

K_s^0 重建及其寿命测量在 BES II 上的研究*

王喆 袁野 张长春

(中国科学院高能物理所 北京 100039)

摘要 在 BES II 上利用 Bhabha, dimu 事例确定了 BEPC 束流对撞中心位置,并以此为初级顶点研究了次级顶点的重建,改进了原有次级顶点重建程序,在此基础上选择 $J/\psi \rightarrow K_s^0 \bar{K}^{*0} \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$ 事例,测量了 K_s^0 的寿命,并利用 50MJ/ ψ 数据测量了 K_s^0 的单举质量谱,最后还利用 MC 研究了 K_s^0 质量的 1C 拟合.

关键词 初级顶点 次级顶点 寿命测量

1 引言

在 J/ψ 衰变中 K_s^0 大量产生. 实现 K_s^0 的重建,提高含 K_s^0 物理信号的信噪比,在 J/ψ 衰变性质的研究中十分重要. 例如 CP 破坏的 $J/\psi \rightarrow K_s^0 \bar{K}_s^0$ 衰变,用于寻找 $\xi(2230)$ 的 $J/\psi \rightarrow \gamma K_s^0 \bar{K}_s^0$ 衰变等, K_s^0 的重建与识别在这些衰变过程的研究中起着关键的作用.

在 BES^[1,2] 过去的 J/ψ 与 D_s 物理研究中,已有人分别做过粒子产生的初级顶点^[3]与 K_s^0 衰变次级顶点^[4]的软件研究工作. 由于 BEPC e^+e^- 束流线中心位置的偏置与束团大小的影响,在 K_s^0 的重建中,初级顶点的重建需要研究与解决. 本文借助 $\mu^+ \mu^-$ 与 bhabha 事例研究了初级顶点的重建.

由于较大的衰变分支比和 K^{*0} 共振态条件, $J/\psi \rightarrow K_s^0 \bar{K}^{*0}$ 衰变过程可提供较纯的 K_s^0 样本. BES 蒙特卡罗软件可以模拟粒子在探测器中的输运过程,同时也保留了粒子产生时的位置与动量,在检查 K_s^0 重建软件时是十分有用的信息. 本文利用 BES-II V103 版本软件库^[5]与新的 J/ψ 数据,仔细地研究了其中的 klamcorr 软件,对其做了查错与改正,并确保误差矩阵在 Telesis 运动学拟合程序的调用中彼此协调. 在此基础上,利用 BES-II 的五千万 J/ψ 事例,仔细研究与测量了 K_s^0 平均衰变长度与寿命.

2 初级顶点重建

2.1 方法

本文利用 $\mu^+ \mu^-$ 与 bhabha 事例研究事例初级顶点的分布. 设束流对撞中心位置为 P, 每个 run 期间,束团位置在 xy 方向变化的线度很小,可假定 P 保持不变. 在 xy 平面内, P 到径迹最近点为 B; 又假定 BES 探测器几何坐标原点为 O, 在 xy 平面内, O 到径迹最近点为 CA (Closest Approach) (见图 1(a)).

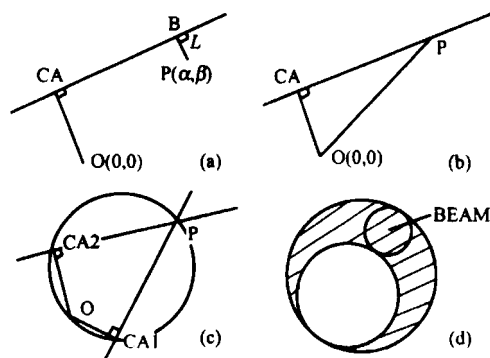


图 1 $x-y$ 平面内的初级顶点分布的图示说明

对于确定的径迹,即确定的 CA, PB 之间的距离 L 是 P 点坐标 (α, β) 的函数,即 $L = L(\alpha, \beta)$. 对于每个 run 内所选事例的 L_i 求平方和,并作取极小计算,可

2002-04-01 收稿, 2002-07-02 收修改稿

* 国家自然科学基金(19991480)资助

得到该 run 束流对撞中心位置 P 的解 (α, β) , 即 $\text{Min} \sum_{i=1}^n L_i^2(\alpha, \beta)$. 在 $\mu^+ \mu^-$ 与 bhabha 事例中 e^+ , μ^+ 动量大, 其径迹在上述 $O-CA$ 与 $P-B$ 范围内可近似看作直线.

图 2 给出了 MC(左列)和 DATA(右列)(只以某一 run 为例)的计算结果. MC 的初级顶点已按照真实 data 的结果作了设置, 以便比较. 图 2(a), (b) 为 CA 位置的 x, y 的两维分布图; (c), (d) 和 (e), (f) 分别为 CA 位置的 x, y 随 ϕ 角(径迹在 $x-y$ 平面内的投影与 x 轴的夹角)振荡图形, 其中虚线为预期曲线; (g), (h) 为找到束流对撞中心位置 P 以后径迹 B 点的分布图. 图中 B 点的展宽包含束流宽度与位置测量误差的贡献.

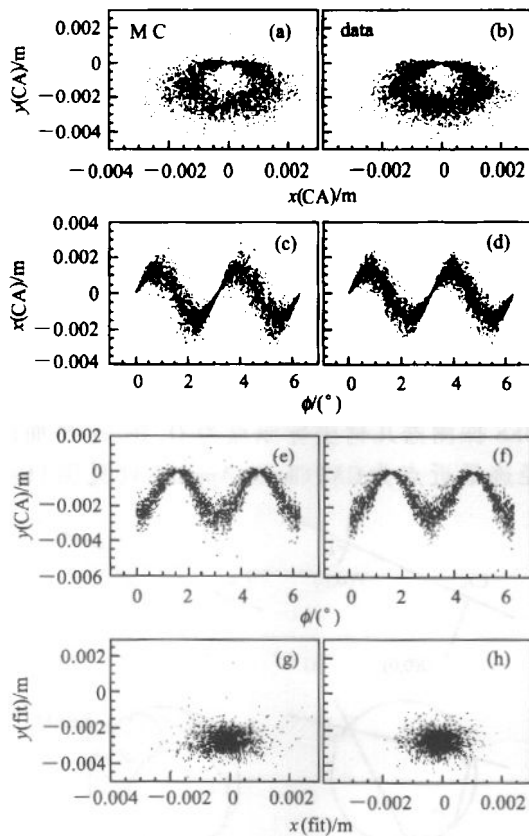


图 2 初级顶点研究
MC 与 data 间的对照

若从 K^+ 衰变出的 K, π 径迹求单个事例的初级顶点, 计算该事例 K^0 的衰变长度, 可以消除径迹探测器随时间变化引起的误差贡献. 但是, MC 模拟表明, 当 K, π 夹角较小时, 它们之间交点位置测量具有较大的计算误差, 如只取夹角较大的事例, 又会丢失大量的信号. 并且一些特殊衰变道如 $J/\psi \rightarrow K^0 \bar{K}^0$ 是给出这样的初级顶点的. 因此, 每个 run 期间采

用 $\mu^+ \mu^-$ 与 bhabha 事例决定的束流对撞中心位置为 K^0 衰变的初级顶点.

2.2 对图 2 中 CA(x, y) 分布形状的解释

假设束团是一个没有大小的点 $P(a, b)$, 各条径迹全由 P 发出, 由 P, O 及 CA 之间的集合关系可见 CA 一定在以 OP 为直径的圆上(见图 1(b), (c)).

当束团有一定大小时, CA 便会分布在如图 1(d) 阴影线所示的环状区域内.

并且可见 CA 的 x, y 会随 ϕ 角震荡.

3 K^0 样本的选择

$J/\psi \rightarrow K_s^0 + \bar{K}^{*0} \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$ 衰变分支比大, 又有两个中间共振态的存在, 因此, 用这一衰变道选取 K^0 衰变样本, 能有效压低背景事例的混入. 事例的选择条件如下:

- (1) 带电径迹的螺旋线拟合质量良好;
- (2) 径迹的 CA 点坐标满足: $R_{in} < 0.8m, |z| < 0.6m$;
- (3) 径迹出射方向 $|\cos(\theta)| < 0.8$;
- (4) 带电径迹总数为 4, 事例的总电荷为 0;
- (5) 必须有一根径迹被鉴别为 K 介子;
- (6) 运动学拟合(4c)的 $\chi^2 < 50$;
- (7) 共振态的质量范围: $0.8\text{GeV} < M_{K^{*0}} < 1.0\text{GeV}, 0.45\text{GeV} < M_{K^0} < 0.55\text{GeV}$.

4 次级顶点的重建

在初级顶点产生的中性粒子(K^0 与 Λ)沿直线飞行一段距离后, 在次级顶点衰变成两个带电粒子(分别为 $\pi^+ \pi^-$ 与 $p\pi$). 由两个次级带电粒子的径迹参量(CA 位置与动量)计算中性粒子(及其衰变产物)在衰变点的位置与动量, 称作次级顶点的重建.

K^0 的平均衰变寿命是 $(0.8934 \pm 0.0008) \times 10^{-10}$ sec, 其最大的平均衰变距离 τc 是 2.6786cm . 因此, K^0 介子的衰变绝大多数在束流管内而少部分在顶点探测器(VC)内发生. 次级带电粒子穿过 VC 与主漂移室(MDC), 动量及其误差需要做能量损失 dE/dx 与多次库仑散射的修正. 从带电粒子径迹在 $x-y$ 平面内的圆轨道, 计算它们 $x-y$ 平面内的交点. 由于位置测量误差的原因, 两个圆轨道之间可以存在

相切,相交与不相交 3 种情况. 再根据 K_S^0 衰变的运动学特征作出合理的判断与选择. 衰变长度是根据初级与次级顶点之间最可几路径长度的计算公式算出的. 衰变产生的带电粒子径迹在交点处的动量可从它们在 CA 处动量推算得到. 如果考虑已知 K_S^0 质量的约束条件,那么次级顶点拟合后的 K_S^0 (及其衰变产物)动量分辨将有所改善. 末态粒子动量的误差矩阵也随着作出相应的修正.

4.1 BES 的 K_S^0 重建软件

BES 包括 3 个 K_S^0 (与 Λ) 重建软件^[5]: Klams, Klamslow 与 klamcorr. 它们都从重建后的径迹参量(动量及其误差)出发,采用近似相同的方法,计算次级顶点位置与粒子衰变长度. 它们的异同之处说明如下:

(1) Klams(调用 klams0):

在 BES-I 软件库早期版本(V84 以前)中, Klams 采用常数磁场,并假定动量及其误差的 dE/dx 与多次散射的修正已在径迹重建时完成;而在 V85 版本之后,误差修正改在调用 scatr 与 pqscat 时完成.

自 BES-II V103 版本起, Klams 改用实测磁场^[4], 动量及其误差的 dE/dx 与多次散射的修正改在调用 superfug^[6] 时完成,修正采用 BES-II 探测器的物质量,并考虑了粒子的质量效应.

(2) Klamslow(调用 klams0):

自 V84 版本起, Klamslow 都采用实测磁场,而动量及其误差的 dE/dx 与多次散射的修正在调用 superfug 时完成. V103 起,几乎相同于 Klams. 不做输入粒子质量的查验.

(3) klamcorr(调用 klamcopy):

调用 cirers,完成交点的寻找,计算交点处动量与方向,以及衰变长度. 方法与公式基本相同于 klams0,但寻找交点的逻辑存在差异.

调用 fitvee,借助非线性最小二乘法,实现 K_S^0 与 Λ 质量约束的 1-C 拟合. 获得改进的 K_S^0 与 Λ 动量分辨. 注意,动量误差在迭代中做了修正,但没在交点与衰变长度的计算中使用. 在含 K_S^0 与 Λ 的衰变末态的运动学拟合中,例如 5-C 拟合(四动量 K_S^0 与 Λ 质量),建议使用 klamcorr.

Klamcorr 及其调用的 klamcopy, cirers, fitvee, mysxim 等程序,最早是从 Mark III 实验引进与改写的. 按照 BES 探测器的磁场与物质量,作了修改与

调整. 在 BES-II 探测器及其分析库软件的环境下,本文对这套 K_S^0 重建软件做了仔细整理与差错研究. 利用 $J/\psi \rightarrow K_S^0 + \overline{K}^{*0} \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$ 衰变过程,选择较纯的 K_S^0 样本. 测定了 K_S^0 衰变寿命. 结果表明,调整后的这套 K_S^0 重建软件(仍名为 klamcorr)工作可靠,重建效率合理.

4.2 好交点的判据

两条带电径迹得到的交点需要经过判别来去除本底,而且经常要在两个交点中选出一个真正的衰变点:

- (1) $R_{xy} < 1m, |z| < 1m$, 次级顶点不可能超出 BES II 的 MDC 的探测范围;
- (2) $\theta < \theta_{max}(\sigma_1, \sigma_2, R_{xy})$ (图 3);

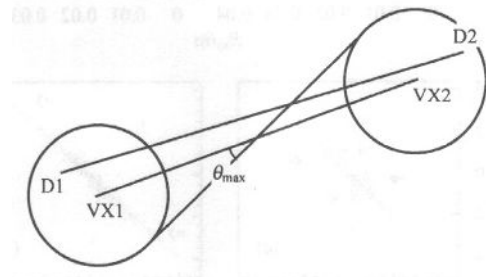


图 3 $\theta < \theta_{max}$

$$\sin \theta_{max} = (\sigma_1 + \sigma_2) / R_{xy};$$

D1: 真实的初级顶点;

D2: 真实的次级顶点;

VX1: 测量到的初级顶点,带有一定的误差半径 σ_1 ;

VX2: 测量到的次级顶点,带有一定的误差半径 σ_2 ;

P_{xy} : K_S^0 在 $x-y$ 平面内的动量矢量,由 π^+, π^- 动量计算而来,对应于矢量从 D1 指向 D2;

R_{xy} : K_S^0 在 $x-y$ 平面内的位移矢量,对应于矢量从 VX1 指向 VX2;

θ : P_{xy} 与 R_{xy} 之间的夹角.

如果 VX1, VX2 测量非常准确, P_{xy} 将与 R_{xy} 严格重合,现在 VX1 和 VX2 的测量都有一定误差,他们之间的夹角将小于 θ_{max} . 图 4(a), (b) 为研究结果(图 4 研究的对象为 $J/\psi \rightarrow K_S^0 + \overline{K}^{*0}$ 中产生的 K_S^0 的 $\cos \theta, R_{xy}$ 及坐标位置).

- (3) $|z_1 - z_2| < 0.05m$, z_1, z_2 分别为两条径迹

在 xy 平面内求出的交点的 z 坐标.

(4) 如此时仍有两个交点, 选 R_{xy} 较小者.

4.3 改进后的版本和 V103 版求出次级顶点 (x, y, z) 与 MC 设置值之间的对照

图 4(c), (d) 以次级顶点的 x 坐标为例 (y, z 亦有同样效果), 看 MC 的设置值与测量值之间的对照, 图 4(c) 为 V103 版, (d) 为改进后的版本, 可见在 (c) 中单箭头所指的许多杂散的点已在 (d) 图中消失, 而且 (b) 图中可见有更多长寿的 K_s^0 被重建出来. 并且 K_s^0 的重建效率亦有所提高.

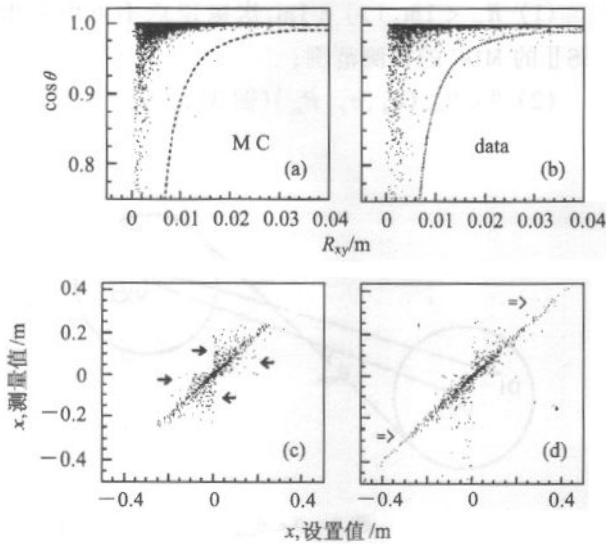


图 4

(a), (b) 两图中, 虚线为 $\cos\theta_{\max}$, 在其上方可见信号点的分布; (c), (d) 两图分别为改进后的软件与 V103 版本的对照.

4.4 xy 平面内的最可几衰变长度的计算^[7]

$$L_{xy} = \frac{L_x \sigma_y t_x + L_y \sigma_x t_y - \sigma_{xy} (t_x L_y + t_y L_x)}{t_x^2 \sigma_{xx} + t_y^2 \sigma_{yy} - 2t_x t_y \sigma_{xy}}$$

这里 L_{xy} 是 K_s^0 在 xy 平面的衰变长度, L_x 与 L_y 分别是 L_{xy} 在 x, y 方向的分量, t_x, t_y 是 K_s^0 动量的 x 与 y 方向矢量, $\sigma_{xx}, \sigma_{yy}, \sigma_{xy}$ 是 K_s^0 衰变顶点的位置测量误差矩阵元.

5 K_s^0 的寿命测量

5.1 衰变寿命 τ 的计算

$$L \equiv \tau c = \frac{m_{K_s^0} \cdot L_{xy}}{P_{xy}}$$

L 是 K_s^0 的衰变长度, P_{xy} 是 K_s^0 动量在 xy 平面内的投影值.

5.2 截断条件 (近区, 远区)

近区: K, π 的误判, $J/\psi \rightarrow 4\pi$ 等的本底都会混杂进来, 但研究表明他们只能污染 τc 较小的那一段 ($\tau c < 0.01\text{m}$). 远区: 由 MC 产生各种固定飞行时间的样本, 可以明显见到在 $\tau c > 0.08\text{m}$, 即飞行距离大于 0.2m 后 K_s^0 重建的效率明显变低, 主要原因在于此时次级粒子在 MDC 中产生, 击中数变少. 最后我们选 τc 从 0.01m 至 0.075m 一段 (对应飞行距离 3cm 到 24cm) 做 τc 测量.

5.3 用于寿命测量的最大似然函数

单个 K_s^0 衰变长度为 L 的几率 (指数分布与高斯分布的卷积) 为

$$g(L) = \left(\frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma_i L_0} \right) \times \int_0^\infty \exp(-\xi/L_0) \cdot \exp[-(L-\xi)^2/\sigma_i^2] d\xi,$$

L_0 为 K_s^0 的衰变长度预期值; σ_i 为测量分辨率, 由 MC 决定.

由于只用一段数据, 需要对以上分布做归一化:

$$g'(L) = \frac{g(L)}{\int_{L_{\min}}^{L_{\max}} g(x) dx}$$

最终的似然函数为: $F = - \sum_{i=1}^n \ln g'(L_i)$

5.4 MC 和数据的拟合结果

$$\tau c_{\text{data}} = 0.0272 + 0.66 \times 10^{-3} - 0.63 \times 10^{-3} \text{ (m)},$$

$$\tau c_{\text{PDG}} = 0.026786\text{m},$$

$$\tau c_{\text{MC}} = 0.0265 + 0.33 \times 10^{-3} - 0.33 \times 10^{-3} \text{ (m)},$$

$$\tau c_{\text{MC}} = 0.0267\text{m} \text{ (MC 设置值)}.$$

6 单举 K_s^0 的质量和宽度

图 5 为利用以上软件包从 $50\text{M } J/\psi$ 中得到的不变质量谱. 要求 $\tau c > 0.01\text{m}$, 于是有较低的本底.

使用高斯与多项式本底拟合,

$$M = 497.77 \pm 0.02\text{MeV}$$

与 K_s^0 的质量的 PDG 值 $497.672 \pm 0.0031\text{MeV}$ 十分接

近,分辨率为5.7MeV.

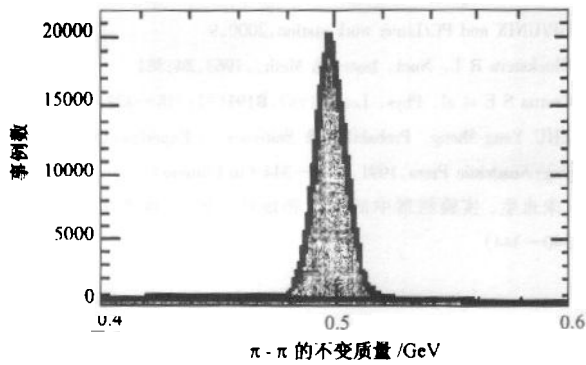


图 5 单举质量谱(GeV)

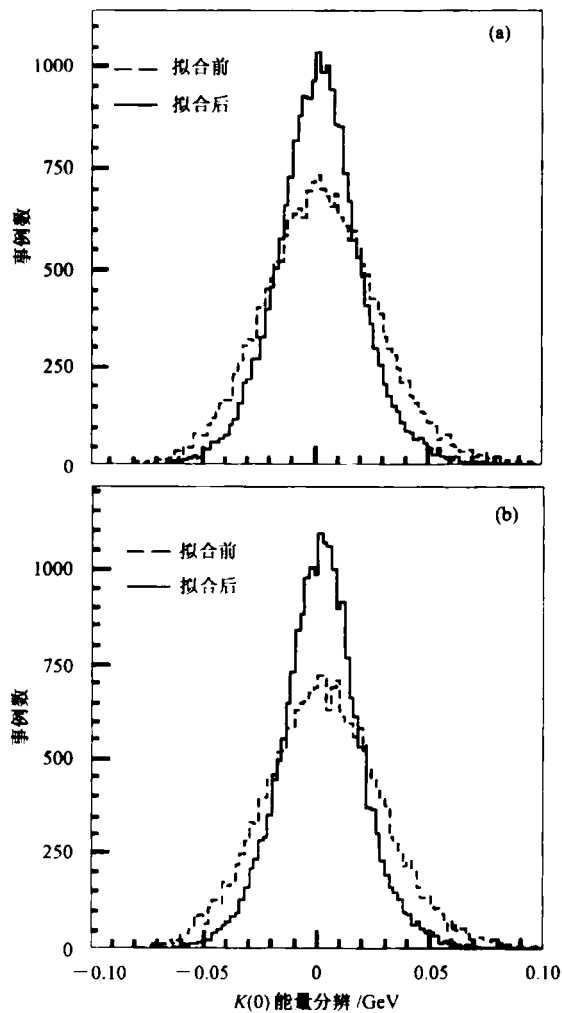


图 6 1-C 拟合前后能量分辨对照

7 K_s^0 质量的 1-C 拟合

7.1 基本方法

带非线性的约束的最小二乘法,将 π - π 质量约束到 K_s^0 质量. 引入 lagrange 乘子,对约束作 Taylor 展开,然后以交点处的动量作为初值,其中误差矩阵也调整到交点处,用迭代的方法求解⁸.

7.2 1-C 拟合的结果(图 6)

MC 提供了粒子的真实动量,与测量值相减可求得测量的分辨率.

经过 1-C 拟合之后, K_s^0 以及 π^+ , π^- 的动量分辨都有了较大的改善.

8 结语

在 BES-II 分析库(V103 版本)环境下, K_s^0 重建软件(Klamcorr)经过 BES II 5000 万 J/ψ 数据的查错检验. K_s^0 重建效率较调整前有所提高. 利用 $J/\psi \rightarrow K_s^0 K^{*0}$ 衰变过程,测得的 K_s^0 平均衰变距离为 $\tau c = 2.72 \pm 0.066\text{cm}$,这一结果和 PDG 粒子手册的值在误差范围内一致. K_s^0 重建后,校正到交点处动量(调用 cirers),将显著改善单举 K_s^0 物理信号的质量分辨;蒙特卡罗的研究表明,经过 1-C 质量约束拟合(调用 fitvec)的动量,能进一步改善动量测量的精度.

感谢 BEPC 和 BES 全体成员在获取 5000 万 J/ψ 事例数据期间所付出的辛勤劳动. 同时感谢 BES 刻度组,MC 组与 J/ψ 物理组同事们的合作与支持.

参考文献 (References)

- 1 BES Collab. Nucl. Instr. Meth., 1994, **A344**:319
- 2 BES Collab. The Bes Upgrade, Nucl. Instr. & Meth., 2001, **A458**:627
- 3 JIANG Zhi-Jin. A Study of Particle Separation with Discriminant Analysis Method and the Use in τ Data Analysis. PhD. Thesis, Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Science, 1993
- 4 LIU Zhao-Feng. Study of J/ψ Radiative Decay to $K^0 K^0$. Master Thesis, Wuhan University, 2001 (in Chinese)
(刘朝峰. J/ψ 辐射衰变到 $K^0 K^0$ 的实验研究. 硕士论文, 武汉大学, 2001)
- 5 BES-II Analysis Software Lib(V103), Institute of High Energy Physics, HP/UNIX and PC/Linux work station, 2000, 9
- 6 Gluckstern R L. Nucl. Instr. & Meth., 1963, **24**:381
- 7 Csorna S E et al. Phys. Lett., 1987, **B191**(3):318—322
- 8 ZHU Yong-Sheng. Probability & Statistics in Experimental Phys. Beijing: Academic Press, 1991. 340—344 (in Chinese)
(朱永生. 实验物理中的概率和统计. 北京: 科学出版社, 1991. 340—344)

Study of K_s^0 Reconstruction and Lifetime Measurement at BES II *

WANG Zhe YUAN Ye ZHANG Chang-Chun

(Institute of High Energy Physics, Chinese Academy of Science, Beijing 100039, China)

Abstract The beam collision center of the BEPC has slightly shifted from geometrical origin of the BES detector and the beam bunch of the BEPC also has certain size. For these reasons, to measure K_s^0 lifetime, primary vertex reconstruction must be carried out. After the investigation of di-muon, bhabha and hadron events, the beam collision center for each run is determined by bhabha and di-muon events. For the large branching ratio of $J/\psi \rightarrow K_s^0 \overline{K}^{*0} \rightarrow K^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ and the existence of the resonance of \overline{K}^{*0} , this channel is chosen to provide much pure K_s^0 signal. With the aid of M.C. tools at BES II, existing software for secondary vertex reconstruction is adjusted and improved. A new method of secondary vertex determination is used and a better position resolution of secondary vertex is obtained. The lifetime of K_s^0 is measured with channel $J/\psi \rightarrow K_s^0 \overline{K}^{*0}$ and the inclusive K_s^0 mass is investigated with BES II's 50M J/ψ data sample, which give consistent K_s^0 lifetime and mass with PDG's value within error. 1C fit on K_s^0 mass is also studied with M.C. events. The resolution of momentum and energy of π^+ , π^- and K_s^0 is improved too.

Key words primary vertex, secondary vertex, lifetime measurement