



核技术及其在 农业科学中的应用

陈子元 温贤芳 胡国辉 主编

核技术及其在 农业科学中的应用

陈子元 温贤芳 胡国辉 主编

科学出版社

1983

内 容 简 介

本书系有关农业科学中应用核技术的综合参考书。是由中国农业科学院原子能利用研究所等 14 个单位, 根据多年来在科研、教学、生产上积累的经验, 参考国内外有关资料编写成的。

全书共 15 章, 前 8 章为核技术基础部分, 包括核物理和核化学; 放射性核素测量; 放射性自显影技术; 稳定性核素测量技术; 活化分析技术; 标记化合物的制备; 同位素实验室的设计和管理以及食物中的放射性测量。后 7 章为核技术在农业上的应用部分, 包括同位素示踪法在土壤、肥料、作物营养代谢、农业环境保护、作物育种、植物保护和畜牧兽医等研究方面的应用。书末附录列出了几个有关的数值表。

本书可供从事核技术在农业生物科学中应用的科技人员及有关大专院校师生参考。

核 技 术 及 其 在 农 业 科 学 中 的 应 用

陈子元 温贤芳 胡国辉 主编

责任编辑 马素卿 王爱琳

科 学 出 版 社 出 版

北京朝阳门内大街 137 号

中国科学院印刷厂印刷

新华书店北京发行所发行 各地新华书店经售

*

1983 年 1 月第 一 版 开本: 787×1092 1/16

1983 年 1 月第一次印刷 印张: 42 1/2

印数: 0001—2,340 字数: 993,000

统一书号: 13031·2103

本社书号: 2867·13—12

定 价: 6.50 元

编 著 单 位

(以笔划顺序排列)

广东省测试分析研究所同位素应用研究室

上海化工研究院

中山大学物理系核物理教研室、生物系同位素实验室

中国农业科学院原子能利用研究所

中国科学院上海原子核研究所

中国科学院生物物理研究所

中国科学院南京土壤研究所

四川农学院 101 研究室

北京农业大学同位素教研室

吉林省农业科学院生物物理研究室

南京农学院植保系

浙江农业大学生物物理教研室、原子核农业科学研究所

浙江省农业科学院原子能利用研究所

湖北省农业科学院原子能利用研究所

编 者 的 话

核技术在农业科学研究和农业生产实践中的应用,对推动和促进农业现代化起着积极作用。为了适应我国原子能农学在教学、科研和生产方面发展的需要,我们结合多年来在科研、教学、生产上积累的工作经验并收集国内外有关的参考资料,编写成这本《核技术及其在农业科学中的应用》一书。

本书编写内容着重从我国实际情况出发,介绍我国核技术在农业上应用的新方法和新成就。同时,吸收国外核技术在农业上应用的先进方法和技术。

本书共分十五章,前八章为核技术在农业上应用的基础部分,主要介绍有关基本原理、基本技术和基础知识,包括:核物理和核化学基础;放射性核素测量技术;放射自显影技术;稳定性核素测量技术;活化分析技术;标记化合物的制备;同位素实验室的设计和管理,以及食物中放射性的测量。后七章为核技术在农业科学几个主要领域中的应用部分,包括:同位素示踪法在土壤、肥料、作物营养代谢、农业环境保护、作物育种、植物保护和畜牧兽医等研究方面的应用。在每章中不仅介绍了研究内容、研究方法,并且列举一些国内外有代表性的应用实例和最新应用成果,以供借鉴。

本书在编写过程中得到了有关领导部门的支持和鼓励,许多兄弟单位积极热情地为我们提供参考资料和宝贵意见,使本书内容得到了很大的充实和提高。对此,我们表示衷心的感谢。

参加审稿者(以姓氏笔划顺序排列):王福均、孙锦荷、陈子元、陈少三、陈传群、沈守江、胡国辉、高金方、温贤芳。

由于我们水平有限,经验不多,书中错漏和不妥之处在所难免。恳切希望广大读者予以批评指正。

编 者

1979年9月

目 录

第一章 核物理和核化学基础	1
第一节 同位素	1
第二节 放射性衰变	4
第三节 核辐射与物质的相互作用	13
第四节 原子核反应	19
第五节 同位素化学	23
第二章 放射性核素的测量技术	37
第一节 气体放电计数管	38
第二节 闪烁计数器	45
第三节 半导体探测器	51
第四节 β 放射性核素绝对测量技术	57
第五节 低水平放射性核素测量技术	64
第六节 放射性核素测量数据的误差处理	71
第七节 液体闪烁测量技术——原理和仪器	74
第八节 液体闪烁测量技术——测量方法和猝灭校正	89
第九节 液体闪烁测量技术——闪烁液与样品制备	106
第三章 放射自显影技术	131
第一节 放射自显影技术原理及基本方法	131
第二节 光学显微放射自显影——组织学放射自显影	145
第三节 电子显微镜放射自显影技术	164
第四节 宏观放射自显影	169
第五节 放射自显影技术在农业科学研究中的应用	172
第四章 稳定性核素的测定方法	179
第一节 稳定性核素 ^{15}N 的测定方法	180
第二节 稳定性核素 ^{13}C 的测定方法	197
第三节 稳定性核素 ^{18}O 的测定方法	202
第四节 稳定性核素 ^2H 的测定方法	205
第五节 稳定性核素测定的精密质谱法	207
第六节 稳定性核素测定的直接质谱法	211
第五章 活化分析技术	220
第一节 基本原理和方法	220
第二节 γ 射线能谱仪	243
第三节 γ 射线能谱分析技术	254

第四节	中子活化分析在农业上的应用	270
第五节	荷电粒子活化分析及其在农业上的应用	275
第六节	荷电粒子激发 X 射线分析及其在农业上的应用	288
第六章	农用放射性同位素实验室的设计和管理	307
第一节	放射性同位素实验室的规模和选址	307
第二节	放射性同位素实验室的布置原则和特点	312
第三节	放射性同位素实验室的设备和技术要求	324
第四节	放射性同位素实验室的管理和有关制度	336
第七章	标记化合物的制备和鉴定	340
第一节	概述	340
第二节	^{14}C 、 ^{35}S 和 ^{32}P 农用标记化合物的制备	345
第三节	^3H (T, 氚) 标记化合物的制备	355
第四节	标记化合物的辐射自分解	363
第五节	放射性标记化合物的分析鉴定	371
第六节	氮-15 标记肥料的合成	379
第八章	食物中放射性核素的监测	390
第一节	食物中的天然放射性核素	390
第二节	食物中的人造放射性核素	394
第三节	样品的采集和预处理	397
第四节	样品中放射性的测量	401
第五节	天然放射性核素(铀、钍、镭、钋)的分析测定	408
第六节	人造放射性核素(铯、锶)的分析测定	418
第九章	同位素示踪法在土壤肥料研究中的应用放射性核素的应用	424
第一节	应用 ^{32}P 研究土壤肥料中磷素问题	425
第二节	应用 ^{86}Rb 研究钾肥施用技术	449
第三节	同位素示踪法在微量元素肥料研究中的应用	452
第十章	同位素示踪法在土壤肥料研究中的应用稳定性核素 ^{15}N 的应用	466
第一节	稳定性核素 ^{15}N 在氮肥研究中的应用	466
第二节	稳定性核素 ^{15}N 在土壤氮素转化研究中的应用	484
第十一章	同位素示踪法在作物营养生理研究中的应用	508
第一节	作物营养生理的研究	508
第二节	作物根系发育和根系生理的研究	533
第三节	植物激素作用机制的研究	539
第十二章	同位素示踪法在农业环境保护研究中的应用	553
第一节	同位素示踪法在研究环境化学污染物中的特点和基本程序	553
第二节	农药对生物体的污染及其防治的研究	556
第三节	农药对土壤、水、空气的污染及其防治的研究	572
第四节	工业“三废”对农业环境污染及其防治的研究	589
第五节	可活化示踪法在环境保护研究中的应用	594

第十三章 同位素示踪法在作物育种研究中的应用	598
第一节 应用同位素示踪法研究作物的丰产性, 筛选高产作物.....	598
第二节 应用同位素示踪法研究植物的根系及抗性	604
第三节 在谷物品质育种中应用的同位素示踪法和其它核技术	609
第十四章 同位素示踪法在植物保护研究中的应用	615
第一节 同位素示踪法在植物病理学研究中的应用	615
第二节 同位素示踪法在农业昆虫学研究中的应用	627
第十五章 同位素示踪法在畜牧兽医研究上的应用	638
第一节 机体组织成分的测定	638
第二节 器官疾患的诊断	642
第三节 物质在体内转移与代谢的研究	647
附录	655

第一章 核物理和核化学基础

前言

自从1923年G. Hevesy最先使用天然放射性核素铅(^{212}Pb)研究铅盐在豆科植物内的分布和运转,至今已达五十余年。由于农业生物科学中核技术的应用,大大促进了农业生物科学的发展,现在不仅能够较确切地了解物质在生物体中的运动规律,并且探明了一些用其它方法不能了解的现象。目前核技术已经广泛地应用在农业生物科学中的各个领域。为了在农业科学上更好掌握和运用核技术,必须具备有关核物理与核化学的基础知识。

第一节 同位素

一、原子和原子核

(一) 原子

自然界是由各种各样的物质构成的,尽管各种物质的形态和性质各不相同,但所有这些物质都是原子构成的。

原子的体积很小,它的直径只有 10^{-8} 厘米(1埃)左右。原子的质量也非常轻,一个氢原子的质量只有 1.6733×10^{-24} 克,就是较重的铀原子,其质量亦只有 3.951×10^{-22} 克。原子的质量通常用原子质量单位来表示。现在,国际上规定以 ^{12}C 原子质量的十二分之一作为原子质量单位。用符号 u 表示。经科学实验准确测定

$$1u = 1.660571 \times 10^{-24} \text{ 克}$$

原子是由带正电荷的原子核和带负电荷的电子所组成。图1-1-1表示原子结构示意图。原子核位于原子的中心,直径大约是 $10^{-18} \sim 10^{-13}$ 厘米,其线度比原子大约小一万倍,可见它只占整个原子的极小部分。但是,原子的质量有99.9%以上集中在原子核上,它的密度接近于 10^{14} 克/厘米³。带负电荷的电子位于原子核外,围绕着核在不同的轨道上高速运行。它的质量很轻,仅为 9.1095×10^{-28} 克,只有氢原子的1/1840。一个电子所带的电量为 1.60210×10^{-19} 库仑,通常可用 e 来表示。在各种原子中,每一个原子核所带的正电荷数量与核外绕行电子数目相等。如氢原子只有一个绕行电子,它的核带有 $1e$ 正电荷,碳原子有6个绕行电子,原子核带有 $6e$ 正电荷,亦即原子核所带的正电荷恰好和电子所带负电荷的总量相等,所以,整个原子呈电中性。

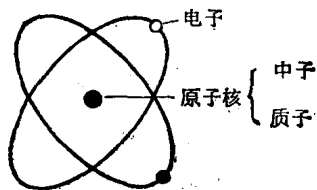
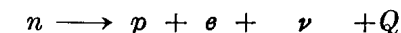


图1-1-1 原子结构示意图

(二) 原子核

现在一般认为原子核基本上是由质子和中子组成的,质子和中子统称为核子。质子

就是氢原子核,带有一单位正电荷,与电子的电量相等,质量为 1.67265×10^{-24} 克。中子是一种带正负电荷相等的电中性粒子,其质量为 1.67495×10^{-24} 克,比质子略重。中子在自然界并不单独存在,只在核反应时被释放出来。当它处于自由状态时是不稳定的,会衰变成一个氢核(即质子)、一个电子和中微子。用式子表示,则为



中子 质子 电子 中微子

式中的 ν 代表中微子,它是一种质量十分微小的中性粒子(它的质量比电子质量的 $\frac{5}{10000}$ 还小); Q 代表衰变过程释放出来的能量。

在原子核内,核子之间的作用,除了质子-质子之间的静电斥力外,尚存在一种很强的力叫做核力。核力的特点是很强而力程(力作用所能达到的空间距离)短。实验证明:对各核子(质子、中子)而言,核力的大小都大致相等。

在原子核中,质子与中子是以一定比率相结合的。原子序数即质子数(Z)与中子数(N)的总数,称为质量数,常以 A 表示,亦即 $A = N + Z$ 。 A 的数值总是用与该元素的原子量最接近的整数来表示。

通常用 ${}_Z^AX$ 或 ${}_Z^AX$ 形式表示某种核素的原子核组成,其中 X 表示原子符号, A 表示质量数(即为核内核子总数), Z 表示原子序数(即为核内质子数)。例如碳-14核素可用 ${}^{14}_6\text{C}$ 或 ${}^{14}\text{C}$ 来表示,又如硫-35核素可用 ${}^{35}_{16}\text{S}$ 或 ${}^{35}\text{S}$ 来表示。

原子核有的稳定,有的不稳定。不稳定的原子核能自发地改变核的结构而转变成另一种原子核,这种现象称为核衰变。在核衰变时,由于总是伴随着放射出带电的或非带电的粒子,所以核衰变亦称放射性衰变,不稳定的核亦称放射性核。例如: ${}^{31}\text{P}$ 原子核是稳定的,但 ${}^{32}\text{P}$ 原子核是不稳定的,它会自发地放射出带电粒子(β 粒子)而转变成另一种新原子核即 ${}^{32}\text{S}$;又如 ${}^{60}\text{Co}$ 原子核亦是不稳定的,它会自发地放出带电粒子(β 粒子)和不带电的粒子(γ 射线)而转变成 ${}^{60}\text{Ni}$ 。 ${}^{32}\text{P}$ 和 ${}^{60}\text{Co}$ 原子核,都称为放射性核。

二、核素和同位素

(一)核素

核素(亦称为核种)是具有特定核特征的某种原子的统称。例如 A 分别为 1, 2, 3, Z 均为 1 的氢(H), 氘(D), 氚(T); A 分别为 31, 32, Z 均为 15 的 ${}^{31}\text{P}$ 、 ${}^{32}\text{P}$ 及 A 为 60, Z 为 27 的 ${}^{60}\text{Co}$ 等,都分别是一种核素。有的核素稳定,称为稳定性核素,例如, ${}^{12}\text{C}$, ${}^{13}\text{C}$, ${}^{31}\text{P}$, ${}^{32}\text{S}$ 等。有的核素不稳定,称为放射性核素。例如, ${}^{14}\text{C}$, ${}^{32}\text{P}$, ${}^{35}\text{S}$, ${}^{235}\text{U}$ 等。

据报道,现在已知的核素共有 1800 种左右(其中 1500 种左右属放射性核素, 300 种左右属稳定性核素),所有核素中的十分之一(170 余种)可供作示踪剂应用,在农业上应用的为 50—60 种。较重要的稳定性和放射性核素的基本性质参见附表。

(二)同位素

凡是 Z 值相同而 A 值不同的一组核素(亦就是属同一元素的一类核素,在元素周期表中占据同一位置),称为该元素的同位素。例如,核素 ${}^{31}\text{P}$ 和核素 ${}^{32}\text{P}$ 都是磷的同位素,

又如核素 ^{11}C 、 ^{12}C 和 ^{14}C 都是碳的同位素。一般每种元素都有一种以上的同位素，多的甚至可达几十种。例如，碳有 11 种同位素，磷有 12 种同位素，硫有 10 种同位素，汞有 29 种同位素。而在一种元素的所有同位素中，有的是放射性的，有的是稳定性的，但亦有的全部是放射性的。例如，碳的 11 种同位素中有 6 种是放射性的 (^9C 、 ^{10}C 、 ^{11}C 、 ^{14}C 、 ^{15}C 、 ^{16}C)，从钋(Po)元素开始，以后的各元素的所有同位素则均为放射性的。

同位素这个术语，过去曾用得不够确切。有时应该用“核素”的场合却往往习惯地用“同位素”。例如，我们常可以听到“在研究中使用了同位素 ^{60}Co 或 ^{32}P ”这类话。确切讲应该为：“在研究中使用了核素(或放射性核素) ^{60}Co 或 ^{32}P ”。或者亦可以这样讲：“在研究中使用了钴的同位素 ^{60}Co 或磷的同位素 ^{32}P ”。因为同位素是相对某元素而言的， ^{31}P 和 ^{32}P 均为磷的同位素， ^{31}P 和 ^{32}P 互为同位素； ^{59}Co 和 ^{60}Co 均为钴的同位素， ^{59}Co 和 ^{60}Co 互为同位素， ^{32}P 和 ^{60}Co 则不互为同位素，而分别是两种核素。由于长期习惯沿用“同位素”这个术语，因此在应该用“核素”的场合下还经常使用“同位素”这个名词，但在今后的使用中将会逐渐区别开来。

通常认为一种元素的同位素在物理、化学和生物学方面的性质是相同的，但具有不同的核物理性质。所以，某元素的任一同位素(不论是放射性的还是稳定性的)及其化合物，与自然界存在的相应元素及其化合物具有基本相同的化学性质和生物学性质，这亦就是我们在医学、生物科学中利用同位素示踪法的依据。其次，自然界所有元素都由一定的同位素构成，只需改变元素原有同位素的组成——或是改变其稳定性同位素的相对比值，或是加入放射性同位素，就可成为该元素的标记化合物，它与正常组成的化合物一样，参加各种化学反应，并保持其示踪的特性，因为标记放射性同位素的辐射特征或稳定性同位素的质量差异，均可利用适当的核子仪器加以测定，这是将同位素示踪法作为重要科学研究手段的基础。但是，实际上，一种元素的各个同位素(放射性同位素或稳定性同位素)，所组成的同一种化合物，它们的性质并不绝对相同。尤其较轻的元素，原子量差异较大，如 ^2H (D) 是 ^1H 的两倍， ^3H (T) 是 ^1H 的三倍，使它们在物理学、化学和生物学的性质上表现出一定的差别。例如氘水(HTO ， T_2O)和普通水的物理和物理化学性质之间表现出一定差异(参见表 1-1-1)。在化学性质上，氘水(T_2O)和其它化合物进行化学反应时，一般比普通水的作用要慢。氘水和 Al_4C_3 的反应速度比普通水的慢二十多倍。又如电解氘水(T_2O)时，氢优先从阴极释放出来，在液相中氘的浓度随电解过程的进行而增加。这种由同位素不同而引起性质上的差异的现象，称为同位素效应。在进行示踪试验时，要注意这种同位素效应。例如，用氢的同位素 ^3H (D) 做示踪实验时， ^3H 与 ^1H 的比例一般不应超过 1:5。因为重水(D_2O)的浓度太高，改变了水的物理常数，因而影响细胞膜的渗透和细胞质粘性。又如， ^{14}C 标记化合物在生物体内的反应速度及其生成物的产率，也往往比相应的非标记化合物为低。

另外，由于放射性核素会放出具有一定能量的射线，如果使用时剂量太高，会对生物

表 1-1-1 普通水和氘水的物理性质差异

物 质	沸 点 $^{\circ}\text{C}$	密 度 g/cm^3	100 $^{\circ}\text{C}$ 时蒸气压(mmHg)
H_2O	100.0	1.0000	760
HTO	100.8	1.1075	738.8
T_2O	101.6	1.2150	718.2

产生辐射效应。然而，在一般的示踪试验中，由于同一种元素的同位素之间在性质上的差异而引起的化学效应或生物学效应都很小，常常在实验误差范围之内。所以，在同位素示踪法中，一般可忽略不计，除非在某些差异显著的情况下，需要考虑这些效应所产生的后果。

除了经常碰到上面所讲的核素和同位素术语外，有时也会遇到下面几个术语：

同量异荷素： A 相同，但 Z 不同的核素。

同中子异荷素： Z 、 A 不同，而 N 相同的核素。

同质异能素： A 、 Z 都相同，只是原子核处于不同能级的核素（不同于化学上的同分异构体）。高能态的常常是放射性的，而较低能态的则可能是稳定性的，也可能是放射性的。

等中子过量素： A 、 Z 、 N 都不相同，但 $N-Z$ 的差（即过量的中子数）相等。

A 、 Z 、 N 三者之间的相互关系，可概括如表 1-1-2。

表 1-1-2 核素的类别和 Z 、 A 、 N 的关系

名 称	Z	A	N	例 子
同位素	同	异	异	$^{31}_{15}\text{P}$, $^{32}_{16}\text{P}$
同量异荷素	异	同	异	$^{32}_{16}\text{P}$, $^{32}_{18}\text{S}$
同中子异荷素	异	异	同	^3_1H , ^3_2He
同质异能素	同	同	同	$^{110m}_{47}\text{Ag}$, $^{110}_{47}\text{Ag}$
等中子过量素	异	异	异	$^{14}_6\text{C}$, $^{16}_7\text{N}$, $^{18}_8\text{O}$

* m 表示处于较高能态的核素与处于低能态的核素的区别。

第二节 放射性衰变

一、衰变类型

放射性核素的核衰变是多种多样的，有 α 衰变、 β 衰变、 β^+ 衰变、电子俘获和 γ 衰变

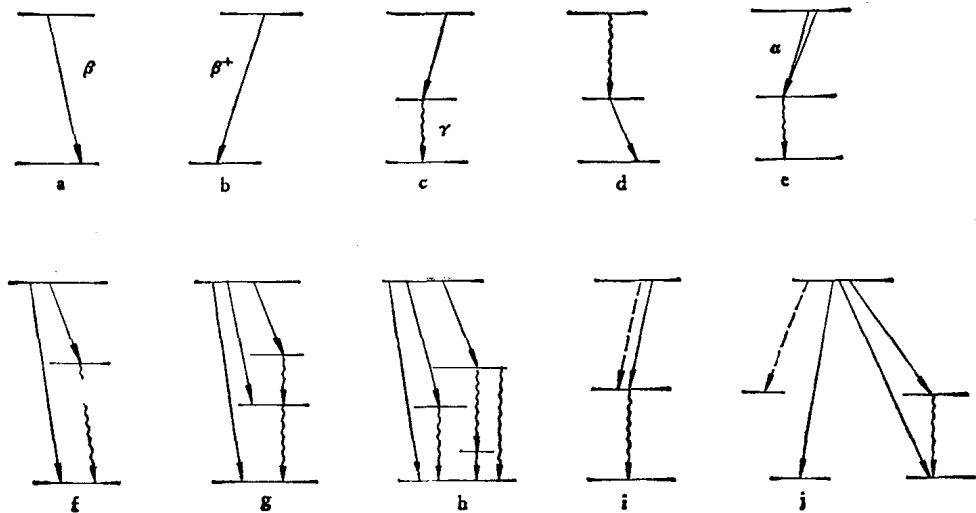


图 1-2-1 放射性核素衰变图型式

等。通常将衰变前的核称为母体核，衰变后产生的核称为子体核。

每种放射性核素的衰变过程和状态，可简明地使用衰变图来表示。图 1-2-1 表示放射性核素的一些典型的衰变图。在衰变图上，上面是母体核素符号，下面是衰变产生的子体核素符号（基态）。横线表示起始和终了的核的能态。向右单线表示 β 衰变；向左单线表示 β^+ 衰变；双线表示 α 衰变；虚线表示电子俘获；垂直线或波浪形线表示 γ 衰变。线旁的数字表示相应为每种辐射的能量（兆电子伏）和百分比（几率）。

将这些衰变图型式归纳一下为

衰变图型 $\left\{ \begin{array}{l} \text{简单的} \left\{ \begin{array}{l} \text{单一: } a, b \\ \text{伴随: } c, d, e \end{array} \right. \\ \text{复杂的} \left\{ \begin{array}{l} \text{分组: } f, g, h \\ \text{分叉: } j, i \end{array} \right. \end{array} \right.$

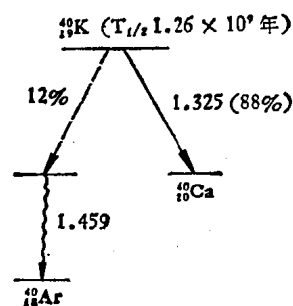


图 1-2-2 ^{40}K 的衰变图

例如：图 1-2-2 为 ^{40}K 的衰变图，表明 ^{40}K 有两种衰变方式。第一种方式是有 88% 的 ^{40}K 放出能量为 1.325 兆电子伏的 β 粒子而衰变成基态的 ^{40}Ca ；第二种方式是有 12% 的 ^{40}K 发生电子俘获，放出能量为 1.459 兆电子伏的 γ 射线，而衰变成基态 ^{40}Ar 。

(一) α 衰变

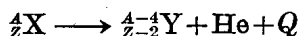
从放射性核素的核里放射出 α 粒子的过程称为 α 衰变。 α 粒子由 2 个质子和 2 个中子组成，带 $2e$ 正电荷，它的质量和氦核相等。所以， α 粒子实际上就是氦原子核。因此，凡发生 α 衰变后产生的子体核，其质量数 A 将比母体核减少 4 单位，核电荷亦即原子序数 Z 降低 2 单位。凡 α 衰变都可用下式表示：



这里的 Q 为衰变能，其值等于母体核质量和子体核及 α 粒子的总质量的差。一般计算都采用核素质量，所以

$$Q = m_Z - (m_{Z-2} + 2m_e + m_\alpha)$$

式中的 m_Z 、 m_{Z-2} 、 m_e 、 m_α 分别表示母体核素原子、子体核素原子、电子及氦核的质量。而 $m_\alpha + 2m_e = m_{\text{He}}$ (为 ^4He 的质量)，所以 $Q = m_Z - (m_{Z-2} + m_{\text{He}})$ 。式 (1-2-1) 用核素质量，则应写成



因为当 Q 为正值时，反应才能向右进行，所以凡是能发生 α 衰变的核素，其原子质量

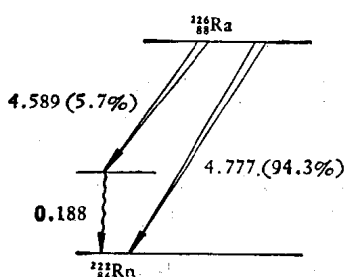


图 1-2-3 ^{226}Ra 的衰变图

一定大于子体核素原子和氦原子的总质量，即 $m_Z > m_{Z-2} + m_{\text{He}}$ 。作 α 衰变的天然放射性核素，其原子序数 Z 绝大部分大于 82，人造放射性核素中作 α 衰变的也大多数是原子序数大于 82 的核素。

由一种核素放射出来的 α 粒子的能量是单一的。但是，伴有 γ 射线的 α 衰变的核素常常放射出不只一种能量的 α 粒子。例如， ^{226}Ra 衰变时 (图 1-2-3)，伴有 γ 射线 ($E_\gamma = 0.188$ 兆电子伏)，它的 α 粒子的能量就有两种，一

种是 4.777 兆电子伏(几率为 94.3%); 另一种是 4.589 兆电子伏(几率为 5.7%)。

(二) β 衰变

1. 定义

从放射性核素的核里放射出快速 β 粒子的过程称为 β 衰变。例如, ^{32}P 放射出 β 粒子的过程。 β 粒子的质量为 9.1091×10^{-28} 克, 并带 $1e$ 的负电荷。所以, β 粒子实际上就是电子。为了与一般电子相区别, 常把从核里放射出的电子称为 β 粒子或 β 射线。

2. β 衰变的条件

从 β 粒子的性质可知, 发生 β 衰变后的子体核质量数 A 和母体核的相同, 而原子序数 Z 将增加 1。所以, β 衰变可用下式表示:



式中 ν : 中微子(质量 m_ν 近似为零); Q : 衰变能, 其值等于母体核质量和子体核及 β 粒子、中微子的总质量差, 用 α 衰变中计算 Q 的同样方法, 可得到 $Q = m_Z - m_{Z+1}$ 。从这个关系可知, 发生 β 衰变的母体核素原子的质量必须大于子体核素原子的质量(即 $m_Z > m_{Z+1}$)。

3. β 粒子的能谱曲线

从式 1-2-2 可以看出, β 衰变有三种生成物: 子体核 ${}_{Z+1}^AY$ 、 β 粒子和中微子 ν , 因此, 衰变时释放出的能量 Q 将由这三种粒子共同带走。由于子体核的质量远远大于 β 粒子和中微子的质量, 所以子体核所带走的能量是微不足道的, 故有:

$$Q = E_Y + E_\beta + E_\nu \simeq E_\beta + E_\nu \quad (1-2-3)$$

式中: E_Y 、 E_β 、 E_ν 分别是子体核、 β 粒子和中微子的动能。由于它们各自的发射方向可以是任意的, 每个粒子所带走的能量就不固定, 所以 E_β 的值可以从 0 到最大值 $E_{\beta\text{最大}}$ (即等于 Q), 这样就形成了一个连续能谱。 E_β 的平均

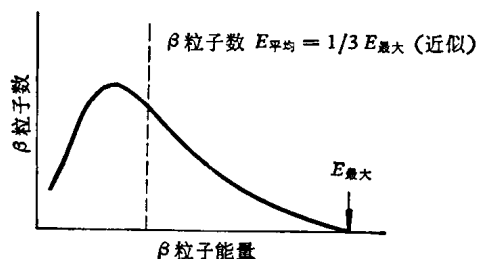


图 1-2-4 典型的 β 能谱曲线示意图

能量 $\bar{E}_\beta$ 约等于 $1/3 E_{\beta\text{最大}}$, 一般图表上所给的 E_β 都是指 $E_{\beta\text{最大}}$ 而言。图 1-2-4 为一般 β 能谱曲线示意图。对于不同的 β 放射性核素放出的 β 射线, 其能谱曲线又略有差异。图 1-2-5 为几种 β 放射性核素的 β 能谱曲线。

4. β 衰变图

许多原子核发生的 β 衰变很简单, 只放射出 β 粒子就转变成一种稳定态(基态)的核素。例如, ^{14}C 、 ^{32}P 、 ^{35}S 等(图 1-2-6)。

但是, 有更多的原子核在放射 β 粒子的同时, 常常伴随放射出 γ 射线。此外, 有些核素的 β 衰变不只有一种衰变方式, 因而放射出的 β 粒子有的只有一组, 如 ^{108}Au ; 有的就有两组或多至四组、五组的 β 粒子, 如 ^{60}Co 、 ^{137}Cs 有两组 β 粒子; ^{131}I 等有四组 β 粒子。它们的衰变图比较复杂(图 1-2-7)。

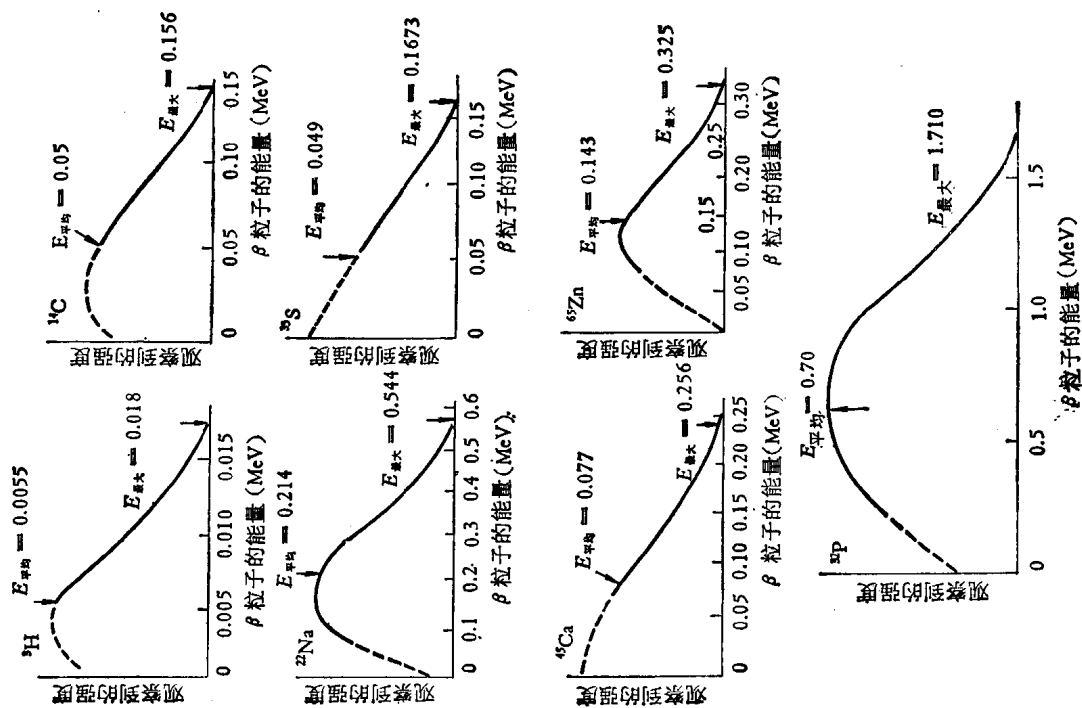


图 1-2-5 几种常用放射性核素的 β 能谱曲线

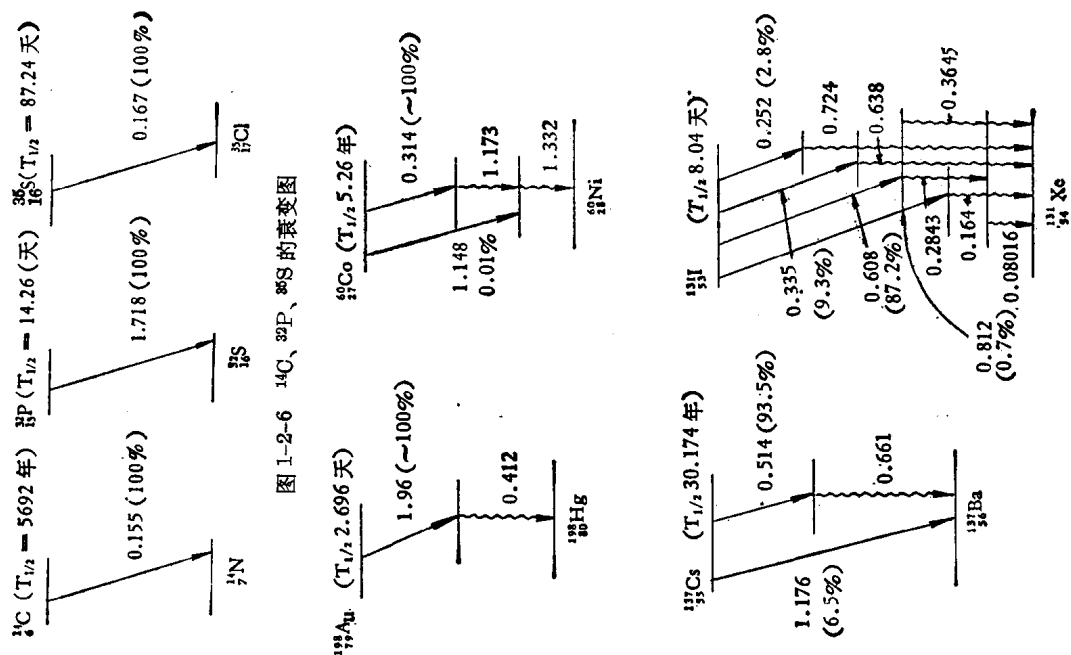


图 1-2-6 ^{14}C 、 ^{32}P 、 ^{35}S 的衰变图

图 1-2-7 ^{138}Au 、 ^{60}Co 等核素的衰变图

(三) β^+ 衰变

从放射性核素的核里放射出 β^+ 粒子的过程称为 β^+ 衰变。这种过程可以看成由于核里一个质子转变成中子而放出 β^+ 粒子和中微子的结果:

$$p \longrightarrow n + \beta^+ + \nu$$

β^+ 粒子的质量和电荷分别与 β 粒子 (亦即电子) 的相等, 只是 β^+ 粒子带的是正电荷, 所以, β^+ 粒子实质上就是正电子。在发生 β^+ 衰变时, 有三个生成物: 与母体核质量数 A 相同的, 但核电荷要小 1 单位的子体核、 β^+ 粒子和反中微子。所以, β^+ 衰变可以用下式表示



用 α 、 β 衰变中计算 Q 的同样方法, 可得到

$$Q = m_X - (m_{Z-1} + 2m_e)$$

因为 Q 的值必须为正值, 所以产生 β^+ 衰变的必要条件为: $m_Z - m_{Z-1} > 2m_e$ 。

一般在原子核中亏缺中子的话, 如衰变能 Q 大于 1.02 兆电子伏 (即 $m_Z - m_{Z-1} > 2m_e$), 则可能发生 β^+ 衰变, 使子体达到更高的稳定性。例如 ${}^{13}\text{N}$ (图 1-2-8) 发生 β^+ 衰变后, 生成稳定态的 ${}^{13}\text{C}$ 。而如果衰变能小于 1.02 兆电子伏, 则可能发生电子俘获。

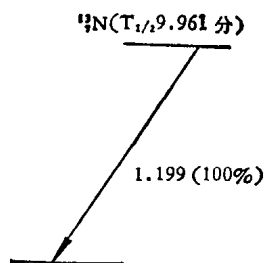


图 1-2-8 ${}^{13}\text{N}$ 的 β^+ 衰变图

β^+ 粒子的性质与 β 粒子的基本上相同, 它的能谱也是连续的, $E_{\text{最大}}$ 仍等于 Q , 只是其值等于母体核素原子质量和子体及 2 个电子质量的差。 β^+ 粒子在吸收体中丧失了动能时, 将和物质中的电子相结合, 而把两个正、负电子的静止质量转化为电磁辐射, 即称为湮没辐射。一般以生成两个光子最为普遍, 每个光子的能量应为 0.511 兆电子伏, 探测这种能量的射线存在与否, 常可判断是否有 β^+ 衰变产生。

(四) 电子俘获

不稳定原子核俘获了一个核外绕行电子, 而使核内的一个质子转变成中子和中微子的过程, 即 $p + e^- \longrightarrow n + \nu$, 这个过程称为电子俘获。它的核衰变过程可用下式表示:



因为 K 壳层最靠近核, K 电子被俘获的几率比其它壳层 (L, M, N, ……) 的大, 所以, 这种过程常称为 K 俘获。如 ${}^{55}\text{Fe}$ 和 ${}^{51}\text{Cr}$ (图 1-2-9), 作 K 俘获衰变的必要条件是母体核

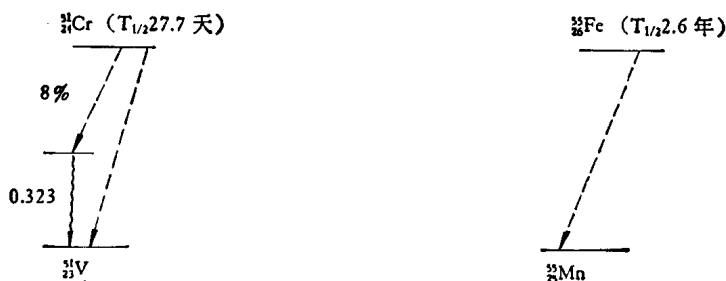


图 1-2-9 ${}^{51}\text{Cr}$ 、 ${}^{55}\text{Fe}$ 的电子俘获衰变图

素原子和子体核素原子的质量差大于电子的结合能。即 $m_Z - m_{Z-1} > \frac{s_i}{c^2}$ 。式中 s_i 为电子的结合能, c 为光速。 $i = K, L, M, \dots$ 。

由于能满足产生 β^+ 衰变的条件, 亦就能满足产生电子俘获的条件。所以, 有许多放射性核素同时具有放射 β^+ 粒子和电子俘获的衰变。如 ^{65}Zn , 亦有为数不多的核素同时具有放射 β^+ 粒子、 β 粒子和电子俘获(K 俘获)的衰变。例如 ^{64}Cu 、 ^{80}Br 等, 还有的核素同时具有放射 β 粒子和电子俘获衰变, 例如 ^{40}K 。这些核素的衰变如图 1-2-10。

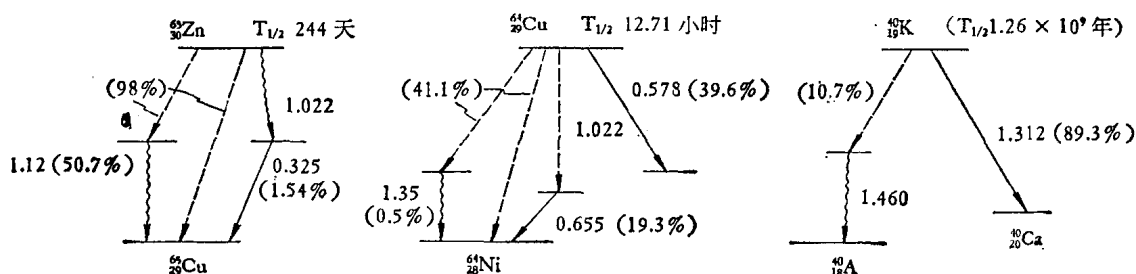
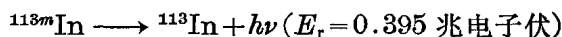


图 1-2-10 具有 K, β^+ ; K, β^+ , β 及 K, β 衰变的图例

作电子俘获的衰变, 除了有些子体处在激发态而放射出 γ 射线外, 核并没有放射出任何易于探测的射线。可是, 它却有次级辐射即特征 X 射线及俄歇电子。次级辐射来源于处于能态较高的(如 L 壳层)绕行电子跃迁到能态较低的(如 K 壳层)空位, 而将两个能态能量的差转变成 X 射线放射出来, 即 $E_X = h\nu = E_L - E_K$, 式中 E_X 表示 X 射线的能量, E_L 和 E_K 分别为 L、K 壳层能态的能量。例如, 从 ^{65}Zn 放射出 8 千电子伏的 X 射线, 从 ^{51}Cr 放射出 5 千电子伏的 X 射线。或者两个能态能量的差传递给另一个 L 电子, 使它成为自由电子放射出来——称为俄歇电子, 这两种次级辐射的能量都是单一并可探测的, 通过对次级辐射的探测, 可以判断电子俘获的发生。

(五) γ 衰变

γ 射线和 α 射线及 β 射线不同, 它是一种不带电的电磁辐射, 是核从激发能态跃迁到较低能态或基态时的产物, 这种放出 γ 射线的过程称为 γ 衰变。在发生 γ 衰变时, 对于原子序数和原子质量数都没有影响, 所以, 这过程又称同质异能跃迁。通常 γ 射线是伴随 α 射线, β 射线或其它射线一起产生的(见前面所列举的衰变图)。但是, 亦有一些同质异能素本身不是某种衰变的产物, 同时它的基态又是稳定的, 这样就构成了纯粹 γ 衰变, 如:



当母体核放射出 β 粒子(或其它粒子)而跃迁到子体核的激发态时停留极短, 通常在 10^{-12} 秒内, 马上就跃迁到较低能态或基态而放射出 γ 射线来, 因而 γ 衰变的半衰期很短。 γ 射线同 X 射线没有本质的区别, 两者之间能量界限不明确, 一般讲 γ 射线波长比较短, 能量比较高, 它是原子核放射出来的, 而 X 射线波长较 γ 射线长, 能量低些, 同时它是由于核外的轨道电子激发的结果而发射的。

发生 γ 衰变的核, 在许多场合可以以发射内转换电子(指向外发射核外的绕行电子)