

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

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。

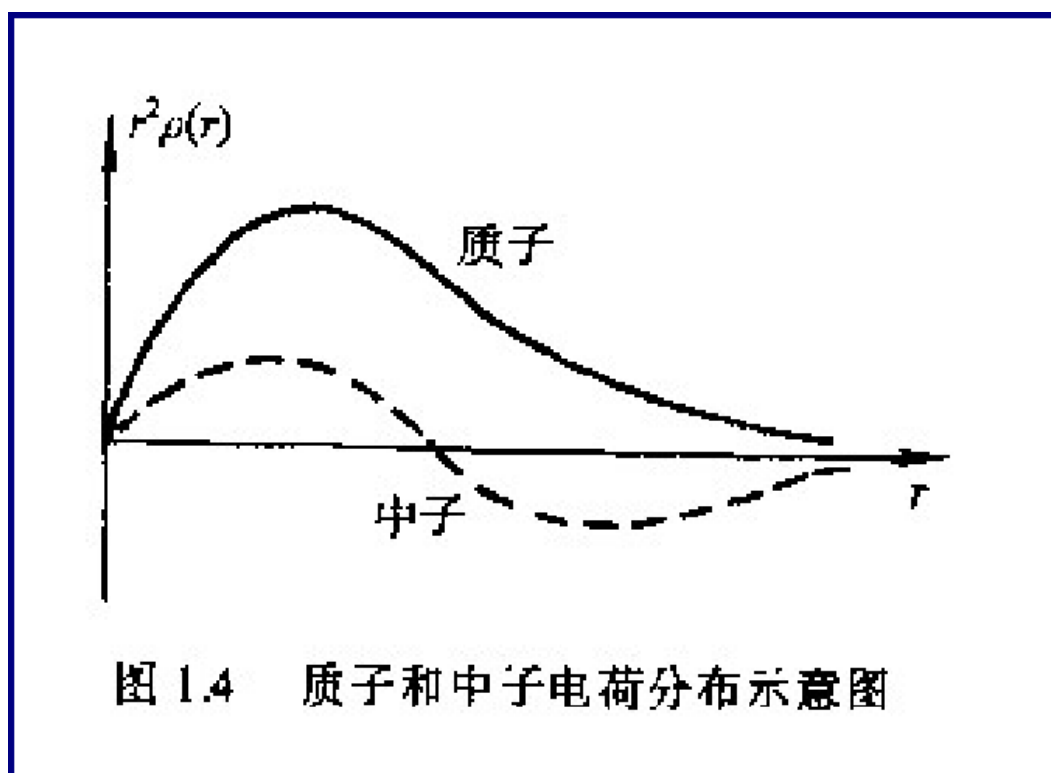


图 2.2: 质子和中子电荷分布示意图。

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: $\frac{1}{2}|Z - N| \leq T \leq \frac{1}{2}(Z + N)$