

文章编号: 1007-4627(2012)02-0208-08

# 裂变产物产额数据的评价

陈永静, 刘廷进, 孙正军, 舒能川

(中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413)

**摘要:** 以中子诱发<sup>235</sup>U 裂变产生的<sup>135</sup>Xe 的累积产额数据为例, 利用了所有可利用的实验数据, 介绍了裂变产物产额数据的评价方法, 包括数据的收集、修正、评价、误差调整和数据处理, 特别是协方差数据的评价、半经验模型理论计算数据的应用和相关数据的处理, 给出了<sup>135</sup>Xe 热能点产额的推荐值以及 0~20 MeV 产额-能量关系曲线。

**关键词:** 裂变产额; 数据评价; 产额能量关系; <sup>135</sup>Xe

**中图分类号:** O571.4      **文献标志码:** A

## 1 引言

裂变产额数据在核诊断、反应堆和乏燃料计算中有着广泛的应用。例如, 衰变热计算、屏蔽、剂量、燃耗、乏燃料处理、废物处理及核安全等。根据应用的不同, 需要考虑的产物核的数目和产额数据的精度也不同, 比如, 核诊断只需要几个产物核的产额数据, 但精度要求很高; 而衰变热计算则需要一千多个产物核的产额。然而, 对于裂变产额, 即使是测量最多的热中子诱发<sup>235</sup>U 裂变, 也没有应用所需要的所有重要核素产额的实验数据。现有的实验测量数据不仅少而且分歧比较大, 有的能区甚至没有实验数据。因此需要对所有实验数据进行分析评价, 同时还需要用半经验方法或者理论模型计算给出没有实验数据的能区裂变产物产额, 给出实际应用所需要能点产额的最佳推荐值以及产额-能量关系。

<sup>135</sup>Xe 是热堆中重要的裂变产物, 也是有名的“裂变产物毒素”。<sup>135</sup>Xe 具有很大的热中子吸收截面(大约  $2.65 \times 10^6$  b), 在反应堆启动后很快趋近饱和, 同时它具有较短的半衰期(9.2 h), 停堆后又很快地衰变, 因此, <sup>135</sup>Xe 的产生和消失对反应堆的有效增殖系数及运行有很大的影响, 它的产额以及产额-能量关系也就显得非常重要。国内对这个核的产额一直没有进行过评价。本工作在收集了最新实验测量数据的基础上, 结合半经验模型的计算

结果, 对中子诱发<sup>235</sup>U 裂变产生的<sup>135</sup>Xe 的累积产额以及 0~20 MeV 产额-能量关系进行了评价。

## 2 评价方法

### 2.1 数据的收集

实验数据主要从 EXFOR 库<sup>[1]</sup>、CINDA<sup>[2]</sup>、国内测量以及其它最新出版物中检索。检索时, 需要对物理量进行判断, 本次评价的是累积产额, 在 EXFOR 库中检索时物理量为“CUM”。当产物核的累积产额与链产额相差不大(<5%)时, 还要收集与其相同质量数的链产额数据, EXFOR 库中称为 CHN。以<sup>135</sup>Xe 为例, 日本裂变产额数据库<sup>[3]</sup>的数据表明, <sup>135</sup>Xe 累积产额和链产额的差别小于 1%。也就是说, <sup>135</sup>Xe 的累积产额与其所在链的链产额几乎相等, 因此 A=135 质量链的链产额可以近似当作<sup>135</sup>Xe 的累积产额使用, 所以检索<sup>135</sup>Xe 的累积产额的同时还检索了 135 质量链的链产额数据。本次评价收集到 37 家与<sup>135</sup>Xe 有关的实验数据, 包括不同测量方法获得的, 如放化法、质谱法、直接  $\gamma$  法以及动能法等; 给出的产额有绝对产额、比值以及比值的比值(也称 R 值)等。

### 2.2 实验数据的修正和处理

对经过初步筛选的实验数据, 根据测量方法从以下几个方面对实验数据进行修正: 实验中采用的

标准产额、所探测  $\gamma$  射线的分支比、链累修正、有效中子能量、中子发射前后的质量分布的转换，以及由比值及  $R$  值求产额。下面具体讨论每种修正和处理。

### 2.2.1 标准产额修正

对于相对测量或者是比值测量得到的产额，还用到标准产额。当标准产额发生变化后，通常需要采用标准产额(监测核产额)的最新数据来修正原来的产额。原实验得到的产额  $Y_0$  与原实验中使用的标准产额  $Y_S^{old}$  的关系以及修正后的产额  $Y$  与标准产额新评价值  $P_S^{new}$  的关系分别是

$$\begin{aligned} Y_0 &= C \times Y_S^{old}, \\ Y &= C \times Y_S^{new}, \end{aligned} \quad (1)$$

$C$  是实验测量量。由修正前后  $C$  不变可以得到修正后的产额  $Y$ 。一般来说，同一个实验只用一个标准产额。标准产额首先采用中国核数据中心(CNDC)最新评价过的数据<sup>[4]</sup>，如果没有则参考其他评价产额库(如 ENDF/B-7<sup>[5]</sup>等)。

例如，文献[6]给出的热中子诱发<sup>235</sup>U 裂变产生<sup>135</sup>Xe 的累积产额，采用的标准是热中子诱发<sup>235</sup>U 裂变产生的<sup>85</sup>Kr<sup>m</sup> 的累积产额。本次评价采用的<sup>85</sup>Kr<sup>m</sup> 产额的最新评价值取自 ENDF/B-7 库。利用式(1)，得到进行标准产额修正后<sup>135</sup>Xe 的累积产额  $Y$  如表 1。

表 1 标准产额修正

核素	$Y_S^{old}$	$Y_S^{new}$	$Y_0(\%)$	$Y(\%)$
<sup>135</sup> Xe	1.330 0	1.290 7	7.070 0	6.861 1

### 2.2.2 $\gamma$ 射线分支比修正

用直接  $\gamma$  法和放化法伴随测量  $\gamma$  给出的产额数据，通常要进行  $\gamma$  射线分支比修正，大部分裂变产物产额测量只用一条  $\gamma$  射线。原实验得到的产额  $Y_0$  与原实验测量使用的  $\gamma$  射线分支比  $P_\gamma^{old}$  的关系以及修正后的产额  $Y$  与  $\gamma$  射线分支比的最新评价值  $P_\gamma^{new}$  的关系分别为

$$\begin{aligned} Y_0 &= C/P_\gamma^{old}, \\ Y &= C/P_\gamma^{new}. \end{aligned} \quad (2)$$

同样，由修正前后实验测量量  $C$  不变可以得到修正后的产额  $Y$ 。如果同一个核素用多条  $\gamma$  射线进行测

量，则情况比较复杂，可作如下近似处理：如果几条  $\gamma$  射线分支比的差别比较大，则用其中一条较大的进行修正，如果几条分支比差不多，则对这些  $\gamma$  射线分支比进行加权平均。 $P_\gamma^{new}$  依次取自 CNDC 最新评价值和 ENSDF(国际评价核结构和衰变数据库)<sup>[7]</sup>。

例如，文献[8]给出的热中子诱发<sup>235</sup>U 裂变产生<sup>135</sup>Xe 的累积产额，采用的  $\gamma$  射线能量为 249.6 keV，寿命为 9.17 h，分支比为 0.911。本次评价采用的  $\gamma$  射线分支比最新评价值取自 ENSDF。利用式(2)，得到  $\gamma$  射线分支比修正后<sup>135</sup>Xe 的产额  $Y$  如表 2。

表 2  $\gamma$  射线分支比修正

核素	$P_\gamma^{old}(\%)$	$P_\gamma^{new}(\%)$	$Y_0(\%)$	$Y(\%)$
<sup>135</sup> Xe	0.911	0.90	6.710 0	6.792

### 2.2.3 链累修正

某些产物核，放射性法测量的累积产额数据较少，如果此产物核的累积产额与其所在质量链的链产额的差别在误差范围内(小于 5%)，则可以用链产额代替累积产额；如果二者相差较大(5%~30%)，则引入链累修正因子  $\alpha$ ，用修正后的链产额代替累积产额。链累修正因子  $\alpha$  由下式计算：

$$\alpha = \frac{Y_{CUM}}{Y_{CHN}} \times 100\%, \quad (3)$$

式中  $Y_{CUM}$  和  $Y_{CHN}$  分别代表累积产额和链产额。

<sup>135</sup>Xe 的链累修正因子  $\alpha$  为 1，所以  $A=135$  质量链的链产额数据不用修正，可以直接当作<sup>135</sup>Xe 的累积产额使用。

### 2.2.4 有效中子能量

有些实验数据给出的入射中子能量是谱平均中子能量  $\bar{E}$ ，考虑到不同能量的中子的裂变截面不同，在研究产额能量关系时，不能直接使用裂变谱或快堆谱中子的平均能量，而应采用裂变截面作为权重对能量作加权平均的有效能量( $E_{eff}$ )：

$$E_{eff} = \frac{\int EN(E)\sigma_f(E)dE}{\int N(E)\sigma_f(E)dE}, \quad (4)$$

这里： $N(E)$  为裂变中子能谱分布，可近似用 Maxwell 谱，其核温度为  $T_M$ ； $E$  为中子能量。谱平均中

子能量  $\bar{E}$  与出射中子 Maxwell 分布核温度的关系为  $\bar{E} = 3/2T_M$ ,  $\sigma_f(E)$  为裂变截面, 数据取自于 ENDF/B-7 库。

本工作对  $^{135}\text{Xe}$  的以下能点(见表 3)进行了有效中子能量修正。

表 3  $^{235}\text{U}$  中子谱平均能量与有效能量

$E_{\text{mean}}/\text{MeV}$	$E_{\text{eff}}/\text{MeV}$
0.4	0.361
0.7	0.668
1.0	0.975
1.3	1.278
1.5	1.480

### 2.2.5 中子发射前后质量分布的转换

有些产物核, 放射性法测量的能点很少, 或者在很大能区范围没有实验数据, 因此无法判断产额-能量关系走向, 这时动能法测量的碎片质量分布结果可用以参考。但是实验数据库 EXFOR 一般只给出碎片发射中子前的质量分布, 而实际需要的是碎片发射中子后的质量分布, 利用碎片瞬发中子数随碎片质量分布的数据可以把发射中子前的质量分布转换成发射中子后的质量分布。本课题组对瞬发中子数随碎片质量分布以及发射中子前后质量分布的转换方法进行了详细的研究, 并编制了相应的计算程序<sup>[9]</sup>。图 1 给出了中子诱发  $^{235}\text{U}$  裂变碎片发射中子前后质量分布的比较。与发射中子前的质量分布比较, 发射中子后碎片的质量分布向质量数减少的方向移动。

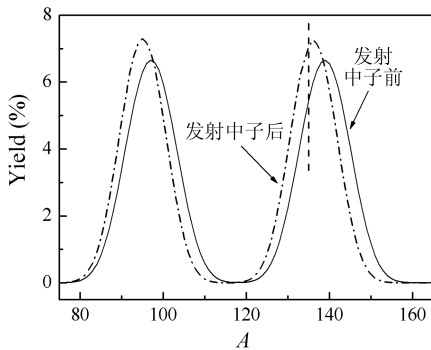


图 1 中子诱发  $^{235}\text{U}$  裂变碎片发射中子前后质量分布的比较

本次评价工作对文献[10—12]给出的发射中子前质量分布进行了转换。表 4 列出了文献[12]中部分能点  $A=135$  质量分布转换前后的比较。 $A=135$

质量(图 1 中的虚线)位于双驼峰质量分布重峰的内翼靠上的位置, 质量分布向左侧移动后,  $A=135$  质量对应的产额增大, 表 4 中列出的质量分布转换后产额变大与图 1 中的变化是一致的。

表 4 质量分布转换前后的比较

能点/MeV	发射中子前(%)	发射中子后(%)
0.5	5.88	7.33
1.5	5.71	6.84
2.5	5.55	6.32
3.5	5.51	6.57
4.5	5.39	6.56
5.5	5.47	6.64

### 2.2.6 比值测量数据处理

有时实验测量结果不是直接给产额, 而是给出两种产额的比值或  $R$  值, 这样可以消除绝对归一误差, 使误差减小。这样的数据, 评价也进行了收集, 比值和  $R$  值数据可以利用已知的标准产额求出相应的产额。如果所涉及的核素都是要评价的, 则需要同时进行评价。对某些核素, 既有绝对测量数据又有比值测量数据(如一个核两个能点的产额比值或者一个能点两个产物核产额的比值), 也需要同时进行评价。

例如, 文献[13]给出了裂变谱中子(FIS)和热中子(MXW)诱发  $^{235}\text{U}$  裂变产生的  $^{135}\text{Xe}$  的累积产额之比, 对此结果我们进行了同时评价, 评价结果见表 5。

表 5 同时评价处理前后的比较

	$^{135}\text{Xe-FIS}(\%)$	$^{135}\text{Xe-MXW}(\%)$	比值
评价前	7.045 2	6.429 3	1.059
评价后	6.870 5	6.461 7	1.063

### 2.3 误差调整

评价需要确定累积产额的总误差, 包含统计误差和系统误差。EXFOR 文档中产额的误差很复杂, 有的给出绝对误差, 有的给出相对误差, 有的只给出统计误差, 许多数据中没有包含  $\gamma$  分支比  $P$  的误差。因此, 在对数据进行修正时, 我们参考了裂变产额测量中常用的放化法和  $\gamma$  谱法的误差来源<sup>[12]</sup>,

综合多方面的影响，对误差进行了调整和处理，得到累积产额的总误差。本次评价工作，误差处理包括标准产额修正引入的误差和  $\gamma$  分支比  $P$  修正引入的误差。

对标准产额和  $\gamma$  分支比进行修正的同时，也需要对误差进行重新计算。一般 EXFOR 库中给出的产额误差为总误差，它包括实验本身误差和原标准产额误差，总误差减去原标准产额误差可以得到实验本身误差。实验本身误差在修正前后是不变的，它加上新标准产额的误差就得到修正后产额的误差。本工作根据式(1)和式(2)以及误差传递公式对

修正后产额的误差进行了计算。修正后产额  $Y$  的绝对误差为  $\Delta Y$ ，相对误差为  $\Delta Y' = \Delta Y / Y$ ，则有

$$\Delta Y' = \sqrt{\Delta Y_o'^2 - \Delta Y_{so}'^2 + \Delta Y_{sn}'^2},$$

$$\Delta Y' = \sqrt{\Delta Y_o'^2 - \Delta P_{\gamma o}'^2 + \Delta P_{\gamma n}'^2}, \quad (5)$$

这里： $\Delta Y_o'$  为原始产额的相对误差； $\Delta Y_{so}'$  和  $\Delta P_{\gamma o}'$  分别为原始标准产额和  $\gamma$  分支比的相对误差； $\Delta Y_{sn}'$  和  $\Delta P_{\gamma n}'$  分别为本次评价工作采用的新标准产额和  $\gamma$  分支比的相对误差。其他修正引入的误差比较小，在本次评价工作中没有考虑。表 6 和表 7 分别是上述两种误差调整的范例。

表 6 标准产额修正引入的误差(实验数据取自文献[6])

核素	$Y_S^{old}(\%)$	$\Delta Y_S^{old}(\%)$	$Y_S^{new}(\%)$	$\Delta Y_S^{new}(\%)$	$Y_o(\%)$	$\Delta Y_o(\%)$	$Y(\%)$	$\Delta Y(\%)$
$^{135}\text{Xe}$	1.330 0		1.290 7	0.004 5	7.070 0	0.850 0	6.861 1	0.825 1

表 7  $\gamma$  分支比修正引入的误差(实验数据取自文献[8])

核素	$P_{\gamma}^{old}$	$\Delta P_{\gamma}^{old}$	$P_{\gamma}^{new}$	$\Delta P_{\gamma}^{new}$	$Y_o(\%)$	$\Delta Y_o(\%)$	$Y(\%)$	$\Delta Y(\%)$
$^{135}\text{Xe}$	0.911		0.90	0.03	6.71	0.18	6.792	0.290 6

### 2.4 分析比较和再评价

经过修正和误差调整后的数据还需要进一步分析比较。对分歧特别大的，则需再次评价：或找分歧原因，看是否数据有误；或参看文献，与作者讨论；或者与其他能点、核素进行比较，看是否有系统差别。最后根据实际情况再进行处理，或者完全舍弃或部分舍弃(能点或者核素)实验数据，或者视

经过处理修正后数据的比较。可以看出，Yang Yi 的数据<sup>[14]</sup>修正后发生了明显的变化。

### 2.5 协方差数据的评价

对于协方差数据的评价，物理上给出的是总误差和关联误差。总误差上节已讨论，下面讨论关联误差的评价。

对于产额测量，系统误差的主要贡献是  $\gamma$  分支比的误差  $\Delta P$ 、探测器效率刻度误差  $\Delta \epsilon_D$  和裂变数测量误差  $\Delta N_f$  (或 200% 归一化误差  $\Delta N_{nor}$ )，而这些误差由于不同的测量方法对不同的产物核和不同的能点的作用和产生的关联性质是不同的。通常， $\Delta P_{\gamma}$  对同一产物核素的所有能点是长程的，但它在双动能法的测量中不起任何作用(双动能法测量不用  $\gamma$  射线)。 $\Delta \epsilon_D$  无论对不同产物核和同一产物核的不同能点都会产生关联，但对前者是中程的，而对后者是长程的。 $\Delta N_f$  ( $\Delta N_{nor}$ ) 对同一能点同时测量的所有产物核的作用是长程的(同一能点，同一次测量)。但对不同的能点一般不会产生关联(不同的能点，不是同一次测量)。

$^{135}\text{Xe}$  多能点产额测量主要有文献[10-12]和

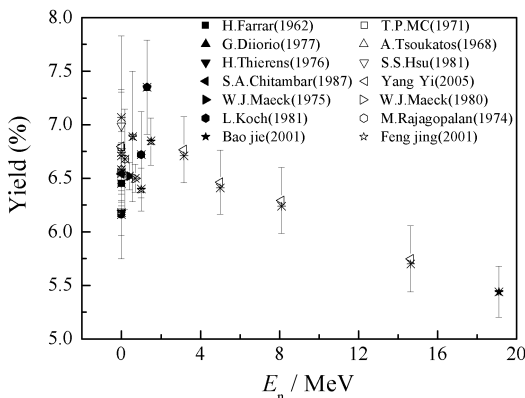


图 2 修正后数据与修正前实验数据的比较<sup>[14-18]</sup>

情况把误差进行再调整，放大误差，使误差棒能搭上。图 2 给出了修正前实验数据(米字符号表示)与

文献[14]。分析这几家实验测量数据,对每家给出的主要系统误差  $\Delta N_f$ ,  $\Delta \epsilon_D$  和  $\Delta P_\gamma$  进行了分析,把

对关联误差有贡献的系统误差求平方并开方给出关联误差,如表 8 所列。

表 8 多能点测量数据的系统误差及关联误差

文献	能点/MeV	核素	系统误差(%)			总关联误差(%)	备注
			$\Delta N_f$	$\Delta \epsilon_D$	$\Delta P_\gamma$		
[10]	热能点, 0.12, 0.2, 0.3, 0.4, 0.5, 0.6	$^{135}\text{Xe}$	5.0	5.0	0.2	7.1	双动能法, $\Delta P_\gamma$ 不产生关联
[11]	热能点, 0.28, 0.73, 1.1, 1.3, 1.7, 2.0, 2.5, 3.1, 3.5, 5.0, 6.1, 7.0	$^{135}\text{Xe}$	5.0	5.0	0.2	7.1	双动能法, $\Delta P_\gamma$ 不产生关联
[14]	热能点, 3.16, 5.0, 8.1, 14.64	$^{135}\text{Xe}$	1.5	2.0	0.2	0.2	不同作者测量, 裂变率、探测器效率之间不存在关联
[12]	0.5, 1.0, 1.5, 2.0, 2.5, 3.0, 3.5, 4.0, 4.5, 5.0, 5.5, 6.0	$^{135}\text{Xe}$	3.0	4.0	0.2	4.0	不同加速器, 中子源之间不存在关联; 动能法 $\Delta P_\gamma$ 不产生关联

### 3 数据处理程序

对上述经过物理评价给定的数据、总误差以及关联误差进行数据处理,给出评价推荐值。所有的处理均考虑了数据的相关性。

#### 3.1 单能点数据——加权平均(CURVEFIT)

如果同一个产物核在同一个能点有多家数据测量结果,则需要对它们进行相关数据的加权平均,用 CURVEFIT 程序完成,最后给出加权平均值及外误差为其评价推荐值。外误差为既考虑到每家数据所给出的误差又考虑到各家数据之间分歧的影响所给出的误差。

#### 3.2 同时评价——ZOTT 程序<sup>[19]</sup>

对某些核素,需要进行同时评价。同时评价采用 ZOTT 程序进行处理。输入数据包括所考虑核素产额的绝对测量值、比值(可以多个)以及各自的误差,还需要建立灵敏度矩阵。ZOTT 程序处理后给出调整后自洽的绝对产额值、误差、比值和协方差矩阵等。

#### 3.3 产额-能量关系——样条拟合(SPCC 程序<sup>[20]</sup>)

实际应用中,不仅需要单能点的产额,还需要知道 0~20 MeV 范围内产额-能量关系。以往评价所用的数据均是 EXFOR 库中检索、修正、评价后的数据,能点较少,有的能区甚至没有实验数据,对产额-能量关系的走向带来了困惑。本次评价第一次利用了理论系统学规律,即 CNDC 发展起来的

半经验模型<sup>[21]</sup>的计算结果,计算结果包括了 0~20 MeV 的全部能点。

半经验模型是在裂变多通道无规颈断裂模型<sup>[22]</sup>基础上,通过简化复杂的裂变多通道位能曲面理论,考虑壳效应所建立的温度相关的裂变产额的半经验理论模型,该模型通过拟合大量的裂变实验数据,确定了模型的参数,计算了中子诱发 $^{235}\text{U}$  裂变 0~20 MeV 全部能点的质量分布和产额-能量关系数据。但是,这些数据的准确性必须依靠实验数据来判定。因此,在具体应用中根据实际情况决定半经验模型的计算结果如何使用。例如,有的核只是利用了该模型计算的产额-能量关系的走向,有的核是计算结果在热能点与评价推荐值归一,有的核计算结果与实验数据进行多能点归一。

## 4 结果与讨论

#### 4.1 单能点数据

从实验数据来看热能点实验测量结果较多,因此这里给出 $^{135}\text{Xe}$  热能点产额以及误差的评价推荐值(如表 9),还给出了所采用的 10 套实验数据及处理方法。表 9 中列出的误差为 1.5%~2.0%,比较小,这是由于其中有质谱法测量的数据,而质谱法测量产额误差较小(2%~3%)。此外,热能点实验测量结果比较多,且各家统计比较一致,多家测量又使误差减小。具体处理时,质谱法、动能法以及飞行时间法测量的数据之间的关联误差取为 0;对

GeLi 探测器的放化法、直接  $\gamma$  谱法和活化法测量数据之间的关联误差取相应  $\gamma$  射线分支比最新评价的误差。

表 9  $^{135}\text{Xe}$  热能点产额推荐数据

核	Y(%)	$\Delta Y(\%)$	实验数据(套)	处理方法
$^{135}\text{Xe}$	6.542 3	0.130 72	10	CURVEFIT + ZOTT

### 4.2 0~20 MeV 产额-能量关系

研究 0~20 MeV 产额-能量关系需要充分利用所有可以利用的数据, 包括修正过的单能点数据、动能法数据及半经验模型计算结果。对  $^{135}\text{Xe}$  的产额, 在热能点, 我们把动能法测量结果与评价推荐值进行了归一, 半经验模型计算结果与 Yang Yi 的测量结果进行了多能点归一。然后, 对所有修正评价过的实验数据和修正归一半经验模型的计算结果进行 SPCC 三次样条拟合。拟合的  $^{135}\text{Xe}$  产额-能量关系曲线及其所依据的实验(评价、修正、加权平均、同时评价过的)和理论数据如图 3。图中 average 表示表 9 中热能点产额的加权平均值。

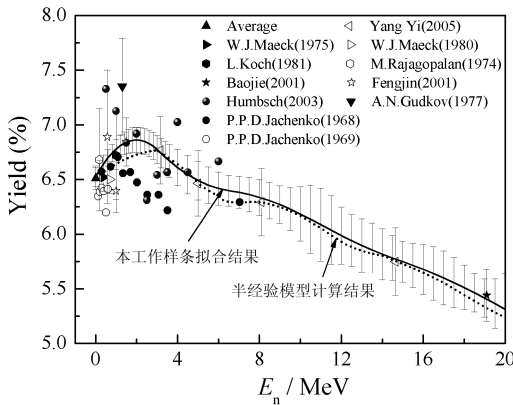


图 3  $^{135}\text{Xe}$  评价采用的数据及评价结果

与以前产额评价结果比较, 这次产额评价的最大不同是加入了理论系统学的结果, 即半经验模型计算的结果。 $^{135}\text{Xe}$  以前没有评价过, 这次是第一次对这个核产额-能量关系进行评价。这个核处在双驼峰质量分布重峰的内翼靠上的位置, 产额总体应该是随入射能量的增加而下降的。从图 3 所示的拟合曲线可以看出, 随着入射中子能量的增加, 除了由于多道裂变造成的台阶外,  $^{135}\text{Xe}$  的产额先增加,

然后大约在 2.0 MeV 后开始下降, 下降几乎是线性的。这与图 4 给出的用半经验模型计算的  $^{135}\text{Xe}$  产额随能量变化的结果是一致的, 图中虚线所标志之处是  $^{135}\text{Xe}$  产额随入射中子能量的变化。

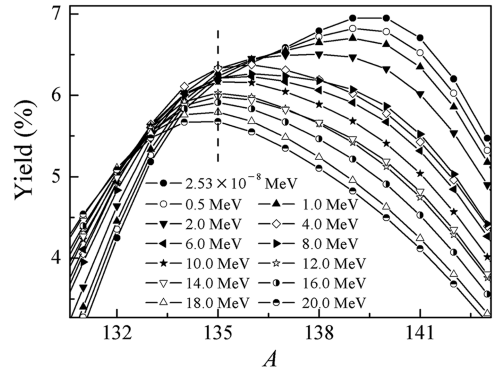


图 4 半经验模型计算的  $^{135}\text{Xe}$  理论系统学结果

### 4.3 协方差数据

数据处理中考虑了数据的相关性, 使拟合计算值及其误差都可能发生变化。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。本工作中关联误差是按照实际情况评价给定的。图 5 给出了  $^{135}\text{Xe}$  拟合值的关联系数矩阵。拟合时考虑了同一家测量数据不同能点之间的关联, 没有考虑各家实验数据之间的关联。从图 5 可以看

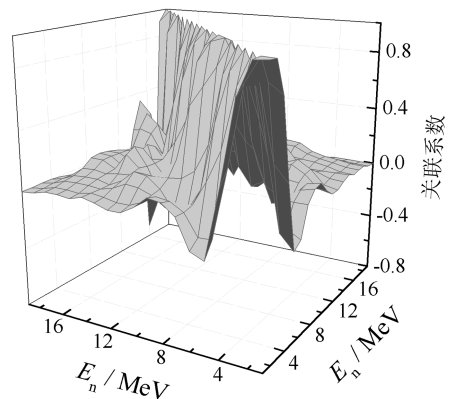


图 5  $^{135}\text{Xe}$  拟合值的关联系数矩阵

出, 所给的评价数据的关联误差是合理的: 首先, 对角线上的关联比较大, 接近于 1。这是由于按照关联系数的定义同一能点本身的关联肯定为 1, 而与它相近的点, 由于 SPCC 样条拟合过程中, 曲线

光滑连续的约束条件而使得它们之间产生比较大的关联；其次，远离点之间的关联较小，这是由于输入实验数据的关联误差比较小，而远离点关联主要是由输入数据的关联传递过来的。

## 5 结论

尽量全地收集了实验数据，根据所测物理量、实验测量方法及其他数据比较决定数据的取舍；用最新评价的标准产额、 $\gamma$  分支比对数据进行了修正，对误差进行了调整；分析评价给出了实验测量的系统误差和关联误差。用相关数据的加权平均、同时评价和曲线拟合程序 CURVEFIT, ZOTT 和 SPCC 对数据进行了处理。

给出了<sup>135</sup>Xe 热能点产额的推荐值以及 0~20 MeV 产额-能量关系曲线。热能点产额测量数据比较多，且统计一致，加权平均和同时评价给出的推荐值是比较可靠的，数据误差考虑了  $\gamma$  分支比的误差，数据处理考虑了测量数据之间的相关性，所给误差是合理可靠的。

本评价利用了半经验模型计算结果，考虑了产额变化的系统性，这在国内外产额数据评价中还是首次；其次，数据的评价处理中考虑了数据的相关性，具体分析了每种测量方法的关联误差，给出了产额拟合值的协方差矩阵。

## 参考文献 (References):

- [1] EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data [EB/OL]. [2010-12-16]. <http://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>.
- [2] CINDA: Computer Index of Nuclear Reaction Data [EB/OL]. [2010-12-16]. <http://www-nds.iaea.org/exfor/cinda.htm>.
- [3] [2010-12-16]. <http://www-nds.iaea.org/publications/iaea-nds/iaea-nds-0138.pdf>.
- [4] [2010-12-16]. <http://www-nds.iaea.org/ndspub/download-ensdf/CENDL-3.1/>.
- [5] [2010-12-16]. <http://www-nds.iaea.org/publications/iaea-nds/iaea-nds-0106.pdf>.
- [6] EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data [EB/OL]. [2010-12-16]. <http://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>. Target: <sup>235</sup>U, Reaction: (n, F), Quantity: FY, Accession: 30666.
- [7] ENSDF: Evaluated Nuclear Structure Data File [EB/OL]. [2010-12-16]. <http://www.nndc.bnl.gov/ensdf/>.
- [8] EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data [EB/OL]. [2010-12-16]. <http://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>. Target: <sup>235</sup>U, Reaction: (n, F), Quantity: FY, Accession: 13286.
- [9] CHEN Yongjing, LIU Tingjin, SHU Nengchuan. Chinese Physics C, 2010, **34**: 953.
- [10] EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data [EB/OL]. [2010-12-16]. <http://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>. Target: <sup>235</sup>U, Reaction: (n, F), Quantity: FY, Accession: 40017.
- [11] EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data [EB/OL]. [2010-12-16]. <http://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>. Target: <sup>235</sup>U, Reaction: (n, F), Quantity: FY, Accession: 40235.
- [12] CHRISTEN A. Neutron Induced Fission of <sup>235</sup>U [D]. Denmark: Physics Institute, University of Aarhus, 2003.
- [13] EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data [EB/OL]. [2010-12-16]. <http://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>. Target: <sup>235</sup>U, Reaction: (n, F), Quantity: FY, Accession: 40489.
- [14] YANG Yi. Experimental Research on the Dependence of <sup>235</sup>U Fission Yields on Incident Neutron Energies [D]. Beijing: China Institute of Atomic Energy, 2005.  
(杨毅. <sup>235</sup>U 裂变产额随入射中子能量变化的实验研究 [D]. 北京: 中国原子能科学研究院, 2005.)
- [15] EXFOR: Experimental Nuclear Reaction Data [EB/OL]. [2010-12-16]. <http://www-nds.iaea.org/exfor/exfor.htm>. Target: <sup>235</sup>U, Reaction: (n, F), Quantity: FY, Product: <sup>135</sup>Xe.
- [16] LI Ze, CUI Anzhi, LIU Daming, *et al.* Chinese J. Nucl Radiochem, 1995, **17**: 65.
- [17] BAO Jie, LIU Yonghui, YANG Yi, *et al.* Commutation of Nuclear Data Progress, 2001, **26**: 8.
- [18] FENG Jing, LIU Yonghui, YANG Yi, *et al.* Commutation of Nuclear Data Progress, 2001, **25**: 4.
- [19] LIU Tingjin. Commutation of Nuclear Data Progress, 1998, **19**: 103.
- [20] LIU Tingjin, LIANG Qichang. Commutation of Nuclear Data Progress, 1994, **11**: 116.
- [21] SHU Nengchuan, CHEN Yongjing, LIU Tingjin, *et al.* Journal of the Korean Physical Society, 2011, **59**: 1251.
- [22] ULRICH B, SIEGFRIED G, ANDREAS M. Physics Reports, 1990, **197**: 167.

## Evaluation of Fission Yields

CHEN Yong-jing<sup>1)</sup>, LIU Ting-jin, SUN Zheng-jun, SHU Neng-chuan

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

**Abstract:** Taking  $^{135}\text{Xe}$  produced by neutron induced fission of  $^{235}\text{U}$  as an example, the evaluation method for fission yield was introduced using the all experimental data available. The evaluation procedure includes the experimental data collection, correction, evaluation, error assessment and data analysis. The study of the uncertainty covariance, application of semi-empirical theoretical calculation and the yield energy-dependence of  $^{135}\text{Xe}$  in the incident energy range 0~20 MeV were emphasized in this work.

**Key words:** fission yield; data evaluation; yield energy-dependence;  $^{135}\text{Xe}$