

力学A(L) PHYS1001AL.02期中考试

2024年11月5日

卷II 11:20 - 12:20

强子对撞实验上的中性双玻色子过程 (50分)

背景介绍:

高能强子对撞实验可以产生各种不同的物理反应。在众多的物理反应中，有一类双玻色子产生过程。这类过程会通过弱相互作用产生两个矢量玻色子，而后矢量玻色子会继续衰变。矢量玻色子的衰变末态可以是各种类型费米子，但一般实验上会选取轻子末态进行测量。这使得双玻色子物理过程末态可以含有多个轻子。这种多轻子末态在强子实验上几乎只能通过双玻色子物理过程产生。于是，双玻色子物理过程天然就具有纯度高、本底低的特点。对于某些稀有物理现象，双玻色子过程就成为了理想的测量途径。

图1是强子对撞实验上中性双玻色子 $pp(q\bar{q}) \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-e^+e^-$ 过程的主要贡献费曼图。这是各类双玻色子过程中最稀有的物理过程。如前所述，该过程从初态一对正反夸克产生两个中性 Z 玻色子，这两个 Z 玻色子随后再各自衰变到一对电子(带正、负电荷的电子一般统称为电子)。于是，该过程末态产生了多达4个电子，这是非常特殊的物理末态。虽然 ZZ 过程反应几率很低，但通过4电子末态选择 ZZ 过程的纯度极高。其他各类物理过程，无论是真实产生4电子末态但是并非 ZZ 过程(比如 $Z\gamma$ 过程，其中 Z 和 γ 各自衰变成一对电子)，还是因为误判产生4电子末态(比如 $Z + b\bar{b}$ 过程，其中 Z 衰变成一对电子， b 和 \bar{b} 被探测器误判成一对电子)，对4电子末态的贡献只占真实 ZZ 过程的不到5%。因此， ZZ 过程成为了强子实验上本底最低的物理反应之一。这种高纯度优势使得我们可以精确测量 ZZ 过程的反应几率。由于 ZZ 过程是标准模型预言的极稀有过

程，因此测量 ZZ 过程相当于是在很高的精度层面检验标准模型相关计算。

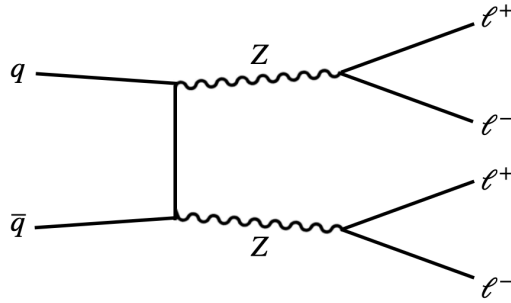


图1: ZZ 过程主要贡献的费曼图

在强子实验上， ZZ 过程可以通过图1以外的方式产生。图2给出了同样能够产生两个中性玻色子的物理反应机制。例如图2(b)给出了初态两个胶子通过box图产生 ZZ 、图2(c)给出了通过Higgs产生 ZZ 、图2(d)给出了通过fusion方式产生 ZZ 的费曼图。这些不同的方式都能产生两个中性玻色子 Z ，每个 Z 也都能继续衰变到一对电子。因此，实验观测到的 4 电子末态原则上是无法区分图2中的各种产生机制的。但是，这些不同的产生机制在运动学层面还是有不同的。最典型的，就是两个 Z 玻色子的角度、能量之间的关联度是不一样的。比如，图1中的 $q\bar{q}$ 初态的主费曼图，其产生的两个 Z 玻色子原则上可以具有更接近的动量方向角度和能量。而图2(b)、图2(c)的两种胶子初态费曼图，其产生的两个 Z 玻色子的相对角度就会大一些。

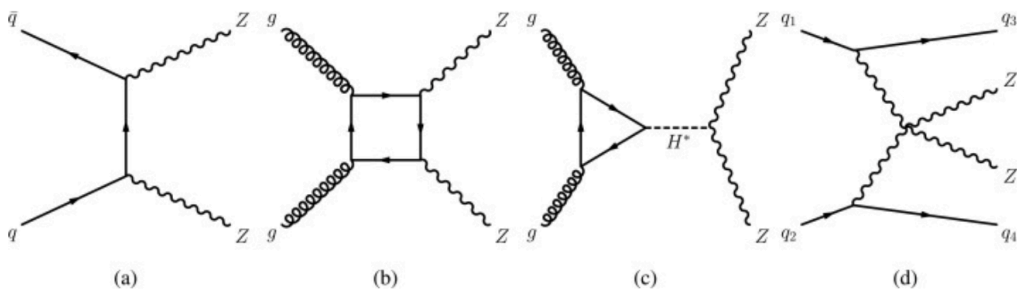


图2: 能够产生 ZZ 过程的各种费曼图

对于一个质子-质子对撞的强子实验，我们以如下方式建立坐标系：如图3所示，两束质子各自加速到6.5 TeV进行对撞，动量大小相等方向相反。 z 轴正方向以其中一个束流为准，并以此建立标准右手直角坐标系。物理反应都从坐标原点 O 处发生。

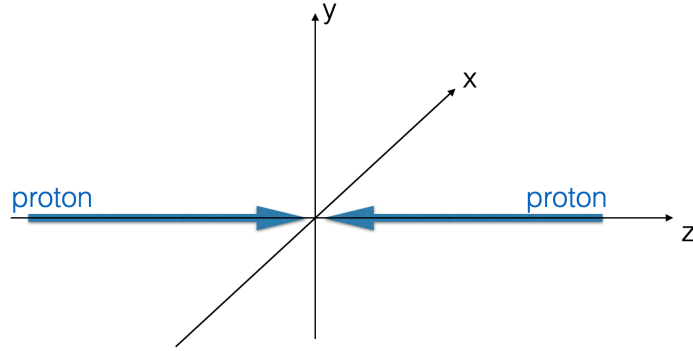


图3：质子-质子对撞坐标系

定义表示方向和动量大小的物理量 rapidity：

$$Y = \frac{1}{2} \ln \frac{E + P_z}{E - P_z}$$

其中 E 是能量， P_z 是 z 方向动量分量。显然，这是一个既相关于动量大小、又相关于动量方向的物理量。强子对撞实验上粒子动量极高，属于极端相对论情况。因此我们在相对论情况下给出能量、动量的关系：

$$E^2 = P^2 + M^2$$

其中 P 是总动量， M 在上式关系中定义为不变质量。这里按自然单位制进行计算，取光速 $c = 1$ (无量纲)。前面说到的 ZZ 过程不同产生机制下两个 Z 玻色子的运动学关系不同，就可以体现在它们的 rapidity 上。比如，实验上常见的处理方式是计算两个 Z 玻色子的 rapidity 的差值的绝对值： $|Y_1 - Y_2|$ 。

求解问题：

表1给出了一个典型的 4 电子末态事例。在这个事例中，末态的 4 个电子被探测，其动量以及动量分量均被测量。假设表1中所给测量数值没有误差，并认为该事例就是来自于一个真实的 ZZ 过程，求该事例中两个 Z 玻色子的 rapidity 差的绝对值： $|Y_1 - Y_2|$ 。计算中，电子作为基本粒子，其不变质量较小，可忽略。此外， Z 玻色子寿命较短，其不变质量原则上可以取任意值，只是取不同值的概率不同。实际上， Z 玻色子不变质量的取值分布具有一个很尖的峰型结构。因此，此题目中，我们忽略 Z 玻色子不变质量分布的宽度，认为 Z 玻色子的质量为固定值：91 GeV。所有计算均在自然单位制下进行。

	Px	Py	Pz
电子1	259.368	-9.330	267.967
电子2	13.396	85.838	88.848
电子3	39.979	178.473	35.525
电子4	111.065	42.743	72.616

表1：某 4 电子末态事例中电子的动量。单位：GeV，自然单位制