

文章编号: 1007-4627(2004)02-0093-03

夸克的横向性分布与核子张量荷*

何汉新

(中国原子能科学研究院, 北京 102413)

(中国科学院理论物理研究所, 北京 100080)

摘要: 夸克的横向性分布的一次矩定义了核子张量荷. 核子张量荷也可用张量流算符在核子态的矩阵元定义, 由此用量子色动力学求和规则、有效理论和模型计算了核子张量荷. 对研究核子性质及强子物理的自洽非微扰途径问题也作了简要讨论.

关键词: 横向性分布; 核子张量荷; 量子色动力学求和规则; 非微扰途径

中图分类号: O572.34 **文献标识码:** A

1 引言

应用量子色动力学(QCD)揭示核子的性质及其夸克胶子结构是当代强子物理和核物理研究中的一个基本课题, 对理解物质的夸克结构和低能 QCD 具有重要意义. 核子性质和结构研究的最主要任务就是要揭示核子的基本性质如质量、自旋、轴荷等的起源, 特别是揭示核子的新的基本特性, 核子的张量荷就是在核物理中长期未被认识的核子的一个新基本性质.

现在已清楚, 完备的夸克部分子分布在领头阶包含 3 个分布函数——自旋平均分布函数 $f_1(x)$ 、螺旋性分布函数 $g_1(x)$ 及横向性分布函数 $h_1(x)$ ^[1]. 这些分布函数的一次矩定义了相应的荷, 它们分别是重子荷、轴荷和张量荷. 分布 $f_1(x)$ 和 $g_1(x)$ 是手征性偶的, 可以通过深度非弹的轻子-核子散射(DIS)进行测量. 在过去的 10 多年中, 人们对分布 $g_1(x)$ 进行了大量深入的实验和理论研究, 使我们对核子的自旋结构已有了相当深入的理解. 现已知道, 夸克自旋仅贡献核子自旋的 30% 左右^[2]. 核子自旋的其余部分来自夸克的轨道角动量和胶子的角动量, 对它们的实验测量仍在进行中. 分布 $h_1(x)$ 是手征性奇的, 因而不能在领头阶 DIS 过程测量到. 研究表明, 可通过测量横向极化的 Drell-Yan 过程^[1]、半内含 DIS 过程的单个自旋的不对称性、质子-质子碰撞末态介子的相干碎裂过程^[3] 等得到

分布 $h_1(x)$. 这些实验正在 RIAC 和 HERA 等开展或计划中, 但今还没有 $h_1(x)$ 和张量荷的测量值, 因此, 当前对横向性分布和张量荷的理论研究十分重要. 核子的张量荷可能是最后一个要研究的核子的基本性质.

2 夸克的横向性分布与核子的张量荷

横向性分布测量横向极化的核子内具有和核子极化平行极化的夸克数与和核子极化反平行极化的夸克数之差

$$h_1(x) = \frac{1}{2} \sum e_f^2 [\delta q_f(x) + \delta \bar{q}_f(x)]. \quad (1)$$

这里 $\delta q_f(x)$ 是 f 味($f=u, d, s$)的横向性部分子分布函数

$$\delta q_f(x) = q_f^\uparrow(x) - q_f^\downarrow(x), \quad (2)$$

$q_f^\uparrow(x)$ ($q_f^\downarrow(x)$) 表示极化为 \uparrow (\downarrow) 的夸克密度, 其中 \uparrow (\downarrow) 指夸克的自旋平行(反平行)于核子的横向极化.

横向性分布函数 $\delta q_f(x)$ 不能由 QCD 直接计算得到. 我们只能计算 $\delta q_f(x)$ 随动量变化的 QCD 演化, 以及用一些 QCD 基础的模型对 $\delta q_f(x)$ 作估算. $\delta q_f(x, Q^2)$ 的 QCD 演化由 Altarelli-Parisi 方程描写. 由于横向性分布的手征性奇的特性, 胶子不参

收稿日期: 2004 - 03 - 11

* 基金项目: 国家自然科学基金资助项目(10075081, 90303006)

作者简介: 何汉新(1941-), 男(汉族), 江苏武进人, 研究员, 从事强子物理的 QCD 研究及规范场的对称性与非微扰场论途径的研究.

与 $\delta q_f(x, Q^2)$ 的演化. 这导致 $\delta q_f(x, Q^2)$ 与纵向极化的分布函数 $\Delta q_f(x, Q^2)$ 有不同的 Q^2 演化行为.

$\delta q_f(x, Q^2)$ 的一次矩联系了核子的张量荷 $\delta q_f(Q^2)$. 核子的张量荷同样可用张量流算符在核子态的矩阵元定义^[4, 5]:

$$\langle PS | \bar{q}_f \sigma^{\mu\nu} q_f | \zeta^2 | PS \rangle = \delta q(Q^2) \bar{U}(P, S) \sigma^{\mu\nu} U(P, S), \quad (3)$$

这里 P 和 S 分别是核子的 4 动量和极化矢量, $U(P, S)$ 为核子的 Dirac 算符. 利用张量荷的矩阵元定义, 我们就可以利用不同的途径和模型计算核子的张量荷.

QCD 求和规则途径是估算低能标度下核子性质十分有效的途径. 我们用 QCD 求和规则的三点关联函数途径^[4] 和外场下的二点关联函数途径^[5] 计算了核子的张量荷. 在后一途径中, 首先研究由夸克构成的核子流在存在外张量场 $Z_{\mu\nu}$ 情况下的 QCD 真空中的传播, 然后计算关联函数 $\Pi(Z_{\mu\nu}, P)$ (至比例于 $Z_{\mu\nu}$ 的线性项). 另一方面, 我们可以应用色散关系在强子图像中给出关联函数, 引入核子的张量荷参量. 根据理论的“双重性”原理假设, 令这两种关联函数的描述(在某动量转移区)等价, 由此可得到用 QCD 参量(夸克质量、QCD 耦合和表示非微扰效应的真空凝聚)表示核子张量荷的关系. 在核子质量标度, 我们得到了质子张量荷的简单公式

$$\delta u = -\frac{4(2\pi)^2 \langle \bar{q}q \rangle}{m_N^3} \left(1 - \frac{9m_0^2}{16m_N^2} \right), \quad \delta d = \frac{\langle g_c^2 G^2 \rangle}{36m_N^4}, \quad (4)$$

这里 δu 和 δd 分别为 u 和 d 夸克对质子张量荷的贡献, $\langle \bar{q}q \rangle$ 和 $\langle g_c^2 G^2 \rangle$ 分别为夸克凝聚和胶子凝聚,

$$m_0^2 = -\frac{\langle \bar{q}g_c \sigma \cdot Gq \rangle}{\langle \bar{q}q \rangle},$$

m_N 为核子质量. 利用标准的凝聚值, 可以得到 $\delta u = 1.29$, $\delta d = 0.02$.

为了从所计算的 QCD 求和规则途径导出更为精确的张量荷值, 我们需要更为完整的求和规则计算, 其中要计算 QCD 真空张量磁化率——表示 QCD 真空对外张量场响应的一类新的凝聚 χ , κ 和 ζ , 它们可以用不同的模型来估算. 在包含了 χ 项贡献后的求和规则计算得到的 δu 和 δd 与简单公式给

出的结果相差不大. 主要的问题是仍得不到稳定解, 暗示着可能在计算途径中丢失了某些物理因素, 例如瞬子物理, 它们可能导致解的稳定, 从而改善理论预言.

在非相对论夸克模型中, 张量荷与轴荷的大小相同: $\delta u_{NR} = \Delta u_{NR} = 4/3$, $\delta d_{NR} = \Delta d_{NR} = -1/3$, $\delta s_{NR} = \Delta s_{NR} = 0$. 这可从矩阵元定义容易理解, 因为张量流算符与轴矢流算符仅相差因子 γ_0 , 而在非相对论极限, γ_0 约化为 1. 相对论导致 δq 和 Δq 偏离于 Δq_{NR} . 由此, 对 δq 和 Δq 的理论研究和实验测量将提供夸克在核子内的相对论特性及对 Δq 的海夸克效应的信息.

核子的张量荷也可用等价于低能 QCD 的有效理论进行计算. 首先我们讨论 QCD 有效理论中核子自旋的求和规则. 利用函数积分技术形式上可积分掉胶子场, 得到 QCD 有效拉氏量, 它等价于一有效夸克理论. 进而, 从有效拉氏量可导出角动量密度, 由此可定义有效 QCD 理论的角动量算符^[6]

$$J_{\text{eff}} = J_{\text{quark}} + J_{\bar{q}\bar{q}}. \quad (5)$$

这里 J_{quark} 是夸克贡献的角动量, 它与 J_{QCD} 中的相应表示式相同. $J_{\bar{q}\bar{q}}$ 的具体表示式反映了所有夸克-反夸克对的角动量之和的贡献, 它等价于 J_{QCD} 中胶子的角动量贡献. 公式(5)在核子态的期望值给出了有效 QCD 理论中核子自旋的求和规则.

根据这一图像, 我们可以用相对论夸克模型——QCD 在大 N_c 极限下的有效模型来估算核子的轴荷和张量荷, 它们可表示为

$$\delta q_q = \langle M_T \rangle \delta q_{NR}, \quad \Delta q_q = \langle M_A \rangle \Delta q_{NR}, \quad (6)$$

其中

$$M_T = \frac{2}{3} + \frac{m}{3E}, \quad M_A = \frac{1}{3} + \frac{2m}{3E}, \quad (7)$$

这里 $m = m_{cu} + m_{dy}$ 为组分夸克质量, $m_{dy} \approx (g_s^2 | \langle \bar{q}q \rangle | \frac{1}{3})^{1/3}$ 为 $q\bar{q}$ 对生成的动力学质量^[7, 8]. 从公

式(6)和(7)可看到, δq_q 和 Δq_q 可分为两部分——价流夸克和夸克-反夸克对(海)的贡献. 利用同位旋矢量轴荷的实验值 $g_A^{(\nu)} = \Delta u - \Delta d = 1.257$ 定出参量 $\langle m/E \rangle = 0.63$, 由公式(6)和(7)可得到

$$\delta u_\nu = 0.89, \quad \delta d_\nu = -0.22, \quad \delta s_\nu = 0, \quad \delta \Sigma_\nu = 0.67. \quad (8)$$

这一结果与格点 QCD 的计算结果十分吻合^[9]. 公

式(8)的结果可理解为: 张量荷主要来自价流夸克的贡献, 这与张量荷的物理含义相一致.

3 对称性与研究强子物理的自治非微扰途径

在研究低能标度核子的性质和其它强子物理时, 需要发展自治的非微扰途径. Dyson-Schwinger 方程(DSE)是一个合适的途径, 但必须找到一个合适的方法截断无穷系列的方程组. 如果能将顶角函数表示为传播子的函数, 则可构成对传播子为封闭的 DSE, 从而可实际求解. 最简单的方法是利用裸顶角近似, 但这破坏了规范不变的结果——Ward-

Takahashi(WT)关系.

近年来, 我们提出了一个基本途径——找到完备的 WT 关系导出顶角函数. 实际上, 保持理论的规范不变性的基本办法只能是利用 WT 关系. 由于通常的 WT 恒等式仅约束顶角的纵向分量, 为此我们研究了约束顶角横向分量的横向 WT 关系^[10]. 组合通常的纵向 WT 关系与横向 WT 关系, 得到了对顶角的完备组 WT 约束关系, 由此导出了完全的顶角函数^[11]. 将这一顶角函数代入 DSE, 则在阿贝尔情况构成了对传播子封闭的 DSE, 从而可用于讨论强子物理问题. 对非阿贝尔 QCD 情况有待作进一步的研究.

参 考 文 献:

- [1] Jaffe R L, Ji X. *Phys Rev Lett*, 1991, **67**: 552.
 [2] Adams D, Adeva B, Arik E, *et al* (Spin Muon Collaboration). *Phys Rev*, 1997, **D56**: 5 330.
 [3] Jaffe R L, Jin X M, Tang J. *Phys Rev Lett*, 1998, **80**: 1 166.
 [4] He H X, Ji X. *Phys Rev*, 1995, **D52**: 2 960.
 [5] He H X, Ji X. *Phys Rev*, 1996, **D54**: 6 897.
 [6] He H X. *Inter J of Mod Phys*, 2003, **A18**: 1 289.
 [7] He H X. *Z Phys*, 1996, **C69**: 287.
 [8] 何汉新. *原子核物理评论*, 2000, **17**(1): 22.
 [9] Aoki S, Doui M, Hatsuda T, *et al*. *Phys Rev*, 1997, **D56**: 433.
 [10] He H X, Khanna F C, Takahashi Y. *Phys Lett*, 2000, **B480**: 222.
 [11] He H X. *Phys Rev*, 2001, **C63**: 025207-1.

Quark Transversity Distribution and Nucleon's Tensor Charge*

HE Han-xin

(*China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China*)

(*Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100080, China*)

Abstract: The first moment of quark transversity distribution defines the tensor charge of nucleon. The tensor charge of nucleon can also be defined as the forward matrix element of the tensor current in the nucleon state, which is used to study the nucleon's tensor charge in terms of quantum color dynamics(QCD) sum rule approach, the effective theory and model. A consistent nonperturbative approach to study nucleon property and hadronic physics is also discussed.

Key words: transversity distribution; nucleon's tensor charge; quantum color dynamics sum rules; non-perturbative approach

* Foundation item, National Natural Science Foundation of China(10075081, 903006)