

$$\text{Streurate } R \left[ \frac{1}{s} \right] = N_b \left[ \frac{1}{s} \right] \cdot N_t \left[ \frac{1}{\text{cm}^2} \right] \cdot \sigma \left[ \text{cm}^2 \right]$$

$\sigma$  kann generell für alle möglichen Prozesse definiert werden: elastische o. inelastische Streuung, Absorption, Reaktion  $A + B \rightarrow C + D + E \dots$

für verschiedene mögliche Prozesse: Wahrscheinlichkeiten addieren sich

"totaler Wirkungsquerschnitt"  $\sigma = \sigma_{el} + \sigma_{inel} + \dots$

$\sigma_t$ : partielle Wirkungsquerschnitte

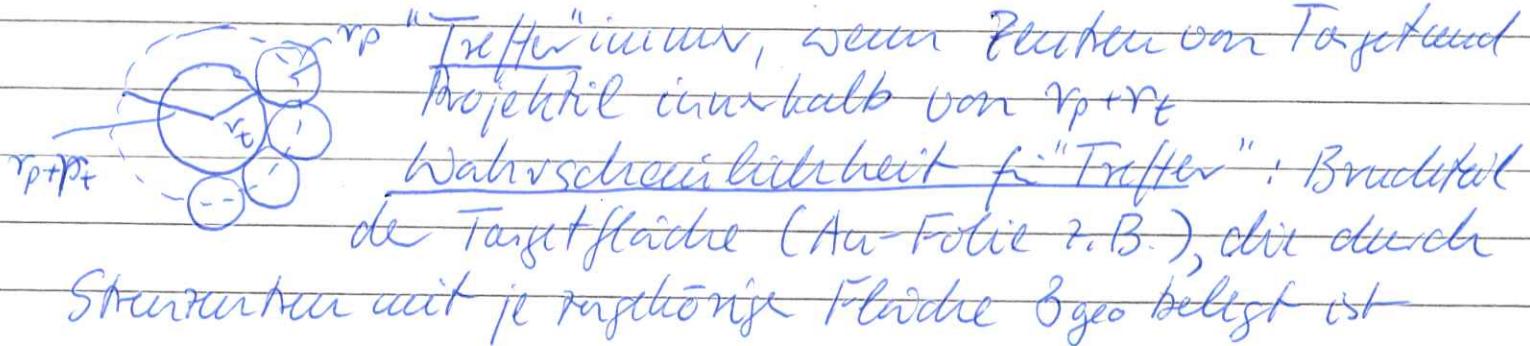
typischerweise ist Wirkungsquerschnitt winkelabhängig, betrachte  $d\sigma/d\Omega$  bzw  $d\sigma/d\Omega_R$  und ebenso

differentielle Raten  $\frac{dR}{d\Omega} = N_b N_t \frac{d\sigma}{d\Omega}$  bzw für inelastische

Prozesse doppelt differenziell  $d^2\sigma/d\Omega dE$

- Skala für Wirkungsquerschnitt ist gegeben durch so genannten "geometrischen Wirkungsquerschnitt" besonders sinnvoll wenn Reichweite der Wirkung und Streupartner endliche Ausdehnung Targetteilechen mit Radius  $r_t$  und Projektilmittpunkt  $r_p$

$$\sigma_{geo} = \pi (r_p + r_t)^2$$



Beispiel: Proton-Proton Kollisionen am LHC:

$$r_p = 0.8 \text{ fm} \quad \sigma_{geo} = 1.6^2 \text{ fm}^2 \cdot \pi = 8 \text{ fm}^2 = 8 \text{ mb} \text{ mit Einheit barn für Wirkungsquerschnitt} \quad 1 \text{ b} = 10^{-24} \text{ cm}^2 = 100 \text{ fm}^2$$

- typischer totaler pp Wirkungsquerschnitt am LHC  
bei  $E_{cm} = \sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$   $\sigma_{tot} \approx 110 \text{ mb}$

inelastic  $\sigma_{inel} \approx 60 \text{ mb}$  elastic  $\sigma_{el} \approx 40 \text{ mb}$

subdiffractive  $\sigma_{diff} \approx 12 \text{ mb}$

relative schwache Energiedependenz:  $p=10 \text{ GeV}, \gamma=10.7$

fixed Target  $\sqrt{s} = m_p c^2 \sqrt{2 + \gamma} \approx 4.54 \text{ GeV}$

$\sigma_{tot} \approx 40 \text{ mb}$

Fsy 2-1a

d.h. Wahrscheinlichkeit für pp-WW ist von Größenordnung 'eins', wenn Protonen sich treffen

Differentielle Wahrscheinlichkeiten, daß ein bestimmter Prozess passiert, ist viel kleiner. z.B. wird ein Higgs-Teilchen nur in 1 von  $7 \cdot 10^9$  pp Koll. am LHC produziert. ( $\sigma_{pp \rightarrow H} \approx 15 \text{ pb}$ )

- für Atomkerne:  $r_A \approx 1.2$  für  $A^{1/3}$  Massenzahl  
Blei-Blei  $\sigma_{geo} \approx 6.35 \text{ b}$

also Reaktionsrate  $R = \underbrace{N_b \cdot N_t}_{\text{luminosität}} \cdot \sigma$

nennt man Luminosität  $\mathcal{L} \left[ \frac{1}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \right]$

2 mögliche experimentelle Konfigurationen

a) stationäres Target

z.B. flüssiger Wasserstoff, Dicke 1m  $\sigma_{H_2} = 0.06 \frac{\text{g}}{\text{cm}^3}$

Flächendichte in Atomen/Molekülen pro Flächeneinheit

$$N_t = \frac{\rho \cdot t \cdot N_A}{M}$$

$N_A$  Avogadrozahl  $6.02 \cdot 10^{23} / \text{mol}$

$M$  Atom oder Molekulargewicht  $2 \text{ g/mol}$

$$= \frac{0.06 \text{ g} \cdot 100 \text{ cm} \cdot 6.02 \cdot 10^{23} / \text{mol}}{\text{cm}^3 \cdot \text{mol} \cdot 2 \text{ g}} = 1.8 \cdot 10^{24} / \text{cm}^2$$

typische Strahleinintensität  $N_b = 10^{12} / \text{s} \Rightarrow \mathcal{L} = 1.8 \cdot 10^{36} / \text{cm}^2 \cdot \text{s}$

Anmerkung war hier: Querschnittsfläche Strahl < Fluide Target, Strahl trifft Target immer.

pp-Wirkungsquerschnitt sei  $40 \text{ mb}$  (Beispiel oben)

$$\text{Rate } R = \frac{1.8 \cdot 10^{36}}{\text{cm}^2 \cdot \text{s}} \cdot 4 \cdot 10^{-26} \text{ cm}^2 = 7.2 \cdot 10^{10} / \text{s} \text{ nesig!}$$

$\lambda = 13.9 \text{ m}$

### b) Kollidierende Stahlen

an einem 'Kollider' laufen in Bündel ('bundles') mit je  $N$  Teilchen mit einer Frequenz  $f$  (Kurzlauffrequenz) im Kreis und treffen an bestimmten Punkten aufeinander. Die Querschnittsfläche des Stahls sei  $A$

$$\text{L} = f \cdot n \cdot \frac{N^2}{A} \quad \text{typischerweise viel kleiner als } f_i \text{ start. Target, aber höhere cur-Energie}$$

Rekord LHC Large Hadron Collider am CERN  
neues Regime



$$f = 11.245 \text{ kHz} \quad n = 2808 \quad N = 1.2 \cdot 10^{11} \quad A = 3 \cdot 10^{-5} \text{ cm}^2 (\phi: 80 \mu\text{A})$$

$$\text{L} = 1.5 \cdot 10^{34} / \text{cm}^2 \cdot \text{s} = 15 \text{ Hz / nb} \quad \text{Rekord in 2016}$$

$$\text{integrierte Luminosität } L_{\text{int}} = \int \text{L} \cdot dt$$

2016 pp-Kollisionen bei  $V_s = 13 \text{ TeV}$  mit  $L_{\text{int}} = 41 \text{ fb}$  für ATLAS und CMS

für Prozess mit z.B.  $\mathcal{S}_{\text{pp} \rightarrow \text{Higgs}} \simeq 40 \text{ pb}$  bei  $V_s = 13 \text{ TeV}$

Aanzahl Ereignisse pro Jahr:

$$N_{\text{int}} = L_{\text{int}} \cdot \mathcal{S} = \frac{41}{\text{fb}} \cdot 40 \text{ pb} \simeq 1.6 \cdot 10^6 \quad \text{Start von Präzisionsmessungen}$$

## 2.4 Feynman-Diagramme

Konzept der Wechselwirkung durch Austausch von Feldquanten ist Grundlage fieldtheoretischer Beschreibung der verschiedenen WW

Feldquanten: Quanten, die die WW verursachen  
Photon ( $\gamma$ ) für ein WW

$W^\pm, Z^0$ -Bosonen für schwache WW

Gluonen  $g$  für starke WW

Pionen für Wechselwirkung zwischen Nukleonen

Konzept kann anschaulich durch sogenannte "Feynman-Diagramme" visualisiert werden.

in 1940er Jahren von R.P. Feynman entwickelte elegante Methode, Übergänge und WW

a) bildhaft eindeutig darzustellen

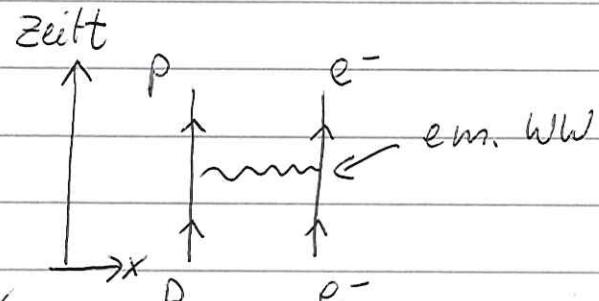
b) mit den Bildern sind in der QFT klare, mathematische Regeln verbunden, das Matrixelement für den dargestellten Prozess, bzw. den Wirkungsquerschnitt, zu berechnen

in der PEP4 hauptsächlich a) verwendet

Beispiel: em. WW zwischen 2 geladenen Teilchen  
Proton und Elektron

wie wird Bild erstellt:

- Zeitrichtung wird festgelegt entweder nach oben oft auch  $\rightarrow t$  nach rechts
- "reelle Teilchen" dargestellt als Strahlen in positive Zeitrichtung (von - unendlich und / oder nach + unendlich  $p^2 = E^2 - \vec{p}^2 = m^2 \therefore$  reell)
- Antiteilchen: Strahlen in negativer Zeitrichtung
- Austauschteilchen sind Segmente (linien, die im Diagramm beginnen und enden)  
keine Viergrößenstrahl



- Ausgetauscht werden:

für die ein WW Photonen, dargestellt als  $\nu\nu$   
 " schwache WW W, Z-Bosonen "

" starke WW Glüonen "  $\pi\pi$

aber auch andere Teilchen können ausgetauscht werden (siehe unten)

- die Sequenzen repräsentieren virtuelle Teilchen

$p^2 = E^2 - \vec{p}^2 \neq m^2$  für ein normales Partikell auf dem Raum oder Zeit möglich wegen Ausdehnung -

Platon für kurzes  $\Delta t$  oder  $\Delta x$

$$\Delta x / p_x \geq \hbar / 2 \quad \Delta E \Delta t \geq \hbar / 2$$

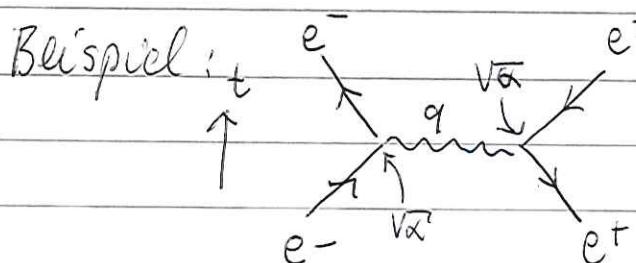
insbesondere für Photonen  $p^2 \neq 0$

- Punkte, an denen 3 oder mehr Linien zusammenkommen: "Vertex"

- Vertex und angrenzende Linien beschreiben Absorption oder Emission eines Teilchens

- an jedem Vertex gelten die Erhaltungssätze  
 - jeder Vertex ist charakterisiert durch eine Kopplungskonstante, gegeben durch die Art der WW. z.B.  $\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} = \frac{1}{137}$  für die elektromagnetische WW

Übergangsmatrixelement  $\propto \sqrt{\alpha}$  für jeden Vertex  
 " Wahrscheinlichkeit  $\propto \alpha$  "



Elektron und Positron wird durch Austausch eines virtuellen Photons

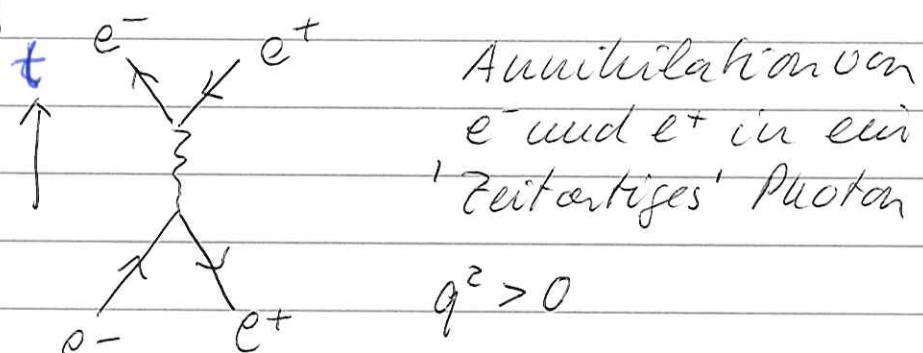
$$\langle < > \rangle \propto e^2 \propto \alpha$$

$$\langle < > \rangle^2 \propto e^4 \propto \alpha^2$$

$q^2 < 0$  negativ  $\leftarrow$  raumartiges? Zeitvall

'raumartig': man kann ein Bezugssystem finden, das sich mit  $v < c$  bewegt und in dem die 2 Ereignisse gleichzeitig passieren, aber an verschiedenen Punkten im Raum

zwischen Elektron und Positron ist auch dieser Prozess möglich



Annihilation von  
 $e^-$  und  $e^+$  in ein  
'Zeitartiges' Photon

$$q^2 > 0$$

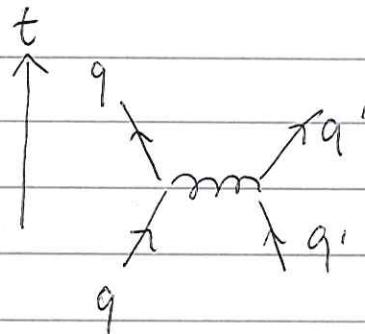
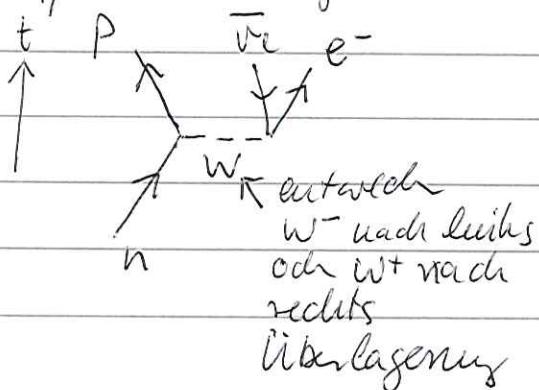
'zeitartig':

es gibt Bezugssysteme mit  $v < c$  in denen die Ereignisse an selben Punkt im Raum passieren, aber immer zu verschiedenen Zeiten

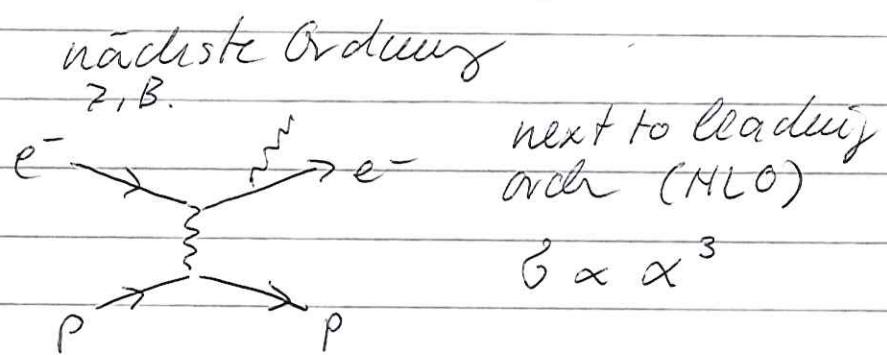
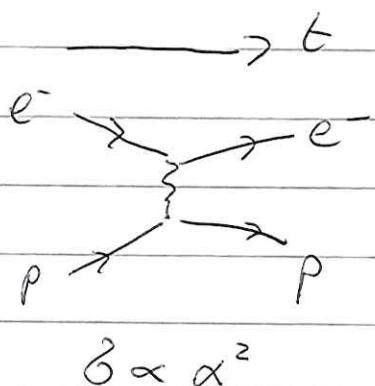
- Austauschteilchen hat keine Vorzugsrichtung in Bewegung von Nachelelement wird es durch sogenannten 'Propagator' beschrieben  $\frac{1}{m^2 + q^2}$  (für Bosonen)  
für ein  $WW$   $\frac{1}{q^2}$

$\rightarrow$  fak.  $e^- e^+$  Wechselwirkung oben  $\delta \propto \frac{\alpha^2}{q^4}$

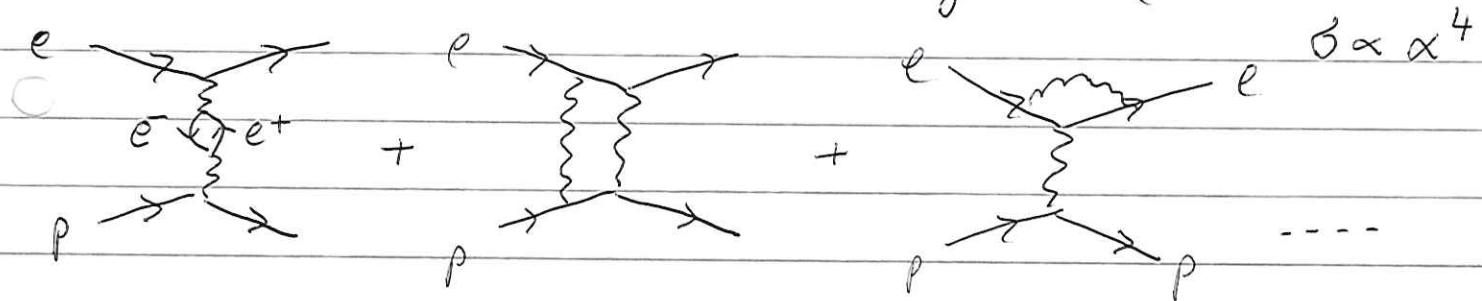
typische Diagramme für schwache und starke WW



bisher betrachtet "führende Ordnung"



und next-to-next-to-leading order (NNLO)



### 3. Wechselwirkung von Teilchen und Materie

- geladene Teilchen ionisieren: das E-Feld einer bewegten Ladung übt Kraft auf gebundene Elektronen aus, überträgt Impuls, Integral über Impulsübertrag auf Elektronen in verschiedenen Abstand (transversal) zu Teilchen ergibt dessen Energieverlust.

schwere geladene Teilchen wie Protonen, Atomkerne, auch Myonen,  $m c^2 \gg m_e c^2$  wichtigster Energieverlust bis  $T \leq$  einige hundert MeV

klassische Herleitung Bohr 1913; quantenmechanisch H. Bethe, Ann. d. Physik 5(1930) 325 und F. Bloch, Ann. d. Physik 16 (1933) 285, siehe Skript

$$-\frac{dE}{dx} = \frac{n 4\pi z^2 e^4}{m_e c^2 \beta^2} \left( \ln \frac{2m_e c^2 \beta^2}{I} - \beta^2 \right)$$

"Bethe-Bloch Formel"

Energie- $-dE$  wird über Distanz  $dx$  abgegeben, wenn Teilchen mit Ladung  $ze$  und Geschwindigkeit  $\beta$  durch Medium mit Elektronendichte  $n = \frac{Z N_A}{M}$  propagiert,  $m_e c^2 = 0.511 \text{ MeV}$

Foulsationsenergie des Mediums  $I \approx (10^7 \pm 1) \text{ eV}$  für  $Z \geq 6$

dazu gibt es detaillierte Konkurrenzen, die aber grundsätzlichen Verlauf nicht ändern (Chapter 33)  
siehe Review of Particle Physics, Chin. Phys. C40(2016)100001

## Energieabhängigkeit:

Fig. 3.1

- bei kleinen  $\beta$  Abfall von  $dE/dx \propto \beta^{-2}$
- breites Minimum bei  $\beta_f = \frac{pc}{mc^2} \approx 3-3.5$
- dann log. Anstieg, moderat  
(Lorentzkontraktion des E-Feldes, kompensiert mit Polarisierung des Mediums  $\hat{=}$  Dämpfung log. Anstieg)
- Polarisierung größer in Flüssigkeiten und Festkörpern als in Gasen, daher log. Anstieg kleiner in Flüssigkeiten und Festkörpern ( $\approx 20\%$ ) als in Gasen ( $\approx 50\%$ )

→ Teilchen mit  $\beta_f \approx 3$  "minimal ionisierend"  
verliert  $1.2-1.8 \text{ MeV/g/cm}^2$  ← sehr Skala

NB: i. A. wird  $dE/dx$  durch Dichte geteilt,  
dann für sehr verschiedene Materialien sehr ähnlich  
(siehe Abb. dx ist dann keine Dicke in cm  
sondern Flächendicke in  $\text{g/cm}^2$ )

- Bei sehr kleinen Energien ( $v < v_{elkhan}$ ) Abfall des Energieverlustes; Elektroneneinfang und schließlich kleine Polarisierung mehr, um noch Reichtschlag

## • Energieverlust von Elektronen

- Korrektur Bethe - Bloch wegen identische Teilchen  
und relativistische Rechnung. Bei gleichem  $\beta$  sind Energieverluste von Elektronen und Protonen durch Polarisierung innerhalb 10% gleich

- für Elektronen höher Energie überträgt ein

anderer Prozess: im Medium wird Elektron im Coulombfeld eines Atomkerns, an dem es verläuft, beschleunigt und emittiert Bremsstrahlung

QED Prozess (Fermi 1924, Wenzänder-Willeman 1936)

$$\frac{dx}{dt} = -\frac{dE}{dx_{br}} = \frac{E}{x_0}$$

$x_0$  charakteristische Länge, über die Energie auf  $1/e$  abfällt  
"Strahlungs Länge"

$$X_0(C) = 18.8 \text{ cm} \quad X_0(Pb) = 0.56 \text{ cm}$$

Prozess dominant für Energien  $\gtrsim 580 \text{ MeV}/z$

$$\text{Amplitude} \propto \text{Beschleunigung} \propto \frac{1}{m_e c^2} \quad \sigma_{\text{Brems}} \propto \frac{z^2 \alpha^3}{(m_e c^2)^2} \propto \frac{\alpha^3}{x_0}$$

• für Prozessen hoher Energie dominiert starke WW über ein WW, sobald es energetisch möglich ist, Pionen zu produzieren

(Pion: leichtestes Hadron  $m_\pi c^2 \approx 140 \text{ MeV}$ )

$$p + p \rightarrow p + p + \pi \quad \sqrt{s} \equiv E_{\text{cm}} \gtrsim 2 m_p c^2 + m_\pi c^2$$

für statisches Target ab  $T = 290 \text{ MeV}$  möglich

bei höheren Energien  $p + p \rightarrow p + p + n\pi + \dots$

dominiert der inelastische Wirkungsquerschnitt

(siehe oben)  $\sigma_{\text{inel}} \approx 30 \text{ mb}$  bei  $\sqrt{s} = 10 \text{ GeV}$

$$\approx 80 \text{ mb} \quad 10 \text{ TeV}$$

das selbe passiert für alle anderen Teilchen, die stark wechselwirken (Hadronen)

Konsequenz: produzierte Pionen (etc.) wechselwirken mit anderen Nukleonen stark und produzieren mehr Pionen  $\rightarrow$  Bildung eines "hadronischen Schowers" bestehend aus vielen Nukleonen, Pionen, ... räumliche Dimension charakterisiert durch char.

Weglänge, bevor starke WW passiert

$$\lambda_{\text{int}} = \frac{1}{\rho_A \cdot \sigma_{\text{HA}}}$$

"unklare Wechselwirkungslänge"

$$P + C \quad \rho_c = 2.3 \text{ g/cm}^3 \approx 1.15 \cdot 10^{23} \text{ Atome/cm}^3$$

$$\begin{aligned} \sigma_{\text{ind}}^{\text{NC}} &\approx 230 \text{ mb} \quad (\text{vgl. } \sigma_{\text{geo}} = \pi (0.8 + 1.2 \cdot 10^{-13})^2 \text{ fm}^2 = 395 \text{ mb}) \\ \hookrightarrow \lambda_{\text{int}} &= 38 \text{ cm} \end{aligned}$$

$$\text{Tiefe hadronischer Schauer} \approx 8-10 \lambda_{\text{int}} \quad \Rightarrow \boxed{\text{Fig. 3.2}}$$

Photonen: Lambert-Beersches Gesetz  $I = I_0 \exp(-\mu x)$

Aufzähil nach Schichtdicke  $\times$  gegeben durch Absorptionskoeff.  $\mu [\text{cm}^{-1}]$ . Nur von Aggregatzustand und Materialeffekten weniger abhängig zu sein:

$\rightarrow$  Massenabsorptionskoeff.  $\mu' = \mu / \rho [\text{cm}^2/\text{g}]$ , dann Beante  $X = \rho \cdot x [\text{g/cm}^3]$   $I = I_0 \exp(-\mu' X)$

$\bullet$   $\mu$  kommt durch Addition von im Wesentlichen 3 Prozessen zusammen

- Photoeffekt (Guisconi 1905, entscheidende Ergebnisse 1899)  $\gamma + \text{Atom} \rightarrow \text{Atom}^+ + e^-$  wenn  $E_\gamma > I_b$  Bindungsenergie des Elektrons; führt zu K, L, ... Absorptionskanten

$\Rightarrow \boxed{\text{Fig. 3-3}}$

da  $I_b$  stark Z-abhängig, starke Z-Abhängigkeit der Wahrscheinlichkeit für Photoeffekt

$$\delta_{\text{ph}} \propto Z^5 / E_\gamma^{7/2} \quad \text{dominant für 10 keV bis 1 MeV je nach Z}$$

- Comptoneffekt (Compton 1922)  $e^- \xrightarrow{e^-} e^-$

$$\frac{1}{E'} - \frac{1}{E} = \frac{1}{m_e c^2} (1 - \cos \vartheta) \leq \frac{2}{m_e c^2}$$

$$E_\gamma \quad E'_\gamma$$

Max. Energieverlust, wenn Photon nach gestreut wird von Elektron (wird hier als quasifrei beschaut)

Wirkungsquerschnitt aus QED-Berechnung (Klein-Hishinaga) 1929  
 für  $E_\gamma \gg m_e c^2$ :  $\sigma_C \approx \frac{\alpha^2 \epsilon^2 (hc)^2}{E_{cm}^2}$  da Elektronendichte  $\propto \epsilon^2$

Photon-Elektron mit Energie  $E_{cm} = \sqrt{(m_e c^2)^2 + 2E_\gamma m_e c^2}$   
 dazu Korrekturen (zu  $\sigma_C$ ) je nachdem ob  $E_\gamma \ll m_e c^2$   
 oder  $E_\gamma \gg m_e c^2$  (siehe Skript)  
 dominant für  $0.1 - 10 \text{ GeV}$  (kleiner  $\epsilon$ ) }  $\rightarrow$  Fig. 3.3  
 $1 - 3 \text{ GeV}$  (größer  $\epsilon$ ) }  $\rightarrow$  Fig. 3.3

Paarbildung (Bethe-Heitler)  $\gamma \rightarrow e^- e^+$  im freien Raum nicht möglich,  
 aber in Umgebung eines Atomkerns, der Rückstoß aufnimmt



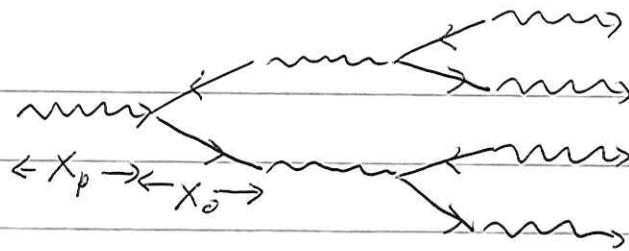
Energieschwelle:  $E_\gamma \geq 2m_e c^2 + 2 \frac{(m_e c^2)^2}{m_e c^2} \geq 1.022 \text{ GeV}$  dominant ab  $10 - 100 \text{ GeV}$

Bemerkung: Feynman-Diagramm sehr ähnlich zu Bremsstrahlung, daher auch Wirkungsquerschnitt. Daher findet auch hier die Stufenlängenlänge  $X_0$  auf. Nach typischerweise  $9/7 X_0$  im Medium annihiliert Photon in  $e^+ e^-$ -Paar.

$\rightarrow$  Summe [Fig. 3.3]

Bei hoher Energie bildet sich sowohl aus Photon als auch aus Elektron ein sogenannter "elektromagnetischer Schauer": Photon  $\rightarrow e^+ e^-$  über Distanz  $X_p \approx 9/7 X_0$ ,  $e^+$  und  $e^-$  emittieren Bremsstrahlungsphotonen nach  $\approx X_0$ , die wieder Paar-

bildung, ---



Ausdehnung:  $\approx 10 X_0$

stirbt aus wenn  $E_e$  unter kritische Energie fällt



Fig. 3.2

- jede hadronische Schauer enthält im Kern auch einen ein. Schauer, da Pionenproduktion  $\pi^\pm \rightarrow \pi^0$  produziert und  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  dominanter Zerfall ein

## 4. Teilchendetektoren

Experimente in der Kern- und Teilchenphysik wiesen gestreute oder produzierte Teilchen nach, bestimmen Impuls oder Energie und Identität.

### 4.1. Impulsmessung

Ablenkung geladener Teilchen im Magnetfeld durch Lorentzkraft. Für homogenen Magnetfeld Kreisförmige Bahn mit Krimmungsradius  $s$  wenn  $\vec{p} \perp \vec{B}$  zu  $\vec{B}$   $s = p / q \cdot B$

sonst helikale Bahn mit  $s = p_{\perp} / q \cdot B$

$p_{\perp}$ : Komponente von  $\vec{p}$  senkrecht zu  $\vec{B}$   
mit  $p$  in GeV/c,  $q$  in m,  $B$  in T,  $q$  in 'e':  $s = p_{\perp} / (0.3 \cdot q \cdot B)$

Konfiguration hängt von Beschleuniger und Wirkungsbericht, den Prozess abdecken soll, ab.

- Vorwärtspektrometer: Dipol, Prozess ab Spez. davor und danach



Fig. 4.1