

中能原子核多重碎裂中的方位角关联

刘福虎

(中国科学院高能物理研究所 北京 100039)
1994-01-25 收稿

摘 要

在发射源静止系碎片各向同性发射的假设条件下,考虑到碎片之间的电磁作用,研究了中能原子核多重碎裂中碎片间的方位角关联,计算结果与500—980 A MeV 能区的实验数据一致。

关键词 中能原子核,多重碎裂,电磁作用,方位角关联。

1 引 言

自七十年代以来,核-核碰撞(或称重离子碰撞)的实验与理论研究一直是核物理的一个十分重要的前沿领域^[1]。根据弹核每核子入射能量的大小,目前一般人为地将核-核碰撞分为低能、中能、高能及超高能四个能区。当然,随着加速器能量的进一步提高,划分上述四个能区的界限也在不断变化。本文所涉及的实验数据对应的入射能量范围为500—980 A MeV,属于中能区。

核-核碰撞是一个非常复杂的过程,不同能区的核-核碰撞有各自不同的特点。就中能区而言,入射原子核的碎裂有三种类型:分裂(裂变)、散裂和多重碎裂。从未态观测到的产物看,分裂过程包含有两个重碎片,散裂过程包含有一个重碎片和少量轻碎片,而多重碎裂过程没有重碎片,只有一些轻碎片。

中能原子核的上述三种碎裂过程有各自不同的物理内容,其中多重碎裂现象曾被认为是核物质发生液气相变的证据^[2],但这种联系有待进一步研究。理论上研究多重碎裂主要包括两方面的工作^[3-7],一是研究发生多重碎裂的临界条件,即核能承受的最大激发能,包括有序的压缩能和无序的热能以及它们的相对重要性,这一研究同热压缩核的稳定性密切相关;二是计算多重碎裂碎片的质量分布以及与之相关的实验可观察量,以便和实验作比较。

近年来,实验发现中能原子核在 CR-39 中多重碎裂的相邻碎片的方位角关联(方位角的差)与各向同性发射的预期结果相差甚远^[8-10]。为了解释这个现象,本文在各向同性发射的假设条件下,考虑到碎片之间的电磁作用,对方位角关联问题进行了研究,并与500—980 A MeV ¹⁹⁷Au 在 CR-39 中多重碎裂的实验结果^[9,10]作了比较。

2 多重碎裂过程及碎片之间的电磁作用

一般认为,导致多重碎裂的物理根源是在核-核碰撞中形成了一个局域低密度的大体

积核子系统,可能是在核内的有些地方有核子(密度较大),有些地方没有核子(密度为零);在这个大体积系统中,由于核力是短程的,每一核子只能和核内邻近的一部分核子相互作用,系统中将出现集团;集团与集团之间不存在核力,只有库仑排斥力。

在这种图象基础上,我们认为集团之间的相互作用将在较短时间内使系统处于准平衡状态,在系统退激发时集团脱离系统成为末态观测到的碎片;在脱离系统的初始时刻,碎片的发射是各向同性的;碎片之间的电磁作用将使发射角发生变化。

以弹核入射方向为 z ,垂直于弹核入射方向的平面为 xoy 平面,建立固定于弹核上的直角坐标系。弹核多重碎裂中碎片的发射方向在 xoy 平面上的投影与 x (或 y) 方向的夹角 φ 就是通常所说的方位角,相邻碎片方位角的差就是本文所要讨论的方位角关联。

实验结果表明^[9],多重碎裂中电荷数为 Z_F 的碎片其平均多重数 $\langle m(Z_F) \rangle$ 依赖于 Z_F ,

$$\langle m(Z_F) \rangle = e^{-\mu Z_F}, \quad (1)$$

式中 μ 对不同大小的核-核碰撞过程有不同的值,对本文讨论的碰撞过程,实验^[9]给出 $\mu = 0.17$ 。

根据碎片发射角和横动量分布符合瑞利型这一实验事实^[10],假设在弹核静止系,在碎片脱离系统的初始时刻,碎片的动量分量 p_x, p_y 和 p_z 均服从高斯分布,且分布宽度 σ_x, σ_y 和 σ_z 相等,均等于 σ 。取归一化形式,有:

$$f_{p_{x,y,z}}(p_{x,y,z}) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} \exp\left(-\frac{p_{x,y,z}^2}{2\sigma^2}\right), \quad (2)$$

式中分布宽度 σ 对不同质量的碎片是不同的,根据文献[8],对质量数为 A_P 的弹核和质量数为 A_F 的碎片,

$$\sigma^2 = \frac{\sigma_0^2 A_P (A_P - A_F)}{A_P - 1}, \quad (3)$$

式中 σ_0 对不同大小的核-核碰撞过程有不同的值,对本文讨论的碰撞过程,实验^[9]给出 $\sigma_0 = 220\text{MeV}/c$ 。

现在考虑带电量为 $Z_1 e$ 的碎片1和带电量为 $Z_2 e$ 的碎片2之间的电磁作用。在时刻 t ($t=0$ 时,等价于碎片从原点开始脱离系统),由碎片2指向碎片1的位矢为:

$$\mathbf{r}_{21} = (\mathbf{v}_1 - \mathbf{v}_2)t, \quad (4)$$

式中 \mathbf{v}_1 和 \mathbf{v}_2 分别为碎片1和碎片2的速度,它们的大小由动量和质量决定。碎片2对碎片1的作用力 \mathbf{F}_1 包括电场力 \mathbf{F}_e 和磁场力 \mathbf{F}_m 两部分:

$$\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_e + \mathbf{F}_m = Z_1 e (\mathbf{E}_2 + \mathbf{v}_1 \times \mathbf{B}_2), \quad (5)$$

式中 \mathbf{E}_2 和 \mathbf{B}_2 分别是碎片2在碎片1所在位置产生的电场和磁场,其具体表示式分别为:

$$\mathbf{E}_2 = \frac{Z_2 e \left(1 - \frac{v_2^2}{c^2}\right) \mathbf{r}_{21}}{4\pi\epsilon_0 \left[r_{\perp}^2 \left(1 - \frac{v_2^2}{c^2}\right) + r_{\parallel}^2 \right]^{3/2}}, \quad (6)$$

和

$$\mathbf{B}_2 = \frac{\mu_0 Z_2 e \left(1 - \frac{v_2^2}{c^2}\right) \mathbf{v}_2 \times \mathbf{r}_{21}}{4\pi \left[r_{\perp}^2 \left(1 - \frac{v_2^2}{c^2}\right) + r_{\parallel}^2\right]^{3/2}}, \quad (7)$$

这里 ϵ_0 、 μ_0 和 c 分别是真空介电常数、真空磁导率和光速, r_{\perp} 和 r_{\parallel} 分别是 \mathbf{r}_{21} 垂直与平行于 \mathbf{v}_2 的分量。

近似计算表明, $F_e/F_m \approx 1/10^{-17} - 1/10^{-20}$, 可见与 F_e 相比, F_m 可以忽略, 即

$$\mathbf{F}_1 \approx \mathbf{F}_{e1}. \quad (8)$$

碎片 2 对碎片 1 的电磁作用力将使碎片 1 的动量发生变化, 碎片 1 获得的电磁动量为:

$$\mathbf{p}_1 = \int_{t_0}^{\infty} \mathbf{F}_1 dt, \quad (9)$$

式中 t 是作用时间, t_0 是从碎片开始脱离到完全脱离系统所经历的时间, 即计及碎片 2 与碎片 1 电磁作用的起始时刻。

同理, 碎片 2 由于受到碎片 1 的电磁作用也将获得电磁动量。

以上讨论的是两个碎片的情形, 当碎片数大于 2 时, 可以用类似的方法讨论其中某个碎片受到其它碎片共同作用的效果。

3 模拟计算过程及与实验结果的比较

根据以上讨论, 可以用蒙特卡罗方法进行模拟计算。由于受 CR-39 探测效率的限制, $Z_F \leq 5$ 的碎片不能探测到, 而一般来说, 这些较轻碎片的速度比较大, 它们产生后会很快远离系统, 再加上这些碎片的带电量较低, 本文在计算碎片之间的电磁作用时没有予以考虑。

模拟计算的步骤如下:

a) 根据式(1)决定 n 个碎片的电荷(本文取 $n = 2$ 和 3), 再由弹核的质量与电荷比换算出这些碎片的质量;

b) 根据式(2)决定每个碎片的动量, 再由质量换算出速度;

c) 根据式(4)、(6)和(8)计算两两碎片之间的电磁力, 再由式(9)计算每个碎片的电磁动量;

d) 把由式(2)决定的动量和电磁动量相加, 得到碎片总动量;

e) 将总动量分解成 x 、 y 、 z 三个分量, 并由 $\tan \varphi = \frac{p_y}{p_x}$ 决定方位角;

f) 将方位角按从小到大顺序排列, 得到 $\varphi_1, \varphi_2, \dots, \varphi_n$, 则 $\Delta\varphi_1 = \varphi_2 - \varphi_1$, $\Delta\varphi_2 = \varphi_3 - \varphi_2$, \dots , $\Delta\varphi_{n-1} = \varphi_n - \varphi_{n-1}$, $\Delta\varphi_n = \varphi_1 - \varphi_n + 2\pi = 2\pi - \Delta\varphi_1 - \Delta\varphi_2 - \dots - \Delta\varphi_{n-1}$ 就是要求的方位角关联;

g) 重复上述运算, 取每种样本的事例数均为 20 万个。

图 1 是当 $n = 2$ 时, 计算得到的方位角关联 $\Delta\varphi$ 的分布与 500—980 A MeV ^{197}Au 在 CR-39 中多重碎裂的实验结果的比较, 图中标有误差棒的实线直方图是根据文献[9]的实验结果改绘的, 虚线直方图是不考虑电磁作用的结果, 点线直方图是取 $t_0 = 8.5 \times 10^{-19}\text{s}$

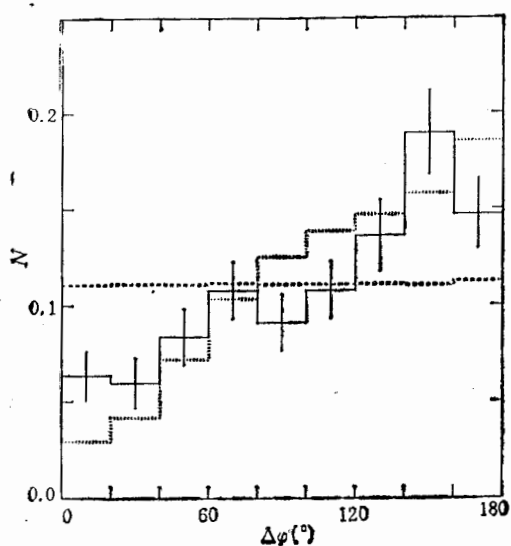


图1 碎片数为2时的方位角关联分布

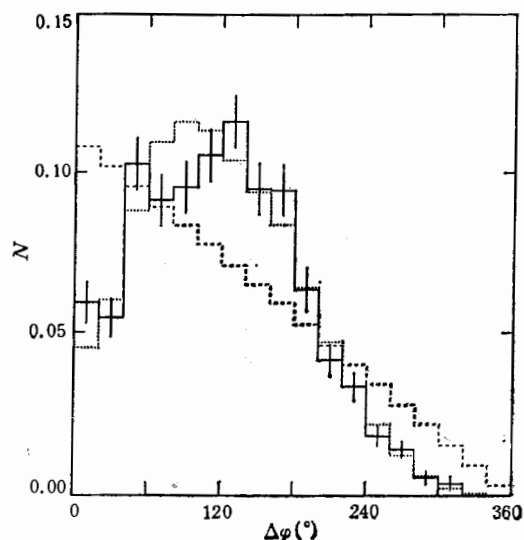


图2 碎片数为3时的方位角关联分布

时的结果,纵轴 N 是每 20° 间隔内关联角出现的几率。可见不考虑电磁作用时,各向同性发射的计算结果不能描述实验结果,当考虑电磁作用时,计算结果给出了与实验结果相同的趋势。

图2是当 $n=3$ 时,计算得到的方位角关联分布与实验结果的比较,图中直方图的意义同图1,但实验结果取自文献[10],入射 ^{197}Au 的能量也是 $500\text{--}980\text{ A MeV}$ 。可见不考虑电磁作用时,计算结果不能描述实验结果,当考虑电磁作用时,计算结果给出了与实验结果相同的趋势。

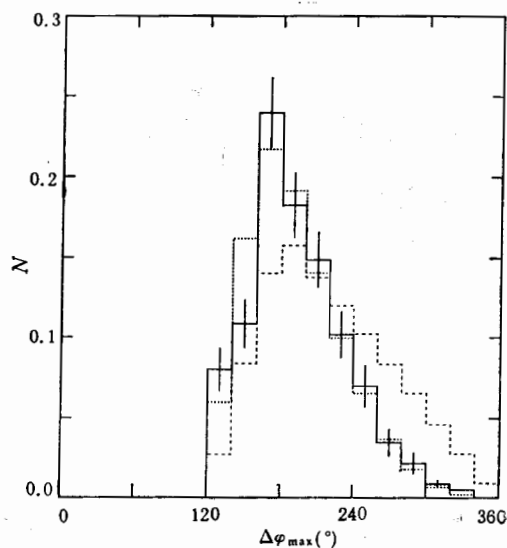


图3 碎片数为3时的最大方位角关联分布

图3是当 $n=3$ 时,计算得到的最大方位角关联 $\Delta\varphi_{\max}$ 的分布与实验结果的比较,

图中直方图的意义同图 1, 实验结果也取自文献[9], 从图 3 也能得出和图 1、图 2 相同的结论。

4 结论与讨论

通过以上比较分析, 可以认为: 中能原子核多重碎裂中碎片之间的电磁作用是引起碎片方位角关联偏离各向同性发射预期结果的原因。假设在多重碎裂的初始时刻, 碎片的发射是各向同性的, 随后计及电磁作用, 可以定性解释实验观测到的方位角关联。

式(9)中的 t_0 描述了从碎片开始脱离到完全脱离系统所经历的时间, 它和方位角关联与各向同性发射预期结果的偏离程度有较强关联。计算表明, t_0 越小, 方位角关联与各向同性发射预期结果的偏离越大, 而当 t_0 增大到 8.5×10^{-18} s 时, 电磁作用的影响基本上可以忽略。从系统大小看, t_0 越大, 说明系统越大, 碎片脱离系统时相邻碎片间的距离越大, 电磁作用越弱。

本文引入碎片之间的电磁作用, 定性地解释了实验观测到的方位角关联。由于受 CR-39 探测效率的限制, 实验没有给出 $Z_F \leq 5$ 的碎片的信息, 这给本文的计算分析带来了一些困难, 正如文中指出的那样, 本文在计算碎片之间的电磁作用时, 忽略了这些较轻碎片的影响。此外, 在计算 t 时刻碎片之间的电磁作用时, 没有考虑 t 时刻之前电磁作用对碎片速度的影响, 也没有考虑靶物质的阻止本领。

感谢丁林培、赵维勤和朱清棋等老师的有益讨论和帮助。

参 考 文 献

- [1] J. Hüfner, *Phys. Rep.*, **125** (1985) 129.
- [2] X. Campi, *J. Phys.*, **A19** (1986) L917.
- [3] C. Ngo et al., *Nucl. Phys.*, **A471** (1987) 381c.
- [4] C. Ngo et al., *Nucl. Phys.*, **A499** (1989) 148.
- [5] J. Desbois et al., *Z. Phys.*, **A328** (1987) 101.
- [6] H. Gutbrod et al., *Z. Phys.*, **A337** (1990) 57.
- [7] D. Gross et al., *Phys. Rev. Lett.*, **56** (1986) 1544.
- [8] J. Dreute et al., *Phys. Rev.*, **C44** (1991) 1057.
- [9] C. Lewenkopf et al., *Phys. Rev.*, **C44** (1991) 1065.
- [10] J. Dreute et al., *Nucl. Phys.*, **A538** (1992) 411c.
- [11] 唐孝威、许国发、刘福虎, 物理学进展, **13**(1993)378. 及其中所引文献。

Azimuthal Correlation in Nuclear Multifragmentation at Intermediate-Energy

Liu Fuhu

(Institute of High Energy Physics, The Chinese Academy of Sciences, Beijing 100039)

Received 25 January 1994

Abstract

Under the assumption that the fragments present isotropic emitting in the rest frame of the source, we have considered the electromagnetic interactions among fragments and investigated the azimuthal correlation between the fragments in intermediate-energy nuclear multifragmentation. The calculated results are in agreement with the experimental data in the energy range from 500 to 980 MeV.

Key words intermediate-energy nucleus, multifragmentation, electromagnetic interaction, azimuthal correlation.