

同位素 ИЗОТОПЫ

(俄)V. U. 巴朗诺夫 主编
王立军等 译

清华大学出版社

同位素

性质、制取与应用

俄罗斯科学院通信院士

V. U. 巴朗诺夫 主编

王立军等 译

清华大学出版社

北 京

内 容 简 介

本书是一本有关稳定性同位素和放射性同位素获取和应用的专著,是按照百科全书型手册来编写的,书中内容所涉及的科学技术领域广泛而且有一定的深度。在同位素获取方面包括了稳定同位素的分离和放射性同位素的制备。其中同位素分离技术不仅详细介绍了电磁法、气体扩散法和气体离心法等主流的分方法,而且还对发展中的激光法、离子回旋共振法等方法进行了介绍。书中还包括了适用于特定元素同位素分离的方法,如适用于碳同位素分离的激光分离法和低温精馏法,氢同位素的电化学法以及汞同位素的光化学法等。在同位素应用方面涉及的内容包括:基本粒子研究、凝聚态物质中的同位素效应、核反应堆工程、考古地质年代测定、同位素示踪和同位素药物、正电子成像以及在生物医学和农业科学中的应用。

本书各章的写作都是由当今活跃在俄罗斯各相关领域的学术专家完成的,因此书中内容在全面叙述与同位素有关的科学技术的同时,还反映了当代科学技术领域中同位素科学研究的发展趋势以及各研究方向的最新成就。

本书对于从事与同位素有关的工作或者想了解科技方面交叉学科的学者和工程技术人员是有益的。对于可能涉及同位素应用的科技领域中的专业人员来说,了解同位素获取和应用的方法是非常必要的。对于核物理、物理、同位素化学以及生物医学同位素技术应用专业的大学生和研究生,本书可以作为手册或教材来使用。

EISBN:5-86656-100-X

Original language published by IzdAT all rights reserved.

本书中文简体字翻译版由作者授权译者翻译,由清华大学出版社出版发行。未经出版者预先书面许可,不得以任何方式复制或发行本书的任何部分。

北京市版权局著作权合同登记号 图字:01-2004-0496

图书在版编目(CIP)数据

同位素——性质、制取与应用/(俄罗斯)巴朗诺夫主编;王立军等译. 北京:清华大学出版社,2004

书名原文:ИЗОТОПЫ

ISBN 7-302-07213-2

I. 同… II. ①巴… ②王… III. ①稳定同位素—基本知识 ②放射性同位素—基本知识
IV. ①O562.6 ②O615

中国版本图书馆CIP数据核字(2003)第080088号

出 版 者:清华大学出版社

<http://www.tup.com.cn>

社 总 机:010-62770175

地 址:北京清华大学学研大厦

邮 编:100084

客户服务:010-62776969

责任编辑:朱红莲

版式设计:刘伟森

印 装 者:北京中科印刷有限公司

发 行 者:新华书店总店北京发行所

开 本:165×230 印张:42.25 插页:1 字数:776千字

版 次:2004年3月第1版 2004年3月第1次印刷

书 号:ISBN 7-302-07213-2/O·346

印 数:1~1000

定 价:98.00元

本书如存在文字不清、漏印以及缺页、倒页、脱页等印装质量问题,请与清华大学出版社出版部联系调换。联系电话:(010)62770175-3103 或(010)62795704

译者序

《同位素——性质、制取与应用》一书是在俄罗斯科学院通讯院士巴朗诺夫先生主持下,由多年从事与同位素科学研究有关的专家写成的。该书2000年以俄文出版发行,翌年清华大学应纯同教授到俄罗斯做学术访问时获赠此书。应教授为该书所具有的学术价值所动,回国后马上开始组织各专业的翻译人员,并与各有关方面联系筹办该书的出版工作。经过努力,俄方出版单位慷慨地放弃了版权要求,允许我们以中文出版该书。在该书的出版过程中得到了清华大学出版社的大力支持与合作。该书能够和读者见面还应该特别感谢中国核学会同位素分离分会陈念念主任委员在出版资金上的支持。

稳定同位素的获取,或稳定同位素分离方面的内容(第3~7章)是该书的重点。在篇幅上,有关这部分的内容超过了全书的二分之一。这部分的写作特点是从最基本的原理出发循序渐进地介绍各种分离方法。如在介绍气体离心机同位素分离方法时,作者是从分子在重力场中的波尔兹曼分布函数开始,逐渐过渡到具体的离心机结构的。这种写作方式很容易让读者完整地了解一种分离方法从孕育、发展到成熟的全过程。从这一点上说,该书特别适合那些初涉同位素分离研究领域的读者阅读。这部分的另一个特点是:在阐述理论框架内各种物理过程和物理模型的同时,并没有回避理论在实践中所遇到的问题。对于许多这样的问题,作者都进行了点评和分析,有的还给出了从大量实验中获得的一些经验的东西,如一些经验或半经验公式。这部分内容对从事同位素分离的工作人员是很有参考价值的。

该书对同位素分离方法的介绍是非常全面的。除了对传统的气体扩散法、电磁法(包括等离子体离心机法、离子回旋共振法和其它一些气体放电中的分离现象)、气体离心机法和激光分离法进行了介绍外,还介绍了许多其它的分离方法,如适用于特定元素的同位素分离方法(汞和碳同位素的光学分离方法),其它还有精馏、化学和电化学法等。

该书的另一个重要部分是同位素的应用。这部分从第 11 章到 19 章,有些章节讲述的是同位素在各个领域内的应用,如稳定同位素在农业和生物学中的应用、同位素在医学中的应用、同位素在物理学基础问题研究中的应用以及凝聚态物质的同位素效应;而有些章节讲述的是一些具体的应用项目,如同位素在地质年代测定中的应用、同位素在反应堆建设中应用、核聚变反应的 μ 介子催化、放射性同位素与等离子体微尘电池、同位素在热核能源中应用等。因此该书也适合各个领域内从事科学研究的人员阅读。

由于该书涉及内容多,又是由数十名专家学者集体写作完成的,因此各种疏漏和错误是在所难免的。对于原书一些显然的笔误或编辑排版上的失误,在翻译时我们给予了纠正。而对有些错误,比如:原书的 231 页和 232 页之间上下文不连贯,显然内容有缺失,我们无法补充,只能遗憾地给予保留。然而瑕不掩瑜,作为当今有关同位素的内容最广泛、最新的一本专著,它仍将给阅读它的人带来裨益。

书中出现了大量的人名,对于像“狄拉克”这样的著名科学家,采用常用的汉译名字。对于一般的科研人员的名字,西方人尽量用英文,俄罗斯人则保留了俄文形式。这样有利于读者进行文献检索。译者要在这里提醒读者注意的是,由于有些英文人名是从俄文翻译来的,可能会有不准确的情况出现。在某些章节中还出现了化学化合物的俄文缩写,由于无法查到完全的拼写,在译文中仍予保留。还有一些不常用的物理量的单位也保留了俄文形式。

该书的翻译工作是在清华大学应纯同教授的积极倡议和支持下进行的。第 1,2,3,5 章和第 4 章的 4.1, 4.3, 4.4 节由蒋同远教授译;第 4 章的 4.2 节和第 6,7,14 章由王立军副教授译;第 8,9,18,19 章由崔秉懿教授译;第 13,15,16,17 章由张庆武译;第 10,11,12 章由贾兴国译。各章节(除第 13 章由赵兆颐教授校核外)由应纯同教授和王立军副教授进行校核,并由王立军副教授作了最后的统稿工作。由于我们水平有限,翻译中的错误在所难免,请广大读者批评指正。

目 录

绪论	1
----------	---

第一部分 同位素的性质及其探测方法

第 1 章 同位素的性质和同位素效应	9
--------------------------	---

1.1 同位素的基本性质和分类	9
1.2 同位素效应分类	10
1.3 同位素的核性质	11
1.4 作为粒子辐射源和 γ 射线源的同位素	16
1.5 同位素光谱	19
1.6 作为“示踪”原子的同位素	21
1.7 同位素性质及其应用领域	24
第 1 章引用文献	26

第 2 章 同位素分析的基本方法	28
------------------------	----

2.1 引言	28
2.2 质谱分析法	30
2.3 光谱分析方法	35
2.4 辐射测量	41
2.5 活化分析	46
2.6 放射化学分析	50
2.7 其它分析方法	56
第 2 章引用文献	59

第二部分 稳定同位素和长寿命同位素的制取

第 3 章 同位素分离的热力学方法	63
3.1 引言	63
3.2 分离单元	64
3.3 分离级联	68
3.4 双组分混合物的分离势	83
3.5 多组分混合物的分离势	86
3.6 熵和分离功	88
3.7 结论	91
第 3 章引用文献	91
第 4 章 分子动力学方法	94
4.1 气体扩散	94
4.2 气体离心机	104
4.3 获得重水和氢同位素的电化学方法	128
4.4 获得稳定同位素及放射性同位素的化学方法	139
第 4 章引用文献	144
第 5 章 物理-化学方法	149
5.1 引言	149
5.2 分离柱中的同位素分离理论基础	150
5.3 分离过程的原理图及其优化	152
5.4 由第三型分离单元构成的级联计算	156
5.5 平衡时间的计算	158
5.6 在“气-液”系统中的化学同位素交换	161
5.7 用于化学同位素交换法分离同位素的若干 “气-液”工作系统	166
5.8 在具有固相系统中的同位素交换	175
5.9 精馏法分离同位素	185
第 5 章引用文献	190
第 6 章 电磁法和等离子体法同位素分离	194
6.1 电磁法基本原理	194

6.2	离子回旋加速器中等离子体选择性加热同位素分离	211
6.3	等离子体离心机	228
6.4	正气体放电柱中的同位素分离	239
	第6章引用文献	257
第7章	同位素分离的光学方法	264
7.1	激光同位素分离的原理	264
7.2	同位素选择性原子光电离法在同位素分离中的应用	279
7.3	分子的红外多光子同位素选择性离解	298
7.4	碳同位素的激光分离	311
7.5	激光分子法铀同位素分离	326
7.6	汞同位素的光化学法提取	340
	第7章引用文献	347
 第三部分 放射性同位素的获得 		
第8章	放射性核素的反应堆积累法	359
8.1	基于中子吸收的方法	359
8.2	超铀元素同位素的积累	365
8.3	核裂变时放射性核素的获取	369
8.4	结论	370
	第8章引用文献	371
第9章	利用带电粒子加速器获取放射性核素	372
9.1	带电粒子加速器制取放射性核素的过程	376
9.2	制取放射性核素的带电粒子加速器	377
9.3	靶装置	386
9.4	在带电粒子加速器上制取的放射性核素和它们的 某些应用领域	387
9.5	在带电粒子加速器上制取放射性核素的核反应	401
9.6	碘-123 的制法	403
	第9章引用文献	406

第 10 章 钢系元素的燃烧	408
10.1 引言	408
10.2 危险长寿命放射性核素嬗变可能性的分析	410
10.3 固体燃料元件反应堆和液体燃料反应堆中钢系元素 嬗变效率的比较	417
10.4 临界反应堆和次临界反应堆的比较	419
第四部分 同位素的应用	
第 11 章 同位素地质年代学	423
11.1 放射性衰变速度, 同位素半衰期	423
11.2 测量岩石的绝对年龄	426
第 11 章引用文献	444
第 12 章 同位素和基础物理问题	448
12.1 弱过程物理中的同位素	448
12.2 同位素和 2β 过程研究	452
12.3 稳定同位素在重离子加速器中的应用	459
12.4 同位素和暗物质的寻找	462
第 12 章引用文献	466
第 13 章 反应堆工程中的同位素	469
13.1 稳定同位素在原子能工业中的应用	469
13.2 反应堆液体吸收剂	488
13.3 降低核反应堆回路中放射性同位素积累的技术	499
13.4 结论	507
第 13 章引用文献	508
第 14 章 凝聚态介质中的同位素效应	514
14.1 固体中的同位素效应	514
14.2 穆斯堡尔谱学	544
第 14 章引用文献	555
第 15 章 热核能源中的同位素	563
15.1 引言	563

15.2	热核燃料的种类	563
15.3	低能区核反应截面的外推	575
15.4	热核等离子体温度诊断的 γ 射线法	576
15.5	结论	578
第 15 章引用文献		579
第 16 章	核聚变反应的 μ 介子催化	582
16.1	引言	582
16.2	μ 介子催化	585
16.3	以 μ 介子催化为基础的原子增殖反应堆	587
16.4	以 μ 介子催化为基础的强中子源	588
16.5	结论	590
第 16 章引用文献		591
第 17 章	在等离子体-微尘结构光伏电池中作为能量来源的同位素	592
17.1	放射性同位素光伏电源	593
17.2	光伏电源中放射性同位素的选择	594
17.3	放射性衰变能量向真空紫外辐射的转换	597
17.4	微尘等离子体	600
17.5	结论	604
第 17 章引用文献		605
第 18 章	医学中的同位素	607
18.1	放射性药物的制取方法和医用放射性核素源	607
18.2	正电子发射断层成像	629
18.3	同位素呼吸试验	636
第 18 章引用文献		645
第 19 章	稳定同位素在农业和生物学中的应用	649
19.1	基本概念和术语	649

19.2 用于氮同位素分析试样准备的设备·····	651
19.3 氮同位素组成光谱分析的理论与实践·····	657
19.4 在农业中实际利用氮的效果·····	660
19.5 重氧在生物学研究中的应用·····	662
19.6 利用 ^{13}C 的核磁共振法在土壤有机物结构研究中的应用 ·····	664
19.7 结论·····	666
第 19 章引用文献 ·····	666

绪 论

В. Ю. Баранов V. U. 巴朗诺夫

同位素的研究、生产和应用问题是极其多种多样的,涉及科学技术的各个领域。同位素应用的范围非常广泛,上至物质结构的普遍原则和宇宙演变的一般规律的研究,下到涉及地球上生命器官的生物化学过程和专门技术应用的具体问题。在这个意义上,同位素本身和自然界中各种同位素效应的综合就成了表现科学中简单事物和复杂事物之间相互关系的鲜明的例子^[1]。

首先要指出的是在基础自然科学研究中同位素的作用,如核相互作用性质的研究和宇宙中核子重组过程的研究,这或许可以解释在自然界中观察到的化学元素的相对分布量。

众所周知,在元素的丰度与原子序数的关系中最让人好奇的问题之一是在由轻元素向重元素过渡时——在锂、铍、硼过渡到碳的区域有很陡的丰度塌陷。这种丰度塌陷是因为轻元素的合成是通过星体内部核子与原子核之间的二体碰撞以及随后的 β 衰变实现的: $d + n \rightarrow T \rightarrow {}^3\text{He} + n \rightarrow {}^4\text{He}$ 。这种二体碰撞合成机制在对称氦核 ${}^4\text{He}$ 处中断了,由于不存在 ${}^5\text{He}$ 核,因而不可能靠它的帮助过渡到重的核素。因此依据二体碰撞的图像在宇宙中应该没有重元素,而没有碳、铁等的宇宙就不会含有有机化合物,当然也就没有生命。这个佯谬可以借助于已知的三粒子合成图像来克服,碳核可以由三个 α 粒子组成(Солиптер反应): $3\alpha \rightarrow {}^{12}\text{C}$,该反应使重元素的合成成为了可能。

实际上几乎所有的元素都有若干个同位素,它们中的大多数是不稳定的(放射性的),少部分是稳定的。当质子和中子的数目偏离最佳值时,核的稳定性就降低,尤其在中等质量的核上更多地观察到这种现象。与最佳值的偏离减小了核子的结合能,导致同位素的不稳定性,出现各种形式的核衰变。

现代理论预言,对于质量数大于110的超重核存在“稳定性岛”^[2],

因此大家做实验来寻找这些核。随后的报告说在合成元素 112, 114^[3] 和 116, 118^[4] 的区域发现了这些核。在这个方向上的突破可能对核物理和核技术的发展产生重要的影响。

元素在宇宙中的丰度分布不仅带有物理性质,同时也是带哲学性质的重要问题。宇宙中各种物体的建造程式,与制造尺寸上差异不大的各种零件时所采用的工程方法类似,而同位素就是这种建造工程中必不可少的原料。例如,稳定同位素就像是我们的宇宙(也可以想象存在着其它一些具有完全不同同位素组成的宇宙)在演化过程中产生的碎片。例如,在某些碳星体中,碳同位素的相对分布量, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=3.4$,与地球上的碳同位素相对分布量, $^{12}\text{C}/^{13}\text{C}=89$ 差别很大。这些偏差是由于星体演化的不同途径造成的,在演化中进行着某些元素“烧尽”和另一些元素积累的过程。宇宙的理论模型具有一定的戏剧性,因为即使自然常数(强相互作用,普朗克常数及其它)的少许变化都能根本地改变化学元素的稳定性和它们的分布量。

在 20 世纪初,从发现同位素现象起,同位素的性质以及与这些性质有关的各种各样可能的应用吸引了很多研究工作者的注意。还在 1913 年匈牙利的放射化学家德·海文思和德国化学家夫·巴列特就建议用与天然同位素组分不同的物质在研究不同过程时作“标记”。从那时开始,同位素及其化合物的应用领域被不断地扩大和深化,但直到现在,分析工作仍然是同位素使用的主要领域之一。正如许多实验所表明的那样,借助于放射性同位素可以探测出真正的单个原子。而传统的化学探测方法的灵敏度要低几百万倍。稳定同位素同样具有很高的灵敏度的被探测能力,尽管它没有放射性的高。

同位素在分析方面的应用还远没有将同位素的有益性质都反映出来。总体上可以援引文献[5]的话说:同位素“是工具,与其它那些能与之竞争的方法相比,使用同位素可以更好,更容易,更快,更简单和更便宜地完成一些工作,并且对某些测量来讲不使用同位素是不能完成的,因为对这些测量来讲没有其它的方法”。更进一步来讲,利用人工方法所获得的在自然界中不存在的物质以及单一同位素组分的材料在许多情况下是不可替代的,并且有着各式各样的应用。现在,放射性同位素和稳定同位素以及以它们为基础制备的化合物被广泛用在现代科学与技术的各个部门:在生物学和医学,实验物理和原子能,在农业和环境保护研究,在工业技术过程的控制设备上,在寻找有用矿藏以及很多其它方面。

同位素对称性(或者反对称性)被广泛用来检验物质的基本性质,例如,检验同位素置换分子气体中玻色对称性有无变化^[6]。同位素浓缩的元素的一个可能的技术应用是建造低放射性的热核反应堆,由于对其构件的同位素组分做了专

门的选择,所以经过工作循环以后这些构件只具有弱的放射性^[7]。

在军备竞赛时期,同位素技术的发展主要与铀-235 的工业生产有关。在 1932 年 Г. Герц(赫兹) 在世界上首先用气体通过由多孔膜级联的方法,分离了轻的惰性气体混合物。在苏联,1949 年在 И. К. Кикоин 院士的领导下开始用气体扩散法工业规模生产铀-235。同年在院士 Л. А. Арцимович 的领导下开始了研制电磁分离器的工作。德国物理学教授 М. Штеенбек 积极地参与了离心技术工作。1961—1962 年在院士 И. К. Кикоин 的领导下开始用气体离心机工业生产铀-235。到目前为止,这个方法仍是现行的重同位素分离方法中最为经济的方法。

“冷战”结束以后,同位素产品的国际市场与同位素在和平技术领域的广泛应用相关。同位素产品的花色品种不断扩大,崭新应用领域不断出现并且在蓬勃地发展着,对同位素品种和纯度的要求也不断提高,它们的供应量在增加。并且在某些情况下,在以研究为目的的工作中(如化学分析等)会对门捷列夫周期表上所有同位素产生需求,但是对于绝大多数同位素来说总的需求量很少,每年以克或者微克计。另一方面,对一些被广泛应用的同位素,例如在核能、医学和其它领域,需求量要高出几个数量级,以公斤甚至以吨计。

同位素技术在医学中的应用前景广阔^[8]。其应用的规模可以从下列统计数据中看出:在美国每天有超过 36000 次的医学治疗和每年有上亿次的实验室试验要用到同位素。用得最广泛的是与计算机成像和采用内科制剂有关的治疗。在核医学中,获得图像的基本方法是借助于稳定同位素在¹H 核上的磁共振谱。但是,还有一些具有自旋和宇称为 $1/2^+$ (³He, ¹³C, ¹⁹F, ²⁹Si, ³¹P 等)的稳定同位素,借助于核磁共振谱可以用来做临床研究。近来,人们正在研究如何使用 ³He 和 ¹²⁹Xe 来获得肺病诊断中所需磁共振图像,该方法可以取代目前采用放射性核素 ¹³³Xe 的方法。

同位素市场的现况可以举两个在医学上用得最广的同位素来说明:稳定同位素碳-13 和放射性同位素钼-99。

同位素 ¹³C 最有前途的新应用之一是被称为“呼吸诊断测试”的应用(diagnostic breath test, DBT)。DBT 试验实质上非常简单(详情见第 18 章):天然(含量约为 1%)的 ¹³C 同位素被浓缩到高浓度(达到 99%)并被加入到食物中。经过各种器官内所发生的一系列新陈代谢过程以后,浓缩同位素被病人以 CO₂ 形式呼出来,这些 CO₂ 被收集起来并用质谱仪分析。¹³C 可标记出在各种器官里经受新陈代谢的物质。由 ¹³C 所标记的碳酸气的析出速度和析出量与器官中新陈代谢过程的活跃程度有关。通过研究这些参数可以让人们对器官的健康状态做出评判。DBT 测试的潜在市场十分广阔:在美国这个市场估计可达八

亿美元并且每年有五百多万病人作此测试。该方法之所以有前途是因为它既不需要触动器官又不会对器官产生辐射。

放射性同位素 ^{99}Mo 被用来生产放射性同位素 $^{99\text{m}}\text{Tc}$,大多数使用放射性医药制剂进行的医学诊断都是以该同位素为基础的。目前市场上每年使用 ^{99}Mo 估计大约为一百万居里,价格为每居里 200 美元。世界市场上对这个同位素的需求估计每年大约以 10% 增长。

可见,医学上对碳和钼的同位素需求增长很快。除此以外,碳-13 还可用于有机化学、地质物理的研究和分析地球大气污染的机制。由于对反应堆技术和放射化学技术的环保要求越来越高,有必要增加这些同位素的生产。因此发展同位素的分离技术,比如激光分离技术,既是科学上也是商业上的紧迫任务。

对同位素及其应用的巨大兴趣还表现在存在大量的与同位素技术有关的期刊上。以同位素技术为题的国内的、地区性的和国际性的会议定期地召开,有关专著不断出版。但是,它们通常只涉及同位素的获得和应用的个别、局部的领域,或者仅涉及某一组同位素的应用问题,例如稳定的,而不包括问题的全部。

本书试图填补这个空白并尽可能广泛地阐述同位素的获得及其在科学和经济生产领域应用的最新方向(包括潜在的可能应用),以及使用它们的原理和方法。可以预见随着同位素纯材料应用的发展必将产生一系列新的技术。希望本书的出版对科学和技术研究中边缘领域的发展有所促进,而这些边缘领域常常是技术进步的源泉。

25 年来,俄罗斯科学中心“库尔恰托夫研究所”就原子分子提取、同位素获取和应用召开了多次全俄和国际会议,本书综合了这些科学会议的成果。

为了编写本书,汇集了一个强大的专家集体,他们在相应的领域有着多年的科学研究和实践工作的经验。希望他们的专业素质和权威性对某些文体上的折中有所补偿,这种折中是对许多作者不同种类的文章进行综合时不可避免的。

当然,本书不可能包括与同位素有关的所有问题。首先,由于某种主观原因放弃了对有些与同位素有关问题的阐述;其二,由于同位素应用领域在不断发展,要想涵盖同位素问题的所有方面从客观上来讲也是不可能的。

读者面前的这本书由四部分组成。在第一部分里简明地归纳了同位素性质和同位素效应(第 1 章),同时概要地阐述了同位素探测的基本方法(第 2 章)。在第二部分描述了获得稳定的或者长寿命弱放射性的同位素的不同方法,而且除了介绍传统的方法外还重点描述了比较有前景的和快速发展的方法——激光法、等离子体方法等。第三部分是获得放射性同位素的基本方法(反应堆和加速器),其中包括在现代医学中目前最广泛采用的,最大量需求的一些同位素产品。在第四部分阐述了某些同位素应用问题。

与原子能电站的燃料获得和使用有关的问题是一个单独的题目,像放射性废料的处置和环境保护问题。对这些问题需要专门的讨论,它们不包括在本书中。然而,本书包含了与同位素有关的广泛问题,可以把本书看作为手册和百科全书性质的参考资料。这种参考资料将有助于在与同位素应用和同位素研究有关的科学和技术交叉领域工作的专家们相互合作。

