

北京正负电子对撞机 (BEPC) 束团长度的测量

李 金 毛泽普

(中国科学院高能物理研究所, 北京 100039)

摘 要

讨论了利用 J/ψ 粒子次级产物中带电粒子顶点测量对撞机束团长度的方法, 并给出北京正负电子对撞机 (BEPC) 对撞点处的束团长度。

一、引 言

在正负电子对撞机中, 束团的长度、束团中电子的分布、束团在对撞点的位置以及它的稳定性是重要的研究课题。精确测量束团的长度对于束流动力学和粒子物理实验研究均有重要意义。

束团长度测量的方法很多^[1]。目前 BEPC 储存环上采用的方法有同步光法、量子寿命法、壁电流电阻法等。本文提出由次级带电粒子径迹顶点测量束团长度的方法, 并给出 BEPC 束团在对撞点处的长度。与其他方法相比较, 这种方法有两个特点: 1) 带电粒子径迹的顶点就是正负电子发生碰撞的位置, 所以测量比较直接。2) 该方法所测量的是对撞点处两束团碰撞的长度(或称亮度长度), 它对物理实验来讲具有特殊的意义, 因为它直接影响飞行时间计数器的时间分辨, 影响对 J/ψ 事例的选取和本底事例的消除。而其他方法只能测量对撞区以外的单束团长度。

二、原理和方法

正负电子在对撞点处碰撞, 当二者的能量等于 J/ψ 粒子的质量 3.1GeV 时, 所产生的 J/ψ 粒子是静止的。 J/ψ 粒子的寿命很短, 它会衰变为一对电子, 一对 μ 子或者很多强子等。这些次级粒子的顶点就是 J/ψ 粒子产生的位置, 也就是正负电子对撞的位置。

设对撞点为坐标原点, 负电子束团从对撞点负方向来, 在 t 时刻, 电子的 z 方向分布为:

$$N^-(z, t) = \frac{N_0^-}{\sqrt{2\pi\sigma_z^-}} e^{-\frac{(z-ct)^2}{2(\sigma_z^-)^2}}, \quad (1)$$

式中 N_0^- 为束团中电子的数量, σ_x^- 为束团的高斯分布宽度, c 为束团运动的速度.

与负电子束团完全对称, 在 t 时刻正电子 z 方向的分布为

$$N^+(z, t) = \frac{N_0^+}{\sqrt{2\pi\sigma_x^+}} e^{-\frac{(z+ct)^2}{2(\sigma_x^+)^2}}, \quad (2)$$

式中 N_0^+ 为束团中正电子的数量, σ_x^+ 为束团的高斯分布宽度.

已知 t 时刻在 z 处产生 J/ψ 粒子的数量 $N^J(z, t)$ 正比于对撞截面 σ_J 和瞬时亮度 $\mathcal{L}(z, t)$:

$$N^J(z, t) = \sigma_J \mathcal{L}(z, t), \quad (3)$$

$$\text{其中 } \mathcal{L}(z, t) = \frac{fN^+(z, t)N^-(z, t)}{4\pi\sigma_x(z)\sigma_y(z)}, \quad (4)$$

式中 f 为束团的旋转频率, $\sigma_x(z)$ 和 $\sigma_y(z)$ 分别为二束团在 z 处的水平和垂直方向的宽度. 为求出两束团碰撞的整个过程中产生的 J/ψ 事例 $N^J(z)$, 应对时间积分, 即将 (1)、(2)、(4) 式代入 (3) 式后对 t 积分, 得到在 z 处产生 J/ψ 粒子的计数. 当两个束团相差不大, 即 $|\sigma_x^+ - \sigma_x^-| \ll (\sigma_x^+ + \sigma_x^-)$, 并令

$$\sigma_x = \frac{\sigma_x^+ \sigma_x^-}{\sqrt{\sigma_x^{+2} + \sigma_x^{-2}}}, \quad (5)$$

则 J/ψ 粒子的分布为:

$$N^J(z) = K e^{-\frac{z^2}{2\sigma_x^2}}, \quad (6)$$

$$\text{这里的常数 } K = \frac{\sigma_J f N_0^+ N_0^-}{(2\pi)^{3/2} \sigma_x(z) \sigma_y(z) (\sigma_x^{+2} + \sigma_x^{-2})^{1/2} C}.$$

由式 (5)、(6) 不难看出:

- 1) J/ψ 粒子的 z 方向分布 $N^J(z)$ 是高斯分布,
- 2) 当 $\sigma_x^+ = \sigma_x^-$ 时, 即正、负电子束团长度相同, 且 $\sigma_x(z)$ 和 $\sigma_y(z)$ 随 z 的变化很小时, 得到

$$\sigma_x^+ = \sigma_x^- = \sqrt{2} \sigma_x. \quad (7)$$

我们称 σ_x 为双束团长度, 或亮度长度. σ_x^+ 或 σ_x^- 为单束团长度.

J/ψ 粒子的探测是由北京谱仪 (BES) 完成的^[2,4]. BES 是安置在 BEPC 第一对撞实验区中的大型通用多粒子磁谱仪. 它由中心漂移室 (CDC), 主漂移室 (MDC), 簇射计数器 (SC) (包括插部和端盖两部分), 飞行时间计数器 (TOF) 和 μ 子探测器组成. CDC, MDC, TOF 和 SC 均在谱仪螺线管磁铁的磁场中. 磁场强度为 0.4T. CDC 和 MDC 用于选取和测量带电粒子的轨迹, TOF 用于分辨 K, π, p 粒子. SC 用于测量中性粒子和电子的能量. 当正负电子束在对撞点碰撞时, BES 的触后判选系统选择 J/ψ 粒子并由计算机对事例做在线记录. 全部测量过程由在线计算机 VAX 11/785 控制. 为从分布 $N^J(z)$ 得到束团长度 σ_x , 采取如下步骤:

- 1) 选择 J/ψ 粒子的某些衰变道: $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ 或 $J/\psi \rightarrow$ 强子. 不论选取哪种衰变道都需要去掉本底, 例如宇宙线事例, 电子打在剩余气体或束流管壁上产生的事例等.

- 2) 对所选取事例中的带电粒子径迹进行拟合, 并求出拟合径迹的顶点坐标 z (即 $x=0, y=0$ 处的 z 坐标)。
- 3) 对所有带电粒子的径迹顶点坐标 z 做统计, 得到分布 $N^J(z)$ 。
- 4) 对分布 $N^J(z)$ 做高斯拟合, 并得到高斯分布的标准偏差 σ_z 。这就是在对撞点处的双束团长度或亮度长度。
- 5) 由式(7)得到正、负电子束流在对撞点处的束流长度 σ_z^+ (或 σ_z^-)。

三、测量结果

1. 只选取 J/ψ 强子衰变道, 由带电强子径迹顶点坐标得到的分布 $N^J(z)$ 如图 1 所示。图中本底比较小, 是一个典型的高斯分布。由拟合曲线得到:

$$\sigma_z = 4.4\text{cm};$$

$$\sigma_z^+ = \sigma_z^- = 6.2\text{cm}.$$

高斯分布的平均值不等于零, 说明两束团对撞的中心位置偏离了坐标原点, 其偏差为

$$\Delta = +1.2\text{mm}.$$

这是分析 1990 年 6 月 6 日—6 月 9 日测量的 J/ψ 事例数据所得到的结果。说明在此期间 BEPC 的平均束团长度为 6.2cm, 对撞中心偏离原点 1.2mm。

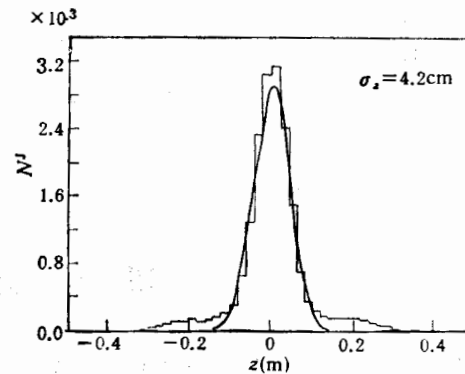
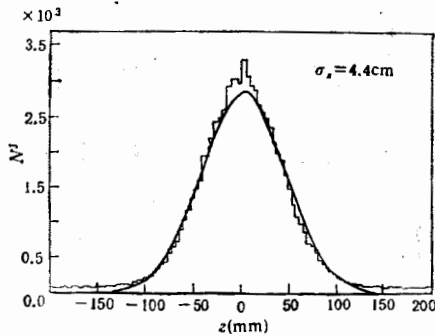


图 1 J/ψ 事例径迹 z 向顶点分布图

图 2 J/ψ 、 e^+e^- 和 $\mu^+\mu^-$ 事例径迹 z 向顶点分布图

2. 选取 J/ψ 所有衰变道(包括 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$, $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ 和 $J/\psi \rightarrow$ 强子)的次级带电粒子, 得到的 $N^J(z)$ 分布如图 2 所示。不难看出, 远离中心处的本底比较大, 但在峰值附近的实验数据与高斯拟合曲线仍然符合得较好。其结果是

$$\sigma_z = 4.2\text{cm};$$

$$\sigma_z^+ = \sigma_z^- = 5.9\text{cm}.$$

对撞中心的位置偏离为

$$\Delta = +1.9\text{mm}.$$

这是 BEPC 在 1990 年 6 月 8 日的束团长度和位置偏离。我们又选用 J/ψ 的强子衰变道对同一数据做了分析, 得到的束团长度 $\sigma_z = 4.3\text{cm}$, 束团中心位置偏离原点 $\Delta = +1.7$

mm。由此可见,在同一次测量中,采用 J/ψ 所有衰变道的带电粒子和只选取 J/ψ 强子衰变道的带电强子所得到的束团长度基本一致。但前者的数据分析比较简单,不必将 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 和 $J/\psi \rightarrow \mu^+\mu^-$ 两种衰变道分离并去除。所以在稳定性测量时采用了这种方法。

3.利用上述的第二种方法得到不同时间的 BEPC 束团长度和对撞中心位置,从而了解 BEPC 运行的稳定性。从1990年4月22日至1990年6月9日,分析了从 Run 766 到 Run 960 的194次测量,每次测量用 Run 号表示。由每次测量数据得到的束团长度 σ_x 和对撞中心位置偏差 Δ 分别示于图3和图4。从图中看出:

- 1) 除个别 Run 外,双束团长度 σ_x 的变化在4.4—5.6cm 之间;
- 2) Run 880 至 Run 890 之间,束团变化比较大;
- 3) 对撞中心平均偏离原点 ~ 2 mm,最大的偏离为4mm,主要在 Run 800—Run 820 之间。

这些结果对分析 BEPC 的运行状况和稳定性很有意义。

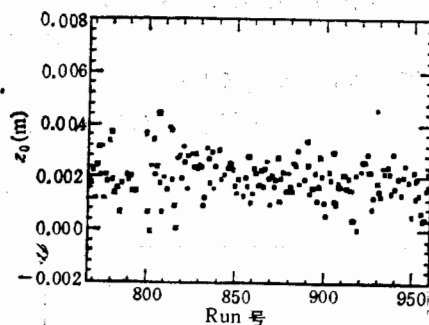
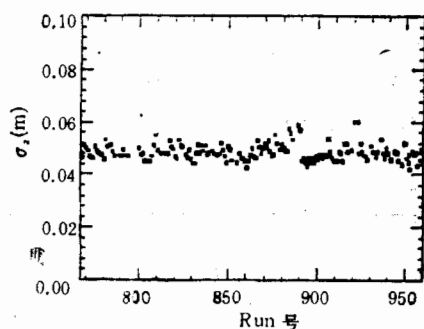


图3 束流长度 σ_x 随 Run 号(时间)的变化 图4 对撞中心位置 z_0 随 Run 号(时间)的变化

四、误差分析

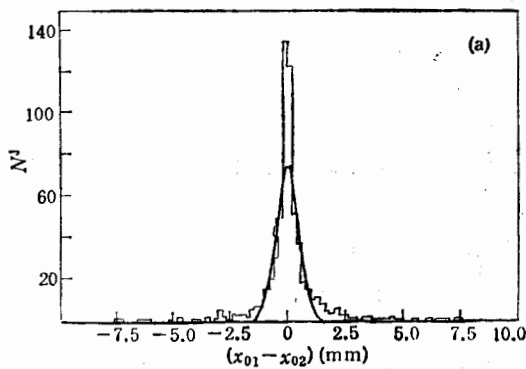
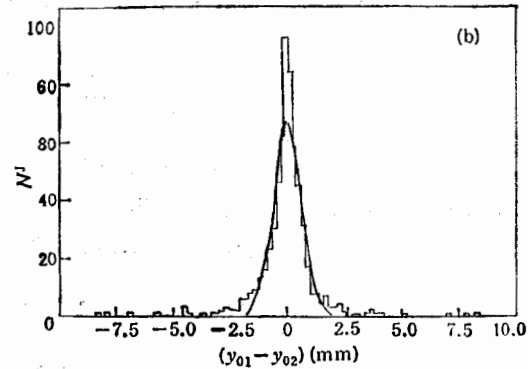
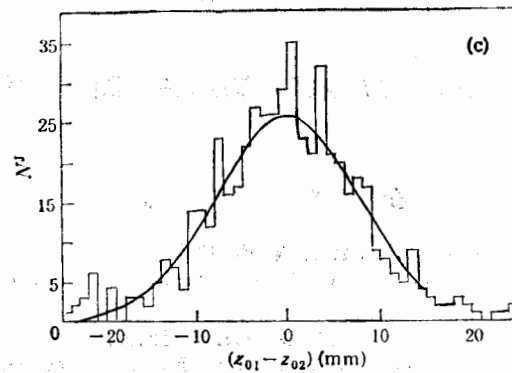
用本方法测量 σ_x 的误差来源主要有三个:

1.主漂移室的位置分辨为 $\sim 200 \mu\text{m}$ 。由大于8次击中的坐标拟合求得带电粒子的径迹与真正的带电粒子径迹有偏离,所以拟合径迹的顶点不一定是产生 J/ψ 粒子的原点。

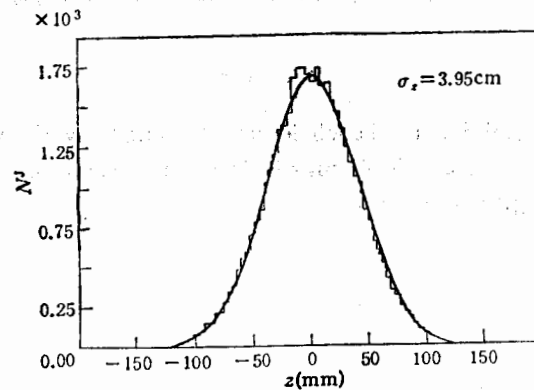
2.束团本身造成的脉冲磁场很强,虽然束团在 x 、 y 方向的截面很小,也可能对带电粒子的轨迹产生影响。而我们在做径迹拟合时忽略了这一因素。

对以上两种误差做了如下测定。选取 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 事例, e^+ 和 e^- 的两条径迹应该从同一点出发,或者说,两条真正径迹顶点的位置差为零。由于上述两个因素,拟合的两条径迹的顶点不重合,可以利用两顶点之差来估计其误差大小。图5(a),(b)和(c)给出 x 、 y 、 z 三个方向上拟合径迹顶点之差 $(x_{01} - x_{02})$ 、 $(y_{01} - y_{02})$ 和 $(z_{01} - z_{02})$ 的分布。高斯拟合后得到不同方向上的误差。分析 Run 935—Run 960 的测量数据,给出 x 方向的误差为0.45mm, y 方向的误差为0.65mm, z 方向的误差为0.69cm。

3.除上述两种误差外,选取事例方法的不同也会带来一定误差。选取 $J/\psi \rightarrow e^+e^-$ 事

图 5(a) 巴-巴事例二径迹的 x 向顶点差分布图 5(b) 巴-巴事例二径迹 y 向顶点差分布图 5(c) 巴-巴事例二径迹 z 向顶点差分布

例时,因为 e^+ 和 e^- 的能量很高,容易去除本底,但事例数少,统计误差偏大。采用 $J/\psi \rightarrow$ 强子的事例时,事例数多,统计误差小,但事例和径迹的选取比较困难。若不做严格的径迹选择,得到 $\sigma_z = 4.4\text{cm}$ (图 1)。做了比较严格的径迹选择(增加了对径迹动量拟合质量和顶位置等参量的限定)之后,得到 $\sigma_z = 3.95\text{cm}$ (图 6)。两者差为 0.35cm 。可见,这

图 6 强子事例好径迹 z 向顶点分布图

种方法确定束团长度还依赖于事例和径迹的选取,但误差不大。

五、讨 论

1. 与其他方法测量的 BEPC 束团长度比较^[3], 本方法得到了比较准确的, 与设计值比较一致的结果, 而且给出了明确的测量误差。

2. 本方法测量的结果是在一次测量中束团的长度, 测量过程中, 两个束流的总流强从 25mA 降至 15mA, 束团长度在变化。这种方法测不到这种变化。但可以得到不同 Run 之间束团长度的差别。

3. 测量中忽略了束团横截面 $\sigma_x(z)$ 和 $\sigma_y(z)$ 与 z 的关系。实际上因为 $\sigma_x(z)$, $\sigma_y(z)$ 随 $|z|$ 的增加而增大, 使亮度 $\mathcal{L}(z)$ 随 $|z|$ 的增大而减小, 即 σ_x 也随之减小。文献[3]对此做了详细讨论。在我们测量的流强范围内, 这种影响很小, 可以忽略。

本工作利用 BES 所采集的 J/ψ 事例的数据, 并与张闯和沈经两同志做了有益的讨论, 在此表示感谢。

参 考 文 献

- [1] 汤城等, 1988 年第四次全国粒子加速器年会论文集, 第 418 页。
- [2] Zheng Zhipeng and Qi Nading, Proc. of the KEK topical conference on e^+e^- collision physics, p.55.
- [3] 张闯, 高能物理所内部报告“由次级粒子径迹确定对撞束团尺寸的讨论”。
- [4] Ye Minghan and Zheng Zhipeng, Proc. of the Inst. Euro. physics conference on HEP, p.622.

The Measurement of Bunch Length of Beijing Electron Positron Collider

LI JIN MAO ZEPU

(Institute of High Energy Physics, Academia Sinica, Beijing 100039)

ABSTRACT

The method of determining the bunch length of collider by the vertex of charged particles which came from J/ψ decay is discussed. The bunch length of Beijing Electron Positron Collider at colliding region is presented.