

文章编号: 1007-1627(2002)01-0035-04

中能核反应中反应平面的确定^{*}

魏志勇, 靳根明, 诸永泰, 吴和宇

(中国科学院近代物理研究所, 甘肃兰州 730000)

摘 要: 介绍并分析了中高能核反应过程中与反应平面相关的可观测量, 以及确定核反应平面的各种方法. 这些方法包括裂变碎片方位角测量、类弹碎片测量、动量流球形张量、横向动量的方向性、方位角关联和 Fourier 谐波分析等.

关键词: 反应平面; 统计发射; 动力学发射

中图分类号: O571.14; O571.42; O571.4 **文献标识码:** A

1 引言

中能重离子核反应机制研究、热核性质及核态方程研究都属于当前核物理研究的前沿领域, 有关这些方面的研究工作已有较多的积累^[1-5]. 核反应机制研究中, 区分核反应过程中的动力学发射和统计发射过程具有特别重要的意义. 核反应过程所在平面的确定是研究中高能重离子核反应机制的一个关键问题之一, 集体流研究及核反应过程中早期动力学演化过程对反应平面的确定有很强的依赖性.

在核反应过程中反应平面确定后, 可以得到反应过程中粒子发射的集体流的形状, 进而利用核反应过程中在动量空间的分布得到位置空间中的分布, 研究核物质的压缩和热化. 比如说, 可以将发射产物分为在平面的成分和出平面的成分, 通过对在平面和出平面成分的研究, 可以对核反应机制有深入的了解, 尤其是侧重于研究核反应过程中存在的动力学发射过程. 将动力学过程和统计发射过程加以区分. 此外, 实验确定核反应平面不仅仅是分析方法和手段方面的突破, 而且是对核物理问题研究本身的深入, 找到这种确定核反应平面的可靠方法又需要对核反应机制有比较深入的研究.

低能核反应过程的一个基本特点就是核反应过程, 是一个两体过程, 核反应过程中相互作用的主要特征是平均场. 反应平面由入射动量和碰撞参数所确定, 此时, 入射炮弹和靶子在同一平面内, 也就是在反应平面内, 同样出射产物和剩余核也在这

一核反应平面内. 只要测量出一个发射产物, 发射粒子出射方向和入射束流所决定的平面就是反应平面. 此时确定反应平面的方法比较简单. 随着轰击能量的提高, 进入中能区后, 核反应机制发生了明显的变化. 核反应过程的实验现象和低能区有很大的不同. 在核反应过程中除发射中子、质子及 α 粒子等轻粒子外, 还发射大量的中等质量碎片, 在一次核碰撞过程中发射的粒子数目往往很大, 发射产物不仅仅在反应平面内, 而且有很大的出平面成分. 发射离子的动能可以跨越几个数量级. 这时, 核反应过程中核反应机制由平均场占据统治地位变为核子-核子碰撞占据统治地位. 由实验确定核反应平面已经是一个必需的分析研究方法. 此时, 需要找出一些和反应平面有单调函数关系, 同时又对其它反应参量依赖性弱的可观测量, 才能确定反应平面.

2 反应平面的确定方法

对于中高能核反应碰撞过程, 随反应体系的不同及轰击能量的不同, 确定反应平面的方法也有所不同. 目前已有的许多确定反应平面的方法, 不仅与核反应体系和束流能量有关, 而且对探测设备也有不同的要求.

对于重反应体系, 反应过程中经过裂变退激发的几率比较大, 可以利用测量裂变碎片来确定反应平面. 由于激发态的重核一般有很大的裂变几率,

收稿日期: 2001-05-24; 修改日期: 2001-08-16

* 基金项目: 中国科学院回国人员基金资助项目; 国家自然科学基金资助项目; 中国科学院“九五”重大基金资助项目(KJ95T-03)

作者简介: 魏志勇(1964-), 男(汉族), 甘肃白银人, 副研究员, 从事重离子核反应研究.

通过位置灵敏探测器(如 PPAC)测量发射碎片的方位角, 根据下式, 即可得到反应平面:

$$\Phi_r = \frac{\Phi_{i_1} + \Phi_{i_2} + 180^\circ}{2}, \quad (1)$$

Φ_r 为反应平面的方位角, Φ_{i_1} , Φ_{i_2} 则分别为两裂变碎片发射的方位角. 这种反应平面确定方法, 对实验探测设备的要求比较简单, 确定反应平面可靠性取决于探测器的位置分辨, 方法本身很可靠. 但是这种确定反应平面的方法只适合于裂变几率比较大的重体系. 另外随着轰击能量的提高, 反应过程中多重碎裂竞争强烈, 裂变过程的几率相对减小. 因此这种方法不适合较高束流能量的核反应过程, 通常用于费米能区附近的重体系的核反应过程.

动能流张量^[7,8]方法, 需要构造如下动量球张量:

$$F_{i,j} = \sum_{\nu=1}^N \omega_\nu P_{i,\nu} P_{j,\nu}, \quad (2)$$

N 为一次核反应事件中的粒子数, $P_{i,\nu}$ 为第 ν 个粒子在 i ($i=1, 2, 3$) 方向的动量分量, ω_ν 为权重, 通常可以取 $1/2m_\nu$, 此时, 动量球张量也叫动能球张量. 对重离子碰撞过程, 张量 F 在空间定义了一个体积, 此体积的形状如雪茄. 张量 F 为对称张量, 对角化后可以得到其三个本征值 f_1 , f_2 和 f_3 ($f_1 > f_2 \geq f_3$), 最大的本征值确定了集体流的方向(在平面方向流). 这一矢量的方向和束流的方向确定的平面就是反应平面.

这种利用动能球张量确定反应平面的方法需要测量核反应事件中的所有碎片、轻带电粒子, 因此需要大型 4π 探测装置, 实验手段比较复杂. 另外, 实际测量中, 探测设备不可能达到 4π , 最多是接近 4π . 除此而外, 带电粒子 4π 探测装置也不测量发射的中子, 因此要对反应事件进行评价和选择, 扔掉测量信息不全的事件. 这样, 数据处理分析任务也很大. 这种方法对于束流能量在 100 MeV/u 以上直到相对论能区的核反应过程比较有效, 随能量降低, 在几十 MeV/u 时, 集体流减弱, 流角(在质心系中动能流张量的主轴和束流方向的夹角)变小, 确定反应平面有较大的偏差.

当束流能量很高, 如达到通常所说的超相对论能区时, 沿束流方向的纵向动量很大, 集体流的方向和束流方向的夹角, 也就是流角, 变小. 此时利

用三维动能流张量来确定反应平面误差会变大, 可以定义垂直于束流平面内的两维的动能流张量来确定反应平面^[8,9].

横向动量分析方法^[10-12] 也被称为 TMA 方法. TMA 方法确定反应平面则是利用束流方向和如下式定义的加权横向动量 Q 来构造反应平面:

$$Q = \sum_{\nu=1}^N \omega_\nu P_{\nu}^{\perp}, \quad (3)$$

P_{ν}^{\perp} 为第 ν 个粒子在垂直于束流方向上动量分量, 权重 ω_ν 可以有多种选择, 根据经验, 可以选等权、质量权重 ($\omega_\nu = m_\nu$)、质心极角权重 ($\omega_\nu = \sin\theta_\nu$). 选择等权时, 对于快度 Y_ν 为正的粒子(质心系中向前发射的粒子), 权重 ω_ν 取 1; 对于快度 Y_ν 为负的粒子(质心系中向后发射的粒子)权重 ω_ν 取 -1. 快度定义为 $Y_\nu = (1/2)\ln[(1+\beta_\nu)/(1-\beta_\nu)]$, $\beta_\nu = v_\nu/c$ 为平行于束流方向的粒子速度和光速的比值. 对反应事件中的所有粒子进行矢量求和, 矢量 Q 在垂直于束流的平面内. 矢量 Q 和束流方向所决定的平面, 就是反应平面. 这种方法基于方向流的性质, 确定反应平面的精度和集体流的大小有关, 加权横向动量 Q 反映了横向动量在前角区和后角区之间的转移. 跳过对 midrapidity 的发射粒子求和, 可以改善反应平面的精度.

在实际的数据处理分析过程中, 往往将数据分为两组, 分别计算反应平面, 选择权重因子, 使得两种方法计算的结果偏差最小^[11].

TMA 方法确定反应平面和利用动能流张量方法确定反应平面, 这两种方法的精度相近. 根据 Danielewicz 等^[12] 分析, 利用 TMA 方法确定的反应平面, 精度要比利用动能流张量方法高一些.

除此之外, 横向动量的方向性^[13,14] (简称为 TMD) 也是一个用来确定碰撞参数的可观测量, 它定义如下:

$$D = \left[\frac{\sum_{i=1}^{M_c} P_i}{\sum_{i=1}^{M_c} |P_i|} \right]_{Y \neq 0}, \quad (4)$$

分子为横向动量的矢量求和, 分母为横向动量的标量求和. 和前面相同, Y 为快度. 矢量 D 和束流所决定的平面就是反应平面. 这种方法不仅可以确定反应平面, 还可以同时确定碰撞参数. D 值越小, 则碰撞参数越小^[15]. 在中心碰撞的一次事件中, 前

半角区各种出射离子的方位角分布各向同性. 在 Kuhn 等人的工作中选 $D \leq 0.3$ 则视为中心碰撞. 根据前面的讨论, 同样的理由, 这种根据横向动量测量确定反应平面的方法一般适用于束流能量在 100 MeV/u 直到相对论能区的核反应过程.

将横向动量的方向性和横向动量分析方法结合起来, 定义如下的矢量:

$$Q = \sum_i \frac{w_i P_i}{|P_i|} \quad (5)$$

矢量 Q 和束流方向决定了反应平面. 这种方法相当于横向动量分析方法中取了依赖于横向动量的权重, 或加权的横向动量的方向性.

方位角关联^[1-3]方法, 也可称为 ACM 方法, 它要求计算各种发射粒子动量相对于假定反应平面的偏差

$$D^2 = \sum_{i=1}^N \left[\frac{P_{ix}^2 + P_{iy}^2 - (P_{ix} + P_{iy})^2}{1 + u^2} \right] \quad (6)$$

实际的反应平面由变量 D^2 对 u 取极小值来确定. u 为假定的反应平面在垂直于束流平面内投影的斜率. 求得 u , 也就确定了反应平面. 根据变量 D^2 对 u 取极小值的条件, 可以得到一个二次方程, u 为这个二次方程的根. 这种方法是先任意给定一个反应平面, 得出各粒子在该平面中的出平面流, 旋转反应平面直至出平面流为最小值. 此时的反应平面即所求的反应平面. 这种方法所依赖的物理根据在于实验发现, 发射反应产物沿方位角分布出现在平面的提高, 即在 $\Phi = 0^\circ$ 和 $\Phi = 180^\circ$ 时, 反应产物比较多.

在集体流研究过程中, 通常要对 p, d, t 及 α 粒子等感兴趣的粒子逐个求集体流. 为避免粒子发射角和反应平面倾角之间的自关联, 求和中跳过所讨论的粒子, 为此引入反冲速度修正^[13] $V_c = P_{ic}/(m_{ip} - m_{ip0})$, m_{ip} 为体系的质量, P_{ic} 和 m_{ip} 分别为所研究的粒子的动量和质量.

对于轻反应体系, 根据 IQMD 模拟计算分析, ACM 方法可靠性要好于 TMA 方法.

方位角分布的 Fourier 展开方法^[16], 将实验所测得的发射粒子方位角分布进行 Fourier 谐波分析

展开:

$$E \frac{d^2 N}{d^3 P} = \frac{1}{2\pi} \frac{d^2 N}{P \cdot dP_x dP_y} \left\{ 1 - \sum_{n=1}^{\infty} 2 V_n \cos[n(\Phi - \varphi_n)] \right\} \quad (7)$$

φ_n 为反应平面所在的方位角. 根据这一展开式, 可以定义 n 阶谐波下对应的两个矢量:

$$X_n = Q_n \cos(n\varphi_n) = \sum_i w_i \cos(n\Phi) \quad (8)$$

$$Y_n = Q_n \sin(n\varphi_n) = \sum_i w_i \sin(n\Phi) \quad (9)$$

上式中 w_i 为权重因子^[17]. n 阶谐波下的反应平面为

$$\varphi_n = \frac{\tan^{-1} \left[\frac{\sum_i w_i \sin(n\Phi)}{\sum_i w_i \cos(n\Phi)} \right]}{n} \quad (10)$$

由 n 阶谐波得到的反应事件平面的方位角在 $0 \leq \varphi_n < 2\pi/n$ 的范围内, 对 $n=1$ 的情况, 所得结果同 $Q = \sum_i (w_i P_i)/|P_i|$ 的结果一致^[18]; 对 $n=2$ 的情况, 所得结果同利用横向球张量矩阵所得的结果一致^[19].

在 高能重离子碰撞过程中, 会形成一块火球物质及类弹、类靶的旁观者物质, 火球也称为参加者. 根据几何模型, 参加者和两块旁观者的大小随碰撞参数的不同而有所不同. 在周边碰撞过程中, 除少量核子在碰撞过程中擦去外, 炮弹中大部分核子以旁观者保留下来. 由于反应过程很快, 类弹旁观者的激发能并不高. 在以炮弹速度运动的坐标系中, 其动量分布服从 Goldhaber 抛物线规律. 这时候的反应也比较简单明了, 类弹碎片和束流方向的夹角决定了反应平面, 测出类弹碎片, 自然就得到了反应平面. 随轰击能量减小, 纵向动量分布稍有加宽, 而横向动量分布有较大加宽.

中能核反应过程中反应平面的确定, 首先是集体流研究的必需要求, 其次是用于核反应机制研究. 反过来, 反应平面的确定的方法、可靠性都依赖于对中能区核反应机制的深入研究. 只有对核反应机制, 特别是对集体流性质有了充分认识, 才能得到可靠的确定反应平面的方法. 这两者互相促进, 共同发展.

参 考 文 献:

- [1] Pochodzalla J., Geelcke U. K., Lynch W. G., *et al.* Two-particle Correlations at Small Relative Momenta for ^{40}Ar -induced Reactions on ^{197}Au at $E/A=60\text{ MeV}$ [J]. *Phys Rev.* 1987, **C35**: 1695-1703.
- [2] 魏志勇, 诸永泰. 核反应过程中的核温度参量[J]. *物理学进展*, 1998, **18**: 43-452; Wei Zhiyong, Zhu Yongtai. Influence of IMF Internal Excitation on the Extraction of the Isotope Nuclear Temperature[J]. *High Energy Physics and Nuclear Physics*, 1997, **21(3)**: 57-62.
- [3] 魏志勇, 段利敏, 吴和宇等. 35 MeV/u ^{40}Ar - ^{197}Au 反应中热核的嫡产生[J]. *物理学报*, 2001, **50(4)**: 649-654.
- [4] Plagnol E., Lukasik J., Auger G., *et al.* Onset of Midvelocity Emissions in Symmetric Heavy Ion Reaction[J]. *Phys Rev.* 1999, **C16**: 014606-1-014606-13.
- [5] 靳根明. 高激发核物质液-气相变与核温度[J]. *原子核物理评论*, 1998, **15(4)**: 227-236.
- [6] Gyulassy M., Frankel K. A., Stöcker H. Do Nuclear Flow at High Energies[J]. *Phys Lett.* 1982, **B110**: 185-188.
- [7] Prendergast E. P., Van Den Brink A., De Haas A. P., *et al.* Flow and Multifragmentation of ^{24}Mg - ^{27}Al at Intermediate Energies[J]. *Phys Rev.* 2000, **C61**: 024611-1-024611-9.
- [8] Ollitrault J. Y. Anisotropy as a Signature of Transverse Collective Flow[J]. *Phys Rev.* 1992, **D46**: 229-245.
- [9] Ollitrault J. Y. Determination of Reaction Plane in Ultrarelativistic Nuclear Collisions [J]. *Phys Rev.* 1993, **D4** 648: 1132-1139.
- [10] Danielewicz P., Odyniec G. Transverse Momentum Analysis of Collective Motion in Relativistic Nuclear Collisions [J]. *Phys Lett.* 1985, **B157**: 116-150.
- [11] Wilson W. K., Lacey R., Ogdilvie C. A., *et al.* Reaction Plane Determination Using Azimuthal Correlations [J]. *Phys Rev.* 1992, **C45**: 738-747.
- [12] Ogdilvie C. A., Cebra D. A., Clayton J., *et al.* Transverse Collective Motion in Intermediate-energy Heavy-ion Collisions [J]. *Phys Rev.* 1989, **C40**: 2592-2599.
- [13] Kuhn C., Konopka J., Coffin J. P., *et al.* Entropy Production in the Au+Au Reaction between 150 A and 800 A MeV [J]. *Phys Rev.* 1993, **C48**: 1232-1245.
- [14] Rensdort W., Ritter H. G. Collective Flow in Heavy-ion Collisions [J]. *Annu Rev Nucl Part Sci.* 1997, **C47**: 663-709.
- [15] 魏志勇, 靳根明, 诸永泰等. 中能核反应中碰撞参数的确定 [J]. *原子核物理评论*, 2001, **18(2)**: 80-84.
- [16] Poskanzer A. M., Voloshin S. A. Methods for Analyzing Anisotropic Flow in Relativistic Nuclear Collisions [J]. *Phys Rev.* 1998, **C58**: 1671-1678.
- [17] Danielewicz P. Effects of Compression and Collective Expansion on Particle Emission from Central Heavy-ion Reactions [J]. *Phys Rev.* 1995, **C51**: 716-750.

Determination of Nuclear Reaction Plane in Intermediate and High Energy Heavy Ion Reactions*

WEI Zhi-yong, JIN Gen-ming, ZHU Yong-tai, WU He-yu

(*Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000, China*)

Abstract: Observables that related to the nuclear reaction plane in intermediate and relativistic energy heavy ion reactions are discussed. Reaction plane determination for intermediate and relativistic energy heavy ion reactions is presented. The methods include fission fragments measurement, projectile-like fragments measurement, kinetic flow-tensor, transverse momentum directivity, azimuthal correlation, Fourier series and etc.

Key words: reaction plan; statistical emission; dynamical emission

* **Foundation item:** the Foundation of Chinese Academy of Sciences for Back Abroad; National Natural Sciences foundation of China; Major Subject of Chinese Academy of Sciences(KJ95T-05)