

# Das magnetische Moment des Protons

Proseminar Präsentationstechnik c

Prof. Dr. Harmut Schmieden

Jonas Wortmann

Universität Bonn

27. Oktober 2024

# Inhaltsverzeichnis

## ① Entdeckung des Protons

# Inhaltsverzeichnis

- ① Entdeckung des Protons
- ② Magnetisches (Dipol-)Moment

# Inhaltsverzeichnis

- ① Entdeckung des Protons
- ② Magnetisches (Dipol-)Moment
- ③ Das Proton als Elementarteilchen

# Inhaltsverzeichnis

- ① Entdeckung des Protons
- ② Magnetisches (Dipol-)Moment
- ③ Das Proton als Elementarteilchen
- ④ Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN

# Inhaltsverzeichnis

- ① Entdeckung des Protons
- ② Magnetisches (Dipol-)Moment
- ③ Das Proton als Elementarteilchen
- ④ Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- ⑤ Die Substruktur des Protons

# Inhaltsverzeichnis

- ① Entdeckung des Protons
- ② Magnetisches (Dipol-)Moment
- ③ Das Proton als Elementarteilchen
- ④ Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- ⑤ Die Substruktur des Protons
- ⑥ SLAC Experiment

# Inhaltsverzeichnis

- ① Entdeckung des Protons
- ② Magnetisches (Dipol-)Moment
- ③ Das Proton als Elementarteilchen
- ④ Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- ⑤ Die Substruktur des Protons
- ⑥ SLAC Experiment
- ⑦ Das Proton als Baryon



# Inhaltsverzeichnis

- ① Entdeckung des Protons
- ② Magnetisches (Dipol-)Moment
- ③ Das Proton als Elementarteilchen
- ④ Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- ⑤ Die Substruktur des Protons
- ⑥ SLAC Experiment
- ⑦ Das Proton als Baryon
- ⑧ Ausblick

# Entdeckung des Protons

# Entdeckung des Protons

WIEN CHARGE MASS RATIO; GOLDSTEIN  $H^+$ ; RUTHERFORD UNTER  
ANDEREM BEKANNT FÜR BENENNUNG 1913 MARDSEN: Wasserstoff wird mit  
 $\alpha$ -Teilchen beschossen: „Aufblitzen“ auf einem Zinksulfidschirm in großer Distanz.[1]

# Entdeckung des Protons

WIEN CHARGE MASS RATIO; GOLDSTEIN  $H^+$ ; RUTHERFORD UNTER  
ANDEREM BEKANNT FÜR BENENNUNG 1913 MARDSEN: Wasserstoff wird mit  
 $\alpha$ -Teilchen beschossen: „Aufblitzen“ auf einem Zinksulfidschirm in großer Distanz.[1]  
→ Schlussfolgerung: „Aufblitzen“ von  $H$ -Atomen verursacht.

# Entdeckung des Protons

WIEN CHARGE MASS RATIO; GOLDSTEIN  $H^+$ ; RUTHERFORD UNTER  
ANDEREM BEKANNT FÜR BENENNUNG 1913 MARDSEN: Wasserstoff wird mit  
 $\alpha$ -Teilchen beschossen: „Aufblitzen“ auf einem Zinksulfidschirm in großer Distanz.[1]  
→ Schlussfolgerung: „Aufblitzen“ von  $H$ -Atomen verursacht.

RUTHERFORD: Stickstoff wird mit  $\alpha$ -Teilchen beschossen.

# Entdeckung des Protons

WIEN CHARGE MASS RATIO; GOLDSTEIN H<sup>+</sup>; RUTHERFORD UNTER  
ANDEREM BEKANNT FÜR BENENNUNG 1913 MARDSEN: Wasserstoff wird mit  
 $\alpha$ -Teilchen beschossen: „Aufblitzen“ auf einem Zinksulfidschirm in großer Distanz.[1]

→ Schlussfolgerung: „Aufblitzen“ von H-Atomen verursacht.

RUTHERFORD: Stickstoff wird mit  $\alpha$ -Teilchen beschossen.

→ Selbe Erkenntnis: „Aufblitzen“ von H-Atomen verursacht.

# Entdeckung des Protons

WIEN CHARGE MASS RATIO; GOLDSTEIN H<sup>+</sup>; RUTHERFORD UNTER  
ANDEREM BEKANNT FÜR BENENNUNG 1913 MARDSEN: Wasserstoff wird mit  
 $\alpha$ -Teilchen beschossen: „Aufblitzen“ auf einem Zinksulfidschirm in großer Distanz.[1]

→ Schlussfolgerung: „Aufblitzen“ von H-Atomen verursacht.

RUTHERFORD: Stickstoff wird mit  $\alpha$ -Teilchen beschossen.

→ Selbe Erkenntnis: „Aufblitzen“ von H-Atomen verursacht.

Stickstoff muss H-Atome als Bestandteile besitzen.

BILD

# Entdeckung des Protons

WIEN CHARGE MASS RATIO; GOLDSTEIN  $H^+$ ; RUTHERFORD UNTER  
ANDEREM BEKANNT FÜR BENENNUNG 1913 MARDSEN: Wasserstoff wird mit  
 $\alpha$ -Teilchen beschossen: „Aufblitzen“ auf einem Zinksulfidschirm in großer Distanz.[1]

→ Schlussfolgerung: „Aufblitzen“ von  $H$ -Atomen verursacht.

RUTHERFORD: Stickstoff wird mit  $\alpha$ -Teilchen beschossen.

→ Selbe Erkenntnis: „Aufblitzen“ von  $H$ -Atomen verursacht.

Stickstoff muss  $H$ -Atome als Bestandteile besitzen.

## BILD

1920 RUTHERFORD: Jedes Atom muss aus  $H$ -Atomen bestehen. Zur Unterscheidung:  
Protonen.



# Magnetisches (Dipol-)Moment

# Magnetisches (Dipol-)Moment

Magnetisches Moment gibt Stärke und Richtung eines magnetischen Dipols an

$$\mathbf{m} = \frac{1}{2} \int d^3r [\mathbf{r} \times \mathbf{j}(\mathbf{r})] \quad \vec{m} = I \cdot A$$

# Magnetisches (Dipol-)Moment

Magnetisches Moment gibt Stärke und Richtung eines magnetischen Dipols an

$$\mathbf{m} = \frac{1}{2} \int d^3r [\mathbf{r} \times \mathbf{j}(\mathbf{r})] \quad \vec{m} = I \cdot \mathbf{A}$$

Klassische / Quantenmechanische Betrachtung mit Drehimpuls

$$\mu_l = \frac{q}{2m_q} l \quad \hat{\mu}_q = \frac{q}{2m_q} \hat{l} \quad \hat{\mu}_s = g_s \frac{q}{2m_q} \hat{s}$$

# Magnetisches (Dipol-)Moment

Magnetisches Moment gibt Stärke und Richtung eines magnetischen Dipols an

$$\mathbf{m} = \frac{1}{2} \int d^3r [\mathbf{r} \times \mathbf{j}(\mathbf{r})] \quad \vec{m} = I \cdot A$$

Klassische / Quantenmechanische Betrachtung mit Drehimpuls

$$\mu_l = \frac{q}{2m_q} l \quad \hat{\mu}_q = \frac{q}{2m_q} \hat{l} \quad \hat{\mu}_s = g_s \frac{q}{2m_q} \hat{s}$$

BOHR'sche Magneton (Elektronen  $\ell = 1$ ) & Kernmagneton (DIRAC-Teilchen)

$$\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} \quad \mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$$

# Magnetisches (Dipol-)Moment

BILD WOFÜR IST DAS MOMENT GUT

# Das Proton als Elementarteilchen

DIRAC–Theorie:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \phi(x, t) = 0$$

Lösungen dieser Gleichung geben erlaubte Zustände für elementare Fermionen an.

# Das Proton als Elementarteilchen

DIRAC-Theorie:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \phi(x, t) = 0$$

Lösungen dieser Gleichung geben erlaubte Zustände für elementare Fermionen an.

BILD ANNAHME PROTON IST ELEMENTARES FERMION

# Das Proton als Elementarteilchen

DIRAC-Theorie:

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \phi(x, t) = 0$$

Lösungen dieser Gleichung geben erlaubte Zustände für elementare Fermionen an.

BILD ANNAHME PROTON IST ELEMENTARES FERMION

$$\mu_p = 1\mu_N = 1 \frac{e\hbar}{2m_p} \approx 5.505 \times 10^{-27} \text{ J/T}$$

Wert CODATA[2]



# Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN

BILD EXPERIMENT

BILD BERECHNETES MAGNETON

# Die Substruktur des Protons

Einteilung der Teilchen: Hadron (BILD MIT 3 HALBKUGELN BOSON HADRON FERMION)

# Die Substruktur des Protons

Einteilung der Teilchen: Hadron (BILD MIT 3 HALBKUGELN BOSON HADRON FERMION)

→ Baryon: Fermion aus 3 Quarks

→ Meson: Boson aus 2 Quarks BILD PAPER GELL MANN ZWEIG

# SLAC Experiment

# SLAC Experiment

Elektronen streuen an Nukleonen mit großen Winkeln BILD HISTORY STANDARD  
MODEL / SLAC

# SLAC Experiment

Elektronen streuen an Nukleonen mit großen Winkeln BILD HISTORY STANDARD  
MODEL / SLAC

→ Analogie zu RUTHERFORD: Nukleonen haben eine punktförmige Substruktur.

# SLAC Experiment

Elektronen streuen an Nukleonen mit großen Winkeln BILD HISTORY STANDARD MODEL / SLAC

→ Analogie zu RUTHERFORD: Nukleonen haben eine punktförmige Substruktur.

Interpretation FEYNMAN & BJORKEN: Proton muss aus Partonen bestehen. Diese Partonen sind als GELL-MANNS & ZWEIGS Quarks zu identifizieren. BILD PAPER

# Das Proton als Baryon



# Das Proton als Baryon

Das Proton ist *kein* elementares Fermion, sondern ein Baryon (u,u,d).

# Das Proton als Baryon

Das Proton ist *kein* elementares Fermion, sondern ein Baryon (u,u,d).

$$\mu_p = \frac{3}{4}\mu_u - \frac{1}{3}\mu_d \approx 2.792\mu_N \approx 1.410 \times 10^{-27} \text{ J/T}$$

Wert CODATA[3]

# Das Proton als Baryon

Das Proton ist *kein* elementares Fermion, sondern ein Baryon (u,u,d).

$$\mu_p = \frac{3}{4}\mu_u - \frac{1}{3}\mu_d \approx 2.792\mu_N \approx 1.410 \times 10^{-27} \text{ J/T}$$

Wert CODATA[3]

Differenz:

$$|\mu_{\text{PF}} - \mu_{\text{PB}}| \approx 4.095 \times 10^{-27} \text{ J/T}$$

# Ausblick

# Bibliography



John Campbell.

Rutherford, transmutation and the proton.

<https://cerncourier.com/a/rutherford-transmutation-and-the-proton/>, 8. May 2019.

Letzter Zugriff: 2024-10-27.



CODATA.

[https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mun|search\\_for=nuclear+magneton](https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mun|search_for=nuclear+magneton), 2022.

Letzter Zugriff: 2024-10-27.



CODATA.

[https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mup|search\\_for=magnetic+moment+proton](https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mup|search_for=magnetic+moment+proton), 2022.

Letzter Zugriff: 2024-10-27.