

物理学咬文嚼字之十一

质量与质量的起源

曹 则 贤

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

“可见四海之内名理多异,不是一一对应的。”

——韩少功《马桥词典》

中文“质量”这个词组是个语义含混的组合,只有嵌在特定的句子中,你才好判定它到底指的是质(quality)还是量(quantity)。比如,“这块冰的质量是1kg”强调的是量,而“这本书的印刷质量很好”强调的则是质地。但显然“质”和“量”是两回事。与质量相比不那么含混但却因其隐性的含混而更具危害性的一个中文词是“国家”,虽然逐渐地我们都以为国家指的是国而不是家,但是中国历史上的许多问题恰恰可归结为国事被某些人当成了家事才造成的。“家国同构”的社会格局是宗法社会的显著特征,“家国同构”的社会政治模式因其巨大的惯性贯穿了中国历史的始终。其他的类似“质量”这样的中文词汇还有很多,人物指人还是指物?学术强调的是学还是术?科学这东西该鼓励登科呢还是提倡做学问?这些本来不该成为问题的问题就因为这样的词组结构在中国成了一笔糊涂账。

质量这个词在物理学的语境中具有举足轻重的地位。物理学的使命一定程度上可以理解为说明“时空—质量—荷”(charge但并不单指电荷)的起源并给出自洽的数学结构。在英文物理文献中,质量对应的词为mass。但是,mass是个相当不单纯的词,简单地将mass等价为中文的“质量”会造成对原文献内涵(implication)的严重过滤。

对物体的感知,重量的概念是本原的。在日常生活中,我们关心一个物体的量的常用词是重量、份量。虽然人们早就知道一个重的物体未必意味着更多,但是物理学意义上的质量概念从重量概念的剥离要等到很晚的时候才显得必要。牛顿在其《原理》一书中最早引入mass(质量)的概念来表示物质的量(the quantity of matter),但他也交替使用了重量heaviness(不是weight那是称量,带入了一个物理的操作,内容更复杂)。那么牛顿是如何描述质量

(物质的量)的呢?牛顿认为物质的量为物质的密度乘上其体积,这个说法也许某个中学生都敢讥讽其太简单,但其实大有深意:(1)它指明质量上的区别应该在致密度(density)这个更深、更抽象的层次上;(2)物质的量是体积那样的广延量,即质量具有可加性且由体积的可加性来保证(或者说把可加性甩给了体积,这是个比广义相对论还难的问题¹⁾),并由此向不同物质体系扩展(图1)。在一些物理文献中,质量相加性被誉为牛顿第零定律(诺贝尔奖得主Wilczek就持这样的观点),其重要性可见一斑。牛顿还用了pondus这个词来描述物质的量,这个字就是称量的意思,至今英国的质量单位还是这个词,Pound(磅),一磅合454克。相关联的动词ponder一般英汉词典会解释为思考,确切点愚以为应翻译成掂量或曰权衡!



图1 质量的可加性: $M(\text{猪八戒背媳妇}) = M(\text{猪八戒}) + M(\text{高小姐})$

1) 读者不妨思考一下如何从集合论的角度给出体积的定义。
——作者注

在牛顿之前描述物质的量的常用词为 bulk 和 moles “Bulk”指“size mass or volume especially when great”，中文合适的对应应是“大块头”，在这个词里体积和质量处于一种含混的统一状态。在物理学、材料科学的语境中，“bulk material”（体材料）被用来强调某个物理性质是大块（宏观的）材料体现出来的，以区别薄膜、量子阱、量子点、纳米线等结构里可能存在的量子尺寸效应或量子限域效应。另一个词“moles”来自拉丁语，也是一大团、一大块的意思，如果加个小词，变成 molecule (molecula)，就成了一小块（类似的词有 article particle corpuscle 这几个词涉及光的本质的世俗语言表达问题，容另议），汉语标准译法为分子。现代化学常用词汇摩尔，是对“Mol”的翻译，来自对德语词 Molekulargewicht (molecular weight 称量一小块所得的量，即分子量)的缩写。摩尔作为表述单质物质的量的单位，很容易被误认为是以某个西方学者的名字命名的，尤其是它老和 Avogadro 常数 (Avogadro's Constant = $6.0221415 \times 10^{23} \text{ mol}^{-1}$) 一起出现。Mole 一词还有黑痣 (痞子)、鼯鼠 (引申为间谍)、防波堤等意思，表面看起来没什么关联，其实是密切相关的。比如，防波堤不过是一大堆石头而已。鼯鼠和 mole 有什么关系呢？读者想必早已猜到 (图 2)。



图 2 鼯鼠 (mole)

Mass 一词不管是在世俗语境里还是在物理学语境里理解起来都比较麻烦。Mass 希腊语为 $\mu\alpha\zeta\alpha$ ，拉丁语为 Massa 德语为 die Masse 都是指一大团、一大块、一大窝 (a paste mass crowd lump) 的意思。比如，纳米科技常见的表述“en masse (沿用法语形式) fabrication of quantum dots”——量子点的 en masse 制作，这里 en masse 制作翻译成大量制作易误解为制作很多，其实它强调的是那种一下子出现很多的制作方式，比如自组装，区别于生产线上

的一个一个的制作方式。一大群人聚在一起，也是 mass 引申意即汉语中的民众、大众、人民。西班牙哲学家 José Ortega y Gasset 在他的著作 *la Rebelión de las masas* (中译本译为《大众的反叛》) 中提醒民众：最大的危险是国家 (El mayor peligro el estado) 以及专业化的野蛮 (La barbarie del especialismo)。其实，民众聚集在一起才是最危险的。

Mass 的动词形式为 massein 有和面、揉搓、捏泥巴的意思。俺看到这个词，总想起当年徐州周边地区 (所谓苏鲁皖地盘) 扒煎饼的景象：直径一米多的大鏊子热腾腾地烧着，操作手双手拢住一块二三十斤的大面团 (mass)，拉开太极揉球架式，将面团在鏊面上迅速滚过 (massein)，一张大煎饼就成了。想象这个景象，也就明白了为什么按摩是 massage (英语直接采用法语词，发音近似马萨热)。Wilczek 给他论质量起源的文章取名“the medium is the mass-age”，用的就是双关语 (mass-age massage)，此中大有深意。

当我试图对质量这个物理词写点真实的东西时，我感到特别沮丧，因为我根本不懂这个词的内涵。因此，我只能罗列几条我所知道的可能是关于质量的比较重要的认识，聊以塞责。

其一、对质量的认识是科学深度的标识。Antoine Lavoisier (拉瓦锡) 注意到反应产物的质量为反应物质量的和，提出了质量守恒律，完成了化学从定性科学到定量科学的转变。实际上，更重要的是人们注意到反应物和生成物的质量比接近小的整数比，这暗示了原子的存在。后来人们在测量原子质量时，发现原子质量比接近一组整数的比，这暗示了原子可能是由更基本的核子 (nucleon) 组成。这个层次上的对整数比的微小偏离导致了同位素概念的提出。而原子质量同后来发现的核子 (质子与中子) 质量比对整数比的微小偏离则由爱因斯坦质能关系给出了解释。我们将注意到，质能关系是理解质量起源的关键，而这一组不同层次上对整数比的接近是量子物理的概念基础——至少是哲学上的。

其二、爱因斯坦的质能关系 $E_0 = mc^2$ 是 20 世纪的符号。其实，物理学家对质能关系的认识远早于爱因斯坦。牛顿就曾写到：“Are not gross Bodies and Light convertible into one another . . . (物体和光之间难道不是可以互相转换的吗)”。其后的岁月，Heaviside 和 Poincaré 都对这个问题作出过回答，Poincaré 甚至在 1900 年得出过质量密度 ρ 同 (假想的) 辐射流体的能量密度 j 之间的关系 $j = \rho c^2$ 。这基

本上就可以算是后来的爱因斯坦质能关系了. 这个关系常见的解释为“*The mass is equivalent to energy* (质量和能量是等价的)”. 但是, Sachs教授 (Mendel Sachs *Concepts of modern physics*) 认为这不对. 爱因斯坦说的是“*The inertial mass of matter is a measure of its energy content* (这表明)物质的惯性质量是其能量内涵的测度.”对这个关系的理解, 许多人是含含糊糊. Lev Okun教授就在一篇文章中考过读者, 关于质能关系, 下面四个写法 $E = mc^2$, $E = m_0 c^2$, $E_0 = mc^2$, $E_0 = m_0 c^2$ 中哪个表达是物理上合理的²⁾? 关于这个公式的实验验证问题是物理学的一个重要研究内容, 但许多研究者却不肯认真对待. 2005世界物理年 *Nature* 杂志年终一篇压轴文章, 提供的就是对这个问题的实验验证. 可惜的是, 那只是对 $\Delta E = \Delta mc^2$ 关系的验证而不构成对爱因斯坦质能关系的验证! 就这个问题我写了一篇短文, 并和欧洲物理学会主席 Hubert教授进行了探讨, 他认为我的观点是对的, 建议我将结果发表到欧洲物理学会的杂志上. 想想这是得罪人的事, 最后还是作罢. 关于这个关系的实验验证, 我认为逻辑上正确的, 是正负电子湮灭实验.

其三、现存的通俗科学文献和物理教科书里经常会遇到 $m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - v^2/c^2}}$ 的写法, 其中 m_0 被称为静止质量 (rest mass proper mass), 而 m 被称为相对论质量 (relativistic mass), 字面表述为“运动的粒子的质量随速度而增加”. 仔细一点的读者会注意到, 这个关系式来自要把 $E = m_0 c^2 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ 写成 $E = mc^2$ 的冲动. 这种罔顾公式所对应的物理图像和物理框架整体的自洽性而随意改写物理公式的现象, 自来有之. 在现代物理体系内, 质量 (m_0 , 惯性质量) 是基本粒子的特征 (character), Poincaré群表示的特征, 因此是个内禀的参数, 并不随运动速度改变. 爱因斯坦自己就写到, 上述关于质量的表述是不对的, “da für M keine klare Definition gegeben werden kann (因为给不出关于 M 的清晰的定义).”

其四、所谓的相对论等价原理. 牛顿的万有引力形式为 $f = Gm_1 m_2 / r^2$, 牛顿第二定律形式为 $a = f/m$, 这两个公式里的质量 m 分别被称为引力质量和惯性质量. 那么这两种质量是一回事吗? 对这个问题的回答就是等价原理关切的事情. 如果这两种质量等价的话 (哪怕仅仅成正比的话³⁾), 被同一物体吸引的两个不同质量的物体下落应该是同时的. 针

对此问题, 一个著名的实验就是 Galileo (伽利略) 的比萨斜塔实验, 给出了正面 (?) 的回答. 对爱因斯坦来说, 质量的等价意味着加速度和引力之间的等价, “(1907年末)我当时正坐在专利局的椅子上, 突然我有了一个想法, ‘如果一个人自由下落, 他就不会感觉到自身的重量了.’ 我被震惊了.” 爱因斯坦所处的那个时代没有蹦极或抛物线飞机, 更没有回收的卫星或飞船, 失重的感觉是柏林一个人跳楼不幸生还后告诉他的.

关于等价原理的实验验证, 现在世界上还有一批人在不惜重金做更精确的实验. 但等价就是等价, 一点点 (爱多小有多小. 请参阅微积分发展史上关于 $\delta - \epsilon$ 证明方法的引入) 的误差仍然可以判决为不等价! 物理学的正确与否不是靠实验精确度来支撑的. 两个不同质量的落体是否该同时下落, 一定是来自严格的逻辑判断. 考察图 3 中的两个质量不同的物体, 假设在自同一高度自由下落过程中获得不同的速度, 质量大的物体下落的快, 那么它们连在一起该如何下落呢? 显然, 一方面因为可以看作是一个质量更大的物体应该下落得更快, 另一方面那个质量相对较大的物体受下落较慢的物体的连累应该下落慢了一些才对. 显然, 如果不同质量的物体同步降落的话, 则连接在一起的物体应该以原来任意一个物体的下落方式 (反正是相同的) 下落, 而不会引起任何逻辑上的矛盾⁴⁾. 这就是逻辑的力量, 物理测量是不具备这样的力量的. 实际上, 只要下落时间有些微 (不管些微有多小) 的不同, 人们也可以得出不同质量的物体下落速度不同的结论. 面对别人的反驳, 伽利略本人不得不在他的 *Dialogues concerning two new sciences* (中译文为“关于两门新科学的对话”, 武际可译, 2006, 北京大学出版社) 中为此作辩护. 他说, 重量 1: 10 的两个物体下落时只差一个很小的时间上的差距, 而根据亚里斯多德的说法应

- 2) 物理学的公式是数学表达式, 但承载着更多关于我们对物理问题认识方面的内容, 包括物理图像、因果关系、量纲等等. 因此, 物理公式的某个表达式是正确的, 其等价的数学表示却可能是 Nonsense. 学物理者不可不知. ——作者注
- 3) 我很奇怪为什么人们不考虑两种质量仅仅成比例这种更普适的关系而一口咬定二者是等价的. ——作者注
- 4) 这段论证出自 Mario Rabinowitz 的 *Falling bodies: the obvious, the subtle and the wrong* 这个论证据说是 Galileo 给出的. 1604 年, Galileo 在没有微积分、没有钟表的情况下, 得到了自由落体的定律, 这是实验物理史上的杰作 (坊间传说的比萨斜塔, 倒是最早出现在 1586 年出版的《论力学》, 作者为荷兰物理学家 Simon Stevin). 实验的杰作, 一定是理论性的!! ——作者注.

该约相差 10 倍,为什么忽视亚里斯多德如此重大的失误却盯住我小小的误差不放呢?

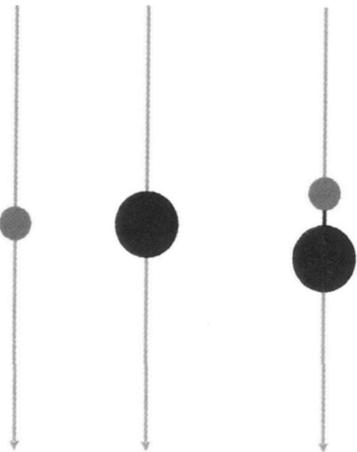


图 3 若两个质量不同的物体自由下落过程中获得不同的速度,那么它们连在一起该如何下落

等价原理应被看成是相对论发展过程中的小插曲.爱因斯坦在广义相对论理论中将惯性质量和引力质量一并丢弃,依此来消解所谓的等价关系.引力是由能量-动量张量引起的时空弯曲的表现,而所谓在重力场中的物体并不受到任何的力,它沿着测地线匀速直线前进,只不过这些发生在一个弯曲的时空里⁵⁾.

其五、质量的起源.关于质量的起源,那可是远超我的能力范围外的讨论话题.一切以“起源”为题目的著作都是那种能称为 milestone benchmark landmark 的巨著.如果 Penzias 1978 年的诺贝尔奖报告“the origin of elements(元素的起源)”尚不足以说服您的话,达尔文的“The origin of species(物种起源)”该给您留下足够的印象.实际上,物理学研究的最终目的被总结为要弄清“the origin of the universe(宇宙的起源)”,人类深空探索的最终目的被总结为除了要弄清宇宙起源和元素起源外,还要弄清“the origin of life(生命的起源)”.“起源”题目之大,由此可见一斑.我自知没资格谈起源,所以只介绍一些大师们,主要是 Frank Wilczek 教授(图 4)对质量起源的看法,给出一些文献,供读者诸君自己参详.别担心看不懂.大师的东西看不懂很正常,他们的思想要是不能超越时代,超越广大的 so-called 教授’s 还能算大师?

质量的起源还是个未完全解决的问题. Wilczek



图 4 质量起源的诠释者之一、2004 年度的诺贝尔物理学奖获得者 Frank Wilczek 教授

教授认为,量子色动力学(QCD)是理解经典力学的基础(不知大学基础课该如何安排).物质的质量来自原子,原子质量主要来自核子,核子由夸克组成,但夸克由无(惯性)质量的夸克组成.囚禁夸克的能量在核子层面上表现为质量.这算是对核子质量起源的一个交代,但对电子质量的起源,目前尚无理论上的解释.可能,关于质量的起源,最终还是落在无质量的存在上,有点类似道家的‘有生于无’的思想. Wheeler 教授(参阅 J. A. Wheeler Geometrodynamics)就宣扬‘mass without mass(没有质量的质量)’的观点,“to remove any mention of mass from the basic equations of physics(要把质量的概念从所有的基本物理方程中剔除)”.不知这一伟大壮举将来要着落在谁人的肩上.

建议深入阅读

Frank Wilczek 教授关于质量起源的文章散见各处.较成体系的有“W hence the force of $f=ma^2$ ”,分成三篇:(1) culture shock; (2) Rationalization; (3) Cultural Diversity 分别发表在 Physics Today 杂志, October 2004, December 2004 和 July 2005 三期上.上述三篇文章由黄晓、曹则贤翻译后发表在 2005 年《物理》杂志 34 卷第 2, 11, 12 期上.

另外三篇文献为:(1) The origin of mass (MIT physics annual 2003); (2) Mass without mass 1; most of matter; (3) Mass without mass 2; the medium is the message 后两篇分别发表在 Physics Today 杂志, October 1999 和 January 2000 上

5) 参阅 J. Magueijo Faster than the speed of light Perseus Publishing 2003