

# Physik

## Hinweise zu den Kärtchen

## Kern- und Teilchenphysik I

Die Kärtchen beziehen sich auf die Vorlesung von Feleccitas Pauss, im SS 2007.

Erstellt von: Thomas Kuster, (2. Semester MSc, D-UWIS)

Verfügbar via: <http://fam-kuster.ch>

# Fundamentale Bausteine

Leptonen und Quarks

Eigenschaften:

- je Spin  $\frac{1}{2} \Rightarrow$  Fermionen
- Es gibt keine Angeregte Zustände
- – 6 Leptonen ( $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ ), sowie 6 Antiteilchen dazu
- – 6 Quarks ( $u, d, s, c, b, t$ ), sowie 6 Antiteilchen dazu

Antiteilchen: Objekte mit derselben Masse und Lebensdauer wie das entsprechende teilchen, jedoch mit entgegengesetztem Vorzeichen der Ladung.

# Grundkräfte: Fundamentale Wechselwirkungen

- Gravitation
- elektromagnetische Wechselwirkung
- starke Wechselwirkung
- schwache Wechselwirkung

# Wechselwirkungen

werden vermittelt durch?

werden dargestellt durch?

Durch Austausch von Vektorbosonen (Teilchen mit Spin=1)

**Gravitation ?**

**elektromagnetische WW** Photon: Wellenlinie

**starke WW** Gluonen: Spirallinie

**schwache WW**  $W^{+-}$ ,  $W^{-}$ ,  $Z^0$ -Bosonen: gestrichelte Linie

# Teilchen und Ladung

Welche Teilchen tragen welche Ladung

elektrische Ladung

schwache Ladung

starke Ladung

Farbladung, Farbe

---

Quarks

Quarks

Quarks

einige Leptonen (z. B. Elektron)

Leptonen

# Reichweite der Wechselwirkungen

**Schwache Wechselwirkung** Reichweite ist sehr gering da

$M_W \approx 80 \text{ GeV}/c^2$  und  $M_Z \approx 91 \text{ GeV}/c^2$  sehr schwer ist und sie somit nach der Heisenberg'schen Unschärferelation nur für extrem kurze Zeit erzeugt werden.

**Elektrische Wechselwirkung** Photon hat Ruhemasse 0  $\Rightarrow$  Reichweite ist  $\infty$ .

**Starke Wechselwirkung** Gluonen haben Ruhemasse 0, jedoch Ladung daher können sie untereinander koppeln  $\Rightarrow$  kurze Reichweite.

# Elektronenvolt

Definition:

Die Energie die ein Teilchen mit Ladung  $1e$  beim Durchlaufen einer Potentialdifferenz von  $1\text{ V}$  bekommt.

$$1\text{ eV} = 1.602 \cdot 10^{-19}\text{ J}$$

# Gauss-System

in Atomphysik

$$4\pi\epsilon_0 = 1 \Rightarrow \alpha = e^2$$

# Leptonen

Kommen frei in der Natur vor:

e Elektron, Positron

$\mu$

$\tau$

$\nu_e$

$\nu_\mu$

$\nu_\tau$

# Quarks

Kommen nicht frei in der Natur vor:

*u* Up

*d* Down

*s* Strange

*c* Charm

*b* Bottom

*t* Top

# Hadronen

„Elementarteilchen“ welche aus Quarks aufgebaut sind: Mesonen und Baryonen

# Mesonen

$$\pi^+ (u\bar{d})$$

$$\pi^- (\bar{u}d)$$

$$K^+ (u\bar{s})$$

$$K^- (\bar{u}s)$$

# Baryonen

$p$  ( $uud$ ) Proton

$n$  ( $udd$ ) Neutron

$\Lambda$  ( $uds$ ) Lambda

$\Omega$  ( $sss$ )

# Wechselwirkungen

Zwischen Grundbausteinen

Wechselwirkungen zwischen Grundbausteinen basieren auf dem Austausch eines Trägerteilchens:

**Photon:**  $\gamma$  elektromagnetische Wechselwirkung

$W, Z$  schwache Wechselwirkung

**Gluon** starke Wechselwirkung

# Einheiten

Welche Einheiten werden verwendet?

**Länge**  $1 \text{ fm} = 10 \cdot 10^{-15} \text{ m}$

**Wirkungsquerschnitt (Fläche)**  $1 \text{ barn} = 1 \text{ b} = 10^{-28} \text{ m}^2$

**Energie** Elektronenvolt:  $1 \text{ eV} = 1.6 \cdot 10^{-19} \text{ J}$

Für Masse und Impuls folgt mit:

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

**Masse**  $\text{eV}/c^2$

**Impuls**  $\text{eV}/c$

$\hbar, c, \hbar \cdot c, \alpha, 1 \text{ fm}$  Grösse und Bezeichnung der Werte

**Planck-Konstante**  $\frac{h}{2\pi} = \hbar = 6.582 \cdot 10^{-22} \text{ MeV}\cdot\text{s}$

**Lichtgeschwindigkeit**  $c = 2.998 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

$\hbar c \approx 200 \text{ MeV}\cdot\text{fm}$

**Kopplungskonstante der elektromagnetischen Wechselwirkungen**

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \approx \frac{1}{137} \text{ (ist keine Konstante)}$$

$$1 \text{ fm} \approx 5 \frac{1}{\text{GeV}} \approx \frac{1}{200 \text{ MeV}}$$

# Natürliche Einheiten

$$\hbar = c = 1$$

$$1 \text{ kg} = 5.607 \cdot 10^{26} \text{ GeV}$$

$$1 \text{ m} = 5.068 \cdot 10^{15} \frac{1}{\text{GeV}}$$

$$1 \text{ s} = 1.519 \cdot 10^{24} \frac{1}{\text{GeV}}$$

SI-Einheiten verwenden und Konstanten mitführen!

# Energien

Übliche Energien und ihre physikalische Interpretationen

Energie	Physikalische Interpretation
---------	------------------------------

---

Energieskala des/der ...

eV  $e$  in äusserer Elektronenschale im Atom

keV  $e$  in innerer Elektronenschale im Atom

MeV  $n, p$  im Atomkern

GeV Quarks im Proton

TeV zukünftigen Beschleunigers LHC am CERN

# Schwerpunktsenergie

$$E_{CM} = \sqrt{s}$$

**Fixtarget**

$$E_{CM} = \sqrt{2E_{\text{beam}}m_{\text{target}}}$$

**Strahl-Strahl**

$$E_{CM} = 2E_{\text{beam}}$$

falls  $E_{\text{beam}_1} = E_{\text{beam}_2}$

# Zweiteilchenreaktion

Reaktionsschema:



Lorentz-invariant:

$$s = M^2 c^4 = (E_a + E_b)^2 - (\vec{p}_a \vec{p}_b)^2 c^2$$

mit  $M$  Gesamtmasse des System  $a, b$   
Gesamtenergie im CM-System)<sup>2</sup>

$$s = (E_a^{CM} + E_b^{CM})^2 = (E^C M)^2$$

Für:  $E_{a,b} \gg m_a c^2, m_b c^2$  d. h.  $E_{a,b} \approx |\vec{p}_{a,b}|$

Stationäres Target:  $\sqrt{s} = \sqrt{2E_a^{LAB} m_b c^2}$

Speicherring:  $\sqrt{s} = \sqrt{4E_a E_b}$  falls  $E_a \approx E_b \Rightarrow \sqrt{s} = 2E \rightarrow$  effiziente  
Nutzung der Strahlenergie.

# Elastische Streuung

Teilchen vor und nach Streuung identisch.

Information über räumliche Form des Objekt an dem gestreut wird, bzw. des Wechselwirkungs-Potentials: Variation der Streudaten mit  $E_{Strahl}$  und Streuwinkel.

# De-Broglie Wellenlänge

De-Broglie Wellenlänge:  $\frac{\lambda}{2\pi}$

$$\frac{\lambda}{2\pi} = \frac{\hbar}{|\vec{p}|} = \frac{\hbar c}{\sqrt{2mc^2 E_{kin} + E_{kin}^2}}$$

# Auflösung von linearer Ausdehnung

Auflösung von linearer Ausdehnung:  $\Delta x: \frac{\lambda}{2\pi} \leq \Delta x$

$$|\vec{p}|c \geq \frac{\hbar c}{\Delta x} \approx \frac{200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}}{\Delta x}$$

# Wirkungsquerschnitt

Erklärung des Begriffs

Mass für die Wahrscheinlichkeit einer Reaktion (damit Mass für die Stärke der Wechselwirkung)

Abhängig von der Art der kollidierenden Teilchen und der Kräfte, die zwischen ihnen wirken.

# Geometrischer Reaktionsquerschnitt

$$\sigma_b = \frac{\dot{N}}{\Phi_a \cdot N_b}$$

Mit:

Gesamtzahl der Targetteilchen:  $N_b = n_b A d$

Fluss:  $\Phi_a = \frac{\Delta N_a}{\Delta t A} = \frac{\dot{N}}{A} = n_a v_a$

mit:  $v_a = \frac{\Delta N_a}{\Delta x A} = \frac{\Delta N_a}{\Delta V}$

Reaktionsrate:  $\dot{N} = \Phi_a N_b \sigma_b$

Frontfläche:  $A$ , Dicke:  $d$ ,  $\sigma_a$  überlagern sich nicht

# Totaler Wirkungsquerschnitt

$$\sigma_{\text{tot}} = \frac{\text{Reaktionsrate}}{\text{Fluss} \cdot \text{Zahl der Streuzentren}}$$
$$\sigma_{\text{tot}} = \sigma_{\text{elastisch}} + \sigma_{\text{inelastisch}}$$

$[\sigma] = L^2$ : hat die Dimension einer Fläche (1 barn = 1 b =  $10^{-28} \text{ m}^2$ )

# Differentieller Wirkungsquerschnitt

$$\frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega}$$
$$\sigma_{\text{tot}} = \int \frac{d\sigma(\theta)}{d\Omega} d\Omega$$

# Luminosität

$$\mathcal{L} = \Phi_a \cdot N_b \Rightarrow \dot{N} = \sigma \cdot \mathcal{L}$$

Im Speicherring:

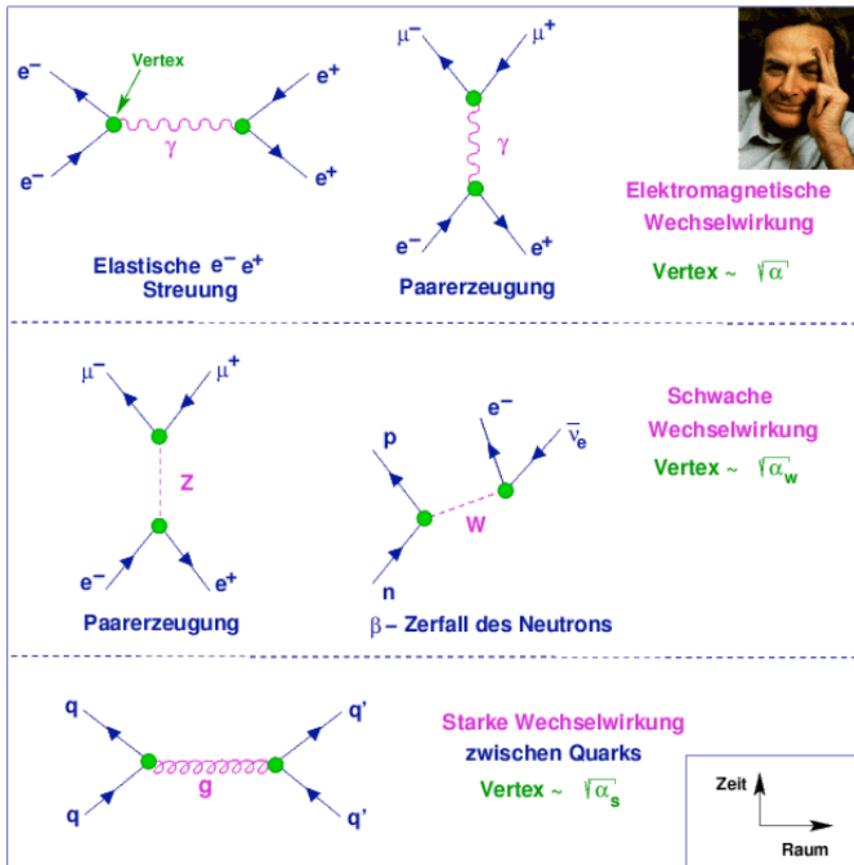
$$\mathcal{L} = \frac{N_a N_b u}{A}$$

mit:

$u$ : Umlauffrequenz mal Zahl der Teilchenpakete ( $u = fn$ )

$A$ : Strahlquerschnitt

# Feynman Diagramme



The image displays three rows of Feynman diagrams illustrating different types of particle interactions. Each row includes a diagram, a title, and a vertex strength formula. A small portrait of a man is in the top right corner, and a coordinate system is in the bottom right corner.

**Electromagnetic Interaction (Elektromagnetische Wechselwirkung):**

- Elastische  $e^-e^+$  Streuung:** Two electrons ( $e^-$ ) and two positrons ( $e^+$ ) interact via a virtual photon ( $\gamma$ ). The vertex is labeled "Vertex".
- Paarerzeugung:** A muon ( $\mu^-$ ) and an antimuon ( $\mu^+$ ) are produced from an electron ( $e^-$ ) and a positron ( $e^+$ ) via a virtual photon ( $\gamma$ ).
- Vertex  $\sim \sqrt{\alpha}$**

**Weak Interaction (Schwache Wechselwirkung):**

- Paarerzeugung:** A muon ( $\mu^-$ ) and an antimuon ( $\mu^+$ ) are produced from an electron ( $e^-$ ) and a positron ( $e^+$ ) via a virtual Z boson ( $Z$ ).
- $\beta$ -Zerfall des Neutrons:** A neutron ( $n$ ) decays into a proton ( $p$ ), an electron ( $e^-$ ), and an antineutrino ( $\bar{\nu}_e$ ) via a virtual W boson ( $W$ ).
- Vertex  $\sim \sqrt{\alpha_w}$**

**Strong Interaction (Starke Wechselwirkung zwischen Quarks):**

- Starke Wechselwirkung zwischen Quarks:** Two quarks ( $q$ ) and two antiquarks ( $q'$ ) interact via a virtual gluon ( $g$ ).
- Vertex  $\sim \sqrt{\alpha_s}$**

**Coordinate System:** Zeit (Time) vs. Raum (Space).

# Elektronen-Synchrotron

Wichtige Begrenzung

Synchrotronstrahlung:  $e^-$  emittiert Strahlung, wenn es durch eine Kraft auf einer Kreisbahn gehalten wird.

Pro Umlauf vom  $e^-$  abgestrahlte Energie:

$$\Delta E = \frac{4\pi}{3} \frac{\alpha \hbar c \beta^3 \gamma^4}{R}$$

mit:

$R$ : Krümmungsradius

$\beta = \frac{v}{c}$ : Teilchengeschwindigkeit

$\gamma = \frac{1}{\sqrt{1-\beta^2}}$ : Lorentzfaktor

Für hochenergetische  $e^+$ ,  $e^-$  ( $\beta \approx 1$ ):

$$\Delta E[\text{GeV}] \approx 9 \frac{(E[\text{GeV}])^4}{R[\text{km}]} \cdot 10^{-8}$$

Bemerkung: für relativistische Protonen (Masse  $M$ ) und relativistische Elektronen (Masse  $m$ ) mit demselben Impuls:  $\Delta E \approx \left(\frac{m}{M}\right)^4 \longrightarrow$  für Protonen  $\approx 10^{13}$  mal kleiner!

# Relativistische Beziehung

$$E^2 = \vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4$$

→ Gesamtenergie kann positive und negative Werte annehmen:

$$E = \pm \sqrt{\vec{p}^2 c^2 + m_0^2 c^4}$$

Klassisch betrachtet sind negative Energien für frei Teilchen bedeutungslos.

Quantenmechanisch betrachtet wird z. B. einen  $e^-$  Strahl der sich mit Impuls  $\vec{p}$  entlang positiver  $x$ -Achse bewegt durch ebene Wellenfunktionen beschrieben:

$$\psi(x, t) = A \exp(i(\vec{p}\vec{x} - Et)/\hbar)$$

Formal werden jedoch auch Teilchen mit  $-E$ ,  $-\vec{p}$  und  $-t$  beschrieben. Beachte: positiver Ladungsfluss in eine Richtung entspricht negativem Ladungsfluss in umgekehrte Richtung.

# Absorption von $\gamma$ Strahlung in Materie

Photoeffekt:

Compton Streuung:

Paarbildung:

# Cherenkov-Strahlung

Geladenes Teilchen mit  $v \approx c$  in Medium mit Brechnugsindex:  $n > 1$ :

$$v > \frac{c}{n}$$

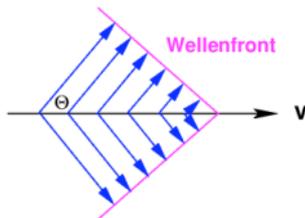
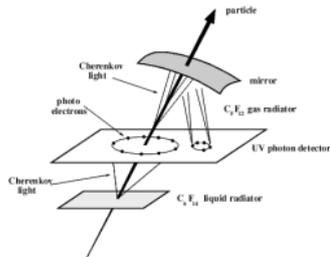
→ Angeregtes Atom sendet Licht aus, dessen Wellenfront unter festem Winkel relativ zur Teilchenbahn ist (wie eine schießende Ente im Wasser). Photonen werden in einem Kegel mit festem Winkel  $\theta$  um die Bahn des geladenen Teilchens emittiert.

$$\cos \theta = \frac{1}{\beta n}$$

Energieverlust durch C-Strahlung klein gegenüber Ionisationsverlust.

Aufbau der Messung:

**RICH**  
Ring-Image-  
Cherenkov-Counter



# Detektoren

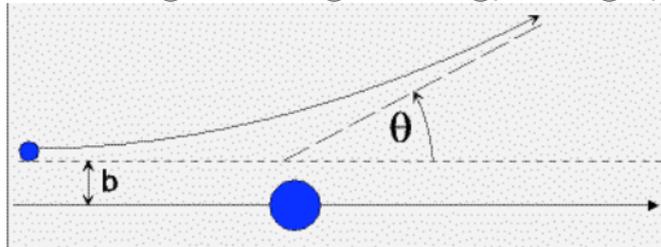
Allgemein Prinzipien

Die Messung erfolgt immer auf Grund einer Wechselwirkung von Teilchen mit Materie!

Teilchenphysik-Experimente: studiere Wechselwirkungen zwischen Teilchen, durch Streuung von Teilchen an anderen Teilchen.

Resultate dieser Wechselwirkungen sind:

Änderung der Flugrichtung, Energie, Impuls des ursprüngliche Teilchens



Produktion neuer Teilchen

Mit einem idealen Detektor wird die gesamte einlaufende und auslaufende Kinematik gemessen (alle auftretenden/erzeugten Teilchen, deren Energie und Impuls, deren Typ (Masse, Ladung, Spin, Lebensdauer, Zerfälle)).

Dies kann nun mit der theoretischen Vorhersagen verglichen werden, was Rückschlüsse über die Dynamik zulässt.

# Detektoren

Gemessene Eigenschaften

**Erzeugung/Durchgang eines Teilchens**  $\Rightarrow$  Typ

**Vierer-Impuls** Energie: mit Kalorimeter, Impuls: „Spuren“

**Geschwindigkeit** Flugzeit oder Cherenkov Strahlung

**Masse** Abgeleitet falls  $E$  und  $p$  oder  $v$  und  $p$  gemessen.

**Ladung oder zumindest Vorzeichen** Ablenkung im Magnetfeld

**Lebensdauer**  $\tau$  aus Flugstrecke, Zerfallsstrecke oder ist statistischer Prozess  $e^{-(t/\tau)}$

# Spuren-Detektoren

Ziel: Sichtbar machen von Teilchendurchgang  $\rightarrow$  Messung von Spuren

Rekonstruiere die Flugbahn anhand der gemessenen Punkte im Raum

Extrahiere Information über Impuls

Beachte: Das Teilchen sollte nicht stark vom Detektor(-Material) beeinflusst werden, d. h. keine Materialien mit hohen Dichten.

Signale auf Grund von Ionisation:

Geiger-Müller-Zähler, MWPC (Multi-Wire Proportional Chambers), DC (Drift Chamber), TPC (Time Projection Chamber), Silicium Detektoren (Strips, Pixel), Bubble-, spark-chambers (früher)

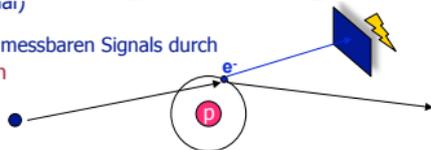
Signale auf Grund von Szintillationslicht:

z. B. scintillating fibers, liquids

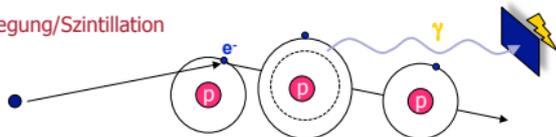
DETEKTOR (Material)

Erzeugung eines messbaren Signals durch

■ Ionisation



■ Anregung/Szintillation



# Nachweisbare Teilchen

**Geladene Teilchen**     •  $e^-$ ,  $e^+$

- $p$  (Proton)
- $\pi^\pm$ ,  $K^\pm$ ,  $D^\pm$ ,  $B^\pm$  (Mesonen)
- $\mu^\pm$  (Myonen)

**Neutrale Teilchen**     •  $\gamma$  (Photonen)

- $n$  (Neutronen)
- $\pi$ ,  $K^0$ ,  $B^0$  (Mesonen)
- $\nu$  (Neutrinos, sehr schwierig)

Verschiedene Teilchen wechselwirken verschiedenartig mit Materie (=Detektor), brauchen deshalb verschiedene Typen von Detektoren.

# Blasen-kammer

In überhitzter Flüssigkeit (kurzzeitige Dekompression)  
Blasenbildung entlang des von geladenen Teilchen erzeugten  
Ionisationsschlauches  
Blasenkommer unter Druck  
Gasblasen mit Kamera aufnehmen  
Wiederholungsrate  $\approx 1$  s  
Big European Bubble Chamber:  $38 \text{ m}^3$

# Gaszähler

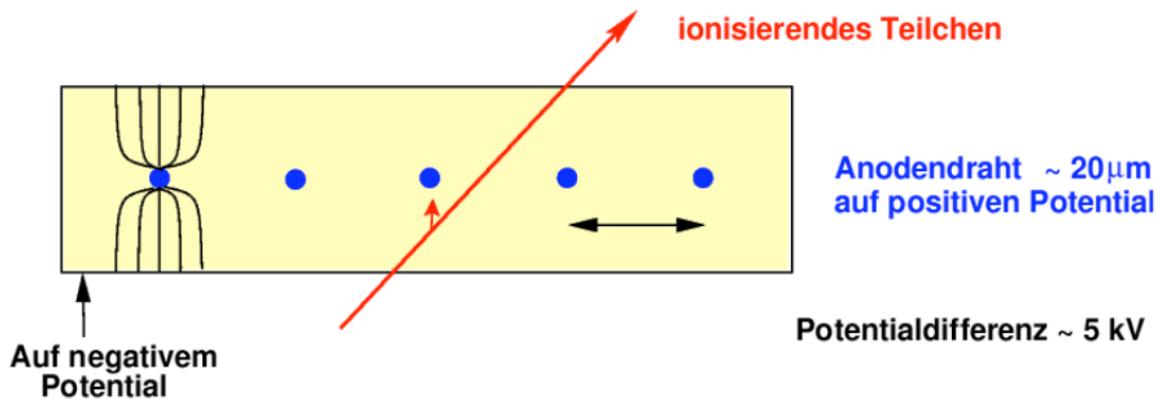
Geladenes Teilchen Ionisiert die Gas-Atome

Elektronen driften zu Anode, Ionen zur Kathode

In der Nähe der Anode werden die Elektronen beschleunigt (anwachsende Feldstärke). Weitere Ionisation (Sekundäre-Ionisation) → Signalverstärkung (z. B.  $10^5$ ) → im Draht wird Signal induziert.

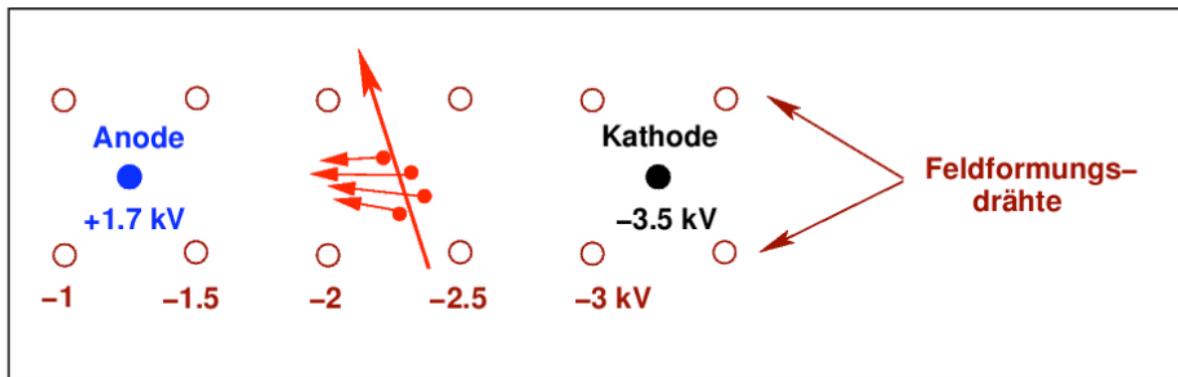
# Proportionalkammer

Bestehen aus flachen mit Gas gefülltem Volumen, in dem dünne Drähte gespannt sind.



# Driftkammer

Dasselbe Prinzip wie bei Proportionalkammern. Abstände der Drähte bis zu einigen cm.



# Siliziumstreifendetektoren

Bestehen aus dünnen Auslesestreifen, im Abstand von ca.  $50 \mu\text{m}$  angebracht.

Ortsauflösung  $\leq 10 \mu\text{m}$

# Energiemessung

Erfordert in der Regel eine vollständige Absorption der Teilchen in einem Medium.

Absorbierte Energie kann umgewandelt werden in:

Signale  $\propto$  ursprüngliche Energie des Teilchens  $\left\{ \begin{array}{l} \text{Ionisation} \\ \text{Anregung von Atomen} \\ \text{Cherenkovlicht} \end{array} \right.$

**Elektromagnetisches Kalorimeter** zur Messung von  $e^+$ ,  $e^-$ ,  $\gamma$   
Bremsstrahlung ( $e^- + \text{Kern} \rightarrow e^- + \gamma + \text{Kern}$ ) und Paarbildung ( $\gamma + \text{Kern} \rightarrow e^- + e^- + \text{Kern}$ )

15 bis 25  $X_0$  notwendig. Energieauflösung:  $\frac{\sigma E}{E} \approx \frac{1\% - 10\%}{\sqrt{E}} E$  in GeV

**Hadron Kalorimeter**

Hadronen erzeugen in Materie durch Serie von inelastischen Reaktionen (starke Wechselwirkung) Schauer aus vielen sekundär Teilchen, meist weiteren Hadronen

Abhängig von Teilchenenergie bis zu  $10\gamma$

Energieauflösung:  $\frac{\sigma E}{E} \approx \frac{40\% - 100\%}{\sqrt{E}} E$  in GeV

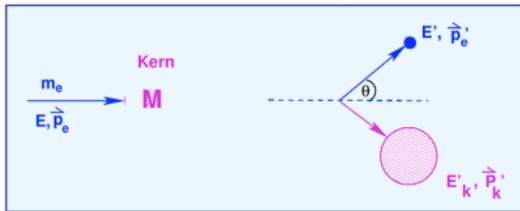
# Grosse Detektorensysteme

Konzept

Kombiniere verschiedene Detektortypen/Technologien zu einem grossen Detektorsystem, das aus Detektorenlagen besteht.

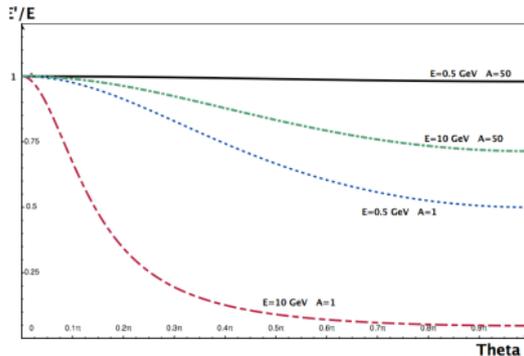
# Kinematik der Elektronstreuung

Energie des  $E'$  des gestreuten  $e^-$  im Laborsystem

Elastische Streuung  $e^-$ -Kern Streuung

Invariante Masse:  $m = \sqrt{\frac{p^2}{c^2}}$

$$E' = \frac{E}{1 + \frac{E}{Mc^2}(1 - \cos\theta)}$$



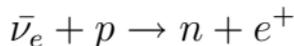
# Cowan und Reines

Erzeugung von  $\nu$ 's in Reaktor durch Neutronen Überschuss nach Spaltung ( $\beta^-$ -Zerfall):



Fluss  $\approx 10^{15} \bar{\nu}_e/\text{cm}^2/\text{s} < E_{\bar{\nu}_e} > \approx \text{MeV}$

Dedektion via Inverser- $\beta$ -Zerfall:



$e^+$  annihiliert (Reaktion mit  $e^-$ ) in  $\approx 10^{-9} \text{ s} \Rightarrow 2 \gamma$ 's ( $E_\gamma = 511 \text{ keV}$ ).

Nachweis des  $n$  in Wasser durch mehrfache elastische Stösse an  $p$  (moderiert).

Im Wasser ist  $\text{CdCl}_2$ ,  $\text{Cd}$  fängt  $n$  ein in  $\approx 10^{-5} \text{ s}$ :

$\text{Cd}(n, \gamma) \rightarrow \gamma$ 's:  $E_{\text{tot}} \approx 8 \text{ MeV}$

Signatur: 2 Pulse von  $\gamma$ 's im Abstand einiger  $\mu\text{s}$ .

# Wieso 3 $\nu$ -Sorten?

Breite *von*  $Z^0$ : Damit misst man alle  $\nu$ 's mit  $m_\nu < \frac{m_{Z^0}}{2}$

TODO Diagramm

Kosmologische Betrachtung: Wenn Anzahl Neutinosorten grösser ist.

Verschiebt sich das thermodynamische Gleichgewicht zwischen  $p$  und  $n$ .

Messe  $\frac{m_{He}}{m_{He}+m_H}$  TODO siehe (1)

Primordiale Nukleosynthese TODO siehe (11)

# CKM-Matrix

Einträge innerhalb der Familie auf der Diagonale (etwa 1 also  $\approx 0.9$ ). Die anderen Übergänge sind mit 1:20 unterdrückt (etwa 0.2).

$$V_{du} > V_{ds} > V_{dt}$$

TODO:

# Breite von Z-Resonanzen

Wenn es mehr Neutrionfamilien gibt ist die Wirkungsquerschnitt tiefer und breiter, wenn es weniger gibt höher und schmaler. Experiment stimmt gut mit 3 Familien überein.

Diagramm der Resonanzkurve, was auf der  $x$ -Achse (Schwerpunktsenergie)

# Bedingung für Fusion

$$\tau[\text{s}]T[\text{keV}]n[\text{cm}^{-3}] \approx 6 \cdot 10^{15} \approx 10^{16}$$

**Tokamak**  $\tau \approx 10 \text{ s}$ ,  $T \approx 10 \text{ keV} \Rightarrow n \approx 10^{12}$  Entspricht etwa der Dichte von Luft

**Fusionslaser**  $\tau \approx 10^{-11} \text{ s}$ ,  $T \approx 10 \text{ keV} \Rightarrow n \approx 10^{25}$  Entspricht etwa 10 mal der Dichte von Blei

# Fusion

Experimente

**Tokamak** 3 Magnetspulen welches das Plasma (Gas ionisierter Teilchen) „führen“, gab schon Fusionen (allerding kam weniger Energie raus als eingesteckt wurde), (wie?) siehe (19)

**Stellerator**

**ITER**

Aussichtsreichste Reaktion:



Wie verliert ein  $e^-$  Energie in  
Materie?

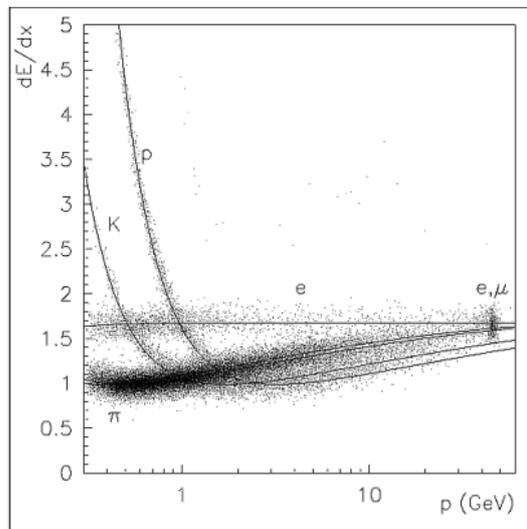
**Ionisation** Bethe-Bloch Formel

**Bremsstrahlung** überwiegt für  $E_{e^-} \approx > 600 \frac{\text{MeV}}{Z}$

# Ionisation

Ennergieverlust geladener Teilchen durch Ionisation. Elektromagnetische WW der geladenen Teilchen mit Hüllenelektronen  $\rightarrow$  Ionisation der Atome.

$$\frac{\langle E_{Lost} \rangle}{\text{Pfadlänge}} = f(\text{Partikelgeschwindigkeit}\beta)$$



# Bremsstrahlung von $e^-$

Hauptsächlich an Atomkernen der Materie

$\vec{E}$ -Feld des Kerns beschleunigt  $e^- \rightarrow$  Abstrahlung von Photonen (stark material- und energie-abhängig)

$$\langle E \rangle = E_0 e^{-\frac{x}{X_0}}$$

Strahlungslänge (Kohärenzlänge)  $X_0$

$X_0$  entspricht der Schichtdicke  $x$  eines Materials, nach welcher die Energie des Elektrons um Faktor  $e$  reduziert ist. Um das Teilchen zu absorbieren etwa  $30 \cdot x_0$ .

Beispielsweise bei Blei  $x_0 = 0.56$  cm

# Feynman-Diagramme

elastische  $e^+ - e^-$ -Streuung

Austausch eines  $\gamma$ 's zwischen  $e^-$  und  $e^+$ :

# Feynman-Diagramme

Neutrale und geladene Ströme (Beispiele im Skript)

TODO Bild einbinden

Wie wurde der Spin von  $W$   
bestimmt?

TODO Antiproton-Proton-Streuung, Bild aus Skript mit Spin für Quarks, Winkelverteilung des Elektrons und Myons.

Bild wie  $W$  in Ruhe zerfällt.

# Beschleuniger

Wie beschleunigt man Teilchen?

Form?

Teilchenführung?

Geladene Teilchen werden durch elektrische Felder beschleunigt ( $\Rightarrow$  teilchen müssen elektrisch geladen sein und grosse Lebensdauer haben):  
**Einfachste Methode** Hochspannungsgeneratoren zur Erzeugung einer Gleichspannung (Van-de-Graaf Beschleuniger). Strahlenergie bis 20 MeV.  
Z. B. Accelerator Mass Spectrometry (AMS) (Suter lässt Grüßen) **Für höhere Energien** Wechselspannung mit hoher Frequenz (vermeidet Überschlag) in Kavitäten. Typische Feldstärken: einige MV pro Meter Beschleunigungsstrecke.

Fast alle modernen Protonen- und Elektronen-Beschleuniger sind kreisförmig (Ausnahme: SLC am SLAC:  $e^+e^-$ )

Elektromagnete (Feld senkrecht Bahnebene) halten Teilchen auf ihrer Bahn innerhalb der Vakuumröhre:  $p[\text{GeV}/c] = 0.3 \cdot B[\text{T}] \cdot R[\text{m}]$

Hochfrequenz und Magnetfeld müssen mit Teilchengeschwindigkeit anwachsen und synchronisiert werden  $\rightarrow$  Synchrotron.

Elektromagnete: konventionelle max.  $\approx 1.4 \text{ T}$ , supraleitende Spulen (LHC): 8-9 T

# HERA-Beschleuniger

Am DESY, wie auch PETRA, DORIS (Normalerweise Elektron Positron Speicherring)

Nach Skript: Elektron (oder Positron), Protonen

Strahlenergie:  $e = 28 \text{ GeV}$ ,  $p = 820 \text{ bis } 820 \text{ GeV}$

Luminosität:  $2 \cdot 10^{31} \frac{1}{\text{cm}^2 \text{s}^{-1}}$

Kinematik, Feynman Diagramme

Detektor (Rechteck) was sieht man? TODO

Alles geht ungefähr weiter in die richtung des Protons da  $E_p \approx 820 \text{ GeV}$

$\gg E_{e^-} \approx 30 \text{ GeV}$

# LEP

Large Electron-Positron Collider (LEP, deutsch: Großer Elektron-Positron Speicherring)

Umfang: 27 km

Teilchen: Elektronen  $\leftrightarrow$  Positronen

Strahlenergie: 45 GeV  $\rightarrow$  104.5 GeV

Luminosität:  $10^{31}$  bis  $10^{32} \frac{1}{\text{cm}^2 \text{s}^{-1}}$ ;  $L_{Int} \gg 1000 \text{ pb}^{-1}$

Experimente: ALEPH, DELPHI, L3, OPAL

# LHC

Large Hadron Collider (LHC)

Teilchen: Protonen  $\leftrightarrow$  Antiprotonen, Schwere Ionen (z. B. Blei)

Strahlenergie: 7 TeV

Luminosität:  $10^{33}$  bis  $10^{34} \frac{1}{\text{cm}^2 \text{s}^{-1}}$

Experimente: ATLAS, CMS, LHC-b, ALICE

# Wo sollen die Detektoren stehen?

Bei HERA

In der unmittelbaren Nähe des Elektronenstrahls

Wie wirken sich die Anzahl  
Neutrinofamilien auf den Big-Bang  
aus?

TODO: Schritte im Script

# Radioaktiver Zerfall

Gesetz?

Halbwertszeit?

Natürliche Radioaktivität?

Gesetz:

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N \Rightarrow N(t) = N_0 \exp(-\lambda t)$$

Halbwertszeit:

$$t_{1/2} = \frac{\ln 2}{\lambda}$$

Natürliche Quellen: Gestein: z. B. Radon aus Uranzerfallsreihe.

# $^{14}\text{C}$ -Methode

$^{14}\text{C}$  in Atmosphäre konstant sobald Einbau Zerfall des  $^{14}\text{C}$  ( $t_{1/2} = 5000 \text{ a}$ ).

# Eichgruppe des Standardmodell

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

$SU(3)$ : spezielle unitäre Gruppe der Dimension 3

# Entdeckung des $W$ -Teilchens

Feynman-Diagramm

Proton-Antiprotonkollision Quark und Antiquark anhillieren. . .

Kap 9 S. 15,16

# Formfaktoren bei Nukleonen

Aussage über Ladungsverteilung Feynman-Diagramm

Diagramme mit verschiedenem Abfall, für He (Gauss) und Pb (Fermi).

TODO Skript.

Fouriertransformierte von  $\rho(\vec{x})$

# Ladungsverteilung

Diagramme mit verschiedenem Abfall, für He (Gauss) und Pb (Fermi).

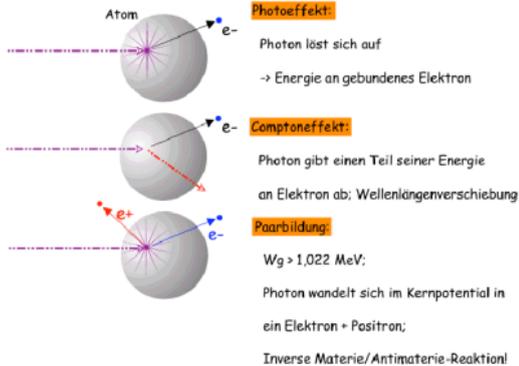
TODO Skript.

Größenordnung  $\approx fmA^{1/3}$

# Absorption von $\gamma$ Strahlung in Materie

Wie verliert ein Photon Energie in Materie?

WW mit Materie (Absorption):



**Photoeffekt:**  $\sigma \sim 1/E^3$

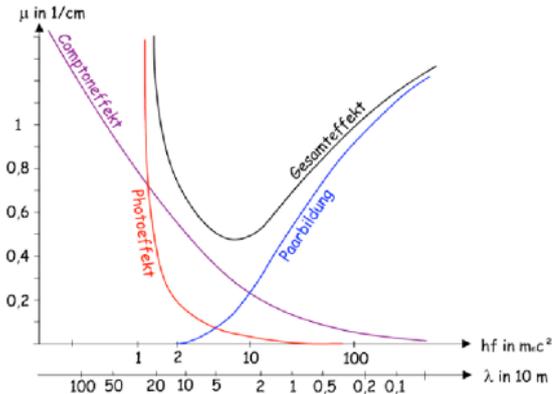
**Compton Streuung:**  $\sigma \sim 1/E$

**Paarbildung:**  $\sigma \sim \text{constant}$   
für  $E > 10 \text{ MeV}$

**Photonabsorption durch**  
 $X_0$  beschrieben:

$$I = I_0 e^{-7x/9X_0}$$

**Intensität auf Wert 1/e**  
gesunken bei  
Schichtdicke =  $7x/9X_0$   
(Konversionslänge)



# Wichtigste Energie und Längenskalen in der Teilchenphysik?

**Längen** fm: Protonen,  $\text{\AA}$ : Atom

**Energieskala** eV: äussere Elektronen, keV: innere Elektronen, MeV:  
Nukleonen, GeV: Quarks, TeV: Higgs

# Weizäckermasseformel

$$m(Z, A) = Zm_H + (A - Z)m_n - a_V A + a_S A^{\frac{2}{3}} + a_C Z^2 A^{-\frac{1}{3}} + a_A \frac{(Z - \frac{A}{2})^2}{A} + \begin{cases} +\delta \\ 0 \\ -\delta \end{cases}$$

**Volumenenergie** ( $a_V A$ ): Kondensationsenergie die frei wird, dominanter Term, erklärt die Näherung:  $m(Z, A) = Zm_H + (A - Z)m_n - B/A(???)$

**Oberflächenenergie** ( $-a_S A^{\frac{2}{3}}$ ): Nukleonen an der Oberfläche sind weniger stark gebunden.

**Coulombenergie** ( $-a_C Z^2 A^{-\frac{1}{3}}$ ): Coulombabstossung zwischen den Protonen.

**Asymmetrieenergie** ( $-a_A \frac{(Z - \frac{A}{2})^2}{A}$ ): Wird verringert wenn  $Z \neq N$

**Paarungsenergie**  $\left( \begin{array}{l} \left( \begin{array}{ll} +\delta & \text{gg - Kerne} \\ 0 & \text{ug, gu - Kerne} \\ -\delta & \text{uu - Kerne} \end{array} \right) \end{array} \right) : \delta \approx a_P A^{-\frac{1}{2}}$

# Callan-Gross Beziehung

TODO

$$2xF_1(x) = F_2$$

Herleitung: Koeffizientevergleich elastische-, inelastische Streuung.

Was sind Baryonen und wie kann man sie ordnen?

Hadronen sind unterteilt in Mesonen mit zwei Quarks und Baryonen mit 3 Quarks.

Strangness und Isospin

# Weshalb wurde Isospin eingeführt

148

TODO siehe 15

*Antwort*

Quark und Leptonenfamilien als  
dupletts und singulets des schwachen  
Isospin.

150

TODO ???

*Antwort*

$J/\Psi$

Was ist das?

Was ist speziell

Eine Quarkonia, eine gebundenes Charm Anticharm Paar  
Das es eine Resonanz von  $e^+ - e^-$ -Streunung ist.

# Was sind Quarkonia

Quark-Antiquark Paare, die analog zum H-Atom Thermoschemen???  
aufweisen mit diskreten Energieniveaus.

Für welche Quarks: charm, bottom

Welche Masse:

# Zerfall des Charmonium?

$\gamma$ , Gluon und Durchgehende Quarklinien

# Impuls eines Teilchens Messen

Magnetfeld und Spur auswerten.

158

*Antwort*

# Kalorimeter

TODO

# Symmetrien in der Physik

Symmetrien spielen eine wichtige Rolle in der Physik

Noether Theorem: Ist ein physikalisches Gesetz (z. B.

Bewegungsgleichung) bezüglich Symmetrieoperationen invariant, so gibt es einen dazugehörigen Erhaltungssatz.

Gesetze der klassischen Physik: invariant gegenüber **kontinuierlicher**

Transformation bezüglich Zeit, Ort und räumlicher Orientierung:

Homogenität der Zeit  $\Rightarrow$  Energieerhaltung

Homogenität des Raums  $\Rightarrow$  Impulserhaltung

Homogenität des Raums  $\Rightarrow$  Drehimpulserhaltung

Beispiele **diskreter** Transformation  $P$ : System zum Spiegelbild transformiert

Paritätserhaltung: Spiegelsymmetrie in der Quantenmechanik

Ladungskonjugations-Transformation  $C$ : Teilchen  $\leftrightarrow$  Antiteilchen

$C$  entspricht Symmetrie, welche Teilchen und Antiteilchen verbindet

**Bemerkung:** Manche Symmetrien sind unter bestimmten Bedingungen (Wechselwirkungen) verletzt.

# Haben Neutrinos eine Masse?

TODO

Im Standardmodell nicht aber es gibt die Neutrinooszillation.

Atmosphärische  $\nu_\mu$  messen.

Direkt bestimmbar durch  $\beta$ -Zerfall von Tritium. Reaktion: TODO,

Kurie-Plot: TODO.  $E$  ist Elektronenergie. Experimentelle

Schwierigkeiten? Auflösung im Kaliometer  $1\%/\sqrt{E}$  (nimmt mit steigendem  $E$  zu).

# Offene Frage des Standardmodell

TODO

**Dunkle Materie**

**Neutrinomasse**

**Die Masse aller Teilchen Higgstheorie**

# $Z^0$ -Produktion

TODO Graphen

$pp$

$p\bar{p}$

$e^- + e^+$

Ist Linearkombination von  $W^0$  und  $B^0$  (siehe 13)

# Rutherford

Experiment

Welche Energie hat der Strahl

$\alpha$ -Teilchen werden auf eine dünne Goldfolie geschossen und auf einer ZnS-Blende abgebildet.

Es ergeben sich sehr grosse Streuwinkel, wie sie nur für punktförmige Streuzentren möglich sind.

Daraus kann der  $R_{max}$  abgeschätzt werden:  $R_{max} \approx 1 \text{ fm}$

Strahlenergie: 5.5 MeV da Kernphysik.

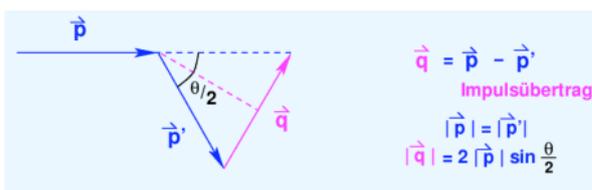
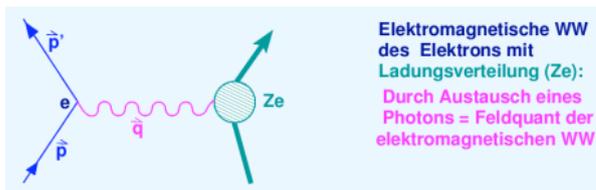
# Rutherford-Wirkungsquerschnitt

Ziel: Berechne  $\sigma$  für elastische Streuung eines  $e^-$  an Atomkern mit Ladungszahl  $Ze$

- $\frac{Ze^2}{\epsilon_0 \hbar c} = Z\alpha \ll 1$  also  $\Rightarrow$  Störungsrechnung gerechtfertigt, Born'sche Näherung (Störungstheorie 1. Ordnung, Zustand vorher ist Zustand nachher des freien Teilchens)

- Punktförmige Teilchen
- Spin vernachlässigt
- Target schwer  $\rightarrow$  kein Rückstoss

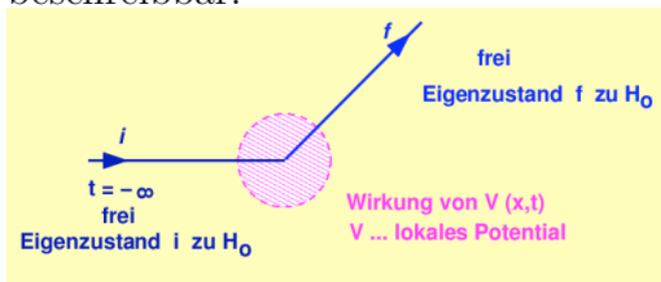
$$\left( \frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{\text{Rutherford}} = \frac{Z^2 \alpha^2 (\hbar c)^2}{4E^2 \sin^2 \theta/2}$$



Feldtheoretische Betrachtung: Photon ist ungeladen, koppelt an Ladung der beiden ww  $\vec{q}$  ist Impuls des ausgetauschten Photons  $\Rightarrow \sigma \propto \frac{1}{|\vec{q}|^4}$

# Nichtrelativistische Störungstheorie

Betrachte nichtrelativistische Streuprozesse: Einzelstreuung an lokalem Potential vor und nach der Streuung: freies Teilchen  
 Teilchen ist frei bei  $t = \pm\infty$ . Potential wirkt nur bei  $t \approx 0$ . *rightarrow*  
 Teilchen als Lösung der Schrödinger Gleichung für freie Teilchen beschreibbar.



**Ziel:** Lösung der Schrödinger Gleichung für Teilchen, welches sich in Anwesenheit eines Wechselwirkungspotentials  $V(x, t)$  bewegt.

# Rutherford-Formel herleiten

Mit:

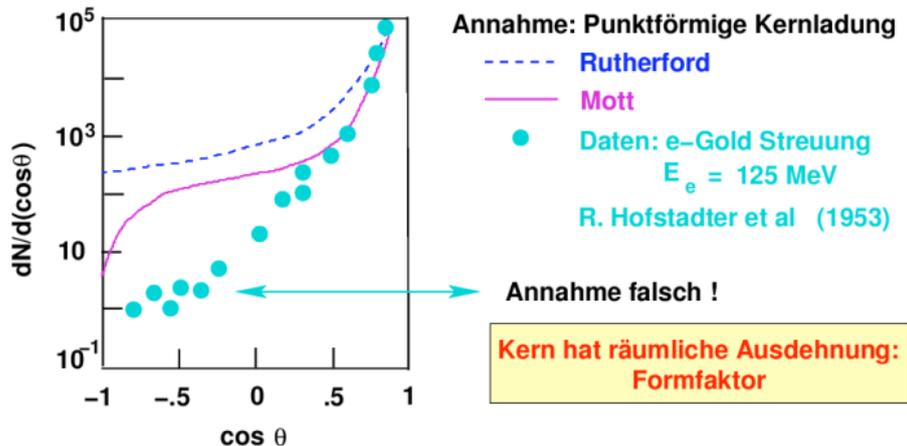
- Fermi's Goldene Regel
- Mit Grafik  $\theta$  vs.  $E'/E$

# Mott Wirkungsquerschnitt

Beschreibt Elektron-Streuung unter Berücksichtigung des Elektronspins  
(Spin=1/2)

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Mott}} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{\text{Rutherford}} \left(1 - \beta^2 \sin^2 \frac{\theta}{2}\right)$$

Vergleich zu Rutherford:



# Fermi's Goldene Regel

Beziehung zwischen Übergangsrate  $W$ , Übergangsmatrixelement  $M_{fi}$  und Zustandsdichte  $\rho(E')$ .

Quantenmechanische Störungstheorie:

$$W = \frac{2\pi}{\hbar} |M_{fi}|^2 \rho(E')$$

$M_{fi}$  enthält die Physik des beobachteten Prozesses.

Für den Wirkungsquerschnitt erhält man:

$$\sigma = \frac{W \cdot V}{v_a} = \frac{2\pi}{\hbar v_a} |M_{fi}|^2 \rho(E') V$$

Kennt man  $M_{fi} \rightarrow \sigma$  berechnen

Kennt man  $\sigma \rightarrow M_{fi}$  berechnen (und damit  $H_{INT}$ )

# Vektrobosonen

180

*Antwort*

Spin = 1

$\beta$ -Zerfall Spin der Produkte ???

siehe (21)

TODO

# Goldhabereperiment

182

W-Boson

*Antwort*

Wie misst man  $e^-$

Kalimeter: Szintillatoren (Kristalle) Sandwiches (Blei/Kristall/Blei)  
Kristalle haben die bessere Auflösung (in Sandwiches gibt es mehr  
Fluktuation).

Auflösung:

$$\frac{\sigma}{E} = \frac{1 - 2\%}{\sqrt{E}}$$

Effekte im Detektor: Photoeffekt, Compton-Streuung, Paarbildung. Bei  
grossen Energien ist die Paarbildung am wichtigsten.

# Kernspaltung

Am Beispiel induzierte Spaltung von  $^{235}\text{U}$ .

Wieso  $^{235}\text{U}$ ?



$n$  sind Prompte Neutronen, für Spaltung werden thermische benötigt.

Freiwerdende Energie geht an: Tochterkerne (Hauptanteil),  $n$ ,  $\gamma$

Bei  ${}^{235}\text{U}$  ist gerade/ungerade reichen thermische Neutronen da dieser zu  ${}^{236}\text{U}^*$  wird welches ein gg-Kern ist  $\Rightarrow$  es wird noch Paarungsenergie frei. Im Gegensatz dazu ist  ${}^{238}\text{U}$  ein doppelt gerader Kern, braucht also prompte Neutronen um die Schwellenenergie zu überschreiten.

# Cabibbo-Winkel

Übergangswahrscheinlichkeiten zwischen Quarkfamilien werden damit beschrieben.

TODO Winkel beim  $\beta$ -Zerfall

# Sonne

Welche Temperatur?

Warum trotzdem Fusion?

Wieviel Energie wird frei?

$$\approx 10^7 \text{ K} = 1 \text{ keV}$$

Dichte ist gross, Maxwellverteilung, QM tunneln.

Energie: 1 eV bei  $10^7 \text{ K}$

# Sonne

Hauptzyklus?

TODO siehe 10 Was passiert da: starke WW da Anzahl Protonen und Neutronen gleich bleibt (keine Quarks werden umgewandelt).

Photon das später noch rauskommt entsteht erst später natürlich via elektromagnetische WW.

# Neutrinoquellen

194

*Antwort*

TODO nach Skript

**Sonne** welche??

**Reaktor** ??

.. ??

# Partonmodell

Bezugssystem, in dem ein Nukleon allein durch die longitudinalen Impulse der Quarks (Partonen) beschrieben werden kann. Den Partonen kann man eine Masse zuordnen, die aber nicht der intrinsischen Quarkmasse entspricht... TODO

# Bjorkensche Skalenvariable

$x$  gibt den Impuls an den ein Quark trägt.

Graph Seite 17 Kap 6 (scheinbar falsch beschriftet im Skript)

# Skalenbrechung

$F_2 \neq const.$  Bedeutet bei genauer Betrachtung allerdings nicht das Quarks nicht punktförmig sind.

Strukturfunktion (Seite 18 links unten), Tiefinelastische Streuung (17)

TODO Graph Seite 35 Kap. 8

# Wu-Experiment

Co, Magnetfeld, Kernspins, Abstrahlcharakteristik ... Paritätverletzung.

TODO siehe 17

# Wozu Higgsteilchen

Elektroschwache Wechselwirkung, skalares Higgs-Feld gibt Teilchen der schwachen WW eine Masse.

Eigenschaften von Teilchen wenn sie aus einer Eichtheorie folgen?

TODO (14)

Sind Masselos  $\Rightarrow$  Higgs-Feld damit sie Masse bekommen.

# Higgsboson erzeugen

TODO (14)

Indirekt via  $e^+ - e^- \rightarrow$  Vektormesonen

Welche Arten des Kernzerfall gibt es?

TODO

$\alpha$  Aussendung eines  ${}^4_2\text{He}$ -Kerns  $A \rightarrow A - 4, Z \rightarrow Z - 2, N \rightarrow N - 2$ .

Zerfallszeiten zwischen Nanosekunden und 10 000 Jahren

$\beta$

$\gamma$  kein Zerfall. Angeregter Kern kehrt in Grundzustand zurück.

Zerfallszeit:  $\tau = 10^{-1}$  s

**Fusion (spontane fission)**

**Spaltung**

$\alpha, \beta, \gamma$  (wieso ist das ein Zerfall), spontane fission, Spaltung???

# $\beta$ -Zerfall

Welcher Prozess ist beteiligt beim  $\beta^-$ -Zerfall

Es gibt drei Arten:

$$\beta^+ \quad p \rightarrow n + e^+ + \nu_e$$

$$\beta^- \quad n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e$$

**Elektroneneinfang**  $EC \quad p + e^- \rightarrow n + \nu_e$

2 Zuschauerquarks und schwacher Zerfall

Spin: 2 Typen Fermi ( $\Delta S = 0$ ) und Gamov-Teller ( $\Delta S = 1$ ). Je nach dem sind die Spins von  $e^-$  und  $\bar{\nu}_e$  parallel oder antiparallel. (18)

Wu-Experiment Gamov-Teller. Erklären!

Antineutrino hat immer Helizität +1 (wenn Annahme Masselos).

# Fermigasmodel

Grundannahem: Nukleonen könne sich frei bewegen, nur Pauli-Prinzip wird berücksichtigt. Analog zu Fermigas bei Elektronen. (24)

Potenzial von Protonen und Neutronen ist verscheiden. TODO (16)

Das  $\phi$  zerfällt in  $K^+ K^-$  oder

$\pi^+ \pi^- \pi^0$

Feynman Diagramme Zeichnen

$q\bar{q}$  ist auf Grund der Zweigregel bevorzugt

Wenn man in die Strahlrichtung des  $e^+e^-$  sieht was sieht man? 2 oder 3

Jets TODO (8)

# CP-Verletzung beim $K^0$

$K^0$  und  $\bar{K}^0$  können über Pionen-Zwischenzustände ineinander übergehen.  $K^0$  zerfällt in  $2\pi$ -Zustände und in  $3\pi$ -Zustände. Diese sind Eigenzustände des CP-Operators, nicht jedoch  $K^0$  selbst! Definiere zwei Linearkombinationen aus  $K^0$  und  $\bar{K}^0$ . Diese sind dann EZ (???) zu CP. Damit CP erhalten ist müssen die beiden Linearkombinationen in verschiedene Zustände zerfallen. Im Experiment beobachtet man das aber nicht.