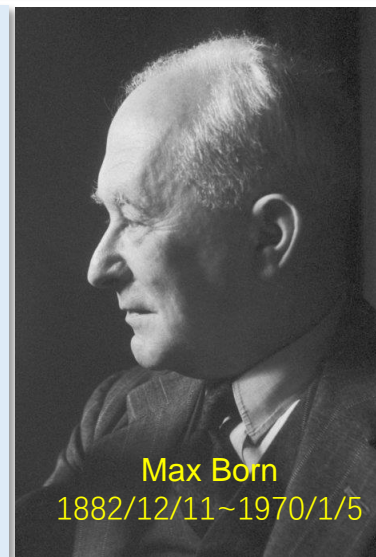


However, a paper by **Heisenberg**, containing his celebrated **uncertainty relationship**, contributed more than the above-mentioned successes to the swift acceptance of the **statistical interpretation of the ψ -function**. It was through this paper that the revolutionary character of the new conception became clear. It showed that **not only the determinism of classical physics must be abandoned**, but also the naive concept of reality which looked upon the particles of atomic physics **as if they were very small grains of sand**. At every instant a grain of sand has a definite position and velocity. This is not the case with an electron.

——Max Born, The statistical interpretation of quantum Mechanics, *Nobel Lecture, December 11, 1954*



上节要点：三种不确定度关系

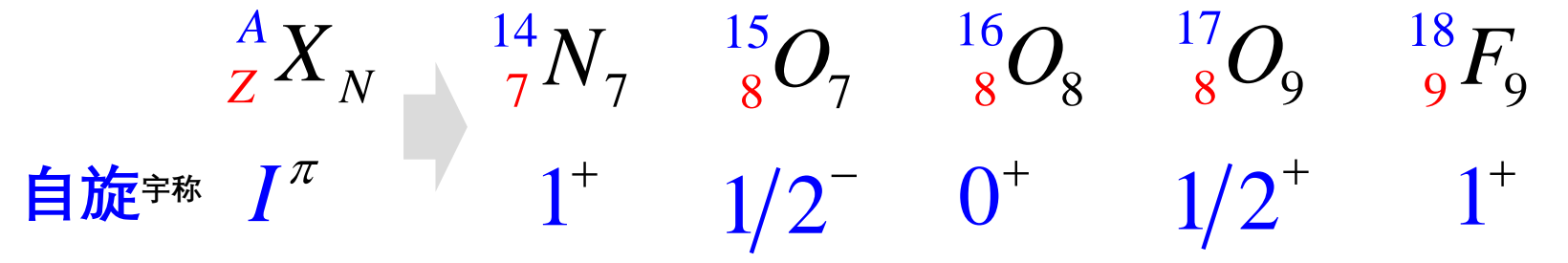
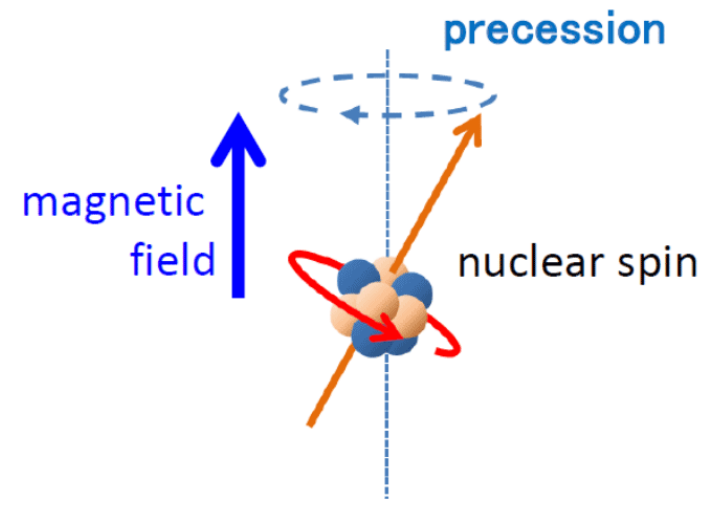
$$E_k = \sqrt{(m_0 c^2)^2 + (pc)^2} - m_0 c^2 \begin{cases} \geq \sqrt{0.511^2 + 124^2} - 0.511 = 123.5 \text{ MeV (电子)} \\ \geq \sqrt{938.272^2 + 124^2} - 938.272 = 8.16 \text{ MeV (质子)} \end{cases}$$

► 本节提要：

- 核素三要素：**质子数，中子数，能态**
- 核体积 $V \propto$ 核子数 $A \rightarrow$ **原子核的不可压缩性**
- β 稳定曲线——**始于 $N=Z$ ，逐渐 $N>Z$ ，终于 $Z>83$**
- 结合能 \leftrightarrow 质量亏损——**静质量减少，动质量增加（可传递的动能）**



教材：附录I



		实验结果 核内A个费米子	“质子-电子”假说 核内A+A-Z个费米子
② 自旋 ↕ ③ 统计性	整数 \hbar ↕ 玻色子	A=偶	Z=偶
	半整 \hbar ↕ 费米子	A=奇	Z=奇
④ 磁矩		10^{-27}J/T	$\sim 10^{-24}\text{J/T}$

× 所以，电子不可能是构成原子核的粒子！

？ 1920年，Rutherford提出：也许质子和电子结合得很紧密，构成了中性的粒子，这个

假设的粒子被称作“**neutral doublets**”。

过程曲折，4章讨论

✓ 1932年，Chadwick发现了中子

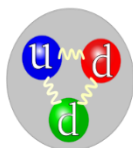


✓ 同年Heisenberg很快提出：原子核是由质子和中子组成的，并且得到了实验支持。



粒子身份证

照片



- 姓名：**中子**
- 英文名：neutron
- 昵称：n
- 出生日期：1932年
- 发现人：James Chadwick

• 体重： $1.67492716 \times 10^{-27} \text{kg}$
 $939.56533 \text{ MeV}/c^2$
 1.00866492 u
 折合： ~ 1839 个电子

• 电荷：0

• 磁矩： $-3.8262 \mu_N$

• 性格：费米子，自旋 $1/2\hbar$
 喜欢独处，服从泡利不相容原理

• 作用力：强力，弱力，电磁力，引力

• 内禀宇称： $+$
 波函数偶对称

• 居住地：核内

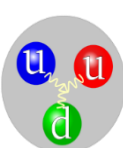
• 预期寿命： 885.67 s **lifetime puzzle**

• 离世方式：被俘获、 β -衰变

签发机关：《核辐射物理及探测学》
 印制人：yyg, 2018-9-19

粒子身份证

照片



- 姓名：**质子**
- 英文名：proton
- 昵称：p
- 出生日期：1917-1920年
- 发现人：Ernest Rutherford

• 体重： $1.67262158 \times 10^{-27} \text{kg}$
 $938.271998 \text{ MeV}/c^2$
 1.00727646 u
 折合： ~ 1836 个电子

• 电荷： $+e$ • 磁矩： $5.5857 \mu_N$

• 性格：费米子，自旋 $1/2\hbar$
 喜欢独处，服从泡利不相容原理

• 作用力：强力，弱力，电磁力，引力

• 内禀宇称： $+$
 波函数偶对称

• 居住地：无限制

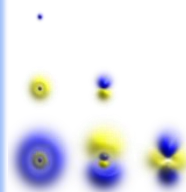
• 预期寿命：稳定

• 离世方式：核内可发生EC、 β^+ 衰变

签发机关：《核辐射物理及探测学》
 印制人：yyg, 2018-9-19

粒子身份证

照片



- 姓名：**电子**
- 英文名：electron
- 昵称：e
- 出生日期：1897年
- 发现人：J. J. Thomson

• 体重： $9.10938188 \times 10^{-31} \text{kg}$
 $0.510998902 \text{ MeV}/c^2$
 0.00054855 u

• 电荷： $-e$ • 磁矩： $-1 \mu_B$

• 性格：费米子，自旋 $1/2\hbar$
 喜欢独处，服从泡利不相容原理

• 作用力：强力，弱力，电磁力，引力

• 内禀宇称： $-$
 波函数偶对称

• 预期寿命： 885.67 s • 离世方式：被俘获、 β -衰变

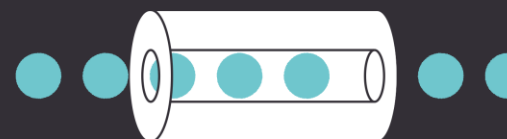
签发机关：《核辐射物理及探测学》
 印制人：yyg, 2018-9-19



中子瓶

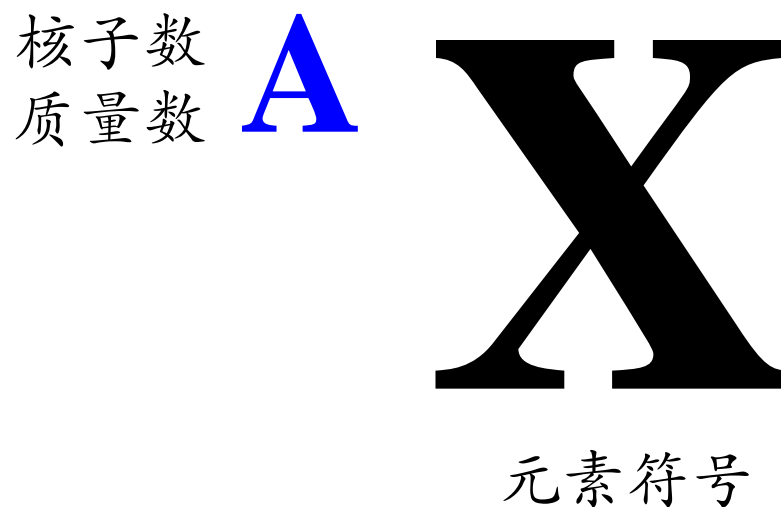
 $879.3 \pm 0.75 \text{ s}$ 

中子飞行

 $888 \pm 2.1 \text{ s}$ 

- 一. 原子结构的发现与核“**质子—电子假说**”的失败
- 二. 原子核的组成及其表示
- 三. 原子核的质量
- 四. 原子核的大小

原子核的简化表示及示例



实际中：

- ① 由于 Z 和 X 是一一对应的，因此 Z 可以不写；
- ② A 等于 Z 与 N 的和，因此 N 也可以不写；
- ③ 原子核通常处于基态，因此 m 也可以不写

- **Nucleus:** 原子核 (名词)

- **Nuclei:** 原子核 (nucleus) 的复数
/'nu:kliə/

- **Nuclear:** 原子核的 (形容词)

- **Nucleon:** 核子 (中子、质子)

- **Neutron:** 中子
/'nu:trɒ:n/

- **Proton:** 质子

- **Electron:** 电子

- **Photon:** 光子

- **Meson:** 介子

- **Neutrino:** 中微子

- **核素 (nuclide)**

➤ 具有一定数目的 (1) **中子** 和 (2) **质子** 以及 (3) **特定能态** 的一种原子核或原子称为核素。

➤ 中子数、质子数和能态只要有一个不同，就是不同的核素。



同位素 (Isotope) —— 原子序数**Z相同**但质量数**A不同**的核素称为某元素的同位素。

氢的三种同位素: ${}^1_1\text{H}$ ${}^2_1\text{H}$ ${}^3_1\text{H}$

铀的二种同位素: ${}^{235}_{92}\text{U}$ ${}^{238}_{92}\text{U}$

同位素丰度 (abundance) —— 元素中各同位素天然含量的**原子数百分比**。

${}^1_1\text{H}$ ${}^2_1\text{H}$

99.985%、0.015%

${}^{16}_8\text{O}$ ${}^{17}_8\text{O}$ ${}^{18}_8\text{O}$

99.756%、0.039%、0.205%

注意：不是质量百分比！

同中异荷素 (Isotone) —— 中子数**N相同**，质子数**Z不同**的核素。

${}^2_1\text{H}_1$ ${}^3_2\text{He}_1$

${}^{14}_6\text{C}_8$ ${}^{16}_8\text{O}_8$

同量异位素 (Isobar) —— 质量数**A相同**，质子数**Z**(或中子数**N**)**不同**的核素。

${}^{40}_{18}\text{Ar}$ ${}^{40}_{19}\text{K}$

${}^{95}_{40}\text{Zr}$ ${}^{95}_{41}\text{Nb}$

有10000g氢气，若将其中的 ^2H 全部提取出来，其重量约为多少？
(^2H 的丰度为0.015%，氢元素的原子量 $\sim 1\text{g/mol}$)

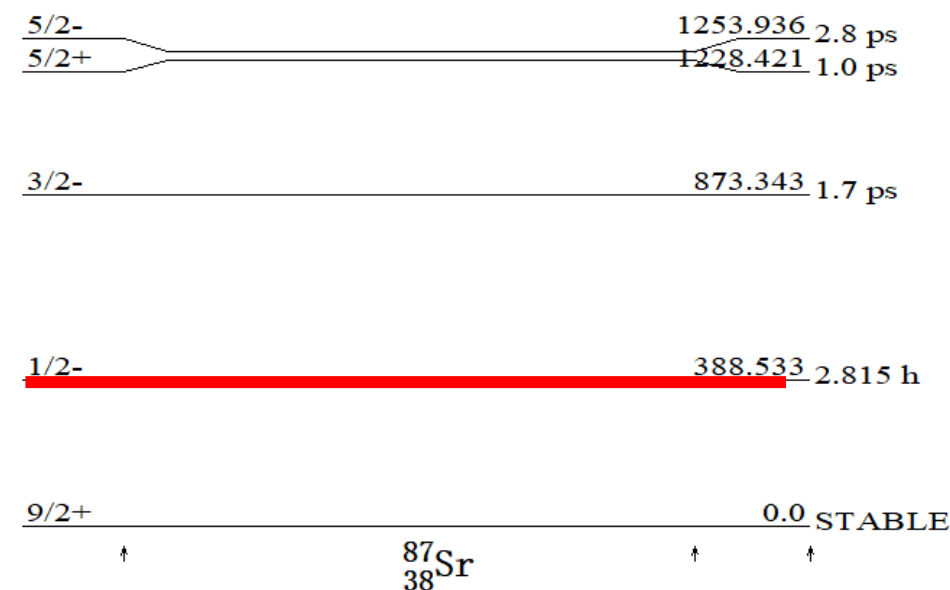
- ☐ A 1.5g
- ☒ B 3g
- ☐ C 无正确选项

提交

同质异能素 (isomer) —— 质子数 **Z** 和中子数 **N** 均相同，而能态不同的核素。

同质异能态 (isomeric states or metastable states) —— 指同质异能素所处的能态，是寿命较长的激发态。

$^{87}_{38}\text{Sr}$ $^{87m}_{38}\text{Sr}$ 激发态半衰期为 2.81hr。



偶A核 (even-A nucleus) —— A 为偶数，N 与 Z 同奇或同偶。

偶偶核 (even-even nucleus) —— 中子数 N，质子数 Z 皆为偶数，如 ^4He , ^{12}C 。

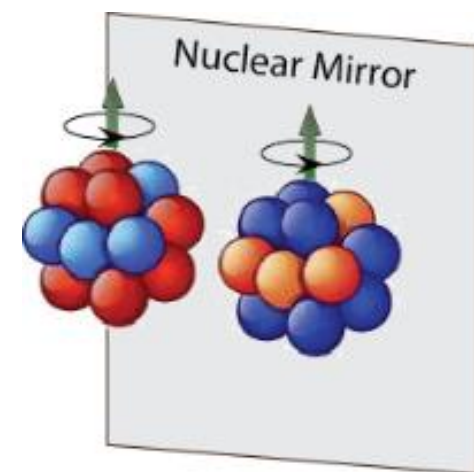
奇奇核 (odd-odd nucleus) —— 中子数 N，质子数 Z 皆为奇数，如 ^6Li , ^{14}N 。


奇A核 (odd-A nucleus) —— A 为奇数，N 与 Z 一个为奇，一个为偶。

镜像核 (mirror nuclei) —— N 与 Z 互换的两个核素。



@第三章·β衰变·超允许跃迁



- 一. 原子结构的发现与核“**质子—电子假说**”的失败
- 二. 原子核的组成及其表示
-  三. 原子核的质量
- 四. 原子核的大小

$a+A \rightarrow B+b+Q$ ，这个反应放出的能量 Q ，可以用质能联系方程来计算。

$Q = (M_a + M_A - M_B - M_b) c^2$ ，你认为这里的 M 指的是谁的质量？

- ☐ A 原子质量
- ☐ B 原子核质量

提交

➤ 质子数为 Z 、核子数为 A 的**原子核质量**用 $m(Z,A)$ 表示，相应的**原子质量**为 $M(Z,A)$ ；

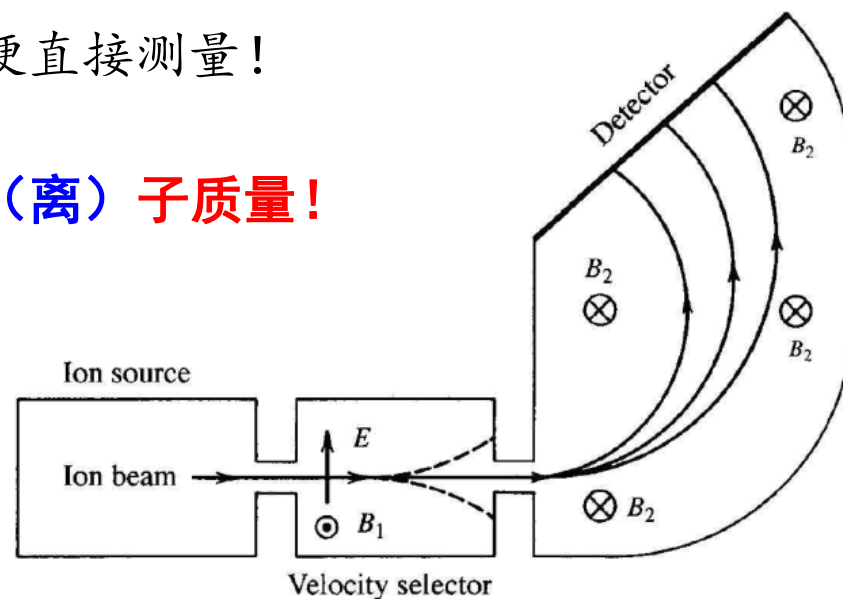
$$M(Z,A) = m(Z,A) + Z \cdot m_0 - \frac{B_e}{c^2} \quad m(Z,A) = M(Z,A) - Z \cdot m_0 + \frac{B_e}{c^2}$$

？ 我们感兴趣的是**原子核质量** $m(Z,A)$ ，为何实际中用的却是**原子质量** $M(Z,A)$ ？

➤ 原子核的质量不便直接测量！

✓ 通常测量的是**原（离）子质量**！

$$R = \frac{Mv}{qB}$$

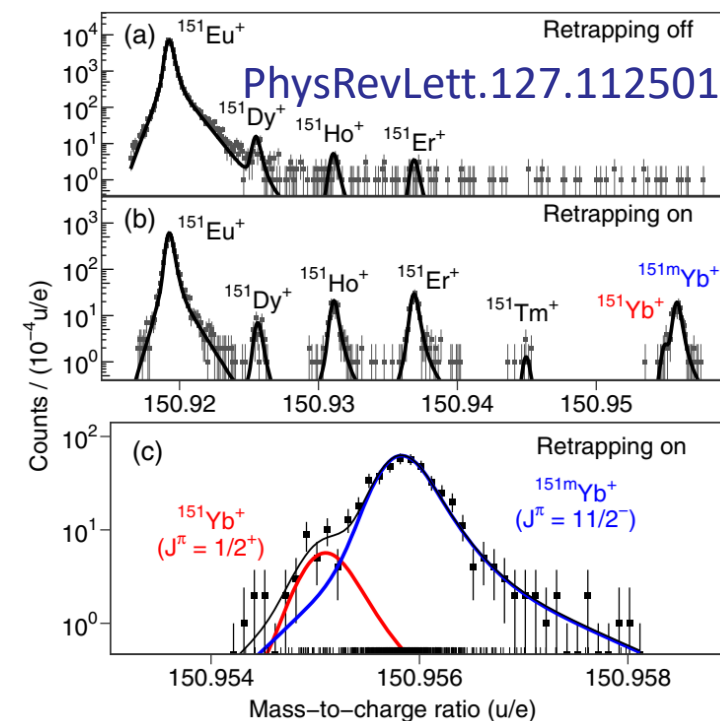


注意：我们虽然讨论的是**原子核**的质量问题，但用的却是**原子**的质量。

第一章阅读材料 (4)

(15/2-) 1531.3+X

(11/2-) 0.0+X 1.6 s
(1/2+) 0.0 1.6 s
151Yb



原子名称	原子质量 (MeV/c ²)	原子质量 (u)	A
¹ H	938.7829537	1.007825	1
² H	1876.123955	2.014102	2
³ H	2809.431586	3.016049	3
⁴ He	3728.400731	4.002603	4
⁶ Li	5603.051062	6.015123	6
⁷ Li	6535.365721	7.016004	7
¹² C	11177.92816	12.000000	12
¹⁶ O	14899.16756	15.994915	16
⁵⁶ Fe	52103.058	55.934936	56
²³⁵ U	218942.0136	235.043930	235
²³⁸ U	221742.8838	238.050788	238

- **A**：原子质量以u为单位时的**取整值**
 - 称其为**质量数**
 - 或**核子数**，是中子和质子数目之和

原子质量单位**u**(unified atomic mass unit)

$$1\textbf{u} = \frac{{}^{12}\textbf{C原子质量}}{12} = 1.66053873 \times 10^{-27} \textit{kg}$$
$$= 931.494013 \text{MeV/c}^2$$

1u≈1个中子或1个质子的质量

3.单选题 (1分)

最后修改: 2022-09-13 16:13

课后附表中的质量过剩 Δ , 描述的是谁的质量?

- ☐ A 原子的
- ☐ B 原子核的
- ☐ C 分子的

正确答案: A

答题统计 (统计数据中的人数, 为已交卷人数)

83/84
完成人数

98.81%
完成率

80.72%
正确率



当原子质量 $M(Z,A)$ 以(u)为单位来表示时,
 $M(Z,A)$ 通常是一个非整数, 大小接近核子数 A 。

$$\begin{array}{rcl}
 M & A + \Delta & \\
 \downarrow & \downarrow & \downarrow \\
 M(^1\text{H}) = & 1.007825\text{u} & \\
 M(\text{n}) = & 1.008665\text{u} & \\
 M(^2\text{H}) = & 2.014102\text{u} & \\
 M(^{56}\text{Fe}) = & 55.934938\text{u} & \\
 & 56 &
 \end{array}$$

将 $M(Z,A)$ 与 A 相减,
 得到**质量过剩**, 以u为单位, 数值可正可负。



实际使用的是与质量过剩对应的能量 Δ

$$\Delta(Z, A) = [M(Z, A) - A]uc^2 \quad (\text{MeV})$$

为什么用 ^{12}C 来表示u?


可不可以是别的元素?

反过来, 用质量过剩也可表达核素的原子质量:

$$M(Z, A) = A + \frac{\Delta(Z, A)}{931.4940} \quad (\text{u})$$

一个原子的质量过剩是仅仅由它自己的质量决定吗?

质量过剩完全是一个为了计算方便而引入的定义, 目的是消除在核衰变、核反应时会被抵消掉的整数(即核子数, 它在核衰变、低能核反应时是守恒的)部分, 即 **$A(u)$** 部分。

- 一. 原子结构的发现与核“**质子—电子假说**”的失败
- 二. 原子核的组成及其表示
- 三. 原子核的质量
-  四. 原子核的大小

➤ 实验表明

- 原子核的线度为 $10^{-14} \sim 10^{-15} \text{m}$ 量级
- 大多数原子核的形状接近**球形**。
- 有的原子核由于有自旋**角动量**，略呈**长**或**扁椭球**状。



如何测得原子核的大小与形状呢？

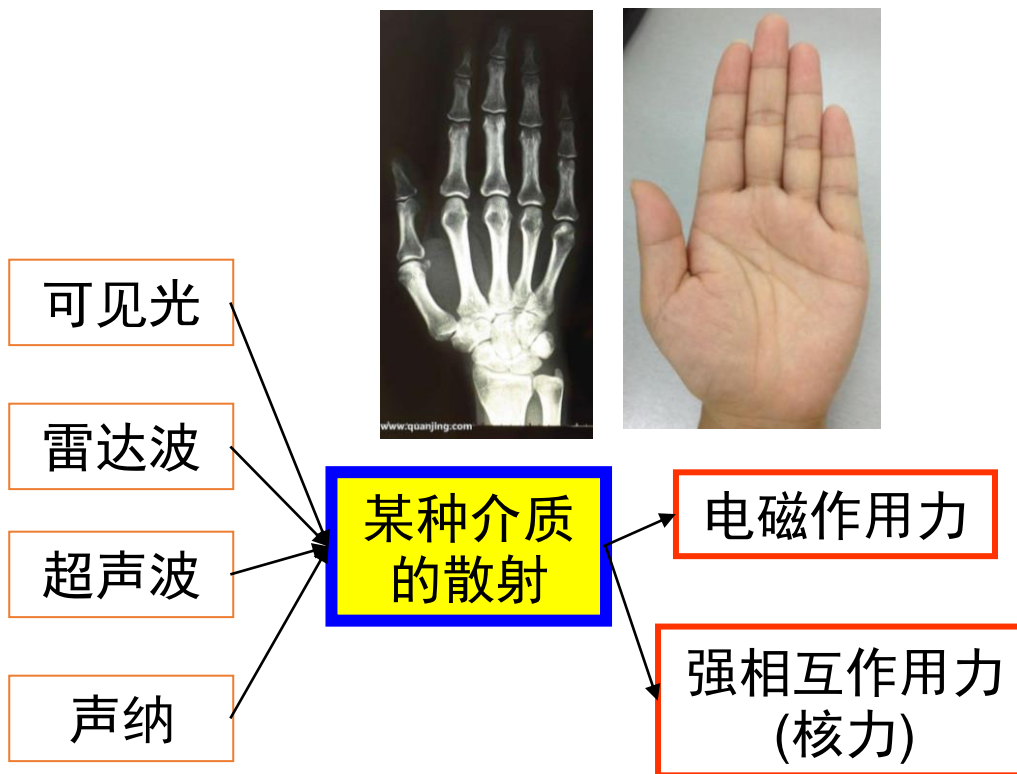


？ 我们如何看一个物体的大小，形状？

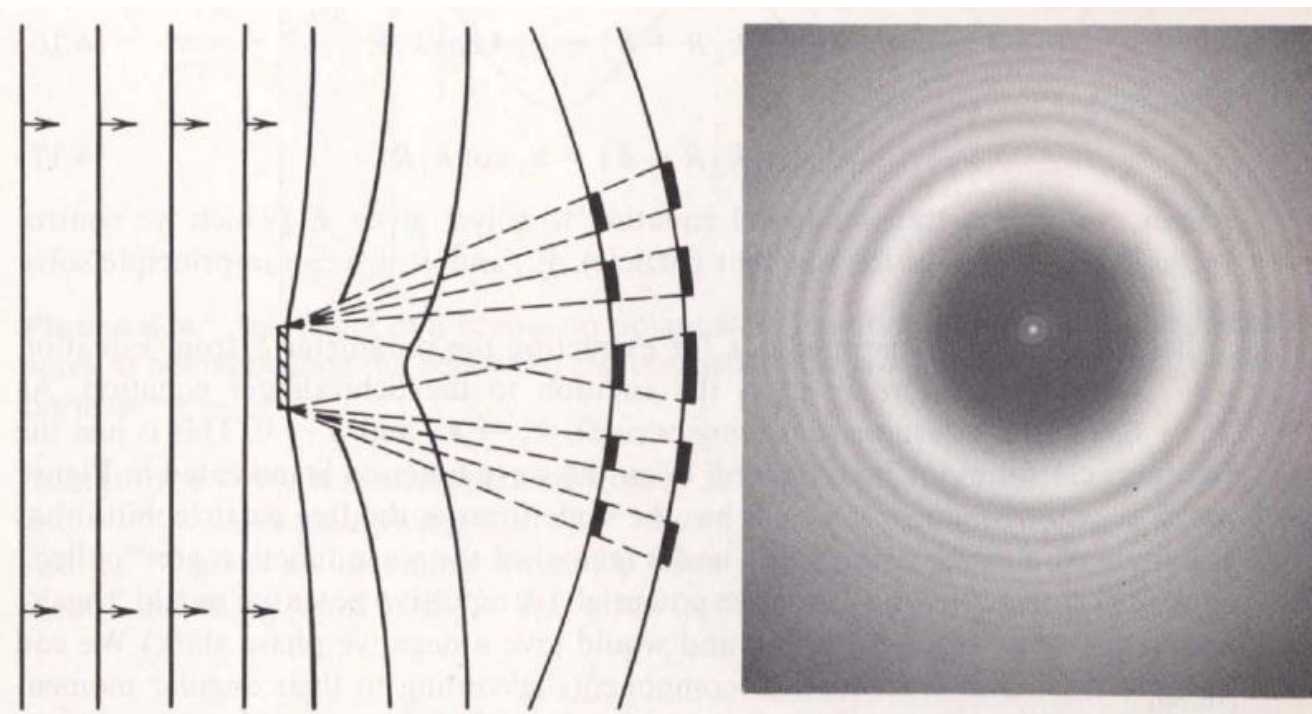
？ 如何侦察飞机？

？ 蝙蝠如何躲避障碍，寻找飞虫

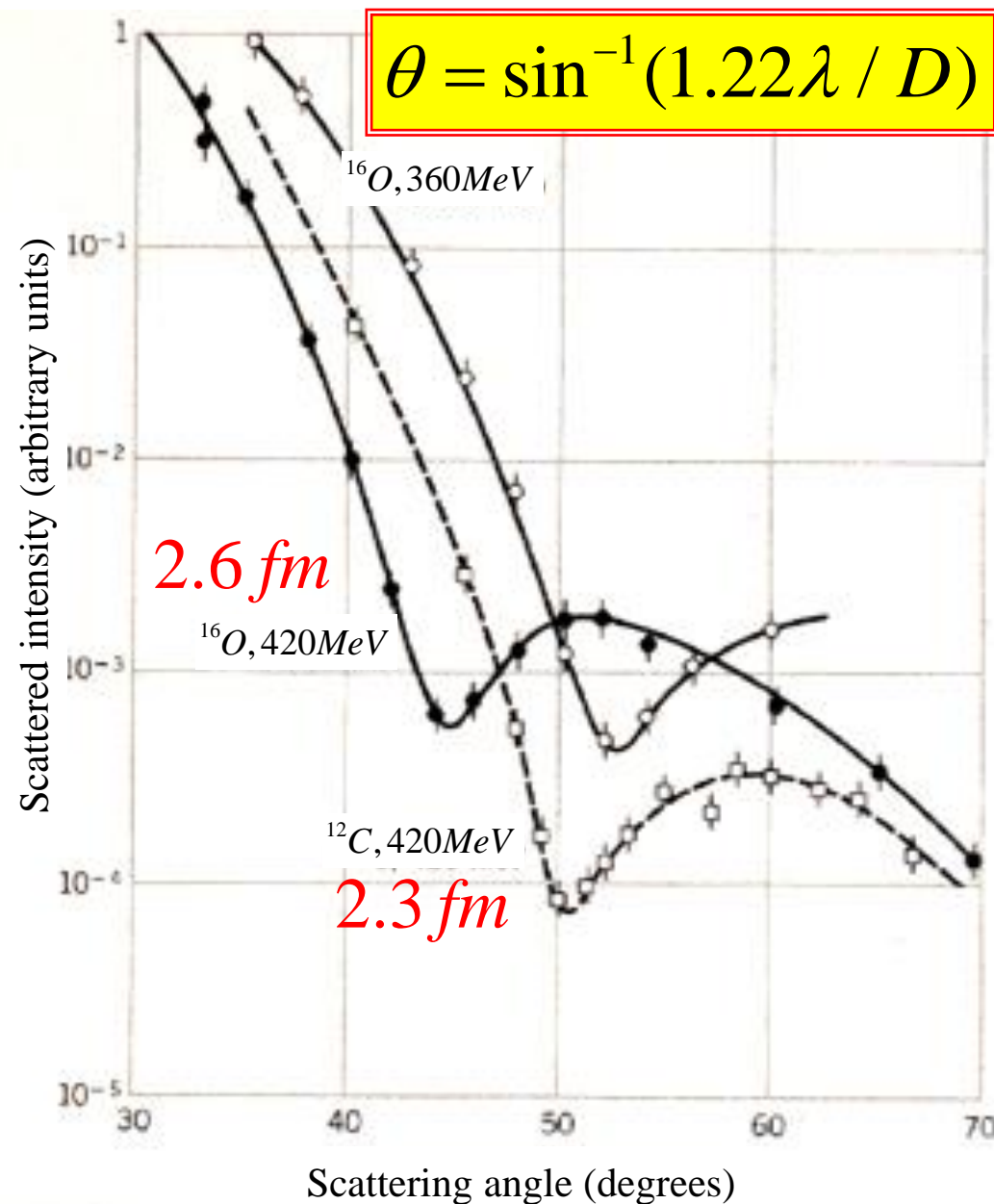
？ 抹香鲸如何在漆黑的深海寻找猎物？



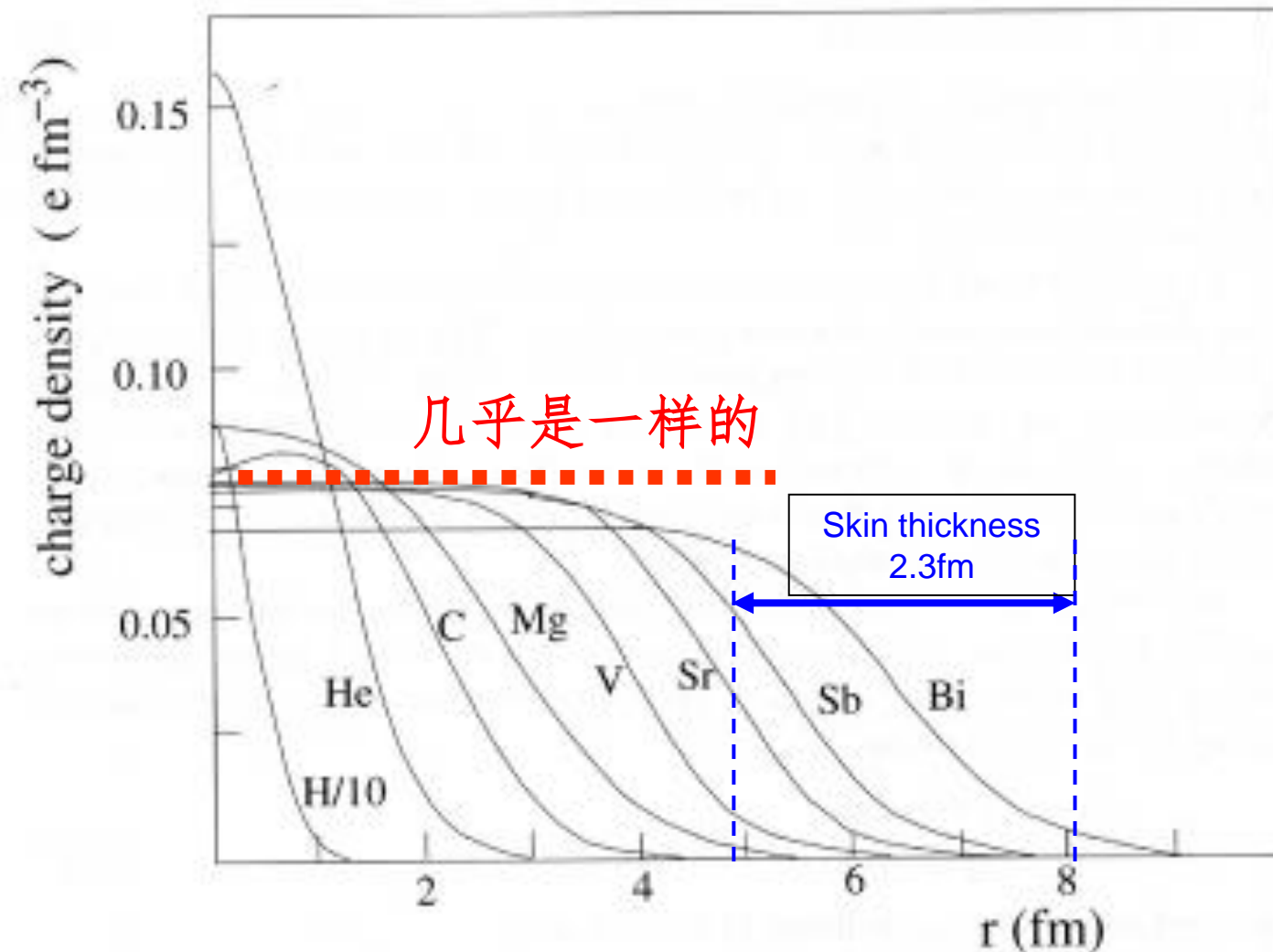
高能电子：100MeV~1GeV（为什么要这么高的能量？）



$$\theta = \sin^{-1}(1.22\lambda / D)$$



第一章阅读材料 (5)



对于中等质量、重核

$$\rho_{\text{charge}}(r) = \frac{\rho_{\text{charge}}^0}{1 + e^{(r-a)/b}}$$

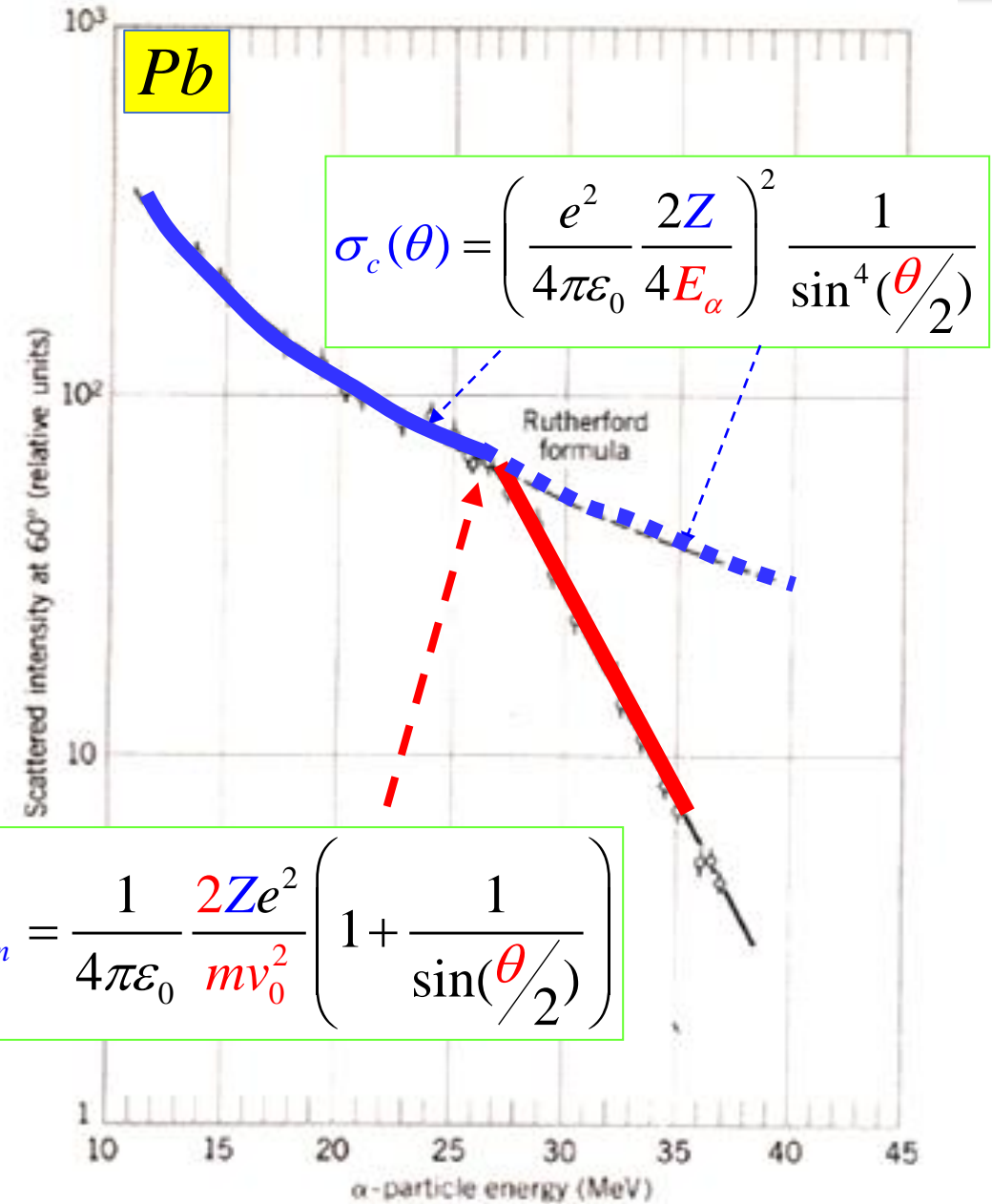
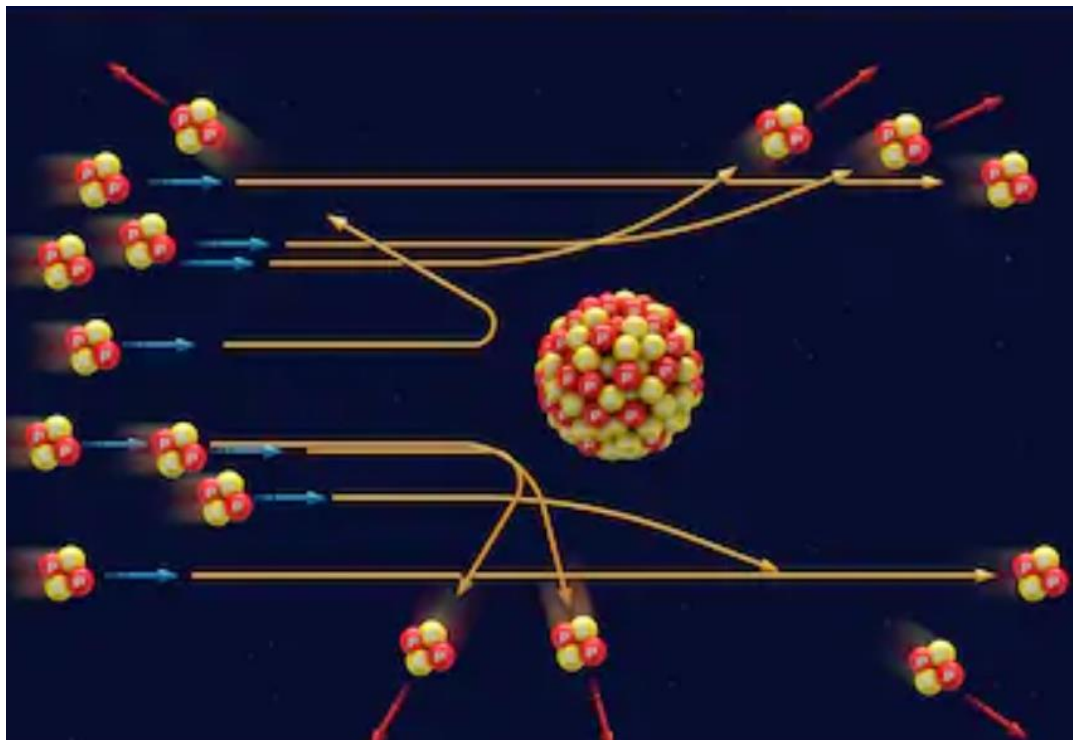
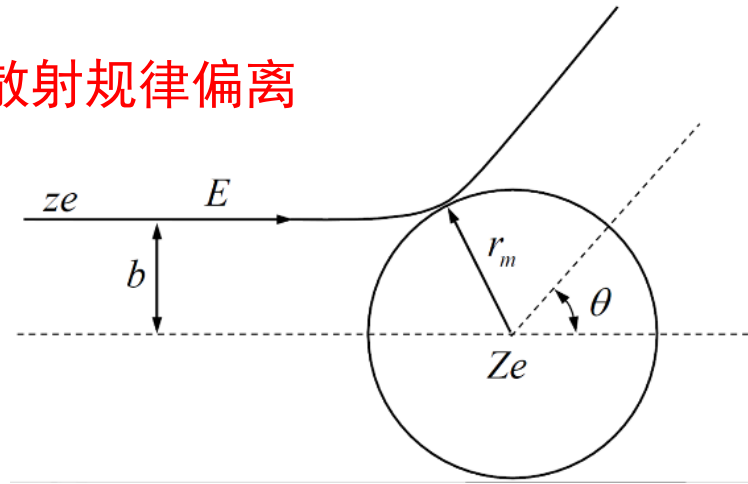
$$a \approx 1.07 A^{1/3} (\text{fm})$$

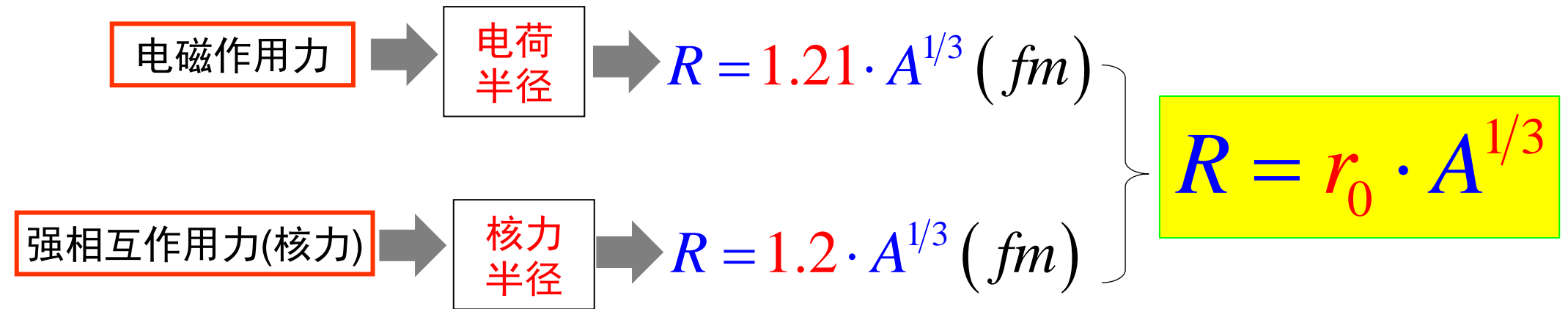
$$b \approx 0.54 (\text{fm})$$

Fig. 1.1. Experimental charge density (e fm^{-3}) as a function of r (fm) as determined in elastic electron-nucleus scattering [8]. Light nuclei have charge distributions that are peaked at $r = 0$ while heavy nuclei have flat distributions that fall to zero over a distance of ~ 2 fm.

核力→测量核内物质的分布，有多种方法来测（卢瑟福散射、 α 衰变、 π 介子X射线等）

核力使卢瑟福散射规律偏离





➤ 电荷半径和核力半径几乎相同，差别**不超过0.1fm**

➤ 在重核区，中子比质子多50% (^{208}Pb)，期望会看到中子的半径会大于质子的半径，所谓“中子皮”，**但实际没有看到**

- 质子互斥，向外排列
- 中子核力吸引，向内收缩
- 二者间杂，故电荷和核力半径几乎一样

其半径均与 $A^{1/3}$ 成正比

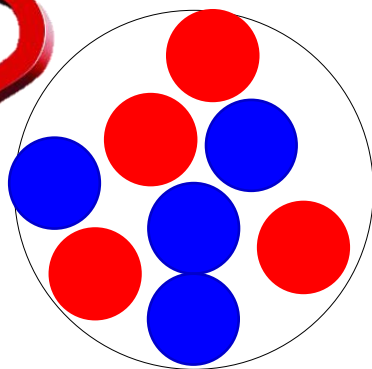
$$R = r_0 A^{1/3}$$



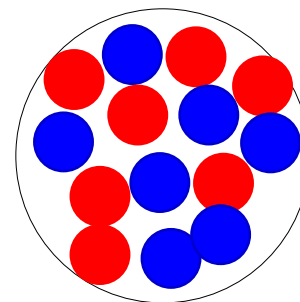
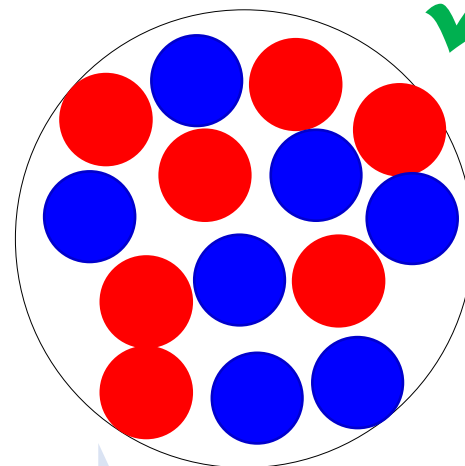
$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 = \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \propto A$$



$$\frac{A}{V} = \frac{1}{\frac{4}{3} \pi r_0^3} = 0.14 / \text{fm}^3$$



当核子数变多时



由实验观察到现象：

- 原子核半径 R 近似正比于 $A^{1/3}$
- 原子核体积 V 近似正比于 A

重要结论
(规律)

核力具有“饱和性”

- 电荷半径和核力半径几乎是一样的。
- 核半径 R 正比于 $A^{1/3}$ ，核体积 V 正比于核子数 A ，原子核的密度不变。
- 说明每个核子所“占据”的体积总是那么大，不会像小雪球汇聚为大雪球时那样因受到挤压而减小（重力是长程力）。
- 这暗示了核力是个短程力，任何一个核子只能给它周围有限的核子施加核力的影响。（核力的特点，我们到第四节再讨论）



绪论

§ 1.1 原子核的组成、质量及半径

✓ § 1.2 **原子核稳定性的实验规律**

§ 1.3 原子核的结合能

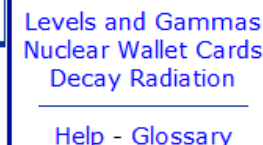
§ 1.4 核力及核势垒

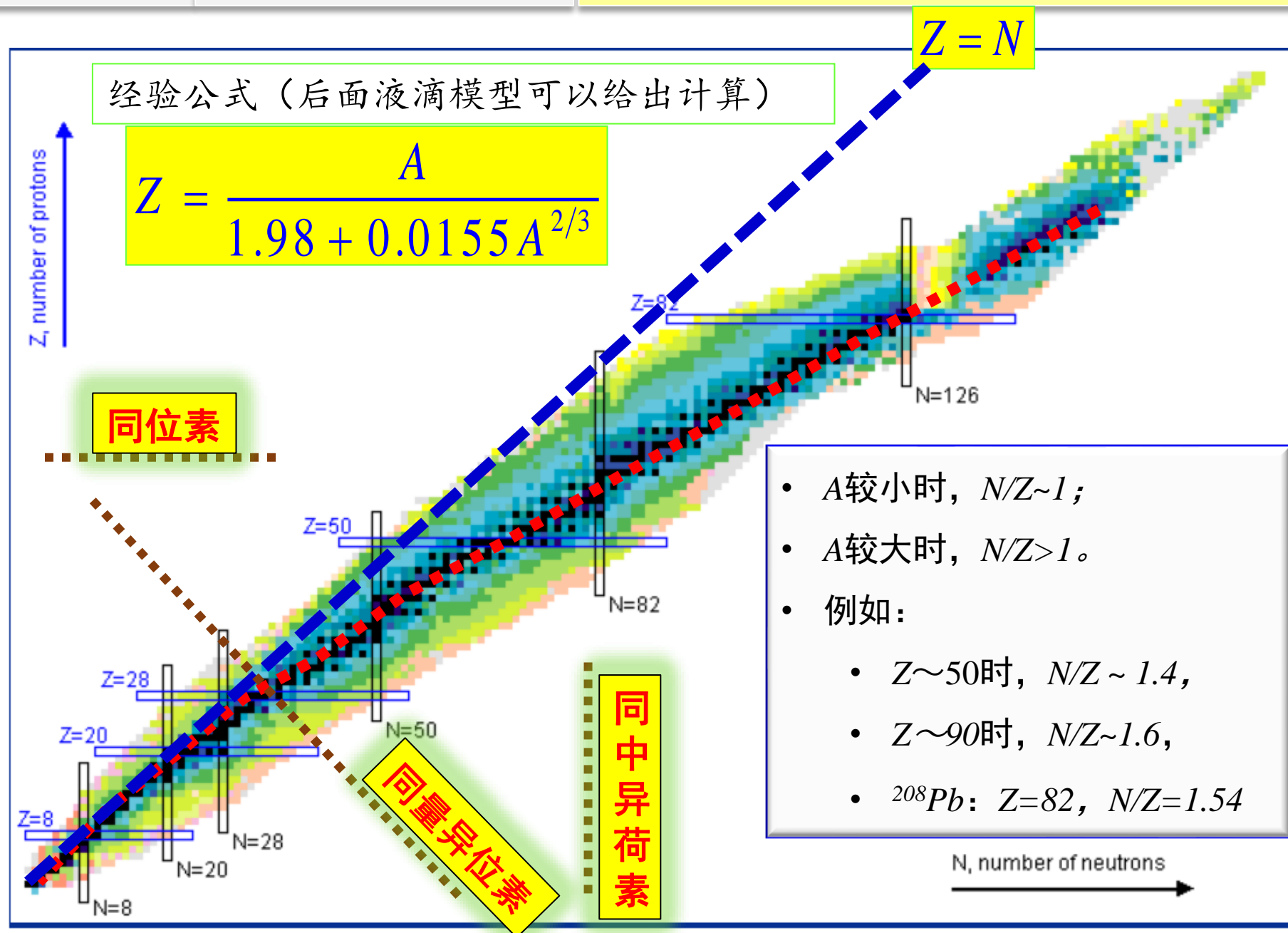
§ 1.5 原子核的矩（自旋、磁矩和电四极矩）

§ 1.6 原子核的统计性质

§ 1.7 原子核的宇称

§ 1.8 原子核的能态和核的壳层模型





Z

15	26S ≤79 NS 2P?	27S 15.5 MS ε: 100.00% εp: 2.30%	28S 125 MS ε: 100.00% εp: 20.70%	29S 188 MS ε: 100.00% εp: 1.3E-3%	30S 178 S ε: 100.00%	31S 2.5534 S ε: 100.00%	32S STABLE 94.00%	33S STABLE 0.75%	34S STABLE 4.25%
14	25P ≤30 NS P: 100.00%	26P 43.7 MS ε: 100.00% εp: 36.80%	27P 260 M ε: 100.00% εp: 1.3E-3%	28P 270.3 MS ε: 100.00% εp: 1.3E-3%	29P 4.142 S ε: 100.00%	30P 2.498 M ε: 100.00%	31P STABLE	32P 14.268 D β-: 100.00%	33P 25.35 D β-: 100.00%
13	24Si 140.5 MS ε: 100.00% εp: 45.00%	25Si 220 M ε: 100.00% εp: 1.3E-3%	26Si 2.2453 S ε: 100.00% εp: 1.3E-3%	27Si 3.9863 S ε: 100.00% εp: 1.3E-3%	28Si STABLE 92.223%	29Si STABLE 4.683%	30Si STABLE 3.092%	31Si 157.36 M β-: 100.00%	32Si 153 Y β-: 100.00%
12	23Al 0.0001 S ε: 100.00% εp: 0.46%	24Al 2.053 S ε: 100.00% εp: 0.04%	25Al 7.183 S ε: 100.00%	26Al 7.17E+05 Y ε: 100.00%	27Al STABLE 100%	28Al 2.245 M β-: 100.00%	29Al 6.561 S β-: 100.00%	30Al 3.62 S β-: 100.00% β-n < 1.60%	31Al 644 MS β-: 100.00% β-n < 1.60%
	22Mg 3.8755 S ε: 100.00%	23Mg 11.317 S ε: 100.00%	24Mg STABLE 78.99%	25Mg 15.022 S ε: 100.00%	26Mg STABLE 11.01%	27Mg 9.458 M β-: 100.00%	28Mg 20.915 M β-: 100.00%	29Mg 1.30 S β-: 100.00%	30Mg 317 MS β-: 100.00% β-n < 0.060%
	10	11	12	13	14	15	16	17	N

丰质子核素, 主要通过 E electron capture 或 β^+ 衰变的方式趋向稳定

只有处于 β 稳定曲线的核素, 才可能是稳定的;

丰中子核素, 主要通过 β^- 衰变的方式趋向稳定

N

Z	N	名 称	稳定核素数目
e	e	偶偶核	166
e	o	偶奇核	56
o	e	奇偶核	53
o	o	奇奇核	9

可以发现：

- 偶偶核最稳定，稳定核最多；
- 其次是奇偶核和偶奇核；
- 而奇奇核最不稳定，稳定核素最少。



？稳定→（等价于）→？

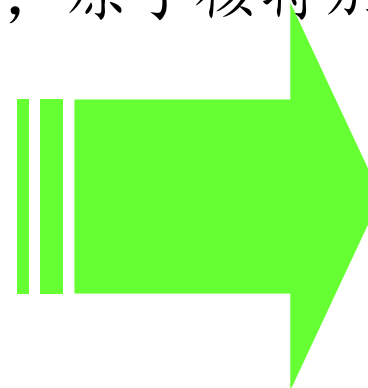
？为什么偶偶核最稳定（原理）？

另外，当质子、中子数目取如下值的时候，原子核特别稳定：

$$Z=2, 8, 20, 28, 50, 82$$

$$N=2, 8, 20, 28, 50, 82, 126$$

这些数目被称为**幻数**（magic numbers）



壳层模型

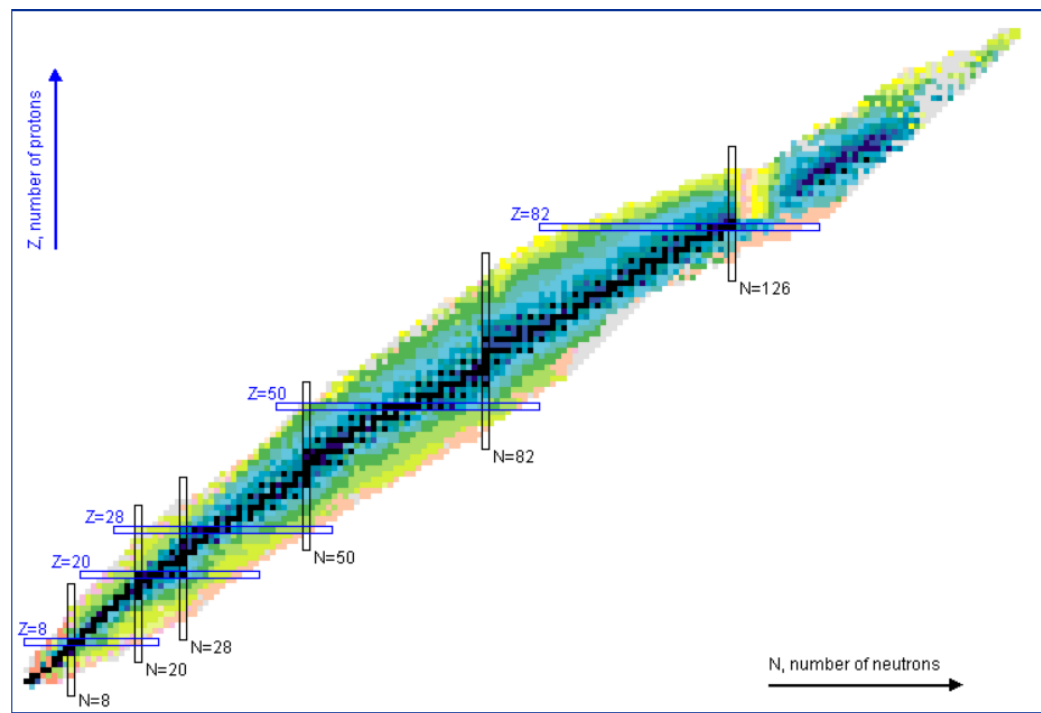
Shell model

？ 看起来稳定的原子核并不多，只有处在 β 稳定曲线上的原子核才是稳定的？

- 是的，只有处于 β 稳定曲线上的原子核才可能是稳定的。对于稳定的核，无论经历多么久的时间，那个原子核还是那个原子核，不会发生衰变。例如 ^{12}C ， ^{16}O ， ^{56}Fe ，就是这样的原子核。
- “稳定核素”共有254个，其中90个不会衰变，剩下164个则是衰变得很慢。

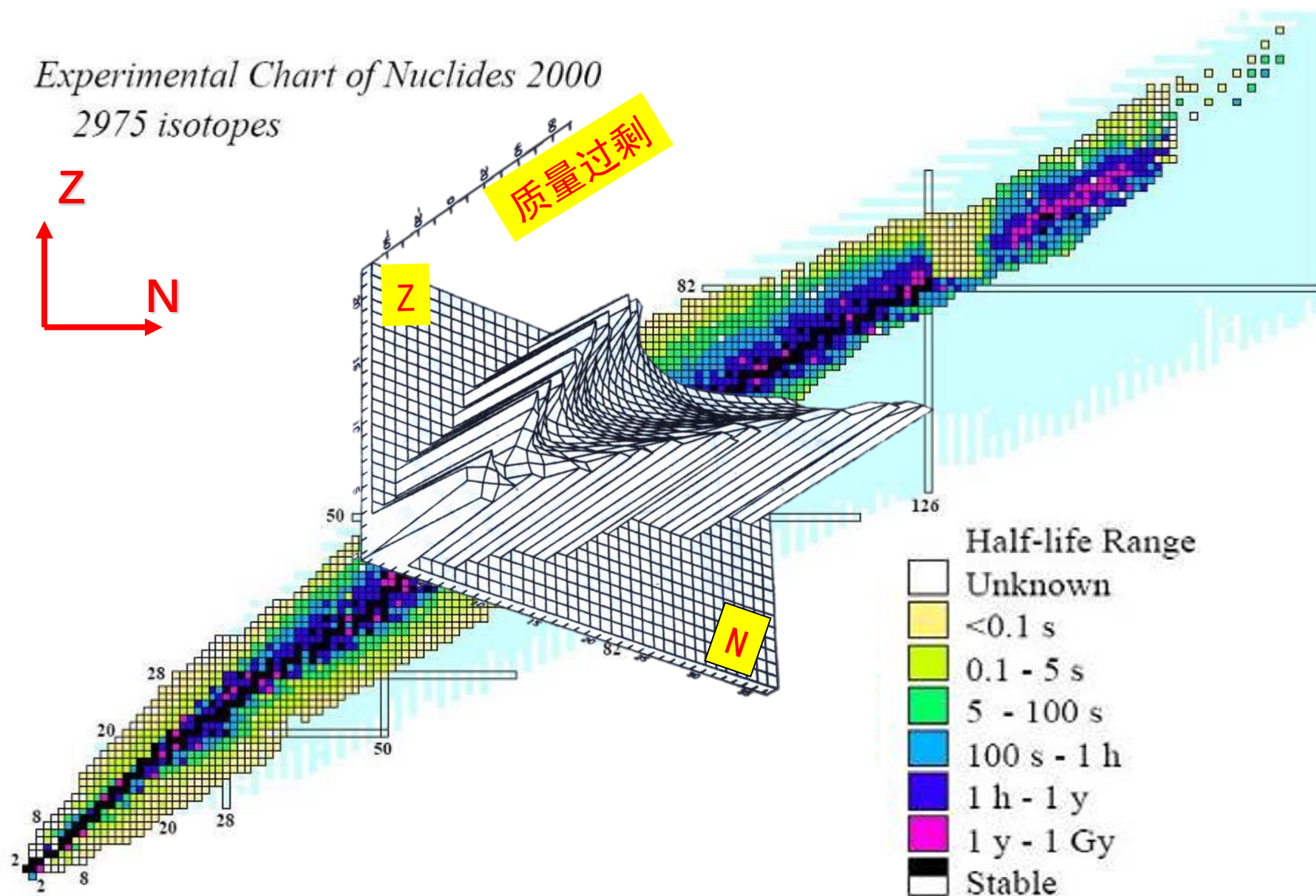
？ β 稳定曲线会有适用范围吗？

- 虽然 β 稳定曲线可以用一个经验公式来拟合，但该公式不能外推到高 Z 区，实际上在83号元素Bi以后，就没有稳定核素了。



？是因为所有的核素都会发生 β 衰变吗？

- 不是，根本的原因是由于 Z 的增大，导致了库仑排斥能的增大，使得原子核不稳定。在高 Z 区，主要发生的是 α 衰变，这个我们在第三章会讲到。



绪论

§ 1.1 原子核的组成、质量及半径

§ 1.2 原子核稳定性的实验规律

✓ **§ 1.3 原子核的结合能**

§ 1.4 核力及核势垒

§ 1.5 原子核的矩（自旋、磁矩和电四极矩）

§ 1.6 原子核的统计性质

§ 1.7 原子核的宇称

§ 1.8 原子核的能态和核的壳层模型

层次越深，结合能的重要性越大(*the deeper, the greater*)

➤电子 (H原子) : $13.6\text{eV}/1\text{GeV} \sim 1.4 \times 10^{-8}$

➤核 (^2H 核) : $2.224\text{MeV}/1.85\text{GeV} \sim 1.2 \times 10^{-3}$

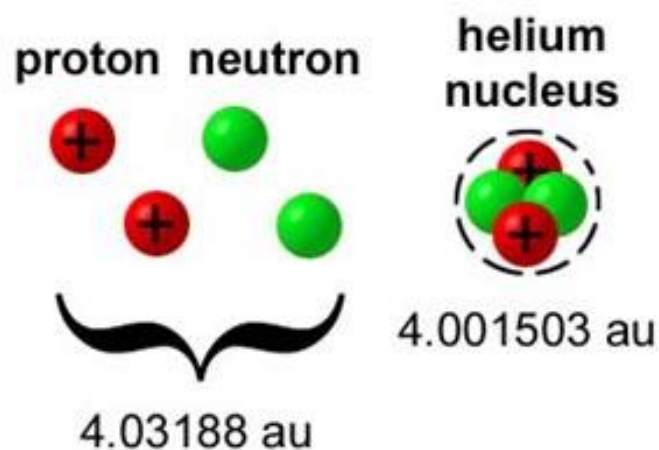
一. 能量和质量的一般关系

二. 质量亏损

三. 原子核的结合能，比结合能

四. 原子核最后一个核子的结合能

五. 液滴模型，原子核结合能的半经验规律



质量 = 质子质量 + 中子质量 ? **No!**

氦核，由一个质子和一个中子组成

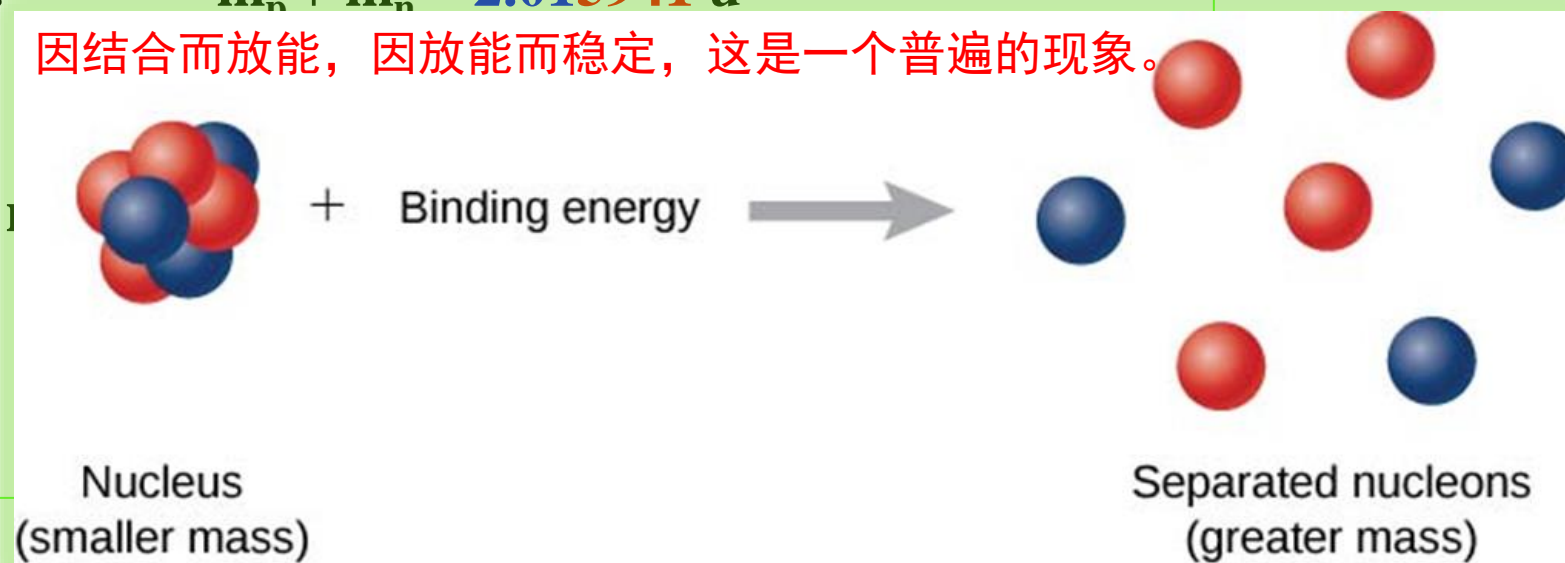
$$m_p = 1.007276 \text{ u}$$

$$m_n = 1.008665 \text{ u}$$

- 质子质量+中子质量：
- 氦核质量：
- 存在差值：
- 以 γ 射线的方式放能：

$$m_p + m_n = 2.015941 \text{ u}$$

因结合而放能，因放能而稳定，这是一个普遍的现象。



组成某一原子核的所有核子质量之和与该原子核质量之差，称为该原子核的质量亏损：

$$\Delta m(Z, A) = (A-Z) \cdot m_n + Z \cdot m_p - m(Z, A)$$

但是，在实际计算中常用的却是 $\Delta M(Z, A)$ ：

$$\Delta M(Z, A) = (A-Z) \cdot m_n + Z \cdot M(^1\text{H}) - M(Z, A)$$



➤ 因为得到原子核的质量并不容易，所以需要从原子质量的角度入手

？ 那么，这么做是否可行呢？

✓ $M(Z, A)$ 的 Z 个电子，与 Z 个 $M(^1\text{H})$ 的 Z 个电子，质量互相抵消；

✓ $M(Z, A)$ 和 Z 个 $M(^1\text{H})$ 中的电子结合能又可以抵消一部分。

➤ 最后，忽略电子结合能差，则有： $\Delta m(Z, A) \approx \Delta M(Z, A)$

体系变化前后的**静止质量差**，称为**广义质量亏损**

$$\Delta M = \sum M_i - \sum M_f$$

若 $\Delta M > 0$ ，体系变化后静止质量减少，相应地体系有能量释放，称为放能变化。

$$\Delta E = \sum E_f - \sum E_i > 0$$

孤立体系的总能量守恒 $\sum M_i c^2 + \sum E_i = \sum M_f c^2 + \sum E_f$

$$\text{所以, } \Delta E = \sum E_f - \sum E_i = \sum M_i c^2 - \sum M_f c^2 = \Delta M c^2$$

一. 能量和质量的一般关系

二. 质量亏损

三. 原子核的结合能，比结合能

四. 原子核最后一个核子的结合能

五. 液滴模型，原子核结合能的半经验规律

结合能：由自由核子组成原子核时所**释放出的能量**

$$B(Z, A) = \Delta m(Z, A)c^2$$

由： $\Delta M(Z, A) \approx \Delta m(Z, A)$

$$\begin{aligned}
 B(Z, A) &= [Z \cdot m_p + (A - Z) \cdot m_n - m(Z, A)]c^2 \\
 B(Z, A) &= [Z \cdot M(^1H) + (A - Z) \cdot m_n - M(Z, A)]c^2 \\
 &= Z \cdot \Delta(1, 1) + \boxed{Z \cdot uc^2} + (A - Z) \cdot \Delta(0, 1) + \boxed{(A - Z) \cdot uc^2} - \Delta(Z, A) + \boxed{A \cdot uc^2} \\
 &= Z \cdot \Delta(1, 1) + (A - Z) \cdot \Delta(0, 1) - \Delta(Z, A)
 \end{aligned}$$

Diagram: A box labeled "0" at the top has three green arrows pointing to the three boxed terms in the third line of the derivation: $Z \cdot uc^2$, $(A - Z) \cdot uc^2$, and $A \cdot uc^2$.

例如：一个质子与一个中子组成氘核，

$$\begin{aligned}
 B(1, 2) &= \Delta(1, 1) + \Delta(0, 1) - \Delta(1, 2) \\
 &= 7.289 + 8.071 - 13.136 \\
 &= 2.224 \text{ MeV}
 \end{aligned}$$

比结合能：原子核中每个核子的平均结合能，称为比结合能 ϵ 。 $\epsilon(Z, A) = B(Z, A)/A$

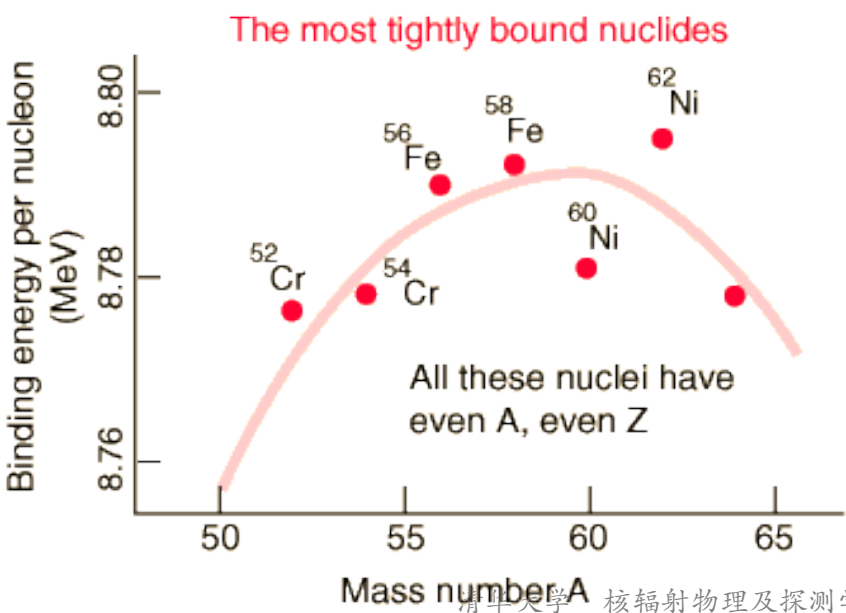
比结合能 ϵ 的物理意义：

- 把原子核拆成自由核子，平均对每个核子所做的功。
- ϵ 越大，原子核结合得越紧，稳定性好；
- ϵ 越小，原子核结合得越松，稳定性差。

核 素	结合能 <i>B</i> (MeV)	比结合能 <i>ε</i> (MeV)
² H	2.224	1.112
³ H	7.718	2.573
⁴ He	28.30	7.07
¹² C	92.16	7.68
¹⁶ O	127.61	7.98
⁵⁶ Fe	492.3	8.79
¹²⁹ Xe	1087.6	8.43
²⁰⁸ Pb	1636.4	7.87
²³⁸ U	1801.6	7.57

²H结合得最松散

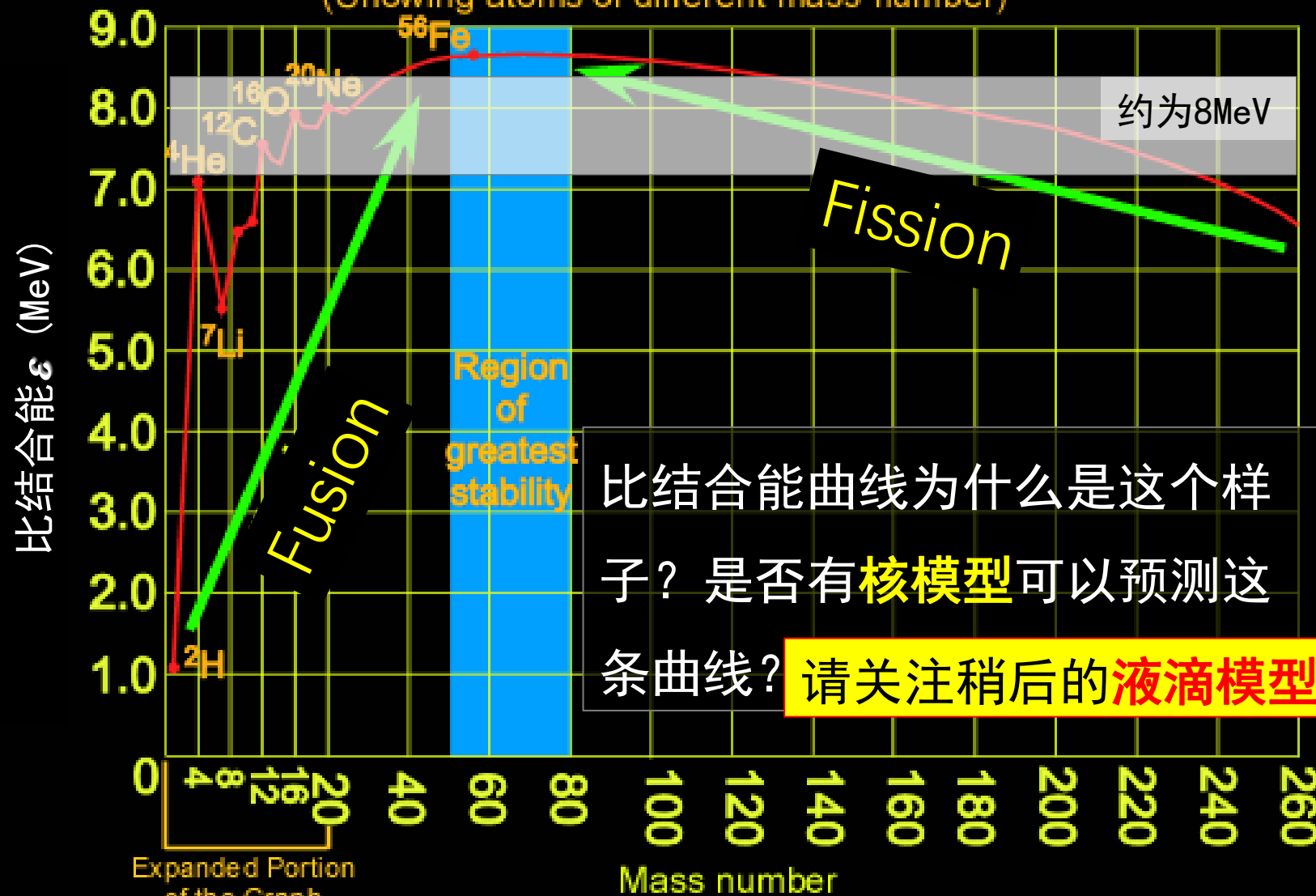
⁵⁶Fe结合得最紧密？



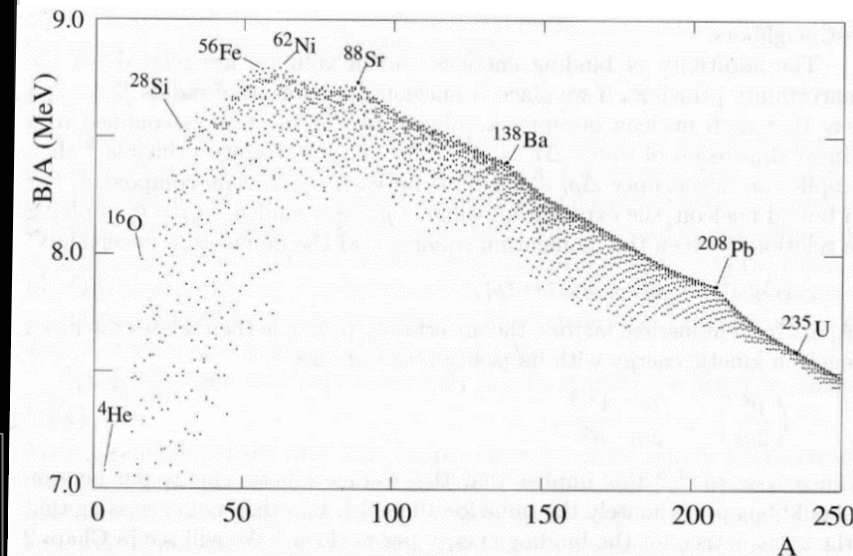
Nuclide	ϵ (keV)
⁶² Ni	8794.60 +/- 0.03
⁵⁸ Fe	8792.23 +/- 0.03
⁵⁶ Fe	8790.36 +/- 0.03
⁶⁰ Ni	8780.79 +/- 0.0

Average Binding Energy per Nucleon

(Showing atoms of different mass number)



其实不是“一根曲线”



一. 能量和质量的一般关系

二. 质量亏损

三. 原子核的结合能，比结合能

四. 原子核最后一个核子的结合能

五. 液滴模型，原子核结合能的半经验规律

一个自由核子与原子核的其余部分组成原子核时所释放出的能量。

对于某种核素：



，有两种情况：

(1)最后一个核子为**中子**：

$$S_n(Z, A)$$

$$= [M(Z, A-1) + m_n - M(Z, A)]c^2$$

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

由于

$$\Delta(n) = [Z \Delta(^1H) + (A-Z)\Delta(n)] - [Z \Delta(^1H) + (A-Z-1)\Delta(n)]$$

$$S_n(Z, A)$$

$$= B(Z, A) - B(Z, A-1)$$

(2)最后一个核子为**质子**：

$$S_p(Z, A)$$

$$= [M(Z-1, A-1) + M(^1H) - M(Z, A)]c^2$$

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

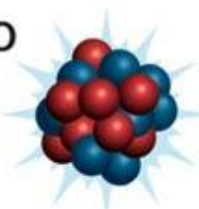
由于

$$\Delta(^1H) = [Z \Delta(^1H) + (A-Z)\Delta(n)] - [(Z-1) \Delta(^1H) + (A-Z)\Delta(n)]$$

$$S_p(Z, A)$$

$$= B(Z, A) - B(Z-1, A-1)$$

^{16}O ：有8个质子和8个中子 ^{16}O



最后一个**中子**的结合能：

$S_n(^{16}\text{O}) = B(8, 16) - B(8, 15) = \mathbf{15.66\text{ MeV}}$

最后一个**质子**的结合能：

$S_p(^{16}\text{O}) = B(8, 16) - B(7, 15) = \mathbf{12.12\text{ MeV}}$

均较大 ($>8\text{MeV}$)，说明 ^{16}O 比较稳定。

给 ^{16}O 增加一个**中子**， $^{16}\text{O} \rightarrow ^{17}\text{O}$ ，**中子**结合能：

$S_n(^{17}\text{O}) = B(8, 17) - B(8, 16) = \mathbf{4.15\text{ MeV}}$

给 ^{16}O 增加一个**质子**， $^{16}\text{O} \rightarrow ^{17}\text{F}$ ，**质子**结合能：

$S_p(^{17}\text{F}) = B(9, 17) - B(8, 16) = \mathbf{0.61\text{ MeV}}$

均较小 ($<8\text{MeV}$)， ^{17}O 和 ^{17}F 比较不稳定。

- 对**不同核素**，**最后一个核子**的**结合能**可能有**较大差别**。
- ^{16}O 的最后一个质子或中子都很难被剥夺，说明 ^{16}O 很稳定！
- 相邻的 ^{17}O (^{17}F)，则很容易被夺走一个中子(质子)，它们不大稳定。
- ^{16}O 之所以稳定，是因为其中子和质子数目都是8，是**幻数(magic numbers)**。

n	0	1	8.071	1/2 +	10.24 min(β^-)
H	1	1	7.289	1/2 +	99.985%
N	7	12	17.338	1 +	11.000 ms(ϵ)
		13	5.345	1/2 -	9.965 min(ϵ)
		14	2.863	1 +	99.634%
		15	0.101	1/2 -	0.366%
		16	5.684	2 -	7.13 s(β^-)
		17	7.870	1/2 -	4.173 s(β^-)
O	8	18	13.110	1 -	624 ms(β^-)
		14	8.007	0 +	70.641 s(ϵ)
		15	2.856	1/2 -	122.24 s(ϵ)
		16	-4.737	0 +	99.762%
		17	-0.809	5/2 +	0.038%
		18	-0.781	0 +	0.200%
F	9	19	3.335	5/2 +	26.88 s(β^-)
		20	3.797	0 +	13.51 s(β^-)
		17	1.952	5/2 +	64.49 s(ϵ)
		18	0.874	1 +	1.829 1 h(ϵ)
		19	-1.487	1/2 +	100%
		20	-0.017	2 +	11.07 s(β^-)
		21	-0.048	5/2 +	4.158 s(β^-)
		22	2.790	(4 +)	4.23 s(β^-)
		23	3.330	(3/2,5/2) +	2.23 s(β^-)

➤对于任何一个原子核，在由自由核子（中子、质子）结合成它的过程中都会有结合能，其大小就是质量亏损 $\times c^2$ 。

？比结合能反映了原子核的稳定性

- 核衰变：比结合能较小的核有可能衰变为比结合能较大的核。
- 核反应：由比结合能小的核构成比结合能大的核时，会放出能量，反之，就需要吸收能量。
- 虽然比结合能是平均到每个核子身上的结合能，但是核内各核子感受到的结合能并不均等。