

## 第三十章 核物理简介

- § 30.1 核的一般性质
- § 30.2 核自旋和核磁共振
- § 30.3 核力（强相互作用）
- § 30.4 核的结合能
- § 30.5 放射性和衰变定律
- § 30.6 穆斯堡尔效应
- § 30.7  $\alpha$  衰变
- § 30.8  $\beta$  衰变
- \* § 30.9 核反应

## ◆ 前言

1897年 **J.J.Thomson** 发现**电子**  
 1911年 **卢瑟福** (**Ernest Rutherford**),  
**Hans Geiger, Ernest Marsden**  
 - **原子的核式结构** (太阳系模型)  
 1932年 **J.Chadwick** 发现**中子**

氢核就是**质子**

**质子和中子称为核子 (nucleon)**

**原子核 (nucleus)** 是由核子组成

2

## § 30.1 核的一般性质

表 5.1 质子、中子和电子的内禀性质比较

内禀性质	质 子	中 子	电 子
质量 /u	1.007 276 466 0	1.008 664 923 5	$5.485\,799\,03 \times 10^{-4}$
质量 /kg	$1.672\,623\,1 \times 10^{-27}$	$1.674\,928\,6 \times 10^{-27}$	$9.109\,389\,7 \times 10^{-31}$
质量 /MeV $\cdot c^{-2}$	938.272 31	939.565 63	0.511 0
电荷 /e	+1	0	-1
自旋量子数	1/2	1/2	1/2
磁矩①/J $\cdot T^{-1}$	$1.410\,607\,61 \times 10^{-26}$	$-0.966\,236\,69 \times 10^{-26}$	$-9.284\,770\,1 \times 10^{-24}$

原子质量单位  $1u = {}^{12}\text{C}$  质量的1/12

$$A = Z + N$$

质量数                      中子数  
                                    质子数或原子序数

3

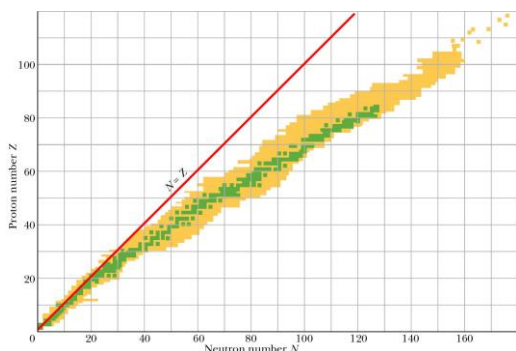
${}^A_Z\text{X}$  或  ${}^A\text{X}$

同位素, 如:  ${}^8\text{C}$ , ...,  ${}^{12}\text{C}$ ,  ${}^{13}\text{C}$ ,  ${}^{14}\text{C}$ , ...,  ${}^{20}\text{C}$   
 98.90%      1.10%       $1.3 \times 10^{-10}\%$

天然丰度: 天然存在的各元素中各种同位素所占比例

有些同位素不稳定, 或长或短的时间内, 衰变成其它核, 所以这些核只能在实验室制造出来。

4



核素图, 绿色部分稳定核素, 黄色部分放射性核素

- 多数核基态是球形, 少部分是椭球形, 极个别的有其它形状
- 球形核的半径通常是  $R = r_0 A^{1/3}$ , 其中  $r_0 = 1.2\text{fm} = 1.2 \times 10^{-15}\text{m}$
- 核密度  $\rho = m/V = (m_{\text{核子}} A) / (4\pi/3 r_0^3 A) = 3m_{\text{核子}} / (4\pi r_0^3)$

与具体的核无关

- 原子核有自旋, 它是质子和中子的轨道角动量, 以及它们的自旋角动量的和
- 对应于核自旋, 有核磁矩

$$\vec{\mu} = g \frac{e}{2m_p} \vec{I}$$

6

### § 30.2 核自旋和核磁共振 (NMR)

$$\vec{\mu} = g \frac{e}{2m_p} \vec{I} \Rightarrow \mu_z = g \frac{e}{2m_p} I_z$$

$$\text{质子 中子 } \mu_z = g \frac{e\hbar}{2m_p} s_z \quad s_z = \pm \frac{1}{2}$$

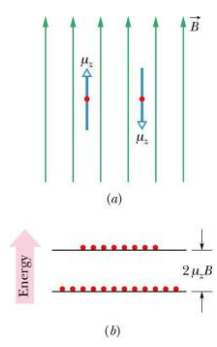
$$g_{s,p} = 5.5857 \quad g_{s,n} = -3.8261 \quad \mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} \quad \text{核磁子}$$

自旋只取向上或向下两个值，磁矩也只有两个值

$$\text{磁矩在磁场中能量} \quad E = -\vec{\mu} \cdot \vec{B}$$

质子磁矩在磁场中有两个能级，如下图

7



如果电磁波频率合适

$$h\nu = 2\mu_z B$$

共振吸收，称为**磁共振**

若  $B = 1.8\text{T}$ ,  
 $\mu_{p,z} = 1.41 \times 10^{-26} \text{J/T}$   
 则  $\lambda = 3.92\text{m}$

8

通常这个磁场除了外场，还包含小的、内部分子或原子磁矩等产生的局域磁场

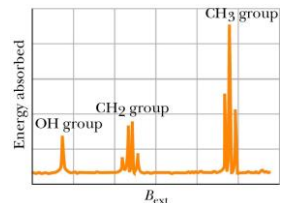
$$h\nu = 2\mu_z (B_{\text{ext}} + B_{\text{local}})$$

通常固定电磁波频率，改变外磁场，磁共振发生时，观察吸收峰，叫**核磁共振谱**

9

不同物体中，**氢核（质子）**所处环境不同，内磁场也就不同，对于外磁场的磁共振峰的位置也不同，如乙醇中各个质子的磁共振峰不同，但合起来构成乙醇独有的特性

$\text{CH}_3\text{-CH}_2\text{-OH}$  乙醇



### 核磁共振成像

人体内到处是水，其中质子（氢核）在不同部位所处内磁场环境不同，所以不同部位有不同的磁共振谱，把这些特性与X射线拍摄的像合在一起，就构成**核磁共振图像**

病变部位磁共振谱与原来正常情况下的不同，我们根据临床经验（数据库），可以判断哪些部位可能发生病变。

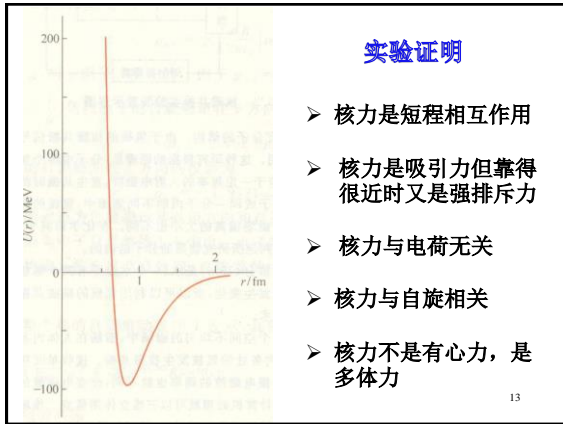
11

### § 30.3 核力（强相互作用）

• **核力是属于强相互作用**（四种基本相互作用之一，其中电磁力和弱相互作用已经统一），相距  $2\text{fm}$  两个质子其库仑力  $\sim 60\text{N}$ ，而相互吸引的核力  $\sim 2000\text{N}$

• 核力没有简单表达式，表现形式也是非常复杂，这暗示核子内部有结构。

12



**§ 30.4 核的结合能**

核的结合能  ${}^A_ZX$

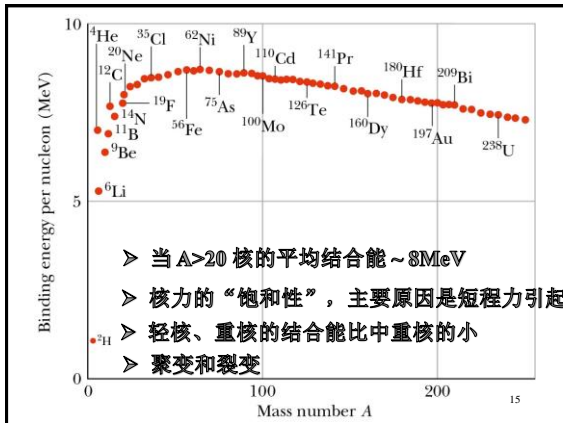
$$E_{bd} = (Zm_p + Nm_n - M_N)c^2 = \Delta mc^2$$

$$= (Zm_H + Nm_n - M_a)c^2$$

$\Delta m$  质量亏损

平均结合能  $E_{bd}/A$       结合能越大越稳定

14



**§ 30.5 放射性和衰变定律**

母核  ${}^{226}\text{Ra} \rightarrow {}^{222}\text{Rn} + \alpha$       子核  ${}^{222}\text{Rn}$

母核  ${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{234}\text{Th} + \alpha$       子核  ${}^{234}\text{Th}$

母核  ${}^{131}\text{I} \rightarrow {}^{131}\text{Xe} + \beta + \bar{\nu}_e$

母核  ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + \beta + \bar{\nu}_e$

• 衰变速率满足统计规律

设有  $N$  个放射性核，则

$$dN = -\lambda N dt$$

$\lambda$  衰变常量

图 5.6 钍系衰变图

16

$N = N_0 e^{-\lambda t}$       平均寿命  $\tau = \frac{1}{\lambda}$

**半衰期**      一半核衰变需要的时间

$$N_0/2 = N_0 e^{-\lambda t_{1/2}} \rightarrow t_{1/2} = (\ln 2)/\lambda = 0.693/\lambda$$

**表 5.2 半衰期实例**

核	$t_{1/2}$	核	$t_{1/2}$	核	$t_{1/2}$
${}^{216}\text{Ra}$	0.18 $\mu\text{s}$	${}^{131}\text{I}$	8.04 d	${}^{237}\text{Np}$	$2.14 \times 10^6$ a
${}^{207}\text{Ra}$	1.3 s	${}^{60}\text{Co}$	5.272 a	${}^{235}\text{U}$	$7.04 \times 10^8$ a
自由中子	12 min	${}^{226}\text{Ra}$	1 600 a	${}^{238}\text{U}$	$4.46 \times 10^9$ a
${}^{191}\text{Au}$	3.18 h	${}^{14}\text{C}$	5 730 a	${}^{232}\text{Th}$	$1.4 \times 10^{10}$ a

17

例

${}^{238}\text{U} \rightarrow {}^{234}\text{Th} + \alpha$        ${}^{234}\text{Th} \rightarrow {}^{234}\text{Pa} + \beta + \bar{\nu}_e$

母核      子核      镤

$$\frac{dN_p}{dt} = -\lambda_p N_p$$

$$\frac{dN_D}{dt} = -\frac{dN_p}{dt} - \lambda_D N_D$$

$$N_D = \frac{N_0 \lambda_p}{\lambda_D - \lambda_p} (e^{-\lambda_p t} - e^{-\lambda_D t})$$

当  $t_{1/2,p} \gg t_{1/2,D}$       在时间段  $t_{1/2,p} \gg t \gg t_{1/2,D}$

$$N_D \approx \frac{N_0 \lambda_p}{\lambda_D}$$

18

## 活度 $A$

单位时间（1秒）内发生衰变的放射性原子核数目称为该物质的**放射性活度**，以  $A$  表示。

$$A(t) = -\frac{dN}{dt} \quad N = N_0 e^{-\lambda t}$$

$$A(t) = \lambda N_0 e^{-\lambda t} = \lambda N$$

初始时刻的活度  $A_0$  最大。

$$\text{初始活度} \quad A_0 = \lambda N_0$$

$$A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

19

活度的国际单位是贝可  $Bq$ 。

$$1Bq = 1/s$$

活度的常用单位是**居里**。

$$1\text{居里 (Ci)} = 3.7 \times 10^{10} \text{次核衰变/秒}$$

$$1Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$$

常用的还有 毫居 ( $mCi$ )

微居 ( $\mu Ci$ )



居里

20

## 年代测定

例如， $^{12}C$  稳定核素， $^{14}C$  放射性核素，**放射性 $^{14}C$** 的比例是很小的，约为  $1.3 \times 10^{-12}$ 。大气中自然丰度恒定，生物活着时，两种核素的含量与大气相同，死后新陈代谢停止， $^{12}C$  含量不变，但  $^{14}C$  由于衰变含量减少。

$$\text{设大气含量} \quad \frac{N_{14}}{N_{12}} = C$$

$$\text{化石中含量} \quad \frac{N'_{14}}{N'_{12}} = C' = \frac{N_{14} e^{-\lambda t}}{N_{12}} = C e^{-\lambda t}$$

$$\text{化石年代} \quad t = \frac{\ln(C/C')}{\lambda} = \frac{\ln(C/C')}{\ln 2} t_{1/2}$$

21

例. 河北省发现有古时的栗子。样品中，1克碳的活度测定为  $2.8 \times 10^{12} Ci$ 。求这些栗子的年龄。

【解】1克新鲜碳中的**放射性 $^{14}C$** 原子核数目为

$$N_0 = 6.023 \times 10^{23} \times \frac{1}{12} \times 1.3 \times 10^{-12} = 6.5 \times 10^{10}$$

这些栗子样品活着的时候，初始活度是

$$\begin{aligned} A_0 &= \lambda N_0 = \frac{0.693}{t_{1/2}} N_0 \\ &= 0.693 \times \frac{1}{5730 \times 365 \times 24 \times 3600} \times 6.5 \times 10^{10} \\ &= 0.25 \text{次/秒} = 6.8 \times 10^{-12} Ci \end{aligned}$$

22

$$\therefore A(t) = A_0 e^{-\lambda t}$$

$$\therefore t = -\frac{1}{\lambda} \ln \frac{A(t)}{A_0}$$

$$= \frac{t_{1/2}}{0.693} \ln \frac{A_0}{A(t)}$$

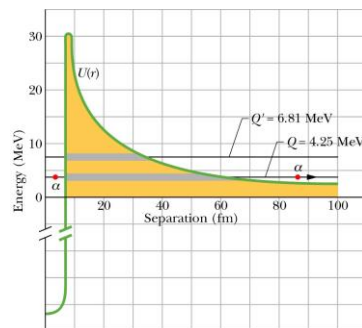
$$= \frac{5730}{0.693} \ln \frac{6.8 \times 10^{-12}}{2.8 \times 10^{-12}} = 7300 a$$

原子核放射性应用的其他例子:

- ◆ 利用  $\alpha$ 、 $\beta$  射线对空气的电离作用来**消除有害的静电积累**。（造纸、纺织、胶片等）
- ◆ 对植物种子辐照可以**改良品种**

23

## § 30.6 $\alpha$ 衰变



重核内核子有时结合成团簇，如形成  $\alpha$  粒子，经过**势垒贯穿**这个量子力学效应，跑到核外，这就是  $\alpha$  衰变。

24

•  $\alpha$ 衰变常常伴随  $\gamma$  衰变，原因是子核处于激发态

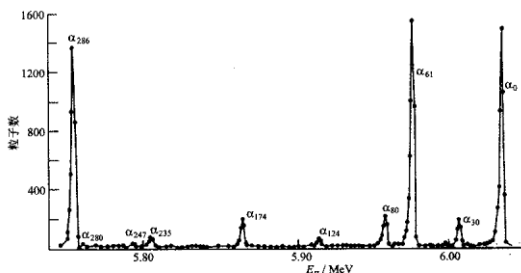


图 5.9  $^{227}\text{Th}$  核的  $\alpha$  能谱的一部分

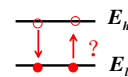
25

### § 30.7 穆斯堡尔效应

光子能量  $h\nu = E_h - E_l$

相同原子发生共振吸收?

发射和吸收都有原子反冲



26

反冲  $h\nu$

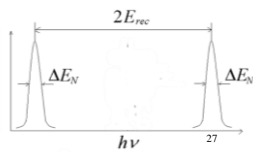
$$0 = p_{rec} + \frac{h}{\lambda_{emi}} = p_{rec} + \frac{h\nu_{emi}}{c} \quad \text{动量守恒}$$

$$h\nu_{emi} + E_{rec} = E_h - E_l \quad \text{能量守恒}$$

$$E_{rec} = \frac{p_{rec}^2}{2m} = \frac{(h\nu_{emi})^2}{2mc^2}$$

$$h\nu_{abs} - E_{rec} = E_h - E_l$$

$$h\nu_{abs} - h\nu_{emi} = 2E_{rec}$$



27

$$h\nu_{abs} - h\nu_{emi} = 2E_{rec}$$

对于原子  $m \sim 10u$   $h\nu \sim 1\text{eV}$   $E_{rec} = \frac{(h\nu)^2}{2mc^2} \sim 5.0 \times 10^{-11}\text{eV}$

原子能级有自然宽度

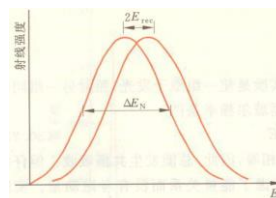
$$\Delta E_N \sim \hbar / \tau$$

原子能级寿命

$$\tau \sim 1.0 \times 10^{-8}\text{s}$$

$$\Delta E_N \sim 6.0 \times 10^{-8}\text{eV}$$

原子反冲可以忽略，  
即总会有共振吸收



28

$$h\nu_{abs} - h\nu_{emi} = 2E_{rec}$$

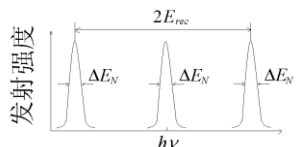
$$E_{rec} = \frac{(h\nu)^2}{2mc^2}$$

对于核能级  $\tau \sim 1.0 \times 10^{-10}\text{s}$   $\Delta E_N \sim 1.0 \times 10^{-6}\text{eV}$

发射  $\gamma$  射线  $h\nu \sim 1\text{MeV}$   $E_{rec} = \frac{(h\nu)^2}{2mc^2} \sim 10\text{eV}$

$$E_{rec} \gg \Delta E_N$$

对于核发射  $\gamma$  射线，  
通常不会有共振吸收



光子的发射和吸收能量分布

29

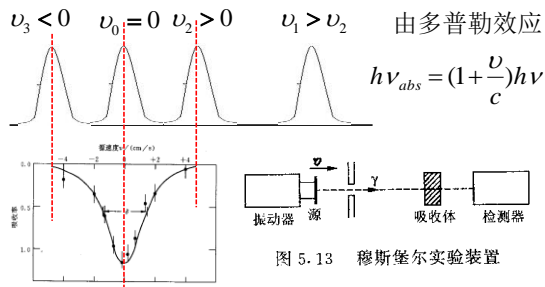
### 穆斯堡尔效应

穆斯堡尔（1958研究生）： $\gamma$ 共振吸收方法

把源和吸收体（放射性核）嵌在晶体中，由于核反冲由整个晶体承受，基本可以忽略，这种无反冲的共振吸收就叫**穆斯堡尔效应**（低温下效果更好）。

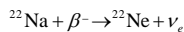
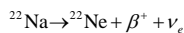
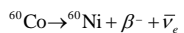
30

## γ射线的谱线宽度的精确测量

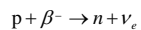
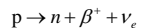
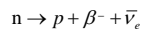


吸收体和源有相同的自然宽度  $\delta = 2\Delta E_N$  31

## §30.8 β衰变



β衰变的本质（费米）



自由质子稳定，  
自由中子  
 $t_{1/2} \sim 12\text{min}$ ，但  
在核内部由于  
弱相互作用，  
核子经常衰变

电子捕获 EC

32

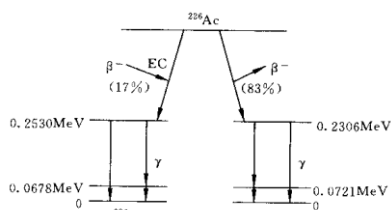
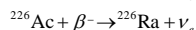
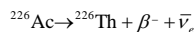


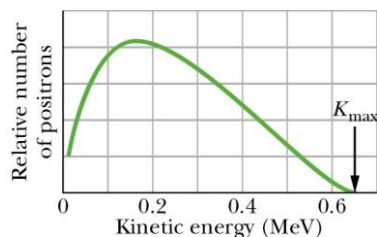
图 5.17  $^{226}\text{Ac}$  的衰变方式



EC: 核  
内质子俘  
获核外电  
子，衰变  
为中子和  
中微子

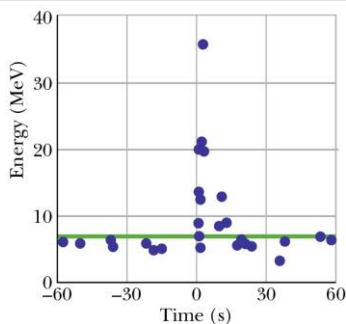
33

## 中微子的提出

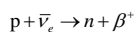


固定核β衰变的能量一定，部分属于电子，另一部分属于中微子，比例有一定分布

34



## 中微子探测



来自 SN 1987A 超新星中微子爆发，在日本废弃深矿井探测到，这个超新星对着南半球

35

The Nature is so exciting!



第三十章结束

36