

25 keV 附近中子平均俘获截面 $\langle\sigma_{ny}\rangle$ 系统学研究

赵志祥 周德邻 蔡敦九

(中国原子能科学研究院, 北京)

文章研究了 25 keV 附近中子平均俘获截面随质量数 A 、有效激发能 U 及能级密度参数 a 的系统学依赖性。给出系统学公式为

$$\langle\sigma_{ny}\rangle = 0.3482 A^{-1.033} U^{-0.2438} a^{0.8569} \exp\{1.011\sqrt{aU}\}$$

关键词 (n, γ) 反应截面, 系统学, 壳效应, 能级密度参数。

一、引言

几十 keV 能区中子平均俘获截面 $\langle\sigma_{ny}\rangle$ 是一种重要的核数据。对其进行系统学研究, 可以预言尚未测量的核素的反应截面, 也可以为改进有关理论提供重要的信息。

1982 年, Недведюк 分析了一些核的 30 keV 中子平均俘获截面对不同核素的中子数、中子结合能及能级密度参数的依赖性^[1], 并借助于图形预言了一些核素的截面^[2]。这是我们看到的唯一的一个 $\langle\sigma_{ny}\rangle$ 系统学研究工作。

为了研究 E_n 为 25 keV 附近 $\langle\sigma_{ny}\rangle$ 的系统学行为, 我们收集了 $E_n = 20 \sim 30$ keV 之间的实验数据。1973 年之前的实验数据是根据文献[3]收集的。73 年后的新实验数据, 根据文献[4]做了补充。一些按能量间隔给出的平均截面, 原作者没有给出误差, 我们给以 10% 的误差, 读图得到的数据, 给以 20% 的误差。

实验数据显示出相当大的分歧。造成这种分歧的因素比较多。就活化测量而言, 低能中子的影响、衰变纲图数据的不确定性等都可以对测量数据引进较大误差。此外, 不少核素在 keV 能区存在着共振, 平均截面随能量的涨落剧烈, 因而不同能量分辨及 20~30 keV 区间的能量不确定性也都可能是造成实验数据分歧的原因。

作为系统学研究, 本工作不对实验数据逐家进行仔细地评价。当实验数据存在分歧时, 以本工作的系统学值为判据作了取舍。

二、平均俘获截面的系统学性质

Bilpuch 用 Breit-Wigner 共振理论, 导出了 l 分波俘获截面的下述表达式^[5]

$$\langle\sigma_{ny}^l\rangle = (2l+1) \frac{\pi}{2} \frac{2.6 \times 10^6}{E_n} \cdot \frac{\bar{\Gamma}_{nl}}{D_l} \left\{ 1 - \sqrt{b_l \pi} e^{b_l} \left[1 - \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^{\sqrt{b_l}} \exp\{-t^2\} dt \right] \right\} \quad (1)$$

式中

$$b_l = \bar{\Gamma}_{\nu l} / (2 V_l \sqrt{E_n} \bar{\Gamma}_n^l) \quad (2)$$

在式(1, 2)中, E_n 为入射中子能量, 以 eV 计, $\bar{\Gamma}_{\nu l}$, $\bar{\Gamma}_n^l$ 和 V_l 分别为 l 分波平均俘获宽度、平均约化中子宽度和穿透因子。

如果假定 $E_n = 25$ keV 时只有 S 分波的贡献, 则由于当 b_0 不太大时, 式(1)中括号内的项随不同核变化不大(如当 $b_0 < 0.1$ 时, 括号内的项在 $1 \sim 0.6$ 之间), 这时, 决定 $\langle \sigma_{n\gamma} \rangle$ 的主要是 S 波 γ 强度函数

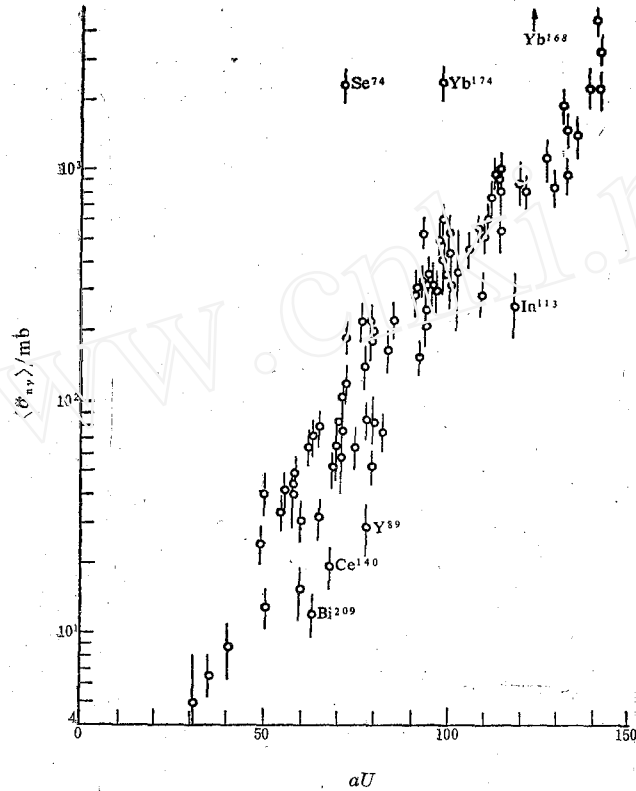


图 1 25 keV 附近 $\langle \sigma_{n\gamma} \rangle$ 的 aU 依赖性
Fig. 1 $\langle \sigma_{n\gamma} \rangle$ around 25 keV versus aU

$$S_{\nu_0} = \bar{\Gamma}_{\nu_0} / D_0 \quad (3)$$

取

$$1/D_0 = \rho \propto \frac{a}{(aU)^{5/4}} \exp\{2\sqrt{aU}\} \quad (4)$$

并使用 $\bar{\Gamma}_{\nu_0}$ 系统学公式^[6]

$$\bar{\Gamma}_{\nu_0} \propto U^{0.9} A^{-0.9} a^{-0.57} \quad (5)$$

则有

$$S_{\nu_0} \propto A^{-0.9} U^{-0.35} a^{-0.82} \exp\{2\sqrt{aU}\} \quad (6)$$

式(3-6)中, a 为复合核能级密度参数, U 为复合核有效激发能, 对于 25 keV 中子, 取

$$U = S_n - \delta \text{ (MeV)} \quad (7)$$

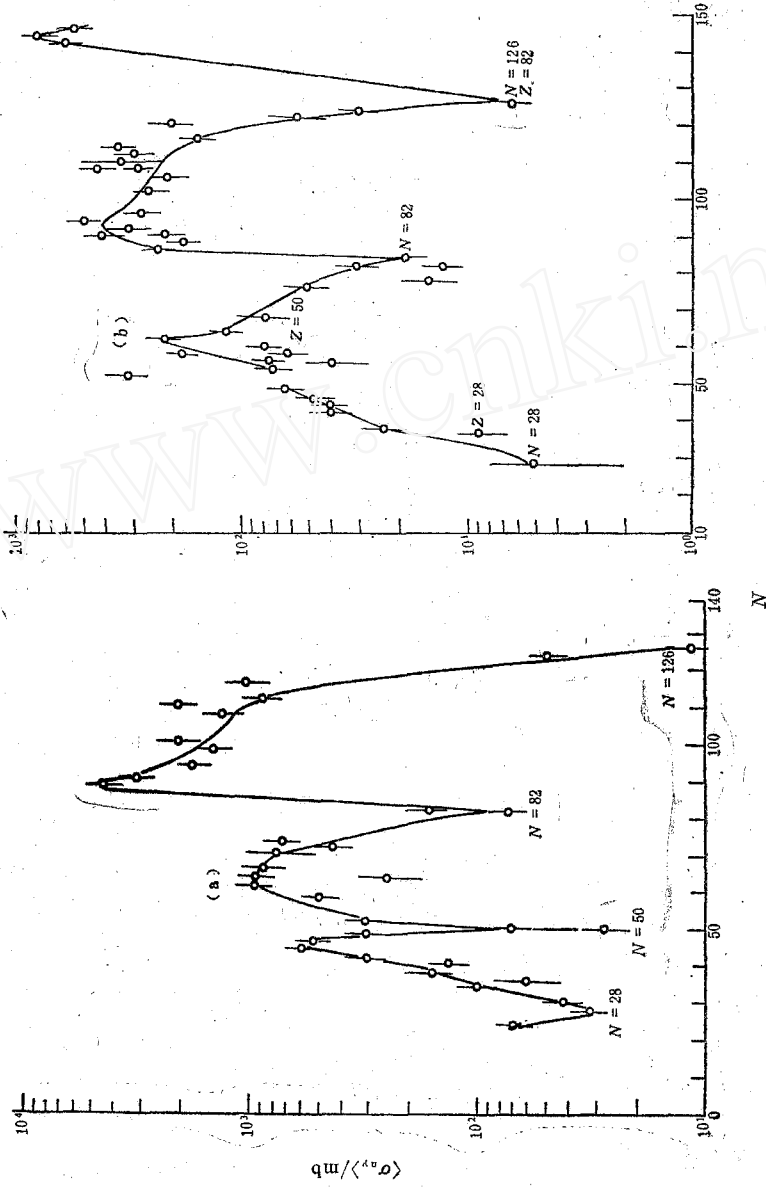


图 2 25 keV 附近 $\langle \sigma_n \rangle$ 随靶核中子数的变化
 Fig. 2 $\langle \sigma_n \rangle$ around 25 keV versus neutron number of target
 (a) 奇 Z 靶核; (b) 偶 Z 靶核.
 (a) for odd-Z target nuclei; (b) for even-Z target nuclei

$$\delta = \begin{cases} 22/\sqrt{A} & \text{偶-偶核} \\ 11/\sqrt{A} & \text{奇}A\text{核} \\ 0 & \text{奇-奇核} \end{cases} \quad (8)$$

A为复合核的质量数。

由式(6)可知, 25 keV 的 $\langle\sigma_{ny}\rangle$ 将主要取决于 aU 的大小。使用文献[7]的能级密度参数计算公式, 将表 1 的数据对 aU 作图示于图 1。由图 1 可见, 除了少数以外, $\langle\sigma_{ny}\rangle$ 随 aU 有很好的系统学行为。由于文献[7]的能级密度参数计算公式已经包含了壳修正和对能修正, 因此, $\langle\sigma_{ny}\rangle$ 对 aU 的光滑依赖性说明 $\langle\sigma_{ny}\rangle$ 必然存在着壳效应和奇偶效应。为了将这一点看得更清楚, 将实验数据对靶核中子数 N 作图示于图 2。由图 2 可以清楚地看到在

表 1 25keV附近 $\langle\sigma_{ny}\rangle$ 的系统学预言值
Table 1 $\langle\sigma_{ny}\rangle$ predicted by this systematics around 25 keV

核素	$\langle\sigma_{ny}\rangle/\text{mb}$	核素	$\langle\sigma_{ny}\rangle/\text{mb}$	核素	$\langle\sigma_{ny}\rangle/\text{mb}$
Sc ⁴⁵	68.4	Rh ¹⁰³	722	Dy ¹⁶⁴	278
Ti ⁵⁰	5.5	Pd ¹⁰⁸	126	Ho ¹⁶⁵	1815
V ⁵¹	33.6	Pd ¹¹⁰	104	Er ¹⁷⁰	279
Mn ⁵⁵	44.3	Ag ¹⁰⁷	896	Tm ¹⁶⁹	2564
Ni ⁶⁴	22.4	Ag ¹⁰⁹	871	Yb ¹⁶⁸	1064
Cu ⁶³	97.3	In ¹¹²	1030	Yb ¹⁷⁴	335
Cu ⁶⁵	92.9	In ¹¹⁵	856	Yb ¹⁷⁶	275
Zn ⁶⁸	24.5	Sn ¹¹⁷	253	Hf ¹⁸⁰	351
Ga ⁶⁹	208	Sn ¹¹⁸	135	Ta ¹⁸¹	1930
Ga ⁷¹	155	Sb ¹²¹	818	W ¹⁸²	558
Ge ⁷⁴	37.6	Sb ¹²³	521	W ¹⁸³	485
As ⁷⁵	316	Te ¹²⁸	60.5	W ¹⁸⁴	389
Se ⁷⁴	105	Te ¹³⁰	32	W ¹⁸⁶	297
Se ⁸⁰	42.8	I ¹²⁷	734	Re ¹⁸⁵	2196
Br ⁷⁹	467	Ba ¹³⁸	19.5	Re ¹⁸⁷	1654
Br ⁸¹	330	La ¹³⁹	151	Os ¹⁹⁰	324
Rb ⁸⁵	413	Ce ¹⁴⁰	54	Os ¹⁹²	219
Rb ⁸⁷	94.3	Ce ¹⁴²	63.8	Ir ¹⁹³	1172
Sr ⁸⁸	105	Pr ¹⁴¹	376	Pt ¹⁸⁸	92.3
Sr ⁸⁷	100	Nd ¹⁴⁶	136	Au ¹⁹⁷	748
Y ⁸⁹	131	Nd ¹⁴⁸	142	Hg ²⁰²	46.6
Zr ⁸⁴	58.1	Nd ¹⁵⁰	194	Hg ²⁰⁴	20.5
Zr ⁸⁶	39	Sm ¹⁵²	375	Tl ²⁰⁵	61.3
Nb ⁹³	309	Sm ¹⁵⁴	308	Pb ²⁰⁸	3.1
Mo ⁹⁸	67.3	Eu ¹⁵¹	2854	Bi ²⁰⁹	28.4
Mo ¹⁰⁰	60.3	Eu ¹⁵³	2838	Th ²³²	664
Ru ⁹⁶	262	Gd ¹⁵⁸	360	U ²³⁵	1200
Ru ¹⁰²	102	Gd ¹⁶⁰	252	U ²³⁸	971
Ru ¹⁰⁴	98	Tb ¹⁵⁹	2284	U ²³⁸	743

$N=28, 50, 82$ 和 126 处, $\langle\sigma_{ny}\rangle$ 出现极小, 另外, 偶 Z 靶核的中子俘获截面明显地低于奇 Z 靶核。图 2 中还标出靶核质子数 $Z=28, 50$ 和 82 的实验数据, 质子壳效应似乎不太明显。

三、25 keV 附近 $\langle \sigma_{ny} \rangle$ 的系统学预言

如上所述, 参照式(6)的形式, 将系统学公式取为

$$\langle \sigma_{ny} \rangle = C_1 A^{C_2} U^{C_3} a^{\sigma_4} \exp\{C_5 \sqrt{aU}\} \quad (9)$$

U 用式(7)计算, a 用文献[7]给出的公式计算, 计算中使用的复合核中子结合能取自文献[3], 质量过剩取自文献[8], 使用实验数据对式(9)进行参量化, 最后得到

$$C_1 = 0.3482, C_2 = -1.033, C_3 = -0.2438, C_4 = 0.8569, C_5 = 1.011 \quad (10)$$

系统学预言值与实验数据的比较示于图3, 数值结果见表1。

与式(6)相比, C_2, C_3 变化不大, C_4, C_5 有一些变化。在系统学预言值 30% 的范围内大约可以包括 70% 的实验数据, 因此, 按正态分布一个标准误差的概率意义, 将系统学预言值的不确定度, 取为 30%。几个偏离系统学预言值较远的实验数据也标在图中。其中, $\text{Se}^{74}, \text{Yb}^{168, 174}$ 三个实验数据均来自于 Sriramachandra 的测量^[9]。

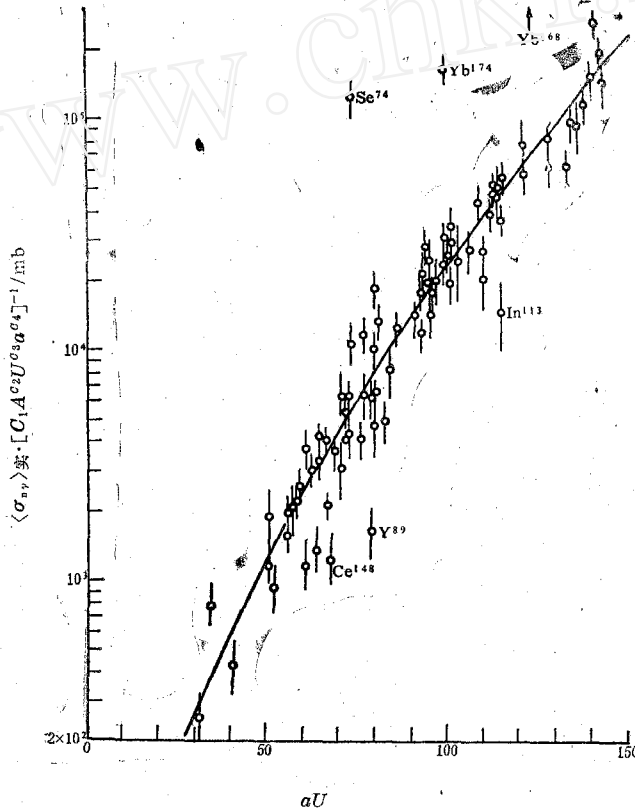


图3 25 keV 附近 $\langle \sigma_{ny} \rangle$ 系统学预言值与实验数据的比较

Fig. 3 Comparison of $\langle \sigma_{ny} \rangle$ predicted by this systematics with measured data.

实线为 $\exp(C_5 \sqrt{aU})$ 值。

使用式(9)和(10), 我们预言了一些尚无实验测量的核素的 25 keV 中子平均俘获截面, 列于表1和2。作为比较, 表2中还给出了 Недведюк 的系统学预言值^[2]。

表 2 25keV $\langle\sigma_{ny}\rangle$ 的系统学预言值与文献[2]的比较
 Table 2 Comparison of $\langle\sigma_{ny}\rangle$ predicted by this systematics with ref.[2]

核 素	本工作,		文献[2], mb				核 素	本工作,		文献[2], mb			
	mb		A		B			mb		A		B	
$^{74}_{34}\text{Se}$	105	±31	150	±20	380	±190	$^{131}_{52}\text{Te}$	153	±46			193	±16
Se^{82}	21.1	6.3	14	5	12	3	Te^{132}	15.0	4.5	3.3	±0.9	5.9	0.7
$^{82}_{36}\text{Kr}$	83.3	25.0	120	20	85	42	$^{131}_{56}\text{Ba}$	191	177	1400			
$^{84}_{38}\text{Sr}$	158	47	160	30			Ba^{132}	307	92	540	40		
$^{102}_{46}\text{Pd}$	150	45	500	70	770	110	Ba^{133}	375	112	800			
Pd^{109}	220	66			660	90	$^{145}_{62}\text{Sm}$	315	94	1000			
Pd^{112}	82.1	24.6	200	60	190	20	Sm^{146}	284	85	160	20	150	25
$^{104}_{48}\text{Cd}$	184	55	700	70			Sm^{151}	727	218			1670	570
Cd^{108}	305	92			1240	220	Sm^{156}	220	66	120			
Cd^{116}	212	64			400	50	$^{152}_{64}\text{Gd}$	600	180			760	80
Cd^{117}	163	49			300	50	Gd^{154}	632	207	720		740	70
Cd^{118}	63.1	18.9	46	12	78	10	Gd^{159}	345	103			875	100
$^{110}_{50}\text{Sn}$	252	75	240	40			$^{161}_{66}\text{Dy}$	331	279			1750	240
Sn^{113}	372	111	840		1130	210	Dy^{166}	967	290			1350	170
Sn^{114}	237	71	150	25	196	23	Dy^{169}	647	190	620	90	700	70
Sn^{116}	288	86	600		560	90	Dy^{165}	246	74			500	50
Sn^{121}	156	50	140		173	20	$^{166}_{70}\text{Yb}$	1432	430			1150	120
$^{120}_{52}\text{Te}$	321	96	210	20			Yb^{168}	1064	320			900	90
Te^{127}	141	42	200		352	40	Yb^{169}	174	52	3100		2820	390
Te^{129}	72.4	21.7	76		257	24	Yb^{175}	253	76	430		370	30

注: A—— $\langle\sigma_{ny}\rangle\sim f(N)$ 预言值; B—— $\langle\sigma_{ny}\rangle\sim f(U)$ 预言值。

参 考 文 献

- [1] Недведюк, К. и др., *Acta Physica Polonica*, B 13,51(1982).
- [2] Недведюк, К. и др., 6th All Union Conf. on Neutron Physics, Kiev, 3,143(1983).
- [3] Mughabghab, S. F. et al., BNL-325, 4th ed., 1,(1981).
Garber, D. I. et al., BNL-325, 3rd ed., 2,(1976).
- [4] IAEA, CINDA 82,CINDA 86.
- [5] Bilpuch, H. G. et al., *Ann. Phys.*, 10,455(1969).
- [6] Malecky, H. et al., *Yad. Phys.*, 13,240(1971)(转引自[3]).
- [7] 陆中道,卓益忠,原成[80]-009(中国原子能科学研究院资料),1980.
- [8] Tuli, J. K., Nucl. Wallet Cards, 1985.
- [9] Sriramachandra murty, M. et al., Conf. on Nucl. Phys. and Solid State Physics, Madurai, 2, 29 (1970).

(编辑部收到日期: 1987年7月6日)

SYSTEMATICS OF NEUTRON AVERAGE RADIATIVE CAPTURE CROSS SEC- TIONS $\langle\sigma_{n\gamma}\rangle$ AT 25 keV

ZHAO ZHIXIANG ZHOU DELIN CAI DUNJIU

(China Institute of Atomic Energy, P. O. Box 275, Beijing)

ABSTRACT

The systematic behaviours of average radiative capture cross sections $\langle\sigma_{n\gamma}\rangle$ at 25 keV on mass number A , effective excitation energy U and level density parameter a are studied. The systematics formula is found as follows:
$$\langle\sigma_{n\gamma}\rangle = 0.3482A^{-1.033}U^{-0.2438}a^{0.8569} \exp(1.011(aU)^{1/2}).$$

Key words (n, γ) reaction cross sections, Systematics, Shell effect, Level density parameter.

www.cnki.net