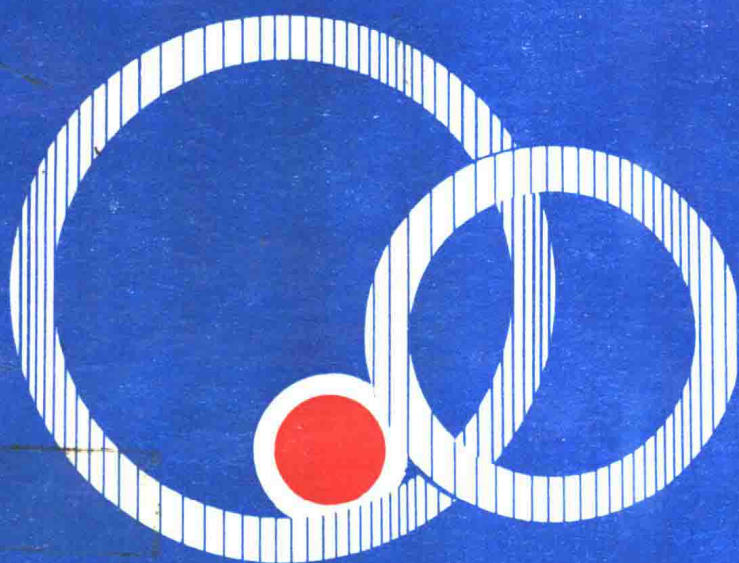


荷电粒子加速器原理

桂伟燮 编
陈佳洱 审



清华大学出版社

荷电粒子加速器原理

桂伟燮 编

陈佳洱 审

清华大学出版社

内 容 简 介

本书系统地对各种荷电粒子加速器进行分类和剖析,着重从物理原理上对各种典型加速器的工作原理、粒子轨道稳定性进行定性和适度定量的讨论,使读者得以从整体上对各类加速器的共同的内在联系,以及由于所采用技术上的差异所带来的各自在粒子加速运动中的特征、结构特点和性能特点有较为清晰的了解。书中对加速器的最新进展也有所反映。

本书可作为加速器及相关专业本科生和研究生的主要教材,也可供有关科技人员学习参考。

(京)新登字 158 号

荷电粒子加速器原理

桂伟燮 编

陈佳洱 审

☆

清华大学出版社出版

北京 清华园

清华大学印刷厂印刷

新华书店总店科技发行所发行

☆

开本:787×1092 1/16 印张:18 字数:423 千字

1994 年 3 月第 1 版 1994 年 3 月第 1 次印刷

印数:0001—1500

ISBN 7-302-01376-4/TL·4

定价:8.30 元

前 言

20 世纪开始,世界进入了原子能时代。作为探索微观世界不可缺少的重要工具,加速器应运而生;随后,从 30 年代开始,加速器品种日新月异,技术不断翻新,规模由初期和中期的小型 and 中型实验室规模,发展到近代的大型国家实验室规模,以至于超大型国际联合实验室规模,能量由早期几百 keV,跃增至近 10^{13} keV 水平。时至今日,加速器技术的发展,仍然方兴未艾。加速器的应用范围,除了原子核、基本粒子及核能利用研究外,也广泛地扩展到工农业、生物医学、地质采矿、材料科学,以及国防军事科学等多种领域。

在我国,加速器事业起步于 50 年代中后期,至今已初具规模。与国际水平相当的各类医用、工业用低能加速器先后研制成功,成百台各类加速器正在运行,一支精干的加速器设计、加工建造和调试运行的科技队伍已经形成。尤其是,近年北京高能物理研究所的高能正、负电子对撞机,兰州近代物理研究所的中能重离子等时回旋加速器,以及合肥中国科技大学的中能电子同步辐射装置等我国三大加速器工程的相继建成,更标志我国的加速器科学技术已达到一个新的水平。

在国内外,全面系统地、深入浅出地论述加速器原理的专著甚为少见。50 年代末,我们选用苏联专家格林别格所著“加速器物理基础”一书,作为加速器课程的主要教材。此书虽具有这方面的特色,但由于时代的局限,内容已嫌陈旧。1963 年起,着手自编教材“带电粒子加速器原理”一书,已出版上册和中册,后因十年动乱而停止。70 年代末、80 年代初,由徐建铭编著的“加速器原理”一书,不失为一本好书,我们曾选之为主要教学参考书。

作者在多年授课中,不局限于将一种一种加速器分隔开来介绍的模式,而着重于依据各类加速器内部本质的联系,逐步探索并形成全面而系统地、综合而“规一化”地论述粒子加速原理的新体系。这与具有完整体系的“电机学”那样综合描述五花八门的各式电机的基本原理相比,有类同之处。本书就是在这种思想指导下构思编写而成的。

书中以不同类型电场对荷电粒子的加速作用、磁场对荷电粒子的导向、聚束作用为主干线,对加速器进行分类和剖析,着重从物理原理上对各种典型加速器的工作原理、粒子运动轨道稳定性等进行定性和适度定量的讨论,从而使读者得以在整体上理解不同类加速器之间共同的内在联系,并对各类典型加速器的特征,特别是粒子在加速过程中纵向和横向运动的特征、所采用电场和磁场技术上的特点、加速器总体结构布局上的特点以及提供粒子束性能上的特点等,有较为清晰的了解。书中对加速器的最新进展也有所反映。

作者在以往从事加速器教学实践中,曾直接受益于中国科学院谢家麟教授的亲自教学示范和指导。在酝酿和着手编写本书的过程中,又曾先后得到中科院高能所徐建铭教授、北京大学陈家洱教授、中国原子能院谢羲教授、西安交大徐式如教授以及中国粒子加速器学会理事顾本广教授等人的热情鼓励和支持,谨在此表示谢意。

本书可供加速器及相关专业本科生和研究生作为主要教材,也可供从事加速器研制和应用的有关科技人员学习参考。

由于加速器涉及的领域较广,作者学识有限,书中难免有错误和不当之处,望读者批评指教。

作 者

1993 年 4 月于清华大学

目 录

第一章 绪论	1
§ 1.1 加速器及其发展概况	1
§ 1.2 加速器作为辐射源的特点及其用途	4
§ 1.2.1 加速器作为辐射源的特点	5
§ 1.2.2 加速器的应用	5
§ 1.3 加速器的分类	7
§ 1.4 加速粒子的动力学特性参量	8
§ 1.4.1 速度和相对速度	8
§ 1.4.2 质量、能量和束流功率	8
§ 1.4.3 动量 P 和磁刚度 G	10
第一章习题	11
第二章 高压加速器	12
§ 2.1 高压加速器基本组成及原理	12
§ 2.1.1 高压加速器的组成机构及其作用	12
§ 2.1.1.1 加速粒子的产生和发射机构——离子源或电子枪	13
§ 2.1.1.2 粒子运动空间——含真空加速室的真空系统	13
§ 2.1.1.3 粒子加速机构——高压电极、电场系统	14
§ 2.1.1.4 粒子加速后的引用机构	15
§ 2.1.1.5 束流测量及反馈控制系统	15
§ 2.1.2 提高主体耐压的措施	15
§ 2.1.2.1 设置高压球壳	15
§ 2.1.2.2 采用高压气体——密封钢筒式结构	16
§ 2.1.2.3 采用均压措施	18
§ 2.1.2.4 加速管内部放电、击穿问题的进一步解决	21
§ 2.1.3 加速粒子横向稳定性	23
§ 2.1.4 粒子源	26
§ 2.1.4.1 基本要求	27
§ 2.1.4.2 电子枪	28
§ 2.1.4.3 离子源	30
§ 2.1.5 加速粒子的引用机构——电、磁偏转装置及靶室	32
§ 2.1.5.1 磁分析器	32
§ 2.1.5.2 静电分析器	33
§ 2.1.5.3 靶	33
§ 2.2 倍压加速器	34
§ 2.2.1 高压倍加器的倍压原理	35
§ 2.2.2 载荷状态下的电压波动及降落	37

§ 2.2.2.1 电压波动及降落的原理	37
§ 2.2.2.2 充放电循环过程分析	37
§ 2.2.2.3 电压波动及降落值的计算	38
§ 2.2.3 减少电压波动和降落的途径	41
§ 2.2.4 倍压加速器性能特点	43
§ 2.2.4.1 加速粒子种类	43
§ 2.2.4.2 能量特性	43
§ 2.2.4.3 流强特性和功率输出	44
§ 2.2.5 结构特点	44
§ 2.2.6 应用和发展现状	44
§ 2.2.7 其他倍压型高压发生器	45
§ 2.2.7.1 绝缘芯变压器	45
§ 2.2.7.2 高频高压发生器	45
§ 2.2.7.3 脉冲高压发生器	47
§ 2.3 静电加速器	48
§ 2.3.1 静电高压发生器的工作原理	48
§ 2.3.1.1 充电原理	50
§ 2.3.1.2 最大充电电流	51
§ 2.3.1.3 输电系统的改进	52
§ 2.3.2 静电加速器的性能特点	53
§ 2.3.2.1 加速粒子种类	53
§ 2.3.2.2 能量特性	53
§ 2.3.2.3 束流强度特性	54
§ 2.3.3 静电加速器结构特点	54
§ 2.3.4 发展现状和展望	54
§ 2.3.5 串列式静电加速器	54
§ 2.3.5.1 工作原理与发展概况	54
§ 2.3.5.2 负离子源和电子剥离器	56
第二章习题	57
第三章 感应加速器	58
§ 3.1 带电粒子在电磁场中的运动方程	58
§ 3.2 感应加速器工作原理	59
§ 3.3 电子在恒定轨道上加速的条件	61
§ 3.4 粒子的横向运动稳定性	63
§ 3.4.1 轴向运动稳定条件	63
§ 3.4.2 径向运动稳定条件	64
§ 3.4.3 横向振荡方程的解	66
§ 3.4.4 横向振荡的振荡能及振幅比	66
§ 3.4.5 加速过程中横向振荡的衰减	67
§ 3.4.6 磁场分布辐向不均匀时“封闭轨道”的畸变	70
§ 3.4.7 横向运动中的共振现象	71
§ 3.5 感应加速器中电子的入射和俘获过程	72

§ 3.5.1	动量差异引起“封闭轨道”的分散	73
§ 3.5.2	非平衡电子的“封闭轨道”的变化	73
§ 3.5.3	三种典型的入射俘获过程	75
§ 3.5.4	俘获电子束的极限强度	75
§ 3.6	电子的辐射效应对感应加速运动的影响	77
§ 3.7	感应加速器的性能特点	78
§ 3.7.1	加速粒子种类	78
§ 3.7.2	能量特性	78
§ 3.7.3	流强特性	78
§ 3.8	感应加速器的结构特点	78
§ 3.8.1	磁极和磁轭	78
§ 3.8.2	环形加速匣(室)	80
§ 3.8.3	电子枪	80
§ 3.8.4	束流偏移和引出装置	81
§ 3.9	现状和发展	81
第三章习题		81
第四章	回旋加速器	83
§ 4.1	经典回旋加速器	83
§ 4.1.1	发展由来——回旋共振加速方法的提出	83
§ 4.1.2	回旋加速器的工作原理	84
§ 4.1.2.1	回旋加速器的基础——拉摩定律	85
§ 4.1.2.2	共振加速条件	86
§ 4.1.2.3	加速粒子的能量	86
§ 4.1.2.4	加速粒子的轨道形状	87
§ 4.1.3	横向电磁聚焦作用	88
§ 4.1.3.1	轴向电聚焦力	88
§ 4.1.3.2	轴向磁聚焦力	91
§ 4.1.3.3	电磁总聚焦效应	91
§ 4.1.4	回旋加速器中的相移现象	92
§ 4.1.4.1	加速相位的定义	92
§ 4.1.4.2	中心区加速时的相聚现象	93
§ 4.1.4.3	回旋加速过程相移产生的原因	93
§ 4.1.4.4	保持常频回旋加速要求的准确共振磁场	94
§ 4.1.4.5	相移公式	94
§ 4.1.4.6	极限能量和阈电压	96
§ 4.1.5	结构特点	98
§ 4.1.5.1	磁铁系统	98
§ 4.1.5.2	D形电极和真空室	99
§ 4.1.5.3	偏转电极	101
§ 4.1.6	性能特点	102
§ 4.1.6.1	加速粒子种类	102
§ 4.1.6.2	能量特性	102

§ 4.1.6.3 束流强度	102
§ 4.1.7 发展现状	102
§ 4.2 等时性回旋加速器	103
§ 4.2.1 等时性条件	104
§ 4.2.2 径向扇型(托马斯型)回旋加速器	105
§ 4.2.2.1 磁场分布形式	105
§ 4.2.2.2 粒子的轨道形状和聚焦	106
§ 4.2.2.3 加速粒子能量的限制	108
§ 4.2.3 螺旋扇型回旋加速器	109
§ 4.2.3.1 磁场分布形式	109
§ 4.2.3.2 粒子轨道形状和聚焦	110
§ 4.2.3.3 粒子能量的限制	112
§ 4.2.4 分离扇型回旋加速器	112
§ 4.2.5 不同中心张角的 D 型电极在等时性回旋加速器中的应用	114
§ 4.2.6 发展现状	117
第四章习题	118
第五章 自动稳相式准共振加速器	119
§ 5.1 准共振加速条件及实现准共振加速的途径	120
§ 5.1.1 自动稳相式准共振加速器的共同特点	120
§ 5.1.2 准共振加速条件	121
§ 5.1.3 实现同步加速的不同途径	122
§ 5.2 自动稳相原理	126
§ 5.2.1 自动稳相基本原理及典型的相运动过程	126
§ 5.2.2 相振荡方程及相振荡规律	129
第五章习题	133
第六章 回旋型准共振加速器	134
§ 6.1 稳相加速器——频率调变法准共振加速器	134
§ 6.1.1 工作原理及调频规律	134
§ 6.1.2 相运动特点及最佳平衡相位	136
§ 6.1.2.1 入射相位	136
§ 6.1.2.2 稳定平衡相位为 $+\varphi$, 在 0° 到 90° 之间	136
§ 6.1.2.3 存在最佳平衡相位 φ^*	136
§ 6.1.3 结构特点	138
§ 6.1.4 性能特点	142
§ 6.1.5 现状和发展趋向	143
§ 6.2 电子回旋加速器——倍频系数调变法共振加速器	144
§ 6.2.1 工作原理	144
§ 6.2.2 共振加速条件及基本参数的选择	145
§ 6.2.3 相运动的特点	147
§ 6.2.4 结构特点	148
§ 6.2.4.1 电磁铁和真空室	148
§ 6.2.4.2 谐振腔和注入机构	149

§ 6.2.4.3 引出机构	149
§ 6.2.5 性能特点	150
§ 6.2.5.1 加速粒子种类	150
§ 6.2.5.2 能量特性	150
§ 6.2.5.3 束流强度特性	150
§ 6.2.6 发展概况	150
第七章 环型准共振加速器	153
§ 7.1 同步加速器——磁场调变法准共振加速器	153
§ 7.1.1 工作原理及同步加速条件	153
§ 7.1.2 磁场、频率调节规律	155
§ 7.1.2.1 调磁规律	155
§ 7.1.2.2 调频规律	156
§ 7.1.3 相运动的特点	157
§ 7.1.3.1 稳定平衡相位落在 0° — 90° 之间	157
§ 7.1.3.2 最佳平衡相位 φ^*	157
§ 7.1.3.3 辐射损失对相运动的影响	157
§ 7.1.4 同步加速器的起动(或预加速)问题	158
§ 7.1.4.1 电子同步加速器的起动	158
§ 7.1.4.2 质子同步加速器的起动	159
§ 7.1.5 结构特点	159
§ 7.1.5.1 电磁铁	159
§ 7.1.5.2 加速系统	160
§ 7.1.5.3 粒子束的引用系统	161
§ 7.1.6 性能特点	162
§ 7.1.6.1 加速粒子种类	162
§ 7.1.6.2 能量特性	162
§ 7.1.6.3 束流强度特性	162
§ 7.1.7 发展概况和实例	162
§ 7.1.7.1 电子同步加速器	162
§ 7.1.7.2 质子同步加速器	163
§ 7.2 强聚焦原理及其在环型加速器中的应用	165
§ 7.2.1 强聚焦原理及光学模型	165
§ 7.2.2 强聚焦四极透镜系统	168
§ 7.2.3 强聚焦同步加速器	171
§ 7.2.3.1 粒子在交变梯度磁场中的运动方程及其转换矩阵	172
§ 7.2.3.2 交变梯度聚焦运动方程的两个独立的周期性解	174
§ 7.2.3.3 周期聚焦系统的稳定性条件和稳定区图	175
§ 7.2.3.4 强聚焦环型加速器中的共振现象	176
§ 7.2.3.5 强聚焦环型加速器中的跳相现象及临界能量	178
§ 7.2.3.6 强聚焦同步加速器的结构特点和性能特点	181
§ 7.2.3.7 发展概况	183
§ 7.2.4 增强器	185

§ 7.2.5 储存环	187
§ 7.2.6 同步辐射光源	189
§ 7.2.7 对撞机	192
§ 7.2.7.1 对撞原理	193
§ 7.2.7.2 对撞机的实施方案	194
§ 7.2.7.3 对撞亮度	195
§ 7.2.7.4 发展现状和实例	196
第七章习题	201
第八章 直线型准共振加速器	202
§ 8.1 驻波直线共振加速器	204
§ 8.1.1 漂移管式驻波直线加速器结构及基本原理	204
§ 8.1.2 共振加速条件及漂移管长度的变化规律	205
§ 8.1.3 相运动的特点及其与束流聚焦的矛盾	206
§ 8.1.4 均匀单周期加速结构	206
§ 8.1.4.1 单周期结构的色散关系	207
§ 8.1.4.2 单周期加速结构内在的效率和稳定性之间的矛盾	208
§ 8.1.5 第二代驻波加速结构——双周期结构	209
§ 8.1.5.1 轴耦合结构	210
§ 8.1.5.2 边耦合结构	211
§ 8.1.5.3 环耦合结构	211
§ 8.1.5.4 盘圈加速结构	212
§ 8.1.5.5 驻波加速腔腔形的优化	213
§ 8.1.6 双周期驻波加速器相运动特点及纵向动力学计算	215
§ 8.1.7 双周期驻波加速器粒子束的聚焦及横向动力学计算	217
§ 8.1.8 交插式高梯度边耦合结构	218
§ 8.1.9 驻波直线加速器的性能特点	219
§ 8.1.10 发展概况和实例	220
§ 8.2 行波直线加速器	222
§ 8.2.1 行波加速原理	223
§ 8.2.2 同步加速条件	224
§ 8.2.3 电磁波在自由空间及光滑波导中的传播	225
§ 8.2.3.1 电磁波在无限自由空间中的传播	225
§ 8.2.3.2 电磁波在光滑波导中的传播	226
§ 8.2.4 盘荷波导慢波结构	228
§ 8.2.4.1 盘荷波导基本结构和作用	228
§ 8.2.4.2 延迟线和盘荷波导的类比	228
§ 8.2.4.3 传播慢波的边界条件及在盘荷波导中的体现	230
§ 8.2.4.4 盘荷波导加速管的某些高频特性	232
§ 8.2.5 相运动的特点及对聚束段的要求	233
§ 8.2.5.1 稳定平衡相位落在波前侧	233
§ 8.2.5.2 随着粒子速度趋近光速相运动趋于停滞	233
§ 8.2.5.3 相会聚任务的提出及聚束段的作用	234

§ 8.2.6 径向运动——横向稳定性和聚束问题的解决	236
§ 8.2.6.1 相稳定性和聚焦的矛盾	236
§ 8.2.6.2 各种径向力的分析	237
§ 8.2.6.3 外加纵向磁场的聚焦作用及临界磁场强度	240
§ 8.2.7 性能特点	242
§ 8.2.7.1 加速粒子种类	242
§ 8.2.7.2 能量特性	242
§ 8.2.7.3 束流强度	243
§ 8.2.8 发展概况和实例	243
§ 8.2.9 螺旋线波导慢波结构——离子行波直线加速器	245
§ 8.3 射频四极场加速器(RFQ)	246
第九章 粒子加速技术发展的回顾和展望	248
§ 9.1 由加速器发展的回顾看不同加速器的内在联系	248
§ 9.2 当前国际上加速器发展的趋势	250
§ 9.3 尚在探索中的新型加速器原理	251
§ 9.4 一项崭新的加速器高科技的崛起——自由电子激光器 FEL	252
§ 9.5 国内加速器发展的展望	254
附录	256
I. 回旋加速器和稳相加速器中粒子在中心区域的运动方程	256
II. 粒子加速周期和能量间关系的推导	258
III. 相迹方程 $\varphi(\varphi)$ 的推导	260
IV. 电子回旋加速器的相运动方程的推导	261
V. 周期聚焦系统参数 μ 的表示式	263
VI. 非平衡粒子封闭轨道系数 α_L 的计算	265
VII. 相对运动粒子间有效作用能的推导	269
VIII. 幅向运动方程与磁场的面平均值 $\bar{B}_z$ 关系式的推导	270
本书主要符号一览表	272
参考文献	274

第一章 绪 论

§ 1.1 加速器及其发展概况

加速器全名为“荷电粒子加速器”,是使带电粒子在高真空中受磁场力控制、电场力加速而达到高能量的特种电磁、高真空装置,是人为地提供各种高能粒子束或辐射线的现代化装备。

高能量的中性粒子束或 X 射线,可通过高能量带电粒子束打靶后产生的核反应或韧致辐射效应,间接地获得。

实际上,在被加速粒子能量足够高时,例如高于静止能量的 4 至 5 倍以上,加速过程中粒子运动速度的变化愈来愈不明显,此时再冠以“加速器”的名称已不甚确切,如果改称为“粒子加能器”则更名副其实。但是,“加速器”的名称早已为人们普遍接受,我们则应对其作正确的理解。

加速器的水平如何,是一个国家科学技术发展水平的标志之一。以当前世界上位居前沿的 $5 \times 10^{11} \text{eV}$ 的强聚焦质子同步加速器为例,质子在周长为 6km 多、磁场周期性变化的轨道上加速运动约 20 万圈,总路程长约 120 万 km,相当于绕地球 30 圈,这就不仅要有高度精确的理论计算,而且要有高水平的生产技术。建造这类加速器,需要综合运用高水平的真空技术、高水平的电磁场和高频技术、高水平的自动控制和测量技术以及高水平的精加工和安装技术等等。这样一台加速器的峰值励磁功率达 10^8VA 上下,平均功率 $3.6 \times 10^7 \text{W}$,磁体铁重达 10^7kg 上下,铜重也在 10^6kg 以上,其规模之大可想而知。

即便是一台小型的加速器,也是多种先进技术的综合体现。

加速器的发展史与核物理的发展史有着不可分割的紧密联系。加速器的发展又依赖于工业技术的水平。从本世纪 20 年代提出建造加速器的要求开始,至今 60 余年,加速器技术有了惊人的巨大发展,加速器的发展和推广应用,又对科技各领域和工农业生产各个方面在很大程度上起了推动作用。

我们可以把加速器的发展大致分为早期、中期、近期三个阶段。

一、早期

1919 年,英国物理学家卢瑟福(Rutherford)第一次用镭 RaC' (即钋的同位素 $^{214}_{84}\text{Po}$) 放射的 α 射线发现核反应 $^{14}_7\text{N}(\alpha, P)^{17}_8\text{O}$ 之后,提出了用人工方法加速带电粒子的设想和要求。

1926 年,美国古里奇(Coolidge)用三个 X 光管串联获 $9 \times 10^5 \text{eV}$ 的电子束。

1931 年,美国范德格拉夫(Vandegraff)建成 $1.5 \times 10^6 \text{eV}$ 静电高压加速器。到目前为止,同类加速器能量已提高一个量级。

1932 年,英国科克劳夫特(Cockcroft)和华尔顿(Walton)建成 $7 \times 10^5 \text{eV}$ 高压倍加器。

至今,同类加速器能量已达 $4 \times 10^6 \text{eV}$ 。

1932年,美国劳伦斯(Lawrence)建成 $1.22 \times 10^6 \text{eV}$ 回旋加速器。之后同类的共振加速器,能量提高了一个量级。

1940年,美国科斯特(Kerst)设计了 $2.3 \times 10^6 \text{eV}$ 电子感应加速器,它是环形轨道加速器的先驱。后来建成的最大的感应加速器,能量达 $3.15 \times 10^6 \text{eV}$,该类加速器的合理能量范围以低于 $5 \times 10^7 \text{eV}$ 为宜。

在这期间,早期直线共振加速器也曾被研制,但未获进一步发展。

二、中期

1944至1945年间,美国姆克米兰(Mcmillan)和苏联的维克斯勒(В. И. Векслер)先后几乎同时独立地发现了准共振加速器以之为基础的“自动稳相原理”,使各类准共振加速器在近似共振的回旋加速器的基础上迅速地向前推进。

1946年,第一台稳相加速器在美国伯克利(Berkley)建成,获能量为 $1.9 \times 10^8 \text{eV}$ 的氘核和 $3.8 \times 10^8 \text{eV}$ 的 α 粒子。至60年代,该类加速器的最高能量被提高到 10^9eV 。

1947年,美国综合电气研究实验室率先建成 $7 \times 10^7 \text{eV}$ 电子同步加速器。往后该类同步加速器的最高加速能量被提高到 $1.2 \times 10^9 \text{eV}$ 水平。

1952年,美国布鲁克海文(Brookhaven)国家实验室最早建成能量为 $3 \times 10^9 \text{eV}$ 的质子同步加速器(即同步稳相加速器),定名为“宇宙加速器”(Cosmotron)。至1958年,苏联把该类加速器能量提高到 10^{10}eV 水平,轨道半径为28m,磁铁重量达 $3.6 \times 10^7 \text{kg}$,是迄今为止世界上最重的加速器。

与此同时,在二次世界大战后,随着雷达技术的发展,高频和微波技术有了很大发展,驻波型和行波型的直线共振加速器也有了新的突破。

1947年,美国伯克利实验室在阿尔伐瑞兹(Alvarez)领导下建成 $3.2 \times 10^7 \text{eV}$ 质子驻波直线加速器。至今,该类加速器最高加速能量提高至 $6 \times 10^8 \text{eV}$ 水平。

最早的电子行波直线加速器是在英国 Harwell 建成的,能量为4MeV。60年代初,英国最先将电子直线加速器用于癌症治疗。随后,美国致力于该类加速器的研制,斯坦福(Stanford)电子直线加速器中心,于1966年建成能量为 $2.2 \times 10^{10} \text{eV}$ 的电子行波直线加速器,加速器总长达3km,是迄今能量最高的直线共振加速器。

三、近期

1952年,美国布鲁克海文国家实验室古兰特(Courant)、里文斯顿(Livingston)、斯内德(Snyder)等人提出了交变梯度聚焦(AG聚焦, Alternating Gradient Focusing)的原理,受到人们的重视。这以前,一位希腊工程师克利斯多非勒斯(N. C. Christofilos)早于1950年就已写出了一份未发表的名为“磁共振加速器中离子和电子的聚焦系统”的报告,阐述了强聚焦原理。之后他应邀赴美国,与里文斯顿等人合作进行了强聚焦同步加速器的研究。

1959年,日内瓦西欧原子核研究中心(CERN)最早建成 $30 \times 10^9 \text{eV}$ 强聚焦质子同步加速器。1972年,美国建成 $500 \times 10^9 \text{eV}$ 强聚焦质子同步加速器,西欧中心则于1976年建成能量为 $400 \times 10^9 \text{eV}$ 的同类加速器,简称SPS。上述两台加速器自建成起,直至80年代末,长期保持其最高能量加速器的世界领先地位。至今,应用强聚焦原理的电子同步加速

器,最高能量则可达 $12 \times 10^9 \text{eV}$ 。

60 年代末至 70 年代初,人们进一步创造性地运用相对论原理的粒子对撞机得到了迅速发展,这使提供给粒子的有效作用能量得以提高几个数量级之多。最早的对撞机是意大利于 1969 年建成的,它是一台名为 ADONE 的直线加速器型电子对撞机,加速的电子能量为 $1.5 \times 10^9 \text{eV}$ 。美、法等国随后建成同类对撞机。70 年代初期,苏联、西德等国率先相继建成能量更高的电子同步加速器型对撞机。

至今,世界上最高能量的直线型电子对撞机是美国 Stanford 的电子对撞机 SLAC,能量为 $2 \times 50 \times 10^9 \text{eV}$,它是在原有 $22 \times 10^9 \text{eV}$ 直线加速器基础上,增设能量倍增系统改建而成的。

世界上最大的同步加速器型电子对撞机是西欧核子研究中心 CERN 于 1989 年末建成的 LEP。正、负电子能量为 $50 \times 10^9 \text{eV}$,加速器周长为 27km。

最早出现的质子对撞机是 CERN 于 1971 年建成的质子同步加速器型对撞机 ISR,加速能量为 $32.6 \times 10^9 \text{eV}$ 。在此基础上,CERN 的 SPS 已被改建成正、负质子对撞机,今已运行十余年。

当今,对撞技术在世界范围正方兴未艾,蓬勃发展。

与此同时,超导技术的研究和应用,受到了广泛的重视。为了减少高能加速器的重量,缩减轨道尺寸,降低耗电功率,科技工作者正致力于用超导磁体取代笨重的电磁铁。

1987 年春,超导研究获得了新的突破,高温超导新材料的研制得到了令人鼓舞的进展,为超高能加速器的发展投下了希望之光。

西欧核子研究中心计划在 LEP 上,用超导腔代替常规的加速腔,从而将电子加速能量由 $50 \times 10^9 \text{eV}$ 提高到 $100 \times 10^9 \text{eV}$ 水平。

世界上第一台采用超导磁体的高能质子同步加速器,是美国费米实验室的 Tevatron,它是在原有 $500 \times 10^9 \text{eV}$ 加速器基础上改建而成的。超导磁体环放在原有的常规磁铁环下面。在此基础上,这台加速器又进一步被改建,成为世界上第一台超导正、负质子对撞机,已于 1981 年投入运行,至今已达能量为 $2 \times 900 \times 10^9 \text{eV}$,是目前世界上已经建成的最高能量的对撞机。

近期,美国又开始利用铌钛(临界温度为 4.5K)超导磁体建造一台超大型的超高能加速器,名为 SSC,即超导超大型对撞机,可以把质子和反质子加速到 $2 \times 20 \times 10^{12} \text{eV}$ 的能量。

在我国,加速器事业是随着原子能事业的发展,自 50 年代后期开始发展的。

1956 年以后清华、北大等某些高等院校相继设置加速器专业,或招收加速器研究生。

建立最早的加速器是科学院原子能所于 1955 年建成的 700keV 质子静电加速器。

1958 年开始,我国加速器事业进入新的发展阶段。

• 静电加速器:

1958 年科学院高能所 2.5MeV 质子静电加速器建成。

1961 年上海先锋电机厂开始试制并投产静电加速器。

• 倍压加速器:

1958 年清华大学建成 400keV 质子倍压加速器。

1964 年上海先锋厂开始试制并投产倍压加速器。

• 感应加速器:

1957—1958 年:清华、北大分别引进苏联造 25MeV 电子感应加速器。并自力更生研制 2.5MeV、10MeV 感应加速器。

60 年代初,一机部自动化所研制 25MeV 电子感应加速器取得成功,70 年代转由保定变压器厂投产。

• 电子回旋加速器:

1957 年前后,科学院开始研制电子回旋加速器。

1958—1959 年,清华大学 2.5MeV 电子回旋加速器出束。

70 年代末至 80 年代初一机部自动化所与清华大学、国家计量局合作研制 25MeV 电子回旋加速器成功。

• 电子直线加速器:

1964 年科学院高能所 30MeV 电子直线加速器建成。

1974—1975 年初:北京(北京医疗器械研究所、清华大学)、上海(上海医疗器械厂、高能所)各自研制的 10MeV 医用电子行波直线加速器相继成功出束。

1977 年:上述加速器通过鉴定后,北京医疗器械研究所、上海医疗器械厂、南京电子管厂、四川东风电机厂、四机部十二所开始小批量生产或研制医用和工业用电子行波直线加速器。

• 回旋加速器:

1958 年:原子能所自苏联引进磁极直径 $\phi 1.2\text{m}$ 回旋加速器。

60 年代初:先后由北京重型电机厂、上海先锋电机厂仿制 $\phi 1.2\text{m}$ 与 $\phi 1.5\text{m}$ 回旋加速器。

我国第一台筹建的高能加速器—— $50 \times 10^9\text{eV}$ 强聚焦质子同步加速器曾于 1977 年由高能所全面开展预制研究,后经计划调整,改为建造 $2 \times 2.8 \times 10^9\text{eV}$ 正负电子对撞机,1988 年秋宣告建成。原设计作为注入器的 30MeV 质子直线加速器,则仍按期于 1986 年建成。

我国最早起步的同步辐射加速器由 200MeV 电子直线加速器和 800MeV 储存环组成,由中国科技大学设计并建造,于 1989 年春建成出光。

兰州近代物理研究所用于加速重离子的分离扇型回旋加速器也已于 1988 年底建成。

清华大学、北京医疗器械研究所先后研制成不同类型的低能驻波加速器,供医疗或工业探伤、辐照应用。

§ 1.2 加速器作为辐射源的特点及其用途

加速器最初是应核物理实验的需要而发展起来的,随着微观世界研究的不断深入,加速器的能量不断提高。

1932 年,科学家在宇宙线实验中第一次发现了一种新的基本粒子——正电子 e^+ ,随后又先后发现了一系列新的基本粒子——介子和超子,从而开辟了高能物理领域基本粒

子物理的新天地,加速器的能量也就向高能领域推进。

但至今,世界上已有的成千台加速器中,主要用于基本粒子物理基础研究的中、高能加速器只占极少数。在 10^8eV 以下低能加速器中,用于原子核和核工程研究方面的也只是小部分,大部分低能加速器都被广泛地用于放射化学、放射医学、放射生物学、材料科学及工农业各个方面。

§ 1.2.1 加速器作为辐射源的特点

比起同位素和宇宙线,加速器有下列一些优点:

1. 可提供的“核弹”(射线)种类多。

加速器可以提供各种预期的粒子流,专门设计的重离子加速器更能提供从氢到铀所有元素的不同能量的离子束,是其他辐射源无法达到的。

其他辐射源一般都只能产生有限的几种粒子或射线,如中子、 γ 射线、 β 粒子、 α 粒子等。

2. 粒子的能量可根据需要和可能在大范围内作不同的选择。不同能级可选择相应的不同类型的加速器。对既定的加速器还可实现对能量作连续、平滑的调节或分档调节。

3. 粒子流强度大,聚束性能好、效率高。

粒子流强度通常以单位时间所发射粒子的个数来量度,对于带电粒子,也可以单位时间内发射粒子的总电荷量(即电流单位)来表示。

轰击粒子束强度越大,靶核被命中的几率也就越大。核反应实验的效率和精度就越高。

一毫克纯镭,每秒钟向 4π 立体角放射的 α 粒子为 3.7×10^7 个,相当于 $1.2 \times 10^{-5} \mu\text{A}$ 。

而同样能级(兆电子伏)的加速器(静电加速器或回旋加速器)甚至可提供约为毫安级的束流,即每秒约 10^{15} 个 α 粒子的强度,相当于数十万克纯镭的放射强度。

低能加速器平均束流功率一般可达数 kW,大的可达 150kW,而 67 000Ci 的钴 60 的放射功率才相当于 1kW,因而一台 150kW 的加速器的辐射功率约相当于 10^7Ci 的钴 60。

由于加速器提供的束流聚焦性能好(束截面常可以平方毫米量度),也易于控制,利用率也就可以很高,达 70% 以上。

4. 安全可靠。

可在任何需要的时候开、停机。停机后即不再产生辐射,安全可靠,属于闭锁性放射设备。

§ 1.2.2 加速器的应用

1. 在原子核物理、中子物理和高能物理方面,利用多种粒子轰击原子核,通过观察原子核与其他基本粒子的变化和相互作用,来了解物质内部结构,探索微观世界的奥秘和规律。

2. 在原子能技术方面的应用有:

(1) 用加速器进行实验,提供设计所需的各种原子核的性质、参数等资料。