

通过极化原子束的磁偏转实现 激光同位素浓缩

朱 熙 文

(中国科学院武汉物理研究所)

1983 年 12 月 26 日收到

提 要

本文描述一种通过极化原子束的磁偏转实现同位素和同质异能素浓缩的新方法。用具有不同频率和偏振的激光进行选择性的光抽运,使束中两同位素的原子分别反向高度极化,然后使这些反向极化的原子在经过自旋选态磁铁后沿不同方向偏转,从而实现同位素浓缩。推算了此法的选择性和产量,与其他方法相比,讨论了其优缺点和可能的应用前景。提出了用锂或钾进行实验的方案。

一、引 言

激光同位素分离或浓缩,因其潜在的工业应用价值,近年来引起了日益增长的兴趣^[1-3]。同质异能素的浓缩,因其在 γ 射线激光器^[4]和核物理实验中的重要性,也受到了人们的注意。现有的激光同位素分离法,有原子选择电离、分子多光子离解、选择性化学反应和光压偏转等^[1]。本文提出一种用激光进行同位素和同质异能素浓缩的新方法(下面仅以同位素为例说明),即通过选择性的光抽运使原子束中两同位素的原子分别反向高度极化,例如用 σ^+ 偏振的激光仅对同位素 A 的原子抽运而使之正极化,用 σ^- 偏振的激光仅对同位素 B 的原子抽运而使之负极化;然后将原子通过自旋选态磁铁,使磁矩方向不同的原子沿不同路径偏转(如同著名的 Stern-Gerlach 实验),从而实现同位素浓缩以至分离。

二、原子束的选择极化和极化束的分离

通过光抽运使原子极化或核极化,从实验上和理论上都已进行了深入的研究^[5]。至今通过光抽运能直接使其高度极化的原子或离子通常是:从其基态或亚稳态至第一激发态的跃迁频率位于现有抽运光源的频段范围,基态或亚稳态附近能级结构较为简单,抽运所涉及的两能级间无亚稳态。为了借助不同频率和偏振的激光选择极化不同同位素的原子并使其具有相反的极化度,不同同位素的吸收线应不相重叠,即与抽运频率相应的同位素频移应大于吸收线宽,且在同一同位素的吸收线宽范围内应无另一同位素的其他超精细谱线。所有上述,即对用本法进行同位素浓缩的元素的要求。

为了使原子高度极化,一是提高抽运速率和增加原子与激光的相互作用时间,二是降低因碰撞和磁场中混态引起的去极化效应。鉴于同一元素的不同同位素原子间的自旋交换截面很大,不同同位素原子间的碰撞将导致严重的去极化,故原子束抽运是降低以至消除碰撞去极化的最可行方案,同时这也有助于压缩吸收线宽。使原子按绝热跟随方式通过整个区域,将防止已极化原子在磁场中混态。为获得高度极化的原子束,除降低去极化效应外,需使束中具有不同速度和处于不同超精细能级的原子都被抽运(所谓速度覆盖和超精细能级覆盖)而极化,即应满足下列要求。

1. 完全的速度覆盖 当窄带激光束垂直于准直原子束时,沿激光传播方向 z 的原子速度分量的覆盖 Δv_z 可用下式估计:

$$k|\Delta v_z| = kv \cdot |\cos \pi/2 - \cos(\pi/2 \pm \Delta\theta)| \simeq kv|\Delta\theta| \lesssim \gamma_H,$$

其中 $k = 2\pi/\lambda$ 为激光传播常数, v 为原子速度, $\gamma_H = \gamma_{\text{rad}}(1 + \sqrt{1+S})$ 为均匀线宽, γ_{rad} 为自发衰变率, S 为饱和参数, $\Delta\theta \simeq \Delta\theta_a + \Delta\theta_p \ll 1$, $\Delta\theta_a$ 为原子束发散角, $\Delta\theta_p$ 为激光-原子束交角与 $\pi/2$ 之差,此处假定激光束发散角小到可以忽略。可见,为得到足够的速度覆盖, $\Delta\theta$ 应小, γ_H 应大,这可通过使原子束准直、激光束与原子束严格垂直和利用功率增宽而实现。通常 $\gamma_{\text{rad}}/ku \simeq 10^{-2}$ (u 为原子平均速度),故在很好准直的原子束 ($\Delta\theta_a \lesssim 10^{-2}$) 中,所有 $v \lesssim u$ 的原子可被未饱和光束抽运;为了抽运 $v_z > 10^{-2}u$ 的原子,激光强度应大于饱和光强;但是,总有一定数量的、 $|v_z| > \gamma_H/k$ 的原子不能被抽运和极化。

2. 超精细能级覆盖 热平衡时,具有非零的 I 与 J 值的原子,分布于基态的所有超精细能级。对 I 或 J 值高的原子,超精细能级数目很多,激光器带宽很难覆盖所有这些能级,通常需采用多台激光器。但对只有较少超精细能级的原子,例如只有二超精细能级的碱原子和类碱离子,除具有甚大超精细裂距者需用两台激光器抽运外,可借助下列方法之一用一台激光器实现超精细能级覆盖。

1) 宽带激光器,如多模染料激光器^[6]。激光器带宽 $\Delta\nu_{\text{las}}$ 应满足:

$$\Delta\nu_{\text{is}} > \Delta\nu_{\text{las}} > \Delta\nu_{\text{hfs}},$$

其中 $\Delta\nu_{\text{is}}$ 为同位素频移, $\Delta\nu_{\text{hfs}}$ 为超精细裂距。

2) 声光调制器^[6,7]。借此可从一台窄带激光器(如单模染料激光器)得到两不同频率的光束,分别抽运两超精细能级,但超精细裂距需小于调制器的可调范围。

3) 同一窄带激光器的不同光束与原子束成不同交角,因而分别对应不同超精细能级的跃迁频率^[6,8]。由于 Doppler 频移,非垂直入射光束不能达到很好的速度覆盖。

具有两超精细能级的原子束,通过弱磁场时用一台窄带激光器进行 F 抽运,然后以绝热通过方式进入强磁场,可获得高的电子极化度,因而避免了超精细能级覆盖的问题。例如,当上述第 1 项以及下述第 3,4 项要求满足时,借助线偏振或 σ^- 圆偏振光抽运

$$F = I + 1/2$$

能级,可得完全的电子负极化,用线偏振或 σ^+ 圆偏振光抽运 $F = I - 1/2$ 能级,可得部分的电子正极化。

3. 足够的激光强度 高的激光强度将增加抽运速率和速度覆盖范围,对 $\sigma Nl \ll 1$ 的光疏原子束(其中 σ 为光吸收截面, N 为束中原子密度, l 为沿激光传播方向的原子束宽

度),可取激光光强较饱和光强(通常为 10 毫瓦/厘米²量级)高一个量级,采用现有的单模染料激光器,这不难达到. 对 $\sigma NL \gg 1$ 的光密原子束,光强需远大于上述值,才能使处于激光束中的所有原子都受到足够光强的激光照射而被极化.

4. 足够长的相互作用时间 原子与激光束的相互作用时间 t , 即原子通过激光束的渡越时间: $t = d/v$, 此处 d 为光束沿原子运动方向的尺度. 当激光光强甚大于饱和光强时,抽运周期主要由激态寿命 $1/\gamma_{rad}$ 决定,由于自发衰变存在多个分支道,要得到完全极化,需经多个抽运周期. 设需 30 个周期,取典型值 $u \approx 10^5$ 厘米/秒, $1/\gamma_{rad} \approx 3 \times 10^{-8}$ 秒,为了完全极化速度为 u 的原子,光束尺度应为 $30u/\gamma_{rad} \approx 0.1$ 厘米,这正是通常激光束的尺度,相应 $t \approx 1$ 微秒. 对速度高于 u 的原子,要得到同样的相互作用时间,必须增加光束尺度,这可借扩展光束或通过往复反射光束使激光与原子多次作用而实现. 但总有一些速度极高的原子,因抽运周期太少而不能被极化.

原子束抽运过程可用率方程描述,此方程通常以数值法求解. 从 (F, m_F) 能级的原子数分布,不难得出高磁场中的电子极化. 由于渡越时间和速度覆盖依赖于原子速度,故此极化与速度有关. 将极化对束的原子速度分布积分,可得原子束的极化. 如前述要求均能满足,则对至今证实能直接抽运的原子和离子,均可被高度极化. 已有实验表明,对 Li 和 Na 束,用现有的商品染料激光器抽运,极化可高达 0.9^[6].

如原子束中两同位素的原子在低磁场中已分别被反向极化,设法使其按绝热通过方式进入在原子束共振技术中采用的 Rabi 型磁铁或六极磁铁,因处于不同的 m_F 或 m_J 态的原子具有不同的等效磁矩,在高度非均匀磁场中将遵循不同轨迹^[9],因而使束中同位素分离(对完全极化束)或浓缩(对部分极化束). 因磁偏转与速度有关,任一自旋态的原子通过磁铁后,因速度不同都有一定的空间分布,为了得到有效的分离,必需有足够的磁场梯度和磁铁长度,以及较小的原子束宽度和较窄的原子速度分布. 两极的 Rabi 型磁铁可分离处于不同电子自旋态的原子,并适用于平面束,故允许有较高的束通量; 六极磁铁能聚焦有效磁矩为负的原子,故此种原子的空间扩展较小,但只适合于圆柱形束.

三、选择性和产量的推算

本法的分离或浓缩效果,决定于束中两同位素原子的极化度以及磁铁对处于两自旋态的原子的分离效率. 定义选择性 S 为分离后两同位素的丰度比与分离前丰度比的比值,不难求得(设分离效率为 100%)

$$S^+ = \frac{(\beta_A^+)}{(\beta_B^+)} \bigg/ \frac{(\alpha_A)}{(\alpha_B)} = \frac{1 + P_A}{1 + P_B} \quad \text{对正极化束;} \quad (1a)$$

$$S^- = \frac{(\beta_B^-)}{(\beta_A^-)} \bigg/ \frac{(\alpha_B)}{(\alpha_A)} = \frac{1 - P_B}{1 - P_A} \quad \text{对负极化束.} \quad (1b)$$

这里 $\alpha_{A,B}(\beta_{A,B})$ 为分离前(后)同位素 A, B 的丰度,上标 $+(-)$ 表示正(负)极化束, $P_A(P_B)$ 为 $A(B)$ 的极化度,此处假定 $P_A > 0, P_B < 0$. 显然,极化度越高,则 S 越大. 如分离效率小于 100%, 则 S 值较上式为低. 分离后同位素 A, B 的丰度分别为

$$\beta_A^+ = S^+ \alpha_A / [1 + (S^+ - 1) \alpha_A], \quad (2a)$$

$$\beta_B^- = S^- \alpha_B / [1 + (S^- - 1) \alpha_B]. \quad (2b)$$

设 $|P_A| = |P_B| = 0.9$, $\alpha_A \approx 0.07$ (如 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^{40}\text{K}$), 则 $S^+ \approx 19$, $\beta_A^+ \approx 0.59$.

被分离同位素的产量, 决定于原子束通量. 对平面型泻流束, 最大前向束强度

$$I \approx hu/4\pi\sigma_v$$

(原子/秒·弧度立体角)^[40], 其中 h 为束高度, σ_v 为气体动力碰撞截面. 取 $h = 1$ 厘米, $u \approx 10^5$ 厘米/秒, $\sigma_v \approx 5 \times 10^{-15}$ 厘米², 则 $I \approx 2 \times 10^{18}$ 原子/秒·弧度立体角. 如希望在磁铁入口处得到束宽 1 毫米、准直度为 10^{-2} 的原子束, 此接收立体角约为 10^{-3} 弧度, 故最大束通量为 2×10^{15} 原子/秒. 为提高产量, 可采用超声束技术^[40]以增加原子束强度, 与泻流束相比, 不难增加三个量级, 此时抽运光强也需相应增加. 同时还可增加原子束数目, 例如在同一原子炉上开 10 道缝, 构成 10 束. 于是, 束通量将增至 2×10^{19} 原子/秒, 取原子量为 100, 则日产量约为 250 克.

四、优缺点和可能的应用前景

本法有如下优点. 首先, 所需的激光光强远较原子选择电离法和分子多光子离解法为低. 在原子选择电离法中, 电离光强与从基态到某一激发态间的激发光强之比为 σ_c/σ_i , 其中 σ_c 为激发截面, σ_i 为电离截面, 通常 $\sigma_c/\sigma_i \approx 10^2 - 10^{4[41]}$, 故需一光强极高的电离光源. 用极化束磁偏转法, 抽运光强与上述的激发光强相当, 故约为电离光强的 $10^{-2} - 10^{-4}$, 此种光强低得多的激光源当然更易于获得. 至于多光子离解过程, 显然也需要甚高的激光光强. 其次, 磁偏转分离较原子电离法中的电磁分离简便易行. 此外, 与非束型方法相比, 本法更适合于同质异能素的分离, 原因是束抽运时, 吸收线宽仅略大于均匀线宽, 即使同质异能素频移甚小, 仍满足大于吸收线宽的要求. 本法的缺点是: 产量偏低, 此为所有束型方法所共有; 不适用于不能由光抽运直接极化的原子. 由此可见, 本法对能通过光抽运直接极化的同位素和同质异能素的小规模浓缩, 在目前的技术条件下是可行的. 如能设法对其他原子进行选择性极化, 并提高产量, 则存在扩大应用的前景.

五、实验方案

对用光抽运易于极化的碱原子(有天然同位素者为 Li, K 和 Rb), 因基态只有两超精细能级, 可用 F 抽运使之极化. 特别是 ${}^6\text{Li}$ 和 ${}^{40}\text{K}$ 的基态超精细裂距小(分别为 228 和 254 MHz), 位于声光调制器的调制范围, 建议用 Li 或 K 按下述方案进行实验. 采用 D_1 线(对 Li 为 6708 Å, 对 K 为 7699 Å)激励, 以一线偏振激光束抽运 ${}^7\text{Li}$ 或 ${}^{39}\text{K}$ 基态的

$$F = I + 1/2$$

能级而使之负极化, 以另一激光器产生的、经声光调制器偏移和未偏移的两 σ^+ 圆偏振激光束抽运 ${}^6\text{Li}$ 或 ${}^{40}\text{K}$ 基态的两超精细能级而使之正极化. 如原子束准直度优于 10^{-2} , 束中原子密度低于 10^{13} 原子/厘米³, 用现有的单模染料激光器, 其光强和束截面均满足使原子束极化甚近于 1 的要求. 用高场强梯度的 Rabi 型磁铁进行分离, 用热线探测器或质谱计测量原子束强度, 因而可从实验上测定选择性和产量.

本工作是作者在美国 MIT 工作期间完成的。作者感谢 M. S. Feld 教授和 J. E. Thomas, W. W. Quivers, Jr. 博士的评论, 感谢张承修教授阅读初稿。

参 考 文 献

- [1] V. S. Letokhov, In *Frontiers in Laser Spectroscopy*, R. Balian, S. Haroche and S. Liberman eds., North Holland, Amsterdam, (1977), p. 771; 以及其中所引文献.
- [2] J. I. Davis, *IEEE Trans.*, NS-30 (1983), 24.
- [3] F. S. Becker and K. L. Kompa, *Nucl. Technol.*, 58(1982), 329.
- [4] G. C. Baldwin, J. C. Solem and V. I. Gol'danskii, *Rev. Mod. Phys.*, 53(1981), 687.
- [5] W. Happer, *Rev. Mod. Phys.*, 44(1972), 169.
- [6] J. T. Cusma, D. R. Swenson and L. W. Anderson, In *Lasers in Nuclear Physics*, C. E. Bemis, Jr. and H. K. Carter eds., Harwood Academic, New York, (1982), p. 333.
- [7] G. Baum, C. D. Caldwell and W. Schröder, *Appl. Phys.*, 21(1980), 121.
- [8] D. E. Murnick and M. S. Feld, In *Polarization in Nuclear Phenomena*, G. G. Ohlsen ed., AIP Conference Proceedings No. 69, AIP, New York, (1981), p. 804.
- [9] N. F. Ramsey, *Molecular Beams*, Oxford, London, (1956).
- [10] H. Pauly and J. P. Toennies, *Methods of Experimental Physics Vol. 7A*, B. Bederson and W. Fife eds., Academic Press, New York, (1974), p. 227.
- [11] V. S. Letokhov, V. I. Mishin and A. A. Puzosky, *Prog. Quant. Electr.*, 5(1977), 139.

LASER ISOTOPE ENRICHMENT VIA MAGNETIC DEFLECTION OF OPTICALLY POLARIZED ATOMIC BEAM

ZHU XI-WEN

(Wuhan Institute of Physics, Academia Sinica)

ABSTRACT

We describe a novel method to enrich isotopes and isomers via magnetic deflection of optically polarized atomic beam. High electronic polarization with opposite signs for atoms of both isotopes respectively is achieved by selective optical pumping using lasers with different frequencies and polarizations and then the isotopes are enriched by deflecting the oppositely polarized isotopes along different directions by the inhomogeneous magnetic field in the spin selective magnet. Separation selectivity and throughput are evaluated and the advantages, disadvantages and prospects of possible application of the present method are discussed in comparison with other existing methods. Experimental scheme with lithium or potassium is suggested.