

极化离子源

宋寿畅

极化离子源是最近发展起来的。它与一般常用的非极化离子源一样是人工制备带电粒子的工具，但所产生的离子束和非极化离子源产生的离子束不同，有其独特的性质。

非极化离子源的功能是驱走原子外层一个或几个电子，或者加上一个电子(电离)，然后形成正的或负的离子束。但是这种源产生的每个离子的核自旋(或磁矩)是任意指向的，因此它所形成的离子束核自旋(或磁矩)是杂乱无章的，不显示任何极性，是非极化离子束。而极化离子源所提供的正、负离子束中各离子的核自旋却部份的或全部的是在同一方向的。因此其整体具有明显的极性，所以叫极化离子束。

极化离子束对核科学基础理论研究有很重要的意义。如对于核-核相互作用的自旋相关性、简化核谱学、用核磁共振测定不稳定核的电磁矩及在重离子核散射中对反应机制的研究等方面的实验工作，极化束是最有效的工具。因此世界各国对这种离子源非常重视。在短短时期内，已获得很大进展。如，它产生的正离子束强度已从 $0.1\mu A$ 提高到 $60\mu A$ ；极化粒子的品种也从轻粒子 (H 、 D) 发展到重粒子 ($A > 4$) 6Li 、 7Li 、 ${}^{23}Na$ 、 ${}^{39}K$ 等；极化度一般在 75% 以上。随着极化离子源基本原理的日益成熟及技术的进展，一些研究工作者曾预言在 80 年代中束流强度还可提高一个数量级。

目前实际运行的极化离子源有两种即原子束型极化离子源(简称原子束源)和兰姆移位型极化离子源(简称兰姆移位源)。此外，大家感兴趣的光泵极化离子源最近在结构原理方面的探索工作也取得了很大进展。

一、原子束型极化离子源

为了便于叙述，首先回顾一下基态氢原子在外磁场中发生能级分裂的现象，即所谓塞曼效应。事实上当外磁场为零时，电子角动量 P_e 和核自旋角动量 P_i 耦合成的原子总角动量 P_t 具有两个值， $F=1$ 和 $F=0$ (以量子数表示)。这种在无外场情况下的能级分裂现象是电子和质子的超精细相互作用(即电子磁矩和质子磁矩的相互作用)所引起的。它们之间的能量差为 $\Delta W = h \times 1402.4\text{MHz}$ 。

在加外磁场的情况下，就发生如图 1 所示的塞曼效应。实线箭头表示电子的自旋方向，虚线箭头表示核(质子)自旋方向。其中 (1)、(2)、(3)、(4) 表示四

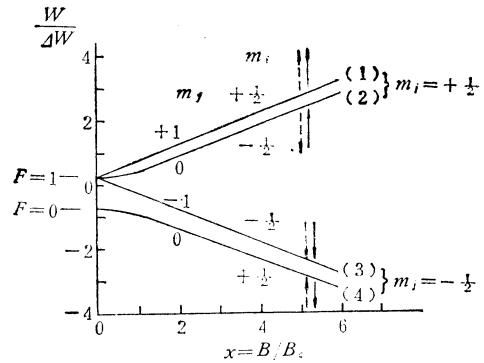


图 1 氢原子基态能级图，其中 B 为外磁场， B_c 为临界场。

种不同的状态，即电子自旋向上，核自旋向上和向下；电子自旋向下，核自旋向下和向上。从图可见，状态 (1)(2) 与状态 (3)(4) 之间的能级差是随着外磁场强度的增加而增加的，并且在强磁场下，电子磁矩的场能变化基本上决定了原子能量的差异。

假如能设法分离出其中一种状态的粒子，就可达到核极化的目的。如果进而能利用两种状态如 (1+4) 或 (2+3) 则束流强度还可加倍。这就是建制原子束源的基本出发点。

我们知道，均匀磁场不能使一个中性原子产生移动，但在不均匀磁场中它受到一力 $f = \mu \text{grad} |B|$ 的作用，使其向外磁场梯度方向移动。式中 μ 为原子的有效磁矩， B 为外磁场强度。

现在如果将一束非极化的中性原子束引入一足够强的不均匀磁场内，由于 (1)(2) 两态的有效磁矩(在强磁场下)基本一致，故向同一方向移动 [(3)、(4) 态向相反方向移动]。这样，当原子束穿过适当长的不均匀磁场区域后就很容易把状态 (1)(2) 与 (3)(4) 互相分开。例如取其中 (1)(2) 两态，就可获得按电子自旋完全相同的一组原子。但从图 1 可看出，(1)、(2) 态的核自旋是互相相反的，并且按统计规律它们具有相等的原子数，所以总的核极化为零。然而如果应用高频跃迁的办法使状态 (2) 转变成状态 (4)，并保持状态 (1) 不变，也就是说，给状态 (2) 外加一能量使它颠倒过来成为状态 (4)，然后将颠倒(跃迁)后的新状态 (4) 和原来的状态 (1) 一起在强磁场内电离，那么，在理论上就可获得核自旋完全相同的极化离子束，即它的极化度是 100% 的。当然在实际上由于跃迁几率和其它原因，一般只能获得 80% 左右的极化度。

一台完整的原子束源应包括下述几个主要部份：

- (i) 离解器，它的作用是将气体分子离解成原子。
- (ii) 准直系统，通过它将离解后的原子形成定向束流。一般是由一只喷嘴和一些准直孔构成的。喷嘴的结构和它与准直孔之间的距离的适当选择，可获得最佳的原子束流。

(iii) 分离磁场,它的作用主要使上述(ii)中形成的原子束通过它后,把处于状态(1)和(2)的那些原子分离出来。

这种磁场一般由如图2所示的六极圆柱型磁铁产生的,长约40cm,束孔直径约1cm,极尖磁场强度 B_m 约6千高斯。它作用在原子上的力 $f = \mu \text{grad} |B| = 2 \frac{B_m}{r_m^2} \mu r$ 是一种圆柱对称的径向力。其中 r_m 为束孔

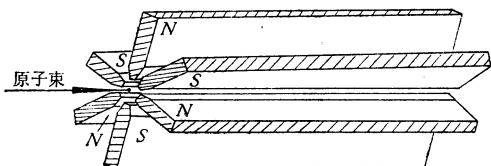


图2 圆柱对称六极磁铁

半径, r 是原子所处离磁铁轴线的距离。当原子束进入这种磁场后,由于状态(1)、(2)原子具有负磁矩,故向磁铁轴线聚焦;而状态(3)、(4)具有相反的磁矩,因此离轴散去被真空泵抽走。图3表示了各原子态在六极磁铁孔内的途径。

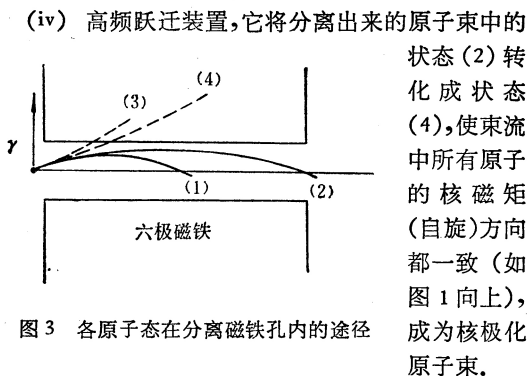


图3 各原子态在分离磁铁孔内的途径

(iv) 高频跃迁装置,它将分离出来的原子束中的状态(2)转化成状态(4),使束流中所有原子的核磁矩(自旋)方向都一致(如图1向上),成为核极化原子束。

(v) 强磁场电离器,它的作用是将上述那些核极化原子在强磁场下通过电子轰击使它们电离,并形成核极化离子束。

(vi) 抽气系统和其它控制设备。

原子束源的原理图如图4所示,它比一般非极化离子源要复杂,体积也较大。其运行程序是:首先使分解器内的低压气体分子用高频放电的方法将它们分解成原子,并通过喷嘴和

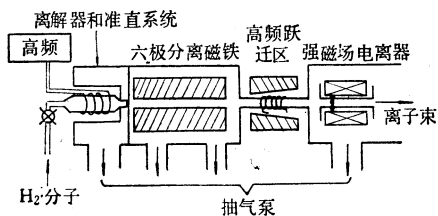


图4 原子束型极化离子源原理图

准直孔形成原子束;然后使它们射入由六极磁铁形成的分离磁场;再将分离后的按电子自旋极化的原子束引入高频跃迁区,使其成为按核自旋极化的原子束;最后将它引入强磁场电离器内电离并成束引出,就可获得所需的正的核极化离子束。

如果要求负的核极化离子束,一般使这正离子束再通过一碱金属蒸汽(如Na)电荷交换室而获取。但由于从 H^+ 到 H^- 的转换效率很低,因此这种方法产生的负束流最多只有零点的微安。

最近美国 Wisconsin 大学研制的碰撞束电离器可大大增加负束流强度。它是利用原子束源产生的中性原子束(拆除原来的强场电离器)与一快速度(40 keV)的中性非极化铯原子束进行碰撞电荷交换 $H^0 + Cs^0 \rightarrow H^- + Cs^+$ 。不用正离子作中间过渡而直接形成负离子。

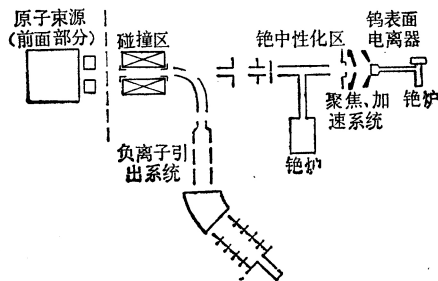


图5 碰撞束电离器原理图

其过程如图5所示,铯表面电离器产生的正铯离子被聚焦加速到40keV;然后注入到“铯中和管道”使其转换成中性原子;再经过静电偏转板及准直系统将带电成份除去并形成中性铯原子束;最后入碰撞区与中性极化原子束 H^0 进行碰撞电荷交换,所得的 H^- 经静电分析器引出。

配上这种电离器的原子束源,目前可引出 $3\mu A$ 的负极化离子束是当前世界上最大的负极化束流。

二、兰姆移位型极化离子源

这类极化离子源与原子束源的主要区别在于工作原子处于不同的状态。原子束源的工作原子是处于基态;而兰姆移位源是利用原子的第一激发态。它是利用兰姆-卢瑟福(Lamb-Rutherford)对氢原子第一激发态中 $2s-2p$ 能级间存在着移位的实验作为其技术基础的。

图6表示了氢原子第一激发态在外磁场中的能级分裂情况。在零场(即无外场)处,这种激发态已分裂成不同的能级。如 $2s_{1/2}$ 和 $2p_{1/2}$ 两能级间的能量差为1058 MHz,通常称它为兰姆移位。但这两状态却具有不同的特性。其中 $2p_{1/2}$ 态的寿命非常短,约 10^{-9} 秒,很快衰变到基态。而 $2s_{1/2}$ 态在无任何外场时其寿命相对 $2p_{1/2}$ 态是相当长的,约为0.1秒,并把它叫做亚稳态。

在外磁场内，这两种态都各自进一步分裂成四种

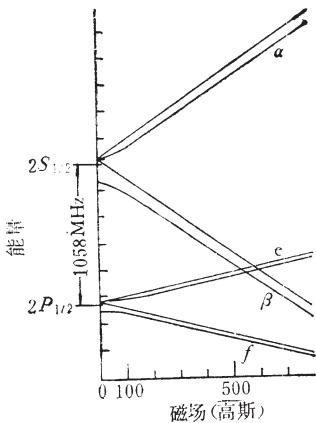


图6 氢原子第一激发态能级图

状态，并且随着外加磁场的变化而它们的能级分裂情况如图6所示的那样变化。从图可见，在外磁场为575高斯左右处， $2s_{1/2}$ 中的 β 态与 $2p_{1/2}$ 中的 α 态相交。如果在这一磁场值下再加一横向静电场，如 $E=10\text{V/cm}$ ，则 β 态与 α 态发生混合，使得 β 态原子的寿命比 α 态原子的

寿命要短 10^3 倍，很快衰变到基态。根据这一现象就有可能把 α 态的原子分离出来。这就是兰姆移位源的主要依据。

显然这种 α 态与上述原子束源中分离出来的含有状态(1)、(2)的原子束类似，只是按电子自旋极化的，核极化的平均值为零。而且由于这里讨论的亚稳原子束是一种快速原子($\sim 500\text{eV}$)，故现在不能应用上述高频跃迁法来获取核极化。但若采用沙纳(Sona)的“磁场突然反向”法是可获得核极化亚稳原子束的。即将原来从正向磁场(+575高斯)区射出的 α 态(就是状态(1)、(2))原子引入磁场强度逐渐减小的区域，通过零点，再进入以反方向逐渐上升的磁场区(-575高斯)。因为通过零点，磁场方向是突然反向的，则其中状态(1)的原子能保持其原来的空间方向，所以，如图7所示，就能使原来正向场中的(1)、(2)状态变为反向场中的(3)、(2)状态，从而达到核极化的目的。

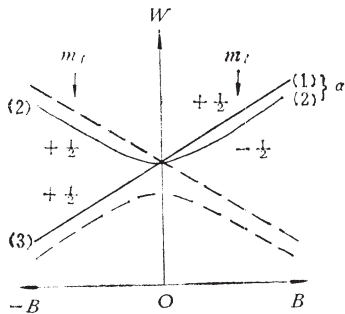


图7 磁场突然反向引起的状态变化

此外，由于这种极化亚稳原子束中一般总含有大量的非极化基态原子，因此最后必须在强磁场内进行选择性电离，就是只允许亚稳原子产生电离而基态原子不受影响。这样在理论上便可得到100%的核极化离子束。

兰姆移位源有下面几个主要部份组成：

(i) 亚稳态原子发生器，由一台非极化的常规离

子源和一只铯蒸汽电荷交换装置所组成。前者产生500eV的非极化正离子束，后者使它们形成亚稳原子束。

(ii) 极化器，它是产生正、负575高斯和10v/cm磁场及电场的装置。当非极化的亚稳原子束通过这装置后便成为核极化的亚稳原子束。

(iii) 选择性强磁场电离器，它只允许亚稳态原子产生电离而基态原子不产生电离。

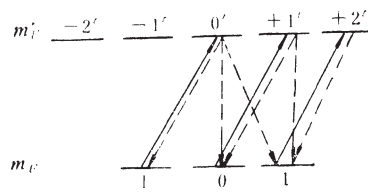
(iv) 抽气系统及其它控制设备。

其运行过程是：首先由正离子源产生500eV的正离子束并将它引入铯电荷交换器，使尽可能多的正离子获得电子而形成中性的亚稳原子；然后使它们通过静电平行板将束流中的带电粒子偏离掉；再将它们引入极化器内使亚稳束成为核极原子束；最后进入强磁场电荷交换电离器选择性地只许亚稳态原子电离，并成束引出，便可得所需的正、负(决定于交换气体)核极化离子束。

兰姆移位源的源体与原子束源差不多，总长约为1.5米。它主要用来产生负离子。而原子束源多用于产生正离子。从发展角度来看，兰姆移位源的前途不是最乐观的，因为其最高负氢离子流至今只不过 $1\mu\text{A}$ 左右，虽经多年努力但成效很少。

三、光泵极化离子源

光泵极化离子源的基本原理如图8。若在外磁场内对基态原子的各塞曼成分



的各塞曼成分 $m_F = -1, 0, +1$ 用相应共振频率的圆偏振光照射时，能按一定的选择规律 ΔM (即 $m_{F'} - m_F$) $= +1$ 吸收一光子，从基态 m_F 跃迁到激发态 $m_{F'}$ ，然后按 ΔM (即 $m_F - m_{F'}$) $= 0, \pm 1$ 规律迅速(10^{-8} 秒)衰变返回到基态。如给以持续光照，则经过多次反复，最后原来处于不同 m_F 值的基态原子将都集中到 m_F 值最大的那个态($m_F = +1$)，从而得到核极化原子束。