

用“量”描述“质”——物理量的定义和测量

李春宇¹ 陈征^{2,†} 魏红祥³ 郑永和⁴

(1 北京十一学校 北京 100039)

(2 北京交通大学理学院 北京 100044)

(3 中国科学院物理研究所 北京 100190)

(4 北京师范大学科学教育研究院 100875)

2021-04-28收到

† email: chenzheng@bjtu.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20210509

物理学注重“用量来描述质”。对每一个我们关心的问题，物理学家首先要做的就是把关心的性质或行为用一组数量(magnitude)表示出来。对物理量本身的理解，正是让所学的物理更像欧内斯特·卢瑟福所说的“物理”而不是“集邮”的关键。文章尝试对物理量本身的思想基础、定义和测量等进行探讨，希望唤起读者对这一问题的重视，从而对物理有更深入的理解与思考。

1 引言

物理学注重“用量来描述质”。对每一个我们关心的问题，比如物理的冷热、运动的快慢等等，物理学家首先要做的就是把关心的性质或行为用一组数量(magnitude)表示出来，如温度、速度等等。如果把完善和发展物理体系喻为修建一座摩天大楼，那么这些以数量的形式表达出的研究对象的性质和行为——物理量，就是构成大厦的最小“砖块”。

很多人在学习、使用、研究物理时，对各种物理量“砖块”只是拿来就用，很少认真思考过这些砖块的特点和共性。然而对物理量本身的理解，正是让所学的物理更像欧内斯特·卢瑟福所说的“物理”而不是“集邮”的关键。

2 物理量的定义

伽利略对斜面和落地的研究推翻了亚里士多德的观点，但这并不意味着亚里士多德的体系对现代物理学没有影响。我们定义物理量的基本思想，还是要参考亚里士多德对“量”的范畴和“质”的范畴的区分。

“量”的范畴基本特征是：“量的数量的每一个状态，总可以借助同一量的其他较小的状态通过加法形成；通过比第一个量小，但却是它同一类型的量的交换和结合操作，量都是这些较小量的总和^[1]。”而那些不符合这一特征的东西则归为“质”，例如一个物体的冷热，在没有把它转化成具有可加性的量之前，我们很难比较。

物理量的定义，就是把物理学中所描述的现象、物体或物质的性质和行为等那些符合“量”的特征的因素找出来，如尺寸的长短，体积的大小，物质的多少等等；或者把那些不符合量的特征的“质”转化成“量”，如把冷热程度转化为体积的大小，或把快慢转化为距离长短和时间长短之间的比值等等。

理论上只要是研究需要，谁都可以定义物理量；同一个性质，也完全可以有不同的物理量定义方式。但为了方便协作，通常各研究领域中都有共同约定的基本量，今天的物理学体系中挑选了7个能够直接测量且相互独立的物理量作为基本物理量。而基本物理量的任意运算组合都能定义出新的物理量。即便同一种组合，在不同的情境

下，也可以是不同的物理量。比如质量与长度的比值，在物质科学领域可以是反映物体质量分布线密度，在健康科学领域可以是衡量人体胖瘦程度以及是否健康的一个标准指数BMI。理论上物理量是无穷无尽的，但实际上，只有发现某种组合能够反映特定的属性后，该物理量才具有实际意义。比如质量与长度的5次方、6次方的比值，如果暂时没有发现能够反映哪种特殊属性，就没有必要定义成物理量。

3 物理量的测量

量的可加性，为测量奠定了基础。比如“物理学大厦”的体积，就是组成大厦的每一块砖体积相加的结果，我们可以把一个砖块的体积作为一个基准(比如“一升”)，通过数这整栋大楼由多少块砖(比如 N 块)，就完成了大楼体积的测量—— N 升。

定量地描述一个物理量的基本范式是数值(通常是实数)和单位的组合。各位读者不妨回顾一下物理学中那些能够直接测量的量，大都是建立在这样的基础之上。而完成这个工作实际需要两步：

第1步：确定一个标准，比如

我们以张开手掌时大拇指尖到中指间的距离(俗称“一拃”),或是用直尺和圆规在白纸上打出等间距的格子作为标准形成一个“单位”,此时我们的手或那张有格子的白纸就成了一个长度“计”。

第2步:用我们定的标准去和想要描述的对象做比较,看看它有多少个“单位”,比如对比一根竹竿的长度有几拃,或是白纸上格子长度的几倍。这个过程就是用“计”去进行“量”,从而获得一个具体的数量。

因此我们所说的物理量的测量,似乎称为“计量”更为准确。“计”和“量”是两件不同的事。“计”是制定标准,制作“尺子”;而“量”则是用“尺子”去和我们想要描述的东西做比较,看看它大约有“尺子”上的“几格”那么长。日常生活中经常进行的“测量”工作只是第2步,拿已经制作好的长度“计”——尺子,去和各种各样的物体做比较,获得有关物体长度的数量描述的过程。而第1步制作“尺子”的过程,已经由计量学家完成了^[2]。



4 单位制

基准的选择是可以因人而异的,对同一物理量的测量往往可以存在多个标准。从数学上看,单位制的建立可以看作所有物理量构成一个向量空间。确定单位制,本质上就是选定一组描述不同属性的物理量的单位作为基矢,则通过物理量之间的相关关系就可以把其他物理量用这一组基矢表示出来。在这个过程中,基矢的选择也并没有唯一的答案。

如果只是一个人封闭地做研究,自己约定单位不会影响物理量之间的内在关联。比如牛顿第二定律 $F=ma$, 当力 F 、质量 m 或加速度 a 的单位改变时,只会影响系数 k , 不会影响加速度与作用力成正比,与受力物体质量成反比的基本规律。但是要进行大规模协作时,单位不统一会造成许多不便。如秦始皇统一中国时就发现各地的长度、容量、轻重单位都不相同,他下命令给士兵发1斗米做粮食,在有的地方可能够两三个人吃,而在有的地方却连一个人吃都不够,让

国家的治理变得混乱不堪,因而促使秦始皇统一度量衡,为整个国家的大规模协作奠定基础。有时单位不统一甚至可能危及人命。1983年的一天,加拿大航空143号班机的燃料监测装置出了点问题,但是备用零件又一时拿不到,于是机长决定手工计算燃料,飞到目的地再维修。这趟航程按照公制大约需要2万千克

的燃油,可是工作人员却是按照英制的2万磅加的油。英制的2万磅其实只有公制的大约9072 kg,还不到一半,结果可想而知,飞机飞到一半就没有油了。在千钧一发的时刻,万幸机长想起几十公里外有一个基米尼空军基地。在没有动力的情况下,飞机进行了创纪录的超长距离滑翔,最终成功迫降,这才避免了一场机毁人亡的惨剧发生。

所以,虽然理论上约定单位制不是必须的,研究者可以根据自己的研究方便定义自己的单位制。但为了领域内沟通交流的方便,通常都会使用约定的单位制。当然,各领域又会根据各自不同的研究特点,确定不同的单位制。

今天,国际单位制(international system of units)是国际计量大会(CGPM)采纳和推荐的一种一贯单位制。在国际单位制中,将单位分成三类:基本单位、导出单位和辅助单位。7个严格定义的基本单位是:长度(米)、质量(千克)、时间(秒)、电流(安培)、热力学温度(开尔文)、物质的量(摩尔)和发光强度(坎德拉)。

5 物理量的内在联系——量纲

物理学通过定义各种物理量来描述对象的不同性质,最终的目的还是找到联系各种物理量之间的物理规律,并通过代数方程的方式表达出来。那么人们定义的各种物理量也就必然通过各种物理规律(有些直接来源于定义)存在一些内在的联系,用数学语言表达就是物理量之间存在函数关系。以给定量制中基本量量纲的幂的乘积表示某量量纲的表达式,称为量纲式、量纲积或简称为量纲。

量纲定性地表达了导出量与基

本量的关系,合理地利用量纲来分析问题,常常带来很多便利。比如最简单地利用量纲齐次原则检查结果的合理性。虽然量纲合理的结果不一定正确,但量纲不合理的结果一定错误,在实际工作中能节约不少资源。Buckingham在1914年提出的 π 定理,有时更能在变量多、模型复杂的计算时对结果进行快速定性预测。

6 结语

物理量的定义和计量,以及单位制、量纲等问题,都是物理学最基本也是最重要的问题,贯穿物理学的各个角落,其中蕴含着物理学的基本思想。然而在物理教育中,它们常常只被“拿来主义”地直接使用,少有深入地探讨,这对学习者和研究者而言都是很大的缺憾。

本文尝试对这些问题做些探讨,希望唤起读者对这一问题的重视,因而对物理有更深入思考。

参考文献

- [1] 皮埃尔·迪昂. 物理学理论的目的与结构. 北京:商务印书馆,2005. 39
- [2] 陈征. 物理运转的奥秘. 杭州:浙江少儿出版社,2021

裂变链式反应可能引爆超新星

最近一个新的想法认为,白矮星爆炸成为超新星是由星球的原子弹引爆的。这想法与教科书的解释不同,后者的解释认为该过程与恒星吸收相伴恒星质量导致的不稳定有关。研究人员认为在星核冷却过程中铀的结晶可导致失控的核裂变。这种裂变“炸弹”又可引爆轻元素类似于氢弹的爆炸(核聚变)而生成超新星。对这种过程还有一些关键问题需要回答,但是专家们认为这一理论是值得探索的。

白矮星是一种致密的恒星,其质量与太阳相当,但是大小与地球相似。当类似太阳的恒星在其大部分燃料烧净时,在引力作用下密度增加而形成白矮星。某些白矮星结束其生命成为Ia型超新星,一般认为这种过程仅在该恒星是双星系统的一部分时才会发生,因为单独的白矮星在冷却时应是稳定的。

印第安纳大学的Charles Horowitz和伊利诺伊州立大学的Matt Caplan指出,包括铀在内的重元素是在白矮星内部冷却时最早固化的。这种冷却和固化过程将

复杂的类似等离子体的混合物分离成它的组分——所谓的相分离过程。Horowitz和Caplan认为,即使最初铀和类似元素的数量很少,但第一批固体中这些元素会是高度浓缩的。

铀核偶尔会发生自发裂变,分裂成较小的碎片,并释放出能量和中子,中子又可使附近的铀核裂变。如果铀的质量大于某个临界值,裂变过程可成为自持续的链式反应,释放大量核能,类似于原子弹的爆炸。

Horowitz和Caplan进行了计算和计算机模拟,表明临界质量的铀的确可以从冷却的白矮星元素混合物中结晶出来。如果铀爆炸,在这个恒星核心产生的热和压力将足以触发较轻元素——特别是碳和氧的核聚变,因而成为超新星。类似于当今的裂变弹引爆的热核聚变弹。

Horowitz说,可能需要大量工作来鉴别这种过程的可观测信号,但是对接近恒星中心点燃的碳聚变的模拟,可能揭示超新星谱或亮度随时间变化的光曲线图的某些特点。

加州大学圣克鲁斯分校的天体物理学家Stan Woosley说,这项工作提出了一个全新的想法。生成Ia超新星的途径可能不止一种。这一结论还需要更多的工作来证实。他特别怀疑结晶的铀是否足够纯。Horowitz承认,目前认为固体铀是高度浓缩的,他们正在进行分子动力学模拟,以求精确了解其组分。

在洛斯阿拉莫斯国家实验室研究核聚变的Paul Bradley认为,可能没有足够的最容易裂变的铀同位素(铀-235),而且恒星条件不适合链式反应。即使碳发生了聚变,也不能肯定其能量足够将恒星摧毁。

(周书华 编译自 *Physics*, March 29, 2021)

