

# 低动量末态粒子的模拟和探测对 $\Xi^*$ 重子谱研究的影响\*

贾晴鹰<sup>1</sup> 班勇<sup>1;1)</sup> 季晓斌<sup>2</sup> 邹冰松<sup>2</sup>

1(北京大学技术物理系 北京 100871)

2(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)

**摘要** 北京正负电子对撞机上的 BES 实验为系统地进行重子谱研究提供了一个很好的舞台。由于很多待研究的衰变道末态为多个小动量的粒子,给探测和分析带来困难。本工作以通过衰变道  $J/\psi \rightarrow \Xi^+ \Delta K^-$  研究  $\Xi^*$  激发态为例,比较了不同模型的蒙特卡罗模拟,并结合实验数据,分析了该类型重子谱研究的探测限及产生子和探测器模拟对结果的影响。

**关键词** 重子谱 蒙特卡罗方法 强相互作用模拟

## 1 引言

重子的夸克结构及组分间的相互作用都有很多待解决的问题;而重子的质量谱及各种产生和衰变率是研究重子内部结构和相互作用的主要手段。BES II 实验采集的 5800 万  $e^+e^- J/\psi$  事例为重子谱研究提供了一个很好的舞台。我们可以选择众多的衰变道来研究重子共振态的内部结构;同时  $J/\psi$  衰变的同位旋守恒也避免了  $\pi N$  或  $\gamma N$  实验中进行同位旋分解所带来的困难<sup>[1]</sup>。在采用  $J/\psi$  衰变研究重子谱时,通常选择衰变到重子-反重子对(或再加一个介子)的衰变道来进行研究;如果重子再继续衰变,那么末态粒子通常包括多个小动量的粒子,这就给探测和模拟带来困难。

在此通过对  $\Xi^*$  的共振态的研究来探讨小动量的粒子对这类研究的影响。在实验上,目前我们对  $\Xi^*$  共振态的了解很不充分,只是对基态( $\Xi(1318)$ )和第一激发态( $\Xi^*(1530)$ )有较多的测量;大部分其他数据都是多年以前的测量结果,其精确性有待提高。在理论上,有各种模型预言了  $\Xi^*$  共振态的结

构,但这些共振态有待实验数据的证实和检验<sup>[2,3]</sup>。因此,充分利用 BES II 实验采集的高统计量  $J/\psi$  数据进行  $\Xi^*$  共振态研究,是很有意义的工作。我们选择衰变道  $J/\psi \rightarrow \Xi^+ \Delta K^-$ <sup>[2]</sup>,从  $\Delta K^-$  的不变质量谱中研究  $\Xi^*$  共振态结构。 $\Xi^*$  和  $\Delta$  会继续衰变,导致该衰变道末态有多个小动量粒子。首先用蒙特卡罗方法研究该道的探测效率;并参考小动量粒子的实验测量数据,比较了不同强子化模拟模型对模拟结果的影响;这不仅对将来的实验研究有指导意义,也会对同类型的重子谱或其他研究提供参考。

## 2 模拟和分析

### 2.1 不同模型的蒙特卡罗模拟程序简介

高能物理实验研究中普遍采用 GEANT 程序作粒子穿过物质时的探测器模拟。随着高能物理实验数据的不断积累、各实验使用 GEANT 程序的反馈信息以及计算技术的进步,GEANT 程序的版本也在不断更新。1998 年 GEANT-4 版本第一次发布,随后

2003-04-29 收稿

\* 国家自然科学基金(19991480)资助

1) E-mail: bany@pku.edu.cn

2) 本文中所有衰变道隐含其电荷共轭末态。

每两年全面更新一次,并随着其成熟而为各大实验所采用.各版本的 GEANT 程序在对粒子和物质相互作用的模拟方式上存在不同,从而影响对各粒子探测效率及其他方面的计算.特别是在粒子能量低于 500MeV 的低能区域,由于其物理过程复杂,模拟比较困难,目前还没有令人满意的模型可以准确地描述粒子在探测器中的全部过程;而这个能区也是我们研究的重点,因此有必要对不同模型模拟的结果进行分析和比较.

本文采用 3 种不同相互作用模型的蒙特卡罗模拟,来分析其对 BES 探测器中低动量粒子的模拟情况,以比较其对 BES 实验中感兴趣的衰变道的探测效率的影响.其中,第一种模型是“SOBER”程序<sup>[4]</sup>;另两种模型是建立在 GEANT-3 上的 SIMBES 程序<sup>[5]</sup>,但对强相互作用分别采用了 G-FLUKA 模型<sup>[6]</sup>和 G-CALOR 模型<sup>[7]</sup>(下面分别用“SIMBES-F”和“SIMBES-C”表示).

这 3 个模型的不同点在于:在“SOBER”程序中,对粒子穿过探测器物质的模拟只考虑了电磁相互作用,没有考虑入射粒子与探测器物质粒子的强相互作用,即把强子当作  $\mu$  子处理;而在低能部分,强子与物质的强相互作用截面有很大贡献,忽略其影响可能使对粒子响应的模拟过于理想化.

“SIMBES-F”采用 G-FLUKA 模型来描述粒子与探测器物质的强相互作用.根据初级入射粒子的不同能区,FLUKA 程序采用不同的模型来描述其强相互作用;在 5GeV 以下直至 300MeV 的核子(或直至 50MeV 的其他粒子),它用一个基于共振产生和衰变的模型来模拟初级相互作用;在初级相互作用中产生的次级粒子的再相互作用则采用核内簇射的方法来处理;其中再相互作用几率用参数模型来描述,同时也考虑了费米运动、势井效应和束缚能等核效应.建立在详尽地描述核内簇射、平衡前发射以及蒸发效应的基础上,该程序也包含了模拟 20—300MeV 能区的核子引起的相互作用的产生子.

“SIMBES-C”采用 G-CALOR 模型来描述粒子与探测器物质的强相互作用.对大于 10GeV 的高能粒子,它与 FLUKA 模型处理方法一样;对于 10GeV 以下、2.5GeV 以上的  $\pi$  介子或 3.5GeV 以上的核子,它用一种混杂处理方法,即一部分相互作用用 FLUKA 模型处理,另一部分相互作用用“刻度模型”<sup>[8]</sup>处理,两者的比例由粒子能量决定.在更低的能区, G-CALOR 模型则调用 Bertini IntraNuclear Cascade (INC)程序<sup>[9]</sup>

## 2.2 不同蒙特卡罗模拟对 $J/\psi \rightarrow \Xi^+ \Lambda K^-$ 衰变道探测效率的比较

为了研究  $\Xi^*$  共振态结构,选择衰变道  $J/\psi \rightarrow \Xi^+ \Lambda K^-$ ,从  $\Lambda K^-$  的不变质量谱中去寻找.该衰变从没有测量数据,但类似衰变道  $J/\psi \rightarrow p \bar{\Lambda} K^-$ ,  $J/\psi \rightarrow \bar{\Sigma}^- \Delta \pi^+$  等的分支比都在  $10^{-3}$  量级,因此我们预期用 5800 万 BES-II 数据可以进行该衰变道的分析.

该衰变道的  $\Xi^*$  重子全部衰变为  $\bar{\Lambda} \pi^+$ ,而  $\Lambda$  重子衰变为  $p \pi^-$ (占 64%)或  $n \pi^0$ (占 36%);因此该衰变道的末态都有 6 个小动量粒子,其衰变链如下:

- (1)  $J/\psi \rightarrow \Xi^+ \Lambda K^- \quad (\bar{\Lambda} \pi^+) \Lambda K^- \quad (p \pi^+ \pi^-)$   
( $p \pi^-$ )  $K^-$ , (占 64%  $\times$  64%);
- (2)  $J/\psi \rightarrow \Xi^+ \Lambda K^- \quad (\bar{\Lambda} \pi^+) \Lambda K^- \quad (n \pi^0 \pi^+)$   
( $p \pi^-$ )  $K^-$ , (占 36%  $\times$  64%);
- (3)  $J/\psi \rightarrow \Xi^+ \Lambda K^- \quad (\bar{\Lambda} \pi^+) \Lambda K^- \quad (p \pi^+ \pi^-)$   
( $n \pi^0$ )  $K^-$ , (占 64%  $\times$  36%);
- (4)  $J/\psi \rightarrow \Xi^+ \Lambda K^- \quad (\Delta \pi^+) \Lambda K^- \quad (n \pi^0 \pi^+) (n \pi^0)$   
 $K^-$ , (占 36%  $\times$  36%).

图 1 显示了用蒙特卡罗产生的该衰变末态粒子  $p, \pi$  和  $K$  的动量分布,可见衰变产生的这些粒子的动量基本都在 500MeV 以下,探测和重建都比较困难.

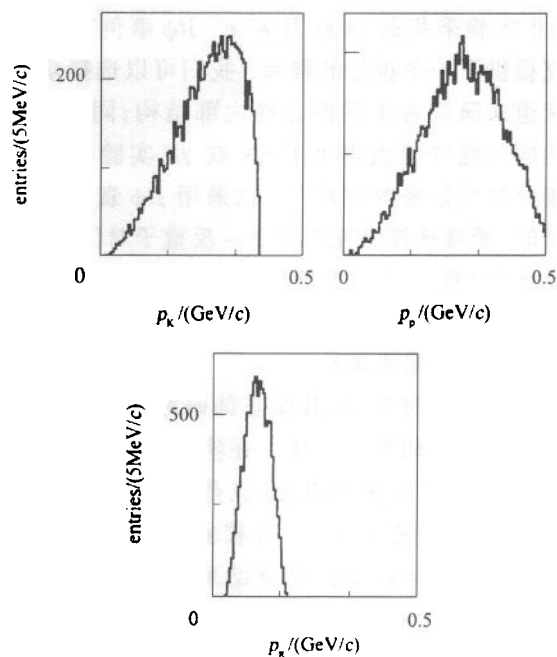


图 1 蒙特卡罗产生的  $J/\psi \rightarrow \Xi^+ \Lambda K^-$  衰变末态粒子  $p, \pi$  和  $K$  的动量分布

挑选事例时有两种途径:一是分别鉴别、挑选全部 6 个末态粒子,然后通过依次组合粒子不变质量

找出  $\Lambda$  和  $\Xi^+$ , 从而挑出该衰变道. 但探测器要探测、重建出全部 6 个末态小动量粒子很困难, 经常有一个或一个以上的粒子由于动量太小而无法探测. 经过尝试发现, 这种方法探测效率太低, 因此采用了第二种方法, 即反冲质量方法: 选择包含 3 个末态粒子  $p, \pi^-$  和  $K^-$  的多径迹事例, 由  $p, \pi^-$  的不变质量重建出  $\Lambda$  粒子; 再根据能量、动量守恒, 计算出  $J/\psi$  衰变系统中对应  $\Lambda$  和  $K^-$  的反冲质量, 从反冲质量谱中取对应  $\Xi$  重子质量的事例, 这样就挑选出了  $J/\psi \rightarrow \Xi^+ \Lambda K^-$  的衰变.

对应上述 3 种不同的蒙特卡罗模拟程序, 分别按衰变链 1 和 2 的比例各产生了 100000 个蒙特卡罗事例. 在事例选择过程中增加了下面一些判选条件: 首先要求带电径迹数至少在 3 根以上、20 根以下; 根据图 1 所示的动量分布, 要求主漂移室每个带电粒子的动量小于  $4.0\text{GeV}$ ; 标志径迹重建拟合特征的参量  $M_{\text{fit}}$  为 2 或 -19; 并且排除靠近束流管的径迹, 即要求径迹方向  $|\cos\theta| \leq 0.8$ ; 同时要求粒子横动量  $p_{\text{xy}} < 4.0\text{GeV}$ . 在粒子鉴别中, 采用了  $dE/dx$  信息, 最后根据所要选择的衰变对所有径迹进行动力学拟合, 要求拟合参数  $\text{Prob}(\chi^2, 1C) < 0.01$ .

对这 3 种蒙特卡罗样本都用同样的程序、同样的判选条件进行事例选择. 图 2 中, (a) 图显示了事例选择的  $p, \pi^-$  的不变质量谱, 峰位对应  $\Lambda$  粒子的质量  $1116\text{MeV}$ ; (b) 图显示了相应的对应  $\Lambda, K^-$  的反冲质量谱; 在此选取  $(p, \pi^-)$  不变质量在  $\Lambda$  粒子的质量的事例 (即 (a) 图中虚线所卡的能量窗口), 可见在对应  $\Xi$  质量位置处 (约  $1321\text{MeV}$ ) 有明显的峰. 用二次多项式作本底, 通过布里格-威格勒拟合可定出衰变事例数.

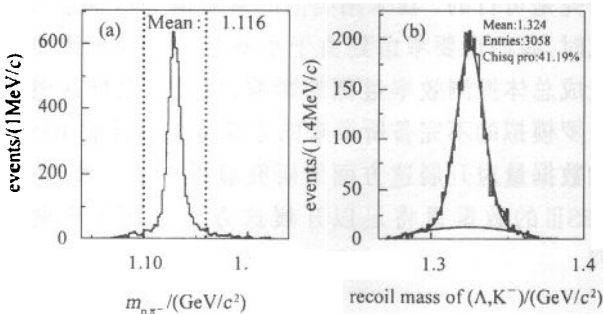


图 2 (a) 为  $(p, \pi^-)$  不变质量谱; (b) 为对应  $(\Lambda, K^-)$  的反冲质量谱

表 1 列出了分别对应 3 种不同的蒙特卡罗样本, 经过事例选择程序的每一步判选条件时, 所通过的事例相对于上一步事例的比例, 以及最后的探测

效率

表 1 每一步判选条件对 3 种蒙特卡罗样本的影响 (通过的事例的比例) 和探测效率

蒙特卡罗样本	粒子数限制	基本判据	粒子鉴别判据	动力学拟合	反冲质量拟合	探测效率
SIMBES-F	98.2%	44.8%	17.8%	48.0%	71.5%	2.7%
SIMBES-C	99.0%	58.5%	15.9%	84.1%	52.0%	
SOBER	96.0%	49.2%	39.0%	95.8%	61.4%	10.8%

由表 1 可以看出, SIMBES-F 和 SIMBES-C 对此道的模拟结果相差不大, 约 1.3% 左右; 这个差别可以作为由探测效率计算带来的系统误差的估计. SOBER 则给出高得多的探测效率. 造成这种差别的主要原因在于在作粒子鉴别和动力学拟合时带来的差别. 其原因如前所述: SOBER 没有考虑强相互作用, 对粒子在探测器中的模拟过于理想化; 尤其在小动量粒子的模拟中, SOBER 给出了明显不合理的高探测效率. 蒙特卡罗模拟和实验数据的各种分布的大量比较也证实了这个判断. 下面就 3 种模型对小动量粒子的模拟作些具体分析.

### 2.3 小动量粒子的探测和模拟及与实验数据的比较

为了比较不同的蒙特卡罗模型对低动量粒子的模拟情况以及探测器的探测效率, 对 3 种末态粒子  $p, \pi$  和  $K$  分别进行了单粒子模拟; 即分别产生不同低能量的各种粒子, 用 3 种蒙特卡罗模型模拟探测器的响应, 检查粒子-物质相互作用模拟和径迹重建的正确性. 图 3 显示了这 3 种入射粒子的拟合情况分布图: 上、中、下图分别对应“SIMBES-C”, “SIMBES-F”和

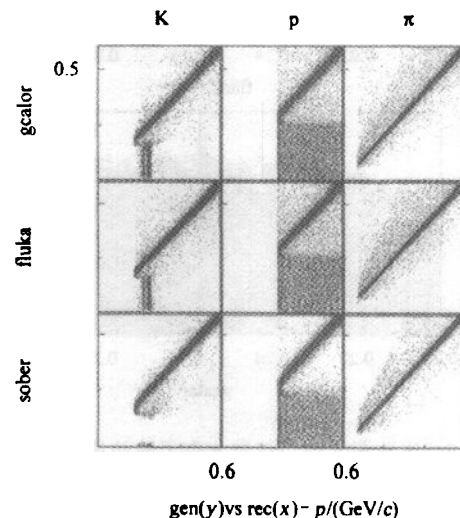


图 3  $p, \pi$  和  $K$  粒子的单粒子模拟

“SOBER”模型的模拟和重建情况,左、中、右图分别对应  $K^-$ ,  $p$  和  $\pi^-$  粒子的动量;纵轴为产生的 3 个人射粒子的动量,横轴为经过探测器模拟、重建后的粒子动量.由于入射的是单种粒子,在此我们没有作粒子鉴别.

从图 3 可以看到,对于  $p$  和  $K^-$  粒子,从“SIMBES-C”及“SIMBES-C”模型得到的结果差别不大,但与“SOBER”模型的差别较明显.对于产生的动量小于  $0.3\text{GeV}/c$  的质子,由于它在探测器的磁场中的运动轨迹为曲率很小的螺旋线,径迹完全无法正确重建,重建程序给出的动量大于  $0.3\text{GeV}/c$  的近似均匀分布的事例也没有意义,它们将在随后的粒子鉴别和动力学拟合中被排除掉.对于所研究的衰变道,大部分事例由于质子动量小于  $0.3\text{GeV}/c$  而损失掉.在“SIMBES-F”及“SIMBES-C”模型中,对动量小于  $0.2\text{GeV}/c$  的  $K$  介子,由于其速度较慢,它们在探测器中将自动衰变,图中重建出来的两个确定动量的事例实际上对应衰变产生的  $\mu$  和  $\pi$ ,而 SOBER 模型则明显缺乏这方面模拟.有证据表明,FLUKA 和 CALOR 模型在低能区对  $p$  和  $K^-$  粒子的模拟很接近实际情况.而对于  $\pi^-$  粒子模拟,这两个模型所采用的处理方式各有不完善的地方,如对  $\pi^-$  介子的吸收截面或非弹性散射截面,库伦散射效应,核位势效应等等,各有考虑不足之处.但比起“SOBER”的简化处理,这两个模型对数据的模拟描述要正确的多.

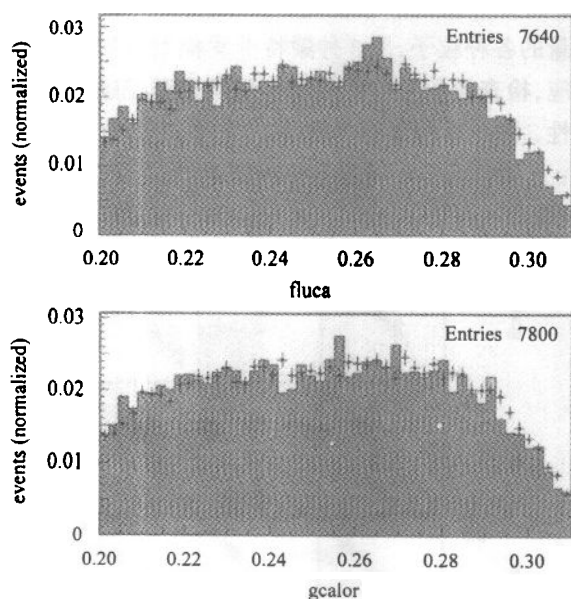


图 4 实验测得的小动量  $\pi^-$  介子的动量分布与“SIMBES-C”及“SIMBES-C”模型模拟结果的比较

图 4 显示了由 BES II 实验数据测得的小动量  $\pi^-$  介子的动量分布及其与“SIMBES-C”及“SIMBES-C”模型模拟结果的比较<sup>1)</sup>;其中,  $\pi^-$  介子是从  $\psi(2S) \rightarrow J/\psi$  衰变中选出的.图中直方图为蒙特卡罗模拟,分离点为实验数据.可见,这两种模型都比较成功地描述了  $\pi^-$  介子在探测器中的相互作用情况.而用“SOBER”模拟的小动量  $\pi^-$  介子分布则与实测结果差别较大.

### 3 结果与讨论

通过以上的分析可以看到,当衰变道包含多个小动量末态粒子时,模拟和探测都比较困难.比较的 3 种蒙特卡罗模型用不同方式处理低能时粒子与物质的相互作用,导致估算出的探测效率也不一样.其中,“SIMBES-F”和“SIMBES-C”尽管所用具体模型和处理方式不同,侧重点也不一样,但都考虑和模拟了被探测粒子和探测器物质作用过程中的强相互作用的贡献,得到了相近的探测效率,模拟给出的粒子动量分布也与实验数据吻合得较好.而把强子也当成  $\mu$  子处理,没考虑强相互作用的“SOBER”模型则给出了过高的探测效率,不能反映真实的情况.因此,在小动量粒子的模拟中,强相互作用不可以忽略.

选择衰变道  $J/\psi \rightarrow \Xi^+ \Lambda K^-$  来研究  $\Xi^+$  激发态时,利用表 1 中 SIMBES 蒙特卡罗模拟得到的探测效率(约 3%)估算,则对于 5800 万  $J/\psi$  数据,如果该道的分支比为  $10^{-3}$  量级,则可选出约 1100 个事例;即使分支比为  $10^{-4}$  量级,也可以选出约 110 个事例.可见,尽管该衰变道包含多个小动量末态粒子,但高统计量的  $J/\psi$  数据表明利用该衰变道进行  $\Xi^+$  重子谱研究是可行的.在采用类似的衰变道进行重子谱研究时,我们也要考虑到由于小动量粒子探测困难而造成总体探测效率过低的影响,以及在低能区蒙特卡罗模拟的不完备所带来的系统误差.目前 BES II 的数据量对开展这方面的研究显得少了一些,未来 BES III 的数据量将足以开展这方面系统细致的研究.

作者感谢中国科学院高能物理研究所的陈江川、吕峰、沈肖雁以及其他老师和同事们对本工作提供了有益的讨论和建议.感谢 BES 合作组蒙特卡罗组的同事们,他们的大量工作使本研究成为可能.

1) 吕峰, BES 合作组内部讨论.

## 参考文献 (References)

- 1 ZOU B S. Nucl. Phys., 2000, **A275**:167c—172c
- 2 Particle Data Group. Review of Particle Physics, Phys. Rev., 2002, **D66**:010001
- 3 ZOU B S. Nucl. Phys., 2001, **A684**:330c—332c
- 4 GEANT Documentation. <http://wwwinfo.cern.ch/asd/geant/>
- 5 GEANT-4 Homepage. <http://wwwinfo.cern.ch/asd/geant4/geant4.html>
- 6 Gabriel T A et al. ORNL/TM-5619, Apr. 1977
- 7 Fasso A et al. SLAC-REPRINT-2000-117, Oct 2000
- 8 Gabriel T A et al. Oak Ridge National Lab. Report ORNL-4542
- 9 Bertini H W. Phys. Rev., 1972, **6(2)**:631

## Effects of Simulation and Detection of Low-Momentum Final State Particles on the Research of Baryon Spectroscopy

JIA Qing-Ying<sup>1</sup> BAN Yong<sup>1,1)</sup> JI Xiao-Bin<sup>2</sup> ZOU Bing-Song<sup>2</sup>

<sup>1</sup>(Department of Technical Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

<sup>2</sup>(Institute of High Energy Physics, CAS, Beijing 100039, China)

**Abstract** The BES experiment at Beijing electron-positron collider provides an excellent laboratory for the research of Baryon spectroscopy. Some difficulties arise due to the often appeared low-momentum of final state particles in such research. Using  $\Xi^*$  spectrum study from the decay  $J/\psi \rightarrow \Xi^* \Lambda K^-$  as an example, we analyzed and compared the effects on the results with different versions of MC simulation, as well as the experimental data of low momentum particles, and derived the detection limit for this channel.

**Key words** baryon spectrum, Monte Carlo method, simulation of strong interaction

Received 29 April 2003

\* Supported by NSFC (19991480)

1) E-mail: hany@pku.edu.cn