Anomales magnet. Moment

Für geladene Dirac-Teilchen (Spin-$\frac{1}{2}$) sollte g-Faktor den Wert 2 annehmen. Für ungeladene Dirac-Teilchen sollte magnet. Moment ($\mu = g \frac{e}{2m} \frac{\hbar}{2}$) verschwinden.

Elektronen und Myonen den Wert $g = 2$
(kleine Abweichung aus QED)
(Suche nach "g-2" bei Myonen als Hinweis für neue Physik! Aktuelle Experimente)

Da die Nukleonen jedoch keine Dirac-Teilchen sind, sondern aus Quarks aufgebaut sind, ergeben sich ihre g-Faktoren aus ihrer Substruktur.

Die experimentellen Werte betragen

$$\mu_p = \frac{g_p}{2} \mu_N = +2{,}79 \, \mu_N$$

$$\mu_n = \frac{g_n}{2} \mu_N = -1{,}91 \, \mu_N$$

wobei μ_N das Kernmagneton ist

$$\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 3.1525 \cdot 10^{-14} \frac{\text{MeV}}{\text{T}}$$

Die Ladungs- und Stromverteilung können wie bei Kernen durch Formfaktoren beschrieben werden. In diesem Falle benötigen man zwei Formfaktoren, die die elektrische und magnetische Verteilung charakterisieren.

Der WQ für die Streuung eines Elektrons an einem Proton wird durch die Rosenbluth-Formel (1950) beschrieben

$$\left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right) = \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott} \cdot \left[\frac{G_E^2(Q^2) + \tau G_M^2(Q^2)}{1+\tau} + 2\tau G_M^2(Q^2) \tan^2\frac{\Theta}{2} \right]$$

$G_E(Q^2)$: elektrische Formfaktor

$G_M(Q^2)$: magn. "

zur Erinnerung $\tau = \frac{Q^2}{4 M^2 c^2}$

Aus Q^2-Abhängigkeit der Formfaktoren kann auf räumliche ~~Ausdehnung~~ Verteilung von Ladung und magn. Moment rückgeschlossen werden.

Wichtiger Grenzfall : $Q^2 \to 0$

$\Rightarrow$ G_E ist auf Elementarladung normiert

$\Rightarrow$ G_M auf das Kernmagneton normiert

$$\left.\begin{aligned} G_E^P(Q^2 \to 0) &= 1 \\ G_M^P(Q^2 \to 0) &= 2{,}79 \end{aligned}\right\} \text{Proton}$$

$$\left.\begin{aligned} G_E^N(Q^2 \to 0) &= 0 \\ G_M^N(Q^2 \to 0) &= -1{,}91 \end{aligned}\right\} \text{Neutron}$$

Experimentell Bestimmung: WQ für feste Q^2 bei verschiedenen Streuwinkeln Θ (damit Strahlenergie E)

$$\Rightarrow \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{exp} \Big/ \left(\frac{d\sigma}{d\Omega}\right)_{Mott}$$

$$\boxed{\text{Fig } 6.1 \quad , \quad 6.2}$$

Exp. Beobachtung: elektr. Formfaktor des Protons und magn. Formfaktor von Proton u. Neutron nehmen in gleicher Weise mit Q^2 ab. Sie durch sogn. Dipolfit beschrieben werden

$$G_E^P(Q^2) = \frac{G_M^P(Q^2)}{2{,}79} = \frac{G_M^N(Q^2)}{-1{,}91}$$

$$=: G^{Dipol}(Q^2)$$

mit $G^{Dipol}(Q^2) = \left(1 - \frac{Q^2}{0{,}71\,(GeV/c)^2}\right)^{-2}$

Dipolformfaktor entspricht einer exponentiell abfallenden Ladungsverteilung

$$\rho(r) = \rho(0)\, e^{-ar} \quad ; \quad a = 4{,}27\ fm^{-1}$$

$\Rightarrow$ Nukleone sind also weder punktförmig noch homogen geladene Kugel, sondern „diffuse" Gebilde.

Mittlerer quadratischer Radius der Ladungsverteilung im Proton und Verteilung des magnetischen Moments im Proton u. Neutron sind gleich groß!

$$\langle r^2 \rangle_{Dipol} = 0{,}66\ fm^2$$

$$\sqrt{\langle r^2 \rangle_{Dipol}} = 0{,}81\ fm$$

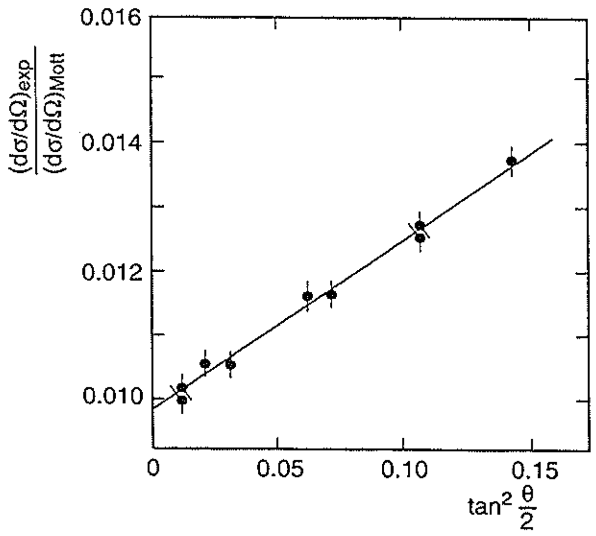


Abb. 6.1. Quotient aus gemessenem und Mott-Wirkungsquerschnitt $\sigma_{exp}/\sigma_{Mott}$ als Funktion von $\tan^2\frac{\theta}{2}$ bei einem Viererimpulsübertrag von $Q^2 = 2.5\ \mathrm{GeV}^2/c^2$ [Ta67]

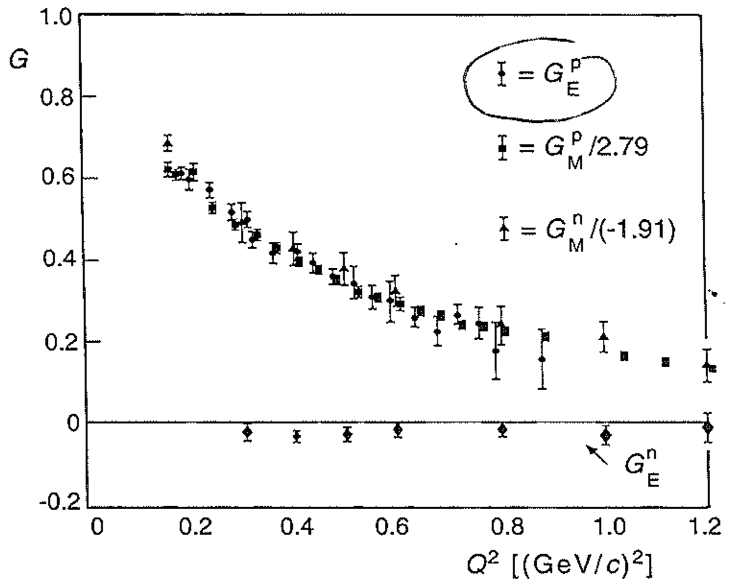


Abb. 6.2. Elektrischer und magnetischer Formfaktor von Proton und Neutron, aufgetragen gegen Q^2. Die Datenpunkte sind mit den angegebenen Faktoren skaliert und liegen dann übereinander, so dass das globale Dipolverhalten deutlich wird [Hu65].

Beste Wert aus Messung bei $Q^2 \to 0$

$$\sqrt{\langle r^2 \rangle_p} = \underline{0{,}862\ \text{fm}}$$

Anm. elektrische Formfaktor des Neutrons durch Streuung von Neutronen an Elektronen (der Hülle) mit Nachweis der freigesetzten Elektronen.

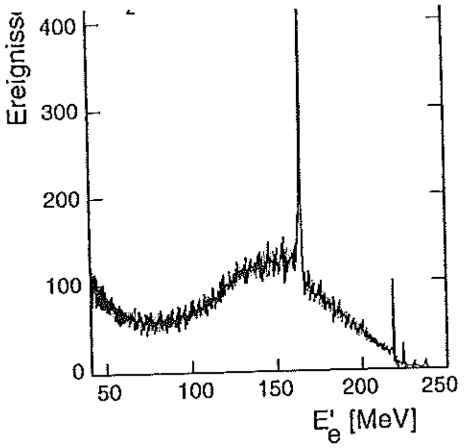
$$\langle r^2 \rangle_n = -0{,}113 \pm 0{,}005\ \text{fm}^2$$

D. h. Neutron ~~ist und~~ nur nach außen hin elektr. neutral. Im Innern befinden sich elektrische Konstituenten, die auch die magnet. Momente tragen.

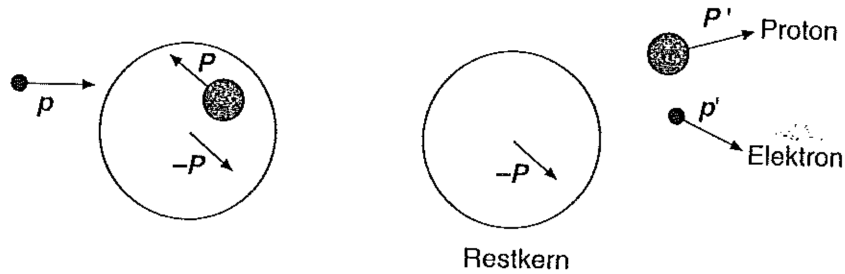
Quasielastische Streuung

Bisher elastische Streuung von Elektronen an Nukleonen behandelt. Für vorgegebene Strahlenergie E findet man bei dieser Reaktion unter bestimmtem Streuwinkel Θ nur gestreute Elektronen mit Energie E'

$$E' = \frac{E}{1 + E/Mc^2\,(1-\cos\Theta)}$$



ten wurden am Linearbeschleuniger MAMI-A in Mainz bei 246 MeV Strahlenergie unter einem Streuwinkel von 148.5° aufgenommen. *(Dieses Bild wurde uns freundlicherweise von J. Friedrich (Mainz) überlassen.)*



Es ergeben sich dann folgende kinematische Zusammenhänge:

$$P_F^2 = \frac{5}{3}\langle \bar{P}^2 \rangle$$

Fermigas-Modell: Nukleonen können sich quasi frei bewegen und haben Impuls (Fermiimpuls)

Streuung an Kern mit mehreren Nukleonen:

Fermiimpuls p_F
effektives Potential S

Kern	^{6}Li	^{12}C	^{40}Ca	^{181}Ta	^{208}Pb
p_F (MeV/c)	169	221	249	265	265
S (MeV)	17	25	33	42	44

- Das effektive mittlere Kernpotential wächst von 17 MeV bei Li bis 44 MeV bei Pb kontinuierlich an (mit Massenzahl A)
- Bis auf leichte Kerne ist der Fermiimpuls unabhängig von A und beträgt $p_F \simeq 250$ MeV/c

Verhalten stützt Fermigas-Modell:
abgesehen von leichten Kernen ist die Dichte der Kernmaterie unabhängig von der Massenzahl A.

Ladungsradius von Pionen und Kaonen (Mesonen)

mit gleicher Methode wie für Neutronen lassen auch die Ladungsradius von anderen Teilchen messen. Bsp. π-Mesonen, K-Mesonen

$$\langle r_\pi^2 \rangle_\pi = 0{,}44 \pm 0{,}02 \text{ fm}^2 \; ; \; \sqrt{(\,)} = 0{,}67 \text{ fm}$$

$$\langle r^2 \rangle_K = 0{,}34 \pm 0{,}05 \text{ fm}^2 \; ; \; \sqrt{(\,)} = 0{,}58 \text{ fm}$$

⇒ räumliche Ausdehnung geringer als beim Proton

⇒ Kaon weist kleineren Radius als Pion auf

K-Meson hat im Gegensatz zum π-Meson ein schweres Quark (s-Quark); größere Masse der Konstituenten
⇒ Abnahme des R

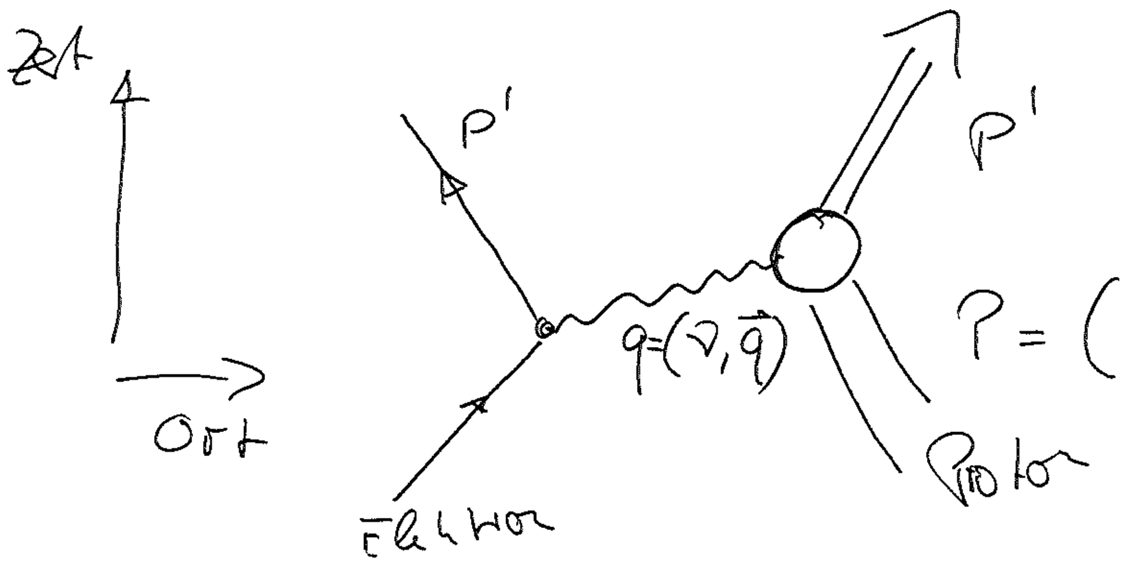
Deep Inelastic Scattering (DIS) – Tiefinelastische Streuung

Analog zur Streuung an Kernen werden weitere Maxima
bei kleinen Streuenergie neben dem Maximum der elast. Streuung

$\Longrightarrow$ inelastische Anregung des Protons

$\Longrightarrow$ Hinweis, daß Proton ein zusammengesetztes System ist.
Deutung der Resonanzen mit Hilfe des Quark Modells

z.Bsp. Δ- Resonanz



$P = (M, 0)$ Ruhend im Labor-system

Invariante Masse $W^2c^2 = P'^2 = (P+q)^2$

$$= M^2c^2 + 2Pq + q^2$$

$$= M^2c^2 + 2M\nu - Q^2$$

Lorentz Größe ν definiert $\nu = \frac{Pq}{M}$

Im Laborsystem, in dem Targetproton in Ruhe ist, gilt $P = (Mc, 0)$ und $q = ((E-E')/c\ ,\ \vec{q})$

$\Rightarrow \nu = E - E'$ ist die Energie, die in diesem System auf das Proton übertragen wird.

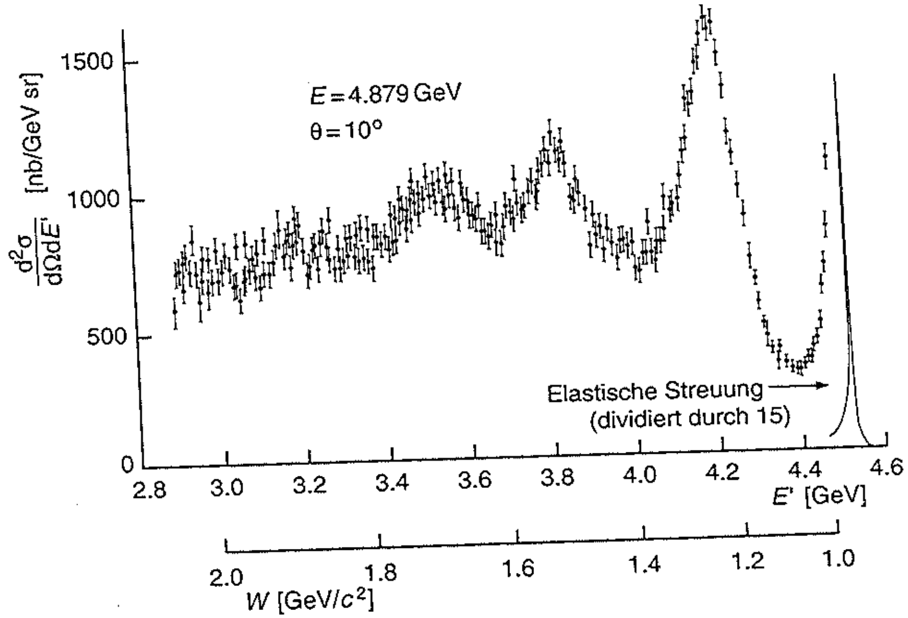


Abb. 7.1. Spektrum der gestreuten Elektronen bei Elektron-Proton-Streuung, aufgenommen bei einer Elektronenenergie $E = 4.9$ GeV unter einem Streuwinkel $\theta = 10°$ (nach [Ba68])