

高等教育21世纪课程教材

大学物理学

(第2版)

DAXUE
WULIXUE

(下)

赵近芳 主编
颜晓红 主审



北京邮电大学出版社
www.buptpress.com

高等教育 21 世纪课程教材

大学物理学

(第 2 版)

(下)

主编	赵近芳	
编者	黎培德	黄克立
	杨友田	崔洪农
主审	颜晓红	

北京邮电大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理学. 下/赵近芳编著. —2 版. —北京:北京邮电大学出版社, 2005

ISBN 7-5635-0707-8

I. 大... II. 赵... III. 物理学—高等学校—教材 IV. 04

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2005)第 140978 号

书 名 大学物理学(下)
主 编 赵近芳
责任编辑 周 堃
出版发行 北京邮电大学出版社
社 址 北京市海淀区西土城路 10 号(100876)
电话传真 010-62282185(发行部)010-62283578(传真)
E-mail ctrd@buptpress.com
经 销 各地新华书店
印 刷 北京通州皇家印刷厂
开 本 787mm×960mm 1/16
印 张 22.5
字 数 422 千字
版 次 2006 年 2 月第 2 版 2006 年 2 月第 1 次印刷

ISBN 7-5635-0707-8/O·103

定 价:26.00 元

如有质量问题请与北京邮电大学出版社联系

版权所有 侵权必究

内 容 简 介

本书是根据教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神编写的. 全书分上、下两册, 上册: 力学基础、相对论、振动与波和热学; 下册: 电磁学、波动光学和量子论. 与之配套的还有《大学物理学学习指导》书. 两者既可彼此独立, 又可相互配套使用. 本书作为工科物理及理科非物理专业大学物理教材的改革尝试, 采取了“高、宽、新、活、宜”的原则, 即高视点选择经典内容, 努力拓宽知识面, 尽力反映新科技发展概况, 注意各部分知识之间的活化联系, 同时内容的难度较适宜.

本书可作为高等工科院校各专业的物理教材, 也可作为综合大学和师范院校非物理专业的教材或参考书, 并配有教学光盘.

第一版前言

本书是为适应当前教学改革的要求,根据教育部《高等教育面向 21 世纪教学内容和课程体系改革计划》的精神,在总结我们多年教材改革实践的基础上,汲取了当前国内外优秀教学改革成果而编写的,是湖南省高等教育 21 世纪课程教材。教材既包括了工科大学物理课程指导委员会制定的教学基本要求的全部内容,又特别加强了近代物理知识和新科技物理基础的介绍,使全书内容更丰富、更符合工科物理教学的需要,这套教材的主要特点是:

1. 高视点选择经典内容,更新了教学体系 如力学中删去了直线运动、抛体运动、碰撞等内容,加强了矢量性、能量及守恒定律等重要概念的阐述,使学生对大学物理有新鲜感。教材把相对论纳入力学篇,使牛顿力学与相对论时空观紧密相联,开拓了学生的视野。同时把振动与波和波动光学归入一篇,是为了强调波动这种运动形式的普遍性,波动的概念可以延伸到量子力学领域,以此沟通经典内容和近代内容的联系。

2. 大力使内容现代化 教材介绍了当前新技术领域中的基础性物理原理,如熵与信息、全息、光纤通信、能带理论、激光、超导、纳米科学技术等,还引入了非线性物理的一些基本概念,如混沌、孤波、耗散结构、非线性光学等内容;同时大力加强了现代物理学的重要观念,如相对论时空观、微观粒子的波粒二象性、量子论以及时空对称性与守恒定律的关系等,使读者尽早接触现代高新科技的发展脉搏和现代物理的前沿课题,具有鲜明的时代特色。

3. 加强从全局观点掌握、运用知识的综合能力 教材力求突出主干,删除枝节,精选了例题和习题,尽量避免烦琐的叙述和冗长的数学推导,力求对物理概念、原理阐述准确、简洁、透彻,重点突出,便于学生阅读和理解。加强重要概念在各部分内容中的联系,如势能概念在力学、热学和电学中一直互相呼应,一脉相承,使学生整体把握知识的能力受到必要的训练,有利于从全局观点掌握、运用知识和综合思考。

4. 开“窗口”、重视科学素质训练 在现代物理部分大胆地“渗透”一些科技前沿信息及开一定的非线性物理“窗口”。尽管有些内容学生不一定能完全清楚,但这将有益于培养学生的求知欲望和独立思考能力,而求知欲和独立思考是科学素质和创造能力的基本要素。

- 说明:(1)本书教学参考时数为 120 学时;
(2)教材中打 * 号的章节多为开“窗口”的内容,教师可自行取舍;
(3)书中小字部分是相关章节的延伸内容,不作要求;
(4)若将打 * 号的章节和小字部分除去,仍不影响教材的整体性.

本书由黎培德编写力学、振动与波、超导电性,黄克立编写电磁学、激光原理,杨友田编写热学,赵近芳编写波动光学、固体的能带结构、纳米科学技术,崔洪农编写相对论、量子物理基础、原子核物理和粒子物理.学习指导的相关章节仍由以上编者分工编写,最后由赵近芳负责全书的修改和定稿工作.在编写过程中,许多学校的老师提出了一些很中肯的建议,尤其是得到了北京航空航天大学、北京邮电大学、华北工学院、武汉理工大学、江汉大学、湘潭大学、中南大学、长沙交通学院、南华大学、湖南大学、华南理工大学、中南林学院等学校老师的帮助和指导,教育部物理教学指导委员会委员颜晓红教授仔细审查了此书并提出了许多宝贵意见,北京邮电大学出版社有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量的劳动,在此一并致谢.

编写适合教学改革需要的教材是一种探索,加之编者水平所限,难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正.

编者
2002 年 5 月

第二版前言

第一版于2002年8月由北京邮电大学出版社出版,为新一代物理教材。该书出版后,曾在国内十多所高校中使用,反映较好。现根据使用学校师生的反馈意见和要求,对教材进行了修改,该版既保持了原教材基础知识系统、扎实,内容精干,重实际训练等特色,又进一步加强了现代物理的新观念、新思想及新技术的介绍,使全书内容更丰富、更符合工科物理教学的需要。

第二版的教材体系与第一版大体相同,分《大学物理学》上、下册和《大学物理学学习指导》:

上册:力学、相对论、振动与波、热物理学

下册:电磁学、波动光学、量子物理学、新技术的物理基础(专题)

指导书:学习指导和系列化习题

几点说明:

1. 第二版将振动与波归入力学篇,同时将电磁学、波动光学连在一起,使电磁波归类,更方便教学。
2. 教材中删去了部分起点较高的内容和习题。
3. 教材增加了阅读材料和本章小结,供学生自学时参考。

本书由黎培德编写力学、振动与波、超导电性及阅读材料一、二、三、五、六;杨友田编写热学及阅读材料七、八、九;黄克立编写电磁学、激光原理及阅读材料十、十一、十二;赵近芳编写波动光学、固体的能带结构、纳米科学技术及阅读材料十三、十四、十五、十六、十七;崔洪农编写相对论、量子物理基础、原子核物理和粒子物理及阅读材料四、十八;王登龙编写玻色-爱因斯坦凝聚及阅读材料十九。学习指导的相关章节仍由以上编者分工编写,最后由赵近芳教授负责全书的修改和定稿工作。在改编过程中,参加讨论和编写的老师还有黄小益、蔡新华、曹东坡、贺江达、卢德华、唐世洪、苏卡林、周宙安、张登玉等,他们提出了许多很中肯的建议,尤其是得到了北京航空航天大学、北京邮电大学、厦门大学、中北大学、武汉理工大学、江汉大学、湘潭大学、中南大学、长沙理工大学、南华大学、湖南大学、华南理工大学、中南林学院等学校老师的帮助和指导,教育部物理教学指导委员会委员颜晓红教授仔细审查了此书,匡乐满教授和罗维治教授对此书提出了许多宝贵意见,北京邮电大学出版社有关人员在本书的编辑出版过程中付出了大量

的劳动,在此一并致谢.

编写适合教学改革需要的教材是一种探索,加之编者水平所限,难免有不妥和疏漏之处,恳请读者批评指正.

编者

2006 年元月

目 录

电磁学篇

第 8 章 静电场和稳恒电场	(3)
8.1 电场 电场强度	(3)
8.2 电通量 高斯定理	(11)
8.3 电场力的功 电势	(17)
8.4 场强与电势的关系	(21)
8.5 静电场中的导体	(25)
8.6 静电场中的电介质	(30)
8.7 电容 电容器	(34)
8.8 电流 稳恒电场 电动势	(39)
8.9 电场的能量	(42)
阅读材料 压电体	(44)
本章提要	(45)
习题	(49)
第 9 章 稳恒磁场与电磁场的相对性	(53)
9.1 磁场 磁感应强度	(53)
9.2 安培环路定理	(65)
9.3 磁场对载流导线的作用	(70)
9.4 磁场对运动电荷的作用	(76)
*9.5 回旋加速器 磁聚焦	(82)
9.6 磁介质	(84)
阅读材料 等离子体及其磁约束	(95)
本章提要	(98)
习题	(99)
第 10 章 电磁感应	(105)
10.1 电磁感应定律	(105)
10.2 动生电动势与感生电动势	(108)
10.3 电子感应加速器 涡电流	(113)
10.4 自感应与互感应	(115)
10.5 磁场能量	(118)
阅读材料 磁单极	(120)

本章提要	(121)
习题	(121)
第 11 章 电磁场和电磁波	(125)
11.1 位移电流 麦克斯韦方程组	(125)
*11.2 电磁波	(130)
*11.3 电磁场的能量与动量	(134)
阅读材料 遥感技术	(137)
本章提要	(139)
习题	(140)
波动光学篇	
第 12 章 光的干涉	(144)
12.1 光源 光的相干性	(144)
12.2 杨氏双缝干涉实验	(147)
12.3 光程与光程差	(151)
12.4 薄膜干涉	(154)
12.5 劈尖干涉 牛顿环	(156)
12.6 迈克耳逊干涉仪	(162)
阅读材料 全息照相	(165)
本章提要	(170)
习题	(171)
第 13 章 光的衍射	(174)
13.1 光的衍射 惠更斯—菲涅耳原理	(174)
13.2 单缝夫琅禾费衍射	(176)
13.3 衍射光栅	(181)
13.4 圆孔衍射 光学仪器的分辨率	(187)
13.5 X 射线的衍射	(190)
阅读材料 光纤通讯	(193)
本章提要	(198)
习题	(199)
第 14 章 光的偏振	(201)
14.1 自然光和偏振光	(201)
14.2 起偏和检偏 马吕斯定律	(204)
14.3 反射与折射时光的偏振	(206)
14.4 散射光的偏振	(208)
14.5 光的双折射	(209)
*14.6 偏振光的干涉 人为双折射现象	(213)
*14.7 旋光现象	(216)
阅读材料 液晶	(217)

阅读材料 非线性光学简介	(222)
本章提要	(226)
习题	(227)
量子论篇	
第 15 章 量子物理基础	(231)
15.1 黑体辐射 普朗克量子假设	(231)
15.2 光的量子性	(235)
15.3 玻尔的氢原子理论	(242)
15.4 粒子的波动性	(248)
15.5 测不准关系	(251)
15.6 波函数 薛定谔方程	(254)
15.7 薛定谔方程在几个一维问题中的应用	(257)
15.8 量子力学对氢原子的应用	(265)
15.9 斯特恩—盖拉赫实验	(270)
15.10 电子自旋	(273)
15.11 原子的壳层结构	(274)
阅读材料 量子力学的争论和非线性量子力学	(280)
本章提要	(281)
习题	(284)
*第 16 章 原子核物理和粒子物理简介	(286)
16.1 原子核的基本性质	(286)
16.2 原子核的放射性衰变	(291)
16.3 粒子物理简介	(294)
阅读材料 黑物质与黑能量	(301)
本章提要	(302)
习题	(303)
第 17 章 新技术的物理基础	(305)
17.1 固体的能带结构	(305)
17.2 激光原理	(317)
*17.3 超导电性	(325)
*17.4 纳米科学技术简介	(336)
习题	(342)
习题答案	(343)

电磁学篇

电磁场是物质世界的重要组成部分,电磁学就是研究电磁场运动规律的学科。

电磁现象形成理论,可以认为是从库仑 1785 年研究电荷之间的相互作用开始的,人们研究了静电、静磁和电流等现象,总结出一些实验定律。但是,电磁学的重大进展是在人们认识到电现象和磁现象之间的深刻内在联系以后才开始的。1820 年,奥斯特发现了电流的磁效应;1831 年法拉第发现电磁感应现象,并提出场和力线的概念。至此,电现象和磁现象作为矛盾统一的整体开始被人们认识。1864 年,麦克斯韦总结前人的成果,再加上他关于感应电场和位移电流两个大胆的假说,建立了描述宏观电磁场的完美理论——麦克斯韦方程组,并从理论上预言了电磁波的存在。1888 年,赫兹利用振荡器在实验上证实了麦克斯韦关于电磁波的预言。麦克斯韦的电磁场理论是从牛顿建立经典力学理论到爱因斯坦提出相对论的这段时期中物理学的最重要的理论成果。

1905 年,爱因斯坦创立了相对论,解决了经典力学时空观与电磁现象的新的实验事实的矛盾。根据电磁现象的规律必须满足相对论时空洛伦兹变换的要求,人们发现:从不同参考系观测,同一电磁场可表现为或只是电场、或只是磁场、或电场和磁场并存。这说明电磁场是一个统一的整体,而描述电磁场的物理量——电场强度和磁感应强度——是随参考系改变的。

电磁学的知识是许多工程技术和科学研究的基础。电能是应用最广泛的能源之一,电磁波的传播实现了信息传递,研究新材料的电磁性质促进了新技术的诞生。显然,电磁学和工程技术各个领域有十分密切的联系。电磁学的研究在理论方面也很重要。物质的各种性能是由物质的电结构决定的,在分子和原子等微观领域中,电磁力起主要作用。许多物理现象,如物质的弹性、金属的导热性、光学的折射率等都可从物质的电结构中得到解释。所以,电磁学理论在现代物理学中也占有重要地位。

本篇主要研究电磁场的规律以及物质的电磁性质。先介绍电场的描述及其规律,接着介绍静电场中的导体和电介质;然后介绍磁场的描述及其规律,接着

介绍磁场中的磁介质;最后介绍电场和磁场的相互联系——电磁感应和宏观电磁场的理论——麦克斯韦方程组以及电磁波. 这些内容尽管复杂一些,但学习过相对论的读者只要耐心阅读是完全可以看懂的. 这有利于深刻理解电磁场的规律,并有助于能力的提高.

第 8 章 静电场和稳恒电场

本章主要研究静电场和稳恒电场的基本性质及电场与导体、电介质的相互作用。

电场强度和电势是描述电场特性的两个重要物理量。高斯定理和场强环流定理是反映静电场和稳恒电场性质的基本规律。

已知场源电荷分布求解场强分布和电势分布是本章要解决的主要问题之一。

在电场的作用下,导体和电介质的电荷分布会发生变化。这种变化了的电荷分布又会反过来影响电场分布,最后达到静电平衡。我们还将讨论电场与物质的这种相互作用规律,以及电容器和电场的能量。

静电场和稳恒电场是电磁学的入门。本章介绍的一些概念、规律、研究和处理问题的方法贯穿在整个电磁学中。在学习过程中应注意提高这方面的能力。

8.1 电场 电场强度

8.1.1 电荷

电荷的概念是从物体带电的现象中产生的。两种不同质料的物体,如丝绸与玻璃棒相互摩擦后,它们都能吸引小纸片等轻微物体。这时,我们说丝绸和玻璃棒处于带电状态,它们分别带有电荷。可见,电荷是物体状态的一种属性。宏观物体或微观粒子处于带电状态就说它们带有电荷。

物体或微观粒子所带的电荷有两种,称为正电荷和负电荷。带同种电荷的物体(简称同号电荷)互相排斥,带异种电荷的物体(简称异号电荷)互相吸引。静止电荷之间的相互作用力称为静电力。根据带电体之间相互作用力的大小能够确定物体所带电荷的多少。表示电荷多少的量叫做电量。在国际单位(SI)制中,电量的单位是库仑,符号为 C。

现代物理实验证实,电子的电荷集中在半径小于 10^{-18} m 的小体积内。因此,常把电子看成一个无内部结构而有有限质量和电量的“点”。质子只有正电荷,都集中在半径约为 10^{-15} m 的体积内。中子内部也有电荷,靠近中心是正电荷,靠外为负电荷;正负电荷电量相等,所以对外不显带电。

由物质的分子结构知识可知,在正常状态下,物体内部的正电荷和负电荷量值相等,物体处于中性状态。使物体带电的过程就是使它获得或失去电子的

过程. 在一孤立系统内, 无论发生怎样的物理过程, 该系统电荷的代数和保持不变, 这就是**电荷守恒定律**. 在粒子的相互作用过程中, 电荷是可以产生和消失的. 例如, 一个高能光子与一个重原子核作用时, 该光子可以转化为一个正电子和一个负电子(这叫电子对的“产生”); 而一个正电子和一个负电子在一定条件下相遇, 又会同时消失而产生两个或三个光子(这叫电子对的“湮灭”). 在已观察到的各种过程中, 正、负电荷总是成对出现或成对消失. 由于光子不带电, 正、负电子又各带着等量异号电荷, 所以这种电荷的产生和消失并不改变系统中电荷的代数和, 电荷守恒定律仍然保持有效.

迄今为止, 所有实验表明, 任何带电体所带电量都是基本电量 $e = 1.602 \times 10^{-19} \text{C}$ 的整数倍. 这种电量只能取分立的、不连续的量值的性质称为**电荷的量子化**. 因为 e 如此之小, 以致使电荷的量子性在研究宏观现象的绝大多数实验中未能表现出来. 因此常把带电体当作电荷连续分布的带电体来处理, 并认为电荷的变化是连续的. 近代物理从理论上预言, 基本粒子由若干种电量为 $\pm \frac{1}{3}e$, $\pm \frac{2}{3}e$ 的夸克或反夸克组成. 然而单独存在的夸克尚未在实验中发现.

实验还证明, 一个电荷的电量与它的运动状态无关. 例如加速器将电子或质子加速时, 随着粒子速度的变化, 电量没有任何变化. 再如氢分子和氦原子都有两个电子, 它们在核外的运动状态差别不大, 电子电量应该相同. 但是氢分子的两个质子是作为两个原子核在保持相对距离约为 0.07 nm 的情况下转动的; 氦原子中的两个质子却紧密地束缚在一起运动. 氦原子中的两个质子的能量比氢分子的两个质子的能量大到一百万倍的数量级, 因而两者的运动状态有显著差别. 如果电荷的电量与运动状态有关, 氢分子中质子的电量就应该和氦原子中质子的电量不同, 但两者的电子电量是相同的, 因此就不可能两者都是电中性的. 但是实验证实, 氢分子和氦原子都精确地是电中性的. 这就说明, 质子的电量也是与其运动状态无关的. 大量事实证明, 电荷的电量是与其运动状态无关的. 所以, 在不同的参考系观察, 同一带电粒子的电量不变. 电荷的这一性质叫**电荷的相对论不变性**.

8.1.2 库仑定律

两个静止带电体之间的作用力(通常简称为两个静止电荷之间的作用力)即静电力, 不仅与它们所带电量及它们之间的距离有关, 而且还与它们的大小、形状及电荷分布情况有关. 当带电体本身的线度与它们之间的距离相比足够小时, 带电体可以看成点电荷. 即带电体的形状、大小可以忽略, 而把带电体所带电量集中到一个“点”上.

真空中两个静止点电荷之间相互作用力的大小与这两个点电荷所带电量

q_1 和 q_2 的乘积成正比,与它们之间的距离 r 的平方成反比.作用力的方向沿着两个点电荷的连线,同号电荷相互排斥、异号电荷相互吸引.这就是库仑定律.它是1785年由法国物理学家库仑首先指出的.相互作用力 F 的大小可表示为

$$F = k \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (8.1)$$

式中 k 为比例系数,其数值和单位取决于各量所采用的单位.在(SI)制中, $k = 8.988\,0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2 \approx 9.0 \times 10^9 \text{ N} \cdot \text{m}^2/\text{C}^2$

为了使由库仑定律推导出的一些常用公式简化,我们引入新的常数 ϵ_0 来代替 k ,两者的关系为

$$\epsilon_0 = \frac{1}{4\pi k} = 8.85 \times 10^{-12} \text{ C}^2/(\text{N} \cdot \text{m}^2) \quad (8.2)$$

ϵ_0 称为真空中的介电常数.以 ϵ_0 代入式(8.1)得

$$F = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \quad (8.3)$$

为了表示力的方向,可采用矢量式表示库仑定律

$$\mathbf{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2} \mathbf{r}_0 \quad (8.4)$$

式中 \mathbf{r}_0 是由施力电荷指向受力电荷的矢径方向的单位矢量.近代物理实验表明,当两个点电荷之间的距离在 $10^{-17} \text{ m} \sim 10^7 \text{ m}$ 范围内,库仑定律是极其准确的.

库仑定律只适用于两个点电荷之间的作用.当空间同时存在几个点电荷时,它们共同作用于某一点电荷的静电力等于其他各点电荷单独存在时作用在该点电荷上的静电力的矢量和.这就是**静电力的叠加原理**.

8.1.3 电场强度

静电力同样是物质之间的相互作用.这种特殊的物质,叫做**电场**.电荷和电荷之间是通过电场这种物质传递相互作用的,这种作用可以表示为

电荷 \rightleftarrows 电场 \rightleftarrows 电荷.

近代物理证实这种看法是正确的.同时还证实电场和一切实物一样,也具有能量、动量和质量等重要性质.因此,电场也是一种物质.但场与其他实物不同,几个电场可以同时占有同一空间,所以电场是一种特殊形式的物质.

相对于观察者为静止的带电体周围存在的电场称为**静电场**.静电场对外表现主要有:

(1) 处于电场中的任何带电体都受到电场所作用的力.

(2) 当带电体在电场中移动时,电场所作用的力将对带电体作功.

电场中任一点处电场的性质,可从电荷在电场中受力的特点来定量描述.

用电量很小的点电荷 q_0 作为试验电荷, 当试验电荷 q_0 放在电场中一给定点处时, 它所受到的电场力的大小和方向是一定的; 放在电场中的不同点处, 其受到的电场力的大小和方向一般是不相同的. 实验电荷 q_0 放在电场中一固定点处, 当 q_0 的电量改变时它所受的力方向不变, 但力的大小将随电量的改变而改变. 然而始终保持力 F 和 q_0 的比值 $\frac{F}{q_0}$ 为一恒矢量. 因此, $\frac{F}{q_0}$ 反映了 q_0 所在点处电场的性质, 称为**电场强度**, 用 E 表示, 即

$$E = \frac{F}{q_0} \quad (8.5)$$

当 q_0 为一个单位正电荷时, $E = F$, 即电场中任一点的电场强度等于单位正电荷在该点所受的电场力. 在 SI 制中, 场强 E 的单位是牛顿每库仑 (N/C), 也可以写成伏特每米 (V/m).

一般情况下, 电场中的不同点, 其场强的大小和方向是各不相同的. 要完整地描述整个电场, 必须知道空间各点的场强分布, 即求出矢量场函数 $E = E(r)$.

8.1.4 场强叠加原理

将试验电荷 q_0 放在点电荷系 q_1, q_2, \dots, q_n 所产生的电场中时, q_0 将受到各点电荷静电力的作用. 由静电力的叠加原理知, q_0 受到的总静电力

$$F = F_1 + F_2 + \dots + F_n$$

两边除以 q_0 , 得

$$\frac{F}{q_0} = \frac{F_1}{q_0} + \frac{F_2}{q_0} + \dots + \frac{F_n}{q_0}$$

按场强定义 $E = \frac{F}{q_0}$, 有

$$E = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{n=1}^n E_n \quad (8.6)$$

上式表明, 电场中任一场点处的总场强等于各个点电荷单独存在时在该点各自产生的场强的矢量和. 这就是**场强叠加原理**. 任何带电体都可以看作许多点电荷的集合, 由该原理可计算任意带电体产生的场强.

8.1.5 场强的计算

如果场源电荷分布状况已知, 那么根据场强叠加原理, 原则上可以求得电场分布.

1. 点电荷的电场

设真空中有一点电荷 q , P 为空间一点 (称为场点). r 为从 q 到 P 点的矢径. 当试验电荷 q_0 放在 P 点时, q_0 所受电场力为