

文章编号: 1007-4627(2022)03-0405-08

裂变产物衰变链设计

黄小龙¹, 何璞映², 杨东^{2,†}, 王香涵¹, 金永利¹, 李剑²

(1. 中国原子能科学研究院核数据重点实验室, 北京 102413;

2. 吉林大学物理学院, 长春 130012)

摘要: 根据核科学参考文献库, 对半衰期、缓发中子发射几率等进行了更新评价, 采用系统学研究和理论研究相结合的评价方法对裂变产物中不确定的基态进行了自旋指定, 对部分存在问题的数据进行了必要修正; 对衰变子核存在同质异能态的放射性核素, 根据衰变纲图和内转换系数重新计算得到退激至子核同质异能态和基态的分支比数据。在此基础上, 结合现有核结构和衰变数据库, 研制了裂变产物衰变链设计专用衰变数据库, 按照衰变规律, 建立了裂变产物衰变路径和衰变信息的完整衰变链, 本工作为裂变产物分析和裂变产额研究提供了一个便利参考。

关键词: 裂变产物; 衰变数据; 衰变链

中图分类号: O571

文献标志码: A

DOI: 10.11804/NuclPhysRev.39.2022020

1 引言

原子核裂变时首先生成具有一定质量的裂变碎片, 这些碎片一般是丰中子的, 很不稳定, 在发射出瞬发中子和瞬发 γ 射线后, 由于仍然具有较高的中子-质子比, 还是很不稳定, 会继续进行一系列 β^- 衰变, 直至它们变为稳定核素时为止。裂变碎片及其中子俘获和衰变子核统称为裂变产物, 裂变产物核素质量数通常从 66 到 172。

通过 β^- 衰变, 裂变产物放出 β 粒子, 转变为另一个核素, 当处于激发态时会跃迁到基态, 发射出缓发 γ 射线。通过 β^- 衰变和电子俘获, 核素原子序数或增或减, 但质量数保持不变, 这些质量数相同的核素就可以排成一排, 构成一个衰变链。衰变链对裂变产物分析和裂变产额研究非常重要。

每个衰变链由于核素衰变模式的不同造成每个链上的衰变路径也不同。对于简单的母子体衰变关系的衰变链, 可采用手工方法进行计算并绘制, 但当母子体衰变关系较复杂时, 例如某一核素同时存在着 β^- 衰变、 β^+ 衰变、同质异能态跃迁、 α 衰变等多种衰变模式时, 就会有多个衰变分支, 相应形成多条衰变路径, 这时若采用手工方法耗时繁琐且容易出错。为此, 本文基于现有核结构和衰变数据库和最新实验测量数据, 研制了裂

变产物衰变链设计专用衰变数据库, 按照衰变规律, 建立了裂变产物的衰变路径和衰变信息的完整衰变链, 以满足裂变产物分析的需要, 为其实验设计提供指导。

2 数据评价

裂变产物衰变链设计时所需要的数据, 常常会遇到这种情况: 某个物理量有很多家测量数据, 这些测量数据存在着严重的分歧。如果不经评价, 这些测量数据就无法使用。评价工作包括物理评价和数学处理两个过程, 其主要流程是: (1) 物理评价, 核数据评价最重要的基础是实验测量数据, 在广泛收集有关实验数据的基础上, 从物理角度出发, 对测量进行筛选和权重评估, 包括: 半衰期、 β 和 γ 射线的发射几率的测量和计算方法、能量和强度数据是否考虑结构数据、测量使用的仪器、研究组、完成时间等; 对于同一组实验团队不同时期的测量数据, 将采用其最新发表的结果。必要时可对实验数据特别是实验数据不确定度做出调整、修正或取舍从而达到统计意义上的一致。(2) 数学处理, 确定了采用的实验数据后, 对统计意义上一致的数据通过数学处理给出在统计意义上“最佳”的推荐值及推荐值不确定度, 尽量不采用无不确定度的实验数据, 但如遇到缺乏实验数据的特殊情况, 则使用该类数据并予以说明。本工作采用的数学处理方法是常见的加权平均法。

收稿日期: 2022-02-25; 修改日期: 2022-03-31

基金项目: 国家基础科学公共科学数据中心“核物理主题数据库”资助项目 (NBSDC-DB-08)

作者简介: 黄小龙 (1967-), 男, 四川广安人, 博导, 从事核结构和衰变数据评价研究; E-mail: huang@ciae.ac.cn

† 通信作者: 杨东, E-mail: dyang@jlu.edu.cn

2.1 加权平均法

在下面讨论中, $x_i (i = 1, 2, \dots, n)$ 是对某个物理量 X 所测的互不相关的测量数据, σ_i 为其不确定度, 相应权重 $w_i = \frac{1}{\sigma_i^2}$, n 为总的测量次数。

加权平均法以测量数据的不确定度作权, 其加权平均值 x_w 为

$$x_w = \frac{\sum x_i w_i}{\sum w_i}, \quad (1)$$

相应的不确定度取 σ_{inn} 、 σ_{ext} 二者之较大值:

$$\sigma_{\text{inn}} = \sqrt{\frac{1}{\sum w_i}}, \quad (2)$$

$$\sigma_{\text{ext}} = \sqrt{\sum_i \frac{(x_i - x_w)^2}{\sigma_i^2 \times (n-1)}} \times \sqrt{\frac{1}{\sum w_i}}. \quad (3)$$

根据核科学参考文献库 NSR^[1] 和核结构数据库 ENSDF^[2], 对半衰期、 β^-n 等实验测量数据进行了收集与整理 (截止时间 2021 年 12 月), 若现有评价数据完成后没有新的实验数据, 对存在缓发中子的先驱核, 半衰期、 β^-n 等取自最新评价数据^[3-4], 其它核的半衰期取自 ENSDF 库; 若现有评价数据完成后有新的实验数据, 则对所有实验数据进行物理分析后, 采用加权平均法给出新的评价数据。

2.2 基态自旋指定

原子核的基态自旋是重要的原子核基础数据, 它直接决定裂变产物衰变链上核素的衰变路径。目前远离稳定线的核素由于实验条件限制相当多的基态自旋数据并不确定或缺乏指定。图 1 给出了一个典型例子, 从图 1 中可看出, ^{102}Y 核的基态和同质异能态的自旋都缺乏指定, 不同的自旋指定会给出不同的衰变路径, 因此必须对数据不确定或缺乏指定的自旋进行重新评价。

E(level) [†]	J ^π [‡]	T _{1/2}	XREF	Comments
0.0+x	HIGH J	0.36 s 4	A	$\% \beta^- = 100$; $\% \beta^- n = 4.9$ 12 $\% \beta^- n$: weighted average of 6.0 17 (1986ReZS) and 4.0 15 (1996Me09). Should be considered as a combined value for both isomers. E(level): from systematics in lighter Y isotopes, two ^{102}Y isomers are expected. Experimental evidence for the existence of two isomers is based on a different I(152γ)/I(326γ) ratio obtained in the studies of 1983Sh13 and 1988HiZQ. J^π probably high because production method via $^{235}\text{U}(n, f)$ favors high-spin isomer. Th high spin isomer is directly produced in the fission reaction. See also general comment. T_{1/2}: from 1983Sh13, $\gamma(t)$. Contamination of T_{1/2} by low-spin isomer cannot be excluded. Others: 0.27 s 7 (1981HiZX), 0.5 s 1, β^- delayed neutron decay (1980KrZY). 0.44 s 6 (1986ReZS). 0.9 s 3 (1974GrZN) is probably incorrect.
0.0+y	LOW J	0.298 s 9	A	$\% \beta^- = 100$; $\% \beta^- n = 4.9$ 12 $\% \beta^- n$: weighted average of 6.0 17 (1986ReZS) and 4.0 15 (1996Me09) should be considered as a combined value for both isomers. E(level): the assignment based on mass-separated samples of $A = 102$ produced in U(n, f) with Sr as major activity. As a consequence primarily the decay of the low-spin isomer of ^{102}Y is fed in the β^- decay of ^{102}Sr and as such indirectly produced. T_{1/2}: Weighted average of 0.30 s 6 (1991Hi02) and 0.29 s 2 (1996Me09). Slight contamination of T_{1/2} by high-spin isomer cannot be excluded. Other: 0.44 s 6 (1986ReZS).
93.80+y 6			A	

图 1 ^{102}Y 核的基态和同质异能态的能级信息 (在线彩图)

采用系统学研究和理论研究相结合的评价方法。在整个裂变产物核区, 区分已有准确自旋指定的原子核和自旋待定的候选核, 考察同位素链和同中子素链中原子核基态自旋随中子和质子的变化, 找出其一致性及随中子和质子的变化规律及导致这些现象的物理机制, 提供自旋指定的系统性证据, 为候选核基态自旋指定提供参考。利用成熟的壳模型和其他理论研究方法, 对重要或者关键的原子核及附近同位素或同中异位素基态自旋进

行研究, 包括微观结构如组态等分析, 与已有的实验结果比较, 最终为基态自旋指定提供理论方面的物理依据。最终根据二者对裂变产物中不确定的基态进行自旋指定, 对部分存在问题的数据进行必要修正。

表 1 给出了部分核基态自旋重新评价结果, 本次基态自旋重新评价结果考虑了以下信息: (1) 直接测量 (磁矩、电四极矩); (2) 衰变数据的自洽; (3) 低激发态结构数据的自洽; (4) 系统学及附近 Nilsson 轨道; (5) 理论计算。

表1 部分核建议的基态自旋修正及重新评价结果

核素	ENSDF数据库	本工作评价	修正原因
^{83}Ga	无	(5/2 ⁻)	系统学、CDFT模型计算
^{85}As	(3/2 ⁻)	(5/2 ⁻)	系统学、CDFT模型计算
^{89}Br	(3/2 ⁻ , 5/2 ⁻)	(5/2 ⁻)	系统学
$^{97-103}\text{Rb}$	(3/2 ⁺)	(3/2 ⁻)	系统学, nilsson轨道分析
$^{105,107}\text{Tc}$	(3/2 ⁻)	(5/2 ⁺)	系统学
^{125}Ag	(9/2 ⁺)	(7/2 ⁺)	系统学
^{147}La	(3/2 ⁺)	(3/2 ⁻)	系统学
^{151}La	(1/2 ⁺)	(3/2 ⁻)	系统学
$^{161-167}\text{Eu}$	(5/2 ⁺)	(5/2 ⁺ , 11/2 ⁻)	系统学

2.3 衰变至子核同质异能态的衰变分支比

若衰变子核存在同质异能态,在设计衰变链时就要知道母核退激至子核同质异能态和基态的分支比,可根据衰变纲图和内转换系数进行计算得到。

假定母核衰变到子核同质异能态的粒子的绝对强度为 B_m ,所有跃迁到该同质异能态的每条 γ 射线的相对强度 $I_j(j=1, 2, \dots, m)$,相对应的内转换系数为 α_j ,则跃迁到该同质异能态的总的绝对强度 $P_m=N \times \sum I_j(1+\alpha_j)+B_m$, N 为归一化因子;母核衰变到基态的粒子的绝对强度为 B_g ,所有跃迁到基态的每条 γ 射线的相对强度 $I_i(i=1, 2, \dots, n)$,相对应的内转换系数为 α_i ,则跃迁到基态的总的绝对强度 $P_g=N \times \sum I_i(1+\alpha_i)+B_g$;此时衰变至子核同质异能态的衰变分支比 R_m 为

$$R_m = P_m / (P_m + P_g). \quad (4)$$

衰变至基态的衰变分支比 $R_g=100-R_m$ 。对于实验测量数据不全或无测量数据的衰变,本工作取 $R_g=50$, $R_m=50$ 。

3 专用核衰变数据库

根据裂变产物的衰变路径和衰变信息等特点,研制了裂变产物衰变链设计专用衰变数据库,采用ENSDF数据格式,包含8种衰变类型的衰变数据,这些衰变类型有: β^- 负衰变、伴随 β^- 负衰变的缓发中子衰变 β^-n 、 β^-2n (由于目前实验上最多只观测到2个缓发中子, β^-3n 及以上就没有涉及)、双 β 负衰变 $2\beta^-$ 、 β^+/ϵ 轨道电子俘获、双 β 正衰变 $2\beta^+/2\epsilon$ 、 α 衰变、IT同核异能跃迁。数据库中的重要数据如半衰期、衰变分支比等,全部取自本工作更新评价、国际评价核结构和衰变数据库ENSDF^[2]和NUBASE^[5]数据库,其中, β^-n 、 β^-2n 等取自最新评价数据^[3-4]。

每个衰变链上除放射性核素外,还有稳定核素,为便于衰变链设计以及实际应用,将ENSDF数据格式的

数据库转换成ENDF格式的数据库,并增加了稳定核素。在构建ENDF格式数据库时,主要考虑:(1)核素ID,每个核素都对应一个核素识别,包括元素符号、质量数、原子序数以及中子数;(2)核的状态,即基态g、第一同质异能态m以及第二同质异能态n(本工作最多考虑两个同质异能态);(3)半衰期或稳定核素丰度;(4)衰变方式;(5)衰变分支比(包括退激至子核同质异能态的分支比)。这样在每个质量链上,就包括所有稳定核素、 β^- 衰变核素以及少量 β^+/ϵ 衰变核素,涵盖了裂变产物衰变链设计所需的全部数据信息。使用该库的数据,可完成 $A=66\sim 172$ 核区裂变产物衰变链设计。下面给出库中的数据内容。

对于所有放射性核素的衰变数据,每个衰变母核的具体数据内容如下所示:

- **母核特性:** E_i (能级), J^π (自旋宇称), $T_{1/2}$ (半衰期), Q (总衰变能), $\alpha\%$, $\epsilon\%$, $\beta^+\%$, $\beta^-\%$, $\beta^-n\%$, $IT\%$ (衰变分支比);
- **子核特性:** E_f (能级), J^π (自旋宇称), $T_{1/2}$ (半衰期);
- **β (或 ϵ)衰变特性:** E_β 、 E_ϵ (平均衰变能量), $I_\beta^\pm$ 、 I_ϵ (衰变强度);
- **γ 衰变特性:** E_γ (γ 能量), I_γ (γ 强度), α_k 、 α_k/α_L 、 $\dots$ (内转换系数);
- **α 衰变特性:** E_α (能量), I_α (强度);
- **其它伴随辐射:** 俄歇电子、内转换电子和X射线等辐射的能量及其强度;
- **归一化因子:** NR(相对 γ 射线), NT($\gamma+ce$ 的总 γ 跃迁), NB(β 衰变), BR(分支比)。

专用数据库中所有核素如表2所列。

4 衰变链设计

4.1 裂变产物衰变链组成

这里以 ^{129}In 为例,介绍裂变产物衰变链是如何组成的并以此说明其复杂性,母体核素形成 ^{129}In 的衰变关系以及 ^{129}In 衰变退激关系如图2所示。

从图2可看出,衰变到 ^{129}In 的母体核素包括:(1)核材料裂变直接产生;(2)由各前驱母体衰变而来,包括 ^{129m}Cd 、 ^{129}Cd 、 ^{129m}In 、 ^{129n}In 。 ^{129}In 衰变退激的子体核素包括:(1) ^{129m}Sn ;(2) ^{129}Sn ;(3) ^{128}Sn 。由此可见, ^{129}In 的衰变链非常复杂,衰变路径多达7条,这部分的计算比较繁杂,需逐个计算每个前驱母核衰变到该核素以及退激至各个子核的衰变信息。

4.2 设计思路

衰变链每个衰变阶段的名称取决于它与前后阶段的关系,“母体核素”衰变后产生“子体核素”。子体核素有可能是稳定的,但也可以继续衰变形成下一个子体核素。

表 2 专用衰变数据库中的所有核素

所有核素列表

V - 66, Cr- 66, Mn- 66, Fe- 66, Co- 66, Ni- 66, Cu- 66, Zn- 66 , Ga- 66, Ge- 66;
V - 67, Cr- 67, Mn- 67, Fe- 67, Co- 67, Co- 67m, Ni- 67, Cu- 67, Zn- 67 , Ga- 67, Ge- 67;
Cr- 68, Mn- 68, Fe- 68, Co- 68, Co- 68m, Ni- 68, Cu- 68, Cu- 68m, Zn- 68 , Ga- 68, Ge- 68;
Cr- 69, Mn- 69, Fe- 69, Co- 69, Co- 69m, Ni- 69, Ni- 69m, Cu- 69, Zn- 69, Zn- 69m, Ga- 69 , Ge- 69, As- 69;
Cr- 70, Mn- 70, Fe- 70, Co- 70, Co- 70m, Ni- 70, Cu- 70, Cu- 70m, Cu- 70n, Zn- 70 , Ga- 70, Ge- 70, As- 70, Se- 70;
Mn- 71, Fe- 71, Co- 71, Ni- 71, Ni- 71m, Cu- 71, Zn- 71, Zn- 71m, Ga- 71 , Ge- 71, Ge- 71m, As- 71;
Mn- 72, Fe- 72, Co- 72, Co- 72m, Ni- 72, Cu- 72, Zn- 72, Ga- 72, Ga- 72m, Ge- 72 , As- 72, Se- 72;
Mn- 73, Fe- 73, Co- 73, Ni- 73, Cu- 73, Zn- 73, Zn- 73m, Ga- 73, Ga- 73m, Ge- 73 , Ge- 73m, As- 73, Se- 73, Se- 73m;
Fe- 74, Co- 74, Ni- 74, Cu- 74, Zn- 74, Ga- 74, Ga- 74m, Ge- 74 , As- 74, Se- 74 , Br- 74, Br- 74m, Kr- 74;
Fe- 75, Co- 75, Ni- 75, Cu- 75, Zn- 75, Zn- 75m, Ga- 75, Ge- 75, Ge- 75m, As- 75 , As- 75m, Se- 75, Br- 75;
Fe- 76, Co- 76, Co- 76m, Ni- 76, Cu- 76, Cu- 76m, Zn- 76, Ga- 76, Ge- 76 , As- 76, Se- 76 , Br- 76, Br- 76m, Kr- 76;
Co- 77, Ni- 77, Cu- 77, Zn- 77, Zn- 77m, Ga- 77, Ge- 77, Ge- 77m, As- 77, Se- 77 , Se- 77m, Br- 77, Br- 77m, Kr- 77;
Co- 78, Ni- 78, Cu- 78, Zn- 78, Ga- 78, Ge- 78, As- 78, Se- 78 , Br- 78, Kr- 78 , Rb- 78, Rb- 78m, Sr- 78;
Ni- 79, Cu- 79, Zn- 79, Zn- 79m, Ga- 79, Ge- 79, Ge- 79m, As- 79, Se- 79, Se- 79m, Br- 79 , Br- 79m, Kr- 79, Kr- 79m, Rb- 79;
Ni- 80, Cu- 80, Zn- 80, Ga- 80, Ga- 80m, Ge- 80, As- 80, Se- 80 , Br- 80, Br- 80m, Kr- 80 , Rb- 80, Sr- 80;
Ni- 81, Cu- 81, Zn- 81, Ga- 81, Ge- 81, Ge- 81m, As- 81, Se- 81, Se- 81m, Br- 81 , Kr- 81, Kr- 81m, Rb- 81, Rb- 81m, Sr- 81;
Ni- 82, Cu- 82, Zn- 82, Ga- 82, Ge- 82, As- 82, As- 82m, Se- 82 , Br- 82, Br- 82m, Kr- 82 , Rb- 82, Rb- 82m, Sr- 82;
Cu- 83, Zn- 83, Ga- 83, Ge- 83, As- 83, Se- 83, Se- 83m, Br- 83, Kr- 83 , Kr- 83m, Rb- 83, Rb- 83m, Sr- 83, Sr- 83m;
Cu- 84, Zn- 84, Ga- 84, Ga- 84m, Ge- 84, As- 84, As- 84m, Se- 84, Br- 84, Br- 84m, Kr- 84 , Rb- 84, Rb- 84m, Sr- 84 , Y - 84, Y - 84m, Zr- 84;
Zn- 85, Ga- 85, Ge- 85, As- 85, Se- 85, Br- 85, Kr- 85, Kr- 85m, Rb- 85 , Sr- 85, Sr- 85m, Y - 85, Y - 85m;
Zn- 86, Ga- 86, Ge- 86, As- 86, Se- 86, Br- 86, Kr- 86 , Rb- 86, Rb- 86m, Sr- 86 , Y - 86, Y - 86m, Zr- 86;
Ga- 87, Ge- 87, As- 87, Se- 87, Br- 87, Kr- 87, Rb- 87 , Sr- 87 , Sr- 87m, Y - 87, Y - 87m, Zr- 87, Zr- 87m;
Ga- 88, Ge- 88, As- 88, Se- 88, Br- 88, Kr- 88, Rb- 88, Sr- 88 , Y - 88, Y - 88m, Y - 88n, Zr- 88, Nb- 88, Nb- 88m;
Ge- 89, As- 89, Se- 89, Br- 89, Kr- 89, Rb- 89, Sr- 89, Y - 89 , Y - 89m, Zr- 89, Zr- 89m, Nb- 89, Nb- 89m;
Ge- 90, As- 90, Se- 90, Br- 90, Kr- 90, Rb- 90, Rb- 90m, Sr- 90, Y - 90, Y - 90m, Zr- 90 , Zr- 90m, Nb- 90, Nb- 90m, Nb- 90n, Mo- 90;
As- 91, Se- 91, Br- 91, Kr- 91, Rb- 91, Sr- 91, Y - 91, Y - 91m, Zr- 91 , Nb- 91, Nb- 91m, Mo- 91, Mo- 91m, Tc- 91, Tc- 91m;
As- 92, Se- 92, Br- 92, Kr- 92, Rb- 92, Sr- 92, Y - 92, Zr- 92 , Nb- 92, Nb- 92m, Mo- 92 , Tc- 92, Ru- 92;
Se- 93, Br- 93, Kr- 93, Rb- 93, Sr- 93, Y - 93, Y - 93m, Zr- 93, Nb- 93 , Nb- 93m, Mo- 93, Mo- 93m, Tc- 93, Tc- 93m;
Se- 94, Br- 94, Kr- 94, Rb- 94, Sr- 94, Y - 94, Zr- 94 , Nb- 94, Nb- 94m, Mo- 94 , Tc- 94, Tc- 94m, Ru- 94;
Se- 95, Br- 95, Kr- 95, Rb- 95, Sr- 95, Y - 95, Zr- 95, Nb- 95, Nb- 95m, Mo- 95 , Tc- 95, Tc- 95m, Ru- 95;
Br- 96, Kr- 96, Rb- 96, Sr- 96, Y - 96, Y - 96m, Zr- 96 , Nb- 96, Mo- 96 , Tc- 96, Tc- 96m, Ru- 96 , Rh- 96, Rh- 96m, Pd- 96;
Br- 97, Kr- 97, Rb- 97, Sr- 97, Y - 97, Y - 97m, Y - 97n, Zr- 97, Nb- 97, Nb- 97m, Mo- 97 , Tc- 97, Tc- 97m, Ru- 97, Rh- 97, Rh- 97m;
Br- 98, Kr- 98, Rb- 98, Rb- 98m, Sr- 98, Y - 98, Y - 98m, Zr- 98, Nb- 98, Nb- 98m, Mo- 98 , Tc- 98, Ru- 98 , Rh- 98, Rh- 98m, Pd- 98;
Kr- 99, Rb- 99, Sr- 99, Y - 99, Zr- 99, Nb- 99, Nb- 99m, Mo- 99, Tc- 99, Tc- 99m, Ru- 99 , Rh- 99, Rh- 99m, Pd- 99;
Kr- 100, Rb- 100, Sr- 100, Y - 100, Y - 100m, Zr- 100, Nb- 100, Nb- 100m, Mo- 100 , Tc- 100, Ru- 100 , Rh- 100, Rh- 100m, Pd- 100;
Kr- 101, Rb- 101, Sr- 101, Y - 101, Zr- 101, Nb- 101, Mo- 101, Tc- 101, Ru- 101 , Rh- 101, Rh- 101m, Pd- 101;
Rb- 102, Sr- 102, Y - 102, Y - 102m, Zr- 102, Nb- 102, Nb- 102m, Mo- 102, Tc- 102, Tc- 102m, Ru- 102 , Rh- 102, Rh- 102m, Pd- 102 , Ag- 102, Ag- 102m, Cd- 102;
Rb- 103, Sr- 103, Y - 103, Zr- 103, Nb- 103, Mo- 103, Tc- 103, Ru- 103, Ru- 103m, Rh- 103 , Rh- 103m, Pd- 103, Ag- 103, Ag- 103m;
Rb- 104, Sr- 104, Y - 104, Zr- 104, Nb- 104, Nb- 104m, Mo- 104, Tc- 104, Ru- 104 , Rh- 104, Rh- 104m, Pd- 104 , Ag- 104, Ag- 104m, Cd- 104;
Sr- 105, Y - 105, Zr- 105, Nb- 105, Mo- 105, Tc- 105, Ru- 105, Rh- 105, Rh- 105m, Pd- 105 , Ag- 105, Ag- 105m, Cd- 105;
Sr- 106, Y - 106, Zr- 106, Nb- 106, Nb- 106m, Mo- 106, Tc- 106, Ru- 106, Rh- 106, Rh- 106m, Pd- 106 , Ag- 106, Ag- 106m, Cd- 106 , In- 106, In- 106m, Sn- 106;
Sr- 107, Y - 107, Zr- 107, Nb- 107, Mo- 107, Tc- 107, Ru- 107, Rh- 107, Pd- 107, Pd- 107m, Ag- 107 , Ag- 107m, Cd- 107, In- 107, In- 107m;
Y - 108, Zr- 108, Nb- 108, Mo- 108, Tc- 108, Ru- 108, Rh- 108, Rh- 108m, Pd- 108 , Ag- 108, Ag- 108m, Cd- 108 , In- 108, In- 108m, Sn- 108;
Y - 109, Zr- 109, Nb- 109, Mo- 109, Tc- 109, Ru- 109, Rh- 109, Pd- 109, Pd- 109m, Ag- 109 , Ag- 109m, Cd- 109, In- 109, In- 109m, In- 109n;
Zr- 110, Nb- 110, Nb- 110m, Mo- 110, Tc- 110, Ru- 110, Rh- 110, Rh- 110m, Pd- 110 , Ag- 110, Ag- 110m, Cd- 110 , In- 110, In- 110m, Sn- 110;

续表 2

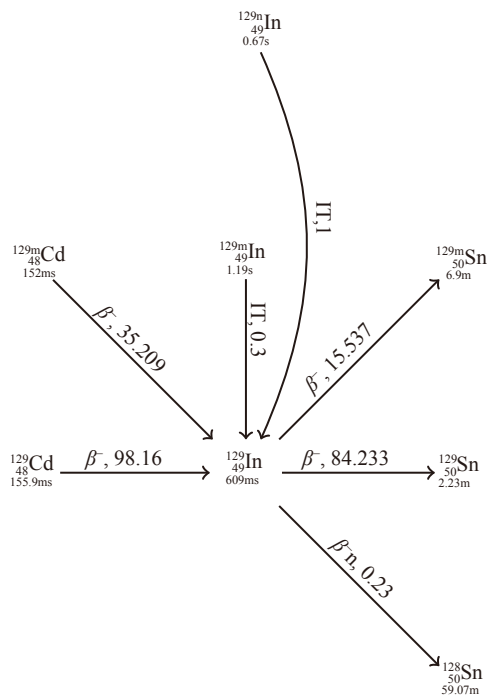
所有核素列表

Zr-111, Nb-111, Mo-111, Mo-111m, Tc-111, Ru-111, Rh-111, Pd-111, Pd-111m, Ag-111, Ag-111m, Cd-111 , Cd-111m, In-111, In-111m, Sn-111; Zr-112, Nb-112, Mo-112, Tc-112, Ru-112, Rh-112, Rh-112m, Pd-112, Ag-112, Cd-112 , In-112, In-112m, Sn-112 , Sb-112, Te-112; Zr-113, Nb-113, Mo-113, Tc-113, Ru-113, Ru-113m, Rh-113, Pd-113, Pd-113m, Ag-113, Ag-113m, Cd-113 , Cd-113m, In-113 , In-113m, Sn-113, Sn-113m, Sb-113; Nb-114, Mo-114, Tc-114, Tc-114m, Ru-114, Rh-114, Rh-114m, Pd-114, Ag-114, Ag-114m, Cd-114 , In-114, In-114m, In-114n, Sn-114 , Sb-114, Te-114; Nb-115, Mo-115, Tc-115, Ru-115, Ru-115m, Rh-115, Pd-115, Pd-115m, Ag-115, Ag-115m, Cd-115, Cd-115m, In-115 , In-115m, Sn-115 , Sb-115, Te-115, Te-115m; Nb-116, Mo-116, Tc-116, Ru-116, Rh-116, Rh-116m, Pd-116, Ag-116, Ag-116m, Ag-116n, Cd-116 , In-116, In-116m, In-116n, Sn-116 , Sb-116, Sb-116m, Te-116; Mo-117, Tc-117, Ru-117, Rh-117, Pd-117, Pd-117m, Ag-117, Ag-117m, Cd-117, Cd-117m, In-117, In-117m, Sn-117 , Sn-117m, Sb-117, Te-117, Te-117m; Mo-118, Tc-118, Ru-118, Rh-118, Rh-118m, Pd-118, Ag-118, Ag-118m, Cd-118, In-118, In-118m, In-118n, Sn-118 , Sb-118, Sb-118m, Te-118; Mo-119, Tc-119, Ru-119, Rh-119, Pd-119, Pd-119m, Ag-119, Ag-119m, Cd-119, Cd-119m, In-119, In-119m, Sn-119 , Sn-119m, Sb-119, Sb-119m, Te-119, Te-119m; Tc-120, Ru-120, Rh-120, Pd-120, Ag-120, Ag-120m, Ag-120n, Cd-120, In-120, In-120m, In-120n, Sn-120 , Sb-120, Sb-120m, Te-120 , I -120, I -120m, Xe-120; Tc-121, Ru-121, Rh-121, Pd-121, Ag-121, Cd-121, Cd-121m, In-121, In-121m, Sn-121, Sn-121m, Sb-121 , Te-121, Te-121m, I -121; Tc-122, Ru-122, Rh-122, Pd-122, Ag-122, Ag-122m, Ag-122n, Cd-122, In-122, In-122m, In-122n, Sn-122 , Sb-122, Te-122 , I -122, Xe-122; Ru-123, Rh-123, Pd-123, Pd-123m, Ag-123, Ag-123m, Cd-123, Cd-123m, In-123, In-123m, Sn-123, Sn-123m, Sb-123 , Te-123 , Te-123m, I -123, Xe-123; Ru-124, Rh-124, Pd-124, Ag-124, Ag-124m, Cd-124, In-124, In-124m, Sn-124 , Sb-124, Sb-124m, Sb-124n, Te-124 , I -124, Xe-124 , Cs-124, Cs-124m, Ba-124; Ru-125, Rh-125, Pd-125, Pd-125m, Ag-125, Ag-125m, Cd-125, Cd-125m, In-125, In-125m, Sn-125, Sn-125m, Sb-125, Te-125 , Te-125m, I -125, Xe-125, Xe-125m; Rh-126, Pd-126, Ag-126, Ag-126m, Cd-126, In-126, In-126m, Sn-126, Sb-126, Sb-126m, Sb-126n, Te-126 , I -126, Xe-126 , Cs-126, Ba-126; Rh-127, Pd-127, Ag-127, Ag-127m, Ag-127n, Cd-127, Cd-127m, In-127, In-127m, In-127n, Sn-127, Sn-127m, Sb-127, Te-127, Te-127m, I -127 , Xe-127, Xe-127m, Cs-127; Rh-128, Pd-128, Ag-128, Cd-128, Cd-128m, In-128, In-128m, In-128n, Sn-128, Sn-128m, Sb-128, Sb-128m, Te-128 , I -128, Xe-128 , Cs-128, Ba-128; Pd-129, Ag-129, Ag-129m, Cd-129, Cd-129m, Cd-129n, In-129, In-129m, In-129n, Sn-129, Sn-129m, Sb-129, Sb-129m, Te-129, Te-129m, I -129, Xe-129 , Xe-129m, Cs-129, Ba-129, Ba-129m; Pd-130, Ag-130, Cd-130, In-130, In-130m, In-130n, Sn-130, Sn-130m, Sb-130, Sb-130m, Te-130 , I -130, I -130m, Xe-130 , Cs-130, Cs-130m, Ba-130, Ba-130m, La-130, Ce-130; Pd-131, Ag-131, Cd-131, In-131, In-131m, In-131n, Sn-131, Sn-131m, Sb-131, Te-131, Te-131m, Te-131n, I -131, Xe-131 , Xe-131m, Cs-131, Ba-131, Ba-131m, La-131; Ag-132, Cd-132, In-132, Sn-132, Sb-132, Sb-132m, Te-132, I -132, I -132m, Xe-132 , Xe-132m, Cs-132, Ba-132 , La-132, La-132m, Ce-132, Ce-132m; Ag-133, Cd-133, In-133, In-133m, Sn-133, Sb-133, Te-133, Te-133m, I -133, I -133m, Xe-133, Xe-133m, Cs-133 , Ba-133, Ba-133m, La-133, Ce-133, Ce-133m; Cd-134, In-134, Sn-134, Sb-134, Sb-134m, Te-134, I -134, I -134m, Xe-134 , Xe-134m, Cs-134, Cs-134m, Ba-134 , La-134, Ce-134; Cd-135, In-135, Sn-135, Sb-135, Te-135, I -135, Xe-135, Xe-135m, Cs-135, Cs-135m, Ba-135 , Ba-135m, Ba-135n, La-135, Ce-135, Ce-135m; In-136, Sn-136, Sb-136, Te-136, I -136, I -136m, Xe-136 , Cs-136, Cs-136m, Ba-136 , Ba-136m, La-136, La-136m, Ce-136 , Pr-136, Nd-136; In-137, Sn-137, Sb-137, Te-137, I -137, Xe-137, Cs-137, Ba-137 , Ba-137m, La-137, Ce-137, Ce-137m, Pr-137; Sn-138, Sb-138, Te-138, I -138, Xe-138, Cs-138, Cs-138m, Ba-138 , La-138 , Ce-138 , Ce-138m, Pr-138, Pr-138m, Nd-138; Sn-139, Sb-139, Te-139, I -139, Xe-139, Cs-139, Ba-139, La-139 , Ce-139, Ce-139m, Pr-139, Nd-139, Nd-139m; Sn-140, Sb-140, Te-140, I -140, Xe-140, Cs-140, Ba-140, La-140, Ce-140 , Pr-140, Nd-140; Sb-141, Te-141, I -141, Xe-141, Cs-141, Ba-141, La-141, Ce-141, Pr-141 , Nd-141, Nd-141m, Pm-141; Sb-142, Te-142, I -142, Xe-142, Cs-142, Ba-142, La-142, Ce-142 , Pr-142, Pr-142m, Nd-142 , Pm-142, Pm-142m, Sm-142; Te-143, I -143, Xe-143, Cs-143, Ba-143, La-143, Ce-143, Pr-143, Nd-143 , Pm-143, Sm-143, Sm-143m, Sm-143n; Te-144, I -144, Xe-144, Cs-144, Cs-144m, Ba-144, La-144, Ce-144, Pr-144, Pr-144m, Nd-144 , Pm-144, Sm-144 , Eu-144, Gd-144; Te-145, I -145, Xe-145, Cs-145, Ba-145, La-145, Ce-145, Pr-145, Nd-145 , Pm-145, Sm-145, Eu-145; I -146, Xe-146, Cs-146, Ba-146, La-146, La-146m, Ce-146, Pr-146, Nd-146 , Pm-146, Sm-146, Eu-146, Gd-146; I -147, Xe-147, Cs-147, Ba-147, La-147, Ce-147, Pr-147, Nd-147, Pm-147, Sm-147 , Eu-147, Gd-147, Tb-147, Tb-147m; Xe-148, Cs-148, Ba-148, La-148, Ce-148, Pr-148, Pr-148m, Nd-148 , Pm-148, Pm-148m, Sm-148 , Eu-148, Gd-148, Tb-148, Tb-148m, Dy-148; Xe-149, Cs-149, Ba-149, La-149, Ce-149, Pr-149, Nd-149, Pm-149, Sm-149 , Eu-149, Gd-149, Tb-149, Tb-149m;
--

续表 2

所有核素列表

Xe-150, Cs-150, Ba-150, La-150, Ce-150, Pr-150, **Nd-150**, Pm-150, **Sm-150**, Eu-150, Eu-150m, Gd-150, Tb-150, Tb-150m, Dy-150;
 Cs-151, Ba-151, La-151, Ce-151, Pr-151, Nd-151, Pm-151, Sm-151, **Eu-151**, Gd-151, Tb-151, Tb-151m;
 Cs-152, Ba-152, La-152, Ce-152, Pr-152, Nd-152, Pm-152, Pm-152m, Pm-152n, **Sm-152**, Eu-152, Eu-152m, **Gd-152**, Tb-152, Tb-152m, Dy-152;
 Ba-153, La-153, Ce-153, Pr-153, Nd-153, Pm-153, Sm-153, Sm-153m, **Eu-153**, Gd-153, Tb-153, Dy-153;
 Ba-154, La-154, Ce-154, Pr-154, Nd-154, Pm-154, Pm-154m, **Sm-154**, Eu-154, Eu-154m, **Gd-154**, Tb-154, Tb-154m, Tb-154n, Dy-154, Ho-154, Ho-154m, Er-154;
 La-155, Ce-155, Pr-155, Nd-155, Pm-155, Sm-155, Eu-155, **Gd-155**, Gd-155m, Tb-155, Dy-155, Ho-155;
 La-156, Ce-156, Pr-156, Nd-156, Pm-156, Pm-156m, Sm-156, Eu-156, **Gd-156**, Tb-156, Tb-156m, Tb-156n, **Dy-156**, Ho-156, Ho-156m, Ho-156n, Er-156;
 La-157, Ce-157, Pr-157, Nd-157, Pm-157, Sm-157, Eu-157, **Gd-157**, Tb-157, Dy-157, Dy-157m, Ho-157;
 Ce-158, Pr-158, Nd-158, Pm-158, Sm-158, Eu-158, **Gd-158**, Tb-158, Tb-158m, **Dy-158**, Ho-158, Ho-158m, Er-158;
 Ce-159, Pr-159, Nd-159, Pm-159, Sm-159, Eu-159, Gd-159, **Tb-159**, Dy-159, Ho-159, Ho-159m, Er-159;
 Pr-160, Nd-160, Pm-160, Pm-160m, Sm-160, Eu-160, Eu-160m, **Gd-160**, Tb-160, **Dy-160**, Ho-160, Ho-160m, Ho-160n, Er-160, Tm-160, Tm-160m;
 Pr-161, Nd-161, Pm-161, Sm-161, Eu-161, Gd-161, Tb-161, **Dy-161**, Ho-161, Ho-161m, Er-161, Tm-161, Tm-161m;
 Nd-162, Pm-162, Sm-162, Eu-162, Eu-162m, Gd-162, Tb-162, Tb-162m, **Dy-162**, Ho-162, Ho-162m, **Er-162**, Tm-162, Tm-162m, Yb-162;
 Nd-163, Pm-163, Sm-163, Eu-163, Gd-163, Gd-163m, Tb-163, **Dy-163**, Ho-163, Ho-163m, Er-163, Tm-163;
 Pm-164, Sm-164, Eu-164, Gd-164, Tb-164, Tb-164m, **Dy-164**, Ho-164, Ho-164m, **Er-164**, Tm-164, Tm-164m, Yb-164;
 Pm-165, Sm-165, Eu-165, Gd-165, Tb-165, Dy-165, Dy-165m, **Ho-165**, Er-165, Tm-165, Yb-165;
 Sm-166, Eu-166, Gd-166, Tb-166, Dy-166, Ho-166, Ho-166m, **Er-166**, Tm-166, Yb-166;
 Sm-167, Eu-167, Gd-167, Tb-167, Dy-167, Ho-167, **Er-167**, Er-167m, Tm-167, Yb-167, Lu-167, Lu-167m;
 Sm-168, Eu-168, Gd-168, Tb-168, Dy-168, Ho-168, Ho-168m, **Er-168**, Tm-168, **Yb-168**, Lu-168, Lu-168m, Hf-168;
 Eu-169, Gd-169, Tb-169, Dy-169, Ho-169, Er-169, **Tm-169**, Yb-169, Yb-169m, Lu-169, Lu-169m, Hf-169;
 Eu-170, Gd-170, Tb-170, Dy-170, Ho-170, Ho-170m, **Er-170**, Tm-170, **Yb-170**, Lu-170, Lu-170m, Hf-170, Ta-170;
 Gd-171, Tb-171, Dy-171, Ho-171, Er-171, Tm-171, **Yb-171**, Yb-171m, Lu-171, Lu-171m, Hf-171, Hf-171m, Ta-171;
 Gd-172, Tb-172, Dy-172, Dy-172m, Ho-172, Er-172, Tm-172, **Yb-172**, Lu-172, Lu-172m, Hf-172, Ta-172, W-172.

图 2 母核到 ^{129}In 的衰变关系以及 ^{129}In 衰变退激关系图

在计算各母体核素对子体核素的形成过程中,需按照衰变路径逐个计算母体核素,但这样不可避免地会造成重复计算。为解决上述问题,本文采用如下方法:从专用衰变数据库产生每个质量链衰变路径的数据文件。每次在计算某条路径上的某母体核素对子体核素的贡献时,通过搜索数据文件,判断从该母体核素到指定子体核素的衰变路径片段是否已在前面的路径上出现过,是则不再计算,否则计算。同样,计算衰变退激到子体核素信息时,也按照这种思路进行。

质量链衰变路径的数据库是按如下方式设计的:在 1 个衰变链中,如果 1 个核素的质子数最小,则以它为母核建立 1 个 β^- 基态链;如果 1 个核素的质子数最大,则以它为母核建立 1 个 EC 基态链;特殊情况,少量核素存在 α 衰变、 $2\beta^-$ 或 $2\beta^+ / 2\varepsilon$, 须分别建立各自的衰变链;如果核素以激发态存在,则以它为母核建立激发态链。

4.3 衰变链设计画图程序

为方便绘制每个质量链的衰变链图,用 Python 语言开发了衰变链设计绘图程序包 DecayChainDrawer,

由两部分组成, `process.py` 和 `draw.py`, `process.py` 主要功能是从专用衰变数据库读取每个核的衰变数据, 产生 `draw.py` 的输入数据文件; `draw.py` 的主要功能是计算原子核之间的衰变关系, 确定每个核在衰变链上的相对

位置, 生成 Tex 格式数据文件, 该 Tex 文件可用 TexLive 产生 PDF 格式的衰变链图。程序主要框架见图 3(a) 和 (b)。应用 `DecayChainDrawer` 程序包可实现裂变产物核区 $A=66\sim 172$ 每条质量链上的衰变链图绘制。

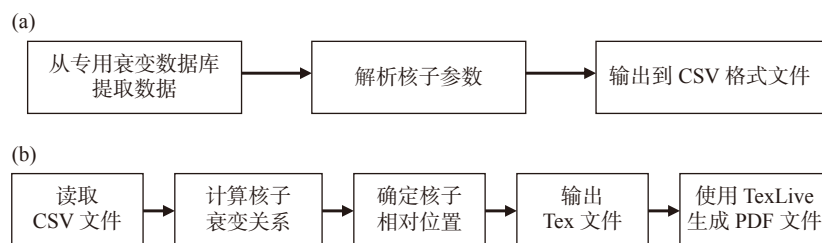


图3 `process.py` 程序架构图 (a) 和 `draw.py` 程序架构图 (b)

4.4 设计例子

以 $A=100$ 质量链为例, 给出一条复杂裂变产物衰

变链的设计示意图, 见图4。从图2和图4可看出, 每个核素都具有特定的母体核素和复杂的衰变分支。

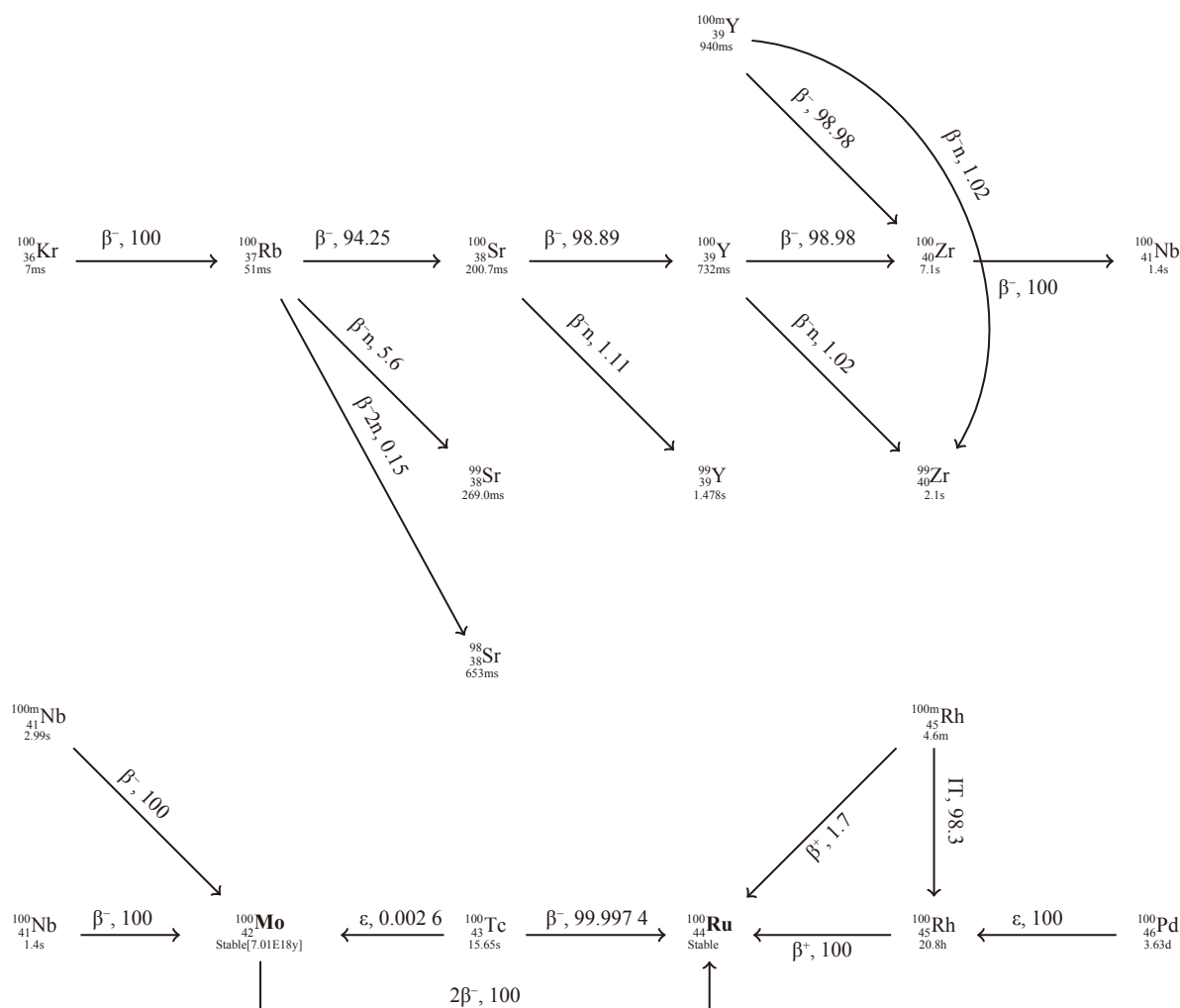


图4 $A=100$ 质量链裂变产物衰变链设计示意图

5 总结

根据核科学参考文献库, 对半衰期、缓发中子发射几率等进行了更新评价, 对部分基态指定存在问题的数

据利用系统学研究和理论研究相结合的方法进行了必要修正, 并根据衰变纲图和内转换系数重新计算了退激至子核同质异能态和基态的衰变分支比数据。在此基础上, 结合现有核结构和衰变数据库, 研制了裂变产物衰变链

设计专用衰变数据库, 按照衰变规律, 建立了裂变产物衰变路径和衰变信息的完整衰变链。

衰变链上的所有核素都是已观测到的, 理论预言存在但实验未观测到的暂不包括, 实验测量截止时间是 2021 年 12 月。所有先驱核缓发中子数据都是实验测量数据, 理论预言存在但实验未观测到数值的都认为该缓发中子发射途径不存在, 因此链上没有画。对 β^+/ϵ 衰变, 最多考虑了两个核素, 而同质异能态 (IT) 衰变同样最多只考虑了两个同质异能态。本工作完成的裂变产物核衰变链可为裂变产物分析和裂变产额研究提供一个便利的参考。

参考文献:

- [1] PRITYCHENKO B, BETAK E, SINGH B, et al. Nuclear Data Sheets, 2014, 120: 291.
- [2] Evaluated Nuclear Structure Data File (ENSDF)[EB/OL]. [2021-11-01]. <https://www.nndc.bnl.gov/ensdf>.
- [3] LIANG J, SINGH B, MCCUTCHAN E A, et al. Nuclear Data Sheets, 2020, 168: 1.
- [4] BIRCH M, SINGH B, DILLMANN I, et al. Nuclear Data Sheets, 2015, 128: 131.
- [5] KONDOV F G, WANG M, HUANG W J, et al. Chinese Physics C, 2021, 45(3): 030001-1.

Design of the Decay Chains for Fission Product

HUANG Xiaolong¹, HE Puyi², YANG Dong^{2,†}, WANG Xianghan¹, JIN Yongli¹, LI Jian²

(1. China NuclearData Center, China Institute of Atomic Energy, Beijing 102413, China;

2. College of Physics, Jilin University, Changchun 130012, China)

Abstract: The evaluation of the half-life and emission rates of delayed neutrons is updated according to the reference library of nuclear science. For uncertain ground states in the fission products, spin designation is carried out using a combination of systematic and theoretical studies and improved data are obtained through corrections. For radionuclides with daughter nuclei in isomeric states, the branching fractions of ground and isomeric states are recalculated with the decay scheme and internal conversion coefficient. Then following a critical review of data in Nuclear Structure and Decay Data File, a special decay database for the design of fission product decay chain is developed. According to the decay law, the complete decay path and information of fission products are established. This work provides a convenient reference for fission product analysis and fission yield research.

Key words: fission product; decay data; decay chain

Received date: 25 Feb. 2022; Revised date: 31 Mar. 2022

Foundation item: Database of Nuclear Physics in National Basic Science Data Center(NBSDC-DB-08)

† Corresponding author: YANG Dong, E-mail: dyang@jlu.edu.cn