

- **Wirkungsquerschnitt**

$$\sigma = \frac{N_s}{N_{in} \cdot \frac{\text{Targetteilchen}}{\text{cm}^2}} \leftrightarrow \text{prozessabhängig!}$$

(ohne Berücksichtigung von Detektorakzeptanzen und -effizienzen, experimentelle Daten (N_s) müssen üblicherweise korrigiert werden (Simulationen zur Effizienz/Akzeptanzbestimmung))

- **Luminosität**

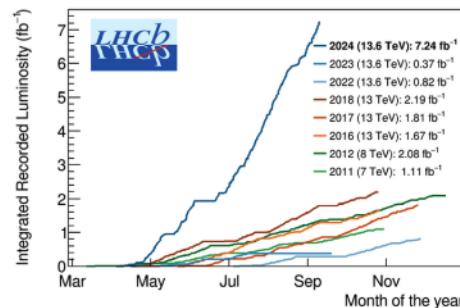
$$L = \phi N_t = \dot{N}_{in} \cdot \frac{N_t}{A} \leftrightarrow \text{Strahlstrom} \cdot \text{Targetflächendichte}$$

- **Integrierte Luminosität**

$$\int L dt$$

\leftrightarrow z.B. zum Vergleich von Datenmengen

Recorded luminosity of 7.24 fb^{-1} in 2024
(as of beginning of September)
More than in the whole of Run 2!



28

Der Wirkungsquerschnitt

1) Der Wirkungsquerschnitt im Allgemeinen

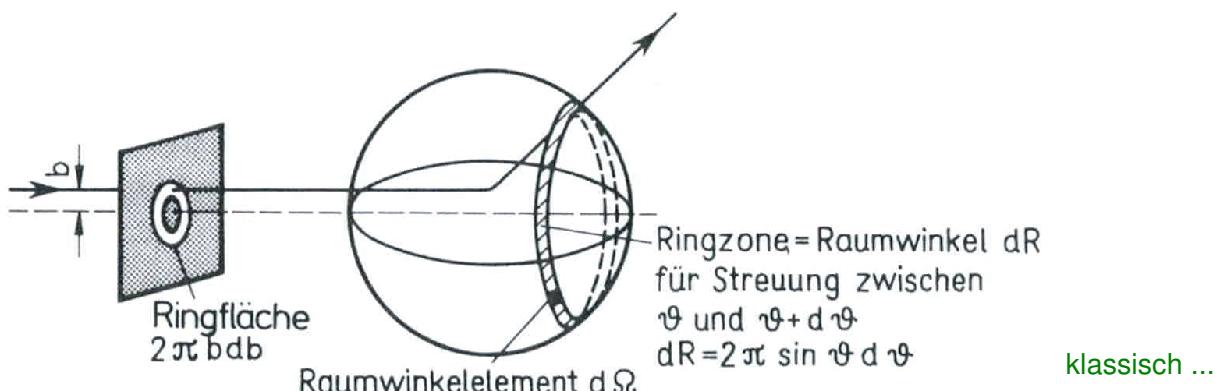
Wie groß ist die Wahrscheinlichkeit, dass eine Reaktion eines bestimmten Typs passiert

\leftrightarrow Information über die auftretenden Prozesse und Wechselwirkungen

2) zurück zur Rutherfordstreuung

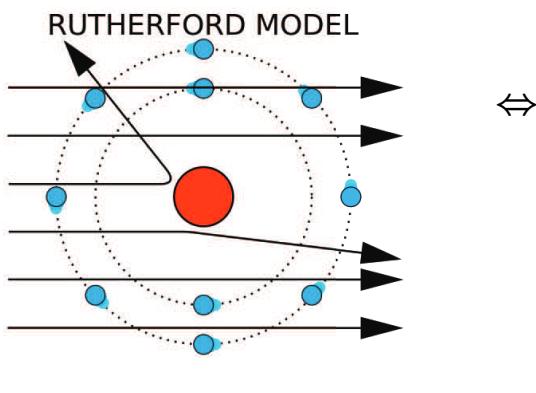
- Überprüfung der theoretischen Erwartung (Coulombstreuung am schweren Atomkern) anhand des Experimentes

\Leftrightarrow **Differentieller Wirkungsquerschnitt für die Rutherford-Streuung = ?**



29

Das Rutherford Streuexperiment

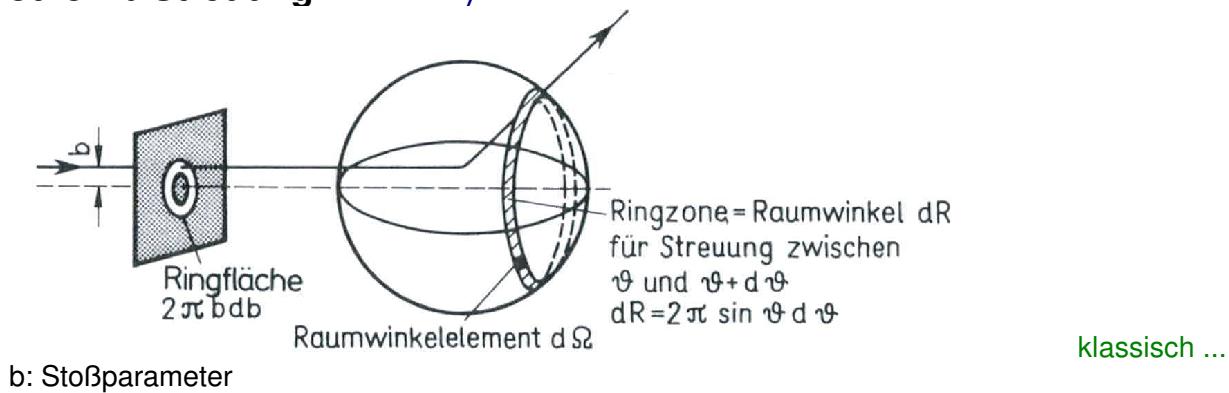


**Masse und positive Ladung in einem kleinen Raumgebiet konzentriert
→ Atomkern**

**Vergleich Experiment
↔ theoretische Erwartung**

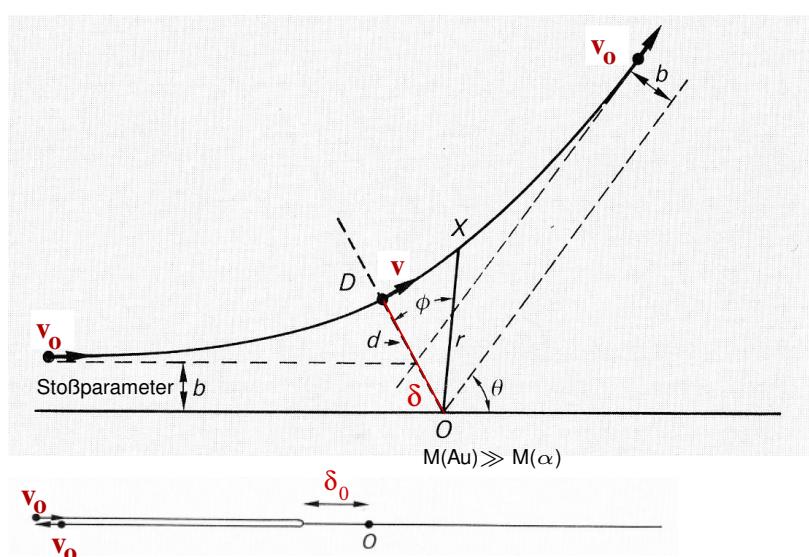
**↔ wie oft werden Teilchen
in Rückwärtsrichtung gestreut?**

Rutherford: Annahme: positive Ladung ist im Zentrum des Atoms konzentriert
⇒ Coulomb Streuung: $F \sim 1/r^2$



30

Das Rutherford Experiment: Coulomb-Streuung



geringster Abstand δ_0

$$E_{kin} = \frac{mv_0^2}{2} = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \delta_0}$$

$$\rightarrow \delta_0 = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 E_{kin}}$$

Energieerhaltung:

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{mv_0^2}{2} - \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \delta}$$

kinetische Energie bei kleinstem Abstand δ

Drehimpulserhaltung:

$$mv\delta = mv_0 b$$

Impulserhaltung:

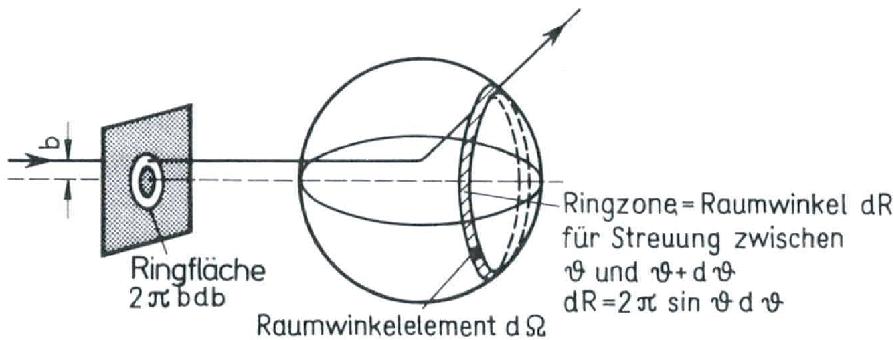
$|\vec{p}| = |\vec{p}'|$: elastische Streuung
 $\vec{q} = \vec{p} - \vec{p}' \quad q = 2p \cdot \sin(\frac{\theta}{2})$

oder $p_{||} = -mv_0 \sin(\frac{\theta}{2})$,
 $p'_{||} = +mv_0 \sin(\frac{\theta}{2})$
 (|| = entlang OD)

$$\tan(\frac{\theta}{2}) = \frac{\delta_0}{2b} \leftrightarrow \text{Ableitung Übungen (*)}$$

31

Das Rutherford Experiment: Coulomb-Streuung



im Folgenden:
 Axialsymmetrie des
 Streuprozesses
 \leftrightarrow nur Abhängigkeit von θ

Klassischer Streuprozess:
 $\mathbf{b} \leftrightarrow \theta$

Teilchenzahlerhaltung:

$$\text{Anzahl einlaufender Teilchen/s} = \text{Anzahl gestreuter Teilchen/s in } d\Omega \text{ of } dR$$

$$\begin{aligned} j \cdot 2\pi b db &= j \cdot dR \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) \\ &= j \cdot 2\pi \sin \theta d\theta \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) \\ \Rightarrow \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) &= \frac{b}{\sin \theta} \left| \frac{db}{d\theta} \right| \quad \text{mit (*)} \Rightarrow \end{aligned}$$

$$\text{Differentieller Wirkungsquerschnitt: } \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) = \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 4E_0} \right)^2 \cdot \frac{1}{(\sin \frac{\theta}{2})^4}$$

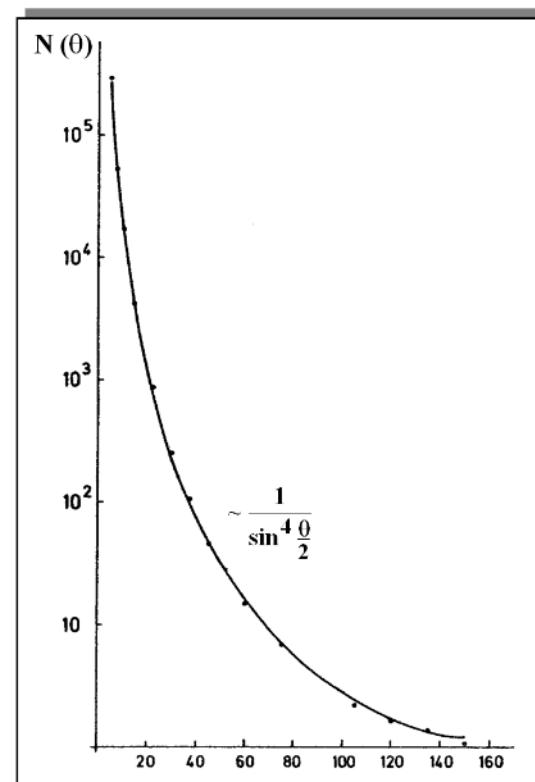
32

Das Rutherford Experiment: Coulomb-Streuung

Rutherford'sche Streuformel:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) = \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 4E_0} \right)^2 \cdot \frac{1}{(\sin \frac{\theta}{2})^4}$$

- fällt sehr schnell mit θ ab
- $\sim \frac{1}{E_{kin}^2}$: fällt bei festem Winkel quadratisch ab
- $\frac{1}{(\sin \frac{\theta}{2})^4}$: charakteristisch für $1/r$ -Potential
- Integral divergiert wegen unendlicher Reichweite der Coulomb-Kraft



33

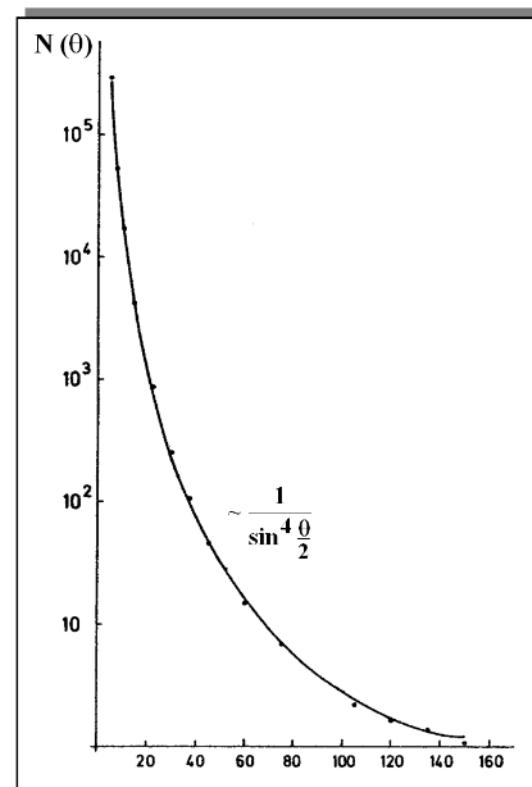
Das Rutherford Experiment: Coulomb-Streuung

Rutherford'sche Streuformel:

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right) = \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 4E_0} \right)^2 \cdot \frac{1}{(\sin \frac{\theta}{2})^4}$$

Näherungen:

- elastische Streuung am reinen Coulombpotential (keine Anregungen), Kern und Projektil als Punktladungen
- $M \gg m$: Rückstoß vernachlässigt
- Wechselwirkungen von Teilchen ohne Spin (keine magnetische WW).



Anmerkung:

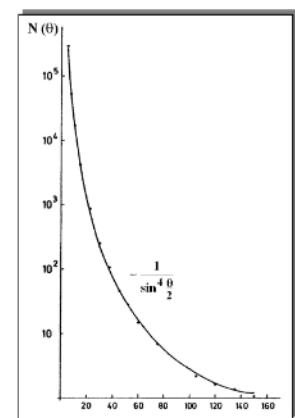
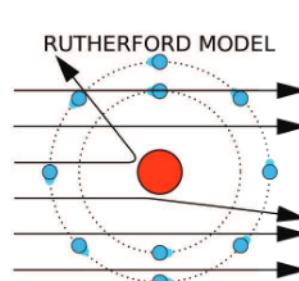
Quantenmechanische Rechnung liefert das gleiche Ergebnis wie die klassische Herleitung

34

Das Rutherford Experiment: Coulomb-Streuung

Anschaulich:

- größere Winkel
↔ größerer Impulsübertrag
 $q = 2p \cdot \sin(\frac{\theta}{2})$
- je größer q ist, desto größer muss Coulombkraft sein, die m spürt, um nach aussen gestreut zu werden
↔ Hohe Felder in der Nähe des Kerns ⇒ kleine b
↔ Relativ zur gesamten Wechselwirkungsfläche (Atome) tritt die Nähe zum Kern sehr selten auf ⇒ Große Winkel sehr selten.
- bei festen θ : q umso größer, je größer E_{kin} ist
je größer q ist, desto größer muss Coulombkraft sein, die m auf θ herausstreuht.
⇒ Wahrscheinlichkeit dafür (d.h. auch der Wirkungsquerschnitt) fällt mit E_{kin}^2



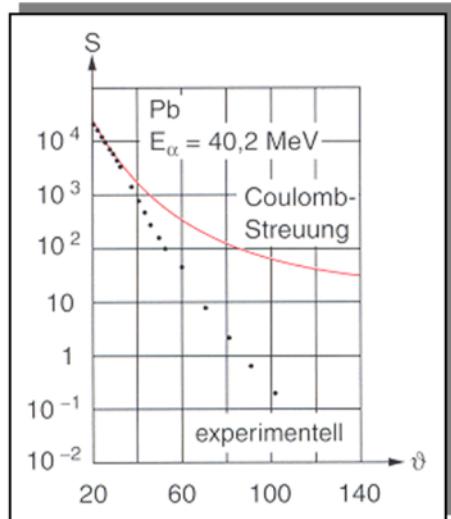
35

Das Rutherford Experiment: Coulomb-Streuung

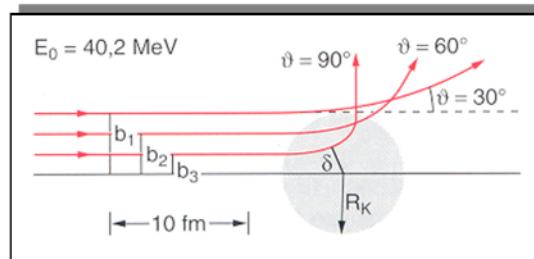
Abweichungen von der Rutherford-Streuung

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \left(\frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 \cdot 4E_0}\right)^2 \cdot \frac{1}{\left(\sin \frac{\theta}{2}\right)^4}$$

- feste Einschussenergie:



\Leftrightarrow Effekt der starken Wechselwirkung



\Rightarrow Bestimmen des Kernradius

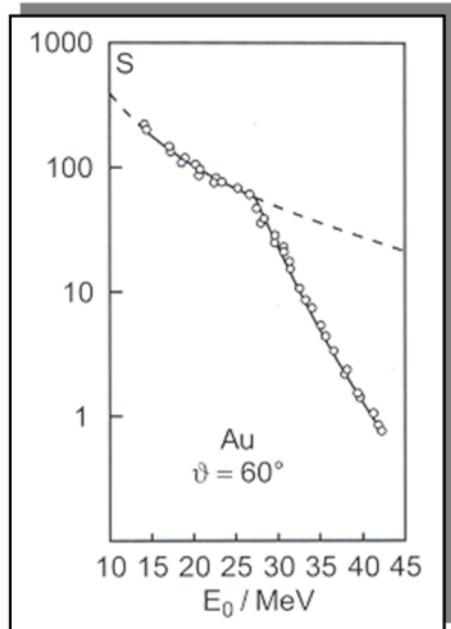
$$R_K \approx \delta_{crit} = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 2E_{kin}} \cdot \left[1 + 1/\sin\left(\frac{\theta_{crit}}{2}\right) \right]$$

36

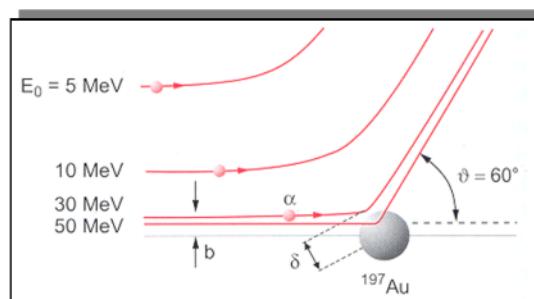
Das Rutherford Experiment: Coulomb-Streuung

Abweichungen von der Rutherford-Streuung

- fester Streuwinkel:



\Leftrightarrow Effekt der starken Wechselwirkung



\Rightarrow Bestimmen des Kernradius

$$R_K \approx \delta_{crit} = \frac{Z_1 \cdot Z_2 \cdot e^2}{4\pi\epsilon_0 2E_{kin}} \cdot \left[1 + 1/\sin\left(\frac{\theta_{crit}}{2}\right) \right]$$

$$\Rightarrow R = R_0 \cdot A^{1/3}, \quad R_0 \approx 1.3 \text{ fm}$$

37

- Größe des Atomkerns: 1-10 fm, $1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$
- ⇒ $R = R_0 \cdot A^{1/3}$, $R_0 \approx 1.3\text{fm}$ aus Streuexperimenten
- Typischer Radius der Atomhülle: $0.1\text{nm} = 10^{-10}\text{m}$
- Atomkerne aufgebaut aus Protonen und Neutronen
- Neutron entdeckt durch Chadwick (1932)

..... wir werden etwas später wieder auf die Atomkerne zurückkommen

Weitere historische Daten

↔ detailliertere Liste siehe z.B. Bethge "Kernphysik"

- Bohr'sches Atommodell (1913), Erklärung des Wasserstoffspektrums
- Entwicklung der Quantenmechanik um die Atomstruktur zu beschreiben (from 1925: De Broglie, Schrödinger, Heisenberg, Born)
(später auch QFT ↔ Lamb-shift)
- Neutrino Hypothese (1930 Pauli) (β -decay)
- Entdeckung des Neutrons (1932 Chadwick)
- Entdeckung des Positrons (1932 Anderson)
- Entdeckung der Kernspaltung (1938 Hahn, Strassmann)
- Erste kontrollierte Kettenreaktion (1942 Fermi)
- Entwicklung der Atombombe (1945 Oppenheimer ...)
- Entdeckung des Pions (1947 Powell) (heute erklärt als $q\bar{q}$)
- Entdeckung von Teilchen mit Strangeness (1953 Brookhaven)
- Entdeckung des Antiprotons (1955 Chamberlain, Segre)
- Experimentelle Entdeckung des Neutrinos (1959 Reines, Cowan)
(nach 29 Jahren ...)

Weitere historische Daten

- **Paritätsverletzung im β -Zerfall (1956 Lee, Yang, Wu)**
(bis dahin hatte man als selbstverständlich angesehen, dass Prozesse invariant unter Raumspiegelung sind)
- **Quarkmodell für Hadronen (1964 Gell-Mann, Zweig)** (Ordnungsschema)
- **Entwicklung der Quantenchromodynamik (1972 Gell-Mann)**
- **Beobachtung des $J/\Psi \rightarrow$ Bestätigung des Charm-Quarks (1974 Richter, Ting)** (zuvor postuliert um das Nicht-Auftreten bestimmter Prozesse in der schwachen WW. zu erklären)
- **Beobachtung des Bottom-Quarks (1977 Ledermann)**
- **Entdeckung des W- und Z-Bosons (1983 Rubbia)** (Eichbosonen der schwachen WW.)
- **Entdeckung des Top-Quarks (1995 Fermi-Lab.)**
- **Beobachtung von Neutrino-Oszillationen \rightarrow Neutrinos haben Masse! (1998 Superkamiokande, 2001 SNO, 2003 Kamland)**
- **Entdeckung des Higgs-Bosons (2012 CERN)**
($M=125\text{ GeV}$, 2013 Nobelpreis für P. Higgs und F. Englert)

40

Einführung: Unser Bild heute ...

Das Standardmodell der Teilchenphysik

Kurze Zusammenfassung ... mehr Information später der Vorlesung

- **Elementarteilchen: 3 Familien:**

	1. Familie	2. Familie	3. Familie	<u>Ladung</u>
Quarks	u up	c charm	t top	+2/3
	d down	s strange	b bottom	-1/3
Leptonen	e e-Neutrino	ν_e Elektron	ν_t τ -Neutrino	0
		μ Myon	τ Tau(on)	-1

(= Fermionen: Spin 1/2-Teilchen)

41

Das Standardmodell der Teilchenphysik

- Elementarteilchen: 3 Familien:

	1. Familie	2. Familie	3. Familie	Ladung	
Quarks	u d	c s	t b	+2/3 -1/3	Teilchen
Leptonen	ν_e e	ν_μ μ	ν_τ τ	0 -1	
Anti-Quarks	\bar{u} \bar{d}	\bar{c} \bar{s}	\bar{t} \bar{b}	-2/3 +1/3	Antiteilchen
Anti-leptonen	$\bar{\nu}_e$ e^+	$\bar{\nu}_\mu$ μ^+	$\bar{\nu}_\tau$ τ^+	0 +1	\leftrightarrow gleiche Massen \leftrightarrow entgegengesetzte Ladung

42

Fundamentale Kräfte / Wechselwirkungen

4 fundamentale Wechselwirkungen

- **Gravitation** (im Bereich der Teilchenphysik zu vernachlässigen)
- **Elektromagnetische Wechselwirkung**
- **Schwache Wechselwirkung**
- **Starke Wechselwirkung**

\leftrightarrow Kraftwirkung zwischen Teilchen

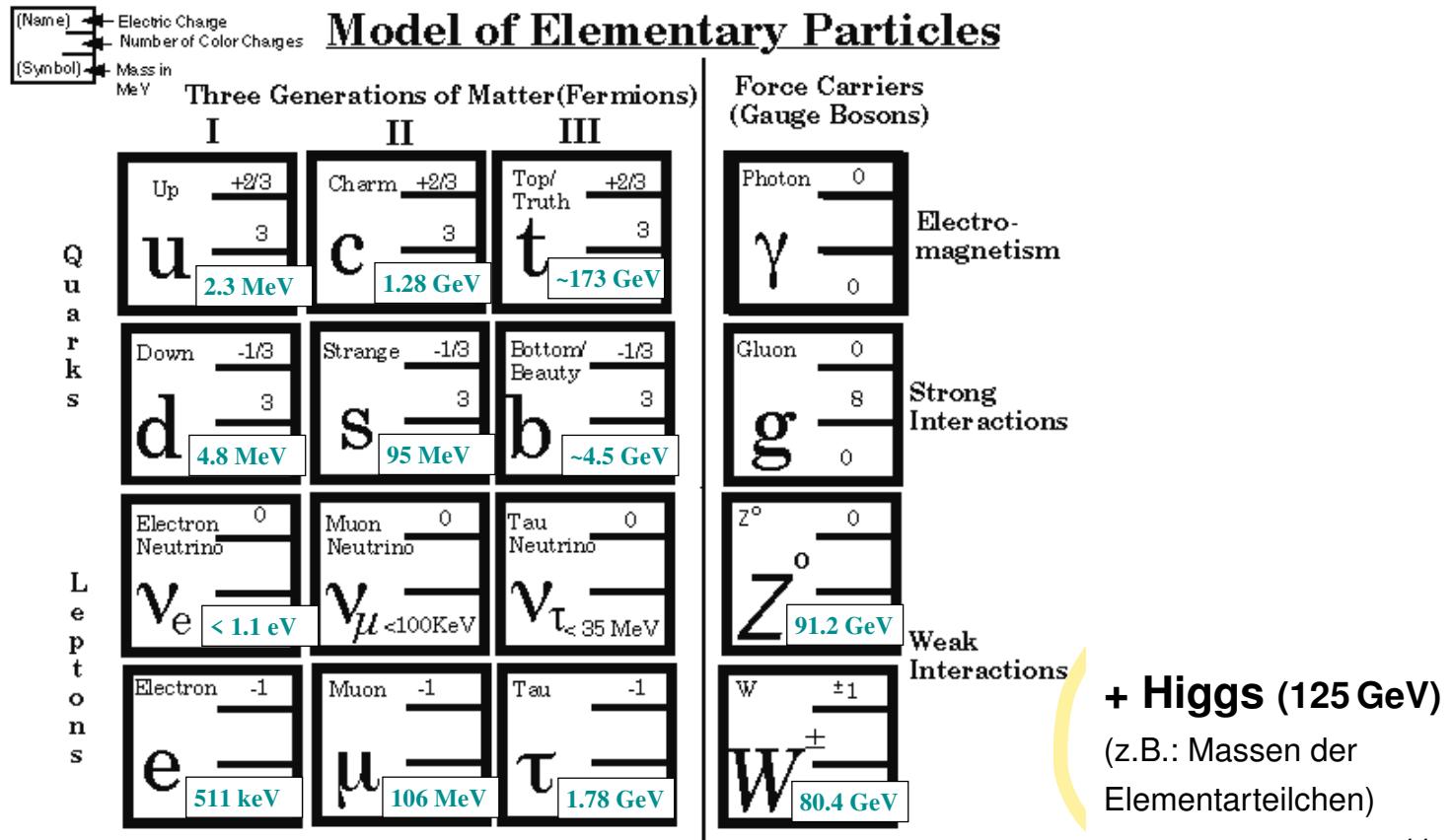
\rightarrow auch verantwortlich für Teilchenzerfälle usw.

\Rightarrow Wechselwirkung durch Teilchenaustausch

43

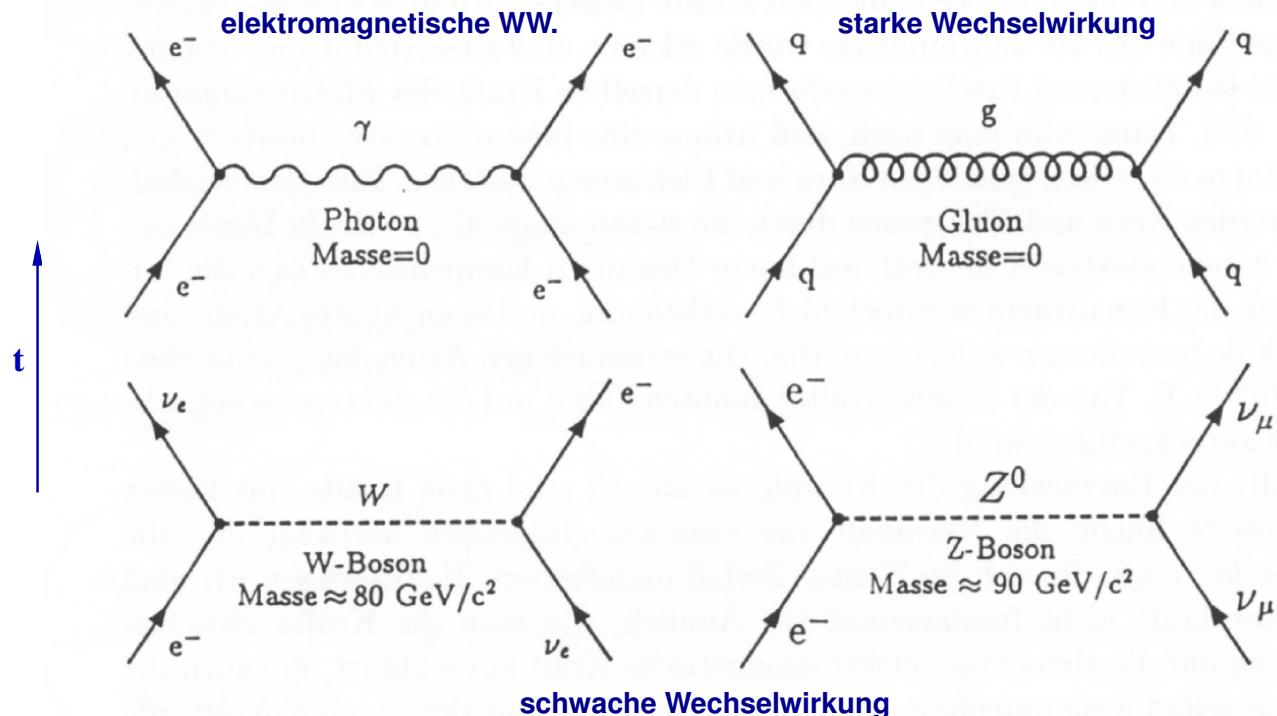
Das Standardmodell der Teilchenphysik

- Elementarteilchen und Austauschteilchen



44

Wechselwirkung durch Teilchenaustausch



(aus Povh et al.)

klassische Physik: Wechselwirkung zwischen zwei Teilchen beschrieben durch ein Feld/Potential

Quantenfeldtheorie: Wechselwirkung durch den Austausch von Bosonen

45

.... Tafel

- 1) Feynman-Diagramme
- 2) Abschätzung zur Reichweite von Wechselwirkungen
(wichtig: keine präzise Herleitung)

$$\sim 1/M$$