

第六篇 量子物理

第17章 原子核物理简介

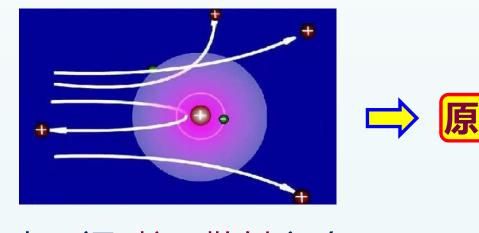
尹航

华中科技大学 物理学院

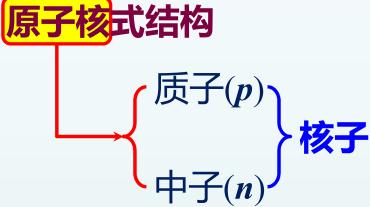
2 原子核的放射性衰变

核反应与核能的利用

口 原子核的组成



卢瑟福α粒子散射实验



1932年查德威克发现中子

获1935年诺贝尔物理学奖。

ロ 原子核的电荷和质量

原子核带电量为+Ze, Z 为核内质子数, 也称为原子核的电荷数, 或元素的原子序数。

 $A \times Z \longrightarrow \begin{cases} X : 元素符号。 \\ Z : 核电荷数 (核内质子数) & 中子数 \\ A : 核素的质量数 (核子数) & A = Z + N \end{cases}$

质子质量: $m_{\rm p} = 1.6726231 \times 10^{-27} \text{kg}$ 中子质量: $m_{\rm n} = 1.6749286 \times 10^{-27} \text{kg}$

碳同位素¹²C 的质量为12u

1u = 1.660566×10⁻²⁷kg 原子质量单位

原子核的形状和大小

实验表明: 原子核的电荷与质量近似球对称分布。

原子核的平均半径:
$$r = r_0 A^{\frac{1}{3}}$$
 量级: 10^{-15} 米 核半径参量: $r_0 \approx 1.2 \times 10^{-15}$ m

在一切原子核中, r 近乎相同

核的质量密度:
$$\rho = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{Am_p}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} = \frac{3m_p}{4\pi r_0^3} = 2.29 \times 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

实验表明:原子核的电荷与质量近似球对称分布。

在一切原子核中, r 近乎相同

核的质量密度:
$$\rho = \frac{m}{\frac{4}{3}\pi r^3} = \frac{Am_p}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} = \frac{3m_p}{4\pi r_0^3} = 2.29 \times 10^{17} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

说明:无论原子核中核子数目有多少,每一个核子在核内几乎都占有相同大小的体积。由此也证实了核力是短程力,具有饱和性。

口 原子核的自旋与磁矩

质子和中子都有自旋角动量与轨道角动量,其矢量和称总

角动量,也称之为核自旋。自旋量子数均为1/2。

核自旋: $P_J = \sqrt{J(J+1)}\hbar$ J为原子核的自旋量子数

核磁矩: $\mu_J = g_N \frac{e}{2m_p} P_J$ g_N 为实验测定的朗德因子

核磁子: $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_P}$ 描述核磁矩的一个新单位。

原子核的自旋对原子能级的影 对比波尔磁子: $\mu_{\rm B}=1836\mu_{\rm N}$

响较小。利用原子光谱的超精 细结构,可以分析测定核自旋。

□ 核力(强力)

核子之间的相互作用力。

核力的特征:

- ① 核力是比电磁力强得多的强相互作用力,主要是吸引力。
- ② 核力是短程力,核子间距离小于10-15 m时才明显。
- ③ 核力与核子带电状况无关。
- ④ 核力具有<mark>饱和性</mark> 核子只与相互邻近的数目有限的 几个核子之间存在着核力的作用
- ⑤ 核力的本质:核子之间交换π介子的交换力。

□ 原子核的结合能(核聚变的理论基础)

原子核的质量总是小于组成该原子核的核子的质量之和, 它们之间的差额称为原子核的质量亏损。

$$\Delta m = [Zm_p + (A - Z)m_n] - M_x$$
 →原子核的质量

核子在结合成原子核时,它们之间的核力作用使体系能量降低,从而释放出能量,相应质量减少了。

结合能: 由质子和中子形成原子核时所放出的能量。

$$\Delta E = \Delta mc^2$$

平均结合能: $\bar{E}_0 = \frac{\Delta E}{\Delta}$ 平均结合能越大,原子核越稳定。

2 原子核的放射性衰变

核反应与核能的利用

口 天然放射性

元素从不稳定的原子核自发地放出射线,从而衰变形成稳定元素的特性。

过 桯 **→ 放射性衰变**

1896年法国贝克勒尔发现铀盐放射性 居里夫妇──镭、钋

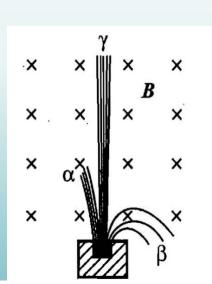
天然放射性元素的衰变方式有下列三种:

 α 衰变——从核中放出 α 粒子的过程,带正电的氦核;

*β*衰变——核中放出**电子**的过程;

/衰变——从核中放出**光子**的过程,

 α 衰变或 β 衰变后形成新核时辐射出来的。



放射性衰变过程遵守电荷守恒、质量数守恒、能量守恒、

动量守恒、角动量守恒。

$$\alpha$$
衰变 ${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A-4}_{Z-2}Y + {}^{4}_{2}He$

$$\beta$$
衰变 ${}^{A}_{Z}X \rightarrow {}^{A}_{Z+1}Y + {}^{0}_{-1}e$

核衰变过程中的位移定则

14C年代测定法

$${}^{14}_{7}N + {}^{1}_{0}n \rightarrow {}^{14}_{6}C + {}^{1}_{1}H$$

$$\stackrel{14}{\sim} C \longrightarrow {}^{14}_{7}N + {}^{0}_{-1}e$$



微拉得 利比 (1908-1980)

1960年诺贝尔化学奖

14C年代测定法

地质、考古、地球物理

千万年以来,地球大气中的¹⁴C

已达到了恒定的丰度,约为

1.3×10⁻¹⁰%, 即1.3×10⁻¹²。

14C是放射性同位素,半衰期约为5730年。

口 放射性衰变规律

t 时刻样品中有N个核,在dt时间内有dN个发生衰变

$$-dN = \lambda N dt \qquad \qquad \vec{x} \qquad \frac{dN}{N} = -\lambda dt$$

λ: 衰变常数 表征衰变快慢

$$t=0$$
时, $N=N_0$
$$N=N_0$$
 放射性衰变定律

半衰期t: 原子核衰变到 $N = N_0/2$ 所需的时间。

$$\frac{1}{2}N_0 = N_0 e^{-\lambda \tau} \longrightarrow \tau = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

• 放射性活度(放射性强度)

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

一个放射源在单位时间内发生的核衰变次数。

$$\tau = \frac{\ln 2}{\lambda} = \frac{0.693}{\lambda}$$

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

$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \times 2^{-t/\tau}$$
 国际单位: 贝克勒尔(Bq)

1Bq表示每秒发生一次核衰变的放射源的活度。

常用单位: 居里(Ci) $1Ci = 3.7 \times 10^{10} Bq$

例. ²²⁶₈₈Ra的半衰期为1600年, 10g纯的²²⁶₈₈Ra活度是多少? 这一

样品经过400年和6000年时的活度又分别是多少?

解:
$$10g$$
纯 $^{226}_{88}$ Ra的原子核数为: $N_0 = \frac{10 \times 6.023 \times 10^{23}}{226} = 2.66 \times 10^{22}$

镭的衰变常量为:
$$\lambda = \frac{0.693}{\tau} = \frac{0.693}{1600 \times 3.1536 \times 10^7} = 1.37 \times 10^{-11} \text{ s}^{-1}$$

起始活度为:
$$A_0 = \lambda N_0 = 3.65 \times 10^{11} \text{ Bq} \approx 10 \text{ (Ci)}$$

由活度衰减公式:
$$A = A_0 e^{-\lambda t} = A_0 \times 2^{-t/\tau}$$

$$A_{400} = 3.07 \times 10^{11} \text{ (Bq)} = 8.3 \text{ (Ci)}$$

$$A_{6000} = 2.71 \times 10^{10} \text{ (Bq)} = 0.73 \text{ (Ci)}$$

例. 2003年河北省某地考古遗迹中发现有古时的栗。一些这种栗的样品中含有1g碳,它的活度经测定为2.8×10⁻¹²Ci,求这些栗的年龄?

解: 1g新鲜碳中的14C的核数:

$$N_0 = \frac{6.023 \times 10^{23}}{12} \times 1.3 \times 10^{-12} = 6.5 \times 10^{10}$$
 14C 的半衰期为: 5730 a 大气中 14C 的丰度

粟样品新鲜的时候,活度为: $A_0 = \lambda N_0 = \frac{0.693}{\tau} N_0 = 0.25 \text{ Bq}$ 由活度衰减公式: $A = A_0 e^{-\lambda t}$ = 6.8×10⁻¹² Ci

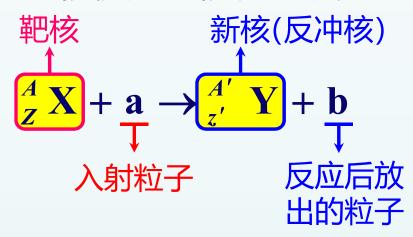
$$t = \frac{\tau}{0.693} \ln \frac{A_0}{A} = \frac{5730}{0.693} \ln \frac{6.8 \times 10^{-12}}{2.8 \times 10^{-12}} = 7300 \text{ a}$$

2 原子核的放射性衰变

3 核反应与核能的利用

口 核反应

用高能粒子轰击原子核使原子核发生改变的过程叫做核反应。



卢瑟福第一次人工核嬗变

$${}_{2}^{4}\text{He} + {}_{7}^{14}\text{N} \rightarrow {}_{8}^{17}\text{O} + {}_{1}^{1}\text{p} - 1.19\text{MeV}$$

查德威克首次发现中子

$${}_{2}^{4}\text{He} + {}_{4}^{9}\text{Be} \rightarrow {}_{6}^{12}\text{C} + {}_{0}^{1}\text{n} + 5.7\text{MeV}$$

卢瑟福第一次人工核嬗变 ${}^{4}_{2}\text{He} + {}^{14}_{7}\text{N} \rightarrow {}^{17}_{8}\text{O} + {}^{1}_{1}\text{p} - 1.19\text{MeV}$

查德威克首次发现中子 ${}^{4}_{2}He + {}^{9}_{4}Be \rightarrow {}^{12}_{6}C + {}^{1}_{0}n + 5.7MeV$

第一次用加速粒子引发的核反应 ${}^{1}_{1}p + {}^{7}_{3}Li \rightarrow ({}^{8}_{4}B) \rightarrow 2^{4}He + 8.03MeV$

首次发现正电子的核反应 ${}^{10}_{5}$ B $+{}^{4}_{2}$ He $\rightarrow {}^{13}_{7}$ N $+{}^{1}_{0}$ n $\rightarrow {}^{13}_{6}$ C $+{}^{0}_{+1}$ e $+{}^{1}_{0}$ n

一种可能的铀核裂变反应 $^{235}_{92}$ U + $^{1}_{0}$ n \rightarrow $^{144}_{56}$ Ba + $^{89}_{36}$ Kr + $^{21}_{0}$ n + 200MeV

氢弹爆炸的热核反应 ${}^{2}_{1}H + {}^{3}_{1}H \rightarrow {}^{4}_{2}He + {}^{1}_{0}n + 17.6MeV$

例. 太阳内含有1.5×10³⁰ kg的氢, 其辐射总功率为3.9×10²⁶W, 若此功率不变, 经多长时间太阳内的氢就要烧光了?

太阳中的热核反应: $4_1^1 \text{H} \rightarrow {}_2^4 \text{He} + 2_1^0 \text{e} + 2\nu_e + 2\gamma + 24.67 \text{MeV}$

解:太阳燃烧能辐射的总能量:

$$W = \frac{1}{4} \left(\frac{1.5 \times 10^{30}}{1 \times 10^{-3}} \times 6.02 \times 10^{23} \right) \times 24.67 \times 10^{6} \times 1.6 \times 10^{-19}$$

$$W = 8.91 \times 10^{44} \text{ (J)}$$

按现在的功率辐射, 太阳还能燃烧的时间是

$$t = \frac{W}{P} = \frac{2.23 \times 10^{44}}{3.9 \times 10^{26}} = 5.72 \times 10^{17} \text{ (s)} = 7.25 \times 10^{10} \text{ a}$$

口 核能的开发与利用

把**重核分裂**成两个中等质量的原子核,或把**轻核聚合**成较重的中等质量的原子核,都会放出大量能量。

天然放射性元素就在自发地进行重核分裂,但这种过程难以控

制且功率太低, 故无法加以大量利用。

1938年发现用中子轰击铀235等几种重核时的分裂现象后,利用重核裂变释放原子核能才成为可能。

 $_{92}^{235}$ U+ $_{0}^{1}$ n \rightarrow_{54}^{139} Xe+ $_{38}^{95}$ Sr+ $_{0}^{1}$ n (铀裂变方式之一)

轻核聚变

高温下, 轻核聚合而放出大量原子核能的反应。

$$\frac{{}_{1}^{2}\mathbf{H}+{}_{1}^{3}\mathbf{H}}{\downarrow} \longrightarrow {}_{2}^{4}\mathbf{He}+{}_{0}^{1}\mathbf{n}$$

在人工控制下进行的热核反 应叫受控热核反应,能够根 据需要控制热核反应的速度, 使之缓慢而均匀地进行。

氚



2021年12月30日,中科院合肥物质科学研究院等离子体物理研究所,"人造太阳"维持1056秒。