

物理学概念 教学研究

李 忠 齐淑静 编著

湖南教育出版社

物理学概念教学研究

李 忠 齐淑静 编著

湖南教育出版社

物理学概念教学研究

李 忠 齐淑静 编著

责任编辑：常继大

湖南教育出版社出版发行

湖南省新华书店经销 湖南省新华印刷二厂印刷

850×1168 毫米 32 开 印张：13.5 字数：350,000

1997 年 4 月第 1 版 1997 年 4 月第 1 次印刷

ISBN 7-5355-2457-5/G·2452

定价：13.75 元

本书若有印刷、装订错误，可向承印厂调换

内 容 简 介

本书是一本专门对物理学基本概念进行深入探讨的中级物理读物，是作者三十多年的教学经验成果。为便于更多的读者阅读，书中数学一般只用到微积分和矢量代数的基本知识。在内容上通过横向比较和纵向联系，使读者能从知识的角度站在较高的层次上认识基本概念，并尽量给出一些理解、掌握基本概念规律性的法则。为有助于深刻认识，本书注意结合物理学方法论、物理学史、辩证逻辑和形式逻辑的基本观点，并由此出发给出掌握基本概念更一般的普遍原则。在对基本概念全面深刻认识的基础上，如何处理某些同一概念在中学、大学不同的教学层次，本书也有阐述。对某些基本概念现存认识上的不同观点本书也有介绍。

本书主要对象为中学物理教师。也可作为高等师范院校、综合大学物理系师生的参考书或选修课教材及在职中学青年物理教师继续教育、业务培训的参考读物。

本书第一、二、三、四、六章由李忠编写，第五章由齐淑静编写。

目 录

第一章 物理学研究对象涉及的基本概念	(1)
1-1 物质概念及“场”的物质性	(2)
1-2 物质“存在的基本形态”：“实物”与“场”概念的发展	(3)
1-3 物质的根本属性——“运动”所涉及的基本概念	(17)
1-4 物质“存在的基本形式”——“空间”和“时间”的概念(物理时空观的进展)	(18)
第二章 物理学方法论关于“概念”的基本观点	(44)
2-1 理论认识的来源——天然实验和模拟实验	(44)
2-2 什么是“概念”、“物理概念”和“物理量”	(46)
2-3 明确概念的逻辑方法——“比较”、“划分”(或“分类”)及“定义”	(48)
2-4 物理量定义的方法	(55)
2-5 理想化方法引入的基本概念	(62)
2-6 形成科学假说的思维方法简介	(66)
2-7 理论体系的结构	(76)
2-8 对理论检验标准的认识	(78)
第三章 力学的基本概念	(82)
3-1 从教学体系认识经典力学的理论基础	(82)
3-2 经典力学涉及的基本概念和原理	(84)
3-3 牛顿第一定律涉及的几个基本概念间的“循环论证”问题	(85)
3-4 牛顿第一定律中几个基本概念的科学认识	(91)

3-5	牛顿第一定律在经典力学理论系统中的重要地位	(96)
3-6	牛顿第一定律的实验验证	(100)
3-7	力的概念 (“定义”及分类)	(100)
3-8	质量 (惯性质量和引力质量) 概念	(110)
3-9	牛顿第二定律的建立及其实验验证问题	(115)
3-10	“物质的量” (amount of substance) 概念	(118)
3-11	经典力学理论的适用范围	(120)
3-12	力和质量基本概念地位的变革	(125)
3-13	“合外力”与“外力矢量和”在概念上的区别	(132)
3-14	“质点”理想模型的抽象条件	(136)
3-15	重力概念的分析, 重量概念的废弃	(144)
3-16	弹力概念的分析	(148)
3-17	摩擦力概念的分析	(168)
3-18	汽车的等效牵引力和等效阻力概念	(181)
3-19	动量和动能概念的联系与区别	(192)
3-20	力学中的三条守恒定律及其成立的条件	(197)
第四章	热学的基本概念	(208)
4-1	热学涉及的基本概念和原理	(208)
4-2	温度概念及其温标	(211)
4-3	能量、内能、功和热量的科学定义	(226)
4-4	不可逆过程和熵的概念	(236)
4-5	“宇宙热寂说”佯谬	(248)
4-6	绝对零度、负绝对温度及量子统计的温度的微观 “定义”	(262)
4-7	静止流体内部压强的微观实质	(274)
4-8	水的一些特殊性质及氢键概念	(286)
第五章	电磁学的基本概念	(301)

5-1	谈谈电磁学学习的一些特点	(301)
5-2	库仑定律	(310)
5-3	静电场中的电势	(315)
5-4	电力线及其应用	(327)
5-5	有介质存在时的静电场	(331)
5-6	电磁学中的场和路	(335)
5-7	磁介质的模型和宏观场 B 、 H	(339)
5-8	对法拉第电磁感应定律的讨论	(349)
5-9	是磁场作功, 还是电源作功	(354)
第六章	光学的基本概念	(358)
6-1	光的概念及光的本性	(358)
6-2	光学理论体系的构成	(366)
6-3	关于“光波”的几个基本概念	(368)
6-4	波的独立传播原理和叠加原理	(373)
6-5	光的干涉现象中涉及的几个基本概念	(374)
6-6	光的衍射现象	(384)
6-7	惠更斯-菲涅耳原理	(387)
6-8	光的干涉和衍射在概念上的比较	(394)
6-9	光的偏振现象中几个基本概念	(401)
6-10	几何光学的基本概念和基本原理	(407)
6-11	鱼的“像”在哪里? ——平面折射成像的像散	(418)
6-12	光度学中的基本量——发光强度 I_v	(421)

第一章 物理学研究对象涉及的基本概念

物理学概念从明确概念的逻辑顺序区分，可以分为基本概念和导出概念。

基本概念（或称为“范畴”）也有它不同的层次。最“大”的范畴是辩证逻辑范畴（由哲学的地位和逻辑学的地位决定，它适用于一切社会科学和自然科学）。它包括：唯物辩证法范畴（物质和意识、运动和静止、时间和空间、对立和统一、质变和量变、肯定和否定、本质和现象、内容和形式、必然性和偶然性、原因和结果、可能和现实）；认识论范畴（实践和认识、感性和理性、真理和谬论、绝对真理和相对真理）；逻辑范畴（思维形式的范畴、思维规律的范畴以及思维方法的范畴，这里从略）。其次是具体科学（如物理学）总范畴。物理学的总范畴是那些与物理学研究对象有关的基本概念，它包括：物质存在的基本形态（实物和场或粒子和场）、物质的根本属性（运动的绝对性，运动描述的相对性，各种物质低级的运动形式）、物质存在的基本形式（物理学的时间和空间概念）等。

再其次是物理学中各具体学科（研究不同的运动形式之规律）理论系统的范畴。如经典力学中主要是力、质量、惯性、惯性运动、惯性参照系等。

本书第一章主要涉及物理学的总范畴，具体学科的基本概念在其他章中分别叙述。须说明的是，一些重要的导出概念，书中附带也做了一些讲解，它们虽不是基本概念，但却是重要的概念，需要我们很好地掌握。

物理学的研究对象是：物质的结构及其较低级运动形式的规律。

在这里牵涉到一些最为基本的概念，分述如下。

1.1 物质概念及“场”的物质性

“物质”概念是最基本的概念。不仅在物理学中，在哲学中也是最基本的概念。

什么是物质？如何理解物质概念？列宁给出了一个科学的定义：“物质是标志客观实在的哲学范畴，这种客观实在是人感觉到的，它不依赖于我们的感觉而存在，为我们的感觉所复写、摄影、反映。”

列宁这个著名的物质定义，给我们一个启示：对客观事物的认识只有上升到“概念”，才能得到本质的全面的认识。只列举世界上的万事万物去说明什么是物质，不但抓不住其本质，也永远不能列举完全而达到全面的认识。只有通过人脑的这种思维形式，抽象出该事物与其他事物相区别的本质属性，才能达到对事物的本质认识。物质的本质属性是什么？列宁在定义明确指出，就是它的“客观实在性”。这种“客观实在性”的特点是什么？就是它可以被人们所感觉（包括借助仪器的间接感觉），但又不依赖于我们的感觉而存在。只要具备这种本质属性就可称其为“物质”。

“物质的抽象，自然规律的抽象，价值的抽象以及其他等等，一句话，一切科学的（正确的、郑重的、非瞎说的）抽象，都更深刻、更正确、更完全地反映着自然。”（列宁语）因为科学的抽象能抓住事物的本质。

“场”同“实物”一样，也是一种物质。但由于其物质属性一般不能由人的感官所直接察觉，往往使初学者对其物质性难以理解。如何论证“场”的物质性？其根据正是物质科学定义所规定的内涵。

经典物理学认为，“场”是传递实物间相互作用的一种物质形态。它同实物一样，也具有“客观实在性”的本质属性。以电磁

场为例，它同样具有能量、动量、角动量以及（相对论的）质量；在空间以有限速度传播并遵循确定的运动规律（麦克斯韦方程组）。它与别的物质相互作用，借助仪器可以感觉到它的物质性。例如，可以测到运动电荷在电磁场中受到“力”的作用，用收音机和电视机可以获得电磁波携带的“能量”，列别捷夫的“光压”实验，有力地证明了电磁场具有能量、动量和（相对论的）质量。而一定条件下场与实物可以相互转化的实验（例如电子和正电子湮没为两个光子，即 $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$ ）更雄辩地说明了场与实物在物质性上的内在一致。

量子场论进一步指出，“场”（指“量子场”）是物质存在的最基本形态，实物不过是场处于激发态的表现。这时，实物粒子与其对应的量子场是同一概念（如电子和电子场），而媒介粒子与其对应的量子场也是同一概念（如光子和电磁场）。场可以量子化，更好地体现了物质的波粒二象性。量子场论将场的物质性的认识又向前推进了一步。

1-2 物质“存在的基本形态”：

“实物”与“场”概念的发展

“量子理论的主要信条：根本的实在乃是一组服从特殊相对论和量子力学的场，其他一切都可作为那些场的量子动力学的结果推演出来。”

——Steven Weinberg

（史蒂文·温伯格，1979年诺贝尔奖金获得者）

物理学理论的发展，以狭义、广义相对论和量子理论的诞生为标志，已经由经典物理学进入到近代物理学阶段，这是一次重大的理论上的变革，一些经典物理学的基本概念和基本原理受到了冲击，而代之以更高层次的理论上的认识。事实证明，自然科学的每一步进展都丰富了辩证唯物主义的基本观点。

现代物理学仍属于近代物理学阶段，只是对经典物理学的变革更加深入了。这一变革的深入大体沿两个方向进行：从宏观角度广泛相对论的研究进一步扩展到宇宙领域，例如对宇宙的研究，它是现代宇宙学的理论基础；从微观角度，前期量子论的提出（普朗克的“能量子假设”和爱因斯坦的“光量子假设”）到量子力学的建立，已经将研究领域由原子、原子核深入到微观粒子尺度（ $\sim 10^{-10}$ 米），即由原子物理学、原子核物理学进入到粒子物理学或高能物理学阶段。目前，粒子物理学的主要基本理论是相对论性的量子场论，它以经典场论、相对论和量子力学为基础，已初步取得了成功，现还在不断地发展中，并且逐步走向渺观领域（如探讨我们宇宙的起源演化机制等等问题）。物理学的理论的发展还有这样的趋势，就是宏观理论与微观理论的紧密结合（例如，关于引力场量子化的“量子引力论”，探讨四种相互作用场统一的“超统一，超引力理论”等）并且更加注意从微观上探讨物质存在的基本形态，以力求得到物质统一的存在基本形态（例如，正在探讨中的“超对称性理论”）。

下面，从现代物理学理论（主要是广义相对论和量子场论）介绍一下对物质存在的基本形态的认识状况及今后的探索方向。

一、量子场论之前的近代物理学的探索

在现代量子场论之前，长期以来物理学理论（主要是广义相对论和量子力学）的看法是：物质有两种基本存在形态——实物和场。

这时，实物被定义为“具有静止质量的微观粒子以及由它们所组成的物体”。须注意，实物中包括正实物（正粒子组成）和反实物（反粒子组成）。而场则被定义为“传递实物间相互作用的物质形态。”相应于不同实物间的相互作用，至今物理学认识到有四种场：引力场、电磁场、强相互作用场和弱相互作用场。从宏观看来，实物与场在存在形态上的主要区别是质量（注意不是仅指

静止质量)或能量在空间中相对的集中,有较为确定的界面,占据有限的空间,有“不可入性”,是一种物质“集聚”的形态。而场表现为物质在空间中的连续分布且具有可叠加性,描述场的物理量满足波动方程,可给出各处场量随时间的变化规律,这就是场波动性的特征。从经典观念看来,实物具有粒子性,场具有波动性,二者从概念上是不能相容的。

顺便指出,所谓“物态”,仅是指实物的存在基本形态。至今科学上发现约有10种:在日常条件下,除大家熟知的“固态”(严格应称为“结晶态”)、液态和气态之外,还有“非晶态”(例如普通玻璃、橡胶、天然树脂、沥青和高分子塑料等)、“液晶态”。在特殊条件下还发现五种物态:超高温下的“等离子态”(例如太阳等炽热恒星内部的情况)、超高压下的“超固态”(原子被“压碎”,原子核紧密排列,例如恒星后期“白矮星”内部的情况)及“中子态”(原子核进一步被“压碎”,中子紧密排列,例如恒星后期“中子星”内部的情况)、超低温下的“超导态”(例如,普铁是发现汞在温度降到4.173K即约-269°C时,出现失去电阻的现象)和“超流态”(目前仅发现液态氦在降到2.17K时突然出现的超流动性)等。

但物理学的发展,却逐步在走向这两个概念的统一。从微观上看,实物与其相应的相互作用场间事实上不能截然分开,因为实物与场的明确界面无法确定,例如:质子和中子总为一个属于其结构的虚 π 介子外壳所包围,与强相互作用场不能截然分开。因此,爱因斯坦说:“实物和场之间的区别,与其说是定性的问题,倒不如说是定量的问题。”“实物便是能量密度特别大的地方,场便是能量密度小的地方。”“把实物和场看作是彼此完全不同性质的两种东西是毫无意义的。”

以后的微观物理学的实验进一步说明,实物与相互作用场间的紧密联系。从存在的角度看,任何实物必与相应的相互作用场同时存在(不但实物外,实物内粒子间也有相互作用场,虽然相

互作用场有时却可以脱离实物“场源”而独立存在，例如，光源消失，原发出的光仍可在空中传播。从相互转化角度看，正负实物粒子与相互作用场间在一定条件下可以相互转化（例如正负电子对与光子的相互转化等等）。

爱因斯坦早就提出了一个大胆的设想：从“质能相当”出发，实物与场无定性区别，所以可否设想将实物归入场，“场是唯一的实在”。他提出，能否实现这一看法的关键是物理学理论的研究上要达到“改变场的定律，使它在能量密度极大的地方仍不致失效。”他说：经典物理学的“结构定律，即麦克斯韦定律和引力定律，在能量密度非常大的地方就失效了，或者说，在场源存在的地方，即带电体或实物存在的地方便失效了。”（本文作者注：这正是经典物理学必须区分为实物和场的真正原因。）但是我们能否稍微改变我们的路程，使它能到处有效，甚至在能量密度极大的地方也有效呢？“我们是否能够放弃纯实物的概念而建立起纯粹是场的物理学呢？”“在我们这种新的物理学中，不容许有场和实物两种实在，因而场是唯一的实在。”“可以把实物看作是空间中场特别强的一些区域。”

但是，在爱因斯坦所在的年代，物理学理论的发展还没有达到这个目标。因此，他说：“但是至今我们还未曾有力地可靠地实现这个预示，究竟能否实现，还有待于未来作出决定。目前我们在所有实际的理论体系中还得假定两种实在：场和实物。”（3）

这正是长期以来，物理学理论上的看法。但是，爱因斯坦的看法是：这可能是理论上还不成熟的表现。物理学理论的研究应该向“场是唯一的实在”努力。的确，目前物理学理论的发展，尤其是微观理论——由量子力学到量子场论正在向这个方向上发展，并已在某些方面取得很大成功。

微观理论首先在物质的粒子性和波动性的统一上进行了研究。从经典物理学看来，粒子性和波动性对同一物质客体来说是

不能相容的。但是量子理论的发展却一再证明物质可以同时具备粒子性和波动性，经典理论中两个不相容的概念在一种新的意义上可以统一，从而进一步消除了实物与场在概念上的鸿沟，为两种存在形态的统一做出了贡献。

首先是爱因斯坦基于普朗克“能量子假设”提出的“光量子假设”，说明光（即一种电磁场）不仅具有波动性，也具有粒子性；之后，德布罗意的“物质波假设”，说明实物粒子（静止质量不为0的微观粒子）不仅具有粒子性，还具有波动性。进而推广为一切微观粒子（无论静止质量为0与否）都同样具有粒子性和波动性。这为实物与场在概念上的统一铺平了道路。

自德布罗意“物质波假设”开始，量子力学得到了充分的发展。量子力学是描述微观粒子运动规律的物理学科，在实物与场的两种存在形态中它侧重立足于实物的存在形态，阐述了实物与场的统一性（表现为实物粒子的波粒二象性：薛定谔证明基于波动性的波动力学与基于粒子性的矩阵力学在理论上等价，是波粒二象性能够在同一物质客体上统一的深刻的理论依据，也说明了这确是物质运动特性的客观反映。）

但是，作为微观物理学的基础理论，量子力学还有它的不足。这表现在：①它的主要研究对象是静止质量不为0的实物粒子，在其理论体系中真正有意义的只是实物粒子的波粒二象性。“在量子力学里并没有把光当做粒子处理，满足波动力学中的薛定谔方程是实物粒子而不是光子。”因此，它主要侧重于实物粒子的波粒二象性研究。作为基础理论应该是研究的对象具有普遍性，而在这方面量子力学的研究对象还有局限性。②量子力学中对实物粒子的波粒二象性的描写还有其认识上的局限性。这表现在量子力学中“首先要有实物粒子的粒子性概念，然后才谈到它的波动性。所谓波动，不过是粒子的概率波，脱离了粒子，概率波就失去了意义。所以，在量子力学里，即使对实物粒子的波粒二象性，也不是一种在物理学上真正平等的二重性，而是建筑在经典粒子概念

之上的一种概率描写。”“总而言之，量子力学里所说的微粒性和波动性，都没有摆脱经典观念的束缚。”③与实物粒子波动性所对应的还不是真实的物理波场，而仅指粒子的概率波。概率波的变化规律在非相对论理论中满足薛定谔方程，用它可以求得粒子的状态（用波函数 $\psi(\mathbf{r}, t)$ 描写，它是坐标 $\mathbf{r}$ 和时间 t 的复函数）随时间的变化规律，但与经典电磁场的场量不同， ψ 本身没有直接的物理实在性，是一个非物理量。按照波恩的波函数统计诠释是：波函数绝对值的平方 $|\psi|^2$ 与某时某处粒子在单位体积内出现的概率成比例。他说：“满足波动方程的波完全不代表物质粒子的运动，它们仅仅决定物质的可能运动，或者不如说仅仅决定物质的可能状态。”因此，量子力学中粒子的波动性不是指某种真实物理场波动的行为，而是指粒子具有的各种力学量（如坐标、动量、角动量、能量等）量子力学中用作用于波函数的各种算符或多行多列的矩阵计算，任时刻在空间所显示出来的一种统计的概率分布。所以在量子力学中，从物质存在形态上看，实物粒子与场还没有建立真正的联系而达到统一。④量子力学对实物粒子运动规律的描写也不完备——不能描写粒子的产生和消失，却不能描述微观粒子间普遍的相互转化过程，这只有在物理学理论上真正达到实物与场在存在形态上的统一才能达到。

二、量子场论的初步探索

近年来，在狭义相对论和量子力学基础之上发展起来的量子场论在这方面取得了一定成果，而且正在微观理论的研究上成为一个有希望的研究方向。

量子场论的研究方向重新又回到了爱因斯坦设想的主题：将实物归于场，场是更基本的物质存在形态。它不仅坚持了而且从更高的角度强调了“相互作用场”的波粒二象性，也提出了“实物粒子场”的新概念，以在存在形态上实现实物与场在概念上的统一，并且从相互转化的角度也说明了“实物粒子场”与“相互

作用场”的统一。量子场论的发展成果，日益为物质存在的基本形态上的认识做出了有益的贡献。

量子场论目前仍是处于不断向前发展的物理学科，虽然已在某些方面做出了令人瞩目的成绩，但有些结论仍处于假设阶段。因此，在物质存在基本形态上目前仅提供一些较为公认的基本看法。

在阐明量子场论的观点之前，先说明一下目前物理学在理论上对微观粒子在最小层次上的分类。(以 m_0 表示静止质量，以“?”表示未经实验证实。)

首先将微观粒子分为实物粒子和媒介粒子两大类，这种分类是与原来实物与相互作用场两种存在形态相对应的。

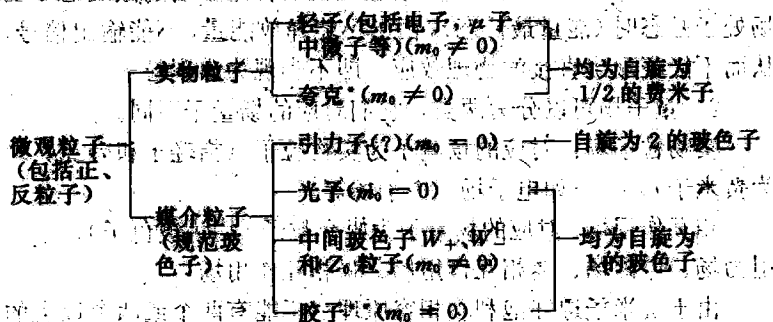


图 1-1

注：* 由于目前物理学理论及实验均未能证明有独立自由夸克的存在，即“夸克囚禁”问题，所以夸克目前仅是理论上最小层次的粒子。在实验上，是以夸克、反夸克和胶子的复合粒子——强子（包括重子和介子）形态出现的。

* 现在实验上也没有发现自由胶子存在，但实验上已可间接验证夸克和胶子在强子内部的存在，因此无论夸克和胶子均可作为目前理论上一种最小层次的粒子。现有实验和理论已认识到，夸克和反夸克是通过胶子传递色相互作用结合成强子的，胶子是传递夸克间色相互作用的媒介粒子。而强子之间的强相互作用，不过是这种色相互作用的剩余作用，但不能简单归结为交换胶子，特别是能量不高时，强相互作用的媒介粒子主要表现为介子 ($m_0 \neq 0$ 自旋为 0 或 1，也是玻色子)。这类似于分子之间的范氏力，它是复杂电磁相互作用的剩余作用，也不能简单地归结为交换光子。因此，我们说，强相互作用的原始媒介粒子应是胶子。

须说明，在这一层次上，理论上还预言存在一种黑格斯粒子 ($m_0 \neq 0$, 自旋为 0 的玻色子)。它在规范场论中，通过黑格斯机制实现对称性的自发破缺，在相互作用场间统一的机理上起重要作用，但至今实验上没有发现。

现在，我们来阐明量子场论关于物质存在基本形态的观点。

1. 在物质存在的两种形态中，场是更基本的物质存在形态。

这表现为任何一种粒子（包括实物粒子和媒介粒子）均对应一种场——称为“量子场”，粒子称为对应的“场量子”。粒子不过是场处于激发状态的表现。不同激发态，表现为粒子的数目和运动状态不同。因此，一个粒子也对应一种量子场的激发态。当场处于基态时（能量最低态），由于不能释放能量，不能输出信号，从而不能表现出直接的物理效应，即不表现为出现粒子。

2. 量子场可以分为两类，它们对应的场量子不同。

实物粒子场：对应的场量子为实物粒子（指轻子和夸克，均为费米子）。——如电子场、中子场等。

相互作用场：对应的场量子为媒介粒子（均为玻色子）。——引力场、电磁场、弱相互作用场、强相互作用场。

由于费米子遵守泡利不相容原理（不能有两个或两个以上的费米子处于同一状态），有不可入性。而玻色子不遵守泡利不相容原理，没有不可入性。导致这两种量子场有明显差别。

费米系统由反对称波函数描述，遵循费米—狄拉克统计，场的量子化时用反对易关系；玻色系统由对称波函数描述，遵循玻色—爱因斯坦统计，场的量子化时用对易关系。

但无论哪种量子场均没有不可入性，各种场在空间中可以互相重叠地充满全空间。

3. 真空态是各种量子场均处于基态的状态。因此不存在任何物理粒子，只表现为场这一种物质存在形态，这进一步说明了场较各种粒子来说是更为基本的存在形态。

真空不是空无一物，其物质存在形态是处于基态的各种量子