

激光光压偏转原子束分离锂同位素

李 丽 王荫德 李明光 王崇业 李君翔 黄上俊 史方永
蔡增良 冯 泽 余世英 张 一 朱清时*

(中国科学院青海盐湖研究所)

提要: 用激光光压偏转原子束进行了锂同位素分离实验。准直比为 450:1 的原子束装置, 炉温 600°C 时发生的原子束的数密度为 10^9 个原子/厘米³, 可调谐连续染料激光经柱面镜系统扩束后与原子束正交。激光线宽 6 兆赫, 在 1 厘米长的交叉区域内功率密度为 70 毫瓦/厘米²。当激光频率对准 ${}^7\text{Li } 2^2P_{3/2}F=3 \leftarrow 2^2S_{1/2}F=2$ 跃迁时, ${}^7\text{Li}$ 原子从束中偏转。被偏转的原子中几乎不含 ${}^6\text{Li}$, 为非常纯的 ${}^7\text{Li}$ 。当激光频率对准 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li } 2^2P \leftarrow 2^2S$ 跃迁的其它超精细跃迁时, 未看到明显的偏转, 这是由于基态超精细能级的光泵浦效应所致。

Separation of Li isotopes by laser deflection of atomic beams

Li Li, Wang Yinde, Li Mingguang, Wang Chongye, Li Junxiang, Huang Shangjun
Shi Fangyong, Cai Zengliang, Feng Ze, Yu Shiyong, Zhang Yi, Zhu Qingshi

(Qinghai Institute of Salt Lake, Academia Sinica)

Abstract: Separation of Li isotopes by laser deflection of atomic beams has been carried out. An atomic beam apparatus with a collimating ratio of 450/1 generates a Li atomic beam of 10^9 atoms/cm³ at the oven temperature of 600°C. The CW tunable dye laser crossing the atomic beam at a right angle has a linewidth of 6 MHz and its intensity at the 1 cm interaction area is about 70 mW/cm². When the laser frequency is tuned to coincide with ${}^7\text{Li } 2^2P_{3/2}F=3 \leftarrow 2^2S_{1/2}F=2$ transition, ${}^7\text{Li}$ atoms are deflected from the beam. The deflected atoms are very pure ${}^7\text{Li}$ and almost does not contain ${}^6\text{Li}$. When the laser frequency coincides with any other transition of $2^2P \leftarrow 2^2S$ of both ${}^6\text{Li}$ and ${}^7\text{Li}$, no apparent deflection is observed because of the optical pumping of the hyperfine levels of the $2^2S_{1/2}$ ground state.

一、前 言

激光光压偏转原子束分离同位素, 是基于从一个定向单色光源到原子束中待分离同

位素组分的选择性动量转移。当原子吸收一个能量为 $h\nu$ 的光子时, 在光的传播方向上它得到一个动量 $h\nu/c$ 。如果这个原子自发辐射,

* 参加过本工作的还有: 李绍伦、李世玫、杨功安、陈秉模、冯加年、王素芳、任钦。

收稿日期: 1981年8月24日。

在离去的光子的运动方向上, 它给予这个光子一个动量 $h\nu/c$ 。由于一个原子朝各个方向自发辐射光子的几率相同, 多次自发辐射给出的总动量为零。因此经过 N 次吸收-自发辐射, 原子从单色定向光源得到的总动量为 $Nh\nu/c$ 。用一束单色激光与一个发散角足够小的原子束正交, 使激光频率对准原子束中某一同位素的一个共振跃迁, 该同位素就因激光的辐射压力而从束中偏转出来。1976年, A. F. Bernhardt^[1] 用此法成功地进行了钡同位素分离。我们用此法进行了锂同位素分离。

二、锂同位素分离

天然锂有两种稳定同位素 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^7\text{Li}$, 它们的丰度分别为 7.4% 和 92.6%。锂原子基态为 $1s^2 2s^2 2^3S$, 第一激发态为 $1S^2 2P^2 P$, 对应这两个态的跃迁波长为 6708\AA , 是锂原子主线系的最强线。从 600°C 炉源中逸出的锂原子束的数密度约为 10^9 个原子/厘米³, 平均速度^[2]:

$$\bar{v}_B = \frac{3}{4} \sqrt{\frac{2\pi KT}{m}} \approx 1.9 \times 10^5 \text{ 厘米/秒}$$

一个平均速度为 1.9×10^5 厘米/秒的锂原子, 在得到一个垂直于其飞行方向的波长 6708\AA 的光子的动量后 (见图 1) 所能偏转的角度为:

$$\alpha = \frac{h\nu}{cmv} = 4.5 \times 10^{-5} \text{ 弧度}$$

要想得到较大的偏转角, 必须反复地吸收-自发辐射多个光子。

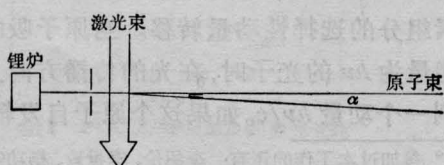


图 1 激光偏转原子束示意图

由于基态锂原子 $J = \frac{1}{2}$, 2^2P 态 $J = \frac{1}{2}$, $\frac{3}{2}$, ${}^6\text{Li}$ 原子的核自旋 $I = 1$, ${}^7\text{Li}$ 原子 $I = \frac{3}{2}$, 使得锂原子 $2^2P \leftarrow 2^2S$ 跃迁很复杂, 和该跃迁相应的 6708\AA 线实际上是由多条超精细结构谱线组成的。我们已用原子束激光诱导荧光法对 $2^2P \leftarrow 2^2S$ 跃迁的超精细结构和同位素位移进行了测定^[3]。

由 [3] 可见, 基态锂原子分裂为两个超精细能级: ${}^6\text{Li}$ 为 $2^2S_{1/2} F = \frac{1}{2}, \frac{3}{2}$, ${}^7\text{Li}$ 为 $2^2S_{1/2} F = 1, 2$ 。这种分裂会给光偏法分离同位素带来极大的困难。例如, 若激光频率对准基态 $F = \frac{1}{2}$ 的 ${}^6\text{Li}$ 原子的吸收线, 当这些原子被激发然后自发辐射返回基态时, 一部分原子可以回到 $F = \frac{1}{2}$ 态, 另一部分则可能落入 $F = \frac{3}{2}$ 态。前者可以再吸收该频率的光子, 而后者就不能够再吸收这样的光子了。于是, 来自锂炉处于基态 $F = \frac{1}{2}$ 的 ${}^6\text{Li}$ 原子将很快被激光抽运到基态 $F = \frac{3}{2}$ 上, 平均每个原子反复吸收-自发辐射光子的次数很少。而本方法要求一个原子反复吸收-自发辐射一定数量的光子, 只有这样才能得到足以使它从束中偏转出来的动量。由此看来, 选择性激发 ${}^6\text{Li}$ 使其偏转出来是困难的。从整个 Li 原子 2^2P 、 2^2S 态超精细结构能级图可以看出, ${}^7\text{Li}$ 的 $2^2P_{3/2} F = 3 \leftarrow 2^2S_{1/2} F = 2$ 跃迁没有上述的光泵浦效应, 它也是 $2^2P \leftarrow 2^2S$ 跃迁的最强线, 只有把激光频率对准这条线而偏转 ${}^7\text{Li}$, 才有希望实现锂同位素的光偏分离。

三、实验

图 2 为实验示意图。

原子束装置由炉室、束室和质谱室组成。

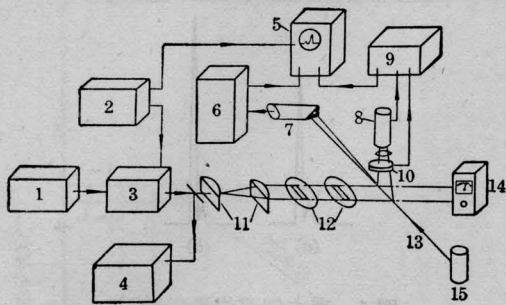


图2 光压法实验装置示意图

1—Ar⁺激光器；2—481B扫描电子仪；3—染料激光器；4—单色仪；5—示波器；6—SQ156L四极质谱仪；7—质谱仪探头；8—光电倍增管；9—锁定放大器；10—光调制器；11—柱面镜；12—光阑；13—原子束；14—功率计；15—锂炉

分别由三个高真空机组抽真空，使残余气压分别小于 8×10^{-6} 、 2×10^{-6} 和 3×10^{-7} 托。炉室内有钨丝加热的不锈钢锂炉，炉内置一盛放金属锂的不锈钢坩埚。锂炉的侧面有一宽 0.3 毫米、高 3 毫米的出射狭缝，锂原子蒸气由此狭缝泻流而出，经过一个连通小孔进入束室，再经同样尺寸的准直狭缝准直成束，两狭缝相距 135 毫米，因此原子束的准直比为 450:1，由此计算的发散角为 4.5×10^{-3} 弧度。束室安有激光窗口，激光通过窗口进入束室与原子束正交。在原子束与激光作用区的正上方有荧光窗口。束室与质谱室之间有微型插板阀，插板阀打开时，原子束进入质谱室。质谱室内安有可移动的 SQ-156L 型四极质谱探头，探头离化室入口处安有随探头移动的 0.3 毫米宽的狭缝，此狭缝离准直狭缝 380 毫米，用来检测原子束的束型、发散角、空间各点的锂同位素丰度比以及锂原子的光压偏转情况。本实验均用天然同位素丰度的金属锂。原子束的发生、检测方法和结果在[4]中已有详细讨论。

激光光源为美国光谱物理公司 380 A 环型可调谐染料激光器，由该公司 171~09 型 Ar⁺ 激光器泵浦。激光染料为 2.5×10^{-3} 摩尔的 DCM、乙二醇(80%)—二甲亚砷(20%)溶液。Ar⁺ 激光全谱线 3 瓦泵浦时，染料激

光器在 6708 Å 附近单模输出可达 90 毫瓦，线宽 6 兆赫。染料激光光斑直径 2 毫米。激光束经过一个柱面镜扩束系统，以及两个 10×3 毫米的光阑后，进入束室，在与原子束交叉处，功率密度约为 70 毫瓦/厘米²。出射激光由 404 型功率计监测。激光诱导荧光由光电倍增管接收放大，并在示波器上显示。

四、实验结果与讨论

前面已经指出，把激光频率对准 ⁷Li 的 $2^2P_{3/2} F=3 \leftarrow 2^2S_{1/2} F=2$ 这个跃迁，能保证 ⁷Li 原子多次反复吸收-自发辐射光子而从束中偏转出来。这条线与相邻的 $F=2 \leftarrow F=2$ 跃迁谱线相距仅 9 兆赫，与 $F=1 \leftarrow F=2$ 线相距也只有 15 兆赫。当锂炉温度为 600°C 时，我们实测的原子束发散角为 4.7×10^{-3} 弧度，由此产生的残余多普勒宽度约 7 兆赫。Li 原子 2^2P 态的自发辐射寿命为 27 毫微秒，因此自然线宽为 6 兆赫。我们使用了 70 毫瓦/厘米² 的较高功率密度，存在显著的功率加宽。此外，由于激光束与原子束不可能严格正交，也会引起多普勒加宽。因此示波器上看到的线宽约 40~50 兆赫。⁷Li 的 $2^2P_{3/2} F=3 \leftarrow 2^2S_{1/2} F=2$ 线与 $F=2 \leftarrow F=2$ 线和 $F=1 \leftarrow F=2$ 线相互重叠，无法做到仅激发 $F=3 \leftarrow F=2$ 而不激发 $F=2 \leftarrow F=2$ 和 $F=1 \leftarrow F=2$ 。因而两者存在基态超精细能级的光泵浦效应，从而显著减少初始处于 $2^2S_{1/2} F=2$ 态上的 ⁷Li 原子平均吸收-自发辐射光子的个数。我们做实验时，把激光频率调到 $F=3, 2, 1 \leftarrow F=2$ 吸收线上，用光电倍增管-示波器监测荧光信号，当示波器上荧光峰到达最高点时，即认为最接近对准 $F=3 \leftarrow F=2$ 跃迁。四极质谱的输出信号也证明此时分离效果最好。

1. 激光偏转前后原子束的空间分布

图 3 为炉温 609°C，激光功率密度 73 毫

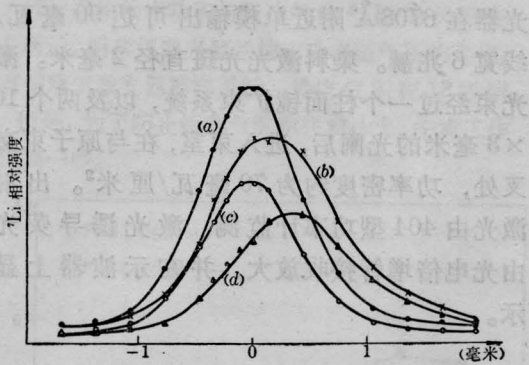


图3 原子束空间分布(${}^7\text{Li}$)

瓦/厘米²时,有无激光作用测得的 ${}^7\text{Li}$ 原子空间分布。(a)为无激光作用时的检测结果;(b)为激光对准 ${}^7\text{Li}$ $2^2P_{3/2}$ $F=3 \leftarrow 2^2S_{1/2}$ $F=2$ 时实验测得的结果;(c)为无激光作用时,原子束中处于 $2^2S_{1/2}$ $F=2$ 态的 ${}^7\text{Li}$ 原子的分布,它占 ${}^7\text{Li}$ 原子总数的 $5/8$;(d)为激光作用下初始处于 $2^2S_{1/2}$ $F=2$ 态的 ${}^7\text{Li}$ 原子偏转情况((c)、(d)是由(a)、(b)实测曲线计算得出的)。

激光功率密度70毫瓦/厘米²时,已达到 ${}^7\text{Li}$ $2^2P_{3/2}$ $F=3 \leftarrow 2^2S_{1/2}$ $F=2$ 跃迁的饱和功率。在这种情况下,若不考虑 $F=2 \leftarrow F=2$ 和 $F=1 \leftarrow F=2$ 附带发生的跃迁,一个 ${}^7\text{Li}$ ($2^2S_{1/2}$ $F=2$) 原子飞过1厘米激光照射区可以吸收-自发辐射约100次,足以使这个原子从束中完全偏转出来。但从图3可见,实际偏转小于全发散角 θ ,这主要是由于 $F=2 \leftarrow F=2$ 和 $F=1 \leftarrow F=2$ 的附带激发而产生的光泵浦效应所致。根据我们的估算,平均每个初始处于 $2^2S_{1/2}$ $F=2$ 态的 ${}^7\text{Li}$ 原子飞越光照区时共吸收-自发辐射的光子数仅为22个。

2. 偏转效率和同位素浓缩

图4为四极质谱探头狭缝置于激光入射侧,离原子束中心0.21毫米处,激光作用前后Li同位素质谱峰的变化。(a)为激光对准 ${}^7\text{Li}$ $2^2P_{3/2}$ $F=3 \leftarrow 2^2S_{1/2}$ $F=2$ 跃迁时的质谱峰,(b)为无激光作用时的质谱峰。由图可见,激光对 ${}^6\text{Li}$ 毫无作用, ${}^6\text{Li}$ 峰没有变化;

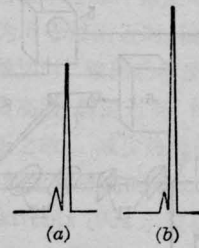


图4 束内锂同位素质谱图

而 ${}^7\text{Li}$ 的峰在激光作用下明显下降了,这显然是由于激光使 ${}^7\text{Li}$ 原子偏转了。考虑到原子束中原有的 ${}^7\text{Li}$ 原子处于 $2^2S_{1/2}$ $F=2$ 态的占 ${}^7\text{Li}$ 原子总数的 $5/8$,处于 $F=1$ 态上的为 $3/8$,因此从峰高的测量得出,初始为 $2^2S_{1/2}$ $F=2$ 态的 ${}^7\text{Li}$ 原子有45%被偏转了。

定义 ${}^6\text{Li}$ 的浓缩系数为 $\beta = (I_6/I_7)_{\text{照射时}} / (I_6/I_7)_{\text{不照射}}$ 由峰高的变化计算出, ${}^6\text{Li}$ 的浓缩系数为1.4,即当激光对 ${}^7\text{Li}$ 进行偏转时,残余束中 ${}^6\text{Li}$ 被富集了。

图5为在激光出射方向上离开原子束中心1.83毫米处测得的 ${}^6\text{Li}$ 、 ${}^7\text{Li}$ 质谱图。(a)为激光作用时的质谱图,(b)为无激光作用时的背景峰。由图可见,激光对 ${}^6\text{Li}$ 不起作用,它的峰不发生变化;而 ${}^7\text{Li}$ 峰在激光作用下显著变高了。(c)为扣除背景后被偏原子的谱峰,几乎不含 ${}^6\text{Li}$, ${}^7\text{Li}$ 具有极高的纯度,由此计算的 ${}^7\text{Li}$ 的浓缩系数很高。如果不扣除本底, ${}^7\text{Li}$ 的浓缩系数约为2.5。若进一步提高原子束准直比,减少本底,可以提高浓缩系数。

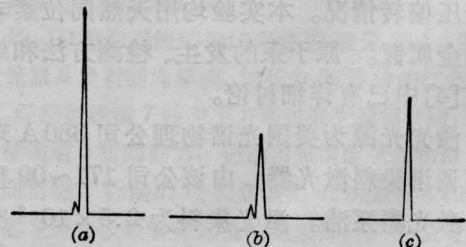


图5 束外锂同位素质谱图

五、结 束 语

上述结果表明,对于锂这样的碱金属,尽管由于基态的超精细分裂而给光压偏转原子束分离同位素带来困难,但仍可以通过将激光频率对准无光泵浦效应的超精细结构跃迁而实现光偏分离。虽然选择激发的超精细谱线并未和相邻谱线分辨开来,但只要由此而产生的光泵浦效应不十分强,则同位素的分离仍是可能的。

此外,为了克服光泵浦效应对光压偏转法分离同位素带来的困难,我们还有两点设想:

(1) 采用两台染料激光器,调节两者的输出激光频率,使处于基态的两个超精细能级上的锂原子同时跃迁至某个共同的激发

态。

(2) 由于锂原子基态超精细分裂仅为几百兆赫,仅使用一台染料激光器也可以部分地消除光泵浦效应:使透射的激光束从原子束装置外折回到入射窗口一侧,再在同一平面内和同一作用区(即第一次入射激光束与原子束所决定的平面和作用区)以一个与原子束成 θ' 角的方向再次射入,适当选择夹角 θ' ,使多普勒频移恰好等于锂基态的分裂,两个基态超精细能级同时被激发而较简便地消除光泵浦效应。

参 考 文 献

- [1] A. F. Bernhardt; *Appl. Phys.*, 1976, **9**, 19~34.
- [2] N. F. Ramsey; "Molecular Beams", Oxford, 1956.
- [3] 李明光等;《激光》, 1982, **9**, No. 7, 434.
- [4] 王荫德等;《真空科学与技术》, 1982, **2**, 73~76.

简 讯

软 X 射线区粒子数反转的观察

利用 10^{11} 瓦大功率激光实验装置,于1981年8月及12月重复观察到镁的类氢离子能级对($n=4 \rightarrow 3$)之间的粒子数反转,相应波长约为 154.6 \AA ,处于软 X 射线波段。

10^{11} 瓦、100微微秒脉宽的钕玻璃激光,经由焦距为120毫米,相对孔径为1:2的非球面透镜,轰击带铜箔冷阱的镁靶,铜箔距平面镁靶约140微米,用三合一 X 光晶体谱仪(可同时拍摄针孔、积分及空间分辨 X 光线谱)记录。在1981年8月89#的一次实验中,从积分线谱获得集居数 $N_4=1.85N_3$ 的反转结果,其时镁等离子体的平均电子温度 T_e 及电子密度 n_e 分别为280电子伏及 $1.7 \times 10^{20} / \text{厘米}^3$ 。

空间分辨 X 光线谱表明,镁的类氢能级对($n=4 \rightarrow 3$)在靶面附近无粒子数反转,但离靶面60微米时,就有明显反转,而且在离靶面75微米以上的区间,也即热的镁等离子体与冷的铜等离子体发生热量交换区间,发现镁的类氢互组合线(波长为 9.23 \AA)被铜等离子体所吸收。

1981年12月下旬的实验表明,不加冷阱的纯镁对应能级反转不明显,而加冷阱时,从积分线谱反映出更好的集居数反转 $N_4=2.8N_3, \Delta N=2.6 \times 10^{13} / \text{厘米}^3$ 。

(中国科学院上海光机所 卢仁祥

1982年2月4日收稿)