

# $\pi$ NN 过程对 Gottfried 求和规则破坏的贡献\*

吴齐<sup>1</sup> 刘春秀<sup>2</sup>

1 (济南大学理学院 济南 250002)

2 (中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 指出在计算  $\pi$ NN 过程对核子结构函数的贡献时,将反冲核子视为物理核子更为合理. 对 Gottfried 求和规则破坏、对质子中海夸克分布  $\bar{u}$  和  $\bar{d}$  不对称  $\bar{u}(x) - \bar{d}(x)$  等方面的贡献给出了详细的计算,与已有实验进行比较. 结果表明  $\pi$  介子交换不是导致这一破坏以及影响核子结构函数的效应的惟一来源.

**关键词** 介子交换过程 结构函数 反冲核子

## 1 引言

高能实验中对各种求和规则的测量,能够揭示出核子内部结构精确的信息. 其中 Gottfried 求和以及核子自旋结构函数一阶矩的测量<sup>[1,2]</sup>,都明显低于原来朴素夸克模型的理论预言<sup>[3]</sup>,前者被称为 Gottfried 求和规则的破坏,引起了对核子内海夸克味道不对称<sup>[4-7]</sup>、电荷不对称<sup>[8]</sup>及奇异-反奇异不对称<sup>[9]</sup>等的讨论;后者预示着夸克自旋对质子自旋的贡献很小<sup>[2]</sup>,引发了所谓的质子“自旋危机”,激发了人们对核子自旋结构的讨论,成为目前粒子物理界十分关注的问题.

在这些问题的研究中<sup>[4-7,10]</sup>,人们发现,早在 30 年代提出的描述核子相互作用的介子交换过程<sup>[11]</sup>,不仅对轻子-核子深度非弹性散射有相当大的贡献,而且对 Gottfried 求和规则破坏以及核子自旋结构函数一阶矩远小于朴素夸克模型的预言等效应都有很重要的贡献. 那么,实验观测到的 Gottfried 求和规则破坏、核子自旋危机是否完全由  $\pi$  介子交换过程引起? 是否还有其他机制的影响? 成为人们关注的主要问题. 在研究这些效应起源时,应该首先将这一贡献计算清楚,然后才可以判断是否还有其他因素的影响. 因此,精确地计算  $\pi$  介子交换对它们的贡献就成为目前亟待解决的问题. 以往讨论中都

将  $\pi$  介子交换过程中的反冲核子看成裸核子<sup>[4-7,10]</sup>,即只考虑其价夸克,这样大大简化了计算,物理上是否合理却不清楚.

为此,首先将  $\pi$  介子交换过程中反冲核子看成裸核子,计算了  $\pi$  介子交换过程对质子海夸克的贡献,并与拟合实验得到的质子海夸克分布的参数化进行了比较,发现  $\pi$  介子对质子内海夸克分布的贡献只占一小部分,这一结果表明以往的工作<sup>[4-7,10]</sup>将介子交换过程中反冲核子看成裸核子是不合适的,而将它看成物理核子,即同时考虑价夸克和海夸克的贡献,应该更合理. 鉴于此,把介子交换过程中反冲核子视为物理核子,我们计算了  $\pi$  介子交换过程对 Gottfried 求和规则破坏、对质子中海夸克分布  $\bar{u}$  和  $\bar{d}$  不对称  $\bar{u}(x) - \bar{d}(x)$  以及对核子自旋结构函数  $g_1(x)$  的一阶矩  $\Gamma_1^p$  和  $\Gamma_1^n$ 、对核子的自旋结构函数  $g_1^p(x)$  和  $g_1^n(x)$  的贡献,并与已有实验进行比较. 结果表明,反冲核子视为物理核子不仅更合理,而且得出的结果与反冲核子视为裸核子的结果有很大差别,介子交换不是导致 Gottfried 求和规则破坏、影响核子自旋结构函数及其一阶矩的效应的惟一来源,其他因素如夸克轨道角动量等也应有相当大的贡献. 本文只给出对核子非极化结构函数的计算结果.

2002-03-28 收稿

\* 中国博士后科学基金资助

## 2 $\pi NN$ 过程对核子内反夸克分布的贡献

NMC 的测量结果<sup>[1]</sup>表明, 在  $Q^2 = 4\text{GeV}^2$  时,  $S_G^{\text{exp}} = 0.235 \pm 0.026$ , 明显低于 Gottfried 求和规则, 即  $S_G^{\text{thm}} = 1/3$ . 其中  $S_G$  是 Gottfried 求和,

$$S_G \equiv \int_0^1 \frac{dx}{x} [F_2^p(x, Q^2) - F_2^n(x, Q^2)], \quad (1)$$

其中  $F_2^p$  与  $F_2^n$  分别是质子和中子的结构函数. 按照部分子模型, 求和规则破坏揭示了核子内海夸克味道分布的不对称, 更加引发人们对强子结构、强相互作用等相关问题的探讨<sup>[4-9]</sup>.

1972 年 Sullivan<sup>[12]</sup> 首先指出核子的  $\pi$  介子云即使在深度非弹极限下对核子的结构函数也有贡献. 入射虚光子或者与  $\pi$  介子散射或者与反冲核子散射, 散射过程如图 1(a) 和 (b) 所示. 很明显反冲重子可以是核子, 也可以是  $\Delta$ , 或者是其他的重子. 与文献[6]类似, 我们也考虑  $\Delta$  的贡献. 图 1 所示过程对结构函数的贡献可表示为<sup>[4-7, 12]</sup>

$$\delta F_{2N(\Delta)}^N(x, Q^2) = \int_x^1 dy f_{\pi}^{\pi NN(\Delta)}(y) F_2^N\left(\frac{x}{y}, Q^2\right) + \int_0^{1-x} dy f_{\pi}^{\pi NN(\Delta)}(y) F_2^{\Delta}\left(\frac{x}{1-y}, Q^2\right), \quad (2)$$

式中  $\delta F_{2N}^N$  或  $\delta F_{2\Delta}^N$  分别代表反冲重子是核子或  $\Delta$  时的贡献;  $F_2^N$ ,  $F_2^N$  或  $F_2^{\Delta}$  表示  $\pi$  介子、反冲核子和反冲  $\Delta$  的结构函数. 公式(2)右边第一项是图 1(a) 的贡献, 第二项是图 1(b) 的贡献.  $y \equiv l \cdot q / p \cdot q$ , 在无穷大动量坐标系内,  $y$  可解释成  $\pi$  介子携带入射核子的动量分数, 函数  $f_{\pi}^{\pi NN(\Delta)}(y)$  (其中第一个  $N$  表示入射核子, 第二个表示反冲重子) 在无限大动量坐标系中可以解释为找到一个携带核子动量分数为  $y$  的  $\pi$  介子的几率, 它可用  $\pi NN(\Delta)$  顶角的耦合常数  $g_{\pi NN(\Delta)}$  和形状因子  $F_{\pi NN(\Delta)}(t)$  表示如下<sup>[4-6, 12]</sup>:

$$f_{\pi}^{\pi NN}(y) = 3 \frac{g_{\pi NN}^2}{16\pi^2} y \int_{t'_{\min}}^{\infty} dt \frac{t}{(t + m_{\pi}^2)^2} [F_{\pi NN}(t)]^2, \quad (3)$$

$$f_{\pi}^{\pi N\Delta}(y) = 3 \frac{g_{\pi N\Delta}^2}{16\pi^2} y \int_{t'_{\min}}^{\infty} dt \frac{t + (m_{\pi} - m_N)^2}{(t + m_{\pi}^2)^2} [F_{\pi N\Delta}(t)]^2, \quad (4)$$

其中  $t$  是  $\pi$  介子四动量平方的负值;  $t_{\min}$  和  $t'_{\min}$  分别是在反冲核子和反冲  $\Delta$  情况下,  $y$  给定时  $t$  的最小值, 分别为  $t_{\min} = m_N^2 y^2 / (1 - y)$  和  $t'_{\min} = m_{\Delta}^2 y / (1 - y)$

$- m_N^2 y$ . 其中公式(4)包含相对论近似, 即  $t$  很小.

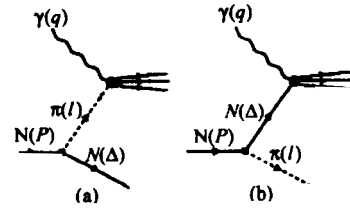


图 1 对深度非弹轻子-核子散射有贡献的包含  $\pi NN$  或  $\pi N\Delta$  顶角的过程

由公式(2), 我们得到图 1 所示过程对 Gottfried 求和规则破坏的贡献为,

$$\delta S_G \equiv \int_0^1 \frac{dx}{x} [\delta F_2^p(x) - \delta F_2^n(x)] - \frac{1}{3} S_G N_{\pi} + \frac{5}{9} \Delta_{\pi}, \quad (5)$$

其中  $N(\Delta)_{\pi} = \int_0^1 dy f_{\pi}^{\pi NN(\Delta)}(y)$  是伴随一个反冲核子 ( $\Delta$ ) 出现的  $\pi$  介子的平均数. 在公式(5)中, 用到了  $\pi^+$  和  $\pi^-$  部分子分布之间的电荷共轭对称性; 同时假定  $\Delta$  海夸克分布有味道对称性. 在这种情况下, 图 1(a) 所示过程对  $\delta S_G$  没有贡献,  $\delta S_G$  只能来自于图 1(b) 的贡献. 如果反冲核子被看成裸核子, Gottfried 求和规则有效<sup>[6]</sup>, 公式(5)右边  $S_G = 1/3$ . 因此,

$$\delta S_G = -\frac{1}{9} N_{\pi} + \frac{5}{9} \Delta_{\pi}. \quad (6)$$

要保证每个核子有 3 个价夸克, 考虑初始核子价归一化, 总的归一化因子为  $(1 + N_{\pi} + \Delta_{\pi})^{-1}$ , 于是

$$S_G = \left( \frac{1}{3} - \frac{1}{9} N_{\pi} + \frac{5}{9} \Delta_{\pi} \right) / (1 + N_{\pi} + \Delta_{\pi}), \quad (7)$$

这是文献[6]的结果. 与当时已有实验数据比较, 结果表明在实验误差范围内图 1 的贡献基本上能揭示 Gottfried 求和规则破坏. 这一结论意味着导致这一破坏的其他可能的机制几乎没有存在的空间.

根据部分子模型, 图 1(a) 所示过程对核子海中反夸克分布有贡献<sup>[12, 13]</sup>, 即

$$x \delta \bar{q}_{\pi}^{(\pi NN)}(x, Q^2) = \int_x^1 dy f_{\pi}^{\pi NN}(y) \frac{x}{y} \bar{q}_{\pi}(x/y, Q^2), \quad (8)$$

$$x \delta \bar{q}_{\pi}^{(\pi N\Delta)}(x, Q^2) = \int_x^1 dy f_{\pi}^{\pi N\Delta}(y) \frac{x}{y} \bar{q}_{\pi}(x/y, Q^2), \quad (9)$$

其中  $\bar{q}_{\pi}(x, Q^2)$  是  $\pi$  介子中反夸克的分布函数. 我们看到,  $\pi$  介子交换过程对核子内反夸克分布的贡献是找到一个携带核子动量分数  $y$  的  $\pi$  介子的几率  $f_{\pi}^{\pi NN(\Delta)}(y)$  与找到一个携带  $\pi$  介子动量分数  $x/y$  的反夸克的几率  $\bar{q}_{\pi}(x/y, Q^2)$  的卷积. 因此, 图 1(a)

对核子内海夸克味道不对称的贡献为

$$x\delta\bar{u}(x, Q^2) - x\delta\bar{d}(x, Q^2) = - \int_x^1 dy \left[ \frac{2}{3} f_{\pi}^{\pi NN}(y) - \frac{1}{3} f_{\pi}^{\pi N\Delta}(y) \right] \frac{x}{y} V_{\pi} \left( \frac{x}{y}, Q^2 \right) \quad (10)$$

其中  $V_{\pi} \left( \frac{x}{y}, Q^2 \right)$  是  $\pi$  介子中价夸克的几率分布. 显然, 如果反冲核子可视为裸核子, 即它只有 3 个价夸克, 则反夸克分布惟一来自介子的贡献. 因此, 公式 (8) 和 (9) 的结果与实验观测的结果作比较, 我们希望两者不会有很大差别. 这一比较也应该显示出反冲核子视为裸核子是否合理. 两者的比较如图 2 所示, 图中实线是公式 (8) 和 (9) 的计算结果, 其中  $\bar{q}^*$  取 GRV<sup>[14]</sup> 的参数化. 计算中, 取  $g_{\pi NN} = 13.5$ ,  $\pi N\Delta$  耦合常数由  $\Delta$  衰变宽度  $\Gamma_{\Delta}$ <sup>[12]</sup> 给出:

$$g_{\pi N\Delta} = m_{\Delta} \left[ \frac{12\pi m_{\Delta} \Gamma_{\Delta}}{|p_{\pi}|^3 (m_N + E_N)} \right]^{1/2}, \quad (11)$$

其中  $|p_{\pi}| = 227.2 \text{ MeV}$ ,  $E_N = 965.4 \text{ MeV}$ . 简单假设公式 (4) 中  $F_{\pi N\Delta}(t) = F_{\pi NN}(t)$ . 在估计  $\pi$  介子和反冲核子 (或  $\Delta$ ) 的贡献时, 采用单极化和指数化形状因子  $F_{\pi NN}(t)$ , 它们分别为

$$F_{\pi NN}^{(1)}(t) = \frac{1 - m_{\pi}^2/\Lambda^2}{1 + t/\Lambda^2}, \quad (12)$$

$$F_{\pi NN}^{(0)}(t) = \exp[-0.106 R^2 (t + m_{\pi}^2)], \quad (13)$$

其中  $\Lambda$  是单极截断参数,  $R$  是指数参数 (口袋半径).

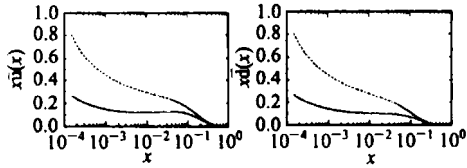


图 2  
—— 图 1 所示过程对核子海中反夸克分布  $x\bar{u}(x)$  和  $x\bar{d}(x)$  的贡献;  
----- 核子海夸克分布的 GRV 参数化<sup>[15]</sup>.

由图 2 看到, 在  $x < 0.01$  区域, 公式 (8) 和 (9) 的计算结果只占核子反夸克分布  $x\bar{u}$  和  $x\bar{d}$  的 30%—40%, 反冲核子内仍有海夸克存在. 因此简单将反冲核子看成裸核子不合适, 而看作物理核子更合理.

### 3 $\pi NN$ 过程对 Gottfried 求和规则破坏及核子海夸克味道不对称的贡献

现在来计算反冲核子为物理核子时, 图 1 所示

过程对 Gottfried 求和规则破坏以及核子海夸克味道不对称性的贡献. 在这种情况下, 公式 (5) 右边的  $S_G$  不再取 1/3 而应该用实验值<sup>[1]</sup>, 即  $S_G = 0.235$ . 详细进行数值计算之后, 图 3 给出两种不同形状因子的情况下  $S_G$  的计算结果 (实线所示). 与早期的结果<sup>[6]</sup> (虚线) 比较, 我们的结果明显偏低, 即将反冲核子看成物理核子比看成裸核子,  $\pi$  介子交换过程对 Gottfried 求和规则破坏的贡献小. 这些结果表明,  $\pi$  介子交换过程对 Gottfried 求和规则破坏有很大的贡献, 但它不是导致这一破坏的惟一来源, 其他机制的影响仍有很大的存在空间.

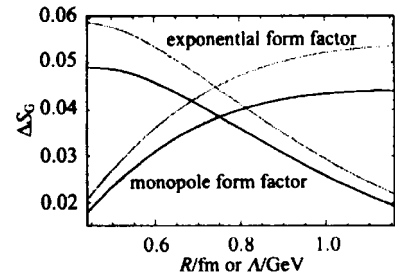


图 3 图 1 所示过程对 Gottfried 求和规则破坏 ( $\Delta S_G = 1/3 - S_G$ ) 的贡献随单极截断参数  $\Lambda$  或指数参数  $R$  的变化  
——和-----分别是反冲核子视为‘物理核子’和‘裸核子’<sup>[6]</sup>时的结果. 实验数据  $\Delta S_G = 0.098 \pm 0.026$ <sup>[1]</sup> 远大于图中的结果.

我们也类似计算了反冲核子为物理核子时, 介子交换过程对核子内海夸克味道不对称的贡献. 这时, 不仅图 1(a) 有贡献, 图 1(b) 也有贡献, 图 1 所示过程对海夸克味道不对称的总的贡献为

$$x\delta\bar{u}(x, Q^2) - x\delta\bar{d}(x, Q^2) = - \int_x^1 dy \left[ \frac{2}{3} f_{\pi}^{\pi NN}(y) - \frac{1}{3} f_{\pi}^{\pi N\Delta}(y) \right] \frac{x}{y} V_{\pi}(x, Q^2) - \int_0^{1-x} dy \frac{1}{3} f_{\pi}^{\pi NN}(y) \frac{x}{1-y} \left[ \bar{u}_p \left( \frac{x}{1-y}, Q^2 \right) - \bar{d}_p \left( \frac{x}{1-y}, Q^2 \right) \right]. \quad (14)$$

(14) 式等号右边第一项为图 1(a) 的贡献, 第二项是图 1(b) 的贡献. 与裸核子的情况比较, 多了第二项的贡献. 计算中采用指数形状因子, 截断参数取  $R = 0.6$ ,  $\pi$  介子结构函数取 GRV 的参数化<sup>[14]</sup>, 结果如图 4 所示. 我们看到, 图 1 所示过程对核子海夸克味道不对称的贡献只占参数化数据<sup>[15]</sup> 的一部分.

总之, 计算结果与已有实验比较, 表明  $\pi NN$  过程中反冲核子视为物理核子更合理; 由此得到对

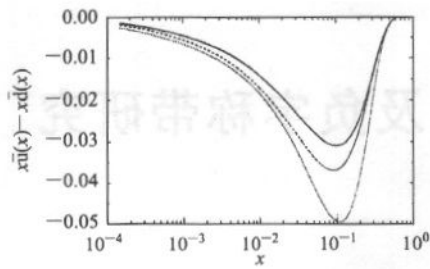


图 4 核子海中反夸克味道不对称分布  $x[\bar{u}(x) - \bar{d}(x)]$   
——和-----分别是反冲核子视为‘物理核子’和‘裸核子’时  
图 1 所示过程的贡献;.....是核子海夸克  
分布的参数化结果<sup>[15]</sup>.

Gottfried 求和规则破坏的贡献明显小于反冲核子视为裸核子时的结果,不足以完全解释 Gottfried 求和规则破坏,仍然有必要引入其他导致这一破坏的机制.很显然, $\pi$  介子交换过程对核子自旋结构函数  $g_1(x, Q^2)$  及其一阶矩  $\Gamma_1$  的贡献,在反冲核子视为物理核子或裸核子时,所得结果也有很大差别.对此我们也有计算,将在另外的文章中说明.

感谢梁作堂教授和谢去病教授以及山东大学理论物理组其他成员的有益讨论.

## 参考文献 (References)

- 1 Amaudruz P et al (NMC Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1991, **66**: 2712; Arneodo M et al (NMC Collaboration). Phys. Rev., 1994, **D50**:R1
- 2 Ashman J et al (European Muon Collaboration). Nucl. Phys., 1989 **B328**; Adams D et al (SMC Collaboration). Phys. Lett., 1994, **B329**:399; Abe K et al (E154 Collaboration). Phys. Lett., 1997, **B405**:180
- 3 Gottfried K. Phys. Rev. Lett., 1967, **18**:1174; Feynman R P. Photon Hadron Interactions New York: Benjamin, 1971
- 4 Henley E M, Miller G A. Phys. Lett., 1990, **B251**:453; Kumano S, Londergan J T. Phys. Rev., 1991, **D44**:717; Melnitchouk W, Thomas A W, Signal A I. Z. Phys., 1991, **A340**: 85; Eichten E J, Hinchliffe I, Quigg C, Phys. Rev., 1992, **D45**: 2269 Szczurek A, Speth J. Nucl. Phys., 1993, **A555**:249
- 5 Kumano S. Phys. Rev., 1991, **D43**:3067
- 6 Signal A I, Schreiber A W, Thomas A W. Mod. Phys. Lett., 1991, **A6**:271
- 7 Steffena F M, Thomas A W. Phys. Rev., 1997, **C55**:900; Ackerstaff K et al (HERMES Collaboration). Phys. Rev. Lett., 1998, **81**:5519
- 8 Boros C, Londergan J T, Thomas A W. Phys. Rev. Lett., 1998, **81**: 4075; Phys. Rev., 1999, **D59**:070421
- 9 Brodsky S J, MA Bo-Qiang, Phys. Lett., 1996, **B381**:317
- 10 Hwang W-Y P, Speth J, Brown G E. Z. Phys., 1991, **A399**:383
- 11 Machleidt R, Holinde K, Elster Ch. Phys. Rep., 1987, **149**:1
- 12 Sullivan J D. Phys. Rev., 1972, **D5**:1732
- 13 Thomas A W, Phys. Lett., 1983, **126B**:97; Frankfurt L L, Mankiewicz L, Strickman M. Z. Phys., 1989, **A334**:343
- 14 Glück M, Reya E, Vogt A. Z. Phys., 1992, **C53**:651
- 15 Glück M, Reya E, Vogt A. Z. Phys., 1995, **C67**:433

## Contribution of the $\pi$ NN Processes to Gottfried Sum Rule Violation\*

WU Qi<sup>1</sup> LIU Chun-Xiu<sup>2</sup>

1 (Science College of Ji'nan University, Ji'nan 250002, China)

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

**Abstract** It is pointed out that contribution of the  $\pi$ NN processes to the structure functions of the nucleon should be calculated by taking the recoil nucleon as a physical nucleon. The obtained result for the contribution to Gottfried sum rule violation is smaller than the corresponding result obtained earlier in literature, where Gottfried sum rule was assumed to be valid for the recoil nucleon. It leaves more space to other mechanisms leading to such violation. Some other consequences are also discussed in this paper.

**Key words** pion exchange process, structure function, recoil nucleon

Received 28 March 2002

\* Supported by Postdoctoral Science Foundation of China