

The background of the book cover is a light green color with a fine, vertical-line texture. Scattered across this background are several stylized atomic symbols, each consisting of a central nucleus with a small circle and a cross, surrounded by three elliptical orbits. These symbols are positioned in the corners and along the edges of the cover.

高等教育试用教材

核物理与核医学仪器

A red octagonal logo with a white border and a small white square in the center, located in the bottom left corner of the cover.

黄宗祺
陆文栋
陈盛祖

主编
主审

原子能出版社

ISBN 7-5022-1410-0



9 787502 214104 >

ISBN7-5022-1410-0/TL8 定价: 12.00元

高等教育试用教材

核物理与核医学仪器

(初 版)

黄宗祺
陆文栋
祝向群

主编

编

陈盛祖
郑惠黎
王乃善

钱景华
朱炳显

主审

审

原子能出版社

北 京

图书在版编目(CIP)数据

核物理与核医学仪器/黄宗祺,陆文栋,祝向群编

北京:原子能出版社,1995.11

ISBN 7-5022-1410-0

I·核… I·①黄…②陆…③祝… II·原子医学-医疗器械-放射性医疗仪器 N.①TL8②TH774

中国版本图书馆 CIP 数据核字(95)第 14362 号

内 容 简 介

本书共分十二章。内容包括:原子结构和原子核的基本性质,放射性核素的衰变,原子核反应,射线与物质的相互作用,医用核辐射探头,基本核仪器,放射性测量技术及统计学,活度计与辐射防护仪器,体外样品测定仪器,脏器功能测定仪器,放射性核素显像仪器,核医学图像和数据处理系统。

本书是高等院校核医学专业教材,也可供从事临床和基础研究的核医学医师、工程物理人员和研究人员参考。

☆ ☆ ☆

本书经核工业教材委员会核医学教材委员会于 1991 年 11 月由郑惠黎教授(代表赵惠扬教授)主持召开的审稿会审定作为高等教育试用教材。

©

原子能出版社出版 发行

责任编辑:杨 姝

社址:北京市海淀区阜成路 43 号 邮政编码:100037

苏州医学院印刷厂印刷 新华书店经销

开本:787×1092mm 1/16 印张 15 字数 365 千字

1995 年 11 月第 1 版 1995 年 11 月北京第 1 次印刷

印数:1-1000

定价:12.00 元

前 言

本书是根据1991年核工业教材委员会会议要求编写的。全书共分十二章。其中前四章介绍核物理基础知识,第五章至第七章分别讲述核探测器、核电子学和放射性测量技术及统计学方面的基础。第八章至第十一章,分别论述了各类核医学仪器,第十二章是核医学图像和数据处理系统。本书教学时数为54学时,实验为18学时。本书可供核医学专业学生阅读,也可供从事临床和基础研究的核医学医师、工程物理人员和研究人员参考。

本书初稿于1993年1月完成,并作为苏州医学院放射医学系首届核医学专业学生的试用教材。陈盛祖研究员对全书进行了两次审阅,并给予了详细指导。本书编写的分工为:黄宗祺编写绪论,第五章至第十章,附录和全书插图;陆文栋编写第一章至第四章和第十一章,并对第十二章的初稿作了修改;祝向群编写第十二章。

承蒙郑惠黎教授、钱景华教授、王乃善总工程师和朱炳显副教授对书稿进行了评审,并对书稿中的错误之处给予指正。金永杰教授、吴文凯研究员也对教材编写大纲提出了宝贵意见,在此谨表衷心感谢。

在本书编写过程中,我们得到苏州医学院院系领导及原子能出版社的关心和支持。常自持老师提供了有关放射性测量统计学方面的资料,我们在此一并表示感谢。

由于编者水平有限,缺点错误在所难免,恳请读者批评指正。

编 者

1994年2月于苏州医学院

目 录

绪 论	(1)
第一章 原子结构和原子核的基本性质	(5)
第一节 原子结构	(5)
一、玻尔的氢原子理论	(5)
二、原子的能级	(8)
三、原子的电子壳层结构	(9)
四、韧致辐射、特征 X 射线和俄歇电子	(11)
第二节 原子核的基本性质	(12)
一、原子核的组成、电荷、质量及半径	(12)
二、核力和核的稳定性、放射性核素	(14)
三、核素图	(15)
四、原子核的结合能	(16)
五、原子核的能级	(19)
第二章 放射性核素的衰变	(20)
第一节 核衰变模式和衰变纲图	(20)
一、核衰变模式	(20)
二、衰变纲图	(26)
第二节 放射性核素的衰变规律	(27)
一、指数衰变规律	(27)
二、生物半衰期和有效半衰期	(29)
三、放射性活度及其单位	(29)
四、简单的级联衰变	(31)
五、人工放射性的生长	(32)
第三章 原子核反应	(34)
第一节 核反应的定义和守恒定律	(34)
一、核反应定义	(34)
二、核反应中的守恒定律	(34)
第二节 实现核反应的途径和核反应类型	(35)
一、实现核反应的途径	(35)
二、核反应类型	(35)
第三节 核反应中的能量和核反应截面	(36)
一、核反应中的能量	(36)
二、核反应截面	(38)
第四节 粒子加速器和核反应堆简介	(40)

一、粒子加速器·····	(40)
二、核反应堆·····	(42)
第四章 射线与物质的相互作用 ·····	(43)
第一节 带电粒子与物质的相互作用 ·····	(43)
一、电离和激发·····	(43)
二、散射·····	(44)
三、韧致辐射·····	(44)
四、契伦科夫辐射·····	(45)
五、湮没辐射·····	(45)
六、吸收和射程·····	(46)
第二节 γ 射线与物质的相互作用 ·····	(47)
一、光电效应·····	(48)
二、康普顿效应·····	(49)
三、电子对效应·····	(50)
四、 γ 射线的吸收 ·····	(51)
第三节 中子与物质的相互作用 ·····	(52)
第五章 医用核辐射探头 ·····	(54)
第一节 概 述 ·····	(54)
一、放射性探测的基本原理·····	(54)
二、探测器类型·····	(55)
三、医用核辐射探头的结构·····	(55)
第二节 气体电离探测器 ·····	(56)
一、基本原理·····	(56)
二、电离室·····	(57)
三、正比计数器·····	(58)
四、G-M 计数管 ·····	(58)
第三节 闪烁探测器 ·····	(59)
一、工作原理与结构·····	(59)
二、闪烁体·····	(60)
三、光收集部件·····	(62)
四、光电倍增管·····	(63)
第四节 半导体探测器 ·····	(64)
第五节 准直器 ·····	(66)
第六章 基本核仪器 ·····	(68)
第一节 核电子学基本知识 ·····	(68)
一、用于核探测的一般电子学系统·····	(68)
二、核电子仪器中的基本电路·····	(69)
三、探测器与电子仪器的连接·····	(70)

第二节 线性脉冲放大器	(71)
一、总体结构	(71)
二、主放大器	(71)
三、主要技术指标	(72)
第三节 单道脉冲幅度分析器	(73)
一、脉冲幅度分析原理	(74)
二、电路原理	(75)
三、主要技术指标	(76)
第四节 定标器	(77)
一、整机结构	(77)
二、定标单元	(79)
三、主要技术指标	(81)
第五节 计数率仪	(82)
一、整机结构原理	(82)
二、泵电路	(82)
第七章 放射性测量技术及统计学	(85)
第一节 概 述	(85)
一、放射性测量的含义	(85)
二、放射性测量中的几个概念	(85)
第二节 α 放射性测量	(86)
第三节 β 放射性测量	(87)
第四节 γ 射线能谱测量	(88)
一、 γ 射线测量的特点	(89)
二、单能 γ 射线能谱	(89)
三、 γ 射线能谱测量和分析	(90)
四、单道 γ 谱仪	(94)
五、多道谱仪	(95)
第五节 γ 射线强度测量	(97)
一、相对测量法	(97)
二、全能峰测量法	(98)
三、对低能 γ 射线的薄壁井型闪烁测量法	(98)
第六节 放射性测量的统计学问题	(99)
一、放射性计数的统计误差	(100)
二、放射性计数的统计规律	(100)
三、放射性测量结果的表示	(103)
四、可疑数据的取舍	(105)
五、仪器性能重复性的统计判断	(106)
六、放射性计数统计误差的控制	(108)

第八章 活度计与辐射防护仪器	(111)
第一节 医用核素活度计	(111)
一、工作原理	(112)
二、典型仪器实例	(112)
第二节 个人剂量监测仪器	(114)
一、概述	(114)
二、热释光剂量仪	(115)
三、全身计数器	(118)
第三节 工作场所辐射监测仪器	(120)
一、概述	(120)
二、外照射辐射监测仪	(121)
三、表面放射性污染仪	(123)
第九章 体外样品测定仪器	(125)
第一节 γ 计数器	(125)
一、与井型探头组合的 γ 计数器	(125)
二、多探头 γ 计数器	(127)
三、自动换样 γ 计数器	(129)
四、微机控制 γ 计数器	(130)
五、 γ 计数器性能鉴定	(134)
第二节 液体闪烁计数器	(135)
一、液体闪烁计数技术	(136)
二、液体闪烁计数器概述	(137)
三、双管液体闪烁计数器	(138)
四、微机控制液体闪烁计数器	(139)
五、测量方法和仪器工作条件的正确选择	(141)
六、淬灭的影响与校正	(142)
第三节 非放射性样品测定仪器	(144)
一、生物-化学发光光度计	(144)
二、酶联免疫检测仪	(145)
三、时间分辨荧光免疫分析仪	(146)
第十章 脏器功能测定仪器	(147)
第一节 甲状腺功能测定仪	(147)
一、甲状腺吸碘率测定原理	(147)
二、仪器结构和工作原理	(147)
三、测量方法	(150)
第二节 肾图描述仪	(151)
一、肾功能测定原理	(151)
二、普通肾图仪	(152)

三、微机化肾图仪	(153)
四、肾图仪的合理使用	(153)
第三节 γ 心功能测定仪	(154)
一、基本构造原理	(154)
二、工作方式	(156)
第四节 脑血流量测定仪	(157)
一、局部大脑血流量测定原理	(157)
二、仪器组成	(158)
第五节 骨密度仪	(159)
一、基本原理	(159)
二、典型仪器	(160)
第十一章 放射性核素显像仪器	(162)
第一节 闪烁扫描机	(162)
一、基本结构与工作原理	(162)
二、性能指标与正确使用	(164)
第二节 闪烁 γ 照相机	(165)
一、基本工作原理	(166)
二、主要组成部分	(169)
三、性能指标及其质量控制	(172)
四、使用须知	(177)
第三节 发射型计算机断层(ECT)	(178)
一、概 述	(178)
二、单光子发射型计算机断层(SPECT)	(180)
三、SPECT 的质量控制及使用	(183)
四、正电子发射型计算机断层(PET)	(185)
五、ECT 与其它影像技术的关系	(188)
第十二章 核医学图像和数据处理系统	(192)
第一节 计算机的基本知识	(192)
一、计算机中数的表示	(192)
二、计算机的硬件和基本结构	(193)
三、计算机软件	(193)
第二节 核医学图像处理系统的构成	(194)
一、总体框图	(194)
二、 γ 照相机接口电路	(194)
三、中央处理单元(CPU)	(194)
四、内存及外存	(195)
五、图像显示系统	(196)
六、输入输出设备	(197)

第三节 核医学图像处理系统的软件·····	(197)
一、临床应用软件·····	(197)
二、管理软件·····	(198)
三、编程软件·····	(198)
四、操作系统·····	(199)
第四节 图像数据的采集方式·····	(200)
一、静态采集·····	(200)
二、动态采集·····	(201)
三、全身扫描·····	(201)
四、表模式采集·····	(201)
五、门控采集·····	(203)
六、双核素采集·····	(204)
七、断层采集·····	(204)
第五节 图像显示和数据处理·····	(204)
一、图像的显示技术·····	(204)
二、感兴趣区的勾划·····	(205)
三、时间-活性曲线及其处理·····	(205)
四、函数图像·····	(206)
五、傅里叶变换和卷积·····	(208)
六、图像滤波·····	(209)
第六节 SPECT 图像处理·····	(216)
一、SPECT 滤波·····	(216)
二、衰减校正·····	(218)
三、散射校正·····	(218)
参考文献·····	(219)
附录一 国际制基本单位·····	(222)
表1 国际制基本单位·····	(222)
表2 具有专门名称的国际制导出单位·····	(222)
附录二 质能当量和放射性活度单位换算表·····	(223)
表1 质能当量·····	(223)
表2 放射性活度单位换算表·····	(223)
附录三 基本常数数值表·····	(224)
附录四 10 的幂词头·····	(225)
附录五 常用放射性核素符号及其主要物理常数·····	(226)
附录六 通用放射性核素衰变计算表·····	(229)

绪 论

核科学技术的诞生是人类科学发展史上的一个里程碑。从 1896 年贝克勒尔(A. H. Becquerel)发现铀的放射性开始,核物理和放射化学两门学科的发展引导了核技术的进步。核技术的进步,主要是以加速器技术、核辐射探测技术和反应堆技术为标志。该技术与医学相结合,促进了医学事业的发展。自本世纪三四十年代起,人工放射性示踪研究开始应用于医学,经过五六十年代的迅速发展,逐渐创立了核医学这门新兴学科。60 年代以后,核医学进入了一个更高的发展阶段,并成为现代医学的重要分支。核医学的发展与核医学方法,即包括功能测定、脏器显像、断层显像和放射免疫分析等方面的发展密切相关。核医学以非损伤手段检测,方法灵敏、简便、安全,能反映体内的生化与生理过程,同时也能反映体内脏器的形态与功能,提供定量准确的静态或动态资料,广泛应用于心、脑、肝、肺、胆、肾、甲状腺和骨等脏器病变的诊断,从而它成为医学诊断中不可缺少的重要手段。核医学的进步,离不开核医学仪器和放射性药物的进步。利用加速器、反应堆生产放射性核素并不是本课程讨论的范围,而应用什么样的仪器进行核医学诊断才是我们研究的主题。本课程在介绍核物理基础知识之后,重点讲述了各类核医学仪器。而核医学仪器是建立在一个新的分支学科——核医学电子学基础之上的,这门分支学科研究的是核医学领域中的电子学问题,它是核技术、电子学和医学互相渗透、互相结合的一门边缘学科。为了叙述的方便,在此首先介绍核医学和核医学仪器的发展史以及它们与诸学科之间的联系。

1896 年,贝克勒尔发现铀的天然放射性现象,这是人类第一次在实验室观察到原子核现象。1897 年,居里夫妇(P. & M. Curie)发现了天然放射性元素钋和镭。接着,1899 年发现了 α 射线和 β 射线,1900 年发现了 γ 射线。在此后一段时间内,核物理学家和放射化学家很快地把大多数天然放射性核素找了出来。

1923 年和 1924 年,核素示踪的先驱者 G. Hevesy 先后发表了把放射性铅和铋放在植物和动物体内做实验的结果,这是示踪原理的萌芽。1926 年,Blumgart 首先将放射性示踪原子应用于临床,他用威尔逊云室来测定血液在臂与臂之间的循环时间。

1928 年,盖革和米勒(H. Geiger & W. Müller)首先制成了计数管。1930 年,劳伦斯(E. D. Lawrence)研制成第一台回旋加速器,并于 1934 年用回旋加速器人工加速粒子,轰击稳定原子核产生放射性核素。同年,约里奥·居里夫妇(F. & I. Joliot-Curie)发现了人工放射性核素,这是人工制备放射性核素的开始。

1938 年,Herte 和 Hamilton 等将放射性碘应用于甲状腺功能检查。1942 年,报告用放射性碘治疗甲亢获得成功;1946 年,报告用放射性碘治疗甲状腺癌获得成功。

1942 年,在费米(E. Fermi)领导下,利用铀裂变释放中子及能量的性质,发明了热中子链式反应堆,这是大规模利用原子能的开始。

以上列举的核物理的重大发现以及核物理实验技术(即加速器技术、核辐射探测技术和反应堆技术),为核医学的诞生奠定了基础。在核物理和放射化学新发现的推动下,本世纪30年代和40年代,就形成了核医学的萌芽阶段。以放射性核素示踪为手段的研究,正为核医学孕育着一场新的变革。

1949年和1950年,以NaI(Tl)为晶体的固体闪烁计数器和液体闪烁计数器的相继问世,为核医学仪器的发展奠定了基础。1951年,卡森(Cassen)研制成功了第一台线性扫描机。同年,W. E. Winche等人研制成功的第一个人工放射性核素发生器(^{132}Te — ^{132}I)——母牛开始应用。1955年,各类线性扫描机应用于甲状腺、肾、肝、骨等脏器的显像,扫描机在50年代至60年代,成为临床显像的主要仪器。

到了50年代中后期,以计数管、闪烁体为主要探测元件,以放大器、单道脉冲幅度分析器和定标器为主要仪器部件的各类脏器功能测定仪,如甲状腺功能测定仪,肾图仪等相继问世。

1957年,安格(H. O. Anger)研制成功了标准型闪烁 γ 照相机,用一次成像技术代替逐点扫描技术。

1960年,伯森和耶洛(Berson & Yalow)发明了放射免疫分析方法。

1972年,英国EMI公司的X线计算机断层扫描(CT)研制成功,这是医学影像学的重大突破,并得以迅速推广,向核医学提出了挑战。1973年,核磁共振显像(MRI)技术问世,1980年Hutchison将其应用于身体主要器官和肾动脉血管成像获得成功。MRI是一种脱离射线的新的成像技术,它的发展,是医学影像学的又一新的突破。

到了70年代中后期,发射型计算机断层(ECT)研制成功。目前应用的ECT包括单光子发射型计算机断层(SPECT)和正电子发射型计算机断层(PET)两类。这种ECT技术消除了不同体层放射性的重迭干扰,可以单独观察某一体层内的放射性分布,这不仅有利于发现较小的异常和病变,还使得局部放射性定量分析更加精确。这是核素显像技术中继扫描机和闪烁 γ 照相机后的新发展。尤其是PET已成为当今国际上核医学最前沿的技术。

随着电子计算机技术的迅速发展,它在核医学领域中也广泛得以应用。从各类核医学仪器的数据获取、数据处理、自动化控制到极其复杂的断层图像重建都离不开计算机。ECT是以计算机化为标志,它的断层图像完全靠计算机计算出来。因此,电子计算机已成为核医学仪器中不可缺少的组成部分。可以毫不夸张地说,没有电子计算机技术,就不可能有现代化的核医学仪器,也就没有现代核医学。

综上所述,核医学是在核物理和放射化学的基础上诞生和发展起来的。核医学仪器和放射性药物已成为主宰核医学发展的两大支柱,它们互相依赖、互相促进,共同推动着核医学的发展。电子计算机是核医学仪器的重要组成部分,现代核医学离不开电子计算机的应用。因此,从事核医学工作的人们,除了应有坚实广博的医学理论知识外,还需具有核物理、放射化学、核辐射探测技术、核医学电子学、核药学和电子计算机等专门知识,才能步入核医学科学的殿堂。

二

本书命名为《核物理与核医学仪器》,准确地讲,是指在核医学中的物理和仪器问题。

这是一门研究如何选用仪器进行核医学检测的专门技术,它建立在核医学电子学这样一门分支学科的基础上,而并不包容核物理和核电子学这两门学科的全部内容。对核医学工作者来说,从临床诊断和实验研究需要出发,应当掌握核物理的基础知识,熟悉某些医用放射性核素的性质、特征和测量技术,并能掌握所用仪器设备原理和使用方法。这些仪器设备,是核医学检测的重要工具,我们将它们统称为核医学仪器。由放射性核素发出的各种射线,之所以能被测量出来的,都是基于射线与物质的相互作用。各种类型的核辐射探测器和核医学仪器,都是根据这种原理设计出来的,仪器生产厂家又按不同的检测目的和需要,设计并配备了电子计算机数据处理系统等附加设备,从而完备了仪器的性能,达到了实用的目的。临床医生以核医学为手段,对病人待测部位进行放射性核素检查,就是根据仪器所测得的放射性药物在脏器组织中的分布及其随时间的变化情况,了解人体的生理、生化过程及脏器病变情况,以作为诊断疾病的依据。

一台现代化的核医学仪器,主要由三个部分组成:第一个组成部分是医用核辐射探头。这是核辐射探测器及有关附件,包括外套、铅屏蔽、准直器及前置放大器的总称。核辐射探测器(简称探测器)可以将不同种类的射线转换成可供记录的电信号,其作用使射线在探测器中产生电离或激发,将所产生的离子或荧光收集转变成成为可记录的电信号,因此,实质上探测器是一个将射线辐射能转换为电能的换能器。例如,探测器把某种核素所发生的 γ 射线转换为脉冲信号,该脉冲信号的幅度与数量正比于该核素发射的 γ 射线的能量和强度,因此放射源的衰变数(dpm)与记录的脉冲数(cpm)相对应,放射源发射的 γ 射线能量(keV)与转换的脉冲幅度(V)相对应;第二个组成部分为电子测量系统(核电子学线路),利用它接收、分析、选择和记录显示由探测器送来的脉冲信号。来自探测器的电脉冲信号十分微弱,需要送给放大器进行放大,然后进入甄别分析系统进行甄别分析。它把有用的电信号选取出来,而把无用的电信号(即本底信号)甄别掉,再把选取出来的电信号送到定标器或率表电路,读出测量结果。数据输出可送到打印机打印,亦可送到记录器描绘出曲线,还可送到显示器显示数据(或影像)。以上探测器和电子测量系统均需用一套高压电源和低压电源供电。近年来,由于计算机技术的迅速发展,电子测量系统中的数据处理与记录显示部分均用计算机系统取代;第三个组成部分为数据处理和记录显示系统——计算机系统。核医学仪器在计算机的控制下,自动完成数据的采集、处理、图像重建、图像和结果的显示,数据的保存和输出等功能。

本书前四章介绍的是核物理的基础知识,其目的是让同学们熟悉射线的种类和性质、原子核的衰变规律、有关物理量,以及射线与物质的相互作用等。第五章至第七章分别讲述核辐射探测器、电子仪器和放射性测量技术,其重点是放在对具有核物理特征的信号处理上。这种信号的处理,通常以用于核研究的核探测仪器,即是由射线经探测器、模拟电路、模拟-数字变换电路(ADC)和数字电路来完成。对于不同的射线,对于不同强度和能量的射线的测定,采用的探测方法和仪器也不同。有关放射性测量的统计学问题在这里也给予专门介绍。自第八章起,详尽讲述了各类核医学仪器。它们是:活度计和辐射防护仪器;体外样品测定仪器,包括用于放射免疫分析的 γ 计数器和对 ^3H 、 ^{14}C 软 β 射线测量的液体闪烁计数器;脏器功能测定仪器,除讨论采用经典方法作吸碘测定的甲状腺功能测定仪以及肾图仪外,还介绍了 γ 心功能仪和脑血流测定仪。骨密度仪也于此做了简要叙述。放射

性核素显像仪器,则是按历史发展顺序先后叙述了闪烁扫描机、闪烁 γ 照相机和 ECT。最后一章介绍核医学图像和数据处理系统。

三

当今,随着核医学事业的发展,核医学仪器也得到相应的发展,并反过来促进核医学的发展,其中尤其是电子计算机技术的发展促进了现代核素显像技术的发展,使核医学的临床应用提高到一个新的水平。ECT 是当代最先进的核素显像设备,它是核探测技术、核电子学与电子计算机技术紧密结合的产物,在诊断肿瘤、神经和心血管疾病中具有特殊价值,它成为现代医学影像技术的重要组成部分。近 10 年来,世界核医学仪器的发展,已从功能测定转向功能与显像相结合的 SPECT 热。目前, γ 照相机型的 SPECT 是核素显像的主要设备,它以单个或两个 γ 照相机探头作为 SPECT 探头,加上旋转机构和图像重建软件就可得到断层图像。这种机器可做静态、动态、全身、断层以及功能与形态的结合,几乎满足了核医学显像的所有要求,在世界上得到了广泛应用。目前,SPECT 在工业发达国家已成为核医学显像仪器的主力军,其中最引人注目的是新型三探头系统,它的灵敏度高(较单探头提高 3~5 倍),获取数据快(检查病人时间缩短为单探头的 1/3),分辨率进一步提高(可达 6mm),计算机运算速度进一步提高,软件更先进,从而使 SPECT 能够进行门电路断层显像。

PET 是当今国际上核医学最前沿技术,PET 所用的正电子放射性核素 ^{11}C 、 ^{13}N 、 ^{15}O 是人体生命的基本元素,这些核素的标记物可以参与人体生理和生化代谢过程,因此 PET 所提供的影像可以反映人体的生理、生化和病理功能,它对研究生命现象和临床应用有重要理论意义和实用价值。有人预言,在临床,广泛应用 PET 的时代为期不远了。

骨密度仪是近年来核医学仪器发展的一个新动向,它利用单光子或双光子吸收原理测定骨中矿物质成分,研究骨代谢疾病。现代的骨密度仪利用了 CT 原理,可以从断层面测定骨中矿物成分,既可定量计算,又可图形显示。

尽管核医学如同其它所有的自然科学一样,面临着严重的竞争和挑战,例如在临床医学显像技术方面,遇到了 CT、B 型超声显像和包括 MRI 在内的各种显像技术的挑战,在体外放射免疫分析方面,面临着非核技术如酶免疫分析的竞争,实际上这是科学中普遍存在的现象。因此,核医学和核医学仪器的研究范围也将在推陈出新的过程中前进。

今后的 10 年,将是世界上影像技术更加活跃的 10 年。核素显像、核医学电子学将起到重要作用。我们开设《核物理与核医学仪器》这门课程,讲授核物理基础和核医学仪器应用知识,为造就通晓理论和应用技术的专门人才抛砖引玉。相信读者对未来核医学事业的作为和贡献,就是从这里起步的。

第一章 原子结构和原子核的基本性质

自 1911 年卢瑟福(E. Rutherford)提出原子的“核式结构”模型,原子就被分成两部分:一是处于原子中心的原子核,一是绕核运动的电子。核外电子的运动构成了原子物理学的主要内容,原子核则成了另一门学科——原子核物理学的主要研究对象。原子和原子核是物质结构的两个层次,或许是分得最开的两个层次。物质的性质,如元素的化学、物理性质,光谱特性,基本上只与核外电子有关,而放射性现象则归因于原子核。

本章第一节内容——原子结构,属原子物理学。我们将从著名的卢瑟福的 α 粒子散射实验入手,讲述原子的“核式结构”,说明原子是由电子和原子核组成的,但还不清楚核外电子的运动规律。进而重点论述玻尔的氢原子理论——旧量子论,阐明电子在氢原子中的运动规律。最后介绍核外电子的分布规律——壳层结构和 X 射线的发射机制。

本章第二节内容——原子核的基本性质,属原子核物理学。作为原子核物理学的开始,我们着重讨论原子核处于静态时的一些基本性质,例如原子核的组成、核电荷、核半径、核质量、核力和原子核的结合能等等。原子核的这些性质与原子核的结构有密切关系,它是学习以后几章的基础。

第一节 原子结构

一、玻尔的氢原子理论

从上个世纪发现电子并证实它是一切原子的重要组成部分以来,关于原子结构,关于电子在原子中运动的方式,人们提出了各种设想。

(一)汤姆逊模型

1897 年汤姆逊(J. J. Thomson)发现了电子,真正从实验上确认电子的存在。1898 年他首先提出了第一个原子结构模型,认为原子中的正电荷均匀分布在整个原子球内,而电子则嵌在其中,正负电荷量相等。有人形象地把汤姆逊模型比为“西瓜模型”或“葡萄干面包模型”。但汤姆逊模型不久就被 α 粒子大角度散射的实验事实否定。

(二)卢瑟福模型

1909 年,卢瑟福的学生盖革和马斯顿在继续由卢瑟福开始的 α 粒子散射实验中,发现 α 粒子在轰击原子时,约有八千分之一的 α 粒子被反射回来。卢瑟福感到就像一枚 15 英寸的炮弹打在一张纸上又被反射回来一样,不可思议。根据汤姆逊模型,可以预料 α 粒子的散射角是非常小的,大于 90° 的大角度散射几乎不可能发生。 α 粒子的散射实验使得汤姆逊模型陷入了困境。卢瑟福充分尊重事实,经过严谨推理后于 1911 年提出了“核式结

构”模型：原子是由原子核及若干绕核运动的电子组成的，原子核带正电荷，占有原子质量的99.9%以上，但其半径不到原子半径的万分之一。

卢瑟福模型最重要的意义是：首先提出了原子的“核式结构”，即提出了以核为中心的概念，从而将原子分为核外和核内两部分，并且大胆地承认了高密度的原子核的存在；其次是以散射为手段研究物质结构的方法，对近代物理一直起着巨大的影响；同时卢瑟福散射为材料分析提供了一种手段。

卢瑟福的“核式结构”模型只肯定了原子核的存在，但还不清楚核外电子的情况，这需要进一步的研究。卢瑟福模型虽可以成功地说明一些实验事实，但在描述氢原子时，至少有两点与氢原子的事实不符，即理论与实验之间存在着两个不可克服的矛盾。

1. 稳定与不稳定的矛盾 根据经典理论，绕核运动的电子必然具有加速度。电子本身带有负电荷，在加速运动中应不断向外发射电磁波（原子发光）而失去自己的能量，以致绕转的轨道半径越来越小，形成电子向着核作螺旋形运动。最后在非常短的时间内（ 10^{-10} s的数量级）掉到核内，从而使正负电荷中和，原子全部崩溃。这与事实不符，原子是一个稳定的系统。

2. 不连续与连续的矛盾 按照经典理论，原子发光的频率应等于电子绕原子核运动的频率。由以上分析，原子辐射时电子的轨道会连续缩小，轨道运动的频率会连续增大，那么发光的频率应是连续变化的，原子光谱应是连续光谱。但从原子光谱的实验规律证实原子光谱是线状分立谱，谱线之间并不是连续变化的。

从以上简单讨论可知，研究宏观现象的经典理论，并不适用于原子这样的微观客体，不能用它来描述原子核外电子的行为。

（三）玻尔模型

既然经典理论不能应用于原子这样的微观客体，就要寻找一种新的理论来描述原子现象。1913年，丹麦物理学家玻尔（N. Bohr）在原子光谱实验规律的基础上，将普朗克（M. Planck）的量子理论引入“核式结构”模型，创立了崭新的氢原子理论。玻尔的氢原子理论是分三步完成的：

1. 经典轨道加定态条件 原子只能处于一系列不连续的能量状态。在这些状态中，电子在某些特定的分立轨道上绕核作加速运动，但不辐射能量。这些状态称为原子的稳定状态，简称定态，这是玻尔的第一个规定。

2. 频率条件 只有当电子从一个定态轨道跃迁到另一个定态轨道时，才会以电磁波的形式放出（或吸收）能量 $h\nu$ 。其值由下式决定，即

$$h\nu = E_n - E_k \quad (1 \cdot 1)$$

这就是玻尔提出的频率条件，又称辐射条件。式（1·1）中 E_n 、 E_k 是发生跃迁前后原子的定态能量， $h\nu$ 为光子能量， ν 为辐射频率， h 为普朗克常数，玻尔在此首先把 h 引入原子领域。

这两条假设是玻尔理论的核心，也可以认为是玻尔对实验事实的高度概括，对整个理论的建立起了奠基作用。

3. 角动量量子化 电子绕核作圆周运动时，只有电子的角动量 L 等于 $\frac{h}{2\pi}$ 的整数倍的轨道才是最稳定的，即