

深度非弹光子结构函数计算的一种方法

陆景贤

(中国科学院高能物理研究所)

摘 要

本文利用矢量为主模型,假定 ρ^0 介子内的价夸克分布函数可以用 π^0 介子内的价夸克分布函数描述,并且利用我们已经给出的在领头对数近似下 π 介子价夸克分布函数的解析表达式^[33],加上类点分量的贡献,讨论并计算了光子结构函数的行为,和现有的实验数据进行了比较,本文的理论结果和实验符合得较好。

一、引 言

自从在深度非弹电子核子散射中实验上近似地发现 Bjorken 的 scaling 行为以来,我们认识到强子在某一运动区域是类点结构为主,这个概念很自然地推广到光子物理,自 1971 年以来有不少理论工作者对光子结构进行了探索和预言^[1-5],但由于当时实验上并没有测量到光子结构,所以研究仅仅停留在理论预言上。1981 年在德意志联邦共和国电子同步加速中心作实验的 PLUTO 小组利用电子光子深度非弹实验第一次成功地从实验上测到了光子结构函数^[6],它给出了光子到夸克一个类点耦合的清楚证据,而且提供了光子到夸克反夸克对的点耦合的胶子修正知识^[7]。随着探测技术的不断改进和对撞机能量、流强的提高,在 DESY 正负电子对撞机上工作的其他小组也测到了光子结构函数,由于实验数据的不断增加,使得在 Q^2 的大范围内和理论进行比较成为可能,在深度非弹电子光子散射中通过测量光子结构函数对 QCD 理论是一个很好的验证,所以引起了越来越多的理论和实验工作者对光子结构函数研究的关注和兴趣^[8-12]。

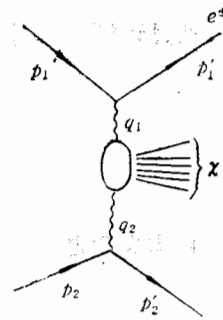


图 1

二、光子结构函数的实验

图(1)是电子光子深度非弹散射费曼图。

实验上是通过测量深度非弹电子光子散射微分截面得到光子结构函数信息及数据

$$\frac{d\sigma}{dx dy} \Big|_{e\gamma \rightarrow eX} = \frac{16\pi\alpha^2}{Q^4} EE_\gamma [(1-y)F_2(x, Q^2) + xy^2F_1(x, Q^2)] \quad (1)$$

$$\text{其中} \quad x = -\frac{q_1^2}{2q_1 \cdot q_2} = \frac{Q^2}{Q^2 + M^2}$$

$$y = \frac{q_1 \cdot q_2}{p_1 \cdot q_2} = 1 - \frac{E'_1}{E_1} \cos^2\left(\frac{1}{2}\theta\right)$$

在(1)式中 Q^2 是电子初末态四动量转移平方, M^2 是末态强子质量平方, E_1 和 E'_1 是初末态电子能量, E_γ 是实光子的能量, x, y 是通常的 scaling 变量, θ 是电子散射角.

由于一般 θ 都较小所以(1)式中 xy^2 是小的, 截面近似地由:

$$\frac{d\sigma}{dx dy} \Big|_{e\gamma \rightarrow e\gamma} \approx \frac{16\pi\alpha^2}{Q^4} E_1 E_\gamma (1-y) F_2(x, Q^2)$$

三、在合理近似下深度非弹光子结构函数的表达式

由于实验结果表明光子结构函数单纯的用矢量为主模型或夸克部分子模型都与实验数据不符, 但是将这两部分贡献迭加以后结果和实验基本趋势一致^[15,16]. 故本文利用矢量为主模型并假定 ρ^0 介子的结构函数可以用 π^0 介子结构函数来代替, 而利用我们已经从 Altarelli-Parisi 严格解得的 π 介子结构函数表达式^[15], 这表式包含了 QCD 的胶子修正, 十分明显地依赖于 Q^2 . 并且加上由 QCD 而来的夸克部分子模型求得类点项贡献, 得到本文的光子结构函数表达式.

利用夸克-部分子模型我们求得光子结构函数的类点分量贡献为:

$$F_2^Y(x, Q^2) = 3 \sum_i e_i^2 \frac{\alpha}{\pi} x \{x^2 + (1-x)^2\} \ln \frac{Q^2}{m_{q_i}^2} \quad (2)$$

由矢量为主模型得到

$$F_2^Y(x, Q^2)_{VDM} = \sum_{\rho^0, \omega, \varphi} \left(\frac{e}{f_\rho}\right)^2 F_2^Y(x, Q^2) \quad (3)$$

通过计算我们得到^[7]

$$\frac{F_2^Y(x, Q^2)_{VDM}}{F_2^Y(x, Q^2)_{\rho^0}} \approx 1.6$$

$$\text{而} \quad F_2^Y(x, Q^2)_{\rho^0} = \left(\frac{e}{f_\rho}\right)^2 \sum_i e_i^2 x q_i^{\rho^0}(x, Q^2) \quad (4)$$

由本文假定

$$q_i^{\rho^0}(x, Q^2) = q_i^{\pi^0}(x, Q^2) \quad (5)$$

$$\text{而} \quad q_i^{\pi^0}(x, Q^2) = \frac{1}{2} [q_i^{\pi^+}(x, Q^2) + q_i^{\pi^-}(x, Q^2)]$$

由电荷共轭和同位旋对称我们有

$$u_v^{\pi^+} = \bar{d}_v^{\pi^+} = \bar{u}_v^{\pi^-} = d_v^{\pi^-}$$

$$\text{而} \quad x \sum_i e_i^2 q_i^{\pi^-}(x, Q^2) = x \left[\frac{4}{9} \bar{u}_{x-}(x, Q^2) + \frac{1}{9} d_{x-}(x, Q^2) \right] \quad (6)$$

将(4), (5), (6)代入(3)式得:

$$F_2^{\gamma}(x, Q^2)_{VDM} \approx 1.6 \frac{\alpha}{f_p^2/4\pi} \cdot \frac{5}{9} q_{u|\pi^-(x, Q^2)} \quad (7)$$

综合 (2) 和 (7) 最后我们得到光子结构函数表达式为:

$$\begin{aligned} F_2^{\gamma}(x, Q^2) &\approx F_2^{\gamma}(x, Q^2)_{QPM} + F_2^{\gamma}(x, Q^2)_{VDM} \\ &= 3 \sum_i e_i^4 \frac{\alpha}{\pi} x \{x^2 + (1-x)^2\} \ln \frac{Q^2}{m_{q_i}^2} \\ &\quad + 1.6 \frac{\alpha}{f_p^2/4\pi} \cdot \frac{5}{9} x q_{u|\pi^-(x, Q^2)} \end{aligned} \quad (8)$$

在计算中我们取 $\frac{f_p^2}{4\pi} \approx 2.2$, $\Lambda = 0.2$, m_{q_i} 为夸克质量, 这里取 $m_u = m_d = m_s \approx 0.3\text{GeV}$, $m_c \approx 1.5\text{GeV}$, $q_{u|\pi^-(x, Q^2)}$ 取 [13] 型式为:

$$\begin{aligned} q_{u|\pi^-(x, Q^2)} &= e^{s(\frac{3}{4}-c)} \frac{1}{\Gamma(s)} \frac{1}{B(a+1, b+1)} x^a (1-x)^b \left(\ln \frac{1}{x}\right)^s \\ &\quad \cdot \left\{ \mathcal{A}_0(a-1, b, s) + \left[\frac{1}{2} \mathcal{A}_0(a-1, b, s+1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \mathcal{A}_1(a-1, b, s) \right] \ln\left(\frac{1}{x}\right) + \left[\frac{1}{8} \frac{s+4}{s+1} \mathcal{A}_0(a-1, b, s+2) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{2} \mathcal{A}_1(a-1, b, s+1) + \mathcal{A}_2(a-1, b, s) \right] \left(\ln \frac{1}{x}\right)^2 \right. \\ &\quad \left. + \left[\frac{1}{24} \frac{s^2+6s+12}{(s+1)(s+2)} \mathcal{A}_0(a-1, b, s+3) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \frac{1}{8} \frac{s+4}{s+1} \mathcal{A}_1(a-1, b, s+2) + \frac{1}{2} \mathcal{A}_2(a-1, b, s+1) \right. \right. \\ &\quad \left. \left. + \mathcal{A}_3(a-1, b, s) \right] \left(\ln \frac{1}{x}\right)^3 + \dots \right\} \end{aligned} \quad (9)$$

$$(9) \text{ 式中 } s = \frac{4}{3\pi b_0} \ln \left(\frac{\ln \frac{Q^2}{\Lambda^2}}{\ln \frac{Q_0^2}{\Lambda^2}} \right)$$

$$b_0 = \frac{33-2f}{12\pi}$$

$$\alpha_s = \frac{1}{b_0 t}$$

$$t = \ln \frac{Q^2}{\Lambda^2}$$

$f =$ 夸克的味道数

$$\mathcal{A}_0(a, b, s) = B(s, b+1)$$

$$\mathcal{A}_1(a, b, s) = \frac{1}{2} s B(s, b+1) + \frac{1}{2} [2a - (s+1)] B(s+1, b+1)$$

$$\begin{aligned} \mathcal{A}_2(a, b, s) = & \frac{1}{24} s(3s+1)B(s, b+1) \\ & + \frac{1}{4} [2a - (s+1)](s+1)B(s+1, b+1) \\ & + \frac{1}{2} \left[a^2 - a(s+2) + \frac{1}{12} (s+2)(3s+5) \right] B(s+2, b+1) \end{aligned}$$

$\mathcal{A}_3 = \dots\dots$ 详见 [13]

a, b 为输入参数(由 π 介子实验值给定)

(9) 式代入 (8) 式进行计算得到本文的结果见图 2, 图 3, 图 4.

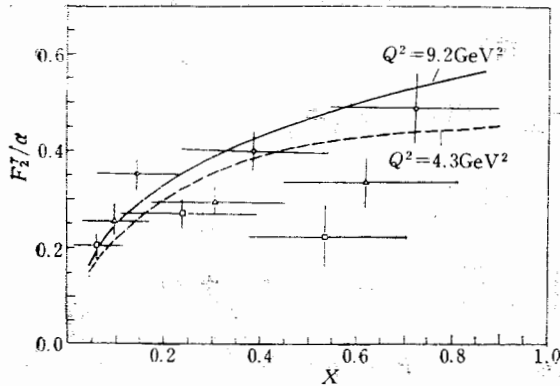


图 2 是由 PLUTO 小组测量 $F_2(x)^{[14]}$ 和本理论计算结果之比较。◇是 $Q^2 = 9.2 \text{ GeV}^2$ 的测量结果，△是 $Q^2 = 4.3 \text{ GeV}^2$ 的测量结果，□是 $Q^2 = 2.4 \text{ GeV}^2$ 时测量的结果。

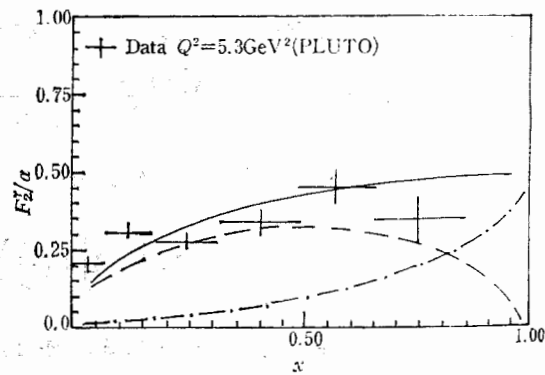


图 3 是由 PLUTO 小组在 $Q^2 = 5.3 \text{ GeV}^2$ 时测量到的结构函数 $F_2(x)$ 和各种理论模型之比较，·····是 QPM 模型，——是 VDM 模型，——是本文理论结果。

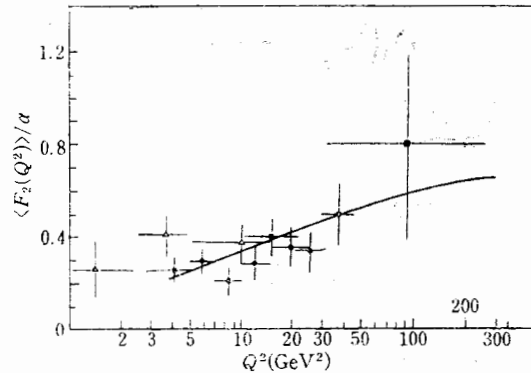


图 4 是结构函数随 Q^2 的演化其中实线是本文理论预言的结果，●及■是 CELLO 小组测到的实验值，△是 PLUTO 小组的实验测量结果，○是 JADE 组的实验测量结果。实验数据来自 [19]

四、讨 论

自从 1981 年 DESY 的 PLUTO 小组第一次测量得到光子结构函数以来,陆续地有

DESY 工作的其他几个小组如 TASSO 组, CELLO 组, JADE 组先后都取得了类似的数据,但就目前已发表的来看,数据积累不像核子结构函数那样丰富,而且精确度也不高,尤其在大 Q^2 区域数据更少。从这些数据来看,都肯定了光子是有结构的,而且可以用 QCD 的方法预言光子结构函数,得到一些强作用的信息^[15-18]并且对进一步的测定 α_s 和 Λ_{QCD} 都有一定的意义。然而光子结构研究仅仅才开始,还没有一个理论能精确描述光子结构,光子在大横动量传递下它的行为类似强子,本文用 π 介子结构来代替光子类强子化时矢量介子 ρ_0 , 这是一种近似,在这种近似下将光子结构类似于强子方面充分体现出来,但光子在某些时候的行为又类似于点粒子,我们用夸克部份子模型来描述它。将这两部份贡献之和成为本文的理论结果和实验比较符合得较好(详见图 2, 图 3, 图 4)。实际上本文是将研究强子结构方法应用于光子,这样自然地会得到类似于强子结构的地方,如有强烈的 Q^2 依赖性,明显的 scaling 破坏,但是从图 2—4 和 [13] 可以看到光子与核子结构函数依赖方式不同,光子结构函数正比于 $\ln Q^2$ 增加,而核子结构函数当 $x \rightarrow 1$ 时随 $(\ln Q^2)^{-1}$ 而迅速下降,而且 $x \rightarrow 1$ 区域光子结构函数不像核子结构函数那样迅速趋向于零,这一些不同是由于强子和光子有不同结构引起的,强子是夸克胶子束缚态而光子仅在某些能量区域行为类似于强子而大多数情况下光子还是作为电磁相互作用传递者这又是强子所力不能及的。

由于实验上无法将纯量子电动力学和量子色动力学的贡献区分开来,而且光子到强子化类点夸克的转化也不十分明显情况下,对光子结构探讨无论从实验上还是从理论上都有大量的工作要作,本文也仅仅是一种初步尝试。

参 考 文 献

- [1] S. J. Brodsky et al., *Phys. Rev. Lett.*, **27** (1971), 280.
- [2] T. F. Walsh and P. Zerwas; *Phys. Lett.*, **44B**(1973), 195.
- [4] E. Witten, *Nucl. Phys.* **B120** (1977), 189.
- [4] C. H. Llewellyn Smith, *Phys. Lett.*, **79B** (1978), 83.
- [5] Wu Chi-min, *Nucl. Phys.*, **B167** (1980), 349.
- [6] PLUTO Collaboration, *Phys. Rev. Lett.*, **107B**(1981), 168.
- [7] W. Wegner, PITHA 83/03.
- [8] C. T. Hill, G. G. Ross, *Nucl. Phys.*, **B148**(1979), 373.
- [9] L. M. Jones and D. W. Willen, *Phys. Rev.*, **D20** (1979), 749; J. Busenitz and J. D. Sullivan, *Phys. Rev.*, **D24** (1981), 1794.
- [10] E. Witten, *Nucl. Phys.*, **B120** (1977), 189.
- [11] W. A. Bardeen and A. J. Buras, *Phys. Rev.*, **D20** (1979), 166; **D21** (1980), 2041E.
- [12] G. Altarelli, G. Parisi, *Nucl. Phys.*, **B126**(1977), 298; W. R. Frazer and J. F. Gunion, *Phys. Rev.*, **D20** (1979), 147.
- [13] 吴济民、陆景贤等, *高能物理与核物理*, **7**(1983), 5.
- [14] PLUTO Collaboration to be Published.
- [15] M. Gluck, K. Grassie and E. Reya, DO-TH 83/23.
- [16] Ciu seppe Rossi, UCSD-10P10-227.
- [17] C. Peterson et al., SLAC PUB-2985.
- [18] J. Alspector et al., *Phys. Lett.*, **85B** (1979), 432.

1.00

量到
一一
是本

三

- [19] Sau Lan Wu DESY 84-028.
[20] H. J. Behreud DESY 84-062.
[21] J. Brodsky SLAC-PUB-3440. SLAC-PUB 3547.

A METHOD FOR CALCULATING PHOTON STRUCTURE FUNCTION IN DEEP INELASTIC SCATTERING

LU JING-XIAN

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

This paper discusses the behaviors of the photon structure function, which is considered as a superposition of a hadronic and a pointlike component. The pointlike component is calculated in the quark parton model. The hadronic part is calculated in the vector dominance model. The valence quark distribution function of ρ^0 is assumed to be the same as that of π^0 . The π^0 valence quark distribution function is represented by an analytic expression in the leading logarithm approximation from the Altarelli-Parisi equation. Results obtained are in agreement with experimental data.