

质子自旋疑难及研究现状

赵玉民 陈 焱

(南京大学物理系 南京 210008)

摘 要 NMC 实验(the New European Muon Collaboration's Experiment)结果是实验向理论提出的一个很有意义的课题. 本文总结了质子自旋的唯象研究成果, 提出对质子波函数重新作动力学计算可能有助于人们加深对质子自旋的理解.

关键词 质子自旋, 夸克, 波函数, 胶子.

质子的内部结构信息, 主要来源于高能轻子对质子的深度非弹性散射, 特别是近年来发展了极化高能轻子与极化靶的散射技术, 对质子内部结构提供了更多的信息, 实验结果向理论研究提供了新的课题, 其中一个疑难被称为质子自旋危机. 本文对这个问题予以简单介绍, 并对其研究现状予以评述.

1988年, EMC 合作组^[1]采用纵向极化的 μ 子对纵向极化的质子靶作深度非弹性散射实验, 在很大范围内确定了自旋相关的结构函数 $g_1(X)$ ($X = \frac{q^2}{2M\nu}$, $0.01 \leq X \leq 0.7$, ν 为 μ 子在深度非弹散射前后在实验室系的能量转移量), 对其积分, 结果为: 0.114 ± 0.012 (统计误差) ± 0.026 (系统误差) (现在结果为 0.122 ± 0.031), 这与 Ellis-Jaffe 求和规则不一致. 这个结果与 β 衰变等结果结合在一起, 可以导出: 总的夸克自旋只占总质子自旋的很小一部分 [由简单估算可以得出, 假定奇异夸克对质子自旋贡献为零, 则 u、d 夸克的自旋只占质子自旋的 $(14 \pm 9 \pm 0.21)\%$]. 若假定实验结果与 Ellis-Jaffe 求和规则的差别来源于 s 海夸克的极化, 那么 uds 夸克所携带的总自旋为质子总自旋的 $(1 \pm 12 \pm 24)\%$, 该结果后被称为质子自旋灾难 (proton spin crisis). 该实验被称为新 EMC 效应或简称 NMC.

NMC 结果出现后立即引起人们的广泛

兴趣, 特别是近一两年, 质子自旋研究方面富有启发性的成果累累^[2,3,4], 人们现在开始相信质子内部包括海夸克在内的夸克总自旋确实仅贡献质子总自旋的很小一部份, 价夸克被 $q\bar{q}$ 云和胶子云所包围, 绝大部分角动量则由夸克反夸克对 ($q\bar{q}$) 的轨道运动或胶子云携带, 整个质子有点象 J. J. 汤姆逊的葡萄干面包模型所描绘的那样. 人们还认为, 假定质子内部具有 SU(3) flavor 对称性是不合理的^[2,4].

关于质子自旋的研究, 目前尚处于唯象或定性的阶段. 如有人在非相对论组分夸克模型框架内考虑质子内部有一对 $q\bar{q}$ 存在, 如果假定 $3q$ 部分的波函数取对称夸克模型中的重子八重态的波函数, 则夸克对只能构成 $J^{PC} = 0^{++}, 1^{++}$ 的对 (J 包括轨道角动量), 用价夸克与 $q\bar{q}$ 一起构造总角动量为 $1/2$ 的波函数, 然后从 NMC 的 β 衰变的实验数据反推以确定质子波函数中各组态的份额^[2]; 再如有人从 QCD 反常 (anomaly) 探讨 $q\bar{q}$ 所带的角动量份额可能很大^[3]; 还有人分析质子内的 $s\bar{s}$ 的份额及其对质自旋的影响 (分析结果认为 $s\bar{s}$ 在质子内的份额很小), 另外胶子 $g \rightarrow q\bar{q}$ 的过程对海夸克产生的有效附加部分也是很小的, 如有人认为 $1.06\Delta G_z + L_z = 0.43 \pm 0.11$ ^[4] (这里的 ΔG_z 和 L_z 分别代表净的胶子自旋对 Z 轴分量的贡献和夸克胶子的轨道角动量在 Z 轴的分量).

在质子自旋研究方面, 还没有专门的动

力学计算的定量结果. 考虑 $q\bar{q}$ 存在的质子波函数可以表示为(这里假定质子内部存在 ud 夸克 $SU(2)$ 对称性):

$$\psi = C_0 \Phi_0 + \sum_{\alpha} C_{\alpha} \Phi_{\alpha} \quad (\alpha=1, 2, \dots, 24) \quad (1)$$

式中 $\Phi_{\alpha} = iN_{\alpha\alpha}^{-1/2} \mathcal{A}^1 \{ \chi_{op}^{\text{ho}}(\vec{r}) [\psi_{S_1 T_1(\lambda\lambda)}(3q) \cdot \psi_{S_2 T_2(\lambda\lambda)}(q\bar{q})]_{S_{12} T(00)} \}_{S M_S}$, \mathcal{A}^1 为反对称算符(相对于第四夸克即 $q\bar{q}$ 集团中的 q 而言), $\mathcal{A}^1 = 1/2(1 - P_{14} - P_{24} - P_{34})$, P 为夸克交换算符. $(\lambda\lambda) = (11)$ 时 $3q$ 和 $q\bar{q}$ 两集团都为色八重态, 但是它们耦合为色单态, $(\lambda\lambda) = (00)$ 时两者都为色单态, S, T 分别为自旋、同位旋, $N_{\alpha\alpha}^{-1/2}$ 为归一化系数. 在(1)中假定 $3q$ 和 $q\bar{q}$ 集团内部运动都为谐振子 $0s$ 态, 而集团间的相对运动为谐振子 $0p$ 态.

80 年代, Fujiwara & Hecht 计算 NN 作用^[5]时, 曾经采用过(1)式作波函数的展开基底, 采用当时的作用势, 他们的计算结果是, Φ_0 在 ψ 中占很大的份额($\approx 73\%$), 而唯象的分析表明, Φ_0 在质子总的波函数中, 所占成分相当小($\approx 5\%$). 两者不一致.

对低能核现象, 理论框架中不考虑胶子自由度, 假定胶子交换效应可以通过胶子交换势来考虑, 而获得囚禁通常使用一个简单

的囚禁势, 它是手放进去的. 近年来, $q-q$ 单胶子交换相互作用势的研究有了一些新的进展, 此外其它相互作用的认识也日益加深^[6]. 不久前作者编写了以(1)式为波函数组态空间的哈密顿量矩阵元数值计算程序, 采用新的相互作用势, 对质子波函数进行更细致的计算, 取得一定进展后, 再考虑胶子自由度和轨道激发等, 尝试给出能解释 NMC 实验结果的波函数.

感谢王凡教授的指教.

参 考 文 献

- 1 Ashman J, et al. Phys. Lett., 1988, B206: 364
Nucl. Phys., 1989, B328: 1
- 2 Lipkin H J. Phys. Lett., 1991, B256: 284 Jaffe R L, Lipkin H J. Phys. Lett., 1991, B266: 458
- 3 Fritzsche H. Phys. Lett., 1991, B256: 75
- 4 Dziembowski Z, Franklin J. J. Phys., 1991, G17: 213
Dosch H G, Narisians S. Phys. Lett., 1991, B256: 515
Gluck M, Reya E. Phys. Lett., 1991, B270: 65
Bagchi B, Basu S. Phys. Lett., 1991, B268: 112
- 5 Fujiwara Y, Hecht K T. Nucl. Phys., 1985, A444: 541
- 6 Su Juncheng, et al. Nucl. Phys., 1991, A524: 615

Open Problem on Proton Spin and Present Status of Its Study

Zhao Yumin Chen Yan

(Department of Physics, Nanjing University 210008)

Abstract The problem on proton spin and its study, which are interest fields are introduced briefly, the achievements in the past few years reviewed here. The dynamical calculation for this problem and its prospect are also mentioned.

Key Words proton spin, quark, wavefunction, gluon.

广东大亚湾核电站获世界发电站大奖

[本刊讯] 由美国权威杂志《国际电力》举办的世界各国发电站评选中, 广东大亚湾核电站荣获 1994 年度发电站大奖, 并且是获奖的 5 座发电站中唯一的核电站. 核电站的二

台 90 万 kW 压水堆核电机组, 至 1994 年底上网电量已达 107.8 亿 kW 时, 并提前 29 天完成全年上网 100 亿 kW 时的计划.