

朱 桐

朱建华

朱根根等 编

HE YAO XUE JI CHU

核药学基础

上海医科大学出版社

1
T

核 药 学 基 础

主 编 朱 桐

副主编 朱建华 朱根根

编 者(以姓氏笔划排列)

王 蕾 朱 桐 朱建华

朱根根 杜 佺 沈鸣华

钟高仁 龚佳玲

上海医科大学出版社

内 容 提 要

本书是为药学院核药学教学的需要而编写的,内容分为核物理和放射性药物的制备及应用两大部分,前者主要介绍核物理基础、放射性测量、放射卫生防护;后者主要介绍放射性药物及标记化合物的制备方法、质量控制及临床上的应用,对核药学领域的一些新进展如放射性竞争结合分析及医药学中的示踪研究等也作了适当的介绍。并附有示教实验。

本书主要作为药学院本科生的教科书,但也可作为核医学、核药学专业及从事这些工作的有关人员的参考书。

(沪)新登字 207 号

责任编辑 阮天明

封面设计 吴 平

核 药 学 基 础

主编 朱 桐

上海医科大学出版社出版

上海市医学院路 138 号

邮政编码 200032

新华书店上海发行所经销

商务印书馆上海印刷厂印刷

开本 787×1092 1/16 印张 13 字数 316 000

1992 年 7 月第 1 版 1992 年 7 月第 1 次印刷

印数 1—4000

ISBN 7-5627-0119-9/R·110

定价: 3.40 元

绪 言

放射性核素在我国医药卫生事业中的应用已有 30 多年历史,大量事实证明,这一新技术在人民保健工作中有很重要的意义。

从临床医学来看,核技术在检查和诊断各种疾病中具有早期、简便、迅速、可靠而又无创伤性等优点。如放射性碘引入体内,很快就集中在甲状腺,从体外测定甲状腺的放射性变化,可判断甲状腺机能是亢进、低下还是正常;又如某些化合物能均匀地分布于肝脏,如果它们带有放射性核素,就可以在体外测知它们的分布情况,若有肿瘤就会出现分布异常(缺损或浓集)。

从基础医学来看,放射性核素的主要用途是示踪,它在生理、药理、病理、生化以及免疫学等学科中应用非常广泛。因为放射性核素可以给被研究对象,如某一元素、某一化学基团、某一化合物或某种细胞、微生物、寄生虫等加上一个标记,以便在实验中追踪该对象的去向,包括吸收、分布、排泄、运动、转化等,有利于对许多生命现象进行动态观察。如多年来人们一直以为,牙齿和骨骼一旦长成后就处于静止状态,可是给动物服用放射性磷酸盐后,发现骨和牙齿中的磷很快就出现了放射性,停止服用后,这种放射性又逐步消失。如果没有放射性核素的示踪作用,就无法发现这种新陈代谢过程。

对药事业来说,当前我国制药工业发展很快,临床上应用每种新药都需要了解它的吸收、分布、排泄和在体内的变化以及生物利用度,以便更好地掌握用药方法。对此,放射性核素的示踪实验也是很有效的工具。凡是没有其他简易测定方法的药物,只要已知化学成分(包括中草药有效成分),几乎都可以用适当的放射性核素标记,再以不同途径给动物服用,然后在不同时间取出有关的脏器或体液等,就可以利用对放射性的测定加以分析,较方便地了解该药物在体内的动态过程,为临床用药提供有价值的参考资料。

总之,放射性核素及核技术在医药学中的应用是非常广泛的,发展也是非常迅速的。国外于 1946 年首先把人工生产的放射性核素用于临床,以后放射性药物(或称放射性药品)在医学中用于诊断和治疗逐步增加。我国 1958 年以来也有了很大发展,这主要取决于高质量放射性药物的研制和生产供应,核技术的发展和核子仪器的改进以及广大核医师的努力。

放射药理学(Radio Pharmacy)或称核药理学(Nuclear Pharmacy)就是适应时代的潮流和需要,在药理学中最新发展起来的分支学科之一。它的主要任务是研究放射性核素标记药物的制备、理化特性、分析鉴定以及应用。放射药理学和核医学有非常密切的关系,放射药理学的主要技术和理论基础与实验核医学有很多共同之处,而放射药理学研究成功的各种放射性药物,提供给临床核医学用于医学实践,是促进临床核医学发展的一个重要方面,当然临床核医学也不断对放射药理学提出新的要求,促使放射药理学不断向新的水平发展。所以放射药理学是一门边缘学科,是原子核科学技术与医学密切结合的产物,它的发展始终和原子核科学技术及临床核医学的发展交织在一起。

由于放射性药物用于人体,必须符合药剂学的质量控制,因此放射药剂师在此领域担负

主要的责任,要把药理学、药剂学的知识和经验,用于制造、分配放射性药物以及放射性药物的药理研究。

在过去 30 多年中,放射性药物作为核医学的基本工具之一,获得了很大发展,不仅在数量上、质量上、品种上都有了很大进展。尤其是近 10 年来,在短半衰期核素的应用方面、体外竞争分析应用方面,都发展了药盒的研制配套工作,以使放射性药物在医学临床应用及实际工作方面都大为简化方便,从而扩大了应用面。尤其是计算机的应用普及使各个领域的各种数据处理高度自动化,促使放射免疫分析的质量控制、示踪动力学、受体的放射配基分析等都在质量上明显提高。受体的研究涉及细胞调控,特别是脑功能本质的探讨,被认为是当前生物医学中最重要的课题之一,而放射配基结合分析法是直接对受体定性和定量的唯一手段,现已建立了几十种受体的分析方法,合成的标记配基多达 100 余种。临床核医学中,小型回旋加速器和发射断层仪(EOT)的应用,促使放射药理学向更高的水平发展,一方面是研制更好的心脑血管动态显像剂,另一方面是建立快速标记法,研制超短寿命核素标记的功能代谢显像剂。

目前不少常用的标记物及放射性药物的供应已基本立足于国内,但大多还是仿制国外的产品。摆在我们专业工作者面前的任务,一方面要进一步加强科学研究,不断推进放射性药物的发展,另一方面要通过教学和科研协作等方式,不断扩大队伍,使核技术的原理方法能介绍到其他学科,更好地推动医药学的现代化进程。国际上最近成立了跨学科的国际同位素学会(International Isotope Society),其主要宗旨就是通过世界性的多学科的学术交流,进一步推动同位素标记物的制备和应用向更高水平发展。

总之,30 多年来,我国放射药理学的发展,在人员、设备、基地等方面都有了一定基础,但与国际上先进水平相比,还有很大差距,如设备方面缺少大型精密仪器,放射性药物没有供应中心,科研方面没有重点基地,人员培训没有对口专业等等,希望今后能发挥多学科、多兵种协同作战的优势,为核药学的提高与普及创造条件,为四化做出应有的贡献。

(朱 桐)

目 录

绪言	1
第一章 核物理基本知识	1
第一节 原子核结构	1
第二节 原子核转变	5
第三节 放射性核素衰变规律	12
第四节 放射性活度	15
第五节 射线和物质的相互作用	17
第二章 放射性测量	22
第一节 探测器	22
第二节 放射性测量及测量装置	30
第三节 放射性测量的统计误差	38
第三章 液体闪烁测量技术	44
第一节 液体闪烁测量的基本原理	44
第二节 闪烁液	48
第三节 样品制备	54
第四节 猝灭校正方法	60
第五节 契伦科夫计数	66
第六节 液体闪烁计数器	68
第四章 电离辐射剂量及放射卫生防护	75
第一节 电离辐射剂量	75
第二节 放射卫生防护	80
第五章 放射性核素标记化合物	93
第一节 医用放射性核素的来源	93
第二节 放射性核素标记化合物的一些基本概念	96
第三节 制备放射性核素标记化合物的基本方法	97
第四节 几种常用核素的标记化合物制备	100
第五节 放射性核素标记化合物的纯化和鉴定	112
第六节 放射性标记化合物的稳定性与贮存	117
第六章 放射性药物	120
第一节 放射性药物简介	120
第二节 放射性药物的临床应用	120
第三节 适用于制备放射性药物的核素	122
第四节 放射性药物的剂型	124

第五节 常用放射性药物的制备	126
第六节 放射性药物的质量控制	132
第七节 放射性药物的设计	133
第七章 竞争放射分析	141
第一节 概述	141
第二节 放射免疫分析基本原理	142
第三节 抗血清的制备及质量鉴定	145
第四节 标记抗原	152
第五节 放射免疫分析中的分离技术	152
第六节 放射免疫分析法的建立及有关问题	154
第七节 放射免疫分析的质量控制	158
第八节 放射受体分析的几个问题	163
第八章 医药学中的示踪研究	172
第一节 放射自显影	172
第二节 稳定核素在医药学中应用	177
第三节 同位素示踪实验	185
示教实验	191
实验一 放射性测量仪器及测量技术	191
实验二 放射性药物的制备	195
实验三 氟标记化合物的制备	197
附录一 国际单位制词头	199
附录二 法定计量单位	199

第一章 核物理基本知识

原子核物理是研究原子核的结构和性质、原子核的转变及其规律、射线与物质的相互作用的一门科学。

第一节 原子核结构

一、原子的结构

原子是很微小的粒子,半径为 10^{-8}cm 数量级。现代原子结构概念认为,原子是由原子核及若干围绕原子核并按一定轨道运行的电子组成。核外电子的运动和分布比较复杂,从核物理的角度,可简要概括以下基本规律:

1. 对中性原子来说,核外电子所带的负电荷(Negative Charge)数等于原子核所带的正电荷(Positive Charge)数,也等于原子序数(Atomic Number)。如碳原子的序数为 6,原子核带有 6 个正电荷,核外有 6 个电子。

2. 核外电子围绕原子核沿一定轨道不断地运动,这些轨道分布在原子不同的壳层上,每一壳层有一定数目的轨道,每条轨道只容纳一个电子,最靠近核的壳层称 K 层,有两条轨道,向外依次为 L 、 M 、 N ……层。每层所能容纳的电子数目可用 $2n^2$ 表示, n 表示层次,如 L 层 $n=2$ 。实际观察到的每层电子数最多不超过 32 个。 K 层电子离核最近,与原子核的相互吸引力最强,其势能(Potential Energy)最低。愈往外层,电子受到的原子核吸引力愈小,其势能愈高。

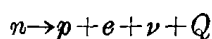
3. 原子在正常或稳定状态时,电子总是优先占据势能较低的内层,内层填满再依次向外层填充,原子的这种状态称为基态(Ground State)。当原子受到外界作用(如射线照射)时,其某个或某些电子可能获得能量,从较低能级的内层跃迁到较高能级的外层,即所谓的激发(Excitation),此时原子就处于激发态(Exoited State)。激发态原子是不稳定的,高能级轨道的某个或某些电子很快就会向低能级轨道跃迁以填补所缺的电子。此时原子从激发态回到基态,称为退激(De-excitation),电子的多余能量则以光子(Quantum)形式释放出来。

如果电子获得的能量较大,则该电子可脱离原子核引力的束缚而离开原子成为自由电子,原子本身则变成带正电荷的离子。这一现象称为电离(Ionization)。

二、原子核的组成和性质

原子核由质子(Proton, p)和中子(Neutron, n)组成。中子和质子统称为核子(Nucleon),它们的质量差不多相等(中子略大)。通常用下列符号表示不同核素的原子核: ${}_Z^AX$, X 为元素符号; Z 是原子序数,等于核内质子数; A 是原子质量数,等于核内质子数及中子数之和; Z 也可不标出而简写成 AX ,如 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^{131}\text{I}$ 等。中子是一种不带电荷的中性粒子,静止质量为 $1.6747 \times 10^{-24}\text{g}$; 质子就是氢核,它带有一个正电荷,静止质量为 1.6725

$\times 10^{-24}\text{g}$ 。自然界里中子并不单独存在,而是在原子核发生变化时,才从核里释放出来。中子处于自由状态时不稳定,会蜕变成为一个质子、一个电子和一个中微子。



式中 e 表示电子,静止质量为 $9.1089 \times 10^{-28}\text{g}$; ν 表示中微子(Neutrino),静止质量不到电子静止质量的万分之五; Q 表示蜕变过程中释放的能量。

不同的原子核是由不同数目的中子和质子组成,如氢原子核是由一个质子所组成。在一个核里,质子和中子的数目并不是可以任意比例存在。一般说来,在质子数小的稳定核中,中子数差不多等于质子数或略多一些,只有 ^1H 和 ^3He 例外;在质子数大的稳定核中,中子要比质子多;在质子数很大时,中子要比质子多 50% 左右。任何含有过多中子或质子的核,都会是不稳定的。

核子间除了有质子与质子间的静电排斥力外,尚存在一种很强的具引力性质的力,称核力。核力克服了静电斥力而使核子得以紧紧地结合在一个小体积里。核力的性质尚未完全了解,已知有以下几点:

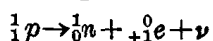
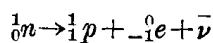
1. 核力大 核子之间的作用力非常大,超过了自然界中其他的作用力(万有引力、电磁作用力等)。有一个简单的对比,普通的纸是由分子组成的,我们可以一扯就破,如果这张纸是由原子核组成的,那就得几百辆机车的力才能扯破它。

2. 力程短 所谓力程短是指力作用所能达到的空间距离。实验指出,两个核子间的距离在 $5 \times 10^{-13}\text{cm}$ 以内时,它们之间的作用力就很强,远远超过质子与质子之间的电磁排斥力。而当核子间的距离大于 $5 \times 10^{-13}\text{cm}$ 以后,作用力很快就减低以至微不足道。

3. 核力大致相等 质子与质子之间,中子与中子之间以及中子与质子之间的核力大致相等。

4. 饱和性 已知道各种原子核的密度大致相等(约 10^{14}g/cm^3)。核子多的原子核大,核子少的原子核小,所以不论是哪个原子核,每个核子在每个核中所占的体积大致一样,加上每个核子只能在很短的力程内和其他核子相互作用,因此,每个核子至多只能和周围的几个核子起作用,这种性质称为核力的饱和性。

5. 交换性 质子和中子起核力作用时,能交换其电荷,质子变为中子,中子变为质子。



式中 ν 和 $\bar{\nu}$ 分别称为正、反中微子。

三、核素、同位素、同质异能素

1. 核素 核素(Nuclide)是表示某种原子具有一定特征的名称。具有相同的质子数、中子数和能态的原子,称为一种核素。反之,质子数、中子数和/或能态不同的原子为不同的核素。如 ^1H 、 ^{12}C 、 ^{99}Tc 、 ^{99m}Tc 都是不同的核素。由此可见,每种元素可有多种核素。现已知的核素约有 2 000 种,分别属于 100 多种元素。

2. 同位素 属于同一种元素的各核素,具有相同的质子数,在元素周期表中分配在同一位置,但中子数不同,或质子数、中子数均相同但核的能态不同,它们称为该元素的同位素。所以同位素是表示核素间相互关系的名称。同一元素的不同同位素,核物理性质可有很大差异,但核外电子数相同,故化学行为基本相同。如 ^1H 、 ^2H 、 ^3H 是同位素,其中 ^1H 、 ^2H 是稳定同位素(Stable Isotope),而 ^3H 是放射性同位素(Radio Isotope)。前者不能自发

发生核转变而后者会自发发生核转变并放出不同射线。如 ^{125}I 和 ^{131}I 也是放射性同位素, ^{131}I 和 ^{131}Xe 就不是同位素而是同质异能素(Isobar)。

3. 同质异能素 核内中子数和质子数都相同, 但核所处的能态不同的核素称为同质异能素(Isomer)。如 ^{99m}Tc 是 ^{99}Tc 的激发态, 其中前者质量数后的符号“m”表示亚稳态(Metastable State), 有时也写在元素符号的右上角。

四、质量(Mass)、能量(Energy)和结合能(Binding Energy)

基本粒子的质量都是十分小的, 用克作单位实在太, 国际上统一规定以 ^{12}C 原子量的 $1/12$ 为质量单位, 称原子质量单位(Atomic Mass Unit, amu), 一个 ^{12}C 原子的静止质量为 $12\,000\,000\text{amu}$, 其他原子或粒子的质量就可以与 ^{12}C 作比较而定。按此标准, $1\text{amu} = (1.660\,53 \pm 0.000\,08) \times 10^{-24}\text{g}$, 电子、质子和中子静止质量分别为 $5.485\,97 \times 10^{-4}\text{amu}$ 、 $1.007\,276\,6\text{amu}$ 、 $1.008\,665\,4\text{amu}$ 。

在原子核物理中, 一般采用的能量单位是电子伏特(eV), 与其他能量单位的关系是:

$$1\text{eV} = 1.602\,189\,2 \times 10^{-19}\text{ 焦耳(J)}$$

此外, 还常用兆电子伏(MeV)作为能量单位。 $1\text{MeV} = 10^6\text{eV}$ 。

质量和能量都是物质必具的属性, 任何物体都同时具有质量和能量, 在经典力学中, 二者的关系为:

$$E = mc^2 \quad (\text{质量能量相互联系定律})$$

式中 E 为物质的能量, m 为物质的质量, c 为光在真空中的速度。

在相对论中, 物质的质量随着物质的速度改变, 即:

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

· 式中 m_0 为物质的静止质量, v 为物质的运动速度, c 为光在真空中的速度。那么物质相应的能量为:

$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

常见的几种基本粒子的静止质量能如下:

$$1\text{amu}(\text{相应的能量}) = 931.478\text{MeV}$$

$$1e \quad 0.511\,006\text{MeV}$$

$$1p \quad 938.256\text{MeV}$$

$$1n \quad 939.550\text{MeV}$$

$$1^4\text{He} \quad 3.728\,33 \times 10^3\text{MeV}$$

对光子(电磁辐射)而言, 它没有静止质量, 因而也就没有相应的静止质量能。光子的能量 $E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$, 全部相当于动能。根据质能联系定律, 光子具有质量 $m = \frac{h\nu}{c^2} = \frac{h}{c\lambda}$ 。 $h = 4.14 \times 10^{-15}$ 电子伏特秒, 称普朗克常数, λ 为光子的波长。

原子核物理提供这样的事实: 由中子、质子和电子所组成的原子其质量并不等于各个粒子的代数, 而是比它小。如氦原子的质量就比组成它的各个成分的质量总和小:

$$m_{\text{He}} < (m_n + m_p + m_e)$$

$$= 2.014\,102 - (1.008\,665 + 1.007\,277 + 0.000\,549)$$

$$= -0.002\,389\,\text{amu}$$

这个差值称为质量亏损(Mass Defect)。质量亏损现象与核子的结合能密切相关。在原子核中,核子间相互吸引力很强,而任何两个相互吸引的物体在相互靠近时都放出能量(因为势能变小)。所以,当自由存在的单个核子相互靠近而结合成原子核时便释出大量的能量,这能量称为结合能。根据质能联系定律,能量的减少(由于释放了能量),意味着质量减少,所以核的质量比其组成核子的质量总和小,所减少的质量就是质量亏损。通过质能联系定律,利用质量亏损计算原子核的结合能。如氦的结合能就应为: $0.002\,389\,\text{amu} \times 931.478\,\text{MeV/amu} = 2.225\,3\,\text{MeV}$,其中包括中子和质子结合成核的结合能以及核和电子结合成原子的结合能,但后者比前者小好几个数量级,因此可把上述结果看作是核的结合能。表 1-1 示出每个核子结合能和原子质量数 A 的关系。

表 1-1 原子质量和结合能

核素	原子质量(amu)	结合能(MeV)	每一核子结合能(MeV)
^2H	2.014 102	2.225	1.112 5
^3H	3.016 050	8.482	2.827
^4He	4.002 603	28.296	7.074
^9Be	9.012 186	58.163	6.463
^{10}B	10.012 939	64.750	6.475
^{11}B	11.009 305	76.206	6.933
^{11}C	11.011 432	73.443	6.677
^{12}C	12.000 000	92.163	7.680
^{13}C	13.003 354	97.109	7.469
^{13}N	13.005 738	94.106	7.239
^{14}C	14.003 243	105.286	7.520
^{14}N	14.003 074	104.659	7.476
^{15}O	15.003 070	111.952	7.463
^{16}O	15.994 915	127.620	7.976
^{18}F	18.000 937	137.371	7.632
^{22}Na	21.994 437	174.147	7.916
^{24}Na	23.990 962	193.526	8.064
^{27}Al	26.981 539	224.953	8.332
^{32}P	31.973 910	270.853	8.464
^{32}S	31.972 074	271.880	8.496
^{36}S	34.969 031	298.823	8.538
^{36}Cl	35.968 309	306.790	8.523
^{40}K	39.964 000	341.524	8.538
^{46}Ca	44.956 190	388.374	8.631
^{51}Cr	50.944 768	444.312	8.712
^{55}Fe	54.938 299	481.059	8.747
^{60}Co	59.933 813	524.812	8.747
^{67}Ga	66.928 216	583.395	8.707
^{86}Rb	85.911 193	747.915	8.697
^{99}Tc	98.906 249	852.754	8.614
^{113}In	112.904 089	963.071	8.523
^{125}I	124.904 578	1 056.343	8.450
^{131}I	130.906 127	1 103.329	8.422
^{137}Cs	136.906 770	1 149.600	8.391
^{140}Ba	139.910 565	1 169.491	8.354
^{186}Au	197.968 231	1 565.923	7.908
^{197}Hg	196.967 360	1 557.881	7.908
^{203}Hg	202.973 880	1 601.168	7.888
^{210}Tl	209.990 054	1 640.888	7.814

对于 A 小的核, 每一核子结合能变化很大, 有四个峰值出现在 ${}^4_2\text{He}$ 、 ${}^9_4\text{Be}$ 、 ${}^{12}_6\text{C}$ 及 ${}^{16}_8\text{O}$ 处。当 A 大于 20 后, 每一核子结合能的变化比较小, 曲线较平坦, 当 A 大于 140 后, 逐渐减低。当 A 为 238 时, 每一核子结合能的值约为 7.5 MeV。所谓原子能的释放, 就是使每一核子结合能低的核转变成每一核子结合能高的核。有两种方法能够达到这个目的。第一种方法是利用重核分裂成为二个质量中等的核, 称为裂变反应(Fission Reaction)。例如:

$$\begin{aligned} & {}^{235}_{92}\text{U} + n \rightarrow {}^{95}_{42}\text{Y} + {}^{137}_{50}\text{Xe} + 2n + Q \\ Q &= [(235.043\,943 + 1.008\,665) - (94.912\,540 \\ &\quad + 138.911\,840\,9 + 1.008\,665 \times 2)] \times 931.478 \\ &= 190.858 \text{ MeV} \end{aligned}$$

第二种方法是将两个或数个轻的核聚合成一个较重的核, 称为聚变反应(Fusion Reaction)。例如:

$$\begin{aligned} & {}^2_1\text{H} + {}^3_1\text{H} = {}^4_2\text{He} + n + Q \\ Q &= [(2.014\,102 + 3.016\,050) - (4.002\,603 \\ &\quad + 1.008\,665)] \times 931.478 \\ &= 17.59 \text{ MeV} \end{aligned}$$

第二节 原子核转变

一、稳定原子核和不稳定原子核

原子核可分为两大类: 一类为稳定存在的, 不会自发地发生核内成分或能级的变化, 或者发生的几率非常小, 半衰期超过 10 亿年。这类原子核称为稳定性原子核, 相应的核素称为稳定核素(Stable Nuclide); 另一类原子核则是不稳定的, 会自发地转变为别的原子核, 或自发地发生核能态变化, 变化时伴有射线的发射。这类原子核称为放射性原子核, 相应的核素称为放射性核素(Radioactive Nuclide)。放射性核素分为两大类, 一类是自然界存在的天然放射性核素; 另一类是核反应产生的人工放射性核素。

在已知的约 2000 种核素中, 稳定核素仅有 274 种。将这些核素的质子数 Z 对 中子数 N 作图(图 1-1), 便可看到, 稳定核素的原子序数小的大致处在 $N=Z$ 的直线上。当质量数 A 增加时, 稳定原子核的点子逐渐向这条线的上方中子数加多的方向偏移。由此可见, 稳定性核素的质子/中子比值有特定的规律, 不能太大或太小, 因为核子间除相互吸引的短程核力(Nuclear Force)外, 还有质子间相互排斥的库伦力(Coulombian Force), 如果太大或太小, 核内两种力的平衡情况就发生变化。原子序数增大时, 质子数增多, 库伦斥力加大, 此时就需要中子数增加得更多些, 使核力得以增强, 同样亦加大了质子间距离, 使斥力不致增加太多, 结果两力间仍能取得平衡, 保持核的稳定。但是质子数增大到一定值($Z>83$)后, 核力不再能与库伦斥力保持平衡, 就会引起原子核的衰变。发生 β^- 和 β^+ 衰变的放射性核素分别处于稳定核素带的上方和下方, 发生 α 衰变的放射性核素在最上面。

二、放射性核衰变方式

不稳定的原子核自发地发生转变并放出射线, 这个过程称为放射性衰变, 简称核衰变(Nucleus Disintegration)。不同的放射性原子核往往有不同的衰变方式, 在不同形式衰变过程中发射出不同的射线束, 基本上有下列几种类型:

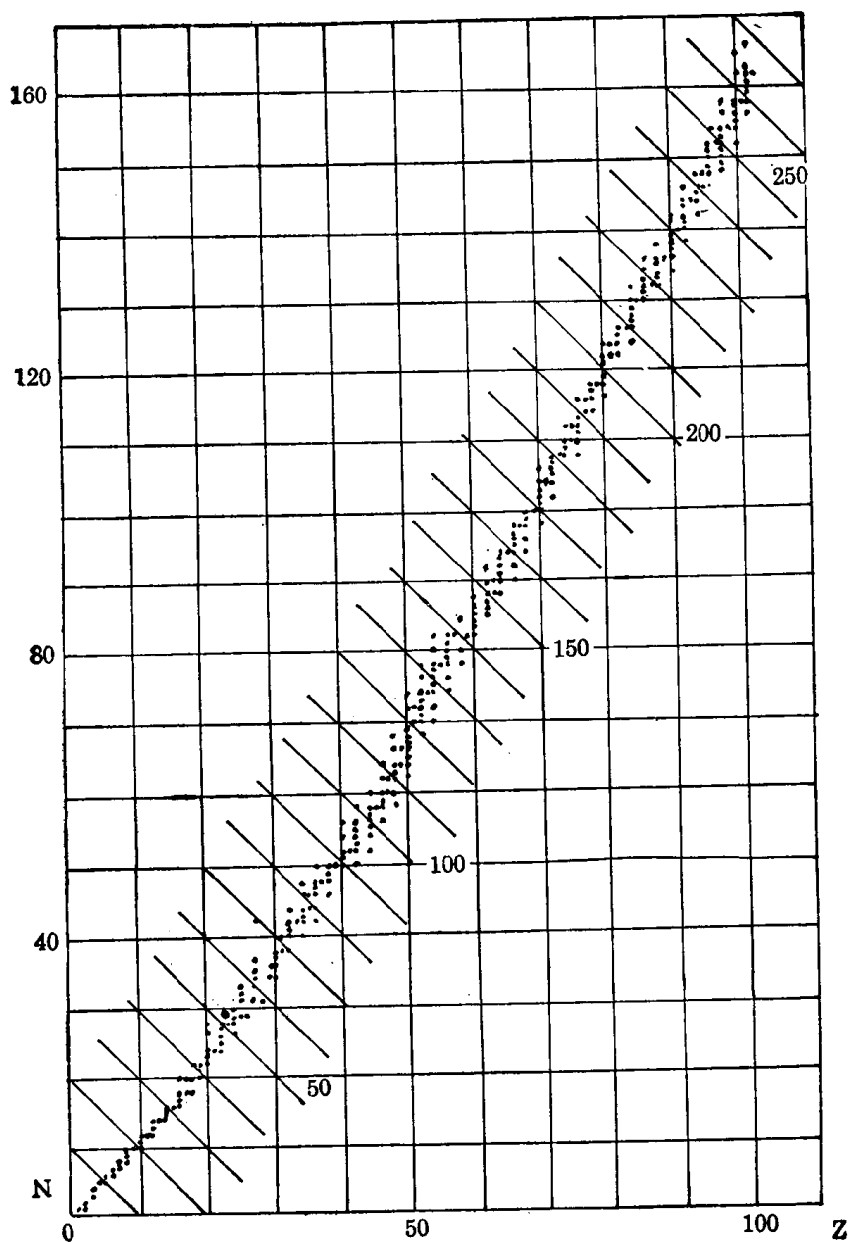
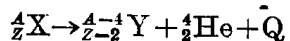


图 1-1 稳定原子核(引自梅镇岳编著的《原子核物理学》)

(一) α 衰变(Alpha Decay)

不稳定核自发地从核内放射出 α 粒子(Alpha Particle)而变成另一种核的过程称为 α 衰变, α 衰变主要发生于重元素的核素(即原子序数大于 82)。可用以下通式表示:



式中 X 表示母核(Parent Nucleus)、Y 表示子核(Daughter Nucleus), α 粒子实际就是两个质子和两个中子组成的氦核 ${}_2^4\text{He}$ 。母核经 α 衰变后, 子核比母核少了两个中子和两个质子, 因而中子数和质子数之比发生了改变, 使子核趋向于稳定。式中 Q 表示在衰变过程中由原子核内部所释放出的能量, 称衰变能(Decay Energy)。例如:



$$\begin{aligned}
 \text{质量亏损}(\Delta m) &= m_{\text{Ra}} - m_{\text{Rn}} - m_{\text{He}} \\
 &= 226.025\,438 - 222.0176\,10 - 4.002\,603 \\
 &= 0.005\,225\,\text{amu}
 \end{aligned}$$

$$Q = 0.005\,225 \times 931.478 = 4.87\,\text{MeV}$$

Q 是正值说明上式的反应能自发进行, 所以凡是能够产生 α 蜕变的核素一定是母体质量大于子体和氦核的质量总和。

衰变能按质量比分配于子核和 α 粒子:

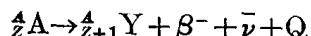
$$E_{\text{Rn}} = 4.87 \frac{m_{\text{He}}}{m_{\text{He}} + m_{\text{Rn}}} = 0.086\,\text{MeV}$$

$$E_{\alpha} = 4.87 \frac{m_{\text{Rn}}}{m_{\alpha} + m_{\text{Rn}}} = 4.77\,\text{MeV}$$

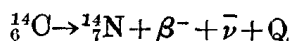
实测结果, 释出的 α 粒子有两组: 一组能量为 $4.777\,\text{MeV}$, 占 94.3% ; 另一组能量为 $4.589\,\text{MeV}$, 伴有 $0.188\,8\,\text{MeV}$ γ 射线, 占 5.7% 。 α 粒子及 γ 光子的能量均为单一的。 ^{226}Ra 核衰变见图 1-2, 理论计算与实测结果基本相符。

(二) β^- 衰变 (Negatron Decay or β^- Decay)

因原子核内中子相对过多造成核内不平衡, 导致一个中子转变成质子, 同时释出一个负电子的过程称为 β^- 衰变。核内释出的负电子通常称为 β^- 粒子或 β^- 射线 (β^- Particle or β^- Ray), 发生 β^- 衰变同时还形成一个反中微子 (Antineutrino, 简称 $\bar{\nu}$)。 $\bar{\nu}$ 是一种质量极小的中性基本粒子, 穿透性极强。 β^- 衰变可用下式表示:



在 β^- 衰变中, 母体和子体的质量数 A 相同, 但子体的原子序数 Z 增加 1 个单位。例如:



$$\Delta m = m_{\text{C}} - (m_{\text{N}} + m_{\beta} + m_{\bar{\nu}} - m_{\text{e}})$$

因为 $\bar{\nu}$ 质量极小, 仅为电子 $5/10\,000$, 可忽略。则:

$$\Delta m = 14.003\,242 - 14.003\,014 = 0.000\,168\,\text{amu}$$

$$Q = 0.000\,168 \times 931.478 = 0.156\,\text{MeV}$$

^{14}C 不发射 γ 射线, 衰变能分配给子核、 β^- 及 $\bar{\nu}$ 。由于子核质量比 β^- 粒子大数千倍以上, 因此只分配到极少的能量, 往往忽略不计, 能量主要在 β^- 及 $\bar{\nu}$ 之间分配, 这种分配是随机的, β^- 粒子得到的能量可以是零到全部衰变能之间的任何数值, 当 β^- 粒子与 $\bar{\nu}$ 成 180° 时, β^- 粒子的能量最小; 二者成 0° 时, β^- 粒子能量最大。 β^- 粒子的能量分布形成一个连续能谱 (图 1-3)。其中, $E = \frac{1}{3} E_{\text{max}}$ 的几率最大, 平均能量约为 $40\% E_{\text{max}}$ 。

如果 β^- 衰变伴有 γ 光子发射, 则核衰变能有一部分用于 ν 跃迁 (ν 跃迁的能量是单一的), 此时 β^- 粒子的 E_{max} 就等于衰变能减去 ν 光子的能量。例如:

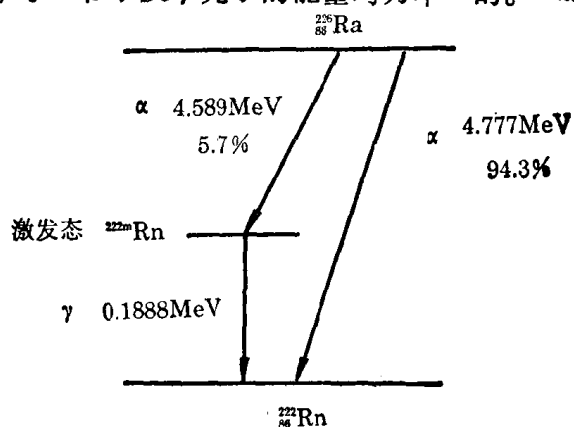


图 1-2 镭的衰变图

$${}^{198}_{79}\text{Au} \rightarrow {}^{198}_{80}\text{Hg} + \beta^- + \bar{\nu} + \gamma + Q$$

$$\Delta m = 197.968\,231 - 197.966\,756 = 0.001\,475\,\text{amu}$$

$$Q = 0.001\,475 \times 931.478 = 1.373\,9\,\text{MeV}$$

因为 γ 射线能量为 $0.412\,\text{MeV}$, 因此 β^- 粒子的 $E_{\max} = 1.373\,9 - 0.412 = 0.961\,9\,\text{MeV}$ (见图 1-4)。

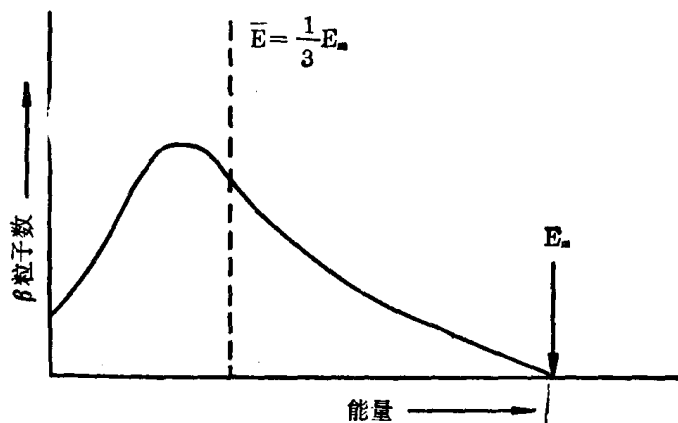


图 1-3 β^- 能谱示意图

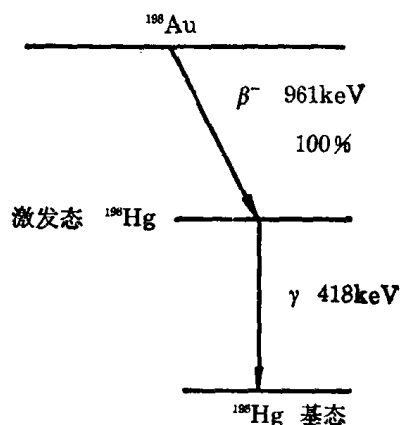


图 1-4 ${}^{198}\text{Au}$ 的衰变图

有时核在发生 β^- 衰变时, 每次连续发射 2 个 γ 光子, 此时 β^- 粒子的 $E_{\max}$ 为衰变能减去二次跃迁的能量。如 ${}^{60}\text{Co}$ 的 β^- 衰变、二次 γ 跃迁的能量分别为 $1.173\,\text{MeV}$ 及 $1.333\,\text{MeV}$, 于是 β^- 粒子的 $E_{\max} = Q - (1.173 + 1.333)\,\text{MeV}$ 。

(三) β^+ 衰变 (Positron Decay or β^+ Decay)

核内中子相对缺少时, 一个质子转变为一个中子, 同时从核内释出一个正电子的过程, 称为 β^+ 衰变。正电子亦称 β^+ 粒子或 β^+ 射线 (Positron or β^+ Ray), 质量与负电子完全相同, 所带电荷相反。迄今为止, 发生 β^+ 衰变的都是人工放射性核素。同 β^- 衰变一样, β^+ 衰变的母核与子核的质量数 A 没变化, 但子核的电荷数要比母核的电荷数减少一个单位。 β^+ 衰变的同时发射 β^+ 粒子及穿透性极强、质量极小的中性基本粒子中微子 (Neutrino, 简称

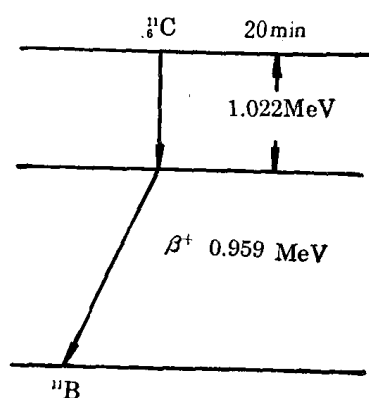


图 1-5 ${}^{11}\text{C}$ 的衰变图

ν)。一般通式为:

$${}_Z^AX \rightarrow {}_{Z-1}^AY + \beta^+ + \nu + Q$$

例如 (图 1-5):

$${}^{11}_6\text{C} \rightarrow {}^{11}_5\text{B} + \beta^+ + \nu + Q$$

$$\begin{aligned} \Delta m &= (m_{\text{C}} - m_{\text{e}} - m_{\text{B}} - m_{\beta^+}) \\ &= 11.011\,432 - 11.009\,305 - 2 \\ &\quad \times 0.000\,543\,6 \\ &= 0.001\,029\,8\,\text{amu} \end{aligned}$$

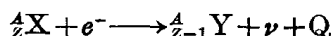
$$Q = 0.001\,029\,8 \times 931.478 = 0.959\,24\,\text{MeV}$$

由此可见, β^+ 衰变的条件是 $m_{\text{e}} > m_{\text{e}-1} + 2m_{\text{e}}$ 。其中 $2m_{\text{e}}$ 的质量亏损正好是核内形成一对正负电子所必须的 $1.022\,\text{MeV}$ 能量来源。因此, 全部质量亏损 $= \Delta m_{\text{e}} + 2m_{\text{e}}$ 。

β^+ 粒子的能谱与 β^- 粒子相似, 也是连续的, 其 $E_{\max}$ 近似等于 Q 。

(四) 电子俘获 (Electron Capture, EC)

电子俘获是指缺核中子, 从核外俘获一个轨道电子, 使核内一个质子转变为中子的衰变过程。该过程也伴有中微子发射。可用下式表示:



整个系统的电子数目在衰变前后无增减, 但子核的原子序数比母核减少一个单位, 同时在俘获电子时, 又必须消耗相当于电子结合能的能量 E_i ($i=K, L, M, \dots$)。由于 K 层电子被俘获的几率最大, 这种衰变有时也称 K 电子俘获。

电子俘获时, 发生质能转换的质量亏损是:

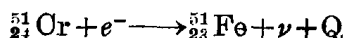
$$\Delta m_s = m_s - m_{s-1} - E_i/c^2 \quad (c \text{ 为光在真空中的速度})$$

因此, 产生电子俘获的必要条件为:

$$m_s > m_{s-1} + E_i/c^2$$

K 电子俘获与 β 衰变不同, 它只放出子体和中微子, 而後者的质量远远小于前者, 根据质量比分配能量, 中微子所具有的能量几乎等于衰变能。

母核发生 K 俘获后, 子核的 K 层电子就少了一个, 留下一个空位, 这时比 K 层电子能级更高的 L 层电子就有可能跃迁到该空位, 同时将多余的能量 (相当于跃迁前后两壳层能级的差) 以 X 线形式辐射出来。这 X 射线必定是子核的特征 X 射线。如 (图 1-6):



有时电子跃迁释放的能量也可不以特征 X 线的形式释出, 而是传递给另一壳层电子, 一部分用以克服该电子结合能使之成为自由电子, 其余部分则成为该电子的动能, 这样释出的电子称为俄歇电子 (Auger Electron)。可见电子俘获时释出的 X 线或俄歇电子都不是直接来自核内, 而是次级辐射。它们在能量方面的特点是: ①能量都较低, 通常是 keV 级; ②能量都是定值而不是连续谱; ③能量随被俘获的电子和跃迁电子所处壳层不同而不同, 所以每种核素 EC 衰变都可发射几种不同能量的 X 线和俄歇电子, 各有一定的几率; ④俄歇电子能量一般都略低于相应的 X 线。实际工作中可通过测定 X 射线和俄歇电子来了解电子俘获的发生。

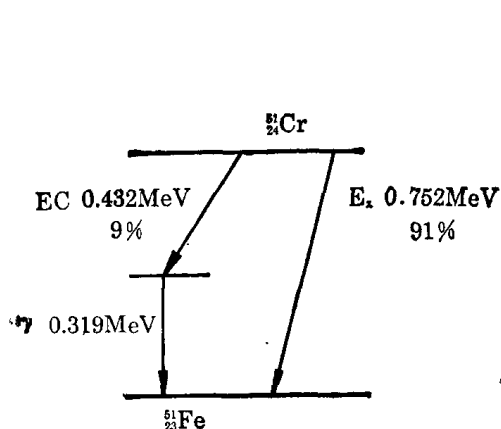


图 1-6 ${}^{51}\text{Cr}$ 的衰变图

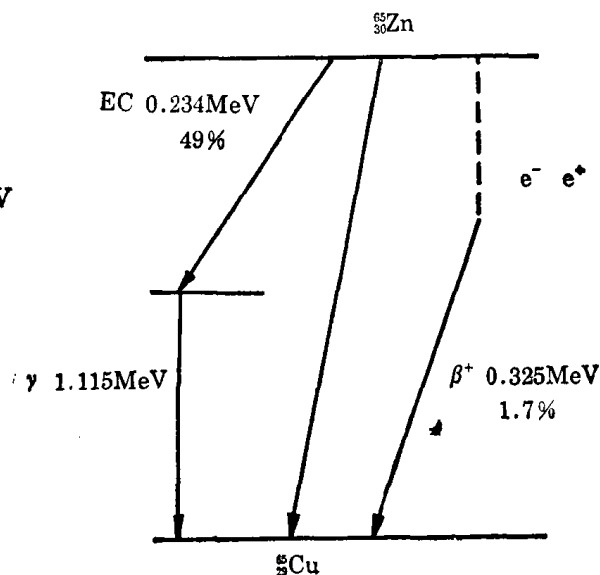


图 1-7 ${}^{65}\text{Zn}$ 的衰变图

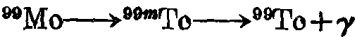
β^+ 衰变与 EC 都发生在缺中子的核素中, 因此同一种核素有时可同时进行这两种衰变。如 $^{55}_{30}\text{Zn}$ (图 1-7)。少数核素甚至可同时进行 β^+ 、 β^- 和电子俘获三种衰变。

(五) γ 衰变(跃迁)

原子核从能量较高的状态(激发态), 跃迁到能量较低的状态或最低能量状态(基态)时, 会放出 γ 射线。有许多放射性核素在发生 α 或 β 衰变后, 生成的子核往往处于激发态, 由激发态向基态过渡时便会发生 γ 衰变。

γ 射线的性质和 X 射线相似, 也是一种电磁辐射, 但前者来自核本身的变化, 后者则是次级辐射。

一般原子核处于激发态的时间十分短暂($<10^{-11}\text{s}$), 因而 γ 衰变可以看成是伴随着 α 、 β 衰变同时发生。也有些原子核衰变时, 子体处于激发态时间长, 可以把 γ 衰变半衰期单独测量出来, 这种激发态称为同质异能态, 子核常被看作一种单独的核素, 称为同质异能素。它本身又作为母体, 经 γ 衰变而变成 Z 和 A 都相同的, 但能量状态不同的子核。例如:



处于同质异能态的原子核, 并不只发生 γ 衰变, 还可伴有其他衰变方式, 如 ^{116m}In 除 γ 衰变外还放出 β 粒子; ^{69m}Zn 除 γ 衰变外, 还有电子俘获。除此之外, 还可通过发射“内转换电子”(Internal Conversion Electron), 使核从激发态回到基态。内转换电子就是核的激发能直接传给核外电子, 使之向外发射电子, 这种内转换电子具有单一能量, 不同于 β 射线。因此, 发射 γ 射线和内转换电子是核从激发态跃迁到较低能级或基态时的两种基本方式。内转换现象发生后, 由于 K 层或 L 层电子发射后会留下一个空位, 因而也会继续发生次级辐射, 如发射特征 X 射线或俄歇电子。

表 1-2 一些常见核素衰变前后母核与子核的质量

核 素	衰 变 方 式	母核质量(amu)	子核质量(amu)
^3_1H	$^3_1\text{H} \longrightarrow ^3_2\text{He} + \beta^- + \nu$	3.016 050	3.016 030
$^{11}_6\text{C}$	$^{11}_6\text{C} \longrightarrow ^{11}_5\text{B} + \beta^+ + \nu$	11.011 432	11.009 305
$^{14}_6\text{C}$	$^{14}_6\text{C} \longrightarrow ^{14}_7\text{N} + \beta^- + \nu$	14.003 242	14.003 074
$^{24}_{11}\text{Na}$	$^{24}_{11}\text{Na} \longrightarrow ^{24}_{12}\text{Mg} + \beta^- + \nu + \gamma$	23.990 962	23.985 542
$^{32}_{15}\text{P}$	$^{32}_{15}\text{P} \longrightarrow ^{32}_{16}\text{S} + \beta^- + \nu$	31.973 910	31.972 074
$^{36}_{16}\text{S}$	$^{36}_{16}\text{S} \longrightarrow ^{36}_{17}\text{Cl} + \beta^- + \nu$	34.969 031	34.968 851
$^{40}_{20}\text{Ca}$	$^{40}_{20}\text{Ca} \longrightarrow ^{40}_{20}\text{Ca} + \beta^- + \nu$	44.956 190	44.955 919
$^{51}_{24}\text{Cr}$	$^{51}_{24}\text{Cr} \longrightarrow ^{51}_{23}\text{V} + X + \nu + \gamma$	50.944 768	50.943 961
$^{60}_{27}\text{Co}$	$^{60}_{27}\text{Co} \longrightarrow ^{60}_{28}\text{Ni} + \beta^- + \nu + \gamma$	59.933 813	59.930 787
$^{125}_{53}\text{I}$	$^{125}_{53}\text{I} \longrightarrow ^{125}_{52}\text{Te} + X + \nu + \gamma$	124.904 578	124.904 418
$^{131}_{53}\text{I}$	$^{131}_{53}\text{I} \longrightarrow ^{131}_{54}\text{Xe} + e^- + \nu + \gamma$	130.906 127	130.905 085
$^{198}_{79}\text{Au}$	$^{198}_{79}\text{Au} \longrightarrow ^{198}_{80}\text{Hg} + \beta^- + \nu + \gamma$	197.968 231	197.966 756
$^{226}_{88}\text{Ra}$	$^{226}_{88}\text{Ra} \longrightarrow ^{222}_{88}\text{Rn} + ^4_2\text{He} + \gamma$	226.025 438	222.017 610

三、人工核反应(Artificial Nuclear Reaction)

原子核结构的变化, 除了放射性核素的自发蜕变外, 还可以用人工方法引起原子核结构的变化。人工核反应就是以高能粒子作为射弹, 轰击靶原子核使之发生改变的反应。作为射弹的可以是天然的 α 粒子, 也可以是经过回旋加速器加速的质子流、氘核流、氦核流及反应堆产生的中子流等。