

小动量转移区高扭曲效应对核子 自旋结构函数的影响*

董宇兵

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

摘要 利用夸克模型计算了核子的自旋相关结构函数随 Q^2 的依赖关系. 在小动量转移区研究高扭曲效应 $a_2(Q^2), d_2(Q^2)$ 对结构函数的影响. 计算结果和其它的一些模型理论计算做了比较.

关键词 夸克模型 高扭曲效应 自旋结构函数

实验上关于核子自旋相关结构函数 $g_1^p(x, Q^2)$ 和 $g_2^p(x, Q^2)$ 的研究对了解核子的复杂结构是非常重要的. EMC^[1], SMC^[2] 以及 SLAC^[3] 已经在深度非弹区进行了大量的实验研究. 同时人们也注意到在小动量转移区, 有关 $g_1^{(p,d)}(x, Q^2)$ 的实验使我们能够检验 Gerasimov-Drell-Hearn(GDH)求和规则^[4], 并给出有关共振态性质的大量信息. 因此这方面的研究也是非常吸引人的. 实验上要想严格地确定自旋相关结构函数 $g_1(x, Q^2)$ 和 $g_2(x, Q^2)$, 需要同时测量不对称性 A_L 和 A_T ^[5]

$$A_L = \frac{\sigma_{\uparrow\uparrow} - \sigma_{\uparrow\downarrow}}{\sigma_{\uparrow\uparrow} + \sigma_{\uparrow\downarrow}}, \quad A_T = \frac{\sigma_{\downarrow-} - \sigma_{\uparrow-}}{\sigma_{\downarrow-} + \sigma_{\uparrow-}}, \quad (1)$$

其中 A_L 是纵向极化电子与纵向极化核子散射的不对称性, 而 A_T 则是纵向极化电子与横向极化核子散射的不对称性. (1)式中的截面是微分散射截面.

实验上有关共振区核子的自旋结构函数的测量正在 Jefferson 实验室^[6], MAMI^[7] 以及 Spring-8^[8] 等电子, 光子实验装置上进行. 1997 年 SLAC 的 E143 组^[9] 第一次给出了小动量转移区共振态对核子所贡献的自旋结构函数的实验数据. 它也是对 GDH 求和规则的最初次检验. 近几年来, E155 也在这方面作了一定的观测和数据分析^[10]. HERMES 组^[11] 则测量了小动量转移区非共振态的影响. 可以乐观地估计在不久的将来 Jefferson 实验室会给出品质更好的有关数据.

理论上已有许多模型被用来预言共振区核子的自旋结构函数的行为. 如 MAMI 的么正模型^[12], 等效拉氏量模型^[13], 非相对论夸克模型^[14], 相对论四维谐振子模型^[15] 以及

2000-07-24 收稿

* 国家自然科学基金资助

经验模型等等^[16]. 在非相对论夸克模型中,核子的自旋结构函数,实光子在核子上的吸收截面以及一些共振态的性质都可以同时得到很好的描述. 因此,本文将利用这个模型来计算核子自旋结构函数的求和规则,特别是一些高扭曲效应对结构函数的影响.

为了进行定量的计算,首先利用非相对论组分夸克模型来计算核子共振态的光及电子产生振幅,进一步来计算光吸收截面 $\sigma_{1/2}, \sigma_{3/2}$ 以及 σ_{TS} . 为了考虑共振态的影响,唯象地引用 Breit-Wigner 假设来描述共振态的传播性质^[17]. 在此基础上,核子的自旋结构函数可表示为^[18]:

$$g_1(x, Q^2) = \frac{MK}{8\alpha\pi^2(1+Q^2/\omega^2)} [\sigma_{1/2}(\omega, Q^2) - \sigma_{3/2}(\omega, Q^2) + 2Q\sigma_{TS}(\omega, Q^2)/\omega], \quad (2)$$

和

$$g_2(x, Q^2) = \frac{MK}{8\alpha\pi^2(1+Q^2/\omega^2)} [\sigma_{3/2}(\omega, Q^2) - \sigma_{1/2}(\omega, Q^2) + 2\omega\sigma_{TS}(\omega, Q^2)/Q], \quad (3)$$

其中 M 是核子的质量, $\alpha = 1/137$, ω 是光子的人射能量, $x = Q^2/2M\omega$, K 是入射光子的流, $K = (W^2 - M^2)/2M$ ^[19] (W 是总的质心能量), $-Q^2$ 是光子四维动量转移的平方. 有关光子的吸收截面的计算请参看文献[14]. 计算中,为简单起见,只考虑 5 个共振态的作用. 这 5 个共振态分别是 $P_{33}(1232)$, $P_{11}(1440)$, $S_{11}(1535)$, $D_{13}(1520)$ 和 $F_{15}(1650)$. 它们是具有较大的光子和电子产生振幅的. 同时,在计算中,体系的质心 W 也限制在 2GeV 以下. 另外,还在这些共振态的非弹性散射贡献的基础上,考虑了小 x 区非共振态的作用. 利用 SLAC^[20] 所给出的关于 $g_1^p(x, Q^2)$ 和 $g_1^d(x, Q^2)$ 的参数化形式来引入这些非共振态的效应. 这样,核子自旋结构函数的求和规则为

$$I_{1,2}(Q^2) = 2M^2/Q^2 \int_0^1 g_{1,2}(x, Q^2) dx = 2M^2/Q^2 \Gamma_{1,2}(Q^2), \quad (4)$$

在极限 $Q^2 \rightarrow 0$ 情况下,有关于 g_1 的非弹性散射区的 GDH 求和规则和关于 g_2 的 Burkhardt-Cottingham(B-C)求和规则^[21]

$$I_1(0) = -\kappa^2/4; \quad I_2(0) = (\kappa^2 + \kappa e_T)/4, \quad (5)$$

其中 κ 是核子的反常磁矩, e_T 是体系的总能量.

表 1 给出了在 $Q^2 = 0.5\text{GeV}^2$ 和 $Q^2 = 1.2\text{GeV}^2$ 下的求和规则 $\Gamma_1(Q^2)$. 表中结果是分别对质子和中子靶而列. E143 组的实验数据(包括系统误差和统计误差)也列于表中. 下角标“res”和“tot”分别代表共振态的非弹性散射的贡献 ($W^2 < 4\text{GeV}^2$), 和共振态与非共振态的总的贡献.

表 1 $Q^2 = 0.5\text{GeV}^2$ 和 1.2GeV^2 时求和规则 $\Gamma_1(Q^2)$

Q^2/GeV^2		$\Gamma_{\text{res}}(\text{Theor.})$	$\Gamma_{\text{res}}(\pm \text{stat.} \pm \text{syst.})$	$\Gamma_{\text{tot}}(\text{Theor.})$	$\Gamma_{\text{tot}}(\pm \text{stat.} \pm \text{syst.})$
0.5	p	0.0213	$0.026 \pm 0.008 \pm 0.008$	0.0371	$0.049 \pm 0.008 \pm 0.013$
0.5	n	-0.0324		-0.0442	$-0.043 \pm 0.029 \pm 0.025$
1.2	p	0.0340	$0.040 \pm 0.003 \pm 0.004$	0.0744	$0.100 \pm 0.005 \pm 0.012$
1.2	n	-0.00523		-0.0240	$-0.006 \pm 0.019 \pm 0.020$

目前为止,我们对小动量转移区以及小 x 区由非共振态对 $g_2(x, Q^2)$ 所提供的贡献

并不了解. 实际上干涉截面 σ_{TS} 对 B-C 求和规则的作用是非常重要的, 特别是在实光子极限下. 在本计算工作中, 假设非共振态对 g_2 贡献的大小与其对 g_1 的贡献的大小是数值相同, 符号相反. 显然, 在此假定之下, 由于方程(2)和(3)的不同因子 $2Q/\omega$ 和 $2\omega/Q$, 干涉截面对 g_2 的影响明显地被压低了. 这一点也说明了干涉截面对 g_1 的作用和对 g_2 的作用是不同的, 特别是在小动量转移区. 其对 g_1 的影响在实光子的极限下为零. 另外, 从表 1 的实验数据中也可以看出即使在小动量转移区, 非共振态的本底影响也应考虑. 图 1(a) 给出了质子的自旋结构函数, (b) 给出中子的自旋结构函数. 图中的实验数据则来源于 E143 组的结果^[9]. 其中总误差是系统误差之平方与统计误差的平方和的平方根. 由图可以看出结果与目前现有的实验数据定性相符.

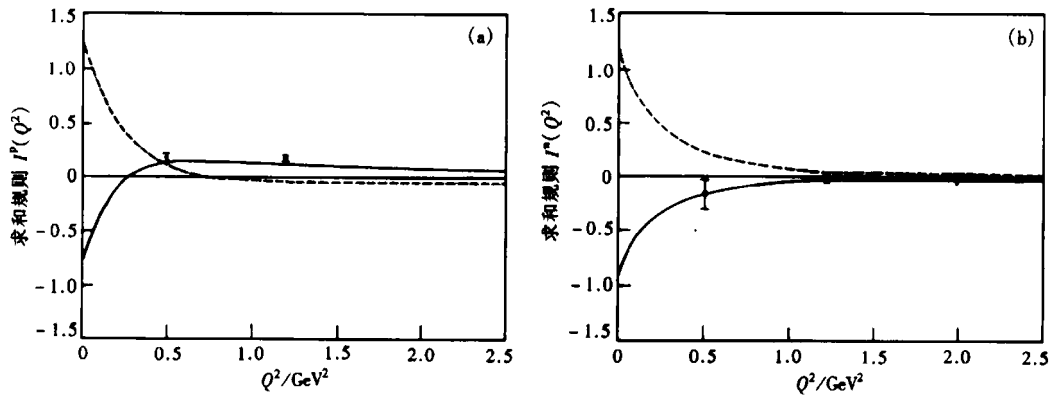


图 1 自旋结构函数

— $I_1(Q^2)$, --- $I_2(Q^2)$.

利用以下公式来计算高扭曲效应, $a_2(Q^2)$ (扭曲-2) 和 $d_2(Q^2)$ (扭曲-3)^[22]

$$a_2(Q^2) = \int_0^1 x^2 g_1(x, Q^2) dx, \quad d_2(Q^2) = \int_0^1 x^2 [2g_1(x, Q^2) + 3g_2(x, Q^2)] dx. \quad (6)$$

值得指出的是在利用(6)式的计算中文献[22]所提到的弹性散射的贡献也要加入进来. 图 2 和图 3 分别给出了对 $a_2(Q^2)$ 和 $d_2(Q^2)$ 的计算结果, 动量转移在一定的范围内, $0.3\text{GeV}^2 < Q^2 < 2.5\text{GeV}^2$.

目前我们对高扭曲效应的了解还很缺乏. 计算中发现在 $Q^2 = 0.5\text{GeV}^2$ 时, $d_2^p = -0.0092$, $a_2^p = -0.0022$. 这两个结果是与其它的理论计算^[23-25] 相一致的, 也与格点规范的计算结果^[26] 相符合. 我们还发现在 Q^2 大于 1GeV^2 以后, $a_2(Q^2)$ 和 $d_2(Q^2)$ 是近乎与 Q^2 无关. 而在 Q^2 小于 0.5GeV^2 的范围内 $d_2(Q^2)$ 随 Q^2 有较强的演化趋势. 另外还注意到, 在 $a_2^p(Q^2)$ 和 $a_2^n(Q^2)$ 之间, 以及 $d_2^p(Q^2)$ 和 $d_2^n(Q^2)$ 之间都有较大的同味旋依赖关系. 这一现象与 QCD 求和规则的计算结果相一致^[25]. 实际上我们的理论框架在同时考虑了共振态和非共振态本底贡献以后, 可以给出关于核子自旋结构函数求和规则 Γ_1 的合理描述. 但对 Γ_2 的计算要利用假定来确定非共振态本底的作用, 特别在小动量转移

区. 当然,目前的假定有许多局限性. 可以预计对 B-C 求和规则研究的深入,会改进我们对这些本底的认识的.

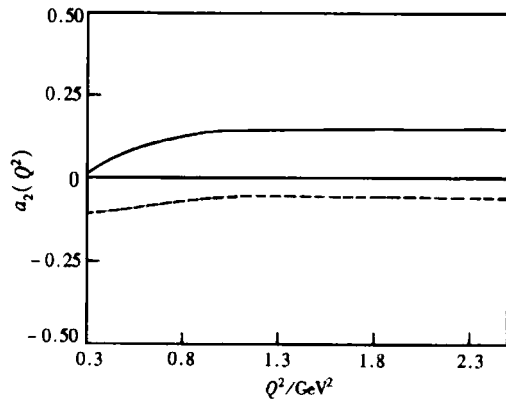


图 2

—质子, ---中子.

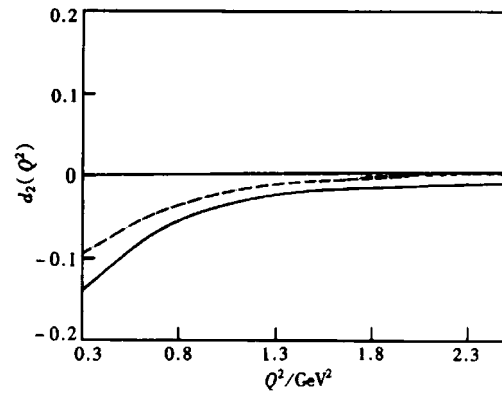


图 3

—质子, ---中子.

总之,基于非相对论组分夸克模型之上合理地计算了求和规则 $\Gamma_1(Q^2)$. 关于高扭曲效应项 $a_2(Q^2)$ 和 $d_2(Q^2)$ 的计算也与其它的理论计算相一致. 当然我们的结果也依赖于对非共振态本底的认识,特别是对干涉截面贡献的了解. 共振区内 $d_2(Q^2)$ 随 Q^2 的明显变化表明了共振态的重要贡献. 关于干涉截面的认识说明,要想确定共振区核子的自旋结构函数 $g_1(x, Q^2)$ 和 $g_2(x, Q^2)$, 同时测量 A_T 和 A_L 是非常必要的.

参考文献 (References)

- 1 Asham J et al. Phys. Lett., 1988, **B206**:364; Nucl. Phys., 1989, **B328**:1; Baum G et al. Phys. Rev. Lett., 1990, **45**:2000
- 2 Aderal et al (Spin Muon Collaboration). Phys. Lett., 1993, **B302**:533; Adams D et al. Phys. Lett., 1994, **B329**:399
- 3 Anthony P L et al (E142 Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1993, **71**:959; Abe K et al (E143 Collaboration). Phys. Lett., 1995, **B364**:61
- 4 Gerasimov S B. Sov. J. Nucl. Phys., 1966, **2**:430; Drell S, Hearn A C. Phys. Rev. Lett., 1966, **16**:908
- 5 Anselmino M, Efremov A, Leader E. Phys. Rept., 1996, **261**:1; Stiegler V Ulrich. Phys. Rept., 1996, **277**:1
- 6 Burkert V D, Ioffe B L. CEBAF-PR-93-034; Burkert V. Nucleon Resonances and Nuclear Structure, Edited by Miller G (World Scientific, 1993, Singapore)
- 7 Ahrens J. Mainz Proposal, 1993, 12/2-93
- 8 Iwata T. Personal Communication
- 9 Abe K et al (E143 Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1997, **78**:815
- 10 Anthony A L et al (E155 Collaboration). Phys. Lett., 1999, **B458**:529
- 11 Ackerstaff et al (Hermes Collaboration). Phys. Lett., 1997, **B404**:383; 1998, **B444**:531
- 12 Dreschel D, Kamalov S S, Krein G et al. Phys. Rev., 1999, **D59**:094021
- 13 Scholten O, Kurchin A Yu. Eur. Phys. J., 1999, **A6**:211
- 14 LI Z P, DONG Y B. Phys. Rev., 1996, **D54**:4301; DONG Y B. Phys. Lett., 1997, **B408**:393; Phys. Lett., 1998, **B418**:365

- 15 DONG Y B, Morii T. Phys. Rev. , 1997, **D56**:143
- 16 Anselmino M, Ioffe B L, Leader E. Yad. Fiz. , 1989, **49**:214; Burkert V, Ioffe B L. Phys. Lett. , 1992, **B296**:223; Soffer J, Teryaev O V. Phys. Rev. , 1997, **D56**:7458
- 17 Walker R L. Phys. Rev. , 1969, **182**: 1729; Effenberger M et al. Nucl. Phys. , 1997, **A614**:501
- 18 Ioffe A L et al. Hard Processes, North-Holland, New York, 1984
- 19 Drechsel D et al (Mainz Collaboration). Phys. Rev. , 1999, **D59**:094021
- 20 Abe K et al (E143 Collaboration). Phys. Lett. , 1995, **B364**:61
- 21 Burkhardt H, Cottingham W N. Ann. Phys. , 1970, **56**:543
- 22 Ji X et al. Phys. Lett. , 1993, **B309**:187; Phys. Lett. , 1994, **B353**:228
- 23 Stein E et al. Phys. Lett. 1995, **B343**:369
- 24 Balitsky I, Braun V, Kolesnichenko A. Phys. Lett. , 1990, **B242**:245
- 25 Ehrnsperger B, Schafer A. Phys. Rev. , 1995, **D52**:2709
- 26 Gockeler M et al. Phys. Rev. , 1996, **D53**:2317

Higher-Twist Effects on the Nucleon Spin Structure Functions in the Small Q^2 Range

DONG Yu-Bing

(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

Abstract Based on the quark model, the Q^2 evolution of the nucleon spin structure functions in the small Q^2 region is calculated. The higher-twist effects $a_2(Q^2)$ and $d_2(Q^2)$ are investigated. Comparison with other model calculations is also proceeded.

Key words quark model, higher-twist effect, spin structure functions

Received 24 July 2000

* Supported by NSFC