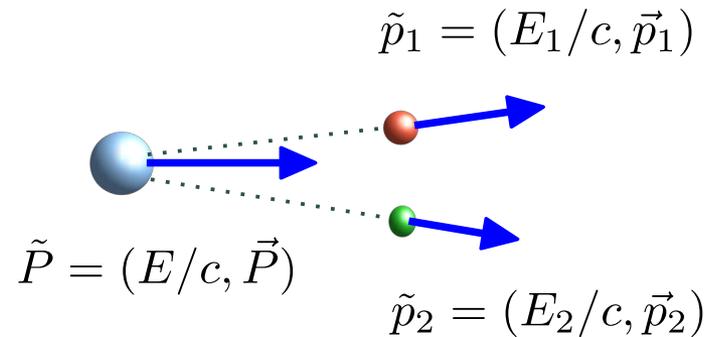
Viererimpulsquadrat der Tochterteilchen = Viererimpulsquadrat d. Mutterteilchens
→ Den Betrag der Summe der Impulse der Tochterteilchen nennt man „**invariante Masse**“

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} E/c \\ \vec{P} \end{pmatrix} = \tilde{p}_1 + \tilde{p}_2 = \begin{pmatrix} E_1/c + E_2/c \\ \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{pmatrix}$$

$$\rightarrow M^2 c^2 = \tilde{P}^2 = (\tilde{p}_1 + \tilde{p}_2)^2 = m_1^2 c^2 + m_2^2 c^2 + 2\tilde{p}_1 \cdot \tilde{p}_2$$

Nachweis kurzlebiger Teilchen

instabile Teilchen werden über die **relativistische invarianten Masse** ihrer **Zerfallsprodukte** identifiziert



Erinnerung Relativitätstheorie (Vorl. 3. Folien 31 u. 32):

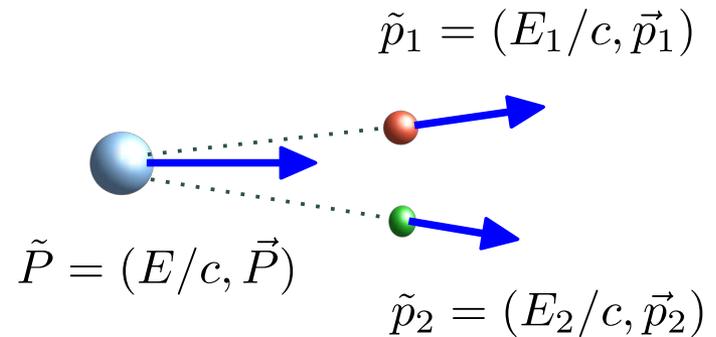
Viererimpulsquadrat der Tochterteilchen = Viererimpulsquadrat d. Mutterteilchens
→ Den Betrag der Summe der Impulse der Tochterteilchen nennt man „**invariante Masse**“

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} E/c \\ \vec{P} \end{pmatrix} = \tilde{p}_1 + \tilde{p}_2 = \begin{pmatrix} E_1/c + E_2/c \\ \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow M^2 c^2 = \tilde{P}^2 &= (\tilde{p}_1 + \tilde{p}_2)^2 = m_1^2 c^2 + m_2^2 c^2 + 2\tilde{p}_1 \cdot \tilde{p}_2 \\ &= (m_1^2 + m_2^2)c^2 + 2\sqrt{m_1^2 c^2 + p_1^2} \cdot \sqrt{m_2^2 c^2 + p_2^2} - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 \end{aligned}$$

Nachweis kurzlebiger Teilchen

instabile Teilchen werden über die **relativistische invarianten Masse** ihrer **Zerfallsprodukte** identifiziert



Erinnerung Relativitätstheorie (Vorl. 3. Folien 31 u. 32):

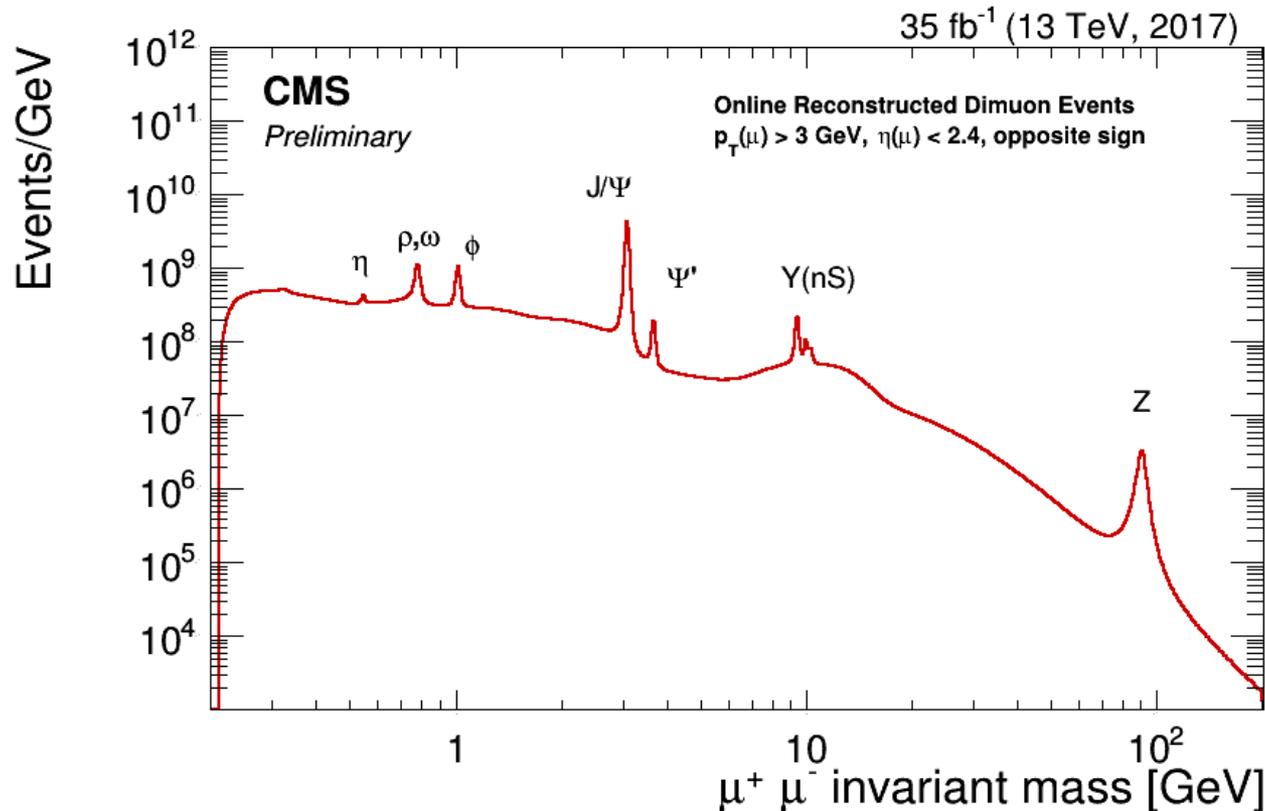
Viererimpulsquadrat der Tochterteilchen = Viererimpulsquadrat d. Mutterteilchens
 → Den Betrag der Summe der Impulse der Tochterteilchen nennt man „**invariante Masse**“

$$\tilde{P} = \begin{pmatrix} E/c \\ \vec{P} \end{pmatrix} = \tilde{p}_1 + \tilde{p}_2 = \begin{pmatrix} E_1/c + E_2/c \\ \vec{p}_1 + \vec{p}_2 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \rightarrow M^2 c^2 = \tilde{P}^2 &= (\tilde{p}_1 + \tilde{p}_2)^2 = m_1^2 c^2 + m_2^2 c^2 + 2\tilde{p}_1 \cdot \tilde{p}_2 \\ &= (m_1^2 + m_2^2)c^2 + 2\sqrt{m_1^2 c^2 + p_1^2} \cdot \sqrt{m_2^2 c^2 + p_2^2} - 2\vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2 \end{aligned}$$

$$\underbrace{\quad}_{cm_{1,2} \ll P} \simeq 2(p_1 \cdot p_2 - \vec{p}_1 \cdot \vec{p}_2)$$

Nachweis kurzlebiger Teilchen: Massenverteilung



Verteilung der Invarianten Masse von Myon-Paaren -

- Signale von instabilen Teilchen sind über dem Untergrund klar zur sehen.
- Paare von Myon-Spuren, die nicht aus Zerfällen eines Teilchens stammen, führen zum zufälligen Untergrund.

Beispiel: der CMS-Detektor

Karlsruher Institut für Technologie

Multipurpose experiment

CMS DETECTOR

Total weight : 14,000 tonnes
Overall diameter : 15.0 m
Overall length : 28.7 m
Magnetic field : 3.8 T

STEEL RETURN YOKE
12,500 tonnes

SILICON TRACKERS

Pixel ($100 \times 150 \mu\text{m}$) $\sim 16\text{m}^2 \sim 66\text{M}$ channels
Microstrips ($80 \times 180 \mu\text{m}$) $\sim 200\text{m}^2 \sim 9.6\text{M}$ channels

SUPERCONDUCTING SOLENOID

Niobium titanium coil carrying $\sim 18,000\text{A}$

MUON CHAMBERS

Barrel: 250 Drift Tube, 480 Resistive Plate Chambers
Endcaps: 468 Cathode Strip, 432 Resistive Plate Chambers

PRESHOWER

Silicon strips $\sim 16\text{m}^2 \sim 137,000$ channels

FORWARD CALORIMETER

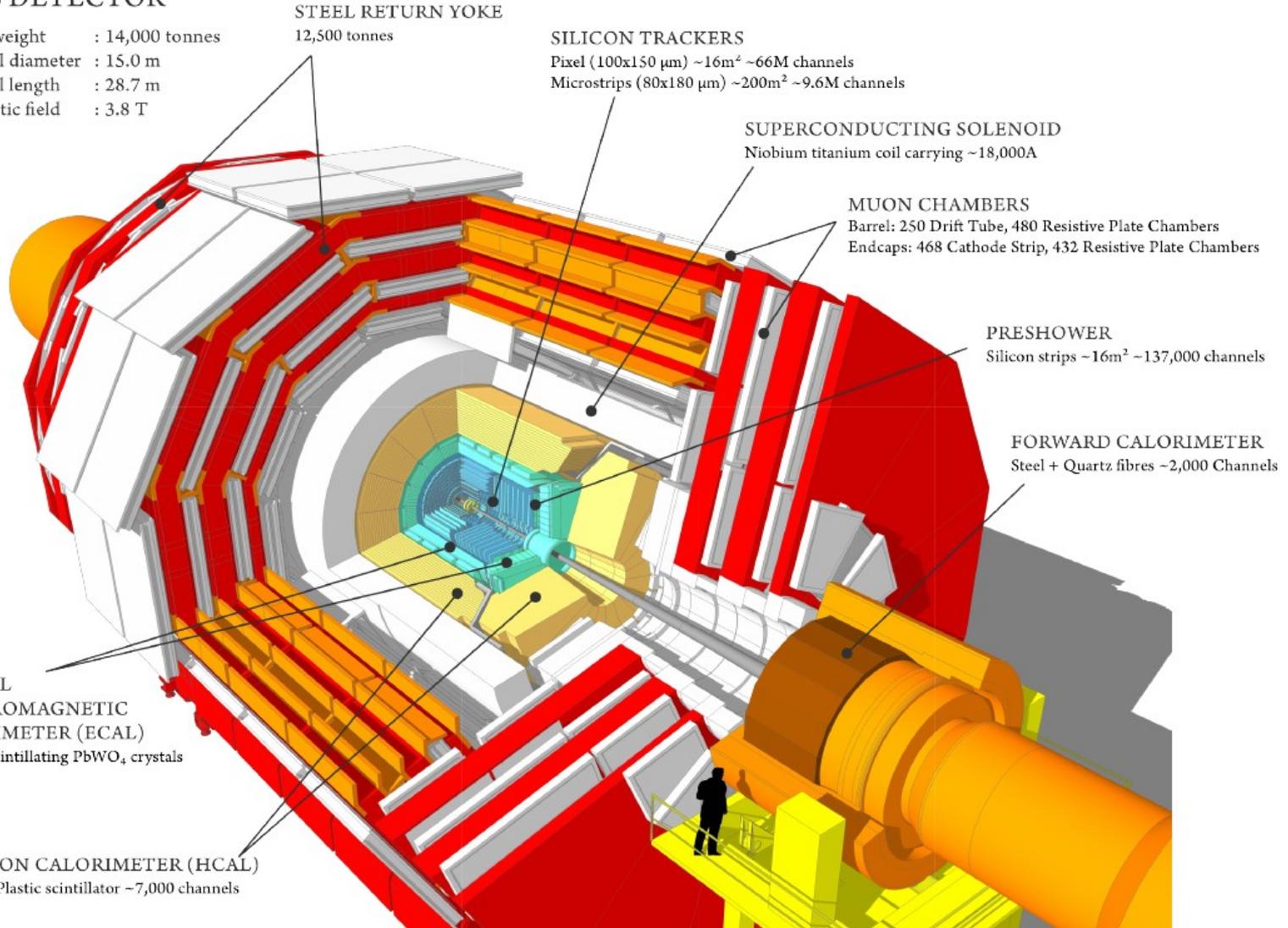
Steel + Quartz fibres $\sim 2,000$ Channels

CRYSTAL ELECTROMAGNETIC CALORIMETER (ECAL)

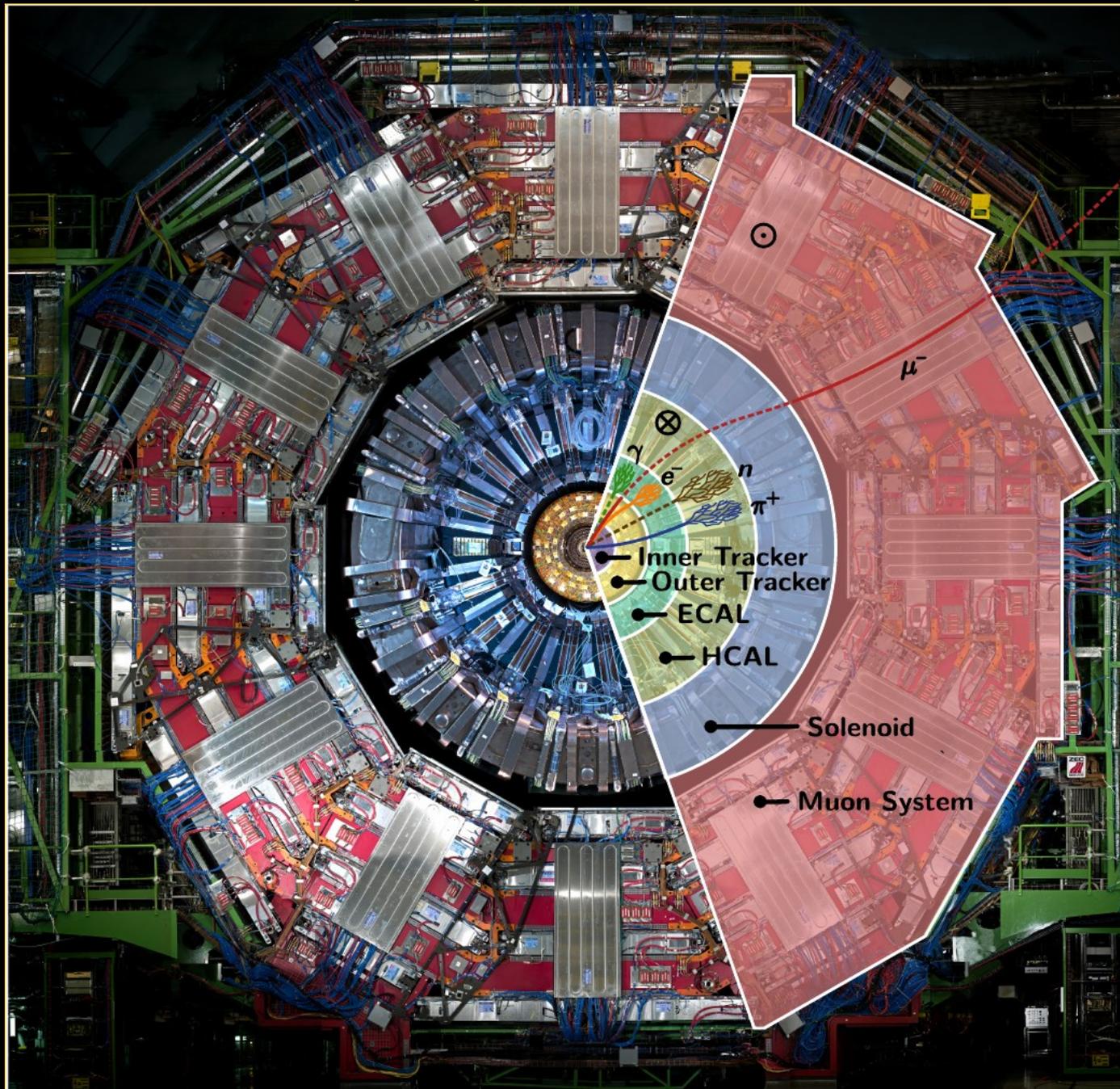
$\sim 76,000$ scintillating PbWO_4 crystals

HADRON CALORIMETER (HCAL)

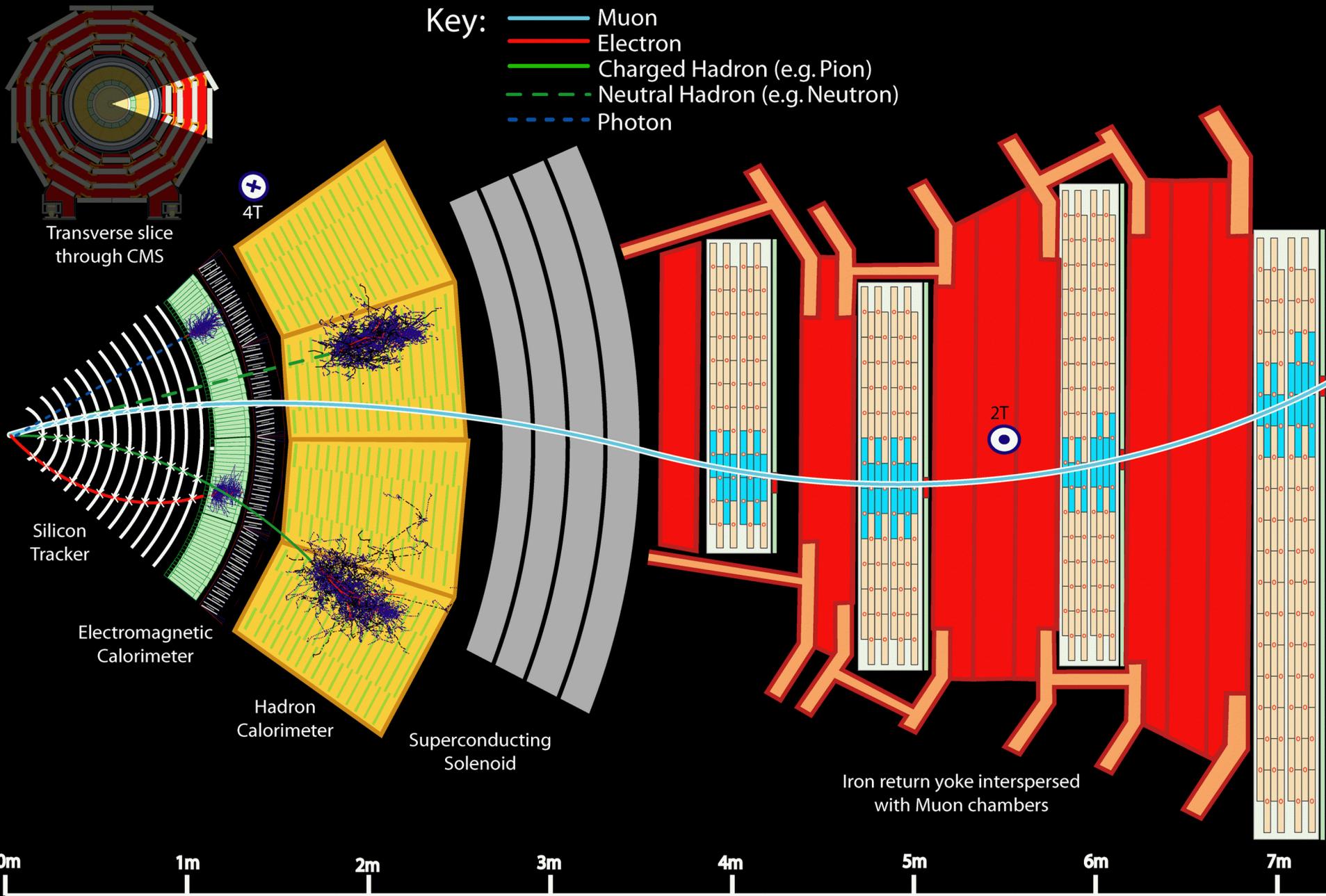
Brass + Plastic scintillator $\sim 7,000$ channels



Funktionsprinzip eines Detektors: CMS



Funktionsprinzip eines Detektors: Ausschnitt aus CMS



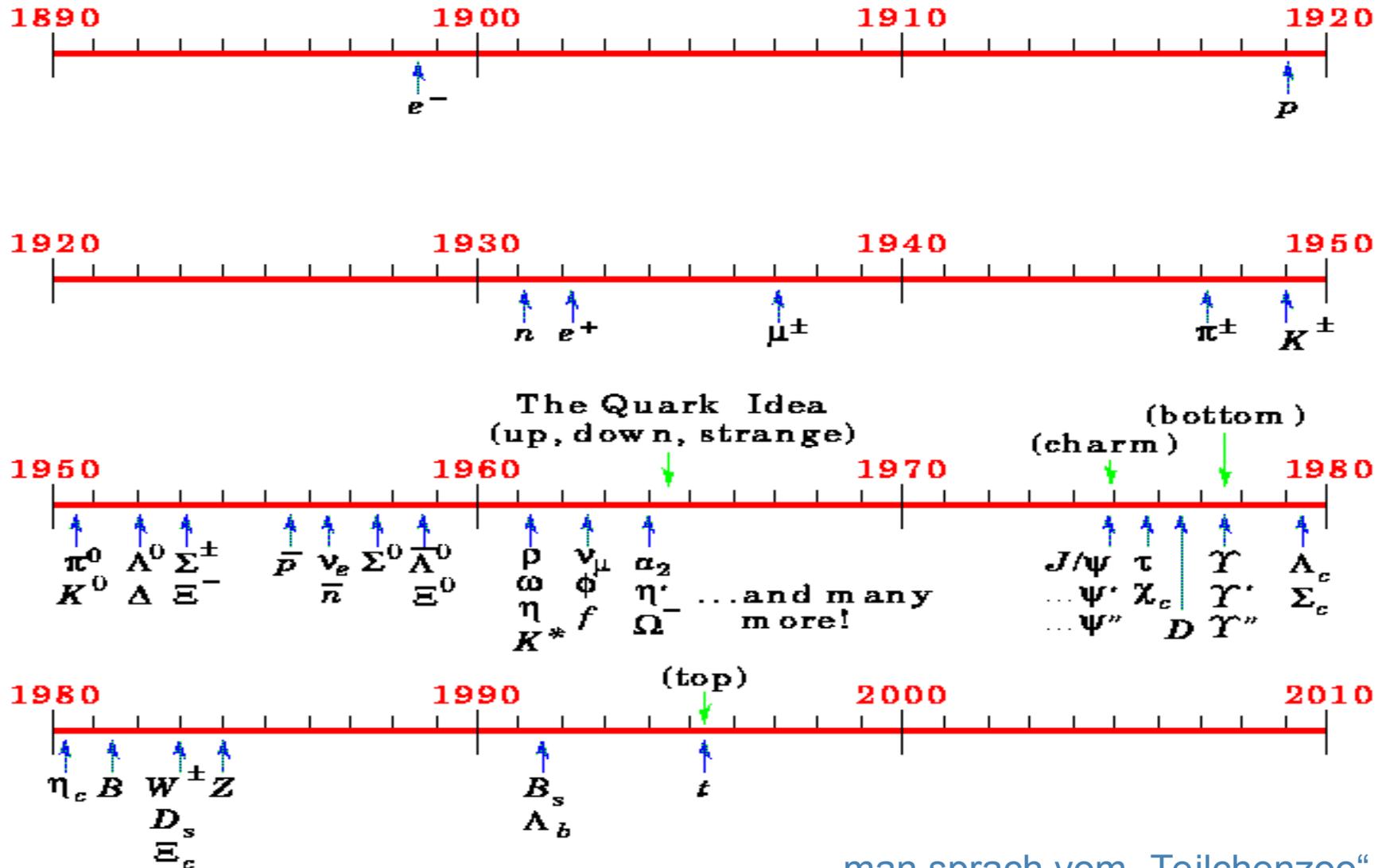
CERN Beschleuniger, Detektoren und Computing



Video:
Path-of-Protons

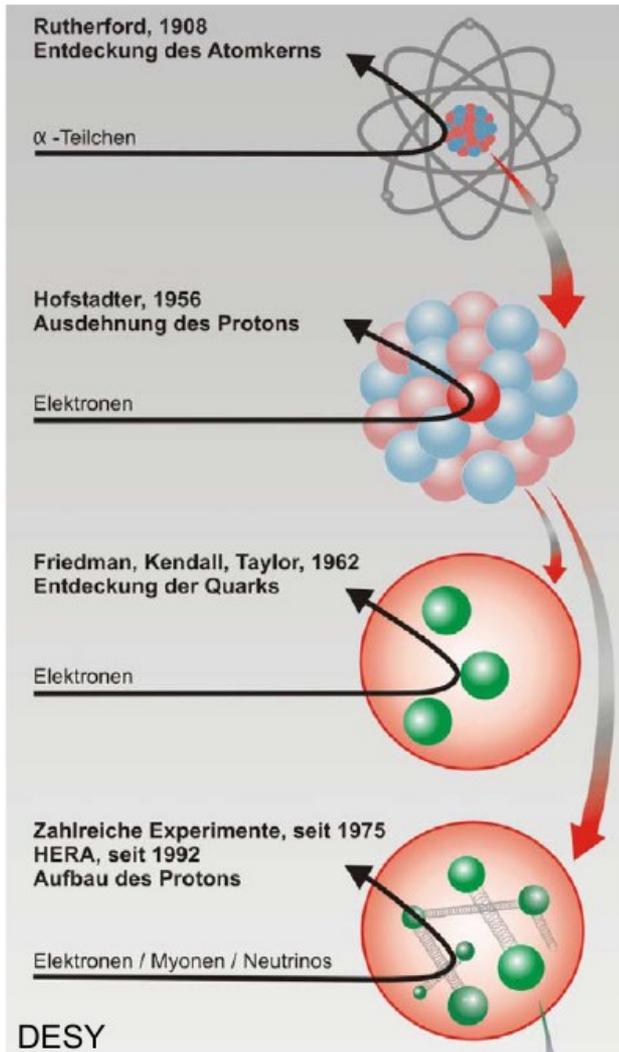
[Link zum Video](#)

Im Laufe der Jahre vervielfachte sich die Zahl der neu entdeckten Teilchen:

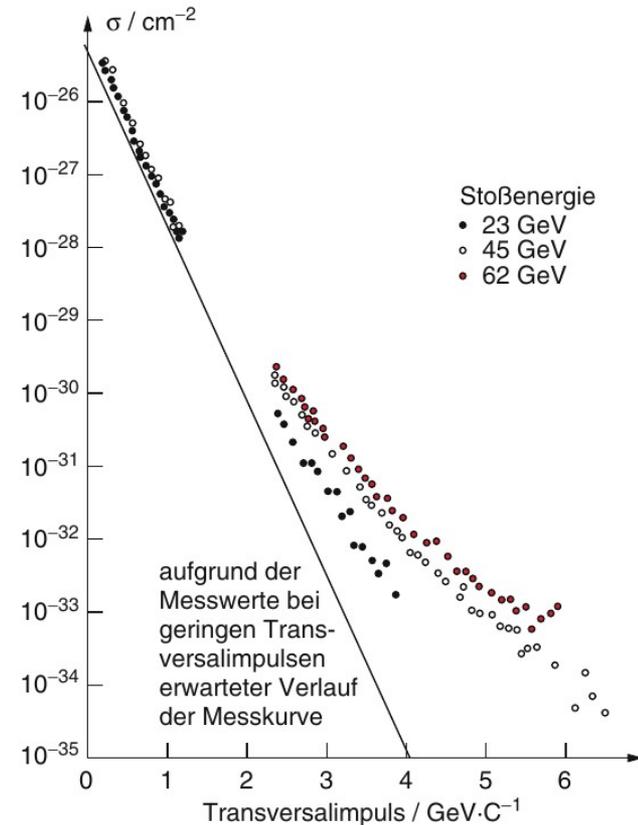
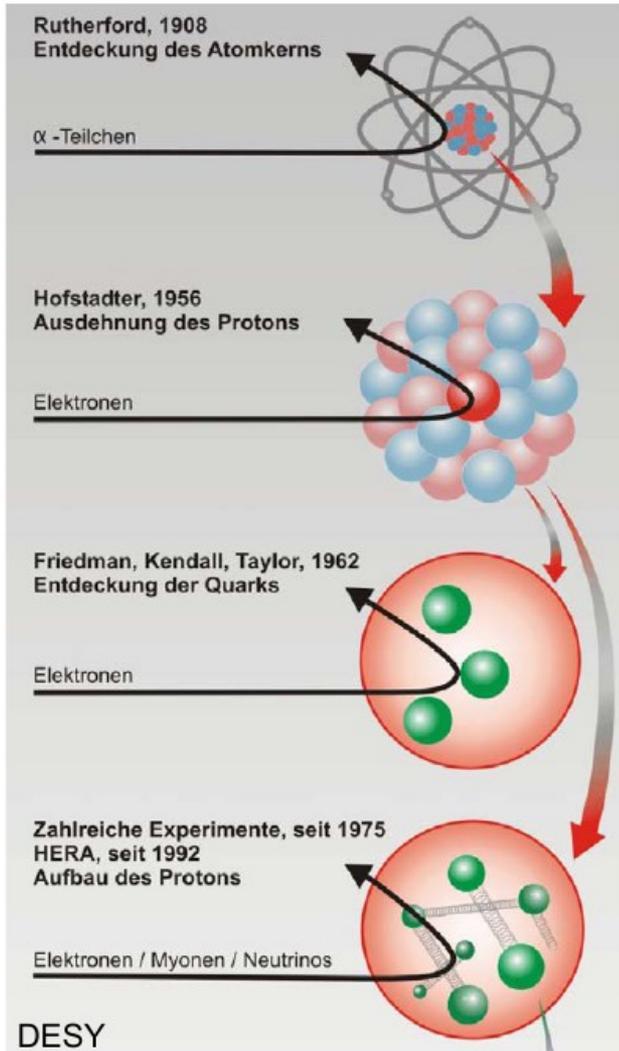


man sprach vom „Teilchenzoo“

Streuexperimente bei hohen Energien haben gezeigt, dass Protonen aus kleinen (punktförmigen) Bestandteilen aufgebaut sind.

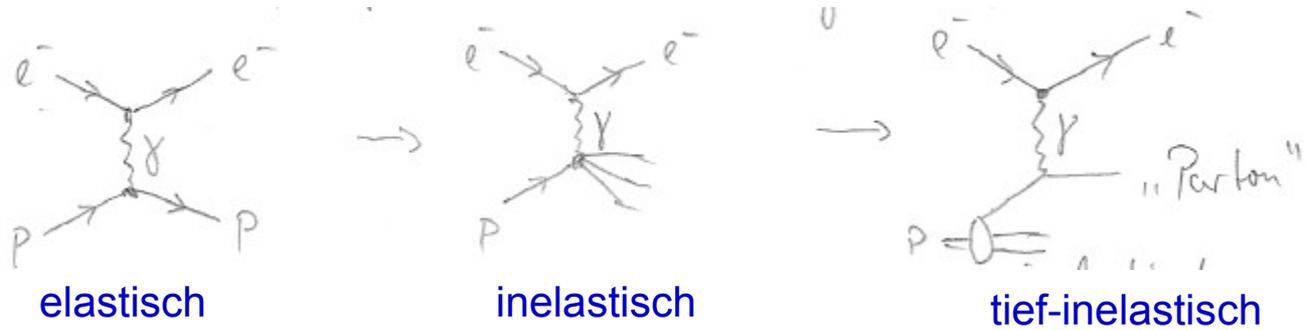


Streuexperimente bei hohen Energien haben gezeigt, dass Protonen aus kleinen (punktförmigen) Bestandteilen aufgebaut sind.



Abweichung vom Punktteilchen
in der Proton-Proton-Streuung

Historisch: Elektron-Proton-Streuung



hohe Energien von einigen GeV \rightarrow deBroglie-Wellenlänge \ll Protonradius

Historisch: Elektron-Proton-Streuung



hohe Energien von einigen GeV \rightarrow deBroglie-Wellenlänge \ll Protonradius

Beobachtung: Streuung an punktförmigen Streuzentren im Proton
zunächst als „Partonen“ bezeichnet, heute „**Quarks**“ genannt

Historisch: Elektron-Proton-Streuung



hohe Energien von einigen GeV \rightarrow deBroglie-Wellenlänge \ll Protonradius

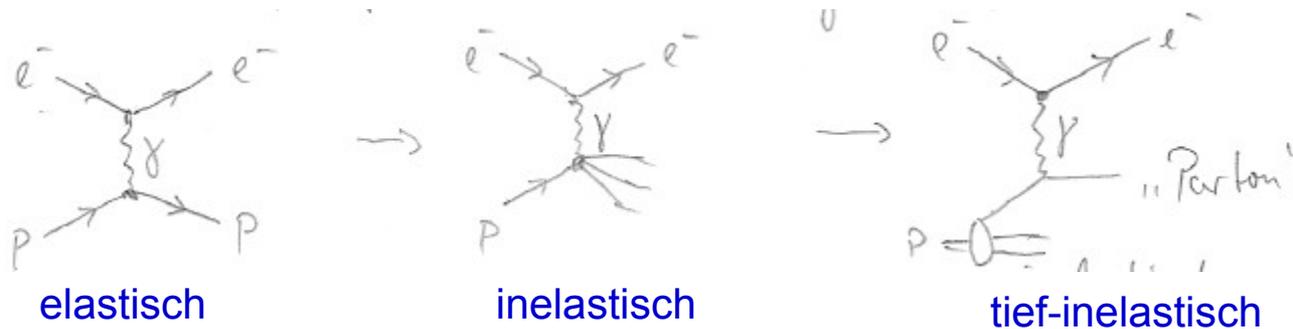
Beobachtung: Streuung an punktförmigen Streuzentren im Proton
zunächst als „Partonen“ bezeichnet, heute „**Quarks**“ genannt

Ergebnisse: Quarks tragen **drittelzahlige Ladungen:**

„up-Quark“: $q = 2/3 e$

„down-Quark“: $q = 1/3 e$

Historisch: Elektron-Proton-Streuung



hohe Energien von einigen GeV \rightarrow deBroglie-Wellenlänge \ll Protonradius

Beobachtung: Streuung an punktförmigen Streuzentren im Proton
zunächst als „Partonen“ bezeichnet, heute „**Quarks**“ genannt

Ergebnisse: Quarks tragen drittelzahlige Ladungen:

„up-Quark“: $q = 2/3 e$

„down-Quark“: $q = 1/3 e$

Es wurden nie freie Teilchen mit drittelzahligen Ladungen beobachtet

\rightarrow **Quarks sind auf das Innere von Hadronen beschränkt**

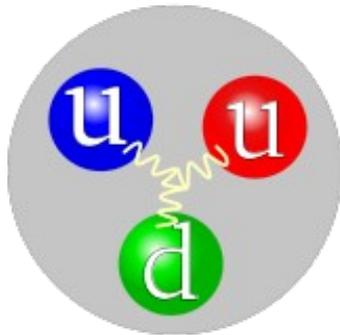
(sog. „Quark-Confinement“, s. später)

Stark wechselwirkende Teilchen, die Hadronen, sind entweder

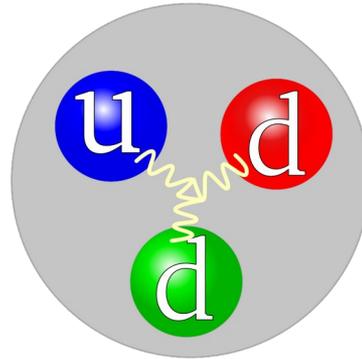
- aus drei Quarks oder
- aus einem Quark und einem Anti-Quark

zusammengesetzt

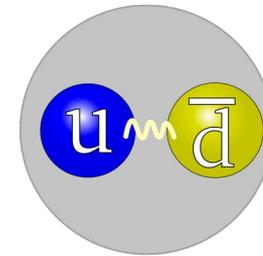
Diese Regel ergibt sich aus der Forderung, dass die beobachteten Hadronen neutral bzgl. der Ladungen der starken WW, der sog. „Farbladung“, sein müssen (s. später)



Proton



Neutron



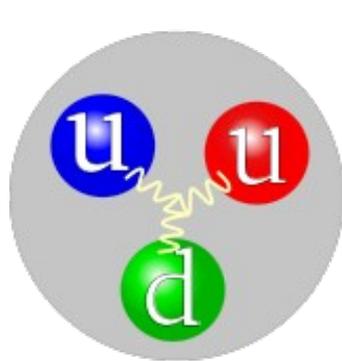
Meson

Stark wechselwirkende Teilchen, die Hadronen, sind entweder

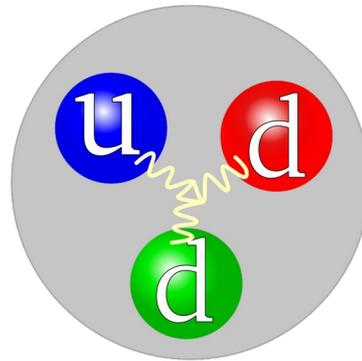
- aus drei Quarks oder
- aus einem Quark und einem Anti-Quark

zusammengesetzt

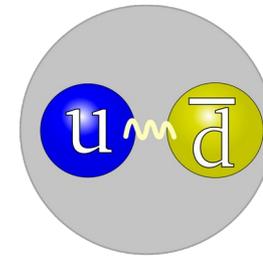
Diese Regel ergibt sich aus der Forderung, dass die beobachteten Hadronen neutral bzgl. der Ladungen der starken WW, der sog. „Farbladung“, sein müssen (s. später)



Proton



Neutron



Meson

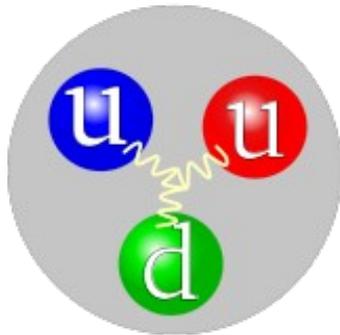
Anmerkung: neuerdings wurden Zustände mit 4 und 5 Quarks gefunden, dabei handelt es sich wahrscheinlich um gebundene Zustände von Hadronen mit 2 oder 3 Quarks (analog Molekülen)

Stark wechselwirkende Teilchen, die Hadronen, sind entweder

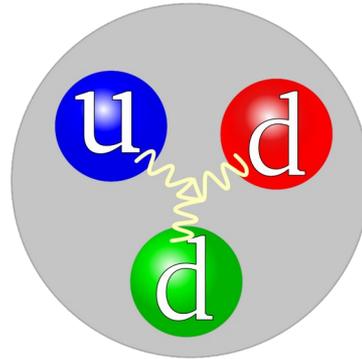
- aus drei Quarks oder
- aus einem Quark und einem Anti-Quark

zusammengesetzt

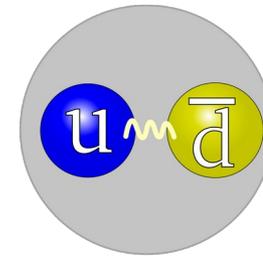
Diese Regel ergibt sich aus der Forderung, dass die beobachteten Hadronen neutral bzgl. der Ladungen der starken WW, der sog. „Farbladung“, sein müssen (s. später)



Proton



Neutron

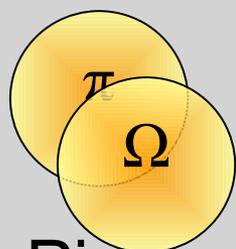


Meson

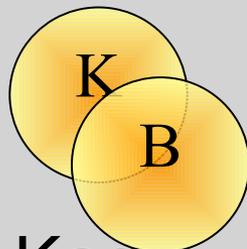
Anmerkung: neuerdings wurden Zustände mit 4 und 5 Quarks gefunden, dabei handelt es sich wahrscheinlich um gebundene Zustände von Hadronen mit 2 oder 3 Quarks (analog Molekülen)

Mit dieser Information kommt Ordnung in den Teilchenzoo

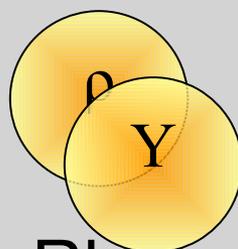




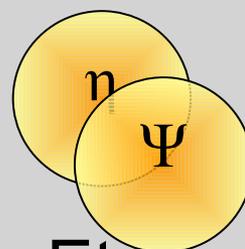
Pion
Omega



Kaon
B



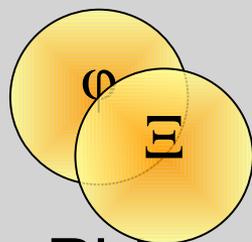
Rho
Ypsilon



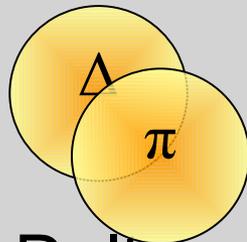
Eta
Psi



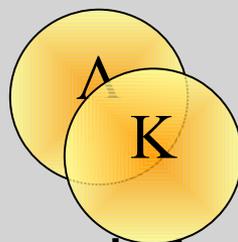
Elektron



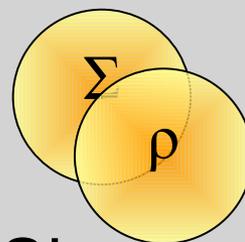
Phi
Sigma



Delta
Pion



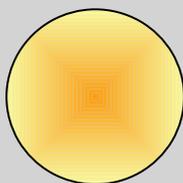
Lambda
Kaon



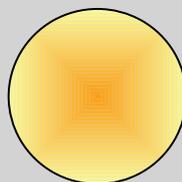
Sigma
Rho



Neutrino



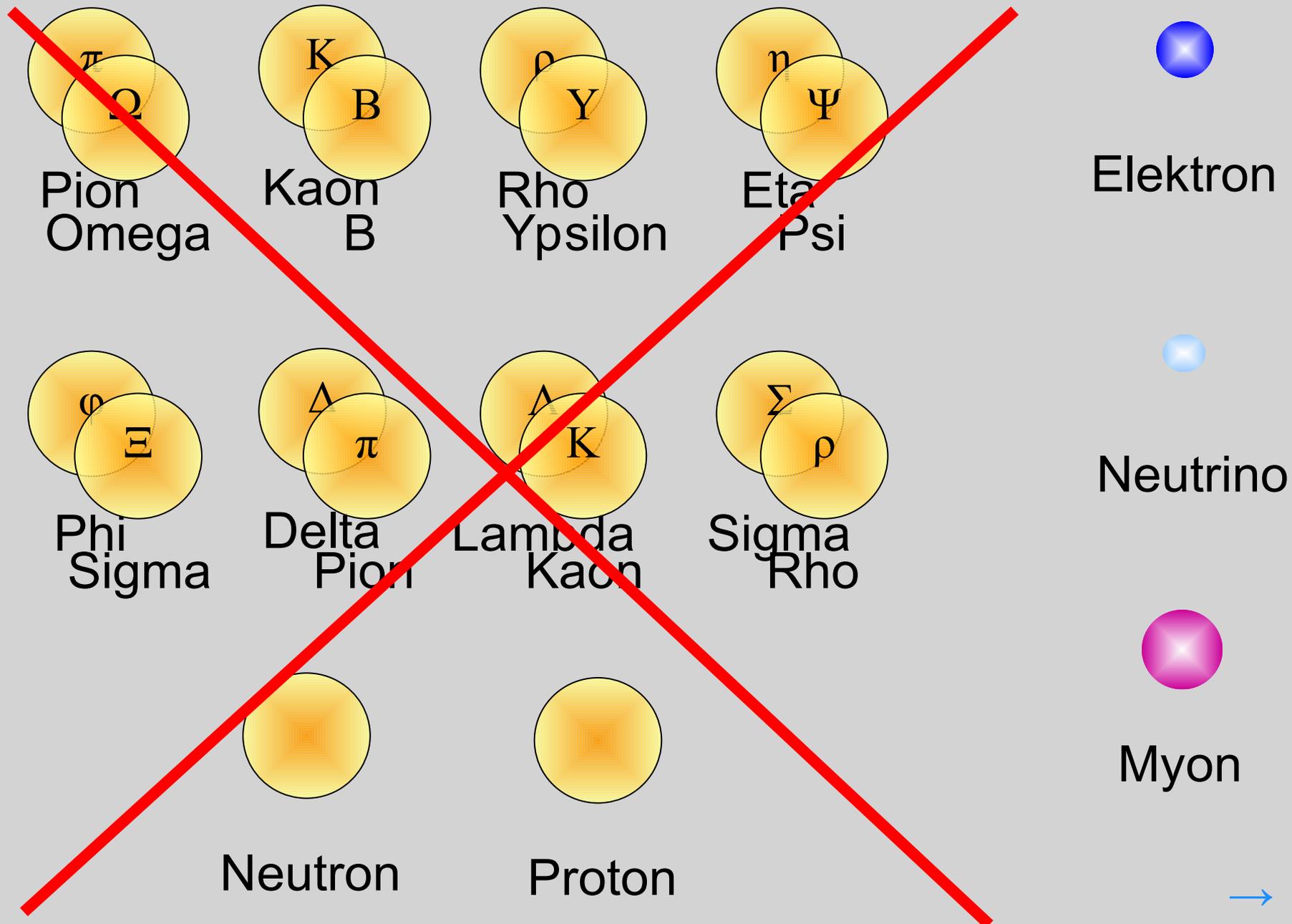
Neutron

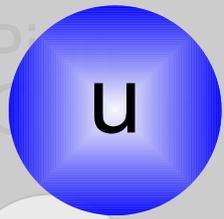


Proton

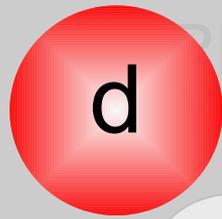


Myon





up-Quark



down-Quark



strange-Quark



Elektron



Neutrino



Myon

Einige Teilchen, die sog. Hadronen,
sind aus einfacheren („Quarks“)
zusammengesetzt !

Neutron

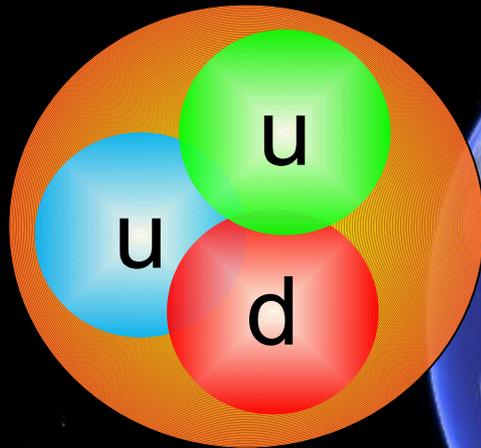
Proton

Woraus besteht die Welt ?

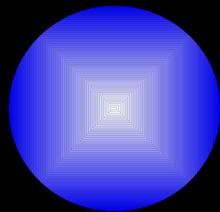
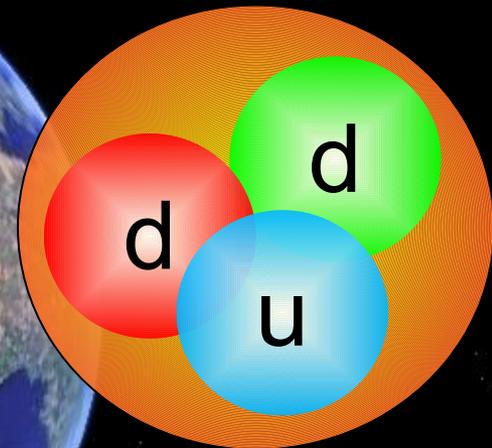


Woraus besteht die Welt ?

Proton



Neutron



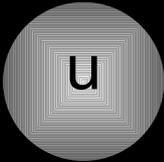
Elektron



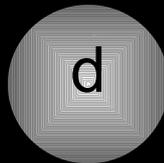
Woraus besteht die Welt ?



Elektron



up-Quark



down-Quark

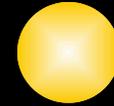
Woraus besteht die Welt ?



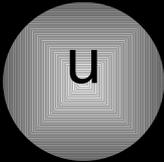
Elektron



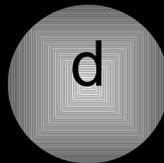
Myon



Tauon



up-Quark



down-Quark

Woraus besteht die Welt ?



Elektron



Myon



Tauon



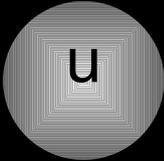
e-Neutrino



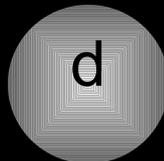
μ -Neutrino



τ -Neutrino



up-Quark



down-Quark

Woraus besteht die Welt ?



Elektron



Myon



Tauon



e-Neutrino



μ -Neutrino



τ -Neutrino



up-Quark



strange-Quark



bottom-Quark



down-Quark



charm-Quark



top-Quark

Woraus besteht die Welt ?



Elektron



Myon



Tauon



e-Neutrino



μ -Neutrino



τ -Neutrino



up-Quark



strange-Quark



bottom-Quark



down-Quark



charm-Quark



top-Quark

Top entdeckt 1995
 τ -Neutrino 2000

Woraus besteht die Welt ?



Elektron



Myon



Tauon



e-Neutrino



μ -Neutrino



τ -Neutrino



up-Quark



strange-Quark



bottom-Quark



down-Quark



charm-Quark



top-Quark

Zu jedem Teilchen existiert ein Anti-Teilchen

Top entdeckt 1995
 τ -Neutrino 2000

Woraus besteht die Welt ?



Elektron



Myon



Tauon



e-Neutrino



μ -Neutrino



τ -Neutrino



up-Quark



strange-Quark



bottom-Quark



down-Quark



charm-Quark



top-Quark

Zu jedem Teilchen existiert ein Anti-Teilchen

Quarks & Leptonen der 2. und 3. Familie sind nicht stabil !

Top entdeckt 1995
 τ -Neutrino 2000

Teilchenbaukasten (2)

Aus den Quarks lassen sich alle bekannten Hadronen

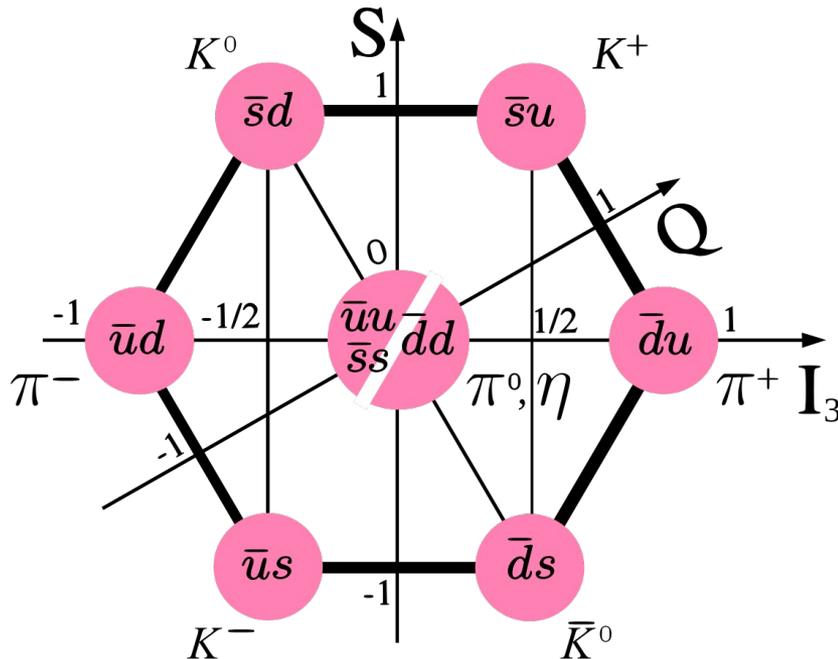
- Mesonen mit Spin 0 und Baryonen mit Spin 1/2 und 3/2 - aufbauen.

Beispiel: die drei leichtesten Quarks u, d, s (die fast die gleiche Masse haben) man verwendet die Quantenzahlen

- „Isospin“ : $I_3 = +1/2$ für das up- und das anti-down-Quark,

$I_3 = -1/2$ für das down- und das anti-up-Quark

- „Strangeness“: $S = -1$ für das strange-Quark und $S=+1$ für das anti-strange-Quark



η'
Singlett-Zustand

Oktett-Anordnung der Spin-0-Mesonen

Teilchenbaukasten (2)

Aus den Quarks lassen sich alle bekannten Hadronen

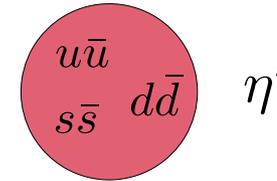
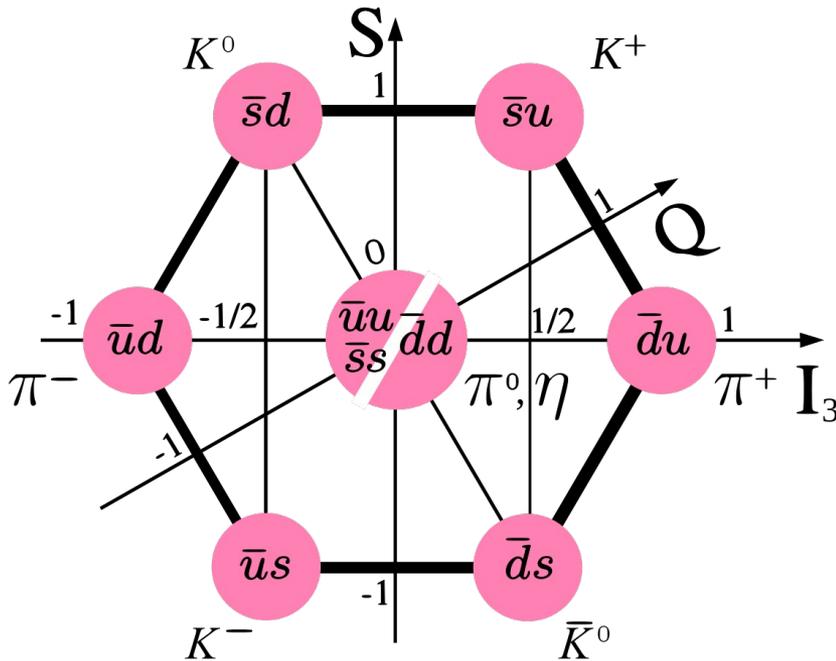
- Mesonen mit Spin 0 und Baryonen mit Spin 1/2 und 3/2 - **aufbauen**.

Beispiel: die drei leichtesten Quarks u, d, s (die fast die gleiche Masse haben) man verwendet die Quantenzahlen

- „Isospin“ : $I_3 = +1/2$ für das up- und das anti-down-Quark,

$I_3 = -1/2$ für das down- und das anti-up-Quark

- „Strangeness“: $S = -1$ für das strange-Quark und $S=+1$ für das anti-strange-Quark

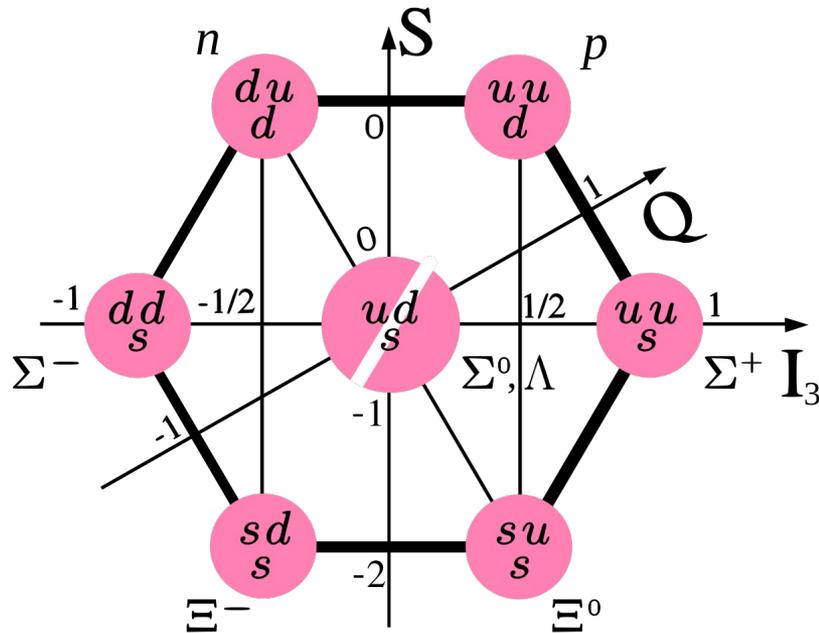


Singlett-Zustand

Es gibt **angeregte Versionen** dieser Mesonen mit parallelen Spins oder Bahndrehimpuls

Oktett-Anordnung der Spin-0-Mesonen

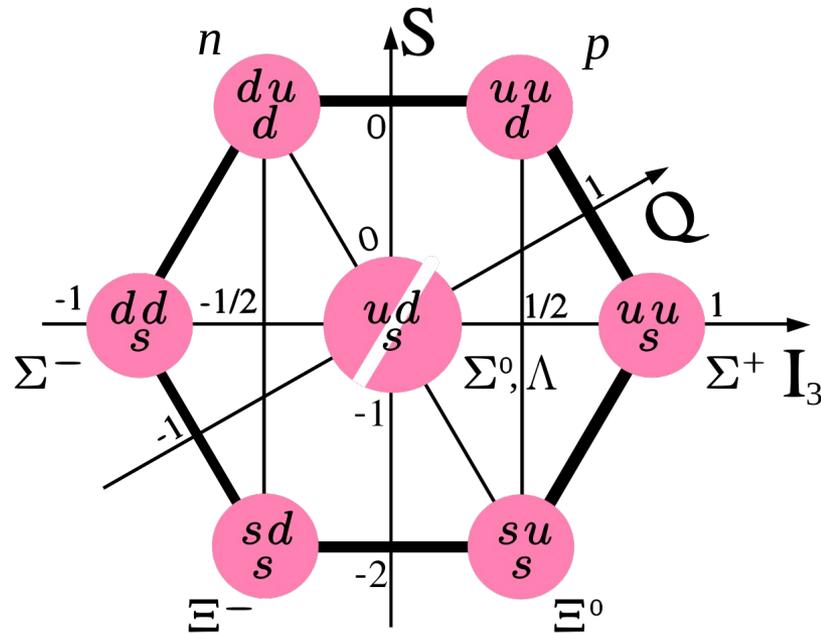
Teilchenbaukasten (3)



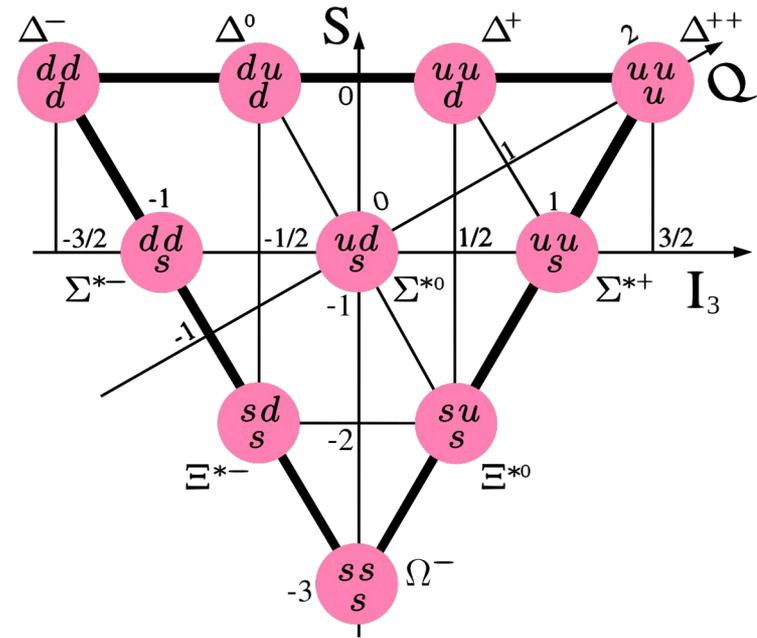
Oktett-Anordnung der spin- $\frac{1}{2}$ -Baryonen

Andere als die gezeigten Zustände sind mit 3 Quarks nicht möglich, weil die Antisymmetrie der Gesamtwellenfunktion unter Austausch zweier Quarks nicht möglich wäre.

Teilchenbaukasten (3)



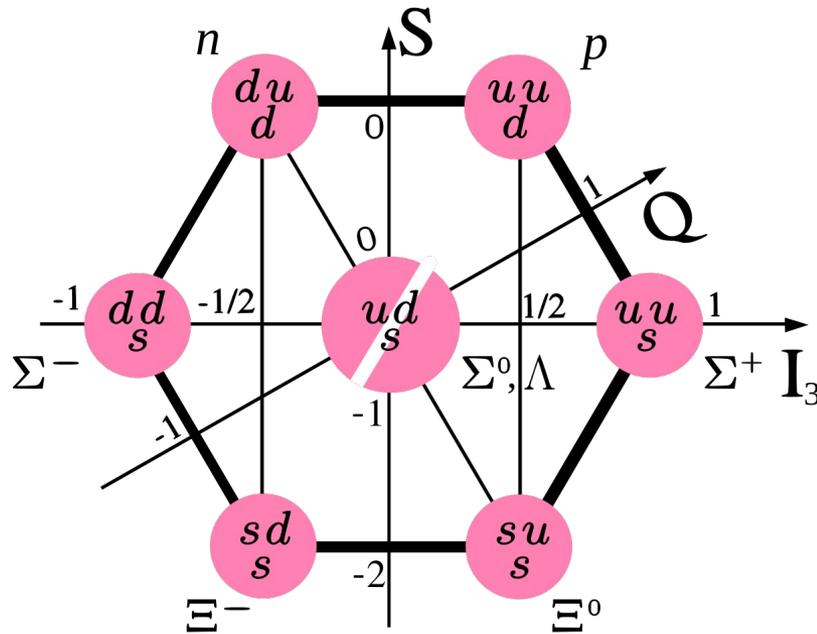
Oktett-Anordnung der spin- $\frac{1}{2}$ -Baryonen



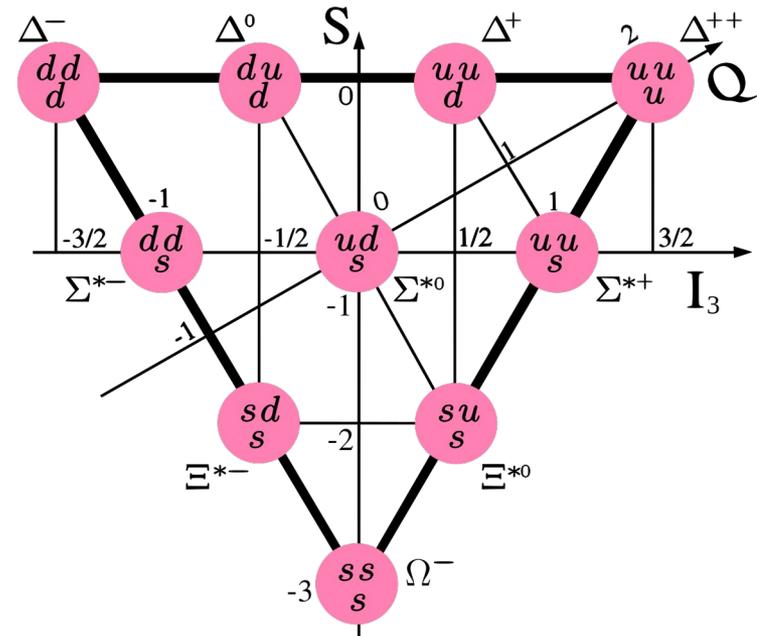
Dekuplett-Anordnung der spin- $\frac{3}{2}$ -Baryonen

Andere als die gezeigten Zustände sind mit 3 Quarks nicht möglich, weil die Antisymmetrie der Gesamtwellenfunktion unter Austausch zweier Quarks nicht möglich wäre.

Teilchenbaukasten (3)



Oktett-Anordnung der spin- $\frac{1}{2}$ -Baryonen



Dekuplett-Anordnung der spin- $\frac{3}{2}$ -Baryonen

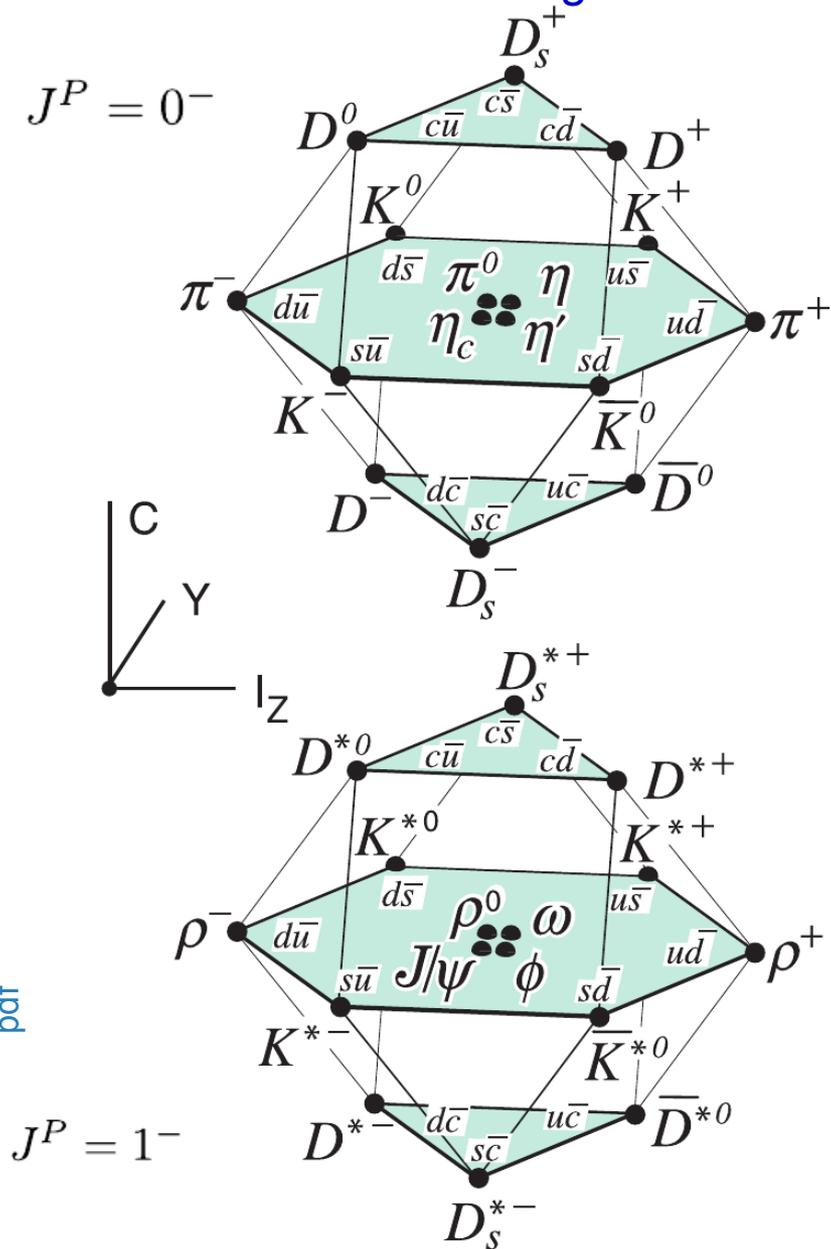
Andere als die gezeigten Zustände sind mit 3 Quarks nicht möglich, weil die Antisymmetrie der Gesamtwellenfunktion unter Austausch zweier Quarks nicht möglich wäre.

Interessant sind die Zustände mit drei identischen Quarks mit parallelen Spins: sie sind nur möglich, wenn es eine weitere Quantenzahl gibt, die die Quarks unterscheidet !

→ Hinweis auf Farb-Quantenzahl

Teilchenbaukasten (4)

Mit dem Charm-Quark ergeben sich die folgenden Darstellungen:



Teilchen und ihre Wechselwirkungen

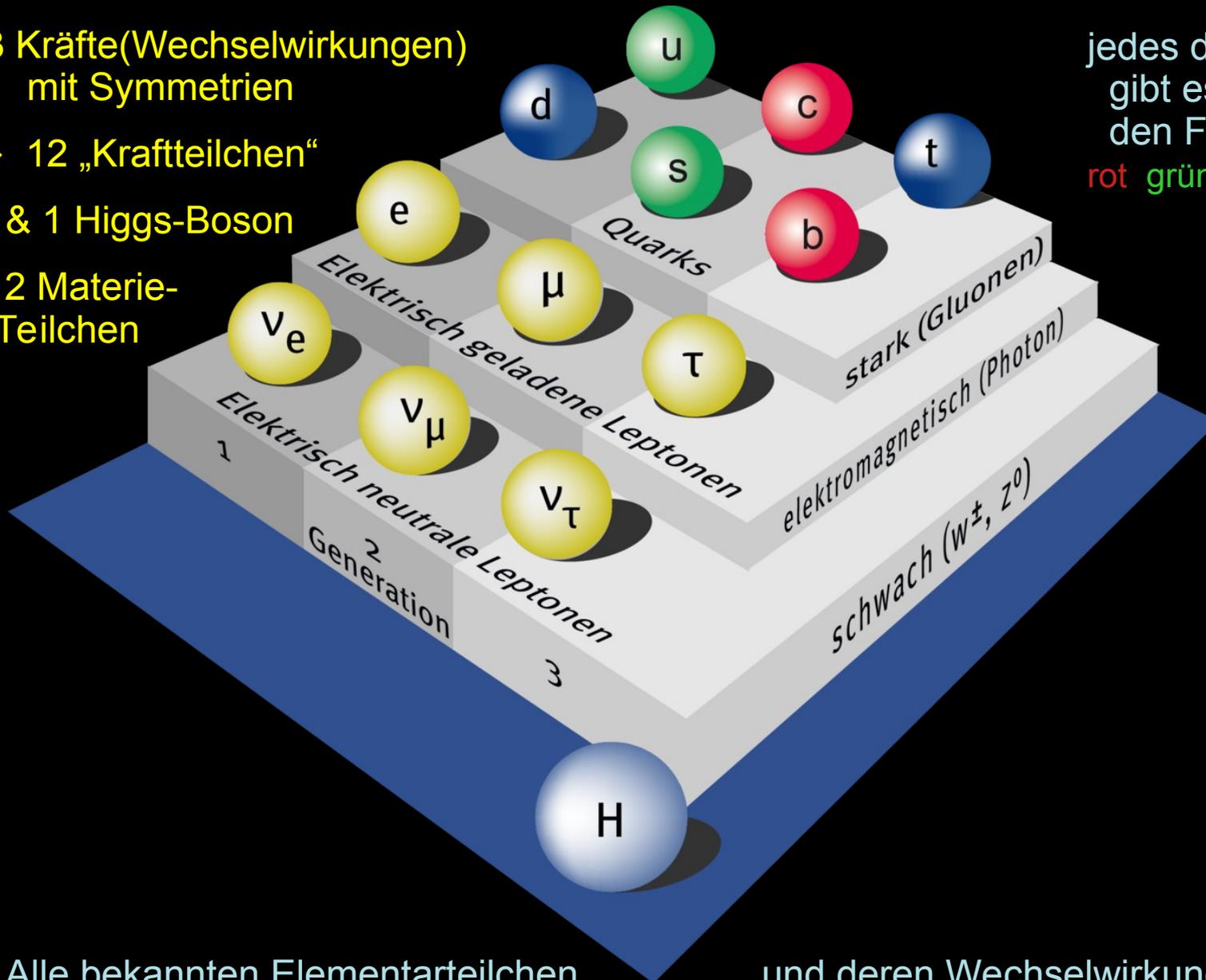
– 3 Kräfte (Wechselwirkungen)
mit Symmetrien

⇒ 12 „Kraftteilchen“

& 1 Higgs-Boson

– 12 Materie-
Teilchen

jedes der Quarks
gibt es in
den Farben
rot grün und blau



Alle bekannten Elementarteilchen

und deren Wechselwirkungen

Ende Vorlesung 24

und Zeit für Fragen ?