

Das magnetische Moment des Protons

Proseminar Präsentationstechnik c

Prof. Dr. Hartmut Schmieden

Jonas Wortmann

Universität Bonn

11. November 2024

- Die Entdeckung des Protons
- Was sind das magnetische Moment und das Magneton?
- Das Experiment von Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- Aktuelle Forschung
- Zusammenfassung

- Die Entdeckung des Protons
- Was sind das magnetische Moment und das Magneton?
- Das Experiment von Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- Aktuelle Forschung
- Zusammenfassung

Die Entdeckung des Protons

1913 RUTHERFORD & MARDSEN: Luft wird mit α -Teilchen beschossen.

- Aufblitzen auf Zinksulfidschirm von **H-Kernen** verursacht.
- Stickstoff muss **H-Kerne als Bestandteile** besitzen.

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

Auszug [Rutherford, 1919]

1920 RUTHERFORD: **Jedes** Atom muss aus **H-Kernen** bestehen.[Campbell, 2019]

- Die Entdeckung des Protons
- Was sind das magnetische Moment und das Magneton?
- Das Experiment von Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- Aktuelle Forschung
- Zusammenfassung

Magnetische Moment und Magneton

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

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

Magnetische Moment und Magneton

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

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

Klassische / Quantenmechanische Betrachtung mit **Drehimpuls**:

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

Magnetische Moment und Magneton

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

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

Klassische / Quantenmechanische Betrachtung mit **Drehimpuls**:

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

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

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

- Die Entdeckung des Protons
- Was sind das magnetische Moment und das Magneton?
- Das Experiment von Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- Aktuelle Forschung
- Zusammenfassung

Motivation

- Untersuchung des **Wasserstoffs** mit dem Ziel einer Bestimmung des **Protonenmoments**.
- Entwicklung einer allgemeinen Apparatur zur Messung magnetischer Momente $\propto \mu_N$.
- Kürzliche Entdeckung von Ortho- und Para-H₂.

[Otto Robert Frisch, 1933]

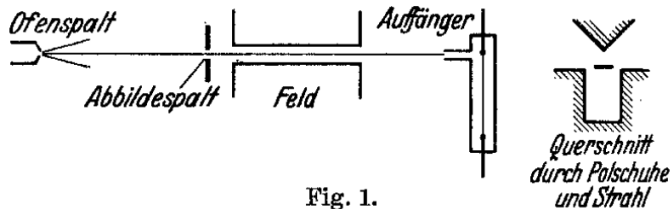
Das mechanische Moment des Protons ist mit großer Sicherheit bekannt; es ist gleich dem des Elektrons $= \frac{1}{2} \frac{h}{2\pi}$. Das magnetische Moment des Elektrons ist $2 \frac{e}{2mc} \cdot \frac{1}{2} \cdot \frac{h}{2\pi}$ (ein Bohrmagneton $= 0,9 \cdot 10^{-20}$ CGS für ein Elektron bzw. 5600 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.

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.

Auszug [Otto Robert Frisch, 1933]



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

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).

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:

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]

Auswertung (Bestimmung des Protonenmoments):

- Gesamtmoment besteht aus **Rotationsmoment** und **Kernmoment** (\propto Protonenmoment).

Rotation \rightarrow

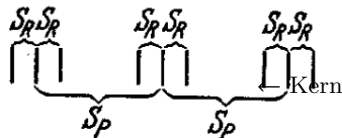


Fig. 9. Aufspaltungsbild
von Orthowasserstoff

Auszug [Otto Robert Frisch, 1933]

- Das Rotationsmoment wird aus reinem Para- H_2 bestimmt, da dieses **unmagnetisch** ist.

Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN

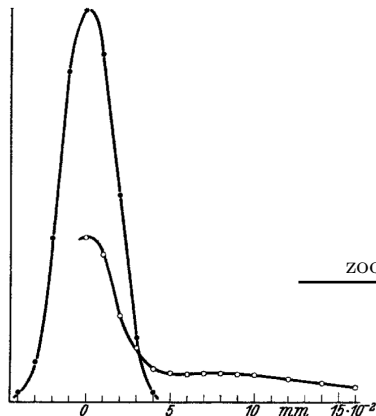


Fig. 11. Beispiel einer Messung
an gewöhnlichem Wasserstoff bei 95° abs.;
Stahlform ohne Feld (●) und mit Feld (○).

zoom →

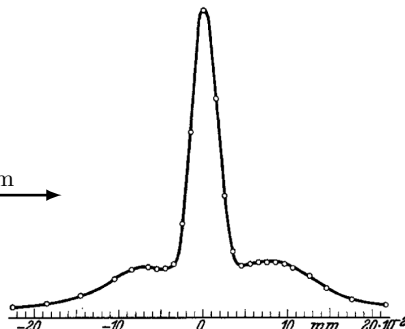


Fig. 12. Vollständiges Aufspaltungsbild
von gewöhnlichem Wasserstoff bei 95° abs.;
die Unsymmetrie ist apparativ bedingt.

Abbildung [Otto Robert Frisch, 1933]

Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN

- Para- H_2 ist BOLTZMANN-verteilt: 73% mit $n = 0$; 27% mit $n = 2$.
- $n = 0$ wird **nicht** abgelenkt; $n = 2$ wird abgelenkt.
- Von 27%: 1/5 nicht abgelenkt; 2/5 Aufspaltung $1 \cdot \mu_R$; 2/5 Aufspaltung $2 \cdot \mu_R$.

Experiment Otto Robert FRISCH & Otto STERN

- Para- H_2 ist BOLTZMANN-verteilt: 73% mit $n = 0$; 27% mit $n = 2$.
- $n = 0$ wird **nicht** abgelenkt; $n = 2$ wird abgelenkt.
- Von 27%: 1/5 nicht abgelenkt; 2/5 Aufspaltung $1 \cdot \mu_R$; 2/5 Aufspaltung $2 \cdot \mu_R$.
- Berechnung: Erwartete Intensität für $\mu_R \stackrel{?}{=} \text{gemessene Intensität für } \mu_R$.

moment μ_R aus den Messungen entnehmen; es ergibt sich zu etwa ein Kernmagneton, eher etwas kleiner.

Auszug [Otto Robert Frisch, 1933]

Ergebnis:

- Magnetisches Moment des Protons $2\mu_N \leq \mu_p \leq 3\mu_N$.

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.

Auszug [Otto Robert Frisch, 1933]

- Die Entdeckung des Protons
- Was sind das magnetische Moment und das Magneton?
- Das Experiment von Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- Aktuelle Forschung
- Zusammenfassung

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

Auszug [Gell-Mann, 1964]

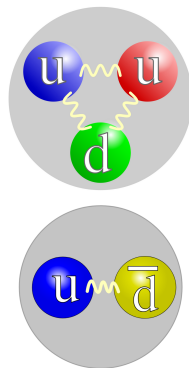


Abbildung:
Quarkmodell Proton
(oben) und Pion
(unten).[Wik, c][Wik, b]

It is fun to speculate about the way quarks would behave if they were physical particles of finite mass

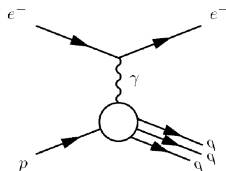
[Gell-Mann, 1964]

It is fun to speculate about the way quarks would behave if they were physical particles of finite mass

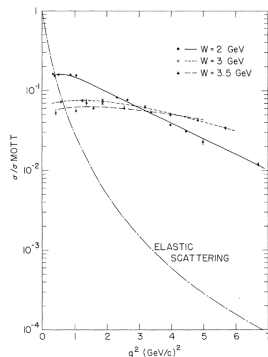
[Gell-Mann, 1964]

SLAC Experiment:

- Elektron – Proton Streuung
- Die Elektronen streuen mit großen Winkeln.



[Schmidt, 2014]



[Bloom et al., 1969]

Die Substruktur des Protons

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, 2022]

es sich zu etwa 5 Kernmagnetonen pro Ortho-H₂-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.

Auszug [Otto Robert Frisch, 1933]

- Die Entdeckung des Protons
- Was sind das magnetische Moment und das Magneton?
- Das Experiment von Otto Robert FRISCH & Otto STERN
- Die Substruktur des Protons
- Aktuelle Forschung
- Zusammenfassung

Baryon Antibaryon Symmetry Experiment (BASE) CERN

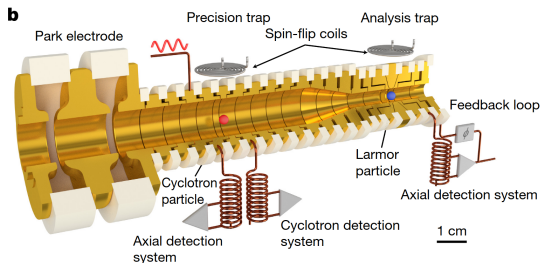


Abbildung: Aufbau des BASE [Smorra et al., 2017].

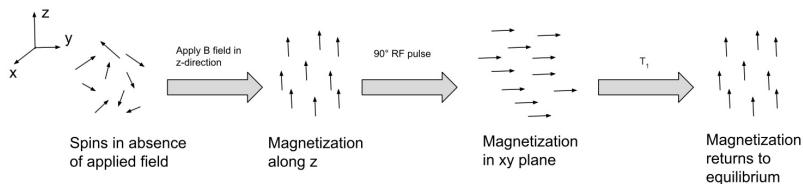
- Vergleich der magnetischen Momente von **Proton** und **Antiproton**.
- CPT Symmetrie
- Materie – Antimaterie Asymmetrie

$$\mu_{\bar{p}} = -2.792\,847\,344\,1(42) \mu_N$$

Magnetresonanztomographie (MRT)

- Protonen im Körper richten ihren Spin entlang des Magnetfeldes (0.1 T – 7 T) aus.
- Impulse von magnetischen Wechselfeldern lenken Protonen aus (LAMOR-Präzession).
- Protonen relaxieren nach dem Impuls.
- Messung der Spindichte im Körper.

[Mafraji, 2023]



[Wik, a]

- 1919 RUTHERFORD: Atome sind aus H-Kernen (Protonen) aufgebaut.
- 1933 FRISCH und STERN: Magnetisches Moment des Protons $\mu_p \neq 1 \cdot \mu_N$ sondern $2 \cdot \mu_N \leq \mu_p \leq 3 \cdot \mu_N$. (Proton kein Elementarteilchen)
- 1964 GELL-MANN und ZWEIG: Mathematisches Quark-Modell.
- 1969 SLAC: Proton besteht aus „pointlike constituents“ (Quarks).
- 2017 BASE CERN: Magnetisches Moment des Protons gemessen mit einer Genauigkeit von $\approx 10^{-12}$.
- Aktuelle Forschung: CTP-Symmetrie, Materie-Antimaterie Asymmetrie, MRT

Bibliography I



[Magnetic resonance imaging.](#)

https://en.wikipedia.org/wiki/magnetic_resonance_imaging.

Letzter Zugriff: 2024-11-11.



[Pion.](#)

<https://en.wikipedia.org/wiki/Pion>.

Letzter Zugriff: 2024-11-10.



[Proton.](#)

<https://en.wikipedia.org/wiki/Proton>.

Letzter Zugriff: 2024-11-10.



[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 \(2022\).](#)

Proton magnetic moment.

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.

Bibliography II



Mafraji, M. A. (2023).

Magnetresonanztomographie (mrt).

<https://www.msdmanuals.com/de/profi/spezielle-fachgebiete/grundz%C3%BCge-der-radiologischen-bildgebung/magnetresonanztomographie-mrt?ruleredirectid=740>.

Letzter Zugriff: 2024-11-02.



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.



Schmidt, S. (2014).

Elektron–proton streuung.

Seminar Präzessionsexperimente der Teilchenphysik; Universität Heidelberg.

Letzter Zugriff 2024-11-11.



Smorra, C. et al. (2017).

A parts-per-billion measurement of the antiproton magnetic moment.

Nature, 550:371–374.