

第十五冊

核 子 鐘

譯者：邱秀吉



照片上所顯示的墓地有 14,000 年的歷史，發現於蘇丹的阿斯萬水庫（Aswan Reservoir）。考古學家爲了決定如此古老的遺物，尋找可以用「碳—14」定年的木材或木炭碎片。這種用「碳—14」測量年代的方法，是本書所敘述的「核子鐘」的一種。

# 目 錄

第一章	概述	1
第二章	核子定年方法的理論	5
第三章	碳—14 時鐘	11
	碳—14 的計數	14
	碳—14 的成果	17
第四章	長半化期的時鐘	21
	鉀—鋇時鐘	22
	鈾分裂時鐘	25
	鉛學	28
第五章	地球的年紀	31
	分析的技術	34
	同位素稀釋	35
	質譜儀	36
	可以被定年的礦物	37
	鉀長石	38
	雲 母	38
	鋇含量很低的長石	39

風信子玉	40
角閃石	41
長石	41
整塊的岩石	42
第六章 一些有趣的結果	43
來自奧都瓦 ( Olduvai ) 的古人	43
地質的年代指標	44
前寒武紀的地層學	50
第七章 從此我們將往何處去?	51
第八章 字彙	53
第九章 附錄	59
放射衰變	59

# 核子鐘

原著 Henry Faul

譯述 邱秀吉

## 第一章 概述

這塊岩石幾歲了？

人類幾歲了？

到目前為止，地球幾歲了？

找個理由來解釋爲什麼有人已經確確實實的知道這些問題的答案，似乎很不容易。但自人類社會啓蒙以來，這些問題一再的被提出。每一種文化都記載着人類探究過去——超乎最老的人的記憶、超乎有記載的歷史，與最早的傳說的過去——的努力嘗試。

對遙遠的過去的好奇心可能起自遠古，但直到最近才有測量很長時間的唯一可靠方法。1896年貝克羅（Henri Becquerel）發現放射性（Radioactivity）\* 之後兩年，居禮夫婦（Marie and Pirre Curie）於1898年確認一些具有放射性的原子以規律不變的速率自行變成別種原子的事實後，這種方法的可能性才顯露出來。

假如有一些東西逐漸地自行變成一些其他的東西，又假如這個變化是以一個已知的速率進行，並且假設所有的產物都保留在某一個封閉系統（closed system）中。理論上，我們可以推算此變化作用開始以後經過了多少時間。早在幾年前就已證明出這個理論的明確無疑，唯一的問題是如何才能滿足這些假設。

1910年以前，地球爲極古老的說法已經確立。許多對含鈾礦物的分析結果，都顯示地球的年紀爲幾億年。即使這些鈾是取自地層（Strata）中較年幼的岩石，結果還是不變。可是那時測量還不甚準確，而且這些粗略的方法只能用於分析少數不尋常並含有足夠的放射

衰變 \* ( Radioactive decay ) 的產物的礦物的年紀。

從此到二次大戰以前，一位哈佛大學的物理學家叫尼爾 ( Nier ) 的完成了質譜儀 ( Mass spectrometer ) 的三十年間，進步不多。此後是戰爭時期，技術跟着很快的進步起來。曼哈頓計劃 ( Manhattan Project ) 製造出結束這次戰爭的原子彈，它也發展了一種新的科學技術，當和平再來之時可用來測量地質年代。

第二個重要進步，於 1946 年由霍姆茲 ( Arthur Holmes ) 在英國與豪特曼斯 ( F.G. Houtermans ) 在德國提出。這二位科學家在戰前都看過尼爾的報告，而且首次理解尼爾的用質譜儀分析鉛，使合理的計算地球年紀變成可能。在無相互影響的情形下，他們各用自己很少的有用數據，各自計算得地球的年紀約為二十至三十億年。( 霍姆茲的年代指標在第二頁 ) 這件事很有趣，因為以後的數以千計的分析都指出今日地球的年紀為四十五億年，和他們早期的估計比較起來，相差並不多。

• 自然放射衰變之過程，請見附錄。

† 第二次世界大戰美國國防的計劃，第一個原子武器由此發展而成。

### 霍姆茲年代指標 ( The Holmes Time-Scale )

年代指標 ( 以百萬年為單位 )

紀	本紀開始距今	持續的時間
更新紀		(大約) 1
.....	(大約) 1	.....
上新紀		10
.....	11	.....
中新紀		14
.....	25	.....
漸新紀		15

.....	40	
始新紀		20
.....	60	.....
古始新紀		10
.....	70±2	.....
上白堊紀 } 下白堊紀 }		65
.....	135±5	.....
上侏羅紀 } 下侏羅紀 }		45
.....	180±5	.....
三疊紀		45
.....	225±5	.....
二疊紀		45
.....	270±5	.....
上石炭紀 } 下石炭紀 }		80
.....	350±10	.....
上泥盆紀 } 下泥盆紀 }		50
.....	400±10	.....
赤留紀		40
.....	440±10	.....
奧陶紀		60
.....	500±15	.....
寒武紀		100
.....	600±20	.....

隨後測量礦物年紀的種種方法很快的發展起來，而且到了1955年左右，許多測量年代久遠的物質所需的基本學理都完成了。表一是

這些基本技術的摘要，後面我們再做解釋。這些新的方法廣泛地證實了早年概略的估計，它們也帶來許多令人驚異的結果。

在討論這些發現以前，我們先看看一些理論根據。

表一 基本的測量法

方 法	物 質	所定的時間	可用的時間(年)
碳—14	木，泥炭， 木炭	植物死亡時	1000—50,000
	骨，貝殼	動物死亡之前不久	2000—35,000
鉀—氬	雲母和一些 整塊的岩石	岩石最後冷却至 300°C 時	10,000,000 以上
	角閃石，長 石	岩石最後冷却至 500°C 時	10,000,000 以上
鉀—鋇	雲母	岩石最後冷却至 300°C 時	5,000,000 以上
	鉀長石	岩石最後冷却至 500°C 時	50,000,000 以上
	整塊的岩石	岩石成封閉系統之 時	100,000,000 以上
	風信子玉 ( Zircon )	晶體形成時	200,000,000 以上
鈾—238 分裂	許多	岩石最後冷却之時	100 至 1,000,000,000 (視物質而定)



## 第二章 核子定年方法的理論

我們可以把原子核想像爲一種滴狀物——很强的短程力聚集中子（Neutron）和質子（Proton）而成的小球。這些基本粒子（此處指原子核內的中子和質子）並非嚴格地排成任何一種的固定形體，它們在核力控制下自由運動著。這運動可能相當劇烈，但對自然界中發現的大部分核種（Nuclide）而言，核力的強度足夠束縛住每一個粒子。因此這些原子核能聚集爲一體，而被稱爲穩定的（Stable）原子核。如果一種特定的同位素（Isotope）有一個原子核是穩定的，那麼其他所有的原子核也同樣是穩定的。因爲對於同一特定種類的一個原子核成立的，對同種類的其他原子也成立。

但是在自然的或人造的核種中，有些核種是不穩定的。它們的原子核處在一種劇烈騷動的狀態中，以致核力不能把它們束縛在一起，於是就有種種小片從原子核分裂出來而飛去。但是如果我們企圖預測一個特定的不穩定原子核在什麼時候會分裂，我們將不會成功。因爲何時一個特定的衰變（或分裂）的發生是一種概率事件。只有當許多同種類的不穩定原子核聚集在一起時，我們才能肯定地說，在一定的時間內，其中有多少比例的原子核會衰變。事實上，不論外界情況若何，這個比例都是相同的。

原子核自行衰變的特性，叫做放射性。不論溫度、壓力、化學結合和物理狀態如何，具有放射性的原子核都以一定不變的速率衰變。

不管這原子的遭遇為何，這個作用都在進行着。換句話說，原子核內部的活動不受圍繞原子核的電子（electrons）所遭遇的事物的影響。（只有在非常特殊的情形下，外界的擾動才能影響原子核的放射性，而且這影響非常輕微。在實際應用上，我們都把放射性衰變的速率視為不變。）

大部分具有放射性的原子核的衰變速率很快；在幾天，至多幾年的時間內失去放射性。其中的大部分能在今日被認知，是因為它們可以由人工製造。它們之中，有的可能在太陽系形成的時候就出現了，但它們已經衰變到剩下原有量的微不足道的部分，再也不能被檢查出來。少數具有放射性的核種，衰變速率較慢，以致能存留至今日而呈現於大自然界。我們把這些核種列於表二中。

表二 在地球上仍有可利用的存量的放射性核種\*

母原子 元素	子原子 產物	半化期 (年)	衰變的形式
鉀—40	氫—40	1.3×10 <sup>9</sup> (總共)	電子捕獲 (electron Capture)
釩—50	鈦—50	~6×10 <sup>15</sup> (總共)	β—衰變 電子捕獲
鉀—87	銨—87	4.7×10 <sup>10</sup>	β—衰變
銻—115	錫—115	5×10 <sup>14</sup>	β—衰變
碲—123	銻—123	1.2×10 <sup>8</sup>	電子捕獲
鏷—138	銀—138	1.1×10 <sup>11</sup> (總共)	電子捕獲
鉍—142	銀—138	5×10 <sup>15</sup>	β—衰變 α—衰變

釷—144	鈾—140	$2.4 \times 10^{15}$	$\alpha$ —衰變
釷—147	釷—143	$1.06 \times 10^{11}$	$\alpha$ —衰變
釷—148	釷—144	$1.2 \times 10^{13}$	$\alpha$ —衰變
釷—149	釷—145	$\sim 4 \times 10^{14} ?$	$\alpha$ —衰變
釷—152	釷—148	$1.1 \times 10^{14}$	$\alpha$ —衰變
鐳—156	釷—152	$2 \times 10^{14}$	$\alpha$ —衰變
釷—174	鐳—170	$4.3 \times 10^{15}$	$\alpha$ —衰變
鐳—176	釷—176	$2.2 \times 10^{10}$	$\beta$ —衰變
錒—187	鐳—187	$4 \times 10^{10}$	$\beta$ —衰變
釷—190	鐳—186	$7 \times 10^{11}$	$\alpha$ —衰變
釷—204	汞—200	$1.4 \times 10^{17}$	$\alpha$ —衰變
釷—232	鉛—208	$1.41 \times 10^{10}$	$6\alpha + 4\beta^+$
釷—235	鉛—207	$7.13 \times 10^8$	$7\alpha + 4\beta$
釷—238	鉛—206	$4.51 \times 10^9$	$8\alpha + 6\beta$

\* 取自 David T. Goldman 的 "Chart of the Nuclide" David T. Goldman, Knolls Atomic Power Laboratory, August 1964  
 † 此衰變作用以一系列進行，此系在衰變期間放射 6 個  $\alpha$  粒子和 4 個  $\beta$  粒子。

在同種類的許多放射性原子核中，有一定的部分會在一定的時間內發生衰變。讓我們把這個一定部分取為二分之一，來測量二分之一的原子核發生衰變所需的時間。我們稱它為這個特定的原子核的半化期 (Half-life)，而且我們可以由種種的物理方法把它準確地測出。在一個半化期內，二分之一的原子核將發生衰變；在次一個半化期內，所剩下的原子核的二分之一將衰變；其餘的，可照此類推。我們可以用表說明如下：

經過的時間 (半化期數)	原有量中的剩餘部分
1	$1/2$

2	1 / 4
3	1 / 8
4	1 / 16
5	1 / 32
6	1 / 64
7	1 / 128
...	.....

換言之，經過七個半化期後，只有比物質原有量的 1% 更少的原子仍然有放射性，其餘的 99% 已經轉變成爲其他核種的原子。我們可以利用這種作用作一種時鐘的基石，實際上，它的功用就像是沙漏計時器的頂室一樣。如用數學式表示，則可寫做：

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

此處  $N$  = 現在系統中所存在的，具放射性的原子的數目。

$N_0$  = 在  $t = 0$  (即時鐘開始走時) 所存在的數目。

$e$  = 自然 (或 Napierian\*) 對數的底，(  $e$  的數值等於 2.718 ... )

$\lambda$  (拉 薩 lambda) = 此放射性物質的衰變速，以每個原子在每單位時間內所衰變的原子數表示。

$t$  = 該系統自開始所經過的時間，以相同的時間單位表示。

在平常的計算中，顯然只曉得這些還不够，我們仍然不能把時間計算出來，因爲仍然有二個未知數  $N_0$  和  $t$ 。然而，在封閉系統中，衰變過的原子並不消失進入空氣中。他們只是變成別的原子——叫做子原子 ( Daughter atom )——而留在該系統中。

而且，在任何時刻，該物質的母原子 ( Parent atom ) 和子原子混合在一起。物質的年紀愈大，則子原子愈多，而母原子就愈少了。有些子原子仍然有放射性，但是這並不會改變整個基本狀況。根據上面的推論，我們得到

$$N_0 = N + D$$

此處  $D$  = 子原子 (已衰變的原子) 數。

我們可以將它代入第一式中，得到

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

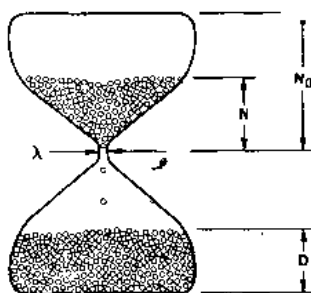
並解出

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

此處  $\ln$  = 自然對數，即以  $e$  為底的對數。

這種系統可以概略地用下圖所示的舊式的沙漏計時器說明。我們在此沙漏計時器上，標記着以上各算式中的參數。(然而有一點必須記住，這不過是一個概略的比喻罷了。核子時鐘走的速率呈指數曲綫變化，而一個好的沙漏計時器的速率幾乎是不變的。)

我們用沙漏器解釋理想的封閉系統。沒有任何東西被加入，也沒有任何東西被移出——沙粒只是從頂室跑進底室的底部。



請各位記住：衰變的原子核並不消失。它只是變為別的原子核，而新的原子核再形成一個可以被自然作用捕獲與固定的原子。衰變過的原子就這樣被收集起來，所以在此處我們有了沙漏計時器的底室。

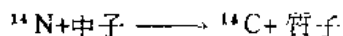
但是有時我們只需要沙漏計時器的頂室。

※用以紀念創始人，蘇格蘭的數學家 John Napier (1550-1617)。  
他也是小數點的發明人。

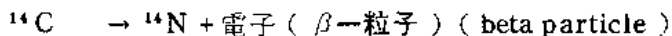


### 第三章 碳—14時鐘

只有頂室的沙漏計時器的最好例子，是碳—14 ( $^{14}\text{C}$ ) 的衰變。在大氣的上層，來自宇宙綫的中子撞擊氮—14 ( $^{14}\text{N}$ ) 的原子，不斷地產生碳—14。這個反應可記為：



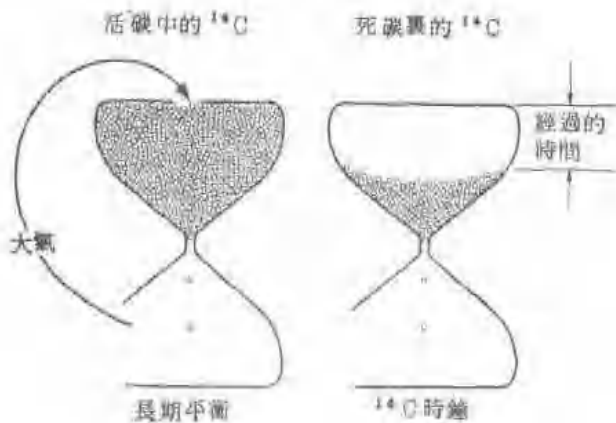
接着碳—14 以 5800 年的半化期衰變：



這個放射性碳放射一個電子，同時變回氮。我們可以說，至少在第一顆原子彈爆炸的 50,000 年前， $^{14}\text{C}$  在地球的上方以一定的速率形成。換句話說， $^{14}\text{C}$  的循環就像一個沙漏計時器，沙粒由上面補充和它從腰部的小孔跑掉是一樣的快。像這種，產生和衰變相等的作用，叫做長期平衡 (Secular equilibrium)。

新產生的  $^{14}\text{C}$  很快地和空氣中的二氧化碳均勻混合，再被活的植物吸收，然後尋着某種途徑進入活的動物體內。實際上，在活的器官內的所有碳，所含的  $^{14}\text{C}$  的比例都一定。如果任何一個碳從循環中被取出——例如當一條樹枝被折斷了，或一個蜆死在海裏——不再有新的  $^{14}\text{C}$  加入此特別的系統中，而老的  $^{14}\text{C}$  繼續耗損。結果，它就像一個沙漏計時器地開始計時了。

例如，我們在某個洞中檢到一塊木炭，或在某一個古代建築物中發現一個木片。我們能測量其中所含的碳，並確定其中有多少  $^{14}\text{C}$ ，然後推算在何時這些  $^{14}\text{C}$  的放射性與今日活着的樹木的  $^{14}\text{C}$  的放射性相等。換句話說，如果我們假定，我們從觀察長期平衡，知道某種活



要說明長期平衡，我們得假想一個沙漏計時器。在頂室，沙粒不斷地被補充——與沙粒從腰部的小孔跑掉而消失的速率一樣快。

的物質原來有若干的  $^{14}\text{C}$ ，我們就能計算任何一個與它相同的古代物質死亡的年代。這就是  $^{14}\text{C}$  法定年的基本原理。



印在美國亞利桑那(Arizona)州那瓦的(Navajo)峽谷岩石上的恐龍的足跡，引起這位科學家的職業上的興趣。過去一段很長的時期，已絕種的史前生物的化石遺跡，是探測岩石形成的年代的最好線索。





一科學家用液態氮凝固二氧化碳氣體。此二氧化碳係由年代古老的物質製得。他正在準備用碳—14的技術斷定該物質的年紀。

譬如，我們可以分析一小塊取自史前時代絕壁上的住宅的椽，或得自古代爐火的木炭殘層的 $^{14}\text{C}$ 的剩餘含量，斷定其年代，而且準確到只有幾百年的誤差。這就確定了這塊用作椽的木材或柴薪從活的樹上折斷或被砍下來的時間，因此我們也確定了使用此木材的人生存的時間。



最常被利用於「碳—14法」定年的試樣是木炭、木材與貝殼。