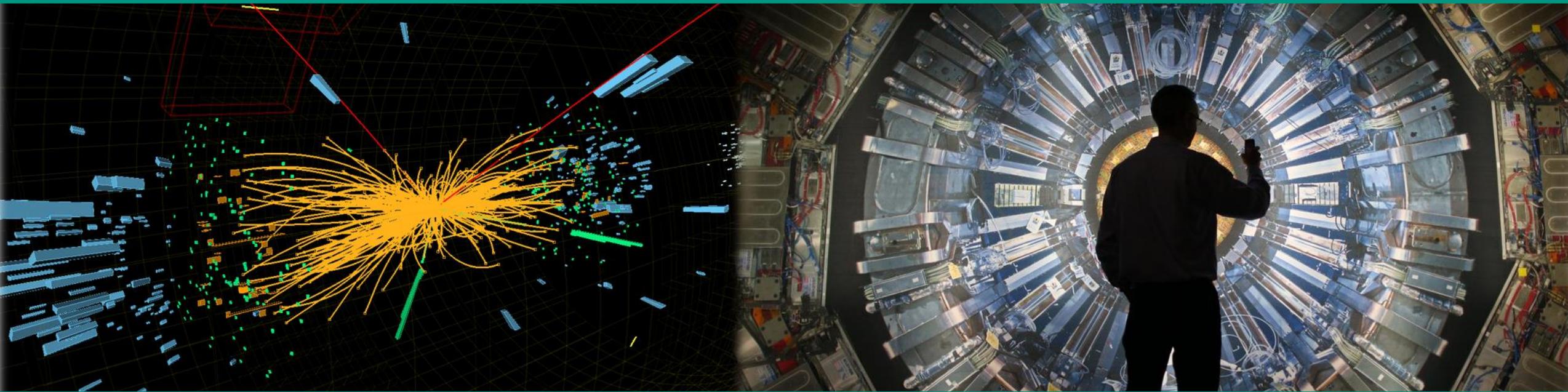


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 3

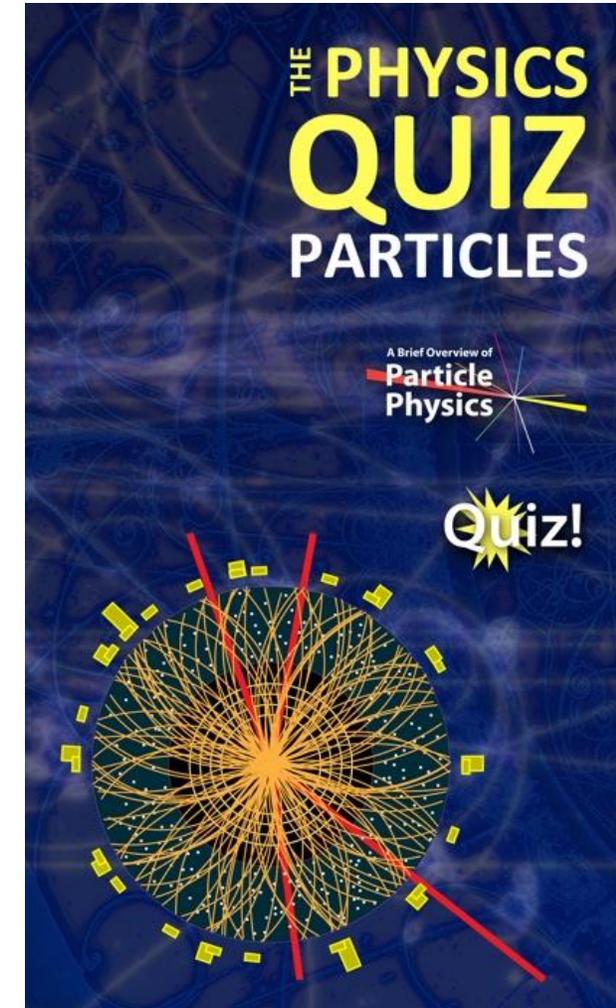
25.4.2023



Welche der folgenden Aussagen ist korrekt?

■ Ein Quiz zum Aufbau von Kernen

- **A**: die Streuung von **Elektronen an Kernen** beschreibt man mit dem Rutherford-Wirkungsquerschnitt 
- **B**: in der Mott-Streuung sind **Spin-flips** unterdrückt 
- **C**: die **Helizität H** ist die (normierte) Projektion des Spins \vec{S} auf den Impuls \vec{p} 
- **D**: bei **ausgedehnten Kernen** wird die Ladungsverteilung mit einem Formfaktor (und σ_{Mott}) beschrieben 
- **E**: der **Formfaktor** ist proportional zur Ladungsverteilung 



Q: appadvice.com

■ Rutherford, Mott & Formfaktoren: auf dem Weg zur Kernstruktur

- Rutherford: Streuung am **Coulombpotenzial** $\frac{d\sigma}{d\Omega} = (2 \cdot m_e \cdot Z \cdot \alpha)^2 \cdot \frac{1}{q^4}$

- Mott: **relativistische** Streuung mit **Spin** $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_M = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R \cdot \frac{E'}{E} \cdot \cos^2 \frac{\theta}{2}$

- Formfaktor $F(\mathbf{q}) \Leftrightarrow$ Ladungsverteilung $\rho(\mathbf{r})$: Fouriertransformierte

■ Kernmodelle: Eigenschaften eines komplexen Viel-Nukleon-Systems

- Schalenmodell, Fermigas-Modell & Tröpfchenmodell, Bindungsenergie E_B/A

Kernmodelle – das Tröpfchenmodell

■ Tröpfchenmodell von C.F. von Weizsäcker

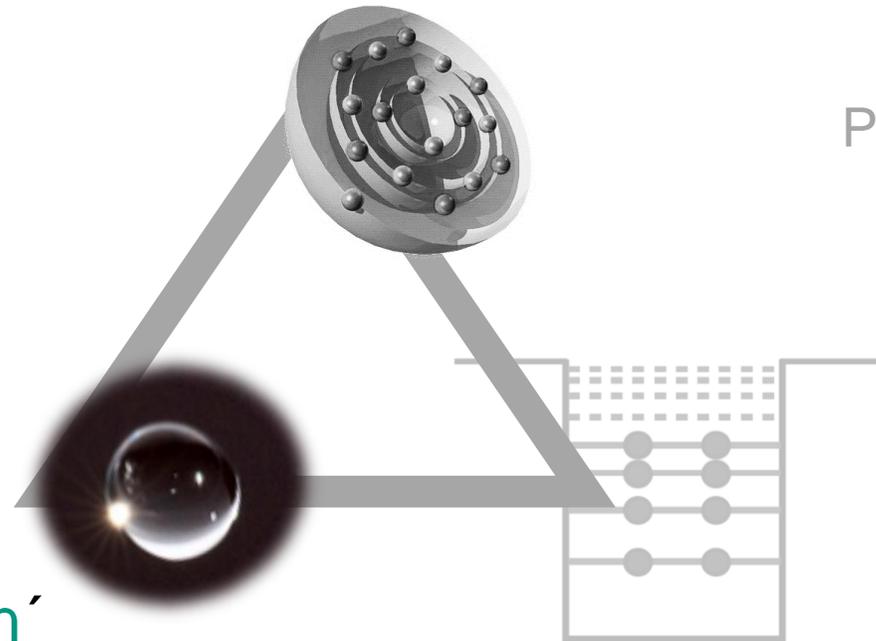
Schalenmodell

Nukleonen bewegen sich voll quanten-mechanisch

Schrödinger-Gleichung
Potenzial mit vielen Termen

Tröpfchenmodell

- Kerne als inkompressible, geladene 'Flüssigkeitstropfen'
- Beschreibung von E_B/A & Spalt-/Fusionsprozessen

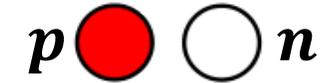


Fermigasmodell

Nukleonen bewegen sich unabhängig voneinander in gemeinsamen Potenzial

Tröpfchenmodell: empirische Terme

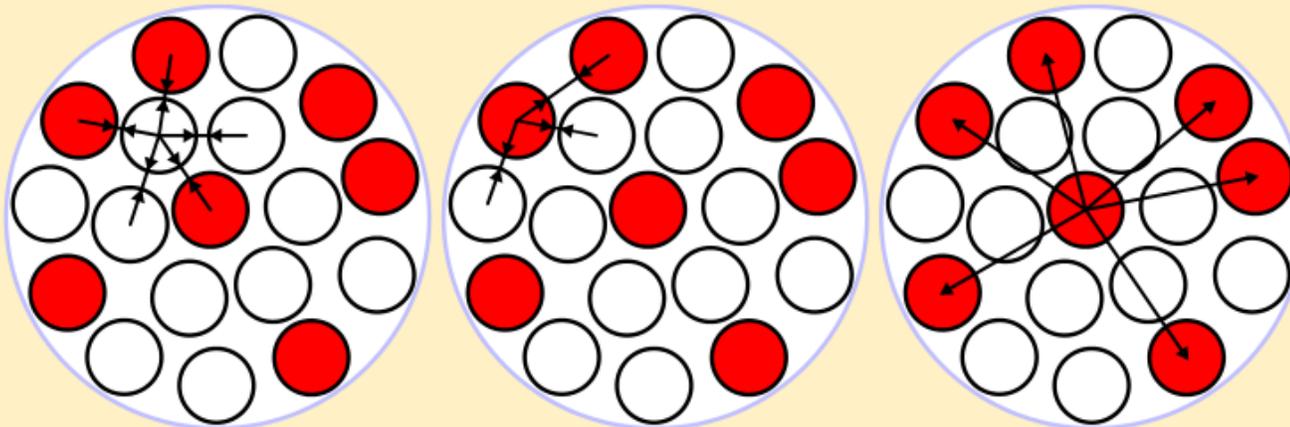
- 3 klassische Terme & 2 quantenmechanische Terme*



klassisch

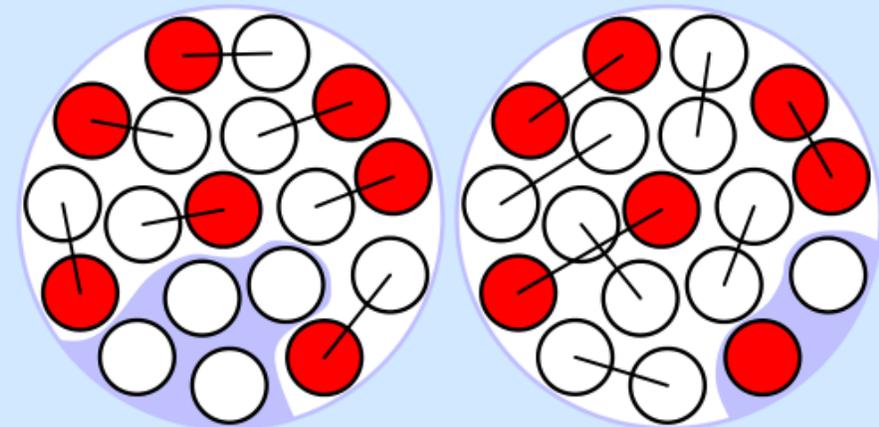
quantenmechanisch

- 1 - Effekte im Kernvolumen (Bindung)
- 2 - Effekte an der Kernoberfläche
- 3 - Coulomb-Abstoßung der Protonen



1 - Volumen 2 - Oberfläche 3 - Coulomb

- 4 - Verhältnis Protonen : Neutronen
- 5 - Paarung von 2 Nukleonen
(pp , nn , jeweils Spin $S = 0$ $\uparrow\downarrow$)

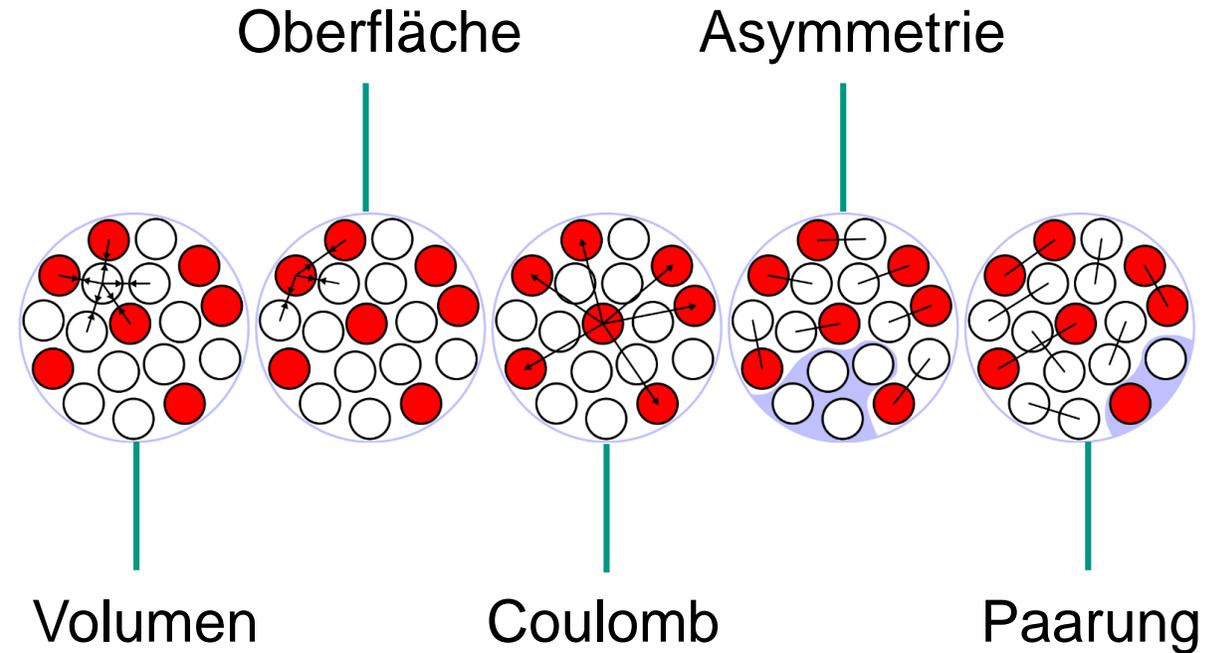
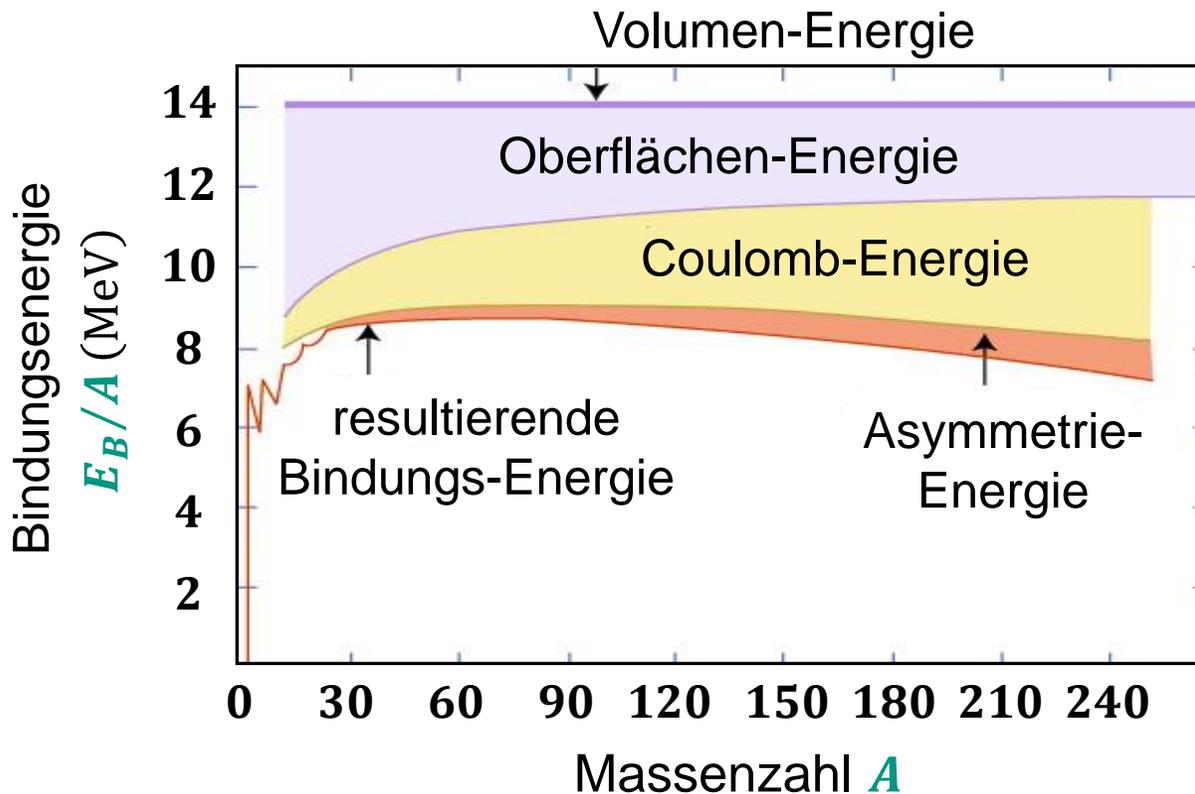


4 - Asymmetrie 5 - Paarung

Tröpfchenmodell: verschiedene Terme

■ Terme zur Bethe-Weizsäcker Massenformel

- Kerne gebunden durch kurzreichweitige Kernkräfte: 5 empirische Terme erforderlich zur Beschreibung der Bindungsenergie E_B/A als Funktion der Massenzahl A

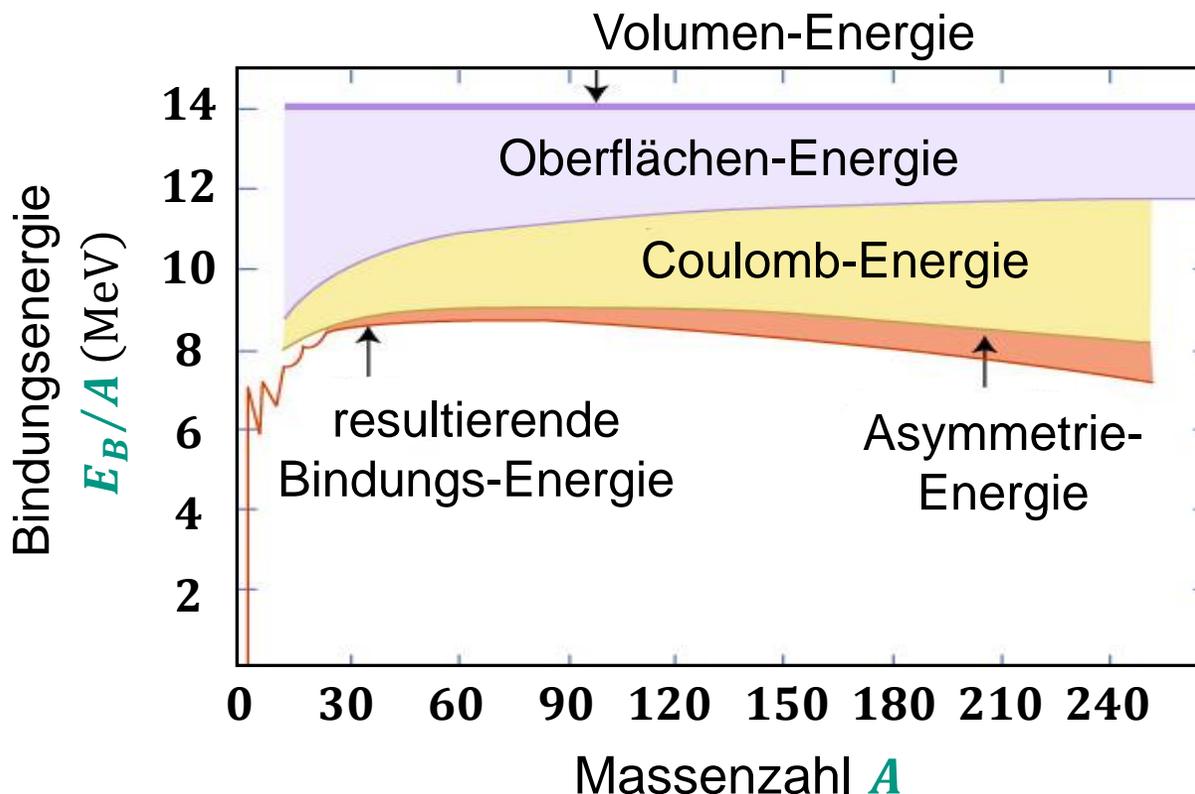


Q: nach: leifphysik,wikipedia

Tröpfchenmodell – Anpassung der Terme

■ Terme zur Bethe-Weizsäcker Massenformel – experimentelle Befunde

$$E_B(Z, A) = a_V \cdot A - a_S \cdot A^{2/3} - a_C \cdot Z^2 \cdot A^{-1/3} - a_A \cdot \frac{(N-Z)^2}{A} + \delta(Z, A)$$



Z : Kernladungszahl, A : Massenzahl

N : Anzahl Neutronen, δ : Paarungsterm

Beitrag	Faktor a	Größe (MeV)
Volumenterm	a_V	15,58
Oberflächenterm	a_S	16,91
Coulombterm	a_C	0,71
Asymmetrieterm	a_A	23,21
Paarungsterm	a_P	11,46

Werte aus Anpassung an Kerndaten mit $A > 40^*$

Tröpfchenmodell & Kernmassen

- **Kernmassen:** die berechneten Bindungsenergien können verglichen werden mit experimentell **gemessenen Kernmassen M**

Kernmasse

$$M(Z, A) = Z \cdot M_p + N \cdot M_n - E_B(Z, A)$$

MeV: 938,27 939,57 ~ 8 ... 9

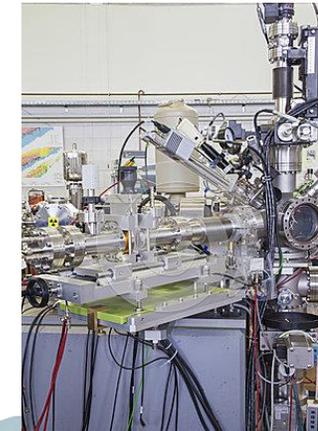
$$E_B/A \sim \alpha_S^2 \cdot m_N$$

α_S : Kopplung der starken Wechselwirkung (= 0,15)

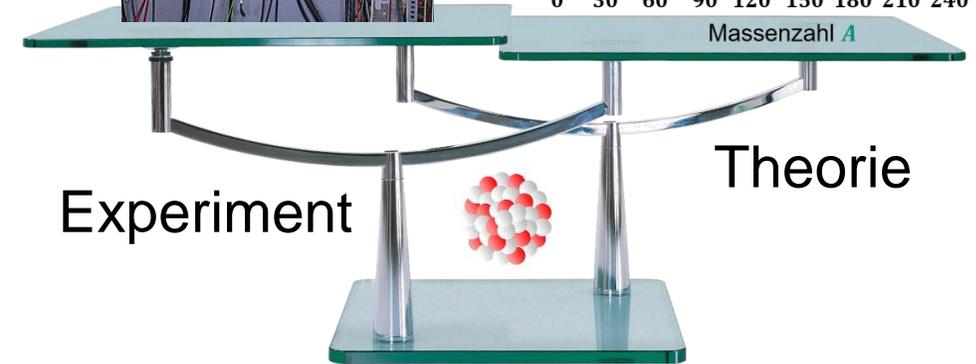
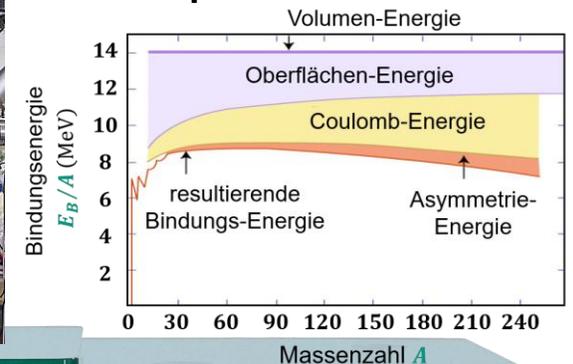
Bindungsenergie des Kerns

klein, ~1 % **der Nukleon-Masse**

Massenspektrometer



Tröpfchenmodell



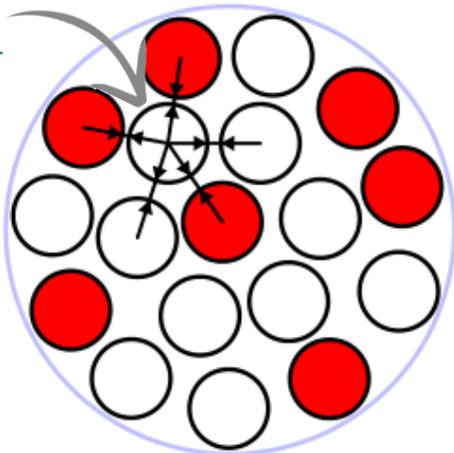
Volumenterm – gesättigte Kernkräfte

■ Volumenterm: $\sim 15 \text{ MeV}$ Bindungsenergie pro Nukleon (E_B/A)

- ein Ensemble von freien Nukleonen wird durch **starke Kernkraft** gebunden
- zwischen Nukleonen wirken kurzreichweitige*, gesättigte Kernkräfte:
damit: $E_B/A = \text{const.}$

Nukleon

#1



Nukleon-Wechselwirkung nur mit direkten Nachbarn:

Nukleon #1: Ww. nur mit engsten Nachbarn

⋮

Nukleon #A: Ww. nur mit engsten Nachbarn

⇒ Anzahl der Wechselwirkungen $\sim A$

⇒ $E_B/A = \text{const.}$

Kern mit A Nukleonen

Q: wikimedia

gesättigte Kernkräfte: Ursache

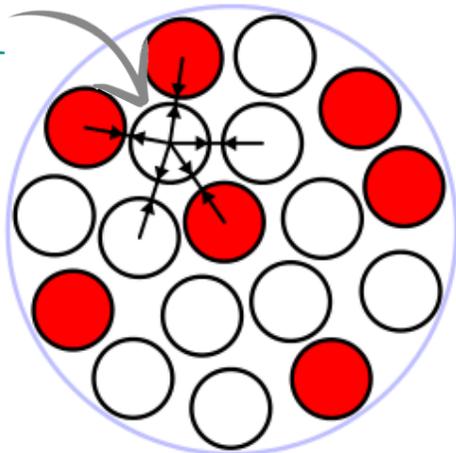
■ Semi-empirisches Modell: Austauschwechselwirkung durch Pionen

- Modell der **Nukleon-Nukleon Wechselwirkung** via Pion-Austausch-Prozesse
- kurzreichweitige, gesättigte Kernkräfte:

$$E_B/A = \text{const.}$$

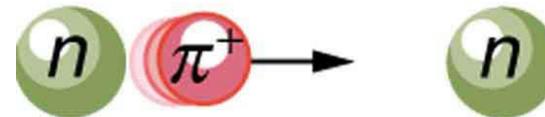
Nukleon

#1



Kernradius ~
einige fm

Kern mit A Nukleonen



Pion-Austausch
ist **kurzreichweitig!**

starke Kernkraft: vermittelt durch Pionen

■ Pionen sind kurzlebige Quark-Antiquark Systeme & die „Austauschteilchen“ der starken Kernkraft

- Austausch **virtueller Pionen** über Heisenbergsche Unschärferelation:

$$\Delta E \Delta t \leq \frac{\hbar}{2}$$



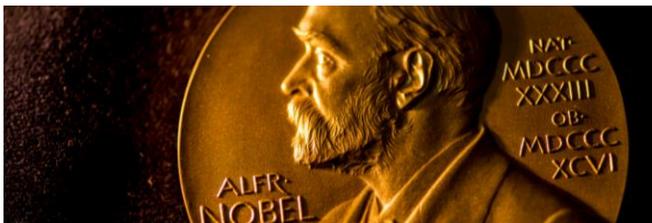
$140 \text{ MeV}/c^2$ Weg $c \cdot \Delta t \sim 1 \text{ fm}$

QCD
später

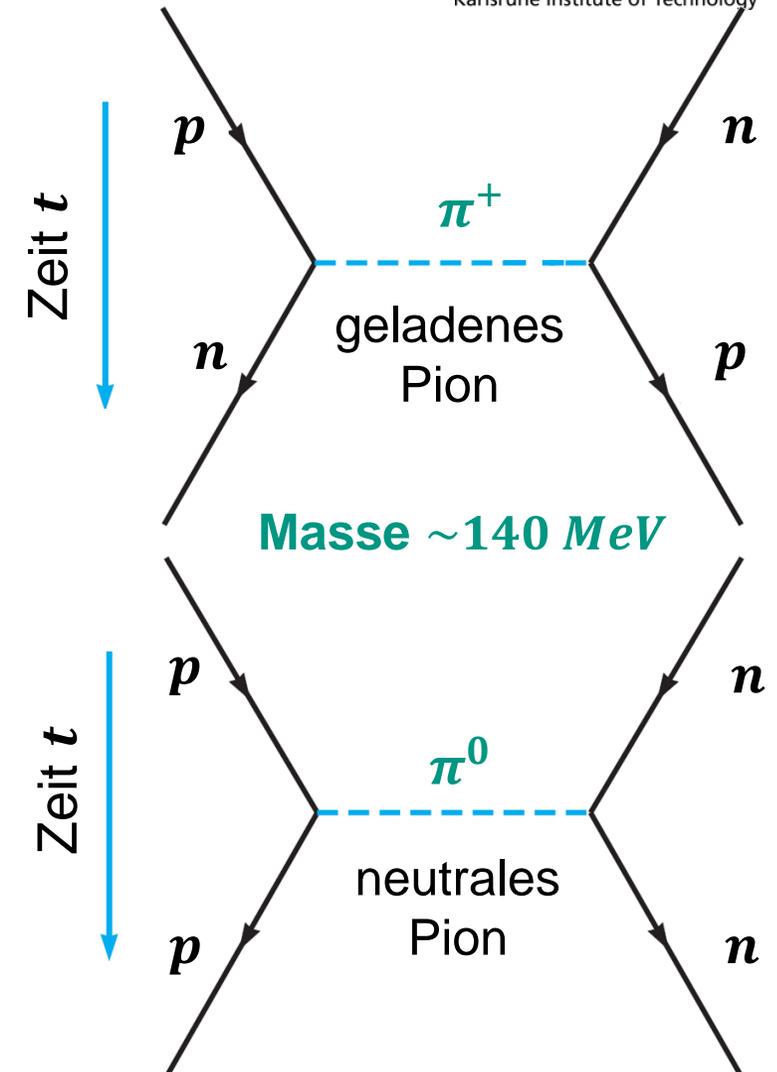
“for his prediction of the existence of mesons on the basis of theoretical work on nuclear forces”



Q: nobelprize



- 1949: 湯川 秀樹 (Hideki Yukawa)



starke Kernkraft: vermittelt durch Pionen

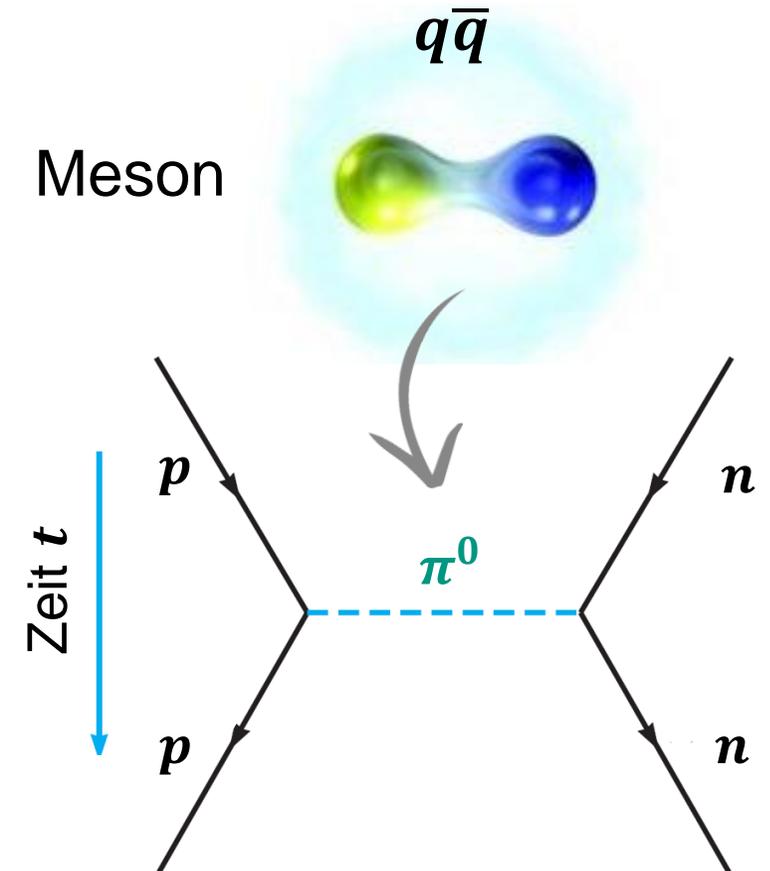
■ Pionen sind kurzlebige Quark-Antiquark Systeme & die „Austauschteilchen“ der starken Kernkraft

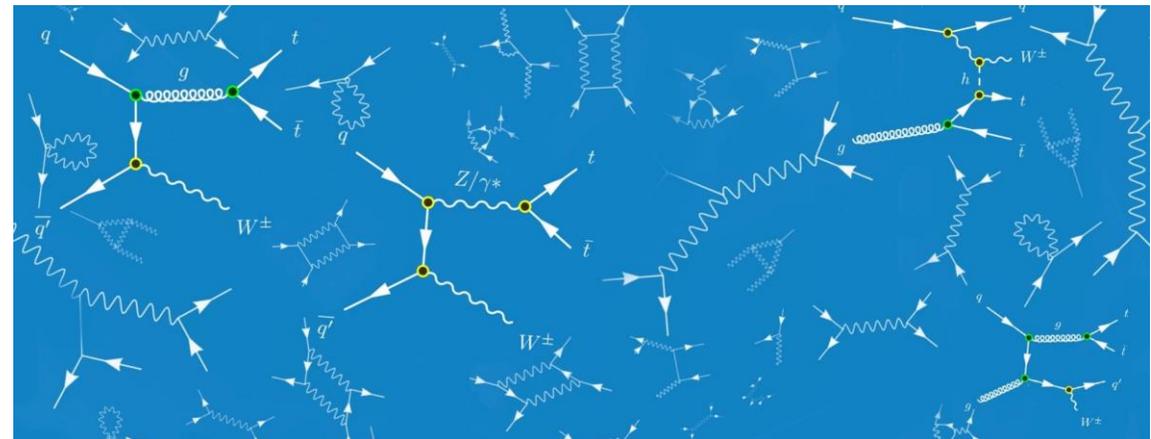
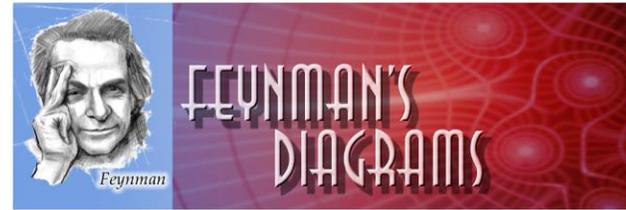
- Austausch **virtueller Pionen** über Heisenbergsche Unschärferelation

ein (reelles) Pion ist:

- kein elementares Teilchen
- kein stabiler Zustand (Zerfall, z.B. $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$)
- ein **Meson**, d.h. ein gebundener Zustand Quark – Antiquark $q\bar{q}$
- Teil eines (Isospin-) Triplets (π^+ , π^0 , π^-)

Masse $\sim 140 \text{ MeV}$



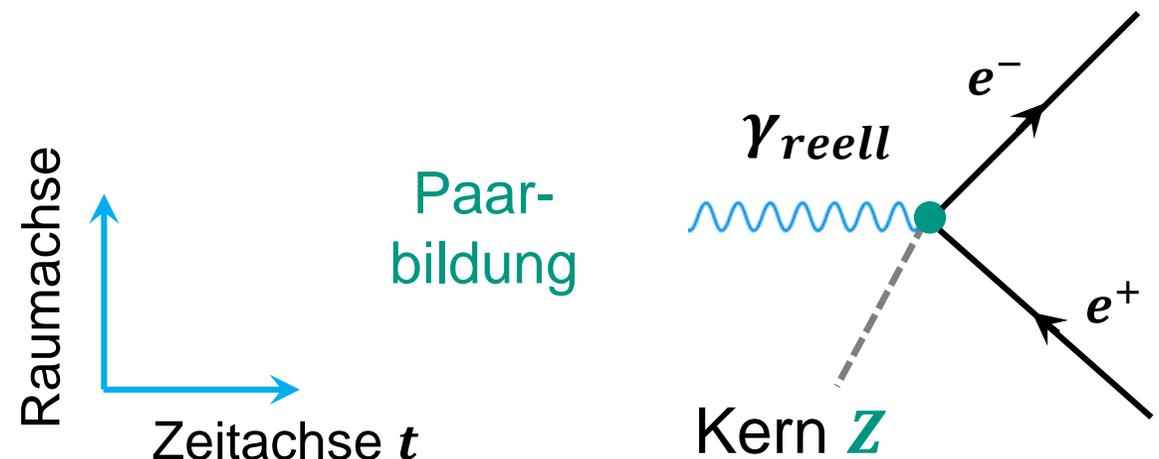
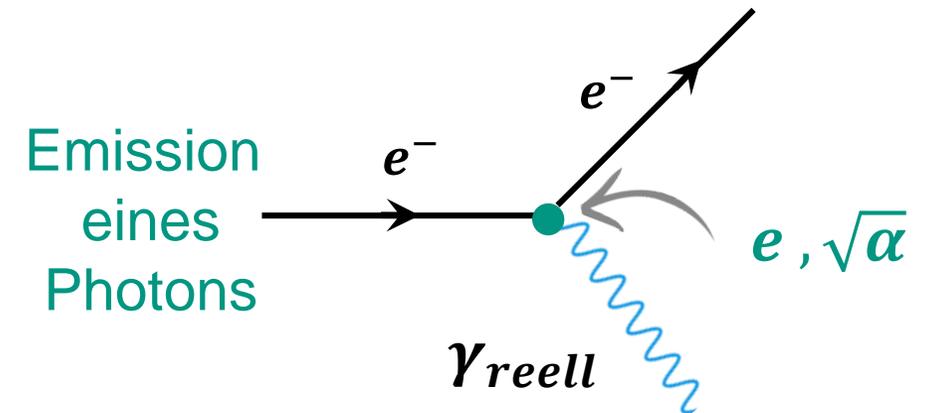


EINSCHUB – FEYNMAN DIAGRAMME

Feynman-Diagramme: Grundlagen

■ 'Visualisierung' von Prozessen & wichtiges Tool für Berechnungen

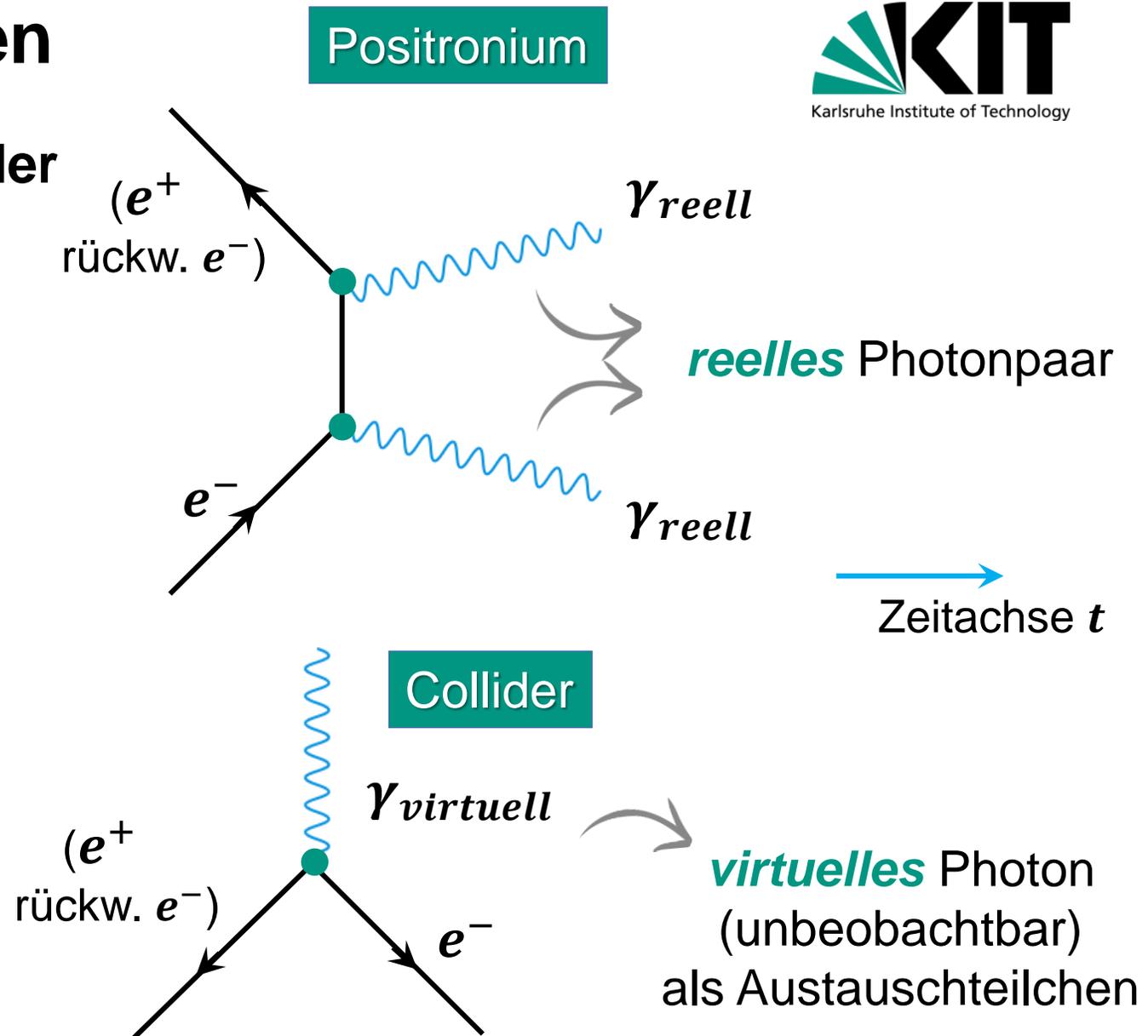
- konkrete Rechenregeln (Störungstheorie) für Wechselwirkungen (Impulse q , ...)
- zu einem physikalische Prozess tragen oft **mehrere Feynman-Diagramme** bei (dabei: **Interferenz der Amplituden**)
- Erzeugung/Vernichtung von Teilchen an einem **Vertex**: ●
- Kopplungskonstante: e bzw. $\sqrt{\alpha}$
- Antiteilchen: e^+ als rückwärts laufendes e^- in der Zeit t



Reelle und virtuelle Teilchen

■ Beispiele: Positronium* \leftrightarrow Collider

- Energie/Impulserhaltung erfordert Erzeugung von **2 reellen Photonen**
- Energie- und Impulserhaltung verbieten Produktion eines einzelnen (reellen) Photons, erlaubt Bildung eines einzelnen **virtuellen Photons** (\rightarrow andere Energie-Impuls-Relation!)



virtuelle Photonen: Eigenschaften

■ Virtuelle Photonen als Träger des elektromagnetischen Felds

- Wechselwirkungen werden vermittelt durch Austausch **virtueller Teilchen**

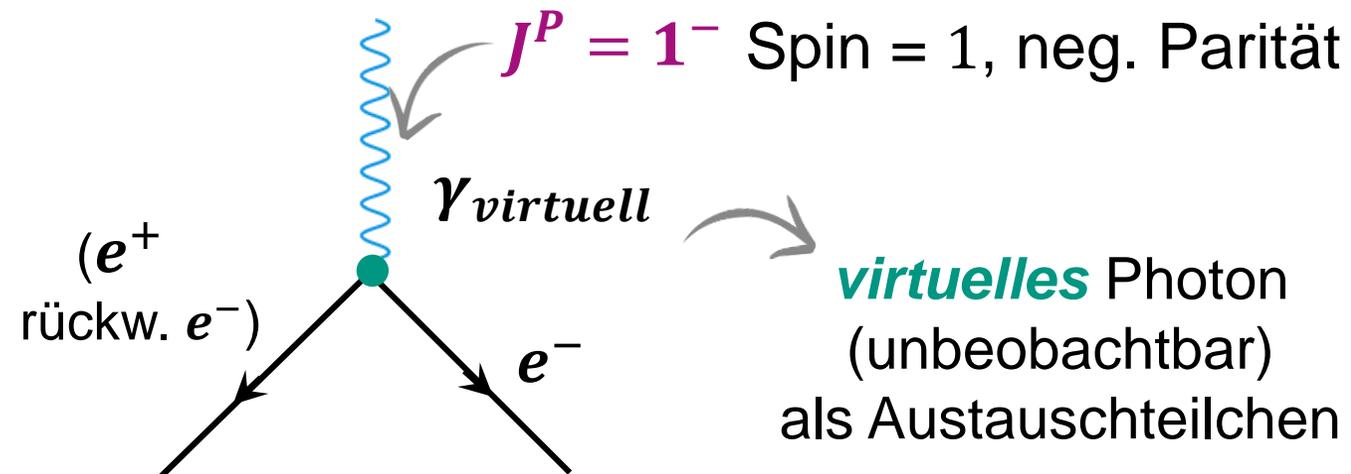
$$\Delta x \Delta p \leq \frac{\hbar}{2}$$
$$\Delta E \Delta t \leq \frac{\hbar}{2}$$



Heisenberg'sche Unschärferelation

- virtuelle Teilchen mit Masse - endliche Reichweite Δx
- kurze Lebensdauer τ

- virtuelles Photon kann z.B. ein **Myon-Antimyon** Paar erzeugen
- virtuelle Teilchen: verantwortlich für **Lamb-Shift*** (H - Atom)

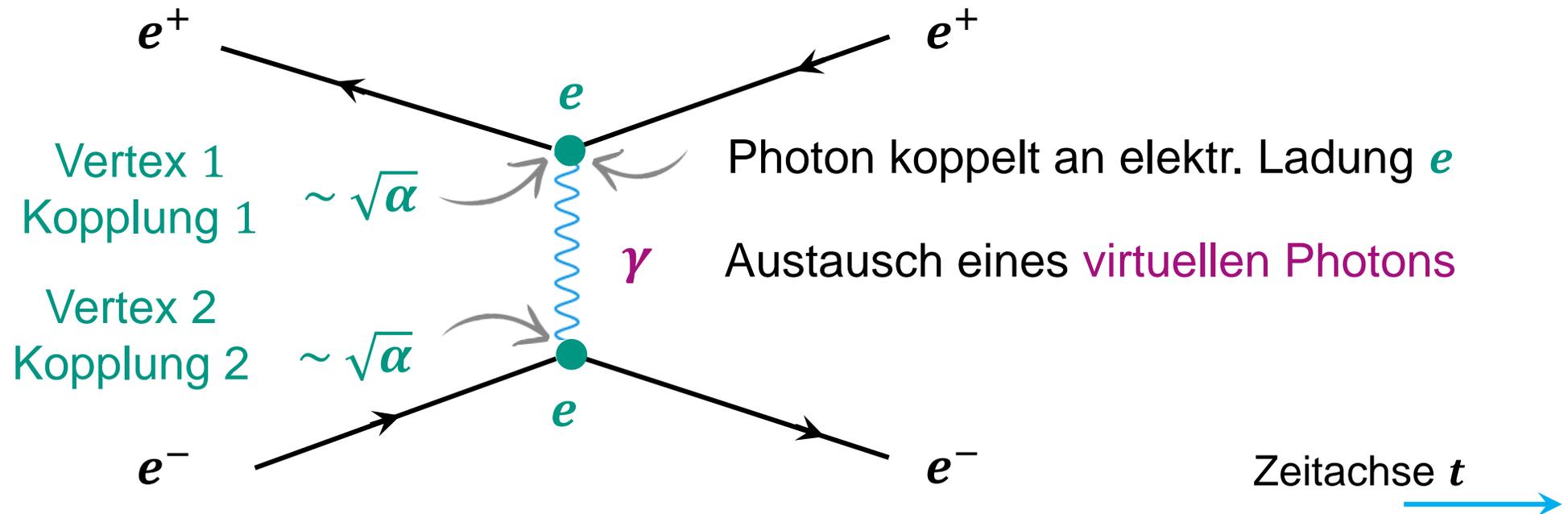


Elektromagnetische Streuprozesse

- **Kopplungsstärke** der elektromagnetischen Wechselwirkung* - **Feinstrukturkonstante** α

$$\alpha = \frac{e^2}{2\varepsilon_0 \cdot hc} \approx \frac{1}{137}$$

- Beispiel: **Elektron-Positron Streuung** - vermittelt über virtuelles Photon



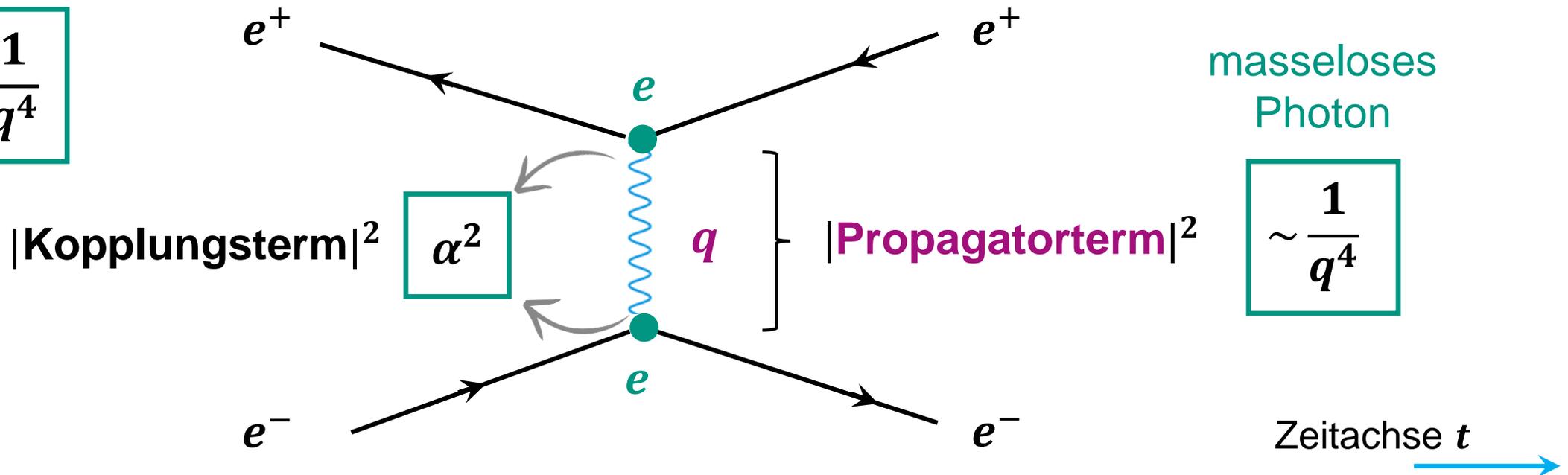
Elektromagnetische Streuprozesse

■ Virtuelles Photon verantwortlich für Impulstransfer q

- **Propagator:** Wahrscheinlichkeitsamplitude für γ – Propagation Vertex **1** \rightarrow Vertex **2**

- **Prozess:** $e^+ - e^-$ Streuung (oder andere elektromagnetische Prozesse) erfordert \rightarrow Wahrscheinlichkeitsamplitude²

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \sim \alpha^2 \cdot \frac{1}{q^4}$$

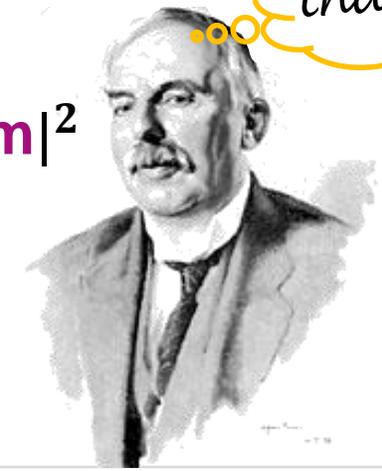


Elektromagnetische Streuprozesse

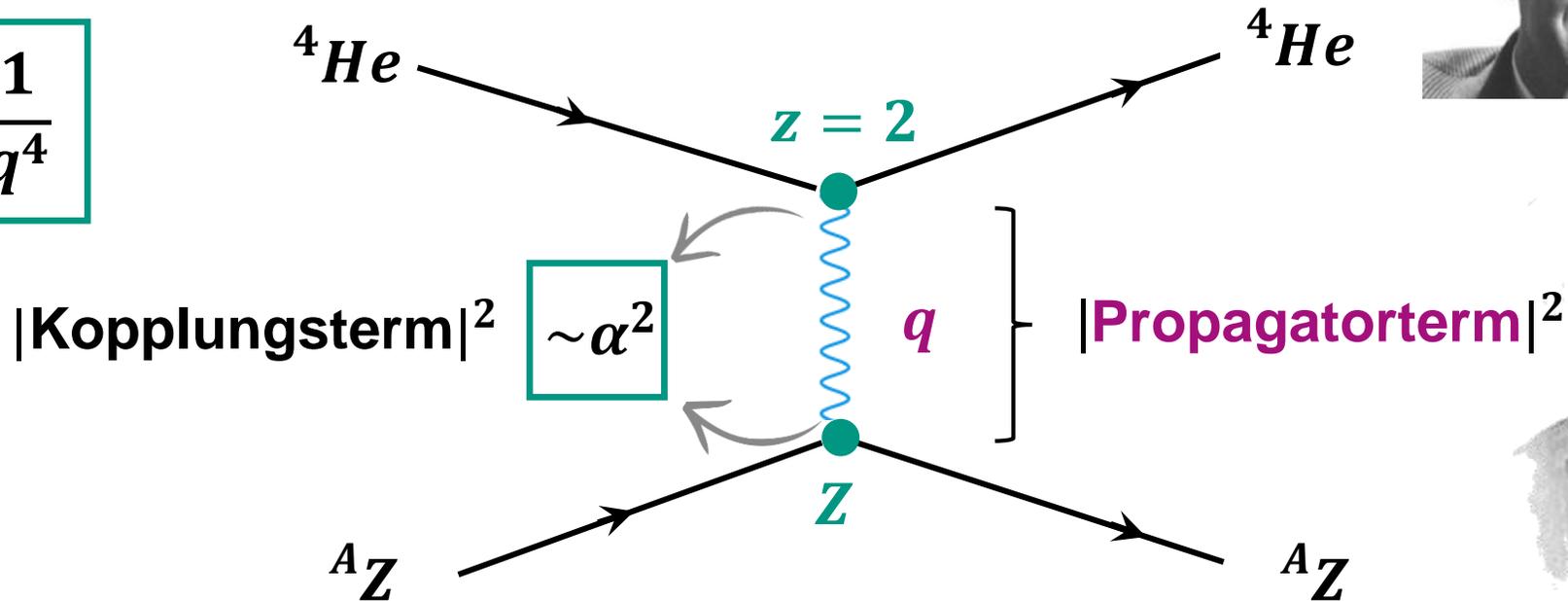
■ Virtuelles Photon verantwortlich für Impulstransfer q

- **Propagator:** Wahrscheinlichkeitsamplitude für γ – Propagation Vertex **1** \rightarrow Vertex **2**

- **Prozess:** $d\sigma/d\Omega$ bei Rutherford-Streuung, s. VL 2):
nur korrekte Ladungen z, Z an Vertices einsetzen

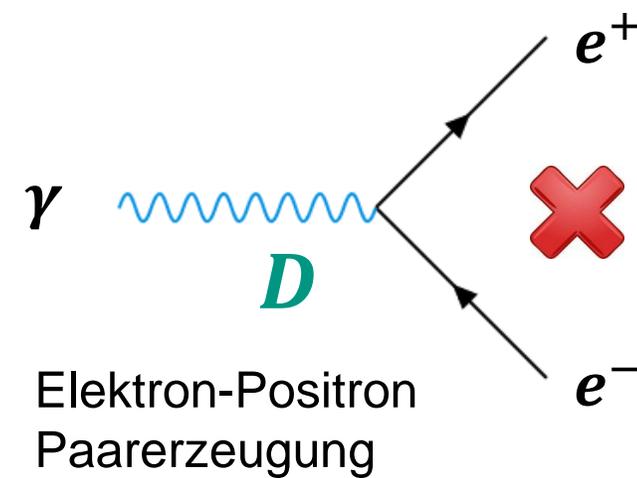
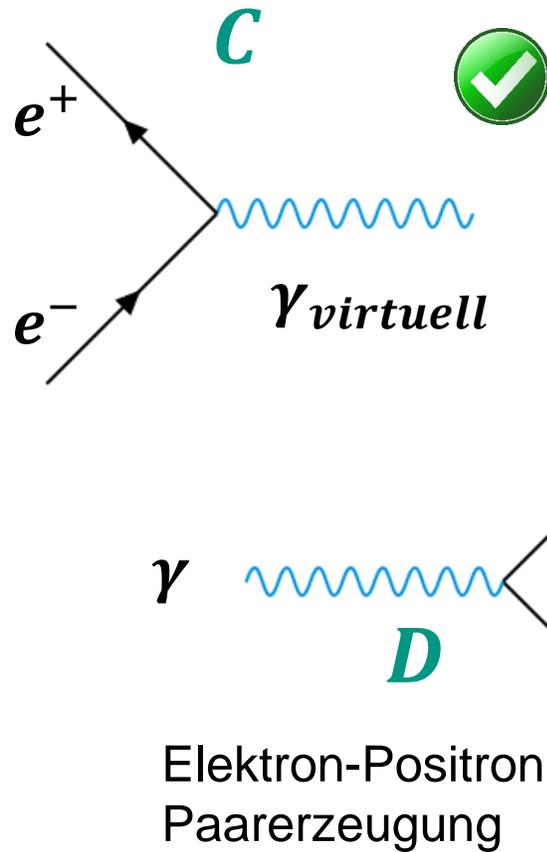
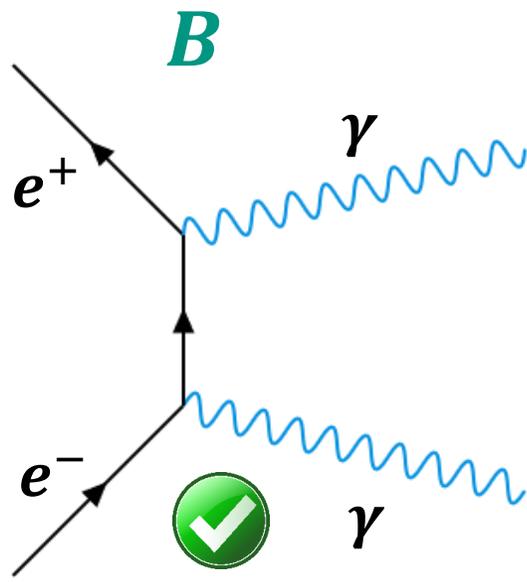
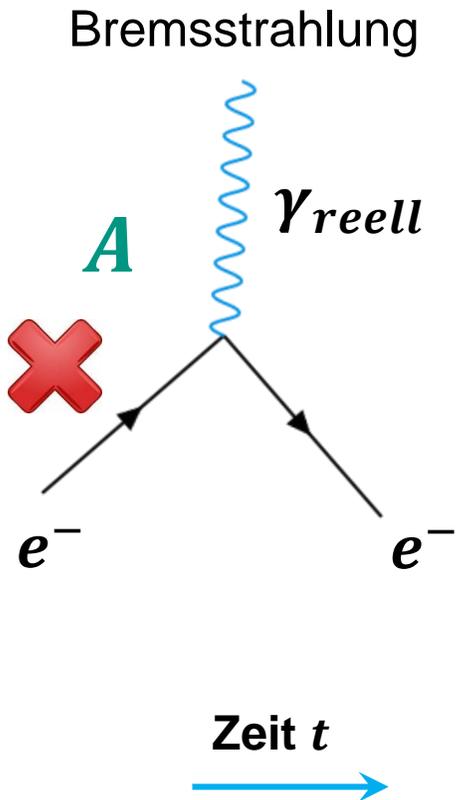


$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \sim \alpha^2 \cdot \frac{1}{q^4}$$



Fun with a Feynman-diagram

- Frage: Welche Feynman-Diagramme stehen für die Vernichtung eines Elektron-Positron-Paares $e^- - e^+$?



SHELDON COOPER
 presents
 FUN WITH FLAGS
 a Feynman diagram



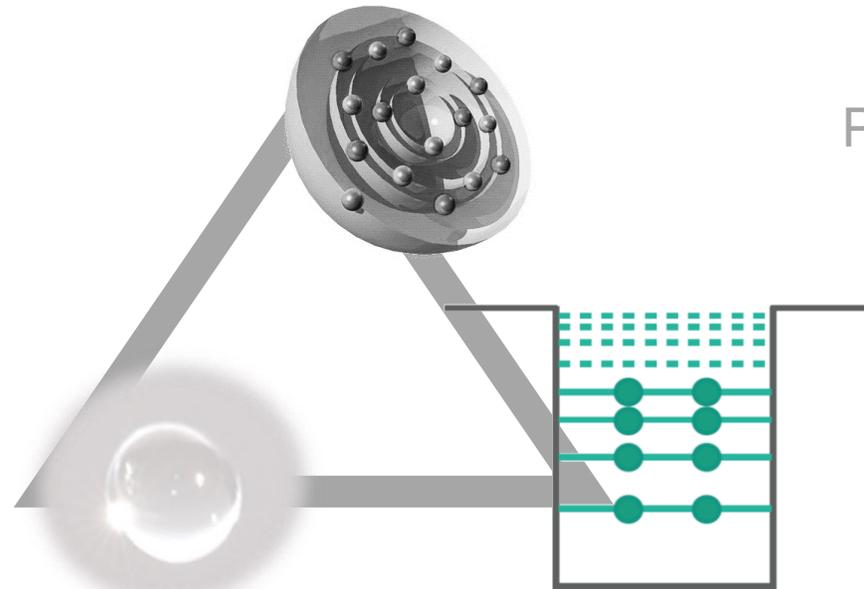
Kernmodelle – das Fermigasmodell

■ Fermigasmodell von Enrico Fermi

Schalenmodell

Nukleonen bewegen sich voll quanten-mechanisch

Schrödinger-Gleichung
Potenzial mit vielen Termen



Tröpfchenmodell

- Kerne als inkompressible, geladene „Flüssigkeitstropfen“
- Beschreibung von B/A und Spalt-/Fusionsprozessen

Fermigasmodell

Nukleonen bewegen sich **unabhängig** voneinander in gemeinsamen Potenzial

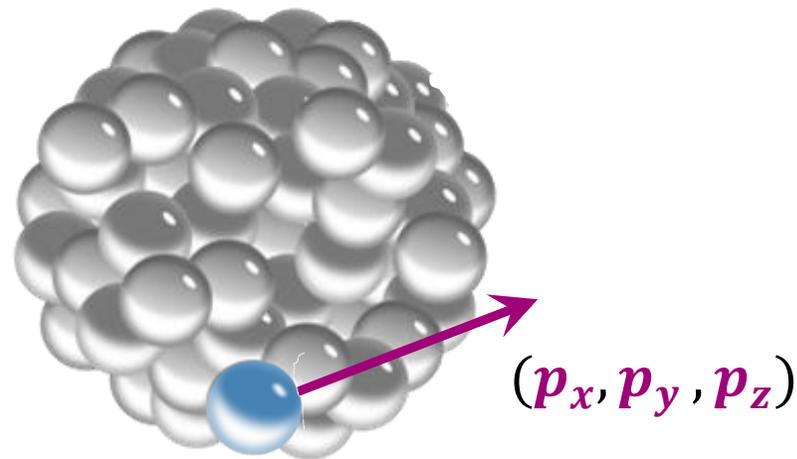
Fermigasmodell - Kernphysik

■ Fermigas-Modell: freies Nukleonengas

- Nukleonen ($A < 250$) bewegen sich...

a) ... mit **Fermi-Impuls** p_F ($250 \text{ MeV}/c$)

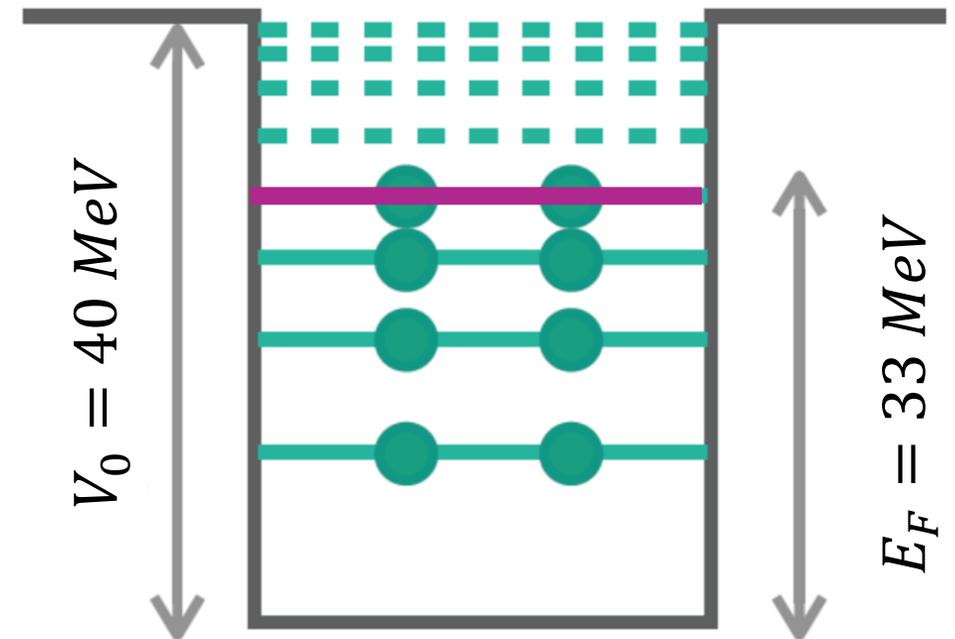
b) ... stoßfrei



- Zustandsdichte $\sim \sqrt{E}$

Q: wikipedia commons

Fermi-Energie: $E_F \sim 33 \text{ MeV}$



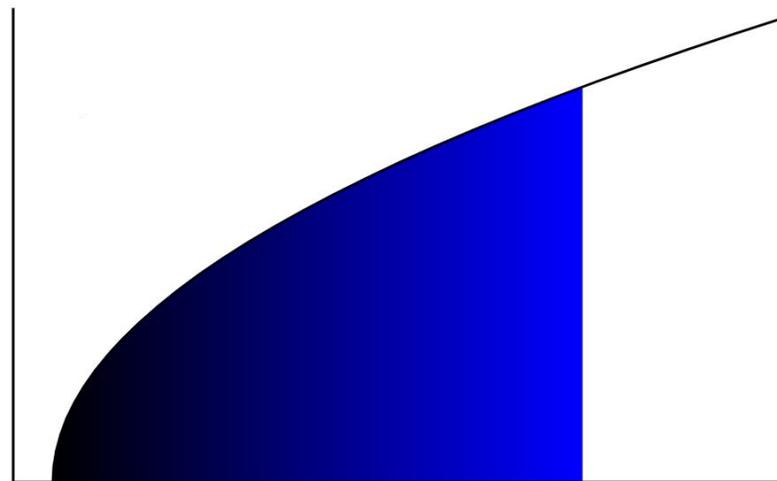
Austrittsarbeit: $W \sim 7 \text{ MeV}$

Potenzialtiefe: $V \sim 40 \text{ MeV}$

Fermigasmodell - Festkörper

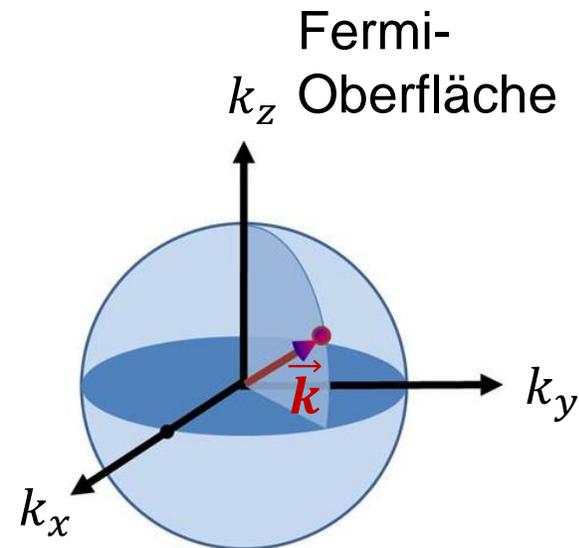
■ Fermigas-Modell: Recap freies Elektronengas*

- Elektronen in Metall: $10^{28} \dots 10^{29} / m^3$
- Fermigas mit $T \sim 0$

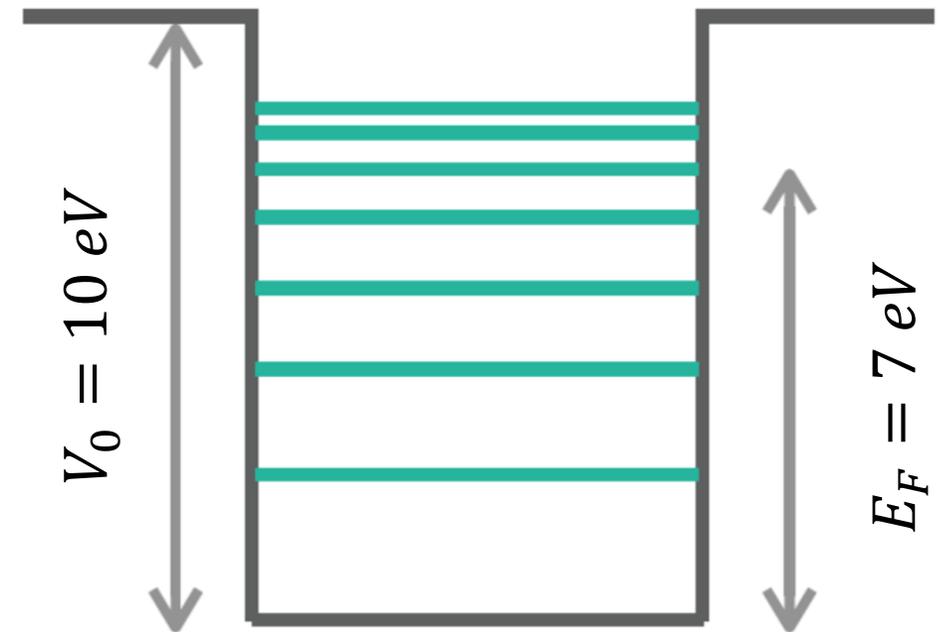


- Zustandsdichte $\sim \sqrt{E}$

Q: wikipedia commons



Fermi-Energie: $E_F \sim 7 \text{ eV}$



Austrittsarbeit: $W \sim 3 \dots 4 \text{ eV}$

Potenzialtiefe: $V \sim 10 \text{ eV}$

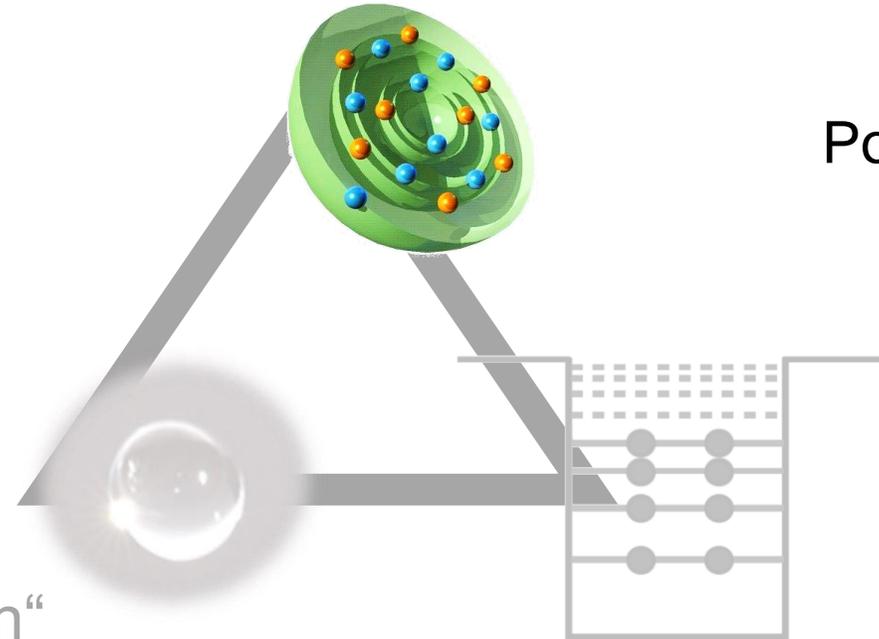
Kernmodelle: das Schalenmodell

■ Schalenmodell des Kerns von Maria Göppert-Mayer

Schalenmodell

Nukleonen bewegen sich
voll quanten-mechanisch

Schrödinger-Gleichung
Potenzial mit vielen Termen



Tröpfchenmodell

- Kerne als inkompressible, geladene „Flüssigkeitstropfen“
- Beschreibung von B/A und Spalt-/Fusionsprozessen

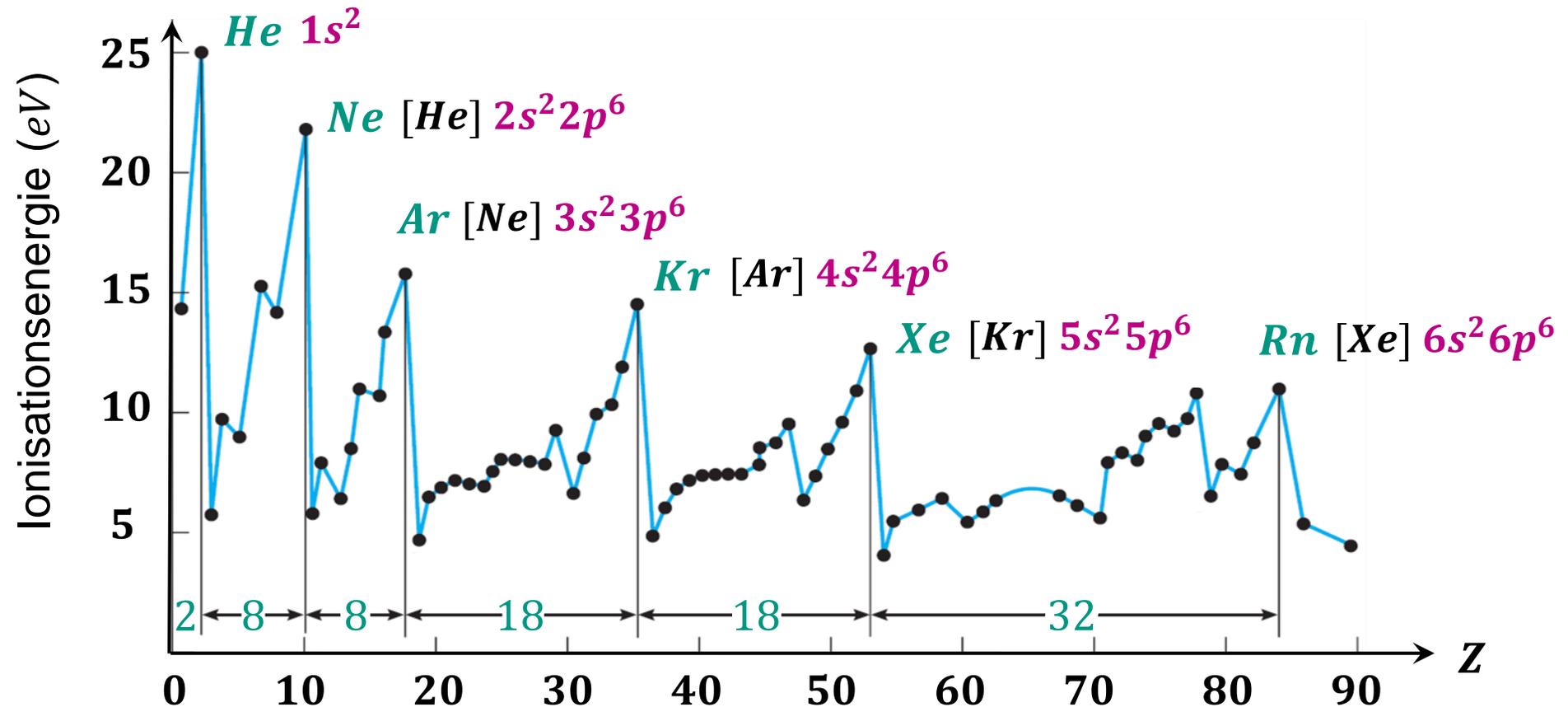
Fermigasmodell

Nukleonen bewegen sich
unabhängig voneinander
in gemeinsamen Potenzial

Schaleneffekte in der Atomphysik

■ Schalenstruktur der Elektronen in der Atomhülle*

- basiert auf **Aufbau-Prinzip von Madelung** bei $Z = 2, 10, 18, 36, 54,$



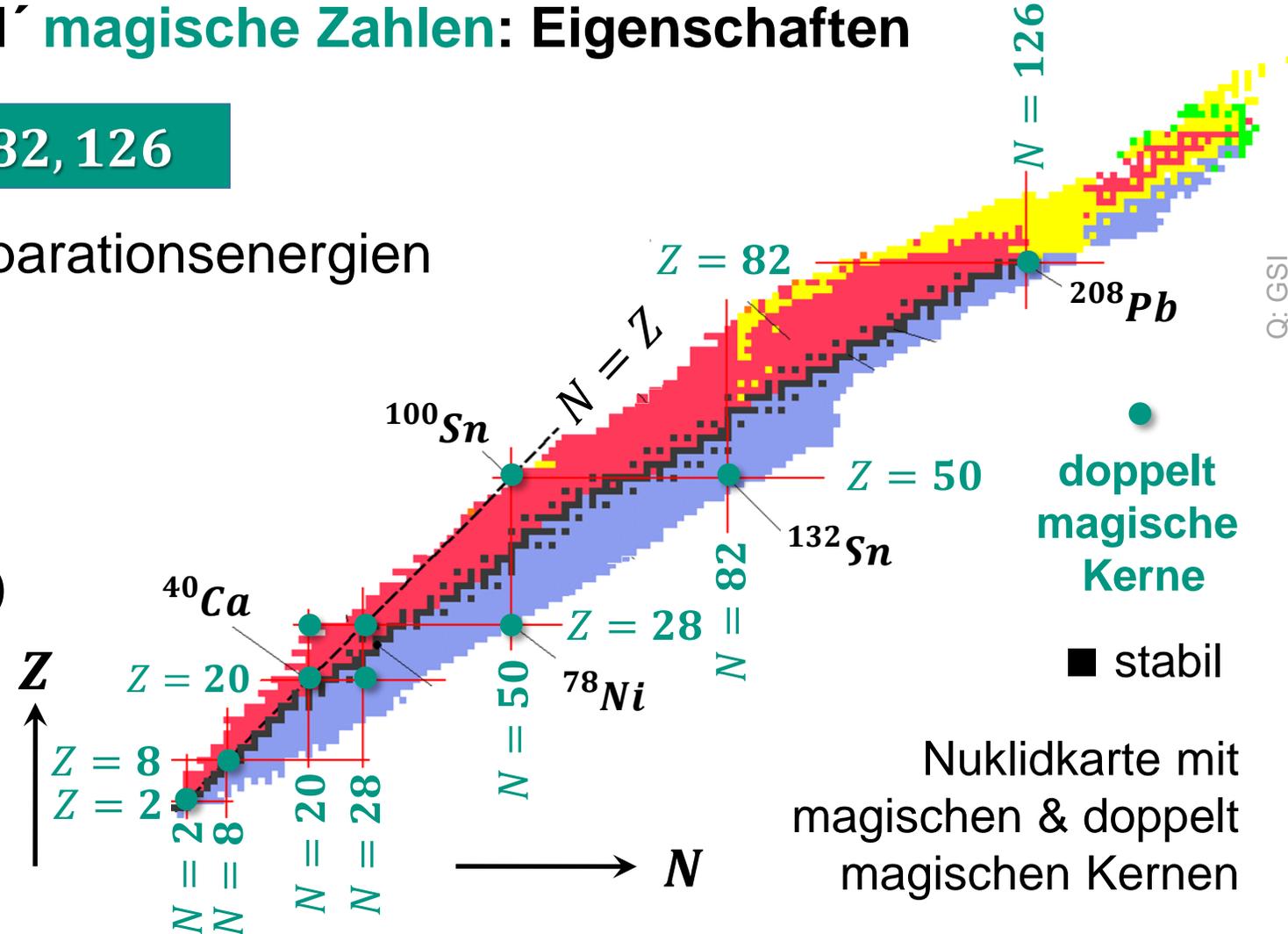
Q: Serway/
Moses/Moyer

Schaleneffekte in der Kernphysik

■ Nuklide zeigen 'experimentell' magische Zahlen: Eigenschaften

Z oder $N = 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$

- hohe Bindungsenergien / Separationsenergien
- hohe Anregungsenergie des ersten angeregten Zustands
- große Anzahl an Isotopen (Isotonen) bei gleichem Z (N)
- kleine Einfangquerschnitte für Neutronen
- große relative Häufigkeit

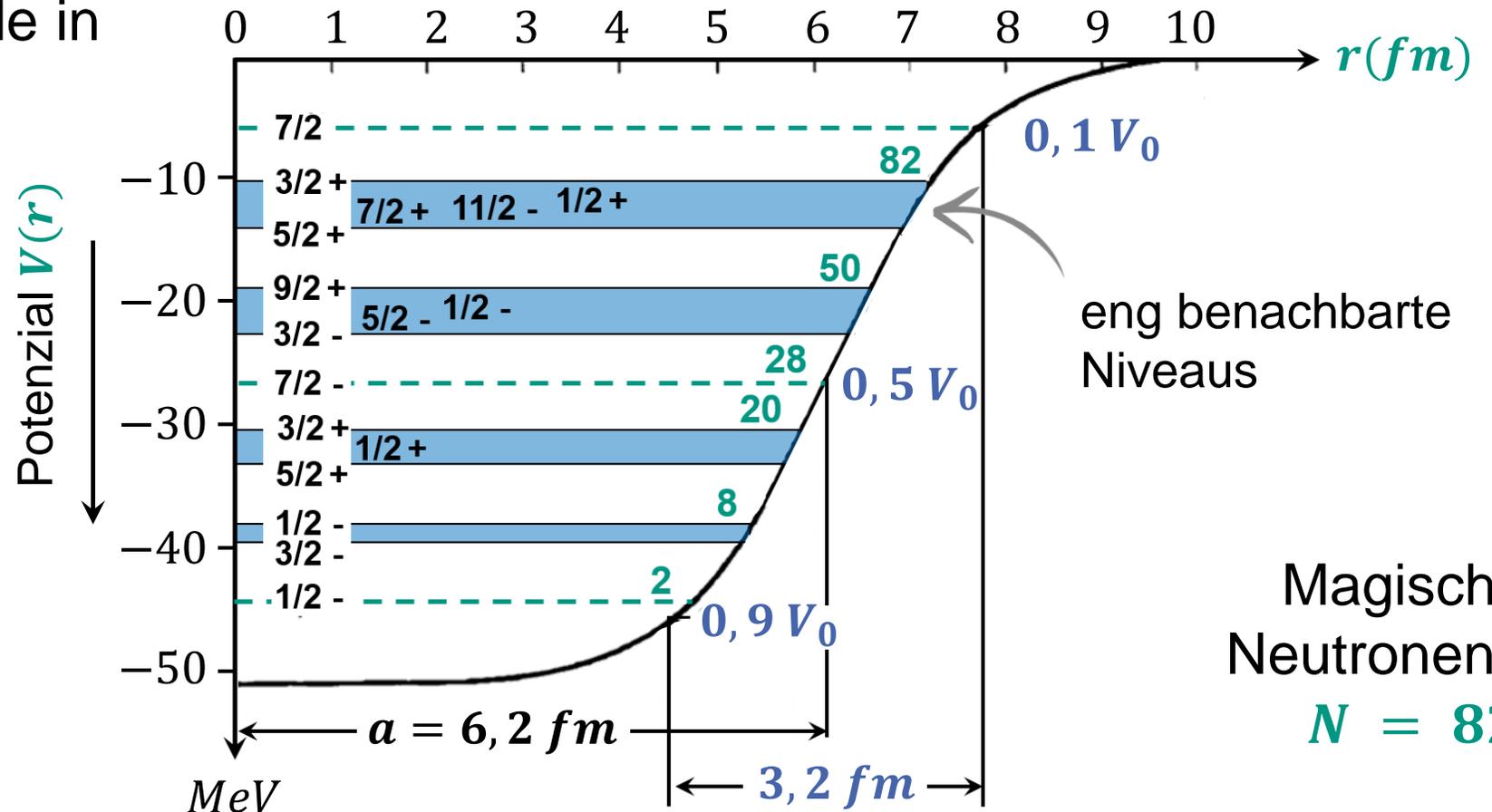
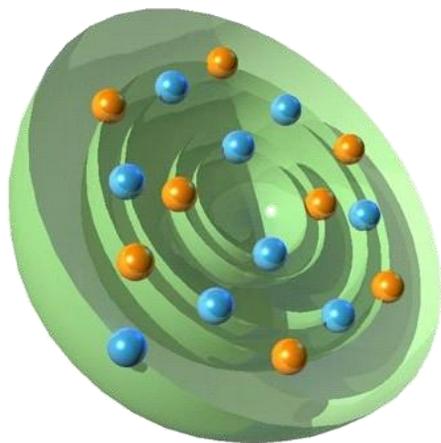


Schalenmodell der Kerne

■ Schalenmodell-Rechnungen* für einen mittelschweren Kern mit $N = 82$

- Einteilchenzustände in
Potential:

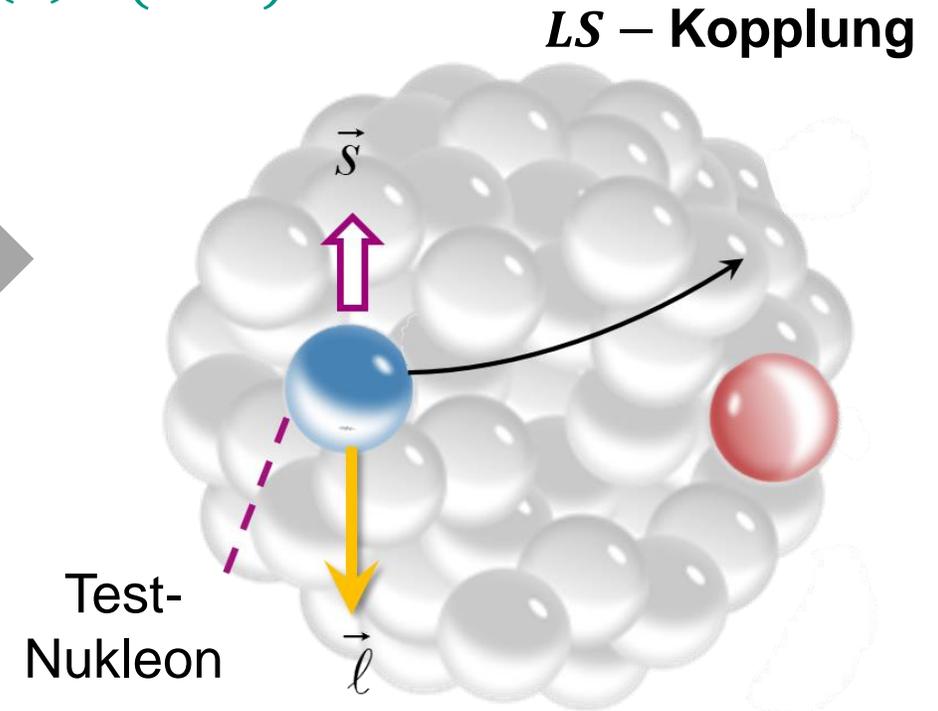
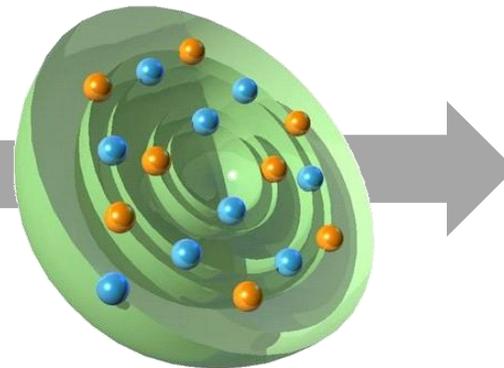
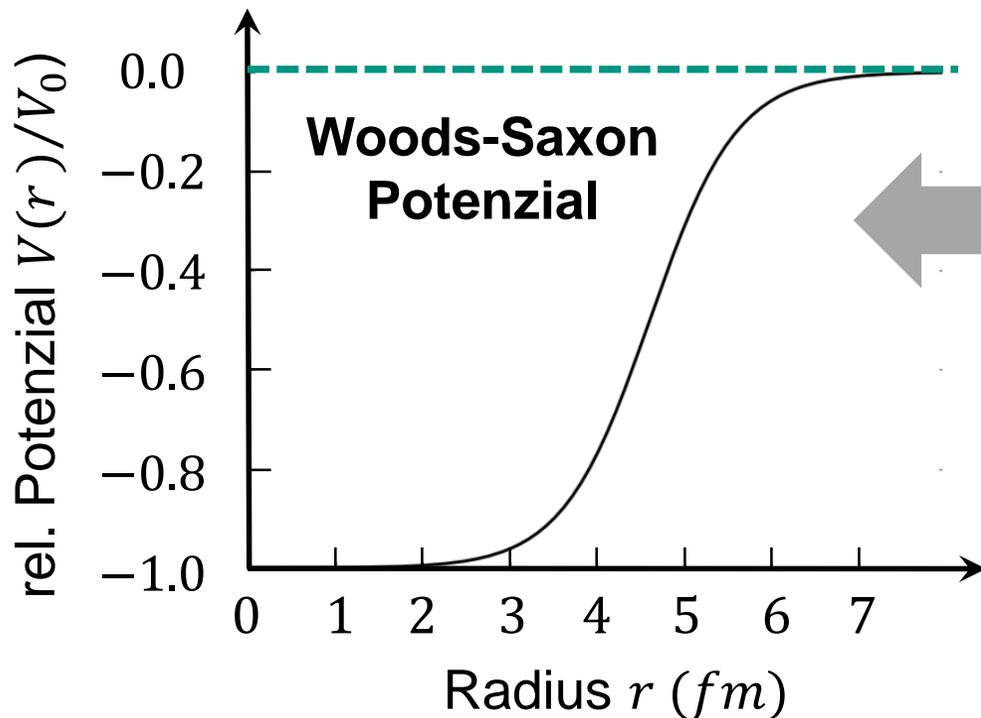
Woods-Saxon
LS – Kopplung



Schalenmodell der Kerne

- Grundlage: Kombination radial-abhängiges Woods-Saxon Potenzial $V(r)$ mit Zusatzterm $V_{\ell s}(r)$ durch **Spin-Bahn-Kopplung** von Nukleonen*

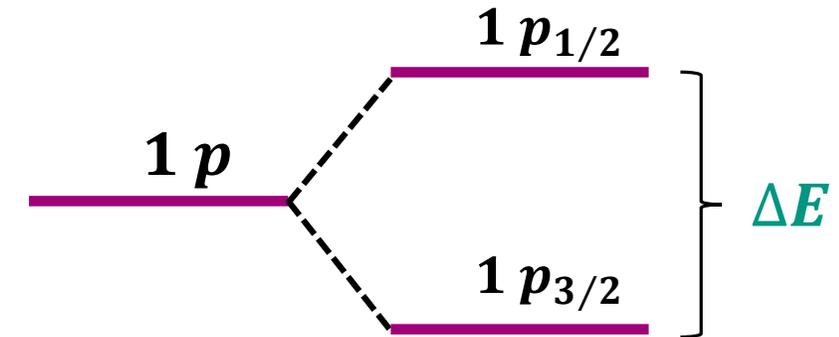
$$V(r) = V_0 / (1 + e^{(r-a)/d}) + V_{\ell s}(r) \cdot (\vec{\ell} \cdot \vec{s})$$



Spin – Bahn – Kopplung in der Kernphysik

■ radial-abhängiges Woods-Saxon Potenzial mit Zusatzterm zur Beschreibung der Spin-Bahn-Kopplung

- **Spin-Bahn-Kopplung** bei der starken Kernkraft führt (überraschend für die Theorie der damaligen Zeit) zu **wesentlich größeren Niveau-Aufspaltungen**



Aufspaltung $\Delta E >$ Niveauabstand

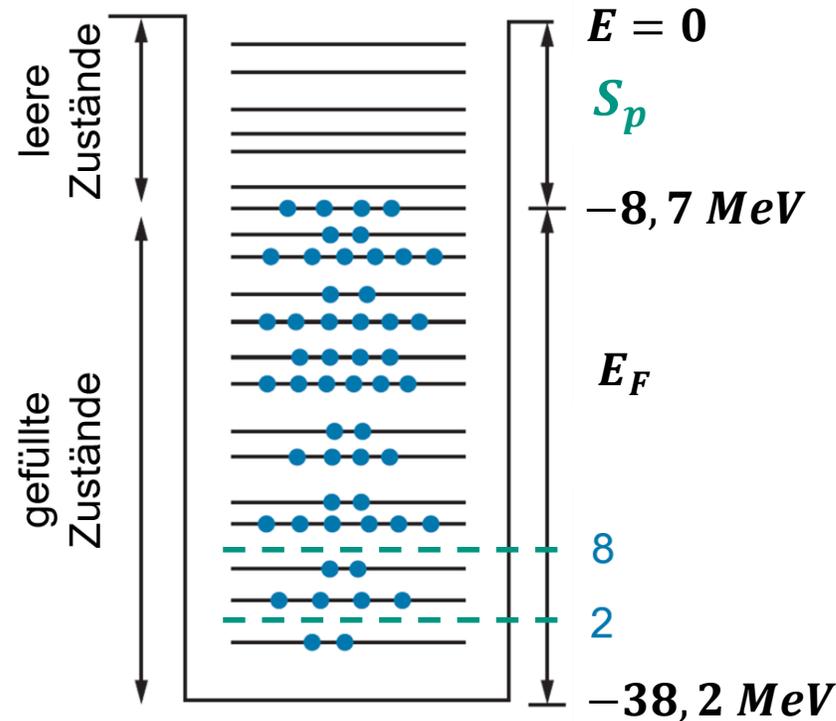
Vorzeichen umgekehrt wie bei Atomen

$$V_{\ell s}(\mathbf{r}) \cdot (\vec{\ell} \cdot \vec{s})$$

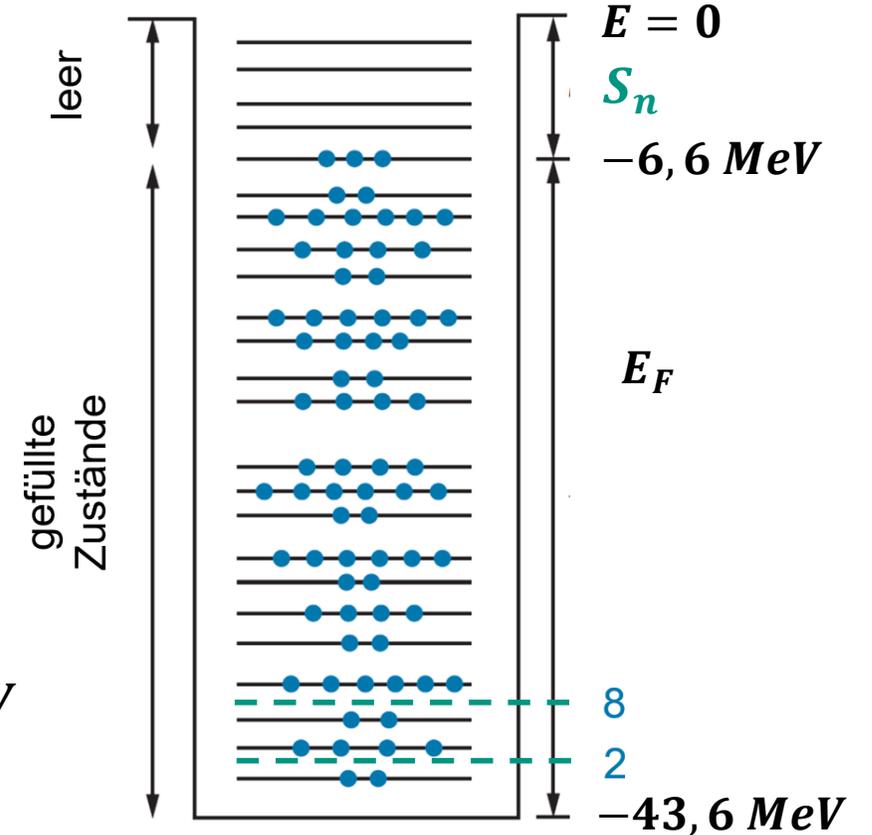
Einteilchen- und Einloch- Zustände

- Schalenmodell: abgeschlossene Schalen, verbleibendes Nukleon: **Leuchtnukleon**, fehlendes Nukleon: **Loch**

realistischer Kern:
Tellur-125

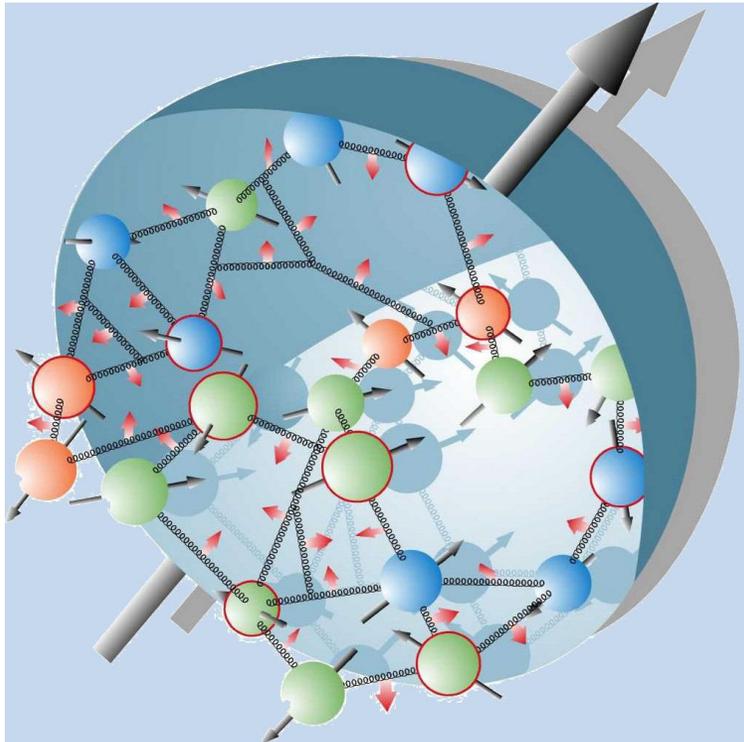


Zustände von **52 Protonen**



73 Neutronen

$S_{p,n}$:
Separations-Energie



KAPITEL 2.4 – STRUKTUR VON NUKLEONEN

Q: weltmaschine, nature

Nukleon als Prototyp eines Hadrons

■ Aufbau und Begrifflichkeiten

- **Hadronen**: alle stark wechselwirkende Teilchen – Proton, Neutron, Meson, ...
- **Leptonen**: alle nicht stark wechselwirkende Teilchen – Elektron, Neutrinos, ...

Protonmasse

Proton	$938,27 \text{ MeV}$
<i>up</i> –Quark	$\sim 1,5 \dots 3 \text{ MeV}$
<i>down</i> –Quark	$\sim 3 \dots 7 \text{ MeV}$

Λ^0 Lambda $m = 1115,6 \text{ MeV}$

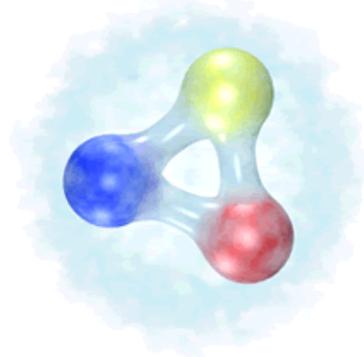
Σ^+ Sigma $m = 1189,4 \text{ MeV}$

Δ^+ Delta $m = 1232 \text{ MeV}$

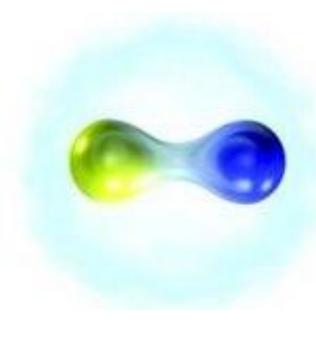
Hadronen

Baryonen

Mesonen



Proton, Neutron



Pion, Kaon

π^+ Pion $m = 139,6 \text{ MeV}$

K^+ Kaon $m = 493,7 \text{ MeV}$

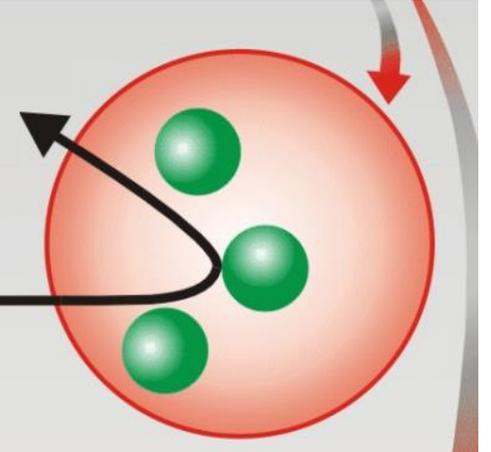
Struktur von Nukleonen aus Streuprozessen

■ Untersuchung der inneren Struktur von Nukleonen

- Nukleonen: typ. Struktur $< 1 \text{ fm}$
- erforderlicher Impulsübertrag*:
 $|q| > 200 \text{ MeV}/c$
- Projektil: leicht, punktförmig, Spin $\Rightarrow e^-$
- Target: gasförmiger Wasserstoff H_2 , D_2
- **Methode:** Streuung hochenergetischer Fermionen an Target, dabei: Rückstoß & Spins von e^- , p , n zu berücksichtigen

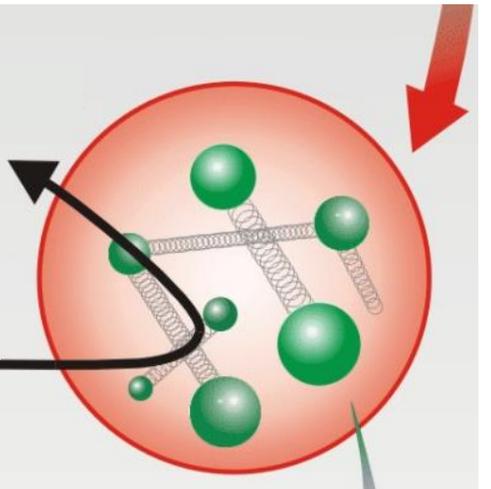
Friedman, 1962
Entdeckung Quarks

Elektronen



HERA (DESY), 1992
Aufbau des Protons

Elektronen, Myonen,
Neutrinos



Struktur von Nukleonen aus Streuprozessen

- Elektronen mit immer höherer Energie & höherem Impulstransfer $|q|$

kleiner Impulstransfer

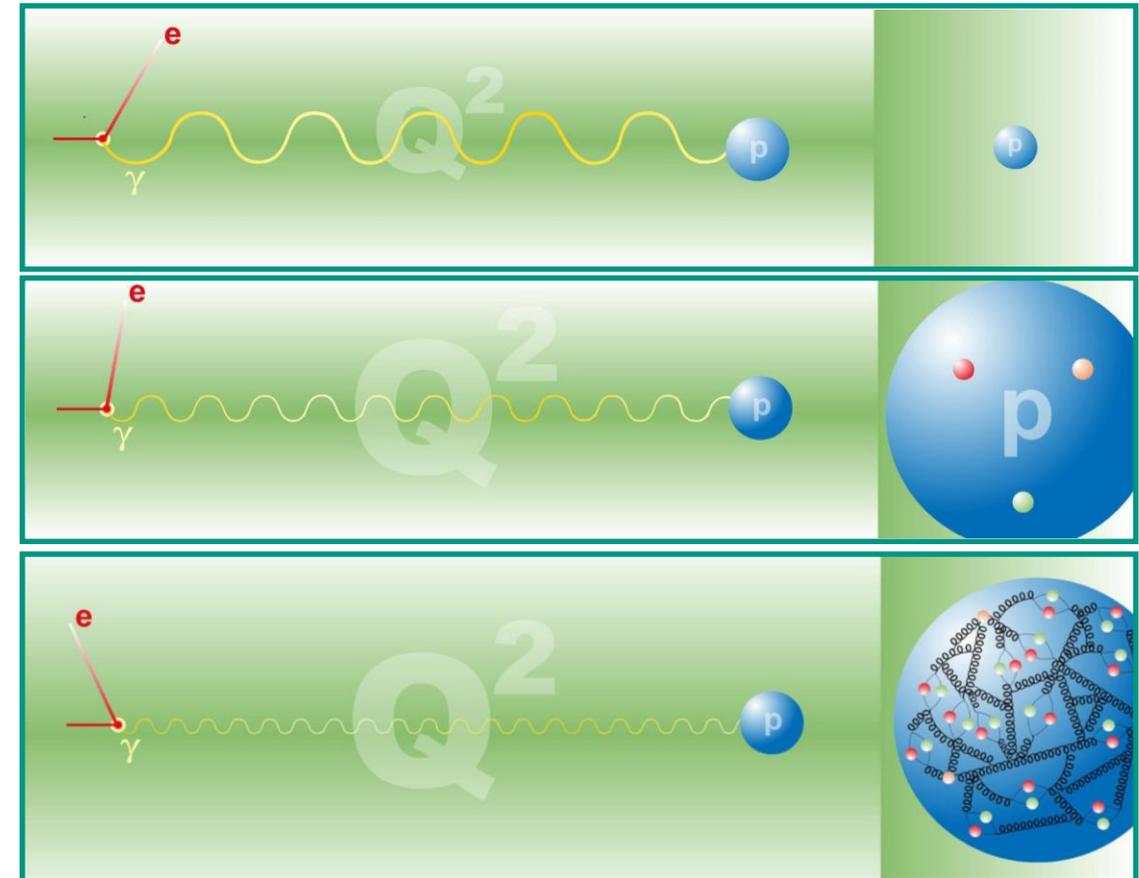
- Proton erscheint **strukturlos**
- exponentiell abfallende Ladungsverteilung

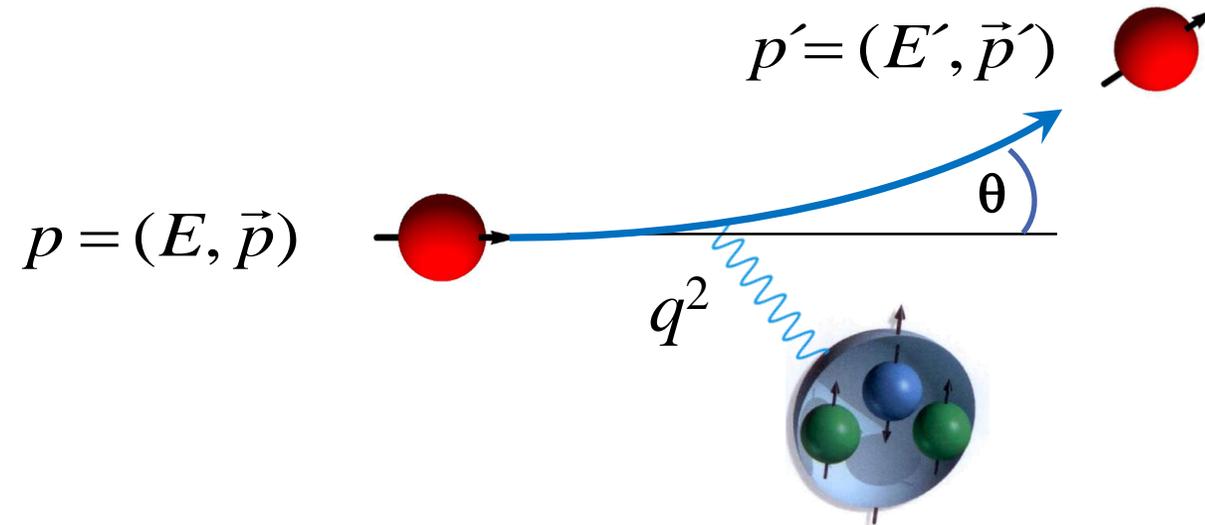
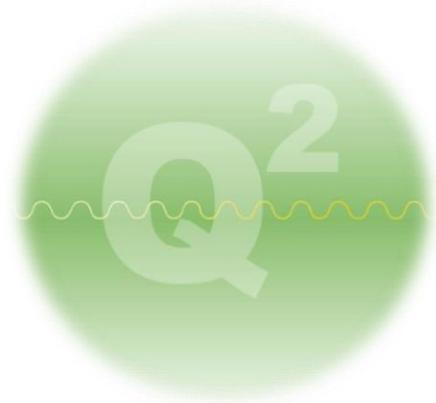
mittlerer Impulstransfer:

- Proton hat innere Sub-Struktur: **Partonen**
- 3 Valenzquarks

hoher Impulstransfer:

- Proton mit komplexer innerer Sub-Struktur
- **3 Valenzquarks, Seaquarks, Gluonen**





EINSCHUB – RELATIVISTISCHE KINEMATIK

Relativistische Kinematik: 4-er Vektoren

■ Übergang zu Lorentz-invarianten Größen:

Viererimpuls $\mathbf{p} = (E, \vec{p})$

$$\mathbf{p}^2 = p_\mu \cdot p^\mu = E^2 - \vec{p}^2 = m^2$$

invariante Ruhemasse m



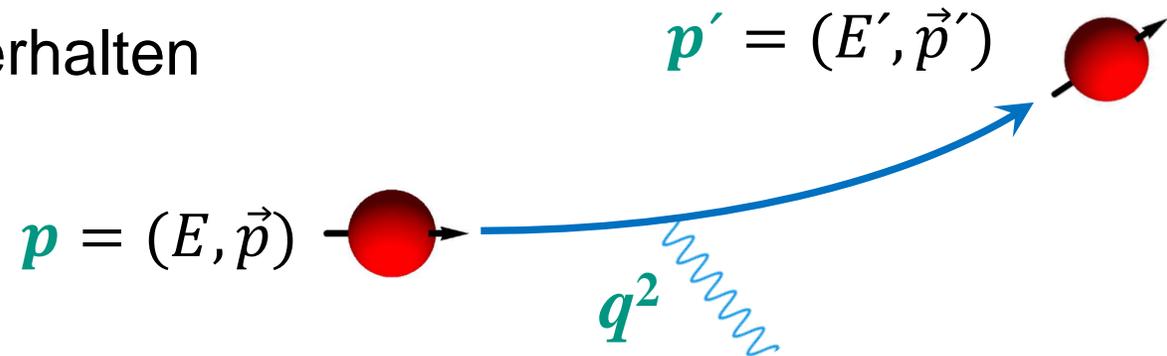
$$E^2 = \vec{p}^2 + m^2$$

- bei einem Stoßprozess bleibt der
Vierer-Impuls des Systems erhalten

- 4 – er Impulstransfer q

$$\mathbf{q} = (E - E', \vec{q})$$

$$\mathbf{q} = \mathbf{p} - \mathbf{p}'$$



Relativistische Kinematik: 4-er Vektoren

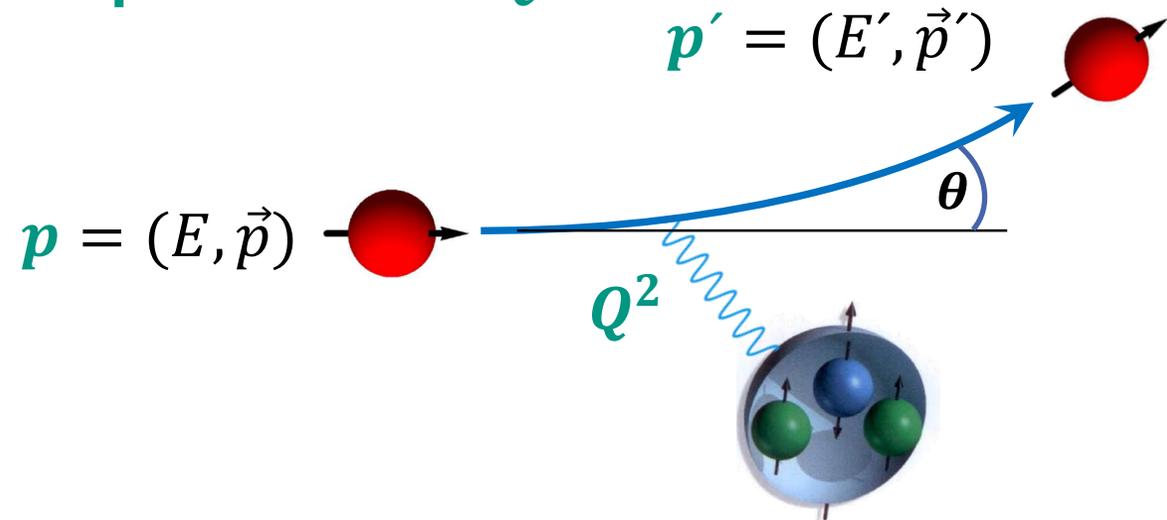
- Lorentz-invariante 4 – er Impulsüberträge q^2 und Q^2

$$q^2 = (E - E')^2 - (\vec{p} - \vec{p}')^2 \cong -4 \cdot E \cdot E' \cdot \sin^2(\theta/2)$$

4er – Impulsübertrag q^2 ist immer negativ

- Konvention: benutze positiven **Impulstransfer** Q^2

$$Q^2 = -q^2$$



Streuprozesse bei hohem Impulstransfer Q^2

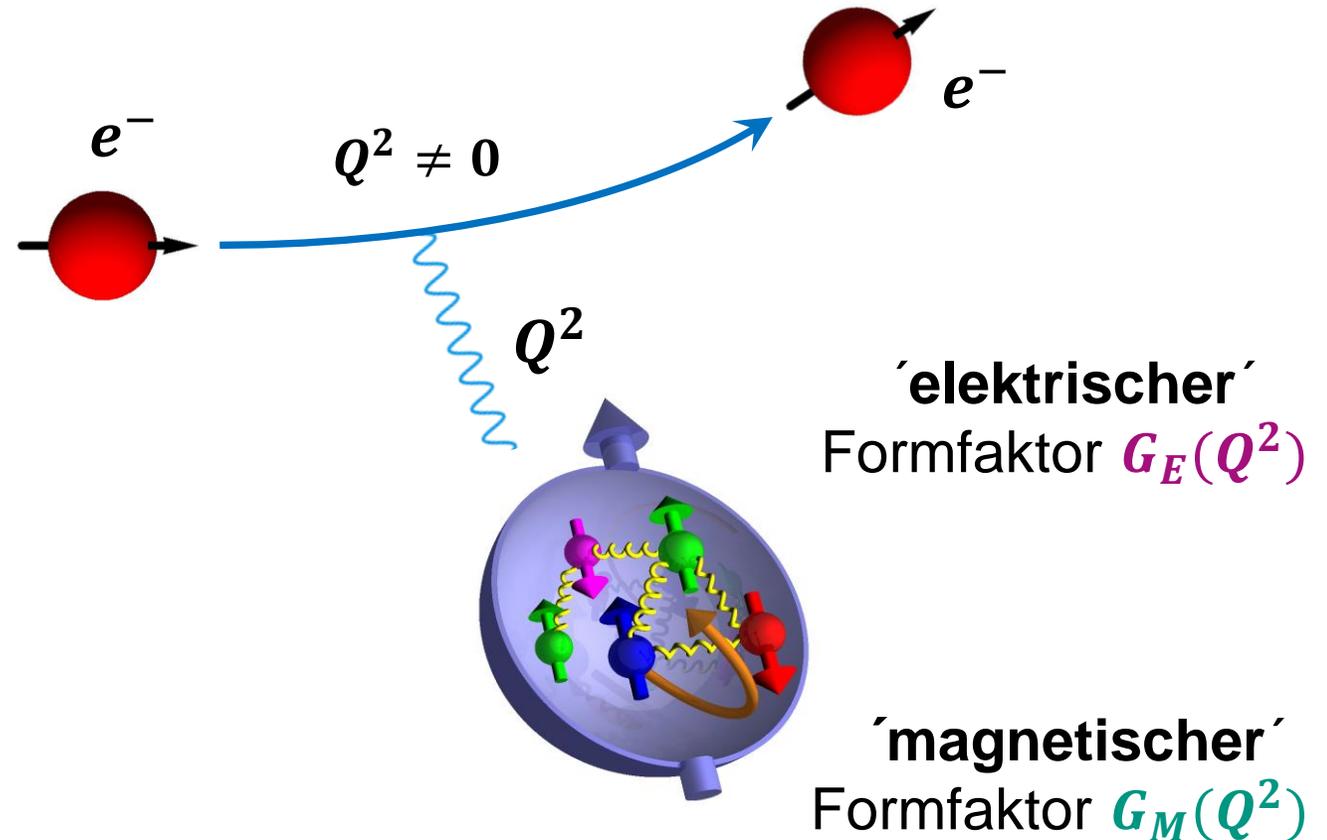
- Elektronen koppeln an **Ladung q** und **magnetisches Moment μ** des Targets

- 'elektrische' Wechselwirkung:
**Kopplung an die Verteilung
der elektrischen Ladung
im Nukleon**

⇒ **elektrischer Formfaktor**

- 'magnetische' Wechselwirkung:
**Kopplung an die Verteilung
des magnetischen Moments
im Nukleon**

⇒ **magnetischer Formfaktor**

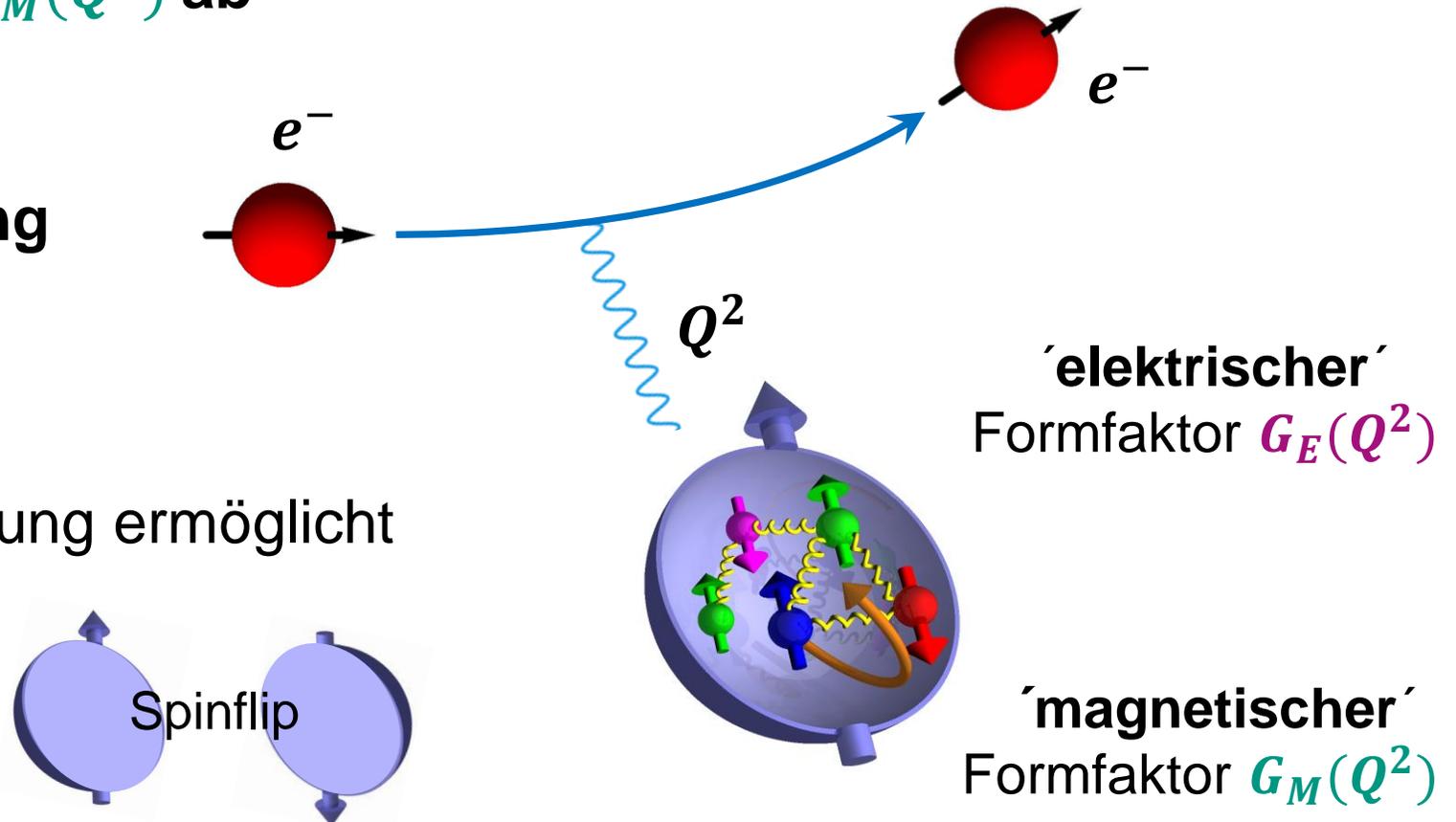


Nukleon-Formfaktoren G_E und G_M

- Elektronen tasten die Verteilung der Ladung $G_E(Q^2)$ und des magnetischen Moments $G_M(Q^2)$ ab

- Nukleon mit Substruktur:
 $G_E(Q^2)$ & $G_M(Q^2)$ Verteilung von Ladung q und magnetischem Moment μ

- 'magnetische' Wechselwirkung ermöglicht **Spinflip des Nukleons** bei inelastischer Streuung (über magnet. Moment μ)



Struktur bei hoher Energie: Kernmagneton

■ Kernmagneton μ_N : legt die Größenordnung **magnetischer Effekte** fest

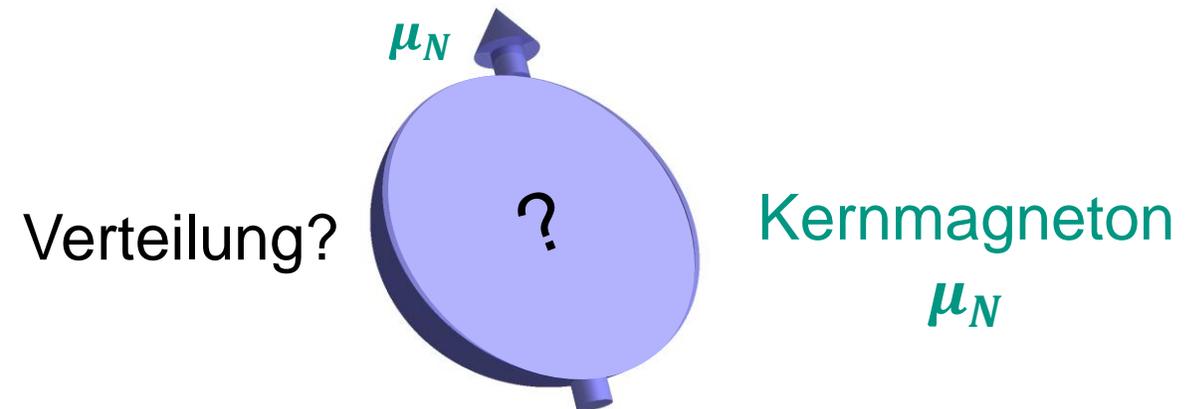
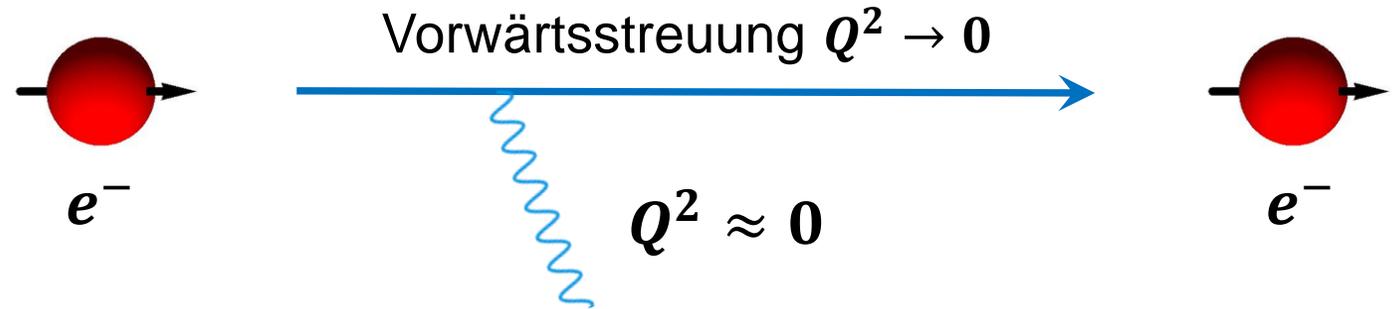
- **Kernmagneton μ_N** definiert über Proton-Masse m_p

$$\mu_N = \frac{e}{2m_p} \cdot \hbar$$

$$\mu_N = 3,152 \cdot 10^{-8} \text{ eV/T}$$

- **Kernmagneton: $\mu_N \sim 2000 \times$ kleiner als Bohr'sches Magneton μ_B !**

$$\mu_B = \frac{e}{2m_e} \cdot \hbar = 5,788 \cdot 10^{-5} \text{ eV/T}$$



Nukleon: p oder n mit Spin $S = 1/2$

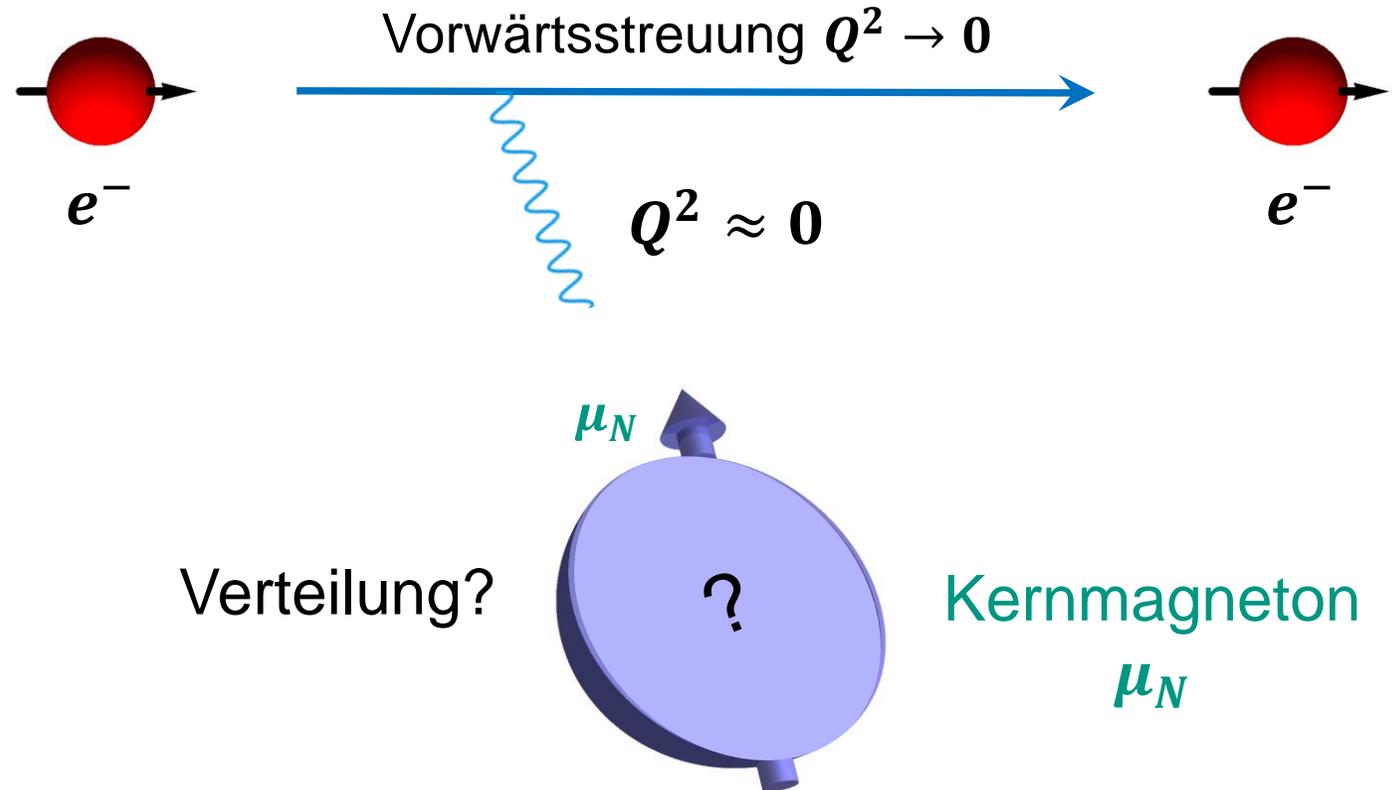
Struktur bei hoher Energie: Kernmagneton

- Kernmagneton μ_N : legt die Größenordnung **magnetischer Effekte** fest

- g – **Faktor** der Nukleonen weicht signifikant ab vom Dirac-Wert $g = 2,000$ ab (**Substruktur!**):



‘anomale’ magnetische Momente der Nukleonen



Nukleon: p oder n mit Spin $S = \frac{1}{2}$

Struktur bei hoher Energie: g – Faktoren

■ g – Faktor des **Protons**: ‘anomales’ Verhalten von g_p durch innere Struktur!

- magnetische Wechselwirkung mit magnet. Dipol-Moment

$\vec{\mu}_p$ des **Protons**

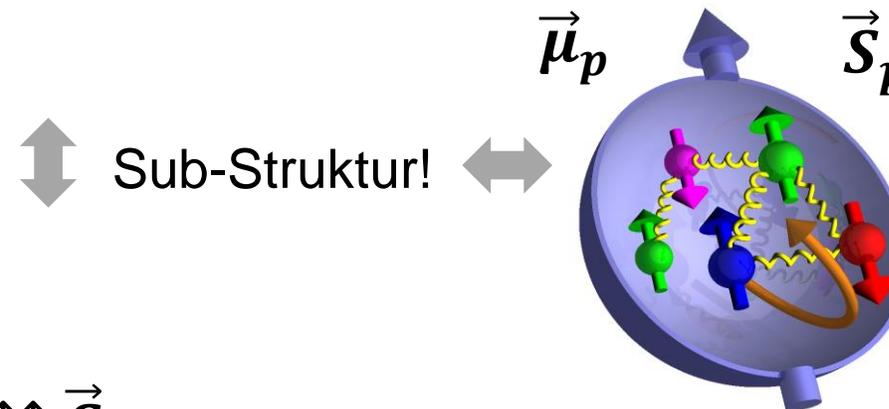
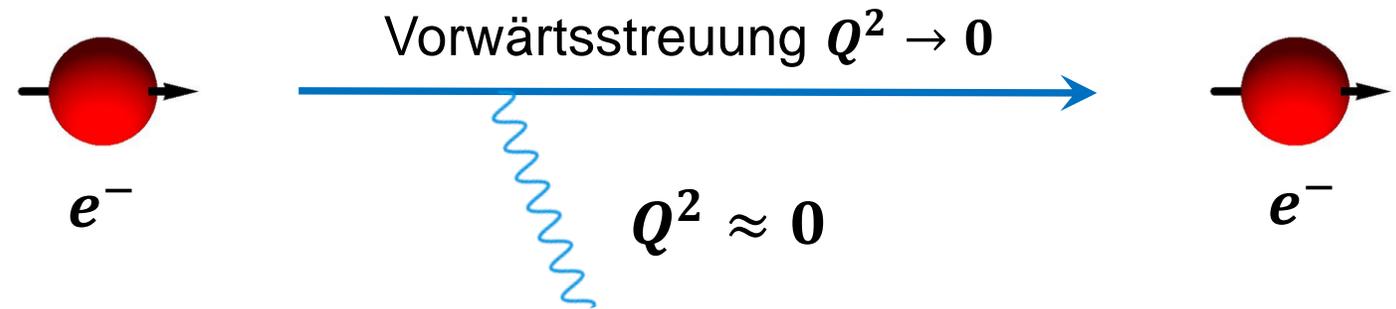
$$\vec{\mu}_p = g_p \cdot \mu_N \cdot \vec{S}_p$$

$$g_p = 5,5857$$

$$g_{Dirac} = 2,0000$$

$$\mu_p = +2,79 \cdot \mu_N$$

$$\vec{\mu}_p \uparrow\uparrow \vec{S}_p$$



Proton: mit Spin $S = 1/2$

Struktur bei hoher Energie: g –Faktoren

■ g –Faktor des **Neutrons**: ‘anomales’ Verhalten von g_n durch innere Struktur!

- magnetische Wechselwirkung mit magnet. Dipol-Moment

$\vec{\mu}_n$ des **Neutrons**

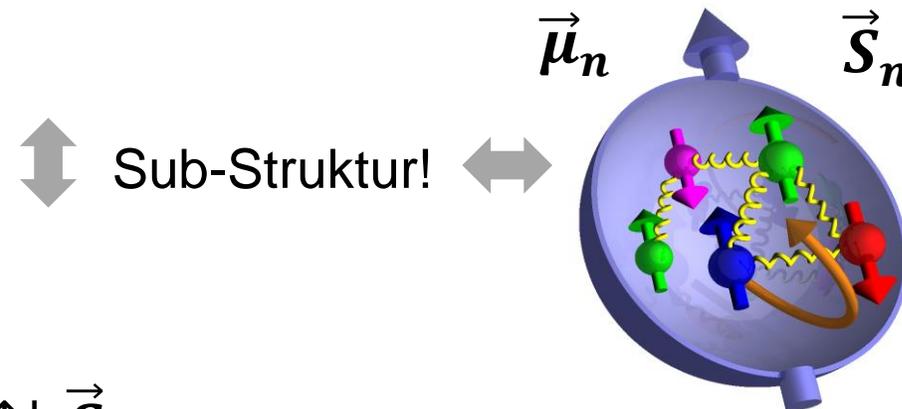
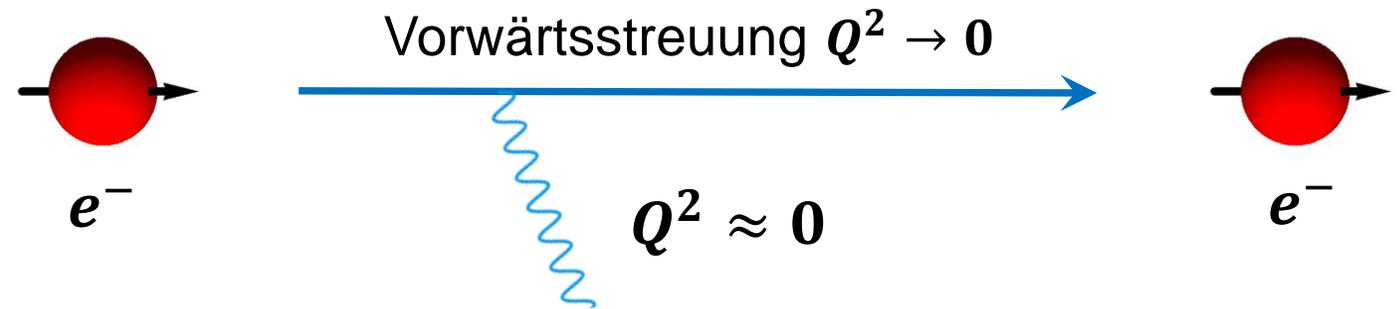
$$\vec{\mu}_n = g_n \cdot \mu_N \cdot \vec{S}_n$$

$$g_n = -3,8261$$

$$g_{Dirac} = 2,0000$$

$$\mu_n = -1,91 \cdot \mu_N$$

$$\vec{\mu}_n \uparrow \downarrow \vec{S}_n$$



Neutron: mit Spin $S = \frac{1}{2}$

Nukleon-Formfaktoren $G_E(Q^2)$ und $G_M(Q^2)$

■ auf der Spur der inneren Struktur des Nukleons

- bei Vorwärtsstreuung ($Q^2 \rightarrow 0$): **Ladung q** bzw. **magnetisches Moment μ**

Proton: $G_E(0) = 1$ $G_M(0) = +2,79$

Neutron: $G_E(0) = 0$ $G_M(0) = -1,91$



- **Ladungsverteilung ρ** des Nukleons \Rightarrow 'elektrischer' Formfaktor $G_E(Q^2)$
- **Stromverteilung** (Verteilung der Magnetisierung) bzw. **magnetisches Moment μ** des Nukleons \Rightarrow 'magnetischer' Formfaktor $G_M(Q^2)$

Nukleon-Formfaktoren: Rosenbluth – Formel

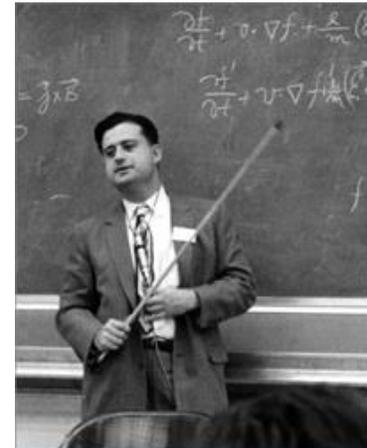
■ Verallgemeinerung des Mott-Wq. zur Rosenbluth-Formel

- differentieller Streuquerschnitt am **Nukleon** als Funktion von G_E und G_M

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{exp} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} \cdot \left\{ \underbrace{\frac{G_E^2 + (Q^2/4M^2) \cdot G_M^2}{1 + (Q^2/4M^2)}}_{\theta - \text{unabhängig}} + \underbrace{\frac{Q^2}{2M^2} \cdot G_M^2 \cdot \tan^2(\theta/2)}_{\theta - \text{abhängig}} \right\}$$

$M = \text{Nukleon-Masse, } c = 1$

- 2 Streuterme: winkelunabhängig $A(Q^2)$
 winkelabhängig $B(Q^2) \cdot \tan^2(\theta/2)$



M. Rosenbluth

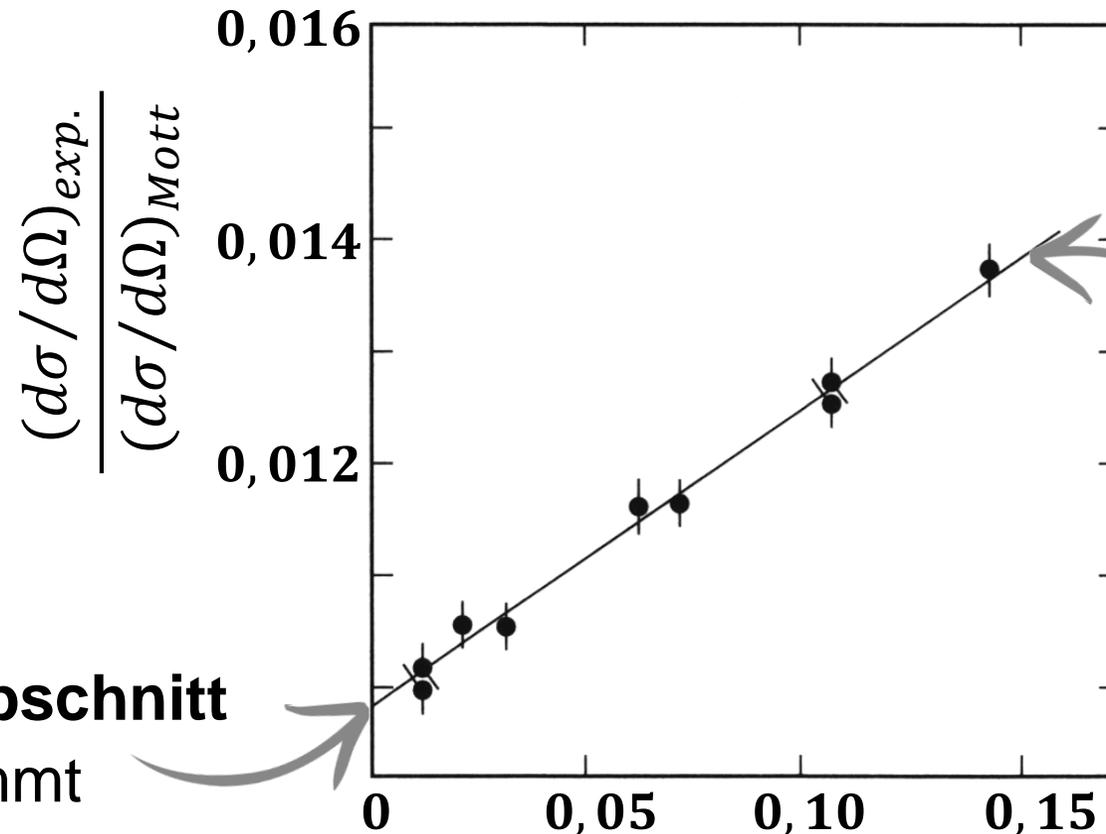
Q: atomic heritage fd.

Nukleon-Formfaktoren: Rosenbluth – Formel

■ Verallgemeinerung des Mott-Wq. zur Rosenbluth-Formel

- differentieller Streuquerschnitt: $A(Q^2) + B(Q^2) \cdot \tan^2(\theta/2)$

- für einen **festen Wert** von Q^2 (hier: $2,5 \text{ GeV}^2$) werden bei fester Strahlenergie E zahlreiche Streuwinkel θ gemessen



aus **Achsenabschnitt** wird G_E bestimmt

$$Q^2 = 2,5 \text{ GeV}^2$$

aus **Steigung** wird G_M bestimmt

$\tan^2(\theta/2)$