

文章编号:1000-582X(2005)08-0092-04

双光子碰撞产生电子对的单圈弱电辐射修正*

曾代敏,方祯云,胡炳全,李志峰

(重庆大学 数理学院,重庆 400030)

摘要:通过在标准模型下对双光子碰撞产生正负电子对的弱电辐射修正——包括虚修正和软光子修正的计算,得到了双光子碰撞产生电子对过程在单圈修正下的散射截面.在GLC对撞机设计的亮度监测范围内,讨论了树图和单圈弱电修正下散射截面随质心能量的变化关系及其微分截面随出射电子方位角的变化曲线.

关键词:弱电辐射修正;散射截面;质心能量;微分截面

中图分类号: O365; O230

文献标识码: A

标准模型(SM)是现代粒子物理学的基石,它可以通过希格斯机制(Higgs Mechanism)^[1]解释粒子质量的产生.在希格斯机制中,弱电规范场和物质场都是通过与一个标量场的相互作用产生的,这个标量场具有一个非零的真空期望值,它就是希格斯场.希格斯场的自相互作用导致了弱电对称SU(2)⊗U(1)到电磁对称U(1)的自发对称破缺.中间矢量玻色子W[±]及Z⁰的发现以及它们的质量与标准模型预测的质量非常一致.但是到目前为止,还没有实验证明希格斯自发对称破缺机制中的质量产生机制,而且希格斯粒子一直未在实验中被发现.未来碰撞机一个最主要的任务就是研究弱电对称破缺机制以及规范玻色子和费米子的质量起源,来检测标准模型.目前TEVATRON, NLC, GLC都在做这方面的努力,希望能够找到标准模型预言的物理信息.

LC上的γγ碰撞是一个重要的研究粒子物理的过程,它可以为实验提供一个非常干净的背景.目前已经有许多研究γγ→W[±]W[∓]^[2],γγ→t \bar{t} ^[3],γγ→t \bar{t} H^[4],γγ→e⁺e⁻H^[5]等过程的文献,讨论了光子碰撞在不同的产物下的散射截面.γγ→e⁺e⁻过程是一个可能用于对撞机亮度监测的反应道.它可以对对撞机的亮度进行高精度测量.在能量对撞过程中其弱电单圈辐射修正的贡献应当考虑.笔者对标准模型下的γγ→e⁺e⁻过程进行了详细的讨论,计算了树图的散射截面以及单圈弱电修正后的散射截面及其微分截面,通过重整化

和正规化处理消除了红外和紫外发散.由于GLC上的亮度探测器的探测范围为0.05 rad ≤ θ ≤ 0.15 rad (θ为出射电子方位角),因此笔者也选取这个角度范围来计算散射截面,当然还包括对称的角度范围(π - 0.15) rad ≤ θ ≤ (π - 0.05) rad.

1 γγ→e⁺e⁻过程在单圈弱电辐射修正后的散射截面

在文中,笔者采用的是't Hooft-Feynman规范^[6].费曼图和振幅通过FeynArts32产生,振幅的化简通过FormCalc32进行,相空间积分和单圈积分函数计算通过LoopTools^[7]完成,整个数值计算都是通过Fortran程序完成.γγ→e⁺e⁻过程的最低阶费曼图如图1.

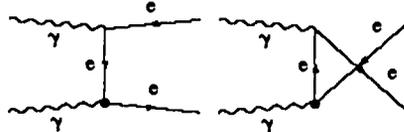


图1 γγ→e⁺e⁻过程的树图

把过程γγ→e⁺e⁻表示成

$$\gamma(k_1, \lambda_1) + \gamma(k_2, \lambda_2) \rightarrow e^-(p_1, \sigma_1) + e^+(p_2, \sigma_2), \quad (1)$$

其中2个人射光子四动量分别为k₁和k₂,出射的电子、反电子的四动量分别为p₁和p₂;λ₁和λ₂分别为入射光子的螺旋度,σ₁ = ±1/2和σ₂ = ±1/2分别为出射电子、反电子的自旋.在忽略电子质量的情况下,

* 收稿日期:2005-04-02

基金项目:国家自然科学基金资助项目(10175096)

作者简介:曾代敏(1977-),女,四川成都人,重庆大学助教,硕士,主要从事理论物理研究.

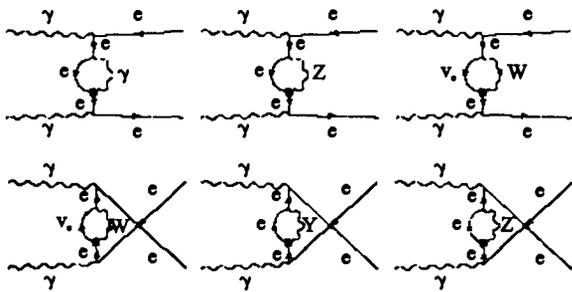
所有的动量遵循质壳条件 $k_1^2 = k_2^2 = 0, p_1^2 = p_2^2 = 0$. 定义 Mandelstam 变量

$$\begin{aligned}
 s &= (k_1 + k_2)^2 = (p_1 + p_2)^2, \\
 t &= (k_1 - p_1)^2 = (k_2 - p_2)^2, \\
 u &= (k_1 - p_2)^2 = (k_2 - p_1)^2.
 \end{aligned}
 \tag{2}$$

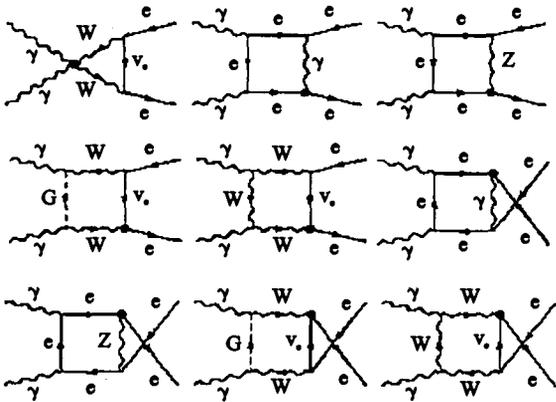
由上面的定义可以写出树图下 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 过程的散射振幅

$$\begin{aligned}
 M_{tree} &= -ie^2 \bar{u}(p_2) \left\{ \gamma_\mu \frac{1}{(k_1 - \not{p}_1) - m_e} \gamma_\nu + \right. \\
 &\left. \gamma_\nu \frac{1}{(k_1 - \not{p}_1) - m_e} \gamma_\mu \right\} v(p_1) \varepsilon(k_1) \varepsilon(k_2).
 \end{aligned}
 \tag{3}$$

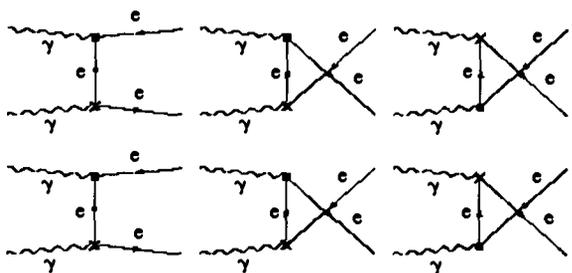
$\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 对过程的单圈弱电辐射修正如图 2(a) - (c). 由于篇幅所限, 76 个顶点修正图未能在文章中给出.



(a) 自能修正图



(b) box 修正图



(c) 抵消项图

图 2 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 过程的单圈弱电修正图

对 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 过程的一圈弱电修正散射截面可以

表示为

$$\begin{aligned}
 \frac{d\sigma}{d\Omega} &= \sum_{\lambda_1, \lambda_2, \sigma_1, \sigma_2} \left\{ \frac{\beta}{64\pi^2 s} [|M_{tree}|^2 (1 + \delta_{SB}) + \right. \\
 &\left. 2M_{tree}^* \delta M \right\} = \frac{d\sigma_{tree}}{d\Omega} (1 + \delta),
 \end{aligned}
 \tag{4}$$

其中 δ_{SB} 表示软光子韧致辐射因子, δM 表示重整化后的单圈修正的振幅, 在 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 过程中包括自能、顶点、box 和抵消项的贡献. δ 表示相对修正, 定义为 $\delta = (d\sigma - d\sigma_{tree})/d\sigma_{tree}$.

在探测器出射角度范围内积分, 可以得到总截面

$$\sigma = \int_{\theta_{min}}^{\theta_{max}} d\cos\theta \int_0^{2\pi} d\phi \left(\frac{d\sigma}{d\Omega} \right).
 \tag{5}$$

由所得到的 Feynman 图可知, 圈图中还含有紫外发散. 笔者通过维度正规化处理, 即把四维时空扩展到 $D = 4 - \epsilon$ 维^[8], 把发散的费曼积分分解为发散和有限的部分. 然后再采用完全在壳重整化方案 (COMS)^[9] 进行重整化来确定重整化参数, 通过引入抵消项与振幅中的紫外发散项相抵消而得到有限的部分. 从而紫外发散被完全的消除, 但红外发散仍然存在. 正因为如此, 就需要引入实光子韧致辐射, 如图 3.

$$\gamma(k_1) + \gamma(k_2) \rightarrow e^-(p_1) + e^+(p_2) + \gamma(k).
 \tag{6}$$

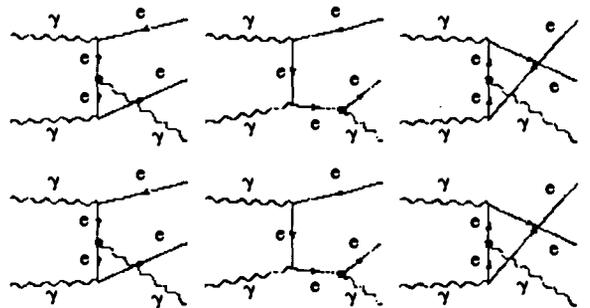


图 3 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 的实光子辐射图

为了把软光子发射从实光子发射中分离出来, 这里采用 phase-space-slicing algorithm^[10], 这样韧致辐射位相空间就分离成奇异与非奇异部分. 实光子辐射的散射截面又可以分为软和硬部分,

$$\sigma_{real} = \sigma_{soft} + \sigma_{hard},
 \tag{7}$$

其中的软和硬是相对于辐射光子能量 E_γ 而言的, $E_\gamma \leq \Delta E$ 为软光子辐射, $E_\gamma > \Delta E$ 为硬光子辐射. σ_{soft} 和 σ_{hard} 均依赖于软截断 (soft cutoff) ΔE , 但是 σ_{real} 与截断无关.

软光子近似就是只考虑 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^- \gamma$ 过程中截断能量 $E < \Delta E$ 的部分. 红外发散是由于圈图中出现了质量为零的虚光子, 可以在计算中通过给虚光子一个非常小的质量 m_γ 而消除. 而与 m_γ 的相关性可以通过软

光子韧致辐射得到消除.

考虑到亮度探测器本身对光子的测量有一个能量分辨下限,可以将此下限值作为软、硬光子的分界值 ΔE , 并认为实验中硬光子辐射过程可以与 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^- (\gamma)$ 过程区别开来,所以不需考虑硬光子辐射的过程. 在这个工作中,假定 $\Delta E = 0.1\sqrt{s}$. 把 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^- (\gamma)$ 过程的总截面表示成

$$\sigma_{tot} = \sigma_{tree} + \sigma_{virtual} + \sigma_{soft} = \sigma_{tree} (1 + \delta_{tot}), \quad (8)$$

其中 $\delta_{tot} = \delta_{virtual} + \delta_{soft}$.

2 数值计算

为了下面的数值计算,使用标准模型参数^[11]:

$m_e = 0.510\ 998\ 902\ \text{MeV}$	$m_\mu = 105.658\ 357\ \text{MeV}$
$m_\tau = 1.776\ 99\ \text{MeV}$	$m_u = 66\ \text{MeV}$
$m_c = 1.2\ \text{MeV}$	$m_t = 174.3\ \text{MeV}$
$m_d = 66\ \text{MeV}$	$m_s = 150\ \text{MeV}$
$m_b = 4.3\ \text{MeV}$	$m_W = 80.423\ \text{MeV}$
$m_Z = 91.187\ 6\ \text{MeV}$	$\alpha_{ew}^{-1}(0) = 137.035\ 999\ 76$

紫外发散和红外发散已经在数值计算中得到了消除,这里并没有给出其数值结果.

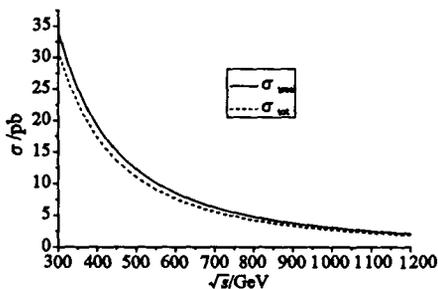
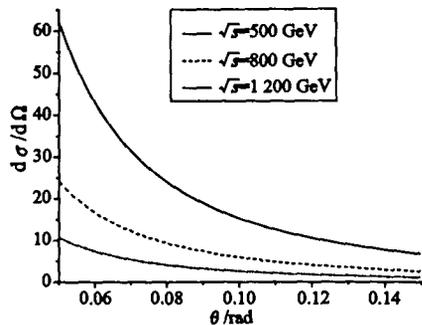


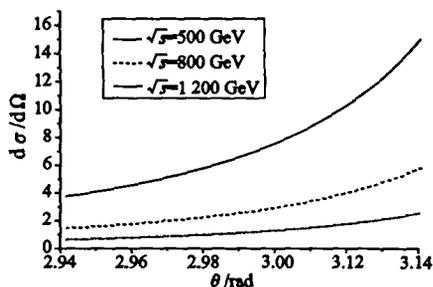
图4 散射截面随质心能量的变换关系

图4中实线表示 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 过程的树图散射截面随 \sqrt{s} 的变化曲线;虚线表示单圈弱电修正后的总截面随 \sqrt{s} 的变化曲线. 截面的单位是 pb, 质心能量 \sqrt{s} 从 300 GeV 增加到 1 200 GeV. 由于末态电子对的质量非常小,因此 2 个光子产生电子对的域值非常小,大约在 0.01 GeV,所以在图4中看不到截面随 \sqrt{s} 增长而增加的峰值,只看到一条呈不断下降趋势的曲线. 由图4还可以看出:单圈弱电辐射修正对 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 过程的修正很大. 在 $\sqrt{s} = 500\ \text{GeV}$ 的时候,相对修正值为 -9.98% ,而在 $\sqrt{s} = 1\ 000\ \text{GeV}$ 的时候,相对修正值达到 -12.21% .

图5是微分截面随散射角的变换关系图,图5(a)、(b)分别是在 $0.05\ \text{rad} \leq \theta \leq 0.15\ \text{rad}$ 和



(a) $0.05\ \text{rad} \leq \theta \leq 0.15\ \text{rad}$ 范围内



(b) $(\pi - 0.15)\ \text{rad} \leq \theta \leq (\pi - 0.05)\ \text{rad}$ 范围内

图5 总微分截面随弧度的变换曲线图

($\pi - 0.15)\ \text{rad} \leq \theta \leq (\pi - 0.05)\ \text{rad}$ 时得到的. 由图5可以看出:出射粒子主要集中在很小的一个角度范围内,在 GLC 上,亮度探测器的范围是 $0.05\ \text{rad} \leq \theta \leq 0.15\ \text{rad}$,已经可以俘获大部分的出射粒子了.

3 结语

笔者计算了标准模型下 $\gamma\gamma \rightarrow e^+e^-$ 过程在树图下的散射截面以及在单圈弱电辐射修正下的散射截面. 通过正规化、重整化处理消除了因引入圈图而带来的紫外发散. 由于在圈图中出现了虚光子传播子,因此会出现红外发散,笔者赋予虚光子一个很小的质量 m_γ ,把红外发散消掉,与 m_γ 的相关性用软光子辐射来消除,得到的总截面是一个红外和紫外有限的量. 最后得到了散射截面随质心能量的变换关系,并且可以看出一圈弱电辐射对树图截面的修正. 而且计算了亮度监测范围内的微分截面,这对该过程用于对撞机亮度监测具有一定的实际意义.

参考文献:

[1] ENGLERT F, BROUT R. Broken Symmetry and the Mass of Gauge Vector Mesons[J]. Phys Rev Lett, 1964, 13:321.
 [2] DENNER A, DETTMAIER S, SCHUSTER R. Radiative Corrections to $\gamma\gamma \rightarrow W^+ + W^-$ in the Electroweak Standard Model[J]. Nucl Phys B, 1995,452:80.
 [3] DENNER A, DETTMAIER S, STROBEL M. Radiative Cor-

- rections to $\gamma\gamma \rightarrow t\bar{t}$ in the Electroweak Standard Model [J]. Phys Rev D, 1996, 53: 44–54.
- [4] CHEN H, MA W G, ZHANG R Y, et al. $\mathcal{O}(\alpha_s)$ QCD and $\mathcal{O}(\alpha_{ew})$ Electroweak Corrections to $t\bar{t}h^0$ Production in $\gamma\gamma$ Collision[J]. Nucl Phys B, 2004, 683: 196–218.
- [5] DAWSON S, REINA L. QCD Corrections to Associated Higgs-boson-heavy-quark Production [J]. Phys Rev D, 1999, 59:054012.
- [6] 裘忠平. 现代量子场论导引[M]. 武汉:华中师范大学出版社, 1991.
- [7] HAHN T. Generating Feynman Diagrams and Amplitudes with FeynArts 3 [J]. Comput Phys Commun, 2001, 140: 418–431.
- [8] DUPLANCIC G, NIZIC B. Dimensionally Regulated One-loop Box Scalar Integrals with Massless Internal Lines [J]. Eur Phys J C, 2001, 20:357–370.
- [9] ESPRIU D, MATIAS J. Renormalization and the Equivalence Theorem: on-shell Scheme [J]. Phys Rev D, 1995, 52:6 530–6 552.
- [10] GIELE W T, GLOVER E W. Higher-order Corrections to Jet Cross Sections in e^+e^- Annihilation [J]. Phys Rev D, 1992, 46:1 980.
- [11] HAGIWARA K, HIKASA K, NAKAMURA K, et al. Review of Particle Physics [J]. Phys Rev D, 2002, 66:010001.

One-loop Electroweak Radiative Corrections to Electron-positron Pair Production Via Two Photon Collisions

ZENG Dai-min, FANG Zhen-yun, HU Bin-quan, LI Zhi-feng

(College of Mathematics and Physics, Chongqing University, Chongqing 400030, China)

Abstract: The authors calculate the cross-section with one-loop electroweak corrections to electron-positron pair production via two photon collisions in the standard model (SM), including virtual corrections and soft photon radiative correction. The relations between the cross-sections are discussed in tree level (and one-loop corrected cross sections) and center-mass energy in the luminosity measuring ranges of GLC. At last, the authors acquire the relation curves between differential cross section and the outgoing electron angle.

Key words: electroweak radiative correction; cross-section; center-mass energy; differential cross section

(编辑 张 革)