

最新重要实验发现

——B 介子衰变到 K^* 介子和光子

张肇西

(中国科学院理论物理研究所)

今年4月中康奈尔电子储存环 CESR (Cornell Electron Storage Ring) 上的 CLEO 组宣布了他们直接测量到了 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ 的结果(γ 代表光子), 给出了相应衰变分枝比。这是继我国精确测量 τ 轻子质量之后, 又一极其重要的高能物理实验结果, 受到理论工作者的普遍重视。本文将扼要介绍此实验及其理论意义。

CESR 是美国康奈尔 e^+e^- 储存环的名称, 但是它的能量比我国的 BEPC 高得多(质心能量 $\sqrt{s} = 9 \sim 12 \text{ GeV}$)。它是专门为研究 B 介子 ($m_B = 5.28 \text{ GeV}$), 以及 $\tau(b\bar{b})$ 家族物理而设计的。现在它的最佳亮度在质心系能量 $\sqrt{s} = m_{\tau(\text{c.s.})}$ ($m_{\tau(\text{c.s.})} = 10.58 \text{ GeV}$) 时为 $2.5 \times 10^{32} \text{ 厘米}^{-2}\text{秒}^{-1}$, 是当初设计亮度的五倍。其性能稳定, 束流质量良好。在此储存环上的主要探测器是 CLEO 组的探测器, 亦称为 CLEO。在早期 CLEO 探测器运行的基础上, 吸取经验, 在 1989 年做了很大改进, 并投入工作。从此, 为区别原来的探测器后者亦称为 CLEO-II。它大大提高了对 B 介子衰变产物(中性和带电)的能量分辨和空间分辨力。性能优良的对撞机和探测器是这次 CESR 能首先成功地测量到 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ 的优越条件。

CLEO 组多年集中精力研究 B 介子物理和 $\tau(b\bar{b})$ 家族物理。仅为研究 B 介子物理, 至今他们在质心能量 $\sqrt{s} = m_{\tau(\text{c.s.})}$, 共振产生 B^+B^- 和 $B^0\bar{B}^0$ 对的能量处, 已经积累了积分亮度 1.4fb^{-1} ($1\text{fb} = 10^{-39}\text{cm}^2$) 的数据。粗略地讲, 在这一能量下 1.0fb^{-1} 可以得到一百万对 $B\bar{B}$ 介子。因此 CLEO-II 探测器中大约记录了 2.8×10^6 B 介子事例。为了估计本底和比较、检验事例的可靠性, CLEO 组在 $\sqrt{s} = m_{\tau(\text{c.s.})}$ 附近, 共振峰之外也采集了积分亮度为 0.6fb^{-1} 的数据。

在 $\sqrt{s} = m_{\tau(\text{c.s.})}$ 共振处研究 B 介子的好处有二: (1) 共振效应有效地提高了 $B\bar{B}$ 介子对的产生率倒数。(2) 产生出来的 B, \bar{B} 介子几乎处在静止状态 ($\beta \equiv \frac{v}{c} \approx 0.06$)。原因是此共振刚好在 $B\bar{B}$ 介子的阈值上一点点。一个由 CLEO-II 记录到的 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ 典型的漂亮的事例, 经计算机重建的径迹图象如(图 1)。这是 e^+e^- 产生一对 $B^0\bar{B}^0$ 的情形。其中 $B^0 \rightarrow$

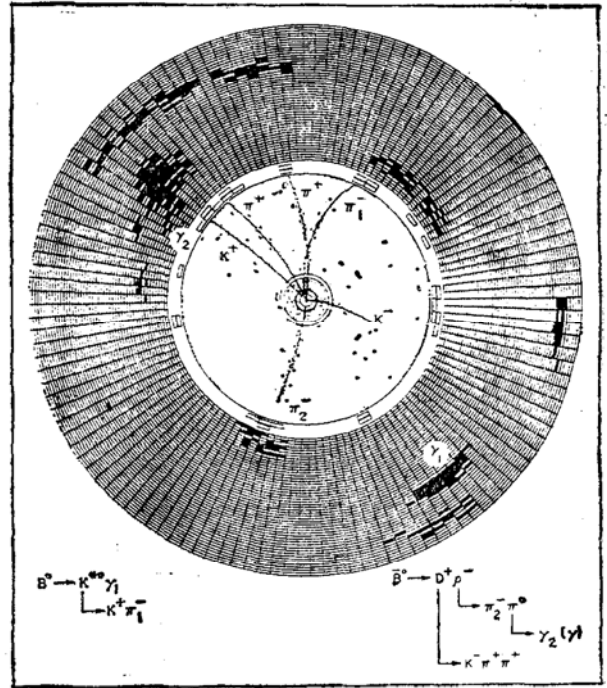


图 1

$K^*\gamma$, 而 $\bar{B}^0 \rightarrow D^+\rho^-$ 。这一事例中的 \bar{B}^0 衰变是一常见衰变方式。CLEO 组在发表他们的新发现时, 一共记录到了八个中性 B^0 介子衰变到 $K^*(892)\gamma$ 的事例。同时还记录到五个带负电的事例 $B^- \rightarrow K^*(892)\gamma$ 。有关事例数对 B 介子质量的台阶图见(图 2)。B 介子质量 $m_B = 5.28 \text{ GeV}/c^2$ 。由此得到的相应衰变分枝比如下:

$$B_r(B^0 \rightarrow K^*(892)\gamma) \approx (4.0 \pm 1.7 \pm 0.8) \times 10^{-3}$$

$$B_r(B^- \rightarrow K^*(892)\gamma) \approx (5.7 \pm 3.1 \pm 1.1) \times 10^{-3}$$

两者加权平均值为

$$B_r(B \rightarrow K^*(892)\gamma) \approx (4.5 \pm 1.5 \pm 0.9) \times 10^{-3}$$

此外, 与 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ 衰变有类似理论意义, 即都是由 $b \rightarrow s\gamma$, $b \rightarrow sg$, 其中 g 是胶子引起的过程, 还有 $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$, $B \rightarrow X, \gamma$ 等等。这里 X, 代表含 s 夸克可能的产物。对于后者, 目前 CLEO-II 的事例只能给出一些上限数值, 例如

$$B_r(\bar{B}^0 \rightarrow K^-\pi^+) < 3.0 \times 10^{-3} (90\% \text{ C.L.})$$

$$B_r(B \rightarrow X, \gamma) < 5.4 \times 10^{-3} (95\% \text{ C.L.})$$

实验上测量到 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ 的分枝比数值意义重大, 又一次直接测量到了电弱理论与量子色动力学(QCD)的“联合”量子效应。电弱理论中, 这一过程不能直接(树图)发生。引起这一过程的基本过程 $b \rightarrow s\gamma$ 是所谓“味道改变中性流”过程。在电弱模型理论中没有这种直接相互作用, 只能通过交换弱玻色子 W 的圈图(量子过程)发生。这样的图, 形状上有些像企鹅(图 3), 因此得名企鹅图。在相应的圈图中, 不仅有已知的夸克 u 和 c 出现, 而且有尚未发现的第三族(代)夸

究 t 出现。这一过程数值大小与对应它们的相应圈图的贡献直接有关。如果电弱统一模型不是如标准模型那样由最小的希格斯 (Higgs) 结构构造,而是扩充了的希格斯模型,即包含一个以上复数的希格斯弱二重态的模型,那么相应的带电希格斯粒子会进到相应的

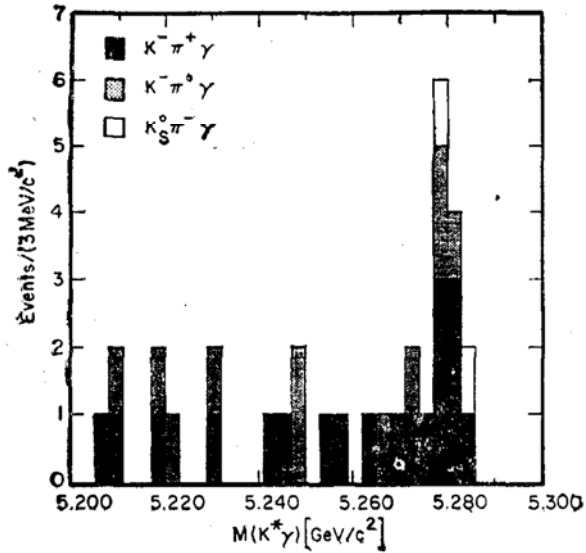


图 2

企鹅图中去。这样带电希格斯粒子可以取代企鹅图中的弱玻色子 w (图 2 中的 H 代表相应的带电希格斯,及取代 w 的地位处),将使圈图数目成倍增加。因此理论计算的精度足够高,且实验误差减小时,这一过程实验值不仅对 t 夸克质量,而且还将对这带电希格斯粒子的性质有很严的限制。

这个过程从电弱理论来看,至少要经过一圈图才能进行,而又是量子色动力学修正很大的少有过过程之一。对此过程有比较精确的理论计算,则需要对其做电弱一圈和量子色动力学圈,至少两圈量子场论的计算。计算结果表明, $b \rightarrow s\gamma$ 中的所谓量子色动力学“修正”可以使没考虑这一“修正”的结果增大 2 至 6 倍(具体数值取决于其中 top 夸克质量 m_t 的大小)。量子色动力学有如此之大“修正”是与这一过程本身在电弱理论模型中,要经过一圈图的量子过程才能发生的这一基本事实相联系的。

目前 CLEO 测出的 $B \rightarrow X_s \gamma$ 的数值上限和 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ 的分枝比值尚都在粒子理论的标准模型(量子色动力学与三族(代)费米子及最小黑格斯的电弱理论的统称)预言范围之内。根据标准模型预言,分枝比

$$B_r(B \rightarrow K^*(892)\gamma) = (1 \sim 10) \times 10^{-4},$$

而

$$B_r(B \rightarrow X_s \gamma) = (2.0 \sim 3.5) \times 10^{-4},$$

当 t 夸克质量在

$$90 \text{ GeV} < m_t < 200 \text{ GeV}$$

范围之内。可见今后不久,当实验精度再提高一些时,标准模型在这一过程上将受到严厉的考验!理论的精度提高亦会对 t 夸克质量值做出更明确的限制。

为寻找标准模型之外的新物理,尝试将希格斯方面进行扩充受到了特别的重视。它是标准模型超对称扩充必须出现的,而且能够提供未解之谜—— CP 破坏的起源的一个不同于标准模型的可能性等等。其中计划中建造的超高能对撞机 SSC 和 LHC 把直接找寻这扩充了希格斯粒子定为主要目标之一。然而目前 CLEO 关于 $B \rightarrow X_s \gamma$ 和 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ 的最新数据,已经能给出对它们的十分明确的限制,如上所述,在这类扩充下,必然会有带电希格斯粒子 H 代替企鹅图中的弱玻色子 w (图 2) 新型企鹅图贡献。所以 CLEO 组的具体数值现在已经“关掉”了很大一片关于带电黑格斯粒子非常有趣的“窗口”。其中重要的一点是这一过程对带电希格斯粒子的质量 m_{H^\pm} 很敏感,即使在当前有十分大的实验误差,和理论计算的不确定性的情况下,已把带电希格斯质量 m_{H^\pm} 的下限,推高到 $100 \text{ GeV}/c^2$ 。

总之, CLEO 组已把关于 $B \rightarrow X_s \gamma$ 和 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ 的实验提到重要地位,将成为全世界粒子物理理论家今后非常关注的过程。为了更好地利用 $B \rightarrow K^*(892)\gamma$ 的实验数据,现正在掀起改进计算其中 B 介子到 $K^*(892)$ 介子矩阵元的新高潮。

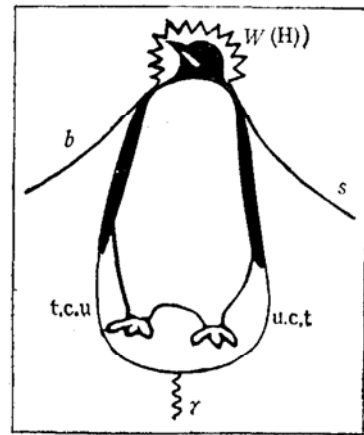


图 3

第五期英语角答案

(1) We are interested in quantity not quality. “not quality” 为非必要成分,仅提供附加的叙述和解释,应将其用逗与主句分开。

(2) I will visit my brother again, early tomorrow morning. “early tomorrow morning” 是句子的必不可少成分不应加逗与主句分开。

(3) All the workers old and young attended the meeting. “old and young” 为非限制短语,它提供非必要的附加信息,应加逗号和主句分开。

(4) Substances, having very high resistance, are called insulators. “having very high resistance” 这一短语是限制性的,是句子的必要成分,不能用逗号和句子分开。(程鹏燕)