

全国高等农业院校教材

农业化学研究法

下 册

(第 二 版)

西北农业大学 主编
华南农业大学

农 业 出 版 社

第十一章 示踪技术的基础知识

核技术在农业科学研究中的应用,主要分为两类:辐射技术和示踪技术。

辐射技术是利用放射性核素释放的高能粒子的辐射特性,照射被研究对象,使其发生各种物理、化学、生物性状的变化,从而进行研究,以获取对人类有益的性状和信息。利用辐射技术可以进行遗传育种,灭菌消毒,防治虫害,食品贮藏,促进作物生长发育,测定土壤水分、密度等研究工作。利用中子或其它高能粒子引起的核反应及产生的X射线,可以进行中子活化分析及X射线荧光分析等方面的研究,快速、定性、定量地分析样品中的各种元素。

示踪技术是利用放射性核素能释放各种射线粒子,或稳定性核素的原子质量区别于其它同类原子的特性,把这些核素的原子作为示踪原子,来进行有关的研究工作。示踪原子是一些带有特殊“记号”的容易辨认的原子,追寻它们的“踪迹”,人们可以探索其它不易或不能辨认的物质的运动和变化规律。自从1923年海威斯(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体内的分布和运转以来,至今已60余年。目前,示踪技术已广泛应用在农业和生物科学研究的各个领域。这种方法阐述和解决了很多用一般方法未能解决的问题,为科学研究提供了一种新而准确的研究手段。

在农业化学研究领域,应用最广泛的是示踪技术,又称为示踪原子法。目前植物所需要的营养元素,大部分有可以作为示踪原子使用的放射性核素或稳定性核素。如: ^2H 、 ^3H 、 ^{13}C 、 ^{10}B 、 ^{14}C 、 ^{15}N 、 ^{18}O 、 ^{22}Na 、 ^{28}Mg 、 ^{32}P 、 ^{35}S 、 ^{36}Cl 、 ^{42}K 、 ^{45}Ca 、 ^{54}Mn 、 ^{59}Fe 、 ^{64}Cu 、 ^{66}Zn 、 ^{99}Mo 等。利用示踪原子可以制备“示踪肥料”,研究这种肥料在土壤中的分布、转移和变化,了解示踪营养元素进入植物体和参与新陈代谢的过程等一系列植物营养和施肥问题,能够深刻揭示土壤、植物、肥料三者之间的复杂关系,为合理施肥,改进农业技术措施,提高农作物产量提出新的依据。

示踪技术具有一些其它方法所不及的优点:

1. 测量灵敏度高 一般化学分析,精密天平只能称量到 10^{-6}g ;应用近代光学仪器分析,可以达到 10^{-9} — 10^{-12}g ;而进行放射性测量,被检查出的放射性物质,至少在 10^{-14} — 10^{-18}g ,有时可达 10^{-20}g 。例如,1Bq(贝可)的放射性核素 ^{32}P 相当于 1.62×10^6 个 ^{32}P 原子,总重量只有 $2.7 \times 10^{-17}\text{g}$ 左右,一般的探测仪器能准确地测定37Bq或更少的放射性。因此,示踪原子法比常用的化学分析法具有更高的灵敏度。

2. 实验操作简便 应用示踪原子法时,可以不进行提取、纯化、分离等复杂的化学分析操作,能够简化试验方法,缩短试验时间,迅速获得结果。例如,在农化研究工作中,

应用放射性自显影方法,不必经过分离,即可测定营养元素在植物体内各部分的分布状况。

3.可以分辨原有的和试验中新加入的分子 在研究植物营养和肥料吸收、肥料利用率等问题时,应用示踪原子法,可以很容易地区分哪些是来自肥料的养分,哪些是来自土壤原有的养分。能够真实地反映土壤、植物、肥料三者之间的关系,准确地测定不同施肥措施,对肥料利用率的影响。

4.实验合乎生理条件 当作为营养元素的放射性核素引入植物体后,可以在正常生长条件下,对植株各部位进行活体测量,研究养分的吸收速度,及其在植物体内的运转和分布。在合乎生理条件下研究植物营养和施肥问题,更符合客观实际,这是常规方法无法做到的。

示踪技术虽然有很多优点,但在使用上还受到一定的条件限制,例如:放射性核素超过安全剂量对人和植物有辐射伤害;操作人员需要特殊训练,建立严格的安全防护措施;稳定性核素的测量比较复杂,测量仪器价格昂贵;某些作物必需的营养元素找不到相应的可以作为示踪原子的核素等等。这些限制因素,虽然给示踪原子法的普遍应用带来一定影响,但并没降低它的应用价值。随着科学的发展,技术条件不断完善,很多限制因素已逐步克服。

示踪技术是农化研究方法中的一种,必须与田间试验、培养试验、农化分析等其它方法配合使用,才能收到良好的效果。

第一节 原子核与同位素

一、原子与原子核

自然界的各种物质是由不同的元素组成的,构成各种元素的最基本单位是该元素的原子。

原子的体积很小,它的直径只有 10^{-8}cm ($1\text{\AA}$) 左右。原子的质量也十分微小,一个氢原子的质量只有 $1.6733 \times 10^{-24}\text{g}$, 就是较重的铀原子,其质量也只有 $3.951 \times 10^{-22}\text{g}$ 。

原子是由带正电荷的原子核和带负电荷的电子组成的。原子核位于原子的中心,直径仅在 $10^{-13}—10^{-12}\text{cm}$ 左右。原子核只占整个原子的极小部分。带负电荷的电子位于原子核外,围绕原子核按不同的轨道高速运行。一个电子所带电荷为 1.60210×10^{-19} 库仑(C),通常用 e 来表示。在各种原子中,原子核所带的正电荷数量,由绕核电子的数目决定。例如,氢原子只有一个轨道电子,它的核带有 $1e$ 正电荷;碳原子有 6 个轨道电子,原子核带有 $6e$ 正电荷。因为原子是电中性的,原子核所带的正电荷总量必定等于轨道电子所带负电荷的总量。

绕行电子和原子核构成一个原子,但它们的质量相差很远。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}g/cm^3 。原子核几乎具有原子的全部质量,绕行

电子的质量总和比起核来要轻得多。例如, 最轻的氢原子核的质量是 $1.6725 \times 10^{-24} \text{g}$, 而它的一个绕行电子的质量只有 $9.1091 \times 10^{-28} \text{g}$, 为前者的 $1/1836$ 。原子序数大的元素, 这个比值还要小。例如, 铀原子的 92 个绕行电子的总质量与铀原子核质量的比值为 $1/4714$ 。

衡量原子或原子核的质量, 通常用原子质量单位来表示。国际上规定, 以核素碳—12 (^{12}C) 原子质量的十二分之一做为原子质量单位, 用符号 u 表示。

$$1 \text{ 原子质量单位 } (u) = 1.6605655 \times 10^{-27} \text{kg}$$

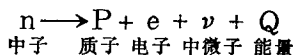
1932 年詹姆斯·恰德维克 (James. Chadwick) 发现了中子, 不久由海森堡 (W. Heisenberg) 提出了原子核是由中子和质子组成的理论。根据这一理论, 原子核由 Z 个带正电荷的质子和 N 个不带电的中子所组成, 即:

$$A = Z + N$$

式中 A 称为原子质量数, 其数值等于原子核内质子数与中子数之和。 A 的数值总是用与该元素的原子量最接近的整数来表示。中子和质子统称为核子。质子的静止质量为 1.007276 原子质量单位 (u), $1.67252 \times 10^{-27} \text{kg}$ 。质子实际上是一个氢原子核, 带有与电子电量相等的 $1e$ 正电荷, 用符号 P 表示。原子核的质子数与所有的轨道电子数是相同的, 这个数称为原子序数。

中子是电中性的基本粒子, 其静止质量为 $1.008665u$, $1.67482 \times 10^{-27} \text{kg}$, 比质子略重, 中子用符号 n 表示。中子在自然界不能单独存在, 只有在原子核受外来粒子的轰击发生核反应时, 才从原子核里释放出来。处在自由状态的中子是极不稳定的, 它很快衰变成一个质子 (P)、一个电子 (e) 和一个中微子 (ν)。

用式子表示则为:



中微子是质量十分微小的中性粒子, 它的质量比电子质量的 $5/10000$ 还小, 所以常把它看成是不带电的质量近似零的微小粒子。 Q 代表中子衰变过程中释放出来的能量。

在原子核内, 许多核子能够非常紧密地构成相对稳定的整体, 不会由于带电粒子的库仑斥力而互相排斥, 说明原子核内存在一种很强大的力, 这种只能存在于核子之间的特有的力, 称为核力。它是一种比万有引力或电磁力强得多的力, 是目前世界上已知的最大的力。

核力的特点是力程 (核力作用所能达到的空间距离) 短, 只有在距离小于 10^{-13}cm 时, 核力才起作用。核力与电荷无关, 质子与质子, 质子与中子, 中子与中子之间的核力是相同的。核力还具有饱和性质, 各种原子核不论它核内的核子数多少, 原子核的密度都近似相同。核子之间的核力是通过交换媒介粒子而产生的, 这种媒介粒子称为介子, 其质量介于电子和质子的质量之间。由于核力的存在, 要改变原子核的结构是非常困难的。

二、核素与同位素

原子核内，质子数（Z）和原子质量数（A）一定，具有特定核特征的某一类原子，称为一种核素。例如：原子质量数 32，原子序数 15 的磷；以及原子质量数 60，原子序数 27 的钴都是一种核素。

每种核素的各个原子，应具有同一能态。铯——134 与铯——134m 虽然质子数和中子数分别相同，但所处的能态不同，应属两种不同的核素，二者称为同质异能素。

核素的表示方法，把质量数（A）写在元素符号（X）的左上角，原子序数（Z）写在左下角，即： A_ZX 。例如，核素磷——32 写成 ${}^{32}_{15}\text{P}$ ；铁——59 写成 ${}^{59}_{26}\text{Fe}$ 等。

凡是 Z 值相同但 A 值不同，化学性质基本相似，在元素周期表上占有同一位置的一组核素，称为该元素的同位素。例如：Z 为 1，A 分别为 1、2、3 的一组核素氕（ ${}^1_1\text{H}$ ）、氘（ ${}^2_1\text{H}$ ）、氚（ ${}^3_1\text{H}$ ）都是氢的同位素。Z 为 15，A 分别为 31、32、33 的核素 ${}^{31}_{15}\text{P}$ 、 ${}^{32}_{15}\text{P}$ 、 ${}^{33}_{15}\text{P}$ 都是磷的同位素。

同位素这个术语，过去曾使用得不够确切，应该用“核素”的场合，却往往习惯地称为“同位素”。例如，在文章中可以见到：“磷肥研究中使用了同位素 ${}^{32}\text{P}$ ”的提法，确切地讲应该是：“磷肥研究中使用了核素 ${}^{32}\text{P}$ ”，或者讲“磷肥研究中使用了磷的同位素 ${}^{32}\text{P}$ ”。同位素是相对某种元素而言。 ${}^{31}\text{P}$ 和 ${}^{32}\text{P}$ 均为磷的同位素， ${}^{31}\text{P}$ 和 ${}^{32}\text{P}$ 互为同位素； ${}^{40}\text{K}$ 和 ${}^{42}\text{K}$ 均为钾的同位素， ${}^{40}\text{K}$ 和 ${}^{42}\text{K}$ 互为同位素。 ${}^{32}\text{P}$ 和 ${}^{42}\text{K}$ 则不互为同位素，而分别是两种核素。核素与同位素的区别，前者泛指任何元素的任何原子，概念比较广泛；后者确指同一种元素的各种原子，概念比较狭窄。因此，同位素实际上也是核素，但核素未必是同位素。

一般每种元素都有两种以上的同位素，多的可达几十种。例如：氢有 3 种同位素；碳有 11 种同位素；磷有 12 种同位素；钾有 16 种同位素。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，有的全部是放射性的。例如：氢的三种同位素，原子质量数为 1 的氕（ ${}^1_1\text{H}$ ）是稳定性的，在天然氢中占 99.9852%；原子质量数为 2 的氢称为重氢或氘（ ${}^2_1\text{H}$ 通常写成 D）也是稳定性的，在天然氢中仅占 0.0148%；原子质量数为 3 的氢称为超重氢或氚（ ${}^3_1\text{H}$ 通常写成 T），它是人工制造的放射性核素。

依据原子核的特性，核素分为两种：一种叫稳定性核素；一种叫放射性核素。凡原子核是稳定的，不会自发地产生核结构转变的核素叫稳定性核素。例如： ${}^{31}\text{P}$ 、 ${}^{14}\text{N}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 等。凡是未受外界原因的作用，核结构会自发地产生变化，在变化过程中，原子核放出某种射线产生核衰变，由一种原子核变成另一种原子核的核素叫做放射性核素。例如： ${}^{32}\text{P}$ 、 ${}^{14}\text{C}$ 、 ${}^{15}\text{N}$ 、 ${}^3\text{H}$ 等。从原子序数 84 的钋（Po）元素开始，以后各种元素的同位素均为放射性核素。

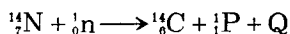
放射性核素又分两种，一种是自然界存在的能自然地产生放射性辐射的元素，叫天然放射性核素，它们在自然界的含量是很少的，如 ${}^{40}\text{K}$ 、 ${}^{234}\text{U}$ 、 ${}^{235}\text{U}$ 、 ${}^{238}\text{U}$ 等等。另外一种是用

人工方法,在特殊装置(原子反应堆或各种加速器)中,用强中子流、质子流或其它高能粒子流去“轰击”稳定性核素的原子核,使其发生核反应,生成一个不稳定的原子核,因而发生“人为放射现象”(人工放射现象),这样获得的放射性核素,叫做人造放射性核素或人工放射性核素。

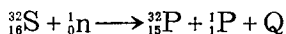
由于科学技术的发展,目前人造放射性核素已达1000种以上。农化研究工作中常用的放射性核素,如 ^{32}P 、 ^{14}C 、 ^{35}S 、 ^{15}N 等都是这样产生的。

产生核反应的方法主要有:①带电粒子的轰击;②吸收慢中子;③快速中子的轰击;④高能光子的照射。例如:

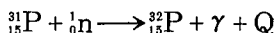
稳定性核素 ^{14}N 俘获中子后产生放射性核素 ^{14}C ,



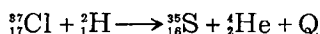
稳定性核素 $^{32}_{16}\text{S}$ 俘获中子后产生放射性核素 $^{32}_{15}\text{P}$,



稳定性核素 $^{31}_{15}\text{P}$ 俘获中子后也可产生放射性核素 $^{32}_{15}\text{P}$,



稳定性核素 $^{37}_{17}\text{Cl}$ 用加速氦核(^3_2H)轰击产生放射性核素 $^{36}_{16}\text{S}$,



式中: ${}^1_0\text{n}$ 为中子, ${}^1_1\text{P}$ 为质子, γ 为 γ 射线, ^3_2H 为氦核, ^4_2He 为氦核(即 α 粒子), Q 为能量。反应式也可简化为:



式中: $^{14}_7\text{N}$ 称为靶核, n 称为入射粒子; P 称为出射粒子; $^{14}_6\text{C}$ 是反应生成的核,又称为反冲核,即新产生的核素。

在农化研究工作中,稳定性核素和放射性核素都可以做为“示踪原子”被应用,但二者的测量方法很不同。放射性核素根据其放出的射线进行探测比较容易;而稳定性核素的测量手续复杂,要求较高的技术设备条件。所以一般示踪研究工作中,稳定性核素远不如放射性核素应用广泛。

第二节 放射性核素的衰变

一、放射性与原子核的稳定性

1896年法国科学家亨利·贝可勒尔(H·Becquerel)发现,从铀的化合物中自发地放出一种辐射,它能穿透黑纸而使里面的照相底片感光,由此发现了天然放射性。

1898年玛丽(Marie)和皮埃尔·居里(Pierre Curie)从铀的矿石中发现了放射性比铀更强的钋和镭。他们还发现,镭放出三种射线,这三种射线在磁场中表现不同的偏转行为。

1900年卢瑟福(E·Rutherford)和索迪(Soddy)经过进一步研究指出:放射性现象和原子核从一种结构或能量状态,自发地转变为另外一种结构或能量状态相联系。微观粒

子系统从某一状态到另一状态的过渡称为跃迁。放射性核素放射出来的粒子或辐射是原子核发生自发跃迁的结果。原子核能否发生自发跃迁与原子核的稳定性有关。

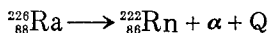
一个稳定的原子核,核内中子和质子的相对数目,对于每一种核素都是有一定比例的。对于 Z 小于20的轻核, N 与 Z 之比为1;中等质量的稳定性核素 N 与 Z 之比为1.4;而在重核区 N 与 Z 之比约为1.5—1.6。大于或小于这个比例,即中子或质子过多时,原子核都是不稳定的。不稳定的原子核会自发地产生核跃迁使结构发生转变,放出某种射线,这种转变叫“核转变”或“核衰变”,简称“衰变”。

如果核内中子过多,则中子放出带负电荷的 β^- 粒子(电子)变成一个质子,产生比原核素原子序数大一位的新核素原子。如果核内质子过多,则质子会放出一个带正电荷的 β^+ 粒子(正电子)变成中子,生成原子序数减少一位的新核素原子。有的放射性核素衰变过程中放出一个新的原子核——氦核(即 α 粒子),或者放出高能电磁波(即 γ 射线)。还有的不稳定原子核俘获轨道电子之后放出X射线,以及发生自发裂变等等。上述核衰变的结果,原子核内中子与质子恢复到一定的比例,核的能量状态恢复到基态,使核重新处于稳定状态,于是由一种核素的原子,变成另一种核素的原子。

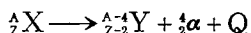
二、核衰变的种类和性质

放射性核素的核衰变是多种多样的,根据衰变时放出的射线种类而区分。主要的核衰变类型如下:

(一) α 衰变 原子核由于自发地放出 α 射线而转变成另外一种原子核的过程叫做 α 衰变。当不稳定的重核内质子数量多,质子间的静电斥力大可以引起 α 衰变。 α 粒子由2个质子和2个中子组成,带 $2e$ 正电荷,静止质量为4.002775原子质量单位(u), α 粒子实际上就是氦——4原子核(${}^4_2\text{He}$)。凡是发生 α 衰变后的子体核,它的原子质量数 A 将比母体核减少4个单位,原子序数 Z 降低2个单位。例如: ${}^{226}_{88}\text{Ra}$ (镭—226)放出一个 α 粒子后变成 ${}^{222}_{86}\text{Rn}$ (氡—222)的衰变过程可用下式表示:



如果用 X 代表母体核, Y 代表子体核,则发生 α 衰变的一般式为:



Q 为衰变能,它是在原子核衰变过程中,由核内部所释放出来的能量,它包括 α 粒子所带走的动能和剩余核,即子体核的反冲能。 Q 值等于母体核质量和子体核及 α 粒子的总质量的差。实际计算采用核素质量进行计算,因为母体原子原有 Z 个绕行电子,但子体原子只有 $Z-2$ 个绕行电子,比原来少了两个,这两个电子的质量必须加进去才可以。因此计算值为:

$$Q = m_x - (m_{x-2} + 2m_e + m_\alpha)$$

式中: m_x 、 m_{x-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。因为 $m_\alpha + 2m_e = m_{\text{He}}$, m_{He} 为 ${}^4\text{He}$ 的质量,所以

$$Q = m_z - (m_{z-2} + m_{He})$$

若一个核素能够进行 α 衰变, 其衰变能 Q 必须为正值。因此只有在满足如下条件:

$$m_z > m_{z-2} + m_{He}$$

或

$$m_z - m_{z-2} > m_{He}$$

时, 才有可能发生 α 衰变。

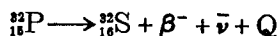
由一种核素放射出来的 α 粒子的能量是单一的, 但是伴有 γ 射线的 α 衰变的核素常常放射出不只一种能量的 α 粒子。例如 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的衰变, 伴有 γ 射线(能量 $E_\gamma = 0.188\text{MeV}$), 它的 α 粒子能量有两种, 分别为 4.777MeV (分支比为 94.3%) 和 4.589MeV (分支比为 5.7%)。

α 粒子带电荷多质量大, 移动速度较其它粒子慢, 在介质中的射程(即在 0°C 和压力为 760mm 水银柱时 α 粒子的直线行程)较短。1 个 3MeV 的 α 粒子, 在空气中的射程为 16mm , 用一片约 0.015mm 厚的铝箔就可以挡住。

自然界中产生 α 衰变的天然放射性核素, 其原子序数绝大部分大于 82。人造放射性核素大部分不发生 α 衰变, 少量人工放射性核素产生 α 衰变的也多是原子序数在 82 之后的核素。

农化研究工作中常用的放射性核素很少是产生 α 衰变的。

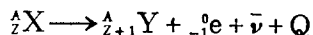
(二) β^- 衰变 不稳定的原子核由于自发地放出 β^- 粒子而转变成另外一种原子核的过程称为 β^- 衰变。例如农化研究工作中, 常用的放射性核素 $^{32}_{15}\text{P}$ 经过 β^- 衰变成为新核素 $^{32}_{16}\text{S}$ 。这个衰变过程可写为:



式中: β^- 为电子, 有时也写为 $e(^-_1e)$; $\bar{\nu}$ 是反中微子, 它是在 β^- 衰变过程中, 伴随 β^- 粒子而放射出来的一种基本粒子。它的反粒子称为中微子, 前者讲过用符号 ν 表示。 $\bar{\nu}$ 与 ν 都不带电, 它们的静止质量可近似看成为零, 它们与其它物质相互作用极为微弱, 因而穿透能力极强。 Q 为衰变能。

β^- 粒子的静止质量为 0.000549u , 带 $1e$ 负电荷, β^- 粒子实际是一束高速电子流, 它们在磁场中有较大的偏转, 运动速度接近于光速。在空气中的射程有几米远, 如果和 α 粒子比较, 阻止 3 兆电子伏的 β^- 粒子, 大约要 6.5mm 厚的铝片。

β^- 粒子的质量和核的质量比起来要小的多, 可以忽略不计, 所以作 β^- 衰变的母体核和子体核的原子质量数 A 是相同的, 而子体核的原子序数 Z 将增加 1 。原子核进行 β^- 衰变的一般式为:



原子核是由质子和中子组成的, β^- 衰变可以看成母体核内一个中子衰变, 生成一个质子放出一个电子和反中微子的过程。衰变能 Q 可以从母核静止质量和子核、电子及反中微子的质量差求出。用核素质量计算时, 因为母体核素质量里包括 Z 个电子质量, 而子体核素质量里包括 $Z+1$ 个电子质量, 无形中多计算了一个电子质量, 所以在计算中必须

减去。计算值为:

$$Q = m_z - [(m_{z+1} - m_e) + m_\beta + m_{\bar{\nu}}]$$

式中: m_z 、 m_{z+1} 分别为母体核素、子体核素的原子质量; m_e 、 $m_{\bar{\nu}}$ 分别为电子及反中微子的静止质量。由于 $m_{\bar{\nu}} \approx 0$, 以及 $m_\beta = m_e$, 所以:

$$Q = m_z - m_{z+1}$$

由此得到: 若一核素能够发生 β^- 衰变, 衰变能 Q 必须是正值, 即

$$m_z - m_{z+1} > 0$$

只有当母体核素的原子质量大于子体核素的原子质量时, 才能发生 β^- 衰变。 β^- 衰变产生的能量将由子体核、 β^- 粒子和反中微子 $\bar{\nu}$ 共同带走。由于子体核的质量比电子和反中微子的质量大得多, 所以衰变能主要由 β^- 粒子 (电子) 和反中微子带走。因为它们的各自发射方向可以是任意的, 每个粒子所带走的能量不固定, 所以同一核素放出的 β^- 粒子能量不同, 能量值 E_β 可以从 0 到最大值 $E_{\max}$ (即等于 Q), 这样就使 β^- 射线具有连续的能谱 (图 11-1)。

β^- 粒子的平均能量 $\bar{E}_\beta$ 约等于 $1/3 E_{\max}$, 一般图表绘出的 β^- 粒子能量都是指 $E_{\max}$ 而言。

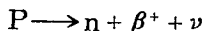
过去曾把能量超过 0.6 MeV 的 β^- 射线称为“硬 β^- 射线”, 能量小于 0.6 MeV 的 β^- 射线称为“软 β^- 射线”。

^{32}P 放出的 β^- 射线具有 1.709 MeV 的能量, 属于硬 β^- 射线; 而 ^{35}S 、 ^{14}C 放出的 β^- 射线能量分别为 0.167 MeV 和 0.156 MeV, 都属于软 β^- 射线。

高能量的 β^- 粒子贯穿能力很强, 用于生物体示踪及测量上很方便, 但防护上要注意, 防止高能 β^- 辐射造成的伤害。 β^- 粒子遇到重金属如铅等可以引起“韧致辐射”, 这是一种具有连续能谱的高能 X 射线。为防止“韧致辐射”, 在铅与 β^- 放射源之间, 用有机玻璃或铝作为吸收层, 几毫米的铝或 1 cm 厚的有机玻璃, 可将 β^- 射线大部分吸收。

农化研究工作中常用的放射性核素很多是产生 β^- 衰变的, 除前面讲过的 ^{32}P 外, ^{35}S 、 ^{14}C 、 ^3H 等也都是产生 β^- 衰变的放射性核素。

(三) β^+ 衰变 从放射性核素的不稳定核里, 自发地放出 β^+ 粒子而转变成另外一种原子核的过程称为 β^+ 衰变。这种衰变可以看成是母体核内一个质子转变为一个中子而放出 β^+ 粒子和中微子的过程。这个过程可以写为:



例如 ^{13}N 发生 β^+ 衰变生成稳定性核素 ^{13}C 的过程可用下式表示:

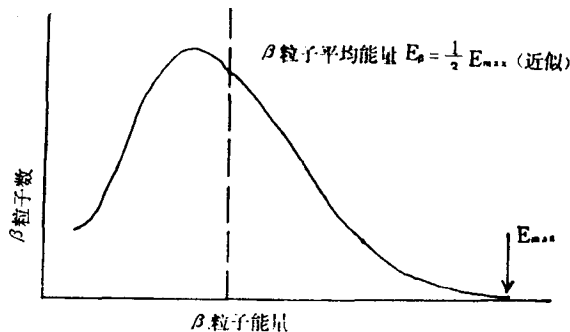
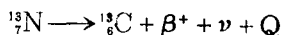
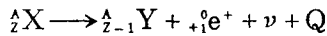


图 11-1 典型的 β 能谱曲线

β^+ 衰变的母体核与子体核具有相同的原子质量数 A ，但子体核的电荷减少一个单位，所以原子序数也减少一个单位。原子核进行 β^+ 衰变的一般式为：



式中， ${}_1^0e^+$ 即为 β^+ 粒子。发生 β^+ 衰变的衰变能计算值为：

$$Q = m_x - (m_{x-1} + m_e) - m_{\beta^+} - m_\nu$$

由于 $m_e = m_{\beta^+}$ ， $m_\nu = 0$ ，所以

$$Q = m_x - (m_{x-1} + 2m_e)$$

只有当衰变能 Q 为正值时，才有可能发生 β^+ 衰变，因此得到 β^+ 衰变的条件是：

$$m_x - m_{x-1} > 2m_e$$

即母体核素的原子质量比子体核素的原子质量大于 2 倍电子质量时，才有可能发生 β^+ 衰变。

不稳定的原子核中，如果质子过多亏缺中子，当衰变能 Q 值大于 1.022MeV（即电子质量 0.511MeV 的 2 倍），可能发生 β^+ 衰变。如衰变能 Q 小于 1.02MeV，则可能发生电子俘获。

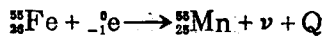
β^+ 粒子与 β^- 粒子的质量和电荷均相等，只是 β^+ 粒子带 1e 正电荷，所以 β^+ 粒子又称为“正电子”、“阳电子”，简称“正子”。它与电子构成一对反粒子。

β^+ 粒子与 β^- 粒子的性质基本上相同，它的能谱也是连续的。 β^+ 粒子存在时间很短，在吸收体中丧失了动能时，将很容易地和物质中的一个电子结合，成对消失，这种现象叫“湮没”。两个正负电子的静止质量转化为高能电磁辐射，放出两个 γ 光子，这种辐射称为：“湮没辐射”，两个 γ 光子的能量分别为 0.511MeV。往往通过测量这种能量 γ 光子的存在及强度，判断 β^+ 粒子的产生和数量。

农化研究工作中常用的放射性核素，放出 β^+ 粒子的较少。 ${}^{13}_7N$ 是放出 β^+ 粒子的放射性核素，但是半衰期很短 ($T_{1/2} = 9.961\text{min}$)，使用价值不大。一些微量元素如 ${}^{55}_{25}\text{Mn}$ 、 ${}^{64}_{29}\text{Cu}$ 等，在产生其它衰变的同时，有部分 β^+ 粒子放出，产生部分 β^+ 衰变。研究土壤盐分问题使用的 ${}^{22}_{11}\text{Na}$ 可以产生 β^+ 衰变。

(四) 电子俘获 (EC) 不稳定的原子核俘获了一个核外某壳层绕行电子，使核发生跃迁的过程称为电子俘获。由于 K 壳层最靠近核，因此俘获 K 壳层电子的机率最大，所以这种俘获常称为 K 俘获。电子俘获用缩写 EC 表示。

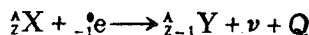
例如 ${}^{59}_{26}\text{Fe}$ 产生 K 俘获的衰变过程如下：



电子俘获过程可以看成不稳定的核内，由于质子过剩，核内一个质子转变成中子和中微子的过程。即：



放射性核素发生电子俘获的一般式为：



原子核发生电子俘获的衰变能等于

$$Q = m_z - m_{z-1} - \epsilon_i / C^2$$

式中: ϵ_i 为 i 层电子结合能, $i = K, L, M, \dots$, C 为光速。原子核发生电子俘获的条件是衰变能必须大于零, 则

$$m_z > m_{z-1} + \epsilon_i / C^2$$

或者

$$m_z - m_{z-1} > \epsilon_i / C^2$$

因此产生电子俘获的必要条件是母体核素与子体核素原子的质量差, 大于电子的结合能。由于能满足产生 β^+ 衰变的条件 (核转化能量大于 1.022MeV), 也能满足产生电子俘获的条件, 所以有很多放射性核素, 在发生 β^+ 衰变的同时, 也产生电子俘获, 如农化研究工作中常用的微量元素 ^{65}Zn 。有的放射性核素同时具有放射 β^+ 粒子、 β^- 粒子和产生 K 俘获的衰变, 如 ^{64}Cu 。还有的核素同时具有 β^- 衰变和电子俘获衰变, 如天然放射性核素 ^{40}K 。

产生电子俘获时有以下几种变化:

1. 子体核仍处于激发态, 将部分多余能量以 γ 射线形式释放出来, 使核恢复到稳定态。
2. K 层被俘获一个电子后出现空位, 这时处于能态较高的电子, 如 L 壳层或其它壳层电子就会跃迁到 K 壳层填补这个空位, 多余的能量 (两壳层能级差) 以特征 X 射线形式放出。即:

$$E_X = h\nu = \epsilon_L - \epsilon_K$$

E_X 为特征 X 射线能量, ϵ_L 、 ϵ_K 分别为 L 、 K 壳层电子结合能。

3. K 俘获产生的子核除通过放出特征 X 射线, 将多余能量释放以外, 还可以把两个壳层能级差交给另一个壳层电子如 L 层电子, 而使这个电子成为自由电子被放出, 这个电子称为俄歇电子, 这一过程称为俄歇效应。俄歇电子与特征 X 射线 (KX) 的发射如图 11-2。

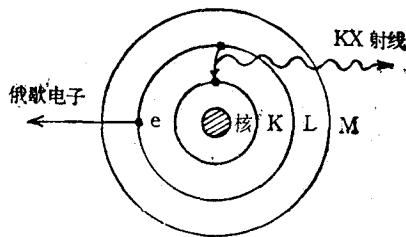


图 11-2 KX 射线和俄歇电子的发射

电子俘获产生的特征 X 射线和俄歇电子都称为次级辐射, 次级辐射的能量都是单一的, 并可以被探测出。通过对次级辐射的探测, 可以判断电子俘获的发生。

前面讲过, 与植物营养有关的放射性核素 ^{40}K 、 ^{59}Fe 、 ^{64}Cu 、 ^{65}Zn 、 ^{36}Cl 、 ^{52}Mn 等, 在发生其它衰变的同时, 也产生一部分电子俘获。

(五) γ 衰变 由于原子中存在不连续的能级, 从而产生原子的线状光谱。与此相似, 原子核也有一系列不连续的能级存在。能量最低的状态称为基态, 能量较高的称为激发态, 这些状态的能量数值即为原子核的能级。

原子核发生其它衰变时, 所产生的子核常常处于较高的能态——核激发态, 而当子核从激发态跃迁到能量较低的激发态或基态时, 就会放出 γ 射线, 这种衰变过程称为 γ 衰

变。由于处在激发态的子核存在时间极短（一般约为 10^{-11} — 10^{-13} s）因而可以认为 γ 射线与其它射线同时产生。

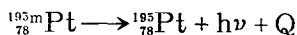
放出 γ 射线的原子核其质量数、电荷数均保持不变，只是能量状态发生了变化，所以这种过程又称为：“同质异能跃迁”。以下几种情况可以产生 γ 射线：

1. 原子核经过 α 或 β^- 衰变放出 α 或 β 粒子后，产生的子核未完全恢复到基态，剩余的核能以 γ 射线形式释放出来。例如，镭—226的衰变： ${}^{226}_{88}\text{Ra} \rightarrow {}^{226}_{88}\text{Rn} + \alpha + h\nu + Q$ ；钴—60的衰变： ${}^{60}_{27}\text{Co} \rightarrow {}^{60}_{28}\text{Ni} + \beta^- + h\nu + Q$ 。式中 h 为普朗克常数， ν 为辐射频率， $h\nu$ 表示 γ 光子的能量。

2. 正电子(β^+)和电子发生“湮没现象”时产生 γ 射线。

3. 发生电子俘获衰变时可以产生 γ 衰变。

4. 同质异能素可以产生纯粹的 γ 衰变。所谓同质异能素是指原子序数与原子质量数皆相同，而核能态不同的核素。例如 ${}^{195\text{m}}_{78}\text{Pt}$ 与 ${}^{195}_{78}\text{Pt}$ ，前者是后者的同质异能素。当它发生 γ 衰变时，反应式为：



γ 射线与 α 、 β 射线不同，它是光子流，是一种不带电的电磁辐射，在磁场中不发生偏转。 γ 射线与X射线相似，但波长比较短(10^{-8} — 10^{-11} cm)，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，能量较低，它是由于核外的轨道能级差引起的。

发生 γ 衰变的不稳定核，也可以通过发射内转换电子（conversion electron）的方式，从激发态回到较低能态或基态，而不必放射出 γ 射线，或者两者兼有。内转换是指处于激发态的原子核，把激发能给予核外的绕行电子，结果使该电子从壳层发射出来，原子核从激发态回到基态。内转换过程如图11—3所示。

内转换过程所发射出来的电子主要是K壳层（也有L壳层或其它壳层）的电子。若用 ΔE 代表核的激发态与基态的能量差， ϵ_i 代表 i 壳层电子结合能，则内转换电子能量 $E_e = \Delta E - \epsilon_i$, $i = K, L, M, \dots$ 。

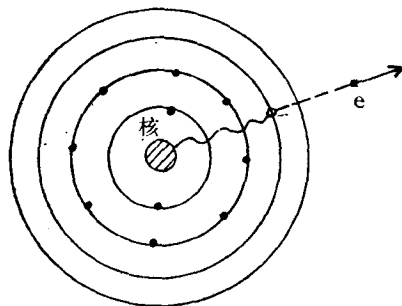


图 11—3 内转换过程

由于核能级的不连续性，故内转换电子的能量 E_e 是单一的，这一点与 β^- 衰变发射出来的电子有明显区别。 β^- 射线具有连续的能谱。

γ 射线的能量是单一的，不是连续的，但一个核素可能产生几种衰变，因而放出几组能量不同的 γ 射线。一般常用的核素， γ 射线的能量在0.1—3MeV左右。 γ 射线贯穿能力较强，在空气中射程达几十米，在金属中也能贯穿几十厘米。

防护 γ 射线用原子序数高的重金属，一般用铅，5 cm厚的铅可以吸收大部分 γ 射线。

农化研究工作中常用的放射性核素，单纯释放 γ 射线的不多。 ${}^{65}\text{Zn}$ 、 ${}^{28}\text{Mg}$ 、 ${}^{57}\text{Fe}$ 、 ${}^{64}\text{Cu}$

等在衰变时,除放出其它粒子外,还产生一部分 γ 射线。

除以上五种主要衰变形式以外,还有其它特殊衰变形式,如自裂变;中子发射等等。由于农化研究工作中不常遇到,故从略。

三、衰变图

放射性核素的衰变过程和状态,除用衰变反应式表示外,还可简明地使用衰变图来表示。衰变图通常从子体核的基态画起,以子核基态为零,用水平直线表示,各激发态在上边按能量大小依次表示出来。如果母核电荷数比子核的大(即衰变过程放出正电荷如 α 衰变、 β^+ 衰变或发生电子俘获等),则母核画在子核右上边。用向左的单线箭头表示 β^+ 衰变;向左的双线箭头表示 α 衰变;向左的虚线箭头表示电子俘获。反之母核电荷数比子核的小(如发生 β^- 衰变),则母核画在子核左上边,用向右的单线箭头表示 β^- 衰变。核的激发态与基态之间用垂直线或波浪线表示 γ 衰变。各种线旁边的数字表示相应的每种辐射的能量(兆电子伏),括弧内的百分数为衰变的分支比,即此种衰变发生的机率。

下面举例说明五种主要衰变形式的衰变图。

(一) $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的 α 衰变图

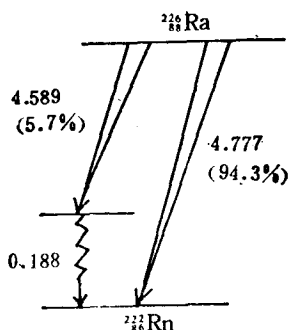


图 11-4 $^{226}_{88}\text{Ra}$ 的衰变图

(二) $^{32}_{15}\text{P}$ 的 β^- 衰变图

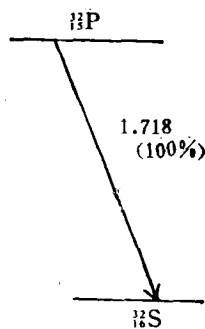


图 11-5 $^{32}_{15}\text{P}$ 的衰变图

(三) $^{13}_{7}\text{N}$ 的 β^+ 衰变图

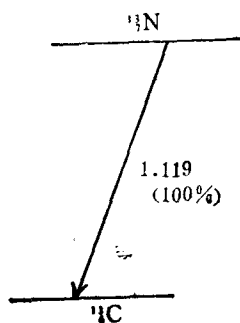


图 11-6 $^{13}_{7}\text{N}$ 的衰变图

(四) $^{55}_{26}\text{Fe}$ 的电子俘获衰变图

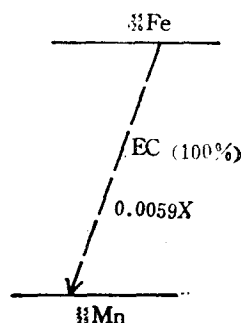
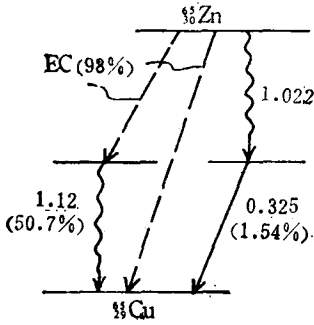
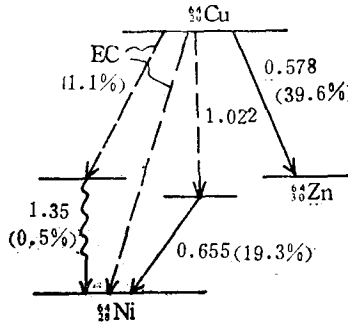
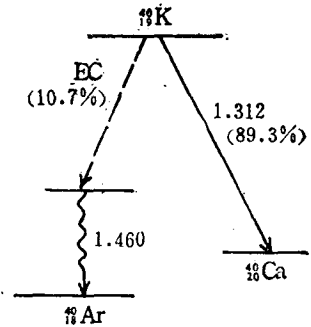


图 11-7 $^{55}_{26}\text{Fe}$ 的衰变图

(五) 具有 γ 、EC、 β^+ 、 β^- 衰变的 $^{65}_{30}\text{Zn}$ 、 $^{64}_{29}\text{Cu}$ 、 $^{40}_{19}\text{K}$ 衰变图

 图 11—8 $^{65}_{30}\text{Zn}$ 的衰变图

 图 11—9 $^{64}_{29}\text{Cu}$ 的衰变图

 图 11—10 $^{40}_{19}\text{K}$ 的衰变图

四、放射性衰变规律

(一) 衰变定律 放射性核素衰变进行的速度，完全不受外界条件（如温度、压力的改变等）的影响。有的核素衰变的很快，有的则很慢，这是每种放射性核素本身的特性。放射性核素的每一个核的衰变并不是同时发生，而是有先有后的，因为核寿命不同，单个原子核的衰变时间是无法预测的。单个测量看不出什么规律，如果累积大量的观察结果，可以发现一个平均衰变规律。用数学公式推导如下：

如果在时间间隔 t 到 $t + \Delta t$ 内，有 ΔN 个原子核发生衰变或跃迁， ΔN 与 t 时刻尚未衰变的原子核数目 N 及时间间隔 Δt 成正比。即：

$$-\Delta N \propto N \cdot \Delta t$$

写成等式：

$$-\Delta N = \lambda N \Delta t$$

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

λ 为衰变常数，表征原子核发生衰变或发生同质异能跃迁机率的一个常数。不同的放射性核素衰变常数 λ 不同，核衰变和跃迁的机率也不同。 λ 反映原子核本身的特性，不随外界条件如温度、压力、电磁场以及核素的化学状态等条件而变化。

负号表示放射性核数 N 随着时间 t 的增加而减少。若时间间隔 Δt 取得足够小，则可将

$$\frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N$$

写成：

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

解此微分方程得：

$$\ln N = -\lambda t + C$$

C 为积分常数，利用初始条件，假定 $t=0$ 时，未衰变的核总数为 N_0 ，即 $N=N_0$ ，所以 $C = \ln N_0$ ， $\ln N = -\lambda t + \ln N_0$ ， $\ln N = \ln_0 e^{-\lambda t} + \ln N_0$ ， $\ln N = \ln(N_0 \cdot e^{-\lambda t})$ ，消对数得：

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

这个公式即为衰变定律。

式中： N_0 ——开始时 ($t=0$) 的放射性原子核数

N ——经过 t 时间后剩余的 (未衰变的) 放射性原子核数

t ——衰变时间

e ——自然对数的底数 ($e = 2.71828\cdots$)

λ ——衰变常数，表示核在单位时间内发生衰变的机率，单位是秒⁻¹、小时⁻¹、日⁻¹

- ——负号表示随着时间 t 的增大，核的数目 (N) 减少。

这个衰变公式的物理意义表示，放射性原子核的数目，随着时间的指数函数而衰减。衰变定律又称为指数衰减规律。

在实际应用时，对于未衰变的放射性核的数目 (N) 我们并不感兴趣，我们所要知道的是：在单位时间内，有多少核发生衰变，亦即放射性核素的衰变率 $-\frac{dN}{dt}$ ，也称为放射性强度。衰变率可用测量伴随着核衰变而放射出来的射线的多少来决定。如果以 A_0 和 A 分别表示原始 ($t=0$) 放射性强度和经过 t 时间后的放射性强度，则用衰变率表示的衰变定律计算式为：

$$A = A_0 \cdot e^{-\lambda t}$$

(二) 半衰期 半衰期是用来表示放射性特征的一种方法。它的定义是：放射性核的数目，因衰变而减少到原来一半所需要的时间。半衰期通常用 $T_{1/2}$ 表示。

根据半衰期的定义和指数衰减规律，可以求出半衰期 $T_{1/2}$ 与衰变常数 λ 的关系。

当 $t = T_{1/2}$ 时

$$N(T_{1/2}) = N_0 / 2 = N_0 e^{-\lambda T_{1/2}}$$

$$N(T_{1/2}) / N_0 = 1/2 = e^{-\lambda T_{1/2}}$$

所以

$$T_{1/2} = \ln 2 / \lambda = 0.693 / \lambda$$

由上式可见， $T_{1/2}$ 与 λ 成反比关系，即放射性核素的半衰期愈长，衰变常数就愈小，反之半衰期愈短，衰变常数就愈大。

半衰期是放射性核素的主要特性之一，它在很大程度上，决定该放射性核素能否在示踪工作中被我们选用。放射性核素的半衰期差异很大，有的很长，如 ^{14}C 的 $T_{1/2} = 5692$ 年，有的半衰期很短，如 ^{15}N 的 $T_{1/2} = 9.961\text{min}$ 。

农化研究工作中，无论是田间试验或培养试验，都要在较长时间内 (如几个月) 栽培植物，半衰期过短的放射性核素无法采用。 ^{32}P 所以被广泛应用，除了它是植物营养必

需元素和具有易于测量的硬 β^- 粒子外, 它的半衰期 ($T_{1/2} = 14.3$ 天) 适中, 也是很重要的原因。

(三) 放射性强度及其单位 放射性强度又称为放射性活度, 它是指单位时间内核衰变的数目, 即核的衰变率 $-\frac{dN}{dt}$; dN 是在时间间隔 dt 内, 放射性核发生自发核跃迁 (衰变) 数的期望值。

放射性强度 A 的国际单位 (SI) 是 “贝可勒尔”, 记为 Bq

$$1\text{Bq} = 1\text{S}^{-1}$$

1Bq 表示放射源每秒钟有 1 次核衰变, 这个单位目前应用并不普遍。暂时允许与 SI 单位并用的专用单位为 “居里” (Curie), 符号为 Ci。1 Ci 表示放射源每秒钟有 3.7×10^{10} 次核衰变, 或每分钟有 2.22×10^{12} 次核衰变。在实验中常用较小的导出单位, 即居里的千分之一称为毫居里 (mCi); 或毫居里的千分之一称为微居里 (μCi)。

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{ 次衰变/s} = 2.22 \times 10^{12} \text{ 次衰变/min}$$

$$1\text{mCi} = 3.7 \times 10^7 \text{ 次衰变/s} = 2.22 \times 10^9 \text{ 次衰变/min}$$

$$1\mu\text{Ci} = 3.7 \times 10^4 \text{ 次衰变/s} = 2.22 \times 10^6 \text{ 次衰变/min}$$

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10} \text{Bq}$$

实际测量工作中, 还常用到比强度, 比强度用 A_m 来表示。

$$A_m = A/M$$

式中: M 为放射性物质的质量; A 为放射性强度。它表征单位质量的放射性物质的放射性强度, 其单位是 Bqkg^{-1} 、 Bqg^{-1} 、 Cikg^{-1} 、 Cig^{-1} 及 mCig^{-1} 等。

(四) 放射性能量的单位 在原子核物理上, 一般采用 “电子伏” (eV) 作为射线能量的单位。1 电子伏是指 1 个电子在真空中, 通过 1 伏特电位差的电场, 所获得的能量。

$$1\text{eV} = 1.602 \times 10^{-19} \text{ 焦耳 (J)}$$

电子伏单位较小, 常用它的导出单位千电子伏 (KeV), 兆电子伏 (MeV) 和十亿电子伏 (BeV) 作为能量的单位。

$$\text{千电子伏 (KeV)} = 10^3 \text{eV}$$

$$\text{兆电子伏 (MeV)} = 10^6 \text{eV}$$

$$\text{十亿电子伏 (BeV)} = 10^9 \text{eV}$$

其中最常用的是兆电子伏 (MeV) 又称百万电子伏。

第三节 射线与物质的相互作用

一、带电粒子和物质的作用

(一) 电离和激发 当运动中的带电粒子 (α 、 β^- 、 β^+ 粒子等) 在物质中通过时, 它的速度将慢慢减低而损失能量, 这些能量损失的主要原因是消耗在使物质电离或激发上。

电离作用是由于带电粒子从原子附近通过时,带电粒子和轨道电子之间就会发生静电作用,如果它通过时离原子足够近,某一轨道电子可能会获得足够的能量变成自由电子而逸出原子,这就是电离过程。失去一个电子的原子带正电荷,跟那个自由电子合起来组成一个离子对。这种电离称为直接电离。

次级电离是入射粒子在物质中由于直接电离打出能量较高的电子,然后这个电子再按照前面所说的过程产生离子对引起电离。不带电的入射粒子(如 γ 射线)亦可产生次级电离。据估计当 α 粒子穿过气体时,有60—80%的离子对是由次级电离产生的。

如果轨道电子所获得的能量不足以使它逸出原子变成自由电子,而仍然留在原子内,只是激发到更高的能级,则称为激发作用。随后受激原子又可以发射具有特征波长的光辐射回复到基态。

带电粒子穿过介质时,在它通过的径迹周围留下了许多离子对,每厘米径迹中离子对的数目称为电离比值或电离比度。

电离比值与带电粒子的运动速度有关,速度大时比值小,速度小时比值大。原因是速度大时,带电粒子经过轨道电子附近空间的时间比较短,使轨道电子电离的机会比较少,所以电离比值比较低。当速度小时情况恰恰相反。

α 粒子因为带电荷多质量大运动速度慢,在介质中停留时间长,与物质作用的机会多,电离能力比其它射线都强,电离比值大。 β 粒子的电离比值和同能量的 α 粒子比较要小得多。因为 β 粒子带电荷少质量小运动速度快,在介质中停留时间短,作用的机会少。 γ 射线因为不带电,贯穿能力强,在介质中停留的时间极短,能量交换的机会更少,只能靠与物质作用产生的次级电子引起次级电离,电离比值更小。

放射性物质放出的每个 α 粒子,其电离比值为 10^4 — 10^5 个离子对/cm。 β 粒子的电离比值约为 α 粒子的百分之一,而 γ 射线的电离比值又为 β 粒子的百分之一左右。

测量 α 、 β 粒子的基本方法之一,是根据电离作用原理进行的。

(二) 散射 带电粒子在物质中通过时,因为受到原子核库伦电场的相互作用,而改变运动的方向,这种现象称为散射。入射粒子经过散射后将按不同的方向运动,其中大部分粒子的散射角(和入射方向所成的角)是比较小的。但是也有一部分粒子经散射后,散射角大于 90° ,即经过散射后,粒子将折返回去,这样的散射称为反向散射简称反射。在散射体使入射粒子产生多次散射时,反向散射的作用特别显著。反射对射线粒子的测量是有影响的。例如进行 β 射线测量时,如果 β 放射源放在一个厚铅片上,或盛 β 放射源的计数盘是原子序数较高的金属制成,则因反射使计数显著地增加,使测量结果不准确,作 β 射线的定量测量时,必须注意到这点。但有时反向散射作用可以被利用来增高计数,以便使弱放射源容易测量。

(三) 吸收 物质对于入射的带电粒子的吸收,是电离作用和散射作用的结果。当带电粒子通过一片薄层的物质时,穿过的粒子数比入射的粒子数为少,除了很少部分向入射方向反射外,大部分粒子被物质所吸收。吸收作用随着物质层厚度的增加而变强,另外吸