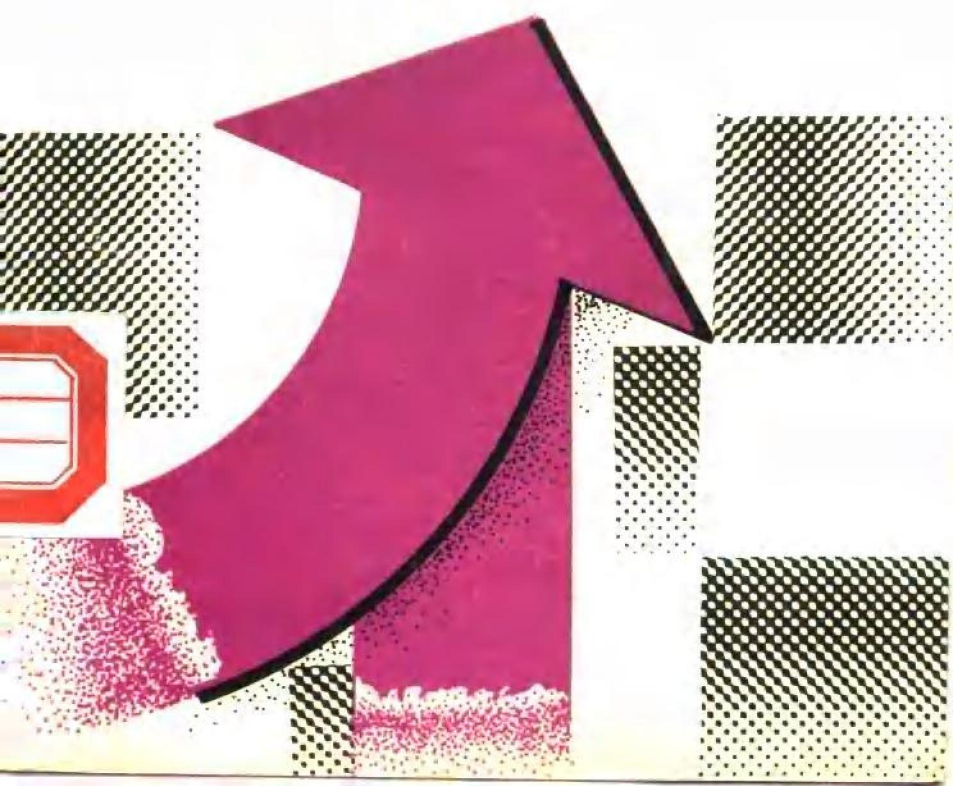


电磁学定律 和电磁场理论的 建立与发展

物理纵横丛书

陈熙谋 陈秉乾





科工委学院802 2 0124553 6

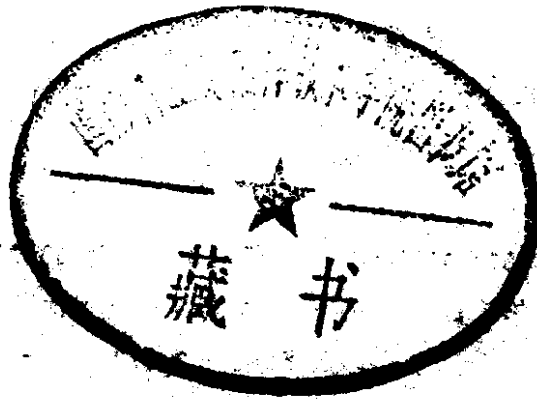
162073

物理纵横丛书

电磁学定律和 电磁场理论的 建立与发展

陈熙谋 陈秉乾

GF122/32



高等教育出版社

内 容 提 要

本书系作者根据在北京大学物理系多年从事“电磁学”教学和教材研究的成果编著而成。全书不仅对电磁学的几个基本实验定律和 Maxwell 电磁场理论的来龙去脉细加分析探讨,挖掘基本定律之间的内在联系,而且适当介绍了近代电磁学若干基本问题的研究动向。本书有利于丰富电磁学课程的教学内容和提高教学质量。并且文笔流畅,引人入胜。

本书是《物理纵横丛书》之一,适合于各类高校从事物理教学的师生,科学、哲学及科技史的有关学科工作者。亦可供广大中专、中学物理教师,自学青年等扩大知识面,开发智力,培养能力,学习科学思维方法,提高科学素养与兴趣之用。本书尤为适合广大从事电磁学教学的大、中学校教师和学习电磁学课程的大学生阅读,也可供涉猎科技史研究的科技教育工作者及广大社会读者参考。

(京) 112 号

物理纵横丛书

电磁学定律和 电磁场理论的 建立与发展

陈熙谋 陈秉乾

*

高等教育出版社出版

新华书店总店北京科技发行所发行

三河科教印刷厂印装

*

开本787×1092 1/32 印张5 字数100 000

1992年7月第1版 1992年7月第1次印刷

印数 0001—2 673

ISBN 7-04-003242-2/O·987

定价 2.80 元

序

当前,为进一步提高教学质量,主要应朝什么方向努力?这是许多从事基础课教学多年的同志走到一起时经常议论的话题。这个问题不那么好回答,甚至是否存在统一的答案,都不太清楚。

记得在六十年代,我们同事间曾议论过教师所应具备的素质和功底。当时谈到“一杯水”和“一桶水”的关系,意即教师在课堂上讲出“一杯水”的内容,需要有“一桶水”的知识作为后盾。不久后开始了那“史无前列”的时期,一切教学传统都被“横扫”了,什么都讲究“立竿见影”,于是初中毕业的教初中,高中毕业的教高中,甚至不学也可以上讲台,知识储备的问题就更谈不上了。这些年全国各地花了很大力气培训师资,也很难说已经完全补上这一课。

其实,“一桶水”和“一杯水”只是数量上的关系。要当好教师,这还是不够的。六十年代我们议论这个问题时,就曾有同志借郭老“丝、蜜、奶、漆”的比喻*,强调教师的工夫贵在“提炼”二字。教师和作家一样,应从丰富的知识背景中提炼出具有启发性的精华,再把它们有机地组织到教材中去。否则材料堆积,难免失之于臃肿庞杂,不会收到好的效果。当然,话

* 郭沫若1961年为宁波市文联题辞:“蚕吃桑而吐丝,蜂采花而酿蜜,牛食草而出奶,树吸肥而产漆。破其卷而取神,挹其精而去粕。熔宇宙之万有,凭呕心之创作。”

虽如此说,做起来却是很不容易的。

对于基础物理教学,教师应经常从哪些方面提取营养来不断充实自己的教学?近几年我一直在考虑这个问题。就我个人现在的认识来说,也许主要有三个方面:

一、现代物理学和有关边缘学科(如天体物理、生物物理)的前沿;

二、物理学史中至今仍有教育意义的题材;

三、物理学在各方面的应用。

陈熙谋、陈秉乾二同志写的这本小册子《电磁学定律和电磁学理论的建立与发展》涉及到上述一、二两个方面,特别是在历史方面,提供了丰富的资料。本书前两章对经典电磁学中主要定律的建立和发展过程,作了较详尽的叙述和介绍,这无疑是电磁学教学非常重要的背景知识。本书第三章将经典电磁学中的问题置于现代物理学的目光下加以审查,这也是基础课教师应该掌握的。

我衷心祝愿这本小册子的出版,能受到广大教电磁学的老师,乃至他们的学生的欢迎!

赵 凯 华

1987 年底于北大

自 序

在将近三十年的教师生涯中,我们曾多次讲授电磁学课程、编纂教材、撰写有关的教学研究论文。我们深切地感受到,电磁学大概是普通物理学中最“成熟”的经典内容之一。几十年来,无论体系、内容、甚至习题都没有什么大的变动,经过一遍遍教学的锤炼,它似乎已经完全“定型”了。

一个令人困惑的问题经常缠绕着我们:如何深入教学研究,发掘具有教育意义的内容,改进教学呢?于是,我们经常切磋探讨,也与其他同事广泛交流。这些富有启发性的讨论凝聚出一些有意义的问题:

1. 作为电磁学基础的基本实验定律,其精确定量形式是如何建立起来的?

2. Maxwell 是如何以彻底的近距作用观念提出涡旋电场、位移电流和电磁波的概念,并进而建立统一的电磁场理论的?

3. 电磁学与物理学其他部门的基本规律之间有什么深刻的联系?

4. 经典的电磁学理论已经发展得相当完善,它有些什么不足?物理学的近代发展向电磁学提出了一些什么新问题?

这些问题诱导我们去查阅各种文献资料,包括某些原始文献,通过深入探讨研究,一些问题逐步弄清楚了,有些曾以专题论文的形式在《大学物理》、《物理教学》上发表。这些问

题的澄清使我们认识到,科学定律和理论的建立不是一蹴而就的,不是一下子就以目前教学中的完善形式提出来的,而是许多科学家经过长期艰苦的探索、猜测、分析、综合、联想、类比、实验检验、理论论证,经过点点滴滴积累逐步完善起来的;挖掘物理定律之间的内在联系是深化认识的重要途径;基础性的内容值得深入研究,古老的问题可能生长出近代的研究课题。这些问题既有兴趣,又富有方法论的教益,使我们豁然开朗,看到了改进教学的希望。虽然一些问题的细节无须在课堂上讲授,但是教师占有雄厚的背景材料,有利于掌握和处理教材的分寸,提出有意义的问题诱导学生学习。此外,学生阅读有关的材料,肯定将有益于扩大知识面、了解科学发展的进程以及锻炼自己的科学素养。

本书不打算全面论述电磁学发展史。目前有关电磁学发展的通史性论文或著作已出版了不少。它们对于电磁学发展的背景提供了丰富的材料。我们仅试图就电磁学的几个基本实验定律和 Maxwell 电磁场理论作深入的剖析,揭示它们建立过程中具有方法论教益的物理思想,对于物理定律之间的相互联系以及电磁学近代若干基本课题的研究也作一些适当介绍,以利于读者了解电磁学研究正焕发着青春活力。

在本书定稿付印之际,我们感到要把原先的想法付诸实施并有所新意决非易事。但我们相信这类工作对于改进普通物理教学是必要的有益的,我们希望能够抛砖引玉,并诚恳地期待批评指正。

《物理纵横丛书》说明

根据国家教委1986—1990年高等学校理科物理类教材建设规划,我们拟在落实原《普通物理学系列参考丛书》、《物理学史参考丛书》及理科非物理类专业参考丛书等项选题的基础上,陆续出版《物理纵横丛书》.内容主要涉及古今中外物理学及相关学科的思想发展史实、评述、传略,以及围绕物理学科的各交叉学科、边缘学科、新学科、新方法、新原理、新应用等.例如,《电磁定律与电磁场理论的建立与发展》、《定性与半定量物理学》、《物质组成思想探溯——原子论与科学发展》、《量子理论的发展》等.目的在于扩大知识面,促进智力开发和能力的培养,加强科学思维方法的训练,提高科学素养与兴趣,发扬古今中外科学家的品德风范.

本丛书可供各类高校从事物理教学的教师、学生、研究生,中学中专物理教师,以及自然科学、哲学、科学技术史和其他有关学科的研究人员,自学青年等参考.

高等学校理科物理教材编审委员会

普通物理编审小组

高等教育出版社

1990年4月28日

目 录

第一章 电磁学三大基本实验定律的建立	1
§ 1 Coulomb 定律	1
§ 1.1 Coulomb 定律确立的历史概况	1
§ 1.2 电力平方反比律的精确验证	7
§ 2 Ampère 定律	16
§ 2.1 Oersted 的发现和早期电磁现象的实验研究	16
§ 2.2 Biot-Savart-Laplace 定律	17
§ 2.3 Ampère 定律的建立	20
§ 2.3.1 Ampère 的四个示零实验	20
§ 2.3.2 Ampère 电流元作用公式	23
§ 2.3.3 Ampère 定律的现代形式	27
§ 3 Faraday 电磁感应定律	31
参考文献	35
第二章 Maxwell 电磁场理论的建立	36
§ 1 Maxwell 电磁场理论赖以建立的物理基础	37
§ 1.1 超距、近距作用观点的论争与 Faraday 的挑战	37
§ 1.1.1 两种观点的早期论争	37
§ 1.1.2 Neumann、Weber 发展超距作用电磁理论的努力	40
附录 A 原始 Ampère 公式的两种形式	48
附录 B 由 Ampère 公式导出运动带电粒子之间的 Weber 力公式	49
附录 C 由 Weber 力公式导出 Neumann 的两载流线圈相互作用 能公式	53
附录 D 由运动带电粒子之间的 Weber 力公式导出感应电动势 公式	55

§ 1.1.3 Faraday 的“力线”和他对超距作用观点的挑战	57
§ 1.2 Thomson 富有启发性的对比研究	60
§ 2 Maxwell 建立电磁场理论的三篇论文	62
§ 2.1 Maxwell 的《论 Faraday 力线》(1855—1856)	
——两类矢量;电紧张状态的数学描述	64
§ 2.2 Maxwell 的《论物理力线》(1861—1862)	
——电磁作用的力学模型;位移电流和电磁波	67
§ 2.3 Maxwell 的《电磁场的动力学理论》(1865)	
——电磁动量;电磁场理论的完整方程组	75
§ 2.4 启迪	83
§ 3 建立 Maxwell 方程组的其他途径	85
§ 3.1 根据能量原理和近距作用原理建立 Maxwell 方程组	86
§ 3.2 根据 Coulomb 定律和 Lorentz 变换建立 Maxwell 方程组	92
§ 3.3 根据变分原理建立 Maxwell 方程组	98
参考文献	100
第三章 电磁学近代若干基本问题的研究	102
§ 1 Maxwell 电磁场理论的内在矛盾	102
§ 1.1 电子运动问题中的根本困难	102
§ 1.2 经典电磁场理论的适用限度	105
§ 2 量子电动力学	106
§ 2.1 场的量子化和电磁作用图景(机制)	106
§ 2.2 发散困难和重正化	110
§ 2.3 Lamb 能级移位和电子反常磁矩	111
§ 2.4 规范不变性与规范场	112
§ 3 磁单极问题	117
§ 3.1 问题的提出及其意义	117

§ 3.2 磁单极的若干性质	120
§ 3.3 磁单极子的实验探测	122
§ 4 Aharonov-Bohm 效应	125
§ 4.1 从基本量的观念谈起	125
§ 4.2 Aharonov-Bohm 效应	128
§ 4.3 实验观测	130
§ 5 光子静止质量问题	132
§ 5.1 光子静止质量不为零引起的后果	132
§ 5.2 光子静止质量的探测	136
§ 6 电弱统一问题	140
§ 6.1 弱作用与电磁作用的比较与人们对统一性的追求	140
§ 6.2 电弱统一理论的建立	141
§ 6.3 实验检验	144
参考文献	145

第一章 电磁学三大基本 实验定律的建立^{[1][2]}

Coulomb 定律、Ampère 定律和 Faraday 电磁感应定律是电磁学三大基本实验定律。这三个定律的建立标志着人类对于电磁现象的认识发展到了新阶段，人们从电磁现象的探索、观察、记录深入到寻找支配现象的物理定律。这些物理定律的定量形式和精确程度显然是十分重要的，它是电磁学作为精密科学的保证。本章将较为具体地阐述物理学家们从现象概括出定律的定量形式以及精确验证所做的工作。

§ 1 Coulomb 定律^{[3][4]}

§ 1.1 Coulomb 定律确立的历史概况

Coulomb 定律是关于两个静止点电荷相互作用力的规律。它指出，两个静止点电荷之间的作用力与点电荷电量的乘积成正比，与点电荷之间距离的平方成反比。后者又称为电力平方反比律。事实上无论是 Coulomb 或其他物理学家确立的电荷相互作用力规律都只涉及电力平方反比律，并未涉及电力与电量的关系，因为电力与电量的关系与电量的定义有关。

最早提出电力平方反比律的当推 Priestley (1733—1804)，Priestley 的好友，著名的电学家 Franklin 曾观察到

放在金属杯中的软木小球完全不受金属杯上电荷的影响。他把他观察到的现象写信告诉 Priestley，希望他重做此实验，并确认这一事实。1766 年，Priestley 做了实验，他使空腔金属容器带电，发现其内表面没有电荷，而且金属容器对于放于其内部的电荷明显地没有作用力。他立刻想到这一现象与万有引力情形非常相似，即放在均匀物质球壳内的物质不会受到来自壳体本身物质的作用力。因此，他猜测电力与万有引力有相同的规律，两个电荷间的作用力应与它们之间距离的平方成反比。

这是一项重要的类比猜测，但是，这一猜测在当时并未引起科学家们的重视，而 Priestley 本人对此猜测能否严格地予以证明又缺乏信心，这一发现就被搁置起来了。

1769 年爱丁堡的 Robison(1739—1805)首先用直接测量方法确定电力的定律，他得到两个同号电荷的斥力与距离的 2.06 次方成反比，而两个异号电荷的吸引力比平方反比的方次要小些，他推断正确的电力定律是平方反比律。他的研究结果在 1801 年发表才为人所知。

1772 年英国著名物理学家 Cavendish 遵循 Priestley 的思想以实验验证电力平方反比律。如果实验测定带电的空腔导体的内表面确实没有电荷，就可以确定电力遵从平方反比律。这个问题我们可简单分析如下。

如图 1.1 所示为一均匀带电球壳，面电荷密度为 σ ，球壳内有一点电荷 Q (位置任意，球心除外)。设点电荷之间的电力与距离 r 的 n 次方成反比，即

$$F \propto \frac{1}{r^n},$$

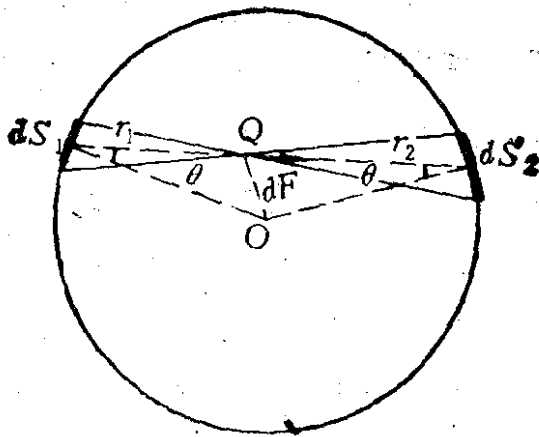


图 1.1

则球面上两个相对的面元 dS_1 和 dS_2 处的电荷 σdS_1 和 σdS_2 对球内点电荷 Q 的作用力的合力为

$$dF \propto \left(\frac{\sigma dS_1 Q}{r_1^n} - \frac{\sigma dS_2 Q}{r_2^n} \right)$$

式中 r_1 和 r_2 分别是 dS_1 和 dS_2 到点电荷 Q 的距离。由于两个相对的面元 dS_1 和 dS_2 在点电荷 Q 处所张的立体角相等，均为 $d\Omega$ ，

$$d\Omega = \frac{dS_1 \cos\theta}{r_1^2} = \frac{dS_2 \cos\theta}{r_2^2}$$

代入上式，得

$$dF \propto \frac{\sigma Q d\Omega}{\cos\theta} \left(\frac{1}{r_1^{n-2}} - \frac{1}{r_2^{n-2}} \right)$$

当 σ 和 Q 是同号电荷，且 $n > 2$ 时， dF 的方向指向距离较大的面元 dS_2 (图中 $r_2 > r_1$)，如图 1.1 所示。与 dS_1 、 dS_2 类似，可将整个球壳分成一对对面元，则每一对面元对点电荷 Q 的作用力都应指向距离较大的面元。整个均匀带电球壳对点电荷 Q 的作用力是各对面元对点电荷 Q 的作用力的矢量和。

结果可概括为：当 $n > 2$ 时，球壳上电荷作用于腔内同号电荷的合力不为零且指向球心，作用于腔内异号电荷的合力不为零且背离球心；当 $n < 2$ 时，球壳上电荷作用于腔内同号电荷的合力不为零且背离球心，作用于腔内异号电荷的合力不为零且指向球心；仅当严格有 $n = 2$ 时，即仅当电力与距离平方成反比时，球壳上的电荷对腔内电荷才没有作用力。换言之，仅当 $n = 2$ 时，均匀带电球壳内部场强才为零，如果带电球壳是导体空腔（内无电荷），则其内表面应无电荷，导体空腔内部任意两点的电位差为零。

Cavendish 的实验如图 1.2 所示。他将一个金属球形容器固定在一绝缘支柱上；用玻璃棒将两个金属半球固定在铰链于同一轴的两个木制框架上，把框架合拢来，使这两个半球构成与球形容器同心的绝缘导体球壳；用一根短导线联接球形容器和两个半球，利用一根系于短导线上的丝线来移动导线。Cavendish 先用短导线使球形容器与两半球相联，用莱顿瓶使两半球带电，莱顿瓶的电位可事先测定；随后通过丝线将短导线抽去，再将两半球移开，并使之放电；然后用当时最精确的木髓球静电计检测球形容器上的电状态。静电计并未检测到球形容器上有任何带电的迹象。此外，Cavendish 还检验了静电计的灵敏度。他将原先加在两半球上的电荷的一部分直接加在球形容器上，发现当球形容器上的电荷为两个半球上原先电荷的 $\frac{1}{60}$ 时，用静电计仍能检测出来。

为了得出定量的结果，Cavendish 假定电荷斥力与距离成反比的方次与 2 有微小的差别（差值为 δ ），计算了球形容器上的电荷与两半球上电荷的比值。他得到，如果上述方次

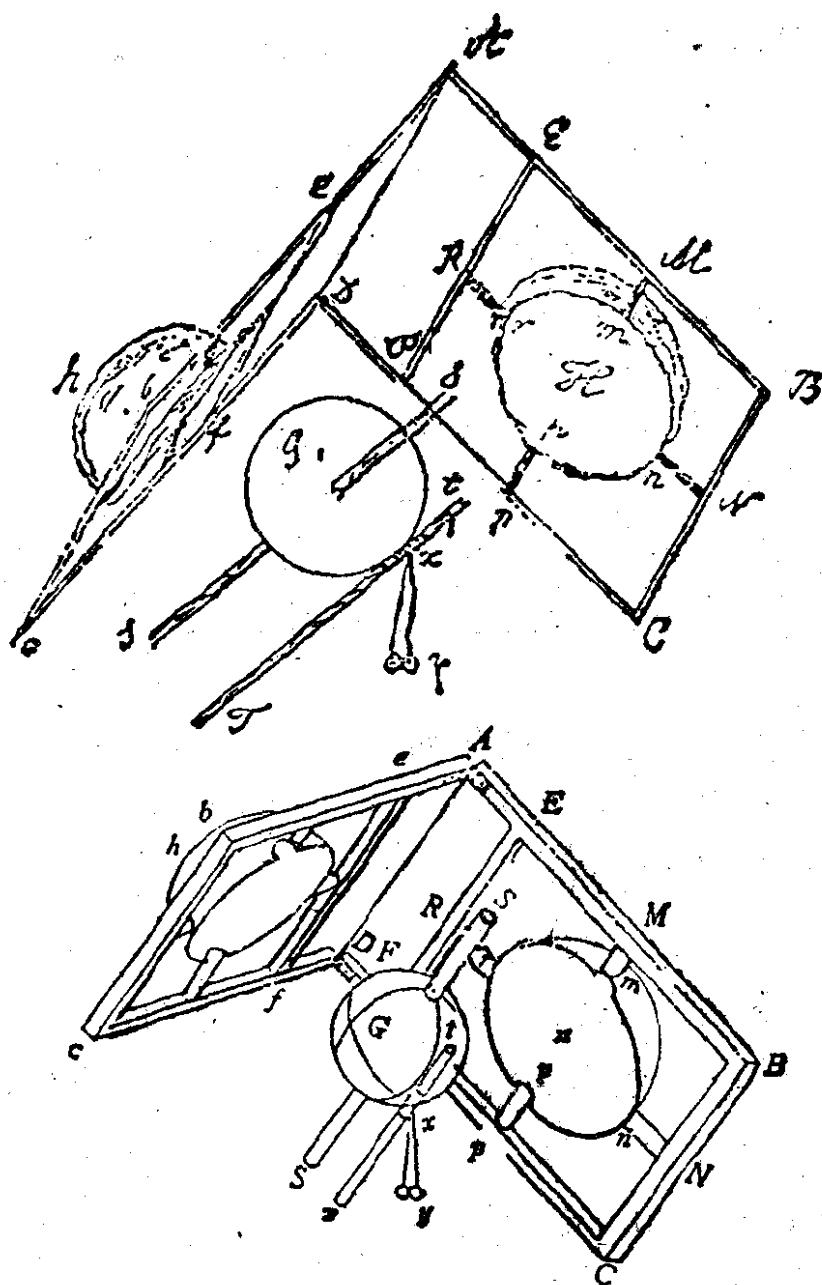


图 1.2 Cavendish 证实电力平方反比律所用的仪器。上图摹拟 Cavendish 本人的草图，下图系绘图员所画。内球直径为 12.1 吋*，两个中空胶纸板半球的直径稍微大些。球和半球均用锡箔覆盖，“以使它们成为较理想的导体”。

*注：此处用吋为英制单位 1 吋=2.54 厘米。

与 2 的差值 δ 为 $\frac{1}{50}$ 时, 则球形容器上的电荷应等于整个仪器上电荷的 $\frac{1}{57}$, 因此是可以用静电计检测出来的。但他并未检测到球形容器上有任何带电的迹象, 这表明电力与距离成反比的方次与 2 的差值 δ 不大于 $0.02 \left(= \frac{1}{50} \right)$ 。

Cavendish 实验得出的定量结果, 与十三年后(1785 年) Coulomb 用扭秤直接测量所得结果的精度相当。然而, Cavendish 实验是精确验证电力平方反比律的开创性工作, 在他以后, 二百年来, 这个实验不断重复和改进, 精度大大提高。

Cavendish 是个性情孤僻、专心致志于学术研究而不计功名的科学家, 他的许多研究成果都没有发表。一百年后 Maxwell 整理 Cavendish 的大量手稿, 才将上述结果公诸于世。

最为著名的是法国物理学家 Coulomb (1736—1806) 的工作。Coulomb 曾从事毛发和金属丝扭转弹性的研究, 这导致他在 1777 年发明了后被称为 Coulomb 秤的扭转天平或扭秤。1784 年 Coulomb 发表论文, 介绍他发现的扭转力与线材直径、长度、扭转角度以及与线材物理特性有关的常数之间的关系, 还介绍了用扭秤测量各种弱力的方法。同年, Coulomb 响应法国科学院有赏征集研究船用罗盘, 他的科学生涯开始从工程、建筑转向电、磁研究。1785 年 Coulomb 设计制作了一台精确的扭秤, 用扭秤实验证明同号电荷的斥力遵从平方反比律, 用振荡法证明异号电荷的吸引力也遵从平方反