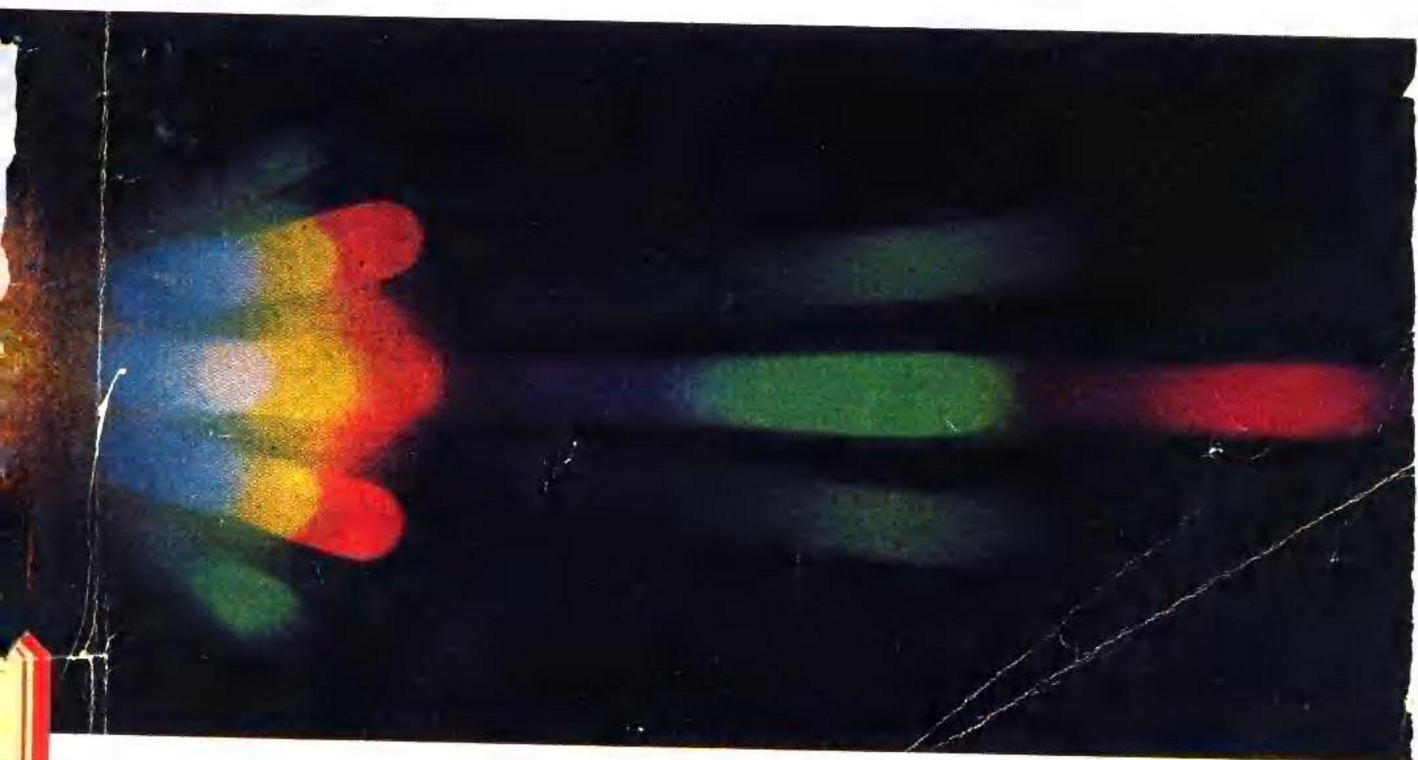


物理学

II

W. 库恩 著 战元龄 译



人民教育出版社

物 理 学

II

W. 库 恩 著

战 元 龄 译

人 民 教 育 出 版 社

内 容 简 介

本书是西德中等教育通用的物理教本,全书分三卷,I卷包括热学、光学、电学、力学、运动学和能量等内容,II卷为高级文法学校语言班基础课和定向课选编了力学、振动与波、光和物质的模型概念和原子模型等内容,III卷由A:力学,B:热力学和统计力学,C:场和电荷,D:振动与波,E:量子物理五个分册组成。

本书总是从实验出发引入概念并建立模型,对问题的探讨,总是从明确的问题出发并归结到一新的更深入的问题上,作者通过科学思想史的生动叙述,有意识地使学生体验到思维和研究的科学方法,对读者极富启发性,本书为便利读者,在编辑上别具一格,图文并茂,实属难能可贵。

卷I可供我国中学师生参考,卷II和卷III则高于我国目前的中学水平,可供中学教师及大专院校理工科师生参考。

中译本责任编辑:曹建庭

Wilfried Kuhn

PHYSIK

Band II

Bearbeiter des Bandes II: Kurt Kress · Wilfried Kuhn

Westermann, 1976

物 理 学

II

W. 库恩 著

战元龄 译

*

人民教育出版社出版

新华书店北京发行所发行

人民教育出版社印刷厂印装

*

开本787×1092 1/16 印张15插页1 字数340,000

1980年6月第1版 1981年11月第1次印刷

印数 00,001--10,200

书号13012·0474 定价2.30元

(附圆环系图片二张)

序 言

本卷为高中语言班^①以及为基础课程和定向课程选编了“力学”、“振动与波”、“光和物质的模型概念”和“原子模型”诸论题。

本书特别考虑到与专业相衔接的、历史的、和科学理论的诸方面。

对题材的阐述作者着重采取一种针对问题的表达方式。探讨总是从鲜明的提问出发，并归结于新的、更深入的问题。学生将体验到思维和研究只有通过联系一问题才能实现。他们将学习去注视问题、分析问题和设计解决问题的途径。通过生动活泼的、直观的和详尽的叙述，可使学生独立地学会若干章节。这将减轻班组中的工作，并能自力地调整十一年级学生中的不同基础。

附录有一部分内容超出了一般教科书的范围，为感兴趣的学生提供了对讲授所研讨的内容进行独立深入钻研的可能性。为此，在正文的相应位置上，于其右上角用小写数码标出了附录的深入注解，反过来在附录的每个注解前用页数表示出该注解与正文的什么地方相联系。

附录包含了数学的、实验的、历史的、科学理论的和哲学的各种补充和深化，它们对其它专业也能提供一个相衔接的处置。众多而又准确的文献目录是为激励独立深入的工作而给出的，它们都是能很好理解和容易得到的文献。

在处理振动学和波动学时，各种不同形式的能量传播，以及出自物理学完全不同领域的各种现象，可以通过一种相衔接的结构(波动)而顺次处理的认识是高超的观点。

讲授可根据此书在理论和实验方面的加强处理而集中于一些窄的领域(例如从经典力学的详尽讨论出发，而发展到天文的宇宙图象、电磁场的深入讨论、原子物理和其它)。另一方面，也可以选择某一主导课题(例如物理模型概念——原子模型——的发展，电磁波与以太问题的联系，波-粒二象性)。因为这种二象性对近代物理学的理解，及对由它得出的认识论的结论有决定性的意义。所以在第一部分中，对其基本思想和在附录中对基础波动力学的多少有些过多的数学讨论，理所当然地给予了应有的地位。

物理学的和科学理论的历史，不是在一特别的章节中去处理，而是在问题的历史意义上作为方法论的原则贯穿在全部阐述之中而起作用。

著作中对实验的发展给予了特别的注意。在正文及在附录中所提到的和由作者所验证的众多实验，对它们的所有技术细节一般都作了描述。读者由此就可以独立地进行实验了。虽然在技术性的描述中提到了某些厂家的个别仪器，但这并不是说只有用这种仪器方能进行所描述的实验。所陈述的实验方法也仅仅应该是一种可能的方法，并应以此作为启示而能提出自己的改

^① 德国初等和中等教育学制共13年，小学4年，中学9年，年级从小学往上排。本卷用作11年级物理学教材。德国文科中学设三种语言类：即古代或古典语言类、近代语言类和数学及科学类。一、二两类的物理教学约用320—560学时，第三类约用560—720学时，按校而异。——中译本编注

进。几个厂对本卷提供了订货目录，这些目录提示了对这里所提到的实验参考文献及所用仪器（见文献目录 89, 90）。

对正文和附录所讨论的内容进行的选择，使得本书有可能在联邦共和国的各州使用。

在这一版中不言而喻地从头至尾应用了新规定的单位(SI 制)。

提到第一卷的页数时皆指 1975 年的修订版。

对贡献出有价值的建议的同事们表示衷心感谢，特别是要感谢出版社为此书所作的优良印装。

作 者

1976 年 1 月于基森城和美茵河畔法兰克福城

目 录

第一章 力学.....1	4.3 反射.....73
1.1 运动.....1	4.4 折射.....76
1.1.1 恒速运动.....2	第五章 光的传播.....79
1.1.2 变速运动——瞬时速度.....3	5.1 微粒模型——波动模型.....81
1.1.2.1 匀加速运动.....5	5.2 不同媒质中的光速——色散.....83
1.2 力、质量和加速度之间的关系.....10	5.3 光传播中的干涉现象——颜色的最终说明.....85
1.3 力的合成和分解.....15	5.4 光的衍射.....89
1.4 速度的合成和分解——独立性原理.....16	5.5 光的偏振.....92
1.5 功和能.....18	第六章 电磁波.....95
1.5.1 功的普遍定义.....19	6.1 电场和磁场.....95
1.5.2 提升功——位能.....19	6.2 电场和磁场之间的关系.....99
1.5.3 加速功——动能.....21	6.2.1 电磁现象.....99
1.5.4 弹性功——弹性能.....23	6.2.2 电磁感应——楞次定则.....101
1.5.5 能量守恒定律.....24	6.2.3 电磁振动.....105
第二章 能量传输的可能性.....28	6.2.4 电磁波.....107
2.1 附在物质上的能量的传播和分布.....28	6.2.5 光的电磁理论.....112
2.2 不附在物质上的能量的传播——表现形式.....31	6.2.6 电磁波谱——能量分布.....114
第三章 振动.....35	第七章 波-粒“二象性”.....118
3.1 弹簧摆.....35	7.1 光的量子化发射和吸收.....118
3.1.1 弹簧摆的距离-时间-规律.....35	7.1.1 光电效应.....118
3.1.2 弹簧摆的振动周期.....39	7.1.2 普朗克作用量子的实验测定.....122
3.1.3 振动的弹簧摆作为能库.....40	7.1.3 康普顿效应.....123
3.2 重力摆.....41	7.1.4 经典物理的原子模型.....124
3.2.1 重力摆的距离-时间-规律.....41	7.1.5 氢光谱, 原子中的能级.....126
3.2.2 重力摆的振动周期.....42	7.1.6 弗兰克-赫兹实验.....129
3.2.3 振动的重力摆作为能库.....44	7.2 物质的波动本性.....132
3.3 由自控(反馈)放大振动.....44	7.2.1 阴极射线的粒子本性.....132
3.4 受迫振动——共振.....46	7.2.2 阴极射线的波动本性.....134
3.5 由耦合传递振动能量.....48	7.2.3 驻波和本征值问题.....140
第四章 在充以物质的空间中由波传输能量.....52	7.2.4 受空间限制的电子波和量子化.....142
4.1 驻波——干涉.....57	7.2.5 波动力学的原子模型.....144
4.2 衍射——惠更斯原理.....68	7.3 由波-粒二象性引出的认识论结论.....145
	7.3.1 海森伯测不准关系.....145
	7.3.2 因果原理.....150

7.3.3 基本观察——模型概念.....	152	开普勒定律(167),	磁场(180),
附录——补充和参考文献.....	154	感应定律(189),	交流电路(191),
		薛定谔方程(201),	公式和物理常数(209),
在附录中,就中处理了如下题材:		参考文献(212).	
微分计算(155),	积分计算(159),	人名和内容索引.....	217
圆周运动(163)	引力定律(166),		

第一章 力 学

引言

本卷旨在讨论贮存在振动中的和由波传播的能量。只有对力学中的若干概念和定律很熟悉,才能正确解释出现的各种现象以及为说明引深的诸问题而设想出各种实验。在这一章中,我们把这些定律综合到一起,其中有的是已知的,有的则要新引进。在附录中可找到若干对理解振动与波的理论虽然不是必不可少的,但对有高要求的学生来说则是对力学的一种令人感兴趣的深入和补充。

这里要特别推荐附录 1.11 中关于力学历史的文献。力学的发展史,不论从自然科学还是从人文科学的观点来看,都是特别有意义的。比如把从现代的意义上讲已经是“自然科学地”进行思维和研究的伽利略(Galilei)^①和已广为流传的并与陈旧传统相联系的教堂加以对比剖析,这不仅发人深思而且会导致对当代人类科学信仰的深入理解。

1.1 运 动

什么是运动?我们知道,物体在任一确定时刻的运动状态可由其速度的大小和方向表示,物体的速度可以不随时间变化,也可随时间而改变其大小和方向,例如汽车拐弯时,其速度的大小和方向一般都要改变。物体的速度(在某些情况下是变化的)决定它的路径,即所谓轨迹。然而这种通过给出每瞬间的速度来描写物体的运动和其轨迹的方法并不是单义的(eindeutig),这由下面的例子可以说明:坐在高速行驶着的汽车上的人,透过车窗观看与汽车同方向飞着的小鸟。他看到,小鸟相对于车窗慢慢地向后移动。而站在公路边上的观察者,却看到小鸟以高速向前飞行。这里,对同一个小鸟,两个不同的观察者却确认了两个不同的速度。有人会说,这是狡辩,提到速度,显然总是对相对于所讨论的物体静止不动的地球而言的。假如这一前提成立,那么在各种情况下都必须能由实验来检验观察者相对于地球是否是静止的。

从下面的讨论可以看出,这并不总是可能的。例如一列火车以恒定的速度在笔直的路轨上行驶。在车厢中我们让一石块向地板降落。在旁边立一手杖就可以断定石块是垂直下落的。如果使石块在窗外降落,我们会观察到同样的结果。而站在路基上的第二个观察者则看到,石块的轨迹延伸得很长,石块开始几乎是以水平的路线沿列车前进的方向向下飞落(图 2.1)。两个观察者对于运动过程的描述看起来是互相矛盾的,谁的正确呢?以后我们将看到,由于在列车上(现设

^① 作者在这里以伽利略的名字体现着一种科学精神。关于伽利略在科学上的伟大贡献,特别是他一生中不屈不挠地与反动教堂和统治阶级所作的斗争,请参看林万和:伽利略的生平及其对科学的贡献——纪念伽利略诞生四百周年,物理通报 1964 年第 3 期 113 页。——译注

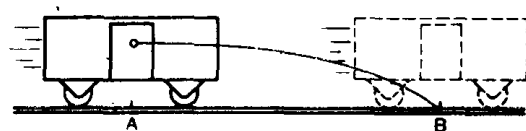


图 2.1. 在行驶着的汽车上一石块自由降落时的轨迹, 车和石块同时到达 B.

想没有车窗)的观察者不可能进行物理实验以测定列车相对于路基的恒定速度, 这两种互相矛盾的说法事实上都是以同等权利成立的. 因此, 只有在给出石块的速度或轨迹的同时补充给出参考系, 才有意义.

这样, 本节的读者相对于房间, 亦即相对于地球来说是静止的. 而相对于太阳, 同一读者却作一相当复杂的运动. 他以约 400m/s 的速度绕地球轴线旋转, 而同时, 始终在转动的地球又以约 30000m/s 的速度绕太阳作圆周运动, 因此, 相对于太阳来说, 他的轨迹就是绕着太阳的波状线.

上述讨论表明: 没有什么绝对的静止, 也没有什么绝对的速度和绝对的轨迹. “在列车车厢里下落的石块, 其轨迹到底是什么样子的?” 这样的问题显然是没有意义的. 只有对某一参考系(例如这里的车厢或路基)来谈物体的运动状态和轨迹才是有意义的. 在下面的讨论中, 我们始终把地球选作参考系, 而不一再说明.

1.1.1 恒速运动

为全面描述物体的速度 v , 除参考系外, 要知道 v 的大小和方向. 因此, 以恒速运动的物体必须是:

1. 在相同的时间间隔 Δt (读作: Delta t)^①内总是经过相同的距离 Δs , 并且
2. 沿一直线运动.

我们用式

$$v = \frac{\Delta s}{\Delta t}$$

计算恒速度 v 的大小.

因为该式既没有表示出 v 的方向, 也没有表示出 s 的方向, 所以我们将速度 v 和距离 s 用箭头亦即用所谓矢量表示. 矢量的长度表示速度(或距离)的大小, 其方向则表示运动(或路径)的方向(图 2.2).

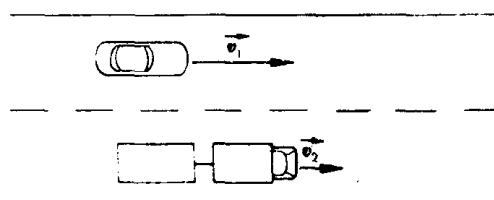


图 2.2. 矢量 $\vec{v}_1$ 和 $\vec{v}_2$ 明确表示出两汽车的速度.

我们把不用方向就可完全描述的物理量, 诸如温度、时间等称作标量.

在只需要知道速度大小的情况下, 式(2)的表示法是要经常用到的. 如果还需要考虑方向, 即 v 和 s 的矢量特性, 则在所涉及的物理量上方标以小箭头.

式(2)的矢量表示法则是

^① Δ 是 D 的希腊字母, 表示“差值(Differenz)”的意思. 例如在时间上两时点间的时间间隔, 在路程上两位点间的距离等.

$$\vec{v} = \frac{\Delta \vec{s}}{\Delta t}, \quad (3.1)$$

式中的等号不仅表示两端的数值相等, 而且也表示 $\vec{v}$ 与 $\Delta \vec{s}$ 有相同的方向. 式(2)或(3.1)告诉我们, 在选择合适的单位后, 怎样来确定物体的恒速度. 为此, 我们必须量出物体经过的任一距离 Δs 和经过此距离所需要的时间 Δt , 并且计算两者的比值. 同样, 已知速度 v 时, 对给定的时间间隔 Δt 就可计算出距离 Δs , 因为

$$\Delta s = v \Delta t. \quad (3.2)$$

1.1.2 变速运动——瞬时速度

如果物体在运动过程中多次改变它的速度, 这时我们虽然也还能测出物体所走的距离 Δs 和为此所需的时间 Δt , 但比值 $\bar{v} = \Delta s / \Delta t$ 却并不能表示出速度随时间的变化. 我们把 $\bar{v}$ 称作平均速度, 因此物体的平均速度由式

$$\bar{v} = \frac{\Delta s}{\Delta t} \quad (3.3)$$

定义.

举一例可说明这个新概念: 汽车司机在公路上 3 小时行驶了 240 km 的路程, 在这时间里, 由于要经过工地、陡坡和平直公路等不同的地段, 他多次改变行车的速度. 因此汽车的平均速度是

$$\bar{v} = \frac{240 \text{ km}}{3 \text{ h}} = 80 \text{ km/h}.$$

也就是说, 假若汽车在 $\Delta t = 3 \text{ h}$ 的时间内以等速 $v = 80 \text{ km/h}$ 行驶, 那么它会跑相同的路程, 240 km. 从数据 $\bar{v} = 80 \text{ km/h}$ 中我们不能知道在所观察的时间间隔里汽车的最大或最小速度, 也不能知道汽车在哪段路程上行驶得慢些或快些. 如果需要比较准确地描述运动的过程, 就必须把行驶时间 $\Delta t = 3 \text{ h}$ 划分成较小的时间间隔, 并且用千米计数器测出每个时间间隔里所走的路程. 现在所得的也还是平均速度. 但是, 把时间间隔选得越小, 那么计算出的各平均速度的总体就越能真实地描述运动的过程.

汽车仪表板上的测速计指示出汽车在每一瞬间的速度, 即所谓**瞬时速度**. 由于“瞬时”没有时间上的延伸, 在某一瞬间所走的距离也就是 $\Delta s = 0$. 这里, 我们既不能测出距离, 也不能测定时间. 那么, 测速计所指的瞬时速度是什么意思呢? 是怎样计算的呢? 根据前面的观察, 我们可以推想, 如果给定的瞬间是在时间间隔 Δt 内, 那么测速计所指的该瞬间的瞬时速度可由计算出的平均速度 $\bar{v} = \Delta s / \Delta t$ 来近似. 把包括所观察的瞬间的时间间隔选得越小, 瞬时速度的近似值就越准确. 为了能把瞬时速度的含义和大小等问题用实验说明, 我们需要一实验装置, 它应能以简单而又准确的方法测出小的时间间隔 Δt 及相应的距离 Δs .

为此我们用粉末图^{1.3)}来测定时间^{1.2)}. 最好先把一金属板轻轻地磨毛并用墨涂黑, 将它经电容或经约 1 兆欧的电阻接到交流电源的火线上, 并在上面撒上升华硫粉末, 现以干燥的手指或以一金属片在板上擦过, 于是视运动速度的大小就显示出图 4 所示的痕迹. 这种现象是容易解释的: 由于运动中发生的摩擦, 很可能是由于撒粉末时空气的摩擦, 使粉末带上了负电, 因为我们的交流电压在每秒钟内改变其正负 100 次, 所以金属板在每秒钟内 50 次带正电, 50 次带负

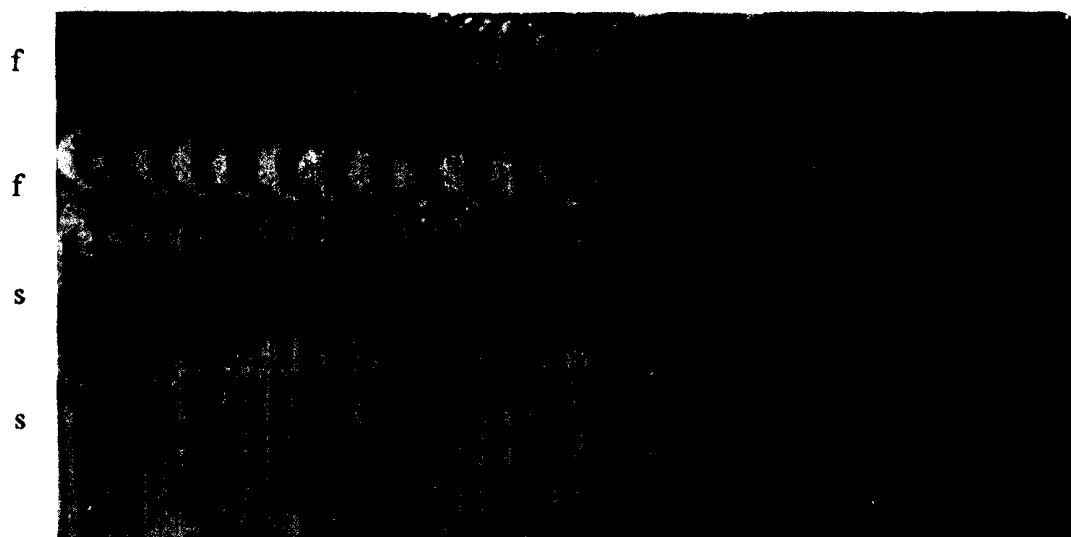


图 4. 在磨毛并涂黑的铅板上手指(f)和金属片(s)的痕迹.

电. 在交流电压为正相位时, 硫的颗粒被金属板吸住, 擦不掉. 在下一个百分之一秒内, 带负电的金属板排斥粉末颗粒, 手指或金属片就把它们擦掉. 因而亮暗条纹的宽度就是手指或金属片在 0.01 秒内所移动的距离. 于是图 4 的痕迹就直截了当地显示出它们的速度及其变化. 量出距离并数出相应的时间刻度(每刻度为 0.01 秒), 就可算出时间间隔为 0.01 秒的平均速度.

为得到 P 点(图 5. 1)的瞬时速度 v_P (在该点存在瞬时速度的前提总是要满足①)的近似值, 我们计算距离 $\overline{AP}$ 和 $\overline{BP}$ 上的平均速度 $\bar{v}_{AP}$ 和 $\bar{v}_{BP}$. 对图 5. 1 所示的运动, 显然

$$\bar{v}_{AP} < \bar{v}_{BP}. \quad (4.1)$$

若把距离的间隔选得越来越小, 如 $\overline{A_1P}$ 和 $\overline{B_1P}$, 然后 $\overline{A_2P}$ 和 $\overline{B_2P}$ 等等, 那么在 P 点的下方, 将得到一系列渐增的平均速度, 而在 P 点的上方则得到一系列渐减的平均速度. 对每一 n 值不等式 (4. 1) 都是成立的, 即

$$\bar{v}_{A_nP} < \bar{v}_{B_nP}.$$

假定速度由 A 至 B 总是增大的, 请读者证明此式, 并由图 5. 1 所给出的数据计算 $\bar{v}_{A_nP}$ 和 $\bar{v}_{B_nP}$.

如果进行实际测量就会看到, 由于测量精度的限制, 一般来说, 在时间间隔为 0.02 至 0.04 秒时, P 点上方和下方的两平均速度就完全相等. 这一共同的数值就是所求 P 点瞬时速度的近似值. 因此 P 点的瞬时速度就是测量方法更精确时, 也就是把时间间隔 Δt 划分得更小时, 在 P 点的上方和下方得到的平均速度的极限值. 当然, 这种极限必须存在, 即速度由 A 至 B 必须是连续增大, 不能有跳跃, 并且物体在每点有一确定的速度. 这样, 只有一个平均速度的数列, 例如 P 点上方的, 也就足够了. 若把 P 点的时刻用 t_P 表示, B 点的时刻用 t_B 表示, 并且相应两点距 O 点的距离分别用 s_P 和 s_B 表示, 则瞬时速度的定义以数学形式可写成

$$v_P = \lim_{t_B \rightarrow t_P} \frac{s_B - s_P}{t_B - t_P} \quad (4.2)$$

① 这句直译是: 总是在说到一时点的速度有意义的假设下. ——中译本编注

② 读作 t_B 以 t_P 为极限. limes 在拉丁文中是极限的意思.

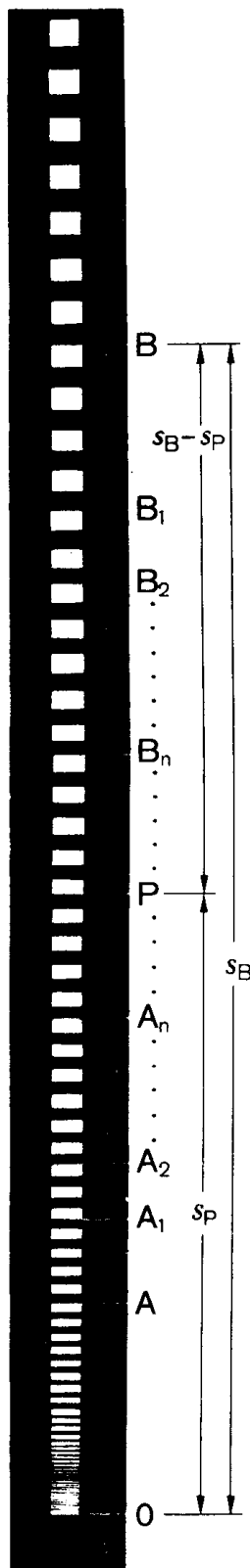


图 5.1. 用金属片显示出的痕迹表明其速度一直在增大的运动情况。

显而易见: P 点的瞬时速度 v_P 是在上限点 B(图 5.1)趋向下限点 P 时, 平均速度所趋向的极限值。应该注意的是: 虽然分子和分母都趋于零, 但分数的值并不为零!

一般不用某距离处点 P 的瞬时速度, 而是用相应时点 t 的瞬时速度; 人们将瞬时速度看成是时间 t 的函数, 并把式(4.2)写成简短的形式:

$$v(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta s}{\Delta t}, \quad (5)$$

式中 t 是在时间间隔 Δt 缩小至零时所对应的时点。在附录 1.4 中, 我们将会看到, 在已知运动的距离与时间的函数关系, 即所谓距离-时间-规律时, 怎样用微分来计算瞬时速度。在不曾由定义把运动形式(如匀速运动)确定下来的情况下, 因为距离和时间都容易测量, 就必须用实验来确定 $s=f(t)$ 的函数关系, 即距离-时间-规律。依式(2)所给出的定义, 匀速运动的距离-时间-规律是 $s=vt$ 。其中 v 是常数。若开始测量的时刻 $t_0=0$ 时距离 $s_0=0$ (图 5.2), 那么就可简单地用 s 和 t 分别代替 Δs 和 Δt 。因为时刻 t 就是消逝的时间间隔, 它等于 t , 所走的距离等于 s 。在 $s-t$ 坐标系中, 函数 $s=vt$ 的图形为一通过零点的直线

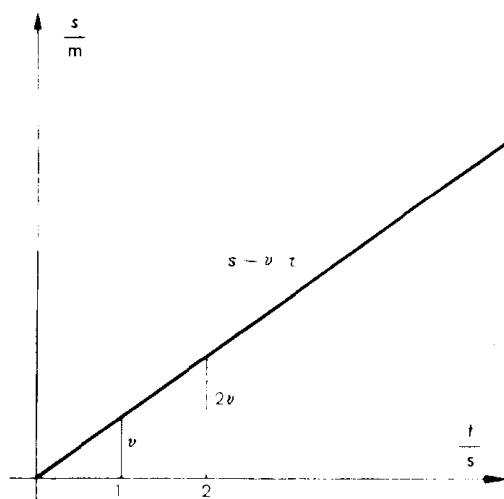


图 5.2. 匀速直线运动的距离-时间-规律。

1.1.2.1 匀加速运动

在斜放的平板上, 若让一球由上滚下, 我们就会看到速度一直在增大。平板的陡度越大, 速度就增加的“越快”。所谓“越快”是指在单位时间内速度的增加量。如图 6 所示, 每秒钟速度的增加, b 情况下的要比 a 情况下的为大。举一数例就会看得更明白: 在平板的陡度较小时, 在第

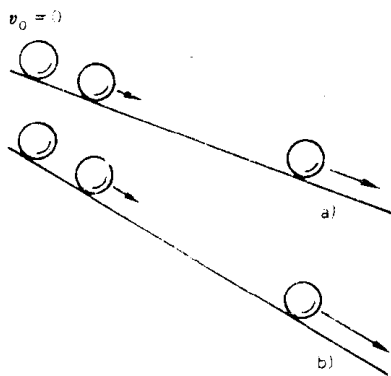


图 6. 在斜面上球的加速运动.

一秒钟内球的速度由 $v_0=0\text{m/s}$ 增加到 $v_1=2\text{m/s}$, 而在平板陡度较大时, 球速在第一秒钟内则由 $v_0=0\text{m/s}$ 增加到 $v_1=6\text{m/s}$. 如果速度的增加是常量, 例如 b 情况下, 球第二秒末的瞬时速度为 12m/s , 第三秒末的瞬时速度为 18m/s , $1/3$ 秒时的为 2m/s , $1/2$ 秒时的为 3m/s 等等, 则我们称之为匀加速运动, 速度的增加量 Δv 与时间间隔 Δt 的比值称作加速度 a ,

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} \quad (a \text{ 是常数, 见附录 1.5}). \quad (6.1)$$

于是在上述的具体数例中

$$a = \frac{6\text{m/s}}{1\text{s}} = 6\text{m/s}^2 \left(= \frac{12\text{m}}{2\text{s}^2} = \frac{18\text{m}}{3\text{s}^2} = \frac{2\text{m}}{\frac{1}{3}\text{s}^2} = \dots \right).$$

定义方程式(6.1)以及上述的数例都表明, 计算匀加速度 a 时, 把时间间隔 Δt 选择得多大是没有关系的. 开始观察的时刻并不必须是运动开始的时刻, 只要我们求出两瞬时速度 v_1 和 v_2 的差值及相应时刻 t_1 和 t_2 的差值, 由式

$$\frac{v_2 - v_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta v}{\Delta t} = a, \quad (6.2)$$

就总可求得匀加速度 a .

例如: $v_1=12\text{m/s}$ 和 $v_2=18\text{m/s}$ 分别是第二秒末和第三秒末的瞬时速度, 即 $t_1=2\text{s}$, $t_2=3\text{s}$, 于是 a 仍为

$$\frac{18-12}{3-2} \frac{\text{m}}{\text{s}^2} = 6\text{m/s}^2.$$

加速度同样也是矢量, 具有速度增长 $\Delta \vec{v}$ 的方向. 以矢量形式可写成

$$\vec{a} = \frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t}. \quad (6.3)$$

当然, 我们还不知道, 这样定义的匀加速运动是否有意义. 也就是说, 我们还完全不知道, 在自然界中是否存在这种运动. 这样的问题, (例如球在斜面上的运动是否是匀加速运动,) 只能由实验来回答. 为此我们必须确定在 Δt 时间里速度的增加量 Δv . 因为我们只能测定距离和时间, 而式(6.2)中的瞬时速度 v_1 和 v_2 又不能由距离和时间确定, 我们就必须找出一个能表征匀加速运动的关系式, 在这个关系式里, 把物体所走的距离 s 和为此所需的时间 t 联系起来. 我们试把距离 s 写成时间 t 的函数, 找出 $s=f(t)$ 的函数, 即找出匀加速运动的距离-时间-规律. 在这

种纯理论的考虑中, 我们当然只能从式 (6) 给出的匀加速运动的定义出发^①。为能更好地统观这种关系, 我们把式 (6) 给出的均匀增加的速度与时间的函数关系用作图法表示出来 (图 7)。图 7 并再一次直观地表示出匀加速运动的时间过程。我们把运动开始的时点记以 $t_0=0$, 把该时点的速度记以 $v_0=0$ 。每秒钟速度增加的数值为 $\{a\}$ m/s, 于是第 1, 2, $\dots$, t 秒末的瞬时速度分别为 $1\{a\}$ m/s, $2\{a\}$ m/s, $\dots$, $\{t\}\{a\}$ m/s。因此, 在匀加速运动情况下, t 秒后的瞬时速度由式

$$v = at \quad (7.1)$$

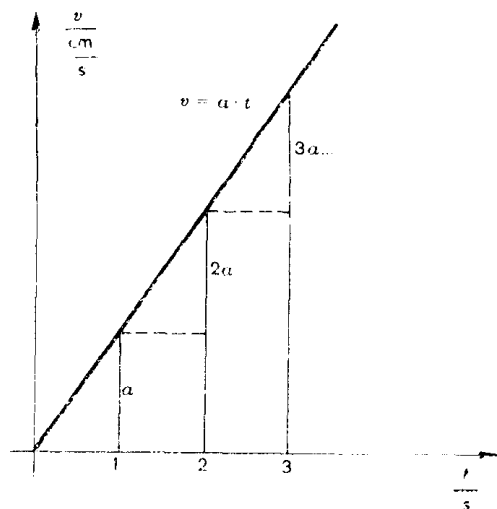


图 7. 匀加速运动中速度的作图表示。

计算。为能确定 t 秒钟内所走的距离, 必须知道 t 秒内的平均速度。因为速度是线性(“均匀的”)增加的(见图 7), 很明显, 在任一时间间隔里的平均速度就是此时间间隔始末速度的算术平均值^①。

在第 1 秒内的平均速度值例如是:

$$\frac{0 + \{a\}}{2} \text{ m/s} = \frac{\{a\}}{2} \text{ m/s}.$$

第 2 秒内的平均速度为

$$\frac{\{a\} + 2\{a\}}{2} \text{ m/s} = \frac{3}{2} \{a\} \text{ m/s} \text{ 等等}.$$

于是在运动的前 $\{t\}$ 秒内的平均速度则为

$$\bar{v} = \frac{0 + ta}{2} = \frac{t}{2} a. \quad (7.2)$$

由式 (3.3) 就可计算出在 t 秒内所走的距离为

$$s = \bar{v} t.$$

把由上述考虑所得的式 (7.2) 的 $\bar{v}$ 值代入上式, 就得到匀加速运动的距离-时间-规律:

$$s = \frac{a}{2} t^2. \quad (a \text{ 为常数}) \quad (7.3)$$

式 (7.3) 以数学的形式和图 8.1 以作图的形式所表示的距离与时间的关系, 是建立在理论思维的基础上的, 也就是由纯粹的推理而得的。式 (7.3) 是所求的匀加速运动的判别式。它表明: 对匀加速运动来说, 比值 $s/t^2 = a/2$ 是常数。现在为验证在斜面上滚的球是否作匀加速运动, 我们就测量从运动开始起的一段距离和为此所需的时间, 然后计算比值 s/t^2 。图 (8.2) 给出适于

① 在数学课上至今我们只学了计算有限个数的平均值, 即把各数相加并用它们的个数去除相加之和。这里则是求无限个瞬时速度的平均值, 应该怎样把它们相加而又用什么数对和作除法呢? 在附录 1.7 中将指出, 这种情况, 平均值这一概念也是有意义的, 并且上述的考虑也是正确的。注意: 式 (3.3) 对 $\bar{v}$ 的定义只表示出一个测量方法, 而不管瞬时速度是有限个还是无限个。

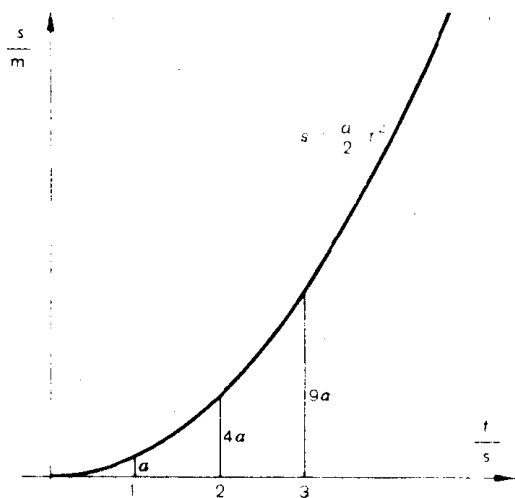


图 8.1. 匀加速运动的距离-时间-规律.

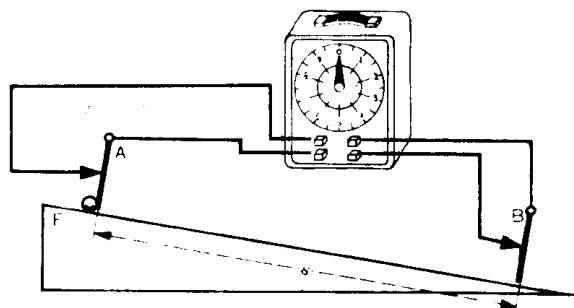


图 8.2. 斜面上的球, F=滚动槽 A, B=小的开关, 电停表.

这种测量的实验装置^{1.8)}; 下表所列的测量数据是一个数例. 比值 s/t^2 围绕平均值 0.9 有约 1.5% 的平均起伏. 图 8.3 的红色曲线表示 $\{a\}/2=0.9$ 时 $s=at^2/2$ 的函数关系; 黑圈代表实际测量的

s (m)	t (s)	$\frac{s}{t^2}\{m/s^2\}$
0.3	0.57	0.92
0.4	0.67	0.89
0.5	0.74	0.91
0.6	0.82	0.89
0.7	0.89	0.89
0.8	0.94	0.91
0.9	0.99	0.92
1.0	1.05	0.90
1.1	1.11	0.89
$\left\{\frac{\bar{a}}{2}\right\} = 8.08:9 \approx 0.9$		

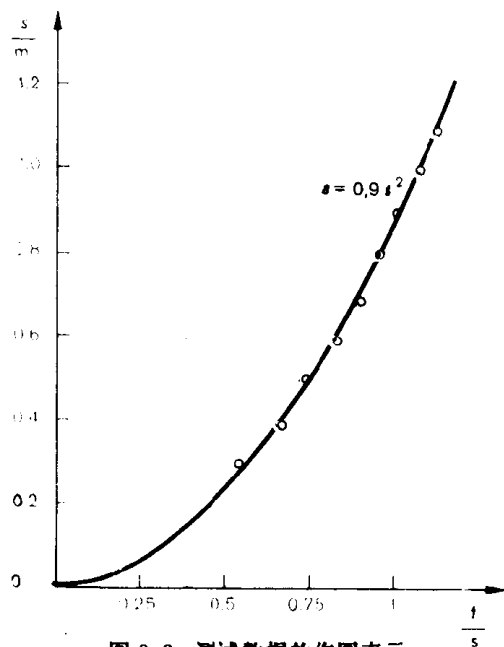


图 8.3. 测试数据的作图表示.

每对 (s/t) 数据. 可以看出, 在斜面上的球作匀加速运动. 在数例中其加速度为 $1.8m/s^2$. 更多的测量表明, a 随着斜面陡度的增加而增加. 最后, 若使斜面垂直, (这时它就不必要了,) 球便自由降落距离 s . 因为这种自由降落仅仅是在斜面上运动的一个特殊情况, 我们可以推想, 自由降落也是遵从距离-时间-规律 $s=at^2/2$ 的匀加速运动. 用与图 8.2 的等效装置进行实验, 就可证明我们的推想是对的^{1.9)}. 如果在这些实验中, 用不同质量和不同材料 (钢、木头、玻璃球) 所得结果是一样的, 即 $a=9.8m/s^2$. 所有自由降落的物体都有相同的加速度, 这种浅显的结论, 似乎和我们日常的经验相矛盾. 例如如果让一把钥匙和一块纸片由同一高处降落, 钥匙在纸片之前先落到地上. 但是如果把纸片揉成一小球, 再重复上述实验, 则很难判断两物体的降落时间有什么差别.

由这个实验可以推断,仅仅是由于空气摩擦造成了降落时间的差别.图9中把降落路径周围(管内)的空气排走,于是看到,所有物体,不管质量大小,不管其化学成分怎样,也不管其形状如何,在同一地点都有相同的降落加速度(Fallbeschleunigung) $a = 9.8 \text{ m/s}^2$.一般用 g 表示降落加速度,其大小稍随地点而变.在地球赤道处 $g = 9.78 \text{ m/s}^2$,而在南北极则为 9.83 m/s^2 ,在我们的地理纬度上 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$ ①.

因为 g 大约等于 10 m/s^2 ,用式(7.3)就可很容易地测出桥梁和建筑物的高度以及井的深度等.这只要简单地用一小块石头从待测的高度上自由降落,数出它到落地时所需的秒数即可,因为 $s \approx 5t^2$.

亚里斯多德(Aristoteles 公元前 384—322 年)认为,重的物体比轻的物体下降得快.他提出:速度与下降物体的重量成正比.由于在当时几乎不能或不知道用实验来证明理论的正确性,这一理论几乎两千年都没有被否定.很明显,只要把一千磅重的石块和 100 磅重的木头在同一高度上让它们同时下落,就足以否定亚里斯多德关于自由落体的错误观点.因为根据他的观点,石块的降落速度应是木头的 10 倍,而事实上两者几乎同时落地.

伽利略(Galilei 1564—1642)第一个从理论上,也部分地从实验上(如他用斜面所作的实验)指出,在同一地点所有物体都一样快地降落.除了其它的实验外,他用下面的思考实验(Gedankenexperiment)来否定亚里斯多德的主张^[1,10].

假定一轻的球比一重的球降落得慢些.在把两球黏到一起而形成一新的物体时,按亚里斯多德的说法,它一方面应比单个的重球下降得慢,因为轻球(它本身降得较慢)起阻尼作用,另一方面这一新物体又比重球还重,它就应比重球降得快些,这样的矛盾只有通过两球有相同的加速度的假设来解决.

探讨这样的问题,特别从人文科学的观点来看是很有意思的,即在我们看来,几个徒手进行的实验就足以说明亚里斯多德的观点错误,但为何直到人们(首先由伽利略)也承认实验有说服力的两千年长的时期里,竟不用实验予以验证,却一直认为他的观点正确.伽利略并不是在他的研究开始时就做实验,而是想用实验来证明每个理论的正确性^[1,11].

t 秒钟后达到的瞬时速度 v ,我们借式(7.1) $v = at$ 来计算.如果我们希望知道瞬时速度 v 与所经过的距离 s 的依赖关系,用关系式 $s = at^2/2$ (7.3)就可把 v 表示为距离 s 的函数,把式(7.3)即

$$t = \sqrt{\frac{2s}{a}}$$

代入式(7.1)中,就得到 $v = \sqrt{2as}$.

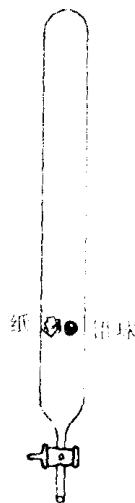
(9)

习题:用式(9)计算运动员从游泳池 1m (2m, 10m) 高的跳板上跳水时,所达到的末速度($a = 9.8 \text{ m/s}^2$),把 v 用 m/s 和 km/h 表示.

注:加速度与被加速的物体无关的特性.对在有一定陡度的斜面上下滚的球来说也成立.然而这里有一误差引人注目,它是这样产生的,因为球不仅沿斜面运动,并且要绕轴转动.然而,只是使球转动所需的动力才与它的质量有关^[1,12].

图10.1中以重量 G 拉小车使其运动加速,我们会看到小车同样是匀加速运动的.载重不同的小车,也就是质量不同的小车,在相同的牵引重力 G 作用下,有不同的加速度.用天平或台秤称出被加速物体的总质量 m ($m = \text{车的质量} + \text{牵引重物的质量}$),并以图 16.2 所示的装置用电停表测出加速度 a ,在 G 为常量的情况下,(忽略小的误差^[1,12])得到

①我国与德国的纬度差不多,所以在我国也是 $g = 9.81 \text{ m/s}^2$. ——译注.



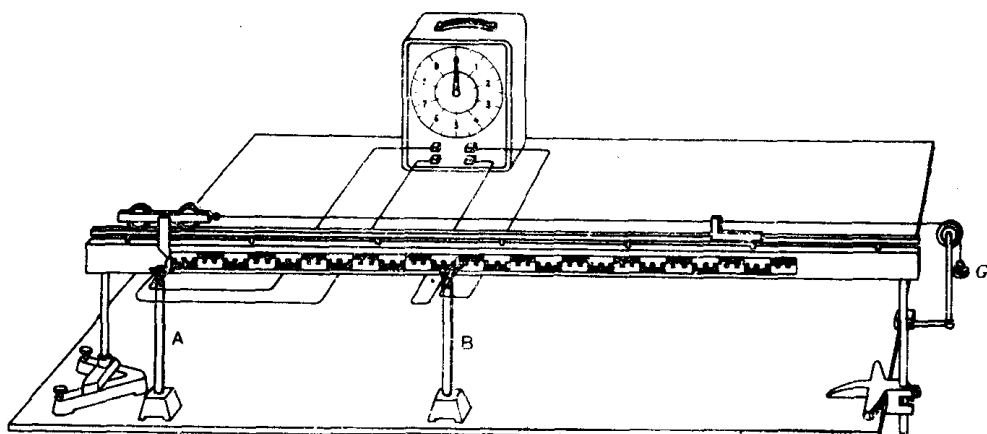


图 10.1. 运动轨道. A, B=小的接触片. 小车在这里不是用吸持磁铁吸住, 而是用接触片卡住, 即用手使接触片压住接触头和小车上的指针即可. 掀开接触片, 运动就开始并同时测定时间, 这样可避免由莫尔斯键的开关过程所产生的误差.

$$a \propto \frac{1}{m} \text{ 或 } am = c, \quad (10.1)$$

其中 c 为常数. 其大小只与所用的牵引重量 G 有关.

把这一结论与对自由落体或在斜面上降落的观察相比, 就提出这样一个问题, 为什么下落物体的质量对其加速度没有影响, 而对在运动轨道上被加速的小车, 加速度按式(10.1)与被加速物体的质量有关.

迄今我们只满足于对不同运动的数学描述, 而并未问及运动的原因^①. 在下一章里, 我们要对它加以探讨, 以回答刚刚提出的问题.

1.2 力、质量和加速度之间的关系

在轨道上小车加速运动的原因, 显然是由于牵引重量 G , 也就是指向地球中心的力 G 的作用. 这个力 (也可在运动进程中) 用装在小车上的弹簧秤测出 (图 10.2), 它通过一个转向滑轮在运动的方向上拉小车. 如果保持总的质量 m 不变, 而只改变此重量 (为此所使用的附加牵引重量都先放在小车上, 与小车一起运动, 以保证被加速的总质量不变), 我们就会看到, a 与 G 成正比, 即

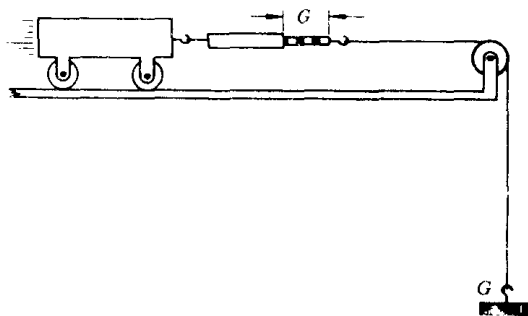


图 10.2. 牵引力的测量.

$$a \propto G, \quad (10.2)$$

由式(10.1)和(10.2)得

^① 这里运动的数学描述是指运动学的描述, 考虑运动的原因则属动力学. ——中译本编注