

# 高离化态重离子研究的最新进展

王友德

(中国科学院近代物理研究所 兰州 730000)

**摘 要** 简要介绍利用重离子冷却储存环开展高离化态重离子研究的最新进展,着重介绍高离化态重原子研究的最新状况,以及高离化态重离子在核物理、天体物理和原子物理等交叉学科研究中的应用.

**关键词** 高离化态重离子 重离子冷却储存环 原子物理

## 1 引 言

长期以来,人们对正负离子结构的了解远没有像对中性原子和分子结构了解的那样多,这种不平衡的原因主要是离子的产生和保持相对要困难得多,特别是对高离化态原子,如直到类氢、类氦铀的产生和保持就更为困难.近年来,重离子冷却储存环的相继建成,为高离化态重离子的研究提供了唯一的途径.

人们之所以对带有一、二个电子的重离子的研究特别感兴趣,是因为它们是最简单、最基本的原子系统.对这些基本原子系统的细致研究,可以得到与多电子原子完全不同的清晰的原子结构,因为多电子原子要想从十分复杂的多能级结构中鉴别出感兴趣的物理问题是非常困难的;对少电子重原子的研究,可有助于深入了解原子核库仑场中量子电动力学(QED)的规律;更重要的是对带有一、二个电子的重离子碰撞和辐射过程的研究,可发现许多过去人们并不熟悉的新物理法则.

一个简单的自由离子,在静止状态中将是最理想的光谱学样品.为了接近这种理想状态,对于较低电荷态的原子已经做了大量有趣的工作<sup>[1]</sup>.在许多基于加速器的实验中,人们寻找一种压缩快离子束样品填充一个尽量小的相空间,为增加相空间密度已经发展了不同的技术.1967年,法国科学家 Budker

首次提出了<sup>[2]</sup>著名的热离子束和一个冷的电子束热交换的电子冷却法.1974年,在前苏联的新西伯利亚建成了世界上第一台电子冷却装置,它充分证明电子冷却不仅是可行的,而且其实验结果超过所有其它方法的实验结果<sup>[3]</sup>.现在世界上电子冷却储存环的数量已有较大的发展,至少10台以上已在运行,另有一些正在安装和计划建造中.但是,能冷却贮存类氢、类氦铀的重离子冷却储存环为数很少.正在计划建造的兰州重离子冷却储存环(CSR)为高离化态重离子的研究提供了一种最新、最有力的手段.因为 CSR 能提供高流强、高品质、清洁的和冷却的高离化态重离子(特别是重的类氢、类氦离子)循环束,使过去无法做到的实验将得以实现.

## 2 交叉学科的研究

利用重离子冷却储存环,在核物理领域可开展放射性束合成新核素的研究、极端条件下核物质性质的研究、探索超重元素合成和重离子辐射应用的研究等.在天体物理方面研究宇宙的产生、演变、能量来源、质量丰度和年龄等.这些学科前沿课题已有专门的详述.这里只涉及核物理、天体物理和原子物理等交叉学科的研究.

在元素的核合成过程中,束缚态  $\beta_b$  衰变就涉及核物理、天体物理和原子物理前沿的重要研究.束缚态  $\beta_b$  衰变是指  $\beta^-$  衰变进入原

子的束缚电子态并发射单色反中微子的奇异衰变： $ZX \rightarrow Z_{+1}Y + \bar{\nu}$ 。它是轨道电子俘获(EC)的时间反演。中性原子不存在电子空位，不可能发生  $\beta_0$  衰变。只有高离化态原子， $\beta^-$  衰变到 K 壳或 L 壳的束缚  $\beta_0$  衰变才可能以高的几率发生，如  $^{163}_{66}\text{Dy}^{66+} \rightarrow ^{163}_{67}\text{Ho}^{66+}$ 。在重离子冷却储存环上研究这种过程，不仅可以研究宇宙演变过程，建立非常重要的宇宙钟<sup>[4]</sup>，而且为核物理学一个重要的、长期进展缓慢的中微子质量上限的测定提供一个有效的方法<sup>[5]</sup>。

### 3 原子物理学研究

#### 3.1 离子电子辐射重组

电荷态  $q$  的重离子与一个电子相互作用，重新结合  $q-1$  电荷态，放出光子，通常将这一过程称为辐射重组(RR)(Radiative recombination)过程。如果是裸离子与电子(自由电子或束缚电子)相互作用，电子可能被俘获到基态(K 壳层)，也可能被俘获到激发态 L、M、...，剩余的能量以发射光子的形式放出，这就是辐射电子俘获(REC)，其过程如图 1 所示；如果是  $q < Z$  的离子与电子相互作用，电子被俘获到某一束缚态，电子释放的能量传给离子的另一个电子，使该电子激发，形成双激发态，这个过程称为双电子复合(DR)(Dielectronic recombination)，其过程如图 2 所示。这两种过程在重离子冷却储存环中都存在。研究离子电子辐射重组不仅是研究重离子冷却储存环本身特性的需要，而且也是研究等离子体物理和天体物理所不可缺少的。因为离子电子辐射重组对等离子体性质和行为有很强的影响，特别是高离化态重离子与电子碰撞的有关数据(如复合截面)，对模拟天体物理中的等离子体和托卡马克装置中的放电现象的研究都是特别重要的。

在重离子冷却储存环中，裸离子通过电子冷却器和内靶时必定发生，带有动能  $E_e$  的电子被俘获到裸离子的 K 壳层或 L、M 等壳

层，多余的能量以光子的形式放出。研究这个过程对了解裸重离子重组机制，特别是对 REC X 射线光谱分布的测量，对提供离子与电子相互作用的有关数据以及电子被俘获进入态的束缚能的数据都是不可缺少的。

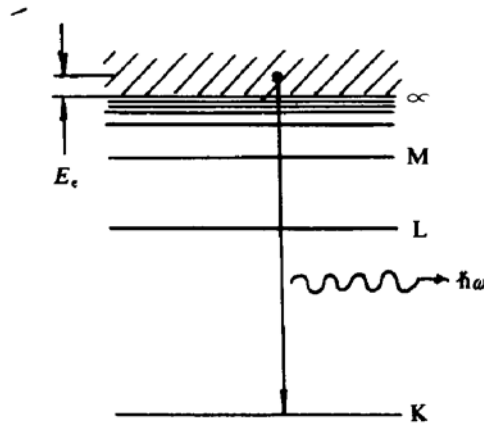


图1 REC 过程示意图

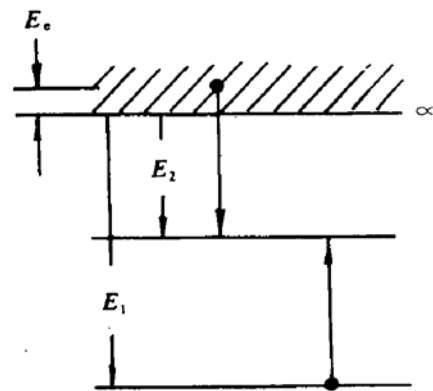


图2 DR 过程示意图

DR 是 Auger 过程的逆过程；虽然 Auger 过程 1923 年就被发现，但是 DR 过程的研究则始于 1983 年以后<sup>[6,7]</sup>，至今，这方面的工作仍开展的很少。因为对于高离化态重离子，在常规加速器或其它装置上随着  $Z$  增大，离子束流强度将减小 ( $< 10^6/s$ )，和电子相互作用的有效密度越来越小，直接测量 DR 截面的实验就变得十分困难，只能用间接的方法，如共振动量转移和激发的方法，一般测量精度都比较差<sup>[8]</sup>。而使用重离子储存环可对 DR 过程进行直接测量。因为重离子在冷却储存环中反复循环运动 ( $\sim 10^6$  圈/秒)，大大增加了有

效离子束的密度,和电子碰撞的几率也增加了近 $10^6$ 倍,这样就能保证 DR 的精确测量.

### 3.2 离子离子碰撞

具有高原子序数  $Z$  的原子(如 Pb 和 U)的内壳层电子具有高的轨道速度,所以在快离子碰撞中可以形成准分子轨道.当入射能量增加到一定的区域时,核可以接近到足以相互接触而形成统一的原子,这个统一的原子具有很强的库仑场,而且它的内壳层电子的波函数也不同于常规原子的波函数.

从这一观点出发,当两高能重离子碰撞时,就发生共振核反应(包括弹性核散射),并对核外电子行为产生一系列影响,表现为 K 壳层电离、X 射线发射、 $\delta$  电子发射和电子俘获等.特别是相对论重离子碰撞,两原子核接近,形成瞬间电荷态  $Z_{\text{eff}} > 173$  时, K 空穴能量进入 Driac 负能连续区,超过产生正负电子对的阈值,即  $U_K \leq -2m_e c^2 = -1.02 \text{ MeV}$ ,电子向 K 空穴跃迁时,会发射正负电子对.这种特有的现象,原先许多理论都不适用了,它开拓了原子物理研究的一个全新的领域.

60年代理论上对正负电子对的产生就作了预言,70年代国际上许多实验室开始寻找重离子碰撞中产生的正电子,由于碰撞的能量不高,产生正电子的几率非常小,实验很难实现.80年代以后,人们用更高的碰撞能量,产生深部非弹性散射,入射粒子在克服库仑位垒后,由于入射动能部分消耗于激发原子核内部,出射的粒子离开库仑位垒时就要停留较长时间,这样正电子发射几率就大为增加.人们不仅找到正电子  $e^+$ ,而且还测量了  $e^+$  能谱.但是在能谱上出现了一些锐的峰,理论上至今还无法解释,实验上需要更精确地测量<sup>[9]</sup>.人们试图找到一种新的理论,也可能发现新的粒子.为此,日本 RIKEN 正在建造的双储存环,把此项研究作为主要项目之一.德国 GSI 正大力开展这项研究,他们除了做  $Z_{\text{eff}} > 173$  各种元素的实验(如  ${}_{92}\text{U} + {}_{96}\text{Cm}$ 、 ${}_{90}\text{Th} + {}_{92}\text{U}$  和  ${}_{90}\text{Th} + {}_{90}\text{Th}$ )外,还做了  $Z_{\text{eff}} < 173$  的实验,如  ${}_{82}\text{Pb} + {}_{82}\text{Pb}$  ( $Z_{\text{eff}} = 164$ ) 和  ${}_{92}\text{U} + {}_{73}\text{Ta}$

( $Z_{\text{eff}} = 165$ ),也都观察到正电子峰.他们使用双桔子谱仪,正电子在后半球探测,电子在前半球探测(每个半球由60个 Si 探测器组成),目的是更精确地测量正电子谱和正负电子能量相加谱随入射能量的变化,以期解开正电子锐峰之谜.

### 3.3 离子原子碰撞

在重离子冷却储存环上开展高电荷重离子和轻原子碰撞,研究共振转移和激发(RTE)过程,不仅能得到较好的结果,而且也能了解冷却的特性.

带有一个(或多个)电子的离子在和环内气体靶原子(分子)发生单次碰撞时,俘获了原子(分子)中的一个轨道电子,使离子形成双电子激发中间态,它和 DR 过程非常类似,也是一种共振过程,只不过是靶原子(分子)中的轨道电子代替了能量单一的定向运动的电子.所以必须将 DR 截面对靶电子的动量分布作平均处理,就得到 RTE 截面.反之,从实验测量得到 RTE 截面就可以获得 DR 信息.利用重离子冷却储存环研究共振转移和激发(RTE)截面,不仅韧致辐射本底大大降低、而且分辨率也会大大改善.

在重离子冷却储存环中,重离子与内气体靶碰撞将有效地产生高电荷低能( $< 10 \text{ eV}$ )反冲离子,这为精确光谱测量提供了一个非常好的途径.根据 Bosch 估算<sup>[10]</sup>,  $200 \text{ MeV/u}$  的  $\text{U}^{92+}$  分别和中性的 Ar 及 Xe 碰撞,裸反冲离子的截面分别大约为  $10^{-19} \text{ cm}^2$  和  $10^{-22} \text{ cm}^2$ .如果在环中用  $10^{10}$  贮存的 U 离子与厚度为  $10^{12} / \text{cm}^2$  的靶碰撞,裸反冲离子的产额分别为  $10^9 \text{ Ar}^{18+} / \text{s}$  和  $10^6 \text{ Xe}^{54+} / \text{s}$ .这种高电荷低能反冲离子能满足任何类种精确光谱学的测量.

### 3.4 精密原子光谱学

近年来,虽然高离化态原子光谱学有了突飞猛进的发展,但高离化态原子光谱的数据仍很缺乏<sup>[11]</sup>.传统的原子光谱学研究主要集中于中性和低电荷原子一个狭小的范围,虽有为数不多的高电荷态光谱线,但剥离度一般都不高.难以获得高电荷的重离子是数

据缺乏的主要方面,问题的另一方面是需要提高实验精度,包括对电子关联、相对论、核效应和量子电动力学(QED)效应等的精细分析和修正.对于高电荷重原子系统,这些效应变得更为突出.

40年代发现的兰姆(Lamb)位移,导致了量子电动力学(QED)的蓬勃发展,也是精细结构研究的一大成就.半个世纪来,尽管实验测量方法和理论计算方法都有较大的发展,但绝大部分实验仍停留在 $Z \leq 36$ 较轻的元素, $n=2$ 的氢和类氢的 $2^2S_{1/2}$ 和 $2^2P_{1/2}$ 间的兰姆位移测量.早期主要研究H、D和He等兰姆位移,以后随着实验手段的不断改进,测量类氢离子越来越重,如 $Li^{2+}$ 、 $C^{5+}$ 、 $O^{7+}$ 、 $F^{8+}$ 、 $Ar^{17+}$ 及 $K^{35+}$ 等.近年来,因重离子冷却储存环的建成,可在环中用裸重离子俘获自由电子研究 $Au^{78+}$ 、 $U^{91+}$ 类氢重离子的兰姆位移.

兰姆位移主要是由电子与辐射场相互作用引起的,这种相互作用对S态影响最大,而对P、D、F、...各态的影响迅速变小,并可以忽略不计.所以,人们主要研究S态的兰姆位移.其位移可用下面的简单公式表达

$$S_n = \frac{\alpha}{\pi} \frac{(Z\alpha)^4}{n^3} F(Z\alpha) mc^2$$

这里, $\alpha$ 是精细结构常数, $Z$ 是原子序数, $n$ 是主量子数, $m$ 是电子质量, $c$ 是光速, $F$ 是 $Z\alpha$ 慢变化函数.从式中可以看出,兰姆位移和 $Z$ 及 $n$ 都是高次方关系,随着 $Z$ 的增加而迅速增加,随 $n$ 的增加而迅速减小.越重的类氢原子兰姆位移越大,这就是人们对高 $Z$ 类氢原子特别感兴趣的原因之一.

对于类氢离子 $1S_{1/2}$ 能级的兰姆位移的研究是80年代以后的事,因为 $1S_{1/2}$ 电子的自能与 $Z^4$ 有关,对于低电荷态类氢离子,实验难以观察, $Z$ 越小实验越困难.由于现在高离化态类氢重离子技术的发展,此项研究才得以实现.目前测量 $1S_{1/2}$ 兰姆位移的主要方法是用弯晶谱仪极为精确地测量 $2P_{3/2}-1S_{1/2}$ 和 $2P_{1/2}-1S_{1/2}$ 的X光波长,然后再用Dirac理论计算 $n=2 \rightarrow n=1$ 的能量,两者的差值即为 $1S_{1/2}$ 的兰

姆位移值.德国GSI最近在重离子冷却储存环上测量了 $Au^{78+}$ 和 $U^{91+}$ 的 $1S_{1/2}$ 兰姆位移<sup>[2]</sup>.

关于类氢离子兰姆位移的研究要比类氢离子复杂得多,因为三体问题的理论计算要考虑很多修正、难度很大,目前只有很少的实验.至于类锂离子兰姆位移研究、难度更大,实验报导也就更少了.

精密光谱学测量另一个重要方面是禁戒跃迁光谱的测量.在中性和低离化态原子光谱研究中,允许的电偶极跃迁占绝对优势,而在高离化态原子光谱中各种类型的禁戒跃迁都变得可能,而且 $Z$ 足高时,禁戒跃迁就可能超过允许跃迁.高离化态重原子光谱非常复杂,除禁戒跃迁外,还有多次激发能级,分析这些谱线是非常困难的.如果是类氢、类氦离子,研究这些光谱就简单得多.

### 3.5 重离子泵浦激光

Ulrich等人证明<sup>[13]</sup>:如将加速器提供的脉冲离子束能量密度为 $10^{11} \text{ W/cm}^2$ 引到一个气体靶上,就可产生红外线激光.因功率密度(P/A)的要求,限制了激光向软X射线的延伸,若加速器的功率密度增加到 $10^{13} \text{ W/cm}^2$ ,激光波长可以缩短3~4倍.由于重离子冷却储存环具有高能量、高流强、高密度的离子流,完全可以产生远紫外到软X射线激光.这种短波长激光器对许多学科将产生重要的作用,这是人所皆知的.

## 参 考 文 献

- 1 Edited by Patrick Richard. Atomic Physics on Accelerators, New York, 1980, 17
- 2 Budker G I. Atomic Energy, 1967, 22: 346
- 3 Budker G I, et al. Particle Accelerators, 1976, 7: 197
- 4 Takahashi K, Yokoi K. Nucl. Phys., 1983, A404: 578
- 5 Kappeler F, et al. Rep. Prog. Phys., 1989, 52: 945
- 6 Belic S S, Dum G H, et al. Phys. Rev. Lett. 1983, 50: 339
- 7 Williams F. Phys. Rev. Lett., 1984, 29: 2936
- 8 Datz S, et al. Nucl. Instr. & Meth., 1987, B23: 248
- 9 Berdermann E, et al. GSI Scientific Reprot, 1990, 161
- 10 Fritz Bosch. Phys. Scripta, 1987, 36: 730

- 11 Martinson I. Rep. Prog. in Phys., 1989,52:157  
 12 Beyer H F, et al. GSI Scientific Report, 1994,133

- 13 Ulrick A, et al. Appl. Phys. Lett., 1983,42:782

## Recent Progress of Study of High Ionized Heavy Ions

Wang Youde

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

**Abstract** The recent progress of study of high ionized heavy ions in the world are presented briefly by using heavy ion cooling stored ring. Especially, the recent status of study of high ionized heavy atoms, as well as the application of study of high ionized heavy ions in cross subject of nuclear physics, astrophysics and atomic physics are described.

**Key Words** high ionized heavy ion heavy ion cooling stored ring atomic physics

(上接第12页)

- |   |   |
|---|---|
| Phys., Oxford Univ., 1988,88:88                                 | 17 Shicheng Wang, et al. Phys. Rev., 1987,C36:2710                  |
| 8 Poenare D N, et al. Phys. Rev., 1993,C47:2030                 | 18 Barwick S W, et al. Phys. Rev., 1986,C34:362                     |
| 9 Poenare D N, et al. Phys. Rev., 1985,C32:572                  | 19 Hourani E, et al. Phys. Lett., 1985,160B:375                     |
| 10 Poenare D N, et al. At. Data Nucl. Data Tables, 1991, 48:231 | 20 潘强岩. 1994年国家自然科学基金申请书, "Z=56~64, N=58~72核区核素的 $\alpha$ 和集团衰变的研究" |
| 11 Price P B, et al. Phys. Rev. Lett., 1985,54:297              | 21 Tretyakova S P, et al. JINR Rapid Commun., 1985, 13:34           |
| 12 Gales S, et al. Phys. Rev. Lett., 1984,53:759                | 22 Tretyakova S P, et al. JINR Rapid Commun., 1985, 7:23            |
| 13 Kutschera W, et al. Phys. Rev., 1985,C32:2036                | 23 Shicheng Wang, et al. Phys. Rev., 1989,C42:2750                  |
| 14 Shicheng Wang, et al. Phys. Rev., 1987,C36:2717              | 24 Moody K J, et al. Phys. Rev., 1987,C36:2710                      |
| 15 Banwick S W, et al. Phys. Rev., 1985,C31:1984                |   |
| 16 Paul M, et al. Phys. Rev., 1986,C34:1980                     |   |

## Study of Heavy-particle Radioactive Decay

Pan Qiangyan

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

**Abstract** The theoretical and experimental decay studies of heavy-particle radioactivity are reviewed. The experimental studies of  $\alpha$  and heavy-particle radioactivity in the region of  $Z=56\sim 64$  and  $N=58\sim 72$  is proposed at HIRFL.

**Key Words** cluster decay cluster model unitized model