

### **Moderne Experimentalphysik II** Teilchenphysik - Vorlesung 07

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



18.01.2024

# 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
- 2 Teilchenphysik





# **Recap: Streuexperimente & Wirkungsquerschnitte**

- Rutherford, Mott & Formfaktoren: auf dem Weg zur Kernstruktur
  - Rutherford: Streuung am Coulom

- Mott: relativistische Streuung mit
- Formfaktor  $F(q) \iff$  Ladungsverteilung  $\rho(r)$ : Fouriertransformierte



**hbpotenzial** 
$$\frac{d\sigma}{d\Omega} = (2 \cdot m_e \cdot Z \cdot \alpha)^2 \cdot \frac{1}{q^4}$$
  
**Spin**  $\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_M = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_R \cdot \frac{E}{E} \cdot \cos^2 \frac{d\sigma}{d\Omega}$ 





# 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

# Q = +2/3Q = +2/317 Q = -1/3

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





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











# Nukleon-Formfaktoren & innere Struktur



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



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



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







# Nukleon: Ladungsverteilung

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



### **exponentiell** abfallende Ladungsverteilung des Nukleons ("<u>kein</u> 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 $\langle r^2 \rangle = \frac{1}{Q} \cdot \int r^2 \cdot \rho(r) \cdot 4\pi \cdot r^2 \cdot dr$ - Definition\* rms - Radius R $R=\sqrt{\langle \ r^2 angle}$ Integration über $\rho(r)$ gewichtet quadratisches Mittel Kugelvolumen mit Quadrat von *r*

$$\sqrt{\left\langle r_{E}^{2} \right\rangle_{P}} = 0,8775 \ fm$$

$$\sqrt{\left\langle \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{E}}^{2} \right\rangle_{p}} \approx \sqrt{\left\langle \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{M}}^{2} \right\rangle_{p}} \approx \sqrt{\left\langle \boldsymbol{r}_{\boldsymbol{M}}^{2} \right\rangle_{n}} \approx 0.8...0.9 \ fm$$

Teilchenphysik 8



### mittlerer quadratischer Ladungsradius des **Protons**

#### mittlere quadratische Radien von Proton, Neutron

ean**-s**quare









# 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 $R_p = 0,84184(67) fm$

### Absorptionsspektrum: klass. *H*-Atom\*

### Emissionsspektrum: exotisches Atom









### Präzisionsmessung des Proton-Radius $R_p$

#### Februar 2022: Reanalyse der Elektron-Streudaten am Proton

- myonische H-Atome  $R_p = 0,84184(67) fm$





#### - Resultate von myonischen Atomen & Streudaten stimmen nun überein







# Inelastische Streuprozesse: Resonanzen

### • Elektronen-Energien E > 2 GeV: inelastische Streuung am Nukleon

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







### Beobachtung von Resonanzen









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

# • die 'berühmte' $\Delta^+$ Resonanz: der 1. angeregte Nukleon-Zustand $\Delta^+(1232): M = 1232 MeV$

- Resonanzen (mit extrem kurzen Lebensdauern) mit charakteristischem **Breit-Wigner Profil**
- Parameter von  $\Delta^+$ :  $\Gamma \approx 100 MeV$





 $^{2}\sigma/(d\Omega \ dE)$ 

1.5

0,5

Q: Povh









# **EINSCHUB – RESONANZEN**

![](_page_14_Picture_3.jpeg)

![](_page_14_Picture_5.jpeg)

# Eigenschaften von Resonanzen

### Resonanzen charakterisiert durch intrinsische Breit-Wigner Verteilung

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

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

![](_page_15_Picture_4.jpeg)

![](_page_15_Picture_6.jpeg)

![](_page_15_Picture_7.jpeg)

![](_page_15_Figure_8.jpeg)

![](_page_15_Picture_10.jpeg)

# Eigenschaften von Resonanzen

- Kurze Lebensdauer rerzeugt große Zerfallsbreite r
- Breite r einer Resonanz durch Heisenberg'sche Unschärfe-Relation

![](_page_16_Figure_3.jpeg)

![](_page_16_Picture_6.jpeg)

![](_page_16_Figure_8.jpeg)

![](_page_16_Picture_10.jpeg)

![](_page_16_Picture_11.jpeg)

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

![](_page_17_Figure_2.jpeg)

![](_page_17_Picture_4.jpeg)

![](_page_17_Picture_5.jpeg)

# Spin in der Teilchenphysik

Spin S: eine sehr wichtige Eigenschaft von Elementarteilchen 

![](_page_18_Figure_2.jpeg)

![](_page_18_Picture_4.jpeg)

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

 $\Delta^+$ – Resonanz m = 1232 MeV $\tau = (5, 63 \pm 0, 14) \bullet 10^{-24}$ Zerfall:  $\varDelta^+ \rightarrow N + \pi$ 

**Proton** m = 938, 27 MeV $\tau > 3,6 \cdot 10^{29} s$ hypothetische Zerfallsmoden

![](_page_18_Picture_9.jpeg)

![](_page_18_Picture_10.jpeg)

![](_page_18_Picture_11.jpeg)

# **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 P = (M, 0)
- auslaufende Resonanz mit 4 er Impuls P
- Energieverlust v des  $e^-$ :  $\mathbf{v} = \mathbf{E} - \mathbf{E}'$

![](_page_19_Picture_9.jpeg)

![](_page_19_Figure_12.jpeg)

![](_page_19_Picture_14.jpeg)

![](_page_19_Picture_15.jpeg)

![](_page_19_Picture_16.jpeg)

# **Resonanz mit invarianter Masse** *W*

invariante Masse W der Resonanz

$$W^{2} = |P'|^{2} = (P+q)^{2} = N$$

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

$$W': \text{ invariante} \qquad v: \text{ Energie-} \qquad Ubertrag$$

$$M: \text{ Masse} \qquad Proton$$

![](_page_20_Picture_5.jpeg)

# $M^2 + 2 P \cdot q + q^2 = M^2 + 2 M \cdot v - Q^2$

![](_page_20_Figure_7.jpeg)

![](_page_20_Picture_9.jpeg)

![](_page_20_Picture_10.jpeg)

![](_page_20_Picture_11.jpeg)

![](_page_20_Picture_12.jpeg)

# Fall 1 : keine innere Anregung

### Elastischer Stoß – keine innere Anregung

### - elastische Streuprozesse ohne Anregung des Nukleons

### 1 freier Parameter

![](_page_21_Figure_4.jpeg)

![](_page_21_Picture_6.jpeg)

![](_page_21_Picture_7.jpeg)

![](_page_21_Figure_8.jpeg)

![](_page_21_Picture_10.jpeg)

# 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  $(E', \theta)$

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

![](_page_22_Picture_6.jpeg)

![](_page_22_Figure_7.jpeg)

![](_page_22_Picture_9.jpeg)

# Von Resonanzen zu...tiefinelastischer Streuung

### Auf dem Weg zu Partonen

- bei sehr hohen Elektron-Energien (hohes  $Q^2$ ) 1,5 nimmt  $d\sigma/d\Omega$  ab für die Erzeugung von 1,0 Resonanzen
- wir benötigen eine kinematische Größe die uns angibt, wie stark inelastisch die Reaktion ist

nb/(GeV sr)]  $^{2}\sigma/(d\Omega \ dE)$ 0,5

Q: Povh

![](_page_23_Picture_7.jpeg)

![](_page_23_Figure_8.jpeg)

![](_page_23_Picture_10.jpeg)

# Von Resonanzen zu...tiefinelastischer Streuung

### Auf dem Weg zu Partonen

- elastische Streuprozesse ohne innere Anregung des Nukleons

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

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

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

Q: Povh

1,5

1,0

0,5

[nb/(GeVsr)]

 $2^{2}\sigma/(d\Omega \ dE)$ 

![](_page_24_Picture_8.jpeg)

![](_page_24_Figure_9.jpeg)

![](_page_24_Picture_11.jpeg)

# Kinematische Größe: Bjorken Skalenvariable x

Eigenschaften: dimensionslose Größe x als Mass der Inelastizität

- Definition:

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

- Grenzfall: elastische Streuung  $Q^2 = 2M \bullet v \iff x = 1 \text{ mit } W = M$ 

Q: Am

x = Impulsanteil des Partons

![](_page_25_Picture_10.jpeg)

![](_page_25_Figure_12.jpeg)

![](_page_25_Picture_14.jpeg)

# Kinematische Größe: Bjorken Skalenvariable x

Eigenschaften: dimensionslose Größe x als Mass der Inelastizität

- Definition:

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

### - inelastische Streuung $Q^2 < 2M \cdot v \iff 0 < x < 1 \text{ mit } W > M$

![](_page_26_Picture_6.jpeg)

An

**Partonmodell** des Nukleons

### x = Impulsanteil des Partons

![](_page_26_Picture_10.jpeg)

![](_page_26_Figure_11.jpeg)

![](_page_26_Figure_12.jpeg)

![](_page_26_Picture_14.jpeg)

# **Tiefinelastische Streuung am Parton**

Streuprozess an individuellem Parton innerhalb des Nukleons

![](_page_27_Figure_2.jpeg)

- konstanter Formfaktor ⇒ punktförmigen Konstituenten ('Partonen')

![](_page_27_Picture_5.jpeg)

![](_page_27_Picture_8.jpeg)

# **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)

![](_page_28_Figure_4.jpeg)

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

punktförmig

![](_page_28_Picture_7.jpeg)

![](_page_28_Figure_8.jpeg)

![](_page_28_Picture_10.jpeg)

# **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 v und  $Q^2$  streut inkohärent an individuellen Partonen

![](_page_29_Picture_6.jpeg)

![](_page_29_Figure_7.jpeg)

![](_page_29_Picture_9.jpeg)

# **Tiefinelastische Prozesse: Strukturfunktionen**

- Streuung an punktförmigen Partonen im Nukleon bei w > 3 GeV
  - Partonen können aus Nukleon nicht einzeln herausgeschlagen werden! Bildung hadronischer Jets

![](_page_30_Figure_3.jpeg)

![](_page_30_Picture_5.jpeg)

![](_page_30_Figure_6.jpeg)

![](_page_30_Picture_8.jpeg)

# **Tiefinelastische Prozesse: höchste Energien**

- 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)

![](_page_31_Picture_4.jpeg)

NATIONAL ACCELERATOR LABORATORY

![](_page_31_Picture_7.jpeg)

![](_page_31_Picture_9.jpeg)

SLAC: Experimente zur tiefinelastischen Elektron-Streuung am Nukleon

Beschleuniger in Stanford

![](_page_31_Picture_13.jpeg)

![](_page_31_Picture_14.jpeg)

# **Tiefinelastische Prozesse: Nobelpreis 1990**

### SLAC: Auszeichnung f ür J. Friedman / H.W. Kendall / R.E. Taylor

![](_page_32_Picture_2.jpeg)

![](_page_32_Picture_5.jpeg)

archive. Henry W. Kendall Prize share: 1/3

![](_page_32_Picture_7.jpeg)

"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"

![](_page_32_Picture_10.jpeg)

![](_page_32_Picture_11.jpeg)

![](_page_32_Picture_13.jpeg)

Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

# nobekprize.org

![](_page_32_Picture_16.jpeg)

# Tiefinelastische Prozesse: RECAP der Schritte

### Aufdeckung der Substruktur der Materie durch Streuexperimente

Kern

#### Rutherford: 4 MeV

#### harte Rückstreuung

34

Teilchenphysik

9

Atom

 $\sim 10^{-10} m$ 

#### Hofstadter: 600 MeV Kernformfaktoren Woods-Saxon

![](_page_33_Picture_5.jpeg)

![](_page_33_Figure_6.jpeg)

![](_page_33_Picture_8.jpeg)

# Frage: Bjorken

- Bjorken x ist wie folgt definiert:
- Im Quark Modell und bei inelastischer Streuung können wir x als ...
  - 1) Energietransferanteil im Nukleon Ruhesystem
  - 2) Impulsübertrag vom Elektron an das Quark
  - 3) Impulsanteil der Quarks (oder Gluonen) am Nukleon Implus
    - ... verstehen.

![](_page_34_Picture_8.jpeg)

![](_page_34_Picture_9.jpeg)

![](_page_34_Picture_12.jpeg)

![](_page_35_Picture_0.jpeg)

### Urlaubskatze auf Kreta

![](_page_35_Picture_2.jpeg)

![](_page_35_Picture_4.jpeg)

![](_page_35_Picture_6.jpeg)

# Moderne Experimentalphysik II - Part II

![](_page_36_Figure_1.jpeg)

![](_page_36_Picture_3.jpeg)

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

![](_page_36_Picture_10.jpeg)

![](_page_36_Picture_11.jpeg)

![](_page_36_Picture_12.jpeg)

# Überblick

- Symmetrieprinzipien und Erhaltungssätze sind zentrales Element von modernen physikalischen Theorien
  - klassische Physik:
  - Quantenmechanik:
  - Festkörperphysik:
  - Teilchenphysik:

- Hamilton-Formalismus
- Phase und Parität der Wellenfunktion  $\Psi$
- Symmetrie von Kristallen
- Eichsymmetrien, z.B. Farb-SU(3)
- Verallgemeinerung bekannter Konzepte aus der klassischen Physik & Quantenmechanik  $\Box$
- innere Symmetrien von Teilchen: Parität P, C, CP...
- **neue Quantenzahlen:** Flavours von Quarks: u, d, ...

![](_page_37_Picture_15.jpeg)

![](_page_37_Picture_18.jpeg)

# **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

- Homogenität & Isotropie des Raumes: Erhaltung von p, J

- Translationsinvarianz der Zeit : Erhaltung von E

![](_page_38_Picture_9.jpeg)

Emmy Noether

![](_page_38_Picture_12.jpeg)

![](_page_38_Picture_13.jpeg)

![](_page_38_Picture_14.jpeg)

![](_page_38_Picture_15.jpeg)

![](_page_38_Picture_17.jpeg)

# Klassische kontinuierliche Symmetrien

#### Noether-Theorem (Emmy Noether, 1918):

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

![](_page_39_Figure_3.jpeg)

Stated simply, Noether's theorem shows that symmetries in nature are intrinsically linked to conservation laws. This profound insight has guided every branch of modern physics.

Perimeter Institute (Ontario): März/April 2022 the all-time greatest equation in physics ...

Noether's Theorem!

![](_page_39_Picture_10.jpeg)

Emmy Noether

![](_page_39_Picture_12.jpeg)

![](_page_39_Figure_14.jpeg)

# **Gleichungen in der Physik**

#### Welche Gleichung ist (neben Noether's Theorem) die Eleganteste, f ür mich?

 $-\Psi(\mathbf{r},t) = \hat{H}\Psi(\mathbf{r},t)$ **Î** 

#### Schrödinger equation

The bread and butter of quantum mechanics, the Schrödinger equation describes the wave function of any quantum system and therefore tracks the system's observable properties over time.

![](_page_40_Picture_5.jpeg)

#### **Energy–momentum relation**

This relation simplifies to the famous E=mc2 for objects at rest, illustrating that mass and energy are two sides of the same coin and can be converted from one form to another.

![](_page_40_Picture_8.jpeg)

#### Stefan–Boltzmann law

Star light, star bright, the first star you see tonight ... can be described by this equation, which relates a star's luminosity to its temperature and radius.

![](_page_40_Picture_11.jpeg)

#### Physics Frenzy: Battle of the Equations - Inside The Perimeter

#### 41 Teilchenphysik

![](_page_40_Picture_16.jpeg)

![](_page_40_Picture_17.jpeg)

# $= (pc)^2 + (mc^2)^2$

![](_page_40_Picture_20.jpeg)

#### Dirac equation

If quantum physics describes the tiniest particles, and special relativity describes the fastest things, what of tiny, fast-moving particles? Enter the Dirac equation, which also predicted the existence of antimatter.

#### Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

![](_page_40_Picture_26.jpeg)

![](_page_40_Picture_27.jpeg)

olo	gy		
-			
ŝ			
-			

Perim

Ö

# **Globale und lokale Symmetrien**

- globale Symmetrie: identische Symmetrieoperation an jedem Raum-Zeit Punkt x
  - globale Phase  $\alpha$ : identische Physik bei  $\Psi(x) \rightarrow \Psi(x) \cdot e^{i\alpha}$
- **Iokale Symmetrie**: Symmetrieoperation ist Funktion von  $x = (\vec{r}, t)$ 
  - lokale Phase  $\alpha$ : identische Physik bei  $\Psi(x) \rightarrow \Psi(x) \cdot e^{i\alpha(x)}$
- Symmetrie wird auf ein System angewandt: System bleibt invariant, d.h. transformierter Zustand kann nicht vom untransformierten **Zustand unterschieden werden**

![](_page_41_Picture_8.jpeg)

![](_page_41_Picture_9.jpeg)

![](_page_41_Figure_10.jpeg)

![](_page_41_Figure_11.jpeg)

![](_page_41_Figure_12.jpeg)

![](_page_41_Figure_13.jpeg)

![](_page_41_Figure_14.jpeg)

![](_page_41_Figure_15.jpeg)

![](_page_41_Figure_17.jpeg)

![](_page_41_Figure_18.jpeg)

![](_page_41_Figure_19.jpeg)

![](_page_41_Figure_20.jpeg)

# **Standardmodell & Eichsymmetrien**

![](_page_42_Figure_1.jpeg)

 $SU(2)_I \times U(1)_Y$ elektroschwacher Bereich I: Isospin Y: Hyperladung Invarianz bei lokaler Eichsymmetrie:

Einführung von neuen Feldern / Wechselwirkungen

![](_page_42_Picture_5.jpeg)

![](_page_42_Figure_7.jpeg)

- starker Bereich
- C: Colour (Farbe)

![](_page_42_Picture_11.jpeg)

### Vektorbosonen

![](_page_42_Picture_13.jpeg)

![](_page_42_Picture_14.jpeg)

#### Gluonen

![](_page_42_Picture_17.jpeg)

# Additive & multiplikative Quantenzahlen

- Additive Quantenzahlen (ladungsartig)
  - Summe der Quantenzahlen in einem Prozess ist erhalten kontinuierliche Symmetrien: elektrische Ladung Q, Hyperladung YLeptonenzahl L, Baryonenzahl B,...
- Multiplikative Quantenzahlen
  - **Produkt** π der Quantenzahlen in einem Prozess ist erhalten: diskrete Symmetrien: Parität *P* Ladungskonjugation *c*

![](_page_43_Picture_6.jpeg)

Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

![](_page_43_Picture_12.jpeg)

![](_page_43_Picture_13.jpeg)

![](_page_43_Picture_14.jpeg)

![](_page_43_Picture_15.jpeg)

![](_page_43_Picture_16.jpeg)

![](_page_43_Picture_17.jpeg)

Q: wikipedia

![](_page_43_Picture_30.jpeg)

# 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

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

![](_page_44_Picture_10.jpeg)

![](_page_44_Picture_11.jpeg)

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

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

# SM: exakte Erhaltung der Baryonenzahl B

Proton als leichtestes Baryon im Standardmodell ist stabil

Masse (p) = 938,272 MeV

- bisher *keine* Baryonenzahlverletzenden Prozesse beobachtet!

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

Q: wikipedia

46 Teilchenphysik

![](_page_45_Picture_7.jpeg)

![](_page_45_Figure_8.jpeg)

![](_page_45_Picture_12.jpeg)

![](_page_46_Picture_0.jpeg)

# EINSCHUB – VERLETZUNG DER BARYONENZAHL

![](_page_46_Picture_3.jpeg)

![](_page_46_Picture_4.jpeg)

Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

![](_page_46_Picture_6.jpeg)

Q: symmetry magazine, ESO

# Erhaltung der Baryonenzahl & Kosmologie\*

### Universum zeigt Baryon-Asymmetrie

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

![](_page_47_Picture_3.jpeg)

### Verletzung der Baryonenzahl

### Annihilation $p\bar{p}$

#### \*VL im Master: Kosmologie

#### Teilchenphysik 48

![](_page_47_Picture_8.jpeg)

![](_page_47_Picture_9.jpeg)

#### $n_B - n_{ar{B}}$ $n_{\gamma}$

#### Wasserstoff

![](_page_47_Picture_12.jpeg)

![](_page_47_Picture_13.jpeg)

Anti-Wasserstoff

Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

![](_page_47_Picture_16.jpeg)

symmetry magazine С S Ш Ö

# Sacharov-Kriterien für Baryon-Asymmetrie

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

![](_page_48_Picture_3.jpeg)

![](_page_48_Picture_5.jpeg)

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

![](_page_48_Picture_9.jpeg)

Andrej Dmitrijewisch Sacharov (1921-1989) 1967: Baryon-Asymmetrie

\*kommt später! Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

![](_page_48_Picture_12.jpeg)

![](_page_48_Picture_13.jpeg)

![](_page_48_Picture_14.jpeg)

![](_page_48_Figure_15.jpeg)

# GUTs: Baryonenzahlverletzende Prozesse!

#### Proton-Zerfall in GUT-Szenarios

<u>hypothetischer Zerfall</u> eines Protons in ein Positron & neutrales Pion erwartet in **GUT** = **G**rand **U**nified Theory\* über ein superschweres sog. **X-Boson** (erzeugt Kopplung Quark-Lepton)

![](_page_49_Picture_3.jpeg)

S. Glashow

![](_page_49_Picture_5.jpeg)

H. Georgi

![](_page_49_Picture_7.jpeg)

![](_page_49_Picture_8.jpeg)

![](_page_49_Figure_9.jpeg)

\*GUTs beinhalten hypothetisches X-Boson

Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

![](_page_49_Picture_12.jpeg)

Q: wikipedia, welt der physik

# 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 🟵

![](_page_50_Picture_3.jpeg)

![](_page_50_Picture_4.jpeg)

W. De Boer (KIT) U. Amaldi

Q: wikipedia, KIT

![](_page_50_Picture_8.jpeg)

![](_page_50_Picture_10.jpeg)

Teilchen & Kräfte im SM

![](_page_50_Picture_13.jpeg)

![](_page_50_Picture_14.jpeg)

# **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)

![](_page_51_Picture_4.jpeg)

![](_page_51_Picture_5.jpeg)

![](_page_51_Picture_6.jpeg)

J. Wess (KIT) W. De Boer (KIT) U. Amaldi

![](_page_51_Picture_9.jpeg)

![](_page_51_Picture_10.jpeg)

![](_page_51_Picture_12.jpeg)

Teilchen & Kräfte mit SUSY

![](_page_51_Picture_15.jpeg)

![](_page_51_Picture_16.jpeg)

![](_page_51_Picture_17.jpeg)

![](_page_51_Picture_18.jpeg)

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

- heutige untere Grenze für Lebensdauer  $t_{1/2} > 1,67 \cdot 10^{34}$  a

![](_page_52_Figure_3.jpeg)

![](_page_52_Picture_5.jpeg)

#### Protonmasse definiert die Energieskala E ~ 1 GeV bei Suche nach Zerfall

![](_page_52_Figure_7.jpeg)

Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

ysics.stackexchange.com, wikipedia 0 ...

![](_page_52_Picture_10.jpeg)

# **Erwartete Zerfalls-Signatur in Super-Kamiokande**

- - Super-Kamiokande: Simulation eines Protonen-Zerfalls mit 3 Cherenkov-Ringen

![](_page_53_Figure_3.jpeg)

![](_page_53_Picture_5.jpeg)

![](_page_53_Picture_6.jpeg)

#### **Protonenzerfalls-Experimente:** große H<sub>2</sub>O-Cherenkov-Detektoren\*

![](_page_53_Figure_9.jpeg)

\*s. VL6

![](_page_53_Picture_12.jpeg)

![](_page_53_Figure_13.jpeg)

# Hyper-Kamiokande: 'ultimative' Sensitivität

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

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

# ~1035 Jahre

![](_page_54_Figure_5.jpeg)

![](_page_54_Picture_6.jpeg)

![](_page_54_Picture_9.jpeg)

ENDE EINSCHUB

Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

![](_page_54_Picture_12.jpeg)

CHIPP per-Kamiokande, Ö

![](_page_54_Picture_14.jpeg)

# Standardmodell: Erhaltung der Leptonenzahl L

- Leptonenzahl L für geladene ( $_{e}, \mu, \tau$ ) & neutrale ( $_{v_e}, v_{\mu}, v_{\tau}$ ) Leptonen
  - Definition:

$$\boldsymbol{L} = N(\boldsymbol{\ell}) - N(\bar{\boldsymbol{\ell}})$$

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

### e- Lebensdauer\* $t_{\frac{1}{2}} > 6,6 \cdot 10^{28} a$

![](_page_55_Picture_8.jpeg)

![](_page_55_Picture_10.jpeg)

![](_page_55_Figure_12.jpeg)

#### \*Limit vom **Borexino-Detektor**

Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

![](_page_55_Picture_15.jpeg)

# Physics World, Spektrum, O

## Standardmodell: Erhaltung von Familien- $L_i$

- - Beispiele:  $L_e = +1$  für  $(e^-, v_e)$  $L_e = -1 \text{ für } \left( e^+, \bar{v}_e \right)$  $L_{\mu} = +1 \text{ für } (\mu^{-}, \nu_{\mu})$  $L_{\mu} = -1 \text{ für } \left(\mu^+, \bar{\nu}_{\mu}\right)$
- Leptonenzahl  $L = L_e + L_\mu + L_\tau$
- Erhaltung von  $L_e$ ,  $L_\mu$  und  $L_\tau$ verletzt durch masse-behaftete Neutrinos (v-Mischung)

![](_page_56_Picture_5.jpeg)

![](_page_56_Picture_7.jpeg)

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

![](_page_56_Picture_9.jpeg)

![](_page_56_Picture_10.jpeg)

Q: Spektrum, symmetry magazine

![](_page_56_Picture_13.jpeg)

# Experiment: Erhaltung von $L_i$ ist verletzt!

- keine Erhaltung von Leptonen-Familienzahl *i* = (e,  $\mu$ ,  $\tau$ ) !
  - Beobachtung\* von v-Oszillationen, z.B. von  $v_e \leftrightarrow v_{\mu}$  (Neutrinos aus der Sonne) von  $v_{\mu} \leftrightarrow v_{\tau}$  (Neutrinos aus der Atmosphäre)
  - Implikation: Neutrinos haben Masse!
  - erste Physik jenseits des Standardmodells!!

![](_page_57_Picture_5.jpeg)

![](_page_57_Picture_6.jpeg)

2014: Takaaki Kajita im kl. HS A

![](_page_57_Picture_8.jpeg)

![](_page_57_Picture_10.jpeg)

![](_page_57_Picture_14.jpeg)

![](_page_57_Picture_15.jpeg)

© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud Takaaki Kajita Prize share: 1/2

![](_page_57_Picture_17.jpeg)

© Nobel Media AB. Photo: A. Mahmoud Arthur B. McDonald Prize share: 1/2

#### atmosphärische v's

![](_page_57_Picture_20.jpeg)

\*Master-VL Astroteilchenphysik

Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

![](_page_57_Picture_23.jpeg)

2: nobelprize, ca-ce-passe-la-haut.fr

![](_page_57_Picture_25.jpeg)

# Leptonenzahl: Verletzung von L jenseits des SM

- Leptonenzahl I : kann genau wie Baryonenzahl B in erweiterten Theorien verletzt sein
  - ist das Konzept von *i* 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
  - 0vßß-Ereignisse mit  $\Delta L = 2$

![](_page_58_Picture_8.jpeg)

![](_page_58_Picture_14.jpeg)

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

![](_page_58_Picture_16.jpeg)

\*\* & Master-VL Astroteilchenphysik

Institute of Experimental Particle Physics (ETP)

MPIK Spektrum LBN

![](_page_58_Picture_20.jpeg)

# 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

![](_page_59_Picture_6.jpeg)

![](_page_59_Picture_7.jpeg)

![](_page_59_Picture_8.jpeg)

#### Steven Weinberg

![](_page_59_Picture_11.jpeg)

![](_page_59_Picture_12.jpeg)