

## Moderne Experimentalphysik II Teilchenphysik - Vorlesung 07

Professor Dr. Markus KLUTE (markus.klute@kit.edu) Institut für Experimentelle Teilchenphysik (ETP)



#### Saalübungen



- Ich nehme an den Saalübungen teil?
  - 1) Ja, regelmässig
  - 2) Ja, manchmal
  - 3) Nein



- Halten Sie die Saalübungen zur Besprechung der Hausaufgaben für sinnvoll?
  - **1**) Ja
  - 2) Nein
  - 3) Man sollte das Format ändern
  - 4) Keine Meinung

#### Recap: Streuexperimente & Wirkungsquerschnitte



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

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

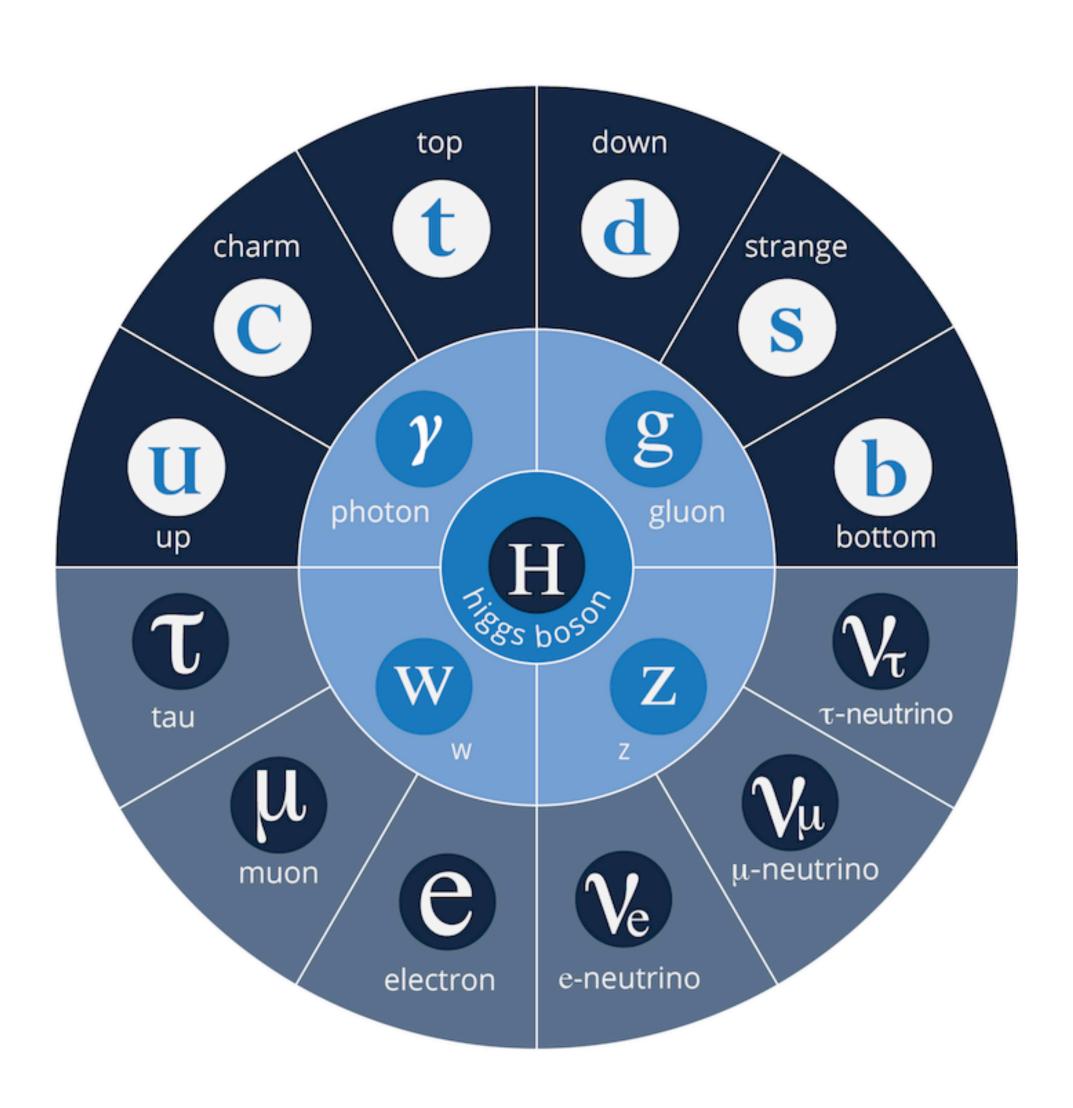
- Mott: relativistische Streuung mit Spin

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{M} = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{R} \cdot \frac{E'}{E} \cdot \cos^{2}\frac{\theta}{2}$$

- Formfaktor  $F(q) \iff$  Ladungsverteilung  $\rho(r)$ : Fouriertransformierte

#### Moderne Experimentalphysik II - Part II



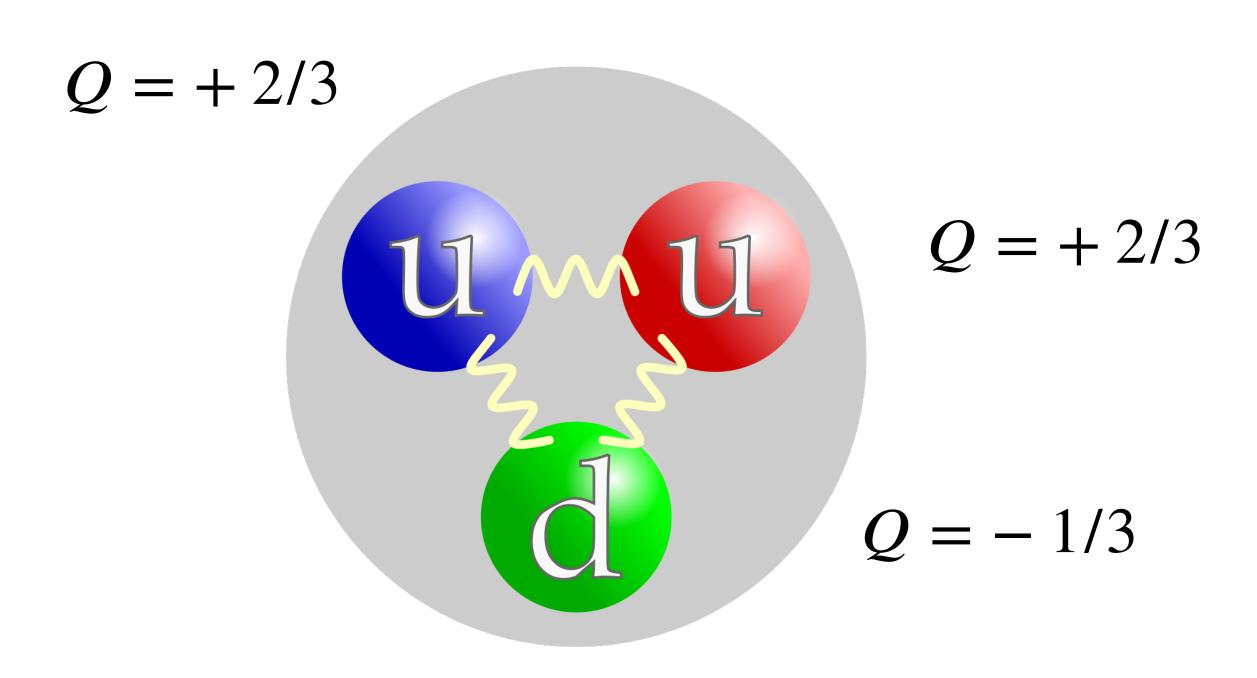


- 3. Struktur der Materie
  - 3.1. Rutherford Streuung & Wirkungsquerschnitt
  - 3.2. Mott Streuung & Formfaktoren
  - 3.3. Struktur von Nukleonen

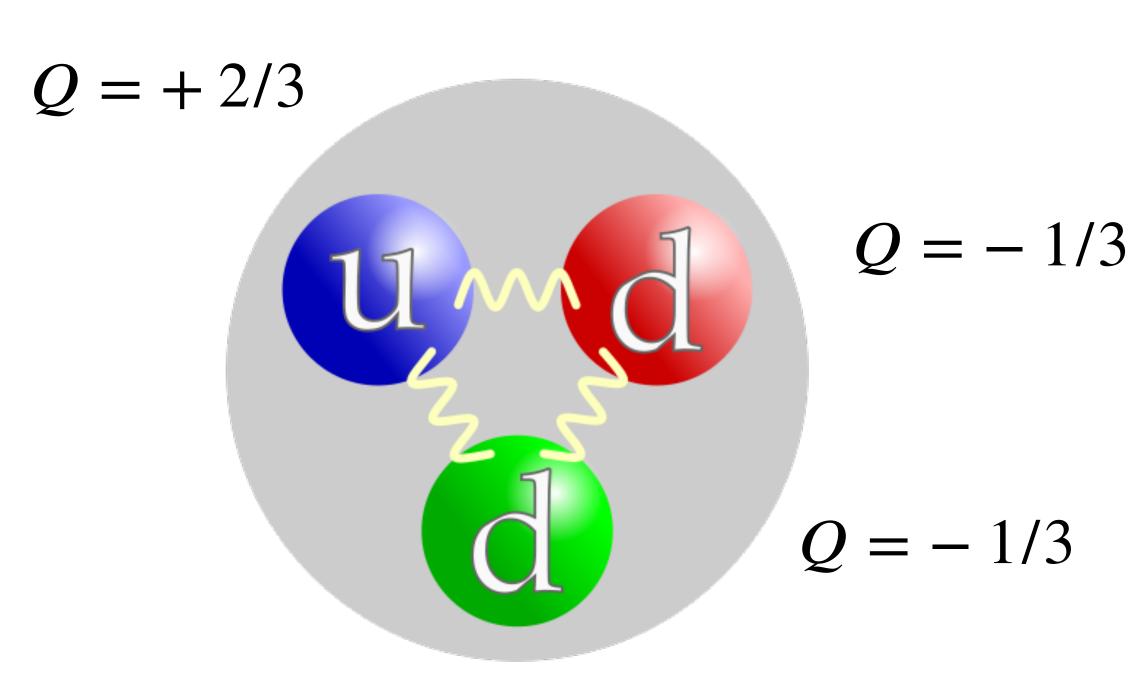
#### Nukleon-Formfaktoren & innere Struktur



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



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

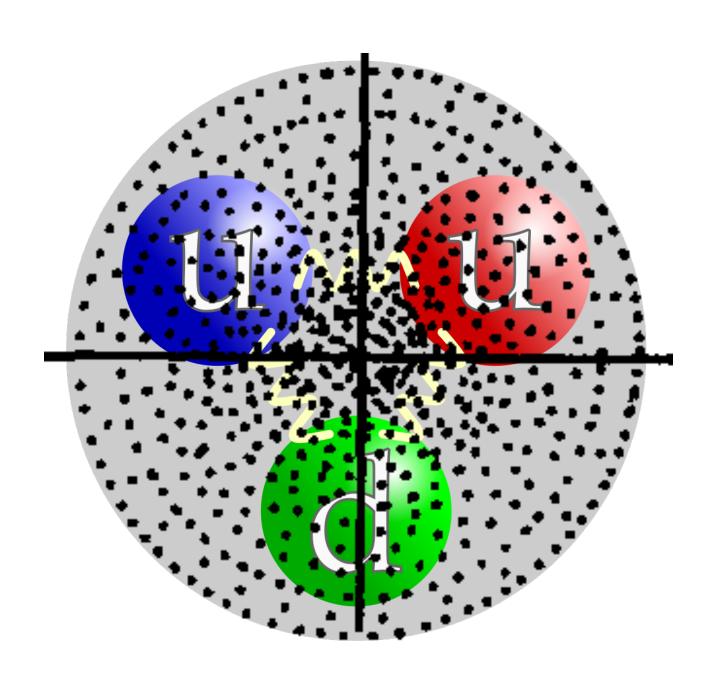


Neutron: q = 0, S = 1/2

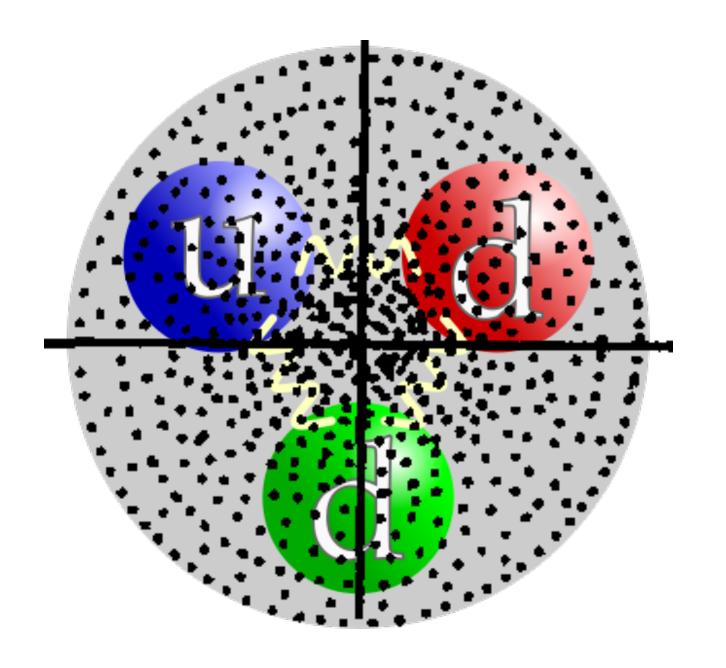
#### Nukleon-Formfaktoren & innere Struktur



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



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



Neutron: q = 0, S = 1/2

#### Nukleon: Ladungsverteilung



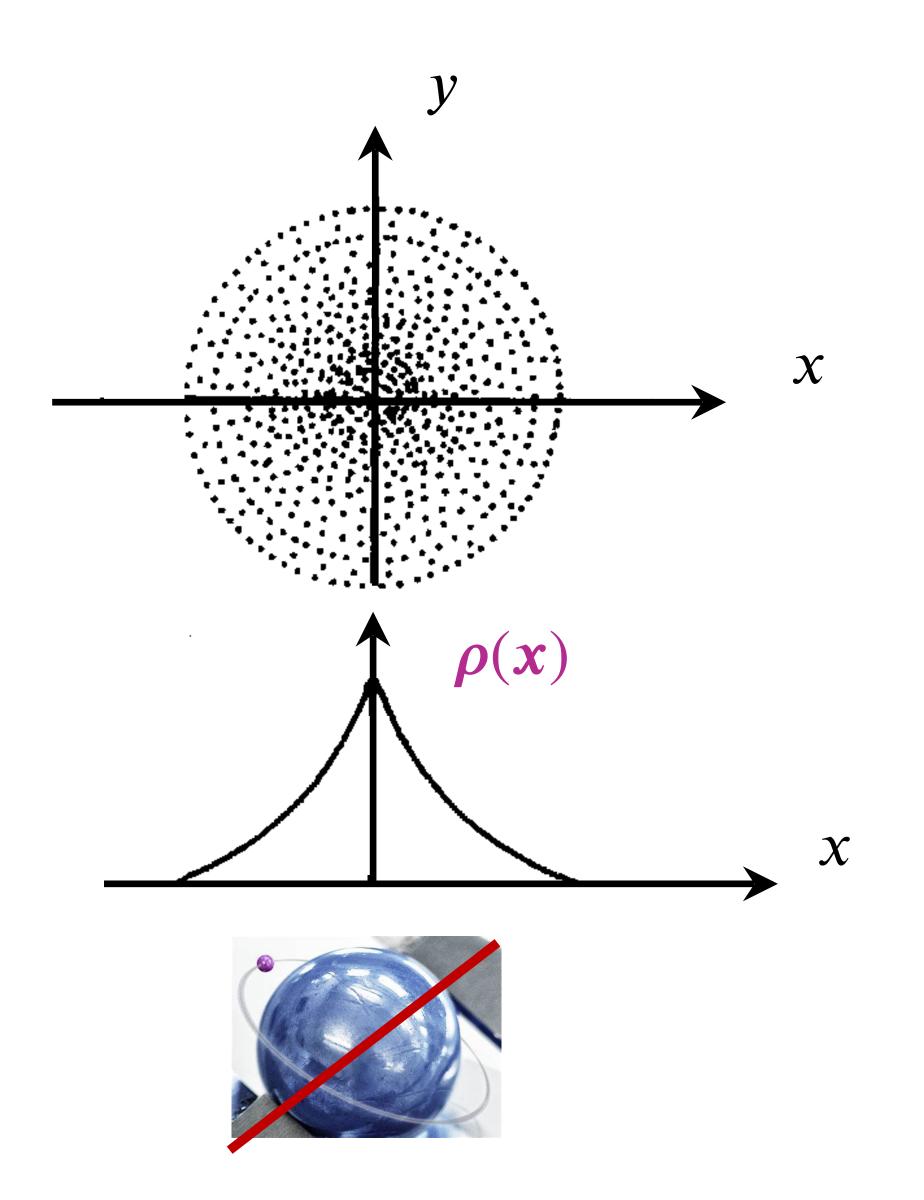
**Ladungsverteilung**  $\rho(r)$  in einem Nukleon

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

exponentiell abfallende Ladungsverteilung des Nukleons ("<u>kein</u> scharfer Rand!")



$$G(Q^2) = \left(1 + \frac{Q^2}{0.71 (GeV/c)^2}\right)^{-2}$$



#### Nukleon: Ladungsradien & Stromverteilungen

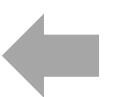


■ mittlere quadratische Radien R des Nukleons

- Definition\* rms — Radius R  $R = \sqrt{\langle \ r^2 
angle}$ 

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

quadratisches Mittel



$$\rho(r)$$
 gewichtet Integmit Quadrat von  $r$  Kug

Integration über Kugelvolumen

$$\sqrt{\left\langle r_E^2 \right\rangle_P} = 0,8775 \ fm$$

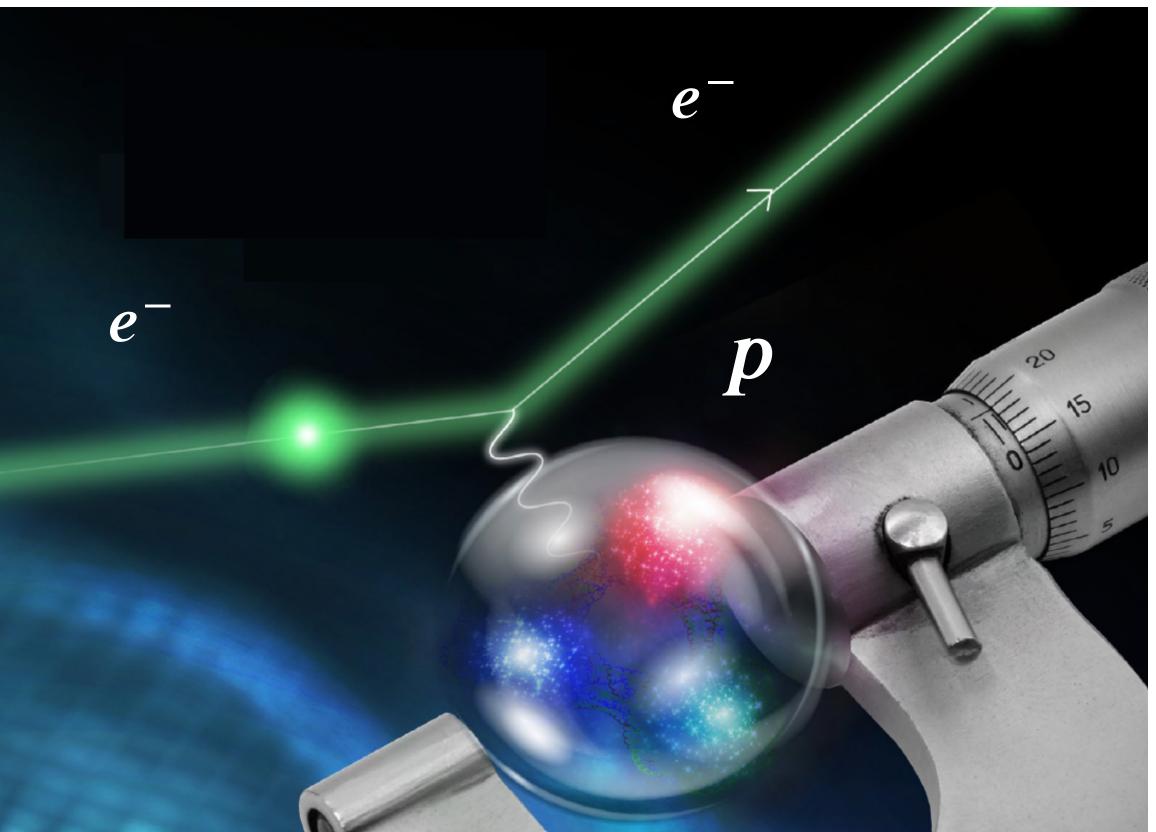
mittlerer quadratischer Ladungsradius des **Protons** 

$$\sqrt{\left\langle r_E^2 \right\rangle_p} \approx \sqrt{\left\langle r_M^2 \right\rangle_p} \approx \sqrt{\left\langle r_M^2 \right\rangle_n} \approx 0.8...0.9 \ fm$$

mittlere quadratische Radien von Proton, Neutron





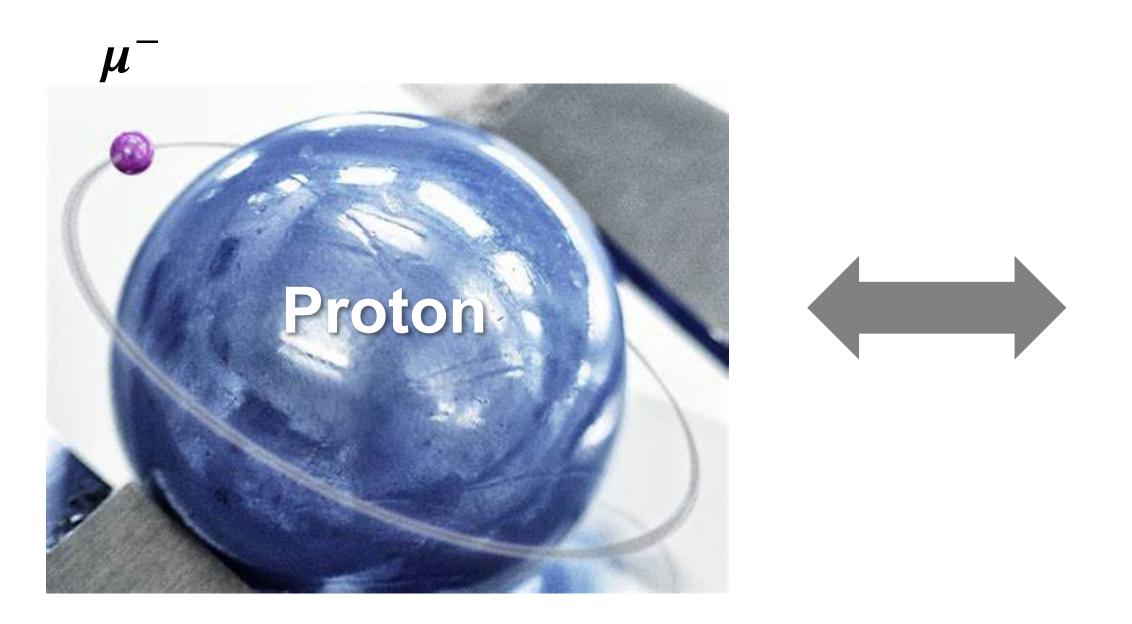


### EINSCHUB - 'GESCHRUMPFTES' PROTON

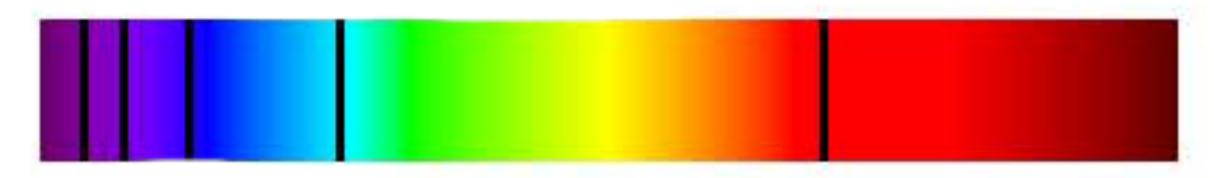
#### Präzisionsmessung des Proton-Radius $R_p$



- Vergleich von Streuprozessen am Proton mit anderen Methoden
  - Resultate von myonischen Atomen\* & Elektron-Streuung:  $5~\sigma$  Diskrepanz
  - myonische H-Atome  $R_p=0,84184(67)\,fm$   $\longleftrightarrow$  Streuung von  $e^{-1}$   $R_p=0,8775\,fm$



Absorptionsspektrum: klass. H-Atom\*



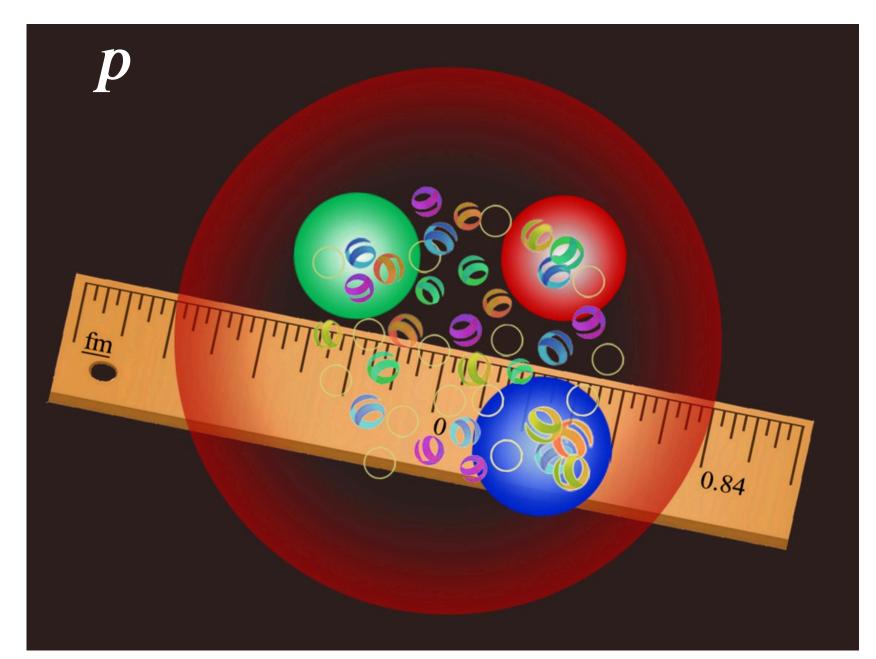
Emissionsspektrum: exotisches Atom



#### Präzisionsmessung des Proton-Radius ${\cal R}_p$



- Februar 2022: Reanalyse der Elektron-Streudaten am Proton
  - Resultate von myonischen Atomen & Streudaten stimmen nun überein
  - myonische H-Atome  $R_p=0,84184(67)\,fm$  Streuung von  $e^-$ :  $R_p=0,840\,fm$

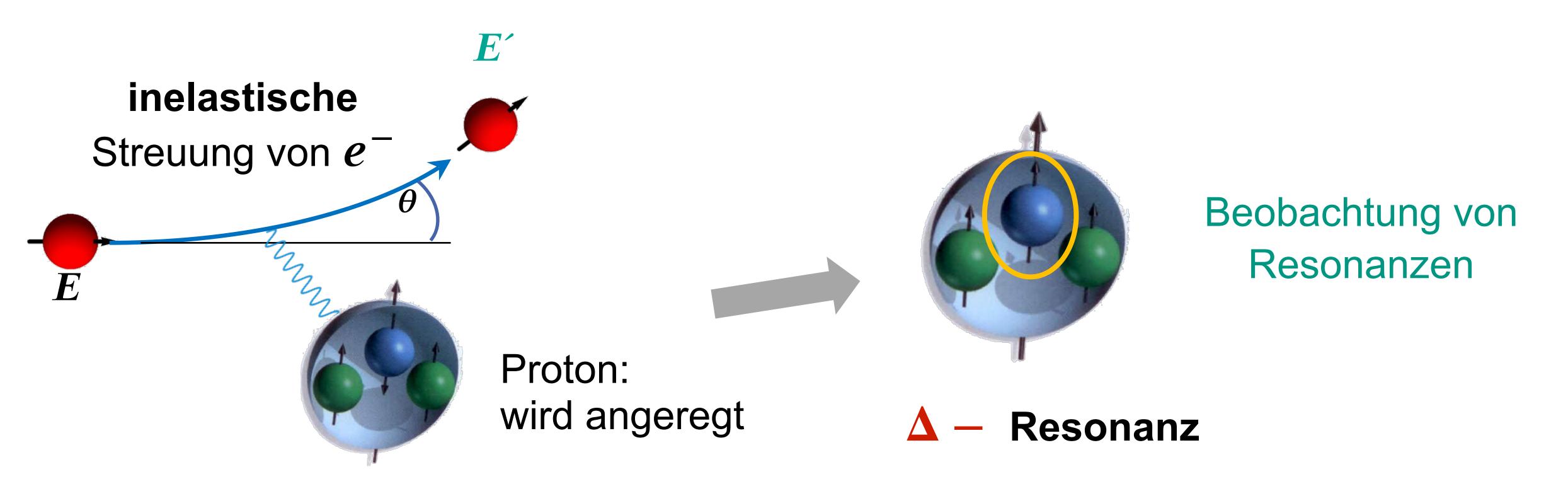




#### Inelastische Streuprozesse: Resonanzen



- ullet Elektronen-Energien E>2 GeV: inelastische Streuung am Nukleon
  - bisher: moderate Elektron-Energien, nur elastische Streuung
  - nun: höhere Energien ⇒ Anregung innerer Freiheitsgrade des Nukleons

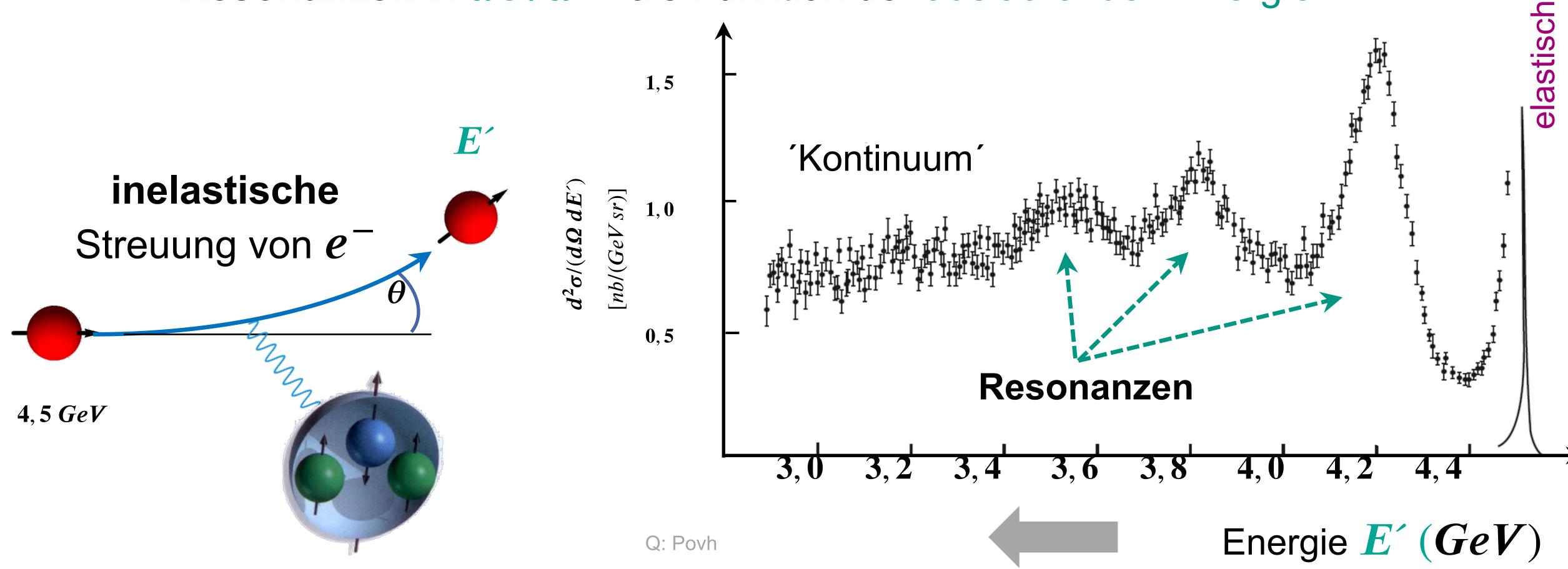


#### Inelastische Streuprozesse: Resonanzen



ullet Elektronenergien  $E > 2 \ GeV$ : inelastische Streuung am Nukleon

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



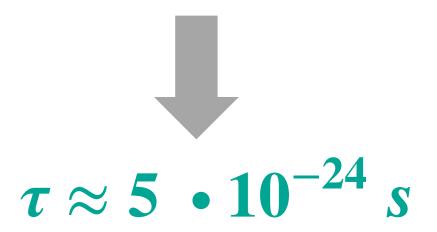
## Delta-Resonanz: ein Spin $S = \frac{3}{2}$ Zustand

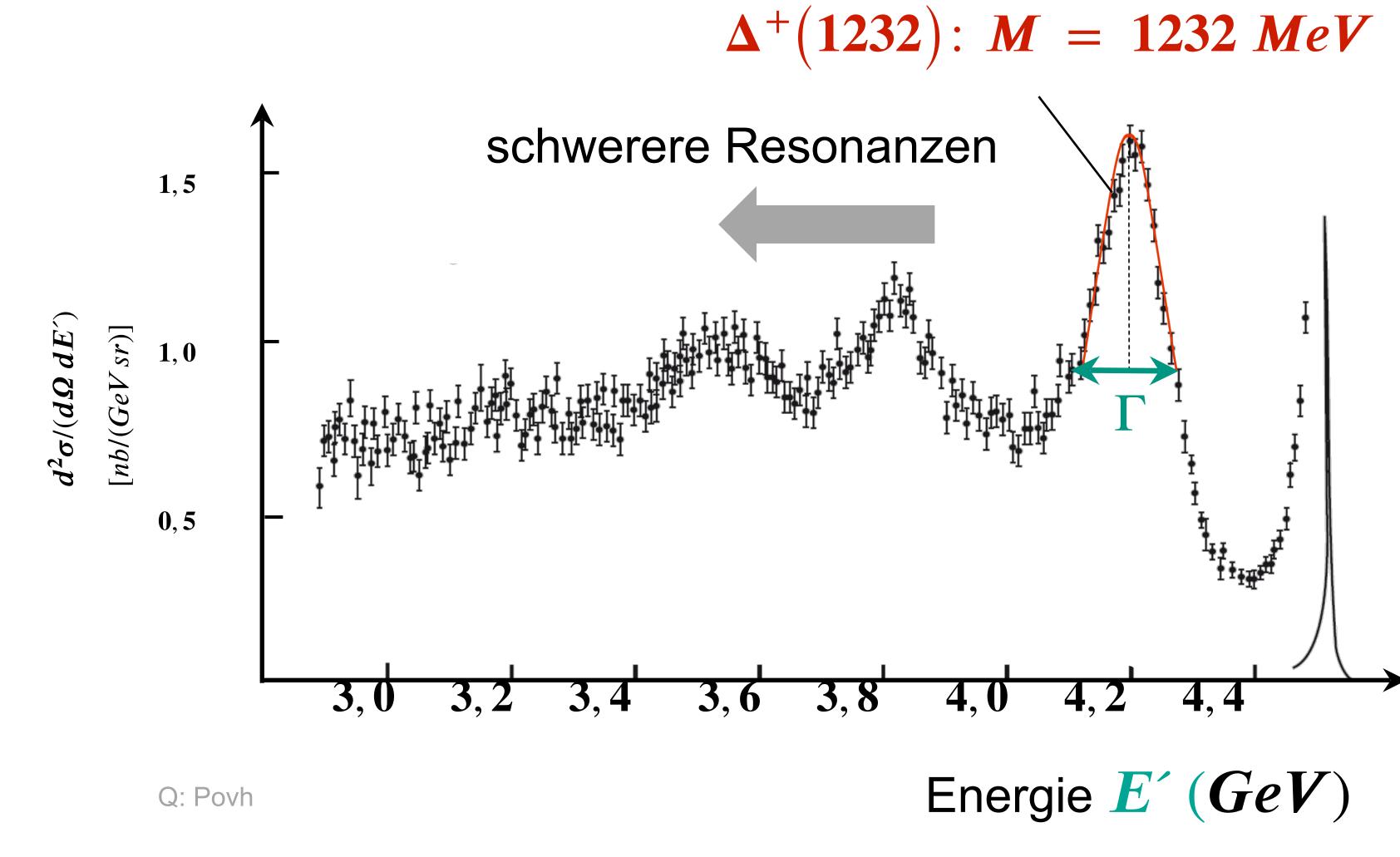


ullet die 'berühmte'  $\Delta^+$  Resonanz: der 1. angeregte Nukleon-Zustand

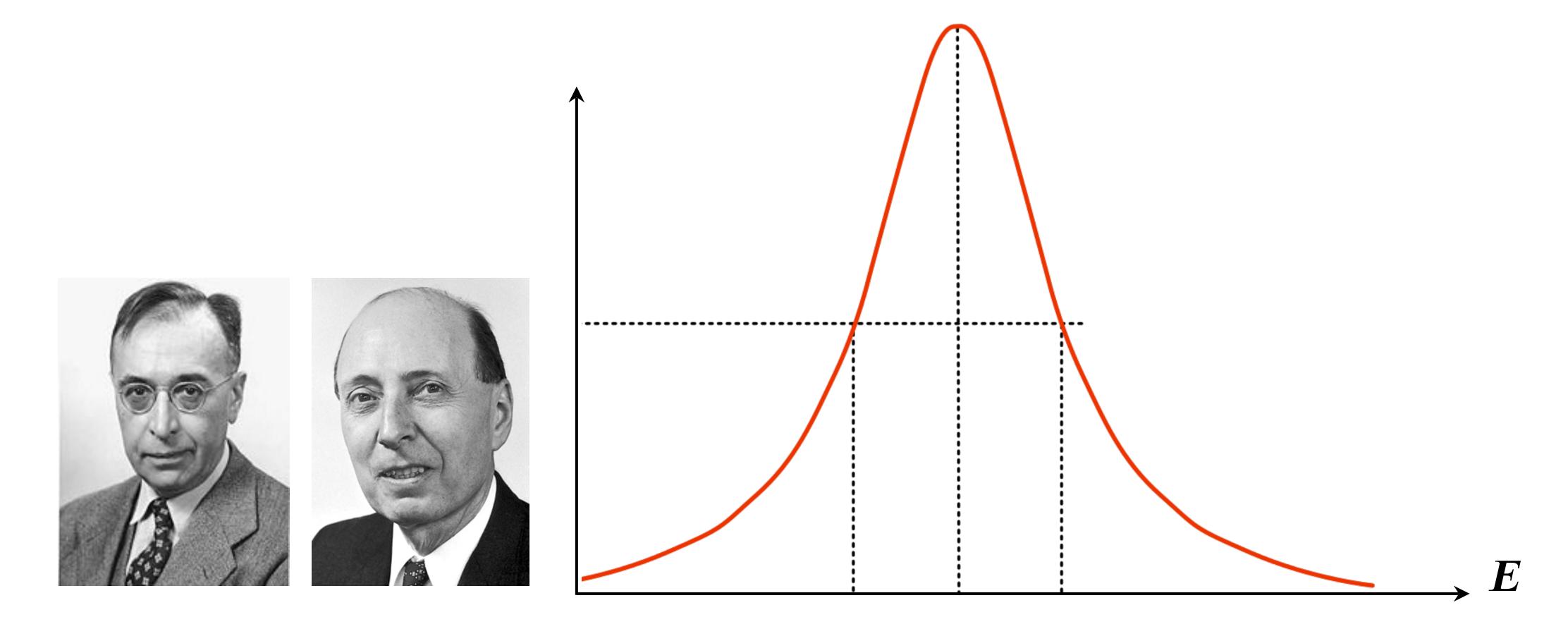
 Resonanzen (mit extrem kurzen Lebensdauern)
 mit charakteristischem
 Breit-Wigner Profil

- Parameter von  $\Delta^+$ :  $\Gamma \approx 100~MeV$ 









## EINSCHUB - RESONANZEN

#### Eigenschaften von Resonanzen



#### Resonanzen charakterisiert durch intrinsische Breit-Wigner Verteilung

 Wahrscheinlichkeitsdichte
 P(E) einer Breit-Wigner-Verteilung

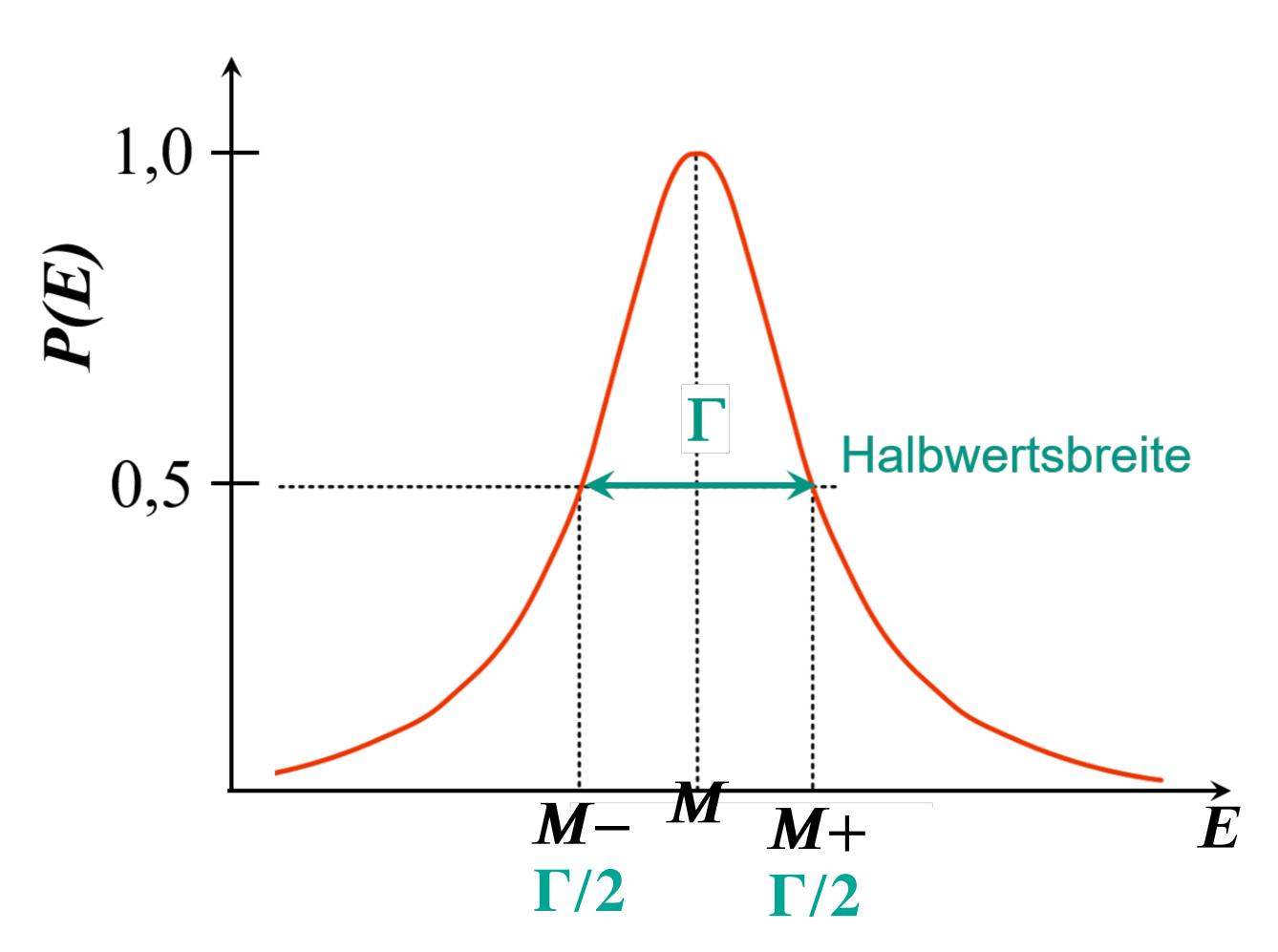
$$P(E) = \frac{1}{2\pi} \cdot \frac{\Gamma}{(E - M)^2 + \frac{\Gamma^2}{4}}$$



Gregory **Breit** 



Eugene Wigner

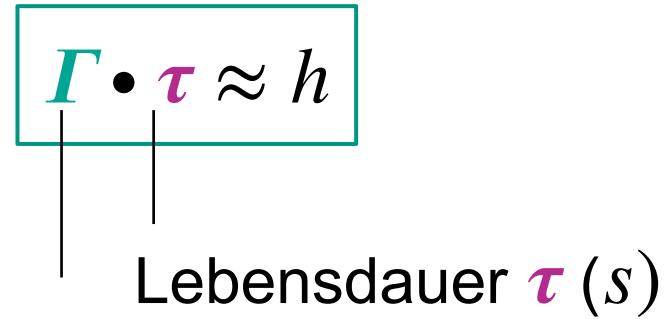


#### Eigenschaften von Resonanzen

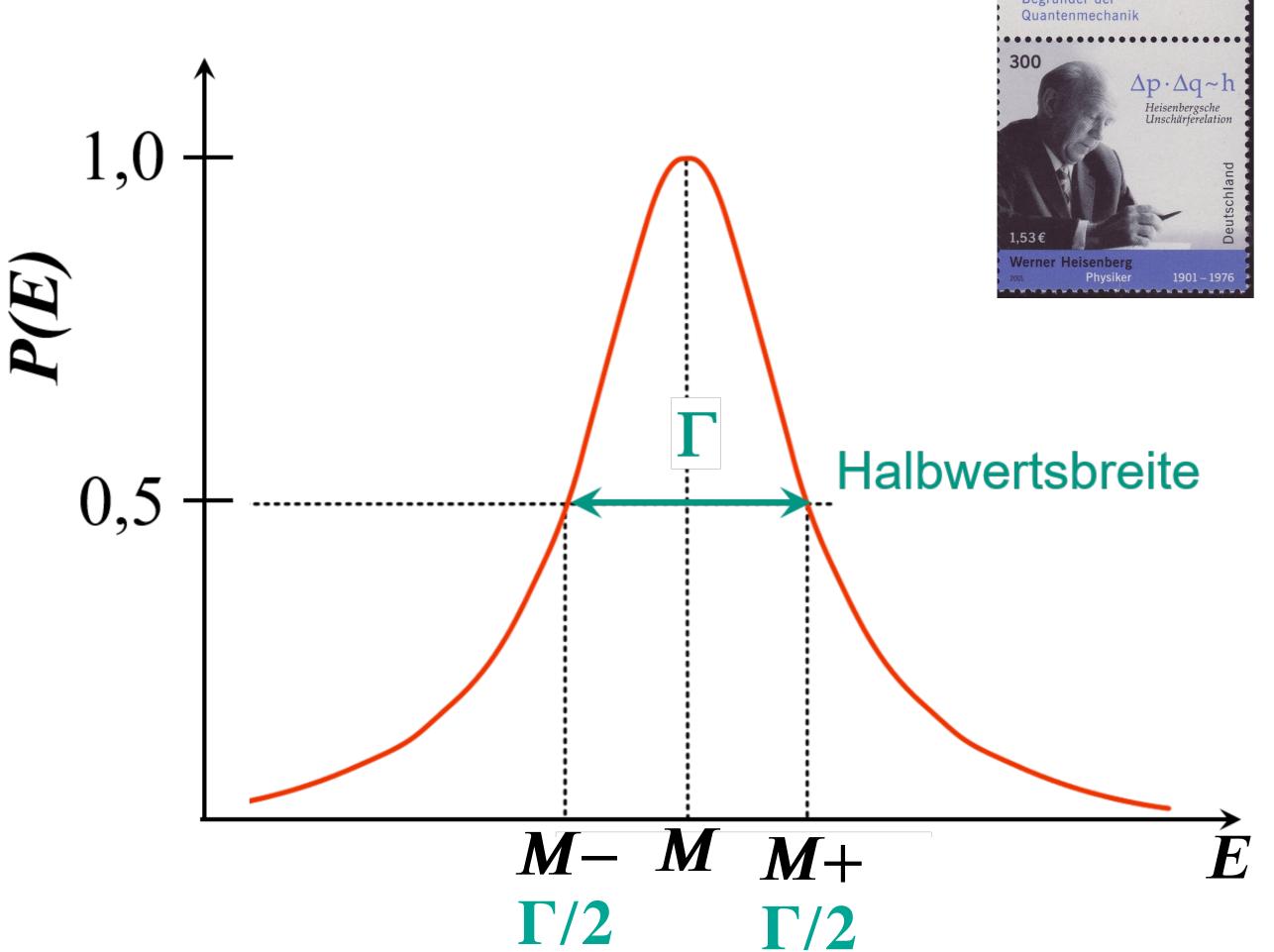


#### Kurze Lebensdauer rerzeugt große Zerfallsbreite Γ

- Breite r einer Resonanz durch Heisenberg'sche Unschärfe-Relation



Breite  $\Gamma(eV)$ 

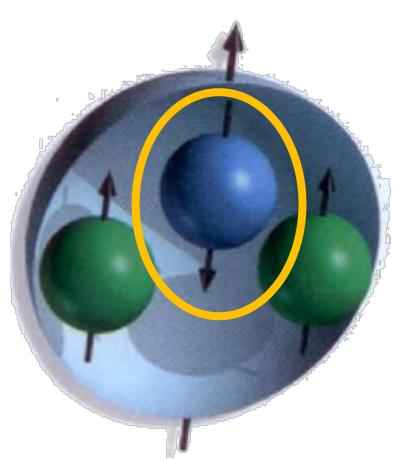


## Delta-Resonanz: ein Spin $S = \frac{3}{2}$ Zustand



■ die 'berühmte' 🛕 Resonanz: der 1. angeregte Nukleon-Zustand

 $\frac{d^2\sigma/(d\Omega dE')}{[nb/(GeVsr)]}$ 

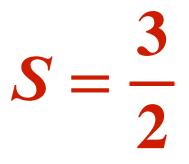


Nukleon

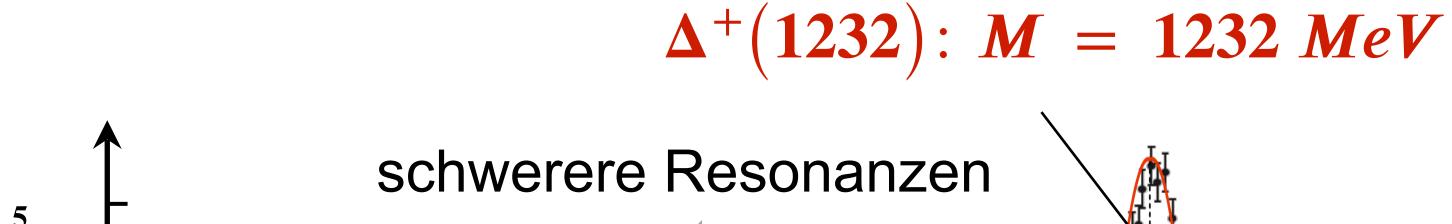
$$S=\frac{1}{2}$$

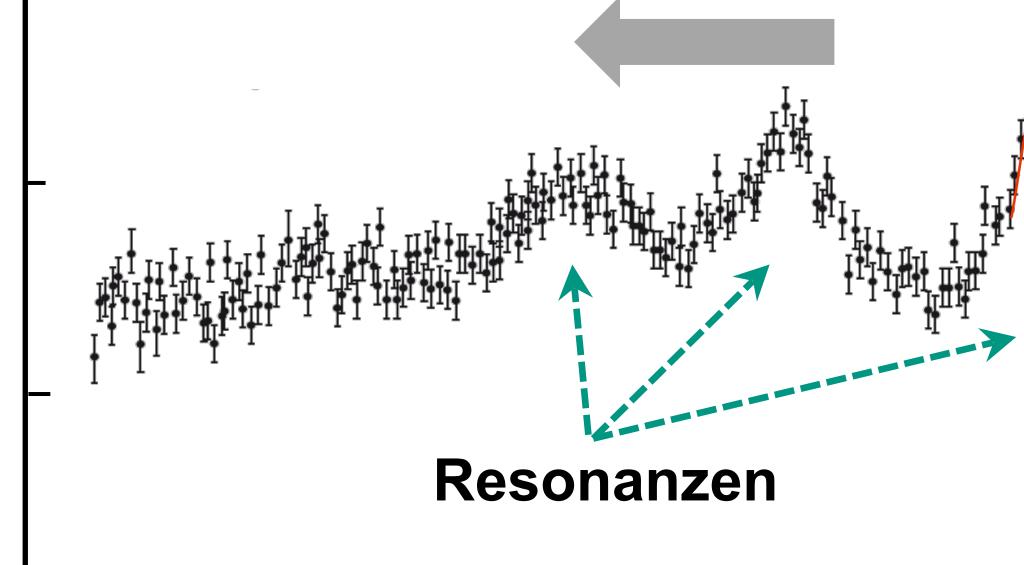


Spin-Flip



 $\Delta^+$  Resonanz





Q: Povh

0,5

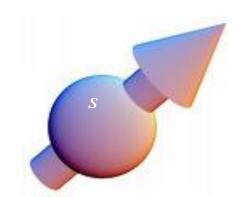
Energie E'(GeV)

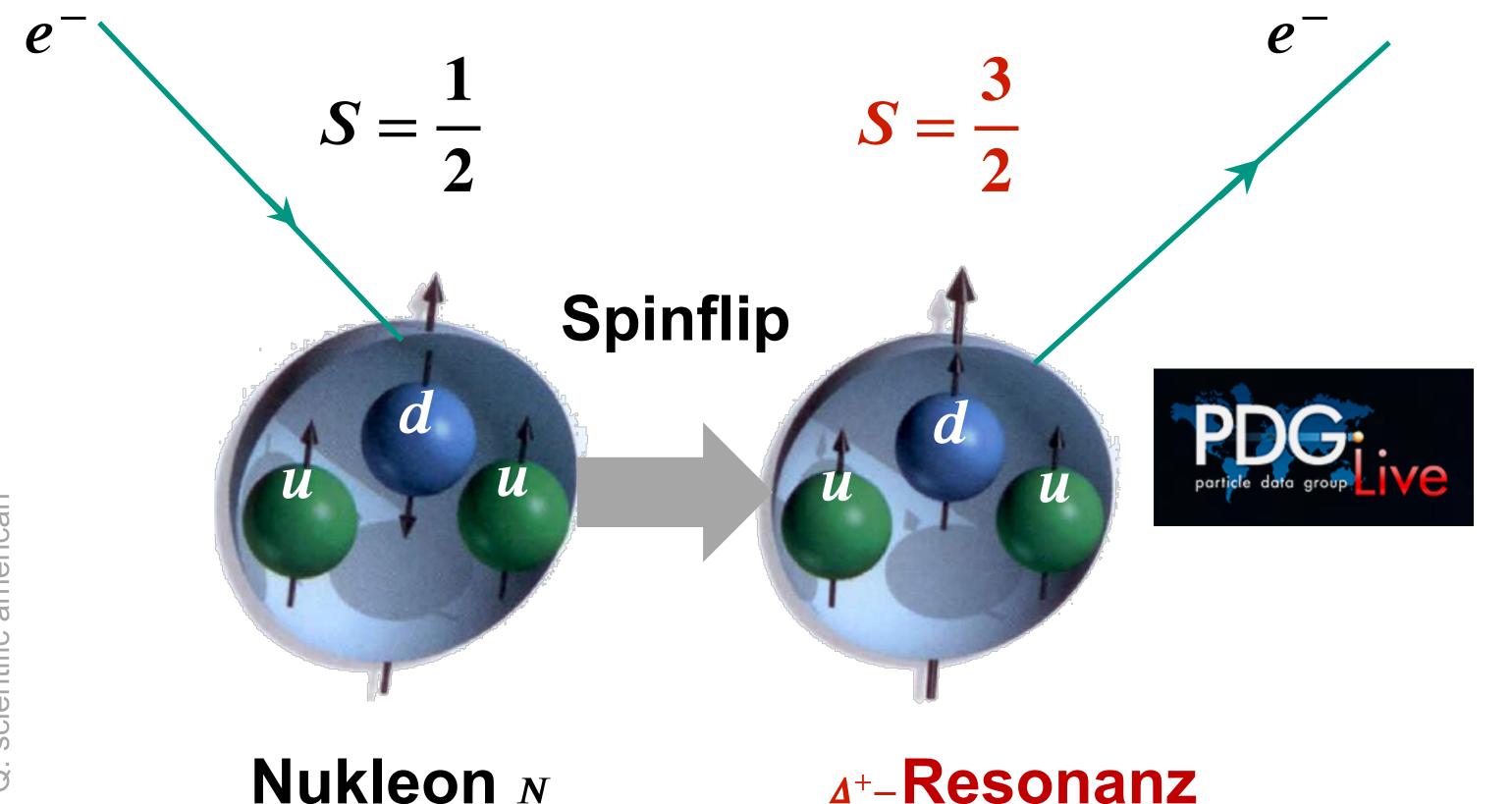
#### Spin in der Teilchenphysik



Spin S: eine sehr wichtige Eigenschaft von Elementarteilchen

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





$$\Delta^+$$
- Resonanz
 $m=1232~MeV$ 
 $au=(5,63\pm0,14)\cdot10^{-24}~s$ 
Zerfall:  $\Delta^+ \to N+\pi$ 

#### **Proton**

$$m = 938, 27 \, MeV$$
  
 $\tau > 3.6 \cdot 10^{29} \, s$   
hypothetische Zerfallsmoden

#### Relativistische Kinematik & Resonanzen



#### Kinematische Variable: Elektron & Proton, Resonanz

- einlaufendes Elektron mit 4 er Impuls p
- auslaufendes Elektron mit 4 er Impuls p'
- "einlaufendes" (ruhendes) Proton mit 4-er Impuls  $I\!\!P=(M,0)$
- auslaufende Resonanz mit 4-er Impuls P

 $p' = (E', \overrightarrow{p}')$ 

- Energieverlust  $\nu$  des  $e^-$ :

$$V = E - E'$$

$$p = (E, \overrightarrow{p})$$

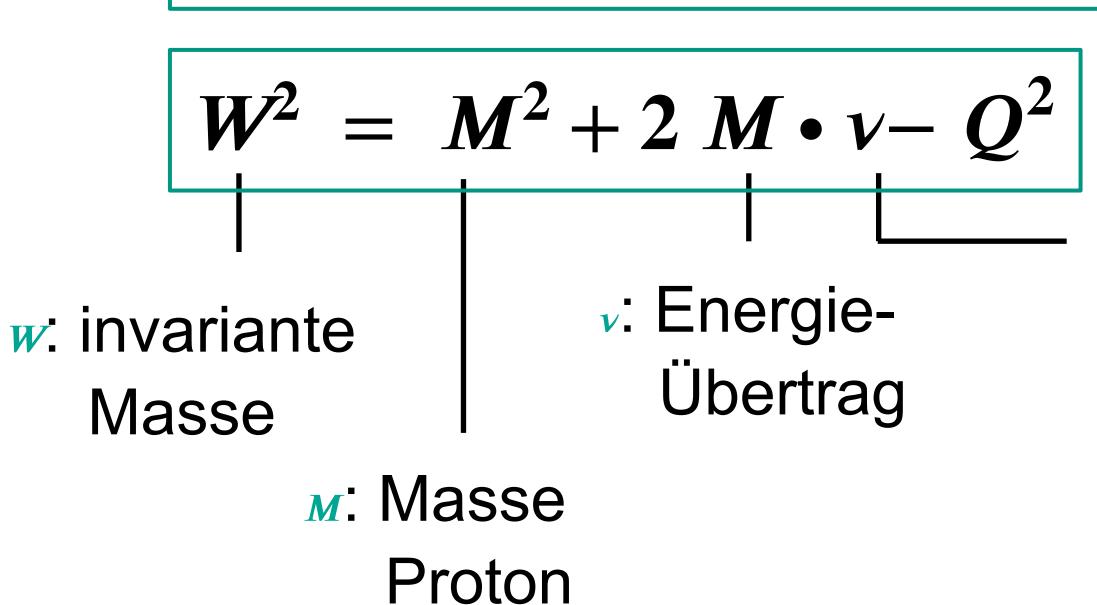
$$P = (M, 0)$$

#### Resonanz mit invarianter Masse W

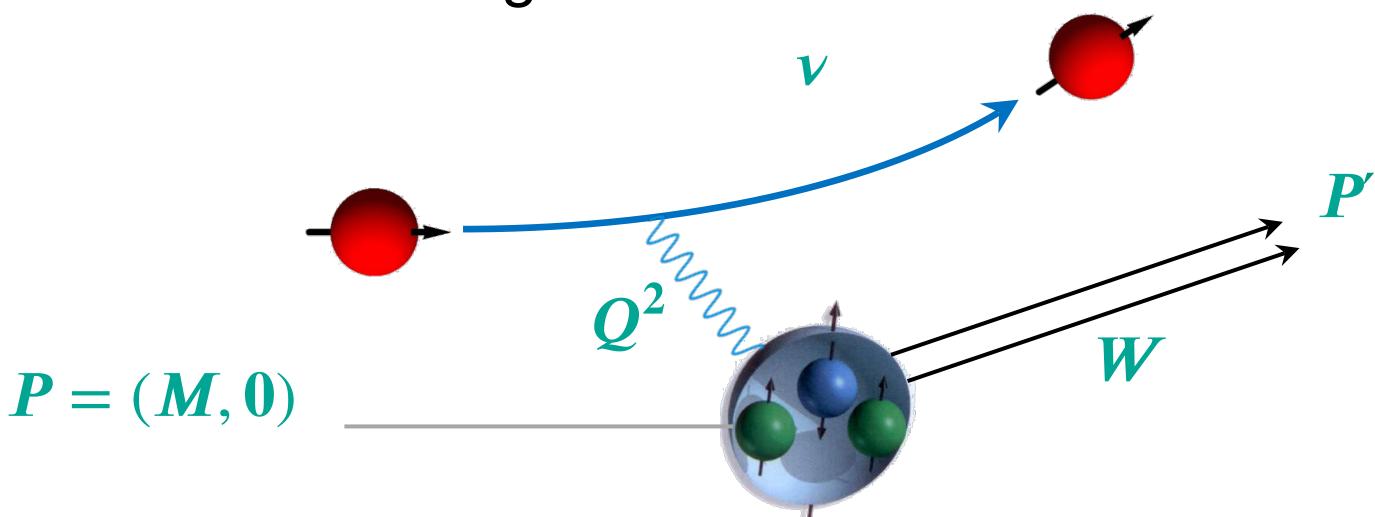


■ invariante Masse W der Resonanz

$$W^2 = |P'|^2 = (P+q)^2 = M^2 + 2 P \cdot q + q^2 = M^2 + 2 M \cdot v - Q^2$$



Q<sup>2</sup>: 4-er Impuls-Übertrag



#### Fall 1: keine innere Anregung



- Elastischer Stoß keine innere Anregung
  - elastische Streuprozesse ohne Anregung des Nukleons

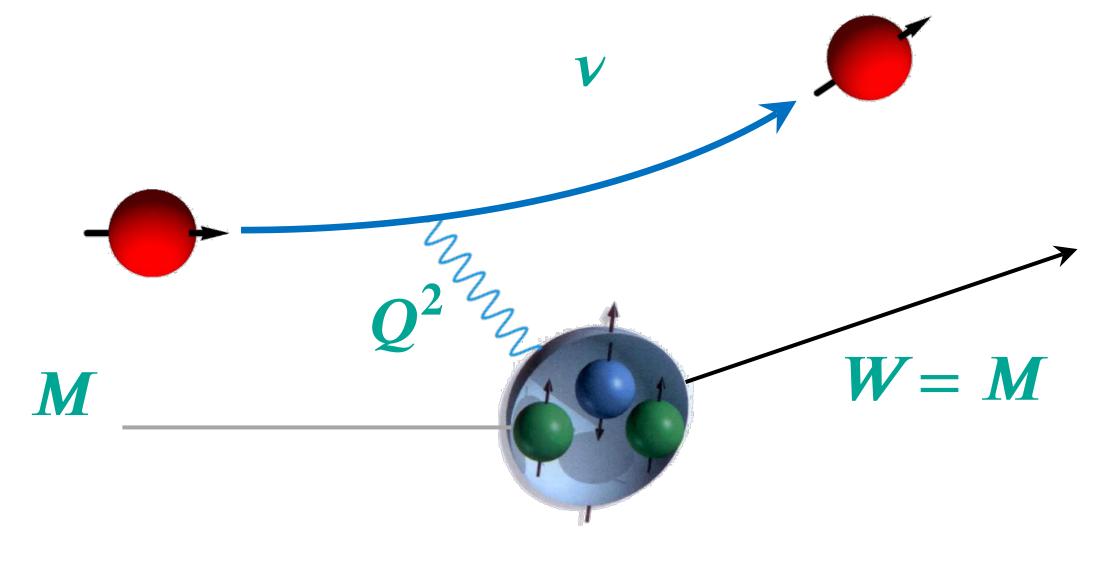
1 freier Parameter

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

$$= 0$$

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





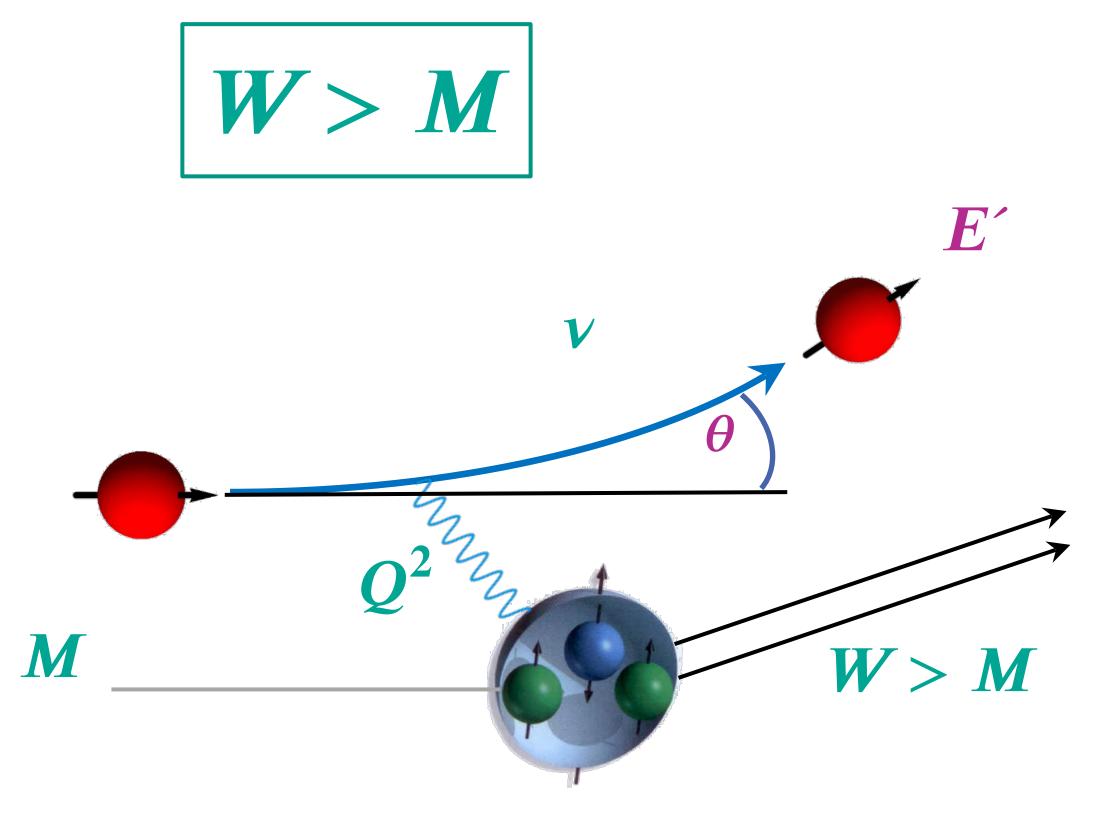
#### Fall 2: Resonanz mit innerer Anregung



- 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 (Strukturfunktionen) erforderlich:

$$(Q^2, v)$$
 Oder  $(E', \theta)$ 

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

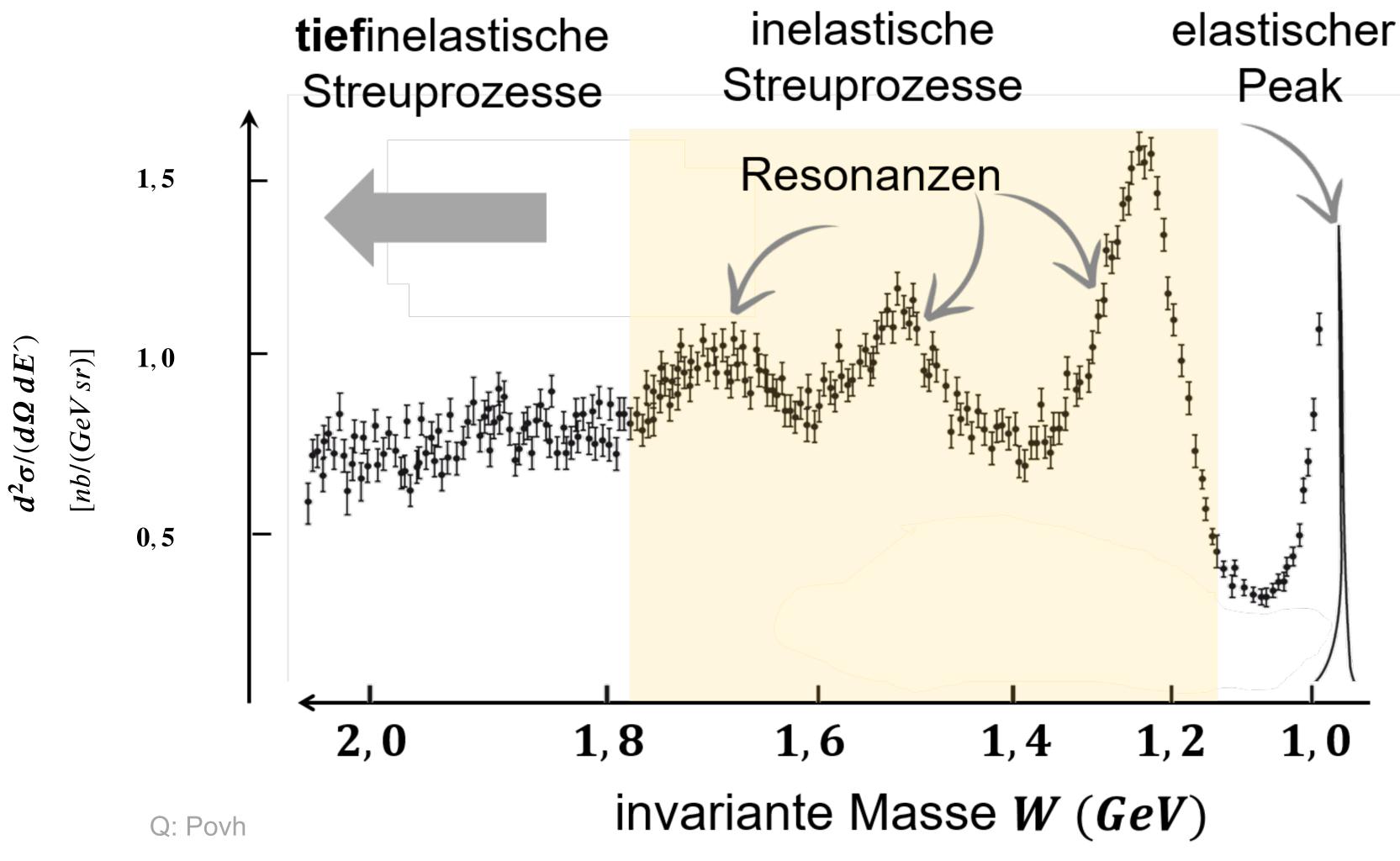


#### Von Resonanzen zu…tiefinelastischer Streuung



#### 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



#### Von Resonanzen zu…tiefinelastischer Streuung



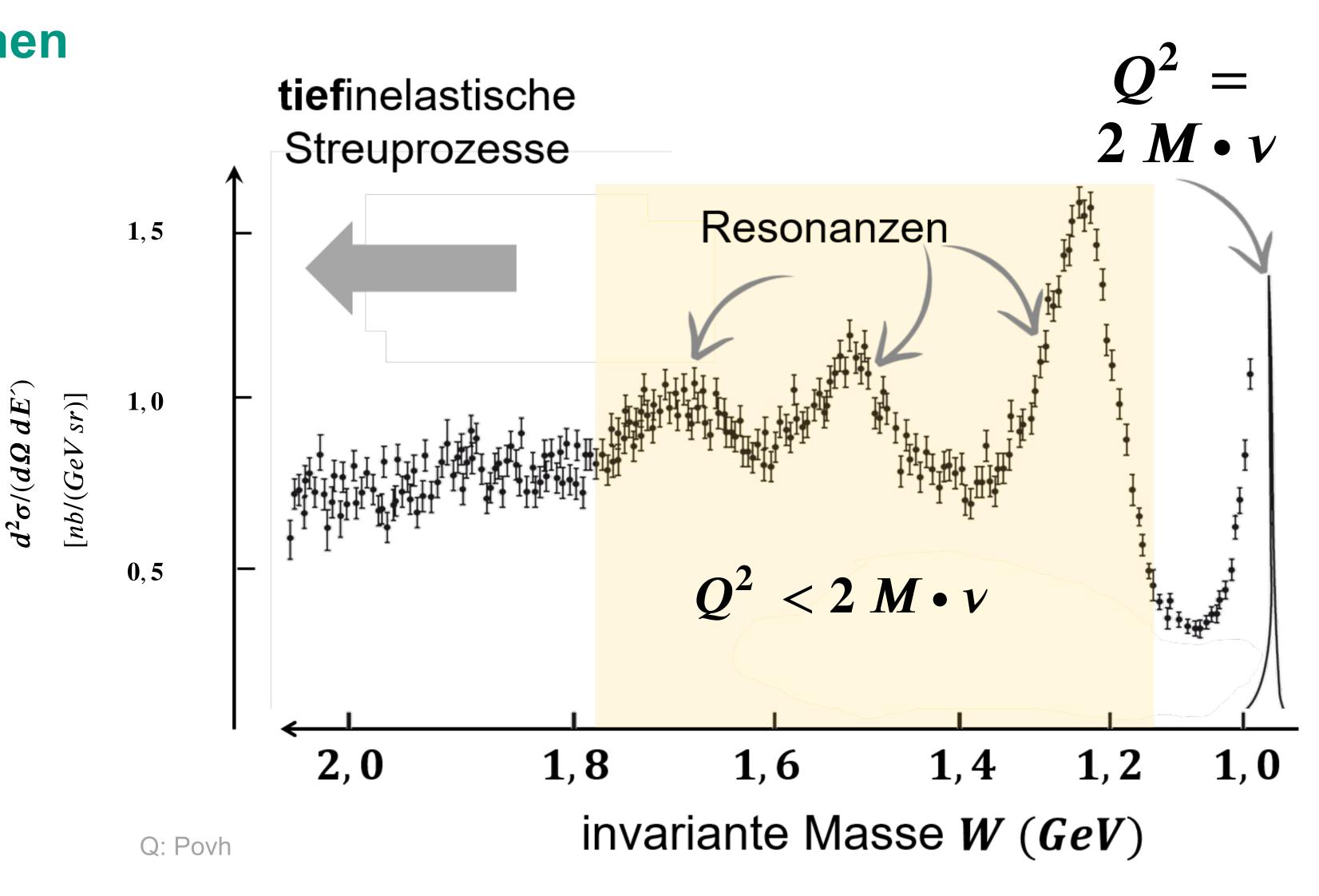
#### Auf dem Weg zu Partonen

elastische Streuprozesse
 ohne innere Anregung
 des Nukleons

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

inelastische Prozesse
 <u>mit</u> innerer Anregung
 des Nukleons

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



#### Kinematische Größe: Bjorken Skalenvariable x



■ Eigenschaften: dimensionslose Größe x als Mass der Inelastizität

- Definition:

$$x = \frac{Q^2}{2M \cdot v}$$

$$x = 0...1$$

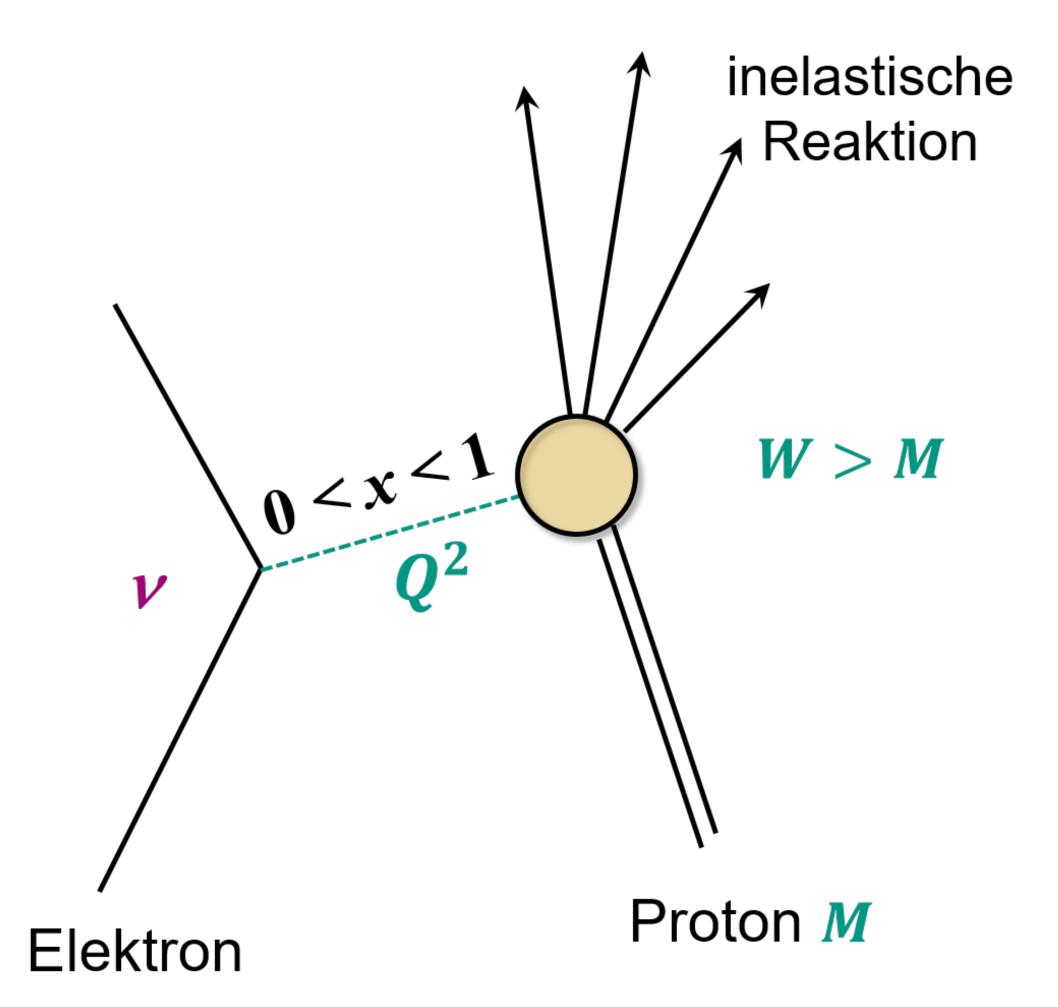
- Grenzfall: elastische Streuung

$$Q^2 = 2M \cdot v \iff x = 1 \text{ mit } W = M$$



**Partonmodell** des Nukleons

x = Impulsanteil des Partons



#### Kinematische Größe: Bjorken Skalenvariable x



inelastische

■ Eigenschaften: dimensionslose Größe x als Mass der Inelastizität

- Definition:

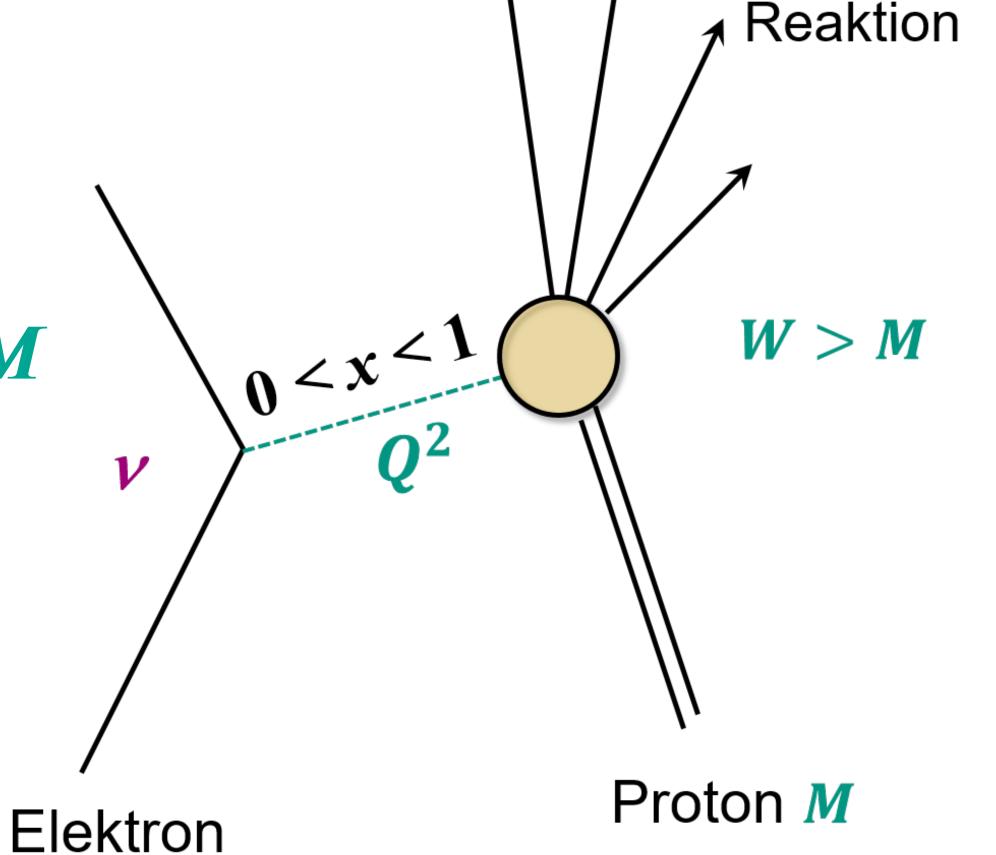
$$x = \frac{Q^2}{2M \cdot v}$$

$$x = 0...1$$

- inelastische Streuung

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



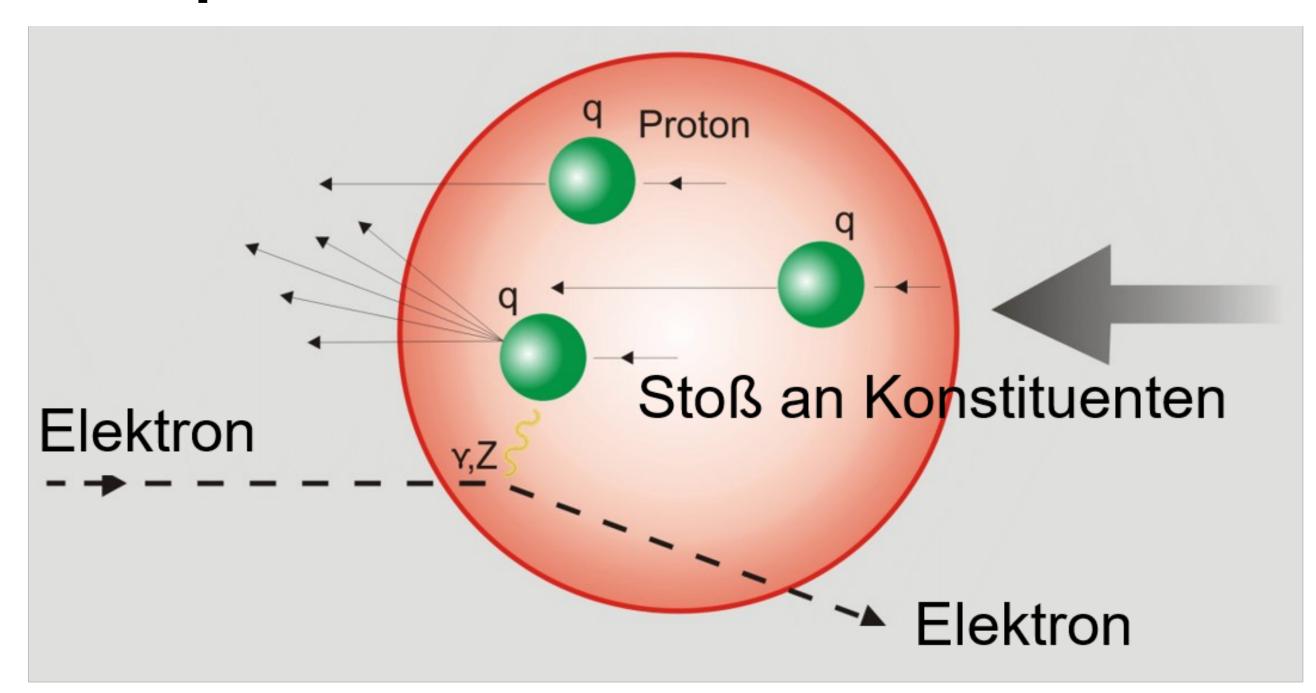




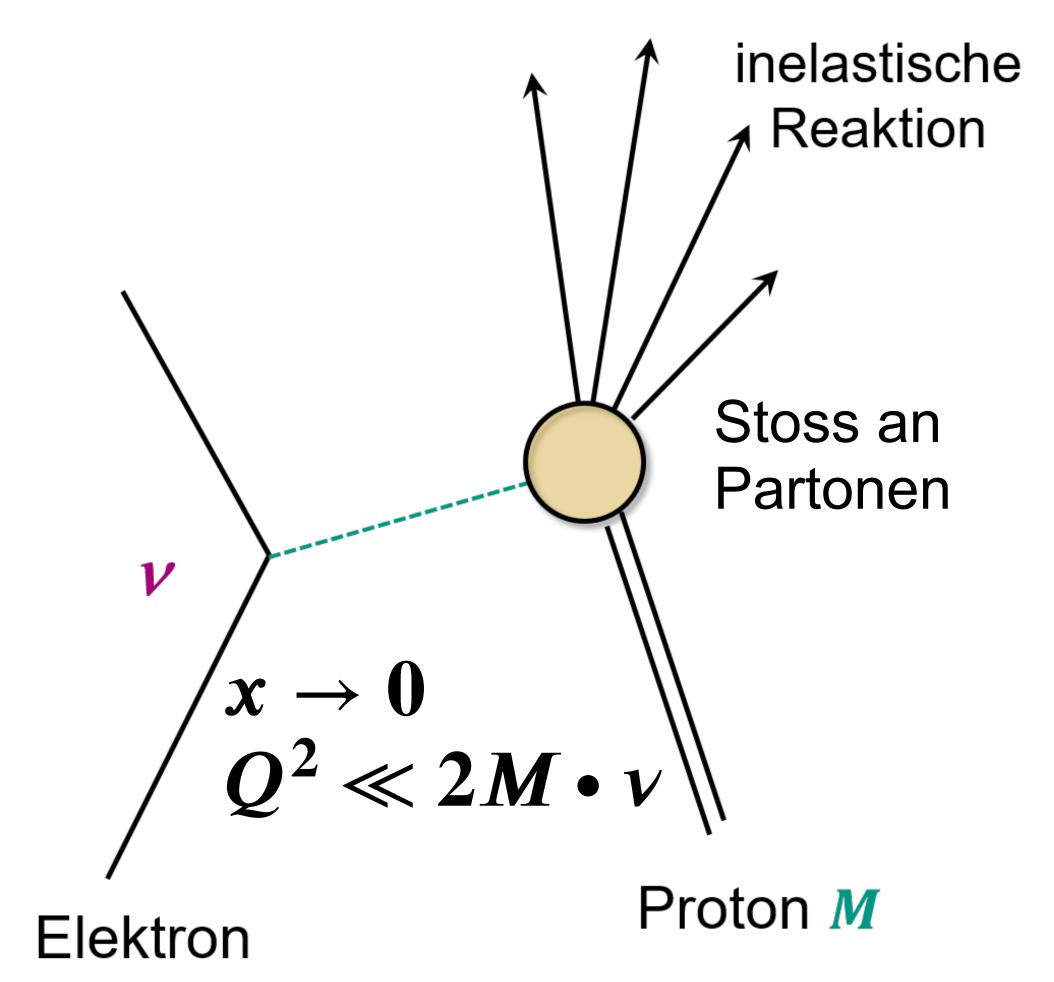
#### Tiefinelastische Streuung am Parton



Streuprozess an individuellem Parton innerhalb des Nukleons



konstanter Formfaktor ⇒ Streuung an punktförmigen Konstituenten ('Partonen')



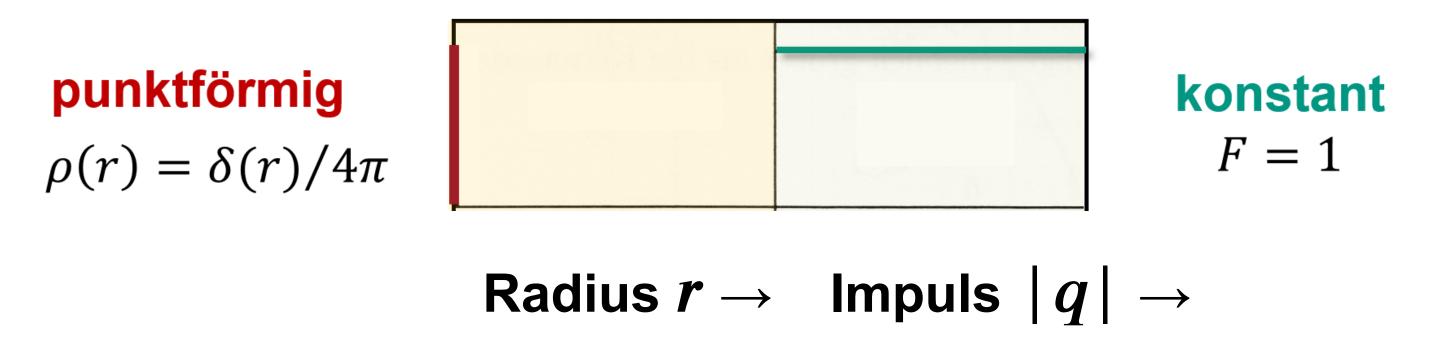
#### Tiefinelastische Prozesse: Strukturfunktionen

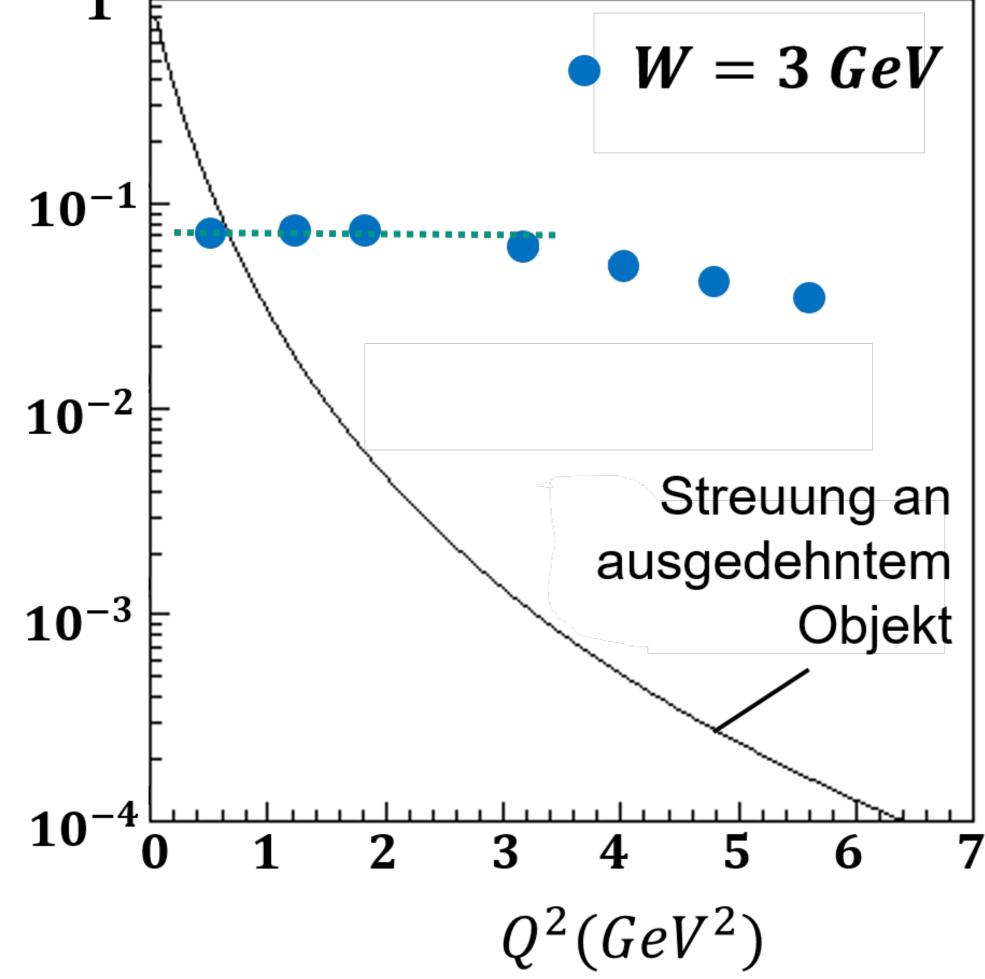


#### - Streuung an punktförmigen Partonen im Nukleon bei $W>3\ GeV$

- 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)





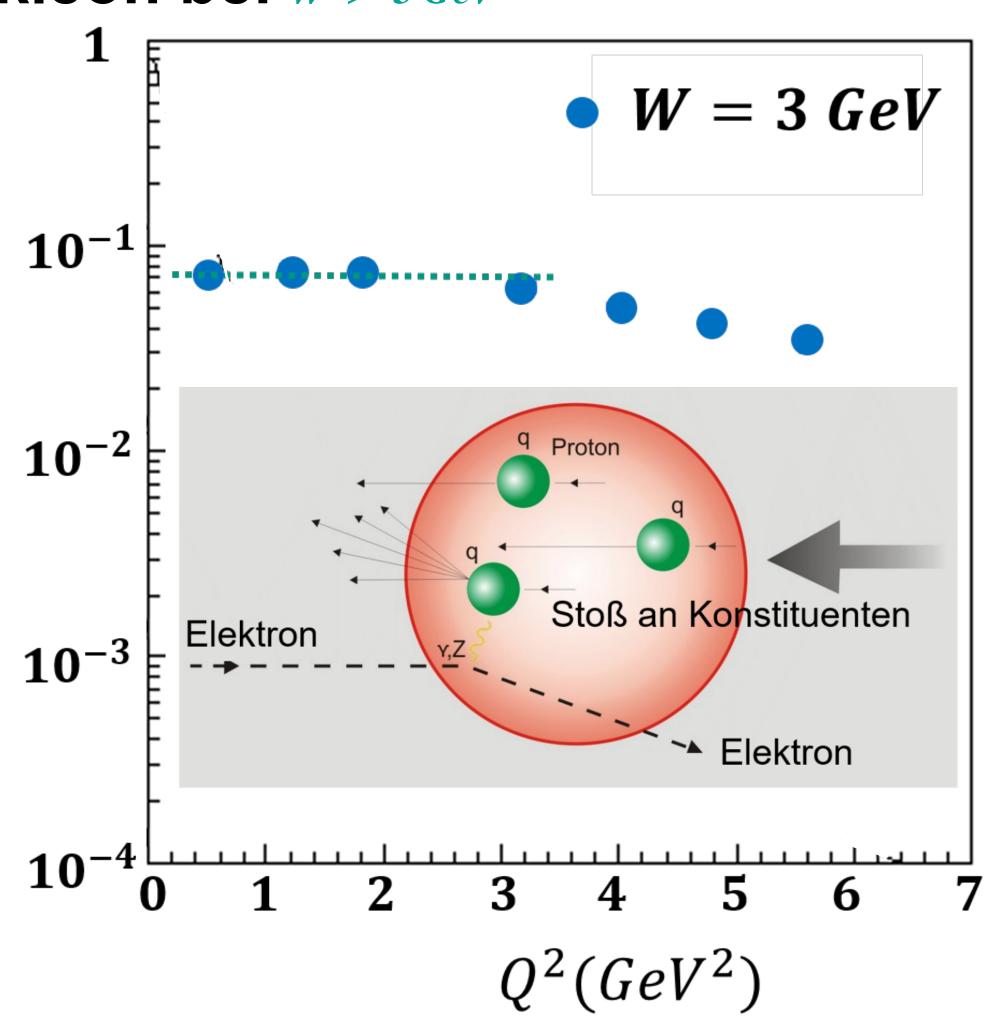


#### Tiefinelastische Prozesse: Strukturfunktionen



#### - Streuung an punktförmigen Partonen im Nukleon bei $w > 3 \, GeV$

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

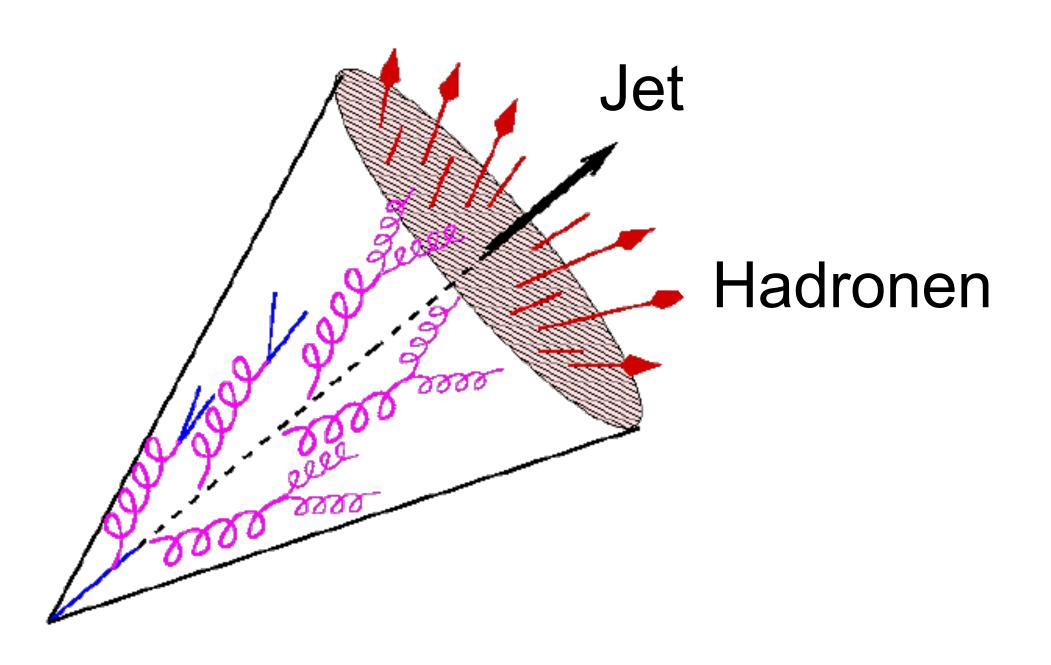


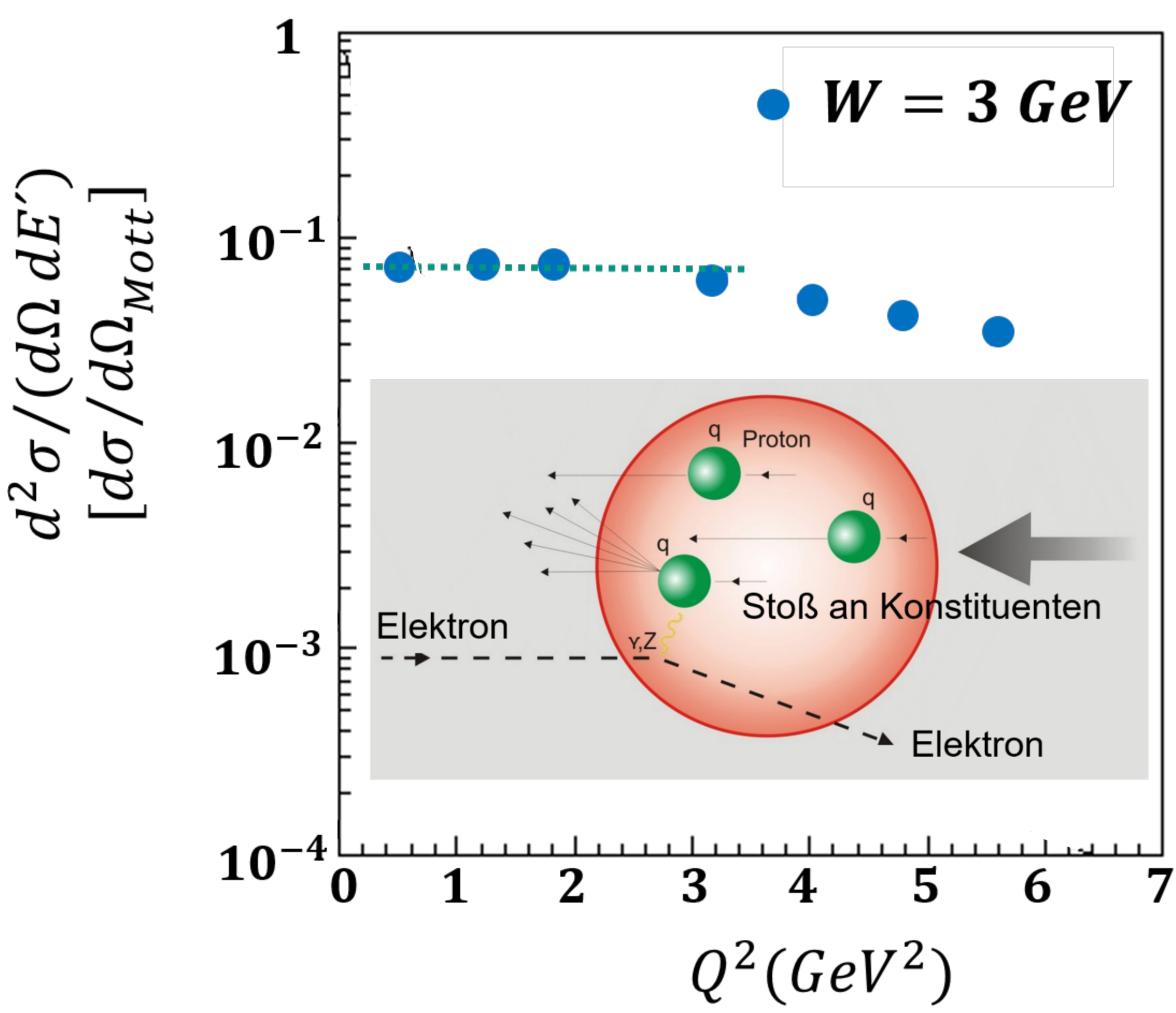
#### Tiefinelastische Prozesse: Strukturfunktionen



- Streuung an punktförmigen Partonen im Nukleon bei  $w > 3 \, GeV$ 

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





#### Tiefinelastische Prozesse: höchste Energien



- SLAC: Experimente zur tiefinelastischen Elektron-Streuung am Nukleon
  - SLAC: 3,2~km langer Linearbeschleuniger für Elektronen bis E~=~50~GeV
  - 1969...72: Messungen bei 4 21 GeV: Beobachtung von Elektronen unter großen Streuwinkeln (Streuung an inneren 'harten' Objekten des Protons)



Beschleuniger in Stanford





# 3. SLAC, nobeknrize ord

#### Tiefinelastische Prozesse: Nobelpreis 1990



#### SLAC: Auszeichnung für J. Friedman I H.W. Kendall I R.E. Taylor

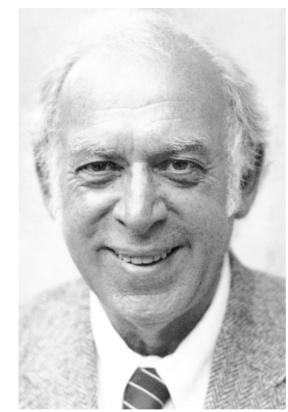


Photo from the Nobel Foundationarchive.

Jerome I. Friedman

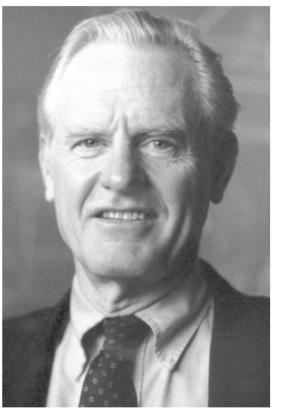


Photo from the Nobel Foundation archive.

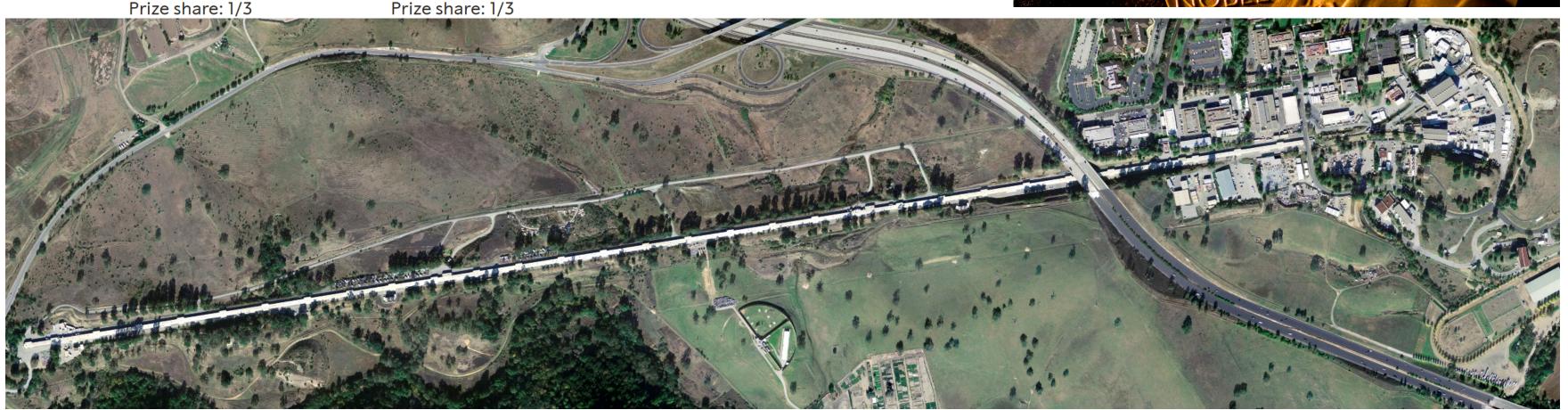
Henry W. Kendall

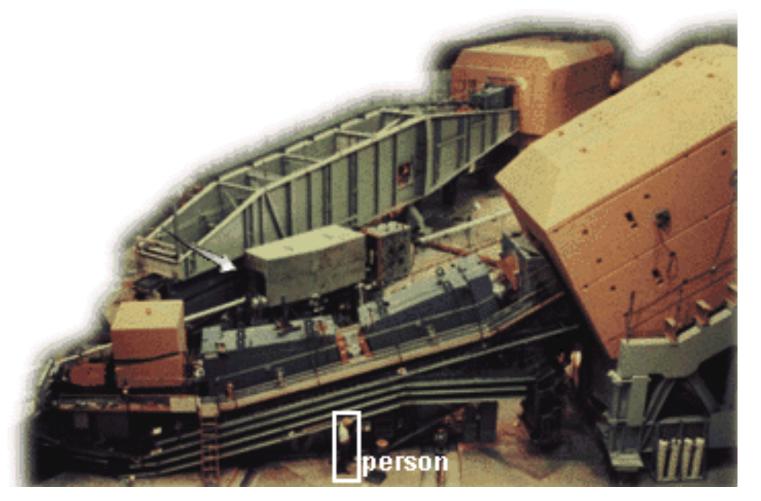


Photo: T. Nakashima
Richard E. Taylor
Prize share: 1/3

"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"



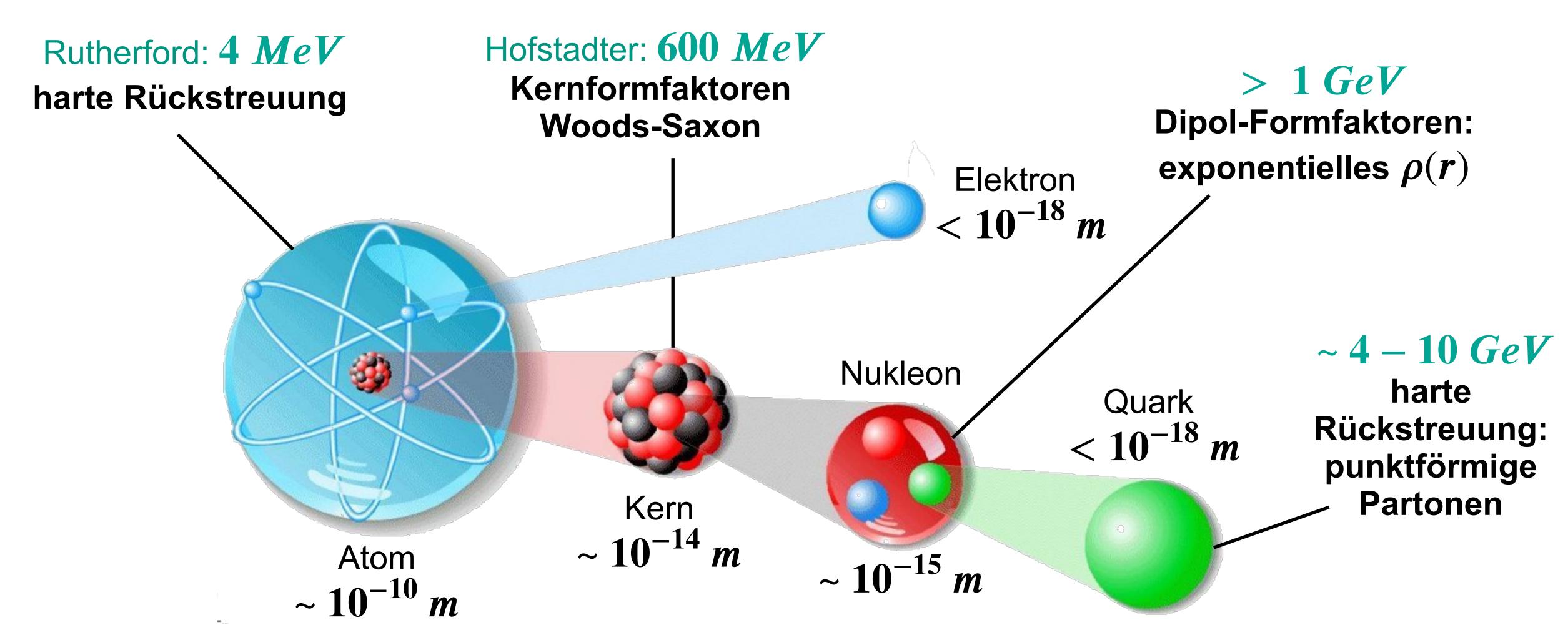




#### Tiefinelastische Prozesse: RECAP der Schritte



Aufdeckung der Substruktur der Materie durch Streuexperimente



#### Frage: Bjorken



- Bjorken x ist wie folgt definiert:
- Im Quark Modell und bei inelastischer Streuung können wir x als ...

 $x = \frac{Q^2}{2M \cdot v}$ 

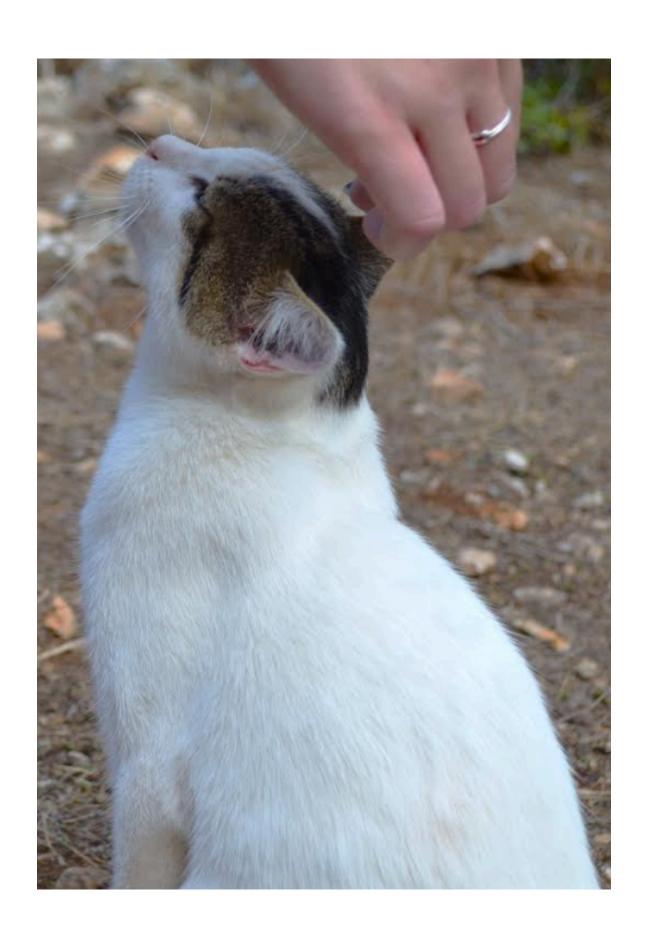
- 1) Energietransferanteil im Nukleon Ruhesystem
- 2) Impulsübertrag vom Elektron an das Quark
- 3) Impulsanteil der Quarks (oder Gluonen) am Nukleon Implus

... verstehen.

#### Katzen

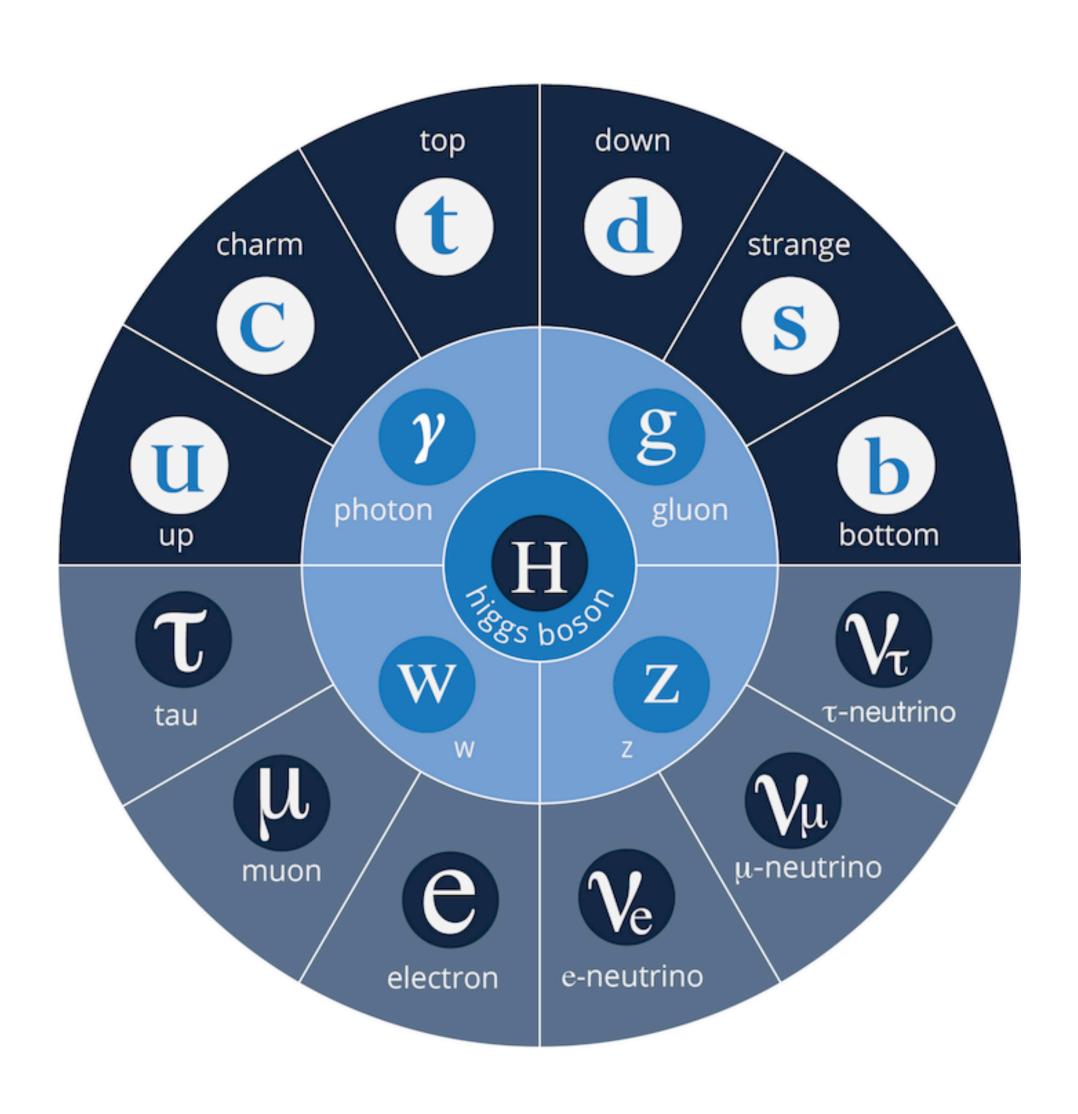


Urlaubskatze auf Kreta



# Moderne Experimentalphysik II - Part II





- 4. Symmetrien und Erhaltungssätze
  - 4.1 Erhaltungszahlen
  - 4.2 Diskrete Symmetrien
  - 4.3 Schlüsselexperimente
  - 4.4 Supersymmetrie

### Überblick



 Symmetrieprinzipien und Erhaltungssätze sind zentrales Element von modernen physikalischen Theorien

- klassische Physik: Hamilton-Formalismus

- Quantenmechanik: Phase und Parität der Wellenfunktion \Psi

- Festkörperphysik: Symmetrie von Kristallen

- Teilchenphysik: Verallgemeinerung bekannter Konzepte aus der

klassischen Physik & Quantenmechanik

⇒ Eichsymmetrien, z.B. Farb-SU(3)

innere Symmetrien von Teilchen: Parität P, C, CP....

neue Quantenzahlen: Flavours von Quarks: u, d, ...

# J. wikipedia, ESO

# Klassische kontinuierliche Symmetrien



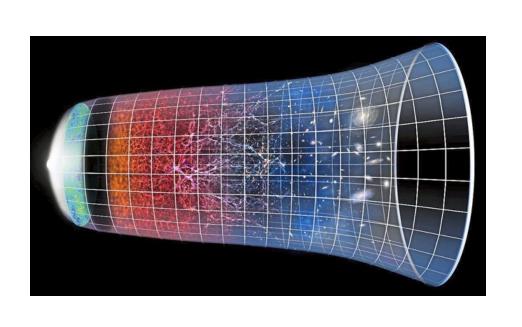
Noether-Theorem (Emmy Noether, 1918):

"zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems gehört eine Erhaltungsgröße" → klassische Raum-Zeit-Symmetrien

Symmetrieoperation	unbeobachtbare Größe	Erhaltungsgröße
Translation im Raum	absoluter Ort	Impuls
Drehung im Raum	absolutes Koordinatensystem	Drehimpuls
Translation in der Zeit	absolute Zeit	Energie

Emmy Noether

- Homogenität & Isotropie des Raumes: Erhaltung von p, J
- Translationsinvarianz der Zeit : Erhaltung von E



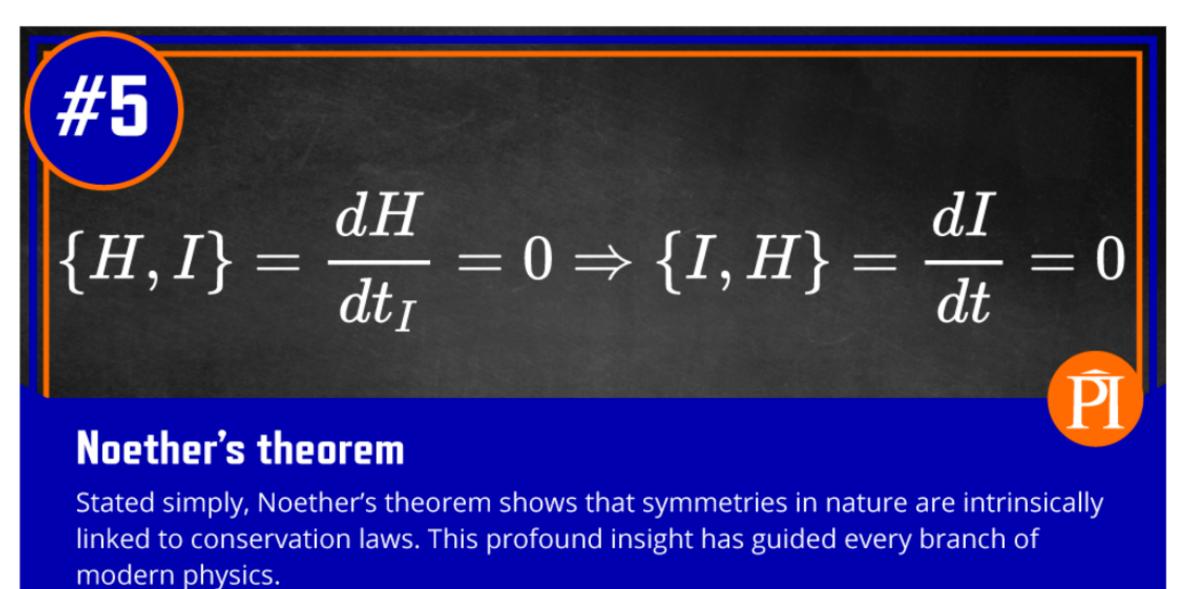
# : wikipedia. Perimeter Institeu

# Klassische kontinuierliche Symmetrien



Noether-Theorem (Emmy Noether, 1918):

"zu jeder kontinuierlichen Symmetrie eines physikalischen Systems gehört eine Erhaltungsgröße" → klassische Raum-Zeit-Symmetrien



Perimeter Institute (Ontario): März/April 2022

the all-time greatest equation in physics ...

Noether's Theorem!



Emmy Noether

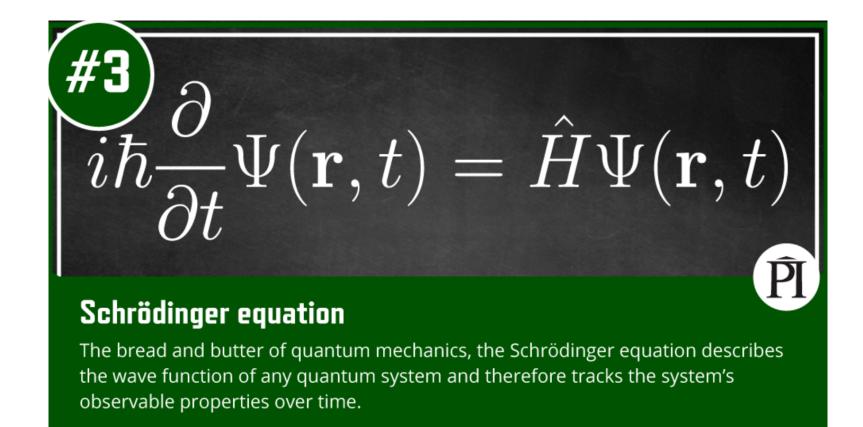
# Q: Perimeter Institute

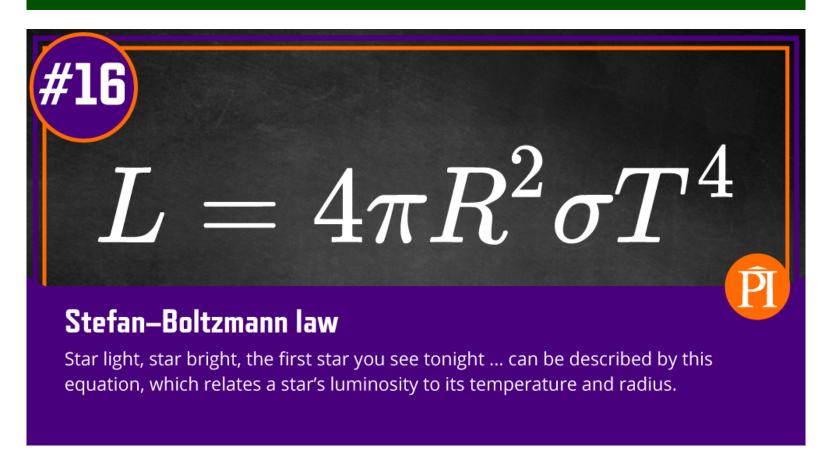
# Gleichungen in der Physik

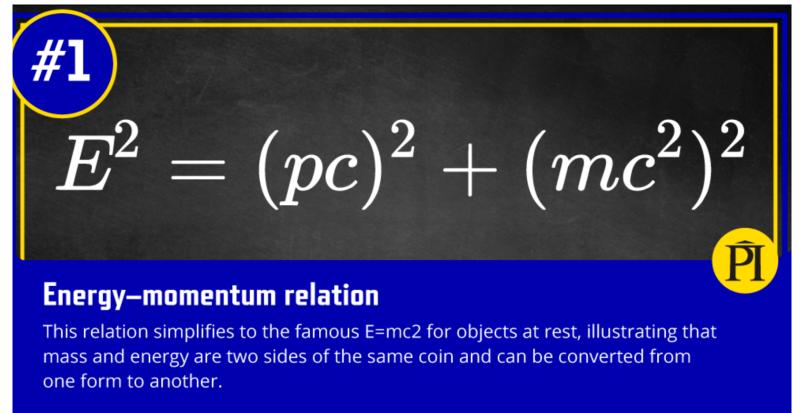


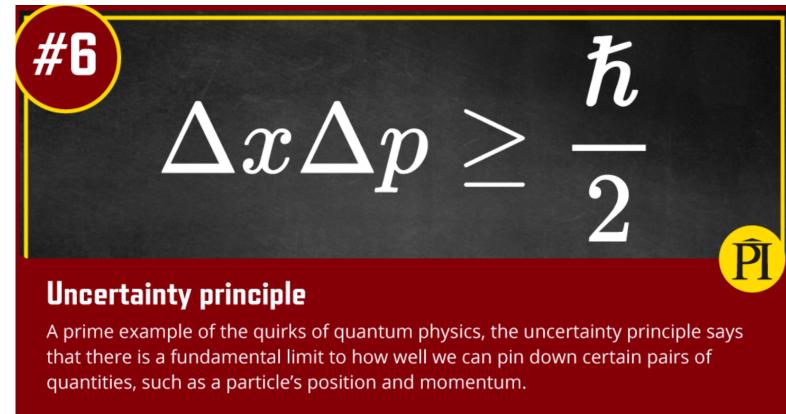
Welche Gleichung ist (neben Noether's Theorem) die Eleganteste, für mich?

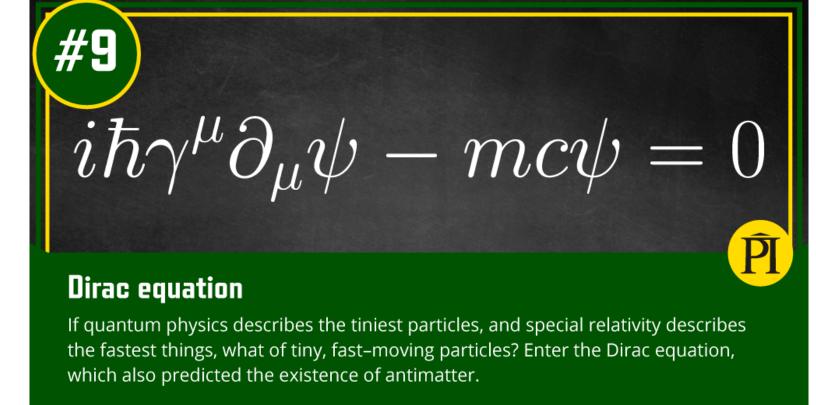


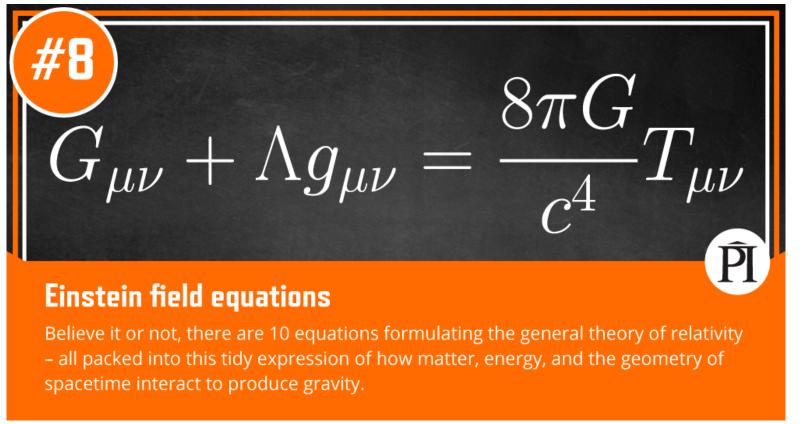












# Globale und lokale Symmetrien



globale Symmetrie: identische Symmetrieoperation an jedem Raum-Zeit Punkt x

globale Phase  $\alpha$ : identische Physik bei  $\Psi(x) \rightarrow \Psi(x) \cdot e^{i\alpha}$ 

■ lokale Symmetrie: Symmetrieoperation ist Funktion von  $x = (\vec{r}, t)$ 

lokale Phase  $\alpha$ : identische Physik bei  $\Psi(x) \rightarrow \Psi(x) \cdot e^{i\alpha(x)}$ 

stärkere Anforderung!

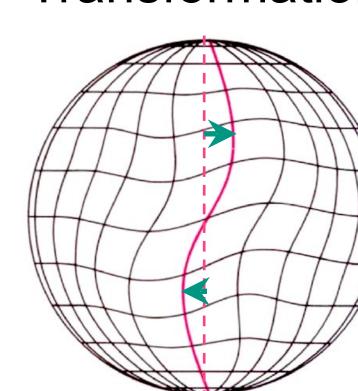
 $\alpha(x)$ 

 $\alpha(x')$ 

Symmetrie wird auf ein System angewandt:

System bleibt invariant, d.h. transformierter Zustand kann nicht vom untransformierten Zustand unterschieden werden

### globale Transformation Transformation



lokale

Q: Spektrum

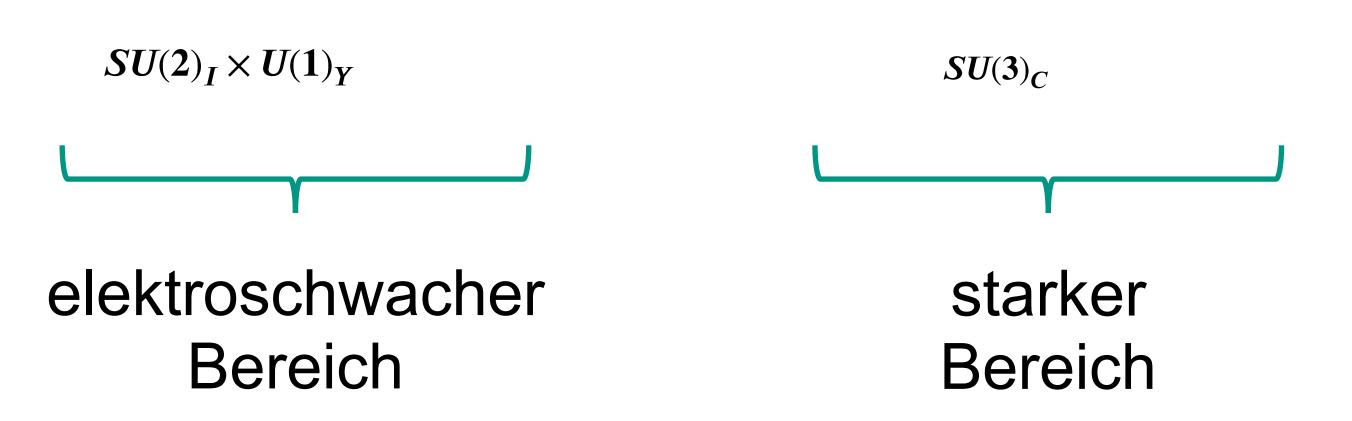
# Standardmodell & Eichsymmetrien

I: Isospin Y: Hyperladung



Standardmodell beruht auf lokalen Eichsymmetrien

zwei Eichgruppen

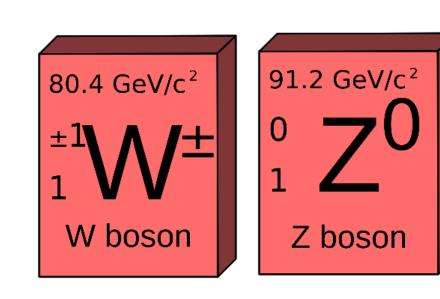


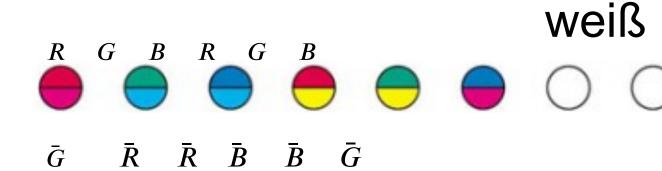
Invarianz bei lokaler Eichsymmetrie: Einführung von neuen Feldern / Wechselwirkungen

C: Colour (Farbe)



Vektorbosonen





Gluonen

# a: wikipedia

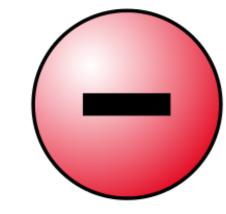
# Additive & multiplikative Quantenzahlen



- Additive Quantenzahlen (ladungsartig)
  - Summe der Quantenzahlen in einem Prozess ist erhalten

kontinuierliche Symmetrien: elektrische Ladung Q, Hyperladung Y Leptonenzahl L, Baryonenzahl B,...





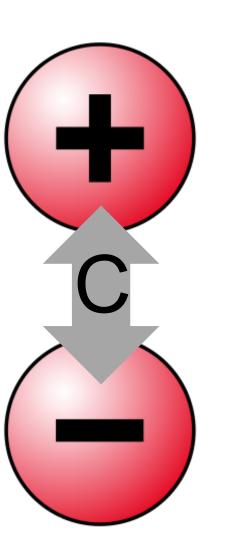
- Multiplikative Quantenzahlen
  - Produkt π der Quantenzahlen in einem Prozess ist erhalten:

diskrete Symmetrien:

Parität P

Ladungskonjugation c





# Intrinsische Quantenzahlen: Baryonenzahl **B**



- Hadronen (Quarks) & Leptonen: intrinsische Quantenzahlen
  - Ladung Q, Farbladung, Flavour, schwache Hyperladung Y,...
- Baryonenzahl B
  - B ist eine erhaltene (additive) Quantenzahl im Standardmodell
  - Definition

$$\boldsymbol{B} = \frac{1}{3} \cdot \left[ N(q) - N(\bar{q}) \right]$$

$$N(q), N(\bar{q})$$
 Anzahl der Quarks, Antiquarks

Beispiel: Nukleon B = 1, Quark B =  $\frac{1}{3}$ , Antiquark B =  $-\frac{1}{3}$ 

# SM: exakte Erhaltung der Baryonenzahl $\boldsymbol{B}$

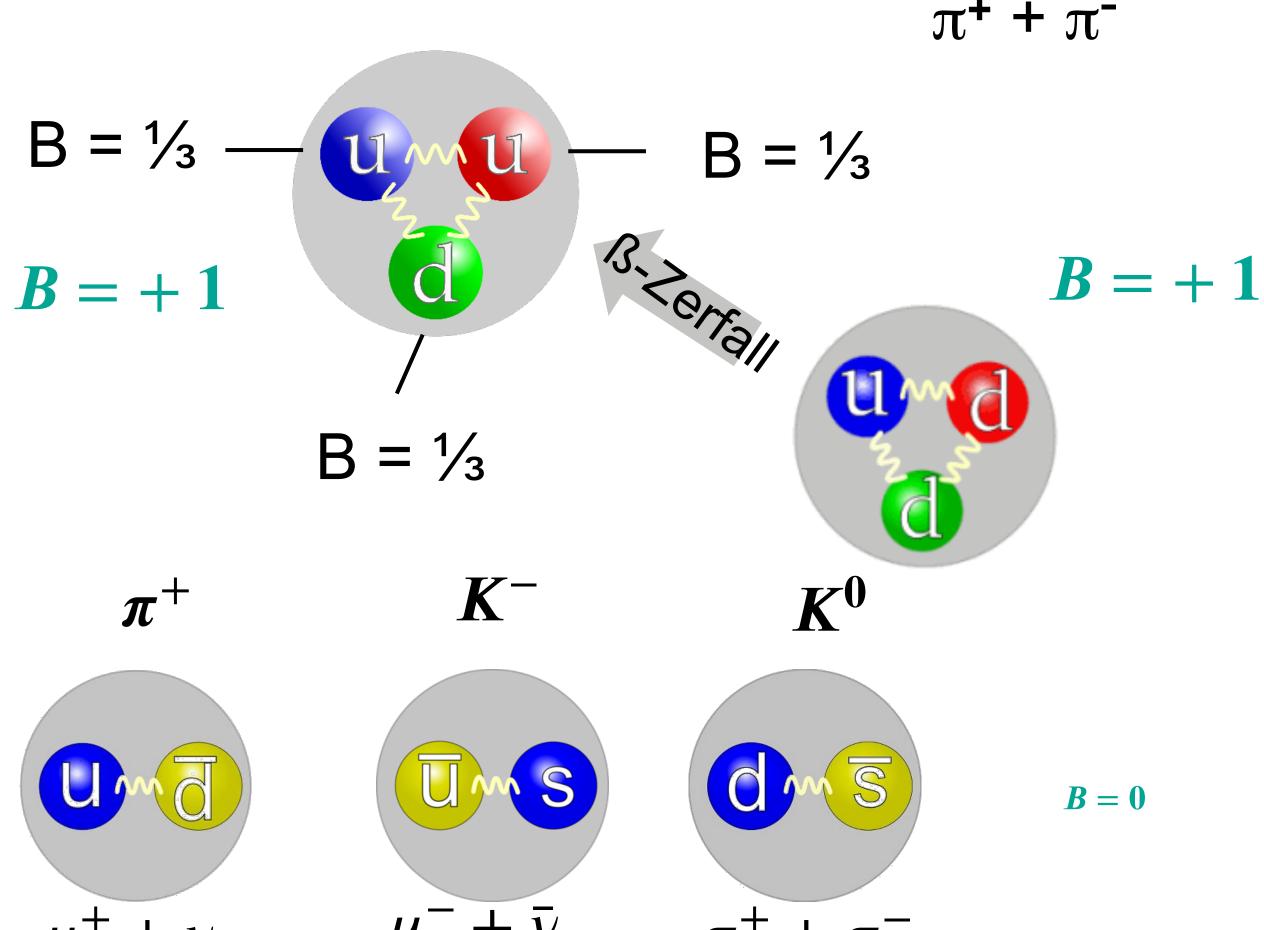


Proton als leichtestes Baryon im Standardmodell ist stabil

Masse (p) = 
$$938,272 \text{ MeV}$$

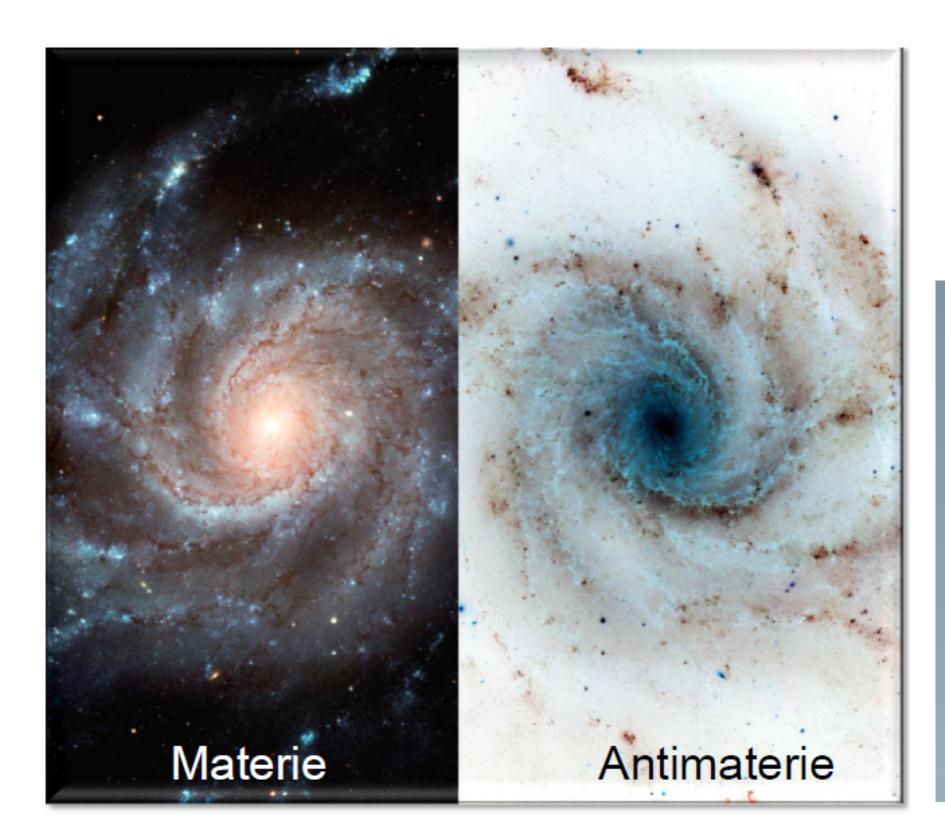
- bisher *keine* Baryonenzahlverletzenden Prozesse beobachtet!

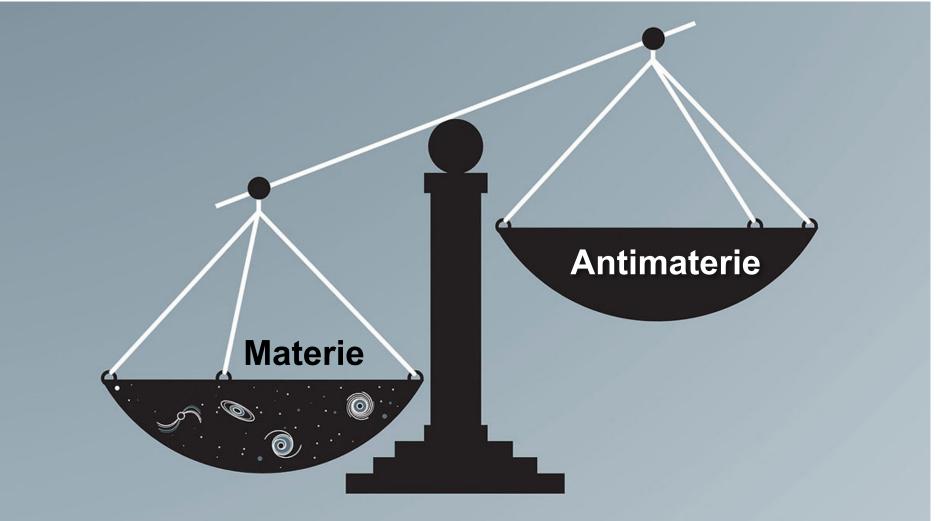
Meson: gebundenes System aus Quark & Antiquark Bsp: Pion, Kaon,...



Q: wikipedia





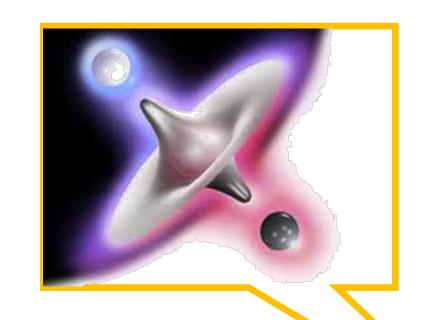


# EINSCHUB – VERLETZUNG DER BARYONENZAHL

# Erhaltung der Baryonenzahl & Kosmologie\*

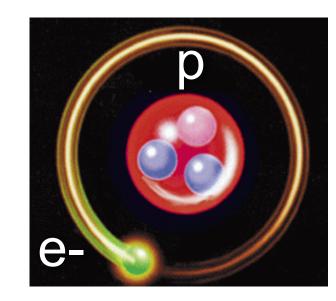


- Universum zeigt Baryon-Asymmetrie
  - beobachtete Baryon-Asymmetrie  $\eta = (6,14 \pm 0,24) \cdot 10^{-10}$

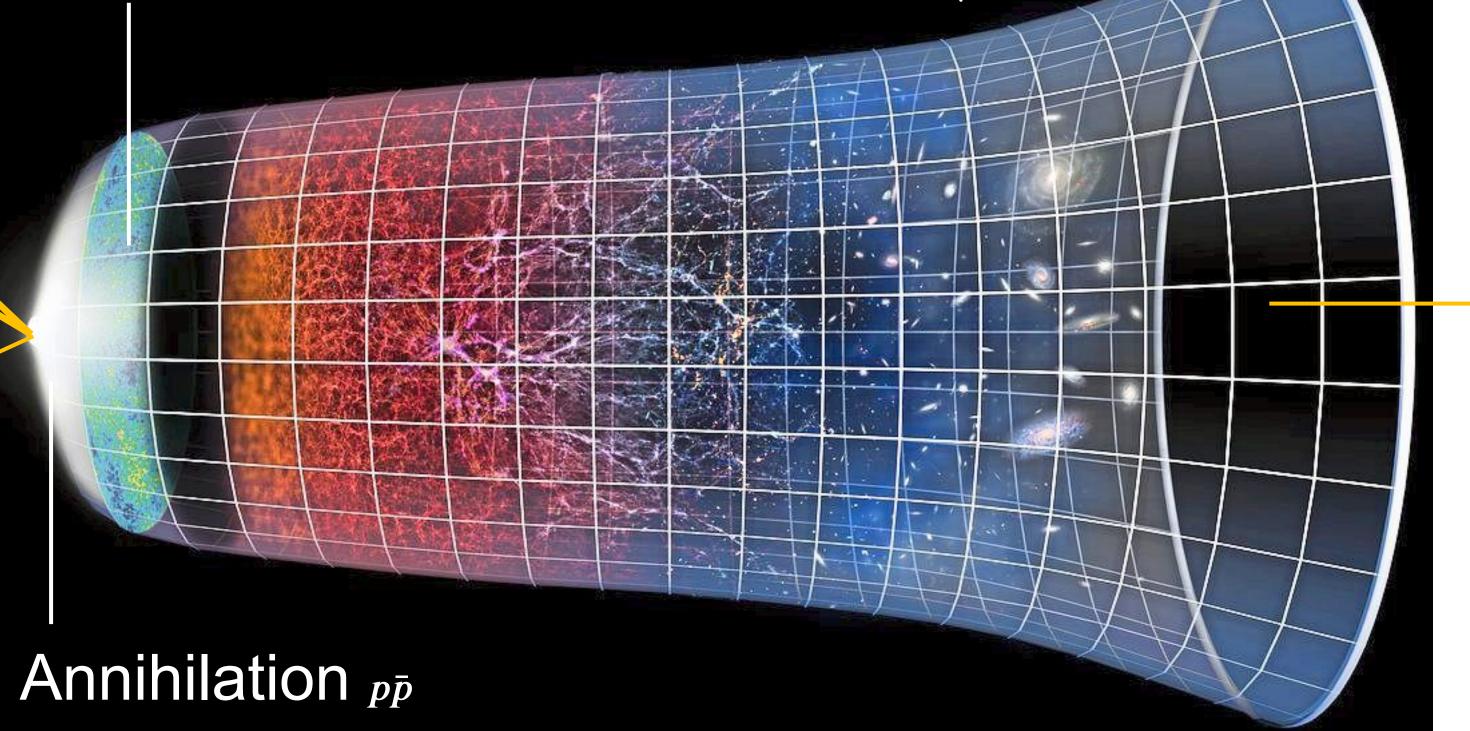


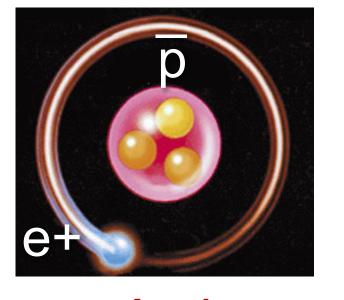
kosm. Mikrowellenhintergrund (n<sub>v</sub>)

Wasserstoff



Verletzung der Baryonenzahl





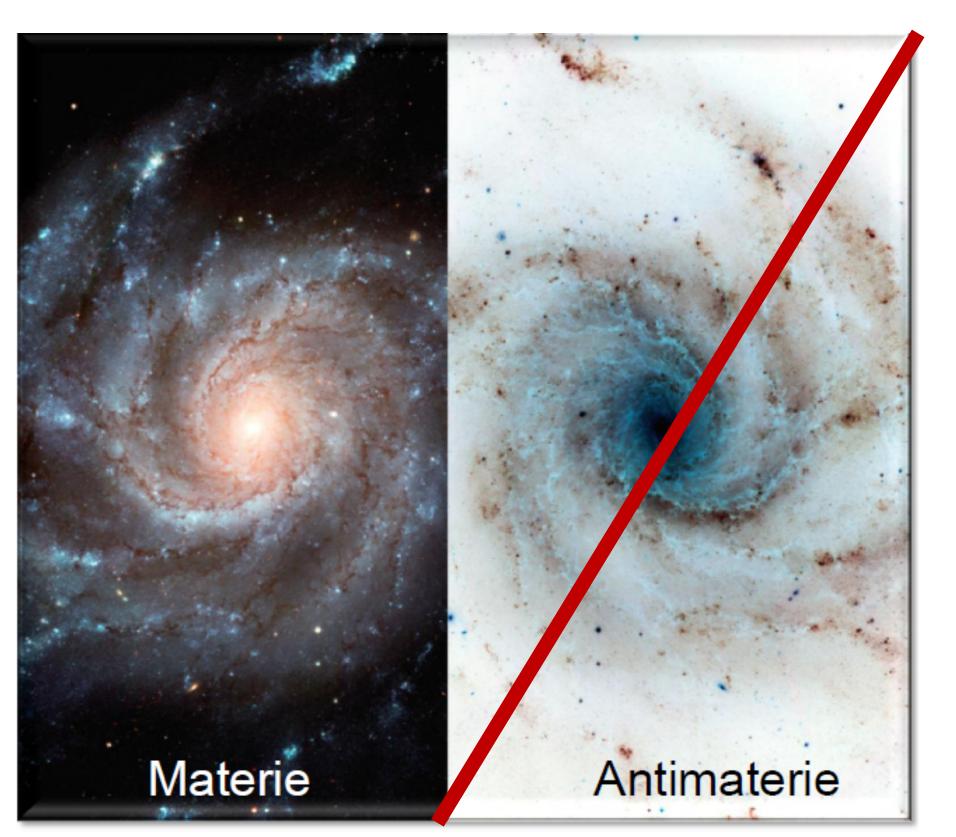
Anti-Wasserstoff

# Q: spektrum, wikimedia

# Sacharov-Kriterien für Baryon-Asymmetrie



- Universum zeigt Baryon-Asymmetrie: nur Materie, keine Antimaterie
  - drei Sacharov-Kriterien für eine erfolgreiche Baryogenese:



- 1. Verletzung der Baryonenzahlerhaltung
- 2. Verletzung der CP-Invarianz\*
- 3. kein thermodynamisches Gleichgewicht



Andrej Dmitrijewisch Sacharov (1921-1989)

1967: Baryon-Asymmetrie

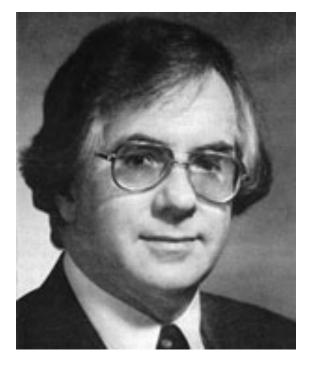
# Q: wikipedia, welt der physik

### GUTs: Baryonenzahlverletzende Prozesse!



### Proton-Zerfall in GUT-Szenarios

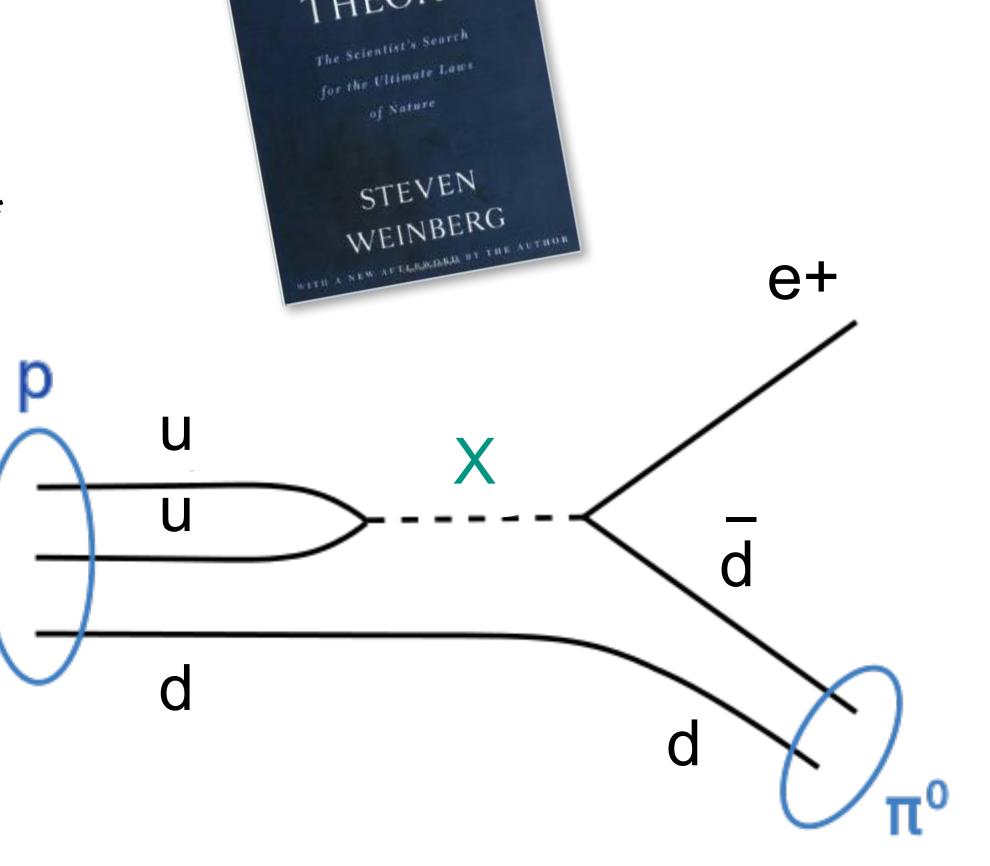
hypothetischer Zerfall
eines Protons in ein
Positron & neutrales Pion
erwartet in GUT = Grand Unified Theory\*
über ein superschweres sog. X-Boson
(erzeugt Kopplung Quark-Lepton)



S. Glashow



H. Georgi



\*GUTs beinhalten hypothetisches X-Boson

### Motivation für GUTs: das SM ist 'unvollkommen'

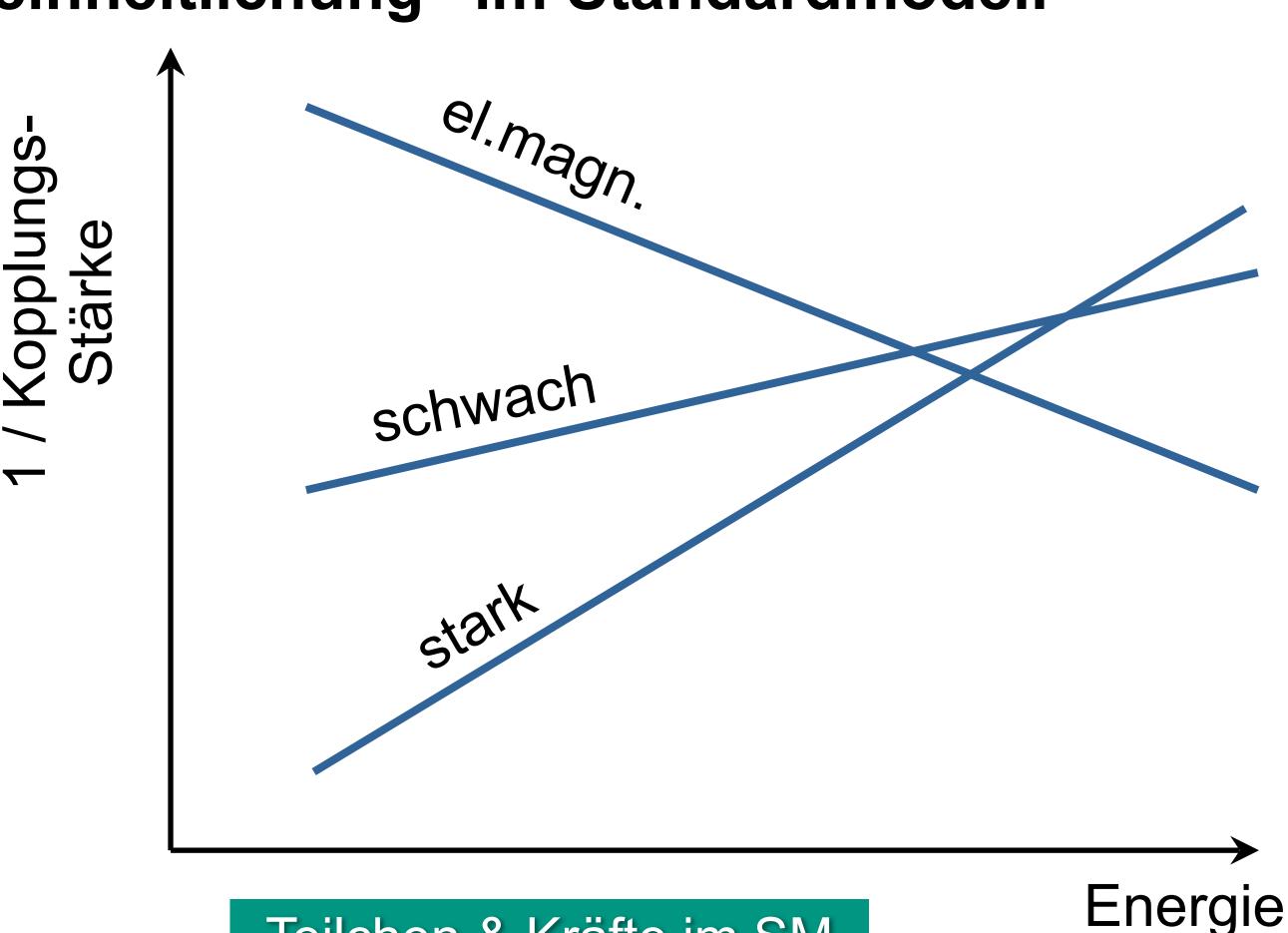


### GUT-Szenarios: keine "Große Vereinheitlichung" im Standardmodell

 Entwicklung der Stärke der Kopplungskonstanten als Funktion der Energie: kein gemeinsamer
 Schnittpunkt ③



W. De Boer (KIT) U. Amaldi



Teilchen & Kräfte im SM

Q: wikipedia, KIT

# SUSY: mit starkem Karlsruher Bezug



### GUT-Szenarios: "Große Vereinheitlichung" in der Supersymmetrie

- Supersymmetrie (SUSY)\*: alle Kräfte treffen sich bei einer Energieskala ©
- erste SUSY Theorie durch J. Wess & B. Zumino (1974)

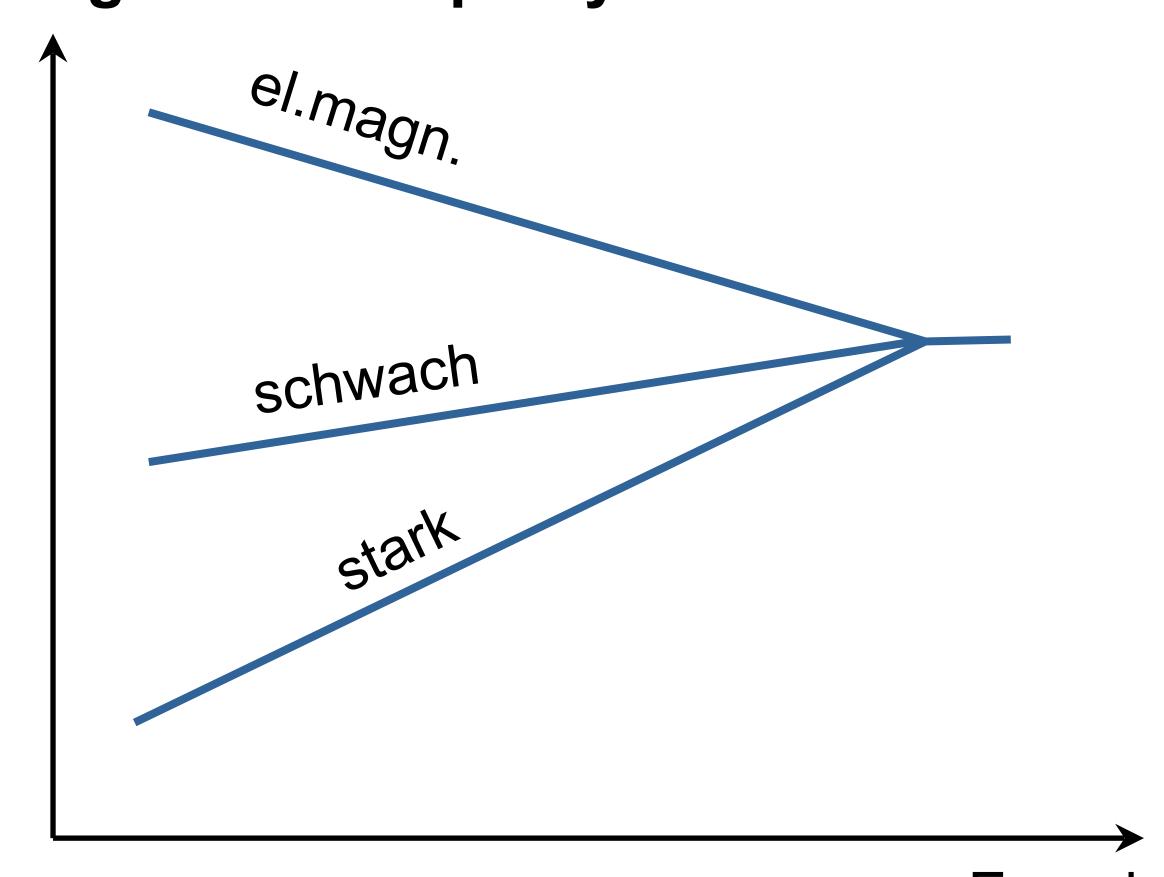






W. De Boer (KIT) U. Amaldi

J. Wess (KIT)



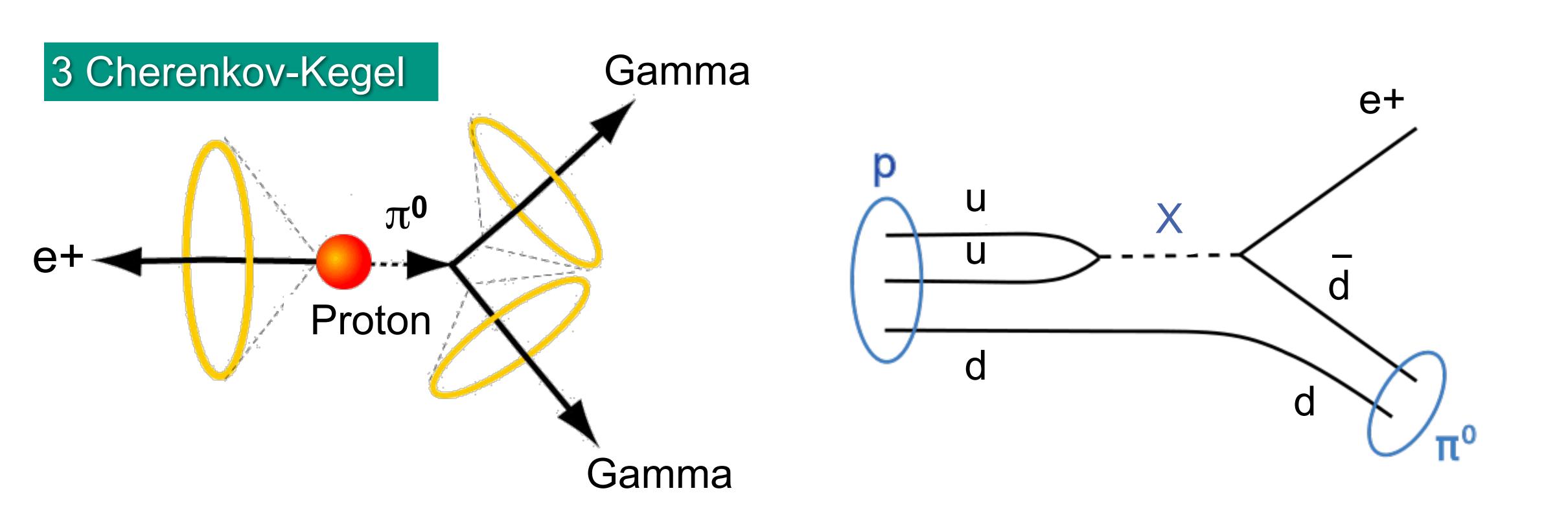
Teilchen & Kräfte mit SUSY

**Energie** 

# Zerfall des Protons in Positron $e^+$ & Pion $\pi^0$



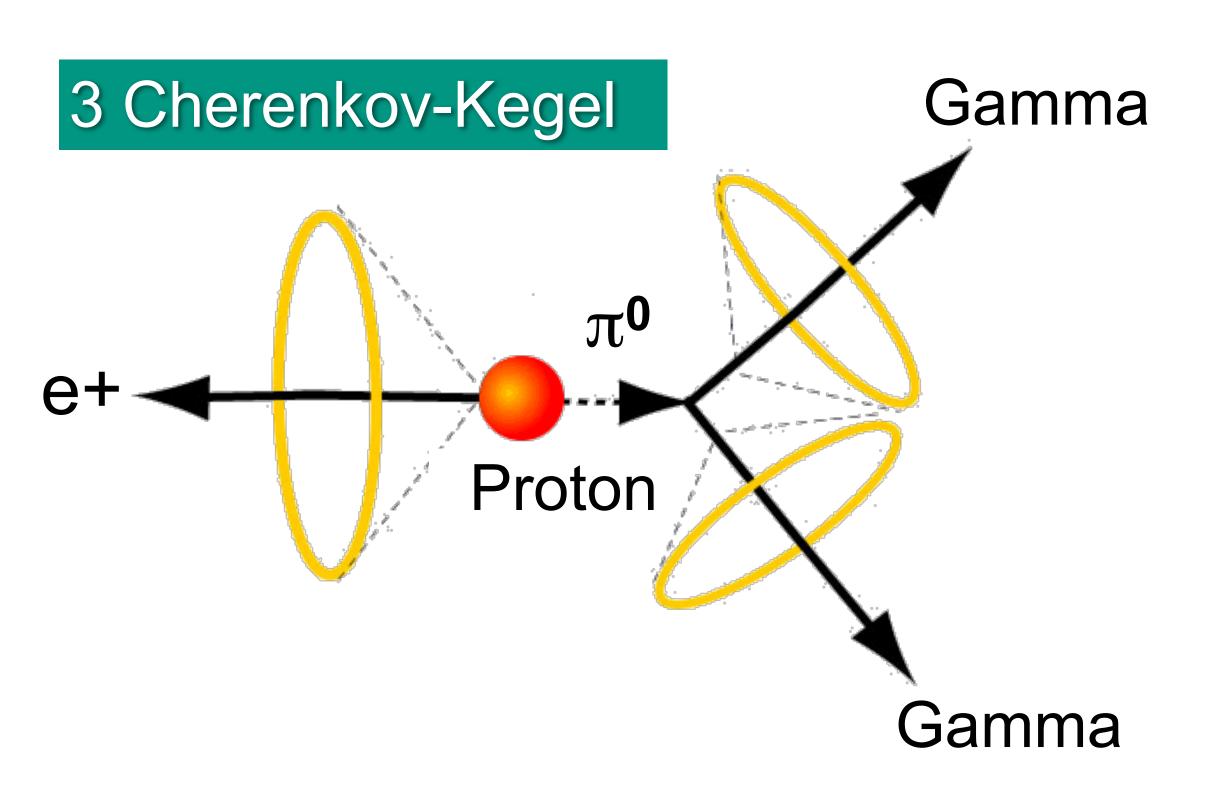
- Protonmasse definiert die Energieskala E ~ 1 GeV bei Suche nach Zerfall
  - heutige untere Grenze für Lebensdauer t<sub>1/2</sub> > 1,67 · 10<sup>34</sup> a

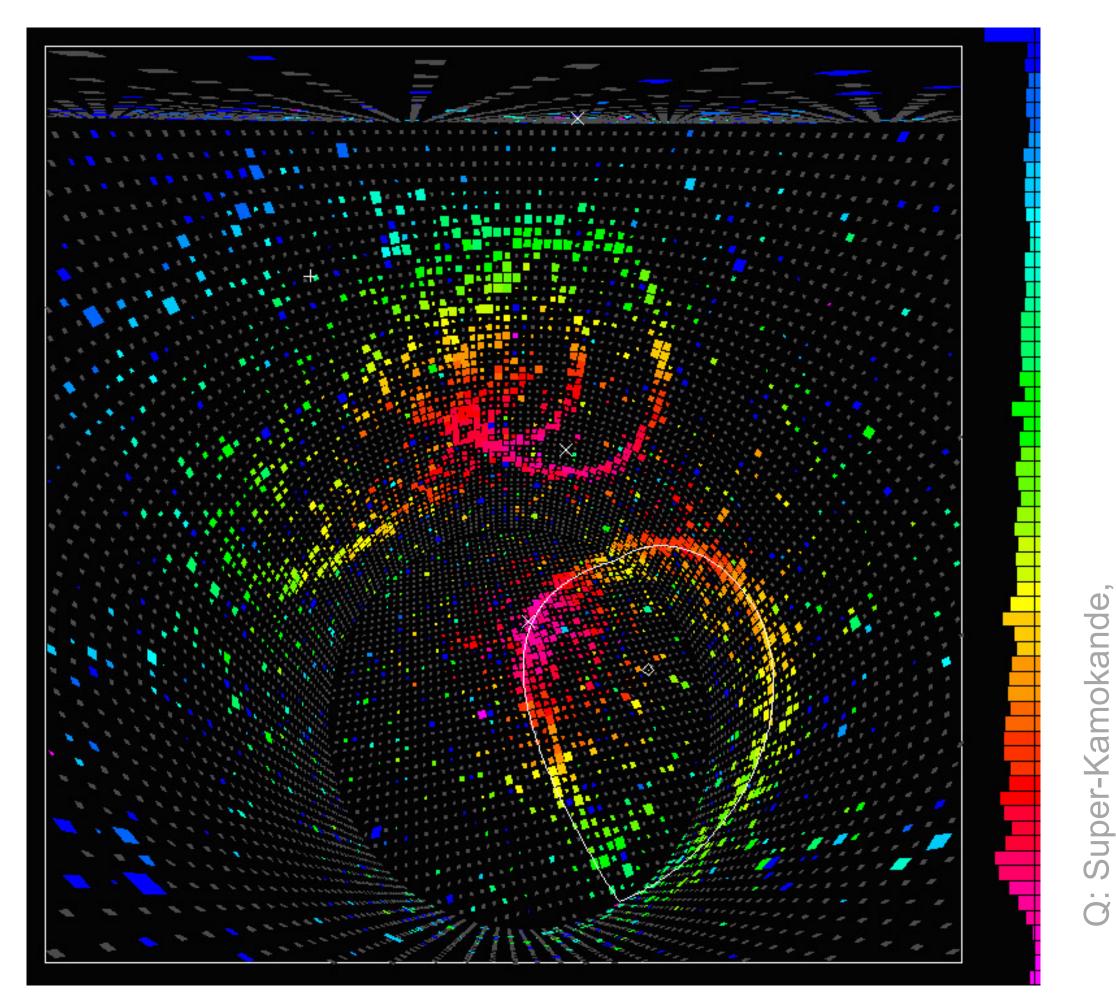


# Erwartete Zerfalls-Signatur in Super-Kamiokande



- Protonenzerfalls-Experimente: große H<sub>2</sub>O-Cherenkov-Detektoren\*
  - Super-Kamiokande: Simulation eines Protonen-Zerfalls mit 3 Cherenkov-Ringen





# : Hyper-Kamiokande, CHIPP

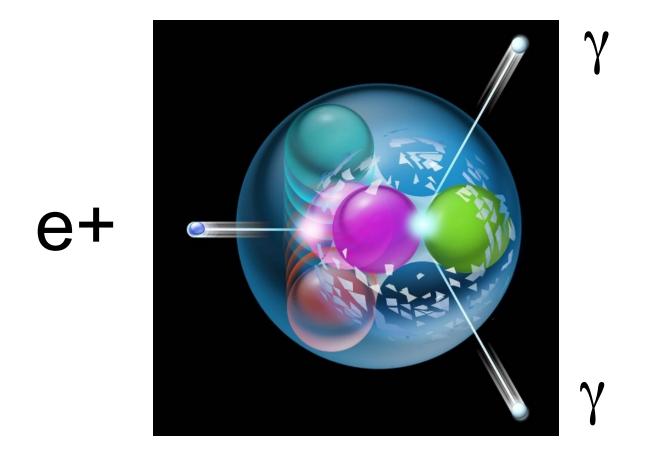
# Hyper-Kamiokande: 'ultimative' Sensitivität

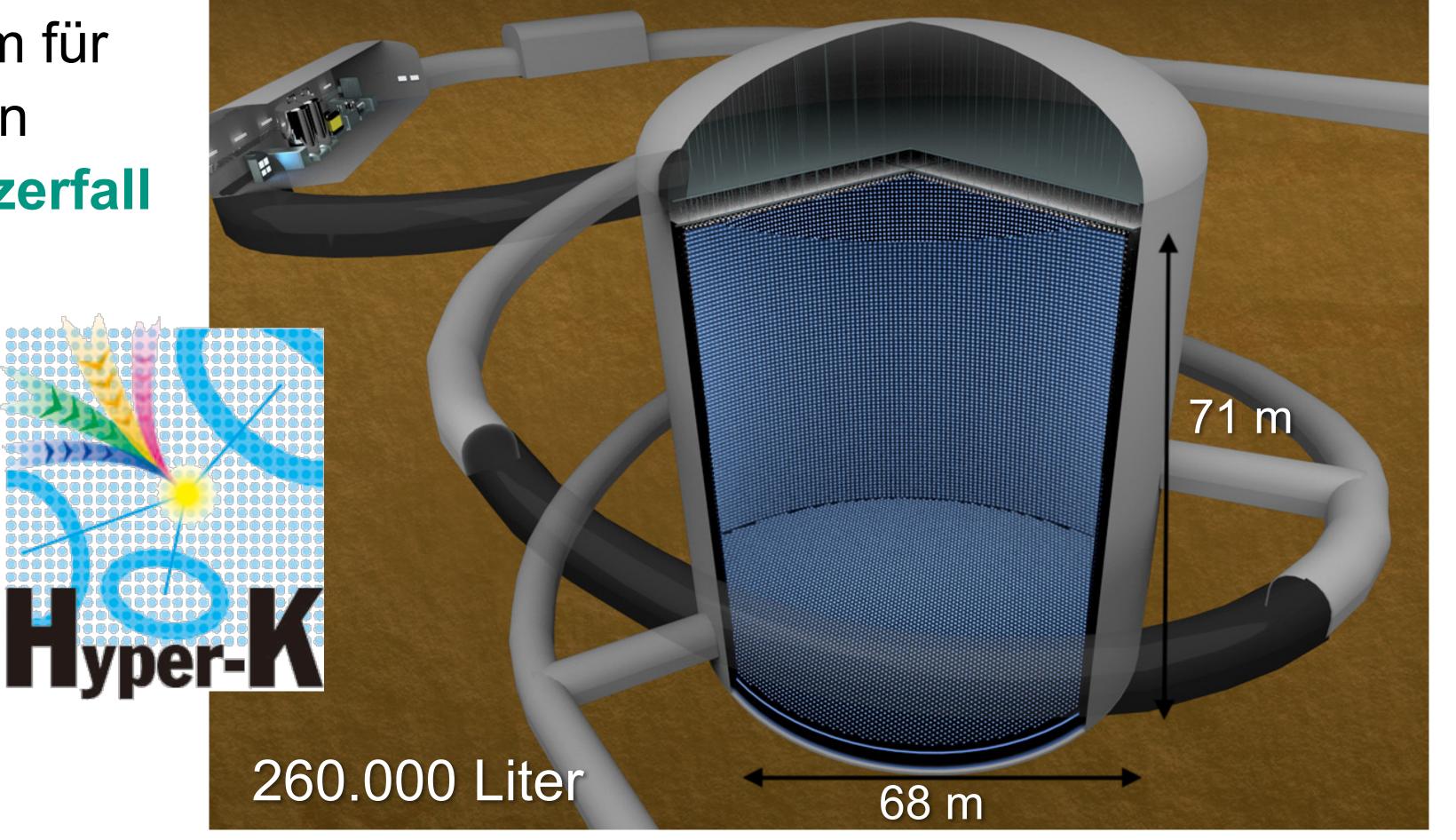


Protonenzerfalls-Experimente: Hyper-Kamiokande in Japan (ab 2027)

- ein neues Observatorium für
  - Neutrino-Oszillationen
  - Suche nach Protonzerfall

~10<sup>35</sup> Jahre





# : Physics World, Spektrum,

# Standardmodell: Erhaltung der Leptonenzahl $oldsymbol{L}$

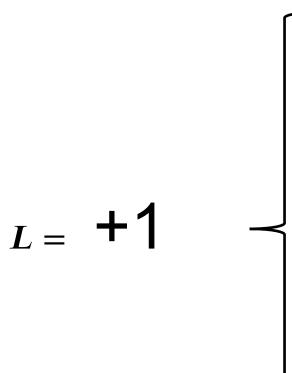


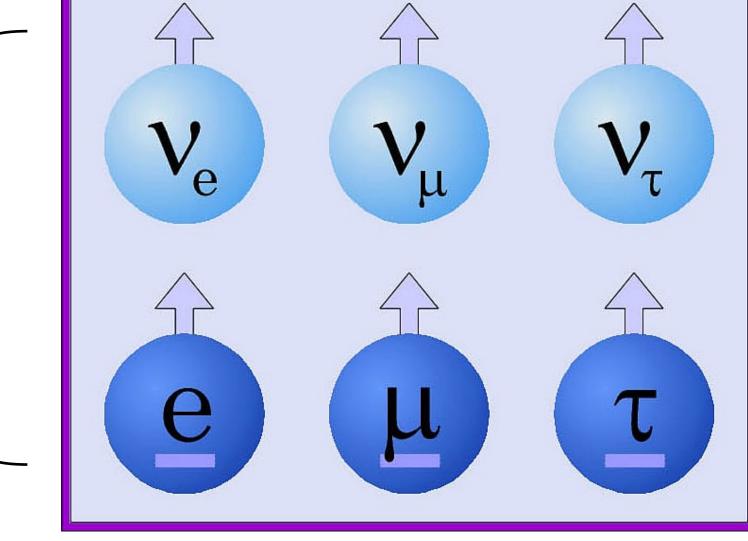
Leptonenzahl L für geladene (e,  $\mu$ ,  $\tau$ ) & neutrale ( $v_e$ ,  $v_\mu$ ,  $v_\tau$ ) Leptonen

- Definition:

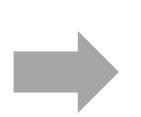
$$L = N(\mathcal{E}) - N(\bar{\mathcal{E}})$$

■ Antilepton



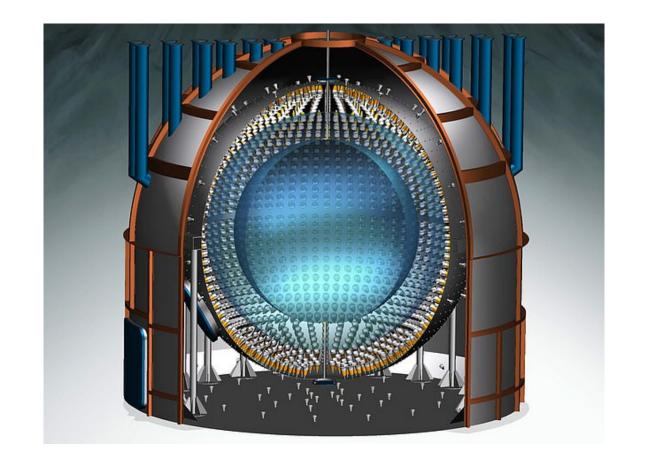


**Elektron** als leichtestes (geladenes) Lepton im Standardmodell mit L = +1 ist **stabil** 



e- Lebensdauer\*

$$t_{\frac{1}{2}} > 6.6 \cdot 10^{28} \text{ a}$$



\*Limit vom Borexino-Detektor

# A: Spektrum, symmetry magazine

# Standardmodell: Erhaltung von Familien- $L_i$

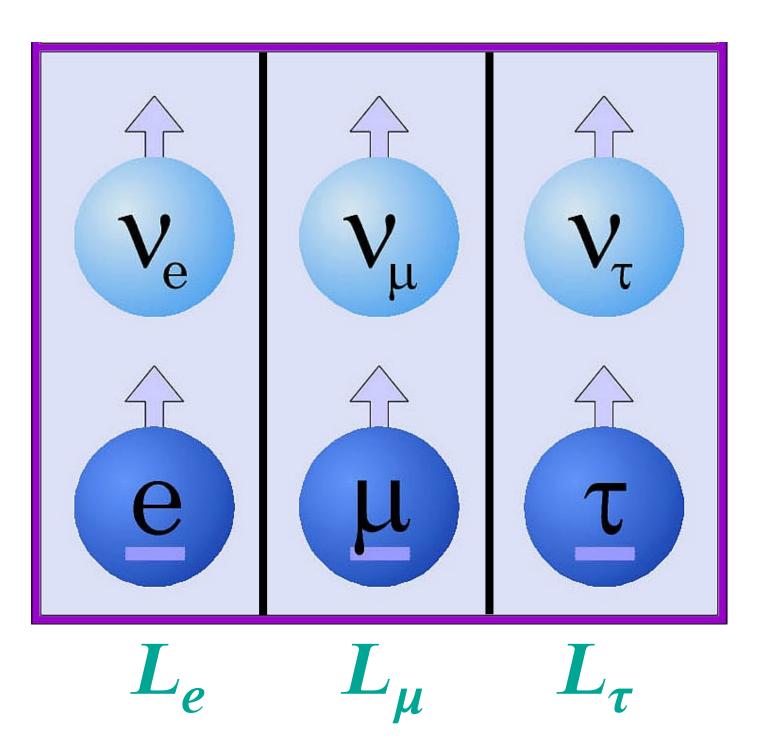


• jede der drei Leptonenfamilien  $i = (e, \mu, \tau)$  besitzt separate Quantenzahl

- Beispiele:  $L_e=+1$  für  $\left(e^-, v_e\right)$   $L_e=-1$  für  $\left(e^+, \bar{v}_e\right)$   $L_\mu=+1$  für  $\left(\mu^-, v_\mu\right)$   $L_\mu=-1$  für  $\left(\mu^+, \bar{v}_\mu\right)$
- **Leptonenzahl**  $L = L_e + L_{\mu} + L_{\tau}$

Erhaltung von L<sub>e</sub>, L<sub>μ</sub> und L<sub>τ</sub>
 verletzt durch masse-behaftete
 Neutrinos (ν-Mischung)





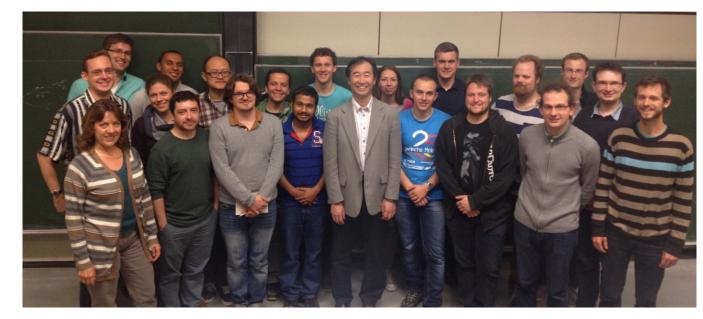
# 3: nobelprize, ca-ce-passe-la-haut.fr

# Experiment: Erhaltung von $L_i$ ist verletzt!

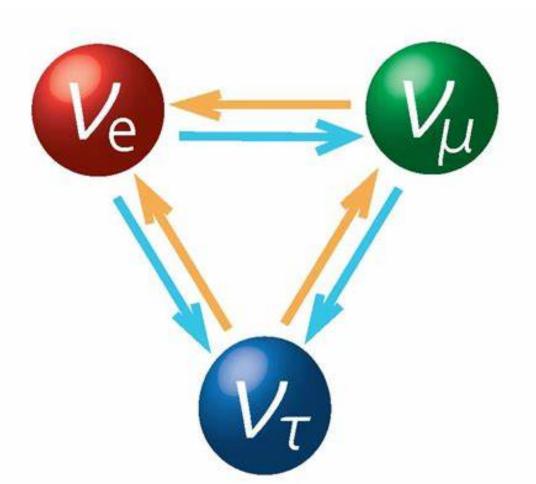


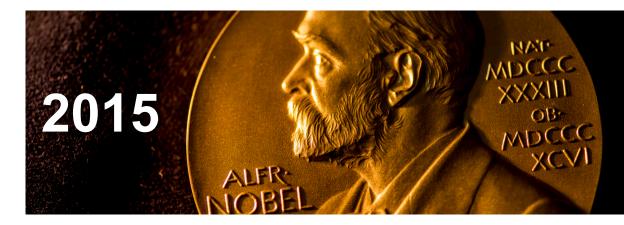
### • keine Erhaltung von Leptonen-Familienzahl $i = (e, \mu, \tau)$ !

- Beobachtung\* von  $\nu$ -Oszillationen, z.B. von  $\nu_e \leftrightarrow \nu_\mu$  (Neutrinos aus der Sonne) von  $\nu_\mu \leftrightarrow \nu_\tau$  (Neutrinos aus der Atmosphäre)
- Implikation: Neutrinos haben Masse!
- erste Physik jenseits des Standardmodells!!



2014: Takaaki Kajita im kl. HS A



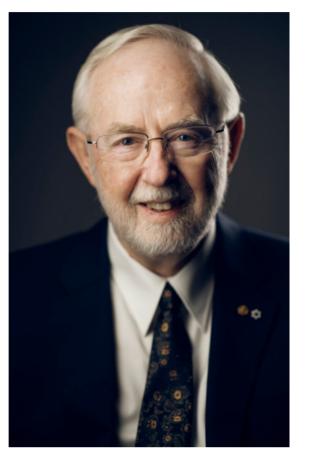




© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

Takaaki Kajita

Prize share: 1/2



© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud

Arthur B. McDonald

Prize share: 1/2

atmosphärische v's solare v's

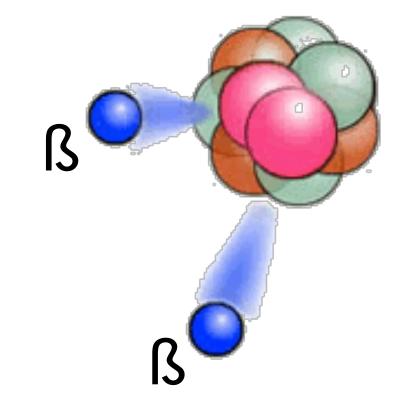
# Leptonenzahl: Verletzung von $oldsymbol{L}$ jenseits des SM



- Leptonenzahl L: kann genau wie Baryonenzahl B in erweiterten Theorien verletzt sein
  - ist das Konzept von L bei Neutrinos sinnvoll?
- Suche nach Verletzung der Leptonenzahl-Erhaltung in seltenem Zerfallsprozess\*: "neutrinoloser Doppel-Betazerfall"
  - zwei Neutronen in einem Kern zerfallen simultan ohne Emission von Neutrinos
  - 0vBB-Ereignisse mit  $\Delta L = 2$



**GERDA Experiment** am LNGS\*\*



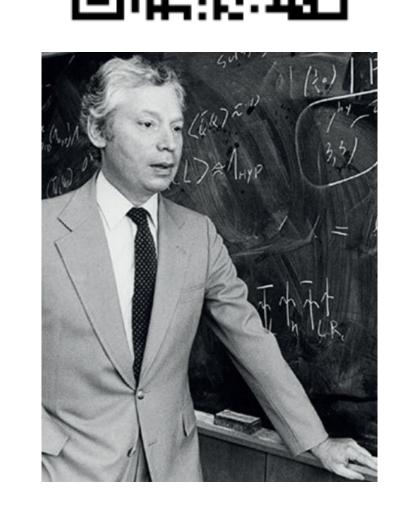
$$\Lambda L = 2$$

\*\* & Master-VL Astroteilchenphysik

# Verletzung von B und L



- Erhaltung der Baryonenzahl und Leptonenzahl im SM & bei GUTs
  - 1) Erhaltung von B und L im SM wohlbegründet durch eine intrinsische Symmetrie der Raumzeit (Noether-Theorem)
  - 2) Erhaltung von B und L ist eine empirische Beobachtung, bisher keine Verletzungen dieser Quantenzahlen experimentell nachgewiesen
  - 3) Bin mir nicht sicher



Steven Weinberg

60