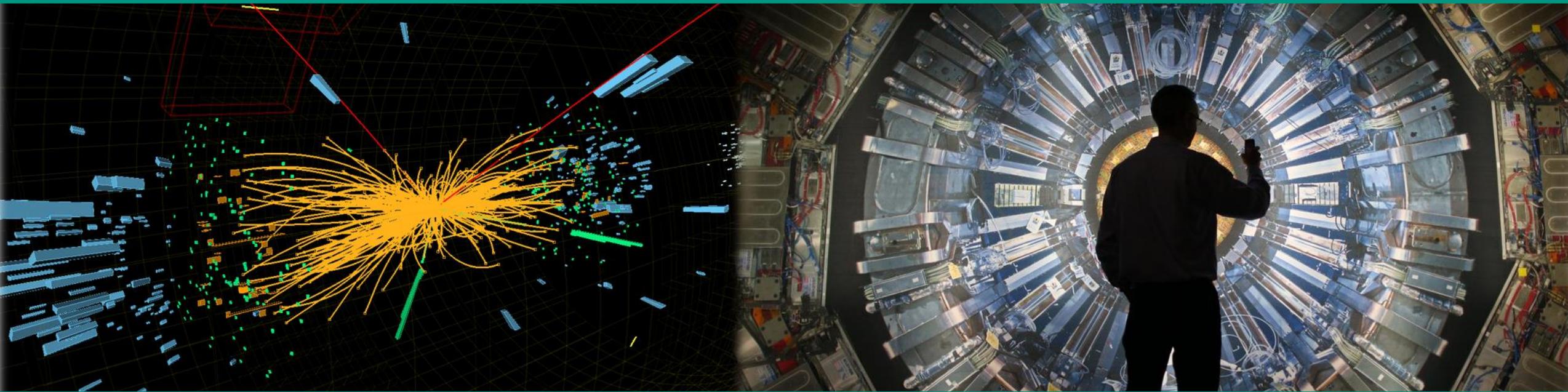


Moderne Experimentalphysik III – Teilchen und Hadronen

Vorlesung 4

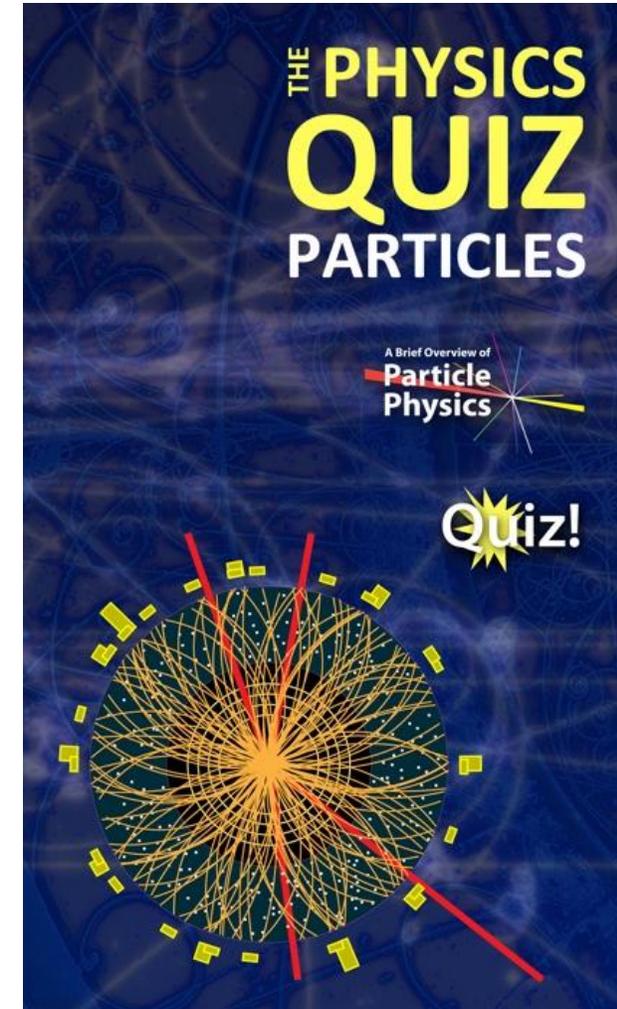
27.4.2023



Welche der folgenden Aussagen ist korrekt?

■ Ein Quiz zum Aufbau von Kernen & Nukleonen

- **A**: das **Schalenmodell der Kerne** und der Atome ist identisch
- **B**: das **Neutron** ist ungeladen und besitzt daher kein **magnetisches Moment**
- **C**: ein **Feynman-Diagramm** reicht für $e^- - e^+ -$ Annihilationsberechnungen vollkommen aus
- **D**: die **anormalen magnetischen Momente** des **Nukleons** können mit der heutigen Physik (Standardmodell) erklärt werden



Q: appadvice.com

Recap: Kernmodelle & Nukleonen

■ Kernmodelle

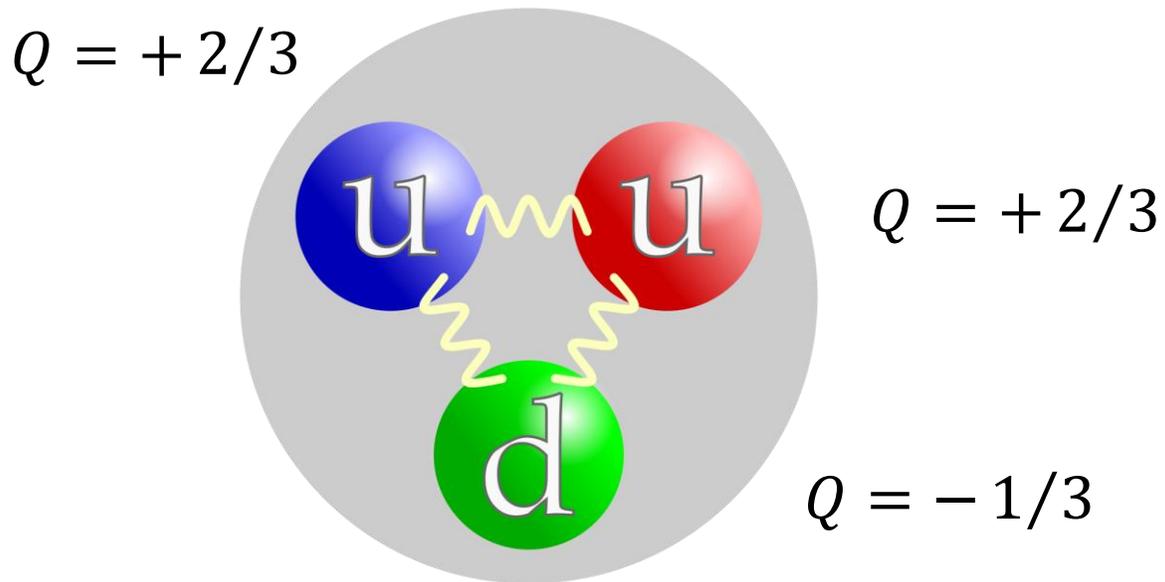
- **Tröpfchen**- semi-empirisch, 5 Terme, für Bestimmung von E_B/A
- **Fermigas**- Nukleonen in Potenzialtopf mit Pauli-Prinzip, Fermi-Energie E_F
- **Schalen**- Woods-Saxon Potenzial $V(r)$ mit LS –Kopplung
 - ⇒ Beschreibung der magischen Zahlen: **2, 8, 20, 28, 50, 82, 126, ...**
 - ⇒ Beschreibung von 1-Teilchenzuständen (‘Leuchtnukleon’)

■ Nukleonen mit $M \sim 1 \text{ GeV}$: $p(uud)$, $n(udd)$

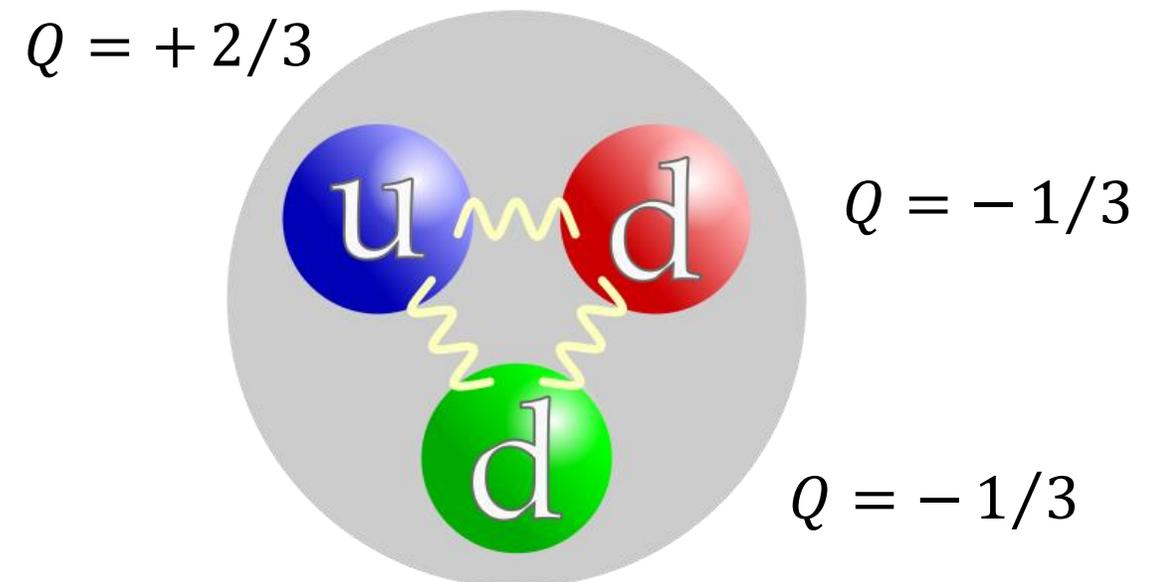
- starke Ww. via Pion-Austausch (Triplet $\pi^+ \pi^0 \pi^-$) mit $m \sim 140 \text{ MeV}$
- elektr.& magnet. Formfaktoren $G_{E,M}(Q^2)$ via Rosenbluth-Formel

Nukleon-Formfaktoren & innere Struktur

- Sneak pre-view: innerer Aufbau des Nukleons aus *up, down* – Quarks



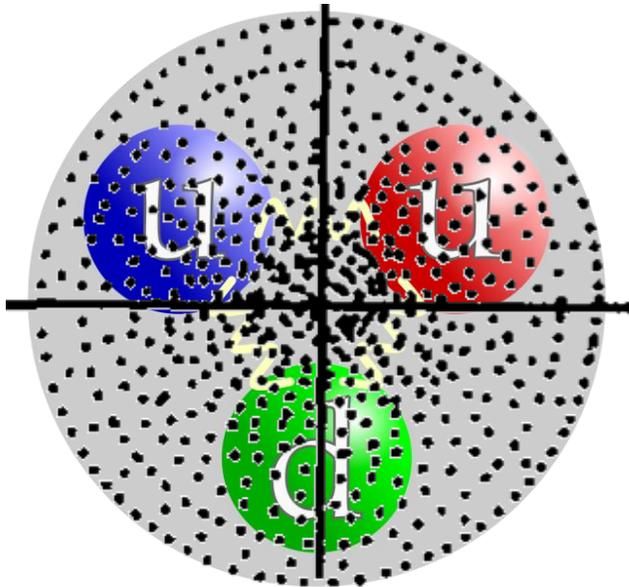
Proton: $q = +1$ $S = 1/2$



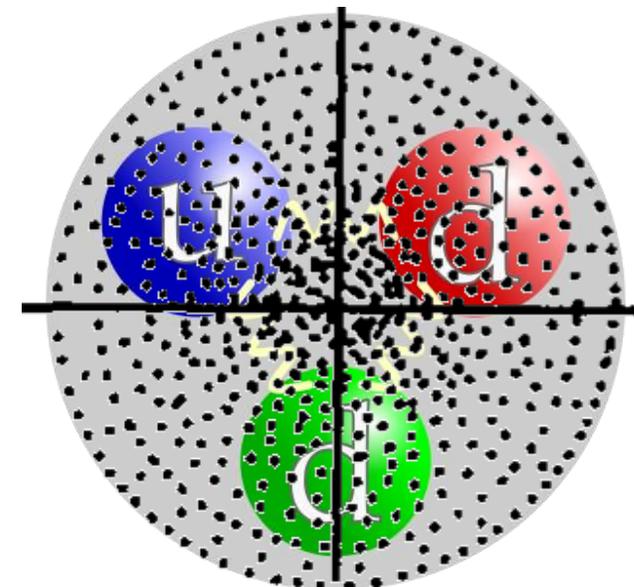
Neutron: $q = 0$, $S = 1/2$

Nukleon-Formfaktoren & innere Struktur

- Fragestellung: wie verteilen sich die Quark-Ladungen/Ströme radial?



Proton: $q = +1$ $S = 1/2$



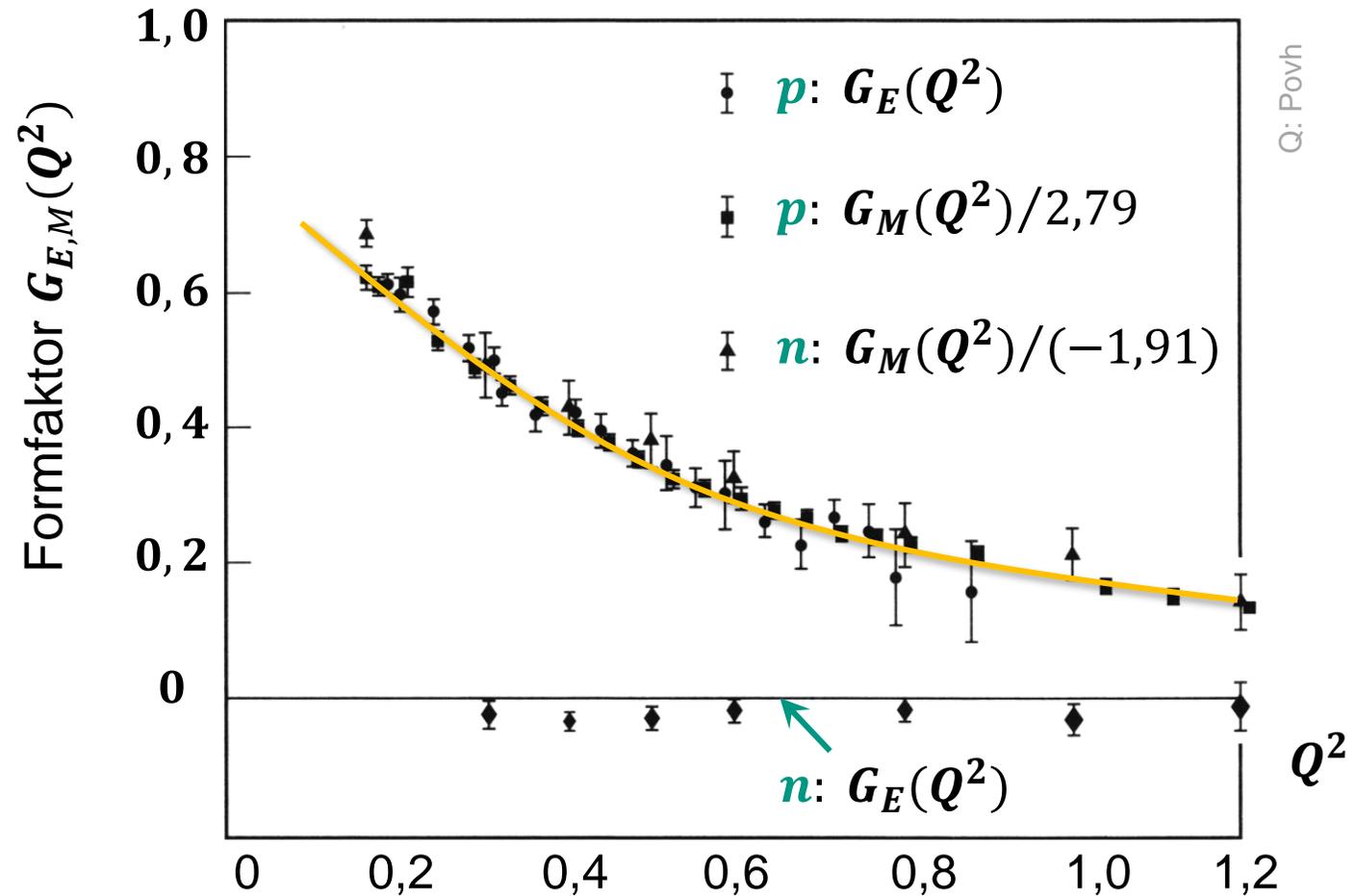
Neutron: $q = 0$, $S = 1/2$

Nukleon-Formfaktoren: Dipol-Charakter

■ Verlauf der Nukleon-Formfaktoren $G_{E,M}(Q^2)$ bei verschiedenen Q^2 –Werten

- man beobachtet einen typ. **Dipol-Charakter** für Q^2 in $[GeV^2/c^2]$
- Fit der experimentellen Daten ergibt:

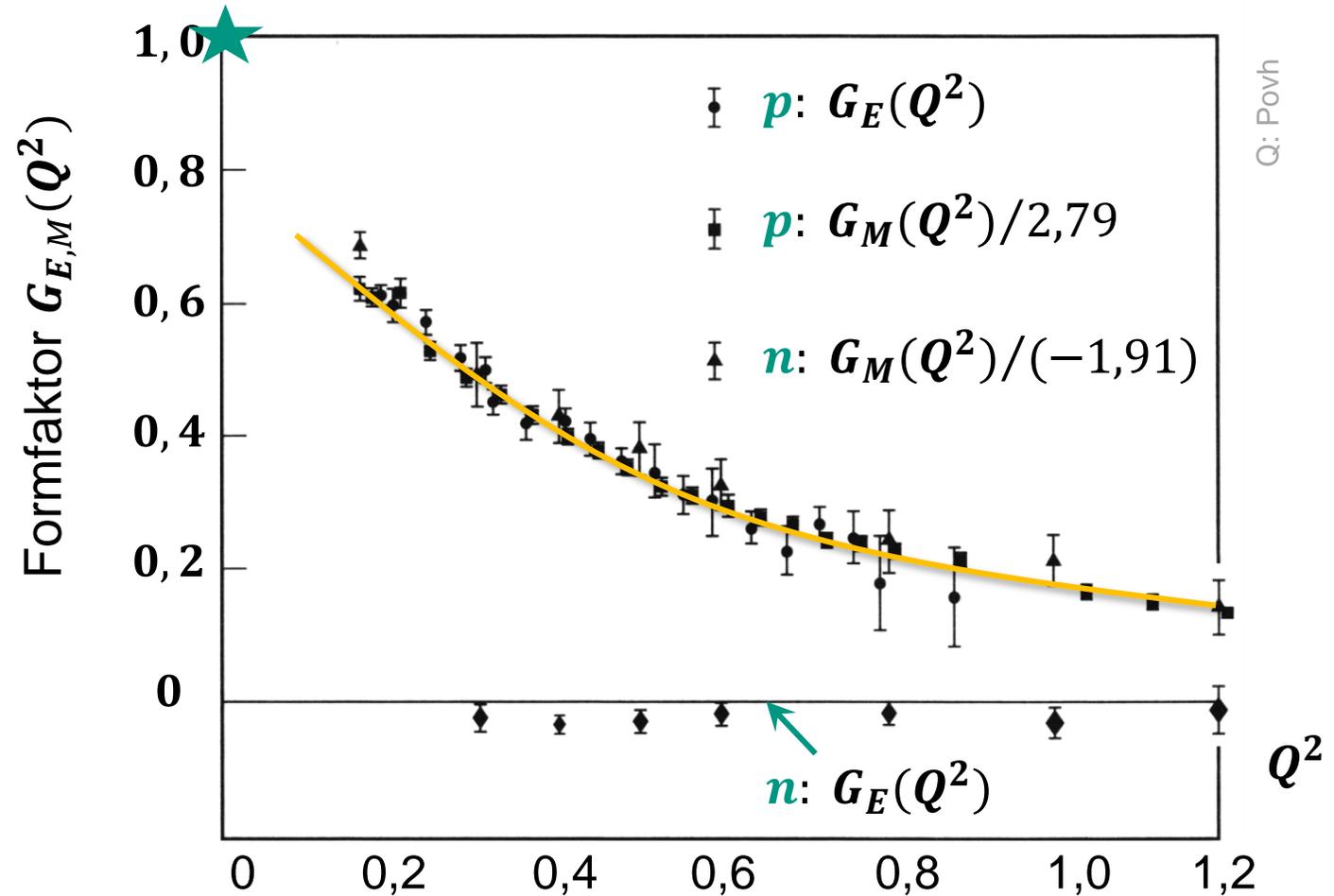
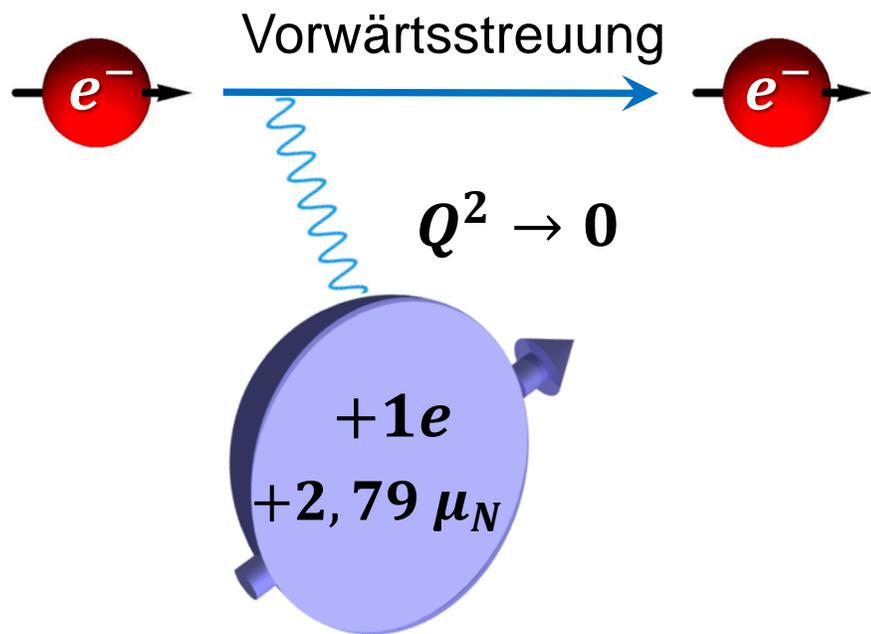
$$G(Q^2) = \left(1 + \frac{Q^2}{0,71 (GeV/c)^2} \right)^{-2}$$



Nukleon-Formfaktoren: Abtasten innere Struktur

Verlauf der Nukleon-Formfaktoren $G_{E,M}(Q^2)$ bei $Q^2 \rightarrow 0$

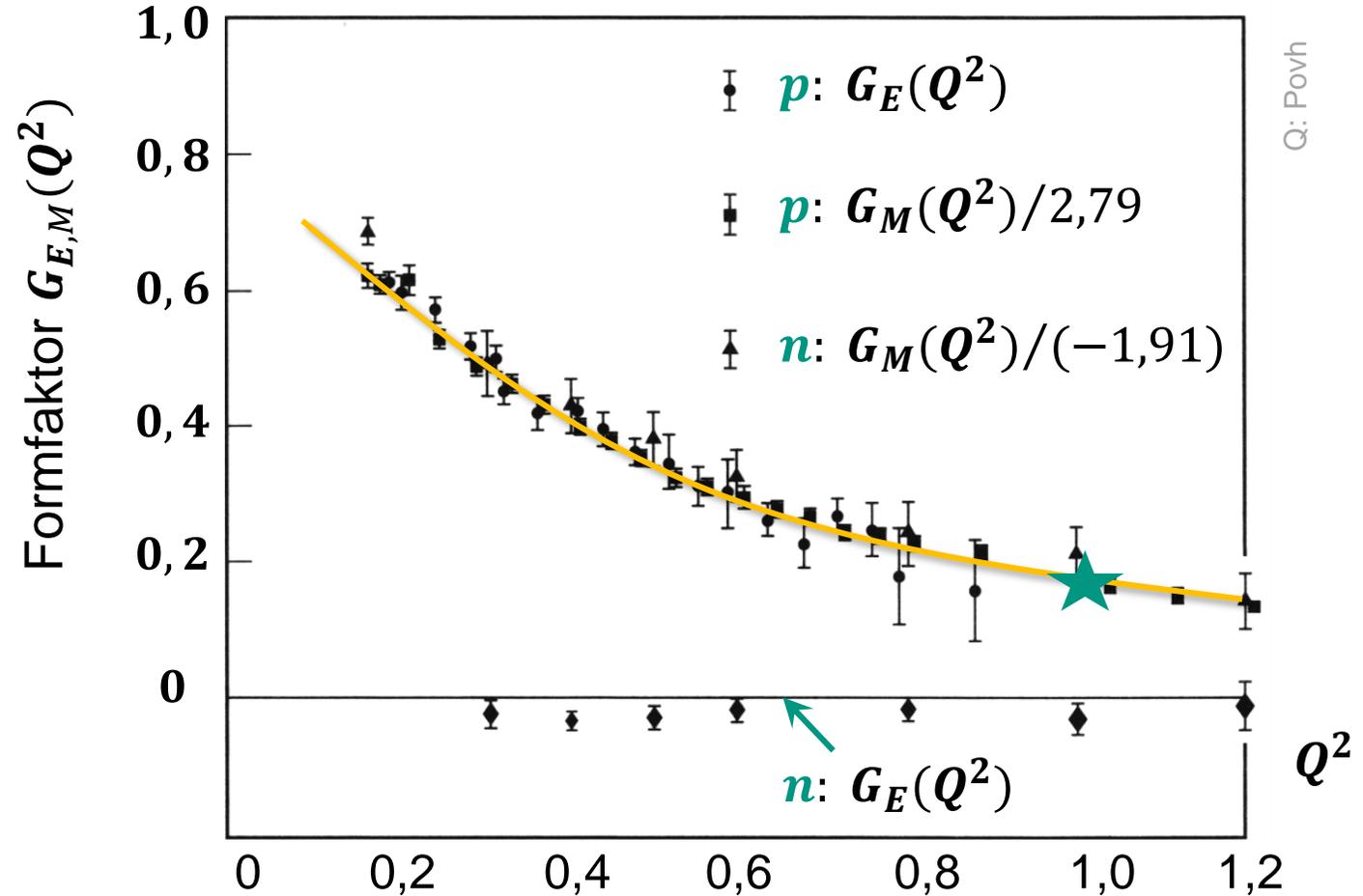
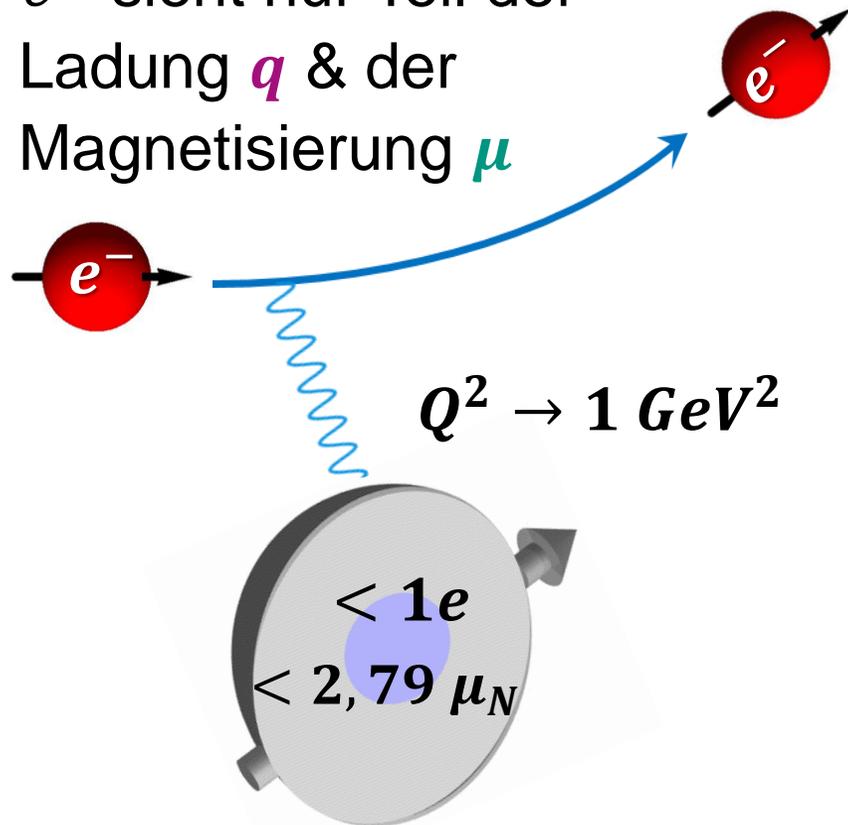
- e^- sieht **volle** Ladung $+1e$ und **volle** Magnetisierung $+2,79 \mu_N$



Nukleon-Formfaktoren: Abtasten innere Struktur

Verlauf der Nukleon-Formfaktoren $G_{E,M}(Q^2)$ bei $Q^2 \rightarrow 1 \text{ GeV}^2$

- e^- sieht nur Teil der Ladung q & der Magnetisierung μ



Nukleon-Formfaktoren: Dipol-Charakter

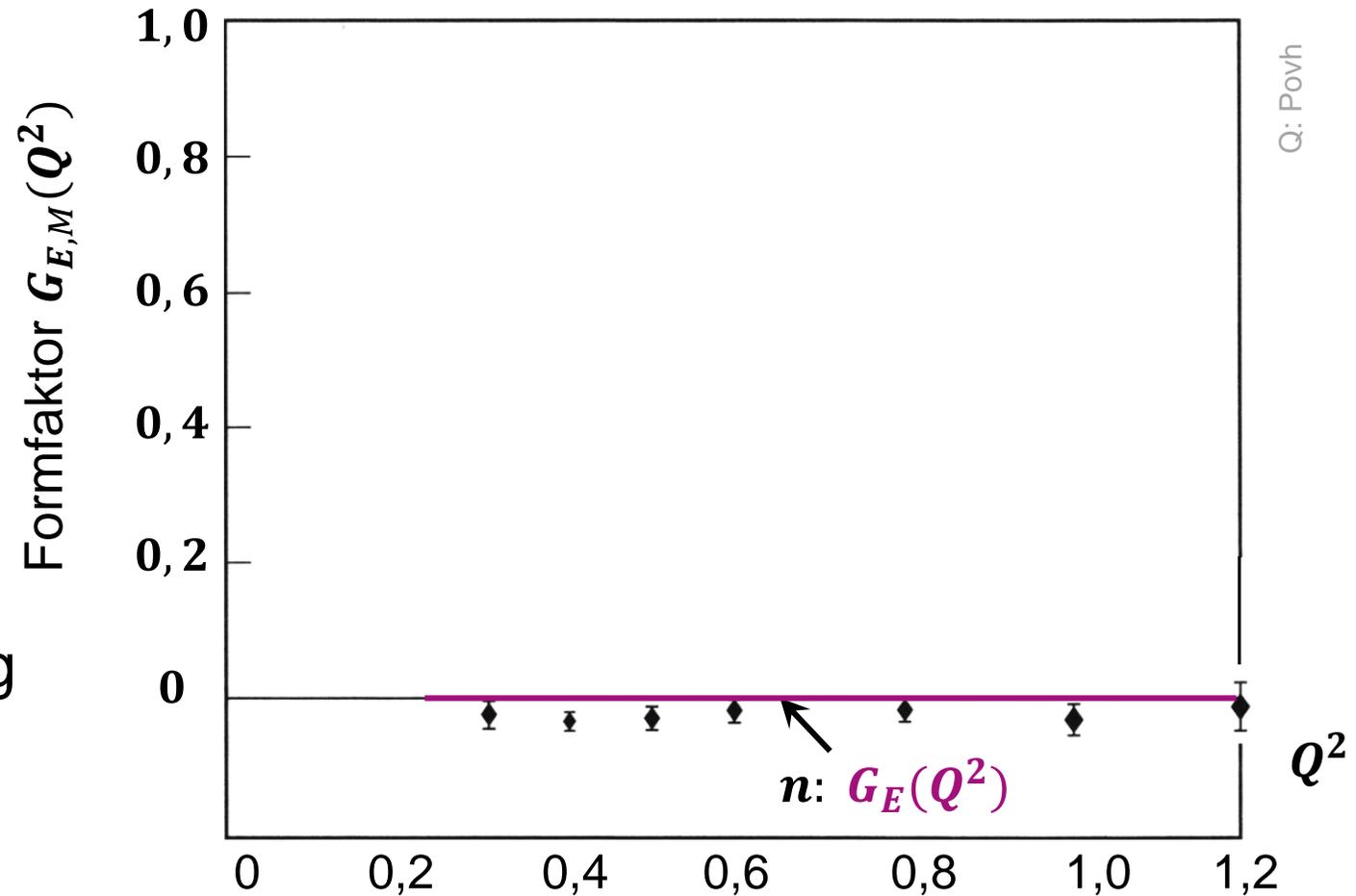
■ Verlauf der Nukleon-Formfaktoren $G_{E,M}(Q^2)$ bei verschiedenen Q^2 –Werten

- für das ungeladene Neutron n beobachtet man (quasi erwartungsgemäß)

$$G_E(Q^2) = 0$$



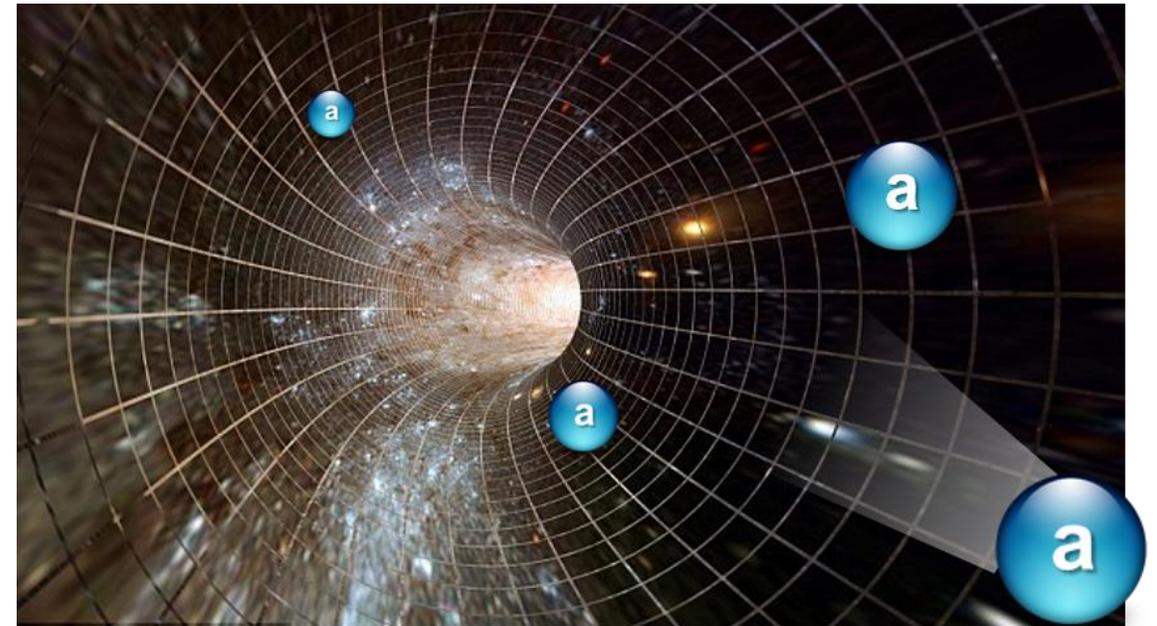
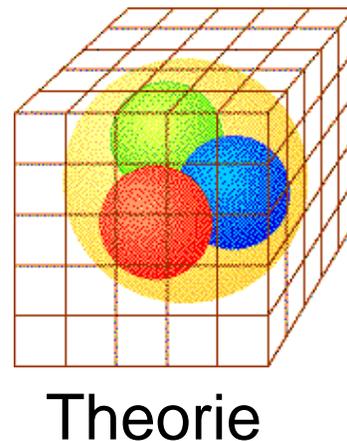
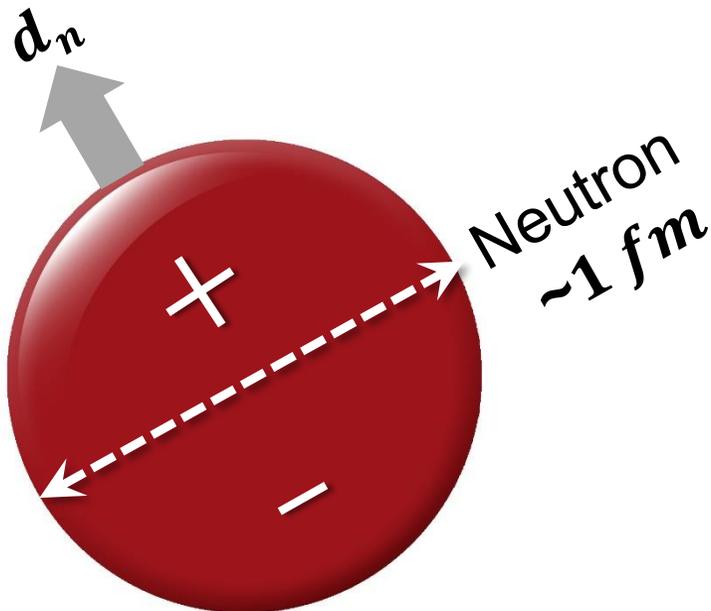
keine asymmetrische Verteilung der inneren Ladung aus den geladenen Quarks (u, d, d)



Nukleon-Formfaktoren: n ist super spannend

- Verlauf der Nukleon-Formfaktoren $G_{E,M}(Q^2)$: es geht weiter im **Master***!

- für das ungeladene Neutron n beobachtet man ein **sehr kleines elektrisches Dipolmoment d_n** , Hinweis auf neue Symmetrie? \Rightarrow **Axionen** als Dunkle Materie?!

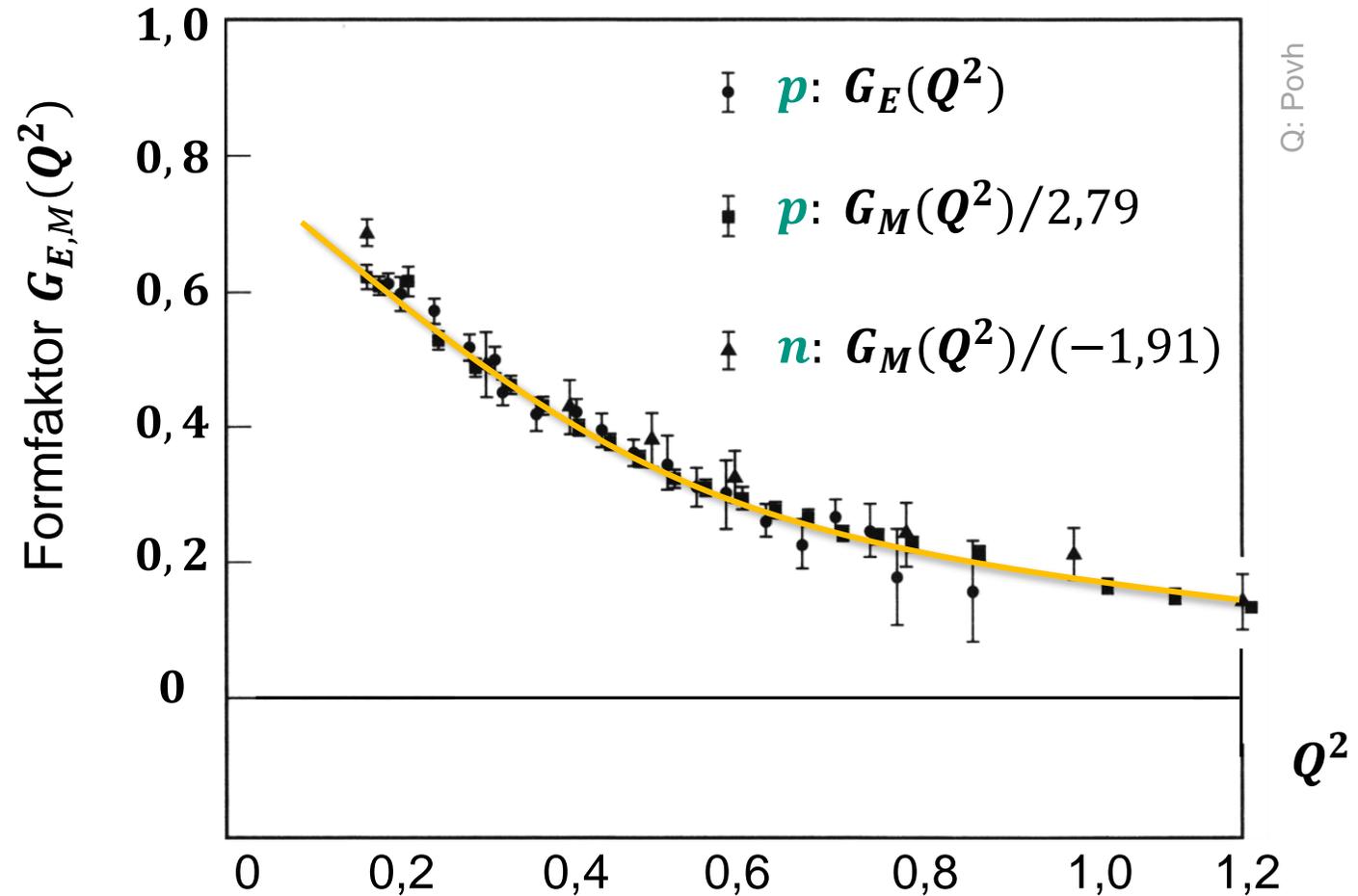


Nukleon-Formfaktoren: Dipol-Charakter

■ Verlauf der Nukleon-Formfaktoren $G_{E,M}(Q^2)$ bei verschiedenen Q^2 –Werten

- man beobachtet einen typ. **Dipol-Charakter** für Q^2 in [GeV^2/c^2]
- für das geladene p wird einheitlicher Verlauf der Dipol-Faktoren $G_{E,M}(Q^2)$ beobachtet, der mit dem $G_M(Q^2)$ des n übereinstimmt:

⇒ **gleiche räumliche Verteilung!**



Nukleon: Ladungsverteilung

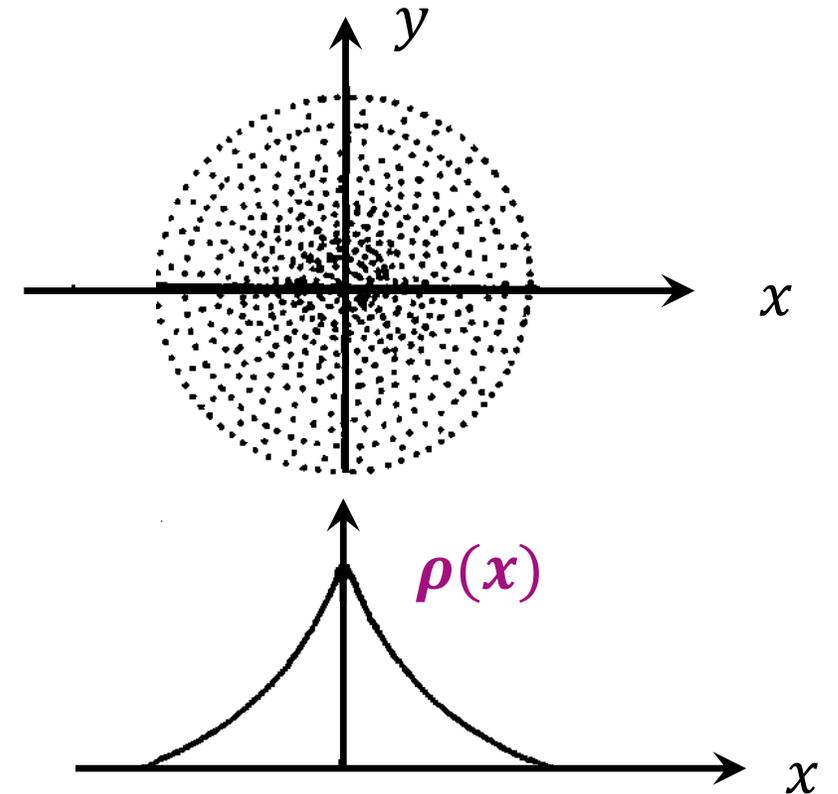
- Ladungsverteilung $\rho(r)$ in einem Nukleon

$$\rho(r) = \rho_0 \cdot e^{-Q_0/r}$$

exponentiell abfallende Ladungsverteilung
des Nukleons („kein scharfer Rand!“)

Fourier- ↑ Transformation

$$G(Q^2) = \left(1 + \frac{Q^2}{0,71 (GeV/c)^2} \right)^{-2}$$



Nukleon: Ladungsradien & Stromverteilungen

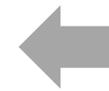
■ mittlere quadratische Radien R des Nukleons

- Definition* *rms* – Radius R

$$R = \sqrt{\langle r^2 \rangle}$$

$$\langle r^2 \rangle = \frac{1}{Q} \cdot \int r^2 \cdot \rho(r) \cdot 4\pi \cdot r^2 \cdot dr$$

quadratisches Mittel



$\rho(r)$ gewichtet
mit Quadrat von r

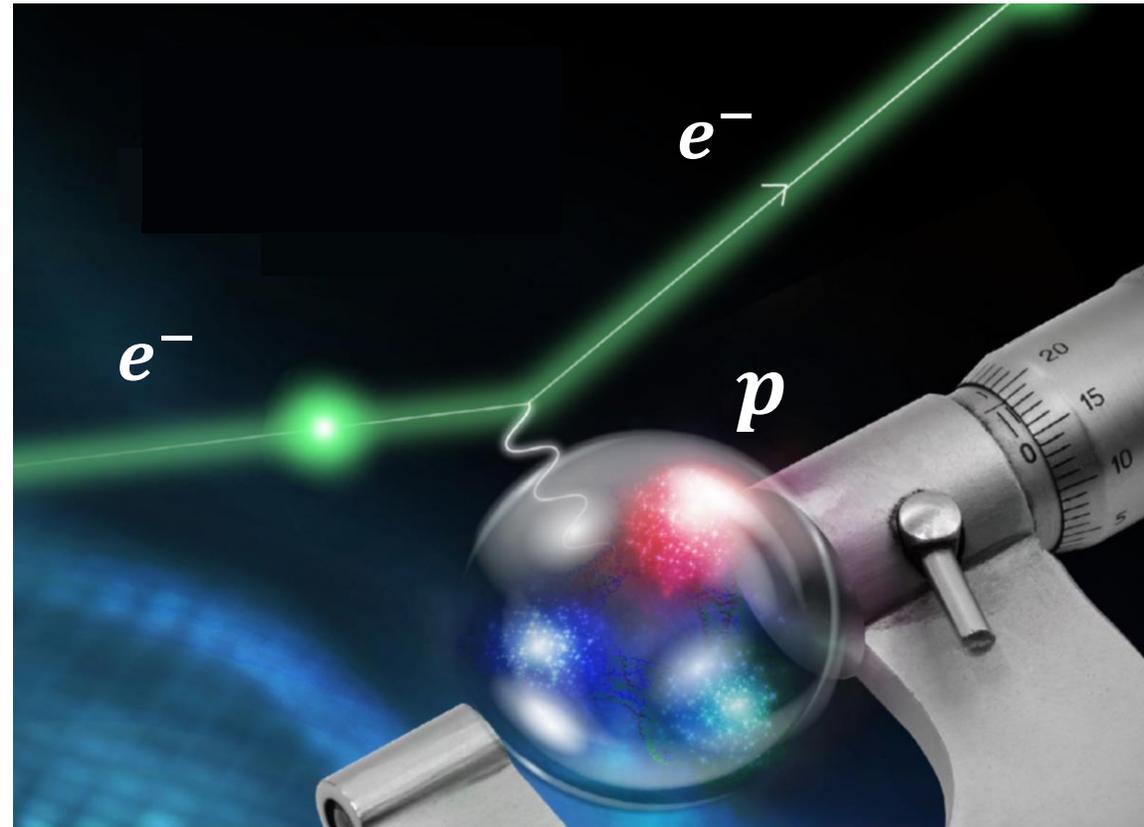
Integration über
Kugelvolumen

$$\sqrt{\langle r_E^2 \rangle_p} = 0,8775 \text{ fm}$$

mittlerer quadratischer
Ladungsradius des **Protons**

$$\sqrt{\langle r_E^2 \rangle_p} \approx \sqrt{\langle r_M^2 \rangle_p} \approx \sqrt{\langle r_M^2 \rangle_n} \approx 0,8 \dots 0,9 \text{ fm}$$

mittlere quadratische
Radien von Proton, Neutron



EINSCHUB – ‘GESCHRUMPFTES’ PROTON

Präzisionsmessung des Proton-Radius R_p

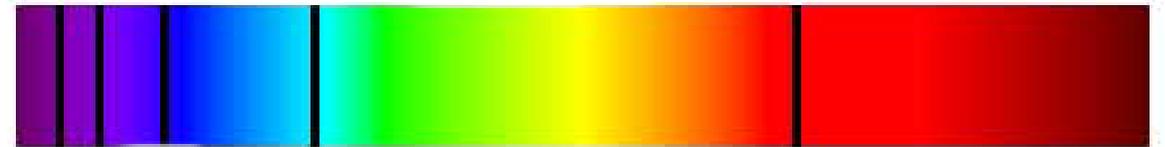
■ Vergleich von Streuprozessen am Proton mit anderen Methoden

- Resultate von myonischen Atomen* & Elektron-Streuung: **5 σ Diskrepanz**

- myonische H –Atome $R_p = 0,84184(67) fm$ \longleftrightarrow Streuung von e^- :
 $R_p = 0,8775 fm$



Absorptionsspektrum: klass. H –Atom*



Emissionsspektrum: exotisches Atom

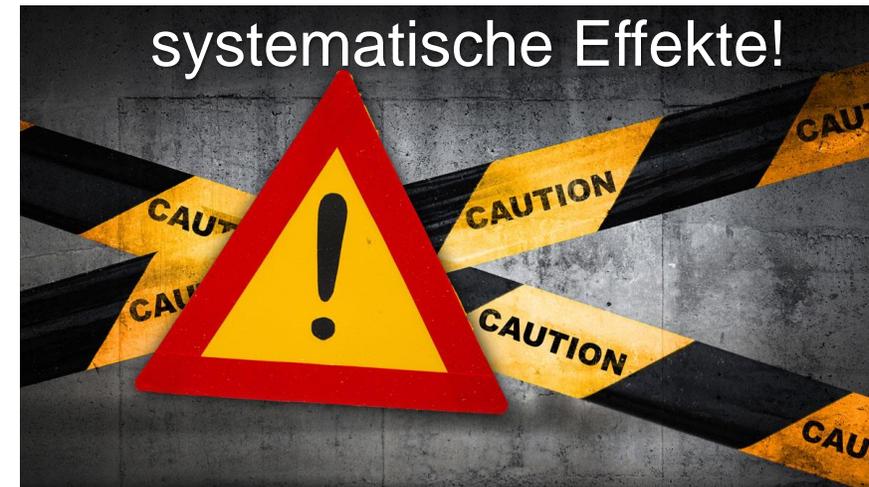
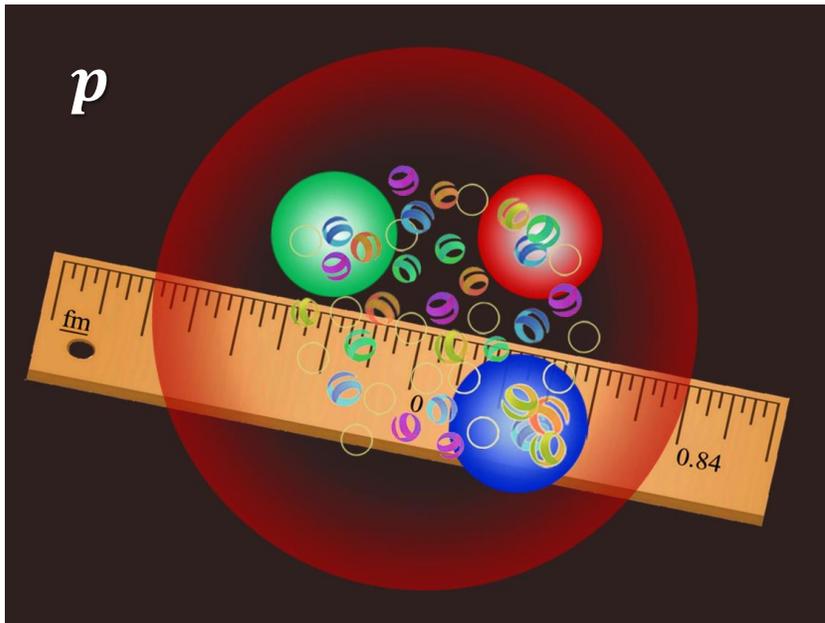


Präzisionsmessung des Proton-Radius R_p

■ Februar 2022: Reanalyse der Elektron-Streudaten am Proton

- Resultate von myonischen Atomen & Streudaten stimmen nun überein

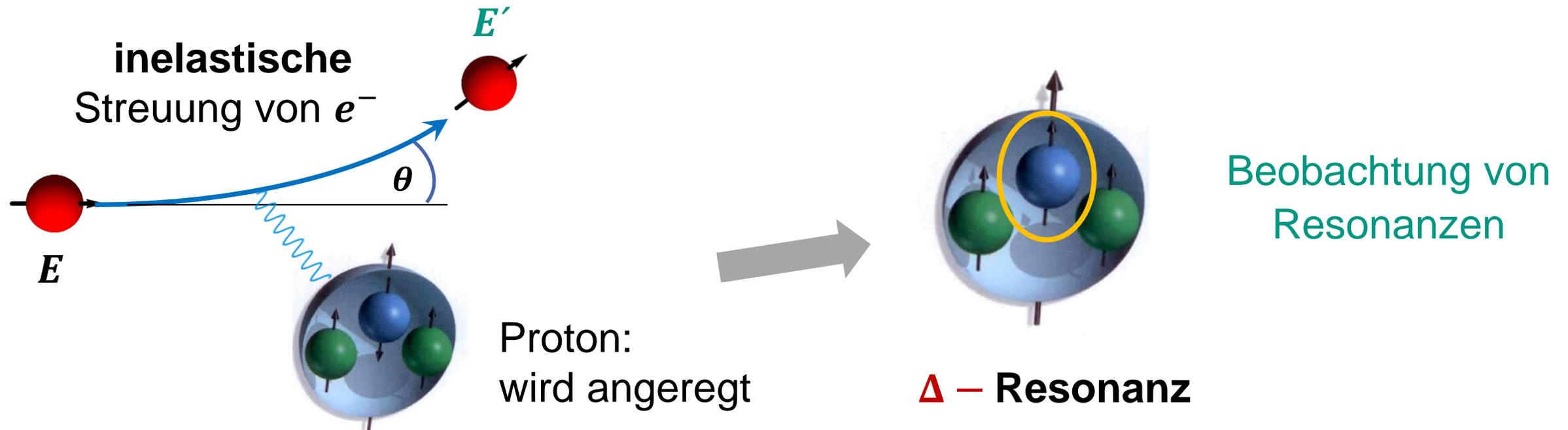
- myonische H –Atome $R_p = 0,84184(67) \text{ fm}$ \longleftrightarrow Streuung von e^- :
 $R_p = 0,840 \text{ fm}$



Inelastische Streuprozesse: Resonanzen

■ Elektronen-Energien $E > 2 \text{ GeV}$: inelastische Streuung am Nukleon

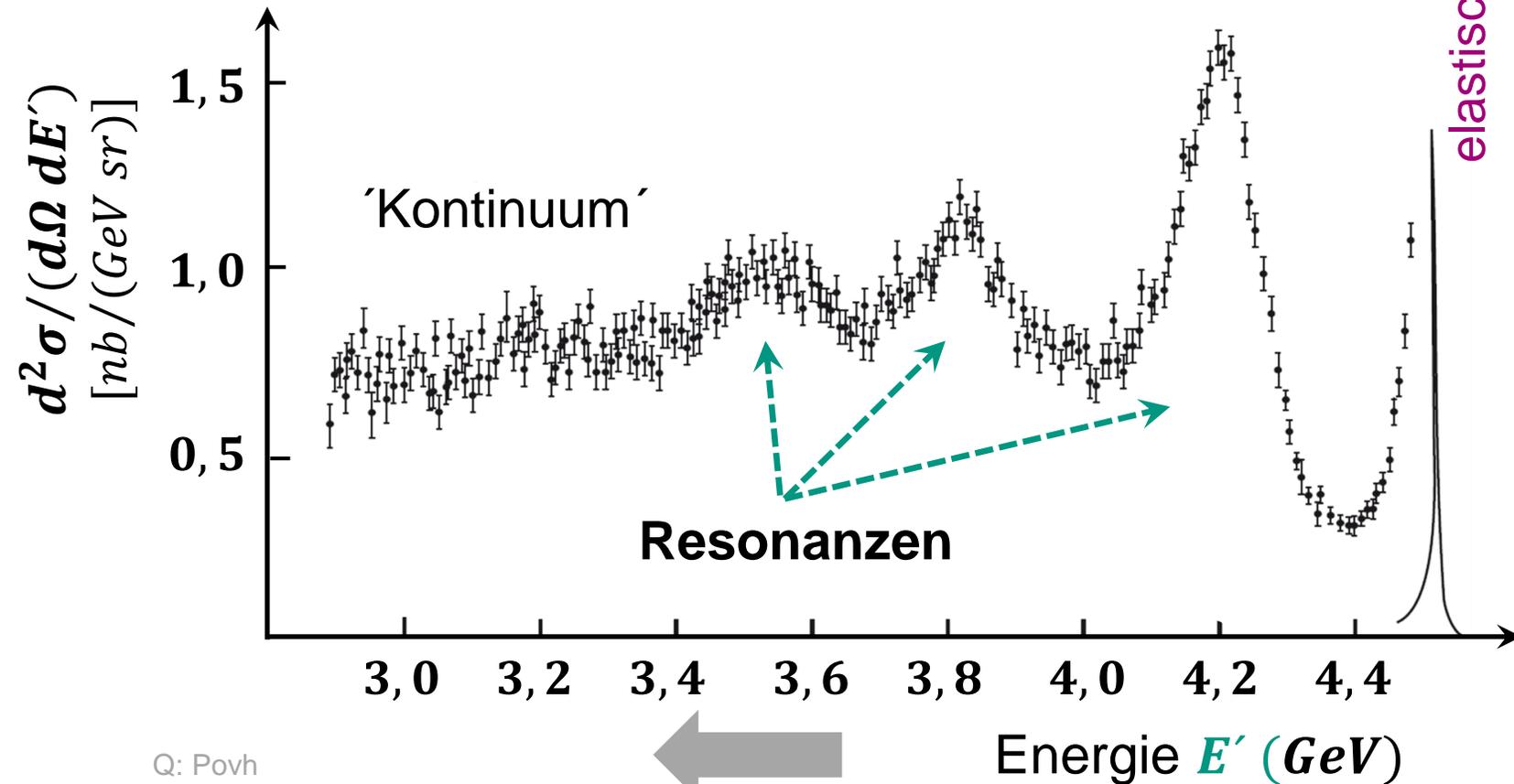
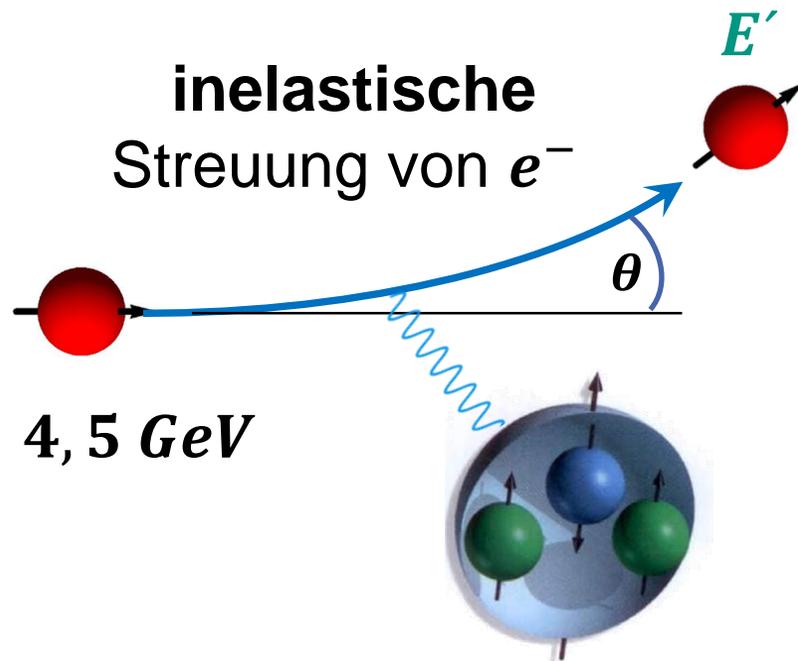
- bisher: moderate Elektron-Energien, nur elastische Streuung
- nun: höhere Energien \Rightarrow **Anregung innerer Freiheitsgrade des Nukleons**



Inelastische Streuprozesse: Resonanzen

■ Elektronenenergien $E > 2 \text{ GeV}$: inelastische Streuung am Nukleon

- Resonanzen in $d\sigma/d\Omega$ als Funktion der auslaufenden Energie E'



e^- verliert mehr Energie

Delta-Resonanz: ein Spin $S = 3/2$ Zustand

■ die 'berühmte' Δ^+ Resonanz: der 1. angeregte Nukleon-Zustand

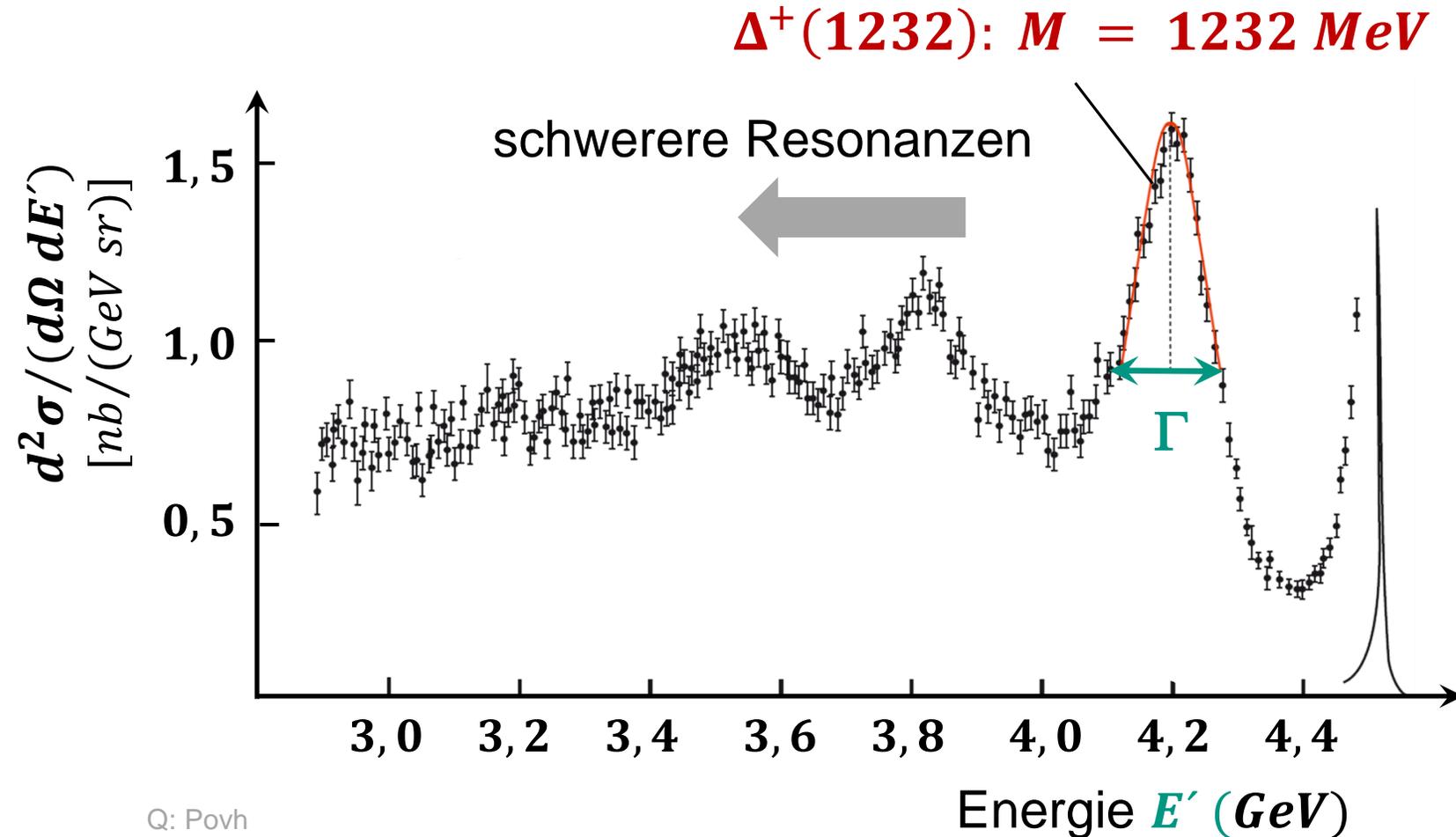
- Resonanzen (mit extrem kurzen Lebensdauern) mit charakteristischem **Breit-Wigner Profil**

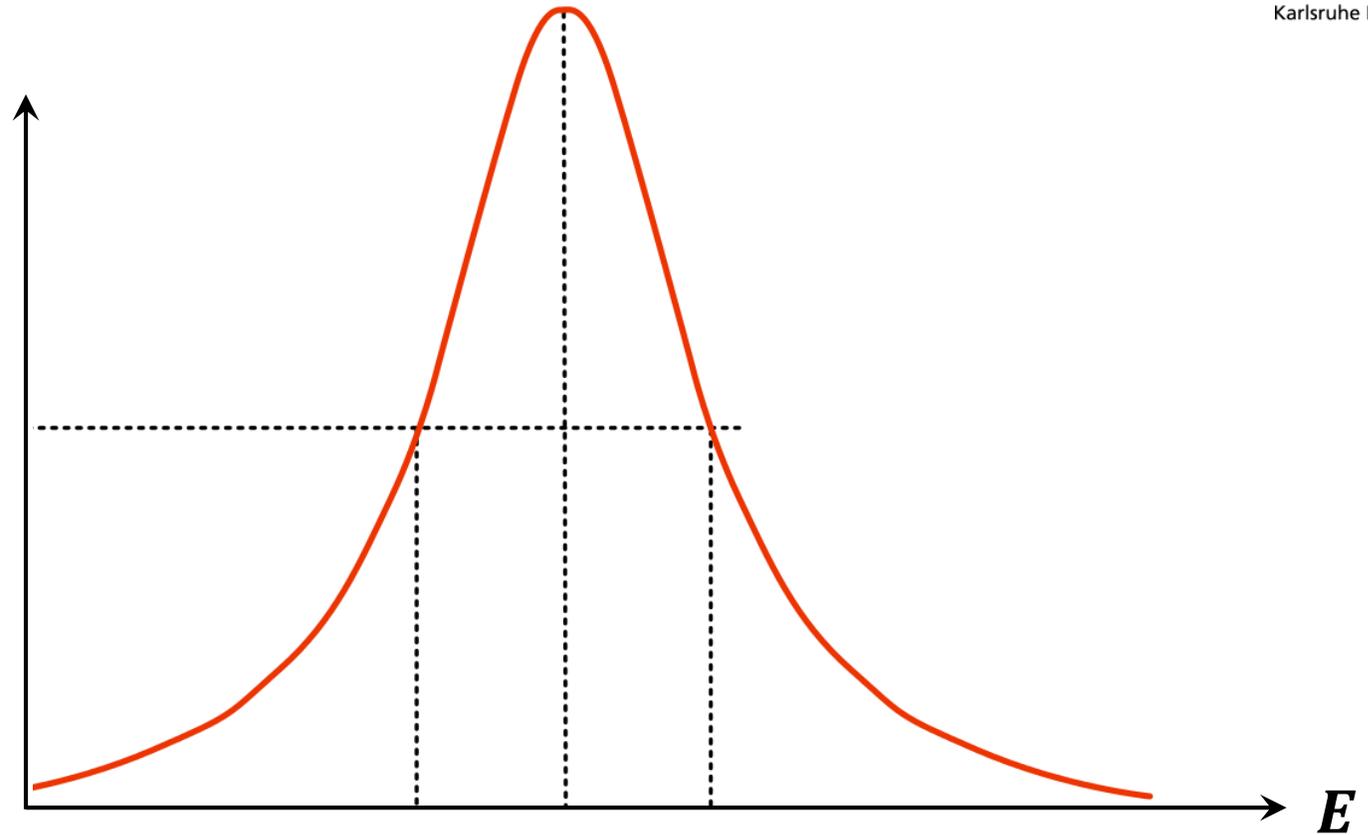
- Parameter von Δ^+ :

$$\Gamma \approx 100 \text{ MeV}$$



$$\tau \approx 5 \cdot 10^{-24} \text{ s}$$





EINSCHUB – RESONANZEN

Eigenschaften von Resonanzen

■ Resonanzen charakterisiert durch intrinsische **Breit-Wigner Verteilung**

- Wahrscheinlichkeitsdichte $P(E)$ einer **Breit-Wigner-Verteilung**

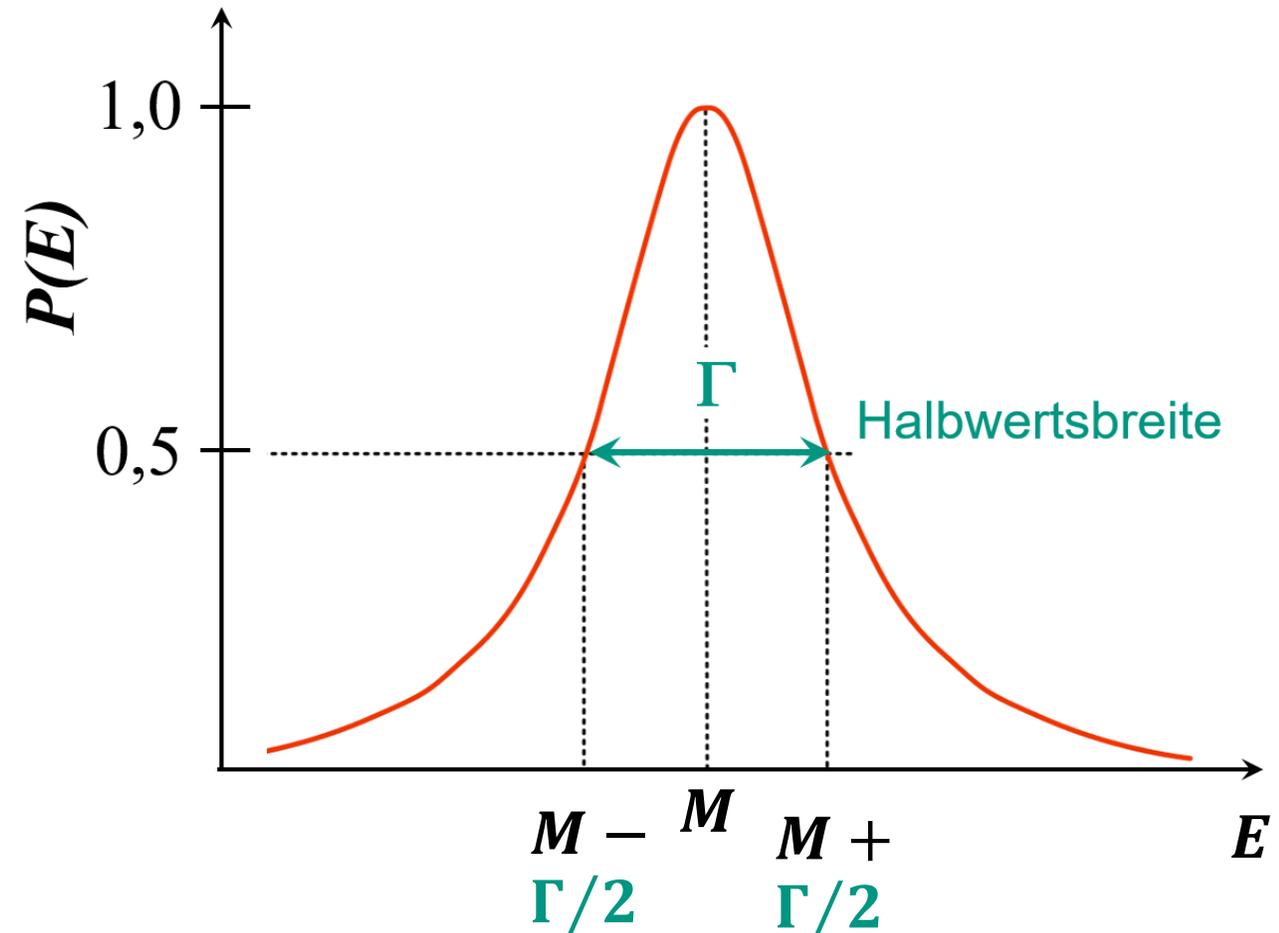
$$P(E) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Gamma}{(E - M)^2 + \Gamma^2/4}$$



Gregory
Breit



Eugene
Wigner



Eigenschaften von Resonanzen

■ Kurze Lebensdauer τ erzeugt große Zerfallsbreite Γ

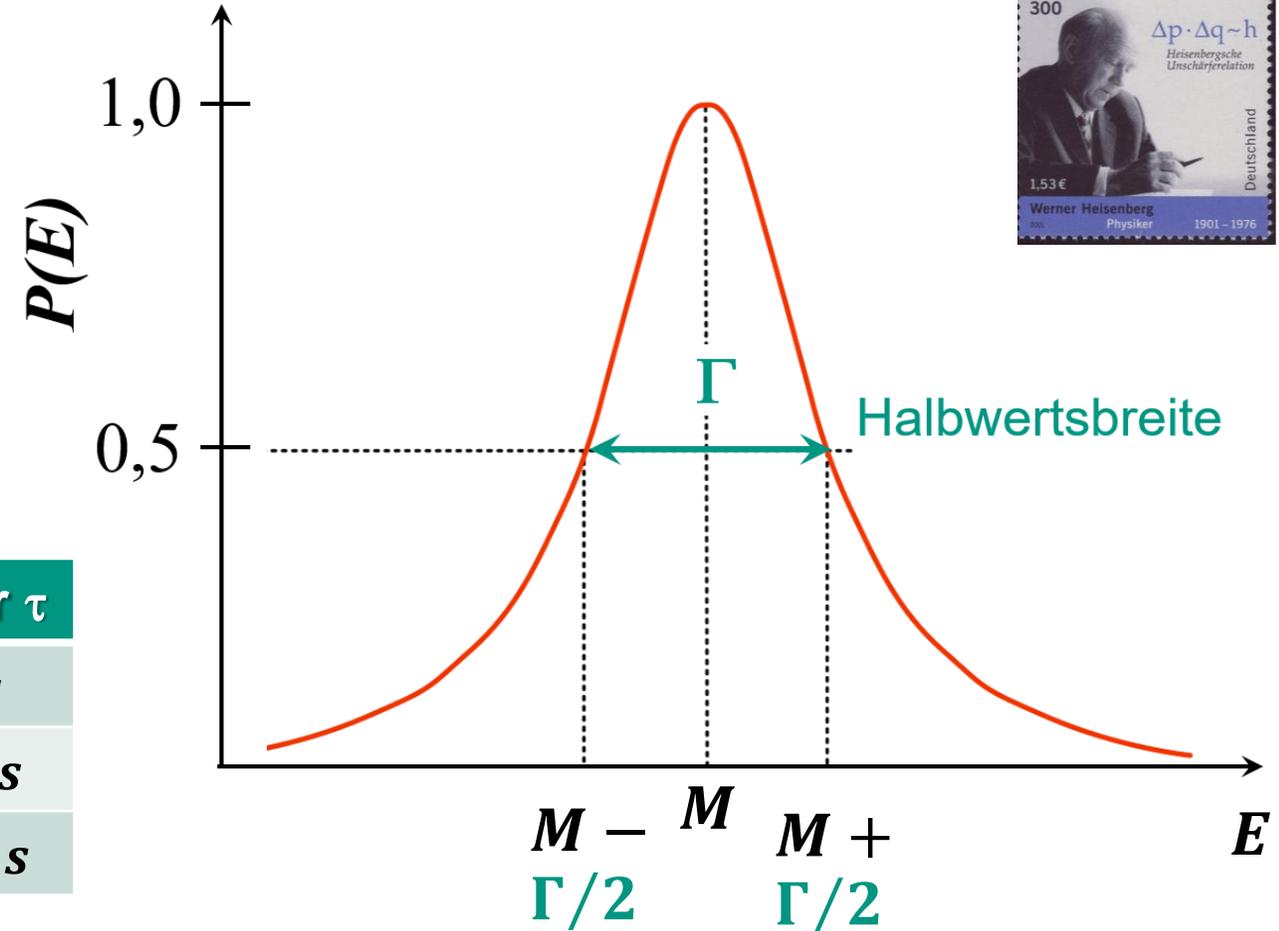
- Breite Γ einer Resonanz durch Heisenberg'sche Unschärferelation

$$\Gamma \cdot \tau \approx h$$

Breite Γ (eV)

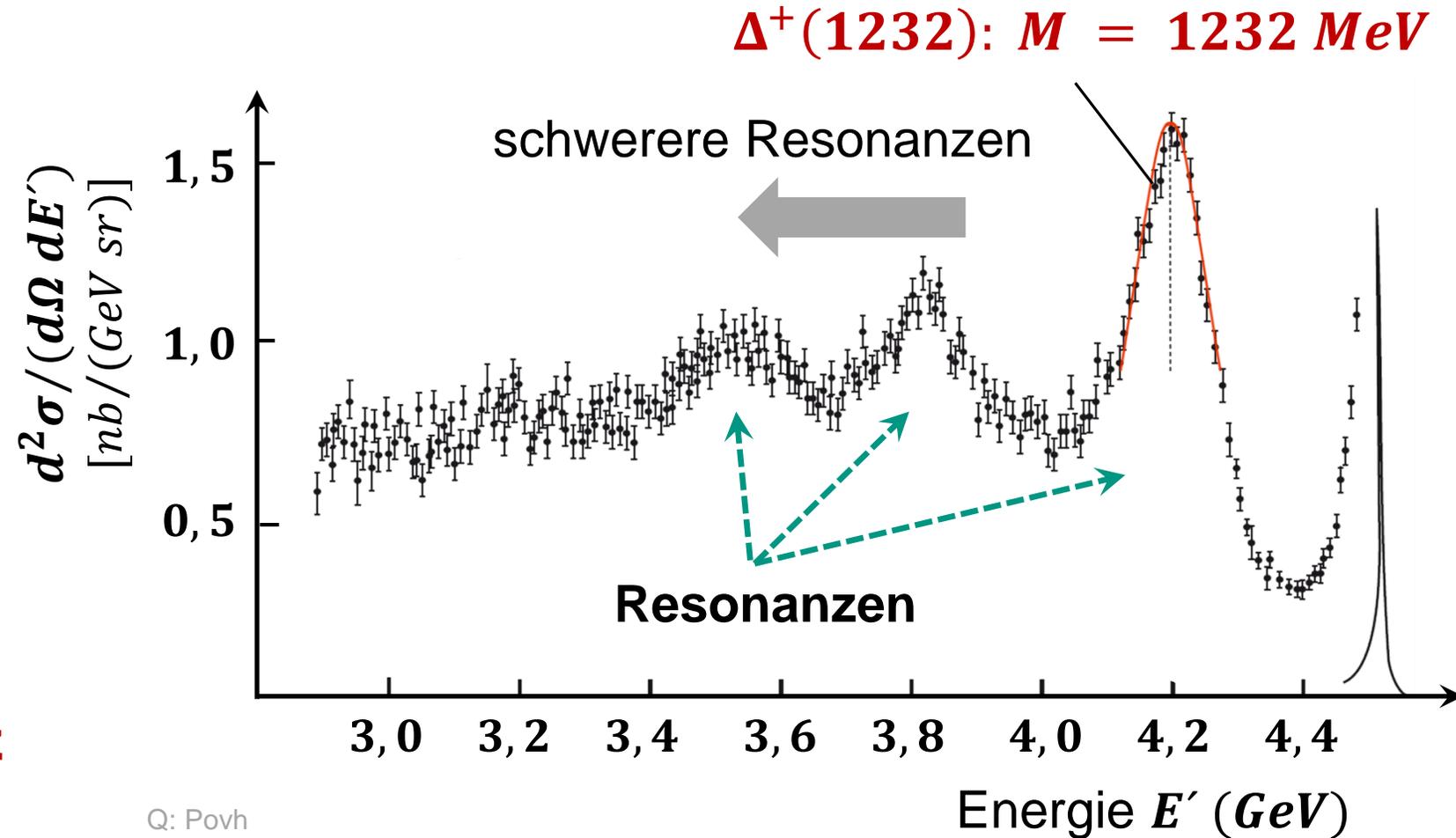
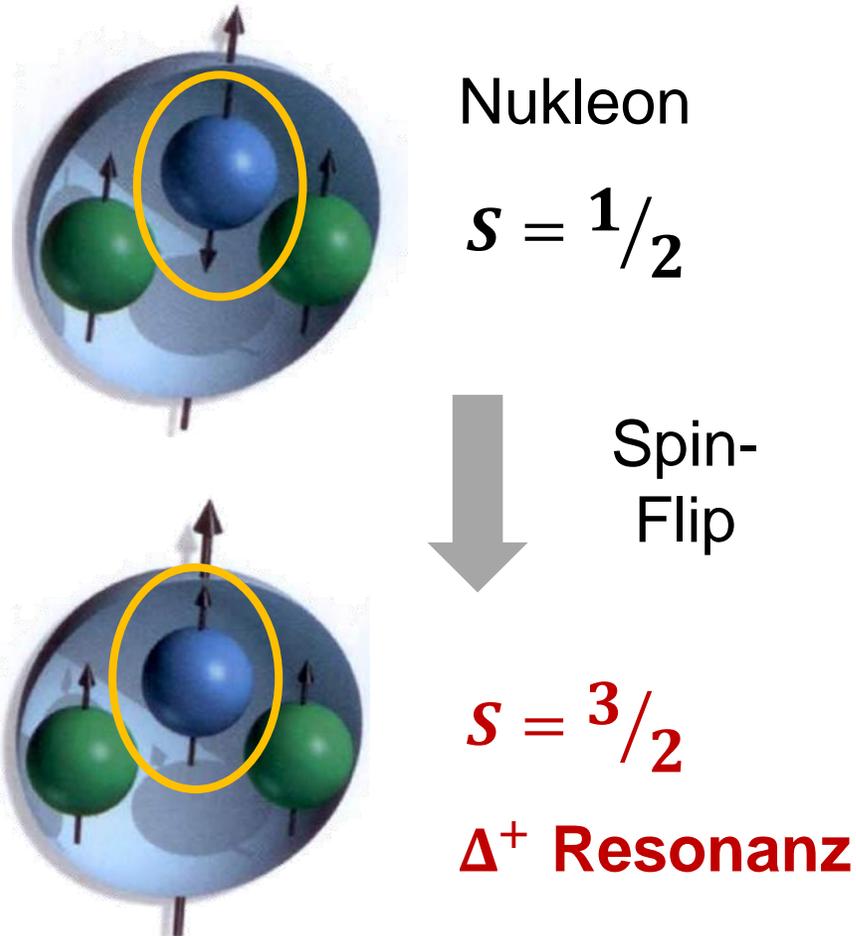
Lebensdauer τ (s)

Resonanz	Breite Γ	Lebensdauer τ
Δ^+ (1232)	$(131,1 \pm 2,4) \text{ MeV}$	$5 \cdot 10^{-24} \text{ s}$
Λ (1115, 7)	keine Resonanz!	$2,63 \cdot 10^{-10} \text{ s}$
ρ^+ (770)	$149,1 \text{ MeV}$	$4,41 \cdot 10^{-24} \text{ s}$



Delta-Resonanz: ein Spin $S = 3/2$ Zustand

- die 'berühmte' Δ^+ Resonanz: der 1. angeregte Nukleon-Zustand

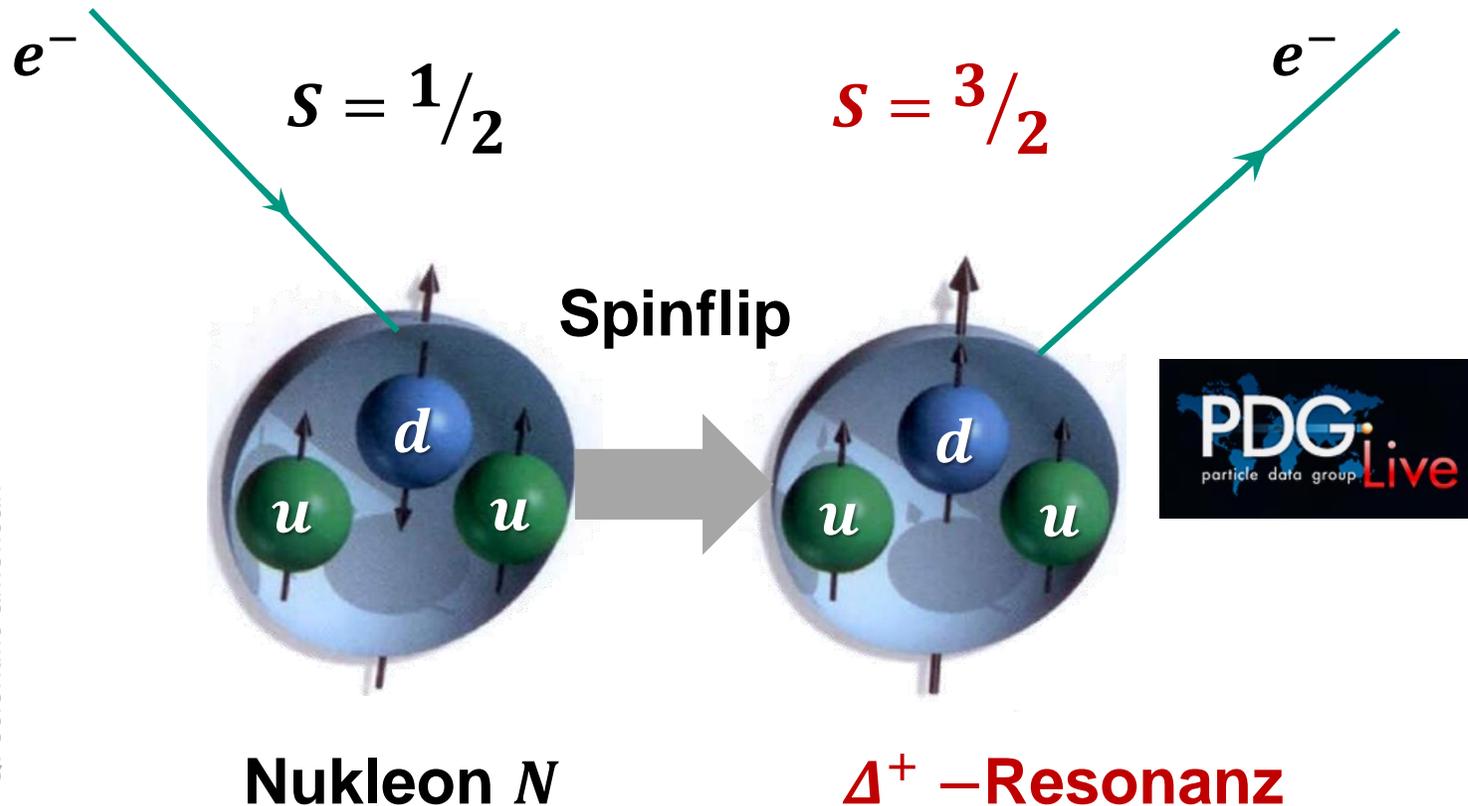


Q: Povh

Spin in der Teilchenphysik

■ Spin S : eine sehr wichtige Eigenschaft von Elementarteilchen

⇒ sehr großer Einfluss auf Masse, Lebensdauer ($p, n \Leftrightarrow \Delta^+$)



Δ^+ - Resonanz

$$m = 1232 \text{ MeV}$$

$$\tau = (5,63 \pm 0,14) \cdot 10^{-24} \text{ s}$$

$$\text{Zerfall: } \Delta^+ \rightarrow N + \pi$$

Proton

$$m = 938,27 \text{ MeV}$$

$$\tau > 3,6 \cdot 10^{29} \text{ a}$$

hypothetische Zerfallsmoden

Spin in der Atomphysik

■ Spin: eine wichtige Eigenschaft beim H – Atom*

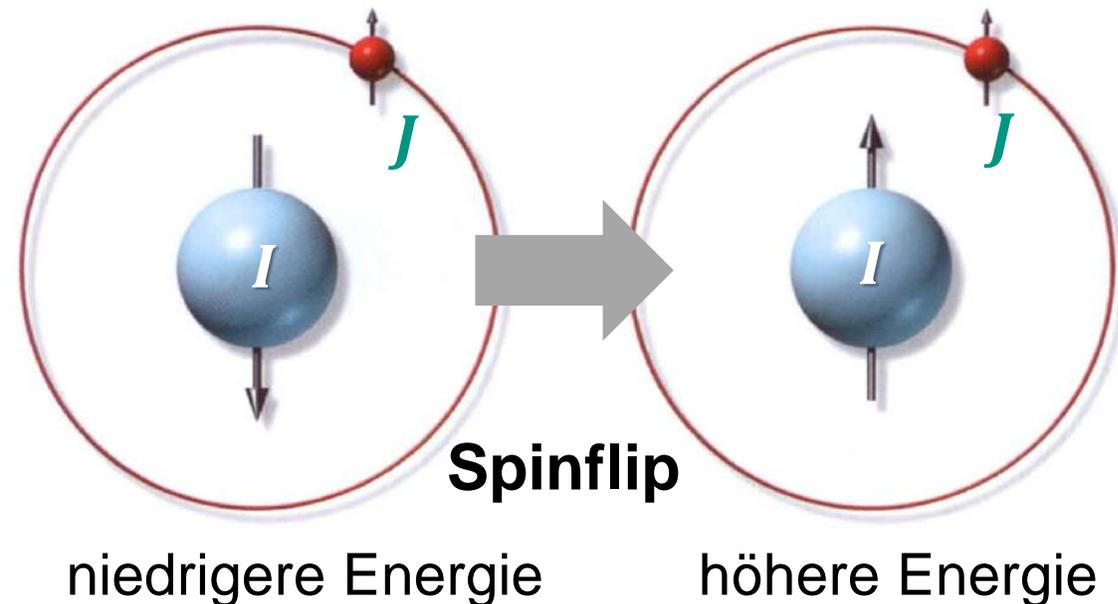
⇒ Spin-Bahnkopplung, Hyperfeinstruktur: **Präzisionsphysik**



Atomphysik - Hyperfeinstruktur

$$S = 0$$

$$S = 1$$



Q: scientific american

Kopplung der Spins von Hülle J und Kern I :
sehr kleiner Effekt relativ zur Masse

$S = 0, 1$ H – Atom

$$m = 938,27 \text{ MeV}$$

$$\Delta E = 5,9 \cdot 10^{-6} \text{ eV}$$

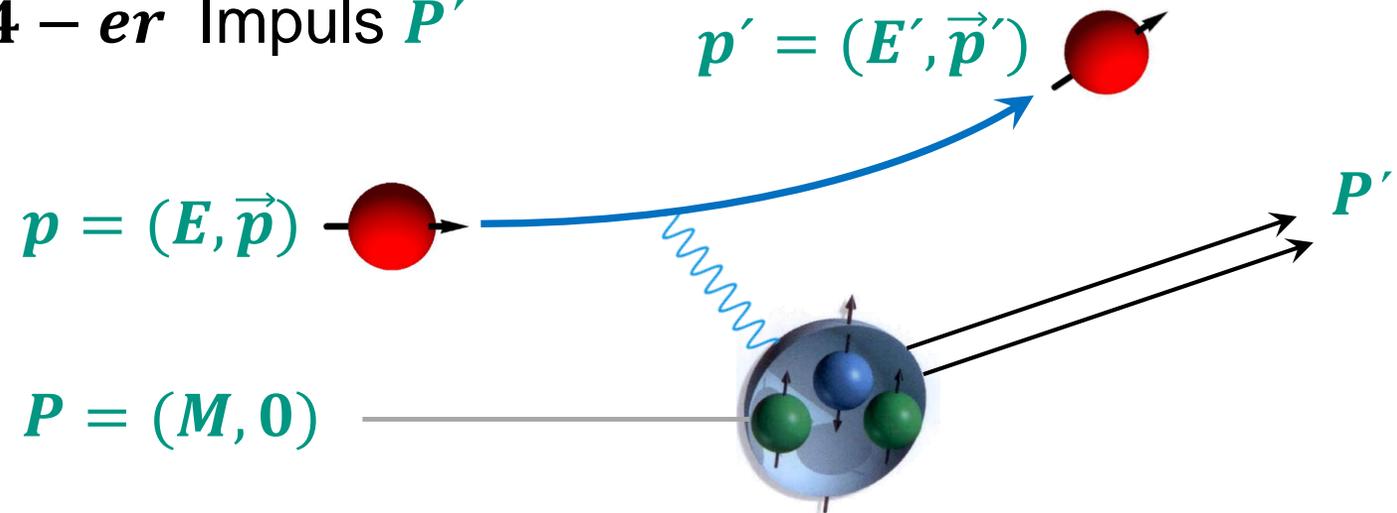
$$\tau(\uparrow\uparrow \rightarrow \uparrow\downarrow) \sim 10^7 \text{ a}$$

Relativistische Kinematik & Resonanzen

■ Kinematische Variable: Elektron & Proton, Resonanz

- *einlaufendes* Elektron mit 4 – *er* Impuls \mathbf{p}
- *auslaufendes* Elektron mit 4 – *er* Impuls \mathbf{p}'
- „*einlaufendes*“ (*ruhendes*) Proton mit 4 – *er* Impuls $\mathbf{P} = (M, \mathbf{0})$
- *auslaufende Resonanz* mit 4 – *er* Impuls \mathbf{P}'
- Energieverlust ν des e^- :

$$\nu = E - E'$$



Resonanz mit invarianter Masse W

■ invariante Masse W der Resonanz

$$W^2 = |\mathbf{P}'|^2 = (\mathbf{P} + \mathbf{q})^2 = M^2 + 2 \mathbf{P} \cdot \mathbf{q} + q^2 = M^2 + 2 M \cdot \nu - Q^2$$

$$W^2 = M^2 + 2 M \cdot \nu - Q^2$$

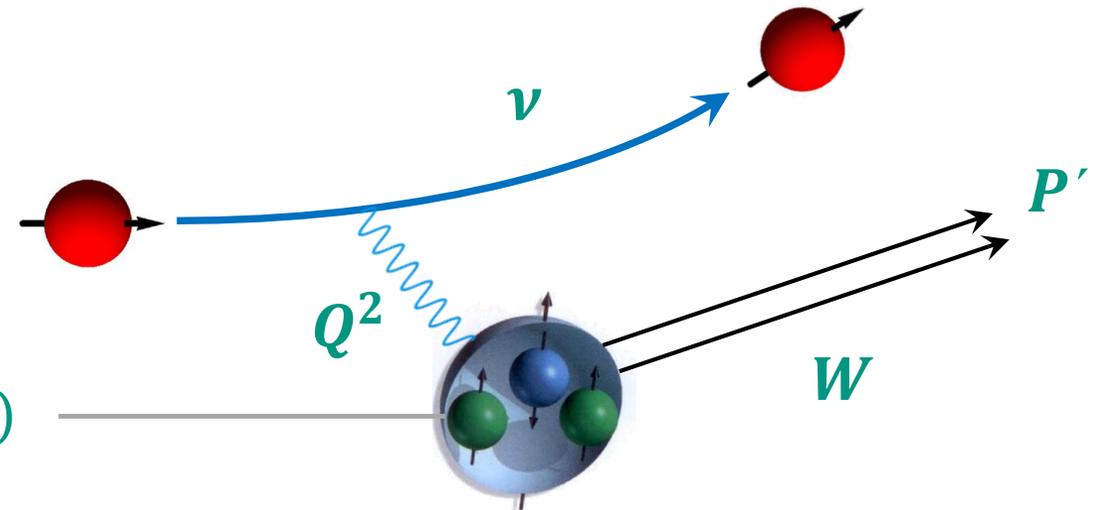
W : invariante
Masse

M : Masse
Proton

ν : Energie-
Übertrag

Q^2 : 4 - *er* Impuls-
Übertrag

$$\mathbf{P} = (M, \mathbf{0})$$



Fall 1 : keine innere Anregung

■ Elastischer Stoß – keine innere Anregung

- elastische Streuprozesse *ohne* Anregung des Nukleons

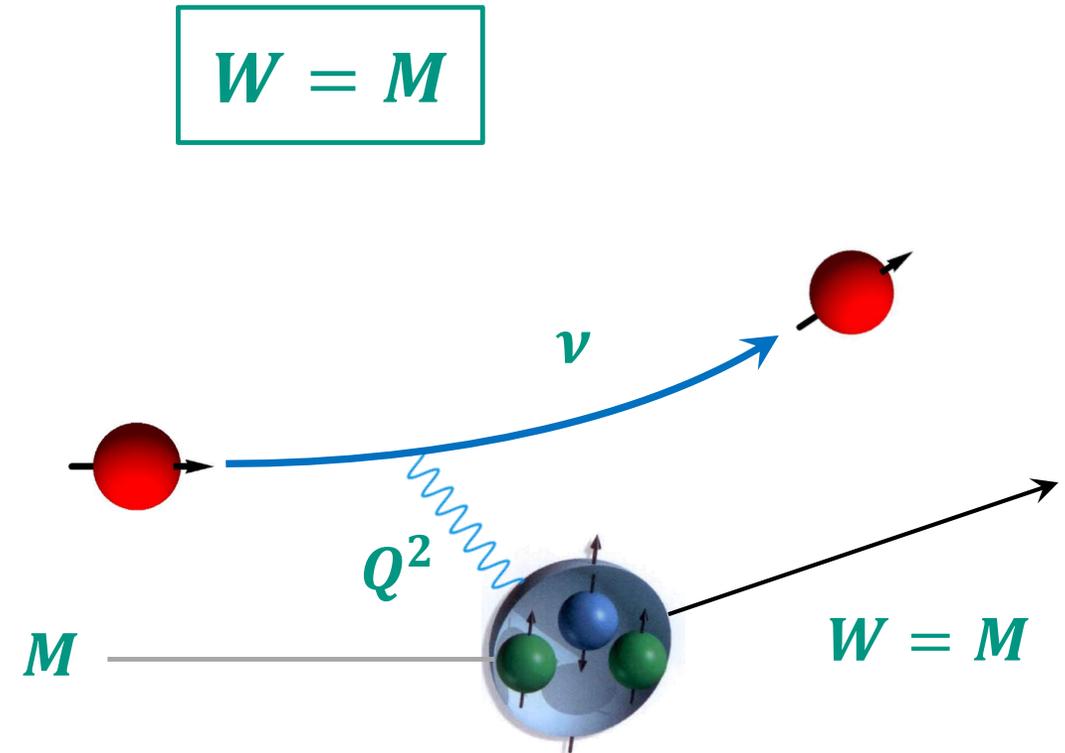
1 freier Parameter

$$W^2 = M^2 + \underbrace{2 M \cdot v - Q^2}_{= 0}$$



= 0

$$2 M \cdot v - Q^2 = 0$$

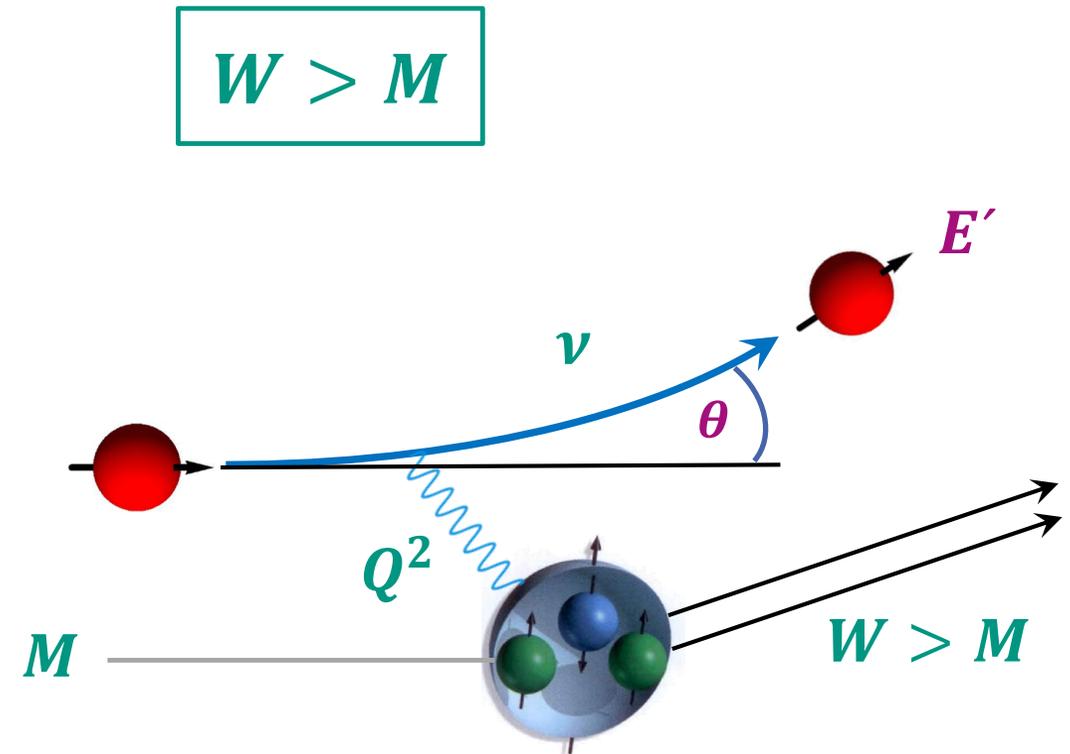


Fall 2 : Resonanz mit innerer Anregung

■ Inelastischer Stoß – innere Anregung: Erzeugung einer Resonanz

- inelastische Streuprozesse *mit* Anregung des Nukleons
- zur Beschreibung der Dynamik einer inelastischen Reaktion sind immer **2 unabhängige Parameter (Struktur-funktionen)** erforderlich:
(Q^2, ν) oder (E', θ)

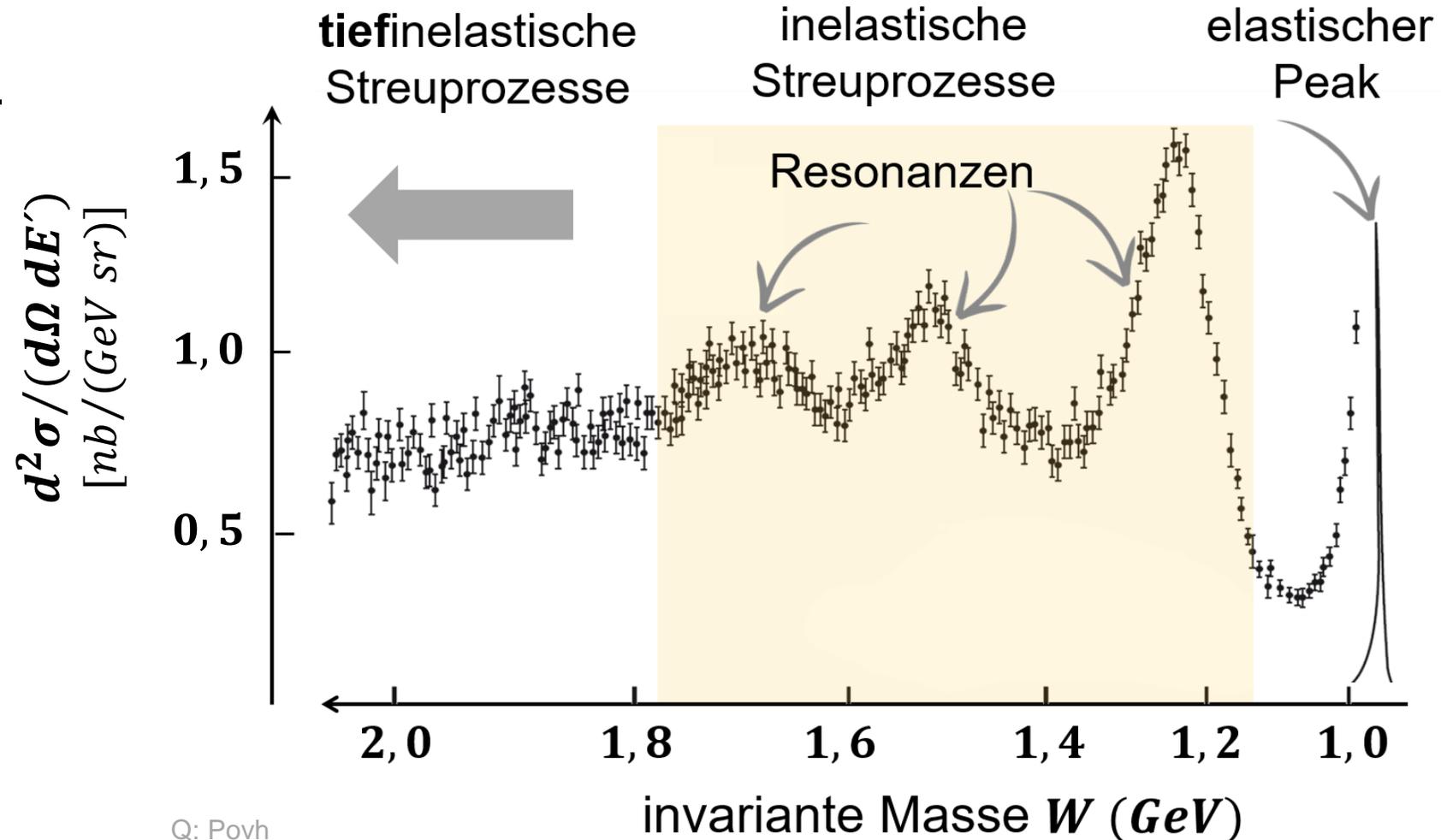
$$2 M \cdot \nu - Q^2 > 0$$



Von Resonanzen zu...tiefinelastischer Streuung

■ Auf dem Weg zu Partonen

- bei sehr hohen Elektron-Energien (hohes Q^2) nimmt $d\sigma/d\Omega$ ab für die Erzeugung von Resonanzen
- wir benötigen eine **kinematische Größe** die uns angibt, wie stark inelastisch die Reaktion ist



Q: Povh

Von Resonanzen zu...tiefinelastischer Streuung

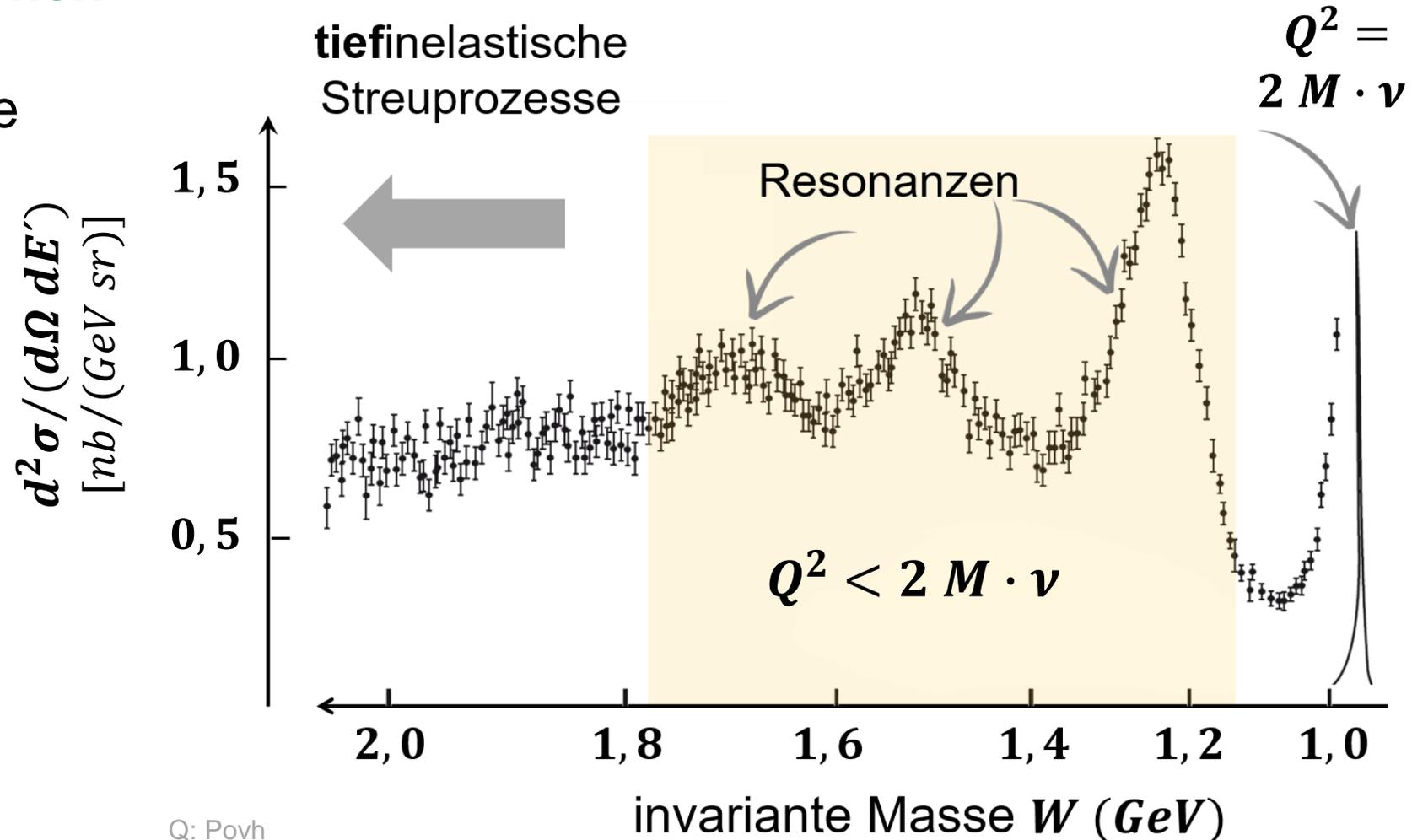
■ Auf dem Weg zu Partonen

- elastische Streuprozesse ohne innere Anregung des Nukleons

$$Q^2 = 2 M \cdot \nu$$

- inelastische Prozesse mit innerer Anregung des Nukleons

$$Q^2 < 2 M \cdot \nu$$



Q: Povh

Kinematische Größe: Bjorken SkalenvARIABLE x

■ Eigenschaften: dimensionslose Größe x als Maß der Inelastizität

- Definition:

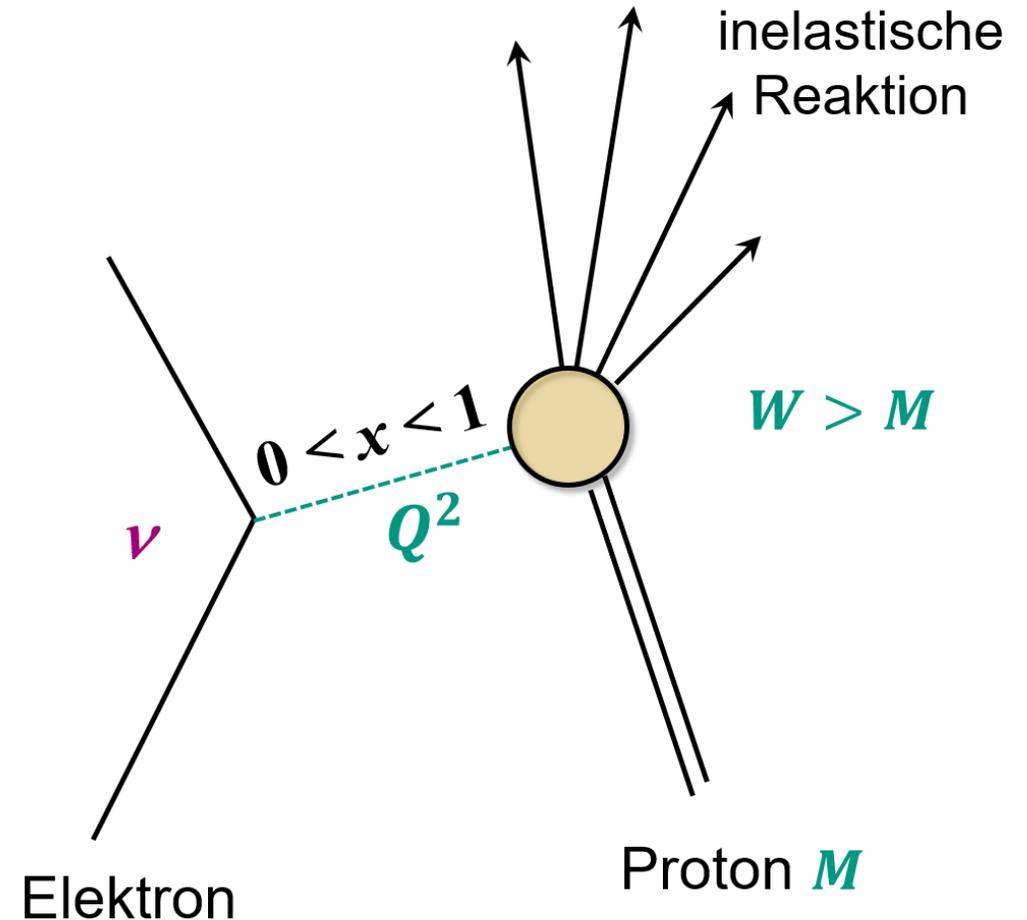
$$x = \frac{Q^2}{2M \cdot \nu} \quad x = 0 \dots 1$$

- Grenzfall: elastische Streuung

$$Q^2 = 2M \cdot \nu \Leftrightarrow x = 1 \text{ mit } W = M$$

**Partonmodell
des Nukleons**

$x =$ Impulsanteil des Partons



James Bjorken

Kinematische Größe: Bjorken SkalenvARIABLE x

■ Eigenschaften: dimensionslose Größe x als Mass der Inelastizität

- Definition:

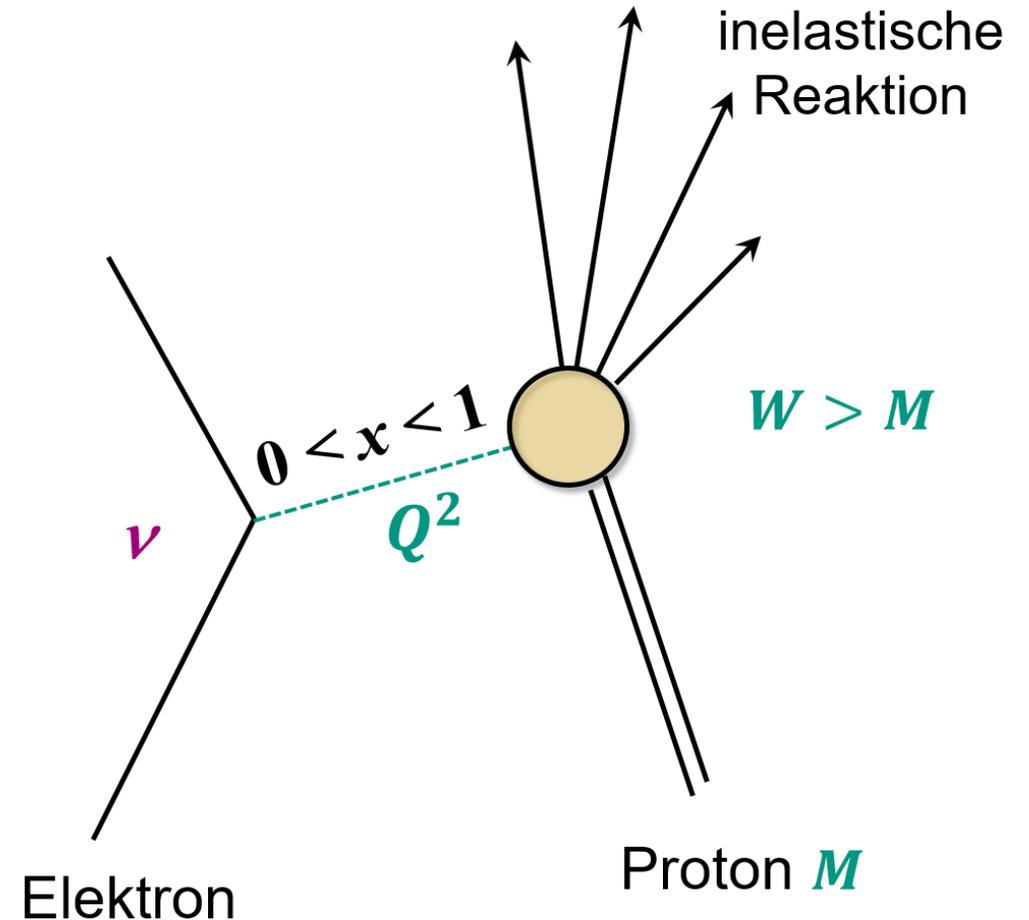
$$x = \frac{Q^2}{2M \cdot \nu} \quad x = 0 \dots 1$$

- inelastische Streuung

$$Q^2 < 2M \cdot \nu \Leftrightarrow 0 < x < 1 \text{ mit } W > M$$

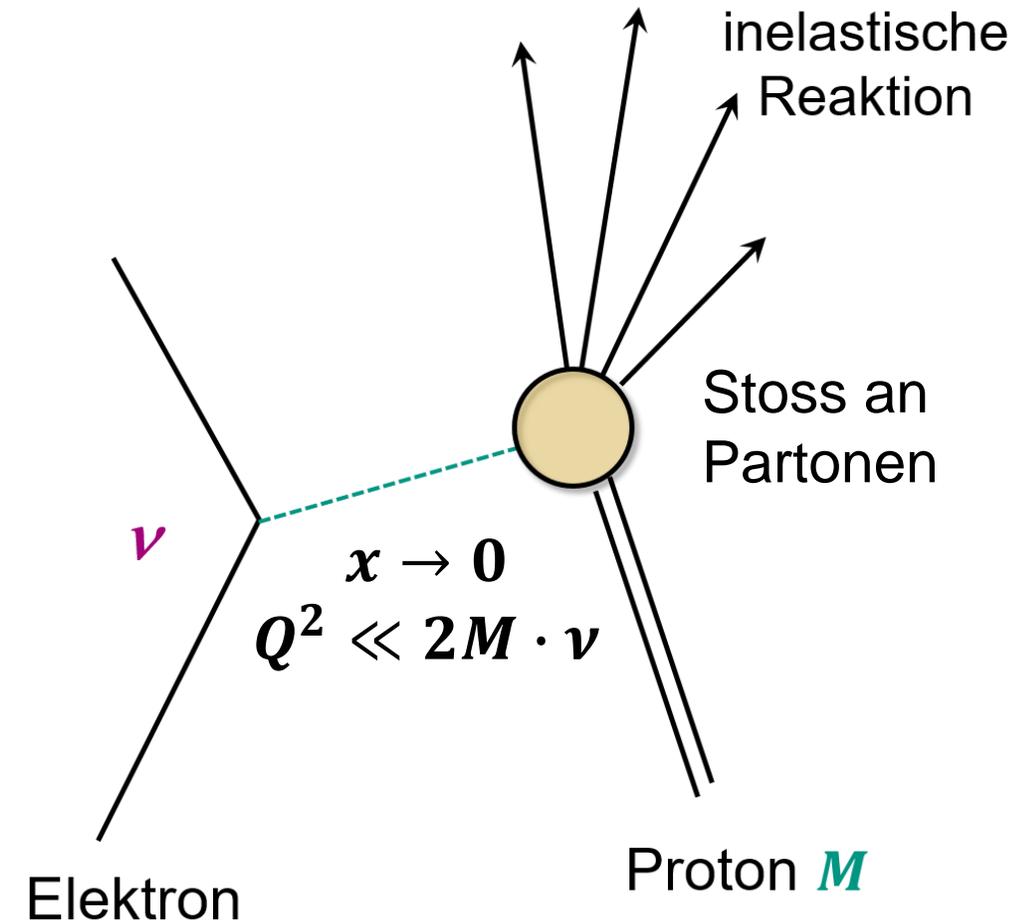
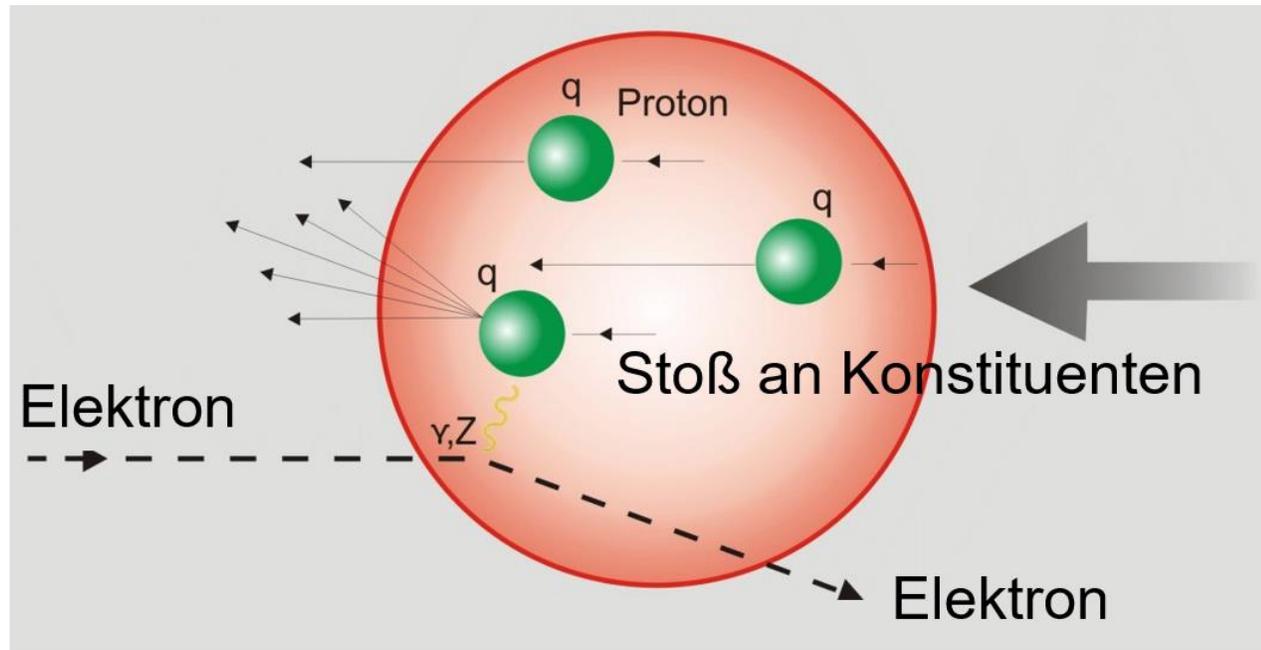
Partonmodell
des Nukleons

x = Impulsanteil des Partons



Tiefinelastische Streuung am Parton

■ Streuprozess an **individuellem Parton** innerhalb des Nukleons



- konstanter Formfaktor \Rightarrow Streuung an **punktförmigen Konstituenten** (**Partonen**)

Tiefinelastische Prozesse: Strukturfunktionen

■ Streuung an punktförmigen Partonen im Nukleon bei $W > 3 \text{ GeV}$

- nur sehr schwache Abhängigkeit von $d^2\sigma / (d\Omega dE')$ vom 4-er Impuls Q^2
- analog: **konstanter Formfaktor** wie bei Rutherford (punktförmiges Atom)*, jetzt: Streuung an punktförmigen Quarks (**Partonen**)

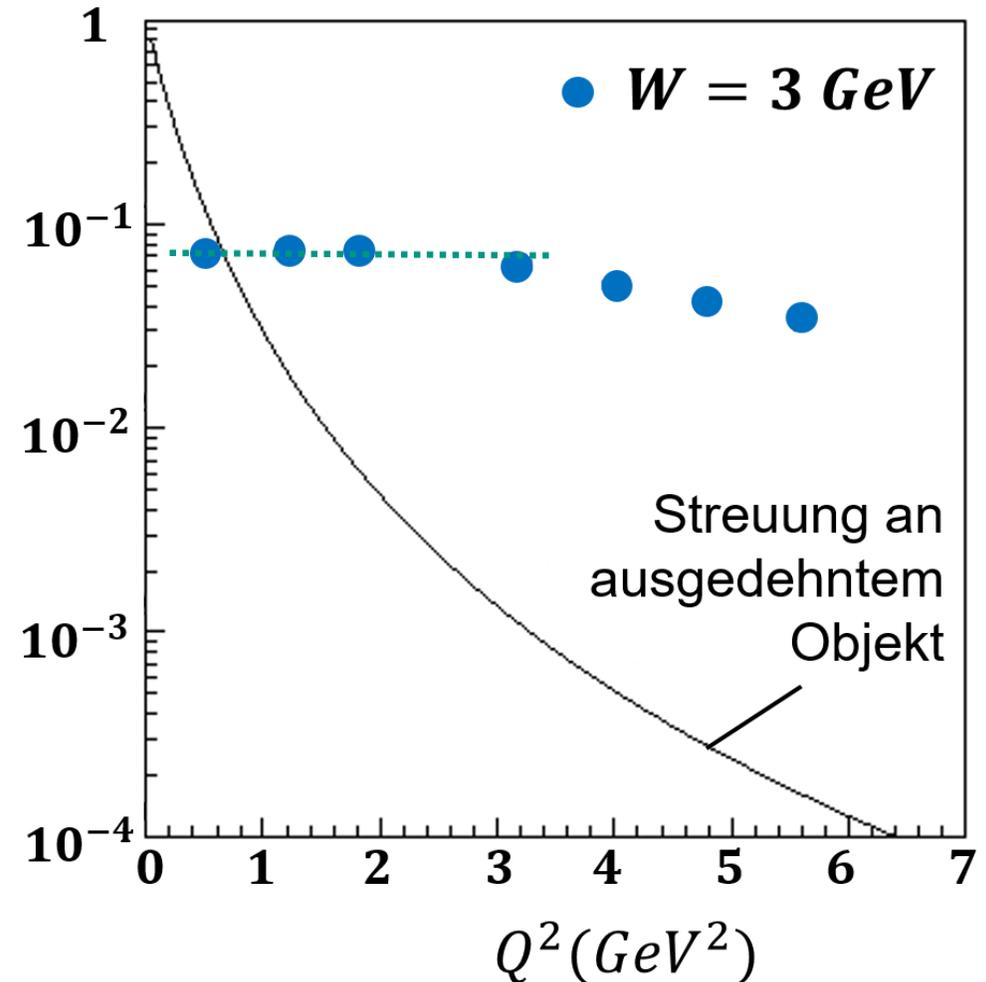
punktförmig
 $\rho(r) = \delta(r)/4\pi$



Radius $r \rightarrow$ Impuls $|q| \rightarrow$

konstant
 $F = 1$

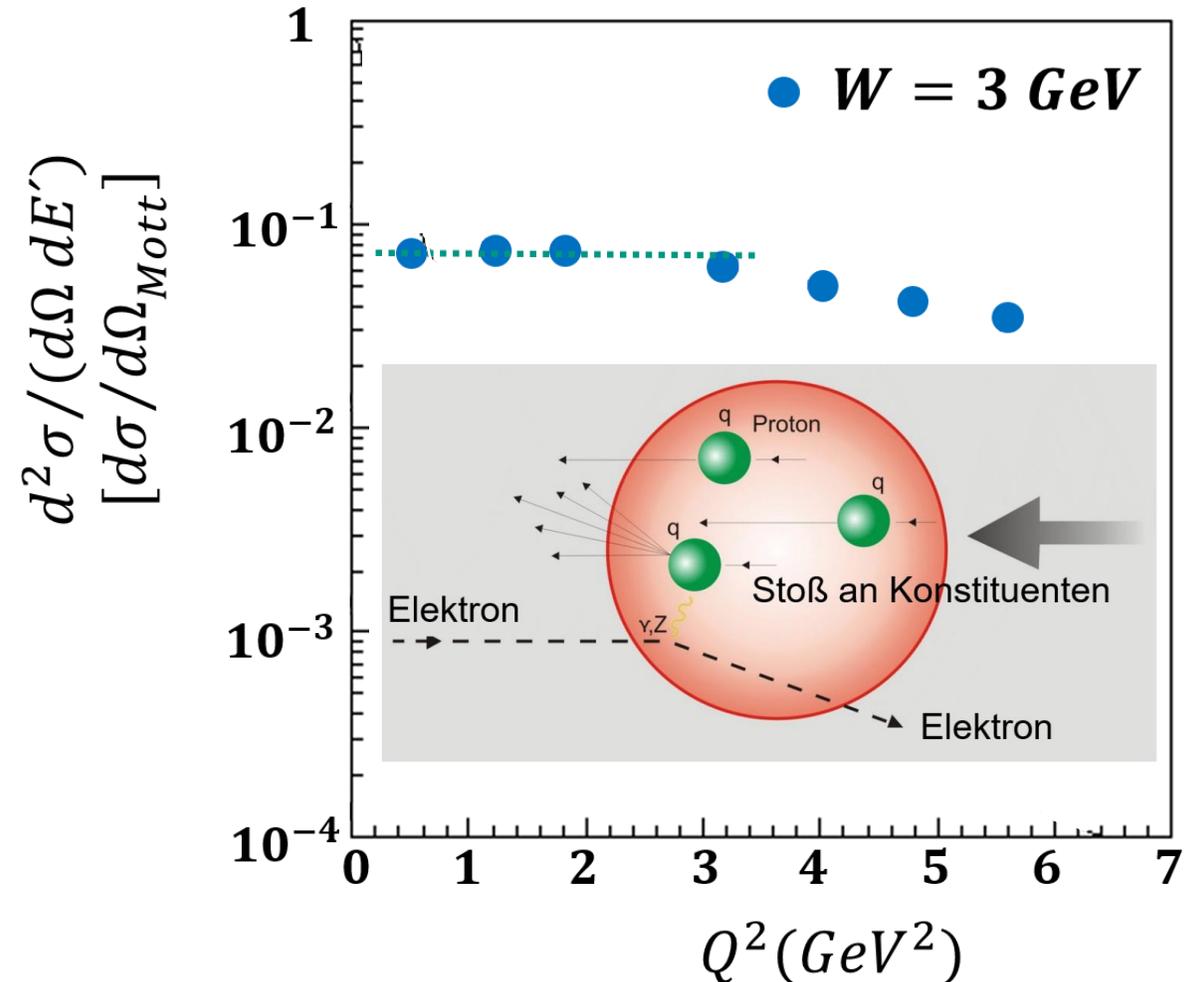
$$\frac{d^2\sigma}{[d\sigma/d\Omega_{Mott}]}$$



Tiefinelastische Prozesse: Strukturfunktionen

■ Streuung an punktförmigen Partonen im Nukleon bei $W > 3 \text{ GeV}$

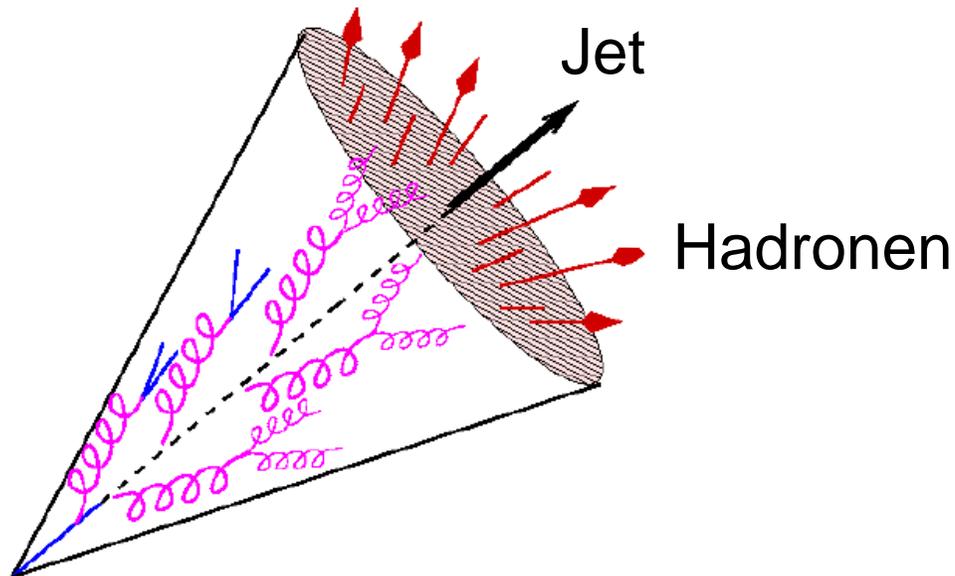
- aus Bedingung $\Delta E \cdot \Delta t < \hbar/2$ ergibt sich sehr kurze Stoßzeit Δt :
 \Rightarrow Parton-Bewegung im Nukleon ist 'eingefroren' (\Rightarrow ultrakurze 'Belichtungszeit' durch Photon)
- Nukleon ist für e^- ein Ensemble von 'quasi-freien' Partonen
- Elektron mit hohem ν und Q^2 streut **inkohärent** an individuellen Partonen



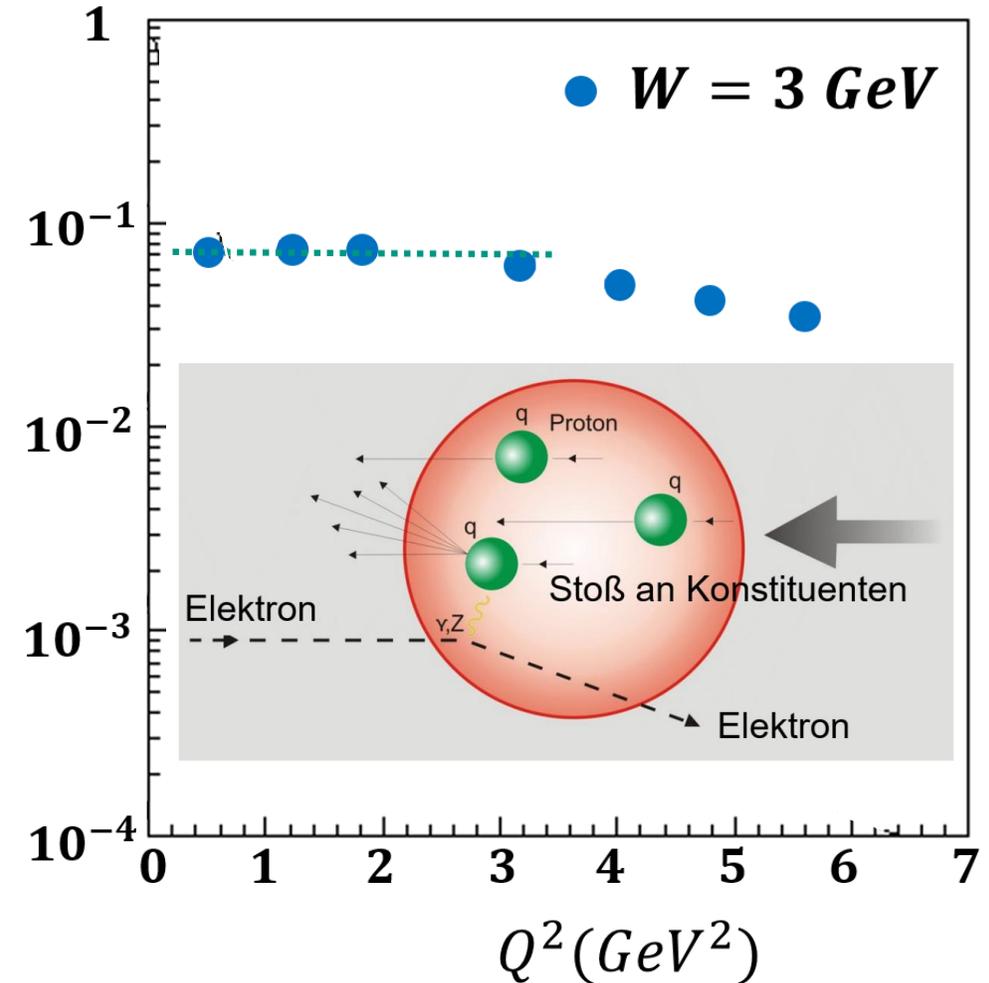
Tiefinelastische Prozesse: Strukturfunktionen

■ Streuung an punktförmigen Partonen im Nukleon bei $W > 3 \text{ GeV}$

- Partonen können aus Nukleon **nicht einzeln herausgeschlagen** werden! Bildung hadronischer Jets



$$\frac{d^2\sigma}{(d\Omega dE')} \left[\frac{d\sigma}{d\Omega_{Mott}} \right]$$



Tiefinelastische Prozesse: höchste Energien

■ SLAC: Experimente zur tiefinelastischen Elektron-Streuung am Nukleon

- SLAC: 3,2 *km* langer Linearbeschleuniger für Elektronen bis $E = 50 \text{ GeV}$
- 1969...72: Messungen bei $4 - 21 \text{ GeV}$: Beobachtung von Elektronen unter großen Streuwinkeln (Streuung an inneren 'harten' Objekten des Protons)



Beschleuniger in Stanford



Tiefinelastische Prozesse: Nobelpreis 1990

■ SLAC: Auszeichnung für *J. Friedman / H.W. Kendall / R.E. Taylor*

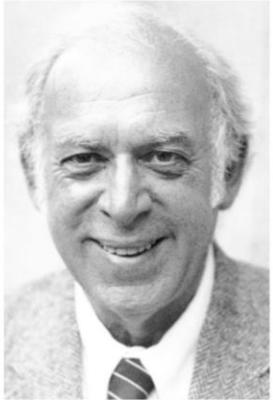


Photo from the Nobel Foundation archive.

Jerome I. Friedman

Prize share: 1/3

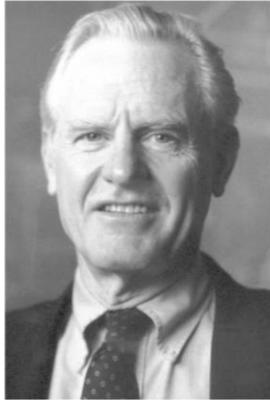


Photo from the Nobel Foundation archive.

Henry W. Kendall

Prize share: 1/3

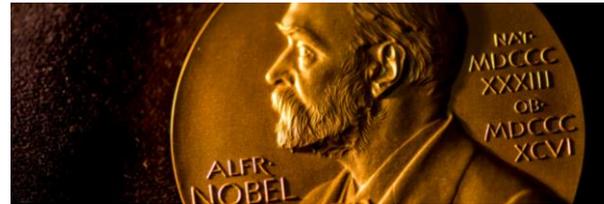


Photo: T. Nakashima

Richard E. Taylor

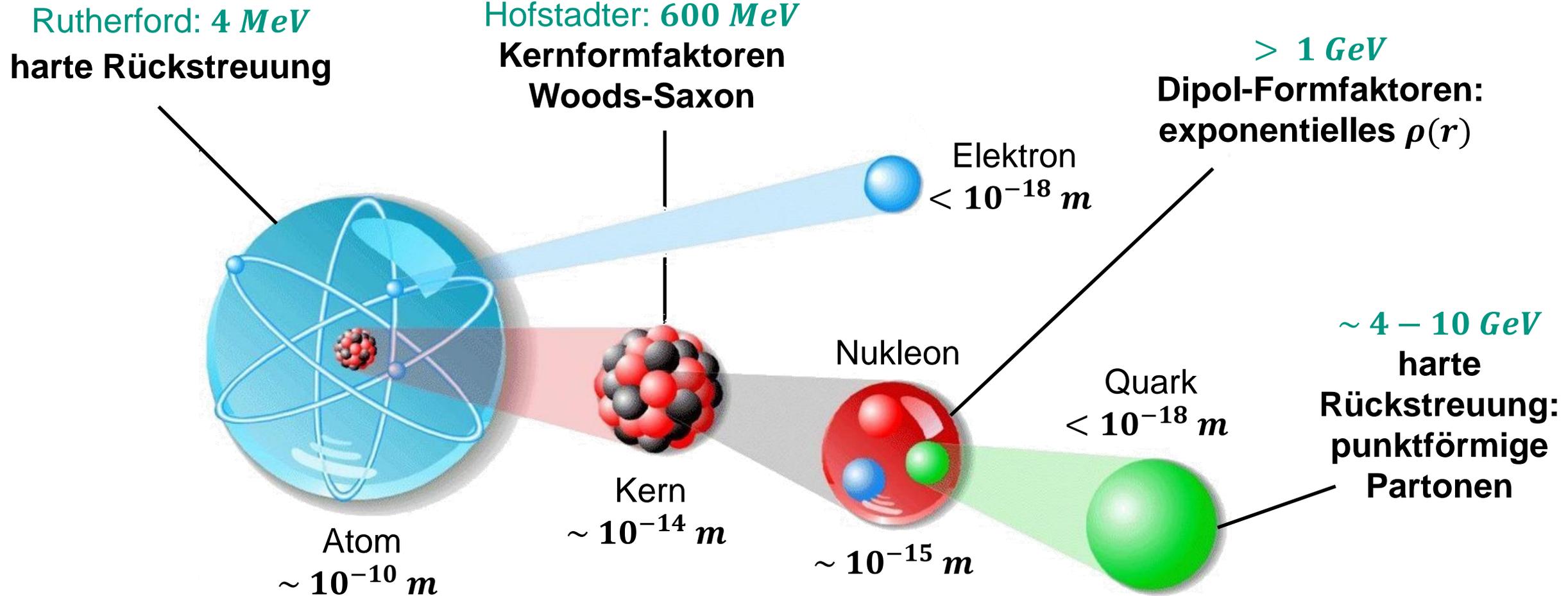
Prize share: 1/3

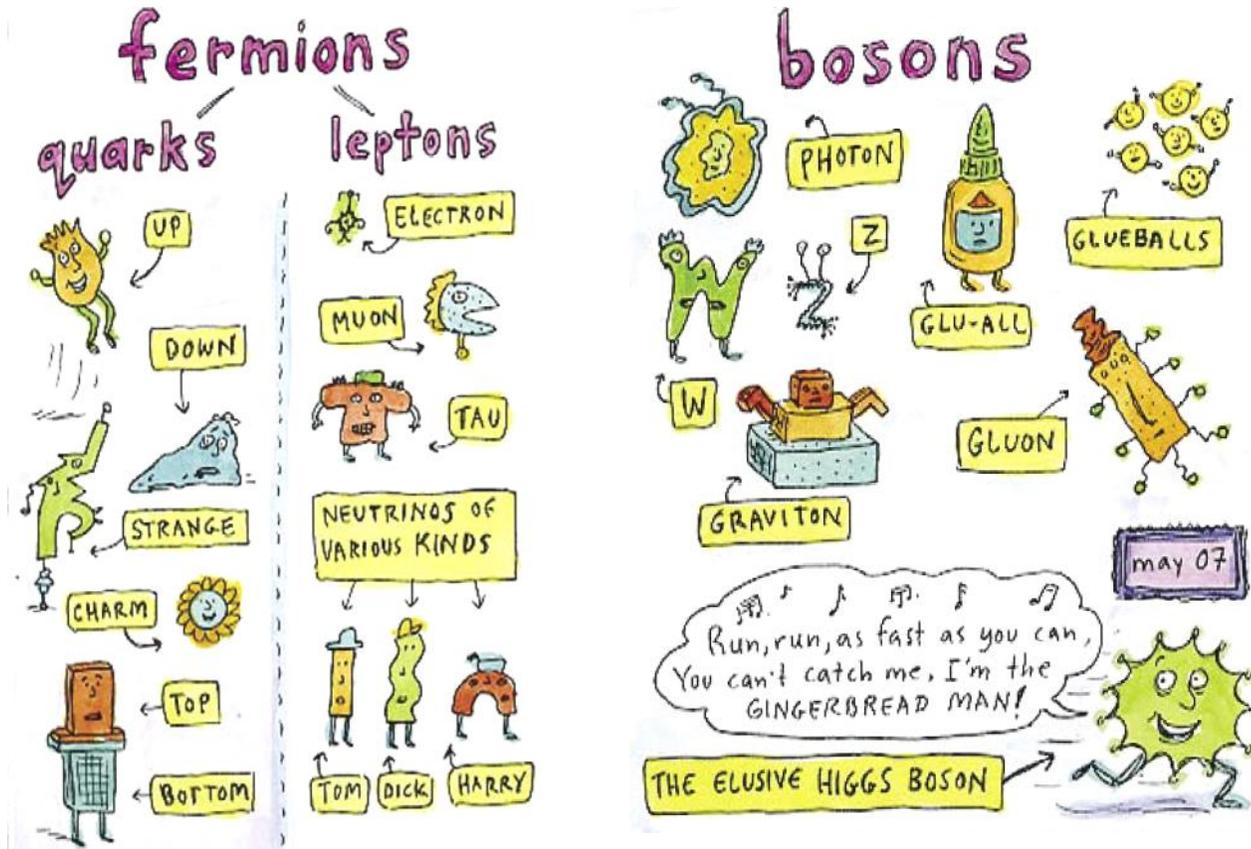
“for their pioneering investigations concerning **deep inelastic scattering of electrons on protons & bound neutrons**, which have been of essential importance for the development of the quark model in particle physics”



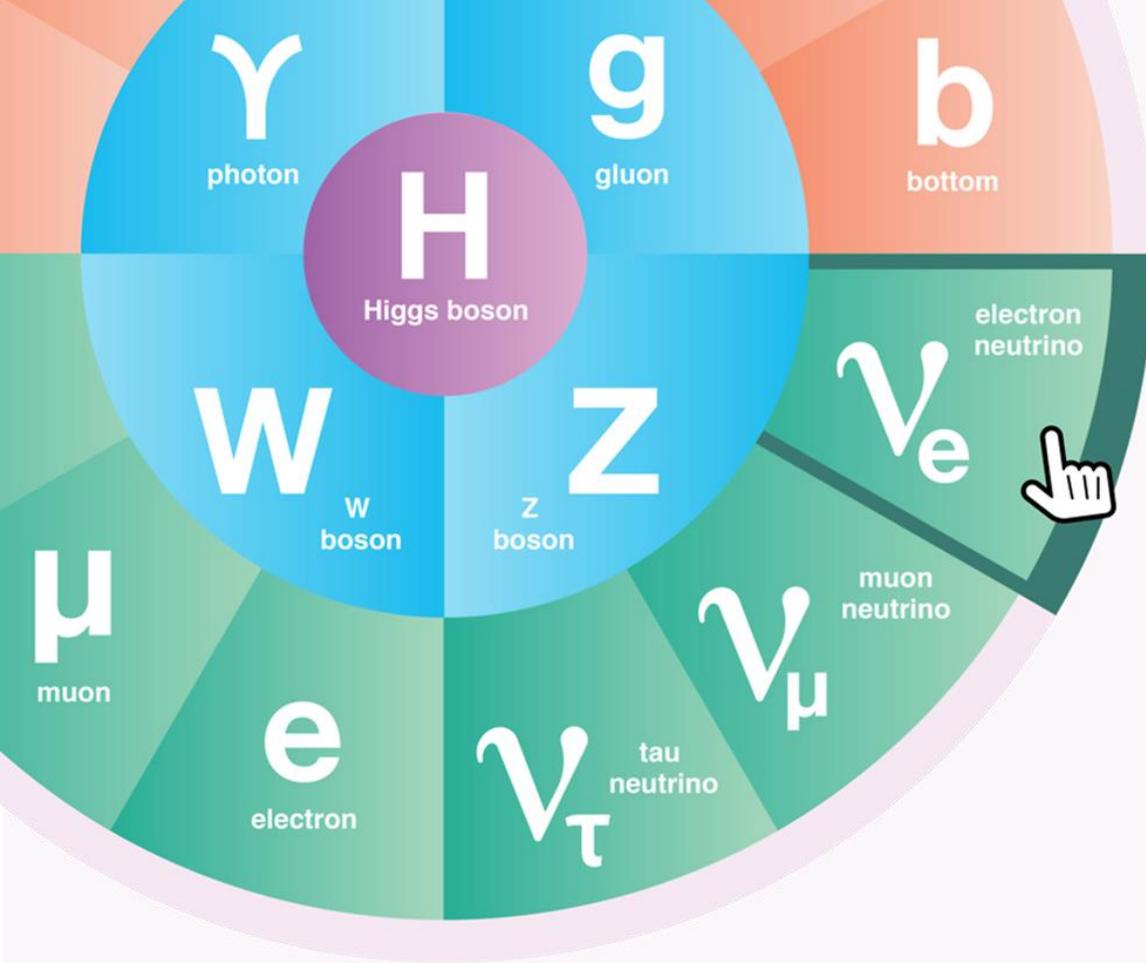
Tiefinelastische Prozesse: RECAP der Schritte

■ Aufdeckung der Substruktur der Materie durch **Streuexperimente**





KAPITEL 2.5 – STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK



explore

The Standard Model

- QUARKS**
- LEPTONS**
- BOSONS**
- HIGGS BOSON**

KAPITEL 2.5 – STANDARDMODELL DER TEILCHENPHYSIK

Grundlagen des Standardmodells (SM)

■ SM der Teilchenphysik: Beschreibung der fundamentalen...

- ... **Bausteine der Materie: Fermionen mit Spin $S = 1/2$**
3 Teilchenfamilien (Leptonen, Quarks)
- ... **Austausch-Wechselwirkungen: Spin-1 Eichbosonen**
(Quantenfeldtheorien): **starke, elektromagnetische & schwache Ww.**
- ... **Massengenerierung: Spin-0 Higgsboson**
Massen von Quarks, geladenen Leptonen, Eichbosonen

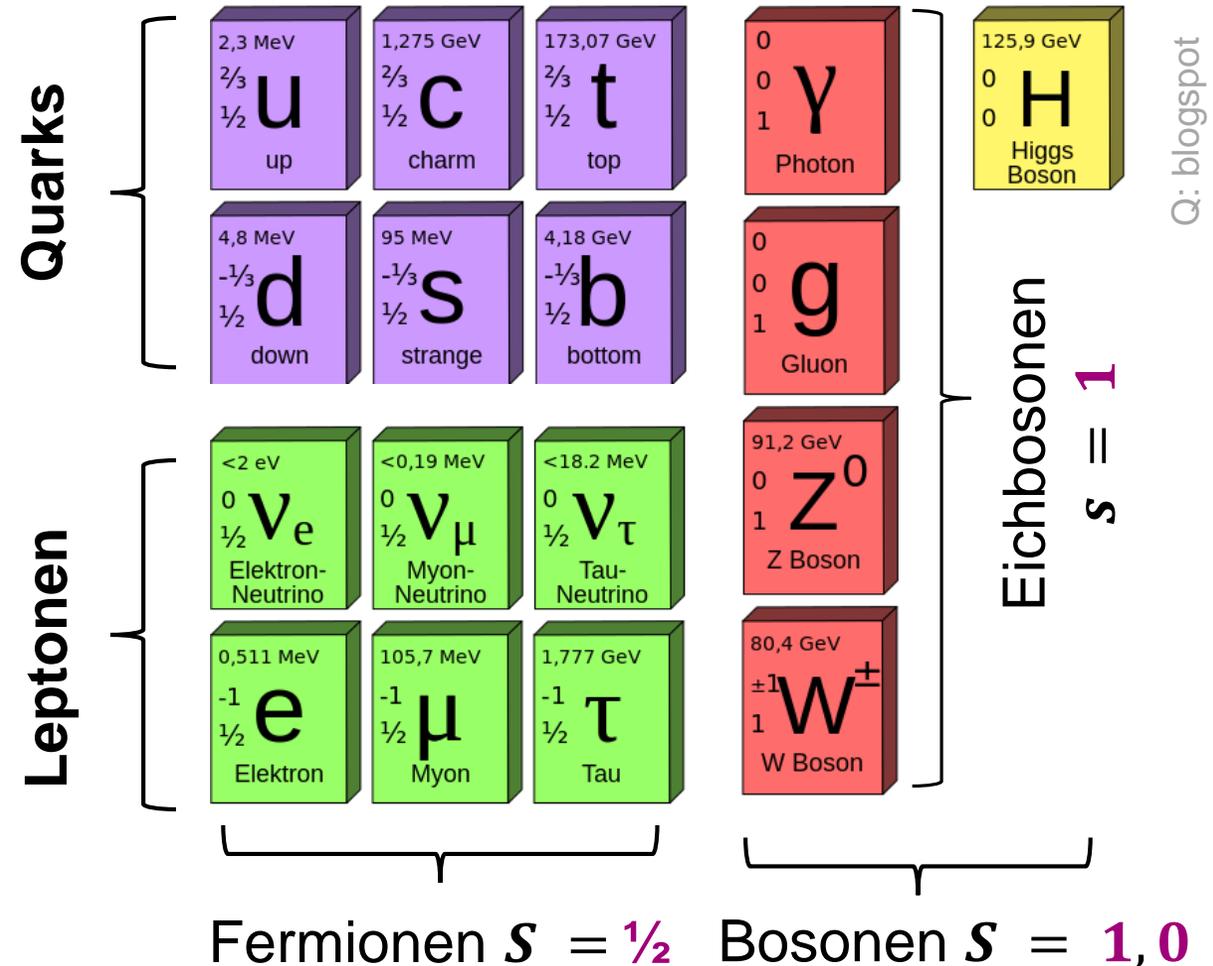
Elementarteilchen im Standardmodell

■ Fermionen mit $S = 1/2$: elementare Bausteine der Materie

- drei Familien an Quarks
- drei Familien an Leptonen
- Erhaltungssätze

■ Eichbosonen $S = 1$: Wechselwirkungen

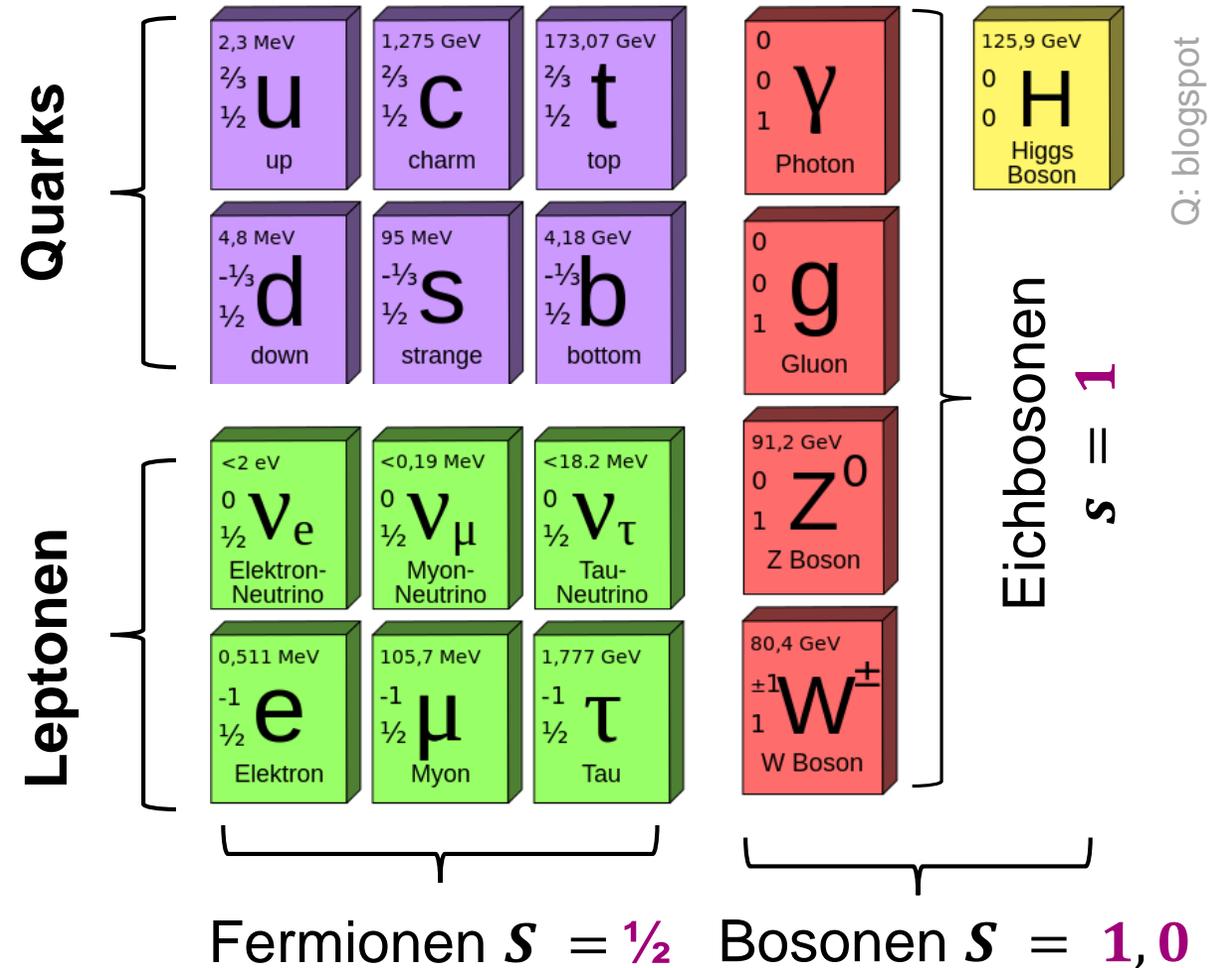
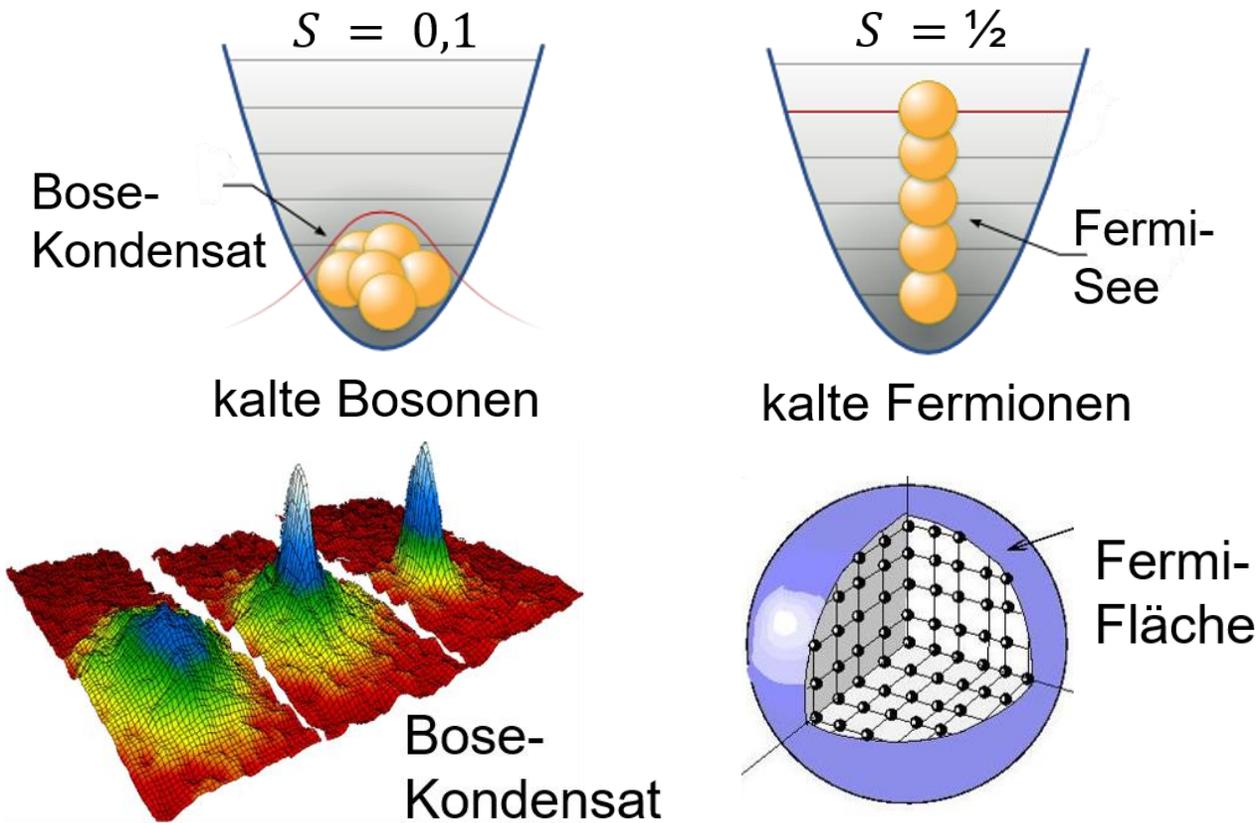
- elektromagnet. / stark / schwach
- Symmetrien & Higgsmechanismus



Elementarteilchen im Standardmodell

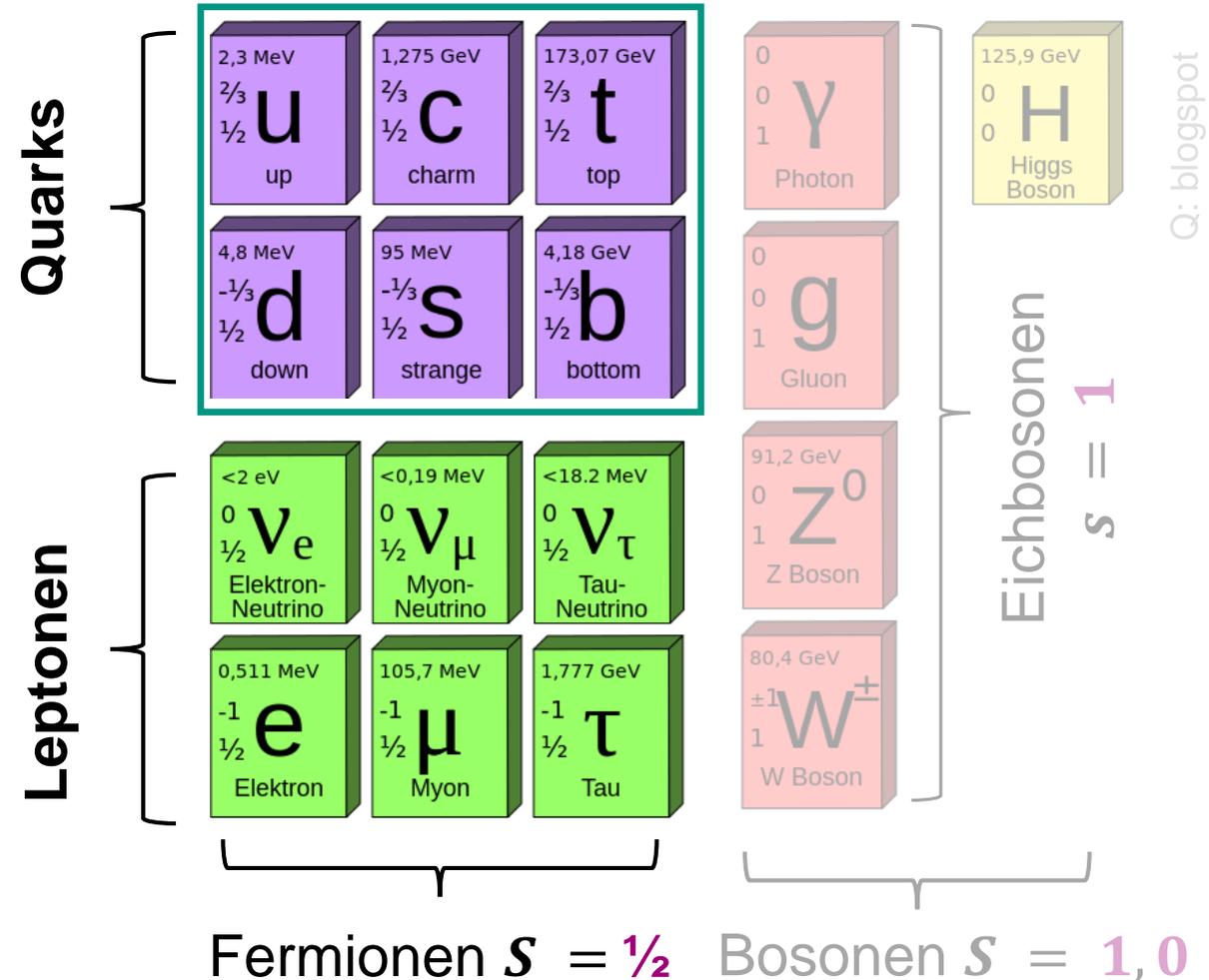
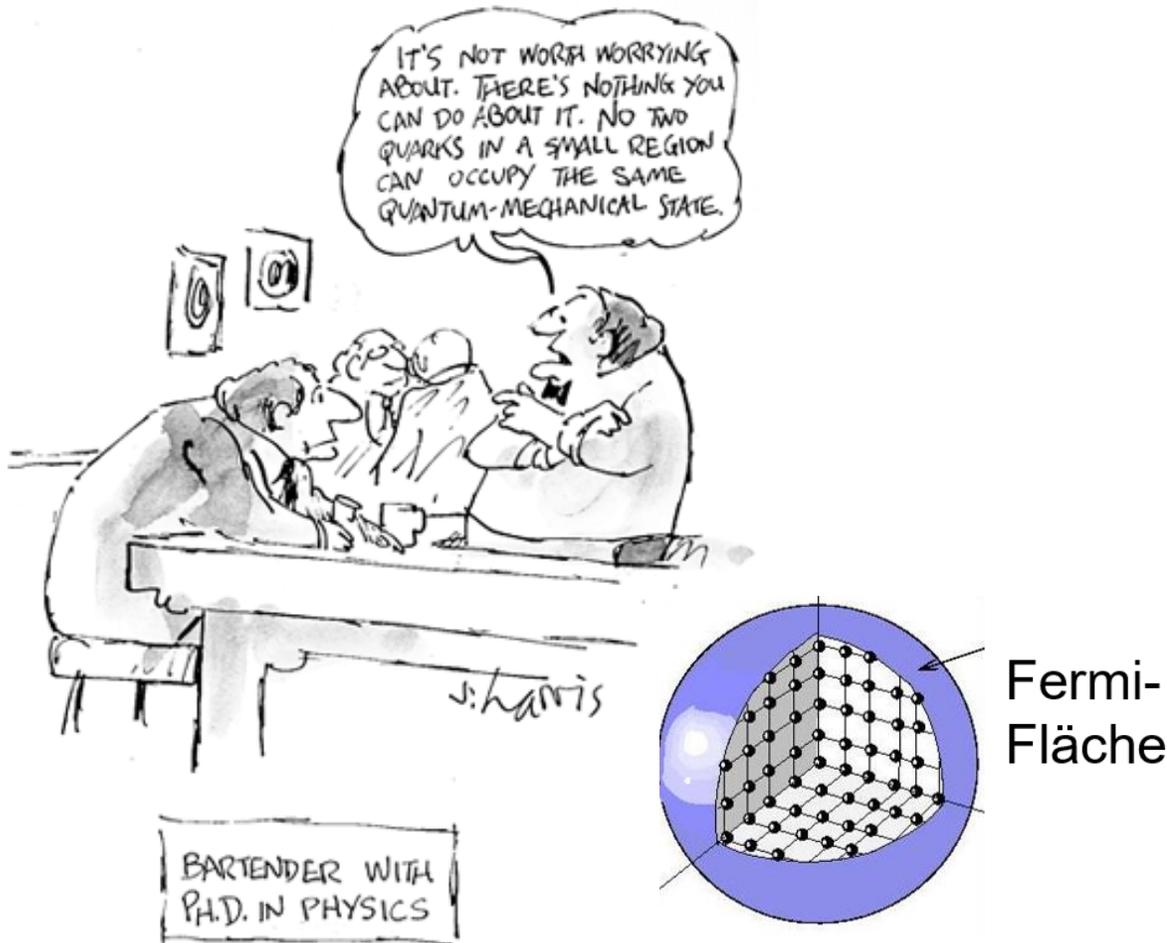
■ Spin S : wichtige Eigenschaft in der Teilchenphysik

unterschiedl. Vertauschungssymmetrien



Elementarteilchen im Standardmodell

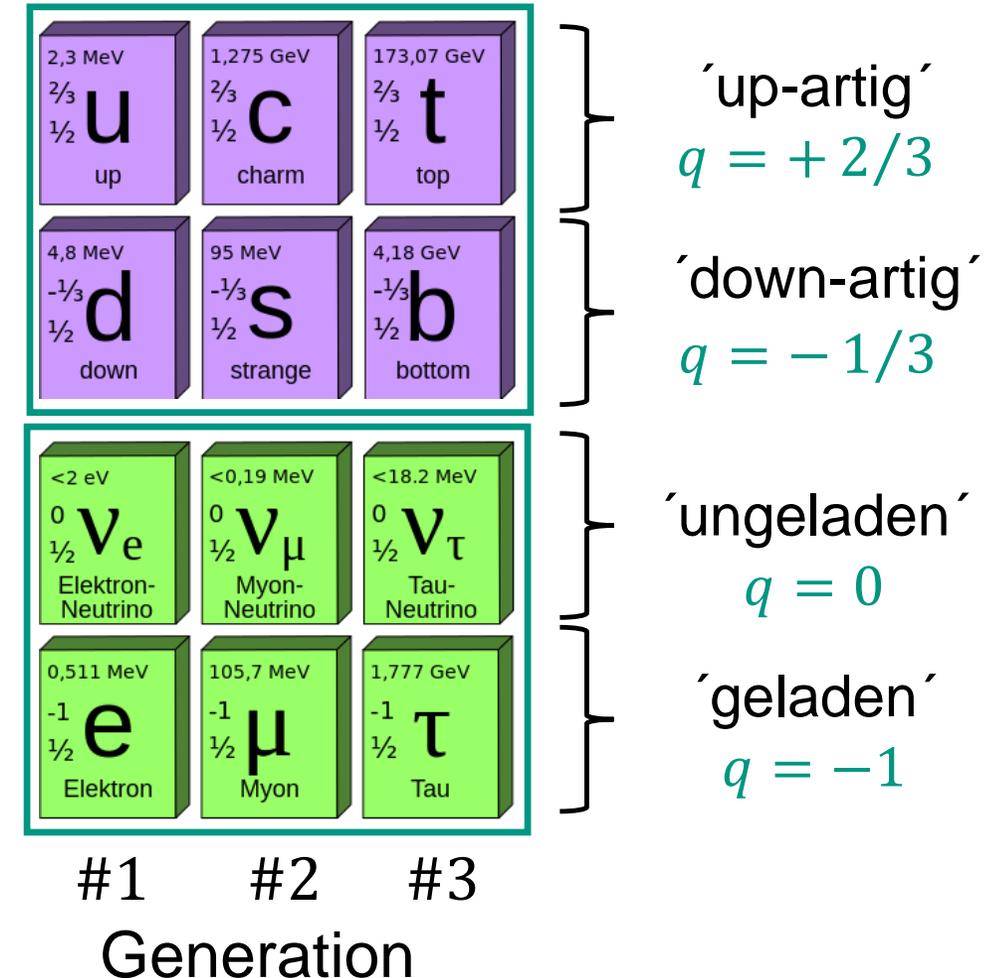
■ Spin S : wichtige Eigenschaft in der Teilchenphysik



Elementarteilchen im Standardmodell

■ Spin $S = 1/2$: Fermionen als elementare Bausteine der Materie

- 6 Quarks: *up, down, charm, strange, top, bottom*
- 6 Leptonen: *Elektron, Myon, Tau, + Neutrinos*
- plus **Antiteilchen**
- jeweils drei **Generationen** mit ähnlichen Eigenschaften
- jede Generation: **Dublettstruktur**
- **Ladung: Quarks drittelzahlig** ($+2/3, -1/3$)
Leptonen ganzzahlig ($0, -1$)



Elementarteilchen im Standardmodell: Fragen

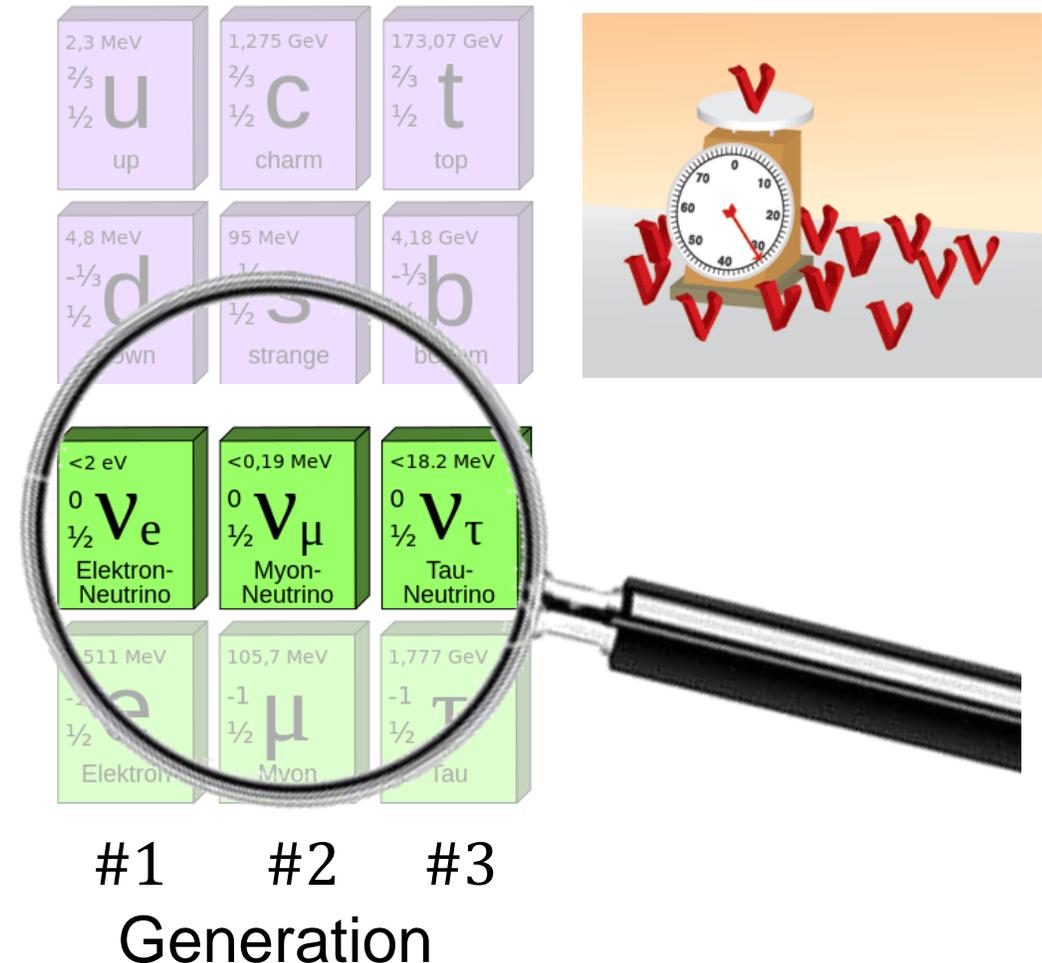
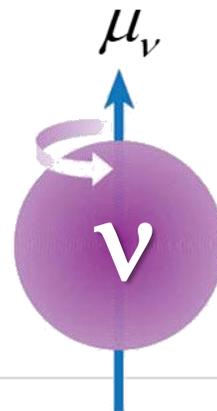
■ Intrinsische Eigenschaften von Neutrinos: offene Fragestellungen

- Neutrino: **Masse**, Teilchen/- Antiteilchen-Charakter (Dirac- vs. Majorana)
- als elektrisch neutrale Teilchen können ν 's bei **innerer Struktur** z.B. ein endliches **magnetisches Moment** ($\mu_\nu \neq 0$) zeigen
- theoretische Erwartung:

$$\mu_\nu \approx 3 \cdot 10^{-19} \mu_B \cdot (m_\nu / 1 \text{ eV})$$

- experimentelle Obergrenze:

$$\mu_\nu < 3 \cdot 10^{-11} \mu_B$$



Elementarteilchen im Standardmodell: Fragen

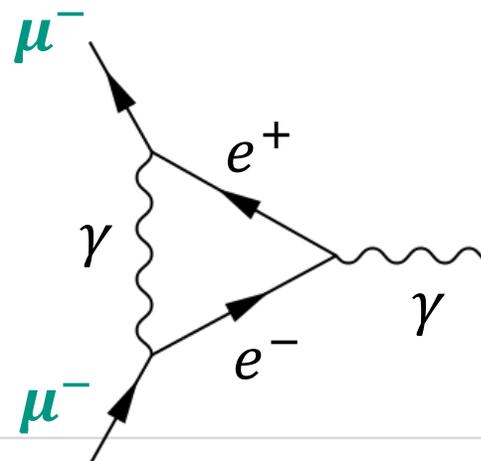
■ Intrinsische Eigenschaften von Myonen: offene Fragestellung g – Faktor

- g – Faktoren für magnetische Momente von elementaren Fermionen (e, μ, τ) werden über **virtuelle Prozesse** beeinflusst: \Rightarrow führen zu Abweichungen vom Wert $g_{Dirac} = 2,00000\dots$

- Test wird als $g - 2$ Experiment bezeichnet

- wichtigste Korrekturen durch **QED** – Prozesse

Vertex-Korrektur



2,3 MeV $\frac{2}{3}$ u $\frac{1}{2}$ up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ c $\frac{1}{2}$ charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ t $\frac{1}{2}$ top
4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ d $\frac{1}{2}$ down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ s $\frac{1}{2}$ strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ b $\frac{1}{2}$ bottom



<2 eV 0 ν_e $\frac{1}{2}$ Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 ν_μ $\frac{1}{2}$ Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 ν_τ $\frac{1}{2}$ Tau-Neutrino
0,511 MeV -1 e $\frac{1}{2}$ Elektron	105,7 MeV -1 μ $\frac{1}{2}$ Myon	777 GeV -1 τ $\frac{1}{2}$ Tau

#1 #2 #3
Generation

Elementarteilchen im Standardmodell: Fragen

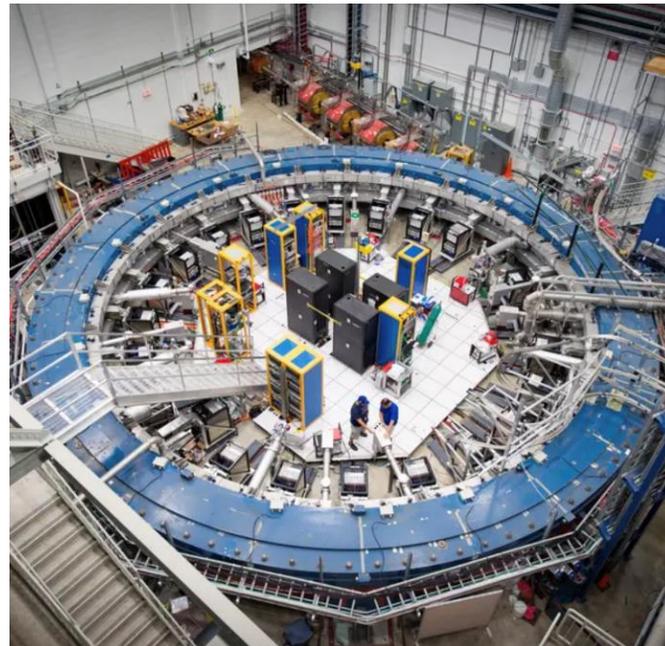
■ Intrinsische Eigenschaften von Myonen: offene Fragestellung g – Faktor

- g – 2 Diskrepanz:
Experiment & Theorie liegen um $4,2 \sigma$
auseinander – Systematik oder ??

The New York Times

A Tiny Particle's Wobble Could Upend the Known Laws of Physics

Experiments with particles known as muons suggest that there are forms of matter and energy vital to the nature and evolution of the cosmos that are not yet known to science.



2,3 MeV $\frac{2}{3}$ u $\frac{1}{2}$ up	1,275 GeV $\frac{2}{3}$ c $\frac{1}{2}$ charm	173,07 GeV $\frac{2}{3}$ t $\frac{1}{2}$ top
---	--	---

4,8 MeV $-\frac{1}{3}$ d $\frac{1}{2}$ down	95 MeV $-\frac{1}{3}$ s $\frac{1}{2}$ strange	4,18 GeV $-\frac{1}{3}$ b $\frac{1}{2}$ bottom
--	--	---

<2 eV 0 ν_e $\frac{1}{2}$ Elektron-Neutrino	<0,19 MeV 0 ν_μ $\frac{1}{2}$ Myon-Neutrino	<18,2 MeV 0 ν_τ $\frac{1}{2}$ Tau-Neutrino
--	--	--

0,511 MeV -1 e $\frac{1}{2}$ Elektron	105,7 MeV -1 μ $\frac{1}{2}$ Myon	777 GeV -1 τ $\frac{1}{2}$ Tau
--	--	--

#1 #2 #3
Generation



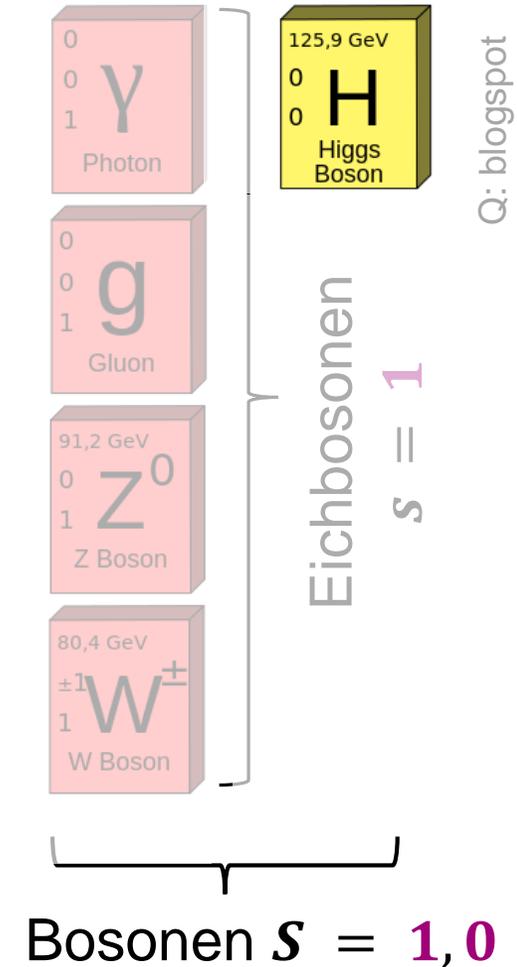
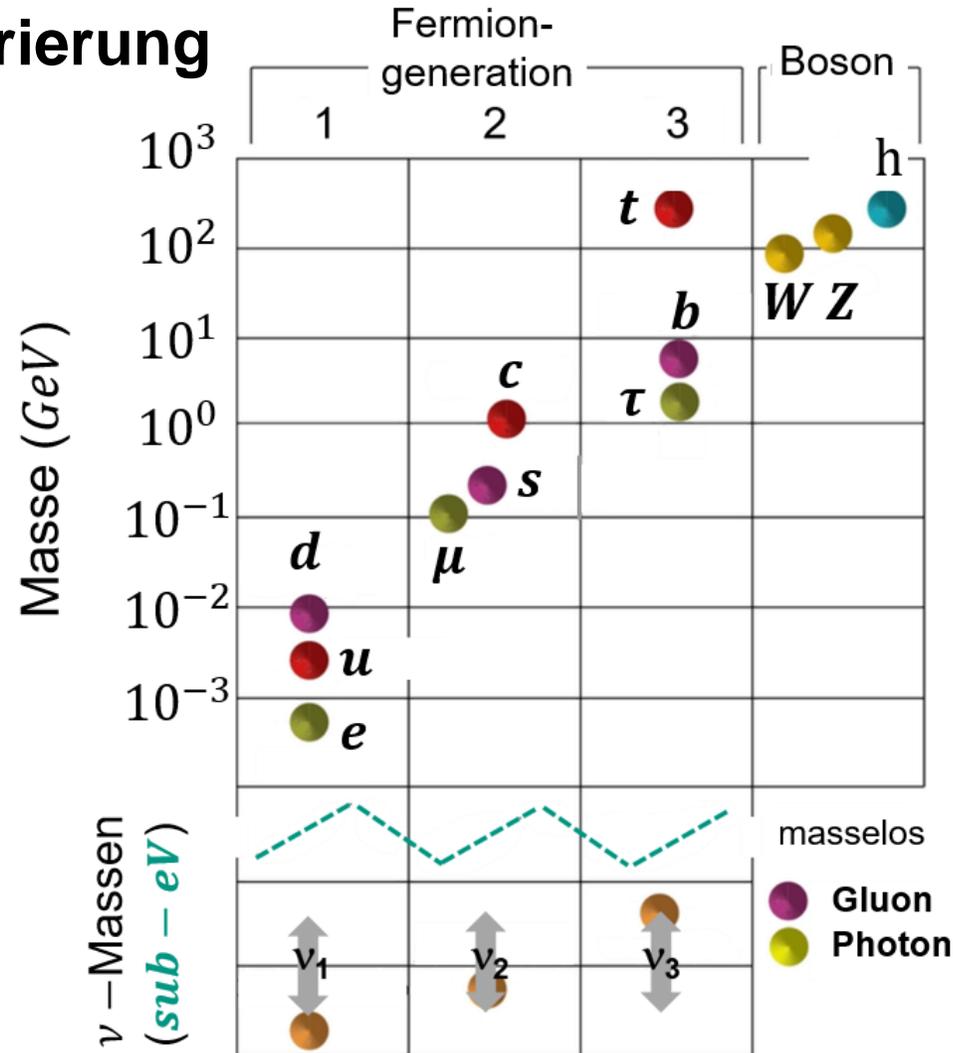
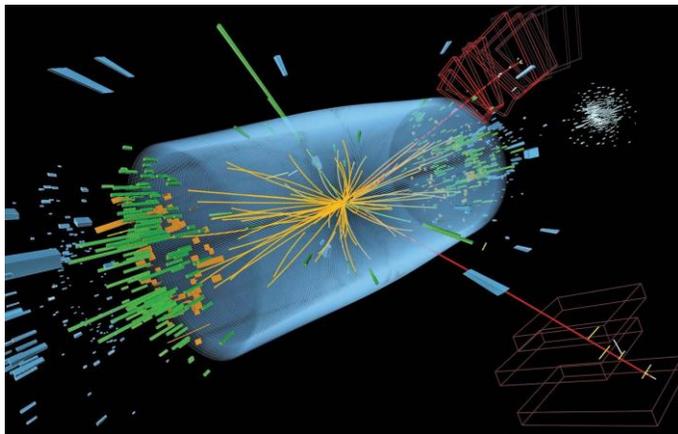
Elementarteilchen im Standardmodell: Higgs

■ Fundamentale Massengenerierung

- Higgs-Boson:

Massengenerierung für

- elementare Fermionen
- Eichbosonen W^\pm / Z^0
- Neutrinomassen-
Erzeugung noch offen!

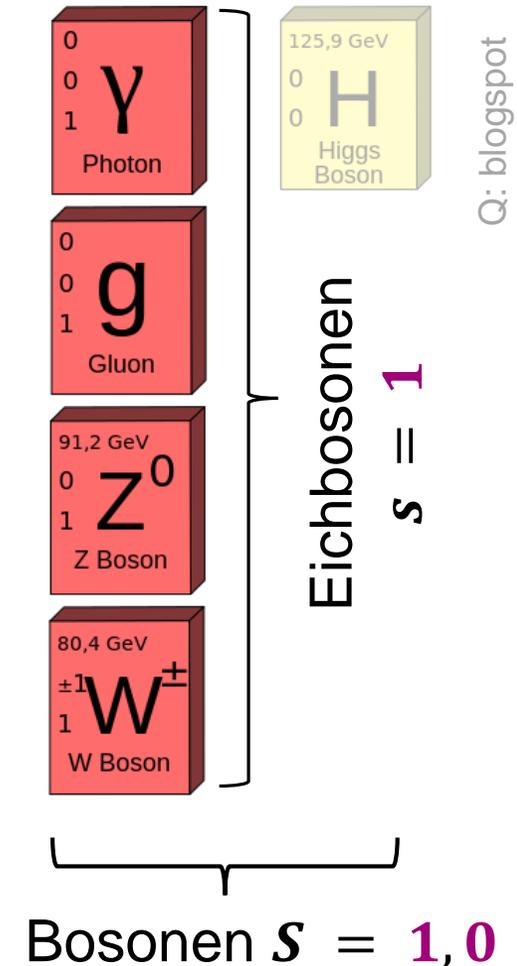


Q: blogspot

Elementarteilchen im Standardmodell

■ Fundamentale Wechselwirkungen vermittelt durch **Eichbosonen**

- **Photon**: elektromagnetische Wechselwirkung
Quantenelektrodynamik (QED)
 wirkt auf: geladene Teilchen, langreichweitig
- **Gluonen**: starke Wechselwirkung
Quantenchromodynamik (QCD)
 wirkt auf: Hadronen (mit Farbladung), kurzreichweitig
- **W^\pm / Z^0 – Bosonen**: schwache Wechselwirkung
elektroschwache Vereinheitlichung (EW)
 wirkt auf: Teilchen (schwache Ladung), sehr kurzreichweitig



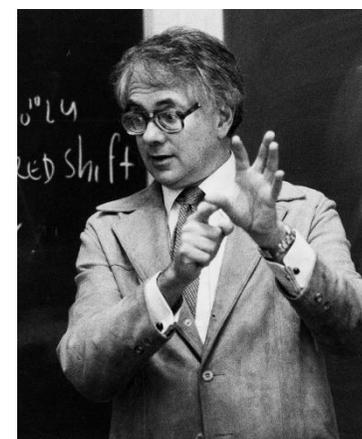
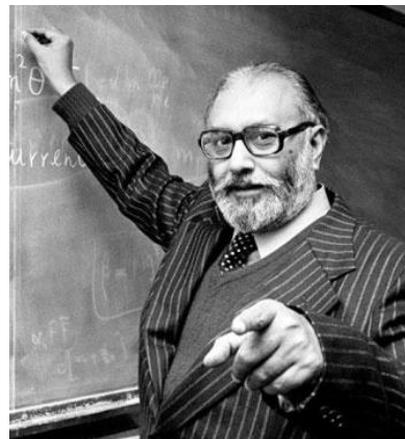
Fundamentale Wechselwirkungen

■ Vereinheitlichte Theorien als Leitmotif unseres Verständnisses

- 1873: **J.C. Maxwell** – Vereinheitlichung : **Elektromagnetismus**
- 1968: **S. Weinberg, A. Salam, S. Glashow** –
Vereinheitlichung : **Elektroschwache Kraft**
vereinheitlichte Theorie von **QED** und **schwacher Kraft**



Q: wikisource



Fundamentale Wechselwirkungen

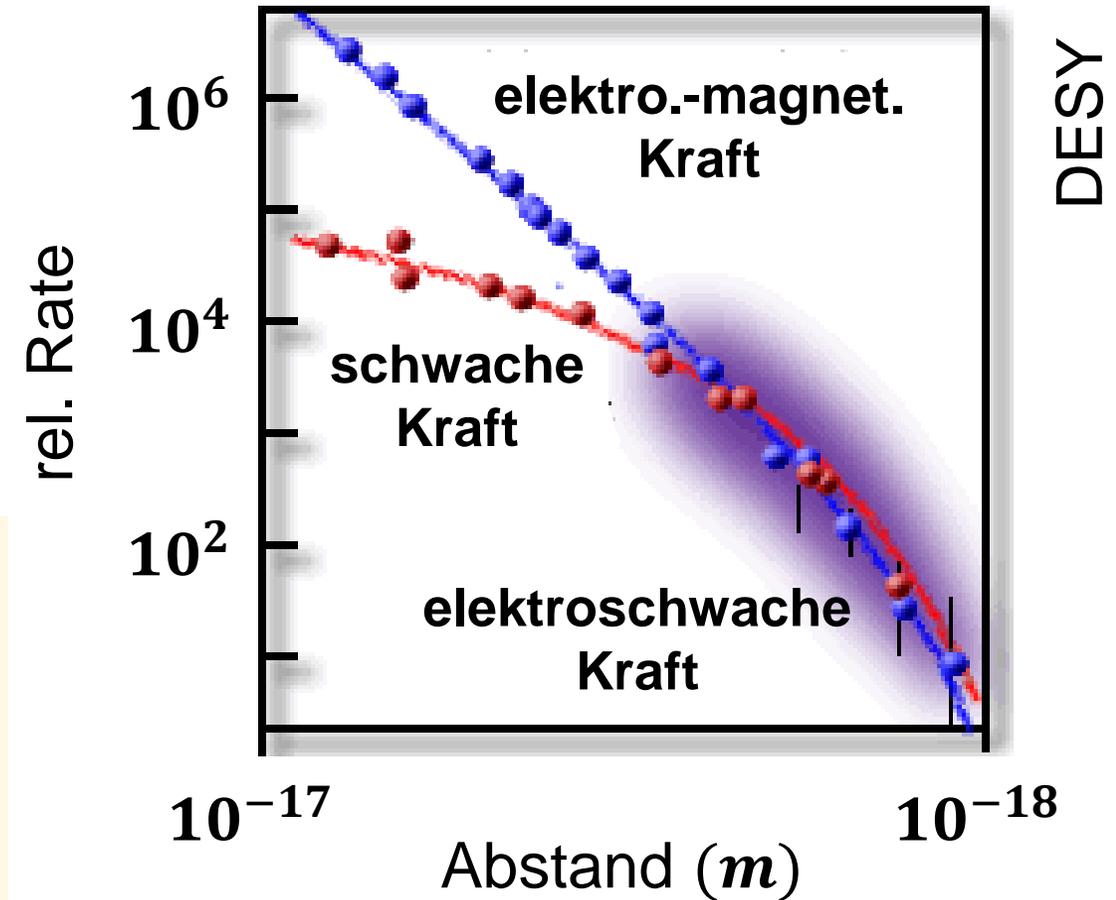
■ Vereinheitlichte Kräfte als Leitmotif unseres modernen Verständnisses

- Skala der Vereinheitlichung?
- Ursache der Symmetrie-Brechung?
- Prinzipien der Vereinheitlichung?

elektro.-magnet. Wechselw.

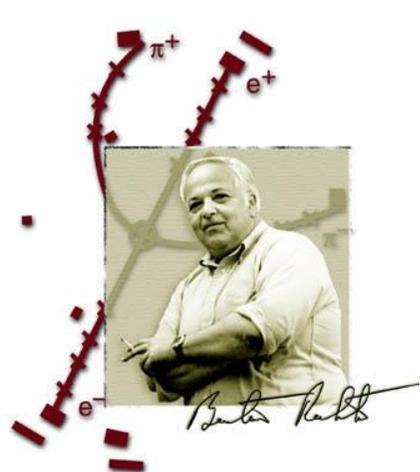
elektro-schwache Ww.

schwache Wechselwirkung



Fundamentale Teilchen & Wechselwirkungen

■ Lange Liste an Schlüsselentdeckungen & fundamentalen Durchbrüchen



1968: SLAC u up quark	1974: Brookhaven & SLAC c charm quark	1995: Fermilab t top quark	1979: DESY g gluon
1968: SLAC d down quark	1947: Manchester University s strange quark	1977: Fermilab b bottom quark	1923: Washington University γ photon
1956: Savannah River Plant ν_e electron neutrino	1962: Brookhaven ν_μ muon neutrino	2000: Fermilab ν_τ tau neutrino	1983: CERN W W boson
1897: Cavendish Laboratory e electron	1937: Caltech and Harvard μ muon	1976: SLAC τ tau	1983: CERN Z Z boson



Q: LANL wikipedia

Q: physicsgg, wikipedia

Q: symmetry magazine