

中国医学百科全书

核 医 学

上海科学技术出版社



中国医学百科全书

中国医学百科全书编辑委员会

上海科学技术出版社

中国医学百科全书

核 医 学

王世真 主编

上海科学技术出版社出版

(上海瑞金二路 450 号)

新华书店上海发行所发行 上海市印刷四厂印刷

开本787×1092 1/16 印张14.25 插页1 字数550,000

1986年2月第1版 1986年2月第1次印刷

印数: 1—5,200

统一书号: 14119·1736 定价: 3.10 元

《中国医学百科全书》编辑委员会

主任委员 钱信忠

副主任委员 黄家驷 季钟朴 郭子恒 吴阶平 涂通今 石美鑫 赵锡武

秘书长 陈海峰

副秘书长 施莫邦 冯 光 朱克文 戴自英

委 员 (以姓氏笔划为序)

丁季峰	王登次仁	马飞海	王 懿(女)	王玉川	王世真	王用楫
王永贵	王光清	王叔咸	王季午	王冠良	王雪苔	王淑贞(女)
王鹏程	王德鉴	王翰章	毛文书(女)	毛守白	邓家栋	石茂年
石美鑫	卢惠霖	卢静轩	叶恭绍(女)	由 崑	史玉泉	白清云
邝贺龄	冯 光(女)	兰锡纯	司徒亮	毕 涉	吕炳奎	曲绵域
朱 潮	朱王葆	朱克文	朱育惠	朱洪荫	朱既明	朱霖青
任应秋	刘世杰	刘育京	刘毓谷	米伯让	孙忠亮	孙瑞宗
苏德隆	杜念祖	杨医亚	杨国亮	杨树勤	杨铭鼎	杨藻宸
李 昆	李永春	李宝实	李经纬	李振志	李肇特	李聪甫
吴之理	吴执中	吴阶平	吴英恺	吴征鉴	吴绍青	吴咸中
吴贻谷	吴桓兴	吴蔚然	余 灏	宋今丹	迟复元	张 祥
张世显	张立藩	张孝骞	张昌颖	张泽生	张学庸	张涤生
张源昌	陆如山	陈 信	陈中伟	陈明进	陈国桢	陈海峰
陈灏珠	林巧稚(女)	林克椿	林雅谷	郁知非	尚天裕	罗元恺
罗致诚	季钟朴	依沙克江	周金黄	周敏君(女)	郑麟蕃	孟继懋
赵炳南	赵锡武	荣独山	胡传揆	胡熙明	钟学礼	钟惠澜
侯宗濂	俞克忠	施莫邦	姜春华	洪子云	夏镇夷	顾学箕
顾绥岳	钱 惠	钱信忠	徐丰彦	凌惠扬	郭 迪	郭乃春
郭子恒	郭秉宽	郭泉清	郭振球	郭景元	唐由之	涂通今
诸福棠	陶桓乐	黄 量(女)	黄文东	黄耀燊	黄家驷	黄祯祥
黄绳武	曹钟梁	盖宝璜	梁植权	董 郡	董承琅	蒋豫图
韩 光	程之范	傅丰永	童尔昌	曾宪九	谢 荣	谢少文
裘法祖	蔡 荣	蔡 翹	蔡宏道	戴自英		

序

《中国医学百科全书》的出版是我国医学发展史上的一件大事，也是对全人类医学事业的重大贡献。六十年代初，毛泽东同志曾讲过：可在《医学卫生普及全书》的基础上编写一部中国医学百科全书。我们深感这是一项重大而艰巨的任务，因此积极进行筹备工作，收集研究各种有关医学百科全书的资料。但由于十年动乱，工作被迫中断。粉碎“四人帮”后，在党和政府的重视和支持下，医学百科全书的编写出版工作又重新开始。一九七八年四月，在北京正式召开筹备会议，拟订了编写出版方案和组织领导原则。同年十一月，在武汉举行了第一次编委会，落实了三十多个主编单位，全国医学界的著名专家、教授和中青骨干都参加了编写工作。

祖国医学发展史中，历代王朝就有学者编纂各类“集成”和“全书”的科学传统，但系统、全面地编写符合我国国情和医学科学发展史实的大型的医学百科全书还是第一次。这是时代的需要，人民的需要，是提高全民族科学文化水平，加速实现社会主义现代化建设的需要。从长远来看，这是发展我国医药卫生事业和医学科学的一项基本建设，也是建设社会主义精神文明的重要组成部分。因此，编写出版《中国医学百科全书》是我国医学界的一项重大历史使命。

我国既有源远流长的祖国医学，又有丰富多彩的现代医学。解放以来，在党的卫生方针指导下，还积累了群众性卫生工作

和保健强身的宝贵经验，涌现了许多中西医结合防治疾病的科研成果。在我们广大的医药卫生队伍中，有一大批具有真才实学，又善于写作的专家，他们都愿意为我国科学文化事业竭尽全力，把自己的经验总结出来，编写出具有我国特点的医学百科全书。

《中国医学百科全书》是一部专科性的医学参考工具书，主要读者对象是医药院校毕业及具有同等水平的医药卫生人员，但实际需要查阅这部全书的读者将远远超过这一范围。全书内容包括祖国医学、基础医学、临床医学、预防医学和特种医学等各个学科和专业，用条目形式撰写，以疾病防治为主体，全面而精确地概述中西医药科学的重要内容和最新成就。在编写上要求具有高度的思想性和科学性，文字叙述力求言简意明，浅出深入，主要介绍基本概念、重要事实、科学论据、技术要点和肯定结论，使读者便于检索，易于理解，少化时间，开卷得益。一般说来，条目内容比词典详尽，比教材深入，比专著精炼。

为适应各方面的需要，《中国医学百科全书》的编写出版工作准备分两步走：先按学科或专业撰写分卷单行本，然后在此基础上加以综合，按字顺编排出版合订本。这两种版本将长期并存。随着学科发展的日新月异，我们并将定期出版补新活页。由于涉及面广，工作量大，经验不足，缺点错误在所难免，希望读者批评指正。

钱信忠

1982年11月

中国医学百科全书

核 医 学

主 编：王世真 （中国医学科学院放射医学研究所
首都核医学中心）

副 主 编：（以下均按姓氏笔画为序）

周 前 （中国医学科学院首都核医学中心
北京协和医院）

夏宗勤 （中国医学科学院首都核医学中心
上海第二医学院基础部）

编 委：马寄晓 （上海第六人民医院）

刘秀杰 （中国医学科学院首都核医学中心
阜外医院）

张家骅 （中国科学院上海原子核研究所）

赵惠扬 （上海第一医学院中山医院）

唐 谨 （中国医学科学院首都核医学中心
肿瘤医院）

学术秘书：卢正福 （中国医学科学院放射医学研究所）

郑钧正 （中国医学科学院放射医学研究所）

编写说明

- 一、本分卷选收实验核医学和临床核医学的条目 118 条。按核医学总论,核物理基础,核射线的探测及核仪器,辐射剂量和核射线的防护,核反应堆、加速器及核素试剂,医学上应用的主要核技术,放射性核素在临床诊断中的应用,放射性核素在临床治疗中的应用,稳定核素及其在医学上的应用等顺序排列。
- 二、核医学是核技术与医学相结合的产物,因此包括与核技术有关的基础知识在内的实验核医学方面的内容,在本分卷中占有一定篇幅。这些内容与临床核医学的关系极为密切。当然,临床核医学的有关条目更直接地体现出核医学在现代医学中的重要地位。读者可以根据需要选读不同条目。
- 三、为便于读者查阅有关内容,并得到更好的阅读效果,正文后有主要参考书目、附录、汉英和英汉核医学词汇、英文缩略词及中文索引。
- 四、核医学是一门新兴学科,名词术语的统一显得更为重要。本分卷着重从科学性方面考虑尽可能做到选用统一术语。但是,由于不少名词有习惯沿用的术语,国际上也正在逐步统一的过程中,因此本分卷部分名词采用了暂时并存的两种或两种以上提法。同时指出今后统一选用的术语。
- 五、核医学方兴未艾,有日新月异之势,而本分卷编撰过程较长,虽然几经补充修订,仍难免在某些方面不能反映出书时的最新进展,只能留待再版时更新。
- 六、本分卷主编单位为中国医学科学院放射医学研究所。
- 七、鉴于核医学有多学科的特点,各部分条目的体例不尽一致。而且本分卷条目撰稿人较多,写作风格各异。分卷编委会已尽可能反复做了修改校订,但仍难免有不够完善之处,祈请读者指正。

核医学分卷编辑委员会

一九八四年三月

中国医学百科全书

核 医 学

目 录

原子核医学	1	医用回旋加速器	56
核素	3	中子发生器及放射性核素中子源	57
核衰变	4	核反应堆	58
放射性活度	6	脉冲核反应堆	59
核射线的物理效应	7	放射性核素的生产	60
核射线的化学效应	8	核素标记物	63
核射线的生物效应	9	放射性核素标记物的化学合成	64
核射线的探测	10	放射性核素标记物的生物合成	68
气体电离探测器	12	氚标记物的气体曝射制备法	69
固体闪烁测量	14	反冲标记	70
液体闪烁测量	15	短半衰期核素标记物的快速制备和快速鉴定	70
半导体探测器	18	放射性标记物的自分解	71
多丝正比探测器	20	放射性标记物的保存	72
雪崩型探测器	21	放射性标记物的包装及运输	73
原子核乳胶探测技术	21	放射性核素发生器	74
切伦科夫辐射	23	放射性药物	76
符合、反符合测量	24	放射性试剂盒	76
多标记测量	25	放射分析	78
放射性核素的绝对测量	26	核素稀释法	79
放射性测量的统计误差	28	核素衍生物法	80
γ 谱仪	30	竞争放射分析法	81
动态功能测定仪	31	放射免疫分析	83
扫描机	33	放射受体分析法和受体的放射分析	85
γ 照相机	34	放射酶促分析法	86
发射计算机断层仪	35	酶的放射化学测定法	87
核磁共振的医学应用	38	活化分析法	88
防护监测仪	38	放射层析法与放射电泳法	91
全身放射性计数	40	穆斯堡尔效应	91
电子计算机与核医学	41	扰动角关联	92
核医学常用的电离辐射量和单位	43	中子衍射	93
外照射剂量计算	44	核酸分子杂交技术	93
内照射吸收剂量的计算	44	微生物的放射测定法	95
核射线的防护	46	生物医学中的放射自显影术	95
核医学实验室的设计	47	细胞群体动力学中的核素示踪技术	98
放射性核素的安全操作	49	核射线辐射效应的医学应用	100
放射性核素工作的防护监测	50	辐射消毒	101
放射性工作人员的健康管理	51	放射性核素电池	102
放射性污染的清除	52	核素示踪方法	103
放射性废物的处理	52	物质转化的示踪研究	104
放射性事故的处理	53	示踪动力学	106
加速器	54	生化反应机制的示踪研究	108

同位素效应.....	109	放射性核素治疗.....	165
生物大分子结构与功能的示踪研究.....	111	甲状腺功能亢进症的 ¹³¹ I治疗.....	165
脏器功能的放射性核素检查.....	113	¹³¹ I 治疗甲状腺转移癌.....	166
脏器的放射性核素显象.....	113	³² P 治疗血液病.....	166
甲状腺功能的放射性核素检查.....	114	恶性嗜铬细胞瘤转移灶的 ¹³¹ I-m IBG 治疗.....	167
甲状腺的放射性核素显象.....	119	放射性核素敷贴疗法.....	167
心血管系统的放射性核素检查.....	123	腔内放射性胶体治疗.....	167
心脏功能的放射性核素检查.....	127	放射性核素组织间插植治疗.....	168
泌尿系统的放射性核素检查.....	128	稳定核素分离.....	169
生殖系统的放射性核素检查.....	131	稳定核素的分析.....	169
消化系统的放射性核素检查.....	133	稳定核素标记物的制备.....	171
肝脏和胆道的放射性核素检查.....	136	稳定核素在医学中的应用.....	172
神经系统的放射性核素检查.....	141	主要参考书目、主要期刊.....	175
脑脊液循环的放射性核素检查.....	143	附录一 国际单位制词头.....	176
骨骼和关节的放射性核素检查.....	144	附录二 有关物理常数.....	176
造血、血液和淋巴系统的放射性核素检查.....	146	附录三 常用单位换算.....	176
呼吸系统的放射性核素检查.....	149	附录四 通用放射性核素衰变计算表.....	177
内分泌系统的放射性核素检查.....	151	附录五 常用放射性核素表.....	179
肿瘤的放射性核素检查.....	154	附录六 常用稳定核素表.....	185
体液及电解质的放射性核素测定.....	157	汉英核医学词汇.....	188
老年疾病的放射性核素检查.....	159	英汉核医学词汇.....	194
儿童疾病的放射性核素检查.....	160	英文缩略词.....	200
短半衰期核素的应用.....	162	索引.....	204
发射计算机断层仪的应用.....	163	元素周期表	

原子核医学

原子核医学 简称核医学或原子医学,是原子核科学技术和医学相结合的产物,是研究核素和核射线在医学上的应用及其理论的学科。核射线可以来自放射性核素,也可以由加速器产生;因此,原子核医学也就是研究核素和加速器在医学上的应用及其理论的学科。它不同于放射医学,后者主要研究放射病的防治及其理论。

核医学可分为实验核医学和临床核医学两大部分。前者主要利用核素进行生物医学研究,以探索生命现象的本质及其物质基础,加深人们对正常生理、生化过程以及病理过程的认识。临床核医学则直接利用核素或加速器来诊断和治疗疾病。

核医学是原子能利用的一个重要组成部分。根据国际原子能机构及世界卫生组织于第三届日内瓦和平利用原子能会议上介绍的资料,世界上生产的所有放射性核素中,约有80~90%用于医学。医用加速器约占全世界加速器总数的一半。

核医学是现代医学的重要内容。三十多年以前,核素的应用在医学科学中引起了划时代的变化。过去研究体内代谢的方法,或采用大剂量的代谢物质,或进行外科手术,或借助于能停止某一正常功能的毒性物质。这些方法极少能在合乎生理的情况下反映整体生物中的物质代谢规律。只有核素示踪方法,才能在生理情况下,从分子水平动态地认识各种物质在体内的代谢变化,细致地揭开体内及细胞内代谢的内幕。在医学科学领域中,特别是生物化学、生理学、药理学、微生物学、免疫学、分子生物学、病理生理学、实验形态学、内分泌学、血液学等学科,都通过核素示踪研究大幅度地丰富了研究成果。

在临床诊断上,核素检查方法的优点是:安全,可靠,快速,简便,灵敏度高,特异性强,对病人无痛苦,可以进行动态的、定量的观察。核素检查不但能显示体内组织器官的形态,而且能反映其功能。因此核医学的作用是其他许多检查技术所无法代替的。体外放射性检查给甲状腺疾病、糖尿病、贫血、生长障碍、胃溃疡、高血压、肾上腺功能异常、病毒感染等增加了新的认识及诊断手段;对药物测定也非常有用。在治疗方面,放射性核素对甲状腺功能亢进、一些分化较好的甲状腺癌转移灶、真性红细胞增多症等病已获得较好的疗效。外照射放射疗法已成为治疗恶性肿瘤的重要手段,在癌症治疗中所占的比重高达70%左右。

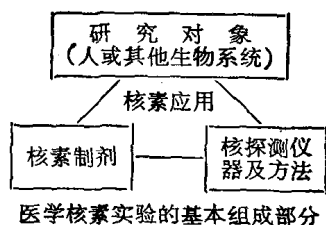
在医学史上,核医学是临床实践与基础科学相结合最成功的例子之一。核医学集中了核物理、电子学、化学、

生物学、工程和基础医学的最新成就,由物理(核探测仪器和方法)、化学(核素制剂)和生物学(研究对象)等部分组成。核探测仪器和方法及核素制剂都是核医学工作的先决条件。至于先进的核医学技术,如电子计算机、高能粒子的应用等,对现代科学的要求无疑就更高了。

核医学的发展 核医学是在核物理和放射化学的基础上逐步发展起来的。自从1896年H. Becquerel发现铀的放射性、1898年居里夫妇发现镭以来,下列一些重要进展可以视为核医学史上的里程碑:G. Hevesy(1913)首先把核素示踪方法应用于化学实验;其后(1923年)他又首次在生物学中应用示踪方法,研究了铅在植物中的代谢规律;H. L. Blumgart等(1925)第一次在人体使用放射性示踪剂,测定了正常人及心脏病人的血流速度;E. O. Lawrence等(1930)研制成功回旋加速器;I. Curie及F. Joliot等(1934)用人工制造放射性核素;F. Fermi等(1942)建成第一个核反应堆;R. Schoenheimer(1942)通过大量应用氘及 ^{15}N 的实验,发表了《体内成分的动态》这部名著;其后,美国国立橡树岭实验室发出包括 ^{14}C 标记物在内的第一批放射性核素制剂(1946),供医院及科研单位使用;B. Casson(1950)制成第一台扫描机;H. O. Anger(1957)创制闪烁照相机;S. A. Berson及R. A. Yalow(1959)创立放射免疫分析法,首先用于胰岛素测定;P. Richards(1959)报道了钼-钨发生器之后,P. Harper(1961)首先在入身上试用 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 。此后,多种以 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 标记的显象剂被广泛应用于临床诊断。此外,G. Hevesy和H. Levi(1936)首次作中子活化分析,L. W. Alvarez和R. Cornog(1939)发现氚,G. T. Reynolds等(1950)创制第一台液体闪烁计数器,E. C. Anderson(1956)首先制成 4π 全身计数器,也是核医学发展史中比较重要的发明与创造。

半世纪以来,核医学是在连续不断地发展着。三十年代,开始供应加速器生产的核素,其中 ^{131}I 和 ^{32}P 成为当时诊断与治疗疾病的有力工具。与此同时,稳定核素的示踪应用为人体和动物体内代谢过程的动态研究作出了重要贡献。四十年代,反应堆大量生产放射性核素,使这类核素的示踪应用成为医学科学研究和临床诊断、治疗中不可缺少的手段。五十年代,扫描机的出现使体内几乎所有脏器的体外显象都成为可能。六十年代,闪烁照相机和 $^{99\text{m}}\text{Tc}$ 的大量推广应用进一步提高了临床核医学的诊断水平。同时期内,竞争放射分析迅速发展,成为核医学中的重要内容。七十年代,电子计算机的应用把核医学推进到定量核医学与动态核医学的新阶段。许多短寿命核素及放射性试剂的不断出现,以及发射计算机断层仪的问世是这一时期新进展的代表。由于生产与探测技术的改进及减少接受辐射的努力,稳定核素的应用又重新兴起。

国内核医学的发展,大致经历了三个阶段。第一阶段是开创时期(1956~1957)。军委卫生部在西安创办了同位素仪器训练班及同位素应用训练班,由丁德泮和王世真两教授担任正、副主任,为全国各地培训了一批技术骨



医学核素实验的基本组成部分

干。北京、西安、天津、上海、广州、长春、重庆等地相继建立了一批同位素实验室。第二阶段是推广时期(1958~1971)。除在京、津、沪、穗等地巡回举办放射性同位素临床应用训练班外,还开展了 ^{131}I 、 ^{32}P 和 ^{198}Au 等核素的临床应用。国产核素已能成批供应。 ^{60}Co 治疗机发展到五十余台。 ^{131}I 吸碘试验已成为诊断甲状腺病的重要手段。多种脏器显象和放射性肾图检查得到推广。核素示踪方法在生物化学、药理学、形态学、内分泌学、病理生理学、微生物学等多学科中的应用都陆续开展起来。但是,十年动乱期间核医学的发展又明显变慢。第三阶段是提高时期(1972~迄今)。1972年中国科学院召开了“全国原子医学专题经验交流会”;翌年,中央卫生部又举办了全国同位素新技术经验交流学习班;这些活动对全国核医学的迅速发展起了促进作用。七十年代后期开始,一方面,标记、测量、脏器显象、体外放射分析、短半衰期核素应用等各项技术都显著提高;另一方面,核素示踪技术在国家重点科研项目的许多课题中也发挥了重要作用。自动液体闪烁计数器、自动固体闪烁体外样品计数器、 γ 照相机等重要设备成批生产推广应用;钼-锝和锡-铟发生器成为临床主要的核素来源之一;放射免疫分析技术的品种和应用范围逐年增加;核心脏病学、稳定核素的医学应用、发射计算机断层等核医学中发展较快的新领域也取得了一定进展。与此同时,核医学专业队伍有了一定的增长和提高,1980年成立全国核医学学会。1981年又创办了《中华核医学杂志》。

核医学的范围 核素及核射线在生物医学中的应用,大致可以归纳为分析工具、示踪原子及辐射源三个方面。

分析工具 核素作为一种分析工具,具有两大特点。一是灵敏度高,二是探测的特异性好,因而在临床检验和医学研究中有极广泛的用途。最突出的有以下两方面:①用于测定体液或组织中含量极微的成分,如微量的激素、维生素、药物等。从六十年代起,出现了竞争放射分析。这种方法灵敏度高,特异性强,所需标本及试剂量少,比较快速,便于自动化,工作效率高,应用范围广,能得到较准确的定量结果。目前,可用这种方法测定的具有生物活性的物质已超过三百种。活化分析技术,可以用极少量的血清、组织,甚至头发、指甲等,一次测定多种元素的含量。②在不损伤机体的情况下测出体内不易分离的成分。例如通过全身计数器,就可以很容易地测出人体内 ^{40}K 的含量,从而计算出全身含钾总量。又如,全身水量可以用同位素稀释法测出。

示踪原子 核素作为示踪原子,在生物医学中可用于:①区分内源物质与外源物质。如口服一定量的放射性铁后,就可以从粪便中测出铁在肠胃道中的吸收量。还可能同时比较两种铁制剂的吸收情况。例如由于 ^{55}Fe 和 ^{59}Fe 的射线不同,同时口服后易于从粪便中分别测出。这种双标记技术的优点是受检者本身就是可靠的对照。②显示物质在体内、细胞内或亚细胞结构中的分布和转移情况。例如标记玫瑰红能被肝脏的多角细胞所摄取,静脉注射后,用扫描机或闪烁照相机可显示出放射性药物在肝脏

分布的情况,从而判断肝脏是否正常,胆道有无阻塞等。各种器官的功能测定是另一大类核素体内诊断方法。其中比较简单的一种是器官血流量测定。由于惰性气体透过血管壁向组织扩散的速度取决于该器官的血流量,将 ^{133}Xe 或 ^{85}Kr 快速引入冠状动脉后,从体外探测心肌内放射性消失曲线,即可算出冠状动脉供血区的心肌血流量。放射自显影是追踪标记药物或代谢物在体内或组织器官内去向的另一类极其有用的方法。例如小动物整体切片的放射自显影,可以观察某一放射性物质在不同脏器的分布及其进出各种脏器的速度。又如, ^3H -胸腺嘧啶核苷会选择性地参入细胞内的脱氧核糖核酸。用它,可能看到染色体分裂过程中DNA的变化。③确定代谢转变和转变的速度。喂给大鼠含有放射性的糖以后,实验动物体内的脂肪含有很高的放射性。这个实验证明了糖在体内能够变成脂肪。另一方面,绝大部分的糖在生物体内会氧化成 CO_2 。微生物的放射测定法,就是将含 ^{14}C 的葡萄糖加到液体培养基中,通过 $^{14}\text{CO}_2$ 的产生来检定细菌的存在及其数量。也可把 ^{35}S -半胱氨酸加到培养基中,探测 H_2^{35}S 气体的产生,作为细菌生长的指标。这种方法具有迅速、客观、灵敏和便于自动化的优点。④研究代谢途径。对生命活动过程中精细代谢途径的研究,几乎非用核素示踪方法不可。例如,核素示踪方法证明:胆固醇是以乙酸分子为原料,经过至少36步中间产物而合成。示踪实验还阐明了胆固醇变成各种固醇类激素的详细步骤,甚至把数以百计的体内固醇类衍生物之间的相互关系的全部图案也基本上弄清楚了。又如,蛋白质生物合成、遗传密码、光合作用、神经内分泌作用机制等,都是通过大量的示踪实验才取得了快速的进展。

辐射源 分为利用核射线的生物效应和以核素作为能源或动力两类。①利用射线杀伤细胞的性能:用放射性碘来治疗甲状腺功能亢进,是内服核素疗法中最成功的。采用敷贴疗法,以放射性磷、锶等核素治疗身体浅表部位的血管瘤、湿疹、神经性皮炎、牛皮癣、角膜炎等。外照射放射治疗是目前治疗恶性肿瘤的重要手段。钴治疗机对于治疗肺癌、食管癌、子宫颈癌等体内深部肿瘤疗效很好。 ^{60}Co 的 γ 线,由于穿透力强,皮肤剂量小,通过提高治疗剂量,能治好一些X线不能治好的疾病。大剂量的高能射线能杀死微生物,因此利用大型 ^{60}Co 源对于许多不耐热的药品器材进行辐射消毒,是很方便的。抗生素、激素、维生素、酶制剂、血浆制品、塑料针筒、外科羊肠缝线等,都可以用辐射消毒灭菌。同理,可用核射线对毒菌进行灭活或减毒,以制备疫苗。此外,核射线还会引起遗传变异,已用于抗生素产生菌的辐射育种,以提高产量。②试制新的能源:最初用作宇宙飞行能源的放射性核素电池,已试用于心脏起搏器。以 ^{238}Pu 作为人工心脏的动力,以 ^{107}Tm 等核素作为携带式无电源X线机的射线源,都在继续研究中。除核素外,加速器是非常有效的辐射源。直线加速器、电子感应加速器和回旋加速器都是治癌的重要工具。前两种能产生高能电子束和高能X线。

后一种是进行质子、中子等粒子治疗的必要装备。加速器在医学上还可用于生产放射性核素、进行活化分析及开展放射生物学研究等。

核医学的展望 核医学的基本条件是核探测仪器和方法及放射化学制剂。因此,核医学的未来发展与这些领域的发展是分不开的。近年来,核医学正向定量核医学和动态核医学的新阶段发展。例如从闪烁照相机得到的大量信息,可用磁带全部永久地记录下来,并可随时取出进行定量、合并、对比、筛选等。还可以编制诊断程序,使计算机提供定量、可靠的资料 and 结果,以提高临床的判断能力。

今后相当的一段时间内,闪烁照相机仍将是临床核医学的主要工具之一。目前正沿着快动作方向发展,病人脏器或脏器某一部分的功能活动,将可能在彩色电视屏上快速显示出来,临床上能直观地对病变作出及时、准确的判断。

自屏蔽半自动化小型回旋加速器的研制将使更多医疗中心装备加速器,从而为短半衰期核素的医学应用创造条件,活化分析的充分利用也将得到可靠的保证。

负 π 介子聚焦好,局部辐射剂量大,在肿瘤治疗上远比X、 γ 线等优越,C、N、Ne等高能重离子和负 π 介子相似,对“氧效应”不敏感,表层剂量小,其治癌作用也在继续探索中。

在放射化学制剂方面,将继续从核素发生器和加速器生产的核素中寻找更好的核素及其标记物。单克隆抗体的出现意味着有可能用标记抗体作特异性肿瘤定位,甚至可用来治疗肿瘤。此外,用标记白细胞作脓肿和感染的定位;用标记血小板作血栓及感染性心内膜炎赘生物的定位,在未来的诊断学中可能起重要作用。 ^{99m}Tc 标记物仍将广泛使用。加速器生产的 ^{11}C 、 ^{15}O 、 ^{13}N 和 ^{18}F 等的标记物正在大力研究,它们有可能制成“真正的示踪剂”,即生理示踪剂,使人们对生理现象和疾病的认识更深入一步。

体外放射分析将更加多样化。竞争放射分析将更加普及,并向自动化和试剂盒化发展。各种分析技术的质量控制也将越来越受重视。

近年来,核素显象正面临新显象技术如X线计算机断层(CT)、B型体层超声显象等的挑战。但各种显象技术都各有优缺点和局限性,可以互相补充。核素显象技术也在迅速发展显示出它所独有的优点。发射计算机断层将核素显象与CT的三维摄象原理相结合,可以给出不同截面的核素分布图象。它不仅能更精确地显示形态上的病变,而且能更好地反映脏器的血流、功能及代谢变化。单光子发射计算机断层仪可与一般发射 γ 线的核素配合使用,已在临床上逐步推广。正电子发射计算机断层仪则须与加速器生产的短寿命核素配合使用,近期内将主要集中在少数医学中心,从事发展医学事业的研究。

稳定核素的生产和探测技术将进一步发展,它的医学应用将不断扩大,有助于推动药理学、营养学、代谢病学等许多学科的发展,为临床诊断提供新的手段。核磁共振显

象给出的三维图象显示出不少优越性,已经引起中外医学界的高度重视。不少人预言,核磁共振显象与稳定核素示踪相结合,将成为一种极有发展前途的新的显象技术。

许多新兴学科将更加普遍地采用核素示踪技术,从而不断获得高速度的发展,反过来又推动核素示踪技术的发展。核医学将和其他现代技术一起,对医学基础理论(包括祖国医学)及疾病防治作出新的贡献。

(王世真)

核素

原子核由质子和中子(统称核子)组成。原子的化学和物理特性主要取决于原子核中的质子数和中子数及其能量状态。凡原子核具有特定的质子数、中子数和能量状态的一类原子,称为一种核素。国际上通常采用符号 ${}^{\text{A}}_{\text{Z}}\text{X}$ 来表示各种核素。其中X为某种元素的化学符号,Z是原子序数,即核内质子数,A是质量数,即核内核子的总数(质子数和中子数的和)。右上角可另加数字或符号表示化学价、电荷或能态,如 $^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ ($^{99}\text{Tc}^{\text{m}}$ 习惯上也常写作 $^{99\text{m}}\text{Tc}$)的m表示该核素处于激发态;右下角可另加数字表示分子态,例如 ${}^2\text{H}_2$ 、 ${}^{13}\text{C}_6$ 。左下标常可省去。

核素、元素和同位素 核素和元素是不同的概念。凡质子数相同的原子称为一种元素,它们的原子序数相同,具有相同的化学特性(可以有化学反应速度的差异,见“同位素效应”条),但原子核中的中子数可以不同,因而物理特性可以有某些差异。换言之,即每种元素可以包括若干种核素。目前已知的核素有1,900多种,分别属于100余种元素。

核素和同位素也是不同的概念。凡属于同一种元素的核素,在元素周期表中处于相同的位置,称为该元素的同位素,或彼此是同位素。所以核素是表示某种原子具有一定特征的名称,同位素则是表示核素之间相互关系的名称。例如 ${}^1\text{H}$ 、 ${}^2\text{H}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{13}\text{C}$ 是四种不同的核素, ${}^1\text{H}$ 和 ${}^2\text{H}$ 相互间是同位素, ${}^{12}\text{C}$ 和 ${}^{13}\text{C}$ 相互间是同位素, ${}^1\text{H}$ 和 ${}^{12}\text{C}$ 则不是同位素。

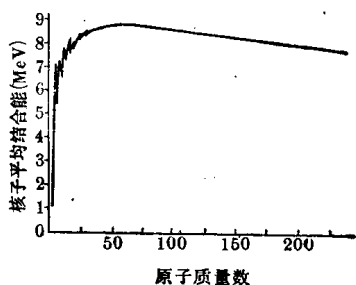
根据质量数A和原子序数Z的数目,核素间的相互关系有以下名称:Z相同而A不同的核素是同位素,如 ${}^{31}\text{P}$ 和 ${}^{32}\text{P}$;A相同而Z不同的核素是同量异位素,如 ${}^{31}\text{P}$ 和 ${}^{31}\text{S}$;A与Z都不同而(A-Z)相同的核素是同中子(异位)素,如 ${}^{10}\text{B}$ 和 ${}^{12}\text{C}$;A和Z都相同而核的能量状态不同的核素是同质异能素,如 ${}^{113}\text{In}$ 和 ${}^{113\text{m}}\text{In}$ 。

质量单位及质量亏损 1961年后,国际上统一用 ${}^{12}\text{C}$ 原子量的1/12作为原子质量单位,其符号为amu。原子质量和原子质量数是不同的概念,前者是指原子的实际质量,后者则是指原子核中核子的总数。 $1\text{amu} = (1.66043 \pm 0.00008) \times 10^{-27}\text{kg}$ 。质子的静止质量是 1.007276amu ,中子的静止质量是 1.008665amu ,电子的静止质量是 0.000548588amu ,即约为中子的1/1839。

一个由Z个质子和(A-Z)个中子构成的原子核,其实际质量总是小于Z个质子和(A-Z)个中子质量的总和。这个差值称为质量亏损。这是因为核子结合成原子核时

有一部分质量转化成能量而被释放出去,核物理上称为结合能。结合能与质量亏损的关系可按爱因斯坦的任何物质的质量 m 与其能量 E 之间的关系均为 $E=mc^2$ 的质能关系公式计算,式中 c 为真空中的光速。 1amu 转化成能量时为 $1.492\times 10^{-3}\text{erg}$ 或 931MeV ($1\text{erg}=0.624\times 10^{12}\text{eV}$)。所以有时也可用 MeV 作为质量单位, $1\text{MeV}=0.001074\text{amu}$ 。

一个原子核的结合能除以其核子数即为核素的核子平均结合能。各种核素的核子平均结合能不同,如图。所以重核裂变和轻核聚变都要释出过剩的结合能,这正是核能利用的物理基础。



核子平均结合能与原子质量数的关系

放射性核素衰变时及某些核素的射线与物质相互作用时也有质量-能量的相互转化,同样可用上述质能关系公式计算(见“核衰变”条)。

原子核的能级 原子核由于核子不断地运动而具有一定的能量。一般情况下,原子核都处于能量最低的状态,称为基态,其能量数值常看作为零(相对)。在一定的条件下(例如放射性核素衰变或某些核素受到高能粒子的轰击),原子核可暂时处于较高能量的状态,称为激发态。能量的改变不是连续性的,而是跳跃式的,核物理上称跃迁。所以通常用能级来标志核的能量状态。能级不是等间隔的,每种核素可以有几种不同的能级,除基态外,分别称为第一、第二、第三……激发态。处于激发态的核素都不稳定,要释出过剩的能量而回到基态(见“核衰变”条)。

稳定核素和放射性核素 核素按照原子核的稳定程度分为稳定核素和放射性核素两大类。稳定核素是指原子核极为稳定的核素,在没有外来因素(如高能粒子的轰击)时,不发生核内成分或能级的变化,或者虽可发生变化,但几率非常小,半衰期超过10亿年。放射性核素则是指原子核不稳定的核素,其原子核容易发生成分或能级的变化。

原子序数在82以下的元素都有一种或几种稳定核素(Tc和Pm例外)。目前人们应用的主要是自然界中相对含量(丰度)较低的稳定核素,例如 ^{12}C 和 ^{13}C 中的 ^{13}C ,主要是从自然界存在的混合物中通过分离手段获得的(见“稳定核素的分离”条),但放射性核素的衰变及某些核反应也能生成稳定核素。

原子序数在83以上的元素都只有放射性核素,对其中某些放射性核素(如 ^{238}U 、 ^{235}U 、 ^{226}Ra),人们也主要从自然界存在的原料中用分离方法进行制备。原子序数在82以下的元素,天然放射性核素的品种不多,数量也很少,现今广泛应用的放射性核素主要用人工方法制备,称人工放射性核素。核医学中常用的放射性核素及其物理特征见附录。

(张家骅 闻基俊)

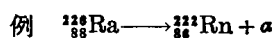
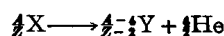
核衰变

放射性核素的原子核不稳定,会自发地变成另一种核素,同时释出一种或一种以上的射线。这种变化过程称为放射性核素的衰变或蜕变(简称核衰变)。

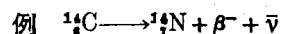
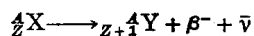
核衰变是由原子核内部的矛盾运动决定的。大量资料表明,每种元素的原子核,其质子数和中子数必须在一定的比例范围内才是稳定的,比例过大或过小者都是放射性核素,都要发生核衰变。核衰变的速度、方式及释出的射线种类和能量都只取决于原子核内部的特征,不受周围环境的影响。

核衰变方式 放射性核素的主要衰变方式有: α 衰变、 β^- 衰变、 β^+ 衰变、核外电子俘获以及 γ 跃迁和同质异能跃迁。

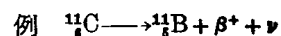
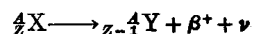
(1) α 衰变: 主要发生于原子序数 >82 的重元素核素。每次衰变释出一个氦核,称 α 粒子,母核失去二个质子和二个中子,故子核的原子序数较母核减小2,原子质量数减少4。可用下列衰变方程表示:



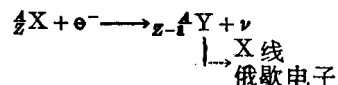
(2) β^- 衰变: 主要发生在中子相对过剩的核素。核中一个中子转化为质子,总核子数不变,同时释出一个负电子(来自核的负电子称 β^- 粒子)及一个反中微子($\bar{\nu}$)。故子核的原子序数比母核增加1,原子质量数不变。 $\bar{\nu}$ 是一种质量极小的不带电基本粒子,穿透性极强,一般探测器不能测知。 β^- 衰变可用下列衰变方程表示:

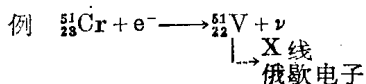


(3) β^+ 衰变: 主要发生在中子相对不足的核素。可以看作是和 β^- 衰变相反的过程,即核中一个质子转化为中子,同时释出一个正电子(称 β^+ 粒子)及一个中微子(ν)。故核子总数也不变,原子序数减少1而原子质量数不变。 ν 也是质量极小的不带电基本粒子,穿透性极强而很难测知。 β^+ 衰变可用以下衰变公式表示:



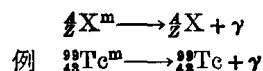
(4) 核外电子俘获(EC): 也发生在中子相对不足的核素。原子核先从核外较内层的电子轨道(K层几率最大,L层次之)俘获一个电子,使之与一个质子结合转化为中子,同时发射出一个中微子。故原子质量数不变而原子序数减少1。随后较外层的轨道上有一个电子跃入内层填补空缺。由于外层电子的能量比内层电子高(相差多少取决于二者分别属那一层轨道),多余的能量就以X线的形式释出,该X线为子核的特征X线。或者该多余的能量传给另一轨道电子,使之脱离轨道而释出,称俄歇电子。整个过程可用以下衰变方程表示:





(5) γ 跃迁及同质异能跃迁: 上述四种衰变的子核可能先处于激发态, 再在不到1微秒的时间内回到基态并以 γ 光子的形式释出多余的能量。此过程称 γ 衰变或 γ 跃迁, 因为不是一个独立过程, 称为 γ 跃迁更妥当。各种核素发生 γ 跃迁的几率不同, 可为0~100%。有时 γ 跃迁释出的能量传给一个核外电子(K层电子几率最高), 使之脱离轨道而发射出去, 这就是内转换。发射的电子称内转换电子。一种核素发射的内转换电子数与 γ 光子数之比为内转换系数 (也有人以内转换电子数与该电子数和 γ 光子数之和的比值作为内转换系数)。各种核素的内转换系数不同。发生内转换后K层轨道的空缺和 EC 的空缺相似, 随后可由外层电子补缺, 从而又发射 X 线和俄歇电子。所以凡伴有 γ 跃迁的核衰变, 发出的射线比较复杂。

同质异能跃迁实质上是延迟的 γ 跃迁。由上述四种核衰变形成的激发态子核有时可维持相当长时间才退激。这种子核可看作一种单独的核素, 本身又作为一种母核, 通过 γ 跃迁(此时称同质异能跃迁)衰变成原子序数和原子质量数都和母核相同, 但能级不同的子核。母核和子核是同质异能素。同质异能跃迁可用以下衰变方程表示:



在以上五种衰变方式中, 任何单个原子都只以其中一种方式衰变, 但对某些核素的许多原子来说, 却可以有二种或两种以上的衰变方式, 各有一定的几率。例如 ${}_{29}^{64}\text{Cu}$, β^- 占 31%, β^+ 占 16%, EC 占 54%。

此外, 还有一些较少见的核衰变方式, 如超铀元素锔-252(${}_{98}^{252}\text{Cf}$)会自发裂变发射中子而变成较轻的两个核素, 被用作同位素中子源; 吸收中子裂变的 ${}_{92}^{235}\text{U}$ 及 ${}_{94}^{239}\text{Pu}$ 可能发生连锁反应, 是核动力及某些核武器的原料等。

核衰变能量 所有核衰变都有质量亏损, 即产物的全部质量小于母体原有的质量。质量亏损按照质能转化公式的关系转变为能量, 称为衰变能, 是核射线的能量来源。

α 衰变时, 由于 ${}^4_2\text{He}$ 核有相当大的质量, 对子核有一定反冲作用, 衰变能按两者质量的反比分配于 α 粒子和子核。例如 ${}_{88}^{226}\text{Ra}$ 衰变时质量亏损为 0.005225amu, 转化为 4.86MeV 衰变能, 其中 4/226 分配给子核, 故 α 粒子的实际能量是 4.78MeV。其余各种类型的衰变, 射线的质量都很小, 对子核的反冲可忽略不计, 衰变能几乎 100% 都分配给发出的射线。 α 粒子的能量都是固定值, 不是连续能谱。

若衰变时发射两种或两种以上射线, 则衰变能按一定规律分配于各射线。例如单纯的 β^- 衰变时, 能量随机分配于 β^- 粒子和 $\bar{\nu}$, β^- 粒子的能量可以从零到全部衰变

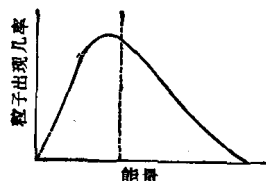


图1 β^- 衰变时 β^- 粒子的能谱

能的任何值, 形成一个 β^- 连续能谱, 最大能量 $E_{\max}$ 等于衰变能, 能量为 $\frac{1}{3} E_{\max}$ 的粒子最多, 而全部粒子的平均能量约为 $E_{\max}$ 的 40%。

β^+ 衰变时能量在 β^+ 粒子和 ν 中的分配也类似。但 β^+ 衰变时需要在核中形成一对正负电子, 负电子与质子结合形成中子, 正电子则以 β^+ 粒子形式释出。这对正负电子是由 1.022MeV 衰变能转变来的 (质能转化的逆过程), 故 β^+ 衰变必须衰变能 > 1.022MeV 才能发生, 其 β^+ 粒子的 $E_{\max}$ 则等于衰变能减去 1.022MeV。例如 ${}_{11}^{22}\text{Na}$ 衰变时的质量亏损为 0.002127amu, 衰变能为 1.980MeV, 而其 β^+ 粒子的 $E_{\max}$ 为 0.958MeV。

若核衰变伴有 γ 跃迁, 则部分衰变能用于形成 γ 光子或内转换电子, α 粒子的能量及 β^- 、 β^+ 粒子的 $E_{\max}$ 等于衰变能减去用于 γ 跃迁的能量。例如 ${}_{53}^{131}\text{I}$ 的衰变能为 0.970MeV, 其主要 γ 线的能量为 0.364MeV, 主要 β^- 粒子的 $E_{\max}$ 为 0.606MeV。 γ 跃迁时子核可能处于不同能级的激发态, 故 γ 光子的能量可能不止一种。有时子核先从较高能级的激发态退激到较低能级的激发态, 最后再回到基态, 造成一次衰变发射 2 个 γ 光子或更多的 γ 光子。但是, 不论何种情况, 核激发态的能级都有固定值, 所以 γ 光子的能量也都是固定值, 不是连续能谱。至于内转换电子的能量, 则等于相应 γ 光子的能量减去电子在轨道上的束缚能。由于轨道可以不同, 故内转换电子的能量分布更为复杂。同质异能跃迁的情况与 γ 跃迁相似。

核外电子俘获的衰变能主要用于伴发的 γ 跃迁及交给 ν 。其 X 线及俄歇电子的能量来自核外电子的跃迁, 也是固定值。

放射性衰变规律 实验证明, 放射性衰变是一级反应, 即对每种放射性核素来说, 单位时间内衰变的原子数只和存在的原子总数呈正比, 可用下式表示:

$$\frac{dN}{dt} \propto N \quad \text{或} \quad \frac{dN}{dt} = -\lambda N$$

式中 N 是存在的原子总数, λ 是衰变常数或称部分衰变率, 其含义是单位时间内衰变掉的原子所占当时存在的原子总数的百分比。各种核素的 λ 不同。 λ 是核素的重要特征参数。

将上式积分, 得

$$N_t = N_0 e^{-\lambda t}$$

式中 N_0 是原有原子数, N_t 是经过时间 t 后剩余的原子数。所以放射性核衰变服从指数规律, 亦即其原子数随时间 t 按指数函数的规律而减少。

从衰变曲线可求出核素的半衰期及衰变常数, 也可求出经过任何时间 t 后, 剩余的核素相当于原有核素的百分之几。

如果某样品是二种以上放

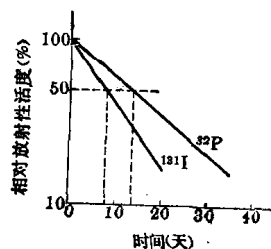


图2 衰变曲线

放射性核素的混合物，或者样品中含放射性杂质，则衰变曲线呈曲线状，用曲线分解法可求出各自的衰变曲线，并可根据分解曲线求出各自的半衰期及衰变常数。

实际工作中还常使用另一特征参数，即半衰期($t_{1/2}$)，即某核素的原子衰变掉一半所需要的时间。数学推导很容易证明

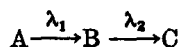
$$t_{1/2} = \frac{0.693}{\lambda}$$

此外，核医学中有时也使用平均寿命(T)这一参数。它的物理意义是：放射性核素在衰变前的平均存在时间。

$$T = \frac{1}{\lambda} = 1.44t_{1/2}$$

各种放射性核素的 $t_{1/2}$ 可相差很悬殊，见附录。

连续衰变 当某一核素衰变后形成的子核仍为放射性核素，则后者又以本身的规律衰变，即所谓连续衰变。



连续衰变的基本公式是：

$$N_2 = \frac{\lambda_1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot N_1^0 (e^{-\lambda_1 t} - e^{-\lambda_2 t})$$

式中假设最初的核素全部是母核，其原子数为 N_1^0 ， N_2 是经过任意时间 t 后 B 的原子数。实际情况有以下三种：

(1) 长期平衡的连续衰变：当母核半衰期很长而子核的衰变远比母核快，亦即 λ_1 很小而 λ_2 很大时，子核数很快达到最大值，此后子核数和母核数的比例保持不变，其绝对值亦接近不变，故称为长期平衡。由于子核的衰变数受母核衰变数的限制，表面看来子核的 $t_{1/2}$ 即为母核的 $t_{1/2}$ ，称为表观半衰期。由基本公式可以导出，达到平衡后， $N_2/N_1 = \lambda_1/\lambda_2$ ， N_2 从零增长到最大值所需的时间约为子核的 6~7 个半衰期。临床常用的锡-钼核素发生器等可归于这一类。



(2) 暂时平衡的连续衰变：当母核半衰期不太长，但子核的衰变仍较母核为快时，亦即 $\lambda_1 < \lambda_2$ ，但两者相差不很悬殊时，母核数逐步减少，子核数先是逐步增长到最大值，以后随母核数减少而减少，子核数和母核数仅在比例上保持不变，故称暂时平衡。子核也以母核的 $t_{1/2}$ 为表观半衰期。由基本公式可以导出，达到平衡后， $N_2/N_1 = \lambda_1/(\lambda_2 - \lambda_1)$ ， N_2 达到最大值的时间则为

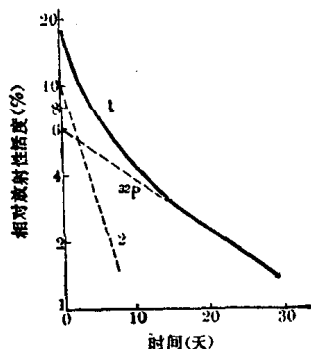


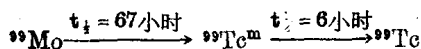
图3 用曲线分解法求样品及杂质的衰变曲线

将实测曲线的直线部分外推到 0 时，再将实测曲线的曲线部分各时相点数值减去外推线各相应点数值，即可求出杂质放射性的各时相点

1. 实测曲线 2. 杂质

$$t = \frac{1}{\lambda_2 - \lambda_1} \cdot \ln \frac{\lambda_2}{\lambda_1}$$

临床常用的钼-钼核素发生器及其他一些寿命较短的放射性核素发生器属于这一类。



(3) 无平衡的连续衰变：若子核衰变远比母核慢，则母核迅速减少，子核迅速增多，经过一段时间，母核绝大部分衰变为子核，混合物按照子核的半衰期进行衰变。

核衰变图 为了直观地反映核衰变的情况，人们设计了核衰变图。各著作及各手册绘制核衰变图的方法细节不完全相同，一般包括以下几项：用两条横线表示母核及子核，中间可加横线表示各激发态；用斜线表示不同类型的衰变所致原子序数的变化，向右表示序数增加，向左表示序数降低，序数降低可由 β^+ 、EC 或 α 衰变引起，在线旁注明；图上还注明半衰期、能量、不同类型衰变的几率等。

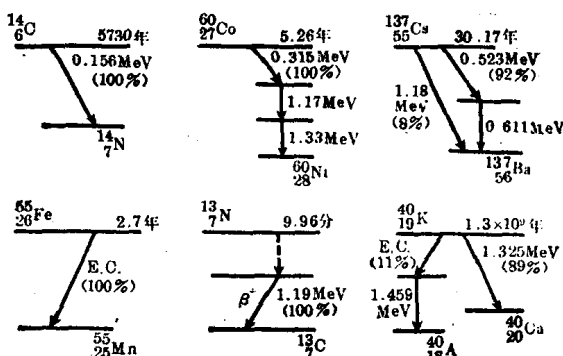


图4 核衰变图

关于核衰变的统计涨落规律，参见“放射性测量的统计误差”条。

(张家骅 周慕俊)

放射性活度

放射性活度(简称活度)是描述放射性核素特征的一个重要的辐射量。在某时刻处于某个特定能态的一定量放射性核素的活度 A ，是 dN 除以 dt 所得的商，即

$$A = \frac{dN}{dt}$$

dN 是在时间间隔 dt 内由该能态发生自发核衰变次数的期望值。 dN 之所以是期望值是由于放射性衰变具有随机性。上述定义中特定能态在没有其他说明时，是指该核素的基态。处于某一特定能态的一定量放射性核素的活度，等于此核素那个能态的衰变常数与该能态的原子核数目之乘积(即 $A = \lambda N$)。

放射性活度反映的是放射性核素的核衰变率，过去习惯称为放射性强度。

活度的单位是 s^{-1} ，实际含义是每秒衰变次数。1975 年第 15 届国际计量大会批准了其国际制单位的专门名称为贝可勒尔(Becquerel)，简称贝可，符号为 Bq。

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

数十年来,活度沿用居里(Ci)为其特殊的专用单位。1Ci等于每秒 3.7×10^{10} 次衰变。它被暂时保留与国际制单位并用。贝可勒尔与居里的换算关系是:

$$1\text{Bq} = 1\text{s}^{-1} = 2.703 \times 10^{-11}\text{Ci}$$

$$1\text{Ci} = 3.7 \times 10^{10}\text{Bq}(\text{准确值})$$

必须指出,贝可勒尔及居里表示的是放射性核素的衰变率,而不是某种辐射的发射速率。例如活度为 $3.7 \times 10^{10}\text{Bq}$ (即1Ci)的 ^{32}P 和 ^{60}Co ,它们的核衰变次数相同,但发射的粒子数不同。 ^{32}P 每秒钟释放 3.7×10^{10} 个 β^- 粒子;而 ^{60}Co 每秒钟除释放 3.7×10^{10} 个 β^- 粒子外,同时还释放 $2 \times 3.7 \times 10^{10}$ 个 γ 光子。

居里单位较大,通常用毫居里(mCi, $1\text{mCi} = 0.001\text{Ci}$)、微居里(μCi , $1\mu\text{Ci} = 0.001\text{mCi}$)等。

1946年,美国国家标准局曾提出用“卢瑟福”(Rutherford)作为放射性活度的单位,1卢瑟福等于每秒 10^6 次衰变。此单位未普遍采用,现已淘汰。在苏联和东欧还曾使用“克镭当量”作为活度单位,国内也沿用过。这是通过与标准镭源比较来确定 γ 源的活度。这个单位未被国际有关辐射量和单位的机构所承认。鉴于它同辐射源的包装过滤条件、测量时放射源的位置、距离以及测量仪器的能量响应等均有关,用克镭当量表示放射性核素活度的方法是很不严格的。

有时放射性核素混有该元素的非放射性核素,后者称为载体。为更好表征各种物质中放射性核素的含量,通常还采用比放射性这一参数。比放射性即单位质量物质的放射性活度。同理,将单位体积的溶液内所含的放射性活度称为放射性浓度。还有用单位克分子物质的放射性活度来描述比放射性的,这种表示方法排除了各种化合物的分子量不同的影响,更有利于对不同化合物的活度进行比较。针对局限于表面的放射性,还可用单位表面积上的活度即表面活度来表征。

(张家骅 郑韵正)

核射线的物理效应

核射线的物理效应也称射线与物质的相互作用,它包括射线对物质的作用(引起物质的电离、激发等)和物质对射线的作用(引起射线的减速、散射及吸收等)两个相互联系的方面。

电离作用是指射线使物质中的原子失去轨道电子而形成正负离子对,它是某些探测器测量射线的物质基础,又是射线引起物理、化学变化及生物效应的主要机制。电离作用的强弱常用射线在每厘米路程上产生的离子对数来度量,即电离密度或比电离。

激发作用指射线使某些原子的轨道电子从低能级跃迁至高能级。当该电子退激时,这部分能量以光子或热能形式释出。激发作用是另一些探测器工作的物质基础,也是射线引起物理、化学、生物效应的机制之一。

减速作用是指射线使物质原子电离或激发时,射线本身消耗能量而速度减慢(如空气中形成一对离子平均要32.5eV)。物质密度越大,减速作用越严重。

散射作用是指带电粒子受到物质原子核库仑电场的作用时,或 γ 光子与物质的轨道电子碰撞时,射线本身偏离原来的方向而行进。散射作用对测量及防护都有一定影响。

吸收作用是由于射线动能全部或将近全部丧失时,会和周围物质发生一些特殊的相互作用,如 β^+ 湮没, β^- 韧致辐射, α 粒子与 β^- 粒子形成自由氢原子及自由电子等。其结果是原来的射线不再存在,这就是射线被吸收。吸收前射线所行经的路程称为射程。射线的射程通常不以厘米等单位来衡量,这是因为同一射线在不同密度物质中所能穿行的距离与物质密度有关。若将距离与该物质密度相乘,则同一射线在不同密度物质中所得乘积基本一样,所以射程通常用 mg/cm^2 来度量。

各种射线与物质的相互作用各有特点:

α 粒子 α 粒子的特点是质量大,电荷多,单能,初速慢($3 \sim 8\text{MeV}$ 的 α 粒子速度为 $1.4 \sim 2.0 \times 10^9\text{cm/s}$)。它通过静电效应引起物质电离(包括初级离子引起的次级电离)。一般说,带电粒子的荷电量越大,速度越慢,所经介质的密度越大,则比电离越大,所以 α 粒子的比电离比相当能量的 β 粒子大数百至数千倍。结果是它的物理、化学、生物效应比 β 及 γ 大得多而射程却短得多。此外在射程范围内, α 粒子在路径上速度会逐渐慢下来,故比电离逐渐增大。当动能全部丧失之后,它从周围吸收二个电子而成为自由氢原子。

α 粒子在标准状况(一个大气压, 15°C)空气中的最大射程与粒子的动能有关。在其他介质中的射程则还与介质密度有关,例如 3MeV 的 α 粒子在空气中射程为16mm,在铝中 $<0.015\text{mm}$,在生物组织中约为空气中的1/820。

α 粒子由于质量大,散射一般不明显。

β 粒子 β^+ 与 β^- 也是带电粒子,与 α 粒子相比,它们的质量小,初速大,电荷量小,所以在与物质相互作用时又有本身的特点:① β 粒子的电离密度比同样能量的 α 粒子小得多;② β 粒子射程比 α 粒子大,而且因为同一源发出的 β 粒子的能谱是 $0 \rightarrow E_{\text{max}}$ 的连续谱,故各粒子的射程也不一致,从接近零直至某一最大值。所谓 β 射线的射程即是指其最大射程。射程 R 可由吸收曲线外推得到。图中吸收体用铝,因为它容易加工。吸收曲线的长尾巴是韧致辐射所引起。使 β 线减少一半的吸收体厚度称为半值厚度($d_{1/2}$)。测得某种 β 线的 $R(\text{mg}/\text{cm}^2)$ 及 $d_{1/2}(\text{mg}/\text{cm}^2)$ 即可由附图查知它的最大能量 E (单位MeV)。或由下列经验公式估算:

$$R = 412E(1.265 - 0.0954 \log E) \quad (\text{适用于 } E < 2.5\text{MeV})$$

$$d_{1/2} = 45E^{1.5}$$

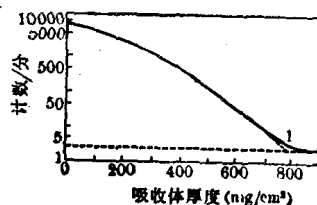


图1 ^{32}P 的 β 吸收曲线

1. 韧致辐射

工。吸收曲线的长尾巴是韧致辐射所引起。使 β 线减少一半的吸收体厚度称为半值厚度($d_{1/2}$)。测得某种 β 线的 $R(\text{mg}/\text{cm}^2)$ 及 $d_{1/2}(\text{mg}/\text{cm}^2)$ 即可由附图查知它的最大能量 E (单位MeV)。或由下列经验公式估算: