

1.1. 现存物理学体系结构/Review of Fundamental Principles of Physics

关于现存物理学体系的流行观点是[1]: 经典力学、经典电磁学和经典热力学是经典物理学的基础, 相对论与量子论是支撑现代物理学的两大支柱。按照这种观点, 物理学的体系结构可以用图 1.1 形象地描述。

力学研究的是物体的机械运动, 即研究物体的空间位形随时间的变化规律。经典力学的基础是由伽利略、牛顿建立的。牛顿通过综合前人的研究工作, 于 1687 年在他的名著《自然哲学的数学原理》中将物质、时空、运动从一般哲学概念发展为可用数学作定量表述的定义、定律、定理, 发表了著名的力学运动三定律, 创立了牛顿力学体系, 从而奠定了经典力学的基础。牛顿力学以力的概念为基础, 直观形象而且易于理解, 但需要借助参考系, 运算比较复杂。1788 年拉格朗日在总结伯努利、达朗贝尔、欧拉工作的基础上发表了著名的《分析力学》, 它用体系的动能和势能替代加速度和力的概念, 简化了力学运算, 建立了经典力学的拉格朗日形式。十九世纪 30 年代, 哈密顿又推广了分析力学, 将力学体系的变量从空间坐标扩大到相应的动量, 进一步拓展了经典力学的应用范围[2]。

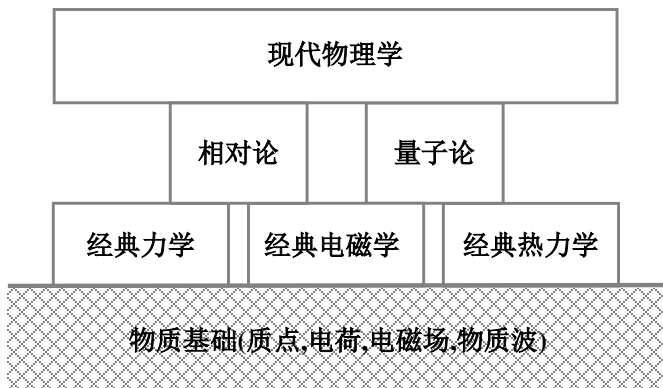


图 1.1. 现存物理学体系结构示意图。

电磁学研究电和磁的相互作用现象及其规律，广义的经典电磁学包含了经典电动力学。库仑定律揭示了点电荷间静电作用力的实验规律，毕奥-萨伐尔定律揭示了电现象和磁现象之间的紧密联系，而法拉第电磁感应定律则揭示了磁电之间的转化关系。电磁学将电磁作用过程归结为场的传递，麦克斯韦综合所有电磁实验现象与规律，提出了著名的电磁场方程组，从而建立了完整的经典电磁场理论体系[3]。

相对论是关于时空和引力的基本理论。牛顿力学定律(运动定律和引力定律)依赖于绝对时空和超距作用概念，但是绝对时空、超距作用与经典电磁场理论不相容。为了调和两者的矛盾，爱因斯坦通过建立相对论将力学和电磁学在运动学的基础上统一起来。一方面，相对论巩固了力学和电磁学在经典物理学中的基础地位，另一方面，由狭义相对论引入的相对时空观念已融入现代物理，由广义相对论发展的引力理论也成为现代物理学的重要组成部分。

热力学研究宏观物体的热现象规律及其相关物理性质。经典热力学的基础是热力学三大定律，研究内容包括热现象过程中能量转化的数量关系，判断物理过程进行的方向以及物质的平衡性质。与热力学相平行的是统计物理，统计物理从物体的微观组成与结构出发，研究大量微观粒子系统的宏观热学性质，是联系宏观性质和微观性质的桥梁。统计物理和热力学均以研究热现象规律为目的，但是统计物理是微观理论，热力学是宏观理论，不需涉及微观细节。经典统计物理建立于十九世纪下半叶，它以经典力学为背景，以等几率原理和吉布斯系综统计为基础，曾经获得很大的成功。但十九世纪末在应用到固体比热、特别是黑体辐射问题时遇到了不可克服的困难。普朗克通过对黑体辐射能谱的研究提出了量子假设，从而揭开了创建量子力学的序幕[4]。

量子力学是描述微观粒子运动规律的理论，研究内容包括原子、分子、

凝聚态物质，以及原子核和基本粒子的结构和性质。在量子力学中，一个物理体系的状态由波函数表示，波函数的任意线性叠加仍然代表体系的可能状态，物理量对应于算符对波函数的作用，波函数的模平方代表物理量出现的几率密度。量子力学是 20 世纪人类文明发展的一个重大飞跃，量子力学的发现引发了一系列划时代的科学发现与技术发明，它与相对论一起构成了现代物理学的理论基础，并对人类社会的进步做出了重要贡献[5]。

1.2. 物理学是不完善的体系/Problems in Fundamental Principles of Physics

现存物理学体系存在着重大缺陷，表现在各个学科缺乏共同的物质基础，貌似稳定的结构包含着深刻的内在矛盾。

首先，现有物理学体系缺乏共同的物质基础。牛顿力学的物质基础是质点，电磁学的物质基础是电荷，根据爱因斯坦的质能等价关系，波动的电磁场也是一种物质形态。热力学的物质基础是粒子，而量子论的物质基础则是具有波粒二象性的物质波。物理学是研究物质运动规律的学科，可是关于物质是什么的问题至今没有统一的认识。由于这种混乱的物质观，本该作为物理学最底层的物质粒子结构问题却变成了高居物理学顶层的尖端领域，这种本末倒置的情况导致物质结构问题扑朔迷离。现今粒子标准模型已由“上帝粒子”的发现宣告完成，但物理学依然处于无法统一的窘境。

另外，物理学各领域之间也存在深刻的矛盾。牛顿力学的绝对时空与经典电磁场理论不相适应，量子力学的定态概念与经典力学图像无法协调，爱因斯坦相对论的非线性、定域性和实在论本质也与正统量子力学的线性、非定域性和实证论本性格格不入。事实表明，虽然狭义相对论表观上协调了牛顿力学与电磁场理论的矛盾，但是由广义相对论描述的引力与经典电

磁力的统一却至今无法完成。在经过二十世纪的“革命”之后，物理学内部仍然处于四分五裂的局面，现行的“四大力学”（牛顿力学、电动力学、热力学和量子力学）理论仍然互不相通，预期中的新的科学综合并没有实现。

正如史蒂文·温伯格(S. Weinberg)在《引力论和宇宙论—广义相对论的原理和应用》中所说：“物理学并不是一个已完成的逻辑体系。相反，它每时每刻都存在着一些观念上的巨大混乱，有些像民间史诗那样，从往昔英雄时代流传下来；而另一些则是像空想小说那样，从我们对于将来会有伟大的综合理论的向往中产生出来。”

1.3. 统一物理学的基础/Basis of Unified Physics

1) 统一物理学的评判标准

如果存在一个关于自然的统一理论，这个理论必须具有物理真实性、原理简单性、逻辑自洽性和普遍适用性[6]。

物理的真实性是统一物理学理论的首要前提。真实的物理理论必须有清晰的物理图像，符合物理与数学、形象思维与逻辑思维相统一的原则。有物理图像的理论不一定真实，但是没有物理图像的理论一定不真实。数学理论是基于定义、公理和演绎规则的逻辑体系，它不需要以真实性为前提。一个物理理论如果没有清晰的物理图像，而是建立在不正确的抽象数学概念之上，这样的理论不可能是真实世界的完全反映。

原理的简单性是统一物理学的必然要求，也是自然规律简单统一性的客观反映。自然规律是简单的，反映这个规律的理论也必然是简单的。一个普适理论并不需要更多的假设、运用更加复杂的数学工具。恰恰相反，一个理论的假设越少，数学越简单，普适性越强，越能真实反映自然。

逻辑的自洽性要求构建理论过程必须符合思维规则，保证概念和观点的前后一致，逻辑推理和数学演算正确无误，内部结论之间相容不悖。

普遍适用性则要求能够给出广泛物理现象的统一描述，能够解释和预测从微观、宏观到宇观各个物质层次的自然现象。

2) 统一物理学的物质基础

统一的物理学必须建立在共同的物质基础上。由于物质波是逻辑矛盾的概念，根据自洽性要求，应该排除。这个基础必须是一元论的，要么是粒子，要么是波场。由于粒子是定域的、客观的物质形态，而场是非定域的、抽象的数学概念，根据简单性标准判断，一元论的物质基础只能是实物粒子，这是本书的根本出发点。

以光现象为例，历史上关于光的本质有两种对立的学说。微粒说认为光线是微粒流，它遵循力学规律以一定的速度在真空或介质中运动。波动说认为光是存在于宇宙中的类似于弹性介质的以太机械振动波。以牛顿为代表的微粒说能够较好地解释光的直线传播、反射和折射现象，十九世纪以前，微粒说一直占有统治地位。但是微粒说难以解释光的干涉和衍射、光束的独立性和光的双折射等现象，以惠更斯为代表的波动说则把光和声类比，把光看作是一弹性机械纵波，从而较好地解释了双折射和光束独立性现象。19世纪初，托马斯·扬作了双缝实验，提出了光的波长、频率等概念，很好地解释了光的干涉和衍射现象。十九世纪中叶，由于电磁场理论的建立，揭示了光现象和电磁现象的内在联系，确认光波是一种电磁波。电磁理论的进一步发展，使电磁场的概念代替了机械以太的概念。到了二十世纪初，普朗克和爱因斯坦相继提出量子 and 光量子概念，二十世纪20年代建立的量子力学，进一步确立了包括光量子在内的一切微观粒子都具有波粒二象性的理论。粒子既具有微粒性又具有波动性，这是确凿的事实，

但是这种波粒二象性的统一机制如何，是物理学一直没能解决的重大基础问题。

本书基于一元论的粒子观点，提出有限粒子系统模型，假定基本粒子只有质子和光子两种。与质子相同，光子也是有质量有体积的三维实体粒子，光子质量极小(就是电子的质量)，充满“真空”，光子本身就是光波的传播媒介。由此统一了光的波粒二象性，严格导出包含波动解的粒子运动方程组，从理论上证明了电磁场的本质就是光子的波动。

3) 物质粒子的形态

承认物质的基础是粒子，真实的理论还必须解决粒子的形态这一关键问题。质点是牛顿力学的最基本概念，也是贯穿物理学始终的基本假设。质点是抽象的、理想的粒子模型，其特征是只有质量，没有体积。当一个物体的结构、形状与大小可以忽略时就可视为质点。可是，数学的抽象并不等同于物理的真实，将粒子形态视为无限小的几何点，是导致物质二元论和波粒不分困境的根本原因。

质点模型的特征就是物质结构层次无限可分，单个粒子体积无限小，系统粒子数目无限多。质点模型在经典领域取得很大成功，但却是现代物理的麻烦与混乱之源。从哲学角度看，质点模型割裂了粒子的质量与时空属性，破坏了粒子的完整性，遗失了粒子的重要特征。从物理学角度来看，质点模型视粒子为几何点，埋下了引力发散和时空奇异的种子。质点模型以数学的无限处理物理的有限，使物理世界陷入了无限的怪圈。其实，“无限”只是一种数学假设，真实的物体不可能是“无限小”和“无限多”的质点系统，应该是“有限体积”和“有限数量”的三维粒子系统。真实的物理学必须从原理上排除奇点和发散，彻底解决时空有限、数目有限的多粒子系统的理论问题。

粒子物理学中的弦论和膜论是从场一元论衍生出来的,都是定域化的非点状物质模型,而且被认为是统一物理学的候选理论,但是一维的弦和二维的膜都不能完全代表三维的真实粒子,它们注定不会成功。由于弦论和膜论涉及及深奥的数学理论,人们会担心处理三维粒子和多体问题的技术复杂性。但是无需过虑,统一的自然是建立在简单规律基础上的,正如本书所揭示,一个真实反映客观世界的物理理论其数学形式也必然是简单的。本书对现存物理学基础的重要修正就在于用有限粒子模型取代质点模型,这个修正不仅提供了物质系统状态的全新表征方式,导致了粒子运动新规律的发现,而且解决了物质结构、电荷起源、力的本质和量子本质等一系列重大基础理论问题。

4) 物质结构复杂性根源

物质的本性是简单的,现实的世界又是复杂的,这种复杂性的物质根源和物理原因究竟在于何处,统一的物理学必须解答这个问题。现存物理学从粒子的质点模型出发,将物质视为相互作用的质点体系,从而将物质结构问题引向两个方向:一是从还原论观点出发研究粒子的结构,将原子不断分割,产生以标准模型为代表的粒子物理学;二是从层展论观点出发,研究原子如何不断形成新的层次结构,这些微观结构又如何影响物体的宏观性质,这种研究形成了目前最为活跃的凝聚态物理学领域。“自上而下”和“自下而上”两个方向都从简单走向了复杂,但是,物质结构研究的两个方向却彼此绝缘,互不相干。现今粒子物理学的标准模型已宣告完成,可是这个理论不能为宏观物体的研究作出任何贡献,凝聚态物理依然在复杂的世界中艰难地摸索前行。因此,人类必定对物质本性的认识存在重大缺失。

物质结构的主要特征在于层次性。物质层次结构是自然界物质存在的普遍形态,表现为按空间尺度、质量和能量大小等特征排成的具有隶属关

系和性质差异的序列。人类对物质层次结构的认识是随着科学技术的不断进步而发展的，19世纪以来的物理学先后揭示了微观物质结构的原子和分子、原子核和基本粒子层次。在对天体的认识方面，人类先后达到了四个层次，即太阳系、银河系、星系团和总星系。在生物领域，按空间尺度也可分为生物大分子、细胞、器官、个体、群落、生物圈等层次。

物质系统的特征在于复杂性。系统的复杂性表现在不同层次结构的相互嵌套和相互关联，简单系统包含较少的结构层次，复杂系统包含较多的结构层次。简单系统物体特性的线性相加并不等于复杂系统的全部，复杂系统的运动规律也不是简单系统的线性分解和简单还原，复杂系统与简单系统在物质结构、运动规律、特征属性等方面存在质的差别。普适的物理理论必须找到系统复杂性的根源，统一描述和准确把握不同层次的嵌套结构与系统关联，并通过这种结构和关联预言物质的性能与形态变化。

对应原理是关于微观与宏观层次物质运动规律的统一原则。对应原理的主要内容是：在大量子数极限情况下，量子力学的行为渐进地趋于经典体系。对应原理也是目前统一不同层次和领域物理理论的方法论基础，例如：几何光学是短波长极限情况下物理光学的近似，牛顿力学是低速情况下爱因斯坦相对论力学的近似，等等。沿袭这一思想，协调物理理论的标准做法就是：保留物理基础，拓展数学概念，编织数学之网，覆盖相关理论，并使其符合对应原理。对应原理在一定程度上反映了物质结构的层次性，但是忽视了物质结构的系统性，不能体现物体的本质关联。

人类对物质本性认识的重大缺失就在于现有物理学关于物质结构的最基本假设：质点模型。质点是一个理想模型，是抽象的数学概念，它割裂了物质与时空的本质联系，违反了自然的客观真实性，在这个简化的物质模型基础之上，人们根本无法认清世界复杂性的本源。有限粒子系统理论的重要突破就在于修正了物质结构认识的这一缺陷，用有限粒子取代了质

点模型；发现了物体复杂性的根源在于系统的非线性，找到了系统精确线性化的正确方法；提出了标度概念用于表征物质的层次特征，提出了团簇概念用于表征物质系统不同层次的关联；发明了团簇系综统计方法，导出了物质系统完整的热力学函数关系和微分方程。这一系列突破为分析物质状态变化和各種复杂现象提供了坚实的理论基础。

5) 力的本质与统一

现有理论认为自然界存在四种基本力：万有引力、电磁相互作用力、弱相互作用力和强相互作用力。基于世界统一性的信念，人类一直试图将各种基本作用纳入统一的理论体系。麦克斯韦方程最早统一了电和磁两种相互作用，爱因斯坦则毕生致力于引力和电磁力的统一研究。上世纪 60 年代温伯格和萨拉姆在格拉肖工作的基础上提出了电磁和弱相互作用统一的理论。70 年代中期，人们进一步提出强、弱、电磁三种作用的统一理论。但是迄今为止，人们探索四种基本作用力的超统一理论的努力始终没有获得成功。

要实现四种基本作用力的统一，必须认清力的本质。力的本质与惯性起源问题密切相关，它们都是牛顿力学的核心概念。在牛顿力学中，力的概念形象直观，牛顿第二定律方便而实用。但是牛顿第一定律涉及的惯性却是一个基本假设，也是理论的致命弱点。牛顿认为惯性是物体的一种内秉属性，与其它物质无关。同时，它通过引入外部的绝对时空定义惯性参考系，从而为运动和力的概念提供逻辑依据。从这个角度理解，绝对时空在牛顿力学中具有基础性意义。当牛顿的绝对时空与电磁场理论相矛盾时，狭义相对论通过洛伦兹变换协调了牛顿力学和电磁场理论，但是爱因斯坦并没有说清惯性的起源，只是用相对时空替代绝对时空，在运动学方面统一了牛顿力学与电磁场理论。尽管诸多佯谬，狭义相对论仍然是现代物理

学的重要支柱，一旦抽去了这根支柱，现有物理学大厦就要倾覆。

由于牛顿力学的巨大成就，人们习惯将力作为物理学的核心概念，因此四种力的统一理论成为物理学的“圣杯”。但由于力的本质问题没有真正解决，所有试图在现有物理学基础上对四种基本力实现统一的努力都没有成功。若想统一四种力，要么首先搞清力的本质问题，要么寻找新的出路。由于力的概念涉及到惯性系定义的困难，从力的概念出发寻求统一物理学之路并非好的选择。事实上，我们完全可以从其它物质运动量出发建立新的物理学体系，而无需面对惯性系定义的困难。例如，从虚功原理和哈密顿原理出发，分析力学建立了以能量形式为主的理论。当然，分析力学是从牛顿力学发展而来，还留下了力的胎记，惯性系问题只是被隐藏了起来。更重要的问题是，分析力学遗传了牛顿力学的基因，这个基因就是物体的质点假设。有限粒子系统理论则在修正质点假设的基础之上，从物质与运动的系统性概念出发，运用质量守恒和动量守恒关系，给出力的一般定义，该定义完全不依赖于参考系的选择，从而在本质上实现了四种力的统一，并将力学基础精简到极致。

6) 物质电荷的本质

电荷被认为是粒子独立于质量和运动的特殊属性。电荷有正负之分，同种电荷相斥，异种电荷相吸。电荷通过电场相互作用，静电力的大小满足库仑定律。运动电荷会产生磁场，由毕奥-萨伐尔定律描述。变化的磁场也会产生电场而对电荷产生作用，由电磁感应定律描述。麦克斯韦综合了这些知识，用一组数学方程统一描述电磁现象，取得了极大成功。现今，麦克斯韦电磁场理论已成为物理学的经典，电荷概念也因此根深蒂固，难以动摇。

但是，经典电磁学的成功并不能完全掩盖电荷本质的问题。被认为“完

美无缺”的电磁场方程组很好地反映了电磁场的传播特性，可是不能解决电磁本性以及带电粒子相互作用的问题。对电荷概念的固有认识也导致了经典力学与电动力学的矛盾，以致需要爱因斯坦的狭义相对论去调解，但是狭义相对论自身又带来更多的问题与佯谬。值得注意的是，爱因斯坦相对论在运动学意义上协调了经典力学与电动力学，但正是在经典引力与电磁力的动力学统一问题上遇到了巨大困难。

这些理论上的深刻矛盾归根结底还是粒子的质点模型造成的。由于质点模型排除了粒子的自旋运动，真实粒子的自旋运动效应无法解释，所以需要引入电荷概念。因为将粒子视为质点，电荷的载体也只能是几何点，这就是点电荷模型的实质。通过将自旋的粒子赋予电荷，自旋相反的粒子赋予相反的电荷，于是同性电荷相斥，异性电荷相吸，正如两个同向旋转的陀螺接近时相互排斥，两个反向旋转的陀螺接近时相互吸引。质点模型无法说明的自旋效应被点电荷模型所解释，二者相互补充，相互依存而发展，孕育了今天的物理学。

有限粒子系统理论从非质点的有限粒子模型出发，将电荷视为粒子的自旋运动效应，从物质基础上解决了引力与电磁力的统一问题。严格的数学推理表明：引力并非物质粒子的本质属性，而是系统属性，它源于不均匀的物质分布，磁力和惯性的本质来源于粒子的运动，也是系统的属性；麦克斯韦方程组对电磁现象的描述并不完备，而且正确性也存在问题。粒子系统的运动应该由新理论中完整的粒子运动演化方程组描述。

7) 相对论的本质意义

通常所说的相对论包含伽利略相对论和爱因斯坦相对论，爱因斯坦相对论又有狭义和广义之分。相对论的本质是说物理定律与参照系的选择无关，它表达了自然规律的客观性，具有“绝对性”的意义。所以“相对论”

名称本身并不确切，容易引起误解。相对论表现在数学上就是将物理方程表示成坐标变换不变的形式，于是有了伽利略变换不变性、洛伦兹变换协变性以及广义协变性。伽利略变换不变性适用于低速惯性系，洛伦兹变换协变性适用于高速惯性系，而广义协变性适用于包含引力在内的非惯性参考系。

既然物理定律与参照系的选择无关，就不应该有伽利略变换与洛伦兹变换之分，不应该有惯性系与非惯性系之分，这说明目前还没有找到合适的数学形式用于统一表述物理规律。要实现统一的目标，必须在基本概念和物理原理上有所突破，彻底排除物理规律对坐标系选择的依赖。

事实上，坐标变换的实质是物理参数和测量标准的变化。基于这一观点，作者引入标度概念，一方面用于表征物质的层次特征，同时代表物理量的测量标准，也就是人所皆知的测量单位。由此，本书提出测量相对性原理，用物理规律的标度变换不变性取代坐标变换协变性。测量相对性原理逻辑上要求平衡态物理量的整数化，从而揭示了量子的本质。

8) 量子的本性问题

量子的本性是什么？这个问题是世纪之谜，至今无人知晓。物理学家盖尔曼(Murray Gell-Mann)曾经说过：“全部现代物理为量子力学所支配。这个理论华丽宏伟，却又充斥着混乱。这个理论经受了所有的检验，没有理由认为其中存在什么缺陷。我们知道如何在问题中运用它，但是却不得不承认一个事实，没有人能够懂得它。”量子论创始人之一波尔(Niels Bohr)甚至说，如果一个人没有被量子力学弄糊涂，那他就还没有真正懂得量子力学。费因曼(Richard Feynman)晚年感叹道：“按照量子力学的观点看待世界，我们总是会遇到许多困难。至少对我是如此。现在我已老迈昏花，不

足以达到对这一理论实质的透彻理解。对此，我一直感到窘迫不安。”

波粒二象性是量子理论的基本出发点，但是这个概念本身存在着逻辑悖论，以致需要测不准原理和互补原理提供解释与支撑，而由此导致的认识论方面的问题引发了更大的争议。不仅如此，量子论与相对论之间也存在深刻的矛盾。狄拉克(Paul Dirac)曾经说过：“我们有了相对论和量子论两个建立非常完善的理论，每一个在他自己的领域内都是非常可靠的，可是它们彼此之间却难以相互协调。如果两个理论都是正确的，那么会想到，它们马上就应该协调成一个单一的体系。但是相对论和量子力学的情况并非如此，它们之间有一定的抵触，这个抵触是最近四十年来物理学的主要问题。”爱因斯坦也指出：相对论和现行量子力学的理论是不相容的，未来的理论必须把两者统一起来。近一个世纪以来，人们围绕这个问题做了许多探索，爱因斯坦为此花费了后半生来研究统一场论。霍金(Stephen Hawking)试图通过广义相对论奇点的分立结构来解决相对论与量子论的一元化问题，但至今尚无被认可的结果[7]。所有这种努力大多集中在为两者提供一套统一的数学框架，从而运用了愈加深奥复杂的数学工具。事实上，相对论和量子论的统一本质上是个物理问题，因为相对论的物质基础是质能等效性，量子论的基础是波粒二象性，两论的物质基础不同，试图通过编织更大的数学之网罩住两论的尝试是不可能成功的。

两论在物理学中具有如此重要地位，它们必然有共同的物理基础，要找到它们的共同基础，修修补补是不行的，必须在基本概念和基本原理上实现突破。在有限粒子系统理论中，量子化规则是测量相对性原理的逻辑要求，不仅如此，测量相对性原理还提供了微观到宏观、从离散性到连续性描述的自然过渡与平滑连接。建立在测量相对性原理和系统关联性原理之上的新的时空观、运动观、能量观为透彻理解两论的本质提供了有力的工具。