



高等学校教材 地球物理系列

系列教材主编：刘光鼎

HEFUSHECHANG

核辐射场与放射性勘查

YU FANGSHEXING KANCHA

程业勋 王南萍 侯胜利 编著

地质出版社

高等学校教材
地球物理系列

核辐射场与放射性勘查

程业勋 王南萍 侯胜利 编著

地 质 出 版 社

· 北 京 ·

内 容 提 要

本书以基本原理、测量方法和实际应用为主线,全面系统地介绍核辐射场和放射性勘查内容。全书三篇,共计十一章。第一篇基础篇,分别介绍放射性及其衰变规律、射线与物质的相互作用、天然放射核素的分布与迁移、放射性探测器及测量仪器。第二篇应用篇,分别介绍射线测量方法与矿产勘查、氡测量方法与矿产勘查、寻找油气藏的放射性方法、自然灾害的勘查、环境辐射与监测、能量色散X射线荧光方法、高灵敏度辐射谱分析方法。本书可作为地球物理相关专业大学本科生的教科书、研究生的参考书,亦可供核技术专业、环境专业、地球化学探矿专业人员参考阅读。

图书在版编目(CIP)数据

核辐射场与放射性勘查/程业勋等编著. —北京:地质出版社, 2005. 8
ISBN 7-116-04397-7

I. 核... II. 程... III. ①放射性—研究—②放射性—勘探 IV. P631.6

中国版本图书馆CIP数据核字(2005)第055065号

责任编辑:陈军申、刘凤仁
责任校对:关凤云
出版发行:地质出版社
社址部编:北京海淀区学院路31号,100083
电 话:(010) 82324508(编辑部)
网 址:<http://www.gph.com.cn>
电子邮箱:zbs@ gph.com.cn
传 真:(010) 82310759
印 刷:北京智力达印刷有限公司
尺 寸:787 mm × 1092 mm^{1/32}
印 张:25.5
字 数:580千字
图 数:1—1500册
版 次:2005年8月北京第一版·第一次印刷
定 价:28.00元
ISBN 7-116-04397-7/P·2565

(凡购买地质出版社的图书,如有缺页、倒页、脱页者,本社出版处负责调换)

中国地质大学（北京）
“地球物理系列教材编委会”

主任：刘光鼎

成员：程业勋 管志宁 李金铭

许云 曾华霖 尉中良

乌达巴拉 魏文博

序

地球是一个庞大而复杂的系统。人类在这颗星球上世代代生息繁衍，并在生产和科学实践中不断地研究和深化对地球的认识。随着人类文明的进步，有数学、物理、化学和地质学等基础学科的诞生；在物理学的领域中，又有取得系统规律性认识的力学、光学、热学、电学、磁学和原子物理学等分支学科。地球物理是应用物理学的理论、方法与技术来研究地球、认识地球，从而相应地又有重力、地磁、地电、地震、地热和放射性等分支学科产生。

地球物理探索地球的各种物理现象本身的规律性，如研究重力场、地磁场、地电场、地震波场等；并利用这些规律性取得对地球的认识，如具有全球分布的地壳、地幔和地核的分层性等等。另一方面，地球物理方法还可激发出多种不同尺度的人工场，如人工电场、电磁场、地震波场等，并利用其探索地球。这样，地球物理可以应用多种物理手段主动灵活地进行目的明确的地球研究，解决经济建设中出现的问题，如矿产资源的探查和开发、环境的监测和保护，以及各种自然灾害的监测与防治等。因此，从某种意义来讲，地球物理有地球物理场作为理论基础，同时又是研究认识地球的高科技。

中国的国民经济建设规模宏伟，对地球物理的需求十分迫切。近年来，中国的油气资源供需矛盾突出，已经引起了广泛注意。远景资源量中还有78%的石油和93%的天然气有待发现，显然亟待增加风险勘探，争取有更多的发现。但是，地质条件的复杂性使勘探具有高难度，致使许多业内人士无限感慨地说油气资源：“成也物探，败也物探”。其实问题何止于油气勘探？煤炭的勘查，恶性事故频发的大小煤矿，如老窖水、瓦斯气、采空区、陷落柱、小断层等一系列的与地质有关的问题，都有待于地球物理去解决；经济建设迫切需要的金属矿如金、铜、铅、锌及各种有色金属矿，实际都处于一种“等米下锅”的状态；如何应用地球物理方法攻深找盲，寻找大矿、富矿，则是当前找矿中的关键问题。为了解决中国北方缺水问题，一直在论证并推行东、中、西三条南水北调的路线，解决这些工程问题必然要用到地球物理；

与此同时，还应使用地球物理方法探查地下水资源，以合理利用江河、湖泊的地面水和地下水资源。此外，长江、黄河的高边坡、堤坝、水库大坝的管涌，以及铁路、公路、桥梁、码头、机场的基础与桩基都需要地球物理工作来提供数据资料以解决问题。总之，在资源、环境的各种领域中，有广泛、大量的地球物理课题，深化地球物理工作，探索其规律，这是时代的要求，必将极有益于我国的国民经济建设。

既然国家经济建设和社会发展对地球物理工作有着广泛的需求（姑且不论地球物理在军事与国家安全上的作用），那么，振兴、开展地球物理工作就具有重要的意义。

北京地质学院于1952年建校时，就有地球物理探矿系和地球物理教研室。在傅承义教授主持工作期间，他首先集中精力抓教材建设，领导并参与研讨教学大纲的编制，指定谭承泽编写磁力勘探，萧敬涌编写重力勘探，陈葵尊编写电法勘探，刘光鼎编写地震勘探，并亲自审阅、修改，为以后的发展奠定了基础。随后，在补充了大量前苏联的地球物理资料之后，形成了培育新中国第一批地球物理工程师的基本教材。中国地质大学（北京）在原北京地质学院的基础上发展起来，继承过去的优良传统，并在不断实践中积累了丰富的资料和宝贵经验，理应与时俱进，在新的高度上编写出新的教材。特别是当前地球物理学发展迅速，而又十分缺乏教学参考书的情况下，编写出高水平的新教材就显得尤其重要。

为此，我向吴淦国校长建议，由中国地质大学（北京）地球物理与信息技术学院负责编写一套“地球物理系列教材”。此事经学校有关领导同志商定，正式列入学校“地学专业基础课和专业课教材专项建设规划”。同时，这套教材的编写和出版还得到“地下信息探测技术与仪器”教育部重点实验室和“地球探测与信息技术”北京市重点学科的大力支持。

经过一段时间的酝酿，中国地质大学（北京）地球物理与信息技术学院于2002年12月26日成立了“地球物理系列教材编委会”。会议上宣布接受邀请参加编写教材的作者为（之后有所调整）：

- | | |
|---------------|-----|
| (1) 重力场与重力勘探 | 曾华霖 |
| (2) 地磁场与磁力勘探 | 管志宁 |
| (3) 地电场与电法勘探 | 李金铭 |
| (4) 地震波场与地震勘探 | 姚 姚 |

(5) 核辐射场与放射性勘查

程业勋、王南萍、侯胜利

(6) 地球物理测井

尉中良、邹长春

(7) 地球物理场与地球物理勘探

刘光鼎、张贵宾等

各位作者提交了教材大纲，进行交流；会议还深入讨论了地球物理教材的内容、结构与编写的指导思想；要求于2004年内提交全部教材的送审稿。

2003年12月18日再次召开地球物理系列教材编委会，编委们认真讨论了曾华霖教授提交的《重力场与重力勘探》送审稿，进一步贯彻编写指导思想。2004年2月24日第三次编委会上，经过讨论强调了教材的科学性与系统性；同时传达了吴淦国校长关于教材应当是精品的主张。此次会议还形成以下共识：地球物理系列教材是专著性的，可以作为地球物理相关专业大学本科生的教科书，研究生的参考书，亦可供地球物理工作者参考；教师可以从教材中选择适当的内容向学生讲授，而教材的篇幅不受学时的限制。此外，还讨论了教材的审查方法与出版事宜。2004年12月20日召开第四次编委会，确定了教材送审、评审和出版的日程安排。

现地球物理系列教材已基本按期完成，经过审阅、修改，近日即将提交地质出版社公开出版，很快就会与广大读者见面。我们真诚地希望读者们按照吴淦国校长提出的“特色+精品”的要求来审查这套地球物理系列教材，多多提出宝贵意见，以便进一步提高质量，使它在培养新一代地球物理学家的过程中能有所贡献，在全面建设小康社会中为振兴地球物理事业起到积极的推动作用。

在地球物理系列教材编写过程中，魏文博教授做了大量组织工作，特此致谢。

中国科学院院士

中国地球物理学会荣誉理事长

中国地质大学（北京）地球物理与信息技术学院院长



2004年12月29日

前 言

地球物理学的基础内容就是探测和研究地球物质的物理场，核地球物理勘查方法的物理场是辐射场。它的特点与放射性核素的迁移有关，因此放射性勘查的辐射场又是随放射性核素迁移而扩展变化（是寻找深部矿物的基本依据）。放射性勘查的基本辐射场有三类：一是放射性核素包括随核素迁移而扩展的直接辐射场；二是对放射性核素有特殊作用的非放射性矿物改变了直接辐射场，形成二次分布的异常场（如油气田和地下水等）；三是人工激发辐射场。因此刘光鼎院士和陈颀院士建议在放射性勘查之前加上辐射场，取名为《核辐射场与放射性勘查》，对学科发展具有重要意义。

由于核动力工程对原料的需要，使放射性勘探方法迅速发展。1930年西方发达国家先后使用 γ 辐射仪和氡气测量方法寻找放射性矿物；第二次世界大战结束后出现找铀矿高潮。我国1954年开始铀矿调查，适时满足了我国核动力工业的需要。

进入20世纪中叶，人类社会的发展受到了资源与环境的制约，要求地球科学对社会提供服务不仅是资源勘查，还需要对日益恶化的环境变化进行研究，以及对多发的自然灾害进行预测，保障人类健康与社会发展。多年来，放射性勘查在寻找地下裂隙水、油气田、多金属矿物以及探查滑坡、地裂缝、塌陷、地震预报等多领域作出了贡献。20世纪70年代人们开始关注放射性的危害，接着世界卫生组织（WHO）公布氡为19种致癌物质之一，引起世界各国对辐射环境的重视。居室氡环境检测，区域辐射环境研究成为热门。

过去把天然放射性测量叫放射性勘探，把人工放射性测量叫核地球物理，其定义的内容都局限在矿物勘探。本书比较系统地整理了近年的研究成果，以基本理论、测量方法和应用技术为主线，按照基本理论进行分类，拓展了应用领域和应用技术。

核辐射场与放射性勘查方法是以原子核物理学和实验核物理学为基础发展起来的，它与地球化学、地质学紧密结合。几十年来经验证明，由于地质情况的复杂性，放射性勘查方法与其他物探方法，以及地球化学、地质学资料相结合进行综合解释，是得出正确结论的有效途径。

本书是地球物理系列教材之一，可作为地球物理相关专业大学本科生的教科书、研究生的参考书；也可作为核技术专业、环境专业、地球化学探矿专业人员的参考书。

由于作者水平所限，不足之处请予批评指正。

编著者
2005.5

目 录

序
前言

第一篇 基础篇

第一章 放射性及其衰变规律	(1)
第一节 核衰变及放射性核素	(1)
一、原子结构及原子核衰变	(1)
二、天然放射性核素	(2)
三、人工放射性核素	(13)
第二节 放射性核素的衰变与积累规律	(14)
一、衰变规律	(14)
二、系列放射性核素的衰变与积累规律	(14)
三、多级衰变与放射性平衡	(16)
第三节 放射性测量单位与标准源	(17)
一、放射性活度与比活度	(17)
二、放射性辐射剂量单位	(19)
三、放射性标准源	(20)
四、放射性标准模型	(21)
练习题	(21)
第二章 射线与物质相互作用	(22)
第一节 带电粒子与物质相互作用	(22)
一、 α 粒子与物质作用	(22)
二、 β 射线与物质的作用	(23)
第二节 γ 射线与物质相互作用	(26)
一、光电效应	(27)
二、 γ 射线的散射作用	(28)
三、电子对效应	(31)
四、 γ 射线在物质中衰减规律	(32)
第三节 中子与物质的相互作用	(33)
一、中子源	(33)
二、中子的散射和核反应	(35)
第四节 宇宙射线与物质作用	(39)
练习题	(41)
第三章 天然放射性核素的分布与迁移	(43)
第一节 天然放射性核素在自然界的分布	(43)
第二节 放射性元素的迁移	(45)

一、铀的迁移和砂岩铀矿	(45)
二、形成分散流与分散晕	(46)
三、放射性核素在地下水中富集与迁移	(46)
四、物质颗粒的垂直迁移——地气	(47)
第三节 铀矿产概况	(47)
第四章 放射性探测器及测量仪器	(50)
第一节 闪烁探测器	(50)
一、闪烁体	(50)
二、光电倍增管	(54)
三、闪烁计数器的组成及其特性	(58)
四、影响稳定性的主要因素及使用中注意事项	(60)
第二节 气体探测器	(61)
一、正比计数管	(62)
二、盖革 (G-M) 计数管	(65)
三、电离室	(67)
第三节 半导体探测器	(70)
一、PN 结型半导体探测器	(71)
二、PIN 结锂漂移型半导体探测器	(72)
三、高纯锗半导体探测器 (HPGe)	(73)
第四节 其他辐射探测器	(73)
一、固体径迹探测器	(73)
二、热释光探测器	(74)
三、气体正比闪烁计数器	(75)
第五节 轻便型 γ 射线测量仪	(77)
一、 γ 辐射仪	(77)
二、四道 γ 能谱仪	(79)
三、轻便型多道 γ 能谱仪	(81)
四、FD-3017RaA 测氡仪	(83)
第六节 航空 γ 能谱仪	(84)
第七节 海洋及测井 γ 能谱仪	(85)
一、海洋拖曳式多道 γ 能谱仪	(85)
二、 γ 射线测井仪	(86)
第八节 核辐射测量中的统计误差	(88)
一、核衰变的统计分布规律	(88)
二、核辐射测量的误差	(90)
三、测量数据的检验	(93)
四、 χ^2 检验法	(94)
五、可疑测量值的舍弃	(95)
练习题	(96)

第二篇 应用篇

第五章 γ 射线测量方法与矿产勘查	(97)
--	------

第一节 γ 辐射场分布特征的基本理论	(97)
一、地面上空 γ 辐射场的计算	(97)
二、地面 γ 辐射场的计算	(99)
三、垂直辐射体走向剖面 γ 场计算	(100)
四、沿钻孔轴线 γ 场分布	(102)
五、指数函数法计算钻孔轴线 γ 场分布	(106)
第二节 无限介质中 γ 散射射线能量分布	(108)
一、无限介质中 γ 射线能量迁移方程	(109)
二、 γ 射线通过物质谱成分变化的实验研究	(112)
第三节 航空 γ 能谱测量方法	(116)
一、航空 γ 能谱测量的原理	(116)
二、航空 γ 能谱测量工作方法	(120)
三、地质解释和应用实例	(121)
第四节 地面 γ 测量方法	(123)
一、野外地面 γ 测量工作方法	(123)
二、地面 γ 测量数据处理与应用举例	(127)
第五节 汽车 γ 能谱测量方法	(130)
第六节 海洋(水下) γ 能谱测量	(130)
第七节 自然 γ 测井方法	(132)
一、反褶积分层解释法	(132)
二、迭代法	(137)
三、平均含量法	(139)
四、 γ 能谱测井与铀含量计算	(141)
五、 γ 测井的其他应用	(142)
第八节 γ 编录及含量测量	(144)
一、 γ 编录	(144)
二、岩(矿)露头铀含量测量	(145)
第九节 γ 散射(γ - γ)方法	(146)
练习题	(150)
第六章 氡测量方法与矿产勘查	(151)
第一节 土壤中氡的运移	(152)
一、层状氡源上覆土壤层中氡浓度的分布	(152)
二、土壤层中氡浓度分布	(155)
三、氡在土壤中运移的讨论	(157)
四、土壤氡浓度的变化	(159)
五、地面岩石、土壤的氡析出率	(160)
第二节 大气中氡的分布	(160)
一、大气中氡的运移特性	(160)
二、大气中氡浓度的变化	(162)
三、大气中氡子体及其变化	(163)
第三节 氡的常规测量方法	(164)

一、瞬时土壤氡测量方法	(164)
二、空气中氡浓度测量方法	(166)
三、测氡仪的标定	(169)
四、水中氡测量方法	(170)
五、土壤(岩石)氡射气系数和析出率的测量方法	(171)
六、岩石的扩散系数及其测量方法	(173)
第四节 氡的累积测量方法	(177)
一、固体径迹探测器方法	(177)
二、 α 聚集器方法	(178)
三、钋-210 测量方法	(180)
四、活性炭吸附器(ROAC)测氡方法	(180)
五、驻极体探测器	(181)
第五节 热释光测量方法	(182)
一、 α 粒子热释光探测器	(182)
二、 γ 射线热释光探测器	(183)
三、土壤热释光	(183)
第六节 液体闪烁测量方法	(185)
第七节 氡气测量勘查放射性矿床	(186)
一、土壤氡异常的评价	(186)
二、氡异常与找矿实例	(186)
第八节 氡气测量勘查地下水及其他应用	(189)
第九节 裂变径迹测量方法	(192)
一、铀含量计算	(192)
二、探测器(片)与样品制备	(192)
三、应用实例	(193)
练习题	(194)
第七章 寻找油气藏的放射性方法	(195)
第一节 油田放射性异常机理的研究	(195)
一、油田放射性异常的特征与形成	(195)
二、铀(系)物质呈纳米微粒直接上升至地面	(196)
三、放射性元素垂向运移的通道	(200)
四、放射性元素垂向运移的动力	(201)
五、油田放射性异常的基本形态	(202)
六、放射性异常的影响因素	(207)
第二节 数据处理与干扰分析	(208)
一、常用的数据处理方法	(208)
二、断层对放射性异常的影响	(212)
第三节 野外工作方法与应用举例	(214)
一、航空 γ 能谱测量方法的应用	(214)
二、地面 γ 能谱测量	(215)
三、氡及其子体测量方法	(215)
练习题	(218)

第八章 自然灾害的勘查	(219)
第一节 氡气测量用于地震预报	(219)
一、基本理论	(219)
二、地下水氡浓度异常分布与震源的相关性	(220)
三、测量方法	(225)
第二节 隐伏断层与地裂缝的勘查	(225)
一、隐伏活动断层的探查	(226)
二、地裂缝的探查	(230)
第三节 滑坡的探测	(231)
第四节 地面塌陷与采空区的探测	(232)
一、采空区探测	(232)
二、隐伏陷落柱探测	(232)
第五节 氡气测量确定地下煤层自燃火区分布	(234)
第六节 古气候变化研究	(235)
一、利用自然 γ 测井曲线反演古气候变化	(236)
二、深海岩心热释光与古气候研究	(238)
练习题	(239)
第九章 环境（放射性）辐射与监测	(240)
第一节 环境放射性辐射与健康	(240)
一、环境放射性辐射源	(240)
二、放射性辐射的生物效应	(245)
第二节 区域环境辐射的监测	(246)
一、区域环境 γ 辐射测量	(246)
二、环境氡的测量	(249)
三、室内氡的主要来源	(254)
四、建材放射性测量与评价	(254)
第三节 矿山氡的危害与测量	(257)
一、矿山氡危害问题	(257)
二、空气中氡子体的浓度测量	(258)
三、氡子体潜能的测量	(260)
第四节 核辐射污染应急监测	(261)
一、核辐射污染物的迁移	(261)
二、核设施的常规监测	(263)
三、核辐射事故应急监测	(264)
第五节 环境样品放射性测量	(266)
一、总 α 活度测量	(266)
二、总 β 活度测量	(269)
三、 α 能谱分析	(270)
四、 γ 能谱分析	(270)
第六节 放射性废物处置	(281)
一、中低放射性废物的处置	(282)

二、高放射性废物深地质处理	(283)
练习题	(285)
第十章 能量色散 X 射线荧光方法	(286)
第一节 X 射线的产生与特征	(286)
一、原子结构与 X 射线	(286)
二、X 射线的产生和性质	(287)
三、X 射线的吸收与跃变	(294)
第二节 X 射线的激发	(297)
一、X 射线荧光产额	(297)
二、X 射线荧光激发效率	(299)
三、放射性同位素激发源	(301)
第三节 能量色散 X 射线测量装置	(307)
一、平衡滤片	(307)
二、能量色散的激发和探测器的几何布置	(309)
第四节 能量色散 X 射线谱样品分析方法	(312)
一、样品分析的基本理论	(312)
二、样品测量方法	(314)
第五节 基体效应及其校正方法	(316)
一、基体效应	(316)
二、基体效应的校正方法	(319)
第六节 X 射线荧光在找矿勘查中应用	(334)
一、铜、铅、锌等金属矿产的找矿	(334)
二、金矿勘查中应用	(336)
第七节 现场原位含量测量的 X 射线荧光方法	(340)
一、工作方法和影响因素	(340)
二、应用实例	(342)
第八节 X 射线荧光测井	(344)
一、激发与探测装置	(344)
二、X 射线荧光测井工作方法	(345)
三、应用实例	(347)
第九节 环境污染的检测	(348)
第十节 在选矿、水泥等其他工业上应用	(352)
一、在线分析	(352)
二、合金成分分析和规格确认	(354)
练习题	(355)
第十一章 高灵敏度辐射谱分析方法	(356)
第一节 中子活化分析方法	(356)
一、基本原理与特点	(356)
二、仪器中子活化分析方法	(358)
三、应用举例	(362)
第二节 质子 X 射线荧光 (PIXE) 分析方法	(363)

一、分析装置	(364)
二、含量分析和灵敏度	(365)
第三节 全反射 X 射线荧光分析	(371)
一、基本原理	(371)
二、应用实例	(373)
附录一 放射性矿石标准模型参数	(375)
附录二 元素的特征 X 射线能量表	(377)
附录三 放射性勘查中常用法定计量单位	(382)
参考文献	(383)

Contents

Preface

Introduction

Section 1: Principles of radioactivity exploration

Chapter 1 Radioactivity and nuclear decay	(1)
1.1 Nuclear decay and radioactivity nuclides	(1)
1.1.1 Atomic structure and nuclear decay	(1)
1.1.2 Natural radionuclide	(2)
1.1.3 Artificial radionuclide	(13)
1.2 Radionuclide decay and accumulation	(14)
1.2.1 Radioactive decay laws	(14)
1.2.2 Decay and accumulation of radioactive series	(14)
1.2.3 Series decay and radioactive equilibrium of radioactive series	(16)
1.3 Radioactivity units and standard radioactive sources	(17)
1.3.1 Radioactive activity and specific activity	(17)
1.3.2 Exposure dose and absorbed dose	(19)
1.3.3 Standard sources	(20)
1.3.4 Calibration models	(21)
Exercise	(21)
Chapter 2 Interaction of radiation with matter	(22)
2.1 Interaction of charged particles	(22)
2.1.1 Interaction of alpha particles	(22)
2.1.2 Interaction of beta particles	(23)
2.2 Interaction of photons with matter	(26)
2.2.1 Photoelectric effect	(27)
2.2.2 Photon scattering	(28)
2.2.3 Pair production	(31)
2.2.4 Photon attenuation coefficients	(32)
2.3 Interaction of neutrons with matter	(33)
2.3.1 Neutron Sources	(33)
2.3.2 Neutron scattering and nuclear reactions	(35)
2.4 Interaction of cosmic rays with matter	(39)
Exercise	(41)

Chapter 3	Distribution and migration of natural radionuclides	(43)
3.1	Distribution of natural radionuclides	(43)
3.2	Migration of natural radionuclides	(45)
3.2.1	Migration of uranium and sandstone uranium deposits	(45)
3.2.2	Formation of original and dispersive abnormalities	(46)
3.2.3	Accumulation and migration of radionuclides in underground water	(46)
3.2.4	Vertical transport of particles in geological formation—geogas	(47)
3.3	Current status of uranium resources	(47)
Chapter 4	Detectors and detector instruments	(50)
4.1	Scintillation detector	(50)
4.1.1	Scintillators	(50)
4.1.2	Dark current of a photomultiplier tube	(54)
4.1.3	Structure and characteristics of scintillator detectors	(58)
4.1.4	Main factors affecting stability of scintillator detectors	(60)
4.2	Gas-filled detectors	(61)
4.2.1	Proportional counters	(62)
4.2.2	Geiger-Mueller counters	(65)
4.2.3	Ionization chambers	(67)
4.3	Semiconductor detectors	(70)
4.3.1	PN-type semiconductor detectors	(71)
4.3.2	Lithium-drifted Germanium detectors	(72)
4.3.3	HPGe semiconductor detector	(73)
4.4	Other radiation detectors	(73)
4.4.1	Solid state detectors	(73)
4.4.2	Thermoluminescent detectors	(74)
4.4.3	Gas proportional scintillation detectors	(75)
4.5	Portable gamma-ray measurement systems	(77)
4.5.1	Gamma-ray detection devices	(77)
4.5.2	Four-channel gamma-ray spectrometers	(79)
4.5.3	Portable multi-channel gamma-ray spectrometers	(81)
4.5.4	Radon monitor—FD-3017RaA	(83)
4.6	Airborne gamma-ray spectrometers	(84)
4.7	Spectrometers for gamma-ray well-logging and marine gamma-ray measurements	(85)
4.7.1	Towed seabed multi-channel gamma-ray spectroscopy systems	(85)
4.7.2	Gamma-ray spectroscopy logging systems	(86)
4.8	Statistics in radiation measurements	(88)
4.8.1	Statistical distribution in nuclear decay	(88)
4.8.2	Errors in radiation measurements	(90)