

14MeV中子(n, 2n)反应截面系统学研究回顾与展望

姚立山

蔡敦九

(兰州大学·原子核研究所)

(中国原子能科学研究院)

摘要: 本文叙述了14MeV中子(n, 2n)反应截面系统学研究的现状及发展, 报告了几种系统学研究的方法, 最后提出了今后的要求。

一、概述

众所周知, 14MeV中子(n, 2n)反应截面是核科学与工程及聚变研究中的重要参数之一, 它直接影响着聚变、裂变的源中子倍增; 易裂变材料的再生; 裂变中子的分布等。对聚变、裂变堆中中子增殖反应及结构材料的性能分析都起着重要作用。

由于14MeV单能中子在实验上易于获

得, (n, 2n)反应的激发曲线在该能点有较大数值, 所以相对说来14MeV中子(n, 2n)反应截面的实验数据不仅数量大、而且精度高, 有些还可作为“标准”截面使用。因此, 14MeV(n, 2n)反应受到人们的重视, 这方面工作近些年来急剧增加。然而由于实验条件、技术的限制以及衰变纲图、标准截面等因素的影响, 一些核的(n, 2n)反应截面测量结果相差还很大。如Misra⁽¹⁾对¹⁸¹Ta(n, 2n)¹⁸⁰Ta的测量结果为990 ± 47mb, 而一年之后,

消除此漏后, 真空室点漏率将会符合设计指标 $5 \cdot 10^{-6} \text{PaM}^3\text{S}^{-1}$ 。

抽空中测量了真空室各部分受力后的应力与应变分布。大部分应力水平较低, 多为 $5-6 \text{Kg} \cdot \text{mm}^{-2}$, 局部最大应力 $10 \text{Kg} \cdot \text{mm}^{-2}$ 。膜盖密封边框中部变形较大约1.5mm, 其它密封面变形较小, 结果与计算值相同, 表明真空室力学行为稳定。

九、结论

包括八块极芯在内, 真空室的气载占系统总气载量的82%, 只用了四台低温泵就获得了预期的真空度。将来腔体及注入引出部件装入后, 启动八台低温泵就能满足加速重离子束流的要求。初次抽空结果表明风华厂的焊接、加工质量优良, 也说明我国设计、建造大型复杂超高真空系统的工艺达到了世

界水平。例如可与80年代初建成的法国国家大重离子加速器相媲美。已经采用的一些新设计和新工艺, 如大型金属密封和材料表面处理技术等, 有在国内推广其应用的意义。

此项工作得到了国内许多单位的大力支持。近代物理所真空工程室的同志仍自始至终, 精心设计, 严格把关, 为之付出了艰辛劳动。风华机器厂姚国详副总师, 王兴宝总机械师和诸宝飞工程师, 在现场组织施工, 攻克技术难关上作出了积极贡献。上海化工学院化机教研室王永昌、张东山、黄震尧和近物所自控室张兴令、沈菊生、王君叶等同志完成了多项有限元法结构力学计算。欧洲联合核子中心的Feldmann和法国国家大重离子加速器的Batz先生在设计中曾给予很多帮助。

Ryues⁽⁴⁾以同样的测量获得 $1307 \pm 40 \text{mb}$ 。近几年，测量精度及系统误差虽有提高，但仍满足不了实际需要。又因从阈能到 20MeV 系统的实验测量数据不多，一般弥补的办法是靠核反应模型理论进行计算。这种靠调节参数使之与选择的实验能点截面值相符合的方法，一般在有实验点的能段可以较好符合，外推则随意性较大，对轻核则效果更差。近二十年来科学家提出了数据的系统学研究，即对大量核素的实验数据进行分析 and 评价，给出这些核素反应截面的系统学规律即找出截面与能量(E)原子核质量数(A)和原子序数(Z)等的关系。用拟合的办法给出一组经验参数，反过来用这组参数可以预言没有测量的核的截面值。一些实验工作者利用现有的实验数据，对(n, 2n), (n, 3n), (n, p), (n, α)……等反应给出了一套经验公式。借用这些经验公式可方便地算出一些尚未测量的数据，供实际应用时参考。这种方法预言值与实验值的偏离一般在10~15%之内。

早期的(n, 2n)系统学工作是1961年Barr⁽⁵⁾作的。真有实用价值的则是Pearlstein⁽⁴⁾所给出的系统学公式。其计算值与实验结果符合程度在当时算是好的。其后，Qaim⁽⁶⁾, Lu⁽⁶⁾, Kondaiah⁽⁷⁾及Segev⁽⁸⁾等人都作了大量的工作，使系统学研究内容更加充实和发展。

国内一些单位近几年来，对反应截面系统学研究也逐渐开展起来并作了一些工作⁽⁹⁻¹¹⁾。

在(n, 2n)反应截面系统学研究中，对系统学行为有不同的描述方法。有的以原子核质量数A作为描绘参数，有的则以(N-Z)作为参数，更多的则以不对称参数(N-Z)/A描述。在进行参数描绘中有的认为在满中子壳层附近有“壳效应”存在，有的认为这种效应不明显或根本不存在。这些看出还有待实验测量去进一步验证。

由于中子核反应没有库仑作用，实验和

数学处理都比较方便。因此这方面的工作开展较早、较多。入射中子与靶核形成复合核后，余核的衰变是多通道的，而随中子能量增加而增加。据估计⁽¹²⁾在0~20MeV能量范围内将有近20种核反应可能发生(表1)。在 高能时，还发生平衡前发射(或称预平衡发射)。目前仅对(n, 2n), (n, 3n)和(n, p)反应研究较多，其余反应道的系统学研究工作刚刚开始。限于篇幅本文仅就14MeV(n, 2n)反应截面系统学研究方法、现状及进展作以概括性介绍。

表1 <20MeV中子可能引起的核反应
N-2 N-1 N N+1

Z	n, 3n	n, 2n	n, n	n, γ
Z-1	n, nt	n, t n, nd n, tn	n, d n, np n, pn	n, p
Z-2	n, n α n, an	n, α n, ^3He n, n ^3He	n, ^3He n, dp n, pd	

二、系统学研究的几种方法

如前所述，系统学研究主要是寻找反应截面与原子核本身的属性A、N、Z等之间的相互关系，因此按照其不同组合大致可分为三种类型。

1. 反应截面与质量数A的关系

1965年Bormann⁽¹³⁾把靶核按照质子数的奇偶性分为两大类，并对质量数A进行描绘，发现在偶质子核时，中子数为N=20, 50，以及奇质子核时，中子数为N=20反应截面有极小值；而在偶质子核时，中子数为N=82, 126以及奇质子核时，中子数为N=28, 50, 82, 126截面又呈现出极大值。这些极值都是叠加在截面对A描绘的总趋向上，构成了某种结构，即所谓的壳效应。这种现象被解释为靶核Q值的差异及余核能级密度具有壳效应的结果。直到1969年Bormann和Lammers⁽¹⁴⁾又重新研究了这种现象时指出：若用相

同的反应能 E_R ($E_R = E_n - E_{th}$) 而不是相同入射中子能量 E_n 的测量值时, 对 $E_R = 3, 6\text{MeV}$ 两种情况的 $(n, 2n)$ 反应进行研究未发现壳效存在, 其理由是使用反应能这一参量时, 实际上避开了 Q 的影响。在这方面, Chatterjee⁽¹⁵⁾ Moretto⁽¹⁶⁾ 及文献[17]也从不同方面研究了系统学行为得出了与 Bormann 早期工作⁽¹³⁾ 相同的结论。应当提到的是 Strohal⁽¹⁸⁾ 把靶核中中子数 N 作为描绘参数时, 在 $N = 50$ 时反应截面也出现极值, 现出极强的壳效应特征。

但是, Bormann 的工作⁽¹³⁾ 在当时并未引起人们的极大兴趣。似乎一个重要原因是把 A 作为系统学参数时忽略了中子在靶核中所占相对份额的效应, 壳效应现象又给系统学研究的数学处理带来了较大的困难。而采用反应能 (E_R) 的方法则要求入射中子能量 E_n ($E_n = E_R + E_{th}$) 随反应阈能 E_{th} 在较大范围内改变, 这给实验工作又带来了更大的困难。事实上, Hill⁽¹⁹⁾ 对 Bormann 的原始实验数据重新进行了分析、处理, 并用不对称参数 (或称相对过剩中子份额) $(N-Z)/A$ 作为描绘参数对 $(n, 2n)$ 截面进行描绘, 得到了相反的结论。这说明在系统学研究中, 没有也无必要把靶核按质子数的奇、偶属性分类, 也无明显的壳效应存在 (图1)。在稍后的许多研究中都支持了 Hill 的这一结论。

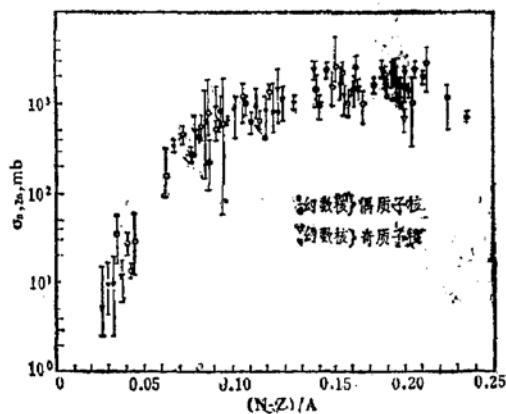


图1. $\sigma_{n,2n} \sim (N-Z)/A$ 的描绘关系⁽¹⁹⁾

2. 反应截面与过剩中子数 $(N-Z)$ 的关系

1966年 Csikai⁽²⁰⁾ 分析了该实验室所测量的一组 $14\text{MeV}(n, 2n)$ 反应截面数据, 认为反应 Q 值是一个不确定因素, 应该用反应能代替入射中子能量。Csikai 取 $E_R = 3.0\text{MeV}$ 时, 对 $(N-Z)$ 的描绘中发现对相同中子数 N 的核的反应截面变化非常显著, 此时不管 Z 是奇数还是偶数, 其描绘总是直线性的。对不同的 N 值, 这些直线都是相互平行或接近平行 ($N = 28$ 除外)。也未观察到明显的壳效应。图2示出了所谓的 Csikai 趋向。利用这种趋向可以给出计算 14MeV 中子 $(n, 2n)$ 反应

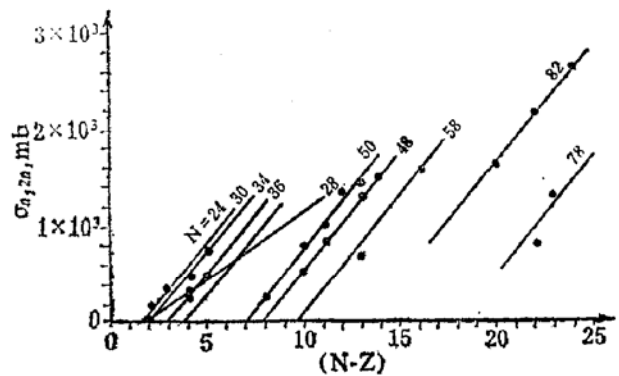


图2 $\sigma_{n,2n} \sim (N-Z)$ 描绘关系⁽²⁰⁾

截面的系统学公式:

$$\sigma(Z \pm \Delta Z, N) = [\sigma(Z, N) \mp mE_R \Delta Z] \quad (1)$$

与文献[20]的方法相同, Chatterjee⁽¹⁵⁾ 研究了 $E_R = 3.0, 6.0\text{MeV}$ 两组反应能时 $(n, 2n)$ 反应截面与 $(N-Z)$ 的描绘关系, 得出了具有特征性的三种趋向: i) 总趋向是反应截面随 $(N-Z)$ 的增加而迅速上升, 然后变得缓慢而平坦; ii) 在总趋向上叠加有同位素趋向和同中子异位素趋向 (Csikai 趋向); iii) 壳层效应, 表现为对同中子异位素趋向的偏离。Chatterjee 研究得到的总趋向近似的数学表达式为:

$$\sigma_{n,2n} = 45.2 (A^{1/3} + 1) \exp[-0.50(N-Z)/A] \quad (2)$$

对其它两种趋向核截面的计算作者也给出详尽的分析及繁冗的数学表达式, 并重新计算了 $(n, 2n)$ 反应截面, 除轻核差别较大外, 预言的特性和实验观察到的基本一致。

3. 反应截面与不对称参数 $(N-Z)/A$ 的关系

目前,在14MeV中子 $(n, 2n)$ 反应截面的系统学研究中,这种方法几乎被普遍采用。1961年美国LASL的Barr⁽³⁾对15个核素的截面实验数据进行分析后,得出总的中子发射截面 $(\sigma_{n,M})$ 与去弹性散射截面 (σ_{ne}) 之比随 $(N-Z)/A$ 的变化服从图3所示的指数关系,即:

$$\sigma_{n,M}/\sigma_{ne} = 1 - K \exp[-m(N-Z)/A] \quad (3)$$
经验参数k, m可通过实验数据的最小二乘拟合得到。Barr给出的值是 $K = 1.754$, $m = 18.14$ 。

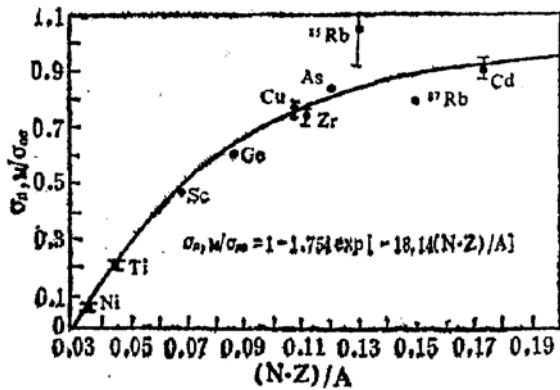


图3 $\sigma_{n,M}/\sigma_{ne} \sim (N-Z)/A$ 描绘关系线⁽³⁾

Pearstein⁽⁴⁾在Barr工作的基础上,从复合核统计模型的理论出发,假定入射中子与靶核形成复合核发射第一个中子后,余核的激发能仍大于靶核最后一个中子的分离能时,则必然还要发射第二个中子,其几率与

总的中子发射几率比值为:

$$\sigma_{n,2n}/\sigma_{n,M} = \frac{\int_0^{E_n - B_1} \varepsilon \sigma_c(E_n) \exp[4\alpha(E_n - \varepsilon)]^{1/2} d\varepsilon}{\int_0^{E_n} \varepsilon \sigma_c(E_n) \exp[4\alpha(E_n - \varepsilon)]^{1/2} d\varepsilon} \quad (4)$$

对14MeV中子 $\sigma_c =$ 常数, 比值可由中子分离能 B_1 和能级密度参数 α 所决定的积分求得。这样 $\sigma_{n,2n}$ 可表述成如下形式:

$$\sigma_{n,2n} = \sigma_{ne} \cdot \sigma_{n,M}/\sigma_{ne} \cdot \sigma_{n,2n}/\sigma_{n,M} \quad (5)$$

这里:去弹性散射截面,

$$\sigma_{ne} = \pi(0.12A^{1/3} + 0.21)^2 \quad (6)$$

$\sigma_{n,M}/\sigma_{ne}$ 由Barr所给K, m参数得到。

Pearstein利用这一套系统学方法所预言的截面值和实验结果达到满意的符合。

这种方法由于公式简单、明瞭、易于计算,所以目前得到了普遍的应用。许多作者^(5-7, 9, 22-24)都把这一公式作为系统学描述的基本形式。1973年Body⁽²⁵⁾还利用 $(N \sim Z)$ 关系系统学计算了137个核素的 $(n, 2n)$ 反应截面并给出了14.7MeV的推荐值。Lu⁽²⁶⁾在研究反应截面系统学的同时还把靶核(即发射一个中子后的余核)最后一个中子的分离能 B_1 相对 $(N-Z)/A$ 进行描绘,也显出一条比较光滑的曲线。这表明把 $(N-Z)/A$ 作为 $\sigma_{n,2n}$ 的描绘参数,似乎是直接与靶核的最后一个中子分离能相对应的。显然这一结论有助于消除系统学研究中的奇、偶效应和Q值效应。因此在系统学研究中,利用截面值对

表2 几组k, m参数的比较:

参数 作者、文献	K	m	$(N-Z)/A$ 范围
Barr(61) ⁽³⁾	1.754	18.14	0.03~0.20
Lu(70) ⁽⁶⁾	1.8124	12.99	0.08~0.21
Kondaiah(74) ⁽⁷⁾	1.365 ± 0.04	10.605 ± 0.43	0.03~0.22
Yao(85) ⁽⁹⁾	1.362	9.836	0.03~0.22
*Hankla(72) ⁽²²⁾	11.5	32.5	

$(N-Z)/A$ 的描绘是对 $(n, 2n)$ 反应截面的一个比较成功的近似。然而在具体问题的处理上,不同作者之间的差别仅在于如何利用最新的,精度更高的实验测量结果重新给出一套 k, m 参数,以达到提高预言值的精度和可靠性的目的。表2.给出了几组 k, m 参数比较。或者作出某些修正和改进使之更加充实、完善。例如Gilbert⁽²⁷⁾考虑了 $(n, 2n)$ 阈附近与之竞争的 $(n, n' \gamma)$ 反应的影响,提出了有效阈能的假定,认为实际的阈能应比理论给出的高0.5MeV,用校正后阈能重新计算,结果稍有改进,但不明显。Sigg⁽²³⁾研究了Lu⁽²⁶⁾的 $(n, 2n)$ 反应截面计算公式:

$$61.6(1 + A^{1/3})^2 \times \{1 - 1.319 \exp[-8.744(N-Z)/A]\} \quad (7)$$

发现偏离较大的计算结果是具有较大中子分离能或较高 Q 值的靶核。作者引入了阈能修正因子并考虑了核半径的影响之后,

$\sigma_{n, 2n}/\sigma_{ne} = \{1 + 11.5 \exp[32.5(N-Z)/A]\}^{-1}$ 用修正后的截面值 $\sigma_{n, 2n}$ 对不对称参数进行描绘使原来由于阈能较高而偏离较大($\sim 20\%$)的截面也处于描绘曲线的误差之内。

1971年Jeki⁽²⁸⁾综合了几种研究方法,既使用相同的反应能($E_R = 3.0\text{MeV}$)又用不对称参数 $(N-Z)/A$ 进行描绘,最后给出唯象的 $(n, 2n)$ 反应截面计算公式:

$$\sigma_{n, 2n} = \{1 - C_1(1 + A^{1/3}) \exp[-C_2(N-Z)/A]\} \cdot C_3 \quad (8)$$

据报道所得结果与Pearlstein的基本一致。

4. 反应截面与恒温模型参数 T 的关系

1975年, Dauey⁽²⁹⁾从核反应蒸发理论出发,利用恒温模型公式:

$$\sigma_{n, 2n} = \sigma_{a, sym} \left[1 - \left(1 + \frac{E_n - B_1}{T} \right) \exp \left(- \frac{E_n - B_1}{T} \right) \right] \quad (9)$$

和核能级密度模型公式:

$$\sigma_{n, 2n} = \sigma_{a, sym} \left[1 - \left(1 + \frac{E_n - B_1}{(E_n/\alpha)^{1/2}} \right) \right]$$

$$\exp \left(- \frac{E_n - B_1}{(E_n/\alpha)^{1/2}} \right) \quad (10)$$

在(9)和(10)式中, $(n, 2n)$ 反应的渐近截面 $\sigma_{a, sym}$ 和核温度 T 、能级密度参数 α 可分别由实验数据的拟合得到。利用 σ_{ne} 实验数据的评价值即可得到 $\sigma_{a, sym}/\sigma_{ne} \sim T$ 和 $\sigma_{a, sym}/\sigma_{ne} \sim \alpha$ 的两组描绘。这样,由公式(5)可计算 $(n, 2n)$ 反应截面。同pearlstein方法比较,恒温模型的方法优点是无须依靠理论公式计算 $\sigma_{n, m}/\sigma_{ne}$,而直接从拟合现有实验数据得到。Dauey研究结果表明,核温度 T 是一个较好的参数,其计算结果对奇一偶核和偶偶核没有多大差别,说明不存在壳效应。张紧⁽¹⁰⁾的工作在恒温模型系统学研究的基础上又有新的进展,这点将在本文下节谈到。

另外, Segev⁽⁸⁾利用核蒸发模型还研究了 $A > 150$ 时 $(n, 2n), (n, 3n)$ 反应的系统学。在忽略掉带电粒子的竞争后,仅考虑中子的发射时,可得一组简化的系统学计算公式,称为Segev公式。应用这一公式可以较好地描述 $(n, 2n), (n, 3n)$ 截面在 σ_{ne} 中所占分支比的系统学规律,结合已知的 σ_{ne} 随 A 变化的拟合曲线,可以求出14MeV $(n, 2n), (n, 3n)$ 反应截面随 A, Z 变化的系统学规律。用这组公式计算的 $\sigma_{n, 2n}$ 是“纯净”的双中子发射截面,而不象Pearlstein公式中还需扣除 $(n, 3n)$ 反应的贡献,这是Segev公式中一个显著优点。我们⁽¹¹⁾用文献(9)的结果在Segev方法的基础上对 $(n, 2n), (n, 3n)$ 截面重新进行计算,并与pearlstein的结果比较,得到了一致的结论。

三、目前现状和发展趋势

在过去20年间,系统学局限于14MeV中子的 $(n, 2n)$ 反应(与实验测量情况有关),但在使用系统学参数方面还存在不同的看法,对于系统学中是否存在有中子壳效应认识也不一致。现在,基本上倾向于把不对称参数 $(N-Z)/A$ 作为系统学描述参数,在某种程

度上可以消除 $(n, 2n)$ 反应阈及奇偶效应的影响。另外, $(N-Z)/A$ 作为描述参数后, 在 $\sigma_{n,2n} \sim (N-Z)/A$ 的描绘曲线上显不出某种结构, 是一条比较光滑的曲线, 澄清壳效应的不同观点。同时这样之后使得问题的处理变得简单、易行, 依据系统学公式方便的算出一些核的 $(n, 2n)$ 反应截面。但是, 随实验技术的发展, 较宽能区测量数据慢慢增多, 不少作者^(8, 10, 12)把入射中子能量 (E_n) 也作为系统学参数, 研究从阈能到 20MeV 甚至更高能区的系统学行为。这不仅扩展了系统学研究范围而且适应了核数据评价对能区的要求。

在稍早的工作中, 为了研究方便而忽略了 $(n, 3n)$ 反应的贡献。事实上对某些核, 在 14MeV 中子入射能量下, 出射第二个中子后还有可能发射第三个中子, 因此在公式(4)中还必须扣除 $\sigma_{n,3n}$ 的贡献。此后, 1973年 Pearlstein 报道了 $(n, 3n)$ 反应截面的系统学计算公式⁽¹²⁾, 在此基础上关于 $(n, 3n)$ 反应的系统学研究才逐渐增多起来⁽⁸⁻¹⁰⁾。

入射中子与靶核作用可以形成复合核再通过蒸发中子而衰变, 也可以在未形成复合核前就发射中子称平衡前发射或预平衡发射。显而易见, $(n, 2n)$ 反应截面的系统学研究中也应考虑平衡前发射的影响。目前这方面研究工作主要有张紧⁽¹⁰⁾, Segeu⁽³⁰⁾, 和 Chatterjee⁽³¹⁾ 等人的工作。张紧等人的工作把中子能区一直扩展到 30MeV, 在应用恒温蒸发模型研究 $(n, 2n)$, $(n, 3n)$ 反应截面系统学特性的同时还考虑了平衡前发射的影响, 即引进了包括平衡前发射的蒸发模型, 作适当简化处理后进行系统学描述。这对前人工作是一个很好的改进, 对数据做了更精确的预言。

除了发射中子的系统学行为研究外, 对出射带电粒子的系统学行为研究也已经开展起来, 利用 $(n, 2n)$ 反应类似的研究方法, 也可以得到带电粒子道的系统学公式, 本文不再详述。当前一个值得注意的趋势是: 对各种反应道系统学预言的截面之和可与去弹

性散射截面实验数据评价值进行比较, 根据其偏离程度可检验各种反应道系统学研究理论的可靠性⁽³²⁾ (图 4)。这似乎也是今后系统学研究发展的一个方向。

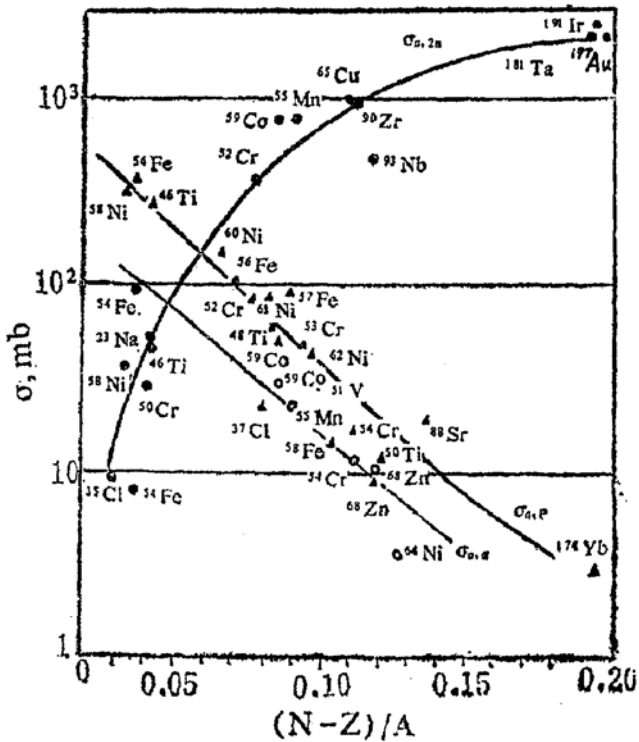


图4 $(n, 2n)$, (n, p) , (n, α) ...对 $(N-Z)/A$ 描绘关系⁽³²⁾

四、小 结

综上所述可见:

- (1). 14MeV中子 $(n, 2n)$ 反应截面系统学研究的重要基础是大量的, 高精度的实验测量数据, 因此加强14MeV $(n, 2n)$ 反应截面的测量工作, 尤其是轻的或较轻的核的截面测量。
- (2). 必须考虑各种效应的修正。例如 $(n, 3n)$ 效应的扣除问题, Q值及奇偶效应的影响, 以及 (n, p) 等反应, 重核裂变过程中与 $(n, 2n)$ 反应竞争等问题。
- (3). 不断完善系统学研究的理论工作, 在复合核统计模型理论上需考虑预平衡发射的贡献, 必要时还需考虑直接作用的贡献。
- (4). 在扩大系统学研究范围的同时还

需注意扩展能区, 扩充核素。使系统学研究的适用范围更加广泛。

(5). 目前对轻的或较轻的核的系统学描述尚不理想, 有待于改进、提高。

中国核数据中心周恩臣同志审阅了此稿并提出许多宝贵意见, 作者深表感谢。

参考文献

1. S.C.Misra et al., J. Phys., G-5, 855 (1979).
2. T.B.Ryves et al., J. Phys., G-6, 771 (1980).
3. D.W.Barr et al., Phys.Rev., 123, 859 (1961).
4. S.Pearlstein, Nucl. Sci. and Eng., 23, 238 (1965).
5. S.M.Qaim et al., Nucl. Phys., A-185, 614 (1972). Nucl. Phys., A-224, 319 (1974).
6. Wen-den Lu et al., Phys. Rev., C-1, 350 (1970).
7. E.Kondaiah, J. Phys., A-7, 1457 (1974).
8. M.Segev et al., Annals of Nuclear Energy, 5, 239 (1978).
9. L. Yao et al., Proc. Int. Conf. on Nucl. Data for Basic and Applied Science, Santa Fe, New Mexico, U. S. A. 13-17 May P257 (1985).
姚立山等., 高能物理与核物理. (待发表).
10. J.Zhang et al., Proc. Int. Conf. on Nucl. Data for Basic and Applied Science, Santa Fe, New Mexico, U. S. A. 13-17 May P1611 (1985).
11. 姚立山等., 全国第五次核数据会议资料, 1986. 12, 北京.
12. S.Pearlstein, J. Nucl. Eng., 27, 81 (1973).
13. M.Bormann et al., Nucl. Phys., 65, 257 (1965).
14. M.Bormann and Lammers, Nucl. Phys., A-130, 195 (1969).
15. S.Chatterjee et al., Nucl. Phys., A-125, 593 (1969).
16. L.G.Moretto, Nucl. Phys., A-180, 337 (1972). Nucl. Phys., A-182, 641 (1972).
17. 上海科大射线研究室等., 第五次全国核物理会议资料汇编, P82(1982), 成都.
18. P.Strohal et al., Nucl. Phys., 30, 49 (1962).
19. P.Hill, Nucl. Phys., A-107, 49 (1968).
20. J.Csikai et al., Physics Letters, 20, 52 (1966).
21. N.N.Flerov et al., J. Nucl. Eng., 4, 529(1957).
22. A.K.Hankla et al., Nucl. Phys., A-180, 157 (1972).
23. R.A.Sigg et al., J. Inorg. Nucl. Chem., 37, 631 (1975). Nucl. Sci. and Eng., 60, 235 (1976).
24. S.L.Sothras et al., J. Inorg. Nucl. Chem., 40, 585 (1978).
25. Z.T.Body et al., Atomic Energy Review, 1, 153 (1973).
26. Wen-deh Lu et al., Phys. Rev., C-4, 1173 (1971).
27. A.Gilbert et al., UCRL-50736, (1969).
28. L.Jeki, KFKI-71-8, (1971).
29. W.G.Davey et al., ANL-75-34, (1975).
30. M.Segev et al., Annals of Nuclear Energy, 7, 577 (1980).
31. A.Chatterjee et al., Phys. Rev., C-18, 2118 (1978).
32. W.Michaelis, IAEA (NDS)-115/L(1984).