

物理学的历史负担

(第二版)



F. Herrmann, G. Job 原著

陈敏华 编译

此译著系译者陈敏华所主持的浙江省教育科学规划 2013 年重点研究课题“传统物理课程的不足之研究：课程考古学的方法”（SB067）的研究成果之一。

译者第一版前言

自从赫尔曼 (F. Herrmann) 等学者开发的《德国卡尔斯鲁厄物理课程》(简称 KPK) 2007 年由上海教育出版社出版以来, KPK 引进中国已经有整整七年了。在这七年中, 我和上海的专家学者们一起对 KPK 进行二次开发, 先后出版了 KPK 高中版五册和高中精编版一册。其中《波动与信息》一册在 2012 年被评为浙江省普通高中首批精品选修课程(我引进 K P K 的成果在同年获浙江省人民政府颁发的浙江省第四届基础教育教学成果一等奖。我因此在今年被评为浙江省第十一批高中物理特级教师)。在此基础上, 我们编写的《KPK 物理》(高中精编版试验本) 经上海市中小学教材审查委员会批准被列入上海市高中物理拓展型教材。

KPK 的二次开发和在课堂教学中的实际使用需要有相应的理论作指导。由于 KPK 所基于的理论不能从教材本身来理解, 因此, KPK 的开发者、研究者和使用者都需要有一本全面介绍其理论的参考用书。到目前为止, 这方面的参考用书的中文版仅有: 我 1993 年汇编的 KPK 作者发表在欧美物理教育杂志上的论文集《社会中的能量和信息》和我 2007 年翻译的《德国卡尔斯鲁厄物理课程中学物理 1—3 教师用书》。

2007 年我在华东师范大学攻读博士期间曾访问赫尔曼所在的卡尔斯鲁厄大学物理教育研究所。赫尔曼曾送给我一本德文版的 KPK 参考用书, 书名为《Altlasten der Physik》(物理学历史负担)。此书 2002 年由德国 Aulis Verlag Deubner 出版社出版。此书是赫尔曼和他的几位同事合著的。它收集了 64 篇曾连载在德国一本学校科学评论杂志《Praxis der Naturwissenschaften》(自然科学实验) 上的文章。他们在本书中认为, 现行物理课程记载了物理学发展过程中曾经出现过的许多错误概念和陈旧方法。如果我们在物理课程中不消除这些概念和方法, 就等于把物理学历史负担强加给了我们的学生。KPK 正是为了消除物理学历史负担而开发出来的物理课程。

赫尔曼在此书的基础上, 不断地在他的网站上发表类似的文章, 到目前为止已有三册, 共 150 多篇, 并还在不断地增加。我一直在关注着他的这些文章, 并用他在这些文章中所阐述的理论来理解 KPK, 来审视我国现行的物理课程。它好比是一个透镜, 能帮助我们看清现行物理课程中存在的问题。我们发现, 有些问题甚至是很严重的, 并且具有国际性。为此, 我于 2012 年向浙江省教育科学规划办公室申请了一个 2013 年度重点课题: 传统物理课程的不足之研究——课程考古学的方法 (SB067)。我把翻译《物理学历史负担》一书作为此课题的其中一项研究内容。我和赫尔曼一起花了一年半的时间同时分别将其中的 125 篇文章从德文译为英文和中文: 他先把德文译为英文, 我再把英文译为中文。

因此，《物理学的历史负担》中译本是我和作者赫尔曼相互合作的结晶。它象征着我们之间的真诚友谊。

希望这本书能帮助我们正确理解 **KPK** 的开发原理，帮助我们尽快消除物理课程中的陈旧概念，帮助我们的学生减轻学习物理的负担。

陈敏华

2014年8月21日于绍兴市柯桥区鉴湖中学

译者第二版前言

目 录

引言.....

1. 总论

- 1. 1 专业术语.....
- 1. 2 相互作用.....
- 1. 3 石英钟和盖革计数器.....
- 1. 4 测量的精确度.....
- 1. 5 线性特征.....
- 1. 6 运动的积分.....
- 1. 7 守恒定律.....
- 1. 8 粒子).....
- 1. 9 以太和真空.....
- 1. 10 力的两个效应和电流的三个效应.....
- 1. 11 自然界中存在着物理量吗?
- 1. 12 因果性原理.....
- 1. 13 课堂中的科学史.....
- 1. 14 当力作用在质量的电荷上时, 它的动量会变化.....
- 1. 15 大自然的最终秘密.....
- 1. 16 如何产生? 如何检测?
- 1. 17 女性教材作者.....
- 1. 18 物理教育研究的目的是什么?
- 1. 19 物质的粒子模型.....
- 1. 20 转化.....
- 1. 21 推导和理解.....
- 1. 22 我、观察者和上帝.....
- 1. 23 质量和物质.....

2. 能量

- 2. 1 能量形式.....

2. 2 纯能.....	
2. 3 功率.....	
2. 4 能量守恒定律.....	
2. 5 能量在哪里?	
2. 6 势能.....	
2. 7 永动机和能量守恒定律.....	
2. 8 孤立系统.....	
2. 9 被释放的能量.....	

3. 电和磁

3. 1 电子的多余和缺失.....	
3. 2 两种电荷.....	
3. 3 流的方向的传统约定.....	
3. 4 流和它前面的冠词.....	
3. 5 试验电荷.....	
3. 6 场在哪里?	
3. 7 磁滞回线.....	
3. 8 场是具有某些性质的物理系统.....	
3. 9 偶极天线.....	
3. 10 楞次定律.....	
3. 11 电磁铁.....	
3. 12 磁极.....	
3. 13 永久磁体的磁场.....	
3. 14 等势面.....	
3. 15 电感.....	
3. 16 螺线管的磁极.....	
3. 17 变压器的漏磁场.....	
3. 18 力场.....	
3. 19 两种电磁感应现象.....	
3. 20 保守矢量场.....	
3. 21 感应电动势.....	

3. 22	涡流.....
3. 23	磁导率.....
3. 24	电火花和电磁辐射.....
3. 25	电场和磁场中的应力.....
3. 26	闭合的 B 场线.....
3. 27	磁单极子和磁荷.....
3. 28	等效电阻.....
3. 29	电解质和掺杂半导体.....
3. 30	电磁学中的类比关系.....

4. 热力学

4. 1	力学与热力学.....
4. 2	状态变量.....
4. 3	理想气体定律的名称.....
4. 4	待改进的温标.....
4. 5	液体和固体的热膨胀.....
4. 6	热量和热容.....
4. 7	热传递.....
4. 8	热和功的等价性.....
4. 9	热能.....
4. 10	内能和热.....
4. 11	可用能.....
4. 12	能量最小的趋势.....
4. 13	熵.....
4. 14	熵的测量.....
4. 15	能量和熵实际上是什么?
4. 16	熵: 不可逆性的量度.....
4. 17	负熵.....
4. 18	熵和生命.....
4. 19	卡诺循环.....
4. 20	卡诺效率.....

4. 21	效率和卡诺系数.....
4. 22	热力学第零定律.....
4. 23	热力学第三定律.....
4. 24	微观和宏观.....
4. 25	温度和粒子的动能)
4. 26	混合熵.....
4. 27	麦克斯韦速率分布.....
4. 28	蒸发和沸腾.....
4. 29	海洋性气候和水的热容.....
4. 30	大气层中的热传递.....
4. 31	流星体和航天船.....
4. 32	热辐射.....
4. 33	太阳和线谱灯.....
4. 34	气体在真空中膨胀时的温度和热.....
4. 35	熵的测量(增补)
4. 36	胡椒粉和食盐混合时的熵增加.....
4. 37	汽化的热、能量和焓.....
4. 38	热力学第二定律.....
4. 39	绝热状态方程.....
4. 40	气压方程.....
4. 41	太阳中的光子.....
4. 42	没有温度就没有熵?
4. 43	液氮制冷.....

5. 力学

5. 1	瞬时速度和平均速度.....
5. 2	加速度.....
5. 3	超距作用.....
5. 4	牛顿运动定律.....
5. 5	静力平衡和牛顿第三定律.....
5. 6	绝对空间.....

5. 7	动量不是 m 和 v 的复合量.....
5. 8	被贬低了的动量.....
5. 9	冲量.....
5. 10	运动状态.....
5. 11	肌肉产生的力.....
5. 12	回复力.....
5. 13	力的作用线.....
5. 14	压强和力.....
5. 15	动压强.....
5. 16	力和能量.....
5. 17	滑轮.....
5. 18	飞机为什么会飞?
5. 19	角动量守恒.....
5. 20	拔河比赛.....
5. 21	动量流的方向.....
5. 22	在静止的动量导体中的动量流.....
5. 23	动量流的方向和坐标系.....
5. 24	力学中的点.....
5. 25	牛顿第三运动定律.....
5. 26	自由下落猫.....
5. 27	牛顿第三定律 (第三次)
5. 28	力的定义.....
5. 29	桌面上的力.....
5. 30	承受加速度.....
5. 31	匀速运动.....
6.	相对论
6. 1	质量和能量的等价性.....
6. 2	$E=mc^2$ 的写法.....
6. 3	光速和速度的极限.....
6. 4	速度相加.....

6. 5	迈克耳逊—莫雷实验.....
6. 6	惯性参考系.....
6. 7	时间膨胀和长度收缩.....
6. 8	狭义相对论和参考系变换.....
6. 9	质量、静质量、不变质量、相对论质量、能量、静能量和内能...
6. 10	GPS 校正和 GTR.....
6. 11	时空中的运动.....
6. 12	同时性的相对性.....
6. 13	“相对论”这一名称.....

7. 振动与波

7. 1	共振频率和固有频率.....
7. 2	受迫振动和相位差.....
7. 3	惠更斯原理.....
7. 4	光的双缝衍射和干涉.....
7. 5	波的相干性.....
7. 6	电磁横波.....
7. 7	非偏振光.....
7. 8	音叉和共振箱.....
7. 9	耦合双摆、耦合振动和同步性.....
7. 10	光的组成.....

8. 光学

8. 1	几何光学和波动光学.....
8. 2	阿贝正弦条件.....
8. 3	成像光学和非成像光学.....
8. 4	辐射强度.....

9. 原子物理学和量子物理学

9. 1	量子力学中的轨迹概念.....
9. 2	原子的图像.....

- 9. 3 空虚的原子.....
- 9. 4 电子壳层.....
- 9. 5 波函数.....
- 9. 6 不可区分的粒子.....
- 9. 7 光子和声子.....
- 9. 8 一个和另一个电子.....

10. 固体物理学

- 10. 1 作为整流器的半导体二极管.....
- 10. 2 作为太阳能电池的半导体二极管.....
- 10. 3 场电流和扩散电流.....
- 10. 4 光电效应.....
- 10. 5 用 LED 测普朗克常数.....

11. 原子核物理学

- 11. 1 核反应和放射现象.....
- 11. 2 质量盈余.....

12. 天体物理学

- 12. 1 赫兹普龙-罗素图.....

13. 化学

- 13. 1 物理过程和化学过程.....
- 13. 2 化学平衡.....
- 13. 3 化学电池.....
- 13. 4 物质流的驱动力-是粒子数密度还是化学势?
- 13. 5 物质流的驱动力-通过相边界的物质流.....

引言

当今的科学课程是“进化”的结果。这些课程记载了科学发展过程的许多细节。学生在学习科学时必须沿着这条科学发展的历史轨迹。他们必须绕着迂回曲折的道路，克服不必要的障碍，重复历史上曾经出现过的错误。他们必须学习一些不恰当的概念，运用一些陈旧的方法。在开发卡尔斯鲁厄物理课程时，我们尽力去消除这些过时的概念和方法。

在科学发展史上通常会出现这样的情况：一些重大的工作和结论没有被科学界所接受。它们一旦被发现了，已经为时很晚了。有时一种变革，尽管已经被证明是非常重要的，也会被拖延很长的时间。这里我们举三个例子：

1. 熵这个物理量曾经有过三次机会，使得它变得连初学者也很容易掌握。第一次机会是布莱克（Joseph Black）和卡诺（Sadi Carnot）的著作问世以后，第二次机会是卡伦德（H.L.Callendar）的著作出版以后，第三次机会是乔布（Georg Job）的《新概念热力学》一书出版以后（译者注：此书已由我翻译，并于2010年由华东理工大学出版社出版）。所有这些机会都被错过了。这些学者的一些观点都被不恰当地解释或忽视。

2. 力这个物理量和相应的术语构成了非常成熟的牛顿力学。然而，力实际上是动量流的强度。普朗克（Max Planck）在1908年就发表了相关的论文，但没有人对此引起注意。

3. 能量概念被引入物理学后的头50年中，人们一直没有弄清楚能量是否遵循局域守恒原理（a local conservation principle）。当时曾有人提出来过，但没有得到证明。为此，有人曾运用某种术语，对这种想法进行了讨论。1898年米伊（Gustav Mie）发表了一篇论文，证明了能量遵循连续性方程。然而，这篇论文没有使得人们运用恰当和简洁的语言来描述能量这个概念。直到现在，我们在提及能量这个概念时仍然带有当时的口气，认为有一天超距作用的现象最终会被发现。

从某种意义上来说，科学知识的发展类似于生物系统的进化。每一个教科学的人都先接受了以前的科学知识。这样，科学知识先被接收，再被传递。然而，知识在传递过程中并不是一点也没有发生变化，这是因为新的研究产生了新的结论，教科学的人力图把这些新的结论考虑进去。这种变化相当于遗传学中的变异。

一般来说，教师通常仅仅根据自己的专业来对科学知识作一些变化和改进，而科学的总体结构会原封不动地传递给学生。因此，在对基础知识的教学中不会因为科学知识的最新发展而带来相应的选择压力。同样，新的知识基本上与旧的部分联系在一起，而不会影响到科学知识的核心内容。在进化论中，这种现象叫做物种的延续（prolongation）。这样，对结构作较大的变革会变得越来越困难，而对这种变革的驱动力也越来越小。换句话说，

系统越复杂，它就越保守。由于这个原因，科学知识非常精确地反映了它的历史发展轨迹。这种现象跟学生们在生物学中所学到的德国生物学家赫克尔(E.Haeckel)的生物发生律(重演论)相类似：个体发育的历史是种系发育历史的简单而迅速的重演。

结果是，科学知识迂回曲折的发展道路得到了保存。在一个较大的范围内，许多不恰当或多余的结构得到了保留。古时候的短暂状态存活到现在，甚至是明显的错误也存活了下来。遗传学家们把这种现象叫做活化石(living fossil)。看一下现有的物理课程，我们可以发现物理学历史中有很多这样的问题。事实上，我们可以从事一种这方面的考古学工作。由于上述原因，每位学生都必须重复走一条历史发展的道路。每位学生的学习过程甚至在细节上也要遵循整个科学的发展模式。

我们将科学知识的“进化”过程与生物系统的进化过程作类比，目的是要说明科学在朝着越来越顽固的方向发展，而这一发展方向又是不可避免的，是正常的；我们这样做，并不是一种胆大的指控，并不是说科学没必要弄得这么复杂和难懂。当我们说科学在整体上处于一种不好的状态时，我们并不意味着科学家们无能。那些为科学的发展做出贡献的人们在当时所做的工作是正确的。这正像远古时期所形成的化石在当时已发挥了重要的功能一样，科学知识的许多内容在过去起着不可替代的作用，尽管现在看来是多余的或不恰当的。

多年来我们系统地收集了物理课程中被认为是历史负担的主题，即关于多余的或不恰当的概念的主题。从1994年以来，这些主题依次发表在德国一本学校科学评论的杂志《Praxis der Naturwissenschaften(自然科学实验)》的一个专题栏目上。

发现这些陈旧的概念需要有一种态度，这种态度也许会被认为是一种对别人不尊重的态度。实际上，我们所不尊重的是，在对这些陈旧概念的进一步发展那些不思革新、墨守成规的人们。然而，对当时最早提出新概念的科学家们我们仍然是很尊重的。

我们所给出的这些文章都是用相同的格式来撰写的。我们先介绍主题，然后描述与这一主题有关的陈旧概念和它们的不恰当之处，即缺点。接下去，我们从历史的角度简要地分析这些主题是怎么来的，即解释为什么这些陈旧的概念在当时会起正面的作用。最后我们针对所存在的问题提出一些建议。

参考文献

F. Herrmann and G. Job. The historical burden on scientific knowledge, Eur. J. Phys. 17(1996), S.159

Friedrich Herrmann, 卡尔斯鲁厄理工学院

Georg Job, 汉堡大学

第一章 总论

1. 1 专业术语

主题:

“专业术语是在特殊的学术领域中对经严格定义的概念的一种专门而严格的命名。”^[1]

“专业术语不同于日常语言，它的概念是被清晰地命名的……”^[2]

缺点:

专业术语被认为是一种非常确切的语言。当我们知道某句话属于某一专业领域时，我们对这句话的意思就很清楚了。这至少是大家普遍认同的观点。也许这是非专业人员的观点。专业人员应该知道，这种观点是不正确的。

我们以力这个词为例。力这个词所涉及的概念有很多，它的拉丁语是 *vis*。大家知道，在 17 和 18 世纪，力这个字表示了许多不同的概念。有些作者用它来表示我们今天叫做动量的概念，另一些作者用它来表示我们今天叫做动能 (*vis viva*) 的概念，今天我们仍然把它叫做力，即 F 。也许有人会认为这是在一个不断清晰的过程中所出现的分歧。然而，实际上当奠定物理学基础的这个清晰程度达到的时候，对这个词的应用却是最不一致的。在 1912 年的教科书中我们可以看到这样的话：“我们把一个运动物体的质量的一半与其速度的平方的乘积叫做活力 (*living force*)。”^[3]甚至在今天的物理学教科书中这个词经常被用来表示能量这个量^[4]。后来在别的领域又出现了新的关于力的概念。在不可逆过程的热力学中，人们用这个词来描述耗散过程产生的“驱动力” (*drive*) 或“原因”：“在前面一节中我们知道，不可逆现象产生的原因有很多，它们包括温度梯度、浓度梯度、化学势梯度或化学亲合势。在不可逆过程的热力学中，这些量叫做力……”^[5]。另外，电动势 (*electromotive force*) 直到今天还在被人们毫无异议地使用。

我们也许会认为，只有我们的前辈们才对科学术语这样不负责任。但情况并不如此。直到现在我们还能看到这个无辜的“力”正在被一群粒子物理学专家随便拿来乱用。我们很难理解粒子物理学家们所说的力到底是什么意思。显然，他们把“力”和“相互作用”当作同义词来对待^[6]：“三个以弱的力相互作用的粒子中的两个是带电的。因此，它们属于电磁力。这样，它们能发射光子，能相互吸引。”显然，在这里“力”这个词并没有被当作一个物理量来使用。

稍微关注一下，我们可以找到许多科学术语的意思发生着这样的变化的例子。

比特 (*bit*) 原来是作为香农的信息量的单位被引入的。但后来它被当作“两态量子系统” (*two-state quantum system*) 的同义词。当量子位 (*qubit*) 这个词出现时，这个术语到

达了一个新的水平。

“轨道”（orbital）是为了取代被量子力学抛弃的“轨迹”（trajectory）这个概念而被造出来的术语。后来它的含义被迁移到了另外两个物理概念上了。对某些情况来说，它表示一个粒子的波函数^[7]；对另外的情况来说，它表示波函数的平方^[8]。

尽管有 DIN（德国标准学会）、ISO（国际标准组织）、SI（国际单位制）和 IUPAP（国际理论与应用物理学联合会），专业术语仍没有被作为独特的含义来使用。科学语言基本上没有与日常语言区别开来。两者都经历着不断的发展过程。这一过程对于日常语言来说是必须的。在语言学中，这种现象叫做语义变化（semantic change）。对于科学语言，这种变化是引起误解和导致学习困难的原因。如果使用这样的语言，就会产生问题，尤其是当教师不注意到科学术语的这种多义性时。

历史：

科学语言遵循着与日常语言相同的语言规律。它在不断地发生着变化。在这两个领域，新的含义的出现常常是由于对语言掌握的漫不经心而导致的。一旦新的特殊的科学主题出现，科学家们就开始说行话了；而这行话在一开始是没有明确界定的，但后来它被浓缩到这个新领域的语言中去了。

建议：

作为教师，不要不加批判地使用特殊科学领域中的每一个特殊的术语。在没有充分的理由的情况下，不要运用任何一个具有不同含义的科学术语。例如，我们必须区分“场”这个词的两种不同的含义：一是作为物理量的名称，二是作为物理系统的名称。如果某个词确定有两个含义，而两者又是不可缺少的，我们也必须向学生告知问题之所在。

[1] Duden, Deutsches Universalwörterbuch (German Universal Dictionary), Dudenverlag Mannheim 1989, keyword: Fachausdruck (technical term).

[2] Wikipedia, December 2006, keyword: Fachsprache (technical language).

[3] Eduard Riecke: Lehrbuch der Physik, Verlag von Veit & Comp. Leipzig, 1912, p. 63.

[4] Force and energy, This series of articles no. 45.

[5] S. R. de Groot: Thermodynamik irreversibler Prozesse, Bibliographisches Institut Mannheim 1960, p. 4.

[6] DES Ys KworkQuark 2006 <http://www.kworkquark.net/>

[7] Klaus Bethge and Gernot Gruber: Physik der Atome und Moleküle, VCH Weinheim 1990, p. 199:“In the chemical literature one-particle wavefunctions are called orbitals...”

[8] dtv-Atlas zur Chemie, dtv München 1983, p. 23:“Instead the term orbital designates the probability of finding an electron (electron density distribution) within an atom.”

Friedrich Herrmann

1. 2 相互作用

主题：

“相互作用”（interaction）一词在物理学中被用在各种不同的场合。因而，它的意思不总是跟日常话语的意思相一致。

缺点：

这个主题表明，物理学中“相互作用”一词描述了几种不同的现象和过程。

1. 这个词用在当两个物体给对方施加力时的情况。这种情况遵循牛顿第三定律。初看上去这个词用在这里还是挺合适的。当物体 A 作用于物体 B 一个力时，根据牛顿第三定律，B 也作用于物体 A 一个力。当我们说力“作用”在物体上时，实际上指的是两个作用：A 作用给 B 和 B 作用给 A。这样，我们就有了“相互作用”这种说法，尤其在日常用语中。然而，这种认识给我们带来了第一个问题。“相互作用”这个词只有当我们用“超距作用”这一牛顿力学模型来描述物理过程时才是合适的。这种描述仅仅指两个系统，这两个系统是相互分离的：物体 A 和物体 B。然而，一百多年来我们已不再需要这种暂定的描述方法，因为我们现在已经确信任何作用都是基于一个物理量的传递。特别是，牛顿力学中所指的力实际上就是动量的传递。如果用一根弹簧（我们假定它没有质量）将物体 A 和 B 拉向对方时（图 1-2-1），A 的动量在增加，B 的动量在减少。但这并不是说，在 B 处动量消失了，在 A 处动量出现了。相反，它是通过中间媒介或系统 C（在我们所举的例子中，它就是弹簧）来传递的。因此，我们可以确定动量怎样从 B 传到 A。根据这一观点，“相互作用”这一说法是不恰当的。当 B 将某一东西扔掉而 A 接收到这一东西时，我们最好把这一过程说成是一种传递或传输。当有人将水从一只水桶倒向另一只水桶时，我们不能这样来描述这一过程：两只桶之间存在着相互作用。



图 1-2-1 弹簧处于拉伸状态。A 的动量在增加，B 的动量在减少（B 的“负动量”在增加）。

2. 在粒子物理学中，我们可以区分物质粒子（强子和轻子）和玻色子（有时叫做相互

作用粒子或媒介子) (译者注: 包括光子、中间玻色子、胶子和引力子)。在这一领域, 相互作用这个词意味着某种粒子的产生和湮灭。由于存在四种玻色场, 所以存在四种不同的相互作用: 电磁相互作用、引力相互作用、弱相互作用和强相互作用。这些过程包括经典意义上的相互作用, 即当粒子的性质没有改变时两个粒子之间的动量在传递 (例如, 电子-电子散射)。另外, 也包括两个相互作用粒子的“相互作用” (例如, 光子-光子或胶子-胶子)。但也有粒子性质改变的过程 (例如, 在质子转变为中子、电子和反中微子时的 β 衰变)。可以看出, 这里的“相互作用”与日常语言中的相互作用在意义上是不一致的。这里, “相互作用”一词更多地描述了一种化学意义上的反应 (reaction)。

3. 在物理学的其他分支学科, 这个词被用在意义更广的场合, 即被用来描述包含两个或更多个子系统的不同过程。现在, 我们很难想象有一个过程与这个词无关, 这样就导致所有过程都是相互作用的过程。把任何过程都说成是相互作用 (哪怕是说得不具体), 这看上去好像是很科学的。

历史:

牛顿那时没有用“相互作用”这个词, 当时还没有“interactio”这个词。他认为, 只有“作用”(actio)和“反作用”(reactio)。后来, 他的第三定律也没有被说成是相互作用定律, 但被说成是反作用定律 (law of counteraction)。直到 19 世纪末, 在科学文献中才出现“相互作用”这个词, 例如在马赫 (Ernst Mach) 的《力学的科学》(Science of Mechanics) 一书中就出现了这个词。后来, 这个词得到了广泛的使用。大概在 20 世纪后半时期, 只要是包含两个子系统的物理过程, 人们都把它们叫做相互作用。

建议:

1. 不要把牛顿第三定律说成是超距作用。这个定律应该这样来表述: B 所减少的动量被传递到了 A。
2. 在四种玻色场中, 这个词有其特殊的含义。虽然这个词并不是最好的选择, 但我们应该将它作为一个新的科学术语来接受, 并赋予它独有的意义。
3. 不要过度地使用“相互作用”这个词。这样反而能使文章表达得更清楚。

Friedrich Herrmann

1. 3 石英钟和盖革计数器

主题：

学生们在物理教科书中能学到盖革计数器的工作原理，但学不到石英钟的工作原理。他们学过液体温度计的原理，但没有学过关于温差电偶的知识。他们知道激光器的电学过程，但不知道白炽灯或蜡烛火焰的电学过程。在高级物理课程中，他们学到质谱仪和维恩滤光器，但没有学到傅里叶频谱仪。他们定量地讨论过等温过程，但根本没有讨论过等熵过程。在大学里，学生们学到了关于为什么天空是蓝色的知识，但没有学到为什么其他地方是红色、绿色、灰色、黑色或白色的知识。

缺点：

当我们设计课程或建立课程标准时（或当我们备课时），我们必须做出正确的选择。哪些物理量我们必须向学生介绍，哪些物理量我们应该删掉？力学应该花多少课时去讲，热学和电学呢？对哪些现象和过程我们应该在微观层面上加以解释，对哪些现象和过程我们应该在宏观层面上加以解释？在课堂中我们应该介绍哪几种仪器？

当我们审视我们的课程和教科书时，我们会发现有许多内容我们是选择得不好的。上面给出的例子就说明了这一点。

历史：

通常，某个主题能列入教学内容的清单之中纯属偶然；后来就形成了习惯，人们再也不会对它提出质疑。另外，“考试问题”这一传统的形成使得某些主题得以在教学内容中保存下来。使某些特殊的主题成为稳定的教学内容的原因还有由教学器材公司生产的设备。这个惯性系统是很大的，它包括教师、大学教授、教师培训机构、大学和中学的教科书以及它们的作者、考试习惯、演示设备、实验室等。

建议：

在为课程、教科书或我们自己的课堂选择主题时，我们建议：首先将所有主题摆出来，将它们都作为课程内容的“候选对象”；然后想办法去找它们的“竞争对手”。“竞争对手”其实就是那些在难度、应用性、在普通教育中的价值等方面都相同的主题。“竞争对手”也许是在课程中不常见的主题。只有当我们有充足的理由说明某个“候选对象”比“竞争对手”更重要，而这个“候选对象”目前尚未进入课程中时，我们才能选择这个“候选对

象”。

我们采用这样的选择方法，是因为我们没有充足的理由来说明哪个主题是更重要的。我们可以为任何一个主题找到这样的理由，一般来说也很容易确信地给出这些理由。因此，重要的是某个主题必须胜过它的“竞争对手”。

我们来举一个例子：电场强度的引入。它的“竞争对手”是什么？它的“竞争对手”有很多种。首先，电位移是描述电场的另一个矢量。其次，电势是描述电场的标量。它们都是电场强度的“竞争对手”。它另外的“竞争对手”是描述磁场和引力场的类比量。现在，我们必须回答以下问题：如果我们引入电场强度，为什么不引入磁场强度和引力场强度？或者说，如果我们不引入引力场强度，为什么我们要引入电场强度？

我们发现，在这一情况中我们不难回答这些问题。在下面的情况中相应的问题就较难回答了。这个主题是固体和液体的热膨胀系数。我们来寻找它的“竞争对手”。它们主要是材料的其他物理性质：热的、机械的、电的、磁的和光的。我们要比较一下它们的数量级。（液体和固体的热膨胀系数的数量级为 10^{-3} 。）我们也要比较一下它们在普通的物理学知识中的重要性和在技术应用中的重要性。在这一情况中，“竞争对手”的数量是很大的，它们的重要性也是很强的，以至于我们很难保留液体和固体的热膨胀系数这一主题。

对于盖革计数器，相同的结论是不可避免的。它的“竞争对手”是大量的仪器设备。在这些设备中，有些象盖革计数器一样也是很奇异的，但有些是很普遍的，如石英钟、面阵 CCD 数字摄像机（译者注：CCD 是 charge-coupled device 的缩写）。

在本文第一节中所举的例子中，有些主题目前在学校中正在处理中，在处理过程中它们将无法保留；另一些主题是不合理的，它们并没有成为课程的内容。

Friedrich Herrmann

1. 4 测量的精确度

主题:

“测量是对一个物理量的实际值的经验确定。”

缺点:

测量一个物理量的值是物理学中的一项标准任务。为了找出（或推导出）物理量之间的关系，我们需要进行测量。在解释为什么需要测量时，我们通常抱有这样的观念：在测量前这个值是未知的，在测量后这个值是已知的。这样就有两种情况：一种是“尚未测量的”，另一种是“已经测量的”。上面所引用的一句话是这种观点的一个极端例子。它还意味着存在一个实际的值。有时人们还强调，我们进行测量是因为我们的感官是不精确的和不可靠的。

这种观点有两方面的不足：

首先，在测量前我们对物理量的值并不是一点也不知道。其次，在测量后我们并不知道物理量的实际值或准确值。在测量前，我们知道这个值在某一区间内，这个区间也许是很大的。在测量后，我们仍知道这个值在某一区间内，但这个区间比测量前的要小了。如果经过测量这个区间明显地缩小了，我们说这是一个好的测量。如果经过测量这个区间只缩小了一点点，我们说这是一个不好的测量。

根据这一考虑，我们可以来定义一个表征对量 X 测量的好坏的量，这个量就是测量前后的两个区间的比值，即

$$\frac{X_{b2} - X_{b1}}{X_{a2} - X_{a1}}$$

式中 b 表示测量前（before）， a 表示测量后（after）。我们把上式的二进制对数（binary logarithm）定义为一个量 M ：

$$M = \log_2 \left[\frac{X_{b2} - X_{b1}}{X_{a2} - X_{a1}} \right] \text{bit.} \quad (1)$$

由于 M 表示在测量中所获得的信息量，所以它的单位为信息量的单位。这个量告诉我们，在测量中，物理量的值的信息量增加了多少比特（bit）。对于某一物理量的测量，假定测量前我们知道这个物理量的值在 10 和 12 之间，测量后我们知道这个物理量的值在 10.6234 和 10.6236 之间。我们来计算在这个测量中所获得的信息量：

$$M = \log_2 \left[\frac{12-10}{10.6236-10.6234} \right] bit = 13.3bit.$$

这个测量工具提供了 13.3bit 的信息*。

历史：

在中学物理教学中，我们通常将精确度系数小于 5%左右的测量定义为好的测量，将精确度系数大于 20%的测量定义为不好的测量。这样的评价是很有随意性的。这是因为，可能由于老式仪表中的指针的测量精确度系数就已经是几个百分点了，也因为我们通过感官确定某些物理量（如长度、速度和质量）的精确度系数在 10%-50%之间。上述观点似乎意味着，只有精确度系数比我们用感官来确定物理量值的精确度系数小的操作才能算作是测量。

建议：

我们建议，对任何测量值都要认真对待，甚至对于我们通常认为不大精确的测量值也是这样。用我们的感官来进行的“测量”也并不一定是不好的测量。这样的测量所增加的信息量 M 也是很重要的。

*这个定义只有当不确定性与测量值相比很小的时候才是合理的。然而，更一般的定义必须把这种情况也包括在内。

M 更一般的定义为

$$M = \log_2 \left[\frac{\lg \frac{X_{v2}}{X_{v1}}}{\lg \frac{X_{n2}}{X_{n1}}} \right] bit.$$

假定我们知道，在宇宙中的质子数在 10^{70} 和 10^{90} 之间。现在有人通过某一天文测量知道这个值在 10^{75} 和 10^{85} 之间。

根据上面的公式我们知道，在这个测量中所获得的信息量为

$$M = \log_2 \left[\frac{\lg 10^{20}}{\lg 10^{10}} \right] bit = \log_2 2bit = 1bit.$$

只有当测量的精确度系数与测量值相比显得很小时，上述 M 的一般式才可以简化为公式 (1)。

Friedrich Herrmann

1. 5 线性特征

主题:

在力学和电学教科书中，学生们对下列线性关系式都很熟悉：

公式	名称
(1) $F = -D \cdot s$	胡克定律
(2) $p = m \cdot v$	无
(3) $F = k \cdot v$	有时叫斯托克斯定律
(4) $n\Phi = L \cdot I$	无
(5) $Q = C \cdot U$	无
(6) $U = R \cdot I$	欧姆定律

缺点:

这些公式表明力学和电学在某些方面具有共同的结构。每个公式均描述了两门学科中三个被动的(passive)线性元件。这六个公式都只有在相应的独立变量在足够小的范围内变化时才成立。如果弹簧被拉得过长，胡克定律就不再成立了。如果物体的速度接近光速 c ，动量就不再与速度成正比了。如果出现湍流，阻力就不再与速度成正比了。如果螺线管由于磁场的作用而变形，磁通量就不再与电流强度成正比了。如果电容器两极板间的距离由于电场内部的拉伸应力的影响而发生变化，电荷就不再与电压成正比了。如果电流过强，电阻器就不再遵守欧姆定律了。

可以看出，每一次的这种线性关系都是一种特殊的情况。然而，这种特殊情况又是特别重要的，尽管它总是在当独立变量的值不是很大时才成立。

在力学和电学中常见的简谐运动的例子告诉我们上述这些公式之间的相互关系。对于两个阻尼简谐振荡的微分方程，在每个微分方程中，与方程（1）至（6）所对应的三个分量都有一个被加数。力学简谐振动系统的每一个分量与电路简谐振荡系统的每一个分量一一对应。由于这些微分方程存在着相同的数学结构，这些方程的解也具有相同的结构。

由此看来，公式（1）到（6）之间的关系就很明显了。将这一结构教给学生是符合逻辑的。而实际当中，我们对这些公式的处理方式是大不相同的。

首先，我们只给公式（1）和（6）取了名称：胡克定律和欧姆定律。这个发现不能说不重要。一个有名称的公式给我们的感觉是比一个没有名称的公式显得更重要。

比较重要的问题是，我们是如何将这些公式“卖”给学生的：只有公式（1）、（5）和

(6) 是按照上述方法来引入的，即把公式明显看成是一个线性关系式，并把它看成是比例系数的定义式。

公式(2)是被当作动量的定义式。因而我们从中看不到有任何性质。它纯粹是一个定义式，因而不是一个自然定律。从这一点上来看，它当然没有名称。

公式(3)是与欧姆定律对应的力学定律。学生们仅仅把它作为辅助材料来学。在力学中通常没有提到这个公式。显然，在固体之间的摩擦被看成为比较重要的内容。然而，在振动的情况下，我们把它处理为一种特殊的摩擦机制。(这个原因是很显然的。)然而，在密立根实验的教学中，我们要用到这个定律。我们可以预料到，学生们不会认为斯托克斯定律是密立根实验的特色。在中学物理教科书中通常没有提到汽车的减震器，而它的重要性并不比弹簧和制动器的要小。

历史:

上述六个公式是在大约 200 年的时间跨度内被不同的物理学家在不同的背景下发现的。虽然我们不难发现它们的结构(这一结构值得在工学院中讲整整一个学期)，但物理课程中从来没有提到过它。这也许是由于物理学家们对传统的敏感性所造成的。

建议:

想要把已经有几百年历史的一个公式的名称除掉是完全不可能的，想要把过去没有名称的公式取一个名称也是几乎不可能的。(尽管我们有理由给公式(2)取惠更斯定理或笛卡儿定律，以纪念这个公式的发现者。)我们所能做的是指出和强调这种相互类比的关系，并指出教科书中这种不对称的处理方法。

我们同样要指出， p 和 v 之间的比例系数(公式(2))确实是值得我们注意的。这样，惯性质量可以用这个比例系数来定义。应用牛顿第二定律 $dp/dt = F$ ，我们得到我们所敬重的(是否太敬重了?)的关系式： $F = m \cdot a$ 。

Friedrich Herrmann

1. 6 运动的积分

主题:

在理论力学中，运动的积分扮演着重要的角色，它们是这样一些物理量，其值不随时间而变。一个具有 n 个自由度的系统具有 $2n-1$ 个这样的积分。人们通常把这些量叫做守恒量。例如：

1. “如果对于所有运动轨迹 $q_i(t)$ 有

$$\frac{df(q, \dot{q}, t)}{dt} = 0, \quad \text{或 } f(q, \dot{q}, t) = \text{常量},$$

并满足拉格朗日方程，则函数 $f(q, \dot{q}, t)$ 叫做守恒量，或运动的积分。” [1]

2. “显然，如果动量的时间导数消失，即在整个运动过程中力 F_1 和 F_2 大小相等，方向相反，即

$$F_1 + F_2 = 0,$$

则动量是守恒量。” [2]

缺点:

在理论力学（或分析力学）中的“守恒量”的含义不同于在物理学其他领域中的守恒量的含义。

在一般情况下，即在避开分析力学的情况下，人们通常用“守恒量”或“不守恒量”来描述实物型物理量（substance-like physical quantity）（如果一个量具有密度和流，则这个量就是实物型物理量）。有些实物型物理量是守恒的，如能量、动量和电荷；有些是不守恒的，如熵。守恒或不守恒分别是一个量的普遍性质。它不是某一个函数、某一个系统或某一个过程的性质。对于非实物型物理量，说它们是守恒的或不守恒的也是无意义的。比如，温度无所谓是守恒的或不守恒的。

相反，在理论力学中“守恒量”这个名称表示“运动的积分”（参见上面所引用的第一个例子）。运动的积分不一定是实物型物理量，通常不是很直观的。隆格-楞茨矢量（Runge-Lenz vector）（译者注：这个矢量可表示为 $\vec{B} = \vec{v} \times \vec{L} - GMm\vec{r}/r$ ）就是其中一个例子。在开普勒运动中，隆格-楞茨矢量是一个与时间无关的量。按照理论力学的惯用说法，它是开普勒运动中的一个守恒量。然而，隆格-楞茨矢量不是实物型物理量，这是因为它没有相应的密度和流密度。另外，它不总是与时间无关的，而仅仅在开普勒运动中与时间无

关。

在理论力学中，能量、动量和角动量有时是守恒的，有时是不守恒的（参见上面所引用的第二个例子）。

历史：

理论力学是物理学中最精致的一个领域之一。它在其他理论中也发挥了很重要的作用；只要对它稍作修正，它就成为量子理论。正是由于它的这一完美性，也就使得它早就成了一门完全独立于物理学其他领域的学科。因而，它就具有自己独特的词汇。跟其他术语一样，“守恒”这一术语在理论力学中有不同于物理学其他领域的含义。这种含义上的差异又不易被察觉，这是因为在有些情况下其含义与在物理学其他领域中的含义有相互重叠之处。这也在某种程度上导致了对真正守恒的量的不恰当描述。人们对一个真正守恒的量总是这样来描述的：在一个封闭系统中，这个量的值保持不变。而实际上，我们对守恒量应该这样来描述：它既不会产生，也不会消灭。

建议：

我们必须区别“运动的积分”和“守恒量”这两个概念。兰多-利夫舒茨(Landau-Lifschitz)早就作了这种区别^[3]：“在这些运动的积分中，有一些是不变的。这种不变性具有深刻的原因，它与时空的基本性质（即一致性和各向同性）有关。所有这些被称为守恒量的物理量有一个共同的重要性质，即可加性。”

参考文献

[1] F. Kuypers: Klassische Mechanik. Physik-Verlag, Weinheim, 1983, S. 38.

[2] W. Macke: Mechanik der Teilchen. Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig, 1962, S. 240.

[3] L. D. Landau and E. M. Lifschitz: Theoretische Physik kurzgefaßt I. Akademie-Verlag, Berlin, 1973, S. 17.

Friedrich Herrmann

1. 7 守恒定律

主题:

我们可以来讨论这样一个问题，即是否所有广延量都是守恒的？就我们所知，有些广延量是遵守普遍的守恒定律的，如能量、动量、角动量、电荷、轻子数、重子数、色荷，等等。然而，有一个量遵守“半守恒定律”，这个量就是熵。熵可以产生，但不会消灭。通常情况下不守恒的量也许在某些情况下守恒。例如，熵在可逆过程中是守恒的。物质的量在通常情况下是不守恒的，然而，在许多过程中这个量是守恒的。

缺点:

如果我们将广延量摆在基础性的地位，我们就可以以一种新的方法来重新描述物理学了。这种方法可以揭示出各个分支学科具有相同的结构。力学、热力学、电学和化学表现为在一种统一结构下的各种特殊的情形。为了利用这种结构上的相似性，我们就必须用类比的方法来处理各种对应的物理量。因此，我们最好将各种守恒或不守恒的广延量用同一种类比方式（即相同的关系）来表示。然而，我们通常没有这样做。

例如，能量守恒被看作为整个物理学中最重要的原理，而动量守恒只在牛顿定律中给以强调。动量守恒定律被这样一种复杂方式来表达，使得这一简单的规律无法被人们所认识。对于电荷，人们则以完全不同的方式来处理：对于它的守恒性，没有更多地给以讨论，这是因为它的守恒性是很显然的。对于熵，我们知道它能产生但不会消灭。这个结论有时可以在教科书中找到，却总是以小字号印在教学中不大涉及的地方。物质的量的不守恒性或在某些过程中它是守恒的这一事实从来不作为一个理论呈现给学生。在原子核物理学和粒子物理学中，人们总是在教学中花费很多宝贵的时间来讨论几种特殊的辐射计的细节，而不是向学生呈现和应用几个简单而有用的守恒定律。

历史:

对广延量的守恒性和不守恒性的表述方式折射出物理学的发展历史。如果这种表述方式的发现和形成是一个艰难和漫长的过程，或对这种表述方式的正确性有一个较长时间的争议，那么对相应概念的教学也将花很长时间，人们对这种表述会引起特别的重视。能量守恒定律就是最好的例子。人们认为能量守恒定律是很有意义的，它阻止人们去妄想挣很多钱。这确实如此。然而，它也削弱了人们的想象力，使他们不再去妄想成为永动机的发明者。然而，如果打破其他守恒定律，他们也就可以挣很多钱了。

另一方面，如果对守恒或不守恒的发现是一个很容易和很快的过程，如果相应的表述在历史上没有什么争议，则人们对相应的定律的教学中也会花较少的时间，或根本没有花什么时间。

建议：

在教学中我们建议：

1. 对每个广延量的守恒或不守恒的性质都给以清晰的表述；
2. 清楚地指出一些量（特别是电荷、物质的量、轻子数和重子数）的守恒或不守恒的重要性；
3. 不要夸大守恒（如能量守恒）的重要性。

Friedrich Herrmann

1. 8 粒子

主题：

“当大量高温蒸汽的分子碰撞汽轮机的轮叶时，它们将一部分动能传递给了轮叶，然后以更小的速度返回。”

“由于海啸的波长很大和水分子之间的摩擦很小，所以海啸减退得很慢。”

“由于当风力很强时电的需求量通常很小，因此，丹麦必须以更低的价格将多余的电子卖给邻国。”

缺点：

对于上面第一句话，实际上只有很少几个分子与轮叶接触，因此说“大量分子”是夸大的。只有说“少量分子”才是对的。

对于上面第二句话，实际上分子之间是不粗糙的，没有摩擦。

对于上面第三句话，受过科学教育的人都知道，这样说是不符合事实的。（对于电流密度为典型值的交流电，电子的来回振荡范围只有几个微米。因此，说电子离开丹麦是一种很夸大的说法。另外，电源线有来回两根。）不懂物理学的人才会相信，电子会从丹麦运动到德国或瑞典。

也许有人会说，这些小错误不值得一提，只要没有这样一种明显的倾向，即多数物理学家用粒子来解释所有现象。人们普遍认为，物理现象只有简化为粒子的行为时才能被正真理解。

当人们讨论水的问题时，就会说起水分子；当人们讨论光的问题时，就会说起光子；当人们讨论电荷的问题时（或像上面第三句话中讨论能量的问题时），就会说起电子。

当然，我们可以在微观的层面上来讨论物理过程，这时肯定会谈到粒子。然而，这样做并不总是有利于解决实际问题的。如果我们用水分子来解释汽轮机的原理，其效果并不会比用水蒸气来解释要好；如果我们用水分子来解释海啸，其效果并不会比用水来解释要好；如果我们用电子来解释电的现象，其效果并不会比用电荷来解释要好。

物理学家通常用物理量来研究物理问题。我们（包括我们的学生）在处理物理量时没有什么问题。确实，粒子能帮助我们进行直觉理解。但是，我们也可以对有些物理量进行直觉理解。我们可以把电荷和能量想象为液体，它们也会流动，也有平衡关系。对于许多情况，如果我们只用粒子来处理问题，在理解上或在数学描述上会更困难。另外，用粒子来描述并不能深刻地揭示出事物的本质。

在较高层次上，许多粒子之间复杂的相互作用表现出新的现象，而这些现象可以用简单的理论来加以描述。在科学哲学中，这种现象叫做突生（**emergence**）。当我们将一个系统的行为简化为它所组成的粒子的行为时，我们通常在用复杂的方法来解释简单的现象。

历史：

“还原论（**reductionism**）”是一种总的趋势。在 19 世纪，它获得了成功，并被人们普遍接受。还原论者认为，一个对象只有被简化为它所组成的粒子的力学问题时，我们才能理解它。

建议：

在汽轮机中，蒸汽膨胀，水蒸汽压轮叶。这样，水蒸汽的压强和温度随之下降，正像大气层中的空气在上升过程中其压强和温度也下降一样。

在讨论海啸时，不要谈及水分子之间的摩擦，只要指出水是稀薄液体就可以了。

最后，丹麦向外输出的不是电子，而是能量。

Friedrich Herrmann

1.9 以太和真空

主题:

“电磁场的携带者以太（aether）是不存在的，这是一个不需要的概念。”“真空中电磁波的携带者以太这一概念直到相对论建立以后才被抛弃。”

缺点:

如果我们假定所考虑的问题是不存在的，那么这个问题就无法被解决。我们这里所讨论的问题涉及到以太在参考系发生变化时所表现出来的奇特性质。这一性质在迈克耳孙-莫雷实验中表现得很明显。在某一时期以太确实被某些研究者们怀疑过。有些研究者认为应该将以太从物理学中彻底抛弃。尽管如此，以太在被部分地抛弃后仍得到了承认，虽然它的名称作了更换。这个名称就是真空（vacuum）。从许多书籍和教科书中我们可以看出，有了真空这一名称后人们觉得情况变好了，空间中没有以太了，又保持了真空的状态。这可以从我们在本文一开始所引用的内容中看出。在许多中学教科书中，在引入场这一概念时，人们也持相同的观点：场被认为是具有某些性质的“虚空”（empty space）。

另一个缺点涉及到那个新的名称，它不仅仅是一个瑕疵。从词源上来说，真空这个词表示没有任何东西。但在这里它被用来表示存在某些东西。然而，使用以太这一古老名称的人却被认为是懂相对论的人^[1]。在任何情况下，只要有利于“虚空”这一概念，就一定会引用爱因斯坦的话。在他后来发表的文献中，只要在肯定以太这一概念时他总会明白地提到他自己^[2]。

历史:

由于迈克耳孙-莫雷实验得到了跟预期相反的结果，所以很明显一种新的理论必将取代历史悠久的力学。否认以太的存在在当时仅仅是一个绝招。它不能解决实验结果所带来的问题。随着广义相对论和量子电动力学的先后出现，“虚空”这一虚构的东西消失了，而以太又以新的名称重新出现了。

建议:

在许多情况下可以证明，“虚空”跟“空瓶”有相同的含义。我们不会说“空瓶”这种说法是错的。我们知道在空的威士忌酒瓶中并没有威士忌酒。但是，我们也清楚，这并不意味着在酒瓶中并没有其他任何东西了，比如空气和光。然而，当我们把“虚空”理解为“没

有包含任何东西的空间”时，“虚空”这个词在理解上就会出现这个问题。因此，我们建议，对“虚空”这个词我们要用得格外小心。在引入场这个概念时，我们最好彻底避免使用这个词。

参考文献：

[1] Robert B. Laughlin: *A Different Universe-Reinventing Physics from the Bottom Down*, Basic Books, New York, 2005:

“‘以太’这个词在理论物理学中有极端负面的涵义，这是由于它曾经与相对论是对立面的。这是很遗憾的一件事，因为如果我们从中除掉这些涵义，它其实刚好就是多数物理学家们所认为的真空。”

[2] A Einstein: Address delivered on May 5th ,1920, in the University of Leyden:

“我们扼要地重述一下，根据广义相对论，空间具有一些物理性质。从这个意义上来说，以太是存在的……根据广义相对论，没有以太是难以想象的。这是因为，在没有以太的空间中就不可能有光的传播，也不可能存在时间和时间的标准（尺和钟），甚至不可能有物理意义上的任何时空间隔。但是，我们不能把以太想象为具有与有质量的介质相同性质的东西，这种有质量的介质的各个部分随时间沿一定轨迹运动。运动的概念不能应用在它上面。”

Friedrich Herrmann

1. 10 力的两个效应和电流的三个效应

主题：

力有两个效应：物体的加速度和形变。电流有三个效应：热效应、磁效应和化学效应。

缺点：

上述分类可以在中学物理教科书中找到。为了弄清楚有关问题，我们来比较上面所引用的这两句话。这种比较并不是牵强附会，因为力也是一种流，是动量流。因此，这是关于流的效应的分类：在第一种情况中是指动量流的效应，在第二种情况中是指电流的效应。通过这样的比较，我们就可以看出上述分类的不一致性了。

1. 我们先来看力的第一个效应：加速度。我们也可以这样来表示这种效应：作用在一个物体上的力可以改变它的动量。对于电流我们可以这样来说：流进物体（或从物体流出）的电流导致物体的电荷发生变化。这一表述当然是对的。但为什么没有把它作为电流的一个效应？这个效应太显然了，没必要这样来强调。照这样说来，力的加速度效应也没必要这样来强调。当动量进入物体而没有马上流出时，物体中必然会积累动量。

2. 下面我们来讨论电流的热效应。不仅仅只有电流会产生热，动量流（力）也会产生热（摩擦生热）。那为什么不把它作为力（动量流）的一个效应？

3. 流的效应还远不至这些。力还有电效应（压电效应）、光效应（双折射）等。电流也有光效应（在 LED 中发生）、制冷效应（在珀尔帖元件中发生）等。

总之，我们可以这样说，上面所引用的两句话并没有完全描述这两种流的特征，并没有将这两种流的所有效应列出来，所列出的效应也并不是最重要的。总而言之，这种分类具有很大的随意性。

历史：

由于力学和电学是相对独立地发展起来的，因而人们在这两门学科中建立了不同的模型和教学习惯。相对于电荷守恒来说，我们对动量守恒（以牛顿定律的形式）太重视了。相反，我们把力学中的摩擦描绘成一种现象，这跟“电摩擦”（电阻）相比，只能削弱力学的重要性。

建议：

1. 抛弃力（动量流）的加速度效应，或把电流的“电荷效应”也列入其中。但我们

还是建议把这两种效应都不列进去，这是因为与其他效应不同，它们只在分流时才会产生。

2. 在对效应分类时，我们必须把电流和动量流的热效应都考虑进去。
3. 我们必须明白，所列出的效应仅仅是选择的结果。

Friedrich Herrmann

1. 11 自然界中存在着物理量吗？

主题

在物理文献中我们可以找到动量流这一概念。物理量力不是别的，就是动量流强度，应力张量就是动量流密度张量。在德国物理学会（DPG）关于卡尔斯鲁厄物理课程的报告中，专家们声称在自然界中不存在动量流^[1]。这两个观点到底哪个是对的？

缺点

两个都对，这是因为：

1. 在自然界中不存在动量流；
2. 在教科书中有动量流。

然而，上述结论对其它物理量来说也是成立的。物理量出现在理论中，仅仅是数学变量，是人们创造出来的^[2,3]。

在自然界中，既没有动量流，也没有电流、力，等等。

电荷不可能流动，这正象*质量不可能被挂在弹簧下*一样，或象*体积不可能盛气体*一样。*电子可以流动*，*物体可以被挂在弹簧下*，*容器可以盛气体*。电子具有我们用电荷所描述的性质，物体具有我们用质量所描述的性质，盛气体的容器具有我们用体积所描述的性质。

有人也许会反对这种说法，认为这过于迂腐。如果这样说是正确的，迂腐也并不是坏事。当我们说质量流、电流或能流时，我们在运用一种模型。如果大家明白这一点，这种迂腐也是好的。如果我们明白了这个道理，当我们说导体中有电流时就不会有人来反对了。物理学家们都在这样说，并且这样说并没有什么不好。然而，根据同样的原因，我们也不能对引入对流动量流或传导动量流有反对意见。

不是所有人在运用电流或能流概念时知道他们在运用一种模型。

在德国物理学会的报告中，关于热的部分在这方面表现得特别明显。

热“到底”是什么？这个问题不仅是报告作者提出来的问题，也是物理学中一个古老的话题。直到当物理学进入其开明时代时，人们才知道这是一个错误的问题。即使到了今天，也不是所有人都清楚这一点。

热是物质还是粒子的运动？对这个问题的争论进行了很长的时间。当时人们认为热无疑是存在于自然界的某种东西，科学家的任务就是去发现它，去研究它的性质。这后来被证明是错的。

这个错误扰乱了許多人，最终导致出现了几个度量在日常生活和物理、化学中叫做热

的物理量。有人因此怨恨热力学，因为它太难了。这样，在物理学中度量热的物理量是 dQ 。为了向中学生和大学生引入热的概念，人们经常要借助于内能 U 这个量。相反，在化学中用焓 H 这个量来度量热的多少。

历史

对科学基本概念缺乏正确的理解。

建议

从一开始就清楚地告诉学生，物理量是人们发明的、建构的和创造的。

[1] M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschede, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach and W. Weber: Expert opinion on the Karlsruhe Physics Course; Commissioned by the German Physical Society;

<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk/Fragen-Kritik/KPK-DPG%20controversy/Expert-opinion-english.pdf>

[2] A. Einstein, L. Infeld: Die Evolution der Physik, rororo 1956, S. 29:

“物理概念是人类的自由创造，而不是象有人所认为的那样是外界环境的产物。”

[3] Falk, G., Ruppel, W.: Mechanik, Relativität, Gravitation, Springer-Verlag Berlin 1973, S. 2:

“有人认为，因为物理学的概念与人类的想象无关，或更一般地说与人类无关，所以物理学是客观的。确切地说，这种观点是不正确的。实际上，物理量是人类的发明；它们可帮助我们传递简单的规则，帮助我们理清大量复杂的现象。”

Friedrich Herrmann

1. 12 因果性原理

主题

在物理教科书中，因果性原理 (principle of causality) 通常只有在这样的背景中被提到：在固体物理学中一个非常特别的主题，即证明克喇末-克朗尼格关系式 (Kramers-Kronig relation) 时会提到这个原理 (图 1)。

实习教师从来不会接触到这个概念。

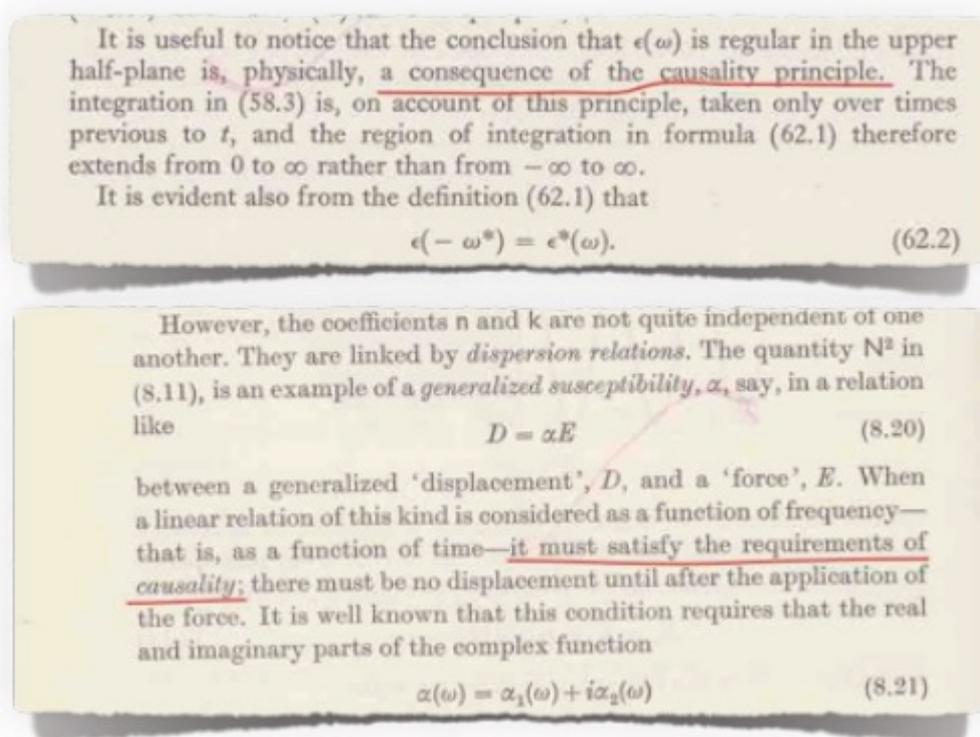


图 1-12-1. 引自两本固体物理学教科书

缺点

对于那些从来没有必要学习这一物理学主题的人来说，这是没有问题的。如果向这样的学生问起因果性原理，你可能会得到这样的回答：这是一个哲学话题；它理所当然是正确的；对于物理学家们来说，这没问题，因为物理学的合理性总是被认可的。

对那些听固体光学性质讲座的学生和也有这一观点的学生来说，问题就出来了。突然听到这种讲座的人都会说，对于后来的计算因果性原理还是需要的。然而，为了让因果性

原理与之密切相关，他是否需要学习三年时间？

历史

也许，这仅仅是一个世代相传的习惯。

建议

我们并不是想在固体光学中提出任何反对意见。然而，如果有人想用这样一个强有力的棍棒，他最好事先提醒一下他正在舍弃它。如果有人曾经在反思物理学的概念基础，他也许已经发现因果性原理时时处处都是有用的。

Friedrich Herrmann

1. 13 课堂中的科学史

主题

科学是我们的文化的重要组成部分，因而在中学应该有科学史的内容。尽管我们没有时间将足够多的科学概念的历史概况纳入其中，我们也力图将最重要的科学发展史和最重要的历史人物介绍给学生。我们将提到研究者的姓名，以示他们在某一方面作出过贡献。

缺点

确定哪些科学家的哪些工作必须在中学课堂中来讨论是一大问题，而这一问题或多或少地在中学教材中成功地得到了解决。

1. 在教材中提到了一定数量的研究者的名字，尽管他们并不认为要这样做：他们的名字幸运地与一种效应、一个公式、一个法则、一个测量单位、一个常量或一个实验联系起来。我们不想讨论这样做的原因。然而，由于以下两个原因，这样做会导致问题的出现。

一个物理表述一旦给它取上一个合适的名字，它就显得格外重要，它就会使人们觉得它比实际更重要。很多情况表明，一个效应或一个公式如果没有带上发现者的名字就会显得不重要，如盖革计数器、威耳逊云室或本生灯。

我们已习惯于这些称呼了，也从来不会问：为什么 $p \sim I/V$ 关系式有合适的名称，而 $p = mv$ 却没有？为什么 $F = Ds$ 有名称，而 $\Phi = LI$ 或 $Q = CU$ 却没有？楞次定律也许是唯一一个只告诉我们公式中一个量的符号的定律或法则。然而，对于其他数十个公式中的符号我们该如何处理呢？

2. 当我们仔细地查找哪些科学家的名字被清楚地和故意地提到，我们会发现，有时这种选择是任意的和轻率的。

我们发现，对于有些大科学家，如欧拉、笛卡儿、莱布尼兹和吉布斯这些大科学家，几乎一直没有提到。

有意思的是，在表述守恒定律时，我们将涉及这个定律是针对哪个量的问题：哪些量守恒，哪些量不守恒？

能量守恒是通常所讨论的主题。焦耳、迈尔（也许还有亥姆霍兹）会被作为发现者提及的。

相反，对于质量守恒只有学化学的学生才会学到，也只有这些学生才知道罗蒙诺索夫和拉瓦锡。相反，似乎物理学家只负责讲质量不守恒：质量盈余。

在物理学中，关于动量是谁引入和动量守恒定律是谁发现的问题上，显得很异常，根

本没有提及笛卡儿和惠更斯。在物理学中，也根本没有提及是谁引入角动量的。欧拉通常被作为数学家来介绍的。

3. 最后，有一个更不公正的例子。有些著名物理学家的名字只是在不是他们最重要的成就中提及。例如，对惠更斯我们只在讲他的基波（elementary wave）时（而不是在讲他的动量时）提到他的名字，对丹尼尔·伯努利我们只在讲他引入“伯努利方程”时（而不是在讲他引入角动量时）提到他的名字，对卡诺我们只在讲他的“四个过程”时（而不是在讲他将热机与水轮机对比时所提出来的重要观点时）提到他的名字。

历史

如果我们考察一下上述例子，我们也许会发现每个例子背后都有各自不同的故事。然而，从上面这些例子中我们可以得出结论：这种经常出现的不合适的选择的原因是巧合和习惯。如果条件合适，一个公式就会获得一个科学家的名字。这正象一条街获得某人的名字一样。如果某人想用街道名称来宣传自己，而当时条件刚好有利于他（或她），而他（或她）又有一个很好的游说团队，这条街就用他（或她）的名字被命名了。一个公式或一条街一旦获得了名称，就永远不会再被改动了。

建议

在给出这个建议时我感到很为难。我坚信，物理学史需要全面修订，尤其是在中学物理教学中。一方面，在哪些科学家的名字需要提及的问题上，我持保留态度；另一方面，在对待物理概念的历史的问题上，我持激进态度。我们为什么不在实习教师所学的科学史这门必修课中来加以修订呢？

Friedrich Herrmann

1. 14 当力作用在质量的电荷上时，它的动量会变化

主题

“一个质量悬挂在一个弹簧上”，“一个电荷在电场中加速”，“一个滤波器传递着特定的波长”。对这些句子，每位物理学家都完全能理解。在这些句子中，物体或物理系统的名称被物理量取代了。它们的意思是“一个**物体**悬挂在一个弹簧上”，“一个**带电粒子**在电场中加速”，“一个滤波器传递着特定波长的**光**”。

缺点

1.物理量是数学意义上的变量。它们不能悬挂，不能加速，也不能被滤波器传递。如果在上面所说的情况中，物理量指的是物体或粒子，这在语言学上叫做转喻（metonymy）。在日常语言中，转喻是很普遍的。例如，我们会说：“据白宫报道...”；这意思是：“据白宫发言人报道...”。

在上面所引用的例子中，物体被能描述它的其中一个物理量所取代。如果我们关心的是物体的振动，而不是其温度或颜色，对于悬挂着的物体只有质量与此相关；如果我们描述滤波器的作用，只有光的波长与此相关。

2.对物体和它的其中一个性质的测量的等同性，这对于质量和电荷来说特别常见。我们不会说能量、熵或动量悬挂在弹簧上。与物体等同的物理量必定是我们把它看成是具有物体特征的物理量。因此，只有当我们所关心的粒子（如电子或质子）的特征是电荷时我们才会说电荷在加速。如果加速的是宏观带电物体，我们会这样说：物体在加速。

3.如果物理量的名称清楚地表示它所测量的物体的某一性质，我们就不会用这个量的名称来表示物体。因此，我们不会说：“物体悬挂在弹簧常数上”，而这样说：“物体悬挂在弹簧上”，尽管这里仅涉及弹簧常数这一弹簧的性质。“常数”这个词与弹簧没有等同性（identification）。我们会说“同种电荷相互排斥”，但不会说“同种磁极强度相互排斥”，而会说“同名磁极相互排斥”。“强度”这个词与物体和相应的测量没有等同性。

4.有人甚至说得更离谱：“质量的动量”、“质量的体积”或“电荷的电势”。这里，我们又一次看到了人们对质量和电荷的特殊处理。也许，没有人会说“能量的动量”或“熵的温度”，也不会有人说“压强的温度”或“长度的时间”。

然而，这在实践中有何问题？通常，这没有多大问题，可有时会带来小问题，有时甚至是大问题，只不过我们通常不大注意。例如，当“电场”作为物理系统的名称与“电场强度”作为物理量的名称被互换或等同时，或者当带磁粒子（在自然界中不存在）与物理

量磁荷等同时，或者当电子与电荷等同时，或者当光子与能量等同时^[1]，问题就出来了。

历史

1.转喻是常用的表达工具之一。通常，它不会引起误解。并且，它丰富了我们的语言。

2.在物理学中，我们追求比日常话语更严谨的语言。这至少是物理学家们的自我概念。实际上，概念的严谨性经常被认为并不值得做得过分地好。通常，物理学中的术语在物理学家们之间的相互理解中是很有用的。然而，对科学术语的不恰当运用经常会直接导致误解甚至科学争论。

3.历史上，广延量质量、电荷和能量的作用自从它们被引入以来经过很长时间才被认识到。当人们清楚地认识到物理现象和过程可以用广延量来描述时，他们一开始就认为它们是一种物质。这样，电荷不仅被看成是描述电学过程的数学工具。人们认为它们是两种电液。同样，人们认为存在磁液和热液。直到今天，人们仍认为物理量质量与物质是同义的。基于这样的观点，人们认为广延量测量的是在自然界存在的某种东西的量，并把这种液体和对这种液体的测量等同起来。电液只有一种单独的性质，即由电荷所描述的性质；热液只有一种单独的性质，即由物理量“热”（或“热量”）所描述的性质。

建议

将物体和物理量等同的做法是在某一学科领域中的专家们所采用的特殊表达方式。

作为中学物理教师，我们必须思考一下是否值得说“一个质量悬挂在一个弹簧上”这句话。我们为何不这样说：“一个物体悬挂在一个弹簧上”？我们为何不说：“一个带电粒子在加速”，而要说“一个电荷在加速”？这样改一下花不了多少力气，可是，概念的清晰度却有了很大的提高。

我们必须避免说类似于这样的话：“质量的能量”，或“作用在电荷上的力”，或“质量的动量”。

在语言表达上有两个极端，一个极端是过于迂腐的咬文嚼字，另一个极端是令人费解的官样文章。我们建议，让官样文章给专家们去做，在学校中把目标定位在概念清晰上；即使有时表达时要费点力气（如，说“电荷流动的流强度为2A”，而不说“流为2A”，或者说“质量为2kg的物体悬挂在弹簧上”，而不说“2kg质量悬挂在弹簧上”）也值得。

[1] F. Herrmann: Historical burdens on physics, Pure energy

1. 15 大自然的最终秘密

主题

“如果物理学家能回答这些问题，我们就最终能在最基本的层面上来理解物质的功能了。^[1]

发展到今天的技术使得我们有望再过 40 年最终能在最基本的层面上破解物质构成的最终秘密。”^[1]

我们可以从另一些物理学家中听到相同的观点，不过他们的语气稍婉转一些：在不远的将来，这个谜会被解开，这个密码会被破解。

新闻记者向公众是这样解释的：

“有了它（指 LHC，欧洲大型强子对撞机）我们有望最终发现“万物至理”，一个能在最深层面上解释这个世界是如何聚集在一起的公式。”

缺点

所有这些诸如“最基本的层面”、“最终秘密”、“最后秘密”等等从《浮士德》（译者注：这是德国思想家、作家和科学家歌德的作品）中引用来的陈腐用词，想表达的同一个意思是：愿这个世界是简单的和清晰的。

显然，科学家们总有这样的愿望：他们的工作最终能完成。这可从他们对其工作的主题和成果所取的名称中看出：**不可再分**（átomos）、**基本粒子**、**质点**、**第一原理**、**万物至理**。所有这些概念无法再被超越，因为它们表达了事物的终点。形容词**基本的**（elementary, fundamental）是最高级了，没有与之可以相比的词了。没有一个尺寸可以比点的尺寸更小。

这些概念多数来自粒子物理学家。但这并不意味着固体物理学家、等离子体物理学家和其他物理学家甚至物理学的门外汉没有这些概念所潜在的信念。

关于研究的终极目标的观念并不是新的观念。它已被一代代物理学家不断地加以强化。那些寻找最终和最基本的自然定律的前景忽明忽暗，然而，总体上没有发生实际的变化。特别地，在 19 世纪末科学前景似乎非常看好。运用统计热力学和麦克斯韦的电动力学（麦克斯韦本人认为这是关于以太的基本力学理论）人们认为可以用力学解释近期发生的所有物理现象。1924 年，在慕尼黑大学的一次演讲中，普朗克指出这一观点是错的^[2]。

今天，也就是 90 年后的今天，我们有了更多的事实证明上述预言是错的。我们知道它是错的，是因为我们看到了后来发生的事。我们看到了过去的将来。我们看不到今天的将来。然而，如果我们能从过去学到某些知识，我们不但能洞察到物理学将终结的结论是不成熟的，而且也能认识到这个结论对今天（在当时来说是未来）来说也是轻率的。更尖锐

地说，我们可以从科学的过去认识到，每一已解决的问题至少会产生一个新的未解决的问题。这一推断不会象“科学的终结不久会到来”这一预言那样危险。

历史

也许有多种原因在起作用。

1.一种简单的解释是：任何人做事总需要有动机。当人们爬山时总相信有一个山顶，爬上山顶是给予他们的唯一奖励

2.理解大自然的秘密的期望也许是对真理的深深渴望。显然，好的专家知识难免会含有天真的期望。相信任何现象都有确定的和详尽的物理解释也许可以与相信全能的神相比。“全能”是不需要再作任何解释的。上帝是如何运行这个世界的？这个问题被认为是不合理的。

3.最后一个原因是市场。LHC 或 RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider, 相对论重离子对撞机)这种机器是很昂贵的。这种规模的课题必须获得公众的关注和认可。换句话说，必须对其做广告。否则，人们也许会认为在这些对撞机中的粒子反应并不比 19 世纪的新化学反应有意义。在那时，物质的巨大多样性可以清楚地追溯到数量很小的化学元素。这是一个伟大的发现，然而在经费上却很划算。

固体物理学、光电子学等学科所需的实验装置相对不大昂贵。在这些领域工作的科学家能为我们的智能手机提供较好的数据存储器和其他方面的改进（我们必须为此付钱）。

在粒子物理学领域，情况并不如此。它特别地费钱。粒子物理学家们只解决自己提出的问题。最后，他们告诉我们，质量来自何处。普通公民会因为从来不知道关于质量的问题而感到惭愧。

要证明这样巨大的开支是合理的，那些智慧超常的科学家们就不得不向公众作出承诺。他们不再相信上帝了。他们得到了最终的、基本的、无结构的粒子，得出了万物至理。

当科学新闻记者作一些夸大的报道时，我们也应该给以一点宽容。他们总得让读者保持一种良好的热情。然而，如果他们也感到对公民的启蒙负有责任，这也许不是坏事。

建议

粒子物理学的研究工作在实际的物理知识的极限范围内进行。这是需要很大开支的工作。然而，我们这个富裕的社会能承担大型对撞机和望远镜所需的开支。然而，请换一种思维方式。每一个解决了的问题是新的问题的开始。难道接受这一观点有那么难吗？难道这不是比指望到达科学终点更好的物理学研究动机吗？

无论如何，到达山顶所带来的喜悦不会维持太久。

这就使得我们想起了西叙福斯 (Sisyphos) (译者注：西叙福斯是希腊神话中一位被惩

罚的神。他受罚的方式是，必须将一块巨石推上山顶，而每次到达山顶后巨石又滚回山下，如此永无止境地重复下去。）。这个比喻并不恰当。西叙福斯必须一次又一次地将巨石推到同一座山上。相反，科学的新问题是新的，每到达一个新的高度都会给我们呈现新的景象。

[1] *Sci. Am.* May 2015, S. 34f.

[2] M. Planck: Vom Relativen zum Absoluten, Gastvorlesung in der Universität München am 1. Dezember 1924, in “Wege zur Physikalischen Erkenntnis. Reden und Vorträge”, Band 1, S. Hirzel Verlag, Leipzig (1944), S. 142:

当我开始物理学研究时，我向我尊敬的老师菲利普·乔利（Philipp v. Jolly）提了关于我的研究的条件和前景的问题。他告诉我，物理学是一门高度发展的科学，是一门几乎完全成熟的科学，现在刚完成对能量守恒定律的发现，因而不久将基本定型。也许在某一角落（或别的角落）里还剩下一粒灰尘或一个小气泡需要我们去研究和分类。然而，物理学作为整个系统需要完整地保护起来。理论物理学已接近象几个世纪以来几何学所已经达到的可理解的完美状态。这是 50 年前一位跟上时代步伐的物理学家观点。

F. Herrmann

1. 16 如何产生？如何检测？

主题

电场是通过作用在试探电荷上的力来引入的。电磁波是通过开放的振荡电路来引入的。波函数是通过测量在某一状态下在某一位置找到粒子的概率来解释的。相干光是通过光源的性质来引入的。

缺点

通常，对于一个新的物理实在（或“系统”），我们通过介绍它们是如何产生和如何检测的来引入。

这种做法有两个不足：

1.通常会发生这样的情况，学生所学到的是物质产生的过程或确认的过程，而物体的性质就被忽视了。

例如，学生学到的是场线是如何画出来的，物体是怎样通过场将力作用于另一个物体的，而场本身对他们来说仍是很含糊和抽象的。关于物理量的值，如场的能量密度、压强、温度、熵的值，几乎没有提及。似乎只有当我们知道了作用在试探电荷上的力，我们才能知道电场的本质情况。

2.对产生（或制造）物质的过程的解释通常比描述物质要来得复杂。通过赫兹振子来引入电磁波就是一例。这样的引入是非常复杂的。它给人的印象是，不介绍赫兹偶极子就不可能理解电磁波。

在引入新的现象或系统时，人们经常会采用这样一种复杂的方式。然而，试问，这种复杂性是否由间接解释引起的。

如果你要向别人解释什么是空气，你肯定不会先从地球史的角度来介绍空气的形成，也不会通过其压强的测量来证明空气的存在。

历史

由于历史的巧合，系统或现象在一开始时显得很复杂。人们认为，我们不能象谈及过程或物理系统那样来谈及它。这样，人们采用了另一种较好的方法：**操作型定义**。这种定义描述了制造或证明现象或系统的（操作）过程。

建议

通过介绍电场和磁场的性质来解释这些场。这些性质特别包括能量密度、力学应力所描述的场的性质，也包括温度和熵所描述的场的性质。

通过介绍自由传播的电磁波来解释这种物质。最好从平面正弦波开始讲起。

通过介绍相干光的性质来解释光的相干性。在介绍光时要特别指出你所介绍的是在哪里的光（光的相干性随位置的变化而变化）。

只有当波函数不受测量影响时，即只有当它在外界作用下跃迁到另一状态而发生改变时才能来解释它。

F. Herrmann

1. 17 女性教材作者

主题

“……人们决定将三相异步电动机安装在高速列车中。功率转换器和半导体闸流管将单相交流电先变为直流电，再变为三相电流。当电动机转换为发电机时，这个转换器能够将刹车过程中的频率和相位合适的电能反馈给电网。”

缺点

我希望，每一位教材作者的笔下千万不要写出上面所引用的这段话中所出现的这么多的术语。这是从一本德国中学物理教材中引用来的一段话。这段话是我为了在讲座中向学生证明为什么物理学（和化学）是学校中最不受欢迎的学科之一而引用的。幸亏这段话并不典型，但它是一种典型风格的极端例子。

在初中物理教学中，大约要向学生介绍 2000 个术语。这相当于一门外语的基本词汇量。我建议大家去读一下 G.Merzyn 关于相关性研究的著作^[1]。根据 Merzyn 的研究结论，平均来说，中学教材中有六分之一的单词是术语（在我们所引用的这段话中，术语占三分之一）。在所有单词中，有一半单词只用了一次。Merzyn 比较婉转地描述了这一困境。我认为，对这个问题最好大声疾呼！如果物理教材（和化学教材）中存在着这样的缺点，即使它还有其他优点，也满足不了我们的要求。

我承认，那些背诵这种含糊不清的术语的学生是少数（在大学生中我偶然发现这种情况）。这也许是这种术语很大的优势：语言越优美，我们越觉察不出它的不可理解性。特别是，它对于口试是有益的。

历史

行为科学家在雄性灵长类动物中发现了语言模仿现象。

亲爱的读者，你认为上面所引用的这段话出自一位女作者之手？我不知道它是谁写的。但是我知道，在 16 位教材作者中没有一位是女的。

建议

请不要误解我。我并不希望你用新的语言来迎合学生。语言必须简洁明了。要做到这一点，首先必须在教材中删除一半术语。这不可能？这当然是可能的。在上面所引用的这段话中，50%的术语在后来是不会再出现的。一旦你在困境中找到了希望，情况就会变得越来越好。你将发现，你能从剩余的术语再删除其中的一半，所有事情会变得非常清晰。对此，你不会再感到惊奇。

对作者提一个操作性的建议：把你所编写的教材读给你夫人听。她会标出她不能理解

的单词。（当然，出版社的编辑也可以来做这件事。）

另一个建议是：为术语的数量定一个上限。在注册教材时这是很容易控制的。当然，最好把这个上限定在一门外语的词汇量以下。

[1] G. Merzyn, Fachbestimmte Lernwege zur Förderung der Sprachkompetenz (3)

F. Herrmann

1. 18 物理教育研究的目的是什么？

主题

在中学和大学的物理课中伴随着许多自然科学发展史的细节。

缺点

物理学的标准很大程度上还没有建立起来，因而显得没必要的难。在物理学包含着许多多余的东西。

历史

从根本上来说，自然科学的发展是无特殊目的的。当然，自然科学的发展是有动机驱动的：对知识的探究和对技术进步的实践。然而，下一步将要发现什么或发明什么，事先是从来不知道的。朝各个方向进行研究和探索，这仍是它今天所处的状态。有许多研究是没有任何结果的，但很少有人知道这些失败。

在牛顿时代，没有人会预见到 150 年后会出现电磁场理论；在 1800 年，没有人会预见到在那个世纪末统计会成为物理学的重要工具；在那个世纪末，没有人会意识到有人正在草拟一个怀疑当时被认为基本原理的决定论的理论。

然而，甚至在很短的时间内我们也能观察到物理结论的不可预测性。1905 年，爱因斯坦在他著名的论文中解释了以太这一概念的多余性。十年后，他收回了原来的话：“根据广义相对论，没有以太的空间是不可想象的。”^[1] 在他 1905 年的论文中的前三页，爱因斯坦还精细地解释了一个重要的问题，即用钟表的同步性来解释两个事件的同时性。十年后，他用引力理论表明，在弯曲的（实际）空间中钟表的同步原则上是不可能的。因此，一般来说，在不同地点来谈同时性是不恰当的。

我们可以将物理学的发展与对一个尚未知道的国家的探索作一个对比；比如，与在十九世纪初探索美国西部的活动相比较。人们总是找最可行的途径去探索未知区域的。后来，当人们发现更短的路径或能建造隧道和桥梁时，始点和终点之间的行程才会变得越来越快。

物理学在开始时并没有朝着物理学在今天的样子发展，它总是朝着开放着的路径发展的。

这样，物理教学以令人惊奇的方式也走着相同的弯曲路径，从而导致严重的后果：

- 它占用了大量不必要的时间。
- 只有在追溯过程中才能被认识到的结构和关系无法呈现在课堂中。

有人也许会认为，只要由这曲折的路径所引起的不足一出现我们就有理由来消除它

们。然而，人们几乎从来没有这样做过。为什么？

物理教学处在一个拒绝变化的系统中。这个系统包括教师、大学教授、教科书、课程、专业组织等。因此，物理学是学校中最保守的学科之一。

为了更好地描述这一现象，我们来问几个关于不同的自然和社会发展过程所经历的时间。

例如，一场典型的战争所经历的时间有多长？（10 年），一个法西斯政权所能维持的时间有多长？（30 年），一个服装式样流行的时间有多长？（2 年），一个消费习惯（如抽烟）能维持多久？（100 年），一个天气状态能持续多久？（几天），一个宗教能维持多久？（1000 年），引进一个技术创新需多长时间？（5 年）。最后，我们要问，一个教学概念能维持多久？

关于以上问题和大致的答案的想法来自我的一位高能物理专业的同事。对教学习惯的描述就得用他的这一方法。他对最后一个问题的回答是：300 年。

请特别关注一下两者之间的差异：引入一个新的教学概念需要几百年，引入一个新的技术创新只需几年（最多几十年）。有人可能会认为，这两者应该在同一时间尺度上。然而，事实并非如此，其差异却相当巨大。

为何技术发展得如此之快，而新的教学概念的引入却如此之难？

答案是显然的：对于技术，强大的竞争使得它能快速地发展。技术的实用价值是用美元、欧元和人民币来衡量的。技术不进步，就会落后。技术所带来的利润是眼前的（近几年的）。

这种回馈方式在教学中是没有的。过于创新的教科书由于跟课程标准不符而不会成功。课程标准也不可能在本质上是现代化的，因为教师不愿从头学起。过于创新的大学教材因为卖不出去而没有出版机会。

最后，还有另一个障碍：在大学里，没有相应的研究机构。实际上，有人会认为，经常考虑课程的内容，重新编辑教材，重新调整教材的结构，把多余的主题删除，这些都是物理教育研究的任务。然而，这里有一个问题：别的自然科学的研究者们不会赞成这些做法。而物理教育研究者们又不想破坏跟哪些有较高声望教授们的关系。这样，人们更愿意在教学研究领域工作。在这里，不会伤害物理系中的任何一位同事。或者，有人喜欢做一些叫做体育娱乐音乐的事。他们可以从体育活动和日常生活中考察和描述好的物理效应，从而为物理做一些促销工作，使得粒子物理学和纳米科学的同事们感到高兴。

建议

我们必须既要在物理课堂中也要用物理课堂来做一些实验。只有这样，我们才能找到

那些与当下问题有关的概念。

这需要有物理教育研究的能力和自信心。在这里，我们要关注不仅仅是做核心研究的同事们所思考的问题。

他们的任务是，审核大学的课程和教学计划，同时也要不断处理当前物理学研究的成果。

最后有一个想法，它看上去并不符合我们教育工作者和教育研究者的意向。（我是从一位成功的企业家那里得到这个想法的。）我们要试图用金融术语来估价课堂。比如，你开发了一个关于学生能接受的内容的新的课堂教学方法，这种方法与现有的方法具有相同的效果；如果这个新的方法所需的教学时间比较短，它就具有经济效益。

[1] Einstein, A.: Äther und Relativitätstheorie. Verlag von Julius Springer, Berlin 1920, S.

12

F. Herrmann

1. 19 物质的粒子模型

主题

在学校，我们引入了物质的粒子模型。这个模型可以在小学、初中和高中教材中找到。似乎这是一个重要的概念。粒子模型到底是什么？下面是一些教材中的有关表述：

10-12 岁学生的教材：

粒子模型

- 1.所有物质都有粒子（小球）组成。
- 2.粒子做匀速运动。
- 3.粒子之间有力。

13-14 岁学生的教材：

气体模型：气体由在空中自由运动的粒子组成。

高中教材：

理想气体模型：

- 1.粒子在碰撞中表现为完全弹性碰撞。
- 2.除碰撞过程外，粒子之间没有力作用。
- 3.粒子象弹性小球一样在容器壁中反弹。
- 4.在粒子的无序运动中，所有方向的运动都是相同的。
- 5.所有粒子的固有体积的总和与气体的体积相比可忽略不计。

缺点

我们先来看两方面的解释：什么是粒子？什么是模型？

粒子：在日常用语和在科学技术用语中，它是小物体的意思。通常这样的小物体有很多。典型的例子是尘埃微粒，或烟灰微粒。（与不小的“部分”相比，这部分不是一个物体，而是一个物体的一部分。）

模型：模型一定是某种东西的模型。假如 B 是 A 的模型。A 由一些相互关联的元素组成。既然 B 是 A 的模型，那么 B 必定也由一些相互关联的元素组成。A 的元素和元素之间的关系被映射到 B 的元素和元素之间的关系上了。我们可以列出它们之间的转换表。现在我们可以根据这张转换表根据 B 的信息来推断出 A 的信息。如果关于 A 的推断通常是正确的，则这个模型是一个好的模型；反之，它是一个不好的模型。不管怎样，A 和 B 的多数性质是不吻合的。模型没有对错之分，只有好坏之别。

现在我们来查看上面所引用的内容。这里没有表明为什么要用“模型”这个术语。谁是

谁的模型？粒子是原子的模型？分子的模型？然后，我们必须解释为什么原子**不是**粒子。然而，教材却不断地告诉学生，原子和分子是粒子。

在玻尔的原子模型这个例子中，模型这个术语是用得恰当的。原子（A）的行为象太阳系（B）一样。在多数性质中，原子和太阳系不都是相同的，但在有些重要方面在一定背景下它们是相同的。

只有在一本化学教材中我发现，作者试图正确使用模型这一术语。但我无法完全理解这个表述：

“然而，在没有借助任何方法的情况下，最小的粒子是不可见的……”

因而，这个模型是借助于思维手段建立起来的。这是一个关于物质可能结构的思想模型。

当我们运用粒子模型时，我们可以把粒子想象为小球……”

不可见性当然不是建立模型的理由。看不见空气不会促使我们去引入一个看得见的空气模型。思维手段在哪里？我们可以认为，例如，物质“实际上”根本不是由原子构成的？原子仅仅是一种思维手段？

实际上，在下列情况中，当我们所讨论的物体不再具有日常所说的粒子的基本特征时，粒子“模型”是具有意义的：在温度很低时，原子的位置的不确定性比它们的直径大得多时；或两个（或更多个）“粒子”相互纠缠时，我们只能说它们是非定域化的粒子；或者，如果粒子的内自由度很少以至两个“粒子”不再可区分，当它们的排列转换一下后粒子仍处于原来的状态。

当人们引入“粒子模型”时显然没有关注到这些状态和过程。当处理这些与粒子概念有点冲突的现象时，粒子这一术语也通常是在漠不关心的情况下被使用的。

然而，当这个词有时很不合适时，情况就不好了吗？问题是，我们所用的教材中含有许多意义深刻的词语。这些琐事合在一起，使得物理学变得如此难看，变得如此复杂。在学生看来，它们对理解物理一点也不重要，对于考试中重复使用这些词语却显得很重要。

历史

粒子模型这一术语可能来自课程标准中。我说不出它出现在哪里。教材作者有点无助，这是不足为奇的。他们必须提到这个词，但并不知道它是什么。是不是因为他们认为粒子模型这个术语听起来很好，很有深刻的认识论意味？

建议

作为教师、课程标准的制定者和教材作者，我们对物理学成为学校中最不受学生欢迎的学科这一事实负有责任。我们所要做的，就是裁减这些术语。对于我们所说的这一特殊

问题，解决的办法很简单：把模型一词去掉。不管怎样，对学生来说，先学物理是最合适的。在高中，如果你有时间，你也可以讨论一些形而上学的问题。

F. Herrmann

1. 20 转化

主题

在物理学中，我们经常提及转化一词。例如，能量从一种形式转化为另一种形式。在这里，指的是一个物理量转化为相同的物理量。情况并非只有这种，例如还有：

“.....用放大电路在像素中将电荷转化为电压。”

甚至有更复杂的表述，例如：

“它将入射光的强度和方向转化为电荷。”

最后，不但物理量可以转化来转化去，真实世界中的物体也可转化为物理量。例如，有人会说光转化为能量，或者：

“在内光电效应中，光转化为电荷。”

缺点

上面所引用的内容不是出自当地报纸的周末版，而是出自德国物理学会杂志的月刊中。

我们先来看定义（引自维基词典）。“转化”（transformation）指的是“现象或特征的明显变化”，“转换”（convert）指的是“某种东西转化或变化为另一种形式、物质、状态或产品”。

因此，转化或转换指的是一个过程。某种东西原来是 A，后来是 B 了。开始时，它并不是 B，结果它不再是 A。这很象 Kana 的婚礼中出现的一个片断：水后来转化为了酒。

这是理所当然的，不重要？显然，这是重要的，因为在物理学中，这个术语用错了。

我在这里并不想来评论能量的转化这种说法，因为在这个系列文章中的另一篇文章中我们已经讨论过。同样，我们也不再讨论质量转化为能量的说法。

我来开始讨论电荷转化为电压的说法。在像素中电荷消失了，导致产生了电压？也许情况不是这样。在上面所引用的内容中有更令人惊奇的错误：方向转化为了电荷。

更令人痛心的说法是，光转化为能量；或在所引用的最后一句话是，光转化为电荷。不要说物理学，从逻辑上来说这也是说不通的。光这种真实世界中的物体怎么会转化为物理量的，转化为数学意义上的变量的呢？

有人也许会说，这是可以接受的，因为这是物理学的通俗语言。遗憾的是，这也许是真的。

亲爱的读者，你也许属于已习惯于差的物理课堂教学的学生中的 10 到 15%的那部分。对你来说重复这些不一致的说法并不困难。然而，你仅仅是 10 到 15%的那部分。

我们不会感到奇怪，在学生的心目中，产生了概念混乱现象。他们相信这种疯狂的转

化（根据我在考试中的经验，我可以来检测它）：能量转化为动量，动量转化为角动量，能量转化为熵，等等。

历史

跟通常的情况一样，这是物理学概念基础的惰性。当然，所有转化的先驱是能量的转化，即功转化为热，热转化为功，热转化为电能，电能转化为化学能，等等。

第二个原因是对这个真实世界的表述与描述这个世界的数学表述之间的混淆。

从逻辑上来说，光不能转化为能量。光**具有**能量，正好比它具有动量、角动量和熵一样。光没有电荷，因此它根本不可能转化为电荷。

建议

1.注意语言表达。说话小心一点并不意味着表达方式变得更复杂和更困难了。相反，这样会更清楚和更容易理解。

2.在物理学中只有少数几个地方需要用到转化或转换这一术语。因此，我的建议是：清除转化这个词和相应的概念。

F. Herrmann

1. 21 推导和理解

主题

在指导学生学士和硕士论文时，我观察到他们喜欢“推导”。

这种倾向也表现在学校教学中：一个最近引入的物理量之间的关系式必须是推导出来的或从实验中得到的。

缺点

这不是一个科学理论的问题，而是一个適切性的问题：怎样更好地理解物理量之间的关系，简单地说，怎样更好地理解公式？

人们也许有这样的印象，即物理教育的主要目的是证明公式的正确性。如果做到了这一点，人们就会认为他的任务就算完成了。我的意思是，物理教育的任务是使物理知识变得可以理解。

“证明”有两种方式：1.推导公式，2.用实验检验。

根据我几十年来对学生所存在的问题的了解，我可以这样说，证明一个公式对于学生理解这个公式没有什么用。在许多情况下，除了推导，学生丝毫没有对所推导的公式有所理解。有时甚至会发生这样的情况，除了推导，学生既不理解所推导出来的公式，也不理解用来推导的公式。因此，他们除了推导本身外，其他方法都没有理解。

此外，在许多情况中，推导比所推导的公式更难理解（这正象智能手机或汽车比它们的制造过程更容易理解一样）。

遗憾的是，如果推导过程对于中学生来说太难了，这个过程就会全部删除，尽管推导的结果容易理解。例如，傅利叶分解就是这样的例子。这个证明过程对于中学生来说太难了，因此，傅利叶级数不会运用在中学课堂中。然而，如果你借助于简单的计算机 app 程序来运用这一方法，傅利叶级数也可在中级水平上来理解。

当然，根据麦克斯韦方程组来推导所有电动力学公式，这是令人满意的事。物理学家们对公理的追求，即根据少数几个公式来推导所有公式的愿望，这是自然界无条件地给予我们人类的智力。类似地，我们也追求获得“第一原理”、终极真理、最基本的粒子、最终公式和大统一理论。

丢掉这些推导过程并不会丢掉物理学的准确性。我们写在黑板上的公式和我们所给出的似乎合理的表述是一个数学关系，这正是我们所要给出的意义。

历史

我们可以给出许多原因：

1. 用计算代替思考。重复一项计算比理解公式背后的物理意义要轻松得多。

2. 我甚至担心这样说会激怒会教数学和物理两个学科的老师，怕他们中的一些人用他们的第二学科数学来讨论这一问题，以此来说明“证明”是一项最重要的科学活动。

3. 直到不久前（我的意思是，在计算机还没有被发明出来以前），分析数学被认为是描述物理问题最重要的工具。然而，分析作为物理学的工具将遇到与300年前几何学同样的命运。在伽利略时代，几何学曾经是唯一的精确描述物理现象的可靠手段。（“谁理解了几何学，谁就能理解这个世界中的一切。”“自然界是用数学这种语言来说话的：这种语言的字母是三角形、圆和其他数学图形。”）当牛顿引入微积分后，情况发生了巨大的变化。

有人也许会这样与康德争论：“……在每一门纯粹自然学说中，只有当它应用了数学后才能算作是一门真正的科学。”这当然是对的。然而，数学并不是简单地从一个公式推导出另一个公式。

4. 在物理教学中，如果没有证明，人们通常什么也不说。对于Pohl（年龄大一点的人会从他的关于实验物理方面的经典教材中认识他）来说，这一追求也是带有强迫性的。当时，教师如果不用实验来演示，就不允许讲任何内容。我的问题是，学生们会怀疑他们在教室里所听到的每一句新的表述的可信度？毕竟，物理学不象其他学科（在这些学科中，一个流派的思想、方法和意识形态跟随另一个流派的思想、方法和意识形态。在这些学科中，人们几乎没有用到推导和实验），它的声望不会给这种怀疑以任何理由。

建议

在引入一个新的公式时，最重要的事是：讨论这个公式，让学生最后能自己写出这个公式。

我们来举一个中学中的例子。例如，动能公式

$$E_k = \frac{m}{2} v^2.$$

如果从我们熟悉的公式

$$\Delta E = F \cdot \Delta s$$

来推导这个公式，这是很复杂的。这是因为，这需要运用学生还没有学过的积分。另外，积分路径中的相应物理过程也不可能涉及。

事实上，我们不用计算而仅仅用教育中的猜想法就能得到这个公式，至少是它的基本部分。首先，你认识到动能取决于质量和速度，跟其他因素无关。然后，你可以肯定，动能一定与质量成正比；这是因为，能量是实物型物理量（广延量），因此在公式右边必定也是实物型物理量的一次方（两个质量和速度相等的物体的动能一定是单独一个物体的动

能的两倍)。最后，我们来看它与速度 v 的关系。能量肯定与物体的运动方向无关（对于一维运动，与速度的正负符号无关）。在这里，动能与速度最简单的函数关系必定是动能与 v^2 成正比。甚至对于系数 $1/2$ ，我们也是有依据的。事实上，在讨论其他能量（储存在拉伸的弹簧中的能量、电容器中的能量和线圈中的能量）公式时，这个系数已经出现过。

另一个建议是针对大学教学的。在这里，推导的步骤非常多。这时，最好对每一中间步骤所得出的结论进行解释，因为它们都有相应的物理意义。

最后，我们来说说另一种推导方法：系统模型法（*modeling system*）。我的看法是，这种方法在物理课堂中用得还不够。这一方法是很容易学会的。这种方法能提供给我们一个很好的理解，能引导我们深度地理解物理过程的逻辑，能让我们避免繁琐的计算。

F. Herrmann

1. 22 我、观察者和上帝

主题

在物理学中，“观察者”扮演着重要的角色（在化学和生物学中情况就不是这样）。在描述物理现象时，观察者通常就是“我”。“我看到米尺缩短了”“相对于我来说， μ 子的半衰期是……”“当汽车急转弯时，我被推向旁边。”

在量子物理学中，观察者的作用更重要：他（是的，观察者总是男性的）是测量者之一，因而在测量过程中会干扰系统。

缺点

在物理学中，我们有两个观察世界的视角。下面我们以地球这一概念为例来说明这两个视角。

从日常生活的视角所形成的地球概念：

由于地平线的限制，我们只能看到地球的一小部分。另外，远处的物体看上去很小；越近看上去越大。我能从自己的房子看到附近村子的钟楼，其视角为 1° 。我看自己村子中的教堂，其视角为 20° 。

从物理学的观点来说，这就是“观察”。你自己也是一名观察者。

从认识者的视角所形成的地球概念：

在我们的心目中，这个地球概念的产生很不相同：地球是一个球；两个教堂的高度是相同的；欧洲人和澳洲人正站在各自的地面上……我们也可以这样说，上帝正看着地球，我们也试图这样去看地球。上帝不需要特殊的观察位置；对他来说，没有地平线，甚至没有特定的观察时刻。当他想象一个量子力学系统时，他不会干扰对它的测量。

在这两个视角中，哪个属于物理学的视角？有人也许会认为，象上帝一样看这个世界，这正是物理学所关心的事：不受地平线的限制；坐标系的任意选择不会引起对称性的破缺；氢原子不会受测量的干扰。

但是，物理学并不是这样的，它也不该是这样。这是因为，物理学家们也想知道人类（他们喜欢把人叫做观察者，即“我”）看到的是什么。物理学家们也必须知道如何去检验他们的结论。一根尺子就是一根尺子。但是物理学会告诉我们它是怎样的。在远处看它，它很小；当它快速运动时，在近处看，它也显得很小时。

然而，在上面这样的要求下，这个世界的描述结果变得更复杂了。因为我们所有人（包括物理学家们）都是人，不是上帝，所以我们描述的结果从根本上来说必定基于我们的观

察。这有错吗？

我认为，在我们的物理描述中（特别在物理教学中），观察者、实验者和“我”扮演了太重要的角色了。

人们在狭义相对论中所遇到的困难大多来自对在某人看来物体的长度和两个事件的时间间隔为多大的问题的回答。在课堂中我们把大量时间花在描述由参考系的选择和变换引起的人为现象上了。顺便提一下，在这个特例中所产生的严重后果是，学生不知道在相同的情境（即相对论情境）中发生了实际的长度变化，例如，在引力波检测器中的平面镜之间的距离发生了变化。

在量子力学中的情况也一样。氢原子是如此的简单，但也有人想说观察者“看到”和“测量到”的东西。当然，这里假定观察者想确切地知道每一时刻电子所处的位置。这样，观察者要去测量电子的位置，因而毁坏了原子在没有受到干扰时所呈现的简单美。

我们来举另一个例子：有一物体坠落到黑洞中。我们作为在外面的人和观察者“看到”这物体越来越慢地落向史瓦西视界，而从来到不了这个视界。假想有一位与这物体一起自由落向视界的观察者。他没有觉察到视界。这两者是怎么协调一致的？这跟教堂中的情况完全不同。如果你想知道这个世界，不要问观察者看到了什么，而要问物体本身的物理描述是什么。它会告诉你一切。当然，它也会告诉你不同的观察者所看到和经历到的东西，但这无非是一些细节。这后一个信息最好用来理解物理学的技巧，而不是用来理解这个世界。

历史

也许这是传统科学实证主义者的态度：只接受测量和证实过的结论。这是合理的态度。在某种程度上来说，健康的表现是物理学比其他科学更有权威性的先决条件。但是，对于我们所研究的物体（物理系统），在我们还没有观察和测量它们之前就假定它们的存在，这当然是合理的。

顺便提一下，在以前情况更不好。年长一些的人也许还记得，当我们还是学生的时候，我们不但要知道观察者测量什么，也要会解释测量仪器（电流计、测力计和盖革计数器）的操作原理。

建议

尽量少用观察者这一术语。多作一些与观察者无关的描述。当然，“我”可以使情况更清晰，特别在口头描述的时候。但是，它最好不出现在我们所讨论的情况中（除非在讨

论动量交换时；例如，在“你”和“我”之间的动量交换)。

特别地，在狭义相对论中，把洛伦兹变换先放在一边；在量子物理学中，把测量先放在一边。

F. Herrmann

1. 23 质量和物质

主题

“黑洞与其他恒星有很大的不同。其他恒星含有物质和质量。相反，黑洞是无实体的质量，是没有物质的质量。”

“在黑洞的中心是一个空白点。这里，以前组成恒星的物质消失了。在这一点，物质和组成它的所有粒子、压强和性质都消失了，只剩下无物质的质量。”

“部分物质转化为了能量。”

“物质、电荷和能量的传输.....”

缺点

我并不想讨论几百年来哲学中关于物质的问题。我对“心灵和物质”“物质和场”“光和物质”等术语的界定也不感兴趣。我在这里仅仅讨论一个简单的问题。

物质是这个真实世界的组成部分，不是人们发明的，在人们给它取名称之前就存在着的。

另一方面，质量是物理量，是一个数学意义上的量，是人们为了物体的某些性质（沉重感和惯性）而引入的量。

知道这一简单的道理后，我们就能清楚地看出上面所引用的内容所存在的问题了。这些内容具有逻辑错误，并且是无意义的。纯质量是无意义的。质量是用来测量的。如果不针对一个物体或实体进行测量，这个测量是无意义的。

一袋土豆具有一定的质量。没有土豆的质量是无意义的。

这种东西只有在童话世界中才有：在《爱丽丝历险记》中有一张没有猫的猫脸^[1]。但是，这仅仅是在一瞬间发生的事；并且，爱丽丝对此感到很惊奇。

然而，人们对上面所引用的内容并不感到惊奇；即使他们发现有人经常在说“光是能量”或“光子是能量子”，他们也不会感到惊奇。

我喜欢给学生做这样一个游戏：“我们来想象一个电子，它正好安静地出现在我们面前。”（没有人会觉得这一现象与量子物理学有矛盾）。“现在我们仅仅在思想上把电子的电荷取掉。你能想象出这样的电子吗？”“是的，我能。这时，我们有了一个不带电的电子。”

（有人会给它取上一个新的名字。但我们仍称它为电子，因为这样能告诉我们一个新的实体是如何出现的。）我继续问学生：“电子有自旋。我们可以粗略地想象它在转动。现在我们想取掉它的自旋。你能想出这样的电子吗？”“是的，我能。这时，我们有了一个没有电荷又不转动的电子。”然后，我把问题转移到描述电子的其他广延量上，如轻荷。最后，

我把问题落在质量上：“现在我们想取掉电子的质量。你能想象出这样的电子吗？”“不，没有这样的电子。这时，电子就什么也没有了。”“但是，我们也许可以把角动量归还给电子，并把质量取走。这有可能吗？”“这不可能，因为这时没有可转动的东西了。”等等，等等。*

在这个游戏中，我们所取走的总是广延量。更确切地说，我们总是将它们的值设置为零。

如果读者看了上面这些内容后表示不认同，我并不感到奇怪。但是，难道这里没有表达出合理的内容？

奇怪的是，你可以在思想上没有障碍地把一些东西取走，但质量不行。人们总觉得，当我们把一个量的值减小到零时，把所考虑的物体（如电子，或许是它的灵魂）也移走了。对于象电子这样的粒子，其灵魂总是在它的质量当中，确切地说，在它的静质量中。

历史

这显然有点形而上学的味道。我只能猜测，我的一些同事们心里到底在想什么。

也许他们在这样想：一个物体、一个粒子、一块物质都是单独的。它不是其物理量的值的集合。其观点也许是，这种形而上的物质的数量是由质量来量度的。当物体的质量变化时，它就不再是原来的物体了。当它的动量（或角动量、熵、电荷，但不是它的质量）变化时，它仍然是原来的物体。质量量度的是物质的数量，而物质是不同于物理量的东西。

也许是同样的原因，粒子物理学家们用质量这个词来表示静质量，即当物体的运动状态变化时所不变的那部分质量。

建议

小心区分物体和物理量，或“物体和测量”。不要把某些事都归罪于质量。质量不仅是对一种性质的量度。

*在这方面，对于宏观物体（而不是电子），人们几乎不会有这样的问题。人们都知道弹簧振子中的无质量的弹簧或单摆中的无质量的细线。这种概念用得很随意，如没有电阻的导体，没有摩擦的滚动的小车。显然，人们在这方面比在将电子想象无质量粒子更开窍。顺便提一下，对于光子，这个游戏更有趣味。

[1] Lewis Carroll 著，爱丽丝遇险记：

猫：“好的”。它从尾巴末端开始慢慢地消失，最后留下一张笑脸。这张笑脸持续了一段时间，直到猫的其他部分全部消失为止。

爱丽丝：“我经常看到带有笑脸的猫，但没有看到过没有猫的猫脸！这是我一生中所看到的最奇怪的东西！”

Friedrich Herrmann

第二章 能量

2. 1 能量形式

主题:

通常认为, 能量以不同的形式存在着。动能、势能、电能、化学能和热能是大家熟悉的术语。平常我们经常这样说: “能量从一种形式转化为另一种形式”。

缺点:

虽然我们经常提到能量的各种形式, 但我们很难来定义它们。在区别储存的能量和传递的能量时, 我们就会出现不一致的情况。相反, 在非正式的场合, 我们一般对这两种能量不加以区分。尽管我们对于热和不同类型的功已经做出了某些规定, 但除了在一些力学教科书中以外, 对于储存的能量形式的分类仍出现模糊不清的现象。弹簧中的能量(或空气分子中的能量)的哪一部分是机械能, 哪一部分是化学能, 哪一部分是电能或磁能? 哪一部分是平动动能, 哪一部分是转动动能, 哪一部分是振动能, 哪一部分是电能? 哪一部分是动能, 哪一部分是势能? 哪一部分是有序能, 哪一部分是无序能? 实际上, 不回答上述问题我们也知道结果是什么。然而, 这一事实告诉我们, 对能量的这种分类在讨论物理问题中是没有什么意义的。

历史:

在各种物理现象中, 列举各种能量的形式是不可避免的一种方法。在能量守恒定律被发现之前, F.Mohr (1837) 曾这样说过: “除了 54 种已知的化学元素外, 在自然界中还存在着另一种东西, 这种东西叫做力; 在某种情况下, 这种力表现为动力、化学力、内聚力、电力、光力、热力和磁力; 上述各种形式的力都可以相互转化。”

建议:

如果我们能避免一些无用的区分, 我们就可以节省很多话语。我们通常习惯性地讲瓶装牛奶和盒装牛奶。然而, 把传输牛奶的过程或喝牛奶的过程叫做“牛奶转换的过程”, 或者把杯子中的牛奶或胃中的牛奶定义为“不同形式的牛奶”, 这是完全没有意义的。对于能量也是这样。最清晰的方法(也许不是最能接受的方法)是完全避免“能量形式”这种说法。当然, 正像一个经过较长康复期的病人, 当他第一次扔掉拐杖时, 会对新的自由环境和复杂的地形感到不适应, 人们对抛弃“能量形式”这种做法也会有一个适应过程。

Georg Job

2. 2 纯能

主题:

在科学教科书和杂志中我们经常可以看到这样的说法：电磁辐射是一种纯能（pure energy）。例如^[1]，“当正电子与电子相撞时，它们就会相互湮灭，并以 γ 辐射的形式释放出纯能”。再举个例子^[2]，“粒子和它的反粒子会相互湮灭，并转化为能量，能量又反过来可以转化为一对粒子和反粒子”。还有一个持相同观点的例子^[3]：“……光也可以被描述为光子，即一份一份地发射的能量子”。

缺点:

显然，电磁波不是纯能。电磁场是一种物理系统，即一种东西，描述它的每个物理量都有一个确定的值，而这些物理量中不仅仅只有能量。因此，总的来说，对于电磁场除了能量，还有诸如动量、角动量和熵等广延量，这些量的值也不等于零。而强度量也有确定的值，这对于其他系统来说也是如此。因此，在电磁场中的每一点都具有压强。（压强具有方向，因而是一个张量。）在某些状态下，即在通常叫做热辐射的那些状态下，电磁场具有确定的温度和化学势。

仅仅用单独一个量来描述辐射显然是不正确的。辐射是一个物理系统，是自然界给予我们的一种东西。而物理量是人类思维的产物。它们是描述系统的工具。

同样，一个光子，即“电磁场”这个系统的基本组成部分不是能量子。光子也携带着除能量以外其他广延量，如动量和角动量。

“物理量”和“系统”这两个概念之间的混淆局面还表现在我们经常遇到的能量和物质这两个概念。这两个概念被认为具有同等地位^[4]：“如果说天体正在彼此远离……，那么可以认为它们曾经以高密度的物质和能量的形式聚集在一起。”

历史:

物理量“能量”和物理系统“电磁场”之间的概念混淆可能由以下两个原因造成。首先，第一个原因明显是由于在理论上我们把能量不仅仅看是一个量。其次，另一个原因是我们没有将场严格地看成为系统。

在十九世纪中叶能量被引入后，它的综合性的意义在科学上很快被接受了。然而，对这个新的物理量的重视导致对它的过度使用和错误理解。能量尤其在“能量学家”眼里被想象为一种物质。我们可以从奥斯特瓦尔德（W. Ostwald）1908年《能量》一书中看到这

样一段话^[5]：“因此，能量被包含在所有实际的和具体的物体中，是组成物体的基本部分，且决不会在物体中消失。因此，我们可以说能量是一种真正的实在。”

另一方面，电磁辐射这一概念在当时并不像现在我们所理解的那样。我们现在知道，它跟其他物理系统（如理想气体、固体中的声子）一样，也是一个系统。跟其他系统一样，电磁场由最基本的部分组成。氢气的最基本部分是氢分子，固体晶格系统的最基本部分是声子，电磁场的最基本部分是光子。

对物理量“能量”和物理系统“电磁场”的错误理解已经有较长的一段历史了。尽管我们早已对它们有更正确的认识，但到现在上述错误理解所留下的历史痕迹仍影响着我們，我们仍轻易地在使用上面一开始所引用的一些句子。

建议：

我们建议，不要说“电子和正电子的反应产生纯能”，而应该说“电子和正电子的反应产生光子”；不要说“电磁辐射是纯能”，而应该说“电磁辐射携带着能量，并且还携带着动量、角动量和熵等其他广延量”。

[1]Scientific American, December 1993, S. 44

[2]Penrose, R.: The emperor's new mind, Oxford University Press, S. 308

[3]Scientific American, April 1993, S. 26

[4]Scientific American, October 1994, S. 32

[5]Ostwald, W.: Die Energie, Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, S. 5

Friedrich Herrmann

2. 3 功率

主题:

“功率”这一名称出现在公式 $P=dW/dt$ 中。

缺点:

公式 $P=dW/dt$ 是对于一给定的面来说的。 dW 是通过这个面所传递的能量。通常，这个能量被叫做系统在这个面的一边对另一边所做的功。这样， P 就是单位时间内通过这个面所传递的能量，或者说， P 是能流。如果能量沿着一条确切的路径流动，并且在这条路径的任一横截面的能流都相同，则 P 也可以被认为是属于整个路径或导体的。

因此， P 的含义是很简单的。然而，“功率”这个名称没有清楚地表达这个含义。“功率”在字义上被理解为是指整个装置（如电动机）的，而不是指连接装置的导线。为了说明功率含有传递的含义，有时我们会把它叫做“传输功率”。这样的说法更显得模糊不清，因为所传输的是能量，而不是单位时间内的能量。

历史:

上面提到的“功率”这个物理量出现在物理学家还不能确定能量或能流所在的位置这个时代。我们知道，一个系统的能量减少与另一个系统的能量增加有关。对于电能的传输，当时人们还不能确定这种能流的分布情况。这就是人们用 P 来描述一个系统（即一个固定的地方）的能量变化。这样，就导致 P 指的是一个物体（或一个装置）的功率，而不是通过一个截面的能流。

建议:

不要把 P 叫做“功率”，应把它叫做“能流”。

Friedrich Herrmann

2. 4 能量守恒定律

主题:

对能量守恒定律的表达看上去是不烦琐的。然而，下面所引用的关于能量守恒定律的表达却并不如此。其中 1 和 2 引自中学的教科书，3 引自大学的教科书。

1. “一个物体的总能量可以以不同的形式分布。如果没有能量传递到其他物体（或从其他物体传递到这个物体），这个物体的总能量保持不变。”……“如果几个物体参与了能量的交换和转化，在没有摩擦的情况下，这几个物体的动能、弹性势能和引力势能的总和保持不变。”……“如果考虑摩擦，这些物体和周围环境的内能也是总能量的一部分。”

2. “机械能守恒定律：在一个对能量来说是封闭的系统中，如果系统中的机械运动不涉及到摩擦，其机械能的总和将保持不变。系统中，能量决不会消失，也不会有新的能量产生，它只能从一种形式的机械能转变为另一种形式的机械能。……根据这一定律，这个封闭系统中存在着一个状态变量。这个状态变量就是机械能。它可以以不同形式存在，而总量保持不变。因此，这样一个系统的能量是一个守恒的物理量。”

3. “能量守恒定律可以表述为：外界对系统提供的热量 ΔQ 会导致系统的内能 ΔU （如热能、电能、化学能）的增加，也会导致功 ΔW （系统对外做功时其值为负）的产生，即 $\Delta U = \Delta Q + \Delta W$ 。”

缺点:

对一个简单的事实用上面这样一种方式来表述，使得我们很难看到其简洁性。人们可能会认为，在描述能量守恒定律之前我们必须考虑有关一些情况。然而，我们最终还是可以用很简洁的话语把它表达出来：能量既不会产生也不会消灭。我们不必为这样简单的话语而担心。否则，守恒这个概念就不可避免地会被认为是一个难懂的概念。

历史:

参见“孤立系统”一文。

建议:

用表述电荷守恒的方式来表述能量守恒，即不需要用很多个“如果”来加以说明。我们可以很简洁地表述这个定律：能量既不会产生也不会消灭。

Friedrich Herrmann

2. 5 能量在哪里？

主题：

以下是对能量传输和能量平衡的描述：

“机械功率告诉我们做功的快慢程度。”

“在一个封闭系统中，所有能量之和是不变的。”

“对一个物体所做的机械功等于它的能量的变化。”

缺点：

能量是一个广延量，遵守守恒定律：当系统 A 的能量值减小时，另一个系统 B 的能量值就增加相应的数量。自从 19 世纪末以来，人们知道这个定律不仅仅只有这样一个综合性的表述。我们可以定义能量密度 ρ_E ，也可以用能流密度 \mathbf{j}_E 来描述能量从 A 到 B 的流动路径。因此，我们可以问：“能量在哪里？它通过什么路径从一个地方流到另一个地方？”这样，能量守恒定律可以用连续性方程来表示：

$$\frac{\partial \rho_E}{\partial t} + \text{div} \mathbf{j}_E = 0.$$

上面所引用的话意味着能量守恒定律只能用老的方式来表达。换句话说，他们允许超距作用的观念存在。能量守恒定律用超距作用的观念来理解的话，即为：B 的能量增加，A 的能量减少。这一过程不需要连接 A 和 B 的第三个系统的介入。

上述能量观念会带来不利的方面。其原因有二：首先，它没有反映出现代物理学不承认超距作用的观点；其次，对能量平衡的描述没有必要这么复杂。

历史：

在 19 世纪中叶，能量概念刚引入物理学时没有其他能量守恒定律的表达形式可供选择。人们只有通过比较 A 和 B 两个系统的能量多少才能观察到能量守恒。当时人们还不清楚在每种情况下能量的局域分布情况，还不能确定能量从 A 到 B 的路径。仅仅是对于热的情况，当时人们已经在物理学方面知道在 A 和 B 之间所发生的情况，但对于电和力中的能量传输，人们还不大清楚。

后来，麦克斯韦给出了电场和磁场中的能量局域分布规律。然而，只有在 1884 年经过海维赛德 (Heaviside) 和坡印亭 (Poynting) 的有关工作后^[1]，人们才认为场中的能量确实是一个局域的量。

然而，问题总体上并没有得到解决。1892年，H.赫兹在他的“对电力传播的研究 (Investigations about the propagation of the electric force)”^[2]一书中对此表示了一种怀疑态度：“对我来说，主要的担忧在于：就我们对于能量的实际知识来说，能量的局域性和流动性有意义吗？对于常见的力学过程中的简单的能量交换，我们还没有作过这样的考虑。因此，能量这个概念是否需要作这样的处理，作何种程度的处理，对此我们还无法回答。”在同一本书中，他后来又这样说：“如果蒸汽机通过皮带来驱动一台直流发电机（皮带在循环地来回运动），而直流发电机通过电线（电流在电线中循环地来回流动）给一弧光灯供电，我们通常无可非议地这样说：能量通过皮带从蒸汽机传到直流发电机，再通过电线从直流发电机传到弧光灯。但是，当我们说能量通过绷紧的皮带沿与皮带运动方向相反的方向逐点传输时，我们是否明白其中的物理意义？如果不是，当我们说能量在电线中（或根据坡印亭理论，在两根电线的空间中）逐点流动时，是否更具有意义？这里，迫切需要我们解释这种概念上的模糊性。”

然而，当赫兹的书问世时，这种模糊性已经得到了解释。1891年，海维赛德也局域地描述了机械能的传输^[3]。当米伊 (Gustav Mie) 在 1898 年出版他的著作“能量传输概论 (Outline of a general theory of energy transmission)”^[4]时，尤其对于德国的读者来说，问题变得更清楚了。他在书中是这样表达他的观点的：“如果有两个系统 A 和 B，它们在空间相互分开，只发生能量的变化，而这能量变化与连接 A 和 B 的物体 C 的各点的状态变量有关，它们之间的关系使我们仅仅利用 C 的各点的状态变量就能计算出能量变化率 dE/dt ，那么，我们可以这样说，能量已经通过 C 从 A 传到了 B。……能量变化，即在空间的能量分布的任何变化，都可以通过能量传输来实现。”

上面在“主题”中所引用的话是我们实际中关于能量的典型说法。这些说法表明，在引入能量后产生的语言被保留了下来，以至于如果坡印亭、海维赛德和米伊的著作从来没有出版，它们将有损于所有那些想弄清楚能量概念的年青人。

建议：

建议这样来引入能量：能量分布在空间，能量会流动。这种引入方法一开始就使问题变得很清楚。建议这样来表述能量守恒定律：“能量既不会产生也不会消灭”。功、功率和能量形式这些概念是多余的^[5, 6]。

[1] Poynting, J. H.: On the transfer of energy in the electromagnetic field, Phil. Trans. A 1884, S. 343-361

[2] *Hertz, H.*: Untersuchungen über die Ausbreitung der elektrischen Kraft, Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1892, S. 234 und 293

[3] Heaviside Electrician 27, 3. Juli 1891

[4] *Mie, G.*: Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung, Sitzungsbericht der mathematisch-naturwissenschaftlichen Classe der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, CVII. Band, Abtheilung II. a, 1898, S. 1113-1181

[5] *Job, G.*: Energieformen, in Altlasten der Physik, AULIS Verlag Deubner, Köln (2002), S. 11

[6] Herrmann, F.: Die Leistung, in Altlasten der Physik, AULIS Verlag Deubner, Köln (2002), S. 21

Friedrich Herrmann

2. 6 势能

主题：

从一本百科全书中我们查阅到：

“势能是物理学中的一种能量形式。这种能是一个物体在一个力场（如引力场或电场）中由于其位置所具有的。”

在一本中学物理教科书中我们看到：

“例如，卫星的势能……”

缺点：

在上面所引用的内容中，势能被指定为物体所具有的。

如果我们认为能量可以被局域化（这是 19 世纪末以来物理学中被普遍相信的观念），那么我们可以把上面所引用的内容理解为：物体含有势能。这意味着：势能必定以一定的方式分布在物体中。然而，这个结论是错的。势能并不分布在物体中，而分布在主要处于物体之间的场中。

特别是第二个引用的例子，这是一个明显错误的说法。如果势能是卫星所具有的，因而分布在卫星中，那么地-月系统的势能就分布在月球中了，由两颗质量相等的星组成的双星系统的势能只分布在其中一颗星上了（这不符合对称原理）。有时势能也用于这样的情况，即两个物体之间通过一个弹簧（而不是通过场）有动量传递的情况。然而，对于能量，“势”（potential）这一形容词是不合适的。根据梅利阿姆-韦斯特（Merriam-Wester）词典，“potential”的意思是：“存在的可能性；实际发展的可能性”。这一定义与能量储存在弹簧中的事实不一致。正像运动的物体中含有动能，处于拉伸的弹簧中也含有能量。对于这两种情况，我们都可以确定它们的能量密度（即能量都局域地分布着）。原则上我们也可以测定两种情况下的相对论质量的增加。

历史：

上述这种不恰当的用词有几个原因：

1. 势能这一概念产生于 1890 年以前，当时人们还没有意识能量可以局域地分布。
2. 在教学中，我们通常考虑地球引力场中的一个小物体的势能。在这一情况下，势能用公式 $E=mgh$ 来计算。这里 h 是小物体相对于地球上的一个零点的高度。 h 并不是两个物体（即小物体和地球）之间的距离，也不是地球相对于小物体的高度，而是小物体相

对于地球或地球表面的高度。

3. 在多数情况下，势能这个词用在这样的情境中：两个物体由于引力相互作用而运动，其中一个物体的质量比另一个物体的质量大得多。我们来讨论著名的苹果落地的情况。我们先来看它们相对于系统质心的动量变化：在这一过程中，只有地球和苹果参与其中；苹果获得了动量，而地球失去了动量；引力场的动量几乎等于零，没有参与动量的交换。我们再讨论能量。这时情况就不一样了。地球的动能实际上没有变化（因为地球的质量比苹果大得多）。苹果所获得的能量并不来自地球，而来自引力场。

当这两个物体用一个弹簧（而不是场）连接时，情况也是这样。在这里，动量也在两个物体之间交换，而能量在质量较小的物体和弹簧之间交换。

建议：

小变动：避免说一个物体的势能。在另一本中学物理教科书中有这样一个例子：

“地球和质量为 m 的物体所组成的系统相对于参考面（它可以任意选取）的势能为……”

这里的用词比上面所引用的内容中的用词要好。然而，它仍然带有超距作用的观念，因为它仍然把地球和质量为 m 的物体作为系统，没有把引力场包括在系统内。

大变动：一开始就引入场这个概念，并把它作为系统的第三部分。必须清楚地指出，能量局域地分布在场中。

在任何情况下应避免使用“势”这个形容词。

Friedrich Herrmann

2. 7 永动机和能量守恒定律

主题:

《布罗克豪斯》* (1839)^[1]: “永动机是这样一种机器, 由于它自己能产生驱动力, 因而它能保持一种稳定的运动状态。但是, 这种机器现在被认为是无法实现的, 因为有大家熟知的自然规律不允许这种现象发生。在以前, 点金石、灵丹妙药等都是骗子们引以自傲的东西, 对他们的发现也是力学家们和数学家们所期盼的。”

《布罗克豪斯》* (1910)^[2]: “永动(拉丁语: *perpetuum mobile*)的意思是, 物体持续地运动。它也特指人们希望实现的一种机器。这种机器要能够为自己的运动而补充力量。由于这样违背了能量守恒定律, 因而它是无法实现的。”

《布罗克豪斯》* (1953)^[3]: “第一类永动机指这样一种机器, 人们不需要对它做任何功, 它也能持续地向外提供能量。这是与能量守恒定律相矛盾的。”

1985年德国联邦专利办公室发表了这样一段文字^[4]: “联邦专利法院指出, 能量守恒定律是整个自然科学界普遍承认的定律。这个定律的意思是, 能量在任何物理过程中不能产生也不会消灭, 它只能从一种形式转化为另一种形式。”

缺点:

认为第一类永动机(PM)由于不遵守能量守恒定律而无法实现的观点在某种程度上是有缺点的。

假如你不知道能量守恒定律, 而你想不通过实验来证明有人提出来的永动机无法实现。我们很容易找到证据, 因为除了能量守恒定律外, 还有其他它所不遵守的定律: 其他守恒定律、麦克斯韦方程、万有引力定律, 等等。力学性质的永动机通常不遵守牛顿运动定律, 即动量守恒定律, 或角动量守恒定律。

物理学家们在讨论一台漂亮的永动机为何不会运转时, 也表明能量守恒定律不是唯一的原因。虽然讨论者完全知道永动机不遵守能量守恒定律, 他们总是认为只有找到了另外的原因(即永动机不遵守的其他物理定律)时这种反驳才是令人满意的。

确实, 能量守恒定律是判断某一过程能否发生的工具。但在我们看来, 它并不是独特的一个判断工具。

历史:

由于违背能量守恒定律是永动机发明者们公认的目标, 因此, 为了证明这种机器不可

能实现，最合适的讨论还是依据这个定律。显然，永动机的发明者们（目前还能找到这样的发明者）并没有太多的想象。他们仅仅局限于设计违背能量守恒定律的机器。其原因也许是因为他们把能量看作是珍贵的商品。看来，他们并不知道他们可以通过违背其他物理定律来赚同样多的钱。

建议：

不会做功的永动机在物理学中是一个有用的话题。我们不能因为它违背能量守恒定律而抛弃这个话题。这样，我们可以产生这样一个印象，即物理学的结构是这样的，所有物理定律在这个世界中的地位都是相同的，除非有些定律已经被另外的定律取代了。

* 《布罗克豪斯》是一部具有悠久传统而受人尊重的德国大百科全书。

[1] Bilder-Conversations-Lexikon, F. A. Brockhaus, Leipzig, 1839

[2] Brockhaus' Kleines Konversations-Lexikon, F. A. Brockhaus, Leipzig, 1910

[3] Brockhaus ABC der Naturwissenschaft und Technik, VEB F. A. Brockhaus Verlag, Leipzig, 1953

Friedrich Herrmann

2. 8 孤立系统

主题:

为了表达能量或其他物理量的守恒，我们通常要规定一个孤立系统。我们要想象一个空间区域，所讨论的物理量无法流入这个区域的边界。下面所引用的关于能量守恒的两个例子来自于高中物理教材。这些内容被安排在教材的显著位置来加以强调。

1. “在一个对于热能和机械能来说是孤立的系统，其总能量是不变的。”
2. “在一个孤立系统中，所有能量的总和保持不变，总能量是守恒的。”

$$E_{\text{总}} = E_1 + E_2 + \dots + E_n = \sum_{i=1}^n E_i = \text{常量},$$

其中 E_1 、 E_2 、 \dots 、 E_n 是不同形式的能量。”

缺点:

一个广延量或实物型物理量的守恒概念并不是一个难理解的概念。这是因为，事实上我们很容易来描述这些物理量，我们可以把它们想象为一种流体或一种实物。这样，一个物理量 X 的守恒性可以用这样的方式来描述：“ X 不会产生也不会消灭。”

这里，用词的确切性是无关紧要的。对守恒定律，我们甚至可以用日常话语来表达。

我们可以这样来描述守恒定律：在空间某一区域的 X 值只有当 X 从这个区域流入或流出时才会发生变化。用数学公式我们可以这样来表达：

$$dX/dt + I_X = 0,$$

这里 dX/dt 是在所考虑的空间区域内的 X 的变化率， I_X 是通过这个空间区域的边界表面的 X 流。

用孤立系统来描述能量守恒定律是上面这种表达方式的特例。“孤立系统”意味着通过空间区域的边界表面的 X 流为零。然而，能量守恒定律并不需要用孤立系统这个条件来加以限制，一个物理量的守恒性与系统是封闭的还是开放的无关。

为了确认我的学生数是“守恒的”，我们并不需要教室的门是关闭的。如果有人从教室里不时地进进出出，这也没什么关系；只要我查清有人进入了教室，我就知道教室内的学生数增加了；或者只要我查清有人离开了教室，我就知道教室内的学生数减少了。

历史：

我们一直用孤立系统来描述能量守恒定律，这一事实是由于能量一直没有被当作一个实物型物理量来对待。直到 20 世纪初，能量的局域性还没有被人们所认识。因而，人们当时还不可能把它与密度和流密度联系起来。普朗克（Max Planck）在 1887 年对能量这个概念作了一个历史性的考察^[1]：

“……根据这一定义，能量只能用那些外界的变化来加以测量。如果我们把能量想象为一种实物材料，我们就必须从系统的环境来考察能量。只有这样，能量才能得到合理的解释，它的概念才得以存在。……另一方面，我们从以前导出的能量守恒定律的形式中可以看出，如果系统中的某个过程没有引起外界的任何变化，系统的能量保持不变。这一观察结果告诉我们，我们可以把能量想象为包含在系统中并独立于外界变化而存在的量。”后来他又说：“同时，以下的结论是不会错的……把能量解释为实物型物理量不但使我们在概念上更加清晰，而且在理解这个概念方面得到了直接的加深……然而，一旦我们涉及到这个问题，能量本身存在的不确定性就成为一个物理问题，而这个问题原则上是可以得到解决的……”

几年后，这个问题由米伊（Gustav Mie）得到了解决^[2]。他证明，能量守恒定律可以表示为局域的形式，即可以表示为连续性方程（a continuity equation）的形式。从此以后，我们再也不需要划分系统和只能从系统周围环境中才能观察到的变化。

这样，人们总共花了 50 年时间才证明了能量的实物型性质。然而，一开始就预言能量具有这一性质的是奥斯特瓦尔德（W.Ostwald）。他在 1908 年的一本小册子《能量》中曾这样评价迈尔（Robert Mayer）的工作：“根据我们的总体观察，迈尔的工作所得出的基本结论是他关于力（即能量）的实物型性质的观点。根据他的这一观点，能量是一个经过严格定义的实在，而不可消灭性和不可产生性是这一实在的特点。”

建议：

我们应该这样来描述实物型量 X 的守恒定律：“能量、动量、角动量、电荷……既不会产生也不会消灭。”

同样重要的是，我们应该这样来描述实物型量的不守恒性，例如：“熵可以产生但不会消灭。”

[1] M. Planck: Das Prinzip der Erhaltung der Energie. B. G. Teubner, Leipzig, 1908, S. 115.

[2] G. Mie: Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung. Sitzungsberichte

der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. CVII. Band, VIII. Heft, 1898, S. 1113.

[3] W. Ostwald: Die Energie. Verlag Johann Ambrosius Barth, Leipzig, 1908, S. 59.

Friedrich Herrmann

2. 9 被释放的能量

主题

能量被释放了。“释放”在英文中是“release”，在法文中是“libérée”，在德文中是“freigesetzt”。

缺点

我们经常说，能量被释放出来了。我承认，我并不真正知道这句话的意思。我们来分析下面这句话：

●能量通过光子的发射而释放出来。

是的，光子飞出来了，象小鸟一样自由地从笼子里释放出来了，或象犯人一样从监狱里释放出来了。这似乎给人以一种能量被释放出来的感觉。然而，在一个吸收过程中我们是否会对能量作出相同的表述：能量被捕获了？没有人会这样说。能量飞出去这一事实不能成为能量“被释放”的依据。

另一种说法是：我们关注的是系统所提供的能量；能量来自某一系统。这时，我们关注的仅仅是提供能量的系统，而不是能量被提供后所发生的情况，如激发、产生热、产生化学反应、蒸发、压缩或加速。下面所引用的内容对此作了解释：

●以热的形式释放能量的化学反应叫做放热反应。例如，所释放的能量用来加热、照明、发电和做功。

然而，下面的表述与这种解释刚好相反：

●在刹车过程中所释放的能量又以电能的形式重新出现，储存在电池中[……]再用于驱动电动机。

这里清楚地说明了在刹车过程中能量是如何发散的。照这样说，能量是在电池中“被捕获”的？如此说来，当它离开电池时肯定又释放出来了，然后又被“重新用于推动”电动机。它是不是一次又一次地被释放出来，一次又一次地变得越来越自由？

“能量被释放出来”这一短语的用法在一些网站（如 Linguee 网站）上可以找到。在 Linguee 网站上，你可找到很多例句。你也可以查找相应的法语或德语字条。你最好关注一下，当你用“传递”替换“释放”时，你所看到的所有句子都仍然含义清晰和正确。

有一点需要提醒下，对于实物型物理量（广延量），在用词上有很大的自由度。我们可以这样说，例如，电荷可**储存**、可**分布**、可**集中**、可**流动**、可**来去**、可**扩散**。这些用词可用于所有广延量上。但是，让我们用“释放”一词来试试：一个带电体在放电时，我们在

释放电荷；刹车时，我们在释放动量；浴缸排空时，它在释放水。我们可以这样说吗？

历史

也许，这是在能流和能流密度这些物理量还没有形成时和能量的局域平衡方程还没有建立时，即大约在 1900 年之前所遗留下来的问题。

建议

我向我的每一位实习生传递了这样一个简单的法则：把能量想象为一种实物，并总是提这样的问题：“能量在哪里？”“能量来自何处？”“能量到哪里去了？”

如果你认为“被释放”这一表述是合理的话，请不要忘记说“能量在以前是被锁定着的，它以后又会被捕获。”

Friedrich Herrmann

第三章 电和磁

3. 1 电子的多余和缺失

主题:

电源（包括电池）两端标有正、负符号。当我们讨论简单的电路时，通常会说，负端有多余的电子，正端缺少电子。

缺点:

这里有两个不恰当的地方，而这两个不恰当又是相互关联的。我们将证明：

—给电源的两端标上正和负的符号是不恰当的；

—认为在电势较低的电源那端有多余的电子和在电势较高的电源那端缺少电子通常是不恰当的，有时是错的。

正、负符号表示在相应的电源两端某一物理量分别具有正值或负值。这个物理量存在吗？

人们也许会认为这个物理量是电荷。我们先来考虑在电池两端（包括相应的两极）上的电荷。这个电荷的大小取决于电池的电容 C_B 。我们必须将电池当做电容来处理。电池两端（包括相应的电极和内部的导体）上的电荷为

$$Q = C_B \cdot U_B, \quad (1)$$

这里， U_B 是电池的电压。如果在两个电极的中点接地，即其电势与地球的电势相同， Q 就是电池的每一端点（和每一极）上的电荷。这时，正极的电势比地球的电势高 $U_B/2$ ，负极的电势比地球的电势低 $U_B/2$ 。然而，这是一种几乎不能实现的特殊情况。一般来说，电池的平均电势不等于地球的电势，因而电池带有净电荷，其相应的异种电荷分布在地球上。这个净电荷为：

$$Q = C_{正} \cdot U_{正} + C_{负} \cdot U_{负},$$

这里， $C_{正}$ 和 $C_{负}$ 分别是电池的正端和负端相对于地球的电容， $U_{正}$ 和 $U_{负}$ 分别是电池两端和地球间的电压。 $C_{正}$ 和 $C_{负}$ 在数量级上与 C_B 相同。 $U_{正}$ 和 $U_{负}$ 取决于整个电路。电路的某处可能接地，但它的电势可以是一个较高的正电势或负电势。因此，一般情况下我们不能说电池的正端携带着正电荷，同样也不能说电池的负端携带着负电荷。

上面的分析表明，电池两端所标的正、负号并不表示电势。正的那端的电势不一定是正的，负的那端的电势不一定是负的。正、负号也不能正确地表示其他物理量。毫无疑问，这种符号导致了不正确的结论。

我们还可以说，“在电池的一端有多余的电子（在另一端缺少电子）”这一说法一般来

说是错的。学生根据这一说法会认为，电池的正端不是电中性的，而是带正电荷的。我们刚才已经看到了，这不一定是对的。

但是，即使我们设法让电池的正端的电势为正(负端的为负)(把地球的电势规定为零)，使正端带正电荷(负端带负电荷)，这时说“电池两端有多余的电子或缺少电子”仍然是不恰当的。

在方程(1)中的电容 C_B 的数量级是 10^{-10} F。由于典型的电压值为 1V，所以多余的电荷的数量级为 10^{-10} C。当我们提及电子的多余或缺失时，实际上意味着在某种情况下电荷或电子在电路中的流动。然而，一秒钟通过接有一个电灯的电路中的导线的横截面的电荷比上述值要大 10 个数量级。我们只要比较电路中的电池和水路中的水泵，“电池两端的电子多余或缺失”这一说法的不恰当性就很明显了。没有负载的电池好比是进出口关闭的灌满水的水泵。我们不会说“这个水泵的进出口有多余的水或缺少水”。如果水泵的进出口有一点多余的水或缺少一点水的话，也是由于水的压缩率不为零引起的。但是，我们很快就能明白，多余的水不是水泵运行的必要条件。对于压缩率为零的液体，水泵照样能运行。

历史:

我们的专栏中的多数主题涉及到以前认为是对的概念或描述方法。我们在这里所给出的就是这样一直来就存在着不恰当的说法的例子。

建议:

我们建议，在电池或电源两端标上“H”(高)和“L”(低)的符号，而不是“+”(正)和“-”(负)的符号。这是电子工程师们常用的符号。这两个符号表示电势的高低。另一种恰当表示方法是，标上“out”(出)和“in”(进)。而这种表示方法所指的是电荷的进出，而不是电子的进出。

Friedrich Herrmann

3. 2 两种电荷

主题:

电荷 (electric charge) 有两种, 一种叫正电荷, 另一种叫负电荷。同种电荷互相排斥, 异种电荷互相吸引。

缺点:

由于电荷是物理量, 上述表述说明, 这个物理量有两种。让我们分别把它们叫做 Q_A 和 Q_B 。我们确实可以用一个物体所含电荷 Q_A 和 Q_B 的多少来描述它的带电状态。然而, 物理量 Q_A 和 Q_B 有一个不好的性质: 把两种电荷分开就会导致它们不是守恒量。它们的产生和消灭是成对出现的: Q_A 的产生伴随着相同量 Q_B 的产生。从数学或从概念的角度来看, 如果我们使用单独一个“电荷”问题会变得更简单。这个电荷允许有正值和负值。显然, 对于这样一个物理量, 守恒原理是符合的。

对于磁极存在着更严重的困惑。电荷的“正”和“负”表明了两“种”电荷之间的数学关系, 而“北极”和“南极”的符号根本没有表明磁极的强度可以用单独的广延量来描述。“北极”和“南极”的名称表明, 这两个磁极有不同的性质, 而在它们之间没有过渡带, 正像“男人”和“女人”之间的关系一样。

历史:

当静电现象被人们发现时, 就出现了这样的问题: 即自然界中存在着两种不同的电液 (two electric fluida) 还是只存在一种电液 (one electric fluidum)? 二元电液理论 (the two-fluida theory) 直到今天仍留有它的影响。

建议:

我们要避免说两种电荷。电荷作为物理量只有一个。它可以是正值, 也可以是负值。把磁极叫做正磁荷和负磁荷。不要说同种电荷、异种电荷、同名磁极和异名磁极, 而要分别说具有相同正负号或不同正负号的电荷、具有相同正负号或不同正负号的磁荷 (magnetic charge)。

Friedrich Herrmann

3. 3 流的方向的传统约定

主题:

电流的方向是约定俗成的。在电子的实际流动方向被发现之前，电流的方向是这样来定义的，即电流在外电路中从电源的正极流到负极。

缺点:

当我们问电流的方向时，实际上我们在问一个矢量的方向。表示电流方向的矢量是电流密度矢量，这正像用能流密度矢量表示能流的方向，或用质量流密度矢量表示质量流的方向一样。然而，电流密度矢量的方向并不取决于传统的约定，而是根据电荷的连续性方程（continuity equation）来确定的。这一方程给出了电荷密度 ρ 与电流密度 \mathbf{j} 的关系：

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div} \mathbf{j} = 0.$$

这一方程告诉我们，在所给定的区域，如果 \mathbf{j} 的散度是正的，则在这个区域的电荷密度 ρ 就会减小。换句话说，在一个很小的区域，如果电流从这个区域流出，则在这个区域的电荷就会减小。对这一表述可以作这样的类比：如果水从一个容器中流出，则这个容器中的水就会减少。

我们知道，当我们确定了电荷的正负号时，我们就定义了电流密度矢量的方向。我们确实可以重新定义电流的方向，但这只有当我们重新定义电荷的正负号时才有可能。如果我们保持电子的电荷为负不变和保持质子的电荷为正不变，则我们就没有选择电流方向的余地了。

历史:

当我们说电流的方向是根据传统习惯来确定时，这意味着它不是电流密度矢量 \mathbf{j} 的方向，而是电荷携带者的运动方向，即电荷携带者的漂移速度 \mathbf{v} 的方向。这两个矢量的关系是：

$$\mathbf{J} = \rho \cdot \mathbf{v}$$

如果正电荷携带者朝一个方向运动，而负电荷携带者朝相反方向运动，则不会有什么问题，因为它们的电流密度方向是相同的。

由于 \mathbf{v} 的方向与电荷携带者的质量流密度的方向或粒子流密度的方向相同，所以我们可以断定，电流方向被误认为质量流或粒子流的方向了。

建议：

我们要完全区别电荷和电荷携带者这两个概念。我们也要区别两个方向：电荷流动的方向和电荷携带者运动的方向（或质量流密度矢量的方向）。电荷从高电势流向低电势（从电源流出），而电荷携带者根据其电荷的正负号朝某一方向或其他方向运动。

为了清楚地向学生说明这一区别，我在课堂中做了这样一个实验：坐在同一排的学生向旁边的学生传递红色和蓝色金属代币。我们假定，每个红色代币的值为 10 欧元，每个蓝色代币的值为负 10 欧元。除了首尾两个学生外，在传递过程中每位学生得到一个红色代币和一个蓝色代币，即每位学生所得到的代币总值为零。现在我们来实现几种代币值从最左端的学生向最右端的学生传递的方式。我们让节拍器发出声音，请每位学生在每次节拍声响起时向旁边的学生传递一个代币。第一次传递过程是这样的：在每次节拍声响起时，除了首尾两位学生外，其他每位学生向右边的学生传递一个红色代币。这样，每位学生剩下的代币值都为零，而首尾两位学生的代币值却不断地在变化：最左边的学生变得越来越穷，最右边的学生变得越来越富。接下来我们改变一下传递方式：在每次节拍声响起时，除了首尾两位学生外，其他每位学生向左边的学生传递一个蓝色代币。跟上次一样，每位学生剩下的代币值都为零，而首尾两位学生的代币值却不断地在变化：最左边的学生变得越来越穷，最右边的学生变得越来越富。第三种传递方式是这样的：在每次节拍声响起时，除了首尾两位学生外，其他每位学生向右边的学生传递一个红色代币，同时向左边的学生传递一个蓝色代币。在上述三种传递过程中，代币值都从左边传向右边，而“代币值的携带者”（即代币）从左向右或从右向左传递。

Friedrich Herrmann

3. 4 “current”（流）和它前面的冠词

主题：

下面这些句子引自物理教科书和互联网上：“Conventional current assumes that current flows out of the positive terminal of a power supply.”（我们通常假定电流从电源的正极流出。），“When a potential difference is applied to a resistive element, current flows according to Ohm’s Law...”（当电势差加在一个电阻元件上时，流的流动服从欧姆定律.....），“The flow of water through a system of pipes can be used to understand the flow of current through an electric circuit.”（通过管道系统的水流可以帮助我们理解通过电路的流的流动。）。在以上这些句子中，“current”（流）前面没有加冠词。

缺点：

在物理学中，我们把电流理解为电荷通过导体的流动。因此，电流（electric current）这一术语是被用来描述一种现象的。

也许读者还没有注意到在上面所引用的几个句子中有一些令人不快的地方。然而，我们必须记住这样一个语法规则：当我们在一般意义上谈论不可数名词时，在它们前不加冠词。所有物质都是不可数名词：

“The ring is made of gold”（这枚戒指是金做的），“Water flows downhill”（水往低处流），“氢和氧反应形成水”（Hydrogen reacts with oxigen forming water），“Hot air rises”（热空气上升），“I need money because I want to buy wine”（我需要钱去买酒）。

在上面所引用的几个句子中，名词“current”（流）前都没有冠词。如果“current”（流）确实表示一种现象，那么我们必须要在它前面加上冠词。在描述电流时我们必须跟描述水流、人流和钱流一样，在“current”（流）前面加上冠词。

如果在上面所引用的几个句子中把冠词取掉，那么这就清楚地表明我们在讨论一种物质，一种像酒、金或钱那样的物质。

“current flow”（流的流）一词特别有趣。我们经常可以在一些科学文献中找到这个词。我们将它与“water flow”（水流）比较。“水流”的意思是“流动着的水”（flowing water）。因此，“current flow”（流的流）的意思是“流动着的流”（flowing current）。这样，“current”（流）看上去好像是会流动但没有流动的东西。我们还可以看出，“current”（流）这个词常用来表示一种实物型的東西。这样，我们就知道了前面没有加冠词的“current”（流）指的是什么了。它指的是“电荷”。如果我们将“电荷”取代“流”，上面所引用的句子就都

对了。

历史：

也许问题出在那些对语言表达的正确性不大注意的专家身上。他们所关心的不是语言的保护和传承。

建议：

1. 在物理教学中，“current”（流）一词仅用来表示一种现象。在使用这个词时前面要加上冠词。我们可以依从专家们的习惯，允许将“current”（流）或“electric current”（电流）这个词当作物理量 I （即电流强度）的名称来使用。但如果我们这样做的话，我们必须清楚地告诉学生，我们用同一个名称表示了两种不同的意思：物理现象和物理量。

2. 当我们讨论某些在流动的东西时，我们必须一开始就告诉学生什么东西在流动：水、电荷、能量……不要说“流在流动”（current is flowing）。

Friedrich Herrmann

3. 5 试验电荷

主题:

电场强度通常用公式 $\vec{E} = \frac{\vec{F}}{Q}$ 来定义:

“电场强度就是作用在电荷上的力与电荷的比值。”

有些作者显得更细心, 将电场强度定义为:

$$\vec{E} = \lim_{Q \rightarrow 0} \frac{\vec{F}}{Q}.$$

缺点:

当人们用下式

$$F = Q \cdot E \tag{1}$$

来引入电场强度时, 他们有两个目的: 首先, 他们是为了给出确定电场强度值的步骤; 其次, 他们是为了给出“场”这个物理系统的直觉理解。我们认为, 用(1)式来引入 E 对于达到这两个目的都是不合适的。

1. 作为一名年长的物理学家, 在我的记忆中我从来没有用公式(1)来确定电场强度。这并不意味着我从来没有接触过这样的工作。相反, 我进行过很多次计算和测定电场强度的工作, 但不是应用(1)式来进行这样的工作。(1)式中的电场力相对于大的测度来说是很小的, 以致于人们不愿意做这样的测量。

实际中电场强度是如何来确定的呢? 原则上任何含有 E 的公式都可用来测定电场强度。对于平行板电容器中的匀强电场, 用 $E = U/d$ 这个关系式显得特别方便。另一个可操作的公式是

$$\sigma = \frac{\epsilon_0}{2} E^2.$$

力学应力或动量流密度 σ 等于力(动量流)除以面积。对于电容器, 我们必须测出一个极板作用在另一个极板上的力。

另一个问题是, 用 $F = Q \cdot E$ 来测定 E 的步骤确实是不明显的。实际上, 所测出来的电场强度值不真正是试验电荷所处位置的电场强度。这就是有些作者总要说“试验电荷”必须是小的, 甚至趋向于零。人们认为这个测量过程在概念上是清楚的。事实上, “试验电荷必须是小的”这句话是似是而非的。从别的测量中我们都知道, 测量工具不能对所测的

系统产生影响。(伏特表必须有较大的电阻, 温度计必须有较小的热容量。)然而, 在我们所讨论的情况中, 试验电荷的值很大也不会影响 E 的测量结果(只要不发生静电感应现象, 即只要所有带电体都固定在空间中)。实际上, 试验电荷值的大小可以是任意的。这个值甚至可以比产生电场的电荷值更大, 这样也不会影响测量结果。

因此, 试验电荷不一定要很小。如果试验电荷很小, 那么问题就出来了, 本来就很小的力就变得更小了。

2. 如果我们用(1)式来描述电场, 那么就会产生这样的观念, 即对试验电荷有力的作用是电场的唯一性质。然而, 这显然是学习静电学的一个很不好的开端, 这是因为我们的最终目的是要让学生知道电场本身是一个独立的物理系统。我们必须记住, 在自然界中发生的多数电磁现象是与电荷无关的。电荷仅仅告诉我们关于电磁场与物质之间相互作用的知识。

历史:

物理大师麦克斯韦当时确实是这样认为的, 相关内容写在他 1000 页巨著的第一页上。这对于麦克斯韦来说是正常的, 这是因为他当时的目的是想用力学来解释所有电动力学的问题。

建议:

不要一开始就将电场与作用在试验电荷上的力这两个概念混在一起。把电场作为一个独立的系统来引入, 并给出它不同的性质。要告诉学生, 电场能储存能量。然而告诉学生, 电场可以用单独一个矢量来描述。只有在这时, 我们可以引入测量电场强度的步骤, 但不是仅仅用作用在试验电荷上的力来引入。

Friedrich Herrmann

3. 6 场在哪里？

主题：

人们几乎唯一地用场线来图示场。

缺点：

当我们问起场在哪里时，场线会起到误导作用。由于场分布在空间，场的强度是逐点变化的，所以有人会认为这个问题没有什么意义。然而，这个问题是有意义的。当问起地球大气层的空气在哪里时，我们会根据空气密度的分布情况来清楚回答这个问题。我们会定性地说：大部分空气在大气层的底部，随着高度的增大空气减少，在 40km 以上的高空几乎没有空气。

在表征场的物理量中，唯一具有密度性质的量是能量密度。因此，如果我们想知道场在哪里，或想知道它在空间的分布情况，最合适的方法是求能量密度。然而，场线图并不能告诉我们关于能量密度的恰当信息，这是因为我们直觉地把它看作是一种流线图。

我们来讨论半径为 R 的带电球体。在很远处（即离球心的距离 r 很大处）的电场强度通量与在 r 很小处的通量是相等的。因此，场线图告诉我们，在很远处厚度为 dr 的体积元所含的场的数量与在较近处厚度为 dr 的体积元所含的场的数量相等。

对于像星球那样的辐射体，这个结论是正确的。如果我们把能量密度作为场多少的量子度，在厚度为 dr 的每个体积元中场的能量是相等的。

然而，对于静电场，这个结论是不正确的。电场强度随 r 的二次方减小，能量密度随 r 的四次方减小。因此，90%的能量分布在半径为 $10R$ 的球内，99%的能量分布在半径为 $100R$ 的球内。从这个意义上来说，我们可以这样说，场分布在带电球体周围一个相对小的区域内。

我们来讨论另一个例子：螺线管的磁场。场线图告诉我们，在螺线管内的场比较集中，但有相当一部分场分布它的外部。如果用能量分布来讨论这个问题，给人的印象是不同的。如果螺线管不是很短，几乎所有能量都集中在螺线管内。这跟电容器的情况一样，几乎所有电容器的电场的能量分布在电容器的两个极板之间

历史：

通常，场被定义为许多力所作用的空间区域。我们可以通过场线图来认识这些力。结果，场线就变成了人们形成对场的直觉理解的唯一的具体依据。

建议：

把场作为一个独立的系统来引入，即不仅仅把它作为一个计算力的数学工具。因为场是一个广延系统，所以我们用密度分布来描述它。我们甚至可以在用力来描述场之前就这样做。只有这样，我们才能告诉学生场这种“材料”是各向异性的。我们可以用理解“木材”的方法来解释场。对于木材，我们不是一开始就来画材料的纹理线，而是告诉学生木材是具有一定密度的均质材料。

Friedrich Herrmann

3. 7 磁滞回线

主题:

当我们讨论“物质中的磁场”这个专题时，我们总要引入抗磁性、顺磁性和铁磁性这些概念。磁滞效应是铁磁物质的一种特性。另外，我们还要引入剩磁的概念。

缺点:

与静电力相比，磁力在实验室中更容易演示。尽管如此，学生和老师对磁现象的认识仍不如对静电现象的认识。其中一个原因是，传统上我们一直通过引入磁滞效应来解释铁磁性。结果，学生们就产生这样一个印象，即磁现象基本上由复杂的磁滞回线来决定。

实际上，磁滞回线可以被看作是非理想的磁性材料的表现。我们来考虑两种极端情况下的磁性材料：理想的软磁材料和理想的硬磁材料。在理想的软磁材料内部是不允许磁场存在的，因而其内部 $\mathbf{H}=0$ 。因此，我们可以将这种情况与电场中的导体类比：电场中的导体内部是不允许电场存在的，即 $\mathbf{E}=0$ 。理想的硬磁材料具有这样的特性，即其磁化强度不会因磁场的存在而发生变化，即 $\mathbf{M}=\text{常量}$ 。我们所需要的正好就是这种性质。如果“永久”磁体在外磁场的影响下其磁化强度会发生变化，那么它就不是永久磁体。实际上，在允许的近似范围内，这两种理想的材料现在已经都有了。磁滞回线所表示的是，如果我们用足够强的外加磁场来影响一个硬磁体，我们就能消除它的永久磁性；对于软磁体，我们还可以使它到达磁饱和状态。然而，在通常情况下，这些现象是不明显的。因此，用磁滞回线来引入材料的磁性相当于从非理想的磁性材料开始介绍磁性。这正好比是，一开始用拉伸到超出弹性限度的弹簧来介绍弹簧的弹性。在这种情况下，我们也能从弹簧那里观察到类似于“磁滞效应”的现象。

历史:

在几十年前用磁滞回线来介绍铁磁性还是合理的。在那时人们所能看到的磁性材料远不是理想的硬磁材料或理想的软磁材料。当时人们容易改变永久磁体的磁化强度。如果磁体的几何形状做得不恰当，其磁化强度就会毁于磁体本身的磁场。在这种情况下，讨论剩余磁化强度（remanent magnetization）是合理的。

建议:

在讨论磁性物质时必须从引入理想的硬磁材料和理想的软磁材料开始。对于硬磁

材料, \mathbf{M} =常量; 对于软磁材料, $\mathbf{H}=0$ 。永久磁体的磁化强度不能轻易地叫做剩余磁化强度。磁滞回线、抗磁性和顺磁性可以在大学固体物理学的课程中来介绍。

Friedrich Herrmann

3. 8 场是具有某些性质的物理系统

主题:

物理学家们把场看作为一个难学的概念。在阅读教科书时，我们总感觉到它是一个神秘的实体（entity）。我们来引用几个文献中的说法：

“这种吸引力独立于中间的介质，甚至在真空中也会产生！一块磁体周围的空间就存在着这样一种明显的性质。它就是磁场。”

“……磁场，磁体附近的区域……”，“……在带电体周围的空间有更奇特的东西……”

“真空是物理性质的载体。这种空间叫做场。”

“在物理学中，场是这样一种空间区域，力可以通过这种区域来施加；……”

缺点:

场是一种物理系统，这种物理系统与其他诸如理想气体、刚体或理想流体等系统没有本质区别。像其他系统一样，它们也有确定的能量、动量、角动量和熵的值。像其他“实物”系统一样，它有压强，也可能有温度（这取决于它的状态）。像其他系统一样，它由基本的部分组成，比如，电磁场的基本部分就是光子。

因此，我们有理由认为，场跟空气或水这些实物系统一样，是一种实体。

在上面所引用的定义中，场被理解为一个“区域”或“空间”。学生们把空间想象为“真空”。现在，他们所学到的是这样的知识，即真空是具有某些性质的。真空中没有什么东西，但这种没有东西的真空却具有某些性质。显然，场被认为是一个难学的概念，这就不足为奇了。

历史:

对场概念的发明者法拉第来说，场是一个简单的概念。它并不要求我们有过高的抽象水平。对于他和他同时代的人来说，空间是充满“以太”这种介质的。以太在当时是一个相当具体的概念。对于法拉第来说，场也具有具体的结构：它们是以太在一种特殊的状态下的空间区域。这种状态的特征就是，以太处于应力状态中。

麦克斯韦发展了法拉第的理论，用数学的形式来表示场。他把场定义为：

“对于电现象来说，电场是带电体周围空间的一部分。”^[1] 请注意，对于麦克斯韦来说，整个空间充满了以太。这样，空间和以太在当时具有相同的含义。

人们根据迈克耳孙-莫雷实验和狭义相对论的理论得出结论，以太中并不存在当初所假

定的简单的力学性质。有些科学家据此就草率地得出结论，认为以太并不存在。这样，“以太”这一术语就从许多（虽然不是全部）物理教科书中消失了。因而，场这个概念就失去了它存在的基础。以前，场被认为是以太的一种特殊状态。而现在，它变成了并不存在的某种东西的一种特殊状态。

然而，人们当时没有意识到这里产生了一个逻辑错误。其原因是，麦克斯韦本人把场定义为空间区域。麦克斯韦在当时已经注意到，如果没有以太，就没有空间。

场失去概念基础的时间不应该拖得这么长。二十世纪初，特别是通过普朗克关于热辐射的研究工作，人们越来越清楚地认识到，电磁场像其他系统一样是一个物理系统。但是遗憾的是，这一观点仅仅在狭义相对论发表后很短时间内被人们所关注。因而，场这一概念直到今天仍处于一种难学的状态。

除了场概念发展的这种复杂性外，还有下面一个原因也导致场这一概念的混乱现象：

场这一术语不仅仅用来作为物理系统的名称，也是一个数学概念。它用来描述一个物理量的值在空间的分布情况。因此，我们可以说温度场、压强场或密度场。通常，场的这两种含义并没有完全区分开。在教科书中，有时候会提到“电场 \mathbf{E} ”这样的名称。然而，这个名称又是什么意思呢？它是指“电场”这一物理系统呢还是指物理量“电场强度”的空间分布 $\mathbf{E}(x, y, z)$ 呢？

建议：

我们建议，在介绍场这一概念时，必须像介绍其他实物系统一样。在介绍理想气体时，我们一开始说：“理想气体是具有下列性质的物质或系统……”。同样，我们在介绍电场时应该这样说：“电场是具有下列性质的系统……”

把场说成为“具有某些性质的空间区域”，这正像我们说“空气是具有某些性质的空间区域”一样，这并没有错。但是，对空气的描述，如果想表达得好一些，没有人会这样说。

参考文献：

[1] J. C. Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, Dover Publications, INC., New York, 1954, p.47

Friedrich Herrmann

3. 9 偶极天线

主题:

在介绍电磁波时我们通常从振荡电路开始，然后讨论无阻尼振荡、阻尼振荡和受迫振荡。对于阻尼振荡，我们需要一个反馈环来补偿它所带来的能量损耗。为了获得高频，我们需要使用哈脱莱型振子（Hartley type oscillator）。为了获得更高的频率，我们需要把线圈和电容器简化为一段电线。这样，振荡电路就变成了一个偶极振子（oscillating dipole）。然后，我们会讨论振子附近的电场和磁场，即“近场”（near field）。再接下去我们就会告诉学生，电磁波被发射出去了；并用实验来演示这一结论。这个电磁波就是“远场”（far field）。

缺点:

下面的评论是很有用的:

(1) 对电磁波的解释的目标一开始就定位在复杂的辐射振子（radiating dipole）（译者注：即偶极振子）的场。这样，我们不但要讨论交叉的场的分布，还要对近场和远场作很细的区别。其实，这两步工作都是没必要的。实际上，还有更简单的波。为了讨论波的传播，我们建议一开始就介绍简单的波，如平面简谐波。甚至还有比这更简单的波，即平面方形波。

(2) 在传统的电磁波介绍方法中，偶极振子扮演着基本的角色。其观点似乎是，对波的产生过程的解释可以使学生最容易理解波。实际上，解释波产生的过程比解释波本身还要困难。

这种介绍方法好比一开始用介绍单簧管的工作原理来介绍声波的方法一样。单簧管是一种共振器，来回流动的能流的很小一部分从这里漏出去，即发射出去。理解单簧管的原理比理解它所产生的波要难得多，同样，理解偶极振子的原理比理解电磁波要难得多。偶极天线也是一种共振器，在近场附近来回流动的能流的很小一部分也从这里耦合，并发射出去。

(3) 尽管我们花了很多时间和精力来解释电磁波，但教学目标还是没有达成。有人试图从简单的振荡电路开始到可能复杂的电磁波一步一步地来介绍。然而，基本的步骤还是丢失了，并留下了空档。学生所学到的是，由于电流通过偶极振子流动，由于电荷在它的两端积累起来，偶极振子周围就存在着电场和磁场。由于这种解释基于对振荡电路的理解，学生们会认为，电场和磁场的相位差是 $\pi/2$ 。然而，如果真的是这样的话，波就不会离开

近场区。

历史：

麦克斯韦预言电磁波的存在后，赫兹（Heinrich Rudolf Hertz）用实验产生了电磁波。赫兹在实验中没有现存的高频发生器。他必须设计一只灵敏的自激装置来产生波。这一复杂的装置在我们的教科书中仍能找到。作为一名伟大的理论家，赫兹计算出了他的振子的场。这一计算过程在许多教科书中被放在显著的位置。在赫兹的计算中，我们可以看出，电场和磁场在近场的相位差已经为 $\pi/2$ 。

建议：

我们建议，对波的讨论要局限于较简单的几何知识：平面正弦波或平面方形波；不要讨论高频发生器。

对电磁波的发生过程可以用以下方法来解释：在一张扩展的金属片中，电流突然开始流动起来。这样磁场就开始形成。这一变化的磁场导致电场的产生。这一电场分布在所有已经有磁场的地方。这样，从金属片开始，一个波前远离金属片，它把已经充满场的空间和还没有场的空间分开。当电路被切断时，第二个波前又向前运动了，在它后面不存在场。在两个波前之间的区域存在着一个平面方形波。

Friedrich Herrmann

3. 10 楞次定律

主题:

在中学电磁学课程中，一般要介绍楞次定律。根据这一定律，感应电流的磁场总要阻碍原来磁场的磁通量的变化。这样，楞次定律明确了一个矢量（即感应电流的电流密度矢量）的方向。

然而，我们还向学生说明，在法拉第电磁感应定律中的负号是楞次定律的结果：

$$U = -\frac{d\Phi}{dt}.$$

在此基础上，我们还这样向学生介绍：将一铁芯插入一个与电池连接的螺线管中。我们会发现，电流强度突然减小了。由于 $d\Phi/dt$ 是正的，感应电动势 emf 是负的，所以必须有一个负号。

另外，楞次定律还经常被这样解释：由于这个负号，电磁感应过程遵守能量守恒定律。

缺点:

传统物理教科书中存在两种缺点。一种缺点是不严密的表述。这些表述从一种教科书被复制到另一种教科书，而又没有人会注意到它们是不严密的，因为它很难被证实。例如，在电磁感应现象中我们很难发现电势差是正的还是负的。另一种缺点是错误的表述。例如，对电磁感应现象，我们经常说“当电路开关合上时，磁通量是增大的”。这是一种错误的表述。

(1) 在解释公式中的正负号时，我们可以通过测量公式中的量来推导这个符号。在电磁感应定律中的负号告诉我们，感应电动势 emf 的正负号与磁通量随时间的变化率 $d\Phi/dt$ 的正负号相反。为了检验这一结论，我们必须知道如何测量包括这个正负号在内的这些量。

我们来讨论磁通量变化的几种情况： B 矢量指向正 x 方向，它的绝对值（即它的 x 分量）在增加。那么它的代数符号是正还是负？如果将坐标旋转 180° ，使 B 矢量指向 $-x$ 方向，这个正负号会改变吗？如果这个磁通量被一个在 $y-z$ 平面上接有一个电压表的圆形导体所包围，那么在电压表上的读数如何显示出正确的正负号呢？

学生们回答不出这些问题。因此，我们向学生指出公式中的负号实际上是没用的。

(2) 我们发现，在有些教科书中，在推导这个负号时存在着一个错误。这个错误看上去是必然的。尽管这个负号可以用不同方式推导出来，但这个负号却不时地出现。当我们给螺线管通电时，我们会说 $d\Phi/dt$ 大于零。这个结论是不正确的。磁通量由磁通量密度决

定：

$$\Phi = \int B dA.$$

由于 dA 是矢量， Φ 是正还是负取决于面积的取向。

(3) 如果我们对某一公式中的负号如此关注，那么对于其他公式中的正号我们也必须作同样的关注。这就是说，在牛顿第二定律、欧姆定律或 $P=\mathbf{v}\cdot\mathbf{F}$ 等公式中是否都有正号？在书写胡克定律时我们应该取正号还是负号？我们来看在竖直方向悬挂在天花板下面的弹簧。考虑一下四种与弹簧有关的力：由弹簧施加给天花板的力、由弹簧施加给它下面的悬挂物的力、由天花板施加给弹簧的力、由弹簧下面的悬挂物施加给弹簧的力。所有这些力都有一个绝对值，其中两个力的方向向上，两个力的方向向下。这样，就存在一个选择的问题。虽然在胡克定律中的正负号问题并不比电磁感应定律中的正负号简单，但我们通常没有考虑胡克定律中的正负号问题。

(4) 为什么我们一定要坚持认为，如果电磁感应定律中的正负号不正确的话，会违背能量守恒定律？这似乎给人们这样一个印象，电磁感应现象在这方面有其特殊性。实际上，如果我们将其他许多物理定律（如 $U=R\cdot I$, $P=\mathbf{v}\cdot\mathbf{F}$, $\mathbf{F}=-D\cdot\mathbf{s}\dots\dots$ ）中的正负号反一下，能量守恒定律也被违背了。另外，如果改变其他任意一个物理定律的正负号，其他守恒定律也会被违背。

(5) 我们并不反对用科学家的名字来命名物理定律。我们把电流密度矢量的方向（这个方向遵循麦克斯韦方程）与科学家的名字联系起来，并给出一个物理定律的各种情况，这是不是有点过分了？

历史：

通常，一个能被充分理解的理论建立在原来理论的基础上。不幸的是，在教学中我们有时既把精力花在这个理论的最后形态上，即最简单、最清楚的形态上，又把精力花在它的最初的形态上。楞次定律仅仅是许多这种例子中的其中一个。

1834 年，也就是在法拉第发现电磁感应定律三年后，楞次提出了他的一个法则：“如果一恒定电流在初级电路 A 中流动，并使 A 移动起来，那么在次级电路 B 中就会有电流感应出来。这个感应电流的方向由它施加给 A 的电磁作用决定，它阻碍两个电路的相对运动。……”^[1]

在那个时代，关于感应电流方向的问题并不是一个烦琐的问题，楞次定律在当时来说是一个新的表述。只有在 13 年后，亥姆霍兹提出能量守恒定律时，人们才知道楞次定律

也可以通过能量守恒定律得到。再过 25 年后，麦克斯韦发表了他的能被充分理解的电动力学理论。这个理论吸收了楞次定律的内容。

我们今天仍这么关注电磁感应定律中的负号，这一事实并不是一种习惯。我们不能忘记，在教学中，一个问题通常是教师把它说成是问题时才成为问题的。

建议：

我们建议，我们不要把楞次定律当作一个定律来教，而把它当作两个“定则”来教，一个是右手定则，另一个是左手定则。右手定则是第四个麦克斯韦方程的表述，左手定则是第三个麦克斯韦方程的表述。

右手定则：让右手的大拇指所指的方向与电流的方向一致，则弯曲四指的方向就是磁场矢量的方向。

左手定则：让左手的大拇指所指的方向与磁通量密度的变化 $d\mathbf{B}$ 方向一致，则弯曲四指的方向就是感应电场的电场矢量的方向。

在对电磁感应定律的掌握中有两种可能：

我们也可能会仔细地解释如何确定不同物理量的正负号，尤其是电流强度和电压的正负号。但不仅如此，我们还必须解释在斯托克斯定理（Stokes' theorem）中关于面积积分和路径积分的正负号的关系：让右手的大拇指所指的方向与积分中的面积元的方向一致，则四指弯曲的方向就是路径积分中的路径环绕方向。在中学我们不能用这种方式来讨论，因为这太麻烦了，不能让学生有深刻的理解。

因此，我们提出第二个解决问题的方法：大胆地仅仅用相应物理量的绝对值来介绍电磁感应定律。

参考文献：

[1] James Clerk Maxwell, A Treatise on Electricity and Magnetism, Dover Publications, Inc., New York, 1954, Volume 2, No.542, p.190

Friedrich Herrmann

3. 11 电磁铁

主题:

如果将一个软铁芯放入一个线圈的内部，由于铁磁材料的磁导率 μ ，铁芯的磁场将比线圈的磁场强几千倍。

缺点:

对上述现象是这样解释的：铁芯的磁化强度和磁通量密度由于磁导率 μ 而增大。 μ 越大，似乎磁铁的磁场越强，而这是不正确的。为了将线圈变成一个电磁铁， μ 只要比 1 大就足够了。如果将 μ 从 1 增大到 1000、10000 或 100000，电磁铁的磁场几乎没有什么变化。

历史:

电磁铁可以直接用麦克斯韦方程来解释。关于磁场强度 \mathbf{H} ，麦克斯韦方程为：

$$\oint \mathbf{H} \cdot d\mathbf{r} = \int (\mathbf{j} + \dot{\mathbf{D}}) \cdot d\mathbf{A}.$$

遗憾的是，人们已经习惯于主要用 \mathbf{B} 这个矢量来描述磁场。有时候这一局限性被证明是正确的，而实际上这种证明在物理学中是站不住脚的。 \mathbf{B} 被说成是磁场。 \mathbf{B} 有时候又被说成是磁场的基本物理量，而 \mathbf{H} 被说成是一个导出量。这是一个严重的错误。我们把一个物理量与一个物理系统混为一谈了。如果学生犯这种错误，我们是决不原谅的。 \mathbf{H} 也好， \mathbf{B} 也好，都不是场。它们不可能是场，因为它们是物理量，是由人们发明的数学符号；而场是物理系统，即使智慧的人类没有观察它或描述它，它也是存在着的。

如果用 \mathbf{H} 而不是 \mathbf{B} 来描述电磁铁中的铁芯，就会变得更容易。

首先，我们容易理解软磁材料的性质。无论外界的磁场有多强，在这种材料的内部的磁场强度 \mathbf{H} 等于零。（当材料处于饱和时，这一性质就消失了。这时，材料就不再是软磁材料了。）

其次，当铁芯插入线圈中时，如果运用 \mathbf{H} 这个量，我们就可以定义一个不变量：沿着线圈绕一周的线积分为一常量。如果这个线积分的一部分路径在铁芯的内部（其磁场强度为零），则其余部分的线积分的值就会相应地增大。

用 \mathbf{B} 来解释就会变得更复杂，并不能令人信服。用这种方法很难来描述软磁材料；对于铁芯插入线圈中的情况，我们无法定义一个不变量。

建议：

在处理磁性物质时，我们建议用 H 而不是 B 。如果用 H 来测量我们所理解的“强磁场”和“弱磁场”，我们就可以解释在磁芯内部的 H 等于零这一事实：软磁材料不允许磁场穿过它，这正像电导体不允许电场穿过它一样。这样，就不难理解关于电磁铁的铁芯的一条规律了：在保持线圈中的电流不变的情况下，在将铁芯插入线圈中时，磁场将被铁芯挤出线圈。

Friedrich Herrmann

3. 12 磁极

主题:

磁极是磁体中标有北极和南极的两个地方，这两个地方的磁场是最强的。

缺点:

磁化强度 (magnetization) 是一个矢量，它用来描述材料中的磁偶极子密度 (magnetic dipole density)。磁体的两个极是磁化线 (magnetization line) 开端或末端。描述磁极的量是磁极强度 (magnetic pole strength) 或磁荷 (magnetic charge) Q_m 。磁荷密度 ρ_m 是磁场强度 H 的源:

$$\nabla \cdot H = \frac{\rho_m}{\mu_0}.$$

磁荷是电荷 (更确切地说，是束缚电荷，因为它出现在极化电介质的表面) 的磁类比的的结果。在物理教科书中通常不介绍磁荷。然而，如果没有磁荷这一概念，就很难定量地描述永久磁体。

如果没有磁荷这一概念，就不能处理 $F = Q_m \cdot H$ 这一关系式。关系式 $F = Q_m \cdot H$ 是关系式 $F = Q \cdot E$ 的磁类比的的结果。这一关系容易通过实验来加以证实。尽管磁极的库仑定律比电荷的库仑定律容易推导，但我们没有在教科书中提到它。这样，要确定永久磁体的最基本的性质 (即每个磁体的总磁荷为零) 也不可能。相反，我们只能得出意义不大的结论，即一个磁体 (至少) 有两个磁极。

对于一个通常的条形磁体，磁化线的末端在磁体的两个端面。这意味着磁荷分布在这些表面。然而，这些表面不同于“磁场最强的区域”，因为在磁体的侧面也有磁场线进出；并且，由铁屑所显示的图片也表明条形磁体两端的侧面的磁场是很强的。实际上，许多学生认为，条形磁体侧面也是它的两极的一部分，从磁极到磁体的中间，磁场越来越弱。将永久磁体的两个侧面涂上绿色和红色，这更强化了这一错误观念。

历史:

以前，磁荷在每一本电磁学教科书中都有介绍。麦克斯韦在他的专题论文集的第二卷的开头就介绍了关于磁极的库仑定律 (它是这本专题论文集集中的第一个公式)。在书中他说道：“每一个磁体的总磁荷量为零。”^[1]

后来，由于误解，磁荷的概念消失了。人们发现，孤立的磁极 (或者说携带净磁荷的

粒子) 无法找到。因而, 人们得出结论, 描述这种磁荷的物理量也不存在。然而, 一个物理量不是自然界中“存在”的东西。正如爱因斯坦所说^[2], 它是描述自然的工具, “是由人类思维自由地创造出来的”。是否引入一个物理量仅仅是一个是否合适的问题。毫无疑问, 引入“磁荷”这一物理量是合适的。如果没有这一物理量, 我们就不能写出关于磁现象的库仑定律, 我们甚至无法定量地断定磁体有两个磁极的结论。

建议:

引入磁荷这一广延量, 并得出结论: “磁体的总磁荷为零。”

参考文献:

[1] James Clerk Maxwell, *A Treatise on Electricity and Magnetism*, Dover Publications Inc., New York, 1954, p.4.

[2] Albert Einstein, *Mein Weltbild*, Ullstein Taschenbücher-Verlag, 1957, p.115.

Friedrich Herrmann

3. 13 永久磁体的磁场

主题：

在中学物理教科书，一般都给出条形磁体的磁场线图。图 1 给出了几个例子。

缺点：

在我所考察过的所有教科书中，磁场线图都是不正确的。（我检查了 10 本中学教科书，多数是德国的，有些是美国的，有一本是意大利的）。这些教科书中的磁场线图如图 3-13-1 所示。将这些图与图 3-13-2a（这是正确的图，来自萨默菲尔德的书^[1]）比较，我们可以看出图 3-13-1 中的磁场线图的错误。中学物理教科书中的磁场图与图 3-13-2a 之间的差异是不可原谅的。图 3-13-1 中的磁极分布有各种预先的假定，实际中没有如图 3-13-1 所示的磁极分布。

在不同的教科书中可以发现不同的错误。

(1) 磁场线仅仅在磁体的端面进出，如图 3-13-1a、b 和 c。实际上，场线也可以在侧面进出。

(2) 磁场线都垂直于磁体表面进出，如图 3-13-1a 和 b。实际上，只有在磁体端面中心进出的磁场线才与磁体表面垂直。

(3) 在磁体侧面进出的磁场线的方向有错误，如图 3-13-1d、e、f、g 和 h。

在蹄形磁体和地磁场的磁场线图中也可以找到相同的错误。通常，在中学物理教科书中也给出用铁屑演示磁场线的照片。在这种教科书中还可以看到与这张照片并排的图，这张图是用来描述照片所显示的磁场线的。而实际上，它们存在着差异。

我还发现在其中一张图中甚至粗糙到连磁场线都不仅从北极发出还终止于北极，在 南极也是这样画的。

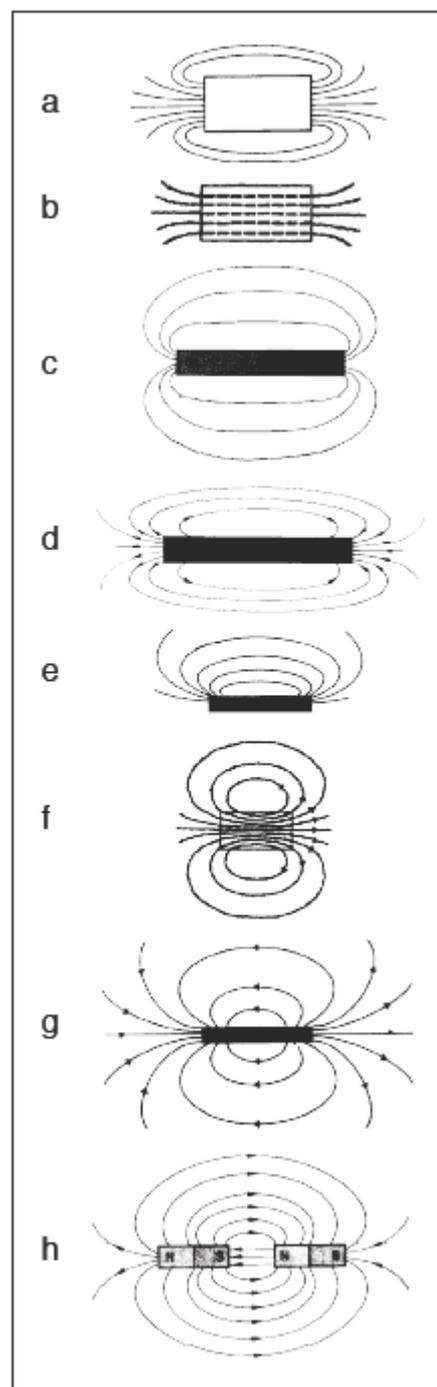


图 3-13-1 在几本中学物理教科书中所画的条形磁体的磁场线。

历史：

用图来描述物理现象时在每一方面都需要简洁明了，要突出最基本的内容，为了清晰起见次要的细节可以省掉。然而，在我们所举的例子中，不但没有作这样的简化，而且传递了错误的信息。学生们对这些错误是不会不知道的。我们可以相信，他们肯定记住了图中的错误结论。实际上，许多学生认为条形磁体的磁场线是垂直于磁体的端面的。当我们要求学生画条形磁体的磁场线时，他们几乎总是画出一张不正确的图。显然，学生们在画他们所记住的一些东西。

当我们要求学生解释磁场线的方向时，他们的回答显得有些混乱。实际原因是，书中不正确的图显得似是而非。

为什么学生们在画从磁体侧面进出的磁场线时其方向会发生错误呢？学生们知道 B 场是无散度的， B 场线既没有开端也没有末端。因此，学生们认为，这些场线在磁体的内部应该是连续的。这样，他们做出了不正确的假设，即这些场线在穿过磁体表面时是不会有弯折部分的。实际上，在一本教科书中，场线就是这样来画的，如图 1f。在有些教科书中，甚至把从端面进出的场线画得特别“光滑”，如图 3-13-1b。（图 b 和图 f 出自同一本教科书。而实际上它们是不一致的。）正确的 B 场线图如图 3-13-2b 所示。请注意，在磁体侧面处场线有明显的弯折部分。

那些把进出的磁场线仅仅画在磁体的端面的学生可能会认为，在磁体内部磁场线等同于磁化线。而这一结论是错的。（磁化线显示出一个匀强磁场的形状。）

那些把进出的磁场线都画成垂直于磁体表面的学生可能会认为，电场线在导体表面的性质也同样适合于磁场线。

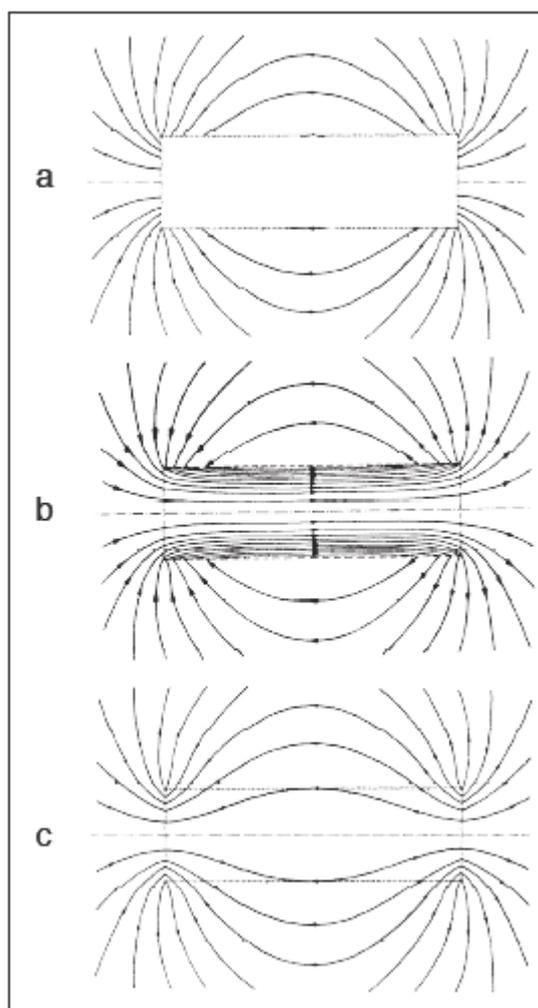


图 3-13-2 条形磁体。(a) 在磁体外面的 H 和 B 场线；(b) B 场线；(c) H 场线。

我们奇怪地发现，在我们所考察的所有大学物理教科书中，有关磁场线的图都是正确的；而在我们所考察的所有中学物理教科书中，相应的图都是错的。显然，中学物理教科书有其自身的原因，而不同于“大学物理”。同时我们还发现，在一本“新的”教科书中，也含有这些陈旧的错误；所以它仅仅新在包装上，而不是真正意义上的新书。

建议：

我们必须把场线图画正确。方法是：不要画 \mathbf{B} 场线图，而要画 \mathbf{H} 场线图，如图 2c。磁极是 \mathbf{H} 场线的源。我们可以把磁体的端面假想为不是磁极，而是携带电荷的地方。画 \mathbf{H} 场线的方法跟画带电体端面的电场线的方法一样。

参考文献：

[1] Sommerfeld, A.: Vorlesungen über Theoretische Physik, Band III, Elektrodynamik. –Akademische Verlagsgesellschaft, Leipzig 1964. –S. 78

Friedrich Herrmann

3. 14 等势面

主题:

我们通常用场线 (field line) 来图示电场、磁场或引力场。对于电场和引力场, 我们有时还用等势面 (equipotential surface) 来描述它们。

场线描述了场的两个方面:

- (1) 场中每一点的场强方向。场线的切线方向就是场强的方向。
- (2) 场源的位置。场源是场线发出或终了的地方。

有时, 我们还根据场线分布图来判断场强的大小。事实上, 在有些特殊情况下, 这是可以做到的^[1, 2]。

缺点:

用图示法来描述场能让我们对场一目了然, 而如果用话语来描述的话, 就会变得很复杂。有句话, “一图值千句”。虽然描述场的图示法有很多种, 然而, 人们用得最多的却只有一种, 即场线图。我们已经习惯于这种描述方法了, 以至于我们很少去考虑还有其他别的方法。其中一种方法是场面 (field surface), 它们与场线是垂直的。

场通常被描述为一种非常抽象的实在。因此, 对于多数学生来说, 场线是看得见摸得着的东西。结果, 他们反而把场线当做场了。

历史:

对于麦克斯韦来说, 用场线 (“力线”) 和场面 (“等势面”) 来描述所有场是很自然的 (图 3-14-1)。这是一种将看不见的东西形象化的描述方法。在十九世纪初, 人们开始怀疑以太的存在, 后来以太从物理学中消失了。结果, 场退化为一种抽象的实在, 几乎变成了一个用来计算力的数学概念。从那时开始, 场线仅仅用来表示试探粒子所受到的力的方向的辅助线。对于垂直于场线的面, 只有在保守场这种特殊的场中才能成为等势面。由于只有在保守场中才会有势, 因此人们认为, 只有对于这种场画垂直于场线的面才是有意义的。显然, 当时人们没有注意到这仅仅是名称的问题。实际上, 对于非保守场我们也可以画垂直于场线的面。当然, 它们不是等势面, 但它们像保守场中的等势面一样也是有用的。实际上, 对于非保守场它们具有特别的意义, 它们能清楚地表示场在什么地方具有旋度。

建议：

下面，我们把场中散度不为零的地方叫做**通量源**（flux source），把旋度不为零的地方叫做**环量源**（circulation source）。

通量源是场线发出或终止的地方，而环量源是场面终止的地方。在场线图中，我们可以清楚地看到通量源；而在场面图中，我们可以清楚看到环量源。因此，人们总喜欢同时用场线和场面（在二维图中，场面也用线来表示。）来图示场。

以电场为例，通量源是电荷，环量源是磁通量随时间变化的地方。

图 3-14-2 表示两个线电荷（两根垂直于纸面的带电细线）和三个小的“直”线圈。三个线圈的磁通量随时间变化着；它们也垂直于纸面，因而看上去是三个点。

这个图也可以被理解为是对磁场的描述。这样，通量源是线性磁荷（线性磁极），而环量源是电流。

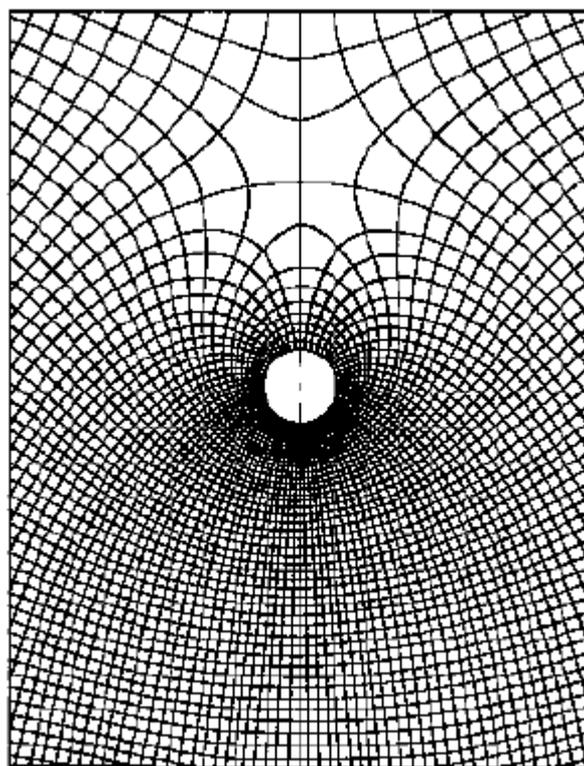


图 3-14-1 垂直于纸面的导体的磁场和匀强磁场的叠加。摘自麦克斯韦的论文“电和磁”。

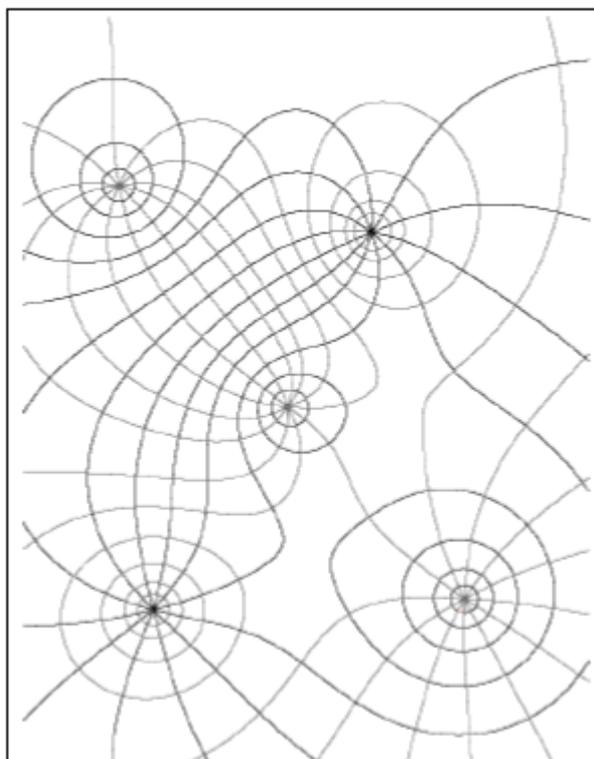


图 3-14-2 两个通量源和三个环量源的场（深色表示场线，浅色表示场面）。

参考文献

[1] Wolf, A., van Hook, S. J., Weeks, E. R.: Electric field line diagrams don't work, *Am. J. Phys.* **64**(1996), p.714-724.

[2] Herrmann, F., Hauptmann, H., Suleder, M.: Representations of electric and magnetic fields, *Am. J. Phys.* **68**(2000), p171-174.

Friedrich Herrmann

3. 15 电感

主题:

在中学物理教科书中，电感 L 通常是根椐电磁感应定律来引入的，即把它定义为感应电动势 $U_{\text{感应}}$ 和电流的时间变化率之间的比例系数：

$$U_{\text{感应}} = -L \cdot dI/dt \quad (1)$$

缺点:

电气工程师们都知道三个线性电学元件：电阻器、电容器和电感器（它们分别类比于振动系统中的阻尼器、振子和弹簧，阻尼器遵守斯托克斯定律，弹簧遵守胡克定律）。对于这些元件有相应的线性关系式：

$$\text{电阻器: } U=R \cdot I$$

$$\text{电容器: } Q=C \cdot U \quad (2)$$

$$\text{电感器: } n\Phi=L \cdot I \quad (3)$$

R 、 C 和 L 取决于元件的几何尺寸和材料。能量在电阻器中耗散掉，在电容器和电感器中储存起来。对于除了电源以外还包含这三种元件的电路，在其内部具有对称性：如果根椐某些转换法则将某种电路转换为别的电路，则这两种电路可以用具有相同数学结构的公式来描述。大家最熟悉的例子是将 RC 电路转换为 RL 电路。以下是几个最重要的转换法则：

$$U \text{ (电压)} \Leftrightarrow I \text{ (电流强度)}$$

$$Q \text{ (电荷)} \Leftrightarrow n\Phi \text{ (磁通量)}$$

$$C \text{ (电容)} \Leftrightarrow L \text{ (电感)}$$

$$R \text{ (电阻)} \Leftrightarrow 1/R=G \text{ (电导)}$$

$$\text{节点} \Leftrightarrow \text{回路}$$

$$\text{串联} \Leftrightarrow \text{并联}$$

$$\text{恒压电源} \Leftrightarrow \text{恒流电源}$$

上面的双箭头表示： U 可以用 I 代替， I 可以用 U 代替； Q 可以用 $n\Phi$ 代替， $n\Phi$ 可以用 Q 代替，等等。这里， n 的出现破坏了对称美。这是由于通过线圈的磁通量是磁通量密度 B 和线圈的横截面积的乘积。如果使用 $\Phi' = n\Phi$ 这个量就更符合逻辑了，这是因为磁场线所穿过的有效面积是线圈横截面积的 n 倍。

如果用 (1) 式来定义电感，这种对称美就被忽视掉了，电容器和电感器之间的类比关系也显示不出来了。

如果我们用类似的方法，即用与（1）式相似的公式

$$I = -C \cdot dU/dt$$

来引入电容这个量，那么，用（1）式来引入 L 的缺陷也能暴露出来。

上面的公式描述了电容器充放电的过程。如果我们用这个公式来引入电容 C ，这就意味着电容仅仅是描述这些过程的物理量。用（2）式来引入电容更普遍。这里， C 表示为了将所给的电荷储存进去我们必须做的努力程度：我们需要较高的电压还是较低的电压？

对于电感也是这样。当我们用（1）式来引入电感 L 时，这就意味着 L 仅仅是在电磁感应现象中是重要的。只有在一些大学物理教科书中才用公式（3）来引入 L 。相反，这些教科书在没有提及感应现象的前提下引入 L 。这里， L 表示为了在线圈中建立某一给定的磁通量我们必须做的努力程度：我们需要较强的电流还是较弱的电流？

历史：

我们可以像引入电容、电阻和许多其他物理量一样用任何一个公式来引入电感。除了公式（1）和（3）以外，电感有时也用下面第三个公式来引入：

$$E = \frac{L}{2} \cdot I^2 \tag{4}$$

这个公式给出了储存在线圈磁场中的能量。利用公式（1）、（3）或（4）引入 L 的三种可能性是同时存在的，这是因为从物理学的角度来说三个公式中都出现了 L 。这里，我们再次提一下，在某些方面中学和大学的物理教科书在很大程度上是相互独立的。

建议：

我们可以先引入磁通量 $B \cdot A$ ，然后用实验来证明线圈中的磁通量密度与线圈中的电流强度成正比。由此，我们又可以得出 $n\Phi$ 与电流强度成正比，即：

$$n\Phi \propto I.$$

其比例系数叫做电感，即：

$$L = n\Phi/I.$$

将上式与电磁感应定律 $U_{\text{感应}} = nd\Phi/dt$ 联立起来，我们可以得到（1）式。

Friedrich Herrmann

3. 16 螺线管的磁极

主题:

螺线管的磁场处在螺线管的外部空间，其几何形状跟条形磁铁的磁场相同。当我们在中学里介绍螺线管和它的场时，我们通常要提到上述这个事实。另外，我们经常说，在螺线管的两端分别是北极和南极。对于环形电流，也有相应的说法。这里，两个极在环形电流的圆形面的两边。

缺点:

为了确定任何形状的磁体的磁极，最好的办法是利用磁化强度 \mathbf{J} 。磁化强度是一个描述物质磁性状态的矢量。它告诉我们每一体积元的磁偶极矩。图 3-16-1 给出了一个磁性圆盘的磁化强度。它的磁极均在圆盘底部。图 1 也画出了磁化线。这些线总是从南极发出，回到北极。螺线管和环形电流都没有磁化强度，因此，它们都没有磁极。

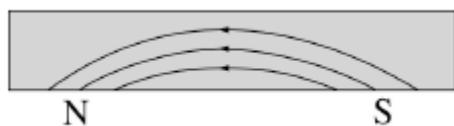


图 3-16-1

为了确定磁极的位置，我们也可以利用 \mathbf{H} 场线图。 \mathbf{H} 场线从北极发出，回到南极。对于螺线管和环形电流， \mathbf{H} 的散度处处为零。由此，我们仍可以确定它们没有磁极。

确实，我们应该提到这样的一个事实，即螺线管的磁场和条形磁铁的磁场是相同的。然而，当我们提到螺线管的磁极时，学生们对磁极会产生错误的概念。他们不会理解一个内部是空的螺线管和一个电磁铁之间的基本区别。

最后，如果螺线管和环形电流有磁极，那么我们可以得出这样的结论，即任何形状的电流分布都有磁极。那么，一根通电导线的磁极在哪里？通常我们会强调，通电导线没有磁极。

历史:

对永久磁铁的磁场和电流分布的磁场的比较是大学物理的一个标准课题。这是一个重要的课题，这是因为学生可以从中学会区别散度算子和旋度算子。什么样的散度分布所对应的场与某一给定的旋度分布所对应的场相同？

显然，中学物理课程中已经有了这个课题。但是，教材作者们并没有意识到他们的教材中存在着错误。

电流产生磁极这个观点后来一直保留了下来。在地理学中，我们总是说地球有地磁南北极。从物理学的角度来说，地球是没有磁极的。理由有两点：首先，它们是由电流引起的；因此，地球的磁场是无散度的。其次，根据地理学的定义，地磁极处在地球表面上的两个点（在这两个点磁场强度的水平分量为零）。即使地磁场是由铁磁物质引起的，地磁极所处的位置也不可能是两个点，而应该是在地球内部的两个空间区域。

我们经常说地球是一个磁铁。这个观点可以追溯到吉尔伯特。他发现地球的磁场发源于地球的内部，而不是在地球外部的空间。他推测，在地球内部有一个磁铁。他的著作“论磁铁、磁体和地球大磁铁”发表在 1600 年。这比奥斯特发现电流和磁场之间的关系要早 220 年。而在这之前的很长时间里人们已经知道在地球内部是如此之热以至于在那里磁性物质是不可能存在的。因此，说地球是一个磁铁不如说地球内部有电流。

建议：

不要说螺线管或环形电流有磁极。在讨论电磁铁时，不要说电磁铁有磁极，应该说它的铁芯有磁极。

Friedrich Herrmann

3. 17 变压器的漏磁场

主题：

“……磁通量 Φ 必须完全限定在铁芯内部，即两组线圈内的磁通量必须相等（没有漏磁通）。” [1]

“当用比较精确的方法测定次级线圈的电压时，其读数比计算值要小。其原因有：一方面是由于焦耳损耗（译者注：又叫做铜损）……；另一方面是由于漏磁，通过次级线圈的磁通量只有初级线圈的一部分。” [2]

缺点：

学生们知道，漏磁场或杂散场是需要避免的东西。原则上，它们是不需要的。如果我们想象物理世界中不存在这些东西，基本的物理原理不会受到破坏。它们跟力学中的摩擦一样。摩擦也是令人讨厌的东西，人们总力图要消除它。一种近似的类比是花园中的水龙头。水龙头肯定有一些小孔，或接头的密封程度不大高。原则上，我们可以将这些漏洞彻底堵塞。实际上，这也可以说成是一种“杂散场”。我们可以用金属罩来避免漏电场的发生，也可以用镍铁高导磁合金屏蔽罩把磁场保护起来，或避免其他装置对它的影响。

有些装置的工作原理要涉及到“漏磁场”或“杂散场”这些名称。下面要讨论的变压器就是这种装置。

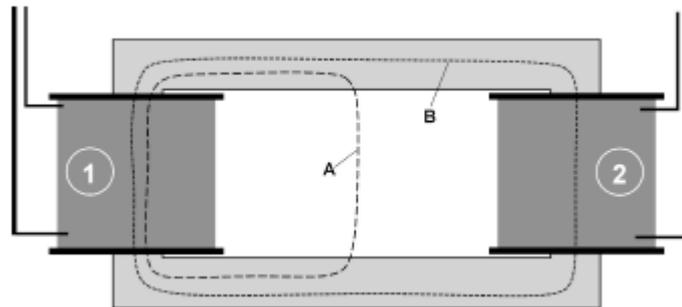


图 3-17-1 在铁芯中的磁场强度 H 为零，只有在铁芯外部的那部分积分路径上的磁场强度 H 不为零。

我们来讨论最简单的变压器：一个矩形铁芯的两个较短的边上装有线圈，如图 3-17-1 所示。习惯上，我们作这样的假定：

1. 两个线圈的电阻比它们的感抗小得多；

2. 负载电阻比次级线圈的感抗小得多；
3. 负载电阻比每个线圈的电阻大得多；
4. 铁芯材料的磁导率 μ 比 1 大得多。

现在我们来应用安培定律。第一个积分的路径是 A：

$$\oint_A \vec{H} d\vec{r} = n_1 I_1.$$

这个积分的值等于积分路径所包围的总电流 $n_1 I_1$ 。（ n_1 和 n_2 分别表示初级线圈和次级线圈的匝数。）在铁芯内部的磁场强度 H 比在外部的 μ 倍。由于典型的 μ 值在 1000 以上，所以沿铁芯内部的路径的积分可以忽略不计。因此，只有“漏磁场”才对积分有贡献。

现在我们来考虑积分路径 B。它包围了两个线圈。由于这条路径通过了整个铁芯内部，所以这个积分值等于 0：

$$\oint_B \vec{H} d\vec{r} = n_1 I_1 - n_2 I_2 = 0.$$

这样，我们得到了大家熟悉的关系式：

$$n_1 I_1 = n_2 I_2.$$

我们发现，如果没有“漏磁场”这个关系式就不成立了。

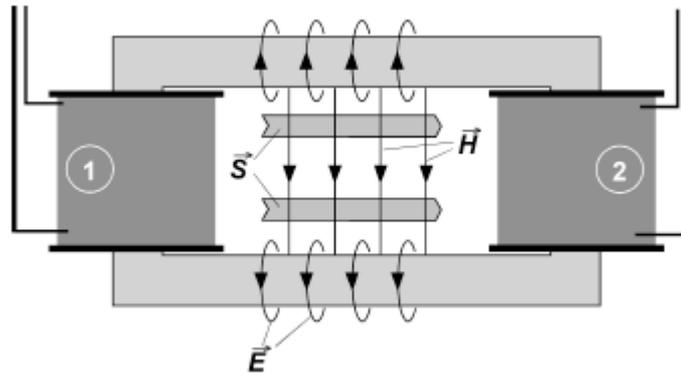


图 3—17—2 变压器两臂之间的场。能量从左流向右。

这个被贬低了的场的重要性还可以通过另一条途径来说明。图 3—17—2 给出了 H 场线和电场线。在铁芯内部的磁通量的变化是由涡流电场引起的，这个场的场线环绕着铁芯的两个臂。另外，这个图还显示了坡印亭矢量：

$$\vec{S} = \vec{E} \times \vec{H}, \tag{1}$$

即在场中的能流密度。可以看出，能量是通过这个场从初级电路流到次级电路的。

这种情况类比于用电缆传输能量的情况。它们之间的差别仅仅是电场和磁场互换了一下，如图 3-17-3 所示。因为不同的导体之间存在着电势差，所以电场线从一个导体指向另一个导体。又因为电流在导体中流动，所以在导体周围环绕着涡流磁场。其能流分布情况与变压器中的相同。

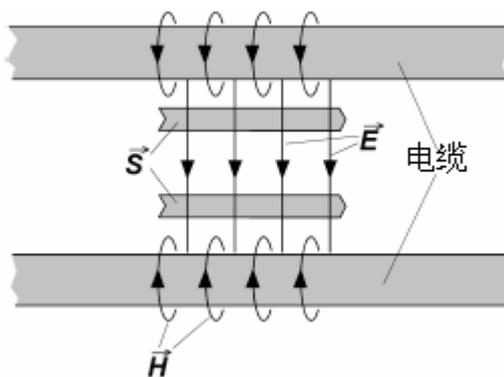


图 3-17-3 一根电缆的两个导体之间的场。能流从左流向右。

变压器的杂散场对变压器的能量损耗与电缆中的两个导体之间的电场对电缆中的能量损耗相比，前者并不比后者来得明显。在两种情况下，其效率主要由“导体”中的能量耗散决定。在变压器中，能量耗散在线圈和铁芯中，其原因是磁化的稳定变化。铁芯内的磁场强度是对这一耗散程度的量度。在理想情况下，它应该等于零，这正像电缆中的两个导体之间的电场强度应该等于零一样。由于在铁芯内部的这种耗散很大，在技术上，变压器的初级和次级线圈之间的距离尽可能做得小一点。

历史：

在对变压器的工作原理的讨论中，人们普遍没有涉及到磁场强度 \mathbf{H} ，而仅仅涉及到磁通密度 \mathbf{B} 。由于在铁芯内部的 \mathbf{B} 比在外部的要大很多，因而使人们产生这样的印象，即在外部的场没有起到基本的作用。单独使用 \mathbf{B} 来描述磁现象会引起误导。我们这里仅仅举了许多例子中的其中一个例子。另一个原因也许是，人们回避对局域能量平衡的讨论。

建议：

1. 不要将所有“杂散场”都扔到同一个锅中。由于“杂散场”和“漏磁场”含有贬义，所以对于变压器的两臂之间的场最好不要使用这些名称。
2. 对变压器中的磁场的讨论，不要仅局限于 \mathbf{B} ，也要讨论 \mathbf{H} 。
3. 要尽可能经常提到这样的问题：能量在哪里？能量沿什么路径流动？

[1] Gerthsen: Physik, 21. Auflage, Springer-Verlag Berlin 2002, S. 414.

[2] Handuch der experimentellen Schulphysik, Elektrizitätslehre III, Aulis Verlag Deubner & Co KG Köln 1965, S. 70.

Friedrich Herrmann

3. 18 力场

主题:

“经验告诉我们，作用在质点 (mass point) m 上的[.....]力可以由质点的位置矢量 \mathbf{r} 来决定，和 (或) 由它的速度 $\dot{\mathbf{r}}$ 来决定，也可以由时间来决定。因此，一般来说，力可以表示为 $\mathbf{F}=\mathbf{F}(\mathbf{r}, \dot{\mathbf{r}}, t)$ 。”^[1]

“在物理学中，力场用来描述作用在空间不同位置的质点上的非接触力。特别地，力场是矢量场 $\mathbf{F}=\mathbf{F}(\mathbf{x})$ ，这里 \mathbf{F} 是质点在 \mathbf{x} 处所受到的力。”^[2]

“我们用数学的方法 (即用功的定义) 来重新描述一下能量的定义。势标量场 $U(\mathbf{r})$ 被定义为这样的场，它的梯度等于在每一点所产生的力，其方向与力的方向相反.....”^[3]

缺点:

每一位物理学者都听过分析力学的课。在这种课中，他们会学到我们上面所引用的内容：力取决于位置，有时也取决于速度和时间。

当我们谈论一个物理量的值时，我们必须指明这个值本质上指向什么。有一类局域量，它们的值指向一个点，这些量包括温度、压强或电场强度。有一些量的值指向一个表面。所有流和通量属于这类物理量：电流、功率 (=能流)、磁通量和力 (动量流)。另一类物理量的值指向一个空间区域。这些量叫做广延量，它们包括质量、能量、电荷和熵等。有些量的值的指向很复杂，例如电阻、电容等。

我们这里所讨论的主题是力。力 \mathbf{F} 与力学应力 $\boldsymbol{\sigma}$ 有关:

$$\mathbf{F} = \iint_S \boldsymbol{\sigma} dA. \quad (1)$$

力学应力 $\boldsymbol{\sigma}$ 是一个局域张量，面积元 dA 是一个矢量。因此，在公式 (1) 中的力指向面积 S 。

对于一根在其长度方向上处于均匀压缩状态或均匀拉伸状态的杆，公式 (1) 可简化为:

$$|\mathbf{F}| = \boldsymbol{\sigma} \cdot A.$$

这里， $\boldsymbol{\sigma}$ 是在杆的长度方向上的应力分量， A 是它的横截面积。在静止的液体和气体中，在空间三个方向上的应力张量的分量都相等，因此，其张量总是对角型的。在这种情况下，这个应力叫做流体静压强 p :

$$\mathbf{F} = p \cdot A$$

无论参考面的取向如何，力的方向总是与这个面积矢量的方向一致。

由电磁场传递的力也可以由公式(1)来计算。在这种情况下， σ 是麦克斯韦应力张量。如果表面 S 包围整个物体，我们就得到“作用在物体上的力”。

我们的观点是，当我们讨论一个力时，我们必须指出这个力所指向的面。然而，这种表述与我们前面所引用的话是相矛盾的。上面所引用的话给我们的感觉是，力是一个局域量，即力的值指向一个点。

上面所引用的话属于分析力学(analytical mechanics)的内容。在这样的话语背景中，只要我们运用质点或点电荷的模型，力确实可以被看作是一个局域量。这样，质量和力这两个量都指向一个点。相反，在连续力学(continuum mechanics)中，质量是一个广延量，因此它指向一个空间区域。结果是，力指向一个面。

质点力学(point mechanics)在大学中被广泛应用，以至于我们容易忘记我们在运用一个模型，一个确实很有用的模型。但与此同时，我们发现在概念上很奇怪的现象。为什么会出现奇怪的现象？在连续力学中很“正常”的物理量在质点力学中会变得无穷大(说得更好一点，这些物理量会变得不存在)。这些物理量包括：密度、流密度和力学应力。

因为在质点力学中，力指向一个点(不是指向一个面)，力就有可能作用在空间任何一个点状物体上。这样，我们就得到函数关系式 $F = F(r)$ ，我们把它叫做“力场”。

我们知道，力场在哈密顿和拉格朗日理论中起着重要的作用，许多实际的系统可以被近似地描述为质点系。然而，我们因此会忽视这样的事实，上面所引用的话通常是不成立的，而仅仅在质点力学中成立。

历史:

牛顿当时认为，力指向一个物体，而不是一个点。那时，场的概念还没有出现；因此，牛顿的力的概念不可能指向一个参考面。这样，他就认为力是指向一个物体的，而不是物体的表面。

质点力学在拉格朗日、哈密顿和雅各比时代到达了繁荣发展的阶段，后来被认为是量子力学的基础。这样，它自然地被作为真正的力学来教给学生。由于这样的原因，那些有关物体的质点性的不合理的结论容易被人们所忽视。

建议:

在引入一个新的物理量时，我们必须讲清楚它的值指向哪一个几何性质。这样做是很有必要的。我们可以与学生一起将他们所知道的所有物理量列出来，然后问学生每个物理

量各指向什么几何性质。也许，你会从学生那里得到使你吃惊的回答。

不要使用力场这个概念，而要使用相应的场强度的概念（如电场强度、磁场强度或引力场强度）。它们才是真正的局域量。

[1] *C. Schaefer und M. Päsler: Einführung in die Theoretische Physik, Verlag Walter de Gruyter & Co 1970, S. 92*

[2] Wikipedia, Search term *Force field*

[3] Eikipedia, Search term *Force*

Friedrich Herrmann

3. 19 两种电磁感应现象

主题：

在引入电磁感应时，我们通常要区分一下两种电磁感应实验的实现方式。

一种电磁感应实验是像图 3-19-1a 所示的那样来实现的：将导体通过一个匀强磁场，其磁场强度不随时间而变。对这个实验的解释是这样的：作用在电荷携带者上的洛伦兹力将它们移动到由移动的电荷引起的静电力与洛伦兹力平衡为止。导体两端的电势差可以用电压表来测量。

另一种电磁感应实验是像图 3-19-1b 所示的那样来实现的：导体静止，磁场强度由于磁体的运动在变化。这时，电压表也会偏转。这个实验不能用洛伦兹力来解释。它似乎建立在另一种物理效应的基础上。

然而，这两个实验的结果都可以用一个方程来概括，这个方程就是电磁感应定律：

$$U_{\text{感应}} = -d\phi/dt.$$

人们对此是这样评价的：“奇怪的是，电磁感应的两个不同的物理起因可以用一个方程来概括。”

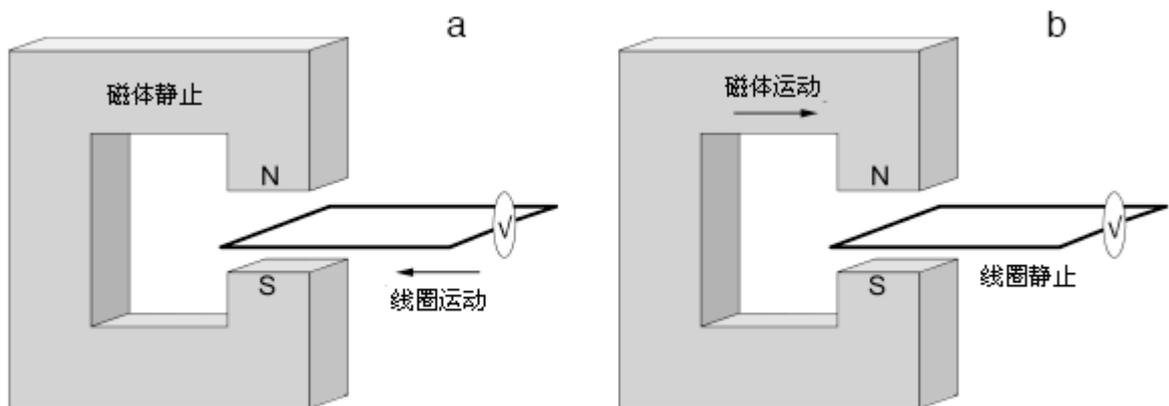


图 3-19-1 在两种不同参考系中的电磁感应。(a) 磁体静止，线圈运动；(b) 磁体运动，线圈静止。

缺点：

对同一个实验我们用两种不同的参考系来描述。

我们先来看图 3-19-1b 所示的第二个实验。线圈静止，磁体运动。我们需要用麦克斯韦第二方程来解释：

$$\text{rot}\vec{E} = -\dot{\vec{B}}.$$

线圈内部的磁通量密度在变化，从而产生了非保守电场（ $\text{rot}\vec{E} \neq 0$ ）。运用麦克斯韦第二方程的积分形式

$$\oint \vec{E} d\vec{r} = -\dot{\Phi},$$

这一事实可以作以下解释：穿过线圈的磁通量在变化，从而在导体内部产生电动势 emf 。

现在我们来看图 1a 所示的实验。洛伦兹力作用在电荷携带者上。这个力与静电力平衡。这里有一个保守的电场（ $\text{rot}\vec{E} = 0$ ）。磁通量密度 \vec{B} 不随时间变化。为了使实验与麦克斯韦第二方程相协调，人们通常运用比较粗糙的数学技巧。当我们在计算磁通量（即磁通密度的面积分）时，总认为相应的面积随时间在变化。严格来说，这相当于隐藏了参考系变化这一条件。

刚才我们看到了这样一种情况，即一个相同的实验用两个不同的参考系来描述。当从一个参考系到另一个参考系时，场强会发生变化，即它的大小会发生变化。只有这样，才会发生这样的情况，即电场在一个参考系中是保守的而在另一个参考系中是非保守的。

为了更好地理解参考系变换所带来的结果，我们来看一个更简单的实验：

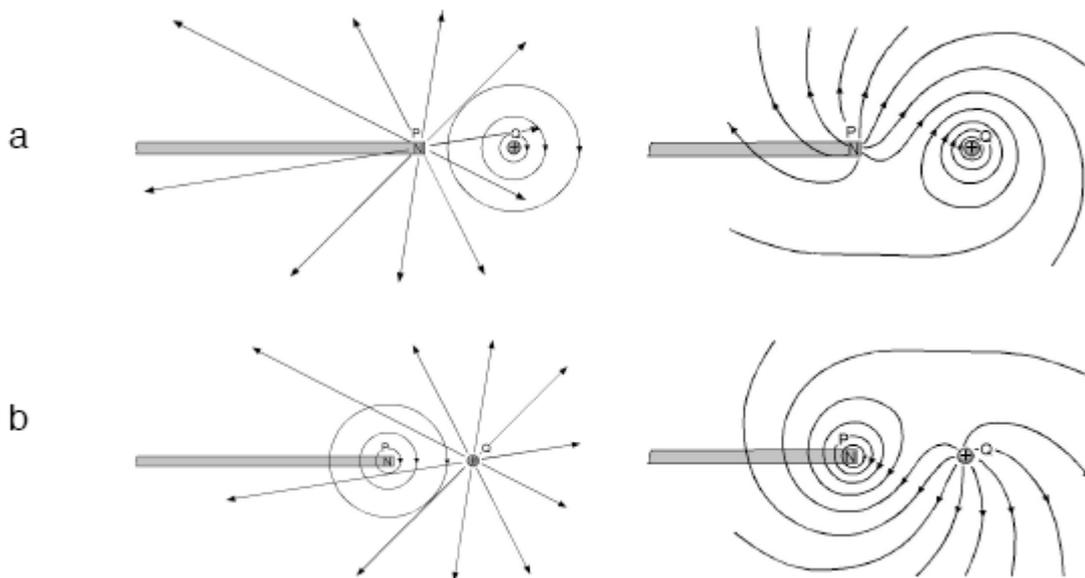


图 3—19—2 一个带电小物体 Q 相对于一个磁极 P 运动。这个过程可以在两个不同的参考系下来描述。(a) 磁体静止，带电体朝垂直于纸面向内的方向运动。(b) 带电体 Q 静止，磁体朝垂直于纸面向外的方向运动。上面两个图表示磁场线，下面两个图表示电场线。在左边的图表示 P 和 Q 单独形成的场，在右边的图表示两个场叠加后的情况。

如图 3-19-2 所示，一个条形永久磁体的 N 极 P 相对于一个小的带正电的物体 Q 运动。运动方向垂直于 P 和 Q 的连线。我们在两种参考系下来描述所发生的现象：P 静止的参考系（由上面的图表示）和 Q 静止的参考系（由下面的图表示）。

1. 以 P 为参考系

电荷与物体 Q 一起运动（如图 3-19-2a，朝垂直于纸面向内的方向运动），形成电流。这一电流被磁场所包围。（这一磁场由麦克斯韦第一方程来描述。）P “感觉”到这个场，并受到一个向上的力。同时，向下的洛伦兹力作用在 Q 上。这样，P 和 Q 之间的相互作用的介质是磁场。在图 2a 的左部分表示 P 和 Q 单独形成的磁场。这样，我们可以读出在 Q 场中作用在 P 上的力和在 P 场中作用在 Q 上的力。这些力也可以从图的右边读出。图的右部分表示合场强。在 Q 上方的场线比在下方的密。由于场在垂直于场线方向上处于压缩状态，Q 被场向下推。另外，在 P 上方的场线比在下方的密。由于场在场线方向处于拉伸状态，P 被场向上拉。

2. 以 Q 为参考系

运动着的磁极 P（从纸面向外运动，如图 3-19-2 b）表示磁“位移电流”。这个电流被电场所包围。（麦克斯韦第二方程表示这个电场。）Q 感觉到这个场，并受到一个向下的力。同时，向上的力作用在 P 上：洛伦兹力的电学类比（在电场中的磁流）。这样，P 和 Q 之间的相互作用的介质是电场。同样，这些力可以从图中的左、右部分读出。

这个例子告诉我们，在电动力学中，参考系的变换要求对一个现象的描述有时必须用麦克斯韦第一方程，有时必须用麦克斯韦第二方程；同一种相互作用有时可以用电场作为介质，有时可以用磁场作为介质。

历史：

我们通常只在力学中讨论参考系，而在物理学的其他领域（如电动力学或热力学）中不熟悉不同的参考系所带来的不同效应。

建议：

在力学中我们知道，参考系的变换会导致问题的复杂化，对参考系的不恰当选择会导致对现象的描述带来麻烦。如果参考系的变换不是实际的教学目标，我们建议回避这一问题。

Friedrich Herrmann

3. 20 保守矢量场

主题:

物理系的学生知道,对于感应电场是无法定义其电势的:“旋转电场的存在表明,不是所有电场都有电势……。这种场的场线是闭合的。当电荷在一个闭合的路径中运动时,它将获得一定量的能量。”

缺点:

我们把问题局限于电场。对于磁场和流体中的速度场也可作同样的讨论。

电场根据其特殊的性质可分为两种:保守场和旋转场。对于保守电场,各处均有下式成立:

$$\nabla \times \vec{E} = 0.$$

这意味着在某处必定有一个场源,即 $\nabla \cdot \vec{E}$ 不可能处处为零。否则就根本不存在场。

$\nabla \cdot \vec{E} \neq 0$ 的地方有时叫做通量源 (flux sources)。

一个纯旋转场各处都有下式成立:

$$\nabla \cdot \vec{E} = 0,$$

在有些地方有下式成立:

$$\nabla \times \vec{E} \neq 0.$$

我们把 $\nabla \times \vec{E} \neq 0$ 的地方叫做环量源 (rotation sources)。

一般情况下,一个场同时具有两种源,因此它不一定属于这种或那种。

然而,这些概念在电动力学教学中扮演着重要的角色。其原因是,人们总是想象在自然界中只有一个电偶极子、一个平行板电容器或一个通电螺线管。关于它们的场可以作这样一个简单的描述:电偶极子的电场是一个保守场,或当通电螺线管中的电流随时间变化时,它周围的电场是旋转场。

这种简单化的分类有时会得出过分的结论。例如,我们前面所引用的那句话就是一个例子:感应电场没有电势。

为了把问题弄清楚,我们先来搞清为什么我们要用“场”这个字。

有时我们会说起点电荷的电场、电偶极子的电场或电容器的电场(或螺线管的磁场产生的电场、环形电流的电场或条形磁体的电场)。我们在作这些表述时,我们总是想象在自然界中只有这个点电荷、这个电偶极子,等等。

在另一些场合,我们会说起给定空间区域的电场。这个场的源也许不是我们原来所关

心的。

我们前面所引用的话是关于第一种情况的。它们是很普遍的表述。这些表述指的是无限延伸的系统。如果想要描述电动力学的一般知识，这种表述是合理的和有用的。但有时它们是不合适的。当遇到一个实际问题时，我们对描述整个世界的表述不感兴趣了，而只对描述局部的空间区域的表述感兴趣。因此，实际的问题是：我们所考虑的空间区域有通量源或环量源吗？如果在这个区域中没有环量源，我们可以定义势。如果场的旋度只在我们所考虑的空间的某些地方不为零，我们可以挖去不包含环量源的单连通区域，并为这个区域定义一个势。在这个区域外是否有环量源对我们是否定义势没有任何影响。如果我们在表面价值上采用了上面所引用的表述，我们决不会使用“势”这一有用的工具。如果有人想说电网中的中性导体的电势为零，这是不允许的，因为变压器内电路的某些地方的合电场的分布情况为

$$\nabla \times \vec{E} \neq 0.$$

或者，我们来考虑一个电器设备。当它靠电池运行时，必须有一个具有势的场；但是，如果它接在电网上，就没有这样的场。

历史：

在电动力学中，我们喜欢运用诸如点电荷、电偶极子、螺线管等这些简单的系统。

建议：

如果我们相信规则的重要性，我们最好按照参考文献[1]所说的来做：

“在导体外部，存在着多值的磁势。在计算场时，这种非单值性不起任何作用。”……
“在导体内部，没有磁势。”

如果有人认为这个方法太大惊小怪了，那么这种观点是无助于我们现在正在讨论的主题的。特别是，持这种观点的人不会这样说：“对于感应电场，不能定义电势。”是否可以用势来描述取决于所讨论的空间区域与什么特殊问题有关。

[1] Bergmann-Schaefer, Lehrbuch der Experimentalphysik, Band II, Elektrizität und Magnetismus, Walter de Gruyter, Berlin 1971, p. 176

Friedrich Herrmann

3. 21 感应电动势

主题:

以下内容引自三本中学物理教科书:

“线圈中电流强度的变化感应出电场，这个电场驱动电荷运动……”

“线圈中电流强度 I 的变化或磁通密度 B 的变化 (B 的变化与 I 的变化成正比) 将导致在线圈中产生阻碍这种变化的感应电场。这个感应电场的强度为 $E_{\text{感应}}$ ，相应的感应电动势为 $V_{\text{感应}}$ 。”

“在一个大线圈中的电流强度发生变化时，相应的磁场强度也发生变化，这样在小线圈中就感应出电动势。”

以下内容引自一本大学物理教科书:

“基尔霍夫定律对交流电也成立:

1. 节点定律: 流入任何一个节点的电流总和等于从这个节点流出的电流总和。

2. 回路定律: 对于任何一个回路，即任何一个闭合电路，其总电压为零。换句话说，不管在电路的哪一条支路测量，电路两点间的电压总是相同的……”

缺点:

多数物理量的值都指向下面的几何形状: 点 (如温度)、有向线段 (如电压)、有方向的面 (如力) 和空间区域 (如质量)。(有些量指向更复杂的特性或关系, 如电阻或电容, 它们实际上表示一种特殊的性质或关系: $U-I$ 特性或 $U-Q$ 特性。) 不管什么时候给出一个物理量的值, 都必须讲清楚它指向哪个点、线、面或空间: 在点 P 处的温度是 20°C , 物体 B 的质量 (在 B 所占有的空间区域) 是 500g , 在细线的截面 S 处的力是 40N 。

在上面所引用的内容中, 无论是关于电压的还是关于电场强度的, 都没有遵守这一规则。所提到的两个量都被含糊地指向一个线圈, 然而这不是正确的说法。

我们先来讨论电动势的一般特性。它是这样被定义的: 电场强度沿一给定的有向路径的积分, 例如, 沿路径 S 从 P 点到 Q 点的积分,

$$U = \int_P^Q \vec{E} d\vec{r},$$

如图 3-21-1 所示。路径也可以是闭合的。如果所讨论的场是保守场, 电动势的值仅仅由 P 和 Q 的位置决定。如果用 φ_P 和 φ_Q 表示 P 点和 Q 点的电势, 则电动势 $U_{PQ} = \varphi_Q - \varphi_P$ 。在这种情况下, 我们可以说电动势属于这对有顺序 (P, Q) 的点。与顺序 (Q, P) 对应的

电动势 U_{QP} 的值的符号相反，即

$$U_{QP} = -U_{PQ}.$$

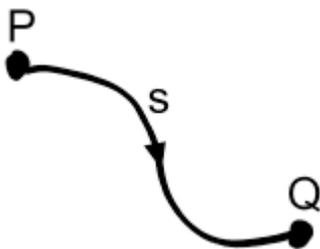


图 3-21-1 电压或电动势指向某一有向路径。

人们通常只关心电动势的绝对值。对于这种情况，人们已经习惯于这样说：“点 P 和点 Q 之间的电压”，而没有指明顺序。这跟说“两点之间的距离”一样，因而意味着其值是正的。只要我们明白这样会引起错误的结论，这样说还是可以接受的。

现在我们回到前面所引用的内容。我们来讨论如图 3-21-2 所示含有一匝线圈的 R-L 电路。沿一闭合路径的电动势为

$$\oint \vec{E} d\vec{r} = -\iint \vec{B} d\vec{A}.$$

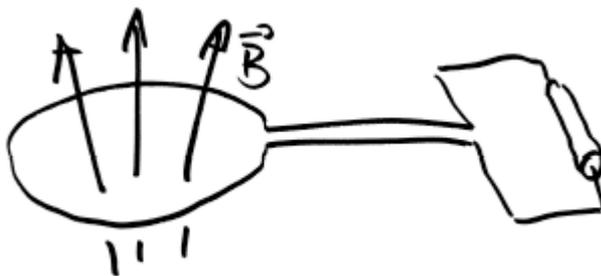


图 3-21-2 在 R-L 电路的闭合路径中，只有电阻器对电场强度的积分有贡献。

我们沿着电路来选择积分路径。它沿着电线的内部和电阻器的内部。面积元 $d\vec{A}$ 的方向和路径元 $d\vec{r}$ 的方向之间的关系遵守右手螺旋定则：如果右手的大拇指指向 $d\vec{A}$ 的方向，则弯曲四指所指的方向就是 $d\vec{r}$ 的方向，如图 3-21-3 所示。因此，只要我们相应地确定了 $d\vec{r}$ 的方向，无论我们怎样确定 $d\vec{A}$ 的方向都没有关系。感应电动势的正负号指的就是用这种方式定义的积分路径。

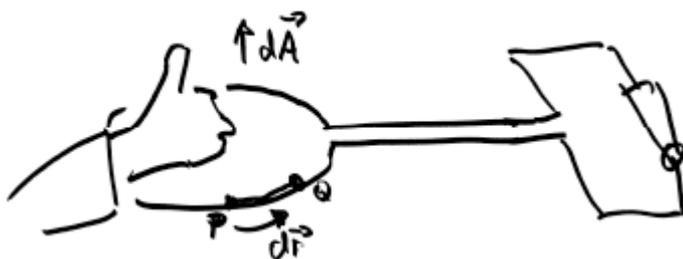


图 3-21-3 在麦克斯韦第二方程中，面积元的方向和路径元的方向之间的关系遵守右手螺旋定则。

现在我们要问，积分路径的各部分对总电动势的贡献如何？换句话说，对 P 和 Q 作不同的选择，其积分

$$U = \int_P^Q \vec{E} d\vec{r}$$

的值将分别是多少？我们必须始终记住，此积分沿着 $d\vec{r}$ 的方向进行，即 Q 在 P 之前。

对于导体中的每一段 P-Q，欧姆定律总是成立的：

$$U = R \cdot I.$$

我们假定“线圈”的电阻和连接电阻器的导线的电阻与电阻器的电阻 R_0 相比均可忽略不计。这意味着电阻器外的任何一段 PQ 的电压均为零。因此，只有电阻器对整个闭合路径的积分有贡献，只有在电阻器内部电场强度不等于零，只有在电阻器内部才需要有电动势来维持电流。

如果我们将单匝线圈换成多匝线圈，情况基本上是一样的。这时，通过电路的总磁通量是通过一匝线圈的磁通量的 N 倍，积分面的形状也有一些变化。但是，其结果是相同的，因为只有电阻器内的那一段对总电动势有贡献。

现在我们来看上面引用的第 1、2、3 个例子。这三个内容的意思是，电动势是在线圈内感应出来的。但是，情况真的是这样吗？为了清楚地表示电动势，电动势所指的路径必须标明。当我们提到“在线圈内”的时候，这就意味着相应的积分路径在线圈内的某一地方。然而，线圈内的任何路径对积分的贡献等于零。因此，线圈内的电动势等于零。

这种情况不仅出现在中学教科书中，也出现在大学教科书中，如我们前面所引用的第四个例子。这里，回路定律用来建立振荡电路的微分方程。甚至有人强调，电动势必须沿着路径来测量。然而，电路中的两个分支的电压值并不相同。原因是，如果通过电路中的磁通量随时间变化，回路定律就不再成立了（同样，当电荷在节点处积累时，节点定律也

不再成立)。

历史:

在电学教学中，电压通常在保守场的背景下来引入的。在这样的特殊情况下，电压确实可以认为是两点之间的值，连接两点的路径确实对电压值没有关系。当我们试图用这种传统的方法来描述电磁感应现象时，我们会陷入困境。

如果我们坚信电压可以用电压表来进行操作性定义：“电压就是电压表所测的量”，我们会碰到另一个困难。只要将电压表接在 P 和 Q 两点，不管它以什么方式连接，它的读数似乎总是正确的。然而，在图 2 所示的电路中，在给定的 P 和 Q 两点之间的电压能否用电压表测出来，这取决于导线是怎样连接的。（请注意，连接用的导线也可以形成一个线圈。）

建议:

如果所涉及到的场是保守场，电动势等于电势差。在这种情况下，当两点的顺序确定后电压也就确定了。然而，标明两点的顺序会让我们感到有点笨拙，因而我们在实际中很少这样做。在一开始用电势值（而不是电势差）来描述电路时，人们避免这种笨拙的做法。然而，在电磁感应中，这种简化工作就不能再做了。根据不同的学生，我们提出不同的教学建议：

对于大学生：不管给出电压值或电动势的值，都要指明它属于那一段有向线段。这一线段可以有始末端，也可以是闭合的。如果它是闭合的，并与电路的导体重合，那么明确了电路以后就足够了。

对于中学生：这里，我们通常遇到关于多匝线圈（不是一匝闭合的回路）中的感应电动势的情况。因此，不要对线圈进行描述，而要描述电路的其余部分或电路其余部分的线段。对于这些部分的描述，我们可以运用熟悉的处理直流电路的方法：将电势归属于每一点。

Friedrich Herrmann

3. 22 涡流

主题：

在科学和技术文献以及中学物理教科书中，有关于涡流概念的介绍。以下是从文献中引用的关于涡流的定义和解释。

1. “感应电动势不仅仅出现在环形导体和线圈中。当在块状结构的金属导体中的磁场发生变化时，也会发生电磁感应现象。由于物体的延伸，出现了环形电流，这种电流又叫涡流。”

2. “在导体中的这种感应电流并不像导线或线圈中的电流一样有一个确定的路径。因此，我们把它们叫做涡流。”

3. “在电磁感应现象中有各种电动势产生，因而相应的电流的路径看上去也是无序的。这些电流产生磁场，其方向与运动方向相反，所以起到阻碍运动的作用。这些电流叫做涡流。”

4. “如果变压器的铁芯是块状的，那么在铁芯中也会产生这样的电流，并使它发热……。这种电流叫做涡流。”

5. “如果一个金属圆盘在匀强磁场 B 中运动，那么通过它的磁场发生变化。由于它是圆形的，所以就感应出圆形的电动势。这样，在金属中各处就产生圆形的电流（即涡流），这些电流还将受到洛伦兹力。”

6. “……我们之所以把它们叫做涡流，是因为这些感应电流的流线像旋涡一样是闭合的。涡流产生磁场。根据楞次定律，这个磁场阻碍它的产生，即阻碍原来的磁场。”

7. “涡流：由于变化的磁场或物体在非匀强磁场中运动而在导体中感应出的变化的电流。由于涡流而产生的热（焦耳效应）可以被用来熔化金属（感应熔炉）。在一般情况下，涡流会导致不希望有的功率损失（涡流损耗）。在变压器中，用叠合的方式将芯片组合起来，从而来减小这种涡流损耗。应用：涡流制动器，电学测量仪器中的阻尼，在交流电表产生的一对力。”

再引用两个关于超导体的内容。在这些内容中没有应用到涡流：

8. “外磁场感应出环形电流。这个电流在导体内部产生相反方向的磁场，从而补偿了外磁场。”

9. “对于外磁场也是这样。它们感应出环形电流，将磁场完全挤出在外。海克·卡末林·昂内斯首先在线圈中产生这种环形电流，然后将电池关掉。”

缺点：

要真正理解涡流的性质是不容易的。

多数涡流的定义强调它们是闭合的电流或环形电流。然而，这对于其他电流来说也是这样，甚至在有电池的电路中也是这样。只有当电路中某些地方的 $d\rho/dt$ （电荷密度的时间变化率）不为零时才不属于这种情况。

定义 2 强调了，涡流的路径是不确定的。这是否意味着，电流在没有其他原因的情况下可以改变路径？（在各向同性导体中）电流沿电场的方向流动。电场线确定了电流的路径。在导线中的电流和在变压器铁芯或涡流制动器中的“涡流”也是这样。

定义 3 告诉我们，涡流看上去是无序的。这意味着什么？这是否意味着我们无法知道电流的路径，或者说我们简直无法计算出电流的分布情况？

定义 1 和 4 强调，涡流产生的地方是块状结构的。块状结构是什么意思？是否是物体很大的意思？但有时候电线是很大的，而涡流制动器是很小的。

在有些文献中提及到涡流的效应。在定义 4 和 7 中提到了涡流的热效应，在定义 3 和 7 中提到了由于楞次定律而导致的制动效应。然而，那些不叫涡流的电流也会产生热，也有制动效应。每一台发电机都有这种制动效应。

定义 7 最清楚地告诉我们，任何感应电流的定义都是一样的。

最后，我们来讨论一下定义 8 和 9 中所提到的环形电流。电流的流线没有终端，这意味着什么？然而，对于任何电路，只要不被电容器所中断，都是没有终端的。我们通常不会强调电路中的电流是环形电流。这个道理很清楚，因为“电路”这个词本身就有这个意思。

我们可以这样说，我们对一个相同的现象由于它出现的环境不同而给出了另外一个名称。在制动器中，我们说那里有涡流；在超导体中，我们说那里有环形电流；在电熨斗和灯泡中，我们说那里有普通的电流，没有给出特别的名称。

如果名称能表达现象的基本特征，用合适的名称来区分不同的现象是必要的。否则，是多余的。因此，我们最好用一个词来表示它们的相同点。

涡流这个词，或者把它描述为无序的或不确定的电流分布，这会导致另外的问题。这明显地在与液体中的湍流作对比。对于湍流，用无序和不确定这些词来描述是恰当的。然而，在这方面涡流和湍流基本上是不同的。

历史：

1824 年，弗朗索瓦·阿拉果发现，可以自由转动的磁针被转动的铜盘所吸引。这一发

现导致法拉第于 1832 年发现了电磁感应现象。

一个在两个磁极之间快速转动的铜盘会慢下来。傅科在 1855 年得出结论，使铜盘转动的功必将以热的形式重新出现。他当时用印象深刻的实验证明了这个结论。在法语中，涡流被叫做傅科电流（*courants de Foucault*）。从这以后，制动效应和热产生效应被作为涡流的两个基本特征来看待，尽管其他感应电流也会产生这两个现象。

因此，现象发现的特殊环境导致了新名称或概念的产生；特别是，在法拉第对电磁感应现象作一般性解释之前发现了铜盘的吸引效应，这一情况容易导致新名称的产生。

这种情况跟楞次定律的情况很相像。对这个定律也有一般性的解释^[1]。

建议：

不要给在变压器铁芯中感应出来的电流或在涡流制动器的电流取上特殊的名称。为了区分“涡流制动器”和机械制动器，我们最好把涡流制动器叫做感应制动器。如果不能确定电流是否是闭合的，不要把电流叫做环形电流，而直接说电路是闭合的。

[1] F. Herrmann: Lenz's law, no. 36 of this series of articles

Friedrich Herrmann

3. 23 磁导率

主题：

对于条形通电螺线管（长为 l ，匝数为 N ，铁芯材料的相对磁导率为 μ_r ）的磁通量密度 B ，教科书中是这样写的：

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{l}. \quad (1)$$

这里假定电流强度不是很大。否则，铁芯将趋于磁饱和状态。

在有些教科书中，还有与（1）式相当的公式：

$$B = \mu_r \cdot B_0. \quad (2)$$

这里， B 是铁芯材料内的磁通量密度， B_0 是没有铁芯的通电螺线管内的磁通量密度。

缺点：

公式（1）和（2）是不正确的。它们只有当磁场所占有的空间中充满相对磁导率为 μ_r 的材料时才成立。

“在磁化强度各向同性的物质占据磁场的所有空间的情况下，或它的部分磁感应线没有穿过磁化物质的表面，则在物质内部有下式成立：

$$B = \mu_r \cdot B_0.$$

这里， μ_r 是磁化物质的相对磁导率……” [1]

因此，公式（1）和（2）对于像具有闭合铁芯的环形线圈是成立的。

为了理解为什么上述公式对于一般的条形电磁铁不成立，对于像图 3—23—1 所示的带有缝的环形电磁铁我们来推导相应于公式（1）和（2）的正确表达式。

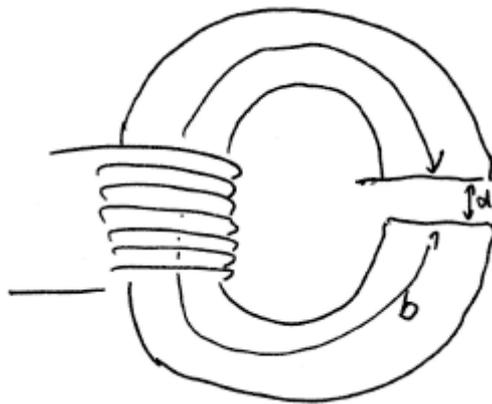


图 3—23—1 只有当缝的宽度 d 足够小时，在铁芯内部的磁通量密度和在缝中的磁通量密度才与 μ_r 成正比。

我们假定缝的宽度足够小，使得我们可以认为缝中的磁场是均匀的。

由于材料远未达到磁饱和，又由于材料是各向同性的，对于材料内各处我们有：

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot H. \quad (3)$$

假定线圈的匝数为 N ，电流为 I ，则

$$\oint \vec{H} d\vec{r} = N \cdot I,$$

这里的积分路径沿整个环。

现在我们假定环的半径（大圆的半径）比环的横截面的半径（小圆半径）要大得多。这样，我们可以容易地计算出这个积分的值：

$$b \cdot H_m + d \cdot H_s = N \cdot I. \quad (4)$$

上式中，下标 m 表示铁芯的材料（material），下标 s 表示缝（slit）， b 是在铁芯材料内部的积分路径的长度， d 是在缝中的积分路径的长度。

由于 \mathbf{B} 场是无散度的，因此我们有

$$B_m = B_s = B,$$

即 \mathbf{B} 在铁芯材料中和在缝中是相同的。

根据（2）式我们得到

$$\mu_r H_m = H_s.$$

将上式代入（4）式，我们得到

$$H_m = \frac{N \cdot I}{b + \mu_r d}.$$

再根据（3）式我们有

$$B = \frac{\mu_0 \cdot \mu_r \cdot N \cdot I}{b + \mu_r d}. \quad (5)$$

我们发现， \mathbf{B} 和 μ_r 的关系并不像（1）式所给出的那样。

对于没有铁芯的线圈，我们有

$$B_0 = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{l},$$

这里 l 是积分路径的总长度。由此，（5）式变为

$$B = \frac{\mu_r \cdot l}{b + \mu_r d} B_0.$$

由此可以看出， B 和 B_0 的关系并不像 (2) 式所给出的那样。

下面我们在两个特殊情况下来讨论 (5) 式：

1. 如果螺线管没有缝，即如果 $d=0$ ，或 $b \gg \mu_r d$ ，我们有

$$B = \mu_0 \cdot \mu_r \cdot \frac{N \cdot I}{b}. \quad (6)$$

在这种近似处理下，磁通量密度与缝宽无关，与铁芯的相对磁导率成正比。由于在材料内部的积分路径的长度 b 几乎等于总积分路径的长度，这个公式与 (1) 式就变得相同了。因此，(1) 式只有当铁芯没有缝或缝的宽度与 b/μ_r 相比很小时才成立。

2. 如果 $b \ll \mu_r d$ ，(5) 式近似为

$$B = \mu_0 \cdot \frac{N \cdot I}{d}. \quad (7)$$

现在 B 与 μ_r 无关，但与缝的宽度成反比。将上式与没有铁芯的情况比较，我们得到

$$B = \frac{l}{d} B_0. \quad (8)$$

可以看出，在这种情况下， B 与 μ_r 也无关。

现在我们来分析，这两种近似情况与我们在教科书中所见到的哪些情况相对应？

假如我们有一个环形磁铁，其总长度为 50cm，其材料为典型的学校实验室中的材料。我们再假定这个环形磁铁有一个宽度不小于 0.2cm 的缝（否则，霍尔探头就无法插入其中）。如果我们允许 $\mu_r=1000$ ，我们会发现 (5) 式右边分母中的 b 只有 $\mu_r d$ 的四分之一。这时，我们遇到的情况属于 (7) 式和 (8) 式所对应的范围，而不是 (6) 式所对应的范围。

实际上，在学校里通常用条形磁铁而不是用环形磁铁来测定 μ_r 的值。在这种情况下，铁芯的两个极之间的距离是很大的。因此，我们现在遇到的情况属于 (7) 式所对应的范围。实际上，这些实验所给出的 μ_r 值要小 10 倍。

公式 (1) 和 (2) 告诉我们，电磁铁铁芯内部的磁通量密度随着材料的磁导率的增大而成正比地增大。这就意味着，在铁芯外部的磁通量密度将增大同样的倍数。因此，一个具有 $\mu_r=100000$ 的铁芯的电磁铁所具有的磁通量密度是一个具有 $\mu_r=1000$ 的铁芯的电磁铁所具有的磁通量密度的 100 倍。然而，(7) 式和我们的经验告诉我们，实际情况并不如此。

对于一个 $\mu_r=500$ 的电磁铁，如果更换另一个铁芯，也很难增大其磁通量密度。（这并不意味着，在某些情况下不需要具有很大 μ_r 值的材料了。）

历史：

我们所引用的这些错误公式出现在五本中学物理教科书中。然而，这些公式没有出现在大学物理教科书中，也没有出现在百科全书中。这就提示我们去思考，这些错误是如何产生的？中学物理教科书要使用尽可能少的物理量。因此，在引入磁导率时，人们没有利用磁场强度 \mathbf{H} 这个量。这样，错误的结论就出来了，人们用类比于引入介电常数 ϵ_r 的方法来引入磁导率。在电容器两极板间插入一电介质时，两极板间的电势差就会减小。有电介质与没有电介质时的电场强度之间的关系为

$$E_0 = \epsilon_r \cdot E.$$

对于电容器，整个电场所占有的空间充满了电介质。因此，跟磁场中的情况不同，这个关系式是成立的。另外，通常的电介质的介电常数 ϵ_r 比典型的铁芯材料的 μ_r 要小得多。

建议：

如果用 \mathbf{H} 来取代 \mathbf{B} ，对静磁现象的描述会变得更加清晰。这样，我们有以下两条简单的规则：

软磁材料将其内部的磁场（用 \mathbf{H} 来测量）排出在外，正像导体将其内部的电场排出在外一样。

对于大多数情况，根据不同的 μ_r 值，磁场被排出 99.9%或 99.99999%，磁场几乎没有随 μ_r 值的变化而变化。

[1] Jaworski, B. M. and Detlaf, A. A.: Physik griffbereit, Vieweg, Braunschweig 1972, p.410

Friedrich Herrmann

3. 24 电火花和电磁辐射

主题:

大家都知道电火花会对收音机和电视机产生干扰。在有雷电时，在操作开关时或在电动机运行时，我们所收听到的调幅信号中夹有噼啪的噪声。如果汽车中没有安装消除干扰的电路，汽车发动机中的电火花也会产生这种干扰。在赫兹证明电磁波存在的原始实验中，电火花起着很重要的作用。

人们普遍认为，产生这种干扰的电磁辐射来自火花隙（spark gap）:

“电火花产生高频脉冲。这种脉冲必须加以消除，否则就无法进行各种测量……”

“……与电火花一起产生的是以电振荡形式出现的放电现象。电火花从一个球跳到另一个球。这样，两球之间的火花隙就起到了发射器的作用。”

“一次电磁振荡（即一次电火花放电）就产生电磁波。这电磁波以光速向远处传播。”

我们可以从描述赫兹实验的图中发现，电磁波从振子的两个球之间的火花隙发射出来。

缺点:

电磁辐射并不是从火花隙中发射出来的，而是从导体中发射出来的。火花隙仅仅是很小的一部分。在赫兹实验中，整个天线都在发射电磁波。火花隙的作用是连接天线两部分的开关。当电压到达某一值时，就会在这里产生电火花。

要获得很强的电场和磁场（闭合开关后），这个电压值必须是很大的。在充电时，天线的两半部分必须是断开的。我们简单地用电火花而不是用通常的开关来连接这两半部分。只要一放电，这两部分导体就被连接起来了。即使在振荡中电压值为零，电火花也不会消失，因为空气被电离了。

对于电灯开关或电动机中的电刷，它们也同样会发出电火花。在这里，电磁波的发射也不是仅发生在电火花中，而是发生在当电路开放时有振荡电流流过的整个导体上。因此，电火花是发射电磁波的必要条件，而波源是电流发生快速变化的地方，即整个导体。

历史:

大家都知道，有电火花时就会有噼啪的噪声。电火花很引人注目，从它那里会有光和声音发出来。看来，“电火花也是电磁波的波源，它产生了干扰作用”的结论是似是而非的。

学生们知道偶极天线的有关知识：整个天线在发射电磁波。尽管上述错误概念与学生

们的这一知识是相矛盾的，但它还是普遍存在着。

建议：

我们要清楚地告诉学生，电火花仅仅起着自动开关的作用。火花隙在两个金属导体之间建立了一种连接。

Friedrich Herrmann

3. 25 电场和磁场中的应力

主题:

电场和磁场处于应力状态。这种应力是很强的，并容易被感觉到，也可以用简单的公式计算出来。然而，在中学和大学的物理教科书中很少提到这种应力。有时它被作为一种虚构的东西从教材中删除。

缺点:

通常我们把电场力和磁场力当作超距作用力，而不提及场中的应力。当我们说“电容器极板相互吸引”时，我们不会提及两极板之间的电场的拉伸应力，我们只会把极板上的相互作用力当作超距作用。至少自从麦克斯韦的电动力学诞生以来，没有物理学家会再相信这种作用了。牛顿本人也已经认为这种力是与感觉不一致的。而麦克斯韦在各种不同的场合指出，对他来说“超距作用”（*actio in distans*）是荒谬的。

历史:

问题在于，我们今天仍然在使用的力这个概念意味着超距作用的存在。牛顿也是勉强地引入“力的语言”的。对他来说，当时没有别的办法，因为场这个概念还没有出现。当法拉第和麦克斯韦最终引入场这个概念时，已为时太晚了^[1]。牛顿所采用的临时替代的解决办法（物体 A 不通过任何介质施加给物体 B 一个力）已经成为了一种学说。然而，还有另一个不幸的事件。将以太从物理学中除掉后，场变成了一个虚构的东西——它几乎变成了一个计算力的数学工具。处于应力状态的东西太具体了，以至于不符合非以太的场的概念。广义相对论和量子电动力学出现后，人们对空间的理解又具体化了，但已为时太晚了。场处于应力状态，这对人们来说仍觉得是一种“虚构”，是错的，因而被完全忽视了。

建议:

我们要严肃地将场看作是一种物质。它具有我们所知道的物质所具有的所有性质，只不过是程度不同而已。场的力学性质容易通过场的强度来计算。对于在电场线方向上的拉伸应力，我们有

$$\sigma_{\parallel} = -\frac{\epsilon_0}{2}|E|^2;$$

对于在垂直于电场线上的压缩应力，我们有

$$\sigma_{\perp} = +\frac{\epsilon_0}{2}|E|^2.$$

它们的绝对值等于电场的能量密度。对于磁场，也有类似的表达式，只要将 ϵ_0 换成 μ_0 ，将 E 换成 H 。

为了帮助学生形成具体的场的概念，我在教学中总要提到这样一个事实：在一颗中子星的磁场中，1 升这样的磁场具有 1kg 的质量，其相应的重力是地球上 1kg 物体的重力的 2×10^{11} 倍。

[1] *Maxwell, J. C.: A Treatise on Electricity and Magnetism, Volume One, Dover publications, New York, 1954, Article 105, p. 157*: “如果 E_2 不是直接通过超距作用而是通过从 E_2 到 E_1 连续分布的介质中的应力分布来对 E_1 施加作用力，显然，只要我们知道任一闭合表面 s （它将 E_1 和 E_2 完全分开）上的每一点的应力，我们就可以完全确定 E_2 作用在 E_1 上的力。”

Friedrich Herrmann

3. 26 闭合的 B 场线

主题：

通常我们认为磁场线是闭合的：

“……电场和磁场的区别在于，电场线总是从正电荷出发终止于负电荷，而磁场线在空间没有出发和终止的点，因为不存在磁单极子。相反，磁场线是闭合的。”

“电流的磁场的场线总是闭合的，而静电场的场线从正电荷（源）发出，终止于负电荷（壑）。”

缺点：

1. 一般来说，我们所说的磁场线是指磁通量密度 B 的场线。场线有起点和终点并不是电场特有的性质。正像静电场的 E 场线有起点和终点一样，静磁场的 H 场线也有起点和终点：它们起始于磁体的北极，终止于磁体的南极。

2. B 场是无散度的场并不意味着 B 场线是闭合的。实际上，一般情况下它们是不闭合的。方程

$$\text{Div } \mathbf{B} = 0$$

仅仅告诉我们，场线没有起点和终点。

首先，当我们说场线是闭合的，这意味着什么？也许，听到这句话我们都会这样想象：有一电流在一确定的路径（电线）中流动。有一任意选取的场线，它环绕着这个电流。从这一场线的某一点出发，沿着场线从电流周围绕一周，我们又回到了原来的起点。

然而，在物理学上没有理由说，绕一周后场线一定是闭合的。实际上，这种情况出现的机会是很小的。作为例外，如果出现这种情况的话，其原因也不是物理学的，而是几何学的。在有限长度的直导线的情况中，或在完全限定在一个平面内的电路的情况中，确实会出现这种情况。与这种情况相比具有最小偏差的情况是，场线在绕一周后与原来的出发点不吻合。我们也许会认为，圆柱形或环形螺线管的磁场线是闭合的。但实际上它们并不如此^[1]。线圈不可避免的螺旋性是导致这种情况的原因。

图 3-26-1 给出了直线电流和圆形电流。可以看出，它们的场线总体上是不闭合的。我们来考虑在环所在平面内的场矢量。在环的内部，圆形电流和直线电流的场的叠加结果是形成一个左旋的场；在环的外部，它们叠加的结果是形成一个右旋的场。显然，它们的场线是不闭合的。

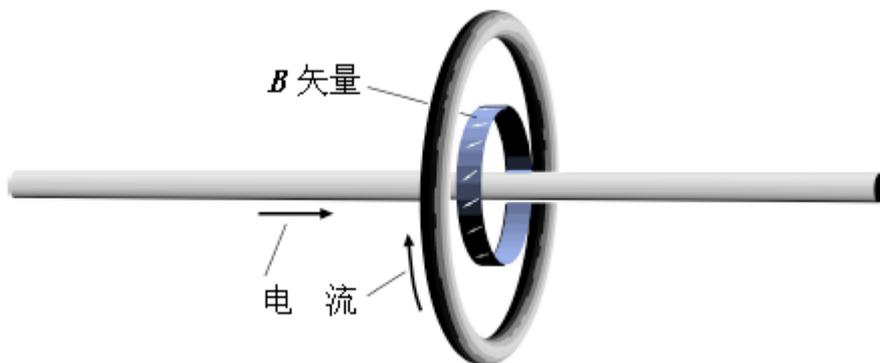


图 3-26-1 直线电流和圆形电流。在环的内部场线是左旋的，在环的外部场线是右旋的。

图 3-26-2 给出了场线不闭合的另一个例子。将一个均匀磁化的弹性圆柱形永久磁体沿着圆柱形的轴线扭转，然后将其扭曲成一个闭合的环。这时，它的磁化线和 B 线将螺旋地绕着环的轴（也就是原来圆柱形的轴），而永不闭合。

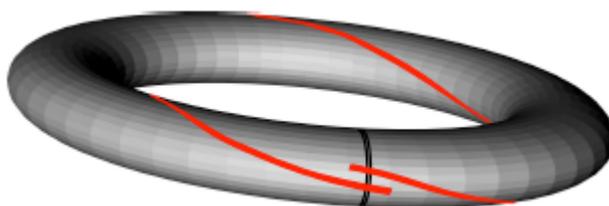


图 3-26-2 一个弹性永久磁体。它开始时是圆柱形的，后来被扭曲成一个圆环。

磁场（如地球的磁场或宇宙中的磁场）在本质上是很复杂的，以至于没有人会怀疑其场线是闭合的。

另一个在技术上的例子是聚变反应堆的磁场。它的场线在沿电流绕一周后离原来的出发点相差很远一段距离。

Joseph Slepian 于 1951 年在美国物理学杂志（American Journal of Physics）上发表了一篇很好的文章^[2]。在这篇文章中他证明了， B 场线总体上是不闭合的。在这篇文章中没有公式，也没有一幅图。在后来的几十年里，又有几篇文章论述了这个主题^[1,3]。

历史：

1. 在中学和大学的课程里，我们通常只涉及简单的磁场：条形磁体的磁场、马蹄形磁

体的磁场、直线电流的磁场、环形电流的磁场或螺线管内部的磁场。一个理想的条形磁体（即完全均匀磁化）的 B 场线或理想的马蹄形磁体的场线确实是闭合的。理想的直导线的磁场或理想的圆形导体的磁场也确实是这样的。对于螺线管的磁场线，仅仅是近似地闭合。我们所讨论的大部分磁场是上述这样一些磁场。这一事实可以用来解释为什么磁场线总是似乎合理地被认为是闭合的。

2. 场线是描述场强分布的几何工具。然而，学生们总是把它们当作一种物理实在。如果我们把场线想象为物理实在，那么关于场线是闭合的观点就有支持的说法了，即使它沿着带电导体一周后仍不闭合。我们来讨论一根细线，而不是场线。有人做了一根弯曲的细线，并保证这根细线没有起点和终点。在这一情况下，细线形成一个或几个闭合回路这一结论是正确的。为什么这一结论对于磁场不适用呢？原来，场线不是物理实在，而是数学概念，是线。对于场线，我们能说的最理想的情况是，场线的终点几乎接近起点。

建议：

不要说场线是闭合的。我们最多可以说场线没有起点和终点。然而，我们也只能尽可能地去消除这种说法所带来的问题，因为问题的根源是很深的。这一问题所产生的原因是我们错误地将场线当作物理实在。

因此，在引入场的概念时最重要的一点是，我们不要先用场线来描述场。我们最好先用灰色的阴影来表示场的能量分布，如图 3-26-3a 所示。

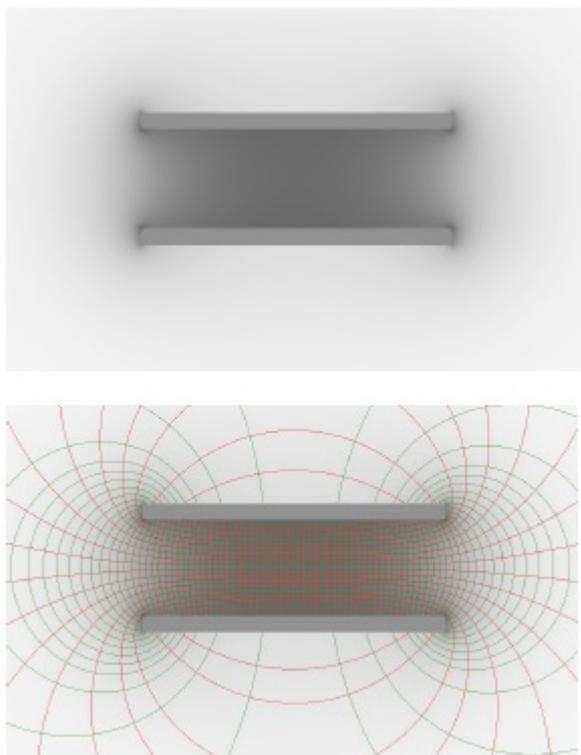


图 3—26—3 (a) 用灰色的阴影表示螺线管的磁场；(b) 用灰色的阴影、场线和场面表示螺线管的磁场。

只有这样，我们才能表示出场在各点都有各自优先的方向，即它不是各向同性的。为了图示这一事实，我们必须画出矢量箭头。在实际中为了方便地表示场，我们画场线，同时也画场面，如图 3—26—3b 所示。所谓场面，就是垂直于场线的面。对于保守场，它就是等势面。对于麦克斯韦来说，在他的所有图中势必要表示出场线和场面^[4]。场线和场面都有简单的直观意义：在场线方向上，场处于拉伸应力状态；在所有垂直于场线的方向，即在场面内的所有方向，场处于压缩应力状态。懂得了这些，我们就不再会把场线理解为实际穿过场的细线，而把它们理解为用来表示场中的力学应力状态的图示工具。

[1] *M. Lieberherr*: The magnetic field lines of a helical coil are not simple loops, *Am. J. Phys.* **78**(2010), S. 1117-1119

[2] *J. Slepian*: Lines of Force in Electric and Magnetic Fields, *Am. J. Phys.* **19**(1951), S. 87-90

[3] *M. Schirber*: Magnetic Fields in Chaos, *Phys. Rev. Focus*,
<http://focus.aps.org/story/v24/st24>

[4] *J. C. Maxwell*: *Lehrbuch der Electricität und des Magnetismus*, Verlag von Julius Springer, Berlin 1838, Tafeln XII bis XXI

Friedrich Herrmann and Ralph von Baltz

3. 27 磁单极子和磁荷

主题

自然界中不存在携带磁荷 (magnetic charge) 的粒子。这就是说, 自然界中不存在磁单极子 (magnetic monopole)。这样, 就引出了一个争议: 物理量“磁荷”或“磁极强度”(magnetic pole strength) 是不存在的。

缺点

我们先来弄清楚以下两个概念:

磁荷密度 ρ_m :

$$\mu_0 \operatorname{div} H = \rho_m \quad (1)$$

因此, 磁荷密度描述了 H 场的正源(source)。因为,

$$\mu_0 \operatorname{div} H = -\operatorname{div} M \quad (2)$$

它也表示 M 场的负源 (sink)。磁荷密度的体积分叫做磁极强度、磁荷或磁量 (amount of magnetism)。

磁单极子:

这个词的运用总是不统一的。

当我们说“磁单极子不存在”时, 它被当作一种粒子, 即携带磁荷 (或磁极强度不为零) 的物体。这种“磁单极子”至今还未找到。

但是, 这个字又被当作磁“库仑场”(即磁场) 源的名称来用。所谓磁“库仑场”, 就是场强 H 随距离 r 的平方而减小的磁场。这种场可以用一些近似的方法来获得。长而薄的条形磁铁两极附近的场就是这种场。

为了避免混淆, 下面我们把带有磁性的粒子不再叫做“磁单极子”, 而叫做“磁单粒子”(monopole particle)。

人们通常用找不到磁单粒子的事实来证明物理量“磁荷”是不存在的。然而, 为了解释这种粒子, 我们需要先引入物理量磁荷, 比如用 (1) 式来引入。

我们不可能通过对自然界的观察来证明物理量是存在的还是不存在的。物理量是人们创造出来的^[1]。如果一个物理量比较好, 可以用来描述自然现象, 我们就会用它。实际上, “磁荷”是一个很好的量。它在下列情况中是有用的:

- 描述磁单粒子是不存在的这一事实;
- 描述磁极带有等量而相反的磁荷这一事实;
- 得出磁极的库仑定律。

当然，不引入磁荷也是可以的。然而，如果这样的话，“不存在携带磁荷的粒子”这句话就得这样说了：“不存在这样的粒子，对它所在空间的磁场强度的散度进行体积分时，其值不为0。”同样，我们也可以不引入电荷。显然，我们是不会这样做的。

历史

磁荷是一个由来已久的物理量。它有好几个不同的名称。在库仑时代，人们把磁想象为由两种磁液产生的（类比于由两种电液产生的电现象）。

对于电液和磁液，库仑发现相应的力遵循平方反比定律^[2]。

麦克斯韦把这个量叫做“极强度”（strength of pole）^[3]：

同极之间在它们的连线上相互排斥，排斥力的大小等于两个极的极强度的乘积除以它们之间距离的平方。

在下一页，他引入了“磁量”这一术语，并指出：

在磁铁的一个极的磁量总是与另一个极的磁量大小相等，符号相反。更一般地说：每个磁体的总磁量（代数和）为零。

后来，波恩（Max Born）也提出了磁量这一术语。

尽管磁荷的库仑定律比电荷的库仑定律更容易用实验加以验证，但磁荷这个量到今天几乎彻底从教科书中消失了。同时，磁场强度这个量也被边缘化了。如果不用磁场强度来描述磁场，方程

$$\mu_0 \operatorname{div} H = \rho_m$$

就不可能帮助我们获得关于磁荷的感觉。

建议

在中学里：在静磁学一开始就象在静电学中引入电荷一样把磁荷作为一个独立的广延量来引入。磁铁的总磁荷为零。

在大学里：先介绍方程

$$\mu_0 \operatorname{div} H = -\operatorname{div} M ,$$

再用下式引入磁荷：

$$\rho_m = \mu_0 \operatorname{div} H .$$

[1] *G.Falk und W. Ruppel: Mechanik, Relativität, Gravitation, Springer-Verlag, Berlin 1973, p.2.*

[2] *C. A. Coulomb: Second Mémoire sur l'Électricité et Magnétisme, Où l'on détermine,*

suivant quelles loix le Fluide magnétique, ainsi que le Fluide électrique, agissent, soit par répulsion, soit par attraction. Mémoires de l'Academie Royale des Sciences, 1785, p. 593.

[3] *J. C. Maxwell*: A treatise on electricity and magnetism, Volume two, Dover Publications, Inc., New York, 1954, p. 3-4.

[4] *M. Born*: Die Relativitätstheorie Einsteins, Heidelberger Taschenbücher, Springer-Verlag, Berlin 1969, p. 133.

Friedrich Herrmann

3. 28 等效电阻

主题

如果将几个电阻为 R_1 、 R_2 、 R_3的电阻器串联，则这个系统的总电阻或等效电阻为

$$R = R_1 + R_2 + R_3 + \dots$$

如果将它们并联，则其等效电阻为

$$\frac{1}{R} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} + \dots$$

缺点

自从电学开始出现在中学物理教科书中以来（也就是 150 年以来），上面这两个公式就成为物理教学大纲的一部分了。

当然，这一点也没错。然而，我们可以提出以下几个问题：为什么这些内容会成为物理教学大纲中的规定内容？它们为什么会成为这样一种标准的公式？为什么我们会花整章篇幅来讲述它们？有人也许会这样回答：因为它们很重要。

然而，如果我们认为它们很重要，以致于必须在物理课堂中广泛地加以讨论，那么，为什么对于大量与此相类似的公式我们没有这样处理呢：串、并联电容器和电感器的公式、胡克弹簧和机械阻尼器（减振器）的公式、热阻器和液阻器的公式？这些公式的数学结构跟电阻器公式的相同。难道热阻没有跟电阻一样重要？难道电容器没有跟电阻器一样重要？

如果我们把上述公式看作是节点定理和回路定理的推导结果，我们可以看出另一个结论。

如果将电压作为两个电势值的差来引入，回路定理就变得很明显了。这样，回路定理就可以这样通俗地来比喻：如果我们乘电梯先上升 2 楼，然后再上升 3 楼，那么我们一共上升了 5 楼。我们可以说：回路定理之所以成立，是因为我们所涉及的是一个保守场。（然而，我们最好不要以这样吓人的方式来表达这个定理。）

节点定理是因为流动着的量的守恒所导致的直接结果。对于所有守恒量的流（能流、电流、质量流和动量流），这个定理总是成立的。如果我们只对电荷运用节点定理，这是很可惜的。

历史

上述这两个定理早在 1845 年（即在电学刚开始时）由基尔霍夫给出的（当时的形式跟我们现在的稍有不同）。当时，所有定律都是新的，因而它们显得很不平凡。为什么这两个定理直到今天还幸存下来，其原因是由于它们有着自己的名字，即基尔霍夫定律（这跟前面提到的类似的定理形成明显对照）。

建议

把电路中电阻器的不同连接作为电学中的许多问题之一来处理，这是无需争议的。然而，我们用不着给处理的结果冠以定理或定律这样的名称。对于其他电器（如电容器和电感器），对于其他流（如能流、动量流、热流和水流），我们也会涉及同样的问题。

最后，我为物理教学大纲所推崇的原理之一是：当我们向物理教学大纲（或物理课程，或物理教科书）引入一个新的主题时，我们总是要先看一下相应的竞争主题（*competing subjects*）是什么。这些竞争主题跟所要引入的主题由于某种类比是相似的。只有当你找到了首次引入这一主题（而不是引入其竞争主题）的理由，这一主题才可被接受。这一方法在其他许多地方证明是很有用的。

Friedrich Herrmann

3. 29 电解质和掺杂半导体

主题

我们知道，电解质是这样一种物质，当有电流通过这种物质时，这种物质会离解。

“电解质是这样一种物质，它至少会部分地电离，从而导电和离解。”

“象盐酸这样会导电和离解的溶液叫电解质。”

“液体会导电，也不会导电，即会离解，也不会离解。会导电的液体叫电解质。它们被电流所离解。”

缺点

当物质被用电解方式离解时（这个过程叫做电解），电流通过这种物质，物质处于溶液或熔解状态。这种物质叫做电解质。在这种情况下，这一名称是合理的（溶液的希腊文是 λύσις，拉丁文是 lysis）。

如果这一名称指原电池的电极间的介质，这一名称就不合理了。这是因为，在这种情况下，其目的不是离解物质。在电极之间的溶液的作用是作为一种“选择性导体”：电解质对某种离子必定是导体，对电子必定是绝缘体。这个不好的名称也许是学生很难理解原电池的工作原理的原因之一。

下面我们来简要说一下原电池的工作原理。

为了产生电势差，我们将利用两种反应物反应时产生的**化学势差**。我们把反应方程写为



原电池中的这两种反应物是部分分离的，因此刚开始时没有发生反应。A 只有被分解为 A 离子和电子这两部分时，即发生以下反应时才能到达 B：



这两种物质分两条不同的路径从 A 到达 B。A⁺离子通过离子导体（电解质）到达 B，电子通过外电路（通常是铜导线）到达 B。在外电路接有能量负载。

对于电解质，它是 A⁺离子的导体，是电子的绝缘体。

太阳能电池的工作原理也是这样的。半导体的 n 型掺杂部分是电子的导体，是空穴的绝缘体；p 型掺杂部分是空穴的导体，是电子的绝缘体。在光的作用下产生高浓度的自由电子和空穴。这样，它们有从高化学势向低化学势流动的趋势，即有离开所产生的地方的趋势。电子只有通过 n 型掺杂材料才能流动，空穴只有通过 p 型掺杂材料才能流动。这样，

我们就可以利用材料的选择性导电率。由于 n 型和 p 型掺杂材料的作用与原电池中的电解质的作用是相同的，因此，电解质这一名称是可以省的。

历史

由于电化学这门学科有着自己独特的原理，因而就产生了自己独特的术语。这些术语对于这方面的专家来说是很有用的，但对于初学者来说却是一个不必要的学习障碍。

建议

把两个电极之间的物质作为离子的导体和电子的绝缘体来介绍。这正象外电路中的铜导线是电子的导体和离子的绝缘体一样。相应地，我们可以把 n 型掺杂半导体作为电子的导体和空穴的绝缘体来介绍，类似地，把 p 型掺杂半导体作为空穴的导体和电子的绝缘体来介绍。这样，电解这一术语就不用提及了，电解质这个词也没用了。

F. Herrmann

3. 30 电磁学中的类比关系

主题

电磁学具有丰富的结构、对称性和类比。它们表现在许多现象中，通过理论描述变得更加明显。下面是几个例子：

- 库仑发现了现在用他的名字命名的关于电荷和磁荷的定律。
- 一个带电体会受到两个力。这两个力通常被认为具有类比关系：一个力正比于电场强度 E ，另一个力（洛仑兹力）正比于磁通量密度 B 。
- 在电工学中，电容器和线圈（以及电容 C 和电感 L ）之间具有类比关系。这种类比关系可以在振荡电路中找到。

缺点

这里我们所讨论的问题是，物理量之间的类比和它们的数学关系之间的类比都是可以描述出来的。如果我们把一个方程中的物理量根据一定的法则用别的物理量来取代，我们将得到一个新的并且是正确的方程。

有时会隐藏这样的问题，在给定的物理学领域根据不同的描述方法可能得出一些相互竞争的类比。在电磁学中就有这样的例子。在上面提到的这些类比中就是一些竞争类比（competing analogy）。如果我们不意识到这里会有不同的类比，就会遇到一些问题。电场强度的磁类比是什么？是 B 还是 H ？有时好象是 B ，有时好象是 H 。人们有时甚至似乎从意识形态的角度来揭示其本质：“实际的”或“真实的”磁场是 B （或 H ）。在有些物理教科书中干脆把磁通量密度重新命名为磁场强度。

如果我们认识到描述的方法是多元的，这个问题就能得到解决。这样，问题就不再是“哪个类比是正确的？”，而变为“对于给定的问题哪个类比是最合适的？”。

我们用三张表来列出电磁学中的三种类比关系。每一张表都有一一对应的物理量和它们的关系式。

1. $\vec{E} - \vec{H}$ 类比

这种类比体现在麦克斯韦方程组中，见表 1。

这种类比在处理静磁学问题时特别有用。 \vec{H} 场有源和汇（sink）。因此，画静磁学中的 \vec{H} 场线图和画静电学中的 \vec{E} 场线图一样简单。大家都知道，学生（不仅是学生）在画磁场线时会感到很困难^[1]。

表 1. $\vec{E}-\vec{H}$ 类比。在这里，自由电荷和传导电流没有相应的磁类比。

描述电矢量场的物理量	描述磁矢量场的物理量
电场强度 \vec{E}	磁场强度 \vec{H}
电通量密度 \vec{D}	磁通量密度 \vec{B}
电极化强度 \vec{P}	磁化强度 \vec{M}
电荷	磁荷
总电荷 Q	总磁荷 Q_m
电荷密度	磁荷密度
总电荷密度 ρ	总磁荷密度 ρ_m
自由电荷密度 ρ_F	自由磁荷密度 $\rho_{mF}=0$
极化电荷密度 ρ_P	极化磁荷密度 ρ_{mP}
麦克斯韦第一方程	麦克斯韦第二方程
$\text{div}\vec{D} = \rho_F$	$\text{div}\vec{B} = \rho_{mF} = 0$
$\text{div}\vec{P} = -\rho_P$	$\text{div}\vec{M} = -\rho_{mP}$
$\epsilon_0 \text{div}\vec{E} = \rho_F + \rho_P$	$\mu_0 \text{div}\vec{H} = \rho_{mF} + \rho_{mP} = \rho_{mP}$
电流密度	磁流密度
传导电流密度 \vec{j}_L	传导磁流密度 $\vec{j}_{mL} = 0$
位移电流密度 $\vec{j}_V = \dot{\vec{D}}$	位移磁流密度 $\vec{j}_{mV} = \dot{\vec{B}}$
麦克斯韦第三方程	麦克斯韦第四方程
$\text{rot}\vec{E} = -\vec{j}_{mL} - \dot{\vec{B}} = -\dot{\vec{B}}$	$\text{rot}\vec{H} = \vec{j}_L + \dot{\vec{D}}$
库仑定律	库仑定律
$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$	$\vec{F} = Q_m \cdot \vec{H}$
$ \vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$	$ \vec{F} = \frac{1}{4\pi\mu_0} \frac{Q_{m1} \cdot Q_{m2}}{r^2}$
能流密度 $\vec{j}_E = \vec{E} \times \vec{H}$	

2. $\vec{E}-\vec{B}$ 类比

这种类比基于电动力学的四元矢量(four-vectors)表征法。这里，四元矢量中的时间分量对应于空间分量。正象时间对应于空间，或能量对应于动量，电荷密度对应于电流密度，电势 Φ 对应于磁矢势 \vec{A} 。这两种势的空间导数（即 Φ 的梯度和 \vec{A} 的旋度）分别是矢量 \vec{E} 和 \vec{B} 。由此，我们得到表 2 中关于力的表达式。

表 2. $\vec{E} - \vec{B}$ 类比

电场源	磁场源
电荷密度 ρ	电流密度 \vec{j}
场强	场强
电场强度 \vec{E}	磁通量密度 \vec{B}
势	势
电势 φ	磁势 \vec{A}
势的导数	势的导数
$\vec{E} = -grad\varphi$	$\vec{B} = rot\vec{A}$
力	力
$\vec{F} = Q \cdot \vec{E}$	$\vec{F} = I \cdot (\vec{s} \times \vec{B})$ (洛伦兹力)
$ \vec{F} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{Q_1 \cdot Q_2}{r^2}$	$ \vec{F} = \frac{\mu_0}{2\pi} \frac{I_1 \cdot I_2}{r} \cdot L$ (两根平行通电导线间)

3. $U-I$ 类比

这种类比在电气工程中特别有用。它是 $\vec{E} - \vec{H}$ 类比的另一种形式。然而，这里的对应关系具有交叉性；电荷不是与磁荷对应，而是与磁通量对应（见表 3）。

表 3. 在电气工程中很重要的一种类比。在这种类比中，不但物理量之间和物理公式之间具有对应关系，电路元件之间和电路元件布局法则之间也具有对应关系。

物理量
电荷 $Q \Leftrightarrow$ 磁通量 Φ
电压 $U \Leftrightarrow$ 电流 I
电容 $C \Leftrightarrow$ 电感 L
电阻 $R \Leftrightarrow$ 电导 G
能量 $E \Leftrightarrow$ 能量 E
能流 $P \Leftrightarrow$ 能流 P
公式
$I = \frac{dQ}{dt} \Leftrightarrow U = -\frac{d\Phi}{dt}$

$P = U \cdot I \Leftrightarrow P = U \cdot I$
$Q = C \cdot U \Leftrightarrow \Phi = L \cdot I$
$E = \frac{C}{2} U^2 \Leftrightarrow E = \frac{L}{2} \cdot I^2$
电路元件
电容器 \Leftrightarrow 电感器
稳压电源 \Leftrightarrow 稳流电流
电路元件布局法则
串联 \Leftrightarrow 并联
短路 \Leftrightarrow 开路

这种类比跟前面提到的两种类比有明显的不同。在这里，一个电路对应另一个电路；表格中的类比可以从左向右进行，也可以从右向左进行。有时，我们把这种类比关系叫做**对偶关系**。例如，我们可以将电压替换为电流，也可以将电流替换为电压；或可以将电容器替换为线圈，也可以将线圈替换为电容器；或可以将并联电路替换为串联电路，也可以将串联电路替换为并联电路。

实际上，电通量与磁荷类比是符合逻辑的。相应的电路元件照理应该是“磁容器”（magnetic capacitor）和“磁线圈”。在这个“磁线圈”中流动着磁荷。由于没有自由磁荷和没有传导磁流（但有束缚磁荷和位移磁流），这两种元件是没有意义的。

历史

$\vec{E} - \vec{H}$ 类比是最明显的类比。这是可以直接从经典的麦克斯韦方程组中直接得到的类比。相对论和四元矢量的描述方法导致了 $\vec{E} - \vec{B}$ 类比的出现。第三种类比的出现是由于它在电工技术中的广泛应用；另外，也由于它是更广泛的电学和力学间的类比的基础（在这种类比中，电容器与弹簧对应，线圈与惯性物体对应，电阻器与阻尼器对应^[2]）。

人们长期来有着这样的争论： \vec{H} 和 \vec{B} 这两个物理量中哪个最适合于描述“真正的”磁场？引起这个争论的原因也许有以下两个方面：

1. 人们可能只知道其中一种类比，而不知道其他两种类比，或不相信其他两种类比。
2. 人们把物理系统“场”与物理量“场强”混同起来了。他们忽视了这样的事实：物理量是人们创造出来的。

从下面这段话中我们看得出来，甚至连伟大的德国物理学家索末菲(A. Sommerfeld)也这样认为，在诸多方法中选择其中一种方法时，我们所关心的是哪一种方法是正确的，

而不是哪一种方法对解决问题更合适^[3]：

“法拉第-麦克斯韦电磁感应定律表明，电场强度 \mathbf{E} 和磁感应强度 \mathbf{B} 是描述强度的物理量。因此， \mathbf{B} （而不是 \mathbf{H} ）应该叫做磁场强度。……从相对论中也可清楚地看出来， \mathbf{B} 对应于 \mathbf{E} ，而 \mathbf{H} 对应于 \mathbf{D} 。这是因为，在六元矢量（反对称张量）中， $c\mathbf{B}$ 和 $i\mathbf{E}$ 在一边，而 \mathbf{H} 和 $-ic\mathbf{D}$ 在另一边。”

建议

1. 首先，不要断言哪个量“是”“真正的”场。
2. 告诉学生，在电磁学中不至一种类比。

参考文献

- [1] F. Herrmann: *Historical burdens on physics*, 43, The field of permanent magnets
- [2] F. Herrmann: *Historical burdens on physics*, 60, Inductivity
- [3] A. Sommerfeld: *Elektrodynamik*, 4. Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig, 1964, Vorwort, S. VI

F. Herrmann

第四章 热力学

4. 1 力学与热力学

主题：

力学是物理学中最重要的分支学科。它是物理学的基础。相反，热力学是不大重要的分支学科之一。这是一种普遍的观念。我们可以在课程和教材中看到这种情况。在一个为中学物理教师开设的学位课程中，每周有 6 个力学面授课时，但只有 2.5 个热力学面授课时。这个比例跟中学物理教科书中力学和热力学的页面数的比例相同，在大学物理教科书中也这样。

人们经常说，力学特别重要。在中学物理教科书中，我们可以看到关于公式 $F=ma$ 的说法：“这确实是本书中最重要的内容。自从 1686 年以来，这个公式改变了这个世界。”

缺点：

不仅热力学在物理课程中所占的内容比力学少，而且所提供的热力学课程也通常没有全部完成。根据学校的课程安排，热力学通常被安排在 11 年级这个学年的末尾，即力学之后。然而，由于在学年结束之际学校干扰比较多，热力学也就成了牺牲品。在大学里情况也是如此。热力学通常与光学合为一个学期的课程。学生们先学光学，剩下来一点点时间再学热力学。结果，许多学生在离开中学和大学时对热力学一点也不知道。

从现代的观点来看，力学是不应该有这样高的地位的，而热力学也不应该有这么不好的名声。

为什么 $F=ma$ 这个公式如此重要？它本质上就是牛顿第二定律，即 $F=dp/dt$ ，它表明动量是守恒的。然而，并不是只有动量是守恒的，能量、角动量和电荷也都是守恒的。并且，这个系列的物理量也应该包括熵：熵可以产生，但不会消灭。

历史：

这个原因很难说清楚。我们还是引用恩斯特·马赫 (Ernst Mach) 在 1883 所说的两段话：

“十八世纪法国的百科全书派们认为他们可以用物理学-力学的方法来解释整个自然界，拉普拉斯认为只要知道初始的位置和速度就可以预测这个世界的未来。这种过高地估计物理学和力学的观点在十八世纪是可以原谅的。这种观点确实是崇高的、有启发性的和令人欣赏的。

但是，一个世纪过去了，我们已经变得更高明了，百科全书派们的观点对我们来说是一种机械式的神话，类似于古代的灵物论宗教 (animistic religion)。这两种观点都是夸大

的和片面的。”

建议：

由于长期来的教育传统，要改变上述观点是不容易的。我们可以从减少运动学的内容开始，来重新建构力学。

Friedrich Herrmann

4. 2 状态变量

主题:

在介绍热力学第一定律时，我们通常要强调内能是一个状态变量。在介绍熵这个物理量时，我们也要强调它是一个状态变量。在中学的教科书或文献中，把压强也叫做状态变量。

缺点:

状态变量这个名称是用来说明在某一状态下的某一物理量具有确定的值。然而，除了功和热量这两个物理量外，所有物理量其实都是状态变量。如果我们只对几个物理量强调它们是状态变量，那么就会形成这样一个错觉：被强调为状态变量的物理量不是正常的物理量，而是特殊的物理量。对于所规定的状态下某一物理量具有一个确定的值这一事实，其实是人们所预料的状态的特征。如果我们真的要强调的话，我们应该强调功和热量这两个量。我们是不会预料这两个量是状态变量的。

历史:

内能、熵和压强这三个量是有点不同的。

能量守恒定律的第一个表达形式是热力学第一定律。这个定律把过程量功和热量与内能联系起来。科学家们当时指出内能是状态量，目的是为了强调在热力学第一定律中所涉及到的三个量中其中一个量是状态量。显然，两个非状态量之和是一个状态量。

现在我们来谈熵这个量。从热力学产生的那时起，人们就开始设想如何定量地测定我们在日常生活中所说的热(heat)。不用说，这是一个状态量。在十八世纪末，布莱克(Joseph Black)引入了这个量。从现代物理学的观点来看，布莱克所说的热正好就是熵。然而，从十九世纪中叶开始，热被重新定义为一种能量的形式，即被定义为一个非状态量。这样，布莱克的热这个概念在物理学中消失了。直到克劳修斯引入熵这一概念后它才被重新提了出来。由于克劳修斯用热这个非状态量来定义熵，因此，有必要强调熵是一个状态量。直到很久以后人们才认识到新引入的熵这个概念基本上等同于布莱克和卡诺那时所提到的热这个概念。^[1, 2]

我们通常借助于力来引入压强。力总是一个物体施加给另一个物体的。显然，力这个概念是把力的相互作用理解为超距作用的那个时代的产物。结果，学生自然地要去寻找施加压强的那个物体和受到压强的那个物体。为了消除学生的这一想法，我们就强调，压强

是一个状态量。如果一开始不是这样不恰当地引入压强这个概念，我们就不需要这样来强调。^[3]

建议：

一个小的建议：我们不要说内能和熵是状态量（因为这在任何情况下都是很清楚的），而要强调功和热量是两个特殊的物理量，它们与其他物理量在这点上不一样。

一个大的建议：我们根本就不引入功和热量这两个量。老师们也许一开始会觉得丢掉了重要的东西。但后来我们很快会发现，我们什么东西都没有丢，相反，我们避开了一些概念上的问题。

我们也可以毫不犹豫地给压强去掉“状态量”这一名称。我们不要借助于难懂的力这个概念来引入压强这个简单的概念，我们可以把压强当作一个独立的量来引入。例如，一开始我们可以先引入压强差：压强差是引起水流或气流的原因。这样，我们就不再需要向学生提醒压强是一个状态量了，因为他们已经不再会对此产生怀疑了。

参考文献

[1] Callender, H. L.: The Caloric Theory of Heat and Carnot's Principle. – Proc. Phys. Soc. London 23 (1911). – S. 153: “最后，在 1865 年，当热质的重要性被更加充分地认识到时，克劳修斯给它取了一个名称，叫做“熵”，并把它定义为 dQ/T 的积分。这一定义仅仅会引起数学家们的兴趣。对于卡诺，公正地说它就是热质，我们可以直接用他的公式来定义它……，而这样定义的熵对小孩来说也能理解。即使对数学家来说，他们只要把热质想象为一种像电一样会流动的东西，一种在摩擦或其他不可逆过程中会产生出来的东西，他们也会认识到这一点。”

[2] Job, G.: Neudarstellung der Wärmelehre – Die Entropie als Wärme.- Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main 1972.

[3] Herrmann, F.: Einige Vorschläge zur Einführung des Drucks.- In: Praxis der Naturwissenschaften, 5(1997). –S.37

Friedrich Herrmann

4. 3 理想气体定律的名称

主题:

方程 $pV=nRT$ 有各种不同的名称: 气体方程、普通气体方程、普适气体方程、理想气体热状态方程, 等等。由于这个方程与两个以上的变量有关, 我们比较感兴趣的是其中两个量之间的关系, 而使其他量保持不变。我们知道, 相应的关系式都有一个特别的名称。 p 和 V 之间的关系式叫做玻意耳定律 (Boyle's law), V 和 T 之间的关系式叫做查理定律 (Charles' law) (译者注: 又叫查理-盖-吕萨克定律。参见 J. Thewlis, Concise Dictionary of Physics and Related Subjects, Pergamon Press, 1979。在我国的教材中叫盖-吕萨克定律), p - T 成正比的关系式叫做阿蒙登定律 (Amontons' law) (译者注: 在我国的教材中叫查理定理), V - n 关系式叫做阿伏伽德罗定律 (Avogadro's law)。在法语和德语文献中玻意耳定律又叫做玻意耳-马略特定律 (Boyle-Mariotte's law), 查理定律又叫做盖-吕萨克定律 (Gay-Lussac's law)。

缺点:

1. 方程的重要性可以通过一个恰当的名称来强调。这种名称也有利于对方程相关问题的说明。气体方程 (我们暂且用这个名称) 是重要的。假定相应的物质被足够地稀释, 或其温度很高, 这个方程对物质来说在很大的范围内有效。这个方程不仅可以应用于通常意义上的气体 (如我们周围的空气), 也可应用于稀释溶液中的溶质, 或在太阳中心区域的压缩等离子体。因此, 这个方程适合于只取一个名称。另一个问题是, “普通” 或 “普适” 这些修饰词也是不恰当的, 这是因为这种分类是很难分到顶的。

2. 用科学家的名字来命名方程是很好的传统。然而, 正像气体方程的情况所告诉我们的那样, 这样做有时也会显得过分。在我们所讨论的情况中, 有六位研究者的名字单独地作为每个方程的名称。从街道名称中我们也可以看出用科学家的名字来命名方程所带来的问题。一条小巷用某人的名字来命名。后来这条小巷变成了一条大街。这样, 他就得到了意想不到的荣誉。相反, 有些大科学家, 如莱布尼兹或笛卡儿, 从来没有对一个重要的公式作过贡献。对于另外的科学家, 他们由于一些不大重要的工作也获得了荣誉, 例如惠更斯由于提出基波概念而获得了荣誉, 法拉第由于发现微弱的法拉第效应或奇特的法拉第杯而获得了荣誉。

3. 让我们再回到气体方程。以下是与通常形式的气体方程等效的其他不同形式的方程:

(a) 当 $T = \text{恒量}$ 时, $E(V) - E(V_0) = 0$, 即当温度不变时, 气体的能量与其体积无关。

(b) 当 $T = \text{恒量}$ 时, $S(V) - S(V_0) = nR \ln(V/V_0)$, 即当温度不变时, 气体的熵与其体积成对数关系。

(c) 当 $T = \text{恒量}$ 时, $\mu(p) - \mu(p_0) = RT \ln(p/p_0)$, 即当温度不变时, 气体的化学势与其压强成对数关系。(根据这个方程, 我们容易得到质量作用定律和气压公式。)

上述三个公式不需要任何其他物理公式就可从“气体方程”中推导出来。因此, 它们都可以叫做“气体方程”。然而, 我们没有这样称呼它们。

4. 用气体方程或“热状态方程”(thermal equation of state) 我们无法完全来描述气体。要完全描述一种特殊的气体需要好几个方程。热状态方程是其中的一个。因此, 气体方程没有描述出理想气体的热(熵)的性质: 气体的温度与它的热(熵)容有什么关系? 对这个问题的回答需要用“熵状态方程”(caloric equation of state)。这个方程所描述的现象跟热状态方程所描述的现象一样引人注目。在传统的中学物理课程中, 这个方程没有被引起足够的重视。其结果是, 许多有趣的过程和现象(如蒸汽机和内燃机中的等熵过程, 或温度随高度的增加而降低的现象)在课堂教学中被忽视了。

历史:

1. 在一般形式下的气体方程和包含这一方程的各种比例关系式中, 我们可以发现不同时期对它的不同贡献。我们也可以发现, 在不同的国家的人们对它也持有不同的观点。

2. 热状态方程含有 p 、 V 和 T 这些容易测量的量。人们过高地评价了它的重要性。熵和化学势在很多过程中显得非常重要, 它们也很容易被测量。然而, 它们从来没有被普遍认识。

建议:

1. 尽量不要用科学家的名字来命名方程。对于气体方程, 我们建议不要给各种比例关系式取上各自的名称。我们还建议, 在给气体方程加上“普通的”、“普适的”、“基本的”等修饰词时要特别小心。

2. 如果学生已经学过对数知识, 我们可以让他们来讨论熵与体积的关系以及化学势与压强的关系。对于任何情况, 我们都要关注一下气体的“熵”的性质, 尤其要关注一下在等熵过程中温度和体积的关系。这一关系能帮助我们理解热机的工作原理和大气层中的温度分层。

Friedrich Herrmann

4. 4 待改进的温标

主题:

通常，在介绍温标时总要提到热膨胀，特别是气体的热膨胀。接着温度应该被定义为一个“绝对”量（即独立于任何测温物质的量） T ；但人们从来没有这样来定义温度，而是借助于对卡诺效率的推论，即 $\eta = (T_+ - T_-) / T_+$ 。这里， T_+ 和 T_- 是卡诺热机的工作温度。

缺点:

考虑到低密度气体的共同性质，我们可以对这种气体定义一个特别的温标 θ ，并忘掉其他所有测温物质。这样，我们就剩下两个温度量，即 θ 和 T 。然后，我们必须讨论对它们的定义、对它们的操作和它们之间的关系。结果是， $\theta \sim T$ ；因而，如果只需在一个温度点（如水的三相点）上有 $\theta = T$ ，则 $\theta \equiv T$ 。这个推导过程并不难，但很少有人提到它。

我们容易避开临时性的温标和卡诺循环，对熵 S 进行操作性定义（direction metrization）（译者注：metrization 这个词由作者 G. Job 造出来的。），然后来定义温度 T 。这里定义 T 的方法是，先从熵流 I_S 和能流 P 开始，然后运用公式 $P = T \cdot I_S$ 。容易证明，这样所定义的 T 具有所有我们所熟悉的温度的性质，也可以用普通的温度计测量出来。在给温度计标定刻度时，我们运用这样一个简单的事实，即对于低密度的气体，其内能仅仅由 T 决定，等容下的压强 p 一定与 T 成正比。这样，测量 p 就等于确定了温度。然而，我们可以毫不费力地知道简单的热机和热泵的物理原理。我们仅需要两、三行字和四则运算，同时运用标准的功和热的图线，以及几个变量的函数的微分和积分运算。

历史:

教科书总是严格按照历史发展的线索来编写。我们仍然在运用液体温度计。这一事实使得我们很自然地要用热膨胀来介绍温度的概念。由于气态方程是一个重要的教学目标，显然教学内容必须涉及到气体温标。另外，根据通常的看法，熵不包括在中小学教学内容中，因而也不包括在中小学教师的研究领域中。

建议:

我们只有抛弃对熵的偏见，问题才能解决。这些偏见已经存在一个半世纪了，它们已经成为物理学的基础知识。这些陈旧的观点把熵看作为一个复杂的状态变量，并以复杂的微积分的形式出现。以这种形式出现的熵使人们觉得无法通过直觉来理解它。

Georg Job

4. 5 液体和固体的热膨胀

主题:

液体和固体的热膨胀。

缺点:

物体的温度变化 10°C ，其热膨胀的效应有 1 密耳的数量级（译者注：1 密耳=0.001 英寸）。这样小的效应还有很多。在物理教学中，我们一般对初学者不讲这样小的效应。

为什么会有这个主题？原因也许是因为日常生活中的许多现象可以用液体或固体的热膨胀来解释。其中一个例子是水银温度计。然而，还有其他种类的温度计，这些温度计对我们来说也很重要，但我们并没有花时间来教给学生。

与这个主题有关的另一个例子是铁轨和桥梁的热膨胀。我们认为这个主题是有问题的。如果桥梁的热膨胀需要解释，那么其他物体（如房子、道路或甚至整个地球）难道没有热膨胀。在引用铁轨的例子时，我们必须向学生解释为什么以前铁轨之间留有间隙，而现在不留了。

另一种效应有时会与等压下的热膨胀混淆起来，这个效应就是等容下的压强变化。与热膨胀相比，这个效应更加明显。这两种效应（等压下的体积变化和等容下的压强变化）分别与两个独立的系数有关。液体和固体在等容下的压强变化一般不教给初学者。其理由好像是这个明显的效应不十分重要。每一个主题的重要性总是通过与其他许多主题的比较后显示出来的。有很多重要的主题，但我们并没有时间去一一讨论它们。

历史:

液体和固体的热膨胀这一主题占用了很多的教學时间。其原因并不是因为它在实际应用中的重要性，而是由于以前的水银温度计的标度。在热力学温标被引进物理学之前，温度是根据水银的热膨胀来定义的。但这个依据在今天已没有价值了。

建议:

对这个主题我们应尽量花较少的时间。如果将它完全删掉也不会给物理课程带来任何损害。

Friedrich Herrmann

4. 6 热量和热容

主题:

过程量 Q 出现在热力学第一定律中。这个量有很多名称：热量 (amount of heat)、热能 (heat energy) 或简称热 (heat)。热容 (heat capacity) C 被定义为提供给系统的热 ΔQ 和系统的温度增量 ΔT 的比值：

$$C = \Delta Q / \Delta T. \quad (1)$$

通常将 C 和质量 m 的比值定义为比热 (specific heat capacity) c 。我们在这里仅讨论热容 C 。

缺点:

“容”一字含有“储存”的意思。显然，将 Q 取名为储存着的“量”是有问题的。当我们把 Q 叫做热量或热能时，这就意味着 Q 对于处于某一状态下的系统有一确定的值，而这个值是属于某一空间区域的，换句话说， Q 是一个广延量，或叫做实物型量。实际上， Q 并没有这些性质。 Q 不是一个通常意义上的物理量，而 $dQ = TdS$ 是所谓的微分形式。因此，用它来测量系统所含的热是不可能的。当我们说“有热量 dQ 提供给系统”时，我们就不能说“系统所含的热因此而变化了 dQ ”。这看上去是一种诡辩，其实不是。

问题出在不恰当的名称上。热和热量这些名称意味着相应的量是一个广延量。但 Q 或 dQ 不是广延量。所以，最好不要给这个微分取专门的名称，也不要给它加专门的符号。这样就不用担心以后会带来什么问题。

现在我们明白了，如果系统所含的热不能用 Q 来表示，那么由 (1) 式所定义的量也不能理解为热容。

教过热力学的老师都知道，要让学生理解 Q 不是一个状态变量有多难。热容这个不恰当的名称又对此增加了麻烦。

历史:

“热”和“热容”是 18 世纪产生的概念。那时过程量 Q 还没有出现。当时“热”这一术语用来表示一个实物型的状态变量，这个量用来测量日常所说的热或热量。在 19 世纪中叶出现了能量这个概念。这时，热这个古老的状态量的名称被剥夺了。从此以后，热这个名称被用来表示能量形式了。由于这个新的热不再具有给定状态的值，它就被委婉地叫做过程量。

建议:

热力学教学应该从熵开始。熵可以这样来引入：它是一个用来测量我们通常叫做热的物理量。我们总可以这样来描述熵：在一个系统中含有（或储存着）多少熵。把 dS/dT 定义为相应的熵容（entropy capacity）是有意义的。熵容与“热容”的关系为：

$$C = T \cdot dS/dT.$$

（顺便提一下，熵容在有些固体物理学的教材中以索末菲常量这个名称出现^[1]。）

参考文献:

[1] Kubo, R. and Nagamiya, T. : Solid State Physics. –McGraw-Hill Book Co., New York 1969. –S. 94

Friedrich Herrmann

4. 7 热传递

主题:

从一本中学物理教科书中我们看到:

“能量以热的形式传递时可以有三种方式: 热传导、对流和热辐射。”

在一本科学百科全书中, 对热传递这一关键词是这样解释的:

“热传递可以以三种不同的方式进行: 热传导, 即热通过固体介质或静止流体流动; 对流, 即热通过运动的介质 (通常是流体) 传递; 辐射, 即热以电磁波的形式传递。”

缺点:

“在我们的园子里有树、有用的植物、蔬菜和杂草。”这句话是错的, 是混乱的。它意味着, 这四种植物分类代表了园子中的植物种类, 而实际上不是。园子中的植物不至这几种, 还有诸如胡萝卜或樱桃树等。

上面所引用的关于热传递的话也有相同的问题。这些话意味着, 任何热传递对应传导、对流或辐射中的一种, 或在某种程度上也意味着对应其中的几种。然而, 热传递现象不能根据这种分类方案来分类。

在举例前, 我们先来描述一下这三种热传递的特点:

1. 热传导。热和熵在物质中流动, 而物质没有运动。这种热传递是耗散的, 即有新的熵产生。这种热传递过程的“驱动力”是温度梯度。

2. 对流。热和熵被传到物质 (如空气或水)。物质运动时将熵带走。这种热传递不需要温度梯度。然而, 物质的运动需要其他的驱动力, 如压强梯度。

3. 热辐射。热通过电磁辐射传递。

现在我们容易看出, 这种分类是有问题的。对第一、二种热传递 (传导和对流) 人们是用驱动力的本质来描述的。他们没有提及相应的携带者。实际上, 第一种热传递包括在非金属中的热传导 (携带者是声子) 和在金属中的热传导 (携带者是电子) 以及在气体中的热传导 (携带者是分子)。

相反, 第三种热传递的携带者只有光子。有关第三种热传递的另一个问题是, 并不是任何以光子为携带者的能量传递都是热辐射。单一波长的微波不传递熵。因此, 我们没有理由把这种能量传递叫做热传递^[1]。

与这种分类方案不一致的热传递的一个例子是在太阳内部从反应区到太阳表面的热流。(在外层, 从反应区到太阳表面有 10% 的热传递是对流式的。现在我们不关心这部分

热传递。)在太阳中能量和熵的携带者是光子。这种热传递属于第三种热传递吗?每个光子只运动很短的距离就被吸收了。新的光子产生出来,又朝任意方向运动。这样,辐射朝前后、左右、上下各个方向进行,换句话说,这是一个扩散的过程。因此,这个过程像热传导,只不过其携带者不是声子,而是光子。跟通常的传导一样,它只有在温度梯度的驱动下才会发生。(在太阳内部,温度梯度平均为 30K/km 。)我们的结论是,这种过程既不是第三种热传递,也不是第一种热传递。

另一个例子是,熵从地球表面传递到对流层的顶部,然后射向空中。有一小部分热传递(8%)的方式与太阳中的热传递方式是相同的,即地球发出电磁辐射。它被吸收,又重新被发射。因此,这一过程也属于第一和第三种热传递。

还有一些热传递过程(例如,一束热原子、热电子或热离子,或在坍缩星中的热中微子流)很难被归到三种热传递方式中的任何一种。

按照三种热传递的分类,我们还可以提出这样的问题:如果我们认为有三种热流,那么是否可以认为有几种电流或动量流呢?实际上,我们可以对其他流进行分类。然而,我们也会遇到像热流一样的问题。那么,一共有几种电流?在金属导体中有电子运动所引起的电流,在溶液中有离子运动所引起的电流,有自由电子束的电流,在等离子体中有各种不同的携带者的运动引起的电流,有运动导体引起的电流,有属于第一和第二种类型的超导电流。显然,人们肯定不会说:“电荷的传递方式只有三种(或四种,或十种)。”

历史:

当人们知道了三种热传递的方式的时候,就产生了这种分类法则,从而不小心地得出结论,即没有其他种类了,只有这三种类型。这种情况出现在人们还不知道太阳内部情况的时候,出现在人们还不知道地球大气层内部的热传递情况的时候,出现在人们还不知道电磁场、光子、等离子体和中微子的时候。

建议:

如果我们愿意的话,我们应该想出一个更可靠的分类。我们可以根据所选择的标准来制定几种不同的分类。这些标准包括:

—携带者是什么?

—传递过程是否是耗散的?

—驱动力是什么?是温度梯度还是其他别的梯度,还是根本没有梯度?

然而,我们必须注意到,我们无法从任何一种分类方案中得到什么。所以,我们的建

议是，避免分类（不仅仅对热传递）。

那么，对于那些已经叫做传导、对流和辐射的过程怎么办？我们当然想把它们区别开来，正像我们想把胡萝卜和荨麻区别开来一样。但对于这两种情况，我们都不需要分类方案。

[1] F. Herrmann and P. Würfel: Thermal radiation, 《物理学历史负担》第 31 篇

Friedrich Herrmann

4. 8 热和功的等价性

主题:

根据有些学者的观点，热是一种无序能^[1]；根据另一些学者的观点，热是分子无规则运动的动能^[2]。另一些学者则认为，热是分子热运动的动能和势能^[3]；它可以通过热接触被加到物体中^[4]；它可以用表达式 $\Delta U - W$ 来表示^[5]；它是一种束缚能 (bound energy) TS ^[6]；它可以用积分 $\int TdS$ 来表示^[7]；它是有争论和多余的概念^[8]。那么，它到底是什么？

缺点:

克劳修斯曾运用两种热的测量方法：一种是包含在物体中的热 H （他把这种热想象为分子的动能）；另一种是“所提供的热” Q 。只有在一些特殊情况下才有 $Q = \Delta H$ 。在上面所引用的例子中，我们很容易认出它们实际上是这两位“双亲”的“后裔”。上述关于热的多种观点表明，不存在能同时描述热这一概念的所有方面的能量型物理量 (energetic quantity)。这是一个令人不愉快的局面。这些能量型物理量在替代热这一概念时，像一条条短的毛毯，要么盖住了手但盖不住脚，要么盖住了脚但盖不住手。人们所强调的热的性质不同，所采用的替代热的物理量也不同。尽管人们运用各种不同的量来描述热这一概念，但经数学处理后所得到的结果却是相同的。这一事实告诉我们，克劳修斯所提出的等价性在热力学计算中是没有意义的。那么，到底用什么来描述热这个概念最好呢？

历史:

这个问题跟物理学一样古老。克劳修斯大约在 1850 年在他的第一定律中就给出了答案，认为热和功是等价的。对这个结论到现在我们仍认为基本上是正确的。然而，对上述问题而言，这样的回答显然是不清晰的。

建议:

如果没有克劳修斯的上述结论，我们的思维反而更自由了。我们在表示能量守恒定律时不需要这个结论。在定义热这一概念时我们也不需要这个结论。我们很容易给出热的操作型定义 (即基本定义)。这一定义方法通常仅用于一些基本物理量 (如长度、时间和质量) 的定义。在这种定义中，我们只要规定好量的单位，然后去确定与这个单位相等或与这个单位成倍数关系的量。然而，我们可以运用这个方法对其他物理量 (如能量、动量、角动量、电荷、物质的量和熵) 进行相应的定义或对一些概念 (如热量、信息量和无序程

度)进行度量化(metrization)。用这个方法可以将所要描述的概念与相应的物理量对应起来。用这种方法一开始就会得出令人惊奇的结论,即科学上所解释的热量这一概念所对应的物理量不是能量型物理量,而是克劳修斯的熵 S ^[9]。这一结论将直接牵涉到热力学中重要的物理量(除温度外),使得我们能对这些物理量进行一次大范围的清理。诸如焓、自由能、能量退化、过程量和状态量,这些概念将统统被清除。这样一个小小的错误在科学计算和语义上造成如此大的影响。这一事实警告了那些只关注计算结果的一致性的理论工作者们,同时也提醒了只关注结果的教育工作者们。

参考文献

- [1] F. J. Dyson: "What is heat?" Scientific American 1954, 191(No.3), S. 58-63.
- [2] R. W. Pohl: "Mechanik, Akustik, Wärmelehre"; Springer: Berlin 1962, S.248.
- [3] C. Gerthsen, O. H. Kneser, H. Vogel: "Physik"; Springer: Berlin 1986, S.193-197.
- [4] C. Kittel: "Physik der Wärme" ; Wiley & Sons: Frankfurt 1973, S. 133.
- [5] M. Born: Physikal. Zeitschr. 1921, 22, S. 218-286.
- [6] H. H. Steinour: "Heat and Entropy"; J. Chem. Educ. 1948, 25, S. 15-20.
- [7] G. Falk, W. Ruppel: "Energie und Entropie"; Springer: Berlin 1976, S. 92.
- [8] G. M. Barrow: "Thermodynamics..."; J. Chem. Educ. 1988, 65, S. 122-125.
- [9] 下面的假设与热量的单位的选择完全可以给出清晰的热量的度量方法:
 - (1) 每个物体含有热。如果物体是绝热的,其数量不会减少。
 - (2) 相同的物体处于相同状态时含有相同数量的热。
 - (3) 一个物体所含的热的总量等于其各部分所含热之和。

Georg Job

4.9 热能

主题：

在一本中学物理教科书中有这样一段话：

“热能是内能的一部分。它基本上是由温度决定的。在许多情况下，人们认为其他形式的能跟温度无关，因此，人们通常仅仅讨论热能……

热就是从一个系统传递到另一个系统的热能的多少……

热传递和能量变化之间有以下关系：

$$Q = \Delta E_{\text{热}}."$$

在另一本中学物理教科书中有下面这样一句话：

“粒子的势能和动能统称为热能。”

在第三本中学物理教科书中有下面这样一段话：

“一个热力学系统的总能量包括热能（粒子的势能和动能）、化学能和核能。这个总能量就是内能 U 。”

缺点：

上述这些热能的定义的目的很清楚：作者试图定义一个能测量一个系统所含“热”的多少的量。而这个量又必须具有以下性质：

1. 它必须是一个状态变量，即对于一个给定状态的系统它有一个确定的值；
2. 它必须是一个能量型的量，即它必须以焦耳为单位；
3. 它必须是内能的一部分（另一部分是化学能）；
4. 它与过程量 Q 不同。 Q 在物理学中叫做热。

问题是，要满足上述条件的量是不存在的，也是无法定义的。我们无法区分粒子的动能、势能和化学能。温度的升高与电子的激发、振动、自旋系统的激发、分子的分离、原子的重新组合（即化学反应）和核反应有关。在这些过程中我们无法清晰地将能量分解为热能和化学能。假如这种分解是可能的，事实上也只能按以下规则来分：其中一种能（热能）只与温度有关，而与化学势无关；另一种能只与化学势有关，而与温度无关。然而，这样的分解是不可能的。

历史：

在物理学、化学和工程热力学中，人们需要测定一个系统所含的热。常识告诉我们，

定义这样一个量是有可能的，这是因为直觉能帮助我们成功地定义这个量。然而，在 19 世纪，当人们要定义这个量时，却发生了一个错误：当时人们认为这个量必须是一个能量型的量。然而，要满足上述条件的能量型的量是无法定义的。结果，就出现了几个替代物。这些替代物能满足其中一些条件，但不能满足另外一些条件。被称为热的量 Q 是其中一个替代物。 Q 不是通常意义上的物理量。对于一个给定状态下的系统， Q 的值是无意义的，因此，人们把它叫做“过程量”。化学家们喜欢用另一个替代物，焓。这个量有点像热，但它只有在等压过程中是这样。然而，物理学家们无法接受这样一个限制条件。

Q 和 H 都无法满足作为测量热的物理量的条件。因此，人们在想，为什么不定义一个更合适的量来满足这些条件？这个量就是热能。

有意思的是，“热能”这个概念只能在中学物理教科书中找到，在大学物理教科书中没有这个概念。我们是否要责备这些中学物理教科书的作者们，是他们忽视了热力学的知识而发明了这个站不住脚的概念？对这个问题既有肯定的回答，也有否定的回答。之因为肯定的回答，是因为这个定义是不成立的；之因为是否定的回答，是因为人们对热力学理论是如此的陌生。

要责备的是大学物理教科书。大学生们所学到的关于热现象的知识是：同时变化的四个量之间的关系（译者注：这个关系指 $pV=nRT$ ）、偏微分、量的变化、一些非直觉的量（如焓、自由能、吉布斯自由能）。这些都是导致学生产生厌恶感的原因。对狄塞耳中的气体压缩的简单解释，人们运用了绝热系数。这个绝热系数被定义为两个偏微分的商。人们都知道偏微分的特点是，一个量保持不变，而另一个量在变化。

人们并不指望学生们用这种方式可以获得关于热现象的简单的关系式。然而，这些学生在后来成为教师时，如何将这些热学知识传授给初学者？我们可以理解，中学物理教师和中学物理教科书的作者为什么要努力去建构与人们的直觉相一致的热力学。

建议：

情况比人们所想象的要简单。只要我们放弃对热必须是能量型的量的要求，把熵作为对热的度量，所有问题就都解决了。

Friedrich Herrmann and Georg Job

4. 10 内能和热

主题:

如果我们给一个物体加点热，这个物体就会含有更多的热。如果我们从一个物体中抽出一点热，这个物体的热就会少一点。一个不懂物理学的人也能看得懂上面所说的话。然而物理老师告诉我们，这些话是错的：我们可以向物体提供热，但后来这个物体的热消失了，或虽然某个物体没有热，但我们可以从它那里抽出一点热。这样说有点像变魔术：魔术师的高顶大礼帽原来是空的，后来突然从中变出一只兔子来。物理学告诉我们，向物体提供热或从物体中抽出热不会改变物体中的热的多少，而改变的是物体的内能或焓，而这又取决于热是如何提供的或如何抽出的。热一旦到达物体中它就不再叫做热，而叫做能量。这不仅仅是一种习惯表达。我们简直不说物体中含有多少热。在物理教材中，这种令人感到奇怪的表达表现为各种不同的形式。有些作者表现得大胆一点^[1]。有些作者冒险地提出一种可疑的理由，说内能可以分为几部分，但他们又无法将这几部分内能定量化^{[2][3]}（参见[4]）。有时候热和内能简直被认为是相同的概念^[5]。

缺点:

我真得不能想象上述说法是对的。即使对于一名小学生，他也知道，如果给物体提供热，物体中就会有热。大多数大学生也不能给以解释。上述说法对学生来说既是谬论，也是一些没有理解清楚（也不需要理解）的强记着的东西。

历史:

对于将热提供给物体这一过程的描述需要对热进行测量。物理学家们所说的“热”是一个“过程量”（process variable）^[6]。这个量很不适合于成为化学家们所钟爱的内能或焓。参见[7][8]。

建议:

这是一个特别简单的问题。我们只要用熵来描述这个过程就是了。熵正好就是不懂物理学的人关于热的概念。如果我们给一个物体加热，我们就等于在给它提供熵。当我们把熵提供给物体后，熵就在这个物体中了。我们很容易给出物体中所含熵的值。我们也很容易测量出在给物体加热的过程中物体中熵的变化量^[9]。

参考文献

[1] Galileo 9(Oldebourg 2000) p. 98: “注意! 请仔细区别热、内能和温度。物体所含有的不是热, 而是内能!”

[2] Spektrum Physik(Schroedel Verlag Hannover 2000) p.17: 内能的组成: 粒子的动能、粒子相互结合的能量、化学能和核能。

[3] Galileo 9(Oldebourg 2000) p. 93: “物体的能量, 除了机械能(势能和动能)外, 还有内能 E_i 。原子能、化学能和生物能都属于内能。其主要部分仍然是与物体的温度有关的能量。”

[4] G. Job, Energieform in Altlasten der Physik, Aulis Verlag Deubner Köln, 2002, p.11.

[5] Metzler-Physik (Metzlersche Verlagsbuchhandlung Stuttgart 1988) p.60: “在所有这些情况中, 物体均在做摩擦功, 因而机械能的一部分转化成了一种无法再转回到机械能的能量形式, 这种形式的能就是分布在系统内外环境的热能或内能。”

[6] F. Herrmann: State Variables

[7] G. Job: Equivalence of Heat and Work

[8] G. Job: Entropie in Altlasten der Physik, Aulis Verlag Deubner Köln, 2002, p.85.

[9] F. Herrmann: Die Messung der Entropie in Altlasten der Physik, Aulis Verlag Deubner Köln, 2002, p.87.

Friedrich Herrmann

4. 11 可用能

主题:

在政府部门或大学所发表的一个国家的能源经济方面的出版物中，我们经常可以看到所谓的能流图^[1、2、3]。这些能流图给出了一个国家在经济中的能量平衡情况。所给出的标题大概是这样的：“对 2008 年美国的能量利用情况的估计”。所发表的内容告诉我们，能量是以何种能量携带者进入国家的经济系统的，哪一部分的能量转化为其他形式的能量了，能量又是以何种形式从系统中流出的。对于流出的能量，人们一方面把它们划分为最终的能量、可用的能量，另一方面把它们划分为损失的能量或扔掉的能量。

缺点:

我们会产生这样的观点：对最后的用户来说，能量必须以某种形式才能被应用。因而，它必须通过转化，为此它又必定会损失一部分。人们试图尽量减少在转化和运输过程中的能量损失，但从物理学的原理来看，大量的能量损失是不可避免的。只有对于终端的用户来说，所利用的能量才是实际需要的能量。

这一观点不是完全准确的。如果我们考虑到能量的损失是由于熵的产生，我们就能认识到这一点。所产生的熵必须传递到外界环境中去。为此，需要能量，这部分能量就损失掉了。损失的能量流 P_L 与必须传递到外界环境中去的熵流 I_S 成正比，即

$$P_L = T_0 \cdot I_S$$

上式中， T_0 是环境（即吸收熵的那个系统）的热力学温度。

根据上面的讨论，我们得出以下两个结论：

(1) 从物理学的观点来看，能量的损失是不可避免的。任何过程都可以以可逆的方式进行。从技术和经济上来说，这是不可能的，但这也不是物理学的限制。在碳（+氧）的化学能“转化”为电能的过程中，人们通常用卡诺效率来表示它的低效率。而实际上这一过程也可以以可逆的方式进行，例如，在理想的燃料电池中就发生着这样的过程。因此，在能流图中，所输入的能量可以理所当然地被称为有用能。

(2) 所有能量在到达所谓的终端用户时最终被“用于”产生熵，即被浪费掉；所有被用户购买的可用能最终变为损失的能量。另外，终端用户所关心的每一个过程都可以以可逆的形式进行。

我们并不是说能流图有什么错的地方，也没有说能流图没有用。我们只认为这些图传递了错误的信息。这些图告诉我们，最初的能量只有一部分是“真正”有用的。这一点是

不正确的。经过一系列的传递过程，最初的能量最终全部用于熵产生。上面所提到的能流图仅仅告诉我们一半的道理。

历史：

为什么能流图只画在某一阶段？为什么它们没有说明所有“可用能”最终都会储存在热这个仓库中？这是因为，这些图是根据相关部门自己所关注的问题来画的。对于能源企业，这些图只画到运费这个地方，因为这是他们收钱的地方。他们所关注的是这以前所损失的能量，他们不关注顾客以后如何处理所买去的能量。

建议：

总之，我们想讲清楚的是，所有最初的能量最终全部被用于熵产生。因为在物理学上没有办法来减少熵产生，所以在物理学上也没有节省能量的办法。当我们试图达到节省能量这一目标时，我们必须讨论由此引发的技术问题。这样，学生们将学到更多的物理学和化学的知识。

参考文献：

[1] <http://str.llnl.gov/Sep09/simon.html>

[2] <http://www.energyliteracy.com/?p=310>

[3] <http://blog.everydayscientist.com/?=1773>

Friedrich Herrmann

4. 12 能量最小的趋势

主题：

发生下列现象的共同原因被认为是由于系统到达了能量最小的状态：

- 单摆最终静止在最低点，
- 一块放入水中的木板最终水平地漂浮在水上，
- 肥皂泡呈球形，
- 海绵吸水，
- 电荷分布在导体表面上，
- 受激气体的原子发射光子，
- 正负离子在晶格中自动组合，
- 重核衰变。

缺点：

对上述现象的描述是不清楚的。这种描述假定每个系统都趋向能量最小状态，并最终到达了的状态，这种趋势不会受到周围环境的阻碍。然而，这样的描述是无意义的。如果一个系统到达了能量最小状态，那么由于能量守恒它的一个互补系统（即周围环境）必定到达能量最大状态。把同样的原理应用到周围环境这个系统，我们就得出了相反的结论。因此，上述能量最小原理不具有普遍性。那么，对什么样的系统这个原理才成立呢？对这个问题需要用热力学知识来回答。正如吉布斯（W. Gibbs）在 1873 年所指出的那样，这个系统除了为保持熵不变所需的能量外必须对其他所有东西封闭。在过程中系统内所产生的熵 S_p 仅仅出现在环境中，能量 TS_p （ T 是环境的温度）和这部分熵一起从系统流向环境。由于 S_p 和 T 总是正值，又由于其他能量交换被阻止了，所以系统的能量总是要减少的。从这个角度来说，能量最小的趋势实质上是熵原理（译者注：这里所说的熵原理就是热力学第二定律）在一种特殊的系统中所起作用的结果。

历史：

在力学中，我们总是忽视物体的热学性质。杠杆、滑轮、弹簧、物块和绳子都被认为是不会发热的，即其温度和熵是不会变化的。实际上，我们默认由于摩擦产生的熵都流到

了环境。在这样的条件下，我们可以认为存在着能量最小趋势。同样，我们将这一原理应用到物理学各分支（流体力学、电学、原子物理学和固体物理学，等等）的许多其他系统中。由于我们没有把熵产生作为上述过程发生的原因，我们就把能量最小原理作为一个独立的自然定律了。

建议：

我们可以清楚描述系统中的熵产生。我们通常所提到的熵的扭曲关系误导我们使用一些有争议的代用品。这样做的最大不幸是武断地把热作为一种特殊的能量形式放入热力学第一定律中，并在一个半世纪的时间中一直给以关注，从而导致产生没完没了和无法克服的困难。只有当我们准备去修正它时，我们才有希望获得持续的改进。

Georg Job

4. 13 熵

主题:

“熵”是一个物理量的名称。这个物理量是一个抽象的函数，最早以积分的形式出现在经典热力学中。这样来定义熵的方法使得这个量变得冷冰冰的，以至于专家们也要花很大的力气才能弄懂它。化学家们为了对它的含义有一个粗略的理解，喜欢把它解释为无序程度的量度。

缺点:

化学家们的方法有一个优点，即它可以使我们能定性地掌握熵这个概念。但是，从物理学家们的角度来看，这样是不够的。对于物理学家们来说，只有当我们知道了某个量的测量步骤时，我们才能定义这个量。把熵解释为无序程度的量度这一方法还有另一个缺陷，这就是它没有给出熵的宏观性质。

历史:

在 19 世纪的前半个世纪中，我们已经清楚地知道，卡诺和其他学者所提出的热的守恒定律是站不住脚的。这就导致克劳修斯在 1850 年试图重新建构热力学，假设热和功能相互转化。在他的这一研究中，他提出了描述这种相互转化的限度的一个量 S 。

建议:

卡伦德 (H. L. Callendar) 在 1911 年伦敦物理学会会长演说中指出^[1]， S 不是别的，正是卡诺称之为热的这个量以更复杂的形式再现；它们之间的唯一区别是，现在我们知道热是可以产生的，而以前人们认为它是不会消灭的。这个观点迟到了半个世纪，以至于人们一直没有纠正这一错误路线。然而，我们可以得出结论， S 这个量不但具有明显的热的直觉意义，也可以用与热相同的简单方法来计量。因而，这个经典热力学中形式主义的幽灵 S 可以变成一个能被小学生也容易接受的概念，并且大量多余的数学公式也可以被废除。这一设想的可行性被许多学校的大量实践所证实。^[2] S 成为热后，甚至在熵这个不能反映它的特征的名称下，这个量就变得像长度、时间或质量一样容易理解了。在信息理论中，它又以另一种形式出现。化学家们的统计物理学和原子的观点并没有阻碍它以热的角色出现在宏观物理学中。

[1] H. L. Callendar: Proc. Phys. Society of London 23 (1911) 153. 卡伦德还指出，将法定单位 J/K 用卡诺（Carnot）来表示。

[2] The Karlsruhe Physics Project, <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/>

Georg Job

4. 14 熵的测量

主题:

熵这一概念给人的印象是，它的大小只有通过复杂的数学计算才能得到。

缺点:

熵和温度是热力学中最重要的物理量。熵是广延量，温度是强度量。这两个量是能量共轭量 (energy-conjugated quantity)。熵和温度之间存在着与电荷和电势之间或动量和速度之间相同的关系。因此，我们可以这样说，熵和熵流在热力学教学中的重要性应该跟电荷和电流在电学中的重要性或动量和力 (= 动量流) 在力学中的重要性一样。然而，对熵这一概念的介绍通常没有体现这一观点。

一开始提及熵时，我们通常强调熵是一个状态函数。^[1] 然而，我们为什么要强调它是一个函数呢？首先，熵是一个物理量，或者用数学的术语来说是一个变量。只有当它随所给定的其他物理量而变化时它才算是一个函数。我们所选定的其他物理量不同，这个函数也不同。

那么，为什么要强调熵是一个状态函数或状态变量呢？几乎所有物理量都是状态变量。然而，这一事实太明显了以至于我们不值得去提它。在对所有物理量的介绍中，唯一不同的是对熵这一概念的介绍。传统的熵介绍方法不采用人们对这个量的直觉判断，而是坚持强调它是状态变量这一性质，尽管它的这一性质并非是一个特殊的性质。

传统的熵介绍方法的最大缺陷是没有给出它的测量方法。熵介绍方法的复杂性使得我们认为对它的测量如果不是不可能的话也是很困难的。

实际上，熵是一个最容易测量的量之一。熵的大小可以仅仅借助于厨房设备就能精确地测量。

历史:

见参考文献[2]。

建议:

当然，我们并不想清理熵和对它的测量方法，而是想清理“熵是很难测量的”这一偏见。

如何测量熵？让我们先较确切地来明确一下这一任务：我们要来确定 5 升水在 60°C 和

20°C时的熵差。

我们先用浸入式加热器给 20°C 的水加热，并一直加到它的温度为 60°C 时为止。在加热过程中，我们不断地搅拌水，并测出在不同时刻水的温度。从加热器流到水的能流或功率 P 是已知的。

根据 $dE=TdS$ ，得到：

$$dS = \frac{dE}{T} = \frac{Pdt}{T}.$$

这样，我们就得到了熵的一个小的增量 dS ，它等于所传递的能量 $dE=Pdt$ 和热力学温度 T 的比值。由于水的温度因加热而不断地变化，我们必须对熵的这一增量从温度 T_1 到 T_2 求积分或求和，从而得到水增加的总熵：

$$\Delta S = P \int_{T_1}^{T_2} \frac{dt}{T} \approx P \sum_i \frac{\Delta t_i}{T_i}.$$

由于温度的变化相对于平均热力学温度 \bar{T} 是很小的，我们可以把上式近似地写为：

$$\Delta S \approx \frac{P\Delta t}{\bar{T}},$$

或者说，水的熵增加量等于浸入式加热器的功率与加热时间的乘积除以平均热力学温度。

[1] Gerthsen-Kneser-Vogel: Physik.-Springer-Verlag, Berlin, 1977. –S.183

[2] Job, G.: Historical burdens on physics **24**, *Entropy*

Friedrich Herrmann

4. 15 能量和熵实际上是什么？

主题：

2012年7月在土耳其伊斯坦布尔召开的世界物理教育大会（WCPE）中，许多发言者在谈到能量在课堂中的引入时多次阐述这样的观点：能量是一个抽象的概念。看来他们的意见是很一致的。从费曼的话中我们也可以了解到这一点^[1]：“我们必需认识到，就当今物理学来说，我们还没有关于能量是什么的知识。”

对于熵来说也是这样。大科学家诺伊曼（John von Neumann）解释道^[2]：“没有人知道熵实际上是什么，因此，当你跟人家讨论熵时，你总是对的。”数学家豪首（Harro Heuser）这样说^[3]：“熵是物理学中最神秘的概念……”

缺点：

能量实际上是什么？熵实际上是什么？

1. 这两个问题提得不恰当，“实际上”这个词应该从中去掉。上面这些作者不应该持宿命论的态度。我们对这两个问题的第一反应不是去吓唬学生，而是告诉他们：它们都是物理量，都是可以测量的。当然，这个回答引出了新的问题：它们测量什么？然而，这个问题看上去显得没有像原来的那么抽象，我们可以来回答这个问题。

2. 通常，我们只对这两个量这样问，对于质量、电荷、温度或压强我们从来不问它们“实际上”是什么。我们同样可以问这些问题。而要回答这些问题，说难也不难，说容易也不容易。

3. 一个好的问题应该能让回答者从一组可能的答案中选择一个正确的答案。对于问题：“谁在这次考试中得了A等？”，班级中全体学生的姓名是一组可能的答案。也有不大好或不好的问题。不好的问题是没有一组可能的答案的。这就是它为什么几乎不可能使发问者满意的原因。家长们会告诉小孩一件或两件事。小孩对这些事的提问可能从“为什么”开始。家长回答一个“为什么”后，小孩又来一个“为什么”。“……实际上是什么？”的问题就是这类问题。对这类问题，发问者会满意吗？

4. 让我们来给出上述问题的答案。

能量是什么？对质量也这样问。质能公式比任何一个物理公式被引用得更多，但在这个公式出现一百多年来，人们还不清楚质能之间的关系。当然，人们可以这样问：“质量是什么？”然而，人们确实不会提这个问题。有人也许会认为，爱因斯坦的回答对于经典物理学来说是不恰当的，这是因为相对论效应只有在高速情况下才显露出来。这种观点是

站不住脚的。质量和能量的性质就是惯性，它们在任何地方都体现这个性质。我们无法通过称量质量来区分充满电的电池的质量和没有电的电池的质量。这一事实跟电池的速度有否到达足以显示相对论效应的大小无关；它是由于我们的测量工具不够精确。

熵是什么？它就是我们在日常话语中所说的热。有人会说，这样的回答太简单了。因而，他就会继续提问：“熵的微观解释是什么？”如此等等。但是，他不应该说：“我们不知道熵实际上是什么”。

历史：

这种错误理解有历史的原因。在历史上，人们认为能量是某种“东西”，是一种物质，是实际存在于世界中的；对它的性质是很难领悟的。

对于电荷，我们没有提相应的问题。这是因为，我们认为它“实际上”是存在的。但是，这种观点建立在这样一种错误之上：把物理量“电荷”与物理系统“电子”混为一谈。

建议：

用模型的方法来引入能量和熵这两个量。把它们想象为两种液体模型。能量和熵就是对这两种想象的液体的数量的测量。其中一种想象的液体表示惯性，另一种想象的液体表示热。这样来引入很容易使人理解。这也是认真地描述物理世界的坚实基础。

[1] Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Matthew Sands: *The Feynman Lectures on Physics* (1964), Volume 1, 4-1.

[2] M. Tribus, E. C. McIrvine: Energy and Information, *Sci. Am.* 224, Sept. 1971, S. 178-184.

[3] Harro Heuser: *Unendlichkeiten*, B. G. Teubner Verlag, Wiesbaden 2008, S. 30.

Friedrich Herrmann

4. 16 熵：不可逆性的量度

主题：

有时候熵被作为一个过程的不可逆性的量度来引入。使用这种方法的目的使我们对于熵有一种直觉的理解。人们一直以为熵是一个抽象的、难懂的量。

缺点：

1. 如果我们把熵作为不可逆性的量度来引入，就容易遮蔽熵产生时所出现的问题。另一个相关的问题是，我们不知道这部分熵是怎么来的，它的效应是什么？我们周围能直接观察到的熵产生（entropy production）看上去很重要，但在宇宙这个大尺度上它是微不足道的。即使在地球这个尺度上，所产生的熵也仅仅占在地球的熵平衡中的总熵的很小一部分。包含在地球中的熵是每年在地球表面所产生的熵（主要是由于吸收太阳光而产生的）的一百万倍。仅仅量度过程的不可逆性的那部分熵实际上是不多的。

2. 关于熵有以下公式：

$$P=T \cdot I_s. \quad (1)$$

这个公式告诉我们，熵流总是与能流伴随在一起的。这个公式与下面的公式具有相同的结构：

$$P=U \cdot I.$$

公式（1）在描述热机中是很有用的。热机的工作原理可以这样来理解：熵流过热机；流入进口的熵流等于从出口流出的熵流。在热机内部，熵从高温流向低温，从而做功，即热机通过输出轴向外输送能量。我们需要用熵来描述热机的工作原理。由于这个过程是可逆的，把熵理解为不可逆性的量度对此并没有什么帮助。

3. 如果我们要量度不可逆性，熵也不是最好的选择。假如我们要比较系统 A 和 B 中所进行的过程的不可逆性，我们所要比较的是过程而不是状态。因此，A 和 B 的熵对此没有用处，有用的是 A 和 B 的熵产生率（entropy production rate）。然而，如果 A 的熵产生率大于 B 的熵产生率，我们也不能得出 A 比 B “更不可逆” 的结论。如果系统 A 比系统 B 大，也有可能 B 这个过程 “更不可逆”。因此，在对不可逆性进行量度时我们必须把熵产生率与系统的大小联系起来。对不可逆性的量度最好用摩尔熵产生率（molar entropy production rate）。

历史：

问题的原因是，我们缺乏“熵可以储存在系统中”的直觉观念，也缺乏对统计力学进行现象学解释的意向。

建议：

把熵理解为系统所含有的热（这里必须对“热”一词作通俗的理解）。这样，我们还可以获得一个通俗的副产品：摩尔熵产生率。

Friedrich Herrmann

4. 17 负熵

主题：

在生物学教科书和其他相关领域中，我们也找到关于熵的负值的说法，例如：“生命系统在不断地产生正熵。为了避免分解直至到达热平衡，需要不断地给这些系统提供负熵。叶绿素的激发能是提供给生命系统大量负熵的唯一来源。激发能是由光子产生的，而太阳是光子的唯一自然资源。”

英文词汇中，负熵也可以写为“negentropy”。它又等同于香农的信息量。

缺点：

以上这种说法在某些地方仅仅对物理学的实践产生一些不好的影响，但在另一些地方它们是不正确的。

1. 由于系统 A 和系统 B 之间存在着广延量 X 的流，系统 A 中的 X 值会增加，系统 B 中的 X 值会减少。这时，对这一过程有两种可能的描述：一种是“从 B 到 A 有正 X 的流”，另一种是“从 A 到 B 有负 X 的流”。相关的理论（更确切地说，连续方程）没有区分这两种描述方式。只有当流的速度能明确的情况下，即当流密度可以用密度和速度来表示 ($j_x = \rho_x \cdot v$) 时，这种区分才可以被证明是正当的。如果密度 ρ_x 是负的，我们才会说“负 X 从 A 流向 B。如果 ρ_x 是正的，我们喜欢说“正 X 从 B 流向 A”。即使如此，这种区分也是没必要的。

然而，如果量 X 原则上只能是正的（如质量或熵），则说“负 X 从 A 流向 B”当然是不大合适的，因为这意味着存在质量或熵的负密度。

当我们说负熵时（正像上面所引用的那段话），我们的目的是很清楚的：我们想说明这样一个观点，即生命系统没有使太阳的熵增加。现在问题来了：即使人们坚持要使用负熵的概念，他们也得承认这种假想的负熵所流过的路径与正熵所流过的路径是相同的，尽管它们流动的方向相反。既然正熵流向外界环境，我们最好这样说：“负熵从外界环境流向生命系统。”因此，说“负熵来自于太阳”的确是不正确的。由于这个问题相当复杂，这个事实并没有引起人们的注意。

为了更好地解释这个问题，让我们来讨论一个更明显的例子：电热器的电热丝。对它的熵平衡的正确描述是这样的：在电热丝中熵产生了。这部分熵流向外界环境。如果套用上面所引用的那句话，我们可以这样说：“负熵与电能一起供给电热丝。这部分熵与电热丝中产生的熵相互抵消。”显然，这种说法是不正确的。

2. 如果认为负熵等于信息量，那我们犯了另一个错误。让我们先来比较熵 S 和信息量 H 。要提醒的是，这两个量可以根据相同的公式来计算：

$$S = -k \sum p_i \ln p_i \qquad H = -f \sum p_i \ln p_i$$

这里 p_i 是系统处于第 i 个微观态的概率。 k 是波耳兹曼常量， f 是 H 以比特为单位时的一个常数。因此， S 和 H 这两个量的值由相同的公式来决定，即这两个量是相同的。系统的熵和以微观状态储存在系统中的信息量是相同的物理量，只不过是常数不同而已。

我们还经常看到这样的笑话。我们来考虑某个系统 A 。人们不说“ A 中储存着信息 H ”，而说“ H 是观察者所失去的信息”。有人甚至这样说：“观察者具有负熵 N ，即

$$N = -H。”$$

人们不是将所计算或测量出来的值归于这个系统，而是取这个值的负数，并把它归到扩充了的系统中，即归到作为系统组成部分的外界环境或观察者上。这正好比在描述物体的质量 m 时认为外界环境具有“负质量”（negmass） $n (= -m)$ 一样。这种说法初听起来觉得还有道理，但毫无疑问它绝对是令人不快的。

历史：

负熵这一提法已经有很久的历史了。热力学专家泰特(Peter Guthrie Tait)是开尔文(Lord Kelvin)的朋友。他当时已经有引入负熵的想法，只不过是把问题考虑得太孤立了^[1]：“对某一给定的燃料室我们很需要有一个词来表示热功的可用性(availability)。根据这一术语，无用的功叫做耗散(dissipation)。不幸的是，熵这个克劳修斯为此所引入的漂亮的词汇被他用到了与我们想要表达的相反意思上去了。”

确切地说，负熵是由薛定谔引入到物理学中的。在他 1944 年出版的著作《什么是生命》(这本书没有运用数学)中，他写道：“在食物中，能让我们远离死亡的珍贵东西是什么？这个问题容易回答。所发生的每一过程，每一事件，每一事物——只要你能说得出来——总之，自然界中所发生的一切都导致自然界中局部地方的熵增加。因此，生命有机体在不断地增加它的熵（如果我们愿意的话，我们也可以这样说：‘它导致了正熵的产生’），这就导致趋向最大熵这一危险状态，这一状态意味着死亡。要避免这一状态的到来，即有机体要活着，就必须持续不断地向外界环境吸取负熵——我们以后将会马上知道，这个带负号的量是真实地存在的。滋养生命的东西就是负熵。说得更明白一点，它是新陈代谢所不可缺少的东西。生物有机体只要活着就会产生熵。要避免熵的增加，生物有机体就需要负熵。”

薛定谔的这些话激怒了反对他的同事们。他为自己辩护，但有点不热心。

“negentropy”这个术语在1956年由布里渊(L. Brillouin)引入^[2]。当时已经发表了几篇关于熵和信息量关系的文章。这些文章比香农的理论要早一些。布里渊非常强调他的观点的重要性，把它叫做“信息的负熵原理”。正如前面所说的，他的观点之所以不正确，是因为他把信息量归到观察者或实验者身上，而不是归到所计算的系统上。

这种不恰当的归因的原因也许是我们给这个量取了“信息”这个名称。

假如有一台计算机，其信息储存量（理想气体的微观态）由公式 $H=x$ Mbyte 来计算。当我们把 H 叫做信息（information）时，我们等于在说“关于信息储存量（或理想气体的微观态），我缺少了 x Mbyte 的信息。”相反，如果我们把 H 叫做信息量（amount of data），则以下这种描述将更合适：“在信息储存器（或理想气体）中的信息量为 x Mbyte。”这样，如果我们运用信息量这个术语，这个量的值就正确地归到了信息储存器或理想气体上了。

建议：

1. 负熵这一名称是没有必要出现的。只有正熵这一概念，反而更好。
2. 将 H 归于信息储存器（热力学微观态），而不是归到观察者。把它叫做信息量。

[1] P. G. Tait: Sketch of Thermodynamics, Edmonston & Douglas, Edinburgh 1868, p.100.

[2] L. Brillouin: Science and Information Theory, Academic Press, New York 1962, p.152f.

Friedrich Herrmann

4. 18 熵和生命

主题:

生物系统是自发形成的高度有序的系统。这一事实带来一个问题。人们总认为，生命有机体的生长与热力学第二定律相矛盾，这是因为在一个封闭系统中熵是不会减少的。实际上，因为生物系统是一个开放系统，因而它与热力学第二定律并不矛盾。实际上生物系统的熵在减少，因为外界环境的熵在增加。

缺点:

首先，我们听到的是这样一个结论，即生物系统的有序性是自发地增强的。有时候这个结论被说成是一个悖论。后来这个问题弄清楚了。我们就这样平静了下来，一切都好了。

然而，在它变成一个悖论之前，我们应该在较早的时间内把问题解决掉。实际上，生物系统的熵容是大家所熟悉的。

例如，人体的 60%是由水组成的。温度为 25℃时，水的熵容是 $3.9 J/(K \cdot g)$ 。在正常体温下，它还要再小一点。人体的其他构成物质包括蛋白质、脂类和糖类，它们的单位质量的熵与其他凝聚的有机物质的相差不是很大，大约在 $1-3 J/(K \cdot g)$ 。不难想象，非生物系统与人体不但在质量、体积和温度方面而且在熵方面都是差不多的。因此，熵容并不是生物系统的特征量。

如果将人体与同质量和同温度的一堆沙比较，这堆沙的熵甚至更少。因为沙是由结晶材料组成的，所以它的熵只有那个人体的四分之一。

顺便提一下，当某一生物长大的时候，它的熵并没有减少，反而增加。道理很简单，这是因为它的质量增大了。如果一个人的质量增大 2kg，他的熵就会增加 4kJ/K 左右。

总之，与质量和体积比较，熵并不是一个特别能表征生物系统的物理量。

历史:

原因也许是多方面的。首先是，人们对熵的非科学性的理解。人们认为熵能表征生命有机体复杂的过程。其次是，人们不知道熵的具体数据（实际上这些数据很容易在表中查到）。第三个原因是，我们用统计物理学的角度来引入熵这个概念。这种方法很吸引人，但不利于人们对熵的数值建立正确的概念。

建议：

把熵理解为对热量（quantity of heat）的量度。要让学生对熵的数值有正确的概念。这样，学生们一开始就不会认为熵在生命系统中扮演着独特的角色。

Friedrich Herrmann

4. 19 卡诺循环

主题：

在大学物理课中，学生们学到卡诺循环。理想气体在一个循环过程中经历了四个阶段：两个等温过程和两个等熵（或绝热）过程。学生们知道，在这个过程中只有一部分热转换为机械功。有时这个结论被推广到任意的循环过程，只要把它分解为无数多个等温和等熵过程。通常，这个过程用 $p-V$ 图来表示。

缺点：

1. 卡诺在他的著作中提出并证明了一个大胆的想法：在一台理想的热机中，“热质”从温度较高处传到温度较低处，从而做功（法文为“*puissance motrice*”）。这个功与温度差和热质的数量成正比。根据卡诺的原理，热机的工作原理与水轮机的相似。在水轮机中，水从高处流向低处，从而做功。卡诺在他的著作中一开始就引入了这个观点。只有在这以后，我们才能想象热机的具体的细节。现在学生所学到的关于卡诺这个观点的知识却是一些特殊热机的烦琐计算。

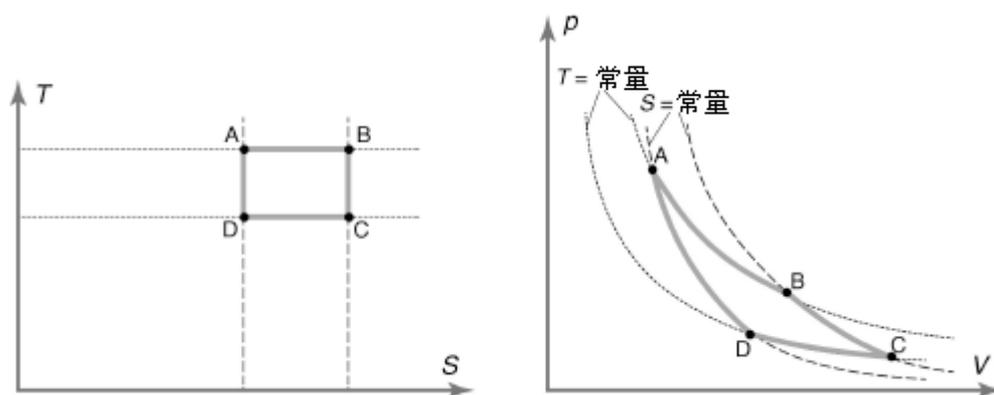


图 4-19-1 卡诺循环的 $T-S$ 图和 $p-V$ 图。在一个循环中，热机从高温处吸收熵，在低温处放出熵。

2. 在卡诺循环中，涉及到两种能量形式： pdV 和 TdS 。如果我们真正要处理卡诺循环，我们最好用两种能量形式下的坐标系来表示这个过程，即 $T-S$ 图和 $p-V$ 图，如图 4-19-1 所示。 $T-S$ 图使过程显得很简单。在这里，卡诺的上述观点可以清楚地看出来：热质（今天叫做熵）在恒定的高温处进入热机（过程 AB），在恒定的低温处离开热机（过程 CD）。

不管运用了何种工作物质， $T-S$ 图是相同的。 $p-V$ 图就不同了。这是一个很重要的事实，这个事实卡诺在讨论“理想气体”的特殊情况之前也强调过。

但是，正像卡诺当时所做的那样，我们也可以抛弃这两个图。事实上， $T-S$ 图是琐碎的，而 $p-V$ 图是不令人感兴趣的。

3. 如果我们将热机运行的过程看成是一个连续的过程而不是由几个阶段组成的循环过程，我们可以更容易地理解热机。

历史：

1. 自从19世纪50年代以来，由于人们热衷于能量这一概念，热质被理解为一种能量形式，卡诺的观点被认为部分地是错的。他所说的热质从高温处通过热机流到低温处，其总量保持不变。从现代物理学的观点来看，热质的这种行为符合熵的行为。这样，我们可以将卡诺的热质认定为克劳修斯在1865年正式提出来的熵。当我们把热质理解为能量时，就会得出错误的结论：在热机的低温出口处所流出来的能量少于在热机的高温进口处所进入的能量。（其差异等于热机所做的功。）

对卡诺原理的不恰当解释一直延续到现在，尽管在概念的发展过程中不断有人指出其错误。

2. 另一个相关的问题是，熵一直被看作是一个与直觉无关的量。因此，老师们只要有可能会回避这个量。因而，简单的 $T-S$ 图就被抛在了一边。

3. 在卡诺所处的时代，循环过程是一种标准，因为当时仅有的热机（即蒸汽机）是一种循环机器。汽轮机当时还没有出现。卡诺当时提到的水轮机是一种连续工作的机器。

建议：

这个主题与中学物理教育有什么关系？难道还不清楚这是一个大学物理教育的主题吗？确实，当我们以通常的、复杂的方式来处理这个问题时，它不在中学物理所讨论的范围内。但是，如果我们清晰地按照卡诺的方法来讨论这个问题的话，它会变得完全适合于中学物理教育。

Friedrich Herrmann

4. 20 卡诺效率

主题:

热机的效率较低，这是由于热能只能部分地转化为功。在理想条件下，所转化的功在热能总量中所占的比例叫卡诺效率 (*Carnot efficiency*)。如果用 T_2 和 T_1 分别表示向热机输入热能的热源的温度和从热机输出热能的热源的温度，则卡诺效率为 $\eta = (T_2 - T_1) / T_2$ 。

缺点:

这个热机效率的表达式表现出出奇的不一致。我们用一台水轮机来作一比喻。卡诺曾作过这样的比喻：假设在德国卡尔斯鲁厄附近的黑森林 (Black Forest) 中，在海拔 $h_2 = 1000\text{m}$ 的地方有一台水轮机。它的一个水轮的水位高度差为 $h_2 - h_1 = 5\text{m}$ 。这样，它每得到 1kg 水所获得的势能为 $mgh = 10\text{kJ}$ 。在理想情况下，它所能利用的这部分水的势能只有 $mg(h_2 - h_1) = 50\text{J}$ 。因此，它的“卡诺效率”为

$$\eta = (h_2 - h_1) / h_2 = 0.005.$$

我们又假设，在较低的莱茵河（海拔 $h = 20\text{m}$ ）也有相同的一台水轮机。那么，它的效率为 0.25 。刚才我们以海平面为参考面来计算势能。如果以地球中心为参考面，势能的值将达到 20MJ 。这样，上面所提到的两台水轮机的效率将减到 $\eta = 2.5 \cdot 10^{-6}$ 。

现在我们可以看出，肯定在什么地方出错了。显然，卡诺效率与水轮机或蒸汽机无关，而与所假定的参考面有关，与相对于这个参考面的实际高度 h_2 和 h_1 或温度 T_2 和 T_1 有关。

历史:

卡诺是在能量原理被发现之前写下它的观点的，当时他还不知道能量这个量。他将蒸汽机与水轮机作对比。对于他来说，像水轮机的情况一样，热机的功来自于热的进出口之间的“势能”差。

建议:

跟在力学中一样，在热力学中效率这个概念是多余的。把热机描述成“熵机” (entropy mill) 后，热机跟水轮机一样都是通俗的名称。

Georg Job

4. 21 效率和卡诺系数

主题:

一台机器的效率被定义为所传输的有用能量与所提供的总能量的比值, 即

$\eta = \text{有用能量} / \text{总提供的能量}$.

对于一个通常的电热器 (电阻器), 其效率为

$\eta = 1$.

对于一台热机, 效率表达式中的分母是来自热源的所有能量, 也就是实际流入热机的能量。如果热机是理想热机, 即热机运行时没有熵产生, 其效率就是所谓的卡诺系数 (Carnot factor):

$$\eta = (T_2 - T_1) / T_2.$$

对于一台热泵, 所有传输的有用能量是在高温 T_2 下离开热泵的能量, 因此, 其效率为

$$\eta = T_2 / (T_2 - T_1).$$

缺点:

上面所定义的效率是不合适的。合理的效率概念应该具有以下几个特点:

1. 它的值必须在 0 到 1 之间;
2. 一台理想机器的效率应该为 1;
3. 一台非理想机器的效率应该小于 1。

当机器的运行是可逆的, 换句话说, 当机器运行时没有熵产生, 这台机器就是一台理想机器。

上面所定义的效率不符合以上三条标准。热泵的效率大于 1, 这不符合第一条标准。理想的卡诺热机的效率小于 1, 这不符合第二条标准。电热器的的工作过程是不可逆的, 是一种大家都知道的能量耗散器件, 但它的效率却等于 1, 这不符合第三条标准。

历史:

人们几乎用了近一百年的时间来寻找一个有效的热机效率的定义。这实际上是一个区分能量和熵的曲折过程。在卡诺的著作中没有找到这个定义。卡诺也许不会对现在普遍使用的定义持肯定态度。我们在亥姆霍兹的著作中找到了这个定义, 但我们不能肯定他是这个定义的发明者。

虽然当时一开始人们选择了这个定义是一种不幸, 但我们至少还能理解当时人们为什

么会这样定义它的。一方面，当时还没有热泵，即还没有（根据上面所定义的）效率大于 1 的机器。另一方面，当时还没有燃料电池，人们还以为我们只有通过燃料碳才能将它的能量释放出来。因此，在当时把蒸汽机的效率归因于炉膛或机器本身都是一样的。

建议：

我们建议使用下面的效率定义：

$$\eta = P_{\text{理想}} / P_{\text{实际}}$$

这里， $P_{\text{实际}}$ 是这台实际的机器的能耗。 $P_{\text{理想}}$ 是与那台实际的机器具有相同功能但在运行过程中没有产生熵的机器（理想的可逆机器）的能耗。

根据这一定义，对于可逆卡诺热机， $\eta=1$ ；这是因为卡诺热机是理想的可逆机器。

对于热泵，其 η 值总是小于或等于 1 的。如果机器在工作时没有任何损耗，即没有任何摩擦损耗、热损耗或电路中的损耗，它就是一台理想机器，其效率就等于 1。如果有损耗，则其效率小于 1。

一个电阻电热器在高温 T_2 下提供一定量的熵流（热流） I_S 。其相对应的理想机器是在相同温度 T_2 下提供相同熵流 I_S 的热泵。它从温度为 T_1 的环境中吸收这部分熵流。这样，它的能耗为

$$P_{\text{理想}} = (T_2 - T_1) \cdot I_S$$

另一方面，那个提供相同热流 $T_2 \cdot I_S$ 的电阻电热器的能耗为

$$P_{\text{实际}} = T_2 \cdot I_S$$

其效率为

$$\eta = P_{\text{理想}} / P_{\text{实际}} = (T_2 - T_1) / T_2$$

它等于卡诺系数。

环境温度 T_1 越高电阻电热器所浪费掉的能量就越多。实际上， T_1 越高，用热泵将熵从环境温度提升到所要达到的温度所消耗的能量越少。

根据同样的道理，其他任何一种加热器，如火力发电厂中的煤炉的效率也等于这个卡诺系数。因此，这种发电厂的“缺点”不是由几乎是可逆运行的汽轮机引起的，而是由煤炉的不可逆性引起的。

上面所给出的效率的定义是热力学中大家所知道的“第二定律效率”。这是一个现代的概念。我们建议一开始就运用这个概念，并直接把它叫做“效率”。

Friedrich Herrmann

4. 22 热力学第零定律

主题:

“如果两个系统都跟第三个系统处于热平衡，它们也处于热平衡。”这就是热力学第零定律。

缺点:

如果两个系统处于热平衡，它们的温度是相等的；如果它们的温度是相等的，它们就处于热平衡。根据这一事实，我们得出热力学第零定律。毫无疑问，这个结论是正确的。然而，这个结论是如此地简单，以致于我们很难理解它为什么会是一个“热力学定律”。

有人可能会认为这个定律的字里行间隐藏着深奥的含义。但我们必须明白，对于其他平衡状态我们也可以得出相应的结论，然而，没有人把它们叫做“定律”，因为这些结论是显而易见的。

由于第零定律经常被引用在统计热力学中，作为对比，我们来讨论化学平衡。在统计热力学中，化学势起着与温度很相同的作用：它和温度是能量概率分布中的两个参数。因此，除了第零定律，我们还可以得出类似的关于化学平衡的“定律”：“如果两个系统都跟第三个系统处于化学平衡，它们也处于化学平衡。”

唯象热力学（phenomenological thermodynamics）告诉我们，我们可以根据吉布斯基本方程中的各项得出其他各种“第零定律”：

$$dE = TdS - pdV + \mu dn + vdp + Fds + \omega dL + \psi dm + \varphi dQ + Id\Phi \dots$$

(T = 热力学温度, S = 熵, p = 压强, V = 体积, μ = 化学势, n = 物质的量, v = 速度, p = 动量, F = 动量流, s = 位移, ω = 角速度, L = 角动量, ψ = 引力势, m = 质量, φ = 电势, Q = 电荷, I = 电流, Φ = 磁通量)

我们可以通过非弹性碰撞来使三个物体达到相同的速度。由此，我们可以对这三个物体得出以下结论：

“如果两个系统都跟第三个系统处于速度平衡，它们也处于速度平衡。”

历史:

当温度和化学势被引入统计力学时，就需要总结出第零定律。后来证明，概率分布中两个参数之一具有我们所熟悉的那个量的性质，这个量就是温度。然而，即使从这个意义来说，第零定律也只不过是对于一个物理量的传递性（transitivity）的描述。

建议：

在中学里我们不讨论第零定律。那么这个主题对中学物理教育有什么相关性？它帮助我们理解，为什么热力学在大学和中学是如此不被普遍认识。没有一个强度量像温度一样扮演着如此重要的角色，也没有一个广延量像熵一样会引起如此小题大作。有时，热力学会使我们想起皇帝的新衣。

关于第零定律的特别建议，我们必须请教大学里的同事。我们劝告学生，不要没问题的找问题。

Friedrich Herrmann

4. 23 热力学第三定律

主题：

“通过任何有限次数的过程都不可能到达绝对零度。”这是热力学第三定律的其中一种表述。

缺点：

为什么我们会认为这一表述值得一提？由于存在大量不可能实现的东西，所以就有大量有关这种表述。通过有限次的抽取过程，我们不可能将容器中的空气抽尽。我们无法用水桶将浴盆中的水掏干净。我们觉得这些描述太无意思了。我们并没有将它们列入自然规律中。然而，熵就不同了。我们所知道的熵是一个被包装过的，因而变得不好理解的概念。对它要做到没有偏见是极其困难的。关于熵的表述变得与它本来就简单的物理性质没有关系了。我们非常看重熵，把它赋予许多极抽象的涵义，以至于我们把它比喻为浴盆中的水被认为是对它的不尊重。然而，这两种表述是属于同一种的。我们所作的简单的类比清楚地反映了所有现行的对热力学第三定律的表述情况。

历史：

这一表述最早是由能斯特（W. Nernst）提出来的。他的学生西蒙（F. Simon）把热力学第三定律表述为：“要完全除去一个物体中的熵是不可能的。”这一表述弥补了由热力学第二定律引起的不足，因为在计算熵时，这个定律决定了积分的常数。

建议：

对热力学第三定律的发现者的尊重不能阻止我们以更清醒的态度来看待这一定律。热力学第三定律的这一表述并不是很基本的，而仅仅是我们可以运用的一般工具而已。

Georg Job

4. 24 微观和宏观

主题：

对于大多数人来说，熵是一个难学的物理量。他们认为，只有当我们在微观层面上理解这个量了，我们才算是真正理解它了；熵具有一种统计分布的特征，或说得更明白一点，熵是对所研究的系统所处的微观态的无序程度的量度。

缺点：

1. 经典热力学或者叫做“唯象热力学”（phenomenological thermodynamics）是一种理论，而统计热力学是另一种理论。一种理论是对一种自然现象的数学描述。对同一种现象的描述理论通常不只有一种。总的来说，我们不能说某种理论一定比别的理论好。对于某一目的，某种理论可能比较合适；对于另一种目的，另一种理论可能更合适。

我们以光的理论为例。光的其中一种理论是几何光学，另一种理论是波动光学，第三种理论是对光的热力学描述，第四种理论是量子电动力学。这些理论都有各自存在的理由。我们不能认为，有了量子电动力学我们就不需要几何光学了。在计算透镜成像问题时，量子电动力学是没有用的。

同样，我们不能说唯象热力学比统计热力学要好或不好。在解决某些问题时，唯象热力学要比统计热力学更合适；对于另外的问题，可能刚好相反。

2. 自然界可以用不同的大小尺度和复杂性尺度来加以描述。我们也许会认为，描述尺度越小越好。我们甚至会认为，当我们进入微观世界时，我们就能对看不见的、无结构的、基本的粒子了解得更清楚了。然而，直到今天经验告诉我们，我们每向微观世界迈进一步，我们对物质构成的探索就向后退一步。同时，我们发现，如果我们向相反方向进行探索，即向更大尺度的方向探索，我们所发现的世界并不是像人们所想象的那样越来越无序和混乱，相反，新的简单的法则和定律从复杂的现象中被找到了。我们从中知道，对世界的微观描述并不比宏观描述更基本；对于热力学这种特殊情况来说，统计热力学并不比唯象热力学更基本。

3. 对于初学者来说，在对热现象的描述及其应用中唯象热力学比微观理论更具有优势。对于熵这个量，如果引用得恰当，它会变得特别符合我们的直觉。如果运用这种方法，学生们对熵的掌握会变得更加容易，他们会很快而轻松地对下列热现象进行定量的描述：热容、热传递、相变、热机及其效率，热力学的三大定律会变得更加显而易见。

4. 没有人会说，只有当我们知道了电阻率的微观解释后（即只有当我们知道了关于电

子-声子耦合的知识后)我们才能理解由电池和电阻组成的电路原理。也没有人会在教力学时先用希格斯机制(Higgs mechanism)从微观上来解释质量这个量。不考虑希格斯场(Higgs field)并不会影响我们正确地应用牛顿力学的知识。

历史:

在 19 世纪末,对于许多科学家来说,科学研究的过程就是把所有物理现象简化为力学问题。当时人们有足够的理由认为这个研究过程是合理的。把力学看作是热学、电学、磁学和光学的基础,这在当时看上去是很自然的。特别是,力学看上去在微观上制约着整个物理世界。自然界的所有东西都可以用很小的基本“粒子”之间的运动和相互作用来解释。麦克斯韦把它的电动力学看作是关于以太的力学理论。利用气体分子的动理论和统计物理学的理论,热现象可以用关于分子或其他粒子的力学知识来解释。一直到 20 世纪初人们才明白,那些非力学理论才是更有生命力的,对这个世界的力学解释含有某些虚构的成份。

建议:

我们建议,在一开始教热力学时就引入熵,正像一开始教力学时就引入质量一样。在力学中,质量是一个容易直接测量的量,我们对它有一种简单和直接的直觉。正像质量是对惯性的量度,熵是对我们在日常生活中所说的热量的量度。对质量这一概念用这种方法来引入,无论是在大学教学中还是在其他不同水平的教学中都是合适的。同样,用这种方法来引入熵,在大学热力学和工程热力学中是很合适的。

Friedrich Herrmann

4. 25 温度和粒子的动能

主题：

“当给气体加热时，气体分子的动能就增加。温度是气体分子对时间的平均动能的度量。……能量和热力学温度之间的关系使我们对温度这一概念有了一个直观的理解。”

缺点：

1. 对于不知道粒子动能的人来说，难道温度不是一个直觉的概念？不懂物理学的人对这个概念肯定没有问题。他们有关于热和冷的感觉，他们知道有一个量用来描述冷热程度的。只有物理学家认为粒子运动的观念能帮助我们直觉地理解温度——这显然是一种“专业畸形” (*déformation professionnelle*) 现象。我们还要提醒一下，用群集和摆动的粒子来帮助学生理解温度，这实际上运用了一个近似的模型，因为液体和固体的各种激发与粒子的观念是很不一致的。

2. 人们认为，粒子的温度和动能是同一个量，最多相差一个系数。然而，它们之间并不是这样的关系。在统计物理学中，温度是玻耳兹曼能量分布函数中的一个参数，它跟能量以多大的自由度储存无关。平动是许多运动中的其中一种。能量也可以以分子的转动和振动、电子的激发、离子的各种状态、等离子和磁的激发等形式储存。因此，人们也许会说，平动至少可以用来作为温度的标志。是的，但为什么我们喜欢用平动来作为温度的标志？我们看不出它比其他自由度的运动来得更好。我们通过布朗运动可以间接地看到这种运动，但我们也可以通过其他方式间接地看到其他激发，如物体由于电子激发而发光，由于振动激发而发射红外线。

历史：

也许这是在 18 世纪关于热的本质的古老争论留下来的余辉。当时的问题是：热是一种物质还是一种运动^[1]？由于物质理论被抛弃掉了，便留下了粒子运动的热解释。在 19 世纪中叶，热被解释为一种能量形式。自从 1911 年以来，热又被等同于熵^[2]。

建议：

我们可以说，粒子的动能与温度成正比。但我们必须清楚，这并不是温度唯一的微观解释。这是因为，当温度升高时，所有“能量储存”都会增加。关于温度的直观理解，没有必要运用一种复杂的微观解释。

[1] *Joseph Black, M. D.*: Lectures on the elements of chemistry, edited John Robinson, LLD., Vol. I, Edinburgh: Mundell and Son(1803), S. 30-34

[2] *H. L. Callendar*: Proc. Phys. Soc. London **23**(1911), S. 153

Friedrich Herrmann

4. 26 混合熵

主题：

在两个容器中盛有两种不同的气体。当把两个容器连接起来后，这两种气体就相互掺和。在这一过程中混合气体的总熵增加了。这一增加的熵叫做混合熵。

缺点：

“混合熵”这一名称是不恰当的，也是多余的。这一名称意味着，气体混合后比混合前具有更多的熵。这一结论的前提是，我们在比较两个系统的熵：混合后气体的熵和混合前气体的熵。根据不同的混合方式，这里有三种不同的比较方法。

1. 气体 A 和 B 盛在两个容器中，如图 4-26-1a。容积为 V_A 的容器中盛有物质的量为 n_A （以 mol 为单位）的气体，容积为 V_B 的容器中盛有物质的量为 n_B 的气体。将两个容器连接起来，使连接后的容器的容积为 $V=V_A+V_B$ ，如图 1b。混合后气体所增加的熵为：

$$\Delta S = n_A \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_A} + n_B \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_B}. \quad (1)$$

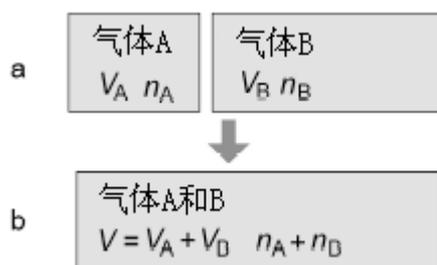


图 4-26-1 气体 A 从体积 V_A 膨胀到 V ，气体 B 从体积 V_B 膨胀到 V 。

上式就是通常所说的混合熵的表达式。然而，这种熵的增加与气体混合的过程毫无关系。这一过程只不过是两种气体分别从体积 V_A 和 V_B 等温膨胀到相同体积 V 的过程。气体 A 和 B 在等温膨胀中所增加的熵分别为：

$$\Delta S_A = n_A \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_A},$$

$$\Delta S_B = n_B \cdot R \cdot \ln \frac{V}{V_B}.$$

这样，在膨胀中所增加的总熵等于（1）式中的 ΔS 。

2. 我们试图对“混合”作另一种解释。有两个容积都为 V 的容器，如图 4-26-2a。它们分别盛有气体 A 和 B。混合后，两种气体都占有相同的体积 V ，如图 4-26-2b。我们来比较混合前后的熵。结果是，混合前的总熵与混合后的总熵是相等的，即一点也没有所谓的混合熵。

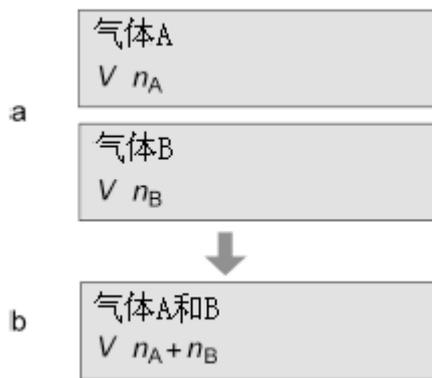


图 4-26-2 气体 A 和 B 被输入到同一个容器中。它们的体积没有发生变化。

3. 我们来看第三种方法，如图 4-26-3。这是一种试探性的方法。气体 A（物质的量为 n_A ）和 B（物质的量为 n_B ）被盛在容积为 V 的同一个容器中。另有一种气体 C，其物质的量为 $n_C=n_A+n_B$ 。我们来比较这两个系统的熵，看它们之间有否差异。单独一种气体 C 的熵与 A 和 B 的混合气体的熵相比会有什么差异呢？这种差异也许可以被认为是取“混合熵”这一名称的理由。然而，在这种情况下，熵的差异取决于气体的化学性质，其值不是由（1）式来决定的。

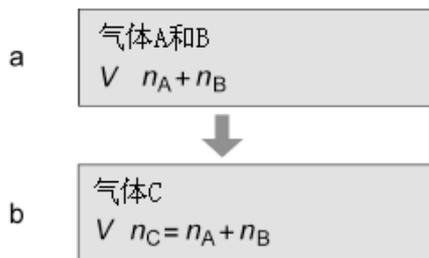


图 4-26-3 用气体 C 来代替气体 A 和 B。C 的物质的量等于 A 和 B 的物质的量之和。

历史:

也许，在杜撰“混合熵”这一新词时，人们想到熵是物理系统的无序程度的量度。这一熵的解释是对的，但对它的掌握却不是那么容易的。

建议:

只要人们知道气体在等温膨胀过程（和等容升温过程）中其熵会增加，他们就不再需要“混合熵”这一术语了。

Friedrich Herrmann and Peter Würfel

4. 27 麦克斯韦速率分布

主题：

根据麦克斯韦速率分布规律，我们可以计算气体分子速率的函数分布。结果表明，当 $v=0$ 时，其分布函数的值为零。随着速率的增大，分布函数的值有一最大值，然后当 $v \rightarrow \infty$ 时又回到零。最可几速率（most probable speed） v_{mp} 、平均速率（mean speed） \bar{v} 和方均根速率（root mean square speed） v_{rms} 的值都是不同的。分子速率分布是通过分子束来测定的。这可以通过模型实验（model experiment）来想象：充当着气体分子的一个个运动小球从气体模型的出口处飞出来。我们根据它们飞出来的速率来对它们进行分类。

缺点：

图 4-27-1 所示的曲线通常叫做麦克斯韦分布曲线。这个曲线的样子是令人难以置信的。像曲线所表示的那样，我们可以接受这样的事实，即高速分子是少数的。但是，难道速率越小概率越大吗？在许多教科书中没有讨论这个明显的问题。实际上，分布函数的这种情况可以认为是人为造成的一种不恰当表示。

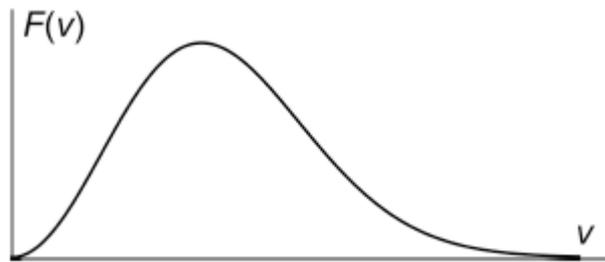


图 4-27-1 速度绝对值的分布

这个曲线表示的是速率的分布，即速度绝对值的分布。速度是矢量。当我们用力学量（速度、动量、力）的绝对值来表示力学定律时，这些定律会变得很复杂。在我们所讨论的例子中，我们并不是要求速率区间 dv 中分子出现的概率，而是要求速度区间 $dv_x dv_y dv_z$ 中分子出现的概率。这样，我们就得到了以 $\mathbf{v} = 0$ （零矢量）为中心的高斯分布。图 4-27-2 给出了速度矢量的一个分量的概率分布（见图 4-27-3 中的方程（1））。为什么当 $v \rightarrow 0$ 时速度的绝对值（速率）趋向于零？其原因是我们没有比较速度空间的相等体积，而

是比较相等区间 dv 。在给定的 dv 中，在速度空间中属于 dv 的体积 $4\pi v^2 dv$ 随速率的平方而增大（见图 4-27-3 中的方程 (2)）。这样，速率大的分子是“特许的”，速率小的分子是“受阻的”。在麦克斯韦的原著中清楚地区分了这两种情况。

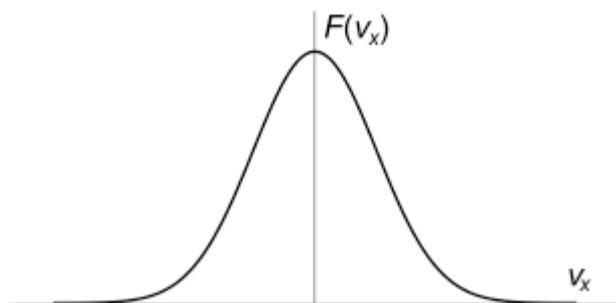


图 4-27-2 速度的 x 分量的分布

2. 我们经常强调，图 4-27-1 中的曲线是不对称的。但我们总没有提起它包含的意思：曲线本身没有对称轴，或者说，曲线没有以纵轴为对称轴。我们也这样说，由于曲线的不对称性， v_{mp} 、 \bar{v} 和 v_{rms} 的值都是不同的。有时我们甚至强调，必须严格区分这些值。对学生来说，他们不知道在什么情况下这种区分是重要的。也许更多的是，学生们从来没有机会来混淆这三个值。

速度矢量为 \vec{v} 的粒子	
$F_1(\vec{v}) = A \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$	(1)
速率为 v 的粒子	
$F_2(v) = B \cdot v^2 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$	(2)
在分子束中速度为 v 的粒子流	
$F_3(v) = C \cdot v^3 \cdot e^{-\frac{mv^2}{2kT}}$	(3)
能量为 E 的粒子	
$F_4(E) = D \cdot \sqrt{E} \cdot e^{-\frac{E}{kT}}$	(4)

图 4-27-3 各种不同的概率分布。常数均分别被合并为 A、B、C 和 D。

3. 公式 (1) 和 (2) 给出了处于热力学平衡状态的气体分子的速率分布。我们经常

这样说，对于每一个粒子束，都有这样的分布规律，这种分布可以直接通过粒子束来测定。实际上，粒子束的速率分布与处于平衡状态下的粒子的速率分布是相同的。然而，相应的函数关系是不一样的，如图 4-27-3 中的公式 (3)。这里，波尔兹曼因子前的速率有 3 次方^[1]。（由于几何学的原因，这里应该是 v^2 ，但由于快速分子对流密度的贡献比慢速分子的要大，所以应再乘上 v 。）

4. 通常，不管是否需要，我们总要强调速率分布的重要性。我们可以根据速度分量的分布计算压强。对于其他许多目的，我们需要知道动能的分布。同样，动能分布与速率分布具有相同的形状（见公式 (4)）。它能回答以下问题^[2]：“有多少气体分子具有足够的能量来引发一个吸热化学反应，或电离一个原子或分子，或激发一个原子，或脱离地球或其他行星的引力场的束缚，或克服两个原子核之间的静电斥力（导致原子核聚变反应的发生）？”

唯一不需要的分布是速率分布，即速度绝对值的分布。

历史：

1. 在麦克斯韦的原著中可以找到速率分布^[3]。麦克斯韦的结论一代代地传下来，因为他是一位伟大的物理学家。

2. 也许是为了证明平均速率是对温度的测量。

3. 用小球做的模型实验来解释是不严密的。

建议：

其他量的分布，如动量矢量的分量的分布或动能的分量的分布将更有用。模型实验最好能省掉。

[1] *Döring, W.:* Einführung in die theoretische Physik V, Statistische Mechanik, Sammlung Göschen, Band 1017, p.16.

[2] *Vogel, H.:* Physik, Gerthsen-Kneser-Vogel, 13. Auflage, Springer-Verlag, Berlin, 1977, p.169.

[3] *Maxwell, J. C.:* On the dynamical theory of gases; Philosophical Transactions of the Royal Society of London, Vol. 157(1867) p.49-88.

4. 28 蒸发和沸腾

主题：

水（跟其他液体一样）可以以两种方式转化为气体：蒸发和沸腾。如果给水加热，它的温度先升高。当其温度到达沸点时，它的温度就不再上升。对于熔解，就没有相应的两种转化方式。

下面是教材中的几种典型的有关讨论：

“当蒸汽压强等于液面外另一种气体的压强时，液体就会沸腾。这样，蒸汽的产生不仅发生在液体的表面，也发生在液体的内部（液体内部形成气泡）。”^[1]

“当蒸汽压强等于液面外的空气压强时，液体就沸腾。沸点由空气压强所决定。”^[2]

“沸腾：沸腾时在液体内部形成气泡。当液体沸腾时，其温度保持不变……蒸发：当液体的温度低于沸点时，蒸汽总是在液面上形成的。”^[3]

缺点：

对以下常见的问题还没有令人信服的答案：

(1) 为什么蒸发这一相变的速度慢，而沸腾这一相变的速度快？

(2) 为什么当液体的温度到达沸点时其温度保持不变？

对这两个问题的回答是很简单的：

蒸发的速度取决于水蒸汽从水面逃离到蒸汽的分压强较小的地方的速度。这是一个扩散过程，显然这个速度是很慢的。我们都知道，我们可以通过吹风（即通过对流）来加快蒸发的速度。当水沸腾时，其蒸发的速度就不局限于扩散了。这时，由于水面上的蒸汽压强等于大气压，即气体是纯的水蒸汽，蒸汽并不是通过扩散离开表面的，而是无阻尼地流出去的。蒸汽是在没有任何阻力的情况下离开水面的。这时，蒸发的速度仅仅由加热的速度决定。

如果熵在低于沸点的情况下以足够快的速度被传递到水中，所产生的蒸汽无法将所有的熵带走。熵就积累起来，水的温度就会升高。当水的温度升高到沸点时，这一瓶颈就消失了。这时，蒸汽形成的速度由熵传递的速度来决定。如果大气压不是 1bar，即沸点比 100°C 要低，情况也是这样的。气泡的形成是眼睛能观察到的，但它对于沸腾这一过程是无关的。如果我们用 IR 灯在水的上面给水加热，只要水面的温度到达沸点，水沸腾时我们仍看不到气泡。

历史:

用眼睛所观察到的现象（气泡）妨碍了我们对现象的本质的揭示。

建议:

唯一的办法是，考虑水面上的水蒸汽所产生的分压强。当这个压强低于大气压时，水就会蒸发。水靠扩散来蒸发的速度很慢。当水沸腾时，水面上的蒸汽是纯蒸汽。这时水的汽化没有受到阻碍。我们在解释气泡的形成时，没有说明这仅仅是当加热器在水的下面时才会发生的沸腾现象。运用化学势的概念就更容易解释了（译者注：因为蒸汽的分压强随化学势的增大而按对数规律单调增大，所以用分压强来解释和用化学势来解释是等价的）：相变和扩散这两种过程都是由化学势差驱动的。

参考文献

- [1] Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik, Springer-Verlag, Berlin, 1977, S. 189.
- [2] Sexl, Raab, Streeruwitz, Das mechanische Universum, Band I, Verlag Moritz Diesterweg, Frankfurt, 1980, S. 205.
- [3] Physik, GROSS-BERHAG, Ernst Klett Schulbuchverlag, Stuttgart, 1996, S. 92.

Friedrich Herrmann

4. 29 海洋性气候和水的热容

主题:

靠近沿海的国家冬暖夏凉。具有一般物理知识的人都会认为，这是水的比热 c 特别大造成的。

缺点:

为什么我们要比较 1kg 物质的热容，而不比较 1mol 或 1m^3 物质的热容？在我们所讨论的这个例子中，无论是单位质量的热容 $C/m = c$ 还是单位体积的热容 $C/V = c\rho$ 都不是最合适的量。而最合适的量是单位面积的热容 $C/A = cph$ ，这里 A 是水的表面积， h 是对热交换有效的水的深度。 h 表示能观察到水温随季节而变化的深度。

为了估计 h 的值，我们来考虑在夏季半年(summer half-year) $a/2$ 时间内(译者注：这里设定了一个简化模型，即假定地球有半年时间吸收热，有半年时间放出热。夏季半年指的是地球吸收热的半年，大概是四月到九月这段时间。 a 是“年”的拉丁语 *annum* 的首字母。)水通过表面 A 所吸收的热量为 Q 。这里，我们设定热传导率常数为 λ ，在所研究的水层中的温度梯度常数为 $\Delta T/h$ 。这样， $Q \approx (1/2) aA\lambda\Delta T/h$ 。另一方面，可以通过热容 $C=cphA$ 和所研究的水层与环境之间的温差 $(1/2) \Delta T$ 来估算 Q ： $Q = cphA (1/2) \Delta T$ 。联立上述两式，我们得到：

$$h \approx \sqrt{\frac{\lambda a}{c\rho}}$$

最后，将 $C/A = cph$ 代入上式，我们得到：

$$\frac{C}{A} \approx \sqrt{\lambda c\rho a}$$

通过对下面表格中的数据比较我们发现，水在这方面的表现是差的。水对气候的影响只有当我们把海洋中的水循环和年降水量考虑进去才能被理解。水在海洋中的循环深度远大于计算值 2m 。欧洲的年降水量的典型值为 1000mm 。在对气候的影响程度方面，这个年降水量相当于足以使 60m 水层温度升高 10K 的热循环。水影响气候的决定性因素是它的流动性和挥发性，而不是它特别大的比热。由于水的密度和热传导率都很小，水较大的比热在这里并不起主要的作用。

表 4-29-1

	ρ	λ	C/m	C/V	C/A	h
	Mgm^{-3}	$\text{Jm}^{-1}\text{s}^{-1}\text{K}^{-1}$	$\text{kJkg}^{-1}\text{K}^{-1}$	$\text{MJm}^{-3}\text{K}^{-1}$	$\text{MJm}^{-2}\text{K}^{-1}$	m
水	1.0	0.6	4.2	4.2	9	2
花岗岩	2.8	3.6	0.8	2.3	16	7
玄武岩	2.9	2.1	0.9	2.5	13	5
河沙 ¹	1.6	1.1	1.0	1.7	7	5
地表泥土 ²	2.0	2.3	1.3	2.5	14	5

注 1: 细沙, 湿度 0.07g/g。注 2: 由细沙组成的泥土, 湿度 0.14g/g。

历史:

我们容易把两个朝相同方向变化的事物之间的关系误认为是因果关系, 更容易屈服于专家们所提出的结论。我们容易相信某些错误结论, 不敢于去反驳, 使这些错误幸存下来。

建议:

仅仅消除上述错误结论是不够的。物理学中还有其他更多类似的不一致性, 而这些不一致性却通常被人们所接受。

Georg Job

4. 30 大气层中的热传递

主题：

对于太阳光来说，地球周围的大气层几乎是完全透明的。因此，太阳光不是被大气层而是被地球表面吸收。对于由地球发出的红外辐射（infrared radiation）（简称 IR），大气层几乎是完全不透明的。从外太空看过去，来自地球的 IR 在一定高度的大气层被散发出来，这一高度叫做散发高度（emission altitude）。相应的能量通过各种机制从地面传到散发高度。这些机制通常用如图 1 所示的能流图来表示。在这一能流图中有两种辐射能流很引人注目，它们比来自于太阳的能流还要大。

缺点：

图 4-30-1 表明，辐射是地面和高对流层（upper troposphere）之间的能流的主要组成部分。相应的箭头是最大的，其能流密度是所有其他能流中最大的。在教材中出现的这种图给人们加深了这种印象。

然而，这种描述误导了人们。如果我们将两种辐射能流叠加起来，我们就得到在地面和高对流层之间的净辐射能流。结果，地球所辐射的能流只占地球所吸收能流的 8%（如图 4-30-2）。在这个图中，我们可以清楚地看出，从地球向外太空传递能量的主要形式不是辐射而是对流。从一级近似的角度来说，辐射甚至可以完全忽略不计。

也许有人会坚持用图 4-30-1 来表示，认为它比图 4-30-2 含有更多的信息。然而，这些信息一般来说是不需要的。根据我们的经验，这些信息会误导学生。

实际上，我们可以将任何其他流分解为两个或更多个分流。我们可以将所在房间里静止的空气分解为两部分，一部分是在给定时刻向右运动的分子，另一部分是在同一时刻向左运动的分子。这样，我们就得到了两个巨大的空气流。同样，我们可以将没有电流的导体中的电子分为两部分，它们可能是方向相反的两个强电流。我们可以用同样的方法来分解大气层中 IR 的水平分量。

我们来讨论另一个例子。这个例子更类似于大气层中的辐射流。这个例子是关于在一个固体（比如一根铜棒）中的热流。这根棒的一端在加热，另一端在冷却。大气层中 IR 的光子相当于在这根铜棒中的声子。当我们讨论铜棒中的热传递时，我们不会把铜棒中的声子流分解为相反方向的两个流。

我们并没有说这样的分解是错的。但这样做会把事情弄复杂，会产生误导作用。

历史:

上述缺点产生的原因可能是由于分能流比净能流容易测量。

建议:

在图中表示出未经分解过的大气层中的辐射能流，而不是分能流。这个量对辐射场中的每一点都有确定的值。这样就能清楚地说明，通过低对流层（lower troposphere）传递热的主要机制是对流。

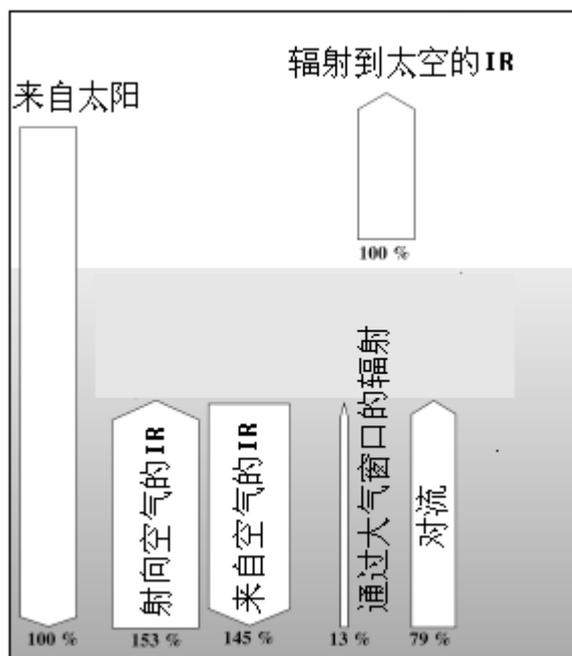


图 4-30-1

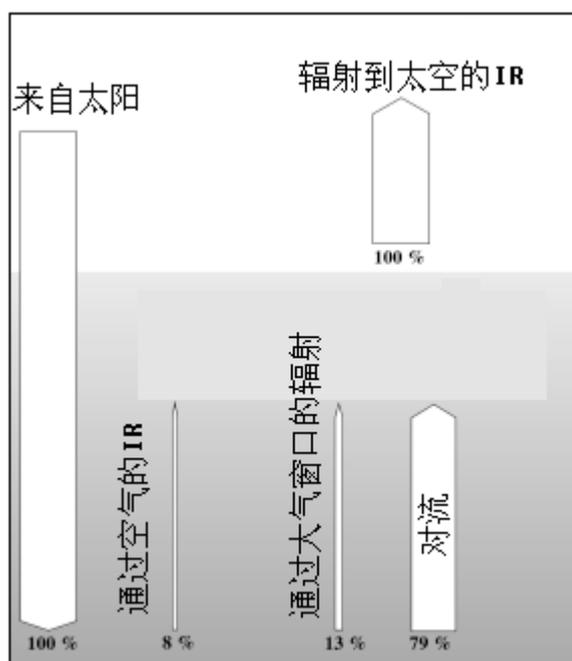


图 4-30-2

4. 31 流星和航天飞船

主题：

当航天飞机、宇宙飞船或流星体进入大气层时，它们的温度会升高。人们总是把这一现象归因于摩擦。

缺点：

摩擦产生热，热意味着高温。人们都有这样的经验。制动器会变热，钝的钻头会产生火花，钝的圆锯锯条会使木头烧焦。人们很自然地用摩擦来解释当航天飞船或流星体进入大气层时所发生的高温现象。然而，这样的解释是不正确的。

一个在空气中高速运动的物体会在前方压缩空气。如果它的速度大于声速，在其前方会形成冲击波，从而突然导致压强、密度和温度向更大的值突变，速度（相对于这个运动的物体）向更小的值突变。物体运动的速度越大，这种突变就越大。对于一个重返大气层的宇宙飞船来说，它的温度可到达 20000K。（因而，其防热层的温度可达 2000K。）在后来发生的膨胀过程以及由此带来的摩擦和湍流过程中，温度又下降了。因此，温度升高的现象发生在飞行物体的“头部”，而不是发生摩擦的地方。

由此引发出两个问题：

1. 为什么温度升高的现象发生在冲击波当中？
2. 为什么在后来的摩擦过程中物体的温度不再升高？

我们可以借用熵的概念来回答上述两个问题。我们所知道的是，对于一定量的气体，其熵取决于它的体积和温度：对于一定的体积，温度越高，气体含有的熵越多；对于一定的温度，体积越大，气体含有的熵也就越多。

对于航天飞机的情况，我们来研究某一部分空气。在冲击波发生的瞬间，这部分空气很快被压缩，即这个过程是一个等熵过程（绝热过程）。由于熵没有变化，而体积减小了，所以温度必定升高。同样，当大气层中的空气质量减少时，其温度也会升高。

第二种效应，即尽管有摩擦但温度还是在降低的现象，更是难以预料的。为了解释这个现象，我们来研究一个模型，这个模型的几何形状比宇宙飞船、航天飞机或流星体要简单，但是其热力学过程基本上与它们的相同：气体在一个有阻力的管道中稳定地流动，如图 4-31-1 所示。当气体在膨胀过程中受到阻力时，在障碍物后面的那部分空气的体积流（每秒升）比在前面的大。如果把气体看作是理想气体，我们可以把这一过程用一个非

常简单的方程来描述：

$$c_p \cdot T + \frac{\hat{m}}{2} v^2 = \text{恒量}$$

这里， c_p 是气体在恒压下的比热容， T 是气体的热力学温度， \hat{m} 是气体的摩尔质量， v 是气体的速度。这个方程告诉我们，等式左边的表达式在一个流线上的每个点的值都是相同的：当速度大时，温度低，反过来也是*。（这个方程成立的条件是，气体没有通过管壁发生能量交换。）当气体在管子中流动时遇到阻力时，这个方程仍然成立。对于图 4-31-1 所示的情况，这个方程告诉我们，气体在通过障碍物后的温度低于通过障碍物前的温度。这是因为，气体在通过障碍物后体积增大，其速度较大。



图 4-31-1

如果我们把气体通过障碍物后的那部分管道做得较宽一点，我们可以保证让气体在障碍物前后的速度相等，如图 2 所示。现在我们理解了，为什么在障碍物中的摩擦过程没有导致气体温度的升高。气体由于摩擦而增加的熵并没有表现为较高的温度，而表现为较大的体积。因此，图 4-31-2 所示的恒温过程与大家熟知的盖-吕萨克膨胀（Gay-Lussac expansion）（译者注：气体向真空膨胀）是相同的。

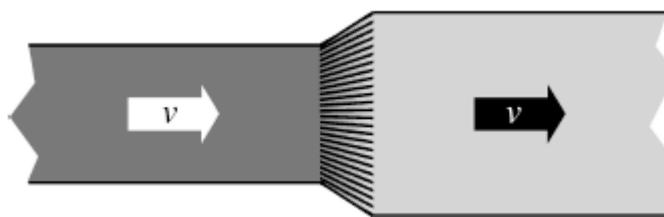


图 4-31-2

对于航天飞船也有相同的结论。这里也存在与摩擦现象伴随在一起的膨胀过程。在这种情况下，有一个辅加的效应：所研究的空气与周围环境的空气混合在一起。结果是，空气的温度确实降低了**。

总之，气体等熵压缩时温度会升高。当它膨胀时，其温度又会下降。气体的温度升高

不仅是由于摩擦，也由于压缩。“运动→摩擦→升温”这一对升温过程的描述方式对于液体和固体来说是正确的，对于气体来说是不正确的。这一现象对应于气体的哪个性质？这完全是由于气体的可压缩性。

历史：

由于等熵压缩或膨胀引起温度的变化是一种很普遍的现象。最引人注目的现象是高山上的雪。对于许多热现象，非物理专业人员的解释是与物理学的分析一致的。然而，在我们所讨论的问题中，他们的解释与物理学的分析不一致了：他们看到山顶上有雪，发现雪的分布与高度有关，而没有认识到与大气压强的关系。相反，他们能正确地解释由于摩擦引起的升温现象。为什么航天飞机或流星体的热现象与摩擦无关？显然，有些物理学者并没有比非物理专业人员高明。原因也许是，他们对熵这个简单而有力的工具并不熟悉。

建议：

告诉学生，等熵压缩和膨胀是引起许多明显的热效应的原因。导致流星体外层的熔化和导致航天飞机产生危险的高温现象是这种热效应之一。

*例如，当汽车轮胎的阀门打开时，空气就会向外冲出来。在轮胎内部，空气的速度为零。而当它离开轮胎时，速度就立即增大了。因而导致其温度降低。

**实际上，这个过程还要更复杂。由于高温，会引发分子的电子激发、溶解和其他化学反应。所有这些都进一步引起温度的降低。

Friedrich Herrmann

4. 32 热辐射

主题：

我们来讨论关于热辐射的三种表述，这些表述可以在教科书中找到。它们中有些是自相矛盾的，有些是不正确的。

- (1) 热传递以热传导、对流和热辐射的形式发生。
- (2) 光谱中可见光的红的那端是红外线或热辐射区域的开始。
- (3) 物体吸收太阳光后其温度会升高。这一现象表明，热和太阳光一起传到地球。

缺点：

我们这个主题的名称是**电磁辐射**，或**热辐射**。这些名称表明产生电磁辐射的特殊方法：物体发射电磁辐射是因为它的热力学温度大于零。还有其他电磁辐射的产生方式，这种辐射叫做非热辐射。用速调管（klystron）产生微波，用半导体二极管产生光，用激光器产生激光，这些都是非热辐射的例子。

我们先来评论上述三种表述中的其中一种。我们的观点是，热辐射不局限于红外区域。太阳光是热辐射，但它的极大部分能量在光谱的可见光区域。宇宙背景辐射是热辐射，它的光谱最强区域在微波段。聚变反应堆的等离子体发射出 X 波段的热辐射。

“热辐射传递热”这一表述犯有更严重的错误。为了分析这一表述，我们先来弄清楚“热或热能在一个过程中传递”这句话的意思。热传递是伴随着熵传递的能量传递。能流 P 和熵流 I_S 相互成正比：

$$P = T \cdot I_S.$$

一般来说，能流的产生有各种不同的原因：热、功、电和化学等方面的原因。只有符合上述方程的那部分能流才与热有关。

为了确定哪一部分的电磁辐射是热辐射，我们必须考虑热流和温度。如果辐射具有普朗克波谱（Planck spectrum），就没有这个问题。然而，辐射越是局部的，要确定相应的温度就越困难。如果辐射来自非热辐射器（例如，来自速调管的微波，或来自无线电发射器的电磁波），情况又变得简单了。在熵流接近零的情况中，我们不把所发射的波叫做热辐射。如果只考虑吸收器中电磁波所产生的效应，即吸收器发热的现象，这些问题是可以忽略的。

现在我们来分析上面所引用的几种表述的错误。吸收器的发热效应并不表明辐射传递了热。这个热效应是由于辐射传递了能量，而这能量又耗散在吸收器中。能量的“形式”

对此并没有关系。对于完全没有熵的辐射和热辐射，如果这两种辐射携带着相同的能量，如果它们又完全被吸收，则它们在吸收器中能引起相同的热效应。

我们小结如下：从吸收器的热效应中我们不能判断热是由辐射传递过来的。

事实上，在我们经常使用那些错误结论的情况中，即与太阳光或来自发光物体的红外辐射有关的情况中，在吸收过程中的熵产生率比由辐射所传递的熵流要大得多。

我们已经发现，吸收器的热效应不能证明辐射传递了熵。然而，有些现象清楚地表明某些辐射在传递着熵。对于这些情况，我们不是去观察吸收器，而是去观察发射器。如果一个物体与周围环境没有接触，而它的温度在下降，即它的熵在减少，我们可以断定，这个物体所发射的辐射一定携带着熵；这是因为，热力学第二定律告诉我们，熵是不能消灭的。

历史：

在人们认识到辐射的性质和光的性质相同之前，在人们知道能量和热的关系之前，人们长时期地一直在观察和研究热辐射。辐射热（strahlende Wärme）这一名称很可能与谢尔勒（Scheele）有关^[1]。在 1790 年，皮克特（M. A. Pictet）认为，光和热是分离的。他特别认为，月光不伴随热，而太阳光伴随热。在十九世纪初，越来越多的人相信光和热辐射在本质上是相同的。然而，一个明确而清晰的解释一直要等到下面这两个重大理论的出现：麦克斯韦的电动力学和普朗克关于辐射的统计热力学^[3]。

建议：

不要把红外辐射和辐射热传递等同起来。

对于来自太阳的电磁辐射，我们应该这样说：“它传递着能量”。吸收器的热效应主要是由于所传递过来的能量的耗散。辐射也会传递熵；在对这一事实的讨论中，我们必须考虑发射器的降温，而不是去考虑吸收器的升温。

[1] Mach, E.: Die Principien der Wärmelehre. _Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig 1919._S.126

[2] Pictet, M. A.: Essai sur le feu. _Genève 1790

[3] Planck, M.: Vorlesungen über die Theorie der Wärmestrahlung.

Friedrich Herrmann and Peter Würfel

4. 33 太阳和线谱灯

主题：

大学生们都知道有两类发光机制不同的光源：一类是属于炽热物体的，如太阳发出的光和蜡烛的黄白色火焰发出的光。另一类属于线谱灯的，如激光器、LED 和单色火焰发出的光。

对于第一类光源，学生们知道，热的黑色物体发射电磁辐射，即热辐射或黑体辐射。其光谱仅取决于辐射体的温度。相应的函数叫做普朗克定律。

对于第二类光源的发光机制，学生们学到的有关知识是这样的：在原子中的电子、分子或晶格从激发态跃迁到低能态，从而发射出光子。相应的光的频率由两个能态之间的能量差决定，其强度由跃迁概率决定。激发态的实现有很多不同的方式：电的方式、热的方式和光泵激（optical pumping）的方式。

缺点：

对不同的光源我们采用了不同层面的理论来讨论：对太阳、灯泡和烛焰等，采用热的理论，对线谱灯、激光和 LED，采用原子理论。这就给人以这样的印象：灯泡发射的光跟原子物理学无关，而撒有食盐的气体火焰中的钠原子发出的光与热力学无关。

实际上，两种光源的发光都是由于系统从激发态跃迁到较低能态造成的，其发光强度都遵循热力学定律。

选择两种不同的理论解释也许是因为我们通常只关注光谱的形状。实际上，黑体的光谱只能用统计物理学的理论来解释。它跟微观机制无关。相反，热力学与线谱灯的谱线无关。线谱灯发出的光需要用原子物理学来解释。

然而，如果我们不向学生说明这两种解释模式的相互关系，我们不可能希望学生有正常的反应：当他们不理解时会提出问题。这种问题可能会是这样的：为什么太阳没有像氢-氦线谱灯那样具有线光谱？

历史：

黑体辐射的理论和线光谱的理论是分别独立地发展起来的。对这两个内容的教学直到今天仍保留着相互的独立性。我们所举的例子也表明，看上去是“满意的解释”实际上并不完全清楚。对于第一种情况，我们给出了微观解释；对于第二种情况，我们对产生辐射的过程和它的谱线进行了描述。

建议：

只要温度不等于 0K，物体都会发出电磁辐射。如果物体在电磁波的频率为 f 时的发射率为 $e(f)$ (e 的大小在 0 到 1 之间)，则在 df 区间的能流密度 j_E 由普朗克定律给出：

$$dj_E = \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{f^3}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} df.$$

而一个物体在每一频率下的发射率都等于这一频率下的吸收率，即

$$e(f) = a(f).$$

如果对于所有频率的 e 值都等于 1，则对于 a 也是这样，物体完全是不透明的，它呈黑色。

如果 $e(f) = 1$ 对于每一频率不成立，则普朗克定律变为：

$$dj_E = e(f) \cdot \frac{2\pi h}{c^2} \cdot \frac{f^3}{e^{\frac{hf}{kT}} - 1} df. \quad (1)$$

因为对于每一频率 e 都比 1 小或等于 1，所以对于每一频率 f 非黑体的光谱能流密度小于或等于普朗克定律所给出的值。单色火焰的光（如，甲烷火焰所发出的带蓝色的光，或撒有盐的氢气火焰所发出的黄光）就是这种光谱。

炽热物体的光谱可以用热力学理论来描述。这一事实并不能说明其发射的微观机制与线谱灯的不同。从炽热物体发射出来的光子是由于跃迁产生的：对于可见光的光子，是由于电子跃迁产生的；对于红外光的光子是由于振动跃迁或旋转跃迁引起的。由于在固体中所有能级的跃迁都有可能，所以经常能出现普朗克发射体的特殊情形。（然而，并不是所有宏观物体都会发射普朗克光谱。这里有一个有趣的实验可以证明这一点：用本生灯给两块靠近在一起的不同材料加热，比如一块是铁，另一块是石英或蓝宝石或白色卵石。我们可以看到，铁块发光了，而石英、蓝宝石或白色卵石没有发射出可见光。）

太阳被看作是一个特殊的热辐射器。我们知道，它几乎是由氢和氦组成的。因此，我们可以认为它的光谱跟氢-氦线谱灯的光谱相同（然而它是由热激发而不是由电激发所致。）另一方面，我们知道太阳光是连续光谱，它与普朗克光谱很接近。

如何让这两种表述相一致？这种解释来自于方程 (1) 中的因子 $e(f) = a(f)$ 。对于实验室中的氢气，它的发光是由热激发所致，对于所有频率这个因子几乎等于 0。只有在紫外光区域，对于有些频率它是完全透明的。因而，这种灯的发射光谱很不同于普朗克光

谱。然而，当物体变厚时，物体的吸收率和发射率都会增大。当光进入物体时，它在物体中的传播路径足够长，最后总能找到合适的跃迁。相应的路径长度当然取决于光的频率。在太阳中，这个长度无论如何也有几百公里。与线谱灯的大小相比，这已经是很长了，但与太阳的半径相比却仍是很小的。一个 10cm 厚的太阳物质层（太阳光球）是完全透明的。在垂直于这个物质层的方向上它实际上没有吸收光也没有发射光。当这个物质层的厚度增加时，其吸收率和发射率都增大。这时，它的光谱与线谱灯的光谱几乎一样了^[1]。当气体层的厚度再增大时，在谱线区域将会有越来越多的光发射出来。对于 1000km 厚的气体层，它几乎完全吸收所有光，并像温度为 6000K 的黑体一样发射光。

然而，这种吸收和发射所对应的是什么跃迁？即使我们只有纯净的氢-氦混合物，如果我们忽略（弱的）电离，当气体层的厚度为几百公里时，在可见光区域的光将被完全吸收。这种吸收是由于谱线的宽度。然而还有另外的吸收机制：氢-氦气体是弱电离的，而自由电子会吸收光。另外，太阳还含有其他物质，虽然它们的浓度很低，但它们的吸收区域部分地落在可见光谱区。

既然我们知道在太阳中光的路径长度对我们来说可以认为是长的，我们就没有必要为“什么是主要的吸收机制”这个问题而烦恼了。这跟大家所熟悉的实验一样：在一个盒子中有一个小孔，无论光如何被内壁反射或散射，无论内壁是黑色的、白色的、黄色的或蓝色的，这个孔总呈黑色。这个孔呈黑色与吸收机制无关。

[1] M. Vollmer: Hot gases : The transition from line spectra to thermal radiation. *Am. J. Phys.* **73**, (2005), p. 215.

Friedrich Herrmann

4. 34 气体在真空中膨胀时的温度和热

主题

在许多情况下，熵的性质与日常口语中热的性质相吻合。然而，在一个著名的实验中，这两个概念出现不一致的情况。这就是气体在真空中膨胀的实验，又叫焦耳-盖-吕萨克膨胀实验（Joule-Gay-Lussac expansion）。

缺点

我们在向学生介绍熵可以作为日常口语中的热的量度时，有时会听到这样的异议：在焦耳-盖-吕萨克实验中熵在增加，但在这里没有“热产生”^[1]。

对此，我们可以作几点讨论：

1. 物理量和它的名称之间的相关性或一致性并不总是很强的。例如， Q 这个量，它的名称叫“热量”。如果告诉学生我们不能说物体中含有一定量的热，他们是很难接受的。对于一个叫做“力”的量 F ，其名称和物理意义之间的一致性更差。

2. 在上面提到的情况中，这个物理量的名称和物理意义之间的一致性甚至更不行，因为这个物理量 S 的名称是熵。唯一的问题是：我们有必要提及日常口语中热的概念和物理量熵的性质之间的一致性吗？事实上，它们之间的一致性比其他物理量的更好。

我们来举力的例子。在实践中我们通常用我们的“肌肉感觉”来引入力。然而，这种“肌肉感觉”与其说是力的性质，倒不如说是能流的性质。但是，没有人会对此提出异议。

3. 我们再回到气体在真空中膨胀的例子。在热力学课程刚开始，我们不会讨论这个实验。我们只是在讨论气体时会引入这个实验。我们会对这个实验作这样的讨论：气体向真空膨胀。到达热平衡后，气体的温度跟膨胀前的几乎相同。我们能断定气体的热含量（日常口语中的“热”）没有增加？初一看，好象是这样。然而，当我们仅仅用温度来判断气体膨胀前后的熵含量（即日常口语中的热的含量）时，我们要格外地小心，这是因为气体的体积发生了变化。我们将气体的体积回复到初始时的大小，并且在这个过程中既不给气体输入熵也不向气体抽取熵。这样做以后，我们发现气体比以前更热了，即其温度升高了。它必定含有更多的熵（即日常口语中的热）。

历史

我们认为，熵反映了日常口语中热的性质这一观点被否认的原因与可能出现的两个概念之间的差异无关。与此有关的原因倒好象是，有人担心发现不了熵的复杂性（这是他们

一生中一直认为的), 拼命地在寻找能说明这个模型的局限性的例子。

建议

在引入熵时, 将它与日常口语中热的概念联系起来。这两个概念的一致性比我们在中学里教的其他物理量与日常口语中相应概念的一致性要更强。

[1] M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschede, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach and W. Weber: Expert opinion on the Karlsruhe Physics Course; Commissioned by the German Physical Society

<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk/Fragen-Kritik/KPK-DPG%20controversy/Expert-opinion-english.pdf>

Friedrich Herrmann

4. 35 熵的测量（增补）

主题

熵有一个“难懂的物理量”这一名声。对熵的这个评价是由于人们确信它是一个难测的量。

缺点

在引入一个新的物理量时，关于它的测量步骤的知识对于理解这个量是非常重要的。测量方法越明确越好。人们也会这样说：测量越“直接”，这个量的概念就越具体和清晰。

然而，通常情况下一个最容易理解的测量方法，未必一定是最准确或最容易操作的。因此，为了清晰地理解某个量，我们需要引入并非很精确和在技术上较难实现而在概念上很明确和简单的测量方法。

熵在这方面是怎样的？熵通常是根据克劳修所说的方法来引入的：“我们把系统的每一个状态解释为系统的状态函数 S 。这个状态函数叫做熵。对于可逆过程，它的完全微分 dS 为

$$dS = \frac{dQ}{T}$$

这里， dQ 是吸收的热量， T 是热量被吸收处的温度。”^[1]

根据这个定义，我们很难看出所测出的熵表示了什么。我们如何来确认系统的状态变化是否是可逆的？我们如何来测量所吸收的热？我们如何来具体操作？

实际上，如果我们利用熵的“产生性”（producibility），即过程的不可逆性，熵是很容易测量的^[2]。其测量过程在技术上很简单，又很便宜和很精确。然而，是否有在原理上更简单的测量方法？

为了回答这个问题，我们来看其他具有与熵一样的共同性质（广延性，或“实物型性”）的物理量是如何测量的。

这些量的测量是基于这样的原理来进行的：所测的量被传递到测量仪器中。测量仪器通过指针的偏转作出反应。用静电计测量电荷就基于这样的原理。所测的电荷被传递到静电计。静电计的指针由于接收到电荷而发生偏转。这个测量并不精确，但电荷的重要性质可以从中清楚地看出：带电体之间有相互作用力。并且，从中也显示出，电荷是实物型物理量。

动量也可以用同样的方法来测量：将动量传递到测量仪器中，测量仪器作出相应的反

应（如指针偏转，或发出其他可见的信号）。冲击摆就是一例。在文献[3]中，我们给出了另一种测量方法。

熵是否也可以用同样的方法来测量？相应的测量仪器如图 1 所示。这是一个盛有冰水混合物的长颈瓶。（另一种仪器比这更复杂，它叫做本生冰量热器。）所测的熵被传递到长颈瓶中。结果，部分冰熔解了。冰的熔解量是所提供的熵的量度。



图 4-35-1. 所测的熵被传递到冰水混合物中。冰的熔解量是所提供的熵的量度。

由于 1g 液态水所含的熵比 1g 冰所含有的熵多 1.40J/K，我们很容易确定加给长颈瓶中的熵的数量。并且，液态水具有比冰更大的密度。因此，熵的增量也可以通过细管中水面的升高量来读出。

这个测量过程在实际测量中并不方便。原因是，在将熵传向仪器的过程中必须保证不会产生新的熵，即过程必须是可逆的。这在理论上是可以做到的（参见文献[4]的描述），但实际做起来是很复杂的。

历史

在物理课程中为何不引入如此简单和明了的熵测量方法？其原因可能是，人们没有认识到熵是实物型物理量。当熵用克劳修斯的方法引入后，它的这一简单的性质很难被人们认识。实际上，直到 1911 年，即克劳修斯提出熵 50 多年后，F. Jaumann 提出了局域的熵平衡方程^[5]；同年，卡伦德（H. L. Callender）揭示了克劳修斯的熵和卡诺的热质（calorique）的相同性^[6]。

建议

忘了熵是难测的这一结论。从理论上来说，熵的测量与电荷的测量是相同的。这种测量既可操作，又精确，甚至更简单。

- [1] Gerthsen, Kneser, Vogel: Physik, 13. Auflage, Springer-Verlag Berlin, S. 183
- [2] F. Herrmann: Measuring entropy
<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/publication/Historical-burdens/30-Measuring-entropy.pdf>
- [3] F. Herrmann, M. Schubart: Measuring momentum without the use of $p = mv$ in a demonstration experiment, *Am. J. Phys.* 57, 858 (1989)
- [4] G. Job, R. Rüffler: Physikalische Chemie: Eine Einführung nach neuem Konzept mit zahlreichen Experimenten (Studienbücher Chemie), Vieweg und Teubner 2010, S. 59
- [5] F. Jaumann: Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze, Wiener Berichte CXX, Abt. IIa, S. 385-530.
- [6] H. L. Callendar: The caloric theory of heat and Carnot's principle, *Proc. Phys. Soc.* London **23** (1911), S. 153

Friedrich Herrmann

4. 36 胡椒粉和食盐混合时的熵增加

主题

“在热没有产生或消灭的情况下，熵会变化（胡椒粉和食盐混合时）。”^[1]

缺点

1. 首先是语法问题：如果某东西产生了，那么它在以前是没有的，是后来才有的；如果某东西消灭了，那么它以前是有的，后来没有了。由此，叫做热的量 Q 既不会产生，也不会消灭。如果我们运用现代意义上的“产生”和“消灭”这两个词，这种理解是对的。我认为，上面这句话不能简单地看作是作者的失言，而是在物理学中普遍存在的一个失误。当学生（对于文法学校的学生来说理由更充分）对这个所谓的过程量或过程函数 Q 有问题时，我们不必感到奇怪。

2. 在统计物理学中，熵是这样定义的：

$$S = -k \sum p_i \ln p_i \quad (1)$$

这个公式可以应用于任何离散随机变量 X 。 p_i 是 X 具有值 X_i 的概率。它的不明确之处是：一方面它没有说明这个简洁定义的理由，另一方面它会导致误解。为了计算熵值，我们不需要别的，只需要概率分布。我们需要知道的是不同的状态。我们不需要知道状态的哪些方面不同，也不需要知道它们不同的程度如何。熵可以被认为是能描述统计分布的几个物理量（如平均值、离差或高阶矩）中的一个。结果，定义（1）可以用于与热力学关系不大的系统或情境中。

特别地，这意味着我们可以计算出并没有处于热力学平衡状态的系统（即既没有确定的温度也没有确定的化学势的系统）的熵值。如果由于一些基本的原因这样一种平衡不能建立，（1）式中的量就失去了热力学含义。尽管有这一事实，热力学中仍经常讨论这种例子。这样，人们会去考虑在洗牌时的熵增加^[2]，或象我们在前面所引用的例子：胡椒粉和食盐混合时的熵增加。在这两个例子中，我们无法确定其温度和化学势；即使经过任意长的时间和不定的加热激活，也不可能使其到达具有这些量的状态。我们从中所计算出来的熵值已经不具有在物理考试中应用（1）式所得到的熵值的含义了。在这种情况下来计算熵值最多是一种学术骗局。

3. 我们假定，提及胡椒粉和食盐是为了表明，即使在它们混合的过程中有熵增加，温度也不会升高。在通常情况下，这由焦耳-盖-吕萨克实验来证明。在高压气体向真空膨胀的过程中，熵增加 ΔS 。如果这部分 ΔS 在体积没有及时增大的情况下已经被提供给气体，

其温度升高将被清楚地观测到。在焦耳-盖-吕萨克实验中，我们没有看到温度的升高。

然而，在胡椒粉和食盐实验中，我们甚至无法确定，由于所期望的熵增加其温度是否变化；如果不考虑前面讨论中的争议，其熵值也只有初始值的 10^{-23} 倍^[3]。因此，这个实验无法确定其温度有否升高。

历史

在熵的教学中，人们通常没有把它看成是一个宏观量，因而没有把它与直觉联系起来。因此，人们总是抱住熵的统计解释不放。这就导致人们去计算那些大家熟知或容易得到的系统的概率分布，如骰子、纸牌游戏或我们所提到的胡椒粉和食盐。

建议

象引入其他物理量一样，我们应该把熵作为物体或物理系统的一种性质的量度来引入。正象质量量度惯性或动量量度我们通常所说的动量或冲量，熵量度我们所能感觉到的物体所含有的热的多少。这样，在理解日常生活和技术装置中的物理过程和物理现象中我们就可以避免走弯路。在下面两个知识点中，学习前者比学习后者来得更重要：当蒸汽通过汽轮机时熵的总量保持不变；在胡椒粉和食盐混合的过程中熵只增加 10^{-23} 倍。。

象处理温度、电阻和质量一样，对熵的微观解释可以放到后面去进行。

[1] 这句话引自发表在德国物理学会网站上的一个报告（第9张幻灯片）。显然，它代表了对卡尔斯鲁厄物理课程的报告的作者的观点。

<http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen-gutachter/vortrag-meier.pdf>

[2] D. Meschede, Gerthsen Physik, 21. Auflage, Springer Berlin, S. 244.

[3] F. Herrmann, G. Bruno Schmid: An analogy between information and energy, Eur. J. Phys. 7, 174-176(1986).

Friedrich Herrmann

4. 37 汽化的热、能量和焓

主题

A. “对于由液体转化为气体的相变，需要传递一定量（与温度有关）的热量 Q_g 。”

B. “对于液体的汽化，需要汽化焓。热从环境或液体中抽取。”

C. “使物体从液态变成气态所需的热能叫做汽化的潜热。[.....] 潜热这一名称有时也叫做转化焓。”

D. “在汽化中，必须克服分子引力做功，从而消耗热。将质量为 1g 的液体在恒温下汽化所需的热量叫做比汽化热 λ 。[.....] 汽化热包括内外两部分。外面的部分用于从初始体积增大到 1g 水蒸汽的体积[.....]。”

E. “同样，在液体变成气体的过程中，把物体分离为粒子时也需要能量。熔解或蒸发过程需要能量，其原因是组成物质的粒子间存在相互吸引的电力。在这个过程中所加的能量后来作为粒子间的势能储存在物质中，即储存在所谓的热力学系统中。”

F. “水在蒸发时，水分子不断地分离。在这个过程中，它们必须克服相互间的引力，它们也必须把空气推开。它们这样做所需的能量通常来自于加热装置[.....]额外的能量储存在水蒸汽中。在凝结过程中，能量被传递到别的物体[.....]。”

缺点

尽管上述作者以不同的方式来表达，他们都用了一个不合适的量来描述这个过程，这个量就是能量。上面所引用的话都以不同方式暴露出不一致性。

1. 我们来看 A：“对于由液体转化为气体的相变，需要传递一定量（与温度有关）的热量 Q_g 。”也许有人会继续说：“因为气体比液体含有更多的热。”但情况并不是这样。

也许有人会认为这是对的，因为在别的背景下根据 A 这句话可以得出这样的结论。

为了给墙壁涂漆，我们需要一定量的油漆。显然，油漆先在桶里，然后在墙上。

然而，由于以下两个原因，相变的情况并不是这样的：

●其主要原因是，热是过程量，热并没有分布在各处。对于过程量我们很难用合适的语言来表述其数学性质，也很难给出相应过程的直觉图象。

●“以热的形式”所提供的能量一旦被提供后并不分布在我们想要找的地方，只有很小部分分布在气体中，剩下的部分进入了跟相变没有多大关系的系统（引力场）中。

（对已经忘记上述结论或还不知道上述结论的读者，我们来详细叙述一下：由于 1kg 水蒸汽比 1kg 液态水含有更多的能量，因此，在所提供的能量中，有一部分进入到了水蒸

汽。但也不是所有能量都进入了水蒸汽，还有一部分能量用于“提升空气”。水蒸汽比水需要更大的空间。这部分能量最后储存在引力场中。)

2. 也许有人会认为 B 是对的：所提供的能量不等于汽化后的物质所增加的能量，而等于它的焓的增加量。然而，这样能让人们理解吗？“所需的焓”是什么意思？它表示所需的焓取自其他某一地方。然而，这是不正确的。从其他地方所获取的不是焓，而是能量。

3. 写 C 的作者想告诉读者，热和汽化焓是同一物理量的两个不同名称。但这是错的。人们试图向学生解释过程量的意义的全部努力受到了挫败。

4. 根据 D，汽化热包括两部分：“外面的部分”和“里面的部分”。如果某物有两部分组成，我们就有可能用某种方法来区分它们。然而，在这里情况并非如此。如果自来水既用于饮用也用于冲洗，我们不会说自来水由饮用水和冲洗水两部分组成。

5. 中学教科书的作者都知道，我们不能将上述所引用的内容显示给中学生。（其原因不是因为学生不聪明。）这是为什么中学教科书的作者们总是将内容定在安全的范围内的原因。请看 E 和 F：这里作者没有提及过程量热量和功，也没有提及勒让德变换焓(Legendre transform enthalpy)。作者只提及性能很好的状态变量能量。然而，问题仍没有得到解决。实际上，这是忽略了进入引力场的那部分能量（见 E）。有人也许会对这一忽视辩解，认为这仅仅是一个多余的副作用。

在 F 中，提到了这个副作用。在我们看来，这是讨论这个主题最好的方法。然而，在这里有些事情进展得并不那么容易。下面让我用一个寓言故事来解释一下。

有人想比较建造不同的吊桥所需的钢材。这几种吊桥具有相同的长度和相同的最大允许负荷量等，但具有不同的设计风格。人们对桥梁的资产很感兴趣，因而选择了造桥费用作为其量度。我们假定，大多数费用花在购买钢材上。然而，这钱当然也要花在其他用途上，尤其要支付给建造公司。显然，对于原本想评价的东西，人们选择了一个不合适的量度：人们选择的不是钢材的质量，而选择了造桥的费用。然而，这恰好也是人们在描述汽化过程中所犯的 error。由于人们回避了熵这一合适的量度，因而就运用了一个“仿制的”量，即能量。然而，能量只能部分地描述人们所关心的特性。

历史

1. 人们一直在采用 19 世纪末对能量的处理方法，对后来的进展却忽视了。到 20 世纪初，人们建立了能量的局域平衡方程。

2. 人们为一个不恰当的量建立了平衡方程。如果当时用了熵，情况就不会变成这样了。

建议

如果你想用能量来描述汽化（如水的汽化）现象：

能量提供给了汽化的那部分水。在汽化后，这能量一部分在气体中，一部分作为所谓的势能储存在被提升的大气中（最好说成是储存在引力场中）。对所有能量可以用“水蒸汽”这一系统的变量来表示： $E + pV$ 。这就是为什么我们可以这样来描述汽化过程的原因：给汽化的那部分水提供能量 ΔE 。焓变 ΔH 等于所提供的能量 ΔE 。剩余的能量已经流到大气中去了。

然而，如果用熵来描述，就会变得更简单和更清晰。熵所描述的性质与我们通常的直觉相一致。如果将熵提供给水，这部分水就会蒸发。所提供的熵后来在水蒸汽中了。

测量汽化熵并不比测量汽化能要难。

[1] G. Mie: Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung, Sitzungsberichte der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften. CVII. Band VIII. Heft (1898), S. 1113

[2] F. Jaumann: Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze, Wiener Berichte CXX, Abt. Iia, S. 385-530.

[3] F. Herrmann: Altlasten der Physik, Teil 1, Artikel 16: Die Messung der Entropie

Friedrich Herrmann

4. 38 热力学第二定律

主题

学生们发现，热力学第二定律有各种不同的形式，如：

- 热不可能从较冷的物体传到较热的物体，而不同时发生与此有关的其他变化。
- 不可能制造出这样的热机，它在一个完整的循环过程中除了提升重物 and 冷却热源外不会产生其他效应。
- 存在着不可逆过程。

缺点

如果用熵来表述，热力学第二定律可以简化为：熵会产生，但不会消灭。如果这样来表述它的话，我们可以将它叫做**熵定律**。这个定律和其他关于实物型量的守恒和不守恒的表述属于同一系列。然而，人们很少这样来表述。相反，在多数场合人们在表述这个定律时不提及熵这一物理量。然而，不提及熵时人们是如何表述第二定律的呢？人们通过对熵的不对称行为的结果的描述来表述第二定律。

这种表述方式对于理解热力学第二定律的要点来说是不利的。

我们来讨论几种从常见的教材中所引用的表述形式。有些表述来自于十九世纪末和二十世纪初几位伟大的热力学物理学家的著作。

1. 对熵的发明和引入作出过贡献的克劳修斯以几种方式来表述第二定律，其中包括：热不会自发地从较冷的物体传到较热的物体。^[1]

相类似的表述可以从现代物理教材中找到。如：

不可能有这样一种过程，从冷源中吸取热能，并将相等数量的热能提供给热源，而最终不发生其他情况。

或：

热总是自发地从较热的物体流向较冷的物体，而决不会朝相反方向流动。

如果我们不拒绝使用熵这一概念，我们可以用以下方式来描述上面这些表述中所提到的一些禁止过程（forbidden process）。

由于关系式

$$dQ = TdS, \tag{1}$$

热流总是与熵流耦合在一起的。因此，我们也可以这样说：**熵**总是自发地从较热的物体流向较冷的物体。在这一过程中会产生额外的熵。因此，在相反的过程中熵必定会消灭。但

这是被第二定律所禁止的。

我们也必须注意到，上面的表述与下面的表述是等价的：

水总是自发地向下流，而决不会自发地向上流。

这个表述也是第二定律的结果，也可以作为第二定律的一个表述。

我们把这种现象看得很平常。这一事实表明，第二定律的结果在我们的日常生活中是司空见惯的。热会自发地从较热的物体流向较冷的物体而不会自发地朝相反方向流。这一事实对于初学热力学的学生来说也并不新鲜。

如果在第二定律的背景下来讨论这些表述或观察结论，我们最好提起其他有能量耗散的现象：电流自发地从高电势处流向低电势处；化学反应总是自发地朝从化学势较大的反应物转化为化学势较小的生成物的方向进行的；在有摩擦的过程中，动量总是自发地从速度较大的物体流向速度较小的物体；等等。

2. 普朗克也给出了几个第二定律的表述，其中包括：

不可能制造出这样的循环工作热机，它除了提升重物 and 冷却热源外不会产生其他效应。^[2]

这种表述在现代物理教材中也可找到，如：

不可能制造出这样的周期性工作的热机，它除了产生机械功和冷却热源外不会产生其他效应。

或：

不可能制造出这样的循环工作热机，它除了从单一热源吸取热和产生相应量的功外不会产生其他效应。

根据(1)式，这些表述相当于在说：熵不会消灭。然而，这些表述没有说：熵会产生。因此，这些表述只与熵定律的一半意思（熵不会消灭）等价。结果，这种表述的含义相当于下面的表述：

不可能制造出这样的周期性工作的热机，它除了产生机械功和带电体的放电外不会产生其他效应。

显然，这种假想的机器不会工作的原因是电荷量不会消灭。

3. 不提及熵来表述第二定律这一做法结出了一个奇异的果实。在由 Meschede 和 Gerthsen 所编的教材中^[3]，第二定律被简略为这样的形式：

存在着不可逆过程。

这句话被放到教材中的一个显著位置。它告诉了我们一个人人都知道的事实，即便他或她从来没有学过物理也知道的事实。它没有给出不可逆过程的物理原因。作为物理学家，

他们至少知道任何一个广延量既不会产生，也不会消灭（象熵是不会消灭的）；或会消灭，但不会产生。

如果有人对这个表述感到满意的话，那么请同样给出另一个具有解释力的定理：
存在着可逆过程。

根据这一表述，我们可以得出结论：存在一个或更多个守恒量，但我们不知道它们是谁。

4. 显然，在同一教材中经常会出现第二定律的不同表述。对几种不同的结论用不同的第二定律表述来描述。这似乎可以看出，教材作者确实不满足于第二定律的单一表述。在 Macke 所编的教材中^[4]，五种不同的表述被列于一张表格中。没有人会想到把电荷量守恒定律用五种不同的方式尽可能完善地表述出来。

历史

第二定律在刚开始时不可能以简单的现代形式出现，这是因为当时人们还不清楚克劳修斯引入的熵属于具有特别简单性质的一类物理量：实物型量。对于每个实物型量，我们都可定义相应的密度、流强度和流密度，如果需要还可定义相应的产生率。这类物理量包括电荷量、动量、质量等。熵也是实物型量这一事实在当时是很不清楚的。

这就是起初很难以容易理解的方式来表述第二定律的原因。克劳修斯本人也给出了几种不同的表述^[5]：

在一个循环过程中，所有变换量（transformation）的代数和只能是正的。
或^[6]：

如果我们把可以互换和又不会引起任何变化的两个变换量叫做等价量，则通过功产生的温度为 t 的热量具有等价量

$$\frac{Q}{T},$$

从温度为 t_1 跃变到温度 t_2 时，与热量 Q 相应的等价量为

$$Q \left[\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1} \right],$$

这里， T 是独立于变换所发生的过程种类的温度函数。

或^[7]：

如果将热量的微分与相应的绝对温度相除，并将此微分式对整个循环过程积分，则积分值有以下关系式：

$$\int \frac{dQ}{T} \leq 0,$$

式中等号适用于以可逆形式所发生的所有循环变化过程，小于号适用于以不可逆形式所发生的所有变化。

正象前面已提到过，克劳修斯还给出了这样的表述：

热不会自发地从较冷的物体传到较热的物体。^[1]

如果不作任何解释，上述前三个表述在今天是很难被理解的。这就是第二定律当时被认为是一个难懂的定律的原因。

我们很难根据克劳修斯的理论得知熵是实物型量。当时的文献主要处理了卡诺的新“观点”，即热是能量的一种形式。根据卡诺的这一观点，进入热机的“热”量等于离开热机的“热”量。如果我们把热理解为能量，进入热机的“热”量大于离开热机的“热”量。这样，卡诺的观点被认为是错的。这是因为，当时人们已有一种信念，认为热是自然界中存在的某种东西（现在我们已经发现了它的真实本质，即它是能量的一种形式）。在这样一个前提下，卡诺的观点确实是错的。后来人们慢慢地认识到，卡诺的观点并不错。当时有两个不同概念的热。卡诺的热是不同于新的具有能量含义的热，是另一个物理量。后来人们发现，卡诺的热刚好与新引入的熵吻合，即克劳修斯引入的熵实际上并不是新的。1908年奥斯特瓦尔德（W. Ostwald）清楚地说明了这一观点^[8]：

那个可以与水量相类比的热力学量还没有引起大家的注意。它的科学名字是熵。它在热力学理论中扮演着重要的角色。然而，它还没有进入中学，因而还没有成为普通人的知识。因此，我们只能有限度地说：它确实可类比于水量，因为当它通过一台（理想）热机时其总量是不变的。

这里，奥斯特瓦尔德间接地提到了卡诺将热机类比于水轮机的观点。

三年后，1911年卡伦德（H. L. Callendar）也证实卡诺的热质（calorique）与熵等同，并指出克劳修斯引入的熵并不需要这么复杂^[9-10]。

同年，尧曼（F. Jaumann）也发表了一篇文章。在这篇文章中，他第一个给出了熵的局域平衡方程。他引入了熵流、熵密度、熵流密度和熵产生率。这样，人们就能够象表述其他实物型量（能量、动量和电荷量）的平衡定律一样来表述第二定律：

能量不会产生和消灭；动量不会产生和消灭；电荷量不会产生和消灭。

然而，很少有教材以这样简单的形式来表述第二定律。

例如，在 Grimsehl 所编的教材中有这样的表述^[12]：

在一个封闭系统中所发生的所有过程中熵决不会减少。

又例如，在 Joos 所编的教材中也有这样的表述^[13]：

在一个封闭系统中所发生的所有状态变化中，熵总是增加的。

这两本教材多年来已不再是先进的教材了。我们可以得出结论，一个古老的教学传统不可能被少数几个人的观点所根除。在奥斯特瓦尔德以后一百多年中，熵“没有成为普通人的知识”。

建议

这个建议特别简单：以卡诺的热质来引入熵，即将其作为热的多少的量度。这样，第二定律就等于在告诉我们：这个“热”会产生，不会消灭。对这一表述，每个外行人都能根据他的日常经验而认可。

参考文献

[1] R. Clausius: Zur Geschichte der mechanischen Wärmetheorie (论热的力学理论的历史), Annalen der Physik, Vol. 221, Heft 1 (1872), S. 132

[2] M. Planck: Thermodynamik, Verlag von Veit & Comp., Leipzig (1897), S. 80

[3] Meschede, Gerthsen Physik, 21. Auflage, Springer, Berlin (2002), S. 248

[4] W. Macke: Thermodynamik und Statistik (热力学和统计物理学), Akademische Verlagsgesellschaft, Geest & Portig K. G., Leipzig (1962), S. 120

[5] R. Clausius: Über eine veränderte Form des zweiten Hauptsatzes der mechanischen Wärmetheorie, Annalen der Physik und Chemie (论热的力学理论中的第二定律的修改形式), Band XCIII (1854), S. 504

[6] R. Clausius: Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie, Erste Abtheilung (关于热的力学理论的专题论文，第一部分), Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig (1864), S. 143

[7] R. Clausius: Abhandlungen über die mechanische Wärmetheorie, Zweite Abtheilung (关于热的力学理论的专题论文，第二部分), Druck und Verlag von Friedrich Vieweg und Sohn, Braunschweig (1867), S. 3

[8] W. Ostwald: Die Energie (能量), Verlag von Johann Ambrosius Barth, Leipzig (1908), S.

[9] H. L. Callendar: The caloric theory of heat and Carnot's principle, Proc. Phys. Soc. London **23** (1911), S. 153

[10] H. L. Callendar: Science, Vol. XXXVI, No. 924 (1912), S. 321

[11] F. Jaumann: Geschlossenes System physikalischer und chemischer Differentialgesetze (物理和化学微分定律的完备系), Wiener Berichte CXX, Abt. Iia (1911), S. 385-530

[12] W. Schallreuter: Grimsehl, Lehrbuch der Physik, B. G. Teubner Verlagsgesellschaft, Leipzig (1957), S. 467

[13] G. Joos: Lehrbuch der Theoretischen Physik, Akademische Verlagsgesellschaft, Frankfurt am Main (1959), S. 488

Friedrich Herrmann

4. 39 绝热状态方程

主题

可逆绝热过程可以用下列方程来描述（这些方程有时又叫做绝热状态方程）：

$$p \cdot V^\gamma = C$$

$$T \cdot V^{\gamma-1} = C$$

$$T \cdot p^{\frac{1}{\gamma-1}} = C$$

这里，C 表示常量， γ 是等压比热容和等容比热容之比：

$$\gamma = c_p/c_v.$$

缺点

原则上，这里没有可以指责的地方。然而，学生对这些过程是怎么想的？

1. 对于一物质的量恒定的理想气体，即对于一个特殊的热力学系统，我们有吉布斯基本方程：

$$dE = TdS - pdV. \quad (1)$$

这个方程除了其他信息外，还告诉我们这样的事实，即这个系统具有两个自由度。

人们经过仔细考虑，认为可以不同时改变不同变量的值。因此，人们喜欢分析方程（1）的五个变量中其中一个不变的过程。这样，系统就变为只有一个自由度的系统了。相应的过程各有一个合适的名称：等温过程、等压过程、等容过程、等能过程和……？绝热过程！

我们知道，“绝热”（adiabatic）是“不通”（impassible）的意思。这样，这个名称不是告诉我们不变的那个量是什么（这个量是熵），也没有把这一过程叫做等熵过程，而是告诉我们为了保持熵不变我们必须做的工作：盛气体的容器壁必须是不透热的，也就是说它必须是不透熵的。请不要指责，认为等熵跟绝热有差别。当然，绝热过程可以在熵产生的情况下实现，结果，这个过程不是等熵过程了；等熵过程也可以在器壁透热的容器中实现。这都是对的。然而，这一术语通常的含义是同时表示绝热和等熵过程。

2. 我们可以定义和测量很多个表征系统的系数。对于公式（1）所表示的系统，有下列系数可以用来表征：

- 等温压缩系数；
- 等熵压缩系数；
- 体积热膨胀系数；
- 压强系数；

- 等容比热容；
- 等压比热容；
- 其他没有合适名称的系数。

然而，这些系数中只有三个是独立的，其余系数可以根据这三个系数来计算。在中学和大学的教学中，我们不仅遇到选择哪些系数来介绍给学生的问題，也遇到如何来引入它们的问题。当我们问“绝热系数” γ 的意义是什么时，答案肯定是：等压比热容与等容比热容的比值。要单独解释 c_p 和 c_v 的意义是比较困难的。然而，这些系数的比值具有什么意义？

3. 处理热学变量有两种极端的方式：保持温度不变，让系统与外界环境充分进行熵交换；或保持熵不变，阻止系统与外界环境发生熵交换^[1]。这两种情况是互补的，它们同等地重要，可以用相同的方法来处理。我们可以这样说：在小系统中发生的过程倾向于等温过程，在大系统中发生的过程倾向于等熵过程；系统越小，所发生的过程越倾向于“等温”。我们也可以这样说：过程发生得越慢，就越倾向于“等温”；过程发生得越快，就越倾向于“等熵”。因此，我们得到一条法则：小和慢→等温；大和快→等熵。或者说，“小鱼是等温的，大鱼是等熵的。”气象现象是大尺度现象。因此，气象现象基本上是等熵的。

4. 上面提到的三个绝热状态方程中，第一个是最没有意思的，因为在等温过程中的 $p-V$ 关系和在等熵过程中的 $p-V$ 关系很相似。比较有意思的是第二个和第三个方程。让我们用更方便的方式来改写这两个方程。设

$$\alpha = \frac{1}{\gamma - 1},$$

我们得到：

$$V \cdot T^\alpha = C \tag{2}$$

和

$$p \cdot T^{-(1+\alpha)} = C. \tag{3}$$

方程（2）告诉我们，气体的温度是怎样随气体的膨胀而降低的。方程（3）告诉我们，越往高处（气压较低处），越冷。下表给出了几个 α 值。

表 4-39-1

	α
空气	2.5
水蒸汽	3.3
二氧化碳	3.4
氧气	1.5
光	3.0

在我们这个自然和技术环境中，等熵过程更重要。这种过程是我们试图在热机中实现的过程，也是与气象现象相关的过程。

5. 如果用热容量来定义方程（2）中的指数，我们就无法形成在等熵压缩或膨胀中气体行为的直觉印象。然而，不提及热容量我们也不难描述这样一种非常自然的现象：当气体被压缩时，“熵也被压缩了”，即它的密度增大了。这样，就不难想象相应的强度量（温度）也要增大。

历史

对熵的普遍厌恶也表现在处理等熵过程这件事上。

建议

引入方程：

$$V \cdot T^\alpha = C$$

和

$$p \cdot T^{-(1+\alpha)} = C.$$

不要用比热来定义方程中的指数。这两个方程告诉我们，温度是怎样随体积和压强的变化而变化的。

Friedrich Herrmann

4. 40 气压方程

主题

当我们讨论大气压时，我们要运用气压方程。为此，我们总要表明这样的事实，即温度与高度无关的基本假设是不切实际的。

1. “公式 (...) 可用来根据两个不同高度的大气压确定其高度差 (气压高度测定)。实际上，这里并没有满足等温的条件。对于高度差并不太大的情况，通常取 h_0 和 h 高度的温度的平均值。”

2. “这个公式通常叫做气压方程。这个公式使我们有可能计算两点之间的高度差，只要我们能知道两点的气压和温度。这两个公式 (...) 对于等温大气层成立。实际上，温度是随高度变化的。然而，如果在公式中引入两点之间温度的平均值 T ，这两个公式对于等温大气层也是适用的，而不会引起较大的误差。”

3. “在 (理想) 条件下，即地球大气层具有独特的温度 T ，气体压强 p 与高度 h 之间的关系可有下式给出： ...”

4. “然而，这里我们假定温度不变，因为我们应用了玻意耳定律。高度公式比较合适，因为它基于绝热定律 $p/\rho^k = \text{常量}$ 和通过类比推导而建立起来的。”

5. “实际上，对流层 (10-12km) 内的温度通常是随高度而变化的。对于对流层中的干燥空气，最好用绝热-随遇分层 (adiabatic-indifferent stratification) 来描述。”

缺点

首先，气压公式是在对流层在竖直方向上处于热平衡的前提下推导出来的。例如，我们推导出下面的公式：

$$p = p_0 e^{-\frac{Mgh}{RT}},$$

接着，这个公式就会招来被否认的声音。

有时这个公式会被采纳 (上述所引用的 1 和 2)，尽管它存在缺陷：在高度差很小的情况下，把温度用其平均值代入，这时可以应用这个公式。

在用数学方法处理问题时，会产生严密的印象。然而，人们会承认计算的前提并不满足“实际情况”，它们是“不符实际的”。有时人们甚至会提出如何做得更好的方法 (如上述所引用的 4 和 5)。

也许有人会用理想化这一观念来证实这一过程的合理性。这是否象力学中对摩擦的忽

略不计？不。在推导气压方程时，我们并没有忽略小的干扰因素。对于在垂直方向上的熵交换，我们已经考虑到了相反方向实际所发生的情况。

我们可以区别热力学过程中的两种极端情况：等温过程和等熵过程。在对流层中，等熵过程，即假定摩尔熵恒定是一个很好的近似；而温度相等是一个不好的假定。“等温”不是“等熵”的近似，它们是相反的过程^[1]。

显然，假定高度与温度无关是一个不好的近似。它意味着在高处的空气与在低处的空气处于热平衡。然而，热平衡只有当非对流熵流动（在一部分空气与另一部分空气之间的熵交换）成为可能时才能建立。空气的流动和强大的气流搅动不可能建立不同高度之间的热平衡。相反，强大的空气流是建立实际存在的自然温度梯度的条件。

显然，自然温度梯度并没有象压强梯度那样被看重。谁会去计算温度梯度，并承认压强梯度为零？

使大气温度趋向均匀的因素有两个：一是，水在低处或地面蒸发，然后在高处凝结，再以雨的形式落回来；这样在向上的方向上发生了熵传输，导致温差的减小。二是，在同一方向上通过热辐射而发生的热交换。

这些都是额外的因素。当人们一开始试图理解对流层的运行机制时会忽略这些效应。人们会从干等熵（dry-isentropic）大气，即干绝热（dry-adiabatic）大气开始考虑。

气压公式对于初学者来说简单易学。这一事实也不能用来证明恒温的假定是合理的，因为在干等熵大气中的压强梯度公式并不比它更复杂：它是一个幂函数（含有分数指数）：

$$p(h) = p(0) \left[1 - \frac{Mg}{c_p T(0)} h \right]^{\frac{c_p}{R}} .$$

被假定为不存在的温度梯度甚至遵循一个简单的定律。它是一个线性方程¹：

$$T(h) = T(0) - \frac{Mg}{c_p} h .$$

上述所引用的 1 和 2 还有另一个特点：

人们试图解释高度是如何通过压强来计算的。气压方程在这里并不合适，只能局限在小的区间内应用。

下图给出了压强和高度的函数关系。这是将气压方程应用于干等熵大气得到的图线。我们可以从中看出：当方程仅应用于小的区间时，两个方程都可以应用。然而，我们也可以作线性近似，用不着去应用复杂的方程而浪费时间。

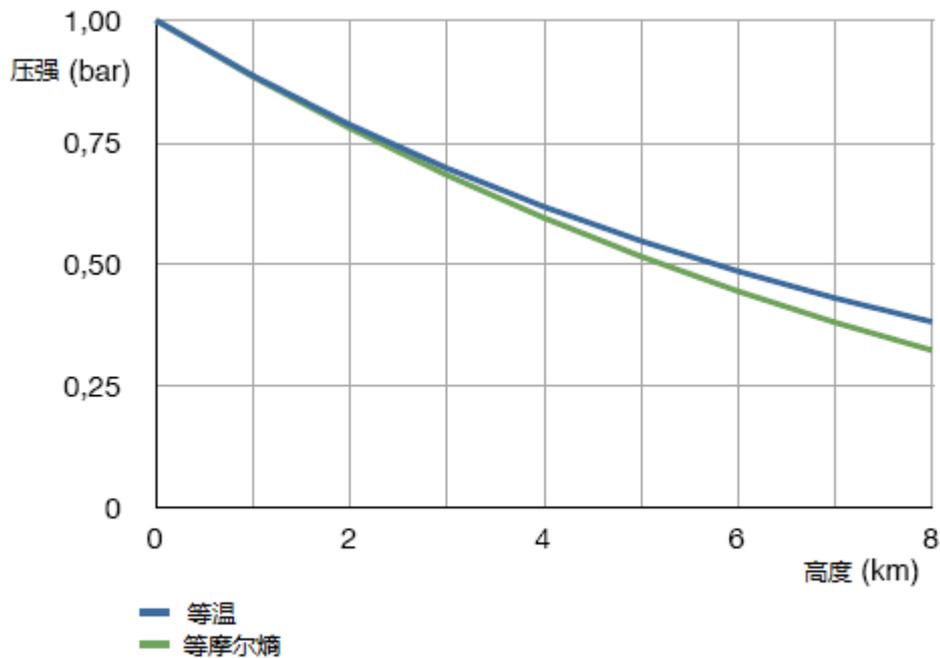


图 4-40-1 压强和高度的函数关系

历史

1. 如果我们轻视熵，等熵的情况就会变得很难。确实，如果我们想回避这个概念，我们就很难形成相应的公式^[2]。

2. 气压方程由于看上去是玻尔兹曼公式的应用，所以很受欢迎。

3. 这个方程可以仅仅由力学公式推导出来。用这种方法，我们可以避免涉及人们不喜欢的热力学。这至少是一种印象。根据热力学，人们只能超越只含有力学量 p 和 V 的波意耳定律。因此，人们没有真正注意到，力学量和热学量是很紧密地耦合在一起的。在这里“保持温度不变”这一条件看上去跟在推导欧姆定律时“保持温度不变”的条件一样。

建议

1. 必须清楚，处于平衡的大气不仅有自然压强梯度，也有自然温度梯度；并且，这一温度梯度不能被看作是对于还没有建立的热平衡没有影响的偏差。

2. 对于等熵大气作理想化处理。这里，温度曲线特别简单，它是线性的。

¹这个公式的结论是，在 30km 高处温度将接近绝对零度。然而，在空气变成液体之前，应用这一公式的条件已经不再具备。

[1] G. Job, Die Temperaturschichtung der Atmosphäre, Altlasten der Physik, Aulis Verlag
Deubner (2002), Köln, S. 117

[2] Altlasten der Physik 164

Friedrich Herrmann

4. 41 太阳中的光子

主题

“在太阳核心处发生着核聚变。在核聚变过程中形成了光子，即“光的粒子”。这些光子以 300,000km/s 的速度运动。当它们遇到其他粒子时，会发生散射而改变运动方向。在太阳内部，物质的密度非常大。因此，光子无法在某一方向上运动得很远，每次在改变方向之前通常只能运动几分之一毫米。越往外运动，这个距离会变得越长。为了计算光子经过太阳内部任意的散射后到达太阳表面的时间，必须对太阳的结构（如它的密度分布）作一些假设。经过计算得到这个时间值在 10,000 到 170,000 年之间。”

“你可以计算出光子经过散射后从太阳核心处“传播到”对流区的底层所需的时间。这个时间值已经计算出来了，大约为 170,000 年。”

缺点

人们坚守着光子（光的粒子）的概念，把它看作是一个小物体或在这个世界中横冲直撞的一列波。甚至对于电子，把它看作是一个小物体也会导致难以理解。为了维持现有的语言表达（和心智模式），人们必须再给出难以理解的表述（如“电子是不可区分的”）来加以补充说明。对于光子来说，情况会更复杂。尽管爱因斯坦的话很有名，但似乎也没有受到重视。这位大师的警句被摒弃了^[1]。请注意，他的话并不出自光子概念产生的早期。量子电动力学在那时早就产生了。

然而，我们上面所引用的（非常典型的）内容到底出了什么问题？这些话不仅是建议，而是清楚地告诉我们，光子从太阳内部的反应区到达了太阳表面。根据我们通常的表达方式，这意味着一个光子开始在那里出发，经过 100,000 年后仍是这个光子到达了太阳表面。这里，再也见不到量子电动力学的专家们所给出的提醒和保留意见。人们想把光子看作是一个小物体就把它看作为一个小物体。

这些话之所以值得怀疑，原因只有一个，到达太阳表面的光子数大约是在太阳核心处出发时的光子数的 3000 倍。

顺便提一下，没有人会用相同方式来描述在一根铜棒中的热传导过程：以声速运动的声子在导体内每分钟运动 30cm。

历史

光电效应似乎要告诉我们，光是由一个个单独的粒子组成的。这种说法是容易使人上当的。对所有提醒，包括爱因斯坦的提醒和量子电动力学中的提醒，人们似乎把它们当作

耳边风。

直到十九世纪末仍很盛行的机械论世界观仍束缚着我们。用更一般的话来说，我们仍持着一种哲学家叫作还原论的态度。还原论认为，我们可以用一种比较简单的方法来描述和理解上帝所创造的这个世界，这个方法就是用原子来描述可感知的现象，用质子、中子和电子等来描述原子，用夸克等来描述质子和中子，这样永无止境地描述下去。

人们不时地强调，这仅仅是一个模型，一个粒子模型。然而，这仅仅是口头上的。如果你认为这仅仅是一个模型，你就不能说它是光子。模型总意味着“它象……”例如，它象一个小物体。事实上，在有些情况、过程或状态下，辐射表现为象小物体，尽管它不经常这样。

这个世界由一个个小的物体构成的观点告诉我们，微观世界象我们所熟悉的宏观世界一样。

许多物理学家也似乎忘记了如何教物理初学者的方法。他们认为，这个物质世界只能理解为由许多小物体聚集起来的。事实上，这些初学者们是可以接受物理学家们的假设的：他们知道在天空中的云层经过足够长距离的运动后自然地不再成为原来的云层了，而形成了新的云层。他们能接受“单独性”和“不可区分性”这样的术语。教学传统一开始就把这一观念强加给了他们。

建议

为了描述太阳内部的能量传递，我们没有必要运用量子电动力学的知识。然而，我们至少要提到这里发生了吸收和发射过程，这样就不会产生单独物体聚集的观念。向学生指出，同样的过程发生在对流层中。这一过程起到冷却地球的作用。这一过程最后转变为红外辐射了。

同时也应该向学生指出，通常的热传导也是这样的过程，只不过由光子变为声子。学生们可以同时学到两个知识点：关于光子的知识点和关于声子的知识点。

对于各种不同的情况，我们只需告诉学生，从太阳内部到表面的温度分布需要 100,000 年时间。或者更确切地说，在电磁辐射中发生了能量传递。这辐射几乎到达了热平衡；因此，它是一种黑体辐射。从太阳内部到外部，温度不断减小。这温度梯度是很小的，然而它会引起能流。这个传递过程是耗散的，有熵产生（是原来的 3000 倍。这个倍数等于内外温度的比值）。

用光子来表述：光子不断发射和被吸收，新的光子又不断发射出来，如此一直下去。然而，请不要如此轻信。说光子从一个原子移动到另一个原子是不妥的。

你也可以对此作一些认识论上的评论，对理论的本质作一些论述。理论是对这个世界

的数学描述。理论没有对错之分，只有对某一目的是否适用之说。

[1] 爱因斯坦在 1951 年写信给他的朋友 Michele Besso:

“这 50 年来的沉思并没有让我找到“什么是光量子”这个问题的答案。今天，粗心的人都认为知道它是什么。然而，他们错了……”

F. Herrmann

4. 42 没有温度就没有熵？

主题

最近，我（在跟这一主题不相关的背景中）读到这样一句话：

“系统有熵，因此有温度。”

这句话并不意味着系统的温度有大于零的值，而是指温度这个量有一个值。

缺点

首先，对于物理量来说，“有”的一般含义是什么？当我们说“一个粒子没有电荷”“光子没有静质量”“一辆汽车没有动量”时，我们的意思是，相应的物理量的值为零，即 $Q=0$ C, $m_0=0$ kg, $p=0$ kg · m/s。当我们说一个系统没有温度时，说的是另外的意思，而不是说 $T=0$ K。（对于化学势也同样。）它更确切的意思是，系统的状态不能用温度来描述。换句话说，这个系统还没有处于热力学平衡状态，或其微观状态在空间的分布与任何一种已知的统计函数并不对应。

如果上面所引用的句子就是这个意思的话，这一表述并不正确。我们不能从 $S>0$ 得出所研究的系统有温度。只有当它处于热力学平衡（所有“可及微观态”在空间具有相同概率）时才具有温度。这时，熵可用下面的公式来简单地计算：

$$S = k \ln W. \quad (1)$$

然而，在通常情况下我们有：

$$S = -k \sum_{i=1}^n p_i \ln p_i. \quad (2)$$

如果所有概率 p_i 都相等：

$$p_1 = p_2 = p_3 = p_4 = \dots = p_n = 1/W,$$

公式（2）就变为公式（1）了。

然而，是不是在我们周围的所有系统都不近似地处于热力学平衡态？系统会不受外界参数变化的影响而很快建立起热力学平衡态从而与非平衡态无关？

根本不是。平衡态建立不起来有两个原因：

第一，相互作用的粒子密度太小。例如，在高处的地球大气层。

第二，粒子密度大，但粒子间没有相互作用。这种现象无处不在：没有到达热力学平衡态的光以后将没有机会到达这个状态，除非借助于象著名的普朗克碳粒子。

我们从太阳那里得到的光是不处于平衡态的光。获得处于平衡态的光的先决条件是，其光源近似于黑体。到达地球上的太阳光的频率分布与处于热力学平衡态的光的频率分布非常近似地相同。与处于热平衡的辐射不同的是角分布。处于热力学平衡态的光必定是等熵分布的，但它是在很远的地方形成的。因此，对于来自太阳的光的能流和熵流之间的关系式不是人们所想象的在热力学平衡态中的热传递公式

$$P = T \cdot I_s,$$

而是

$$P = (3/4)T \cdot I_s.$$

然而，式中 T 不是我们所接收到的光的温度，而是太阳表面的温度。

历史

也许其原因是，公式 $S = k \ln W$ （或 $S = k \ln \Omega$ ）已经成为熵的象征了（图 1）。（爱因斯坦的公式 $E = mc^2$ 也同样。）

公式（2）更好奇，它可以作为信息量的测量公式。

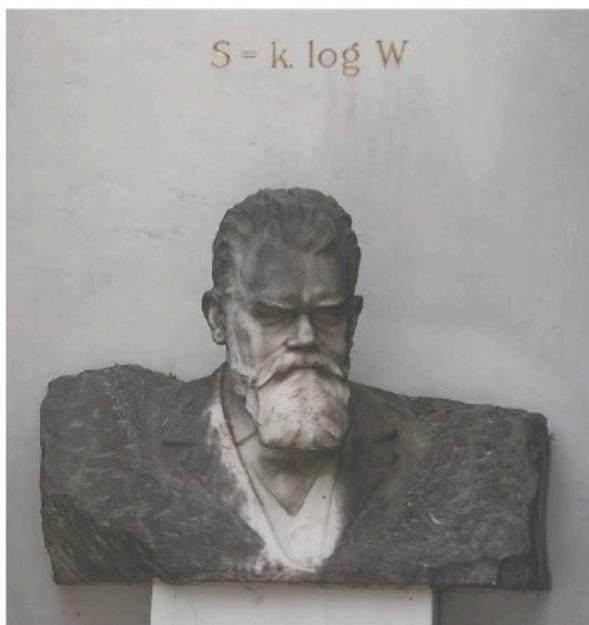
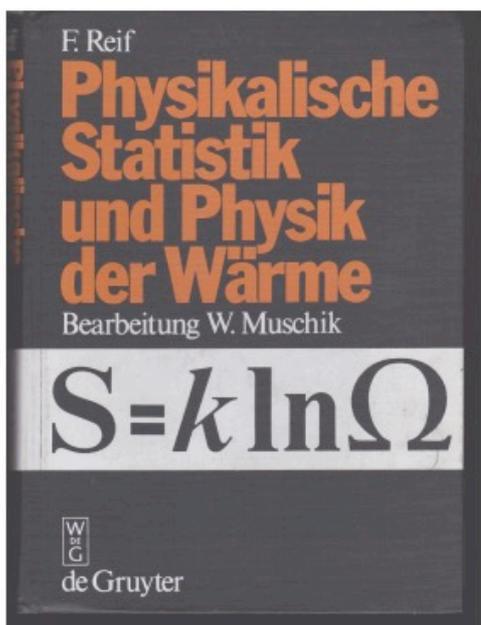


图 4-42-1. 一本统计热力学教材的封面；在维也纳中央公墓的玻尔兹曼墓碑。

建议

1. 我建议，在指物理量的值时要小心用词。对于广延量（实物型量），我们可以并且必须与说物质一样的方式来说它们的值：一个系统具有**很多**、**很少**或**没有**熵（电荷、质量、动量）。对于强度量，用词就大不一样了：系统的温度（电势、速度）**高**或**低**。一个系统

可以没有温度和化学势这些量。

2.对于（经常会遇到的）热力学平衡的特殊情况，用公式（2）来引入熵。这样，学生可以从中知道，熵比温度（和我们在这里并没有讨论的化学势）具有更广泛的含义。

3.如果给没有相应的热力学平衡分布的光赋予光源的温度，我们要有得出不一致结论的思想准备。

F. Herrmann

4. 43 液氮制冷

主题

“用液氮制冷有很多优点。它除了结构简单和容易维护外，还有成本低和能耗小的优点。这种制冷方法还有更大的优点：不仅价格低廉，也比较安全和环保。液氮属于非燃烧性物质，无毒，无污染。”

“在大型加速器（如在日内瓦的 CERN）中，通常要用液态氮将其中的磁铁的温度冷却到接近绝对零度。当时曾用氮将欧洲天王星号（Herschel）红外卫星冷却到最低的温度，以增强其对宇宙天体的热辐射的敏感性。”

“制冷器被用于会发热的技术设备中。通常的方法是被动制冷，即通过热辐射器将热传递到周围空气。最常见的例子是用冰箱冷藏食物。在机动车中通常用水来冷却，在计算机中通常用空气来冷却，在较大的区域通常用空调来冷却。”

“处理器冷却：它不同于空气冷却、水冷却、蒸发冷却、珀耳帖冷却和干冰冷却。”

缺点

制冷意味着使物体的温度降低，或使它的温度保持较低的值。要达到这一效果，必须将熵从物体中取出来。

理论上，从物体中取出熵有两种可能的方法：

1.环境要比待冷却的物体更冷。这时，我们只要确信，熵会随着自然的驱动从热的物体流到冷的物体。例如，对汽车发动机的冷却就借用了这种方法。

2.如果没有这样的环境（待冷却的物体的温度比环境温度更低），我们必须把熵从低温处移到温度更高的环境。这就需要能量和合适的装置：热泵（最好叫做熵泵）。

在力学中也有相以的问题。为了使物体（如车辆）有更大的速度，或保持较大的速度，我们必须给它提供动量。

这里也有两种可能的办法：

1.将物体与已经处于高速状态的系统耦合起来。这时，动量将随着自然的驱动从高速的系统流向低速的物体。刹车就是这样的过程：刹车装置在车辆与大地之间建立动量传递的连接，这样，动量会自发地流向大地。

2.如果没有这样的高速“环境”，我们必须用能量把动量从低速的环境“泵到”车辆。汽车中的发动机正好起到这样的作用。

我们没有必要来讨论在电学和化学中相似的情况。

当我们讨论用液氮、液氦或冰块制冷时，给人的印象是：制冷剂起着决定性的作用。磁铁的线圈用液氦来冷却。然而，这仅仅意味着用已经冷却的东西来冷却另一件东西。冷却是用来调节两物体间的温度的。

然而，谁冷却了氦？在氦中的熵是怎么被移去的？至少在我们上面所引用的内容中没有提到这些，而简单地提到液化。

在上面第三个引用的内容中提到了冰箱和空调。如果我对教材的理解是正确的话，作者仅仅提到在空调背面的热交换器中熵是如何传递到周围空气的。显然，这是冰箱冷却的地方。这样，构成冰箱的热泵就显得不大重要了。

在最后一个引用的内容（引自维基百科，并稍作了改动）中，有一个可笑的混淆之处。珀耳帖元件和干冰同时被提到了。第一个是热泵，第二个仅仅是一种熵事先已经抽出一部分的制冷物质。

在这里，在制冷中起决定性作用的热泵根本没有被提及，或仅仅出现在技术细节中。我们“只有”在液化时需要它，或将可乐制成冰块时需要它。

历史

如果不提及熵，我们能把上面的内容表达清楚吗？相应地，我们当然也无法提及抽取熵的过程。如果用熵的“替代量”热能或焓来表达，内容会变得很复杂。最好什么都别说。

建议

总的来说，我们不要把卡诺的著作削减为有点纠缠不清的卡诺循环。卡诺循环仅仅是他的著作中的一个例子。我们需要采用他的一个独特的观点：将热机与水轮机进行类比。他之所以没有将热泵与水泵类比，是因为那时还没有热泵。

当我们讨论冷却问题时，要把制冷机（热泵）放在最重要的位置。它的功能很容易描述：热泵通过消耗能量将熵从冷处抽到热处，正象水泵将水从低压处抽到高压处一样。这很容易解释。相应的技术可以放到后面去解释，或干脆完全不提及它们。

最后还有一个建议：不要区分热泵和冷水机。当然，这两个装置在制造上是不同的。然而，至少指出一下它们的相同点，这对学生是有帮助的。

Friedrich Herrmann

第五章 力学

5. 1 瞬时速度和平均速度

主题：

在一本中学物理教科书中，我发现有以下表述：

“对于匀速运动的速度 v ，我们可以把它理解为任意一段位移 Δs 和相应的时间 Δt 的比值，这个比值为一常数，即

$$v = \Delta s / \Delta t.$$

“对于匀速运动，如果初始值 $t=0$ 和 $s=0$ ，则除了有 $v = \Delta s / \Delta t$ ，还有 $v = s / t$ 。”

“实际上我们发现，瞬时速度近似等于当时间足够小时的平均速度。”

在另一本教科书中我又发现以下表述：

“定义：如果一个做直线运动的物体的位移 s 和时间 t 成正比，则比例系数 $s/t=v$ 叫做这个物体的速度。”

“定义：如果在直线运动的某一段中所有的 $\Delta s / \Delta t$ 值都相同，则 $\Delta s / \Delta t = v$ 就是这段运动的速度。”

“如果 Δs 和 Δt 是任意一段运动的位移和时间，则

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

是位移和时间分别为 Δs 和 Δt 的这段运动的平均速度。”

“在时刻 t_0 的瞬时速度近似等于包含 t_0 的足够小的时间间隔内的区间速度 (interval velocity)。”

教科书中对加速度的表述也采用了同样的方法。

这些表述并不是上述我所看到的教科书中特有的，在其他许多教科书中同样可以找到这种表述，无论它们是新的、具有现代气息的，还是百年老教材。

缺点：

教科书中以一种特别细致的方式来引入速度这一概念。这就引发我们对以下问题的思考：

1. 这种细致和精确的做法在后来没有得到维持。在引入力、热和电流强度这些概念时，就显得很粗了。

2. 物理教科书在一开始就以这样的方式呈现给学生，这会导致学生害怕物理。

3. 严密思维和过于迂腐之间的区别不是很大的。有人也许会说，上面所说的情况还没有到达迂腐的程度。

4. 速度被定义为 $\Delta s/\Delta t$ 。人们不认为 $v = \Delta s/\Delta t$ 是 v 、 s 和 t 之间的关系。我们是否想这样告诉学生，他们以前所学的速度概念不是物理学意义上的速度概念？我们最好不要向学生呈现这种数学化的细节。顺便提一下，如果我们一定要给速度下个定义，这里还有另外的定义方法。^[1]

5. 上面所说的方法对于理解速度这个概念是不方便的。这种迂回曲折的方法会引出几个特殊的速度概念：瞬时速度、区间速度和平均速度。如果对于其他物理量我们也作同样的处理，我们就根本没有时间把物理学中其他更重要的内容教给学生。如果这样的话，当我们引入其他物理量时我们就必须作这样的说明：“实际上我们发现，瞬时电流强度近似等于时间足够小时的平均电流强度。”或“局域质量密度近似等于空间区域足够小时的平均密度。”

历史：

也许在物理学作为一门科学一开始时就给我们留下了这样的描述传统。在 18 世纪的教科书中我们可以找到对于其他内容也有相同的描述，而对于这些内容现在我们觉得没什么问题。

建议：

我们有几种方法来阻止这种描述。我们并不需要解释什么是速度和什么是恒定速度。公式描述了当速度不变时速度、运动距离和所需时间之间的关系。如果速度在变，我们就采用别的大小随时间而变的其他物理量的处理方法。速度可以用流速计来测量。

注：

[1] 我们这里介绍另外两种定义速度的方法。然而，我们并不建议在中学里向学生介绍这些定义。

(1) 速度可以用关系式 $dE = \mathbf{v} \cdot d\mathbf{p}$ （即能量变化量与动量变化量的比值）来定义。这种速度的定义类比于电势差的定义（能量变化量与电荷变化量的比值）和热力学温度的定义（能量变化量与熵变化量的比值）。

(2) 速度可以进行操作型定义。用流速计（不一定有刻度），我们可以确定速度是否

不随时间而变。这样我们可以来定义速度的单位 v_0 。现在我们就容易得到比这个单位大几倍的速度。物体 A 以相对于 B 为 v_0 的速度运动，而 B 相对于地球的速度也为 v_0 。这样，A 相对于地球的速度为 $2 v_0$ 。

Friedrich Herrmann

5. 2 加速度

主题：

在运动学中我们通常要引入“加速度”这一物理量，并且把它细分为瞬时加速度、平均加速度、切向加速度、径向或法向加速度、角加速度、离心加速度、向心加速度和科里奥利加速度。学生们也知道，匀速圆周运动是加速运动。

缺点：

(1) 专业术语可以让我们简洁地表达科学思想。通常，用别的方法需要用一句话来表达，而用专业术语只需用一个词就可以了。因此，运用一个经严格定义的专业术语可以使表达变得更加清晰。然而，专业术语的数量有一个最佳值。如果专业术语的数量太多，就会使表达更难以理解。有了专业术语，可以使表达简洁，但由于每一个术语都必须经严格定义，这样整个教材的篇幅就未必会减小。由于读者必须先弄清楚相关的定义，使他们理解起来更加吃力。加速度就是一个很好的例子，这样一个物理量派生出这么多不同的名称，而实际上它们是同一个物理量。

(2) 一个质点的运动可以用不同的时间函数来描述。我们用得最多的是位移函数 $s(t)$ 、速度函数 $v(t) = ds/dt$ 和加速度函数 $a(t) = d^2s/dt^2$ 。我们甚至可以引入更高阶的时间导数。位移的三阶时间导数有时叫做加加速度 (jerk)。这个词清楚地表达了这个概念的意思。然而，我们要问，运动学真的需要这么多的函数吗？我们这样问的目的当然不是想来搞乱现有的运动学。

我们来讨论最重要的一种运动，即匀加速运动。对于中学生来说，仅仅用 $s(t)$ 这个函数来描述这种运动是太复杂的，因为 s 是时间的二次函数。从数学的角度来看，用加速度来描述这种运动是最简单的，因为 $a(t)$ 对于这种运动来说是不变的。但是，位移对时间的三阶导数且是最简单的，因为对于任何 t 它总等于 0。如果我们来比较这四种函数，我们可以得到很多结论。然而，如果我们只关心一种最简洁的描述运动的方法，我们就会把讨论限于那些跟现象最直接的那些函数。根据这一观点，这些函数就是 $s(t)$ 和 $v(t)$ 。在我们所讨论的例子中， $v(t)$ 告诉我们，速度随时间均匀增大。我们认为，这一表达比“加速度是不变的”更易理解。显然，当我们问一位技术比较高的人关于汽车的运动情况时，他们不会说“汽车的最大加速度是多少米每二次方秒”，而会说“汽车在多少秒时间内速度从 0 加速到 100km/h”。因此，他们是用速度而不是用加速度来讨论问题的。他们是

用速度来表示加速度的。

有人也许会认为，如果没有加速度物理教师就简直做不了事了，因为在牛顿第二定律中有加速度这个量。实际上，在牛顿的著作中并没有加速度这个概念。他是用运动的量的时间变化率来表示他的第二定律的。

(3) 物理量 a 的名称“加速度”是导致某些不一致的原因。最近，我从一本物理学杂志上看到一篇文章，上面写着这样一句话：“带电粒子在加速或减速或改变运动方向时会发射辐射。”这句话当然并没有什么错。然而，下面一句话是这样的：“在圆周轨道上运动的粒子，即使它们的速度保持不变，它们也在加速，因而也会发射辐射……”。在第一句话中，作者区分了加速、减速和速度方向变化三种情况；而第二句话则意味着，每个粒子只要 $a(t)$ 不等于零，它总是在做加速运动，而不会出现减速的情况。

我们在别的地方也能发现这种问题。在非正式的场合，对于一个物理量的正值和负值我们经常会有不同的表述：加速和减速，压力和张力，热和冷……然而，一个物理量只需一个名称就够了。

历史：

与普遍的观点相反，牛顿并没有运用“加速度”这个量。根据他的第二定律的表达式，一个物体的“运动”(motus)的变化与作用在它上面的力成正比。他把“quantitas motus”(即运动的量，今天又叫做动量)简化为“motus”。惠更斯也没有用“加速度”这个量^[1]。在1754年发表的文章中，欧勒(L.Euler)(译者注：瑞士科学家)运用了微商 d^2s/dt^2 ，但他既没有用合适的名称，也没有用合适的符号来表示它^[2]。我们发现，在1742年出版的《约翰·伯努利全集》中^[3][译者注：约翰·伯努利(Johann Bernoulli)是瑞士数学家，是流体力学中经常提到的丹尼尔·伯努利(Daniel Bernoulli)的父亲]，最早引用了加速度这一物理量。显然，加速度这一概念是在牛顿以后力学中增加了数学成份后才被引入的。

建议：

我们不需要引入加速度这个量。正像运动学所关心的那样，我们把所讨论的内容局限在位移和速度对时间的函数。在动力学中我们也同样不需要加速度。我们把牛顿第二定律写成： $F=dp/dt$ 。

[1] Dijsterhuis, E. J.: Die Mechanisierung des Weltbildes. — Springer-Verlag, Berlin, 1956. — S.528.

[2] Euler, L.: Vollständige Theorie der Maschinen, die durch Reaktion des Wassers in

Bewegung versetzt werden. — Ostwald's Klassiker der Exakten Naturwissenschaften, Nr.182. —
Verlag von Wilhelm Engelmann, Leipzig, 1911.

[3] Sambursky, S.: Der Weg der Physik. — Artemis Verlag, Zürich, 1975. — S.428.

Friedrich Herrmann

5. 3 超距作用

主题:

我们经常可以看到这样的表述：“月球被地球所吸引”，“太阳施力给地球”，“同名磁极相互排斥，异名磁极相互吸引”。

缺点:

以上这些表述意味着，A 对 B 的影响或作用不需要第三个系统作为连接 A 和 B 之间的介质。由法拉第和麦克斯韦创立的现代电动力学首先引入了场理论。从那时起，科学家们相信，上面所说的那种作用是不存在的，这种描述是不恰当的。

历史:

超距作用 (action-at-a-distance) 可以从牛顿时代以来的所有物理教科书中找到。确实，在法拉第和麦克斯韦的理论创立之前，人们只能用超距作用来描述电力、磁力和引力。牛顿本人也认为超距作用是他的理论中的一个缺陷。

建议:

在讨论两个物体之间的引力、电力和磁力时，我们必须引入相应的场，把它作为第三个系统。把场描述为像两个物体一样真实的系统。例如，电荷之间的相互吸引或排斥可以这样来描述：两个同种电荷被它们共同的电场拉开，两个异种电荷被它们共同的电场拉在一起。

Friedrich Herrmann

5. 4 牛顿运动定律

主题：

(1) 一切物体总保持静止状态或匀速直线运动状态，除非作用在它上面的外力迫使它改变这种状态。

(2) 一个物体的动量变化的方向与作用在它上面的力的方向相同，其大小与这个力成正比。

(3) 作用在两个物体上的力总是大小相等，方向相反。

缺点：

这三个定律都可以被看成为下面这个定律的特殊情况：动量既不会产生也不会消灭。如果我们把“力”看成为动量流强度，那么上述结论就很容易被理解了。这样，牛顿运动定律可以表示为：

(1) 只要流入或流出物体的动量为零，这个物体的动量就不会变化。

(2) 一个物体的动量随时间的变化率等于流入或流出这个物体的动量流。

(3) 当动量流从物体 A 流入物体 B 时，从 A 流出的动量流等于流入 B 的动量流。

这些动量守恒定律的推论是如此的简单，以至于我们很难把它们当作为一个定理或定律。为此，我们来表述一下另外的守恒定律的相应推论。简单一点，我们来看关于水量守恒的表述：“只要流入或流出容器中的水量为零，这个容器中的水量就不会变化……”

历史：

我们都知道牛顿运动定律产生的历史。然而，我们需要对牛顿的工作进行彻底的分析，从而来理解在牛顿系统中的三大定律为什么会相互独立的。它们是一个由大量观察和定义所构成的复杂系统的一部分。当然，牛顿在开始时并没有考虑到动量守恒。

建议：

我们建议，在力学课中一开始就引入动量，并把它当作一个量来对待，把它作为对“运动的量”的度量，或更通俗地说，把它作为对“冲量”的度量。如果一个物体的动量发生了变化，我们不能说“一个力作用在物体上”，而要说“动量从这个物体流入（或流出）”。这种表达方式对于一位有经验的物理老师来说会有点不习惯。然而，对于初学者来说，这

是很容易被接受的；这是因为，它避免了在讨论牛顿运动定律时，特别是在讨论牛顿第三定律时所带来的复杂性。

Friedrich Herrmann

5.5 静力平衡和牛顿第三定律

主题：

力作用在物体上。如果一个物体 P 受到另一个物体 A 对它的力 F_{AP} 而没有加速，则肯定至少另有一个物体 B 有力 F_{BP} 作用在 P 上，使得作用在 P 上的合力为零。P 处于平衡状态。根据牛顿第三定律，当 A 有力 F_{AP} 作用在 P 上时，P 必定有力 F_{PA} 作用在 A 上。同样，P 也必定有力 F_{PB} 作用在 B 上。所有这四个力具有相同的绝对值，而方向成对地不同：

$$F_{AP} = -F_{BP}, \quad F_{AP} = -F_{PA}, \quad F_{BP} = -F_{PB}, \quad F_{PB} = -F_{PA}.$$

这是对 P 处于静止状态的情况的描述。所有力都等于零是上述情况中的一种特例。我们可以想象出这种最简单的静力学情况。要理解力，我们必须在概念上区分这四种力。

缺点：

对这个问题的处理是如此的复杂，以至于一般的学生很难理解它。实际上，对于大学生来说，也不能区分这些力。即使这样，学校还是不顾一切地向初中学生介绍牛顿所提出的力的概念。

历史：

我们现在所使用的力这一概念是牛顿想象出来的。它是在人们还只能把力的相互作用描述为超距作用的那个时代被引入的。场的概念仅仅在一百年以后才被引入到物理学。根据牛顿的观点，一个力涉及到两个物体：施力物体和受力物体。在我们所举的例子中有三个物体，这三个物体共受到 6 个力，其中 4 个力与物体 P 有关（包括 2 个 P 受到的力和 2 个 P 作用给其他两个物体的力）。

在法拉第和麦克斯韦引入场概念时，力这一概念的简化工作就应该完成了。实际上，只有在把动量当作一个独立的量（而不是乘积 mv 的简称）来考虑时这一工作才能完成。事实上，在 1908 年，即狭义相对论发表三年后，普朗克证明^[1]，力不是别的，就是动量流强度。因此，力的大小就不涉及到两个物体，而涉及到动量导体的横截面（对于其他流也是这样）。

如果将这一观点应用到上述情况，这一大堆力简直是不需要的。所有这四个力就变成了同一个动量流在四个不同截面上的动量流强度： F_{PA} 是动量流从 A 流到 P 的过程中离开 A 时的动量流强度， $-F_{AP}$ 是相同的动量流流入 P 时的动量流强度， F_{BP} 是这个动量流再从 P

流出时的动量流强度， $-F_{PB}$ 是这个动量流最后流入 **B** 时的动量流强度。由于在物体中或在物体之间的任何地方都没有动量积累起来，所以，所有这些动量流强度的绝对值都是相同的。因为动量流所涉及的面不总是朝着同一个方向，所以其正负号不总是相同的。

建议：

如果我们用动量流来代替力，所有问题都解决了。然后，描述的语言也要作相应的改变：动量流从 **A** 流到 **P**，再从 **P** 流到 **B**。由于在任何地方都没有动量积累，所以通过任一横截面的动量流强度都是相同的。

参考文献：

[1] Max Planck, Phys. Z. 9, 1908, p.828.

Friedrich Herrmann

5. 6 绝对空间

主题：

“绝对空间，就其本质而言，是与外界任何事物无关而永远是相同的和不动的。”（牛顿）^[1]

“不用说，上面刚提到的牛顿的观点违背了他只研究客观存在的实在这一意图。没有人能说得出关于绝对空间和绝对运动的情况。它们只不过是人们意想出来的概念，而这些概念与我们的经验没有任何联系。”（马赫）^[2]

“因此，有必要揭露“绝对时间”和“绝对空间”这两个词的真相，它们是前相对论时代未经证实和不可思议的偏见。”^[3]

缺点：

引力现象可以分为两类。

第一类是相对静止的物体之间的引力相互作用。在经典物理学中，人们用牛顿的引力定律来描述这种现象，而这种现象与静电现象相似。我们可以把它们叫做静引力现象（gravitostatic phenomena）。物体能“感觉”到引力场的组成，它可以用引力场强度的矢量场来描述。

第二类是当物体加速时才能观察到的现象。今天我们用广义相对论的度量张量（metric tensor）来描述这种现象（包括静引力现象）。当一个物体相对于别的物体加速运动时，它就能“感觉”到这种现象。这种现象与距离的关系不同于静引力相互作用：在远距离加速的物体比静止的物体具有更大的重力^[4]。由于这个原因，由于加速产生的力只有相对于宇宙中巨大的物体才会出现，而在我们身边的“小”物体所引起的力是很微小的，以至于无法检测到。它们在引力磁效应（gravitomagnetic effect, Lense-Thirring-Effect）中显示出来。物理学家们相信这种效应的存在。

牛顿是怎样处理这两种力（或效应）的？他用大家熟知的引力定律来描述静引力效应。他认为他的理论中关于超距作用的观点是一个缺陷。他清楚地表明了这一点。然而，他的担忧并没有使他在《自然哲学的数学原理》中提到在天体之间能传递动量（the quantitas motus）的介质。我们都知道他的一句名言：“假设并非虚构”（hypotheses non fingo）。我们可以相信，从这一观点出发我们必定可以看出星际之间第二类力（即惯性力）产生的原因。这一点当时年轻的乔治·伯克利（George Berkeley）早已提出来了。然而，在这一点上

牛顿喜欢用别的解释，这种解释确实是更好的想法。加速力并没有来自于遥远的物体，而是来自于“绝对空间”，即所讨论的物体所在的地方存在的某种东西。因此，他运用了局部的描述方法。从某种角度来说，我们可以把这种东西看作是我们叫做场的前身。

根据以上的讨论，我们可以认为马赫的批评是不适当的，对绝对空间缺乏考虑的指责（见上面第三个引用）无助于对牛顿观点的客观评价。

历史：

相关的历史在前面已经有所提及。人们对静引力现象和动引力现象采用了不同的方法，其原因也许是当时人们还没有准备好用超距作用理论来解释惯性力，尽管伯克利的基本观点已经产生。

建议：

对牛顿的绝对空间观念要多给予一些尊重。这个观念并不像人们所认为的那样不好。

[1] Wikipedia, keyword “Absolute time and space”

[2] Mach, E: Die Mechanik in ihrer Entwicklung. Leipzig: Brockhaus, 1897, S. 223.

[3] Dorn-Bader, Physik, Gymnasium Gesamtband, Hannover: Schroedel, 2000, p. 405.

[4] Sciama, D. W.: The Physical Foundations of General Relativity. New York: Doubleday & Company, 1969, p. 22-33.

Friedrich Herrmann

5. 7 动量不是 m 和 v 的复合量

主题:

一个物体的动量通常被定义为它的质量和速度的乘积:

$$\mathbf{p} = m \cdot \mathbf{v}. \quad (1)$$

这样, \mathbf{p} 只不过是 m 和 \mathbf{v} 的乘积的一个缩写符号。动量看上去是一个典型的“导出量”。在有些书上, 人们明确地把动量叫做辅助量^[1]。

缺点:

动量不是导出量而是一个独立的基本物理量。这个观点基于以下几个理由:

(1) 动量是守恒量。动量的这一性质使得我们容易对一个运动物体的动量进行测量, 而不需要通过公式(1)来进行计算。^[2, 3] 既然(引力)质量和速度可以独立地被测量出来, 公式(1)可以通过实验得出。

(2) 公式(1)并不是对所有系统都成立。电磁场的动量不能通过这个公式计算出来。电磁场的动量密度可以通过电场强度和磁场强度来计算:

$$\rho = \frac{\mathbf{E} \times \mathbf{H}}{c^2}.$$

(3) 在力学和电学之间有一个意义深远的类比: 在物理量之间和这些物理量的关系之间有一种对应关系。例如, 守恒量动量在电学中可以类比为电荷, 强度量速度在电学中可以类比为电势。公式(1)告诉我们, 在非相对论速度下动量与速度成正比。这个公式在电学中可以类比为:

$$Q = C \cdot U. \quad (2)$$

上述公式告诉我们, 对于一个由两个固定极板构成的电容器, 电荷与两极板间的电势差成正比。通过比较(1)和(2)式我们知道, 质量可以被理解为“动量容”(momentum capacitance)。一个物体的质量越大, 在给定速度下它所具有的动量就越多。

通过比较我们发现, 用公式(1)来定义动量是不合适的。这正好比我们用公式(2)来定义电荷一样。而实际上, 我们把电荷当作一个基本物理量来引入, 这个量可以不通过 U 和 C 来加以测量。

(4) 把动量直接当作一个独立的量来引入, 还基于这样一个事实: 动量(更确切地说

是动量密度)是能量-动量张量的一个分量。这意味着,在引力场中动量扮演着电荷在电磁场中同样的角色。动量密度与能量密度、能流密度和动量流密度都属于引力场场源的。场源在基本相互作用中起着重要的作用。把它们当作导出量看来是不合适的。

历史:

与电荷相比,动量这一物理量的形成经过了很长的历史过程。在十七世纪,力学家们声称要达到这样一个目标,即找出碰撞过程所遵循的规律。当时人们正确地判断出,有一个不变的量起着决定性的作用。这个量被认为是质量和速度的组合。

1644年,笛卡儿发表了他的著作《哲学原理》(Principia Philosophiae)。在这本书中他指出,质量和速度的乘积,即运动的量(quantitas motus)是守恒的。几十年以后,莱布尼兹证明,质量和速度的平方的乘积是碰撞过程中“恰当的”不变量。结果爆发了著名的长时间的关于真正的“力的测量”的争论。这一争论一直到1726年才被伯努利(Daniel Bernoulli)打断。最后,这次争论既没有赢者也没有输者。结果出现了两个量,一个是我们现在叫做动量的量,另一个量就是动能。

动量自然地用公式(1)来定义了。过了很久以后人们才发现,如果守恒量动量被建立起来,(1)式就必须被抛弃掉。狭义相对论告诉我们,新的、守恒的动量与速度不成正比。只要引入与速度有关的质量,公式(1)仍成立。

建议:

我们建议,把动量作为一个独立的、有自己的测量方法的物理量来引入。这种方法跟引入电荷的方法一样。这样,公式(1)就成为惯性质量的定义式了,惯性质量成了动量和速度之间的比例系数。

参考文献:

- [1] Pohl, R. W.: Mechanik, Akustik und Wärmelehre.-Springer-Verlag, Berlin, 1969. -S. 45
- [2] Herrmann, F.: The Karlsruhe Physics Course, The Teacher's Manual, p. 23, <http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk/english/KPK-Teacher.pdf>
- [3] Herrmann, F., Schubart, M.: Measuring momentum without the use of $p = mv$ in a demonstration experiment, Am. J. Phys. **57**(1989), p. 858

Friedrich Herrmann

5. 8 被贬低了的动量

主题:

“第二定律: 物体的加速度 a 与作用在物体上的力 F 成正比, 与物体的质量 m 成反比, 即:

$$F=ma.”$$

“质量为 m 的物体在半径为 r 的圆周上运动。它在切线方向的速率为 v 。作用在这个物体上的向心力为:

$$F=ma_c=mv^2/r.”$$

缺点:

显然, 下面的公式的价值和有用性是没有问题的:

$$F=ma. \tag{1}$$

然而, 我们认为, 把它叫做“第二定律”或“基本运动定律”是不合适的, 这是因为它包含了被分得很清楚的其他两个定律。第一定律实际上就是第二定律:

$$F=dp/dt. \tag{2}$$

这个公式告诉我们, 系统的动量只有当动量流流入系统或从系统流出时 (换句话说, 只有当“有力作用在系统上”时) 才会发生变化。因此, 我们可以认为动量是守恒量。

为了得到 (1) 式, 我们需要应用下面的公式:

$$p=mv, \tag{3}$$

或它的时间导数:

$$dp/dt=m dv/dt.$$

公式 (3) 的特点与公式 (2) 的特点不同。在另一种背景下, 它可以叫做本构方程 (constitutive equation)。这种公式在某种情况下对某些系统成立。因此, 公式 $p=mv$ 只有当速度与光速 c 相比很小时才成立。对于电磁场, 它是不成立的, 因为这种系统无法用 m 和 v 这两个量来描述。

为了更清楚地表达我们的观点, 我们来讨论相应的电学定律。对下面给出的电学定律和力学定律之间的类比关系人们是很熟悉的:

力学

$$F=dp/dt$$

电学

$$I= dQ/dt$$

$$p=mv$$

$$Q=CU$$

$$F=m \, dv/dt$$

$$I=CdU/dt$$

显然，我们没给公式 $I=CdU/dt$ 一个类似于“电学基本定律”的名称。

当我们忽视公式（2）并声称公式（1）是基本定律或叫第二定律时，我们就没有必要再提及动量了。表面上看来，这似乎考虑到了一个优势。实际上，在通常的力学教科书中，我们一般在一开始就讨论力，即动量流，而动量必须等到讨论碰撞过程时才会被提到。

我们还可以在其他地方看到对动量回避的这种情况，见前面所引用的第二个例子。这里，中间结论又被丢失了。推导向心力的第一步是计算做圆周运动的物体的动量随时间的变化率：

$$dp/dt= mv^2/r.$$

公式的右边只包含表征做圆周运动的物体的物理量。仅仅根据牛顿第二定律我们得到：

$$F_c= mv^2/r.$$

历史：

对动量的贬低或把它简化为纯粹是碰撞过程中的一个量并不是早期力学所遗留下来的。相反，在牛顿时代之前和在牛顿时代，动量是人们所关注的一个关于动量平衡的量。它的拉丁语是 *quantitas motus*。这个词可翻译为运动的量（quantity of motion 或 amount of motion）。动量在现代物理学中是非常重要的。相对论物理告诉我们，动量密度是能量-动量张量的一个分量，因而它属于引力场的源。因此，在基础力学中对动量的明显忽视是不可理解的。

我们认为，我们不得不责备莱布尼兹。在莱布尼兹和笛卡儿学派关于“力的真正测量”的著名争论中，他们讨论了这样一个问题，即 mv 和 mv^2 哪个才是“正确”测量运动的量？现在我们知道了，物理学需要这两个表达式。第一个表达式就是我们今天所谓的冲量（*impetus*）或动量，第二个表达式（不考虑前面的系数 1/2）就是动能。这两个量与在莱布尼兹时代有些人所说的力有关，与今天我们所说的（口头表达上的含义）冲量或驱动力或动量有关。在传统的力学教学中，冲量这个日常概念原来是与动能（即莱布尼兹的 mv^2 ）这个量有关。一个简单的理由是，我们一般先介绍动能，后介绍动量。这样，当我们要引入动量时，那个测量跟我们关于冲量的直觉有关的物理量的位置已经被占用了。结果是，多数学生认为动量是一个更抽象的量。他们认为，动量和动能不是同一个量，但所测量的东西很相象。因此，动量被认为是一个更难懂的量，它的作用基本上被弱化为碰撞过程中的一个不变量。

顺便提一下，动量的这一命运与熵的命运有点相同。开始时，这个量完全是用来测量我们日常生活中所说的热量（heat）的。能量概念和能量守恒定律被引入后，与热量这个词有关的名称和认知图像转移到了微分形式 dQ 。结果，熵就变成了一个相当“抽象”的量。

建议：

在力学一开始就引入动量，并把它作为一个基本的物理量。在引入动量时要向学生讲清楚，动量就是对我们日常生活中所说的冲量的测量。

我们要像牛顿当时所做的那样来引入牛顿第二定律： $F=dp/dt$ 。然后，我们再引入关系式 $p=mv$ 。这跟引入电荷 Q 后再引入关系式 $Q=CU$ 一样。

对于圆周运动，在引入向心力之前我们应该先告诉学生下面的公式：

$$dp/dt = mv^2/r.$$

Friedrich Herrmann

5. 9 冲量

主题：

“力的冲量 Δp 被定义为这样一个矢量：

$$\Delta p = \int_{t_0}^{t_1} F dt.$$

缺点：

冲量是根据公式 $F=dp/dt$ 引入的。 F 、 p 和 t 三个量有明确的含义。这个公式可以写为 $dp=Fdt$ 。这个名称是取给这个公式右边这一项的。在教科书中，通常还告诉学生一些细节，让学生知道这里有超出牛顿第二定律范围的知识。特别是，学生会认为这里引入了一个新的物理量。实际上，冲量不是一个物理量，至少在通常意义上不是。一个物理量在给定的状态上有一个明确的值^[1]。然而，冲量并不是这样。

冲量这个概念并不一定需要。这可以从这样的事实中看到，即其他不同的“量”可以用同样的方法来建构，但人们没有这样做。实际上，力可以被看作动量流，冲量可以被看作动量流的积分。这样，我们发现，这种积分对于其他任何流都可以写出来，如电流的积分、质量流的积分或能流的积分。因此，我们可以把下面的表达式作为一个新的“量”来引入，并给它取上一个恰当的名称：

$$\int P dt.$$

（这里， P 是能流，或叫“功率”）

我们并不是说计算这样的积分没有什么意义。我们只认为引入这样一个新的物理量是不合适的。

实际上，当我们将力（动量流）与时间积分时，我们会得到力所作用的物体（即动量流入的物体）的动量变化。这个积分显然是不必要的，这是因为动量是一个广延量或实物型物理量。

假如有人将水倒入浴盆中。当我们把水流强度与倒水的时间相乘，我们就得到流入浴盆的总水量。为了理解上面这句话的意思，我们并不需要“水冲量”这个概念。

给力对时间的积分取一个合适的名称实在是多余的，这跟给 Fds 和 TdS 分别取名为功和热量是一样的。这两个表达式在通常意义上也不是物理量。

历史:

冲量这个表达式的引入是为了描述时间很短的动量传递过程，这种过程对时间的特殊关系显得不很重要。这种考虑是可以理解的。但是，不给它取新的名称也是可以的。我们这样说就够了：有一定量的动量传递过去了。然而，力和动量这两个量比较，力在当时被认为是更基本的物理量，动量被认为仅仅是质量和速度的乘积。因此，人们很自然地用力而不是动量来表述上面的意思。

建议:

如果我们严肃地把动量本身当作一个物理量来看待的话，冲量是没必要引入的。取消冲量这个概念后，力学并不会失去什么，倒反而变得更清晰了。

[1] Falk, G.: Theoretische Physik, II Thermodynamik, Heidelberger Taschenbücher. Springer-Verlag Berlin, 1968, p.4

Friedrich Herrmann

5. 10 运动状态

主题：

在考试中，学生对“力的作用效果是什么”这个问题的回答是：力的作用效果是使它所作用的物体发生形变或运动状态变化。

缺点：

“运动状态变化”一词指速度的变化。中学生知道什么是矢量。因此，我们可以认为他们也知道速度是矢量。当我们说“运动状态在变化”时，我们把原来已经表达清楚的东西（在其他场合，我们通常确切地说“某个物理量的值在变化”）反而说模糊了。当我们给物体提供热时，我们就说“物体的温度在升高”，我们不会说“物体的热状态在变化”。当我们给物体提供电荷时，我们就说“物体的电势在升高”，我们不会说“物体的电状态在变化”。当我们给轮胎充气时，我们就说“我们在给轮胎提供空气”，我们不会说“我们在改变轮胎的压缩状态”。

历史：

“运动状态”这个词直接出自我们的物理学大师牛顿。他在第一定律中是这样说的：

“Corpus omne perseverare in statu suo quiescendi vel movendi uniformiter in directum, nisi quatenus a viribus impressis cogitur statum illum mutare.”

（一切物体总保持静止或匀速直线运动的运动状态，除非作用在它上面的力迫使它改变这种状态。）

这里出现了“运动状态”（*statu movendi*）这一说法。

可以理解，牛顿不得不用这种方式来表达。他当时没有把速度看做矢量，因为矢量这个概念要到一百多年后才出现。

建议：

“运动状态”一词在更一般的意义上使用比较合适。它包括运动的所有特征量：速度、加速度、角速度……然而，在牛顿定律中，我们最好明确这种变化是速度的变化。

Friedrich Herrmann

5. 11 肌肉产生的力

主题：

“虽然我们通过肌肉已经对力有推或拉的直觉……牛顿定律使我们对力有更精确的理解。”^[1]

“我们对力和力的作用效果有相当深的直觉理解。我们通常用肌肉来施加力：我们将咖啡杯捧到嘴边，将陷入沟中的汽车推上来，对运动着的篮球施加力使其停止运动”。^[2]

“力的概念可以追溯到我们的肌肉感觉。”^[3]

缺点：

肌肉的活动使我们产生一种力的感觉。我们并没有把它当作一种特别的感受，而是当作一种主动的作用。然而，这种作用效果可以作为对哪个物理量的度量？一方面，当肌肉活动时就有力的作用。另一方面，肌肉的活动需要能量。不管我们的肌肉是否在搬运东西（传输机械功），ATP 都在转化为 ADP（在不传输机械功时，它只产生热）。因此，肌肉的感觉既指力（动量流）也指能流（即功率）。在物理教学中力和功率是经常被混淆的。因此，我们认为，在引入力的概念时我们不能求助于肌肉的感觉。

历史：

在引入力的概念时不能求助于肌肉的感觉，这是有原因的。这是因为，我们可能会认为肌肉是产生力的原因。我们来看一个例子：在图 5-11-1a 中的细线中的力是由谁（或什么）引起的？我们的直觉也许会告诉我们，它是由弹簧引起的。那么对于图 5-11-1b 所示的情况呢？它是由人的肌肉引起的吗？这一直觉会导致我们认为：“弹簧产生了拉力”，或“人产生了拉力”。我们不会说：“细线产生了拉力”，或“墙壁产生了拉力”。但是，这些话是错的。我们来看图 5-11-1c。这里，两个弹簧中哪个产生了力，哪个是产生力的原因？在图 5-11-1d 中，哪个人产生了力？最后，我们也可以把细线看作是劲度系数很大的弹簧。这样，我们刚才所说的寻找力的原因的步骤是无效的。因此，问题就来了：难道我们的感觉欺骗了我们？难道对于静止的装置弹簧和人一点区别都没有？是的，一点区别都没有。弹簧和人都是可以充当机械能的能源。因此，它们都是产生肌肉感觉的地方，都是我们所观察到的现象的原因。实际上，它们不一定要传输机械能，它们仅仅是能传输机械能。因此，如果我们把它们看作是产生力的原因，我们并没有把问题找准。

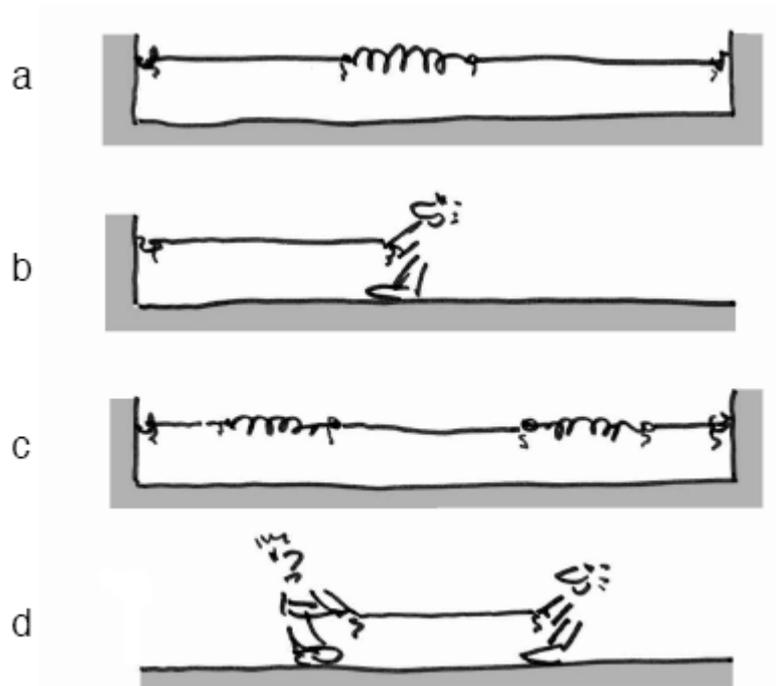


图 5-11-1 (a)弹簧是产生力的原因吗？(b)人是产生力的原因吗？(c)哪个弹簧是产生力的原因？(d)哪个人是产生力的原因？

建议：

实际上，我们完全可以感觉到作用在我们身上的力。大自然专门赋予我们特殊的感觉器官。我们的皮肤对压缩、拉伸和剪切应力能产生感觉。这些感觉器官对于力的测量是很可靠的，这正像我们身体上的其他感觉器官对于“测量”其他物理量（如温度、光强和声强）是很可靠的一样。因此，我们可以感觉到力的存在，不管我们的肌肉是否在活动。我们甚至可以对很小的力的作用（如作用在指尖上很小的压强，或作用在手臂上 1N 的力，即相当于一个 100 克的重物放在手臂上）形成相当清晰的单位概念。

[1] Paul A. Tipler and Gene Mosca, Physics-for Scientists and Engineers, Sixth edition, W. H. Freeman and Company, New York, 2008, p. 93.

[2] http://theory.uwinnipeg.ca/mod_tech/node20.html

[3] 引自一本德国中学的教科书。

Friedrich Herrmann

5. 12 回复力

主题：

在中学物理教科书中，对简谐振动的定义通常要作某些强调，比如“在力学中，弹簧振子是这样一个系统，它所受到的回复力与位移成正比，即：

$$F = -D \cdot s. \quad (1)$$

显然，这里明显强调了成正比这一关系。

缺点：

1. 这种强调句会引起我们的特别关注：“我所说的是很重要的！”然而，上面所引用的这句话并没有值得我们重视的地方。

我们注意到，有另外两个变量也是相互成正比的，它们是动量和速度：

$$p = m \cdot v. \quad (2)$$

(1) 式和 (2) 具有相同的结构。它们对于振动来说是同样重要的。它们分别描述了弹簧振子的两个部分：(1) 式描述了弹簧，(2) 式描述了振子。运用动量守恒定律，我们可以写出它的运动方程。

有人也许会说，(2) 式不值得强调，因为不管怎样它总是正确的；速度和动量之间的比例系数的偏差只有在接近光速时才会由于相对论效应而出现；把它作为简谐运动的条件提出来似乎显得迂腐了一点。是这样吗？那么第一个公式呢？当我们向学生介绍振动系统由振子和弹簧组成时，这个公式也是很容易被理解的，因为没有人会过度地拉伸弹簧。

为了从更远的角度来审视力学问题，最好的办法是把它转换为电学问题。

对于电路中的简谐振荡，也只有当两个线性关系成立时才会发生。这两个线性关系描述了电路中的两个元件，即电容器和电感器。这两个关系式为：

$$n\Phi = L \cdot I \quad \text{和} \quad Q = C \cdot U.$$

将上面的式子与电荷守恒定律联立起来，我们可以写出这个振动系统的微分方程。

在这里，这种线性关系特别容易被破坏：如果将铁芯插入线圈中，使其进入磁饱和状态，或使用电解电容器，这种情况就会发生。尽管有这种可能性，但没有人会认为以下表述是必要的：“在电学中，简谐振荡电路由电感器和电容器组成，在电感器中的磁通量与电流成正比，电容器的电压与其电荷成正比”。为什么我们没有作这样的定义？这是因为我们都觉得这是理所当然的事，没有必要再来强调“磁通量与电流成正比和电压与电荷成

正比”。

2. 对于力学中的这个简谐振动系统，我们是否真正需要给这个力取一个名称（回复力）？相应地，有人也许会说，振荡电路中的电感器中的电流也应该有它自己的名称，比如“回复电流”。

历史：

这又是一个受力学特殊处理的例子。由于历史的原因，力学确实占有统治地位。

建议：

我们不能在没有必要的地方过于严密。对某些句子的强调是有帮助的。但对无足轻重的句子的强调则会令人讨厌的。

Friedrich Herrmann

5. 13 力的作用线

主题：

在介绍“力”这一物理量时，有时我们会强调力的三个要素：大小、方向和作用点。在处理力矩问题时，我们还会强调力的第四个要素：力的作用线。

缺点：

我们通常用一种不必要的复杂方法来介绍力这一概念。上面所说的仅仅是其中一个例子。这样，力看上去需要用一种特殊的方法来处理。力是矢量，因而它由三个分量来决定，或者说由它的大小和方向来决定。然而，我们是否非要给力外加一个作用点不可？实际上是不需要的。这其实是一个错误。

多数物理量的值跟下面四种几何性质有关：点（如压强和温度）、线（如电压）、面（如电流强度和磁通量）和体积（如质量、电荷和熵）。与点有关的物理量有时叫做强度量（intensive quantity）或局域量（local quantity）。与体积有关的物理量是广延量（extensive quantity）。其大小与表面积有关的物理量叫做流或通量。这种分类对标量适用，对矢量和张量也适用。比如，温度和电场强度都是局域量，温度是标量，而电场强度却是矢量；电荷和动量都是广延量，电荷是标量，而动量却是矢量；功率和力都是与表面有关的量，功率是标量，而力却是矢量。

现在我们可以更清楚地知道力的作用点到底是什么了。它实质上被假定作为一种几何性质，而这种几何性质与力的大小有关。这样，有两点是很明确的：

(1) 与力的大小有关的几何性质不是点而是面；

(2) 在定义一个物理量时，我们通常不会提及与这个量的大小有关的几何性质。我们不会说：温度由其大小和相应的点来决定。我们也不会说：电荷由其大小和它所占有的体积来决定。

历史：

在十八和十九世纪所产生的经典质点力学中，力确实与点有关。质点力学在当时甚至直到现在始终是很成功的。然而，特别就中学物理来说，我们必须清楚地看到，质点力学是对实际的一种近似，而这种近似使得有些中学物理中必须出现的概念（如密度和流密度）显得没有意义了。

建议：

我们必须清楚地认识到，力的大小与表面积有关。然而，我们没有必要把这一点作为力的一个特殊的性质来加以强调。对于其他关于流的物理量来说也同样如此。

Friedrich Herrmann

5. 14 压强和力

主题：

“在液体内部向上、向下和向侧面所施加的压强的大小均相等。”

缺点：

上面所引用的这句话来自比较早的大学物理教科书。我们将要提出的问题在最近的物理教科书中也会碰到。这个问题就是：力和压强的区别。

在传统物理教科书中，我们是先引入力的，然后把压强定义为单位面积上的力。然而，下面的关系式是不能成立的：

$$p = \Delta F / \Delta A,$$

这是因为 p 是标量，而 ΔF 是矢量。并且， ΔA 是矢量，矢量是不能被矢量除的。

要避免这个问题，我们可以把压强定义为

$$p = dE/dV,$$

即压强等于单位体积变化的能量变化。但我们通常不这样做。如果我们坚持要引入单位面积的力，我们可以将下式

$$p = \Delta F / \Delta A$$

改为

$$\mathbf{F} = \boldsymbol{\sigma} \cdot \mathbf{A}, \tag{1}$$

这里 $\boldsymbol{\sigma}$ 是应力张量。在静止（没有内摩擦）的流体中，这个张量只有三个数值相等的对角元素。因此，它可以用一个数来表示，这个数就是指流体压强。在这种情况下，公式（1）可以写为

$$\mathbf{F} = p \cdot \mathbf{A}$$

通常情况下， $\boldsymbol{\sigma}$ 没有这样简单的结构。这是很明显的，甚至对于非物理专业的人来说也是清楚的：一个物体有可能在三个正交方位上各自独立地受到三个应力的作用。如果不讨论这一简单的事实，就很难理解为什么我们必须指出“液体内的压强在各个方位上都相同”。

在上面引入的句子中，还存在另一个问题：显然，教材作者在标量、矢量和张量这些概念之间纠缠不清。实际上，“向上的压强和向下的压强相等”这句话是没有意义的。张量能把三个相互正交的轴区分开来，但这些轴没有方向。因此，不存在向上或向下的压强，

而只有在竖直方位上的压强。这样，竖直方位上的应力（或压强）不同于水平方位上的应力（然而，在流体中没有这种应力）。显然，我们将向上和向下的压强与向上和向下的力混同起来了。

历史：

根据古老的牛顿力学的观点，力作用在物体上。当我们用力来定义压强时，很自然地会认为压强作用在物体上。认为压强（或应力）具有方向，这是似是而非的。

建议：

在引入力时，必须明确它是一个涉及到面的物理量，而不是涉及到点或物体（体积）的物理量。

在讨论液体内的压强之前，应该先引入固体中的应力，并告诉学生应力具有方位。我们容易知道，我们可以将应力在相互正交的方位上独立地施加给一个物体。液体和气体的情况比较特殊，它的三个应力具有相同的大小。

（另一个特殊情况是电场和磁场。在这种情况下，三个主要的应力具有相同的值。在场强矢量的方位上应力是负的（处于位伸状态），在垂直于场强的方位上它是正的。）

我们要避免说“作用在……上的压强”，而应该说“在给定的某个方位上的压强”，比如“在水平方位上的压强”。

Friedrich Herrmann

5. 15 动压强

主题:

无粘性、不可压缩、稳定流动的流体遵循以下伯努利方程:

$$p + \rho gh + \frac{\rho v^2}{2} = \text{恒量}.$$

这里, p 是压强, ρ 是质量密度, g 是引力场强度, h 是高度 (向上为正), v 是速度。“恒量”意味着, 方程左边的各项之和在同一流线上的各点保持不变。如果变量的局域值在截面上每一点都相同, 那么约束的条件会少一些。因此, “恒量”的意思是, “在每个截面上的值相同”。

通常, 伯努利方程是这样来解释的: 方程中有几种不同的压强, 它们分别是静压强 (static pressure) p 、引力压强 (gravitational pressure) ρgh 和动压强 (dynamic pressure) 或滞止压强 (stagnation pressure) $\rho v^2/2$ 。伯努利方程告诉我们, 在满足上述条件的情况下, 这三种压强之和是恒量。

缺点:

伯努利方程可以定性地理解为:

- (1) 流体运动得快的地方压强较小, 运动得慢的地方压强较大。
- (2) 在流体内部, 越往下的地方压强越大。

在上面的表述中, 只涉及到一个压强, 这个压强就是伯努利方程中的 p 。 ρgh 和 $\rho v^2/2$ 具有压强的量纲, 但它们不是我们通常所理解的压强。这三项表达式不是同一种物理量。 ρgh 这一项不能理解为引力压强, 因为越往下引力压强越大, 而 ρgh 却越小。

历史:

也许这种错误的解释是由于人们试图将压强看作为一个遵循守恒定律的物理量。实际上, 当我们看到“总压强是守恒的”这一表述时, 我们会联想到有关能量、电荷或角动量守恒的表述: “在一个孤立系统中能量 (电荷、角动量) 的总量保持不变。”这种表述具有普遍性, 也容易表达。由于伯努利方程, 压强也进入了著名的守恒量这个圈子中了。然而, 这个结论看上去是很自然的, 因为伯努利方程可以通过能量守恒定律推导出来。

我们认为, 这种观点是言过其实的。压强不能作为一个“守恒量”, 因为守恒量必须是

广延量，而压强不是广延量。

有人也许会持相反的观点，认为可以将 $\rho v^2/2$ 取名为“动压强”，给它取个名称也谈不上对和错。然而，名称的选择有合适和不合适的问题。我们认为，给 ρgh 和 $\rho v^2/2$ 取压强的名称是不合适的。对压强这个量我们有一个很好的直觉。把 $\rho v^2/2$ 叫做压强会使学生认为压强是一个难学的概念。“动”这个字更使学生感到这种压强是难理解的。

然而， $\rho v^2/2$ 这一表达式可以被看作是动能密度。因此，有人把伯努利方程中的每一项都叫做能量密度：把 p 叫做静能量密度，把 $\rho v^2/2$ 叫做动能量密度，把 ρgh 叫做引力能量密度。显然，这不是一个好的想法。

建议：

把伯努利方程理解为：（1）当速度增大时，压强减小；（2）当高度增大时，压强减小。这两种表述是可取的，因为它符合人们的直觉，而不需要作任何推理。

Friedrich Herrmann

5. 16 力和能量

主题：

下面是含有“驱动力”一词的几个表述：

- “来自发动机的驱动力推动汽车前进。”
- “由于汽车的驱动力来自发动机，它是……”
- “在混合动力汽车中，装有驱动力传递系统……”
- “驱动力从发动机传递到轮子……”
- “一辆慢速行驶的汽车可以通过发动机的力来加速。”

缺点：

如果有东西从 A 传递到 B，根据通常的表达习惯，这种东西原先在 A 里，后来才到达 B。上面的几个表述有些来自于中学教科书。如果按照物理学中关于“力”的含义，上述几种表述即使在不大严密的场合也是不能说的。然而，如果将“力”换成“能量”，上述几种表述就对了。

历史：

今天，在物理学中“力”表示 F 这个量。然而，这个词在很长时期内一直含有多种意思。在以前，它被用来描述我们今天叫做能量[即动能，当时被称为“活力”(vis viva)]和动量这两个物理量。在历史上著名的莱布尼兹和笛卡儿之间关于“力的真实测量”的争论证实了这一点。这一争论是关于用 mv 还是 mv^2 来作为运动的“真实”量度的问题。显然，这一争论在科学术语中留下了根深蒂固的影响，以至于现在人们还经常在用“力”这个字来描述“能量”这个概念，并且这一错误说法没有被作者和读者所察觉。然而，如果学生们还没有将这两个概念区分开，我们不应该把这个问题牵累给他们。

建议：

在物理学中对“力”这个字要用得小心。

Friedrich Herrmann

5. 17 滑轮

主题：

“像杠杆一样，滑轮也能起到省力的作用，并能改变力的方向。”

“这种滑轮不省力，能改变力的方向（使向上的力变为向下的力）。对许多人来说，这是很有用的。”

“滑轮能改变力的方向，使我们容易把物体提到高处。”

缺点：

如图 5-17-1 所示，某人 A 正在拉一根绳子，这根绳子绕过滑轮 B，在另一端挂有物体 C。

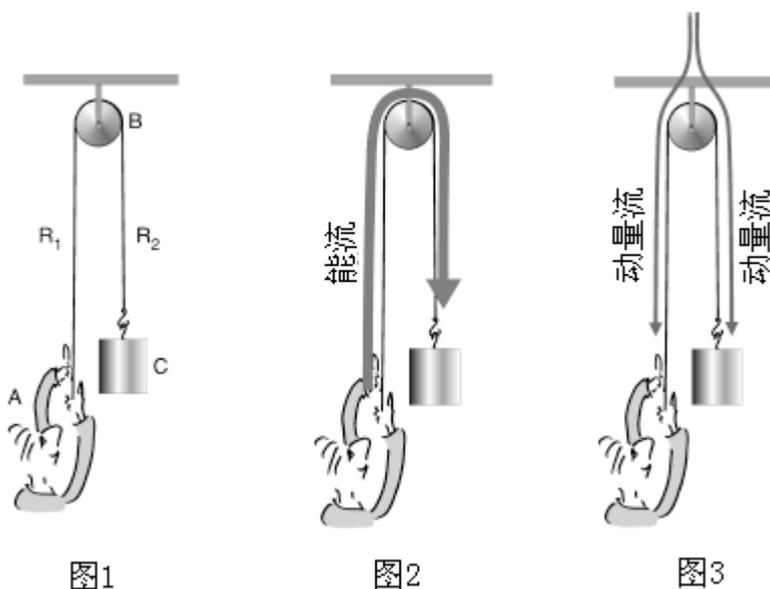


图 5-17-1

图 5-17-2

图 5-17-3

1. 上面所说的力指在同一根绳子中的两部分 R_1 和 R_2 中的力。对于一个力，如果没有指明哪个物体施力和哪个物体受力，这个矢量的方向是不明确的。

人作用在滑轮上的力 F_{AB} 是向下的，滑轮作用在人的力 F_{BA} 是向上的。绳子左部分（即 R_1 ）的状态可以用其中一个力来清楚地描述。

上面所引用的话告诉我们，力的方向发生了改变。这句话可以理解为：从 R_1 到 R_2 ，

力改变了方向。但我们发现，力的方向是这样或那样由我们自行来决定。 F_{AB} 的方向确实与 F_{BC} 的方向相反，似乎力可以改变方向；但是 F_{AB} 的方向和 F_{CB} 的方向是相同的，这样看来力又不能改变方向。

2. “改变方向”意味着原来是某一方向后来变成了另一个方向。因此，上面引用的话意味着力从绳子 1（左边）“走到”了绳子 2（右边）。但是，如果是这样的话，那么第三个力呢？即天花板下的悬挂处作用在滑轮上的力呢？这个力往哪边“走”？实际上，滑轮改变了某个（甚至是两个）东西的方向：首先，它改变了绳子的方向；其次，它改变了能流的方向（如图 5-17-2 所示）。当绳子 R_1 被人向下拉时，能量就沿绳子 R_1 部分向上流；然后它绕过滑轮，沿着绳子 R_2 部分向下流到物体 C。

3. 我们确实可以像上面引用部分所说的那样来处理力。力可以解释为动量流。我们容易给出这个滑轮装置中的动量流。然而，动量流并不像人们看了上面引用部分后所猜测的那样。它并没有沿着绳绕过滑轮。如果我们取向上为动量的正方向，那么动量从天花板下的悬挂处流到滑轮，然后在那里分为两个相同大小的流，一个通过 R_1 ，另一个通过 R_2 ，如图 3 所示。

历史：

这个装置给人们这样一个印象，即除了绳子还有别的东西绕着滑轮在流动。但是，能流显然被投射到了力的流动，参见文献[1]。

建议：

力能改变方向的观点是很不好的。如果我们在用能流和动量流描述滑轮和滑轮组时仔细地将能量和动量区分开，正像在电学中将能流和电荷流完全区分开一样，那么情况就清楚了。

[1] F. Herrmann, Force and energy, 《物理学的历史负担》第 45 篇

Friedrich Herrmann

5. 18 飞机为什么会飞？

主题：

飞机为什么会飞？对这个问题不仅在关于空气动力学的专门文献中有讨论，在大学和中学物理教科书和普通的科学文献中也有讨论。我们从中可以找到各种不同的解释。一种文献一个解释，有些教科书给出了几种不同的解释。最常见的解释有以下几种：

(1) 在机翼上部的空气流速大于底部的空气流速。根据伯努利方程，机翼底部的压强大于上部的压强。

(2) 空气分子在机翼表面反射。传递给机翼底部的动量大于传递给上部的动量。

(3) 在机翼周围会形成空气环流。这个环流会引起向上的力。

这些解释没有提出相应的产生升力的机制。它们仅仅是对同一现象的不同解释。

缺点：

(1) 通常这些解释是很难理解的。有些教科书还给出了大量细节和术语：分层流动、机身阻力、雷诺数、冲角、升力系数、环量、涡旋度、粘滞度、斯托克斯定律、伯努利方程、湍流……

(2) 有些教科书这样说：上面所涉及到的过程都对升力有一定的影响。在一本教科书中是这样说的：分子把动量传递到机翼的底部，使得上部的压强比较小。

(3) 这里我们着重讨论的问题是，当学生问飞机为什么会飞时，我们应该如何来回答才能使他们感到满意？

我们认为，上述任何一种解释都不能使学生感到满意。为什么我们这样说？让我们来思考关于飞机飞行最普通的一个问题。我们把“飞机为什么不会掉到地上？”这个问题改为“为什么放在桌面上的花瓶不会掉下去？”

假定有一位用伯努利方程来解释飞机飞行的物理学家。他对上述问题的回答也许是这样的：“桌子是有弹性的。它像压缩的弹簧一样有力作用在花瓶上。”显然，这个回答并不错。然而，提问的学生并不关心谁给花瓶底部施加了力。对于飞机也是这样。如果我们知道空气给机翼施加了一个向上的推力，我们仍不理解为什么飞机不会掉下来。

假定有一位用分子理论来解释飞机飞行的物理学家。他对花瓶的问题可能会这样回答：“花瓶不会掉下去，是因为花瓶和桌面的分子之间有相互作用的斥力。”对这个回答学生也是不满意的。用同样的方式来解释飞机飞行也不会使人们有更深入的理解。难道我们真得

非要动用原子物理学的理论才能解释飞机飞行的原理？

也许我们所假想的物理学家没有真正听懂我们上面所提的那个问题。显然，他把学生的问题转换成了可以用他所掌握的关于空气动力学和分子动理论的知识来回答的问题。

历史：

我们在中学教科书和其他通俗的科学书籍（即不是为专家所写的书）中所找到的对飞机飞行的解释是没有经过处理的工程师的知识。为了设计一个最优化的机翼，流线场的概念当然是很重要的。为了应用位势理论（potential theory），我们需要将速度场分解为抵消梯度和环量的分量。然而，这些内容不能被放到通识教育的课程中。

建议：

我们认为对飞机的飞行应该这样来解释：正像飞鸟、昆虫、直升飞机、飞盘、飞镖和降落伞一样，飞机在空中飞行时必须使空气向下运动，让空气把它由于万有引力（实际上，力就是动量流）而不断得到的动量带回到地球。

Friedrich Herrmann

5. 19 角动量守恒

主题：

角动量守恒定律通常是这样引入的：以一个质点为研究对象。在牛顿第二定律 $\mathbf{F}=\mathrm{d}\mathbf{p}/\mathrm{d}t$ 的两边乘上位置矢量 \mathbf{r} （矢积）（ \mathbf{r} 相对于任意选择的原点）。由此，我们得到力矩和角动量的时间变化率之间的关系式：

$$\mathbf{M}=\mathrm{d}\mathbf{L}/\mathrm{d}t.$$

我们可以写出两个或更多个质点的相应的关系式，并考虑到质点之间的内力

$$\mathbf{F}_{ik}=-\mathbf{F}_{ki};$$

并且，这些内力与矢量 $\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_k$ 平行。这样，我们得出结论：质点系的角动量对时间的导数等于合外力的力矩之和。由此，我们可以得出角动量守恒定律：“如果作用在系统上的合外力的力矩为零，则系统的角动量保持不变。”

缺点：

我们对角动量守恒定律的上述推导过程显得很简短，这是因为我们认为读者已经知道这个推导过程。在教科书中，这个推导过程大概有十行方程组成，需要整整一个页面。学生们可以一步一步地阅读这个推导过程，并且不会感到困难。他们阅读后最终会认为动量守恒定律是正确的。然而，如果我们问学生，这个推导过程实际上证明了什么内容，他们就会感到难以回答。这个推导过程从牛顿第二定律出发。牛顿第二定律与动量守恒定律是等价的。推导的结果是角动量守恒。学生们不可避免地会认为，角动量守恒定律是用数学的方法从动量守恒定律推导出来的。毫无疑问，这样说是错的。学生们很难知道这个推导过程中施了一个花招。他们甚至不会怀疑这里没有什么花招。实际上，在上面的推导过程中，角动量守恒定律不是从动量守恒定律中推导出来的。当我们说 \mathbf{F}_{ik} 和 \mathbf{F}_{ki} 与矢量 $\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_k$ 平行时，我们实际上把角动量守恒的结论加到推导过程中了。

图 5-19-1 给出了实际上不存在的情形。两个物体之间的相互作用力大小相等、方向相反 ($\mathbf{F}_{12} = -\mathbf{F}_{21}$)，但与矢量 $\mathbf{r}_1-\mathbf{r}_k$ 不平行。它们遵循牛顿第三定律，因而其动量守恒。但由于这两个力形成一个力矩，因此系统的角动量将增加。这是在没有外力矩的情况下的角动量增加。这里，根本没有这样的外力作用在系统上。这就违背了角动量守恒定律。因此，“ \mathbf{F}_{ik} 和 \mathbf{F}_{ki} 与矢量 $\mathbf{r}_i-\mathbf{r}_k$ 平行”等效于“角动量是守恒的”。

总之，人们在一个有点长的运算过程中引入了角动量守恒的结论。人们对得出角动量

守恒的结论感到很高兴。但是，对这个运算过程他们又是怎么想的呢？

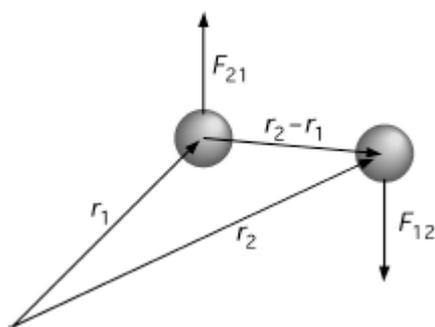


图 5-19-1 作用在两个物体上的力与这两个物体的连线不平行。因此，在这种情况下角动量守恒定律不成立。

历史：

牛顿运动定律实际上就是动量守恒定律。由于牛顿运动定律的巨大成功，使得人们普遍认为它们不仅仅是一个简单的守恒定律。它们好像是物理学的全部内容，是推导其他物理学结论的基础。有时候人们甚至认为能量守恒定律也是从牛顿运动定律中推导出来的（这里又有一个花招）。

建议：

将角动量作为一个独立的量来引入，同时引入相应的角动量守恒定律。这并不是说，质点系的角动量与其组成部分的动量之间没有联系。

Friedrich Herrmann

5. 20 拔河比赛

主题

A、B 两人在进行拔河比赛。通过绳子，A 对 B 施加一个力，B 对 A 也施加一个力，如图 1 所示。

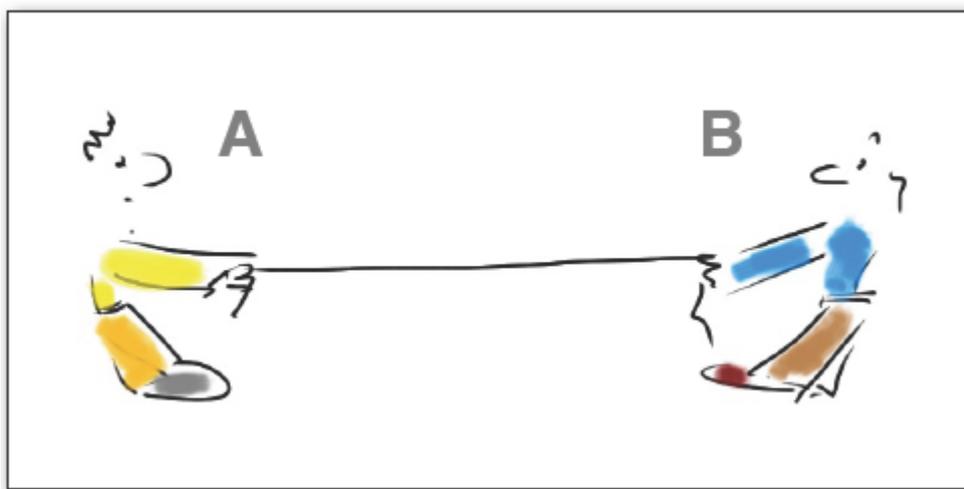


图 5-20-1. A 对 B 施加一个力，B 对 A 也施加一个力。

缺点

在一次研讨课中，教师要求 17 名将要成为物理教师的大学生（三年级或四年级学生）对两位正在进行拔河比赛的人画出受力图，并讨论这些力之间的关系。他们被允许分组讨论。教师不给学生任何指导，并要求他们展示讨论的结果。

他们从分析最简单的情况开始：A 和 B 两人都静止，并保持静止状态。这样，他们的速度和加速度都为零。教师告诉学生，这两个人的“拉力都为 200N”。

对于“作用在绳子中”的力，学生们有三种不同的观点。

观点 1：由于 $(+200\text{N}) + (-200\text{N}) = 0$ ，绳子中的力为零；

观点 2：由于 $2 \times 200\text{N} = 400\text{N}$ ，绳子中的力为 400N；

观点 3：由于人的拉力为 200N，绳子中的拉力为 200N。

由于学生们经过讨论后仍达不成一致的意见，它们决定投票。出乎意料的是，这时所有学生都投了第 2 个观点。

由于学生们对这个投票结果仍感到不踏实，他们经过讨论，决定通过实验来验证结论的正确性。他们决定在绳子中串联上三个弹簧秤。如图 2 所示，把一个弹簧秤接在 A 端，

用来测量 A 所施加的力；把另一个弹簧秤接在 B 端，用来测量 B 所施加的力；把第三个弹簧秤接在中间，用来测量“绳子中”的力。

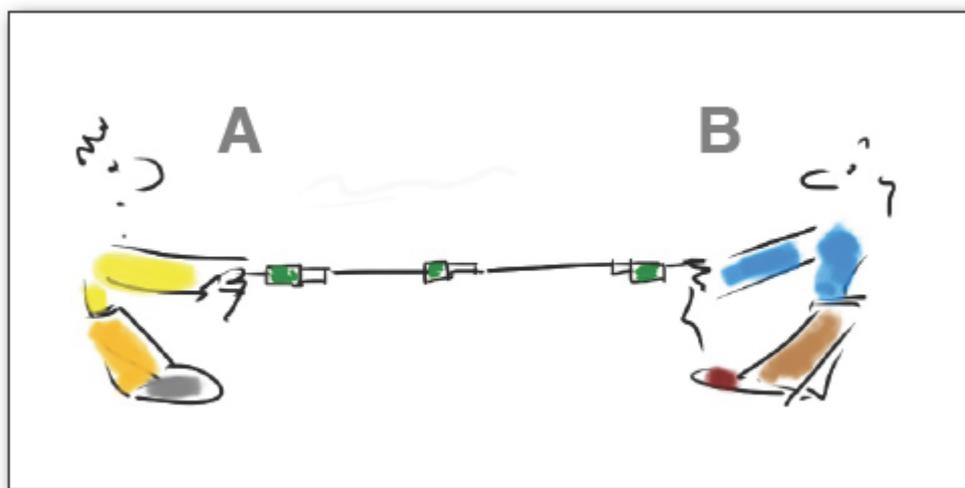


图 5-20-2. “左边的弹簧秤用来测量 A 的力，右边的弹簧秤用来测量 B 的力，中间的弹簧秤用来测量绳子中的力。”

由于物理实验室就在旁边，教师建议他们去实际做个实验。实验果真做了。实验结果令学生们吃了一惊。

这是最近刚发生在德国卡尔斯鲁厄理工学院物理系的事。那时，17 位学生已经“学过”牛顿力学三次：一次在初中，一次在高中，一次在大学。另外，他们还学过哈密顿和拉格朗日力学。并且，他们并不给人以特别无天赋或特别愚笨的感觉。

把这种情况叫做失败是一点也不夸张的。我们还可举出对其他基础物理学的问题所出现的相同情况。我们得出结论：学生们并没有弄懂牛顿力学。

历史

事实上，对于上述情况我们不能责怪学生，也不能责怪中学老师和大学教授。总之，我们不能责备老师在教自己不理解的物理。上述情况的出现与所教学生的老师无关。因此，我们不应去追纠责任，而应去追问原因。而这原因是容易找到的，它就是描述动量传递的牛顿力学方法（Newtonian way）。

我们来分析图 3 所示的情境。两个物体 A 和 B 用一根被拉伸了的弹簧连接起来。A 的动量在增加，B 的动量在减少。

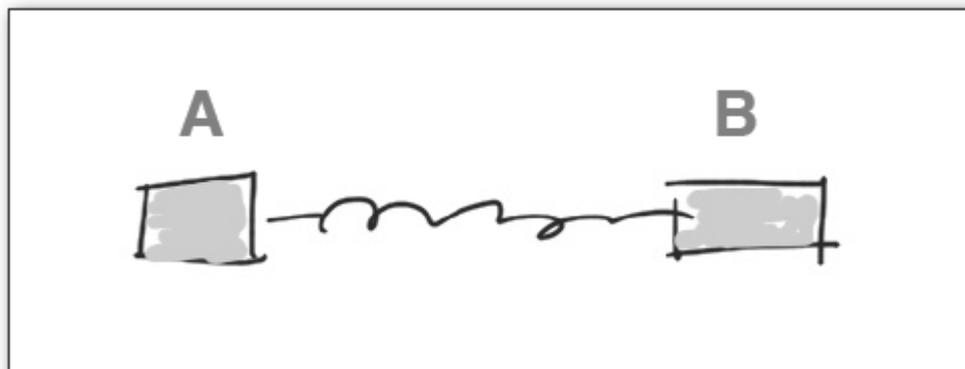


图 5-20-3. 弹簧处于拉伸状态。动量从右流向左。

如果我们严格地按局域动量守恒的原理来分析，我们会认为动量通过弹簧从 B 传到了 A；换句话说，动量通过弹簧从 B 流到 A。如果从 B 流出的动量流强度是已知的，那么我们就知道流入 A 的动量流强度，也能知道在 A 和 B 之间所有地方的动量流强度。确切地说，我们能知道流过 A 和 B 之间任一截面的动量流强度。

我们刚才所用的描述方法是在物理学其他领域中被证明是有用的模型：实物模型（substance model）。在这个模型中，动量被想象为一种实物或流体，这正象质量或电荷被想象为实物一样。一个系统的动量变化仅仅是由于动量的流入或流出引起的。

牛顿当时无法运用或引入这个简单的模型。这是因为，如果要运用这个模型，就必须运用场的概念。但是，在牛顿时代，人们还不知道场。牛顿的定律多数被应用在天体中。动量（the *quantitas motus*）是怎样从地球到达月球的？或从月球到达地球的？

牛顿当时对地球和月球之间的局域情况了解不足。地球和月球之间的这个系统今天我们叫做引力场。牛顿有一句名言：“我不杜撰假说（*Hypotheses non fingo*）。”因此，就出现了有点难弄的力的模型（force model）。对于“动量从 A 流到 B”这句话，在力的模型中，我们必须这样说：“A 给 B 施加一个力，B 给 A 施加一个力，这样两个物体的动量都发生了变化。”显然，对牛顿来说这不是最后的表述^[1]。牛顿的力的模型给了我们一个合乎逻辑的力的相互作用的描述方法。然而，正象我们所知道的那样，这种方法是很难掌握的。

建议

今天我们所面临的情况比牛顿那个时候的要好多了。我们可以肯定地说，如果牛顿当时也知道了场的概念，他也会用动量流来描述我们所讨论的那些情况。

[1] Letter of Newton to Richard Bentley; The Newton Project

<http://www.newtonproject.sussex.ac.uk/view/texts/normalized/THEM00258>

牛顿给本特利（Richard Bentley）的信：

“我非常喜欢你的第二个观点的最后一条。无生命物质在没有中介和不相互接触的情况下会相互作用和影响，这是不可想象的。根据伊壁鸠鲁的观点，引力在这里是固有的。这就是我希望你不要认为固有的引力是我的观点的理由之一。这引力是物质固有的，因此一个物体可以超距地通过真空这一没有任何东西的介质作用于另一个物体；通过这一介质，它们的作用或力可以从一个物体传递到另一个物体；这在我看来是多么地荒谬。我认为，一个具有哲学思想的人是不会接受这一观点的。引力必定由遵循某一定律的介质持续地作用引起的。然而，这介质是物质的还是非物质的，这仍是一个问题。我把这一问题留给读者们自己去思考。”

Friedrich Herrmann

5. 21 动量流的方向

主题

力可以被解释为动量流强度（或简称动量流）。这种对力的理解最早由普朗克提出^[1]，后来在各种不同的理论物理教科书中（特别在连续介质力学的内容中）被引用。由于动量是矢量，也由于它的笛卡儿坐标分量可以是正值或负值，其符号的选择具有任意性。动量的三个分量的流的方向也就取决于这个选择了。

缺点

由于动量流这一概念只出现在高级水平的教科书中，所以大多数物理系的学生并不知道力的动量流解释。因此，甚至有经验的物理学家也不能保证掌握了这一概念。流的方向取决于对所流动的量的符号的任意规定。对于这一事实，有些人不接受^[2]。

在物理学中，不管所流动的物理量是哪一个，“这个物理量的流”的方向总是与其流密度矢量的方向一致。

在力学和电学中，流的方向问题是相同的。因此，让我们先来看电流的方向是如何定义的。

电荷的连续性方程是：

$$\frac{\partial \rho_Q}{\partial t} + \operatorname{div} \vec{j}_Q = 0 \quad (1)$$

这里， ρ_Q 是电荷密度， \vec{j}_Q 是电流密度。

如果在一给定点的电荷密度在减小，即 $d\rho_Q/dt < 0$ ，那么电流密度 \vec{j}_Q 的散度是正的，即电荷从这个点流出。这种电流方向的定义基于电荷的连续性方程，而不是象有时我们所说的基于一种约定。

然而，我们也可以通过重新定义电荷的符号来得到相反的电流方向。通常我们认为电子带负电，质子带正电。如果我们定义电子带正电，质子带负电，方程（1）告诉我们，电流沿与刚才相反的方向流动。

我们再回到动量。动量的三个坐标分量都遵循守恒定律。这样，每一分量都有与（1）式相同的连续性方程。与电荷一样，对于每一分量我们都可以随意地定义我们可以理解的正动量和负动量。当我们确定了动量的符号时，动量流的方向也就确定了。当我们改变想

法，定义另一个方向为动量的正方向时，动量流也随之反向。

要使电荷符号的定义取得一致，这没问题。一旦电荷符号的约定确定，就按此约定来操作。可是，对于动量就不能这样。对于每个新的实验或具体的情境，动量符号的约定必须重新规定。实际上，我们有一个约定，但并不是很有用。这个约定是：如果物体向右运动，其速度的 x 分量和动量是正的。这个约定来自数学，后来被物理学家们所采纳：任一坐标系的水平轴的正方向指向右。然而，这显然跟我们在对面观察到的结论相反：对于在我们看来是正的速度分量，在对面的观察者看来是负的。作为教师，我们经常遇到这种情况。因此，对在教师讲台上做的实验最好从学生的角度来给以描述。

历史

流的方向的改变依赖于正动量方向定义的改变，这看上去不美。不熟悉动量流的人会这样抱怨：一个明显对称的过程或现象被弄得不对称了。图 1a 给出了一个简单的动量流路。弹簧处于拉伸状态。动量流沿逆时针方向流动。（除了所画出的动量流外，在架子中还有其他动量流在流动。）如果我们定义正 x 动量的方向为向左方向，动量流的方向就反向了，如图 1b 所示。

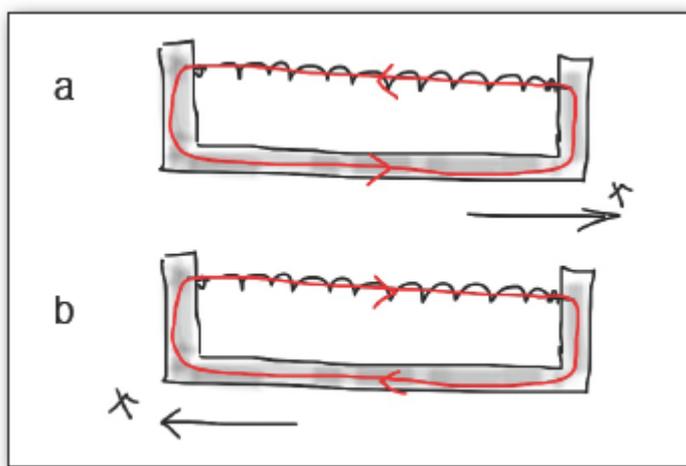


图 5-21-1. (a) 正动量（运动）向右：动量逆时针流动；(b) 正动量向左：动量顺时针流动。

然而，令人惊奇的是，一些资深的物理学家会对此生气。这种对称破裂（*symmetry breaking*）通常是对一个问题的数学描述所必须付出的代价。当我们选择了一个坐标系时，我们会打破左右、上下等的对称性。当我们计算电子轨道时，任何瞬时优选的方向（通常叫做 z 方向）出现在球对称的情况下。初学者对此事实会有疑问，但他们最终会知道，

这种特性仅仅由数学描述引起。

我们也可以举一些别的例子，如流的方向的变化仅仅由参考系变化引起。我们来看自行车链条中的能流。在自行车这个参考系中，能量通过链条张紧部分从驱动链轮流到从动链轮。如果以链条张紧部分（假定这部分处于静止状态。这部分沿自行车运动方向运动，并比自行车本身还要运动得快）为参考系，链条中就没有能流了。如果以（相对于地球）运动得更快的物体为参考系，能量会反向流动：能量自从动链轮流向驱动链轮。（请不要担心流到后轮的净能量会受参考系的变化而变化。能量正在流过自行车这个参考系，因为这个参考系在运动）

德国物理学会的“专家们”对这种情况也会声称“这样的流本质上是不存在的”，或“这不是系统的性质”？

建议

在中学引入电流时不要强调电荷携带者的运动，而要一开始就引入“实物模型”：把电荷想象为能在导体中流动的实物。流的方向可从平衡方程中得出。在中学，甚至没有必要引入连续性方程。当物体的电荷在减少时，我们理所当然地可以说有电荷从物体中流出。

对于动量，我们也可以采用同样的方法来处理。这里，一开始就明确选定好正动量的方向是很重要的。

[1] M. Planck: *Physikalische Zeitschrift*, 9. Jahrgang, Nr. 23 (1908), S. 828.

[2] Expert opinion on the Karlsruhe Physics Course; Commissioned by the German Physical Society; M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschede, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach und W. Weber;

<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk/Fragen-Kritik/KPK-DPG%20controversy/Expert-opinion-english.pdf>

Friedrich Herrmann

5. 22 在静止的动量导体中的动量流

主题

我们都熟悉，动量可以被运动物体或流动的液体和气体传递。在这些过程中所传递的动量有时叫做对流动量流（convective momentum current）。我们不大熟悉（甚至怀疑）动量也能在静止的介质中流动（当介质处于应力状态时）^[1]。相应的动量流有时叫做传导动量流（conductive momentum current）。

缺点

图 1 是一个不大常见的振动装置。两个物体 A 和 B 能在水平方向上运动，并与两根弹簧和一根杆子相连接^[2]。我们假定，这根杆子是绝对刚性的，这两根弹簧是没有质量的*（在力学中我们经常这样假设）。

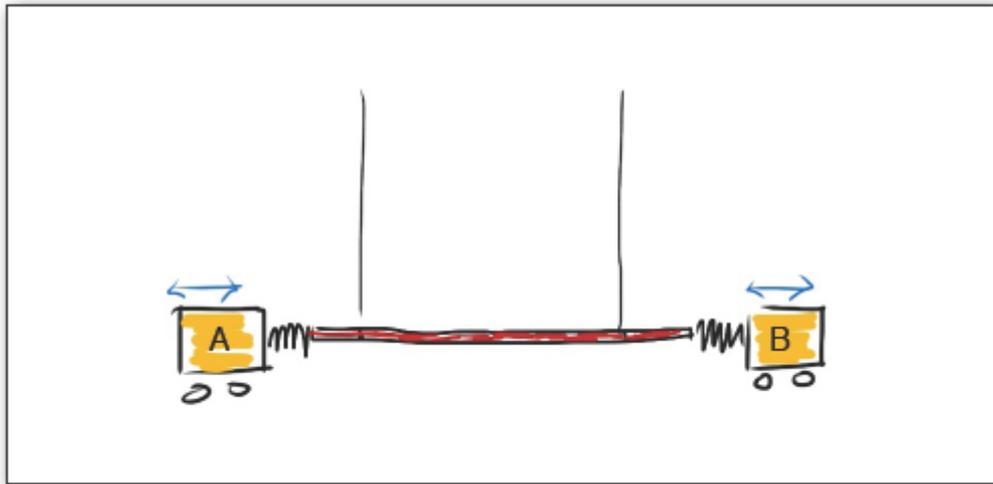


图 5-22-1. A 和 B 相向运动。因此，中间的杆子保持静止状态。

现在，我们将两个物体向两边拉开，然后释放，让它们振动起来。A 和 B 的动量将发生周期性的变化，一个物体的动量减少伴随着另一个物体的动量等量地增加。我们可以换一种方式来描述这一事实：动量在两个物体间来回地流动。

如果我们不用动量流来解释物理量 F ，我们就无法用这样简洁的语言来描述这一事实。我们只能这样来说：A 施加一个力给左边的弹簧，左边的弹簧施加一个力给 A；同样，左边的弹簧施加一个力给杆子，杆子施加一个力给左边的弹簧；再同样，杆子施加一个力给右边的弹簧，右边的弹簧施加一个力给杆子；最后，右边的弹簧也施加一个力给物体 B，

物体 B 施加一个力给右边的弹簧。这里，我们甚至没有提及所有这些力之间的关系。

历史

我们认为，非对流动量流之所以这么难以让人接受，是由于物理学中关于流的概念的一个朴素的观点：物质的运动或微粒的共同运动才会导致流。根据这一流的概念，自然地可以得出这样的结论：没有物质的运动或没有微粒的运动，就没有流。然而，这既不是日常用语中流的概念，也不是物理学中流的概念。

在日常用语中，在没有涉及物质的运动时我们也会谈及到流，如资金流（flow of money）。然而，在物理学中，谈及流时会涉及到广延量，如信息量流（flow of data）。

在物理学中，情况甚至更加简单。如果下式成立，我们就说有量 X 的流：

$$\frac{\partial \rho_X}{\partial t} + \text{div} \vec{j}_X = \sigma_X$$

这个方程叫做连续性方程。它可以被理解为一个平衡方程。方程中物理量的名称解释如下： ρ_X 叫做 X 的密度， \vec{j}_X 叫做 X 的流密度， σ_X 叫做 X 的产生率密度（如果 X 是守恒量，它等于 0）。

这个方程并不要求在 \vec{j}_X 不为零的地方 ρ_X 必须为零^[3]。

实际上，当流动的量 X 既可取正值也可取负值时，这种情况（ $\vec{j}_X \neq 0, \rho_X = 0$ ）是可以实现的。这样，我们可以想象，对实际的流由两个贡献。在这里，这两个贡献的密度之和为零，而流密度之和不为零。

通常电导体中的电流就是这种例子。正负电荷携带者的电荷总和为零，而相应的电流密度之和不为零。

对于只能取正值的广延量（如能量、质量、熵或物质的量）就没有这种可能。

另外，连续性方程的价值在于它是物理学家们运用这个模型的唯一合理性证明，它并不要求有相应的运动粒子。

认为必须有运动粒子耦合才能更好地理解流的人最好来看一下如图 2 所示用不运动的气体来传递动量的例子。两个活塞被气体向外推动而加速。活塞 A 被向左推，活塞 B 被向右推。显然，动量是从左向右传递的（我们定义向右运动时动量为正）。在这个例子中，动量传递的微观机制是如此明显，以致于在用动量流解释这一过程时不会产生任何疑问。

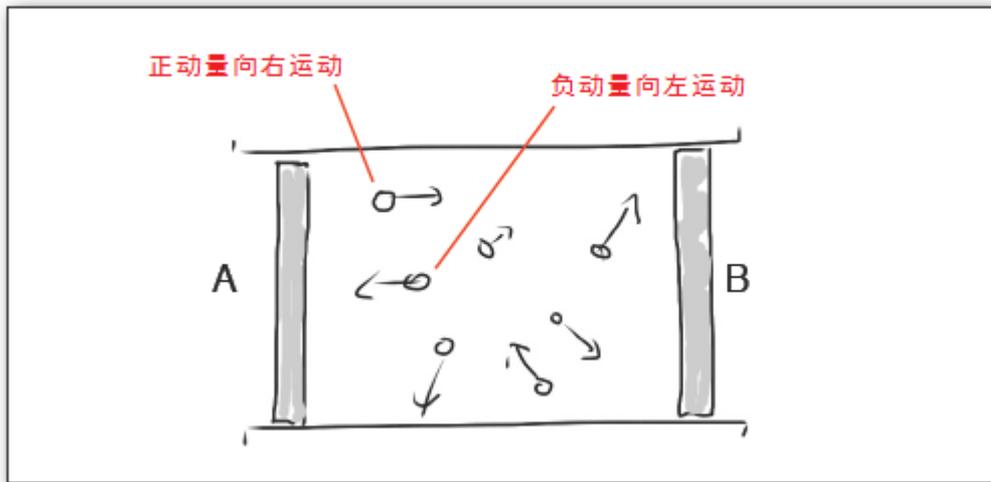


图 5-22-2. 动量从活塞 A 传到活塞 B。一半分子携带着正动量向右运动，而另一半分子携带着负动量向左运动。

那些速度具有正 x 分量的分子携带着正动量向右运动；而那些速度具有负 x 分量的分子具有负动量，并将这负动量传向左边（这相当于将正动量传向右边）。我们发现，这两类分子对动量密度的总贡献为零，而它们对动量流密度的总贡献是两者之和。

你也许已经看出了一个问题，即动量流的方向会随正动量的方向的定义的改变而改变。上述例子告诉我们，这不奇怪。

对流过固体或电磁场的动量流我们也可作同样的解释。当然，具体情况会变得更复杂一些^{**}。然而，这绝不是德国物理学会会员们所看到的复杂性。如果我们对照上述气体的有关情况，这也是很好理解的；也就是说，它们甚至可以被初中生所理解。

建议

物理量在数学上来说就是变量。因此，它们原则上不能象物质一样流动（这正象质量不能悬挂在弹簧下一样）。如果我们仍要说电荷的流、质量的流或动量的流，这意味着我们在运用一种模型。认识到了这一点，我们就不会问“在自然界有动量流存在吗”这样的问题。我们可以引入这些流的概念，也可不引入它们；我们可以运用这个模型，也可不运用它。反对运用动量流模型的观点会引发这样一个问题：为什么我们可以对能量、质量和电荷量运用这个模型？

*这个条件与我们的目的相符。实际上，这意味着动量的传递速度不等于声速，而等于无穷大。

**我们建议将受热激发的原子的线性弹簧振子链模型 (thermally excited linear chain) 作为一个掌握动量流概念的练习，来讨论相应的原理。

[1] Expert opinion on the Karlsruhe Physics Course; Commissioned by the German Physical Society; M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschede, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach and W. Weber;

<http://www.physikdidaktik.uni-karlsruhe.de/kpk/Fragen-Kritik/KPK-DPG%20controversy/Expert-opinion-english.pdf>

[2] 我很高兴 Werner Maurer 为解释这个观点设计了一个实验。详见：

<http://www.youtube.com/watch?v=aBLPEOM7xbM>

[3] Gustav Mie: Entwurf einer allgemeinen Theorie der Energieübertragung, Sitzungsberichte der Mathematisch-Naturwissenschaftlichen Classe der Kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, CVII. Band, Abtheilung II.a, 1898, S. 1113-1181

Friedrich Herrmann

5. 23 动量流的方向和坐标系

主题

如图 1 所示，A、B 两个物体由一根拉伸的弹簧连接。

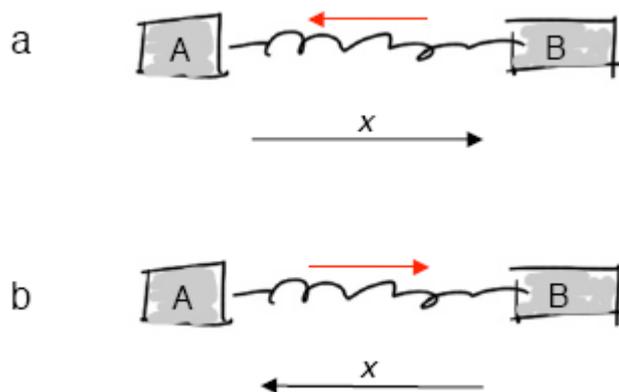


图 5-23-1. 弹簧处于拉伸状态。红色箭头指向 x 动量流的方向。(a) A 的动量增加，B 的动量减少。(b) B 的动量增加，A 的动量减少。

在图 1 (a) 中， x 轴指向右。因此，A 的动量增加，而 B 的动量减少。我们得出结论，动量从右流向左，即动量向负 x 方向流动，如图中红色箭头所示。

如果 x 轴指向左，图 1 (b) 中 B 的动量增加，A 的动量减少，即动量从左流向右。

这不可能是真的。这是因为，这意味着我们可以“任意地改变动量流的方向，即动量流的方向与系统中实际发生的情况无关，而仅与所选择的坐标系有关”^[1]。

缺点

上述推理包含着一个错误。

我们先来讨论一个大的原则性问题。

物理量描述系统的性质。物理量的值由几个因素决定。首先，它由系统的状态决定，这是因为我们所描述的就是系统的这个状态。它也取决于所选择的测量单位（这点是不重要的）。最后，它通常与所选择的参考系有关。物理量的值与参考系有关这一事实对于每位物理家来说都是知道的。

在刚才这个例子中，所暴露出来的矛盾，或更确切地说，所显示出来的困难，可以通过两条路径来解决。

1. 流的方向用数学的话来说是流密度矢量的方向。矢量表示的是与参考系无关的量。速度是矢量。如果我们用一个箭头来表示这个矢量，这个箭头的方向与所选择的坐标系无关。对于笛卡儿坐标系，情况并不是这样。我们来考虑两辆都以 60km/h 的速率相向运动的汽车，一辆向左运动，另一辆向右运动。为了用物理学的方法来描述这个情境，我们给每辆汽车标记一个矢量。这样的描述具有左右对称性。如果我们运用笛卡儿坐标，我们就必须给其中一辆汽车标上 $+60\text{km/h}$ 的正速度，对另一辆汽车标上 -60km/h 的负速度。这样，对称性被破坏了（对这一事实没有物理学家会不接受）。

动量流会不会也是这样的情况？动量流密度是否也是矢量？其方向是否跟坐标系的选择无关？动量流密度不是矢量，是张量。我们在这里所说的动量流方向，实际上指的是动量矢量的其中一个分量的流的方向。这个方向与坐标系有关。这与我们前面所讲的例子中关于速度分量的方向有相同的原因。

2. 在中学，我们没有必要给学生讲张量。我们可以把动量的三个分量独立地来看待，把它们看作是三个标量。每个单独的分量都遵循守恒定律。我们来考虑动量的 x 分量。我们不仅要选择 x 轴的方向，也要选择动量的方向。如果 x 轴是水平方向的，我们可以定义向右运动（或向左运动）所对应的动量为正动量。一个在第一种定义（向右为正）中具有 5 个单位动量的物体在第二种定义（向左为正）中具有 -5 个单位动量。因此，我们对系统的描述没有反映出系统的内在对称性。然而，当我们用笛卡儿坐标（或柱面坐标，或球面坐标）来描述系统时，我们总会有这种损失。在选择坐标系时我们破坏了系统的对称性。

实际上，我们可以用一种不变的方式来表述动量流方向的法则：

如果弹簧处于拉伸状态，（正）动量向负方向流动。

如果将正动量方向的定义改变一下，上述结论仍成立。然而，我们不建议在中学运用这一法则。学生并不会象有经验的物理学家们那样存在这种困难。

历史

看来，德国物理学会的“专家们”不接受对称情况的数学描述会导致对称破坏这一事实。原因也许很简单，他们从来没有注意到过我们这里所说的特殊情况。如果你关注一下周围的情况，你很容易找到也会发生这种情况的许多其他现象。然而，人们不会把它们视作困难，原因很简单，人们已经对这种情况很熟悉了。

下面我们举几个例子：

在用量子力学处理氢原子时， z 方向看上去起到了特别的作用。学生们对此有疑问，有些学生从来没有理解 z 方向仅仅是用于数学描述的一个人造工具。

对于电磁感应的两个著名的基本实验，几乎没有学生明白两者之间的关系：在其中一个实验（磁铁运动，线圈静止）中，感应电动势是由于 $\dot{\vec{B}}$ 不等于 0 引起的；在另一个实验（线圈运动，磁铁静止）中，感应电动势是由于洛伦兹力引起的。在第一种情况中，电场是旋度场；而在第二种情况中，电场不是旋度场。实际上，两者都描述了相同的效应，但采用了不同的参考系。这里，人们又会感到奇怪，对相同过程可采用两个绝然不同的解释方法，这两种方法“与系统中实际发生的情况无关”。

对于自行车链条中的能流也有这种情况。自行车链条中的能流有时从前链轮流向后链轮，有时则朝相反方向流动；换句话说，能流密度矢量指向左还是右取决于参考系的选择，即“与系统中实际发生的情况无关”。难道能流密度矢量的方向不描述“系统的性质”？

我们来考虑通电直导线的磁场。通常我们这样认为，这磁场是由带电粒子（即电子）的（漂移）运动引起的。然而，在电子的漂移速度为零的参考系中，这磁场不再是由于电子的运动引起，而是由原子核的运动引起。（顺便提一下，这里参考系的变化是很微小的，因为其漂移速度只有每秒几分之一毫米。）因此，引起磁场的原因会因选择不同的参考系而发生变化，“与系统中实际发生的情况无关”。

最后，我们来考虑电子束的磁场。在电子的参考系中，磁场强度为零。这样，就得出有磁场或没有磁场两个不同的结论，“与系统中实际发生的情况无关”。

以上所有这些例子对物理学家们来说都是很常见的。然而，他们必须认识这些情况。弹簧中的动量流只不过是另一个例子罢了。

建议

1. 对于中学来说，象卡尔斯鲁厄物理课程那样来做。选择从学生的角度向右为正 x 方向。这个选择可以是一次，也可以固定不变。根据我们的经验，大多数学生对掌握“处于拉伸状态的弹簧中的动量向左流”这一法则没有困难。

2. 在后来，我们可以来讨论别的情境中的问题。在这里，我们要告诉学生：“参考系的变换并没有改变这个世界，而仅仅改变描述这个世界的方法。”

[1] M. Bartelmann, F. Bühler, S. Großmann, W. Herzog, J. Hüfner, R. Lehn, R. Löhken, K. Meier, D. Meschede, P. Reineker, M. Tolan, J. Wambach and W. Weber: Gutachten über den Karlsruher Physikkurs; in Auftrag gegeben von der Deutschen Physikalischen Gesellschaft.

<http://www.dpg-physik.de/veroeffentlichung/stellungnahmen-gutachter/Stellungnahme-KPK.pdf>

“.....根据这个定义，问题就出来了： x 轴的方向可以任意确定，在空间中可以独立于系统中所发生的物理现象而变化。这就意味着，KPK 中的动量流的方向可以任意改变，即动量流的方向与系统中所生的物理现象无关，而只与所选择的坐标系有关。因此，我们可心断定，KPK 的动量流的方向不是系统的一个性质。”

Friedrich Herrmann

5. 24 力学中的点

主题

在质点力学中，我们运用了质点、位置、轨迹、力场等概念。

质点力学是物理学家们所喜欢的力学。物理系的学生学了大量质点力学的内容。在中学物理教材中通常也提出质点的概念。

缺点

1. 在物理学中，质点力学占主导地位，以致人们都很自然地把物体叫做质点（mass point）或点质量（point mass）。这就导致了力场的概念，导致“力在空间各点具有不同值”观点。

在这样的描述中，一些力学中的重要概念（如压强、质量的密度、电荷和能量）就失去了意义，出现了问题。然而，特别在中学物理中，我们没有必要来介绍这种纯粹的理论描述。

2. 另外，我们容易分辨“质量”（mass）和“点”（point）这两个名称。我们来简单地解释一下这两个概念。质量是物理量，是量度物体或粒子的惯性的物理量。什么是点？点这个字有很多含义（在维基词典中共有 48 种不同的解释）。在我们所讨论的情况中，只有一个相关的含义：“确定的位置，一个空间位置”。

根据我们的表达习惯，质点指有质量的点，点质量指一个点的质量。实际上，这两个概念都是无意义的。

我们先来看质点这一概念：有质量的一个物体或一个粒子。点是一个几何体，原则上不可能有质量。质点的概念并不意味着点的质量为 0kg 。当然，它并没有质量所量度的那种性质。

什么是点质量？一个物体可以是点状的，可以足够地小。然而，质量在数学上是一个变量，既不可能是点状的，也不可能不是点状的。

教材中是怎样解释这两个概念的？教材编者又是怎样促使学生掌握这两个概念的？我们来举两个大学教材的例子。

其中一本教材中把质点定义为具有质量的点。

另一本教材解释得稍好一些：“对一个运动的物体必须作理想化处理，……我们把这样的物体叫做点质量。”把物体叫做“质量”确实不大好。然而，这样的解释至少把质量赋予了一种新的含义：这时，质量不再是一个物理量的名称了，而变成了一个物体的名称。

这样一种松散的概念在研究和工程领域中不会产生不好的效果。然而，在中学中，对

概念的仔细分析并不是迂腐的表现，而是让学生掌握清晰概念的条件。每一位物理教师都懂得：只有运用清晰的概念，物理才不会变得更难，而会变得更简单。

3. 我们从来不说动量点 (momentum point)、熵点 (entropy point) 或能量点 (energy point)。这一事实也是值得我们深思的。我们可以断定，在许多物理学家们的心目中，质量 (mass) 不仅仅是描述物体或粒子的性质的一个变量。对于电荷，也有与质量类似的情况。在物理学家们的心目中，不但有点质量的概念，还有点电荷的概念。点电荷这一概念也带来同样不好的副作用：学生们会把电子这一概念退化为点电荷。在这种情况下，我们可以观察到一种令人遗憾的概念混淆现象：混淆物理系统或物体 (电子) 和物理量 (电荷) 这两个不同的概念。

历史

质点力学为何在物理学中扮演着重要的角色？

在天文学中，质点力学取得了巨大的成功。在粒子物理学中，它也起到了重要的作用。

为什么这样的用词是不恰当的？

质量一词被误解为物质一词了。

在中学课程中为什么会有点质量这一概念？

在教师教育中，老师们在一学期的实验物理课程中学习质点力学，在一学期的理论物理课程中学习质点力学，根本没有学习连续介质力学 (mechanics of continuous media)。

建议

1. 取消质点、点质量和点电荷这些名称。如果确实需要描述点状物体，最好用点状物 (pointlike body) 这一名称。然而，最好用小物体 (small body) 这一名称。如果不会产生误解，可以用粒子 (particle) 这一名称。

2. 在中学几乎没有任何理由来向学生介绍质点力学。在将物理学应用于日常生活中时，用连续介质力学更合适。这样，力的概念所经常出现的问题就会立即消失。

F. Herrmann

5. 25 牛顿第三运动定律

主题

“当一个物体施加给另一个物体力时，另一个物体同时对这个物体施加一个大小相等和方向相反的力。”

“第三定律表明，所有两个物体之间的力都大小相等和方向相反。当物体 A 施加给物体 B 力 F_A 时，B 也同时施加给 A 力 F_B ，并且这两个力大小相等和方向相反，即 $F_A = -F_B$ 。”

“第三定律的意思是，所有力都是两个不同物体之间的相互作用，或在一个物体内的不同区域之间的相互作用。因此，所有力一定伴随着一个与其大小相等和方向相反的力。”

“力总是成对出现的：一对大小相等和方向相反的作用力和反作用力。”

这个定律的正确性通常用这样一个实验来加以证明：两个站在滑板上的人用绳子相互拉。从一方面来看，两人中其中一人在拉；从另一方面来看，另一人在拉（图 1）。

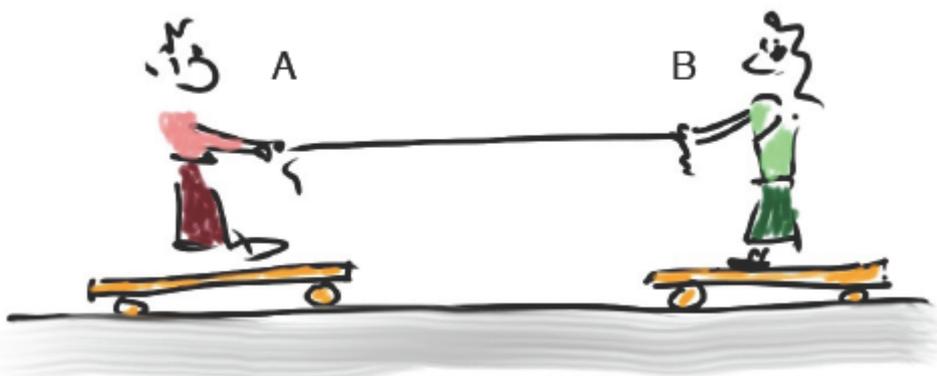


图 5-25-1.证明牛顿第三定律的实验：一个人在拉，另一个没有拉。

缺点

我承认，我经过了很长时间（甚至到研究生毕业时）才弄清楚这个定律。但是，我也不承认我真的对这个定律感兴趣。这个定律似乎跟我们在宗教课中所学到的法则有点象。你所学到的是你在一些特别的场合（如在考试中）必须回答的东西。当然，我知道如何回答。重复这样的定律是不难的。

我的问题是：对于一个定律我们所期望的是，它必须告诉我们事物应该怎样，也应告诉我们事物不应该怎样。为了理解某个定律，我必须能想象出这个定律不成立的世界是怎样的。以牛顿第二定律（今天我们就是这样叫它的）为例。这个定律是这样的：

$$F = m \cdot a.$$

那些还不知道这个定律的人也许会想象出力和质量之间与此不同的关系，例如，是这样的关系：

$$F=k \cdot m^2 \cdot a.$$

然而，我简直想象不出违反牛顿第三定律的世界是怎样的。我们无法想象，当物体 A 施加给 B 的力与物体 B 施加给 A 的力不相等时情况会是怎样。从对称性的角度来说，这是不可能的。这样，我为什么需要定律？由于大家在遇到图 2 所示的情境时会感到不安，有人就对图 1 所示的实验提出了疑问。



图 5-25-2. 一个对称的情境

首先，这个装置是对称的：两轮小车和两个人。然而，当其中一个人去拉绳子时，这种对称性就被破坏了。它所产生的结果是：A 拉绳子，即 A 施加了力，而 B 没有拉。这是否意味着 B 没有力施加给 A？而实际上 B 是有力施加的，也许它并不是有意施加的。否则的话，A 就不会加速。也许人们可能没有马上注意到这样的事实，其中一人的“拉”或另一人的“拉”与第三定律并没有关系。它仅仅揭示了这样的事实，实验者混淆了关于能量和动量的表述。这两个部分相关的实验之间的差别仅仅在于车加速时能量来自何处（是 A 拉还是 B 拉）。人们为了得到信服而去去做这个实验的原因是，他们相信了“肌肉感”可用来识别是否有力这一值得怀疑的说法。有人建议，在这个实验中不要将绳子连在不拉绳子的那个人的手上，而将绳子系在她的腰部，这样她就没有“肌肉感”了。（看来，这位实验者忘记了这样一个事实，即在她的臀部和腿部也会有肌肉感。）

历史

原因出自牛顿本人。毫无疑问，牛顿是天才人物。然而，在他那个时代，科学家们通常把这个世界描述为一个数学对象，即公理化的描述方式。他有一本著作的书名就是《自然哲学的数学原理》，这本书中充满了许多定义、定律、评注、推论和引理等。当然，牛顿没有达成他书名中所说的目标，这正如马赫所详细说明的那样^[1]。因此，把两个大小相等和方向相反的法则作为他的一个定律是不足为奇的。

建议

1.第三定律是动量守恒定律其中一种（琐碎的）表述。有了动量守恒定律，我们无需别的（第三）定律了。

2.如果既要讨论动量平衡又要讨论能量平衡，即如果所讨论的内容涉及动量流和能流，滑板实验是有用的。

参考文献

[1] E. Mach: The Science of Mechanics, a Critical and Historical Account of its Development, The open court publishing Co. 1919, Chicago, London, p. 187

F. Herrmann

5. 26 自由下落猫

主题

你一定听说过关于自由下落猫的故事。将猫朝任意方向扔出去，让它自由下落。猫总会四脚伸展，平稳地落地。如果你有一点科学知识，你肯定会担心这猫违背了角动量守恒定律。然而，如果你在维基百科中查一下“自由下落猫难题”(Falling cat problem)的词条，你会发现一切都没问题：“这个问题最早由 Kane 和 Scher 解决了(1969)。他们将猫抽象为前后一对能转向的圆柱体。Montgomery 后来将 Kane-Scher 模型用位形空间连接来表示，将猫的运动概括为物理学所允许的两部分的相对运动。这样，猫自由下落的动力学问题成为非完整力学系统的一个典型例子 (Batterman 2003)。这正是控制论的核心内容之一。

.....

用物理学的话来说，Montgomery 的连接是位形空间中的一种 Yanf-Mill 场，是用规范场表示的形变物体动力学的一般方法中的一种特殊情况.....

缺点

我找不到维基百科中的这一词条具有讽刺意味的线索。通常情况下，过段时间后它是会被删除的。

首先，我们简要地来说说这个问题所在。使我们明显感到惊奇的是，如果不矛盾的话，这猫是无法转动的。我们会感到，这里有一个关于角动量守恒定律的问题。当我们读到前面所引用的解释时，我们肯定会关注这个问题。无论如何，猫所采用的技巧并不那么简单。

这个解释的缺点是：

1.转动不是猫所特有的能力，人类和其他动物当然也有这种能力。你可以自己试一下：你一只脚站在光滑的地面上（最好穿上底部光滑的鞋子，或甚至只穿袜子），然后绕竖直轴转 90 度。

我用不着解释你怎么会转动的，我只是想证明你用不着任何指导就能完成这一动作。

（你也可以利用摩擦来完成这一动作。这时，你仍可以一只脚站着。然而，这不再是我们所讨论的主题了。）

2.猫在空中的转动（和你的转动）与我们通常所做的许多其他动作并没有特别之处。在物理课堂中，我们对这些其他的动作并不感到惊奇。这些动作包括：散步、跑步、骑自行车、撒把骑车、溜冰、跳绳.....

3.对于这明显的矛盾，我们做了没必要的解释。

历史

1.对这个问题的讨论具有悠久的历史了。麦克斯韦、斯托克斯和其他许多学者讨论过这个问题。

2.它暴露了成人的小孩子气。

3.作为物理学家，我们可以自豪地向普通人们（占总人口的 80%）秀一下自己的物理知识，告诉这些物理盲们，物理学不仅仅涉及他们不关心的希格斯粒子、纠缠光子和暗能量，甚至在解释宠物的行为时也需要物理学。

4.也许这个问题跟角动量稍微有点尴尬关系。

建议

我们可以在课堂里向学生演示一个有趣的现象。前面已经说过，这个演示用的是一张转椅，而不是一只猫。为了使人和转椅的水平转动与它们与地面的摩擦无关，我们让一位学生坐在转椅上，且不能接触地面。我从来没有发现学生不能成功地转动起来。

这个实验有何意义？首先，与此类似的平动实验是做不成功的。

这个平动实验是这样的：有两辆小车 A 和 B。威利（卡尔斯鲁厄物理课程中的主人公）坐在小车 A 上，并试图通过拉或推小车 B（或想通过前后移动小车 B）来改变整个系统的质心位置（图 1）。

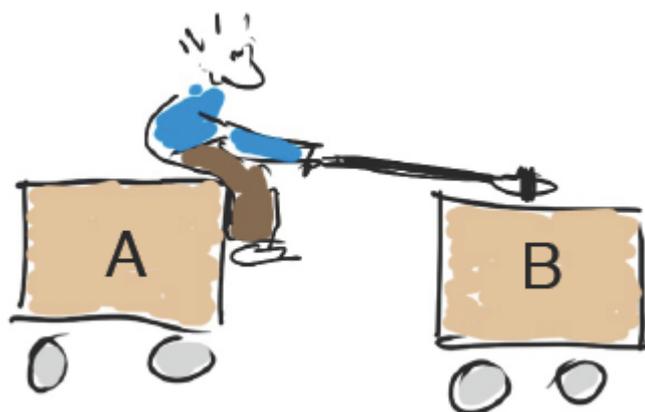


图 5-26-1. 系统的质心无法移动。

大家知道，这系统的质心是无法移动的。这个结论也可以容易地用理论来加以推导：根据公式：

$$p = m \cdot v,$$

$$\Delta s = \int v dt,$$

我们得到：

$$\Delta s = \frac{1}{m} \int p dt,$$

$$m \Delta s = \int p dt.$$

这个公式既对威利坐的小车成立，对小车 B 也成立。根据动量守恒定律，我们有：

$$m_A \Delta s_A = -m_B \Delta s_B.$$

对于小车 A 的任一位移，对应着小车 B 的位移：

$$\Delta s_B = -\frac{m_A}{m_B} \Delta s_A. \quad (1)$$

这意味着，无论威利怎么做，由两辆小车组成的系统的质心不会发生移动。如果到最后两车间的距离跟开始时的相同，那么最后每辆小车的位置跟开始时的也一定相同。这个结论的前提是， m_A 和 m_B 没有发生变化。

然而，让我们来探究一下质量变化的情况。

开始时，小车 A 是空的，小车 B 却装满了砂。小车 B 比小车 A 重。威利仍坐在小车 A 上，用一根杆子拉小车 B。B 稍微移动了一点，A 却移动了很多。接着，将小车 B 中的砂释放掉，并装载到 A 上。现在，小车 A 比小车 B 重了。威利用杆将 B 推开。现在，A 只移动了一点点，而 B 移动了很多。最后，A 和 B 之间的距离跟原来开始时一样了，但整个系统向右移动了一段距离。发生这样的情况的原因是，两边的质量发生了改变：威利推小车 B 时两边的质量比 m_A/m_B 与他拉小车 B 时两边的质量比 m_A/m_B 不相等。因此，两辆小车的质心位置发生变化的现象是不足为奇的。可以这么说，我们上了一个当。然而，前面转动的例子之所以很有趣，是因为我们也用了非常相同的方法。然而，这时我们不会再上当了。

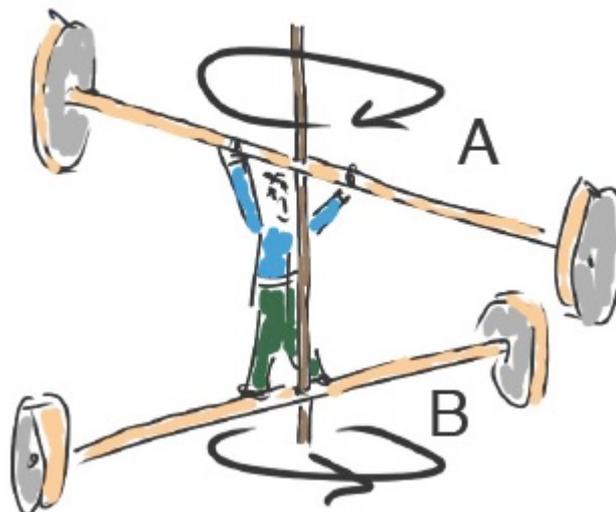


图 5-26-2. 人来回转动哑铃，并在转动过程中通过移动两端的铃子来改变哑铃的转动惯量，以改变其转动方向。

我们来分析绕共同转轴转动的两个哑铃（图 2）。现在我们要实现的不是两个物体的净位移，而是两个物体的净转角。

转角公式类似于（1）式：

$$\Delta\alpha_B = -\frac{J_A}{J_B} \Delta\alpha_A \quad (2)$$

（式中， α 是转角， J 是转动惯量。此式的推导过程跟前面的完全一样。）

假如有人站在下面的哑铃上，并试图转动上面的哑铃，于是下面的哑铃也随之转动起来了。它们的转角遵循（2）式。

如果让两个哑铃的转动惯量保持不变，则根据（2）式，每个 $\Delta\alpha_A$ 对应着一个确定的 $\Delta\alpha_B$ 。如果这个人来回转动一次，最后每个哑铃都指向原来的方向。

然而，我们可以不通过改变哑铃的质量（不减少或增加重物）来改变它们的转动惯量。如果我们在使哑铃来回转动一次的过程中让 A 在其正向转动时的转动惯量 J_A 比反向转动时的大，那么就会产生一个净的转角。猫或人在转动过程中也是这样做的。

F. Herrmann

5. 27 牛顿第三定律（第三次）

主题

“如果威利和莉莉用相同的力拉，绳子就不会运动。这是力的平衡。如果绳子运动，比如说向左运动，威利的拉力就相对大一些。”

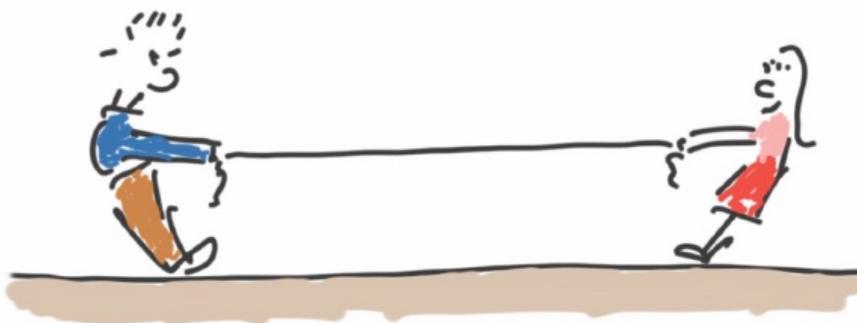


图 5-27-1. 威利的拉力更大一些吗？

缺点

如果有读者把这篇文章扔掉，我不会生气。毕竟，牛顿第三定律的主题已经出现两次了，并且前一篇是在几个月前刚发表的。现在又提出来是由于大家都知道的原因。

每位作者总希望有很多读者，但并不是仅仅为了这个；他们希望有一群特定的读者。同样，这个专栏的作者也有这样一个愿望：希望教材作者是这个专栏的读者。遗憾的是，他们不是。因此，作为非教材作者的读者们只能失望地（或胡闹一番）看到教材作者把相同的错误一代一代地传播下去。

然而，这里有一个对教材的修改意见，并且对于出版社来说是新的（见上面所引用的）。我们对它稍作修改：由于绳子的质量与其他部分的质量相比可以忽略不计，威利施加给绳子的力总是与莉莉施加给绳子的力相等。这就是牛顿第三定律。也许，通过测量来核实一下这个结论是一个很好的想法。

如果我们将这一结论应用到另一个系统中，就会得出有趣的结论：两个带电体互相吸引着，它们在进行着“拔河比赛”。在这里的“绳子”就是电场。如果根据我们前面所引用的结论，其中一个带电体的拉力会比另一个的大。如果这样，整个系统的质心就会运动。如果情况确实是这样的话，在能量缺乏的时代，也许这是一个很好的赚钱模式。

历史

1. 用牛顿的方式来表述时，力学会变得很难。
2. 有一种观点是，通过肌肉我们能感受到力。

3. 如果一个错误的解释没有造成不利的后果，正确的解释就没有机会得到传播。在生物进化中就有这种情况。尽管右旋分子对生物进化不会产生不利的影响，但所有有机体的蛋白质构造都是左旋的。当一种生物物种数量庞大时，其他物种就越来越没有生成的机会，直至灭绝。显然，无论在中学或大学的考试中还是在日常生活中，对牛顿第三定律的错误理解没有造成不利的后果。

建议

如果人们执着要用近期一直在用的巴洛克式的（复杂的）牛顿方式（而不用不会产生困难的动量流方式）来表述的话，他们只能理解牛顿力学。显然，这不是所有人能真正学懂的力学。

如果有人想在学校中讨论拔河比赛，这里有几个建议。

我们的目的是要确定威利比莉莉强还是莉莉比威利强。这里，“强”的意思并不是力大。首先我们要问，在这个情境中，威利和莉莉的不同之处是什么？

我们可以来做下面的（思想）实验，分别来按图 2 的装置测量一下威利和莉莉分别有多强。

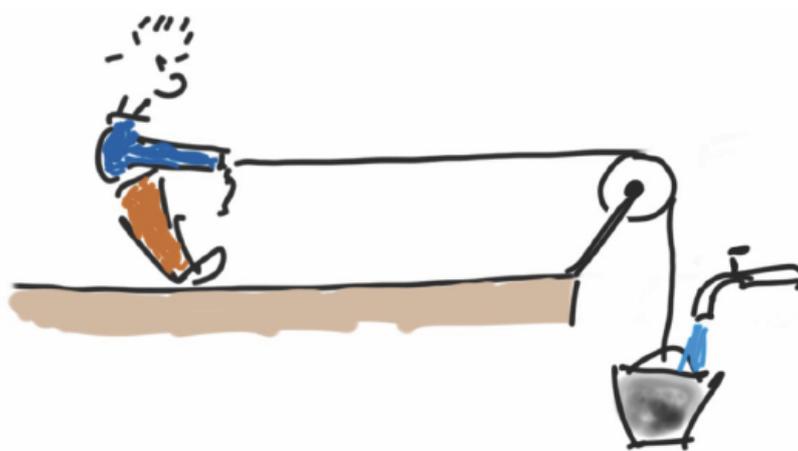


图 5-27-2. 测量威利的强壮程度

首先，威利必须把悬挂着的水桶拉住。如果桶中的水不是很多，他是没问题的。现在，我们不断地给水桶加水，直到威利拉不住它为止。这时的水量就是威利强壮程度的量度。因此，威利这时拉住水桶的力就是他强壮程度的量度。

用同样的方法可以测出莉莉的强壮程度。这时我们可以确定谁“更强壮”，谁会在拔河比赛中获胜。然而，有一个问题仍然存在：这里所测量的物理量量度了这两个人的什么性质或能力？如果威利的鞋底比较光滑，他就会输。当然，这不是我们想测量的。因此，

我们必须保证地面是完好的，两人不会在地面上打滑和磨损。现在，我们再来看情况到底如何。某人（比如，威利）有力施加在绳子和地球上。这两个力大小相等。这些力有一个最大值。如果它们超过了最大值，威利就会滑倒。他的肌肉能否承受取决于他拉的姿势。

因此，我们所测量的是这个最大的力。在拔河比赛中，其中一方的力先到达这个值，这一方就输了。

用动量流来描述是这样的：威利（或莉莉）的身体只能承受某一动量流强度。当动量流到达某一值时，动量导体就会断裂（这正象电路中的熔断器只能承受某一最大电流一样。当电流太大时，它就会切断电路）。

拔河比赛的问题还有另一方面。威利或莉莉的身体不仅仅是用来承受（传递）力的。当然，力是必须有的。在有肌肉的地方就有力。然而，这时它们不仅仅是力的传递器（动量导体），也是机械能的能源。这在即使没有能量流动的平衡状态中也是需要考虑的。（事实上，威利在仅仅拉住水桶的情况中需要能量。当然，这是另一个话题了。）

可以看出，拔河比赛的物理解释比我们所想象的更复杂。用牛顿第三定律来解释这一现象是不合适的。这是因为，作用力和反作用力的问题相对于其他问题来说是次要的。

然而，这里还有另一个建议：如果一个错误的解释没有给学生带来不好的后果（他们也许仍然会成为优秀的经理、审计员或甚至工程师），我们也可以干脆不考虑这一话题。我们可以把时间花在更有意义的地方。这样，我们也就不会损害物理学的名声了。

在拔河比赛的情况中，一种表述很容易被模仿，这也不是完全没有道理。但是，要纠正它（包括在普通教育的课程中）是很难的。我们在别的地方也遇到过这种情况。确实，物理学需要有一个较好的名声。

F. Herrmann

5. 28 力的定义

主题

“它（力）被定义为动量的变化率。因此，其大小为

$$F=dp/dt. ”$$

“公式 ($F=m \cdot a$) 是力的定义。这个力是外界对物体作用大小的量度。它是通过物体的加速度来量度的。”

“力的概念可追溯到牛顿时代。牛顿在 17 世纪用他的三大牛顿定律奠定了力学的基础。在这里，他把力定义为动量的时间变化率。”

缺点

我不得不再用牛顿来打扰一下读者。

1.如果力被定义为动量的变化率，那么牛顿第二定律就不是一个定律而是一个定义了。然而，它是一个定律，因为这个结论是可以通过实验来检验的：独立地测量一个物体的动量变化率和它受到的合力。

2.如果力是由公式 $F=dp/dt$ 来定义的，那么所有静止的物体所受到的力就都等于零了。这样，工程师们就遇到了一个难题。

3.如果人们接受了 dp/dt 是力的定义这一观念，那么这一观念会影响他/她们所使用的语言。例如，这等于允许他/她们说“物体 A 施加给物体 B 以动量的变化”。

社会科学和精神分析学等学科似乎逻辑很严密，但其中的观点是没有被实过的。难道物理学也要成为这样的学科吗？物理学不能与为这样的学科。物理学是在学校中最不普及的学科，难道这用奇怪吗？

历史

一本新教材的编写过程可以想象如下：在编写时，作者会受已有旧教材的影响。他会发现一些不一致和累赘的地方，也许还发现一些错误。他会作出相应的修改。这样，物理教材就会变得越来越好。是的，但这仅仅是想象，而实际情况并非如此。有的新教材会比原来的更好，但也有的却比原来的更差。有些主题，原来已经介绍得很清晰了，在新教材中可能会变得大为减色或被曲解。这种情况在力学中可以清楚地看到。

我们来回顾牛顿的力的定义（定义 IV）：

他拉丁文是这样表达：

“*Vis impressa est actio in corpus exercita, ad mutandum ejus statum vel quiescendi vel movendi uniformiter in directum.*”

翻译为英文是 (Jacob Philipp Wolfers, 1872):

“An impressed force is an action exerted upon a body, in order to change its state, either of rest, or of moving uniformly forward in right line.”[外力是为了改变物体的运动状态 (静止或匀速直线运动状态) 而给物体施加的作用。]

牛顿明显地没有把力定义为物体的运动状态的变化。

建议

如果我们能确定只有 F_1 而没有其他力 F_2 作用在物体上, 我们可以用 dp/dt 来测量作用在物体上的力 F_1 。这在有时候是容易的, 有时候是不大容易的。然而, 这并不意味着我们把力定义为 dp/dt 。

在实验中我们发现下面的公式总是成立的:

$$dp/dt = F,$$

式中 F 是作用在物体上的合力。这样, 这些实验告诉我们, 动量是守恒量。在测量前我们也可以推测实验结果可能是:

$$dp/dt > F,$$

或

$$dp/dt < F.$$

在第一种情况中, 我们可以得出动量会产生的结论; 在第二种情况中, 我们可以得出动量会消灭的结论。

如果力这一物理量在一开始就被解释为动量流, 上面所引用的错误就不会产生。这样, 我们的直觉马上会告诉我们 F 和 dp/dt 之间的关系肯定是: 因为 p 是守恒量, 所以物体的动量变化率等于流入物体的总动量流强度。

如果动量只流过物体, 物体的动量就不会变化, 流入物体的动量流与流出物体的动量流相等。用牛顿的话来说: 作用在物体上的两个力大小相等但方向相反, 这些力是平衡的。

F. Herrmann

5. 29 桌面上的力

主题

在物理教科书的力学章节中出现了各种不同的力：重力、下滑力、正压力、摩擦力、浮力等等。人们会说，一个物体施加给另一个物体一个力。如果不想提及施力物体，也可以这样说：这个力作用在一个物体上。有时也会这样说，它作用在作用线上，或作用在作用点上。偶尔，有人不说“一个物体施加给地球一个力”，而说“将力施加在其支持物上，例如，斜面上。

缺点

从这些语言表达中我们可以看出，我们遇到了一个难学的物理量（这跟通常人们所说的“每个人都对力有一种天然的感觉”刚好相反）。对力这一物理量的语言理解是如此的不平常。这一事实告诉我们，这一概念是难懂的。从中我们也可看出，多数学物理的学生是没有完全理解这个概念的。

我们来看这样的情境：一个放在地面上的箱子。（一个简单的静力学问题却很难想象。）在这一情境中，地球施加给箱子一个力。我们可以根据 $m_{\text{箱}} \cdot g$ 来计算这个力。地球施加了这个力了吗？整个地球？包括下面的新西兰？它必定是这样施加的。正如我们所说的，它将力施加给了箱子。整个箱子？是的，但也不是。是的，它施加给了整个箱子。然而，正如人们所说的，它施加在作用点上。然而，它又是怎样从作用点传递到箱子的其他点的？特别地，如果这箱子是空的，作用点就在空气所在的地方。对于地球的情况呢？它也有作用点？不管怎样，根据牛顿第三定律，一定有一个与第一个力对应的反作用力，它作用在地球的作用点上。不是吗？难道我们不愿意说“这箱子把力作用在支承面上”？至少，这似乎比说“作用在整个地球上”要更合理一些。现在，我们把箱子放在桌面上。这样事情会变得更复杂。这时，箱子将力作用在桌子上，或更确切地说，作用在桌子的支承面上。然后，桌面将它传递给了桌子的脚上。（然而，在考试中允许这样说吗？，如果不允许，我们应该怎么说？）桌子的每只脚施加了一个力给地球。问题又来了：这个力只作用在四个支承面上，还是整个地球（包括新西兰）？这里还有引力场。它在这里扮演着什么角色？有时人们会说，它“传递力”。它正象两个异性之间的媒人一样，在两个物体之间传递着力。

亲爱的读者，你肯定已经注意到了，我在装糊涂。你也许会责备我。是的，我在装糊涂。然而，难道我所提出的问题 and 那些尴尬的词语不存在吗？难道在中学里引入静力学时（和在大学里讲物理课时）不会提出这样的问题？

问题是，在静力学问题中，我们总会涉及一个闭合的路径，至少是它的一部分（然而，这不是我们所讨论的）。相反，我们讨论的最好的情况是在这个路径中的几个横截面，或涉及一些没有物体（如环或空箱子）的作用点的最坏的情况。

这样，有很多关于箱子的问题都没有得到解决：箱子中的力如何计算？桌面上的力如何计算？桌脚上的力如何计算？地面上的力如何计算？引力场中的力如何计算？我们挑选了两个或三个容易计算的力。然而，我们很难说我们在讨论学生所生活的这个世界。

有人也许会认为，这里无法这样做：课堂教学时间是稀缺产品，我们必须把时间放到对简单问题的处理上。结果，我们只能处理线性振子，将非线性振子放到大学里去讲；我们只能处理理想气体，把真实气体放到大学里去讲，等等，……如果我们想处理静力学问题中的所有力的分布（确切地说，力学应力分布），有人会认为，我们需要运用朗道物理学第7卷（或其他相同）的知识；因此，这不是中学里能解决的问题。由此，我们得出结论，我们只能局限于描述几个地方或几个点的力。

事实上，这里的问题并不是振动的线性近似或气体的理想化处理问题，并不是说，箱子中的力比箱子与地面接触处的力要小。因此，这并不是近似处理的问题，而是有许多现象被隐藏的问题。

历史

我们仍按牛顿时代的方式在教力学。那个时代没有别的解决办法。欧拉和伯努利的理论是后来要教的内容，在中学物理中几乎没有涉及。在大学里，未来的教师学到的是哈密顿和拉格朗日的理论。他们的理论很高档，很难在专业上用到。

牛顿力学的语言不能提及桌面上的力、地球中的力、被另一个球推动的球内的力、引力场中的力这些问题；力仅仅作用在物体上，作用在地球上（或作用在月球上），作用在弹簧上，或有时作用在绳子上。当然，在牛顿时代不可能提及作用在引力场上或引力场中的力，因为那时还没有出现引力场的概念。

建议

由牛顿提出来的巴洛克时代的力的隐喻现在已经过时了。牛顿提出这个概念的时候并没有提及我们上面所说的问题，但在当时这是一个有独创性的概念。他的主要问题是，他没有引力场的概念。因此，他的理论离连续介质力学还很远。

今天，继欧拉和伯努利的连续介质力学特别是普朗克把力解释为动量流后，我们处于了一个很好的时代，我们不再需要运用狡猾的牛顿语言。描述桌面上的箱子时，我们可以采用这样的方法：动量从地球上的所有点通过引力场传递到了箱子；它从四面八方流到箱子中有质量的所有点；然后，它通过构成箱子的材料流到其底部，再大面积地扩散到地球

各处。因此，这个流动路径是闭合的。当然，流过地球的动量流还有很多，我们刚才所描述的是与这箱子有关的那一部分。

上面这些结论甚至在没有进行任何计算前就可以作出。

有时会盛行这样的观点：没有计算，就没有真正的物理学。我不同意这个观点。我认为，理解可以先于计算。

我们知道，水在海洋中蒸发，由空气传递到陆地，凝结后以雨的形式降落到地面，积聚成小溪和河流，又流回到海洋。在这里，我们描述了水的循环，但没有提及通过这一循环路径中任一截面的水流强度或任一点的水流密度。对于动量，我们为什么不能用这种方式来描述？这样的描述是很容易接受的！

F. Herrmann

5. 30 承受加速度

主题

“在地球附近的一块石头要承受 $g=9.81\text{m/s}^2$ 的加速度。”

“汽车在加速行驶时，乘客要承受大约 $0.3g$ 的加速度……”

“人所承受的加速度的方向也会起作用。“向下的”加速度通常会引起大脑和眼睛充血。”

“当在自由落体参考系中的观察者进入黑洞视界时，他观察到在视界外没有真实粒子，只有虚拟粒子。对于在加速参考系中的观察者来说，由于其加速度，他总保持在视界上方，会观察到过多的真实粒子。”

缺点

在运动学中，我们用 a 表示的那个量叫作加速度。由于这个量是度量我们在日常用语中所指的加速程度，这个名称是合情合理（同样，加速度也用来描述圆周运动）。

在物理学中，如果我们想正确地用加速度表述一个物体的加速程度，最好说“物体具有加速度”，或“它的加速度具有某一值”（对于速度、温度或密度，我们也是这样表述的）。我们决不会说“物体承受加速度”。

加速度是一个运动学中的量，用来描述实体的运动。这个实体不一定是一个物体，也可以是计算机屏幕上的一个点。同样，我们也不会说物体承受速度。

只有物体可以承受某些东西。加速度最多只能指某种效果。

在涉及地球引力场时，我们经常能看到物体“承受”加速度的表述。相应地，人们把 g 这一物理量叫作引力加速度。

为了避免这一尴尬局面，在德国中学教科书中，人们把 g 叫作“局域因子”。

这也许比以前好了一些，但由于另一个原因，尴尬局面仍没有消失。

公式 $F=m\cdot g$ 类比于我们熟悉的静电学公式 $F=Q\cdot E$ 。与 g 相对应，我们也可以把 E 叫作局域因子。这是因为，象其他许多物理量的值一样，电场强度的值取决于位置。

为什么 E 叫作电场强度和 H 叫作磁场强度，而 g 不叫作引力场强度？

有人也许会说，对这种语言习惯的批评未免显得太迂腐了。难道人们不知道它的意思？如果这是一个孤立的事件，这是可以接受的。然而，不幸的是，在物理学中有很多这样用词不清晰、不恰当或自相矛盾的地方。我们能多大程度地说物理学运用了清晰一致的语言？

历史

我们没有把 g 叫作引力场强度，这也许是因为我们仍然固守着由牛顿勉强引入的超距作用观。毕竟，在牛顿时代人们还不知道引力场的存在。

这种语言表达方式即使没有带来严重的后果，也折射出一种陈旧的世界观。

我也必须承认，任何说这种话的人不必为此担忧，因为其他人也在这样说。作为一个例外，我提一下上面所引用的最后一段话，即 Kip Thorne（他 2017 年获得诺贝尔奖。当然，这是他应得的奖）所说的话。因此，说物理学中的术语（尤其是诺奖获得者的话）能给业内人士以一种放心的感觉，不管他们是否理解了物理学。

建议

绝对不要说物体承受加速度。

如果你确实想用“承受”这个词（但最好不要对所有物体说“承受”），请说物体“承受”力，或场承受力，或地球承受力。但是，请千万不要说“承受”加速度。

把 g 叫作引力场强度。这样，我们可以清楚地看出， $F=m\cdot g$ 和 $F=Q\cdot E$ 具有相同的地方。

Friedrich Herrmann

5. 31 匀速运动

主题

最简单也是最常见的运动是车辆的匀速运动：一辆汽车在公路上行驶，或一辆火车在轨道上行驶。

缺点

在物理教学中如何处理这些过程？在运动学中我们会把它们作为匀速运动的例子（也是最简单的运动例子）讨论这些过程。

然而，在动力学中我们如何来描述通常的汽车或火车的运动？

这里有一个例子：

“对于一辆做匀速运动的车，必定有能量持续地输送到它的发动机中。这是因为，在车的运动过程中，摩擦会持续地释放热。

这个驱动力正好等于总的摩擦力 F_F 。因此，使车匀速移动距离 s 所需的能量为 $E = F_F \cdot s$ 。在这个过程中，车的动能保持不变。”

上面这些句子也许是对的。并且，如果我们仍然用驱动力来理解所学的内容，这些描述是好的。一个力总是由物体 A 施加给物体 B 的。在我们所举的例子中，哪个是物体 A？哪个是物体 B？别忘了，汽车是被驱动的。因此，汽车是物体 B。是吗？根据通常的解释和表达方式，这驱动力源自发动机。但是，发动机是物体 B 的一部分。驱动力作用在这部分上。学生没有办法选择哪种说法，只好死记硬背，需要的时候拿出来用。

这些话也没有回答初学者会问的问题：为什么车的速度会保持不变？这个问题难吗？不重要吗？为什么这两个力是相同的？驾驶员需要通过适当地踩加速踏板使汽车既不加速也不减速？

我们期待另一本教材也谈到这个问题。这里，这个主题被放在摩擦已经很详细地讨论过了，包括滑动摩擦、静摩擦和滚动摩擦，也包括相应的摩擦力公式和在分子层面上对摩擦的解释。所有这些似乎对理解汽车为什么做匀速运动都是必要的。

即使我们不能理解所有问题，有一点肯定能看到：这个情况格外地复杂。为了理解汽车的运动，我们必须区分 10 种不同的力：驱动力、驱动阻力、相互作用力、静摩擦力、滑动摩擦力、正压力、滚动摩擦力、空气阻力、输入力和加速阻力。然而，好心的读者会问自己，驱动力是什么意思？教材是这样说的：

“驱动力 F_A 是通过齿轮箱从发动机传递到汽车轮子的力，它几乎等于最大静摩擦力。”

因此，这里清楚地表明，驱动力源自发动机。我们来理解其含义。假定发动机中的活塞在竖直方向运动，即上下运动。热气压活塞。当然，热气也在向下和向两边压，但这跟我们所讨论的问题也许没有关系，因为发动机是用移动的活塞来驱动的。这样，我们要考虑的力是气体向上的力。然而，汽车没有向上运动，而在向前运动。现在又怎么了？这确实是个问题，因为发动机整体上没有产生向前的力。除了这个问题，前面我们还留下一个问题：发动机是汽车的一部分。它不可能给汽车施加一个向前的力，否则会向后运动。

这是一个笨问题吗？也许是。然而，教材作者是否自己也没有弄清楚他所给出的这么多力是什么意思，他自己把力和能量混淆了？如果将力换成能量，那句话是对的：能量通过齿轮箱从发动机到达（更学术一点，“传递到”）汽车轮子。

历史

伽利略惯性定律的发现、牛顿的著作、笛卡儿和惠更斯的著作，这些都标志着科学的诞生，标志着 2000 年左右以前在希腊已经开始的工作得到了延续。但是，不久后科学又进入了持续几个世纪的黄昏时期。从伽利略和牛顿开始，我们知道力是引起加速度的原因。这个观点是伟大的。然而，它也有一个负面的副作用：回顾历史，摩擦这一导致亚里士多德对运动物体的错误解释现在看来仅仅是对这座美丽的科学大厦中的一个干扰。现在看来，真正的物理只适用于在没有摩擦的宇宙之中。在牛顿时代的马车或今天的高速列车在行驶时只不过克服了这一干扰。真正的物理现象只有在运动刚开始很短的加速阶段才能被观察到。

这样，牛顿第二定律变成了物理学的神秘圣地，即使后来人们有了新的发现，知道它只不过是一个物理量（即动量）守恒的表达式。动量守恒定律确实是一条重要的物理定律，但它并不一定要比后来发现的其他广延量（如能量、电荷、熵或角动量）的守恒或不守恒定律来得更重要。

我们对这么多种力再来作另一方面的讨论：牛顿的观点到现在已经有 300 多年了，从那时以来已经发生了很大的改变。幸亏我们不再需要象牛顿时代那样灵巧的力的隐喻了。如果我们认识到力可以解释为动量流这一事实，我们会发现，所列出的几个力可以简化为一个动量流，这些力只不过是在不地位置针对不同方向的面所测得的同一动量流。

建议

有摩擦情况下的匀速运动在中学是一个很好的主题。这是一个重要的主题，也是不太难的主题。它是物理学中叫做稳态的一个简单的例子。所谓稳态，就是向外的流自动调节

到与向内的流相等为止。

这个原理可应用于水流中。图 1 所示的容器有一个小孔。水流入这个容器。开始时容器是空的。把龙头打开，水就流入容器了，容器中的水面随之升高。这就导致向外的水流增大，并一直增大到与向内的水流相等时为止。

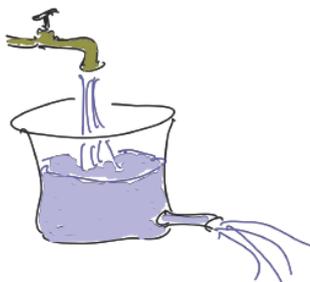


图 5-31-1. 水面自动调节到流出的水流与流入的水流相等时为止。

这一原理也可应用于汽车。发动机使动量从大地流到汽车，使汽车的速度增大，从而使由于摩擦引起的向汽车外的动量流增大。向汽车外的动量流一直增大到与向汽车内的动量流相等时为止。

我们也可以将汽车加热的房间进行类比。首先，房间的温度升高，然后……

对地球表面的平均温度的分析又是一个例子。这也是稳态建立的结果。

有人也许会说，上面所引用的内容不仅仅是稳态建立这件事。我们假定教材中没有任何错误，即使它们有不恰当之处。当今对物理教学改革的需求没有在物理教学中引入新主题的需求那样大。当我们想引入新的主题时，就必须先扔掉一些内容。上面提到的与汽车有关的十个力就是要被扔掉的对象。

Friedrich Herrmann

第六章 相对论

6. 1 质量和能量的等价性

主题:

爱因斯坦的质能方程为 $E=mc^2$ 。

缺点:

在许多教科书和刊物中我们可以看到对爱因斯坦的质能方程是这样解释的：质量和能量是同一个物理量的不同表现，质量和能量之间可以相互转化^[1]。如果这种解释成立的话，我们就可以将能量和质量区别开来了。能量的减少将导致质量的增加，反过来也是。然而，事实并非如此，这也不是爱因斯坦的质能方程所告诉我们的。这一关系式所告诉我们的，质量和能量是用不同单位来测量的同一个物理量。

历史:

也许问题出在爱因斯坦本人。他曾这样说过：

“根据狭义相对论，质量和能量是同一事物的不同表现。这是一般人都不大熟悉的概念。然而，质能方程告诉我们，能量等于质量与光速平方的乘积，即很小的质量可以转化为很大的能量，或反过来。根据上面所提到的方程，质量和能量实际上是等价的。”

他不应该说“很小的质量可以转化为很大的能量”，而应该说“很小的质量对应很大的能量”。

建议:

在教学中我们必须向学生讲明以下几点：

1. 我们以前所知道的能量这个量也具有我们以前所知道的质量这个量的性质，即重量和惯性的性质。一个充了电的电池比没有充电的电池更重，一杯热水比一杯冷水更重，一个运动着的物体比静止时更重，等等。然而，上述所说的轻重差异是如此的小，以致于我们无法将它们测出来。

2. 我们以前所知道的质量这个量也具有我们以前所知道的能量这个量的性质。一开始，我们会觉得这是难以相信的。能量的一个典型性质是，它能让我们做有用的功。这样，我们会问，1g 砂能否做 $E = 1g \cdot c^2 = 10^{14}$ J 的功？这显然是不可能的。然而，我们确实不可能获得包含在一个系统中的所有能量。我们无法用压强为 1bar 的“压缩”空气来驱动一把手提钻，我们也无法用常温下的“热”水来驱动一台热机。如果仅仅用汽油，我们

无法用它来驱动一台发动机，我们还需要氧气。同样，仅仅用 1g 砂我们当然无法驱动任何东西。现在，我们对此也就不再感到奇怪了。我们还需要 1g 砂的反物质。如果有了这种反物质，砂就能为我们做功了。

参考文献

[1]“……这种成对的湮灭是著名的爱因斯坦方程 $E=mc^2$ 关于质量可以转化为能量的结论性证明。”

Friedrich Herrmann

6. 2 $E=mc^2$ 的写法

主题:

表示质能等效关系的方程是这样写的:

$$E=mc^2.$$

缺点:

根据数学上传统的习惯, 自变量 x 和因变量 y 之间的线性关系可以写为

$$y = ax + b,$$

而不写为

$$y = b + ax.$$

如果是二次函数关系, 则写为

$$y = ax^2 + bx + c,$$

而不写为

$$y = xb + c + x^2a.$$

这种书写习惯帮助我们尽快掌握方程所表达的意思。在物理学中, 我们同样有这样的书写习惯, 即将常数写在自变量的前面。

一看到方程

$$E_k = \frac{m}{2}v^2,$$

我们就马上知道这是速度和动能的二次函数关系。这个方程让我们去想象这样一个过程, 即在这个过程中速度在变化而质量 m 是一个常数。否则, 我们就应该把这个方程写为

$$E_k = \frac{v^2}{2}m.$$

同样, 我们有

$$U=R \cdot I \text{ (而不是 } U=I \cdot R),$$

$$Q=C \cdot U \text{ (而不是 } Q=U \cdot C),$$

$$E=h \cdot f \text{ (而不是 } E=f \cdot h),$$

$$Q=I \cdot t \text{ (而不是 } Q=t \cdot I) .$$

在上面这些式子的等号右边中，我们把在过程中变化的量写在后面，把保持不变的量写在前面。

根据这一书写习惯，方程

$$E=mc^2$$

的意思是：能量与光速的平方成正比，质量是一个比例系数。实际上，这个方程的意思与此大不相同：一个粒子或物体的质量越大，它所含有的能量也越多，其比例系数为 c^2 。

由此，我们最好把质能方程写为

$$E=c^2m.$$

但是，这样的形式也是有缺点的。为什么我们要把比例系数写成这样一个不直观的形式呢？

历史：

爱因斯坦已经把质能方程写成这样的形式了，而人们又没有想到去改变它。我们可以来推测一下其中的原因。也许是因为在方程

$$E_k = \frac{m}{2}v^2$$

中，我们把质量也写在前面，而把速度写在后面。

建议：

把质能方程写成你已经习惯了的形式：

$$E=k \cdot m.$$

这里 k 是一个普适量。

Friedrich Herrmann

6. 3 光速和速度的极限

主题：

在方程

$$E=m \cdot c^2$$

中的常数 c 叫做光速。

缺点：

将牛顿力学加上一条新的公理（质能相当性原理）就可以推导出狭义相对论的原理。由此，我们可以得出结论：自然界中有一速度极限。当给一个粒子（或一个物体）注入动量时，它的速度就会接近这个极限速度 c 。粒子的静止质量越小，它到达这个极限速度就越快。如果粒子的静止质量为零，它就只能以极限速度运动。这个速度值只能通过实验得到。

当我们把这个极限速度叫做“光速”时，我们就会产生这样的印象，即光在相对论中扮演着特殊的角色。从表面上来看，其他粒子的运动都必须受光的限制。我们认为，对所有物体来说这并不是一个正确的观点，这是因为所有粒子都独立地遵守着相同的规律。对于光来说，除了它的静止质量为零外，并没有什么特殊的性质。但即使就速度这一点来说，它也不是独一无二的。

历史：

通常，在推导狭义相对论时我们并不是从质能相当性原理出发，而是从观察光速与参考系无关这一现象开始。如果这样的话，光一开始就扮演了一个特殊的角色。

当我们考虑一个完整的理论时，我们注意到光子基本上与其他粒子没有什么区别。它们所遵循的规律与其他粒子所遵循的规律是一样的。如果说有区别的话，仅仅是描述它们特性的物理量的值跟描述其他粒子的有区别。就力学来说，这些量是静止质量和本征角动量。

对光的优选考虑的另一个原因是，在引入相对论时运动学被作为一个焦点内容。在运动着的火车内和火车旁的光信号和时钟扮演着重要的角色。这样又一次强化了光在相对论中是一种特殊的物质这样的观念。这一观念在 20 世纪初的情况下是可以理解的。在那时，人们不知道引力波以光速传播，也不知道中微子几乎以光速运动。那时没有粒子加速器和对撞机，人们不知道在那里有许多粒子被加速到极限速度。

建议：

应该这样说，对于所有物体和粒子的运动都受极限速度的限制。就我们所知，光子和引力子刚好以这个速度运动。后来我们又知道，中微子也是以这个速度运动的。

Friedrich Herrmann

6. 4 速度相加

主题:

“在.....中消除 u 后我们得到

$$u = \frac{u'+v}{1 + \frac{u'v}{c^2}}. \quad (1)$$

这就是爱因斯坦速度相加定律。

缺点:

上面这个公式告诉我们，当参考系变换时，速度这个物理量是如何变换的。对于长度、时间、能量和动量、电场强度和磁场强度等其他物理量都有相应的变换定律，但只有对于速度我们把相应的定律叫做“相加”定律，而不是“变换”定律。这就会使学生认为，速度相加与其他物理量的变换在本质上是不同的。

我们也必须记住，“相加”是数学运算中的专用名词。

当我们把上面的公式叫做“速度相加公式”时，学生们会认为，用通常的方法来对速度相加时是错的。由于用通常的数学相加会导致比光速 c 还要大的速度，因此，不允许这样的速度相加。然而，这个结论是不正确的。我们可以并且必须做速度相加的工作，不管计算的结果如何，比如，我们可以根据许多不同的速度来计算它们的平均速度。

历史:

爱因斯坦本人把上面的公式叫做速度相加定律^[1]。之所以使用这个名称，是因为对于低速的情况，这个公式可以简化为简单的数学相加公式。

建议:

把公式 (1) 叫做速度变换定律，而不是速度相加定律。

[1] *Einstein, Grundzüge der Relativitätstheorie, Akademie-Verlag Berlin, 1970, S. 39.*

6. 5 迈克耳孙-莫雷实验

主题:

“‘光以太’ (luminiferous ether) 的引入将被证明是多余的。这里所产生的观点不需要具有特殊性质的‘绝对静止的空间’。” (Einstein) [1]

“看来以太 (即人们所推荐的参考系) 这个概念没有可接受的实验基础, 无论我们把以太看作是静止的还是被牵引的。” [2]

缺点:

迈克耳孙-莫雷实验已经证明, 光速不依赖于测量所在的参考系。从他们的实验结果中可以得出几个物理结论。其中一个结论是非常重要的。这个结论表明, 我们需要一种新的理论, 这种理论包含并修正经典力学和电动力学。另一个结论与第一个结论有间接的关系, 它表明光以太是不存在的。这两个结论经常被同时引用, 这给人们以这样的印象, 似乎以太的不存在是相对论中许多新表述中的其中一个。实际上, 它有时以爱因斯坦 1905 年的出版物中所给出的方式被提到[1]。或者, 人们认为一种特殊的参考系的不存在相当于光以太的不存在[2]。

我们将用一个思想实验证明, 这两个结论是相互独立的, 我们不能从任何一个结论推出另一个结论。

一辆汽车在传送带上高速运动。传送带开始时是静止的。汽车相对于传送带的速度几乎等于光速 c 。现在我们开动传送带的电动机, 让传送带的运动方向与汽车的运动方向相同。虽然汽车的速度和传送带的速度之和大于 c , 但我们观察到汽车相对于地球的实际速度没有超过 c 。我们让传送带朝相反方向运动, 让汽车的速度仍然接近于 c 。现在我们假定用迈克耳孙-莫雷实验来代替这个实验。那么实验者能得出什么结论? 他们的结论是, 速度有一个极限值, 当改变参考系时不允许把速度加上去。这些结论将导致新的理论, 即相对论。这个理论能解释所观察到的现象, 尽管这个现象初看起来很奇怪。请注意, 实验者决不会认为汽车的携带者 (即传送带) 不存在。然而, 从迈克耳孙-莫雷实验中人们精确地得出了这个结论。人们从“光速不随参考系的改变而改变”的结论推出“光波的携带者不存在”的结论。

历史:

只要当时还没有相对论, “光以太不存在”这一结论看上去是摆脱困境的唯一方法。然

而，有了爱因斯坦的理论，这个问题就以一种崭新的方法得到了解决。我们可以这样认为，爱因斯坦说以太是可有可无的，这是一个过失。他第一次发表他的新理论后几年，他发现他当时是错的：“……没有空虚的空间，即没有不存在（引力）场的空间。”^[3] 后来他甚至更清楚地表明：“根据广义相对论，没有以太的空间是不可想象的。”^[4]

建议：

只要在实际中可以回避以太，就不要去提及以太。否则，你将会被卷入一堆杂乱的概念之中：以太、空间、引力场和真空。如果你要引用爱因斯坦关于以太的论文，你必须引用他后来发表的内容。

[1] Einstein, A.: Zur Elektrodynamik bewegter Körper. Annalen der Physik und Chemie, Jg. 17, 1905, S. 891-921

[2] Resnick, R.: Introduction to Special Relativity. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1968, p. 33

[3] Einstein, A.: Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie. Berlin: Akademie-Verlag. WB, 1973, p. 125

[4] Einstein, A.: Äther und Relativitätstheorie. Berlin: Verlag von Julius Springer, 1920, p. 12

Friedrich Herrmann

6.6 惯性参考系

主题

“惯性参考系”（inertial frame of reference）这一概念在中学和大学的物理教学中起到很重要的作用。它被用在描述惯性定律中：

“物体总保持静止或匀速运动，除非外界有力作用于它。”

这个定律只有当我们用合适的参考系来描述相应的运动时才成立。这个合适的参考系就是惯性参考系。

那么，什么是惯性参考系？

“在物理学中，惯性参考系（在拉丁语中，iners 是懒惰和无力的意思）是这样的参考系，其中的物体保持匀速运动，除非有力作用于它。”

惯性参考系在近似条件下可以“实现”：

“太空飞船是在理想的近似条件下实现的惯性参考系。只要太空飞船在离开其他所有物体很远的星际空间运动并且自身不旋转时，它就是惯性参考系。”

缺点

我们先来看惯性定律：

“在没有受到外力作用时，物体的速度保持不变。”

仅就上面这句话来说，这是错的，因为只要选择合适的参考系任何物体的运动速度都可以保持不变。因此，惯性定律不是普遍成立的。它只有在特定的参考系即所谓的惯性参考系中成立（所以我们后来才知道这一点）。这样，我们对惯性定律的最好表述为：

“在没有受到外力作用时，物体相对于惯性参考系的速度保持不变。”

然而，我们是如何知道一个参考系是否是惯性参考系？人们会认为，不受力的物体是惯性参考系。这样，我们就可以判断其他物体的运动速度是否保持不变。至今为止，这是一个很好的办法。

然而，这里遗留着一个问题：我们是如何知道这个惯性参考系没有受力？我们总不能这样说：因为它的速度保持不变。这是因为，就是这个参考系告诉我们速度不变的意思是什么。这样，我们不得不去寻找别的解释这个参考系没有受力的方法。初看起来，这是一个简单的问题。我们知道自然界中的力，我们也知道力的来源，知道力与距离的关系所遵循的定律。这样，我们至少在思想实验中相信没有力作用在这个参考系上：我们可以保证没有电力、磁力和接触力作用在这个参考系上。

我们也可以认为这个参考系没有受万有引力的作用。然而，这里有一个问题。我们无

法排除万有引力。只要我们认为万有引力（可以用牛顿万有引力定律计算的力）可以区别于惯性力，就不会有这个问题（回顾前面提到的太空飞船，这足以使它到达星际空间）。然而，如果我们承认在理论上不能区分这两种力，这个争论就不存在了。我们无法再决定一个力是否作用在物体上。一个力作用在一个参考系上，而不是另一个参考系上。

我们想象，我们正坐在飞行在星际空间中的太空飞船，火箭发动机以恒定的推力运行着。在太空飞船中惯性定律是否成立？当然是成立的。如果我们释放一个物体或抛出一个物体，它不会沿直线运动，这是因为有力作用在它上面。以太空飞船为参考系，引力场强度不为零。因此，万有引力作用在物体上。根据牛顿第二运动定律，物体会加速运动。因此，牛顿运动定律在“非惯性参考系”也成立。

那么，我们为何还要用惯性参考系这个概念呢？

历史

为什么通常人们不提及牛顿运动定律假定成立的参考系？其原因也许是牛顿本人在他的第一和第二定律中没有提及这种参考系。牛顿不需要这样做，这是因为他在他的“运动定律”的前一章中以“定义”的形式解释了其成立的条件。在这里，他用真实力和虚拟力来解释。真实力就是有施力物体的力，而虚拟力或惯性力没有施力物体。他的定律只适用于真实力。

在《原理》出版后的第二十年，这个观点受到了质疑。爱尔兰哲学家伯克里（George Berkeley, 1685-1753）提出，惯性力也来自于其他物体，即恒星。这一观点后来被物理学家和哲学家马赫所接受。根据他的观点，虚拟力的概念不再需要，惯性力成了真实力。

在关于万有引力的物理中有一个奇怪的现象持续了很长时间：人们认识到惯性质量和引力质量是相等的，但无法解释这个现象。1916年，爱因斯坦对这一事实作了如下评论：

“一个物体的引力质量和惯性质量是相同的。迄今为止的力学已经采纳了这一重要事实，但还没有给以解释。”^[1]

广义相对论告诉我们，一个现象或过程如果可以在一个参考系中用惯性来解释，那么也可以在另一个参考系中用引力来解释。这样，引力质量和惯性质量之间的区别就消失了，正象惯性参考系和非惯性参考系之间的区别消失一样。

1922年，爱因斯坦这样写道：

“（广义）相对论的真正成就是，它让物理学避免了引入惯性参考系的需求。这个概念的不足之处是：它不加证明地从所有可想象到的参考系中选择了某些参考系。然后，它假定物理学的定律（如惯性定律和光速不变定律）只有对于这些惯性参考系才成立。这样，人们可以将空间赋予一种性质，这种性质区别于其他物理定律所描述的性质：在没有那些

对空间的干扰的情况下，它对所有物理过程起着决定性的作用。虽然这一理论在逻辑上是可能的，但它是很不令人满意的。牛顿曾清楚地意识到这一理论的缺陷，但他认识到在当时的物理学来说没有其他别的办法。后来，科学家们（特别是马赫）明确指出了这一缺陷。”

[2]

建议

有人也许会认为，消除惯性参考系这一概念的工作只有在用广义相对论处理引力时才能进行，也就是说，只有当我们在广义相对论中涉及张量运算、爱因斯坦场方程（Einstein's field equation）和里奇张量（Ricci tensor）等方面时才能进行。然而，这种要求有点夸张。引力质量和惯性质量的相同性确实是广义相对论的结果，但没有广义相对论我们照样可以理解这一点。我们要做的是，我们必须承认这两种质量的相同性不是偶然的。

下面我们来介绍一下如何将这一主题介绍给学生。我们来看图 1 所示的情境。威利在著名的升降机中，而莉莉在外面。对威利（他的参考系是升降机）来说，那个球没有运动，它漂浮着。他认为这是正常的，因为在他所处的参考系中引力场强度 g 等于零，没有力作用在这个球上。而莉莉对此现象的解释是不同的：引力场强度不为零，有力作用在这个球上。

我们得出结论：引力场强度与参考系有关。我们并不为此感到惊奇，因为我们知道其他许多物理量也是这样的。



图 6-6-1. 威利：“球漂浮着。引力场强度必定为零。” 莉莉：“球正在下降，它的速度在增大。引力场强度不为零。”

在图 2 中的问题是，为什么弹簧会被拉伸？在威利看来（从他所处的参考系看来），引力场强度处处为零。弹簧被拉伸的原因是与弹簧连接的物体在加速。由于它的惯性或它的惯性质量，它要阻止其加速。

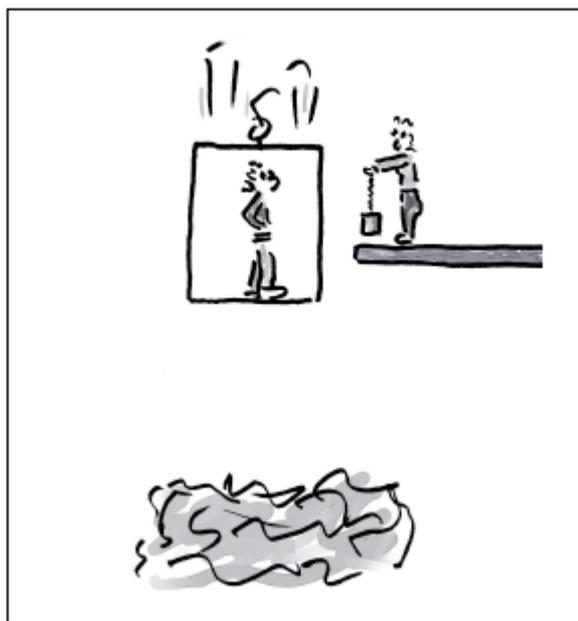


图 6-6-2. 威利：“引力场强度为零。弹簧被拉伸的原因是正在加速的物体具有惯性。” 莉莉：“弹簧被拉伸的原因是由于物体的重力。”

相反，莉莉认为弹簧被拉伸跟它的惯性无关，而与作用在物体上的引力有关，也就是说，与物体的引力质量有关。

我们得出结论：根据参考系的不同，质量有时表现为引力质量，有时表现为惯性质量。我们发现，引力质量和惯性质量之间的区别，跟真实力和虚拟力之间的区别一样，也跟惯性参考系和非惯性参考系之间的区别一样，是相对论前的物理学中的一个人为产物。

[1] *A. Einstein: Über die spezielle und die allgemeine Relativitätstheorie*, Akademie-Verlag Berlin (1973), S. 54.

[2] *A. Einstein: Grundzüge der Relativitätstheorie*, Akademie-Verlag Berlin (1970), S. 138.

Friedrich Herrmann

6.7 时间膨胀和长度收缩

主题

长度收缩和时间膨胀

缺点

在通常的语言中和在技术用语中，收缩和膨胀表示过程，即某种东西随着时间的推移发生了变化。如果开始时比较长的物体变短了，我们就说它在收缩；如果开始时比较短的物体变长了，我们就说它在膨胀。然而，这与在相对论中所说的长度收缩和时间膨胀并不是同一意思。这里，长度的值和时间的值仅仅是因为参考系的变换而发生了变化。换句话说，这是对同一物体或同一过程的不同数学描述。

这种因参考系的变换而发生的物理量值的变化在物理学中是一种法则。

所有物理学家都知道，动能的值会随参考系的变换而变化。然而，我们不会因此说能量增加了。能量增加这一表述会引发一个问题：能量变化率 dE/dt 为多大？

同样，动量的值也会随参考系的变换而变化。然而，我们不会因此说动量增加了。当你说动量增加时，你得回答这样的问题：相应的动量变化率 dp/dt 为多大？这动量变化率是引起动量变化的力。

你也许会说，我们未必要说得这样微妙，因为这些道理大家都知道。如果不涉及相对论，也许你这样说是对的。

初学者艰难地学习长度收缩和时间膨胀及所有相关知识。收缩的尺子没有发生变化，相对于其他钟表走慢了的钟表也没有发生变化。参考系变换后，不但尺子变短了，整个世界都变短了。这就是我们生活在这个世界中却没有觉察到任何收缩的原因。

但是，初学者在相对论的其他主题中学到了长度变短或变长的内容。他们认为这跟参考系变换时的现象是相同的。例如，用来观察引力波的迈克耳孙干涉仪。在这个实验中，镜子之间的距离发生了变化，因而光传播的路径和干涉图样都发生了变化。然而，其他长度（光的波长、尺子的长度、研究者的体型尺寸）是否也发生了变化？如果是，长度缩短的现象将无法被观察到。

当然，这个结论是错的。我们必须涉及实际发生的过程，这种过程不会因为参考系的变换而消失。如果我们不清晰地区分“物理过程”和“参考系的变换”这两个概念，就建立不起这样的观点。

另外，反复地断言以太不存在或空间是空的，上面这个问题也会得到加重。如果空间是空的，按照我们对空的正常想象，空间膨胀的概念是无意义的。

历史

长度收缩这一名称只适用于洛伦兹的概念框架中^[1]。根据洛伦兹理论，长度收缩是材料物体之间距离的实际减小。在他的前辈菲茨·杰拉德 (Fitz Gerald) 的概念框架中^[2]，收缩是一个实际的过程 (图 2)。

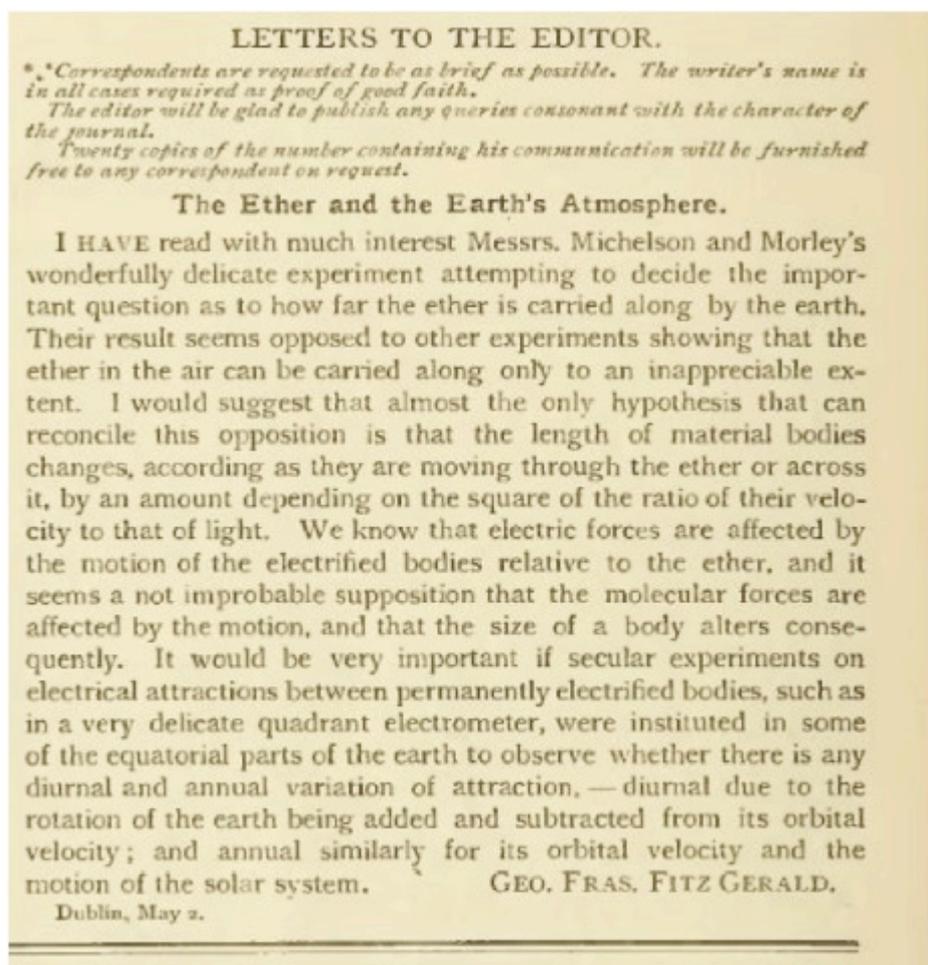


图 6-7-1. 长度收缩的前相对论概念

建议

请小心，避免产生这样的印象，即洛伦兹公式描述的是一个过程。特别地，要避免使用长度收缩和时间膨胀这样的名称。

相反，在涉及用干涉仪检测引力波的问题时，要清楚地断定镜之间的距离在变化；相应地，也要清楚地断定宇宙确实在膨胀。在这里，收缩或膨胀这两个词是合适的。问题出来了，谁在收缩或膨胀？如果你已取缔了以太这个词，你需要对这个膨胀的实在物取另一个名称。如果我们把它叫做空间，这对学生没有帮助。在通常的语境中，空间仅仅意味着物体的空间。如果空间的概念仅仅如此，那么空间只能增加而不会膨胀。

[1] *H. A. Lorentz*: Die relative Bewegung der Erde und des Äthers(Zittingsverlag, Amsterdam, Akad. v. Wet., 1 (1892), p. 74

[2] *G. F. Fitz Gerald*: The Ether and the Earth's Atmosphere, Science, Vol. XIII, No. 328, Letters to the editor, p. 390

F. Herrmann

6.8 狭义相对论和参考系变换

主题

大家都知道，狭义相对论很难学。它要求我们不要将空间和时间当作两个独立的实在来看待，而要将它们看成是一个单独的概念。当参考系发生变换时，时间和空间间隔发生了变化。

缺点

毫无疑问，狭义相对论（STR）是难懂的。其原因不在于数学，因为它并不需要学生具有比平方根更难数学，初中生所学的数学已经足够了。STR 难学必定有其他原因。显然，这个原因是空间和时间的合并。

我跟狭义相对论初学者的谈论和跟讲授这一课程的同事的讨论使我对它也有了一些怀疑。

让我们来举一个别的例子。假如现在是十月份的最后一个星期六的晚上六点。今天夜里，夏令时将结束。有人说：“明天的同一时间天已经黑了。”另有人说：“明天的同一时间还只是五点。”请问，哪位说得对？

如果不仔细想一想，几乎没有人能判断出这两句话哪一句是正确的。然而，这是为什么？这里不涉及矢量分析、微分方程、空间弯曲、不确定关系。这个难处既不是数学的原因也不是物理的原因。我们对此感到困惑的原因是参考系的变换。在 STR 中，我们也必须面对同样的但程度更大的困难。

为了用数学解决一个物理问题，特别是力学问题或电磁学问题，我们必须选择一个参考系。问题总是出现在当参考系发生变换的时候。

著名的孪生子佯谬就是一例。实际上，这一问题的物理原理是简单的。然而，人们却写了大量论文来分析它。在一本写得很漂亮的为初中生阅读的相对论书中，用了 11 页的篇幅来分析孪生子佯谬^[1]。

问题发生的原因是这样的：一开始，人们选择了一个合理的参考系来处理这一佯谬，即选择了不去遥远星系的孪生子为参考系。这样处理起来非常容易。可是，有人后来坚持要用第二个孪生子的参考系来描述。这实际上是不明智的选择，因为这个参考系不是自由漂浮的，它相当于随时间变化的引力场。

在经典物理学中也没有人（也许，除托勒密以外）会去选择这样的参考系。

历史

SRT 基于物理定律和光速不随参考系而变这两个前提。然而，SRT 最早的结论远远超出了参考系变换会带来什么变化的问题。我们今天仍然用光速不随参考系而变作为相对论的开始。这一事实再次表明，相对论的教学内容是一直是固化着的。

不幸的是，这个理论的名称直指参考系的变换。人们早就注意到了，这个名称是不好的。

建议

（狭义）相对论动力学的最重要的方程可以从质量与能量的等同性这一条件出发来简单地推导出来。在这里，无需参考系的变换。

在这种情况下，让我们回顾一下在用数学来描述一个问题时每位物理学家都遵循的法则：

- 一开始就选择一个描述起来最简单的参考系；
- 在计算过程中不要变换参考系。

把相对论这一名称换成泰勒（E. F. Taylor）和惠勒（J. A. Wheeler）所倡导的名称“时空物理学”（Spacetime Physics）。

[1] *G. Beyvers und E. Krusch: Kleines 1×1 der Relativitätstheorie. Books on Demand GmbH, Norderstedt, 2007, S. 67-77.*

[2] E. F. Taylor and J. A. Wheeler: *Spacetime Physics*. W. H. Freeman & Co. Ltd. (1992)

F. Herrmann

6.9 质量、静质量、不变质量、相对论质量、能量、静能量和内能

主题

四维动量的闵可夫斯基模方 (Minkowski norm) 在不同参考系中是一个不变量。因此, 尤其是粒子物理学家们, 把它叫做“不变质量” (invariant mass), 或直接叫做“质量”。在别的地方, 它又被叫做“静质量” (rest mass), 或在以能量为单位的地方被叫做“静能量” (rest energy)。有时, 它又被叫做“内能” (internal energy)。另外, 在物理学中人们不仅把质量理解为其不变部分, 也把它理解为总质量。总质量随速度的变化而变化, 因此它又被叫做“相对论质量” (relativistic mass)。当它用能量单位度量时, 人们直接把它叫做“能量”。

缺点

有些物理量 (确切地说, 物理量的名称) 会给我们带来麻烦: 它们的意义会随着时间的推移而发生变化, 或者不同的人对它们有不同的理解。有些物理量的这种情况长期来或一直来存在着。例如, “力” 和 “热” 这两个名称就一直存在这种情况。对于质量来说, 它的问题是最近发生的。长期来 (大约 200 年当中) 它一直是一个比较好的物理量。质量的麻烦是相对论引起的。这个问题是简单的, 但带来的麻烦是大的。

下面我们来它的情况。以下是两个著名的方程:

$$E^2 = E_0^2 + c^2 p^2,$$

$$E = mc^2.$$

问题是, 我们给 m 、 E 和 E_0 这三个量取什么名称。

事实上, 自从发现了质量和能量的同一性后, 质量和能量这两个名称中有一个是多余的。但是, 由于上述原因实际中反而产生了几个新的名称。

历史

这个问题源自相对论。一方面, 相对论告诉人们质量和能量是相同的物理量, 能量具有与质量相同的性质, 即引力质量和惯性质量。

另一方面, 这个新理论的特征是, 它用四维矢量和洛伦兹不变模方来描述物理世界。洛伦兹不变量给我们带来了方便。它们包含了粒子或过程的本质, 包含了与参考选择无关的性质。由于质量在几个世纪中一直被用来描述粒子的特性, 它代表了粒子本体最本质的部分, 它独立于参考系, 因此人们总是希望这个名称在将来也能发挥现在同样的作用。这

样，这个名称尤其被粒子物理学家们用于四维矢量的洛伦兹不变模方（它当初被叫做静质量）。

我们可以看出，下面两个对质量这一名称的要求是有冲突的：

- 质量作为度量物体或粒子的惯性的名称（它在一个参考系中可能会很大，在另一个参考系中可能会很小）；

- 质量作为描述粒子与参考系无关的性质的名称。

因此，所造成的混乱局面是事先就设置好了的。

把“质量”这个词用于度量惯性的人需要对在质心参考系的质量值取一个新的名称。显然，“静质量”和“静能量”是候选名称。然而，对“静”这个字不要考虑得太严格。它仅仅意味着质心是静止的。除此之外，系统所含的就是非静止的那部分质量了。

把“质量”这个词用来表示洛伦兹不变量的人需要发明测量惯性的新名词。这个新名词叫做“相对论质量”。由于担心有人可能不知道 m_0 所表示的意思，他们就小心地把它叫做“不变质量”。

建议

我们不敢向粒子物理学家们提出建议。然而，我们向中学物理教师建议，把质量作为描述物体惯性和引力（质量）的物理量来引入。这个概念容易被理解。在后来介绍相对论时，学生们会学到质量和能量是同一个物理量；他们会知道，当给物体加热时时，在将弹簧拉长时，在给电容器充电时，它们的引力质量和惯性质量会增大。理所当然地，我们仍象以前一样把这个量叫做“质量”。因此，我们没有必要改变我们关于质量的概念。再说一次，质量度量的是引力（质量）和惯性。

我们可以把 E_0 和 m_0 叫做“静止能量”和“静止质量”，即使除了质心以外没有物体静止。“内能”这个名称也许更合适。

Friedrich Herrmann

6.10 GPS 校正和 GTR

主题

在 GPS 卫星中，需要校正的钟表相对论偏差有两种：一种是由于卫星的速度而引起的“时间膨胀”，另一种是由于卫星（与地球上的钟表所在处相比）处在较强的引力势中。第一种效应是狭义相对论效应（以下简称 STR 效应）。对第二种效应，通常仅仅用广义相对论（GTR）来解释。有时，人们会说卫星上的钟表由于弱的引力场而走快。

缺点

GTR 的效应引发了两个问题。

1. 它与场强无关，但仅仅由势决定。它出现在近似的匀强场中，即出现在场强与高度无关的场中。

2. 把这效应说成是 GTR 效应是粗笨的。当然，我们可以讨论那些效应属于 GTR 效应。引力质量等效于惯性质量这一事实是关于 GTR 的？一旦我们将参考系变换到加速参考系，我们就要运用 GTR？根本不需要。为了方便，我们可以将 GTR 和非 GTR 的边界定义为：如果现象或效应可用闵可夫斯基空间（Minkowski space）来描述，那么它就不是 GTR 效应。

如果我们采用这个定义作为判据，那么上面所说的在不同高度的两只钟表本身的时间差不是 GTR 效应。在匀强场中也可观察到这种效应，其黎曼张量为零。换句话说，这个场可以通过在自由落体参考系中的情境描述加以转换。

我们来分析著名的孪生子（A 和 B）佯谬。其中 A 生活在高层建筑的顶层，B 生活在底层。他们在中间层相遇，并校正了各自的钟表。分别生活在顶层和底层一段时间后，他们又相遇了，比较了一下各自钟表的读数，发现 A 的钟表的读数比 B 的要大。在自由落体参考系中将大楼和孪生子一起来考虑，这个时间差是容易得到解释的。假定在第一只钟表校正器的时空点第三个人 C 跳回到 A 和 B 的第二次相遇时的时空点。当 C 自由下落时，A 和 B 分开，再加速回来。对于 A 和 B 的两个事件之间的时间差可以由 STR 来确定。这个效应与经典孪生子佯谬的效应相同。在经典孪生子佯谬中，孪生子在不同的世界线（world line）从一个时空点运动到另一个时空点。

历史

主张这个效应取决于不同的场强的人也许会认为，一个钟表所显示的读数比另一个钟表所显示的读数大这一事实必定有局域的原因；因此，A 和 B 所在的两个不同地方必定有不同之处。然而，这种说法暴露出他们对时空概念还没有理解。

认为这是 GTR 效应的人也许持这样的观点：只要当引力场一出现，STR 就不再成立了。场只能用加速参考系来转换。也许人们有这样一种信念：加速度不属于 STR。

建议

对上述两种效应都在 STR 框架中来分析。

F. Herrmann

6.11 时空中的运动

主题

“测地线假设 (Geodesic Hypothesis): 小的“自由落体”沿测地线运动.....”

“.....当克里卡廖夫 (Krikalev) 以每小时 17000 英里的速度登上和平号空间站时, 对他来说在那里的时间流逝速率与地球上的不一样。”

“由于恒星、行星或人的质量, 在它们周围的时空是弯曲的, 在它们附近的物体必定沿靠近它们的曲线轨道运动。在球面上物体不可能沿直线运动, 同样, 在弯曲的时空 (spacetime) 中物体也不可能沿直线运动.....”

缺点

在三维空间中描述这个世界时, 时间仅仅是一个参数, 我们可以依次排列系统的不同状态。然而, 在时空中情况就不一样了, 空间和时间被看作为一个整体。然而, 在时空中我们的表达方式应该具有相同的效果。在日常语言中, 我们将空间和时间分开, 这一直是描述物理现象的基础。我们在经典物理学中也是这样来描述的。这种描述被坚实地固定了下来。我们总是说“事件在**发生**”、“物体在**运动**”、“前一事件是后一事件发生的**原因**”。

严格地说, 上述所有这些表述在时空中不再有效。当我们用日常语言来描述时空中的过程时, 我们要防止引起混乱。

我们上面所引用的几段话从不同的角度反映了这种情况。我们来逐个进行讨论。

1. 在经典物理学中和在我们所感知的这个世界中, 运动的物体是有轨迹的。轨迹是空间中的曲线。当我们说物体在**运动**时, 我们考虑了第四个维度, 即时间。物体不可能在时空中运动。当有人说物体在世界线 (world-line) 上运动时, 他的思维其实又回到了三维轨道。在时空中, 运动的概念是没有意义的; 同样, 流的概念也是无意义的 (流的概念是我们通常所想象的物质的集体运动, 或把物理量想象为物质后的物理量的集体运动。)

2. 在物理学中, 变化率指的是一段时间内的情况。因此, 电荷的变化率是 $\Delta Q/\Delta t$ 。在我们所引用的第二段话中提到了时间本身的变化率。然而, 在空间站中的这一变化率是什么, 在地球上它又是什么? 对此我们可以做的只能是, 将固有时间间隔 (proper time interval) 除以坐标时间间隔 (coordinate time interval)。然而, 这是否意味着对于克里卡廖夫来说在高速飞行的空间站比在地球上时间流逝得更快?

在日常语言中, 我们经常说“时间飞逝得快”或“时间有快慢”。然而, 这不是物理学的语言, 而是心理学的语言。

3. 在我们所引用的第三段话中，我们又一次遇到了“通过时空的运动”这样的说法（见我们所引用的第一段话）。

另外，作者还认为物体不可能在弯曲的时空中沿直线运动。然而，直线在这里是什么意思？测地线是直的！让我们来观察两条相互靠近的平行线。当我们观察到它们之间的距离在增大或减小时，其原因有两个：这两条线是曲线，或空间是弯曲的。在一个球表面上的大圆可以认为是在一个弯曲空间上的直线。（当然，线和空间可能都是弯曲的。这时，它们的弯曲效应有可能相互抵消。有一个例子是，地球上的纬度圆：尽管两个圆都是曲线，但它们之间的距离在各处是相等的。）

历史

我们所讨论的理论摧毁了我们描述这个世界的最基本范畴。我们不能因此去责备那些提出这一新的理论的科学家们，指责他们在语言上所产生的矛盾。将他们的理论改造为适合于初学者的形式，这不是他们的职责。在我们看来，教师们和媒体宣传员们并不真正知道这个问题。

建议

能用数学语言很好地表达的地方，日常语言就会失效。

看来，我们只能小心地表达了。这意味着：

1. 不要说“物体 K 在世界线 AB 上运动”，而要改为“AB 是物体 K 的世界线”。
2. 对于克里卡廖夫来说，相比之下它所在的那只钟的读数比他在地球上的同事所在的那只钟的读数要大。或者换句话说，在同一位置测量固有时间的钟的指针比测量坐标时间的钟的指针运动得更快。
3. 把（两维或三维空间中的）测地线叫做直线。这是因为，在它所在的空间中它并不是弯曲的。

F. Herrmann

6.12 同时性的相对性

主题

在有狭义相对论的中学物理教材中，除了长度收缩和时间膨胀这两个主题外，同时性的相对性也是一个重要的主题。通常，这一要点被表达为“同时性是相对的”。

缺点

我们认为，与狭义相结论（STR）中另外两个命题相比，这个主题被给予了太多的关注。这确实是一个很复杂的问题，但也体现不出与此相关的其他任何重要性。

在两个不同地方发生的两个事件是否具有同时性的问题源自我们这样一种信念，即有一种独立于位置和速度的时间，这个参数允许我们将这个世界作为一个整体的状态清楚地排列起来。为了回答这个问题，我们需要一个操作步骤来确定在不同位置的两个事件是否具有同时性。这个操作步骤是这样来定的：在不同位置放有同步的钟。

退一步讲，让我们来思考另一个相似的问题：同地性（equal-positionness）也具有相对性？用更通俗的话来说：有两个事件，对于某人来说发生在同一地点或位置，对于另一个人来说也发生在同一地点？在这里，“某人”和“另一个人”的意思是“在一个参考系中”和“在另一个参考系中”。对这个问题的回答是：“不”。这个道理是如此的明显，以至于没有人会问起这个问题。

同时性的相对性实际上也并不重要。这一事实我们可以从广义相对论（GTR）的角度看出来。在 GTR 中，这个问题象手指间的沙马上消失了。一般来说，要同步两个相同的钟是不可能的。因此，同时性这一概念就失去了它的意义，除非我们赋予同步这个词以新的含义。例如，在 GPS 系统中，在卫星中我们安装一只钟。这只钟如果安装在地球表面上时，它比旁边的正常钟要慢。如果将它安装在卫星上，这钟将与地球上的钟“同步”：两只钟每次相遇时，它们的读数总是相同的。然而，请注意：这种同步不同于在 STR 背景下所说的同步。

跟长度收缩和时间膨胀一样，同时性的相对性与参考系的变换有关。无论在相对论中还是在经典物理学中，无论对于学生还是对于有经验的物理学家，参考系的变换经常会引起混淆^[1]。在变换参考系时，我们必须记住：变化的不是自然界，不是这个真实的世界，而仅仅是我们描述这个世界的数学方式。有人也许会稍微夸张一点地说：由参考系的变换而引起的物理量的值的变化以及由此引起的对现象的解释方式的变化是不适当的描述方法所导致的结果。然而，遗憾的是，我们别无其他选择。

然而，为什么同时性的相对性显示不出其重要性呢？这是因为，在一个参考系中是同

时的两个事件，在另一个参考系中是不同时的，这两者之间的关系不是随便地相联系的。这样，时间序列的倒置不可能具有任何重要性。

历史

爱因斯坦在他的著名论文“论运动物体的电动力学”^[2]中用三个多页面的篇幅处理了时间同时性这一问题。这是对爱因斯坦思想感兴趣的读者一开始会遇到的问题。

爱因斯坦在写这个文章时还不能猜测到这个概念会被他本身在几年后所提出的理论带来奇怪的命运。

1905 年看来是讨论一个人类非常期待的问题的合理时间。这个问题是，两个在不同地方发生的事件是否具有独立于参考系的的同时性。从 GTR 的角度来看，这是一个绝望的尝试，这个尝试保存了我们对这个世界的直觉上的误解。

建议

这个建议让我们获得了时间：至少在中学里直接删除这个内容。在相对论中，还有另外更重要的时空背景下的结论和表述。然而，这些结论通常被表述得不好。

参考文献

[1] F. Herrmann: Altlasten der Physik, Relativitätstheorie und Bezugssystemwechsel

[2] A. Einstein: Zur Elektrodynamik bewegter Körper, Annalen der Physik und Chemie, Jg. 17, 1905, S. 891-921.

F. Herrmann

6.13 “相对论”这一名称

主题

爱因斯坦的两个伟大的理论被叫作相对论：狭义相对论和广义相对论（STR 和 GTR）。它们都基于相对性原理：自然界的定律对所有观察者来说都具有相同的结构。在 STR 中，这个原理仅仅被应用于相互做匀速直线运动的参考系中。在 GTR 中，它被推广到做加速运动的参考系中。

缺点

相对论这一名称告诉我们，在爱因斯坦的理论中，参考系的变换起着特殊的作用。这个名称也给我们这样的印象，参考系的变换是这一理论的主题。这种观点会反映到教学中，特别在 STR 教学中。在还没有读到相对论的有趣的内容前，人们已经遇到了复杂的相互运动的参考系问题。结果是，（大学和中学的）学生失去了对这一学科的兴趣。

想象一下，如果有人想在不超过 2 分钟的时间内听你讲述 STR，你会怎么跟他/她讲？我认为告诉他/她们相对论原理的应用是不合适的。这里有几个较好的建议：

- 把空间和时间合并为同一个性质。
- 用四元矢量（而不是三元矢量）来描述世界。
- 把能量和质量当作同一物理量。
- 把光速叫作极限速度。

有人可能会说，一个理论的名称对学生对这一理论的理解不会有影响。我不同意这个观点。根据我的经验，教学的成功很大程度上取决于语言，特别取决于所使用的术语。有句古话，名称已经诉说了一切。如果教师根据名称认为，相对论的主要目的是描述参考系的变化，那么他/她就会组织相应的教学结构来进行教学。

那些知道这些理论的人也许不理解这些方面。然而，我所担忧的不是专业人员，而是那些认为“相对论”物理学仅仅是许多别的教育专题之一的人。他们要记住的是在参考系变换时长度和时间的微妙变化。（人们至少知道质能方程 $E=mc^2$ ，因为这个公式出现在涂鸦、书名和邮票上。）实际上，这一理论的实质已经丢失了。

历史

人们很早就杜撰这个名称了。在 1906 年，普朗克第一个将“洛仑兹-爱因斯坦理论”这一名称改成为“相对的理论”。不久以后，它又被改为“相对论”。爱因斯坦在 1907 年也用了这个名称。

假如情况稍微有点不一样：STR 产生的起点不一样，例如，发现能量描述的是惯性质

量和引力质量所描述的性质的实验是它的起点，即发现能量和质量是相同的物理量的实验是它的起点。如果这样的话，你应该如何称呼这个理论？也许你应该叫它“质能相同理论”吧？当然，你就会建立起完全不同的教学传统。

建议

对于相应的章节，不要给出相对论或相对论物理学这些名称，而要象惠勒（Wheeler）一样把它取名为时空物理学。

或者，如果有人不想从运动学而想从动力学开始教这个专题，那么它的名称最好取为：**极限速度，或质能相同性。**

F. Herrmann

第七章 振动与波

7. 1 共振频率和固有频率

主题:

当我们讨论受迫振动时，我们总强调这样一个事实：共振频率不是刚好等于振子的固有频率，而是近似等于振子的固有频率。

缺点:

我们如何来理解这句话的意思？显然，这句话意味着大自然无法使物体按合理的方式来振动。老师们先告诉学生，当振子与驱动力同步时就会发生共振；后来又告诉学生振子的共振频率和固有频率不是刚好相同的。大自然看上去在破坏游戏规则。我们是否可以说，刚开始提出来的观点是错的？看来矛盾出来了。

这种不一致很容易被消除。共振意味着振子吸收和消耗的能量随策动力的频率变化而达到了最大值。因为，

$$P = \mathbf{v} \cdot \mathbf{F}_0,$$

这个最大值刚好出现在速度达到最大值时频率坐标轴的相应位置上。（我们假定，振子由振幅恒为 F_0 的力来驱动。对于由振幅恒定的速度来驱动的振子，可作同样的分析。）这样，与速度振幅的最大值相对应的频率就是固有频率。结果，与固有频率所对应的位移振幅就不可能是最大值。与加速度振幅的最大值相对应的频率与固有频率也不相等。

根据

$$x(t) = x_0(\omega) \cdot \sin(\omega t),$$

我们得到

$$\dot{x}(t) = \omega \cdot x_0(\omega) \cdot \cos(\omega t) = v_0(\omega) \cdot \cos(\omega t)$$

和

$$\ddot{x}(t) = -\omega^2 \cdot x_0(\omega) \cdot \sin(\omega t) = a_0(\omega) \cdot \sin(\omega t).$$

如果在共振角频率 ω_{res} 下的速度振幅 $v_0(\omega) = \omega \cdot x_0(\omega)$ 为最大值，则位移振幅 $x_0(\omega)$ 和加速度振幅 $a_0(\omega) = -\omega^2 \cdot x_0(\omega)$ 都不可能在这个频率下有最大值。因此，固有频率与“共振频率”之差的差异是由于相应的物理量选择不当引起的。显然，有许多其他物理量与频率存在函数关系，它们的最大值出现在频率坐标轴的不同位置。根据这样的分析，我们不能根据所选择的物理量的最大值所对应的频率不同而得出共振发生在不同频率这样的结论。

历史：

也许我们有这样一种倾向，即我们总是把能用眼睛看到的事物放在最显著的位置。我们已经习惯于把力学问题看成是已知物体的运动轨迹（即位移与时间的函数关系）的问题。然而，经过很长的时间反复讨论，我们才不得不承认，动量和能量（而不是运动学中的那些量）才是力学中最基本的物理量。

建议：

不要用位移振幅这个看得见的物理量来定义共振。共振发生在振子吸收的能量达到最大值的时候。

Friedrich Herrmann

7. 2 受迫振动和相位差

主题：

在学习受迫机械振动时，学生们了解到在共振时驱动装置和振动器之间存在着 $\pi/2$ 的相位差。这个结论常常作为一个重要的句子表述出来，如：

“在共振时，存在着相位差 $\Delta\varphi = \pi/2$ 。”

“在共振时，单摆的振动迟后了四分之一周期。”

缺点：

1. 相位差总是指两个物理量与时间的正弦变化关系。对于受迫简谐振动，我们通常没有提及相应的物理量。然而，由于我们一般总是关心位置坐标，我们就不会去想到其他物理量之间的相位差。但是，我们可能会去研究其他物理量的相位差。其中一个物理量也许是振动物体的速度、加速度或动量，或者是作用在振动物体上的力。第二个物理量也许是驱动装置的位置、速度或加速度。我们可以选择任何两个物理量，来考虑相应的相位差。这些相位差中的大多数是很难解释的。对于上面所引用的两句话中所提及的相位差也是很难解释的。我们到底能从“驱动装置和振动器的位置坐标之间的相位差是 $\pi/2$ ”这句话中学到什么？

2. 一个受迫的弹簧振子有以下几部分组成：运动物体、弹簧和驱动装置。增加第四个元件（即阻尼器，相当于电路中的电阻器）后，其振动就是阻尼振动。这四个元件可以有几种不同的组合。机械“电路”可以有几种不同的布局（相应的电路也是这样）。为了清楚地描述振子的运动，我们必须同时考虑能源（即驱动装置）的性质。仅仅考虑驱动装置的正弦式运动是不够的。我们还必须考虑当位置的频率、速度的频率、力的频率或能流的频率发生变化时其振幅保持不变。共振曲线的形状取决于这种选择。在以上这些可能的组合中，有两种组合所出现的问题特别清楚：

— 所有这四种元件并联连接，驱动装置的力的振幅保持不变（图 7-2-1）；

— 所有这四种元件串联连接，驱动装置的速度振幅保持不变（图 7-2-2）。

（在电学中也有两种基本的振荡电路。当电路元件并联连接时，电流的振幅就确定了。当电路元件串联连接时，电源的电压保持不变。）

现在我们可以看出，上面所引用的表述对这两种基本的“电路”都不成立，但对串并联混合的“电路”成立。因而，用这种表述来解释相位差是很困难的。相反，对于两种基本“电路”这种解释就变得简单了。我们来讨论图 7-2-1 所示的并联“电路”。

共振意味着从驱动装置（driving mechanism，下标为 D）流向振动器的能流的时间平均值达到最大。能流的时间平均值公式为：

$$\bar{P} = \overline{v_D F_D}.$$

因为，

$$v_D = \hat{v}_D \sin(\omega t),$$

$$F_D = \hat{F}_D \sin(\omega t - \phi),$$

所以，

$$\bar{P} = \frac{\hat{v}_D \hat{F}_D}{2} \cos \phi.$$

在上面的表达式中， \hat{v}_D 、 \hat{F}_D 和 $\cos \phi$ 这三个因子原则上与频率有关。对于如图 7-2-1 所示的“并联振子”，力振幅 \hat{F}_D 保持不变，它与频率无关。另外两个因子在共振频率时都有最大值。因此，对于共振我们有 $\cos \phi = 1$ ，或 $\phi = 0$ 。这意味着驱动装置的速度和作用在振子上的力是“同相位的”。这一表述是似是而非的。为了最有效地驱动振子，当振子运动得最快时我们必须用最大的力去推动它或拉动它。

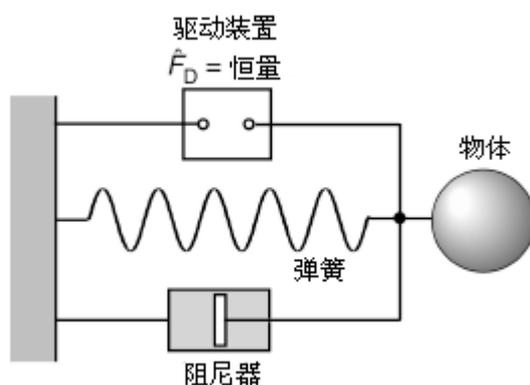


图 7-2-1 并联振子具有恒定的驱动力振幅。

对于“串联振子”（如图 7-2-2），速度振幅与频率无关。力振幅和 $\cos \phi$ 在共振频率时都有最大值。这样，我们又得到 $\phi = 0$ 。



图 7-2-2 串联振子具有恒定的速度振幅。

在力学中我们考虑得最多的振子布局如图 7-2-3 所示。可以证明，这个振子在数学上与并联振子是等效的。对于力，我们可以把它写为 $D\hat{x}_D \sin(\omega t)$ 。在共振时，这个力与振子的速度是同相位的。这一事实可以通过与证明并联振子的零相位差相同的方法来加以证明。由于振子的位置和速度之间的相位差是 $\pi/2$ ，所以就出现了上面所引用的那种表述。

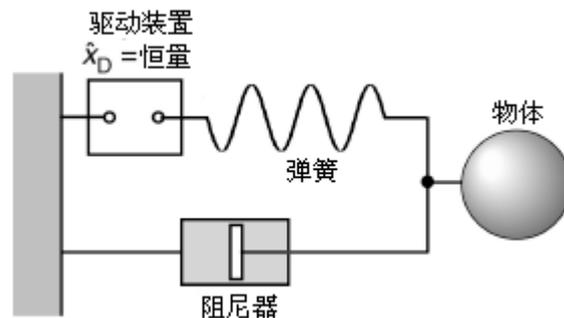


图 7-2-3 混联振子

历史：

请参见我们的另一篇文章^[1]。把驱动装置和振子的位置振幅放到中心地位，这是力学的一个传统。在这种传统方法下，我们总认为当把位置-时间关系确定时（即当我们把眼睛所看到的東西计算出来时）问题就解决了。然而，如果我们把动量、能量以及相应的流放到中心地位，我们对力学就会有更好的理解。

建议：

只有当我们能解释相位差与频率的函数关系时，讨论这一函数才有意义。很容易解释力和速度之间的相位差。它们的乘积是耗散能的流。在共振频率时，零相位差导致这个乘

积达到最大值。

[1] Historical burdens on physics: 50 Resonant frequency and natural frequency

Friedrich Herrmann and Holger Hauptmann

7.3 惠更斯原理

主题:

在当代物理教科书中，惠更斯原理不仅用来解释光的单缝衍射、双缝衍射和光栅衍射，也用来解释平面波的反射和折射。

缺点:

1. 惠更斯原理（又叫惠更斯-菲涅耳原理）是确定两个或更多个波的干涉图样的简单的数学工具。然而，在最简单同时又是最重要的干涉实验中并不需要特殊的原理。即使没有惠更斯原理我们也能推断出这样的现象：当一个平面波遇到一个（比波长要小的）小孔或一个障碍物时，就会出现圆波或球面波。对于两个或更多个小孔的情况，也不需要新的原理。然而，对于出现圆波的情况，也没有理由要给出“元波”这个特别的名称。这个原理只有当缝比波长大时才有用。

2. 在描述反射和折射时惠更斯原理也是不需要的，这是因为它用圆波的行为来解释平面波的行为。我们可以用许多不同的方法来分解一个函数：把它分解为几个简谐函数、几个球谐函数、几个贝塞耳函数，等等。这样分解以后，我们有理由来选择一组基本的函数以考虑问题的对称性。显然，在将平面波分解为“元波”（即圆波）时，情况并不如此。平面波已经具有一个波所有的最高的对称性。用平面波的概念容易理解反射和折射。用球面波或圆波来解释意味着将简单问题复杂化。

历史:

这个原理出现在惠更斯在 1690 年出版的著作《关于光的专题论文》(Traité de la Lumière) 一书。这比菲涅耳和杨提出波动光学的时间还要早 100 年，比法拉第和麦克斯韦提出电动力学理论还要早 150 年。在惠更斯时代，人们已经知道反射和折射定律，也知道光具有确定的速度，也知道光可以分解为各种不同颜色的光。为什么这个原理在当时显得这么重要？为什么它的重要性一直保持到现在？

在惠更斯时代，光的另一个理论已经出现：先后由笛卡儿和牛顿提出的微粒说。针对这一理论，惠更斯提出了光的波动说。在当时判断一个理论的好坏主要看它能否解释折射和反射。

解释意味着（今天仍然意味着）把一个现象简化为另一个基本的现象，因而这个简化的现象不需要再解释。然而，在菲涅耳时代，折射和反射不需要用元波来解释。当麦克斯

韦最后发现光是电磁波并用数学公式描述了电磁波时，惠更斯的元波明显地变成了一种障碍，甚至对于这种复杂的电磁横波它是否有效也不清楚了。后来基尔霍夫成功地证明了惠更斯原理和电磁波理论的一致性。

惠更斯原理今天在中学和大学中所扮演的角色仍保持着原来的重要性。这正像楞次定律或开普勒定律仍保持着一种较为普遍的定律一样。确实，这个原理在近似地确定干涉图样方面仍然是一个有用的方法，然而，我们应该把它当作物理学的一个工具，而不能把它叫做原理。

建议：

为了解释单缝衍射、双缝干涉图样和光栅干涉图样，我们不需要特殊的原理。在大学里，如果我们处理大缝的衍射，我们可以利用惠更斯原理，但还是需要采用谨慎的态度。

Friedrich Herrmann

7. 4 光的双缝衍射和干涉

主题：

单缝和双缝实验在物理教学中起着很重要的作用。衍射图样被广泛地讨论。双缝实验被用来证明光的波动性。后来，它被用来演示所谓的量子效应。

缺点：

1. 在教材中，我们详细地讨论单缝和双缝中光的衍射，这已经超出了普通教育的标准。托马斯·杨做的第一个双缝实验扮演着“实验十字”(experimentum crucis) (译者注：拉丁语，意为证明理论是否正确的实验)的角色。今天我们知道光的波动性已经有许多其他证明，这样使得这个双缝实验失去了它当时的重要性。并且我们知道，实验中相应的光仅仅是电磁波谱中的很小一部分。对于其他部分的电磁辐射，我们很少关心对它们的波动性的证明。我们直接把它们认定为是波。理由很充分，因为如果不是波的话，就不会出现相应的现象。

2. 单缝和双缝衍射实验是很复杂的。衍射和干涉这两个现象混杂在这个实验中，并且它们总是没有被清楚地区分开。有时人们甚至说这两者没有什么区别。

3. 如果我们要求尚无偏见的学生设计一个两束光波的干涉实验，他们就一定不会想到双缝实验。他们最明显的想法是运用两个光源。只有当学生们发现这样的实验是不会成功的，甚至用了激光也不成功时，他们才会明白确实需要更精细的实验设计。一个更精细的实验会给学生产生这样一种印象：“这原来就是我所想到过的”。双缝实验当然不属于这种实验。

4. 在量子力学中，双缝实验是各种矛盾集中的地方。光被认为是由光子这种很小的东西组成的。这些光子要从光源到达检测器，必须经过一个缝。尽管有过很深的教训，但把光看成是独立的小粒子的观念还是根深蒂固的。为了强调光子的独特性质，我们现在通常把它们叫做量子，而不叫做粒子。但是，即使是这样，当我们提及它们时，我们的语气中还是保留着原来那种小粒子的意思。实际上，只要提起光子通过缝的问题，人们就已经自然地把光当作小粒子了。同时，人们还要提到这些粒子的大小：它们的横向尺寸至少要小于缝的宽度。

历史：

1. 在杨氏实验和菲涅耳的理论出现之前，对光的波动性和粒子性已经有很好的证据了。

当时人们自然地认为，这两者只有一个是“正确的”：光要么是波，要么是粒子。杨氏实验似乎已经解决了这个问题。几十年后，人们又找到了许多光的波动性的证据，当然不仅仅是杨氏实验。杨氏实验 70 年后出现了麦克斯韦的理论。这个理论使人们认识到了光的波动性质，人们至少认为它确实是波。然而，在可见光的两端人们找到了更多的这种性质的波。尽管关于光的波动性有了这些新的发现，在教学中我们仍然把杨氏实验当作一个重要的实验来对待，似乎它是唯一能证明光的波动性的实验。

2. 量子物理学把双缝实验提高到了一个新的高度。量子力学使我们感到我们原来高兴得太早了。“光的真实本质”变得更复杂了。

3. 在中学期末考试和大学入学考试中，传统上一直从来没有把单缝和双缝中波的衍射问题包括进去。

建议：

1. 当我们用实验来证明光波的相干性时，首先要彻底讨论一下为什么这个实验不能用两束激光来做。

2. 一开始就运用光栅来做实验，而不是用双缝和单缝来做实验。因为，用光栅来做实验，其结果更令人信服。

3. 在某些方面，迈克耳孙干涉仪更合适。其优点是：在教学中我们不需要正弦函数，也不需要衍射现象。

4. 讨论衍射效果比光更明显的辐射：微波或声波。这样就出现了一个有意思的问题：不是为什么光没有衍射效应，而是相反，为什么可见光的衍射效应如此地小。

Friedrich Herrmann

7.5 波的相干性

主题：

在教科书中，对相干性这一概念的解释有各种不同的方式。下面几种解释来自于几种不同的教科书：

(1) “波列相互干涉叫做波的相干性，波列不相互干涉叫做波的非相干性。”

(2) “当两个波发生器能产生稳定的干涉图样时，这两列波是相干的。这两列波必须具有相同的频率和恒定的相位差。”

(3) “对于一个发光体（如炽热的灯丝）来说，从各个不同的点射到眼睛的波是不相干的，即它们具有完全不同的相位和偏振方向。”

(4) “从光源的同一个点发出的光分开后经过不同的路径传播，这样的光才会相干。”

(5) “由于从一个高温物体自发地发射的光都是从相互独立的原子中辐射出来的，我们可以肯定，两个不同的光源发出的光不可能刚好具有相同的振动，即它们不可能发出相干波列。”

(6) “若一个缝的宽度 d 和它的光锥体孔径角 2α 满足

$$d \cdot \sin\alpha < \lambda/2,$$

则从这个缝发出来的光是相干光。”

缺点：

无论是中学生还是大学生，他们对于相干性的概念存在着一定的问题。看了上面所引用的关于相干性的定义，我们对此就不足为奇了。在这些定义中，有些是很难理解的。如果让这些定义统一起来，就更难了。

在下面的讨论中，所标的数字表示我们上面所引用的相干性定义的序号。

相干性指的是什么？根据定义（1）、（3）和（5），它指两个“波列”之间的关系。然而，“波列”是什么？是整个波？还是部分波？是哪一部分的波？

根据定义（2），相干性表示两个波发生器之间的关系。这一定义告诉我们，这些波的发生器的振动频率必须是相同的，并有恒定的相位差。这是否意味着，存在着这样的发生器，它们的振动频率相同但相位不恒定？

定义（6）单指光的相干性。

现在的问题是，如果这些定义是对同一事实的不同表述，那么它们之间是否存在相互矛盾的地方呢？

定义(3)告诉我们, 只有从一个点发出的光才是相干的。定义(4)也是这个意思。然而, 两个不同的点是什么意思? 是否存在一个最大的两点间的距离? 在这一点上, 定义(5)说得更清楚: 来自不同原子的光不可能相干。然而, 我们都知道, 我们可以运用迈克耳孙测星干涉仪通过来自于遥远恒星的光来确定恒星的直径。在这里, 来自于相距百万公里的光源的光相互发生了干涉。

历史:

(1)至(6)的所有定义都描述了相干波的产生和相干性的演示, 但没有一个定义告诉我们相干波的本质是什么。然而, 如果我们仅仅知道波源的性质, 我们如何来判断未知波源或不确定波源的波的相干性? 比如, 海洋中的水波就是这样的波。

这里, 我们看到了这样一种倾向, 即人们总是喜欢描述一个现象的产生过程或对这个现象的观察过程而不是这个现象本身。通常, 这些过程总是比实际的现象要复杂。当我们要知道自行车的工作原理时, 我们并不需要知道在自行车工厂里的生产过程。为了理解声波, 我们并不需要知道风琴管的工作原理或人的听觉机制。

另一个导致不一致的原因是, 人们总喜欢把现象理解为仅仅是几个质点的行为。相干性是完全可以用经典波动理论来描述的现象。如果我们把它当作量子现象来看待的话, 我们很容易陷入各种模型和解释的丛林之中。

建议:

让我们从相干性这一概念的两个一般的特征开始讨论:

(1)相干性可强可弱。它是光的一种性质。我们知道, 光具有光源的一些特性。但这并不意味着, 相干性和不相干性是光源的性质。

(2)相干性是光的局域性质。这就意味着, 某一光在空间的分布使得其在某一地方比在另一地方有更强的相干性。因此, 从一恒星发出的光在空间的相干性是这样的: 在其表面最弱, 在地球(即在离恒星很远的地方)最强。

当我们说相干性是一种局域性质时, 我们并不是说相干性所在处指的是在数学意义上的点。(从这个意义上来说, 没有一个物理量是局域的。)

相干性可以用各种不同的方式来解释和定义。我们可以用各种描述光的理论来解释光的相干性。这些理论包括: 几何光学、经典波动光学、光的热力学、量子电动力学。因为我们的目的是向初学者解释这一概念, 所以我们将选择最简单的理论, 即几何光学。以后, 我们可以把这种解释转换为波动光学的解释。我们建议, 不要在原子尺度上给中学生解释

这一概念。这是大学的课题。

我们把对相干性的讨论局限在定性的层面上。我们来讨论在我们面前一个很小的空间区域中的光。通过这一空间的光是一种什么光？我们来讨论特别简单的四种情况。

第一种情况是这样的，我们站在浓雾中，空间区域有来自各个方向的光。这些光是所有不同颜色的光的混合光。图 7-5-1 用不同的虚线来表示不同颜色的光。

第二种情况是，在黑夜里，我们站在浓雾中，街上有一盏发出单色光的灯。同样，穿过空间区域的光也来自各个方向。如图 7-5-2 所示。

第三种情况是，在黑夜里，没有雾，没有月光，没有星光。在很远的水平距离处有一盏白炽灯。这样，通过空间区域的光都具有相同的方向，但具有不同的颜色。如图 7-5-3 所示。

第四种情况跟第三种情况有点相似，只不过是灯所发出的是单色光（如图 7-5-4 所示）。这样，所有光都具有相同的方向和相同的颜色。

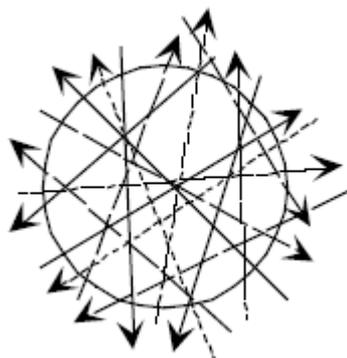


图 7-5-1 所有颜色、所有方向的光。这些光在时间和空间上均不相干。

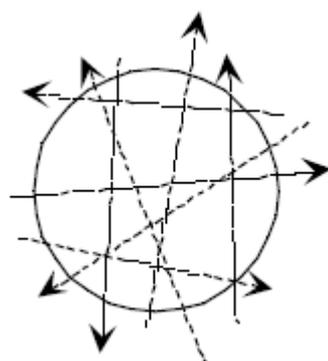


图 7-5-2 单一颜色、所有方向的光。这些光具有时间相干性 (temporally coherence)。

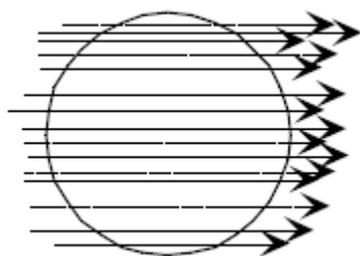


图 7-5-3 单一方向、所有颜色的光。这些光具有空间相干性 (spatially coherence)。

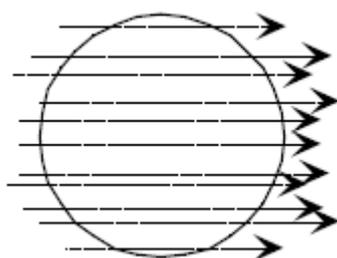


图 7-5-4 单一颜色、单一方向的光。这些光具有时间相干性和空间相干性。

图 7-5-1 中的光是完全不相干的。图 7-5-2 中的光是时间相干的。因此，时间相干光是单色光。图 7-5-3 中的光是空间相干的。因此，空间相干光与散射光刚好相反。图 7-5-4 中的光是时间相干和空间相干的。

这里，我们给出一个类比或叫做譬喻。我们可以将这个譬喻告诉给学生。我们来考虑一箱苹果。这些苹果有各种不同的颜色和大小。我们打算给这些苹果进行分类。我们先根据它们的大小将它们分到 10 只较小的箱子中，每箱苹果的大小都在一个给定的大小范围内。现在，每只箱子中的所有苹果在我们所规定的大小标准下都是相同的。下一步，我们根据颜色的不同将每箱苹果再分到 10 只更小的箱子中。现在我们总共有 100 只小箱子了。每只小箱子中的苹果在我们所规定的大小和颜色标准下都是相同的。

我们还可以给出更深层次上的苹果和光的相似性。显然，只要在最初的那只苹果箱中将那些在大小和颜色上不符合我们要求的苹果选出在外，我们就能获得一箱相同的苹果。将多种颜色和多种大小的苹果转换为单一颜色和单一大小的苹果是不可能的。同样，将不相干的光转换为相干光也是不可能的。否则，熵就会减少；这样，就违背了热力学第二定律。

相反，我们可以种植一开始就能长出相同苹果的树。同样，我们可以制成某种光源，这种光源一开始就能产生相干光。这种光源就是激光。

最后，我们来说一说相干性的波动光学描述。当 \mathbf{k} 矢量（译者注： \mathbf{k} 矢量就是在公式 $p = \hbar k$ 中的波矢）的大小的波散（dispersion）小的时候，光是时间相干的。当 \mathbf{k} 矢量的角波散（angular dispersion）小的时候，光是空间相干的。我们很容易根据对波的观察（例如，观察在湖面上的波。）来确定波的相干性。这种波的局部看上去应该像正弦波。这部分波具有确定的长度和宽度。这个长度是对时间相干性的测量，这个宽度是对空间相干性的测量。

Friedrich Herrmann

7. 6 电磁横波

主题：

学生们一开始学波这一章时，就学到纵波和横波的定义：

“对于横波，载波体的每一部分的位移都与波的传播方向垂直。对于纵波，载波体的每一部分都在波传播方向上来回振动。”

后来，在学电动力学时，学生们学到：

“光可以是偏振的。因此，它是横波，它的 E 场和 B 场在垂直于波的传播方向上振动。”通常，电场强度和磁场强度在空间的分布情况用图 7-6-1 来表示。

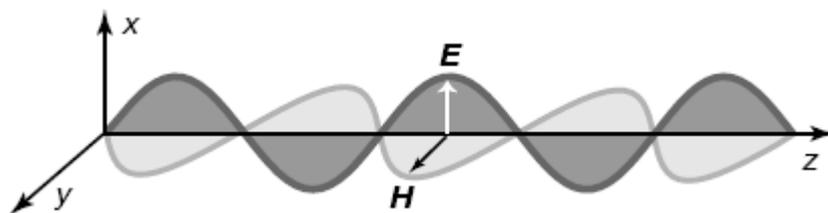


图 7-6-1 一个正弦波的电场强度和磁场强度的“快照”

缺点：

根据学生们所学到的横波和纵波的定义，在横波中载波体在垂直于波传播方向上运动。如果我们严格地按照这个定义，那么电磁波不是横波，因为在这种波中没有东西在运动。当然，有人会说这个定义并没有这么严格，它跟我们通常说“温度或股市价格在变动”一样。

然而，学生们对“运动”是看得很认真的。我们认为，问题部分出在图 1 中（这个图几乎在每一本物理教科书中都能见到）：电场强度和磁场强度的矢量箭头的运动的快照。

容易发现，在大学物理考试中有些地方是无法理解的。当要求学生画出在考试所在的教室中来自于附近无线电发射台的无线电波的场线图时，学生们通常会画出如图 1 所示的图。当我们向他们指出这不是场线图时，学生们会感到很困惑。显然，他们用我们前面所引用的内容那样来解释图 1：运动。对这个图的解释是有点难的，原因首先是这里画了特殊的坐标系，其次是画出了另外两个物理量 E 和 B 。在力学中我们知道，我们经常画处于一般空间中的物体的力矢量图。在我们所讨论的情况中，存在着另一个困难，那就是 E 和

B 的值是逐点变化的，它们的函数关系仅仅适用于一个空间坐标。这样，这个图具有很强的运动（振动）暗示。

历史：

上述缺陷产生的原因是，没有经过认真的反思将力学中的纵波和横波的定义应用于电动力学中。这也许存在着一个历史的原因，即为什么振动隐喻（oscillation metaphor）如此广泛地被应用到电动力学中。在以前，学生们学到：“光是以太横波”。这是力学意义上的横波定义。

建议：

应该用图 7-6-2 来取代图 7-6-1，以此来解释周期波中的场强分布。

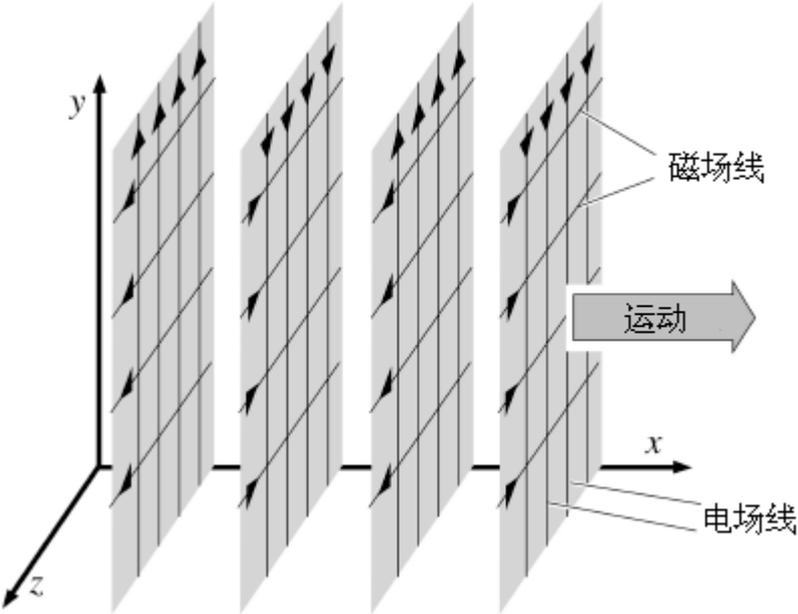


图 7-6-2 周期性电磁波的场线图

Friedrich Herrmann

7. 7 非偏振光

主题：

非偏振光是什么意思？下面引用的内容是对这个问题的回答。

“如果光波的 E 矢量的振动没有优先的方向，这就是非偏振光。如果 E 矢量在某个确定的方向上振动，这就是偏振光。白光一般来说是非偏振光。”

“一般来说，电磁辐射是由许多振动面的方向不同、振动的相位不同的波叠加而成的。”

“自然光通常是非偏振光。它产生于大量原子的原子跃迁。每个原子发射一个光波，其偏振方向在空间是任意分布的。因此，发射光的振动面是不断在变化的。”

有时偏振光用图 7-7-1 所示的曲线来描述。这种曲线可以想象为电场强度（更确切地说是电场强度矢量的箭头）在光传播方向上的位置坐标的快照。我们可以同时在同一位置看到不同的“波”。



图 7-7-1 电磁波中电场强度矢量箭头的“快照”。这个波是非偏振的吗？

缺点：

对偏振电磁波的概念是不难理解的。同样，对偏振器的工作原理也是不难理解的。对非偏振光的理解看来是个较难的问题。在中学物理教科书中，这个问题在某种程度上被忽视了。

有几种不同的光的理论：几何光学、经典电磁学、量子电磁学和热力学。根据不同的理论，对非偏振光的解释是不同的。这里，我们把讨论局限在经典电磁学的范围内。

垂直于光的传播方向的平面上的电场强度矢量随时间变化的情况最好地描述了光的偏振状态。用图示的方法来描述的话，就是在这个面上画出矢量箭头的运动情况。（这里我们假定光线在其横向振动方向上是各向同性的。）

光可以有各种不同的偏振状态。最重要和最常见的偏振状态是线偏振、椭圆偏振（圆偏振是一种特例）和完全非偏振。

对于线偏振光，其矢量箭头做简谐运动。对于椭圆偏振光，其矢量箭头做椭圆运动。我们可以产生出其他许多可能的偏振光，其矢量箭头的运动呈各种形状，具体表现为利萨如图线。对于非偏振光，其矢量箭头的运动没有规则的形状，也没有确定的周期。这种运动的平均速度取决于光的温度，矢量箭头的长度取决于光的强度，运动方向和路径无规则地变化。我们也可以用笛卡儿坐标的分量来描述这种矢量。这时我们可以说，矢量的 x 和 y 分量无规则地变化。对于这两种描述，对光的“无序”状态有两方面的贡献，因而对光线所传递的熵有两方面的贡献。

下面我们来讨论上面所引用的内容：

1. 第一个引用的内容是， \mathbf{E} 矢量在振动，其振动没有一个优先的方向。通常我们知道，振动是一种周期性的运动。然而，对于白光，其电场强度矢量的箭头并没有做周期性的运动，而是无规则的运动。

2. 第二个引用的内容是，热辐射是由一个个波叠加而成的。这个说法有点扯远了。首先，我们必须明确“单独一个波”是什么意思。人们也许会认为它指一个正弦波。这样，“单独一个波”就是光波的简谐分量。如果是这样的话，更合适的说法应该是，热辐射可以被分解为这样的简谐波，正像它可以被分解为许多其他形式的波一样。但是，这里并没有简谐分量的意思。在第三个引用的内容中就是这样说的。

3. “每个原子发射一系列光波，……”由此我们知道，光波不可能是一个纯的正弦波。由于它源自一个原子，它有开始就必有结束。根据许多学生所具有的概念，这样的“光波”是可以单独地被识别的或至少可以被想象的。也许光子是人们熟悉的概念。它的通俗概念是：它是一个小的东西，这个东西像一根被扭成波形一样的线。它即使是光线的一部分，也具有单个性。在一些教科书的插图中强化了光子的这个概念。

4. 物理教科书中通常有一些描述偏振器工作原理的图。有时这些图像图 1 那样。在这个图中，给出了三个“单个的波”。它们有相同的波长和相位。这个图没有表明它们的长度。如果仅考虑所表示的那部分，叠加的结果将是一个线性偏振波。在图中无法看到这样的结论，即波的状态是无序程度（熵）为最大值时的状态。

历史：

看来，这些问题来自好几个原因。

1. 当学生们知道光是横波时，他们也许会认为场强矢量的箭头必定在垂直于波传播方

向的平面内振动。

2. 人们总是认为，光波是由光谱分量构成的，而不是由我们任意分解的分量构成的。光波由光谱分量构成，正像书本由页面构成一样。

3. 对光子的朴素理解。光由这些单独的光子组成，但无线电波并不如此。

4. 不敢用热力学的观点来讨论光。

建议：

白光是普遍存在的光，是完全非相干的光。因此，我们应大胆对这种光的场强分布进行描述，并讨论在这种状态下对无序程度的各种贡献。

不要对光的“本质”进行推测。坚持用电动力学的方法来描述光的偏振和非偏振状态。热力学理论对这个问题的讨论是没有好处的。

在描述非偏振光时，避免使用振动一词。电场强度矢量并没有振动，它在做无序的运动。

Friedrich Herrmann

7.8 音叉和共振箱

主题

“当被敲击过的音叉与共振箱或桌面或甚至头盖骨接触时，所产生的声音被放大了，并很容易被听到。”

“敲击音叉，并将它与几个物体接触，有时声音变得很响。音叉与共振箱接触时声音最响。”

“音叉振动产生的声波很微弱。硬的衬垫物可以作为音叉的共振物体，这样其振动会被放大，使我们能听到。”

缺点

在 Pohl 所著的著名教科书^[1]中我们可以读到：“通常我们会说振动可以用共振来放大。这句话是不可思议的。” Pohl 在很早时就写了这句话。显然，他的这句话当时没有被引起足够的重视。我们前面所引用的典型内容表明，直到今天人们还是经常能听到这样的话：声音被共振**放**大了，或更直接地说：声音变大了。这实际上并没有错，然而正象 Pohl 所说的那样，确实是不可思议的。这些话的意思好象是有一种免费的东西。

这些话类似于下面的话：如果我们付出较多的钱，营业额就会增加。初听起来，这好象是对的。然而，这里的问题容易看出来。如果你的营业额在这个月的第一个星期是高的，在后三个星期中你的营业额会一点也没有。

对于声音，情况也是这样。利用共振箱音叉的声音变大了，但它持续的时间相应地变短了。由于共振箱发出声音，其振动会受到很强的阻尼，音叉会受到共振箱的阻尼。

这跟图 1 所示的电路很相似。

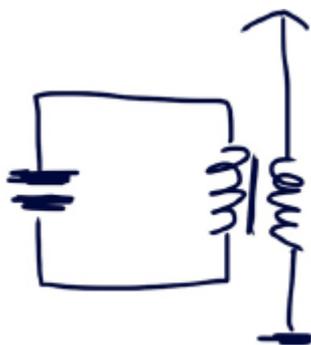


图 7-8-1. 先将左边的振荡电路充入能量。如果它不与右边的天线振荡器耦合，它将长时间地振荡。由于它们的耦合，它很快地失去能量。能量随所发射的电磁波而离开这个电

路。

如果只有左边的振荡电路，阻尼将很弱。一旦给它充入能量，它将长时间地振荡。然而，它必须与右边的天线振荡电路耦合。天线振荡器有很强的阻尼，因为它要发射电磁波。由于感应耦合，第一个振荡器很快地将能量传递给第二个振荡器，这样第一个振荡器就只能振荡很短的时间。

在这里，“放大”一词是不合适的，因为这个词在科学和技术中通常具有特殊的意义：在放大器中，信号以很小的能流进入，以很大的能流发出。这种放大器工作时必须接上能源。

相反，共振箱只能保证音叉的能量流走得更快。

历史

人们突出了感觉的地位，而忽视了守恒量能量的平衡。

建议

建议这样来解释共振箱的作用：它只能保证能量随波的发射而很快地释放。能流越大，声音就越响；然而，它持续的时间就会比没有共振箱时短。

[1] R. W. Pohl: *Mechanik, Akustik, Wärmelehre*, Springer-Verlag Berlin (1969), S. 235.

F. Herrmann

7.9 耦合双摆、耦合振动和同步性

主题

在物理教材中有这样的标题：

“耦合双摆”

“耦合振动”

这两个标题的意思是相同的：将两个单摆或弹簧振子用一根弹簧耦合起来。

缺点

图 1 中的两个单摆是耦合的。说它们的振动是耦合的，这是不合适的。实际上，这一观点来自实验观察：这两个振动是独立的，它们的运动是不耦合的。在物理学中，当一个系统不能分解为两个互不影响的子系统时，我们可以说这两个系统是耦合的。换句话说，当哈密顿函数（或更一般地叫做吉布斯-马休函数）不是由两个没有共同变量的被加数组成时，这两个系统是耦合的。

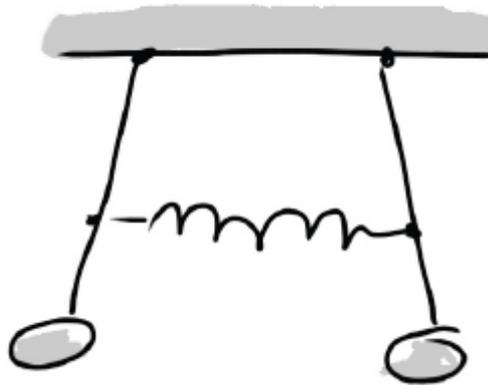


图 7-9-1. 耦合双摆，但非耦合振动

选择合适的坐标系，我们可以将系统分解为两个互不影响的子系统。每个坐标系各描述了其中一个固有振型（normal mode）。

在对惠更斯所发现的一种叫做注入锁定（injection locking）的奇怪现象的传统解释中，我们也可以看出这样一种倾向：没有将两个复摆看成为没有耦合的固有振型。这个解释是这样的：几个独立设计的钟摆被固定在同一个外壳中。过一会儿，它们会同步振动，并有固定的相位差。首先，这好象是一个奇迹：一个钟摆会将自己振动的频率和相位告诉给另一个钟摆。每个钟摆有自己最喜好的频率吗？这又是如何被其他钟摆所影响的呢？

为了回答这个问题，通常借助于看上去很亮的工具：非线性过程。这种方法既综合又正确。然而，我们没有必要用这种吓人的方法。采用这种方法的人没有考虑到科学教学的一条常用原则：用最简单的情形来解释现象。最后，在处理熟悉的振动时，我们也用这一方法：先考虑非阻尼简谐振动；如果还有时间，我们会继续讨论阻尼振动、受迫振动、自激振动、非线性振动和张弛振动。

历史

我们有这样一种倾向，即根据我们能看到的现象来进行物理描述。在上述情况中，每个单摆的运动就是能看到的现象。

建议

我们并不在指耦合振动。如果我们一定要用“耦合”这个词，我们最好说“耦合双摆”。然而，我们最好这样说：“有两个自由度的简谐振子”。

关于注入锁定中的同步性现象，我们来考虑最简单的例子：两个具有质量的物体用一个弹簧耦合起来，成为一个弹簧振子（图 2）。如果用某种方式来激发这个系统，两个物体总体上将做无规则的运动。



图 7-9-2. 有两个自由度的弹簧振子

然后，我们引入阻尼器（见图 3 中的阻尼器符号）。这样，在一般情况下其中一个物体的振动会比另一个物体的振动更快地消失。如果它是一个自生振荡（相当于惠更斯钟表），这个系统将及时优先地吸收能量，显示出较小的阻尼，结果这个振型将继续维持振动，而另一个系统将损失能量。

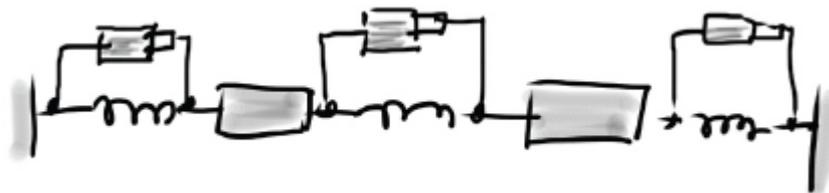


图 7-9-3. 有阻尼的弹簧振子。其中一个振型的阻尼比另一个的要强。

这就是同步性。如果我们把两个物体各视为一部分系统，它们看上去具有共同的频率。

这是一种奇观。相反，如果我们把眼光聚焦在两个固有振型上，结果在整个过程中只有其中一个衰减。这是可以预料到的。对于两个物体都同时衰减的情况，这是不大可能的。

F. Herrmann

7.10 光的组成

主题

人们经常说，白光是由不同波长或频率的光组成的：

“白光由不同波长的光混合而成的。”

“为什么白光由许多不同波长组成？”

“色散是白光分解为各种颜色的光的过程。”

“光由光子组成。一个光子由一确定的波长。光由不同波长组成。”

缺点

对诸如“白光由不同**波长**组成”或“白光由不同**颜色**组成”这类对概念清晰的人们会带来冲击的错误说法，我们会不假思索地说出来。这一主题在第 144 篇文章中我们已经讨论过。

光可以用不同的方式来描述。换句话说，我们有不同的光的理论：关于光成像的几何光学、主要关注光场中的能流分布的非几何光学、基本上以电磁描述为主的波动光学、光的热力学描述（例如，这种描述对于确定太阳能电池的效率很重要）和量子光学。这些理论没有一个是错的，这是理所当然的。我们也不能说某一理论比另一理论要好。我们选择哪一个理论取决于我们想要解决的问题。

下面我们要讨论的问题局限于在中学比较重要的内容：波动光学和光的热力学。

让我们再回到前面所引用的内容。这些内容可以被看成为关于光的典型表述：光由不同的**波长组成**。

然而，如果“组成”一词被理解为日常话语中的“组成”：物体的组成指包含在物体中并可在物体中找到的东西，光并不是由正弦波组成的。我们最好不要用“组成”这个词，而用“分解”一词（不同波长的贡献）。

实际上，光不仅仅可以被分解为正弦波。我们可以有其他许多可能的分解方案。

我们是否可以说，海面上的波由不同的波长组成？如果有人想这样说，我们会不由自主地加以反对：但是你会发现，这些波不是正弦波。直到我们想到海水的无序运动可以象太阳光一样进行傅利叶分解时，我们才不会给以反对了。

我们有理由担心，在学生的心目中，我们产生了如图 1 所示这样一种光的概念：如图所示的波列就是光子。（也许有人会说，光子具有确定的波长，参见第 4 个所引用的内容。

在这种情况下，光子具有无限大的长度。与此同时，人们会假定光子并不很长，而是点状的；并不会提及光子的宽度。)

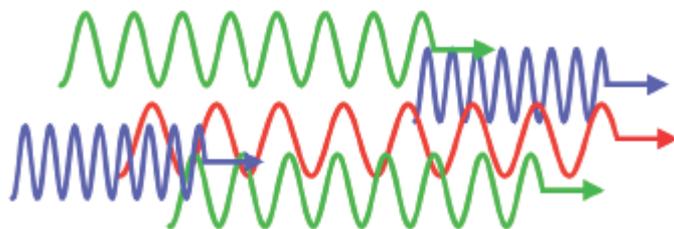


图 7-10-1. 这是光的组成？这是光子？

比较合适的做法是，一开始就来描述我们称之为太阳光的电磁场的状态，而无需提及傅利叶分解：这个场处于最无序的状态，即熵最大的状态，也可以说是以最大的非相干性将相空间中的状态分布清洗得最干净的状态。场强与时间的关系大致如图 2 所示。



图 7-10-2. 白光：在所给定点的场强与时间的函数关系

作为物理学家，人们喜欢把这种场描述得很丑陋。在通讯工程领域，人们把这种时间函数叫做噪声，而噪声是一种人们不喜欢的、要避免和消除的现象。难道单色平面波真的是实验中最好的波吗？对单色波的数学描述真的比无序的白光要简单吗？这并不一定。从另一个标准来看，无序的或“热的”光是最简单的。它只需用两个变量来描述：温度和化学势。在许多人们感兴趣的情况中，化学势为零。这样，从某一角度看过去是最复杂的东西，换个角度去看却变得特别简单了。科学哲学家把这种出自复杂性的简单性叫做**突生 (emergence)** (译者注：参见第 116 篇“粒子”)。

历史

首先第一个原因是三棱镜：如果在三棱镜后面射出各种不同颜色的光，人们就自然得出“这些光就是进入三棱镜的光的组成部分”的结论。对“组成”一词的轻率使用还表现在其他地方，如在原子物理学中有时有这样的说法：原子的电子壳层由某些确定的轨道组成。然而，壳层也是可以以不同的方式分解的，在方便的时候我们确实是这样做的。这些部分被取上杂化轨道 (hybrid orbital) 这样令人生畏的名字。对于学生来说，这基本上是新

的概念，因而是比较难理解的概念，甚至象魔术一样。实际上，整个原子壳层这块蛋糕已经被切成了另一种形状的许多小块。

另一个原因也许是，人们认为白光由正弦波组成。“光是电磁波”这一说法从物理学的角度来看并不是不正确的。然而，在我们的日常用语中，波被理解为一种周期性的现象。如图 2 所示的函数不会被叫做波。

建议

用词要小心。请弄清楚，频谱分解仅仅是许多表述中的其中一种。

不要把正弦波作为光的本质来引入。同时也要引入非正弦光的分布所形成的像。

最后，我们建议，引入一点热力学并不会有害处。

参考文献

- [1] F. Herrmann: *Historical burdens on physics*, 43. The field of permanent magnets
- [2] F. Herrmann: *Historical burdens on physics*, 60. Inductivity
- [3] A. Sommerfeld: *Elektrodynamik*, 4. Auflage, Akademische Verlagsgesellschaft Geest & Portig, Leipzig, 1964, Vorwort, S. VI

F. Herrmann

第八章 光学

8. 1 几何光学和波动光学

主题

“几何光学是当 $\lambda \rightarrow 0$ 时的波动光学的极限。在几何光学中，光的波动特性和衍射现象就不用再考虑了。”

“如果能量辐射的波长减少到可以与光学系统的物理尺寸相比较，衍射效应就变得不明显了。当 $\lambda \rightarrow 0$ 时，把这一概念推到极限，光在均匀介质中沿直线传播这一结论是成立的。这样，我们得到了几何光学的理想定义。”

“当光的波长小到可以与物理系统中的其他长度相比较时，光波模型可以用光线模型来取代。这时，光沿直线运动，这条直线表示光波的传播方向。”

缺点

如果光的波长足够小，光的直线传播的条件就满足了。然而，我们都知道菲涅耳双镜实验。在这个实验中，一束放大的激光射向双镜，两束反射光在屏上产生干涉条纹。虽然激光的波长已小到可以与“其他尺寸”相比较，但我们仍可观察到典型的波的现象。为了避免光的波动性，还需要满足另一个条件：光必须具有足够的时间不相干性。

历史

几何光学是独立于波动光学发展起来的。它当时的目的是制造光学仪器。这些仪器用太阳光、恒星发出的光和白炽灯发出的光工作。由于这些光源处于热力学平衡状态，它们所发出的光具有最大熵值，因而是完全（时间）相干的。当两束光相互叠加时，其平均能流密度可以相加。在波动光学中必须相加的场强分布无论如何是未知的。

建议

我们必须给遵循几何光学原理的光的两个必须有的性质取上相应的名称：波长小和非相干性。

F. Herrmann

8. 2 阿贝正弦条件

主题

在中学（通常在七年级），学生会学到几何光学最基本的原理。这些原理包括大家熟悉的物体成像原理，也许还包括透镜方程。

在大学物理学中，学生还能在适当的时候再次接触到这些原理：厚透镜和薄透镜、像差、费马原理和光学仪器的工作原理。

在这些大量的原理中，学生会学到其中一个原理，它就是阿贝正弦条件：

$$\Delta x_1 \cdot n_1 \sin \Delta \alpha_1 = \Delta x_2 \cdot n_2 \sin \Delta \alpha_2 \quad (1)$$

这个公式涉及光线的两个横截面，即横截面 1 和横截面 2。 Δx 表示光线的横向宽度， $\sin \Delta \alpha$ 表示光线在某一点的横截面的角宽度。这个公式告诉我们，在光线在各处的横截面没有发生散射的前提下，这两个“横向量”的乘积对于每一个横截面来说具有相同的值。

缺点

正弦条件是在光学成像的数学描述这一背景下引入的，是对薄透镜和厚透镜所成的像处理后引入的，是在讨论轴外光线的问题中引入主平面这一概念后引入的，是在处理不同像差（如像散性、场曲率及其校正）中引入的。它是从“正切条件”这一显明相似的公式中推导过来的。对于已经对几何光学有点厌倦的学生来说，正弦条件就是一贯来对光学成像的几何处理方法的进一步细化。学生们不会怀疑的一点是，他们在这里所看到的是一个完全不同的表述。

事实上，正弦条件正是热力学第二定律所要求的条件：光在经过光学元件时，其熵不会减少；如果光没有散射，其熵保持不变。

学生们当然不会怀疑这一表述，这是因为整章内容看上去并不是物理学的内容，而是几何学的内容，是关于如何使光学成像尽可能趋于完美的问题。在这里，没有一个真正的物理量，而只有距离和角度这些几何量。

历史

是什么原因引发对光学成像和透镜像差这些细节的研究的？

光学成像理论属于应用物理学的内容。它相当于电工学、工艺力学（technical mechanics）、流体力学和化学的内容。

历史上，在工艺力学、电工学和流体力学之后，化学很早就成为一门独立的学科。相

反，光学仍一直作为物理学的一部分。但它具有工艺学的特点，其内容包括对透镜系统的计算。它还具有前数字时代（在这个时代，人们还不能运用光线跟踪的方法来计算透镜系统）的一些特征。对于一个象著名天塞公司（Tessar）所制造的透镜，如果不是一件工艺品，那么它不能算作是精制的发明。

一本光学教科书通常包含了大量物理实验的内容。

正弦条件正好就是一条规定光学成像质量的原理。

建议

光这种物质特别适合于演示一些热力学效应。有时候，它比其他常见的理想气体更合适。原因之一是，光子之间的相互作用几乎没有（或很弱）；原因之二是，其耗散现象（熵产生现象）比其他气体更容易控制。这样，我们就能用光更好地解释熵为何可以作为量度无序程度的物理量。

为了简单起见，我们将把目光集中在从某一表面均匀地辐射出来的一束光上。这束光的其中一部分通过一个光学仪器被限制在其作为光的入口的光瞳内。这个作为入口的光瞳就是我们所划定的系统的边界。（这里所说的系统指的是光，而不是光学仪器）。现在我们来比较光流中不同截面处的光。为了使系统始终限定在入口处的光瞳这一范围内，我们必须保证在仪器中没有光的吸收和发射。光学仪器是由能折射或反射光的物体组成的。它决不能产生像，因为正弦条件的有效性超出了光学成像的范围。

根据（1）式， Δx 是光线在 x 方向（横向）的宽度。我们也可以说，它是光在 x 方向的发散程度、模糊程度或无序程度。 $\Delta\alpha$ 也是我们用不同的角度来量度其模糊程度的量。（1）式中的乘积（在 z 轴上）各处保持不变的事实也可以这样来表述：你只能用方向的无序性的增加换来位置的有序性的增加。这似乎隐藏着一个守恒定律。情况确实如此，它确实表达了这样的事实：光在通过光学仪器时，其熵保持不变；如果某一光学元件使光发生了散射，这个乘积就会增大，相应地，其熵也会增大。

为了与熵建立联系，最好的方法是用 k 矢量的 x 分量的扩散来表示角扩散（angular spreading）：

$$\Delta k_x = n \cdot k \cdot \sin\Delta\alpha$$

（ n 是折射定律中的一个量。）

这样，（1）就变为：

$$\Delta x_1 \cdot \Delta k_{x1} = \Delta x_2 \cdot \Delta k_{x2}$$

我们可以从中看出六维相空间（ μ 相空间）的两个分量。这两个分量也就是对在相空

间中光的六维体积有贡献的两个因素。我们知道，根据这个相空间体积可计算出熵。

Friedrich Herrmann

8.3 成像光学和非成像光学

主题

学习几何光学的唯一目的似乎是成像。几何光学的知识被应用于光学仪器（如放大镜、眼镜、显微镜和望远镜）的制造。在成像过程中，要让从物体某点射出来的光尽可能多地会聚到成像的点上。

缺点

在正常的成像过程中，物体上的点必须“成像”在一个像平面上，从物体上的点发出的光要尽可能多地会聚在像点上。如果有可能，所有光线在通过光学系统后都要会聚在像点上。对于所成的像，我们还希望它不失真，即各个像点相对于光轴上某点的角度的比值要与各个物点相对于光轴上的这一点的角度的比值相等。

如果我们要考虑成像过程中的能量传递，也可以这样说：要想用光来进行能量传递，光必须满足一个附加的条件。

如果考察一下周围的自然和技术中光传播的情况，我们会发现，与光学成像有关的光传播仅仅是一种特殊情况。在某些场合（即总是在信息传递的场合），这种光传播很重要；在另外的场合却并不重要。

如果我们把问题局限在这样的情境，即光将能量从一个地方传递到另一个地方而不成像，我们会发现，对光学系统的要求不仅仅是减少一些条件而已，而变得完全不同了。这时，我们所涉及的是非成像光学这个领域。

跟成像光学一样，非成像光学也属于几何光学的领域。它的研究目的是，要将光源（通常是发光表面）发出的光尽可能多地传递到接收器。非成像光学的研究任务就是关于照明、聚光等问题。

遗憾的是，成像光学在中学和大学里已经占居了主导地位，没有给非成像光学留下空间。这导致了这样的情况，关于光的照明和聚光的问题被简单地当作成像光学的粗糙应用来处理。这些应用中的最佳设备会被理解为尽可能克服透镜缺点的多镜头光学系统。然而，这样的观点显得离题了。新的应用导致了完全不同的光学的产生。在这个领域中，我们会涉及不同的定律和原理，而校正镜头这种光学系统是一个不好的解决方案。

历史

非成像光学的问题也许晚于成像光学问题。另外，非成像光学和其他许多物理学的技

术应用很早就从物理学中分离出去了，成为光学技术的一门特殊学科。这门学科在大学里很可能会被归到电工技术系中。

建议

非成像光学所要研究的问题与成像光学所要研究的问题是不同。它要解决的问题是尽可能多地将光从一个表面传递到另一个表面。非成像光学中最典型的设备是聚光器。在聚光器中，光通过面积为 A_1 的入口进入，从面积为 A_2 的出口离开（图 1）。

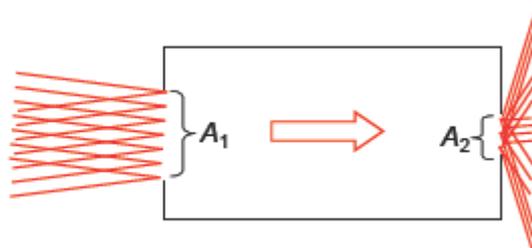


图 8-3-1. 聚光器示意图

在设计聚光器是需要重点考虑的定律是正弦条件，即阿贝正弦条件。这个条件实际上就是热力学第二定律：

$$A \cdot \sin^2 \alpha = \text{常量}$$

式中 A 是光束的横截面积， α 是横截面上每一点的光分布角。这个正弦条件告诉我们，“位置的无序性”（即面积）只有在“角无序性”增大时才会减小：熵不会消灭。

当我们开始设计如何制造聚光器时，会计算聚光系数这一重要的参数：

$$c = \frac{A_1}{A_2}$$

根据正弦条件，上式可写为：

$$c = \frac{A_1}{A_2} = \frac{\sin^2 \alpha_2}{\sin^2 \alpha_1}$$

在聚光器出口处的光分布角 α_2 不可能大于 90° 。因此，聚光系数的最大设计值为：

$$c_{\max} = \frac{1}{\sin^2 \alpha_1}$$

这个简单的运算过程已经包含了许多基本的同时也是可信的物理规律：

入射光的光圈角越小，越容易聚焦。

对于发散光，即 $\alpha_1=90^\circ$ 的光，聚光系数为 1；光不可能聚焦。

对于太阳光， $\alpha_1=0.266^\circ$ 。其最大聚光系数为 46400。

理论上，一台最佳的聚光器的最大可能的聚光系数可达 96%。然而，我们不值得去制造这样的聚光器，因为一个简单的圆锥形漏斗镜的聚光系数也能达到 92%。

有人也许会认为，校正镜头的聚光系数会更大。事实上，无论是校正还是不校正（光圈系数为 1.7），其聚光系数只能达到它的 10%。

上面后一句话表明，非成像光学并不是简单地放弃成像质量。这是完全不同的另一个物理学领域。我们可以这样说，与成像光学相比，非成像光学更象物理学。

Friedrich Herrmann

8. 4 辐射强度

主题

有一根内壁涂成黑色的细管。将一束单色光均匀照在这根细管的内壁上。当我们看这根细管的内壁时，我们无法确定所看到的位置距我们有多远。

缺点

上面对实验的描述是很清楚的。但是，这个现象还呈现了这个实验没有揭示的特点。这一特点又是很普遍的。我们也可以将上面的结论表述为：我们所感觉到的物体的发光强度不随距离而变。这不仅仅可以通过我们的眼睛感觉到，也可以通过普通的照相机拍摄到。眼睛和照相机都可以对此进行很好的测量。然而，测量什么呢？所测的量肯定是局域的量，因为这个“测量”发生在眼睛或照相机这个地方，而不是光所发出的表面的某一点。这个物理量在所有中学物理教材中没有提到过，在大学物理教材中也很少提到。它就是辐射强度 L 。

如果没有这个物理量，我们也很难理解为何借助于透镜或平面镜不可能将太阳光聚焦的地方的温度超过太阳表面的温度。（几何光学的原理允许这种光的聚焦。）

历史

我们的物理课堂内容大部分是传统遗留下来的。传统的方法告诉我们，对光的处理方法是几何光学的方法。对于能量分布和能流分布的问题，传统的方法却没有强调。

另外，一些有意义的课题也会被原有的背景知识所排斥，而这些课题我们是很想知道的。例如，我们学到了关于光度学和辐射度量学的许多术语和定义，但不曾想知道其中的基本原理和理解其中有意义的解释。

建议

辐射强度是单位立体角的能流密度。（这里我们不关心与波长的关系。我们假定所讨论的仅仅是单色光。）这个量是一个标量，一个局域地描述辐射场的量。它不仅取决于辐射场内的位置 (x,y,z) ，也取决于每一点 (θ, φ) 的方向。

这听起来有点复杂，但实际上并不难。理解这个量的最好方法是看图 1 所示的辐射计。

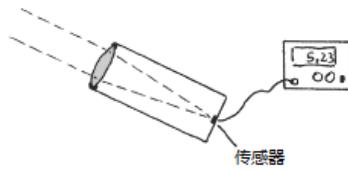


图 8-4-1. 辐射计。它在透镜中某一处并朝沿装置的光轴方向测定辐射强度。

这个装置测量的是光在透镜入口处某一位置和沿装置光轴方向的辐射强度。为了获得辐射的空间分布值，这个装置将在保持方向不变的前提下在空间移动。为了获得辐射的角分布值，这个装置将在某一固定位置朝不同的方向转动。（如果我们测量频率分布值，我们将获得频谱辐射。这时，它所描述的是在六维相空间中的辐射场。）

如果我们在装置的光轴方向上移动装置，不使它改变方向，则所测得的值保持不变；或更一般地说，在光线方向上，光线上各处的辐射强度都相等。光可以通过任何一个由透镜和平面镜组成的光学系统，但在光线方向上其辐射强度是不变的。只有当光线被散射或被吸收时，其辐射强度才会发生变化。（当光进入折射率为 n 的材料后，其辐射强度会增加到原来的 n^2 倍；当它从这种材料出来时，其辐射强度又回到了原来的值。）

如果我们知道了上面最后一条原理，就不难理解为什么我们无法将通过对太阳光的聚焦而使聚焦的地方的温度超过太阳表面的温度。要达到这一温度，最好的办法是，在像面（image plane）上所有点的光都来自整个“半空间”（half-space）。由于所测得的辐射强度与太阳表面的辐射强度相等，像面上的情况与太阳表面上的情况相同，因为光来自这整个半空间。这相当于将接收装置直接面对着太阳表面一样。这样，最后会形成太阳表面与接收装置之间的热平衡。

Friedrich Herrmann

第九章 原子物理学和量子物理学

9. 1 量子力学中的轨迹概念

主题:

“在量子力学中，根据海森伯的测不准原理，粒子的轨迹这一概念就不再有意义了。”我们都熟悉这种（或类似的）说法。

缺点:

这一说法意味着什么？它是否意味着，在其他情况下，或者说在不是量子力学的其他物理学分支学科中粒子的轨迹这一概念就一定有意义了？那么，在热力学中，轨迹是什么意思？在几何光学中，轨迹是什么意思？在物理光学中呢？在我们的日常生活中它是什么意思？什么东西可以有轨迹？云的轨迹是什么？在流转中的钱的轨迹是怎样的？在互联网中传递的信息的轨迹是怎样的？所以，上面所说的“在量子力学中轨迹的概念不再有意义了”并不是例外，而是一条规则。

那么，为什么我们特别要强调“在量子力学中轨迹的概念不再有意义了”呢？这是因为我们运用了一个不恰当的模型：物体的质点模型。我们可以用这个模型研究单独一个物体的轨迹。然而，由于运用了这个不恰当的模型，后来人们经常要处理由此而带来的许多问题，以纠正一些错误的观念。因此，这些问题是人为造成的。

我们来考虑氢原子的一个定态，比如它的基态。无论是理论还是实验都告诉我们，电子不是一个质点，电子在定态时根本没有运动。如果我们没有告诉学生电子是一个很小的质点，我们就没有必要让学生放弃电子的轨迹这个概念。

历史:

在 20 世纪初，质点模型是很成功的。所有的物理现象都可以简化为很小的“质点”的运动，以及它们之间的相互作用。人们舍不得抛弃这样一个强有力的工具，这是可以理解的。然而，这个工具在后来被用到了不合适的地方。它被扭曲了，以致于失去了它原有的功能。这样，到了要解释量子力学中的概率时，人们就很难接受这个新的概念了。

尽管物理学家们知道这个道理，但他们仍然在不断地使用这个不恰当的模型。在物理口试中，当我们要求学生解释氢原子的结构时，他们总是用玻尔模型而不是用我们所要求的量子原子模型来解释。即使他们的物理不怎么好，他们也知道玻尔模型。

在许多情况下，我们教给了学生原则上应该加以纠正的内容。虽然在书中并没有写到，但学生经常可以听到：电子绕着原子核运动。在这方面，学生们听到错的结论的次数比听

到对的结论的次数还要多。

建议：

相信量子力学是正确的。它的可靠性已经得到了很好的证实。不要再使用会误导我们的那些模型。

Friedrich Herrmann

9. 2 原子的图像

主题:

我们这里讨论的主题是一幅图像，这幅图像不仅仅只有物理学家们所熟悉。我们不要再重演这幅图像了，其原因我们很快会知道。这是一幅原子的图像：原子核是一个小的球状结构，外面是沿椭圆轨道运动的电子，有时电子也被认为是一个小的球状结构。

缺点:

“一图值千句。”对于一个物体，它的图像比描述它的句子或数学公式要好记。图像对于教师来说是一种生动的教学工具。然而，由于图像容易被记住，它们有时也会妨碍一个预定的学习过程。这种情况发生在它们对物体的描述不正确的时候或它们的描述与教师想要教的不一致的时候。它们不是教师所要选择的图像。然而，它们还是遍布整个世界，并不断重演着。它们具有很强的感染力，使人们对其产生很深的影响。即使有些学人知道其危害性，但也屈服于它们。刚才提到的原子图像，即玻尔模型，就是这种图像。我们可以在教科书和科普杂志上找到它，可以在公司门口树立的铜铸标识中看到它，可以在成千上万张邮票和纸币中看到它；令人奇怪的是，我们还经常可以在专业的物理杂志上看到它。

问题的原因在于，尽管有了量子物理学，但它还没有改变我们的原子观。我们花了很多时间来说明这种图像的缺陷，并指出必须用另外的图像来取代它。然而，这种图像已深深地铭刻在学生的脑子中了。因此，我们所做的工作只能产生很有限的效果。最后，记在人们脑子中的还是那个玻尔模型，那个环绕原子核运动的电子。

历史:

这个原子结构的图像最早是由卢瑟福和玻尔引入的。然而，在不到 20 年的时间内，薛定谔（还有海森伯、玻恩和乔丹）提出了量子力学。这样，这个图像就成为了一种障碍。

最早提出的模型总比后来提出的模型具有优势。然而，新的模型总要取代旧的模型。但在物理学中，情况很少是这样。

建议:

玻尔原子模型和相应的图像是物理学历史上很引人注目的内容。然而，在物理教学中它却起着反作用。我们可以通过比这更好看、更能引起人们注意的图像来消除人们对玻尔图像的影响。其中有一种方法是，将概率密度 (Ψ^2) 分布图线用颜色来表示。

Friedrich Herrmann

9.3 空虚的原子

主题:

由于原子核与电子相比体积很小且质量很大，我们通常认为原子的大部分是空的。电子被认为是一个点（有时说得很清楚，有时说得模糊一点）。这就是说，整个原子所占的空间中只有很小一部分被物质所占有。比如有这样一种说法：“一个原子基本上是由空虚的空间所构成的，里面只有很小的一个原子核和一些电子。”

缺点:

(1) 我们说原子是空虚的，其依据是我们所应用的原子模型。我们确实可以把电子想象为这样的模型，即其体积很小，没有运动轨迹。当时为了描述电子的这种性质，人们引入了概率密度的概念。根据另一种电子模型（物质模型），电子占据了由波函数所决定的整个空间。波函数的平方是电子这种物质在空间分布的量度。因此，电子的大小就是其轨道的大小。由于没有对其轨道定义严格的边界面，玻尔轨道半径可以被认为是电子大小的等效半径。

(2) 如果我们选择了电子的质点模型，那么这个模型也必须应用于对原子核的描述上，即质子和中子也是有点状的夸克组成的。这样，不仅原子的大部分是空虚的，而且整个原子，乃至整个宇宙都是空虚的。显然，这种描述是无用的。

历史:

卢瑟福的实验告诉我们，原子核是很小的实体。

建议:

本来人们想表达一个简单的事实，即原子核的质量远大于壳层的质量。然而，这不需要涉及到有争议的空虚空间的概念。我们不能忘记，壳层只有在质量上比较小。而质量仅仅是许多描述粒子性质的广延量中的其中一个物理量。在电荷方面，原子核和壳层是一样的。对于角动量，情况也是这样。对于磁矩，壳层比原子核还要大。

Friedrich Herrmann

9. 4 电子壳层

主题:

为了解释原子的不同性质（例如原子半径或电离能量随原子序数周期性变化的性质），我们要利用壳层模型。为了证实壳层的存在，我们通常用 $r^2 \cdot \rho(r)$ （即含有许多电子的原子的电子密度乘以 r^2 ）来表示 r 的函数（ r 是到原子核的距离）。相应的图线也表明，“在原子核所占据的空间中找到电子的概率是极其微小的”。

缺点:

由于电子的概率密度随 r 的增大而单调减小(如图 8-4-1a), 函数 $r^2 \cdot \rho(r)$ 在中心处(即在原子核的区域)为零, 并随 r 的增大有几处极大值。最后, 对于很大的 r 值, 这个函数的值又趋向于零(如图 8-4-1b)。图 1b 所示的函数不是正常的空间概率密度, 而是每个半径区间 dr 的概率。有些教科书指出, 这里使用了一个技巧; 而有些教科书就没有指出这一点。不管怎样, 这很难避免读者会误认为纵坐标所对应的是密度本身。我们在跟大学物理系的学生交谈中发现, 学生们记住了图线的形状, 认为纵坐标表示概率密度。尤其是他们认为, 在中心处概率密度为零, 在壳层区域是密度特别大的地方。

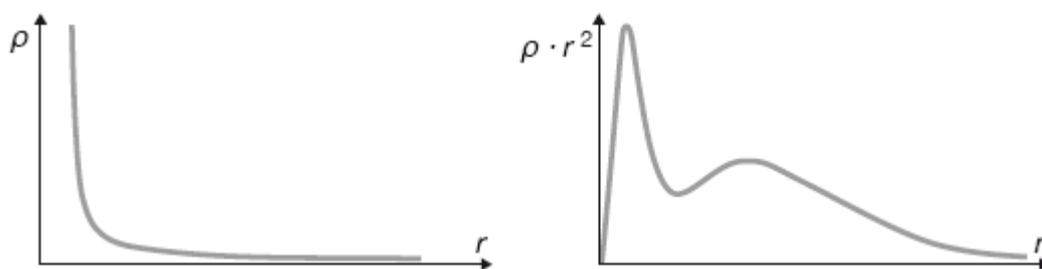


图 9-4-1 (a)原子中的概率密度。(b)密度对立体角积分。

下面的例子表明, 当我们要获得密度分布的具体印象时, 这对 $r^2 \cdot \rho(r)$ 这一表达式来说确实有点为难了。如果我们要知道一个玻璃球的质量分布情况, 我们就画出它的质量密度图线(图 8-4-2a)和 $r^2 \cdot \rho(r)$ 的函数图线(图 8-4-2b)。显然, 要知道球内的质量分布情况, 最好看一下图 8-4-2a。

我们说“在原子核中找到电子的可能性比在它外面找到电子的可能性大得多”这句话跟说“在伯克来(Berkeley)(译者注: 在美国加州西部)找到彩票获奖者的可能性比在内华达(Nevada)(译者注: 美国西部之一州)找到彩票获奖者的可能性大得多”这句话一

样，在统计学上都犯了样本偏离的错误。

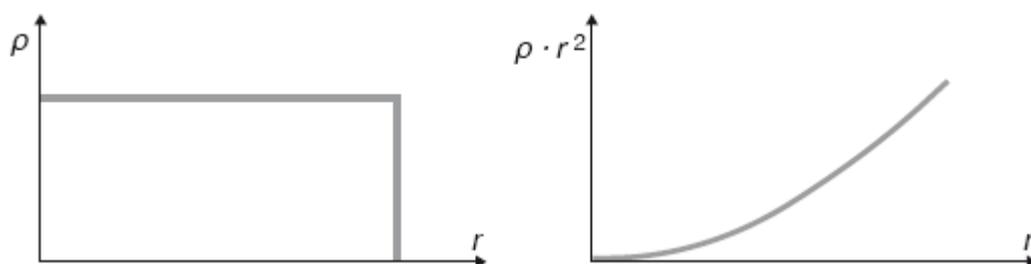


图 9-4-2 (a)一个球体的质量密度。(b)质量密度对立体角的积分。

历史:

显然，一些物理学家们不愿意将能够做出一些正确推论的壳层模型抛弃掉。他们要寻找壳层中的密度分布。然而，他们遇到了麻烦，他们发现在原子核内部找到电子的概率不为零。

建议:

表达式 $r^2 \cdot \rho(r)$ 没有什么本质上的优势，它反而会导致一些错误。我们建议，只使用密度 $\rho(r)$ 这一概念。

Friedrich Herrmann

9. 5 波函数

主题:

“波函数本身是没有直接的物理意义的。”

“…… Ψ 并不表示一个像长度或场强那样可以直接测量的量。”

“波函数是不真实的，但是复杂的。这一事实表明， $\Psi(\mathbf{r},t)$ 并不像诸如在经典光学或电动力学中光波的电场强度 $\mathbf{E}(\mathbf{r},t)$ 那样具有实际的物理意义（在量子电动力学中 \mathbf{E} 也没有实际的物理意义）。”

缺点:

当我还是一名学生时，我已经知道物理学中有许多信念。在我看来，它们是先验的东西。它们看上去像是科学中非常基本的陈述。它们是我们所意想不到的。我实际上无法理解它们。它们为什么有用，这对我当时来说是不清楚的。在这些陈述中，其中一条是这样说的，即波函数不能直接测量。虽然物理教授仅仅是不在意地提到它，但它已经铭刻在我的心中了。现在它在中学物理教科书中也出现了。

那么，为什么波函数不能直接测量？我们可以找到两种证明：1. 事实上，它是一个复杂的函数。然而，还有其他复杂的函数。人们都知道如何处理这些复杂的函数。没有人说这些量是不能测量的。2. Ψ 的绝对值表示电子密度分布，但其相位是任意的，是不可测的。但这并不是非常正确的。相位表现在流密度（通常叫做几率流密度）中。这是可以测量的。因此，波函数（至少对一个粒子的波函数）是完全可以由密度和流密度来确定的。

当我们强调一个量不能被直接测量时，我们必须明确直接测量是什么意思。在这种情况下，我们经常会提到电场强度，但对这个量的测量不是我们说的直接测量。当我们用试验电荷来测量时，我们要尽可能减小它对所测的电场的影响，使试验电荷所处位置的电场与原来的电场有最大的相似性。

历史:

玻恩对波函数的概率解释阻碍了我们对波函数的直觉理解。

建议:

如果我们不明确“直接”测量的意思，说 Ψ 函数不能直接测量是无意义的。当我们运用另一种模型（或“解释”）（例如，薛定谔和马德隆把 Ψ 的平方解释为电子云的质量和电

荷的连续分布)时, 这种说法也许就会消失。

Friedrich Herrmann

9.6 不可区分的粒子

主题：

在介绍量子统计力学的理论时，我们总强调粒子的相同性，即不可区分性。

“对于两个粒子所组成的系统，如果将粒子的位置交换以后对系统的任何观察值或测量值都不变，我们就说这两个粒子是相同的。”

“如果两个粒子的所有固有属性（质量、自旋、电荷等）都相同，则这两个粒子是相同的。没有实验可以来区分这两个粒子。这样，宇宙中所有电子都是相同的，所有质子也都是相同的，所有氢原子也都是相同的。”

缺点：

在学生时代，当提起这种不可区分性的时候，我总有不快的感觉：这种表述有否价值？它是否描述了量子世界的一个奇怪而难以理解的性质？这种表述只能给我们带来理解上的困难。其原因有两个。

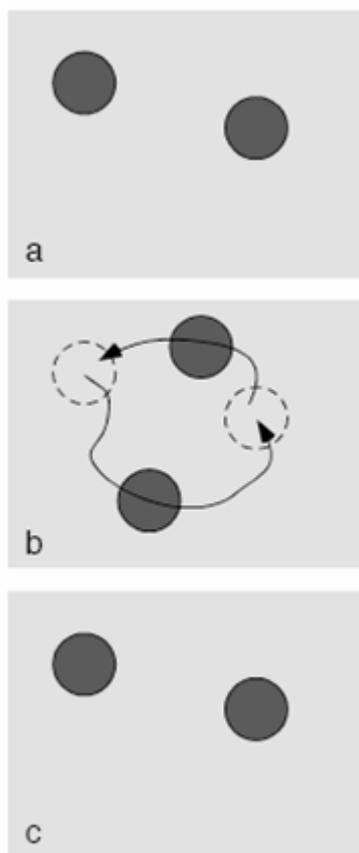


图 9-6-1. 在计算机屏幕上的两个圆相互交换位置。

1. 所谓的不可区分的两个粒子其实是很容易区分的。假定有两个电子，一个在左，其位置为 r_L ；另一个在右，其位置为 r_R 。当然它们在许多方面是相同的：相同的质量、相同的电荷、相同的自旋和相同的激发态，以及它们所具有的其他性质也是相同的。（我们可以这样说，它们的固有属性是相同的。）但是它们还有一个特性是不同的：它们的位置，一个在 r_L 处，另一个在 r_R 处。因此，它们是可以区分的。

实际上，在统计物理学中人们所关心的不是粒子的不可区分性，而是它们的状态。我们再来讨论那两个电子。我们来讨论它们的一种状态：一个在 r_L 处，另一个在 r_R 处。现在我们将左边的那个粒子拿到 r_R 处，将右边的那个粒子拿到 r_L 处。现在我们所得到的状态与刚才的状态是不能区分的，这两个状态是相同的（这里我们将“相同的”这个词作为非正式场合下的含义来运用）。然而，在每个状态中，在粒子相互交换位置的前后，它们是可以区分的：一个在左，另一个在右。

这一情况与下面的“实验”是相同的：运用画图程序我们在计算机屏幕上画出两个半径和颜色相同的完整的圆，如图 1a。现在我们用鼠标来移动这两个圆，如图 1b。最后我们得到跟原来一样的图像，如图 1c。当我们移动这两个圆时，我们交换了它们的位置。图 1a 的像和图 1c 的像是不能区分的。然而，在一个像中的两个圆是可以区分的。

2. 将两个粒子互换一下位置后它们的状态真的是相同的吗？我们确实无法知道互换位置后“旧的”状态变成了“新的”状态？如果在经典力学的练习中我们不把粒子想象为除了某些物理量外还可以用所谓的灵魂来表征的很小的东西，我们就不会有这个问题。在量子物理学中，我们试图改变这种思维习惯，去培育那种量子物理学的语言。有意思的是，当我们讨论电子时就出现了这个问题。在半导体中交换两个空穴的位置时，我们却没有遇到这个问题。我们没有将空穴想象为像电子一样单独的个体（individual bodies）。与电子相比，它们更像计算机屏幕上的两个圆。

历史：

经典力学研究的是一个一个单独的个体。如果相应的系统具有某些性质并一直保留着，系统在另一时刻和别的环境时我们仍能认出它，这时个体的概念是适合的。在我们的日常经验中，能表征一个单独个体性质的主要是其形状和构成系统的物质的分布情况。然而，如果系统的自由度很小，最后只剩下质量、动量、角动量和位置，个体的概念就消失了。换句话说，对于自由度很大的系统，个体的概念是合理的和明确的，是没问题的。因此，经典力学中个体（粒子）的概念在量子力学中不是一个好的基本概念。

建议：

在日常语言中我们用经典力学的概念来描述不是个体的物体是没有问题的。例如，在描述天空中的云和蜡烛的火焰时就是这样的。五分钟以后的云与五分钟以前的云一样吗？5 秒钟以后火焰仍然是这个样子吗？对于没有偏见的人来说，对这些问题的回答也许仅仅是耸一下肩，因为这里不存在什么问题。

在量子力学中，如果所用的语言和模型要稍作调整的话，我们就要做大量的工作。这样，电子必须这样来引入：它是物质不可分割的一部分，它具有确定的质量、电荷和角动量。如果我们在左手和右手分别具有这样的一部分物质，然后互换一下它们的位置，我们很难说互换后的状态与互换前的相同。从一开始我们就不会把它看成是一种像灵魂一样的东西。

Friedrich Herrmann

9.7 光子和声子

主题：

在高中物理教科书中介绍了光子的概念：光子是光在吸收或发射过程中所交换的一份能量，或光子是组成光的粒子。相反，声子在大多数教科书中是没有被提到的。这就导致这样一个事实，大学物理系的学生对光子有相当具体的概念，而对声子却一无所知。

缺点：

光子和声子之间具有丰富的类比关系。光和声的经典理论有许多共同点，正像在相应的量子理论方面有很多相同的地方一样^[1, 2]。它们之间的类比关系表现在很多不同的地方。

其中一个例子是，用粒子传递热。在一种不会导电但会导热的材料中，传递热的粒子是声子。（在导电材料中，电子起主要作用。）这个传热过程是扩散型的，即这种传热过程是声子连续地产生和消灭的过程。这个过程很像太阳内部从反应层向外的热传递过程。这里，传递热的粒子是光子，它稳定地发射和被吸收。

它们之间的类比还揭示了在热力学平衡中声子和光子系统的能量和温度的关系。在这两个系统中，能量都随温度的 4 次方变化（对于光子来说，这就是我们所知道的斯忒藩-玻耳兹曼定律）。

因此，这两种粒子有许多共同之处。在物理教学中我们没必要对它们采用不同的处理方法。

历史：

声子是在对晶格振动的量子化处理中被引进物理学中的。相反，光子作为光的粒子已是一个有百年历史的传统概念了。另外，单独一个光子很容易被检测到。检测 γ 射线和 X 射线的装置很早就有了。到了今天，可见光的光子也可以用一些不大贵的材料来加以检测。

人们把声子叫做“准粒子”。这是由于声子被认为是比光子更抽象的概念。所谓准粒子，就是那些在它们的局域环境中才出现并表现出一些性质的粒子。实际上，对准粒子和所谓的正常粒子加以区别的观点正在被抛弃。最近我们刚获悉，正常粒子是由于希格斯场(Higgs field)才表现出它们的性质。

建议：

1. 在引入声子时不要过于小心。要把它们当作正常的粒子来对待。学习声子的概念

并不比学习光子的概念难。我们发现，在有些中学物理教科书中有介绍介子的内容。声子当然比介子更接近人们的日常生活。那么，为什么我们不能介绍声子呢？

2. 在引入光子时要谨慎一些。

3. 在运用“准”、“虚”这些字时要更加小心。这些字对概念的解释起不了什么作用，反而会使学生感到更难理解。

[1] *Ashcroft, N. W., Mermin, N. D.: Solid State Physics, Holt, Rinehart and Winston, Inc., Oriando (1976), p. 453: “在电磁场的量子理论中，在空腔中的辐射场的简正模所允许的能量值为 $(n+1/2) \hbar\omega$ ，这里 ω 是波模的角频率。然而，在普遍的情况中，我们不把 n 说成是波模的激发量子数，而说成是所给出的那种类型的光子数。同样，确切地说，我们不这样说：波矢为 \mathbf{k} 的支波 s （在晶体中）的简正模处于 $n_{\mathbf{k}s}$ 激发态，而这样说：在晶体中有 $n_{\mathbf{k}s}$ 个波矢为 \mathbf{k} 的声子。”*

[2] *Vogel, H.: Gerthsen-Kneser-Vogel, Physik, Springer-Verlag Berlin(1977), p. 598: “角频率为 ω 的晶格振动可以像单独一个粒子的振动一样仅仅具有这样一些能量值，这些值的差异都是 $\hbar\omega$ 的整数倍。由于这个原因，例如，光波只能以这个值的某个整数倍与晶体点阵进行能量交换。基于同电磁波同样的理由，我们可以来解释能量为 $\hbar\omega$ 的声学量子（或叫声子）的存在。”*

Friedrich Herrmann

9. 8 一个和另一个电子

主题

一个多电子原子的哈密顿函数包含每个电子的坐标：电子 1 的坐标 r_1 、电子 2 的坐标 r_2 ，等等。泡利原理要求这个多电子系统的波函数具有反对称性：变换一下两个粒子的坐标，其符号将发生变化。在双电子系统中，假定双粒子的波函数可以写为两个单粒子波函数的乘积，则

$$\psi(1,2) = \frac{1}{\sqrt{2}}[\psi_a(1)\psi_b(2) - \psi_a(2)\psi_b(1)].$$

式中 1 和 2 表示两个电子的坐标，a 和 b 表示两个电子的状态。

缺点

在这一情况下，我们所涉及的是处于状态 a 的一个电子和处于状态 b 的一个电子（例如，一个 s 电子和一个 p 电子）。

这听起来很熟悉，在任何一本物理或化学教材关于多电子原子这一章的内容中，我们都能读到这个相同的内容。但是，教材简直忽视了这个内容的不一致性。

当我们讨论多电子系统（电子 1、电子 2、一个 2s 电子、一个 3p 或 4f 电子）的某个电子时，总会引发出问题。

人们所使用的语言是在讨论一个严格定义了的单独一个实体时所使用的语言。阅读关于电子的相应内容的人会这样解释：电子 1 是一个粒子，电子 2 是另一个粒子，尽管他们不能确切地说出这些粒子的位置。然后，你知道它们是不可区分的（这当然是很难理解的）。然而，一旦你接受了它，你就有了两个不可区分的电子（电子 1 和电子 2）

现在的问题是，过了一会儿，人们提到了几个电子。这次，它们被叫作 a 和 b，或 3d、4f，等等。然而，人们也许并没有注意到，电子 1 和 2 不是电子 3d 和 4f。请记住，在这两种情况中，我们所讨论的是处于同一状态的同一原子。

这里所涉及的数学明确地告诉我们，一方面，1 和 2 之间存在着一定的关系；另一方面，a 和 b 之间存在着一定的关系。然而，根据所运用的语言，这关系并没有被揭示出来。

实际上，上面这种情况与两个耦合的单摆很相似。我们把它们叫作单摆 1 和单摆 2。然后，我们用两个标准的模型 a 和 b 来描述它们。在这里，没有人会把这两个标准模型叫做单摆 a 和单摆 b。

历史

玻尔模型的语言表达是这样的：一个小粒子电子“绕着”原子核。粒子的不可区分性

和泡利原理都不适用于这个模型。但是，这一语言表达已经影响了我们，电子作为一个小粒子的观念已经深入人心。我们不得不接受由这种语言所传递给我们的关于这个模型的不一致性。

顺便提一下，电子作为一个小粒子的观念并不总是不好的：根据粒子的状态，它可以渐渐地被你所喜欢。

建议

这个建议很难提。我们必须运用仅由数学来描述的语言；这种语言并不基于模型，并不给我们提供一种心智模式。同时，我们也必须运用另一种语言；这种语言基于比玻尔模型更合适的模型，一种液态电子（电子物质）或电素的模型。

根据这个模型，电子不是一个小粒子，而是一种“物质”特定的一部分。这部分的质量为 m_e ，电荷为 e 。

当然，这个模型并不总是适用的：它不能解释干涉现象。它的优点是，它告诉我们电子具有确定的电荷和确定的质量这一事实，它不需要那种难以理解和甚至无法解释的“电子是不可区分的”这样的说法。

Friedrich Herrmann

第十章 固体物理学

10. 1 作为整流器的半导体二极管

主题:

在物理教科书中通常把 pn 结的整流作用归结于 p 区和 n 区之间的接触面两边的耗尽层 (depletion layer)。

“如果 n 层与电源的正极相连和 p 层与电源的负极相连，则耗尽层会变厚，二极管不导通。反过来，如果 p 层与电源的正极相连和 n 层与电源的负极相连，则自由电子和空穴进入耗尽层，因而这个耗尽层失去作用，二极管变成了导体。”

缺点:

确实，耗尽层的厚度随外加电压而变。因此，上述结论似乎是正确的。然而，根据电荷携带者的密度来推论电阻的大小有一个前提，即所考虑的二极管的相应区域的电荷携带者本身不能变化。如果电荷携带者参与了反应，这种推论就不成立了。对于 pn 结就属于这种情况。当加上正向电压时，电子和空穴反应，变成光子和声子。当加上反向电压时，反应朝相反方向进行。然而，这个反应的速率很小，因为在常温下只有很少的光子和声子。电阻的不对称性正是由于这种反应速率的不对称引起的。

整流效应发生的区域是由扩散长度 (diffusion length) 决定的。这个长度是耗尽层厚度的 1000 倍。

历史:

在传统上，物理学家们不喜欢使用化学用语。这就导致他们在解释半导体二极管时仅仅运用欧姆定律和静电定律，即仅仅运用电学这个工具，从而产生了这种无意义的探索。实际上，如果不借用化学定律而要解释二极管以及 pnp 型和 npn 型三极管，这是不可能的。如果将化学势梯度作为驱动因素（这类比于将电势梯度作为驱动因素）来考虑，这样的解释会变得最完美。

建议:

作为整流器或 LED 用的半导体二极管的原理可以这样来解释：当加上正向电压时，电子从 n 层向 pn 结运动，而空穴从 p 层向 pn 结运动。在那里它们发生反应，并产生光子和声子。这时二极管的作用像一个合上的开关。作为一个 LED，这时的二极管的原理可以最恰当地这样来描述：这时产生了尽可能少的声子和尽可能多的光子。当加上反向电压时，

电荷携带者从中间（即接触区）向外流动。由于在 pn 接触区没有电荷携带者的源，所以没有电荷携带者从这里流走。因而，就没有电流，也没有辐射出去的光。如果更仔细一点的话，我们会发现，由于周围环境的热辐射，确实有电子和空穴以极小的速率产生出来。这些电荷携带者就是产生反向电流的原因。

Friedrich Herrmann

10. 2 作为太阳能电池的半导体二极管

主题:

在中学和大学的物理教科书中，我们可以发现有这样的结论：在太阳能电池中， pn 结的空间电荷层中的电势梯度是产生电池中的电流的原因。具体表述为：

“电子和空穴的分离是由耗尽层内部的电场引起的，这种分离就是发电机效应。”

“由于电场力，自由电子被推到 n 层，而空穴被推到 p 层。”

缺点:

粗略一看，似乎上面的表述是正确的。太阳能电池所产生的电流确实需要一种驱动力。物理学家们知道，电场就是产生这种驱动力的原因。确实，在二极管中存在着电场，它的方向也符合了我们的需要。物理学家们就因此得出结论，电场强度或相应的电势梯度是形成电流的原因。然而，物理学家们忽视了另一个事实。电势梯度决不是产生稳定而持续的电流的原因。如果我们跟踪一个在电路中移动的（正）电荷，我们会发现，它所经历的路径中电势的降幅和升幅是相同的。由于在电阻器上它沿电势降的方向流动，所以在电源中它必定沿电势升的方向流动。在（正）电荷流出的那个极的电势要高于流入的那个极的电势。根据这一事实，我们就可以确切地知道电源的这一性质。

在电源内部的某些地方电荷沿电势降的方向流动。这一事实并不能反驳上面的结论。在一个电路中，电势每时每刻在变化，即使在没有电池的电路中也是如此。整个电路中每一段的电势之和等于零。这就是我们用不着关心这个现象的原因。

历史:

用我们熟悉的电学知识来解释二极管的工作原理，这看上去很精确，但其结论是不正确的。

建议:

电荷携带者流动的原因或驱动因素可以是但不一定是电势梯度。实际上，在太阳能电池中电流产生的原因是化学势梯度。因此，太阳能电池是与电化电池（electrochemical cell）（译者注：如蓄电池、干电池等）很接近的电池。

Friedrich Herrmann

10.3 场电流和扩散电流

主题:

在无电流的 pn 结中, 电势梯度是引起“场电流”(field current) 的原因。场电流和“扩散电流”(diffusion current) 叠加。扩散电流朝相反方向流动。扩散电流是由电荷携带者的浓度梯度引起的。

缺点:

当导体材料中有电势梯度且其化学势在各处都相同时, 导体中就会有电荷携带者的流动。电荷携带者是由电势梯度“驱动”的。当导体中有化学势梯度(例如, 由浓度梯度引起的化学势梯度)且其电势在各处都相同时, 导体中也会有电流。这时, 电荷携带者的“驱动力”是化学势梯度。这样, 拉“粒子”的力就有两种可能: 一种是拉电荷 Q 的电势梯度, 另一种是拉物质的量 n 的化学势梯度。

通常, 这两个梯度不为零, 总的驱动力是由这两个梯度引起的。我们可以用电化学势 (electrochemical potential) η 来描述它们。电化学势原则上是由电势 φ 和化学势 μ 合成的:

$$\eta = \mu + z \cdot F \cdot \varphi.$$

对于电流密度, 我们有:

$$\vec{j} = -\frac{\sigma}{zF} \text{grad} \eta.$$

式中 σ 是电导率, z 是每个电荷携带者的基本电荷数, F 是法拉第常量 (译者注: $F = 96485 \text{ C} \cdot \text{mol}^{-1}$)。

电化学势的值可能为零。这就是说, 两种驱动力可能大小相等、方向相反, 并相互抵消。这时, 导体中就没有电流, 导体处于“电化学平衡”(electrochemical equilibrium) 状态。

我们通常这样说:“电势梯度导致‘场电流’, 化学势梯度导致‘扩散电流’, 这两种电流叠加为总电流”; 而不是这样说:“粒子的流动由两种方式来驱动, 或有两个驱动力”。在电化学平衡中, 导体中有两个方向相反、大小相等的电流。

这样解释的问题在于, 这两种电流都将独立地产生熵 (即热)。但我们知道, 其总电流是无耗散的, 导体中没有熵产生。我们如何在微观上来想象这种情况: 是否可以认为, 有些电荷携带者与电势梯度有关, 有些电荷携带者与浓度梯度有关? 如果我们任意选择一种电荷携带者, 哪种电流属于这种电荷携带者呢?

我们来比较与其相似的情况。通过比较, 我们也可以看清这种描述的不恰当性。这种

情况就是大气中的空气流。对于这种情况，人们不会将空气流分解为两个相反方向的流。在这种情况下，也有两种驱动力：引力势梯度将空气分子向下拉，压强梯度将空气分子向上拉。当空气静止不动和温度均匀时，这两个驱动力大小相等、方向相反，并相互抵消。在这种情况下，为什么我们不这样说：“空气有向下的场电流和向上的扩散电流”？

历史：

上述情况也许是由几个原因引起的：1. “化学势”这个简单而有力的工具虽然早在 100 多年前就被引入到物理学中，但直到现在物理学中几乎很少有人知道它，也很少有人在用它。2. 人们没有真正地把电势当作物理量来对待。

建议：

电荷携带者有两种驱动力：拉电荷的电驱动力和拉物质的量的化学驱动力。由于电荷和物质的量有紧密的联系，它们相应的势可以合并为一个势，即电势。电势梯度可以用来解释粒子的流。

Friedrich Herrmann and Peter Würfel

10. 4 光电效应

主题:

在中学和大学里，通常用光电效应现象来证明光的量子本性。我们可以通过这个实验来简单而又精确地测定普朗克常量。

图 10-4-1 是这个实验的示意图。光照到阴极上。阴极是由逸出功 (work function) 小的材料制成的，这种材料通常是碱金属。

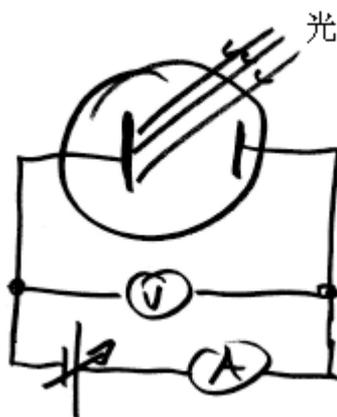


图 10-4-1 将电压调节到光电流等于零为止。

我们将电压调节到光电流等于零为止。我们可以用爱因斯坦方程来解释。这个方程用现代的符号可以写为:

$$E_{kin} = h \cdot f - W_{A-cat} \quad (1)$$

这里 h 是普朗克常量, f 是入射光的频率, W_{A-cat} 是阴极 (cathode) 材料的逸出功。

发射出来的电子在阴极中损失了部分能量。上述方程指那些在离开阴极表面之前没有损失能量的电子。因此, E_{kin} 表示其最大的动能 (kinetic energy)。

现在我们假定

$$E_{kin} = e \cdot U_{max} \quad (2)$$

这里 U_{max} 是使电流为零所必须加上去的电压^[1, 2, 3, 4]。

这个实验用几种波长不同的光来做。这样, 我们可以画出 $e \cdot U_{max}$ 随入射光频率的变化而变化的图线。这条图线是一条斜率为普朗克常量 h 的直线:

$$e \cdot U_{max} = h \cdot f - W_{A-cat} \quad (3)$$

这条直线与纵坐标的交点就是阴极材料的逸出功。

缺点：

方程 (2) 是错的。实验中所测定的电压并不是方程 (1) 中的动能。相应地，方程 (3) 也是错的。

为了理解其中的原因，我们来讨论如图 10-4-2a 所示的模型。我们来看盛有水的容器 L 和 R (L 表示左和 R 表示右)。L 的边缘离水面的高度 h_L 小于 R 的边缘离水面的高度 h_R 。我们把 Δh 叫做水面的高度差。

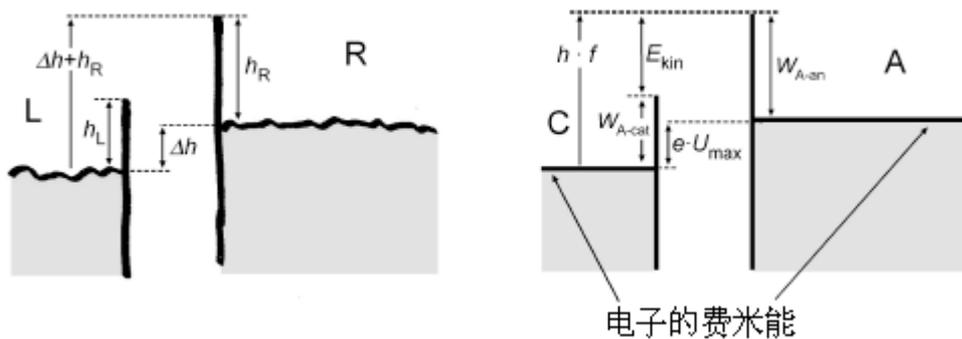


图 10-4-2 (a) 质量为 m 的水从左边的容器 L 被输送到右边的容器 R。完成这一过程需要 $m \cdot g \cdot (\Delta h + h_R)$ 的能量。(b) 一个电子从阴极 C 被输送到阳极 (anode) A。完成这一过程需要 $eU_{\max} + W_{A-an}$ 的能量。

现在我们把质量为 m 的水从 L 输送到 R。完成这一过程所需的能量由 L 的水位和 R 边缘的高度差决定：

$$\text{最小传输能量} = m \cdot g \cdot (\Delta h + h_R) . \quad (4)$$

从上式可以看出，这部分能量与 h_L 无关。

显然，光电效应也有类似的情况。在图 10-4-2b 中，左边有阴极 C，右边有阳极 A。竖直方向的符号表示电子的能量。

图 10-4-2a 中的两个水位分别相当于阴极和阳极中电子的费米能 (电势)。水面与相应的容器边缘之间的距离表示逸出功 W_C 或 W_A 。将一部分水从一个容器传输到另一个容器所需的最小能量相当于将一个电子从阴极传输到阳极光子至少应具有的能量 $h \cdot f$ 。我们可以从图中看出，这部分能量可以用两种方式来表示：

$$h \cdot f = e \cdot U_{\max} + W_{A-an} , \quad (5)$$

或

$$h \cdot f = E_{kin} + W_{A-cat} . \quad (6)$$

根据 (5) 式, 我们得到

$$e \cdot U_{\max} = h \cdot f - W_{A-an}.$$

这个表达式类比于 (4) 式。根据 (6) 式, 我们得到

$$E_{kin} = h \cdot f - W_{A-cat}.$$

与最后两个公式相应的直线如图 9-4-3 所示。为了将电子从阴极拉出来 (为了使 $E_{kin} > 0$), 光子的能量 $h \cdot f$ 必须大于阴极的逸出功, 即 $f > W_{A-cat}/h$ 。

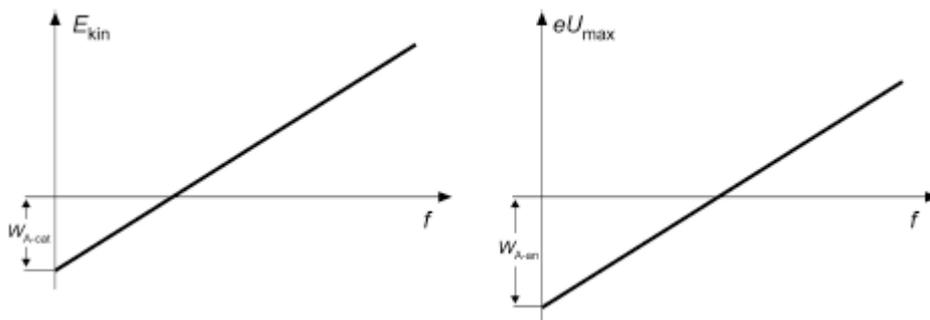


图 10-4-3 (a) 动能与入射光的频率的关系图线。纵坐标上所标出的那一段表示阴极的逸出功。(b) 最大电压和基本电荷的乘积与入射光的频率的关系图线。纵坐标上所标出的那一段表示阳极的逸出功。

图 10-4-3 (a) 所示的直线可以通过对图 10-4-3 (b) 所示的直线向纵轴方向平移 ($W_{A-an} - W_{A-cat}$) 后得到。阳极和阴极的逸出功之差相当于两种材料的接触电压 (contact voltage) U_C 。我们有

$$e \cdot U_C = W_{A-an} - W_{A-cat}. \quad (7)$$

在我们所引用的多数教科书中, 都像图 9-4-3b 那样画出了 $e \cdot U_{\max}$ 与频率的函数图线, 而在坐标上标的却是图 10-4-3a 所示的名称。我们仅仅在斯波斯基 (E. W. Schpoliski) 所编著的教科书中找到了对这个问题的正确处理^[5]。

读者即使接受了我们的上述观点, 但仍会产生下面的异议: 在中学或在大学实验室中所做的这个实验所给出的结论是阴极材料的逸出功, 而不是阳极材料的逸出功。实际测量表明, 阳极材料的逸出功比阴极材料的要大 2eV。对这一奇怪现象的解释是, 有一小量的铯 (我们假定阴极材料是用铯做的) 到达了阳极的表面。实际上, 制造光电管的厂家注意到这种效应。在阳极表面上不时地涂上铯, 这足以让所有光电子射到阳极材料上。逸出功小的材料的每一点表示势的最小值, 使电子自愿地选择这些地方, 从而进入阳极材料。根据制造商的建议, 有些光电管必须经常加热, 以清理来自阴极材料的杂质。否则, 由于杂

散光 (stray light) 阳极本身也会开始充当光电子的发射源。

最后有人可能会问, 为什么制造商要用像铯这种逸出功小的材料来做阴极, 为什么不用这种材料来做阳极? 要回答这个问题, 我们必须弄清楚生产光电管的目的是什么。光电管通常不是用来给物理教师测普朗克常量的, 它们是用来测光的强度的。对于后一种用途, 外加的电压是另外一个方向: 这个电压不是用来阻止电子的运动, 而是用来把电子从阴极拉出来。为了使光电管对波长较大的光比较敏感, 阴极材料的逸出功必须是小的。

历史:

爱因斯坦的工作是在实验的效应上, 而不是在实验上。

在他发表论文后的很长一段时间里, 一直没有出现相关的实验数据。爱因斯坦当时只关注对观察到的现象的解释: 单独一个电子的动能与光的强度无关, 射出来的电子数正比于光的强度^[6]。

在爱因斯坦发表论文后的几十年中, 有很多研究人员对这个效应做了非常彻底的测量工作。其中最重要的工作是密立根(R. A. Millikan)的实验^[7, 8]以及卢开斯基(P. Lukirsky)和普莱才(S. Prilezhev)的实验^[9]。图 10-4-4 引自卢开斯基等学者的著作。它表明, 发射出来的电子的动能 E_{kin} 是入射光频率的函数。根据公式 (1), 直线在纵轴上的截距 (在图中没有画出) 乘以系数 e 后等于阴极的逸出功。作者通过将阴极和阳极之间的接触电压与所测得的电压 U_{max} 相加后得到动能。他们 (指密立根等) 独立地测出了接触电压。

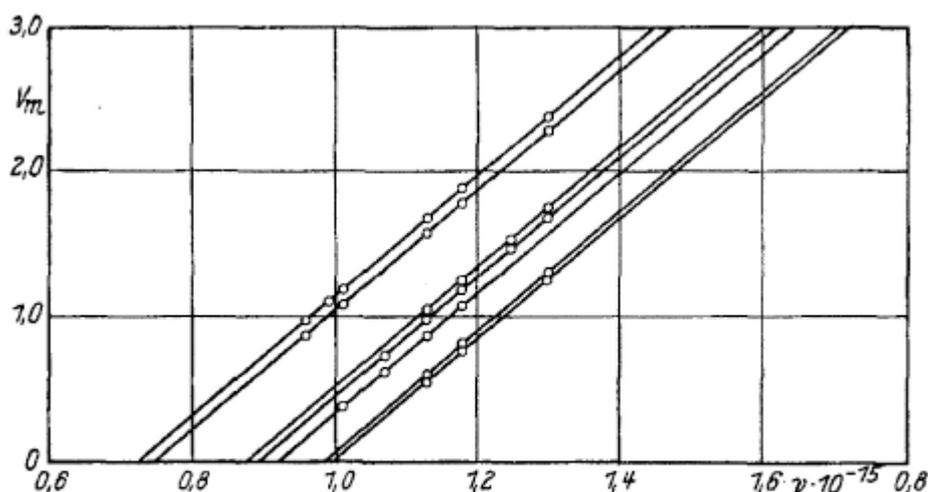


Fig. 10.
Die Geraden entsprechen den Metallen (von links gerechnet):
Al, Zn, Sn, Ni, Cd, Cu, Pt.

图 10-4-4 从卢开斯基和普莱才的著作中所得到的原始结论^[9]。纵坐标:

$U_{\max}+U_C$ ，横坐标：入射光的频率。 U_{\max} 是当光电流刚好等于零时的电压， U_C 是接触电压。在纵轴上的截距（图中未画出）相应于阴极的逸出功。如果只表示出 U_{\max} ，我们将得到阳极的逸出功。

在许多教科书中，我们可以找到相同的图线，只不过有一点不同，相应于 $e \cdot U_{\max}$ （或 U_{\max} ）的纵轴被认为是动能轴。在参考文献[2]中，卢开斯基等学者的原始图线被照样复制了过去，但纵轴的名称被改成了 U_{\max} 。

这样的传递错误是如何产生的？不难看出，截止电压（乘以基本电荷）与最大动能是相等的。不熟悉接触电压的人也许会把它们看作是一种混乱。这种混乱对于第一种方法来说是可以忽略的。即使是卢开斯基，虽然他对这个课题作了全面的研究，他仍认为接触电压是一个不好的概念。当然，我们可以持这一观点。但是，我们不要去解释纵轴上的截距，这是因为，阴极的逸出功跟这两个逸出功的差属于同一种量，见公式（7）。

最后，接触电压无非就是在两种材料中电子的化学势差。化学势与材料的表面无关，与表面是否清洁无关。因此，逸出功和接触电压这两个量跟描述材料其他性质的量（如密度、电导率）一样重要。当然，表面的清洁程度会影响测量的精确度，这是因为，如果表面上有灰尘，我们必须考虑到灰尘的化学势，而不是整块材料的化学势。

不仅是这个错误的来源有点意思，而且去纠正这一错误的过程（这一过程最后没有结果）也是很有意思的。在 1973 年有一篇标题很清楚的文章“光电效应的一个常见错误”发表在英国的《物理教育》（Physics Education）杂志上^[10]。三年后，一篇题为“关于描述光电效应中的一个普遍性错误”发表在《美国物理学杂志》（American Journal of Physics）上^[11]。这位作者可能忽视了英国的那本杂志。在 1980 年有一篇相同的文章出现在德国中学的科学评论上，其标题显得没有特色：“逸出功和光电效应”^[12]。这位作者引用了美国杂志上发表的文章。

这个故事告诉我们，一个错误会长期保存下来，即使人们已经注意到要去纠正它。如果错误的观念是似是而非的，如果这种观念的传播没有引起大的负面影响，要纠正它似乎是不大可能的。

建议：

有三种可能性：

1. 正确地解释光电效应，正如上面所介绍的用水来模拟。
2. 不要解释坐标轴上的截距。

3. 完全不要开展光电效应的实验和解释这个实验。对于在 1910 年或 1920 年的科学家来说，这个实验是很重要的，它是一个关键性的实验。幸运的是，今天的学生并不要像以前的学生那样在比较困难的条件下来获取知识。现在我们知道这个故事是怎么结束的。我们知道还有大量另外的实验仅仅根据光和物质之间相互作用的量子化来解释现象。我们知道薛定谔方程，我们能够用便宜的材料来检测单个光子。如果学生没有通过实验看到光电效应，他们也能理解相应的物理知识。

[1] *Gerthsen, Kneser and Vogel: Physik, Springer-Verlag, Berlin 1977, p.308*

[2] *Stierstadt, K.: Physik der Materie, VCH, Weinheim 1989, p.489*

[3] *Wichmann, E. H.: Quantum Physics, Berkeley Physics Course, Volume 4, McGraw-Hill, New York 1971, p.28-31*

[4] *Hecht, E.: Optik, Addison-Wesley, Bonn 1989, p.571-574*

[5] *Schpolski, E. W.: Atomphysik, VEB Deutscher Verlag der Wissenschaften, Berlin 1972, p.315-320*

“其次，跟其他所有相同的情况中所发生的一样，由于接触势（它很难精确测定），图线也发生了移位。这一困难跟其他几个困难以及错误产生的来源都是导致爱因斯坦方程在一开始不能得到恰当证明的原因。只有密立根经过很长时间的才用实验得到了证明，并精确地测出了 h 。这样，经过了一段很长的历程，矛盾终于被揭示了出来，并得到了消除。”

[6] *Einstein, A.: Über einen die Verwandung des Lichts betreffenden heuristischen Gesichtspunkt (关于光的产生和转化的一个试探性观点), Annalen der Physik 322, Nr. 6, 1905, S. 132-148.*

“如果激发光的每个能量子独立地（与所有其他能量子无关）把它的能量释放给电子，那么，电子的速度分布（它衡量所产生的阴极射线的特性）将与激发光（exciting light）的强度无关；另一方面，离开物体的电子数在其他条件相同的情况下与激发光的强度成正比。”

[7] *Millikan, R. A.: Einstein's Photoelectric Equation and Contact Electromotive Force, Phys. Rev. 7, 1916, p. 18-32*

[8] *Millikan, R. A.: A Direct Photoelectric Determination of Planck's "h", Phys. Rev. 7, 1916, p. 355-388*

[9] *Lukirsky, P., Prilezhev, S.: Über den normalen Photoeffekt (关于正常的光电效应),*

Zeitschrift für Physik 49, 1928, p. 236-258. “如果纵坐标表示 V_2+K 的值（它通过用不同频率的光照射到一给定的金属上而得到），横坐标表示频率 ν ，我们得到一条直线。这条直线的斜率等于 h/e 。由于 e 是已知的，所以我们得到了 h 的值。”（这里， V_2 就是 U_{\max} ， K 就是接触电压。）

[10] *James, A. N.*: Photoelectric effect, a common fundamental error, Phys. Ed. 8, 1973, p. 382-384

[11] *Rudnick, J., Tannhauser, D. S.*: Concerning a widespread error in the description of the photoelectric effect, Am. J. Phys. 44, 1976, p. 796-798

[12] *Strnad, J.*: Die Austrittsarbeit beim Photoeffekt, Praxis der Naturwissenschaften-Physik, 1980, p. 343-344

Ralph von Baltz, Friedrich Herrmann and Michael Pohl

10. 5 用 LED 测普朗克常量

主题:

普朗克常量可以用发光二极管(LED)来测定。加在LED上的电压不断地增大,直到二极管开始发光。这时,相应的临阈电压 U_0 乘以基本电荷叫做带隙能(band gap energy),它等于所发射的光子的能量。这个实验用各种不同的LED来做,因为这些不同的LED可以发射不同频率的光。

缺点:

对于发光二极管所发出的光,是没有临阈电压这个概念的。光的强度与二极管中的电流成正比。电流 I 与所加电压 U 之间的函数关系近似为

$$I = I_s \cdot \exp\left[\frac{eU}{\eta kT}\right] = I_s \cdot \exp\left[\frac{U}{U_T}\right]. \quad (1)$$

这里 k 是玻耳兹曼常量, T 是热力学温度, e 是基本电荷。 η 叫做非理想因子(non-ideality factor),其值介于1和2之间。如果所有电子-空穴对都以辐射的形式重新结合,它的值等于1。只要所比较的二极管的 η 值都相等, η 值对所讨论的问题是无关紧要的。 I_s 是饱和电流。它取决于温度和带隙能 E_g 。它们之间有以下关系式成立:

$$I_s \sim A \cdot \exp\left[-\frac{E_g}{\eta kT}\right],$$

式中 A 是pn结的接触面积。除了

$$U_T = \frac{\eta kT}{e},$$

(1) 式中没有其他特征电压。然而, U_T 与带隙能无关^[1, 2]。

由于二极管一直在发射电磁波,所以对它来说没有所谓的开始发射时的最小电压。但是,发射的强度与所加的电压有关。当 $U=0V$ 时,它也在发射,即发射热辐射。当电压增大时,发射光的强度按指数规律增强,而它的光谱分布没有变化。使人感到奇怪的是,二极管发射的光子能量几乎等于带隙能,即使提供给电子-空穴对的能量 eU 比较小。实际上,当所加电压小的时候,二极管将稍有些冷却。它的作用变得像珀耳帖元件一样了。由于这个效应比较小,它被不可避免的耗散热所掩盖了。

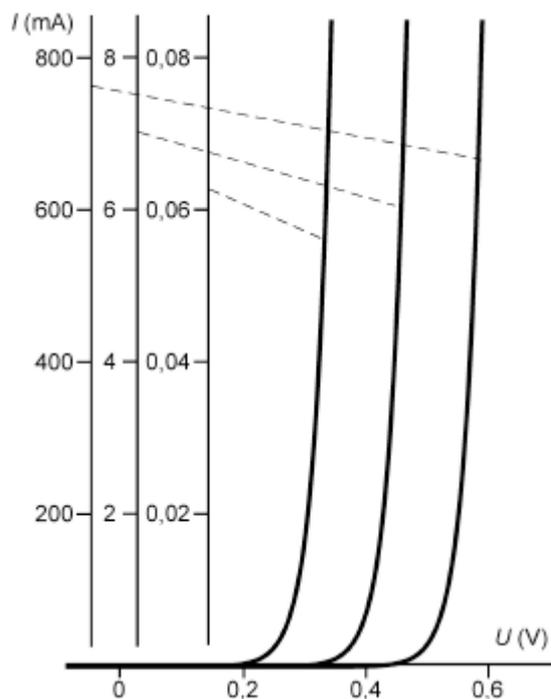


图 10—5—1 相同的二极管的特征曲线。不同的曲线对应于不同的电流标度。这些曲线具有相同的形状。经过水平平移后，它们能完全吻合。

获得“临阈电压” U_0 的方法基于一种错觉。图 10—5—1 给出了三条相同的指数曲线。这三条曲线的区别仅仅是由于选择了不同的坐标原点。在每次选择坐标原点时，我们将纵坐标的标度变换了一下，都缩小 100 倍。这样，曲线就水平平移

$$\frac{kT}{e} \ln 10^2 = 0.119V.$$

（这里，我们假定 $\eta=1$ 。）

我们从图线中将读出不同的“临阈电压”值，而每次的变化量是相同的。

历史：

这个实验在中学和大学物理实验室中是作为一个简单而便宜的实验来介绍的。对这一实验的这种不正确的解释给人造成一种似是而非的感觉。显然，它忽视了这样的事实，即“临阈电压”原则上不能用指数函数来确定。

建议：

普朗克常量可以通过几个二极管的不同带隙能来确定（图 10—5—2）。

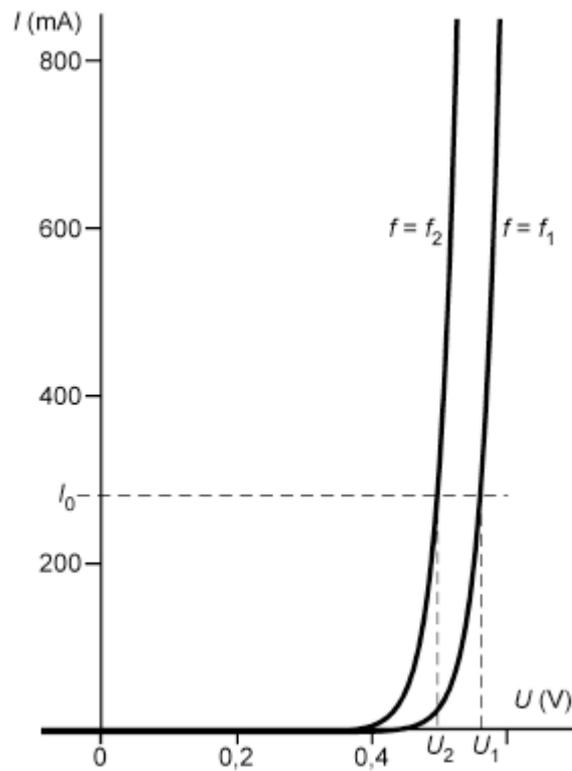


图 10-5-2 两个二极管的特征曲线。它们发射不同频率的光。这两个曲线通过水平平移后能完全吻合。

但是，这里有一个条件：所有二极管的 pn 结的接触面积必须相同。如果满足这个条件，那么相应的特征曲线的区别仅仅在于

$$\exp\left[-\frac{E_g}{\eta kT}\right]$$

这个因子的不同^[3]。带隙能 E_g 与发射光的平均频率的关系为

$$E_g = h \cdot f.$$

这样，两条曲线的水平距离为

$$(E_{g1} - E_{g2})/e.$$

现在我们任意选择一个电流值 I_0 ，并读出相应的电压值 U_i 。我们得到

$$U_1 - U_2 = (E_{g1} - E_{g2})/e,$$

即

$$e(U_1 - U_2) = (E_{g1} - E_{g2}) = h(f_1 - f_2).$$

因此，我们有

$$h = \frac{e(U_1 - U_2)}{f_1 - f_2}.$$

请注意，无论是 $eU_1 = hf_1$ 还是 $eU_2 = hf_2$ 都是不成立的。

如果我们作 eU_i 与发射光频率的函数图线，我们将得到一条斜率等于普朗克常量的直线（图 10-5-3）。

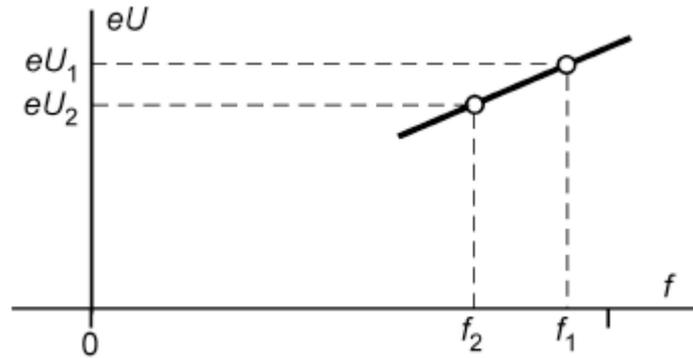


图 10-5-3 对于两个（或更多个）二极管，在 I_0 时的电压和 e 的乘积与发射光频率的函数图线。直线的斜率等于普朗克常量。

（我们也可以画出相同电流下每条曲线在相应点的切线，并在横坐标上读出其截距。显然，我们也可以在图 10-5-2 中直接读出这两个电压值。但是，这样会导致一种错觉，即以为这个截距就是临阈电压。）

图 10-5-3 中的直线是否过原点，这仅仅取决于对电流 I_0 值的选择。

不采用上述方法（读出给定电流下的电压值），人们通常采用另一种方法：选择当二极管发出可见光时的电压值。由于人们会很自然地将二极管发出的光的强度与周围环境的光的强度作比较，一个电压值就很可靠地被确定了。运用这一方法，所有二极管的电流值可以足够精确地确定为相同。这就解释了为什么这种方法会给出令人满意的结果。用这种方法得到的直线通常会通过原点。然而，这一事实纯粹是一种巧合。

[1] Herrmann, F. and Schätzle, D.: Question # 53. Measuring Planck's constant by means of

an LED, Am. J. Phys. **64**, 1996, S. 1448

[2] *Morehouse, R.*: Answer to Question # 53. Measuring Planck's constant by means of an LED, Am. J. Phys. **66**, 1998, S. 12

[3] *Würfel, P.*: Physics of Solar Cells, Wiley-VCH, Weinheim 2009

Friedrich Herrmann and Peter Würfel

第十一章 原子核物理学

11. 1 核反应和放射现象

主题:

这个主题包括对原子核转变的描述和对核辐射过程的测量和检测的讨论。

放射性物质会放射出三种射线： α 、 β 和 γ 射线。原子核转变过程可以分为放射性衰变、核裂变和核反应三种。

缺点:

原子核物理学是陈旧概念成堆的地方。如果我们比较一下对原子核转变的描述方法和对化学反应的描述方法，这一点是非常明显的。这里，我们已经发现了第一个不足的地方。通常所说的化学知识和关于原子核的化学知识（即关于原子壳层的物理知识和关于原子核的物理知识）具有很多相同点。然而，在许多教科书中却没有呈现这些相同点。如果我们运用这些相同点来对两种知识进行类比，原子核物理学的概念就会得到简化，学生对这部分知识的学习就会变得更容易。

在原子核物理学中，我们把在化学中已经有的概念用新的名称来引入：在化学中叫做单分子反应（monomolecular reaction），在原子核物理学中却叫做核衰变（decay）或自发裂变（spontaneous fission）；在化学中叫做自催化反应（autocatalytic reaction），在原子核物理学中叫做链式反应（chain reaction）；在化学中叫做反应速率（reaction rate），在原子核物理学中叫做放射性活度（activity）；在化学中反应速率的单位是摩尔/秒（符号为 mol/s），在原子核物理学中放射性活度的单位是贝克勒尔（Antoine Henri Becquerel）（符号为 Bq）。

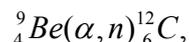
由此，我们可以知道两者的关系应该是：

$$1 \text{ mol/s} = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ Bq}$$

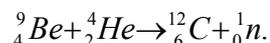
然而，在实际中却是这样写的：

$$1 \text{ mol/s} = 6.02 \cdot 10^{23} \text{ Bq} \cdot \text{mol}$$

反应方程在化学中和在原子核物理学中的写法也是不一样的。例如， ${}^9_4\text{Be}$ 和 ${}^4_2\text{He}$ 变成 ${}^{12}_6\text{C}$ 和 1_0n 的反应在原子核物理学中是这样写的：



而在化学中却是这样写的：



另外，在原子核物理学中的这种表示方法给我们带来更大的不利是，它强调了反应物 ${}^9_4\text{Be}$ 和 ${}^4_2\text{He}$ 以及生成物 ${}^{12}_6\text{C}$ 和 1_0n 的不对称性，而这种不对称性不是一个根本性的问题，它

仅仅是 ${}^9_4\text{Be}$ 和 ${}^4_2\text{He}$ 之间以及 ${}^{12}_6\text{C}$ 和 ${}^1_0\text{n}$ 之间质量的差异。并且，这种表示方法只能应用于刚好是两种反应物和两种生成物的情况。

有时相同的一句话在化学中和在原子核物理学中具有不同的意思。在原子核物理学中，在核反应中至少有两种反应物参与反应，否则不叫核反应，但在化学中却不这样。

在学习原子核物理学时肯定会遇到特别多的术语。在原子核物理学中通常会作一些不必要的和非本质性的区别。例如，在原子核物理学中，人们总是要区别天然放射性和人工放射性，即在自然界中可以找到的核素的衰变过程和人工制造的核素的衰变过程。当然，化学工作者们也可以区别天然和人工化合物，区别它们各自的自发分解过程。幸运的是，他们并没有这么做，这是因为这不是本质性的区别。

给衰变产物在已有常规名称的基础上再取上“辐射名称”也是不必要的。并且， α 、 β 和 γ 辐射这些名称似乎告诉我们这些粒子之间存在着相同点或类比关系，但实际上没有这么回事。另一方面， γ 过程（译者注：在核反应中高能光子的发射和吸收过程）和光化学反应（photochemical reaction）的关系通常不是很明显的。

历史：

为何在原子核物理学中对辐射的描述占如此强的优势？那些迅速增长的术语来自何处？为什么我们要花这么多教学时间用于描述辐射的测量过程？

首先，在很长一段时期内，人们只知道原子核的转变与“辐射”有关。人们当时只能通过辐射来获得关于原子核转变过程的信息。这个信息就是，其中一种反应产物具有较小的质量，它几乎携带着所释放出的全部能量。刚开始，人们观察到辐射，但不知道它的本质是什么。自然地，人们要给它们取一个恰当的名称。并且，在原子核物理学诞生之际，对辐射的研究是很流行的，有好几位新辐射的发现者获得诺贝尔奖金。原子核和原子壳层所发生的过程的相同点是慢慢地被人们认识到的。几十年以后人们才观察到（或实现了）反应速率像化学反应一样快的核反应。直到1920年人们才认识到太阳也是一个核反应堆。到1942年人们才开始建造出第一个核反应堆。

建议：

这个建议并不是很简单的。它需要我们对原子核物理学的内容和结构作全面的调整。如果真的要这样做，那就最好以化学为典范。

Friedrich Herrmann

11. 2 质量盈余

主题:

原子核的质量小于它的组成部分的质量之和。这一质量差叫做质量盈余 (mass excess)。

缺点:

1. 质量盈余一词是在原子核物理学中被引入的。然而, 相应的现象在有关电子壳层的物理学中也存在。一个原子的质量小于组成它的原子核和电子的质量之和。同样, 一个分子的质量小于组成它的原子的质量之和。两块相反的磁极相互吸引在一起的磁铁的质量小于它们分开时的质量之和。

2. 这一名称意味着, 我们所预期的质量值与实际的值之间存在着一个小的偏差。然而, 当我们进入核子内部来考察组成它们的粒子(夸克)时, 相应的质量盈余将比它们的组成部分的质量之和还要大。最后, 我们不得不得出这样一个结论: 任何粒子的总质量总是“盈余的”。

3. “盈余”一词通常带有“多余”的意思。只有对于那些不知道场也具有质量的人才会认为质量会多出来。因此, 质量盈余并不是一个缺陷, 它更有利于平衡关系的建立。否则, 质能关系是不完善的。

历史:

曾经, 质量盈余这一名称是合理的。自从 1772 年拉瓦锡发现质量守恒定律以来, 人们都知道物质的质量等于它的组成部分的质量之和。这个定律在测量的精确度范围内被证明是成立的。直到 1900 年它一直被认为是正确的。

质量守恒定律被发现后约 100 年, 人们独立地发现了能量守恒定律。直到 1905 年我们才知道, 按原有的形式, 这两个定律没有一个是正确的。然而, 质量和能量是同一个物理量, 只有对于新的物理量能量-质量 (energy-mass) 才有守恒定律。在前相对论时代, 原子核的质量和组成它的质子和中子的质量之间的差异是一件令人惊奇的事。1905 年后, 它只不过是爱因斯坦理论的一个证明。然而, 从现代物理学的观点来看, 质量盈余这一名称是有误导作用的。

建议:

从现代物理学的眼光来看待质能相当性原理, 把质量盈余看作是理所当然的事。这样,

我们就不会认为有质量多出来了。质量是不会多出来的。

Friedrich Herrmann

第十二章 天体物理学

12. 1 赫兹普龙-罗素图

主题

在任何一本高中物理教科书中都可找到赫兹普龙-罗素图 (The Hertzsprung-Russell diagram)。图中的点表示恒星，横坐标表示光谱的类型或恒星的表面温度，纵坐标表示光度。

缺点

1.坐标的名称

纵坐标的变量叫作光度。光度实际上就是能流。

横坐标的变量叫作光谱类型。我们知道，这并不是变量；如果它是变量，其值也是不连续的。事实上，恒星的光谱是很复杂的。首先，它们跟普朗克辐射体的光谱不完全相同。另一方面，它们既有吸收谱线，也有发射谱线。为了理清许多不同类型的光谱，我们引入了光谱类型这一概念，其数值和复杂程度随时间的增大而增大。然而，我们也可以用单独一个数值来表示每种光谱，这数值就是最接近恒星谱线的黑体辐射的温度。

对于学生来说，显然最好把 HR 图的坐标轴分别叫作“能流”和“温度”。

2.变量的选择

然而，更麻烦的是变量的选择：能流和温度。当然，这两个变量是相关的。然而，我们到底想要表达什么？一般情况下，在物理学中所涉及的是函数关系，而不是相关关系。或者用图像来表示的话，在物理学中所涉及的是图线，而不是散点。散点图是社会学家、教育家和经济学家所用的相关关系图。

实际上，我们也可以在坐标系中用图线来描述 HR 图所表示的函数关系：对于一颗单独的恒星，在从其产生到消灭的整个历史过程中，此图线给出了从这颗恒星流出的能流和其表面温度的函数关系。这图线的样子基本上取决于恒星的质量。因此，我们可以得到一组以恒星质量为参数的不同函数。另一方面，在 HR 图中质量似乎是一个随机变量。

但是，如果我们把从恒星流出来的能流想象为其表面温度的函数，问题就马上出来了：我们的做法显然是错的。我们希望传递给学生的信息完全不是这个。我们想告诉学生的是：每颗单独的恒星经历着一个演化的过程。当我们在课堂中讨论恒星演化时，总要去探究关于时间的函数；如果要探究恒星的内部规律，还要考虑到位置（离恒星中心的距离）。例如，我们要探究（在某一固定位置 r 处）恒星表面的温度与时间的函数关系，或向外流出的总能流与时间的函数关系。

历史

对恒星的分类在希腊化时代已经完成了。然而，在 18 世纪恒星物理学（即天体物理学）开创时期，这一分类有了更大的发展。当时人们发现，恒星并不是象以前人们所想象的那样恒定不变的。到了 19 世纪中叶，人们已经能测出最近的恒星离我们的距离了，并测定恒星的绝对亮度了。最终，人们发现了恒星的绝对亮度和光谱之间的关系。关于能源的问题涉及恒星演化的问题，但这一问题当时是无法回答的。赫兹普龙-罗素图所给出的相关关系是当时所观察到的少数几个现象之一。现在看来，这实际上应归类于“原始数据”，因为物理学家们所关心的实际上是单独一颗恒星在当时的演化情况。

HR 图能够保留下来的原因之一当然是它的名称。有了名称，它就显得重要了。赫兹普龙和罗素必定是有名的研究者。这样，HR 图毫无疑问属于普通教育的教学目标。然而，学生从其他许多对天体物理学的创立起重要作用的研究者们那里学到了什么？谁发现了恒星的运动？谁首先测定了恒星的距离？最后，对上述我们所讨论的主题也许是最重要的问题是：谁提出了恒星的能源是核反应？

这样，这又是一个我们的总话题的一个典型例子。在物理学史中，产生了复杂的不透明的散点图，直到后来它才得到了解释，并应该被一种更透明的图示方法所取代。然而，它没有被真正取代，并被保留了下来。

建议

对恒星的演化可以用典型的类太阳恒星的演化来讨论：类太阳恒星最后变为白矮星，白矮星最后变为中子星，中子星最后变为黑洞。在这里，赫兹普龙-罗素图是不需要的。

F. Herrmann

第十三章 化学

13. 1 物理过程和化学过程

主题:

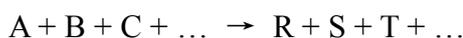
下面两段内容引自两本化学教科书:

“物质变化的过程叫做化学过程。通常，物质的状态变化叫做物理变化。在物理变化中，物质的基本性质没有变化。硫溶解或汽化后，仍然是硫。”

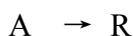
“化学是一门关于物质及其变化的科学。相反，物理学是研究物质的状态及其变化的科学。”

缺点:

(1) 物理学和化学的分界线被不恰当地歪曲了: 物理学和化学的区别就是“化学反应”和相变的区别。然而，这两种过程是有紧密联系的。我们更容易来强调它们的相同点。这两种过程可以用相同的方法和概念来描述。化学反应可以用符号描述为:



相变是化学反应的特例。在对相变的描述中，箭头的左边和右边都只有一种物质:



然而，这一特殊性在对相应问题的数学处理上并没有引起根本性的差异。这两种过程都是由反应物和生成物之间的化学势差来驱动的。上述两种情况的化学势值都可以从同一张表中查得。同样，我们可以用相同的计算步骤和同一表格中的数值来计算热平衡的问题。在上述两种情况中，都有吸热和放热过程，而这两种过程又都可以是可逆的或不可逆的。

(2) 如果我们采用上述关于物理过程和化学过程的定义，我们无论如何会陷入一种困境。化学过程的判断标准是新物质的形成。然而，什么是新物质？溶解过程是物理过程还是化学过程？水合作用是化学过程还是物理过程？气态的 NaCl、溶解状态的 NaCl 和晶体状态的 NaCl 是不同的物质吗？在固体物质中所发生的相互作用过程又是什么过程呢：晶格空位与填隙原子或离子的相互作用，电子与空穴的相互作用？

历史:

在开始介绍一门新的学科领域时，其方法通常是不一样的。显然，化学教科书特别清楚地界定了它与物理学的区别。而在物理教科书中，在与化学划定界线方面就没有作相应的努力。另外，在物理学和电子工程之间也没有彼此划定界线的倾向。

建议：

我们最好不要强调相变和“真”化学反应之间的区别，最好将这些过程作为同一种过程的特殊情况来处理。以下这些过程也属于这类过程：电子与空穴的反应、实物与光的反应、填隙原子与晶格空位的反应、原子核之间的反应.....

Friedrich Herrmann

13. 2 化学平衡

主题：

“化学平衡是反应物和生成物的浓度不再随时间变化时的状态。在这个状态中，向正方向的反应速率等于向负方向的反应速率。这种过程叫做**动态平衡**。”

缺点：

我们来讨论一个较大系统中的两个子系统 A 和 B。这个大系统可以实现几种平衡，其数量等于 A 和 B 之间能相互交换的广延量的数量。（这里，只有能量不能计入这个数量中，这是因为它在交换时一定伴随着别的广延量的交换。）对于第一个广延量 X （除能量外）对应一个与能量“共轭”的强度量 ζ 。如果 A 和 B 之间可以交换 X ，这种交换只有当 A 和 B 相应的强度量具有相同值时（即当 $\zeta_A = \zeta_B$ 时）才会停止。现在两个子系统由于 X 的交换而处于平衡状态。然而，这决不是它自身的平衡。任何一种平衡都是相对于一个广延量来说的。因此，当我们说平衡时，我们总是要指明是哪一种平衡。两个可以交换熵的系统当它们的温度相等时（即当 $T_A = T_B$ 时）处于**热平衡**状态。两个可以交换电荷的系统当它们的电势相等时（即当 $\varphi_A = \varphi_B$ 时）处于**电平衡**状态。两个在摩擦过程中交换动量的物体当它们的速度相等时（即当 $v_A = v_B$ 时）处于**力学平衡**状态。在化学反应中，物质的量 A (1)、A (2)、A (3) ……由于物质的量 B (1)、B (2)、B (3) ……的变化而发生变化。当物质 A (i) 的化学势之和等于物质 B (i) 的化学势之和时（即 $\sum \mu_{A(i)} = \sum \mu_{B(i)}$ 时），在反应方程一边的物质与另一边的物质处于**化学平衡**状态。

当把化学平衡放在一个较大的背景下来考察时（正像我们刚才所做的），我们会发现，把化学平衡强调为**动态平衡**是不恰当的。

我们将化学平衡与电平衡作一比较。为了说明得具体一点，我们来讨论一根铜线。我们想象这根导线由相同的 A 和 B 两部分组成。显然，这两个子系统处于电平衡状态。我们有理由说，在 A 和 B 之间没有电流。然而，如果我们像描述化学平衡状态那样来描述这种状态，我们不会说 A 和 B 之间没有电流。因为从 A 到 B 和从 B 到 A 两个方向上电子始终在运动，对于横截面积为 1mm^2 的铜线来说，相应的电流分别为：朝一个方向的电流是 10^8A 和朝另一个相反方向的电流是 10^8A 。同样，当没有风的时候，我们不会说空气处于静止状态，这是因为向右有 $100\text{kg}/(\text{m}^2 \cdot \text{s})$ 的质量流和向左有同样大小的质量流；另外，还有向上、向下、向前和向后的质量流。同样，在热平衡中，声子（phonon）在两个方向上流动；在力学平衡中，动量在两个方向上始终传递着。

当然，在微观上这样来考虑平衡过程并没有错。但是，有两点需要指出。首先，化学

平衡跟其他平衡并没有什么特别的地方，对于其他平衡我们并没有强调它们是“动态平衡”；其次，过分地强调某一方面反而容易引起误解。如果在一根“没有电流”的铜线中有两个相反方向的电流，那么为什么这根线没有发热？同样我们要问，为什么同时朝相反方向进行的两个化学反应中没有出现耗散现象？显然，这个问题是人为造成的。我们把微观和宏观两个不同层次的描述方法混在一起了。

历史：

化学这门学科自身还没有用化学势建立一种简单的现象学层面上的化学反应描述方法。这跟物理学不同。在物理学中，通常把热流描述为由温度梯度引起的流，把电流描述为由电势梯度引起的流。对这些过程的微观描述要在后来的原子物理学和固体物理学中来介绍。在化学中，人们一开始就直接从分子层面来描述相关的现象，这样就导致那些简单的热力学量需要用复杂的方法来解释了。

建议：

我们应该这样说，反应一直到化学平衡时才停止。只有在高级水平的课程中我们才来讨论微观层面上的那种永久的化学涨落。我们应该像在电学中那样来描述反应过程。在电学中我们一开始是这样来描述的：“在电平衡状态中电流为零”。然而，这并不影响我们以后再费米面的对称性在微观层面上来解释这种状态。

Friedrich Herrmann

13. 3 化学电池

主题:

除了发电机以外，化学电池也是一种非常重要的电源。化学电池在历史上曾经是最早的电源。毫无疑问，化学电池应该进入中学物理教育中。

缺点:

在物理课程中我们找不到化学电池的内容。这是为什么？物理老师也许会这样认为：“这个内容比较难懂。有关化学电池要学的内容都是些要记忆的东西，即发生在电极上的各种不同的化学反应。对不同种类的电池，这些化学反应又各不相同。因此，这是一个典型的化学方面的课题。”

如果考察一下化学教科书，我们就会相信上述结论。化学教科书中通常给出大量细节和技术上的术语，最后使读者无法注意到问题仍没有得到解决这一事实。这正是科学工作者经常责备人文工作者所存在的缺点。无论在物理课中还是在化学课中，我们都没有引入一个与那些细节和某个反应的独特性无关的可用来解释有关现象的量，这个量就是化学势。

然而，这一课题也不是化学独有的，它也属于物理学的课题。这里有两个原因，首先，化学电池可以用典型的物理学的方法来解释；其次，总的来说它与化学反应的细节无关。

我们可以将其与对另一种电源的解释方法作比较。在解释发电机时，我们用一个简单的模型来说明它的基本原理。这样，我们就理解了对所有发电机来说都相同的原理，对许多在技术上不同的发电机都用同样的原理来加以说明。对于化学电池，我们也应该用同样的方法来处理。我们应该把一般的工作原理放在最重要的位置。

历史:

事实上我们没有运用化学势这个概念。吉布斯基本方程是：

$$dE = TdS - pdV + vdp + \mu dn + \phi dQ + \dots$$

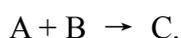
这个方程告诉我们，在描述能量交换的过程中我们需要下列哪些物理量：热力学量温度 T 、熵 S 、压强 p 和体积 V ，力学量速度 v 和动量 p ，化学量化学势 μ 和物质的量 n ，电学量电势 ϕ 和电荷 Q ，等等。我们发现，有两个量几乎从来没有在这里被用过，好像它们是禁区似的。这两个量就是熵和化学势。为此，人们付出了很高的代价：一方面，人们使用笨重的代用品，例如，用焓（而不是熵）这一实际上不合适的量来作为对热的测量，或用能量

的贬值来描述熵的产生；另一方面，人们简单地从课程中消除这些课题（如果运用那些量这些课题是可以得到解释的），如化学电池。

建议：

如果我们运用化学势的概念，我们会这样来解释化学电池：

物质 A 和 B 反应，生成 C：



这个反应由下面的化学势差来驱动：

$$\Delta\mu = (\mu_A + \mu_B) - \mu_C.$$

不同物质的化学势可以从表中查得。如果反应进度（reaction extent）为 ξ ，则所释放的电能为

$$E = \Delta\mu \cdot \xi.$$

那么，化学电池是怎样工作的呢？

如果反应物 A 和 B 在空间中彼此分开，它们就不会反应。这时，反应阻力为无穷大。正像两个具有不同电势的物体之间如果没有导体连接，它们之间就不会有电流。如果 A 是气体，我们用管子把两个容器连起来，那么，A 就会流向 B，反应就会发生。然而在这种情况下，所有能量将被释放出来。这些能量可以被利用，也可能以热的形式耗散掉。图 13-3-1 是一种特殊形式的连接装置。

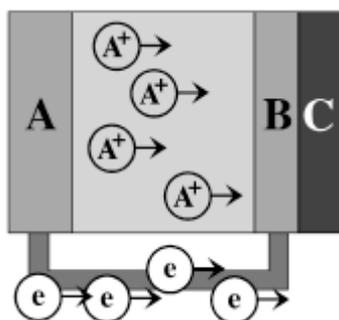


图 13-3-1

这里，A 和 B 不是用一个而是两个通道连接起来。其中一个通道是盐溶液（叫做电解质溶液），它具有可渗透性，只允许 A+ 离子通过，而不允许电子 e 通过。另一个通道是一根铜线，它允许电子 e 通过，而不允许离子 A+ 通过。这样，A 就分两路（A+ 路和 e 路）流到 B。A+ 通过 A+ 导体流动，e 通过 e 导体流动。当它们到达 B 时，它们就与 B 发生反应，

并生成 C。所有释放出来的能量可能都会马上用来产生热。然而，我们可以让其中一条通道的电流用于驱动某些物体。我们选择 e 通道的电流。这样，所有释放出来的能量都可以被利用。

所输出的能量可以用电压 $\Delta\phi$ 和电荷 Q 来表示，即

$$\Delta\phi \cdot Q = \Delta\mu \cdot \xi.$$

因为 $Q = z \cdot F \cdot \xi$ （式中 z 是一个小的整数，它取决于反应的性质； F 是法拉第常量）（译者注： F 的值参见 9.3 节）。这样，我们得到电池的电压公式：

$$\Delta\phi = \frac{\Delta\mu}{z \cdot F}.$$

最后我们得出以下结论：

在电池中，电荷向高电势流动（与其自发流动的方向相反）。为此，电荷携带者需要另一种驱动力。这个驱动力就是化学势差。这样，电荷携带者在电池中上“电势山”，下“化学势山”。

Friedrich Herrmann

13. 4 物质流的驱动力-是粒子数密度还是化学势？

主题

在物理学和化学中，我们会用到各种不同的物理量的“流”：电流（电荷的流）、质量和体积流，物质流（更确切地说，物质的量的流，因为这里所流动的物理量是物质的量）。任何流都会受到“阻碍”，因而是耗散的，需要“驱动力”。电流的驱动力是电势梯度，质量流的驱动力是引力势梯度，热流的驱动力是温度梯度。对于物质的量的流，通常把粒子数密度的梯度作为驱动力来引入。这样，物质的自发传播叫做扩散。人们认为，物质从粒子密度大的地方向粒子密度小的地方扩散。

缺点

首先，我们来看一个细节：这里我们所关注的是某一物理量的密度，而这物理量就是物质的量。它是 SI 单位制中的基本物理量。如果运用我们粒子数密度这个量，这相当于电学中运用元电荷数密度而不是电荷密度。正象我们有时会去关注电子的密集程度，在考虑扩散问题时，我们有时也会去关注粒子的密集程度。然而，在多数实际问题中，对上述问题分别运用电荷密度和物质的量密度比较好。对于扩散问题，我们会倾向于这样来说：物质从物质的量的密度较大处向物质的量的密度较小处扩散。

现在回到我们所讨论的主题。

上述结论的定量表述就是裴克第一定律（Fick's first law），其现代的表达式是：

$$\vec{j}_n = -D \cdot \text{grad} \rho_n, \quad (1)$$

式中 ρ_n 是摩尔密度（物质的量 n 的密度）， \vec{j}_n 是物质的量的流密度，梯度前面的 D 是扩散系数。对于理想气体，它与摩尔密度无关。

在对扩散现象的描述中，摩尔密度梯度看上去是物质流形成的原因或驱动力。

我们会发现，这个定律属于在热力学不可逆过程中扮演重要角色的其他一系列公式。这些公式描述有阻力情况下的广延量的流（又叫耗散流，即熵产生过程中的流）。

我们熟悉的例子是电流密度公式：

$$\vec{j}_Q = -\sigma \cdot \text{grad} \varphi, \quad (2)$$

这里 φ 是电势， σ 是电导率。

(1) 式告诉我们，物质流从摩尔密度大的地方流向小的地方。然而，(2) 式并没有告诉我们电流从电荷密度大的地方流向小的地方。这也许是有时会出现的情况，却仅仅是有时。

当我们考虑摩尔流时，在某些情况下（即除了摩尔密度不均匀外，系统的流是均匀的）

和扩散物质遵循理想气体状态方程的情况下，摩尔密度可以被认为是流的驱动力。然而，在一般情况下，最合适的描述驱动因素的物理量是化学势 μ 。这个量在形式上可以与其他情况中的某些量进行类比。

这样，我们可以把 (1) 改为：

$$\vec{j}_n = -K \cdot \text{grad}\mu. \quad (3)$$

这个表达式可应用到其他地方，不仅对于理想气体适用，对于其他均匀系统也适用（当然，假定没有其他驱动力，不涉及其他耦合的流）。

对于理想气体，我们有：

$$\mu = \mu_0 + RT \ln \frac{\rho_n}{\rho_{n0}}.$$

(3) 式中的系数 K 与质量密度成正比：

$$K = \frac{D\rho_n}{RT}$$

然而，如果 D 与质量密度无关，(1) 式至少对于理想气体来说是否是一个更简单或更漂亮的公式呢？是的，它更简单，但并不更漂亮。

如果我们要合理地解释这个式子，认为梯度是流的驱动力，那么从 (1) 式所得出的结论并不符合这样的图象：对于一给定的驱动力，流与“流动的量”的密度成正比。在电学中，确实有这样的情况（在热学中也如此）。我们知道，(2) 式中的电导率与运动的电荷携带者的电荷密度成正比。

历史

(1) 式（裴克第一定律）发表于 1855 年，即发表在吉布斯 1873 年引入化学势之前。从这里我们可以看出，跟物理课程中其他许多情况一样，一个概念一旦引入，就很难改变它。

建议

把化学势这个容易理解的、友好的和普遍有用的物理量引入物理课程中。将裴克第一定律写成 (3) 式的形式，这样它跟相应的电学定律的相似性也可以清楚地看出来。顺便提一下，在维基百科中有一句很好的话：“从热力学的观点来看，在压强 p 和温度 T 保持不变的情况下，化学势 μ 的梯度是物质流的驱动力。”

Friedrich Herrmann

13. 5 物质流的驱动力-通过相边界的物质流

主题

到处都可以看到物质流或物质传输的现象，其中一类是扩散。这种现象在中学物理教科书中很少提到，有时只在半导体二极管的主题中会有所提及。在化学教材中，对这一现象的分析遍布各处，学生会从中学到：

“扩散是两种物质自发的混合过程。这种混合过程是由于组成物质的粒子不断的随机运动引起的。”

“物质从粒子密度大的地方向粒子密度小的地方扩散。”

缺点

遗憾的是，尤其在物理教学中，对物质传输这一主题是非常淡化的。物质（或组成它的粒子）会自发地从高浓度扩散到低浓度的事实只应用到均匀系统这种特殊的情况中。一般来说，物质也可以朝相反方向扩散。

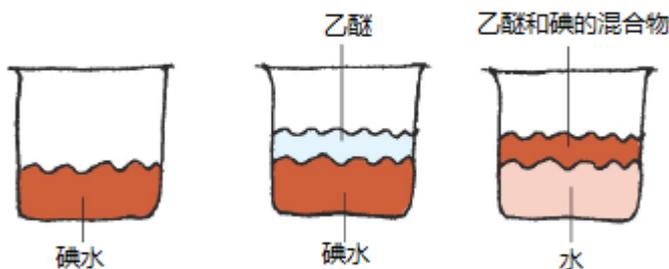


图 13-5-1. 碘沿化学势梯度（但逆浓度梯度）从水扩散到乙醚。

这里（图 13-5-1）有一个简单的实验。这个实验表明，物质可以从低浓度（低“粒子数密度”）处向高浓度（高“粒子数密度”）处传输。实验过程是这样的：将一些碘溶解在水中。这溶液是褐色的，上面覆盖着一层无色的乙醚。如果将它们剧烈地搅拌，过一会儿它们会自动分离，还原到原来的分层：上层是乙醚，下层是水。但是，有一点是不同的：现在乙醚是深褐色的，而水是浅褐色的。多数碘溶解到了乙醚中了。刚开始，碘沿着浓度梯度从水扩散到乙醚；但后来，它逆着浓度梯度的方向扩散。到最后，在乙醚中的碘的化学势和在水中的碘的化学势相等，尽管在乙醚中的碘的浓度比在水中的碘的浓度高。

我们发现，浓度梯度不是物质传输的驱动力，传输物质的驱动力是化学势梯度。浓度梯度和化学势梯度在特殊情况中也相互关联，但这仅仅在特殊情况下会发生。

凡是上帝知道的，就不复杂了。知道了这一法则，我们就可以打开解释许多现象的可

能性大门，否则对这些现象我们所能做的仅仅是描述。

●鱼是怎样通过它们的鳃呼吸的？氧气怎么会在水中的？它在水中发生了什么？鱼不是一点点消耗氧气的吗？在水中的氧气和在空气中的氧气几乎处于化学平衡：在水中的氧气的化学势等于在空气中的氧气的化学势。当鱼消耗掉一点氧气时，新的氧气就会马上从空气中流入水中。因此，水中总是有氧气的，鱼没有必要担心。

●在我们的肺中，氧气是怎样从空气流到我们的血液的？这是因为，在空气中的氧气的化学势（ -3.88kJ/mol ）大于通过肺动脉与血液一起流入肺部的氧气的化学势（ -7.30kJ/mol ）。当血液从肺静脉流出时，血液中的氧气的化学势增大到 -5.03kJ/mol 。

●将盛有半瓶碳酸矿泉水的瓶子打开，并将水面上方的 CO_2 吹掉；再将瓶子盖住，并使使劲地摇。当你再将瓶子打开时，它会发出嘶嘶的声音。这是因为，当 CO_2 从水中进入空气层时，在水面上形成了过度的压强。它在气相中的浓度大于在液相中的浓度。这一物质传输的驱动力是什么？它仍是化学势差。

化学势有如此大的功能，它不但能描述均匀物质在各相之间的扩散现象，也能描述在任何复杂边界条件下的物质传输现象。不仅如此，化学反应的方向、扩散的方向、相变的方向、在相边界之间的物质传输的方向都是由化学势来决定的。

历史

1. 化学势总是最简单、最符合我们感知的物理量之一。不过，它的命运并不好。在化学领域，化学家们喜欢那些非直觉的热力学势，即函数 $U(n, V, S)$ 的勒让德变换（Legendre transforms）。当能量作为广延量的函数仍活跃在物理学中时，其他量（ H 、 F 、 G ，等等）是如此地抽象，以致于人们只能盲目地将解决问题的希望寄托于数学，以得到正确的答案。

2. 物理学家们为何不喜欢 μ 这个量，也许还有另一个原因：它的名字取错了。为什么要让物理学家们去运用一个化学中的量呢？

建议

正象我们把单位电荷的能量叫电势，把单位熵的能量叫绝对温度，我们也可以毫不拘束地把单位物质的量的能量叫化学势。这种引入方式可用于任何地方，并形成一幅完美的物理图象。

Friedrich Herrmann