

# 第一章 原子核的基本性质

静态性质：标志一个核的存在的基本物理量

电荷、质量、半径、自旋、磁矩、电四极矩、宇称、统计性等

动态性质：标志原子核发生变化的物理量

衰变寿命、分之比等

## § 1.1 原子核的电荷、质量和半径

### 1. 电荷

Rutherford大角散射：确定原子有一个核心

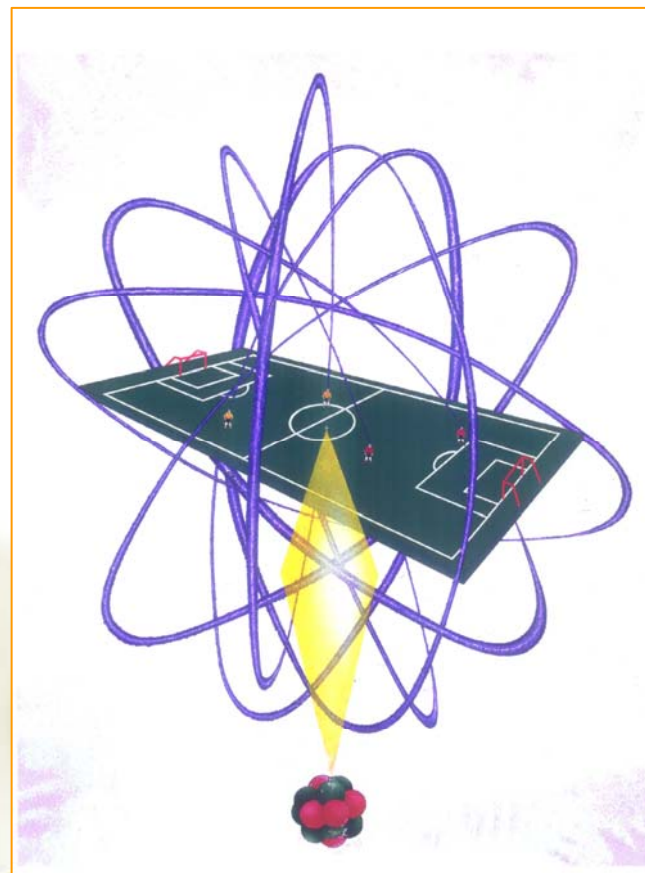
原子——原子核+核外电子

原子核： $\sim 10^{-14}\text{m}$

占有99.9%以上的原子质量

$$Q_{\text{原子}} = Q_{\text{核}} + Q_{\text{电子}} = 0$$

$Z =$  原子序数 = 核电荷数 = 核内质子数



## 测定原子核电荷

**Rutherford方法:**  $N \propto Z^2$

**Moseley方法:**  $\sqrt{\nu} = AZ - B$

对于特定的X射线, **A, B=常数**

\*对短寿命重元素, 需采用复杂的电荷辨别方法(相对论效应)

\*1-94号元素: 天然存在(43、61、93号元素除外)

95-114号元素: 人工产生  
超重岛?

## 2. 核的质量

$$M_A = M_N + M_e - W_e$$

$$\begin{aligned} 1\text{u} &= \frac{^{12}\text{C原子质量}}{12} = \frac{1}{N_A} = 1.6605402 \times 10^{-27} \text{kg} \\ &= 931.49423 \text{ MeV}/c^2 \end{aligned}$$

特征能量单位: keV、MeV、GeV、TeV  
 $10^3$   $10^6$   $10^9$   $10^{12}$  eV

$$1\text{eV} = 1.60217733 \times 10^{-19} \text{ J}$$

测质量的质谱仪方法 (电磁方法):

$$qV = \frac{1}{2}Mv^2 \quad \frac{Mv^2}{R} = qvB$$

$$M = \frac{qB^2R^2}{2V}$$

V: 电压[V]; B: 磁感应强度[tesla]; R: 半径[m]; q: 电荷[C]; M: 质量[kg]

原子核的质量数=质子数+中子数 $\approx$ 核的质量整数 (u)

核素(Nucleus): 有确定的质子数和中子数

同位素(Isotope): 质子数相同的一类核素

同中子数(Isotone): 中子数相同的一类核素

同量异位素(Isobar): 质量数相同的一类核素

同核异能素(Isomer): 有确定的质子数和中子数但能量不同的核素 ( ${}^{60m}\text{Co}$  或  ${}^{60}\text{Co}^*$ )

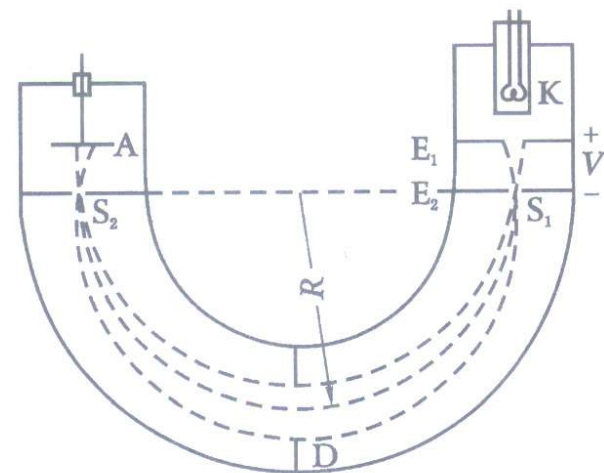


图 1-1 质谱仪原理图

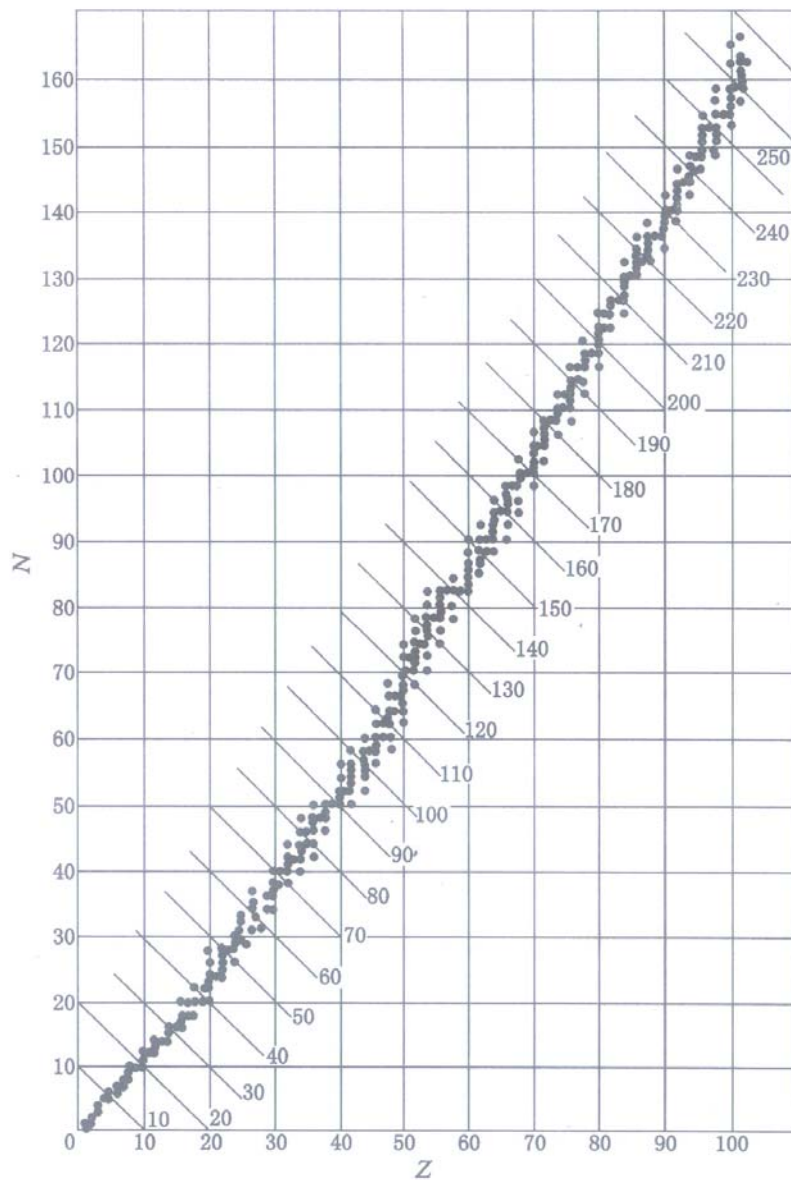


图 2-11  $\beta$  稳定线的核在  $Z-N$  平面上的标绘

Box 1a. Heyde, P.43,  
The heaviest artificial  
elements in nature: from  
 $Z=109$  towards  $Z=112$

表 1-1 一些原子的质量<sup>①</sup>

原子名称	原子质量/u	原子名称	原子质量/u
<sup>1</sup> H	1.007825	<sup>7</sup> Li	7.016005
<sup>2</sup> H	2.014102	<sup>12</sup> C	12.000000
<sup>3</sup> H	3.016050	<sup>16</sup> O	15.994915
<sup>4</sup> He	4.002603	<sup>235</sup> U	235.043944
<sup>6</sup> Li	6.015123	<sup>238</sup> U	238.050816

**Mass excess:  $\Delta = M - A$  in MeV or u**

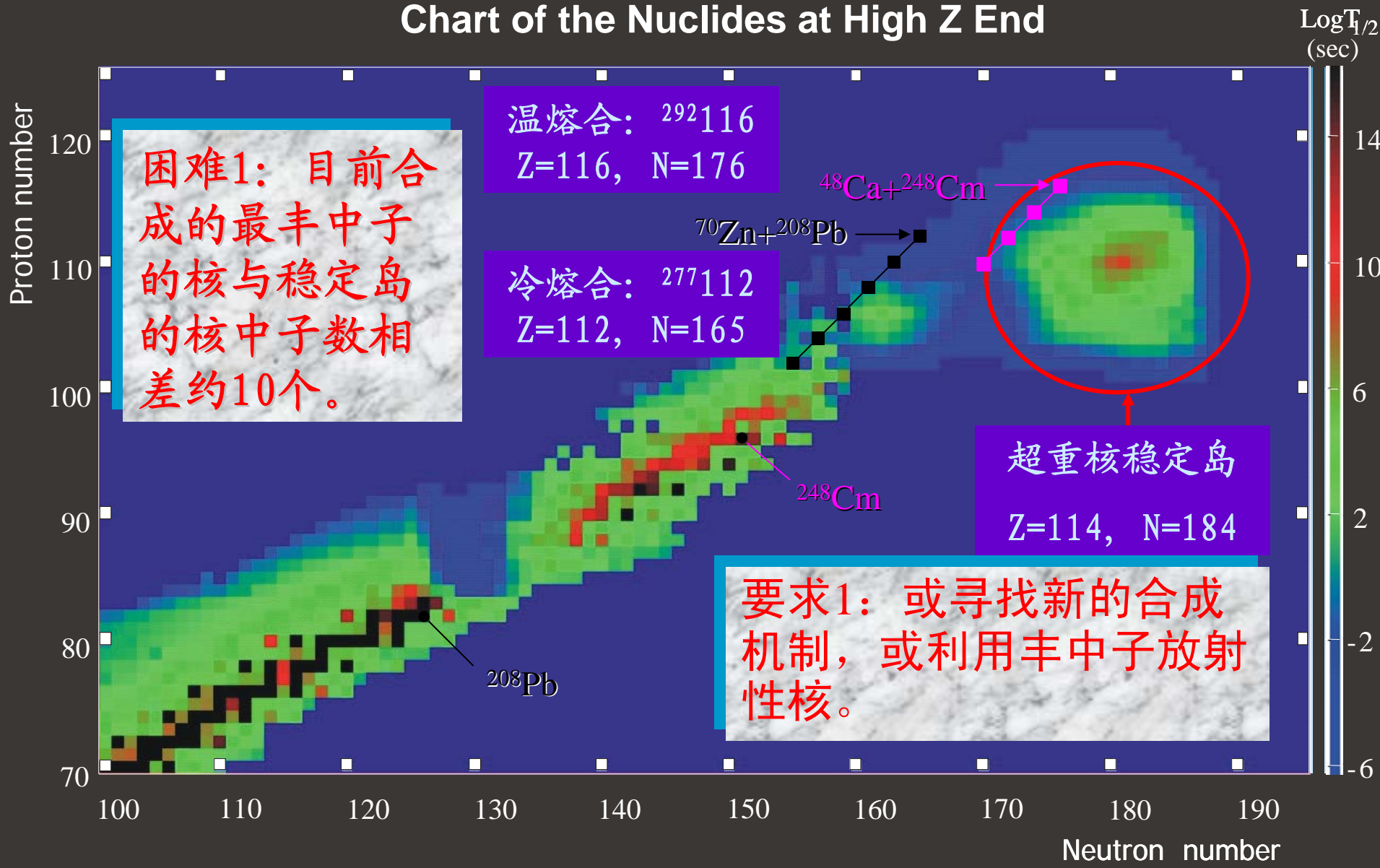
<http://nst.pku.edu.cn/> (核科学与核技术教育部网上合作研究中心)

<http://www.nndc.bnl.gov/index.jsp>

不稳定原子核的质量有一定宽度:  $\Delta E \tau = \hbar$

# 超重核研究现状和发展趋势

## Chart of the Nuclides at High Z End



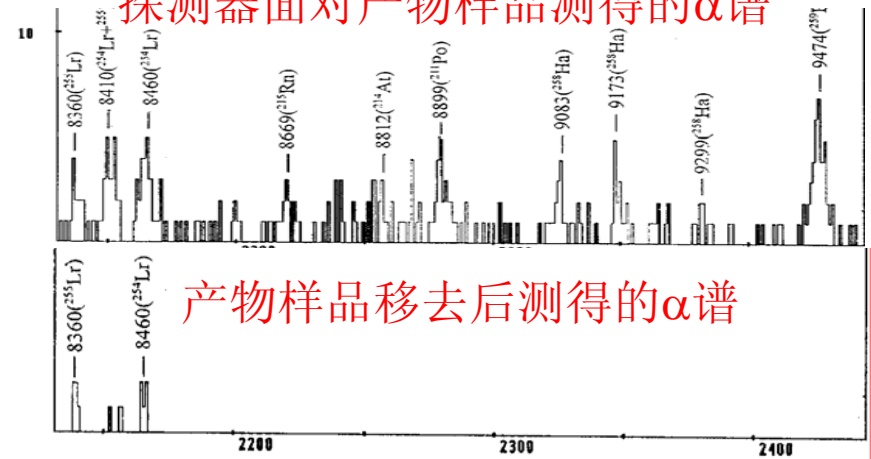
从1969至1974，美国Berkeley和俄罗斯Dubna，重离子诱发的“热熔合”，合成了104、105和106三种元素的几个同位素。中子跑走太多，融合截面小。

1973年，Dubna小组利用 $40\text{Ar}+208\text{Pb}$ 反应证实了他们提出的以双幻核为靶以减少复合核的激发能，降低复合核裂变的竞争，提高重余核产额的想法 -“冷熔合”。德国GSI在1975年建成了重离子强流直线加速器、研制了重余核分离设备SHIP和单个原子的 $\alpha$ 衰变关联测量技术，使得他们可以分离寿命短至几个微秒的蒸发余核并测量其 $\alpha$ 衰变。从1981-1996年，GSI小组利用强流 $54\text{Cr}$ ， $58\text{Fe}$ ， $62\text{Ni}$ ， $64\text{Ni}$ 和 $70\text{Zn}$ 束流轰击 $208\text{Pb}$ 和 $209\text{Bi}$ 靶，先后合成了 $Z=107-112$ 的6种新元素的一系列同位素。在“冷熔合”反应中，所要合成元素的生成截面随其原子序数的增加而呈指数下降，合成 $Z=112$ 的元素已经达到目前GSI技术条件的极限。

2004年，日本的RIKEN小组利用极强的 $70\text{Zn}$ 束流轰击 $209\text{Bi}$ 靶合成了113号元素。近几年来，Dubna小组考虑到“冷熔合”反应截面的减小，选择了双幻核 $48\text{Ca}$ 轰击丰中子锕系靶，通过所谓的“温熔合”来产生接近理论预言的球形超重稳定岛的长寿命核。该实验室经过一系列艰苦的设备改造后，于1998年底开始了 $Z\geq 114$ 号元素的合成探索。基于单个原子的 $\alpha$ 衰变关联测量技术，先后获得了1个 $^{289}\text{114}$ 、2个 $^{288}\text{114}$ 、2个 $^{287}\text{114}$ 、2个 $^{292}\text{116}$ 、3个 $^{288}\text{115}$ 、1个 $^{287}\text{115}$ 和2个 $^{294}\text{118}$ 衰变事件。尽管目前报道的实验结果已经合成到了118号元素（117号未见报道），但被确认的结果只到112号元素，113-116和118号元素的确认需待进一步的验证实验。

# 1、 $^{259}\text{Db}$ 合成：首次进入超重核区

探测器面对产物样品测得的 $\alpha$ 谱



测量结果:  $E_\alpha = 9.47\text{MeV}$ ,

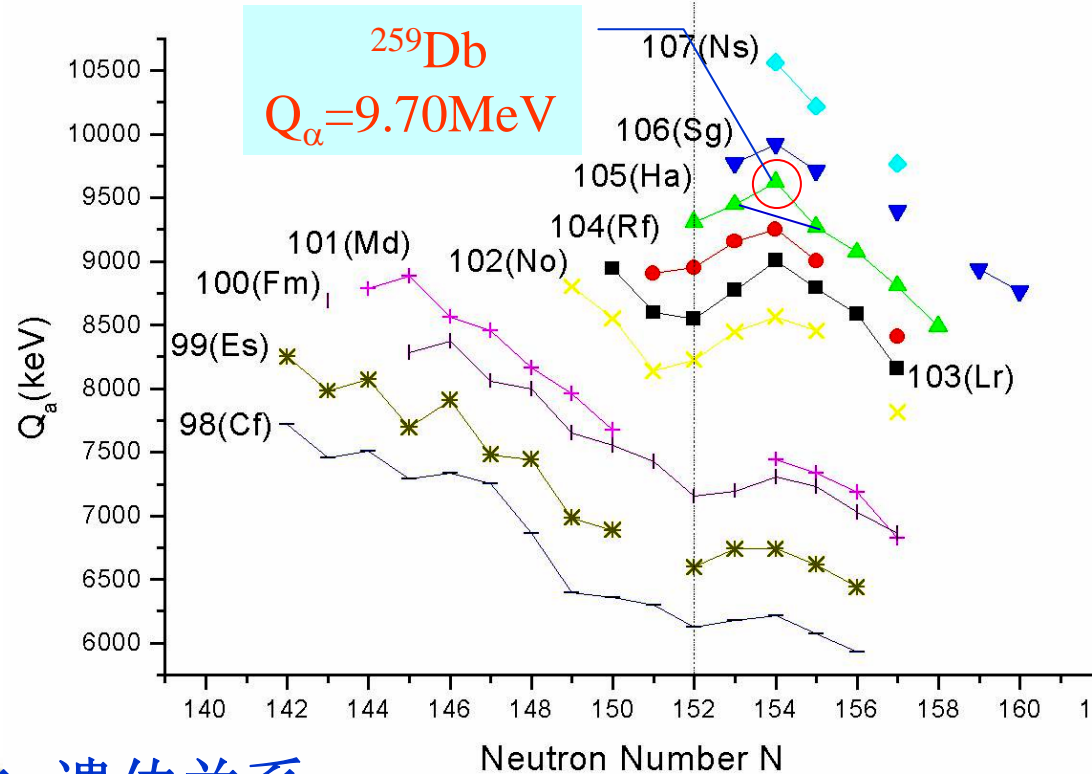
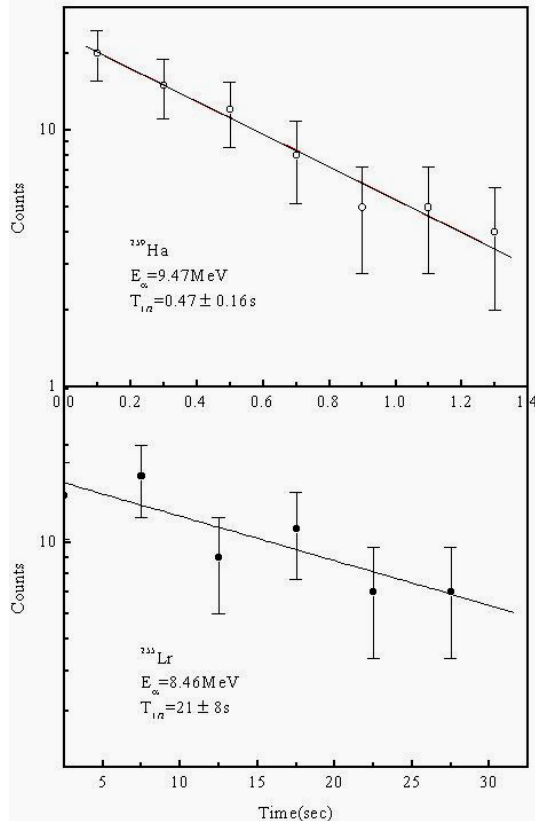
$T_{1/2} = 0.47\text{ s}$ ,  $Q_\alpha = 9.70\text{MeV}$

我国新核素合成首次进入超重区!

$^{22}\text{Ne} + ^{241}\text{Am} \rightarrow ^{259}\text{Db}$

A new alpha-emitting isotope  $^{259}\text{Db}$

Euro. Phys. J., A10, (2001) 21-25



He-jet + 转动轮系统母子体 $\alpha$ 遗传关系



## 2、Z=107超重新核素 $^{265}\text{Bh}$ 的合成

靶材料： $^{243}\text{Am}$ 靶的制备

束流材料：金属 $^{26}\text{Mg}$ 的还原

束流时间：约250小时

束流强度： $0.8\mu\text{A}$

束流能量：168MeV

反应道： $^{26}\text{Mg}+^{243}\text{Am}\rightarrow^{265}\text{Bh}+4n$

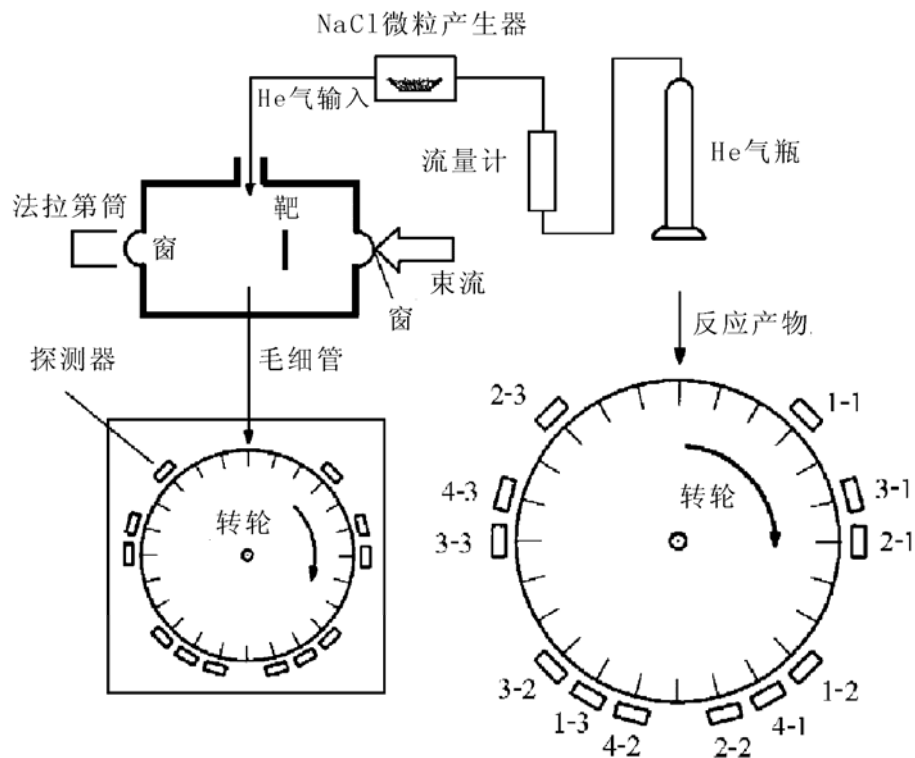
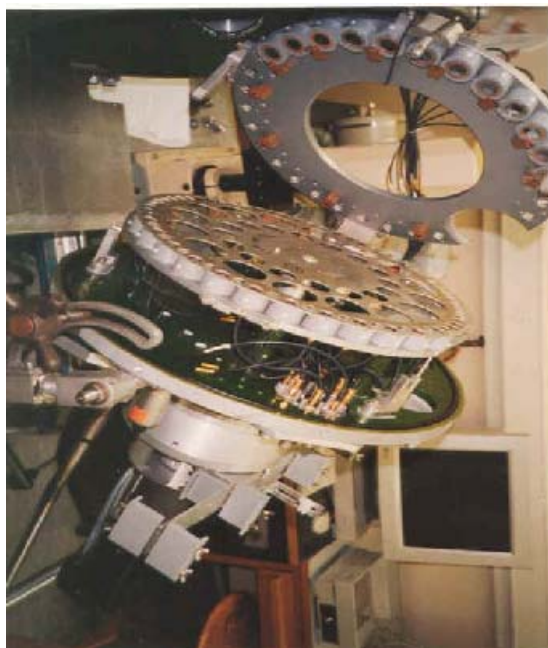
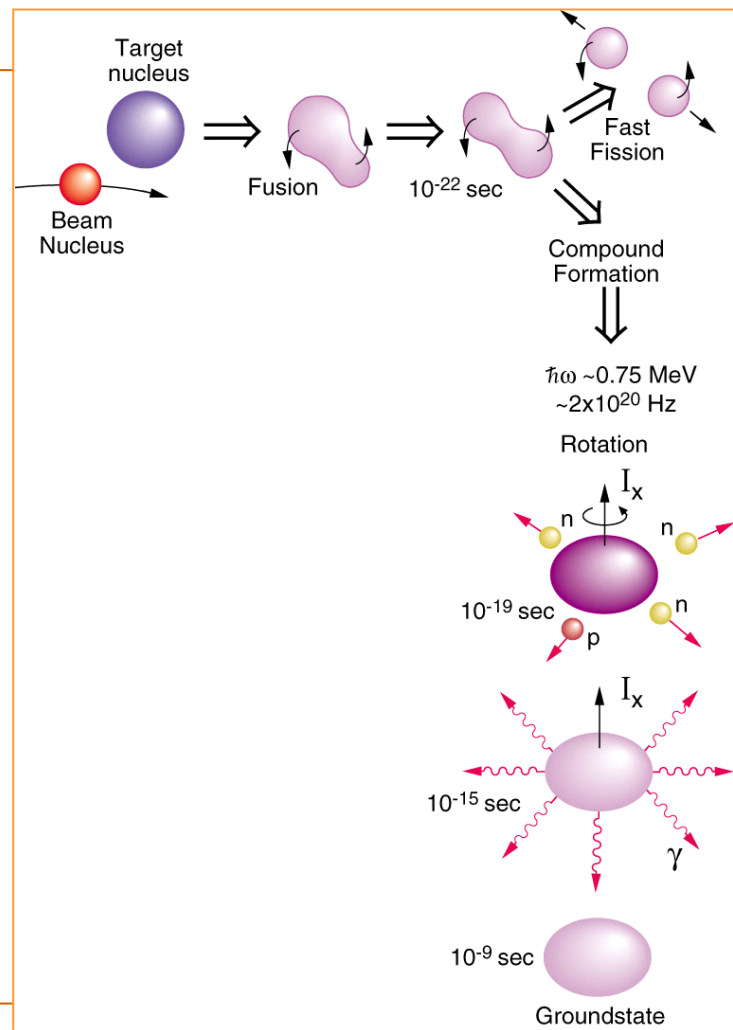
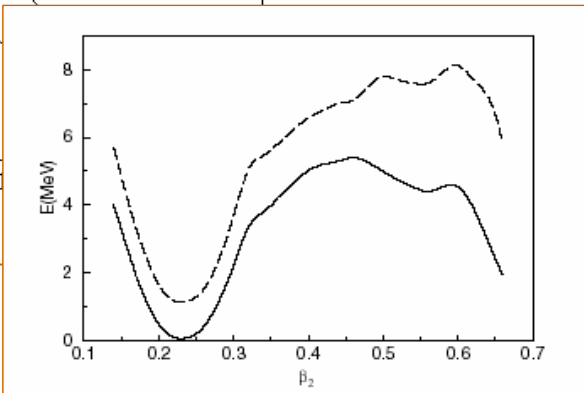
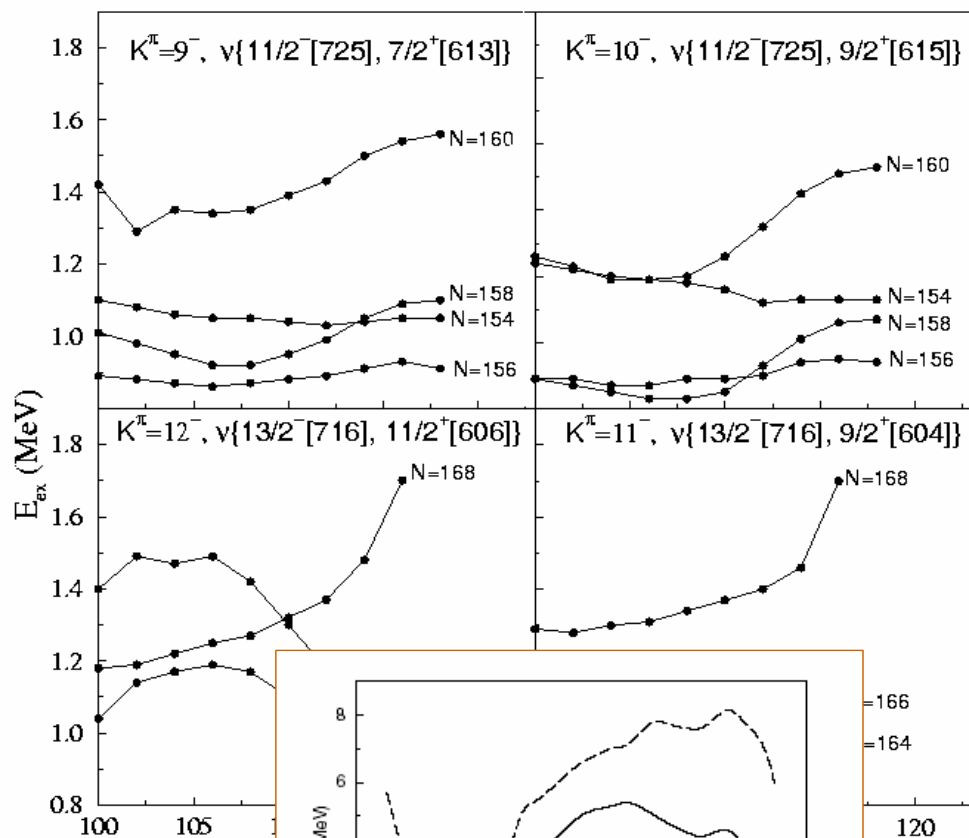


图1 氦喷嘴靶室和毛细管传输以及转轮收集和探测系统简图。探测器的排列表示在右下部分。

# F.R. Xu, *et al.*, PRL92, 252501 (2004)



## ■ 未来5年— 超重元素探索和新核素的合成

关键科学问题：超重核合成的新机制和技术

1) 截面1 pb以下； 2) 现有融合体系中子数缺10个左右； 3) 长寿命核无法利用现有在束  $\alpha$ - $\alpha$  级联衰变的方法进行单个事件鉴别

主要研究内容：

- 1) 合成和用单粒子技术鉴别  $Z \geq 110$  的新核素一个以上
- 2) 验证新的超重谱仪
- 3) 理论与实验结合探索超重核合成新机制和新的直接鉴别方法
- 4) 系统研究超铀 ( $Z > 90$ ) 区核的性质

前五年：

合成了  ${}_{105}^{259}\text{Db}$ ,  ${}_{107}^{265}\text{Bh}$

使用He-jet + 转动轮系统

少量融合机制研究

### 3. 核的半径

原子核近似为球形，可定义半径或平均半径（ $10^{-14}\sim 10^{-15}\text{m}$ ）。

“虚”表面，半径的定义模型相关。

核的大小的测量：电子、中子、质子散射；反应截面测量等。

#### (a) 核力作用半径

由核散射、核反应等确定：近似地  $\sigma = \pi R^2$

通常：  $R \approx r_0 A^{1/3}$ ,  $r_0 = (1.4\sim 1.5) \text{ fm}$ ,  $1\text{fm} = 10^{-15}\text{m}$

#### (b) 电荷分布半径

核内电荷分布半径      质子分布的半径

高能电子散射：

$$\lambda = \frac{hc}{[E_k (E_k + 2E_0)]^{1/2}}$$

$\lambda$ ：电子的波长； $E_k$ ：电子的动能； $E_0$ ：是电子的静止能量。

当 $E_k \gg E_0$ 时：

$$\lambda = \frac{hc}{E_k}$$

高能电子在核上散射的角分布近似为核内电荷分布的傅立叶变换。电荷分布半径：

$$R \approx 1.1 \times A^{1/3} \text{ fm}$$

实际上，对于较重的核：

$$\rho = \frac{1}{1 + e^{(r-R)/d}}$$

$d$  (diffuseness) 表示核表面厚度的一个参量。

以  $t$  表示密度从 90% 降到 10% 所对应的厚度 (称为表面厚度)，  
则它与  $d$  的关系为：

$$t = 4d \ln 3$$

核的电荷分布半径比核力作用半径要小一些。

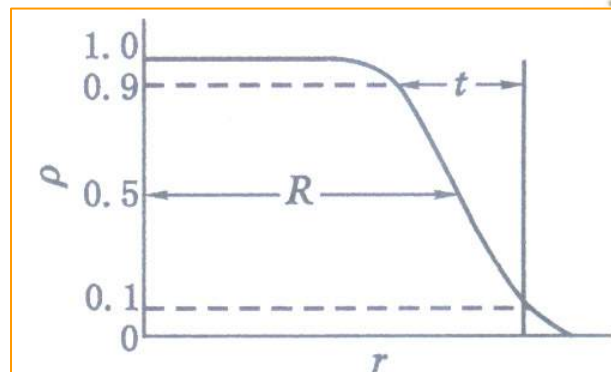


图 1-2 核内电荷分布状况

$$\rho_{\text{mass}}(\vec{r}) = \sum_{k=1}^A \left| \varphi_{\alpha_k}(\vec{r}) \right|^2$$

“中子晕”：指远离核芯的外围很宽范围的中子分布。这种核称为中子晕核。 ${}^6\text{He}$ ,  ${}^{11}\text{Li}$ ,  ${}^{11}\text{Be}$ ,  ${}^{14}\text{Be}$ 等。是一种量子效应。

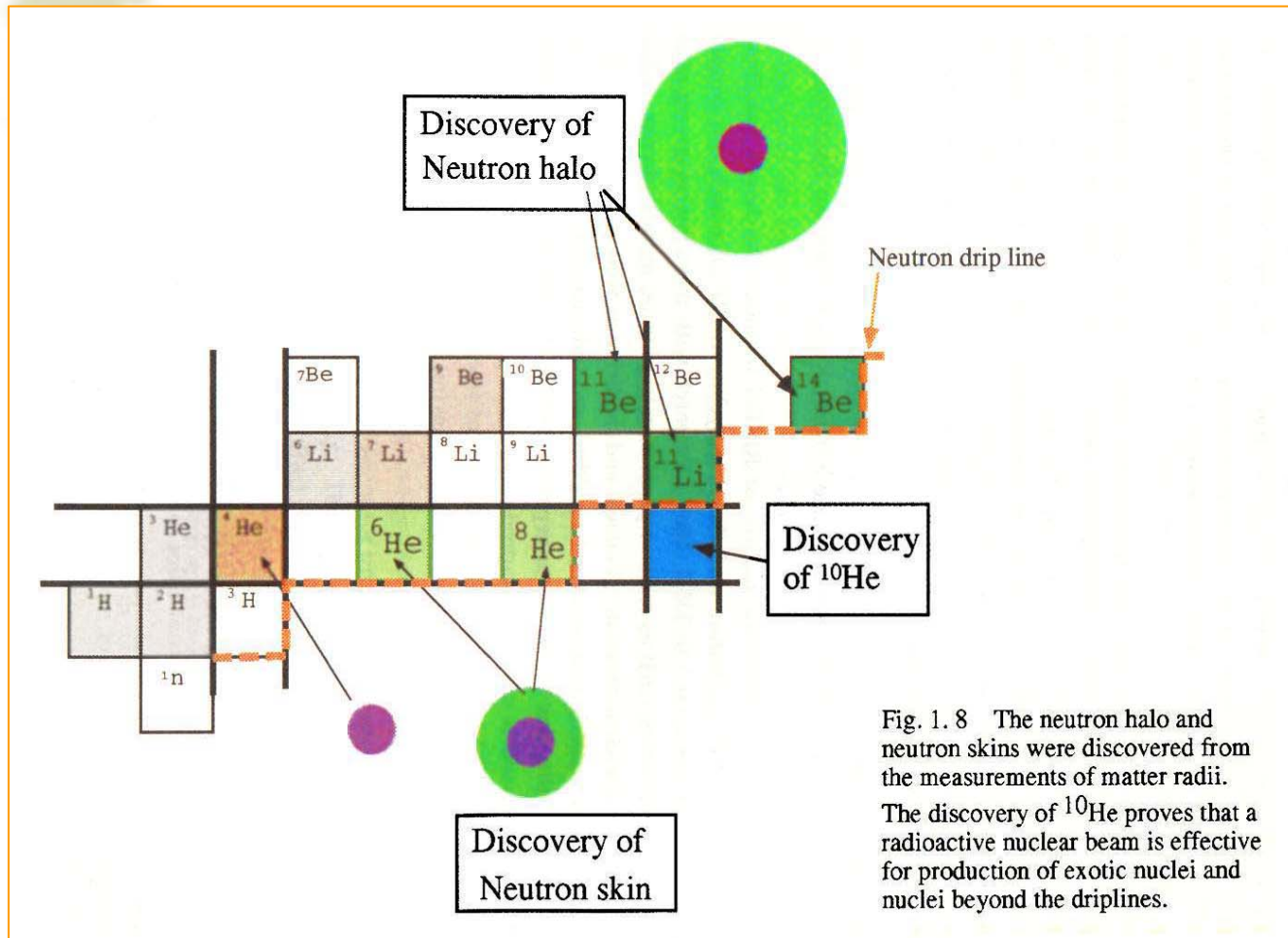
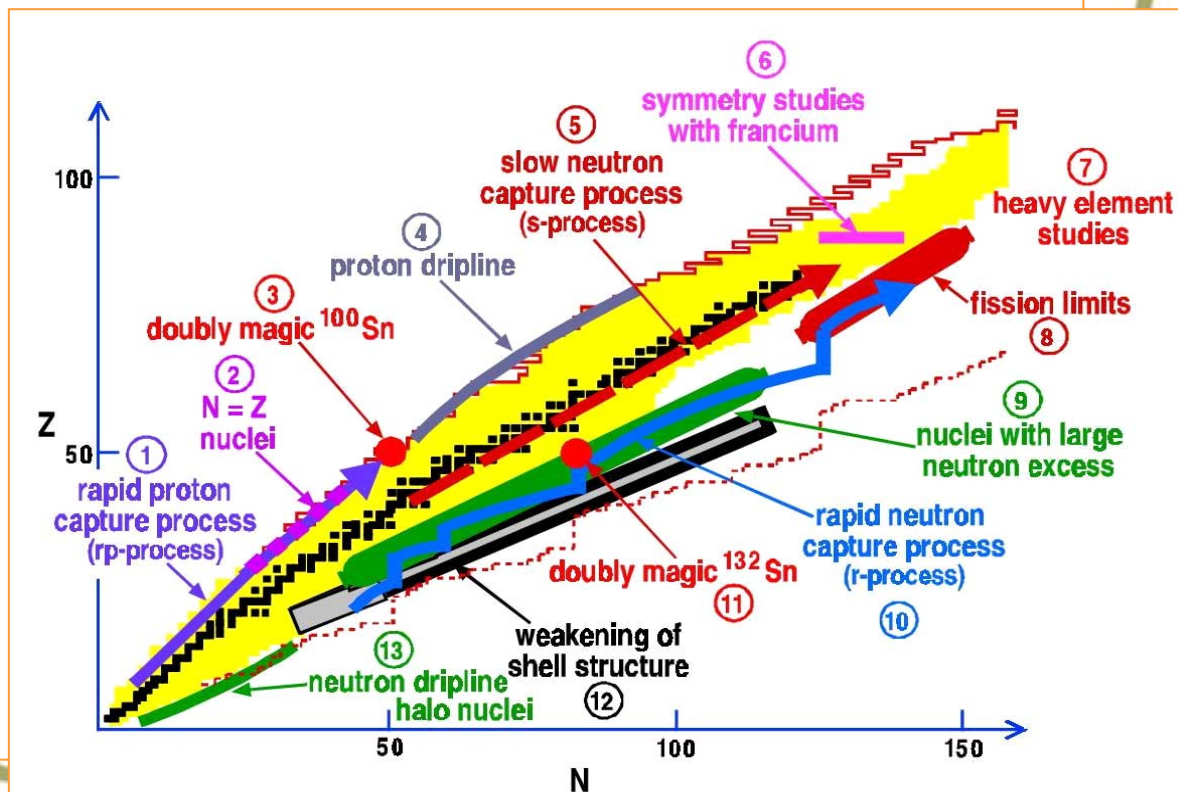
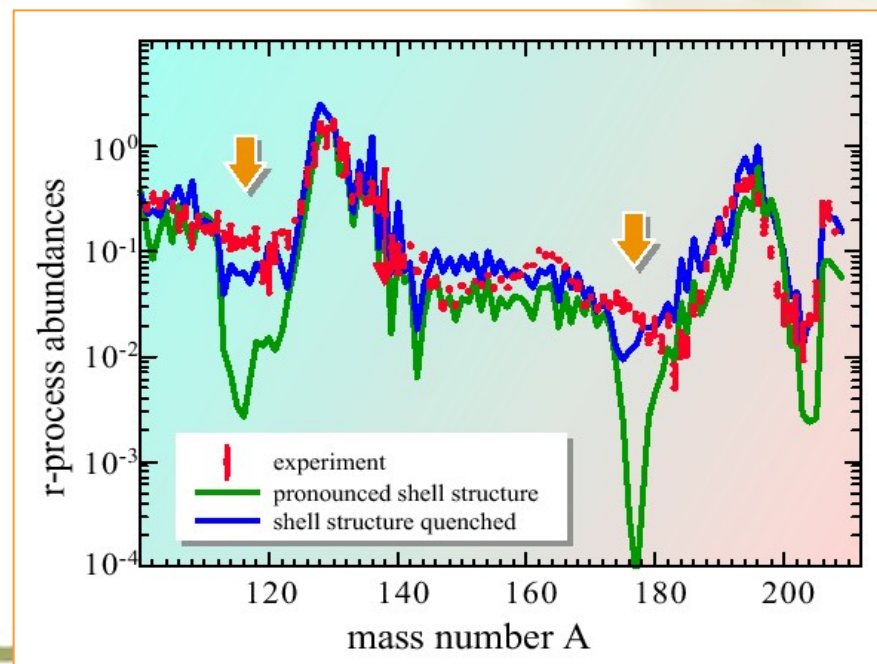
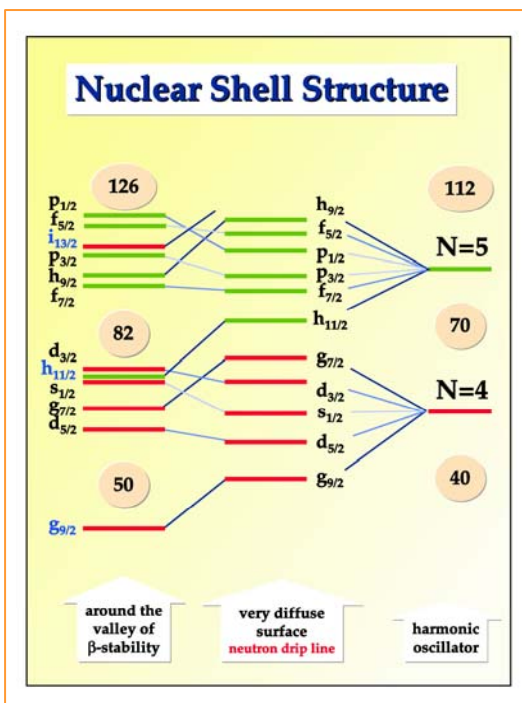


Fig. 1.8 The neutron halo and neutron skins were discovered from the measurements of matter radii. The discovery of  ${}^{10}\text{He}$  proves that a radioactive nuclear beam is effective for production of exotic nuclei and nuclei beyond the driplines.

放射性核束物理是近**20**年发展起来的核物理新领域，它研究的对象是在新型大科学装置上已经或即将产生的数千个非稳定（**unstable**）也就是弱束缚（**weak-binding**）的核素，而过去近百年只研究了几百个在稳定区附近的核素。在初期的研究中，已经发现了晕结构、集团自组织、新幻数、非线性多中子关联、连续态强耦合、同位旋相变等量子多体的新现象，并观察到反常截面增大、多反应道耦合、集团破裂和转移等新的反应机制和效应。放射性核束物理研究是对广阔的核科学未知领域的探索，正在极大地改变对原子核的传统认识。



与此同时，天体物理的许多重要问题如能量和元素的来源，中子星的结构和冷却，超新星的爆发，都涉及到基本的核物理问题，尤其是弱束缚核的结构和反应。另一方面，天体中的核过程与核聚变等装置中的核过程相似，通过相关研究可以为核能源开发应用等提供重要信息和参考资料。核物理与天体物理的交叉不仅是人类认识天体及宇宙演化过程及规律的重要方式，并且与能源开发和利用、国防安全建设等密切相关。放射性核束物理涉及众多新的核样本和核数据，将在超重核合成、新型核材料、新型核能装置等方面产生难以估量的重大影响。





对稳定核，半径近似地正比于  $A^{1/3}$ ，即原子核的体积近似地与  $A$  成正比：

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

核的核子密度（单位体积的核子数）：

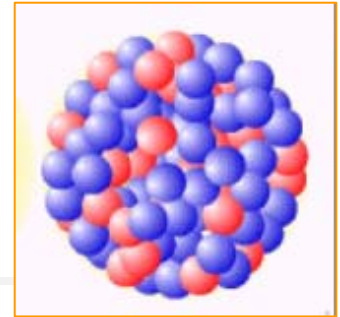
$$n = \frac{A}{V} \approx \frac{A}{\frac{4}{3}\pi r_0^3 A} \approx 10^{38} \quad (\text{cm}^{-3})$$

取一个核子的质量  $m_N$  为  $1.66 \times 10^{-24} \text{g}$  计算，核物质的密度

$$\rho = nm_N \approx 1.66 \times 10^{14} \quad (\text{g} \cdot \text{cm}^{-3})$$

即每立方厘米的核物质有亿吨重。

## § 1.2 原子核的自旋



原子核的自旋：原子核的总角动量

所有核子自旋和轨道角动量的矢量和

(\*可否从夸克迭加?)

原子核自旋角动量量子数为  $I$  时，角动量  $\mathbf{P}_I$  的本征值：

$$P_I = \sqrt{I(I+1)}\hbar, \quad I \text{ 为整数或半整数}$$

核自旋角动量  $\mathbf{P}_I$  在空间给定  $z$  方向的投影  $P_{Iz}$  为

$$P_{Iz} = m_I \hbar$$

$m_I$  叫磁量子数，它可以取  $2I+1$  个值：

$$m_I = I, I-1, \dots, -I+1, -I$$

自旋量子数  $I$  是自旋角动量  $\mathbf{P}_I$  在  $z$  方向投影的最大值(以  $\hbar$  为单位)。

通常用  $I$  来表示核的自旋的大小。

例： $^{14}\text{N}$  的自旋为 1，是指它的  $I=1$ ；

$^9\text{Be}$  的自旋为  $3/2$ ，是指它的  $I=3/2$ 。

$$\vec{j}_k = \vec{l}_k + \vec{s}_k$$

$$\vec{I} = \sum_{k=1}^A \vec{j}_k$$

correct operators

$$(I^2, I_z)$$

最常用的测量核的基态自旋的方法是利用原子光谱的超精细结构。

原子光谱的精细结构：电子的轨道角动量  $\mathbf{P}_l$  与自旋  $\mathbf{P}_s$  耦合形成总角动量  $\mathbf{P}_j$ ,

$$\mathbf{P}_j = \mathbf{P}_l + \mathbf{P}_s$$

$$P_j = \sqrt{j(j+1)}\hbar, \quad P_l = \sqrt{l(l+1)}\hbar, \quad P_s = \sqrt{s(s+1)}\hbar;$$

$j$ 、 $l$  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：

$$j = l+s, l+s-1, \dots, |l-s|$$

对  $l=1, s=\frac{1}{2}$ ,  $j=\frac{3}{2}$  和  $\frac{1}{2}$ , 能级:  $3P \rightarrow 3P_{3/2}$  和  $3P_{1/2}$ 。

对  $l=0$ ,  $j$  只能取  $\frac{1}{2}$  能级:  $3S \rightarrow 3S_{1/2}$

$$V \propto \vec{l} \cdot \vec{s}$$

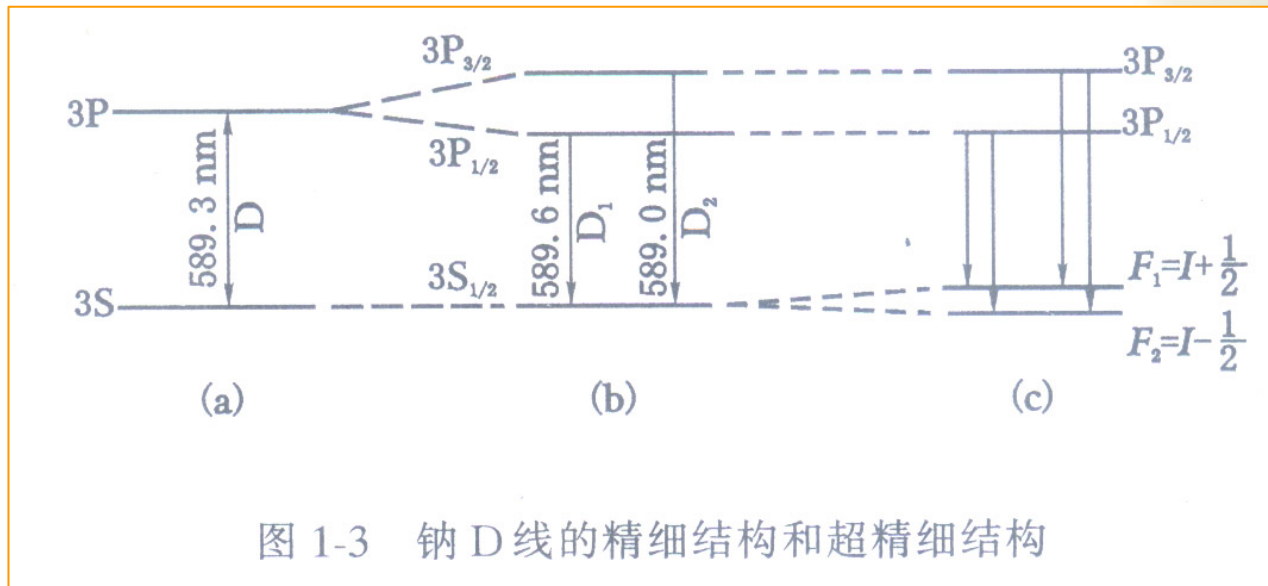


图 1-3 钠 D 线的精细结构和超精细结构

超精细结构：核的自旋与电子的总角动量耦合

$$\mathbf{P}_F = \mathbf{P}_I + \mathbf{P}_j$$

$F$  可取值：

$$F = I + j, I + j - 1, \dots, |I - j|$$

如果  $j \geq I$ ,  $F$  有  $2I + 1$  个值；如果  $I \geq j$ ,  $F$  有  $2j + 1$  个值。

不同  $F$  的能级具有不同的能量。从而造成了原子光谱的超精细结构。超精细结构能级的间距只有精细结构的几百分之一。

光谱线的超精细结构可用来定出核的基态自旋（利用谱线条数、谱线间距之比、或谱线强度）。

## 问题讨论：如何从实验确定原子核的自旋

基态规律：

(1) 偶  $A$  核的自旋为整数。其中偶偶核（即质子数  $Z$  和中子数  $N$  均为偶数的核）的  $I = 0$ 。

(2) 奇  $A$  核的自旋为半整数。

这两条规律将在第八章的核结构的壳模型理论中进行讨论。

激发态自旋，特别是高自旋的测量依靠衰变谱学何核反应等测量。

## § 1.3 原子核的磁矩

电子轨道运动的磁矩:

$$\mu_l = -\frac{e}{2m_e} \mathbf{P}_l = g_l \left(\frac{e}{2m_e}\right) \mathbf{P}_l, \quad g_l = -1$$

电子自旋的磁矩:

$$\mu_s = -\frac{e}{m_e} \mathbf{P}_s = g_s \left(\frac{e}{2m_e}\right) \mathbf{P}_s, \quad g_s = -2$$

!!

$\mathbf{P}_s$  和  $\mathbf{P}_l$  是电子的自旋和轨道角动量; 因子  $g$  称为电子的  $g$  因数。

$\mathbf{P}_s$  和  $\mathbf{P}_l$  取以  $\hbar$  为单位, 则:

$$\mu_s = g_s \mu_B \mathbf{P}_s, \quad \mu_l = g_l \mu_B \mathbf{P}_l$$

玻尔磁子:  $\mu_B = \frac{e\hbar}{2m_e} = 9.2740 \times 10^{-24} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ 。

电子的磁矩:

$$\mu = \mu_s + \mu_l = (g_s \mathbf{P}_s + g_l \mathbf{P}_l) \mu_B$$

质子和中子自旋相应的磁矩：

$$\mu_p = g_p \left( \frac{e\hbar}{2m_p} \right) \mathbf{P}_s, \quad \mu_n = g_n \left( \frac{e\hbar}{2m_p} \right) \mathbf{P}_s$$

$g_p$  和  $g_n$  分别为质子和中子的  $g$  因数， $m_p$  为质子质量。如果与电子自旋磁矩情形相比较，对于质子应该有  $g_p = +2$ ，对于中子，因它不带电，应该有  $g_n = 0$ 。但实验证明， $g_p = +5.586$ ， $g_n = -3.826$ 。这表明核子有内在结构。

核的磁矩  $\mu_I$ ：

$$\mu_I = g_I \left( \frac{e\hbar}{2m_p} \right) \mathbf{P}_I$$

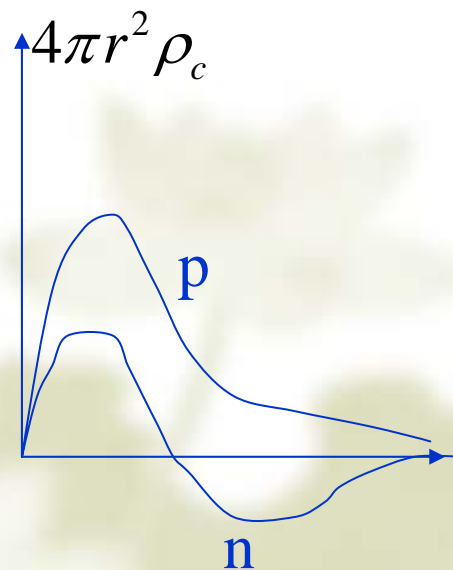
$g_I$  称为核的  $g$  因数

$\mathbf{P}_I$  在空间给定  $z$  方向的投影  $P_{Iz}$  有  $2I+1$  个值：

$$m_I = I, I-1, \dots, -I+1, -I$$

$\mu_I$  在给定方向的投影  $\mu_{Iz}$  也有  $2I+1$  个值：

$$\mu_{Iz} = g_I \left( \frac{e\hbar}{2m_p} \right) m_I$$



其最大投影

$$\mu_I' = g_I \left( \frac{e\hbar}{2m_p} \right) I = g_I \mu_N I$$

核磁子:  $\mu_N = \frac{e\hbar}{2m_p} = 5.0508 \times 10^{-27} \text{ A} \cdot \text{m}^2$ , 是玻尔磁子  $\mu_B$  的  $\frac{1}{1836}$ 。

通常是用核磁矩在给定  $z$  方向投影的最大值  $\mu_I'$  来衡量核磁矩的大小, 并且常以核磁子  $\mu_N$  作单位。一般文献和书籍中所列核磁矩  $\mu$  的大小就是指以  $\mu_N$  作单位的  $\mu_I'$  值。例如质子和中子的自旋投影值为  $1/2$ , 因此磁矩分别为 **+2.793** 和 **-1.913**。

## 核磁共振法测磁矩

将被测样品放在一个均匀的强磁场  $\mathbf{B}$  中 ( $\approx 1\text{T}$ )，由于核具有磁矩  $\mu_I$ ，它在磁场中与  $\mathbf{B}$  作用获得附加能量：

$$E = -\mu_I \cdot \mathbf{B} = -\mu_{Iz} B = -g_I \mu_N m_I B$$

$Z$  是磁场方向。 $m$  有  $2I+1$  个值，所以  $E$  也有  $2I+1$  个值。

$$\Delta E = g_I \mu_N B$$

在垂直于均匀磁场  $\mathbf{B}$  的方向再加上一个强度较弱的高频磁场，当其频率  $\nu$  满足：

$$h\nu = \Delta E$$

高频磁场的能量将被原子强烈吸收，称为共振吸收。

$$g_I = h\nu / \mu_N B$$

测得了共振  $\nu$  和磁场  $B$ ，可求出  $g_I$ 。

问题讨论：测到原子磁矩还是核磁矩？改变的是原子状态还是核的状态？

核磁共振的应用

高精度测磁场强度。

核磁共振仪

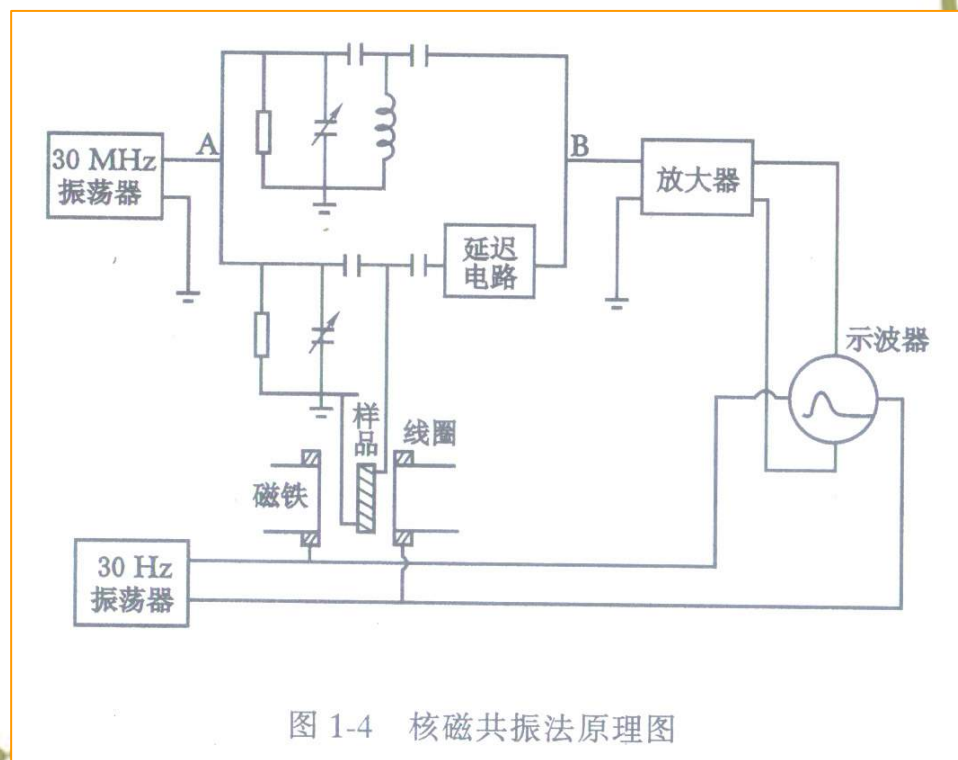


图 1-4 核磁共振法原理图



# PKU-FEL实验平台覆盖的电磁波谱

