

## 第一次讨论课

# 衰变纲图

课程内容：

- 1、复习原子核的衰变，解读衰变纲图；
- 2、讨论**衰变纲图**；
- 3、期中考试的范围和要求。

2022年10月28日@二教401

# 1、复习原子核的衰变，解读衰变纲图

**原子核的衰变**：不稳定原子核在没有外界影响的情况下，**自发地**发生核蜕变的过程。

原子核衰变的主要形式： $\alpha$ 、 $\beta$ 、 $\gamma$ 。

- ① 衰变本质和**表达形式**是什么？ **衰变式**和**衰变纲图**
- ② 衰变中**释放的动能**是多少？
- ③ 衰变发生的**必要条件**是什么？
- ④ 衰变发生的**概率**决定于什么？ **衰变能和粒子能量**
- 选择定则**和**半衰期**

**综合问题**：根据**数据**画出**衰变纲图**。  
能够正确**分析****衰变纲图**。

## 母核特点

$\alpha$ 衰变

$A > 140$ , 重核

$\beta$ 衰变  $\left\{ \begin{array}{l} \beta^- \text{ 衰变} \\ \beta^+ \text{ 衰变} \\ \text{EC} \end{array} \right.$

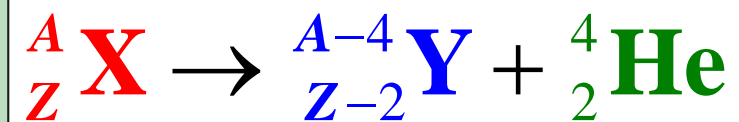
任意  $A$ , 偏离 $\beta$ 稳定线

$\gamma$ 跃迁  $\left\{ \begin{array}{l} \gamma \text{ 跃迁} \\ \text{内转换} \end{array} \right.$

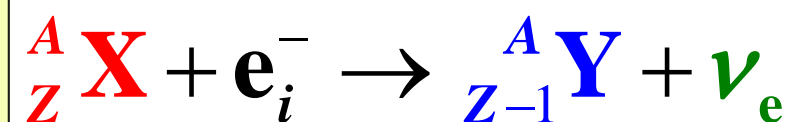
有激发态

# 表达式

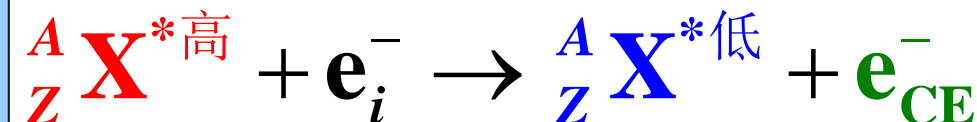
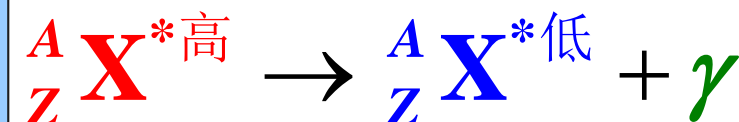
$\alpha$ 衰变



$\beta$ 衰变  $\left\{ \begin{array}{l} \beta^- \text{ 衰变} \\ \beta^+ \text{ 衰变} \\ \text{EC} \end{array} \right.$



$\gamma$ 跃迁  $\left\{ \begin{array}{l} \gamma \text{ 跃迁} \\ \text{内转换} \end{array} \right.$

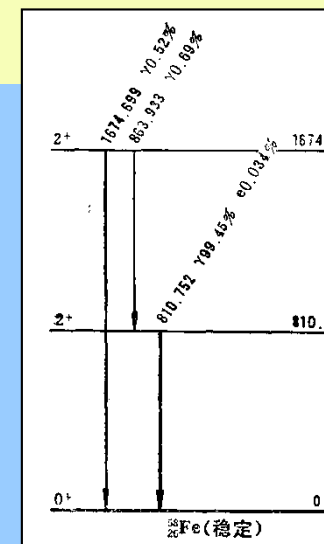
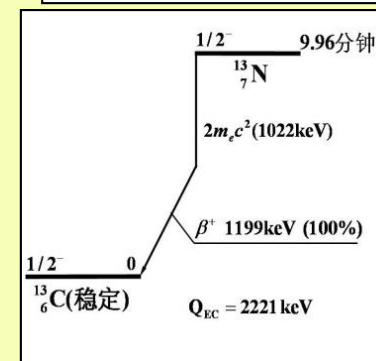
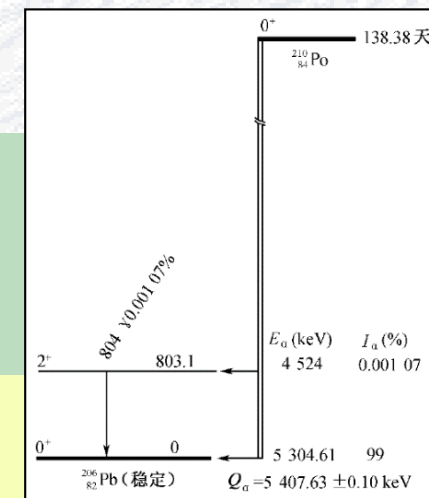
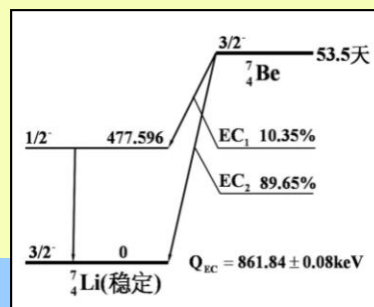
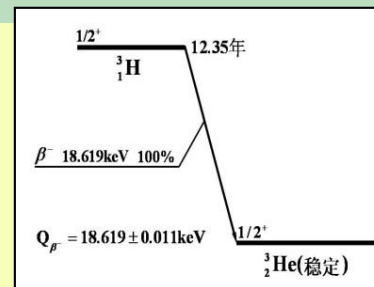
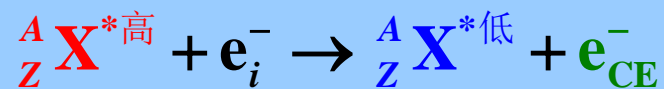
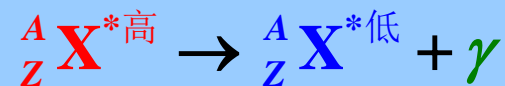
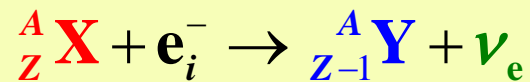
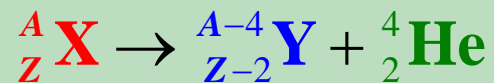


# 衰变纲图

$\alpha$ 衰变

$\beta$ 衰变  $\left\{ \begin{array}{l} \beta^- \text{ 衰变} \\ \beta^+ \text{ 衰变} \\ \text{EC} \end{array} \right.$

$\gamma$ 跃迁  $\left\{ \begin{array}{l} \gamma \text{ 跃迁} \\ \text{内转换} \end{array} \right.$



# 辐射粒子 直接, (后续)

$\alpha$ 衰变

$\alpha$ 粒子

$\beta$ 衰变  $\left\{ \begin{array}{l} \beta^- \text{ 衰变} \\ \beta^+ \text{ 衰变} \\ \text{EC} \end{array} \right.$

$\beta^-$  粒子, 反中微子

$\beta^+$  粒子, 中微子, (湮没辐射)

中微子, (后续: 特征X或俄歇电子)

$\gamma$ 跃迁  $\left\{ \begin{array}{l} \gamma \text{ 跃迁} \\ \text{内转换} \end{array} \right.$

$\gamma$ 光子

内转换电子 (后续: 特征X或俄歇电子)

# 能谱特点/能量特征

$\alpha$ 衰变

$\beta$ 衰变  $\left\{ \begin{array}{l} \beta^- \text{ 衰变} \\ \beta^+ \text{ 衰变} \\ \text{EC} \end{array} \right.$

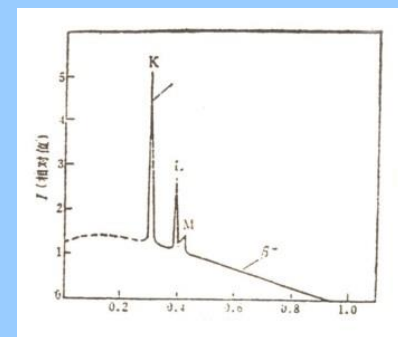
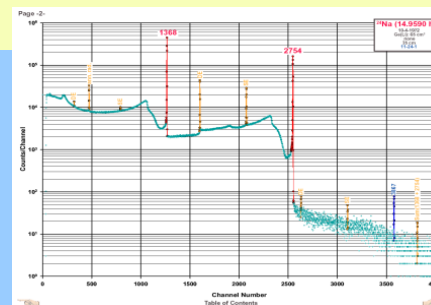
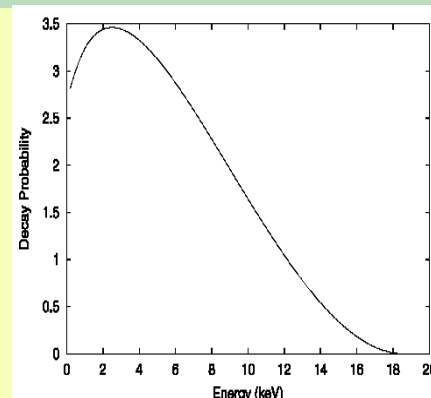
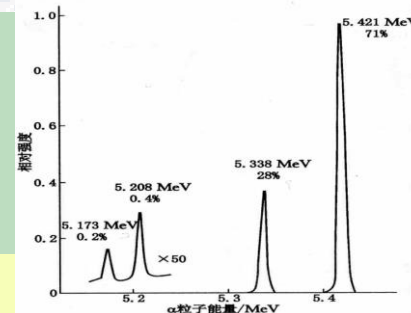
$\gamma$ 跃迁  $\left\{ \begin{array}{l} \gamma \text{ 跃迁} \\ \text{内转换} \end{array} \right.$

分立能谱

连续能谱

分立能谱

分立能谱



# 衰变能

$\alpha$ 衰变

$$E_0 = \Delta(Z, A) - [\Delta(Z - 2, A - 4) + \Delta(2, 4)]$$

$\beta$ 衰变  $\left\{ \begin{array}{l} \beta^- \text{ 衰变} \\ \beta^+ \text{ 衰变} \\ \text{EC} \end{array} \right.$

$$E_0 = \Delta(Z, A) - \Delta(Z + 1, A)$$

$$E_0 = \Delta(Z, A) - \Delta(Z - 1, A) - 2m_0c^2$$

$$E_0 = \Delta(Z, A) - \Delta(Z - 1, A) - \varepsilon_i$$

$\gamma$ 跃迁  $\left\{ \begin{array}{l} \gamma \text{ 跃迁} \\ \text{内转换} \end{array} \right.$

$$E_0 = E_i - E_f$$



# 衰变发生必要条件<sub>(能量)</sub>

$\alpha$ 衰变

$$\Delta(Z, A) > \Delta(Z - 2, A - 4) + \Delta(2, 4)$$

$\beta$ 衰变  $\left\{ \begin{array}{l} \beta^- \text{ 衰变} \\ \beta^+ \text{ 衰变} \\ \text{EC} \end{array} \right.$

$$\Delta(Z, A) > \Delta(Z + 1, A)$$

$$\Delta(Z, A) > \Delta(Z - 1, A) + 2m_0c^2$$

$$\Delta(Z, A) > \Delta(Z - 1, A) + \epsilon_i$$

$\gamma$ 跃迁  $\left\{ \begin{array}{l} \gamma \text{ 跃迁} \\ \text{内转换} \end{array} \right.$

$$E_i > E_f$$

# 衰变能与粒子能量

$\alpha$ 衰变

$$E_0 \approx \frac{A}{A-4} T_\alpha$$

$\beta$ 衰变  $\left\{ \begin{array}{l} \beta^- \text{ 衰变} \\ \beta^+ \text{ 衰变} \\ \text{EC} \end{array} \right.$

$$E_0 \approx E_{\beta^- \text{ max}}$$

$$E_0 \approx E_{\beta^+ \text{ max}}$$

$$E_0 \approx E_{\nu_e}$$

$\gamma$ 跃迁  $\left\{ \begin{array}{l} \gamma \text{ 跃迁} \\ \text{内转换} \end{array} \right.$

$$E_0 \approx E_\gamma$$

$$E_0 \approx E_e + \varepsilon_i$$

# 衰变能与子核激发能

$\alpha$ 衰变

$$E_i^* = E_0 (= \Delta_X - \Delta_Y - \Delta_\alpha) - E_{0i} (= \frac{A}{A-4} T_{\alpha i})$$

$\beta$ 衰变  $\left\{ \begin{array}{l} \beta^- \text{ 衰变} \\ \beta^+ \text{ 衰变} \\ \text{EC} \end{array} \right.$

$$E_i^* = E_0 (= \Delta_X - \Delta_Y) - E_{\beta_i^- \text{ max}}$$

$$E_i^* = E_0 (= \Delta_X - \Delta_Y - 2m_0c^2) - E_{\beta_i^+ \text{ max}}$$

$$E_i^* = E_0 (= \Delta_X - \Delta_Y) - E_{\beta_i^+ \text{ max}} - 2m_0c^2$$

$\gamma$ 跃迁  $\left\{ \begin{array}{l} \gamma \text{ 跃迁} \\ \text{内转换} \end{array} \right.$

$$E_{\text{高}}^* = E_{\text{低}}^* + E_\gamma$$

$$E_{\text{高}}^* = E_{\text{低}}^* + E_e + \varepsilon_i$$

# 衰变概率

**衰变能**大，衰变常数大，半衰期短  
(衰变概率强烈依赖衰变能)

$\alpha$ 衰变

$\beta$ 衰变  $\left\{ \begin{array}{l} \beta^- \text{ 衰变} \\ \beta^+ \text{ 衰变} \\ \text{EC} \end{array} \right.$

$\gamma$ 跃迁  $\left\{ \begin{array}{l} \gamma \text{ 跃迁} \\ \text{内转换} \end{array} \right.$

跃迁级次	自旋变化	宇称变化
允许跃迁	$\Delta I = 0, \pm 1$	$\Delta \pi = +1$
一级禁戒跃迁	$\Delta I = 0, \pm 1, \pm 2$	$\Delta \pi = -1$
二级禁戒跃迁	$\Delta I = \pm 2, \pm 3$	$\Delta \pi = +1$
.....		
n级禁戒跃迁	$\Delta I = \pm n, \pm(n+1)$	$\Delta \pi = (-1)^n$

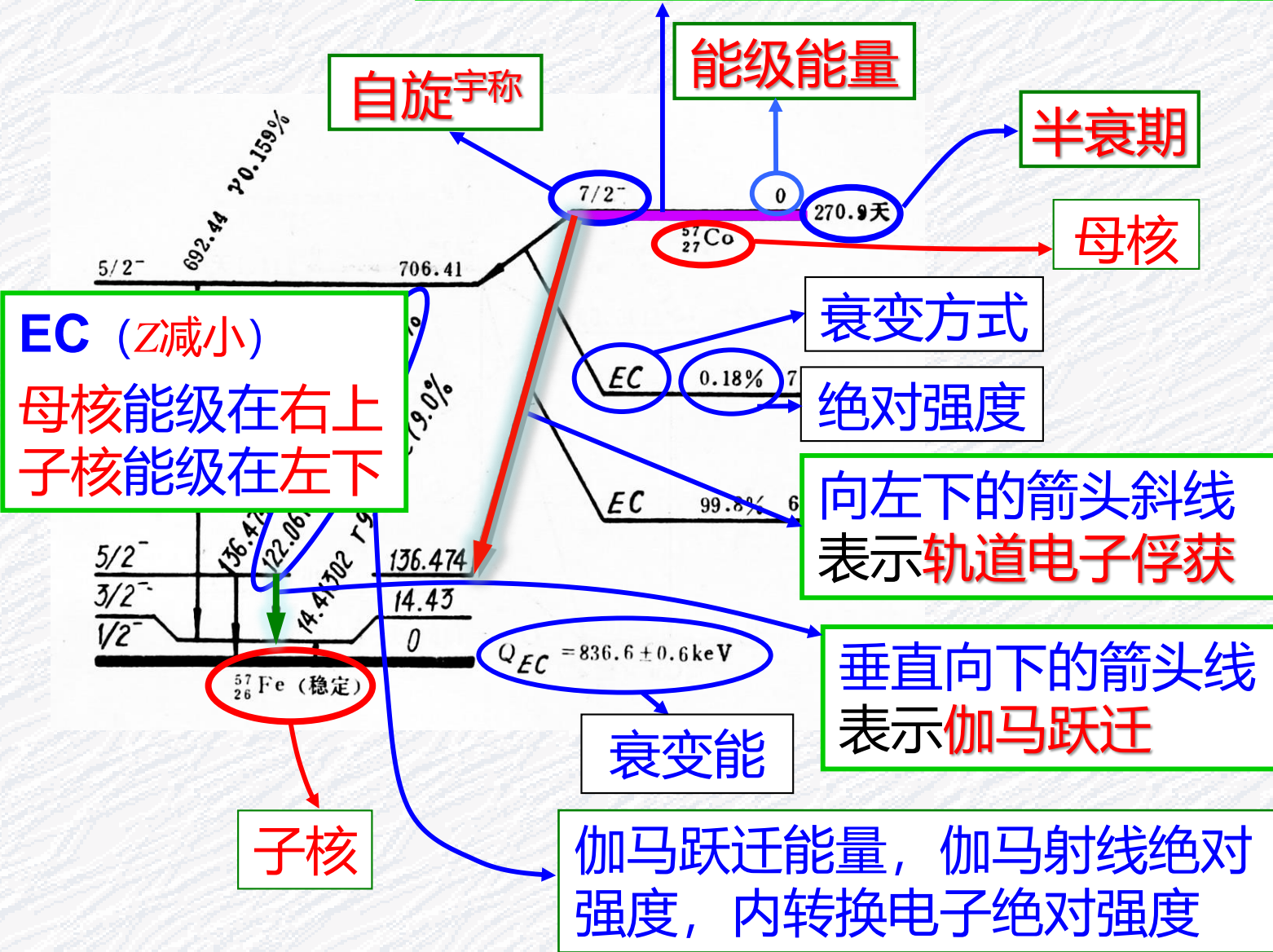
$\Delta \pi \backslash \Delta I$	0或1 奇	2偶	3奇	4偶	5奇
+ 偶	M1 (E2)	E2	M3 (E4)	E4	M5 (E6)
- 奇	E1	M2 (E3)	E3	M4 (E5)	E5

先**选择定则**再衰变能

衰变能大衰变常数大

# 衰变纲图

横线表示核能级，线左上标自旋宇称，  
右上标能级能量，右侧标半衰期。



## 两种线

**横线——能级**

(自旋、宇称、能级能量、半衰期)

**箭头线——衰变**

(5种—— $\alpha$ 、EC、 $\beta^+$ 、 $\beta^-$ 、 $\gamma$ )

## 两类符号

**核素符号——母核/子核**

**衰变方式——6种**

( $\alpha$ 、EC、 $\beta^+$ 、 $\beta^-$ 、 $\gamma$ 、e)

能量值——对应的**粒子能量**

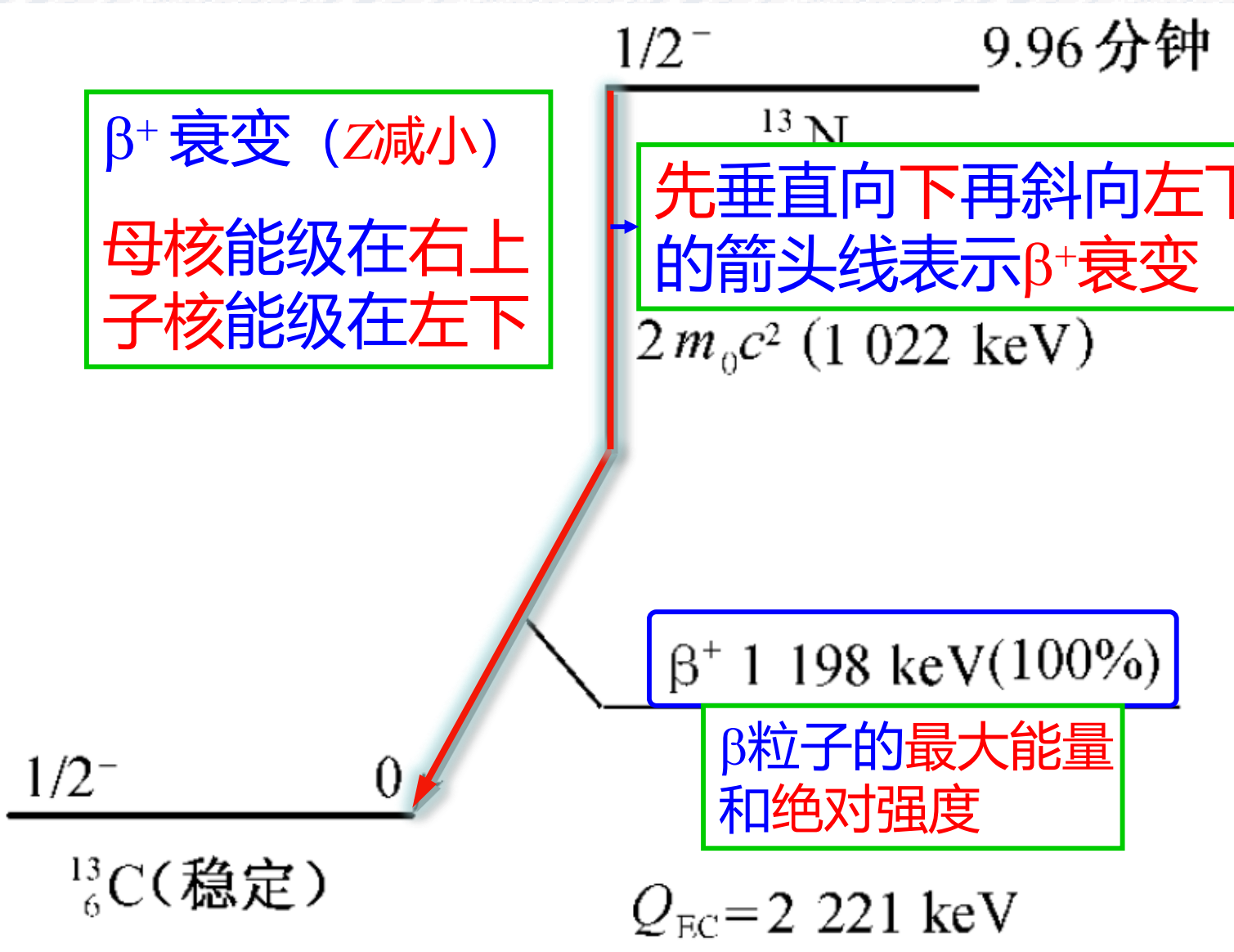
( $\alpha$ 粒子、 $\beta^+$  $\beta^-$ 粒子最大、 $\gamma$ 射线)

百分数——**绝对强度**

(对应到母核衰变的百分数)

衰变能——**到子核基态的**

# 衰变纲图



## 两种线

横线——能级

(自旋、宇称、能级能量、半衰期)

箭头线——衰变

(5种—— $\alpha$ 、EC、 $\beta^+$ 、 $\beta^-$ 、 $\gamma$ )

## 两类符号

核素符号——母核/子核

衰变方式——6种

( $\alpha$ 、EC、 $\beta^+$ 、 $\beta^-$ 、 $\gamma$ 、 $e$ )

能量值——对应的粒子能量

( $\alpha$ 粒子、 $\beta^+$ / $\beta^-$ 粒子最大、 $\gamma$ 射线)

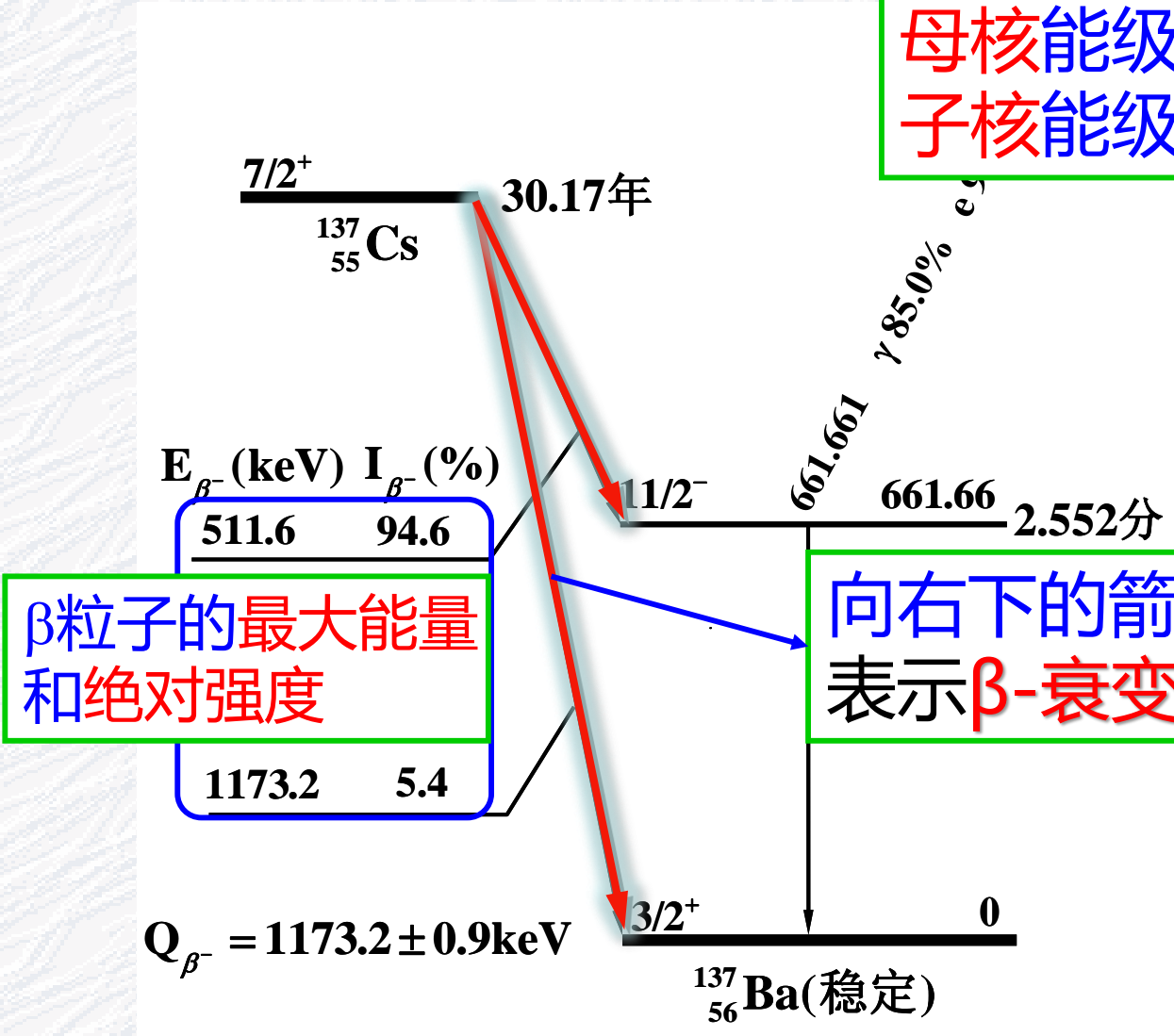
百分数——绝对强度

(对应到母核衰变的百分数)

衰变能——到子核基态的

# 衰变纲图

$\beta^-$  衰变 (Z增大)  
母核能级在左上  
子核能级在右下



$\beta$ 粒子的最大能量  
和绝对强度

向右下的箭头斜线  
表示 $\beta^-$ 衰变

## 两种线

横线——能级

(自旋、宇称、能级能量、半衰期)

箭头线——衰变

(5种—— $\alpha$ 、EC、 $\beta^+$ 、 $\beta^-$ 、 $\gamma$ )

## 两类符号

核素符号——母核/子核

衰变方式——6种

( $\alpha$ 、EC、 $\beta^+$ 、 $\beta^-$ 、 $\gamma$ 、 $e^-$ )

能量值——对应的粒子能量

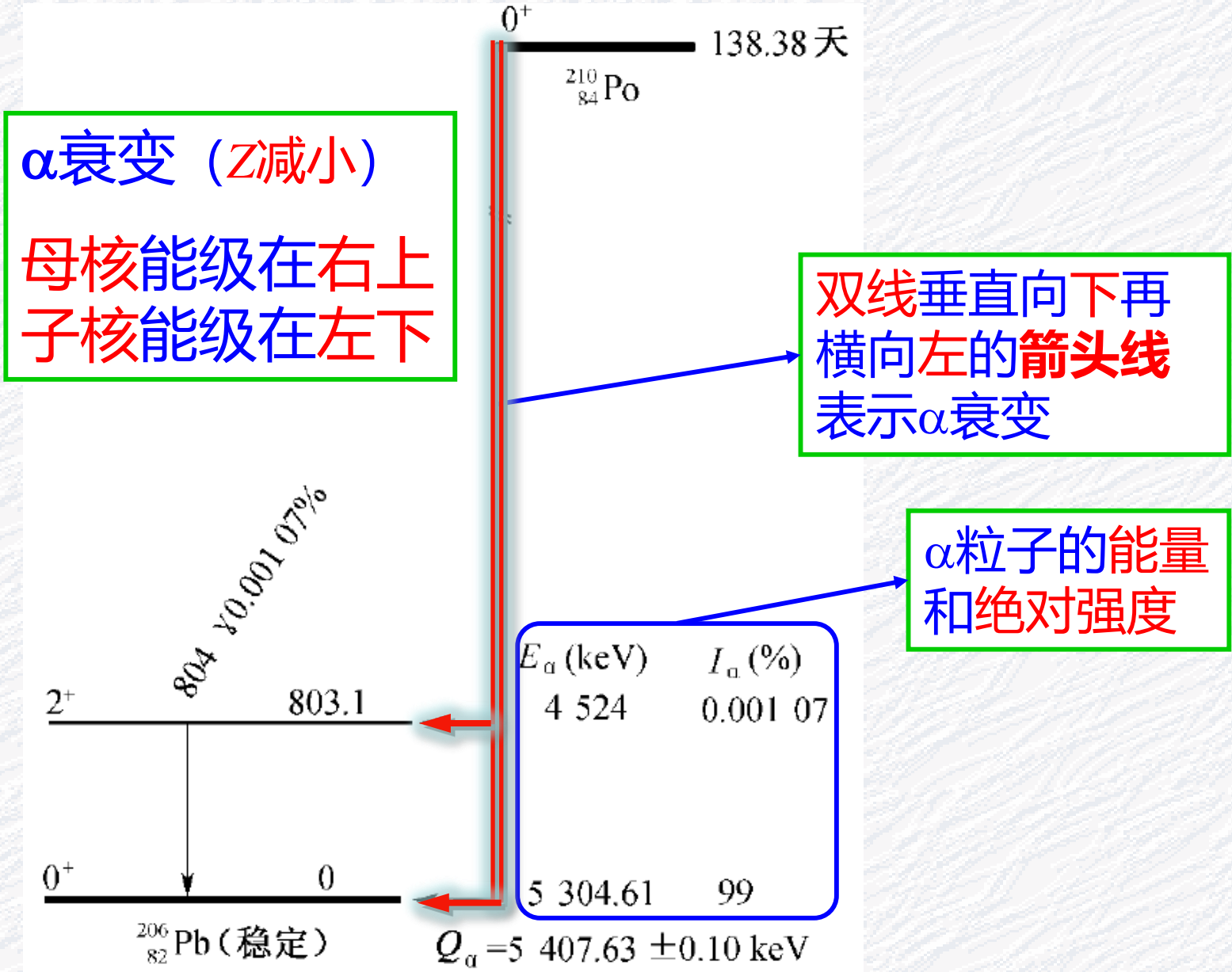
( $\alpha$ 粒子、 $\beta^+$  $\beta^-$ 粒子最大、 $\gamma$ 射线)

百分数——绝对强度

(对应到母核衰变的百分数)

衰变能——到子核基态的

# 衰变纲图



## 两种线

横线——能级

(自旋、宇称、能级能量、半衰期)

箭头线——衰变

(5种——α、EC、β<sup>+</sup>、β<sup>-</sup>、γ)

## 两类符号

核素符号——母核/子核

衰变方式——6种

(α、EC、β<sup>+</sup>、β<sup>-</sup>、γ、e)

能量值——对应的粒子能量

(α粒子、β<sup>+</sup>β<sup>-</sup>粒子最大、γ射线)

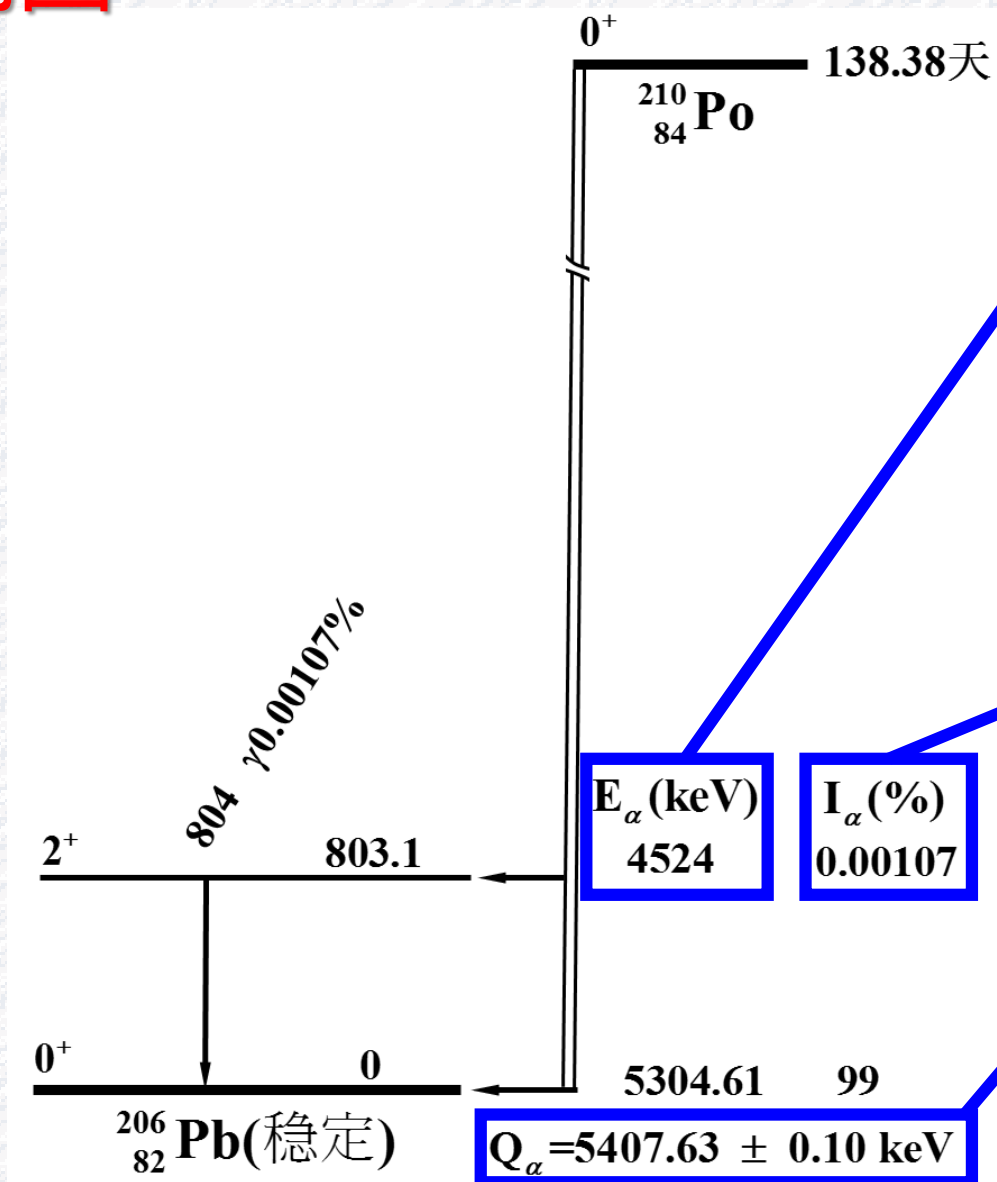
百分数——绝对强度

(对应到母核衰变的百分数)

衰变能——到子核基态的



# 衰变纲图



$E_\alpha$  :  $\alpha$  粒子的能量

$$E_\alpha = \frac{A-4}{A} (Q_\alpha - E_i^*)$$

$E_i^*$  为子核激发态能量

$I_\alpha$  : 衰变到子核某一能级的  
 $\alpha$  的绝对强度

$Q_\alpha$  :  $\alpha$  衰变的衰变能

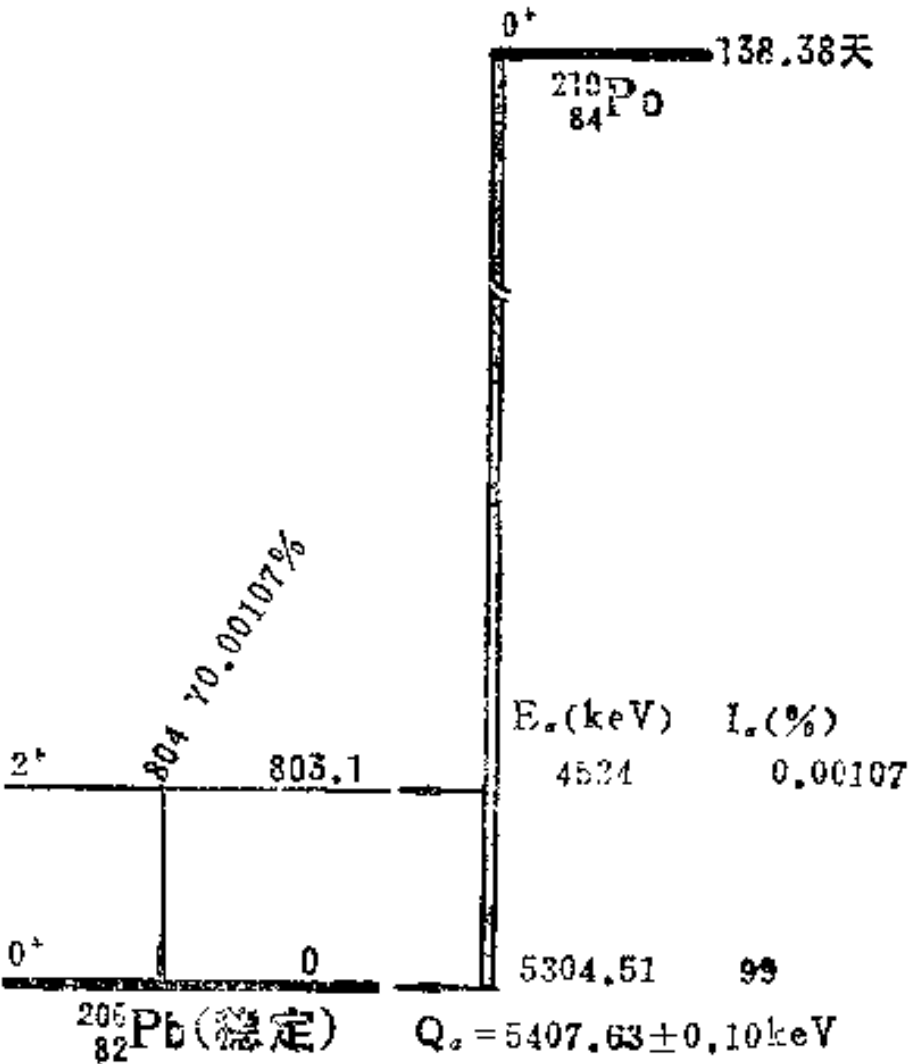
$$Q_\alpha = \Delta(Z, A) - \Delta(Z-2, A-4) - \Delta(2, 4)$$

衰变纲图

<sup>210</sup><sub>84</sub>Po(钋)

半衰期 138.38±0.01天.

主要获取方式 <sup>210</sup>Bi 衰变子体.



衰变类型和射线				能 量		绝对强度	
$\alpha$	X	$\gamma$	ce	(keV)		(%)	
$\alpha_1$				4524	5	0.00107	2
$\alpha_2$				5304.51	7	99	
	Pb KX			74.9		$1.65 \times 10^{-4}$	16
	Pb L <sub>1</sub>			9.2		$1.11 \times 10^{-4}$	22
	Pb L <sub>2</sub>			10.5		0.0111	11
	Pb L <sub>3</sub>			12.6		0.00972	73
	Pb L <sub>γ</sub>			14.8		0.00215	32
		$\gamma$		804	3	0.00107	2

说明

- 1. 半衰期引自[1].
- 2.  $\alpha$  粒子能量转引自[1], 强度取自[2].
- 3.  $\gamma$  射线能量和 X 射线强度分别取自[3], [4].
- 4. 衰变纲图参见[1].

Results:

Dataset #1:

Author: F.G. Kondev Citation: Nuclear Data Sheets 109, 1527 (2008)

Parent Nucleus	Parent E(level)	Parent J $\pi$	Parent T <sub>1/2</sub>	Decay Mode	GS-GS Q-value (keV)	Daughter Nucleus	Decay Scheme	ENSDF file
<sup>210</sup> <sub>84</sub> Po	0.0	0+	138.376 d 2	$\alpha$ : 100 %	5407.45 7	<sup>206</sup> <sub>82</sub> Pb		

Alphas:

Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
4516.58 10	0.00104 % 6	4.7E-5 3
5304.33 7	100 %	5.30433

Electrons:

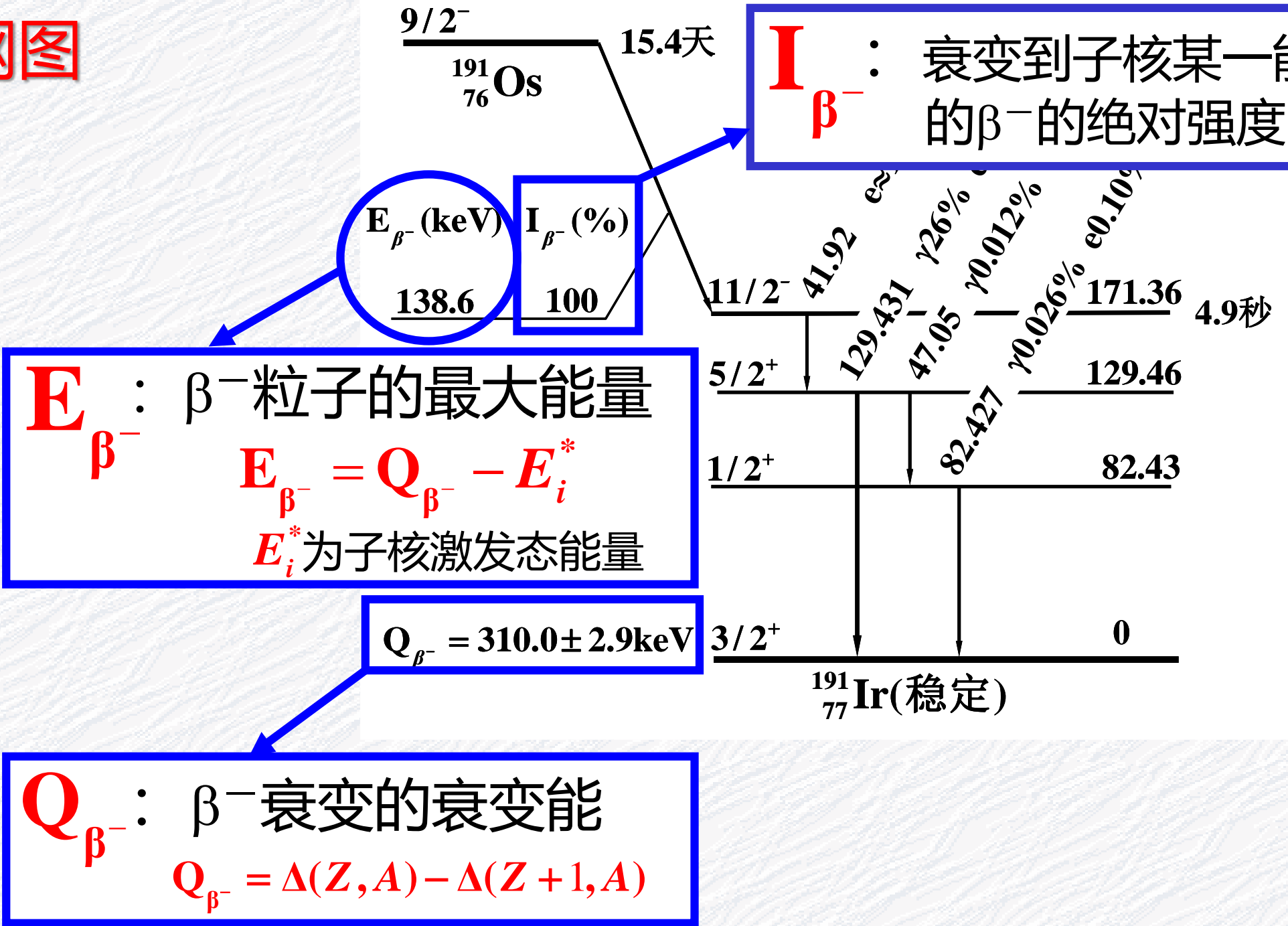
	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
Auger L	7.97	5.3E-6 % 3	4.21E-10 23
Auger K	56.7	3.1E-7 % 4	1.74E-10 21
CE K	715.06 3	8.3E-6 % 5	5.9E-8 4
CE L	787.20 3	1.80E-6 % 11	1.41E-8 8
CE M	799.21 3	4.3E-7 % 3	3.46E-9 21
CE N	802.17 3	1.10E-7 % 7	8.8E-10 5
CE O	802.98 3	2.12E-8 % 13	1.70E-10 10
CE P	803.06 3	1.95E-9 % 12	1.56E-11 9

Gamma and X-ray radiation:

	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
XR L	10.6	3.23E-6 % 20	3.42E-10 22
XR ka2	72.805	2.29E-6 % 15	1.67E-9 11
XR ka1	74.969	3.83E-6 % 24	2.87E-9 18
XR kb3	84.45	4.6E-7 % 3	3.90E-10 25
XR kb1	84.938	8.9E-7 % 6	7.5E-10 5

<https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

# 衰变纲图



# 衰变纲图

半衰期 15.4 ± 0.1

主要获取方式 1940

## 衰变类型和射线

$\beta$	X	$\gamma$	ce
$\beta^-$	IrK $\alpha_2$ IrK $\alpha_1$ IrK $\beta$	$\gamma_1$ $\gamma_2$	ceL + M

## 说明

1. 半衰期取自[2].
2.  $\gamma$  射线能量取自[3].
3.  $\gamma_1$  的内转换系数取自[4].  
 $\gamma_2$  的内转换系数参
4.  $\gamma$  射线绝对强度从[5].
5. 衰变纲图参见[9].

Beta-:

Energy (keV)	End-point energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
37.5 3	141.4 11	100 %	0.0375

Mean beta- energy: 37.5 keV , total beta- intensity: 100 % , mean beta- dose

Electrons:

	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
CE K	6.316 10	0.165 % 16	1.04E-5 10
Auger L	7.06	89.4 % 18	0.00631 13
CE L	28.428 22	71.8 % 11	0.0204 3
CE L	33.63 3	0.27 % 3	9.1E-5 11
CE M	38.672 22	22.0 % 4	0.00849 14
CE N	41.156 22	5.44 % 8	0.00224 3
CE O	41.803 22	0.803 % 12	3.36E-4 5
CE M	43.88 3	0.069 % 8	3.0E-5 4
CE N	46.36 3	0.0167 % 20	7.7E-6 9
CE O	47.01 3	0.0025 % 3	1.19E-6 14
Auger K	49.6	2.40 % 23	0.00119 11
CE K	53.320 5	57.0 % 8	0.0304 4
CE L	69.008 10	0.122 % 12	8.4E-5 8
CE M	79.253 10	0.031 % 3	2.44E-5 24
CE N	81.737 10	0.0075 % 7	6.1E-6 6
CE O	82.384 10	0.00117 % 12	9.6E-7 10
CE L	116.012 5	12.27 % 19	0.01423 22
CE M	126.257 5	2.91 % 4	0.00367 5
CE N	128.741 5	0.713 % 11	9.18E-4 14
CE O	129.388 5	0.1214 % 19	1.570E-4 24

## IC衰变的后续过程

## 子核原子退激

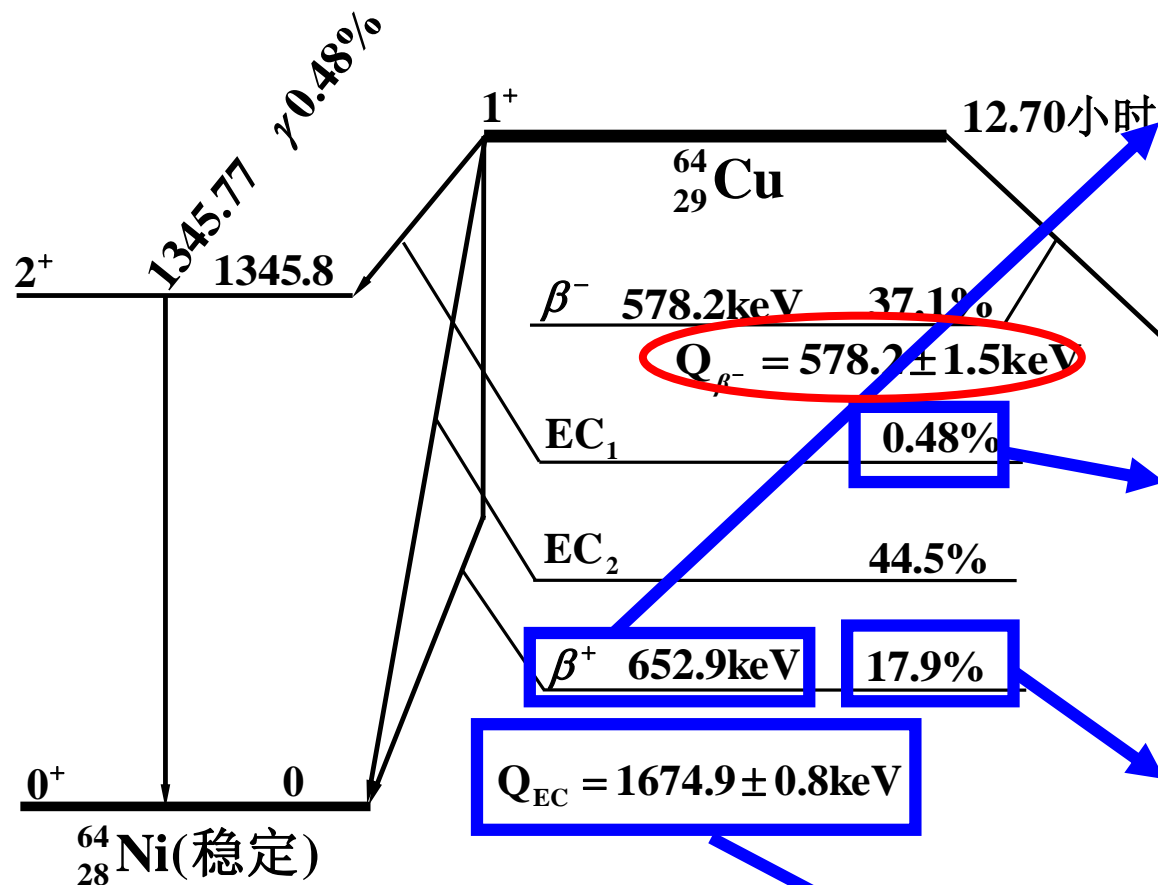
图中未标, 但能测到的其他射线  
子核IC后 原子的特征X射线或  
俄歇电子。

<https://www.nndc.bnl.gov/nudat3/>

Gamma and X-ray radiation:

	Energy (keV)	Intensity (%)	Dose (MeV/Bq-s)
XR 1	9.18	41.9 % 18	0.00384 16
	41.846 22	0.005885 % 8	2.463E-6 4
	47.05 3	0.0025 % 3	1.18E-6 14
XR k $\alpha_2$	63.287	15.7 % 4	0.0099 3
XR k $\alpha_1$	64.986	26.7 % 7	0.0173 4
XR k $\beta_3$	73.202	3.15 % 8	0.00231 6
XR k $\beta_1$	73.56	6.06 % 15	0.00446 11
XR k $\beta_2$	75.575	2.14 % 5	0.00162 4
	82.427 10	0.031 % 3	2.56E-5 25
	129.431 5	26.50 % 4	0.03430 5

# 衰变纲图



$E_{\beta}$  :  $\beta^+$  粒子的最大能量

$$E_{\beta^+} = Q_{\text{EC}} - 2m_0c^2 - E_i^*$$

$E_i^*$  为子核激发态能量

$I_{\text{EC}}$  : 衰变到子核某一能级的 EC 的绝对强度

$I_{\beta^+}$  : 衰变到子核某一能级的  $\beta^+$  的绝对强度

$Q_{\text{EC}}$  : EC 衰变的衰变能

$$Q_{\text{EC}} = \Delta(Z, A) - \Delta(Z - 1, A)$$

# 衰变纲图

衰变类型和射线				能 量		绝对强度	
$\beta$	X	$\gamma$	ec	(keV)		(%)	
$\beta^-$				578.2	15	37.1	4
EC <sub>1</sub>						0.48	4
EC <sub>2</sub>						44.5	4
$\beta^+$				652.9	8	17.9	4
	NiK <sub><math>\alpha</math>2</sub>			7.4609		4.7	4
	NiK <sub><math>\alpha</math>1</sub>			7.4782		9.2	7
	NiK <sub><math>\beta</math></sub>			8.26		1.9	1
		$\gamma$		1345.77	6	0.48	4
		$\gamma^\pm$		511		35.8	8

### 说明

- 1. 衰变纲图取自
- 2. 半衰期参见[1]
- 3.  $\gamma$ 射线能量取
- 4.  $\beta^-$ 、EC、 $\beta^+$

- [1] M. L. Ha
- 28, 179 (1
- [2] R. L. Hea

## EC衰变的后续过程

### 子核原子退激

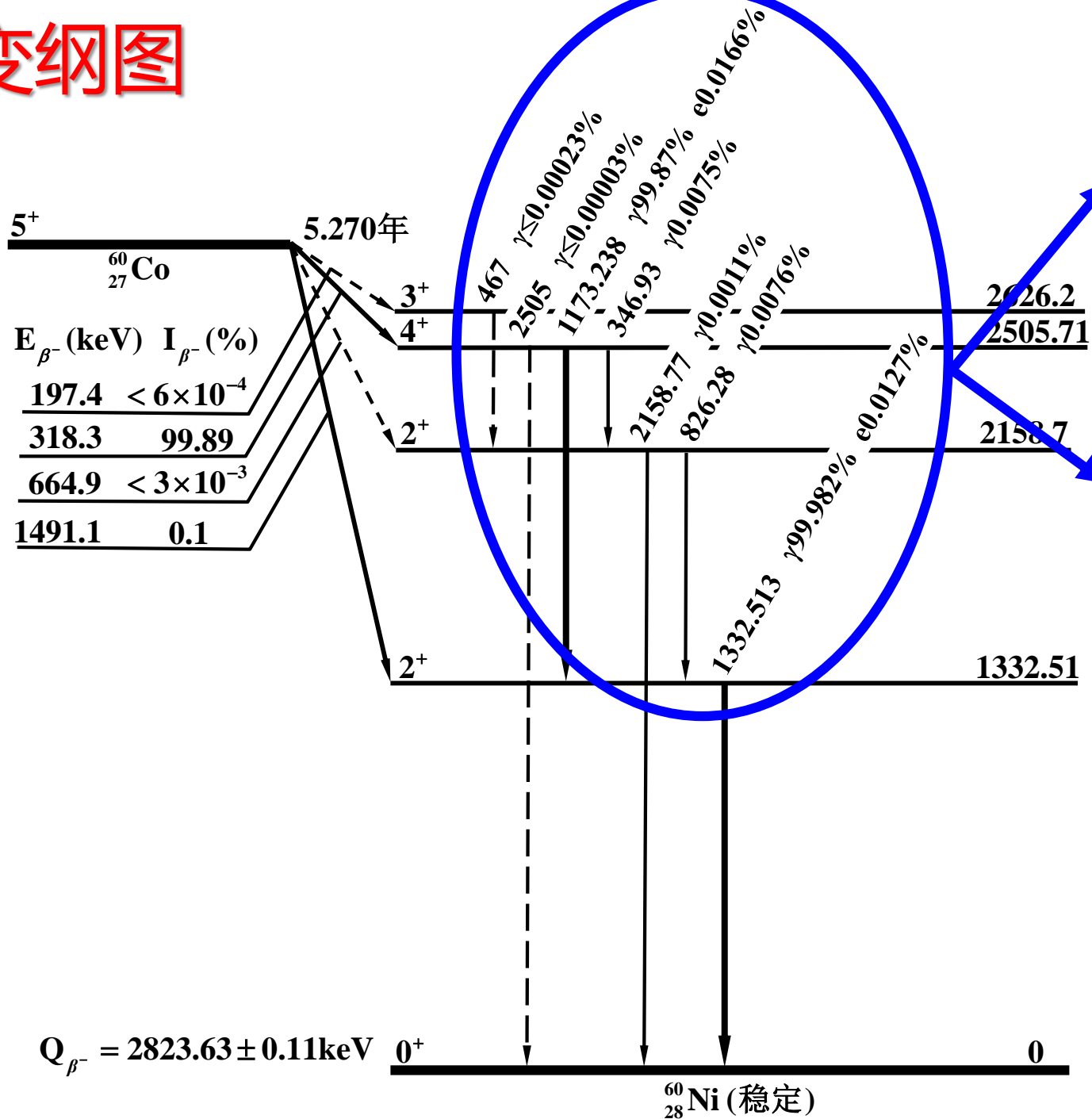
图中未标，但能测到的其他射线  
EC放射源肯定会产生 对应的 **子核原子的特征X射线**或**俄歇电子**。

## $\beta^+$ 衰变的后续过程

### 正电子湮没

图中未标，但能测到的其他射线  
 $\beta^+$ 源肯定会产生 **511 keV 的湮没 $\gamma$ 射线**，强度是 $\beta^+$ 强度的2倍。

# 衰变纲图



**数值：**指跃迁能级差

$E_{\gamma} = \text{数值}$

$E_{\text{CE}} = \text{数值} - \epsilon_i$

$\gamma$ ： $\gamma$  射线绝对强度

$e$ ：内转换电子绝对强度

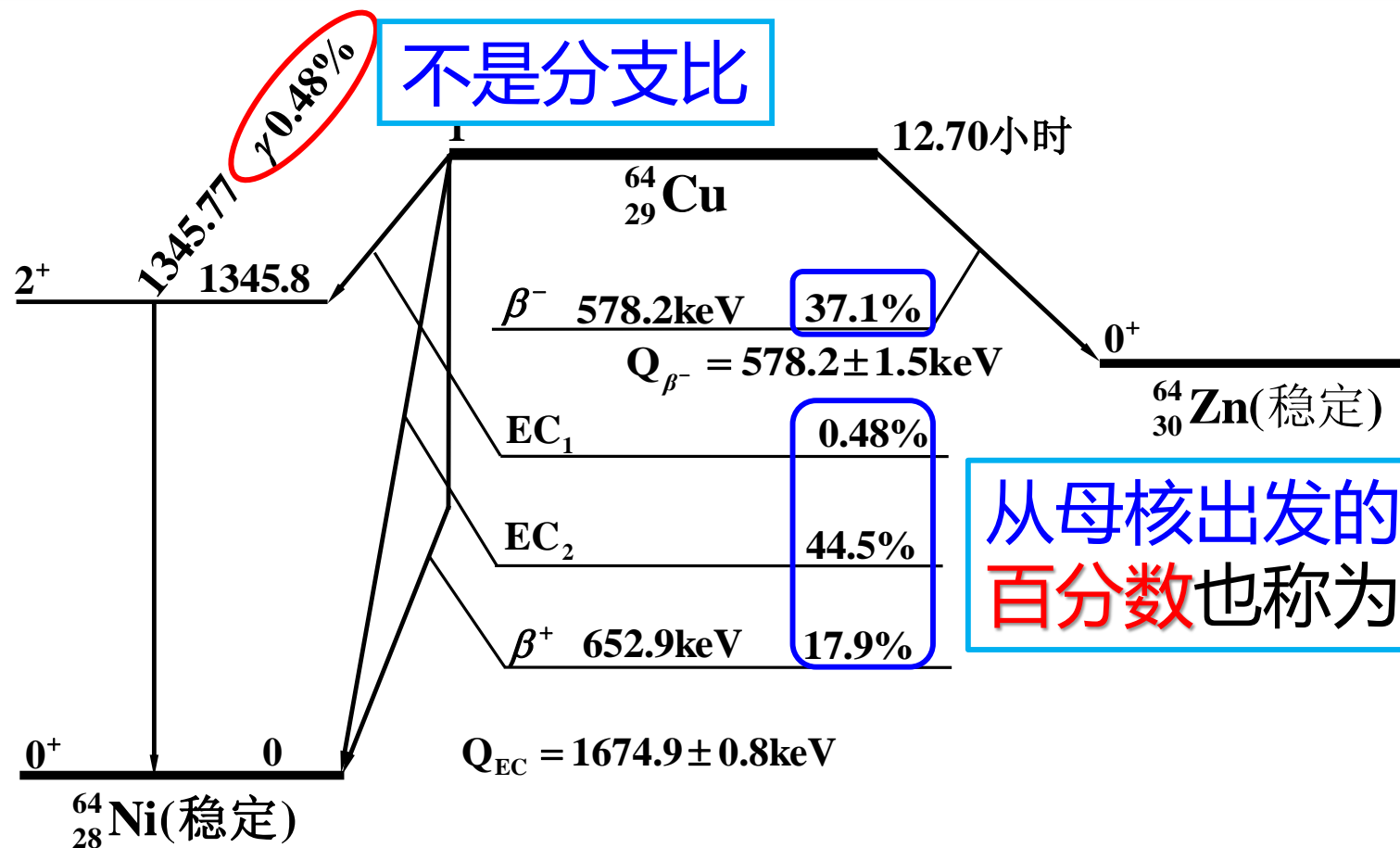
**%：**指绝对强度，即每100个母核衰变时，平均发射出的 $\gamma$ 光子或内转换电子数



# 衰变纲图中的百分数：??%

名称：绝对强度

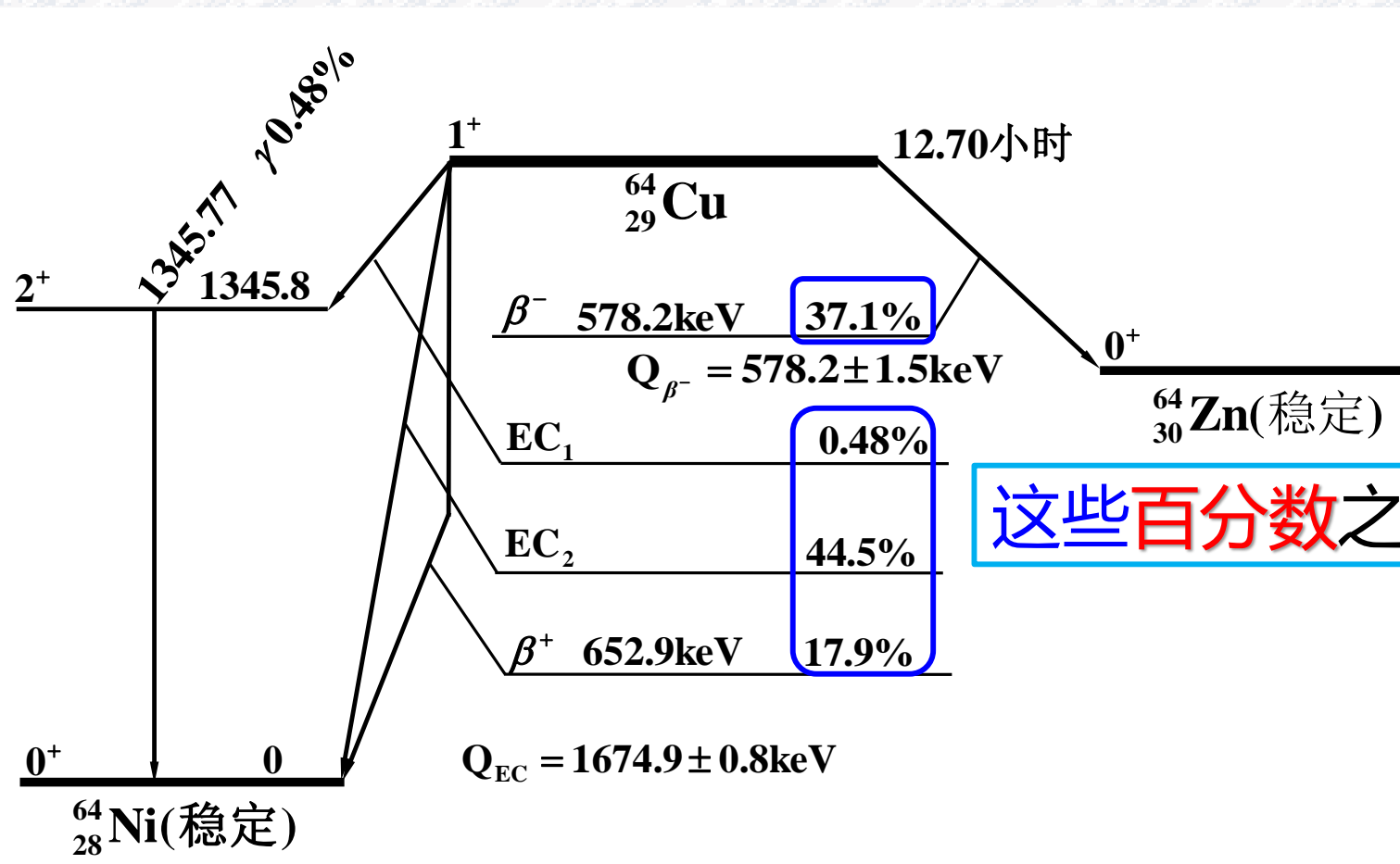
含义：100个母核衰变发射出的该射线数目





# 衰变纲图中的百分数之间的关系

## (1) 分支比之和等于100%



这些百分数之和等于100%

## 衰变纲图中的百分数之间的关系

(2) 强度平衡：到子核某激发态的百分数之和等于离开该激发态的百分数之和。

$$I_{(\alpha/\beta^-/\beta^+/\text{EC})} + \sum_l I_{\gamma_l} (1 + \alpha_l) = \sum_j I_{\gamma_j} (1 + \alpha_j)$$

母核衰变到子核激发态  $i$  的绝对强度  
(分支比)

子核从较高能级跃迁到  
激发态  $i$  的  
 $\gamma$ 射线强度及内转换系数

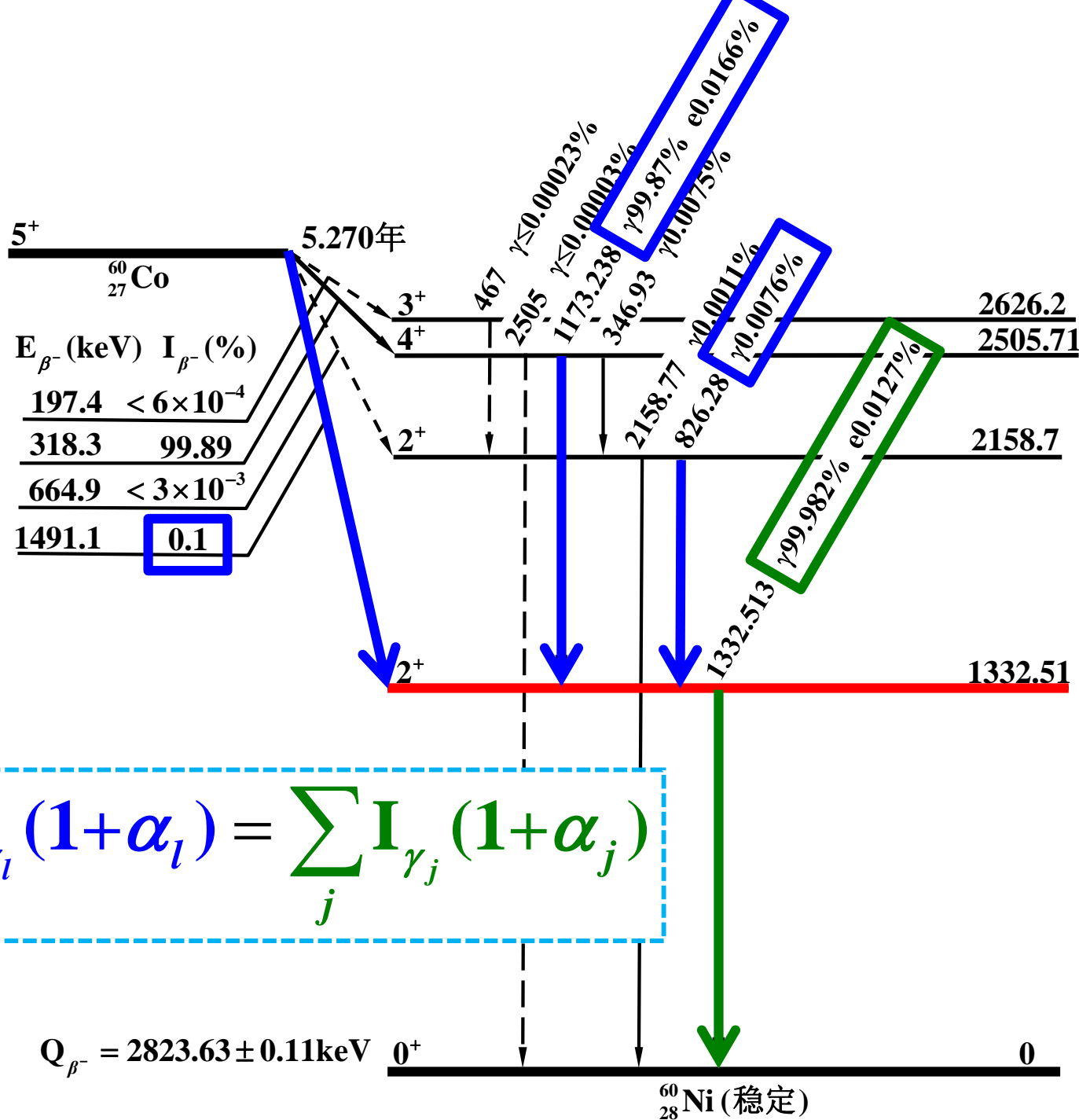
子核从激发态  $i$   
退激发出的  
 $\gamma$ 射线强度及内转换系数

对子核激发态  $i$  而言：

指向该能级的%之和 = 离开该能级的%之和

# 衰变纲

## (2) 强



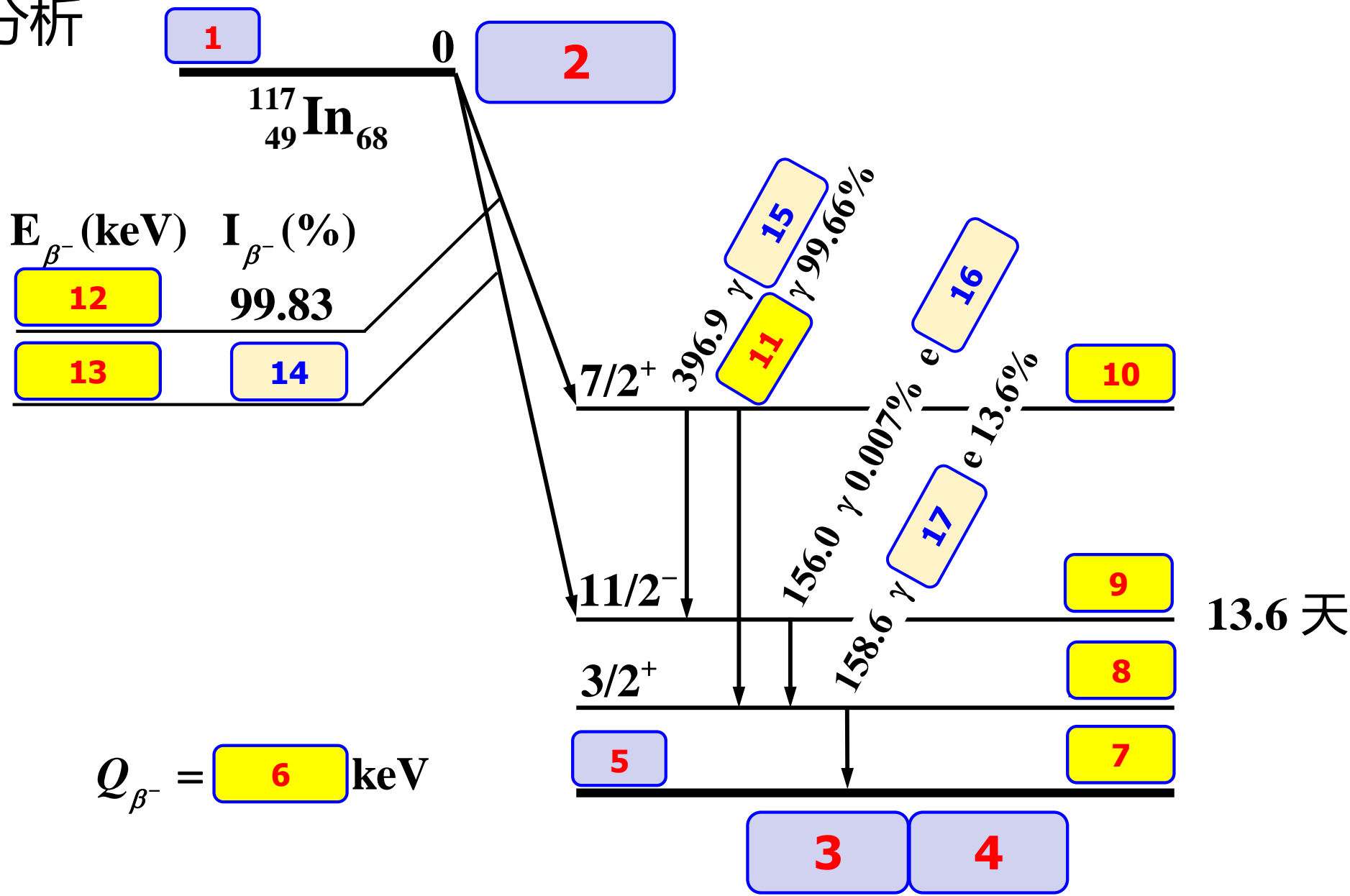
等于离开该

一般情况下，衰变到子核激发态  $i$  的  $\beta$  强度，都是根据该能级的强度平衡给出的，即：

$$I_{\beta^-} + \sum_l I_{\gamma_l} (1 + \alpha_l) = \sum_j I_{\gamma_j} (1 + \alpha_j)$$

$$I_{\beta^-} = \sum_j I_{\gamma_j} (1 + \alpha_j) - \sum_l I_{\gamma_l} (1 + \alpha_l)$$

练习：看图分析



练习：看图分析

各 $\gamma$ 跃迁的跃迁类型

各 $\beta$ 衰变的跃迁类型

跃迁级次	自旋变化 $\Delta I = I_i - I_f$	宇称变化 $\Delta \pi = \pi_i \cdot \pi_f$
允许跃迁	0, $\pm 1$	+1
一级禁戒跃迁	0, $\pm 1, \pm 2$	-1
二级禁戒跃迁	$\pm 2, \pm 3$	+1
.....		
n级禁戒跃迁	$\pm n, \pm(n+1)$	$(-1)^n$

$\Delta \pi \backslash \Delta I$	0或1奇	2偶	3奇	4偶	5奇
+偶	M1 (E2)	E2	M3 (E4)	E4	M5 (E6)
-奇	E1	M2 (E3)	E3	M4 (E5)	E5

括号内的跃迁类型表示可能同时(概率相当)发生，具体有没有要看光子角动量  $L$  (跃迁前后原子核能级自旋的耦合) 能否取到该值。

允许跃迁  $\Delta I = 1, \Delta \pi = +1$

一级禁戒  $\Delta I = -1, \Delta \pi = -1$

二级禁戒  $\Delta I = 3, \Delta \pi = +1$

四级禁戒  $\Delta I = 4, \Delta \pi = +1$

$9/2^+$  0 43.2 分钟

$^{117}_{49}\text{In}_{68}$

$7/2^+$

$11/2^-$

$3/2^+$

$1/2^+$

$^{117}_{50}\text{Sn}_{67}$

$\Delta I = 2, \Delta \pi = -1$  M2(E3)

$\Delta I = 2, \Delta \pi = +1$  E2

$\Delta I = 4, \Delta \pi = -1$  M4(E5)

$\Delta I = 1, \Delta \pi = +1$  M1(E2)

$\Delta I = 3, \Delta \pi = +1$  M3(E4)

$\Delta I = 5, \Delta \pi = -1$  E5

396.9  $\gamma$  0.17%

552.9

156.0

158.6

13.6 天

$Q_{\beta^-} = 1455.0 \text{ keV}$

## 2、讨论衰变纲图

### $^{56}\text{Mn}$ 简易衰变纲图的建立

3-8 实验测得  $\beta^-$  放射性核素  $^{56}\text{Mn}$  衰变过程中放出的  $\beta^-$  粒子有三种, 最大能量(分支比)分别为  $2.847\text{ MeV}$  (56.3%),  $1.037\text{ MeV}$  (27.9%),  $0.734\text{ MeV}$  (14.6%); 放出的  $\gamma$  光子也有三种, 能量(强度)分别为  $0.847\text{ MeV}$  (98.9%),  $1.810\text{ MeV}$  (27.2%) 和  $2.113\text{ MeV}$  (14.3%)。

- (1) 试作出  $^{56}\text{Mn}$  的衰变纲图。
- (2)  $^{56}\text{Mn}$  的  $\beta^-$  衰变子核是  $^{56}\text{Fe}$ , 请问  $^{56}\text{Fe}$  基态的自旋和宇称分别是?
- (3) 已知本题涉及的  $^{56}\text{Fe}$  的激发态自旋和宇称均是  $2^+$ , 分析各  $\gamma$  跃迁的类型和极次, 利用  $\gamma$  跃迁的概率公式, 分析说明为什么只测到了这三种  $\gamma$  光子。

## $^{56}\text{Mn}$ 测量结果(习题3-8)

### ■ $\beta^-$ 粒子的最大能量和强度

最大能量 (MeV)	分支比
2.847	56.3%
1.037	27.9%
0.734	14.6%

### ■ $\gamma$ 光子的能量和强度

能量 (MeV)	强度
0.847	98.9%
1.810	27.2%
2.113	14.3%

发生的 $\beta^-$ 衰变为:  $^{56}_{25}\text{Mn} \rightarrow ^{56}_{26}\text{Fe} + e^- + \tilde{\nu}_e$

涉及到的核素为:  $^{56}_{25}\text{Mn}$  和  $^{56}_{26}\text{Fe}$

## 查表可得到<sup>56</sup>Mn和<sup>56</sup>Fe的信息

### ■ <sup>56</sup>Mn性质

<b><i>Z</i></b>	<b>25</b>
<b><i>A</i></b>	<b>56</b>
<b><math>\Delta(\text{MeV})</math></b>	<b>-56.910</b>
<b><math>I^\pi</math></b>	<b>3<sup>+</sup></b>
<b><math>T_{1/2}</math></b>	<b>2.58h(<math>\beta^-</math>)</b>

### ■ <sup>56</sup>Fe性质

<b><i>Z</i></b>	<b>26</b>
<b><i>A</i></b>	<b>56</b>
<b><math>\Delta(\text{MeV})</math></b>	<b>-60.605</b>
<b><math>I^\pi</math></b>	<b>0<sup>+</sup></b>
<b>丰度</b>	<b>91.754%</b>

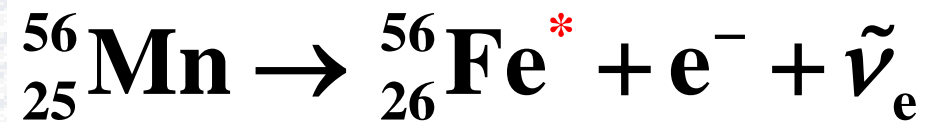
见课本附录I 核素的性质表



根据衰变能定义：

$$Q_{\beta^-} = \Delta(^{56}_{25}\text{Mn}) - \Delta(^{56}_{26}\text{Fe})$$
$$= -56.910 + 60.605 = 3.695\text{MeV}$$

而测量的最大 $\beta^-$ 粒子能量为  $E_1 = 2.847\text{ MeV}$ ，小于  $Q_{\beta^-}$ ，所以没有从母核基态到子核基态的跃迁。衰变过程应该为：



即衰变到了 $^{56}\text{Fe}$ 的激发态。

$$E_1 = \Delta(^{56}_{25}\text{Mn}) - \Delta(^{56}_{26}\text{Fe}^{*1}) = \Delta(^{56}_{25}\text{Mn}) - [\Delta(^{56}_{26}\text{Fe}) + E_1^*]$$

$$E_1^* = Q_{\beta^-} - E_1$$

$$E_1 = Q_{\beta^-} - E_1^*$$

■ 对应的<sup>56</sup>Fe激发态的能级分别为：

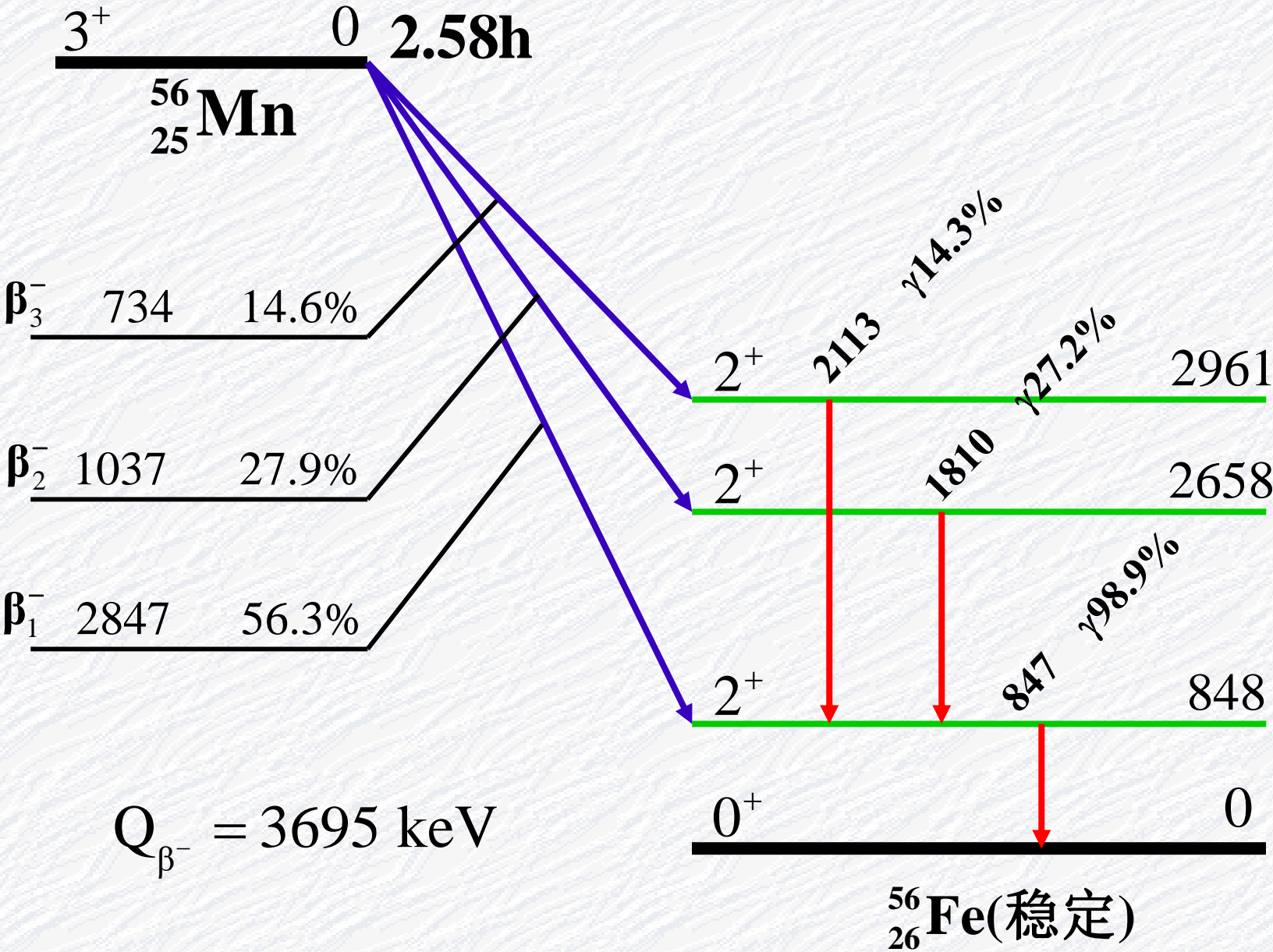
激发态1( $E_1^*$ )	$Q_{\beta^-} - E_{\beta 1} = 3.695 - 2.847 = \mathbf{0.848MeV}$
激发态2( $E_2^*$ )	$Q_{\beta^-} - E_{\beta 2} = 3.695 - 1.037 = \mathbf{2.658MeV}$
激发态3( $E_3^*$ )	$Q_{\beta^-} - E_{\beta 3} = 3.695 - 0.734 = \mathbf{2.961MeV}$

定义<sup>56</sup>Fe基态为 $E_0$ , 则 $E_0 = 0$

■ 同时考虑到<sup>56</sup>Mn测量结果（能量单位：MeV）：

$\beta$ 最大能量	分支比	$\gamma$ 能量	强度	对应能级差
2.847	56.3%	0.847	98.9%	$\sim E_1^* - E_0 = 0.848$
1.037	27.9%	1.810	27.2%	$\sim E_2^* - E_1^* = 1.810$
0.734	14.6%	2.113	14.3%	$\sim E_3^* - E_1^* = 2.113$

据此可得到<sup>56</sup>Mn的简易衰变纲图（能量单位： keV）

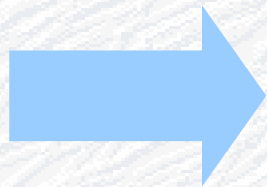


## 用选择定则讨论衰变纲图

### ■ $^{56}\text{Mn}$ $\beta^-$ 衰变的类型:

$$3^+ \rightarrow 2^+$$

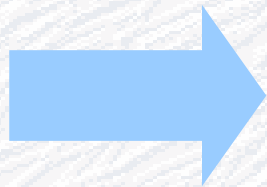
允许跃迁



$$\Delta I = I_i - I_f = 1$$
$$\Delta \pi = \pi_i \cdot \pi_f = +1$$

$$3^+ \not\rightarrow 0^+$$

二级禁戒跃迁



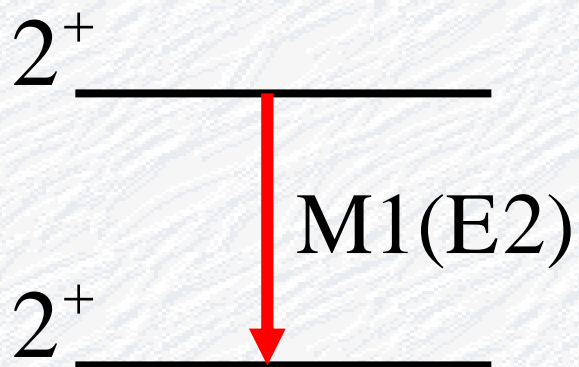
$$\Delta I = I_i - I_f = 3$$
$$\Delta \pi = \pi_i \cdot \pi_f = +1$$

- $^{56}\text{Mn}$   $\beta_1, \beta_2, \beta_3$  均为允许跃迁, 其分支比与  $E_\beta$  有关。  
 $E_\beta$  越大, 相应的分支比越大。 Sargent定律。

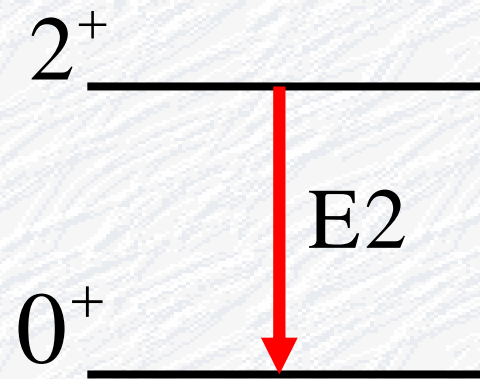
$$\lambda \propto 1/T_{1/2} \propto E_0^5$$

## 用选择定则讨论衰变纲图

### ■ $^{56}\text{Fe}$ $\gamma$ 跃迁的类型:



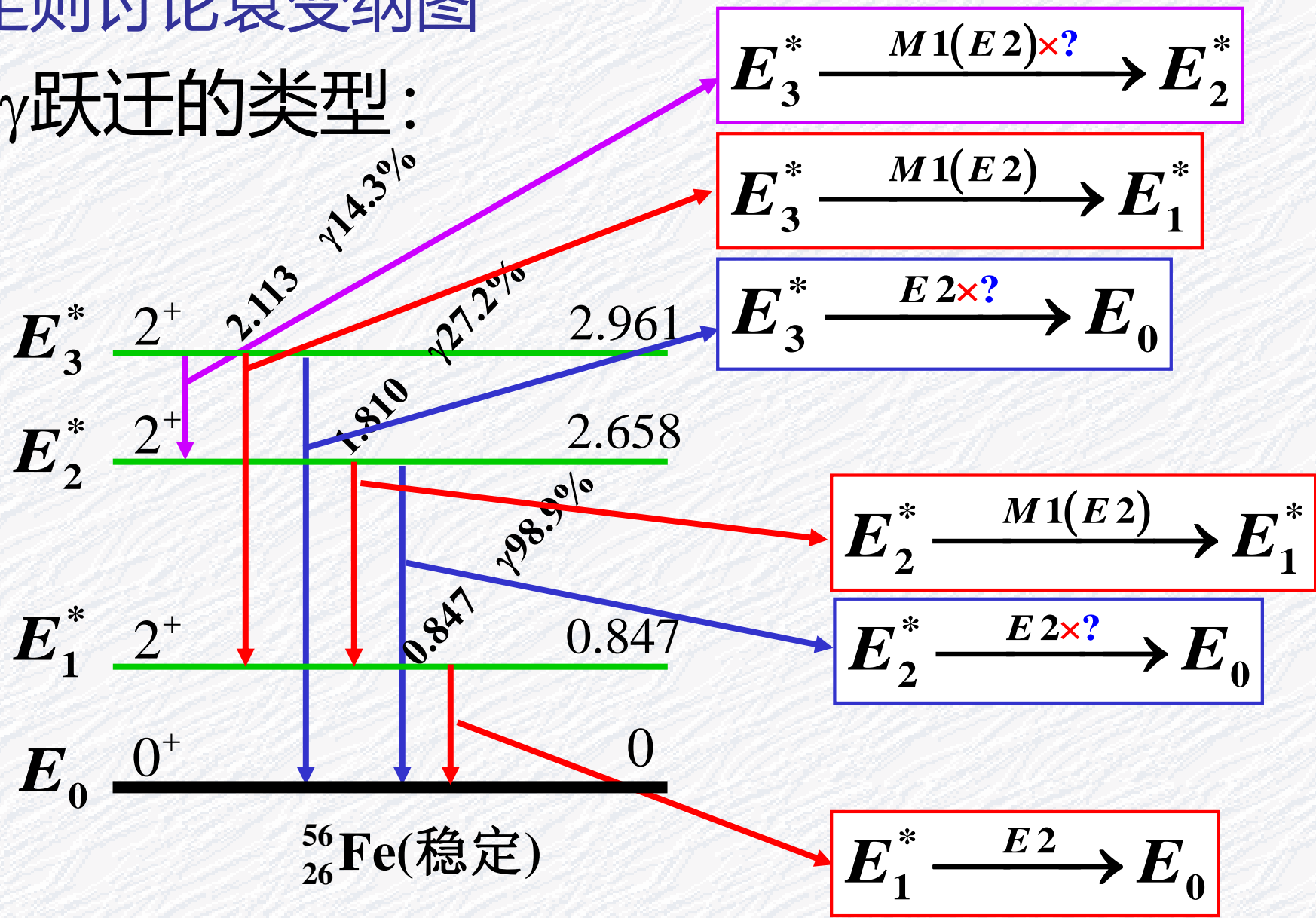
$$\Delta I = |I_i - I_f| = 0, \text{取} 1$$
$$\Delta\pi = \pi_i / \pi_f = +1$$



$$\Delta I = |I_i - I_f| = 2$$
$$\Delta\pi = \pi_i / \pi_f = +1$$

# 用选择定则讨论衰变纲图

## ■ $^{56}\text{Fe}$ $\gamma$ 跃迁的类型:



## 用选择定则讨论衰变纲图

$\gamma$ 跃迁的概率 (教材85页3.77式)

$$\lambda_E(L) = \frac{4.4(L+1)}{L[(2L+1)!!]^2} \left( \frac{3}{L+3} \right)^2 \left( \frac{E_\gamma}{197} \right)^{2L+1} (1.4 \times A^{1/3})^{2L} \times 10^{21}$$

$$\lambda_E(2) = \frac{4.4(2+1)}{2[5!!]^2} \left( \frac{3}{2+3} \right)^2 \left( \frac{E_\gamma}{197} \right)^5 (1.4 \times A^{1/3})^4 \times 10^{21}$$

$$= \frac{4.4 \times 3}{2 \times [15]^2} \left( \frac{9}{25} \right) \left( \frac{1}{197} \right)^5 (1.4 \times 56^{1/3})^4 \times 10^{21} E_\gamma^5$$

$$\lambda_E(2) = 2.93 \times 10^{10} \cdot E_\gamma^5$$

$\lambda$  单位:  $s^{-1}$

$E_\gamma$  单位: MeV

## 用选择定则讨论衰变纲图

$\gamma$ 跃迁的概率 (教材85页3.78式)

$$\lambda_M(L) = \frac{1.9(L+1)}{L[(2L+1)!!]^2} \left( \frac{3}{L+3} \right)^2 \left( \frac{E_\gamma}{197} \right)^{2L+1} (1.4 \times A^{1/3})^{2L-2} \times 10^{21}$$

$$\begin{aligned} \lambda_M(1) &= \frac{1.9(1+1)}{1 \times [3!!]^2} \left( \frac{3}{1+3} \right)^2 \left( \frac{E_\gamma}{197} \right)^3 (1.4 \times A^{1/3})^0 \times 10^{21} \\ &= \frac{1.9 \times 2}{1 \times 3^2} \left( \frac{9}{16} \right) \left( \frac{1}{197} \right)^3 \times 10^{21} E_\gamma^3 \end{aligned}$$

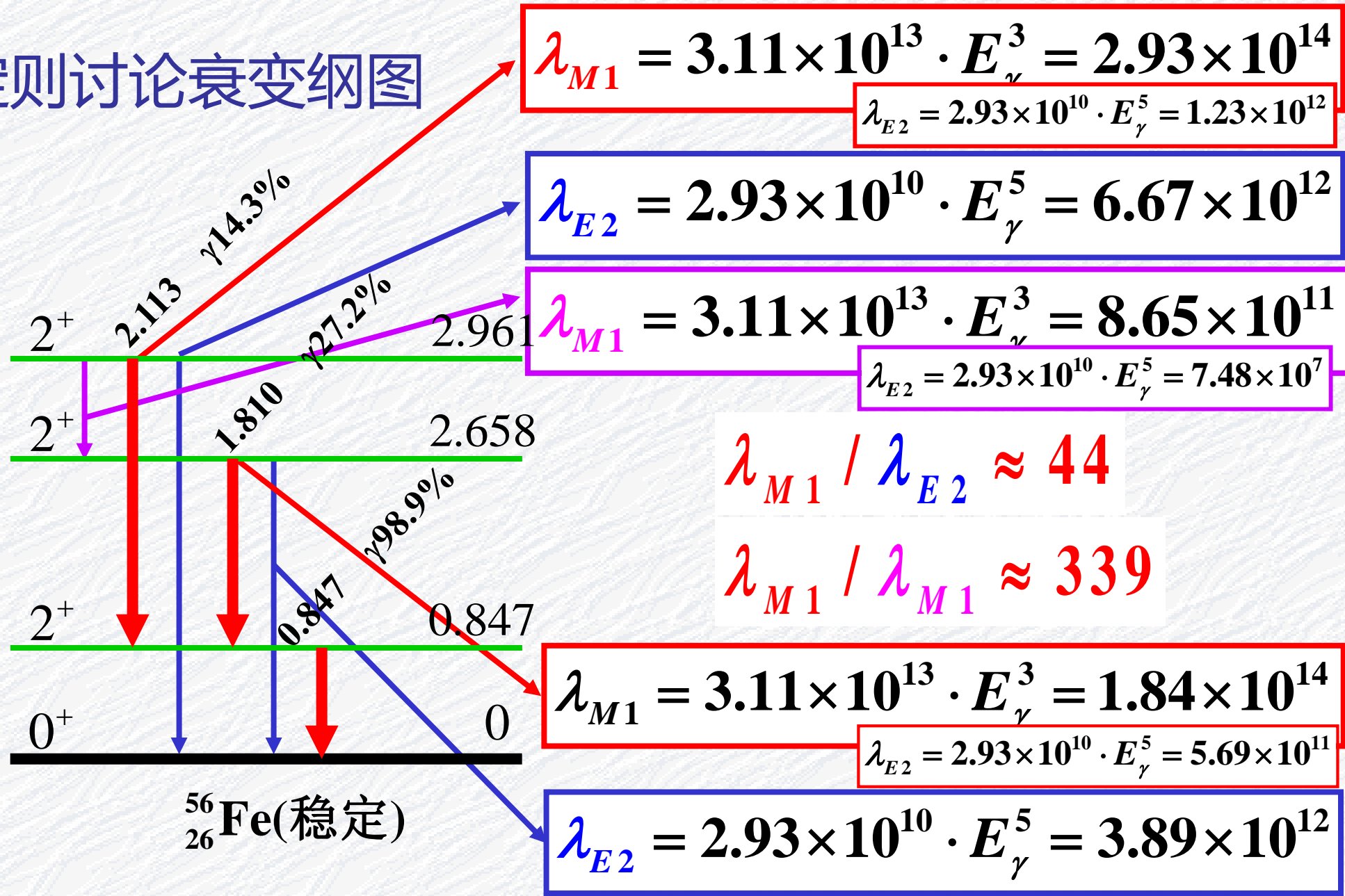
$$\lambda_M(1) = 3.11 \times 10^{13} \cdot E_\gamma^3$$

$\lambda$  单位:  $s^{-1}$

$E_\gamma$  单位: MeV



用选择定则讨论衰变纲图

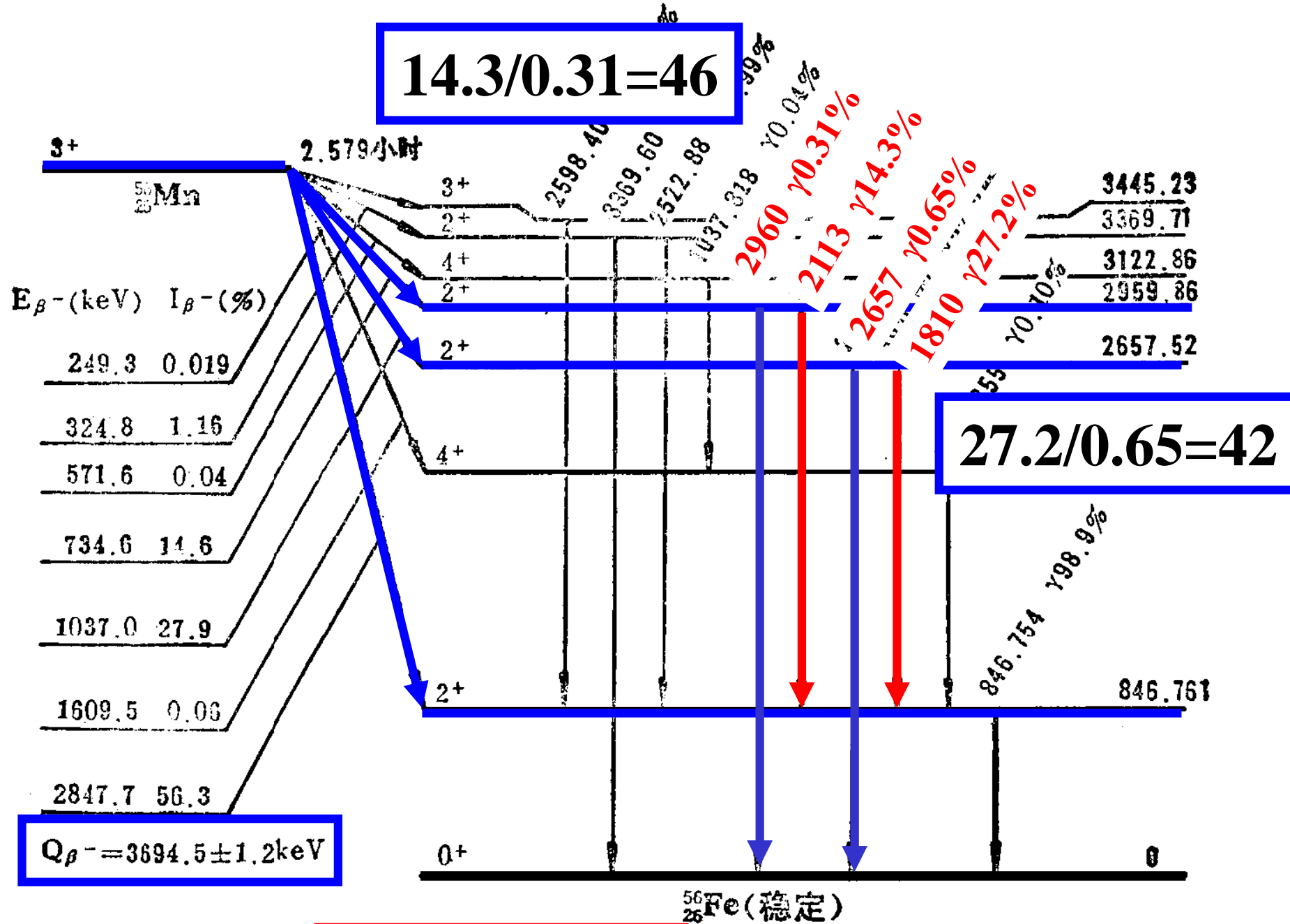


$\lambda_{M1} / \lambda_{E2} \approx 44$

$\lambda_{M1} / \lambda_{M1} \approx 339$

$\lambda_{M1} / \lambda_{E2} \approx 47$        $\lambda$  单位:  $s^{-1}$

用选



主要获取方式:  $^{55}\text{Mn}(n, \gamma)^{56}\text{Mn}$

### 3、期中考试的范围和要求

- **全闭卷考试**（会给所需核数据和复杂公式：如Q方程）
- 时间：11月4日，晚上7:20～8:55
- 地点：A班（张） 五教5101  
B班（杨） 五教5102
- 考试范围：第 1、2、3、4 章的内容
- **请携带计算器**
- **基本概念、计算、分析**

#### 去年考题类型

- 单选题 15题×2分 = 30分
- 多选题 10题×3分 = 30分
- 分析计算题 4题 = 40分

#### 前年考题类型

- 单选题 15题×2分 = 30分
- 多选题 10题×3分 = 30分
- 分析计算题 4题 = 40分

#### 大前年考题类型

- 单选题 10题×2分 = 20分
- 多选题 10题×3分 = 30分
- 分析计算题 5题 = 50分

#### 大大前年考题类型

- 单选题 10题×2分 = 20分
- 多选题 10题×3分 = 30分
- 分析计算题 6题 = 50分

# 2022期中考试范围

- 第一章：原子核的基本性质（10-20分）
  - 原子核的表示
  - 相关术语的理解（核素、同位素、同位素丰度、同量异位素...）；
  - 原子核的大小和形状（与什么有关？是怎样的关系？）
  - 原子核的统计性（由谁决定？是什么关系？）
  - 原子核的能级及能级特性（什么是核能级？基态、激发态？描述核能级的特征量：自旋、宇称、能级能量、能级寿命；用壳模型分析原子核能级的自旋和宇称） 偶偶核基态的自旋和宇称： $0^+$
  - 原子核的结合能（概念和计算，质量亏损、质量过剩的含义等，结合能概念的拓展：包括原子核最后一个核子的结合能、两个原子核结合成复合核的结合能等等） 计算公式要记住
  - 核素图和原子核稳定性规律的理解（ $\beta$ 稳定线？ $\beta$ 稳定线的特点，丰中子核素、缺中子核素，各有什么衰变性质？）
  - 核力的基本性质，库仑势垒高度的计算

# 2022期中考试范围

- 第二章：原子核的放射性 (10-20分)
  - 放射性的基本规律 (单一放射性的指数衰减规律) 计算公式要记住
  - 四个特征量及相互关系 (衰变常数、半衰期、平均寿命、能级宽度, 各自的意义; 分支衰变及分支比) 计算公式要记住
  - 活度的概念 (单位、变化规律)、比活度的概念。计算公式要记住, Ci和Bq的关系要记住
  - 放射性平衡 (暂时平衡、长期平衡, 平衡的条件和平衡后的放射性核的数目及活度关系; 放射系的活度) 平衡后活度关系或数量关系公式要记住
  - 放射性规律的应用 (活度的变化规律、活度的计算、射线强度的计算、放射源性质的分析、放射源制备时间、放射源制备活度、放射源制备所需靶物质的量、利用放射性确定远期年代) 这部分的所有计算公式要记住

# 2022期中考试范围

- 第三章：原子核的衰变-1 (30-50分)
  - 衰变的概念 (自发)
  - 衰变类型 ( $\alpha\beta\gamma$ 三大类,  $\beta$ 三种,  $\gamma$ 两种)
  - 衰变的表示 (表达式和图形)
  - 衰变能 (定义和计算) 计算公式要记住
  - 衰变发生的条件 (必要条件: 衰变能大于零)
  - 衰变中的守恒定律及其应用 (电荷数、质量数、能量、动量、角动量、宇称[ $\beta$ 衰变除外])
  - 射线种类、射线能量特征及特征能量 (射线产生来源: 衰变直接/后续过程产生的等) 计算公式要记住



# 2022期中考试范围

## ■ 第三章：原子核的衰变-2 (30-50分)

- **射线能量与核能级的关系** (对 $\alpha$ 衰变, 必须先由射线能量求出衰变能; 注意内转换电子的能量与衰变能的差异) 计算公式要记住
- **衰变概率 (选择定则的应用)** ( $\alpha$ 衰变概率主要决定于衰变能,  $\beta$ 和 $\gamma$ 有各自的选择定则, 选择的是概率最大的跃迁类型, 从某能级往下有相同跃迁类型时看能量; 伽马跃迁概率与能级寿命的关系, 内转换修正)
- **衰变纲图的建立和解读** (由所给数据及核素性质表分析计算得到核能级特征[能量、自旋、宇称、寿命]并绘制衰变纲图, 注意各衰变有不同的图形表示方式, 应标注完整的能级特征、衰变类型、粒子能量、绝对强度、衰变能等信息; 正确解读衰变纲图, 获取相关信息, 可利用选择定则进行分析, 掌握能量关系、绝对强度之间的关系, 内转换系数的计算等; 能补充完整衰变纲图中缺少的信息) 计算公式要记住

# 2022期中中考试范围

## ■ 第四章：原子核反应 (25-35分)

- **核反应的概念** (相互作用引起的过程, 与核衰变不同)
- **核反应的表示及术语** (靶核、剩余核...; 分类)
- **核反应的守恒定律** (判断反应产物、反应能否发生)
- **核反应能** (定义及计算, 放能反应和吸能反应) **计算公式要记住**
- **$Q$ 方程** (计算剩余核的质量、激发能, 出射粒子的能量)
- **核反应阈能** (定义及计算) **计算公式要记住**
- **核反应截面** (定义理解及计算; 微分截面; 坐标系转换)
- **核反应产额** (定义及理解; 中子反应产额, 透射率, **中子束强度的衰减规律、宏观截面, 微观截面**) **计算公式要记住**
- **复合核模型** (理解, **复合核的激发能及能级宽度**) **计算公式要记住**
- **$1/v$ 规律** (理解和**应用**) **计算公式要记住**



下课啦！