

中子反应截面系统学研究的新进展

姚立山

(兰州大学原子核所)

摘要: 本文简要的介绍了中子反应截面系统学研究的发展概况及其最新进展, 并且讨论了在系统学研究中存在的问题。

一、引言

中子反应核数据是裂变、聚变堆设计中最重要的数据之一。在核工程建设、核技术开发以及基础理论研究中有着不可估量的作用。然而由于实验条件和技术的限制, 实验测量的数据远不能满足实际工作的需求。虽然按照一定的模型理论进行计算可以弥补, 但费时费力且又受到可靠性的限制。而中子反应截面的系统学研究为应用提供了较为简便和可靠的方法。

在轻核范围内, 由于其本身所具有的较强的核结构特性, 从现有的实验数据很难得出明显的系统学规律。因此, 本文将着重讨论中等和重质量核的系统学研究工作。

快中子可能引起的核反应过程包括: (n, γ) , $(n, n' \gamma)$, $(n, 2n)$, (n, p) , (n, d) , (n, t) , $(n, {}^3\text{He})$, (n, α) , $(n, 2p)$, (n, np) , $(n, n\alpha)$ 以及在重核情况下可能的 $(n, 3n)$ 和 (n, f) 等。上述反应在不同的靶核质量范围内, 其反应截面是不一样的, 例如在轻核时发射带电粒子是主要的; 而在中等和重质量核的情况下, 中子的发射则占绝对优势。对不同的反应来说, 情况也大不一样。 $(n, n' \gamma)$, $(n, 2n)$, (n, p) 和 (n, α) 反应较为强烈, 截面较大, 其次有 (n, d) , $(n, n' p)$, $(n, n' \alpha)$ 和 (n, γ) 反应, 较弱的有 (n, t) , $(n, {}^3\text{He})$ 和 $(n, 2p)$ 等。一般说来, 对较强的反应, 实验数据较多, 系统学研究相对来说也比较成熟

和可靠, 如 $(n, 2n)$, (n, p) 和 (n, α) 反应等。而对 (n, t) , (n, d) 反应等则研究较少, 因而预言结果的不确定性就较大。

至于微分截面的数据, 诸如发射粒子的角度和能量分布可以给出反应机制和核结构的极为有用的信息。但由于每个核都具有其本身固有的精细结构, 微分截面的系统学研究是非常困难的和具有极大的不确定性。因此, 一般情况下, 中子反应系统学研究仅限于积分数据的情况; 而对大批核素来说, 表现出平均效应。在寻找系统学规律时, 一般都是把积分截面表示为核的质量数 A , 电荷数 Z , 中子数 N , 过剩中子数 $(N-Z)$ 或相对过剩中子份额 $(N-Z)/A$ 的函数。但是, 应当指出的是, 即使是同一类型的反应, 如 (n, p) 反应中, 不同质量范围的各种靶核, 其反应能是不一样的, 甚至对于同一靶核从最轻同位素到最重的同位素截面也是变化的。很显然这是由于 Q 值效应及反应能不同所引起的。然而, 在大多数情况下, 这种效应被忽略掉, 最终仍可给出较好的系统学的经验公式。尽管如此, 利用系统学的方法仍然可以快速的预言未知核素的各种类型的反应截面, 这正是研究系统学规律的重要意义之所在。

二、 $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ 反应

$(n, 2n)$ 反应激发函数的系统学研究最初是由 Barr 等人^[1] 1961 年进行的。其后 Pearl-

stein^[2]在Barr^[1]工作的基础上做了进一步的改进和提高,提出了一套较完整、方便的计算公式,并且推广到(n,3n)反应阈以上。作者计算了A>30的22个核素的(n,2n)及(n,3n)反应截面,与实验数据比较得到了满意的结果。1975年Davey等人^[3]用核能级密度参数(a)和核温度(T)模型的公式对大量实验数据进行拟合得到a和T两个参数,从而找出(n,2n)反应截面的系统学规律。用这种方法,作者研究了A=12~238的61个核素的150组数据。同Pearlstein^[2]工作比较,该工作的特点是:归一化因子($\sigma_{n,m}/\sigma_{n,e}$)不是由理论公式而是直接由实验数据拟合得到,这增加了预言结果的可靠性。与此同时,Segev等人^[4]还利用核的蒸发模型研究了A>150的(n,2n),(n,3n)反应系统学,预言的 $\sigma_{n,2n}$ 是“纯净”的,而不像Pearlstein^[2]方法那样还须从计算的 $\sigma_{n,2n}$ 中扣除(n,3n)反应的贡献。

随着实验测量数据的不断发表和相继更新,核反应理论也逐渐完善。不少作者在考

虑统计理论的同时,还包括了平衡前发射的机制。其中,主要有Segev等人^[5],J.Zhang等人^[6]以及L.Yac等人^[7]的工作。这些作者都从不同的方面改进和发展了前人的工作,研究了(n,2n),(n,3n)激发函数的系统学规律性,给出了一套较好的经验参数,预言了一批核素的 $\sigma_{n,2n}$, $\sigma_{n,3n}$ 值,并与实验结果比较符合较好。

在入射中子能量较高的情况下,除了平衡前发射机制外,还必须考虑直接相互作用的影响。

关于14MeV单能点系统学研究的评述作者已另有文章^[8],这里不再赘述。

三、(n,p),(n, α)反应

(n,p),(n, α)反应的激发函数系统学研究较早的是1973年Pearlstein^[9]的工作。作者给出了Z=20~40范围内的经验公式:

$$\sigma_{n,p} = C_p S_p(E_n) \text{ 和 } \sigma_{n,\alpha} = C_\alpha S_\alpha(E_n) \quad (1)$$

$$\text{其中, } C_p(\text{mb}) = 1100\pi(0.12A^{1/3} + 0.21)^2 \exp\left[-34.8 \frac{N-Z}{A}\right] \quad (2)$$

$$C_\alpha(\text{mb}) = 400\pi(0.12A^{1/3} + 0.21)^2 \exp\left[-39.2 \frac{N-Z}{A}\right]$$

如前所述,Pearlstein的公式对实验数据的描述是比较粗糙的,尤其是公式中形状因子 S_p , S_α 完全由经验确定,无法从理论给予证明。此后较好的工作是赵志祥等人^[10]用包括平衡前发射在内的蒸发模型,在一定的近似条件下,给出了(n,q)反应的激发函数系统学规律:

$$\sigma_{n,q}(E_n) = C_q f(E_c^q, E_n) \quad (3)$$

(q=p,d,t,³He, α)

其中, E_c^q 表示库仑势垒的高度, C_q 正

比于 $\sigma_{n,q} + \sigma_{n,qn} + \sigma_{n,q2n} + \dots$ 最大值。在对大量实验数据拟合的基础上可以得到 E_c^q , C_q 与靶核的N,Z系统学规律。用这组公式作者预言的(n,q)反应的激发曲线无论在核素范围还是曲线的形状和绝对值方面都明显的好于Pearlstein^[9]结果。

14MeV中子引起的(n,p),(n, α)反应截面的系统学研究最具有代表性的是Levkovskii^[11]的工作。作者从统计理论模型出发建立了(n,p),(n, α)反应的系统学公式:

$$\sigma_{n,p}(\text{mb}) = 45.2(A^{1/3} + 1) \exp\left[-33 \frac{N-Z}{A}\right], A = 40 \sim 202$$

$$\sigma_{n,\alpha}(\text{mb}) = 18.1(A^{1/3} + 1) \exp\left[-33 \frac{N-Z}{A}\right], A = 30 \sim 150 \quad (4)$$

这就是著名的Levkovskii公式，这一组公式后来被广泛地应用着。

Kumabe等人^[12]重新分析了实验数据

$$\begin{aligned} \sigma_{n,p}(mb) &= 21.8A \exp\left[-34 \frac{(N-Z)}{A}\right], A=40\sim 62 \\ &0.75A^2 \exp\left[-43.2 \frac{(N-Z)}{A}\right], A=63\sim 89 \\ &0.75A^2 \exp\left[-45.0 \frac{(N-Z)}{A}\right], A=90\sim 160 \\ \sigma_{n,\alpha}(mb) &= 51.0A^{1/2} \exp\left[-30 \frac{(N-Z)}{A}\right], A=30\sim 60 \\ &55.0A^{1/2} \exp\left[-33 \frac{(N-Z)}{A}\right], A=61\sim 105 \\ &7.6 \times 10^{-4} A^3 \exp\left[-40 \frac{(N-Z)}{A}\right], A=106\sim 150 \end{aligned} \quad (5)$$

Kumabe的计算结果确实明显地改善了对实验数据的符合程度。

Lu等人^[13]对能级密度和阈漂移考虑了常温近似下的统计模型后，计算的14.4MeV(n,p)反应的 $\sigma_{n,p}$ 与实验值的偏差在20%以内，(n, α)反应在30%以内。类似的工作还有Bayhurst等人^[14]研究了靶核的奇偶效应后

$$\sigma_{n,p} = 107.98(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left[-36.749 \frac{(N-Z+1)}{A}\right] \quad (7)$$

指出，对⁴⁰Ca~²⁰⁹Bi的150个核素的计算结果表明这一公式在较宽的质量范围内好于以前可以与之比较的公式。这主要是由于采用(N-Z+1)/A参数后，一定程度上消除了反应的Q值、库仑势垒和核温度(或能级密度)的影响。

下面再着重地介绍一下Qaim等人^[17]的工作。Qaim等人对14MeV(n,p)反应的系统学研究做了大量的工作，并对实验数据进行 $\sigma_{n,p} \sim (N-Z)/A$ 描绘(图1)。从图中可看出， $\sigma_{n,p}$ 随(N-Z)/A的增加呈下降趋势，壳效应的影响极小或不存在。这与Chatterjee^[18]提出的有壳效应的结论是不一致的，Qaim认为这是受当时实验精度和数量限制所致。因此从图中的描绘可以得到所谓的“(N-Z)/A

后，对Levkovskii公式进行了修正，提出了新的形式：

指出这种效应是对能效应引起的。最近，Horibe^[15]又给出了更新的Levkovskii公式的变形形式用以计算²³⁸U裂变谱平均的(n,p)，(n, α)反应截面。而Tahar^[16]则利用(N-Z+1)/A代替不对称因子(N-Z)/A后给出了新的(n,p)反应截面公式：

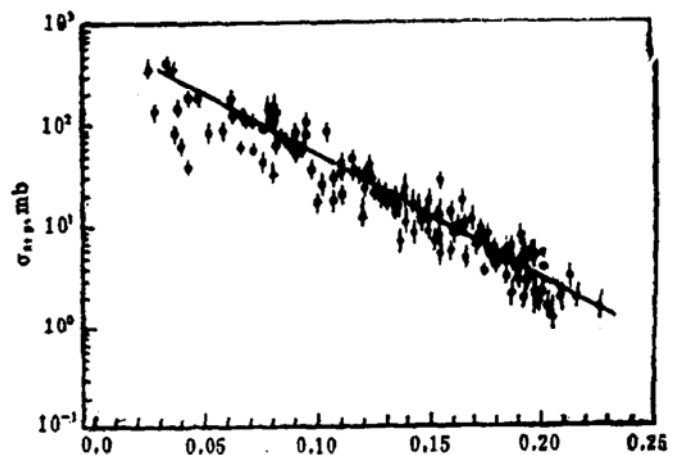


图1. $\sigma_{n,p} \sim (N-Z)/A$ 系统学关系
○ 幻质子数核, △ 幻中子数核, ● 其它核。
规律”。另外，作者还对 $\sigma_{n,p} \sim Z_R$ (剩余核电荷数)进行描绘，发现在 $Z_R=20$ 时，曲线有极大值，当 $Z \leq 20$ 时， $\sigma_{n,p}$ 随 Z_R 增加而上升，

但当 $Z_R > 20$ 时, 则随 Z_R 的增加而稳定下降。很显然, 这是库仑效应的结果, 它不仅对 (n, p) 反应而且在 (n, α) 反应的 $\sigma_{n, \alpha} \sim Z_R$ 描绘中也存在极大值, 只不过此时位于 $Z_R = 15$ 。 (n, p) 和 (n, α) 反应系统学研究中另一个重要的问题是所谓的同位素效应和奇偶特性, 前者是 Q 值不同引起的, 而后者则是由于核的对能效应的结果。

除此之外, 还有Eder^[10], Gardner^[20]和Pai^[21]等人的工作, 在此不一一叙述。

四、 (n, γ) , $(n, n' \gamma)$ 反应

一般地, 辐射俘获截面都是由 γ -谱积分得到。对质量数的描绘直到 $A \leq 80$ 都是显示出增加的趋势, 对 $A > 80$ 的核则截面几乎保持不变^[22]。1974年以来的测量结果使人们相信大多数核的 (n, γ) 截面在14MeV有 $\sigma_{n, \gamma} \lesssim 1\text{mb}$, 近几年没有新的系统学文章发表。

由于实验数据的缺乏, $(n, n' \gamma)$ 反应截面的系统学趋向尚未观察到。仅有的数据对 $(N-Z)/A$ 的描绘表明: 在开始增加之后, 截面几乎不变, 对整个中等和重质量范围的全部核素都是如此。

至于 $(n, n' \gamma)$ 过程中某些同质异能态的系统学研究, 找到的仅有Vonach^[23]一篇工作。

(n, γ) 反应的激发函数系统学研究尚未见诸报道, 其困难在于 (n, γ) 反应的机制比较复杂, 要用一个简单的核模型来描述从热能 $\sim 20\text{MeV}$ 激发函数的形状确实是一项比较困难的工作。

五、 (n, d) , $(n, n' p)$ 反应

对中等和重质量核的 (n, d) , $(n, n' p)$ 反应截面的测量主要是在西德的Julich实验室^[24]利用活化技术和美国的Livermore实验室^[25]用带电粒子探测技术进行的。活化法测量的是 (n, d) , $(n, n' p)$ 和 (n, pn) 过程的

总和, 总截面对 $(N-Z)/A$ 描绘由曲线A, B给出。实验点明显地落在两条不同的曲线上, 曲线A对应于靶核中最轻的同位素(缺中子同位素), 中子的分离能大于质子分离能($S_n > S_p$)。虽然实验点不多, 但下降趋势是明显的。过程中, $(n, n' p)$ 反应的贡献占优势。曲线A称缺中子稳定线。而曲线B($S_n < S_p$)则较详细地描述了反应的总过程的一般趋向, 称为丰中子稳定线。

根据 (n, d) 反应的Livermore实验结果^[25]和 (n, p) 趋向^[24], 不难看出, 发射质子的几率大于发射 d 粒子的几率, 而且 (n, d) 反应截面在整个质量范围内几乎没有变化。这是直接相互作用占主要地位的结果。

应当指出的是: 对 $(S_n > S_p)$ 的核, 其反应截面对聚变堆的结构材料中氢形成的计算是相当重要的。而在丰中子核, 氢产生的 $(n, n' p)$ 过程是很弱的, 主要贡献是 (n, p) 反应。

六、 $(n, x\alpha)$, $(n, n\alpha)$ 反应

测量 $(n, x\alpha)$ 反应截面的方法有三种: 带电粒子探测, 质谱仪和活化法。三种方法得到的结果基本一致^[26], α 谱积分^[26, 27, 28]及质谱仪法^[29-31]得到的 α 粒子发射总截面对 Z 的描绘见图2。为便于比较, 图中虚线还画出了活化法测量的纯 (n, α) 反应的趋势。很

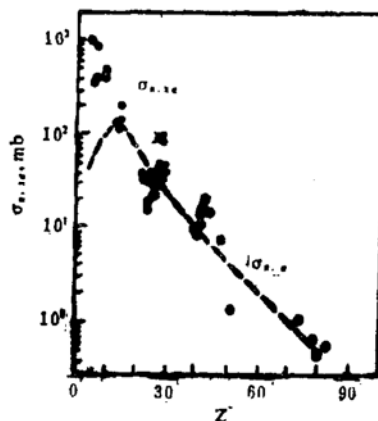


图2. 总的 $\sigma_{n, x\alpha} \sim Z$ 关系曲线
 ○ 质谱仪测量, ○ 带电粒子探测器测量,
 --- 活化法测量。

明显,对 $Z < 10$ 的轻核, $\sigma_{n,\alpha}$ 较小,几个 α 粒子的发射占主要地位,如 $(n, 2\alpha)$ 和多粒子破裂过程。而对 $Z \geq 10$,大部分测量的 $\sigma_{n,\alpha}$ 是由 (n, α) 反应过程贡献的。

对于 $(n, n\alpha)$ 反应则与 (n, α) 过程无关,可以用活化技术很好的进行测量,其系统学趋向如图3所示。由图可知, $(n, n\alpha)$ 反应对 $\sigma_{n,\alpha}$ 的贡献一般在 $10 \sim 15\%$,有时仅占 0.5% 。显然,在估计聚变堆结构材料中总的氦产生过程,除了 (n, α) 反应外,还需要考虑 $(n, n\alpha)$ 过程。不过与 $(n, n'p)$ 反应在总的氢产生所占的重要性相比, $(n, n\alpha)$ 过程显得并没有那么重要。

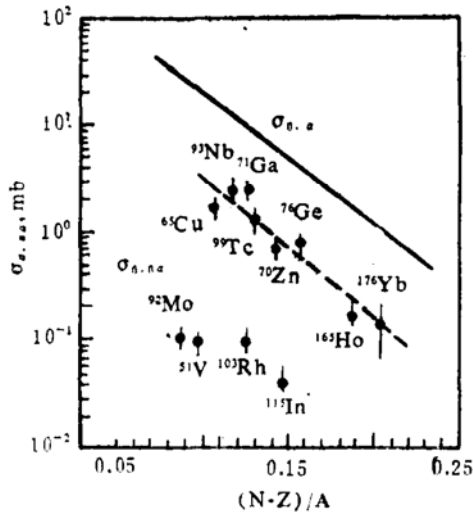


图3. $\sigma_{n,n\alpha} \sim (N-Z)/A$ 关系曲线

七、 (n, t) 反应

$14\text{MeV}(n, t)$ 反应是聚变堆研究中最重要核过程之一,主要用于氦燃料的再生。具有代表性的是Qaim^[32,33], Biro^[34], Sudar^[35], Diksic^[36]和Boedy^[37]等人的工作。

Qaim等人^[32,33]在自己测量工作的基础上研究了 $\sigma_{n,t} \sim Z$ 的关系^[38](图4)。从图中可以粗略的看出,对一些轻的核,如 ^8Li , $^{10,11}\text{B}$, ^{14}N 和 ^{18}F 等的 $\sigma_{n,t}$ 值很大,在mb数量级。这与轻核弥散的表面存在所谓的“粒子结团”有关。它由两类直接相互作用氦“敲出”和氦“拾起”过程产生,因此用一个简单

的系统学关系尚不能描述。在 $Z = 13 \sim 20$,对中等质量的核, $\sigma_{n,t}$ 仅在 μb 量级,按一般情况, $\sigma_{n,t}$ 随 Z 的增加(库仑势垒增高)应有减小的趋势。但实验表明,恰恰相反, $\sigma_{n,t}$ 却呈上升趋势(见图4)。这种现象Qaim解释为

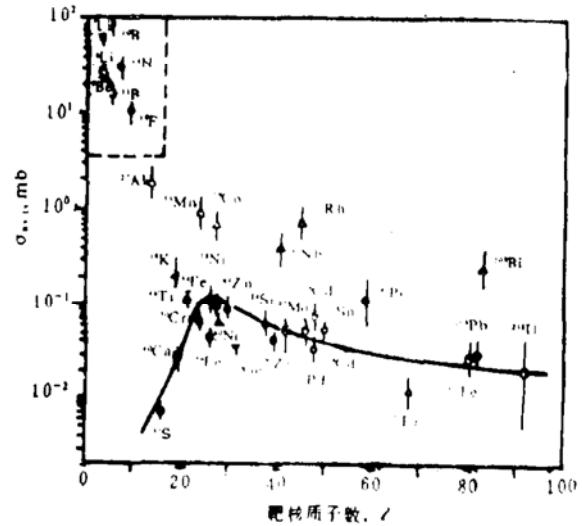


图4. $\sigma_{n,t} \sim Z$ 关系曲线

(n, t) 反应的复合核过程的低激发态被阻止后,核结构效应通过直接作用的激励而出现。大约在 $Z = 26$ 时, $\sigma_{n,t}$ 有极大值。Biro^[34]的研究也证实了峰值的存在。当 $Z > 26$ 时,由于发射中子的竞争, $\sigma_{n,t}$ 迅速下降,发射中子的过程成为最主要的。这后一部分可用系统学的方法 $\sigma_{n,t} \sim (N-Z)/A$ 关系来描述(图5)。图中示出了 $\sigma_{n,t}$ 的奇,偶核的不同趋向^[38]。这种现象不是一般的Q值效应,而被认为是Q值的对能效应的结果。当入射中子能量增高时,奇偶效应消失。Sudar^[35], Boedy^[37]的研究也得到了同样的结论。从图6的描绘中,对偶数核, Qaim^[38]给出系统学经验公式为:

$$\sigma_{n,t}(\mu\text{b}) = 4.52(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left[-10 \frac{(N-Z)}{A}\right] \quad (8)$$

应当指出的是在Qaim的工作中对 (n, t) 反应的系统学研究与 (n, p) , (n, α) 反应相似,忽略了Q值引起的同位素效应以及不同的反应能所造成的影响。

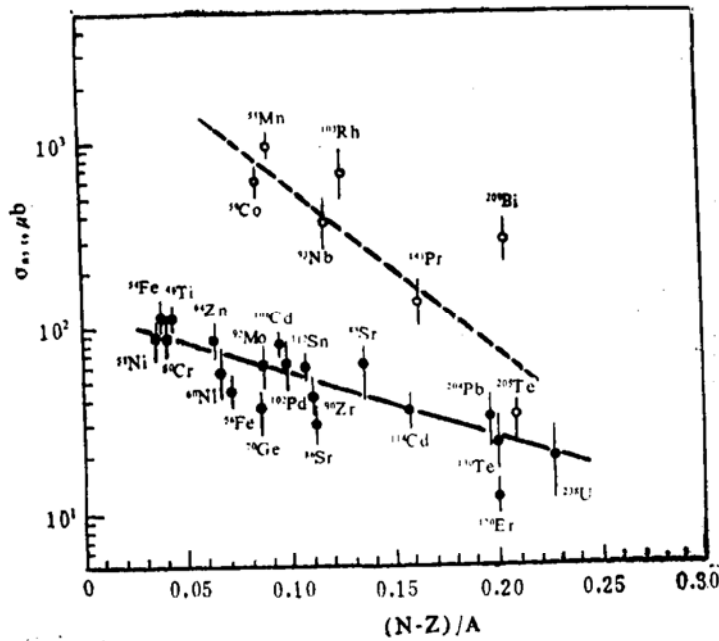


图5. $\sigma_{n,t} \sim (N-Z)/A$ 关系曲线
○ 奇数核, ● 偶数核。

从上述的 (n,t) 反应系统学研究还可得出这样一个结论: 氚的再生只有在最轻的元素才是有意义的, 像 ${}^6\text{Li}(n,t){}^4\text{He}$, ${}^7\text{Li}(n,n'){}^4\text{He}$ 反应。至今对这两个核的氚再生过程的 14MeV 的数据已经很好的知道^[39]。

八、 $(n, {}^3\text{He})$ 反应

目前这类反应的实验数据几乎全是活化方法测量的 14MeV 的数据, 主要的仍是 Qaim 等人^[38,40] 的工作。 $(n, {}^3\text{He})$ 反应截面的 $(N-Z)/A$ 系统学趋向如图 6 所示, Qaim 给出的经验公式为:

$$\sigma_{n, {}^3\text{He}}(\mu\text{b}) = 0.54(A^{1/3} + 1)^2 \exp\left[-10 \frac{N-Z}{A}\right] \quad (9)$$

从图可看出反应截面的 $(N-Z)/A$ 关系与 (n,t) 反应相似都比 (n,p) 反应要弱得多, 但仍随 $(N-Z)/A$ 的增加而减少。从图 6 与图 5 的比较可知 $\sigma_{n, {}^3\text{He}}$ 差不多要比 $\sigma_{n,t}$ 小 1~3 个数量级, 这表明 $(n, {}^3\text{He})$ 反应可能还包含着更直接的作用过程。但是, 由于活化测量存在

两个不足之处, 其一是 $(n, {}^3\text{He})$ 反应与 $(n, 2pn)$, $(n, n' 2p)$, (n, pnp) 和 (n, dp) 过程不能分开而导致相同的产额, 其二是活化法不可能得到角分布和能谱的知识, 因此这类反应的机制难于弄清楚。一般地认为 $(n, {}^3\text{He})$ 反应过程完全由库仑势垒效应控制着, 发射 ${}^3\text{He}$ 粒子的复合核的低激发态被阻止后, 其贡献可能来自直接相互作用。而 Qaim^[38] 更倾向于 ${}^3\text{He}$ 的“敲出”和 $2p$ 的“拾起”过程, 对 $(n, {}^3\text{He})$ 反应来说, 直接的“敲出”和“拾起”过程比 (n,t) 反应更为强烈。Diksic^[38] 和 Miljanic^[41] 等人分别研究了 14MeV

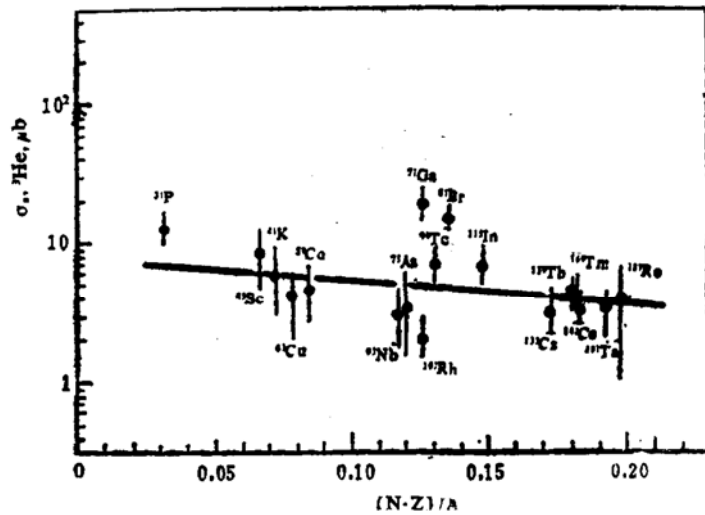


图6. $\sigma_{n, {}^3\text{He}} \sim (N-Z)/A$ 关系曲线

$(n, {}^3\text{He})$ 反应的系统学趋向和反应机制得出了与 Qaim 完全一致的结论。

结束语

中子反应系统学研究是对实验测量的一种很好的补充, 可为聚变堆的研制提供一定范围内的可靠数据。但是在系统学研究中, 目前尚存在一些问题还有待进一步研究。

1. 除上述介绍的反应截面的系统学工作外, 还有一些在此基础上发展起来的同质异能态截面比系统学, 裂变性质研究的系统

学, 辐射宽度系统学, γ 强度函数系统学, 能级密度参数系统学以及光学模型参数系统学等都属于中子反应系统学的研究范围。

2. 与 $(n, 2n)$, (n, p) , (n, α) 反应相比, (n, t) , $(n, {}^3\text{He})$ 反应的实验数据较少, 因此预言截面的不确定性很大。进一步的实验测量, 特别是角分布和能谱的测量对研究这类反应的作用机制, 提高预言的可靠性是系统学研究的一个很重要方面。

3. 进一步研究出射带电粒子的 (n, p) , (n, α) , (n, t) , $(n, {}^3\text{He})$ 等反应的激发函数系统学, 扩充核素种类、扩展能量范围, 使系统学研究给出更多、更有用的数据信息。

4. 为了进一步证明 $(n, 2n)$ 反应中的中子壳效应, (n, p) 和 (n, α) 反应中质子壳效应的存在与否以及系统学研究的 $(N-Z)/A$ 规律中的奇偶效应, 同位素效应和不同反应能的 Q 值效应的影响等都需要大量的更精确的实验数据。

5. 发射中子的系统学的理论基础是包括蒸发模型在内的平衡前发射机制, 而对发射带电粒子的系统学研究还必须包括直接作用的各种过程在内。只有这样才能更好的预言未知核素的各种反应的截面值。

参考文献

1. D. W. Barr et al., Phys. Rev., 123 (1961)859
2. S. Pearlstein, Nucl. Sci. Eng., 23 (1965)238
3. W. G. Davey et al., ANL-75-34(1975)
4. M. Segev et al., Ann. of Nucl. Energ., 5(1978)239
5. M. Segev et al., Ann. of Nucl. Energ., 7(1980)577
6. J. Zhang(张紧)et al., Proc. Int. Conf. on Nucl. Data for Basic and Applied Science, Santa Fe, New Mexico, U. S. A.(1985)1611
7. L. Yao(姚立山)et al., Proc. Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Techn., Mito, Japan(1988)639
8. 姚立山等., 核物理动态, 4(2)(1987)39
9. S. Pearlstein., J. Nucl. Energ., 27 (1973)81
10. 赵志祥等, 原子核物理, 10(1988)337
11. V. N. Levkovskii., Soviet Physics-JE-TP, 4(1957)291
12. I. Kumabe et al., J. Nucl. Sci. and Techn., 24(1987)839
13. W. Lu et al., Phys. Rev., C4(1971)1173
14. B. P. Bayhurst et al., J. Inorg. Nucl. Chem., 23(1961)173
15. O. Horibe, Proc. Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Techn., Mito, Japan (1988)493
16. S. A. Tahar, J. of Phys., G13(L)(1987)121
17. S. M. Qaim et al., Z. Naturf., 25a (1970)1977
Nucl. Phys., A242(1975)317
Nucl. Phys., A283(1977)269
18. A. Chatterjee, Nucl. Phys., 60(1964)273
19. G. Eder et al., Z. Physik, 253(1972)335
20. D. G. Gardner et al., Nucl. Phys., A96(1967)121
21. H. L. Pai et al., Can. J. Phys., 44(1966)2337
22. F. Cvelbar et al., Nucl. Phys., A158 (1970)251
23. H. K. Vonach, IAEA Advisory Group Meeting on Nucl. Data for Fusion Reactor Techn., Gaussig/Dresden, DDR(1986)
24. S. M. Qaim, Nucl. Phys., A382(1982)255
25. S. M. Qaim, Nucl. Phys., A458(1986)237
26. S. M. Grimes et al., Phys. Rev., C19 (1979)2127
Phys. Rev., C23 (1981)700
27. A. Paulsen et al., Nucl. Sci. Eng., 78 (1981)377

1988年世界核电发展报告

朱维和

(秦山核电公司)

一、世界核电发展现状

1. 1988年世界核电统计

据西德《原子经济与原子技术》1989年第3期统计,至1988年底世界上有26个国家(地区)的414台核电机组并网发电,总装机容量为331094MWe*,有22个国家正在建造137台核电机组,总装机容量为126809MWe,有8个国家已订货25台核电机组,总装机容量为24421MWe,三项合计为576台核电机组,总装机容量为482324MWe。

1988年全世界有7个国家的12台新核电机组(总净装机容量为11500MWe)并网发电,其中英国3台,美国、法国、西德各2台,

*IAEA统计为429座堆,总净装机容量为310812MWe。

28. R. Fischer et al., Phys. Rev., C34 (1986)460
29. H. Farrar et al., Trans. Am. Nucl. Soc., 28(1978)197
30. D. W. Kneff et al., J. Nucl. Materials, 103+134(1981)1451
31. D. W. Kneff et al., Nucl. Sci. Eng., 92(1986)491
32. S. M. Qaim et al., J. Inorg. Nucl. Chem., 35(1973)19
33. S. M. Qaim et al., Nucl. Phys., A257 (1976)233
34. T. Biro et al., J. Inorg. Nucl. Chem., 37(1975)1583
35. S. Sudar et al., Nucl. Phys., A319

苏联、西班牙、南朝鲜各1台。这12座动力堆中有9座压水堆,3座气冷堆。1988年世界上只有日本新开建3台核电机组(均为沸水堆)(总装机容量为2777MWe)。

至1988年底运行的核电机组和装机容量最多的国家是美国,为109台,102298MWe;在建的核电机组和装机容量最多的国家是苏联为43台,44116MWe。

现已建成的世界上最大的多机组核电站是日本的福岛(Fukushima),共有10台沸水堆机组,总装机容量为9096MWe;现已建成的世界上装机容量最大的核电机组是苏联的Ignalina,为1500MWe的轻水石墨堆。

全世界核电站中采用最广泛的堆型是压水堆。在总计576台核电机组中压水堆有343座(台60%),总装机容量为312417MWe(占65%)。

据统计,现在世界上有12个国家的33家(1979)157

36. M. Diksic et al., J. Inorg. Nucl. Chem., 36(1974)477
37. Z. T. Boedy et al., Proc. Int. Conf. on Nucl. Data for Sci. and Techn., Antwerp, (1982)368
38. S. M. Qaim, Nucl. Phys., A438(1985)384
39. S. M. Qaim, J. Inorg. Nucl. Chem., 36(1974)239
40. S. M. Qaim, Radichimica Acta, 25 (1978)13
41. D. Milganic et al., Nucl. Phys., A419 (1984)351