



普通高等教育“十一五”规划教材
21世纪高等学校创新教材

李端勇 余仕成 主编

大学物理学

D A X U E W U L I X U E

(下册)



科学出版社

www.sciencep.com

普通高等教育“十一五”规划教材

21 世纪高等学校创新教材

大学物理学(下)

李端勇 余仕成 主编

科学出版社

北 京

版权所有,侵权必究

举报电话:010-64030229;010-64034315;13501151303

内 容 简 介

本书分上、下两册,内容分五篇.第一篇力学;第二篇热学;第三篇电磁学;第四篇机械振动和机械波、波动光学;第五篇相对论与量子物理.

本书作为非物理专业的大学物理教材,各篇基本内容简明扼要,注重突出课程内容的现代化,基础和分层次教学的需要以及培养科学思维的创新能力;选读部分和科学家介绍通俗易懂,注重扩大学生的现代知识,拓展学生的学术襟怀和眼光.

本书可作为高等工科院校各专业和理科非物理学专业的大学物理课程用书,也可供其他专业选用和大学物理教师教学参考.

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学(下)/李端勇,余仕成主编. —北京:科学出版社,2010.8

普通高等教育“十一五”规划教材 21世纪高等学校创新教材

ISBN 978-7-03-028612-3

I. 大… II. ①李…②余… III. 物理学—高等学校—教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 158549 号

责任编辑:王雨舸 / 责任校对:董艳辉

责任印制:彭 超 / 封面设计:苏 波

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>

京山德兴印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2010年8月第 一 版 开本:B5(720×1000)

2010年8月第一次印刷 印张:20

印数:1—5 500

字数:392 000

定价:33.80 元

(如有印装质量问题,我社负责调换)

前 言

物理学以研究物质世界的基本规律和本质属性为己任. 物理学鞭辟入里的分析方法、高屋建瓴的思维模式、辩证唯物的认识论和世界观以及所展现出来的和谐、对称、统一的科学美,使得它自面世以来,就一直是自然科学的带头学科,技术科学的理论基础,是一切工程技术的坚实支柱,是创新思想的源泉. 物理学曾经是,现在是,将来也是全球技术和经济发展的主要驱动力. 它代表着一整套获得知识、组织知识和运用知识的有效方法和步骤. 由于物理学的普遍性、基本性以及与其他学科的相关性,在培养学生科学素质、科学思维方法及科学研究能力,尤其是在培养具有综合能力的创新人才方面起着其他学科不可替代的作用,这也就决定了大学物理学这一课程在高等教育中的地位.

本教材力求与教育部高等学校非物理类专业物理基础课程教学指导分委会关于《非物理类理工科大学物理课程教学基本要求》相适应. 它是编者在总结多年教材改革和教学实践的基础上,吸取当前国内出版的面向 21 世纪物理教材的先进思想和优秀教学改革成果,充分考虑一般工科本科院校学生的起点和基础,集多年教学经验编写的. 本书以相对稳定的传统教学内容为主,在保持大学物理课程持续发展的同时,紧紧追踪物理科学技术的发展;以现代的视野重新演绎和审视传统物理学的内容,力图在基础的层次上寻找一些前沿内容的根,逻辑地、紧凑地把一些相关的科学发现或科学理论的建立集成到一起,使课程现代化更突出,让学生感受到科学的不断发展和进步,应该如何批判继承;内容由浅入深、广泛严谨,概念清晰准确,使科学思维与创新能力的培养更明显,让学生感受到融会贯通的乐趣;教学内容和体系富有弹性,体系结构科学,选择灵活多样,使分层次组织教学更方便,在深度和广度上更好地适应新一代的大学生起点和基础. 本书也力求体现当代杰出物理学家和教育家、诺贝尔物理奖得主理查得·费曼所说的,“科学是一种方法,它教导人们:一些事物是怎样被了解的,什么事情是已知的,现在了解到什么程度(因为没有事情是绝对已知的),如何对待疑问和不确定性,证据服从什么法则,如何去思考事物,做出判断,如何区别真伪和表面现象”,使学生对物理学的内容和方法、工作语言、概念和物理图像、其历史现状和前沿等方面,从整体上有一个全面的了解,使大学物理学成为培养学生科学素质的最有效的基础课.

全书上册由胡亚联、吴锋主编,下册由李端勇、余仕成主编,并负责制定本教材的编写提纲,提出要求. 其中第一篇力学,第四篇中的第 14 章、第 15 章、第 16 章和第五篇中的第 17 章由胡亚联进行修改和统稿;第二篇热学、第四篇中的第 12 章、

第13章和第五篇中的第18章由李端勇进行修改和统稿;第三篇电磁学,由余仕成进行修改和统稿. 全书各篇章的具体执笔人员如下:胡亚联(第1章,第17章);刘培姣(第2章);岑敏锐、黄祝明(第3章);吴锋、张昱(第4章);吴锋、黄淑芳(第5章);余仕成(第6章);殷勇(第7章);黄河(第8章);吴涛(第9章);徐志立(第10章);俎凤霞(第11章);李端勇(第12章,第13章);熊伦(第14章);汤朝红(第15章);谭荣(第16章);何菊明(第18章).

本书在编写过程中,参考和借鉴了近年来国内外出版的物理教材,对于这些教材的作者,本书作者特别致以诚挚的谢意.

本书在出版过程中,得到了教学部门和教学管理部门的关心和支持,我们在此表示衷心的感谢.

由于编写时间较紧,编者水平所限,书中疏漏和不足之处难免,我们敬请读者提出宝贵的意见.

编 者

2010年5月

目 录

第三篇 电磁学(续)

第 10 章 电磁相互作用	3
10.1 磁场对运动电荷的作用	3
10.2 磁场对电流的作用	13
思考题	21
习题 10	22
阅读材料	23
第 11 章 变化的电磁场	26
11.1 电磁感应定律	26
11.2 动生电动势	30
11.3 感生电动势 感生电场	34
11.4 自感 互感	39
11.5 磁场的能量	44
11.6 位移电流	48
11.7 麦克斯韦方程组和电磁波	52
思考题	58
习题 11	60
阅读材料	62

第四篇 振动和波 波动光学

第 12 章 机械振动	67
12.1 简谐振动	67
12.2 描述简谐振动的特征量	69
12.3 孤立系统简谐振动的能量	72
12.4 旋转矢量	73
12.5 角谐振动	77
12.6 简谐振动的合成	78
12.7 阻尼振动 受迫振动和共振	85
思考题	89

习题 12	90
阅读材料	91
第 13 章 机械波	94
13.1 机械波的形成与图像 几个概念	94
13.2 平面简谐波的波函数(波动方程)	98
13.3 波的能量	103
13.4 惠更斯原理 波的衍射、反射与折射	106
13.5 波的叠加	108
13.6 声波	112
* 13.7 多谱勒效应	115
思考题	118
习题 13	119
阅读材料	120
第 14 章 光的干涉	123
14.1 光的电磁理论 光的相干性	124
14.2 分波阵面法干涉 空间相干性	133
14.3 分振幅法干涉 薄膜的等厚与等倾干涉	140
14.4 迈克耳孙干涉仪 时间相干性	152
14.5 多光束的干涉	155
思考题	157
习题 14	158
阅读材料	160
第 15 章 光的衍射	163
15.1 光的衍射现象 惠更斯-菲涅耳原理	163
15.2 单缝夫琅禾费衍射	165
15.3 圆孔衍射 光学仪器的分辨本领	172
15.4 光栅衍射	175
15.5 X 射线衍射	182
思考题	184
习题 15	186
阅读材料	187
第 16 章 光的偏振	190
16.1 光的横波性 自然光和偏振光	190
16.2 起偏与检偏 马吕斯定律	194
16.3 反射和折射时光的偏振 布儒斯特定律	198

16.4 双折射 寻常光和非常光	200
16.5 椭圆偏振光和圆偏振光 偏振光的干涉	208
思考题	212
习题 16	212
阅读材料	213

第五篇 相对论 量子物理

第 17 章 狭义相对论基础	219
17.1 伽利略相对性原理	220
17.2 伽利略变换与牛顿力学的困难	221
17.3 狭义相对论的基本假设与洛伦兹变换式	229
17.4 狭义相对论的时空观	235
17.5 狭义相对论动力学基础	244
思考题	252
习题 17	253
阅读材料	255
第 18 章 量子力学基础	257
18.1 热辐射 普朗克的能量子假说	257
18.2 光电效应 光的波粒二象性	262
18.3 康普顿效应 光量子性的进一步证实	266
18.4 氢原子光谱	269
18.5 德布罗意假设 实物粒子的波粒二象性	274
18.6 海森伯不确定关系	278
18.7 波函数及其统计解释	281
18.8 薛定谔方程及应用	286
18.9 氢原子的量子理论简介	292
* 18.10 激光原理及其应用	296
思考题	301
习题 18	301
阅读材料	302
参考答案	307
主要参考书	311

电磁相互作用

第三篇

电 磁 学 (续)

第 10 章 电磁相互作用

电流能产生磁场,磁场反过来也对电流施加作用力——安培力,而电流的本质是带电粒子的定向移动,即磁场对运动电荷会产生作用力,这个力称为洛伦兹力.本章将介绍洛伦兹力和安培力的作用规律.

10.1 磁场对运动电荷的作用

10.1.1 洛伦兹力

荷兰物理学家洛伦兹首先提出了运动电荷产生磁场和磁场对运动电荷有作用力的观点,为纪念他,人们称这种力为洛伦兹力.实验证明:洛伦兹力 f 的大小与带电粒子的电量 q ,粒子的运动速率 v ,磁感应强度的大小 B 以及 v 与 B 之夹角 θ 的正弦函数 $\sin\theta$ 成正比,即

$$f \propto |q|vB\sin\theta \quad (10.1.1)$$

考虑到 f 的方向,将式(10.1.1)表示成矢量式,有

$$\boldsymbol{f} = q\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B} \quad (10.1.2)$$

由于 q 可以是正电荷也可以是负电荷,所以洛伦兹力的方向有两种情况:

(1) 若 $q > 0$,则 f 的方向为 $\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$ 的方向,如图 10.1.1 所示.

(2) 若 $q < 0$,则 f 的方向为 $\boldsymbol{v} \times \boldsymbol{B}$ 的反方向.

由于洛伦兹力的方向与运动电荷的速度方向总是垂直,因此洛伦兹力永远不对运动电荷做功,它只改变带电粒子的运动方向,而不改变带电粒子的速率和动能,这是洛伦兹力的一个重要特征.

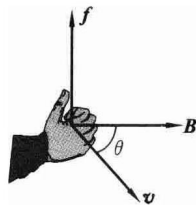


图 10.1.1 洛伦兹力的方向($q > 0$)

例 10.1.1 宇宙射线中的一个质子以速率 $v = 1.0 \times 10^7$ m/s 竖直进入地球赤道附近的磁场内,估算作用在这个质子上的磁场力有多大.

解 在地球赤道附近的磁场沿水平方向,靠近地面处的磁感应强度约为 $B = 0.3 \times 10^{-4}$ T,已知质子所带电量为 $q = 1.6 \times 10^{-19}$ C,按洛伦兹力公式,可算出磁场对质子的作用力为

$$F = qvB \sin \theta = 1.6 \times 10^{-19} \times 1.0 \times 10^7 \times 0.3 \times 10^{-4} \times \sin \frac{\pi}{2} \\ = 4.8 \times 10^{-17} \text{ (N)}$$

这个力约是质子所受重力 $mg = 1.6 \times 10^{-26} \text{ N}$ 的 10^9 倍, 因此当讨论微观带电粒子在磁场中运动时, 一般可以忽略重力的影响。

例 10.1.2 图 10.1.2 为一滤速器的原理图, K 为电子枪, 由枪中射出的电子速率大小不一. 当电子通过孔 A 进入方向相互垂直的均匀电场和均匀磁场后, 只有一定速率的电子能够沿直线前进通过小孔 S , 设产生均匀电场的平行板间的电压为 300 V , 间距 5 cm , 垂直纸面的均匀磁场的磁感应强度为 $6 \times 10^{-2} \text{ T}$, 求:

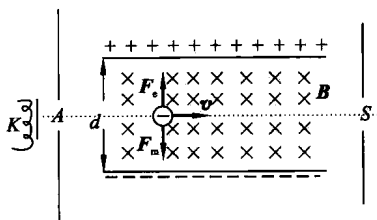


图 10.1.2 滤速器

(1) 磁场的指向应该向里还是向外?

(2) 速率为多大的电子才能通过小孔 S ?

解 (1) 平行板产生的电场强度 E 方向向下, 使带负电的电子受到电场力 $F_e = -eE$, 方向向上. 如果没有磁场, 电子束将向上偏转, 为了使电子能够穿过小孔 S , 磁场施加于电子的洛伦兹力必须向下, 这就要求 B 的方向垂直纸面向里.

(2) 电子受到的洛伦兹力 $F_m = -e(\mathbf{v} \times \mathbf{B})$, 它的大小 $F_m = evB$, 与电子的速率 v 有关, 因此只有那些速率的大小刚好使得 F_m 与电场力 F_e 相抵消的电子可以沿直线通过小孔 S , 这样, 能通过小孔 S 的电子的速率 v 应满足下式:

$$F_m = F_e$$

即 $evB = Ee$. 由此得

$$v = E/B$$

这样 $v > E/B$ 的电子, 受到的 $F_m > F_e$, 从而会下偏; $v < E/B$ 的电子, 受到的 $F_m < F_e$, 从而会上偏.

因为 $E = U/d$, (U 和 d 分别为平行板间的电压和距离), 故

$$v = \frac{U}{Bd}$$

上式表明, 能过滤速器的粒子的速率与它的电荷及质量无关.

将 $U = 300 \text{ V}$, $B = 0.06 \text{ T}$, $d = 0.05 \text{ m}$ 代入上式, 得

$$v = \frac{300}{0.06 \times 0.05} = 10^5 \text{ (m/s)}$$

即只有速率为 10^5 m/s 的电子可以通过小孔 S .

10.1.2 带电粒子在电磁场中的运动

当电荷射入电场和磁场时,将受到电场和磁场的作用,在近代科学技术中,广泛利用电场和磁场对带电粒子的作用来控制粒子束的运动,例如质谱仪、回旋加速器、磁聚焦技术、磁悬浮技术等等.下面讨论带电粒子在电磁场中的运动.

1. 带电粒子在静电场中的运动

一个带有电荷量为 q 质量为 m 的带电粒子在静电场中所受到的电场力为

$$\mathbf{F} = q\mathbf{E} \quad (10.1.3)$$

根据牛顿第二定律,带电粒子仅在电场力作用下的运动方程(设重力可略去不计)为

$$q\mathbf{E} = m\mathbf{a} = m \frac{d\mathbf{v}}{dt} \quad (10.1.4)$$

在一般电场中求解上述运动微分方程比较复杂,我们只讨论带电粒子在匀强电场中的运动.

1) 带电粒子的速度方向与场强方向平行($\mathbf{v}_0 \parallel \mathbf{E}$)

如图 10.1.3 所示,一带电粒子,质量为 m ,带有正电荷 q ,以初速度 $\mathbf{v}_0$ 进入匀强电场,设初速度 $\mathbf{v}$ 与场强 $\mathbf{E}$ 同向,忽略重力的作用,作用在带电粒子上的力为 $\mathbf{F} = q\mathbf{E}$,由于力的大小和方向都不变,所以粒子做匀加速直线运动,加速度的大小为

$$a = \frac{qE}{m}$$

其运动速度 $\mathbf{v}$ 的大小可用下式计算:

$$v^2 - v_0^2 = 2as = 2 \frac{qE}{m} s$$

由动能定理,得

$$\frac{1}{2}mv^2 - \frac{1}{2}mv_0^2 = qU$$

即带电粒子在静电场中经过电势差为 U 的两点后,电场力所做的功 qU 等于粒子动能的增量,这一结论是从均匀电场中得出,但它对带电粒子在非均匀场中运动时也同样适用.

2) 带电粒子的速度方向与场强方向垂直($\mathbf{v}_0 \perp \mathbf{E}$)

如图 10.1.4 所示,粒子以初速度 $\mathbf{v}_0$ 进入一匀强电场,设初速度 $\mathbf{v}_0$ 和场强 $\mathbf{E}$ 垂直,这时由于加速度垂直于初速方向,带电粒子将作抛物线运动(与重力场中的水平抛射体的运动相类似),取坐标如图,带电粒子在原点 O 处进入电场,经过时间 t

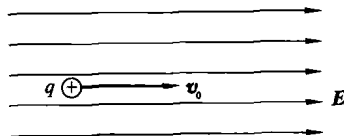


图 10.1.3 带电粒子进入匀强电场中运动($\mathbf{v}_0 \parallel \mathbf{E}$)

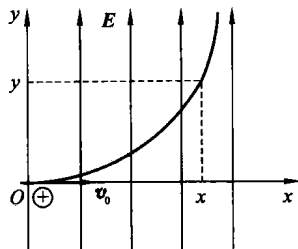


图 10.1.4 带电粒子在均匀电场中运动($\mathbf{v}_0 \perp \mathbf{E}$)

后,在 y 轴方向上的位移分量为

$$y = \frac{1}{2}at^2 = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} t^2$$

而 x 轴方向上的位移分量为

$$x = v_0 t$$

消去以上两式中的 t , 得带电粒子在电场中的轨迹方程

$$y = \frac{1}{2} \frac{qE}{m} \frac{x^2}{v_0^2}$$

在生产技术上常用一对平行板产生匀强电场以引起电子射线的横向偏移.

当带电粒子进入匀强电场时,如果初速度 $\mathbf{v}_0$ 与场强 $\mathbf{E}$ 斜交,那么带电粒子的运动与物体在重力场中的斜抛运动类似,读者可以自行分析.

2. 带电粒子在均匀磁场中的运动

设有一均匀磁场,磁感应强度为 $\mathbf{B}$,一电量为 q ,质量为 m 的粒子,以初速 $\mathbf{v}$ 进入磁场中运动,下面分三种情况讨论.

1) 带电粒子的速度方向与磁场方向平行($\mathbf{v} \parallel \mathbf{B}$)

这时粒子受到的洛伦兹力 $\mathbf{f}_m = q\mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$,带电粒子进入磁场后作匀速直线运动.

2) 带电粒子的速度方向与磁场方向垂直($\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$)

如图 10.1.5 所示,粒子所受的洛伦兹力

$$\mathbf{f}_m = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$$

且 $\mathbf{f}_m, \mathbf{v}, \mathbf{B}$ 三者相互垂直, $\mathbf{f}_m$ 只改变粒子的速度方向,不改变速度大小,洛伦兹力为粒子提供了在垂直于磁场平面内作匀速圆周运动的向心力,根据牛顿第二定律方向程式

$$qvB = mv^2/R$$

得带电粒子作圆周运动的半径(回转半径)为

$$R = \frac{mv}{qB} \quad (10.1.5)$$

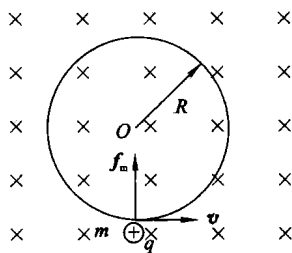


图 10.1.5 带电粒子在均匀磁场中作圆周运动($\mathbf{v} \perp \mathbf{B}$)

式中, q/m 称为带电粒子的荷质比. 可看出对一定的带电粒子, q/m 是一定的. 当 B 一定时,粒子的速率越大,则圆周运动的半径越大. 这在核物理的研究中有着重要的应用. 当带电粒子在一定的磁场中运动时,可以根据粒子运动的照片,测量其运动轨迹的曲率半径,同时若知道粒子的荷质比,则可确定粒子的速度和能量.

带电粒子一周所用的时间称为回转周期,用 T 表示

$$T = \frac{2\pi R}{v} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (10.1.6)$$

带电粒子在单位时间内转过的圈数称为回转频率用 ν 表示

$$\nu = \frac{1}{T} = \frac{qB}{2\pi m} \quad (10.1.7)$$

由上述三式可知:在磁场 B 给定时,对荷质比一定的带电粒子,回转周期,回转频率与粒子速度无关,这说明速率大的带电粒子回转半径大,速率小的带电粒子回转半径小,但是它们各自运动一周所用的时间相同.

3) 带电粒子的速度方向与磁场方向夹角为 θ

如图 10.1.6 所示,将粒子的初速度分解为平行 B 和垂直于 B 的两个分量在平行于 B 的方向上, $v_{//}$ 分量对应的洛伦兹力为零,因此在这个方向上,粒子作匀速直线运动. 在垂直于 B 的方向上,粒子受到垂直于 B 和 $v_{\perp}$ 方向的洛伦兹力 $f_{\perp} = qv_{\perp} B$, 因而粒子在垂直于 B 的平面内作匀速率圆周运动. 其合运动的轨迹是一个轴线沿磁场方向的螺旋线.

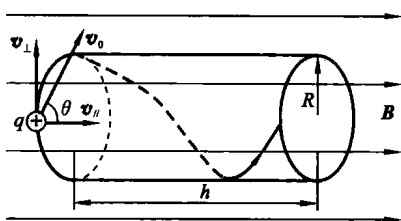


图 10.1.6 带电粒子在匀强磁场中运动 ($\mathbf{v}_0 \cdot \mathbf{B} = \theta$)

$$v_{//} = v_0 \cos\theta \quad v_{\perp} = v_0 \sin\theta$$

螺旋线的半径

$$R = \frac{mv_{\perp}}{qB} = \frac{mv_0 \sin\theta}{qB} \quad (10.1.8)$$

回旋周期

$$T = \frac{2\pi R}{v_{\perp}} = \frac{2\pi m}{qB} \quad (10.1.9)$$

带电粒子回旋一周所前进的距离称为螺距,用 h 表示

$$h = v_{//} T = v_0 \cos\theta \frac{2\pi m}{qB} \quad (10.1.10)$$

由此可见,带电粒子回旋一周所前进的距离 h (螺距) 只与 $v_{//}$ 有关,而与 $v_{\perp}$ 无关. 利用这一性质可以实现磁聚焦. 如果在均匀磁场中某点 A 处,引入一发射角不太大的带电粒子束,其中粒子的初速度大小大致相同,则这些粒子沿磁场方向的分速度大小几乎一样,虽然开始时粒子初速度方向各异,螺旋线的半径不等,而由于

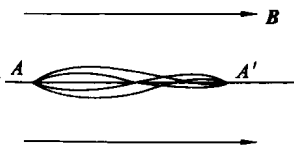


图 10.1.7 磁聚焦

其轨迹有几乎相同的螺距,这样,经过一个回旋周期后,这些粒子将重新聚合穿过另一点 A' ,从而达到粒子束聚焦的目的(见图 10.1.7). 这种现象与光线经过光学透镜聚焦的原理很相似,所以称为磁聚焦. 磁聚焦在电子光学中有着广泛的应用.

3. 带电粒子在电磁场中的运动应用举例

1) 回旋加速器

回旋加速器是获得高能粒子的一种装置. 世界上第一台回旋加速器是美国物理学家劳伦斯(E. O. Lawrence, 1901—1958)于1932年研制成功的. 这台加速器的磁极直径只有10 cm, 加速电压为2 keV, 可加速氘离子达到80 keV的能量. 回旋加速器的光辉成就不仅在于它创造了当时人工加速带电粒子的能量记录, 更重要的是它所展示的回旋共振加速方式奠定了人们研发各种高能粒子加速器的基础. 为此, 劳伦斯获得1939年诺贝尔物理学奖. 回旋加速器的基本原理是利用带电粒子在磁场中作圆周运动时, 其回转频率与速度无关的特性, 使带电粒子在电磁场的共同作用下, 反复加速, 获得高能粒子. 下面简述回旋加速器的工作原理.

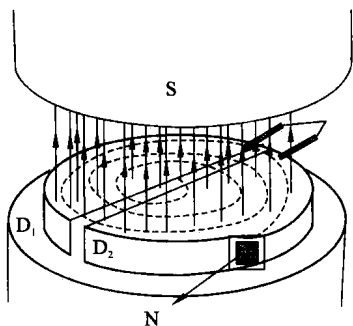


图 10.1.8 回旋加速器

如图 10.1.8 所示, 回旋加速器的核心部分是密封在真空中的两个半圆形金属空盒 D_1 和 D_2 . 两个 D 形盒在强大的均匀磁场中隔开相对放置, 中心附近放置有粒子源. 两个 D 形盒与高频振荡电源连接, 在它们的缝隙间形成一个交变电场以加速带电粒子. 置于中心的粒子源产生带电粒子射出来, 在缝隙间受到电场加速, 在 D 形盒内不受电场力作用, 仅受磁场的洛伦兹力作用, 粒子在垂直磁场平面内作圆周运动. 粒子绕行半圈的时间为 $\pi m/qB$ 其中 q 是粒子电荷, m

是粒子的质量, B 是磁场的磁感应强度. 如果 D 形盒上所加的交变电压的频率恰好等于粒子在磁场中作圆周运动的频率, 则粒子绕行半圈后正赶上 D 形盒上电极性变号, 粒子仍处于加速状态. 由于上述粒子绕行半圈的时间与粒子的速度无关, 因此粒子每绕行半圈受到一次加速, 绕行半径增大. 只要缝隙间交变电场以不变的回旋周期 $T = 2\pi m/qB$ 往复变化电极性, 经过很多次加速, 粒子就会沿着螺旋形的平面轨道逐渐趋近 D 形盒的边缘, 最终将以达到预期速率的粒子从 D 形盒边缘引出.

回旋加速器加速的粒子的能量受制于随粒子速度增大的相对论效应. 由于相对论效应, 当粒子的速率很大时, q/m 已不再是常量 ($m = m_0/\sqrt{1-v^2/c^2}$), 从而回旋周期 T 将随粒子的速率增大而增大, 这时若仍保持交变电场的周期不变, 就不能保持与回旋运动同步, 粒子经过缝隙时也就不能始终得到加速. 对于同样的动能, 质量越小的粒子, 速度越大, 相对论效应就越显著. 例如, 2 MeV 的氘核的相对论性质量只比静止质量大 0.01%, 而 2 MeV 的电子的相对论性质量约为其静质量的 5 倍, 因此, 回旋加速器更适合加速较重的粒子, 如氘核等. 但是, 即使对

于这些较重的粒子,用回旋加速器来加速,所获得的能量也还是受到了相对论效应的限制。

为了改善相对论引起的效应,出现了同步稳相回旋加速器. 它保持磁场不变,改变施加在 D 形盒电极上交变电压的频率,从而使交变电场的变化,与粒子的回旋运动同步。

随着人们认识微观世界的层次越深入,要求加速的粒子的能量就越高. 例如,将电子从原子中打出来,大约要 10 eV 的能量;将核子从原子核中打出来,大约要 8 MeV 的能量;为产生 π 介子和 K 介子,则需要质子具有几亿到几十亿电子伏的能量. 从 1931 年劳伦斯的第一台加速能量为 0.08 MeV 的加速器到现在的 $5 \times 10^5\text{ MeV}$ 的加速器,回旋加速器的能量大约每隔 10 年提高一个数量级,而能量的每次重大提高,都带来了粒子的新发现和新知识. 例如,1983 年发现的 $W^\pm$ 和 Z^0 粒子,就是对电弱统一理论的有力支持. 20 世纪 70 年代以来,为了适应重离子物理研究的需要,成功地研制出了能加速周期表上全部元素的全离子、可变能量的等时性回旋加速器,使每台加速器的使用效益大大提高. 此外,近年来还发展了超导磁体的等时性回旋加速器. 超导技术的应用对减小加速器的尺寸、扩展能量范围和降低运行费用等方面为加速器的发展开辟了新的领域。

2) 质谱仪

质谱分析是一种物理方法,其基本原理是使试样在离子源中发生电离,生成不同荷质比的带正电荷的离子,经加速电场的作用,形成离子束,进入质量分析器. 在质量分析器中,再利用电场和磁场使发生相反的速度色散,将它们分别聚焦而得到质谱图,从而确定其质量. 第一台质谱仪是英国科学家阿斯顿(F. W. Aston, 1877—1945) 于 1919 年制成的. 阿斯顿用这台装置发现了多种元素同位素,研究了 53 个非放射性元素,发现了天然存在的 287 种核素中的 212 种,第一次证明原子质量亏损. 他为此荣获 1922 年诺贝尔化学奖. 质谱分析及仪器在近代得到极大发展,主要表现在:计算机的深入应用,用计算机控制操作、采集、处理数据和图谱,大大提高了分析速度;各种各样联用仪器的出现,如色-质联用,串联质谱等;许多新电离技术的出现等. 质谱分析法在化学工业、石油工业、环境科学、医药卫生、生命科学、食品科学、原子能科学、地质科学等广阔的领域中发挥越来越大的作用。

图 10.1.9 所示是一种质谱仪工作原理示意图. 从离子源产生的正离子经过狭缝 S_1 和 S_2 后,进入速度选择器 P_1, P_2 . 在速度选择器 P_1, P_2 区间中,均匀电场的电场强度 E 和均匀磁场的磁感应强度 B 方向相互垂直. 根据例 10.1.2 所述滤速器的原理,电量为 $+q$ 质量为 m 的正离子的速度满足 $v = E/B$ 时它们就能径直穿

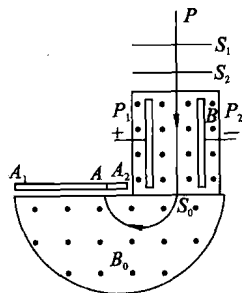


图 10.1.9 质谱仪示意图