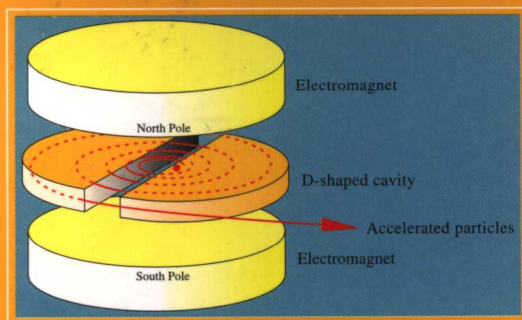


研究生前沿教材书系

Accelerator Physics  
(2nd Edition)

加速器物理学  
( 第二版 )  
( 英文影印版 )

S.Y.Lee  
(Indiana University, USA)



復旦大學出版社

研究生前沿教材书系

物理 (910) 物理学系

( ) 力学系

第一一 力学系

物理学系

1981-1982

1

英文

# Accelerator Physics

(2nd Edition)

## 加速器物理学

(第二版)

(英文影印版)

S.Y.Lee

(Indiana University, USA)

復旦大學出版社

## 图书在版编目(CIP)数据

加速器物理学(第二版) = Accelerator Physics(2nd Edition)/  
[美]李著. —上海:复旦大学出版社, 2006. 11  
(研究生前沿教材书系)  
ISBN 7-309-05209-9

I. 加… II. 李… III. 加速器-研究生-教学参考资料-  
英文 IV. TL501

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2006)第 121625 号

Accelerator Physics(2nd Edition)

S. Y. Lee

Copyright © 2004 by World Scientific Publishing Co. Pte. Ltd.

本书由(新加坡)世界科技出版公司 授权出版英文影印版

著作权合同登记号 图字:09-2006-682

## 加速器物理学(第二版)

[美]S. Y. 李 著

---

出版发行 复旦大学出版社 上海市国权路 579 号 邮编 200433  
86-21-65642857(门市零售)  
86-21-65118853(团体订购) 86-21-65109143(外埠邮购)  
fupnet@fudanpress.com http://www.fudanpress.com

---

责任编辑 梁 玲  
总 编 辑 高若海  
出 品 人 贺圣遂

---

印 刷 浙江省临安市曙光印务有限公司  
开 本 787 × 960 1/16  
印 张 37.25  
版 次 2006 年 11 月第 2 版第一次印刷  
印 数 1—3 100

---

书 号 ISBN 7-309-05209-9/O · 381  
定 价 50.00 元

---

如有印装质量问题, 请向复旦大学出版社发行部调换。

版权所有 侵权必究

# 出版者的话

复旦大学出版社出版英文影印版《研究生前沿教材书系》，主要基于以下几点考虑。

1. (新加坡)世界科技出版公司以出版科技专著闻名于世,同我社已有 10 多年的友好交往。从 20 世纪 90 年代以来,尤其是 1995 年该公司并购了伦敦帝国学院出版社(Imperial College Press) 51% 的股份(近年已完成了 100% 的股份收购)之后,这两大出版机构在潘国驹教授的集中指挥下,充分发挥了编辑学术委员会的职能,使得出书范围不断拓宽,图书层次逐渐丰富,因此从中遴选影印图书的空间就更大了。再加上该公司在上海设有办事机构,相关工作人员工作细致,服务周到,给我们两个单位的合作交流带来极大的便利。

2. 研究生教育是创新人才培养的关键,教材建设直接关系到研究生科学水平和创新能力的培养。从 2003 年开始,我社陆续出版了 *Fudan Series in Graduate Textbooks* 这套丛书,国内的读者反响很好。但限于作者人力,这套丛书涵盖的学科和门类都较为不足。为此,我们想到再借助国外出版力量,引进一批图书作为硕士研究生的补充教材,(新加坡)世界科技出版公司与我社的合作,恰好提供了这样一个良好的机会。我们从该公司提供的大量近期书目中,遴选出 30 多本样书,经过专家审读后,最终确定了其中的 11 种作为首批《研究生前沿教材书系》影印出版。这 11 种图书的作者来自美、英、法、德、加拿大 5 个国家的 10 多所高校或研究部门,他们既是相关学科科研的领军人物,又是高年级本科生和研究生教学的杰出教授(详见各书的作者介绍)。各门教材既考虑到深入浅出的认知规律,又突出了前沿学科的具体应用,每本书都有充实的文献资料,有利于读者和研究人员深入探索。其中 6 本教材配有习题,

还包括一本具有物理背景的人员都需要了解的高级科普读物——《理解宇宙——从夸克到宇宙学》。

3. 为了有利于广大读者和图书管理、图书采购、图书销售人员的使用,特请龚少明编审为每本影印书编写出中文内容介绍和作者概况,并由他将 preface(序言)译成中文。序言是一本书的总纲,它涉及写作要旨、逻辑体系、内容特色和研读指导等等,我们将其译成中文至少有利于读者的浏览和选购,避免买书仓促带来的失误,毕竟英语是多数读者的第二种语言。

4. 原版书价格较贵,大大超出读者的购买能力,即使图书馆或大学资料室也会受到经费不足的制约。出版影印本的书价不到原价的十分之一,无疑会给需要这些书的研究生和图书馆带来真正的实惠,这也是(新加坡)世界科技出版公司与我们合作的目的之一。

5. 考虑到物理类图书是(新加坡)世界科技出版公司的第一品牌,我们首次引进的 11 本书,都属大物理的范畴。这一尝试如果得到读者和专家的认可,今后我们将陆续开辟其他学科的影印渠道。

欢迎读者批评指正,并提出有益的建议。

复旦大学出版社

2006 年 9 月

## 内 容 简 介

这本教科书是作者根据自己在印第安纳大学给研究生讲授《加速器物理学》的上课笔记和给美国粒子加速器学院讲授的两门课的相关讲稿基础上写成的。自 1999 年第一版问世以来,被广泛用作教材。第二版除了对原书作必要的修改之外,增补了自由电子激光器(FEL)和束线-束线相互作用的第五章。

加速器物理学是一门高度综合的课程,涉及荷电粒子在特殊设计的电磁场中运动并形成特殊用途束线的物理原理和技术应用的各个领域。本书第一章介绍各种类型加速器的基本原理和发展历史;第二章讲述回旋加速器的横向运动及其物理处理方法;第三章介绍同步辐射加速器和线型加速器的原理和设计方法;第四章讲述同步辐射现象和低辐射电子存储环的设计原理。全书的最后部分,提出了开发第四代光源的前景。

全书在每节末尾都专门设计了练习题,为了使解题变得较为容易,作者有意把题目细分为很多小题。这些题目的解题思路和最终结果除了使读者深入了解基本原理之外,还可使读者直接进入相关的设计领域。

## S. Y. Lee

美国印第安纳大学教授、美国物理学会集束物理学分会 (Division of Physics of Beams) 会员。长期从事加速器物理的教学和研究工作。研究工作包括集束冷却技术, 集束的非线性动力学特征, 同步辐射的自旋动力学, 空间电荷对集束性能的影响, 加速器设计原理, 电子存储环的设计, 集束不稳定的原因, 自由电子激光器, 集束的控制原理和技术, 加速器的应用。多年来除了给本科生讲授加速器物理和辅导加速器实验之外, 主要负责研究生的教学工作。

曾担任美国粒子加速器学院 (The United States Particle Accelerator School) 院长, 美国物理学会集束分会经济委员会成员, 物理学会提名委员会成员, 粒子加速器理事会项目评估委员会成员。

出版著作有: *Accelerator Physics*, *Spin Dynamics and Snakes in Synchrotrons*, *Space Charge Dominated Beams and Applications of High Brightness Beams*, *Beam Measurement* 等。

# 序 言

自 1999 年本书第一版出版以来,就一直被用作研究生水平的《加速器物理学》这门课的教材或教学参考书。来自同行和学生的质疑、批评和建议,使我受益匪浅。作为对有关建议的回应,在这次修订中,我采取了更易理解的表述方式并增加插图。

加速器物理学主要研究荷电粒子与电磁场的相互作用。加速器的应用几乎包括科学、技术、医学诊断、工业加工等等所有的领域。加速器科学家就是为了满足各种应用的特殊需求,发明出很多能够产生很优质束流的新颖的技术。

这本教科书是为已读过经典力学、电动力学、量子力学和统计力学等核心课程的研究生准备的。我将尽量减小数学的难度,把重点放在创新思想背后的基础物理上。这本教科书对学完了经典力学和电磁学的高年级大学生同样适用。对加速器物理的入门者来说,可从第二章的 2.1 节至 2.4 节入手,再读回旋运动和同步运动基础的 3.1 节至 3.2 节。接下去再读关于色差和集束不稳定性的 2.5 节、2.8 节和 3.7 节。读完这些小节的基础专题之后,再读第三章的 3.5 节、3.6 节、3.8 节所涉及的射频(RF)技术和线型加速器的基础物理。通常情况最基础的加速器物理课程到第四章电子存储环物理一节结束为止。

我采用了 Frenet-Serret 坐标系( $\hat{x}, \hat{s}, \hat{z}$ )来表示横向、纵向的径向出射方向,以及由右手规则形成的垂直方向的单位基矢: $\hat{z} = \hat{x} \times \hat{s}$ 。第二章各节中,除了(2.20)式讨论到 $\pm$ 号以外,我在推导回旋加速器的运动方程时,电荷都采用正号。如果你想求解加速器中电子的运动方程,那么 Hill 方程中有些项的正负号就要跟着变更。

根据线型加速器和同步辐射加速器的行业规定,两者的射频相

相差  $\frac{\pi}{2}$ :  $\phi_{\text{线型}} = \phi_{\text{同步}} - (\pi/2)$ 。为了与第三章的同步运动保持一致,我用同步辐射行业规范的射频相来描述 3.3 节的线型加速器的同步加速器方程。

这次修订中,又增补了自由电子激光器(FEL)和束线-束线相互作用两个专题(第五章)。2000 年,成功地演示了自放大自发辐射(SASE)的 FEL 的实验,许多光源实验室相继在 SASE 和高增益谐振发生器(HGHG)的概念基础上,提出开展第四代光源的研究工作。同样,高亮度 B 因子的成功,指出束线-束线相互作用在基础加速器物理的研究中仍然十分重要。这些活跃的研究工作,说明在加速器物理的教科书中补充这两个导介性的专题是恰当的。

最后,设计了一些求解特殊问题的家庭作业,为了减少解题中的难度,题目又细分为很多步骤。题目的答案往往就在每道作业的最后一步中出现,计算结果可用于加速器系统的实际设计工作中。我将非常感谢读者能对这一修订版再次提出评论和批评。

S. Y. Lee

Bloomington, Indiana, U. S. A.

2004 年 11 月

# 第一版序言

高能加速器的发展开始于 1911 年,亦即 Rutherford 发现原子里面的原子核的时候。从此之后,高压直流和射频加速器建立起来了,具有很高场质量的强场磁体也获得了,束线的横向和纵向的聚焦原理也发现了,高强度射频源也发明出来了,高真空技术有了长足发展,高强度(极化/非极向)的电子/离子源也得到了。此外,束线动力学和束线调控办法也发展得很快,如束线的注入、束线的集聚、束线的慢压缩和快压缩、束线的阻尼和束线的冷却、束线的不稳定反馈机制等都取得了重大的进展。加速器的发展,对粒子物理和核物理,对原子物理和分子物理,对凝聚态物理、生物物理、医学卫生、生物学和工业加工等诸多领域的大量突破性发现的影响是很明显的。

加速器物理和技术是一个逐步壮大的科学分支。随着技术的不断进步,集束物理学的研究使加速器的性能不断提高。Ⅱ类超导材料的进步促使强场磁体的发展。对撞机概念的发明开启了单粒子束和多粒子束动力学的研究和发展的前程。现在加速器的发展已经相当完善了。1930 年代,高能的测量单位是 MeV,1950 年代是 GeV,1990 年代已是 TeV 的好多倍了。未来的几十年里,质心能量甚至会达到  $10 \sim 100\text{TeV}$ 。1950 年代,每个脉冲强度含  $10^9$  个粒子。现在,AGS 的强度已经达到  $6 \times 10^{13}$  个质子/脉冲。我们正在探索每束强度达到  $10^{14}$  个质子的应用前景。20 世纪 70 年代,第一代同步辐射光源的同步辐射亮度大约是  $10^{12}$  个光子/ $[\text{s} \cdot \text{mm}^2 \cdot \text{mrad}^2 0.1\% (\Delta\lambda/\lambda)]$ 。现在亮度已达  $10^{21}$  个光子,经过努力,许多自由电子激光器(FEL)的研究目标已瞄准亮度为  $10^{29} \sim 10^{34}$  个光子。

这本教科书阐述的是基础加速器物理学,它是根据我在印第安纳大学给加速器物理研究生的讲课笔记和给美国粒子加速器学院

讲学的两门课的讲稿基础上写成的。这些素材,曾被用于 Indiana 大学加速器物理本科生从事毕业论文研究的预备性教材。本书共分四章,第一章讲述加速器发展的历史概况。第二章处理回旋加速器中的横向运动。第三章涉及同步运动,并对线型加速器作介绍。第四章讲述同步辐射现象和低辐射电子存储环的基本设计原理。由于本书是一本讲述基础加速器物理的教科书,诸如非线性集束动力学、集束的不稳定性等等专题,只是在第二、三章中简单地提了一下。

本书的注意力集中在推导相空间坐标的作用角变量,因为在理解集束不稳定现象和集束非线性动力学中,变换是基础,概念是根本。在同步加速器的设计中,弥散函数在粒子稳定性、集束性能和集束传送中的作用是十分重要的。第二章专门有很长的一节讨论弥散函数。这个函数在设计低辐射存储环串列中的作用同样是很重要的。

本书自始至终都采用 SI 单位制,我还使用工程上的习惯,用  $j = -i$  来表示虚数。每节都安排一定的练习,让学生使用专门的技巧求解加速器物理的问题。通过将每道题分解为很多步的办法,使求解变得容易起来。

加速器物理和技术,关系到很多学科领域,本书中对很多相关的学科都未作全面讨论:如线型加速器、感应式线型加速器、高亮度集束、集束不稳定性、非线性动力学、集束冷却物理学和技术、线型对撞机物理学、自由电子激光器、电子和离子源、散裂中子源、介子对撞机、高强度集束、真空技术、超导电性、磁体技术、仪器设备等等。不管怎么说,本书对基础加速器物理的理解为加速器物理和技术研究奠定了不可或缺的基础。

S. Y. Lee

Bloomington, Indiana, U. S. A.

1998 年 1 月

# Acknowledgments

I would like to thank students and colleagues, particularly D. Li, H. Huang, X. Kang, M. Ellison, K.M. Fung, M. Bai, A. Riabko, who helped me polish the lecture notes into a book form. I would like to thank S. Cousineau, C. Beltran, S. Breitzmann, W. Guo, X. Huang, V. Ranjbar, and Y. Zhang, who made many useful suggestions to this revised edition. I would like to thank Angela Bellavance for pointing out mis-prints during a USPAS program in 2001. During the course of this work, I have benefited greatly from the collaboration with Drs. David Caussyn, Y. Wang, D. Jeon, K.Y. Ng, Y. Yan and Prof. A. Chao. I owe special thanks to Margaret Dienes for editing the first edition of this book. I owe special thanks to Prof. Jau-Jiun Hsiao for making critical suggestions to the new chapter in this revised edition. The responsibility for all errors lies with me. Your comments and corrections will be highly appreciated.

# Contents

|          |                                                             |           |
|----------|-------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>1</b> | <b>Introduction</b>                                         | <b>1</b>  |
| I        | Historical Developments . . . . .                           | 4         |
| I.1      | Natural Accelerators . . . . .                              | 5         |
| I.2      | Electrostatic Accelerators . . . . .                        | 6         |
| I.3      | Induction Accelerators . . . . .                            | 6         |
| I.4      | Radio-Frequency (RF) Accelerators . . . . .                 | 9         |
| I.5      | Colliders and Storage Rings . . . . .                       | 17        |
| I.6      | Synchrotron Radiation Storage Rings . . . . .               | 18        |
| II       | Layout and Components of Accelerators . . . . .             | 19        |
| II.1     | Acceleration Cavities . . . . .                             | 19        |
| II.2     | Accelerator Magnets . . . . .                               | 20        |
| II.3     | Other Important Components . . . . .                        | 22        |
| III      | Accelerator Applications . . . . .                          | 23        |
| III.1    | High Energy and Nuclear Physics . . . . .                   | 23        |
| III.2    | Solid-State and Condensed-Matter Physics . . . . .          | 24        |
| III.3    | Other Applications . . . . .                                | 24        |
|          | Exercise . . . . .                                          | 24        |
| <b>2</b> | <b>Transverse Motion</b>                                    | <b>35</b> |
| I        | Hamiltonian for Particle Motion in Accelerators . . . . .   | 36        |
| I.1      | Hamiltonian in Frenet-Serret Coordinate System . . . . .    | 37        |
| I.2      | Magnetic Field in Frenet-Serret Coordinate System . . . . . | 39        |
| I.3      | Equation of Betatron Motion . . . . .                       | 41        |
| I.4      | Particle Motion in Dipole and Quadrupole Magnets . . . . .  | 41        |
|          | Exercise . . . . .                                          | 42        |
| II       | Linear Betatron Motion . . . . .                            | 47        |
| II.1     | Transfer Matrix and Stability of Betatron Motion . . . . .  | 47        |
| II.2     | Courant-Snyder Parametrization . . . . .                    | 51        |
| II.3     | Floquet Transformation . . . . .                            | 52        |

|       |                                                                        |     |
|-------|------------------------------------------------------------------------|-----|
| II.4  | Action-Angle Variable and Floquet Transformation . . . . .             | 57  |
| II.5  | Courant-Snyder Invariant and Emittance . . . . .                       | 60  |
| II.6  | Stability of Betatron Motion: A FODO Cell Example . . . . .            | 65  |
| II.7  | Symplectic Condition . . . . .                                         | 66  |
| II.8  | Effect of Space-Charge Force on Betatron Motion . . . . .              | 67  |
|       | Exercise . . . . .                                                     | 73  |
| III   | Effect of Linear Magnet Imperfections . . . . .                        | 85  |
| III.1 | Closed-Orbit Distortion due to Dipole Field Errors . . . . .           | 85  |
| III.2 | Extended Matrix Method for the Closed Orbit . . . . .                  | 91  |
| III.3 | Application of Dipole Field Error . . . . .                            | 92  |
| III.4 | Quadrupole Field (Gradient) Errors . . . . .                           | 101 |
| III.5 | Basic Beam Observation of Transverse Motion . . . . .                  | 105 |
| III.6 | Application of quadrupole field error . . . . .                        | 108 |
| III.7 | Transverse Spectra . . . . .                                           | 110 |
| III.8 | Beam Injection and Extraction . . . . .                                | 115 |
| III.9 | Mechanisms of emittance dilution and diffusion . . . . .               | 117 |
|       | Exercise . . . . .                                                     | 121 |
| IV    | Off-Momentum Orbit . . . . .                                           | 129 |
| IV.1  | Dispersion Function . . . . .                                          | 129 |
| IV.2  | $\mathcal{H}$ -Function, Action, and Integral Representation . . . . . | 133 |
| IV.3  | Momentum Compaction Factor . . . . .                                   | 136 |
| IV.4  | Dispersion Suppression and Dispersion Matching . . . . .               | 139 |
| IV.5  | Achromat Transport Systems . . . . .                                   | 141 |
| IV.6  | Transport Notation . . . . .                                           | 143 |
| IV.7  | Experimental Measurements of Dispersion Function . . . . .             | 145 |
| IV.8  | Transition Energy Manipulation . . . . .                               | 146 |
|       | A. $\gamma_t$ jump schemes . . . . .                                   | 146 |
|       | B. Flexible momentum compaction (FMC) lattices . . . . .               | 149 |
|       | C. Other similar FMC modules . . . . .                                 | 155 |
|       | D. FMC in double-bend (DB) lattices . . . . .                          | 156 |
| IV.9  | Minimum $\langle \mathcal{H} \rangle$ Modules . . . . .                | 157 |
|       | Exercise . . . . .                                                     | 161 |
| V     | Chromatic Aberration . . . . .                                         | 172 |
| V.1   | Chromaticity Measurement and Correction . . . . .                      | 173 |
| V.2   | Nonlinear Effects of Chromatic Sextupoles . . . . .                    | 178 |
| V.3   | Chromatic Aberration and Correction . . . . .                          | 178 |
| V.4   | Lattice Design Strategy . . . . .                                      | 183 |
|       | Exercise . . . . .                                                     | 184 |
| VI    | Linear Coupling . . . . .                                              | 186 |
| VI.1  | The Linear Coupling Hamiltonian . . . . .                              | 186 |
| VI.2  | Effects of an isolated Linear Coupling Resonance . . . . .             | 189 |
| VI.3  | Experimental Measurement of Linear Coupling . . . . .                  | 193 |

|          |                                                            |            |
|----------|------------------------------------------------------------|------------|
| VI.4     | Linear Coupling Correction with Skew Quadrupoles . . . . . | 196        |
| VI.5     | Linear Coupling Using Transfer Matrix Formalism . . . . .  | 197        |
|          | Exercise . . . . .                                         | 197        |
| VII      | Nonlinear Resonances . . . . .                             | 202        |
| VII.1    | Nonlinear Resonances Driven by Sextupoles . . . . .        | 202        |
| VII.2    | Higher-Order Resonances . . . . .                          | 209        |
| VII.3    | Nonlinear Detuning from Sextupoles . . . . .               | 211        |
| VII.4    | Betatron Tunes and Nonlinear Resonances . . . . .          | 212        |
|          | Exercise . . . . .                                         | 213        |
| VIII     | Collective Instabilities and Landau Damping . . . . .      | 216        |
| VIII.1   | Impedance . . . . .                                        | 216        |
| VIII.2   | Transverse Wave Modes . . . . .                            | 220        |
| VIII.3   | Effect of Wakefield on Transverse Wave . . . . .           | 221        |
| VIII.4   | Frequency Spread and Landau Damping . . . . .              | 225        |
|          | Exercise . . . . .                                         | 228        |
| IX       | Synchro-Betatron Hamiltonian . . . . .                     | 232        |
|          | Exercise . . . . .                                         | 237        |
| <b>3</b> | <b>Synchrotron Motion</b> . . . . .                        | <b>239</b> |
| I        | Longitudinal Equation of Motion . . . . .                  | 240        |
| I.1      | The Synchrotron Hamiltonian . . . . .                      | 244        |
| I.2      | The Synchrotron Mapping Equation . . . . .                 | 245        |
| I.3      | Evolution of Synchrotron Phase-Space Ellipse . . . . .     | 246        |
| I.4      | Some Practical Examples . . . . .                          | 247        |
| I.5      | Summary of Synchrotron Equations of Motion . . . . .       | 248        |
|          | Exercise . . . . .                                         | 249        |
| II       | Adiabatic Synchrotron Motion . . . . .                     | 251        |
| II.1     | Fixed Points . . . . .                                     | 252        |
| II.2     | Bucket Area . . . . .                                      | 253        |
| II.3     | Small-Amplitude Oscillations and Bunch Area . . . . .      | 255        |
| II.4     | Small-Amplitude Synchrotron Motion at the UFP . . . . .    | 258        |
| II.5     | Synchrotron Motion for Large-Amplitude Particles . . . . . | 259        |
| II.6     | Experimental Tracking of Synchrotron Motion . . . . .      | 261        |
|          | Exercise . . . . .                                         | 263        |
| III      | RF Phase and Voltage Modulations . . . . .                 | 268        |
| III.1    | Normalized Phase-Space Coordinates . . . . .               | 268        |
| III.2    | RF Phase Modulation and Parametric Resonances . . . . .    | 271        |
| III.3    | Measurements of Synchrotron Phase Modulation . . . . .     | 277        |
| III.4    | Effects of Dipole Field Modulation . . . . .               | 280        |
| III.5    | RF Voltage Modulation . . . . .                            | 288        |
| III.6    | Measurement of RF Voltage Modulation . . . . .             | 295        |
|          | Exercise . . . . .                                         | 297        |

|        |                                                                       |     |
|--------|-----------------------------------------------------------------------|-----|
| IV     | Nonadiabatic and Nonlinear Synchrotron Motion . . . . .               | 301 |
| IV.1   | Linear Synchrotron Motion Near Transition Energy . . . . .            | 302 |
| IV.2   | Nonlinear Synchrotron Motion at $\gamma \approx \gamma_T$ . . . . .   | 305 |
| IV.3   | Beam Manipulation Near Transition Energy . . . . .                    | 308 |
| IV.4   | Synchrotron Motion with Nonlinear Phase Slip Factor . . . . .         | 309 |
| IV.5   | The QI Dynamical Systems . . . . .                                    | 312 |
|        | Exercise . . . . .                                                    | 315 |
| V      | Beam Manipulation in Synchrotron Phase Space . . . . .                | 317 |
| V.1    | RF Frequency Requirements . . . . .                                   | 318 |
| V.2    | Capture and Acceleration of Proton and Ion Beams . . . . .            | 320 |
| V.3    | Bunch Compression and Rotation . . . . .                              | 322 |
| V.4    | Debunching . . . . .                                                  | 326 |
| V.5    | Beam Stacking and Phase Displacement Acceleration . . . . .           | 326 |
| V.6    | Double rf Systems . . . . .                                           | 327 |
| V.7    | The Barrier RF Bucket . . . . .                                       | 334 |
|        | Exercise . . . . .                                                    | 340 |
| VI     | Fundamentals of RF Systems . . . . .                                  | 343 |
| VI.1   | Pillbox Cavity . . . . .                                              | 343 |
| VI.2   | Low Frequency Coaxial Cavities . . . . .                              | 345 |
| VI.3   | Beam Loading . . . . .                                                | 353 |
| VI.4   | Beam Loading Compensation and Robinson Instability . . . . .          | 356 |
|        | Exercise . . . . .                                                    | 359 |
| VII    | Longitudinal Collective Instabilities . . . . .                       | 362 |
| VII.1  | Longitudinal Spectra . . . . .                                        | 363 |
| VII.2  | Collective Microwave Instability in Coasting Beams . . . . .          | 367 |
| VII.3  | Longitudinal Impedance . . . . .                                      | 369 |
| VII.4  | Microwave Single Bunch Instability . . . . .                          | 373 |
|        | Exercise . . . . .                                                    | 381 |
| VIII   | Introduction to Linear Accelerators . . . . .                         | 383 |
| VIII.1 | Historical Milestones . . . . .                                       | 383 |
| VIII.2 | Fundamental Properties of Accelerating Structures . . . . .           | 387 |
|        | A. Transit time factor . . . . .                                      | 387 |
|        | B. Shunt impedance . . . . .                                          | 388 |
|        | C. The quality factor Q . . . . .                                     | 388 |
| VIII.3 | Particle Acceleration by EM Waves . . . . .                           | 389 |
|        | A. EM waves in a cylindrical wave guide . . . . .                     | 390 |
|        | B. Phase velocity and group velocity . . . . .                        | 391 |
|        | C. TM modes in a cylindrical pillbox cavity . . . . .                 | 392 |
|        | D. Alvarez structure . . . . .                                        | 395 |
|        | E. Loaded wave guide chain and the space harmonics . . . . .          | 396 |
|        | F. Standing wave, traveling wave, and coupled cavity linacs . . . . . | 399 |
|        | G. HOMs . . . . .                                                     | 401 |

|          |                                                            |            |
|----------|------------------------------------------------------------|------------|
| VIII.4   | Longitudinal Particle Dynamics in a Linac                  | 402        |
| VIII.5   | Transverse Beam Dynamics in a Linac                        | 407        |
|          | Exercise                                                   | 410        |
| <b>4</b> | <b>Physics of Electron Storage Rings</b>                   | <b>417</b> |
| I        | Fields of a Moving Charged Particle                        | 422        |
| I.1      | Non-relativistic Reduction                                 | 424        |
| I.2      | Radiation Field for Particles at Relativistic Velocities   | 424        |
| I.3      | Frequency and Angular Distribution                         | 427        |
| I.4      | Quantum Fluctuation                                        | 433        |
|          | Exercise                                                   | 435        |
| II       | Radiation Damping and Excitation                           | 437        |
| II.1     | Damping of Synchrotron Motion                              | 438        |
| II.2     | Damping of Betatron Motion                                 | 441        |
| II.3     | Damping Rate Adjustment                                    | 445        |
| II.4     | Radiation Excitation and Equilibrium Energy Spread         | 448        |
| II.5     | Radial Bunch Width and Distribution Function               | 453        |
| II.6     | Vertical Beam Width                                        | 455        |
| II.7     | Radiation Integrals                                        | 456        |
| II.8     | Beam Lifetime                                              | 456        |
|          | Exercise                                                   | 462        |
| III      | Emittance in Electron Storage Rings                        | 466        |
| III.1    | Emittance of Synchrotron Radiation Lattices                | 467        |
|          | A. FODO cell lattice                                       | 467        |
|          | B. Double-bend achromat (Chasman-Green lattice)            | 469        |
|          | C. Minimum $\langle \mathcal{H} \rangle$ -function lattice | 473        |
|          | D. Minimizing emittance in a combined function DBA         | 475        |
|          | E. Three-bend achromat                                     | 476        |
| III.2    | Insertion Devices                                          | 478        |
| III.3    | Beam Physics of High Brightness Storage Rings              | 486        |
|          | Exercise                                                   | 489        |
| <b>5</b> | <b>Special Topics in Beam Physics</b>                      | <b>497</b> |
| I        | Free Electron Laser (FEL)                                  | 498        |
| I.1      | Small Signal Regime                                        | 500        |
| I.2      | Interaction of the Radiation Field with the Beam           | 506        |
| I.3      | Experiments on High Gain FEL Generation                    | 509        |
|          | Exercise                                                   | 510        |
| II       | Beam-Beam Interaction                                      | 513        |
| II.1     | The beam-beam force                                        | 517        |
| II.2     | The Coherent Beam-Beam Effects                             | 519        |
| II.3     | Nonlinear Beam-Beam Effects                                | 521        |