

等离子体共振法分离同位素

王 龙

(中国科学院物理研究所)

目前在工业上分离同位素(主要是铀)的方法主要是气体扩散法和离心法。二者都基于利用同位素间微小的质量差,因而每级分离器的效率是不高的。例如,气体扩散法使气态的 UF_6 通过有微孔的壁,对于不同的同位素来说,扩散速率反比于其质量的平方根。用这种方法来分离 ^{235}U 与 ^{238}U ,每一级仅能使 ^{235}U 浓度提高到 1.004 倍。因此,欲把 ^{235}U 的浓度从 0.7% 的自然浓度提高到 3% (轻水堆要求),共需要 1250 个分离单元。因此,此类工厂的设备费与运转费极其昂贵。气体离心法利用两种同位素在高速旋转时受到的离心力不同而分离,能量消耗较少,但所需单元数更多。

正在研究中的新方法有激光法和等离子体法。其中激光法比较成熟。这种方法用激光选择激发某种同位素的原子或分子至高能态,使其化学活性增加,然后用其它方法予以分离。这种方法的优点是所需分离单元数较少,设备与运转费用约为现行方法的几分之一。

等离子体法可分为旋转法和共振法。旋转法和上述气体离心法的原理是一样的,但由于使用电磁场来实现带电粒子的运动,不受容器材料强度的限制,旋转速度可更快一些。但旋转加快会使温度增加,不利于分离,故也存在一定限制。

共振法利用离子回旋频率附近的波和粒子相互作用来分离同位素。这是因为,处于磁场中的带电粒子在垂直磁场方向作回旋运动。其回旋圆频率为 $\omega = qB/cm$, 其中 B 为磁场强度, q 为粒子电荷, m 为粒子质量, c 为光速。如果外加交变电磁场的频率等于或接近某一种同位素的回旋频率,则与此种离子发生共振。

在这一类方法中,首先提出来并在实验室中实现了分离的是离子回旋共振法^[1]。这种方法是使频率为所需分离的同位素离子的回旋共振频率的波加于处在均匀磁场中的等离子体,使所选择的同位素离子在垂直磁场方向加速,用一个带偏压的冷钨带收集这些高能离子而达到分离。

为实现分离需要两个条件。首先,必须有足够的加速离子的时间,这要求

$$\omega\tau(\Delta M/M) > 1, \quad (1)$$

其中 $\tau = L/v_{\parallel}$, L 为装置长度; v_{\parallel} 为粒子在平行磁场方向的平均速度; ω 为所加交变场的圆频率; M 为同位素质量; ΔM 为同位素间质量差。

其次要求碰撞足够少。这是因为,碰撞使共振粒子的动能从垂直磁场方向转到平行方向,或传递给非共振粒子。这要求

$$(v/\omega) < (\Delta M/M), \quad (2)$$

其中 v 为高能离子的平均碰撞频率。

文献 [1] 所描述的实验使用了两个装置。一个是静态等离子体装置(Q 机)。主要参数是:等离子体直径 5.7cm, 长 1m; 最大静磁场 4kG; 磁场的空间均匀度 $\Delta B/B < 0.3\%$; 典型的等离子体参数为 $n = 10^{10} - 10^{11} \text{cm}^{-3}$, $T_e \approx T_i \approx 0.2\text{eV}$ 。用一个长螺线管产生 80—100kHz 的高频场。当泵功率为 300W 时,在角向产生的感应电场强度为 $E = 0.06r$, 其中 r 为径向坐标,单位为 cm; 电场强度单位为 V/cm。

另一装置为直流感电装置。超导磁体产生的最大磁场为 20 kG, 空间均匀度 $\Delta B/B < 0.7\%$ 。使用处于装置一端的两个电极来直接激发高频电场。这种激发方式只要求 3W 的功

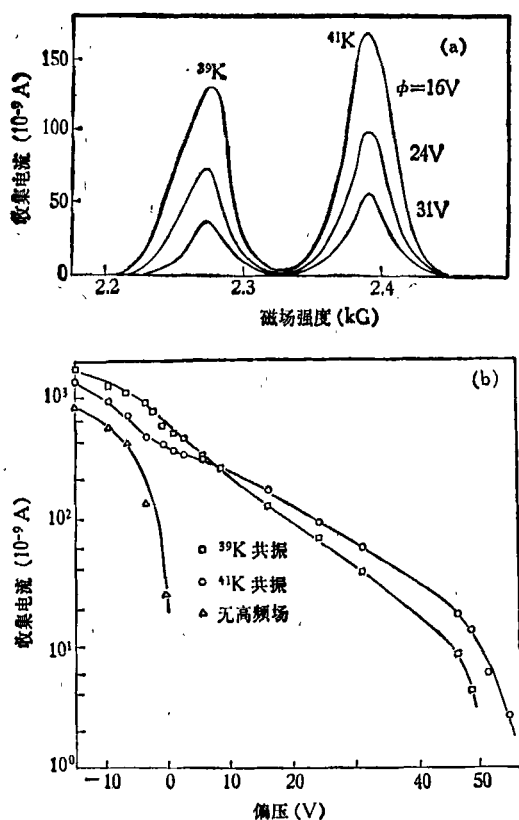


图 1

(a) 用径向能量分析器测量的离子电流, 静磁场的变化相应于 ^{39}K , ^{41}K 共振, ϕ 为加在分析器上的偏压;
 (b) 在无高频场、 ^{39}K 共振、 ^{41}K 共振时, 离子电流与分析器偏压的关系

率。在这一实验装置上得到的结果与前一装置一致。

用一个加一定正偏压的径向能量分析器来收集高能离子。图 1 表示钾等离子体(包含 ^{39}K 和 ^{41}K 两种同位素)的实验结果。(a) 为高频频率一定 (88.6 kHz), 对于不同的分析器偏压, 收集电流随静磁场大小变化的曲线。这一电流与超过相应能量的高能离子数目成比例。由图可看出, 相对于不同的共振频率, 不同的同位素 ^{39}K 和 ^{41}K 离子得到加速。(b) 表示在无高频波及高频波与 ^{39}K 离子共振, 或与 ^{41}K 离子共振时, 收集电流随分析器偏压的变化曲线。由图可以看出, 在共振时, 离子可被加速到 50eV。这两条曲线近于直线, 说明垂直于磁场方向速度近于麦氏分布。

用一个加 4V 偏压的冷钨带 (-5°C) 来收集高能离子, 运转 30min 后, 将钨带连同收集到的宏观样品送进一个四极滤质器分析, 发现在 ^{41}K 共振激发时, 所得到的样品中, 同位素 ^{41}K 与 ^{39}K 的比例, 已由自然丰度比的 0.07 提高到 4。

用这种方法实现了三十多种原子和分子的共振。这种方法还可配合其它物理或化学分离技术来提高分离效率。

为了缓和分离条件 (1), (2) 的矛盾 (提高温度使第二个条件易于满足, 但第一个条件更难满足), 还可利用离子回旋共振频率的谐波。在文献 [2] 所描述的实验中, 已观察到直至第十三次谐波的同位素共振实验。

第二种等离子体共振法称为离子回旋频率附近的有质动力势法 [3]。

所谓有质动力是指电磁波或等离子体中的其它电振荡作用在带电粒子上的一种非线性力。它可用一个势 φ_j 来表示:

$$F_j = -\nabla\varphi_j. \quad (3)$$

在回旋共振频率附近, 这个有质动力势可表示为

$$\varphi_j = q_j^2 E_0^2 / 2m_j (\omega - \Omega_j) \omega, \quad (4)$$

其中 g_j 为该粒子的电荷; E_0 为左圆偏振平面电磁波的电场振幅; m_j 为该粒子的质量; Ω_j 为该粒子的回旋频率。

如果存在两种质量很接近的同位素离子, 可把交变场的频率选在两种离子的回旋共振频率之间, $\Omega_1 < \omega < \Omega_2$, 那么, 两种离子的有质动力势的符号相反, 也就是说, 高频场的梯度分别把两种离子推向相反的方向, 因而直接在空间上分离了同位素。

冷等离子体中的离子回旋波的色散关系为

$$\frac{k^2 c^2}{\omega^2} = 1 - \sum_i \frac{\omega_{pi}^2}{\Omega_i (\omega - \Omega_i)}, \quad (5)$$

其中, k 为波矢; $\omega_{pi} = q_i \sqrt{n_i / m_i}$ 为第 i 种粒子的等离子体频率; Ω_i, q_i, n_i, m_i 分别为该种粒子的回旋频率, 电荷, 密度以及质量。

如果 $m_1 \approx m_2, \Omega_2 \approx \Omega_1$, 以及 $n_1 \gg n_2$, 如 ^{235}U 和 ^{238}U 的情况, 可令

$$\omega = (\Omega_1 + \Omega_2) / 2. \quad (6)$$

色散关系(5)可近似写为

$$k^2 c^2 = -\omega_{p1}^2 / \alpha, \quad (7)$$

其中, α 是一个很小的数:

$$0 < \alpha = [(\Omega_2 - \Omega_1) / 2\Omega_1] \ll 1. \quad (8)$$

从(7)式,可知 k 为虚数,意味着波的衰减,因而可形成场的梯度,产生有质动力分离不同的同位素离子。

如果 $n_1 \ll n_2$, 如对 ^{39}K 和 ^{41}K 的情况,仍取(6)式,色散关系式(5)近似为

$$k^2 c^2 = \omega_{p2}^2 / \alpha. \quad (9)$$

这时 k 为实数,波并不衰减,必须利用驻波来形成所需要的场梯度。

仍考虑第一种情形.在达到热力学平衡时,两种粒子的分布为

$$n_1 = n_{10} \exp(-m_1 E_0^2 / 2\alpha T B_0^2), \quad (10)$$

$$n_2 = \text{const } n_1 \exp(m_1 E_0^2 / \alpha T_i B_0^2), \quad (11)$$

其中 $T = T_e + T_i$, T_e , T_i 分别为电子温度、离子温度.把第一种离子密度公式(10)代进色散关系式(7),得到关于电场分布的非线性波动方程:

$$\frac{d^2 E_0}{dz^2} - \frac{1}{\alpha} \omega_{p10}^2 \exp\left(-\frac{m_1 E_0^2}{2\alpha T B_0^2}\right) E_0 = 0. \quad (12)$$

假设波在 $z = 0$ 处激发,那么方程(12)的解如图2所示.分离区的特征长度为

$$L = \sqrt{\alpha} / \omega_{p10} = (\alpha m_1 / q_1^2 n_{10})^{1/2}. \quad (13)$$

可按下式定义富集效率:

$$\sigma = (n_2/n_1)_{\text{max}} / (n_2/n_1)_{\text{min}}. \quad (14)$$

从(10), (11)式得到

$$\sigma = \exp(m_1 E_0^2 / \alpha T_i B_0^2). \quad (15)$$

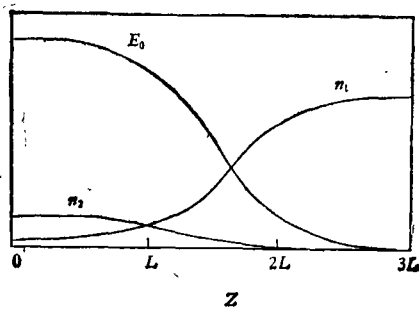


图2 电场振幅 E_0 , 两种同位素的密度 n_1 , n_2 的轴向分布

同一文献给出了为分离 ^{235}U 和 ^{238}U 而提出的一组设计参数:

$$\begin{aligned} B_0 &= 25\text{kG}; & n_1 &= 10^{11}\text{cm}^{-3}; & T_i &= 2\text{eV}, \\ T_e &= 4\text{eV}; & E_{0\text{max}} &= 30\text{V/m}; \\ L &= 8.89\text{m}. \end{aligned}$$

这样的装置对于两种同位素呈自然比例的铀,富集效率可达 $\sigma = 32$.

以上推算基于有质动力势在回旋共振频率附近的表达式(4).按此式,当 $\omega \rightarrow \Omega_j$, $\varphi_j \rightarrow \infty$, 成为一个奇点.这是因为在推导(4)式时,作了绝热近似,认为在一个回旋半径范围内,电场变化很小.所以(4)式的适用范围是 $l \gg v / (\omega - \Omega_j)$, 其中 l 为电场梯度的标量长度, v 为粒子速度.当高频场的频率接近回旋频率时,这一条件不成立,因而必须研究回旋频率附近有质动力势的非绝热效应。

为此,文献[4]采用了如图3所示的实验装置

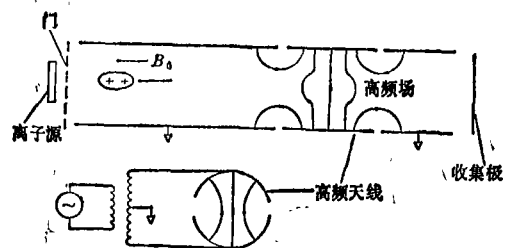


图3 测量回旋共振频率附近的有质动力势的装置

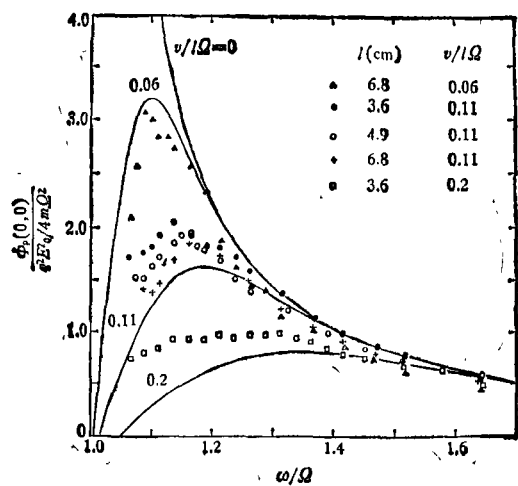


图4 对于不同的参数 l , $v/l\Omega$ 的有质动力势与频率关系的实验值和理论值

置。该装置长 137cm, 半径 7.3cm, 在轴向产生一个 1.8kG 的均匀磁场, 在装置中间用一对半圆天线产生高频电场。改变天线长度可以改变高频场梯度的特征长度 l 。在装置的一端, 用一个控制栅使一束一定能量的离子通过装置, 持续时间为 $20\mu\text{s}$, 在装置另一端用一个收集极接收。如果高频场的有质动力势超过粒子动能, 离子束将不能通过装置而达到收集极。

实验结果如图 4 所示。实验点系对于不同的参量 $l, v/l\Omega$ 所作的有质动力势作为高频场频率的函数。曲线为对于不同的 $v/l\Omega$ 值的理论计算值。由图可看出, 实验与理论一致, 有质动力势是频率和 $v/l\Omega$ 的函数。当 $v/l\Omega = 0$ 时, 即为绝热近似的表达式 (4); 当 $v/l\Omega > 0$ 时, 有质动力势的峰值不在 $\omega = \Omega$, 而在 $\omega \simeq \Omega + 1.7v/l$ 处。此时的有质动力势约为同一频率的绝热值的 0.75 倍。

因此, 非绝热效应降低了有质动力势。在分离同位素装置中, 要求所加频率 ω 处的有质动力势接近绝热值。为此, 要求

$$\omega > (\Omega + 2v/l). \quad (16)$$

由于 (6) 式, $\omega - \Omega$ 是一定的, 因此粒子热速度有一个最大值。这要求此值

$$\beta \equiv [8\pi n_i T_{\parallel} / B_0^2] < [(\Delta M / M)^3 / 32], \quad (17)$$

其中 T_{\parallel} 为平行磁场方向的离子温度。对于分离铀同位素, 要求 $\beta < 1.3 \times 10^{-7}$ 。

上面所述的离子回旋频率附近的有质动力

势法可直接在空间上分离同位素, 但由于对 β 值的限制, 密度不能很高, 因而限制了工作效率。此外, 对于一定的同位素, 特征长度 L 的变化范围很小, 难于用比较小的装置来进行此种实验。

鉴于对同位素的需求以及现行的分离同位素方法的缺点, 正在研究各种新的分离方法。本文所介绍的等离子体共振法, 特别是第二种方法, 提出较晚, 在将来的工业生产上能否与其它方法竞争尚难于预料。需指出的是, 此法的优点在于, 对于不同元素的同位素, 仅仅装置的运转参数不同。也就是说, 比起激光法来说, 这一方法更容易用非放射性同位素来模拟铀的分离。

此外, 这一研究与一些重要的等离子体物理问题, 如波在等离子体中的激发、传播与模的转换, 波与等离子体的非线性相互作用, 还有一些重要的聚变应用, 如离子回旋共振加热、开端装置的高频塞子、杂质的清除等, 有极其密切的关系。可结合这样一些问题来开展这一研究。

参 考 文 献

- [1] J. M. Dawson et al., *Phys. Rev. Lett.*, **37** (1976), 1547.
- [2] J. P. M. schmitt, *Phys. Fluids*, **21** (1978), 1461.
- [3] E. S. Weibel, *Phys. Rev. Lett.*, **44** (1980), 377.
- [4] G. Dimonte, et al., *Phys. Rev. Lett.*, **48** (1982), 1352.

(上接第 153 页)

用药效果提供依据。同样, 在进行中医中药的科研中, 许多学者也可以从超微结构方面来探讨中药的药理作用, 如对补气药——黄芪的研究, 就取得了一些有价值的资料。自从广泛开展计划生育和优生学的研究以来, 科研工作者为避免畸形儿和智力低下儿的出世作了大量工作, 已经知道某些病毒感染(如风疹病毒、巨细胞病毒等)具有致畸和影响智力发育的作用。现在已能利用电镜技术对孕妇是否患有这些疾

病作出快速诊断, 这将有利于及早采取措施, 有助于优生优育。此外, 电镜在病毒致畸机理的基础研究中, 也在发挥着其独特的作用。在公共卫生和一些职业病的研究中, 电镜同样具有不可取代的作用。利用电镜技术中的微区元素分析方法, 对人体组织器官中的微量元素能得到定量的结果, 如对人矽肺的研究就很有帮助。总之, 根据各学科、各领域的不同特点, 选择相应的电镜技术, 均能做出有意义的结果。