

NSF核物理研究的最新进展

颜家骏

(中国科学院近代物理所)

摘要: NSF是世界上第一流的探测物质结构的设备之一。在 NSF 上进行的核物理研究中,最近已取得了意义重大的最新进展。本文讨论它在核集体运动、丰质子核、核碰撞和理论研究方面的最新进展。

一、NSF的设备进展

在世界上探测物质结构的形形色色的设备中, NSF和SRS都属于第一流的,早已名闻遐迩。NSF是 Nuclear Structure Facility的简称,而SRS是Synchrotron Radiation Source的简称。它们都不断取得意义重大的科研成果。近年来几乎每年都有上千名科学家,从英国本国和其它国家来到达累斯伯里,利用这些设备进行范围广泛的研究。这些课题从研究核的形状到研究蛋白质分子形状。达累斯伯里实验室已经成了十分活跃的国际科研中心之一。

NSF可提供的离子束流品种不断增加,以便满足核结构研究实验日益增长的需要。用户对束流能量和束流强度的要求,需要串列静电加速器的工作电压范围为12到20.5MV,现在还增加了工作电压在17MV以上时的运行时间。可加速离子的种类的范围从质子到Bi,其中包括 ^3H 和 ^{14}C 束。现在已经加速过总数高达57种不同的离子种类,这说明串列静电加速器和新型溅射离子源相互结合的巨大潜力。用低能束聚束器和开始使用新的极化重离子源能够改进束流。在这种条件下,还可以进一步展宽 NSF 的适用范围。

连续进行关于核行为集体特色的实验研究,并不断取得重大进展,这使达累斯伯里成了研究高速旋转核的一个国际中心。当然

这与 TESSA2和 TESSA3 装置的相继问世有很大关系。这两个 γ 射线探测系统设计精巧并且结构复杂,能够得到大量的很高质量的数据,这就大大展宽了数据存储技术。

实验装置方面的另一个重大进步是,成功地使用了反冲分离器。在存在非常大数目束流粒子的情况下,反冲分离器都能够研究来自核反应的反冲核。这种谱仪有18个磁单元和静电单元,能够把不需要的粒子滤除出去。

还有一个设备进步就是采用超导电子螺线管谱仪。它用于探测和测量来自激发核的内转换电子的能量。这些电子是核退激时为放出激发能而发射出 γ 射线时产生的,而不是由原子射出的。这个过程与 γ 射线衰变竞争,对于较重的核尤其如此。采用螺线管谱仪,可以在由束流和反应产物产生的不需要的电子的本底非常大时,都能够选择出真正需要的那些内转换电子。显然,这种谱仪既大大展宽了NSF用户可得到的设备的范围,又使在束实验的成功进行得以实现。

由于上述的几种设备进步,才使NSF日臻完善。同时也为NSF核物理研究的最新进展,提供了不可缺少的设备基础。下面重点介绍和讨论几个取得出色成果的重要领域。

二、核的集体运动研究

1. 一般情况

在NSF实验计划中的一个突出特点是,

不断进行核行为集体特色的实验。对于产生高角动量高激发核来说，这台重离子串列静电加速器是非常合适的设备。它适用于研究核高速旋转时所发生的变化。

与电子在原子中的情况非常相似，核内单个核子(中子和质子)都存在分离的能级。每个核子都在某具体轨道上运动，该轨道由所有其它核子的影响之和决定。象能够相互独立无关地运动一样，这些核子还能都在一起运动也就是集体运动。例如，非球形核能够由高速旋转造成并且形状能够由运动改变。如果核的形状发生改变，那末单个核子的轨道和运动也必然改变。显然，当这些单个核子的运动因为受到科里奥利力或其它因素而遭受破坏时，作为整体的核的形状也会改变。随着核旋转速度的增加，就会产生很大的离心力，趋向把整个核拉开，这也引起核形状的改变。

研究高速旋转核的形状改变，能够大大深入对核的理解，在单个核子运动与集体运动的关系能够推测时就更是如此。例如，当处于最低能态的核是长球形的。但随着角动量的增加，该核或许会大大变形，因为它受到离心力作用趋向被拉散。核的形状甚至可能变成扁球形的，这时相互独立的核子首先逐个调整、接着就是整个核调整其角动量。

两个重离子的融合反应会产生受激核。测量受激核射出的 γ 射线，是研究上述现象最直接的方法。核由高角动量时的一个能态向另一较低能态的退激，与测到的 γ 射线谱的谱线相互对应。完成这类测量所用的仪器过去是TESSA2谱仪。它由环绕靶配置的许多探测器组成。单个核由高激发态向基态衰变时，所发射的所有 γ 射线将分散在一个很大的面积内。用TESSA2能够进行上述探测，但是由于反应产物的类型繁多并且能级情况复杂致使测量效果不甚理想。利物浦大学和达累斯伯里已经研制出TESSA3。它由一个若干小型的Bi钨酸盐探测器组成的芯，该芯被12个Ge探测器所环绕。Bi钨酸盐探测器

几乎完全把靶包围起来，用于测量在一个符合事件期间的 γ 射线的数目和总能量；即是说同一个受激核经过级联退激，几乎同时发出的几个 γ 射线能够进行符合测量。Ge探测器用于精确测量所有 γ 射线的逐个能量。还有一个妙用就是，用记录在不同探测器里同时探测到两个或多于两个 γ 射线的方法，就有可能建造所探测核激发能级的完整图象。来自联合王国和欧洲其它国家的许多物理学家，已经用TESSA3进行了大量实验。

2. 高自旋核研究

近几年来，TESSA2已经积累了许多有关高激发态高自旋核的数据。这些数据给人深刻难忘的印象，特别是来自利物浦大学和曼彻斯特大学的小组、与来自达累斯伯里和欧洲另一些国家的小组，其成果更加引人注目。我们下面就要介绍关于同位素 ^{152}Dy 、 ^{162}Er 、 ^{132}Cr 和 ^{168}Er 的重要实验。

研究高速旋转核的分离线谱，已经得到了关于这些同位素核结构的宝贵信息。已经观测了与角动量高达45的受激核有关的一些能级的分离谱线。结果表明高自旋时核性质的一些有吸引力的特色。尽管 ^{132}Ce 在离心力作用下，似乎稍微增加了长球状的变形；但是 ^{152}Dy 却变形极大，以致成了“超变形”的形状。 ^{168}Er 完全不存在集体方式，同时得到了不规则的 γ 射线谱，这表明核发生长球状到扁球状的形状改变。更加让人感到意外的是， ^{162}Er 显示出某种内部结构。甚至在我们能够观测到的最高自旋时，核形状都惊人地稳定，即几乎不随旋转程度改变。在行为上的这种巨大的差别，显然是由于中子数和质子数的相当小的差别造成的。这就成了理论物理学家们面临的富有挑战性的课题。

分离线谱学是研究旋转核的一种方法。但是，随着核的角动量或“温度”(激发能)的增加，这些分离的谱线将变得不能分辨，我们观测到的将是 γ 射线的一种平滑能量分布了。这种 γ 射线“连续”谱的研究，也成了近年TESSA2进行的实验研究计划的一个重

要部分。在 γ 射线能谱中，在比各分离谱线更高能量处有一个展宽的峰，这就是著名的“E2隆起”。一些 γ 跃迁，包括“E2隆起”，都能归因于很高自旋时许多不同转动带的能级间的衰变。在甚高角动量和增加激发能的情况下，在有关集体效应和单粒子效应之间相互影响方面，上述研究提供了附加的和互为补充的信息。

来自达累斯伯里、曼彻斯特大学和利物浦大学的物理学家们，已经把连续 γ 射线谱学用于研究质量数约为160的几个稀土核和 ^{132}Ce 。 ^{152}Dy 的谱与该核在很高角动量时两个轴半径比为2:1也就是有巨大拉长是一致的，这就是说核形状已从近似球形的变成了“超变形”的。在 ^{160}Er 和 ^{160}Yb 谱中的E2隆起的形状，随总角动量的改变也平滑改变。这意味着，甚至高达我们能够观测到的最高的角动量，这些核的形状都不再改变了。但是， ^{158}Er 的连续谱却并不表明有这种平滑地改变。同时来自分离线谱的证据也表明， ^{158}Er 在角动量约达40时，它由长球形向扁球形改变。在扁球形情况下，这些单个核相对于对称轴而言的自旋彼此间相互独立而没有集体关联，并且已经不可能用唯一的转动频率来标征这个系统了。

3. 铜系核研究

研究质量数约220的铜系核，是涉及 γ 射线谱学的另一重要领域。来自利物浦和布雷德福的小组与西德的科学家密切协作，探索出新的技术使这类研究成为可能。这些核的低能级的退激，即能通过发射 γ 射线，又能通过发射一个来自内部原子轨道的电子（内转换）来实现。对于重核的低能跃迁来说，内转换较之 γ 射线发射更为有利。用测量 γ 射线与电子之比的方法，就有可能测量这种电磁衰变的性质，这在核态反射对称的测定中是重要的。利物浦大学已经制成了超导螺线管谱仪，并已用于测定转换电子。1986年上半年已经对铜系核进行了第一批实验，现在已得到了初步数据。

理论预言在核素图这个区域里的核，都存在八极变形。对此类现象的实验研究就受到很大重视。根据反射不对称模型的预期，对于奇质量数的核都存在这样的正宇称转动带或负宇称转动带，这些转动带的能量类似于分子的一系列激发态。由此可见，对于奇质量核的研究具有特殊的重要意义。电子测量业已揭示：特别是 ^{210}Ra 核在高自旋时表现出反射不对称性，但它的结构却让人回想起处于基态或低激发态时的球形核。

三、丰质子核研究

1. 丰质子核研究的重要性

众所周知，稳定的或天然存在的同位素约300种，已能人工制备的同位素却有2000多种，而理论预言有几千种半衰期大于1ms的不稳定同位素存在。这些不稳定同位素通过 α 衰变和 β 衰变变成其它元素，通过 γ 发射退激到较低能态。重离子碰撞为这些不稳定核的合成和研究提供了一个有效的途径。不稳定核通常有熔合-蒸发反应生成。在这类反应中，重核碰撞首先形成复合核即熔合后的系统，该系统具有非常高的激发能，它能自发发射中子和质子这类轻粒子或 α 粒子。该系统在约 10^{-20}s 的时间内迅速丢失其部分能量，然后受激核在约 10^{-12}s 的时间内通过发射 γ 射线而最终回到最低能态。由于整个过程中所发射的轻粒子的类型和数目不同，通常得到几种不同的放射性“产物”核。在绝大多数情况下，与天然存在的稳定同位素相比，产物核的质子与中子之比都太大了。事实上，这类反应有可能得到接近质子下滴线的产物核。所谓质子下滴线，就是指超过此线的核过剩的质子如此之多，以致于质子就会简单地从中溢出，恰似质子缓缓涌出然后滴下。

研究这类奇异的丰质子核，是NSF实验计划中重要的一部分。这类核与稳定核相比，核中的核力与库仑力之间的不平

衡程度要大得多。对这类核的性质进行测量和研究,就提供了核物理学家望眼欲穿和渴盼已久的机会,能够精确严密地检验核结构的各种流行理论。

2. 反冲分离器问世的重要性

反冲分离器于1986年成功地研制出来并投入使用。能够得到的远离稳定性核的数量甚少,并且多处于激发态。对这类核的研究来说,反冲分离器是最好的设备。由重离子碰撞得到的产物核,首先穿过磁场和电场,被速度过滤器进行初步分离。然后它们彼此依照原子量被偶极磁铁再次分离,最后,它们被距靶12米处的电离探测器探测。

这些核的激发态可用符合实验进行研究。符合实验包括记录反冲核紧靠靶射出的所有 γ 射线和记录反冲核的质量。反冲核和 γ 射线两者都必须在很短的时间间隔内同时探测到,这样才能确保所测事件是真实可靠的。因此,我们根据上述测量就能断定这些 γ 射线是归因于某具体原子量的核。如果没有这种技术,就不能解释说明得到的 γ 射线谱。这是因为各种不同的产物核都对 γ 谱有贡献,而在绝大多数情况下只能观测到那些极强的谱线。

反冲分离器的性能已用几个实验进行了检验。其中一个检测实验是用275MeV的 ^{80}Se 束轰击 ^{62}Cr 靶,所产生的丰质子核的质量约为130。该反应共得到四种不同质量的产物核,其质量分别为129、130、131和132。根据它们在最后的电离探测器中的位置,对它们进行了清楚地分离。即使存在很强的 ^{80}Se 束,甚至该束强度大于每秒 10^9 粒子时,它都能探测到单个的产物核。通过计算机控制的自动调整分离器中的电场和磁场,可以很容易地对选出的产物核进行聚焦。

3. 丰质子核的研究进展

NSF正在进行的变形丰质子核研究计划有两个。其中之一是来自曼彻斯特大学的一个科学家小组,他们研究质子数和中子数都在40附近的核。理论计算表明,这个区域的

核的形状强烈地决定于核自旋和核内中子数。这些核中的一部分处于最低能态,并且无论那一个核的形状都变形很大。该实验具有决定性意义之处在于,鉴别极丰质子核 ^{80}Zr 发射的 γ 射线。因为 ^{80}Zr 的N和Z都为40,是“双幻数”核,这是特别有意义的检测。第二个研究计划是来自利物浦大学、布拉德福大学和曼彻斯特大学的一个小组进行的。他们研究轻稀土核的激发态。这些核的Z值在58到66之间,而N值小于76。图1给出了反冲核质量为130的符合 γ 谱。只有不多几条强 γ 射线是以前曾经观察到的,并且还都是 ^{130}Nd 的基态转动带造成的。其它谱线都应归因于 ^{130}Nd 或相邻核 ^{130}Pr 的激发态。 ^{130}Pr 是质子数和中子数都是奇数的核。事实上,根据原子序数Z也就是质子数的不同,还可以进一步分离这些 γ 射线,至少对 γ 谱中的强谱线能够做到这一点。他们的方法是即从电离探测器提取信号,又记录反冲核在进入电离探测器前在空气中的能量丢失。这个能量丢失随着反冲核电荷即Z值的增大而增大。

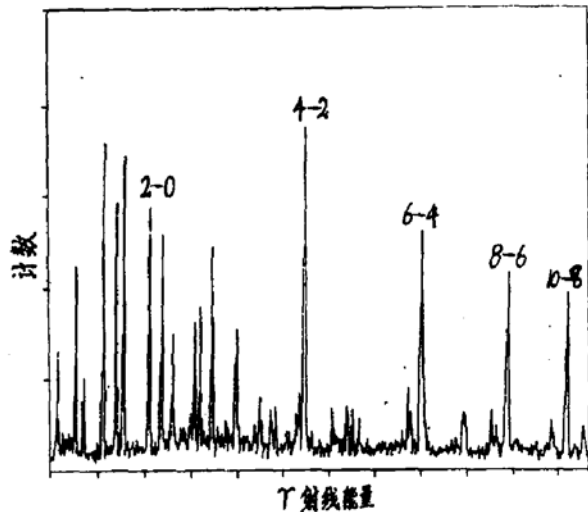


图1. 用反冲分离器得到的典型 γ 符合谱。 γ 射线与质量130的反冲核相符合。

由来自英国的牛津、曼彻斯特和达累斯伯里的成员组成的一个小组,研究了Ca、Xe、I、Te和Sb的轻同位素。他们的实验使用了同位素分离器DOLIS,并同稀释致冷器结合起来。他们的实验测量用 β 衰变探索

研究了可以得到的低位激发态，并且测量了这些核的基态磁偶极矩以及长寿命同核异能态的磁偶极矩。他们已经测量出质量数为117到122的I核的基态磁矩，也测量出 ^{118}I 和 ^{120}I 同核异能态的磁矩。对于 ^{118}I 和 ^{120}I 的测量具有特殊的重要性。因为这种测量证实了核结构的两种特色。详情如图2所示。我们早

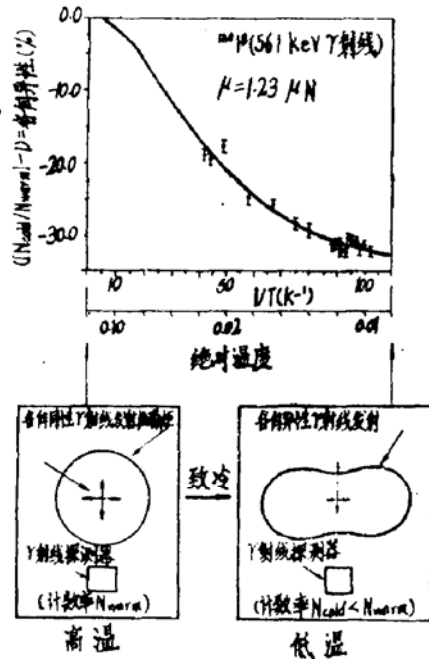


图2. ^{120}I 作为温度倒数的函数的各向异性。

就知道，含有某些确定数值的质子数和中子数的核，结合得特别牢固。这种情况下结合能的增加与核子数目有关，此时核子占据特殊的轨道。这些轨道的能量间隔是参差不齐的，也就是说在某些位置间隙足够大。如果某具体核包含的中子数和质子数恰好能够填满低于某间隙的所有轨道，那末就是特别稳定的。当中子数或质子数为2、8、20、28、50、82……时，就出现上述情况。这些数字似乎具有梦幻般的魔力，所以一直被称作“幻数”。通常把这种现象归因于壳层闭合，因为此时某主壳层已经填满。但是最近已经发现，另一些核子数也能以类似方式影响核；另外，这还与核子轨道间的能量间隙有关。这种影响并不象“幻数”那样强烈，它通常称做亚壳层闭合。壳层闭合和亚壳层闭合

也影响到核的形状和激发能级的范围。例如，靠近或正在壳层闭合状态下的核是球形的，因为只有在球形时单个核子间的束缚才是非常紧密的。在他们最近的实验中发现，在中子数为64时亚壳闭合的影响特别明显。这个闭合产生了具有65个中子的 ^{118}I 核的近似球形。它对具有67个中子的 ^{120}I 影响已经不大了。但是这些同核异能态的磁矩表明：与各自的基态相比，它们的变形是相当明显的，这种现象称为形状共存。在进行这些实验期间，还测到了在这个区域的Te核能级的有关数据。这些数据、特别是通过电子转换的观测，都支持和证实了在 ^{118}Te 和 ^{120}Te 中存在形状共存现象。

在分离器上还进行了其它实验研究。其中包括使用激光测量放射性核的核半径和基态矩。来自达累斯伯里、伯明翰大学和曼彻斯特大学的一个小组、对Sr和Sm的缺中子同位素进行了类似测量。在Sm长寿命同位素的情况下，具有偶核子数的核要大于邻近的奇质量数核。这个结果是出乎意料之外的。过去一直认为，奇质量数核中的那个特别的核子，似乎应当极化其它的核子致使核变得较大。但是，对于这些同位素来说，这些核的集体振动是影响核尺寸变化的一个重要因素。甚至在这些核处于它的基态时，这种振动就存在了。这个现象称为零点振动。达累斯伯里的理论研究证明，这些振动的幅度在奇质量核时较小。幅度上的降低意味着平均核半径的减小。

四、核碰撞中的结团现象

近年来核物理研究的重大进展之一，也是核碰撞过程的一个重要特色，就是发现了核子的结团。长期以来都把原子核描述成中子和质子的混合物，这些核子中的每一个都在共同的引力势中运动，而这个引力势是所有核子共同产生的。这种描述是根据壳层模型得到的。众所周知，壳层模型是核物理中

展史上最成功的模型之一。它假定核子间的相互作用只通过微弱的径向力。但是几个轻核的性质清楚地表明，在核中确实形成了 α 结团。这些 α 结团都是由两个中子和两个质子组成的。 α 结团性即可存在于核的低能态，又能存在于核的高激发能态。对于后者核能够通过发射 α 结团而碎裂。至于说到 α 结团性的证据，在前者通过涉及 α 结团转移的反应来收集；在后者证据将更为直接，因为此时的结团性导致激发态的 α 衰变。

达累斯伯里的核碰撞研究计划中的一个重要部分，就是有关结团性的实验。来自英国金斯学院和伦敦的一个小组，正在进行 ^3H 束引起的反应的研究，即是说研究核态中的 α 结团。通过来自靶核的 α 粒子向 ^3H 炮弹的转移反应，已经生成了 ^7Li 核。当在靶核中存在 α 结团时，这个反应将应当是最强烈的。

实际上 ^7Li 核本身就是结团性的一个很好的例证，它可以看作是一个 α 与 ^3H 的结团。当 ^7Li 与靶碰撞时，由于炮弹和靶核间静电力和核力的影响，它能分离成它的组成成分 ^3H 和 α 粒子。 ^7Li 的破碎能够通过两种机制进行。一种是直接破碎，此时在碰撞引起的力的影响下核直接分离破碎。另一种机制是 ^7Li 先变成激发态然后再分离。当只是较长程的库仑力起作用的情况下，也研究了这两种破碎模式间的相互关系。如果 ^7Li 的轰击能不足以使两个核牢固地紧贴在一起时，上述情况也就会出现，即两核间的相互作用中短程核力不再占优势。已经预期只有在两个结团的中子与质子比不同时，直接破碎机制才是重要的。来自爱丁堡大学的一个小组研究 ^9Li 碎裂成 α 粒子和 ^2H 的实验，并实验证实了上述预言。在这个实验中，破碎过程几乎完全是第二种机制，没有观测到直接破碎存在的证据。

比 α 粒子和 ^3H 更大的结团也是重要的。例如 ^{24}Mg 的一些高激发态表明存在 ^{12}C 结团态。如果两个碳核经散射相互分开，在散射出粒子的计数上就出现峰值，这计数是轰击

能量的函数。峰值与临时形成的 ^{24}Mg 激发核有关。这个过程类似于两个原子形成分子，所以称为准分子共振，不过在某种意义上至今都有待进一步研究斟酌。来自英国牛津、伯明翰和达累斯伯里的物理学家，采用更直接的方法进行研究。他们研究 ^{24}Mg 激发核中的 ^{12}C 结团。他们所研究的 ^{24}Mg 破碎，是通过 ^{24}Mg 与更轻质量数的靶的碰撞产生的，还涉及到如何探测生成的 ^{12}C 核。用研究C碎片能量分布的方法，能够得到 ^{24}Mg 射出能量和与结团如何相关的信息。图3示出了碎裂如

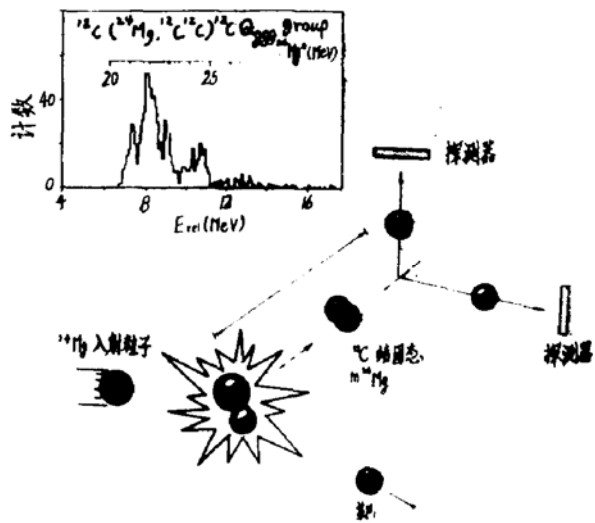


图3.靶核作用下 ^{24}Mg 中 ^{12}C 结团态碎片

何发生和由他们的第一批实验得到的结果。直到目前为止还没弄清楚的是，在更早的 ^{12}C 散射实验中看到的准分子共振与现在的碎裂究竟有什么关系。

五、最新理论进展

NSF目前正在进行几个理论研究计划，共同目的都是理解核的一些其它性质。

在过去的描述中，质子和中子的结团都认为只在轻核中存在。在重核中，质子和中子都有不同的轨道，它们之间形成结团的可能性就不大了。但是核子间的吸引力或许引起一些类型的中子和质子对间的关联。对于这种四个一组结团的可能证据，可在稀土核的低激发态中寻找。图4示出了两个最低能态间 γ 射线跃迁的某具体类型的计数率，它

是核中四个一组结团数目的函数。这个数目是由 ^{132}Sm 核测到的。因为这种四个一组的结团是由两个中子和两个质子组成的，不同的核可能具有相同的四个一组的结团数，但是它们中过剩的中子对数和质子对数却是不同的。详细情况如图4所示。跃迁计数率几

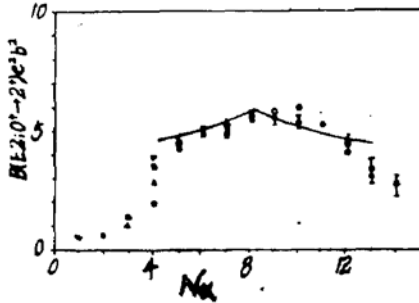


图4. 第一激发态和基态间引起的跃迁计数率。它是四个一组的结团数目 N_4 的函数。不同的符号表示具有相同 N_4 的函数。

乎完全决定于四个一组结团的数目，而与“非四个一组结团的”核子数且关系甚小。这同时给出了支持四个一组的结团模型，和希土区核惯量矩中实验观测到的趋势符合甚好。

相互的库仑排斥形成了经典熔合位垒。能量低于经典熔合位垒时，两个重核熔合的几率究竟如何？这是核物理学家的最新研究课题之一。正如大家都熟知的，当两个重核在相互碰撞时，必然会引起相互激发或交换核子，熔合几率几乎随能量不断增加，当然有时是在达到某一数量级前才是如此。NSF进行的这类研究已经展宽了，这归功于新的 γ 射线探测装置的相继问世。新装置能够测定熔合几率与核的相关角动量之间的相互关系。如果库仑位垒宽的话，熔合几率不但小于窄位垒的情况，而且随角动量的增加而更快地减小。详细情况如图5所示。通过测量各种不同角动量时的相应贡献，或许能够估计位垒的形状，也就是大间隔时核势的行为。我们正乐观地期待着NSF在此领域的进一步实验结果，以便据此计算出角动量分布与势弥散形状和核变形的定量相关性。

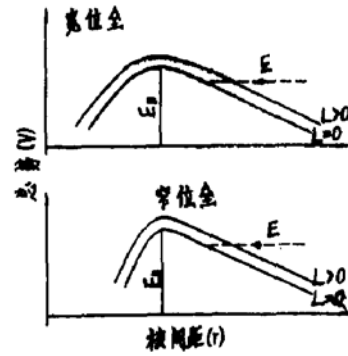


图5. 在位垒高度 E_B 相同时，窄位垒时的亚位垒熔合截面较大，并且随角动量的增加截面减小得慢。

随着NSF和SRS的日臻完善，随着数据获取和计算机技术的日新月异，随着理论思想的活跃开放和实验技术的突飞猛进，人们正把关注和期待的目光投向达累斯伯里。核物理学界似乎有理由认为：在核科学的某些领域特别是核结构研究领域，NSF完全有可能取得突破性进展。

参考文献

- 1、F. A. Brieva et al., Nucl. Phys. A452 (1986)221
- 2、H. J. Daley, J. Phys. G: Nucl. Phys. 12(1986)L51
- 3、H. J. Daley, et al., Nucl. Phys. A449 (1986)256
- 4、P. V. Drumm et al., Nucl. Phys. A448 (1986)93
- 5、V. R. Green et al., Phys. Lett. B173 (1986)115
- 6、C. J. Lister et al., Phys. Rev. Lett. 55 (1985)810
- 7、M. A. Nagarajan et al., Phys. Lett. 173 (1986)29
- 8、B. M. Nyakó et al., Phys. Rev. Lett. 56(1986)2680
- 9、J. F. Sharpey-Schafer, Nucl. Phys. A447 (1986)233
- 10、A. C. Shotton, J. Phys. G: Nucl. Phys. 12(1986)L93
- 11、P. J. Smith et al., J. Phys. G: Nucl. Phys. 11(1985)1271.
- 12、P. J. Twin et al., Phys. Rev. Lett 55 (1985)1380
- 13、J. Simpson et al., J. Phys. G: Nucl. Phys. 12(1986)L67.
- 14、F. Videbaek et al., Nucl. Phys. A451 (1986)131