

同位素地质学

[芬] K·兰卡玛 著

地质出版社

同位素地质学

[芬] K·兰卡瑪 著

· 朱 錫 涛 譯

地 質 出 版 社

1960·北 京

ISOTOPE GEOLOGY

by

KALEKVO RANKAMA, Ph. D.

RESEARCH PROFESSOR OF MINERAL CHEMISTRY
UNIVERSITY OF HELSINKI

London, 1954

本書分成两大部分。第一部分叙述核类的物理学和化学；第二部分探讨自然界中的同位素，这部分几乎包括了周期表中的全部元素。

本書可供地質学家、物理学家、化学家和生物学家們参考。

本書由朱錫濤譯，苗樹平和李亿斗校对。

同 位 素 地 質 学

著 者	(芬) K. 兰 卡 瑪
譯 者	朱 錫 濤
出 版 者	地 質 出 版 社

北京朝陽學市大街地質部內

北京市書刊出版登記證：出字第150号

发 行 者	新 华 書 店 科 技 发 行 所
經 售 者	各 地 新 华 書 店
印 刷 者	地 質 出 版 社 印 刷 厂

北京軍安門外六號減40号

印数(京) 1—6200册	1960年5月北京第1版
开本787×1092 ¹ / ₁₆	1960年5月第1次印刷
字数560 000	印张22 ¹ / ₄ 插頁
定价10.2.85元	

中 譯 本 序

同位素地質學是近10年來才正式形成起來的一門邊緣學科。通過這門學科，使原子核物理學和同位素化學領域里在理論和技術上所取得的巨大成就迅速地應用於地質學的理論研究和生產實踐。同位素地質學可以說是地質科學中最有遠大發展前途的分支學科之一，它為地質學從舊的範疇躍進到新的範疇指明了方向。同位素地質學研究已經積累了不少有用的數據，並且得出了有關的某些規律，為地質學研究創造了一些新的方法，比較合理地“解決了”一些過去認為是地質學上的重大疑難問題。但是，更客觀地說，在這方面，既得的成績與已經利用的可能性，遠遠比不上可能取得的成績和尚未利用以及目前還不知道的潛在可能性。可以相信，同位素地質學將會繼續使地質學的領域擴大，特別是使它向更高一層突破。我想，讀者只要琢磨了這本書以後就會接受這種看法的。

同位素地質學已經列為我國科學發展計劃的要目，這是地質學家們值得萬分歡欣鼓舞的大事。譯者是從事礦床成因和地球化學教研工作的，所以在这里特別願意提出一點：就是利用示踪原子來進行礦床成因和成礦過程的定量歷程的理論研究。探索一下這種可能性和現實性是有益處的。

譯者在1955年獲得了芬蘭地球化學家K·蘭卡瑪所著的“同位素地質學”以後，與我國個別的原子核物理學家和同位素化學家通過口頭和通訊方式進行了個人接觸，獲得不少教益並克服了理解上的一些困難，譯者對這些同志和朋友的幫助致以謝意。

蘇聯學者已在1956年將這本巨著譯成俄文，並在莫斯科發行了第一版。譯者學識淺陋，勝任這項工作本是不甚恰當，故不論在科學原理或詞彙上均難免有所謬誤的理解以致譯文失實，尚希有關學者和同志直接指責，以便今後改善。

鑑於各學術界的需要，特別是對不熟悉這門學科的地質學家們和青年同志們的，需要，加以同志們多方面敦促，才勉力以赴，完成了這項任務。

本書中有關術語，悉遵照中國科學院出版的物理學名詞、化學化工術語、數學名詞、地質學名詞、礦物學名詞、岩石學名詞等譯出。沒有適當規定的譯名則譯者試擬並與有關學者討論過。英、日人名則據1952年哈爾濱外國語學院出版的字典由俄文轉譯而成。

朱 錫 濤

1957年8月

俄 譯 本 序

著名地球化学家卡勒沃·兰卡瑪所著“同位素地質学”一書，是现代地球化学問題方面出色的貢獻，它包含着丰富的資料，它涉及到自然界中这种同位素的存在状况和行为及其性質。

作者收集的大批資料，对理解測定地質建造的絕對年齡的放射性方法的原理无疑是具有极大价值的。此外，这本书还提供了关于同位素地球化学方面的大量参考文献。

本書开头的这一部分討論了核类的物理学和化学；这一部分所闡述的材料基本上运用了现代的知識水平。其次，接着叙述了一直到鐳这个元素为止共91种元素的同位素。

应该指出，并不是本書所有章节都写得同样詳尽的，其中某些章节的实际材料闡述得缺乏系統性。关于天然放射元素方面所引証的資料，带有一些随便的特色；例如，叙述氫的性質只化費不到半頁的篇幅，尽管在自然条件下氫的行为在理論上和实际上具有很大的意义。

与書中所涉及的所有問題有关的文献基本上提得相当充分。編者認為在某些情况下加以注释，以确定对某些問題进行研究的年代順序是有必要的。例如，在討論关于鈾的自发裂变的問題时沒有提到在1940年第一次发现这个現象的彼得查克和弗雷洛夫的名字。

除开“нуклид (nuclide)”核类这个术语以外，作者所用的都是公認的科学术语，“нуклид (nuclide)”这个术语在苏联科学文献中到现在为止几乎从未采用过。值得提出的是，作者在書名上使用了“同位素”这个术语，而同时在正文里又采用了“核类”这个术语。苏联讀者們大多习惯于“同位素”这个术语，因此，認為按照含义分別以“同位素”或“原子核”代替术语“核类”是适宜的^①。

尽管本書存在着上述的缺点，但是它对地球化学及其相邻的科学領域的研究者來說，仍具有极大的兴趣，并且在很大的程度上补足了我們在同位素地球化学的科学文献上的空缺。

II. 史塔里克

①校者注：原文中“nuclide”（核类）一詞，在俄譯本中許多地方均按含义的不同而分別譯为“изотоп”

（同位素）及“ядро”（原子核）。但是，正如作者所指出的，“核类”、“同位素”及“原子核”这三个詞，具有不同的意义。“原子核”是指正电的，差不多含有整个原子的質量并为一些电子所圍繞的原子核；“核类”是指以核內的中子数和質子数为分类基础而划分成的核族，而“同位素”則指在周期表中占有同一位置的原子核。因此，在中譯本中仍然按作者原意將“nuclide”一詞譯为“核类”，虽然，在許多地方，按含义的不同而分別將“同位素”或“原子核”代替“核类”一詞也是可以的。

〔术语“核类”是指原子序数及質量数相同的原子族，“同位素”指原子序数相同而質量不同的原子核；“同量素”則指質量数相同而原子序数不同的原子核。至于“原子核”这个概念，按邏輯学的說法，应该具有比上述三个概念更广的外延和更狭的內涵〕。

目 錄

中譯本序	
俄譯本序	
原序	
緒論	

第一部分 核类的物理学和化学

第一章 原子、原子核和核类.....14

1.1 原子的构造.....14
1.2 質量和能量.....15
1.3 物質的基本粒子.....15
1.4 軌道电子的分布.....16
1.5 原子核的构造.....16
1.6 質子、中子和質量数.....17
1.7 核类.....17
1.8 原子核的性質.....18
1.9 核类图表.....20
1.10 核类的存在与丰度.....21

概論—存在諸定則—分布与丰度諸
定則—机变数

1.11 自然界核类的存在情况.....33

第二章 周期系統.....35

2.1 元素的分类.....35
2.2 周期表.....35

第三章 同位素.....38

3.1 同位素的发现.....38
3.2 同位素矩和同位素的可分离性38
3.3 同位素分馏的理論.....39

同位素一般的物理性質和化学性質
—同位素化合物的热力学性質—同
位素交換反应过程中的平衡常数—
同位素分子的反应速率

3.4 同位素的分离.....43

概論—物理学的方法—化学的方法

第四章 質量分析47

4.1 引論.....47
4.2 化学原子量的測量.....47
4.3 流体比重的測定.....47
4.4 光譜—同位素分析.....48
4.5 質譜分析.....50

概論—質量振譜仪—質量分光計

4.6 同位素丰度比率的測定.....56

質量振譜仪分析—質量分光計分析
—一般的同位素分析

4.7 質量分析的应用.....58

概論—在物理学上的应用—在化学
上的应用—在生物学上的应用—在
地質学上的应用

4.8 中子激活分析.....60

第五章 放射性.....60

5.1 放射性的发现.....60
5.2 放射性的性質.....61
5.3 放射性衰变和生长.....62
5.4 放射核类与它的衰变产物之間 的关系.....64
5.5 放射性平衡.....65
5.6 半衰期的測定.....66
5.7 分支蛻变或双衰变.....67
5.8 发射粒子与衰变过程.....68
5.9 放射性核类.....70
5.10 天然放射性.....70

概論—鈾族—釷族—錒族—錒系—
天然族的对比—并行星—单独的天
然放射性核类

5.11 人工放射性与核嬗变.....78

人工放射性的发现—核嬗变—核反
应的特殊型式—核嬗变过程中的能
量关系—核截面

5.12 核类反抗放射性衰变的稳定性81
5.13 放射性的单位83
5.14 放射性的量度83

第六章 核輻射的性質85

6.1 甲种輻射.....85

甲种粒子的量程和吸收—甲种粒子
的能量—盖格-納托尔 定則—甲

种衰变理论—甲种发射体的体系	
6 · 2 乙种与辐射	88
乙种粒子的射程和吸收—乙种粒子的能量—乙种衰变理论—正乙种放射性—双乙种衰变—轨道电子俘获	
6 · 3 丙种辐射	90
丙种辐射的射程与吸收—丙种辐射的能量与内转换—衰变公式—同位异能跃迁	
6 · 4 中子	91
中子的放射性—中子的量与吸收—中子的辐射俘获—中子截面—中子的共振俘获	
第七章 自然界的核反应	93
7 · 1 概论	93
7 · 2 (α, n) 反应、 (α, p) 反应、 (γ, n) 反应、 (n, γ) 反应、 (n, α) 反应、 (n, p) 反应与 $(n, 2n)$ 反应	93
7 · 3 天然裂变	95
7 · 4 由宇宙辐射引起的核类生产	95
7 · 5 导自原子爆炸的裂变产物的产生	96
第八章 放射性在地质学上的应用	97
8 · 1 引论	97
8 · 2 火成岩中放射性的分布	97
8 · 3 地质年代计量学上的放射性	99
8 · 4 地球的年龄	104
8 · 5 元素的年龄	105
8 · 6 岩石中的放射生成热	106
概论—由放射性核类所产生的热量—核反应过程中所产生的热	
8 · 7 射线自动照相术	110
矿物和岩石中放射性组份的测量—矿物和岩石中放射性的定量测量	
8 · 8 矿物构造中放射性的干扰	113
8 · 9 大洋沉积物的年龄与沉积速率	116
8 · 10 放射性与矿床	117
8 · 11 放射性与石油的成因	118
8 · 12 放射性在矿石精选上的应用	118
8 · 13 放射性测井	118
8 · 14 实验室地质学上的放射核类	119
第九章 元素与核类的丰度和成因	120

9 · 1 元素的大地丰度	120
9 · 2 元素的宇宙丰度	122
9 · 3 核类的宇宙丰度	124
9 · 4 元素的成因	125

第十章 自然界同位素分馏的一般

可能性	127
10 · 1 天然的分馏历程	127
10 · 2 时间效应与年代效应	130

第二部分 自然界中的同位素

第十一章 氢

11 · 1 氢同位素	132
11 · 2 氢和氘的宇宙产况	133
11 · 3 陨石中的氢和氘	133
11 · 4 大气圈中的氢和氘	133
11 · 5 水圈中的氢和氘	134
11 · 6 岩石圈中的氢和氘	136
11 · 7 生物圈中的氢和氘	139
11 · 8 氦	139

第十二章 氦

12 · 1 氦同位素	140
12 · 2 星球中的氦同位素	141
12 · 3 陨石中的氦同位素	141
12 · 4 大地来源中的氦同位素	142
12 · 5 测量地质材料年龄的氦法	145

氦法的原理—使用氦法的先决条件—矿物的顽氦性（矿物保存氦的顽强性）—氦法对火成岩的应用—甲种氦法

第十三章 锂

13 · 1 锂同位素	153
13 · 2 自然界的锂同位素	153

第十四章 铍

14 · 1 铍同位素	154
14 · 2 自然界中的铍同位素 ^9Be	154

第十五章 硼

15 · 1 硼同位素	155
15 · 2 自然界的硼同位素	155

第十六章 碳

16 · 1 碳同位素	158
16 · 2 ^{12}C 和 ^{13}C 的宇宙产况	160
16 · 3 碳—氮旋迴	161
16 · 4 陨石中的同位素 ^{12}C 和 ^{13}C	163
16 · 5 大气圈中的同位素 ^{12}C 和 ^{13}C	165

16.6	水圈中的同位素 ^{12}C 和 ^{13}C166	第二十章 鎂.....237
16.7	岩石圈中的同位素 ^{12}C 和 ^{13}C166	20.1 鎂同位素.....237
	火成的岩石和矿物—沉积的岩石与 矿物—变质的岩石和矿物——般的 結論—特殊的地質学問題	第二十一章 硅.....237
16.8	生物圈中的同位素 ^{12}C 和 ^{13}C183	21.1 硅同位素.....237
16.9	同位素 ^{12}C 和 ^{13}C 的旋迴.....193	22.2 自然界的硅同位素.....238
16.10	大地碳的原始同位素組成.....194	第二十二章 硫.....240
16.11	自然界的同位素 ^{14}C196	22.1 硫同位素.....240
16.12	測定碳質物質年齡的放射碳法199	22.2 自然界中硫的同位素分額.....241
16.13	放射碳法在地質学上的应用.....202	22.3 隕石中的硫同位素.....241
16.14	放射碳法在考古学和人类学上 的应用.....204	22.4 水圈中的硫同位素.....242
第十七章 氮.....206		22.5 自然硫的同位素組成.....243
17.1	氮同位素.....206	22.6 硫化矿物中硫的同位素.....245
17.2	星球中的氮同位素.....207	22.7 火成成因硫的同位素組成.....248
17.3	大气圈中的氮同位素.....207	22.8 沉积成因的硫酸盐矿物中的硫 同位素.....248
17.4	岩石圈中的氮同位素.....208	22.9 生物生成物質中硫的同位素組 成.....249
17.5	生物圈中的氮同位素.....208	22.10 硫同位素的旋迴.....251
第十八章 氧.....209		第二十三章 氯.....252
18.1	氧同位素.....209	23.1 氯同位素.....252
18.2	氧同位素的宇宙产况.....210	23.2 自然界中氯的同位素.....253
18.3	隕石中的氧同位素.....210	第二十四章 氫.....253
18.4	大气圈中的氧同位素.....211	24.1 氫同位素.....253
18.5	水圈中的氧同位素.....213 引論—大气的沉淀—冰—井水和泉 水—湖水—河水—海水—原生水— 岩漿水	24.2 大气圈和水圈中的氫同位素.....254
18.6	岩石圈中的氧同位素.....221 引論—火成成因的矿物和岩石—沉 积成因的矿物和岩石—变质成因的 矿物和岩石	24.3 岩石圈中的氫同位素.....258
18.7	生物圈中的氧同位素.....228 植物和动物中的氧同位素—光合氧 的同位素組成	24.4 測量地質体年齡的氫法259
18.8	大地氧的原始同位素組成.....230	24.5 測量最上部地圈年齡的氫法261
18.9	氧同位素的旋迴.....231	第二十五章 鉀.....263
18.10	測量溫度的氧法.....232 引論—碳酸盐溫度計—用碳酸盐溫 度計量得的溫度	25.1 鉀同位素.....263
第十九章 氖.....236		25.2 ^{40}K 的放射性.....263
19.1	氖同位素.....236	25.3 ^{40}K 放射性的地質意义.....264
19.2	大气圈中氖的同位素.....236	25.4 ^{40}K 衰变过程中放射生成热产 生的速率.....265
		25.5 自然界中的同位素 ^{40}K267
		25.6 測量示差天文年齡的鉀法267
		25.7 自然界的同位素 ^{39}K 和 ^{41}K268
		第二十六章 鈣.....270
		26.1 鈣同位素.....270
		26.2 自然界的鈣同位素.....271
		26.3 測量地質材料年齡的鈣法271

26·4 放射生成 ^{40}Ca 对于岩石成因问题的可能应用	273	法	291
第二十七章 鈦	274	41·5 測量某些海相沉积物年龄的鈦法	292
27·1 鈦同位素	274	第四十二章 釷	293
27·2 星球中的鈦同位素	274	42·1 釷同位素	293
第二十八章 鈮	275	第四十三章 鈷	293
28·1 鈮同位素	275	43·1 鈷同位素	293
第二十九章 鉻	275	第四十四章 鈳(鈳)	294
29·1 鉻同位素	275	44·1 鈳同位素	294
第三十章 鉄	276	第四十五章 鉍	294
30·1 鉄同位素	276	45·1 鉍同位素	294
30·2 自然界的鉄同位素	276	第四十六章 鐳	295
第三十一章 鈷	277	46·1 鐳同位素	295
31·1 鈷同位素	277	46·2 自然界的鐳同位素	295
第三十二章 鎳	278	第四十七章 釷	296
32·1 鎳同位素	278	47·1 釷同位素	296
32·2 自然界中的鎳同位素	278	第四十八章 鈹	296
第三十三章 銅	278	48·1 鈹同位素	296
33·1 銅同位素	278	第四十九章 銀	297
33·2 自然界中的銅同位素	279	49·1 銀同位素	297
第三十四章 鋅	279	第五十章 鋇	297
34·1 鋅同位素	279	50·1 鋇同位素	297
第三十五章 鎳	280	第五十一章 鈳	298
35·1 鎳同位素	280	51·1 鈳同位素	298
第三十六章 鋅	281	第五十二章 錫	300
36·1 鋅同位素	281	52·1 錫同位素	300
36·2 自然界的鋅同位素	281	第五十三章 銻	301
第三十七章 硒	282	53·1 銻同位素	301
37·1 硒同位素	282	第五十四章 碲	301
第三十八章 溴	283	54·1 碲同位素	301
38·1 溴同位素	283	第五十五章 碘	302
第三十九章 氩	283	55·1 碘同位素	302
39·1 氩同位素	283	第五十六章 氙	302
第四十章 鉀	284	56·1 氙同位素	302
40·1 鉀同位素	284	56·2 自然界的氙同位素	303
40·2 自然界的鉀同位素	285	56·3 測量鈾矿物年龄的氙法	305
40·3 ^{87}Rb 衰变过程中放射生成热产生的速率	286	56·4 測量元素年龄的氙法	305
第四十一章 鐳	286	第五十七章 鉍	306
41·1 鐳同位素	286	57·1 鉍同位素	306
41·2 自然界的鐳同位素	286	57·2 ^{137}Cs 假定的天然放射性	306
41·3 測量地質材料年龄的鐳法	287	第五十八章 鋇	308
41·4 測量地質材料年龄的反鐳		58·1 鋇同位素	308
		第五十九章 鐳	308
		59·1 鐳同位素	308

第六十章 銻.....309	法
60·1 銻同位素.....309	75·4 測量放射性矿物年齡的鉛同位素法.....329
第六十一章 鎘.....309	概論—鉛—同位素法的原理—蝕變對於鎘—同位素年齡的影響—最或然的年齡的計算—鉛—同位素法的量程
61·1 鎘同位素.....309	75·5 測量放射性矿物年齡的鎂法.....336
第六十二章 釷.....310	75·6 測量晶質鈾礦年齡的立方體稜法.....337
62·1 釷同位素.....310	75·7 應用於解決某些地質學問題的鉛同位素.....338
第六十三章 鉭.....311	已知的最古老的礦物和岩石的年齡—地質時標的構成—地球的年齡—鉛礦的成因—火成岩的對比
63·1 鉭同位素.....311	75·8 根據鉛同位素比率計算元素的年齡計算.....345
第六十四章 釷.....312	第七十六章 鉍.....346
64·1 釷同位素.....312	76·1 鉍同位素.....346
64·2 自然界中的釷同位素.....313	第七十七章 鈾.....347
64·3 ^{147}Sm 衰變過程中放射生成熱產生的速率.....313	77·1 鈾同位素.....347
第六十五章 釷.....313	第七十八章 鈾.....347
65·1 釷同位素.....313	78·1 鈾同位素.....347
第六十六章 釷.....314	第七十九章 氫.....348
66·1 釷同位素.....314	79·1 氫同位素.....348
第六十七章 鎘.....315	第八十章 鈾.....348
67·1 鎘同位素.....315	80·1 鈾同位素.....348
第六十八章 鉛.....315	第八十一章 鐳.....349
68·1 鉛同位素.....315	81·1 鐳同位素.....349
第六十九章 銻.....316	81·2 測量沉積物年齡的鐳法.....349
69·1 銻同位素.....316	第八十二章 銅.....352
第七十章 鐵.....316	82·1 銅同位素.....352
70·1 鐵同位素.....316	第八十三章 鈷.....353
第七十一章 鉑.....317	83·1 鈷同位素.....353
71·1 鉑同位素.....317	83·2 測量沉積物年齡的鈷法.....353
第七十二章 金.....317	83·3 鈷衰變過程中放射生成熱產生的速率.....354
72·1 金同位素.....317	第八十四章 鎳.....354
第七十三章 汞.....318	84·1 鎳同位素.....354
73·1 汞同位素.....318	第八十五章 鈾.....354
73·2 自然界中的汞同位素.....318	85·1 鈾同位素.....354
第七十四章 鉍.....319	85·2 鈾的裂變.....356
74·1 鉍同位素.....319	85·3 測量放射性矿物年齡的鈾同位素法.....358
第七十五章 鉛.....319	
75·1 鉛同位素.....319	
75·2 天然鉛的同位素組成.....320	
概論—普通鉛的同位素組成—放射生成鉛的同位素組成	
75·3 測定放射性矿物年齡的鉛法.....325	
鉛法的原理—使用鉛法的先決條件—RaD法, RaB法, AcB法, ThB法—適用於火成岩中的礦物的鉛	

85·4 用于绝对年龄和示差天文年龄 测量的铀-同位素法	359	第八十八章 鎢	365
85·5 铀的衰变过程中放射生成热 产生的速率	360	88·1 鎢同位素	365
第八十六章 铈	360	第八十九章 鋇	365
86·1 铈同位素	360	89·1 鋇同位素	365
86·2 自然界的铈同位素	361	第九十章 鉛	366
第八十七章 铈	362	90·1 鋇同位素	366
87·1 铈同位素	362	第九十一章 鋇	366
87·2 自然界的铈同位素	363	91·1 鋇同位素	366
		91·2 鋇元素	366
		参考文献	367

原 序

在今天，地質学已經大大地脱离了描述的阶段。地質学的一个精确化的时代已宣告开始。本書是根据在地質学中精确和定量的方向具有重大意义的这个信念而問世的。

在目前許多科学領域里，似乎存在着一种趋向，即进行蒐集和整理大量积累的材料，以作出一个明了和綜合性的概括，作为进一步研究的依据。換句話說，許多科学已經面临这样一个阶段，在这个阶段里，为了查明科学的发展方向以及为了順利地制訂出研究的远景规划，检查和說明一下已經完成了的工作并检查和說明一下这些研究結果的实际意义是什么，这样作显然是有益的。本書是通过对地質学与物理学以及化学方面的近代发展之間比較密切而著有成效的联系当中所获得的一部分材料加以評論，来从事这样一种概括的嘗試。作者曾經設法力求采取不抱成見的态度来运用这些研究成果，至于不少作为討論基础的数据，也只容許根据它作出試探性的結論，随着将来研究的深入，这些結論必然会有所改变和修正。

作者力求使本書充分地具有文献的性質，因此，它帶有研究論文风格特点。当然，这样作会降低这本書的可讀性。有关本書中切要的資料，广泛地分散在物理学、化学、天文学、地質学、地球物理学、地球化学、生物学領域的期刊里，以及分散在本書沒有提到的一些不是专为那一种特殊的科学分支服务的一般性刊物里。所以，势必就不能要求单独一个人的研究組能达到将所有文献完全概括在內的地步。

1953年标志着同位素发现的四十周年。在既往的年代里，同位素地質学方面的研究主要是由物理学家和化学家們作的。我殷切地希望，这本書对于为使同位素研究应用于各种各样的地質学問題方面所提供的許多可能性付諸实现而努力的地質学家們能有所帮助。

卡勒沃·兰卡瑪

1954年7月 赫尔辛基

緒 論

某个時間，有一靜止的重物，在真空中沿鉛直方向而下墜，于未知地点，它开始微微偏斜，何故這偏斜若此，且可能若此。

T. 卢克里求斯·卡魯斯 論自然物体，第二卷。

同位素地質学是由本書作者在1950年确定的“利用元素的稳定同位素和不稳定同位素以及它們在丰度上的变化进行地質現象的研究”的一門科学。这个定义中的地質学是要在极其广泛的意义上理解的，它部分地包含了这样一些研究分支：如地球物理学、地球化学、生物学。从各种不同的天然来源所获得的稳定元素的同位素組成产生变异的可能性，最先是英国 H·V·A. 布立斯可和 T·L·罗宾逊在1925年由于他們根据不同地区采集来的矿物里硼原子量的研究結果而提出来的。

定量質量分析的成就，使地質学家們掌握了一种强有力的工具。在地質問題上利用同位素的第一次建議，早在1932年就开始提出了。那一年，英国的 A·霍尔姆斯建議在岩石成因的研究方面利用鈣同位素組成上的可能变异。1937年和1938年，他試圖用鉛同位素組成上所观察到的变异来追索鉛矿石的成因。随后，1941年在瑞典又有 F. E. 維克曼利用同位素的組成作了自然界碳素旋迴中煤与瀝青的总量的計算。他的方法是以1939年和1941年美国的 A. O. C. 納尔、E. A. 葛尔勃兰逊和 B. E. 墨菲在他們的首創性工作中从各种天然来源获得的关于碳同位素組成方面的数据作为基础的。

已經用两种方法确定了自然界中元素同位素組成方面变异的存在。第一，通过对于从地圈最上部所获得的物質的直接試驗，例如，在氖和碳的場合，从不同的天然来源获得的物質中，显示有这种变异的存在。这是一种“試驗与錯誤”的方法^①。第二，用理論来預測某些元素——例如氧——的天然同位素分馏的存在，这些理論以下列业經肯定的真理为基础，即：某一种給定的元素，其同位素的化学性質是不同的，并且这些同位素在化学反应动力学的性質上也不相同。同位素交換反应与根据理論求出的或者由實驗室实验測得的同位素交換反应的平衡常数，曾被利用来預測許多天然分馏的历程和分馏的程度。

一般說来，天然同位素分馏的分离因数是很小的。关于輕元素的重同位素天然貧乏的这个真理，对下列事实不无关系，这个事实就是：用普通的實驗室方法一般并不能察觉同位素組成上的差异以及輕元素的化学原子量并不产生显然很大的变异。此外，不精确方法的应用会助长人們繼續保持这样一种看法，这就是認為自然界每一种稳定元素的同位素組成是一个常数。

①校者注：“試驗与錯誤”(trial-and-error)的方法，就是試驗一錯誤一再試驗一再錯誤，如此繼續下去，直至成功为止的一种方法。作者的意圖是說，第一种方法并不是以理論为出发点，而是純經驗性的。

近代的工作指明，元素同位素組成的天然变异比以前認為可能的变异要大而且种类广泛得多。可以預計这些变异将会被記載于元素周期表中。同位素組成愈能精密地加以測定，則就愈能察覺实际上比較小的差异。这样会使我們能够观测和了解那怕是很輕微的分離，并从而提供了研究为数与日俱增的地質現象和地質作用的可能性。同时也可以由此而获得关于自然界里物質的无机作用和有机作用的演化过程及其确切性質的新資料。

同位素地質学既研究稳定核类也研究不稳定核类。自从早前发现放射性以来，放射性核类就一直用在地質問題的研究方面。这个研究領域称为放射地質学。原子核物理学和地質学之間的合作，在关于地球的历史、构造、化学成分以及地球的热平衡方面，已經取得成果。当然，两种学科从这种合作当中都得到了益处。不論在實驗室里或者在野外从事研究地球的新奇事物时，地質学家有了听任使用的新的工具和技术，因而也就有能力对自然核現象获得新的理解。原子核物理学家則可以得到用以証实預期的核反应所必需的地質材料和資料。

同位素地質学今天正处在一个不断生长和迅速发展的阶段。这是原子核物理学方面的进展和同位素研究的新工具发展的結果。但是，在同位素地質学的許多方面，还极需要更多的数据。

本書分为两部分。第一部分試图为地質学的讀者們提供关于核类的物理学和化学的材料，以及闡明同位素地質学中所采用的主要的研究方法。

第二部分討論核类的自然科学，也就是核类在自然界里的产况。这部分是数据的汇集以及对于这些数据进行解释的一次嘗試。

第一部分 核类的物理学和化学

第一章 原子、原子核和核类

1.1 原子的构造

1911年，英国物理学家 E. 卢瑟福设计了一种原子核的模型，按照这一种模型，每个原子乃由带正电荷并且几乎包含原子全部质量的一个小的核 (nucleus) 构成，这个核又被一些带负电荷的电子所包围。现在认为，核是由质子和中子组成的，这些质子和中子合称为核子 (nucleon)。原子的半径大约是 10^{-8} 厘米，至于核的半径大致是 10^{-12} 厘米— 10^{-13} 厘米，电子的半径直到现在还不完全清楚。通常以 2.8×10^{-13} 厘米的长度作为电子的“标准”半径。电子很轻，其质量只有氢原子的 $1/1840$ 。核的电荷是电子电荷 e ($e = 4.8025 \times 10^{-10}$ esu) ① 的一个整倍数 Z ，所以，围绕一个中性原子的核的电子数也必须等于 Z 。 Z 数称为核电荷数或原子序数。

在卢瑟福的模型里，设想电子是绕原子核而旋转的，就象太阳系里的行星绕太阳运行一样。但是，这种模型早已废弃不用了，这是因为它引起了在能量关系方面用经典力学和电动力学无法解释的困难。这些困难促使丹麦物理学家 N·波尔在 1913 年提出了原子构造的量子论列式。根据这个理论，原子只可以在具有固定能量的，并且与围绕核的一定圆形电子轨道相适应的稳定和驻立状态中存在。其后，在 1916 年主要由德国的 A. 索迈斐尔德提出了这个理论的通则。在这个通则中，除圆形轨道外，同时还提出了椭圆形的轨道，而核则被限定在其中的一个焦点上。对于每个原子来说，电子在量子态里呈一种特殊的方式分布着，并在距离核的远近各不相同的地方迴转着。在任何一个距离，只有一定数目的电子才能迴转，因此可以认为电子围绕核形成半径渐增的同心球形层壳。最内部的是 K-层，其后依次为 L-层、M-层、N-层等。

波尔和索迈斐尔德的原子模型，现在已经为另一种新的学说所代替，这就是 1926 年由奥地利物理学家 E. 薛定格所作出的论证，这个理论是以量子力学或波动力学作为基础的。根据波动力学的学说，严格规定的电子轨道应予摺弃，而应该由在原子所占有的空间里的电子的一种概率分布来代替。

看来，原子首先是由带正电荷且基本上拥有原子全部质量的一个小的中心核所组成，其次，还包括围绕核的、并且使整个原子保持电性中和的核外电子或轨道电子的一种排列。正因为核和电子比起整个原子来远远小得多，所以，显然在一个原子物质实际体积仅为原子总体积的一小部分（事实上约为原子的 10^{-12} ）。所

① 译者注：esu 指静电单位 (electrostatic unit)。

以，一个原子絕大部分的空间是空着的，这样就很容易被快速移动着的如电子之类的粒子，所貫穿。

假定在核里有同核外排列方面所发现的情况相类似的并且代表不同能态的固定能阶壳层存在，这种能阶壳层就被称为核能阶壳层，它們可以呈稳定的构型或不稳定的构型存在。最低的能阶或者标准的能阶就是基态能阶；可以想象：还有各种受激态的能阶存在，其能量值大于标准态的能阶。核能态的差别为各种核现象提供了一种解释，例如，核同质异能现象（見 1.7）。从一个較高的能阶跃迁到一个較低的核能阶，要释出一大部分的能量，这部分能量是呈波长极短的輻射的形式发射出去的，那就是 γ -射綫（两种射綫）。

1.2 質量 和 能量

一个物体的質量与它的能含量之間存在着相应的关系，这个事实是以德国物理学家A.爱因斯坦所列的質量-能量公式来体现的。

$$E = mc^2, \quad (1.1)$$

在这公式中， E 是能量， m 是質量， C 是光的速度（ 2.998×10^{10} 厘米/秒）。若 m 以克为单位， E 值以尔格表示，則得：

$$E = 8.99 \times 10^{-10} m \text{ 尔格} \quad (1.2)$$

核能是以电子伏来表示的，一个电子伏（ev）是一个单位的带电粒子降低一伏特的势差所需的能量。1电子伏（ev）的值用尔格（erg）表示則为：

$$1 \text{ ev} = 1.603 \times 10^{-12} \text{ 尔格 (erg)}$$

比較大的单位是千电子伏（ $1 \text{ kev} = 10^3 \text{ ev}$ ）和兆电子伏（ $1 \text{ Mev} = 10^6 \text{ ev}$ ）。質量的能当量是：

$$E = 5.61 \times 10^{32} m \text{ ev} = 5.61 \times 10^{29} m \text{ kev} = 5.61 \times 10^{26} m \text{ Mev}. \quad (1.3)$$

在原子量量标上，質量单位是氧原子 ^{16}O 質量的1/16（見1.8）。原子量量标的質量单位用亞佛加德罗数 6.024×10^{23} 来除，得出1質量单位等于 1.66×10^{-24} 克。將該因数代入公式（1.3），得：

$$E = 931 m \text{ Mev} \quad (1.4)$$

式中 m 是物理原子量量标的質量。

1.3 物質的基本粒子

假定一种粒子不是由其他的粒子所組成的，或者不含有別种粒子，我們常常称这种粒子为基本粒子或元質点。据近代物理学的理論，这个定义常常并不見得正确。尽管如此，自从1952年以来，至少已有14种不同的粒子被称为基本粒子，虽然其中有許多种粒子的真正性質还没有完全了解。与核嬗变现象具有固定关系的基本粒子都列在表1.1內。此外，有几种在宇宙輻射里所发现的称为介子的粒子，也許倒是基本粒子。有人曾这样提出过：一个介子場包围着原子核里的核子，而介子是核子間相互作用的能量子的载体，介子的交换使得核內的質子与中子保持在一起。根据介子假說：中子是被許多負介子所包围的質子，这些負介子連續不断地被发出和被重新吸收。在实践方面，介子已經可以用高能粒子和丙种射綫轟击普通核的办

法获得。

表1-1

物質的某些基本粒子

粒 子	符 号	質量, 电子質量	質量, 物理原子量 量标的質量单位	質 量, 克	穩定性	电 荷	蜕变产物
电 子	e^{-1}	1	0.000549	9.10×10^{-28}	穩 定	-	—
正 子	e^{+1}	1	0.000549	9.10×10^{-28}	穩 定	+	—
質 子	$H^1(p)$	1845	1.00738	1.67×10^{-24}	穩 定	+	—
中 子	n^1	1845	1.00894	1.67×10^{-24}	不穩定	0	質子和电子
中微子	η	0	~ 0	$\sim 0(?)$	穩 定	0	—
光 子	$h\nu, \gamma$	0	0	0	穩 定	0	—

光子就是輻射(例如 γ -射綫或丙种-射綫的輻射)的量或量子, 这与一个單純的能量子有关。正子是質量与电子相同且电荷亦相等但符号相反的一种粒子。中微子被假定电荷中性而質量小于电子的一种粒子。光子和正子在放射性蜕变和核嬗变时所起的作用将在第五章和第六章里加以研討。

許多放射性核类发出的甲种粒子就是氦核, 例如, 带双电荷的 ^4He 原子便是。氦核系由两个質子和两个中子組成, 所以甲种粒子虽然很重要但并不是一种基本粒子。甲种粒子的質量为4.00279質量单位, 或 6.64×10^{-24} 克。核現象中另外一种經常出現的粒子就是氘核, 即氘 ^2D 的核, ^2D 是氢的重穩定同位素。氘是由一个質子和一个中子構成的。 ^2D 带有一个正电荷, 按物理原子量量标为准, 其質量是2.01421单位, 或 2.34×10^{-24} 克。

1.4 軌道电子的分布

一个原子的化学性質和許多物理性質是由核外电子或軌道电子所决定的。这些电子呈一些不同的能态分布着, 所謂不同能态即指原子的电子能阶。在标准情况下, 电子占有原子中最低的能阶。这就是基态能阶。如果原子与一个快速移动着的粒子(象在高温火焰里的原子和分子; 放电現象中的原子、分子、离子、电离的分子以及电子; 来自一个放射源的核粒子)碰撞, 那么就有一个或一个以上的最外层电子会移到較高的能阶去。这样, 原子就处在一种受激态。电子回返到它原来的位置。不可避免会产生較高能阶与較低能阶之間的跃迁, 并伴随有元素光譜的发射。有些能阶之間产生跃迁的概率很高, 称为容許跃迁, 而其他出現的概率很小的跃迁, 則称为禁戒跃迁。

如果一个原子所吸收的能量远远超过在光区里产生一条譜綫所需的能量, 則一个或一个以上的电子将会从一个内能阶轉移到一个能量高得多的能阶上去, 或者甚至会从軌道电子系統里碰擲出去。它們的移动会造成一种空缺, 这些空缺立即被来自高能阶的其他电子所填充。过剩的能量就呈元素的X-射綫譜发射出去。

1.5 原子核的构造

一般認為, 核只是由質子 p 和中子 n 即核子所構成的。并且質子和中子是在一个球体里彼此混合的。質子是氢核 H 的單純組份, H 是最簡單的核。一般情况下, 質子的电荷与电子是相等的, 但符号相反。質子的質量大致等于氢原子的質量, 或