

Kerne und Teilchen

Moderne Experimentalphysik III Vorlesung 4

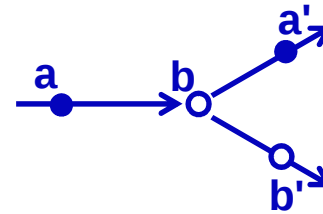
MICHAEL FEINDT
INSTITUT FÜR EXPERIMENTELLE KERNPHYSIK

Streuung

Streuprozesse

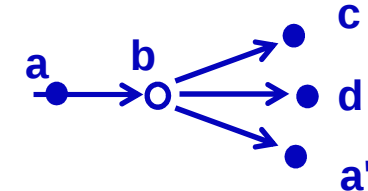
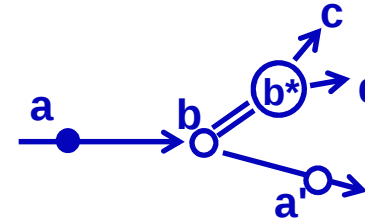
- elastisch: $a + b \rightarrow a' + b'$

identische Teilchen,
Impulse, Energie anders

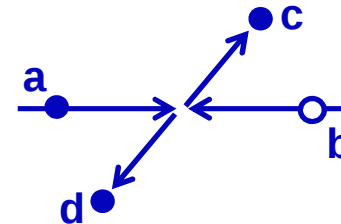


- [illegible]

im Endzustand andere Teilchen
als im Anfangszustand



- kollidierende Strahlen



- Auflösungsvermögen: (reduzierte) de Broglie – Wellenlänge

$$\lambda = \frac{h}{p} = \begin{cases} h / \sqrt{2mE_{kin}} \\ hc / E \end{cases}$$

nichtrelativistisch, $E_{\text{kin}} \ll mc^2$

relativistisch, $E \approx E_{\text{kin}} \gg mc^2$

Streuung bei steigender kinetischer Energie

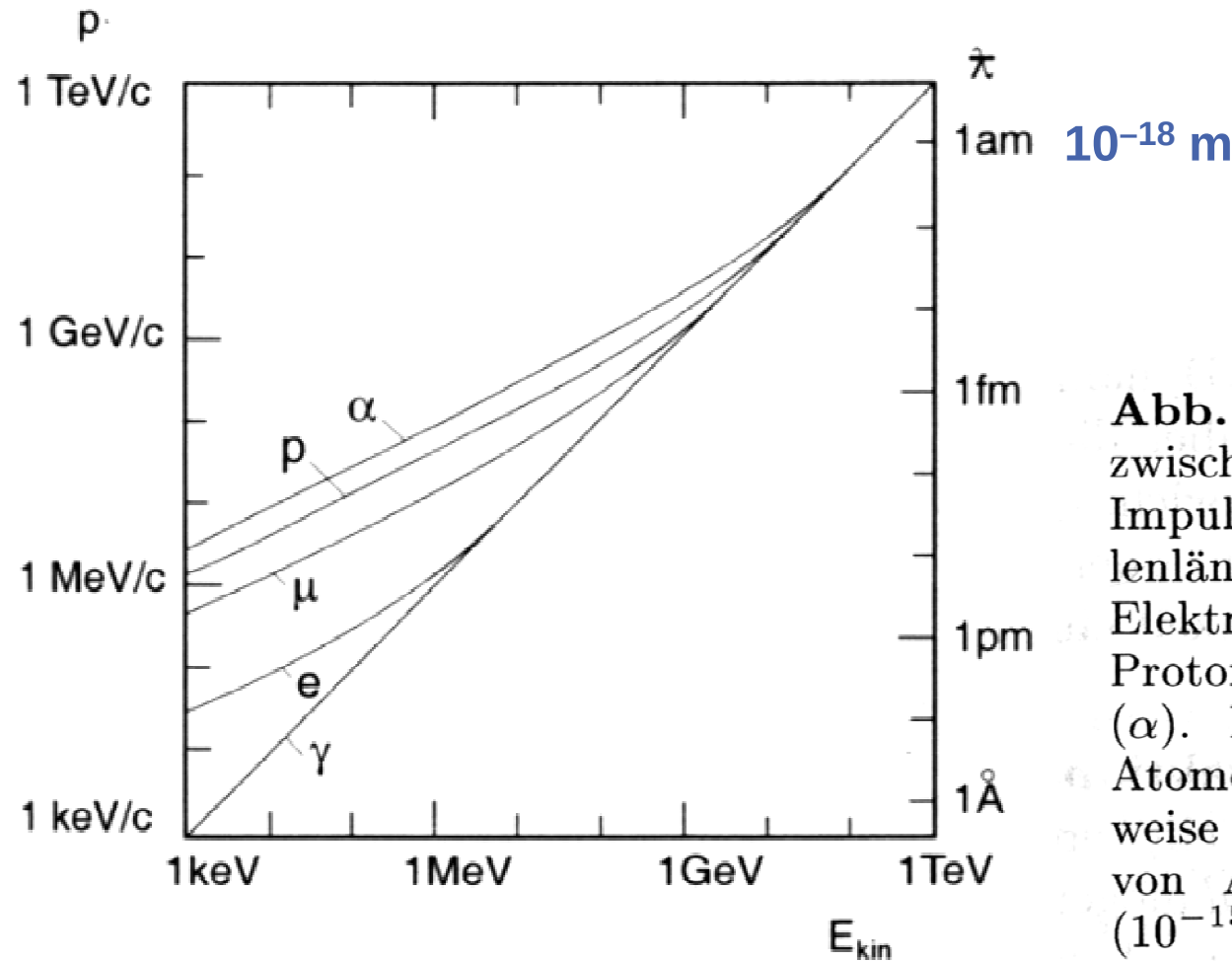


Abb. 4.2. Zusammenhang zwischen kinetischer Energie, Impuls und reduzierter Wellenlänge für Photonen (γ), Elektronen (e), Myonen (μ), Protonen (p) und ^4He -Kerne (α). Der Durchmesser von Atomen beträgt typischerweise einige Å (10^{-10} m), der von Atomkernen einige fm (10^{-15} m). [Quelle: Povh, Teilchen und Kerne]

Wirkungsquerschnitt II: Theoretische Berechnung

- Erinnerung: Reaktionsrate

$$\dot{N} = \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Luminosität}}}{\mathcal{L}} \cdot \underset{\substack{\uparrow \\ \text{Wirkungsquerschnitt}}}{\sigma}$$

- Rechnung zum WQ: **Fermi's "Goldene Regel"**

- Übergangsmatrixelement (=Wahrscheinlichkeitsamplitude) für WW, die Anfangszustand „i“ in Endzustand „f“ überführt:

$$M_{fi} = \langle \psi_f | H_{\text{int}} | \psi_i \rangle = \int \psi_f^* H_{\text{int}} \psi_i dV$$

- Reaktionsrate hängt auch von der Anzahl der möglichen Endzustände im Phasenraum (= 6-dimensionaler Orts-Impuls-Raum) ab:

Heisenberg: 1 Teilchen nimmt Phasenraum-Volumen $\mathbf{h^3 = (2\pi\hbar)^3}$ ein

Streuung: erfolgt in Volumen V und Impulsbereich $\vec{p}' \dots \vec{p}' + d\vec{p}'$
= Kugelschale im Impulsraum
 $\Rightarrow 4\pi p'^2 dp'$

Zahl der möglichen Endzustände:

$$dn(p') = \frac{V \cdot 4\pi p'^2 dp'}{(2\pi \hbar)^3}$$

Wirkungsquerschnitt II: Theoretische Berechnung

Aus $E=p^2/2m$ folgt $dE' = v' dp'$ und damit die

- Anzahl der Energiezustände im Energieintervall dE' : $\frac{dn(E')}{dE'} = \rho(E') = \frac{V \cdot 4\pi p'^2}{v' (2\pi \hbar)^3}$
- Reaktionsrate W pro Targetteilchen und pro einfallendem Teilchen:

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

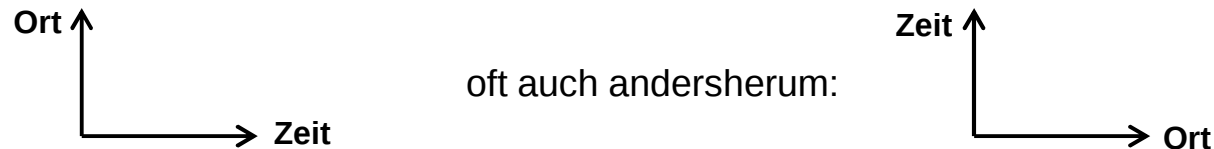
⇒
$$\sigma = \frac{2\pi}{\hbar v_a} |M_{fi}|^2 \cdot \rho(E') \cdot V$$
 Goldene Regel

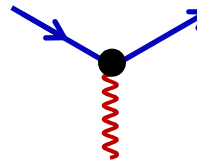
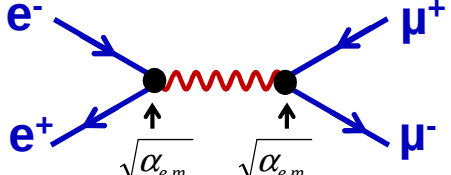
- σ berechnen, wenn $|M_{fi}|^2$ bekannt (aus Theorie)
 $|M_{fi}|^2$ berechnen, wenn σ bekannt (aus Experiment)
- Gilt analog für:
 - Zerfälle instabiler Teilchen
 - Anregung von Teilchenresonanzen
 - Übergänge zwischen Energiezuständen
- Bemerkung: $\tau \leftrightarrow$ Energiebreite von Zuständen (Γ) (aus $\Delta E = \hbar/\tau$)
→ Breit-Wigner-Kurve

$$W = \frac{1}{\tau}$$

Feynman – Diagramme

- graphische Ort-Zeit – Darstellung von Reaktionen zur Berechnung von M_{fi}



Fermionen:		Teilchen (z.B. e^-)	
		Antiteilchen (z.B. e^+)	= Teilchen, das sich rückwärts in der Zeit bewegt
Eichbosonen:		Photon γ	
		Vektor-Bosonen (W^+ , W^- , Z^0)	
		Gluonen	
Vertex:		beschreibt Struktur und Stärke der Wechselwirkung, z.B. Emission eines Photons. Jeder Vertex enthält eine Kopplungskonstante:	
		$\sqrt{\alpha}$	e.m. WW ($\alpha=1/137$)
		$\sqrt{\alpha_s}$	starke WW
		$\sqrt{\alpha_w}$	schwache WW

Berechnung von Feynman – Diagrammen

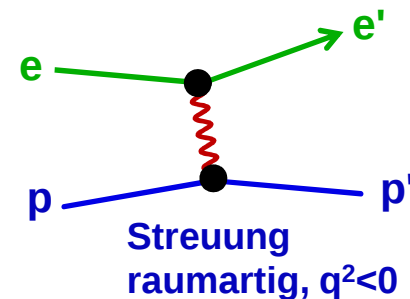
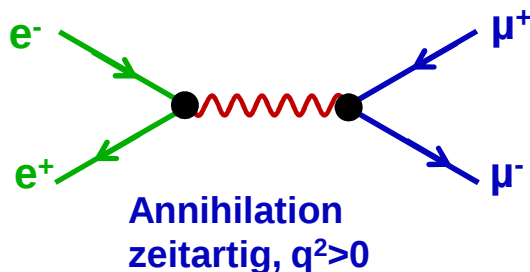
- ausgetauschte Teilchen (interne Linien) der Masse M tragen zum Übergangsmatrixelement einen Propagatorterm bei:

$$\frac{1}{-q^2 + M^2 c^2}$$

$$q^2 = |\text{Viererimpuls-Übertrag}|^2$$

$$= \begin{cases} >0 & \text{wenn zeitartig} \\ <0 & \text{wenn raumartig} \end{cases}$$

- Def.: $Q^2 = -q^2$ ($\Rightarrow Q^2 > 0$ für raumartige Prozesse)
- für virtuelle Photonen ($m_\gamma = 0$): $\rightarrow 1/Q^2$ in Amplitude
 $\Rightarrow \sigma \propto 1/Q^4$ im W.querschnitt (z.B. Rutherford)
- Propagatorterme der schwachen WW sind wegen $M_W \approx 80 \text{ GeV}$, $M_Z \approx 90 \text{ GeV}$ fast konstant und viel, viel kleiner (Grund für die Schwäche!).



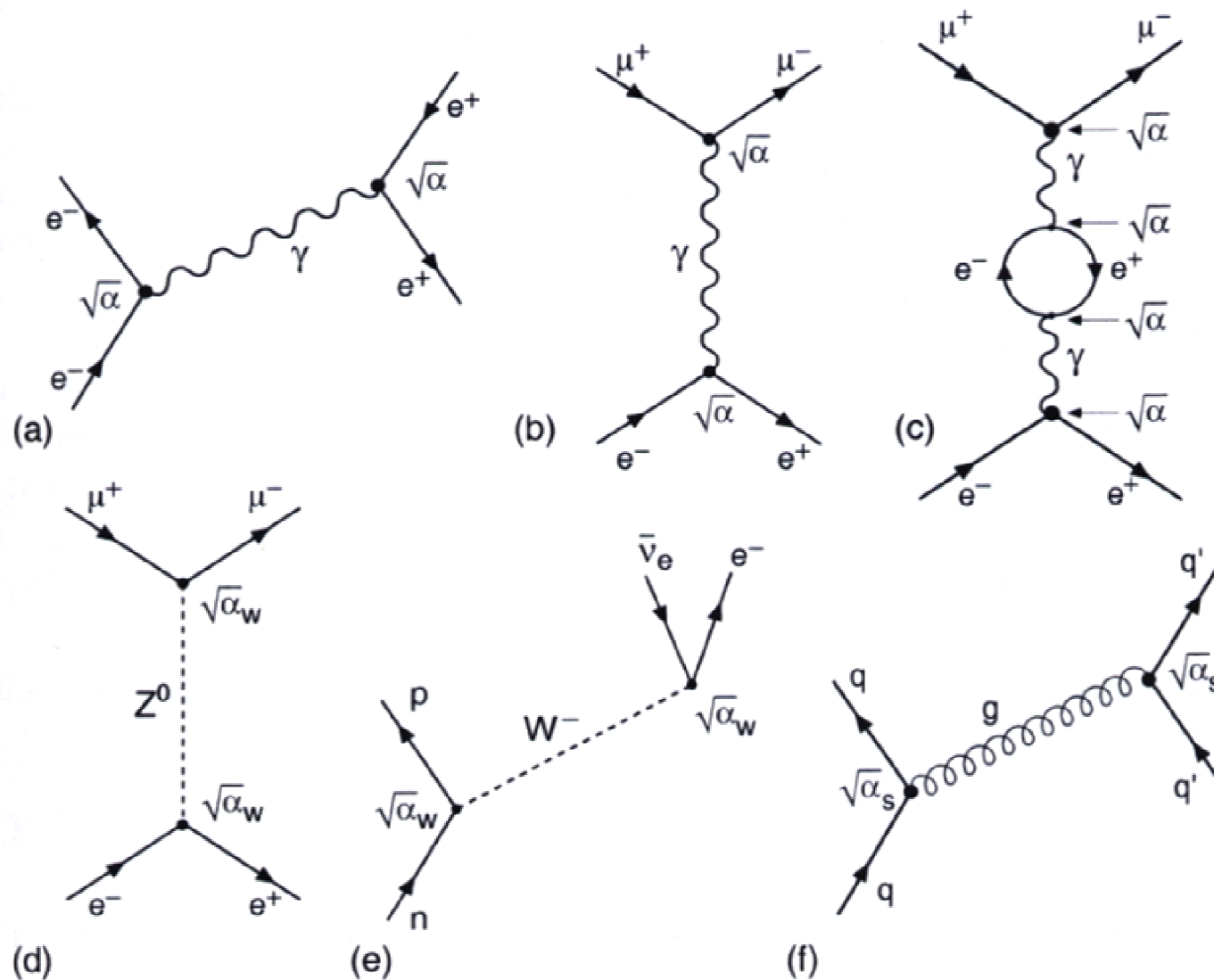


Abbildung 4.5. Feynmangraphen zur elektromagnetischen (a, b, c), zur schwachen (d, e) und zur starken Wechselwirkung (f)