

绪 论

§ 1 什么是物理学

一、物理学研究的对象

我们把不依赖人的意识而独立存在的客观实在统称为物质。物质有实物物质和场两种形式。实物物质能够被人所感知,它表现出有形、有色、有味、有质量、有能量、有动量等多方面的自然属性。场一般不能被人所感知,它无形、无色、无嗅,但场也有质量、有能量、有动量,能够用很多方法间接地证实它的存在并测定它的属性。人类最早认识的物质形态都为实物物质,场的概念则是 19 世纪才提出来的。

形形色色的物质构成了广阔无垠、绚丽多姿的宇宙。大到日月星辰和星系,小到分子原子直至基本粒子(包括场量子)都处在永恒的运动与变化之中。早在一个多世纪以前,恩格斯就在他的《自然辩证法》一书中精辟地论述道:“运动就其一般的意义来说,就它被理解为存在的方式、被理解为物质的固有属性来说,它包括宇宙中发生的一切变化和过程,从单纯的位置移动起直到思维。”一言以概之,没有不运动的物质,也没有无物质的运动。

物质运动的形式多种多样,研究各种运动形式的普遍规律是物理学最主要的任务之一。此外,物理学还研究物质的结构以及物质间的相互作用。从这些意义来说,物理学是一门最普遍,也是最基本的基础科学。

二、物理学的基本研究方法

人类最早对物质运动的认识来自观察。最早的观察当首推埃及人、苏美尔人和我国古代人对天文现象的观察,这些观察的文字记载可追溯到 4 000 多年以前。即使在科学已经极其发展的今天,人类还是在继续使用观察的手段,对宇宙的各个角落和物质的各个层次进行着探索。观察是人类认识自然的最简单和最直接的方法。依靠观察,在很早的时候人类就总结出一些物质运动的规律。如我国古代有关磁现象的记载;对光的反射规律的总结;希腊人阿基米德发现的浮力定律等都已有 2 000 多年的历史。观察毕竟是最简单的方法,古代人对许多自然现象的观察都只能停留在感性认识的初级阶段,而无法从中总结出规律进而上升为理论。在 16 世纪以前的漫长时间里,科学的发展极其缓慢,似乎在渡过它的休眠期。

16 世纪中叶,商业资本主义在欧洲得到迅速发展,特别是机械、航海、军事等方面

都向科学提出了各种迫切要求。也正是在这个时期，人类创造了实验的方法，从此科学的脚步就再也没有减缓过。意大利科学家伽利略在比萨斜塔所做的落体实验，开创了实验方法的先河。实验方法是科学上的一项重大进步。由于实验方法的诞生，物理学才从各门科学及哲学的混合物中升华出来，从而成为一门独立的学科。

我们把观察和实验所得到的结果称为事实，事实是构造科学知识这座宏伟建筑的砖石。人类通过不断的观察和实验，逐步积累起大量事实，用来建造科学的大厦。事实好比拼图板游戏中的碎片，科学要做的游戏就是找到这些碎片之间的固有关系，并按正确的方式把它们拼起来。对大量事实进行分析、归纳、抽象和概括，最后用精炼的语言把事实之间相互联系的模式表述出来，这叫作定律。如我们熟知的阿基米德浮力定律；开普勒行星运动定律；牛顿运动定律等都是事实的总结。定律不但确认了先前互不相关的各事实之间存在可重复的规律性，因而使人类获得的知识产生联系并得到简化；同时定律也提示人们，这些规律性可能存在于未曾观察到的现象之中。可以毫不夸张地说，观察与实验是物理学发展的源泉。

用一个或几个普遍定律去代替其他更多的定律，这种情况在历史上已经发生过多次。比如，开普勒行星运动定律和伽利略落体定律最终都被包含在牛顿运动定律之中。这些少数的普遍化的定律构成了科学知识概念性组织的更高层次，我们称之为理论。今天，许多领域的物理学理论已经建立，每一种运动形式只用少数几个普遍化定律就能解释其所有现象。经典力学由牛顿的三个运动定律就可表述；经典电磁学也被麦克斯韦总结为四个方程；宏观热现象也只有三条定律；狭义相对论则仅从两条基本假设出发就得全部建立。在寻找定律进而建立理论的过程中，科学家们使用的方法不外乎假说、推理和演绎。恩格斯曾断言：“只要自然科学在思维着，它的发展形式就是假说。”在物理学的发展史上，曾出现过不少著名的假说。如安培分子电流假说；麦克斯韦涡旋电场和位移电流假说；狭义相对论基本假设；普朗克量子假说；乌伦贝克电子自旋假说等，都在物理学发展的过程中起到过里程碑的作用。我们必须明确，假说是一种思维方式的结晶，但绝不是无的放矢的空想。假说以事实为依据，在事实没有得到可靠的解释之前，为了概括所获得的全部经验材料，假说就作为一种暂时性的方案被提出。假说能否反映真实的客观规律，能否站得住脚，最终只能靠实践来检验。只有当假说能够说明已有的全部事实，并且它的逻辑推论又为以后的实践所证实时，它才能成为可靠的理论，否则假说就会被修正或抛弃。逻辑推理是又一种重要的思维方式，它是从假说出发，推得未知现象之结果的思维过程，而演绎则是推理采用的主要形式。推理和演绎是进行理论工作时必不可少的重要手段。如麦克斯韦对电磁波的预言；量子力学对正电子的预言；狭义相对论对物质静能的预言等，都是逻辑推理的成功典范。经逻辑推理而得出的结论，其真理标准仍然是实践。

纵观物理学的建立和发展过程，其使用的方法大致可概括如下：首先经观察和实验得出事实，进而对事实进行抽象性和概括性的总结并提出假说和建立定律，再由此出发

进行逻辑推理和演绎使之上升为理论。理论再经实践的检验 去粗取精 去伪存真 不断得到修正和完善。

近半个世纪以来，现代物理学所研究的课题越来越复杂，比如，粒子物理中对撞机的使用，航空航天设备的研制与发射等等无一不是大规模的系统工程，物理学的成就越来越显示出集体劳动的共同成果。信息的储存、交流和反馈，计算机网络和现代化通信设备的应用 自动化操作系统的实施 理论人才、实验人才、工程技术人才和管理人才的协同配合等越来越显示出其重要意义。因此，在现代物理的研究中，除上述那些传统的方法之外，信息论、系统论、控制论和协同论的方法已成为必不可少的研究手段。

必须指出，由于受到观察角度和观察环境的制约以及实验条件和实验精度的限制，反映任何一种运动形式的已有理论，总带有一定的近似性和局限性，它们都只在一定程度上和一定范围内反映客观实际的规律性。我们在学习和应用物理学理论的时候，一定要牢记这一点，绝不可把任何一门理论的适用范围无限地外推。比如，关于气体的热力学理论只适用于可看作理想气体的系统。再如，经典力学只在宏观低速条件下才是正确的，在高速情况它要让位给狭义相对论，在微观领域它又被量子力学所取代。

三、物理学与其他学科及工程技术的关系

早期的自然科学史表明，自然科学的产生与发展完全是由于生产实践的需要。在以农业为主要生产方式的古代，人类需要知道气象、天文和水利等方面的知识，因此天文学、水利学被最早地发展起来。土地的丈量需要几何知识，因此欧几里德几何学早在两千多年以前就得到了相当程度的发展。不过在那个时代，由于生产水平和认识水平所限，人类对自然的认识只能停留在一些表面的肤浅的观察上，科学与哲学常常混在一起 带有明显的思辨性质。16世纪中叶，科学从思辨走向实验，物理学才真正成为一门精密的科学。在那之后，生产和生活实践不断向物理学提出新课题，促进了物理学的发展。反过来，物理学的新发现，它所产生的新概念及新理论又常常发展为新的学科或学科分支。物理学理论与实验方法向其他学科或技术领域的渗透，几乎毫无例外地促成该学科或技术领域发生革命性的变化与进步。历史上，几次重要的技术革命都是以物理学的进步为先导。17、18世纪，机械工业的兴起和热机的研究使得经典力学和热力学理论得到完善，最终导致了以蒸汽机的广泛应用为标志的第一次工业革命，从而使人类进入了使用热能的时代。到了19世纪中叶，电磁理论的完成，使电力与电子工业以及无线电技术得到蓬勃发展，人类进入全面应用电能的时代，这被称之为第二次工业革命——工业电气化。20世纪的前30年里，相对论和量子力学相继诞生，这使人类对原子、原子核以及放射性的认识日益深入，人类开始进入应用原子能的时代。特别是20世纪后半叶以来，物理学与其他学科和技术的联系更加紧密。40年代中期到50年代中期 原子弹产生的冲击波刚刚平息，原子反应堆便如雨后春笋般地在世界各地建立起来，同时人类也开始了可控热核聚变的研究。50年代中期到60年代中期，人造地球卫星发射成功，

人类开始走向外层空间。今天人类早已登上月球，登陆车也在火星表面着陆，空间实验站也建立起来，航天飞机不断起落，人类还向太阳系之外发射了寻求智慧生物的宇宙飞船。60年代中期到70年代中期，从人工合成胰岛素到重组DNA分子，人类开始进入控制遗传和生命的新阶段。目前已达到克隆动物的水平。70年代中期到80年代中期，微处理机在生产和生活中被广泛应用，人类又开创了研究大脑秘密的新纪元。80年代中期至今这十余年的时间里，以各种计算机软件的开发和利用为内容，人类进入了信息时代，有人称之为第三次工业革命。回顾这半个世纪来科学技术突飞猛进、日新月异的发展，每个阶段都与物理学密切相关。核能的开发和利用，是建筑在相对论质能关系的基础之上；空间技术的发展，是引力场理论研究的重要实践之一；生物工程之花，是物理学与生物化学嫁接的产物；微机的出现，依赖的是半导体物理学与集成技术的结合；信息革命得以实现，靠的是光—电、电—光转换机制与激光集成电路技术。物理学提供的理论依据，使许多高新技术日臻完善，极大地发展了生产力；而高新技术与生产力的进步，又反过来为物理学的进一步研究提供了雄厚的物质条件，再一次促进了物理学的发展。

当代物理学的研究成果，在转化为生产力方面的速度越来越快，周期越来越短，有些还能迅速发展成一门新兴工业。科学技术与生产生活实践不断向物理学提出新问题，许多发现发明已很少带有偶然性，而往往是人们有意识、有目的地进行系统研究的结果。当今自然科学发展的重要特征是各学科之间的相互渗透与交叉，这一特征在下个世纪将显得更为突出。半个世纪来，一大批知识密集型的高新技术的崛起，极大地推动了社会生产力的发展，其速度之快、规模之大、范围之广、影响之深远，在历史上是空前的。统计表明，截至1980年，人类积累的知识有90%左右是在近50年中获得的。有人曾预言，到下个世纪初，人类社会获得的知识还将翻一番。

§ 2 物质结构及其相互作用

一、物质结构的层次

自古以来，人们就相信宇宙万物都有一个共同的本源。古希腊人泰勒斯认为：“水为万物之本。”我国古代也有万物由“金、木、水、火、土”形成的五行说。大约在公元前550年，希腊人莱乌起保斯和德谟克利特就提出了朴素的原子论。他们认为，物质（当时仅指实物物质）都是由一种最小的不可再分的单元——原子构成。atom一词就来自希腊语，意思是不能再分之物。按照他们的观点，物质虽然可以运动和变化，但原子是永远不变的，是不能被破坏的终极粒子。

古希腊人的朴素原子论大约统治了400年，之后由于基督教的兴起，除亚里斯多德的哲学之外，其他一切都被视为异端邪说，原子论从此逐渐被人们所遗忘。直到文艺复兴时期开始之后，与伽利略同时代的加桑迪才重提原子论。最早用原子论解释物理学和化学现象的是玻义耳。他认为多数物质可由其他物质通过化学反应而得到，但有一些

特殊物质不能由其他物质通过化学反应来合成，他把这些特殊物质称之为元素。进一步，他认为对应各种不同的元素存在着不同的原子。1704年牛顿在他的《光学》一书中对原子作了如下的描述：“在我看来，似乎上帝在开始创造物质时就创造了牢固、沉重、坚硬、不可穿透、能够运动、具有这般大小和形状、具有诸如此类的其他性质并且在空间按这样比例配置的粒子，……；这些原始的粒子是坚固的，比起任何由它们组成的疏松实体来是无比坚硬的；它们坚硬到不能损坏和分割；任何寻常的力量都不能分开上帝自己在第一次创造时所造出的任何粒子。”1799年，普劳斯特发现了化学的定比定律；1804年，道尔顿发现了倍比定律，这两个定律都暗示物质是由某种最小单位构成。1809年盖·吕萨克又发现了气体反应定律。实验中用2L的氢气和1L的氧气化合后生成了2L的水蒸汽。盖·吕萨克认为如果假定同温、同压、同体积的任何气体中都含有相同的原子数，则容易说明实验现象。可道尔顿马上发现了问题。若盖·吕萨克的假设成立，设2L的氢气中有 $2N$ 个氢原子，那么1L的氧气中就有 N 个氧原子，生成的水蒸汽也应该是 $2N$ 个，这样每个水蒸汽中就只能有半个氧原子了！这与原子是不可分的前提假定相矛盾。1811年阿伏伽德罗引入分子的概念，解决了上述矛盾。他认为构成气体的要素不是原子，而是由几个原子相结合而成的分子；元素的分子由同种原子构成，化合物的分子由几种不同的原子构成。例如氢气分子由两个氢原子构成，氧气分子也由两个氧原子构成，而水分子则由一个氧原子和两个氢原子构成。进而他提出：不论何种气体，在同温同压下，相同体积中所含的分子数（而不是原子数）都相同（阿伏伽德罗假说）这样就圆满地解释了气体反应定律。从这以后，实物物质由分子、原子构成的观点逐渐被人们所接受。1869年门捷列夫把已发现的各种元素按质量大小排列起来，他发现元素的物理、化学性质大体上呈现出周期性变化的趋势。进而门捷列夫把这些元素按上述周期性重复的方式排成一个表。表中的空位被他认为是尚未发现的元素，他同时也预言了这些元素的物理和化学性质，结果都与后来的发现惊人的符合。元素周期表应该算是早期原子论的最有力证据了。

1858年，普留卡在研究稀薄气体放电的现象中发现从阴极发射出一种不可见的物质，该物质打到阳极上可产生荧光，且该物质在磁场中路径会发生偏转，因而可断定该物质带负电。1876年哥尔德斯坦再次确认了这一现象，并把从阴极发射的物质命名为阴极射线。1897年J. J.汤姆逊提出大胆假说，他认为阴极射线是由比原子、分子轻得多的带负电粒子形成的高速粒子流。之后不久，人们又发现阴极射线在电场作用下也会发生路径偏转。接着汤姆逊利用阴极射线在电场磁场同时作用下的偏转实验测定了它的荷质比(m/e)，结果表明阴极射线的荷质比与气体种类无关。同电解后的氢原子的荷质比比较，发现阴极射线的荷质比只是氢原子荷质比的两千分之一左右。汤姆逊把他假想的粒子称为电子。接着他又设计了一系列精巧的实验，最终证实电子所带的负电荷与电解后的氢原子所带的正电荷数值相等，这说明电子质量只有氢原子质量的两千分之一左右。

汤姆逊对电子的发现，是对早期原子论的重大突破。人们开始认识到，原子并不是构成物质的最小单元，原子也有内部结构，它至少包括两种粒子（分别带有正、负电荷），根据这些，1903年汤姆逊提出了一个原子结构模型：原子质量的绝大部分由一个带正电的粒子所占有，这个粒子的大小就代表原子的大小（约为 10^{-10}m ），而体积与质量都小得多的电子被埋没在这个带正电的粒子内部。汤姆逊的原子模型不能解释1908年卢瑟福所做的 α 粒子散射实验。为了说明 α 粒子的大角度散射现象，1911年卢瑟福提出了原子的有核模型。卢瑟福认为原子中的正电荷和几乎全部质量由一个叫原子核的粒子所携带，原子核的大小约为 10^{-15}m ，带负电的电子则绕核运行，类似行星绕太阳的运动，电子轨道的大小约为 10^{-10}m 。卢瑟福把最轻的核——氢原子核称为质子，并认为其他原子核是由数目不等的质子构成的复合体。可很快就发现了问题：除氢原子以外，其他原子的电中性问题受到了挑战。比如氦，它有两个核外电子，可它的质量却是氢原子的4倍！其他原子都存在类似情况。到了1920年卢瑟福不得不假定，原子核内除了质子之外，还有一种与质子质量相同但却不带电的粒子。1932年查德威克证实了这种粒子的存在，并为它取名叫中子。

1905年爱因斯坦为解释光电效应提出了光子理论，1923年由康普顿效应进一步得到证实。1930年狄喇克预言了正电子（质量与电子相同，电荷却与质子一样），1932年被安德森在宇宙线中找到。1931年泡利提出中微子假设，1953年由莱因兹和柯望证实。汤川秀树1935年预言在核内还有 π 介子，1947年由泊叶尔和拉迪斯证实。坂田昌一、谷川安孝、井上健于1942年预言了 μ 介子。1937年安德森和尼德迈尔在宇宙线中发现一种质量约为电子质量200倍的粒子，当时被误认为是 π 介子，后来在1947年才由泊叶尔和拉迪斯确认为是 μ 介子。

总之，到1947年为止，人们已经发现和预言了电子、质子、中子、光子、中微子、 π 介子、 μ 介子，后称 μ 子为基本粒子。正电子被叫做电子的反粒子，其他反粒子也被预言。如1930年狄喇克预言了反质子，1955年由加利福尼亚小组发现。以上这些粒子连同它们的反粒子一起被称为第一代基本粒子。就在1947年，罗彻斯特和巴特拉利用雾室发现两个成“V”字形的径迹，与任何已知粒子的径迹都不相同，这预示着新粒子的发现。从那之后，加速器的能量不断提高，对撞机也被设计出来。另外探测手段也不断提高，由40年代的威尔逊云雾室发展到50年代的原子核乳胶，进而是气泡室和放电室。这一来，真是让物理学家大开眼界， Δ 粒子、 Σ 粒子、 Ξ 粒子、 K 介子等相继被发现。现在人们把这些称为第二代基本粒子。50年代初，人们用 π 介子轰击质子，发现质子并不是一成不变的“基本”粒子，它可以有多种不同的状态，称之为共振态。之后在重原子核的研究中发现各已知的粒子几乎都有许多共振态。当时对于共振态是不是基本粒子还不能作出回答，人们就暂且把各种共振态统称为第三代基本粒子。共振态一出现，基本粒子家族一下子人丁兴旺起来，包括各种共振态在内，一共发现了三百多种基本粒子，而且数目还在逐年增加。这使物理学家们感到十分不安。人们的本意是找到少数几个真正基

本的粒子，用它们的不同组合和相互作用来说明宇宙万物及其运动。但现在一下子出来这么多粒子，而且还在越来越多，到什么时候才是个头呢？共振态现象其实已经在暗示人们，过去认为是基本粒子的东西其实并不基本，它们也有内部结构。于是有些人开始了对基本粒子的资格审查工作。在这方面，最早的比较系统的模型是1956年坂田昌一提出的坂田模型。在这个模型中，质子、中子、 Λ 粒子被作为基础粒子，其他重子（ Σ 、 Ξ 粒子等）和介子被认为是由这三种基础粒子构成的复合体。例如 Σ^+ 粒子由质子（ p ）、反中子（ \bar{n} ）和 Λ 粒子构成，记为（ $p\bar{n}\Lambda$ ）； Σ^- 粒子则为（ $n\bar{p}\Lambda$ ）； π^+ 介子是（ $p\bar{n}$ ）； π^- 介子是（ $\bar{p}n$ ）等等。不过坂田模型在构成轻子（包括电子、 μ 子、 τ 子和各种中微子）时遇到困难。1961年盖尔曼和内曼又提出了由八种基础粒子构成强子（重子和介子的统称）的八重态模型。这个模型与坂田模型的思维方式是一样的，同时也存在着构成轻子的困难。八重态模型要求有一种新粒子存在，很快在1963年就找到了符合要求的 Ω 粒子。1964年盖尔曼、兹维格等人又提出标准模型。在这个模型中提出了强子都是由夸克粒子构成的假说。理论上认为夸克有三代共六“味”，每“味”夸克又有红、绿、蓝三“色”。于是连反夸克在内共有36种夸克。需要说明这里所说的“味”和“色”只是一种类比，意指夸克的不同属性。根据标准模型，重子都由三个夸克构成：质子由两个 u 夸克和一个 d 夸克构成，中子由两个 d 夸克和一个 u 夸克构成。介子都由一个夸克和一个反夸克构成： π^+ 由一个 u 夸克和一个反 d 夸克构成； K^+ 介子由一个 u 夸克和一个反 s 夸克构成； J/ψ 粒子则由正、反 c 夸克构成等等。标准模型要求夸克具有 $\pm\frac{1}{3}e$ 或 $\pm\frac{2}{3}e$ 的电荷。标准模型提出到现在的30多年时间里，人们还没有办法找到自由状态的夸克。但按照夸克理论计算的结果都与实验符合。1990年8月在新加坡召开的第25届高能物理国际会议上对标准模型曾作过如下结论：“标准模型理论成功地经受住了所有实验的检验。超出标准模型理论的实验结果一个也没有得到。”

到现在为止，人们总算理出了一个头绪。基本粒子可分为三大类。

1. 规范粒子

规范粒子是构成各种场的粒子，也叫场量子，它们是传递各种相互作用的媒介。规范粒子被认为共有四类。光子（ γ ）是电磁场的场量子，用以传递电磁作用；中间玻色子（ W^\pm, Z^0 ）参与弱相互作用；胶子（ g ）在组成强子及把强子结合成原子核的过程中起作用；引力子目前还是人们假想的引力场量子，它是传递万有引力的媒介。

2. 轻子

轻子不参与强相互作用。轻子共3代12种（包括反粒子），第一代是电子（ e^- ）和电子型中微子（ ν_e ），第二代是 μ 子（ μ^- ）和 μ 型中微子（ ν_μ ），第三代是 τ 子（ τ^- ）和 τ 型中微子（ ν_τ ）。

3. 夸克

夸克的第一代是上夸克（ u ）和下夸克（ d ），第二代是粲夸克（ c ）和奇异夸克（ s ），第三

代是顶夸克(t)和底夸克(b)。

在粒子物理的研究方面 还存在很多悬案。如能否打破“禁闭”释放出自由夸克 能否找到自由胶子 引力子到底存不存在 如何解释夸克和轻子的“代”中微子的质量等 都有待解决。

二、物质间的相互作用

相互作用在物理学上是指：一个粒子的运动及位置受到周围其他粒子的影响。相互作用也被抽象为物体彼此间施加的力。最初人们把力分为两大类：一类是相互接触的物体互施的力；另一类是相互分离的物体互施的力。后来人们才认识到这两类力的作用机理是一样的。所有相互作用都是通过交换场量子而实现的。按所交换的场量子的种类可以把相互作用分为四种。

1. 强相互作用

人类认识强相互作用是从原子核开始的。原子核内有很多质子，按静电斥力，它们应该相互分离，但人们所发现的各种原子核不但十分稳定，而且不用很高的能量很难将它们拆散。于是人们猜想在原子核内部必然存在着某种比库仑力大得多的力，这种力的力程很短，只在原子核的范围内起作用。1935年汤川秀树提出介子理论来解释核力。该理论认为 核子（包括中子和质子）间的强相互作用是通过交换 π 介子来实现的。例如一个质子和一个中子间的交换力，既可以是中子从质子周围的介子场中获得一个 π^+ 介子，也可以是质子从中子周围的介子场中获得一个 π^- 介子 或者两种情况同时发生。在上述交换过程中，中子可瞬时地变为质子，质子也可瞬时地变为中子。对于两个同类的核子来说，它们交换的是不带电的 π^0 介子。自从标准模型被提出之后，波利策、格罗斯和维尔泽克于1973年又建立了量子色动力学。该理论认为，强相互作用首先在夸克之间通过交换胶子把夸克束缚在一起形成核子，进而再通过交换 π 介子把核子束缚在一起形成原子核。

强相互作用的范围是 $2.0 \times 10^{-15} \text{m}$ 之内。在此范围之外 强相互作用迅速衰减到可忽略不计的程度。

2. 电磁相互作用

电磁相互作用产生于带电粒子之间。电磁相互作用是一种长程力，它可以在相当大的范围内起作用。交接力的思想最早是用来解释电磁相互作用的，后来才被强相互作用所借用。电磁相互作用交换的场量子是光子。电磁相互作用的大小只有强相互作用的 $10^{-2} \sim 10^{-4}$ 。解决电磁相互作用的理论是1945~1948年间由费曼、施温格、朝永振一郎等三人创立的量子电动力学。电磁相互作用是目前被人们认识得最清楚且理论最完善的一种相互作用。

3. 弱相互作用

已发现的各种粒子，都有自己的寿命。质子的寿命约为 10^{31} 年，电子的寿命约为

10^{21} 年，它们可称得上是长寿粒子了，因为宇宙的年龄不过才 10^{10} 年。但也有很多粒子是短命的 特别是那些共振态更是如此。中子除不带电外 其余性质都与质子相似 但它的半衰期只有 10.7min。中子衰变时，放出一个电子和一个反中微子，而它自己却变为质子。最初人们试图用强相互作用和电磁相互作用来解释衰变现象，但没有获得成功。1934年，费米提出了弱相互作用的概念，解释了中子的衰变。后来人们又发现，处在核内的中子也会发生衰变，这时电子和反中微子射出核外，而质子留在核内，这叫 β^- 衰变。另外核内的质子也不那么长寿了，它可以放出正电子和中微子而衰变为中子，这叫 β^+ 衰变。还有一种电子俘获的情况，即原子中的一个电子与原子核内的一个质子相互作用，产生的中子留在核内，中微子则射出核外。

1960年李政道和杨振宁提出中间玻色子理论来解释弱相互作用。该理论认为弱相互作用也是一种交换力，其交换的场量子有三种： W^+ 和 Z^0 。1984年 欧洲核子中心发现了这三种中间玻色子。

弱相互作用力程极短，一般认为小于 10^{-17} m。其强度只有强相互作用的 $10^{-8} \sim 10^{-13}$ 。弱相互作用可发生于一切粒子，但它的效应往往被更强的作用所掩盖。

4. 引力相互作用

早在牛顿时代，就有了万有引力定律，人们还根据这条定律发现了海王星和冥王星。1915年，爱因斯坦的广义相对论描述了与牛顿引力学说完全不同的景象。广义相对论认为引力不是超距作用，引力也是通过场来传递的。1918年 爱因斯坦又提出引力波假说。进而狄喇克又预言了引力子，即引力相互作用中交换的场量子。不过至今还没有确凿的证据表明有引力子和引力波存在。引力作用也是一种长程力，它甚至在宇宙天体乃至星系间发生作用。引力相互作用只有强相互作用的 10^{-38} 左右。引力相互作用虽然是人们认识最早的一种相互作用，但它至今留给人们的悬念最多。1969年美国的韦伯声称 他设计的重达 14kN 的圆筒形天线发生异常振动，他认为这是由来自银河系中心的引力波造成的。从那以后，在世界各地建起了类似的探测引力波的装置达几十台之多，能够测量的振幅值已达到原子核尺度的万分之一。1987年 2月 23日 离我们最近的河外星系（约 16万光年）大麦哲伦云 中出现一颗超新星（SN1987A）其内核坍缩时发出的引力波理应被探测到，可当时只有一个研究小组宣称接收到了来自 SN1987A 的引力辐射，而其余的装置当时都未在正常工作状态，因此无法对引力波的存在提供旁证。

总结四种相互作用，它们都有一种场与之相联系，每种场都有场量子。通过交换场量子，相互作用得以实现。同时，四种相互作用的传递速度都是光速。这些共同的特征，自然使物理学家们产生联想，他们认为这四种相互作用一定有共同的本源。爱因斯坦在他的后半生的研究中，就曾花了很大的精力试图把引力与电磁力统一起来，但没有成功。本世纪 60年代，格拉肖、温伯格和萨拉姆提出了弱作用和电磁作用统一的理论并得到一系列实验证明，获得了巨大成功。之后，人们又开始了弱电与强相互作用的统一工

工作，这被称之为大统一理论。目前大统一理论已经取得了很多重要成果，不过大统一理论的直接实验验证要求把粒子加热到 10^{26}K 的高温，这根本无法实现。现在，我们只能检验大统一理论在低能条件下的推论。大统一理论预言质子的平均寿命为 10^{31} 年。于是人们就希望能从 10^{31} 个质子中于一年内观测到一次自发衰变。当然单凭这一项观察，离大统一理论还相距很远，可要实现这一观察实在不亚于大海捞针。在美国俄亥俄州一个盐矿的井下，有人用 8 000t 水进行着这项实验，但至今尚无确切的消息传出来。

大统一理论的序幕才刚刚拉开，有人又试图导演二场包括引力在内的超统一理论的历史巨片。有一种观点认为，在宇宙大爆炸的最初瞬间，在那种极高温、极高能量的状态下，所有相互作用和基本粒子都是统一的。后来随着宇宙的膨胀，温度和密度不断降低，四种相互作用才逐渐分离开来，各种粒子也相继产生。现今我们观察到的一切，都是当时曾发生过的超统一状态所留下的遗迹。因此，要想直接证实超统一理论，我们必须创造“混沌初开”时的那种物理环境，这在连大统一所要求的物理环境都无法实现的今天，简直是不可想象的事情。但我们相信会有峰回路转、柳暗花明的一天。

§ 3 单位制与量纲

一、单位制 基本单位和导出单位

我们经常要对各种物理量进行测量。测量的结果一般包括数值和单位两部分。只有少数物理量是没有单位的纯数。

由于各物理量之间存在着规律性的联系，因此不必对每个物理量都给出独立的单位。我们可以选出一定数量的物理量作为基本量，并为每个基本量规定一个基本单位，其它物理量的单位则可按照它们与基本量之间的关系，通过定义或定律推导出来。基本量之外的物理量统称为导出量，其单位被称为导出单位。例如在力学中我们取时间、长度和质量作为基本量，并规定它们的基本单位是 s、m 和 kg，于是按速度和加速度的定义，其单位将分别是 m/s 和 m/s^2 。利用牛顿第二运动定律也可得到力的单位是 $\text{kg} \cdot \text{m/s}^2(\text{N})$ 。

按照上述方法制定的一套单位，构成一定的单位制。目前，世界各国基本上都采用国际单位制（用符号 SI 代表）。国际单位制包括国际制(SI)单位、国际制(SI)词冠和国际制(SI)单位的十进倍数与分数单位三部分。国际制(SI)单位由基本单位、辅助单位和导出单位构成。国际制(SI)词冠有 M、k、m、 μ 等共 16 个(见表 1)。国际制(SI)单位的十进倍数与分数单位由国际制(SI)词冠加在国际制(SI)单位之前构成。例如千米(km)和微安(μA)是国际制单位的十进倍数和分数单位，它们是国际制词冠千(k)和微(μ)分别加在国际制单位米(m)和安培(A)之前构成的。

国际单位制中共选定七个基本量和两个辅助量。

1. 时间

时间的单位叫秒 用 s 表示。最早秒被定义为平均太阳日的 $1/86\,400$ 。但后来的天文观测发现地球自转角速度并非恒定不变，因此一度改用回归年作为制定时间的基准。现在是采用原子辐射频率作为时间基准的。1967年第十三届国际计量大会规定：“秒是铯-133原子基态的两个超精细能级之间跃迁所对应的辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期的持续时间。”

2. 长度

长度的单位叫米 用 m 表示。最早用铂铱合金制成具有相当大的硬度和抗氧化能力的米原器，存放于巴黎国际度量衡局。在 0°C 时，米原器上两条刻痕之间的长度为 1m 。1960年第十一届国际计量大会规定：“米等于氪-86原子的 $2p_{10}$ 和 $5d_5$ 能级之间跃迁所对应的辐射在真空中的 $1\,650\,763.73$ 个波长的长度。”目前气体激光的精度已超过氪-86的谱线，因此对米的定义有可能会重新进行。

3. 质量

质量的单位叫千克 用 kg 表示。1901年第三届国际计量大会规定：“千克是质量单位 等于国际千克原器的质量。”近一个世纪以来 对千克的定义没有变化 千克原器也保存在巴黎国际度量衡局。

4. 电流强度

电流强度的单位叫安培 用 A 表示。电流强度的基准是用间接的方法，从它所产生的效应通过其他量的度量而制定的。1946年国际计量委员会决定 并经1948年第九届国际计量大会批准：“安培是一恒定电流，若保持在处于真空中相距 1m 的两根无限长而圆截面可忽略的平行直导线内，则此两导线之间产生的力在每米长度上等于 2×10^{-7} 牛顿。”

5. 热力学温度

热力学温度的单位叫开尔文（简称为开）用 K 表示。最早采用的温度标准是根据水的冰点和沸点制定的经验温标。1967年国际计量大会规定水的三相点（水、水蒸汽和冰平衡共存的状态）热力学温度为 273.16K ， 1K 等于水的三相点的热力学温度的 $1/273.16$ 。同时对摄氏温度 用 t 表示 作了重新规定 即 $t = T - 273.15$ 其中 T 代表热力学温度。摄氏温度的单位叫摄氏度，用 $^\circ\text{C}$ 表示， 1 摄氏度等于 1 开。

6. 物质的量

物质的量的单位叫摩尔 用 mol 表示。 0.012kg 碳-12所包含的原子数目叫 1 摩尔，用 N_A 代表， $N_A = 6.022\,045 \times 10^{23}$ 。在一物质系统中 包含的基本单元数若等于 nN_A 我们说该系统中有 n 摩尔的某物质。其中基本单元可以是原子、分子、离子、电子或其他原子集团。

7. 发光强度

发光强度的单位叫坎德拉（简称为坎）用 cd 表示。坎表示光源在给定方向上的发光强度。最初将鲸鱼油制成直径 $7/8$ 英寸和重 $1/6$ 磅的蜡烛点燃，使其每小时消耗

3/175磅 由此产生的烛焰 在某一方向的发光强度为 1 烛光。1967年第十三届国际计量大会规定温度为 2 042K(铂的凝固点)且气压为 101 325 牛顿/米² 的绝对黑体 在其面积等于 10⁻⁵/6 平方米时, 沿法线方向的发光强度为 1 坎 按此定义 60坎等于 58.8 烛光。如今对坎的定义有了更精确的方法。选定某光源发出 5.4×10¹⁴Hz 的单色辐射, 在某方向上的辐射强度为 1/683W/sr 时, 该方向的发光强度为 1 坎。式中 W 是瓦特 ,sr 是球面度。

8. 平面角(辅助量)

平面角的单位叫弧度 用 rad 表示。在一圆中, 两条半径在圆周上截取的弧长若与半径相等 则该弧所对的圆心角叫 1 弧度。周角等于 2π 弧度。

9. 立体角(辅助量)

立体角的单位叫球面度, 用 sr 表示。在一个球体内, 取顶点位于球心的一个立体角, 若该立体角在球面上截取的面积等于以球半径为边长的正方形面积, 则该立体角为 1 球面度。一个点向外所张的立体角为 4π 球面度。

二、量 纲

为了表示一个导出量与基本量的关系, 我们用字母来代表基本量。在国际单位制中 它们分别是: 长度 L 时间 T, 质量 M 电流强度 I 热力学温度 Θ 物质的量 N 和发光强度 J。任意一个物理量 Q 与基本量的关系可一般地表为

$$[Q] = L^{\alpha} M^{\beta} T^{\gamma} I^{\nu} \Theta^{\epsilon} N^{\lambda} J^{\mu}$$

上式称为 Q 的 量纲式 指数 α、β、γ、… 等称为 Q 的量纲。有时也把量纲式简称为量纲。比如速度、加速度和力的量纲可分别记作

$$[v] = LT^{-1}$$

$$[a] = LT^{-2}$$

$$[F] = LMT^{-2}$$

量纲与单位是有本质区别的。量纲表示的是一个物理量由哪些基本量构成以及它同这些基本量的关系, 而不管这些基本量采用什么单位。比如速度的单位可以是 m·s⁻¹ 也可以是 cm·s⁻¹ 但速度的量纲只有一个 就是 LT⁻¹。另外还要注意 由于各种单位制中所选定的基本量以及对基本单位的规定可能不同, 因此一个物理量在不同的单位制中, 量纲的表示也可以不同。

利用量纲表示, 可以进行单位换算。例如在 CGS 中 力的单位叫达因 而在 SI 中, 力的单位是牛顿。由量纲 [F]=LMT⁻² 可知 L 和 M 的单位分别增大 10² 和 10³ 倍时, 力的单位将增大 10⁵ 倍 因此得到 1 牛(顿) = 10⁵ 达因。量纲表示的另一个用途是检验公式的正确性。只有量纲相同的量才能相加减或用等号相联接。如果我们在运算中得

到一个公式，式中各项量纲不同或等号两边量纲不同，那么我们可以肯定此公式有误。

量纲分析已经发展成为一门专门的学科，它在流体力学等领域中有着广泛的应用。

表 1 SI 词冠

因数	词头名称		符号	因数	词头名称		符号
	英文	中文			英文	中文	
10^{18}	exa	艾〔可萨〕	E	10^{-1}	deci	分	d
10^{15}	peta	拍〔它〕	P	10^{-2}	centi	厘	c
10^{12}	tera	太〔拉〕	T	10^{-3}	milli	毫	m
10^9	giga	吉〔伽〕	G	10^{-6}	micro	微	μ
10^6	mega	兆	M	10^{-9}	nano	纳〔诺〕	n
10^3	kilo	千	k	10^{-12}	pico	皮〔可〕	p
10^2	hecto	百	h	10^{-15}	femto	飞〔母托〕	f
10^1	deca	十	da	10^{-18}	atto	阿〔托〕	a

三、SI 导出单位及物理学常数

虽然我们规定了基本量及基本单位，但有些导出量的单位若用基本单位表示则显得很长，用起来很不方便，因此对很多导出量也规定了它们的单位名称。比如力的单位若用基本单位表示应是千克·米/秒²(SI)，但我们为力的单位取了一个简单的名字叫牛顿 即 1 牛〔顿〕=1 千克·米/秒²。像这样具有专门名称的导出单位还有很多，现将其列在表 2 中。另外表 2 中也有一些用基本单位表示的常用物理量。表 3 是常用的物理学常数表 表中各值是 1986 年国际推荐值。凡在下面各表中出现的物理量名称、符号和单位，以后在正文中一般不再给出。

表 2 物理量名称、符号和单位(SI)一览表

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
速度	u, v, V	米每秒	$m \cdot s^{-1}$
加速度	a	米每二次方秒	$m \cdot s^{-2}$
角速度,角频率	ω	弧度每秒	$rad \cdot s^{-1}$
角加速度	β	弧度每二次方秒	$rad \cdot s^{-2}$
转速	n	每秒	s^{-1}
频率	ν, f	赫〔兹〕	Hz(1Hz=1s ⁻¹)
波长	λ	米	m
波数	$\bar{\nu}$	每米	m^{-1}
动量	P, p	千克米每秒	$kg \cdot m \cdot s^{-1}$
冲量	I	千克米每秒	$kg \cdot m \cdot s^{-1}$
动量矩,角动量	L	千克二次方米每秒	$kg \cdot m^2 \cdot s^{-1}$
转动惯量	J	千克二次方米	$kg \cdot m^2$
力	F	牛〔顿〕	N

续上表

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
力 矩	M	牛〔顿〕米	$N \cdot m$
压强	p	帕〔斯卡〕	Pa
劲度系数	k	牛顿每米	$N \cdot m^{-1}$
功	W, A	焦〔耳〕	J
能〔量〕	E, W	焦〔耳〕	J
动 能	E_k, T	电子伏〔特〕	eV
势 能	E_p, V	电子伏〔特〕	eV
功 率	P	瓦〔特〕	W
摄氏温度	t, θ	摄 氏 度	°C
热 量	Q	焦〔耳〕	J
热传导系数	k, λ	瓦〔特〕每米开〔尔文〕	$W \cdot m^{-1} \cdot K^{-1}$
热容〔量〕	C	焦〔耳〕每开〔尔文〕	$J \cdot K^{-1}$
比热〔量〕	c	焦〔耳〕每千克开〔尔文〕	$J \cdot kg^{-1} \cdot K^{-1}$
摩尔质量	μ, M_{mol}	千克每摩尔	$kg \cdot mol^{-1}$
定压摩尔热容	C_p	焦〔耳〕每摩尔开〔尔文〕	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
定体摩尔热容	C_v	焦〔耳〕每摩尔开〔尔文〕	$J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$
内 能	U, E	焦〔耳〕	J
熵	S	焦〔耳〕每开〔尔文〕	$J \cdot K^{-1}$
扩散系数	D	二次方米每秒	$m^2 \cdot s^{-1}$
电 量	Q, q	库〔仑〕	C
电场强度	E	伏〔特〕每米〔牛顿每库仑〕	$V \cdot m^{-1} (N \cdot C^{-1})$
电 势	U, V	伏〔特〕	V
电势差, 电压	$U_{12}, U_1 - U_2$	伏〔特〕	V
电 动 势	ϵ	伏〔特〕	V
电位移	D	库〔仑〕每平方米	$C \cdot m^{-2}$
电位移通量	Φ_D	库〔仑〕	C
电 容	C	法〔拉〕	$F (1F = 1C \cdot V^{-1})$
真空电容率	ϵ_0	法〔拉〕每米	$F \cdot m^{-1}$
相对电容率	ϵ_r	无量纲	
电偶极矩	p, p_e	库〔仑〕米	$C \cdot m$
电流密度	j, δ	安〔培〕每平方米	$A \cdot m^{-2}$
磁场强度	H	安〔培〕每米	$A \cdot m^{-1}$
磁感应强度	B	特〔斯拉〕	$T (1T = 1Wb \cdot m^{-2})$
磁 通 量	Φ, Φ_m	韦〔伯〕	$Wb (1Wb = 1V \cdot s)$
自感系数	L	亨〔利〕	$H (1H = 1Wb \cdot A^{-1})$
互感系数	M	亨〔利〕	$H (1H = 1Wb \cdot A^{-1})$
真空磁导率	μ_0	亨〔利〕每米	$H \cdot m^{-1}$
相对磁导率	μ_r	无量纲	
磁 矩	p_m	安〔培〕每平方米	$A \cdot m^{-2}$
电磁能密度	w	焦〔耳〕每立方米	$J \cdot m^{-3}$
坡印廷矢量	S	瓦〔特〕每平方米	$W \cdot m^{-2}$
电 阻	R	欧〔姆〕	$\Omega (1\Omega = 1V \cdot A^{-1})$
电 阻 率	ρ	欧〔姆〕米	$\Omega \cdot m$

续上表

物理量名称	物理量符号	单位名称	单位符号
光 强	I	瓦〔特〕每平方米	$W \cdot m^{-2}$
折 射 率	n	无 量 纲	
辐〔射〕出〔射〕度	M	瓦〔特〕每平方米	$W \cdot m^{-2}$
辐〔射〕照度	I	瓦〔特〕每平方米	$W \cdot m^{-2}$
声强级	L_I	分 贝	dB

表 3 常用基本物理常数

名 称	符号	1986 年国际推荐值	计算用值 (单位与推荐值相同)
真空中光速	c	$299\,792\,458 m \cdot s^{-1}$	3.00×10^8
引力常数	G	$6.672\,59(85) \times 10^{-11} m^3 \cdot kg^{-1} \cdot s^{-2}$	6.67×10^{-11}
阿伏伽德罗常数	N_A	$6.022\,136\,7(36) \times 10^{23} mol^{-1}$	6.022×10^{23}
摩尔气体常数	R	$8.314\,510(70) J \cdot mol^{-1} \cdot K^{-1}$	8.31
玻耳兹曼常数	k	$1.380\,658(12) \times 10^{-23} J \cdot K^{-1}$	1.38×10^{-23}
基本电荷	e	$1.602\,177\,33(49) \times 10^{19} C$	1.602×10^{-19}
原子质量单位	u	$1.660\,540\,2(10) \times 10^{-27} kg$	1.66×10^{-27}
电子静止质量	m_e	$9.109\,389\,7(54) \times 10^{-31} kg$	9.11×10^{-31}
质子静止质量	m_p	$1.672\,623\,1(10) \times 10^{-27} kg$	1.673×10^{-27}
中子静止质量	m_n	$1.674\,928\,6(10) \times 10^{-27} kg$	1.675×10^{-27}
真空电容率	ϵ_0	$8.854\,187\,817 \times 10^{-12} F \cdot m^{-1}$	8.85×10^{-12}
真空磁导率	μ_0	$4\pi \times 10^{-7} N \cdot A^{-2}$	$4\pi \times 10^{-7}$
玻尔磁子	μ_B	$9.274\,015\,4(31) \times 10^{-24} A \cdot m^2$	9.27×10^{-24}
电子磁矩	μ_e	$9.284\,770\,1(31) \times 10^{-24} A \cdot m^2$	9.28×10^{-24}
玻尔半径	a_0	$0.529\,177\,249(24) \times 10^{-10} m$	0.53×10^{-10}
普朗克恒量	h	$6.626\,075\,5(40) \times 10^{-34} J \cdot s$	6.63×10^{-34}
康普顿波长	λ_c	$2.426\,310\,58(22) \times 10^{-12} m$	2.43×10^{-12}
斯特藩-玻耳兹曼常数	σ	$5.670\,51(19) \times 10^{-8} W \cdot m^{-2} \cdot K^{-4}$	5.67×10^{-8}

第一篇 粒子

第一章 机械运动的描述

宇宙万物都处在永恒的运动之中，运动是物质的基本属性。在物质的各种运动形式中，最简单的是物体的位置随时间的变动。宏观物体之间（或物体内部各部分之间）的相对位置变动叫机械运动。例如，行星绕太阳的运动，地球的自转，河水的流动，车辆的行驶等都是机械运动。本章将研究机械运动的描述方法。

§ 1.1 质点 刚体 参照系

一、质点 质点系 刚体

在物理学中，为了突出研究对象的主要性质，暂不考虑一些次要因素，经常引入一些理想化模型来代替实际的物体。这是一种科学的研究方法。

在研究机械运动时，有些场合物体的形状和大小是不须考虑的。以火车的行驶为例，我们只说什么时间火车到什么站，而从不说什么位置，车尾在什么位置。在这个问题中，火车就是作为一个点看待的。忽略物体的大小和形状，将其抽象为一个几何点，这种物理模型叫质点。一个物体能不能被抽象为质点，关键不在物体本身的大小，而由所研究的问题的性质来决定。例如，地球的半径约 6370km ，它可算得上是一个庞然大物了，但我们在研究地球绕太阳公转的运动时，却可以把地球当作质点看待。因为在这个问题中我们只关心地心在公转轨道上的位置，而不需了解地球自转运动的细节。再如，原子的尺寸约为 10^{-8}cm 的数量级，即使借助最高倍的电子显微镜也无法看清原子的真面目。当我们研究原子的结构时，如此之小的原子也不能当作质点看待。

在很多情况下，物体的形状和大小是重要的，我们不能把物体当作质点来研究，但这时质点的概念仍然十分有用。因为我们可以把物体分为许多细小的部分，使得每一部分都可按质点来处理。我们把由若干质点组成的系统称为质点系。

有一类特殊的质点系。当系统运动时，系统中任意两质点间的距离保持不变，这类质点系被称为刚体。刚体也是一种非常有用的物理模型。真正的刚体并不存在，但当物体运动时，若它的形变非常微小，以至达到几乎观察不到的程度，就可以把该物体当作刚体来看待。

以上的分析使我们看到，在机械运动中，研究质点的运动是十分重要的。只要把质点的运动研究透彻，则质点系及刚体的运动便会迎刃而解。

二、参照系 坐标系

我们说一个物体在运动，总是指它相对某参考物体在运动而言。这个被选做参考的物体或物体系统就叫作参照系。要描述物体的运动可选择不同的参照系。选择的参照系不同对运动的描述也不一样。例如有一列在平直轨道上匀速运动的火车相对地面参照系而言)车厢中有一个人相对车厢竖直向上跳起。若选火车为参照系 这个人的运动是竖直方向的直线运动；若选地面为参照系，则其运动轨迹为一抛物线。参照系的选择有任意性，这主要视问题的方便而定。有了参照系，我们就可以对运动作出定性的描述。例如我们可以说某物体作直线运动、圆周运动或曲线运动等等。要想对运动作定量描述，只有参照系是不够的，还必须在参照系中建立坐标系。一般最常用的坐标系是三维直角坐标系如图 1.1 所示 其中 i, j, k 分别代表 x, y, z 方向的单位矢量。除三维直角坐标系外 还有球极坐标系、柱坐标系、平面直角坐标系、平面极坐标系、自然坐标系等多种坐标系。

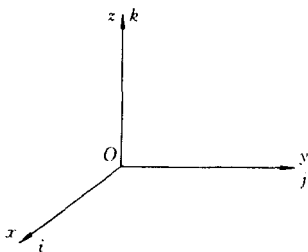


图 1.1

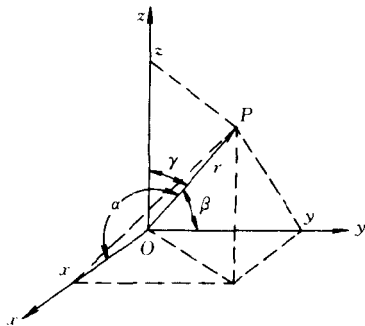


图 1.2

§ 1.2 位矢 速度 加速度

一、确定质点位置的方法

要想描述质点的运动，首先要确定质点的空间位置。确定质点的位置基本上有三种方法，下面分别介绍这些方法。

1. 坐标法

在图 1.2 中 由质点 P 向三个坐标轴分别引垂线 $\overline{P_x}$ $\overline{P_y}$ $\overline{P_z}$ 三条垂线在三个坐标轴上的垂足坐标 x, y, z 完全决定了质点的位置。这种确定质点位置的方法叫坐标法，