

原子物理

P. Armbruster et al.

长期以来,实验原子物理不但与基础研究的进展并驾齐驱,而且还是检验新理论的试金石。要是没有原子物理学家们许多巧妙和精密的实验所提供的数据,当今物理所基于的量子力学和量子电动力学简直是不可想象的。尽管现在在世界最大的加速器上所从事的核物理及主要是基本粒子物理研究已成为科学工作的主要课题,但是,为了更多地理解自然界所遵循的基本规律,原子物理学的研究仍然是必不可少的。UNILAC重离子加速器似乎特别适用于原子物理方面的实验工作,至少有两个原因。

1.利用高能重离子可以得到一些处于奇异电荷态的原子,即带有少数几个电子的重原子。

2.在重离子(原子序数为 Z_1)和重靶(原子序数为 Z_2)的近距离碰撞中,会形成短寿命的准原子“超重”系统——巨“原子”。此时内壳层电子束缚在总电荷数为 $Z_1 + Z_2$ 的电场中,它大大超过了已知元素的电荷数 Z ($Z \leq 109$)。

那些从重离子加速器上得到的奇异超重原子或瞬时超重原子,使我们第一次有机会在地球上的实验室内来研究只能在星体内部神秘地进行着的那些奇异而重要的过程。

用束箔方法研究高带电重原子

在UNILAC加速器上得到的加速重离子的典型速度为光速的5%到20%。当这些离子通过薄箔后,就会失去大部分电子。所以,用“束箔”方法就能产生具有一定速度的

高带电离子。当前可以产生具有足够强度的只带有一个电子的Kr($Z=36$)离子束(称为类氢原子)来进行高分辨谱学研究。这样的电离程度相当于 10^8 的开氏温度(在 10^8 °K时,一个氪(Kr)原子最可几状态是具有一个核外电子,由于此温度下发生的剧烈碰撞,其它电子都已失去了)。可是,实际上这种温度只存在于星体中心及太阳耀斑上。

利用这种束箔方法,不仅能把发生在星体内部的原子过程移置到地球上,同时人们还能够所有的辐射波长标度内来研究这些现象,而在星体上发出的辐射大部分均被大气所吸收,只有在可见光及辐射电磁波区的两个“窗”内的辐射可以达到地球表面。最近几年,为了收集到可以比较的资料,已经安排了用于x射线光谱及紫外线光谱学的第一批卫星。

重离子束中的强剥离和高激发原子是软x射线的发射源,其波长——在几个埃量线内——可用晶体谱仪确定。从只有一个或两个电子的重原子的这种辐射的精确测量中,可以使原子物理和辐射学的基本理论——量子电动力学(QED)——得到极灵敏的检验。当然量子电动力学已在轻系统中得到了验证,实验和理论的符合是相当好的。可是量子电动力学预言的效应随原子序数的增大而强烈地增强,所以类氢重离子似乎可以在更为精确的程度上验证这种基本理论的真伪。此外,这种束箔方法还可以确定亚稳态的寿命,如果可以改变激发箔和谱仪间的距离,就可以从强度的变化中直接测定放射性原子态的寿命。

当离子的速度约为每毫微秒几个厘米时,这种方法可以测到直到 $10\text{ps}(10^{-11}\text{s})$ 以下的寿命。当原子仍带有两个以上的核外电子时,可用这种方法,用时通过观察发射的x射线和电子(俄歇电子),确定两种相互独立的衰变寿命。

高带电慢反冲离子的谱学

高能重离子炮弹的一个最显著的特点是在一次碰撞中,由于传递给靶子微量的动能,可以产生高电离但缓慢运动的靶原子。这样,重离子束可以用来注入离子源,即产生直到裸原子的所有电荷态的离子。与传统的等离子体源相比,这些次级离子缓慢地(初级离子速度为 $3 \times 10^8\text{cm/s}$,次级离子速度为 10^8cm/s)通过一个冷的气体环境;与快的初级离子(用于束箔方法)相比,次级离子是接近于静止的。人们可以将现在实验上进行的课题分为三类:慢反冲离子的产生机制;高激发电离态的x射线和俄歇电子衰变辐射;缓慢运动的高带电反冲离子与中性原子的二次碰撞。

与重入射离子碰撞的靶原子的多重电离有几种过程。通过强的弹核场的两体相互作用,靶原子上的电子会移到连续态上(‘库仑电离’),也可能被俘获到入射离子的适当束缚态上。而且内壳层的空穴可通过俄歇电子发射而衰变。碰撞系统越对称,分子效应对靶的激发和电离就变得越为重要。这些过程对净电离的贡献大小与实际碰撞系统有关。然而惊奇的是,重入射离子引起的高带电反冲离子($Z \sim 18$)的截面甚至在原子标度上也是很大的。(对 1.4MeV/u 的铀入射离子及类氢氩反冲原子,典型截面值为 10^{-19}cm^2)。

通过K-x射线和K-俄歇电子衰变辐射的观测,已经对带有少数电子的原子态的激发和衰变机制有了很有价值

的了解。由于只剩下少量几个电子,只能发射几条相互分立的谱线。可以精确测量这些选择跃迁的能量,在检验当前原子态计算的正确性时,可将这种慢反冲离子视为检验对象。为了保证小的x射线、俄歇电子谱线的运动学展宽和位移,首先要使反冲离子具有慢速度,这是一个重要条件。

同时,已经研究了直到 $\text{Ar}(Z=18)$ 的反冲离子发射的能谱。发现,如果用重入射离子(5.9MeV/u 的铀-66离子),主要产生一个到三个电子态的原子(见图1)。

除了由于入射离子碰撞直接产生高激发离子态外,在靶原子的电离足够高时,另一过程也变得重要起来。在二次碰撞中,反冲离子会从其它中性靶原子中拾取一个电子到它的外壳层上。观察到的衰变辐射揭示了俘获电子所处的定态和衰变方式。

对等离子体物理和天体物理,探索在高激发态缓慢运动的离子和中性原子间的电荷交换是很重要的,因为要了解星体和等离子体内所发生的过程,必须要弄清一个明显非平衡态体系的能量耗散(如离子-中性原子系统)。通过电子俘获可以得到确定的高

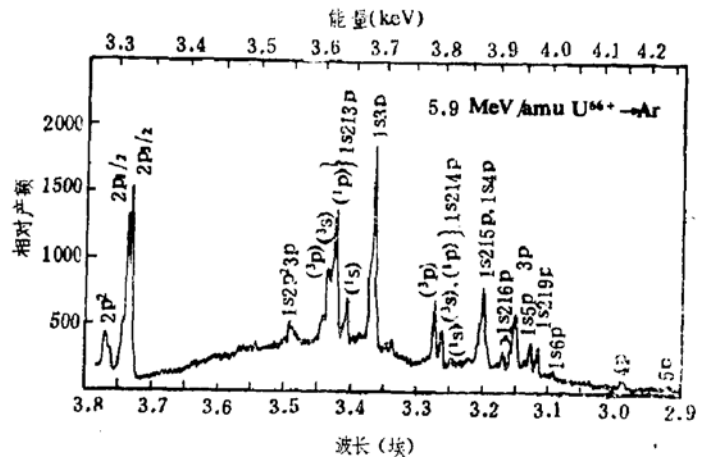


图1. 能量为 5.9MeV/u 的铀离子轰击中性氩原子得到的由单电子、双电子和三电子氩离子所发射的x射线能谱。单电子氩离子发射的谱线由一个数字后紧接一个字母表示,如 $14p$;双电子离子发射的谱线由两个数字和两个字母组合来表示,如 $(1s3p)$;三电子时,用三个数字和三个字母的组合来表示,如 $(1s2b3p)$ 。

激发原子态，所以对许多基础原子物理实验以及对一些特殊的应用来讲，使得反冲离子成为具有吸引力的粒子。向确定的原子能级上的这种俘获强烈地依赖于中性原子的电离势。因而依赖于确定的原子态的转换，这种俘获是在紫外线甚至 x 射线区内得到可调性相干辐射源所必须的。其次是要产生更高强度的这种高电离重离子束。这是我们今后必须做到的。

用高电离、减速离子研究原子碰撞

为了获得一个重准分子的电子结构的特殊信息，人们关注探索内层准分子轨道间的耦合。可以在碰撞系统的固定能级上造成一个空穴，并根据其经历来进行这样的研究。为了得到一个准分子，碰撞速度必须适中；要想使入射离子的内壳层产生空穴，剥离过程的速度必须很快。所以采用加速—剥离—减速(A-S-D)是提供具有内壳层空穴的离子来进行重碰撞分子激发过程的选择研究的适当的方法（当然，气体靶必须提供单一碰撞条件）。此外利用高带电的或减速重离子，人们有了唯一的机会研究在中等束流速度下发生在入射离子基态和激发能级上的电子俘获（见图2）。

到目前为止，用A-S-D技术全面研究过的最重的系统是入射能量在2~5MeV/u之间、入射电离态分别在37~47之间的 $Xe^{q+} \rightarrow Xe$ 和33~54之间的 $Sm^{q+} \rightarrow Xe$ 系统。例如电荷态为47就是指一个原子序数为54的Xe离子入射时，在L壳层上有了三个空穴。在近距离碰撞中，这种入射到L壳层上的空穴在碰撞的靠近区就会转换为总电荷数为108的准原子的L壳层上的空穴。对 $Sm^{q+} \rightarrow Xe$ ，其总电荷数为116。

对这种超重准原子，在平均结合能为28MeV的2p能级上估计会有约9KeV的自旋—轨道劈裂。在整个碰撞的后期，准原子的L壳层空穴会转移到裂开碎片的K壳层上。

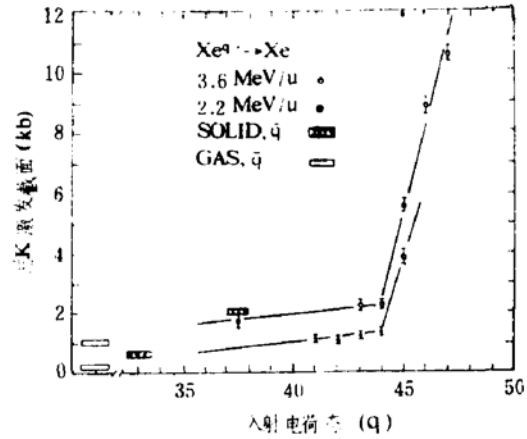


图2. 2.2MeV/u和3.6MeV/u能量下 $Xe^{q+} \rightarrow Xe$ 碰撞中作为入射离子电荷态函数的Xe—K激发截面。在q大于44后的截面增大，表明分子空穴转移。

Xe—K辐射将证明空穴转移到K壳层。在非相对论区，即碰撞对的电荷数较低时，这种由所谓的转动耦合引起的L—K空穴转移过程可以建立起来。对于重碰撞系统，9KeV的能级劈裂可能阻碍这种L—K空穴转移。对比之下，甚至在自旋—轨道劈裂相当大的相对论情况下，在对称和接近对称的碰撞系统中，实验表明，这种旋转L—K空穴转移也能成为主要的激发过程。

在远距离碰撞中，靶原子的电子被入射离子俘获。大部分俘获电子终止在激发能级上，最后导致特征x射线发射。由于重入射离子主壳层和子壳层的劈裂，可以部分地区别开不同主量子数和角动量状态的俘获。第一组 $Sm^{q+} \rightarrow Xe, Ar, He$ 实验表明，当入射能量处在3~5MeV/u时，在很大的程度上，靶原子的外层电子被俘获在激发能级上。

对更重的碰撞系统，用A-S-D技术预期会出现更有趣的结果。将来甚至可以电离轴离子的K壳层，这些电离后的离子又得到充分的减速，这样人们将会用新的眼光看待整个超重准原子和电子俘获的研究领域。

超重准原子

UNILAC 加速器提供了解开原子物理学

关键的一把钥匙：可以研究束缚在电荷数 $Z > \frac{1}{\alpha} = 137$ 的电子，而 $Z = 137$ 已远大于稳

定元素的 Z 值。打开这把锁的钥匙是这样：一个实验，两个电荷数分别为 Z_1 和 Z_2 的重原子核靠得很近，在 $10^{-19}s \sim 10^{-20}s$ 的碰撞时间内，最内层电子束缚在电荷总数为 $Z = Z_1 + Z_2$ 的核上。这样，自然界可让我们看一眼寿命极短的超重“准原子”。

由于这种紧紧束缚的电子在一个电磁耦合常数为 αZ (大于或等于 1) 的电场中运动，可用相对论双中心的狄拉克方程的解计算其能量本征值。计算的参数是与时间有关的核间距离 R 。这些计算的基本结果是，在两个碰撞核间距离非常小的情况下，结合能迅速增大。在这些轨道上的电子的束缚能量可与它们的静止质量相当，甚至更大。这样，研究这些重离子—原子碰撞，为研究相对论性的、空间扩展的束缚系统提供了唯一的可能性(见图3)。

由于双中心库仑场与时间有关，在碰撞过程中能量和动量传递给了束缚电子。结果，它们能被激发到高的激发态或能量连续区，从而在最深的轨道上形成了一个空穴。这表明，在这些态的众多的衰变道中(特征 x 射线辐射，分子轨道辐射，正电子发射)，特征 x 射线占绝对优势，这是因为空穴的寿命比碰撞时间大一个或两个数量级。我们研究了参与碰撞的两个原子核 Z_1 、 Z_2 所发射的特征 x 射线和碰撞之后空穴仍停留在原子核壳层而发射的特征 x 射线，从而推论超重准原子相应态的激发机制。根据碰撞过程壳层空穴衰变的分子轨道辐射的能谱，可以了解到跃迁过程中各准原子态之间的能量差别。

从许多不同的 Z_1 、 Z_2 系统和不同的入射离子速度以及有碰撞参数选择或无碰撞参数选择时的实验结果中，其最重要的结论如下：

1. 最强的束缚准原子轨道的激发需要有

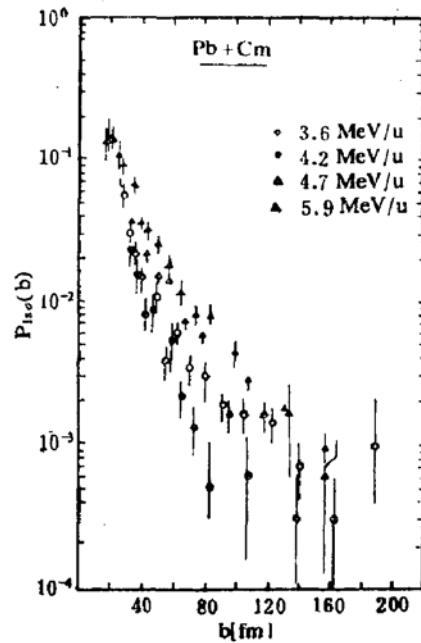


图3. 铅轰击铈 (Pb + Cm) 时形成的最内层分子轨道(1s σ)上的电子，电离几率与碰撞参数 b 之间的变化关系。这些曲线的斜率，直接反映了几百个 KeV 的结合能，因此结合能将最内层电子束缚在铅和铈的总核电荷场中。

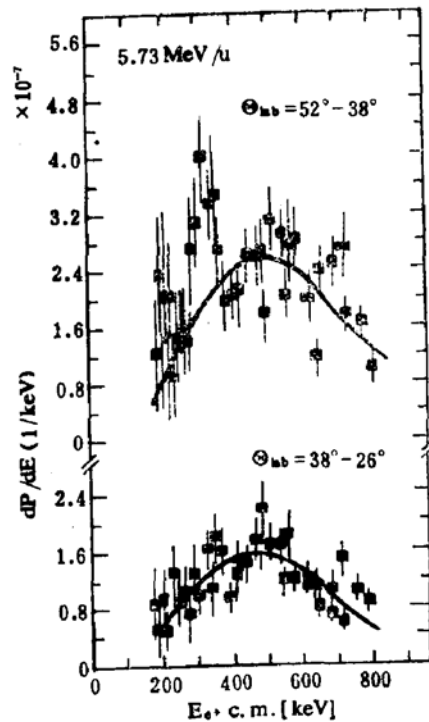


图4. 5.73 MeV/u 的铀轰击铀原子在不同的离子散射角度下测到的正电子能谱。图的上部在 300 KeV 处出现的狭窄谱线，可能是第一个关于形成长寿命 $U + U$ 核分子 ($Z = Z_1 + Z_2 = 184$) 的线索。

近距离碰撞，其碰撞参数甚至比假定复合原子(united atom, $Z = Z_1 + Z_2$)的半径还要小。

2. 小碰撞参数时，激发几率很大(每次碰撞的典型值为百分之几)。较轻的、非相对论系统外推预测的值要小几个数量级。

3. 最内层轨道的结合能与理论计算值的符合相当好。

这三点指出，应怎样去理解这些结果：轨道的极强烈约束是与围绕着电荷 Z_1 、 Z_2 为中心的，与轨道相应空间的相对论波函数的收缩同时并存的。总电荷 $Z = Z_1 + Z_2$ 越高，这种收缩就越强，因而必须在近距离碰撞时才能形成这种准原子态。空间波函数的这种收缩意味着在动量空间中，相应波函数的高动量明显增大。 Z 的增大以及在小的核间距下其高动量有利于激发，这样就可解决强束缚轨道上的电子的激发几率非常大这一矛盾。

在碰撞产生重原子的场中，高电子动量的巨大增长，直接反映在发射电子(δ 电子)的能谱中，其能量可高达几个MeV。

这两种研究的结果是，小的激发区域和

出射电子的能谱分布支持了下述观点：即在准原子系统中，存在一个强区域性的、深度束缚的K态。尽管一般不可能精确地定出结合能，但是基于激发几率和 δ 电子的能量，还是可以确定这种超重准原子的某种“能谱学”。

还有大量的问题没有得到解决：首先，一个老问题，即束缚电子能否达到负能级连续区的边缘——所谓的“潜入负能海”(diving)问题还没有解决。原因之一是要从观察到的正电子中去掉其它过程发射的正电子，特别是由瞬时强库仑场自身发射的正电子，这是极为困难的(见图4)。(在负连续能级中，通常本征态是填满的，其中的一个空态表现为带正电的类似于电子的粒子——正电子)。

可是由几个在GSI使用不同类型的正电子谱仪进行工作的实验组得到的最新结果表明，发射的正电子能谱上有预想不到的类峰结构，对此还没有得到一个令人满意的结果。

(张玉虎译自“Interdisciplinary Science Reviews” v.9, No.4(1984)321, 诸永泰校)