

原子能知识丛书



核时钟



原子能知识丛书

核 时 钟

——放射性同位素地质年龄测定

〔美〕亨利·福尔 著

秋 平 译

李耀松 校

原 子 能 出 版 社

核 时 钟

——放射性同位素地质年龄测定

〔美〕亨利·福尔著

秋 平译 李耀松校

原子能出版社出版

(北京2108信箱)

张家口地区印刷厂印刷

(张家口市建国大街8号)

新华书店北京发行所发行·新华书店经售

☆

开本 $787 \times 1092 \frac{1}{32}$ ·印张 $2 \frac{1}{8}$ ·字数 45 千字

1980年10月第一版·1980年10月第一次印刷

印数001—2100 统一书号：15175·239

定价：0.25 元

出版说明

一提到原子能，就要和不可捉摸的放射性联系在一起，一些人往往望而生畏，敬而远之，这说明原子科学领域对于许多人还是陌生的。其实原子能既不可怕，也不神秘，它在我们的生活中正在起着愈来愈大的作用。

为了介绍原子能的基本知识和应用情况，我们有选择地翻译出版美国当代原子能学者和专家编写的原子能知识丛书（Understanding the atom series）。这套丛书取材广泛、内容丰富、语言生动、深入浅出，具有中等文化水平的读者，花一些气力，读懂它是不成问题的。

随着科学技术的急速发展，书中引用的有些材料已经过时，但是这些材料对于理解基本概念还是有价值的。

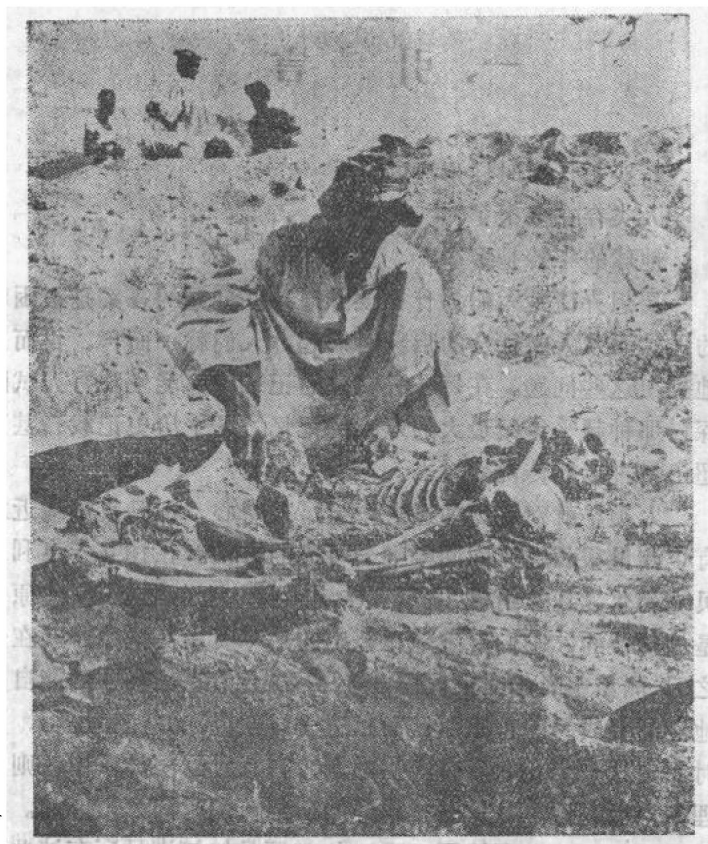
原子能知识丛书

- | | |
|------------|-------------|
| 物质的微观结构 | 放射性同位素和生命过程 |
| 能的直接转换 | 原子能科学研究与动物 |
| 研究用核反应堆 | 辐射对遗传的影响 |
| 核 电 站 | 全身计数器 |
| 核动力与商船 | 放射性同位素在医学上的 |
| 核动力的安全问题 | 应用 |
| 受控核聚变 | 放射性同位素发电 |
| 原子能在农业上的应用 | 核 时 钟 |
| 核燃料史话 | 激 光 |
| 合成超铀元素 | 计 算 机 |
| 钷 | 无损检验 |
| 惰性气体化学 | 辐射保藏食品 |
| 低 温 学 | 核试验的放射性沉降物 |
| 空间辐射 | 放射性废物 |
| 人体与辐射 | 原子，大自然与人类 |

目 录

一、引言	(2)
二、同位素地质年龄测定的理论	(6)
三、碳-14法年龄测定	(11)
1. 基本原理	(11)
2. 碳-14的计数	(14)
3. 应用碳-14法的成果	(19)
四、利用长寿命同位素的年龄测定法	(20)
1. 铷-锶法	(22)
2. 铀裂变径迹法	(26)
3. 铀-铅法	(29)
五、地球的年龄	(29)
1. 怎样测定地球年龄	(31)
2. 分析技术	(33)
(1) 同位素稀释法	(34)
(2) 质谱测定法	(35)
3. 可以测定年龄的矿物	(37)
(1) 钾长石	(37)
(2) 云母	(38)
(3) 低铷长石	(39)
(4) 锆石	(40)
(5) 角闪石	(42)
(6) 透长石	(42)
(7) 全岩样品	(42)

六、一些有趣的结果.....	(43)
1. 奥杜瓦伊古人	(43)
2. 地质年代表	(44)
3. 前寒武纪地层学	(50)
七、展望	(51)
词汇	(52)
附录 放射性衰变	(57)



在苏丹正在挖掘着一座 14000 年前的古墓。为了确定如此古老遗物的年代，考古学家们在寻找能用碳-14法测定年龄的所有木片或木炭屑。用碳-14法测定年龄，是本书所介绍的“核时钟”的一种

一、引言

石头是什么时候形成的？

人类存在多久了？

地球的年龄是多少？

要想弄清楚人们为什么要知道这些问题的答案是很困难的，然而从人类社会的启蒙时期起，人们就一而再、再而三地提出这些问题。在每一种文化的记载中都能发现有人试图探讨那种超乎年纪最大的老人的记忆、超乎历史记载、甚至超出最古老的传说的过去。

人类早就对遥远的过去产生了好奇心，但是直到最近才有了测量很长的时间间隔唯一可靠的方法。在1896年亨利·贝克勒尔发现放射性*之后，1898年居里夫妇确定了某些原子是放射性的，它们自发地以恒定的速率变成其他原子。在这之后，测量很长的时间间隔才有了可能。假设某种东西能自发地逐渐变成另一种东西，而且这一转变以已知速率进行，同时假定这一变化的所有产物都保持在某种封闭体系中，则从理论上说，计算从这一过程开始所经历的时间是可能的。人们早就知道这一理论了，唯一的问题是如何满足所有这些条件。

在1910年以前，科学家就肯定了地球的年龄是非常老

*用黑体字印的名词，在词汇表中有解释。

的。对一些含铀矿物的分析表明，地球的年龄有几亿年，即使这种铀是取自地层中已知的相对年轻的岩石也是如此。但是那时的测量方法还不够准确，并且那时可供这种粗略测定年龄方法用的矿物也很少。只有那些稀有的，一般具有强放射性的矿物，才有足够的放射性衰变*产物供分析之用。

直到第二次世界大战前夕，哈佛大学物理学家A. O. C. 尼尔发明质谱仪之前的大约三十年中，没有取得多大进展。随后，在战争年代里，技术得到了迅速发展。美国制造原子弹的曼哈顿计划**研究了一些新的科学技术。当战争结束后，这些科学技术才可能被用于测定地质年龄。

1946年A. 霍姆斯 (Arthur Holmes) 和 F. G. 霍特曼斯 (Houtermans) 分别在美国和德国做出了第二个重要成就。他们在战前都看过尼尔的报告，并且都认识到尼尔用质谱仪分析铅，使合理地计算地球年龄第一次成为可能。这两位科学家运用他们当时能得到的少量数据，分别独立地计算出地球的年龄约为20—30亿年(见A. 霍姆斯地质年代表)。非常有意义的是，在经过数以千计的分析之后的今天，我们这个行星的年龄被确定为45亿年，与他们早期的计算相差不远。

以后，测定矿物年龄的各种方法得到了迅速发展，到1955年，测定非常古老的物质年龄所必需的许多基础理论研究也完成了。表1列出了测定物质年龄的基本技术，在本书后面将对它们加以阐述。这些新方法对早期粗略的计算提供

* 关于天然放射性衰变，见附录。

** 曼哈顿计划是第二次世界大战期间美国陆军部研制第一颗原子弹的计划。

了大量证据，也带来了一些惊人的成果。

在介绍这些发现之前，让我们先研究一下理论基础。

A. 霍姆斯地质年代表

地质时代	距今时间 (百万年前)	延续时间 (百万年)
更新世		约 1
.....	约 1	
上新世		10
新	11	
中新世		14
生	25	
渐新世		15
代	40	
始新世		20
.....	60	
古新世		10
.....	70 ± 2	
白垩纪		65
中	135 ± 5	
生 侏罗纪		45
代	180 ± 5	
三叠纪		45
.....	225 ± 5	
古 二叠纪		45
生	270 ± 5	
代 石炭纪		80

古	.....	350 ± 10	.....
	泥盆纪		50
生	.....	400 ± 10	.....
	志留纪		40
代	.....	440 ± 10	.....
	奥陶纪		60
	.....	500 ± 15	.....
	寒武纪		100
	.....	600 ± 20	.....
元	震旦纪		
古	:		
代	:		

表1 基本测量方法

方 法	物 质	所测定的时间	适用时间范围 (年)
碳-14法	木料、泥炭、木炭	植物死亡时刻	$10^3 - 5 \times 10^4$
钾-氩法	骨头、贝壳类	动物死亡前不久	$2 \times 10^3 - 3.5 \times 10^4$
	云母, 某些全岩样品	岩石最后冷却至约 300℃ 的时间	$\geq 10^5$
	角闪石、透长石	岩石最后冷却至约 500℃ 的时间	$\geq 10^7$
铷-锶法	云 母	岩石最后冷却至约 300℃ 的时间	$\geq 5 \times 10^6$
	钾 长 石	岩石最后冷却至约 500℃ 的时间	$\geq 5 \times 10^7$
	全 岩 样 品	岩石形成封闭单元 的 时 间	$\geq 10^8$
铀-铅法	锆 石	晶体形成时间	$\geq 2 \times 10^8$
铀裂变径迹法	多种物质	岩石最后冷却时间	$100 - 10^9$ (视物质而定)

二、同位素地质年龄测定的理论

我们可以把原子核想像为由很强的短程力把中子和质子束缚在一起的一种滴状物。原子核中基本粒子的排列不是固定的或刚性的，而是大致在这种力的作用范围内自由运动着。这种运动可能相当剧烈，但对于在自然界中发现的大多数核素来说，核力足以束缚住每个粒子，因此这些原子核能保持不变，称之为稳定性原子核。如果某种同位素的一个原子核是稳定的，则这一同位素的所有其他原子核也都是稳定的，因为对给定核素的一个原子是对的事，则对同一核素的其他原子也都是对的。

然而某些核素是不稳定的，包括人造的和天然的。它们的核子强烈骚动，以致核力不能永远把它们聚集在一起，各种小片和小块会从原子核飞出去。但是，如果我们试图预言一个具体的不稳定原子核什么时候发生这种变化，我们是不成功的，因为任一具体衰变（或变化）事件发生的时间完全是偶然的。只有当大量同类的不稳定原子核在一起时，我们才可以肯定地说，在一限定的时间内这些原子中有多大的比例将发生衰变。并且已经证明，这个比例不受任何外界条件的影响。

原子核自发衰变的特性叫放射性。放射性核以恒定的速率发生衰变，不受温度、压力、化学状态及物理状态的影响。即不管原子所处的外界环境如何，这一过程一直进行

着。换句话说，核内的活动不受围绕原子核旋转的外层电子发生的遭遇的影响（只有在非常特殊的情况下，外界的干扰才能影响核的放射性，即使这时，影响也极为轻微。在所有实际应用中，放射性衰变速率都被视为是恒定的）。

大部分放射性核素的衰变速率都很快（大多数在几天或几年之内就失去它们的放射性）；并且其中大多数，只是由于能用人工方法生产出来，在今天才知道有它们。这些人工放射性核素中，有的可能在太阳系形成的时候存在过，然而由于不停的衰变，现在已衰变到它们起始量的非常微小的部分，以致不能再探测到它们了。只有少数几种放射性核素（表2）的衰变慢得足以延续到今天，所以还存在于自然界中。

表2 天然存在的长寿命放射性核素

母体核素	子体产物	半衰期(年)*	衰变类型
钾-40	氩-40 钙-40	1.26×10^9 (总)	电子俘获 β 衰变
钒-50	钛-50 铬-50	6×10^{15} (总)	电子俘获 β 衰变
铷-87	锶-87	4.7×10^{10}	β 衰变
铟-115	锡-115	5×10^{14}	β 衰变
铈-123	镧-123	1.2×10^{13}	电子俘获
镨-138	钡-138 铈-138	1.2×10^{11} (总)	电子俘获 β 衰变
铀-142	钍-138	5×10^{10}	α 衰变
钍-144	铀-140	2×10^{15}	α 衰变
钷-147	钆-143	1.07×10^{11}	α 衰变
钷-148	钆-144	$> 3 \times 10^{14}$	α 衰变
钷-149	钆-145	$> 10^{15}$	α 衰变

续表

母体核素	子体产物	半衰期(年)*	衰变类型
钷-152	钷-148	1.1×10^{14}	α 衰变
镱-156	钷-152	2×10^{14}	α 衰变
铈-174	镱-170	2.0×10^{15}	α 衰变
镱-176	铈-176	3×10^{10}	β 衰变
铈-187	镱-187	5×10^{10}	β 衰变
钨-190	镱-186	6.1×10^{11}	α 衰变
钨-204	汞-200	1.4×10^{17}	α 衰变
铈-232	钨-208	1.4×10^{10}	$6\alpha + 4\beta^{**}$
铈-235	钨-207	7.1×10^8	$7\alpha + 4\beta$
铈-238	钨-206	4.51×10^9	$8\alpha + 6\beta$

* 本书的半衰期数据已按原子能出版社出版的“核素表”校订。

** 这一衰变过程中共有六个 α 衰变和四个 β 衰变(见附录)。

在某种放射性核素的大量原子核中,在一定时间内将有一定比例的核发生衰变。我们取这一比例为 $1/2$,并测量该半数原子核发生衰变所经过的时间,把这一时间叫做这一特定核素的**半衰期**。测量半衰期有许多精确的物理方法。在一个半衰期的时间内,原子核的半数将发生衰变,在下一个半衰期中,剩余的原子核又有半数将发生衰变,依此类推。我们将这一特性示于下表:

经过的时间 (半衰期数)	剩余的原子核数/起始 的原子核数
1	$1/2$
2	$1/4$

3	1/8
4	1/16
5	1/32
6	1/64
7	1/128
.....	

也就是说，经过七个半衰期之后，起始放射性物质还剩下不到 1%，而其 99% 以上的原子则转变成了其他核素的原子。这种过程可以作为一种钟表（计时器）的基础。实际上它像早先用于计时的砂漏的顶室一样工作着。这一过程的数学表达式为：

$$N = N_0 e^{-\lambda t}$$

式中 N 为 t 时刻体系中存在的放射性原子数；

N_0 为 0 时刻（或者说，当这一计时器开始启动时）体系中存在的放射性原子数；

λ 为单位时间内每个放射性物质原子发生衰变的几率，叫衰变常数；

t 为体系开始存在后所经历的时间，用同一时间单位表示；

e 为自然对数（纳皮尔对数*）的底， $e = 2.718\cdots$

很明显，在一般的计算中，只知道上式中的 N 和 λ ，我们还不能计算出时间 t ，因为式中有两个未知数—— N_0 和 t 。但是在封闭体系中，已经衰变的原子并没有消失在稀 疏

*以自然对数的创造者纳皮尔的名字命名。纳皮尔是苏格兰数学家（1550—1617），他还发明了小数点。

的空气中。它们只不过变成了叫作子体原子的其他原子，并仍保留在这一体系中。

物质中任一时刻都同时存在着母体原子和子体原子。物质的年代越长，子体原子就越多，母体原子就越少。有些子体原子也是放射性的，但是这并不能改变这一基本状况。所以

$$N_0 = N + D$$

式中 D 为子体原子数（即衰变了的母体原子数）。我们可将其代入第一个公式，得：

$$N = (N + D) e^{-\lambda t}$$

解出

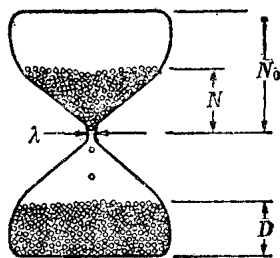
$$t = \frac{1}{\lambda} \cdot \ln (1 + D/N)$$

式中 $\ln$ 是以 e 为底的自然对数。

这种体系可以粗略地用古代流行的砂漏来表示，在图中标出了公式中使用的参数。（但应注意，这仅是大致相似，核时钟以对数衰减速率进行，而一个准确的砂漏却以近似不变的速率工作）。

请记住，衰变了的原子核并没有消失。它只是变成了另一种原子核，这种新核形成能被自然过程捕获和固定下来的原子，已衰变的原子核就这样被收集起来，因而就像我们有了砂漏的底室一样。

但是，有时我们只需要砂漏的顶室。



从砂漏表示理想封闭体系。砂粒只从顶室流向底室，体系中既没有增加任何东西，也没有减少任何东西