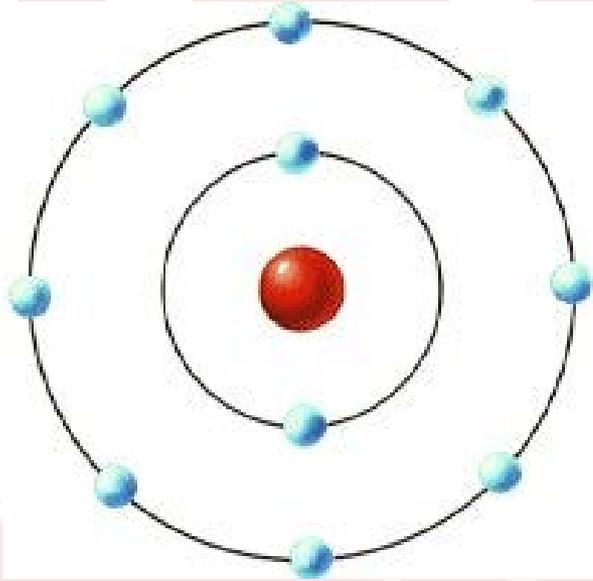
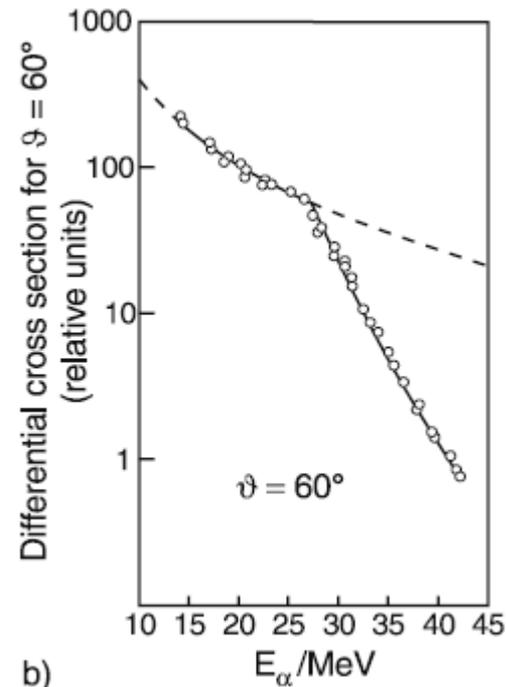
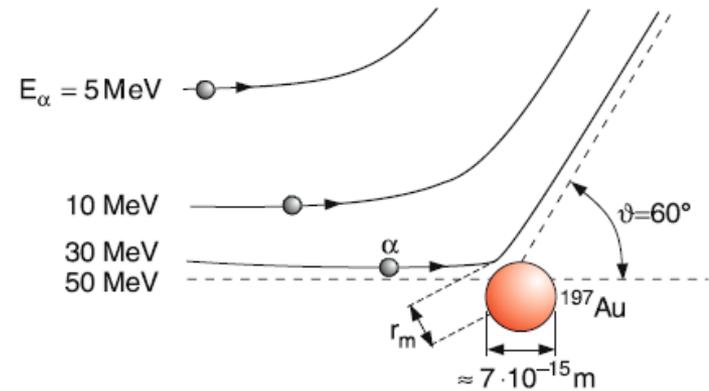


第七章 原子核的基本性质和结构



图中的例子，转折点发生在25MeV

$$\begin{aligned}
 r_m &= \left(\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0} \right) \frac{Z}{E} \left(1 + \csc \frac{\theta}{2} \right) \\
 &= 1.44 \text{eV} \cdot \text{nm} \frac{79}{25 \text{MeV}} \left(1 + \frac{1}{\sin 30^\circ} \right) \\
 &\sim 1.36 \times 10^{-14} \text{m}
 \end{aligned}$$



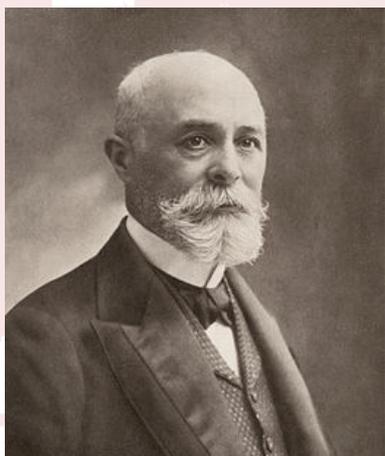
b)

§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的组成



1896, Becquerel发现铀的天然放射性。

1897, Pierre & Marie Curie 发现放射性元素Po和Ra。



Henri Becquerel

(1852 –1908)

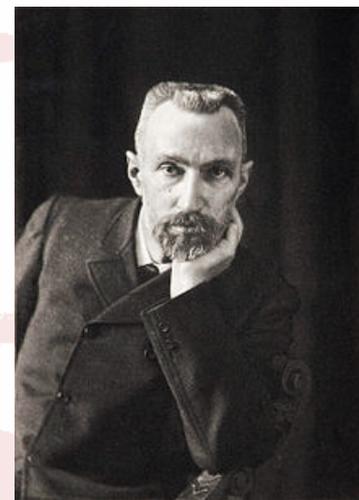
"in recognition of the extraordinary services he has rendered by his discovery of spontaneous radioactivity"



Marie Curie

(1867 –1934)

"in recognition of the extraordinary services they have rendered by their joint researches on the radiation phenomena discovered by Professor Henri Becquerel"



Pierre Curie

(1859 – 1906)

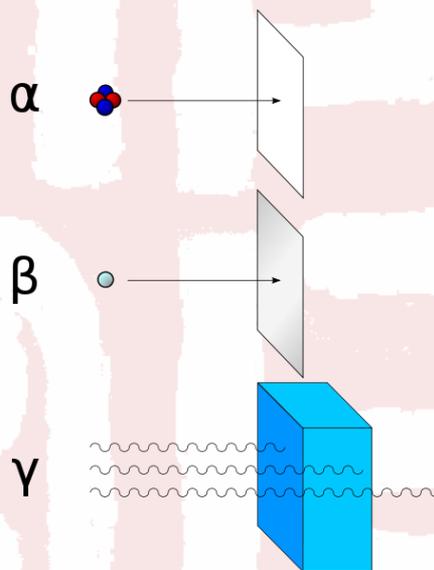
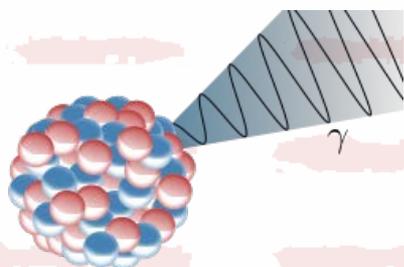
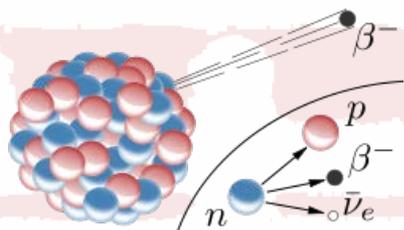
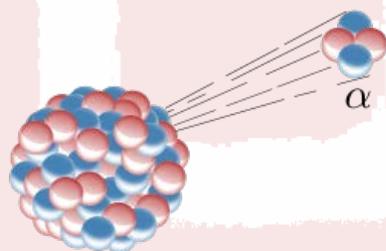
§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的组成



1899、1900年，Rutherford 将放射性分为 α 、 β 、 γ 三类。

1903年，Rutherford 证实 α 射线是带正电的He离子、 β 射线是电子。

1911年，Rutherford 提出原子的核式模型。放射性是核现象。



Ernest Rutherford
(1871–1937)

§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的组成



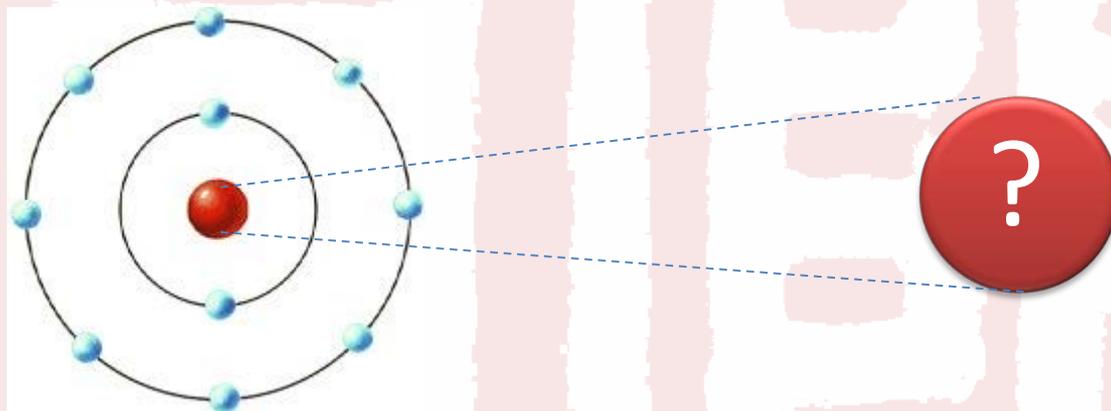
1919年，Rutherford 实现核嬗变，第一次实现人工核反应，并发现了质子。



Ernest Rutherford

(1871 –1937)

§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的组成



已知粒子：电子、质子、光子

原子核质量 $\sim A m_p$

A 是原子量

原子核电荷量 $Z \sim A/2$



原子核： A 个质子 + $(A-Z)$ 个电子

解释 β^- 放射性

§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的组成



➤ 例如：氦原子核的核电荷数 $Z=2$ ，原子量 $A=4$ ，
设原子核由4个质子和2个中子组成

氦原子核的大小约为 $d \sim 10 \text{ fm}$

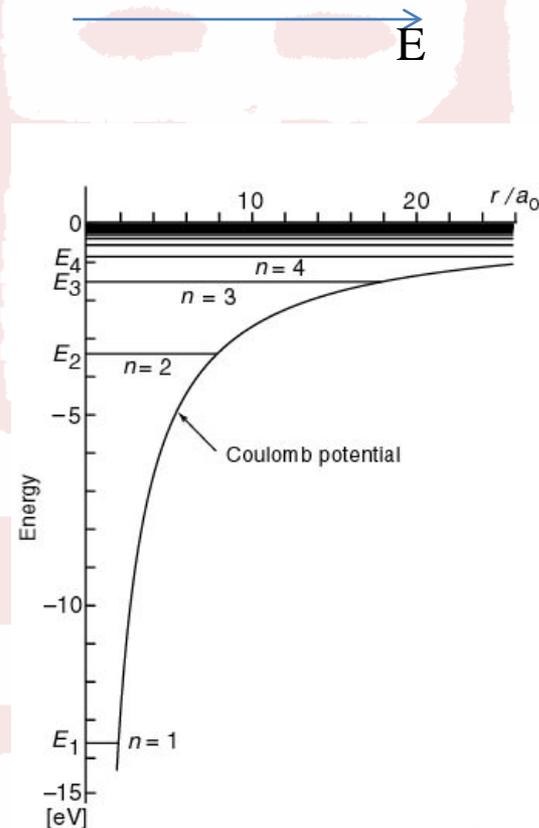
由不确定关系： $p \cdot d \sim h$

➡ 电子在核中的能量

$$E = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} \sim pc$$
$$= \frac{hc}{d} = \frac{1240 \text{ eV} \cdot \text{nm}}{10 \times 10^{-15} \text{ m}} = 124 \text{ MeV}$$

100 MeV的电子会从核中泄漏出来，

而 β^- 放射性的电子最大能量为 $4 \text{ MeV} \ll 100 \text{ MeV}$



§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的组成



➤ 观测到的原子核的磁矩是核磁子 $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p}$ 的数量级

如果核中有电子存在，核磁矩要大得多。

➤ N原子核的质量数为14，电荷数为7，按照假设，核内应有14个质子，7个电子，则总自旋必定是半整数，但N核自旋的实验值是整数1。



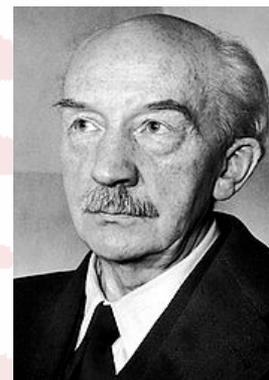
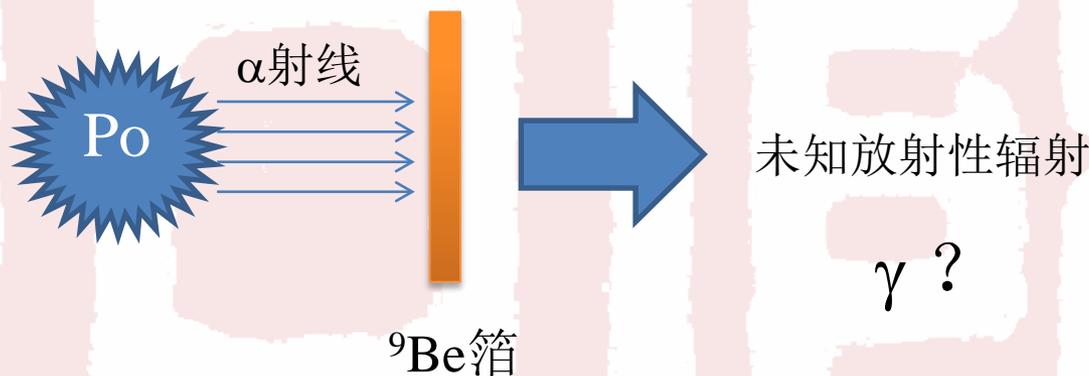
Ernest Rutherford
(1871 –1937)

1920年，Rutherford 猜测或许存在一种中性的粒子，可能是一个质子和一个电子束缚在一起构成的，Rutherford称之为**中子**。

§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的组成

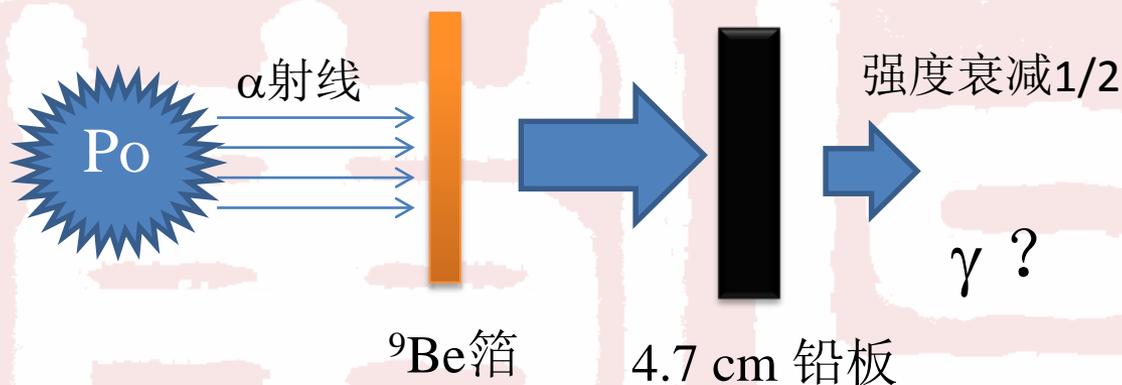


1930年, Bothe 和Becker 发现



W. G. Bothe
(1891 – 1957)

1932年, Joliot-Curies夫妇发现

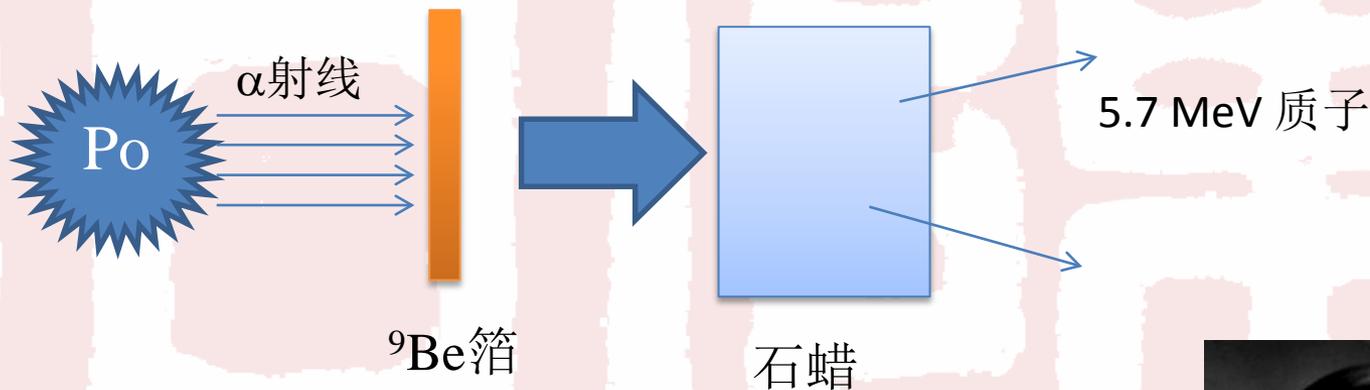


Irène Joliot-Curie
(1897 – 1956)

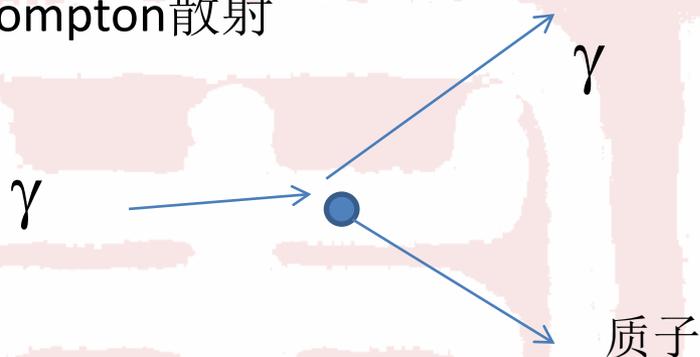
§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的组成



1932年, Chadwick发现



Compton散射



(1) γ 能量至少50 MeV

(2) 产生的质子数比Compton散射大几千倍



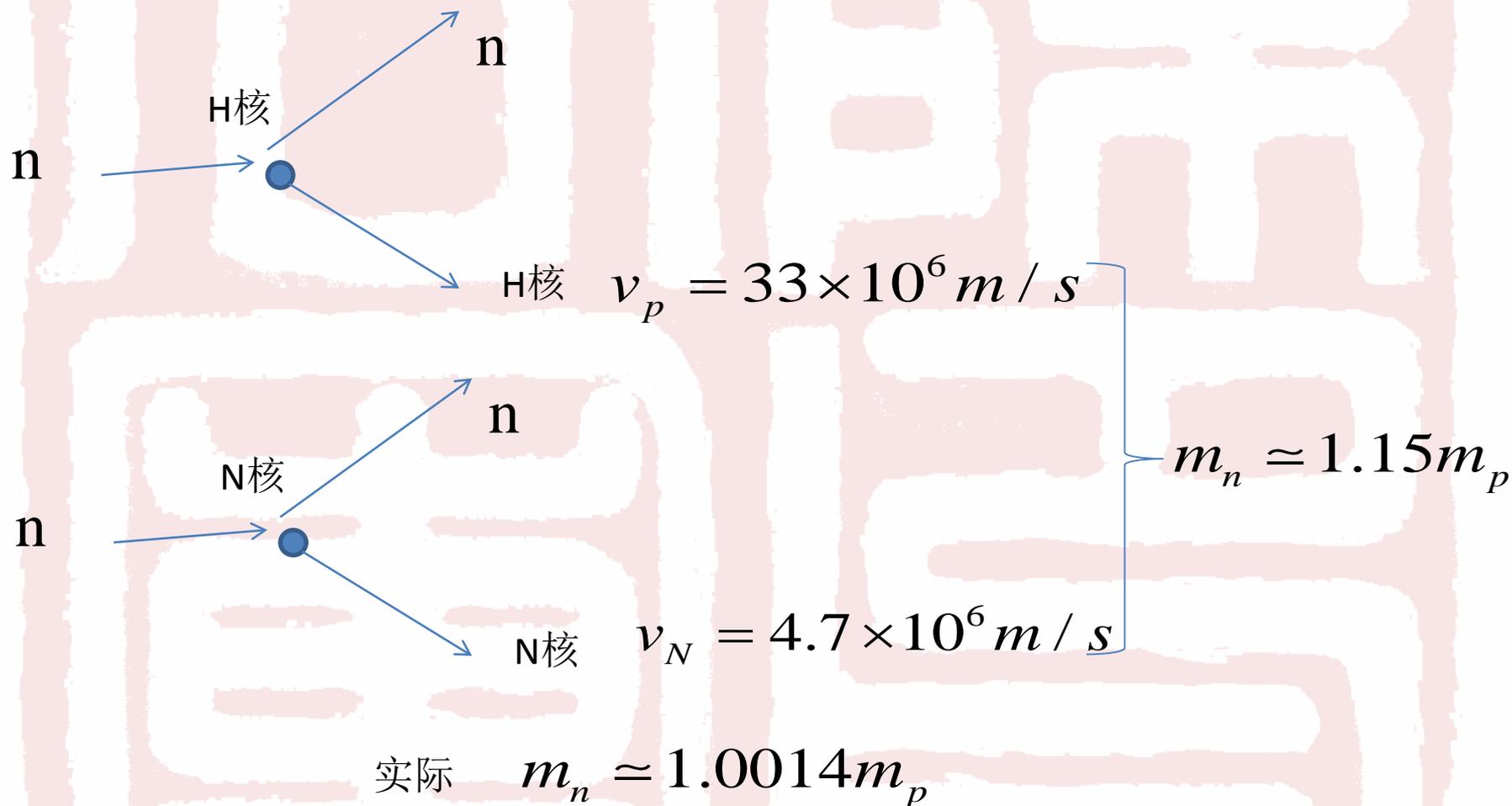
James Chadwick

(1891–1974)

§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的组成



1920年, Rutherford 猜测或许存在一种中性的粒子, 可能是一个质子和一个电子束缚在一起构成的, Rutherford称之为**中子**。



§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的质量和核素



1932年，Heisenberg立刻提出了原子核的质子中子模型。

原子核是由 Z 质子和 N 中子组成的，核子数 $A=Z+N$

中子的质量：

$$m_n = 1.008665u \quad (\text{原子质量单位})$$

质子的质量：

$$m_p = 1.007227u$$

$$m_p + m_n = 2.015942u$$



Werner Heisenberg
(1901–1976)

§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的质量和核素



氘核的质量： $m_D = 2.013552u$

差值： $m_p + m_n - m_D = 0.002390u = 2.225\text{MeV} / c^2$

$n + p \rightarrow D$ 释放 $2.225\text{MeV}/c^2$ 结合能

原子核的质量 = Z 个质子质量 + N 个中子质量 - 结合能

用质谱仪测量离子的质量 → 推测原子核的质量

书中通常给出原子的质量表。

§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的质量和核素



核素

通常把具有相同质子数 Z 和中子数 N 的一类原子，也即具有相同原子序数 Z 和质量数 A 的一类原子叫核素。

符号



简写



或



原子核	自旋 (h)	磁矩 (μ_N)	电四极矩 (10^{-28}m^2)	原子质量 (u)	比结合能 (MeV)	丰度或衰 变类型(%)	半衰期
n	1/2	-1.91304	0	1.008665		β^-	614s
${}^1\text{H}$	1/2	2.79285	0	1.007825		99.985	
${}^2\text{H}$	1	0.85744	0.00286	2.014102	1.112	0.015	
${}^3\text{H}$	1/2	2.97896	0	3.016049	2.827	β^-	12.33y
${}^3\text{He}$	1/2	-2.12762	0	3.016029	2.57	1.37×10^{-4}	
${}^4\text{He}$	0	0	0	4.002603	7.07	99.99986	
${}^6\text{Li}$	1	0.82205	-0.0008	6.015122	5.33	7.59	
${}^7\text{Li}$	3/2	3.25644	-0.041	7.016004	5.61	92.4	
${}^8\text{Be}$	0	0	0	8.005305	7.06	2α	$7 \times 10^{-17}\text{s}$
${}^{12}\text{C}$	0	0	0	12.000000	7.68	98.93	
${}^{13}\text{C}$	1/2	0.7024	0	13.00335	7.47	1.07	
${}^{14}\text{C}$	0	0	0	14.00324	7.52	β^-	5715y
${}^{14}\text{N}$	1	0.40376	0.0200	14.00307	7.48	99.63	
${}^{15}\text{N}$	1/2	-0.28319	0	15.00011	7.70	0.368	
${}^{16}\text{O}$	0	0	0	15.99492	7.98	99.757	
${}^{17}\text{O}$	5/2	-1.8938	-0.026	16.99913	7.75	0.038	
${}^{18}\text{O}$	0	0	0	17.99916	7.77	0.205	
${}^{39}\text{K}$	3/2	0.39146	0.49	38.96371	8.55	93.2581	
${}^{40}\text{Ca}$	0	0	0	39.96259	8.55	96.94	
${}^{60}\text{Co}$	5	3.799	0.44	59.93382	8.79	β^-	5.271y
${}^{85}\text{Sr}$	0	0	0	87.90562	8.61	82.58	
${}^{99}\text{Tc}$	9/2	5.6847	-0.129	98.90625	8.55	β^-	$2.13 \times 10^5\text{y}$
${}^{127}\text{I}$	5/2	2.8133	-0.79	126.9045	8.44	100	
${}^{176}\text{Lu}$	7	3.169	4.92	175.9427	8.05	$2.59\beta^-$	$3.8 \times 10^{10}\text{y}$
${}^{197}\text{Au}$	3/2	0.14575	0.55	196.9666	7.92	100	
${}^{208}\text{Pb}$	0	0	0	207.9766	7.87	52.4	
${}^{232}\text{Th}$	0	0	0	232.0381	7.62	100α	$1.40 \times 10^{10}\text{y}$
${}^{235}\text{U}$	7/2	0.38	4.9	235.0439	7.59	0.720α	$7.04 \times 10^8\text{y}$
${}^{238}\text{U}$	0	0	0	238.0508	7.57	99.275α	$4.468 \times 10^9\text{y}$
${}^{239}\text{Pu}$	1/2	0.203	0	239.0522	7.56	α	$2.41 \times 10^4\text{y}$

§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的质量和核素



只要 Z 相同，元素在周期表中的位置就相同，例如 ^{235}U 和 ^{238}U ，两者相差3 个中子，作为原子它们是同位素，其化学性质几乎完全相同。

但核的性质完全不同，是不同的核素，前者是核燃料，后者是核废料。

核素的分类：

(1) **同位素**：具有相同 Z ，不同 N ，例如 ^{235}U 和 ^{238}U

(2) **同中子异荷素**：具有相同 N ，不同 Z ，例如 ${}^6_7\text{N}$ ${}^6_6\text{C}$

(3) **同量异位素**：具有相同 A ，不同 Z ，例如 ${}^{40}_{19}\text{K}$ ${}^{40}_{18}\text{Ar}$

(4) **同质异能素**：具有相同的 N 和 Z ，但内部状态不同的核素

例如： ^{137}Ba 有一个高出原子核基态 0.66 MeV的、平均寿命3.8min的同质异能素



§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的大小和密度



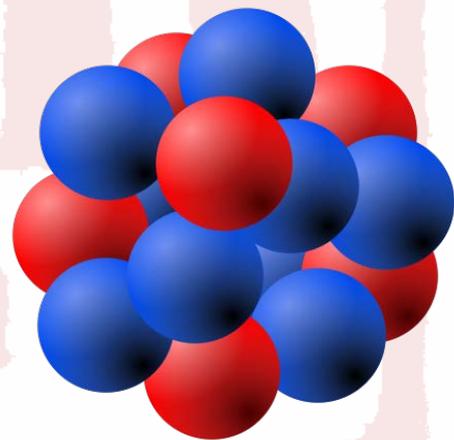
原子核相对来说有比较明确的边界，在原子核表面以内，原子核物质存在的概率很高；在原子核表面以外，这个概率很快下降到零，特别是重原子核更是这样。

实验表明，一部分核的形状近于球形，其余的核的形状为椭球形，主要集中在 $A \sim 150-190$ 和 $A > 220$ 的区域，但绝大部分相对球形的变形是较小的。

可以用原子核半径来近似表示原子核的大小

$$A = \frac{4}{3} \pi R^3 \rho \quad \longrightarrow \quad R = r_0 A^{1/3}$$

r_0 是由实验确定的系数， A 是原子核的质量数。



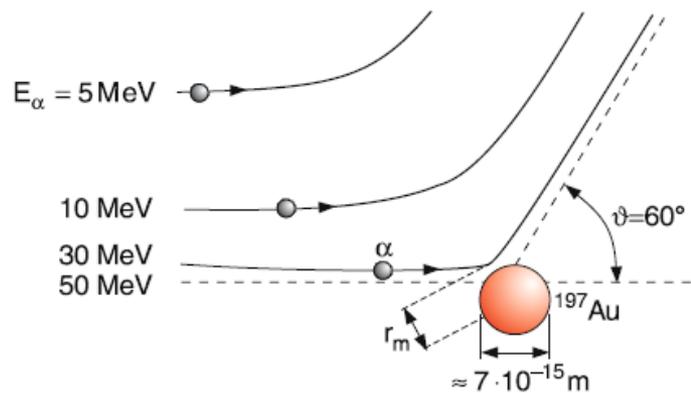
§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的大小和密度



如何确定原子核的半径?

(1) 原子核与粒子之间的核力作用

α 粒子散射 $r_0 \sim 1.4 \times 10^{-15} \text{m}$



(2) 原子核与粒子之间的电磁作用

高能电子被核的散射
或 μ 原子的X射线谱学

$r_0 \sim 1.2 \times 10^{-15} \text{m}$

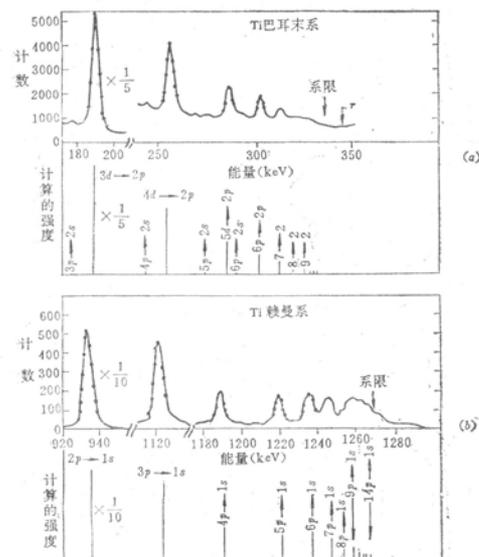


图 1.6.2 铁的 μ 原子的X射线能谱

§ 7.1 原子核的一般性质—原子核的大小和密度



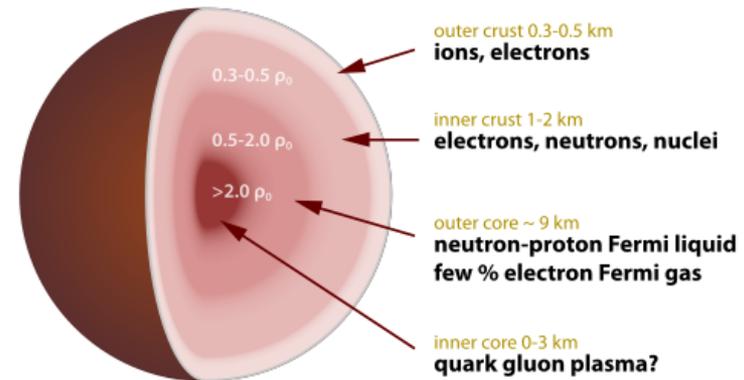
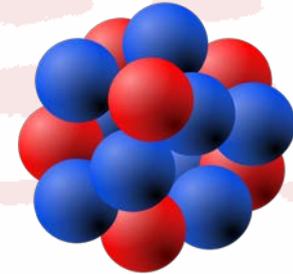
原子核体积

$$V = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A$$

原子核密度

$$\rho_0 = \frac{M}{V} = \frac{A / N_A}{4\pi r_0^3 A / 3} = \frac{3}{4\pi r_0^3 N_A}$$
$$= 2.3 \times 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

铁的密度 $7.9 \times 10^3 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$

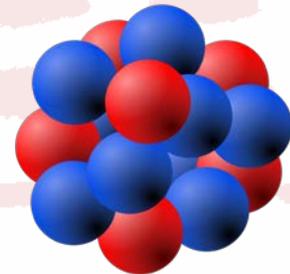


Cross-section of neutron star

§ 7.2 原子核基态的量子性质—基态的核自旋



- 每个核子与电子一样也具有内禀的角动量，即自旋，质子与中子的自旋均为 $1/2$ 。
- 核子在原子核内运动也有相应的轨道角动量。



↓
总角动量 I

原子核基态的总角动量 I → 原子核的自旋

$$I^2 = I(I+1)\hbar^2 \quad I \text{ 是核自旋角动量量子数。}$$

实验发现：

所有的偶偶核(中子数、质子数均为偶数)的自旋都为零；

所有的奇偶核(中子数、质子数有一个为奇数)的自旋是 \hbar 的半整数倍；

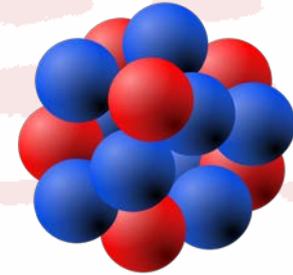
所有的奇奇核(中子数、质子数均为奇数)的自旋都为 \hbar 的整数倍。

§ 7.2 原子核基态的量子性质 — 基态的核磁矩



$$\boldsymbol{\mu}_I = g_I \mu_N \mathbf{I} / \hbar$$

其中 $\mu_N = e\hbar / 2M_p$ 称为核磁子。



M_p 为质子的质量， g_I 为原子核的 g 因子。

z 分量

$$\mu_{Iz} = g_I \mu_N m_I, \quad m_I = -I, \dots, +I$$

核磁矩通常用它在给定 z 方向的投影的最大值来量度

$$\mu_I = g_I \mu_N I$$

§ 7.2 原子核基态的量子性质—基态的核磁矩



质子的磁矩

$$\mu_p = \mu_N (\mathbf{l} + g_{p,s} \mathbf{s})$$

理论预言 $g_{p,s} = 2$  $\mu_p = \mu_N$

Stern 实验测量 $g_{p,s} = 5.586$

精确实验测量值 $\mu_p = 2.792847386(63)\mu_N$

中子的磁矩

中子不带电，磁矩应该为零。

实验测量 $\mu_n = -1.91304275(45)\mu_N$

$$g_n = -3.8260854$$

§ 7.2 原子核基态的量子性质—基态的核磁矩



原子核的磁矩

测得的原子核 g 因子有正有负，因此， μ_J 也有正有负，数值在0到6个核磁子之间

偶偶核的 $\mu_J = 0$

原子核	自旋 (h)	磁矩 (μ_N)	电四极矩 (10^{-28}m^2)	原子质量 (u)	比结合能 (MeV)	丰度或衰变类型(%)	半衰期
n	1/2	-1.91304	0	1.008665		β^-	614s
^1H	1/2	2.79285	0	1.007825		99.985	
^2H	1	0.85744	0.00286	2.014102	1.112	0.015	
^3H	1/2	2.97896	0	3.016049	2.827	β^-	12.33y
^3He	1/2	-2.12762	0	3.016029	2.57	1.37×10^{-4}	
^4He	0	0	0	4.002603	7.07	99.99986	
^6Li	1	0.82205	-0.0008	6.015122	5.33	7.59	
^7Li	3/2	3.25644	-0.041	7.016004	5.61	92.4	
^8Be	0	0	0	8.005305	7.06	2α	$7 \times 10^{-17}\text{s}$
^{12}C	0	0	0	12.000000	7.68	98.93	
^{13}C	1/2	0.7024	0	13.00335	7.47	1.07	
^{14}C	0	0	0	14.00324	7.52	β^-	5715y
^{14}N	1	0.40376	0.0200	14.00307	7.48	99.63	
^{15}N	1/2	-0.28319	0	15.00011	7.70	0.368	
^{16}O	0	0	0	15.99492	7.98	99.757	
^{17}O	5/2	-1.8938	-0.026	16.99913	7.75	0.038	
^{18}O	0	0	0	17.99916	7.77	0.205	
^{39}K	3/2	0.39146	0.49	38.96371	8.55	93.2581	
^{40}Ca	0	0	0	39.96259	8.55	96.94	
^{60}Co	5	3.799	0.44	59.93382	8.79	β^-	5.271y
^{85}Sr	0	0	0	87.90562	8.61	82.58	
^{99}Tc	9/2	5.6847	-0.129	98.90625	8.55	β^-	$2.13 \times 10^5\text{y}$
^{127}I	5/2	2.8133	-0.79	126.9045	8.44	100	
^{176}Lu	7	3.169	4.92	175.9427	8.05	$2.59\beta^-$	$3.8 \times 10^{10}\text{y}$
^{197}Au	3/2	0.14575	0.55	196.9666	7.92	100	
^{208}Pb	0	0	0	207.9766	7.87	52.4	
^{232}Th	0	0	0	232.0381	7.62	100α	$1.40 \times 10^{10}\text{y}$
^{235}U	7/2	0.38	4.9	235.0439	7.59	0.720α	$7.04 \times 10^8\text{y}$
^{238}U	0	0	0	238.0508	7.57	99.275α	$4.468 \times 10^9\text{y}$
^{239}Pu	1/2	0.203	0	239.0522	7.56	α	$2.41 \times 10^4\text{y}$

§ 7.2 原子核基态的量子性质—基态的核电四极矩



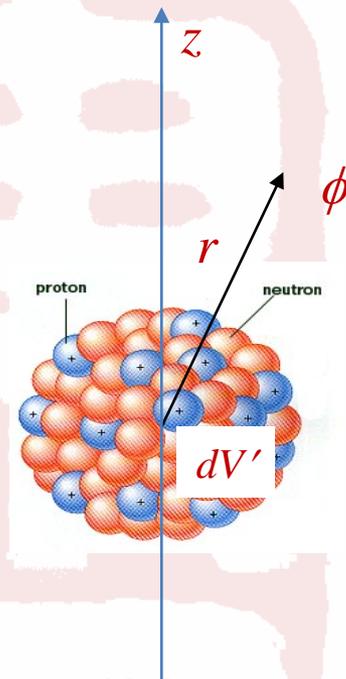
有限大小的原子核，其核内电荷有一定分布，在远离原子核处产生的电势相当于电多极矩产生的势：

$$\phi = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \left(\frac{1}{r} \int \rho dV' + \frac{1}{r^2} \int \rho z' dV' + \frac{1}{r^3} \int \rho (3z'^2 - r'^2) dV' + \dots \right)$$

点电荷势

电偶极势

电四极矩势



原子核是椭球型的，其电荷是轴对称分布的，电偶极矩恒为零，但存在电四极矩，大小为：

$$Q = \frac{1}{e} \int \rho (3z'^2 - r'^2) dV' = \frac{2}{5} Z (c^2 - a^2)$$

其中对称轴方向半轴为 c ，垂直对称轴的两个半轴为 a

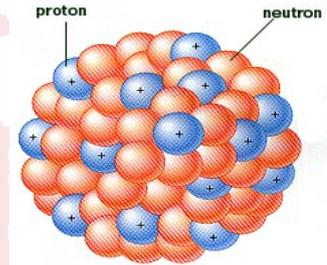
§ 7.2 原子核基态的量子性质—基态的核自旋和磁矩



$c > a$ 时, $Q > 0$, 长椭球形原子核, 具有正的电四极矩;

$c < a$ 时, $Q < 0$, 偏椭球形原子核, 具有负的电四极矩;

$c = a$ 时, $Q = 0$, 球形原子核的电四极矩为零。



形变参数 δ

$$\delta = \frac{\Delta R}{R}$$

R 为与椭球同体积的球的半径

$$\frac{4}{3}\pi R^3 = \frac{4}{3}\pi a^2 c \quad \Rightarrow \quad \Delta R = c - R$$

$$\text{有 } c = R(1 + \delta) \quad a = R / \sqrt{1 + \delta}$$

形变不大时, 参数 δ 较小

$$Q = \frac{6}{5}Z\delta R^2 \approx \frac{6}{5}Zr_0^2 A^{2/3}\delta$$

§ 7.2 原子核基态的量子性质—基态的核自旋和磁矩



(1) 原子核的电四极矩值 Q 一般是很小的；

(2) 自旋 $J = 0$ 或 $1/2$ 的核的 $Q = 0$ ；

(3) 仅对一些稀土原子核和超铀原子核才有显著大的 Q 值，但形变也不大；

如： ^{176}Lu 的电四极矩特别大

$$Q = 8.0 \times 10^{-28} \text{m}^2,$$

$$\text{但 } \delta = 0.21$$

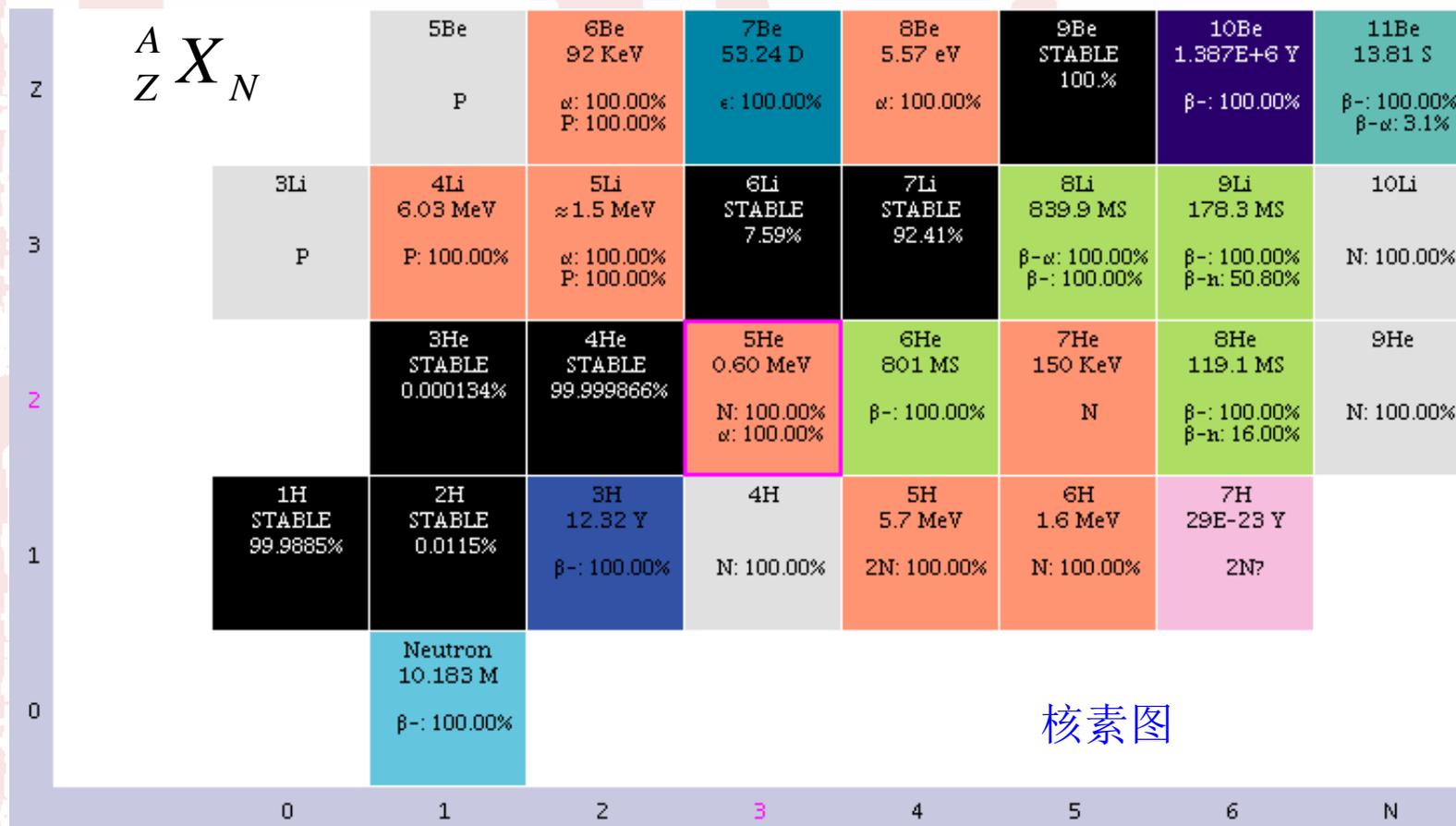
原子核	自旋 (h)	磁矩 (μ_N)	电四极矩 (10^{-28}m^2)	原子质量 (u)	比结合能 (MeV)	丰度或衰 变类型(%)	半衰期
n	1/2	-1.91304	0	1.008665		β^-	614s
^1H	1/2	2.79285	0	1.007825		99.985	
^2H	1	0.85744	0.00286	2.014102	1.112	0.015	
^3H	1/2	2.97896	0	3.016049	2.827	β^-	12.33y
^3He	1/2	-2.12762	0	3.016029	2.57	1.37×10^{-4}	
^4He	0	0	0	4.002603	7.07	99.99986	
^6Li	1	0.82205	-0.0008	6.015122	5.33	7.59	
^7Li	3/2	3.25644	-0.041	7.016004	5.61	92.4	
^8Be	0	0	0	8.005305	7.06	2α	$7 \times 10^{-17}\text{s}$
^{12}C	0	0	0	12.000000	7.68	98.93	
^{13}C	1/2	0.7024	0	13.00335	7.47	1.07	
^{14}C	0	0	0	14.00324	7.52	β^-	5715y
^{14}N	1	0.40376	0.0200	14.00307	7.48	99.63	
^{15}N	1/2	-0.28319	0	15.00011	7.70	0.368	
^{16}O	0	0	0	15.99492	7.98	99.757	
^{17}O	5/2	-1.8938	-0.026	16.99913	7.75	0.038	
^{18}O	0	0	0	17.99916	7.77	0.205	
^{39}K	3/2	0.39146	0.49	38.96371	8.55	93.2581	
^{40}Ca	0	0	0	39.96259	8.55	96.94	
^{60}Co	5	3.799	0.44	59.93382	8.79	β^-	5.271y
^{85}Sr	0	0	0	87.90562	8.61	82.58	
^{99}Tc	9/2	5.6847	-0.129	98.90625	8.55	β^-	$2.13 \times 10^5\text{y}$
^{127}I	5/2	2.8133	-0.79	126.9045	8.44	100	
^{176}Lu	7	3.169	4.92	175.9427	8.05	$2.59\beta^-$	$3.8 \times 10^{10}\text{y}$
^{197}Au	3/2	0.14575	0.55	196.9666	7.92	100	
^{208}Pb	0	0	0	207.9766	7.87	52.4	
^{232}Th	0	0	0	232.0381	7.62	100, α	$1.40 \times 10^{10}\text{y}$
^{235}U	7/2	0.38	4.9	235.0439	7.59	0.720, α	$7.04 \times 10^8\text{y}$
^{238}U	0	0	0	238.0508	7.57	99.275, α	$4.468 \times 10^9\text{y}$
^{239}Pu	1/2	0.203	0	239.0522	7.56	α	$2.41 \times 10^4\text{y}$

§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—核素图和 β 稳定线



核素

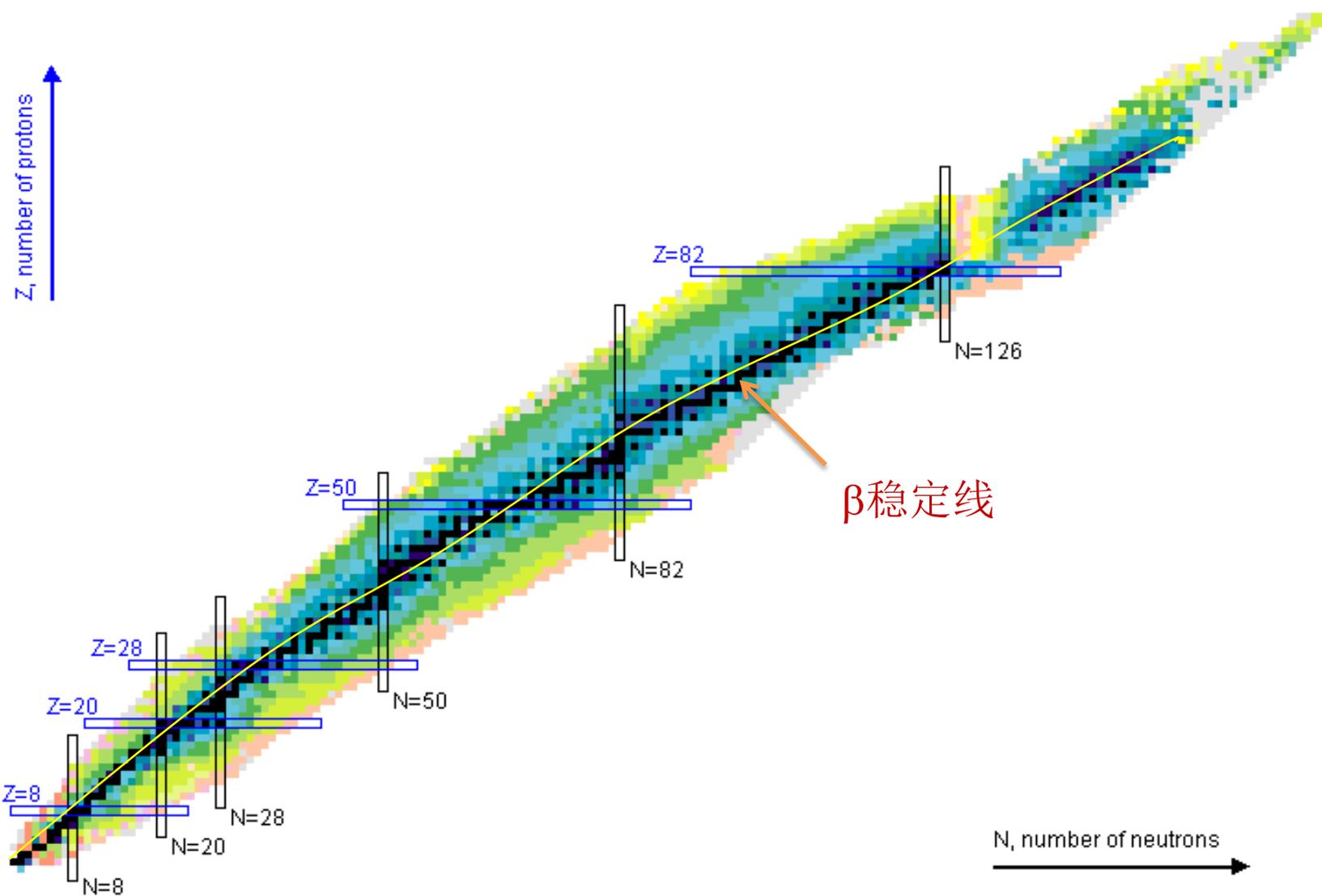
具有相同质子数 Z 和中子数 N ，或具有相同原子序数 Z 和质量数 A 的原子叫核素。



核素图

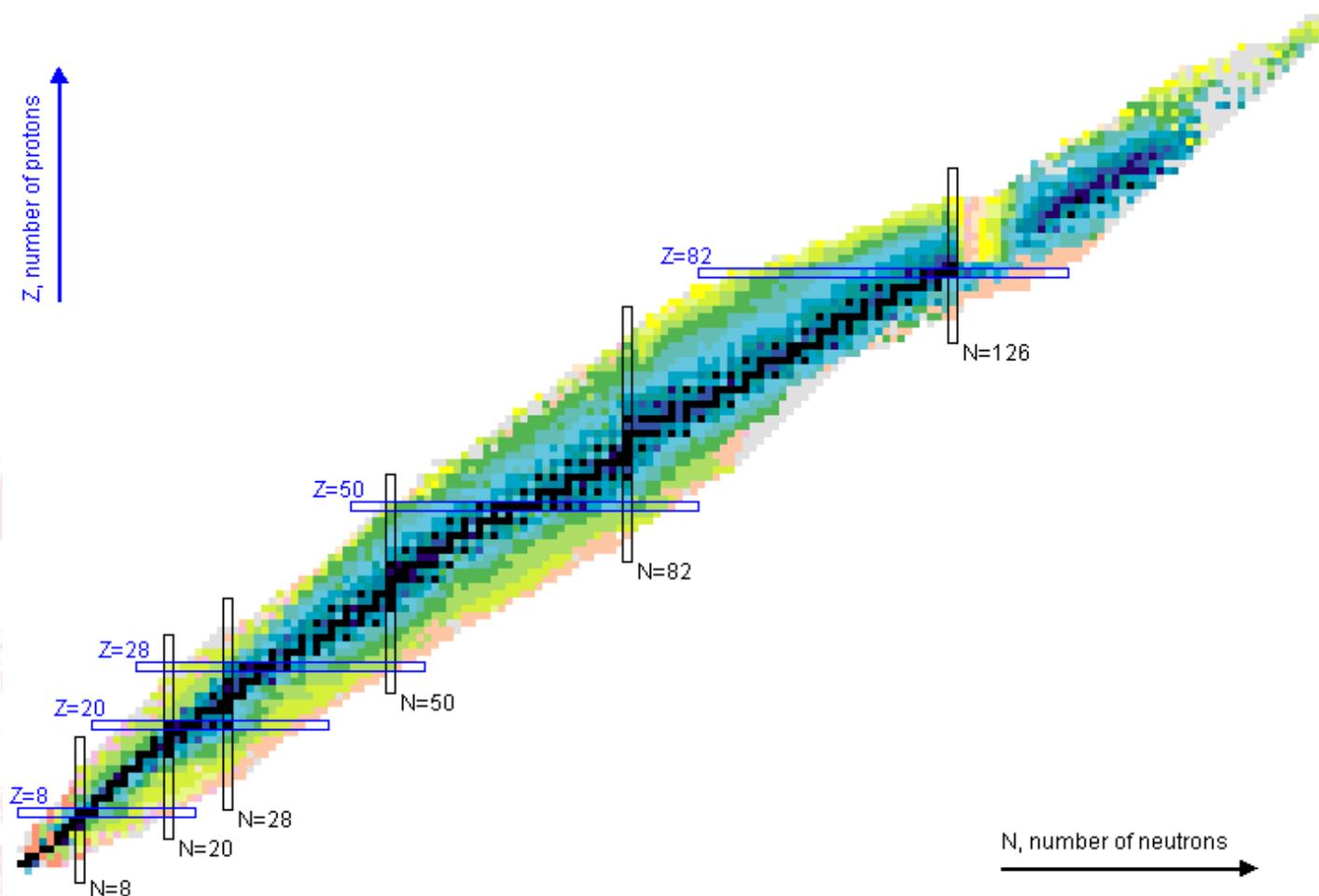
已经发现的核素约有2600种，其中276种是稳定核素，50多种是天然存在的放射性核素。

§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—核素图和 β 稳定线



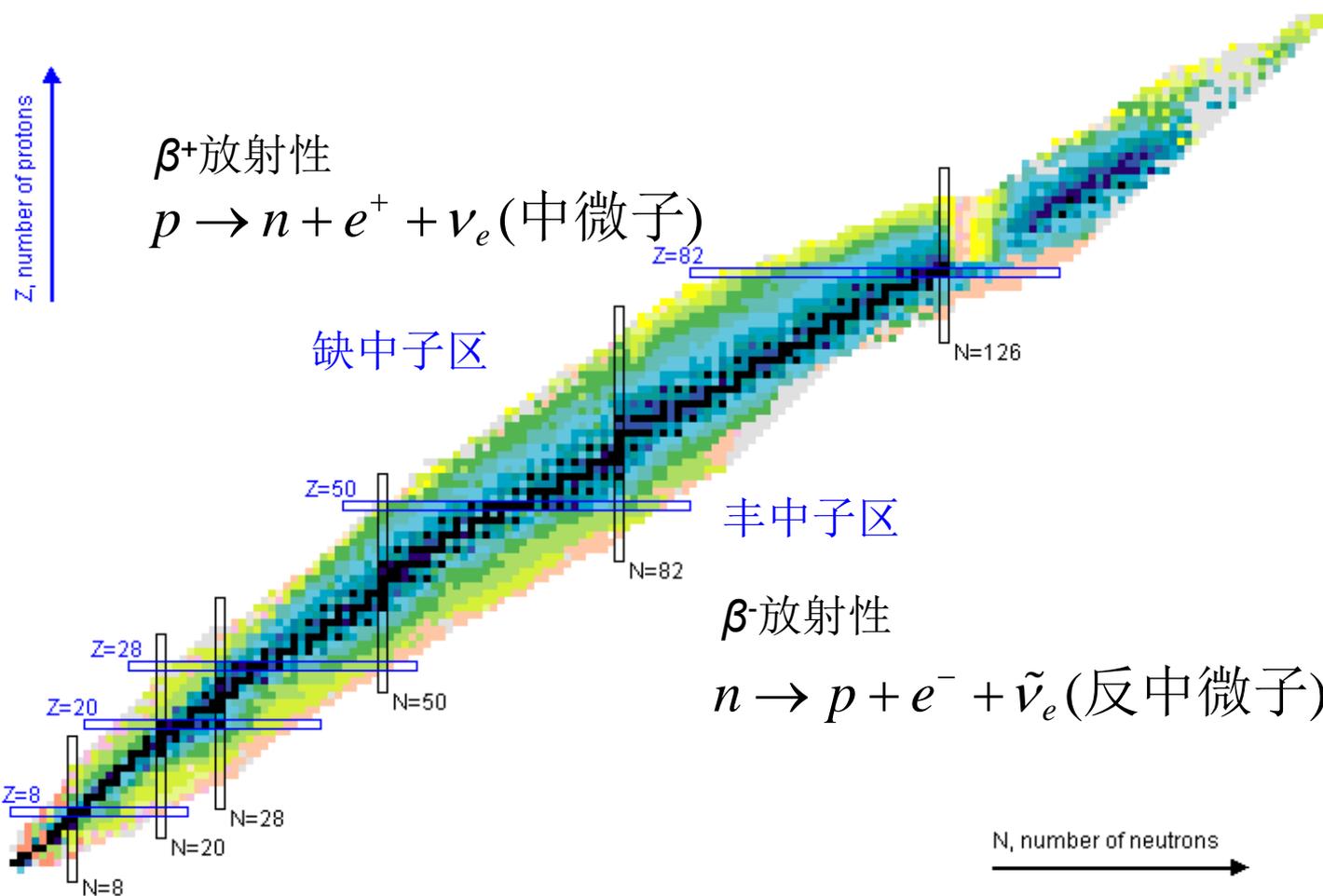
核素图

§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—核素图和 β 稳定线



更重的原子核的 β 稳定线逐渐向 $N > Z$ 方向偏离，如 ^{208}Pb 的 $N=1.54Z$

§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—核素图和 β 稳定线



两边的核素经 β 衰变后都趋向 β 稳定线

§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—结合能



原子核的质量 $m(Z, A) \neq Zm_p + (A - Z)m_n$

质量亏损: $\Delta m(Z, A) = Zm_p + (A - Z)m_n - m(Z, A)$

核子在核力作用下相互吸引而结合成原子核时要释放出—部分能量, 称为结合能

$$B(Z, A) = [Zm_p + (A - Z)m_n - m(Z, A)]c^2$$

通常给出原子质量

$$M(Z, A) = m(Z, A) + Zm_e - B_A / c^2$$

B_A 是原子的电子结合能


$$B(Z, A) = [Zm_p + (A - Z)m_n - M(Z, A) + Zm_e - B_A / c^2]c^2$$


$$B(Z, A) = [ZM_H + (A - Z)m_n - M(Z, A)]c^2$$

忽略 B_A 与 Z 各H原子结合能的差

§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—结合能



定义质量过剩:

$$\Delta(Z, A) = [M_A(Z, A) - A]c^2$$

其中A为质量数, $M_A(Z, A)$ 为以u作单位的原子质量。

则结合能可以表示为

$$B(Z, A) = [Z\Delta(^1\text{H}) + (A - Z)\Delta(n) - \Delta(Z, A)]c^2$$

§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—结合能

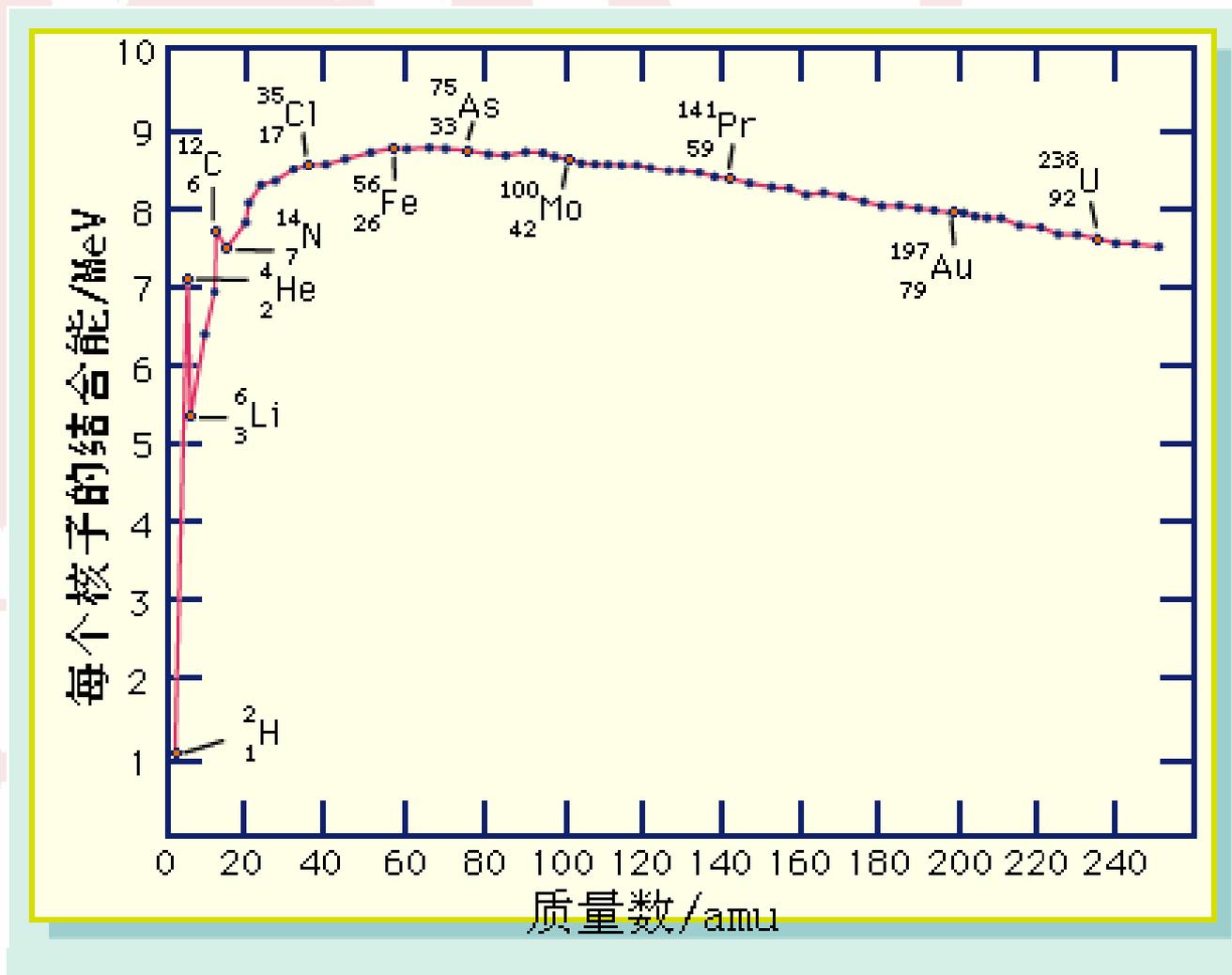


比结合能 $\varepsilon = B / A$

ε 表示把每个原子核拆成自由核子时，平均对每个核子所做的功，因而标志了原子核结合的松紧程度， ε 越大，结合得越紧。

$$\begin{aligned}\varepsilon^{4\text{He}} &= [ZM_H + (A - Z)m_n - M(Z, A)]c^2 / A \\ &= (2 \times 1.007825 + 2 \times 1.008665 - 4.002603) \times 931 \text{MeV} / 4 \\ &= 7.07 \text{MeV}\end{aligned}$$

§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—结合能



比结合能曲线

§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—结合能



(1) 除很轻的核素外，所有稳定原子核的 ε 值近于常数，约 8MeV/ 核子。这表明原子核的结合能粗略地与核子数成正比。

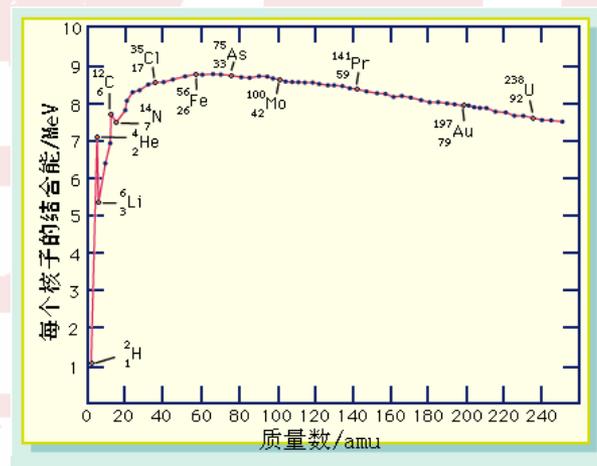
(2) 中等质量数 ($A=40-120$) 的原子核的平均结合能最大，在 8.6MeV 左右。质量数更大或更小的原子核的比结合能较小。

如 ^{235}U 的比结合能是 7.59MeV ， ^2H 的是 1.11MeV ， ^3H 的是 2.83MeV

裂变反应：把重原子核分裂成中等质量的核

聚变反应：把轻原子核 ^2H 、 ^3H 聚合成较重的核如 ^4He

放出大量的能量



§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—液滴模型和半经验公式



1935年，魏扎克根据液滴模型给出了结合能的半经验公式

$$B(Z, A) = B_V + B_S + B_C + B_a + B_p$$

前三项来源于液滴模型

$$\varepsilon = B / A \sim \text{const.} \quad \rightarrow \quad B \propto A$$

核子间的相互作用力具有饱和性

原子核的密度近似常数

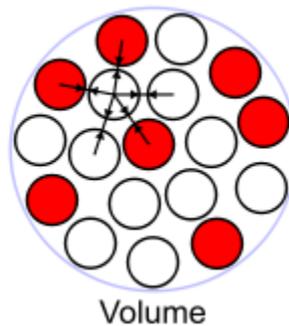
$$\rho_0 = \frac{M}{V} = \frac{A / N_A}{4\pi r_0^3 A / 3} = \frac{3}{4\pi r_0^3 N_A}$$

原子核的不可压缩性

(1) 体积能(基本贡献)

$$B_V = a_V A$$

$$V = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A$$



Niels Bohr
(1885 –1962)



John Wheeler
(1911 –2008)



Carl Weizsäcker
(1912–2007)

§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—液滴模型和半经验公式



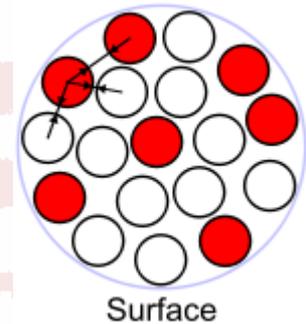
(2) 表面能

在表面上的核子只受到内部核子作用，结合能要小些，相当于表面张力。表面能正比于表面积。

$$S = 4\pi R^2 = 4\pi r_0^2 A^{2/3}$$



$$B_S = -a_S A^{2/3}$$

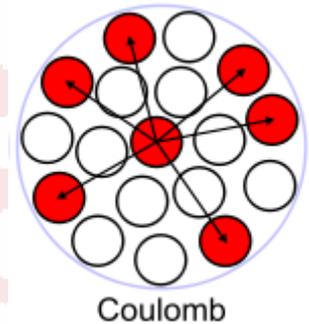


§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—液滴模型和半经验公式



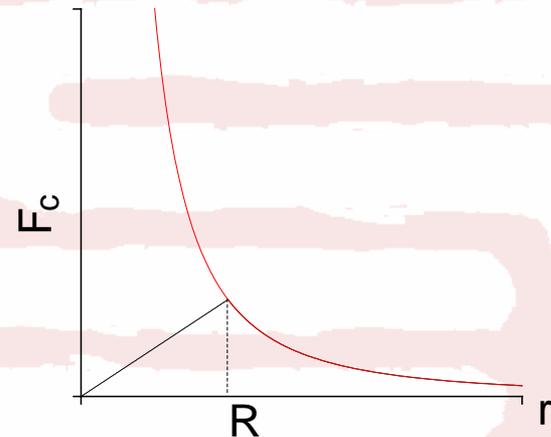
(3) 库仑能

核内各质子间的静电排斥作用能，也是负值项。



$$B_C = \int_0^\infty \frac{1}{2} \epsilon_0 E^2 dV = \frac{1}{2} \epsilon_0 \int_0^R \left(\frac{Ze}{4\pi\epsilon_0 R^3} r \right)^2 4\pi r^2 dr + \frac{1}{2} \epsilon_0 \int_R^\infty \left(\frac{Ze}{4\pi\epsilon_0} \right)^2 \frac{4\pi r^2 dr}{r^4}$$
$$= \frac{Z^2 e^2}{4\pi\epsilon_0 R} \left(\frac{1}{10} + \frac{1}{2} \right) = \frac{3Z^2 e^2}{20\pi\epsilon_0 r_0 A^{1/3}} = 0.714 Z^2 A^{-1/3} \text{ MeV}$$

→ $B_C = -a_C Z^2 A^{-1/3}$



§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—液滴模型和半经验公式

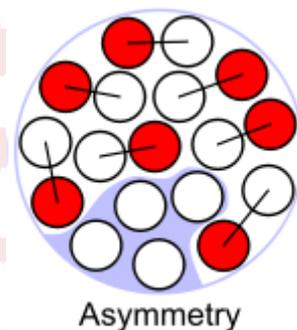


(4) 对称能

β 稳定线

当 $N=Z$ 时，原子核结合更稳定些， $B_a=0$ ，

当 $N\neq Z$ ， $B_a\neq 0$ ，使结合能减小。

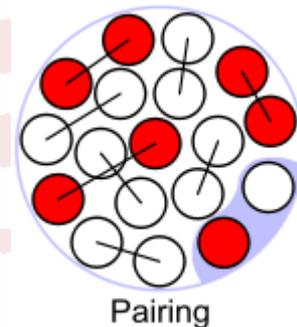


$$B_C = -a_a \left(\frac{A}{2} - Z \right)^2 A^{-1}$$



(5) 对能

稳定核的质子和中子各有配对趋势得到的。在实验上已经发现，在稳定的核素中有一大半（161种）是偶偶核，奇奇核只有5种，它们是 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^6_3\text{Li}$ 、 ${}^{10}_5\text{B}$ 、 ${}^{14}_7\text{N}$ 和 ${}^{138}_{57}\text{La}$ ，这表明偶偶核结合能最大，奇奇核的最小。



两个核子(质子-质子或中子-中子)，自旋平行形成三重态；
自旋反平行形成单重态。

由于核力是吸引力，所以自旋反平行的单重态能量低。
核子间趋向于反平行配对。

$$B_p = \begin{cases} a_p A^{-1/2} & \text{偶偶核} \\ 0 & \text{奇A核} \\ -a_p A^{-1/2} & \text{奇奇核} \end{cases}$$

§ 7.3 原子核的稳定性和结合能—液滴模型和半经验公式



$$a_V = 15.835\text{MeV或}0.017000\text{u}$$

$$a_S = 18.33\text{MeV或}0.01968\text{u}$$

$$a_C = 0.714\text{MeV或}0.000767\text{u}$$

$$a_a = 92.80\text{MeV或}0.09962\text{u}$$

$$a_p = 11.2\text{MeV或}0.012\text{u}$$