第 19 卷 第 4 期
2002 年 12 月

原子核物理评论
Nuclear Physics Review

Vol. 19, No. 4
Dec., 2002

文章编号：1007－4627(2002)04－0380－07

中能核反应中的集体流*

魏志勇[1]，李祖玉[2]，诸永泰[2]，周　瑾[1]

(1 苏州大学核医学院，江苏 苏州 215007；
2 中国科学院近代物理研究所，甘肃 兰州 730000)

摘　要：介绍了中高能核反应过程中与集体流相关的可观测量，以及利用这些可观测量分析研究集体流、确定集体流参量的方法. 除此而外，还介绍了通过测量分析集体流研究核态方程、介质中核子-核子碰撞截面及中高能核反应动力学发射过程.

关 键 词：集体流；动力学发射；方位角关联；反应平面

中图分类号：O571.1；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是当前核物理研究的前沿领域之一，有关这方面的研究工作已有较多的积累[1,2]. 在这一问题研究中涉及一个很重要的问题，就是区分和研究核反应过程中的动力学过程和统计过程[3,4]. 动力学过程和统计过程是中能重离子核反应机制研究中的两个重要方面，统计过程主要是平衡态或局部平衡下的热运动，动力学过程主要侧重于集体运动. 集体流属于这种集体运动.

核反应过程中核物质的集体流是指核物质在受某种相互作用下集体流动状态. 在 20 世纪 50 年代流体力学引入原子核碰撞时，就预言了核物质碰撞中会产生冲击波，强烈地压缩后导致纵向膨胀流. 在 20 世纪 70 年代 Scheid 等[5]基于流体动力学理论进一步预言了高能核-核碰撞过程中会形成密度达 3—5ρ_0的高密度区域，这种被压缩的高密度核物质，随后会进行膨胀，将大部分压缩能以动能形式释放出来，形成集体流，提出了集体流这一概念. 到了 20 世纪 80 年代，才从实验上观测到这一现象，Buchwald 等[6]和 Gustafsson 等[7]首先在实验上观测到了集体流，Gustafsson 利用塑料球探测阵列测量了 10°—160°内的 p，d，t，^{3}He，^{4}He 及 π^+，发现集体流随束流能量的降低而变小. Krofcheck 等[8]利用 Bevalac 加速器上的流光室，研究了不同轰击能量 130，70 和 50 MeV/u 下^{139}La＋^{139}La 的核反应过程，首次研究了中能区的集体流. 在中能区集体流随轰击束流能量的降低而降低，并发现在 50 MeV/u 处集体流消失.

研究核物质集体流的主要目的有 3 个方面：

(1)可以研究核反应机制，尤其是核反应中的动力学过程. 一般来说，剧烈的重离子碰撞过程可以划分为 3 个阶段. 在重离子碰撞的第一个阶段中形成了高温高密度的热核体系，重离子的动能在碰撞过程中转化为体系的热能和压缩能，大量的熵(80%以上)在这一阶段产生. 在随后的第二阶段，体系发生膨胀，由于在膨胀过程中大量的核子-核子碰撞，致使部分压缩能转化为体系内核子杂乱运动的热能，另外，大部分压缩能变成集体运动动能，形成集体流. 体系的熵有少量增加，体系的温度有比较大的下降，这一阶段为绝热或等熵膨胀过程. 在第三阶段核子之间的碰撞趋于停止，核子结合为结团、碎片后发射出来.

(2)研究核态方程，主要侧重于研究核物质的粘滞性和压缩性，集体流是和核物质的压缩有关的物理量，其能量来自于碰撞早期的压缩能，由于核物质中压强梯度导致了核物质的集体运动. 大量的理论计算表明，在高能核反应碰撞过程中，集体流的大小和核物质不可压缩系数 K_∞有很强的依赖关

收稿日期：2001－09－26；**修改日期**：2002－07－26

* **基金项目**：中国科学院留学回国人员基金，苏州大学启动基金

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

系，通过集体流研究可以获得关于原子核的软硬程度的信息. 此外，Mota 等[9]利用 Landau-Vlasov 方法采用 Gogny 势计算表明，对于低能核反应碰撞过程这种关联关系有所减弱，核子之间的相互作用具有动量相关的成分，集体流对这种动量相关的相互作用有很强的依赖性，因此，通过对集体流研究还可以研究这种动量相关的核力.

(3)研究核介质中核子-核子碰撞截面，集体流和介质中核子-核子碰撞截面有很灵敏的依赖关系，介质中核子-核子碰撞截面变化 20% 导致平衡能量的变化达 10 MeV/u，随体系的总质量 A 的增大，介质中核子-核子碰撞截面对集体流的影响越敏感.

集体流的形式有很多种，根据反应平面来分类，集体流可以有：在平面集体流[10, 11]或平面流(也叫边流或方向流)，在平面集体转动和出平面椭圆流[12, 13](也叫挤出效应). 根据集体流的对称性来分类，可以有径向流、转动流、径向横流和非对称横流. 非对称横流主要有方向流和椭圆流[14—16].

各种形式的集体流是互相关联的，它们从不同侧面反映了体系的动力学集体行为. 在研究集体流问题时，由于侧重点不同，反应体系和能区不同，集体流表现出不同的形态和特点. 随着研究工作的不断深入，不同的阶段集体流采用了许多不同的名称. 目前，比较重要而且研究比较多的是非对称横流，即方向流和椭圆流，椭圆流中还包括比较重要的挤出效应.

2　平面流

在重离子中心碰撞过程中，压缩过程后出现各向同性的横向膨胀，这种横向膨胀具有沿方位角的对称性，因此称为径向横流. 当碰撞参数增加和碰撞变为非中心碰撞时，沿方位角的对称性被破坏，这时候会出现许多种不同形式的流. 平面流就是其中的一种.

平面流中有两个重要现象，side-splash 和 bounce-off，这两个的贡献都在反应平面内. 集体流研究中，对 bounce-off 研究得比较多，也研究得比较早. bounce-off 对应于周边碰撞，由于高能时排斥的两体相互作用占主导，旁观者被偏开，这一集体现象和碰撞过程中的横向动量转移密切相关. side-splash 反映了沿方位角的非对称发射，它来源于参加者.

为研究分析集体流，可以有多种方法定义流参量. 普遍采用方法定义球张量为 $F_{i,j}=\sum_{\nu}P_i(\nu)\cdot P_j(\nu)w(\nu)$，如果取权重因子 $w(\nu)=(1/2)m(\nu)$，上式中的球张量则成为动能流张量. 张量 F 为对称张量，对角化后可以得到其 3 个本征值 $f_1>f_2\geqslant f_3$. 最大的本征值确定了集体流的方向(在平面方向流)，根据流球张量，可以定义在平面的纵横比 f_1/f_2 和出平面的纵横比 f_1/f_3 作为实验观测量来研究核反应过程的动力学行为. 在质心系中将动能流张量的主轴和束流方向的夹角定义为流角. 流角所在的平面就是反应平面[17]. 如果以流角 θ_f 为流参量，就会发现流角和碰撞参数有很强的依赖关系. 随着碰撞参数的减小，流角变大，对中心碰撞，流角甚至可达到 90°. 此外，流角随轰击能量的提高而减小，进入相对论能区和超相对论能区后，流角会变得很小，此时一般不再用流角来描述集体流.

为研究分析平面流，除了前面定义的流角外，还有一个边流参量，它定义为 $\langle p_x\rangle$，p_x 为在反应平面内横向动量的投影[18]，或定义为反应平面内单位核子横向动量的投影 $\langle p_x/A\rangle$. 这一流参量就是反应平面内平均横向动量的大小. 符号 $\langle\rangle$ 表示对所选的核反应事件求平均. 在质心系中表示，流参数在前半球($y>y_{cm}$)和后半球($y<y_{cm}$)有相反的符号，在 $y\approx y_{cm}$ 附近流参量 $\langle p_x\rangle$ 接近于零，但此时流参量的斜率比较大. 因此，流分析中还常利用这种斜率

$$F_y=\left(\frac{\mathrm{d}\langle p_x(y)\rangle}{\mathrm{d}y}\right)\Big|_{y=y_{cm}}$$

作为流参量来分析平面流.

在平面横向动量集体流的大小会随碰撞参数而变化，在中心碰撞中集体流很小，随碰撞参数增大集体流增大，到周边碰撞时，集体流又减小了. 如图 1 所示，流参数定义为 $\langle p_x\rangle(y_p-y_{NN})/A$，$y_p$ 和 y_{NN} 分别为炮弹及核子-核子散射质心的快度. 集体流与发射粒子的质量数有关. 随发射碎片的质量数增大，集体流增大. 这几种分析方法要求先确定反应平面，再进一步得到发射粒子在反应平面内横向动量的投影.

平面流的大小反映了核碰撞过程中原子核内部吸引的平均场与排斥的核子-核子相互作用之间的竞争. 在高能区由于流体力学 side-splash 致使平面流为正流，表明排斥的两体相互作用占主导，在低

能区平面流为负流，表明吸引的平均场占主导. 吸引的平均场与排斥的核子-核子相互作用导致了这种在平面内的流. 由于其方向在反应平面内，并且质心系中向前发射的碎片和向后发射的碎片具有相反的横向动量，因此平面流也称为在平面方向流或方向流. 在某个能量下两者达到平衡，平面流消失. 这一能量叫做平衡能量 E_{bal}，有时也叫消失能量.

当核内 Coulomb 场和核子-核子相互作用达到平衡时，集体流消失，此时对应的入射能即平衡能和反应体系有关. MSU 的 Westfall 等[19]利用 4π 阵列测量了 C+C(C 束能量为 $E_{lab}=55-155$ MeV/u)、Ne+Al(Ne 束能量为 $E_{lab}=55-140$ MeV/u)、Ar+Sc(Ar 束能量为 $E_{lab}=35-115$ MeV/u)和 Kr+Nb(Kr 束能量为 $E_{lab}=35-75$ MeV/u)核反应过程中的集体流，其平衡能见表 1.

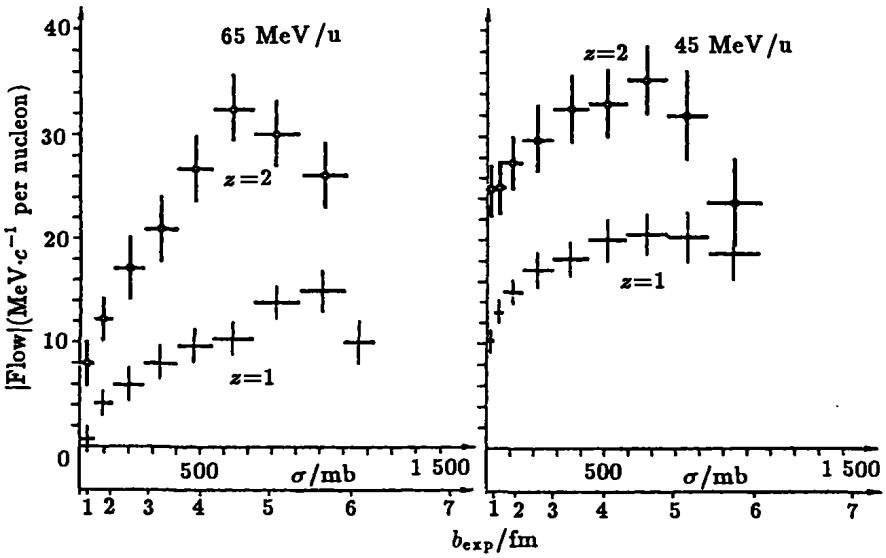

图 1 Ar+Al 反应体系中集体流随碰撞参数的变化

表 1 反应体系的平衡能

反应体系	C+C	Ne+Al	Ar+Sc	Kr+Nb
$E_{bal}/(\mathrm{MeV\cdot u^{-1}})$	122±12	111±10	87±12	64±12

反应体系不同，平衡能不同，平衡能和体系的质量 A 有 $A^{-1/3}$ 的依赖关系[11]. 此外，平衡能随碰撞参数而变化，对于同一反应体系，周边碰撞下的平衡能比中心碰撞下的平衡能高.

根据 BUU 模型对 ^{64}Zn+^{58}Ni 反应体系的计算[20]，平衡能量对介质中核子相互作用截面依赖性很强，而对状态方程的依赖性比较弱.

尽管在平面方向流的大小和发射碎片的质量有关，E_{bal} 对所有的碎片都相同[21]，利用核反应过程中发射的 p，d，t，α 等粒子提取的 E_{bal} 都一样. 平衡能量实验和模拟计算都表明 E_{bal} 正比于 $A^{-1/3}$，这里 A 为弹靶组合体系的质量. 体系的质量数越大，对应的平衡能量越低. 平面流和核态方程及动量相关的相互作用都有依赖关系.

3 出平面集体流及椭圆流

出平面集体流一般比较复杂，其中首先要说的是 squeeze-out，也叫 out of plane squeeze-out. 在低能区中心碰撞过程中，集体流主要在平行于反应平面的方向发射. 实际上流随反应时间而发生变化，在核反应过程早期，流发射垂直于反应平面，随后的膨胀则导致在平面流、能量流的方向最终和碰撞参数平行. 随着轰击能量的增高，集体流变为主要在垂直于反应平面的方向发射. 在平面和出平面集体流有不同的起源，旁观者中的核物质阻止了参加者中核子的前进，从而核物质被挤出[22]. 从发射流的对称性看. 为研究分析核反应中的出平面发射，通常引入方位角分布函数 $P(\phi)\propto 1+a_1\cos\phi+a_2\cos(2\phi)$，$\phi$ 为发射粒子相对于反应平面的方位角. 经验表明方位角分布中，展开到二阶项已足够了，不需要引入更高阶的展开项. a_1 的大小反映了在平面集体流. 快度在 y_{cm} 附近时，在平面发射贡

献最小，而出平面的贡献变大. 定义一个描述出平面发射的观测量

$$R_n = \frac{P(90°)+P(-90°)}{P(0°)+P(180°)} = \frac{1-a_2}{1+a_2},$$

此时，利用 R_n 很容易看出：如果 a_2 为正，则对应于转动效应[23]，在平面发射有较大的贡献. 如果 a_2 为负，出平面发射有较大的贡献，则对应于挤出效应. 中心碰撞对应的 a_2 为负，而周边碰撞对应的 a_2 为正. 随束流能量的提高，出平面发射起初增大，随束流能量的进一步提高，出平面发射又减小[10]. 方位角分布对集体流参量比较灵敏，但方位角分布测量方法中反应平面的确定是研究平面方向流和出平面集体流的一个必需的步骤.

另外一种研究方法是定义关联函数 $C(\Delta\phi)=N_{corr}(\Delta\phi)/N_{uncorr}(\Delta\phi)$，其中 $N_{corr}(\Delta\phi)$ 为选自同一事件关联对的分布，$N_{uncorr}(\Delta\phi)$ 为来自于混合事件关联对的分布，一般是从具有相同碰撞参数的不同的反应事件中随机选取. 关联函数一般具有如下形式：$C(\Delta\phi)=A[\lambda_0+\lambda_1\cos(\Delta\phi)+\lambda_2\cos(2\Delta\phi)]$，不同于方位角分布，方位角关联分析方法不需要确定反应平面[13]，因此，由于确定反应平面而来的误差被排除了. 除此而外，探测器效率、接收立体角等因素的系统误差的影响也比较小. 方位角关联函数可以提供两种集体运动信息，一种是集体转动(λ_2)，这种模式的集体运动发射方位角关联函数具有 90°对称的分布，如图 2 所示. 图 2 中左边的(a)，(b)，(c)分别表示模拟计算的纯粹转动、平面流及两者混合时的方位角关联函数，右边的(a)，(b)，(c)分别表示对应于不同碰撞参数实验测量得到的关联函数.

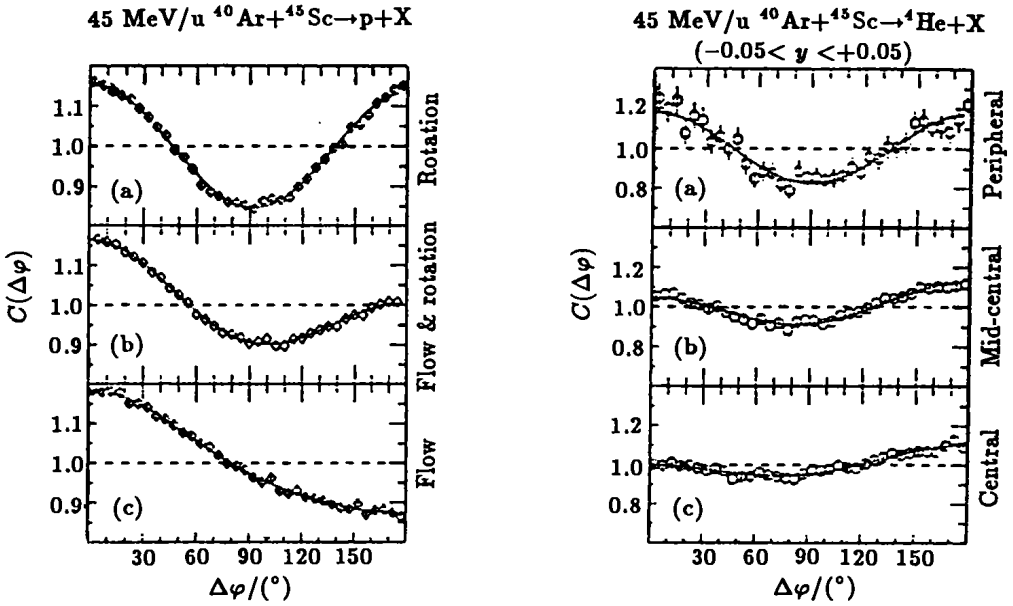

图 2　模拟计算的关联函数及实验测量的结果[13]

另外一种是在平面集体流(λ_1). 通过拟合实验关联函数可以发现，λ_1 随束流能量增加起初减小，达到一个极小后，变为 λ_1 随束流能量增加而增加. 对应于 λ_1 为极小的束流能量，就是集体流消失的平衡能量. 利用这种方法得到的平衡能量和标准的利用横向动量方法提取的平衡能量一致. 这种模式的集体运动发射方位角关联函数随关联角增大而单调下降. Monte Carlo 模拟计算和 45 A MeV ^{40}Ar+^{45}Sc实验测量^{4}He 的结果如图 3 所示. 随碰撞参数的减小，关联函数的非对称性更明显，随着束流轰击能量的增加，这种集体转动效应逐步减小.

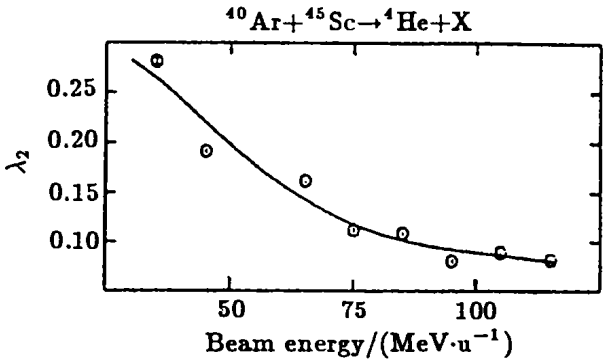

图 3　集体转动效应随束流能量的变化

椭圆集体流或者称为椭圆流是集体流中最广泛的一种流的形式，椭圆流就是指能量流沿方位角出现的非对称性[14]. 在非中心碰撞过程中，核物质压缩产生非对称的空间质量分布，由于核物质的膨胀将这种非对称的空间分布转化为动量的非对称的分布，因此，椭圆流对应于非中心碰撞. 通过测量核反应过程中发射粒子的集体流就可以对反应过程中的非对称分布及膨胀过程进行研究. 空间非对称性会随体系膨胀而减小，因此椭圆流对研究碰撞过程的早期行为提供帮助.

从集体流的性质上讲，根据椭圆流的定义，很容易发现前面所介绍的平面流及出平面集体流都应该属于椭圆流的范畴，它们是椭圆流中很特别的一类. 在这里研究的椭圆流要比前面提到的平面流及出平面集体流复杂得多，并且流参量及所采用的分析研究方法也完全不同. 因此，在许多研究工作中并不将平面流及出平面集体流纳入椭圆流来研究分析.

椭圆流参量定义为 $V_2=\langle(p_x^2-p_y^2)/(p_x^2+p_y^2)\rangle$，通常选束流方向沿 z 方向，x 方向为碰撞参数所在的方向. 这种定义和下面的 Fourier 展开分析方法所定义椭圆流参量是一致的. 在高能核碰撞过程中有比较大的在平面发射，$V_2>0$.

核反应过程中发射离子的方位角分布可按下式来进行 Fourier 展开分析，由于相对于反应平面的反射对称性，而所有的 sin 项消失，展开式中只能有 cos 的项，即

$$E\frac{\mathrm{d}^3N}{\mathrm{d}^3p}=\frac{1}{2\pi}\frac{\mathrm{d}^2N}{p_t\mathrm{d}p_t\mathrm{d}y}(1+\sum_{n=1}^{\infty}2V_n\cos[n(\phi-\varphi_r)]),$$

其中 ϕ 为发射粒子的方位角，φ_r 为反应平面所在的方位角，p_t 为横向动量. 经 Fourier 分析后[15]，cos 项中的第一个系数 V_1 对应于方向流的贡献，

$$V_1=\langle\cos(\phi-\varphi_r)\rangle=\langle\frac{p_x}{p_t}\rangle,$$

p_x 为反应平面内的横向动量. 第二个系数 V_2 对应于椭圆流 $\langle(p_x/p_t)^2\rangle-\langle(p_x/p_t)\rangle^2$. 方位角分布 Fourier 展开中二阶项不为零时，在极坐标系中 $(a+b\cos2\phi)$ 为一个椭圆，因此称为椭圆流. 椭圆流对体系最大压缩下的演化比较敏感[11]，高动量的椭圆发射流对动量相关的相互作用势依赖性很强. Fourier 展开中的高阶项（$n\geq3$）反映了集体流的高阶对称性，已有一些实验现象表明 Fourier 展开中不为零的高阶项存在，如 π 介子的反流，即 π 介子的方向流和质子的方向流方向相反. 另外，随着束流能量的提高，低能区的挤出效应会过渡到高能区的 in-plane elliptic flow，在这两种集体流效应都存在的情况下，Fourier 展开中的四阶项不为零.

4 结束语

通过分析流和碰撞参数的依赖关系，利用流参量的大小可以确定碰撞参数[16]. 如 A. M. Poskanzer 等对 158 GeV/u Pb+Pb 核反应过程中 π 介子数据进行了研究分析，根据 π 介子椭圆流可以确定碰撞参数. RQMD 和实验数据分析结果之间有系统偏差. 核反应过程中不同时期的压强对横向流的贡献是同一方向，而反应早期和后期的压强对椭圆流具有不同的符号[14]. 椭圆流可提供核反应早期动力学演化的信息. 在非中心碰撞过程中，碰撞参数比较大，核物质压缩产生非对称的空间质量分布会导致比较大的椭圆流，如图 4 所示. 由于椭圆流参数和碰撞参数之间有对应的单调函数关系，同其它确定碰撞参数的方法一样[25]，椭圆流参数也可以提供一种确定碰撞参数的方法.

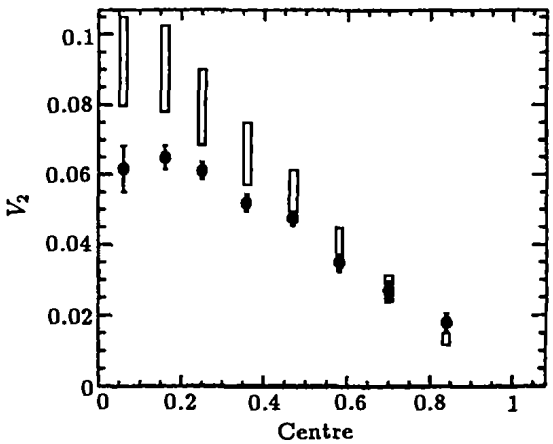

图 4 椭圆流参数 V_2 随中心性 Centre 的变化[24]

• 为实验结果，□为一定初始空间非对称性下流体力学给出的上限.

在相对论能区高能重离子碰撞过程中，会有大量的 π^+，π^-，K^+，K^- 和反质子产生. 测量这些粒子的发射过程，可以研究高能碰撞过程中夸克胶子等离子相变、核物质热化及动力学膨胀. Bearden 等[26]利用 200 GeV/u S+S 和 158 GeV/u Pb+Pb

的碰撞过程测量了 π^+，π^-，K^+，K^-，p，$\bar{p}$ 的横向质量分布，横向质量定义为 $m_t=\sqrt{m^2+p_t^2}$，发现由横向质量分布提取的斜率温度参数和发射粒子的质量有关，斜率温度参数随发射粒子的质量的增加而增加，并将这种现象解释为体系膨胀过程中径向集体流所致.

径向集体流为沿径向各向同性膨胀，这种现象对应于中心碰撞过程中导致的压缩膨胀. 从这个径向膨胀热源发射出来的粒子其能谱为

$$\frac{d^3N}{dEd^2\Omega}\propto Pe^{-\gamma E/T}\left\{\frac{\sinh\alpha}{\alpha}(\gamma E+T)T\cosh\alpha\right\},$$

其中 E 和 P 分别为质心系中粒子的总能量和动量，$\gamma=(1-\beta^2)^{-1/2}$，$\alpha=\gamma\beta P/T$，$T$ 为发射源的核温度. 利用这一表达式可以研究发射谱中集体运动的贡献.

当核物质的 Z/N 偏离饱和核物质的 Z/N 时，集体流现象会有所不同. 比如，由于核物质中 np 散射截面是 nn 散射截面的 3 倍，因此丰中子体系的平衡能量会更大. 同位旋相关的集体流研究是近年来比较感兴趣的研究方向[27]，它为研究核态方程及核物质中核子-核子碰撞截面对同位旋自由度的依赖关系提供了依据.

集体流研究已经进行了多年，取得了许多进展，同时随着研究工作的深入又提出了一些新的课题. 集体流研究在今后必将得到进一步的发展，通过对集体流的研究，对核反应机制研究及核物理研究会起促进作用.

参 考 文 献：

[1] Pochodzalla J, Gelbke C K, Lynch W G, *et al*. Two-particle Correlations at Small Relative Momentum for ^{40}Ar-induced Reactions on ^{197}Au at $E/A=60$ MeV[J]. Phys Rev, 1987, **C35**: 1 695.

[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**：33.

[3] 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.

[4] Plagnol E, Lukasik J, Auger G, *et al*. Onset of Midvelocity Emissions in Symmetric Heavy Ion Reaction [J]. Phys Rev, 1999, **C61**: 014606, 1.

[5] Scheid W, Müller H, Greiner W. Nuclear Shock Waves in Heavy-ion Collision[J]. Phys Rev Lett, 1974, **32**: 741.

[6] Buchwald G, Graebner G, Theis J, *et al*. Kinetic Energy Flow in Nb(400 *A* MeV) + Nb: Evidence for hydrodynamic compression of nuclear matter [J]. Phys Rev Lett, 1984, **52**: 1 594.

[7] Gustafsson H A, Gutgrod H H, Kolb B, *et al*. Collective Flow Observed in Relativistic Nuclear Collisions[J]. Phys Rev Lett, 1984, **52**: 1 590.

[8] Krofcheck D, Bauer W, Grawley G M, *et al*. Disappearence of Flow in Heavy-ion Collisions [J]. Phys Rev Lett, 1989, **63**: 2 028.

[9] Mota V, Sebille F, Farine M, *et al*. Analysis of the Transverse Momentum Collective Motion in Heavy-ion Collisions below 100 MeV/nucleon[J]. Phys Rev, 1992, **C46**: 677.

[10] Reisdorf W, Ritter H G. Collective Flow in Heavy-ion Collisions[J]. Ann Rev Nucl Part Science, 1997, **47**: 663.

[11] 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.

[12] Andronic A, Stoicea G, Petrovici M, *et al*. Transition from In-plane to Out-of-plane Azimuthal Enhancement in Au+Au Collisions[J]. Nucl Phys, 2001, **A679**: 765.

[13] Lacey Roy A, Elmaani A, Lauret J, *et al*. Multifragment Azimuthal Correlation Functions: Probes for reaction dynamics in collisions of intermediate energy heavy-ions[J]. Phy Rev Lett, 1993, **70**: 1 224.

[14] Heinz Sorge. Elliptical Flow : A signature for early pressure in ultrarelativistic nucleus-nucleus collisions[J]. Phys Rev Lett, 1997, **78**: 2 309.

[15] Poskanzer A M, Voloshin S A. Methods for Analyzing Anisotropic Flow in Relativistic Nuclear Collisions[J]. Phys Rev, 1998, **C58**: 1 671.

[16] Poskanzer A M, Voloshin S A. For the NA49 Collaboration Centrality Dependence of Directed and Elliptic Flow at SPS [J]. Nucl Phys, 1999, **A661**: 3 41c.

[17] 魏志勇，诸永泰，靳根明等. 中能核反应中反应平面的确定[J]. 原子核物理评论，2002，**19**(1)：35.

[18] 贺智勇，Peter J, Angelique J C, *et al*. 57 MeV/u ^{64}Zn+^{27}Al 反应中集体流的研究[J]. 高能物理与核物理，1994，**18**：800.

[19] Westfall G D, Bauer W, Graig D, *et al*. Mass Dependence of the Disappearance of Flow in Nuclear Collisions[J]. Phys Rev Lett, 1993, **71**: 1 986.

[20] He Zhiyong, Dai Guangxi, Jin Genming, *et al*. Disappearance of Flow as a Function of Impact Parameter for ^{64}Zn+

^{58}Ni Collisions at Intermediate Energies[J]. Chinese Journal of Nuclear Physics, 1994, **16**(4): 313.

[21] Ogilvie C A, Bauer W, Cebra D A, *et al*. Disappearance of Flow and Its Relevance to Nuclear Physics[J]. Phys Rev, 1990, C42: R10; Buta A, Angelique J C, Auger G. Azimuthal Correlation Function and the Energy of Vanishing Flow in Nucleaus-nucleus Collisions[J]. Nucl Phys, 1995, **A584**: 397.

[22] Gutbrod H, Kampert K H, Kolb B, *et al*. A New Component of the Collective Flow in Relativistic Heavy-ion Collisions[J]. Phys Lett, 1989, **B216**: 267.

[23] Phair L, Moretto L G, Wozniak G J, *et al*. Reducibility, Thermal and Mass Scaling in Angular Correlations from Multifragmentation Reactions[J]. Phys Rev Lett, 1996, **77**: 822.

[24] Ackermann K H, Adams N, Adler C, *et al*. Elliptic Flow in Au+Au Collisions at $\sqrt{S_{NN}}=130$ GeV[J]. Phys Rev Lett, 2001, **86**: 402.

[25] 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.

[26] Bearden G, Boggild H, Boissevain J, *et al*. Collective Expansion in High Energy Heavy Ion Collisions[J]. Phys Rev Lett, 1997, **78**: 2 080.

[27] Baoan Li. Neutron-proton Differential Flow as a Probe of Isospin-dependence of the Nuclear Equation of State[J]. Phys Rev Lett, 2000, **85**: 4 221.

Collective Flows in Intermediate and Relativistic Energy Heavy Ion Reactions*

WEI Zhi-yong[1], LI Zu-yu[2], ZHU Yong-tai[2], ZHOU Jin[1]

(1 *Nuclear Medical School, Suzhou University, Suzhou* 215007, *Jiangsu, China*;

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

Abstract: Observables that related to the flows in intermediate and relativistic energy heavy ion collisions are discussed. The flow parameters which describe directe flow, squeeze-out and elliptic flow, as well as probing the equation of state, in medium n-n cross section and the dynamical emission are reviewed.

Key words: collective flow; dynamical emission; azimuthal correlation; reaction plane

* **Foundation item**: Foundation of Chinese Academy of Sciences for Scientists Back Abroad; Foundation of Suzhou University for Starting Project