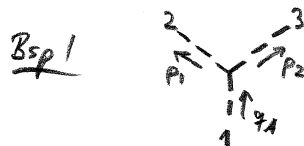
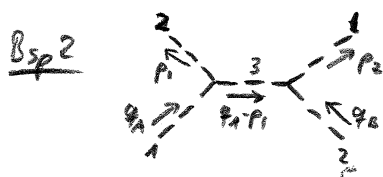


Bsp Wie gegeben dual  $\hat{L}_I = -g \hat{\phi}_1 \hat{\phi}_2 \hat{\phi}_3$

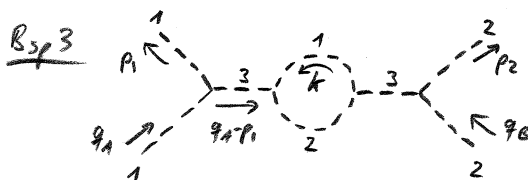


$$M = (-ig) \textcircled{2} (i) \textcircled{3} = g$$



$$M = (-ig)^2 \textcircled{2} \left( \frac{i}{(q_1 - p_1)^2 - m_3^2} \right) \textcircled{3} (i) \textcircled{3}$$

$$= \frac{g^2}{(q_1 - p_1)^2 - m_3^2}$$



$$M = (-ig)^4 \textcircled{2} \left( \frac{i}{(q_1 - p_1)^2 - m_3^2} \right)^2 \left( \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \right) \textcircled{5} \left( \frac{i}{k^2 - m_1^2} \right) \textcircled{3} \left( \frac{i}{(q_1 - p_1 + k)^2 - m_2^2} \right) \textcircled{3} (i) \textcircled{3}$$

$$= \frac{ig^4}{[(q_1 - p_1)^2 - m_3^2]^2} \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \frac{1}{(k^2 - m_1^2) [(q_1 - p_1 + k)^2 - m_2^2]}$$

#### 4. Quantenelektrodynamik (QED)

Entwicklung: 1946-51 Feynman, Schwinger, Tomonaga; (Nobel 1965)

QED ist die am genauesten verifizierte Theorie der Physik!

magnetisches Moment des  $e^-$

(( im Entstehen des "Bohr'schen Magneton"  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e}$  ))

$$\frac{\mu_e}{\mu_B} = 1.00115965218073 (28) \quad \leftarrow \text{experimentell gemessen}$$

Unsicherheit der letzten beiden Ziffern [Harvard, 2008  
s. arXiv: 0801.1134]

$$= 1.001159652183 (7) \quad \leftarrow \text{theoretisch berechnet}$$

[s. arXiv: 0712.2607]

Relevanz: QED beschreibt (u.a.) W'ien von  $e^-$ ,  $\gamma$

$\rightarrow$  alle Phänomene z.B. der Chemie folgen aus QED!

Formulierung der QED:

$$\hat{L}_I \equiv e \bar{\psi} \gamma^\mu \hat{A}_\mu \psi$$

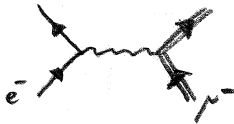
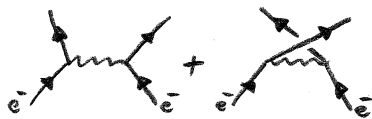
Elementarladung  $e$ 

besser zu machen:

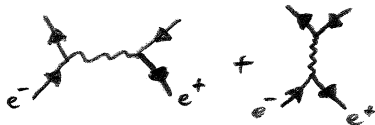
$$\text{Feinstrukturkonstante } \alpha_{\text{em}} \stackrel{\text{nat.}}{\equiv} \frac{e^2}{4\pi} \stackrel{\text{SI}}{=} \frac{e^2}{4\pi \epsilon_0 \hbar c} \approx \frac{1}{137.035999...}$$

$$\Rightarrow \text{Vertex: } \text{---} \rightarrow \text{---} \rightarrow \text{---} \Rightarrow \mathcal{M} = ie \gamma^\mu$$

können nun Feynman-Diagramme der niedrigsten Prozesse machen:

Prozess erster Ordnungmagnetisches Moment des  $e^-$   
 $\mu_e / \mu_B = 1$ elastische Prozesse zweiter OrdnungElektron-Muon-Streuung:  $e^- + \mu^- \rightarrow e^- + \mu^-$ "Mott-Streuung":  $m_\mu \rightarrow \infty$ "Rutherford-Streuung":  $v_e \rightarrow 0$  ( $e^- + p^+ \rightarrow e^- + p^+$ )Elektron-Elektron-Streuung:  $e^- e^- \rightarrow e^- e^-$ 

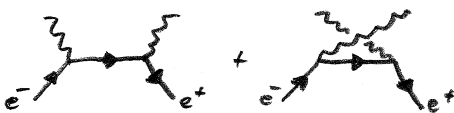
"Møller-Streuung"

Elektron-Positron-Streuung:  $e^- e^+ \rightarrow e^- e^+$ 

"Bhabha-Streuung"

Elektron-Photon-Streuung:  $e^- \gamma \rightarrow e^- \gamma$ 

"Compton-Streuung"

inelastische Prozesse zweiter OrdnungPaarvernichtung:  $e^- e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$ Paarerzeugung:  $\gamma + \gamma \rightarrow e^- e^+$

wichtigster Prozess dritter Ordnung

"Strahlungskorrekturen"  
 zum magn. Moment des  $e^-$   
 oder: "anomales" magn. Moment des  $e^-$

(( grobe Abschätzung der Größenordnung dieser Korrekturen:

2 neue Vertices  $\rightarrow e^2$ . jede "Schleife" gibt  $\frac{1}{(4\pi)^2}$

$$\rightarrow \frac{e^2}{16\pi^2} = \frac{\alpha_{EM}}{4\pi} \approx \frac{1}{4\pi \cdot 137} \approx \frac{1}{1720} \quad ?$$

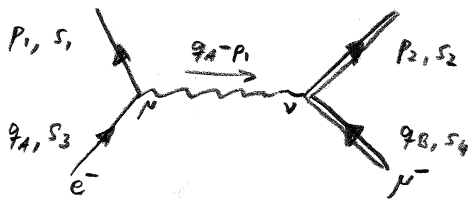
die genaue Antwort ist  $\frac{\alpha_{EM}}{2\pi} \approx \frac{1}{861} \approx 0.0011617..$

vgl. mit (s.o.)  $\frac{\mu}{\mu_B} = 1.0011596..$  (exp.) ! ))

etc... Teilchenphysik als "Puzzlespiel" mit Feynmandiagrammen !

Nun können wir aber mit Hilfe der Feynman-Regeln (s. § 3.3)  
 die Amplituden berechnen.

Bsp: Amplitude für  $e^- \mu^-$ -Streuung



Zur Anwendung der Feynman-Regeln: jede Fermionlinie "rückwärts" verfolgen

$$\begin{aligned} \mathcal{M} &= \bar{u}(\vec{p}_1, s_1) \textcircled{1} i e \gamma^\mu u(\vec{q}_1, s_3) \textcircled{2} \bar{u}(\vec{p}_2, s_2) \textcircled{1} i e \gamma^\nu u(\vec{q}_2, s_4) \textcircled{3} \frac{-i g_{\mu\nu}}{(q_1 - p_1)^2} \textcircled{7} (+i) \\ &= - \frac{e^2}{(q_1 - p_1)^2} \bar{u}(\vec{p}_1, s_1) \gamma^\mu u(\vec{q}_1, s_3) \bar{u}(\vec{p}_2, s_2) \gamma_\mu u(\vec{q}_2, s_4) \end{aligned}$$

① ausl.  $e^-$     ② Vertex    ① eml.  $e^-$     ①    ②    ①    ③ Photon-Propagator    ⑦ Gesamtphase

Bem: • für gegebene  $\vec{p}, \vec{q}, s_i$  ist dies eine Zahl !

• falls es mehrere Diagramme gleicher Ordnung gibt:  
 Addition/Subtraktion (Regel ⑥), z.B.

$$|\mathcal{M}|^2 = |\mathcal{M}_1 \pm \mathcal{M}_2|^2 = |\mathcal{M}_1|^2 + |\mathcal{M}_2|^2 \pm (\mathcal{M}_1 \mathcal{M}_2^* + \mathcal{M}_2 \mathcal{M}_1^*)$$

letzter Term: repräsentiert gem. Interferenz !