

放射性同位素

W. J. 华脱霍斯 著
[英] J. L. 布特門

科学技術出版社

放射性同位素

W. J. 华脱斯
[英] J. L. 布特門 著

湯 良 知 譯

科学技術出版社

內 容 提 要

本書總結了各方面的實際經驗，從實用出發，對放射性同位素的制備、探測和應用作了扼要的介紹。分析了各種制備方法和其優缺點，闡明了各種探測方法和探測用儀器的設計、構造和用法，扼要地介紹了放射性同位素在科學研究、工業生產和醫學方面的應用，以及在應用中應予注意的一些措施，對於原子核物理學中的一些基礎理論也作了必要的說明。

本書可作為在各個專業中學習和進行放射性同位素工作者的參考書。

放 射 性 同 位 素

Radioactive Isotopes

原 著 者：〔英國〕W. J. Whitehouse,
J. L. Putman

原出版者：Oxford University Press: 1953

譯 者：湯 良 知

*

科學技術出版社出版

（上海南京西路2004號）

上海市書刊出版業營業許可證出 079 號

上海中華印刷廠印刷 新華書店上海發行所總經售

*

統一書號：13119·150

開本 850×1168 1/32 · 印張 13 7/16 · 字數 332,000

1958年7月第1版

1958年7月第1次印刷 · 印數 1—2,000

定價：(10) 2.20 元

54,293

2

KG29/04

(KG29/38)

目 录

緒 論	1
-----------	---

1. 原子核的性質

第一章 应用于制备人工放射性同位素的一些核反应	12
-------------------------------	----

1. 对于最适宜的核反应的选择
2. 复原子核
3. 核反应的分类
4. 核反应的截面
5. 核反应截面随能量所起之变化
6. 截面的实验值
7. 计算放射性同位素产量的公式

第二章 核衰变的方式	26
------------------	----

1. 引言
2. 中子发射
3. α -衰变
4. 计算带电粒子从核中逸出的几率的方程式
5. 势垒对核反应的影响
6. β -衰变
7. 同质异能转换
8. 裂变

第三章 辐射的性質	56
-----------------	----

1. 总論
2. α -粒子
3. β -粒子和正电子
4. γ -射线和 x-射线
5. 裂变

第四章 放射性同位素的制备	99
---------------------	----

1. 緒言
2. 鈾反应堆的構造和工作原理
3. 在一个反应堆中的照射情况
4. 利用反应堆制备同位素
5. 回旋加速器
6. 利用回旋加速器制备同位素
7. 能量极高的粒子所引起的反应

第五章 各种粒子的探测	150
-------------------	-----

1. 緒言
2. Geiger 计数器
3. Geiger 计数器的类型
4. 衰变率的相对测定
5. 衰变率的绝对测定
6. 倍加器和闪烁计数器
7. 计数实验的统计学

第六章 辐射的效应	225
-----------------	-----

1. 引言
2. 被吸收的辐射的量
3. 电离室
4. 静电计
5. 用以测定各种粒子所产生的电离量的典型仪器
6. 利用

1102381

7. 射线电离室进行绝对测定和相对测定 7. 利用电离室对
 β -辐射作绝对测定 8. 辐射的总电荷量的测定 9. 卡计
 10. 化学的辐射剂量学

第七章 放射性同位素的应用276

1. 一般应用方法 2. 放射性同位素的示踪应用 3. 放射性标记物 4. 利用完全物理性混合的示踪实验 5. 利用原子的化学性质一致性的示踪实验 6. 利用放射性同位素作为致电离剂 7. 应用同位素辐射的吸收和散射原理 8. 应用放射性同位素的衰变率来测定时间, 断定考古学标本的年代 9. 激活分析

第八章 放射性物质的操作348

1. 引言 2. 沾染 3. 电离辐射对人体的一般效应 4. 各种曝射所引起的效应 5. 安全耐受剂量 6. 用以探索和测量辐射的仪器 7. 放射性实验室中安全操作的一些建议 8. 防御物 9. 放射源的安全操作 10. 放射性废物的处理 11. 放射性物质的运输 12. 总结

附录 I 物理常数377

附录 II 同位素的质量378

附录 III 元素的热中子俘获截面379

附录 IV 同位素表380

緒 論

1. 原子核的性質

1.1. 組成部分

原子核內的粒子称为核子,核子有二种,質子和中子。質子的質量为 1.00757 原子質量單位(1.672×10^{-24} 克),帶有与电子的电量相等的(4.8021×10^{-10} 靜电單位)一个正电荷。中子的質量为 1.00893 原子質量單位,不帶电。

每种原子核含有一定数目的質子和中子。最輕的原子核即質子和中子(質子系氫原子的核)。自然界中最重的原子核是鈾-238,有 92 个質子和 146 个中子。

原子序数(Z)等于原子核中的質子数,亦代表核內的电量 Ze 。通常,凡是原子序数(Z)相同的原子核的周圍,就有相同数目的(Z)核外电子,因而形成化学性質相同的原子。反之,在任何一种化学元素的所有原子核中,質子数(Z)必須相等,但是其中的中子数却并不一定需要相同。因此,在化学性質相同的原子之間,就可以有几种不同的原子核或者**同位素**。

中子数(N)指原子核中的中子数目。

中子数相同,質子数不等的原子核称为**等中子素**。

質量数(A)是核中粒子的总数($A = Z + N$)。質子和中子的質量都大致等于一个原子質量單位。所以,質量数亦近乎等于以原子質量單位为單位的原子核的实际質量。于 §1.2 中将会述及,一个原子核的質量并不正好等于其中各个核子的質量之和;不过,这

个差別是相当微小的。

原子核的符号是从原子的化学符号衍化而来的。原子序数写在符号的左下角,質量数則放在右上角。因此,三个氢的同位素就是 ${}_1\text{H}^1$ 、 ${}_1\text{H}^2$ 、 ${}_1\text{H}^3$, 鈾的三个天然放射性同位素为 ${}_{92}\text{U}^{238}$ 、 ${}_{92}\text{U}^{235}$ 、 ${}_{92}\text{U}^{234}$ 。有时,原子序数是不写出的,因为根据原子符号,就可知道原子序数。有些原子核的 A 值相同,但 Z 和 N 則不同,这些元素就叫**同量素**,其中有許多是成对的穩定同量素,如 ${}_{22}\text{Ti}^{50}$ 、 ${}_{24}\text{Cr}^{50}$; 以及某些三联的穩定同量素,如 ${}_{40}\text{Zr}^{96}$ 、 ${}_{42}\text{Mo}^{96}$ 、 ${}_{44}\text{Ru}^{96}$ 。同样的,也有許多放射性同量素。

同位数 (I) 系指中子和質子之間的差数($I = N - Z$)。最輕的穩定原子核的同位数很小,等于 0 或 1; 同位数随質量数而增加,直至最重的原子核,其同位数可达 50 (§1.3.)。

原子核的精确質量: 大多数原子核的精确質量可以用質譜仪測得非常正确。对多数輕的和中等原子核,其誤差仅及 $1/10^5$, 但对較重的原子核,其精确性却要差得多。

原子的質量約等于質量数,但是二者之間的差別要比实验誤差大。例如: C^{12} 的質量为 12.00382 ± 0.00004 。在下节中即將指出,根据原子核的确实質量,即能算出原子核的結合能。

原子核的大小: 目前有許多不同的方法可以測定原子核的大小,这些方法可在原子核物理学書籍中找到[5—11]。各种方法的所得結果大致相同; 即,原子核系近乎球形,如 A 值是一个相当大的数值,其半徑 $R = 1.5 \times 10^{-13} A^{\frac{1}{3}}$ 厘米。这一关系式說明原子核的体积与 A 成正比,后者为核中的核子数。这点暗示原子核可被認為是許多球形粒子的聚集,每一粒子占据相同的体积,互相之間由强大的核力所束縛。

液滴模型: Bohr 和 Kalckar 二氏所假設的一个液滴模型,認為原子核与一小滴液体的結構相仿,核中的核子則好比是液体中的分子。并且,与一滴液体中的分子一样,核中的核子亦不断的

在运动。如果核的总能量增加，譬如在遭受一个快速粒子的轟击后，則核子的平均动能亦会增加。在核子之間进行能量分配所費時間，要比核子之間互相碰撞的平均時間長得多；但是，如要用目前的仪器測量，則这一分配時間的数量級还是嫌短許多倍。然而，即使在这种不可度量的短促的時間中，个别粒子的能量，尚可发生显著的統計学上的波动；因此，就可能使充分的能量集中在一个粒子上，促使后者自原子核中逸出。这一过程亦极酷似一小滴液体的蒸发。

自旋和角动量：若要解釋原子和原子核現象，必需假定每个基本粒子都具有一种內禀的角动量。这种角动量即为該粒子的自旋，以 $\hbar/2\pi$ (常写成 $\hbar$) 为測量單位，其中 $\hbar$ 是普郎克常数。質子、中子和电子的自旋各为半个單位 ($\frac{1}{2}\hbar$)。从一个原子核中发射出的电磁輻射的一个光子，总帶有整数个單位的角动量。

在一个原子核中，各个粒子之間的角动量会自行安排，使含有偶数粒子的原子核的总角动量，总是成为 $\hbar$ 單位的整数倍数。因此，最簡單的偶数原子核的角动量是： H^2 , 1; He^4 , 0; Li^6 , 1。反之，含有奇数粒子的原子核的总角动量，則等于 $\hbar$ 單位的半整数倍数。所以，某些簡單的奇数原子核的角动量是： H^1 , $\frac{1}{2}$; H^3 , $\frac{1}{2}$; Li^7 , $\frac{3}{2}$ 。

1.2. 結合能

假設，我們可以將八个中子和八个氫原子結合成一个氧原子，氫原子中的八个电子可作为氧原子的核外电子，則这个氧原子的質量應該是 $8 \times (1.00893 + 1.00812) = 16.13640$ 原子質量單位。但在事实上，用以作为原子質量計量标准的 O^{16} 原子的質量，恰为 16 个原子質量單位；因此，在原子核的这一假設的合成中，將損失質量 0.1364 原子質量單位。如果在这一过程中所亏损的質量系以能量方式散失，我們便可应用爱因斯坦的公式 $W = mc^2$ 計算这一能量，其中 W 为相当于 m 克質量的能量，以尔格为單位， C 則为

真空中的光速。根据这一公式，一个原子質量單位相当于 931 百万电子伏特的能量，电子的靜質量則相当于 0.51 百万电子伏特。

因此，从理論上合成一个氧原子要亏损 0.1364 原子質量單位，也就表示約有 127 百万电子伏特的能量損失。这一能量，就是將原子核分裂成單獨的核子所需的能量，所以称之为結合能。

根据前例，可以看出，如已知原子核的精确質量，即可算出其結合能。通常，我們可应用下列方程式：

$$\Delta E = 931 [M - Z \cdot M(H^1) - N \cdot M(N^0)],$$

ΔE —以百万电子伏特为單位的結合能，以負量表示。

M —以原子質量單位为單位的原子精确質量。

Z —原子序数。

$M(H^1)$ —氫原子的質量。

N —中子数。

$M(N^0)$ —中子的質量。

結合能随着質量数发生变化的情况，可見图 1，图中表出了 $\Delta E/A$ 对 A 的关系。每一核子的結合能的数值，最初增加得很快，

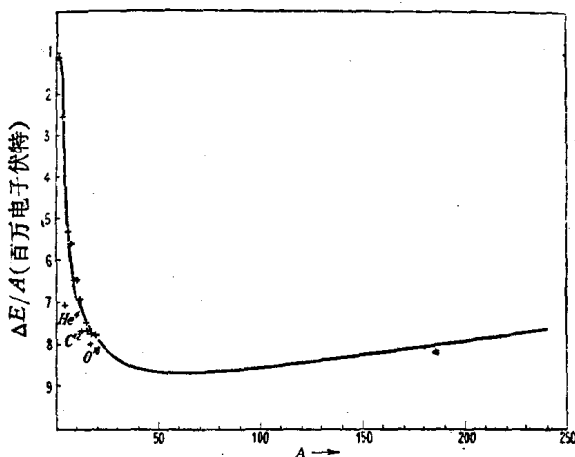


图 1. 每一粒子的結合能，作为質量数的一个函数繪出。曲綫代表平均值，‘+’符号为輕的原子核的实驗值。

但約到質量數 50 以後,就逐步下降。從圖中可以看出, α -粒子或氦核的結合能特別高,它們因此便和其他一些原子序數等於 4 的倍數的輕原子核一起出現在曲線的另一支綫上。

附錄 II 中有一分 Bethe 氏所製備的同位素質量表。表中列有 $A=50$ 以下的原子的質量,其精確性能適合我們計算能量變化的要求。但是,那些較重的原子核質量的實驗誤差就太大,而不能用。必須指出,表中某些原子核的質量是用質譜儀測得的實驗值,但另一些則是根據核反應中能量測定的結果而計算出來的。

1.3. 質子和中子的相對數目

在任何一个穩定原子核中,質子和中子的相對數目,有相當嚴格的規定。這點在圖 2 中表現得非常清楚,圖中以所有穩定核(以

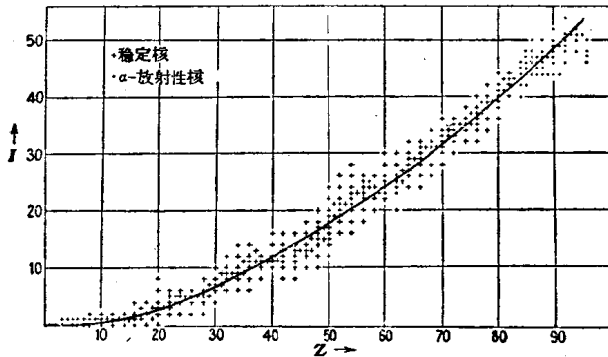


圖 2. 非 β -放射性原子核的同位數對原子序數所繪成的曲線。

十代表)的同位數(I)對原子序數(Z)繪成曲線。 α -放射性核亦放在圖中,但用黑點代表。在一直到氮原子核為止的輕的原子核中,其中的質子和中子數相等,或者最多差一個。在較重的核中,中子數漸超過質子數;直至在最重的核中,同位數約為 50。在較重的原子核中,中子過多的原因是由於帶電質子互斥的緣故。這種靜電斥力會減低原子核的穩定性,如果核的體積較小,則這種斥力更

为强烈。若质子数(Z)相同,则一个 $N > Z$ 的原子核的体积比一个 $N = Z$ 的原子核的体积大; 在前者中的质子, 因为平均相距较远, 相互之间的斥力亦就较弱。在一个稳定核中, 中子和质子的比数,

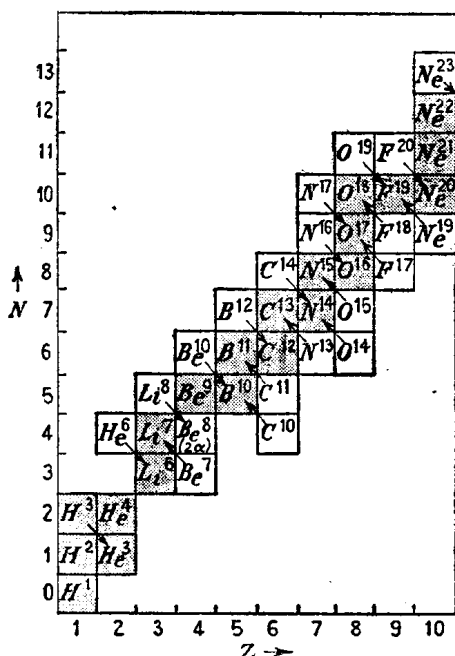


图 3. 轻原子核间的 β -衰变过程。

§1.4 中述及, 并准备于第二章中详细讨论。

1.4. 原子核的稳定性

一个原子核能存在的最低能量状态称为**基态**。自然界中所有稳定原子核都处于此一状态。原子核的能量大于基态时则为处于**受激态**。

任何一种原子核, 不论其是否处于受激态, 如能发射一个粒子, 并且放出能量而衰变为另一原子核, 就都有被激发的倾向。这种原子核, 因有下列原因之一而不稳定:

(1) **发射核子或其他重粒子:** 可以是中子或带电粒子, 例如

是纯粹核力与静电斥力之间相互作用取得平衡的结果, 前者倾向于使二种核子的数目相等, 后者则会促使中子数目过多。

中子和质子的比数过高或过低的任何一种原子核都不稳定。这些不稳定的原子核, 约有 500 种。我们将其中一部分列入图 3, 从图中可看出, 这些核都集中在稳定核的上方或下方(图 3 是用 N 对 Z 绘成的)。它们所产生的辐射类型 (β -衰变), 将于

α -粒子(氦核)、質子等等。有关这些粒子被釋出的情形,將于第二章中述及。

α -粒子是从天然原子核中发射出的惟一的重粒子。絕大多數的 α -放射性核,不論天然的或人工的,其質量数均在 200 以上。这点,与图 1 中結合能曲綫的性質是相符合的。一个 α -粒子的发射,会使 A 减去四个單位, N 和 Z 各减去二个單位,結果使中子和質子的比数几乎沒有变动。

(2) β -衰变: 这一衰变的最簡單形式是从核中发射出一个正的或負的电子。由于原子核中并无电子,因此祇能假定电子是在发射之际,由一个中子轉变为一个質子,或者由一个質子轉变为一个中子而产生的。

β -衰变过程因此使 Z 增加一个單位, N 减少一个單位,質量数則不变。在图 3 中,这点系用自左向右,向下移位表出原子核的衰变。同样的, β^+ -衰变过程使 N 增加一个, Z 减少一个單位,图中以自右向左,向上移位表出这一衰变过程。因此,中子过多而超过稳定比率的原子核要进行 β^- -衰变,放出 β^- -粒子;那些缺少中子的原子核,則会发生 β^+ -衰变。

1.5. 原子核的能級; γ -放射性

我們可以用几种不同的方法促使一个原子核处于受激发态。其中最簡單的就是 γ -射綫

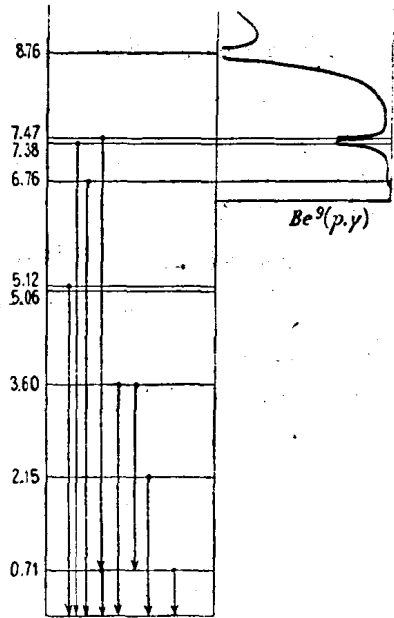


图 4. B^{10} 原子核的某些能級。垂直方向为能量(百万电子伏特), 未确定的能級已被删去。能級之間的轉換, 伴有 γ -射綫发射, 系用垂直的箭头指出。右上方的曲綫指出 B^{10} 的某些能級与形成 B^{10} 的核反应 $Be^9(p, \gamma)$ 曲綫的一些巔值之間相适应的情况。

的吸收。較通常的是，于吸收或激发一个粒子后，原子核就处于激发态。但是，不論激发的方式如何，从量子学說的定律推論，激发能必定是某些分立的数据。

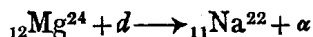
通常，都以能級图解表明这种激发能，图 4 即为这种图解的示例。一般說来，激发能增加則能級之間的距离就减小。如与較重的原子核比較，在輕原子核中，低能級之間的距离較大。

一个被激发的原子核，可由发射 γ -射綫而偿失其能量。图 4 中的垂直箭头便是几組这种 γ -射綫能級的示例。它們的能量等于核的高低能級之間能量的差別，其能量范围是非常狹窄的。原子核的 γ -射綫譜都是綫狀輻射譜。

1.6. 核反应中能量变化的計算方法

任何一个核反应中的能量变化可以很方便的根据質量表算出。原則上，这种方法和 §1.2 中关于計算結合能的方法是相同的。这种計算方法比較重要，故举三例予以闡明：

(1) 用氘核轟击鎂以产生 Na^{22} ，反应式为：



式中 d 代表一个快速氘核或重氫原子核， α 代表一个 α -粒子或氦核。这一反应將于第四章中詳細加以討論。

根据 Bethe 氏質量表，左边的一些原子的質量总和是：

$$23.9925 + 2.0147 = 26.0072 \text{ 原子質量單位。}$$

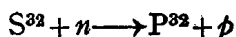
右边的質量总和为：

$$21.9999 + 4.0039 = 26.0038 \text{ 原子質量單位。}$$

因此，在这一反应过程中，总的質量亏损为 0.0034 原子質量單位，約相当于 3 个百万电子伏特。从这一方程式中可以看出有能量过剩情况，因此这种反应亦称**放热反应**。这些过剩能量，則以反应产物的动能或以产物原子核的激发能方式釋出。当然，引起这一反应的氘核必須被加至高速，才能进入原子核的靜电場，其能

量則被轉遞給反应的产物。

(2) 用中子轟击硫以产生 P^{32} , 反应式为:



n 代表一个中子, p 代表一个質子。

利用与上例相同的方法, 將原子質量相加, 得出右边的質量超过左边的 0.001 原子質量單位, 相当于 0.9 百万电子伏特。因此, 就必须供給这么許多能量, 才能发生这一反应, 所以被称为**收热反应**。这一能量必须由中子以动能方式供給。因此之故, 除非中子能量超过約一个百万电子伏特, 否則就不能产生此反应, 此能量值即为这一中子能量的**閾值**。

(3) **随着中子俘获而发射 γ -射綫**: 当一个原子核俘获一个中子时, 总有能量过剩, 約相当于几个百万电子伏特。这些能量通常即在无法测量的短時間內, 以 γ -射綫方式釋出, 称为**俘获的 γ -射綫**。但是, 我們对所发射之 γ -射綫的数目, 或者在 γ -射綫中过剩能量的分配情况, 实在很少了解。不过, 总的能量是可以根据該元素的几种兄弟同位素的質量計算出来的。例如, C^{12} 俘获一个中子轉变为 C^{13} 。 C^{12} 原子和中子二者質量之和为 $(12.00382 + 1.00893) = 13.01275$ 。 C^{13} 原子的質量 = 13.00751。因此, 相当于 0.00524 原子質量單位的 5 个百万电子伏特的能量, 就以 γ -射綫方式釋出。

在一个核反应中所产生的能量, 常被称为該反应的 Q -值。上述二个示例的 Q -值, 因此各約等于 3 百万电子伏特和 -0.9 百万电子伏特。

在以上一些計算中, 都采用原子的質量而不是原子核的質量。在絕大多数核反应中, 这样做是允許的, 因为在反应前后的电子数是相同的。但在某些反应中, 主要是正电子发射和核外电子俘获过程中(第二章), 就必须將电子的質量計入。

在最初三章中, 我們將对核反应的某些問題, 核衰变的形式,

以及核衰变所产生的辐射进行詳細討論。

参 考 文 献

1. PANETH, F. A., *Radioelements as Indicators*. McGraw-Hill, New York and London, 1928.
2. HEVESY, G., *Radioactive Indicators, their Application in Biochemistry, Animal Physiology and Pathology*. Interscience Publishers, New York and London, 1948.
3. HEVESY G., and PANETH, F. A., *A Manual of Radioactivity*. Oxford, The Clarendon Press, 2nd edn., 1938.
4. *International Bibliography of Nuclear Science*. The United Nations Atomic Energy Commission. Provisional edition, 1948, vol. 2, Part IV: 'Isotopes in Biology and Medicine' Part V: 'Applications of Tracers in Nonbiological Sciences and Technology'.
5. BETHE, H. A., *Elementary Nuclear Theory*. Wiley, New York, and Chapman and Hall, London, 1947.
6. GAMOW, G., and CRITCHFIELD, C. L., *Theory of Atomic Nucleus and Nuclear Energy-sources*. Oxford, The Clarendon Press, 1949.
7. RASETTI, F., *Elements of Nuclear Physics*. Blackie, London and Glasgow, 1937.
8. STRANATHAN, J. D., *The 'Particles' of Modern Physics*. The Blakiston Co., Philadelphia and Toronto, 1942.
9. POLLARD, E., and DAVIDSON, W. L., *Applied Nuclear Physics*. Wiley, New York, 1942.
10. (a) BETHE, H. A., and BACHER, R. F., 'Nuclear physics A. Stationary states of nuclei'. *Rev. Mod. Phys.* 1936, **8**, 82.
(b) — 'Nuclear physics B. Nuclear dynamics, theoretical'. *Ibid.* 1937, **9**, 69.
(c) LIVINGSTON, M. S., and BETHE, H. A., 'Nuclear physics C. Nuclear dynamics, experimental'. *Ibid.* 245.
11. FERMI, E., *Nuclear Physics*. University of Chicago Press, 1950.

第一章

应用于制备人工放射性同位素 的一些核反应

1. 对于最适宜的核反应的选择

用以制备人工放射性物质的核反应，大都纯粹从技术方面着想，选自原子核物理学研究工作中所应用的许多核反应。首先，就偏重于同位素的生产必须是产额高，代价低，同时要求制备的方式不会使同一反应中进行的研究工作受到严重影响。主要的，由于上述这些原因，铀反应堆才所以成为最理想的生产工具。此外，只有那些半衰期超过半小时的同位素，才有实用价值。有一些核反应问题，虽对物理学家来说具有极大的兴趣，但对重要关键在于总产量的同位素制备技术，就无甚紧要了。因此，通常只需粗浅地从某几方面懂得控制核反应的一些定律，就足以看出某一核反应是否有生产价值。

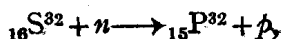
在 Seaborg 和 Perlman 二氏的同位素表的末项中列有非常完备的核反应表 [1] 可资参考。

若要制备任何一种元素的放射性同位素，在这些表中就可找到制备这一同位素的各种不同的方法。此外，并可进一步找出会产生放射性沾染物质的所有副反应。但是，这些同位素表未曾指出这一反应的产额是否足资实际应用，也没有说明那一种制备方法最好。因此，有时就可能需要参考原始文献，才能知道；不过，在绝大多数场合下，我们只需根据最基本的理论，亦可断定某一核反

应是否适宜应用。作者期望通过本章和第四章中充分的资料，可以使不熟悉原子核物理学的读者们，自己能够判断是否值得采用某一核反应以制造某种同位素。

2. 复原子核

所有人为的核反应，都是从原子核俘获一个粒子或 γ -射线开始，而于射出一个或更多的粒子或者 γ -射线后终止。所以，产生重要的 β -放射性同位素 P^{32} 的核反应可以写成：

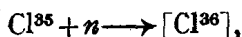


或者，简写成 $S(n, p)P^{32}$ 。

根据 Bohr 氏于 1935 年所创说之复原子核的概念，通常都认为这种核反应的形成须经过三个步骤：(i) 入射粒子被俘，形成复核（本例中则为 S^{33} ）；(ii) 复核的存在期；如以秒计这一时期是非常的短，但如与轰击粒子的能量在核子之间进行分配所需时间比较，就非常的长；(iii) 复核的衰变。上述反应式因之应写成：



如用目前的仪器进行测量，复核的寿命就嫌太短了，仅约 10^{-18} 秒。但是，它的寿命已足以使入射粒子有充分时间将其能量传递给核中的核子，因为这一传递过程所耗时间更短，只 10^{-21} 秒左右。对于大多数的核反应，我们有一定的控制力，可决定希望产生那一种复核，并且可决定由入射粒子传递多少能量给复核。但是，复核如一经形成，那末我们就不能影响它的衰变形式，无法加以控制了。这样就会显著地影响我们对核反应最后产物的控制。兹选择一个在实际工作中相当重要的例子，加以说明。如用中子轰击氯或其化合物，同位素 Cl^{35} 和 Cl^{37} 都会俘获中子。现在，仅就 Cl^{35} 进行讨论。根据反应式：



Cl^{35} 于俘获一个中子后即形成受激态复核 Cl^{36} 。复核一经形成，就