

原子核物理

作者：刘鑫

目录

1	绪论	1
1.1	物理的发展	1
1.2	近现代物理的研究方向	1
1.3	核科学的发展	1
2	原子核的组成	3
2.1	历程	3
2.2	质子和中子的性质对比	3
2.3	亚核子自由度	4
2.4	夸克	4
2.5	夸克禁闭	5
2.6	轻子	5
3	原子核的静态性质	6
3.1	原子核的电荷	6
3.2	原子核的质量	6
3.3	原子核的半径	7
3.4	原子核的自旋	7
3.5	原子核的磁矩	8
3.6	原子核的电四极矩	8
3.7	原子核的宇称	9
3.8	原子核的统计性质	9
3.9	原子核的同位旋	9
4	原子核的结合能与液滴模型	10
4.1	原子核的结合能	10
4.2	液滴模型	11

第一章 绪论

1.1 物理的发展

经典物理 19 世纪末之前

近现代物理 19 世纪末 20 世纪初 ~ 现在

1.2 近现代物理的研究方向

1. 宇观。星球 \rightarrow 星系 \rightarrow 宇宙
2. 微观。原子物理与粒子物理。
3. 各个层次之间的联系。大的物质由小的物质组成，小物质之间的联系、大物质与小物质之间的联系就是研究的方向。

1.3 核科学的发展

1. 1895 年，伦琴发现 X 射线，核科学的开端。（原理是核外电子在不同轨道之间跃迁，会释放出能量，这就是 X 射线）
2. 1896 年，贝克勒尔发现了铀的天然放射性。（铀盐无论是否在太阳下曝晒，都能使胶片感光）
3. 1897 年，汤姆逊发现电子。（做实验过程中发现有一种粒子在磁场中发生偏转，偏转的方向标明带负电）
4. 1898 年，居里夫妇分离出放射性的钋和镭。（在贝克勒尔的基础上，发现铀矿石的放射性比铀盐中的放射性强度要强，然后分离出钋和镭）
5. 1898 年，卢瑟福发现 α 、 β 射线。
6. 1900 年，维拉德发现 γ 射线。
7. 1905 年，爱因斯坦提出相对论。
8. 1909 年，卢瑟福验证了 α 粒子就是氦原子核。（ α 粒子打到玻璃管上，隔一段时间去检测，出现了氦，先猜测 α 粒子是氦原子核，从玻璃管上拿到电子，形成氦原子，后又验证了）
9. 1911 年，卢瑟福用 α 粒子轰击金箔发现了原子核。（八千分之一的概率弹回来）
10. 1914 年，莫塞莱用 X 射线测定原子核的电荷。
11. 1919 年，卢瑟福首次实现人工核反应，发现质子。（用 α 粒子打 ^{14}N ，打出了一种粒子，命名为质子）
12. 1932 年，查德威克发现中子。
13. 1938 年，Hahn 和 strassman 发现重核裂变。
14. 1939 年，建立了裂变的液滴模型。
15. 1942 年，费米等实现受控的链式核反应。
16. 1945 年，第一颗原子弹爆炸。

高自旋的研究: 给原子核一个能量, 让其从基态到高自旋态, 会展示出什么新的特征。(形状、属性...)
不可控核聚变是氢弹。

第二章 原子核的组成

2.1 历程

1. 电子的发现
2. 原子核的发现 → 卢瑟福用 α 轰击金箔，有八千分之一的几率被反射。⇒ 正电荷和原子质量集中在原子中心。
3. 质子的发现 → 用 α 粒子轰击 ^{14}N ，发现了质子。($\alpha + {}^{14}_7\text{N} \Rightarrow {}^{17}_8\text{O} + p$)
4. 早期原子核组成的想法及其碰到的困难
5. 中子的发现 $\alpha + {}^9\text{Be} \Rightarrow {}^{12}\text{C} + n$ ，用 n 再打石蜡能出来质子，根据打出质子的能量，推测出不是射线，是中子（质量跟质子差不多）（不带电粒子的发现比较困难，因为电磁学知识已经完备，探测带电粒子比较简单）【中子穿透性强，寿命短 14.81min，可以用来做中子弹】

原子核的符号表示： ${}_Z^AX_N$ ， Z 是质子数， A 是核子数， N 为中子数

2.2 质子和中子的性质对比

1. 中子比质子质量大一点点 $938\text{MeV}/c^2$ $939\text{MeV}/c^2$
2. 统计性规律都是费米子
3. 质子寿命非常长， 10^{31}year ，中子很短，14.81min。
4. 随之探测技术发展，中子带一点点负电 $(-0.4 \pm 1.1) \times 10^{-23}e$ （质子带 $1 \pm 10^{-21}e$ ，中子带电比质子小两个数量级），可以认为不带电。

性质	质子	中子
质量 m	$938.27231(28)\text{MeV}/c^2$	$939.56563(28)\text{MeV}/c^2$
自旋 s	$\hbar/2$	$\hbar/2$
统计性	F-D统计	F-D统计
同位旋 (t, t_z)	$(1/2, 1/2)$	$(1/2, -1/2)$
平均寿命 τ	$>10^{31} \text{ a}$	$888.6 \pm 3.5 \text{ s} (\approx 14.81\text{min})$
电荷 Q	$1 \pm 10^{-21} e$	$(-0.4 \pm 1.1) \times 10^{-23} e$
电荷方均半径 ¹⁾ $\langle r_e^2 \rangle$	$0.648(18) \text{ fm}^2$	$-0.130(11) \text{ fm}^2$
磁矩 μ	$2.792847386(63) \mu_N$	$-1.91304275(45) \mu_N$
磁矩的方均根半径 $\langle r_m^2 \rangle^{1/2}$	$0.80 \pm 0.03 \text{ fm}$	$0.79 \pm 0.15 \text{ fm}$

图 2.1: 质子与中子的对比。

2.3 亚核子自由度

实验猜想原子核内部质子中子是怎么分布的：参考卢瑟福 α 散射实验，使用小的 α 粒子打大的金箔，根据 α 粒子的散射情况，猜测原子的结构；这里使用电子打原子核，根据电子的散射情况，猜测原子核的结构。（这种实验方法叫电子散射）

如图 2.2 所示，横坐标可以理解为距离质子/中子中心的距离，纵坐标表示电荷量。通过这个图，可以猜测出质子/中子并不是最小微粒，因为电荷分布不均匀。

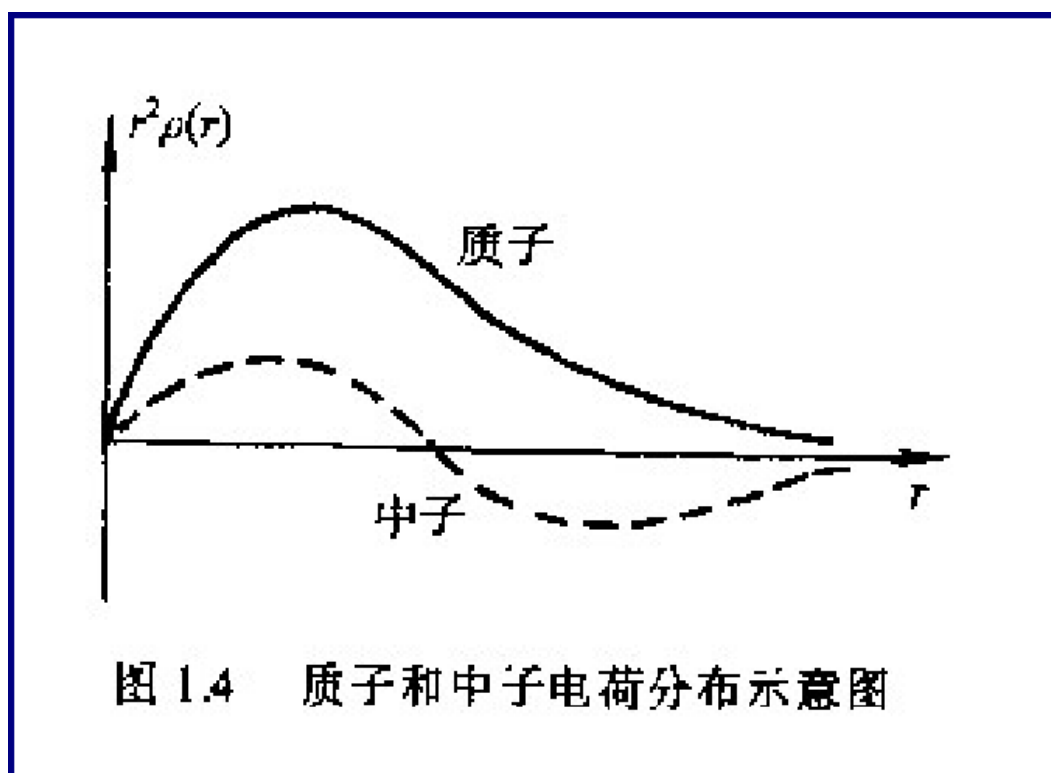


图 2.2: 质子和中子电荷分布示意图。

电子散射：用电子轰击原子核，来推测原子核内部结构。

质子和中子电荷分布示意图：表明质子和中子并不是最微观的粒子。

2.4 夸克

质子和中子由夸克组成，总共有 6 种夸克：上夸克 (up)、下夸克 (down)、顶夸克 (top)、底夸克 (bottom)、粲夸克 (charm)、奇异夸克 (strange)。其中 up/top/charm 带三分之二的正电荷，down/bottom/strange 带三分之一的负电荷。

质子和中子是费米子，夸克也是费米子，自旋是半整数。

质子由三个夸克组成，uud(两个 up，一个 down)

中子由三个夸克组成，ddu(两个 down，一个 up)

2.5 夸克禁闭

带色的粒子不能单独存在，夸克总是和别的夸克禁闭在一起而形成色中性的强子。

强子中的夸克疯狂的交换胶子进行强作用，他们存在于由胶子组成的色场中：当胶子场获得足够能量时，就会折断成一对夸克-反夸克。

夸克禁闭问题至今还没有完全解决清楚。

遗留问题：核子质量大约是电子 1800 倍，而核子由三个夸克组成，则电子不是由夸克组成，猜想还有比夸克更小的粒子。

2.6 轻子

总共 6 种轻子： e (电子)、 τ (τ 子)、 μ (μ 子)、 ν_e (电子中微子)、 ν_τ (τ 子中微子)、 ν_μ (μ 子中微子)。

宇宙射线就是 μ 子。

粒子物理标准模型：6 种夸克 + 6 种轻子 + 传递力的粒子。

原子核物理模型：无统一模型，不同的原子核适用不同的模型。

第三章 原子核的静态性质

原子核物理学是研究原子核性质、结构和转化的科学。

- 静态性质包括：原子核的半径、质量、自旋、磁矩、电四极矩、宇称、统计性、同位旋
- 动态性质包括：衰变寿命、分质比

3.1 原子核的电荷

3.1.1 电荷

原子核带正电，电子带负电，正负电荷相抵消，原子对外不带电。

3.1.2 测量电荷数 Z

使用莫塞莱定律，测量原子特征 X 射线的波长 λ ，根据 $c = v\lambda$ ，求出频率 v ，然后根据 $\sqrt{v} = AZ - B$ （其中 A、B 为常数），求出 Z 。

X 射线的由来：对于原子来说，核外电子在不同轨道运动，轨道之间有固定的能量差，给核外电子一个能量，电子会被激发到其他轨道上，在它退激发的过程中，就会释放出电磁波，这个电磁波就是 X 射线。

3.1.3 核素图

纵坐标表示质子数 Z ，横坐标表示中子数 N 。

稳定核素（ β 稳定线上的）大约 300 个，实验室合成出来的 3000 个，理论上预言 6000-8000 个。

3.2 原子核的质量

3.2.1 质量

碳单位：原子的质量太小，为了方便计算，将 ^{12}C 质量的 $\frac{1}{12}$ 作为 1u （实际质量值为 $1.661e^{-27}\text{kg}$ ），其他原子的相对质量就是其原子质量与 1u 的比值，如 ^{16}O 的相对原子质量为 16 ($2.657e^{-26}/1.661e^{-27} = 16$)。

质能方程： $E = Mc^2$ ， $1\text{u} = 931.448\text{MeV}$ （1 质量数对应的能量为 931.448 兆电子伏）。

- 质子静止质量： $938.280\text{MeV}/c^2$
- 中子静止质量： $939.573\text{MeV}/c^2$
- 电子静止质量： $511.003\text{keV}/c^2$

3.2.2 测量质量

1. 用质谱仪（针对稳定核好用）
2. 飞行时间法

3. 用核反应精确测定

测出原子核质量之后，可以知道原子核能量，根据原子核能量 = 质子能量 + 中子能量 + 结合能（释放出来），可以算出结合能。知道了结合能，就能知道给原子核多少能量，它可以分开。结合能的意义就是原子核结合的紧密程度。

3.3 原子核的半径

3.3.1 半径

半径 $10^{-15}m$ ，也可以说 1fm

3.3.2 测量半径

可以电子或质子/中子去打原子核，根据反应截面，得出半径。

- 用电子打时，依据电磁相互作用，测的是电荷分布半径。
- 用质子/中子去打时，依据强相互作用（核力），测的是核力作用半径。

核力作用半径更大一些。可以理解为：电荷分布半径是依据质子与电子的电磁作用，核力作用半径是依据核子之间的相互作用，加上了中子，表现的更大一些。

半径与质量数的 $1/3$ 成正比 **$[R \propto A^{1/3}]$**

核力作用半径 $R \approx (1.40 \pm 0.10)A^{1/3}fm$

电荷分布半径 $R \approx (1.20 \pm 0.30)A^{1/3}fm$

根据 $V = \frac{4}{3}\pi R^3$ ，则 $R \propto A$ ，可推出，原子核具有不可压缩性（后来被推翻，发现了晕核）。

根据 $\rho = \frac{A}{V}$ ，可以算出原子核的密度，密度特别大（每立方厘米有亿吨重）。（中子星-全是核子）

3.3.3 总结

1. 有两种半径：核力作用半径、电荷分布半径。核力作用半径稍微大一点。
2. 半径与质量数的三分之一成正比，体积与质量数成正比。

3.4 原子核的自旋

3.4.1 自旋

电子的自旋是 $\frac{1}{2}$ ，自旋跟角动量对应。

电子的角动量是自旋角动量和轨道角动量耦合得到的。

拓展到原子核：

核子的角动量 = 核子的自旋 + 轨道角动量。

原子核的角动量 = 所有核子的角动量的耦合。

3.4.2 测量自旋

测量电子的自旋用的是原子光谱的精细结构。

在原子光谱的精细结构中，轨道分为 s p d f g h i k，对应的轨道角动量为 0 1 2 3 4 5 6 7

j, l 和 s 分别是电子的总角动量、轨道角动量和自旋角动量量子数。 $j=l+s, l+s-1, \dots, |l-s|$

钠发黄光，是钠电子在 s p 轨道，角动量分别是 0 1，电子自旋角动量是 $\frac{1}{2}$ ，这样就有 $P_{\frac{3}{2}} P_{\frac{1}{2}} S_{\frac{1}{2}}$

测量核的基态自旋的方法是利用原子光谱的超精细结构。

F, i 和 j 分别是原子的总角动量、原子核的总角动量和电子的总角动量。 $F=i+j, i+j-1, \dots, |i-j|$

原子核的总角动量很小，在精细结构中，可以将其忽略。在超精细结构中，不能忽略其影响。但在钠发黄光的能谱中，它只影响了 s 轨道。

怎么测量核自旋

- 如果 $I \leq J$ ，就有 $2I+1$ 个 F 值（即能级分裂为 $2I+1$ 个能级），数原子光谱中超精细结构的数目即可求得 I。
- 如果 $I \geq J$ ，那么能级分裂为 $2J+1$ 个，显然无法由数亚能级数目来确定 I。 $F=I+J, I+J-1, \dots$ 亚谱线的相邻间距满足 $\Delta E_1 : \Delta E_2 : \Delta E_3 : \dots = (I+J) : (I+J-1) : (I+J-2) : \dots$

偶偶核 Z/N 都是偶数基态自旋是 0

奇 A 核 Z/N 一个是偶数基态自旋是半整数

奇奇核 Z/N 都是奇数基态自旋是整数

质子存在两两抱对的现象，中子也是。稳定核一般是偶偶核，或者奇 A 核。偶偶核更稳定。

3.5 原子核的磁矩

3.5.1 磁矩

$\mu_1 = g_1 \mu_N I$ ，其中 μ_1 为磁矩， g_1 为 g 因子， μ_N 为核磁子， I 为自旋。

3.5.2 测量磁矩

核磁共振。

偶偶核的磁矩为 0，使用奇 A 核，如医疗上核磁共振是探究 1_1H_0 在人体的分布情况，核磁共振没有辐射。

3.6 原子核的电四极矩

原子核大多都不是标准的球型，有许多是椭球形（还有三轴形变等...），用电四极矩来描述椭球形的原子核。

将椭球形放到坐标轴中，两个相等的边为 a、b，另一个与前两者不相等的为 c。 $a=b < c$ 为长椭球， $a=b > c$ 为扁椭球。

$$Q = \frac{2}{5} Z(c^2 - a^2)$$

- 当 $c=a$ 时， $Q=0$ ，即球形核的电四极矩为零。

- 当 $c > a$ 时, $Q > 0$, 即长椭球形原子核具有正的电四极矩。
- 当 $c < a$ 时, $Q < 0$, 即扁椭球形原子核具有负的电四极矩。

Q 值随质量数 A 作正负交替的变化, 当 Z 或 N 的数值等于幻数 (2,8,20,28,50,82,126) 时, Q 约等于 0, 而双幻核时 Q 等于 0, 这反应了原子核结构的壳层特性。

19 < A < 28, 150 < A < 190, A > 220 三个区为变形核区, 变形核有明显的核子集体运动的规律。

3.7 原子核的字称

概念: 宇称的概念是微观世界中所特有的, 它是微观体系在空间反演变换下具有对称性时, 所相应的守恒量。

对于 $K=+1$ 的情形, 即 $\varphi(-x) = \varphi(x)$, 我们称这样波函数具有正 (偶) 宇称。

对于 $K=-1$ 的情形, 即 $\varphi(-x) = -\varphi(x)$, 我们称这样波函数具有负 (奇) 宇称。

特性

- 所有原子核都有确定的宇称, 这是由强相互作用的性质决定的, 有一些基本粒子没有确定的宇称。
- 原子核状态的宇称是正还是负, 取决于组成原子核的 A 个核子的轨道量子数之和
- 只有当原子核与其他核 (或其他粒子) 相互作用而改变状态时, 该原子核的宇称才会改变, 但是, 包括原子核和其他核 (或其他粒子) 在内的整个体系, 其宇称在变化前后是守恒的。
- 宇称在弱相互作用过程中不守恒。

自旋宇称 $= I^\pi$ 。例: ^{40}K 基态的自旋为 4, 宇称为负, 则表示为 4^-

3.8 原子核的统计性质

费米子: 自旋是半整数

玻色子: 自旋是整数

质子、中子、电子都是费米子。

由奇数个费米子组成的粒子仍是费米子, 由偶数个费米子组成的粒子则为玻色子; 由无论是奇数还是偶数个玻色子组成的粒子总是玻色子。所以: 奇 A 核是费米子; 偶 A 核是玻色子。

3.9 原子核的同位旋

质子的同位旋是 $\frac{1}{2}$, 中子的同位旋是 $-\frac{1}{2}$, 总的同位旋是所有质子中子同位旋的矢量和。

同位旋 $T_3 = \frac{1}{2}(Z - N)$

同位旋量子数 T 满足: $\frac{1}{2}|Z - N| \leq T \leq \frac{1}{2}(Z + N)$, 基态的 $T = \frac{1}{2}|Z - N|$

第四章 原子核的结合能与液滴模型

4.1 原子核的结合能

4.1.1 质量与能量的一般关系

质能方程： $E = mc^2$

相对论还给出，以速度数值 v 运动的粒子为例，其中 m_0 是粒子的静止质量。当粒子的速度 v 增大时，它的质量 m 也随之增大。

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - (\frac{v}{c})^2}}$$

总能量 $E =$ 静止质量 $m_0c^2 +$ 动能 E_k ，即 $E = m_0c^2 + E_k$

对于光子来说，静止质量为零，但有动能。光子的总能量等于它的动能。

质量亏损：组成某一原子核的所有核子质量和与该原子核质量的差称为原子核的质量亏损。

广义质量亏损：体系变化前后静止质量之差。

原子核的结合能：自由核子组成原子核时放出的能量或原子核分解为自由核子时吸收的能量，都叫原子核的结合能，它是原子核整体稳定性的度量。

例如，一个中子和一个质子结合成氘核时，要放出 2.22 兆电子伏的能量，这个能量以 γ 光子的形式辐射出去。

比结合能：原子核平均每个核子的结合能又称为比结合能。

比结合能表示，若把原子核拆成自由核子，平均对于每个核子所要做的功。比结合能的大小，可以用以标志原子核结合的松紧程度。越大的原子核结合的越紧；越小的原子核结合的较松。比结合能的物理意义是将原子核拆散成自由核子时，外界对每个核子所做的最小的平均功。

β 稳定线：原子核靠核力和库仑力维持平衡，核力是核子之间都有的，库仑力只在质子中有，随着质子数的增加，库仑力增加，这时候还要维持平衡的话，就不能添加质子，只能添加中子了，因为添加中子会增加核力，但不增加库仑力。这也解释了 β 稳定线在质子比较大的领域， $N > Z$ ，其中 ^{208}Pb 的中质比 $\frac{N}{Z} = 1.54$

核子数的稳定性：自然界接近 300 种稳定核中，偶偶核更稳定。如图 4.1 所示。

表 2-5 稳定核素的奇偶分类表

Z	N	名称	稳定核素数目
E	e	偶偶核	156
E	o	偶奇核	48
O	e	奇偶核	50
O	o	奇奇核	5
合 计			259

图 4.1: 稳定核素的奇偶分类表。

重核的不稳定性：实验发现，能发生 α 衰变的天然放射性核素都是一些重核，其中最轻的是 ^{142}Ce ，很重的核几乎都具有 α 放射性。能够发生自发裂变的核素也都是些很重的核。

4.2 液滴模型

液滴模型来自于比结合能曲线。

结合能的半经验公式： $B = B_V + B_S + B_C + B_{sym} + B_P$

- B_V 为体积能。
- B_S 为表面能。
- B_C 为库伦能。
- B_{sym} 为对称能。
- B_P 为对能。

比结合能各项的贡献如图 4.2 所示。

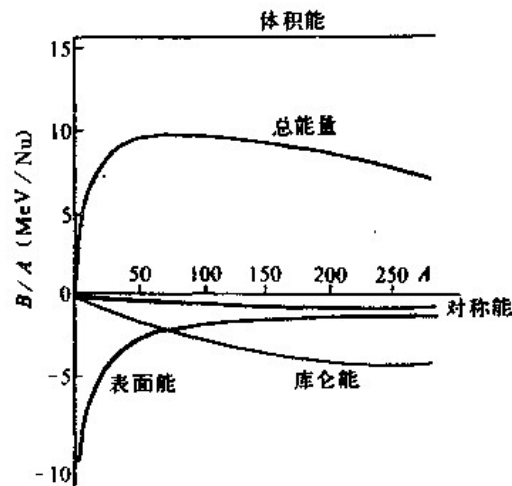


图 1.3.2 比结合能各项的贡献

图 4.2: 比结合能各项的贡献。

根据液滴模型，可以推出 β 稳定线，其为比结合能的极值点。也能推出中子滴线、质子滴线，其为比结合能为 0 的点。