

中心集体流对带电粒子关联函数的影响*

郝鸿飞¹ 诸永泰¹ 沈文庆² 魏志勇¹

1 (中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

2 (中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

1996-06-26收稿

摘 要

讨论了中心集体流对带电粒子关联函数的影响, 采用蒙特卡罗方法研究了热源发射出的单粒子能谱与双粒子关联谱受中心集体流的影响. 利用 QMD 模型计算了 $100\text{MeV}/u$ 的 Ni + Ni 系统在 $b = 0\text{ fm}$ 条件下的双质子关联函数. 在计算中发展了一种交换粒子计算方法并证实了在 $100\text{MeV}/u$ Ni + Ni 的中心碰撞中存在中心集体流. 计算结果表明, 在中重系统中关联函数对中心集体流是灵敏的, 为在 $100\text{MeV}/u$ 以上能区研究中重系统中心碰撞形成的中心集体流提供了一种可行的方法.

关键词 带电粒子关联函数, 对心碰撞, 中心集体流, QMD 模型.

1 引 言

核物质状态方程的研究是当前中高能重离子碰撞的主要研究课题, 一个有效的方法就是通过重离子中心碰撞将核压缩到 1—2 倍正常核密度, 然后通过测量出射产物来研究核状态方程^[1], 在 $150\text{MeV}/u$ Au + Au 的一系列实验中发现了中心碰撞存在中心集体流^[2]. 通过分析出射中等质量碎片 (IMF) 在质心系的能谱发现, 不同质量 IMF 的平均单粒子能量基本上与 IMF 的质量数无关, 而只依赖于轰击能量^[2]. 在分析这一实验结果时假定存在一个向外膨胀的中心集体流, 且这一集体流正比于粒子产生时的半径, 则 IMF 的平均能量 $\langle E \rangle = 3T/2 + A\bar{E}_{\text{flow}}$, 其中 T 为热运动分量, \bar{E}_{flow} 表示集体流^[1]. 通过研究不同质量 IMF 的平均能量与其质量的关系, 可以给出中心集体流 \bar{E}_{flow} . 对轻系统在高能量轰击的条件下, 复杂粒子的产额很少, 因此用这种方法分析中心集体流就比较困难. 实际上中心集体流对轻带电粒子也有影响, 但仅从单粒子谱比较难以判定, 因为单粒子谱同时受温度和集体流的影响. 双质子关联函数是中高能重离子碰撞中测量相互作用区域大小的一种有效方法, 一般称之为 HBT 效应^[3-6]. QMD 是近年来发展起来的用

* 国家自然科学基金资助.

来描述中高能重离子核反应比较好的模型之一^[7].

2 中心集体流对热源发射的单粒子谱 及双粒子关联函数的影响

在重离子核反应中, 一般认为存在一个或多个发射源^[8], 假定热源的温度为 T , 则发射的单粒子能谱在质心系中可近似表示为:

$$\frac{dN}{dE} \sim \sqrt{E - E_C} \exp \left[- \left(\frac{E - E_C}{T_N} \right) \right], \quad (1)$$

其中 E_C 为库仑能, T_N 为核温度. 公式(1)可以用来拟合实验中测得的带电粒子能谱, 即运动源拟合模型^[8]可以将中高能重离子核反应碰撞过程中粒子产生的区域看成是一个球, 由于可能存在的膨胀过程, 形成一个由中心区向外膨胀的中心集体流. 在文献[1]中假定中心集体流正比于粒子产生的半径.

在半径为 r 处的集体运动动量 $p(r)$ 为

$$p(r) = p_0 \frac{r}{r_0}, \quad (2)$$

其中 $r_0 = 9\text{fm}$ 为热源的最大半径, 这样可以较好地解释在实验中测到的不同质量的复杂粒子平均能量与质量无关的实验现象. 为了研究这种中心集体流对质子能谱及双质子关联函数的影响, 首先作一个简单的蒙特卡罗模拟. 假定发射的质子均匀分布于半径为 r_0 的球内, 其无规运动动量分布服从高斯分布, 在不同半径上粒子还存在一个向外的正比于半径的集体流. 则粒子的总动量 $p = p_t + p_r$, 其中 p_t 表示无规分量, p_r 表示径向集体

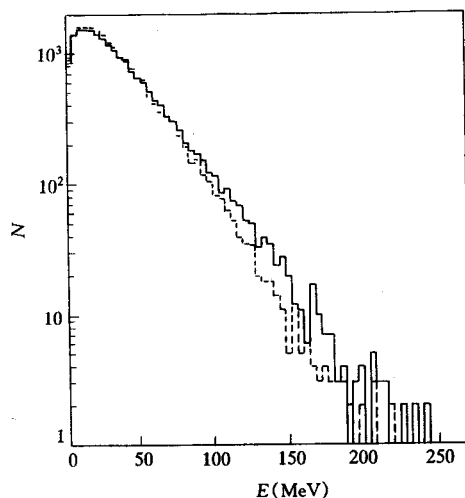


图1 热源发射的单粒子能谱

—— $T=150\text{MeV}/c$, $P_0=0$; - - - $T=120\text{MeV}/c$,
 $P_0=20\text{MeV}/c$.

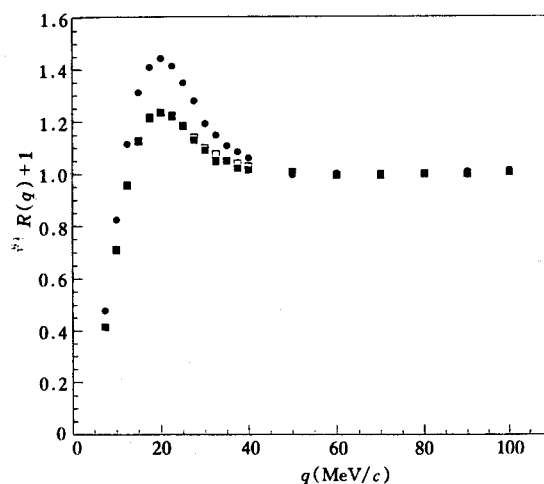


图2 热源发射的双质子关联函数

□为 $T=150\text{MeV}/c$, $P_0=0$; ●为 $T=120\text{MeV}/c$,
 $P_0=20\text{MeV}/c$; ■表示用交换粒子方法计算的
 $T=120\text{MeV}/c$, $P_0=20\text{MeV}/c$ 时的结果.

分量, $p_r = p_0 \frac{r}{r_0}$, $p_t \propto \exp - \frac{p^2}{2\sigma^2}$, 其中 $\sigma = 5 \text{ MeV} / c$ 为动量分布宽度.

图 1 显示了这个简单热模型给出的单粒子能谱, 图中 T 表示热运动分量, P_0 表示最大的中心集体流. 从图中还可以看到在 $P_0 = 20 \text{ MeV} / c$, $T = 120 \text{ MeV} / c$ 时的能谱与 $P_0 = 0 \text{ MeV} / c$, $T = 150 \text{ MeV} / c$ 时的能谱相差不多. 这说明存在中心集体流时, 单粒子能谱显得热一些. 同时也说明从单粒子能谱上很难判定粒子发射来源于一个高温热源, 还是一个低温但存在中心集体流的热源. 双质子的小相对动量关联函数一般定义为^[3]:

$$1 + R(q) = KN(q) / M(q), \quad (3)$$

其中 q 表示两个关联质子的相对动量, $N(q)$ 为给定动量 q 的符合计数, $M(q)$ 为本底谱, 一般在实验上通过事件混合方法得到. 理论上关联函数可以表示为^[9]:

$$1 + R(q) = \frac{\int db dp_1 dp_2 dr_1 dr_2 f_1(p_1, r_1) f_2(p_2, r_2) \psi(q, |r_1 - r_2|) \theta_\Delta(q)}{\int db dp_1 dp_2 dr_1 dr_2 f_1(p_1, r_1) f_2(p_2, r_2) \theta_\Delta(q)}, \quad (4)$$

其中 $f_i(p_i, r_i)$ 表示一体 Winger 分布函数, $\psi(q, |r_1 - r_2|)$ 表示由于末态相互作用引起的关联项^[3], b 为碰撞参量.

图 2 给出了当热源半径 r_0 为 9 fm 时在不同条件下由 (4) 式计算的双质子关联函数, 可以看出关联函数在 $q = 20 \text{ MeV} / c$ 时的峰值随中心流的增加而增加, 反映了从关联函数得到的源的表观大小由于中心集体流的存在而变小. 通过这一简单的热源模型可以看出中心集体流对单粒子谱和双粒子关联谱都有影响, 在实验中同时测量单粒子谱和双粒子关联谱将有助于把热运动与集体运动区分开来.

3 量子分子动力学对 $100\text{--}400 \text{ MeV} / u$ Ni + Ni 中心碰撞的模拟

为了研究中心集体流对关联函数的影响, 我们用 QMD^[7] 模型对中重系统在 100--

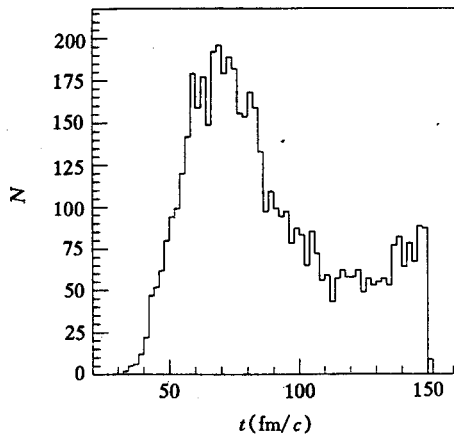


图3 在 $b=0 \text{ fm}$ 时 $100 \text{ MeV} / u$ Ni+Ni 碰撞中核子发射的时间谱

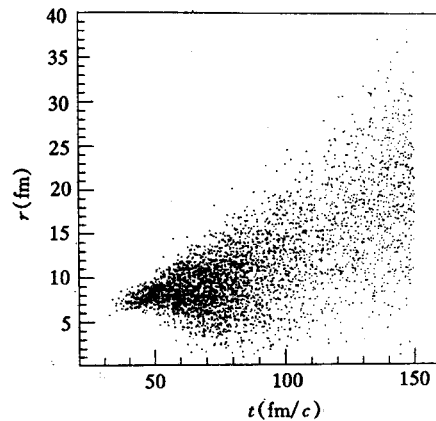


图4 在 $b=0 \text{ fm}$ 时 $100 \text{ MeV} / u$ Ni+Ni 碰撞中核子发射地距中心的距离与发射时间的关联谱

400MeV/u, $b = 0\text{fm}$ 的 Ni + Ni 碰撞做了动力学模拟计算. 如文献 [7] 所述, 当一个核子与其它核子的距离大于 3fm 时, 可将其看作自由核子. 计算关联函数必须计算粒子的发射时间谱. 定义核子发射的时间 t : 当核子在 t 时刻成为自由核子后一直保持为自由核子, 则 t 为该核子的发射时间.

从图 3 中可以看到, 大部分核子在 $t = 70\text{fm}/c$ 左右时被发射出来, 此时体系发生了

多重碎裂. 一直计算到 $t = 150\text{fm}/c$ 为止. 图 4 给出了核子发射点到中心距离与发射时间的关联图, 在 $t < 50\text{fm}/c$ 之前, $r > 5\text{fm}$, 核子基本上为表面发射, 而当 $t > 60\text{fm}/c$ 以后, r 的分布从 0 开始, 说明发射为体发射. 图 5 为由 QMD 计算的发射粒子的单粒子分布函数, 然后再按公式 (2) 计算得到的双质子关联函数, 从图中看到随轰击能量的增加, 关联函数在 $q \sim 20\text{MeV}/c$ 处的峰值增加, 由于体系的大小基本一样, 因此这种现象可以归因为中心集体流的影响.

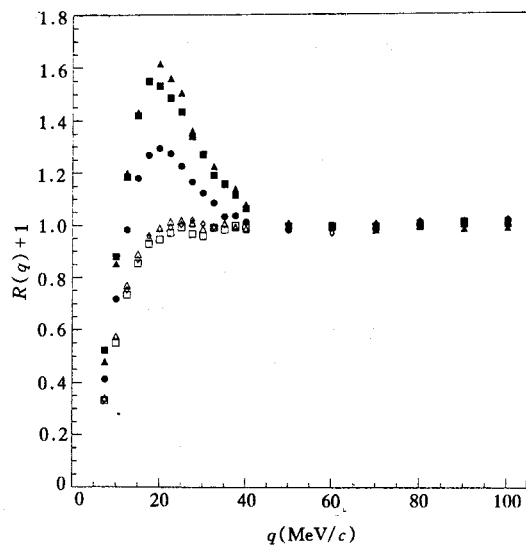


图 5 在 $b=0\text{fm}$ 时 Ni+Ni 碰撞中发射质子的关联函数

●, ■, ▲ 为 100, 250, 400MeV/u 时无交换粒子的计算结果,
□, △, ◇ 为 100, 250, 400MeV/u 时交换粒子法计算的结果.

为了进一步证明关联函数 $1 + R(q)$ 在 $q \sim 20\text{MeV}/c$ 处的峰值随轰击能量的增加而增加是由于存在一个与发射位置相关的中心集体流的影响, 而不是发射区域随轰击能量的增加而变小. 采用了一种交换粒子的计算方法, 即对每一个关联事件交换两粒子的动量, 这种做法保证了 $d = |r_1 - r_2|$ 不变, 因此不会影响发射区域的大小. 从图 5 可以看出在 $q \sim 20\text{MeV}/c$ 处没有明显的峰. 反过来证明 100—400MeV/u $b = 0\text{fm}$ 时 Ni + Ni 反应中关联函数的峰值随轰击能量的增加而增加是由于中心集体流的增加. 这一点也符合 Au + Au 系统在 100—400MeV/u 的极中心碰撞中发现的中心集体流随轰击能量的增加而增加的实验规律及量子分子动力学的计算结果^[10].

4 结 论

通过简单的蒙特卡罗模型表明对于一个热源, 如果存在一个向外膨胀的中心集体流, 则发射的单粒子能谱和双粒子关联谱会同时受到影响, 中心集体流的存在使得单粒子能谱的温度更高, 而双粒子关联函数的源的大小要小一些. QMD 对 $b = 0\text{fm}$, 100—400MeV/u 的 Ni + Ni 碰撞系统的计算结果表明, 关联函数在 $q \sim 20\text{MeV}/c$ 处的峰值随轰击能量的增加而增加. 由于弹靶的大小基本一样, 因此这种影响主要是由于中心集体流造成的. 交换粒子方法的计算进一步证明了这一结论. 由于在高轰击能量下, 对应于

中心碰撞复杂粒子产额变小, 因此, 在反应中同时测量单质子能谱和双质子关联谱对于研究中重系统在高能重离子中心碰撞中形成的中心集体流是很有意义的. 同时由于双质子关联函数对介质中的核子-核子相互作用截面比较灵敏, 因此比较高能条件下双质子关联函数与 QMD、BUU 的计算结果, 对于进一步认识这一能区的反应状态方程有很大帮助.

参 考 文 献

- [1] Proceedings of the International Workshop XXII on Gross Property of Nuclei and Nuclear Excitation, ed. by H. Feldmeier and W. Nörenberg 1994.
- [2] S. C. Jeong *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **72**(1994)3468.
- [3] S. E. Koonin, *Phys. Lett.*, **B70**(1977)43.
- [4] W. G. Lynch *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **51**(1983)1850.
- [5] W. G. Gong *et al.*, *Phys. Rev.*, **C43**(1991)1804.
- [6] H. F. Xi *et al.*, *Nucl. Phys.*, **A552**(1993)281.
- [7] J. Aichelin, *Phys. Rep.*, **202**(1991)233.
- [8] T. C. Awes *et al.*, *Phys. Rev.*, **C25**(1982)2361.
- [9] G. J. Kunde *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **70**(1993)2545.
- [10] 郝鸿飞等, 100MeV / u Au + Au 对心碰撞中心集体流的发展, 高能物理与核物理, **21**(第 8 期)(1997).

Influence of Central Collective Flow on Charged Particle Correlation Functions

Xi Hongfei¹ Zhu Yongtai¹ Shen Wenqing² Wei Zhiyong¹

1(Institute of Modern Physics, The Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

2(Shanghai Institute of Nuclear Research, The Chinese Academy of Sciences, Shanghai 201800)

Received 26 June 1996

Abstract

Influence of the central collective flow on two-particle correlation function is discussed. The Monte-Carlo calculation is used to describe how the single particle and two-particle spectrum from a hot emission source are effected by the central collective flow. The two-proton correlation function for Ni + Ni system with $b = 0\text{fm}$ at $100\text{MeV}/u$ is calculated by using QMD model. The particle interchange model is developed and used to prove the existence of a central collective flow in central collisions of $100\text{MeV}/u$ Ni + Ni system. The results show that the two-particle correlation functions are indeed sensitive to the central collective flow. This might provide a method for studying the central collective flow formed in central collisions for medium heavy system at energies above $100\text{MeV}/u$.

Key words charged particle correlation function, central collision, central collective flow, QMD model.