

重离子近心碰撞核反应研究

李祖玉 戴光曦

(中国科学院近代物理研究所)

摘要: 重离子近心碰撞是低能区和中能区的重要研究领域之一,正处于广泛关注的开拓时期。本文将介绍这方面的有限实验结果和一些定性的理论描述。

一、引言

重离子近心碰撞相对于周边碰撞而言是低能区(5MeV/A—20MeV/A)和中能区即费米能区(20MeV/A—200MeV/A)的重要研究领域之一。近心碰撞以投弹与靶核的强烈作用为主要特征,因此又称作破坏性碰撞。与之相反,周边碰撞是温和碰撞;它以部分核弹与靶核作用,在低能区表现为库仑激发、准弹性散射与深度非弹性散射;在费米能区表现为剥落反应。而近心碰撞则在低能区表现为全融合反应、非全融合反应;在中能区则出现非完全线性动量转移,从融合—裂变的二体出射道朝多重碎裂反应的三体或多体出射道过渡。目前认为剥落反应已被很好的了解,但多重碎裂反应则被看成是一个尚未知的统计过程,许多实验和理论^[1-4]都正在围绕这种反应进行数据积累与模型检验。可以说,近心碰撞正经历着一个被广泛关注的开拓时期,下面我们将对这方面的有限实验结果和一些定性的理论描述作一些介绍。

二、当前国际上近心碰撞的研究状况

1. 原子核极限状态的研究

国际上由于ECR离子源用于中等大小的回旋加速器,提高了中等质量的重离子能

量,使其达到20MeV/A以上;同时法国G-ANIL中能重离子加速器的运转等使得世界上开始中能重离子研究的实验室大大增加。在这些研究中,近心碰撞是个重要的项目,因为近心碰撞对核的作用最强,破坏性最大。在这种碰撞中,将得到最大限度的线性动量和轨道角动量的转移,使核获得最高的激发能即处于最高核温度。我们知道

$$E^* = \frac{\langle P \rangle^2}{2 \langle M' \rangle} \cdot \frac{M_T}{\langle M' \rangle + M_T} + Q \quad (1)$$

其中 $\langle P \rangle$ 和 $\langle M' \rangle$ 分别为平均转移的动量和质量, M_T 为靶质量, Q 为反应 Q 值。从(1)式看出,激发能与转移的动量和质量有关,在用30MeV/A的 ^{58}Ni 和用44MeV/A的 ^{40}Ar 轰击 ^{232}Th 靶时,给出的最大复合系统的激发能分别达到1GeV和0.934GeV,即核最高可达3.5MeV/A的激发能,这正是50年前N. Bohr发现复合核的论文中曾作出过的估计;即原子核可承受1GeV的最大激发能,现在证实了他的预言。目前用“热核”来称呼这种高激发态的核。由于“热核”首先发射中子及一些轻粒子,然后裂变才有较大几率,因此从中子能谱可以给出“热核”的温度。例如测量热核蒸发中子能谱给出 ^{20}Ne (30MeV/A)达到 $4.1 \pm 0.14\text{MeV}$,而对 $^{14}\text{N} + ^{154}\text{Sm}$ 的 $A \sim 160$ 复合核,其核温度达到5.5MeV。近心碰撞还可最有效地合成远离 β 稳定线新核素。而研究原子核能承受的最高激发能、核温度、 N/Z 与最高自旋界限的关系是当前国际上竞争的重要项目之一。

2. 线性动量转移量 (LMT) 的测定是近心碰撞有效的探索方法

LMT对于周边碰撞的不完全性在低能时已经显示出来, 要得到最大的LMT, 近心碰撞是最有效的。在图1中显示了近期美国

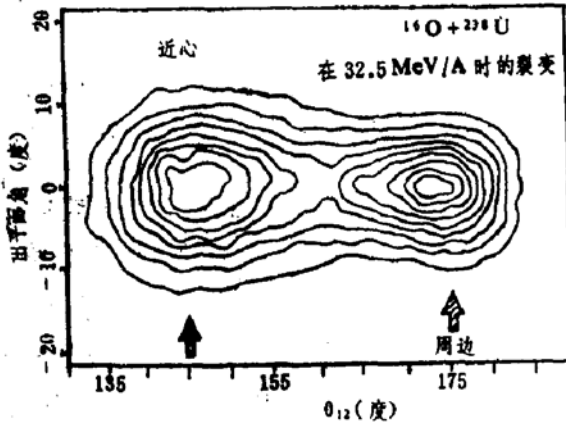


图1. 裂变碎片的在平面和出平面二维分布等高图

LBL实验室作的 $^{16}\text{O}(32.5\text{MeV}/\text{A}) + ^{238}\text{U}$ 反应测到的裂片夹角 θ_{12} 和出平面角 $\Delta\varphi$ 的分布等高图^[5]。从图可见裂片分为两组, 周边碰撞转移的线动量较小, 在 $\theta_{12} \sim 175^\circ$ 成峰; 而近心碰撞的LMT很大, 在 145° 成峰。如果将 ^{238}U 靶换成 ^{197}Au 靶则仅出现近心碰撞峰, 这是由于 ^{238}U 易碎而 ^{197}Au 不易碎造成的。从图1可见, 近心碰撞平均LMT仅为全LMT的75%, 这意味着LMT的限度为 $185\text{MeV}/\text{C}$ 。它是对弹核 ^{16}O 的每核子而言, 且与靶核无关。这与过去发现的最大LMT与弹核数成正比的规律是一致的。例如 $^{40}\text{Ar}(31-44\text{MeV}/\text{A}) + ^{232}\text{Th}$ 和 $^{58}\text{Ni}(20-30\text{MeV}/\text{A}) + ^{232}\text{Th}$ 系统的实验给出, 此值为 $180\text{MeV}/\text{C}$, 它对应于0.2光速。一些作者(如Lefort)提出, 0.2光速正是声音在核质中的传播速度, 因此LMT转移量的限度与声速联系起来, 这意味着在核中要给出超音速的激波是不可能的。声速的估计上有一些困难, 按照经典原理, 声速 v 为:

$$v = \sqrt{\frac{kKT_0}{\mu}} \quad (2)$$

在此 K 为玻尔兹曼常数, KT_0 为核温度, 而 μ 为核的质量, k 是定压与定容热容量的比值。从(2)式可以定性地看到声速与初始核温度 KT_0 相关, 而最大线动量转移与核可能承受的最高末态核温度有关联。

近心碰撞的最大LMT的正比律的发现, 使人们对这个现象作出了一些解释。当入射核超过库仑位垒 V_B 的速度 V 大于费米速度时,

$$V = [(E_{c.m.} - V_B) / 2\mu]^{1/2} \quad (3)$$

则预平衡的核子(中子与质子)及核子团(α 粒子)的瞬时发射将有很大几率。从实验 $^{16}\text{O} + ^{238}\text{U}$, $^{16}\text{O} + ^{197}\text{Au}$ 系统的测量中发现, 近心碰撞事件所联系的轻碎片, 正是只有质子与 α 粒子。因此采用激子模型来计算与预示实验LMT值是目前的理论方法。

3. 多重碎裂过程及统计无规碰撞模型

从融合——裂变到多重碎裂碎片的反应过程是低能到中能区研究的一个重要方面。简单地说, 在中能区甚至到相对论能

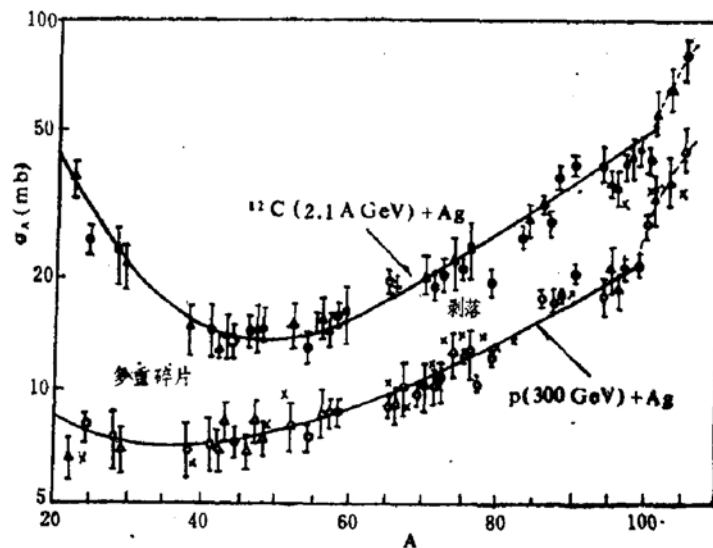


图2. 银靶反应碎片产物的分布图, 实线是实验符合。

区, 核在近心碰撞中打碎了, 碎成大小不等的三个或更多的碎片。从单举实验测到的 $d\sigma/dA = \sigma(A)$ 对 A 的关系图中, 可以看到这种

现象。例如在图2中所示的相对论能区， ^{12}C (2.1 GeV/A) + ^{108}Ag 和p (300 GeV) + ^{108}Ag 的系统中， $d\sigma/dA$ 有一个简单的规律：

$$\sigma(A) = \sigma_0 \left(\frac{A}{A_T}\right)^{-\tau} + \sigma_1 e^{\alpha A/A_T} \quad (4)$$

式中 $\tau=2.5$ ， $\alpha=3.7$ 是常数，而 $\sigma(A)$ 只与 A/A_T 有关而与入射核无关。在(4)式中的指数项表征了剥落(spallation)反应的特点，它是 $A > 50$ 并近于靶核 A_T 时的单裂片遵循的规律；而 $A < 50$ 则为多重碎裂过程。

在中能区，图3a显示了 ^{12}C (30 MeV/A) + ^{108}Ag 系统的 $\sigma(Z)$ 分布，这是一个典型的多重碎裂过程。如果忽略 Z 与 A 的不同，则其分布在双对数坐标中为一条直线：

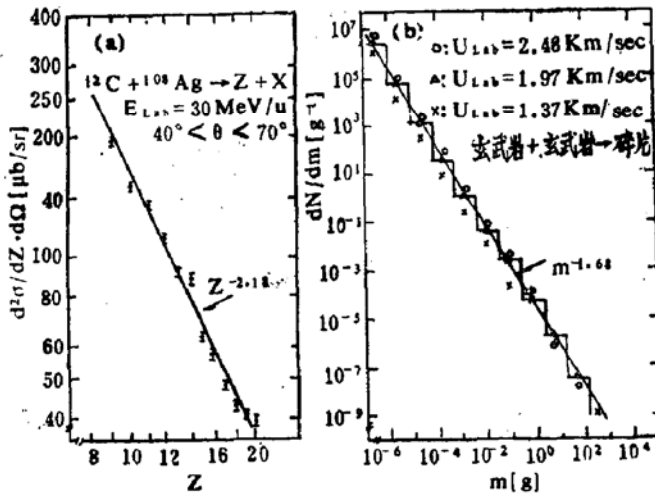


图3. (a) 碳轰打银产生碎片的核电荷分布，截面以双对数坐标画出，(b) 0.5cm直径的玄武岩弹以所示速度轰打5cm直径的玄武岩得到的碎石质量分布。

$$\ln \sigma(A) = -\tau \ln A + \text{const.} \quad (5)$$

有趣的是在图3b中同时显示了用0.5cm直径的玄武岩石弹以5.5km/sec速度(约为在玄武岩中声速的1/3)去轰打5cm直径的玄武岩，给出的碎石质量分布图。从图可见它与 $^{12}\text{C} + ^{108}\text{Ag}$ 遵从相同的双对数呈直线的规律。从这可以看到原子核在中能近心碰撞下变成很易碎裂的、象玻璃球那样的物体。

多重碎裂目前在理论上尝试使用热力学统计理论，用无规随机计算或蒙特——卡诺

方法对大计算的可能性进行随机拣选，以进行过程模拟。为了计及核的性质，将常用的液滴势中的体积能与表面能项，加入核温度依赖项后作为计算碎片能量的基础。这样一个核在各种多重碎裂方式下的总能量、自由能和熵 $S(i)$ 等热力学量均可算出。从而得到在第 i 种碎裂方式下的热力学几率 $W(i) = \exp S(i)$ 。这种熵的分析避开了要求平衡态的先决条件。即使在非平衡条件下这个热力学几率公式仍能成立。

计算表明，在单核子激发能大于3.5 MeV以后开始碎裂(温度为5.5 MeV左右)，以后核温度随激发能增加而呈直线上升，碎片质量分布随 A 呈指数下降，而且激发能愈

高，碎片的质量变得愈小。多重碎裂在激发能更高时，将呈更小的小液滴态；激发能再高将呈费米气体态。这些就是所谓的相变过程。

综合上述，近心碰撞是最有效地将核从普通状态激发到高温、高压和高角动量态的方式。在这种情况下人们过去对核的低激发态所积累的知识已不够用了，不得不去研究更一般的核物质在高温、高压下的性质。这时实验上要求作遍举的多重测量，而理论上碰到现实的多体问题。这两方面目前均处在起步阶段。它们将是近几年中被人们所广泛

关注的重要领域。

参考文献

- [1]. J. HUFNER, Proceedings of International Conference on Heavy Ion Nuclear Collisions in the Fermi Energy Domain, Caen, France, May 12—16, 1986. P. C4—3
- [2]. J. P. Bondorf, Proceedings of International Conference on Heavy Ion

(下转12页)

(上接15页)

Nuclear Collisions in the Fermi Energy Domain, Caen, France, May 12—16, 1986. PC4—263

[3]. M. Mostefaï et al., Proceedings of International Conference on Heavy Ion Nuclear Collisions in the Fermi Energy Domain, Caen, France, May 12—16,

1986. PC4—361

[4]. X. Campi, Proceedings of International Conference on Heavy Ion Nuclear Collisions in the Fermi Energy Domain, Caen, France, May 12—16, 1986. P. C4—419

[5]. Y. Chan et al., LBL—23381. May 1987