

热核的形成和衰变产物的研究

颜家骏

(中国科学院近代物理研究所)

摘要: 中能重离子 (10—100 MeV/u) 是研究热的核物质的最有力的工具。热核的形成可以通过两种主要类型的反应: 深部非弹碰撞和熔合。实验中可以观测到的量是主要衰变剩余物 (深部非弹碎片或熔合剩余物) 和衰变产物, 也就是轻粒子、中等质量碎片、 γ 射线或 π 介子。本文讨论了用研究衰变产物的方法识别和分析热核的四个问题: 根据态的相对布居测量核温度; 根据动能谱测量核温度; 根据衰变粒子多重性测量激发能; 根据中等质量碎片的产生机制判定热核的形成。

一、根据态的相对布居测量核温度

现在我们考虑处于热平衡 (温度 T) 的系统 S 和满足麦克斯韦-玻尔兹曼统计学的子系统 s 。在给定量子态 Ψ 观测到 s 的几率正比于玻尔兹曼因子 $e^{-E^*/T}$, 式中 E^* 是 Ψ_s 态的内能。在两个量子态观测到 s 的几率的比值为

$$R = \frac{P_1}{P_2} \rightarrow R \propto e^{-(E_1^* - E_2^*)/T} \quad (1)$$

在核物理中 S 是核而 s 是 S 蒸发出来的结团。那末问题就变成了从这个结团的两个量子态的布居比来导出 T 。我们需要考虑两种情况。如果两个量子态是粒子稳定的, 通过探测这些结团和 (或者) s 的衰变 γ 射线就能测定这些布居。Morrissey等就采用过这个方法。如果两个量子态是粒子不稳定的, 就要探测和分析衰变粒子。在MSU和GANIL用的就是这种方法。

至于谈到用上述方法得到的温度是否可靠, 有三类问题需要研究: ①如果待研究的结团保持对初始热槽 S 的记忆, 也就是说观测的衰变是初始衰变的话, 这个方法才是可靠的; ②无论采用 γ 射线方法还是采用符合粒子方法, 都存在着有待克服的缺点; ③当

用于结团进入核的情况时, 就要认真考虑

(1) 式是否能够成立。

我们下面就依次讨论上述这三个问题。

①副馈送效应

J. Pochodalla等1987年对此进行了讨论⁽¹⁾。它的影响是推论出的温度过分偏低的主要原因; 而在 $E_1^* - E_2^*$ 的差额增加时, 它的影响减小。当涉及到的两个量子态相互分离很宽时, 温度值就会更加可靠。这也是为什么 γ 射线方法通常导出低表观温度的主要原因, 此时所涉及到的两个量子态相互分得不太远。我们只要把实验和计算结合加以比较, 就可以得出明确结论。D. Hahn等在1988年用Hahn和Stöcker模型进行了讨论⁽²⁾。他们假定发射源 S 处于热平衡和化学平衡中, 然后计算了副馈送效应。对每种情况算出的预期表观温度和数据符合甚好。

为了对副馈送效应作出结论, 应该记住就可靠性而言, γ 射线方法不如符合粒子法。当温度 T 变大时, γ 射线法就成问题了。实验表明, 只有在 $T < 2\text{MeV}$ 时, R 的数值才与标征待研究结团的初始态分布的温度关系密切。

② γ 射线法和符合粒子法的明显缺点

γ 射线法的缺点纯粹是实验方面的, 象多普勒频移、本底抑制和光电效率等。D. Morrissey等1985年作过很好的评论, 并讨论了

解决方法⁽³⁾。

粒子符合法的主要问题在于，两个符合粒子究竟是来自某结团的衰变还是来自S的蒸发过程？应该怎样区分？J. Pochodzalla等1987年作过广泛讨论⁽¹⁾。当s在S里面时，由两个待探测粒子组成的子系统s的态密度由下式给出：

$$\rho(p, q) = \rho(p)\rho(q) = \rho_0(p)[(\rho_0(q) + \Delta\rho(q))] \quad (2)$$

$$\rho(p, q) = \frac{V_p^2}{2\pi^2} \left[(2j_1 + 1)(2j_2 + 1) \frac{V_q^2}{2\pi^2} + \frac{1}{\pi} \sum_l (2l + 1) \frac{d\delta_l}{dq} \right] \quad (3)$$

式中p是S中s的线性动量，q是待探测粒子的相对线性动量，V是S的体积， j_1 和 j_2 是待探测粒子的自旋， δ_l 是描述该相互作用的相移。在(2)式中态密度分为两部分。 $\rho_0(p)$ $\rho_0(q)$ 项描述待探测粒子的量子态，当然它们在S内要不存在相互作用，这是连串发射的情况。 $\rho_0(p)\Delta\rho(q)$ 项是S中两个粒子间的相互作用引起的，它是结团在S中形成的原因。对于给定的q值，只有这第二项才展示结构情况。

在对带玻尔兹曼因子的态密度加权并对变量p积分后，(3)式可以给出给定q值时的态布居表达式。在它们由S中逃逸出来之后，还要用它们和系统剩余部分的长程库仑相互作用，对态布居进行修正。所有这些特点都已包括在实验数据的分析过程之中。因此，结团衰变和连串发射之间的区分，并不会影响提取温度的可靠性。

③玻尔兹曼统计学对结团发射的适用性问题

从普通统计力学的观点看，只有在s和S的剩余部分之间的相互作用很弱时，玻尔兹曼统计学才能适用于系统S的子系统s。只有在达到热化并且结团s的态布居统计学上不需要由周围的核物质进行修正时，结团衰变方法才是正确的。这也是稀释核物质和

Hahn-Stöck模型适用的情况。这就假定了结团从这样稀释的核物质系统中逸出，其密度只有普通核物质密度的百分之几。尽管这种假说本身就是另一个困难的问题，但是从对各种结团进行的许多测量的结果来看，这种假说似乎是正确的。

在普通密度核物质的情况下，在轰击能低于10MeV/u时，过去认为γ射线法是正确的。但是，由于明显高估了角动量效应，真实情况究竟如何还是不清楚的。现在采用费米气体模型和统计理论，就可能取得进展。蒸发两个不同粒子1和2的几率之比可以写作：

$$\frac{P_1}{P_2} = \frac{g_1 \mu_1 E^* - E_1}{g_2 \mu_2 E^* - E_2} \frac{a_2}{a_1} \exp[2(a_1 E_1)^{1/2} - 2(a_2 - E_2)^{1/2}] \quad (4)$$

式中 E^* 是初始核的激发能， $E_{1,2}$ 是逸出粒子的最小能量， $g_{1,2}$ 是自旋简并因子， $\mu_{1,2}$ 是约化质量。如果粒子1和2是处于两个不同激发态的相同结团，并且 E_1 和 E_2 与 E^* 相比甚小，那末

$$R = \frac{P_1}{P_2} \cong \left(1 + \frac{\Delta E}{E^*}\right) \exp \frac{\Delta E}{T} \cong \exp \frac{\Delta E}{T} \quad (5)$$

式中 $\Delta E = E_1 - E_2$ 是该结团内能在两个涉及态时的差额。显然，玻尔兹曼表达式(1)甚至对于普通核物质都是正确的，至少在费米气体模型近似中是如此。

现在已经做出初步结论。结团衰变法是很有用的方法，其主要局限在于先验的假定了已经达到热平衡。这个假定似乎为后来的许多实验证明是正确的。但是，用这个方法就很难解释副馈送效应。在γ射线法的情况下，这个缺点是严重的。在粒子符合法的情况下，有可能对此作出修正，但得到的结果是有模型相关性的。必须看到，实验条件决定对于给定的碰撞类型（如周边碰撞、对心碰撞）无法选择，并且至今只完成了为数有限

的实验。设备的建造和改进都是刻不容缓的事情。

二、根据动能谱测量核温度

用统计理论可以预期粒子动能谱的形状。在大动能 E 时该分布的指数衰减,经常用于推导温度数值 T 。如果 E_s 是发射选定粒子的阈能,即相应的库仑位垒,那末可以写成:

$$W(E)dE \approx \frac{E-E_s}{T^2} e^{-\frac{E-E_s}{T}} dE \quad (6)$$

该法的主要优点在于它是与核模型无关的,因为(6)式的获得一点也不需要知道核物质的密度。只要探测到的粒子的确来自给定热核的蒸发,该法就是可靠的。J.Galin等指出,小轰击能量时最可能的反应机制是复合核形成,所有探测到的 α 粒子全来自复合核衰变,其动能谱明确给出复合核温度。当轰击能很明显增大时,复合核形成不再是占优势的反应道,此时几种机制并存而轻带电粒子的来源就有几个,由这样的谱中提取核温度就变得相当困难,但是常常仍能完成。通常假定这些粒子有三个来源:其速度接近束流速度的快源、作为重的剩余产物的慢源、具有中等反冲速度的中速的神秘的来源。在这样的分析中提取的温度通常是无意义的,至少从两个方面看来是如此:①只有在三种来源都具有很好确定的反冲速度时,上述图象才是可靠的,而这无疑是不可能的。②只有在达到热动力学平衡时,测得的量才能称之为温度,而这也是实际上不会存在的。

只有在实验中把粒子与发射核符合探测时,提取的温度数据才是真实的核温度。D.Jacquet等把来自系统 $Ar+U$ (27MeV/u)的 α 粒子动能谱的实验值与预期值进行了比较⁽⁴⁾。在熔合过程之后裂变的复合测量中,在几个反向角探测了轻带电粒子。为了避免快发射粒子所以在反向角探测。裂变产物的

探测用于导出熔合核的速度。他们进行了涉及各种角度测量的完整的动能分析,并由此作出了关于探测粒子本性的结论。它们中的绝大部分还在熔合核裂变之前就已蒸发出来。由两种情况可以估计这些核的热化程度,即蒸发粒子的角分布和实验数据与Landau-Vlasov模拟之间的相干性。他们给出了典型结果。碰撞刚开始时各向异性程度很大,远未达到热化。但是在100fm/c (3×10^{-22} 秒)之后,初始方向不再清楚,初始的c.m.动能完全耗散,即转化成压缩核的热能。他们计算了熔合核的激发能,大约在全部能量耗散后达到最大值。对于从均匀激发核蒸发出来的几乎所有粒子都进行了计算。关键是知道压缩能如何紧跟着热化。他们假定完成了这种转化,然后提取了温度信息。从计算得到的数值和从轻带电粒子动能谱得到的数值是相符的,这就说明他们的整个描述是正确的。

可以做出下述结论:①根据内含粒子动能谱导出的温度通常是不可靠的;②要想进行正确可靠的温度测量,只有在与发射粒子符合测量中探测发射核,并且在几个探测角度进行研究,以便把蒸发粒子相互隔离,同时确保测量是在已经达到热化之后才进行。如果上述条件都能满足,实验提取的温度数值就是可靠的。还应该记住粒子动能谱决定于几个参数,即温度、角动量、发射核的形状、压缩能的数量和行为,也就是说决定动能谱的因素并不只是温度。为了区分这多个变量的影响和使测量更加可靠,随着入射能的增加,还需要进行大量的工作。因为在能量达到一定限度时,压缩或多重碎裂的影响就再也不能忽略了,上述专一测量的结果就会出现严重问题了。

三、根据衰变粒子多重性测量激发能

直接的激发能测量能够给出精确的温度

信息。获得激发能的方法是在探测热核的所有衰变产物，并且是对产物和相应的重剩余核进行符合测量。激发能被中子、质子和较重的带电粒子带走。探测所有粒子的最好装置是 4π 装置。A. Olmi 1987年研究了相当缺中子的系统 $^{92}\text{Mo}+^{92}\text{Mo}$ ，只测量带电粒子⁽⁵⁾。他把轻带电粒子多重性对深部非弹逸出产物的动能丢失关系进行了标绘。这两个变量之间的关系是十分清楚的。J. Galin等和D. Jiang等1988年研究了重系统⁽⁶⁾，主要衰变道是中子发射，用 4π 中子球测量了中子多重性。与热核有关的实验结果主要有两类，即折叠角分布和相应的 4π 中子多重性。正如预期的那样，中子多重性是碰撞猛烈程度的递增函数。但是显著特点是在某个数值出现饱和，并且与轰击能无关。在考虑带电粒子蒸发之后，他们估计在Ar炮弹为27到44MeV/u时，得到约630MeV的相同激发能。1989年D. Guerreau指出，用更重的炮弹可以得到更大的激发能。用Kr炮弹时中子多重性可大于1.5，而激发能可超过1GeV。对于内含数据而言，这样的进展是引人注目的。

在上述讨论中最重要的有两点：①根据上述结果和线性动量转移数据，可以得出的明确结论就是，就想得到高激发能来说沉积是重要的，越重的炮弹就越有效。②但是，线性动量转移和多重性之间的相关性并不是完美无缺的。根据Jiang的测量，Ar炮弹在27到44MeV/u时都得到类似数值的线性动量转移值，理论预期更高的激发能或中子多重性在44MeV/u时达到。验证上述预期的最简单的方法就是假定理论预期是错误的就是说非全熔合不经过质量转移，但是饱和仍然是不清楚的。

我们必须正视多重测量的几个缺点。为了提取激发能信息，必须知道每个中子带走的平均激发能。当轰击能增加时，另外的困难又出现了，探测器的效率是中子能量的递减函数，在10MeV时效率仅为原来的50%。因为探测中子的能量并不在 4π 探测器中测

量，探测效率又成了与模型相关的了。更严重的问题是正确区分蒸发粒子和非蒸发粒子是件很困难的事情。另外甚至对重系统而言，随着核温度的明显增加，带电粒子和结团的蒸发也是必须考虑的了。

当温度高时，要想导出可靠的 E^* 或 T 是很困难的。另一方面由于热化就是可利用的能量在整个系统中的均配。在更大的终态多重性时， 4π 方法是热化事件的有力的过滤器，这已得到实验证实。H. Fuchs等1985年对三种轰击能量的Ne+Au系统进行了研究。通过各种角度 α 望远镜触发探测器，他们测量了中子多重性。实验表明，在反向角探测到的 α 确实来自伴有强烈热化的猛烈碰撞。而在前向角测到的 α 却有两个不同的来源，即伴随强烈热化的对心碰撞和更加周边的碰撞。

四、根据中等质量碎片的产生机制判定热核的形成

中等质量碎片是耗散现象的标志。至少直到轰击能量40MeV/u时，它们中的一部分是深部非弹碰撞的逸出产物。另一部分来自受激的类弹碎片或类靶碎片和更加对心碰撞中的类熔合核。现在人们开始致力于中等质量碎片发射机制的详细研究。

B. Tamain 1985年指出，它们中的相当一部分来自简单的蒸发过程。统计理论并没有预言蒸发只限制在轻核系统。随着激发能的增加，结团蒸发的几率迅速增加。K. Kwiatkowski等1986年研究了轻炮弹引起的核反应⁽⁷⁾。他们研究系统 ^3He (66MeV/u)+Ag发现，几乎绝大多数反向出射的中等质量碎片都来自熔合核的蒸发，而许多前向出射的中等质量碎片都来自类聚集或直接堆积。B. Faure等1988年在几个重粒子研究中提出，许多中等质量碎片也是来自蒸发。他们对于26到45MeV/u区间的Kr+C、Kr+Al和Kr+Ti碰撞，多次探测了中等质量碎片。它们几乎

全都来自平衡系统的发射。测量结果中可以看到相应于前向发射和反向发射的两个分支,并且都来自熔合核的发射。**L. Moretto**等1988年研究Nb等在各种轻靶上引起的反应,也得到了类似的结果⁽⁸⁾。实验证明反向运动学是个有用的工具。他们清楚地证明,探测到的中等质量碎片事件是由两部分组成的。在每种情况下,中等质量碎片都来自很高激发的类熔合核的两部衰变。他们还讨论了系统Mo+Mo在20MeV/u时在深部非弹研究中得到的结果。他们发现中等质量碎片的发射几率正比于激发能的平方根;这和简单蒸发图象预期的相同,在这种图象中的中等质量碎片来自深部非弹产物的跟随蒸发。**V. Lynen** 1988年给出了另一类引人注目的信息,那就是中等质量发射可能更加决定于耗散能而不是入射道的特性。

B. Faure等1988年用Ti靶代替C或Al靶,用Kr 44MeV/u炮弹进行研究⁽⁹⁾。他们发现,除了许多中等质量碎片简单地来自连串跟随蒸发之外,还观测到产生中等质量碎片的其它机制。当耗散变得很大时,理论上就能观测到与简单蒸发衰变图象的偏离。例如在反向运动学反应和在给定轰击能时,用更重的靶就能观测到。他们的实验证实了上述理论推测的正确。

早在1984年**A. Panagiotou**等就提出,上述图象从多重碎裂过程和在某确定阈以上的液态气体相位跃迁过程的出现之日起就应该修正。他们据此解释了中等质量碎片在原子序数上的分布。但是**C. Gregoir** 1986年提出上述解释并不是无懈可击,因为许多其它方法也可以得出类似的结论。**B. Faure** 1988年指出,进行更系统的研究会更加复杂的实验测量结果,用入射道的动力学效应有可能作出解释。

当中等质量碎片以相当大的几率从中等程度激发的核中发射时,动力学效应的存在可能就必须考虑。**G. Bizard**等最近发现⁽¹⁰⁾,系统Ar+Au在60MeV/u时可能存在的一个

过程就是,来自类弹碎片的中等质量碎片连串跟随发射。实验同时测到的类弹碎片激发能小于2MeV/u。如果在这些衰变过程中不考虑动力学效应,那就很难解释上述实验观测。

在用43MeV/u轰击能的Kr+Au和Kr+Ag系统进行研究时,中等质量碎片用 4π 多级探测器进行探测,该探测器特别适用于多重碎裂研究。在对事件进行逐个分析时,**R. Bougault**等定义了一个 y 变量,用它表示相对速度与平均速度的最大歧离⁽¹¹⁾。大的 y 值表明相对速度大的离差,这是类靶碎片的跟随衰变引起的。小的 y 值表明低的离差。这就表明所有探测到的碎片有个共同的来源。对于甚小的 y 值,已经用相当大的几率观测到中等质量碎片的多重性为3到6。**Bougault**还发现,所有中等质量碎片都来自同一个类熔合源,并且它们的相关动能可以与多重碎裂过程相比。但是**O. Granier**等指出,从运动学上很难区分多重碎裂和多级跟随衰变。**J. Lopez**等用蒙特卡洛计算模拟了两种极端情况⁽¹²⁾。计算结果表明,如果想得到明确清楚的结论,相应的相关动能分布作为工具并不容易。应当指出,上述模拟是在假定达到平衡的前提下完成的。在最近的Landau-Vlasov模拟中,已经证明动力学效应能够在对心碰撞中导致多重碎裂过程;在这种情况下,中等质量碎片的角分布将在与束流成 90° 处成峰。最新的实验数据支持这个观点。

非常明确的是特别需要专一的实验数据。因为伴随中等质量碎片到来的还有更重的碎片、轻带电粒子、中子,并且都有相当宽的动能分布,所以要想获得专一的中等质量碎片的数据,那的确是难上加难。要想及时鉴别一个给定事件的所有最终产物也很困难。**G. Jin**等1988年朝着这个目标迈出了可喜的一步。他们为了使获取专一化数据的困难稍为简单化一点,毅然选择了轻系统Ar+Al。他们能够用接近 4π c.m.的探测器正确

地探测几乎所有的逸出粒子。当探测到1至5个中等质量碎片的时候，他们画出了对心碰撞时的激发函数。测量表明，在产生3到5个中等质量碎片时，截面在35MeV/u附近猛烈增加。这或许表明了多重碎裂过程的开始。这样的结果可能与下述事实有关，那就是Ar引起的反应中在35MeV/u附近融合碰撞消失。

关于中等质量碎片的产生机制问题的初步结论如下：①中等质量碎片是在非常耗散的碰撞中发射的；②许多中等质量碎片都来自两部衰变。过去用于小激发能的那些统计学概念，甚至在激发能高至500MeV时仍然是正确的；③中等质量碎片也可能来自除了蒸发之外的其它机制。统计学的多重碎裂是合理的选择，但是要想清楚地鉴别这种机制却很困难。这是因为它的运动学特性与跟随衰变并没有什么明显不同，这就对二者很难加以区分。另外，要想证明在衰变前已经实现热化也是困难的，弄清楚动力学效应是否起着确定的作用也并非易事。上述想法只有在专一的中等质量碎片测量中，才能有希望得到解决。

在研究热的核物质时，中能重离子（10—100MeV/u）是最有潜力的工具。利用中能重离子已经取得了突出的进展，展望未来更是充满着希望。我们深信，随着我国规模最大的兰州重离子加速器的胜利建成出束和

投入运行，必将极大地推动我国重离子物理和整个核科学的迅速进展。

参考文献

1. J.Pochodalla et al., Phys. Rev. C35 (1987) 1695
2. D.Hahn et al., Nucl. Phys. A476 (1988) 718
3. D.Morrissey et al., Phys. Rev.C32 (1985) 877
4. D.Jacquet et al., Phys. Rev.C32 (1985)1594
5. A.Olmi, Nucl.Phys. A471 (1987) 97C
6. D.Jiang et al., Proceedings of the third Inter, Nucleus-Nucleus Collisions, Saint Malo. Communication 1988, p.110
7. K.Kwiatkowski et al., Phys.Lett. B171 (1986) 41
8. L.Moretto et al., Nucl.Phys.A488 (1988) 337C
9. B.Faure et al., Proceedings of the XXVI Inter. Wint. Meeting on Nuclear Physics, Bormio 1988, p.133
10. G.Bizard et al., Z.Phys.A323(1986) 459
11. R.Bougault et al., Nucl.Phys.A488 (1988) 255C
12. J.Lopez et al., Nucl.Phys.A431(1984) 728