

介子云对质子和中子形状因子的影响

董宇兵

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 利用夸克模型,考虑 π 介子云对质子,特别是中子的形状因子的影响,计算了质子和中子的电磁形状因子. 对中子的性质给予了较好的描述.

关键词 介子云 夸克模型 形状因子

传统夸克模型多数是非相对论组份夸克模型. 由于只考虑核内的组份夸克自由度,核子的一些性质尚不能清楚地描述^[1]. 如对中子形状因子, $P_{33}(1232)$ 共振态和 $N^*(1440)$ 共振态的螺旋度振幅的描述,理论和实验有较大的差别.

为了改进理论模型,本工作考察了介子云,主要是 π 介子云对核子形状因子,特别是中子形状因子的作用.

首先考虑核子内部三夸克成份. 利用以下的标量、矢量混合禁闭位

$$V_{\text{Conf}} = \frac{a_c}{2}(1 + \gamma_0)r^2 = V_s + V_v,$$

其中 a_c 代表禁闭位的强度,假设核子内部中夸克的运动遵守 Dirac 方程

$$[\boldsymbol{\alpha} \cdot \mathbf{p} + \gamma_0(V_{\text{Conf}} + m_q) - E_{nl}]\psi = 0,$$

其波函数可以解析地写出^[2]

$$\psi_{0s}(\mathbf{r}) = \left(\frac{\alpha_{0s}}{\pi}\right)^{3/4} \left(1 + \frac{E_{0s} - m_q}{2(E_{0s} + m_q)}\right)^{-1/2} \begin{bmatrix} i \\ -\frac{\alpha_{0s}}{E_{0s} + m_q} \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{r} \end{bmatrix} e^{-\frac{\alpha_{0s} r^2}{2}}$$

其中

$$a_c = \frac{(E_{nl} - m_q)^2 (E_{nl} + m_q)}{4(2n + l + 3/2)^2}, \quad \alpha_{nl} = \sqrt{a_c(E_{nl} + m_q)} = \frac{1}{b_{nl}}. \quad (4)$$

公式(3)中 α_{nl} 是谐振子参数, b_{nl} 是谐振子长度. 核子内部三夸克波函数可写为3个单粒子波函数之积. 然而质心运动需要扣除. 扣除质心运动的方法很多,这里我们用 Peierls 和 Yoccoz^[3] 方法去扣除质心. 动量空间中核子波函数为:

$$\Psi_p^N(\mathbf{p}_1, \mathbf{p}_2, \mathbf{p}_3; \alpha_{0s}) = (2\pi)^3 \delta^3(\mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 + \mathbf{p}_3 - \mathbf{p}) \psi_{0s}(\mathbf{p}_1) \psi_{0s}(\mathbf{p}_2) \psi_{0s}(\mathbf{p}_3) \quad (5)$$

实际计算中取夸克质量为零 $m_q = 0$, 另外选 Dirac 方程的本征能量 E_{0s} (公式(2)) 做为另

外一个参数. 选 $E_{0S} = 540\text{MeV}$. 这样 a_c 和 α_{0S} 可分别由(4)式得出:

$$a_c = (E_{0S})^3/9 = 449.325\text{MeV}\cdot\text{fm}^2, \quad (6)$$

$$\alpha_{0S} = (E_{0S})^2/3 = 0.0972\text{GeV}^2.$$

为了在三夸克成分之上考察介子云的作用, 可考察以下的拉氏量:

$$\mathcal{L}_{\text{tot}} = \mathcal{L}_q + \mathcal{L}_\pi, \quad (7)$$

其中:
$$\mathcal{L}_q = \frac{i}{2} \bar{\psi}(\mathbf{r}) \gamma^\mu \tilde{\partial}_\mu \psi(\mathbf{r}) - \bar{\psi}(\mathbf{r}) [V_{\text{Conf}} + m_q] \psi(\mathbf{r}) \quad (8)$$

$$\mathcal{L}_\pi = \frac{1}{2} (\partial_\mu \phi_\pi(\mathbf{r}))^2 - \frac{1}{2} m_\pi^2 \phi_\pi^2(\mathbf{r})$$

其中 ϕ_π 代表 π 场. 手征变换下

$$\psi(\mathbf{r}) \rightarrow \psi(\mathbf{r}) - i\gamma_5 \frac{\boldsymbol{\tau} \cdot \boldsymbol{\phi}_\pi}{2f_\pi} \psi(\mathbf{r}). \quad (9)$$

赝标介子与夸克的耦合为

$$\mathcal{L}_{\text{q}\pi} = \frac{i}{f_\pi} \bar{\psi}(\mathbf{r}) \gamma^5 (V_s(\mathbf{r}) + m_q) \boldsymbol{\tau} \psi(\mathbf{r}) \cdot \boldsymbol{\phi}_\pi(\mathbf{r}). \quad (10)$$

f_π 是 π 的衰变常数, 而且

$$\phi_\pi(\mathbf{r}) = \int \frac{d^3k}{[2\omega_k(2\pi)^3]^{1/2}} [a(\mathbf{k})e^{i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}} + a^\dagger(\mathbf{k})e^{-i\mathbf{k}\cdot\mathbf{r}}]. \quad (11)$$

这样光子和核子耦合可写为

$$J'' = j''_{q\gamma} + j''_{\pi\gamma}, \quad (12)$$

其中 $j''_{q\gamma}$ 和 $j''_{\pi\gamma}$ 分别代表光子和夸克以及 π 介子云的耦合. 而核子波函数也可在推广的 Fock 空间中写为^[4]

$$|B\rangle = Z_2^{1/2} \left[|\bar{\Psi}^B(3q)\rangle + \sum_{B'=\bar{N}, \Delta} C^{BB'} |\bar{\Psi}^{B'}(3q)\phi_\pi\rangle_B \right], \quad (13)$$

其中有三夸克分量和重子-介子部分. 这里中间态 B' 只选 Δ 和 \bar{N} . (3)式中 $|C^{BB'}|^2$ 和 $Z_2^{1/2}$ 分别是介子-重子态的几率和重整化常数.

图 1—4 分别给出了质子和中子的电和磁形状因子. 从图 4 可以看出本模型理论可以较好地解释中子电形状因子和电荷分布半径. 光子和核子 $|B\rangle$ 相互作用如图 5 所示. 可以看出图 5(a) 对中子电磁形状因子没有贡献. 本工作对中子电磁形状因子的解释是来自图 5(b) 和 5(c). 这两个图都是由于介子云的影响. 显然由于介子云的作用, 中子中还有 $|\pi^0 n\rangle$ 和 $|\pi^- p\rangle$ 的组份. 因此中子的电荷分布不再为零. 这是个很自然的结果. 我们所给出的中子电荷半径的平方为

$$\langle r_{\text{En}}^2 \rangle = -0.0958\text{fm}^2.$$

这个值与实验值 $\langle r_{\text{En}}^2 \rangle_{\text{data}} = -0.113 \pm 0.005^{[14]}$ 基本相符.

另外, 可以看到本工作是基于相对论夸克模型. 在非相对论夸克模型之中, 组份夸克的质量为 $M_N/3$. 因此核子的质量大多数源于组份夸克. 然而在相对论理论中, 夸克质量不再起如此重要的作用, 这主要是因为 Dirac 方程(2)中 γ_0 矩阵减少了夸克质量的贡

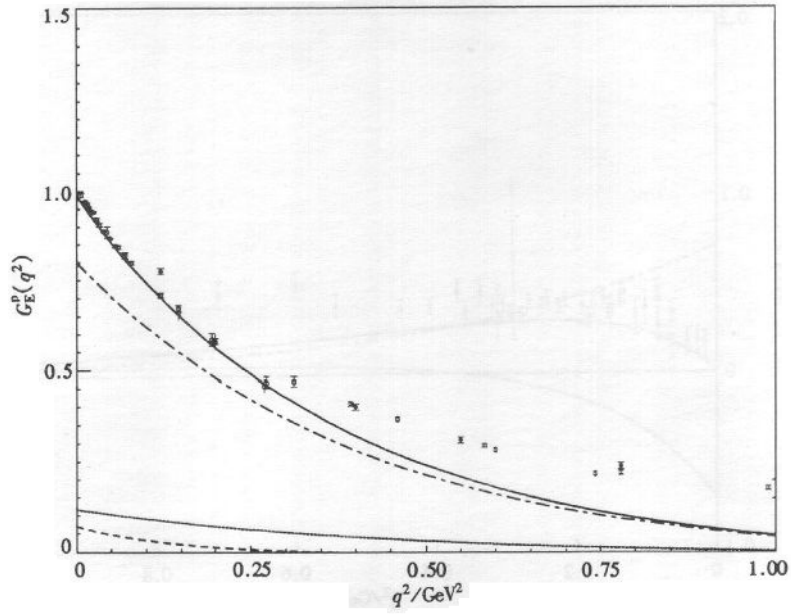


图 1 质子的电形状因子

点划线,点线和划线分别是光子与质子内部三夸克部分中夸克相互作用的结果,光子与介子-重子分量中夸克相互作用的结果以及光子与 π 介子的作用.实线为总的结果.图中的实验数据是文献[5,6]的结果.

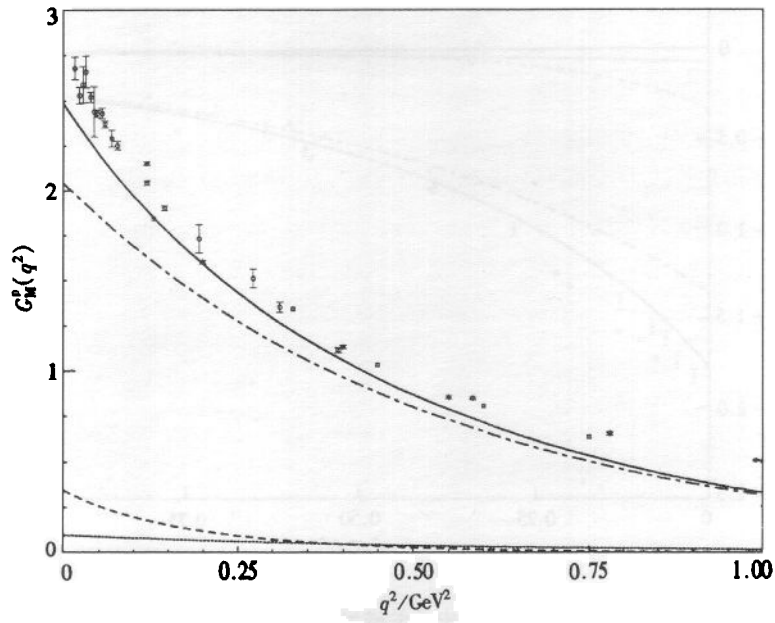


图 2 质子的磁形状因子

曲线代表的意义与图 1 相同.实验数据取自文献[6,7].

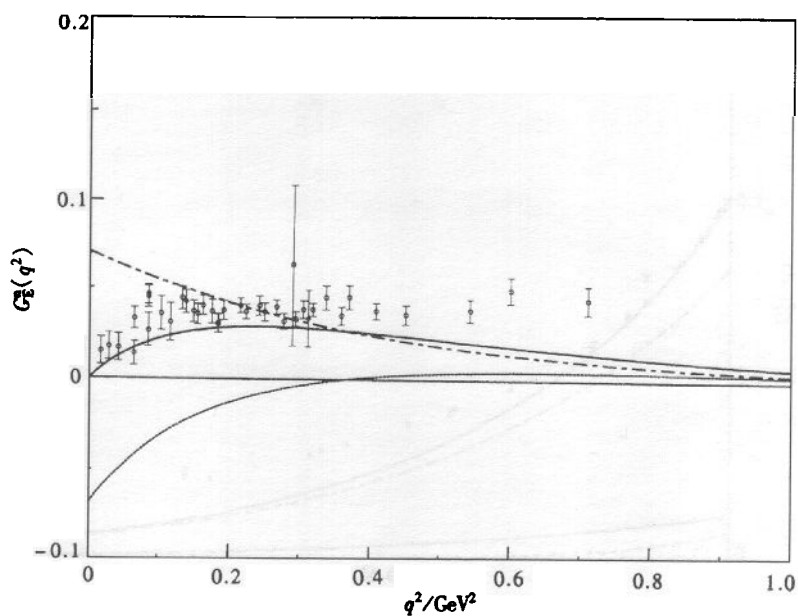


图 3 中子的电形状因子

曲线代表的意义与图 1 相同. 实验数据取自文献[8—11].

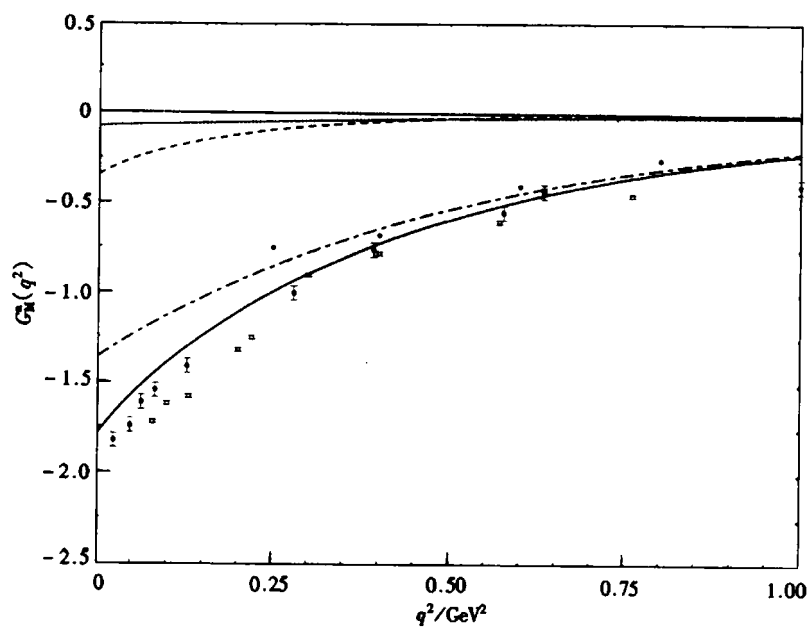


图 4 中子的磁形状因子

曲线代表的意义与图 1 相同. 实验数据取自文献[5—7]和[12].

献. 动能项则起着较为重要的作用. 本工作的两个参数分别是夸克质量和单粒子 Dirac 方

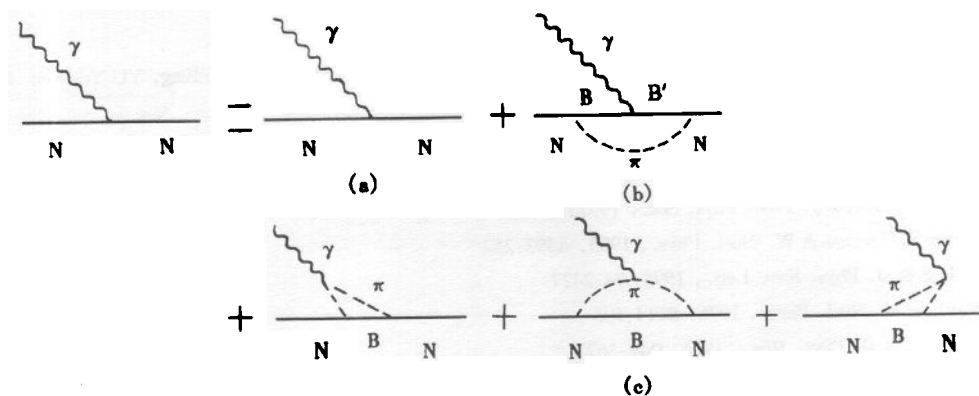


图 5 光子和核子相互作用的示意图

程本征能量 E_{0s} . 表 1 表明小夸克质量的选取是好的. 另外 $E_{0s} = 540\text{MeV}$ 的选择也是必要的. 因为单粒子能量是 540MeV , 整个核子的能量 (扣除质心以后) 为 $2E_{0s} = 1080\text{MeV}^{[2]}$. 这个值是与 N, Δ 平均能量 1085MeV 相吻合的.

表 1 的数值表明了本工作的计算基本能够解决中子电形状因子的问题, 对其他物理量如质子、中子磁矩和质子电形状因子的解释也是与实验符合的. 图 1—4 中对 π 介子云的描述说明了介子云的影响. 本工作的成功之处使得进一步推广本工作到核子共振态 Δ 和 N^* 性质的研究成为一个新的课题.

表 1 质子和中子性质的计算结果

	m_q / MeV	$\langle r_{Ep}^2 \rangle / \text{fm}^2$	$\sqrt{\langle r_{Ep}^2 \rangle} / \text{fm}$	$\langle r_{En}^2 \rangle / \text{fm}^2$	$\mu_p [e\hbar / (2M_N c)]$	$\mu_n [e\hbar / (2M_N c)]$
图 5(a)	0	0.469		0	2.044	-1.362
图 5(b)		0.0687		0.0412	0.101	-0.0773
图 5(c)		0.137		-0.137	0.346	-0.346
总结果		0.685	0.827	-0.0958	2.491	-1.785
图 5(a)	150	0.441		0	1.767	-1.178
图 5(b)		0.0822		0.0403	0.129	-0.0689
图 5(c)		0.128		-0.128	0.376	-0.375
总结果		0.651	0.807	-0.0877	2.272	-1.622
图 5(a)	300	0.522		0	1.568	-1.045
图 5(b)		0.0929		0.0518	0.0998	-0.0669
图 5(c)		0.139		-0.139	0.387	-0.387
总结果		0.754	0.868	-0.0872	2.055	-1.499
实验数据			$0.847 \pm 0.008^{[13]}$	$-0.113 \pm 0.005^{[5]}$	$2.7928^{[13]}$	$-1.913^{[13]}$

注: 表中的结果是重整化以后的结果. 表中给出了 3 种不同的夸克质量 m_q 下, 质子和中子的均平方半径 $\langle r_{Ep,En}^2 \rangle$, 质子的均方根半径 $\sqrt{\langle r_{Ep}^2 \rangle}$, 和质子和中子的磁矩 $\mu_{p,n}$.

参考文献 (References)

- 1 Isgur N, Karl G. Phys. Lett., 1977, **B72**:109; Phys. Rev., 1979, **D19**:2653; DONG YuBing, YU YouWen. High Energy Phys. and Nucl. Phys., (in Chinese) 1993, **17**:191
(董宇兵, 余友文. 高能物理与核物理, 1993, **17**:191)
- 2 Tegen R, Brockmann R, Weise W. Z. Phys., 1982, **A307**, 339
- 3 Peilerls R E, Yoccoz J. Proc. Phys. Soc., 1957, **70**:381
- 4 Theberge S, Thomas A W. Nucl. Phys., 1983, **A393**:252
- 5 Kopecki S et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**:2427
- 6 Höhler G et al. Nucl. Phys., 1976, **B114**:505
- 7 Walker R C et al. Phys. Rev., 1974, **D49**:5671
- 8 Bartel W et al. Nucl. Phys., 1973, **B58**:429
- 9 Platchkov S et al. Nucl. Phys., 1990, **A510**:740
- 10 Eden T et al. Phys. Rev., 1994, **C50**:1749
- 11 Meyerhoff M et al. Phys. Lett., 1994, **B327**:201
- 12 Hanson K M et al. Phys. Rev., 1973, **D8**:753
- 13 Particle Data Group, Phys. Lett., 1986, **B170**:11
- 14 Kopecki S et al. Phys. Rev. Lett., 1995, **74**:2427

Effect of Meson Cloud on Electromagnetic form Factors of Nucleon

DONG YuBing

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039, China)

Abstract A relativistic quark potential model is employed to study the electromagnetic form factors of the proton and neutron. Moreover, the pion meson cloud effect is also taken into account. The nucleon wave function is described in an extended Fock space with the intermediate states N and Δ . The result shows the important role of the meson cloud on the neutron electroic form factor.

Key words meson cloud, quark model, form factors