

# 激光离子源——寻找与研究新核素的新工具

徐四大

(清华大学物理系 北京 100084)

**摘要** 本文评述激光离子源的基本原理、主要性能、研究方案和近年来的发展,以及在寻找与研究新核素中的应用。

**关键词** 激光, 共振电离, 离子源, 新核素。

## 1 引言

新核素的合成与研究,早已成为核物理学研究的重要前沿领域之一。经过多年的努力,已经发现了两千多种核素。根据现有理论估计,在中子和质子滴线之间可能存在的核素有六千多种。显然,寻找新核素的研究还有十分广阔的天地。但是,今天寻找新核素的研究工作已经是一项艰难的任务。其主要困难是:待寻找的新核素已逼近滴线,即属于远离 $\beta$ 稳定线的核素,通过核反应合成的这样的核素十分稀少;寿命通常很短,例如在 $0.1\sim 1s$ ,或更短;又处于极大数量的背景核素中;待寻找的新核素中很多是难熔的等等。所有这些特性,自然要求鉴别新核素的设备应具有高的效率和灵敏度;很强的质量数 $A$ 和电荷数 $Z$ 的选择性;能够在线和快速运行;对高熔点元素仍然有效。

在线同位素分离器将短寿命核素的产生、质量分离及衰变性质的测量等过程在时间上有效地衔接起来,因此而成为鉴别和研究远离稳定线核素的主要设备。建立在欧洲核子研究中心(CERN)的世界上第一台在线同位素分离器为短寿命核素研究作出了突出贡献,极大地推动了远离 $\beta$ 稳定线核素的研究。目前运行的在线同位素分离器大多都采用传统的热离子源。这种离子源运行时,先将核反应产物停止在固体介质中,再通过加热蒸发与表面电离产生各

种核素的离子。采用这种离子源的同位素分离器在鉴别与研究新核素时将遇到下列困难:(1)由于加热温度有限,高熔点元素难以再蒸发,致使核反应中产生的难熔核素不能引出和鉴别;(2)蒸发与电离没有元素选择性(即 $Z$ 选择性),这对于处在极大数量的背景核素中的稀少新核素的鉴别,将存在强烈的同量异位素(Isobar)的干扰,给质谱分析带来了难以克服的困难;(3)蒸发电离过程弛豫时间较长( $>1s$ ),不利于短寿命核素的鉴别与研究。

基于上述热离子源用于鉴别新核素的困难,近年来不少核物理研究者致力于对难熔元素有效、具有 $Z$ 选择、又能高效率 and 快速运行的新离子源的探索。激光离子源就是这类新离子源中的佼佼者,将为新核素的鉴别与研究开辟一条新路。

## 2 激光离子源的运行原理和主要特征

激光离子源是利用激光共振电离方法<sup>[1,2]</sup>使待研究原子电离的一种离子源。当时间上同步的不同波长的多束(常用两束或三束)激光与待研究原子相互作用时,通过调节激光波长,实现多步共振激发,把原子从基态激发到自电离态而电离,或者通过多步共振激发,把原子从基态激发到里德堡态,再用场电离或光电离实现电离。

由于激光离子源是采用激光共振电离方法

使原子电离,完全不同于通常的热离子源的电离方式,这就使它具有许多独特的性质.

1) 很强的元素选择性,即具有很高  $Z$  的鉴别能力

$Z$  选择性高是激光离子源独有的特性. 激光共振激发的最大选择性可表示为<sup>[3]</sup>

$$S_{ij} = (\Delta\nu_{ij}/\Gamma)^2$$

式中,  $\Delta\nu_{ij}$  为已选定的待研究原子的两共振能级(例如,基态与第一激发态)间距与背景原子的相应两能级间距之最小差值(如果讨论同位素选择性,  $\Delta\nu_{ij}$  即为同位素移  $\Delta\nu_{is}$ ),  $\Gamma$  为能级的自然宽度. 通常,  $\Delta\nu_{ij} \geq 10\text{GHz}$ ,  $\Gamma \sim 10\text{MHz}$ . 因此,一级共振激发的选择性,  $S_{ij} \sim 10^6$ , 三级共振激发的选择性可望达到  $10^{18}$ , 即在  $10^{18}$  个背景原子中可以选出一个待研究原子. 如果三级共振激发的第三级是共振激发到自电离态,则由于自电离态能级宽度很大,选择性不可能很高. 一般说来,激光离子源的  $Z$  选择性可以达到  $10^{15} \sim 10^{18}$ . 这样高的  $Z$  选择性对于消除同量异位素的干扰,鉴别产量稀少的新核素十分有利. 值得一提的是,高  $Z$  选择性的激光离子源对于研究物理和化学性质十分相似的稀土区核素也具有独特的作用.

2) 很高的电离效率

离子源的电离(电荷态  $1^+$ )效率通常定义为,从离子源引出的离子数与进入离子源的原子数之比. 高的电离效率是离子源的重要指标. 用于寻找新核素的离子源要求有足够高的电离效率. 激光使原子共振激发而电离的效率主要取决于共振激发截面和激光的功率. 原子的基态到第一激发态的共振激发截面  $\sigma_1 = 10^{-14} \sim 10^{-11}\text{cm}^2$ . 激发态间的共振激发截面  $\sigma_2 \approx 10^{-15} \sim 10^{-13}\text{cm}^2$ , 高激发态到自电离态的共振激发截面  $\sigma_3 \approx 10^{-15}\text{cm}^2$ . 相应于这些值,可计算出饱和激发所需的激光功率密度. 若采用高重复频率(例如,  $10\text{kHz}$ )的脉冲激光,功率密度高于  $10\text{W} \cdot \text{cm}^2$  即可实现饱和激发<sup>[4]</sup>. 当把激光聚焦到直径为  $2\text{mm}$  的束时,功率为  $330\text{MW}$  即达到上述饱和值. 常用的铜蒸气激光器泵浦的染料激光器即可输出这一功率水平的激光束. 由于实现了

饱和激发,电离效率接近于 1,激光离子源的整体效率可以达到比较高的值,例如,  $10^{-2} \sim 10^{-1}$ .

3) 延迟时间短

通常可以达到 0.1 秒或更短.

4) 适用于包括难熔元素在内的各种元素

从后面介绍的正在研究的各种类型的激光离子源中可以发现,在靶室与离子源构成的系统中,均不存在像通常的热离子源那样的加热、蒸发过程,因此激光离子源的应用不受核反应产物熔点高低的限制.

5) 易于获得脉冲化离子束

可用脉冲激光器进行共振电离获得脉冲离子束;也可用连续或准连续激光器进行共振电离,由脉冲电场引出方式获得脉冲离子束.

### 3 激光离子源研究进展

自 70 年代以来,可调谐染料激光器出现,为光谱学研究提供了分辨率极高、调谐性能优良、功率又强的光源,激光共振电离谱学方法因此而产生,并得以快速发展<sup>[1,2]</sup>. 将激光共振电离谱学方法用于离子源研究,开创了激光离子源研究的历史. 经过近十年的努力,激光离子源的研究已提出了多种实施方案,并已取得了令人鼓舞的进展.

#### 3.1 高温腔共振电离法

将共振电离腔室与靶室连接为一体(或通过一短管连接),使直接进入电离室的反应产物原子与通过电离室壁上的小孔进入的激光束相互作用,通过多步共振激发而被电离成离子,再由引出电极孔引出. 未被电离的原子将在电离室内作热运动,它们可能多次穿过激光束,从而增加相互作用机会. 由于激光入射孔和引出电极孔(可以是一个孔)都很小,热运动的原子泄漏出电离腔室的几率很小. 为了防止核反应产物原子凝结在电离腔室的壁上,将电离腔室加热到  $2000\text{K}$  以上. 这种方案是 V. S. Letokhov<sup>[5]</sup> 和 H. J. Kluge<sup>[6]</sup> 各自独立提出的. 最近, G. D. Alkhasov 等人<sup>[7]</sup> 根据这样的方案,研制成了激光离子源,并首次连接同位素分离器进行了在线实验. 激光离子源与靶室连成一体(图 1). 核反

应产物直接进入电离腔室,整个系统加热到 2200~2500K. 激光系统为铜蒸气激光器(重复频率  $f=10\text{kHz}$ )泵浦的染料激光器,输出功率达 0.2~0.5W. 在线实验研究了由 1GeV 的质子轰击钼靶产生的核反应产物 Ho, Ho 原子被三步共振激发到自电离态而电离. 引出离子的总效率达到 20~50%, 选择性为 3. Z. N. Qambieh<sup>[8]</sup> 也进行了类似的离线研究.

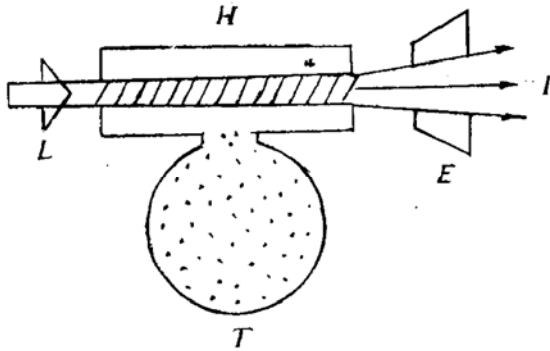


图 1 G. D. Alkhazov 等人实验的激光离子源. L 为激光束, I 为离子束, H 为加热腔, T 为靶, E 为引出电极

高温腔共振电离法的突出优点是效率很高,靶-离子源系统的总效率可以到达百分之几十. 这是因为核反应产物直接进入电离腔室,并且可以与激光光子多次相互作用. 但是,这种方案也存在重大缺点,仍然不适用于高熔点元素. 虽然电离腔室已加温到 2500K,像 Nb、Mo、Tc、Ru、Ta、W、Re、Os、Ir 等元素,其熔点都在 2500K 以上,它们仍然很容易凝结在室壁上. 再加高电离腔室温度,则受到绝缘材料性能等因素限制. Z 选择性不高也是这种方案的突出缺点. 这是因为核反应产物的原子在电离室内将与高温室壁多次碰撞,很容易因表面电离而形成离子. 在许多情况下由表面电离而形成离子的份额可以与激光共振电离形成离子的份额比拟. 前面提到的 G. D. Alkhazov 的在线激光离子源,其 Z 选择性仅为 3,就是存在严重的表面电离所致.

### 3.2 激光解吸式

这种方案由 W. M. Fairbank Jr 等人<sup>[9]</sup>提出,其基本工作过程如图 2 所示. 用氦气将核反应产物携带出靶室,直接沉积在一绝缘转轮的收

集膜上,转动转轮,使收集膜处于电离位置,再用足够强的脉冲激光照射收集膜,核反应产物被解吸出来,立即以多束可调谐激光照射,实现共振电离. 这种方案的重大优点是能够用于高熔点元素. 激光解吸时焦点温度可以达到 3300K 以上,难熔元素亦能被解吸出来;不存在表面电离过程,选择性亦很高. 李克平等<sup>[10]</sup>已

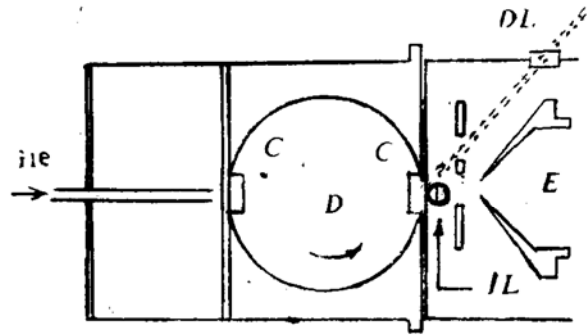


图 2 W. M. Fairbank Jr. 提出的激光离子源方案. He 为来自靶室, C 为收集膜, D 为转轮, DL 为解吸激光, IL 为电离激光, E 为引出电极

用这种方案实现了 Au、Pt 等元素的共振电离,在线测量了它们的同位素移. 所用的解吸激光是由二倍频的 YAG 激光器提供,重复频率为 10Hz,脉冲能量 0.3~0.5J. 共振电离激光由准分子激光器泵浦的两台染料激光器和 Ar<sup>+</sup> 激光器泵浦的染料激光器所组成的系统提供. 李克平等人的实验表明,激光解吸式激光离子源是可行的,能用于研究稀少核素. 但是这种离子源存在重大的缺点,总体效率很低. 虽然 W. M. Fairbank Jr 估计能够达到 1~10%,但是李克平等人的实验仅为  $5 \times 10^{-5}$ . 激光解吸效率低下,解吸后形成的原子云与共振电离激光束在空间上重叠不完善是造成整体效率不高的主要因素. 另外,这种激光离子源要求核反应产物的传递、解吸激光和电离激光在空间上和时间上完善配合,技术上不易实现.

### 3.3 激光氦喷嘴谱仪型

这种方案是为了克服上述两种方案的缺点,由清华大学和中科院近物所提出的<sup>[11]</sup>. 它的

工作原理如图 3 所示. 核反应产物停止在氦气中, 并被中性化为原子, 由氦气携带从超声喷嘴射出, 经分离器 (Skimmer) 分离后, 形成一束准直的中性原子束, 再与激光束相互作用, 通过多步共振激发而电离成离子. 如激光的单色性很好 (例如,  $\Delta\nu \sim 10\text{MHz}$ ), 则可以进行同位素选择; 如果降低对激光单色性的要求 (例如,  $\Delta\nu \sim 1\text{GHz}$ ), 能实现元素选择, 获得单一元素的离子. 这种激光离子源集中了前述两种激光离子源的主要优点: (1) 不存在表面电离, 电离仅由激光

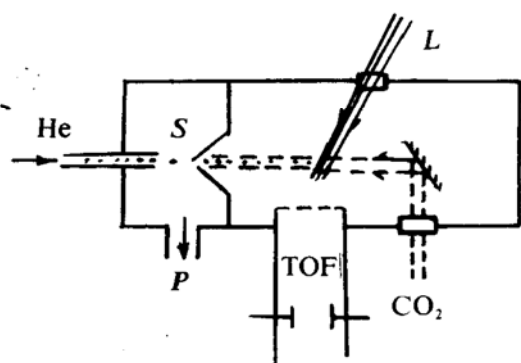


图 3 激光氦喷嘴谱仪型离子源. He 为来自靶室,  $I$  为电离激光束, TOF 为飞行时间谱仪,  $\text{CO}_2$ 、 $\text{CO}_2$  为激光用于被共振激发到里德堡态的原子电离, P 为接泵, S 为分离器

共振激发完成, 元素选择性强; (2) 核反应产物由氦气带出及直接与激光束作用, 不存在在电离室壁表面沉积问题, 适用于高熔点元素; (3) 整体效率高. 根据计算<sup>[4]</sup>, 如果选用准连续激光系统 (高重复频率的脉冲激光系统), 电离效率易于接近饱和; 激光束与垂直的原子束作用, 再将激光束多次反射, 提高了激光光子与原子作用机会; 氦喷嘴系统传输效率不算低, 不难达到 10% 以上. 估计这种离子源的传输效率可以达到 0.01~0.1. 这种离子源正在研制中, 尚未碰到难以克服的困难.

#### 4 激光离子源的激光系统

激光系统在激光离子源的研制中处于关键地位, 激光离子源对其激光系统提出了很高的要求: (1) 输出激光波长调节范围广. 包括稀土, 难熔和超铀等元素在内得大多数元素中, 其第一激发能级能量处于 1.8eV~4.0eV, 相应的激

发光子波长处在 6900~3100 Å. 为使多数元素均被共振电离, 激光系统的输出激光波长可调范围应在 3000~7000 Å, 或者更广; (2) 为了获得足够高的共振电离效率, 激光系统应有足够高的输出功率, 通常应达到 0.1~1W. 如选用脉冲激光器, 应有尽可能高的占空比; (3) 激光的线宽应足够窄, 通常应有  $\Delta\nu \sim 1\text{GHz}$ , 才能实现元素选择.

可调谐的激光系统由泵浦光源与可调谐染料激光器 (亦可用固体可调谐激光器) 构成. 泵浦光源采用脉冲的, 或者连续的激光器. 脉冲激光器输出脉冲能量高, 易于实现饱和激发. 由准分子激光器 (脉冲式的) 为泵浦光源构成的可调谐激光系统, 输出激光波长调节范围广 (可在 3000~8000 Å, 或更广), 用于激光离子源十分有利. 但是它的脉冲重复频率低, 通常在 10~100Hz, 激光离子源不能获得较高的效率; 由连续激光器 (如  $\text{A}^+$  激光器) 为泵浦光源构成的激光系统, 占空比无穷大, 但是输出功率不可能很高, 波长调节范围亦不能满足要求, 如果倍频, 则输出功率更低. 鉴于脉冲的和连续的激光系统均难于满足要求, 准连续的激光器 (高重复频率的脉冲激光器) 在激光离子源的研制中受到广泛重视. 这种激光器构成的系统, 易于达到 0.1~1W 的输出功率; 重复频率在 10kHz (如铜蒸气激光器), 占空比不低. 根据计算<sup>[4]</sup>, 这样的激光系统易于实现饱和电离, 电离效率高. 由于准连续激光器仍是脉冲式的, 倍频不存在困难, 能满足波长覆盖广的要求. W. Ruster 等人<sup>[12]</sup>已用 BBO 晶体将铜蒸气激光器泵浦的染料激光器输出的  $\lambda = 5600\text{Å}$  的激光 (1.7W), 倍频到  $\lambda = 2800\text{Å}$ , 倍频效率达到 17%, 即倍频后功率仍有 289mW. 顺便指出, 由铜蒸气激光器构成的可调谐激光系统已广泛用于铀同位素分离, 生产核燃料, 选用这样的系统研制激光离子源, 可以借鉴有关成熟技术.

#### 参 考 文 献

- 1 Hursf G S, et al. Rev. Mod. Phys., 1979, 51: 767

- 2 Letokhov V S, Mishin V I. Opt. Commun., 1979, 29 : 168
- 3 Kudriavter Y A, et al. Appl. Phys., 1982, B29 : 219
- 4 张 力, 尚仁成, 徐四大. 物理学报, 1992, 41 : 579
- 5 Letokhov V S. Acad. Sci., USSR for experiments with ISOLDE, CERN Facility ZINAL, 1984, D7, 1
- 6 Klage H J. TRI, 85-1.
- 7 Alkhazov G D, et al. Nucl. Instr. Meth., 1991, A306 : 400
- 8 Qambieh Z N, et al. Nucl. Instr. Meth., 1992, B70 : 131
- 9 Fairbank Jr W M, et al. Nucl. Instr. Meth., 1987, B26 : 357
- 10 Lee J K P, et al. Nucl. Instr. Meth., 1988, B34 : 252
- 11 徐四大, 尚仁成. 物理学进展, 1991, 11 : 53; Shang R C. Inter. Symp., Heavy Ion Physics and Its Application, 1990, 479
- 12 Ruster W, et al. Nucl. Instr. Meth., 1989, A281 : 547

## Laser Ion Sources

Xu sida

(Department of physics, Qinghua University, Beijing 100084)

**Abstract** The basic principles, important characteristics, developing plans and recent developments as well as applications in finding new nuclide on laser ion source were reviewed in this paper.

**Key Words** laser, resonant ionization, ion source, new nuclide.

(上接 49 页)

### 2 程序的收集范围与分类

核数据中心建程序库的目的是为我国核能事业发展与核数据工作本身服务,所以收集的程序也仅是与此有关的,内容有:(1)核数据理论计算程序;(2)实验编评数据及其误差分析处理程序,拟合画图程序;(3)群常数制作、宏观检验与核工程等有关程序;(4)计算机系统有关程序与实用程序模块;(5)有关库管理程序与服务程序。

为了便于用户按专业查找,我们将国内程序分成若干类,分别用不同字符串表示,填写在程序摘要中的第十七项(categor)栏中。为了国际交流方便,类别及代表字符串与 NEA Data Bank 的模型程序库的相同,在他们的基础上适当调整,分类如下:CC Coupled Channel; DI Direct Interaction; DWBA

Distorted Wave Born Approximation; EDP Experimental Data Process; FKK Feshbach-Kerman-Koonin; INCM Intra-nuclear nucleon cascade model; OM Optical Model; PEM Pre-Equilibrium Model; PLT Plot; RM R-matrix; RP Related program; SM Statistical Model; SRM Sum Rule Model; SYS Systematics;

### 3 程序库的现状与模式

程序库从零开始,经过几年的努力,目前已初具规模。

首先广泛调研,制定了一系列规章制度,比如:程序的收集范围,评审办法与评审员的责任,程序的分类与分级等,并在工作中逐步完善,基本做到了事事有章可依。

我们的程序库建立在 MICRO-VAX-I 计算机上,研制了一套用于程序的登记、管理、检索的计算机软件,建立了与之对

应的文件格式环境,初步实现了计算机化管理,今后将加强软件研制,不断提高计算机化的程度。

NEA Data Bank 经营多年,存有世界各国的一千多个程序,有一系列关于程序信息的出版物,并有一整套计算机管理服务软件系统及其相匹配的信息格式环境。为了交换和使用方便,我们将按照他们的模式建库,争取引进他们的管理系统。所以程序的摘要与索引都应用他们的格式,程序的分类也是在他们模型库程序分类的基础上,根据我们的具体情况适当调整。

根据程序来源,我们建立了两个子程序库,一个是 CNDCP 子库,其中的程序都是国内研制的,所以又按国内程序系列子库,程序的编号是 CNDCP 字母开头,该子库现有程序 30 多个。另一个是 CNDCB 子库,其中的程序都是来自国外,主要来自 NEA Data Bank,所以又称国外程序系列子库,该子库现有程序 100 多个,其中不少正在使用中。

### 4 入库程序的评审

程序库是为原子能事业与核数据本身服务的,是为了推广使用,并提供国际交流,所以必须注重质量,依非核数据中心及核数据协作网共同作出评判。我们的评审办法是先请一、二位专家作为评审员对物理思想、理论模型、计算方法进行审查,并上机运行测试,然后组织专家开评审会,并对入库程序评出等级。这样的会已先后于 1989 年、1992 年召开过两次,参加会的多数是物理学、数学和程序专家。评审的程序主要是关于理论计算与实验编评的,有关群常数制作与库管理方面的程序将陆续评审入库。

(中国核数据中心 刘瑞哲 张丽敏 孙乃红供稿)