



苏联大百科全书选译

放射化学
放射性同位素

人民教育出版社

基 芒

T41
841

放射化学·放射性同位素

刘程霖

人民教育出版社出版 高等学校教学用书编辑室
北京夏门内大街2号

(北京市书刊出版业营业登记证出字第2号)

人民教育印刷厂印装 新华书店发行

统一书号 13010·813 开本 787×1092¹/₁₆ 印张 1⁰/₁₆

字数 14,900 印数 0001-5,000 定价(8) 0.09

1980年7月第1版 1980年7月北京第1次印刷

放射化学

放射化学是化学的一个部門，它研究放射性元素(放射性同位素)的物理化学性質和化学性質、放射性元素的提取法与濃縮法。放射化学的所以分立成为一門独立的学科，是具有下列原因的：1)絕大部分的放射性元素的存在時間是有限的；2)在操作時所用的量通常是极少的(数量級 $10^{-10} - 10^{-20}$ 克)。放射化学的特征在于：第一，放射性元素的濃度比一般物理化学定律所确定的量要小得多，因此对放射性元素的濃度來說，这些定律的适用性，以及此時它們所用的表示式，需要通过实验加以檢驗。第二，在用可称量的量工作时所广泛地采用的絕大部分实验方法，对短寿命放射性元素來說是不适用的。最后一点，由于放射性測量法的高度灵敏性与其特殊性，就可以借放射性元素实现以普通化学方法所不能完成的一系列的研究工作。放射化学可以分为三大部分：1)普通放射化学，是在极稀(放射化学)的濃度下研究放射性物质的一般法則与性質的化学；2)单个放射性元素的化学；3)应用放射化学，是把放射化学方法应用于各科学与技术部門中的化学。

历史概要 法国皮尔·居里与瑪丽·斯克拉托夫斯卡娅·居里于1898年发现了一些新的放射性化学元素——鐳与钋，而后提炼出了它們的长寿命放射性同位素 Ra^{226} 与 Po^{210} ，这就奠定了放射化学的基础。放射化学发展的初期(由1898至1907—11)的特征是积累实验資料。在这个时期內，发现了約35种天然放射性元素。这个时期最著名的放射化学家，法国有居里夫妇，英国有重.索特基，德国有重.盖杰尔与O. 汉，俄国有

T. H. 安東諾夫。第二时期(从 1907—11 到 1924—26)的特征是研究放射化学的基本的特性的法则;当确定了放射性元素在 Д. И. 門捷列夫周期系内的位置后,进行这类工作就有了可能性;当时所发现的所有的放射性元素都是下列元素的放射性同位素:鉍 Tl、鉛 Pb、銻 Bi、釷 Po、釷 Rn、鐳 Ra、錒 Ac、釷 Th、釷 Pa、鈾 N。在这方面工作的首要成就是德国放射化学家 K. 法揚斯与 Ф. 巴涅特(1913)在研究放射性元素与难溶盐的共沉淀作用方面的工作,以及俄国放射化学家 A. C. 卡勞福拉特-契尔文斯基在研究射气方面的工作(1907—14)。这个时期主要是探討为 Г. 黑維时与 Ф. 巴涅特所提出来的放射性指示剂的方法(見同位素指示剂),也就是利用放射性元素来研究非放射性物質的性質,它是应用放射化学的基础。俄国的放射化学家 Б. И. 斯皮欽在 1917 年利用此法测定了难溶盐类的溶解度。此时确定了某些放射性元素(Po、RaE)的溶液具有胶体性質,并进行了放射性元素电化学方面的最早的工作。放射化学发展的第三时期(由 1924—26 到 1934)的特征是由定性的研究过渡到确定定量的定律。这个时期的开始,是与苏联放射化学家 B. F. 赫勞平(1924)在关于放射性元素与結晶沉淀的共晶作用理論方面的工作有关的,也与 O. 汉(1926)在共沉淀現象与射气現象方面的工作相联系着。在这个时期,研究了放射化学的基本的量的定律。在 1934 年法国化学家依林与福列杰里·約里奧-居里发现了人为放射性現象,这也就是放射化学发展的第四时期的开始。由于获得了全部化学元素的人为放射性同位素与新的放射性化学元素,因而就大大地扩大了放射化学的应用范围,并促使它很快地发展起来。在最后的时期内,应用放射化学的发展取得了很大的成就,而同时在研究放射性化学元素的化学性質方面也取得了成就。放射化学是现代工业法制取鈾 U^{235} 与釷 Pu^{239} 的基础,

此两元素是核燃料(見原子能)。

普通放射化学。从实验上确定了下列的一般原理：1)放射性元素的化学性质与其放射性无关。放射性射线可能会引起次要的放射化学过程，但放射性同位素与非放射性同位素的化学性质是相同的；各种同位素的性质上之差别是由它们的质量的不同所引起的，而不是由它们的放射性性质间的差异所引起的(見同位素)。2)放射性元素在极稀浓度的情况下保持有本身所具有的化学特性，并且不带有在溶液中存在量很多的其他元素的性质。这个论点的正确性，已为德国放射化学家 Φ . 巴涅特与 K. 法扬斯以及瑞典放射化学家 A. 斯特烈姆赫里木与 T. 斯维特别尔格(1909年)在研究放射性元素的共沉淀方面的最初的工作所指出了，它的正确性继续为苏联的放射化学家 B. T. 赫劳平与德国放射化学家 O. 汉等的进一步的工作所证实。3)在称量浓度基础上所确立了的基本的物理化学定律在放射性浓度下也是适用的。但这些定律往往仅是经简化并改写成为极端形式，这些式子在溶质的浓度极小时是正确的。

在普通放射化学的章节中，研究放射性元素与难溶盐的共沉淀定律有着特别重要的意义。由于放射性元素的浓度极小，在极大多数的情况下他们不可能生成固相，因此为了沉淀某一放射性同位素时，就需要往含有该元素的溶液中注入“载体”——与该放射性元素在性质上尽可能相近的其他稳定的元素。当载体沉淀时，放射性元素与载体共同沉积。物质处于极稀释状态时的共沉淀定律，已为 B. T. 赫劳平和他的学生们作了相当程度的研究。这个定律只当证实了存在着两种不同形式的共沉淀后才被确定。此两种共沉淀是：a) 共结晶，即放射性元素分布在沉淀的全部体积内，并进入晶格中。b) 吸附，即放射性元素聚集在沉淀物的表面。在固相析出呈很好的晶状物面并没有很大表

面的情況下，主要是發生共結晶；當微晶形沉淀或無定形沉淀具有很大的表面時，它們就能俘獲放射性元素，在這樣的情況下主要是發生吸附。只有放射性元素參入沉淀的晶格之內時，也就是它們與固相的陰離子生成化合物時（與沉淀物生成類質同晶或同二晶物），才發生共結晶現象。

共結晶時，放射性元素轉入到結晶內的量，可由赫勞平方程式求得：

$$\frac{x(100-y)}{(100-x)y} = D$$

式中 x 是放射性元素的百分數， y 是載體在沉淀中的百分數， D 是結晶系數（此常數與相的相對量、放射性元素的濃度和晶體的大小無關）。

當結晶時，系數 D 便決定了放射性元素與載體的分離度：如果 $D > 1$ ，則放射性元素在晶體內，如果 $D < 1$ ，則它濃聚在溶液中，而且 D 與 1 相差得愈大，放射性元素濃聚在溶液中的愈多。這一原理是工業上結晶分離與淨化的基礎。如從熱力學分析所證實的（蘇聯放射化學家 A. H. 拉特涅爾），對在液相和固相中能形成理想溶液的電解質來說， D 值等於載體元素鹽和與具有相應的放射性元素鹽的溶度積之比。對真實溶液來說，特別是在液相中， D 值可能與溶度積之比相差甚大。由於對放射性元素的共結晶作用的研究，就奠定了為 B. F. 赫勞平與 B. A. 尼吉金所探討出的確定新型放射性元素化合物的方法。吸附與共結晶不同，它與晶體的大小有很大的關係。法揚斯和巴涅特以及漢解釋了吸附量與放射性元素化合物的溶解度，以及與表面電荷的符號之間的性質方面的關係。經繼續研究証實了這些關係都是近似的，因為它們只表示出性質方面的特徵，並且沒有考慮到它們之間存在着不同類型的吸附。吸附現象的精確的定量的研究法是為 B. F. 赫勞平與其研究員們（1939）研究出的，結果奠定了放射性元素在極性鹽上的各種吸附類型的量間的定律。最主要的吸附：第一次交換吸附，就是放射性元素從溶液中轉到沉淀的晶格的表層上；第二次交換吸附，此時溶液內的放射性元素的離子為沉淀物的表層上之電荷的靜電吸引而固定在沉淀物的表面上。第一次吸附決定類質同晶離子的吸附量，而第二次吸附決定同二晶離子的吸附量。測定第一次交換吸附量，是研究晶形沉淀表面的研究法的基礎，此法是由巴涅特提出的，並經 B. F. 赫勞平與 M. C. 麥爾庫洛夫（1939）研究成功。

放射性元素在无定形物质(玻璃、金属的氧化物、滤纸等)的表面上的吸附,在放射性化学中起着很大的作用;粒子愈小就愈容易被吸附。但更仔细地研究这些过程,还是刚刚开始。在1913年巴涅特和波兰放射化学家T. 夏特列夫斯基已发现,在某些放射性元素的溶液中它们在一定的pH范围内呈现胶体性质,也就是形成很小的放射性胶体颗粒。苏联的放射化学家H. E. 斯大里科于1930年详细地研究了钋溶液后指出:随pH值的不同,钋可能生成由自己本身组成的固相,也可能吸附在其他杂质上。

在放射化学中广泛地应用电化学方法:以电解法或不贵重金属置换法分离放射性元素,以及用电流法研究放射性元素的迁移。对放射化学来说,电化学法之所以很重要是有下列原因的:电化学不需要用载体并且能获得均匀薄片状的纯放射性元素,这对放射性测量来说是很重要的;从另一方面来说,电化学法具有很大的理论上的意义,因为借助于电化学法可以研究放射性元素在溶液中的状态:元素的原子价,离子电荷的符号与电荷量。由于放射性元素浓度是极稀的和与此相关的其电荷的迁移是微不足道的,因而就不能应用一般的电化学的研究法。为了测定放射性元素的电化学常数,已研究出一些特殊的测量法。法国P. 约里奥-居里(1930)与M. 加依新斯基(1932)对分离放射性元素的电位已作了仔细的研究。

在天然放射性元素中存在着氧的放射性同位素(射气) Rn^{222} , Rn^{220} , Rn^{219} (在室温下它们都是气态物质),这样就有可能使它们从固体部分地进入到空气中。这种现象就称为射气化,在理论与实际中有着很大的意义。自然界中水及大气的放射性,以及与镭、钍和铀等等之制剂接触的物体和空气的活化作用,就是由它们引起的。俄国的放射化学家J. C. 卡劳福拉特-契尔文斯基曾详细地研究了无机盐在不同的温度下之射气化现象,奠定了射气化基本定律,并首次提出,如测得射气化系数,就可以把它用来研究在固体物质中所进行的过程,例如,从一种晶型转化

为另一种晶型，因为这些过程会大大引起射气化学本領。繼而射气化学方法用于研究重金屬氢氧化物的凝胶陈化过程，研究玻璃的化学稳定性和在变形合金中重結晶过程以及在固体中的反应，等等。

放射性元素化学 不穩定与短寿命同位素之元素（如U与Th以及Tc, Pm, Po, At, Rn, Fr, Ra, Ac, Pa, Np, Pu, Am, Cm, Bk, Cf）是根据它們的放射性而发现的；由于它們的量是很少的，根本就不可能用一般的化学法来研究，因此它們的性質最初是借放射化学法来研究的。直到現在，其中某些元素（如At, Fr等）还没分离出能够称量的量来。因而关于它們的化学性質的知識，我們完全靠放射化学法来研究。另一些长寿命的放射性化学元素（Po, Rn, Ra, Ac, Np, Pa, Pu）已获得能够称量的量了，对它們的化学性質用一般的化学法更进一步地作了深入而正确的研究。但想要提取、純化和濃縮这些元素是需要采用特殊的放射化学法，这是因为制得后这些元素的濃度是非常小的緣故。同样如用一般元素的人为放射性同位素工作时，也需要用放射化学法，以及用鈾和鈾的短寿命同位素工作时也用此法。因此，研究提取、濃縮和純化一般元素的放射性同位素方法都包括在放射化学所研究的范围内。这些方法与所提取的放射性元素所要求的純度和核反应（該元素是由这个反应制得的）的特性有关。

在放射化学中，可分两种純度：放射性純的放射性元素，在这样純度的元素中不存在其他放射性元素，但它含有相当量的非放射性元素和共同組元素，另一是不存有载体的化学純的放射性元素，它們所含非放射性元素与共同組元素的量还不到称量之量。放射性元素的純化法与濃縮法，根据在核反应时所制得的放射性元素是否是被輻射体的同位素，而有很大的区别。当制备放射性純的放射性元素（此元素并不是被輻射体的同位素）时，只要加入此放射性元素的穩定同位素，就可以用一般的能称量的

方法来分离。但此时必须保证放射性元素与载体完全混合，以及对污秽的放射性元素也需要加入载体。放射性元素是辐射体的同位素时，其浓缩可利用这样的一个特性来进行，即当发射出 γ -量子或转换电子时，由于反冲的结果，可制得化学纯的元素。这样所获得的元素状态与被辐射体本身的状态是不同的(例如，如果所取的被辐射体是元素有机化合物，则制得的放射性元素是呈无机离子的形式)。制备没有载体的化学纯的放射性元素是非常困难的。此时除用共沉淀法外，广泛地应用了电化学法、有机溶剂的萃取与色层分析法。

当用大量的放射性元素工作时，则增加了其使用上的困难，这是由于放射性元素射线，特别是射线射入有机体内时，会引起有害的作用。因此在利用大量的放射性元素工作时，要采取一定的防护措施：吸收 γ -射线的铅板、特殊的防护衣、密闭的玻璃橱，而当用更大量(大于一居里)时，则借助于操作器完全作远距离操作。

应用放射化学 由于放射化学法具有高度的灵敏性，以及可能借此法来很容易地分别放射性同位素间量的不同及它与同一元素的非放射性同位素间量之差别。因而此法在科学研究和技术上获得广泛的应用。当要追踪很少量的物质或某一元素的原子间之交换位置时，放射化学法就可用来很容易地解决用其他方法很困难或根本不能解决的问题。利用放射性指示剂法之最有价值的例子为：测定极小量的混合物；根据分子间交换速度来研究化学键的强度；自扩散过程和扩散过程；测定岩石的绝对地质年龄；研究动物有机体中物质的交换；临床诊断；研究机械磨损过程和炼铁炉中的过程以及在化学、生物、医学、技术等各个领域中的一系列其他方面的应用。

参考文献

Бреслер С. Е., Радиоактивные элементы, 2 издание, М.—Л., 1952.

Ратнер А. И., Радиоактивные индикаторы и их применение, Л., 1936.

Брода Э., Современное состояние в радиохимии, перевод с английского, 2 изд., М., 1953.

Хан О., Прикладная радиохимия, перевод с [английского], Л.—М., 1947.

Хевеши Г., Радиоактивные индикаторы, их применение в биохимии, нормальной физиологии и патологической физиологии человека и животных, перевод с английского, М., 1950.

Камен М., Радиоактивные индикаторы в биологии, перевод с английского, М., 1948.

篇名: Радиохимия

著者: А. И. Ратнер

译者: 刘程

译自苏联大百科全书第35卷 576至578页

放射性同位素

放射性同位素是化学元素的不稳定同位素，它们经放射性蜕变后转变为其他一些元素的同位素。所有的由稳定性同位素组成的化学元素中都有大量的放射性的（天然放射性的或人为放射性的）同位素。原子序数 $Z=43$ 、 $Z=63$ 以及 $Z>83$ 的放射性元素仅仅是由放射性同位素组成的。

放射性同位素的类型和原子核的结构 原子核的结构和组成原子核的质点间的结合能归根到底决定着：那些同位素是稳定的，那些是放射性的，以及放射性的类型。原子核是由荷正电的质点——质子(p)和中性质点——中子(n)所组成的。核内质子和中子的总数等于质量数 M 。决定核电荷的质子数确定 I. II. 门捷列夫周期系内化学元素的原子序数 Z 。核内的中子数 $N=M-Z$ 。对任一 M 值来说，都有这样的 p 和 n 数的比率，即在这样的比率下 p 不可能转变为 n 或 n 不可能转变为 p 。大部分带有过剩 n 的原子核是 β^- -放射性的（也就是放出电子的），而带有过剩 p 的原子核是通过电子俘获（也就是从原子壳层上俘获电子，一般都是从最靠近核的 K -层上俘获，而很少的情况下是从 L -层上俘获）或以放射出正子 (β^+) 而变化的。例如，在三个同量异位素（即其原子具有相同的质量 M 而不同的化学本性）的情况下，如 ${}_{12}\text{Mg}^{27}$ — ${}_{13}\text{Al}^{27}$ — ${}_{14}\text{Si}^{27}$ ，仅仅 ${}_{13}\text{Al}^{27}$ 的 n 和 p 的数目符合于 n 和 p 的稳定 ($M=27$) 比率。因此同位素 ${}_{12}\text{Mg}^{27}$ 和 ${}_{14}\text{Si}^{27}$ 相应地放出 β^- 或 β^+ 后变为 ${}_{13}\text{Al}^{27}$ ：



β^- -转变的放射性同位素 (β^+ , β^- , 电子俘获) 称为 β^- 不稳定放射

性同位素。

放射性永远是放热(释能)过程,即伴随着放射出电磁波和质点动能形式的能量。因此,放射性原子核的核质量 M_A (而当电子俘获时为 $M_A + m_e$, 此处 m_e 是电子的质量) 比它所变成的原子核的质量 M_B 要大这样多,即等于所放射出的质点的质量

M_C 和按下式与能量 E 相关联的质量 m : $m = \frac{E}{c^2}$, 其中 c 是光在

真空中传播的速度。 m 愈大,放射性同位素所放出的辐射能也就愈大。例如为了在能量上有可能发生 α -蜕变,则必须有下面的关系式 $M_A > M_B + M_C$; 反之, α -蜕变稳定的则以关系式 $M_A < M_B + M_C$ 来表示。 β -转变时也发生与此相似的情形。

同位素的放射性类型与核组成的关系可直观地用质子-中子图来表示出(见第3卷“原子核”一篇内图)。从这图上可看出,在化学元素的 β -稳定同位素链的旁边一方处有 β^- -放射性同位素,而另一方为 β^+ -放射性的或发生有俘获电子的转变。从图上也看出, β -稳定原子的 p 和 n 的数目随 M 增加而改变,这与原子核结构的规律性是相应的。

仔细观察该图可看出,当 M 为某些偶数值时,存在有 β -稳定的同量异位素。例如 β -稳定的同量异位素有: ${}_{50}\text{Sn}^{124}$ — ${}_{52}\text{Te}^{124}$ — ${}_{54}\text{Xe}^{124}$, ${}_{52}\text{Te}^{128}$ — ${}_{54}\text{Xe}^{128}$ 等等。处于它们之间的同量异位素(例如 ${}_{53}\text{I}^{128}$) 是不稳定的,因为它与相邻的同量异位素(例如 ${}_{52}\text{Te}^{128}$ — ${}_{54}\text{Xe}^{128}$) 相比,具有较大的质量。因此它们可能变为与其相邻的两个 β -稳定的同量异位素,因而有两种类型的放射(例如,95%的 ${}_{53}\text{I}^{128}$ 原子放射 β^- 而转变为 ${}_{54}\text{Xe}^{128}$, 而近于5%的 ${}_{53}\text{I}^{128}$ 原子以电子俘获和放射 β^+ 而转变为 ${}_{52}\text{Te}^{128}$)。例如, ${}_{52}\text{Te}^{128}$ 顺序地放射出两个 β^- 后并不能转变为 ${}_{54}\text{Xe}^{128}$ (尽管它具有较大的质量), 这是因为当转变开始时, 它应转变为 ${}_{53}\text{I}^{128}$, 而由于

$_{53}\text{I}^{128}$ 具有較大的質量，并能轉变为 $_{52}\text{Te}^{128}$ ，故轉变为 $_{53}\text{I}^{128}$ 在能量上是不可能的。 $_{52}\text{Te}^{128}$ 同位素仅当同时放射出两个电子时，它才轉变为 $_{54}\text{Xe}^{128}$ 。两次 β -蜕变在原理上是存在的，但从理論上得知，这种蜕变的几率是很小的，因此两次 β -蜕变的存在从实验上已証实，显然仅对于与理論相符合的并具有半衰期 $T \approx 10^7$ 年的 $_{20}\text{Ca}^{48}$ 同位素才有这种現象；而对其他的許多同量异位素， T 值大于 2—3 数量級者，还没有在实验上发现两次 β -转变。因此在 β -稳定核中有許多同量异位素是一次 β -蜕变稳定的，而两次 β -蜕变是不稳定的。

同位素的放射性是以放射性蜕变的几率或半衰期 T 来表征的。核内的过剩中子或质子数目愈多，即核与 β -稳定区相距愈远，放射性转变的平均几率也就愈大，而平均存在时间和放射性同位素的半衰期就愈小。因此，如果研究到同量异位素逐次 β -转变系时，则此系的一个项与最終的 β -稳定同位素相距愈远 [例如， $_{52}\text{Tl}^{135} (T=1 \text{ 分钟}) \xrightarrow{\beta} _{52}\text{I}^{135} (T=6.7 \text{ 小时}) \xrightarrow{\beta} _{54}\text{Xe}^{135} (T=9.2 \text{ 小时}) \xrightarrow{\beta} _{55}\text{Cs}^{135} (T=2 \times 10^8 \text{ 年}) \xrightarrow{\beta} _{56}\text{Ba}^{135} (\text{稳定的})$]， T 值 (单独地研究了奇数 M 和偶数 M 的同量异位素，因为偶数 M 的较为稳定) 愈小。与此相似，如果对比同一化学元素同位素 (并且有相同类型的放射性和对偶数 M 与奇数 M 同位素单独的) 的 T 值时，则发现同位素的 M 值与 β -稳定的同位素之 M 值相差愈大， T 就愈小。原则上，核内过剩的 n 和 p 不仅仅是通过核内 n 和 p 的 β -放射过程，并且也由于直接地放射出过剩的 n 和 p 而得到消失，如当蜕变时生成相应为 p 和 n 放射的元素 $_{3}\text{Li}^5$ 和 $_{3}\text{He}^5$ 就是这样。但对所有已知的原子核来说， n 放射仅在某些情况下才发生，如在 β -蜕变后生成激发态的核的情况下 (最低能级的状态是基态，而任意其他状态为激发态) [例如， $_{35}\text{Br}^{87} (T=56 \text{ 秒}) \xrightarrow{\beta} _{36}\text{Kr}^{87*} \rightarrow _{36}\text{Kr}^{86}$ ， $_{35}\text{I}^{137} (T=19.3 \text{ 秒}) \xrightarrow{\beta} _{54}\text{Xe}^{137*} \rightarrow _{54}\text{Xe}^{136}$ 。多半在 β^- -放射性

核的区域边缘上原子核是中子蜕变不稳定的,而在 β^+ -放射性核(和以电子俘获转变的核)的区域边缘上可能是质子蜕变不稳定的短寿命同位素。

某些 β -稳定的同位素虽然不具有 β -放射性,但还是可能表现其他形式的放射性转变: α -蜕变或自生裂变为两个中间质量数的裂变物。从核内质点的结合能的过程(见图)可看出,差不多从铍($Z=60$)开始, β -稳定的同位素可能经受 α -蜕变,因为这些同位素 $M_{Z+2} > M_Z + M_\alpha$ 。但是对于大多数的直到 ${}_{83}\text{Bi}^{209}$ 的 β -稳定核(除去 ${}_{82}\text{Sn}^{147}$,它的放射性是与从82个 n 起填充核壳层相关联的)来说, α -蜕变能和几率是这样小,以致到现在还没有发现。核壳层填满了126个 n 以后(在铋铊间),结合的能量曲线有较急剧的转变,因此 ${}_{83}\text{Bi}^{209}$ 以后的全部 β -稳定同位素(以及大多数 β -放射性同位素)是 α -放射性的。最重的元素——铋、铊以及超铊元素,其 β -稳定的同位素可能蜕变,除具有 α -蜕变外,也以自生裂变的形式蜕变,这种现象是苏联科学家И. А. 别特尔日斯基和Г. Н. 弗廖罗维在1940年发现的。自生裂变的 T 值,与 α -蜕变的相比,要大得多,但随 M 和 Z 的增加它很快地降低。在1955年的一年中总共发现了277种稳定的同位素,其余的 β -稳定的同位素都是 α -放射性的。但是这些同位素中某些同位素(${}_{23}\text{V}^{50}$, ${}_{48}\text{Cd}^{113}$ 或 ${}_{49}\text{In}^{113}$, ${}_{51}\text{Sb}^{123}$ 或 ${}_{52}\text{Te}^{123}$, ${}_{73}\text{Ta}^{180}$)很可能是具有很大半衰期的 β -放射性的,此外,一部分稳定的同位素可能是两次 β -蜕变不稳定的,而铋后的大部分稳定同位素如上面所指出的,是 α -蜕变不稳定的(但是这些同位素有着一很大的 T 值,以致到现在还发现不了它们的放射性)。从此可看出,稳定同位素系中存在某一不定性。

当研究放射性时,曾发现所获得的半衰期的数目比获得的放射性同位素要多。原因在于,在很多的情况下同一个 M 值应

• 12 •

列入不是一个 T 值而是两个甚至三个不同的 T 值。这一点可以解释为，一个 T 值相应着基态的核蜕变，而其他的 T 值相应着激发能态的核蜕变。但从某些能级上跃迁，有时是不太可能的，因为它们相应于初态与终态的自旋之间的很大差值，对这些跃迁来说， T 值可能是很大的——其数量以小时、日和月来计算。核的这种激发态称为准稳定态。处于准稳定态的核称为同质异能素，而现象的本身称为核的同质异能作用。因此如果不考虑同质异能作用，放射性同位素具有下列类型的放射性： β^- ， β^+ ，电子俘获， α -蜕变和自生裂变。

天然放射性同位素 除了属于放射系组成内的天然同位素外，长寿命的钍同位素 (Th^{232}) 和铀同位素 (U^{235} 和 U^{238}) 以及长寿命 (半衰期 $T > 10^8$ 年) 的同位素： K^{40} ， Rb^{87} ， In^{115} ， La^{138} ， Sm^{147} ， Lu^{176} ， Re^{187} ，都是放射系的始祖同位素，在自然界中也发现有相当少量的快蜕变的放射性同位素。由于各种核反应，它们就在地球上不断地产生。宇宙射线能引起生成放射性核的许多核反应。例如，由于宇宙射线的中子 (n) 与氮同位素 (N^{14}) 在空气层内相互作用，就生成半衰期 $T = 5568$ 年的碳的放射性同位素 (C^{14}) (反应为 $\text{N}^{14} + n \rightarrow \text{C}^{14} + \text{H}^1$)，半衰期 $T = 12$ 年的氢的放射性同位素 (H^3) (反应为 $\text{N}^{14} + n \rightarrow \text{C}^{13} + \text{H}^3$)，以及 Be^7 。在天然碳和氢中发现有小量的以混合物形式存在的放射性碳 (C^{14}) 和氢 (H^3) (浓度比 $\frac{\text{C}^{14}}{\text{C}^{12}} = 10^{-12}$ ， $\frac{\text{H}^3}{\text{H}^1} = 3 \times 10^{-18}$)。自然界中 H^3 的存在就引起其子系物 He^3 ，即氢的轻同位在地球的大气层内堆积 (它在大气层中的浓度比 $\frac{\text{He}^3}{\text{He}^4} = 1.3 \times 10^{-4}$)。

除此而外，当铀原子核和钍原子核自生裂变时，以及在由于放射性元素所放射出的射线的作用下而发生各种核反应时，所生成的中子同样可以引起在自然界中生成放射性同位素。例

在实际工作中某些常用的放射性同位素

元素名称	放射性同位素	射线类型	α 、 β -粒子或 γ -射线 强度(百万电子伏特)	半衰期	制备同位素的基本反应
锂	Li^3	β^-	0.019(β^-)	12.4年	$\text{Li}(n, \alpha)\text{E}^+$
碳	C^{14}	β^-	0.155(β^-)	5568年	$\text{N}^{14}(n, p)\text{C}^{14}$
钠	Na^{22}	β^+, γ	0.54(β^+); 1.3(γ)	2.6年	$\text{Mg}^{24}(d, \alpha)\text{Na}^{22}$
钠	Na^{24}	β^-, γ	1.39(β^-); 2.76 1.3(γ)	15小时	$\text{Na}^{23}(d, p)\text{Na}^{24}$
磷	P^{32}	β^-	1.7(β^-)	14.3日	$\text{S}^{32}(n, p)\text{P}^{32}$
硫	S^{35}	β^-, γ	0.17(β^-)	87.1日	$\text{Cl}^{35}(n, p)\text{S}^{35}$
钾	K^{42}	β^-, γ	3.58(β^-)	12.4小时	$\text{K}^{41}(d, p)\text{K}^{42}$
钙	Ca^{45}	β^-	0.25(β^-)	152日	$\text{Ca}^{44}(d, p)\text{Ca}^{45}$
锰	Mn^{54}	电子俘获, γ	0.84(γ)	310日	$\text{Cr}^{52}(d, n)\text{Mn}^{54}$
铁	Fe^{59}	β^-	0.46(β^-)	45日	$\text{Fe}^{58}(n, \gamma)\text{Fe}^{59}$
钴	Co^{60}	β^-, γ	0.31(β^-); 1.33与1.17(γ)	5.3年	$\text{Co}^{60}(n, \gamma)\text{Co}^{60}$
铜	Cu^{64}	β^-, β^+, γ	0.57(β^-)	12.8小时	$\text{Zn}^{64}(n, p)\text{Cu}^{64}$
锌	Zn^{65}	β^+, γ	0.32(β^+); 1.12(γ)	250日	$\text{Zn}^{64}(n, \gamma)\text{Zn}^{65}$
溴	Br^{82}	β^-, γ	0.46(β^-)	34小时	$\text{Br}^{80}(n, \gamma)\text{Br}^{82}$
铯	Cs^{90}	β^-	1.46(β^-)	53日	$\text{Sr}^{88}(d, p)\text{Sr}^{90}$
碘	I^{131}	β^-, γ	0.6(β^-); 0.36(γ)	8日	$\text{Te}^{130}(n, \gamma)\text{Te}^{131} \rightarrow \text{I}^{131}$
钋	Po^{210}	α	5.3(α)	138.3日	$\text{Bi}^{209}(n, \gamma)\text{Bi}^{210} \rightarrow \text{Po}^{210}$

如,这种过程可导致在铀矿中生成量为不多的钷(其浓度与钍相比的数量级为 10^{-14}),用特殊灵敏的分析方法得以检出这种放射性同位素钷。

放射性同位素的生产 放射性同位素广泛地应用于科学研究、医学、工业和农业中,现在主要以核反应堆法大规模地生产放射性同位素。广泛地应用着放射性特征适宜(T 值不非常小而放射性射线类型很适合于用来精确地记录蜕变的各过程)的放射性同位素。表中列出了在实际工作中常用的一些放射性同位素。

为了制备大量的放射性同位素一般都采用原子核链式裂变反应和俘获或发射中子反应(n, γ 和 $n, 2n$ 反应)以及在氦核和 α -质点作用下所发生的反应(d, p 和 α, p)。放射性同位素也可在核反应堆中和在荷电质点加速器上制得。例如,为了在核反应堆中制备同位素 C^{14} ,通过反应堆的内部空间(在此空间恒有高体积浓度的中子)用抽气机不断地对 10 分之几升的硝酸铵水溶液进行抽气。根据上面所提到的反应结果获得同位 C^{14} 。当进行核反应时发生下列对制备放射性同位素的技术来说很重要的现象:氮转化为碳的反应伴随有大量能量的析出,因此获得大能量的 C^{14} 原子就从分子(在核反应前, C^{14} 是处于其中的)中抛出。经过很短的时间,由于它们和周围介质的分子进行碰撞,其能量降低到不能引起周围分子电离的程度(由数千电子伏特降到 ≈ 10 电子伏特),即使这样,它们的能量还超过周围分子热能数百倍。因此,就造成了它们的温度高于周围介质数百倍以上。是由于这一点,它们的化学活性是非常大的,因而它们常常被称为“热原子”,而由热原子所引起的化学过程称为“热原子化学”。碳 C^{14} 热原子与周围物质相互作用,同时发生一系列的化学反应。生成由碳、氢、氧组成的最简单结构的分子的可能性最大。