

文章编号: 1007-4627(2015)01-0121-07

20 MeV 以下 $^{65}\text{Cu}(n, p)^{65}\text{Ni}$ 反应截面及其协方差数据的评价

贾敏¹, 刘廷进²

(1. 华北水利水电大学数学与信息科学学院, 郑州 450000;

2. 中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413)

摘要: 为满足核工程对核数据的需求, 对 20 MeV 以下 $^{65}\text{Cu}(n, p)^{65}\text{Ni}$ 反应截面的实验数据进行了分析和评价, 包括实验数据的收集、修正、选取、归一、误差调整和数据处理, 在分析实验误差特别是关联误差的基础上构造了每家数据的协方差矩阵, 最后利用样条拟合程序 SPCC 给出了评价截面数据和实验数据的协方差矩阵。评价不仅考虑了实验数据的误差, 还考虑了数据间的相关性。

关键词: 截面; 评价; 关联误差; 协方差矩阵

中图分类号: O5714 **文献标志码:** A **DOI:** 10.11804/NuclPhysRev.32.01.121

1 引言

^{65}Cu 是天然铜的两个同位素之一, 质量分数在天然铜中占到 30.83%, 是聚变和裂变反应堆中重要的结构材料和屏蔽材料。 $^{65}\text{Cu}(n, p)^{65}\text{Ni}$ 反应是反应堆剂量测量中重要的指示剂反应, 对其截面进行评价具有重要意义。

随着反应堆物理和计算机技术的发展, 除了截面数据, 对协方差数据的需求也越来越大。传统的误差只给出协方差矩阵的对角元素, 它们仅仅描述了数据的精确性; 而协方差矩阵给出了全部的误差信息, 除给出协方差矩阵的对角元素, 还给出了非对角元素, 即描述了数据间的关联性。因此, 对 $^{65}\text{Cu}(n, p)^{65}\text{Ni}$ 反应截面及协方差数据进行评价在核能利用上是很有必要的。

2 实验数据评价

2.1 实验数据的收集和比较

$^{65}\text{Cu}(n, p)^{65}\text{Ni}$ 反应的实验数据均取自 EXFOR 库^[1]。从 1952 年到 2008 年直接给出了反应截面值的共有 37 家实验数据, 由于数据比较多, 14 MeV 附近的 20 家单能点数据作为一组表示出来, 如图 1 所示。从图中可见各家实验数据之间, 实验数据和评价数据之间, 各评价数据(取自 CENDL-3.1, ENDF/B-VII.1, JENDL-4.0 评价库)^[2]间也有很大分歧, 趋势亦不尽相同。这需要对实验数据仔细分析、评价、修正和处理。

首先进行初步筛选。从图 1 可见, 2008 年 Furuta 等^[3]测量的数据能点为 0.93 MeV, 低于反应阈 1.375 MeV, 数据有问题, 舍弃。1992 年 Uwamino 等^[4]测量的数据从图上看趋势形状不对, 查阅实验信息发现, 中子源非单能, 为连续中子谱, 数据不可取。

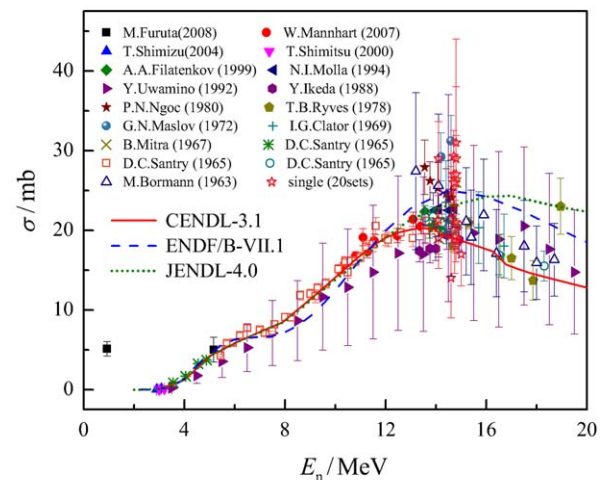


图 1 (在线彩图) $^{65}\text{Cu}(n, p)^{65}\text{Ni}$ 实验数据的收集与比较

2.2 实验数据的修正和选取

$^{65}\text{Cu}(n, p)^{65}\text{Ni}$ 反应截面, 大多用活化法测量。活化法截面测量的基本思想是照射样品后, 测量反应剩余核的 γ 或 β 放射性, 由 γ 或 β 的活性和入射中子数计算出反应截面, 为了避免绝对测量, 往

收稿日期: 2014-02-21; 修改日期: 2014-04-13

基金项目: 国家自然科学基金资助项目(11104072)

作者简介: 贾敏(1978-), 女, 河南安阳人, 讲师, 硕士, 从事核数据评价研究; E-mail: jiamin@ncwu.edu.cn.

往用标准核反应作为监视器进行相对测量。 $^{65}\text{Cu}(n, p)^{65}\text{Ni}$ 反应剩余核 ^{65}Ni 会产生 γ 和 β 衰变, 半衰期是 2.517 19 h, 实验中主要采用的 γ 射线能量为 366.27, 1 115.53 和 1 481.84 keV, 而 β 射线很少采用。由于测量年代和实验室的不同, 有的测量中利用的标准截面和衰变分支比不是最新的, 必须用最新的数据对所有的测量截面进行修正。

新标准截面选取的优先顺序: 国际标准截面、国内最新评价、ENDF/B-VII.1 和其它评价库, 衰变分支比数据取自 ENSDF (国际评价核结构和衰变数据库^[5])。

另外, 不同的测量中剩余核 ^{65}Ni 基态所用半衰期不同, 有的不同于最新值 2.517 19 h, 但是差别并不大, 且不知道冷却和测量时间, 所以不对半衰期做出修正, 这样不会产生很大的误差。

EXFOR 文档中实验数据误差的形式给出的比较复杂, 有的给出绝对误差, 有的给出相对误差; 有的给出了总误差, 而有的只给出统计误差, 甚至一些数据给出的误差和分析描述中的不一致, 或者根本就没给出误差。而评价需要确定截面的总误差, 其包含系统误差和统计误差, 是二者的平方和的平方根, 所以在修正数据的时候, 误差也要进行相应的分析和调整, 特别是要考虑标准截面和衰变分支比修正引起的系统误差。

例如 1963 年 Bormann 等^[6]用活化法进行相对测量, 其以 $^{56}\text{Fe}(n, p)$ 的反应截面作为标准截面即监视器, 采用能点值是 14.1 MeV, 截面值 σ_{monitor} 为 112.5 mb。经查验标准截面不是最新值, 需要对数据做出修正, 新的标准截面取自中国核数据中心 (CNDC) 评价的数据^[7], 利用式 (1) 修正计算。文献^[6]测量中采用的 γ 射线能量为 1 481.8 keV, 分支比 P_{γ} 为 0.25, 评价

中 γ 衰变分支比最新数据取自 ENSDF^[5], 利用式 (2) 进行修正。表 1 给出了修正类型和修正因子, 截面值修正结果见表 2。

$$\sigma_{\text{exp}}^{\text{new}} = \frac{\sigma_{\text{monitor}}^{\text{new}}}{\sigma_{\text{monitor}}^{\text{old}}} \cdot \sigma_{\text{exp}}^{\text{old}}, \quad (1)$$

$$\sigma_{\text{exp}}^{\text{new}} = \frac{P_{\gamma}^{\text{old}}}{P_{\gamma}^{\text{new}}} \cdot \sigma_{\text{exp}}^{\text{old}}, \quad (2)$$

表 1 修正类型

修正类型	能量	旧值	新值	修正因子
标准截面 $^{56}\text{Fe}(n,p)$	14.1 MeV	112.5 mb	113.7 mb	1.010 7
γ 衰变分支比	1 481.8 keV	0.25	0.235 9	1.059 8

表 2 修正结果

入射中子 能量/MeV	原截面值 ±误差/mb	修正截面值 ±误差/mb	相对误差 /%
13.2	27.4±9.86	29.35±10.56	36
14.1	25.6±8.96	27.42±9.60	35
14.6	21.5±7.31	23.03±7.83	34
15.2	21.1±6.75	22.60±7.23	32
15.4	19.1±5.92	20.46±6.34	31
15.9	21.9±7.01	23.45±7.51	32
16.4	17.1±5.47	18.31±5.86	32
17.5	18.0±5.76	19.28±6.17	32
18.0	15.9±4.61	17.03±4.94	29
18.7	16.3±4.56	17.46±4.89	28

仿照上述方法, 对所有的实验数据都进行以上类似的修正。有的所用标准和分支比与最新的一样或者有的旧标准和分支比无法查到, 这样的数据不进行修正。所有数据的修正情况见表 3。

表 3 数据修正情况*

年代	作者	样品	能量/MeV(点数)	标准截面	探测粒子	修正内容	取舍
2008	M.Furuta+	$^{65}\text{Cu}(99.61\%)$	0.93~5.17 (2)	$^{115}\text{In}(n,n')$	γ , 1 481.8		舍
2007	W.Mannhart+	^0Cu	10.2~14.0 (10)	$^{238}\text{U}(n,f)$	γ , 1 481.8	S, E	取
2006	A.K.M.Harun	^0Cu	14.8 (1)	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	γ , 1 115.5	S	取
2004	T.Shimizu+		2.90~3.09 (2)	$^{115}\text{In}(n,n')$	γ , 1 481.84		取
2000	T.Shimitsu+	$^{65}\text{Cu}(99.61\%)$	3.00~3.20 (2)	$^{115}\text{In}(n,n')$	γ , 1 481.84		取
1999	A.A.Filatenkov+	^0Cu	13.6~14.8 (7)	$^{93}\text{Nb}(n,2n)$	γ , 366.3, 1 115.5, 1 481.84	E	取
1999	A.A.Filatenkov+	^0Cu	14.1 (1)	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$		E	取
1994	N.I.Molla+	^0Cu	13.9~14.7 (4)	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	γ , 1 115.8	B	取
1992	Y.Uwamino+	^0Cu	3.50~3.85 (36)				舍
1991	A.Ercan+		14.6 (1)	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$			舍
1988	Y.Ikeda+	^{65}Cu	13.3~14.9 (8)	$^{27}\text{Al}(n,\alpha)$	γ , 1 115.84	S, B	舍

续表 3

年代	作者	样品	能量/MeV(点数)	标准截面	探测粒子	修正内容	取舍
1987	J.W.Meadows+	⁰ Cu	14.7 (1)	²³⁵ U(n,f)	γ, 1482.	S, B, E	取
1986	G.P.Vinitskaya+	⁰ Cu	14.8 (1)	⁶⁵ Cu(n,2n)		S	取
1985	R.Pepelnik+		14.7 (1)	²⁷ Al(n,α)			取
1985	J.P.Gupta+		14.8 (1)	⁵⁶ Fe(n,p)		S	取
1980	P.N.Ngoc+		13.66~14.7 (6)	²⁷ Al(n,α)	γ, 1481.		取
1978	T.B.Ryves+	⁰ Cu	14.7~19.0 (6)	¹ H(n,el)		S, E	舍
1977	S.M.Qaim+	⁰ Cu	14.7 (1)	²⁷ Al(n,α)	γ, 1115., 1482.	S	取
1976	R.A.Sigg	CuO	14.6 (1)	²⁷ Al(n,α)	γ, 1115.5, 1481.9	S, B, E	取
1973	J.C.Robertson+	⁰ Cu	14.78 (1)	⁵⁶ Fe(n,p)	β-	S	取
1973	J.Dresler+		14.6 (1)	⁵⁶ Fe(n,p)	γ, 1490.	S, E	取
1972	G.N.Maslov+		14.2~14.6 (2)	⁶⁵ Cu(n,2n)		S	舍
1971	R.Prasad+		14.8 (1)	⁵⁶ Fe(n,p)		S	舍
1969	I.G.Clator		14.4~16.7 (3)	⁵⁶ Fe(n,p)	γ, 1483.	S, B	取
1967	B.Mitra		14.1~14.8 (2)	⁶³ Cu(n,2n)		S	舍
1965	D.C.Santry+		3.56~4.88 (4)	³² S(n,p)	γ, 1490.	S, E	取
1965	D.C.Santry+		5.45~13.6 (31)	³² S(n,p)	γ, 1490.	S, E	取
1965	D.C.Santry+		13.6~20.2 (8)	³² S(n,p)	γ, 1490.	S, E	取
1964	C.G.Bonazzola+	⁰ Cu	14.7 (1)	³ H(d,n)	β-		取
1963	E.T.Bramlitt+		14.7 (1)	⁶⁵ Cu(n,2n)			舍
1963	M.Bormann+	⁰ Cu	13.2~18.7 (10)	⁵⁶ Fe(n,p)	γ, 1490.	S, B, E	取
1961	H.Pollehn+	⁰ Cu	14.1 (1)		γ		舍
1961	S.K.Mukherjee+		14.8 (1)	⁶³ Cu(n,2n)			舍
1960	M.J.Depraz+		15.0 (1)	⁶³ Cu(n,2n)	β-	S	舍
1959	A.Poularikas+		14.8 (1)	⁶³ Cu(n,2n)			舍
1958	R.S.Scalan+		14.8 (1)	⁶³ Cu(n,2n)			舍
1952	S.G.Forbes		14.1 (1)				舍

* S: 标准修正, B: 分支比修正, E: 误差修正。

修正后的数据如果分歧仍然很大, 需要进一步的分析、处理和取舍。经过查阅实验信息和原始文献, 依据中子源、测量方法、探测器、样品、监视器、实验室、年代和数据误差等, 舍去了不合理的数据。例如 1991 年 Ercan 等^[8]测量的数据远离其他数据, 很小不可靠。而有很多数据用的是碘化钠(NaI)探测器, 能量分辨率低, 不可取, 如 1972 年 Maslov^[9]、1971 年 Prasad^[10]和 1961 年 Pollehn 等^[11]的测量。1978 年 Ryves 等^[12]测量的数据, 涨落很大, 统计性也不好, 舍去。60 年代之前的测量, 如 Scalan^[13]和 Forbes 等^[14]的测量没提供任何实验信息, 难以判断其可靠性, 故未采用。1965 年 Santry^[15]和 1963 年 Bormann 等^[6]测量的数据在 14 MeV 附近虽然分歧很大, 但 15 MeV 以上统计一致, 符合较好, 都选用。数据的取舍结果见表 3, 图 2 给出了选取的实验数据。

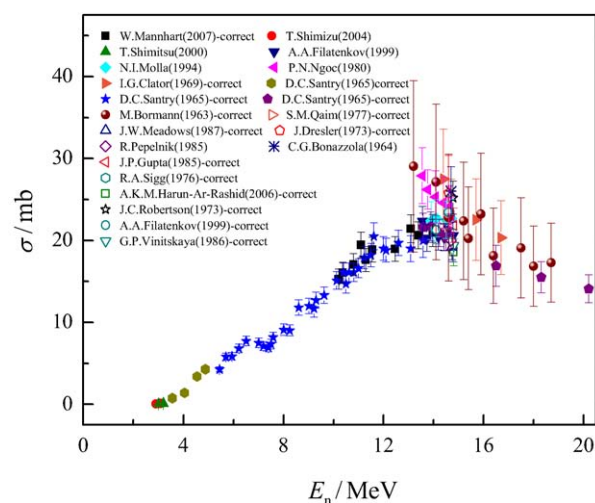


图 2 (在线彩图) ⁶⁵Cu(n, p)⁶⁵Ni 选取的修正后实验数据

2.3 实验数据的归一和处理

经过修正和误差调整后的数据还需要进一步分析比较。如果分歧特别大,则需要再评价。从图 2 可见选取修正后的数据还有很大的分歧,特别是 14 MeV 以上的数据。活化法相对测量的精确度受 T(d, n) 中子源中氘的破裂产生的低能中子的影响很大。14 MeV 以上数据分歧的主要原因就在于中子源中低能连续中子的影响,除了所要求的单色能量的中子外,这些低能中子也会与靶核发生反应,由于作为标准截面的反应和待测反应的阈不同,使其剩余核产生的所测的放射性不同,因而使计算得到的截面值不同,两种反应阈差别越大,这种影响亦越大。低能中子主要由 T(d, n) 反应中氘破裂和再生氘靶上 D(d, n) 反应产生的,入射氘的能量(中子能量)越高, T(d, n) 反应中氘破裂产生的低能中子越多,换靶后加速器运行时间越长,氘的累积越多,再生氘靶上 D(d, n) 反应产生的低能中子越多,因而影响就越大。在各家的实验测量中,有的甚至在同一家不同的测量中(例如氘的累积)这些影响因素是不同的,而且这些低能中子的贡献作定量修正很困难,于是造成了测量结果的分歧。但是 T(d, n) 中子源在 14 MeV 附近单色性好,氘的破裂低能中子的影响可以忽略,15 MeV 以上能区所用的 T(d, n) 中子源单色性差,氘的破裂低能中子影响很大。所以 13.5 ~ 15 MeV 的实验数据比 15 MeV 以上的数据较为可靠。为了消除这种影响,把 13.5 ~ 15 MeV 的所有实验数据作为一组,在 14.7 MeV 评价给出一个较为准确的值,然后所有数据特别是 15 MeV 以上数据都在能点 14.7 MeV 按照这一评价值归一。

13.5 ~ 15 MeV 的所有实验数据用 CURVEFIT 程序^[16]拟合计算出 13.5 ~ 15 MeV 的截面值,其中能点 14.7 MeV 拟合截面值为 22.192 mb。能点多的实验数据选择离能点 14.7 MeV 近的数据插值计算,或者用正交多项式拟合得到能点 14.7 MeV 的截面值。能点少的不适于曲线拟合,用接近的数据与 14.7 MeV 的拟合值比较求出该能点截面值,相对误差都保持不变。得到每家数据在 14.7 MeV 的截面值后用 CURVEFIT 程序加权平均,计算出 14.7 MeV 的加权平均值为 21.678 mb,相对误差为 2.6%。

14 MeV 附近能点多的实验数据,选择离该能点近的数据插值计算进行归一;与加权平均值接近的实验数据,直接采用,无需归一;能点多的实验数据用正交多项式拟合,得到 14.7 MeV 能点的截面值,与 14.7 MeV 的加权平均值比较算出归一系数,再将其他能点数据乘以该系数,得到归一后的实验数据值。图 3 给出了 1965 年 Santry^[15] 测量的数据在归一前后的比较,很明显由

于归一处理这些截面值变大了。需要注意的是归一后数据的误差都要考虑归一造成的系统误差 2.6%。所有数据归一后的结果如图 4 所示,可见归一处理后的实验数据已经统计一致。

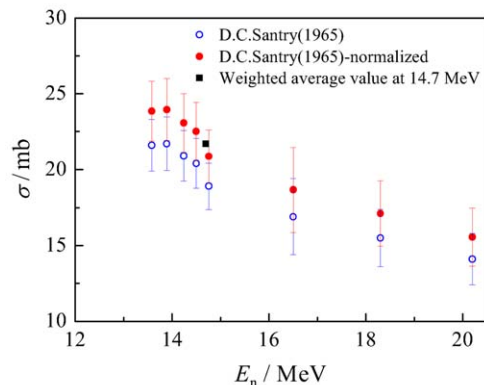


图 3 (在线彩图) D.C.Santry 测量的数据归一前后的比较

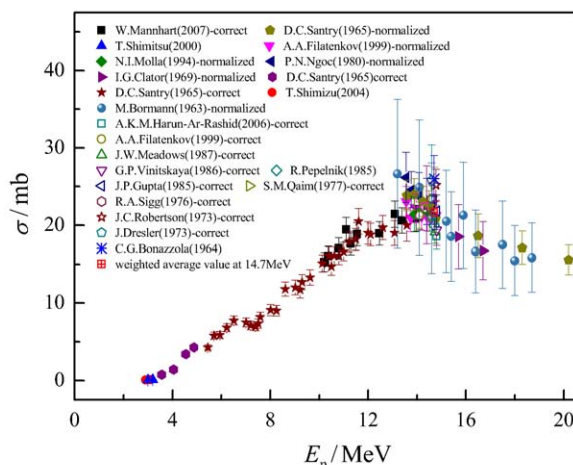


图 4 (在线彩图) ⁶⁵Cu(n, p)⁶⁵Ni 归一后的实验数据

3 协方差数据评价

3.1 协方差矩阵的构造

协方差数据的评价方法采用最小二乘法(GLSM),所用程序是以此为基础的样条拟合程序 SPCC^[17]。对于每家不同测量能点的实验数据,绝对协方差矩阵的对角元素 V_{ii}^A 是第 i 个能点数据的总误差的平方,

$$V_{ii}^A = \Delta\sigma_i^{\text{tot}} \cdot \Delta\sigma_i^{\text{tot}} \quad (3)$$

非对角元素 V_{ij}^A 是第 i 个和第 j 个能点数据的关联误差的乘积,

$$V_{ij}^A = \Delta\sigma_i^{\text{Corr}} \cdot \Delta\sigma_j^{\text{Corr}} \quad (4)$$

相对协方差矩阵就是绝对协方差矩阵的每个元素除以相对应的能点截面值的乘积,其元素 V_{ij}^R 由式(5)计

算:

$$V_{ij}^R = \frac{V_{ij}^A}{\sigma_i \cdot \sigma_j} \quad (5)$$

关联系数矩阵元素 V_{ij}^R 由下面式 (6) 计算得到, ρ_{ij} 也叫关联系数, 满足条件 $-1 \leq \rho_{ij} \leq 1$, 可见对角元素即数据本身的关联 $\rho_{ii} = 1$,

$$V_{ij}^R = \rho_{ij} = \frac{V_{ij}^A}{\sqrt{V_{ii}^A \cdot V_{jj}^A}} \quad (6)$$

由以上计算公式可见总误差和关联误差是构造协方差矩阵所必需的。一般实验数据都会给出总误差, 总误差包括统计误差和系统误差, 而有些系统误差可使数据产生关联, 比如相对测量中标准截面小了, 会使整个能区的数据都变小。使数据产生关联的系统误差叫关联误差, 关联误差需要评价者根据相关信息分析给出。系统误差包括中程误差和长程误差, 比如 γ 探测器效率、多次散射等是中程误差, 标准截面、衰变分支比、样品定量等是长程误差, 总系统误差就是中程误差和长程误差平方和的平方根。然而本文中的相关测量都没给出任何的或足够的关于中程误差的信息, 所以关联误差就考虑了长程系统误差。

每家测量数据的系统误差使这家数据不同能点间产生关联, 有的数据在归一处理时, 又引入了归一造成的系统误差 2.6%, 这一系统误差使归一处理的每家数据间产生关联。

由于每家测量数据的关联误差的来源和性质不同, 所以每家数据都要分析给出相应的关联误差即长程误差。例如 1980 年 Ngoc^[18] 测量的 ⁶⁵Cu(n, p)⁶⁵Ni 反应截面的关联误差, 包括标准截面、样品和归一造成的关联, 如表 4 所列。仿照这一方法, 分析给出每家数据的关联误差, 利用式 (2)~(5) 计算得到每家数据相应的协方差矩阵。

表 4 关联误差

标准截面	样品重量和纯度	归一	总关联误差
5%	2%	2.6%	5.98%

3.2 结果与讨论

应用样条拟合程序 SPCC 对所有分析评价过的测量数据进行了曲线拟合, 该程序在数据处理中考虑了数据的相关性, 不仅考虑了同一家测量数据不同能点之间的关联, 也考虑了归一造成的各家实验数据之间的关联。非相关数据的处理, 把全部误差都按照统计处理, 误差会随实验点数 \sqrt{N} 增加而减小; 而相关数据的处理则考虑了其中的系统误差, 总误差中的统计误差按照统计规

律减小。这样会使拟合计算值及其误差都发生变化。拟合结果作为 ⁶⁵Cu(n, p)⁶⁵Ni 反应截面的推荐评价价值, 同时与其他评价数据作比较, 如图 5 所示, 可见不同的评价数据之间还有很大的分歧, 但本评价结果与实验数据符合要好。

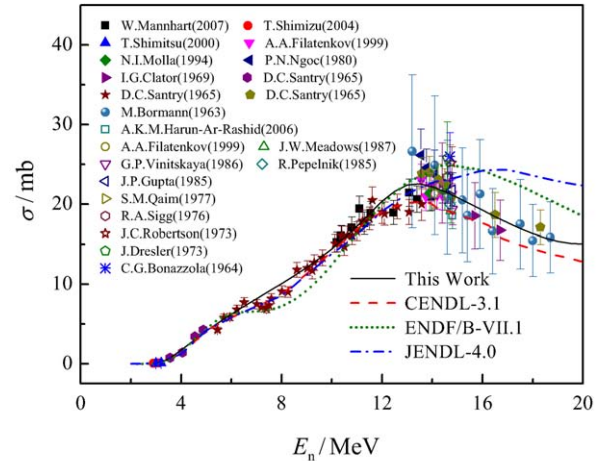


图 5 (在线彩图) ⁶⁵Cu(n, p)⁶⁵Ni 实验数据的评价结果及比较

评价结果还给出了推荐协方差矩阵, 包括绝对协方差、相对协方差和关联系数协方差矩阵。拟合值的关联系数矩阵见图 6, 很明显对角元素等于 1, 即每个能点数据本身的关联为 1。接近对角线附件的点关联也很大, 这是由样条拟合过程中曲线的光滑性和连续性的约束条件要求而产生的。远离对角线的能点之间的关联较小, 这是由于输入实验数据的关联误差比较小, 而这些能点间的关联主要是由输入数据的关联传递过来的。

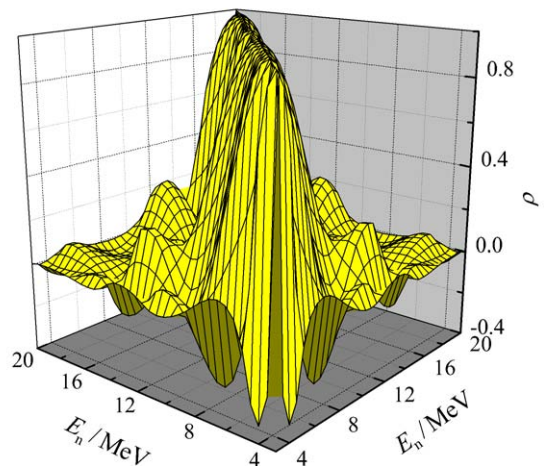


图 6 (在线彩图) ⁶⁵Cu(n, p)⁶⁵Ni 拟合值的关联系数矩阵

4 小结

对实验数据进行了收集和仔细的分析评价, 用最新

的标准截面和分支比对数据进行了修正,相应地调整了误差;根据实验数据的测量方法、探测器等,对数据进行了取舍;用加权平均程序 CURVEFIT 在 14.7 MeV 对数据进行了归一处理,消除了 14 MeV 以上高能段数据的分歧;分析评价给出了实验数据的关联误差,最后用相关数据的样条拟合程序 SPCC 对数据进行了处理。

给出了 20 MeV 以下 $^{65}\text{Cu}(n, p)^{65}\text{Ni}$ 反应截面的评价推荐数据,也给出了评价数据的协方差矩阵。评价考虑了数据的相关性,不仅给出了数据的误差,还给出了数据间的关联。而国际上几大评价库只有 ENDF/B-VI.8 有协方差数据 (JEFF-3.1 取用它的的数据),且这些数据只是对数据实验误差的半定量估计,而不是严格的评价计算,所以 ENDF/B-VII 就没再保留。本评价结果是依据实验数据,经过仔细的物理分析评价和严格的数学处理给出的,其结果更为合理、可靠。

参考文献:

- [1] EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>.
- [2] Evaluated Nuclear Data File (ENDF) [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/endl00.jsp>
- [3] FURUTA M, SHIMIZU T, HAYASHI H, *et al.* EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>. Target: Cu-65, Reaction: (n, p), Quantity: CS, Accession: 23032.
- [4] UWAMINO Y, SUGITA H, KONDO Y, *et al.* EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>. Target: Cu-65, Reaction: (n, p), Quantity: CS, Accession: 22703.
- [5] ENSDF: Evaluated Nuclear Structure Data File.[EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>.
- [6] BORMANN M, CIERJACKS S, FRETWURST E, *et al.* EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>. Target: Cu-65, Reaction: (n, p), Quantity: CS, Accession: 21343.
- [7] HUANG Xiaolong, LU Hanlin. CNDC Standards, Evaluated at CNDC, (INDC(CPR)-045,1998.
- [8] ERCAN A, ERDURAN M N, SUBASI M, *et al.* EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>. Target: Cu-65, Reaction: (n, p), Quantity: CS, Accession: 22338.
- [9] MASLOV G N, NASYROV F, PASHKIN N F. EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>. Target: Cu-65, Reaction: (n, p), Quantity: CS, Accession: 40136.
- [10] PRASAD R, SARKAR D C. EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>. Target: Cu-65, Reaction: (n, p), Quantity: CS, Accession: 30336.
- [11] POLLEHN H, NEUERT H. EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>. Target: Cu-65, Reaction: (n, p), Quantity: CS, Accession: 21352.
- [12] RYVES T B, KOLKOWSKY ZIEBA P K J. EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>. Target: Cu-65, Reaction: (n, p), Quantity: CS, Accession: 20772.
- [13] SCALAN R S, FINK R W. EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>. Target: Cu-65, Reaction: (n, p), Quantity: CS, Accession: 11550.
- [14] FORBES S G. EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>. Target: Cu-65, Reaction: (n, p), Quantity: CS, Accession: 11474.
- [15] SANTRY D C, BUTLER J P. EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>. Target: Cu-65, Reaction: (n, p), Quantity: CS, Accession: 11776.
- [16] LIU TingJin, SUN ZhengJun. Commutation of Nuclear Data Progress, 2006, 30, 23.
- [17] LIU Tingjin, LIANG Qichang. Commutation of Nuclear Data Progress, 1994, 11: 116.
- [18] NGOC P N, GUETH S, DEAK F, *et al.* EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data. [EB/OL]. [2012-10-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/exfor/exfor.htm>. Target: Cu-65, Reaction: (n, p), Quantity: CS, Accession: 30562.

Evaluation of the $^{65}\text{Cu}(\text{n}, \text{p})^{65}\text{Ni}$ Cross Sections and Their Covariance Data Below 20 MeV

JIA Min^{1, 1)}, LIU Tingjin²

(1. North China University of Water Resources and Electric Power, Department of Mathematics and Information Science, Zhengzhou 450000, China;

2. China Institute of Atomic Energy, Science and Technology on Nuclear Data Laboratory, Beijing 102413, China)

Abstract: To meet the needs for nuclear data engineering, the experimental data of the $^{65}\text{Cu}(\text{n}, \text{p})^{65}\text{Ni}$ cross section below 20 MeV were analyzed and evaluated. The evaluation procedure includes the experimental data collection, correction, selection, normalization, error adjustment and data processing, especially the covariance matrix for each experimental data is constructed with the information on experimental errors and correlation errors. The evaluation cross section data and the corresponding covariance matrices were given using the spline fitting procedure SPCC. The evaluation work was done with the consideration of not only the experimental errors but also the correlation of data.

Key words: cross section; evaluation; correlation error; covariance matrices

Received date: 21 Feb. 2014; **Revised date:** 13 Apr. 2014

Foundation item: National Natural Science Foundation of China (11104072)

1) E-mail: jiamin@ncwu.edu.cn.

<http://www.npr.ac.cn>