

相对论重离子碰撞实验中混合事件方法的研究*

冯笙琴 刘连寿

(华中师范大学粒子物理研究所 武汉 430079)

摘要 把RQMD(Relativistic Quantum Molecular Dynamics)产生器产生的数据输入作为原始事例取样,讨论了在比较复杂的背景情况下,一种新的混合事件方法,用以证实在相对论重离子碰撞实验中高能激发共振态的存在,并以共振态重子 Δ^{*+} 为例演示了这一方法的应用.

关键词 RQMD 混合事件方法 共振态重子 不变质量分布 标度因子

1 引言

在相对论重离子碰撞中,随着碰撞能量的增加,实验上已经发现愈来愈多的共振态重子被激发以及更多的 π 介子产生.这已经被早期输运理论所公认^[1-5]并用来研究相对论重离子碰撞机制.较早的在相对论重离子碰撞试验中讨论共振态重子产生是由Brockmann等人在1.8A GeV Ar + KCl作用中进行的^[6].后来发展为确定 $\Delta(1232)$ 共振态质量和温度.在这些研究中^[7], $\Delta(1232)$ 共振态不变质量分布由关联(p, π^+)对重建.

除了用混合事件方法讨论共振态粒子外,最早用混合事件方法讨论高能物理实验问题是在1959年Goldhaber等人^[8],他们用混合事件方法测量全同玻色子的玻色爱因斯坦关联,并利用这种关联来测量系统发射源的大小^[9].自此以后,混合事件方法在高能物理实验中得到广泛应用和发展^[10-12].

在讨论 Δ^{*+} 共振态产生问题时,如何在不变质量分布中把关联的(p, π^+)对从直接产生的 p 和 π^+ 中提炼出来,这在相对论重离子碰撞实验中是一个非常重要的研究课题.我们知道相对论重离子碰撞会产生大量的粒子,但是由探测器给出的末态粒子是从高能碰撞产生的热系统中冻结出的粒子,其中许多高能激发共振态粒子已经衰变,如何证明这些高能激发共振态粒子的存在是一个很重要的问题.混合事件方法(mixing event method)是证实这些

高能激发共振态粒子的存在和给出它们的分布的一个重要的方法.

用这种方法的最大困难来自于如何消除信号以外的背景,这种背景有可能是非关联的背景,也有可能是关联的背景.首先,一个重要任务是如何产生这些碰撞事件中的背景.混合事件方法告诉我们,从研究组成共振态粒子的粒子对的不变质量分布出发,然后用来自不同事件的组成共振态粒子的粒子搭配成与相同事件一样的粒子对,对于非关联的背景的消除,原则上讲,只要采用了一个较合理的归一化方法就可以消除背景.如果关联背景混合在非关联的背景之中,目前还没有一个统一的方法来消除这些复杂的背景.本文将尝试一种新的混合事件方法来消除这些背景.下面将阐述这一方法,并用RQMD产生器产生的数据作为输入样本,用我们的新混合事件方法来找出 Δ^{*+} 共振态,作为应用这一方法的例子.

2 一种新的混合事件方法

RQMD产生器是一个半经典的微观理论模型的产生器,它把经典的输运理论与系综相互作用有机地结合在一起.在相互作用中弦和共振态一起被激发,它们的碎裂和衰变导致粒子的产生.迄今为止,RQMD被认为是讨论AGS能区的重离子碰撞的最好模型之一.

2002-05-27 收稿

* 国家自然科学基金(19775018, 19975021)资助

本文之所以讨论 $19\text{GeV}/c$ 能量下 $p + \text{Pb}$ 作用, 主要是从 3 方面考虑: 1) $19\text{GeV}/c$ 能量对应为 RQMD 产生器能够很好拟合的 AGS 能区; 2) 与核-核作用比较, 质子-核作用的背景比较简单, 便于用混合事件方法来找 Δ^{*+} ; 3) 取较向前的快速区间的事件取样, 有一定的物理内涵, 我们希望了解一些领头共振态粒子的特征.

用 50000 个 RQMDv2.3 (RQMD 的 2.3 版本)^[13] $p + \text{Pb}$ 作用在 $19\text{GeV}/c$ 能量下的事件作为事例取样, 并且取 $2.3 \leq y \leq 3.3$, 以及 $0.1 \leq p_T \leq 1.1\text{GeV}/c$ 的动力学区间. 由于 Δ^{*+} 的寿命很短, 由 RQMD 产生器出来的末态粒子已经没有 Δ^{*+} , 只有 Δ^{*+} 衰变后的质子 (p) 和 π^+ 介子, 以及其他的较稳定的粒子. 我们知道, 由 RQMD 产生器出来的粒子除了有 Δ^{*+} 衰变后的质子和 π^+ 外, 还有直接产生的质子和 π^+ 介子. 因此只能用混合事件方法来提炼出 Δ^{*+} 不变质量分布. 具体的操作步骤如下:

(1) 在同一事件中, 根据由 RQMD 产生器出来的粒子鉴别号 (Particle Identification (PID)), 让所有的 p 与 π^+ 一一配对, 并计算出 $p-\pi^+$ 对的不变质量. 本文把由相同事件所得到的 $p-\pi^+$ 对的不变质量分布定义为 same.

(2) 同样由 RQMD 产生器出来的粒子的 PID, 让分别来自不同事件的 p 与 π^+ 一一配对, 也计算出 $p-\pi^+$ 对的不变质量. 本文把由不同事件所得到的 $p-\pi^+$ 对的不变质量分布定义为 mix. 由 mix 分布给出非关联对的背景分布.

(3) same 中既有关联对的分布, 又有非关联对的背景分布, 通过选择合适的标度因子, 通过 mix 把 same 中非关联对的背景消除. 最后就能得到我们所需要的信号分布.

由相同事件的 $p-\pi^+$ 对和不同事件的 $p-\pi^+$ 所形成的不变质量分布分别由图 1(a), (b) 给出.

Δ^{*+} 的质量是 $1.232\text{GeV}/c^2$, 分布的宽度大约为 $0.12\text{GeV}/c^2$. 一般认为在不变质量大于 $1.45\text{GeV}/c^2$ 的范围, 应该没有 Δ^{*+} 粒子的出现. 因此可以用质量大于 $1.45\text{GeV}/c^2$ 的范围的 same 和 mix 的粒子数目作为消除背景的标度因子, 或称为规一化因子. 因此出现 Δ^{*+} 信号为

$$\text{signal}_{\text{cal}} = \text{same} - \frac{\langle \text{same} \rangle_{>1.45}}{\langle \text{mix} \rangle_{>1.45}} \times \text{mix}, \quad (1)$$

这里 $\langle \text{same} \rangle_{>1.45}$ 和 $\langle \text{mix} \rangle_{>1.45}$ 分别对应由相同事件和由不同事件 p 与 π^+ 对在质量大于 $1.45\text{GeV}/c^2$ 所配对的数目, $\langle \text{same} \rangle_{>1.45} / \langle \text{mix} \rangle_{>1.45}$ 为消除背景的标度

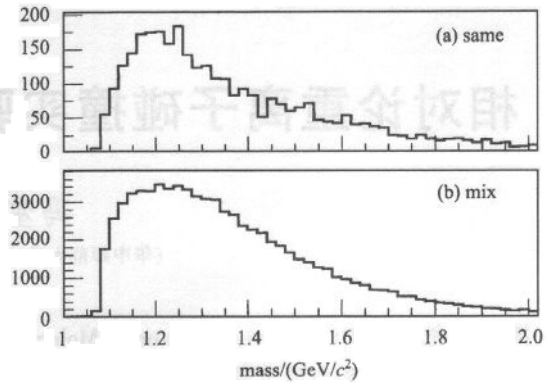


图 1 (a) 由相同事件 p 与 π^+ 对所产生的不变质量分布; (b) 由不同事件 p 与 π^+ 对所产生的不变质量分布

因子或称为规一化因子, $\text{signal}_{\text{cal}}$ 为用这种标度方法所得到的信号不变质量分布. 对应的信号由图 2 给出. 我们发现, 用这种方法得到的信号 (Δ^{*+}) 质量分布 (图 2 中) 出现了下凹 (某些质量 (bin) 的粒子数小于零) 现象, 这是过低估计产生的 Δ^{*+} 信号的一种明显特征. 这表明, 采用这种方法在消除背景的同时, 把应该存在的信号也减掉了一部分.

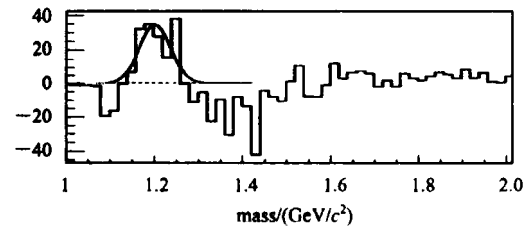


图 2 用大于 $1.45\text{GeV}/c^2$ 的质量区间的粒子数作标度因子所得到的不变质量分布

用混合事件方法提取背景较复杂的信号时, 出现上述某些质量 (bin) 的粒子数小于零的现象是正常现象. 可能的原因是: (1) 背景 mix 不能反映 same 中的背景的真实情况, 检验营造背景是否恰当, 关键是看同一粒子总数的情况下, 它们的动量分布是否一致. 在相同事件中得到的 π^+ 和 p 对的总数为 4767, 由不同事件得到的 π^+ 和 p 对的总数为 73891. 如果把相同事件中得到的 π^+ 和 p 对的动量分布乘上标度因子 $73891/4767$, 对应为图 3 中的实线分布, 虚线对应为不同事件 π^+ 和 p 对的动量分布. 这两种分布基本上一致. (2) 标度因子选取不恰当. 在此方法中, 假定在质量大于 $1.45\text{GeV}/c^2$ 的范围内, 来自相同事件的 p 与 π^+ 之间已经没有关联配对. 实际上在质量大于 $1.45\text{GeV}/c^2$ 的范围内同一事件中的 p 与 π^+ 可能存在某种关联, 因此方程 (1) 中标度因子不能完全反映 same 中非关联的份额, 而对应

的却是关联对和非关联对的一种组合. 由此看来, 即使使用混合事件方法构造了正确的背景, 如果相减的方法不当, 也不能保证产生正确的信号. 对背景较复杂的情况, 即使正确制造了背景, 用一次消除背景的方法不能合理地消除背景.

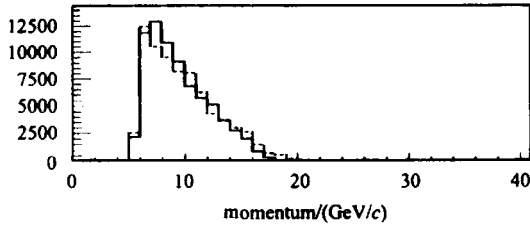


图 3 π^+ 和 p 对的动量分布

实线为来自相同事件中 π^+ 和 p 对的动量乘上标度因子 73891/4767 的分布, 虚线为来自不同事件中 π^+ 和 p 对的动量分布.

在消除背景时, 如何合理地选取规一化因子能避免出现下凹的质量分布现象, 是一个重要的问题. 因为标度因子表示背景在总的分布中所占的份额. 这个份额选择的不对, 就会出现过高或者过低估计背景的现象, 真正的信号就不能得到.

本文引入一种新的消除背景的方法, 称之为循环叠代方法. 如果来自相同事件对的数目为 N_{same} , 来自混合事件对的数目为 N_{mix} , 用相同事件对的不不变质量分布减去混合事件对的不不变质量分布与标度因子 N_{same}/N_{mix} 的乘积. 由此所得到的不变质量分布的直方图的净粒子数记录为零, 记下所有的 (bin) 内为正记录的粒子数总和为 N_R . 然后重复上述过程, 但对应的标度因子换成 $(N_{same} - N_R)/N_{mix}$. 直到 N_R 值基本上保持不变, 即相邻两次 N_R 的差值小于某一给定值时, 这种循环过程才结束, 对应的信号不变质量分布由图 4 给出.

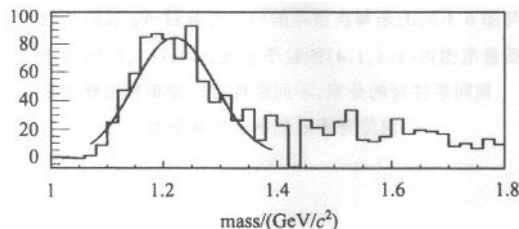


图 4 用循环叠代方法消除背景, 当 N_R 取所有的 (bin) 内粒子数为正记录的粒子数总和时, 所对应的不变质量分布

在此值得提醒讨论的一个现象是: 如果上述的 N_R 对应不是所有 (bin) 的正记录总和, 而是在 Δ^{++}

的不变质量范围内的 (bin) 内为正记录的粒子数总和, 则对应的不变质量多重数分布由图 5 给出. 图 5 中仍然存在下凹的质量分布现象.

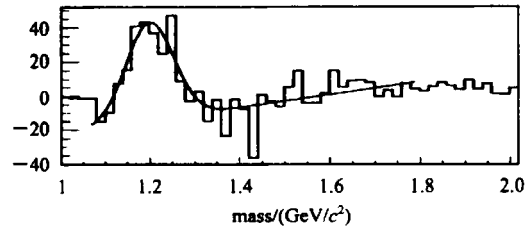


图 5 用循环叠代方法消除背景, N_R 对应不是所有 (bin) 的正记录总和, 而是在 Δ^{++} 的不变质量范围内的 (bin) 内为正记录的粒子数总和所得到的不变质量分布

从上述图形可以看出, 在循环计算中, 对应图 5 每次 N_R 只取质量在 Δ^{++} 质量范围在 (1.1, 1.4) 粒子数大于零的 (bin) 的粒子总数, 看来还不能完全反映产生信号的真实情况, 因为由此最后得到的信号不变质量分布有下凹现象, 说明这种方法过高估计了背景. 主要原因是该方法给出的每次循环的信号粒子数偏低.

由此可见, 在这种循环叠代方法中, 对应每次循环的信号数目 N_R 不仅仅限制在 Δ^{++} 质量范围内. 如果采取图 4 所用的方法, 认为每次循环后对应的信号粒子数为所有的粒子数大于零的 (bin) 的粒子数的总和, 通过循环依次减少背景, 直到背景一点点地被消除, 此时对应相邻两次循环的信号数则基本上保持不变, 当相邻信号粒子数之差小于指定的数时, 此时可以认为混合背景已经被消除.

3 结果的分析 and 结论

上文已经给出了用混合事件方法得到的 Δ^{++} 信号, 从图 4 在 Δ^{++} 不变质量范围内 (1.1, 1.4) 的粒子数为 784. 如果让 RQMD 产生器的 Δ^{++} 衰变开关关闭, 50000 个事件共有 802 个 Δ^{++} 粒子, 这两个结果基本上一致. 而第一种用大于 1.45 的规一化方法所得到的 Δ^{++} 在不变质量范围内 (1.1, 1.4) 的粒子数为 152. 它们具体消除背景的示意图分别由图 6 和图 7 给出.

从图 6(a) 中很难看出高斯分布的 Δ^{++} 信号, 因为小于 1.18 和大质量区域都与高斯分布不一致. 通过来自不同事件的对营造了背景分布图 6(b), 把图 6(a) 中背景部分依靠营造的背景 mix 进行了处

理,最后由图 6(c)可以看出清楚的 Δ^{++} 信号.

即使正确营造了背景分布,如果不能采用正确的相减标度因子,就会出现一些(bin)内的粒子数为负数的现象,对应为图 7(a),(b),(c).

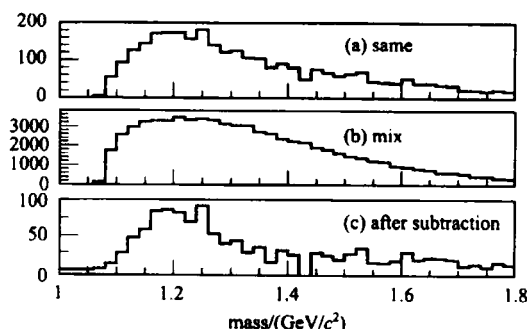


图 6 用循环叠代法找 Δ^{++} 信号的不变质量分布 (a),(b),(c)分别对应相同事件对的分布,不同事件对的分布和用叠代法消除背景后的不变质量分布.

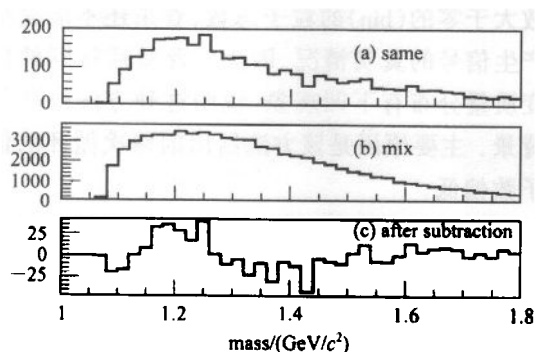


图 7 用不变质量大于 1.45 的粒子数作标度因子法消除背景找信号的不变质量分布 (a),(b),(c)分别对应相同事件对的分布,不同事件对的分布和消除背景后的不变质量分布.

为了深入讨论循环叠代混合事件方法的内涵,有必要对循环叠代混合事件方法的每一步作细致的分析.实际上,对应的循环叠代过程就是寻找正确的标度因子 scale 的过程.对应的信号分布 signal 应该是:

$$\text{signal} = \text{same} - \text{scale} \times \text{mix} . \quad (2)$$

由正确的标度因子 scale,就能得到合适的信号分布

signal. 第一次循环对应的标度因子 scale_1 为

$$\text{scale}_1 = \frac{\langle \text{same} \rangle}{\langle \text{mix} \rangle} , \quad (3)$$

其中 $\langle \rangle$ 分别表示对相应的不变质量分布的 $\pi^+ - p$ 对的数目求和. 对应 scale_1 , 由等式(2)可得到的所谓的信号分布 signal, 在此, 求出信号分布 signal 中 (bin) 内粒子数大于零的相应的信号数目总和为 N_R . 第二次循环的标度因子 scale_2 为

$$\text{scale}_2 = \frac{\langle \text{same} \rangle - N_R}{\langle \text{mix} \rangle} . \quad (4)$$

同理, 由等式(2)可求出新的信号分布 signal, 也同样可求出新一轮的 N_R , 下一轮循环依次类推. 随着循环次数的不断增加, scale_n 愈来愈接近真实的 scale 因子, N_R 也愈来愈接近真实的信号粒子总数, 它们在相邻两次循环中的差也会愈来愈小. 当 N_R 基本上为一个不变的数时, 循环结束.

但当 N_R 不是取信号分布 signal 中 (bin) 内粒子数大于零的总和, 而是取 Δ^{++} 不变质量范围内 (1.1, 1.4) 的 (bin) 内粒子数大于零的总和时, 无论怎样增加循环次数都不能消除信号分布 signal 中的下凹现象, 见图 8.

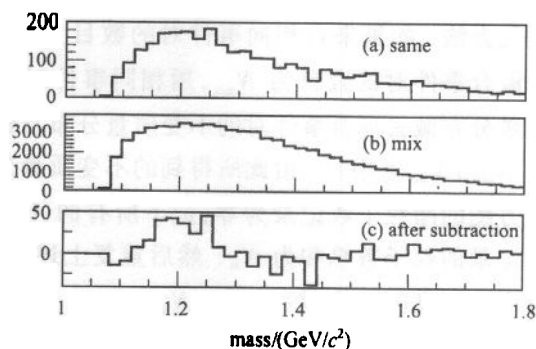


图 8 用循环叠代法所得到的 Δ^{++} 信号的不变质量分布图

与图 6 不同的是每次循环的信号数目 N_R 取的是 Δ^{++} 质量范围内 (1.1, 1.4) 的粒子总数; (a),(b),(c) 分别对应相同事件对的分布, 不同事件对的分布和用叠代法消除背景后的不变质量分布.

参考文献 (References)

- 1 Bertsch G F, Das Gupta S. Phys. Rep., 1997, **160**:189
- Cassing W, Niita K, Wang S J. Z. Phys., 1998, **A331**:439
- 3 Cassing W, Metag V, Mosel U et al. Phys. Rep., 1990, **188**:363
- 4 Aichelin J. Phys. Rep., 1991, **202**:233
- 5 Bass S A, Hartnack C, Stöcker H et al. Phys. Rev., 1994, **C50**:2167
- 6 Brockmann R, Harris J W, Sandoval A et al. Phys. Rev. Lett., 1984, **53**:2012
- 7 Barrette J et al (E814 Collaboration). Phys. Lett., 1995, **B351**:93
- 8 Goldhaber G et al. Phys. Rev. Lett., 1959, **3**:181; Goldhaber G et al. Phys. Rev., 1960, **120**:300
- 9 Hanbury Brown R, Twiss R Q. Philos. Mag, 1954, **45**:663
- 10 Acton P D et al (OPAL Collaboration). Z. Phys., 1993, **C68**:207
- 11 Jack B V. Nucl. Phys., 1995, **A590**:215c
- 12 Agababyan N M et al (NA22 Collaboration). Z. Phys., 1996, **C71**:409
- 13 Sorge H. Z. Phys. 1995, **C67**:497; Sorge H. Phys. Rev., 1995, **C52**:3291

A Study of Mixing Event Method in Relativistic Heavy Ion Collision Experiments *

FENG Sheng-Qin LIU Lian-Shou

(Institute of Particle Physics, Huazhong Normal University, Wuhan 430079, China)

Abstract A new mixing event method is developed in the analysis of relativistic heavy ion collision experiments with a relatively complicated background by using RQMD (Relativistic Quantum Molecular Dynamics) as input data sample. The proposed method is then applied to the study of invariant mass distribution of Δ^{++} resonance as an example. A new iterative algorithm is also proven by providing the invariant mass spectra of Δ^{++} 's using different algorithms for the combinatorial background subtraction.

Key words RQMD, mixing event method, resonance baryon, invariant mass distribution, scale factor