

两圈图产生的 W 玻色子电偶矩*

李重生 胡炳全 方祯云

(重庆大学应用物理系, 630044)

摘 要

在 Weinberg-Higgs 模型中, 考虑 CP 破坏是由于交换带电 Higgs 粒子而引起的情形, 我们计算了 W 玻色子的电偶矩。同时我们也与有关文献中的结果和推测作了比较。

一、引 言

最新的关于中子电偶矩 D_N 的实验上限值^[1] 对不同的 CP 破坏模型提供了很强的约束。然而仔细地考察其它粒子的电偶矩也同样重要的。事实上, 早在 25 年前, Salzman^[2] 指出, W 玻色子可能有内禀电偶矩 $D_W = \lambda_{we}/2M_W$, 并且他们推测如果 $\lambda_w \sim 1$, 则 W 玻色子的电偶矩可提供在中性 K 介子衰变中可观察到的 CP 破坏的起源。但在标准模型中即使精确到两圈量级, $\lambda_w = 0$ 。后来 Marciano 和 Queijeiro^[3] 表明, 在一个有效场论中, 非零的 W 玻色子电偶矩可经单圈图产生中子电偶矩。根据中子电偶矩的实验上限值, 他们预言 $|\lambda_w| \leq 10^{-3}$ 。然而这个结果是与模型无关的。因此在可重整化的 CP 破坏的规范模型中深入地研究 W 玻色子的电偶矩并应用中子电偶矩上限值讨论对 D_W 的约束仍然是重要的。有关这个问题的一个最新的工作已由 He 和 Mckellar^[4] 做出。他们在 Weingber-Higgs 模型^[5] 中计算了由于交换中性 Higgs 粒子而在两圈图量级上产生的 W 玻色子电偶矩。本文将在同一模型中讨论经由交换带电 Higgs 粒子而在两圈图量级上产生的 W 玻色子电偶矩。

二、计 算

在一个普遍的代表 W 玻色子与光子耦合的有效拉氏量^[6] 中, 代表 W 玻色子电偶矩的项为

$$\mathcal{L}_{\text{eff}} = ikW_\mu^+ W_\nu \tilde{F}^{\mu\nu} + i \frac{\lambda}{M_W^2} W_{\alpha\mu}^+ W_\nu^\alpha \tilde{F}^{\nu\alpha}, \quad (1)$$

式中 W_μ 是 W^+ 玻色子的场, $W_{\mu\nu} = \partial_\mu W_\nu - \partial_\nu W_\mu + gW_\mu \times W_\nu$ 以及光子的对偶场

本文于 1991 年 3 月 4 日收到。

* 国家教委优秀青年教师基金资助。

强 $\tilde{F}^{\mu\nu} = \frac{1}{2} \varepsilon^{\mu\nu\alpha\beta} (\partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu)$. 在动量空间(1)式中的项可表为

$$f_1 \varepsilon^{\mu\nu\lambda\alpha} (k_1 - k_2)_\alpha + \frac{f_2}{M_W^2} \varepsilon^{\mu\nu\beta\alpha} (k_1 - k_2)_\alpha (k_1 + k_2)^\lambda (k_1 + k_2)_\beta, \quad (2)$$

式中 k_1 和 k_2 分别表示W玻色子的人射动量和出射动量, 形状因子 $f_1 = \lambda - k$ 和 $f_2 = \frac{1}{2} \lambda$ 是动量转移平方 $(k_1 - k_2)^2$ 的函数. 在极限 $(k_1 - k_2)^2 \rightarrow 0$ 情形下, W玻色子电偶矩 D_W 可表为^[6]

$$D_W = (f_1 - 4f_2)(e/2M_W), \quad (3)$$

其中 $\frac{e}{2M_W} = 1.2 \times 10^{-16} e\text{-cm}$. 我们知道在 Weingberg-Higgs 模型中经交换中性 Higgs 粒子或经交换带电 Higgs 粒子而产生W玻色子电偶矩 D_W 的过程均至少来自两圈费曼

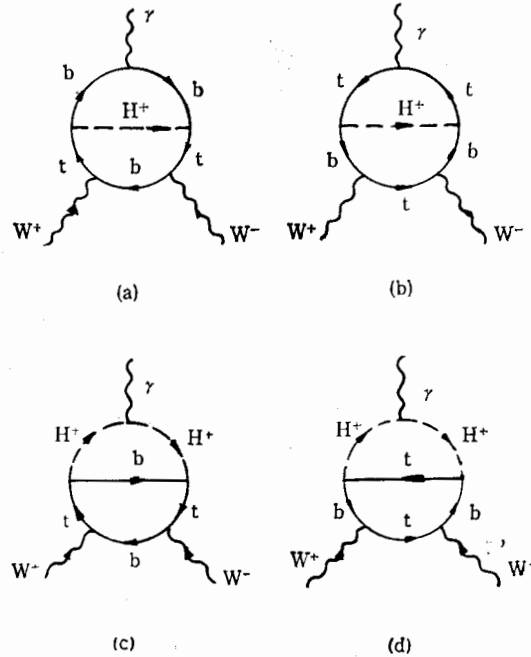


图1 对W玻色子电偶矩有贡献的两圈费曼图

图. 在本文计算中有关的两圈图在图1中给出. 直接的计算给出形状因子 $f_{1,2}$ 为

$$f_{1,2} = \frac{-ie g^2}{128 \pi^4} \frac{m_b m_t}{M_W^2} I_m(a^* b) H_{1,2}, \quad (4)$$

式中我们已取 Kobayashi-Maskawa 矩阵元 $V_{tb} = 1$, $H_i = h_i(\sigma_b, \sigma_t, \sigma_H) + h'_i(\sigma_b, \sigma_t, \sigma_H)$, ($i = 1, 2$), 以及 $\sigma_b = \frac{m_b}{M_W}$, $\sigma_t = \frac{m_t}{M_W}$, $\sigma_H = \frac{m_H}{M_W}$, 而函数 $h_{1,2}$ 和 $h'_{1,2}$ 由下列参数积分定义:

$$h_i(\sigma_b, \sigma_t, \sigma_H) = \int_0^1 dx \int_0^1 d\xi_1 \int_0^{\xi_1} d\xi_2 Q_b x(1+x) \xi_2 [x(1-\xi_2+x\xi_{21})\sigma_b^2 + x(1-x)\xi_2\sigma_t^2$$

$$+ (1 - \xi_1)(1 - x)\sigma_H^2 + x(1 - x)\xi_{21}(1 + \xi_{21})]^{-1} + (Q_b \rightarrow Q_t, \sigma_b \leftrightarrow \sigma_t), \quad (5)$$

$$h_2(\sigma_b, \sigma_t, \sigma_H) = \frac{+1}{2} \int_0^1 dx \int_0^1 d\xi_1 \int_0^{\xi_1} d\xi_2 Q_b x^3 \xi_2 \xi_{12}(1 - \xi_{12})(1 - x)[x(1 - \xi_2 + x\xi_{21})\sigma_b^2 + x(1 - x)\xi_2\sigma_t^2 + (1 - x)(1 - \xi_1)\sigma_H^2 + x(1 - x)\xi_{21}(1 + \xi_{21})]^{-2} + (Q_b \rightarrow Q_t, \sigma_b \leftrightarrow \sigma_t), \quad (6)$$

以及

$$h'_1(\sigma_b, \sigma_t, \sigma_H) = \int_0^1 dx \int_0^1 dy \int_0^1 d\xi_1 \int_0^{\xi_1} d\xi_2 x^2(1 - y)\xi_2\{x(1 - y)[(1 - \xi_{12})\xi_{12}l(x, y) - (1 - \xi_1 + \xi_{12}l(x, y))\sigma_b^2 - l(x, y)\xi_2\sigma_t^2] - l(x, y)(1 - \xi_1)\sigma_H^2\}^{-1} + (\sigma_b \leftrightarrow \sigma_t), \quad (7)$$

$$h'_2(\sigma_b, \sigma_t, \sigma_H) = \frac{-1}{2} \int_0^1 dx \int_0^1 dy \int_0^1 d\xi_1 \int_0^{\xi_1} d\xi_2 x^3(1 - y)^2 \xi_2 l(x, y)\xi_{12}(1 - \xi_{12})\{x(1 - y) \times [(1 - \xi_{12})\xi_{12} \times l(x, y) - (1 - \xi_1 + \xi_{12}l(x, y))\sigma_b^2 - l(x, y)\xi_2\sigma_t^2] - l(x, y)(1 - \xi_1)\sigma_H^2\}^{-2} + (\sigma_b \leftrightarrow \sigma_t), \quad (8)$$

其中 Q_b 和 Q_t 分别表示 b 夸克和 t 夸克的电荷(以 e 为单位), $\xi_{ij} \equiv \xi_i - \xi_j$ 以及 $l(x, y) \equiv 1 - x + xy$.

(4)式中 $\text{Im}(a^*b)$ 是与模型有关的 CP 破坏参数因子,可表为^[5,7]

$$\text{Im}(a^*b) = \sqrt{2} G_F \text{Im}(Z_2) m_b m_t. \quad (9)$$

有关积分 $h_{1,2}$ 和 $h'_{1,2}$ 的数值计算结果在表 1, 2 中给出。在计算中我们考虑了几种不同的 t 夸克和 Higgs 粒子质量取值情形。

表 1 积分 $h_{1,2}$ 和 $h'_{1,2}$ 的数值计算结果 ($m_t \gg m_H$)

$m_t \gg m_H$	h_1	h'_1	h_2	h'_2
$m_t = 200\text{GeV}$ $m_H = 10\text{GeV}$	-9.43	14.4	+2.03	-28.8
$m_t = 150\text{GeV}$ $m_H = 10\text{GeV}$	-14.70	3.31	+3.39	-6.61
$m_t = 100\text{GeV}$ $m_H = 10\text{GeV}$	-18.7	9.22	+4.42	-18.4

表 2 积分 $h_{1,2}$ 和 $h'_{1,2}$ 的数值计算结果 ($m_t \gg m_H$)

$m_H \gg m_t$	h_1	h'_1	h_2	h'_2
$m_t = 100\text{GeV}$ $m_H = 600\text{GeV}$	0.250	-0.013	+0.083	-0.001
$m_t = 100\text{GeV}$ $m_H = 800\text{GeV}$	0.048	-0.012	+0.016	-0.002
$m_t = 100\text{GeV}$ $m_H = 1\text{TeV}$	-0.003	-0.006	+0.003	-0.0002

表3 W玻色子电偶矩的上限值

中子电偶矩的计算模型 t夸克、Higgs 粒子质量取值	Valence 夸克模型 ^[8]	Higgs-核子耦合 ^[9]	Weinberg 胶子算符 ^[7,10]
$m_t = 200\text{GeV}$ $m_H = 10\text{GeV}$	$ D_W < 6.3 \times 10^{-20} e\text{-cm}$	$ D_W < 6.3 \times 10^{-23} e\text{-cm}$	$ D_W < 1.3 \times 10^{-21} e\text{-cm}$
$m_t = 150\text{GeV}$ $m_H = 10\text{GeV}$	$ D_W < 4.8 \times 10^{-22} e\text{-cm}$	$ D_W < 4.8 \times 10^{-23} e\text{-cm}$	$ D_W < 9.6 \times 10^{-23} e\text{-cm}$
$m_t = 100\text{GeV}$ $m_H = 10\text{GeV}$	$ D_W < 6.8 \times 10^{-21} e\text{-cm}$	$ D_W < 6.8 \times 10^{-24} e\text{-cm}$	$ D_W < 1.4 \times 10^{-22} e\text{-cm}$
$m_t = 100\text{GeV}$ $m_H = 600\text{GeV}$	$ D_W < 1.3 \times 10^{-23} e\text{-cm}$	$ D_W < 1.3 \times 10^{-26} e\text{-cm}$	$ D_W < 2.6 \times 10^{-27} \text{ m}$
$m_t = 100\text{GeV}$ $m_H = 800\text{GeV}$	$ D_W < 2.9 \times 10^{-24} e\text{-cm}$	$ D_W < 2.9 \times 10^{-27} e\text{-cm}$	$ D_W < 5.8 \times 10^{-26} e\text{-cm}$
$m_t = 100\text{GeV}$ $m_H = 1\text{TeV}$	$ D_W < 3.8 \times 10^{-24} e\text{-cm}$	$ D_W < 3.8 \times 10^{-27} e\text{-cm}$	$ D_W < 7.7 \times 10^{-25} e\text{-cm}$

由于同一个参数因子 $\text{Im}(Z_2)$ 既出现于W玻色子电偶矩 D_W 表达式中也出现于中子电偶矩 D_n 的表达式中,故我们可根据中子电偶矩的实验上限值得到对参数因子 $\text{Im}(Z_2)$ 的限制并进而得到对W玻色子的电偶矩 D_W 的相应的限制。我们知道存在不同的方法计算带电 Higgs 对中子电偶矩的贡献,因而我们也将得到对参数因子 $\text{Im}(Z_2)$ 的不同的限制,于是我们有如表3所示的对W玻色子电偶矩 D_W 的不同限制。在表3 D_W 的上限值计算中,我们取的中子电偶矩的实验上限值与文献[4]相同,即 $|D_n| < 1.2 \times 10^{-25} e\text{-cm}$,其目的是为了与之比较。尽管我们知道最新的实验结果^[1]为 $|D_n| \leq 8 \times 10^{-26} e\text{-cm}$ 。

三、分析与讨论

从表3可看出在中子电偶矩的 Higgs-核子耦合计算模型中,我们可得到的对W玻色子的电偶矩 D_W 的上限值相对最小;并且无论在何种中子电偶矩的计算模型中, $m_t \gg m_H$ 情形下得到的W玻色子电偶矩上限均较 $m_H \gg m_t$ 情形要大几个数量级。此外,与文献[4]结果比较,在 $m_t \gg m_H$ 情形下,我们的结果是与之接近的,而在 $m_H \gg m_t$ 情形,本文结果却要小几个量级。的确,正如文献[4]所预料那样,这是由于轻夸克质量因子压低的结果,但对于 $m_t \gg m_H$ 情形,文献[4]的预言不完全正确。其次与 Marciano 和 Queijeiro^[5]结果比较,本文结果均较小,这也是预料之中的。因为 Marciano 等人是直接采用(1)式第一项作为有效作用项来计算单圈图产生的中子电偶矩。为了正规化发散积分,他们引入了一个形状因子来切断积分,然后应用中子电偶矩的实验上限值来得到W玻色子电偶矩的上限值。而我们是在一个特殊的 CP 破坏的规范模型中所做的计算,其结果还将受到由该模型对中子电偶矩的理论预言值而带来的对模型参数的约束,故一般来

讲,其结果要较他们的小。当然,要将本文结果与 Marciano 等的结果作一番细致的比较,需要在一个单圈图过程可给出(1)式第一项作为其有效作用项的模型中直接计算W玻色子电偶矩的形状因子。有关这个问题的深入讨论,本文作者之一将在另文^[11]中加以研究。

最后,我们得出结论,取决于中子电偶矩的实验上限值在几种不同的中子电偶矩的计算方法中对模型的 CP 破坏参数的约束以及 t 夸克和 Higgs 粒子的质量取值, W 玻色子电偶矩在本文模型中的上限值为 $7.3 \times 10^{-20} e\text{-cm} - 5.5 \times 10^{-27} e\text{-cm}$ 。

参 考 文 献

- [1] I. S. Altarev et al., *JETP Lett.*, **44**(1986), 460.
K. F. Smith et al., *Phys. Lett.*, **234B**(1990), 191.
- [2] F. Salzman and G. Salzman, *Phys. Lett.*, **15**(1965); 91; *Nuovo Cimento* **41A**(1966), 443.
- [3] William J. Marciano and Alfonso Queijeiro, *Phys. Rev.*, **D33**(1986), 3449.
- [4] X.-G. He and B. McKellar, *Phys. Rev.*, **D42**(1990), 3221.
- [5] S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.*, **37**(1976), 657.
- [6] K. Hagiwara, P. D. Peccei, and X. Zeppenfeld, *Nucl. Phys.*, **B282**(1987), 253.
- [7] S. Weinberg, *Phys. Rev. Lett.*, **63**(1989), 2333.
- [8] N. G. Deshpande and E. Ma, *Phys. Rev.*, **D16**(1977), 1583.
- [9] A. A. Anselm, et al., *Phys. Lett.*, **B152**(1985), 116;
T. P. Cheng and L. F. Li, *Phys. Lett.*, **B234**(1990), 165.
- [10] E. Braaten, C. S. Li, and T. C. Yuan, *Phys. Rev. Lett.*, **64**(1990), 1709.
- [11] D. Chang, C. S. Li and I. Phillips, Northwestern Preprint in Preparation.

W-Boson Electric Dipole Moment Generated at the Two-Loop Level

LI CHONGSHENG HU BINGQUAN FANG ZHENYUN
(Department of Applied Physics, Chongqing University, 630044)

ABSTRACT

We calculate the W-boson electric dipole moment in the Weinberg-Higgs model in which the Cp violation is mediated by charged Higgs boson exchange and compare our results with other works.