



21 世纪高等学校教材

大学物理

(上册)

► 汤钧民 主编

华中科技大学出版社

E-mail: hustpp@wuhan.cngb.com

21 世纪高等学校教材

大学物理

(上册)

主 编 汤钧民

编 者 汤钧民 项林川

华中科技大学出版社

图书在版编目(CIP)数据

大学物理(上册)/汤钧民 主编
武汉:华中科技大学出版社, 2004年1月
ISBN 7-5609-3080-8

I. 大…

II. ①汤… ②项…

III. 物理学-高等学校-教材

IV. O4

大学物理(上册)

汤钧民 主编

策划编辑:周芬娜

封面设计:刘 卉

责任编辑:周芬娜

责任校对:吴 晗

责任监印:张正林

出版发行:华中科技大学出版社

武昌喻家山 邮编:430074 电话:(027)87542624

录 排:华大图文设计室

印 刷:湖北新华印务有限公司

开本:850×1168 1/32 印张:12.375

字数:298 000

版次:2004年1月第1版 印次:2004年1月第1次印刷

定价:15.00元

ISBN 7-5609-3080-8/O · 303

(本书若有印装质量问题,请向出版社发行部调换)

前 言

《大学物理》是为高等学校工科大学物理课程编写的教科书。本书是在原华中理工大学物理系1989年3月出版的《大学物理》和1998年1月出版的《大学物理》的基础上修订出版的。书中除包含了前国家教委委托工科物理课程教学指导委员会制订的、并经国家教委批准印发的1995年修订版《大学物理课程教学基本要求》的全部内容外,又加强了近代和现代物理方面的内容,增添了相应的专题,以便能更好地适应面向21世纪的教学需要。

本书注意加强基础、精选内容,广度和深度适中,容量适度。学生在有限的学时内可以学到物理学的基本知识和方法,为学习专业课程和掌握近代科学技术打下基础。

全书分为三册。上册有第一篇力学,第二篇热学。中册有第三篇电磁学。下册有第四篇振动与波动,第五篇波动光学,第六篇量子物理学基础。

参加本书编写工作的教师有(以所编内容先后为序):项林川(第1、2、3、4、5章,专题A),汤钧民(第6、7、8章,专题B,上册附录),范淑华(第9、10、13、14章),葛国勤(第11、12章,专题C、D),黄伯坚(第15、16、17、18、19、20章,专题F),肖奕(第21、22、23、24章,专题E)。

对朱苍磬、周卓嫩、高国勋、邓顺蓉、孙威娜、易丽莎、张文华、王瑞西等老师以前的工作,在此表示感谢。

书中若有错误或不足之处,热诚欢迎读者批评指正。

黄伯坚

2003年9月

目 录

时空简介	(1)
------------	-----

第一篇 力 学

第1章 质点运动学	(15)
第1节 参考系 质点	(15)
第2节 位置矢量 位移	(17)
第3节 速度 加速度	(19)
第4节 相对运动	(29)
习题	(32)
第2章 牛顿运动定律	(35)
第1节 牛顿运动定律	(35)
第2节 基本力简介	(40)
第3节 牛顿运动定律的应用	(42)
第4节 惯性力	(46)
习题	(49)
第3章 动量 角动量	(52)
第1节 冲量与动量定理	(52)
第2节 质点系的动量定理 动量守恒定律	(56)
第3节 角动量定理 角动量守恒定律	(63)
习题	(69)
第4章 功和能	(71)
第1节 功 功率	(71)
第2节 动能 动能定理	(76)
第3节 保守力 势能	(78)

第4节 功能原理 机械能守恒定律	(84)
习题	(87)
第5章 刚体的定轴转动	(92)
第1节 刚体的平动和转动	(93)
第2节 刚体定轴转动定律	(97)
第3节 刚体转动的功和能	(107)
第4节 刚体的角动量定理和角动量守恒定律	(110)
第5节 进动	(113)
习题	(115)
第6章 狭义相对论	(118)
第1节 伽利略相对性原理 伽利略变换	(118)
第2节 狭义相对论基本原理	(125)
第3节 洛伦兹变换	(128)
第4节 相对论速度变换	(135)
第5节 狭义相对论的时空观	(143)
第6节 相对论质量、动量和能量	(161)
第7节 四维时空	(175)
习题	(180)
现代物理专题A——广义相对论简介	(184)

第二篇 热 学

第7章 气体动理论	(197)
第1节 热学的几个基本概念	(197)
第2节 统计的基本思想	(202)
第3节 理想气体状态方程	(208)
第4节 理想气体压强公式	(212)
第5节 温度的微观解释	(215)
第6节 能量均分定理 理想气体的内能	(218)
第7节 麦克斯韦速率分布律	(222)

第8节	玻耳兹曼分布律	(234)
第9节	气体分子的平均自由程	(240)
第10节	实际气体 范德瓦耳斯方程	(243)
第11节	偏离平衡态	(249)
习题		(254)
第8章	热力学基础	(260)
第1节	功与热量	(260)
第2节	热力学第一定律	(266)
第3节	热容	(269)
第4节	热力学第一定律对理想气体的应用	(272)
第5节	绝热过程 多方过程	(280)
第6节	循环 卡诺循环	(290)
第7节	与热现象有关的宏观自然过程	(305)
第8节	热力学第二定律	(307)
第9节	熵	(310)
第10节	熵增加原理和熵的微观意义	(317)
第11节	热力学系统的熵变	(330)
习题		(336)
现代物理专题B——耗散结构		(344)
附录		(365)
附录一	国际单位制(SI)	(365)
附录二	常用常量数值	(370)
附录三	本册物理量	(372)
习题答案		(375)

时空简介

“上下四方曰宇，往古来今曰宙”。这里的“宇”和“宙”分别是空间和时间的总称。自古以来，人们正是通过物体的广延性和过程的持续性来感知空间和时间的。这是人们从日常生活的具体过程中抽象出来的空间、时间概念，可以说是司空见惯、尽人皆知的。这样看来，时间和空间似乎是十分简单的问题。而实际上，若要问到底什么是时间，什么是空间，时间和空间的本质究竟是什么？到目前为止，物理学家们对此还不能给出一个非常圆满的答案。

一、牛顿和爱因斯坦的时空观

历史上，人们对于时间和空间的物理性质曾有过各种各样的认识。随着对物质及其运动规律的研究的深入，人们的时空观也在不断地发展和完善着。在这里，我们仅对牛顿和爱因斯坦的时空观作一个简单的介绍。

1. 牛顿的绝对时空观

17世纪，牛顿总结了前人和同时代其他人的研究成果，经过艰苦的探索，提出了机械运动的三个基本定律和万有引力定律，建立了牛顿力学的完整理论体系。而全部牛顿力学是建立在牛顿的所谓“绝对时空观”的基础之上的。

1687年，牛顿在他的划时代的著作《自然哲学的数学原理》一书中写道：“绝对的、纯粹的、数学的时间，就其本身和本性来说，永远均匀地流逝而与任何外界事物无关。”“绝对的空间，就其本性来说，与任何外界事物无关，而永远保持着相同和不变。”可见，牛顿的时空观是绝对时空观，他认为时间、空间和“外界事物”这三者都是相互独立的、没有关联的，空间的延伸和时间的流逝是绝对的，时间的度量和空间的度量也都是绝对的。并且牛顿认为，物体

的质量和运动无关,是绝对的。

按照牛顿的观点,时间和物质的存在与否以及物质的运动无关,并且时间和空间也是无关的。因而,整个宇宙可以使用同一个钟来计时,整个宇宙的时间是统一的、共同的,而且这个统一的、共同的普适时间和观察者的运动也没有关系,打个比方,假若牛顿看到自己的怀表走过一分钟,则他认定世界上所有的钟也都同步地走过了一分钟,而不管是何处的钟,也不管是处在哪一种运动状态的钟。这就是时间间隔的绝对性,也就是时间度量的绝对性,换句话说,时间的度量和参考系的选择无关。简言之,时间不因地点的不同而不同,不因观察者运动状态的不同而不同。由于时间的度量具有绝对性,同时性也必定具有绝对性。在某个参考系看来同时发生的两个事件,在其他任何参考系中来看必定也是同时发生的,同时性也和参考系的选择无关,是绝对的。比如,“在新年到来的那一刻,北京和上海同时敲响了新年的钟声。”在任何参考系来看,这两个敲钟事件都是同时发生的。

同样,空间和物质以及物质的运动无关,也与时间无关。空间只是为物质的运动提供舞台和背景,而物质的存在和物质的运动却不会给空间造成任何影响。这就是空间的绝对性。可以打个粗浅的比方,在一间仓库中可以存放一定数量的东西,也就是说仓库有一定的容量,或者说空间。这个空间的大小与仓库里放不放东西、什么时候放东西、放的是什么东西、放多少东西以及放进去的东西是静止的还是运动的是没有关系的。假若设想让此仓库无限地扩展开来,就得到了一个与任何具体物质无关的、绝对的空间。它就是牛顿所讲的绝对空间。由于空间的绝对性,任意两个事件之间的空间距离也是绝对的,和观察者的运动情况无关。比如说,一根直棒的长度,如果在某个参考系中测得它是1米的话,那么,在任何其他的参考系中来测量,它仍旧是1米,而不管参考系和直棒之间的相对运动状态如何,这就是长度的绝对性,也就是空间度量的绝对性。

牛顿进一步认为,在时空坐标的参考系中,存在一种地位优越的“惯性系”,对于惯性系来说,物体的运动遵从惯性定律,即不受力的物体将保持其原有的静止或匀速直线运动状态。当物体受力 F 时,按牛顿第二定律 $F=ma$ 产生加速度 a 。此加速度 a 是相对于惯性系的坐标来定义和测量的。在牛顿力学中,运动的描述是相对的,对同一物体的运动的描述因参考系的不同而可以不同。但一切力学规律在相互作用匀速直线运动的惯性系内部都是一样的,这称为力学相对性原理。此原理表明即使真的存在一个绝对静止的空间,并将它看做一个优越的惯性系,通过力学实验也没有办法找到它。因为按照力学相对性原理,力学规律对一切惯性系都是一样的。实际上,我们前面所说的参考系指的都是惯性系。

牛顿的绝对时空观是人们凭日常生活过程中的经验在直觉的基础上建立起来的,它和我们的日常生活经验相一致,易于被人们所接受,但同时也不可避免地有它的历史局限性。

2. 爱因斯坦的时空观

在19世纪末20世纪初,由于当时物理学研究的深入,特别是电磁学和光学研究,很多结果与经典物理学的时空观发生了尖锐的矛盾,促使人们重新去审查原有的时空观,从而揭示了牛顿的经典时空观的局限性,并导致了新的时空观的建立。

1905年,26岁的爱因斯坦发表了一篇题为《论动体的电动力学》的论文,提出了狭义相对论。

狭义相对论的出发点是两条基本假设,或者说两条基本原理。第一个是爱因斯坦相对性原理:物理规律对所有惯性系都是一样的。这是对力学相对性原理的一个推广。第二个是光速不变原理:在任何惯性系中测量,光在真空中的传播速率都相等。

狭义相对论否定了绝对参考系的存在,否定了牛顿的绝对时空观。下面根据光速不变原理来分析一下同时性的概念。我们将看到,同时性具有相对性,而不是牛顿所认为的同时性是绝对的。

假设有一车厢相对地面做匀速直线运动。在车厢的正中点 P

装有一闪光灯,当闪光灯闪光时,有两个光脉冲同时发出,向车厢前端 A 和后端 B 传去。静止于车厢内的观察者看到,光由 P 点传到 A 端和 B 端走过的路程相同,由光速不变原理知,光脉冲将同时到达车厢的前后两端。同样根据光速不变原理,静止于地面上的观察者看到两个光脉冲以相同的速率向前端 A 和后端 B 传播,但他看到前端 A 在离开光脉冲,后端 B 在接近光脉冲,因而到达 A 端的光脉冲比到达 B 端的光脉冲走的路程要长些,所以光脉冲先到达 B 端,后到达 A 端。我们不妨把光脉冲到达 A 端称为事件1,光脉冲到达 B 端称为事件2,那么,在车厢参考系来看,事件1和事件2是同时发生的,而在地面参考系来看,这两个事件却不是同时发生的。在一个参考系看来同时发生的两个事件在另外一个参考系来看不一定也是同时发生的,这称为同时性的相对性。

上面讨论的实质上是事件1和事件2的时间间隔。在车厢系,事件1和事件2的时间间隔是零,在地面系看不是零。这表明时间的度量和参考系的选择有关,不同参考系里的钟并不同步,每个参考系都必须用本参考系的钟来测量属于自己的时间,牛顿所说的绝对时间并不存在。按照相对论,当乙相对于甲运动时,在甲看来乙的钟变慢了,这称为钟慢效应。实际上,不仅乙的钟,而且乙的一切涉及时间流逝的过程,比如生物的新陈代谢、生物的寿命、分子振动以及放射性元素的衰变等等,都完全一致地变慢了。这些效应得到了实验的有力证明。因此,时间的流逝并不是绝对的,运动将改变时间的进程。

显然,由于时间度量的相对性,在不同的参考系来看,两个事件发生的先后次序可能会颠倒。但相对论并不违背因果律,也就是说,如果这两个事件是因果事件,则在任何参考系来看,它们的先后次序都是一样的,先因后果,不会颠倒。原因在于真空中的光速是物体运动和能量传递速度的上限。这在狭义相对论一章中将详细讨论。

按相对论,空间的度量也是相对的。考虑一根细棒的长度。沿

细棒建立坐标轴。当细棒相对于观察者静止时,观察者只需将棒的两个端点的坐标相减就得到了棒的长度;而当细棒沿坐标轴相对于观察者运动时,为了求得棒的长度,观察者必须在同一时刻测得棒的两个端点的坐标,把这两个坐标相减得到棒的长度。根据前面的讨论,同时性具有相对性,因此可以断言,长度的测量也必定是相对的,也就是说,在不同的参考系中测量同一物体的长度,结果可以是不一样的。实际上,当被测物体相对于观察者静止时测得的长度最长,称为原长;当被测物体相对于观察者运动时,在运动方向上物体的长度和静止时测得的结果相比要小,即在运动方向上长度收缩了,这称为长度收缩效应。因此,空间的度量和时间的度量有关,和运动有关。

按光速不变原理,光速不受光源速度的影响。假如一火车相对地面以速度 v 作匀速直线运动,按相对论,火车头上的车灯发出的光相对地面的速度总是 c ,而不是 $c+v$,无论火车的速度有多大。这表明经典的速度合成公式在相对论中不再成立。

总之,按照狭义相对论,时间和空间有关,时间、空间都和物质的运动有关。并且物体的质量和运动有关,质量随着速度的增大而增加,这在相对论中由质速关系式来描述。

需要指出的是,当物体运动速度远小于真空中的光速时,上述相对论效应很小,回到牛顿力学的结论。

狭义相对论揭示了时间、空间和物质运动的关系,是人类时空观的一次重大飞跃。

整个狭义相对论是在惯性系中建立起来的,惯性系被赋予了特殊的地位,惯性系是平权的,而非惯性系和非惯性系是不平权的。爱因斯坦进一步认为一切物理规律对所有参考系都应该是一样的,而无论是惯性系还是非惯性系,从而取消了惯性系的特殊地位。这便是爱因斯坦的广义相对性原理,是广义相对论的基本原理之一。按照牛顿的万有引力理论,引力作用是直接的、瞬时的,引力的传递不需要时间,这直接违背了狭义相对论。狭义相对论变革了

牛顿的绝对时空观,但没有触及牛顿的万有引力理论。所以必须引入新的引力理论。根据物体的引力质量和惯性质量相等的实验事实,爱因斯坦提出了广义相对论的第二个基本原理,即等效原理。在这两个原理的基础上爱因斯坦于1915年创立了广义相对论,这是一种崭新的引力理论,它使得人们对时空性质的认识进一步深刻了。

广义相对论指出,物质使其周围的时间和空间发生弯曲,物体的质量越大,时空弯曲得就越厉害。所以,空间不再是平直的。原则上,通过测量可以发现空间的几何性质不遵从欧几里德几何学,从而判定空间是弯曲的。用广义相对论的观点来看,行星绕太阳运动并不是因为太阳对行星有什么力的作用,而是因为质量巨大的太阳使自己周围的空间发生弯曲,在这种被弯曲了的空间,行星沿可能的最短的路线自由漂移,当然,由于空间是弯曲的,这个最短路线并非直线。实际观测发现,光线在太阳附近经过时也会发生偏折,而不是走直线,偏折的角度和广义相对论的计算结果一致。这表明太阳附近的空间确实如广义相对论所说是弯曲的。总之,两个物体间的引力作用并非是什么“力”的作用,甲物体对乙物体的所谓引力作用,实际上是甲物体使自己的周围空间产生弯曲,被弯曲了的空间再对乙物体的运动产生影响;反之亦然。于是,在广义相对论中引力的概念被取消了。和对空间的影响类似,物质也会使时间发生扭曲,靠近太阳的钟比远离太阳的钟走得要慢些,这称为引力时间延缓效应。这种引力时间延缓效应在地面上也存在,并且已经被实验所证实。

总之,在爱因斯坦的广义相对论中,时间、空间、物质和物质运动是相互作用着的统一体。爱因斯坦曾经说:“空间-时间未必能被看做是一种可以离开物理实在的实际客体而独立存在的东西。物理客体不是在空间之中,而是这些客体有着空间的广延。因此,‘空虚空间’这概念就失去了它的意义”。

二、时间和空间的计量

为定量地研究物体的运动,要用到时间和空间这两个概念。这自然要涉及对长度和时间这两个物理量的计量。

1. 长度的计量

空间是物质运动广延性的反映。空间中两点间的距离就是长度。在国际单位制中,长度的单位为米,用m表示。任何长度的计量都是通过与某一长度基准的比较而进行的。历史上,米是由于寻求通过巴黎的子午线从北极到赤道之间长度的某一适当分数而产生的,米定义为这个长度的千万分之一。但随后的许多精确测量都表明,这个基准和它所要表达的值有约0.023%的微小差异。在这之后,国际上对长度基准“米”的定义做过三次正式规定。

1889年第一届国际计量大会规定:将保存在法国的国际计量局中用铂铱合金制成的具有相当大的硬度和抗氧化能力的米原器(截面呈“X”形的铂铱合金棒)在0℃时它的两条刻线之间的距离定义为1米。这是长度计量的实物基准。

长度的实物基准不易长久保存,不易复制,精度不高。因此,有必要用长度的自然基准来代替实物基准。有了光干涉技术以后,人们可以将实物的长度和光的波长进行比较。1960年第十一届国际计量大会决定用氪86(^{86}Kr)原子的橙黄色光波来定义“米”,规定:“1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波长的1 650 763.73倍的长度。”从而实现了长度的自然基准,其精度达 4×10^{-9} 。

按照狭义相对论的观点,相对于不同的惯性系,真空中的光速都是相同的。这已为实验所证实。由于稳频激光器技术的进展,使激光频率的复现性远优于氪86灯光定义的精度。1983年10月第十七届国际计量大会采用了真空中的光速 $c=299\,792\,458\text{ m/s}$ 这一常量来定义长度单位“米”,规定:1米是光在真空中 $(1/299\,792\,458)\text{ s}$ 的时间间隔内行进的路程的长度。

粒子物理的进展表明,空间是量子化的,即离散的,空间长度存在下限。据认为这一下限为普朗克长度 10^{-35}m 。当小于普朗克长度时,现有的空间概念就可能不再适用了。

2. 时间的计量

时间是物质运动持续性的体现。在国际单位制中,时间的单位为秒,用 s 表示。时间的计量主要是一个计数的过程。1583年,物理学的奠基人——年轻的伽利略用自己的脉搏跳动的次数测量了比萨大教堂里的吊灯摆动的周期,发现摆的周期与摆幅无关。当时还没有钟,更没有秒表。伽利略的方法表明了测量时间的关键,原则上,任何能够重复的周期性过程都可以作为计量时间的基准,例如人的脉搏的跳动、太阳的运行、季节的循环、月亮的盈亏、时钟的运转、放射性同位素的衰变、晶体的振动等等。长久以来,在自然界发生的许多重复的周期性现象中,人们一直采用地球绕自身轴线的转动(自转)作为时间的计量基准,并定义1秒为平均太阳日的 $1/86\,400$ 。某地的太阳日就是太阳相继两次经过该处子午面的时间间隔,即从白天正午到第二天正午的时间间隔。由于地球公转的轨道是椭圆,公转的速率常在变化,一年之中太阳日长短不一,平均太阳日就是全年太阳日的平均值。更好的秒的定义是根据恒星日来确定的。同一恒星连续两次通过观察处子午面所经过的时间叫做恒星日。假如地球自转是均匀的,那么每一恒星日的长短就是一样的。

然而,许多精确的观测表明,地球自转的速率在渐渐变慢,经过1个世纪后一天要增加 0.001 秒;在20个世纪中,时间计量上的这一累积可多达几个小时。所以,地球的自转周期并非一个理想的计时基准。根据观测,太阳年每世纪约增长 $(1/2)s$,因此,1956年重新把秒定义为1900回归年(太阳年)的 $1/31\,556\,925.974\,7$ 。1回归年的定义是太阳相继两次通过春分点的时间间隔。

由于人们对微观世界认识的深入,以及微波技术的不断发展,使得利用某些分子或原子的固有振动频率作为时间的计量基准成

为可能。事实上,氨分子钟和铯原子钟的精度已分别达到 10^{-9} 和 10^{-10} 以上。这比基于地球自转的时钟准确几十倍或几百倍以上。因此1967年10月第十三届国际计量大会决定采用铯原子钟作为新的时间计量基准,定义秒为位于海平面上的铯133原子基态的两个超精细能级在零磁场中跃迁辐射的周期的9 192 631 770倍。这个跃迁频率测量的精度达到 10^{-12} 至 10^{-13} 。利用原子钟就有可能对许多具有重大科学意义和实践意义的问题进行研究。这些问题包括从地球自转的变化和相对论的验证,直到航天技术的改进等等。

有关理论指出,时间也是量子化的,时间间隔也有下限,即普朗克时间 10^{-43} s,当小于普朗克时间间隔时,现有的时间概念就可能不再适用。

三、物质世界的层次和数量级

物理学研究所涉及的范围极广,从人们身旁发生的物理现象,大到宇宙天体的运动及构造,小到微观领域中分子、原子及基本粒子等物质的运动。物理学是一门定量的学科,在许多问题中经常需要作粗略的数量级估计,因此有必要对各类物理量的数量级有所了解。以下对物质世界空间和时间尺度的数量级作一简介。

1. 空间尺度

物理学研究对象所涉及的空间尺度相差极大。天文观测表明,宇宙大小的下限为 10^{26} m。我们的太阳系充其量只是宇宙中的沧海一粟。往小的方向看,宏观物体是由各种分子、原子组成的,原子的大小是 10^{-10} m量级。原子核由质子和中子组成,质子和中子的大小约为 10^{-15} m。质子和中子由夸克组成,夸克的大小约为 10^{-20} m。所以,实物的空间尺度从 10^{26} m到 10^{-20} m,相差46个数量级。人类选择了与自身大小相适应的“米”作为长度的基本单位。表1中列出了物质世界中一些实物空间尺度的数量级。

表1 物质世界的空间尺度

实 物	空间尺度/m
目前能观察到的宇宙的半径	10^{26}
星系团半径	10^{23}
银河系半径	7.6×10^{22}
地球到银河系以外最近的星系的距离	10^{21}
地球到银河系中心的距离	2.2×10^{20}
地球到最近的恒星的距离	4.0×10^{16}
冥王星的平均轨道半径	5.9×10^{12}
地球到太阳的距离	1.5×10^{11}
太阳的半径	1.0×10^9
地球到月球的距离	3.8×10^8
地球半径	6.4×10^6
月球半径	1.7×10^6
珠穆朗玛峰的高度	8.9×10^3
人的平均身高	1.7×10^0
尘埃	10^{-3}
细菌	10^{-5}
大分子	10^{-8}
原子半径	10^{-10}
原子核、质子和中子	10^{-15}
电子半径	$< 1 \times 10^{-18}$
夸克半径	1×10^{-20}
普朗克长度	10^{-35}