

2. ИЗОТОПЫ ПЛУТОНИЯ

Из 100 возможных изотопов плутония в настоящее время синтезированы 25, у 16 из них изучены ядерные свойства, четыре нашли практическое применение. Их радиоактивные свойства приведены в Табл. , и , которые дополняют друг друга хотя друг другу и несколько противоречат.

Замечание. Данные по ядерным, физическим и химическим свойствам плутония достаточно противоречивы. Прежде всего, это связано трудностями его получения в чистом виде. Как правило, он содержит примеси, сильно влияющие на его характеристики. В публикуемых данных часто не указывается тип плутония, к которому отнесены данные (сверхчистый плутоний, оружейный, реакторный). Даже температуры, к которым относятся эти данные, не сообщаются (плутоний саморазогревается за счёт собственного излучения, вызывая дрейф параметров). Определённое влияние на разброс данных оказывают трудности работы с высокоактивным плутонием, а также соображения секретности – истинные характеристики плутония кому ни попадя знать не обязательно.

№ эле- мента	Эле- мент	И з о т о п ы				
98	Cf		²⁵¹ Cf 898 лет		²⁴⁷ Cf 3,15 час	
97	Bk	²⁵¹ Bk 55,6 мин	α ↓	²⁴⁷ Bk 1380 лет	ε ↓	
96	Cm		²⁴⁷ Cm 1,56·10 ⁷ лет	α ↓	²⁴³ Cm 28,5 лет	
95	Am		↓	²⁴³ Am 7380 лет	ε ↓ 0,24%	
94	Pu		²⁴³ Pu 4,95 час	↓	²³⁹ Pu 2,4·10 ⁴ лет	²³⁵ Pu 25,6 мин
93	Np			²³⁹ Np 2,35 сут	↓	²³⁵ Np 196 сут 0,003%
92	U		²³⁹ U 23,5 мин		²³⁵ U 7,13·10 ⁸ л	↓ 0,0014% ²³¹ U 1,2 дня
91	Pa				²³¹ Pa 3,4·10 ⁴ лет	↓ 0,006% U-As ряд
90	Th			²³¹ Th 24,6 час	↓	²²⁷ Th 19,6 дня
89	Ac				²²⁷ Ac 21,77 года	

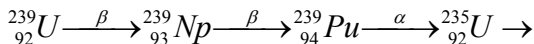
Рис. 3. Плутоний-239 в ряду предшественников природного ряда урана-235.

Все изотопы плутония получены искусственно. Для синтеза плутония используются заряженные частицы большой энергии, такие, как дейтоны и ионы гелия, ускоренные в циклотроне. Легкие изотопы обычно можно получить путем реакции с заряженными частицами. Более тяжелые изотопы получаются в результате нейтронных реакций в ядерных реакторах. Наиболее устойчив изотоп ²⁴⁴Pu (T=8,05·10⁷ лет).

Средняя энергия α-излучения изотопов ²³⁴Pu, ²³⁵Pu, ²³⁶Pu, ²³⁷Pu; ³³⁸Pu; ²³⁹Pu, ²⁴⁰Pu, ²⁴¹Pu, ²⁴²Pu, ²⁴⁴Pu равна соответственно 3,78·10⁻¹; 1,61·10⁻⁴; 5,85; 2,74·10⁻⁴; 5,58; 5,23; 5,24; 1,22·10⁻⁴; 4,97; 4,65 МэВ/(Бк·с). Легкие изотопы плутония (²³²Pu, ²³⁴Pu, ²³⁵Pu, ²³⁷Pu) претерпевают электронный захват.

В ядерных реакторах за счёт набора параллельных и последовательных ядерных реакций образуется несколько изотопов плутония от 236-го до 246-го, периоды полураспада которых существенно различаются (от 87,7 л. для ²³⁸Pu, до 7,6·10⁷ л. для ²⁴⁴Pu).

Плутоний-239 – член ряда генетически связанных нуклидов, начинающегося с ^{239}U и переходящего в ряд природного актино-урана, ^{235}U :



(На самом деле ^{239}U не является истинным родоначальником ряда: род нептуния не обязательно вести от ^{239}U , т.к. ^{239}Np образуется и при α -распаде ^{243}Am , а у того много предков).

Некоторые продукты распада ^{239}Pu приведены в **Табл. 1**.

Синтезированы лёгкие изотопы плутония (с массовыми числами от 232 до 237). Период полураспада самого легкого изотопа – 36 минут. На них мы останавливаться не будем.

Табл. 1. Изотопы плутония.

Масса	Период полураспада	Излучение	Энергия излучения	Методы получения
232	36 м.	э. з. α	980^0_0 6.58 (2 ⁰ / ₀)	$\text{U}^{235} (\alpha, 7n)$
233	20 м.	э. з. α	990^0_0 6.30 (0.1 ⁰ / ₀)	$\text{U}^{233} (\alpha, 4n)$
234	9 ч.	э. з. α	940^0_0 6.19 (6 ⁰ / ₀)	$\text{U}^{235} (\alpha, 5n)$ $\text{Cm}^{238} \alpha$ -распад
235	26 м.	э. з. α	990^0_0 5.85 ($3 \cdot 10^{-3}$ ⁰ / ₀)	$\text{U}^{235} (\alpha, 4n)$
236	2.85 г.	α	5.763 (69 ⁰ / ₀), 5.716 (31 ⁰ / ₀), 5.610 (0.18 ⁰ / ₀), 5.448	$\text{U}^{235} (d, n)$
237m	с. д., $3.5 \cdot 10^9$ л.	γ	0.047, 0.110	$\text{Cm}^{240} \alpha$ -распад
237	0.18 с. 45.6 д.	и. п. э. з. α	990^0_0 5.65, 5.36 ($3.3 \cdot 10^{-3}$ ⁰ / ₀)	$\text{Cm}^{241} \alpha$ -отдача $\text{U}^{238} (\alpha, 5n)$ $\text{U}^{235} (\alpha, 2n)$
238	86.4 г.	γ α	0.033, 0.043, 0.059 5.495 (72 ⁰ / ₀), 5.452 (28 ⁰ / ₀), 5.352 (0.09 ⁰ / ₀)	$\text{U}^{238} (d, 2n)$ $\text{Cm}^{242} \alpha$ -распад
239m	с. д., $3.8 \cdot 10^{10}$ л. $1.93 \cdot 10^{-7}$ с.	γ и. п.	0.043	$\text{Np}^{237} (n, \gamma)$ $\text{Np}^{238} \beta^- \rightarrow$ $\text{Cm}^{243} \alpha$ -распад
239m	$1.1 \cdot 10^{-9}$ с.	и. п.		$\text{Np}^{239} \beta^-$ -распад $\text{Cm}^{243} \alpha$ -распад
239	24360 л.	α	5.147 (72.5 ⁰ / ₀), 5.134 (16.8 ⁰ / ₀), 5.096 (10.7 ⁰ / ₀), 5.064 (0.037 ⁰ / ₀), 4.999 (0.013 ⁰ / ₀), 4.917 (0.005 ⁰ / ₀)	$\text{Np}^{239} \beta^-$ -распад $\text{Np}^{239} \beta^-$ -распад
240	с. д., $5.5 \cdot 10^{15}$ л. 6580 л.	γ α	0.012, 0.051 5.162 (76 ⁰ / ₀), 5.118 (24 ⁰ / ₀), 5.014 (0.1 ⁰ / ₀)	$\text{Pu}^{239} (n, \gamma)$
241	с. д., $1.2 \cdot 10^{11}$ л. 13.0 л.	γ β^-	0.045 0.0208 (99 ⁰ / ₀)	$\text{Pu}^{240} (n, \gamma)$
242	$3.79 \cdot 10^5$ л.	α	4.893, 4.848 ($3 \cdot 10^{-3}$ ⁰ / ₀)	$\text{Pu}^{241} (n, \gamma)$
243	с. д., $7.1 \cdot 10^{10}$ л. 4.98 ч.	α β^- γ	4.898 (76 ⁰ / ₀), 4.858 (24 ⁰ / ₀) 0.579 (62 ⁰ / ₀), 0.490 (38 ⁰ / ₀) 0.042, 0.054, 0.084, 0.096, 0.381	$\text{Pu}^{242} (n, \gamma)$
244	$7.6 \cdot 10^7$ л. с. д., $2.5 \cdot 10^{10}$ л.	α		$\text{Pu}^{243} (n, \gamma)$
245	10.1 ч.	β^-		$\text{Pu}^{244} (n, \gamma)$
246	10.85 д.	β^- γ	0.15 (73 ⁰ / ₀), 0.33 (27 ⁰ / ₀) 0.027, 0.047, 0.175, 0.215	$\text{Pu}^{245} (n, \gamma)$

Примечание: с. д. – спонтанное деление, э. з. – электронный захват, и.п. – изомерный переход, г. – годы, л – лет, д. – сутки, ч – часы, м. – минуты, с – секунды

Табл. 2. Изотопы плутония.

Радио-нуклид	T _{1/2}	Тип распада	Средняя энергия излучения, МэВ/(Бк·с)			Дочерний радио-нуклид (выход)
			характеристическое, γ - и аннигиляционное излучение	β -излучение, конверсионные электроны и электроны Оже	α -излучение и ядра отдачи	
²³⁶ Pu	2.851 года	СД, α	$2.09 \cdot 10^{-3}$	$1.35 \cdot 10^{-2}$	5.85	²³² U радиоакт.
²³⁷ Pu	45.3 сут.	ЗЭ, α	$5.23 \cdot 10^{-2}$	$1.58 \cdot 10^{-2}$	$2.74 \cdot 10^{-4}$	²³³ U (выход $5 \cdot 10^{-5}$); ²³⁷ Np радиоакт.
²³⁸ Pu	87.74 года	СД, α	$1.81 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-2}$	5.58	²³⁴ U радиоакт.
²³⁹ Pu	24065 лет	α	$7.96 \cdot 10^{-4}$	$6.65 \cdot 10^{-3}$	5.23	²³⁵ U радиоакт.
²⁴⁰ Pu	6537 лет	СД, α	$1.73 \cdot 10^{-3}$	$1.06 \cdot 10^{-2}$	5.24	²³⁶ U радиоакт.
²⁴¹ Pu	14.4 года	β^-	$2.54 \cdot 10^{-6}$	$5.24 \cdot 10^{-3}$	$1.22 \cdot 10^{-4}$	²³⁷ U радиоакт. (выход $2.45 \cdot 10^{-5}$); ²⁴¹ Am радиоакт.
²⁴² Pu	376300 лет	СД, α	$1.44 \cdot 10^{-3}$	$8.72 \cdot 10^{-3}$	4.974	²³⁸ U радиоакт.
²⁴³ Pu	4.956 ч.	β^-	$2.55 \cdot 10^{-2}$	$1.71 \cdot 10^{-1}$	—	²⁴³ Am радиоакт.

Табл. 3. Свойства некоторых изотопов Pu и ²³⁵U

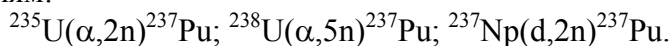
Изотоп	Период полураспада, г.	Основной тип радиоактивного распада	Относительная энергетическая ценность (²³⁹ Pu = 1)	
			в тепловом реакторе	в быстром реакторе
²³⁸ Pu	87,7	α -распад, спонтанное деление	-1,0	+0,5
²³⁹ Pu	24100	α -распад	1,0	1,0
²⁴⁰ Pu	6560	α -распад, спонтанное деление	-0,4	+0,2
²⁴¹ Pu	14,1	β -распад	+1,3	+1,4
²⁴² Pu	37500	α -распад, спонтанное деление	-1,4	+0,1
²³⁵ U	$7 \cdot 10^8$	α -распад	+0,8	+0,7

Pu-236

В плутониевой фракции, полученной из природного урана, бомбардированного ионами гелия с энергиями 40 МэВ, наблюдали группу α -частиц с пробегом 4,35 см (5,75 МэВ). Эта группа относилась к изотопу ²³⁶Pu, образуемому по реакции ²³⁵U($\alpha,3n$)²³⁶Pu. Позднее было обнаружено, что имеют место такие реакции, как ²³⁷Np($\alpha,p4n$)²³⁶Pu; ²³⁷Np($\alpha,5n$)²³⁶Am $\xrightarrow{93}$ ²³⁶Pu. В настоящее время его получают по реакции ²³⁵U(d,n)²³⁶Pu. Этот изотоп образуется также при распаде 27-суточного α -излучателя ²⁴⁰Cm и 22-часового β -излучателя ²³⁶Np. ²³⁶Pu - α -излучатель (три группы частиц, дочерний нуклид ²³²U), период полураспада 2.851 лет, способен к самопроизвольному делению. Скорость самопроизвольного деления $5,8 \cdot 10^7$ делений на 1 г/час соответствуют периоду полураспада для этого процесса $3,5 \cdot 10^9$ лет. Изотоп ²³⁶Pu используют для изучения метаболизма плутония в организме и в радиозэкологических исследованиях.

Pu-237

²³⁷Pu возникает при бомбардировке природного урана ионами гелия с энергией 40 МэВ по ядерным реакциям:



В небольших количествах получается и при облучении урана реакторными нейтронами. Основной типа распада – электронный захват (99%, характеристическое рентгеновское излучение, образование ²³⁷Np), но имеет место α -распад с образованием ²³³U и слабое γ -излучение, период полураспада 45,2 дня.

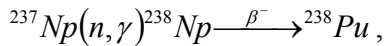
Изомер	E(level)	Время полураспада	Форма распада
^{237}Pu	0.0	45.2 дн	1/2+

^{237}Pu находит применение в системах контроля химического выхода плутония в процессе его выделения из проб окружающей среды, а также для исследований метаболизма плутония в человеческом организме

Pu-238

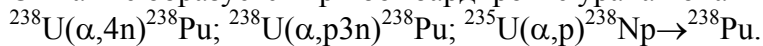
Плутоний-238 – исторически первый открытый изотоп плутония. Его ядра, как, впрочем, ядра всех изотопов плутония с чётными массовыми числами, тепловыми нейтронами не делятся, поэтому он не может служить ядерной взрывчаткой. $T_{1/2} = 87,74$ г, поперечное сечение захвата тепловых нейтронов $\sigma = 5 \cdot 10^{-26} \text{ м}^2$.

^{238}Pu образуется в результате нейтронного захвата ^{237}Np :



что приводит к образованию заметных количеств этого изотопа в ядерных реакторах и открывает путь к получению почти изотопически чистого ^{238}Pu .

Он также образуется при бомбардировке урана ионами гелия с энергией 40 МэВ:



Вследствие относительно короткого периода полураспада ^{238}Pu , высокой концентрации ^{238}U в природном уране и большого выхода (d,2n) реакции, основная часть α -активности плутония, возникающей при дейтронной бомбардировке обычного природного урана, связана с ^{238}Pu (вместе с ^{236}Pu , образующимся из ^{235}U). По этой причине ^{238}U явился первым распознанным изотопом плутония. Скорость самопроизвольного деления $5,1 \cdot 10^6$ делений на 1 г/час соответствуют периоду полураспада для этого процесса $3,8 \cdot 10^{10}$ лет. При этом развивается очень высокая тепловая мощность: 567 Вт/кг. Период полураспада по делению $3,8 \cdot 10^{10}$ лет. Деление под действием тепловых нейтронов имеет поперечное сечение примерно 18 барн. Он обладает очень сильной α -радиоактивностью (в 283 раза сильнее ^{239}Pu), что делает его много более серьезным источником нейтронов от реакций (α, n). Содержание плутония-238 редко превышает 1% от общего состава плутония, однако излучение нейтронов и нагрев делают его неудобным для обращения. Удельная радиоактивность 17.5 кюри/г. Изотоп - ^{238}Pu (α -излучатель (энергии 5,495(76%), 5,453(24%) и 5,351 (0,15%) МэВ, слабый γ -излучатель (энергии от 0,044 до 0,149 МэВ), $T=90$ лет), широко применяется как источник тока в космической технике и в медицине.

При α -распаде ^{238}Pu выделяется 5,5 МэВ энергии. В источнике электричества, содержащем один килограмм плутония-238, развивается тепловая мощность 560 ватт. Максимальная мощность такого же по массе химического источника тока – 5 ватт. Существует немало излучателей с подобными энергетическими характеристиками, но одна особенность плутония-238 делает этот изотоп незаменимым. Обычно альфа-распад сопровождается сильным гамма-излучением. ^{238}Pu – исключение. Энергия γ -квантов, сопровождающих распад его ядер, невелика, защититься от нее несложно: излучение поглощается тонкостенным контейнером. Мала и вероятность самопроизвольного деления ядер этого изотопа. Поэтому он нашел применение не только в источниках тока, но и в медицине. Батарейки с плутонием-238 служат источником энергии в специальных стимуляторах сердечной деятельности.

Pu-239

Практически самый важный - изотоп ^{239}Pu с периодом полураспада $T_{1/2} = 2,44 \cdot 10^4$ лет, испускающий α -частицы (5,15 (69%), 5,453 (24%) и 5,351(0,15%) МэВ и слабое γ -излучение, поперечное сечение захвата тепловых нейтронов $\sigma = 2,71 \cdot 10^{-26} \text{ м}^2$. Скорость самопроизвольного деления 36 делений на 1 г/час соответствуют периоду полураспада для этого процесса $5,5 \cdot 10^{15}$ лет. 1 кг ^{239}Pu эквивалентен 22 миллионам киловатт час тепловой энергии. Взрыв 1 кг плутония равен взрыву 20000 тонн тротила. Единственный изотоп плутония, используемый в атомном оружии.

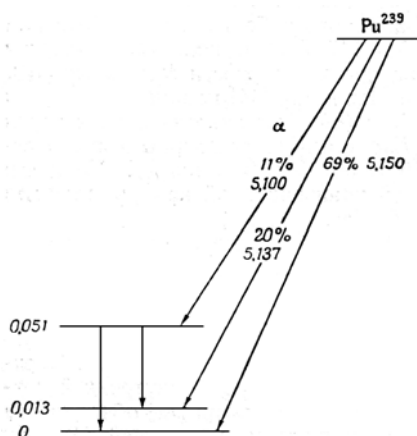
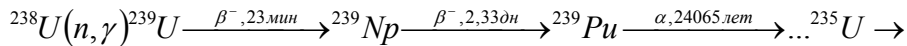


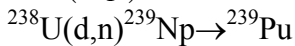
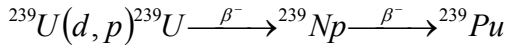
Рис. 4. Схема распада ^{239}Pu .

Этот изотоп делится под действием тепловых нейтронов и используется в ядерных реакторах в качестве горючего, и в атомных бомбах, как ядерное вещество. Он - первый искусственный элемент, производство которого началось в промышленных масштабах. ^{239}Pu получается в ядерных реакторах по реакции:



Поперечное сечение реакции около 455 барн.

${}^{239}\text{Pu}$ образуется также при бомбардировке урана дейтронами с энергией выше 8 МэВ по ядерным реакциям:



а также при бомбардировке урана ионами гелия с энергией 40 МэВ

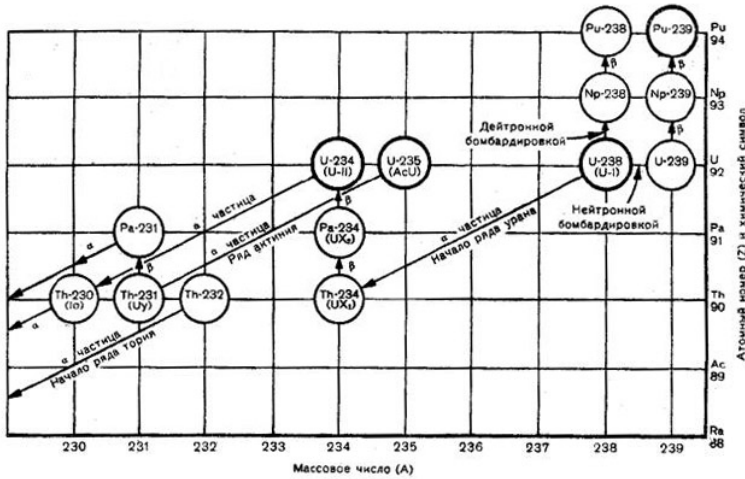
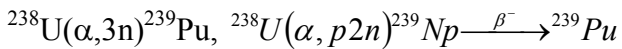


Рис. 5. Способы получения изотопов плутония из урана-238: облучение нейтронами переводит его в плутоний-239, а облучение ускоренными дейтронами – в плутоний-238.

Отделение плутония от урана, проводимое химическими методами, представляет относительно более простую задачу, чем разделение изотопов урана. Вследствие этого стоимость плутония вдвое ниже стоимости ${}^{235}\text{U}$. Когда ядро ${}^{239}\text{Pu}$ делится нейтронами на два осколка примерно равной массы, выделяется около 200 МэВ энергии.

Замечание. До сих пор мы рассматривали период полураспада относительно α -распада. Для некоторых применений важен другой период – период самопроизвольного деления. Для ${}^{239}\text{Pu}$ он равен $10^{15,5}$ лет (по другим данным - $4 \cdot 10^{15}$ лет).

${}^{239}\text{Pu}$ имеет большие сечения рассеивания и поглощения, чем уран и большее число нейтронов в расчете на одно деление (3,03 нейтрона на один акт деления по сравнению с 2,47 у ${}^{235}\text{U}$), и, соответственно, меньшую критическую массу (для высокообогащенного урана значение критической массы составляет 52 кг, для оружейного плутония - 11 кг при пушечной схеме атомной бомбы, при импловивной схеме, критические массы, естественно, намного меньше (для ${}^{239}\text{Pu}$ не более 6 кг). Чистый ${}^{239}\text{Pu}$ имеет среднюю величину испускания нейтронов от спонтанного деления примерно 30 нейтронов/с·кг (~10 делений/с·кг). Сечение деления тепловыми нейтронами изотопа ${}_{94}\text{Pu}^{239}$ весьма велико (738 барн), причем один акт деления приводит к испусканию трёх нейтронов. Из-за сильной α -радиоактивности доля включения легких элементов в плутониевом заряде атомной бомбы не должна превышать нескольких частиц к миллиону (чтобы избежать реакций (α, n)).

Табл. 4. Сечения деления σ_f и захвата σ_c изотопов урана и ${}^{239}\text{Pu}$ тепловых и быстрых нейтронов

0,025 эВ		1 МэВ					
σ_f барн	σ_c барн	ν	η	σ_f барн	σ_c барн	ν	η
738	290	2,9	2,1	2	0,1	3	3
530	60	2,5	2,3	2	0,1	2,5	2,5
580	110	2,5	2,1	1,3	0,1	2,5	2,5
0	2,7	0	0	0,5	0,15	-	-
3,9	3,5	2,5	1,3	0,01	0,15	2,5	0,2

Здесь ν - число нейтронов, возникающих при одном акте деления, η - число нейтронов, идущих на деление.

Табл. 5. Минимальные критические массы изотопов плутония

Нуклид	Критическая масса	Условия, в которых находится критическая масса
^{238}Pu	7,8 кг	Металлический, полностью экранированный шар
^{238}Pu	15,0 кг	Металлический, неэкранированный шар
^{239}Pu	509 г	Раствор (33 г Pu/л H_2O) в шарообразном сосуде диаметром 30,48 см, экранированный
^{239}Pu	531—547 г	Раствор плутония, полностью экранированный
^{239}Pu	905 г	Раствор $\text{Pu}(\text{NO}_3)_4$ в шарообразном сосуде из высококачественной стали (толщина стенок 0,317 см), не экранированный
^{239}Pu	5,425 кг	Металлический шар, полностью экранированный водой
^{241}Pu	260 г	Раствор плутония (32 г Pu/л H_2O), полностью экранированный

Относительно короткий период полураспада ^{239}Pu (по сравнению с ^{235}U) подразумевает значительное выделение энергии при радиоактивном распаде. ^{239}Pu производит 1.92 Вт/кг. Это выше, чем средняя теплота обмена веществ у взрослого человека. Как следствие, на ощупь плутоний достаточно теплый. Если кусок плутония хорошо теплоизолировать, он разогреется до температуры свыше 100° за два часа и вскоре до точки перехода альфа в бета фазу. Такой разогрев представляет проблему для конструирования оружия из-за изменения объема, фазовых переходов нестабилизированного плутония. Удельная активность ^{239}Pu 61.5 мКи/г. Можно ожидать, что принадлежащие к одному радиоактивному семейству ядра ^{239}Pu и ^{235}U , будут близки по характеру протекания процесса деления. Действительно, оба нуклида содержат четное число протонов и нечетное число нейтронов, и, следовательно, оба сильно возбуждаются при присоединении к ним нейтрона. Кроме того, параметр деления $\frac{Z^2}{A}$ для ^{239}Pu даже больше, чем для ^{235}U . Поэтому ^{239}Pu легко делится тепловыми нейтронами. Делящийся изотоп ^{239}Pu при полном распаде дает тепловую энергию, эквивалентную 25000000 квт-час/кг, что открывает возможность использования ^{239}Pu в качестве ядерного горючего.

Табл. 6. Основные элементы цепи распада ^{239}Pu

Плутоний-239 (период полураспада: 24110 лет) альфа-распад
Уран-235 (период полураспада: 704000000 лет) альфа-распад
Торий-231 (период полураспада: 25,2 ч) бета-распад
Протактиний-231 (период полураспада: 32700 лет) альфа-распад
Актиний-227 (период полураспада: 21,8 лет) бета-распад
Торий-227 (период полураспада: 18,72 дня) альфа-распад
Радий-223 (период полураспада: 11,43 дня) альфа-распад V
Радон-219 (период полураспада: 3,96 с) альфа-распад
Полоний-215 (период полураспада: 1,78 миллисекунды) альфа-распад
Свинец-211 (период полураспада: 36,1 мин) бета-распад
Висмут-211 (период полураспада: 2,15 мин) альфа-распад
Таллий-207 (период полураспада: 4,77 мин) бета-распад
Свинец-207 (период полураспада: стабильный элемент)

Pu-240

Плутоний-240 образуется при интенсивном облучении плутония тепловыми нейтронами по реакции $^{239}\text{Pu}(n,\gamma)^{240}\text{Pu}$. Он также может быть получен при бомбардировке урана ионами гелия с энергией 40 МэВ по реакции $^{238}\text{U}(\alpha,2n)^{240}\text{Pu}$. Скорость самопроизвольного деления $1,6 \cdot 10^6$ делений на 1 г/час соответствуют периоду полураспада $1,2 \cdot 10^{11}$ лет. α -излучатель (5,162 (76%) и 5,118 (24%) МэВ), период полураспада 6600 лет.

Плутоний-240 - основной изотоп, загрязняющий оружейный ^{239}Pu . Уровень его содержания важен из-за интенсивности спонтанного деления - 415000 делений/с·кг, испускается 1000000 нейтронов/с·кг так как каждое деление рождает 2.26 нейтрона - в 30000 раз больше, чем у ^{239}Pu . Наличие всего 1% этого изотопа производит так много нейтронов, что пушечная схема заряда уже неработоспособна – начнётся раннее инициирование взрыва и заряд будет расплывён до того, как взорвётся основная масса взрывчатки. Пушечная схема возможна только при 100% содержании ^{239}Pu , добиться чего практически не реально. Поэтому плутониевые бомбу собирают по имплозивной схеме, которая допускает использование плутония довольно сильно загрязнённого изотопом ^{240}Pu . В стандартном оружейном плутонии содержание ^{240}Pu не превышает 6.5%. Более высокие уровни приведут к предетонации (и уменьшению заряда) даже с очень быстрой имплозией. ^{240}Pu хорошо делится, несколько лучше ^{235}U . Однако высокие концентрации такого изотопа увеличивают требуемую критическую массу, создавая проблему нейтронного фона. Вследствие короткого времени жизни (1/4 от ^{239}Pu), тепловой выход выше, 7.1 Вт/кг, обостряя проблему перегрева. Удельная активность плутония-240 227 мКи/г.

Pu-241

Плутоний-241 получается при сильном облучении плутония нейтронами, а также в циклотроне по реакции $^{238}\text{U}(\alpha, n)^{241}\text{Pu}$. β^- (99%, 0,02 МэВ) и α (1%, две линии: 4,893 (75%) и 4,848 (25%) МэВ) и γ -излучатель. Этот изотоп так же делим, как и ^{239}Pu (сечение деления тепловыми нейтронами около 1000 барн), имеет низкий нейтронный фон и умеренную тепловую мощность и потому непосредственно не влияет на удобство применения плутония. Он распадается через 14 лет в ^{241}Am , который очень плохо делится и создаёт много тепла: 10⁶ Вт/кг. ^{241}Pu обладает большим сечением деления на нейтронах реактора (1100 барн), что имеет значение в использовании плутония в качестве реакторного горючего. Если оружие первоначально содержит ^{241}Pu , то через несколько лет его реакционная способность падает, и это следует учитывать для предотвращения уменьшения мощности заряда и увеличения самонагрева. Сам ^{241}Pu сильно не нагревается (всего 3.4 Вт/кг) несмотря на свой очень короткий период полураспада из-за очень слабого β -распада. Удельная активность ^{241}Pu 106 Ки/г.

Pu-242

Один из самых интересных изотопов плутония – ^{242}Pu можно получить, облучая длительное время ^{239}Pu в потоках нейтронов. ^{242}Pu очень редко захватывает нейтроны и потому «выгорает» в реакторе медленнее остальных изотопов; он сохраняется и после того, как остальные изотопы плутония почти полностью перешли в осколки или превратились в ^{242}Pu . ^{242}Pu важен как «сырьё» для сравнительно быстрого накопления высших трансурановых элементов в ядерных реакторах. ^{242}Pu тепловыми нейтронами не делится, его и в больших количествах можно облучать в интенсивных нейтронных потоках. Поэтому в реакторах из этого изотопа накапливают в весовых количествах все элементы от калифорния до эйнштейния. Скорость самопроизвольного деления 2,9·10⁶ делений на 1 г/час соответствуют периоду полураспада для этого процесса 6,7·10¹⁰ лет. ^{242}Pu - α -излучатель (4,88 МэВ), период полураспада 37500 лет. Поперечное сечение реакции $^{241}\text{Pu}(n, \gamma)^{242}\text{Pu}$ на медленных нейтронах примерно 250 барн. Интенсивность испускания нейтронов ^{242}Pu 840000 делений/с·кг (вдвое выше ^{240}Pu), кроме того, он плохо подвержен вынужденному делению (делится только нейтронами высоких энергий, хотя и склонен к самопроизвольному делению). При заметной концентрации ^{242}Pu серьёзно увеличивает требуемую критическую массу и нейтронный фон. Имея большую продолжительность жизни и маленькое сечение захвата, ^{242}Pu накапливается в переработанном реакторном топливе. Удельная активность ^{242}Pu 4 мКи/г.

Pu-243

Плутоний-243 впервые обнаружен в химически очищенном образце, облучённого нейтронами плутония, содержащего ^{242}Pu . Это - β^- (энергия 0,56 МэВ) и γ -излучатель (несколько линий в интервале 0,09 – 0,16 МэВ) с периодом полураспада 4,98 часа. Поперечное сечение реакции $^{242}\text{Pu}(n, \gamma)^{243}\text{Pu}$ на медленных нейтронах 100 барн.

Pu-244

Плутоний-244 накапливают в ядерном реакторе (из ^{243}Am). ^{244}Pu ($T_{1/2} = 8,26 \cdot 10^7$ лет), поперечное сечение захвата тепловых нейтронов $\sigma = 1,9 \cdot 10^{-27}$ м². Это не только самый долгоживущий изотоп плутония, но и самый долгоживущий из всех изотопов трансурановых элементов! Следы этого изотопа нашли в редкоземельном минерале бастнезите. Из-за его высокой стабильности это перспективный для химических исследований изотоп. Его удельная активность в 3000 раз меньше удельной активности ^{244}Pu . Однако до сих пор неизвестны способы получения ^{244}Pu в заметных количествах и в изотопически чистом виде. Предпринимались попытки найти более живучий чем ^{244}Pu изотоп трансуранового элемента. Но все попытки

остались тщетными. Одно время возлагали надежды на кюрий-247, но после того, как этот изотоп был накоплен в реакторе, выяснилось, что его период полураспада всего 14 млн лет. Побить рекорд ^{244}Pu не удалось.

Еще более тяжелые изотопы плутония подвержены бета-распаду, и их время жизни лежит в интервале от нескольких дней до нескольких десятых секунды. В термоядерных взрывах образуются все изотопы плутония, вплоть до ^{257}Pu . Но их время жизни – десятые доли секунды, и изучить многие короткоживущие изотопы плутония пока не удалось.

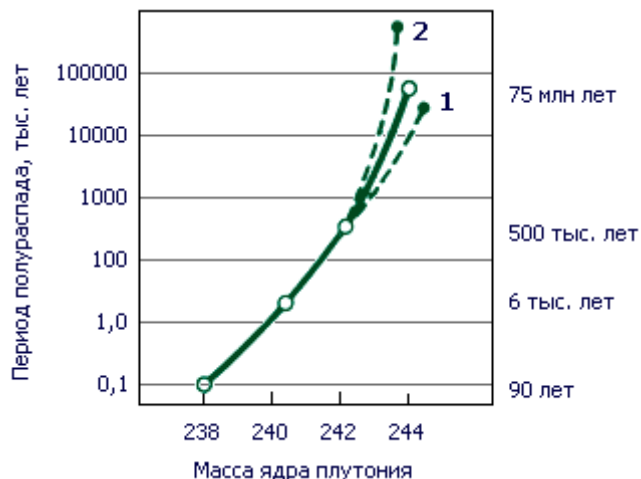


Рис. 6. Периоды полураспада некоторых изотопов плутония

Отметим, что в отличие от нечётных изотопов, периоды полураспада изотопов тяжелых радиоактивных ядер с четными массовыми числами меняются закономерно. График зависимости периода полураспада четных изотопов плутония от массового числа (**Рис. 6**) показывает, что с увеличением массы растет и «время жизни» изотопа.