



普通高等教育“十一五”国家级规划教材

大学物理通用教程

主编 钟锡华 陈熙谋

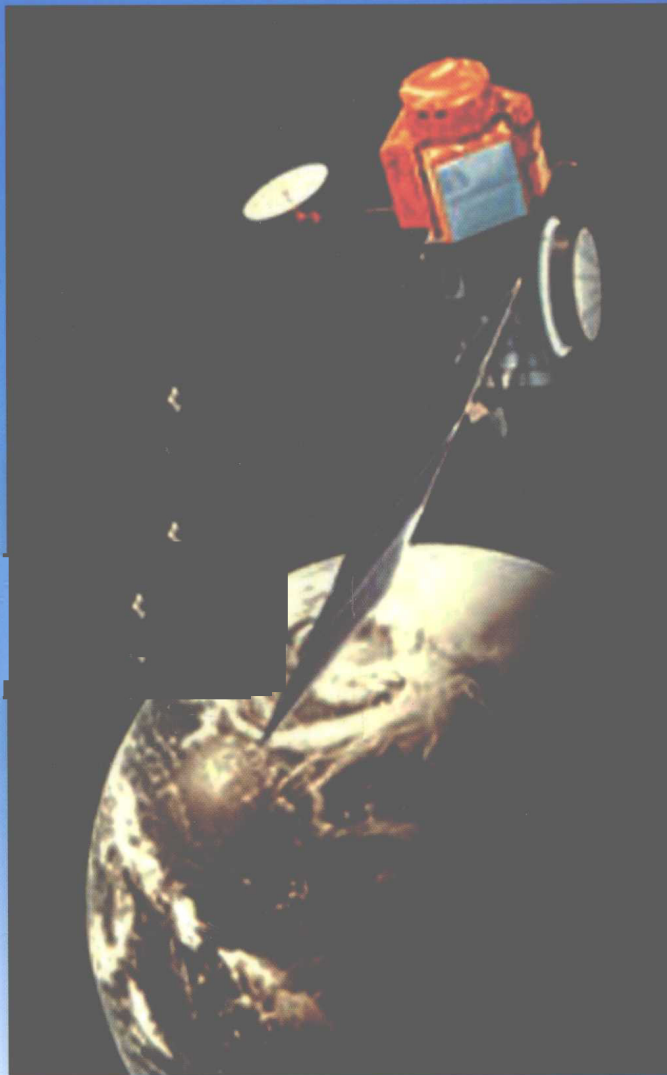
力学

钟锡华

周岳明

编著

第二版



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

大学物理通用教程

力学

(第二版)

钟锡华 周岳明 编著



北京大学出版社
PEKING UNIVERSITY PRESS

图书在版编目(CIP)数据

大学物理通用教程. 力学/钟锡华,周岳明编著.—2版.—北京:
北京大学出版社,2010.2

ISBN 978-7-301-16097-8

I. 大… II. ①钟…②周… III. ①物理学-高等学校-教材②力学-高等学校-教材 IV. O4

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2010)第 021095 号

书 名: 大学物理通用教程——力学(第二版)

著作责任者: 钟锡华 周岳明 编著

责任编辑: 瞿 定 顾 卫 笑

标准书号: ISBN 978-7-301-16097-8/O·0806

出版发行: 北京大学出版社

地 址: 北京市海淀区成府路 205 号 100871

网 址: <http://www.pup.cn> 电子邮箱: zpup@pup.pku.edu.cn

电 话: 邮购部 62752015 发行部 62750672 编辑部 62752021

出版部 62754962

印 刷 者: 北京大学印刷厂

经 销 者: 新华书店

890 毫米×1240 毫米 A5 10.75 印张 308 千字

2010 年 2 月第 2 版 2010 年 2 月第 1 次印刷

印 数: 0001—4000 册(总 26001—30000 册)

定 价: 20.00 元

未经许可,不得以任何方式复制或抄袭本书之部分或全部内容。

版权所有,侵权必究

举报电话:010-62752024 电子邮箱:fd@pup.pku.edu.cn

大学物理通用教程

第二版说明

这套教程自本世纪初陆续面世以来,至今已重印七次.这第二版的主要变化是,将原《光学·近代物理》一本书改版为《光学》和《近代物理》两本书,均以两学分即 30 学时的体量来扩充内容,以适应不同专业或不同教学模块的需求.

这第二版大学物理通用教程全套包括《力学》、《热学》、《电磁学》、《光学》、《近代物理》、《习题指导》等六本书.在每本书的第二版说明中作者将给出各自修订、改动和变化之处,以便于查对.

这第二版大学物理通用教程系普通高等教育“十一五”国家级规划教材.作者感谢广大师生多年来对本套教材赐予的许多宝贵意见和建议,感谢北京大学教材建设委员会给予本套教材建设立项的支持,感谢北京大学出版社及其编辑出色而辛勤的工作.

钟锡华 陈熙谋

2009 年 7 月 22 日日全食之日
于北京大学物理学院

《力学》第二版说明

本书第一版自 2001 年面世以来,至今已重印七次.这第二版在篇幅上增长了约 5%,其主要变化在以下三个方面.

其一,考虑到原书文句精炼,而不免有时显得简略,这次再版对全书通篇文句作了润色,并在解说上多处作了稀释.

其二,在章节安排上唯一的变动是,将 9.7 节“拍与李萨茹图形”提前到第 8 章,单独开列 8.9 节“振动的合成”予以介绍.原先那样安排是基于一种考虑,即振动合成的内容过于数学化,若将其作为振动运动学的内容在开篇介绍,势必推迟振动动力学问题作为主角的登场,而将振动合成的出现场合置于两列波的叠加区域显得更为物理.现在我们尊重传统习惯,置其于振动一章的最后一节,还是恰当的.

其三,添加了若干节段包括例题.将它们开列如下以备查考:天文单位,科里奥利力公式的另一种推导,子弹冲击木棒一例,动滑轮加速度一例,用准静态能量法求出弹簧有效质量,流体内部压强具有各向同性的说明,旋转流体自由表面弯曲一例.

钟锡华 周岳明

2009 年 7 月于北京大学物理学院

大学物理通用教程

第一版序

概况与适用对象 这套大学物理通用教程分四册出版,即《力学》、《热学》、《电磁学》和《光学·近代物理》,共计约 130 万字. 原本是为化学系、生命科学系、力学系、数学系、地学系和计算机科学系等非物理专业的系科,所开设的物理学课程而编写的,其内容和份量大体上与一学年课程 140 学时数相匹配. 这套教程具有较大的通用性,也适用于工科、农医科和师范院校同类课程. 编写此书是希望非物理类专业的学生熟悉物理学、应用物理学,并对物理学原理是如何形成的有个较深入的理解,从而使他们意识到,物理学的学习在帮助他们提出和解决他们各自领域中的问题时所具有的价值. 为此,首先让我们大略地认识一下物理学.

物理学概述 物理学成为一门自然科学,这起始于伽利略-牛顿时代,经 350 多年的光辉历程发展到今天,物理学已经是一门宏大的有众多分支的基础科学. 这些分支是,经典力学、热学、热力学与经典统计力学、经典电磁学与经典电动力学、光学、狭义相对论与相对论力学、广义相对论与万有引力的基本理论、量子力学、量子电动力学、量子统计力学. 其中的每个分支均有自己的理论结构、概念体系和独特的数理方法. 将这些理论应用于研究不同层次的物质结构,又形成了原子物理学、原子核物理学、粒子物理学、凝聚态物理学和等离子体物理学,等等.

从而,我们可以概括地说,物理学研究物质存在的各种主要的基本形式,它们的性质、运动和转化,以及内部结构;从而认识这些结构的组元及其相互作用、运动和转化的基本规律.与自然科学的其他门类相比较,物理学既是一门实验科学,一门定量科学,又是一门崇尚理性、注重抽象思维和逻辑推理的科学,一门富有想象力的科学.正是具有了这些综合品质,物理学在诸多自然科学门类中成为一门伟大的处于先导地位的科学.

在物理学基础性研究的过程中所形成和发展起来的基本概念、基本理论、基本实验方法和精密测试技术,越来越广泛地应用于其他学科,从而产生了一系列交叉学科,诸如化学物理、生物物理、大气物理、海洋物理、地球物理和天体物理,以及电子信息科学,等等.总之,物理学以及与其他学科的互动,极大地丰富了人类对物质世界的认识,极大地推动了科学技术的创新和革命,极大地促进了社会物质生产的繁荣昌盛和人类文明的进步.

编写方针 一本教材,在内容选取、知识结构和阐述方式上与作者的学识——科学观、知识观和教学思想,是密切相关的.我们在编写这套以非物理专业的学生为对象的大学物理通用教程时,着重地明确了以下几个认识,拟作编写方针.

1. 确定了以基本概念和规律、典型现象和应用为教程的主体内容;对主体内容的阐述应当是系统的,以合乎认识逻辑或科学逻辑的理论结构铺陈主体内容.知识结构,如同人体的筋骨和脉络,是知识更好地被接受、被传承和被应用的保证,是知识生命力之本源,是知识再创新之基础.知识的力量不仅取决于其本身价值的大小,更取决于它是否被传播,以及被传播的深度和广度.而决定知识被传播的深度和广度的首要因素,乃是知识的结构和表述.

2. 然而,本课程学时总数毕竟仅有物理专业普通物理课程的40%,故降低教学要求是必然的出路.我们认为,降低要求主要体现在习题训练上,即习题的数量和难度要降低,对解题的熟练程度和技巧性要求要降低.降低教学要求也体现在简化或省略某些定理证明、理论推导和数学处理上.

3. 重点选择物理专业后继理论课程和近代物理课程中某些篇

章于这套通用教程中,以使非物理专业的学生在将来应用物理学于本专业领域时,具有更强的理论背景,也使他们对物理学有更为全面和深刻的认识。《力学》中的哈密顿原理;《热学》中的经典统计和量子统计原理;《电磁学》中的电磁场理论应用于超导介质;《光学·近代物理》中的变换光学原理、相对论和量子力学,均系这一选择的结果。

4. 积极吸收现代物理学进展和学科发展前沿成果于这套通用教程中,以使它更具活力和现代气息。这在每册书中均有不少节段给予反映,在此恕不一一列举,留待每册书之作者前言中明细。值得提出的是,本教程对那些新进展新成果的介绍或论述是认真的,是充分尊重初学者的可接受性而恰当地引入和展开的。

应当写一套新的外系用的物理学教材,这在我们教研室已闲散地议论多年,终于在室主任舒幼生和王稼军的积极策划和热心推动下,得以启动并实现。北大出版社编辑周月梅和瞿定,多次同我们研讨编写方针和诸多事宜,使这套教材得以新面貌而适时面世。北大出版社曾于1989年前后,出版了一套非物理专业用普通物理学教材共四册,系我教研室包科达、胡望雨、励子伟和吴伟文等编著,它们在近十年的教学过程中发挥了很好的作用。现今这套通用教程,在编撰过程中作者充分重视并汲取前套教材的成功经验和学识。本套教材的总冠名,经多次议论最终赞赏陈秉乾教授的提议——大学物理通用教程。

一本教材,宛如一个人。初次见面,观其外表和容貌;接触多了,知其作风和性格;深入打交道,方能度其气质和品格。我们衷心期望使用这套教程的广大师生给予评论和批判。愿这套通用教程,迎着新世纪的曙光,伴你同行于科技创新的大道上,助年轻的朋友茁壮成长。

钟锡华 陈熙谋

2000年8月8日于北京大学物理系

作者前言

这本力学分册内容共十一章. 质点运动学为首章, 篇幅占全书 10%. 后续四章占全书 25%, 论述牛顿运动定律和万有引力定律, 以及动量变化定理、机械能变化定理和角动量变化定理, 它们构成了牛顿力学的基础框架和严整的理论体系. 无疑, 在这一体系中牛顿运动定律, 即质点运动的动力学方程是根基, 三个变化定理合成为一个主干. 而有关质点组质心的五个力学定理, 专辟第 6 章予以集中论述, 占全书 4%, 这出于作者对质心的偏爱, 不乐意将其力学全貌分散于多处介绍. 接着的四章为刚体力学、振动、波动和流体力学, 占全书 51%, 它们可以被看作牛顿力学的发展; 其中波动一章占有较大篇幅, 从波动理论到波动应用和最新发展, 均有了明显的加强, 这与波动作为物质运动两种最基本形式之一的地位是相称的, 教师可根据专业特点和个人兴趣选用. 最后一章为哈密顿原理, 篇幅占全书 10%. 将原本属于分析力学的理论要点, 吸收到这本通用教程中来, 是基于以下两点考虑: 其一, 非物理专业系科的学生无后继的理论力学课程, 现在有了这一章垫底, 使他们在今后学习量子化学或分子生物学这类课程中, 接触到哈密顿原理和哈密顿量时, 不至于感到突然和陌生. 其二, 哈密顿力学独树一帜, 以与牛顿力学完全不同的方式表达力学规律. 牛顿力学以微分方程形式即逐点渐变的方式表达运动规律, 哈密顿力学以变分方程即路径积分为极值的方式表达运动规律, 两者却是等价的. 因此, 通过这一章的学习, 将有助于学生开阔理论视野, 增长科学世界观, 这原本也是开设物理课程的初衷之一——让学生欣赏一种思维方式, 就是物理学家看待世界、说明自然界如何运行时所采取的思维方式.

我们注意到了, 20 世纪 90 年代以来国内出版的若干力学教程中, 突出地强调了对称性与守恒律, 试图努力以动量、能量和角动量三个守恒律为核心来展开力学. 我们没有采纳这一思想, 因为我们认

为守恒并不永恒,守恒是有条件的.对称性可爱,非对称可亲,动力学方程才是根本.尤其是在经典力学范畴,动力学方程已经被确立,由此自然地导出了守恒律.力学系统的一种对称性联系着一个守恒量,这个概念无疑是重要的.在开始讲授本书的两个个月后,在最后一章哈密顿原理中,对此将顺乎其然地给出明确的论证.我们在北京大学的生物学系用了4个学时讲授这一章,学生可以接受,可供其他院校参考.

本书以力学基本规律和概念、典型现象和应用为主体内容,同时注重知识的扩展和适度的深化,这包括某些历史背景和注记,学科发展前沿评介,以及有关学习的指导.对于诸如非线性振动、混沌、非线性波动、孤波、激波、超流、湍流,哈勃定律、失重态的适应和太空站微重力科学、通信和气象卫星、傅里叶分析和频谱、波包群速和波包展宽、双原子分子和三原子分子的简正模和生理流动等内容,本书均有认真的描述.本书力求语言平实明净,论述方式快切快入.

综上所述,崇尚结构、力求平实、承袭传统、注重扩展,是本书的编写方针和倾向.

本书由钟锡华撰写第1章、第2章2.2,2.6节、第3~10章;由周岳明撰写第2章2.1,2.3,2.4,2.5节和第11章,并编配全书习题.两位作者从1985年开始至今,先后为化学系、生物学系、力学系、地学系和计算机科学系讲授力学课程.此课程系物理学B类课程,约36学时.本书内容份量大体上与这个学时数匹配.

力学是整个物理学的基础,是学生进入物理科学宏伟大厦的第一馆,它一如既往地起着基石和入门的作用.作者愿以此书献给新世纪的大学生们,希望本书能对他们的成长和事业有所裨益和帮助.本书若有不妥和错误之处,欢迎读者批评指正.

钟锡华 周岳明

2000年5月于北京大学物理系

目 录

力学引言	(1)
第 1 章 质点运动学	(2)
1.1 时间与空间	(2)
1.2 物体的点模型	(7)
1.3 位置矢量与轨道方程	(9)
1.4 速度矢量	(11)
1.5 加速度矢量	(15)
1.6 运动学中的逆问题	(18)
1.7 角速度	(23)
1.8 极坐标系与自然坐标系	(24)
习题	(27)
第 2 章 牛顿力学的基本定律	(31)
2.1 牛顿以前的力学	(31)
2.2 牛顿运动定律	(34)
2.3 几种常见的力	(38)
2.4 万有引力定律	(40)
2.5 力学相对性原理与伽利略变换	(43)
2.6 惯性系与非惯性系 惯性力	(46)
习题	(55)
第 3 章 动量变化定理与动量守恒	(60)
3.0 概述	(60)
3.1 质点动量变化定理	(60)
3.2 质点组动量变化定理	(63)
3.3 动量守恒律	(64)
3.4 火箭推进速度	(66)
习题	(69)
第 4 章 动能与势能——机械能变化定理与 机械能守恒	(72)

4.1	质点动能变化定理	(72)
4.2	保守力的功	(74)
4.3	保守力场中的势能	(77)
4.4	机械能变化定理与机械能守恒	(81)
4.5	三种宇宙速度	(84)
4.6	两体碰撞	(88)
	习题	(92)
第 5 章	角动量变化定理与角动量守恒	(96)
5.1	角动量与力矩	(96)
5.2	质点组角动量变化定理	(99)
5.3	有心运动	(101)
	习题	(105)
第 6 章	质心力学定理	(108)
6.0	概述	(108)
6.1	质心动量定理	(109)
6.2	质心动能定理	(112)
6.3	质心角动量定理	(115)
6.4	有心运动方程与约化质量	(117)
	习题	(119)
第 7 章	刚体力学	(121)
7.1	刚体运动学	(121)
7.2	定轴转动惯量	(127)
7.3	定轴转动定理与动能定理	(132)
7.4	一组刚体力学的典型题目	(138)
7.5	快速重陀螺的旋进	(154)
	习题	(158)
第 8 章	振动	(163)
8.1	振动的描述	(163)
8.2	弹性系统的自由振动	(167)
8.3	多自由度弹性系统	(173)
8.4	弹性系统的阻尼运动	(182)
8.5	简谐量的保守性与对应表示	(185)
8.6	弹性系统的受迫振动与共振	(189)
8.7	自激振动	(196)

8.8	非线性振动与混沌	(197)
8.9	振动的合成	(201)
	习题	(207)
第 9 章	波动	(211)
9.1	波与波函数	(211)
9.2	波动方程	(215)
9.3	弹性体的应变与应力	(218)
9.4	介质中的波速	(224)
9.5	波场中的能量与能流	(231)
9.6	波的叠加和驻波	(238)
9.7	多普勒效应与激波	(247)
9.8	介质色散 波包群速与波包展宽	(254)
9.9	孤立波与非线性波动	(257)
	习题	(259)
第 10 章	流体力学	(263)
10.1	流体的宏观物性	(263)
10.2	理想流体的定常流动 伯努利方程	(269)
10.3	黏性流体的运动	(277)
10.4	物体在黏性流体中的运动	(281)
10.5	湍流与雷诺数	(286)
	习题	(289)
第 11 章	哈密顿原理	(292)
11.0	概述	(292)
11.1	力学系统的约束与广义坐标	(293)
11.2	哈密顿原理	(297)
11.3	哈密顿原理与拉格朗日方程	(301)
11.4	哈密顿原理与哈密顿正则方程	(306)
	习题	(314)
附录	物理常量 保留单位	(316)
	习题答案	(317)

力学引言

物质世界存在多种多样的运动形态,其中机械运动是最基本最直观的运动形态.简单地讲,机械运动是指物体位置的变动,也包括物体内部各部分的相对运动即形变.力学是研究机械运动基本规律的一门学科.其主要内容可概括为以下几个方面.

- 研究物体的运动轨道,研究决定运动轨道的动力学因素,建立动力学方程.

- 研究物体与物体之间属于机械运动范畴的相互作用,诸如,推动、冲击、碰撞、支持、摩擦、吸引和排斥,等等;研究这类相互作用过程中物体运动量的交换和变化的规律.

- 寻求物体运动过程中或相互作用过程中的守恒量及相应的守恒条件.

它们构成了牛顿力学的基本内容,它们至今依然是研究复杂运动的基础和入门.本书第1章至第6章论述牛顿力学的理论体系及其典型现象与重要应用,随后的第7章至第10章为刚体力学、振动、波动和流体力学,它们可以被看作牛顿力学的推广和发展.特别是关于波动与流体力学,其研究对象已经由先前的离散物体发展为连续介质,研究重点已经由先前的物体运动规律发展为介质元的运动和运动在介质中的传播规律,以及整个流速场的基本规律.

力学按研究内容划分为运动学和动力学.经典力学按研究方法或研究路线划分为牛顿力学和分析力学.哈密顿原理是分析力学中最重要的一个基本原理,在本书最后一章给予简明而系统的阐述,旨在为今后学习分子生物学、量子化学等高级课程提供理论基础,也使我们欣赏到关于物理学规律的一种新颖的表述方式.

1

质点运动学

- 1.1 时间与空间
- 1.2 物体的点模型
- 1.3 位置矢量与轨道方程
- 1.4 速度矢量
- 1.5 加速度矢量
- 1.6 运动学中的逆问题
- 1.7 角速度
- 1.8 极坐标系与自然坐标系

1.1 时间与空间

- 时空概念起源于运动
- 长度单位与基准
- 时间单位与基准
- 自然界中的长度量级
- 自然界中的时间量级
- 天文单位

● 时空概念起源于运动

日月经天,江河行地,飞禽走兽,车水马龙,春夏秋冬,草木枯荣,宇宙万物无不在运动变化之中.先哲们正是在对自然现象和天体运动的观察和感悟中,逐渐形成时间与空间概念.随时间而在空间中变化的现象,概被言之谓运动.常言道,流水年华,光阴似箭,斗转星移,一晃五十年,如白驹过隙.由此可见,与运动图像相比,空间概念对于人们较为抽象,而时间概念就更为抽象了.人们好用具体形象的运动的空间图景来刻画时间.时空概念起源于运动,起源于人们对运动的观察和感悟.一旦形成了概念,时间与空间便超脱于运动,而成为两个独立的物理量,被用以描述运动,将人们对物体运动的认识从最初的直观的唯象的水平,提高到定量的清晰的可分析的境界.因此,时

空概念被首选为本章质点运动学之开篇。

上下四方,谓之宇. 往古来今,谓之宙。

如果用极简炼的语言定义时间与空间,那可采取如下的一种表述: 时间与空间表示事物之间的次序——时间描述事件的先后顺序,而空间描述物体的位形,表示物体分布的秩序。

● 时间单位与基准

在国际单位制中,时间的单位为秒,记作 s. 最早,人们是利用地球自转运动来计量时间的,其基本单位是平太阳日. 19 世纪末,将一个平太阳日的 $1/86\,400$ 作为 1 秒,被称为世界时秒. 由于地球的自转运动存在着不规则变化,并有长期减慢的趋势,使得世界时秒逐年变化,不能保持恒定. 按此定义复现秒的准确度只能达到 1×10^{-8} . 随着科学技术的不断发展及其对计时准确度要求的日益提高,关于秒的定义曾有过两次重大的修改。

第一次是在 1960 年,国际计量大会决定采用以地球公转运动为基础的历书时秒,作为时间单位,其措词是“将 1900 年初附近,太阳的几何平黄经为 $279^{\circ}41'48.04''$ 的瞬间作为 1900 年 1 月 0 日 12 时整,从该时刻起算的回归年的 $1/31\,556\,925.974\,7$ 作为 1 秒”. 换句话说,一回归年等于 $31\,556\,925.974\,7$ 秒. 按此定义复现秒的准确度提高到 1×10^{-9} .

第二次是在 1967 年,国际计量大会决定采用原子秒定义取代历书时秒定义,其措词是“秒是铯-133 原子基态的两个超精细能级之间跃迁相对应的辐射的 $9\,192\,631\,770$ 个周期所持续的时间”. 按此定义复现秒的准确度已优于 1×10^{-13} . 原子在发生能级间跃迁时以电磁波形式辐射或吸收能量,该电磁波的频率或周期精确地与原子微观结构相对应,因而极为稳定. 人们利用这一特性制成了各种各样性能优异的原于钟. 其中实验室型铯束原子钟,具有最高的准确度和长期稳定度,是复现原子秒定义的时间频率基准器。

用选定的某一特定时刻作为原点,用选定的时间单位“秒”进行连续不断的积累,就构成一个时间参照坐标系——时标. 原子时标是由连续不断工作着的原子钟得到的. 以各国有关研究所运转的原子

钟的读数为依据,进行加权平均而建立的时标被称作国际原子时(TAI),它的起点是1958年1月1日0时0分0秒。

● 自然界中的时间量级

- ▲ 人体心律周期约 0.8 s.
- ▲ 太阳光传播到地球的时间约 5×10^2 s.
- ▲ 地球上出现猿人的时间距今约 4×10^2 万年.
- ▲ 侏罗纪(亦称恐龙世纪)距今约 0.5~1.5 亿年.
- ▲ 地球上出现生物的时间距今约 3.5 亿年.
- ▲ 地球年龄约 46 亿年.
- ▲ 太阳年龄约 50 亿年.
- ▲ 宇宙年龄约 150 亿年.
- ▲ 电子寿命大于 10^{22} 年.
- ▲ 人眼视觉弛豫时间约 0.1 s.
- ▲ 人体感觉神经脉冲间隔约 1 ms(毫秒), $1 \text{ ms} = 10^{-3} \text{ s}$.
- ▲ 普通气体光源原子发光持续时间约 1 ns(纳秒),
 $1 \text{ ns} = 10^{-9} \text{ s}$.
- ▲ 当今超短激光脉冲宽度已达 5 fs(飞秒), $1 \text{ fs} = 10^{-15} \text{ s}$.
- ▲ 顶夸克寿命约 10^{-24} s .

● 长度的单位与基准

在现行国际单位制中,长度的单位为米,记作 m,其实物基准是一根铂铱米尺,亦称国际米原器.它是一根横截面近似为 H 形的尺子,保存在 1 标准大气压下,水平地置放于相距 571 毫米的两个圆柱上,圆柱直径约 1 厘米.这是 1889 年第 1 届国际计量大会上批准建立的.在 1927 年第 7 届国际计量大会上对米定义作了严格的规定,其措词是“国际计量局保存的铂铱米尺上所刻两条中间刻线的轴线在 0°C 时的距离”.按此定义的米,其不确定度为 1×10^{-7} .长度的实物基准在稳定性和安全性方面有着诸多潜在的弊端.随着科学技术的不断发展及其对长度计量精度要求的日益提高,关于米的定义曾有过两次重大更改.