

Das magnetische Moment des Protons

Proseminar Präsentationstechnik c

Prof. Dr. Harmut Schmieden

Jonas Wortmann

Universität Bonn

31. Oktober 2024

- Entdeckung des Protons

Draft

Inhaltsverzeichnis

- Entdeckung des Protons
- Magnetisches (Dipol-)Moment

Draft

Inhaltsverzeichnis

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

Draft

Inhaltsverzeichnis

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

Inhaltsverzeichnis

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

Inhaltsverzeichnis

- Entdeckung des Protons
- Magnetisches (Dipol-)Moment
- Das Proton als Elementarteilchen
- Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- SLAC Experiment

Inhaltsverzeichnis

- Entdeckung des Protons
- Magnetisches (Dipol-)Moment
- Das Proton als Elementarteilchen
- Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- SLAC Experiment
- Das Proton als Baryon

Inhaltsverzeichnis

- Entdeckung des Protons
- Magnetisches (Dipol-)Moment
- Das Proton als Elementarteilchen
- Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- SLAC Experiment
- Das Proton als Baryon
- Ausblick

Inhaltsverzeichnis

- Entdeckung des Protons
- Magnetisches (Dipol-)Moment
- Das Proton als Elementarteilchen
- Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- SLAC Experiment
- Das Proton als Baryon
- Ausblick

Entdeckung des Protons

1913 MARDSEN: Wasserstoff wird mit α -Teilchen beschossen.

- Aufblitzen auf einem Zinksulfidschirm in **großer Distanz** (zu kurz für α).
- Aufblitzen von **H-Atomen** verursacht.

Draft

Entdeckung des Protons

1913 MARDSEN: Wasserstoff wird mit α -Teilchen beschossen.

- Aufblitzen auf einem Zinksulfidschirm in **großer Distanz** (zu kurz für α).
- Aufblitzen von **H-Atomen** verursacht.

RUTHERFORD: Stickstoff wird mit α -Teilchen beschossen.

- Aufblitzen von **H-Atomen** verursacht.

Entdeckung des Protons

1913 MARDSEN: Wasserstoff wird mit α -Teilchen beschossen.

- Aufblitzen auf einem Zinksulfidschirm in **großer Distanz** (zu kurz für α).
- Aufblitzen von **H-Atomen** verursacht.

RUTHERFORD: Stickstoff wird mit α -Teilchen beschossen.

- Aufblitzen von **H-Atomen** verursacht.
- Stickstoff muss **H-Atome als Bestandteile** besitzen.

Entdeckung des Protons

1913 MARDSEN: Wasserstoff wird mit α -Teilchen beschossen.

- Aufblitzen auf einem Zinksulfidschirm in **großer Distanz** (zu kurz für α).
- Aufblitzen von **H-Atomen** verursacht.

RUTHERFORD: Stickstoff wird mit α -Teilchen beschossen.

- Aufblitzen von **H-Atomen** verursacht.
- Stickstoff muss **H-Atome als Bestandteile** besitzen.

1920 RUTHERFORD: **Jedes** Atom muss aus **H-Atomen** (Protonen) bestehen.[Campbell, 2019]

Entdeckung des Protons

is the only atom which is expressed by $4n+2$. We should anticipate from radioactive data that the nitrogen nucleus consists of three helium nuclei each of atomic mass 4 and either two hydrogen nuclei or one of mass 2. If the H nuclei

Abbildung: Auszug:[Rutherford, 1919]

Entdeckung des Protons

mass. Under such conditions, it is to be expected that the α particle would only occasionally approach close enough to the H nucleus to give it the maximum velocity, although in many cases it may give it sufficient energy to break its bond with the central mass. Such a point of view would explain

Abbildung: Auszug:[Rutherford, 1919]

Entdeckung des Protons

able. Considering the enormous intensity of the forces brought into play, it is not so much a matter of surprise that the nitrogen atom should suffer disintegration as that the α particle itself escapes disruption into its constituents.

Abbildung: Auszug:[Rutherford, 1919]

Inhaltsverzeichnis

- Entdeckung des Protons
- **Magnetisches (Dipol-)Moment**
- Das Proton als Elementarteilchen
- Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- SLAC Experiment
- Das Proton als Baryon
- Ausblick

Magnetisches (Dipol-)Moment

Magnetisches Moment gibt **Stärke** und **Richtung** eines magnetischen Dipols an.

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

Draft

Magnetisches (Dipol-)Moment

Magnetisches Moment gibt **Stärke** und **Richtung** eines magnetischen Dipols an.

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

Klassische / Quantenmechanische Betrachtung mit **Drehimpuls**:

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

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**:

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

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

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

Inhaltsverzeichnis

- Entdeckung des Protons
- Magnetisches (Dipol-)Moment
- **Das Proton als Elementarteilchen**
- Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- SLAC Experiment
- Das Proton als Baryon
- Ausblick

Das Proton als Elementarteilchen

DIRAC-Theorie:

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

Lösungen sind erlaubte Zustände elementarer Fermionen.

Draft

Das Proton als Elementarteilchen

DIRAC–Theorie:

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

Lösungen sind erlaubte Zustände elementarer Fermionen.

Proton als DIRAC–Teilchen:

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

[CODATA, 2022a]

Das Proton als Elementarteilchen

Das mechanische Moment des Protons ist mit großer Sicherheit bekannt; es ist gleich dem des Elektrons $= \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$. Das magnetische Moment des Elektrons ist $2 \frac{e}{2mc} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$ (ein Bohrmagneton $= 0,9 \cdot 10^{-20}$ CGS für ein Elektron bzw. 5600 CGS pro Mol); nimmt man an, daß für das magnetische Moment des Protons dieselbe Formel gilt (eine Annahme, die durch die Diracsche Theorie des Elektrons nahegelegt wird), so würde dieses im Verhältnis der Massen, also 1840mal kleiner sein ($0,5 \cdot 10^{-23}$ CGS für ein Proton bzw. 3 CGS pro Mol). Wir wollen diese Größe im folgenden wie bisher (U. z. M. Nr. 1, l. c.) als *ein Kernmagneton* bezeichnen.

Abbildung: Auszug:[Otto Robert Frisch, 1933]

Inhaltsverzeichnis

- Entdeckung des Protons
- Magnetisches (Dipol-)Moment
- Das Proton als Elementarteilchen
- Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- SLAC Experiment
- Das Proton als Baryon
- Ausblick

Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN

Der unmittelbare Zweck der vorliegenden Arbeit war also die Untersuchung des Wasserstoffs mit dem Ziele einer Bestimmung des Protonenmoments. Darüber hinaus aber sollte ganz allgemein eine Apparatur zur Messung von magnetischen Momenten von der Größenordnung Kernmagneton entwickelt werden. In erster Linie sind Messungen von magnetischen Kernmomenten für Fragen der Kernstruktur von Wichtigkeit und könnten die Bestimmungen aus der Hyperfeinstruktur der Spektrallinien kontrollieren und ergänzen. Außerdem gibt es noch andere Fälle, wo Momente dieser Größenordnung auftreten, z. B. bei der Rotation von Molekülen, diamagnetische Momente usw.

Abbildung: Auszug:[Otto Robert Frisch, 1933]

Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN

Ortho- und Parawasserstoffs. Vor allem bietet sich die Möglichkeit einer Messung des magnetischen Moments des Protons, einer Größe, die experimentell bisher nicht zugänglich war, dabei aber ihrer Art nach, als eine Eigenschaft der positiven Elementarladung, besonderes Interesse beansprucht.

Abbildung: Auszug:[Otto Robert Frisch, 1933]

Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN

Strahlen aus Wasserstoffmolekülen wurden nach der Methode von Gerlach und Stern magnetisch abgelenkt und so ihr magnetisches Moment bestimmt.

Abbildung: Auszug:[Otto Robert Frisch, 1933]

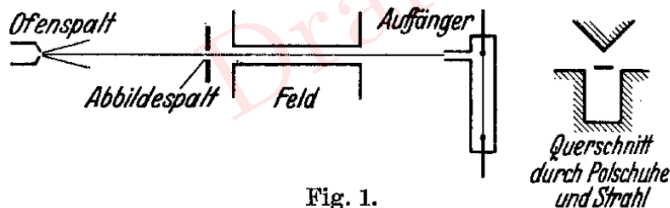


Abbildung: Versuchsaufbau zur Messung des magnetischen Moments. Gesamtlänge des Aufbaus ca. 30 cm.[Otto Robert Frisch, 1933]

Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN

Anforderungen zur Messung kleiner magnetischer Momente:

- Strahl muss **lang** und **schmal** sein (kleinster Strahl ca. 0.03 mm).
- **Große Inhomogenität** des Feldes (ca. 2.2×10^5 Gs/cm = 22 T/cm).

Draft

Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN

Anforderungen zur Messung kleiner magnetischer Momente:

- Strahl muss **lang** und **schmal** sein (kleinster Strahl ca. 0.03 mm).
- **Große Inhomogenität** des Feldes (ca. 2.2×10^5 Gs/cm = 22 T/cm).

Die Ablenkung des Strahls für 1 Kernmagneton liegt bei $s \approx 0.044$ mm.

Draft

Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN

Anforderungen zur Messung kleiner magnetischer Momente:

- Strahl muss **lang** und **schmal** sein (kleinster Strahl ca. 0.03 mm).
- **Große Inhomogenität** des Feldes (ca. 2.2×10^5 Gs/cm = 22 T/cm).

Die Ablenkung des Strahls für 1 Kernmagneton liegt bei $s \approx 0.044$ mm.

Schwierigkeiten:

- Der Strahl ist **nicht monochromatisch**, sondern MAXWELL-verteilt. Das gesuchte magnetische Moment muss aus der **Intensitätsverteilung** erschlossen werden.
- Wegen der großen Länge und geringen Höhe war die **Intensität klein**.

[Otto Robert Frisch, 1933]

Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN

Ergebnisse:

- Parahelium hat kein magnetisches Moment.
- Aufhebung der Entartung der Drehimpulsquantenzahl von Orthohelium.

es sich zu etwa 5 Kernmagnetonen pro Ortho- H_2 -Molekül. Das magnetische Moment eines Protons wäre also danach nicht ein Kernmagneton, sondern etwa 2 bis 3 Kernmagnetonen. Dieser Zahlenwert ist nicht sehr genau; doch scheint ein Wert von der Größe 1 mit den Messungen nicht vereinbar zu sein.

Abbildung: Auszug:[Otto Robert Frisch, 1933]

Inhaltsverzeichnis

- Entdeckung des Protons
- Magnetisches (Dipol-)Moment
- Das Proton als Elementarteilchen
- Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- SLAC Experiment
- Das Proton als Baryon
- Ausblick

Die Substruktur des Protons

We then refer to the members $u^{\frac{2}{3}}$, $d^{-\frac{1}{3}}$, and $s^{-\frac{1}{3}}$ of the triplet as "quarks" 6) q and the members of the anti-triplet as anti-quarks \bar{q} . Baryons can now be constructed from quarks by using the combinations (qqq) , $(qqqq\bar{q})$, etc., while mesons are made out of $(q\bar{q})$, $(qq\bar{q}\bar{q})$, etc. It is assuming that the lowest baryon configuration (qqq) gives just the representations **1**, **8**, and **10** that have been observed, while the lowest meson configuration $(q\bar{q})$ similarly gives just **1** and **8**.

Abbildung: Auszug:[Gell-Mann, 1964]

Die Substruktur des Protons

Both mesons and baryons are constructed from a set of three fundamental particles called aces. The aces break up into an isospin doublet and singlet. Each ace carries baryon number $\frac{1}{3}$ and is consequently fractionally charged. SU_3 (but not the Eightfold Way) is adopted as

Abbildung: Auszug:[Zweig, 1964]

Inhaltsverzeichnis

- Entdeckung des Protons
- Magnetisches (Dipol-)Moment
- Das Proton als Elementarteilchen
- Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- **SLAC Experiment**
- Das Proton als Baryon
- Ausblick

SLAC Experiment

Elektronen streuen an Nukleonen mit **großen Winkeln**.

- Analogie RUTHERFORD: Nukleonen haben eine punktförmige **Substruktur**.

Draft

SLAC Experiment

Elektronen streuen an Nukleonen mit **großen Winkeln**.

- Analogie RUTHERFORD: Nukleonen haben eine punktförmige **Substruktur**.
- Interpretation FEYNMAN & BJORKEN: Proton besteht aus **Partonen**.
- Partonen sind als GELL-MANNS & ZWEIGS **Quarks** zu identifizieren.

Draft

SLAC Experiment

There have been a number of different theoretical approaches in the interpretation of the high-energy inelastic electron-scattering results. One class of models,⁶⁻⁹ referred to as **parton models**, describes the electron as scattering incoherently from **pointlike constituents within the proton**.

Abbildung: Auszug:[Bloom et al., 1969]

SLAC Experiment

point particle, which became known as the nucleus of the atom. In the same way, the SLAC experiment found that electrons were sometimes scattered from nucleons at large angles, and this was interpreted by Feynman and Bjorken [8] as indicating that the neutron and proton consisted of point particles. It was natural to identify these “partons” with Gell-Mann and Zweig’s quarks. But of course the mystery about all this was why no one

Abbildung: Auszug:[Weinberg, 2004]

Inhaltsverzeichnis

- Entdeckung des Protons
- Magnetisches (Dipol-)Moment
- Das Proton als Elementarteilchen
- Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- SLAC Experiment
- **Das Proton als Baryon**
- Ausblick

Das Proton als Baryon

Draft

Das Proton als Baryon

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

Draft

Das Proton als Baryon

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

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

[CODATA, 2022b]

Draft

Das Proton als Baryon

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

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

[CODATA, 2022b]

Differenz:

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

Inhaltsverzeichnis

- Entdeckung des Protons
- Magnetisches (Dipol-)Moment
- Das Proton als Elementarteilchen
- Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- SLAC Experiment
- Das Proton als Baryon
- **Ausblick**

Ausblick

Draft

Ausblick

Magnetresonanztomographie

Draft

Bibliography I



Bloom et al. (1969).

Observed behavior of highly inelastic electron-proton scattering.
Phys. Rev. Lett., 23:935–939.



Campbell, J. (8. May 2019).

Rutherford, transmutation and the proton.
<https://cerncourier.com/a/rutherford-transmutation-and-the-proton/>.
Letzter Zugriff: 2024-10-27.



CODATA (2022a).

https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mun|search_for=nuclear+magneton.
Letzter Zugriff: 2024-10-27.



CODATA (2022b).

https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?mup|search_for=magnetic+moment+proton.
Letzter Zugriff: 2024-10-27.



Gell-Mann, M. (1964).

A schematic model of baryons and mesons.
Physics Letters, 8:214–215.



Otto Robert Frisch, O. S. (1933).

Über die magnetische ablenkung von wasserstoffmolekülen und das magnetische moment des protons.
Zeitschrift für Physik, 85:4–16.



Rutherford, P. S. E. (1919).

Collision of α particles with light atoms. an anomalous effect in nitrogen.
The London, Edinburgh, and Dublin Philosophical Magazine and Journal of Science, 37:581–587.

Bibliography II



Weinberg, S. (2004).

The making of the standard model.

The European Physical Journal C, 34(1):5–13.



Zweig, G. (1964).

An su_3 model for strong interaction symmetry and its breaking.

CERN, CERN-TH.401:1–24.

Draft