

${}^2\text{He}^4$ ${}^5\text{B}^{11}$ ${}^7\text{N}^{14}$ ${}^3\text{Li}^7$
 p ${}^8\text{O}^{16}$ ${}^6\text{C}^{12}$

质子和重离子 治疗及其装置

(修订版)

刘世耀 著



科学出版社

质子和重离子治疗及其装置

(修订版)

刘世耀 著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

本书介绍质子和重离子治疗的原理和方法、治疗装置的系统和设备,以及国际上质子和重离子治疗中心的概况;物理概念清晰,内容图文并茂、系统全面;高度概括了世界上质子和重离子治疗及其装置研制的最新研究成果、当前水平以及发展趋势,信息量丰富。

本书适合从事放射治疗的医学界专业人士或从事治疗装置研制技术的专业人士,也适合放疗专业的教师和学生、医疗行政管理工作人员和设备运行维修技术人员使用;对卫生医疗领域的决策者,甚至对希望了解最适宜治疗方法的癌症患者,都有重要的参考价值。

图书在版编目(CIP)数据

质子和重离子治疗及其装置/刘世耀著. —修订版. —北京: 科学出版社, 2016.3
ISBN 978-7-03-047691-3

I. ①质… II. ①刘… III. ①肿瘤-放射治疗学 ②放射治疗仪器 IV. ①R730.55
②TH774

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016)第 049728 号

责任编辑: 刘凤娟 / 责任校对: 钟 洋
责任印制: 张 倩 / 封面设计: 耕者设计

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号

邮政编码: 100717

<http://www.sciencep.com>

北京通州皇家印刷厂 印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2012 年 8 月第 一 版 开本: 720×1000 1/16

2016 年 3 月修 订 版 印张: 36 1/4 插页: 2

2016 年 3 月第二次印刷 字数: 730 000

定价: 199.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

第一版序

质子和重离子治疗及其装置是当前医学物理界的一大前沿热点,是在 20 世纪电子直线加速器肿瘤放疗的基础上放疗方法领域一个新的质的飞跃。虽然人们早在 20 世纪 50 年代就已知质子和重离子的物理特性在肿瘤治疗上极具特色和优势,但是质子和重离子治疗的定位精度远高于常规放疗要求,对产生质子和重离子的加速器技术指标,对肿瘤的定位诊断精度,对旋转机架的等中心点精度,对计算机的快速数据传输、处理和医用影像学等都有很高的要求。因而直到 21 世纪初,质子和重离子治疗及其装置才得以在 20 世纪 80 年代后发展起来的加速器应用技术、计算机技术和 CT 影像诊断技术等高科技的基础上逐步得到发展和推广。国际上近年来快速发展的质子和重离子治疗,不但提高了肿瘤的控制率,还能明显提高患者的生活质量。1998 年以前国际上仅有美国一家 Loma Linda 专用质子治疗中心,而到 2008 年全世界已有数十家专用质子和重离子治疗中心投入使用。

利用质子和重离子技术治疗癌症,对年增二百多万癌症患者的中国来说,具有极为重要的意义。质子和重离子治疗装置是核技术、计算技术、精密机械、图像处理、自动控制和医用影像等高科技相互交叉和集成的产物,是一个医学和核技术的高科技工程,具有相当高的复杂性。当前国内的放疗医务界和核医用技术界也对这方面的工作表现出很大的兴趣。但近十年来,国内还没有出版过这方面的专著,即使期刊论文也很少。《质子和重离子治疗及其装置》一书作者根据自己在这方面十多年的工作经验,并进行总结归纳、系统提高,撰写成书,这对我国人口与健康的领域做了一件难得的大好事。

我认为该书的出版,将对今后发展我国的质子和重离子治疗和研制中国的质子和重离子治疗装置具有现实的医学价值和引导自主创新的学术意义,特以此为序。

陈佳洱

2010 年 1 月 1 日

修订版序

本人所著《质子和重离子治疗及其装置》一书,在中国科学院科学出版基金委的资助下于2012年8月出版。书出版后,中国著名放射肿瘤学专家殷蔚伯教授称之为“值得一读的质子和重离子治疗参考书”,原中国粒子加速器学会应用委员会主任、放疗装备专家顾本广教授说本书是“放疗临床界与工程界的好参考读物”。当前国内从事此领域工作的一些研究所、大学、医院、放疗和投资公司等都曾咨询过作者如何购买此书。该书出版一年后即售罄,但陆续仍有大量读者要求订购。为满足市场,亦为修订原版中的一些编写错误,我们决定推出修订版。

全球著名的放疗装备制造公司美国瓦里安医疗设备公司(Varian Medical System)在中国建立瓦里安医疗设备(中国)有限公司。近年来,瓦里安在全球推出质子治疗的先进装备。在此,深深感谢瓦里安医疗设备中国公司总裁张晓博士和瓦里安医疗设备中国公司大中华区副总裁赵戡博士,他们选择《质子和重离子治疗及其装置》一书作为瓦里安在中国开办有关质子治疗的培训学习班的主要参考教材。

《质子和重离子治疗及其装置》一书中大部分涉及部件和系统工作原理的内容始终保持其固有的学术价值,而有些统计数字和国际上产品型号无疑已过时,考虑到科学出版社在2016年3月出版的《质子治疗系统的质检和调试》一本新书中已登载了较新的统计数字和国际上产品型号,因此这次修订版,仅做少数补充外,不做全面更新。

《质子治疗系统的质检和调试》这本新书将包含2012年以后几年有关质子治疗系统方面的最新进展,特别是在系统方面的进展,集中表现在质检、调试、测量和集成这些方面的成就,欢迎读者选购与批评指正。

刘世耀

2015年1月1日

第一版前言

质子和重离子治疗及其装置在近十年才快速发展起来,国内外发表的相关文章在书刊中很少见。该课题涉及的专业面很广,包括加速器技术、束流探测、束流输运、辐射屏蔽、剂量安全、计算机控制、精密机械、放射医学、影像医学、治疗计划、患者精密定位准直等。本书是在许多人的帮助下才得以出版的,在此对他们表示衷心感谢。

首先,感谢已仙逝的父亲刘承械、母亲沈伯芸大人,他们一生省吃俭用,让我接受最好的教育;从上海觉民小学、上海南洋模范中学直到清华大学电机系,为我一生科技工作奠定了坚实的教育基础。

其次,感谢有关领导,他们的帮助与支持使我有机会在中国科学院原子能研究所和中国科学院高能物理研究所(高能所)工作四十余年,奠定了我在加速器技术、核探测、束流输运、计算机控制等方面的专业知识。特别要感谢北京正负电子对撞机工程领导小组组长谷羽同志(1915~1994,曾任中国科学院新技术局局长,人造卫星工程领导小组组长,中国科学院副秘书长、顾问等职)的鼎力起用,虽然她已仙逝,我还要趁此机会表达长期以来要感谢她的强烈心愿。感谢高能所、高能所原计划处、原学秘室等部门领导,他们给予我高度的信任、重要的任务、不可多得的机会和热情耐心的帮助。我还要感谢深圳奥沃公司原总裁宋世鹏先生和质子部总经理陈武山先生,北京质子科技开发公司董事长孙启银先生,清华大学医学院领导,原常务副校长杨家庆教授和清华大学工程物理系林郁正教授,西安长安信息集团公司董事长蔡世杰先生和副总裁张小会先生,中国泰和诚医疗集团公司总裁杨建宇博士,北京质子医疗筹备中心任斌主任以及所有支持过我的人,是他们为我提供了从事质子和重离子治疗及其装置的建造和研发机会。

我还要感谢陈佳洱院士(1934~,物理学家、教育家,北京大学物理学教授、国家重点基础研究发展计划专家顾问组副组长,曾任北京大学校长、国家自然科学基金委员会主任、中国物理学会理事长、北京市科协主席、亚太物理联合会理事长、国际纯粹与应用物理联合会第25届副主席等职),中国物理学会原副秘书长唐金媛高级工程师,中国医学科学院肿瘤医院放疗科主任医师蔡伟明教授,感谢他们在此书出版过程中给予的支持和帮助。感谢陈佳洱院士和曾益新院士在百忙中审稿作序,并给予积极的评价。感谢比利时 IBA 公司凌蔚翔医学博士为本书提供宝贵

的资料。最后我要感谢我的妻子殷定贞女士和女儿刘晴远女士，家人的支持使我得以顺利完成这本书的写作。

本书分为四部分：第一部分是质子和重离子治疗的物理基础，对质子和重离子治疗的原理作全方位的介绍；第二部分是质子和重离子治疗装置和系统，对质子和重离子治疗装置和系统的部件和分系统作比较详细的介绍；第三部分是描述质子和重离子治疗中心，重点介绍国际上有代表性的、知名的专用质子和重离子治疗中心；第四部分介绍有关治疗中心的设计和建造问题。

本书是目前国内第一部全面介绍质子和重离子治疗及其装置的科技书。内容丰富，概括了国际上质子和重离子治疗的发展和成就，也概括了国际上目前最新的质子和重离子治疗装置和系统的研制进展。可供从事放疗工作的医务、管理、教育和技术人员参考，也可作为从事质子和重离子放疗工作的医务、运行、管理工作的人员培训参考教材。

本书初稿于 2009 年就已完成，却因意外，延迟了整整一年后才重新启动出版，由于本人水平有限，不妥之处在所难免，欢迎读者对本书提出批评指正，来信请寄我的电子邮箱：shiyaoliu@yahoo.com。

刘世耀

2011 年 1 月 1 日

目 录

第一版序
修订版序
第一版前言

第一部分 基础和概况

第 1 章 绪言	3
第 2 章 质子和重离子放射治疗的历史回顾	6
2.1 放射治疗技术发展史	6
2.2 质子治疗技术发展史	7
2.3 重离子治疗发展史	12
2.4 中国质子和重离子治疗的发展经历	13
第 3 章 质子和重离子治疗的物理性能和基础	17
3.1 质子治疗的物理性能和基础	17
3.2 重离子治疗的物理性能	30
第 4 章 质子和重离子治疗的生物性能	36
4.1 离子治疗的生物效应	36
4.2 相对生物有效性的一些特点	37
4.3 扩展布拉格峰分布质子流的相对生物有效性	39
4.4 辐照使癌细胞死亡的原因	40
4.5 重离子治疗的生物效应	41
4.6 扩展布拉格峰分布碳离子流的相对生物有效性	42
4.7 氧增比	43
4.8 治疗计划中对 RBE 的处理方法	44
第 5 章 质子和重离子治疗的原理	46
5.1 质子治疗的基本原理	46
5.2 重离子治疗的原理	50
第 6 章 质子和重离子治疗的临床治疗参数	53
6.1 临床治疗参数	53

6.2	美国能源部在 1993 年发表的质子医用装置的临床治疗参数	55
第 7 章	质子和重离子治疗在放射治疗中的定位	56
7.1	评估治疗效果的判断标准	56
7.2	评估和比较不同粒子治疗优缺点的判断标准	56
7.3	质子和重离子、X 射线、电子在放射治疗中的比较	57
7.4	质子和碳离子在放射治疗中的比较	58
7.5	质子和重离子治疗发展的原因和局限性	60
第 8 章	国际上对质子和重离子治疗的不同看法	62
8.1	欧、美、日、中放疗界对质子和重离子治疗的看法	63
8.2	美国官方对粒子和常规放疗的意见	63
8.3	国际肿瘤医学界对质子和重离子治疗的意见	66
8.4	对质子和重离子治疗持怀疑反对态度的意见	67
第 9 章	质子和重离子治疗肿瘤的适应类型	69
9.1	引言	69
9.2	质子和重离子治疗的肿瘤适应类型的分类	70
9.3	治疗肿瘤的适应性指示	71
9.4	1968~1998 年质子治疗总结	72
9.5	2001~2009 年质子治疗的肿瘤类型	74
9.6	21 世纪碳离子治疗的肿瘤类型	82
9.7	质子和重离子治疗的肿瘤适应患者市场	87
第 10 章	国际上质子和重离子治疗的发展概况	88
10.1	美国质子治疗的发展概况	88
10.2	日本质子和重离子治疗的发展概况	90
10.3	欧洲建造重离子治疗中心的有关情况	91
10.4	质子和重离子治疗装置的应用前景	93
第 11 章	全球的质子和重离子治疗中心概况	95
11.1	已停止运行的装置	95
11.2	运行中的装置	96
11.3	在建的专用质子和重离子治疗中心	97
11.4	新建的中心平均年治疗患者数	98
第 12 章	全球的质子和重离子治疗装置	99
12.1	质子和重离子治疗装置分代方法	99

12.2 国际上运行治疗的质子和重离子治疗中心(场所) 的分类	100
12.3 世界上正在建造的质子和重离子治疗中心 (场所) 的分类	101
12.4 国际上能提供交钥匙整体治疗系统的供应商和类型	101
第一部分参考文献	103

第二部分 治疗装置和系统

第 13 章 质子和重离子治疗系统的结构	107
13.1 质子治疗系统的结构	107
13.2 重离子治疗系统的结构	109
第 14 章 质子和重离子的束流产生装置——加速器	110
14.1 对质子和重离子加速器的要求	110
14.2 质子和重离子治疗加速器的技术参数	110
14.3 质子和重离子治疗加速器的类型	112
14.4 世界上各治疗中心用的同步加速器性能特性	113
14.5 直线加速器	114
14.6 同步加速器	117
14.7 回旋加速器	132
第 15 章 质子能量选择系统	138
15.1 引言	138
15.2 系统的总体结构	140
15.3 能量选择和发射度控制段	141
15.4 束流能量和能散度控制段	142
15.5 运用效率	143
第 16 章 质子和重离子治疗用的旋转机架	144
16.1 质子治疗用的旋转机架	144
16.2 碳离子治疗用的旋转机架	148
16.3 新型 Riesenrad 型离子旋转机架	150
16.4 新型 FFAG 永磁结构的超轻质子旋转机架	151
16.5 新型 IBA 的超导碳离子旋转机架方案	152
16.6 旋转机架的技术要求	153
16.7 旋转机架的类型	153
16.8 等中心旋转机架的分类	154

16.9	旋转机架的基本结构	155
16.10	旋转机架的电子光学	156
16.11	旋转机架的控制	158
第 17 章	束流输运系统	159
17.1	引言	159
17.2	总体安排	160
17.3	固定治疗头的支束线输运线	160
17.4	直线节周期性输运段	161
17.5	旋转治疗头的支束线输运线	161
第 18 章	质子和重离子治疗用的治疗头	162
18.1	引言	162
18.2	束流横向扩展法	162
18.3	散射法治疗头	164
18.4	铅笔束扫描治疗头	168
18.5	扫描治疗中器官的运动问题	177
18.6	瑞士 PSI 旋转扫描治疗头的扫描方法	181
18.7	世界各大治疗中心所采用的扫描方法	184
18.8	世界各大治疗中心所采用的治疗头实例	191
第 19 章	质子和重离子的精密定位和准直系统	198
19.1	患者精密定位的内容	198
19.2	患者肿瘤固定装置	200
19.3	患者精密定位椅	201
19.4	患者精密定位床	202
19.5	患者精密准直系统	203
19.6	数字化影像定位系统	211
19.7	机器人患者定位系统	214
19.8	影像引导下的放疗定位新技术	216
19.9	动态适应的放疗定位新技术	219
19.10	锥形束 CT 和四维 CT	222
19.11	容积 CT 扫描	223
第 20 章	质子和重离子的治疗计划系统	225
20.1	引言	225

20.2	治疗计划系统的基本功能	229
20.3	治疗计划系统的基本图像操作	230
20.4	散射束流场的治疗计划设计工作	231
20.5	扫描调强治疗计划设计工作	235
20.6	美国瓦里安公司的 Eclipse™ 治疗计划系统	238
20.7	国际医科达公司的 XIO 治疗计划系统	242
第 21 章	质子和重离子治疗辐射安全系统	245
21.1	引言	245
21.2	安全要求和标准	246
21.3	危险分析	246
21.4	连锁分析和其质量论证	247
21.5	断开束流的方法	248
21.6	束流中断部件	248
21.7	控制系统和安全系统之间的关系	248
21.8	瑞士 PSI 的安全系统	250
21.9	比利时 IBA 的安全连锁系统	252
21.10	治疗参数的测量验证、数据库和档案管理系统	256
21.11	水、电、空调、冷却水等通用系统的运行稳定性	257
第 22 章	粒子束流测量和剂量学	258
22.1	引言	258
22.2	束流测量	259
22.3	粒子剂量学	264
22.4	绝对测量吸收剂量方法	267
22.5	剂量的质量验证	269
22.6	监示单位的计算	271
第 23 章	质子和重离子治疗控制系统	274
23.1	引言	274
23.2	控制系统的设计目的	274
23.3	控制系统的设计原则	275
23.4	控制系统的分系统和控制功能	276
23.5	治疗控制硬件系统的结构	279
23.6	治疗控制硬件系统的层次	281
23.7	治疗控制软件系统的设计准则	284

23.8	质子治疗控制软件系统的层次和对应功能	285
23.9	治疗控制软件系统的结构	286
第 24 章	质子和重离子治疗系统的调试和验收	288
24.1	引言	288
24.2	验收测试和调试的区别	289
24.3	治疗参数和束流参数间的关系	290
24.4	验证系统的任务和分类	292
24.5	调试和验收的基本原则	294
24.6	测试、总调、验收和质量检验的准备工作	296
24.7	测试总调和质量验证的表达方法	299
第 25 章	质子和重离子治疗系统 QA、调试和验收的实例	302
25.1	引言	302
25.2	质子和重离子放疗的 QA	303
25.3	美国 M. D. Anderson 质子治疗中心的调试和 QA 实例	307
25.4	美国 Florida 质子治疗中心的调试和 QA 实例	324
25.5	美国 MGH 质子治疗中心 NPTC 的患者专用装置和铅笔扫描调试实例	334
25.6	韩国癌症中心建成验收实例	344
第 26 章	肿瘤信息系统	349
26.1	引言	349
26.2	肿瘤信息系统的发展历史	349
26.3	整合型计算机化的 OIS 中的功能件	352
26.4	OIS 的效果	353
26.5	国际 Elekta 公司的 IMPAC's MOSAIQ OIS	354
26.6	美国 Varian 公司的 ARIA 肿瘤信息系统	357
第 27 章	专用质子和重离子治疗中心的系统集成和整合	361
27.1	系统集成和整合	361
27.2	系统集成所需的技术和方法	362
27.3	专用质子和重离子治疗中心的系统集成	363
27.4	中心系统集成的基本方案	365
27.5	实施中的难点和关注点	368
第 28 章	质子和重离子治疗装置的运行和维护	371
28.1	引言	371

28.2 装置的治疗控制系统的运行模式	371
28.3 不同职员的控制权限	373
28.4 患者定位装置的机械运动和操作	373
28.5 质子和重离子的治疗辐照流程	374
28.6 如何进行运行和维护	379
28.7 治疗中心的人员编制	383
第二部分参考文献	384

第三部分 专用质子和重离子治疗中心

第 29 章 美国和加拿大的质子治疗中心	391
29.1 美国 Loma Linda 大学专用质子治疗中心	391
29.2 美国 M.D.Anderson 质子治疗中心	395
29.3 美国 Florida 质子治疗中心	400
29.4 美国费城大学 Roberts 质子治疗中心	404
29.5 美国中西部质子放疗研究所	406
29.6 美国 ProCure 质子治疗中心	409
29.7 美国麻省总医院 Francis H. Burr 质子治疗中心	412
29.8 美国北 Illinois 质子治疗和研究中心	414
29.9 美国 Hampton 大学质子治疗研究所	415
29.10 加拿大 TRIUMF 癌症治疗中心	417
第 30 章 日本专用质子和重离子治疗中心	420
30.1 日本重离子医用加速器中心	420
30.2 日本兵庫重离子医学中心	424
30.3 日本群馬重离子治疗中心	428
30.4 日本筑波大学质子医学研究中心	432
30.5 日本若狭湾 WERC 的质子治疗中心	433
30.6 日本南东北质子治疗中心	435
30.7 日本松元相泽医院质子治疗中心	436
第 31 章 德国和欧洲其他国家的质子和重离子治疗中心	437
31.1 德国慕尼黑的 Rinecker 质子治疗中心	437
31.2 德国海德堡重离子治疗中心	441
31.3 瑞士 PSI 质子治疗中心	451

31.4	德国 GSI 重粒子物理研究所	454
31.5	奥地利离子治疗和研究中心	456
31.6	捷克布拉格质子治疗中心	459
31.7	意大利轻离子治疗中心	460
第 32 章	中国质子和重离子治疗中心与韩国国家癌症中心	464
32.1	中国淄博万杰医院博拉格质子治疗中心	464
32.2	中国北京质子医疗中心	467
32.3	中国兰州重离子治癌中心	470
32.4	中国上海市质子重离子医院	471
32.5	中国台湾长庚医院质子暨放射治疗中心	473
32.6	中国台湾台大医院质子治疗中心	476
32.7	中国香港养和医院质子治疗中心	477
32.8	韩国国家癌症中心	479
第 33 章	下一代紧凑型质子治疗装置	481
33.1	引言	481
33.2	美国 MEVION S250(Monarch 250™ PBRT)紧凑型质子治疗装置	483
33.3	美国介质壁型加速器小型质子治疗装置	488
33.4	激光加速器型质子治疗装置	492
33.5	美国 ProTom Radiance 330™紧凑型质子治疗装置	493
33.6	分布式质子放射治疗	496
第 34 章	研制中的新型离子治疗方案	498
34.1	美国 BNL 的快周期 RCS 方案	498
34.2	医用粒子加速器的 PAMELA 方案	500
34.3	意大利 TERA 的 Cyclinac 方案	502
34.4	图像引导的直线强子治疗方案	505
34.5	日本 PMRC 的激光治疗方案	506
第三部分	参考文献	509

第四部分 治疗中心的设计和建造

第 35 章	治疗中心的设计	515
35.1	治疗中心的类型	515

35.2	治疗中心的设备和面积	516
35.3	资金和使用	517
35.4	患者和工作人员的流向	517
第 36 章	建造的阶段、要点、设备选型和谈判	519
36.1	建造的工作内容和阶段	519
36.2	筹建治疗中心的有关要点	520
36.3	选择治疗装备的类型	521
36.4	外商谈判的项目内容和方法	523
第 37 章	治疗中心的建筑	525
37.1	引言	525
37.2	建筑要求	526
37.3	辐射安全措施	528
37.4	节能措施	530
37.5	通用设备	530
第 38 章	建筑的辐射屏蔽	532
38.1	屏蔽的基本原理	532
38.2	束流损失和辐射源	534
38.3	辐射区的分类和剂量限值	536
38.4	屏蔽材料	538
38.5	迷宫和穿透管道	539
第 39 章	环境保护安全	541
39.1	概述	541
39.2	系统运行时产生的辐射和有害物质	541
39.3	质子束流损失及中子产额	542
39.4	进入天空的中子源强	543
39.5	气载放射性流出物排放量	543
39.6	放射性固体废物和加速器结构材料的活化	544
39.7	土壤和地下水的活化	545
39.8	电磁辐射和噪声	545
39.9	可能发生对环境影响的事故	545
第 40 章	场所和环境的监测	546
40.1	加速器的辐射场及对监测器的要求	546

40.2	辐射监测器布点的选择	547
40.3	(区域)高辐射水平中子和 γ 射线监测器	547
40.4	(环境)低辐射水平中子和 γ 射线监测系统	549
40.5	ANM 型高灵敏度中子探测器	550
40.6	AGM 型区域 γ 射线监测器	551
40.7	数据采集与处理系统	552
第四部分参考文献		553
附录一 “2000~2016 年质子和重离子治疗与其装置论文集” 的目录		555
附录二 作者简介		558
附录三 媒体对作者工作的评论		559