

电子束离子阱及高电荷态离子相关物理*

邹亚明[†]

(复旦大学应用离子束物理教育部重点实验室 上海 200433)

摘要 文章简要介绍了电子束离子阱(EBIT)的发展背景及其在国际上的状况,较详细地解释了它的结构和工作原理,介绍了它在分解研究等离子体方面的特别优势以及在EBIT上能够实现的高电荷态离子相关的前沿物理学问题研究.

关键词 电子束离子阱,高电荷态离子,原子结构,原子碰撞,等离子体诊断,量子电动力学效应

ELECTRON BEAM ION TRAPS AND HIGHLY CHARGED ION RELEVANT PHYSICS

ZOU Ya-Ming[†]

(Applied Ion Beam Physics Laboratory, Fudan University, Shanghai 200433, China)

Abstract A brief introduction to the historical background and current status of electron beam ion traps (EBITs) is presented. The structure and principles of an EBIT for producing highly charged ions are described. Finally, EBITs as a potential tool in hot-plasma diagnostics and in studying frontier problems of highly charged ion physics are discussed.

Key words electron beam ion trap, highly charged ion, atomic structure, atomic collision, plasma diagnostics, quantum electro-dynamic effect

在通常实验室条件下,人们用物理和化学方法来电离原子,所获得的都是低电荷态的离子,从原子上剥离的电子都是少量的价电子.但是,在星球和宇宙中,或者是在实验室高温等离子体中,原子中的电子可以被大量剥离,不仅价电子,内部深层的电子也可以被电离,使原子成为高电荷态的离子.

过去,产生高电荷态离子的手段很有限,电荷态高于2—3价的离子就已经被称作高电荷态离子.随着实验手段的发展,人们在实验室中能够产生和研究的离子电荷态越来越高.借助于对高电荷态离子的逐渐认识,人们对自然界及宇宙的认识也不断的进步.例如,对于日冕(solar corona)温度的认识,过去一直认为它的温度与太阳表面温度相近,在6000℃左右.由于对Fe的高电荷态的研究,才使人们认识到日冕中的未知谱线并非是由地球上不存在的元素产生,而是Fe的12价正离子谱线,由此推断日冕的温度要比太阳表面的温度高出三个数量级,即几百万度^[1].随着所能涉及的离子电荷态越来越高,从量变到质变,它对物理学家提出了新的挑战.

人们要问,高电荷态离子有哪些不同于低电荷态离子的特性,研究高电荷态离子的物理会给已有的物理学基本理论带来什么样的变革,高电荷态离子在宇宙中的形成过程等等.高电荷态离子相关物理的研究是一门新的学科,它对许多相关学科都有重要影响.它对原子结构、核结构、相对论、量子电动力学、基本粒子理论的研究和检验,以及对天体、聚变等各类等离子体的研究和诊断都有着重要的作用.所以,国际学术界一直致力于这方面的研究,特别是研究怎样产生(极)高电荷态离子以及它们的基本特性.

1 EBIT的发展概况

在实验室中产生很高电荷态离子是非常困难的

* 国家杰出青年科学基金(批准号:10125520)、国家教育部优秀青年教师基金资助项目

2002-07-11收到初稿,2002-08-19修回

† 通讯联系人, E-mail: zouym@fudan.edu.cn

表 1

	电子束能量/keV	束流密度/(A/cm ²)	束流强度/mA	电子束半径/ μm	磁场强度/T	液氮消耗量/(L/h)
上海 EBIT	200	5000	200—250	30—50	5	0.2
SuperEBIT	200	6000	200	35	3	6
EBIT II	30	6000	200	35	3	5
FreEBIT	350(设计)	10000(设计)	750(设计)	30—50(设计)	8(设计)	0.2
	90(已达)	500(已达)	150(已达)	100(已达)	5(已达)	
YEBISU	340(设计)	10000(设计)	350(设计)	30(设计)	4.5	4—5
	150(已达)	3300(已达)	250(已达)	36.7(已达)		

事情,需要经过有大于被电离电子束束缚能的质心系碰撞能量的多次碰撞。一般采用两种方法:一种方法是用大型加速器产生的相对论性重离子轰击静止的固体靶,把离子剥离到高电荷态;另一种方法是用能量低得多的电子去轰击几乎静止的重离子(原子)气体靶,剥离离子(原子)到高电荷态。后一种方法就是电子束离子阱(electron beam ion trap, EBIT)中用到的。

靠电子束产生的空间电荷分布约束离子,并对这些离子接连不断地轰击,产生带多重电荷的离子,这一想法早在 20 世纪 50 年代就由 Plumlee 提出^[2]。十多年之后由 Donets 等人对其做了关键性的改良^[3],并在前苏联 Dubna 原子核联合研究所建立了第一台电子束离子源(electron beam ion source, EBIS)。这也是第一台用低能电子产生高电荷态离子的装置,它是 EBIT 的前身。1988 年,美国劳伦斯利物莫尔国家实验室(Lawrence Livermore National Lab)的 Marrs, Levine 及 Knapp 等人对 EBIS 进行了改良,建成了世界上第一台 EBIT 装置^[4],当时它的电子束的最高能量是 30 keV。在 1993 年这一台装置的能量被提升到 200 keV,然后于 1994 年在这套装置上第一次^[5]观察到了裸铀离子 U^{92+} 。在 EBIT 之前,要产生电荷态高于 30 的离子只能通过国际上几台昂贵的大型加速器,如今在 EBIT 这样一种适合于中等和小型实验室的装置上就可以产生周期表中任意元素的任意高电荷态离子,建造和运行费用都要比大型加速器经济得多。

目前国际上共有 7 台 EBIT,分布在美国、德国、英国和日本。美国的劳伦斯利物莫尔国家实验室于 1988 年和 1993 年先后建成了 EBIT I 和 EBIT II 两台装置,其中 EBIT I 在 1993 年完成能量升级,成为 SuperEBIT;EBIT II 于 2000 年搬迁至加州的 Lawrence Berkeley 实验室。另外美国的国家标准局(NIST)于 1994 年建成 NistEBIT。德国有两台装置:

一台是马普研究所(柏林)的 BEBIT^[6],建成于 1997 年,另一台是马普研究所(海德堡)的 FreEBIT^[7],于 2000 年在弗来堡大学建成,2001 年搬迁至海德堡。英国剑桥有一台 Oxford EBIT^[8],建成于 1994 年。日本电气通讯大学的一台 EBIT 称为 YEBISU^[9],建成于 1996 年。上述 EBIT 中 EBIT II, Oxford EBIT, NISTEBIT 和 BEBIT 的指标基本相同,都属低能 EBIT 装置。EBIT II 和所有的高能 EBIT 的性能指标列于表 1。我国正在上海建造一台上海 EBIT 装置,它的设计指标也列于表中。从表 1 可见,上海 EBIT 的设计指标接近国际上已达到的最好实际指标。

2 EBIT 的构造和工作原理

EBIT 的核心是一个能让电子和低电荷态离子连续碰撞的工作区。在这个区域中要有高密度的电子束流和被其约束的离子。最早实现这一要求的装置是 EBIS。图 1 是 EBIS 的内部结构示意图。

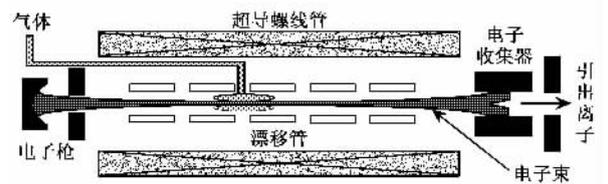


图 1 EBIS 内部结构示意图

EBIS 主要用作离子源,要求约束离子数多,而约束离子数与约束长度几乎成正比,故 EBIS 的轴向约束长度很长,一般在 0.5 到 1m。约束长度长导致的问题是离子升温很难得到控制,故离子的可约束时间很有限,这样电子对它们的逐渐电离的时间也就受到限制。虽然 EBIS 在众多种类的离子源中在能达到的离子电荷态高度方面是佼佼者,但它所能达到的电荷态仍然不尽人意。

Marrs, Levine 以及 Knapp 等人对 EBIS 中产生

强磁场的线圈及离子轴向约束长度等进行了改良,建成了第一台EBIT.在EBIT中(见图2),离子约束长度降低到2—3 cm,使得离子能够得到适当的冷却,延长离子约束时间,增加电子与离子的碰撞次数,所以在EBIT中能够产生的离子电荷态要高得多.同时由于在EBIT中使用了亥姆霍兹(Helmholtz)线圈替代了EBIS中的螺旋管线圈来产生强磁场,使得对离子约束阱区的直接观察成为可能,这样EBIT就成了一个集离子源和光源于一身的装置. EBIT是目前惟一能在一个很小的体积中产生、约束并研究高电荷态离子的设备.对于通过光谱手段的科学研究,EBIT有特别的优势,它能提供近乎静态的高电荷态离子的光谱,并且有很窄的电荷态分布.

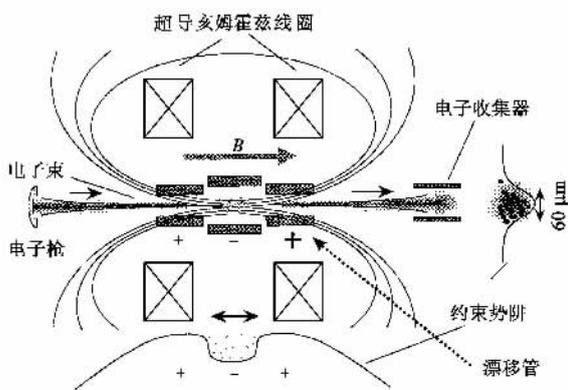


图2 EBIT内部结构示意图

一个完整的EBIT装置的例子如图3所示,它是正在建设中的上海EBIT.所有EBIT装置的主要结构基本上是相同的,它主要包括电子枪、输送管、漂移管(一般三节)、电子接收部件、加在漂移管外的超导亥姆霍兹线圈、冷凝系统(液氮)、高压电源、气体原子输入部件、低电荷离子源、低电荷态离子引入装置和超高真空系统.若考虑引出高电荷态离子,还要加入离子引出装置.其中最关键的是电子枪、漂移管、超导磁场和高压电源.

EBIT的工作原理如下:电子束从电子枪中被引出后,被漂移管和电子枪之间的高电压差加速(见图3),进入漂移管时达到所需能量,在漂移管中与低电荷态离子碰撞,使离子的电子不断被剥离,电荷态不断升高,直到达到平衡.漂移管中央即离子阱的阱区.通过选择电子束的能量和密度可以选择离子的电荷态.电子经过漂移管后被减速,最后被电子接收部件收集.

低电荷态离子可以由金属蒸气真空电弧(MEVVA)或激光离子源(LIS)产生后被引入到漂

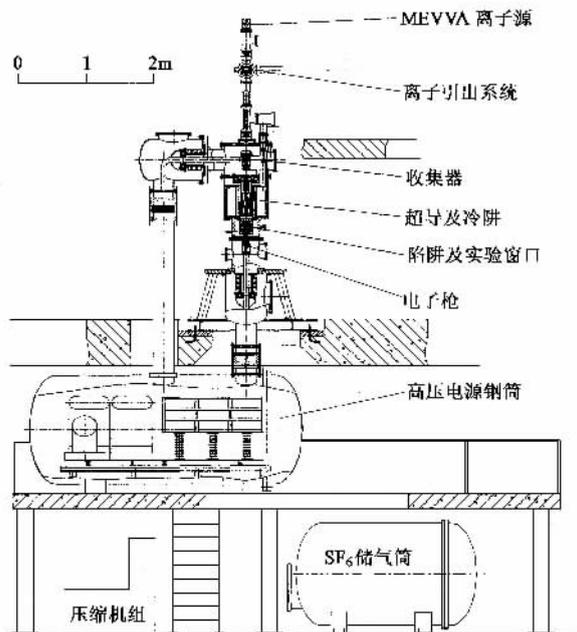


图3 正在建设中的上海EBIT结构示意图

移管,也可以直接把气体原子通过漂移管观察窗输入到漂移管中央,与电子初步碰撞后就形成低电荷态离子.离子一旦形成,就受到三重约束:电子束的空间分布(30—70 μm)对离子的径向约束,超导磁场对离子的附加径向约束及漂移管两端静电场对离子的轴向约束.超导磁场的主要作用是压缩电子束,增强电子流密度,以加快电离速度.超导磁线圈由冷凝系统维持.冷凝系统在维持超导线圈正常工作的同时,还使漂移管内的真空度进一步提高(在EBIT出现之后,为节省费用,出现了一种常温EBIT,用一般的磁线圈替代超导磁线圈,所以磁场强度低得多,电子束不能被压缩得很细,电子流密度也就不太高,所以常温EBIT所能达到的电荷态要比本文介绍的EBIT低得多).

3 在EBIT中获得高电荷态离子的基本原理

众所周知,当两个粒子碰撞,只有在质量相差十分悬殊(例如电子和原子碰撞)时,质量较轻的一方才可能将其几乎所有的动能转化为较重一方的内能;质量相当的粒子碰撞(例如离子和原子碰撞)时,有很大一部分能量必须留给质心运动以保证碰撞过程的动量和能量守恒,动能转化为内能的效率就低得多.针对后一种情况,人们发展了对撞机,使

质心保持静止以减少给予质心运动的能量来提高能量转换效率. 在 EBIT 中则是利用了上述第一种情况, 所以动能-内能转换效率很高.

现在我们先看一看 EBIT 对电子束能量的要求. 原则上讲, 只要电子在加速过程中得到的动能超过原子(或离子)中被电离电子的束缚能, 那个电子就可以被电离(注意碰撞电子和被电离电子的区别, EBIT 电子束中的电子是碰撞电子). 原子中越靠近原子核的电子, 其束缚能越大, 即束缚得越紧. 原子中由里向外, 第一主壳层的电子($n=1$)称为 K 电子、第二主壳层($n=2$)称为 L 壳层……当碰撞电子能量逐渐升高时, 它能电离掉的电子由外层向内层进发. 越是内层的电子越是难电离, 它需要的能量越高. 事实上电离和激发从物理过程来讲, 没有太大的区别, 电离可以说是被电离的电子被激发到连续态上, 而激发只是电子被激发到束缚态上, 但是电离使原子(离子)的电荷态升高, 而激发并不改变电荷态. 氢原子唯一的一个电子, 它的束缚能(基态)是 13.6 eV, 一旦 EBIT 中的电子束能量超过这一束缚能, 氢原子的电子就可以被电离掉. 铀离子的最后一个电子或者说类氢铀离子的唯一的一个电子, 它的束缚能是 131820.1 eV, 当碰撞电子能量超过这一数值, 那么铀离子会丢掉它最后一个电子而成为裸离子. 这并不意味着一旦 EBIT 中电子束的能量超过 132 keV, EBIT 中就充满了铀的裸离子, 事实正好相反, 即使在 198 keV 那么高的电子束能量下, 裸铀离子的存在比例也是极小的^[5], 小到几乎可以忽略. 原因是 (1) 电子与离子碰撞, 不仅可以电离离子, 使离子电荷态上升, 同时也可能与离子重组, 使电荷态降低. 这本身是一个竞争过程, 但是电子重组的截面(几率)相对碰撞电离的截面随碰撞能量下降的较快, 所以提高碰撞能量对得到高电荷态离子是有帮助的. (2) 在 EBIT 中的真空度虽然已经很高, 但是总有剩余气体原子或低电荷态的离子存在, 高电荷态离子与这些原子或离子碰撞, 将发生电荷转移, 使高电荷态离子的电荷态降低, 而低电荷态离子的电荷态上升. 对于高电荷态离子, 这种电荷交换截面很大, 即发生几率很大, 所以这事实上成了最主要的限制离子电荷态提高的阻力. 这就要求 EBIT 离子阱区的真空度很高, 以减少电荷交换的对象, 这对得到高电荷态离子非常重要.

另外, 电离速率与电子流密度成正比, 在真空度足够好的情况下, 到达某电荷态 q 所需要的时间近似反比于电子流密度, 电子流密度越高, 达到电荷态

q 越快. 这在很大程度上也取决于所需电荷态, 电荷态越高, 所需时间越长. 一般研究在 ms—s 量级^[10]. 因为电荷交换过程与电子流密度没有直接关系, 所以提高电子束流密度可以增强电离过程的竞争力, 同样也达到提高电荷态的作用.

上面已经提到, 电荷态越高, 得到它所需时间越长, 所以我们要考虑怎样延长高电荷态离子在 EBIT 中的约束时间. 电子与离子碰撞, 除了引起电离、激发和重组等非弹性碰撞外, 也会因弹性碰撞起到一个加温作用, 使阱中离子温度逐渐升高. 当离子温度升高到足以抵抗径向或轴向势阱的约束, 则这一轮的约束宣告结束. 一般离子被加温到足以逃逸所需时间大约在 s 量级, 而离子与原子(或低电荷态离子)碰撞使阱中离子达到准平衡态, 弛豫时间大约在 ms 量级. 离子与原子(或低电荷态离子)碰撞在使电荷态由高向低转移的同时温度也由高向低转移, 这可用以延长离子在阱中的约束时间. 在同一电位差形成的势阱中, 电荷态低的离子感受到的势阱深度浅, 电荷态高的离子感受到的势阱深. 若在离子阱(漂移管中央)中引入比我们研究的离子轻的原子, 则轻原子就会在阱中很快得到足够使其逃逸的能量而离开阱区并带走能量. 倘若不断地引入轻原子, 就可以使其不断地从阱区带走能量, 从而达到冷却的作用, 显著地延长了我们感兴趣的离子在阱区的时间. 这种方法称为蒸发冷却, 它可以使重元素高电荷态离子的约束时间延长到 1—2h, 曾报道的最长约束时间为 4h.

根据以上所述, 对于 EBIT 性能起主要影响的是电子的加速电压、电子枪的输出电流及超导磁线圈的磁场强度等, 此外合理的电子光学系统以确保在阱区得到最强的电子束流密度, 系统尽可能高的真空度以减少高电荷态离子的损失等等, 对 EBIT 的性能都是很重要的.

4 高电荷态离子物理

我们将简要介绍通过 EBIT 所能进行的有关高电荷态离子研究中一些非常有趣的物理问题.

4.1 与高电荷态离子结构相关的物理

当提及少电子原子或离子时, 人们首先想到的是氢、氦、锂等轻的原子或离子, 但它们只是对应等电子系列中的很小一部分. 等电子系列是指具有相同电子数但不同核电荷数的原子和离子组成的系列, 比如类氢等电子系列: H, He¹⁺, Li²⁺, Be³⁺, B⁴⁺

... 类氢等电子系列 :He, Li¹⁺, Be²⁺, B³⁺, C⁴⁺ ... 来自不同物理根源的效应沿着等电子系列体现出不同的贡献. 例如, 对于类氢离子, 由于原子核与核外电子库仑作用形成的束缚态原子能级, 其不同主壳层间的能级间隔正比于核电荷的平方, 而相同主壳层不同能级的间隔与核电荷成线性关系; 由相对论效应引起的电子轨道与自旋相互作用能量与核电荷的四次方成正比; 量子电动力学(QED)效应引起的兰姆(Lamb)位移粗略地随核电荷的四次方变化; 由原子核的内禀磁矩与核外电子的相互作用引起的能级超精细分裂随核电荷的三次方增加等等, 都与核电荷有很大的依赖关系. 为了有一个感性认识, 我们比较一下氢(H)和类氢铀离子(U⁹¹⁺)的几个物理量的量级, 如表 2 所示. 氢原子和类氢铀离子可以说是氢等电子系列的一头一尾, 它们之间这些物理量的差别, 达好几个量级, 由此可见这些物理量随核电荷的变化之大.

表 2

	H	U ⁹¹⁺
L _a 跃迁能量	10 eV	10 ⁵ eV
L 壳层精细结构分裂	4.5 × 10 ⁻⁵ eV	4.6 × 10 ³ eV
基态兰姆位移	3.5 × 10 ⁻⁵ eV	4.6 × 10 ² eV

表 3 列出了在类氢等电子系列中容许跃迁几率、各类禁戒跃迁几率^[11]、超精细相互作用、量子电动力学效应、相对论效应及宇称不守恒效应随核电荷数 Z 的变化趋势.

表 3

容许跃迁(E1)(Δn = 0)	Z	禁戒跃迁(E2) (精细结构之间)	Z ¹⁶
容许跃迁(E1)(Δn ≠ 0)	Z ⁴	禁戒跃迁(2E1)	Z ⁶
禁戒跃迁(M1)(Δn = 0)	Z ³	禁戒跃迁(E1M1)	Z ⁶
禁戒跃迁(M1)(Δn ≠ 0)	Z ⁶	超精细分裂	Z ³
禁戒跃迁(M1) (精细结构之间)	Z ¹²	QED 效应	Z ⁴
禁戒跃迁(E2)(Δn = 0)	Z	相对论效应 E _{so}	Z ⁴
禁戒跃迁(E2)(Δn ≠ 0)	Z ⁶	宇称不守恒效应	Z ⁵

从表 3 中可以看到, 所有类型的能级跃迁几率都随核电荷数 Z 增大, 而大多数禁戒跃迁几率随 Z 的增加比容许跃迁快得多, 致使有些禁戒跃迁在极重离子极高电荷态下可以与容许跃迁相比拟, 从而禁戒跃迁不再禁戒. 不同的禁戒跃迁对应于不同的物理原理, 例如自旋禁戒跃迁来自相对论效应引起

的不同自旋的波函数的混合, 宇称破坏跃迁则来自原子核中核子与电子的弱相互作用所导致的不同宇称的波函数的混合. 通过对禁戒跃迁的研究, 可以对相对论及基本粒子相互作用理论进行检验. 通过同组态超精细能级之间的禁戒跃迁又能够对核结构进行研究. 通过对 E2, M1 禁戒跃迁的研究可以进一步检验原子波函数, 因为品质好的原子波函数不仅可以预言容许跃迁几率, 同时应该可以预言禁戒跃迁几率. 所以研究禁戒跃迁对原子结构理论是至关重要的.

量子电动力学效应, 在氢原子中已经由超高精度的谱学研究得到了很好的验证. 对重一些的离子, 实验虽然达不到这样的精度, 但是由于 QED 效应随 Z⁴ 增加, 在高电荷态离子中它对离子的能级结构的影响很大, 并且其高次效应将逐渐得到体现. 对于核电荷 Z > 40 的离子, 高次项将主宰 QED 效应中的最主要部分——自能项^[12]. 随着 Z 的增加, 原子核与核外电子的(波函数)重叠越来越严重, 核电荷分布不仅对离子的狄拉克方程本征值有影响, 对 Lamb 位移的贡献也体现出来, 在 Z > 70, 它的贡献将超过 QED 效应中的真空极化项(绝对值)^[13], 并达到与自能同数量级. 这些效应只能通过极高电荷态极重离子来进行研究, 所以高电荷态离子使更全面地研究 QED 效应成为可能.

由于超精细能级分裂随核电荷 Z³ 增大, 在较低 Z 原子或离子情况下, 通常是通过容许跃迁的超精细分裂来研究的. 在重离子中, 例如 Z > 50 的类氢离子, 它们的基态超精细能级分裂足够大, 以至于基态超精细能级之间的禁戒跃迁落到测量精度最高的可见光波段, 从对它们的研究可以得到原子核的磁和电分布. 这不仅对核物理学科很有意义, 对精密研究和检验 QED 理论同样是非常重要的.

由于极重离子内壳层电子与原子核波函数的有限重叠, 使内壳层电子(主要是 1s 电子)的分布情况对核衰变通道及几率产生影响. 在德国重离子研究中心 GSI 曾经成功地观察到原本完全禁戒的¹⁶³₆₆Dy 到¹⁶³₆₇Ho 的 β 衰变^[14], 因为 Dy 原子的这一核衰变的 Q 值不够, 所以衰变不能发生. 裸 Dy 离子 β 衰变所产生的电子可以占据 Ho 的 1s 态, 为衰变节约了 63keV 的能量, 这样反应 Q 值就不再是一个问题了, 衰变可以发生. 所以, 高电荷态离子又为研究核物理开辟了新的渠道.

4.2 分解研究等离子体

在 EBIT 中离子与电子发生碰撞, 主要导致离

子升温、激发、电离、离子与电子的辐射重组及双电子重组,在EBIT中离子与离子也发生碰撞,主要导致温度传播、电荷转移.在EBIT阱区,离子与电子组成一个电子能量单一的等离子体,而电子能量又是可以控制调节的.由于这一特点,EBIT为分解研究等离子体提供了强有力的工具.在EBIT中,可以根据所需研究的等离子体的大致温度区域决定的电子能量分布,调节电子束能量,在每一电子束能量下测量EBIT中的辐射,以达到模拟及分解研究等离子体的目的.图4显示了在德国海德堡FreEBIT上的一个实验结果(图中灰度代表事件发生强度).

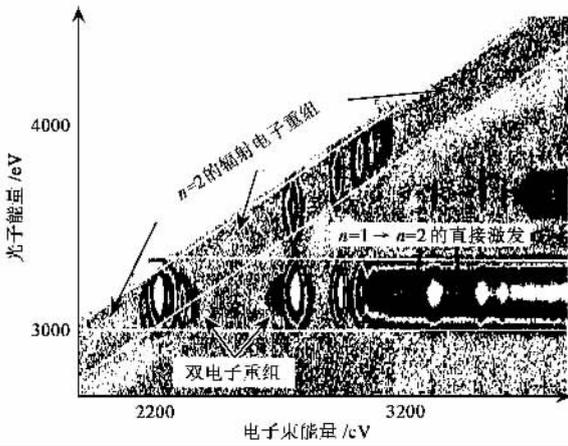


图4 电子能量从1.9 keV扫描至3.8 keV中记录的对应电子能量下 Ar 离子的 X 波段的辐射强度(实验中EBIT充氩气)

在图4中我们可以清楚地区分各类离子发生在等离子体中的过程.图中45度斜线上连续分布的辐射事件来自电子与氩离子的 $n = 2$ 辐射电子重组(RR),即电子束中的电子被氩离子俘获至主量子数为2的能级上,这一过程释放的能量全部交给一个光子,这就是为什么辐射光子能量与电子束能量成正比,在图中呈连续特征.图4中两条水平线之间是氩离子 $n = 2$ 到 $n = 1$ 的跃迁辐射事件,即 K_{α} 辐射.左边第一个强事件区对应与氩离子与电子的KLL双电子重组(DR),双电子重组是一个共振过程,只发生在一些特定的电子能量下.DR过程先形成一个双激发的中间态,之后那两个处在激发状态的电子将辐射退激,完成DR过程.在KLL的DR过程中,中间态两个电子都处在L壳层($n = 2$),所以它们都可以发生 $n = 2 \rightarrow 1$ 的 K_{α} 辐射.图4中水平双线之间第二个强事件区,是氩离子与电子的KLM双电子重组(通过 K_{α} 辐射).它的中间态两个激发电子分别处在L和M($n = 3$)壳层,所以它既可以通过L电子的 K_{α} 辐射来完成这个KLM的DR过

程,也可以通过M电子的 K_{β} 辐射($n = 3 \rightarrow 1$)来完成这个DR过程.这就是为什么在相同电子能量下,我们注意到在这一时间区上部还有一个事件区,它对应于 K_{β} 辐射($n = 3 \rightarrow 1$).类似地,水平第三个事件区对应KLN双电子重组,同样除了 K_{α} 辐射外,在它的上部,还可以看到 K_{γ} 辐射.依次类推,KLO, KLP, ... 相邻事件的电子能量间隔越来越小,直至连续.从连续区开始,氩离子的 $n = 1 \rightarrow 2$ 的直接激发阈被打开,在以上的所有电子能量下都有 K_{α} 辐射.我们还注意到在连续的 K_{α} 辐射事件上还叠加了一些分裂的,或称共振的事件区,那里有能量更高的KMM, KMN, KMO, ... 双电子重组事件.....若直接观察等离子体,则相当于把图4的横坐标完全压缩,只能看到几个大峰和一些连续本底,无法区分各峰里包含的不同的物理过程以及它们发生的相对几率.由此可以看出EBIT用于分解研究及模拟等离子体研究的强有力之处.

4.3 高电荷态离子与表面相互作用

在EBIT中产生的高电荷态离子可以被引出来,用于高电荷离子与表面或与原子、离子的碰撞研究.高电荷态离子在某种程度上相当于一个电荷黑洞,极易把原子、低电荷态离子和物体表面的电荷吸引过来.当慢速高电荷离子靠近固体表面时,会从表面俘获很多的电子.对于绝缘体表面,这将引起表面的负电荷过度贫瘠,或称正电荷过剩,从而导致产生如库仑爆炸、形成缺陷或面垒、引起表面电子发射及X射线发射等一些现象,这对表面刻蚀有着潜在的应用.对于金属表面,由于其中近乎自由的电子的及时补充,不容易发生库仑爆炸,而由于电子俘获或转移的能量匹配特点,被俘获的电子大部分处在外围高激发态上,形成庞大的空心原子.这种高激发态的原子在通常情况下是极不稳定的,寿命很短,但是有一部分状态,其电子的自旋排列同向,由于自旋禁戒的原因,退激几率较低而寿命很长.这种状态会形成很强的局域磁场,有很好的研究和潜在的应用前景.

除了上面提到的原子结构、QED效应、相对论效应、原子核结构与核反应、宇称问题的研究、等离子体研究、高电荷态离子与表面相互作用的研究之外,通过EBIT这一有力的工具,人们还能对电子与离子、离子与离子碰撞的各种过程的截面进行研究.

EBIT装置的出现,使人们对研究自然获得了一种新的有力的实验手段.我们希望上海EBIT能够早日建成,为迅速在我国开展对高电荷态离子的物

理研究和开辟这一新的学科领域奠定基础.

致谢 作者感谢复旦大学王迅院士和杨福家院士对本文的撰写给予的极大的帮助 ;感谢中国科学院上海原子核研究所朱希恺教授提供上海 EBIT 的结构图.

参 考 文 献

[1] Edlen B. *Astronomi and Fysik* ,1942 28B :1
 [2] Plumlee R H. *Rev. Sci. Instrum.* ,1957 28 :830
 [3] Donets E D. *The Physics and Technology of Ion Sources*. Ed. Brown I G. New York :Wiley ,1989. 245
 [4] Marrs R E , Levine M A , Knapp D A *et al.* *Phys. Rev. Lett.* ,1988 60 :1715
 [5] Marrs R E , Elliott S R , Knapp D A. *Phys. Rev. Lett.* , 1994 72 :4082
 [6] Biedermann C ,Foerster A ,Fussmann G *et al.* *Physica Scripta* , 1997 ,T 73 360

[7] Crespo J R , Dorn A , Moshhammer R *et al.* *Physica Scripta* , 1999 ,T 80 502
 [8] Silver J D , Varney A J *et al.* *Rev. Sci. Instrum.* ,1994 65 : 1072
 [9] Currell F J , Asada J , Ishii K *et al.* *J. Phys. Soc. Jpn.* , 1996 65 3186
 [10] Fussmann G , Biedermann C , Radtke R. *Advanced Technologies Based on Wave and Beam Generated Plasma*. Ed. Schlueter H , Shivarova A , Kluwer. Academic Publishers , 1999. 429
 [11] Fischer C F , Brag T , Joensson P. *Computational Atomic Structure*. Institute of Physics Publishing Bristol and Philadelphia ,1997
 [12] Johnson W R , Soff G. *At. Data Nucl. Data Tables* ,1985 33 405
 [13] Indelicato P. X-90 , AIP Conference Proceeding. New York : 1990. 591
 [14] Jung M , Sosch F *et al.* *Phys. Rev. Lett.* ,1992 69 :2164

· 信息服务 ·



美国伦斯勒理工学院招生信息

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics ,Applied Physics ,and Astronomy Areas of Research :Astronomy ,Elementary Particles Physics ,Nano-Structure Physics ,Origins of Life ,THz Imaging ,THz Electronics.

Teaching ,research assistantships and fellowships are available.

Application [http //www. rpi. edu/dept/grad-services/](http://www.rpi.edu/dept/grad-services/)

Information [http //www. rpi. edu/dept/phys/](http://www.rpi.edu/dept/phys/)

E-mail [gradphysics@rpi. edu](mailto:gradphysics@rpi.edu)