

核素图解释

概要

在本核素图中，每个实验观察到的核素用一个标有其元素符号和核子数 A 的正方形表示。图中核素按质子数 Z 为纵坐标，中子数 $N = A - Z$ 为横坐标排列。

在本次核素图的更新过程中，将 Karlsruhe 核素图 1998 年版与 NUBASE 2003 年评估版 [16] 相比较，得到一张 1998 年评估版中没有的核素的清单。从该清单中，我们仅选择那些已经实验测量的核素，尤其是挑选那些半衰期或质量已经测定的核素，或者是已经明确鉴定了的核素。对于一个已经鉴定，但其半衰期还没有被测量过的核素，我们将给出其半衰期的检测限值（高于或低于一个数值）。

无 α 衰变、 β 衰变或自发裂变，即只通过发射 γ 射线衰变的亚稳态核素，如其半衰期大于 1s ，都被包括在本图中。若粒子的发射出自不稳定核素的共振态，用以下关系式给出共振态的能级宽度及相应的半衰期：

$$\Gamma_{\text{c.m.}} T_{1/2} \cong \hbar \ln 2, T_{1/2} (\text{s}) \cong 4.562 \times 10^{-22} / \Gamma_{\text{c.m.}} (\text{MeV})$$

对于质量数 $A=266-294$ 的核素，我们使用了最新的（截止至 2005 年 8 月 12 日）Nuclear Data sheets（核数据表）2005 年修订本 [17] 中的数据。对于未被 NUBASE 涵盖的时期（即 2003 年至 2006 年夏）的核素信息则引自 Nuclear Data sheets 100-107。此外，截止至 2006 夏发表的原始出版物也都被收录。一张新的和经过更新的核素的完整列表将在这本小册子的后面给出。

元素的原子量和同位素丰度引自 J. R. De Laeter [18]。对于只通过自发裂变而衰变的同核异能素，在本图中没有给出衰变数据。小册子中给出了一张半衰期（均小于 0.1s ）表，数据引自 B. Singh [19]。累计链产额引自英国 [20]，中子截面引自 N. E. Holden [21]。

Пояснения к таблице нуклидов

Общая информация

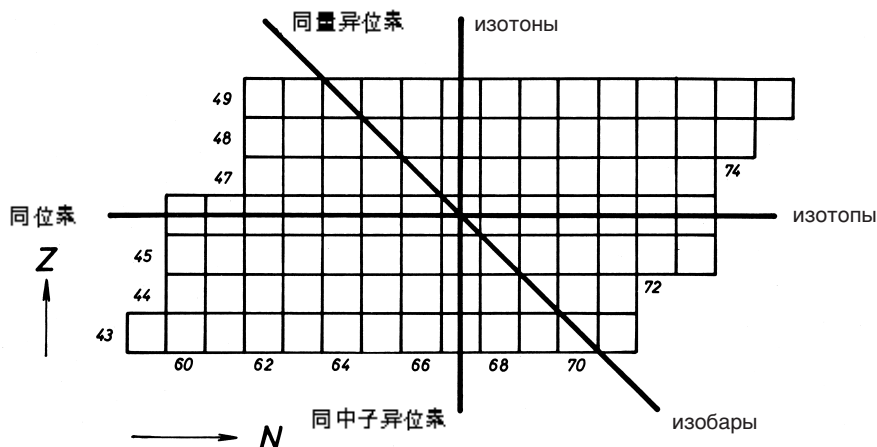
В этой таблице каждый нуклид, изученный экспериментально, представлен квадратом с указанием в нем символа элемента и количества нуклонов, A Расположение нуклидов в таблице следующее: число протонов, Z , – по ординате, а число нейтронов, $N = A - Z$, – по абсциссе.

При подготовке этого обновленного варианта Таблица нуклидов, разработанная в Карлсруэ в 1998 г., была сравнена с оценкой NUBASE 2003 [1], в результате чего был получен список нуклидов, отсутствовавших в редакции 1998 г. Из этого списка мы отобрали только те нуклиды, которые были изучены экспериментально. Это, в частности, нуклиды, для которых был определен период полураспада или масса, либо нуклид был четко идентифицирован. Для идентифицированных нуклидов, период полураспада которых не был измерен, приводится предел обнаружения (больше или меньше некоторого значения). Метастабильные состояния, не претерпевающие альфа- или бета-распада, либо спонтанное деление т.е. распадающиеся лишь с испусканием гамма-излучения, включаются только в том случае, если их период полураспада составляет более 1 сек. Когда же испускание частицы обусловлено резонансным состоянием в неустойчивых нуклидах, приводится как ширина резонанса, так и соответствующий период полураспада, на основе следующих соотношений:

$$\Gamma_{\text{c.m.}} T_{1/2} \cong \hbar \ln 2, T_{1/2} (\text{s}) \cong 4,562 \times 10^{-22} / \Gamma_{\text{c.m.}} (\text{МэВ})$$

Для массовых чисел в диапазоне $A = 266-294$ мы использовали последние пересмотренные версии ядерных таблиц за 2005 г. (до 12 августа 2005 г.) [2]. За период, не охваченный базой NUBASE, т.е. с 2003 г. по лето 2006 г., информация о нуклидах бралась из ядерных таблиц 100-107. Кроме того, учитывались различные опубликованные данные до лета 2006 г. Полный перечень новых нуклидов в настоящей таблице и тех, по которым были обновлены данные, приводится далее в данной брошюре.

Атомные веса элементов и распространенности изотопов взяты из работы J. R. De Laeter с соавторами [3]. По изомерам, распадающимся исключительно спонтанным делением данные по распаду в таблице не приводятся. В брошюре приводится таблица периодов полураспада (все менее $0,1\text{ сек.}$) из работы B. Singh с соавторами. [4]. Суммарные выходы цепной реакции взяты из R. W. Mills [5], а нейтронные сечения – из [6].



- [16] G. Audi, O. Bersillon, J. Blachot and A.H. Wapstra, The NUBASE evaluation of nuclear and decay properties, Nuclear Physics A, 2003, 729, 3 (2003).
 [17] M. Gupta and T. W. Burrows, Nuclear Data Sheets 106, 251 (2005).
 [18] J. R. De Laeter, J. K. Böhlke, P. De Bièvre, H. Hidaka, H. S. Peiser, K. J. R. Rosman, and P. D. P. Taylor, Atomic Weights of the Elements: Review 2000, Pure & Appl. Chem., 75, 683 (2003).
 [19] B. Singh, R. Zywina, and R. Firestone, Table of Superdeformed Nuclear Bands and Fission Isomers, 3rd Edition, Nuclear Data Sheets 97, 241 (2002).
 [20] A. Koning, R. Forrest, M. Kellett, R. Mills, H. Henriksson, Y. Rugama "JEFF Report 2.1: The JEFF-3.1 Nuclear Data Library". OECD/NEA Report to be published. See also R. W. Mills "Fission Product Yield "Evaluation", Thesis, 1995, The University of Birmingham, UK.
 [21] N. E. Holden, Neutron Scattering and Absorption Properties, Handbook of Chemistry and Physics on CD-ROM, version 2006, 11-185, Ed. D.R. Lide, CRC Press, Boca Raton, Florida.

衰变方式：颜色和符号

稳定核素



Виды распада: цвета и символы

Стабильный нуклид

原生放射性核素，即在地球物质积聚过程中形成并留存至今的放射性核素



Первичные радионуклиды, т.е. образовавшиеся при формировании земной материи и сохранившиеся до наших дней.

衰变方式用特定的颜色来表示

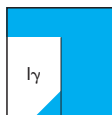
- p: 质子衰变
- α : 阿尔法衰变
- ϵ : 电子俘获
- β^+ : 正电子衰变
- γ : 同核异能跃迁
- β^- : 负电子衰变
- sf: 自发裂变
- ce: 簇发射, 例如C 14, Ne 20
- n: 中子发射

Виды распада представлены определенным цветом.

- p: протонный распад
- α : альфа-распад
- ϵ : путем захвата электрона
- β^+ : позитронный распад
- γ : изомерный переход
- β^- : негатронный распад
- sf: спонтанное деление
- ce: кластерный распад, например, C 14, Ne 20
- n: путем испускания нейтрона



左侧的数据用于亚稳态，右侧的数据用于基态。 γ 表示由激发态至同一核素的基态的衰变（同核异能衰变）发射的 γ 量子。



Данные, приведенные в левой части, относятся к метастабильному состоянию, тогда как те, что справа – к основному состоянию. γ обозначает кванты гамма-излучения в результате распада до основного состояния того же нуклида (изомерный распад).

衰变特性归属于亚稳态还是基态尚未确定。



Отнесение по характеристикам распада к метастабильному или основному состоянию неопределенно.

只观察到通过自发裂变而衰变的一个或多个短寿命能态（自发裂变同核异能素）用一绿色竖条表示。



Одно или несколько короткоживущих состояний, по которым был измерен лишь распад спонтанным делением (спонтанно делящиеся изомеры), обозначены вертикальным зеленым столбиком.

发射 γ 量子；它们总是同其母体核素一道列出。

γ

Испускание квантов гамма-излучения; они всегда приводятся вместе с соответствующим исходным нуклидом.

从 β 衰变形成的子核的一个激发态发射指定的粒子或自发裂变（ β 缓发粒子发射或裂变）。

β^+p ; β^+n ;
 β^-d ; β^-t ;
 $\beta^+\alpha$; β^+sf

Испускание определенных частиц или спонтанное деление с возбужденного уровня дочернего нуклида, населенного посредством бета-распада («испускание запаздывающих бета-частиц или распад»).

同时发射两个 β 粒子（“双 β 衰变”，例如 Te 130 \rightarrow Xe 130）。

$2\beta^-$

Одновременное испускание двух бета-частиц («двойной бета-распад», например, Te 130 \rightarrow Xe 130).

从粒子不稳定核素发射指定粒子。如果单粒子发射的可能性因能量原因被排除，仅标明同时发射两个粒子（例如 Be6 \rightarrow 2p）。

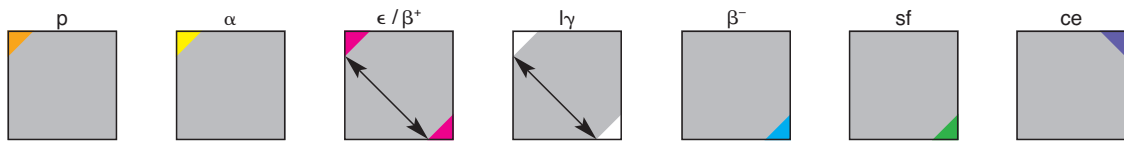
p; n
2p; 2 α

Испускание определенных частиц из основного состояния неустойчивого в отношении частиц нуклида. Одновременное испускание двух частиц указывается только в том случае, если испускание одной частицы исключается по энергетическим причинам (например, Be6 \rightarrow 2p).

多个衰变方式和分支比

衰变方式的分支比被三个不同大小的彩色部分和符号的序列来表示。纯衰变方式用一种单一的颜色（如前所示）来表示。混合衰变方式用彩色的三角形来表示。如图所示，位于左上角或右下角的一个小的彩色三角形表示该种衰变方式的分支比 $\leq 5\%$ （相反地，主要的衰变方式的分支比 $\geq 95\%$ ）。代表质子或阿尔法粒子发射的小三角形总是位于左上角（头两个方框中）。代表 β 发射或自发裂变的三角形总是位于右下角。代表 ϵ/β^+ 和 γ 的三角形可置于左上或右下角，取决于主要的衰变方式。对于 ϵ/β^+ ，如果主要衰变方式为阿尔法发射，红色的三角形位于右下角。

否则，红色的三角形位于左上角。对于同核异能跃迁 I_γ ，如果主要衰变方式为 α -或 p -发射或 ϵ/β^+ ，白色的三角形位于右下角，否则位于左上角。簇发射总是由一个位于右上角的小三角形来表示。因此，小三角形的位置如下：

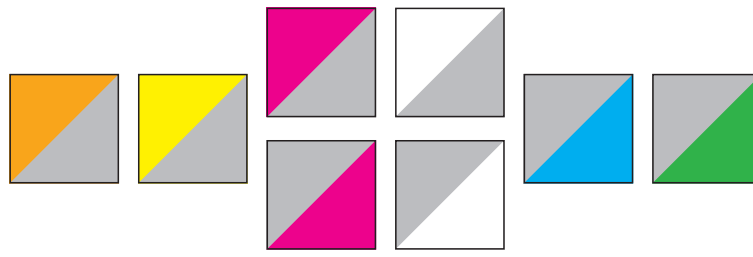


如果次要衰变方式的分支比率落在5%至50%之间（意味着主要衰变方式分支比在50%至95%之间），方框被一条连接左下角和右上角的对角线分为两部分。大三角形的位置与前述类似。

Виды множественного распада и коэффициенты разветвления

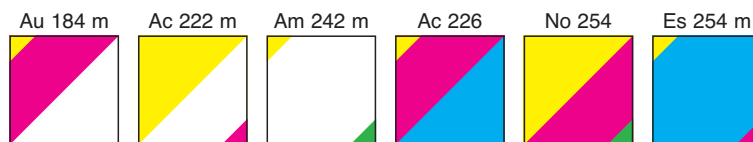
Вероятности ветвления для видов распада указываются цветными участками трех разных размеров и последовательностью символов. «Чистые» виды распада одноцветные (например, см. предыдущий раздел). Смешанные виды обозначены цветными треугольниками. Небольшой цветной треугольник слева сверху или справа внизу показывает вероятности ветвления для вида распада $\leq 5\%$ (наоборот, вероятности ветвления основного вида $\geq 95\%$), как показано на рисунке. Небольшие треугольники, представляющие испускание протонов или альфа-частиц, всегда в верхнем левом углу (первые два квадрата). Треугольники негатронного распада и спонтанного испускания всегда внизу справа. Треугольники, представляющие распад путем захвата электрона/позитронный распад и изомерный переход могут быть сверху слева или внизу справа, в зависимости от основного вида. Для распада путем захвата электрона/позитронного распада красный треугольник внизу справа, если основной вид – распад с испусканием альфа-частиц. В противном случае, красный треугольник – в верхнем левом углу. Для изомерного перехода, I_γ , белый треугольник внизу справа, если основной режим это испускание альфа-частиц или ϵ/β^+ , в противном случае, он в верхнем левом углу. Кластерный распад всегда обозначается небольшим треугольником в верхнем правом углу. Следовательно, расположение треугольников следующее:

Если вероятность ветвления второстепенного вида распада в пределах 5–50% (что предполагает вероятность ветвления для основного вида в пределах 50–95%), квадрат делится надвое диагональю, соединяющей нижний левый и верхний правый углы. Расположение крупных треугольников подобно расположению описанному выше.

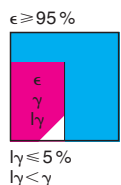
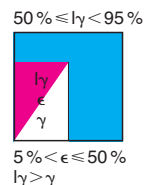
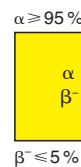
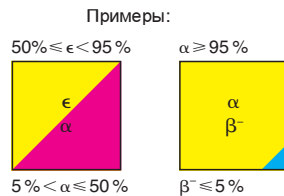
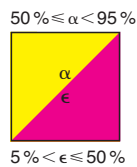
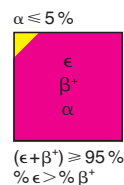
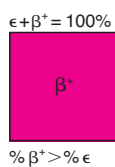
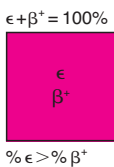


在某些情况下可能有三种衰变方式。下面就是一些例子。

В некоторых случаях возможно три вида распада. Ниже приводится несколько примеров.



例如:



粒子发射衰变方式的符号是根据分支比排列的，分支比最高的排在最前，然后排列的是发射 γ 量子 和 内转换电子。同核异能衰变的数据按相应的衰变方式的分支比排列。 β 缓发粒子或缓发裂变 (βn , βp , βsf) 根据相对强度排在 γ 量子之前或之后。

对于一种给定的辐射，能量的排列顺序与该种辐射的相对强度顺序相对应（以递减顺序）。在 β 衰变的情况下，将使用一个稍有不同的规则（见下文）。

略号表示还有同一类型但强度较低的跃迁。

对于 γ 量子，能量用keV表示，对于所有种类的粒子，则用MeV表示。无能量值的辐射符号表示该种辐射存在，但其能量尚未被测量。

丰度最高的 β 跃迁的端点能量。如果还存在能量更高的跃迁，第二个数字对应于观察到的最高端点能量。

能量已知的多个 β 跃迁，它们的丰度总和少于1%。

如电子俘获比 β^+ 衰变的概率大，则标以电子俘获。

粒子能量按各自跃迁的概率以递减顺序列出。至少给出一个能量值，即使最重要的一组粒子的丰度小于1%。

最强的 γ 量子的能量按强度递减顺序排列。强度小于1%的列在括号内。

带星号的 γ 能量表示跃迁发生在发射 β 缓发粒子之后。

几个能量在291-1319 keV范围内、强度未知的 γ 量子。

仅当内转换电子的丰度比 γ 量子高时才标为内转换电子，其能量不列出。

截面

所有的截面都以靶恩 (10^{-24} cm^2) 表示，它们是与热中子 (0.0253 eV) 反应的截面。

(n, γ) 反应的截面。如果给出两个值，第一个指形成亚稳态产物核的截面，第二个指形成基态产物核的截面。

裂变截面
(n, p) 截面
(n, α) 截面
吸收截面

附加的符号及缩写

U 235及Pu 239 的热中子裂变的链产额 (%), 分别标注在箭头线之上和之下。

闭中子壳层或闭质子壳层的核素用粗体横线或竖线表示。

符号“m”和/或“g”表示子核分布于它的亚稳态和/或基态。符号按概率递降顺序排列。概率小于5%的分支不标明。“m”的下标如 m_1 , m_2 , 用来表示不同的亚稳态 (m_2 表示的能态的能量高于 m_1 表示的能态的能量)。

数据或归属不确定

纳秒, 微秒, 毫秒, 秒, 分, 小时, 日, 年

...

β^+ 2.7...
 β^- 1.2; 1.9...

β^- ...
 β^+ ...
 ϵ

α 3.75, 4.43...
 p 1.56
 βp 4.5

γ 815; 1711...
 γ (1340)

γ 815*

γ 291-1319

e^-

σ

σ_f
 $\sigma_{n,p}$
 $\sigma_{n,\alpha}$
 σ_{abs}

1.92
0.73



m; g

?

ns, μ s, ms, s,
m, h, d, a

Символы видов распада с испусканием частиц расположены в соответствии с вероятностью ветвления, причем сначала наибольшая вероятность ветвления, за ним следуют кванты гамма-излучения и конверсионные электроны. Данные по изомерному распаду расположены в соответствии с вероятностью ветвления. Запоздывающие бета-частицы или деление (n, p, sf) предшествуют квантам гамма-излучения или следуют за ними, в зависимости от относительных интенсивностей. Для определенного типа излучения последовательность энергетических состояний соответствует относительным интенсивностям соответствующего излучения (в убывающем порядке). В случае бета-распада применяется несколько иное правило (см. ниже).

Точки указывают на дальнейшие переходы того же самого вида, но меньшей интенсивности.

Энергии даны в кэВ для квантов гамма-излучения и в МэВ для всех типов частиц. Символ излучения без значения энергии указывает на то, что излучение имеет место, но энергия не измерена.

Конечная энергия наиболее распространенного бета-перехода. В том случае, если существуют переходы с более высокими энергиями, второе число соответствует самой высокой измеренной конечной энергии.

Бета-переходы с известными энергиями, для которых сумма распространенностей менее 1%.

Захват электрона указывается лишь в том случае, если он более вероятен, чем положительный бета-распад.

Энергии частиц приводятся в соответствии с убывающими вероятностями соответствующих переходов. Дается по крайней мере одно значение энергии, даже если распространенность самой распространённой группы менее 1%.

Энергии самых мощных квантов гамма-излучения расположены в порядке убывания интенсивности. Интенсивности менее 1% заключены в скобки.

Энергии гамма-излучения со звездочкой обозначают переходы после испускания запоздывающих бета-частиц.

Несколько квантов гамма-излучения в интервале энергий 291-1319 кэВ.

Конверсионные электроны указываются лишь в том случае, если они более распространены, чем кванты гамма-излучения. Энергии не приводятся.

Сечения

Все сечения даны в барнах (10^{-24} см^2) и относятся к реакциям с тепловыми нейтронами (0,0253 эВ).

Сечение (n, γ)-реакции. Если даны два значения, первое относится к образованию дочернего ядра в метастабильном, а второе – в основном состоянии.

Сечение реакции деления

(n, p)-сечение

(n, α)-сечение

Сечение поглощения

Дополнительные символы и аббревиатуры

Суммарный выход цепной реакции (%) для деления U 235 под действием тепловых нейтронов (выше) и Pu 239 (ниже) линии со стрелкой.

Нуклиды с замкнутой нейтронной или протонной оболочкой обозначены жирными вертикальными или горизонтальными линиями.

Символы «m» и/или «g» указывают на заселение соответственно метастабильного и/или основного состояния дочернего нуклида. Они представлены в порядке убывающей вероятности. Разветвления с вероятностями менее 5% не показаны. Подстрочные индексы при m (например m_1 , m_2) используются для обозначения разных метастабильных состояний (причем m_2 означает более высокое энергетическое состояние, чем m_1).

Данные или отнесение неопределенны.

Наносекунда, микросекунда, миллисекунда, секунда, минута, час, сутки, год.

符号和数据的编排

元素

元素符号
以 C12 = 12 为基准的标准原子量

热中子吸收截面 (靶恩)

稳定核素

元素符号, 核子数
天然元素的丰度 (原子百分比)

形成亚稳态和基态 Te 127 的
热中子 (n, γ) 截面 (靶恩)

元素的符号, 核子数
左侧: 亚稳态半衰期;
同核异能跃迁的 γ 能量 (keV)

右侧: 天然元素中的丰度 (原子百分比)
热中子的 (n, γ) 截面 (靶恩)

不稳定的核素

元素符号, 核子数
半衰期
衰变方式, β^- 辐射的端点能量 (MeV)
 γ 能量 (keV), 内转换电子,
(n, γ) 截面 (靶恩)

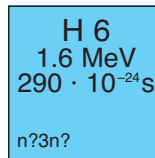
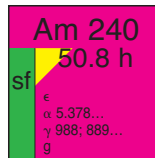
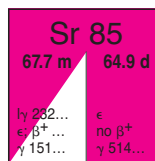
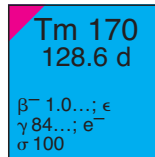
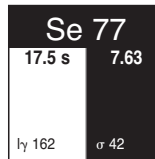
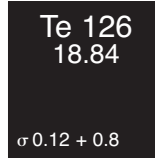
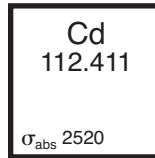
元素符号, 核子数
半衰期

两种能态均为电子俘获衰变; 由亚稳态衰变至基态的 I_γ 的
分支比在 50% 至 95% 之间

元素符号, 核子数
左侧: 自发裂变同核异能素,
 $T < 0.1$ s

右侧: 基态的衰变数据
“g” 表明形成子核 Pu 240g 的概率至少为 95%; 形成概
率不大于 5% 的 Pu 240m 的生成不能排除

若一个粒子从一个不稳定核素的某一共振态发射, 共振宽
度 Γ (MeV) 和半衰期 $T_{1/2}$ 均被给出。



Расположение символов и данных

Элементы

символ элемента
стандартный атомный вес, основанный на C 12 = 12

поперечное сечение поглощения для тепловых
нейтронов (барн)

Стабильные нуклиды

символ элемента, количество нуклонов
распространенность в природном элементе (ат.%)

(n, γ)-сечения образования метастабильного
и основного состояния Te 127 тепловыми нейтронами
(барн)

символ элемента, количество нуклонов
левая сторона: период полураспада метастабильного
состояния
энергия гамма-излучения (кэВ) изомерного перехода

правая сторона: распространенность в природном
элементе (ат.%)
(n, γ)-сечения для тепловых нейтронов (барн)

Неустойчивые нуклиды

символ элемента, количество нуклонов
период полураспада
виды распада, конечная энергия бета-минус
излучения (МэВ)
энергия гамма-излучения (кэВ), конверсионные
электроны
(n, γ)-сечение (барн)

символ элемента, количество нуклонов
периоды полураспада

оба состояния распадаются с захватом электронов;
метастабильное состояние распадается до
основного состояния с вероятностью ветвления в
пределах 50% - 95%

символ элемента, количество нуклонов
левая сторона: изомер спонтанного деления,
 $T < 0,1$ сек

правая сторона: данные распада основного
состояния
«g» указывает на то, что дочерний Pu 240g
образуется не менее чем до 95%; населенность Pu
240m до 5% нельзя исключить

испускание частицы происходит в результате
резонансного состояния в неустойчивом ядре,
приводится и резонансная энергия Γ (МэВ) и период
полураспада $T_{1/2}$