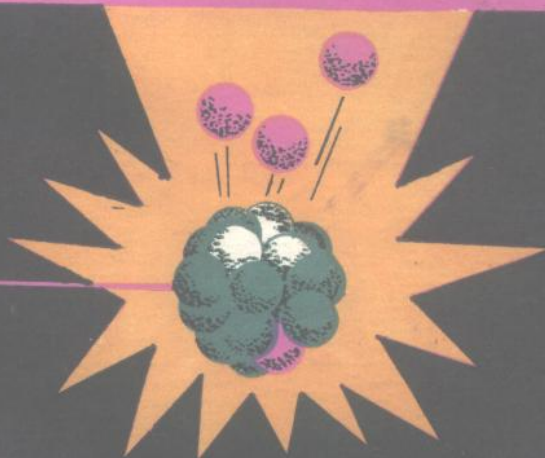
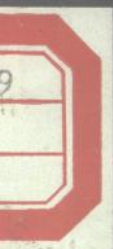


HE
JI
SHU
CONG
SHU



激光分离同位素



陈达明

原子能出版社

73.77.9
604
2

核 技 术 丛 书

激光分离同位素

陈达明 著



原 子 能 出 版 社

8610392

核技术丛书

激光分离同位素

陈达明 著

秦启宗 审校

责任编辑 石庆元

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

北京市9203信箱印刷厂

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092^{1/82}$ ·印张4·字数 88千字

1985年2月第一版·1985年2月第一次印刷

印数1—3700 · 统一书号: 15175·567

定价: 0.55元

0611/29
内 容 提 要

激光分离同位素是当代重要的科研课题，它与核能源的开发和利用有着密切的关系，因而受到国内外的极大重视。由于现有的同位素分离方法，效率低、工艺复杂、成本很高，因此寻求较经济的同位素分离新方法是人们多年的夙愿。本书以通俗的语言介绍了激光分离同位素的基本原理和有关知识，着重介绍了铀和氢同位素的激光分离过程及国内外进展情况，展望了激光分离同位素的美好前景以及说明了对发展基础学科和边缘学科的重要性。

本书可供一般科技人员和中等文化程度的广大青年、教师、干部阅读和参考。

序

1896年，天然放射性的发现拉开了揭示原子内部奥秘的序幕。继这以后，经过世界各国许许多多科学工作者数十年的辛勤探索和研究，取得了辉煌的成果：发现了不少新的放射性元素；实现了人工核反应；人工合成了放射性同位素；中子、质子和正电子的发现，丰富了人们对原子核的认识；从三十年代起，各种类型加速器的建成，为核物理研究提供了一种强有力的新工具，同时，用加速器生产了很多新的放射性同位素；1939年，发现了核裂变，接着，1942年，建成了世界上第一座核反应堆，它标志着人类进入了原子能时代。核反应堆提供了一种强大的中子源，为中子的研究和应用，以及放射性同位素的大量生产创造了条件。这样，放射性同位素、放射源、放射性标记化合物、放射性药物和同位素仪表等的研制和供应，逐步走上了商品化的道路，为核科学技术在各个领域中的应用打下了良好的基础。

核反应堆技术的进步和成熟，导致五十年代中核电站的出现，开创了核科学技术应用的另一崭新的领域。核能发电突出的特点是单位重量燃料的发电量十分高，一座100万千瓦的核电站每年仅消耗约一吨铀-235，而烧煤电站则需270万吨标准煤。目前核电的成本不比火电贵，对环境的污染也少；包括反应堆在内的核发电设备现已十分成熟，达到了商品化水平。今天，核能发电已占世界电站总装机容量的

十分之一，可以肯定，今后仍将不断增长。

加速器的发展，使它超出了原先专供核物理研究的范围，已开始向着应用领域迈进。加速器能生产纯度高、半衰期短、发射正电子的无载体放射性同位素，加速器产生的各种粒子束流比放射性同位素放射出的射线的强度高很多。它为核科学技术的应用提供了一种新工具，开辟了新领域。

核技术丛书包括十几个专题，基本上反映了核技术及其在各个领域中的应用概貌。编写本丛书的目的，在于使读者对核技术的特点及其应用能获得较清晰而又正确的了解，消除对放射性和射线的恐惧，普及核技术应用知识，推动核技术的应用，为我国四个现代化建设做出应有的贡献。

张永华 1983, 10, 3

前 言

在科学技术发展一日千里的今天，一种新技术的诞生，往往给一些应用领域带来不可估量的影响。本世纪六十年代初诞生的激光技术，宛如百花园中一枝奇特的鲜花，光彩夺目。她那独一无二的特性，不仅给古老的经典光学带来新的活力，而且在应用方面开创了许多新的领域，其中激光分离同位素就是引人瞩目的一个领域。

自从七十年代初，第一次用激光成功地分离了氢同位素以来，由于激光分离同位素具有分离系数高、成本低、设备比较简单等突出优点，因而引起了人们的极大重视。在短短的十年间，已经在实验室成功地分离了二十多种元素的同位素，有的已开始向中间试验工厂迈进。

应该指出，用激光技术分离的诸同位素中，人们的注意力是集中在氢的同位素氘和铀的同位素铀-235上。其原因主要有二点：一是氘和铀-235在核能开发利用方面占有十分重要的地位；二是目前生产氘和铀-235的成本极高。因此，人们试图把激光技术用于分离作为核燃料的同位素，为核能的开发和利用寻找一条经济廉价的新途径。

激光分离同位素属于激光应用技术的一个重要方面，涉及到激光与物质相互作用、激发态的产生及能量传递等过程，是现代物理、现代化学研究的重要课题。因而，从事激光分离同位素的研究，对一些边缘学科如激光化学的发展无疑是有意义的。

本书试图通俗地介绍这门新技术的产生过程、基本原理以及在分离氙和铀-235同位素方面的进展情况,使读者对激光分离同位素这项新技术有个概括的了解。应该说明,激光分离同位素技术还十分年轻,正方兴未艾,本书介绍难免挂一漏万。

在编写过程中,曾得到秦启宗等同志的热情指导和帮助,在此表示衷心的感谢。限于作者水平,缺点错误在所难免,请读者批评指正。

1980.10.10

目 录

前言

一、原子家族的孪生兄弟——同位素	1
同位素的发现	1
同位素的特点	4
同位素的妙用	6
昂贵的同位素	10
不够满意的分离方法	12
二、激光分离同位素应运而生	16
从光化学分离到激光分离	16
令人神往的优点	17
崭新的边缘应用科学技术	21
三、发光与激光	25
发光的奥秘	25
神奇的激光	33
五光十色的激光	41
四、光谱与激光分离	44
原子和分子的“指纹”——光谱	44
激光分离同位素的原理	50
激光分离同位素的方法	58
五、激光分离氢同位素	63
巨大的能源	63
分离方法的进展	66

光致预离解.....	69
红外多光子离解.....	71
分离工厂的概念设计.....	75
六、激光分离铀同位素.....	79
历史与现状.....	79
好处与风险.....	82
原子蒸气体系.....	84
气体分子体系.....	87
凝聚态体系.....	97
激光浓缩铀系统的设计.....	99
七、广阔的发展前景.....	102
经济的工业化道路.....	102
在核工业中的广泛应用.....	107
激光器与原子能.....	112
向微观世界的王国进军.....	114
结束语.....	115

一 原子家族的李生兄弟——同位素

同位素的发现

提起原子家族的李生兄弟是怎样发现的，这里有着不寻常的经历。

早在十九世纪末，人们根据原子学说，认为某一种元素是由某一种原子构成的。有个名叫普劳特的英国物理学家提出：所有的原子都是由氢原子构成的。但是，这一想法并没有引起人们的注意。随着时间的推移，科学家们掌握了准确测定原子量的方法，结果发现原子量并不是一个整数，如硼原子量为 10.81，氯原子量为 35.453，铀原子量为 238.029，等等。由此，科学家们对以前形而上学的观点提出了疑问：难道存在分数原子吗？这是不可思议的。

紧接着，在 1896 年，法国物理学家贝可勒尔在一个偶然的机会发现了铀化合物的放射现象，随后居里夫妇也发现了钍的放射性。这些重要的发现，轰动了整个科学界，科学家们开始寻找其它放射性元素。英国科学家克鲁克斯从铀中分离出一种物质，它数量极少，但放射性比铀强很多倍。他认为这种物质肯定不是铀，而是某种未知元素，当时就叫它“铀 X”。与此同时，贝可勒尔也发现，经过提纯的铀，不知什么缘故，放射性却增强了许多倍。就是说，铀会象“魔术师”那样变出许多放射性更强的物质。就在差不多同一时期里，著名物理学家卢瑟福和他的助手索迪从钍中分离出了一种放射性更强的物质——“钍 X”。此外，还发现镭也有同样的本领。

8610392

这些新的实验现象带来了新的矛盾，即发现的放射性“元素”的数目超过了门氏周期表中留下的空位。按照传统的观点，一个空格只能填入一种元素，而且认为它是由性质绝对相同的一类原子组成的。于是化学家和物理学家就开始共同寻找这些元素转变的原因。他们先是把发现的各种各样的新物质分别命名为镭 A、镭 B、新钍 I、新钍 II 及锕 C，等等。并发现这些具有放射性的新物质可分别属于三个放射性衰变系：即铀的衰变系、钍的衰变系和锕的衰变系。化学家还发现这三个系的最终产物的化学性质都与铅元素一样，但是经测定，它们的原子量却并不一样，铀系最终产物的原子量是 206；钍系最终产物的原子量是 208；锕系最终产物的原子量却是 207，就是说，同一种元素可以由不同原子量的原子组成。于是在 1910 年，索迪根据以上实验事实提出同位素的假说：“存在化学元素的变种，它们具有不同的原子量和放射性，但它们的物理化学性质是完全一样的。”这种变种应处于周期表中的同一位置上，故命名为“同位素”。由于这一重要发现，索迪获得 1921 年的诺贝尔化学奖。

此后，科学家们在天然放射性元素中又发现了许多同位素。那么，普通元素（即非放射性元素）有没有同位素呢？1919 年，英国科学家阿斯顿根据带电原子（即离子）在磁力和电力作用下会产生偏转，而且偏转角度大小与粒子速度和质量有关的原理，发明了一种分离同位素的灵敏的实验装置，叫质谱仪。他用这一仪器首次成功地分离了稀有气体氖的同位素，证明普通元素也有同位素。以后他进一步改善实验方法，在七十一一种元素中发现了二百〇二种同位素，为发现同位素作出了重要的贡献。由此，阿斯顿荣获 1921 年的诺贝尔化学奖。

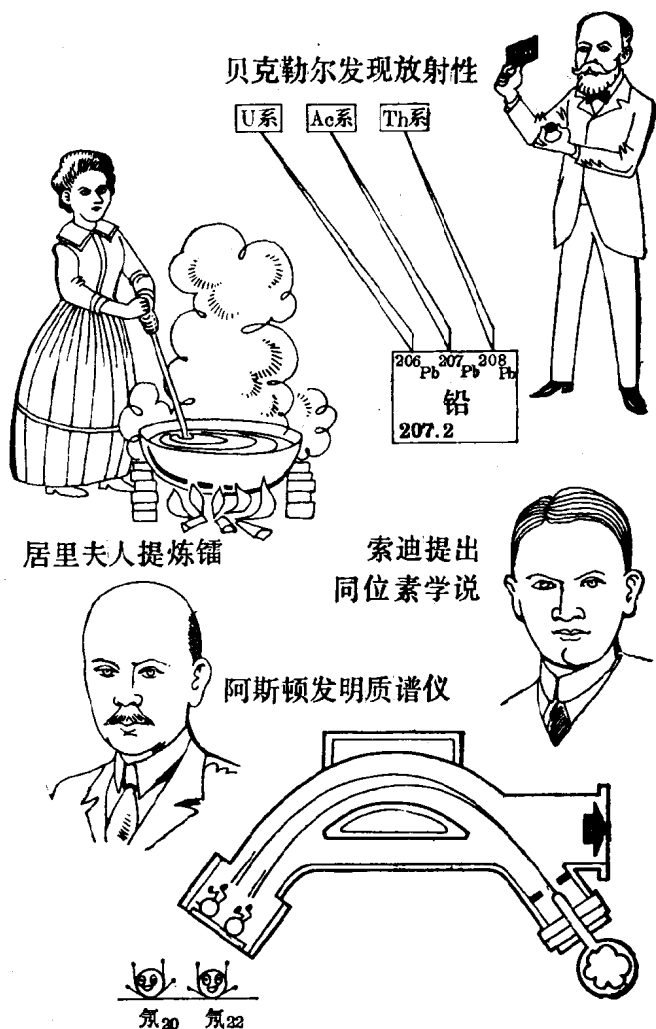


图1 同位素的发现

同位素的发现，终于解开了“原子量为什么不是整数”之谜，如氯元素的原子量为 35.453，是因为它由氯-35 和氯-37 两种同位素组成，且两者之比例为 4:1，所以氯元素的平均原子量为 35.5（更准确的计算值为 35.453）。

同位素又分天然同位素和人造同位素，其中又有稳定同位素和放射性同位素之分。是不是自然界中存在的所有元素都有同位素呢？不是的。有的元素有三种、四种，甚至有十种同位素，如锡就有十种同位素；但也有不少元素只有一种同位素，如铍只有铍-9 同位素，铝的同位素只是铝-27，等等。应该指出，“只有一种同位素”的说法是不妥当的，好象叫“只有一个孪生兄弟”一样，是不严格的。目前国际上已采用新的叫法，即将具有特定结构的原子核统称为“核素”。“核素”这个词，泛指原子序数、原子量和能态不同的各种原子，而“同位素”却只是指同一元素的不同原子。所以，“核素”可以把所有同位素包括进去，避免上述说法的弊病，使元素的含义更加明确。

同位素的特点

人们所熟知的元素周期表，好象一座居住着许多不同原子的大厦，里面的每个房间住着胖瘦不同的某种原子的孪生兄弟。我们都知道，原子是由原子核和绕它旋转的电子组成的，而原子核又由质量约为电子的 1837 倍的二种粒子，即带正电的质子和电中性的中子所组成。同位素是核外电子数相同而质量数不同的原子，而原子的质量又集中在原子核上，所以也可以说，同位素的原子核内质子数相同而中子数可以不同。以最简单的氢原子为例，它有三种同位素，其质量数分别为 1，2，3。它们的原子结构如图 2 所示。人们

给这三个孪生兄弟起了个名字，分别叫氢（或叫氕）、氘（重氢）、氚（超重氢）。

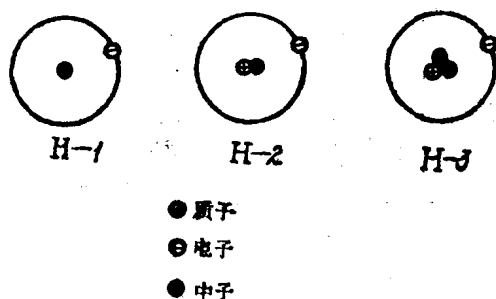


图 2 氢的三种同位素的原子结构示意图

正是由于同位素的原子结构具有相同点和不同点，因而决定了同位素的特性。

（1）同种元素的同位素的物理化学性质是很相似的。在通常的情况下，元素的各种同位素都是混合在一起参加物理和化学变化的。譬如，水在一个大气压、 100°C 温度下沸腾是人们熟知的现象，人们是不考虑水中所含数量极少的重水的影响的。又如，化学反应主要是由核外电子引起的，而一种元素的同位素的核电荷数是相同的，所以化学性质也是相同的，原子核质量数的差别所产生的影响是微不足道的。所以一种元素的同位素之间的物理化学性质，如熔点、沸点、溶解度及化学反应性等基本上是相同的。当然，严格地说，纯一核素的物理化学性质仍是有差别的。如重水的沸点，实际上是 101.42°C ，密度、蒸汽压也有一定的差别。光谱性质也是有差别的，在高分辨率的光谱仪中，我们可以把同位素光谱中的微小差别分辨开来，这就是激光分离同位

素的主要依据。

(2) 同种元素的同位素的核性质是大不相同的。随着科学技术的发展, 科学家们的研究已深入到原子核内部。由于同位素核的主要差别表现在原子核上, 所以核性质的差别就明显地反映出来了。这种差别首先表现在放射性等核的性质上, 如铀有铀-238, -235, -234 三种天然同位素。其中铀-235 在热中子和慢中子(能量在 1—1000 电子伏)作用下, 会发生裂变反应, 达到临界体积时, 通过自持链式反应释放出大量能量; 而铀-238 在慢中子作用下不会发生分裂, 只有在快中子(能量在 0.1—20 兆电子伏)作用下才会发生裂变反应; 铀-234 无论在什么情况下也不会发生裂变反应。又如硼的二种同位素(硼-10, 硼-11)中, 硼-10 能有效地吸收热中子, 而硼-11 则不具有这种特性, 故硼-10 可用来作反应堆控制棒的材料。

同位素的妙用

人们认识事物本质的最终目的, 就是要使它为人类造福。同位素的这些重要特性, 已经在工、农、医及科学研究中得到了广泛的应用。特别是某些用作核燃料的同位素, 在人类开发新能源方面扮演重要的角色。根据同位素的特性和用途, 简要地叙述一下它们的妙用。

(1) 稳定同位素的用途。没有放射性, 或者半衰期很长(10⁹ 年以上), 亦即放射性非常微弱的同位素, 都可归为稳定同位素, 如碳-13、氮-15、硫-33、氧-18、钙-44 等等。浓缩的稳定同位素可作为标记化合物, 广泛用于科学研究中, 如研究各种有机化学反应、光化学反应、电化学反应, 催化反应等过程的机理及其动力学效应, 为化学工业

提供可靠的科学依据。又如用于研究光合作用及动植物体内的生理过程，为科学家解开“生命之谜”提供有用的信息。纯稳定同位素，由于核素单一，常用于核物理研究，探索原子核的奥秘；也可做精度极高的原子钟，也可用于激光器的工作物质，使激光束频率比较单一、比较稳定（见图3）。稳定同位素不放出射线，因而不能用探测射线的仪器发现它。虽然它比较安全，但是要用比较昂贵的质谱仪、核磁共振仪等装置去探测它，因此使稳定同位素的应用受到一定的限制。

（2）用作核燃料的同位素。目前我们用于裂变反应和聚变反应的同位素，它们可以释放大量的核能，如铀-235、钚-239、氘、锂-6等等。其中铀-235和钚-239是用于原子弹和反应堆的重要核燃料。但是，这些同位素需要浓缩到一定浓度后，方可作为核燃料，如含铀-235 90%以上，才可用作原子弹炸药，含铀-235 3%以上，才可作为反应堆的核燃料。目前，铀-235裂变反应释放的核能，已广泛用于发电，这种用核能作为动力的电厂，称为核电站。除发电外，也可用作潜艇、轮船和飞机等运输工具的动力。此外反应堆在裂变过程中，还产生大量有用的放射性核素（见图4）。

（3）放射性核素的应用。顾名思义，能放射出射线（ α 、 β 、 γ ）的核素，称为放射性核素，如碘-131、锶-90、铯-137等等。这些核素的特点是，它们放出的射线可以用比较简便的射线探测仪测出。由此，我们可以象生物学家研究鸟类、鱼类的生活习性时做上标记那样，用放射性核素原子标记在某种物质上，以便利用放射性原子的“踪迹”来探索极其复杂和微妙的物理、化学过程。这种方法我们称