

# 裸核与重类氢离子研究

戴光曦

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘要** 中性原子的核与全剥离电子的裸核在核衰变行为上将会出现 A 链上相邻两核素的正负  $\beta$  衰变的反置, 从而修改了  $\beta$  稳定线. 现代技术已有可能产生直到最重的铀裸核, 并能存贮一定时间. 这就可能对很重的类氢离子的 S 电子兰姆移位和它们的超精细分裂值进行精确测量, 从而检验量子电动力学 (QED). 简要介绍产生并存贮裸核的最新成就, 在更高一级的水平上, 将核物理与原子物理的研究结合起来.

**关键词** 裸核 负  $\beta$  衰变到束缚态 兰姆移位

## 1 引言

高速原子束穿过一片碳箔, 将产生电离而变成离子. 箔内密集电子对束的电离作用等效于极高温下的热电离. 该温度可与炽热星球的温度相比拟. 基于这个原理而衍生出束箔光谱学的学科. 这时, 可在实验室内模拟天体上的热电离过程; 对比束箔谱与天体谱, 用来确定星球的化学组分.

基于束箔原理要将重元素原子的电子全剥离, 特别是产生裸铀核 (剥去 92 个电子), 由于要求束的能量很高, 所以只在近年来一些配套设施的建立才得以实现. 1989 年美国伯克利 (LBL) 的高能重离子加速器 (Bevalac) 和 1992 年德国达姆施塔得的国立重离子研究所 (GSI) 的 SIS 加速器才相继宣告获得了裸铀核. 不久, GSI 的 SIS 和与之相配套的大型电子冷却存贮环 (ESR), 首次将裸核存贮相当长的时间, 从而发现了 A 链上的正负  $\beta$  衰变的反置现象.

## 2 重裸核的产生和存贮

要得到重裸核, 采用束箔方法时要求束的能量达到高能区. 即单核能在  $200 \sim 2000 \text{ MeV/u}$  范围. 该束流又称高能重离子束. 兰州重离子国家实验室仅可提供中能束, 在  $20 \sim 100 \text{ MeV}$  范围. 因此只有美国 LBL 与

德国 GSI 有产生高能重离子加速器设备.

要剥离最内层的电子, 则重离子的运动速度应和它的 k 壳电子速度大致相等, 这样当它穿过箔时才能变成裸核. 原子序数为 Z 的离子, 要全剥离, 则重离子的单核能  $E_k$  可按下式估算

$$E_k = 1836 \times 13.6Z^2 \quad [\text{eV}] \quad (1)$$

对于铀,  $E_k$  为  $210 \text{ MeV/u}$ . 图 1 显示了实测结果:  $230 \text{ MeV/u}$  的 Bi 离子穿过铜箔后的电离谱. 从图可见, 最大电离几率为剥去 82 个电子, 这时仍留一个电子, 是铋的类氢离子. 图中可见, 全剥离 ( $83+$ ) 已有相当大的几率.

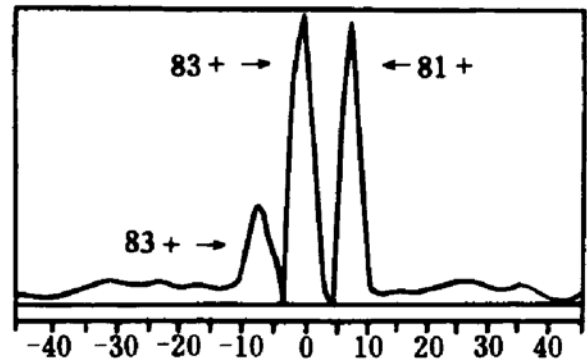


图 1 德国 SIS 加速出的  $230 \text{ MeV/u}$  Bi 离子穿过  $20 \text{ mg/cm}^2$  厚的铜箔后, 测出的铋离子剥离电荷谱

裸核获得后还有一个问题是如何将它有效地存贮起来, 以研究它们的性质. 裸核绝不可与容器壁接触, 否则马上与壁中电子复合

而成中性原子. 要有效地孤立高电离态的离子, 一个简便实用的方法是让它在高真空环内转圈. 该真空环称作存贮环. 要转圈, 就必然需要磁场, 图 2 显示了 GSI 的 SIS 与 ESR 的配置图. 在图中存贮环的一个重要附属装置是电子冷却器. 存贮时离子要在环中转几百万圈, 这要求环内真空要好, 以免残余气体改变离子电荷态而丢失离子. 同时离子能量也要单色化, 否则转几圈后(由于轨道偏离中心)也会丢失一些. 所以要降低离子能散度(换句话说就是降低离子束的无规运动的温度), 而用同离子速度相同的单能强电子束与离子束并行一段时间. 这样如果离子速度比电子速度高或低都会受到电子云的阻尼; 结果离子束的能量将趋于单色化: 被电子冷却了. 这种冷却是以电子束能散度变差为代价的. 冷却后离子可能在存贮环内呆较长时间, 以研究它的性质. 测试表明, 对 310MeV/u 的氦离子, 存贮的半衰期可达到 23.5 s. 这时对应的 $^{20}\text{Ne}$ 离子绕行离子束跑道上千万圈!

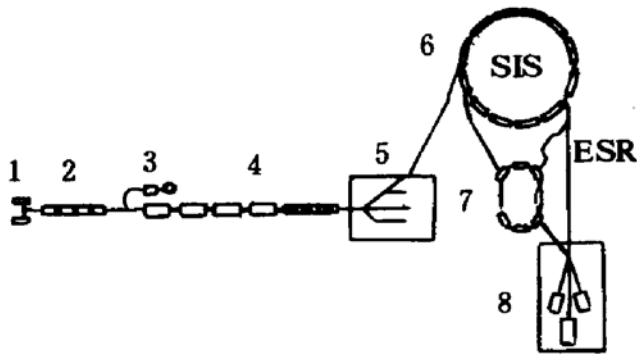


图 2 GSI 高能重离子加速器与电子冷却存贮环的配置图. 1. 离子源 2. 直线预加速器 I 3. 原子物理实验端 4. 预加速器 II 5. 中能核实验端 6. 高能加速器 SIS 7. 存贮环 ESR, 其中方块为电子冷却段 8. 高能重离子实验端

### 3 裸核 A 链上正负 $\beta$ 衰变反置的实验证明

原子是核与电子组成的量子系统. 电子状态对核的衰变是否有影响? 这是一个有趣的问题. 早在 1947 年 Deudell 等人曾从原理

上首次提出某些核在裸核时会从稳定核变成负  $\beta$  衰变核, 而相关邻核却从正  $\beta$  衰变变成稳定核. 这种  $\beta$  衰变反置现象, 虽然在 14 年后被 Bahcall 定量作过计算, 但一直没有实验证明. A 链上的 $^{163}\text{Dy}$ 和 $^{163}\text{Ho}$ 就属于这种情况. 在正常中性原子时前者为稳定核, 后者经过电子俘获(低能量的正  $\beta$  衰变)而达到前者, 半衰期为 33 a. 可是裸核 $^{163}\text{Dy}$ , 由于它比类氢 $^{163}\text{Ho}$ 的质量稍高, 所以有可能出现反过来的情况: 即裸 $^{163}\text{Dy}$ 作负  $\beta$  衰变, 并将发射的电子送到 $^{163}\text{Ho}$ 的 k 壳上. 这在专业术语称作“负  $\beta$  衰变到束缚态”的衰变(BBD). 实验是在 GSI 的存贮环上进行的. 将 290MeV/u 的裸核 $^{163}\text{Dy}$ 注入到存贮环中, 进行 $^{163}\text{Ho}$ 的生长曲线测量. 果然发现 $^{163}\text{Ho}$ 的量随时间而增加, 见图 3. 从增加率而计算出 $^{163}\text{Dy}$ 作 BBD 衰变到 $^{163}\text{Ho}$ 的半衰期为 47d.

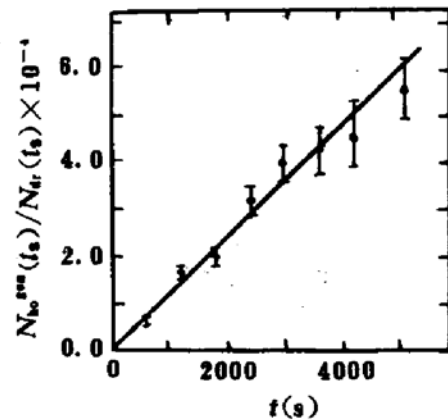


图 3 在存贮环中裸核 $^{163}\text{Dy}^{66+}$ 经过“负  $\beta$  衰变到束缚态”产生类氢 $^{163}\text{Ho}^{66+}$ 子核的生长曲线

这一实验首次证明了电子态对于核衰变的影响. 曾经过计算机搜寻后认为, 除 $^{163}\text{Dy}$ 外, 还应有 $^{187}\text{Re}$ 、 $^{205}\text{Tl}$ 、 $^{153}\text{Gd}$ 、 $^{193}\text{Ir}$ 、 $^{194}\text{Au}$ 、 $^{202}\text{Tl}$ 、 $^{213}\text{Po}$ 、 $^{215}\text{At}$ 、 $^{222}\text{Rn}$ 和 $^{235}\text{U}$ 等共 11 种核素. 目前 GSI 的科学家正对 $^{187}\text{Re}$ 和 $^{205}\text{Tl}$ 进行类似测量, 估计它们的半衰期分别为 10a 和 100d. 当然, 半衰期越长, 要求存贮的时间就长, 技术上也就更加困难.

由于在星球演变过程中的炽热状态, 等离子体是存在的一种方式, 这时核都呈裸核状态. 因此核素图中的  $\beta$  稳定线将在上述 11

个核素中朝原子序数加 1 移位. 这样在星球演变中的核合成计算中, 必须考虑这一点.

### 4 重类氢离子的兰姆移位测定

通常将裸核外仅一个电子的高电离离子称作类氢离子. 将核与电子均看成点电荷, 略去有限大小时, 量子力学预示在同壳层下总量子数相同能量也相同. 例如, 总量子数均为  $1/2$  的  $S_{1/2}$  与  $P_{1/2}$  应有相同能量. 但是兰姆发现它们之间有能差, 这叫兰姆移位. 实际上兰

姆移位发生在各条量子能级上, 对于基态 ( $n=1$ ) 的  $S_{1/2}$  移位最大, 它半经验地表示为

$$\Delta E_{1s} = \frac{\alpha}{\pi} (Z\alpha)^4 F(Z\alpha) m_0 c^2 \quad (2)$$

式中  $Z$  为类氢离子的原子序数,  $\alpha$  为精细常数 (它为  $1/137$ ),  $m_0 c^2$  为电子的质能 ( $511\text{keV}$ ).

从 (2) 式可见, 离子越重, 则移位  $\Delta E_{1s}$  越大, 与  $Z$  的 4 次方成正比. 过去仅研究到  $Z \sim 50$ , 再重则尚未研究. 由于重类氢离子现已获得, 所以测得实测数据将可以从 (2) 式来定出  $F(Z\alpha)$  因子函数.

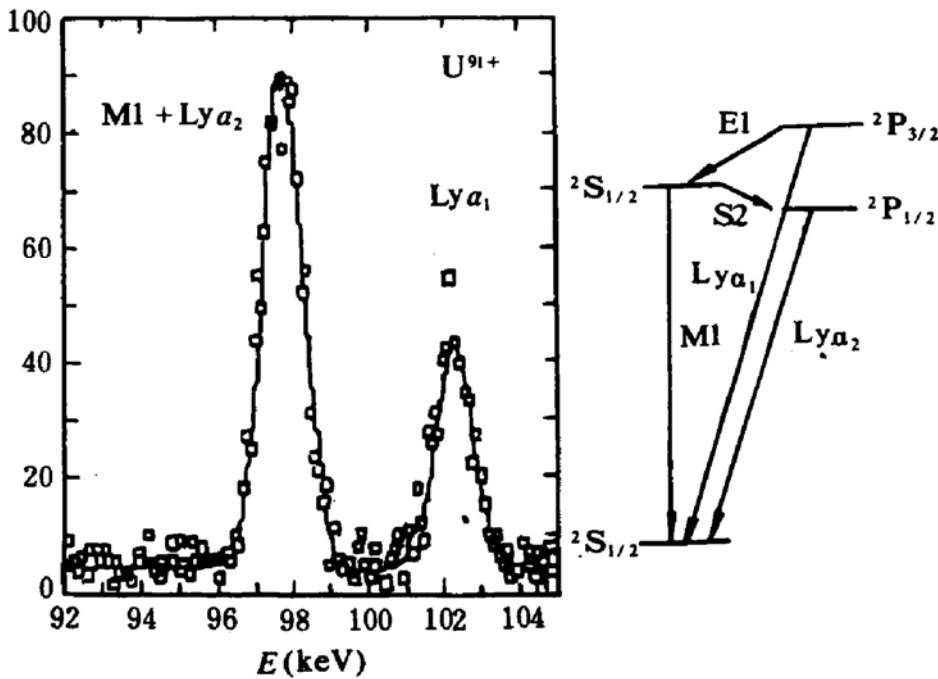


图 4 铀类氢离子发射的 X 射线谱, 这时  $M_1$  与  $Ly\alpha_2$  混合跃迁线能量为  $97.71\text{keV}$ , 比无兰姆位移计算值  $98.14\text{keV}$  低  $430\text{eV}$

图 4 中显示了铀类氢离子兰姆位移的测量结果. 用  $295\text{MeV/u}$  的裸铀核, 穿过氮气后俘获一个电子而形成类氢铀离子. 用环状的锗(锂) X 光探测器测量该电子从  $n=2$  退激到基态的 X 射线并与类氢铀离子符合起来. 这就给出无本底的 X 光谱. 图中也显示了这条拉曼  $\alpha$  线系谱和对应的退激能级图. 从 X 射线谱可得到基态  $1S_{1/2}$  的兰姆移位为  $429 \pm 63\text{eV}$ , 而理论计算结果为  $458\text{eV}$ . 实验支持了理论结果. 除了铀外, 对  $Z=66, 79, 83$  都作了移位测量, 这样就补全了  $1S_{1/2}$  的兰姆移位数

据. 这些数据都显示在图 5 中.

从图 5 可以看出, 在  $Z > 66$  区域上, 理论的  $F(\alpha Z)$  随  $Z$  有上升的趋势, 实验点也是支持的.

实验与理论一致, 表明约翰逊的计算是正确的. 从计算结果可看出  $1S_{1/2}$  移位的贡献主要来自核的有限大小与点核下的电子自能项. 前者给出的贡献随  $Z$  减小而减小. 例如对铀, 此贡献达到  $42.3\%$ , 而对锡 ( $Z=50$ ) 贡献仅为  $5.4\%$ . 这表明重类氢离子兰姆位移随核半径增加占的比份很大.

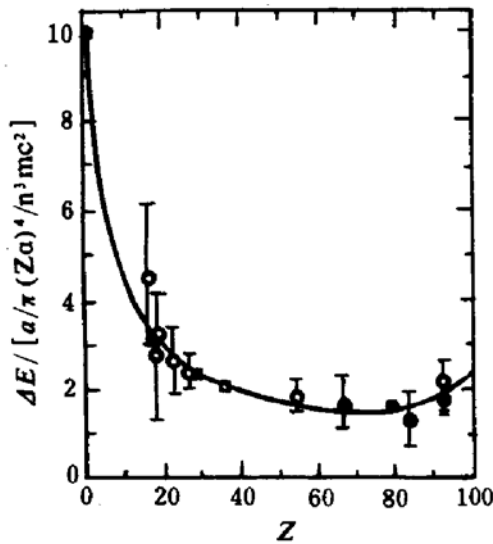


图 5 兰姆移位函数因子  $F(\alpha Z)$  的实验测量点与理论曲线的比较

### 5 重类氢离子超精细分裂测量

由于核磁矩或电四极矩与电子的作用, 将使电子能级呈超精细分裂. 对于  $^{209}\text{Bi}$  的类氢离子, 由于  $^{209}\text{Bi}$  核自旋为  $9/2$ , 而  $1s$  电子自旋为  $1/2$ , 所以就使电子能级分裂成  $F=4$  和  $5$  两条能级, 见图 6. 图中也给出了两条能级间的 M1 跃迁谱.

实验是用平行于  $^{209}\text{Bi}$  类氢离子束的激光束进行激发的. 测出处于  $F=5$  激发态上的寿命为  $0.351\text{ms}$ , 退激光的频率为  $2438.9\text{\AA}$ . 图中的光谱有一定宽度 ( $\sim 0.4\text{\AA}$ ), 它是由于 Bi 离子的速度稍有不同而造成多谱勒效应差别而出现的. 不过这仍是相当精确的测量.

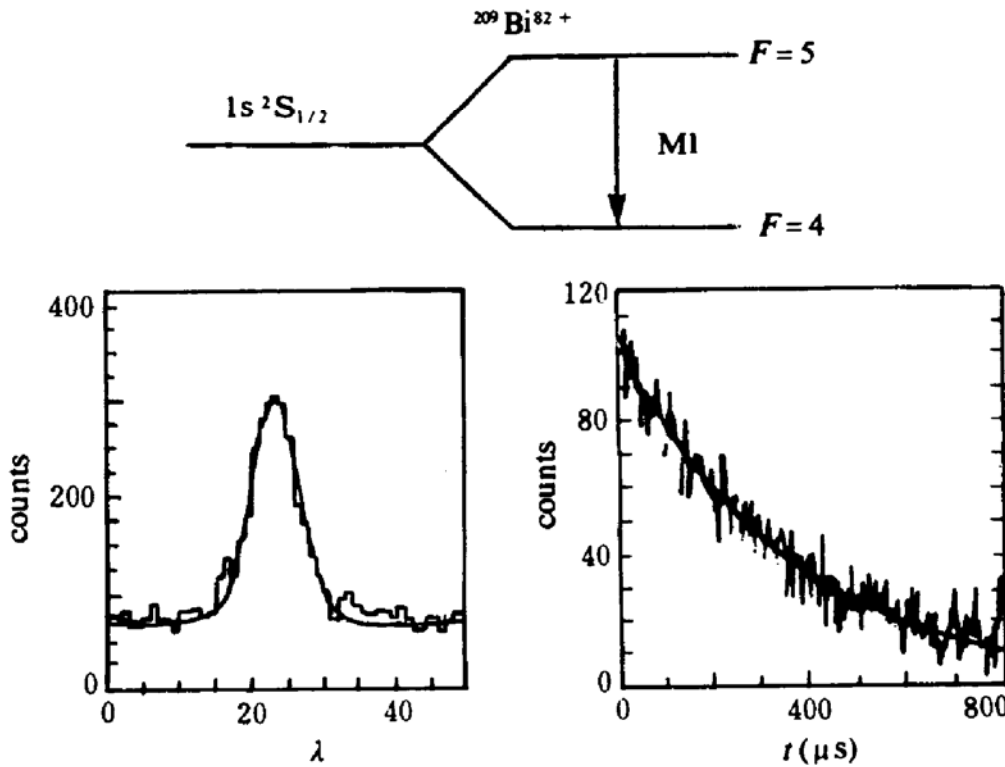


图 6  $^{209}\text{Bi}^{82+}$  类氢离子  $1s$  电子能级的超精细分裂及测量到的能级间的跃迁谱(左)和上能级衰变的时间谱(右)

从实测的退激光频可定出超精细分裂值, 加上寿命值均应从理论上得到解释. 计算表明用常规理论, 考虑核的电荷有限分布和电子对核的磁化分布, 可满意地解释实验结果; 而且无需做量子电动力学(QED)修正. 这就与狄拉克理论正好相称. 由此可得出这

样的看法, 要么 QED 效应很小可以忽略, 要么真空极化修正与自能修正(修正值的符号与前者相反)正好抵消. 这两者都是以前尚未预料到的. 总之, QED 是否在超精细分裂中起作用就有了疑问. 所以进一步从实验与理论上进行研究就十分必要了. (下转第 2 页)

1). 纲图中的能级基本与在  $^{175}\text{Yb}(t, \alpha)^{175}\text{Tm}$  反应研究中所得到的  $^{175}\text{Tm}$  的一些激发态相一致<sup>[5]</sup>.

$^{175}\text{Er}$  的半衰期测定为  $1.2 \pm 0.3\text{min}$ . 从  $^{175}\text{Er}$  的衰变纲图中, 我们指定了属于  $^{175}\text{Tm}$  的  $\frac{1}{2}^+$  [411] 基态带. 该带的相应惯性参数及脱耦参数被确定为  $A=12.9$  和  $a=-0.93$ , 与附近核的值具有很好的一致性.

衷心感谢加速器人员的大力支持!

### 参 考 文 献

- 1 Chasteler R M, et al. Z. Phys. 1989, A332:239
- 2 Becker K, et al. Nucl. Phys., 1991, A522:557
- 3 Yuan Shuanggui, et al. Z. Phys., 1993, A344:355
- 4 Yuan Shuanggui, et al. Z. Phys., 1993, A346:187
- 5 LΦVhΦiden G, et al. Nucl. Phys., 1979, A327:64

## New Isotope $^{175}\text{Er}$

Zhang Xueqian Yuan Shuanggui Yang Weifan Guo Tianrui

Li Zongwei Yu Xian Mou Wantong Du Yifei

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Sciences, Lanzhou 730000)

**Abstract** the synthesis and  $\gamma$  decay scheme of new isotope  $^{175}\text{Er}$  is reported for the first time. The related experimental process and main results are represented briefly also.

**Key Words** synthesis of new isotope  $\gamma$  decay decay scheme

(上接第 11 页)

## Nude Nucleus and Hydrogen-like very Heavy Ions

Dai Guangxi

(Institute of Modern Physics, Chinese Academy of Science, Lanzhou 730000)

**Abstract** In behaviour of nuclear disintegration a couple of nuclei linked by  $\beta^+$  decay would be reversed by  $\beta^-$  decay, when these nuclei are changed from neutral to nude state that results in the revision of  $\beta$ -stability line. With the nude nucleus  $\beta^-$  decay into atomic bound states is noted by  $\beta_b$ . By the modern technology it is possible to produce up to Uranium nude nucleus which can be kept for a certain time. With the nude nuclei or H-like ions, the  $\beta_b$ , the Lamb shift on S-electron and the hyperfine splitting for very heavy H-like ions can be studied. From the splitting accurate data the QED can be checked.

In addition the achievement of the technique of the cooling and storage heavy ion ring is briefly introduced in the paper. The research of nuclear and atomic physics would be connected together in higher level.

**Key Words** nude nucleus  $\beta^-$  decay to the bound states Lamb shift