

## 中微子去了哪里？

当两个质子在大型强子对撞机（LHC）中以非常高的能量碰撞时，该碰撞可能会产生多个粒子，例如电子， $\mu$ 子，中微子，夸克，以及它们各自的反粒子。大多数这些粒子可以被设在碰撞点周围的粒子探测器探测到。例如，在夸克经历一个称为强子化的过程中，夸克们变成了亚原子粒子的簇射，称为“喷注”。

另外，探测器中存在的强磁场甚至使非常高能量的带电粒子弯曲到足以确定其动量。ATLAS 探测器使用超导螺线管系统，能在探测器内部的碰撞点周围产生恒定均匀的 2.00 特斯拉磁场。但会使动量在某一数值以下的带电粒子强烈弯曲，以至于它们在磁场中不停转动并且极可能不被探测到。由于中微子的特性，它通过探测器逃逸时不会发生相互作用，因而完全不会被检测到。

数据：电子静止质量  $m = 9.11 \times 10^{-31}$  kg; 基本电荷,  $e = 1.60 \times 10^{-19}$  C;

光速  $c = 3.00 \times 10^8$  m s<sup>-1</sup>; 真空介电常数  $\epsilon_0 = 8.85 \times 10^{-12}$  F m<sup>-1</sup>,

### A 部分 ATLAS 探测器物理

- A.1** 当磁场垂直于电子运动速度时，推导出电子圆形轨道的回旋运动半径  $r$  的表达式，将该半径表示为其动能  $K$ ；电荷量  $e$ ；质量  $m$  和磁场  $B$  的函数。假设电子是非相对论的经典粒子。 0.5pt

实际必须用相对论来处理 ATLAS 探测器内部产生的电子。然而，当考虑相对论动量时，回旋运动半径的公式也适用于相对论运动。

- A.2** 计算能使电子沿径向逃离探测器内部的动量最小值。探测器内部呈圆柱形，半径为 1.1 米，电子恰好在圆柱体中心的碰撞点产生。用 MeV/c 表达你的答案。 0.5pt

当加速度垂直于速度时，电荷  $e$  和静止质量  $m$  的相对论粒子发射电磁辐射，称为同步辐射。发射功率是

$$P = \frac{e^2 a^2 \gamma^4}{6\pi\epsilon_0 c^3}$$

其中  $a$  是加速度， $\gamma = [1 - (v/c)^2]^{-1/2}$ 。

- A.3** 当粒子速度非常接近于光速时，称其为超相对论粒子。对于超相对论粒子，发射功率可表示为： 1.0pt

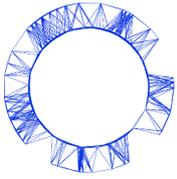
$$P = \xi \frac{e^4}{\epsilon_0 m^k c^n} E^2 B^2,$$

其中  $\xi$  是实数， $n, k$  是自然数， $E$  是带电粒子的能量， $B$  是磁场。求出  $\xi, n$  及  $k$  的值。

- A.4** 在超相对论极限中，电子能量的时间函数是： 1.0pt

$$E(t) = \frac{E_0}{1 + \alpha E_0 t},$$

其中  $E_0$  是电子的初始能量。推导出  $\alpha$  的表达式，它是以  $e, c, B, \epsilon_0$  和  $m$  表示的函数形式。



**A.5** 考虑在碰撞点处产生的电子，沿径向方向射出，其能量为 100GeV。当电子逃离探测器内部时，估算其因同步辐射而损失的能量值，以 MeV 为单位。 0.5pt

**A.6** 在超相对论极限下，推导出电子回旋角频率的表达式，它是一个关于时间的函数。 0.5pt

### B 部分. 寻找中微子

在图 1 中，两个质子之间的碰撞会产生顶夸克 ( $t$ ) 和反顶夸克 ( $\bar{t}$ )，它们是迄今为止检测到的最重的基本粒子。顶夸克会衰变成  $W^+$  玻色子和底夸克 ( $b$ )，而反顶夸克衰变成  $W^-$  玻色子和反底夸克 ( $\bar{b}$ )。在图 1 所示的情况中， $W^+$  玻色子衰变为反  $\mu$  子 ( $\mu^+$ ) 和中微子 ( $\nu$ )， $W^-$  玻色子衰变为夸克和反夸克。本题的任务是使用一些检测到的粒子动量来重建中微子的所有动量。为简单起见，除顶夸克和  $W^\pm$  玻色子外，本题中的所有粒子和喷注都将被视为无质量的。

除了中微子沿  $z$  轴的动量分量，其他所有顶夸克衰变产物的动量可以通过实验来确定（见下表）。探测器探测到的终态粒子的总线性动量仅在横向平面 ( $xy$  平面) 上为零，而沿着碰撞线方向 ( $z$  轴) 则不为零。因此，人们可以从横向平面中的缺失动量中找到中微子的横向动量。

在 2015 年 6 月 4 日，LHC 的 ATLAS 实验在 00:21:24 GMT+1 时记录了质子 - 质子碰撞，如图 1 所示。

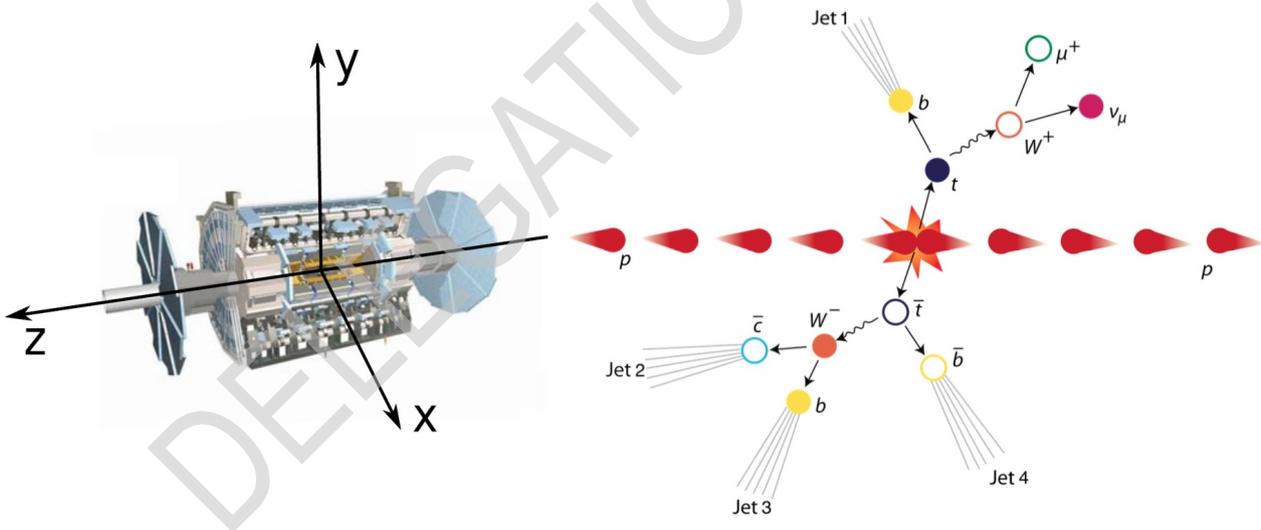
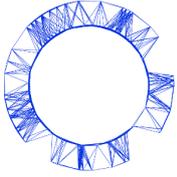


图 1. ATLAS 探测器的坐标系（左）和质子 - 质子碰撞（右）的示意图。

来自顶夸克衰变的三个终态粒子的动量，包括中微子的，其各部分分量写在下面。

粒子	$p_x$ (GeV/c)	$p_y$ (GeV/c)	$p_z$ (GeV/c)
反 $\mu$ 子 ( $\mu^+$ )	-24.7	-24.9	-12.4
喷注 1 ( $j_1$ )	-14.2	+50.1	+94.1
中微子 ( $\nu$ )	-104.1	+5.3	-



- B.1** 推导出一个方程，将  $W^+$  玻色子质量平方  $m_W^2$  与上表中的中微子和反  $\mu$  子动量分量联系起来。用中微子和反  $\mu$  子横向动量、

$$\vec{p}_T^{(\nu)} = p_x^{(\nu)} \hat{i} + p_y^{(\nu)} \hat{j} \text{ 和 } \vec{p}_T^{(\mu)} = p_x^{(\mu)} \hat{i} + p_y^{(\mu)} \hat{j},$$

以及它们的  $z$  轴动量分量， $p_z^{(\mu)}$  和  $p_z^{(\nu)}$  来表示你的答案。

- B.2** 假设  $W^+$  玻色子质量  $m_W = 80.4 \text{ GeV}/c^2$ ，计算出沿  $z$  轴的中微子动量分量即  $p_z^{(\nu)}$  的两个解的数值，以  $\text{GeV}/c$  为单位表示你的答案。

- B.3** 计算前面两个解各自所对应的顶夸克质量。用单位  $\text{GeV}/c^2$  表示你的答案。

[如果你没有在 B.2 中得出这两个解，使用

$$p_z^{(\nu)} = 70 \text{ GeV}/c \text{ and } p_z^{(\mu)} = -180 \text{ GeV}/c$$

对于顶夸克质量的测量，归一化的碰撞事件的频数（由实验测定的），有两个部分：称为“信号”（相应于顶夸克衰变）和“背景”（相应于其他过程而不包括顶夸克事件）。实验数据则包含了这两个过程，见图 2。

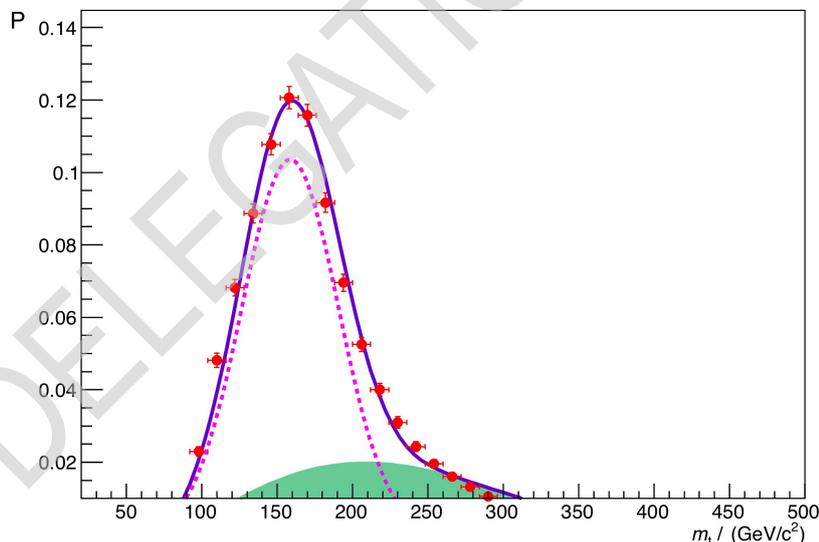


图 2. 由实验测定的顶夸克质量分布，即，不同顶夸克质量的事件发生的频数的归一化图。图中点对应于数据。虚线对应于“信号”，阴影对应于背景。

- B.4** 根据图中顶夸克的质量分布，前面得出的两个解中，哪一个更可能是正确的？对于更可能是正确的解，由图估计其概率。

- B.5** 利用那个更可能正确的解，计算顶部夸克在衰变前行进的距离。假设顶夸克静止时的平均寿命为  $5 \times 10^{-25} \text{ s}$ 。