

同位素地质学原理

[美] G. 福尔 著

科学出版社

同位素地质学原理

〔美〕 G. 福尔 著

潘曙兰 乔广生 译

李继亮 校

科学出版社

1 9 8 3

内 容 简 介

本书是根据美国著名同位素地质学家 G. 福尔 1977 年所著的《同位素地质学原理》英文本一书译出。作者以生动简洁的语言阐述了地质工作者在解释同位素数据时所用的各种原理,并阐明怎样用这些解释来解决地质学问题。

本书内容丰富,涉及地质学各个方面。其主要内容包括三部分:第一部分(一至五章)是同位素地质学基础理论和技术方法部分,第二部分(六至十七章)是放射性同位素地质学部分,第三部分(十八至二十一章)是稳定同位素地质学部分。书末以附录形式列出了拟合等时线求年龄值的计算程序及当前流行的地质年表。

本书是现代地质学的重要基础理论读物,在内容上它是目前同位素地质学领域内比较全面一部权威性著作,适合于高等地质院校高年级学生和大学毕业生阅读参考,也是目前我国广大地质工作者渴望运用同位素地质学理论知识解决地质学问题的必读书。

Gunter Faure

PRINCIPLES OF ISOTOPE GEOLOGY

John Wiley & Sons, 1977

同位素地质学原理

[美] G. 福尔 著

潘曙兰 乔广生 译

李继亮 校

责任编辑 李增全

科学出版社出版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 2 月第一版 开本: 787×1092 1/16

1983 年 2 月第一次印刷 印张: 22 3/4

印数: 精 1—1,480 插页: 精 2
平 1—1,650 字数: 520,000

统一书号: 13031·2130

本社书号: 2909·13-14

定价: 布脊精装 4.50 元
平 装 3.50 元

译者序

近十年来,同位素地质学迅速发展。一方面测试技术的改进,数据精度的提高,使以往无法测定的样品,获得了准确的数据。另一方面,板块构造理论的进展,要求地学各领域的知识有机地综合在一起。同位素地质数据为复原古代板块构造提供了各种岩石建造的时代、起源、演化和构造环境的资料。因此,同位素地质学以空前的深度与广度渗入到地质学的各个领域。当前,不仅从事同位素测试的实验工作者,而且越来越多的各专业的地质学家都深感获得同位素地质学基础知识的必要和提高运用同位素资料能力之急需。美国著名同位素地质学家 G. 福尔的《同位素地质学原理》便是应此种需要而精心编著的。

本书共有 21 章,可归为三大部分。第一部分包括第一至五章。简要阐述同位素地质学一般原理、测试仪器和测量技术等基本知识。第六至七章构成第二部分,详细阐述了同位素年龄测定方法、应用范围和同位素比值的地质应用与解释。第三部分包括第十八至二十一章,扼要说明了 O、H、C 和 S 等稳定同位素在自然界的分馏作用,测定方法及稳定同位素数据在解决地球化学问题方面的应用。此外,本书最后还以附录形式列出了拟合等时线求年龄值的计算程序及当前流行的地质年表。

本书最显著的特点是系统全面而又言简意明,使读者可借览一书之劳,收得窥同位素地质学全貌之效。同时每章自成系统,使对某一方面有特别兴趣的读者既能得到较深入的了解,又能查到主要的参考文献。因此,这本著作得到不少同位素地质学家的好评。

福尔教授的这一著作还有采诸家之长,资料丰富、图文并茂的优点。于是使读者易读易记,趣味盎然。在各主要章节之后,还附有习题与答案,俾使读者躬身实践,加深记忆。

诚然,本书也有不足之处。例如,近年来 Sm-Nd 法的发展,已显示出对确定年龄、解释地壳与上地幔的演化有潜在的重大意义,作者却未予介绍。也许作者认为这类方法还未臻成熟,待再版之际加以补充,但终使求全的读者微有憾意。另外,对某些操作技术,介绍不够详细,难以循述实践。不过有兴趣的读者尚可查阅作者列举的文献,找到解决问题的途径。

关于这本书的读者对象,作者自序中已注明,这里不再赘述。最后,应该说明,由于译者水平所限,译文不妥与错误之处在所难免,欢迎读者批评指正。

译者 1981年7月

序 言

同位素地质学如今已经发展成为渗透到地学各个领域的一门学科,它能大大有助于解决各种各样的地学问题。看来,把这一课题列入课程,以使各分支的地质学家有准备地去应用这门学科的基础知识,时机已经成熟。尽管作为同位素地质学基础的测试工作,可能还依然由为数不多(但人员增长很快)的技术专家来承担,然而,数据的解释工作却应当越来越多地由熟悉复杂地质问题的地质学家担负起来。

这本基础理论读物的写作目的,为的是使那些即使现在还不具备同位素地质研究条件的学院和大学,也能开展这门学科的教学工作。现在,大部分权威性的地质学杂志都发表同位素地质研究的论文,因此,所有的地质学家都应该十分熟悉同位素地质学的原理,以便能够对这些论文中的数据和结论进行评价,或者作出自己的解释。因而我建议无论对高年级的还是刚毕业的大学生,都应该把同位素地质学作为地质学的一门重要课程。对这一水平的学生讲授同位素地质学,使用本书,特别适宜,因为它涉猎地学的各个方面,俾使读者对此学科得窥全貌。

本书内容分三部分。第一部分(一至五章)属介绍性质,提供了一些重要的基础知识。预备知识相当充沛的学生,跳过这些章节也不会感到困难。尽管如此,我还是把这些内容包括在本书之中,以保证所有学生在学习后面更重要的章节时,打下共同的知识基础。

第二部分(六至十七章),解释一些元素由于放射作用而发生的同位素组成的变化。这几章主要阐述地质年代测量学和鉴别具有放射性成因同位素的那些化学元素的来源及其演化过程。

本书的最后一部分(十八至二十章),概述自然界中被分馏的原子,氢、氧、碳及硫的同位素组成。这些元素都居于地壳丰度最大的元素之列,它们在同位素平衡温度以及作为自然界的某些生物、化学和物理过程的指示剂方面,为各种各样的地质体提供了有用的资料。

本书的主要目的,在于阐述解释同位素数据时所使用的各种原理,并阐明怎样用这些解释来解决地质学问题。我力图着重推导解释同位素数据的数学方程,来说明同位素地质学原理。在许多情况下,同位素地质研究得到的结论,其地质意义往往取决于进行这类计算时所作的假设。我相信,如果学生们能够循序逐步推导有关方程,并了解推导过程中引入的各种假设,他们就能更好地鉴别计算结果的局限性。同位素地质学中并不存在那种只要代入数据就能得到神奇答案的万灵公式。

所有主要章节后面都有一些习题,可供学生检查对原理的理解程度,也可提高其计算数据的熟练程度。大部分习题都取自各种文献,它们包含了切合地质情况的数据解释。许多习题列出了答案,为的是增强学生的自信心,使其相信自己做对了。有些情况下,只列出参考文献,让学生自己去选取“正确”答案。

本书另一些有益的特点是:在主要章节末尾作了小结和对插图作了详细说明。后一特点为浏览本书提供了方便,也补充了正文的内容。每章末尾列出了 1975 年底以前具有

94261/03

代表性的文献,虽然只是发表过的文献中的一小部分,但我所引用的文章会促使有兴趣的学生在图书馆中查到任一给定的课题。

本书并不奢求将同位素地质学各分支的现有技术状况都一一列出,因此,文献上报道的许多重要研究,我们只是顺便提了一下,而另外一些则全未列举。不过,我完全相信,学生读过这本书后,就对评价文献中遇到的有关同位素研究的文章奠定了基础。有志于专门研究同位素地质学的学生,可将本书作为向目标登攀的阶梯,不过他们需要对理论方面的复杂情况和实验室中遇到的实际问题作更多的研究。这本书主要为那些非专业人员而又应该熟悉同位素地质学原理的人准备的。

我十分感谢朋友们和同事们的帮助,他们是:G. K. 查曼斯克 (G. K. Czamanske), P. 戴内 (P. Deines), B. R. 多伊 (B. R. Doe), H. 福尔 (H. Faul), R. J. 福莱克 (R. J. Fleck), E. D. 戈登堡 (E. D. Goldberg), M. J. 麦克萨温尼 (M. J. McSaveney), P. 帕旋卡 (P. Pushker) 和 E. K. 拉尔夫 (E. K. Ralph)。另外,我还要感谢 R. L. 阿姆斯特朗 (R. L. Armstrong), K. 贝尔 (K. Bell), R. D. 达尔迈耶 (R. D. Dallmeyer), W. G. 德塞 (W. G. Deuser), J. D. 奥布拉多维奇 (J. D. Obradovich), J. L. 鲍威尔 (J. L. Powell) 和 J. F. 萨特 (J. F. Sutter), 他们对本书的底稿提出了多方面的建议与忠告。不过本书的缺点和由于遗漏导致的错误与他们无干,完全归咎于作者本人。我感谢各出版商慨允我援引他们拥有版权的资料,同时也感谢这些作者允许我这样做。最后,我还要感谢 K. 加拉利克 (K. Garalik) 和 C. 温豪夫 (C. Weinhoff) 将手稿打字,也感谢 C. D. 纳顿 (C. D. Nardone) 帮助我做了初步校对。

目 录

译者序

序言	ix
----------	----

第一章 同位素地质学的由来	1
---------------------	---

一、地球的年龄有多大?	1
二、放射性的发现	2
三、英雄的年代	3
四、对地质学的影响	5
五、稳定同位素的分馏作用	6
六、关于同位素地质学的书籍	7

第二章 原子的内部结构	10
-------------------	----

一、核体系	10
二、原子量	11
三、核的稳定性及丰度	13

第三章 放射性原子的衰变机制	20
----------------------	----

一、 β (负电子)衰变	20
二、正电子衰变	24
三、电子俘获衰变	25
四、同量异位素的分支衰变和 β 衰变	27
五、 α 衰变	29
六、核裂变	33

第四章 放射性衰变与增长	35
--------------------	----

一、放射性母核衰变为稳定的子核	35
二、衰变系列	39
三、放射性单位与剂量	43
四、中子活化	44

第五章 质谱计	52
---------------	----

一、质谱计的原理	52
二、质谱计中离子的运动方程	54
三、同位素稀释分析	55

第六章 Rb-Sr法年龄测定	59
----------------------	----

一、铷和锶的地球化学	59
二、火成岩中含铷矿物的年龄测定	60
三、火成岩的年龄测定	62
四、变质岩的年龄测定	64

五、未受变质的沉积岩的年龄测定	70
六、等时线的拟合	71
七、小结	72
第七章 二元混合物中的锶	77
一、二元混合物的化学组成	77
二、具有不同 $^{87}\text{Sr}/^{86}\text{Sr}$ 比值的二元混合物	78
三、同位素比值和化学组成	80
四、假等时线	82
五、小结	83
第八章 锶同位素地质学	86
一、石陨石与原始锶	86
二、地球中锶同位素的演化	89
三、火山岩	91
四、花岗岩的成因	99
五、加利福尼亚岩基	100
六、大洋	102
七、深海沉积物	106
八、小结	109
第九章 K-Ar 法年龄测定	116
一、原理和方法	116
二、地磁极性倒转年表	121
三、变质慢	123
四、前寒武纪年表	124
五、小结	127
第十章 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 法年龄测定	131
一、 $^{40}\text{Ar}/^{39}\text{Ar}$ 方法的原理	131
二、逐级加热技术	134
三、氩同位素相关图	138
四、K-Ar 等时线和大气圈的演化	139
五、小结	141
第十一章 Re-Os、Lu-Hf 和 K-Ca 法年龄测定	146
一、Re-Os 法年龄测定	146
二、Lu-Hf 法年龄测定	148
三、K-Ca 法年龄测定	151
四、钙同位素的分馏	152
五、小结	153
第十二章 U、Th-Pb 法年龄测定	156
一、早期使用的方法	156
二、铀和钍的地球化学	157

三、铀和钍的衰变系列	158
四、同位素的 U、Th-Pb 法年龄测定	161
五、U-Pb 谐和图	165
六、谐和曲线的其它模式	170
1. 连续扩散模式	170
2. 扩容模式	170
3. 化学风化作用	172
七、U-Th-Pb 谐和曲线	172
八、U-Pb, Th-Pb 和 Pb-Pb 等时线	173
九、U-Xe 法年龄测定	176
十、小结	177
第十三章 普通铅法年龄测定	181
一、霍尔姆斯-侯特曼斯模式	181
二、陨石和地球的年龄	183
三、普通铅年龄测定	184
四、Th/U 比值	187
五、整合矿床中的正常铅	188
六、异常铅的解释	190
1. 瞬间增长模式	191
2. 连续增长模式	192
3. Th/U 比值	192
七、加拿大大不列颠哥伦比亚库特内弧的铅	193
八、小结	195
第十四章 多阶段铅的解释	199
一、二阶段和三阶段增长历史	199
二、年轻玄武岩类中的铅	202
三、铅在谐和图中的演化	205
四、全岩法年龄测定	206
五、普通铅法钾长石年龄测定	209
六、小结	209
第十五章 裂变径迹法年龄测定	213
一、方法	213
二、“年龄方程”的推导	215
三、裂变径迹的衰退	216
四、 α 反冲径迹	220
五、多色晕	220
六、小结	221
第十六章 不平衡铀系列法年龄测定	225
一、测定深海沉积物年龄的铀法	226

二、 ^{234}U 的不平衡性和 ^{234}U - ^{238}U 地质时计	230
三、 ^{230}Th - ^{238}U 和 ^{230}Th - ^{234}U 法年龄测定	232
四、铀-钍法年龄测定	234
五、用 ^{210}Pb 测定年龄	236
1. 雪和冰的地质年代学	236
2. 湖泊和海洋沉积物的地质年代学	237
六、火山岩中的不平衡铀系列	239
七、小结	241
第十七章 ^{14}C法年龄测定	245
一、 ^{14}C 的发现	245
二、 ^{14}C 法年龄测定的原理	246
三、大气中放射性碳含量的变化	248
四、同位素分馏	251
五、方法学	252
六、碳酸盐样品的年龄测定	253
七、小结	255
第十八章 水圈与大气圈中的氧和氢	259
一、水与水蒸汽中的氧和氢	260
二、雪与冰的地层学	265
三、大洋中水的同位素组成	267
四、古温度测定法	269
五、地热水与卤水	273
六、小结	277
第十九章 岩石圈中的氧和氢	280
一、造岩矿物的氧分馏作用	280
二、火成岩中的氧	286
三、热液矿床中的氧与氢	289
四、沉积岩中的氧与氢	291
五、变质岩中的氧	294
六、小结	296
第二十章 碳	302
一、现代生物圈中的碳	302
二、化石燃料	304
三、前寒武纪时代的沉积岩	305
四、海相与非海相碳酸盐	306
五、碳酸岩与金刚石	308
六、火成岩与火山气体中的碳	310
七、大理岩与石墨	312
八、热液矿床	313

九、小结	315
第二十一章 硫	320
一、生物成因的分馏作用	320
二、现代沉积物中的硫	321
三、化石燃料	323
1. 石油	323
2. 煤	324
四、自然硫矿床	324
五、海相硫酸盐的同位素演化	326
六、硫化矿床	327
七、硫化矿物间的同位素分馏作用	328
八、成矿液体中的同位素分馏作用	329
九、小结	331
附录 I Rb-Sr 法年龄测定中等时线的拟合	336
附录 II 显生宙地质年表	350

第一章 同位素地质学的由来

一、地球的年龄有多大？

询问我们的大地母亲的芳龄、也许有伤大雅，但科学是不顾这些繁文缛节的，而应该不断地去大胆地探索大地所严守的秘密。

阿尔萨斯·霍姆斯(Arthus Holmes),1913.

关于我们所居住的星球的年龄，这个“粗俗”的问题。二百多年来，一直是科学上争论不休的问题。虽然古代文明国家的一些教士与哲人提出了某些关于地球历史的见解，但是地质学被建立成为独立的研究领域之前，这个课题并没有进入科学的范畴。在十八世纪中叶之前，关于地球的起源与其后的历史，不过是神学的一类问题。1650年大主教乌斯赫(Ussher)宣布：世界是在公元前4004年创造出来的。这种说教在大多数英文的圣经中以傍注的形式出现，因而严重地妨碍了许多早期地质学家的思想，他们成为神学的偏见的牺牲品。大约在1750年以前，公认的观点是所有的沉积岩都是在诺亚及其部族遇到的大洪水期间沉积的，地球的所有表面形态都是由断断续续的突变事件造成的。

地质学作为一门科学的兴起，一般都联想到苏格兰的詹姆斯·赫顿(James Hutton)的工作。他强调造成地球表面形态的缓慢而连续的作用过程的重要性。这种观念与突变论相抵触，而且预示了在他1785年发表的《地球的理论》一书中提出均变论的概念。他的主要观点是：现在所发生着的地质过程造成了地球过去的历史，而且在将来还会这样继续下去。他说：他发现对地球来说，“……既没有开始的痕迹，也没有终止的征兆”。地球的历史显然延续过很长的时间，然而也未必延续了无限长的时间。

赫顿关于地球的年龄的结论受到如此对待：“当时的官方头领表现出理所当然的厌恶，他们当中，多数人把神学的研究与他们看得中的科学联合在一起，他们需要科学与圣经谐调一致。”(Holmes, 1913)。然而，随着时间的流逝，越来越多的地质学家接受了均变论的原理，其中包括坚信那些累积厚度达数英里的沉积岩，需要很长的时期才能沉积下来。地质学作为一门科学的出现，肯定地根据了岩石中所保存下来的证据，而这些证据又是依据均变论的原理加以解释的。1830年，查理·莱伊尔(Charles Lyell)发表了《地质学原理》第一卷。新一代的地质学家逐渐代替了老一辈，随着老一代地质学家的逝世，要求地质学理论必须与摩西的圣经相符合的时代也一去不复返了。到十九世纪中叶，地质学家似乎有把握地坚信：地球确实是很古老的，野外填图填到的巨大厚度的沉积岩的沉积作用实际上要用非常长的时间。

地球的明显的古老特点与均变论的原理，受到威廉·汤姆逊(William Thomson)的意外的攻击，他又被人尊称为凯尔文男爵(Burchfield, 1975)。汤姆逊是英国十九世纪后半叶的最杰出的物理学家。他对地质学的介入，在大约五十年长的一段时间中，深深地影响了地质学中关于地球年龄的见解。在1862和1899年之间，汤姆逊发表过若干文章，在

这些文章中,对地球的可能年龄加了一系列的限制。他的计算,是根据太阳的发光度,地球的冷却史和月亮潮汐对地球转动速度的影响的考虑进行的。他最初得出结论:地球的年龄不可能大于一亿年。在以后的文章中,地球的年龄进一步减小。在1897年,凯尔文男爵(他在1892年被封为贵族)做了著名的讲演:“作为生命适宜的棲居地的地球的年龄”,在这篇演说中,他把地球的年龄缩小成二千万年和四千万年之间。

凯尔文男爵等人对地球的年龄的这些估计和更早时期的估计,对地质学家是一种严重的阻碍。凯尔文的论据似乎是不可反驳的,而这些论据与地质学家根据均变论解释的证据是不相一致的。这就使得一些人徒劳地去加快过去的地质作用,以便把地球历史缩短到凯尔文所允许的几千万年之内。另外一些人抱着这样的希望:终究有一天会发现他的论证中的缺陷,而地质学的证据最后会与物理学的定律调和一致。

颇有讽刺意味的是,就在凯尔文爵士1897年发表他的演说的前一年,法国物理学家亨利·贝克勒尔(Henri Becquerel)公布了放射性的发现。仅仅几年之后,人们就认识到了放射性元素的蜕变是一个放热过程。岩石的天然放射性产生热量,因而使地球不只是像凯尔文男爵在他的计算中所假定的那样的冷却着的物体。因此,他关于地球年龄的结论是不成立的。于是,地质学历史上的一段困难时期就此告终。从这个插曲应该吸取的教训,以下面的动人的言辞表达出来:

“严密的数学分析的迷人印象,还有那充满严谨与文雅的气氛,都不应该蒙蔽我们,使我们看不到决定整个过程的前提之不足。”

T. C. 錢伯林(T.C. Chamberlin,1899)

二、放射性的发现

也许是因为人类没有探测放射性的感官的缘故,所以使放射性现象的发现还不到一百年。人们不能直接看到、摸到、闻到或者听到放射性,而只能借助于机械设备或电子设备把它检测出来。它最后被发现是一系列有利的条件促成的,其中包括用阴极射线管作实验和铀的盐类的发光现象的研究。

1855年左右,德国的玻璃工人H. 盖希尔(Heinrich Geissler)制作装有金属电极的抽真空玻璃容器取得成功,这能用于研究电荷穿过真空的传导。由于使用盖希尔(Geissler)的管子进行实验而发现的阴极射线,在十九世纪后半叶受到物理学家们的高度重视。1897年汤姆森(J.J. Thomson)把它解释为负电荷粒子(电子)流。这在快速发展着的对原子内部构造的认识方面,是一个重要的里程碑,因此,在1906年汤姆森获得了诺贝尔奖金物理奖。

但是,放射性的发现与阴极射线管只有间接的联系。1880年左右,亨利·贝克勒尔做了用紫外线照射二硫酸铀晶体引起发光的实验。发光,是某些物质在用其它能量源激发时射出可见光的一种性质。用阴极射线管进行工作的物理学家们,曾观察到阴极射线轰击阴极射线管壁时玻璃容器壁的发光现象。德国物理学家W.K. 伦琴(W.K. Roentgen)当时正研究这种现象,并发现他的用黑硬纸板套着的阴极射线管引起敷有铂氰化钡的纸片发光。只要供给阴极射线管能量就有这种发光,甚至当他把纸片移到隔壁房间的时候,也仍然发光!显然,阴极射线管发射出一种能穿透黑纸的神秘的辐射线。他在1895年12

月所作的关于他的发现的报告,引起了他的同事们很大兴趣,同时有几位科学家开始探索伦琴的X射线与发光之间的联系。

伦琴的发现激励着亨利·贝克勒尔重做他先前用铀的盐类进行的实验工作。为了探寻铀的化合物是不是能放射X射线,他把照相底版包在黑纸里,然后把一些硫酸铀晶体放在上面,再把整个纸包暴露于日光中。果然,硫酸铀晶体发射出一种看不见的辐射线,它穿透黑纸并使照相干板感光而变模糊。贝克勒尔终于确定:铀的盐类甚至含铀矿物不暴露于日光也连续地发射出这种辐射线。1896年贝克勒尔向巴黎科学院提出的这些发现,后来具有深远的影响,并且在以后的几十年中引起了原子物理学、核子物理学和放射化学的发展。

三、英雄的年代

贝克勒尔的发现引起了几位青年科学家的注意,其中就有玛丽·斯克洛多夫斯卡·居里(Marie Skłodowska Curie)。1891年,玛丽·斯克洛多夫斯卡从她的出生地波兰来到巴黎在索尔邦纳学习。1895年7月25日,她与在索尔邦纳(巴黎大学的神学、理学、文学部)工作的才气焕发的物理学家皮埃尔·居里(Pierre Curie)结婚。在贝克勒尔报告了他的关于铀的盐类的发现之后,玛丽·居里决定将她的博士论文致力于系统地探索是否别的元素及其化合物也发射类似的辐射线。当她发现钍也是一种穿透射线的有力发射体时,她的工作得到了酬报。回过头来检查天然的铀和钍的矿物,她注意到这些矿物比纯铀和钍的盐类具有远远更强的放射性。这一重要的观察向她暗示出:天然的铀矿石,例如沥青铀矿,应该含有比铀更强的射线体。因此,玛丽·居里和皮埃尔·居里申请了一些来自捷克矿石山(Joachimsthal)的铀矿石,并在1898年开始了探寻她推断存在的强放射体的系统的努力。这一探索工作终于导致了两种新放射性元素的发现,他们把这两种元素命名为钋和镭。玛丽·居里根据镭的发射现象创造了“放射性”这个词。她刻苦地工作以生产出金属状态的纯镭,而她的丈夫则从事射线的物理性质的研究。1903年居里夫妇因为发现放射性而同贝克勒尔一起荣获诺贝尔物理学奖金。

虽然皮埃尔·居里在1906年的一次交通事故中逝世于巴黎,但玛丽·居里继续致力于她对于镭的化学研究。她被任命为索尔邦尼的物理学教授,填补了她丈夫去世所留下的空位。1911年,她由于成功地分离出纯镭而获诺贝尔化学奖金。1914年她建立了镭研究所,成为核物理与核化学的研究中心。在这个研究所,她继续从事她的放射性元素化学及其在医药上的可能用途的研究工作。她死于1934年,由于她终生研究的放射性元素发射的辐射线的影响,引起了白血病,使她离开了人间。

居里夫妇在1898年发现的镭发射的电离辐射引起恩斯特·卢瑟福(Ernest Rutherford)的好奇心,那时,卢瑟福正在剑桥大学的凯文迪什实验室与汤姆森一起工作。那时他已经研究了气体被X射线的电离,后来,他从事镭发射的辐射线的性质的研究。1898年秋天,卢瑟福移居蒙特利尔,在那里,他接受了姆克吉尔大学的物理学教授职衔。一年以后,他报道了放射性物质所发射的辐射线由三种不同的成分组成, he 把它们分别叫做阿尔法,贝他和伽玛。阿尔法最后表明是由氦核构成,贝他射线被鉴定出来是电子。唯有伽玛射线被证明是一种与伦琴所发现的X射线相似的电磁辐射。

1900年, 弗莱德里克·索迪(Frederick Soddy)作为一名化学的实验教授者来到姆克吉尔大学。在蒙特利尔度过的二年中, 索迪与卢瑟福一起从事钍的化合物的研究工作, 这项工作使他们把放射性衰变与增长的理论系统化。他们指出: 放射性元素的原子自发蜕变形成另外的元素的原子。他们提出这种蜕变伴有 α 和 β 粒子的辐射, 并提出辐射的强度与所在的放射性原子的数目成比例。因此, 他们把蜕变速率表达为

$$-\frac{dN}{dt} = \lambda N \quad (1.1)$$

这里 λ 是衰变常数, 代表单位时间内一个原子可能衰变的几率, N 是存在的放射性原子的数目。1902年索迪去与伦敦的大学学院的S. W. 拉姆齐(S. W. Ramsay)一起工作。卢瑟福留在姆克吉尔大学, 1907年他成为曼彻斯特大学朗沃西(Langworthy)物理学教授。1908年由于他的放射性研究工作的成就, 获得了诺贝尔物理学奖金。

然而, 卢瑟福的最大成就尚未到来。在曼彻斯特大学, 他开始了 α 粒子被金属箔散射的著名实验。这些实验的结果表明, 原子具有小的带正电的核, 此核被在轨道上运动的电子围绕着。原子核的正电荷来自质子。质子的名称是卢瑟福1919年提出的。一年以后, 他推测原子可能含有一种中性粒子。这种假设的粒子, 即中子, 在1932年根据博思(W. Bothe), 约里奥(F. Joliot)和查德威克(S. J. Chadwick)(F. 约里奥是玛丽·居里和皮埃尔·居里的大女儿伊丽娜·居里的丈夫)进行的实验而被发现。

卢瑟福的原子模型没有维持多久。1912年年轻的丹麦物理学家尼尔斯·玻尔(Niels Bohr), 作为高级研究员来到曼彻斯特大学。他把马克思·普朗克(Max Planck)和阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)发展的与经典物理学有根本分歧的量子力学原理应用于氢原子的可能能态。玻尔的氢原子模型根据了这样的假定: 原子核的轨道电子的角动量只能具有 $h/2\pi$ 的倍数, 这里 h 是普朗克常数, 还假定氢原子发射或吸收的辐射能是电子由不同能态之间的跃迁造成的。玻尔的理论在解释氢光谱方面显然是成功的。但当应用于多电子的原子时就失败了。玻尔的理论后来被狄拉克、海森堡和薛定谔发展的波动力学所代替。

1919年, 卢瑟福继汤姆森之后任剑桥大学凯文迪许实验室的主任, 这里曾是他早年开始科学生涯的地方。1914年他被封为爵士, 1932年他成为奈尔逊和剑桥的第一个外籍男爵。

当人们把铀和钍的放射性衰变系列搞出来后, 产生了一个混乱费解的问题。例如, 人们发现存在着几种不同衰变速率的钍。此外, 美国化学家理查德(T. W. Richards)所作的仔细测定表明元素的原子量不是象1815年普劳特(W. Prout)提出的那种整数。更令人混乱的是1913年理查德的报告。他的报告表明铀衰变所产生的铅的原子量与通常的铅不同。这些问题被索迪的大胆的建议解决了, 他建议一种特定的元素在周期表中所占的位置可以容纳一种以上的原子。他把这些原子叫做“同位素”(isotopes), 这个词的希腊原意是“同一地方”。实际上, 克鲁克斯(W. Crookes)在1886年就试图说明普劳特的假说缺陷, 他指出元素的原子具有不同的整数原子量, 而元素的原子量代表不同原子的混合物的平均重量。当J. 汤姆森1913年观察到氖由原子量分别约为20和22的两种原子组成的时候, 上述的那些概念便得到了实验的肯定。这些观察是用汤姆森建立的“阳离子射线”仪做出的。

当时,年轻的化学家阿斯顿(F. W. Aston)正在凯文迪许实验室工作。他立即开始去检验汤姆森的阐述,以期得到肯定或否定的结果。在第一次世界大战结束之后,阿斯顿改进了汤姆森的“阳离子射线”仪的设计,并把这种改进的仪器称为“质谱计”。用这种仪器,他不仅肯定了汤姆森先前关于氖的工作,而且还发现了质量为 21 的第三个同位素。阿斯顿把他的余生致力于建立精度更高的质谱仪,用这种仪器他发现了 287 种天然同位素中的 212 种。他也测量了这些同位素的质量并根据元素的天然同位素质量和相对丰度计算出各种元素的原子量。由于他的成就,阿斯顿于 1922 年获得了诺贝尔化学奖。“质谱计”的设计在以后的年代里得到登普斯特(A. J. Dempster)、班布里奇(K. T. Bainbridge)、尼尔(A. O. Nier)、英拉姆(M. G. Inghram)、达克沃思(H. E. Duckworth)和许多别人的改进。质谱仪已经发展为测量地质物质中元素的同位素丰度的高精密度和高准确度的工具。质谱仪的理论将在第五章中阐述。

四、对地质学的影响

放射性的发现以及居里、卢瑟福、索迪、汤姆森、拉姆齐等人随后的工作,对地质学有深远的影响。1903 年居里和拉博尔德(Laborde)证明放射性衰变是一个放热过程。这就为地质学家测量岩石的放射性和计算热产生率开拓了一条新的研究思路。1906 年斯特拉特(K. J. Strutt)根据岩石中镭的含量首先做了这种计算。1907 年乔利(J. Joly)认识到由于放射性矿物的存在,使岩石中产生了多色晕圈。他也测量了不同种类的岩石中镭和钍的含量,并在 1909 年,在一本名为《放射性地质学》的书中概括了他的重要结论。在这本书里,他讨论了多色晕圈的成因;报道了岩石放射性的测量,并且计算了所造成的热产生作用。他也曾推断过放射性提供了山脉形成需要的能量。乔利,斯特拉特以及其他关于放射性元素在地球中的分布和引起的热产生作用的研究工作,一直延续到现在。事实上,由于自 1969 年到 1972 年载人飞行登月,这个课题最近受到更多的注意。这些飞行的初始目的之一乃是测量月岩中放射性元素的含量。这些测量提供了关于月球的热历史与其现代温度分布的知识。

放射性不仅引起岩石中的热产生作用,而且也提供了测量岩石与矿物年龄的精确方法。这种可能性是卢瑟福和 B. 博尔德伍德(B. B. Boltwood)在 1905 年左右认识到的。1905 年卢瑟福在耶鲁大学讲学期间曾提出:铀矿物的年龄可以用它们中累积的氦的数量来测定。他实际地进行了几个铀矿物的这种年龄测定,得到的年龄大约为 5 亿年。这就在凯尔文爵士提出他对地球年龄问题的解答之后不到十年的时候,确证了他对地球年龄的估计是错误的。

1904 年,卢瑟福在皇家学院作了一次关于镭的放射性的热产生作用及其对地球的热历史的影响的讲演。当他进入讲演厅时,他感到担心,因为凯尔文爵士也在座。但是,他宣布:凯尔文爵士曾根据地球热历史计算过它的年龄,而这种计算是以没有发现新的热源为前提条件的,这样就避免与这位老人发生可能是爆发性的冲突。这样说,似乎是凯尔文爵士事实上已预见到了放射性的发现和这种现象所产生的热!于是凯尔文男爵一直安静地听完其余的讲演,然后愉快地微笑了。

1904 年美国化学家 B. 博尔德伍德报道了在多数老的铀矿物中 U/Ra 比值是个常

数。1905年他又根据希勒布兰德(Hillebrandt)在1890年和1891年完成的沥青铀矿的很仔细的化学分析,推测铅是铀衰变的稳定的最终产物。1907年博尔德伍德发表了根据U/Pb比做出的三个沥青铀矿样品的年龄测定。他所得到的年龄范围是从4.10亿年到5.35亿年,这个范围与现代由相应地点取得的类似样品所做的年龄测定合理而良好的一致。博尔德伍德的年龄测定是在同位素被发现以前做的,那时还不知道铅也是由铀衰变产生的,也未精确地知道铀的蜕变速率。

霍姆斯23岁的时候,即1913年,出版了他的著作“地球的年龄”这本书明晰地评论了这门技术当时的状况。在这本书中,霍姆斯对于放射性对地球年龄问题的重要意义作了权威性的说明,并且根据堆积的沉积岩的厚度和含铀矿物中铀和铅的形成提出了第一个地质年表。从一开始,霍姆斯就是放射性对地质学具有重要意义的热情拥护者。然而,地质学家未必都具有这种热情。因而霍姆斯在1913年遗憾地说:“放射性为我们提供的意料不到的事情,未必被人们象应该接受的那样接受下来。”霍姆斯所说的意料不到的事情之一便是:根据放射性所测定的矿物年龄表明了好像过于长的地质时代。这肯定是一种带讽刺意味的情况:就在凯尔文爵士以他的地球年龄不能大于4千万年的“不可辩驳”的计算的好容易才镇服了地质学家15年之后,现在地质学家们却在抱怨根据放射性进行的年龄测定使地球的年龄太长了。产生这个困难的原因是根据放射性计算的年龄远大于由剥蚀速率,大洋的含盐量和沉积作用速度得到的年龄值,这种不一致性意味着,要么在地质历史上沉积作用比现在慢,要么就是大量的沉积物被剥蚀掉了。这二者都没有引起那些不愿意相信放射性年龄测定的可靠性的地质学家的注意。霍姆斯1913年发表的地质年表表明太古代片麻岩的年龄为13亿年,但是他推断最老的太古代岩石必然有16亿年的年龄。霍姆斯把他毕生的主要精力放在放射性对解决地质问题的应用上。他一生最关心的是地质年表(附录II)。

关于地质时计的后来历史,我们将在描述现在所用的几种不同年龄方法的有关章节中谈到。1923年美国科学院研究委员会设置了原子蜕变地质年龄测试委员会,这时,岩石的放射性的研究和地质年代的测定才在美国得到了合法的承认。这个地质年龄测试委员会负责召开科学会议和定期出版那些在同位素地质学的发展上起了巨大作用的那些阶段报告。

五、稳定同位素的分馏作用

在结束这一章之前,我们还必须阐述另一个重要的发现。1931年尤里(H. C. Urey)根据理论预言氢的同位素的蒸气压应该有个差值。他对氢的兴趣是由于伯奇(Birge)从门泽尔(Menzel)提出氢可能有天然同位素引起的。尤里和默菲(Murphy)及布里克韦德(Brickwedde)一道工作,迅速地制定了计划,并做了一个决定性的实验:用质谱仪来检测蒸发大约六升液态氢后所剩的残留气体体积中的 ${}^1\text{H}$ 和 ${}^2\text{H}$ 。实验结束之刻,证实了 ${}^1\text{H}$ 的存在,但 ${}^2\text{H}$ 没有找到。尤里把新发现的同位素命名为“氘”,因为它的质量差不多是氢的二倍。因为直到1932年以前还不知道中子的存在,所以氘存在的具体原因当时还不清楚。1934年,由于尤里发现了氘而荣获诺贝尔化学奖。第二次世界大战期间,他用他的同位素分馏知识发展了气体扩散分离 U^{235} 的方法。战争结束时,他把注意力转移到氧的