

Kap 3 Konzepte d. Kernphysik

3.1 Erhaltungssätze

Untersuchung mittels Streu & Reaktionsprozessen

Erhaltungssätze erleichtern Wahl d. bestmög. Reaktionen &

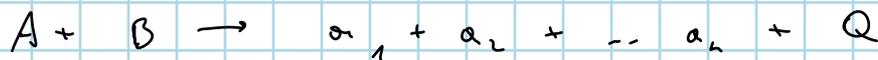
erleichtern Identifikation d. Reaktionsprodukte

- Energie
 - Impuls
 - Drehimpuls
 - Ladung
- weitere, bei Reaktionsprozessen:
- Baryonenzahl
 - Leptonenzahl
 - Isospin

kommen nicht aus Standardmodell, sind aber erfüllt

→ Auswahlregeln

Q - Wert einer Reaktion:



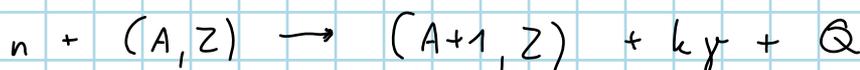
// Beschreibung d. Reaktion + Energiebilanz \leftarrow

$$Q = m_A c^2 + m_B c^2 - (m_{a_1} c^2 + m_{a_2} c^2 + \dots + m_{a_n} c^2)$$

Q negativ endotherm

pos exotherm

Bsp: Neutroneneinfang - Emission $\sim k$ Photonen



Bindungs E / Nukl. $\sim 8 \text{ MeV}$

Q wird von Photonen über-
nommen bis auf geringe Rückstoß-
energie

Drehimpulserh. kann nur d. Messung d. Winkelverh. im Exp.

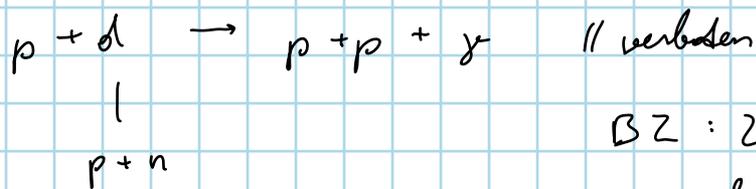
verifiziert werden!

Paritätserhaltung - nur bei starken WW

Baryonenzahl

Zahl d. Nucleonen - Zahl d. Antinucleonen bleibt erhalten

erhalten



BZ: 2 \rightarrow 3 geht nicht

Lebensdauer Proton $> 10^{32}$ a \rightarrow Erhaltungsges.

Leptonenzahl: e^-, μ, τ

$$L_e = N(e^-) + N(\nu_e) - N(e^+) - N(\bar{\nu}_e)$$

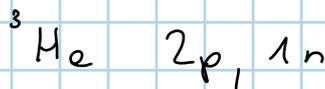
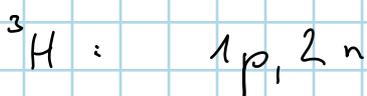
L_τ
 L_μ

} analog

Zunächst dachte man jede Generation erhalten - später

Neutrinooszillationen $\rightarrow L_e + L_\tau + L_\mu = \text{const}$

Isospinraum



Diff der Bindungsener. d. Coulombabst. zw. 2 prot.

\rightarrow Ladung hat auf Kernkraftanteil geringen Einfluss (starke WW)

\rightarrow Ähnlichkeit von p & n in Bezug auf starke WW

\rightarrow p & n sind Zustände eines Teilchens, des Nucleons

Isospin \hat{T} eingeführt

$$T = \frac{1}{2}$$

$$T_3 = +\frac{1}{2} \text{ Prot.}$$

$$T_3 = -\frac{1}{2} \text{ Neut.}$$

$$[T_m, T_n] = i \epsilon_{mnc} T_c$$

$$T^2 : T(T+1) \quad T = 0, \frac{1}{2}, 1, \dots$$

$$T_3 : -T \dots T$$

el. Ladung q bestimmen:

$$q = e_0 \left(\frac{Y}{2} + T_3 \right)$$

Y : Hyperladung
 \sim doppeltem Ladungsschwerpunkt.

$\rightarrow T = \frac{1}{2} : Y = 1$

Pionen: $Y = 0$

Δ Baryonen: $T = \frac{3}{2} \quad Y = 1$

des Multipletts

\rightarrow Summe aller d-Ladungen

d \hat{T} -Multipletts / Sum d. Teilchen

Dem liegt die Idee zugrunde, dass starke WW inner. gegenl.

Drehungen im Isospin-Raum ist u & d Quarks müssten gl. schwer sein. Dem ist nicht so \rightarrow (p & n daher auch)

Näherung unterhalb f. Kernphysik

Einzelchenzustände

Nukleon: $\hat{T}^2 = \frac{3}{4}$

$$\begin{aligned} \hat{T}_3 |p\rangle &= \frac{1}{2} |p\rangle \\ \hat{T}_3 |n\rangle &= -\frac{1}{2} |n\rangle \end{aligned}$$

Leitungs: \hat{T}_+ & \hat{T}_- auf p & n geben \emptyset

$$\hat{T}_\pm = \hat{T}_1 \pm i \hat{T}_2$$

$$\hat{T}_1 \text{ gibt } \frac{1}{2}$$

$$\hat{T}_2 \text{ gibt } +\frac{i}{2}$$

T_1 & T_2 werden
 als p \rightarrow n
 und umgekehrt
 $\parallel p \& n$
 $\parallel p \mid n$

Nukleonenzustand

$$|N\rangle = \alpha |p\rangle + \beta |n\rangle$$

$$|\alpha|^2 + |\beta|^2 = 1$$

\parallel nur nukleone
 4 Anteile

$\frac{1}{\sqrt{2}} [|p\rangle + |n\rangle]$ gilt mit physikalisch??
 (gilt mit mit 1 Teilchen?)

$$\hat{T}_1 |p\rangle = \frac{1}{2} |n\rangle$$

Matrixschreibw.: $|p\rangle = \begin{pmatrix} 1 \\ 0 \end{pmatrix} \quad |n\rangle = \begin{pmatrix} 0 \\ 1 \end{pmatrix} \quad |N\rangle = \begin{pmatrix} \alpha \\ \beta \end{pmatrix}$

$$\hat{T} = \frac{1}{2} \hat{T}$$

$$T_1 = \begin{pmatrix} 1 & \\ & 1 \end{pmatrix}$$

$$T_2 = \begin{pmatrix} i & \\ & -i \end{pmatrix}$$

$$T_3 = \begin{pmatrix} 1 & \\ & -1 \end{pmatrix}$$

Rotationsmatrix im Isospin Raum:

$$|p'\rangle = e^{-i\phi/2} \cos(\alpha/2) |p\rangle + e^{i\phi/2} \sin(\alpha/2) |n\rangle$$

$$|n'\rangle = -\sin(\alpha/2) |p\rangle + \cos(\alpha/2) |n\rangle$$

Zweimuldeonensystem: Man $T=0$ || $T=1$ erlaubt

	↑ Singlet	↑ Triplet
Vertauschen:	antisym	symm
Isospin-Rot.:	invariant	Vektorhafte

$ T, T_3\rangle$:	$\frac{1}{\sqrt{2}} (pn\rangle - np\rangle)$ $= 0, 0\rangle$	$ pp\rangle = 1, 1\rangle$ $\frac{1}{\sqrt{2}} (pn\rangle + np\rangle) = 1, 0\rangle$ $ nn\rangle = 1, -1\rangle$
--------------------	--------------------------------------------------------------------	------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Isospin = Kernenzahl

$$N = Z$$

$$Z_{e_0} = \sum_{i=1}^A \left(\frac{1}{2} + T_{3,i} \right) = e_0 \left(\frac{A}{2} + \sum_{i=1}^A T_{3,i} \right)$$

Im Isospin $\vec{T} = \sum_{i=1}^A \vec{T}_i$

$$T_3 = Z - \frac{A}{2} = \frac{1}{2} (Z - N)$$

$$\rightarrow \frac{1}{2} |Z - N| \leq T \leq \frac{1}{2} A$$

p & n sind identische Fermionen die sich in Isospin \mathbb{Q}^2 unterscheiden
Pauli Prinzip ist wirksam \rightarrow Gesamtzustand d. Kerns antisymm bez.

Vertauschung aller FMG (auch T)

Ausgangspunkt: Hamilton d. starken WW invar. bzgl. Rot. im T-Raum \rightarrow

erweitertes Pauli Prinzip mit $\vec{r}, s \& T$

2 Nukl. System $\psi(1,2) = -\psi(2,1)$ // Gesamtzahl v. 2 Nukleonen

Ausgehen von QZ & vertauschen 2 Nukl. - Zustand hat QZ L:

Vertauschen: Vorfaktor $(-1)^L$

Spin: $(-1)^{s+1}$ Isospin: $(-1)^{T+1}$

$$\rightarrow (-1)^{L+s+1+T+1} = -1$$

L	S	T	
0	0	1	Triplet
0	1	0	Singlet
1	0	0	Singlet
1	1	1	Triplet
2	0	1	Triplet
2	1	0	Singlet
3	0	0	Singlet
3	1	1	Triplet

Kernkräfte

Aufgabe: Verständnis d. Kernphysik auf Basis der Kernkräfte

Man richte v. QCD aus

qualitatives Verständnis OK

quantitative Aussagen sowie Streu & Reaktionsquerschnitte bei

hervorgehobener E ($< 300 \text{ MeV}$) nicht möglich (gilt auch f. 2 Nukl. WW)

\rightarrow Annahme eines Modells & Zuhilfenahme v. exp. Daten \Rightarrow

Beschreibung d. N-N WW

1
p/p Streuung
n/p

§ Eigenschaften d. Deuterons

n/n nur indirekt

(kein n -Target)

Stuhl / Stuhl fund noch nicht!

Können jedoch nur on-shell Infos (asymptotischer Vert.)

off-shell : Bremsstrahlung ($N+N \rightarrow N+N+\gamma$)

Mesonproduktion ($N+N \rightarrow N+N+\pi$)

Mehrkleinanreaktion starke WW

Modelle: a) Potentialmodelle (N-N WW parametrisiert - mit exp. Daten abgeglichen)

b) Bosonaustauschmod. (Feldtheoretische Mod. Austausch π , Mesonen)

entw. Formfaktoren & Abschneideparameter } Kopplungskonst. werden variiert!

- Struktur d. T berücksichtigen

Deuteron betrachten - auf Eigenschaften d. N-N WW schließen

Deuteron $A=2$, keine angeregten Bindungszustände

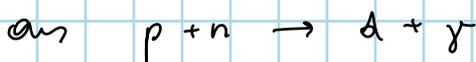
$B(2,1) = 2,225 \text{ MeV}$

$\begin{matrix} 1 & 1 \\ A & Z \end{matrix}$

// klein geg. 8 MeV mittl. B_{ν}
Kühl. in Kern

$J^{\pi} = 1^{+}$

$\mu_d = 0,857 \mu_N$



// durch Neutronen

ϵ bestimmen

$2 \cdot 10^{-14} \text{ m}$

Niedriger $E_0 \rightarrow$ großer Ladungsradius (von Proton) - aus e^{-} Streuung
Reichweite d. KK. ist viel kleiner $\sim 10^{-15} \text{ m}$

mag. Dipolmom: $\vec{\mu} = \mu_N (g_p^L \vec{L}_p + g_n^L \vec{L}_n + g_p^S \vec{S}_p + g_n^S \vec{S}_n)$

\uparrow \uparrow
 1 0

Wenn $l=0$ nur letzte 2 Terme wichtig

$\rightarrow \mu_p + \mu_n = 0,88 \mu_N \quad \mu_d = 0,86 \mu_N$

\Rightarrow Deuteron kein reiner s-Zustand, auch d Zustand dabei
 p kann nicht sein

Auftreten von Q_d (el. Quadrupolmom) - Deformation
 bestätigt dies

Deut: $J^\pi = 1^+$ Zustand & s-Welle \Rightarrow Spin v p & n gleich ausger.

$\rightarrow S=1 \quad S=0$ kein Bindungszustand L kann nur 0 & 2 sein!

N/N-WW hat Spinabhängigkeit

Andere: starke WW ist Ladungsunabh. \rightarrow auch p-p & n-n kein Bindungszustand
 Auch bei $S=1$ keine geb. Zust. f. p-p & n-n (Barli)

Ansatz f. Deuteron WF:

$$\psi_d(\vec{r}, t) = \left[\frac{u_s(r)}{r} \chi_s + \frac{u_d(r)}{r} \chi_d \right] e^{i \frac{E_d}{\hbar} t}$$

\downarrow \downarrow
 $J=S=M_J=1, l=0$ $l=2$

$\chi_s = \chi_{00} \chi(1,1) = \frac{1}{\sqrt{4\pi}} \chi_p^+ \chi_n^+$
 Spineigenfkt.

$\chi_d = \left[\sqrt{\frac{1}{10}} \chi_{20} \chi(1,1) - \sqrt{\frac{3}{10}} \chi_{21} \chi(1,0) + \sqrt{\frac{6}{10}} \chi_{22} \chi(1,-1) \right]$

$J^2 \chi_s = S^2 \chi_s = 2\hbar \chi_s \quad \parallel \text{ordge } \chi_d$

$$J_z \gamma_s = \hbar \gamma_s$$

$$L^2 \gamma_s = 0$$

$$L^2 \gamma_D = \hbar^2 \gamma_D$$

|
2(2+1)

$$\int d\Omega \gamma_{s,D}^+ \gamma_{s,D} = 1$$

$$\int d\Omega \gamma_s^+ \gamma_D = 0$$

Normierte Gesamtheit

$$\rightarrow p_s = \int_0^\infty dr u_s(r)^2$$

$$p_D = \int_0^\infty dr u_D(r)^2$$

$$p_s + p_D = 1$$

WS, dass Dert in D Zustand

Erwartungswert d. mgl. Moments

$$\mu_d = \mu_N \int d^3r \psi_d^+ \left[\vec{L}_p + g_p^s \vec{s}_p + g_n^s \vec{s}_n \right]_z \psi_d$$

im z-Komp

$$\mu_s = (g_p^s + g_n^s) (0,5 - 0,75 p_D) \mu_N$$

$$\mu_c = \frac{3M}{2M_p} p_D \mu_N$$

M: reduzierte Masse

$$\mu_d = 0,857 \mu_N = \mu_s + \mu_c = (a - b p_D) \mu_N$$

$\rightarrow p_D \sim 4\%$ Beimischung d. D Zustands

Q_d berechnen

$$Q_d = \left(\frac{M}{m_p} \right)^2 \int d^3r \psi_d^+ r^2 [3 \cos^2 \Theta - 1] \psi_d$$

$$= \frac{1}{5} \left(\frac{M}{m_p} \right)^2 \int_0^\infty dr r^2 [\sqrt{8} u_s(r) - u_D(r)] u_D(r)$$

u_D kennt man nicht; Berechnet man die Rad-Fkt für real.

N/N Potentiale so wird $p_D \sim 4-6\%$.

Q_d gibt nur, wenn $u_D \neq \emptyset$

N/N UV ist keine Zentralkraft, da immer Bindungszust. bei fixem l
 Spin - Bahn Kopplung gibt nur Bindungszust. zu festem $l, j \rightarrow$
 Mischung von s & d Wellen durch anderen Term in N/N UV

- muss mit J vertauschen

$$\rightarrow S_{12} = 2 \left(\frac{3(\vec{s} \cdot \vec{r})^2}{r^2} - \vec{s} \cdot \vec{s} \right) \quad - \text{invariant under } \vec{r} \rightarrow -\vec{r}$$

$$\vec{r} = \vec{r}_p - \vec{r}_n$$

Kraft hängt vom Winkel zw \vec{s} & \vec{r} ab

L -Term gibt Beitrag zu Zentralpot

Summspin & Einzelspins ausdr:

$$\hat{s}_i = \frac{1}{2} \hat{\sigma}_i$$

$$S_{12} = \frac{3(\vec{\sigma}_1 \cdot \vec{r})(\vec{\sigma}_2 \cdot \vec{r})}{r^2} - \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2$$

Nr d. Nukleons

|| liefert f. $S=0$ keinen Beitrag

$$\text{Poti: } V_{NN}(r) = V_C(r) + V_T(r) S_{12} + V_O \vec{\sigma}_1 \cdot \vec{\sigma}_2 + \underbrace{V_{SO} \vec{L} \cdot \vec{S} + V_{T20} (\vec{L} \cdot \vec{r})^2}_{\text{erforderlich}}$$

Nukleon / Nukleon Streuung

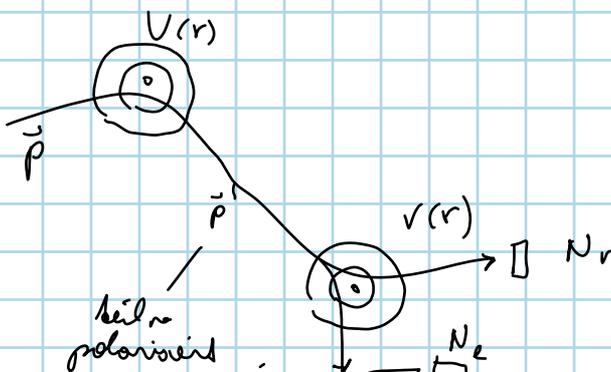
Unters. d. NN-UV d. Streuung p_n, n_p & n_n

indirekt, da kein n -Target

Polarisation zeigt Spinabhängigk. d. Kernkraft

Doppelstreuung:

(Spin ist in 1 Richtung
ausgerichtet)



$$P(\theta) = \frac{N_r - N_e}{N_r + N_e} \quad // \text{ Polarisation nach 1. Streuung}$$

hängt vom Streuwinkel ab $\& -1 \leq P \leq 1$

Braucht aufgrund d. Doppelstreuung höhere Intensitäten d. Wirkungsquerschn. Messung

Zusätzlich polarisiertes Target - weitere Observablen - Messung der Polarisation nach 2. Kollision (Dreifach Streuparameter)

Spin Bahn Term muss in NN UV sein damit die Streuung richtungsdehn ist

$\vec{L} \vec{S}$ ist $\vec{r} \& \vec{p}$ linear.
(2 axiale Vekt)

$\vec{r} \& \vec{p}$ nicht polar & polar

Polar: räumliche Spiegelung - negativ $\vec{r}, \vec{p}, \vec{E}, \vec{v}$

axial: - bleibt gleich \vec{B}

Niederenergiestreuung $E_n < 25 \text{ meV} \rightarrow$ nur elastisch

$$\sigma_{el} = \frac{\pi}{k_a^2} \sum_l (2l+1) |1 - S_l|^2$$

S-Matrix element = $e^{i2\delta_l}$

$$\begin{aligned} |1 - e^{2i\delta_l}|^2 &= (1 - e^{2i\delta_l})(1 - e^{-2i\delta_l}) \\ &= 1 - e^{2i\delta_l} - e^{-2i\delta_l} + 1 \\ &= 2\left(1 - \left(\frac{e^{2i\delta_l} + e^{-2i\delta_l}}{2}\right)\right) \\ &= \frac{4}{2} (1 - \cos 2\delta_l) \\ &= 4 \sin^2 \delta_l \quad \checkmark \end{aligned}$$

Nur s-Wellen ($k \rightarrow 0$)

$$b_0 = \lim_{k \rightarrow 0} b_{el} = 4\pi a_0^2$$

Streulänge $a_l = -\lim_{k \rightarrow 0} \frac{f(\theta)}{k^{2l}} \approx \lim_{k \rightarrow 0} \frac{\delta_l}{k^{2l+1}}$

$\rightarrow a_l$ für 3 Systeme — Coulomb Korrekturen: $a_{nn} \approx a_{pp}$

n_p : $b_{el}(n_p) = \frac{1}{4} b_s + \frac{3}{4} b_+ = \pi (a_s^2 + 3a_+^2)$

aus $b \approx 4\pi a^2$ (s-Wellen)

$a_s = -23,7 \text{ fm}$

$a_+ = 5,37 \text{ fm}$ Pos Wert \rightarrow Bindungsanzustand (Drehmoment bei n_p)

Delitz Streulänge: $a(k) = \frac{-1}{k \cot \delta_0}$ (komplex)

$$b_{el} = \frac{4\pi}{k^2} \sin^2 \delta_0 = \frac{4\pi}{k^2 + \frac{1}{a^2(k)}}$$

Entwickl von $\frac{1}{a} = \frac{1}{a} - k^2 \frac{r_{eff}}{2}$

Niederenergieparameter: n_p

	a	r_{eff}
simp	-23,7	2,77
hijv	+5,1	1,75

p-p Streuung Interferenz zw. Coulomb & starken WK

$$C^2 k \cot(\delta_0) + 2k \eta_c h(\eta_c) = \frac{-1}{a_{pp}} + k^2 \frac{r_{eff}}{2} - \frac{P_{pp} k^4}{1 + Q_{pp} k^2}$$

$$- \ln(\eta_c) - \text{const} + \eta_c^2 \sum_{n=1}^{\infty} \frac{1}{n(n^2 + \eta_c^2)}$$

η_c : Sommerfeld Parameter
 $= \mu \frac{Z_p}{k}$

Ci Gesamtfaktor

$$C^2 = \frac{2\pi\eta_c}{e^{2\pi\eta_c} - 1} \quad // \text{ s-Wellen}$$

Formparameter $P_{pp} = 0,73 \text{ fm}^3$

$$Q_{pp} = 3,35 \text{ fm}^2$$

Anteil d Coulomb WW in f herausrechnen:

$$f_N(\theta) = f(\theta) - f_{\text{Coul}}(\theta)$$

$$\rightarrow a_{pp}^{\text{stat}} = -17,3 \text{ fm}$$

$$r_{\text{eff}}^{\text{st.}} = 2,85 \text{ fm}$$

Für nn schwierig da kein n Target

Extraktion aus 1) Streuung n n an Deuteron

2) Pionabsorption am Deuteron

1) nur Proton beteiligt \rightarrow 3 Körperproblem

Analyse nicht modellunabhängig - große Unsicherheiten

$$a_{nn} = -16,16 \text{ fm}$$

$$a_{pn} = -23,9 \pm 1 \text{ fm}$$

a_{nn} aus Endzustand WW von Kernreaktionen

Untersuchen von Reaktionen, bei denen 2 auslaufende n

nabezu parallel mit gleicher E auftreten - lange in WW

Wirkungsquerschnitte hängen stark von Endzustands-WW ab! -

liefert Info über nn WW

Pionabsorption: $\pi^- + d \rightarrow n + n + \gamma$

Wirkungsquerschnitt best. f $E_\gamma \rightarrow 0$ γ Quant nachweisen

Annahme von 3 Stufen d Reaktion:

1) Streuung π^- an d 2) Annihilation 3) Endzust. WW

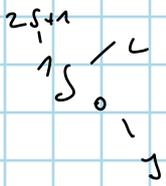
\rightarrow aus 3

$$a_{nn} = -18,7$$

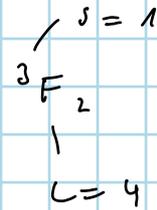
$$a_{nn} = -18,5$$

$$r_{\text{eff}} = 2,8$$

Mehr Unsicherheit jedoch gleiche Tendenz



$$\begin{array}{l}
 {}^1P_1, \quad S=0 \\
 \quad \quad L=1 \\
 \quad \quad J=1
 \end{array}$$



Tab. 3.4 $S+D$ koppeln, $P \& F$

$$T=0, \quad n \& p$$

$T=1$: alle anderen Komb auch

Es röhren in diesen Zuständen gleiche Kernkräfte egal ob nn, np od pp

Wirkungsquerschnitte: (nur S -Wellen)

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{np} = \frac{1}{4} |f({}^1S_0)|^2 + \frac{3}{4} |f({}^3S_1)|^2$$

|
|

Singlet
Triplet

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right)_{nn} = |f({}^1S_0)|^2$$

Mesentheoretisches Modell

elm. WW d A^+ Koppung an SGL oder Dirac \mathcal{L}
 unter Forderung d. Invarianz bzgl. Eichung

analog andere WW durch Felder

Yukawa: Felder durch T . veränderen, die zw WW Partnern
 ausgetauscht werden

$E \& p$ Erhaltung nicht verletzen - Teilchen im Bereich der
 Unschärferelation $c \Delta T < \hbar c / \Delta E$

$$\text{aus } E = \hbar \omega$$

$$\frac{\hbar}{E} \sim \frac{1}{\omega}$$

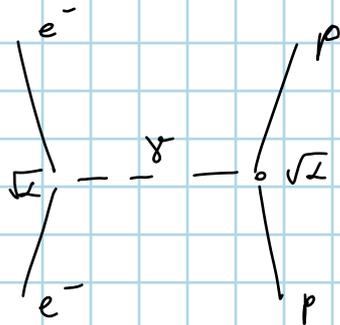
// virtuelles T

vermittelt innerhalb $\hbar c/\Delta E$ mit $c \Delta t$

Reichweite d. Kraft: $1,5 \text{ fm}$ $\Delta E \approx 133 \text{ MeV}$

→ Meson postuliert

Photon hat $m_0 = 0$ (unendl. Reichweite)



Coulomb WW

Vertex: Knoten

E, p & ladungsartige Gr. sind erhalten

Stärke der Coulomb geht mit $\sqrt{k_p}$ ein

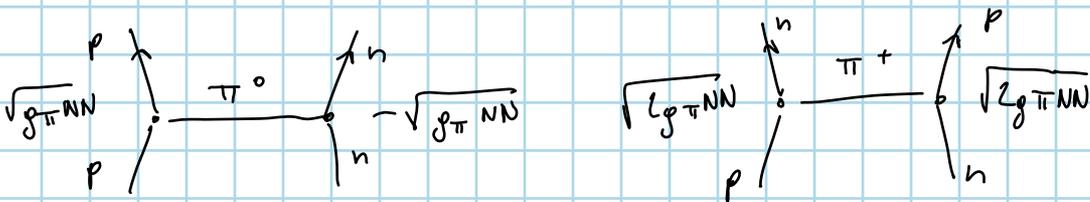
repräsentiert Anteil 1. Ordng. zum Streuamplit (f)

→ Absolutqu. nehmen

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \text{const} \cdot (\sqrt{2} \cdot \sqrt{2})^2 = \text{const} \cdot k_f^2$$

Propagator (Greenie) geht auch mit ein $\sim \frac{1}{q^4}$

Stärke UV - anderen Graph



Kopplungskonst: $g_{\pi NN} = \frac{g^2}{4\pi}$ g : resonante Ladung

$$\text{andog zu } \alpha = \frac{e_0^2}{4\pi} \sim \frac{1}{94}$$

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = \text{const} \cdot (-g_{\pi NN} + 2g_{\pi NN})^2 \frac{1}{(q^2 + m_\pi^2 c^2/\hbar^2)^2}$$

Weise an Vertices entstehen d. Clebsch Gordon Koeff im Isospin-Raum
 Messen wurde gefunden

Quantitative Aussage:

Klein Gordon: $(\Delta - \frac{1}{c^2} \partial_t^2 - \mu^2) \phi(\vec{r}, t) = 0$

\uparrow $\left| \frac{(mc)^2}{\hbar^2} \right.$ Bosonenfeld

also $E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2$ // quantisieren, umschreiben

rel. Gleichung ohne Spin

SGL: $E\psi = H\psi$ nicht rel., ohne Spin

∂_t \downarrow Δ

Zeit & Ort nicht in gl. abh. | auch kein Spin - nicht rel.

Andere: statisches Bosonen Feld $\phi(\vec{r})$ & Nukleonfeld als
 Bosonen Quelle $v(\vec{r})$

$(\Delta - \mu^2) \phi(\vec{r}) = v(\vec{r})$

Lsg mit Green's: $G(\vec{r}, \vec{r}') = -\frac{1}{4\pi} \frac{e^{-\mu|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|}$

$\rightarrow \phi(\vec{r}) = -\frac{1}{4\pi} \int d^3r' \frac{e^{-\mu|\vec{r}-\vec{r}'|}}{|\vec{r}-\vec{r}'|} v(\vec{r}')$

1 Nukleon an \vec{r}_1 : $v(\vec{r}') = g \delta(\vec{r}' - \vec{r}_1)$

$\phi_1(\vec{r}) = -\frac{g}{4\pi} \frac{e^{-\mu|\vec{r}-\vec{r}_1|}}{|\vec{r}-\vec{r}_1|}$ // \sim Ladungsdichte

$V_{NN}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \int d^3r \phi_1(\vec{r}) v_2(\vec{r})$ // Pot. zwischen 2 Nukleonen

→ wieder ein $g \cdot \delta(\dots)$

$$V_{NN}(\vec{r}_1, \vec{r}_2) = \frac{-g^2}{4\pi} \frac{e^{-\mu |\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}}{|\vec{r}_1 - \vec{r}_2|}$$

S_i : $g_{\pi NN} = \frac{g^2}{4\pi \epsilon_0 \hbar c} = 14,6$ — viel stärker

Coulomb: $\alpha_f = \frac{1}{137}$

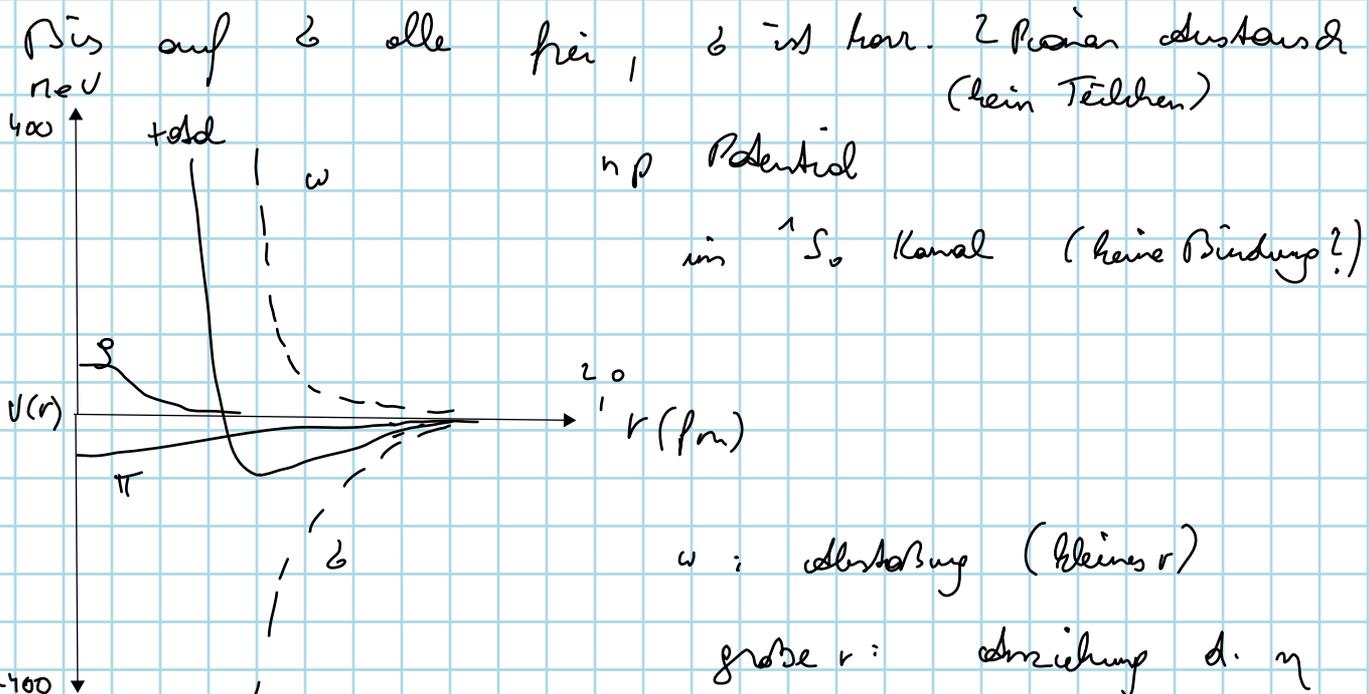
Eigenschaften bzgl Spin & Isospin müssen berücksichtigt werden

→ Tensorterm (Mischung aus s & d Wellen zB Deuteron)
 WF

Quantitative Beschreibung — mehrere Bosonen austauschen

Pion ist leichtestes Meson → legt Reichweite fest

Meson	Mass (MeV)	Range (fm)	Eff	Stärke g^2
π	138	1-2	Reichw	14,6
ρ	~500	0,5-1	Bünd	8
ω	~700	0,7	Republik	20
ρ	~700	0,7	LS	0,95
η	~500	1	Bünd	3
δ	~900	0,5	kurzwe	4-5



QCD: fundament. Verständnis — keine quantitative Best.

Das Sätt der QCD ist NN-WW nicht dominanter Teil d
starken WW, sondern ähnlich zu Van der Waals-Kr. zw Atomen