

5.3 Spektren

Im Falle von Mehr-Elektronen-Systeme ist das beobachtbare Spektrum aufgrund der sehr komplexen Multipl.-Struktur kompliziert:

Bsp 1: He Abb-I-12: Helium-Spektrum

Bsp 2: Natrium Abb-I-13: Natrium-Doppellinie

Energiedifferenz ΔE_p zwischen zwei Termen mit gleichem Haupt- QZ und benachbarten l -Werten ist nicht mehr klein gegenüber ΔE_n zwischen-Niveaus (\rightarrow Aufhebung l -Entartung):
 $3s \leftrightarrow 3p$ im Vergleich zu $3s \leftrightarrow 4s$ (\rightarrow WW der Elektronen).

Bei Alkali-Atomen muß nur ein einzelnes „Leuchtelektron“ berücksichtigt werden $\Rightarrow S = \frac{1}{2} \Rightarrow$ Multipl. $2S + 1 = 2$,
 d.h. man findet immer Dubletts mit erlaubten J -Werten: $J = L \pm \frac{1}{2}$:
 ${}^2P_{1/2}$, ${}^2D_{3/2}$, ${}^2D_{5/2}$, ${}^2F_{5/2}$... Für $L=0$ nur ${}^2S_{1/2}$ Term!
 Übergang $3p \rightarrow 3s$ ist die bekannte Na-Doppellinie!

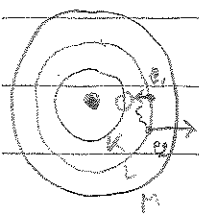
5.4 Inneren Schalen Anregung und Auger-Elektronen

Die Anregung eines Elektrons aus einer inneren Schale bedarf im Vergleich zu einem „Leuchtelektron“ einer weit höheren Energie (Abschwächung v. Kernladung Z_e ist schwächer $\rightarrow Z_{eff}$ ist größer).

\rightarrow Anregung nur durch UV oder Röntgenphotonen od. durch Elektronenstoße

Im das entsprechend entstandene Loch kann ein Elektron aus einer höheren Schale fallen \Rightarrow Photon mit $h\nu = E_i - E_k$, typ. im keV-Bereich. (Röntgen) \Rightarrow Quelle der charakteristischen Röntgenstrahlung (Kap. 6).

Die Energie kann aber auch direkt auf anderes Elektron übertragen werden \rightarrow Autoionisation = Auger-Effekt



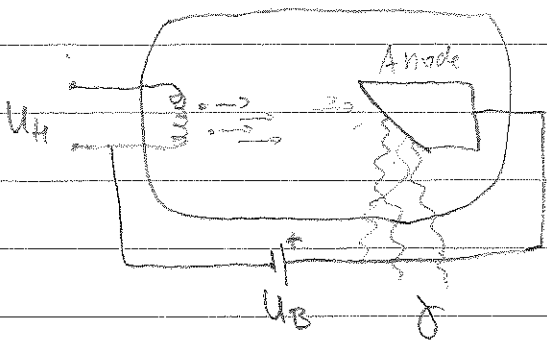
$E_i \rightarrow$ Loch:
Energieübertrag
auf E_k

6. Röntgenstrahlung

s. Fig. I. 14a (Hörnich)

1895 entdeckte Wilhelm Conrad Röntgen beim Experimentieren mit Gasentladungsröhren (GP. Lenard), daß aus diesen Röhren eine Strahlung ausstritt, die Stoffe wie Glas, Holz etc. durchdringen kann: X-Strahlen (\rightarrow Nobelpreis für W.C. Röntgen 1901, erster N-Preis für Physik)

Prinzip einer Röntgenröhre



$$E_{kin} = eU_B$$

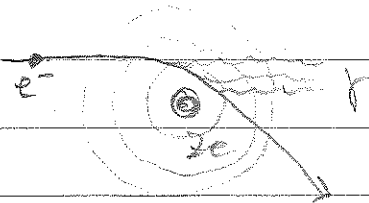
Beim Auftreffen auf Anode verbleiben die Elektronen Teil ihrer Energie durch Abstrahlung von Photonen

2 verschiedene Mechanismen zur Erzeugung von Röntgenphotonen:

1) Abbremsen der Elektronen im

Feld der Kerne der Anode \rightarrow

Bremsstr. (besch. Ladung strahl e.m. Strahlung ab): kontinuierliches Bremsstrahlungsspektrum



2) Ionisation bzw. Stoßanregung von Elektronen aus inneren Schalen E_K hinterlassen freie Plätze die von äußeren Elektronen i besetzt werden.

$$\Delta E = E_i - E_K = h\nu_{ik} = \underbrace{-\left(\frac{Z - \Sigma}{Z_{eff}}\right)^2}_{\text{Zeff}} R_y hc \left(\frac{1}{n_i^2} - \frac{1}{n_K^2} \right)$$

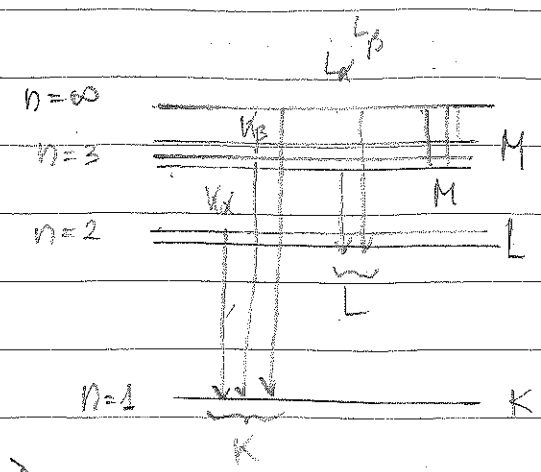
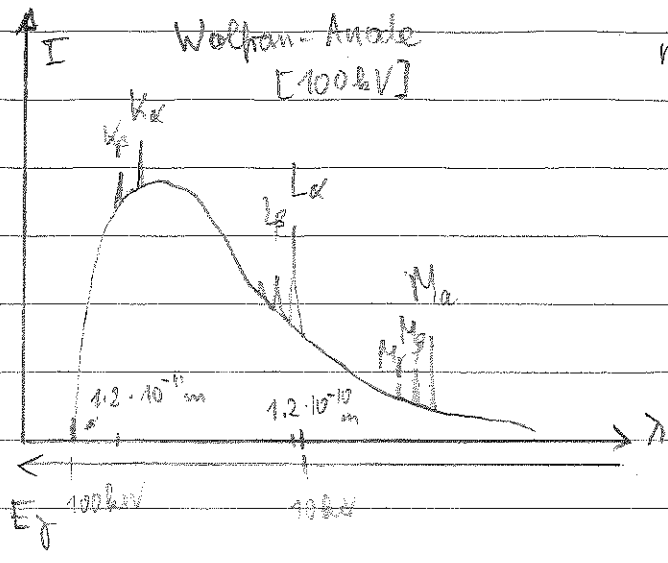
\Rightarrow charakteristisches Spektrum

häufig als Mosley'sches Gesetz bezeichnet

Bei beiden Strahl.-Arten handelt es sich tatsächlich um e.m. Strahl. wie durch Messung der Polarisation ^(C. Barkla) so wie mit Beugung + Interferenz-Exp. nachgewiesen wurde (Laue, W.H. + W.L. Bragg)

William Henry Bragg William Lawrence Bragg

Röntgen-Spektrum



(s.a. Abb-I. 146)

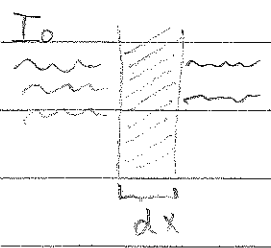
Minimale Wellenlänge = max. Energie der Photonen =
 max. kin. Energie = eU_g :

$$h\nu \leq h\nu_g = eU_g \quad \text{bzw.} \quad \lambda \geq \lambda_g = \frac{hc}{eU_g}$$

mit Zahlenwerten: $\lambda_g = \frac{1234,5 \text{ nm}}{U [\text{V}]}$

Bsp: $U_g = 100 \text{ kV}$ $\lambda_g = 1,2 \cdot 10^{-10} \text{ nm} = 1,2 \cdot 10^{-11} \text{ m}$
 (s.oben)

Absorption von Röntgenstrahl:



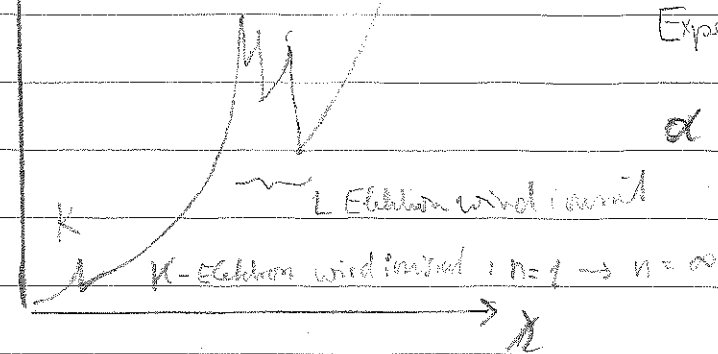
$$dI = -\mu I_0 dx \Rightarrow \text{Dicke } d: I(d) = I_0 e^{-\mu d}$$

$\mu = \text{Absorptionskoeff.} = \mu_s + \kappa$
 (Streuung) Absorption

Für Röntgenstrahl ist die Absorption bestimmt durch das Anregungs-
 spektrum / Ionisationsspektrum des Absorbermaterials.

Absorptionskoeff. α , bzw. Absorptionsquerschnitt $\sigma_A \sim \alpha$

[bei Eicht.] L



Experimentell findet man:

$$\alpha \sim Z^4 \lambda^3$$

(Pb schirmt wg $Z=82$
1580x stärker ab als Al $Z=13$)

Abb I.16

(K; $n=1$)

H. Mosley hat die K-Absorptionskanten benutzt um die
Kombi der Elemente zu studieren:

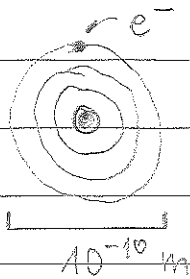
$$v(K\text{-Kante}) : h\nu_K = R_y \cdot hc \underbrace{(Z - Z_0)^2}_{Z_{eff}^2} \left(\frac{1}{1^2} - \frac{1}{\infty^2} \right)$$

Trägt man $\sqrt{\nu_K}$ für verschiedene Elemente (Z)
 ergibt sich eine Gerade, s. Abb I.16.

II. Fundamental Materiebausteine und ihre WW ^{x)}

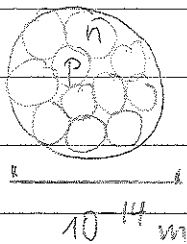
^{x)} WW = Wechselwirkung

1. Struktur der Materie



Atom $\approx 10^{-10} \text{ m}$

typ. Bindungsenergie e^- : eV ... keV
 „elektromagn. WW“



Kern $\approx 10^{-14} \text{ m}$

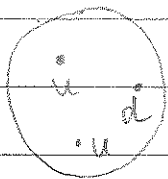
typ. Bindungsenergien MeV
 „starke Kernkraft“

$${}^A_Z X_N \begin{cases} A = \text{Massenzahl} & A = Z + N \\ Z = \text{Kernladungszahl} \\ N = \text{Neutronenzahl} \end{cases}$$

Kernradius: $R_K^3 \sim V \sim A$

$$\rightarrow R_K \sim A^{1/3}$$

$$\text{bzw. } R_K \approx 1.22 \cdot 10^{-15} \text{ m} \cdot A^{1/3} \\ \approx 1.22 \text{ fm} \cdot A^{1/3}$$



10^{-15} m

Nukleon: Proton od. Neutron $\approx 10^{-15} \text{ m}$

typ. Bindungsenergien O(GeV)
 „starke Kraft“

Proton: uud-Quarks $m_p = 938.3 \text{ MeV}/c^2$

Neutron: udd-Quarks $m_n = 939.6 \text{ MeV}/c^2$

- u, d Quarks
- e^-

Fundamentale Quark + Leptonen (Elementar)
 strukturlos bis 10^{-18} m („punktförmig“)

$$Q_e = +\frac{2}{3} (u); \quad -\frac{1}{3} (d); \quad -1 (e)$$

Atommassen
häufig in [u]

$$1 \text{ u} = \frac{1}{12} \left[{}^{12}_6\text{C} - \text{Atom} \right]$$

berücksichtigt die Bindungsenergie
der Nucleonen sowie die Masse
und Bindungsenergie der Elektronen

$$m_p = 1.00728 \text{ u}$$

$$m_n = 1.00867 \text{ u}$$

Bem.: 1) „Strukturlos“

Nach Stand unseres Wissens weisen die Teilchen
bis 10^{-18} m keine Substruktur (Abbildung) auf
Limitiert durch die verfügbare Energie / Impuls der
Testteilchen: $\Delta p_x \cdot \Delta x \approx \hbar$

$$\text{mit } \hbar c \approx 197 \text{ MeV fm}$$

$$\Rightarrow E(\text{Testteilchen}) \approx \frac{\hbar c}{\Delta x} = \frac{0.2 \text{ GeV} \cdot 10^{-15} \text{ m}}{10^{-18} \text{ m}} \approx 0(200 \text{ GeV})$$

2) Neben den genannten 3 fundamentalen Teilchen
gibt es ein 4. Teilchen, das man bei Kernzerfällen
(β Zerfall) und Kernreaktionen beobachten kann: $\bar{\nu}_e$ (Masse $m_e \approx 20\%$)

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

$$m_{\bar{\nu}_e} = 0$$

2. Fundamentale Bausteine

(ν_e, e^-) sowie (u, d) bilden die erste Generation „fundamentaler Bausteine“. Insgesamt wurden 3 Generationen beobachtet.

Wir wissen heute (seit 2012) daß es nur genau diese 3 Generationen gibt. Sie werden nach Leptonen und Quarks sortiert. Sie sind alle „strukturelos“ und besitzen Spin $\frac{1}{2}$ (Fermionen).

Abb II.1

<u>Generation</u>	I	II	III	Q_{el}
Leptonen	ν_e	ν_μ	ν_τ	0
	$m_\nu < 2 \text{ eV}/c^2$ (aufgrund ν -Oszillation wissen wir daß $m_\nu > 0$)			
	e	μ	τ	-1
	$511 \text{ keV}/c^2$	$106 \text{ MeV}/c^2$	$178 \text{ GeV}/c^2$	
Quarks	u	c	t	$+\frac{2}{3}$
	$\sim 3 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 1,3 \text{ GeV}/c^2$	$173 \text{ GeV}/c^2$	
	d	s	b	$-\frac{1}{3}$
	$\sim 6 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 104 \text{ MeV}/c^2$	$\sim 4,2 \text{ GeV}/c^2$	

- Nur die Quarks und die geladenen Leptonen der ersten Generation sind stabil (Neutrinos sind alle stabil): $\text{II.} + \text{III.} \rightarrow \text{I.}$
- Massenspektrum: Die Massen der Teilchen nehmen mit Generationen zu. Auch wenn es möglicherweise einen tieferen Grund für das Massenspektrum gibt, so verstehen wir das Spektrum heute nicht.

Für Quarks existiert neben der elektrischen Ladung noch die sogenannte „Farbladung“ = Ladung der starken WW (hat nichts mit tatsächlicher Farbe zu tun). Sie kann 3 verschiedene Werte annehmen, die man häufig mit r, g, b bezeichnet (Bem.: E.H. WW besitzt nur eine Ladung).

Quarks existieren nicht frei (Kraft zwischen Farbladung wäre zu groß) sondern nur in „stark“ gebundenen „farbneutralen“ Zuständen: Hadronen (farbneutral). *

Zu allen fundamentalen Teilchen existieren Anti-Teilchen mit entgegengesetzten Ladungen ($Q_{\text{el}} \rightarrow -Q_{\text{el}}; r, g, b \rightarrow \bar{r}, \bar{g}, \bar{b}$) aber gleicher Masse:

$$\begin{array}{ll} e^- \mapsto e^+ & u \rightarrow \bar{u} \\ \nu_e \mapsto \bar{\nu}_e & d \rightarrow \bar{d} \end{array}$$

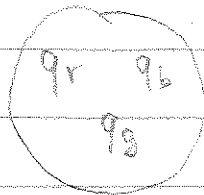
Wird im Abschnitt WW behandelt

x) Farbneutrale Quark-Kombinationen

3 Farben:

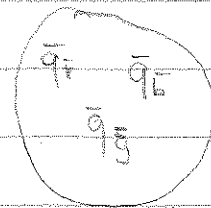
Baryonen

n, p



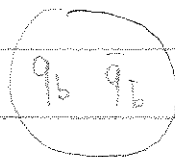
Anti-Baryonen

\bar{n}, \bar{p}



Farbe + Anti-Farbe

Mesonen



Auch andere „Multi-Quark-Systeme“ (Tetra-, Pentaquarks) sind prinzipiell möglich. In letzten Jahren häufen sich Anzeichen für ihre Existenz.

3. Fundamentale Wechselwirkungen

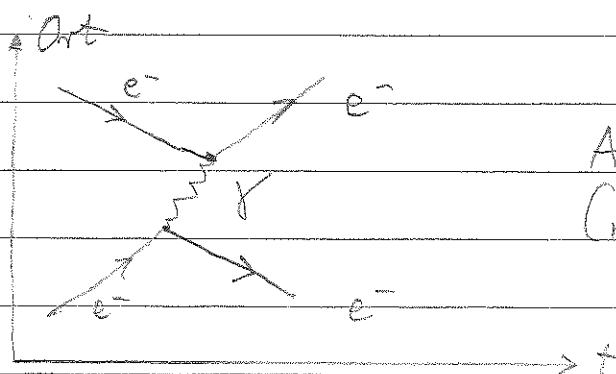
35

Neben der elektromagn. Kraft, die zwischen allen geladenen Teilchen wirkt, und der starken Kraft, die zwischen den farbgeladenen Quarks wirkt existiert die schwache Kraft, die für den radioaktiven β -Zerfall verantwortlich ist. Als vierte Kraft kennen wir die Gravitation.

Die klassische Behandlung der Kraft als Resultat eines Potentials ist wenig befriedigend. Bsp: Elektronstreuung an elektr. Potential eines Protons: Es kommt zu einem Impuls austausch ohne dass dies mit einem Teilchenaustausch verbunden wäre. Es handelt sich um eine Art „Fern-Wirkung“ deren Ursprung man nicht wirklich versteht.

Quantenfeldtheorie: Behandlung von Kräften und WW als quantisiertes Felder. WW zwischen Elementarteilchen werden durch Austausch dieses Feldquanten (ganzzahlige Spins: Austauschbosonen) übertragen

Bsp: Beschreibung der e.m. Streuung zweier Elektronen (QED)



Austausch eines Photons
(Feynman-Diagramm)

Das Standardmodell (QFT) beschreibt überaus erfolgreich die e.m., schwache und starke WW zwischen den fundamentalen Teilchen als Austausch von Photonen, W^\pm , Z Bosonen und Gluon.

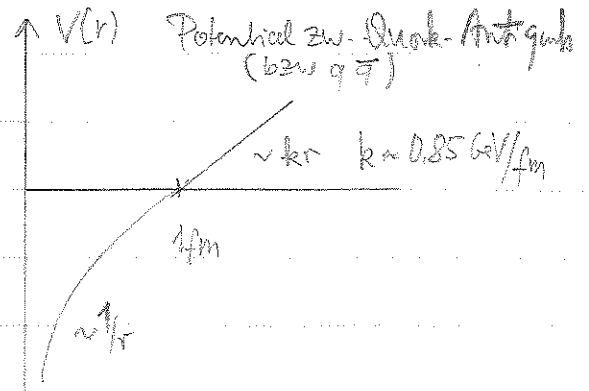
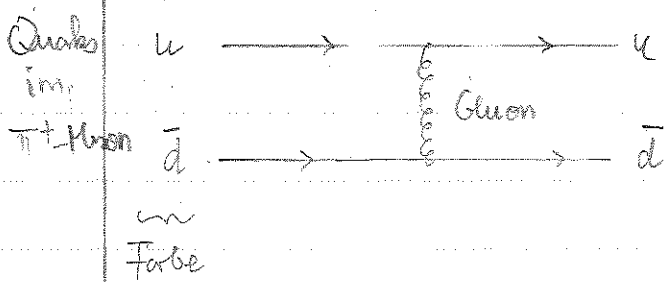
WW	rel. Stärke	Austauschboson	Spin	Masse	Reichweite
Starke	1	8 Gluonen	1	0	$< 1 \text{ fm}$
e.m.	$\sim 10^{-2}$	Photon	1	0	∞
Schwache	$\sim 10^{-7}$	W^\pm, Z	1	$80, 91 \text{ GeV}/c^2$	$\sim 10^{-2} \text{ fm}$
Gravitation	$\sim 10^{-39}$	Graviton?	2	0	∞

Bem. zur Gravitation:

- spielt auf großen Skalen eine wichtige Rolle, kann aber bei Behandlung von Elementarteilchen für Energien unterhalb der Planck-Skala (10^{19} GeV), d.h. bis zu Abständen von $\sim 10^{-35} \text{ m}$ vernachlässigt werden.
- Es ist bis heute nicht gelungen die Gravitation im Rahmen einer QFT konsistent zu behandeln
(Problem sind nicht lineare Effekte: attraktives Potential zweier Massen \rightarrow Beschleunigung $\rightarrow m = \gamma m_0 \dots$)

WW zwischen den fundamentalen Teilchen:

- a) e.m. WW wirkt zwischen allen elektr. geladenen Teilchen
- b) starke WW wirkt nur zwischen Teilchen mit Farbladung = Quarks
(als effektive Kraft auch zwischen Nucleonen eines Kerns)

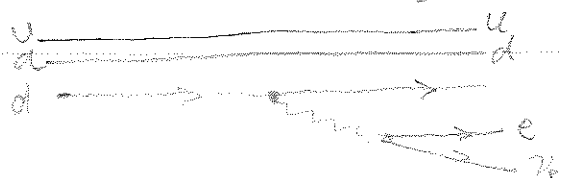
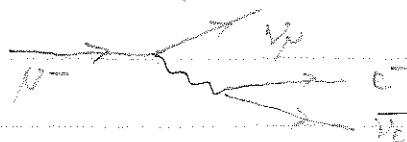


- entfemt man 2 Quarks voneinander wirken große Kräfte
(und es wird mehr und mehr Energie in das Feld zw. ihnen gepumpt.)
- Quarks sind in farbneutralen Hadronen eingeschlossen = Confinement

Typen von Hadronen.

- (1) Quark-Antiquark-Systeme = Mesonen Farbe + Anti-Farbe = Farb-neutral
Bsp: $\pi^+ = |u\bar{d}\rangle$, $\pi^- = |\bar{u}d\rangle$, $K^+ = |u\bar{s}\rangle$, $K^- = |\bar{u}s\rangle$
- (2) 3 Quark-Systeme = Baryonen = r+b+g = Farbneutral
Bsp: $p = |uud\rangle$, $n = |udd\rangle$, $\Lambda^0 = |uds\rangle$
- (3) Es gibt exp. Anzeichen für Tetraquarks ($qq\bar{q}\bar{q}$) und Pentaquarks ($qqqq\bar{q}$)
→ Aktuelle Forschung! (Prinzipiell erlaubt)

c) Schwache WW koppelt an alle Quarks + Leptonen (auch Neutrinos)
→ Teilchenübertrage



Teilchen	starke WW	e.m. WW	schwache WW
----------	-----------	---------	-------------

ν	0	0	X
-------	---	---	---

e^-	0	X	X
-------	---	---	---

Quarks	X	X	X
--------	---	---	---

⏟

auch Anti-Teilchen

Higgs-Boson:

Neben den Austauschbosonen der 3 WW gibt es ein weiteres Boson (Spin 0): koppelt an alle massive Fermionen und massive Austauschbosonen.

Higgs verleiht den Teilchen durch Kopplung Masse.

→ Higgs-Boson, entdeckt 2012 am LHC

Das Higgs war das letzte Standardmodell-Teilchen und das erste fundamentale Spin=0 Teilchen.

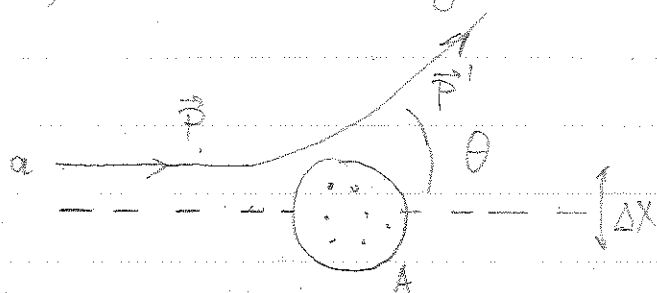
4. Strukturuntersuchung durch Streuexperimente

Streuexperimente und Winkel die Dynamik der Teilchen

Streuexperimente liefern mit Reaktionsraten, Impuls- und Winkelverhältnissen Informationen über Dynamik der WW und über Struktur der Teilchen

Impulsionen über Bau/Struktur

a) elastische ^a Streuung eines Testteilchens an Target A:



$$a + A \rightarrow a + A$$

$$\Delta p_x = \sin \theta |\vec{p}|$$

Um Strukturen in A aufzulösen muß die DeBroglie Wellenlänge des Probe Teilchens $\lambda = \frac{h}{|\vec{p}|}$ in der Größenordnung der Struktur sein.

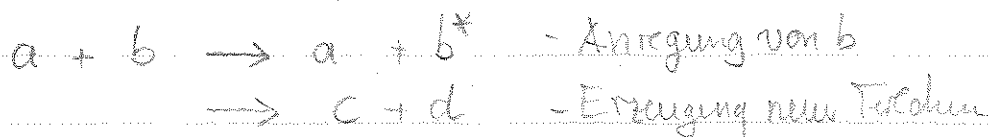
(Aus Optik: $\lambda \approx \Delta x$ mit $\lambda = \frac{\lambda}{2\pi}$)

Auflösungsmöglichkeit: $\Delta x \approx \frac{h}{\Delta p_x}$

(Zur Abschätzung benutzt man $\frac{h}{c} \approx 197 \text{ MeV fm}$)

p	Δx ($\theta = 45^\circ$)
1 GeV/c	$0,3 \cdot 10^{-15} \text{ m}$
100 GeV/c	$3 \cdot 10^{-18} \text{ m}$
200 GeV/c	$1,5 \cdot 10^{-18} \text{ m}$

b) inelastische Streuexperimente



Bsp: $e^+ e^- \rightarrow \mu^+ \mu^-$

