

核技术农学应用

谢学民 王寿祥 张勤争 编著
徐步进 奚海福 张永熙

上海科学技术出版社

核 技 术 农 学 应 用

谢学民 王寿祥 张勤争

徐步进 奚海福 张永熙

编 著

上海科学技术出版社

内 容 简 介

本书介绍了核技术在农业科学中的应用原理和方法。全书共分十章，主要内容有：原子核物理基础；放射化学概论；核辐射探测器及射线测量方法；辐射剂量与防护；同位素示踪试验的设计与实践；示踪技术在土壤、肥料、作物营养生理、遗传育种、农药残留与环境保护以及畜牧兽医等研究中的应用；对核辐射应用于诱变育种、食品保鲜及昆虫不育等方面的原理与现状也作了概略介绍；书末附录还介绍了部分放射性核素、部分物理常数以及放射性衰变计算等内容。

本书可作为高等农林院校本科生、研究生相应课程的教材，对医学和生物专业的学生、农林科技工作者也有一定的使用与参考价值。

核 技 术 农 学 应 用

谢学民 王寿祥 张勤争 编著
徐步进 奚海福 张永熙

上海科学技术出版社出版、发行

（上海瑞金二路450号）

浙江农业大学印刷厂印刷

开本787×1092 1/16 印张13.75 字数324,000

1989年6月第1版 1989年6月第1次印刷

印数1—4000

ISBN 7-5323-1688-2/S·205

定价：4.65元

编 者 的 话

随着近代科学的发展,核技术在农学中的应用日趋广泛与深入。根据有关部门的意见,为使农业院校学生了解原子核技术的基础理论与方法,我们自1981年2月起,对农学类各专业开设了《同位素在农业上应用》课程(50~60学时)。原编教材分基础与应用两部分,分别由王寿祥、陈传群执笔。经过几年的教学实践,且又因核技术的迅速发展,1984年4月由当时的执教者对原教材分别作了修改与补充,修改稿除编者互相审阅外,还经孙锦荷、吴美文、徐寅良同志审阅,其中第十章特请高明尉教授审阅,并更名为《核技术农学应用》。这次正式出版前,编者作了进一步修改;每章末均附有习题或复习题;增加了绪论,并请陈子元教授审阅。两次修改稿,均由谢学民、王寿祥定稿。我们对审阅者及本书所引用资料的作者,对为本书出版给予大力支持上海科学技术出版社表示衷心的感谢。

本书的编写者(按内容先后为序)是:谢学民(绪论、第七章及第十章一、二节)、王寿祥(第一、二、三章及附录)、张永熙(第四章)、徐步进(第五、六章)、奚海福(第八章)、张勤争(第九章及第十章三、四节)。

由于水平有限,经验不足,加上时间仓促,书中错漏和不妥之处在所难免,恳切希望读者予以批评指正。

1989年元月

绪 论

一、核技术的意义和特点

核技术是原子核科学技术的简称。核科学技术除核能利用外,还包括核素工业仪表,核探测与分析,核辐射应用,核素示踪技术等等。1896年A.H.Becquerel(贝可勒尔)对铀矿石天然放射性的发现,揭开了原子时代的序幕。1942年世界上第一座核反应堆的建立,使人类进入了利用核能的年代。随着核能(放射能,裂变能,聚变能)的开发利用,一项具有强大生命力的新技术——核技术已形成,并日益发展壮大。仅仅数十年的历史,核技术已渗透到国民经济各个领域,已成为当代科学技术发展的一个重要标志。

大量成熟的核技术使工业进入仪表化、系列化、专业化和商业化的阶段。放射性核素厚度仪、密度仪、温度仪,各种快速分析仪和射线无损探伤仪,已应用于轧钢、冶金、炼油、化工、造纸、塑料、机器制造等生产过程中,中子和 γ 射线测井仪用于勘探石油和开发煤田。辐射技术在高分子有机化学中具有聚合、改性、接枝等特殊效用。同位素电池被用作宇航、海洋和遥控自动装置的电源。此外,活化分析、中子照相、核磁共振等核技术,已成功地用于工业生产之中。

核技术与医学结合形成的核医学,是研究核素和核辐射在医学上应用及其理论的新学科。核医学分为实验核医学和临床核医学两大部分。实验核医学是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和病理过程的认识;临床核医学则直接利用核素或加速器来诊断和治疗疾病。经济发达国家高度重视核医学的发展,美、英、日等国家,均在全国合理布局大型核医学中心,配备专门技术队伍,技术设备先进。这些国家亦重视核医学的普及,有的用法律作了规定,如美国早在1971年制定了法律,规定一个有250张床位以上的医院,必须设立核医学机构,否则不准营业。核技术在国民经济各部门及科学研究中的广泛应用及其重要地位,正如IAEA(国际原子能机构)的一个公报中指出:“从对技术影响的广度而论,可能只有现代电子学 and 数据处理才能与同位素相比”。

目前世界上已有一百多个国家开展了核技术的应用研究。核技术的应用给国民经济带来了巨大的经济效益。1980年,主要资本主义国家仅核素仪器仪表就有六十一万台,其经济效益为二十七亿美元。近二十年来资本主义国家的核素仪器仪表量正以每五年增长一倍到两倍的速度发展着。自1960到1985年的二十五年中,世界各国核技术应用总的经济效益为800亿美元。其中西方工业国家,在核素仪表上取得经济效益累计460亿美元,平均效益系数为5.9;苏联与东欧国家的经济效益累计250亿卢布,平均效益系数为5.0。

核技术有其显著特点,它能解决其他技术不能解决的问题,能达到其他技术难以达到的超微量分析水平,可以在不破坏客体的完整条件下分析其内在问题,并且还具有投资少,见效快,应用广,收益大,工艺简、控制易等优点,因而发展非常迅速。

二、核技术农学应用的成就

核技术在农业上的应用是原子能和平利用的一个重要组成部分,目前主要包括两大方面,一是核辐射应用;二是核素示踪技术应用。

(一)核辐射在农业上的应用

1. 作物辐射育种:辐射育种是利用各种射线诱发农用植物突变而培育成新的品种。辐射育种起始于1927年,六十年代后逐步开展,七十年代后辐射育成的新品种迅速增加,成果十分突出,引起育种家的广泛重视。据 IAEA 1982年统计,辐射育成的植物品种共518个,其中农作物280个、观赏植物238个,有的已成为主要推广的良种,至1987年通过辐射育成作物品种超过一千个,在全世界播种面积达几百万公顷,每年经济效益达10亿美元。我国辐射育种自五十年代开始,近十年又有很大发展。据1984年不完全统计,已培育出19种作物的新品种194个,种植面积1.3亿亩,每年增产粮食25亿公斤,皮棉3亿公斤,油料2亿公斤,增产价值30~40亿元,其中棉花“鲁棉1号”、水稻“原丰早”、大豆“铁丰18号”荣获国家一等发明奖。此外,辐射还在创造许多有价值的种质资源,开展了诱变应用方法技术和基础理论研究,进行辐射与生物技术,辐射与远缘杂交结合,扩大诱变利用途径等方面均有较大的进展。

2. 食品辐照保藏:农、畜、渔产品在贮运过程中屡遭损失,据联合国有关机构估计,全世界农产品因病虫害造成的损失约占总产量的20%。在我国,据估计粮食损失约占总产量的10%,肉食品占30%,水产品高达40~50%。五十年代,美、苏、英等国开展辐照保藏食品研究;七十年代后,世界各国进行了水果、蔬菜、水产品、肉制品辐照保藏研究,并逐步走向实用化和商业化。截至1985年8月,世界上已有31个国家批准了76种辐照食品可供食用,投放市场以供消费。我国从1958年开始,进行食品辐照保藏的研究,并取得了可喜的成果。1983年已经批准了马铃薯、大米、洋葱、大蒜、蘑菇、猪肉、板栗等七种辐照食品可供食用和出口;近两年,苹果、草莓、生姜、蚕蛹、薯干、酒、香肠、酱油、中餐软罐头、香烟、饲料等的辐照保藏也已通过技术鉴定。

3. 辐射昆虫不育防治害虫:辐射昆虫不育防治害虫是现代生物防治法的一项新技术。国外自五十年代开始研究,目前世界上约有三分之一的国家,对一百多种害虫进行辐射不育研究,已有三十多种害虫进入中间试验或实际应用研究。美国根除了牲畜螺旋蝇,抑制了棉花红铃虫。墨西哥由于地中海果蝇的危害,每年要损失15亿美元,1979年4月建立当时最大的养虫工厂,每周生产5亿只不育虫,连续释放11个月,到1980年6月根除此虫。日本1977年在久米岛消灭了瓜实蝇为害,1982年东方果蝇在冲绳岛灭绝。加拿大防治苹果蠹蛾获得成果。我国1960年开展此技术研究,用辐射昆虫不育防治玉米螟,取得初步结果,对小菜蛾、蚕蛆蝇的研究取得进展。我国台湾省利用辐射不育防治东方果蝇、柑桔小食蝇也取得显著成效。

4. 低剂量辐射刺激增产:低剂量辐射能刺激植物生长发育,国外,尤其是苏联在六十年代报道较多。我国近年对蚕业和水产方面研究有进展,低剂量的 γ 射线和中子辐射处理柞蚕卵,可提高产茧量10~20%,蚕丝品质也得到改善;辐射处理鲤鱼可提高孵化率,对仔鱼有促进生长趋势,体重增加;辐射处理虾卵和幼体,提高了孵化率和仔虾成活率,加速了生长发育。

(二)核素示踪技术在农业科学上的应用

核素示踪技术在农业科学上的应用已有六十余年的历史,现已成为一项应用广泛的先进技术。其应用使许多以往无法揭露的生命活动的本质提供了可能。目前,一些基础性研究项目和指导生产发展的一些规律性研究,都离不开示踪技术。FAO(联合国粮农组织)/IAEA早在1965年就开始广泛组织世界各国开展核素示踪技术在农业方面的研究课题。1982年,将其列为FAO/IAEA的重点项目。

实践证明,核素示踪技术在农业科学中的应用效果显著。美、苏,五十年代研究磷肥合理

施用,改进施肥方法,收到了上千万美元的经济效益。罗马尼亚利用示踪技术解决磷肥施用,每年可节省开支3600万美元。印度用 ^{15}N 示踪技术研究家畜饲料,解决了牛的液体饲料,收益1600万美元的效益。日本用 ^{151}Eu 标记鱼饲料,研究白鲑鱼的回游规律,对鱼类资源管理,增加鱼产量作出了贡献。我国核素示踪技术在农业科学研究上的应用,三十多年来取得很大进展,作出了显著的成绩,例如用示踪技术研究农药残留标准的成果,为农业部制定农药安全使用标准所采用,具有重大社会效益和经济效益;研究明确氮肥增效剂的肥效和残留,鉴定出较好的品种,具有明显的经济效益;以 ^{15}N 研究水稻氮肥“一次全层基施”,能提高水稻对氮肥利用率,增产15%,湖北省推广此技术后,在1980~1982三年共增产稻谷3.2亿公斤;示踪技术研究腐殖酸对磷肥的作用,为停建腐磷厂提供了依据,给国家节约了大量资金;利用放射免疫,建立“通信采样”放免分析技术诊断牲畜妊娠与疾病等,也取得了良好效果。

综上所述,我国核技术在农业上的应用,取得很大进展和显著的经济效益与社会效益,为农业生产作出了卓越的贡献。也得到同行的高度评价。FAO/IAEA联合处处长Fried 1982年访华时曾说,世界上没有一个国家象中国这样,在核技术农业应用上有这样庞大的队伍和完整的研究体系,核技术农业应用研究成果是显著的。

三、核农学新学科的形成与发展

如果自1923年Hevesy以 ^{212}Pb 研究菜豆对铅的吸收与1927年Muller发现射线诱发遗传变异算起,核技术在农业上应用已有六十余年的历史。经过核科学与农业科学人员的共同努力,在农业各领域中取得了卓著的成绩。大量事实表明核技术农学应用不仅有明显的经济效益与社会效益,还积累了成功的经验,建立了相应的基础理论;在这些基础上,加之由原子核科学技术与农业科学之间的交叉,逐步形成一门新生的边缘学科——核农学。核农学是一门研究核素,核辐射与相应核技术在农业科学与农业生产中应用及其理论基础的科学。至目前,核农学已有其自己的研究内容,逐步建立起其理论基础,科学体系与研究方法。

我国核农学的发展,大致经历了三个阶段。

第一阶段(1956~1960)为开创时期。我国于1956年制订的第一个十二年科学发展规划,将原子能和平利用列为五大重点发展项目之一。1957年在中国农业科学院建立了原子能利用研究室(四年后发展成为研究所),该室举办了五期同位素与辐射应用训练班,培训四百余名技术骨干,为全国开展核技术农业应用奠定了基础。接着沈阳、长春、杭州、南京、广州等地相继建立了一批同位素实验室,北京、沈阳、吉林、浙江、华南等农业院校还建立了相应专业,培养人才。

第二阶段(1961~1976)为成长时期。六十年代初,我国贯彻调整,巩固、充实,提高的“八字方针”,对方兴未艾的核农学事业也作了调整、紧缩;尤其在十年动乱时期,则是遭到了严重的摧残。但是,从中央到地方的不少单位,在十分艰难的条件下,仍然坚持科学实验,取得了非常可喜的进展,获得了相当一批的科研成果,核农学事业仍展现出它的蓬勃新姿。

第三阶段(1976后直到现在)为发展时期。各省市恢复与成立核农学或原子能农业利用研究所(室),一些农业院校恢复专业并招生,北京、浙江、吉林、南京、江苏、四川、西南、广西等农业院校与研究单位还招收硕士研究生,其中中国农科院原子能利用研究所与浙江农业大学还招收博士研究生。尤其是1979年3月在杭州成立了“中国原子能农学会”,著名核农学专家徐冠仁教授被推选为首届理事长,接着各省市相继成立了分会,广泛开展了各种学术活动、科普活动与培训技术队伍等,有力地促进了核农学事业发展。目前,从事核农学专职或兼职的科技人

员达数千名。不少研究项目,开展了全国性的大协作,全国已获得了一大批科研成果。此外,还开展了国际学术交流,不少专家学者出访外国,参加有关核农学的国际学术会议,参加FAO/IAEA的协作项目等。在中国举办了核农学应用国际会议和培训班。浙江农业大学陈子元教授被聘为IAEA科学顾问委员会委员。凡此这些是核农学发展的结果,亦是今后前进的基础。《核农学学报》与《核农学通报》刊物的公开发行人是我国核农学发展到成熟阶段的标志。

四、核农学的内容

核农学集中了核物理、核化学、放射化学、电子学与农业生物学的最新成就,由物理(核探测仪器和方法)、化学(核素制剂)和农业生物学(研究对象)等部分组成。核探测仪器和方法及核素制剂是核农学的先决条件。

鉴于核农学新学科是在核技术农业应用获得成就基础上形成的,核技术农业应用又分辐射应用与示踪应用两大类,因此形成学科的分支内容及其基础理论均有较大的差异。

属辐射方面的分支学科,有辐射育种学,其基础学科有辐射遗传学与放射生物学等;食品辐射工艺学,其基础学科有食品营养学、食品卫生学与食品保藏学等;辐射昆虫不育治虫技术,其基础学科有昆虫学、昆虫生理学与昆虫生态学等,其相关学科有辐射剂量学,辐射防护学等。

属示踪方面分支学科,有核素示踪学,可分放射性核素示踪学与稳定性核素示踪学,基础学科有核物理、核化学、放射化学等,相关学科有辐射剂量学、辐射防护学、放射性检测技术等。近年又从核素示踪学中分离出放射免疫学、活化分析技术、放射自显影,放射性层析分析等。

核农学的共同基础学科与相关学科有植物生理学、生物化学、生物技术与生物物理学等。

五、核农学的展望

核农学新学科是在原子核科学技术与农业生物科学相互促进的基础上形成的,随着核农学的进展亦将丰富与促进核技术与农业科学。随着核技术、生物技术以及其他高技术的迅速兴起,核农学正在向纵深方向发展。为使核农学这门新学科健康成长,我们认为须继续做好工作。

第一,建议有关部门加强领导。对核农学除积极扶植,增加投资外,要充分发挥从上而下的原子能农业科学(核农学)研究机构与原子能农(核农)学会活动的两个“网络”,广泛展开,深入研究,加强纵横联系,使核农学这门新学科更加完善,以列入世界先进行列。

第二,扩大研究领域。核技术的应用涉及到大农业的种植业、养殖业及其加工业的各个方面,例如开发天然资源、提高单产、改进品质、防治自然灾害、发展农业工程等等。在这些方面应用过程中,将累积大量资料,形成一些新的分支学科,将更丰富核农学。

第三,加强基础理论的研究。农业生物科学中尚有不少问题,如光合作用机理、固氮机理等至今尚未完全阐明清楚,农作物的遗传工程还需深入研究,核技术在这些领域中,可发挥其作用,对这些问题的深入研究,又可丰富核农学的内容。

第四,培养核农学专门人才。要将核技术推广应用到大农业上,需要一支专业队伍,现除理工院校设有核科学技术系科外,少数农业院校有农业生物物理(农业应用物理)专业,部分农业院校招收农业生物物理专业硕士、博士研究生,培养高级专门人员。许多农业院校把《核农学》作为学生的必修课或选修课,以丰富学生的知识和扩大学生的知识面。

第五,增加国际交往。核技术农学应用,在国外并没有象我国这样庞大的研究队伍和完整的研究体系。不过技术发达国家还是有不少研究,IAEA每年均有有关核农学的学术活动,参加这些活动将会为我国核农学的发展提供积极的条件。

目 录

绪 论

第一章 原子核物理基础	(1)
第一节 原子核的基本性质.....	(1)
第二节 原子核的结合能及其稳定性.....	(3)
第三节 原子核衰变.....	(7)
第四节 放射性活度的单位.....	(15)
第五节 射线与物质的相互作用.....	(15)
习 题	(20)
第二章 辐射的探测及测量方法	(21)
第一节 辐射探测器的基本原理.....	(21)
第二节 G—M计数管.....	(23)
第三节 半导体探测器.....	(27)
第四节 闪烁计数器.....	(29)
第五节 计数统计学及测量数据处理.....	(33)
习 题	(38)
第三章 辐射剂量及防护	(40)
第一节 辐射剂量及其单位.....	(40)
第二节 辐射对人体的影响及其防护.....	(43)
第三节 辐射防护标准.....	(49)
第四节 去污及废物处理简介.....	(51)
习 题	(53)
第四章 放射化学基础	(54)
第一节 放射化学的发展简史和基本概念.....	(54)
第二节 放射性核素的制备.....	(57)
第三节 放射性物质的分离纯化及核素的鉴定.....	(61)
第四节 放射化学实验室的安全和操作.....	(63)
习 题	(64)
第五章 示踪法农学应用的基本原理和特点	(65)
第一节 农学中应用示踪法的基本依据.....	(65)
第二节 同位素示踪法的特点.....	(66)
第三节 农学中示踪法的应用类型.....	(67)
习 题	(68)
第六章 示踪试验设计的一般原则和程序	(70)
第一节 示踪剂的选择.....	(70)
第二节 示踪剂用量的估算.....	(71)

第三节 放射性制剂说明书的考察和开瓶分装	(73)
第四节 动、植物示踪试验的实施	(76)
第五节 样品的采集和制备	(80)
习 题	(82)
第七章 放射自显影	(83)
第一节 概述	(83)
第二节 放射自显影的基本原理	(86)
第三节 宏观自显影	(91)
第四节 光学显微自显影	(95)
第五节 电镜自显影	(100)
第六节 自显影的几种特殊制备方法	(102)
第七节 影响自显影质量的有关因素	(104)
习 题	(105)
第八章 稳定性同位素示踪法	(106)
第一节 概述	(106)
第二节 稳定性同位素示踪原理	(107)
第三节 稳定性同位素测定的原理及仪器	(109)
第四节 稳定性同位素的样品制备及丰度测定	(116)
第五节 稳定性同位素示踪试验的设计和数据分析	(123)
习 题	(128)
第九章 示踪法在农业科学中的应用	(129)
第一节 示踪法在作物营养生理研究中的应用	(129)
第二节 示踪法对植物激素作用机理的研究	(136)
第三节 示踪法在农药对作物、土壤等的污染及其防治研究中的应用	(139)
第四节 示踪法在作物遗传育种研究中的应用	(146)
第五节 示踪法在植物保护研究中的应用	(151)
第六节 示踪法测定土壤有效养分和肥料利用率	(155)
第七节 示踪法在动物营养研究中的应用	(163)
习 题	(170)
第十章 电离辐射的应用	(171)
第一节 辐射的生物学效应	(171)
第二节 辐射育种	(179)
第三节 辐照保藏食品	(185)
第四节 辐射昆虫不育防治害虫	(193)
习 题	(195)
附录一 部分常用放射性核素表	(197)
附录二 部分常用物理常数	(207)
附录三 放射性衰变计算表	(207)

第一章 原子核物理基础

众所周知,自然界里的所有物质是由各种元素组成的。截至1984年,已发现了109种元素,其中17种“超铀元素”是人工方法制造的;这表明,元素仅仅是在一定条件下相对稳定的结构单位,并不是永恒不变的。可以想见,随着人为嬗变技术的发展,将有更多的元素被制造出来。

组成每种元素的基本单位是原子。原子是很小的粒子,其直径不过 10^{-10}m ,原子的质量也很微小,一个氢原子的质量只不过 $1.67 \times 10^{-27}\text{kg}$,就是最重的天然元素铀原子的质量也只有 $3.95 \times 10^{-25}\text{kg}$ 。

1911年,卢瑟福(E. Rutherford)通过 α 粒子的散射实验,证明了原子的核式结构。这已是现今大家所熟知的了。原子系由按其几何体积很小的、荷正电的核与沿一定轨道环绕核运动的荷负电的电子壳所组成。一个电子所带的电荷为 $1.6 \times 10^{-19}\text{C}$,通常以字母 e 表示。原子核所带正电荷数(以 e 为单位)等于门捷列夫周期系内的原子序数。

原子内的电子是按一定的规律分布的——每一轨道最多只能容纳两个电子,几个轨道组合在一起,又形成壳层结构——离核最近的壳层称K层,K层上有(除原子序数为1的氢原子外)两个电子(K电子),其次的一层称L层,它有8个电子,以此类推。各壳层容纳的最多电子数可由通式 $2n^2$ 算出, n 为层次。 $n=1$ 就是K层, $n=2$ 就是L层,等等;但最外层不超过8个电子。如果附加能量给原子壳层(比如用高速电子轰击物质,以光或热激发原子),则原子壳层中电子的能量呈不连续的增加,原子由一种量子状态转变到另一种状态——“高量子状态”;若去除外界的激发,处于高量子态的原子便转入“低量子状态”,即低能态;此时放出光子,其频率 ν 可由关系式 $h\nu = \Delta E$ 求出。式中 ΔE 为原子壳层的两个能量状态(即能级)之差,而 h 为普朗克常数, $h = 6.626 \times 10^{-34}\text{J}\cdot\text{s}$,平常所说的特征(或标识)X射线乃是最内诸壳层间的电子跃迁所致。

上述这些是原子物理研究的对象,不在本课程的范围;而作为原子科学技术基础的原子核物理,主要是研究原子核的结构、性质和变化规律,简要地介绍一下这方面的知识是很有必要的。

第一节 原子核的基本性质

一、原子核的组成

原子核由质子和中子组成。质子实质上就是氢的原子核,带一个单位正电荷;中子是一种不带电的中性粒子,比质子略重。既然质子和中子是组成原子核的基本单元,所以它们又统称为核子。

二、原子核的电荷

核电荷是原子核的重要特征之一。通常,原子是电中性的,而电子壳带负电;可见,原子核带正电,且所带的正电荷数应等于核外电子壳的电荷数,即核带 $+Z$ 个电荷;同时,不难理解,核

的电荷数即组成核的质子数。对自然界中所有元素的原子核分析研究时发现,同一种元素的原子核往往含有不同数目的中子,于是我们便把质子数(或原子序数)相同而中子数不同的原子核所相应的元素互称为同位素;还发现,某些元素原子核总核子数虽相同,但质子和中子数却不同,甚至某些核的质子数和中子数均相同,即核子总数相同,但具有不同的能量状态,这些核对应的元素的原子分别互称为同量异位素和同质异能素。这些在本章第三节还要提到。

三、原子核的质量

核的质量是原子核的另一重要特征。为了方便,通常并不以“克”或“千克”表示原子核(原子亦然)的质量,而是以相对质量,即原子量表示。其定义是:以天然最广泛存在的碳的一种同位素质量的 $1/12$ 作为单位,其它元素的原子或原子核的质量与该单位作比较,即得相应的原子量。比如质子的质量与该单位之比值 1.007276 ,那么质子的质量就是 1.007276 原子质量单位(原子质量单位通常记为 u ,是unit的缩写),以此,中子为 $1.008665u$ 。对各元素原子质量的研究指出,所有原子的质量都接近整数,我们把该整数叫做质量数,以 A 表示。如一种氧的同位素的质量为 $15.994915u$,一种金的同位素为 $196.968231u$,它们分别接近整数 16 和 197 。不难理解,中子和质子的质量数皆为 1 ,因此,质量数就是原子核中所含的核子数。

四、原子核的半径

对于原子核大小的理解,与寻常对物体大小的理解有所不同。一种是指组成原子核的粒子间的距离,或核电荷的分布范围;另一种是指核力的作用范围,即核力的作用半径。但由这两类基本实验得出的关于核半径的数值差异不大。

实验证明,原子核的体积与其质量成正比:

$$V \propto m \approx A$$

同时,大量实验证明,原子核是近于球形的,故常用核半径来表示核的大小,这样,上式可变为

$$R \propto A^{1/3}$$

$$\text{或} \quad R = r_0 A^{1/3} \quad (1-1)$$

式中 r_0 为比例常数。若 $A=1$,则 $R=r_0$,即 r_0 表示一个核子的大小。用不同的方法得到 $r_0=(1.2\sim 1.5)\times 10^{-15}\text{m}$ 。

于是,原子核的体积便可写成

$$V = \frac{4}{3} \pi R^3 \approx \frac{4}{3} \pi r_0^3 A \quad (1-2)$$

若原子核的质量为 m ,则核内核物质的平均密度为

$$\rho = \frac{m}{V} \approx \frac{A}{\frac{4}{3} \pi r_0^3 N_A} = \frac{3}{4 \pi r_0^3 N_A} \quad (1-3)$$

非常接近于常数。式中 N_A 为阿伏加德罗常数。若将 N_A 、 r_0 值代入上式,得 $\rho \approx 10^{17} \text{kg/m}^3$ 。可见,核物质的密度大得惊人!

作为本节的结束,提出一个重要的术语“核素”。所谓核素乃是具有一定核特征,即一定质子数和中子数的一类原子。由于电荷和质量是原子核的两个最重要的性质,国际上通常用质量数和原子序数表示核素的特征。方法是把质量数 A 放在化学符号的左上角,原子序数 Z 放

在左下角。如质量数为36、原子序数为17的核素氯,表示成 ${}^{36}_{17}\text{Cl}$ 。一般地,对质量数 A 、原子序数 Z 的核素 X ,表示成 A_ZX ;有时,只标出质量数,而原子序数略掉,如核素 ${}^{12}_6\text{C}$,只写成 ${}^{12}\text{C}$,等等。

第二节 原子核的结合能及其稳定性

一、原子核的结合能和质量亏损

前已述及,原子核是由质子和中子组成。但是核素的质量并不等于组成核素的所有质子、中子及电子的质量之和(或者,明确地说,原子核的质量并不等于组成它的全部的质子和中子的质量之和)。例如 ${}^2\text{H}$ 核由一个质子和一个中子组成,其质量之和为 $m_a + m_p$,而 ${}^2\text{H}$ 核的质量为 $m_{{}_2\text{H}}$,两者之差

$$\Delta m = m_p + m_a - m_{{}_2\text{H}} = 1.007276 + 1.008665 - 2.013553 = 0.002388\text{u}.$$

这种质量的差异,揭示了原子核能的应用原理。大家知道,相对论原理指出质量和能量的相互关系是

$$E = mc^2 \quad (1-4)$$

这就是著名的爱因斯坦质能关系式,或叫质能联系定律。它表明, m kg的物体便具有 mc^2 J的能量。于是,一个中子和一个质子结合成 ${}^2\text{H}$ 时多出了 0.002388u 的质量(何止是 ${}^2\text{H}$ 核!所有原子核的质量皆小于组成它的全部质子和中子的质量之和),这就转变成相应的能量放出,我们把这个能量谓之原子核的结合能; Δm 则称为质量亏损〔注1〕,一般地

$$\Delta E = \Delta MC^2 \quad (1-5)$$

二、原子核结合能的计算

如果把组成原子核(或原子)粒子的质量总和与该核(或原子)的真实质量作比较,便可求出核的(或原子及原子核)结合能。总的原子和原子核的结合能 E ,是

$$E_t = [Zm_p + (A - Z)m_a + Zm_e - M_0]C^2 \quad (1-6)$$

这里 M_0 、 m_e 分别为原子核所属核素的质量、电子质量, m_a 、 m_p 同前,为中子和质子的质量。其质量亏损为

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_a + Zm_e - M_0. \quad (1-7)$$

而 E 可分别以原子的结合能 E_a 和原子核的结合能 E 表示:

$$E_a = m + Zm_e - M_0. \quad (1-8a)$$

$$E = Zm_p + (A - Z)m_a - m \quad (1-8b)$$

式中 m 为原子核的质量。

因为实验所测定的都是原子质量,而且和原子核(结合)能比较起来,原子(结合)能非常之小〔注2〕,所以质量数为 A 、原子序数为 Z 的核素的质量 M_0 可以近似为核质量 m 与 Z 个电子质

〔注1〕也有不少教科书将核素的质量与质量数之差定义为质量亏损。

〔注2〕核和电子的结合能比核子间的结合能小得多。例如质子和电子结合成核素 ${}^1_1\text{H}$ 时所释放的结合能只有 36eV ,而一个质子与一个中子结合成 ${}^2_1\text{H}$ (最简单的多核子核)时,平均每个核子要释放 1.1MeV 。

量之和:

$$M_0 \approx m + Zm_p \quad (1-9)$$

这样便可把(1-8b)写成〔注3〕

$$E = [ZM_{1H} + (A - Z)m_n] - M_0 \quad (1-10a)$$

$$\text{或} \quad E = \{ [ZM_{1H} + (A - Z)m_n] - M_0 \} \cdot C^2 \quad (1-10b)$$

式中 M_{1H} 为核素氢的质量。

根据质能联系定律不难计算出 $1u$ 所对应的能量。由于 $1u = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg}$, 而光在真空中的速度 $C = 3 \times 10^8 \text{m/s}$, 于是 $1u \times C^2 = 1.49 \times 10^{-10} \text{J}$ 。但在核研究中一般并不采用焦耳作能量单位。最常用的是电子伏(记为 eV), 它相当于电子通过 1V 电位差(加速)时所获得的能量。

因为电子的电量为 $1.6 \times 10^{-19} \text{C}$, 于是

$$1\text{eV} = 1.6 \times 10^{-19} \times 1 = 1.6 \times 10^{-19} \text{J}$$

再大的单位采用千电子伏(记为 keV)、兆电子伏(记为 MeV)。 $1\text{keV} = 10^3 \text{eV}$, $1\text{MeV} = 10^6 \text{eV}$ 。运用这些新的单位, 可得:

$$1u = 931.50 \text{MeV}$$

$$m_e = 0.511 \text{MeV}$$

作为练习, 我们把中子与质子质量之差用 MeV 表示:

$$m_n - m_p = 1.008665 - 1.007276 = 0.001389u \approx 1.29 \text{MeV}$$

可见, 中子与质子质量之差比电子质量大约大 0.78MeV 。表 1-1 列出了某些核素的原子质量, 表 1-2 给出了能量单位的变换系数。

如果将原子核的结合能除以它所包含的核子数(即质量数), 便得每个核子的平均结合能, 或叫比结合能:

$$\varepsilon = \frac{E}{A} \quad (1-11)$$

图 1-1 表示了比结合能与质量数的关系曲线。可见, 在 $A < 30$ 时, 曲线的趋势是上升的, 但有明显的起伏, 在 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 、 ${}^{20}\text{Ne}$ 和 ${}^{24}\text{Mg}$ 处出现明显的峰; 当 $A > 30$ 时, 比结合能变化不大, 且 $\varepsilon \approx 8 \text{MeV}$, 但在 A 很大时, 比结合能有所下降。这样就形成了曲线中间高两边低(低 A 端低中有峰)。

原子核的结合能, 确切地说, 比结合能, 反映了原子核的稳定性。曲线形状表明, 很轻和很重的一些核的比结合能较小, 它们较之中等质量的核要不稳定, 即结合得较松, 而 ${}^4\text{He}$ 、 ${}^{12}\text{C}$ 、 ${}^{16}\text{O}$ 、 ${}^{20}\text{Ne}$ 及 ${}^{24}\text{Mg}$ 则要较其附近的核稳定得多。在重核裂变或轻核聚变时, 都相当于比结合能较小的核转变为比结合能较大的核, 因而释放出能量。

作为一个例子, 我们计算 ${}^4\text{He}$ 核的结合能。利用关系式(1-10a), 并由表 1-1 查得相应的质量数据, 便可得:

〔注3〕不过(1-10a)式的得出, 是略去了相应核素的原子结合能 E_a 与 Z 个氢原子的结合能 $Z\varepsilon_a$ 的差。由(1-10a)得:

$$E = Z(m_p + m_e - \varepsilon_a) + (A - Z)m_n - (m + Zm_e - E_a)$$

将此式减去(1-8b)便得:

$$Z(m_p + m_e - \varepsilon_a) + (A - Z)m_n - (m + Zm_e - E_a) - Zm_p - (A - Z)m_n + m = E_a - Z\varepsilon_a$$

由于 E_a 和 $Z\varepsilon_a$ 皆为很小的量, 其差自然便可略去,

表1—1

一些核素的原子质量

核 素	M(u)	核 素	M(u)
n	1.008665	$^{12}_6\text{C}$	12.000000
^1_1H	1.007825	$^{14}_6\text{C}$	14.003242
^2_1H	2.014102	$^{14}_7\text{N}$	14.003074
^3_1H	3.016049	$^{16}_8\text{O}$	15.994915
^3_2He	3.016030	$^{27}_{13}\text{Al}$	26.981542
^4_2He	4.002603	$^{56}_{26}\text{Fe}$	55.934940
^6_3Li	6.015123	$^{208}_{82}\text{Pb}$	207.976641
^7_3Li	7.016004	$^{235}_{92}\text{U}$	235.043925
^9_4Be	9.012183	$^{238}_{92}\text{U}$	238.050786

表1—2

能量单位换算表

	MeV	u	erg	J	kg	Cal
1MeV=	1	1.07×10^{-3}	1.60×10^{-6}	1.60×10^{-13}	1.78×10^{-30}	3.82×10^{-14}
1u=	931.50	1	1.49×10^{-3}	1.49×10^{-10}	1.66×10^{-27}	3.57×10^{-11}
1erg=10 ⁻⁷ W·s=	6.23×10^5	6.70×10^2	1	1×10^{-7}	1.11×10^{-24}	2.39×10^{-8}
1J=1W·s=	6.23×10^{12}	6.70×10^9	1×10^7	1	1.11×10^{-17}	2.39×10^{-1}
1kg=	5.62×10^{29}	6.02×10^{26}	9.0×10^{23}	9.0×10^{16}	1	2.15×10^{16}
1cal	2.63×10^{13}	2.81×10^{10}	4.19×10^7	4.19	4.66×10^{-17}	1

$$E = (2M_{\text{H}} + 2m_{\text{n}}) - M_{\text{He}} =$$

$$= (2 \times 1.007825 + 2 \times 1.008665) - 4.002603 =$$

$$= 0.030377\text{u} = 28.30\text{MeV}$$

而比结合能

$$\varepsilon = \frac{E}{A} = \frac{28.30}{4} = 7.07\text{MeV/核子}$$

这里,我们打算把所讨论的问题再引伸一步。只是指出,在稳定核的研究中发现了不少有趣而值得注意的规律。其中最重要的是核的稳定性与核中的质子数和中子数之间的比例以及它们数目的奇偶性有着密切的关系。当 $A < 36$ 时,中子数和质子数大约相等;随着 A 的增加,稳定核中的中子数便超过质子数;而对于重的原子核,中子数与质子数之比达1.5左右。另一方面,中子数和质子数皆为偶数的核,即所谓的偶-偶核,最稳定,其次是奇数中子和偶数质子,即奇-偶核,再次是偶数中子和奇数质子,即偶-奇核,而奇数中子、奇数质子,即奇-奇核的稳定性最差。天然存在的274种稳定核素中,偶-偶核达163种,奇-偶核57种,偶-奇核50种,而奇-奇核只有4种,且皆是较轻的核— ^2_1H , ^6_3Li , $^{10}_5\text{B}$ 和 $^{14}_7\text{N}$ 。图1—2示出了稳定核中的中子数和质子数之间的关系。

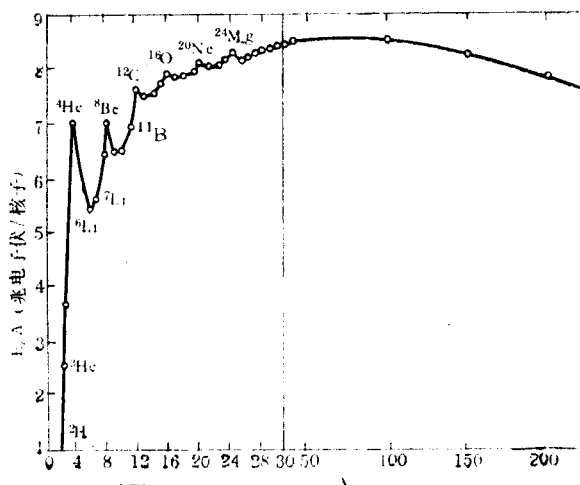


图1—1 核子的平均结合能

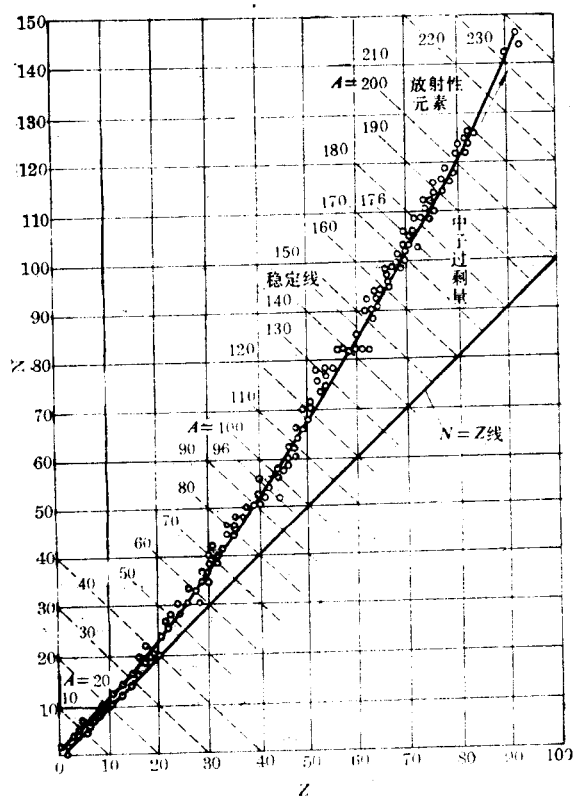


图1—2 最常见稳定核素的中子、质子图
三个同量异位素发生在 $A=40$, $A=96$, $A=176$

还有,原子核的稳定性随着质子数和中子数的变化出现某种周期性。当质子数或中子数为2,8,20,28,50,82及中子数126时,原子核就特别稳定,在自然界中分布也很广。上述这些数字称为“幻数”。甚至有些原子核的质子数和中子数皆为幻数,这称双幻核,如 ${}^4_2\text{He}$, ${}^{16}_8\text{O}$, ${}^{40}_{20}\text{Ca}$,等。具有幻数的核特别稳定已为实验所证实;这种现象可用原子中电子壳被填满而原子特别稳定这样的类似来解释。这就是原子核壳层模型的实验基础。

第三节 原子核衰变

一、放射过程的一般特性

1896年贝可勒尔对于铀的放射性的发现,是原子物理学史上的极为重要的事件之一。接着,于1898年,玛丽·居里(Marie Curie)夫妇发现了钍的化合物也能放出与铀相似的辐射。从此就开始了原子核自发变化过程的一系列研究。在当时已经清楚了,铀所发出的辐射与它的物理-化学状态无关,辐射对该元素来说是一种特殊的性质。我们把这些原子核自发地放出辐射的现象称为放射性,把因放射性而使一种原子核转变为另一种原子核的过程称为核衰变或核蜕变。在目前已发现的2000多种核素中,天然存在的稳定性核素只有274种,其余都是不稳定的,即具有放射性的。

研究表明,放射性物质表现出一系列特殊的性质。它能使气体电离,使照相乳胶变黑,使某些荧光物质发光,它们还放出能量,所以放射性物质的温度常比周围媒质的温度高。后来(1899年)的实验表明,镭所放出的射线有三种: α 、 β 、 γ 射线。

α 射线的贯穿本领很小,但有很强的电离作用,照相作用也很强,在磁场中要产生偏转。

β 射线较之 α 射线有大的贯穿本领和小的电离作用,在磁场中也要发生偏转,但偏转的方向与 α 射线相反。

γ 射线较之上述二种射线有最大的贯穿本领和最小的电离作用,在磁场中不偏转。

对放射性的进一步研究证实了放射性物质随时间而减少。对某一放射性核素来说,其放射性减少一半总有一特定的时间,这个时间叫半衰期。因为放射性是核素的性质,则可清楚地看出,若辐射强度减少1/2,与此相应的放射性核素也减少了同样的量,即减少了1/2。

放射性衰变是一个统计过程。就是说,原子核的衰变不是同时发生的,而是有先有后,没有规定的顺序,对某一特定的原子核,它的衰变完全是个几率过程。一般地说,衰变速度是由原子核内部的特性决定的,与核素本身所处的化学状态无关〔注4〕;衰变后的核有的稳定,有的不稳定而继续衰变,通常把衰变前的核称为母核(体),衰变后的核称为子核(体)。若子体继续衰变,则有第二代子体以至于更多代子体,对于第二代子体而言,第一代子体便是它的母体,余可类推。

二、衰变定律

我们仅研究最简单的衰变—单次衰变—的规律。假定一定量的某种放射性核素,其所含的原子数为 N_0 。显然, N_0 随时间而减少。精确的实验证明,在时间间隔为 $t \rightarrow t + \Delta t$ 内,原子核的衰变数 ΔN 与时间 Δt 及该瞬时尚未衰变的原子核数 N 的乘积成正比:

〔注4〕在轨道电子俘获及牵涉到内转换现象的衰变中,原子核外围的情况会影响到衰变过程;同时,由于近代实验技术的进步,也已观察到化学环境对某些衰变过程的影响,只是这种影响甚微。