

原子核碰撞的过程

——核反应

靳根明

(中国科学院近代物理研究所 730000)

前面介绍了原子核的结构和性质,那么它的内部结构和性质是如何知道的呢?老话说得好,要知道核桃仁的样子,就要把核桃敲开,仔细查看。所以,要知道原子核的内部结构,就要把原子核敲开。原子核是非常小的,其尺寸大约只有 10^{-14} 米,一般榔头打不着。原子核还非常结实,比如,要把一个铁-56原子核打散,就需要用大约 $8\text{ MeV}\times 56$ 的能量。因此,只有用高速运动的原子核去撞击一个原子核了。国际上第一位对原子核研究进行变革的人是卢瑟福,1909年他利用放射性原子核 ^{210}Po 发射的 α 粒子轰击非常薄的金箔,发现了原子核。后来,在1919年,卢瑟福又利用 α 粒子轰击纯的氮气,不仅发现了质子,还产生了氧同位素 ^{17}O ,核反应式是 $^{14}\text{N} + \alpha \rightarrow ^{17}\text{O} + \text{质子}$ 。当然, ^{17}O 的鉴别还是布兰克特在1925年完成的。1932年,查德威克利用 $^9\text{Be}(\alpha,n)^{12}\text{C}$ 反应,不仅变革了原子核,还发现了

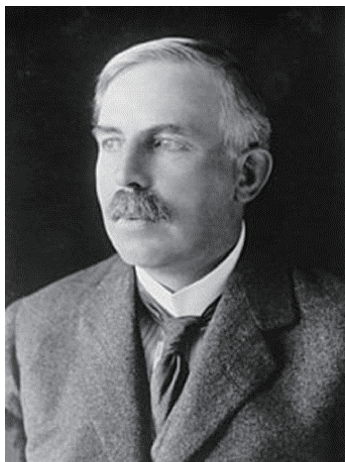


图1 E.卢瑟福(1871~1937)

中子。近百年来,核物理学家利用不同能量的各种原子核轰击其他原子核,不仅深入研究了原子核的结构和性质,而且,还在实验室中合成和研究了近3200种新核素,发现了20多种新元素。

一、核反应需要的条件

前面说了,要使两个原子核相互碰撞,它们之中最少有一个原子核具备足够高的能量(称为炮弹),或者两个原子核都具备足够高的能量。早期,在实验室中常用的炮弹有两种:一种是来自放射源(可以发射具有一定能量的粒子的放射性原子核)的粒子,包括中子、 α 粒子、高能 γ 射线;第二种是来自离(粒)子加速器的离子束。放射源是早期实验用的工具,可以是天然的,也可以是人造的。核反应堆中子源是一个常用的中子源。加速器是实验室使用的大型实验装置,它有许多类型,例如高压倍加器、串列加速器、回旋加速器和同步加速器。

再一个就是需要有合适的靶原子核,一般都会选择一种由单一的稳定原子核构成的材料,固体的或者是气体的,制成需要的靶子,以备使用。还有一个不可缺少的条件就是需要有探测粒子和原子核的设备,根据需要,其结构由简单的一个探测器,或是几个探测器的组合,更复杂的是由几种不同类型的探测器组合起来的鉴别系统,如超重核的鉴别系统。

在国际上具备上述条件的核物理实验室有美国的伯克利实验室、俄罗斯的杜布纳核物理实验室、德国达姆施塔特重离子研究所、中国科学院近

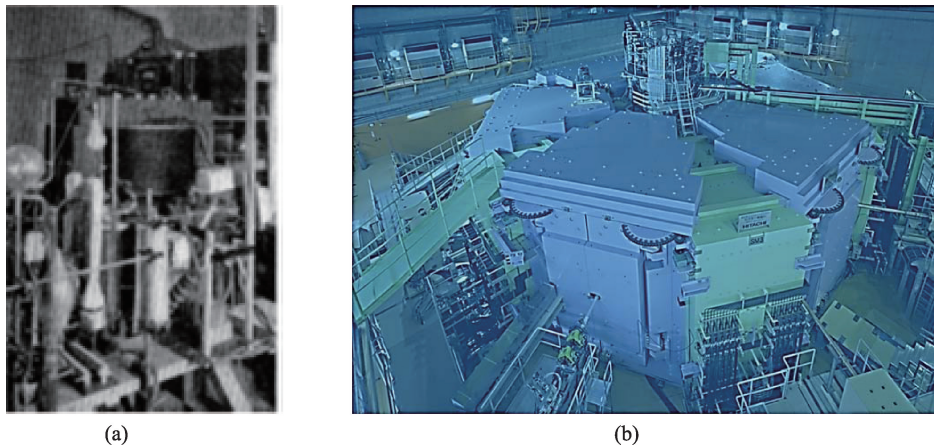


图2 美国建成的世界第一台回旋加速器(a)RIKEN的超导环形加速器(直径18.4 m)(b)

代物理研究所、中国原子能科学研究院、日本理化研究所、密歇根州立大学-美国能源部联合研究室等。这些实验室不仅具备很好的实验设备,还集中了一批优秀的核物理理论和核物理实验学家,每年都有大量科研经费的投入。而且,随着核物理研究的发展,这些实验室都在不断地发展和更新相应的设备,以便能向更新的目标进发。例如,最初只有简单的高压倍加器,只能提供低能的轻粒子(质子,氘粒子和 α 粒子)束流,但是,这对于研究同样一种元素的更丰中子,或者更丰质子的新核素是不够的,于是就发展了重离子(比Li离子重的各种离子)加速器。在合成超重新核素时,由于反应截面非常小,因此,需要更强的束流强度,为此,发展了强流重离子加速器,能够提供的束流强度可以是原来的

几十倍,甚至上百倍。俄罗斯杜布纳原子核物理实验室的加速器可以提供的 ^{48}Ca —由20个质子和28个中子组成,是钙元素中质子数最多的稳定同位素,束流强度达到约 2×10^{12} 个每秒,一般的加速器只能达到约 10^{10} 个每秒。同时还投入几千万的资金建设大型复杂的探测设备,如俄罗斯的超重谱仪,美国的GRETA γ 谱仪(由30个田字型 γ 探测单元和10个 γ 能量跟踪探测单元组成)等。

二、与核反应有关的一些名词说明

质心坐标系:

以两个相互碰撞原子核的质量中心为原点的坐标系。通常实验者进行核反应研究时,会将待轰



图3 世界上主核物理实验室的分布

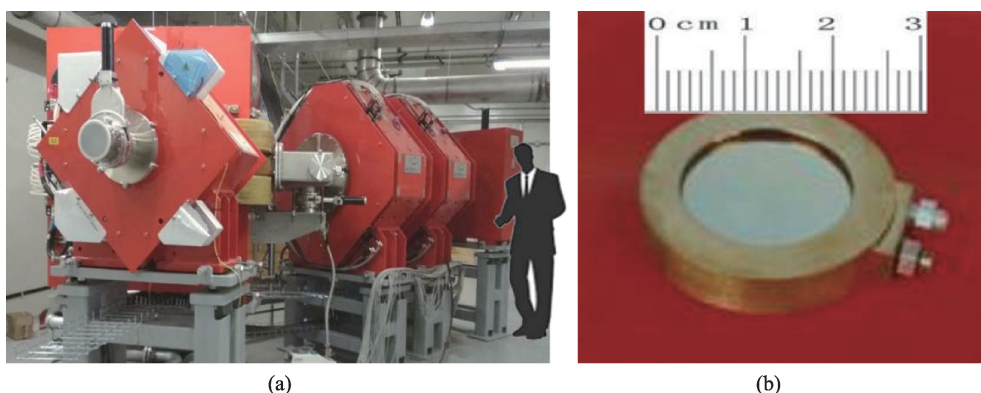


图4 俄罗斯杜布纳弗里洛夫原子核研究实验室的超重谱仪(a)和金硅面垒探测器(b)

击的靶子竖直固定在一个真空室的中心位置。以这个位置为原点,以炮弹前进的方向为 Z 轴, X 轴在水平面。 Z - X 之间的夹角记作 θ , Z - Y 之间的夹角记作 ϕ 。这样的坐标系就是所谓的实验室坐标系。在这个坐标系中,可以很方便地记录炮弹的能量,核反应过程中发射各种粒子的总数及其分布等。但是,在讨论理论问题时,就有些麻烦,例如,炮弹与靶原子核接粘在一起后,还会运动一段时间,并在运动中发射粒子,计算粒子的能量和角度时需要考虑这些因素。因此,为了理论计算的方便,就建立了质心坐标系,即以炮弹和靶原子核的质量中心为坐标原点,以炮弹的运动方向为 Z 轴方向的坐标系。用一套公式,可将实验室坐标系的测量数据转换为质心坐标系的数据。

两个原子核的相互作用势:

原子核都是带电的,因此,当两个原子核相互接近时,在很远距离上就会感到库伦排斥作用($V_C = Z_1 Z_2 / (4\pi\epsilon_0 R)$)。由于核力的存在,在原子核周围也存在核势场。所以,当两者非常靠近时,两个核会受到核势(V_N)的吸引作用。我们还知道,当入射弹核在靶核附近经过时,就会产生相对角动量,而且瞄准距离不同,形成的角动量也不同,这个角动量称为轨道角动量($L(\ell \hbar)$),也就有相应的轨道角动量势能($V_L = \ell(\ell+1)\hbar^2 / \mu R^2$)。因此,当弹核与靶核碰撞时,存在的总相互作用就是这三种势的总和($V_C + V_N + V_L$) (见图5)。图5中的细黑线是 $V_C + V_N + V_L(\ell=0)$ 的总

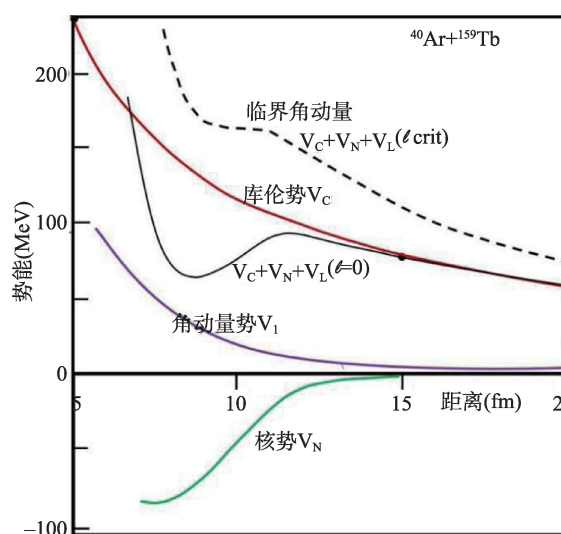


图5 原子核之间的作用势

和。可以看出,这条线上有一个洼坑,坑的右边是一个较为平坦的峰,通常称为熔合位垒,即弹核的有效能量高于这个位垒时,才能顺利地更加接近靶核,掉进势能曲线的坑中,与靶核发生熔合。图5中还有一条虚的总势能线,这条虚线上有一个平台。这条势能线对应的角动量称为熔合反应的临界角动量。当入射角动量高于临界角动量的入射弹核就不能与靶核熔合在一起。

反应截面:

简单说就是炮弹核与靶原子核发生碰撞的概率。假设单位面积上只有一个靶原子核,一个炮弹粒子轰击这一单位面积时,与这个靶原子核撞上的概率就是反应截面。实际实验时,已知单位面积上

的靶原子核数为 N ,测定在一定时间内入射到单位面积上的炮弹数目(I),以及发生反应的数目(N'),一般用 σ 表示反应截面(概率),则 $\sigma=N'/IN$ 。如果面积的单位用 cm^2 ,则定义1靶(ban) $=10^{-24}\text{cm}^2$ 。如果将某个原子核作为靶心,炮弹距离靶心的垂直距离称为碰撞参数(b)或瞄准距离。不同数值的 b 对应不同的环面积,炮弹落入的概率也不同。同样速度的炮弹,从不同的 b 经过时,它对应的轨道角动量 L 也不同(L 是量子化的,用 $\ell\hbar$ 表示, $\ell=0,1,2,\dots$)。如果将 b 也量子化, L 与 b 的关系是: $L=b\mu v$,其中, μ 是炮弹的折合质量, v 是炮弹的质心速度。

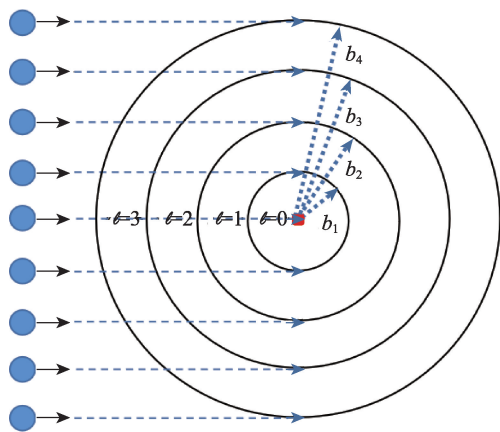


图6 反应截面示意图

核反应中的守恒定律:

强调一下,这里所说的核反应是指炮弹核的能量不是非常高,最高也仅能将原子核敲碎,而不将核子(质子和中子)激发从而产生其他基本粒子;再一个是核反应过程不包括反应后生成物的衰变过程。

大量实验表明,在原子核反应过程中,反应系统遵守以下几个守恒定律:

总电荷数守恒:反应前后系统的电荷数不变。

总质量数守恒:反应前后总的核子数不变,尽管会有中子和质子重新组合,但总的数目不会增加或减少;

能量守恒:反应后系统的总能量(静止能量和动能)虽然会进行重新分配,但是其总量与反应前相比,不会有任何改变;

动量守恒:反应前后的总动量不会发生变化。

角动量守恒:炮弹核和靶核都会有自旋角动量,而且,弹核入射时也具有轨道角动量,这两者之矢量和是反应前的总角动量。反应后的总角动量是,各种产物的自旋角动量和它们之间相对运动的轨道角动量的矢量和。反应前后的总角动量相等。

宇称守恒:即对于每一种类型的核反应,体系总的宇称保持不变。这也限制了产物核之间相对运动的轨道角动量的取值范围。

三、原子核碰撞的不同过程——核反应类型

物质都是由原子构成的。尽管原子之间基本上都是相邻的,但是,一个原子的尺寸是原子核的上万倍。因此,炮弹核在靶物质(一般都是很薄的)穿行时,除部分与核外电子相碰撞,产生自由电子,而降低速度外,绝大部分则是自由通过。只有极少的炮弹核能在靶原子核附近通过。弹核与靶原子核的瞄准距离不同,弹核与靶核相互作用的过程也不相同。以瞄准距离计算,从远到近,相互作用过程可分为以下几种:

- 弹性散射;
- 库伦激发;
- 非弹性散射;
- 少数核子转移反应;

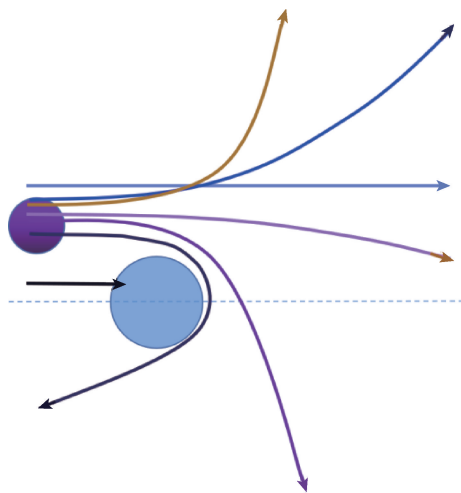


图7 弹核的出射轨道与碰撞参数发关系

深部非弹性散射；

复合核反应；

影响核反应的重要因素有三个：反应系统中原子核的质量、弹核的速度和瞄准距离。这三个因素可以归结到角动量 $L(=b\mu v)$ 中。从角动量的角度考察各种反应截面的分布可给出如图8的样子。量子隧穿效应使得不同反应交界处呈现出缓慢过渡状态。

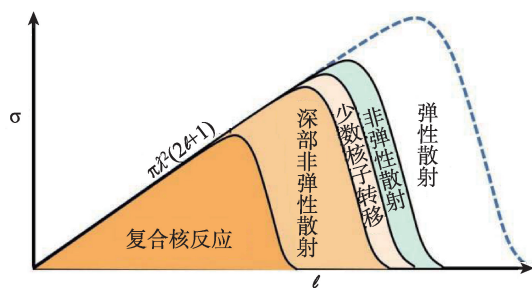


图8 各种核反应与轨道角动量的关系

弹性散射：

当炮弹核(带电荷数为 Z_1)在比较大的瞄准距离上入射时，弹核与靶核(带有电荷数 $=Z_2$)之间的相互作用，就像两个带电的小球相碰时那样，只有动量转移，各自的内能都没有变化，也就是说这两个原子核的结构和性质也不可能发生任何改变。库伦散射后，出射的弹核大都集中在入射方向附近，随角度的增加，则以 $[16\sin^4(\theta/2)]^{-1}$ 的速度下降。能量很低的带电粒子与较重的原子核碰撞时只会发生这种现象(见图9)。

由于核力的存在，当能量比较高的弹核入射时，随着瞄准距离的减小，弹核会受到核力的影响，其轨道偏转情况也会发生相应的变化，不再遵循纯粹的库伦散射轨道。碰撞参数进一步减小时，原子核之间的相互作用(吸引)增强，导致弹核将少量的动能转移给靶核，甚至在弹核和靶核之间有少数核子的转移。这就使得弹性散射截面与纯粹库伦散射相比，会很快下降。通常，实验人员在不同角度上测得弹核的散射截面，并将实验测量截面与理论计算的库伦散射截面进行比较，从而给出两者的比值图(见图10)。对于一个碰撞系统，从弹性散射角分布的比值可以看出，比值下降发生的角度与入射弹核

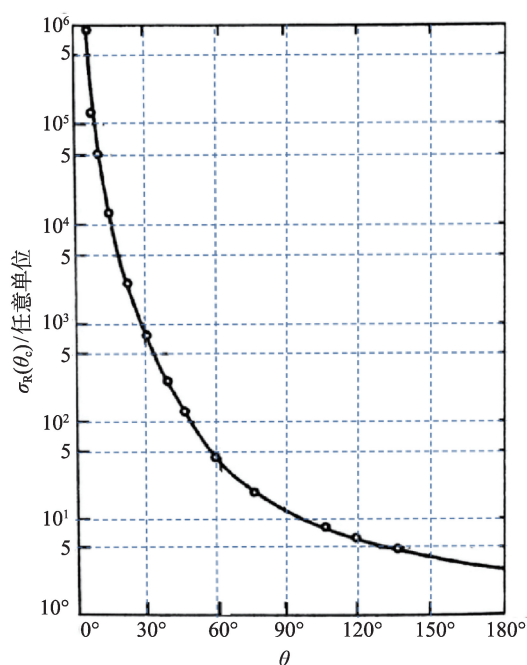


图9 低能α粒子散射角分布

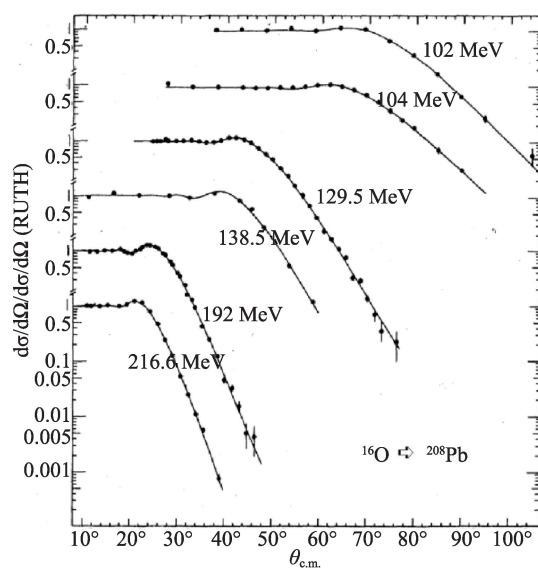


图10 不同能量的 ^{16}O 在 ^{208}Pb 上散射的角分布

的速度(能量)有密切关系。从经典力学的角度来看，弹核速度的增加相当于在靶原子核附近的线速度增大，在同样作用力的影响下，偏转角度变小。也就是说，炮弹核的速度越快，其能够被散射的弹核就越集中于入射方向附近。反过来说，只有瞄准距离较大的弹核才能与靶核发生弹性散射，随着瞄准距离的减小，发生弹性散射的几率就变得越小。

通过弹性散射截面的测量，并与理论计算相比

较,可以确定弹核与靶原子核之间的核作用势($V_N(r)$,常用伍兹-萨克森光学势的形式 $\{(V+iW)[1+\exp(r-R)/a]^{-1}\}$ 表示),以便为核反应截面的理论计算提供重要的原子核之间的核相互作用。另外,通过弹性碰撞的测量也可以得到弹核与靶核相切的距离,从而更准确地获得弹核与靶核之间发生转移反应的瞄准距离。

核结构对弹性散射有一定的影响。例如,晕核 ${}^{11}\text{Li}$ 是由核芯 ${}^9\text{Li}$ 和两个晕中子结合而成,且两个晕中子的结合能非常小。如果利用 ${}^{11}\text{Li}$ 作为弹核,当它和靶核接近时,由于库仑场的作用,两个晕中子就有可能离开核芯 ${}^9\text{Li}$,使得其弹性散射截面更快地偏离库伦散射。

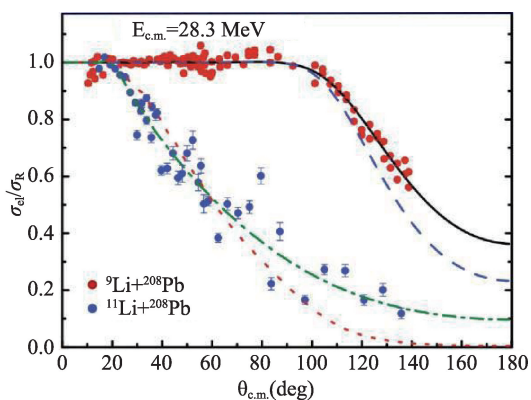


图 11 ${}^9\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 和 ${}^{11}\text{Li}+{}^{208}\text{Pb}$ 的弹性散射角分布

库伦激发:

如果入射弹核的能量较低,不能穿过库伦位垒(除了隧穿效应外),由于弹核与靶核(特别是两个较重的原子核之间)存在库伦相互作用,会使靶核或者弹核吸收虚拟的 γ 射线,从而被激发到较低的能量状态。但是,接近光速的弹核在靶核旁边经过时,也会产生非常强的电磁场,也会使弹核或靶核获得非常高的激发能。

非弹性散射:

当弹核对靶核的瞄准距离比较小时,除了会发生弹性散射以外,还会将其部分动能转换为靶核或者弹核本身的内能,使它们处于激发状态。这种过程称为非弹性散射。

当实验测量弹核的弹性散射能谱时,在稍低于弹核能量的位置上会出现一些能量峰(见图 12),这就是非弹性散射峰。

转移反应:

当炮弹核对靶核的瞄准距离更近时,特别是弹核与靶核相切,或者稍有重叠,两者之间就会发生核子转移。在此过程中,由于弹核与靶核有短暂的接触时间,在这一短暂的时间内,不仅发生了能量转移,同时也会发生核子转移。转移核子的多少,有很多

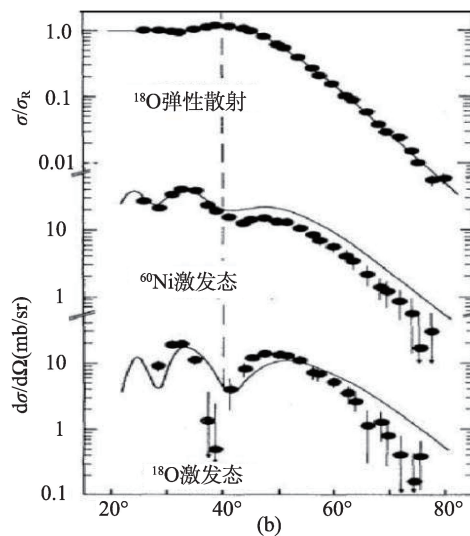
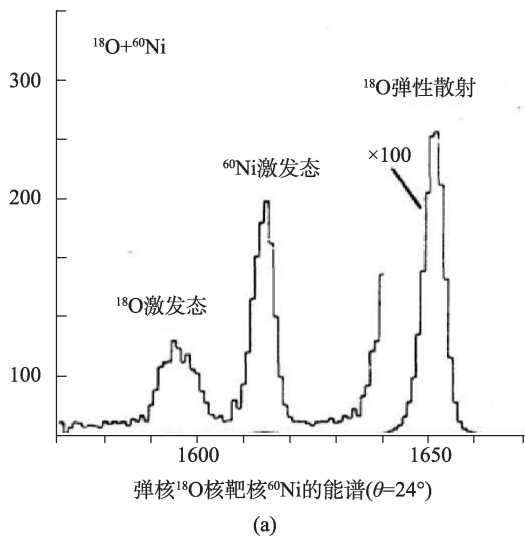


图 12 ${}^{18}\text{O}$ 与 ${}^{60}\text{Ni}$ 核发生非弹性散射时, ${}^{18}\text{O}$ 和 ${}^{60}\text{Ni}$ 核的激发能谱(a)及角分布(b)

因素在起作用。例如,瞄准距离,弹核速度,两个核的内部结构等。转移核子越多,其转移概率越小,但是核结构的影响会使这一特点发生较大的变化。

1974年当我们在用较低能量的 ^{12}C 轰击 ^{197}Au 时测量出射 α 粒子的角分布时,发现 α 粒子的角分布不是我们预想的各向同性(来自复合核蒸发)那样,而是与转移反应出射粒子的角分布相似。后来进一步实验测量证实,这些 α 粒子确实是来自 ^{12}C 向靶核转移 ^8Be 后出射的,而且转移的几率比转移一个核子的概率要大得多。后来,又利用不同能量的 ^{12}C 离子轰击 ^{209}Bi 原子核,测量了转移 ^8Be 的截面,以及转移后生成核(^{217}Fr)退激发及随后 α 衰变成 ^{211}At 的截面,进一步证实了 ^8Be 转移具有很大的概率。原因在于 ^{12}C 可以认为是由在同一平面上的3个 α 组成,其中2个 α (或 ^8Be)与靶核结合的概率更大些。在利用 ^{14}N 核轰击同样的靶核时,转移 ^{10}B 的截面就要小许多。利用 ^{12}C 轰击不同的靶原子核,其转移 ^8Be 的截面也因靶核结构的不同而有较大的差别。例如,在有效能量几乎相同的情况下(约64 MeV), ^{12}C 轰击靶核 ^{159}Tb 时,转移 ^8Be 的截面仅有大约89 mb,而轰击天然 Ag 时,却高达150 mb。即使利用 ^{12}C 轰击不同的同位素靶核,例如 ^{112}Sn 和 ^{124}Sn ,其转移截面也有较大的区别(见图13)。这说明靶核的结构对多个

核子的转移也有明显影响。

深部非弹性散射:

当利用比较重的炮弹核,例如 ^{40}Ar 轰击重的靶核,例如 Au 时,如果瞄准距离较小,使得弹核与靶核有一定的接触,甚至有一定重叠,会发生另外一种现象,称为深部非弹性碰撞,即弹核与靶核会粘在一起,并会转动一定的角度,同时有较多的能量损失和较多的核子转移。后来发现,即使在比较轻的核反应系统中,如 ^{16}O 轰击 ^{28}Si ,也会有这种现象。有人用一个图对这种现象作了形象的描述(见图14)。

总之,当弹核与靶核的距离非常接近,或者稍有重叠,由于弹核和靶核的部分核子之间的相互作用,甚至核子集团与核的相互作用,能够发生核子的转移。核子转移并不是单向的,靶核中的核子也可以转移到弹核中。核子转移的同时,也携带了本身的具有的能量。

全融合反应:

当弹核的瞄准距离进一步减小,弹核的能量也比较合适时(低于临界角动量所对应的能量),弹核就有一定的概率与靶核融合在一起,形成一个内能比较高、不稳定的新原子核,它的总核子数等于弹核与靶核核子数的总和,而且弹核的有效动能全部转变

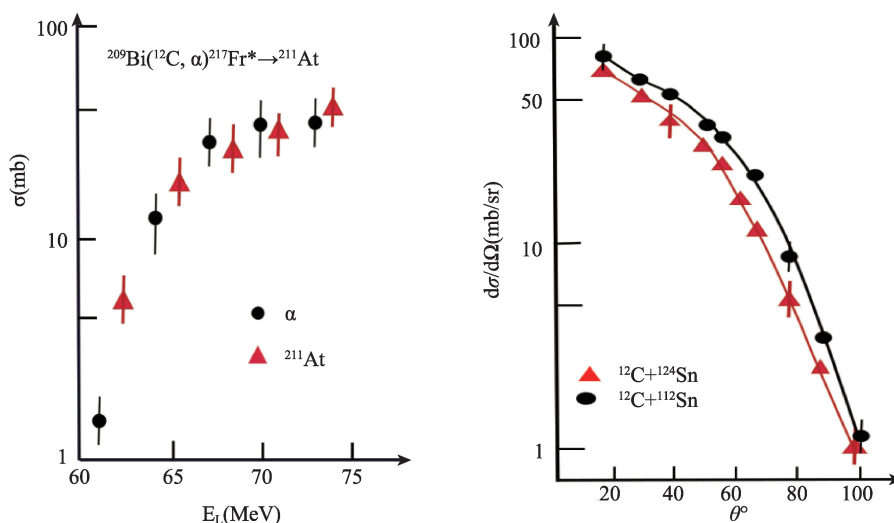


图13 大质量转移及其靶核结构的影响

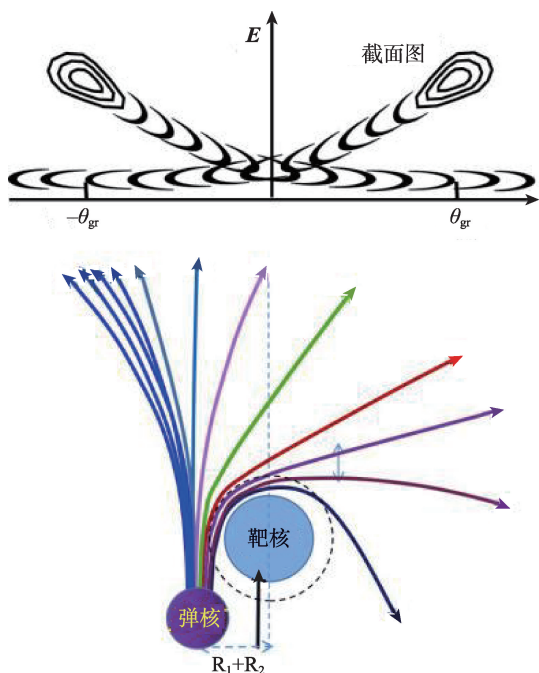


图 14 深部非弹性散射示意图

为新原子核的内能。这个新原子核被称为复合核。复合核对它的形成过程没有记忆,只知道自己有多少核子,有多高的激发能,至于来自何处,完全忘记。

复合核形成的概率会受到各种因素的影响。比如,弹核的能量,弹核或者靶核的结构,甚至复合核的结构等。随着入射能量的增加,熔合截面呈指数增加,当弹核的能量比反应系统的库伦位垒高很多后,就会逐渐趋于饱和(临界角动量的限制)。当入射弹核的能量非常低时,熔合反应概率会非常小,受到各种因素(核结构等)的影响也会非常明显,实验测量也变得非常困难。这也促使科研人员创造出各种特殊的技术和设备,以获得所需结果。特别是非常低能的轻粒子,以及 ^{12}C 、 ^{14}N 、 ^{16}O 、 ^{28}Si 等核素轰击不同靶核时的熔合截面,在天体核合成和超重元素合成中具有非常重要的作用,人们非常重视对它们的研究。

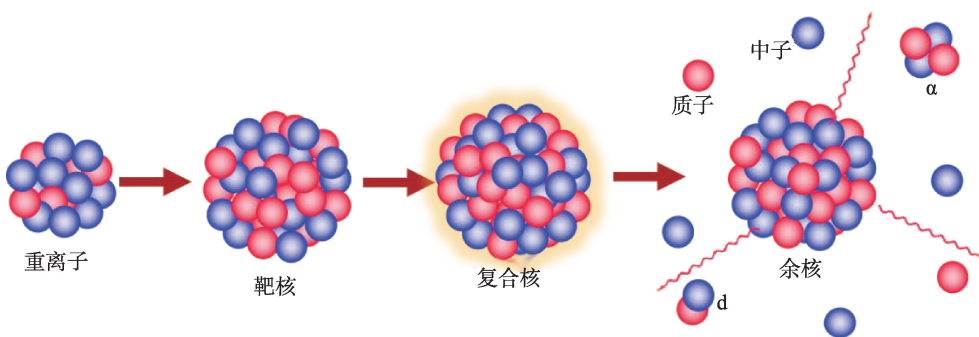


图 15 复合核形成及其蒸发粒子示意图

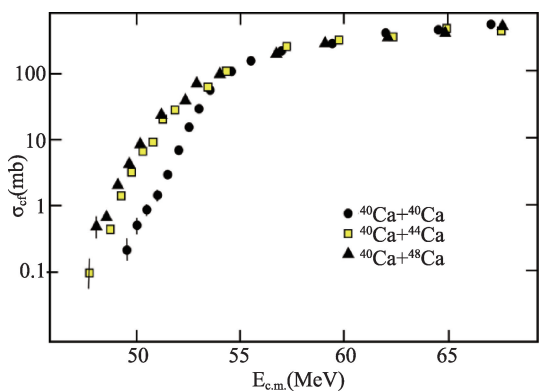


图 16 熔合截面与弹核能量和靶核的关系

通常,由于复合核的热能比较高,非常不稳定,在极短的时间内会通过发射多个中子和 γ 射线而形成稳定的余核,有时会发射中子和其他少量的轻带电粒子,如质子,氦核和 α 粒子,以及 γ -射线等,将自己的多余的热量消耗掉,从而变成一个稳定的原子核。如果复合核包含的核子数很多,也就是非常重时,除了发射粒子退激发外,还会发生裂变,称为熔合裂变。熔合裂变的几率随着复合核的质子数的平方与其质量的比值(Z^2/A)和激发能的增加都会增加。通常用 Γ_f 表示复合核裂变概率,用 Γ_n 表示产生

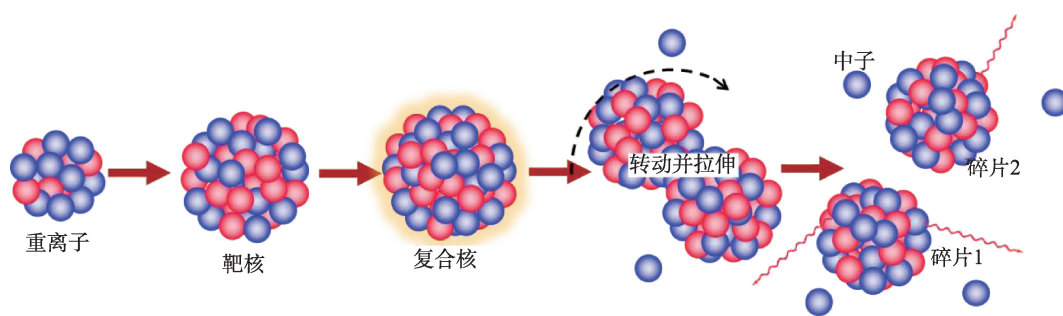
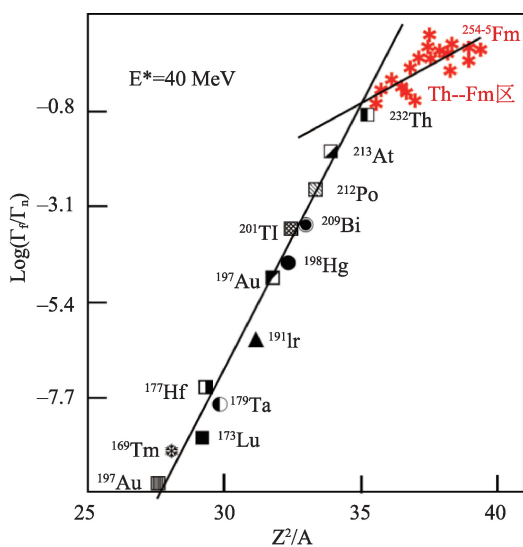


图17 复合核裂变示意图

蒸发中子余核的概率,从这两个概率的比值大小可以看出复合核裂变的容易程度(见图18)。熔合裂变与自发裂变的区别在于,复合核的温度要比自发裂变核的要高,因此,熔合裂变碎片质量分布更接近对称分布。熔合裂变前会发射粒子,特别是发射中子。如果温度很高,在裂变前会发射更多的中子。熔合裂变后的碎片也会有一定的激发能,可通过发射中子和 γ 射线趋于稳定。重离子反应形成复合核时,随着复合核激发能的增加,复合核裂变的几率会很快增加,特别是当复合核的质量数非常大时,甚至于几乎全部都发生裂变,只有极少的复合核能够通过发射中子(轻离子)和 γ 射线退激发,最终成为一个稳定的重余核。当非常重的两个核碰撞时,虽然瞄准距离小,也是接触后即裂开,而不可能形成复合核,这一过程也为准裂变。

图18 复合核裂变与蒸发概率之比随其 Z^2/A 的变化

在重离子反应中形成的复合核通常都具有较高的自旋角动量。在粒子发射时,会随之带走一些角动量,但是,当剩余的激发能不够蒸发一个粒子时,或者对于重核不能发生裂变时,发射 γ 退激就是它唯一的退激发方式。实验发现,在 ^{37}Cl 轰击 ^{120}Sn 生成的复合核 ^{156}Dy ,在蒸发3~4个中子后,仍然具有高达 $130\hbar$ 的角动量。也就是说 ^{153}Dy (或 ^{152}Dy)原子核可处于变形非常大的状态。

复合核的退激发过程有长有短,特别是重核裂变过程是一个比较慢的过程。复合核退激发过程最长可以达到 10^{-16} 秒,也就是说,复合核的寿命最长约 10^{-16} 秒。

放射性原子核,或称为不稳定原子核,相比同种元素的稳定核而言,它的中子数比较多,或者是中子比较少。用这些原子核作为炮弹核引起复合核反应时,所形成的复合核会多一些中子,或者少一些中子。如果放射性弹核具有晕结构,或者最后一个或两个核子的结合得比较松散,那么,能够形成复合核的概率与稳定的弹核相比就会有明显的差别。当这类不稳定弹核接近靶核时,由于库伦势和核势的作用,弹核的核芯与外围核子有概率会首先分开,这样,在本应该形成复合核的瞄准距离上入射,就有可能不再形成复合核,即复合核的形成截面就可能会降低。但是,实验结果表明,弹核能量较高时,并没有明显的影响。

总之,当弹核与靶核碰撞时,不同入射能量、不同瞄准距离会引起各种各样的核反应。核物理实验中,每秒钟就会有成千上万亿个弹核冲向靶子。

相对弹核而言,靶子上靶核之间的距离实在是太大了。因此,绝大部分弹核不会与靶核碰撞而直接穿过靶物质,剩下的弹核,除了大部分与靶核发生弹性散射外,仅有小部分弹核在不同瞄准距离上与靶核相撞而发生各种核反应。即使这样,每秒还是会产生出大量的核反应产物。如何将大量的出射产物按照不同的核反应区分开来,就成了实验者首要研究和发展的课题。长期以来,核物理实验人员根据不同的实验目的,发展出了许多有针对性的实验探测设备和方法,从而能成功地完成实验。

高能入射弹核引起的核反应:

高能弹核轰击靶原子核时,除了前面说过的核反应外,还可能发生许多新的核反应现象。早年利用高能质子轰击较重的靶核时,会产生散裂反应。原因在于质子的质量小,但是,当高能质子击中靶核时,它会在靶核中不断地与靶核内部的核子碰撞,被碰到的核子也得到一定的能量,从而会与其他核子碰撞。当然,入射质子也损耗了自己的动能。这样,高能入射质子除了有很小的概率在碰撞一两次后跑出靶核外,大部分都会通过不断碰撞将自己的动能全部转变为靶核的热能,自己也被靶核吸收,使得靶核的温度在瞬间急剧上升,从而导致靶核四分五裂,产生非常多质量不等的核碎片(见图19)。

如果较重的高能弹核轰击靶核,当瞄准距离稍小时,弹核与靶核有部分重叠,未重叠的部分会与

重叠部分分离,形成新的原子核碎片,并基本上以原来的速度继续向前飞行,同时也会发射几个粒子,使本身稳定下来。这一过程被称为弹核碎裂反应。弹核与靶核碰撞时,由于重叠程度不同,弹核碎裂后形成的新原子核也有轻有重,各不相同,有非常缺中子的,也有非常丰中子的。如果弹核和靶核都是丰中子的,弹核碎裂后,产生丰中子原子核的几率就会大些,反之也一样。弹核碎裂的产物质量分布与炮弹核的速度有关,速度越高,碎裂的产物质量分布越广,非常丰中子或缺中子的碎片产额也会更大一些。这一过程可以用来产生新的放射性核素,特别是丰中子新核素。例如德国的重离子物理实验室利用每个核子1000兆电子伏的 ^{238}U 与Ti原子核碰撞,一个实验下来就可观察到几百种核素,而且有许多是非常丰中子和非常长缺中子的核素。自从1985年利用弹核碎裂反应发现 ^{11}Li 等一些核具有晕结构以来,从理论和实验上对这种核过程进行了许多研究,还建立了专门的次级束流线实验设备,通过这种核反应产生和研究了上千个新的核素,并选择有较大产额的不稳定核素,使其形

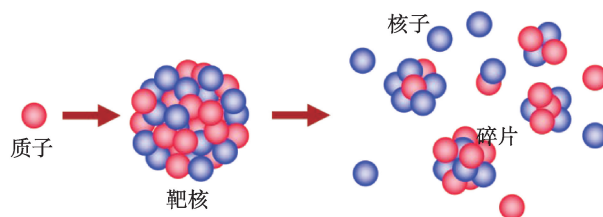


图19 散裂反应示意图

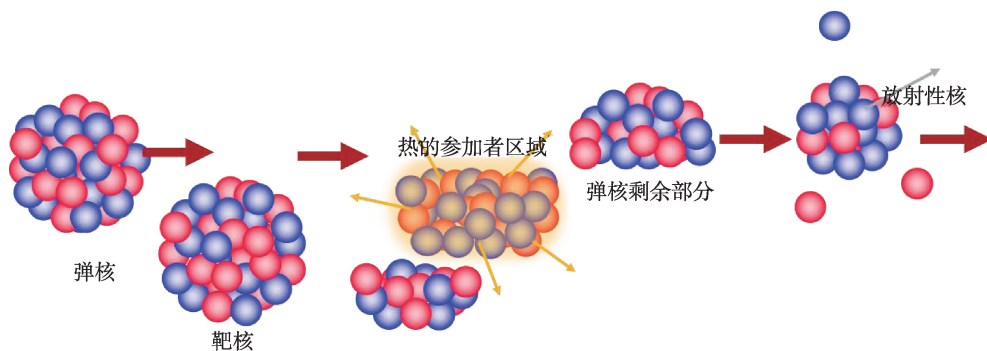


图20 弹核碎裂示意图

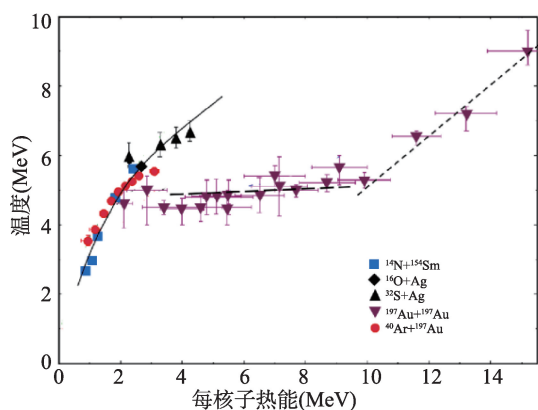


图21 原子核的量热曲线

成新的放射性核束流,用来研究或合成更丰中子的新核素。

瞄准距离很小的高能重离子轰击靶核时,也会被靶核俘获,形成一个非常“热”的原子核,随后就发射许多核子或轻的离子,最后形成一个稳定的原子核;或者发射一些粒子后,分裂成三个碎片。当然,这些过程都是在瞬间发生的。通过实验研究发现,当一个“热”的原子核的激发能达到约 3 MeV/A 时,就会同时裂开成为三个碎片。如果进一步增加热量,热核就会碎裂成更多质量更小的碎片。当一个原子核系统的激发能更高时(大约 5 MeV/A 以上),它可以像水一样,发生液—气相变,从液态慢慢地变为气态(核子和轻离子的混合物)。但是,原子核反应是一个非常复杂的过程,不同能量和不同质量的弹核被靶核俘获时,所形成的热核的热量(温度)和压强不同,最后表现出的结果也不可能相同。要测量原子核的液—气相变,就要同时获得其

温度和热量。实验中可以用不同的处理方法获得热核的温度,使用不同的处理方法,其结果也会不同。所以,原子核的相变测量不会像测量水的相变那么简单明了。这些研究对理解中子星内部的性质很有帮助。

如果两个非常接近光速的原子核对头相撞,例如每个核子 100 GeV 的两个Au原子核对头相撞(称为对撞),就会形成一种新的物质状态——夸克—胶子等离子体。实验结果表明,目前实验形成的这种物质的温度极高,达到了 150 MeV 上下(约 $1.8 \times 10^{12} \text{ K}$),比较粘稠,有点像液态。通过相对论能量的重离子碰撞,也可以产生各种高能粒子和超核。特别是通过Au-Au对撞,发现了反 ^4He 核——包含2个反质子和2个反中子的原子核,成为寻找反物质路上的重要里程碑。

中子引起的核反应:

1932年以前,科学家都以为原子核是由中子和电子组成的。在1932年,一个名叫卡德威克的物理学家用 α 粒子轰击铍时,探明有 ^{12}C 产生,但是“从碰撞过程中能量守恒和动量守恒来看,很难解释这一结果。如果还有另外一个质量数为1,电荷为0的产物——中子生成,困境就烟消云散了”。由此可知原子核是由质子和中子组成的。

由于中子不带电,因此,中子不仅可以在核上发生非弹性散射,同时,由于没有库伦散射,即使中子的能量非常低,也会引起核反应,如热中子——

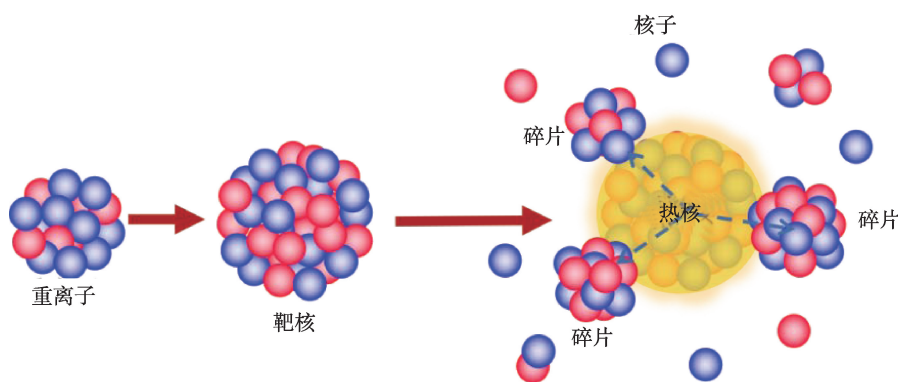


图22 “热”核裂成三个碎片过程的示意图

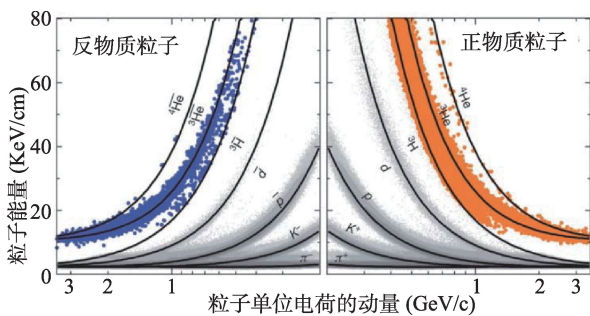


图23 反物质粒子谱

能量约0.025 eV(速度约2200 m/s),同样会引起一系列的核反应,如 ^{235}U 吸收热中子发生裂变,这是裂变反应堆的热量来源,发展出了今天的核电站。更高一些能量的中子就可以引起 ^{238}U 和其他重核的裂变,且随着中子能量的升高,重核吸收中子后裂变为质量近似相等的两个碎片的几率会更大(见图24)。中子与靶核碰撞时,产生复合核的截面与中子的能量有关。在中子能量低时,靶核吸收中子的截面与中子速度的倒数成正比;当中子能量相对较高时,靶核吸收中子的截面就等于中子看到的靶核的面积。

总之,原子核之间的碰撞,除了弹性散射外,可以引起各种各样的原子核反应,包括库伦激发、非弹性散射、核子转移、深部非弹性散射,以及复合核反应等。到底会发生哪种核反应,取决于反应系统的弹核与靶核的组合(包括它们的质量、结构和形状)、弹核入射能量、瞄准距离等因素。发生核反应后,会产生各种各样的反应产物,包括各种轻的粒子,如 γ 射线、中子、质子、氘核、氚核、 α 粒子,以及各种原子核。这些产物原子核中有缺中子的也有丰中子的不稳定原子核,有的还会(暂时)处于不同的自旋状态,甚至是非常高的自旋状态,随后通过发射 γ 射线回到其基态(能量最低状态)。通过对核反应产物的分布和性质,以及产物核性质的测量,可以判断原子核的内部结构和性质。例如,通过测量反应生成的高自旋状态原子核退激 γ 射线,可以得知原子核的内部结构,通过测量放射性原子核的放

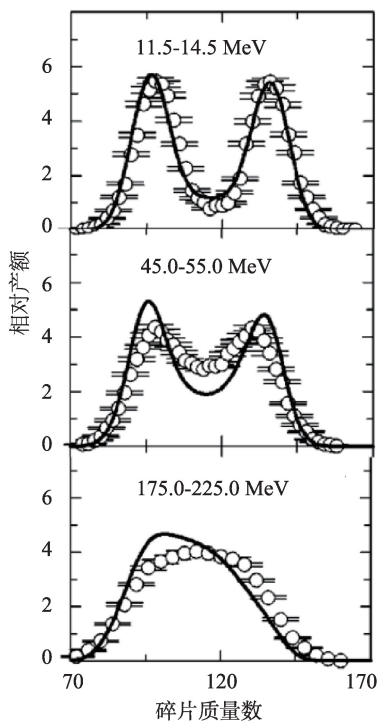


图24 高能中子诱发 ^{238}U 裂变碎片质量分布

射性也可得知它们的核性质。测量不同核反应的截面,特别是非常低能量的质子、 α 粒子和较轻的重离子与其他原子核,特别是非常缺中子和非常丰中子的原子核发生反应的概率,会为天体演化和其他学科的研究,特别是核技术应用提供必要的依据。

