

在农业生物学中放射性指示剂
应用方法上的有关问题

解利舍夫

科学出版社

在農業生物學中放射性指示劑
· 应用方法上的有關問題 ·

C. II. 澤利舍夫 著
張 良 誠 譯

內 容 提 要

本書為蘇聯物理數學科學候補博士、斯大林獎金獲得者 С. П. 澤利舍夫所著。書中論述了有關在農業生物學研究中利用放射性同位素測定方法上的一些基本問題。

作者首先介紹了這方面的工作所必需的關於放射性原子物理的知識，其中涉及同位素、放射性蛻變、輻射的種類、性質和能量等問題；在這些知識的基礎上，介紹了測定放射性的儀器、方法和它們的使用原理、標記材料與供測樣品的準備及實驗數值之修正方法；第三部分討論了如何處理測得數據，以便對實驗結果作出相應的解釋並確定測量的精確度；第四部分討論對放射性指示劑進行工作時的一些造成誤差的原因以及發現和消除誤差來源的方法；最末部分談到進行工作時防止受放射性物質的射線傷害的問題。

書中常列舉一些數據和實例來幫助說明各種問題。對於本書中不擬詳細討論的一些有關問題，作者提供了若干參考文獻。

本書可供生物學和農業科學工作者以及對放射性同位素之實際應用感興趣之其他部門之科學工作者閱讀或參考。

一. 在農業生物學中放射性指示劑 應用方法上的有關問題

Некоторые вопросы методики при-
менения радиоактивных индикато-
ров в агробиологии

原著者	(蘇聯)澤利舍夫(С.П.Целищев)
翻譯者	張 良 誠
出版者	科 學 出 版 社 北京朝陽門大街117號 北京市書刊出版業營業許可證出字第061號
原文出版者	蘇聯農業書籍出版社
印刷者	中國科學院印刷廠
總經售	新 華 書 店

1955年11月第一版 書號:0816 印張:1 3/4
1959年7月第三次印刷 開本:850×1168 1/32
(京)4,811-6,410 字數:43,000

定價:(10) 0.35元

目 錄

一. 放射性原子物理学中的必需知識.....	2
二. 測量放射性的方法.....	15
三. 測量結果的處理.....	37
四. 對放射性指示劑進行工作時的一些誤差來源.....	43
五. 對放射性指示劑進行工作時的安全措施.....	48

近年來，放射性指示劑的方法，在生物學和農業生物學的研究中得到愈來愈多的應用。這一方法是以同一元素的各种同位素具有在實際上完全相同的化學性質為基礎的¹⁾。研究者在所要研究的元素的化合物中引入該元素的放射性同位素之後，就有可能根據其放射性同位素所放出的射線，在試驗的所有階段中去追蹤該元素的移動情況，而毋須求助於化學分析。

放射性同位素方法為農業生物學家提供了廣泛的可能性去觀察植物體內物質的進入、轉移及代謝情況，觀察在土壤中發生的一些過程，觀察植物對“帶有記號”的肥料的利用情況等。很重要的，藉助於放射性同位素，農業生物學家就能研究一些藉助於其他研究方法來進行觀察在原則上不可能研究成功的過程。屬於這方面的有，例如，在不破壞植物的正常生命活動的情況下測量活的生長着的植物體各部中以放射性同位素標着記號的物質的數量的可能性；發現並定量地測定以百萬分之一毫克來計量的極微量的標記物質的可能性等。

鑒於放射性同位素的應用日益擴大地普及到了農業生物學的研究中，農業生物學科學工作者必須，一方面熟悉同位素方法的一般物理基礎，而另一方面要熟悉許多個別問題，這些問題主要屬於測定標有放射性同位素的物質底量的方法方面。方法問題的重要性，決不可以輕視，因為在任一實驗研究領域內要成功地應用放射性同位素，在很大的程度上決定於研究者善於擬訂並應用與進行試驗的特定條件相適應的最合理的測定方法。

在這一論文中，我們討論在農業生物學研究中利用放射性同位素時測定方法上的一些主要問題。

1) 唯一的重要例外是氫的同位素 H^1 、 H^2 、 H^3 ，它們在物理化學性質上彼此有顯著的差異。

一. 放射性原子物理學中的必需知識

放射性同位素的獲得. 核反應 幾乎所有在作為農業生物學研究中的指示劑上有重要意義的放射性同位素都是用人工方法得來的。純元素或某種化合物狀態的原始材料, 在加速設備(迴旋加速器, 同步加速器)或核反應堆中受到快速質點——中子(n)、質子(p)、氦核(d)或 α 質點——的轟擊。快速質點進入靶子材料的原子核中, 引起複雜的中間核的生成, 這中間核在經過極短的間隙後發生進一步的轉變, 這時通常有某種質點發射出來。記載核反應時, 通常首先寫出轟擊的質點(為原先的核所俘獲), 接着寫下生成的中間核在轉入最終狀態時所放出的質點。例如, 原始材料受到中子轟擊而發生並在發生時有電磁輻射以 γ 光子形式放出的核轉變反應, 就以(n, γ)的式子記載下來。也可能有其他的類型, 例如(n, p)、(n, α)、($n, 2n$)、(γ, p)、(d, n)、($\alpha, 2n$)等。

當要完全地記載一定同位素所發生的核反應的式子時, 在表示核反應類型的括弧的左邊寫被轟擊同位素的符號, 而在右邊寫反應產物同位素的符號。中間核通常不表示出來。我們舉出獲得某些在生物學上重要的放射性同位素的核反應的式子作為例子。



核反應生成的同位素, 通常為放射性的, 但是, 也可能形成穩定的同位素, 例如在當中子通過含氫物質時觀察到的下述反應中



在(n, γ), ($n, 2n$), (p, d), (d, t)¹⁾ 這些反應的情況下, 得到的是

1) t —氫的重放射性同位素 H^3 的核氦核的序號。

被轟擊元素的同位素(通常是放射性的);在其他反應的情況下,則產生別的元素同位素的核。

放射性蛻變 放射性的核與穩定的核不同,它甚至在沒有外界作用的情況下,也不能無限長久地保持不變。由於內在的規律性,它們逐漸地發生內部構造上的變化,並從不大穩定的亞穩狀態轉入穩定狀態,同時轉變成為穩定的核。在某些情況下,向穩定狀態的過渡是經由一系列順序的放射性轉變而發生的。例如,天然放射性同位素鈾 ${}_{92}\text{U}^{238}$ 的核轉變為放射性同位素釷 ${}_{90}\text{Th}^{234}$ (UX_1) 的核,後者又轉變為同位素釷 ${}_{91}\text{Pa}^{234}$ (UX_2) 的放射性核等等。這一系列的轉變以穩定同位素鉛 ${}_{82}\text{Pb}^{206}$ 的生成告終。類似的許多轉變也在其他天然放射性元素中發生。

所有在生物學上重要的放射性同位素,都以一步進入穩定狀態為特徵。

每一核轉變——放射性蛻變——均伴隨着有某種輻射放出。這輻射是放射性核用以“向外面世界報告”其內部所進行的變化的信號。

放射性蛻變,就其本性來說,是一統計性過程。任一單個核的蛻變時刻是無法預測的,因為各個放射性核的“壽命”可以在很大的範圍內(理論上從零到無窮大)變化。但是,一定同位素的核的平均壽命却是一完全確定的值,因此在任一不太短促的固定長度的時間內,發生蛻變的核在這一段時間開始時的全部放射性核中所佔的比例是一定的。

蛻變方程式 放射性蛻變的規律可以數學地用下式表示:

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}, \quad (7)$$

這裏 N_0 和 N_t 是放射性原子最初的量和經時間 t 以後的量;

e 是自然對數的底,等於 2.71828……;

λ 是該同位素的蛻變常數,它表徵出核在單位時間內發生轉變的幾率; λ 的數值視所用時間的單位而定。

半衰期 蛻變常數 λ 與半衰期 T ——放射性核最初量中的一半

蛻變掉所需的時間——之間存在着簡單的相互關係：

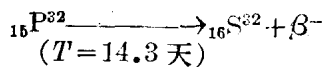
$$T = \frac{0.693}{\lambda} \quad (8)$$

這一相互關係得自方程式(7)，假如我們設 $N_t = \frac{1}{2} N_0$ 和設 $t = T$ 的話。

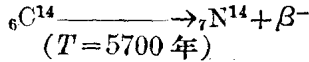
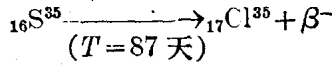
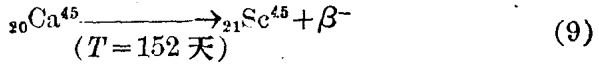
半衰期是放射性同位素的主要特性之一，它在很大的程度上決定着這一同位素被利用於農業生物學實驗的可能性¹⁾。例如，放射性磷 P^{32} ($T = 14.3$ 天) 僅對在一個生長期內進行的試驗完全適用，而放射性鈣 Ca^{45} ($T = 152$ 天)，以及特別是放射性碳 C^{14} ($T = 5700$ 年)，就是在好多年的試驗中都可以成功地被利用。對於農業生物學有特別巨大意義的氮，沒有適於在農業生物學研究中應用的放射性同位素；壽命長的氮的放射性同位素 N^{13} 所具有的半衰期總共只約 10 分鐘；經過 4 小時只剩下最初 N^{13} 原子數量的一千八百萬分之一了。

放射性原子的輻射 放射性同位素所放出的輻射的類型，決定於放射性核轉變時其內部所發生的過程的本性。原子的核只有當參與其組成的中子數和質子數滿足某種對每一元素來說是完全確定的比例(一種或若干種比例)時，才能是穩定的。如果在放射性核中，與“標準額”比較具有過多的中子的話，那麼核就將藉把一個核內中子轉變為質子而轉入穩定狀態；這時放出負的 β 質點 (β^-)，這 β 質點的負電荷與 $n \rightarrow p$ 這一轉變中所產生的正電荷相對消。 β 質點就其本性來說，乃是以極大速度運動着的普通電子，其速度常接近於光速。這一轉變中產生的核屬於原子序數較發生蛻變的放射性同位素的原子序數大一位的同位素。

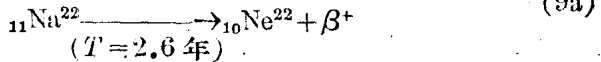
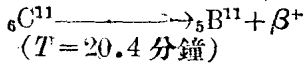
放射性同位素磷 (P^{32})、鈣 (Ca^{45})、硫 (S^{35}) 和碳 (C^{14}) 的蛻變可以作為這種變化的例子：



1) 在 В. М. Калачовский (1953) 的論文中對各種同位素的性質從其是否宜於在農業生物學研究中應用這一觀點作了分析。



当核內質子过多時，那麼向穩定狀態的过渡是藉核內的一個質子轉變為中子並放出正的 β 質點 (β^+)——正子而實現的。这种轉變發生在例如碳 C^{11} 和鈉 Na^{22} 的情況：



在某些具有过多質子的不穩定核中，質子的轉變為中子並不是藉核內拋出正的 β 質點而發生的；而是核俘獲住原子原有的電子殼層中的一個內在電子。这种類型的核轉變稱為 K 俘獲(或 B 俘獲)。 K 俘獲的同時，放出特有的倫琴射線，这射線是因所生成的原子的電子殼層的重組而產生的。

β^+ 蛻變或 K 俘獲結果所形成的核，屬於原子序數比原來同位素的原子序數小一位的元素的同位素。

也有一些放射性同位素，它們能以不同的方法轉變為穩定同位素。例如，銅的放射性同位素 ${}_{29}\text{Cu}^{64}$ ，藉 β^- 蛻變(全部核中的 31%) 轉變為鋅的主要同位素 ${}_{30}\text{Zn}^{64}$ ，而藉 β^+ 蛻變(15%) 或 K 俘獲(54%) 轉變為鎳的同位素 ${}_{28}\text{Ni}^{64}$ 。

某些元素的放射性轉變是由於核的極深刻的改造而發生的，並有核的結構單位—— α 質點放出， α 質點乃是以每秒 10^9 厘米這樣等級的速度从核中飛出的氦原子核。

这种型式的轉變 (α 放射性) 為許多天然放射性同位素和人工鈾後元素所特有的；在輕的人工放射性同位素中， α 放射性是很难得遇到的 (Be^8 和 B^9 有之)。

由於放射性轉變結果所生成的核常變得處於“受激狀態” 它將

多餘的能量(“受激能”)以電磁輻射(γ 光子)的狀態拋出而轉入“正常狀態”。這些情況下產生混合的射線: β^- , γ ; β^+ , γ 或 α , γ 。也可能有其他類型的核轉變,對於它們我們不準備談,因為它們不是在農業生物學研究中應用的放射性同位素所特有的。

所放出的射線的類型和能量,乃是放射性同位素的非常重要的特徵。不論測量原始材料(溶液,肥料)中的放射性、植物組織與土壤中的放射性或經它們改造過的產物中的放射性,測量的方法都完全決定於所用放射性同位素的輻射特性。由於對農業生物學家有重大興趣的放射性同位素大多是 β^- , γ 或 β^+ , γ 輻射體,所以我們只討論這些輻射的性質。

β 輻射 β 射線是由這樣一些放射性核放出來的,這些核藉一個核內中子轉變為質子 ($n \rightarrow p + \beta^-$) (如果核內中子過剩的話) 或相反的轉變 ($p \rightarrow n + \beta^+$) (如果核內質子有多餘的話) 而變為更穩定的狀態。

β^- 質點(電子)和 β^+ 質點(正子)僅在電荷的符號上不同,而在通過物質時,它們與物質的相互作用是相同的。在原子的電子和核的電場的影響之下,它們好多次改變自己運動的方向——發生散射。通常散射是“非彈性的”,散射時 β 質點的能量減小。當與原子的電子相碰時, β 質點會或者將電子從原子中打出(使原子電離)或者將電子送到較高的能量水平上(使原子受激)。因此, β 質點在物質中循着多少有些曲折的路線運動時,在自己後面留下因它而形成的離子偶所組成的“徑跡”。被 β 質點從原子中打出的電子自己又能進行電離作用,並在自己的行徑上造成離子偶。

當與被貫穿物質的原子核相互作用時, β 質點也會丟失自己的一部分能量,把它以核的受激能或所謂障礙輻射(тормозное излучение)的形式發放出來,障礙輻射是當 β 質點在核場中受到嚴重的障礙時放出來的。障礙輻射就其本性和產生的機構來說,是與電子在倫琴管的對陰極(антикатод)遇到障礙時產生的倫琴射線(連續譜)相同的。

如果說 β^- 和 β^+ 質點与物質相互作用的性質大体上是相同的話，那麼它們的最終命運却是完全不一樣的。負的 β 質點在碰撞中損耗了自己的能量以後，就与正離子重行結合起來，或者黏着於中性原子或分子上而形成負的離子。正的 β 質點（正子）在喪失自己的大部分能量後，便移近原子中的一個電子而与它一齊“湮沒”——即消失掉。這時有兩個 γ 光子代替消失掉的電子和正子而產生出來，這些 γ 光子向各個方向飛散開去。

大多數在農業生物学中用的放射性同位素均屬於負 β 質點的輻射体。对農業生物学研究有用的 β^+ 輻射体的數目比較小。（表 1）

β 質點的能量、 β 譜 放射性核在轉變時刻所放出的電子（或正子）的能量，可以有从零一直到某一最大值 E_{max} 之間的任一值，最大值 E_{max} 對於每种放射性同位素是完全確定的。这一最大能量 E_{max} 与放射性核的能量變化是相应的。發生相同轉變的同樣的核所放出的 β 質點會具有不同的能量，其原因在於，与 β 質點同時从核中飛出的尚有一質點——中微子，这中微子帶有一部分能量（其量視飛出的方向而定）¹⁾。因此， β 質點的能譜，亦即就能量而言它們的相对分佈情況，是連續的。

圖 1 所繪是典型的 β 譜。水平軸表能量的值，垂直軸表具有相应能量的 β 質點的相对數目。放射性同位素的表（И. П. Селпнов，

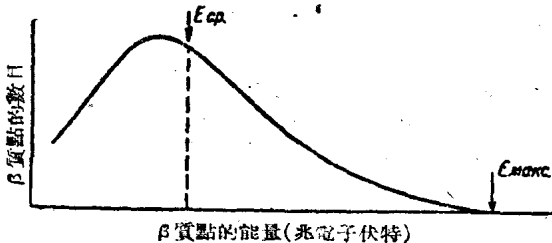


圖 1 β 質點在能量方面的分佈情況（ β 譜）

（譯者註： E_{cp} 表平均能量）

1) 中微子沒有電荷而具有極微小的（可能等於零）的靜止質量。雖然迄今尚未直接觀察到中微子，但間接的試驗肯定地說明了它們的存在。

表1 一些放射性同位素和它們所放出的輻射的物理特性

同位素	半衰期 $T_{1/2}$	轉變型	β 質點的能 量(最大) 反 β (兆電子伏)	γ 射線的能 量 (兆電子伏)	β 質點在物質 中的最大行駛 距離 L_{β} (毫克/厘米 ²)	β 射線的半 值厚度 $D_{1/2}$ (毫克/厘米 ²)	β 射線的有 效吸收係數 μ (厘米 ² /毫克)
H ³	12.46年	β^-	0.018	無 γ	~ 0.25	~ 0.02	—
C ¹⁴	5720年	β^-	0.156	無 γ	0.20	2.7	0.26
Na ²²	2.6年	β^+	0.575	1.30	200	18	0.038
Na ²⁴	15小時	β^-	1.390	1.38; 2.76	600	63	0.011
Mg ³⁸ *	22.1小時	β^-	0.3	譜(?)	65	8.6	0.08
P ³²	14.3天	β^-	1.70	無 γ	780	87	0.008
P ³³ **	24.8天	β^-	0.260	無 γ	60	5.7	0.122
S ³⁵	87.1天	β^-	0.169	γ (?)	21	3.0	0.21
K ⁴⁰ (天然放射性)	1.21×10^3 年	β^- (87.6%) K(12.4%)	1.350	1.54	580	60	0.011
K ⁴²	12.4小時	β^-	2.07(25%) 3.58(75%)	1.4; 2.1	1850	105 400	0.007 0.002
Ca ⁴⁵	152天	β^-	0.260	無 γ	60	5.7	0.122
Mn ⁵⁴	310天	β^- (0.1%) K($\approx 100\%$)	1.0	0.885	400	40	0.017

Fe^{59}	45.5 天	β^-	0.260(50%) 0.460(50%)	1.1, 1.3	140	6.0 13.0	0.117 0.052
Co^{60}	5.3 年	β^-	0.310	1.17; 1.33	80	7.8	0.088
Cu^{64}	12.9 小時	β^+ (31%) β^- (15%) K(54%)	0.571(β^-) 0.657(β^+)	1.35	240	20	0.035
Zn^{65}	250 天	β^+ (2.3%) K(97.7%)	0.32	1.12	75	9.3	0.074
As^{74}	17.5 天	β^- β^+	1.25(β^-) 0.9(β^+)	0.582	480	40	0.017
Rb^{86}	19.5 天	β^-	0.716(20%) 1.820(80%)	1.08	850	~85	0.008
Rb^{87} (天然放射性)	7.46×10^{10} 年	β^-	0.130	0.034; 0.053 等	16	2.0	0.35
Sr^{90}	54.5 天	β^-	1.46	無 γ	660	69	0.010
Mo^{99}	68.3 小時	β^-	1.25	0.24; 0.75	480	58	0.012
Jr^{91}	8.0 天	β^-	0.250(14%) 0.605(86%)	0.08; 0.28. 0.36 譜	220	5.2 19.0	0.134 0.036

* Jones, J.W., Kohman(Phys.Rev.,90,495,1953).

** Jensen et al.(Phys.Rev,85,112,1952).

1951; В. Дзелепов и С. Петровиц, 1950) 中所列出的 β 輻射的能量是指譜的最大能量 $E_{\text{макс}}$, 並且是表徵同位素特性的值。所發放的 β 質點的平均能量, 幾乎對所有放 β 射線的同位素來說都接近等於 $0.4 E_{\text{макс}}$ 。

β 質點的能量 通常如原子物理中所習慣用的那樣, 以特定的單位——電子伏(эв)——來計量。電子伏就是電子在電位差為一伏特的加速電場中前進時所獲的能量; $1 \text{ 電子伏} = 1.6 \times 10^{-12}$ 爾格 $= 3.9 \times 10^{-20}$ 大卡。導出單位有: 千電子伏(кэв) ($1 \text{ 千電子伏} = 10^3$ 電子伏) 和兆電子伏(Мэв 或 Mev) ($1 \text{ 兆電子伏} = 10^6$ 電子伏)。

β 質點的吸收 具有一定方向的 β 質點束(пучка, beam), 當通過物質層時會變弱。這一變弱包括束內質點數目的減少和質點能量的喪失。質點數目減少主要是由於它們的散射。質點在發生大角度的偏傾後, 就離開了質點束而不再會打中記錄器了。在改變方向的同時, 每一質點在通過物質層時, 由於它使被貫穿物質的原子電離和受激, 所以會在某種程度上喪失自己的能量。也有一部分能量在非彈性散射時以障礙輻射的形式丟失掉。某些質點在丟失能量後, 由於質點速度的喪失而“滯留”於吸收物質中。通常把 β 質點束在通過物質時的總的變弱看作質點在物質中被吸收的結果。

在測定 β 質點的吸收時, 散射的作用可以很大; 散射的作用在很大程度上決定於測量的方法和儀器的幾何形勢。為了減小散射的作用, 應該把吸收體放得儘可能接近於測量輻射的儀器。

因為 β 射線吸收的發生主要是由於 β 質點與原子中電子的相互作用, 所以它應當與通過吸收層的 β 射線束所貫穿的物質容積中電子的數目成正比。

對於垂直地進入厚度為 d 厘米的物質層而截面為 1 厘米^2 的束來講, 被貫穿容積等於 $d \text{ 厘米}^3$ 。如果物質的密度為 ρ 克/厘米³, 那麼在 $d \text{ 厘米}^3$ 的容積中電子數目 N_e 將等於

$$N_e = \frac{d\rho Z}{A} 6.02 \times 10^{23}$$

原子序數 Z 与原子量 A 的比, 对大多数元素來講接近於 $\frac{1}{2}$ 。

因此:

$$N_e \approx \text{常數} \cdot d \cdot \rho$$

而在厚度為 d 厘米的物質層中, β 射線的吸收將決定於乘積 d (厘米) $\times \rho$ (克/厘米³), 亦即決定於以克/厘米² (或者更常用毫克/厘米²) 來計量的吸收体“厚度”。

当吸收体的厚度增加到足够大時, 將沒有一個 β 質點能通过它。

与 β 質點的最大行駛距離相当的全吸收之厚度, 決定於 β 譜的最大能底值。對於具有不同能量的電子, 其全吸收厚度的值可藉助於實驗曲線 (圖 2) 來確定。一些同位素的最大行駛距離 R_{\max} 的值提

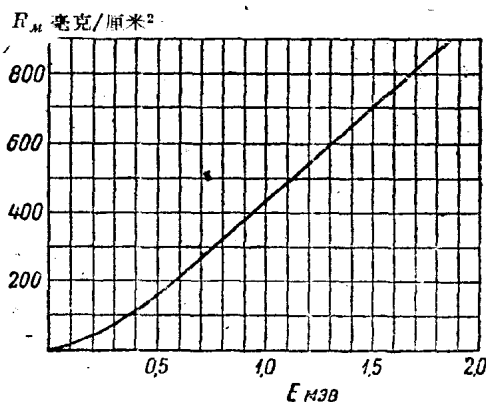


圖 2 β 質點在物質中的最大行駛距離 R_{\max} 對它們的能量的依賴關係

供於表 1 的第 6 縱行內。

β 質點的吸收既与束中質點數目的減少有關又与質點能量的喪失有關这一事实, 說明了測定吸收時所得結果对所用測量方法的依賴性。

用電離法測量得的 β 質點吸收曲線指出, β 質點流的能量底吸收可以近似地用下面这一方程式來表示:

$$I = I_0 e^{-\mu x}, \quad (10)$$

這裏 I_0 和 I 爲 β 質點流在通過厚度爲 X 毫克/厘米² 的吸收物質之前和之後的能量, 而 μ 則爲所研究的放射性同位素的 β 譜底有效質量吸收係數。

有效質量吸收係數 μ 可根據 β 譜的最大能底值用經驗公式來確定 (Gleason, Taylor and Tabern, 1951):

$$\mu = 0.017 \cdot E_{\alpha}^{-1.43}, \quad (11)$$

這公式能給我們以與試驗很附合的值。我們還可以實驗地測定吸收體的層底 $D_{1/2}$ 這一厚度 (以毫克/厘米² 計), 這厚度使 β 質點束的強度降低一半, 並根據這一厚度的值用下面的相互關係去求 μ (以厘米²/毫克爲單位):

$$\mu = \frac{0.693}{D_{1/2}} \quad (12)$$

這式子是直接從方程式 (10) 得來的。一些同位素的 $D_{1/2}$ 和 μ 提供於表 1 中。

在用蓋革計數器 (счётчик Гейгера, Geiger counter) 根據質點的數目來測量 I_0 和 I 時, 吸收曲線與指數律略有偏異。然而就是在那種情況下, 式子 (10) 還是常被看作在實踐上已足夠近似而在吸收之研究中被使用着。

γ 輻射 有 α 或 β 質點放出的放射性蛻變的結果所形成的核, 與其基本狀態相比, 可以具有一些多餘的能量。這種“受激的”核在轉變到其基本狀態時, 以一個或若干個 γ 光子 (波長很短的電磁輻射脈衝) 的形式拋出它所具有的多餘能量。

應用於生物學研究中的一些放射性同位素所放出的 γ 光子的能量處於 0.1 到 3 兆電子伏之間。爲了比較起見, 我們提一提倫琴射線光子能量的值爲 0.01 到 0.2 兆電子伏。 γ 射線由於具有很大的能量, 所以其所能貫穿的物質厚度比倫琴射線所能貫穿的要大得多。

圖 3 中舉了某些在放出 β 質點時有 γ 光子輻射出來的同位素的蛻變圖解。

γ 輻射與物質的相互作用 γ 射線以很複雜的方式與物質相互

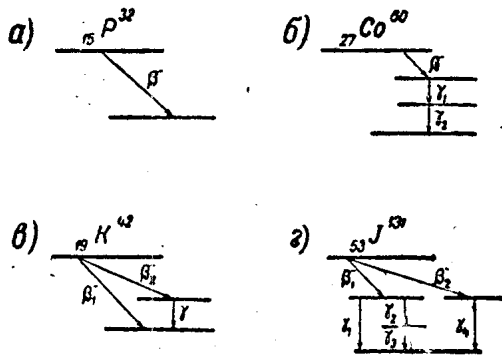


圖3 某些同位素變化的圖解

作用。最重要的相互作用類型為：а) 康普頓散射 (Комптонское рассеяние, Compton scattering); б) 光電吸收; в) 偶 (電子 + 正子) 之產生。

當 γ 光子與任一原子中電子起彈性碰撞時，發生康普頓散射。 γ 光子交出自己的一部分能量 (這部分能量的大小視互撞的幾何形勢而定) 之後，就與其原來的方向成某種角度地散射開去。散射時能量的損失使散射後的 γ 光子波長增加。從 γ 光子那裏得到能量的原子內電子就離開了原子。因此，與 γ 射線的康普頓散射同時，有原子的電離發生。康普頓電子在能量方面具有連續的分佈——從零到 $E_{\text{Комп. макс}}$ ，後者是由 γ 光子的初能 E_γ 所決定的。康普頓散射是中等能量的 γ 射線與輕核及中級核相互作用的主要類型。

γ 射線的光電效應，就其本性來說，與紫外光和可見光的光效應沒有什麼區別。 γ 光子被吸收，而它的能量則完全傳與了原子內的一個電子，這電子帶着能量 $E_{\text{э.}} = E_\gamma - a$ 從原子中逸出，這裏 a 為原子中電子的結合能。如果原子的內層電子之一被打了出來，那麼在光效應之後會發生電子級的補缺，這時有標幟倫琴射線放出。當能量低的 γ 射線在原子序數高的物質中，例如在鉛中被吸收時，光效應起着特別重要的作用。

偶 (或稱電子偶) 之產生，乃是與電子和正子的湮沒相反的過程。