

# 公式 $F = ma$ 中的力从哪来？\*

Frank Wilczek

(Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA)

黄 娆 译 曹则贤 校

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

力的概念早在 Hamiltonian 力学的框架内就失去了存在的合理性,但它却一直贯穿于我们处理力学问题的思维并在教科书中快乐地存在着.本文(发表在 Physics Today, Oct. 2004)中,2004 年度诺贝尔物理学奖得主、MIT 物理学教授 Frank Wilczek 从科学发展史、科学方法论以及文化与心理学的角度研究了这一悖论,读来令人有茅塞顿开之感.我们迅速翻译了这篇好文章,以飨国内的广大物理学爱好者.

(中国科学院物理研究所 曹则贤)

## 1 文化震撼

在我的学生时代,经典力学是最让我费神的一门课.这常常让我觉得很奇怪,因为在我学习那些通常被认为更难一些的高级课程时,并不觉得它们有什么困难.现在我想我已经找到答案了.这是“文化冲击”的一个例子.从数学的角度,我期望得到一个运算法则.结果我遭遇到的是一些完全不同的东西——实际上是某种“文化”.下面让我来解释.

### 1.1 有关 $F = ma$ 的一些问题

牛顿第二定律  $F = ma$  是经典力学的灵魂.和其他堪称灵魂的东西一样,它并不那么牢靠.方程的右边是有确切意义的两项之积.加速度是一个纯运动学的概念,可以根据空间和时间来定义.质量很直接地反映了物体的可测量性质(重量,反冲速度).另一方面,方程的左边却没有独立的意义.然而,即使使用最高的标准来衡量,牛顿第二定律显然意义重大:它在很多特定的情形下都十分有用.外观富丽堂皇、花里胡哨的桥梁,比如 Erasmus 桥(以“鹿特丹的天鹅”之名而闻名于世),确实能够承重;宇宙飞船确实能够抵达土星.

当我们以现代物理的观点去考察“力”的时候,就会进一步加深这个悖论.事实上,力的概念在很多基本定律的高级表达方式中是不存在的.它不出现在薛定谔方程中,也不出现在量子场论的任何合理的公式中,广义相对论的建立也不需要用到它.目光敏锐的人观察到消除力的概念这一趋势早在相对论

和量子力学产生之前就开始了.<sup>1)</sup>

杰出的物理学家 Peter G. Tait( Lord Kelvin 和 James Clerk Maxwell 的密友兼合作者)在他 1895 年出版的《动力学》一书中写道:“在所有包含力这个概念的方法和体系中,力是人造产物……;力’以及那些产生‘力’的感官概念的引入并不是必要的.”<sup>[1]</sup>

尤为令人惊奇的是, Bertrand Russell 在他 1925 年出版的为知识分子普及相对论的读物《相对论入门》中写道:“如果人们试着用一种新的方式来看待这个世界,消除‘力’的概念将不仅仅影响到我们物理上的观念,而且可能还包括道义上和政治上的…….在关于太阳系的牛顿理论看来,太阳似乎是一个发号施令的君主,行星则必须遵守这些命令,而爱因斯坦构造的世界里与之相比要多一些个人主义,少一些专制独裁.”<sup>[2]</sup>这种想法是如此的特别而且颠覆传统.

Russell 那本书第 14 章的题目就是“力的剔除”.

如果  $F = ma$  形式上是空洞的,精确推敲起来则模糊晦涩,甚至道义上是可疑的,那么它的不可否认的力量又是从哪里来的呢?

### 1.2 力的文化

为了弄清它的来源,我们来看看这个公式是怎

\* 2004-10-10 收到

“Reprinted with permission from Physics Today, October 2004, Copyright 2004, American Institute of Physics.”

1) Hamiltonian 力学已消除了力的概念(译校者注)

样被应用的。

一类很普遍的问题是给定一个力,然后求解运动,或者反过来。这类问题看起来很像是物理,但实际上只是微分方程和几何学的练习题,加了一点伪装而已。为了与物理事实联系起来,我们必须对实际存在于这个世界上的力做一个声明,各种各样的假设被塞了进来,但经常并不说明。

经典力学里关于运动的第零定律是质量守恒。由于它过于基本所以牛顿没有明确指出。物体的质量被认为是独立于它的速度和任何施加于它的外力的,总质量既不产生也不消灭,只是在物体相互作用的时候重新分配。当然,如今我们知道以上内容并不十分正确。

牛顿第三定律指出,对于每个作用,存在着一个大小相等方向相反的反作用。而且,我们通常假定力不独立于速度。这两个观点也都不那么正确。例如,它们不能解释带电粒子间的磁相互作用。

很多教科书讨论到角动量的时候,引入了第四定律:物体间的作用力沿着连接它们的直线的方向。这被用来“证明”角动量守恒。但这个定律对于分子间作用力是完全错误的。

当我们引入约束力和摩擦力的时候还要做出一些其他假设。

在此我不作赘述。任何人仔细想一想就会发现,公式  $F = ma$  自身显然并不能为构建整个力学体系提供一个运算法则。这个方程更像是一种用以表达力学体系里各种不同的、有用的见解之公共语言。换句话说,对这些符号的解释包含了完整的文化。当我们学习力学的时候,我们不得不通过大量被解过的例子来领会力到底是什么,这不仅仅是经由练习培养技能的问题,而是我们吸收了由这许多假定构成的一种默认的文化。不能认同这一点就是造成我困扰的原因。

力学的历史发展反映了一个类似的学习过程。牛顿在解释行星运动上获得了巨大的成功,他发现一个形式简单的单一的力决定了整个体系的行为。他在《原理》第二卷中所做的描述延展物体和流体之力学的尝试是突破性,但却没有决定性的结果,而且他几乎没有接触到力学中更实用的方面<sup>[3]</sup>。后来,许多杰出的物理学家和数学家对于我们今天所理解的“力的文化”做出了重要的贡献,他们当中特别包括 Jean d'Alembert (约束和接触力), Charles Coulomb (摩擦), 和 Leonhard Euler (刚体,弹性物体和流体)。

### 1.3 物理和心理上的来源

我们发现,许多根植于“力的文化”中的观点并不是完全正确。此外,我们今天认为更正确的那一套物理定律如果要嵌入这种文化的语言框架却不是那么容易的。要知道产生这种现状的原因,必须回答两个问题:为什么这种文化能持续繁荣?为什么它会最先出现?

对于物质的行为,我们今天拥有非常完善和精确的定律来描述,大体上涵盖了经典力学和更大范围内的现象。量子电动力学和量子色动力学为构建物质个体以及它们之间的非引力作用提供了基本的定律;广义相对论则使我们对引力有了充分的描述。从这些有利条件来看,我们可以得到有关“力的文化”整个领域及其边缘的清晰图景。

相对于早期的观点,出现于20世纪的现代物质理论更精确,更具多视角的特点。直白一点说,解释各种符号时的自由度变小了。量子电动力学和量子色动力学的方程形成了一个封闭的逻辑体系:它们告诉你什么样的物体会出现,同时能预先规范它们的行为,它们支配着你的测量设备,和你本身!因此,它们定义了什么样的物理问题可以被提出,并且为这些问题提供了答案,或者至少是得到答案的算法(我深信量子电动力学加量子色动力学不是解释自然界的完备的理论,而且,实际上我们并不能很好地求解那些方程)。荒谬的是,现代物理的建立较之于早期的并不那么完善的理论体系包含了较少的解释和文化。方程仅仅提供算法,如此而已。

同现代基础物理相比,“力的文化”定义很模糊,视野有限,而且是近似的。不过,由于一个决定性的优势,它在这场竞赛中生存了下来,而且持续繁荣,那就是它容易操作。实际上我们不希望穿越广阔的希尔伯特空间,归一化消除紫外发散的灾难,解析延拓那些由有限步骤定义的欧氏空间里的格林函数,然后计算发现覆盖了电子云的核子组成原子,再聚集起来构成固体,……而所有这些只是为了描述两个弹子球的碰撞。这样的做法简直比直接用机器代码在没有操作系统帮助的情况下进行电脑绘图更显得像精神病。这个类比的意思是:力是一个相当于高级语言的灵活创造,它使我们从不相关的细节中解脱出来,让我们相对不那么痛苦地专心于应用。

为什么我们能够将那些物质的结构复杂封装起来而不顾?那是因为物质通常处于一种稳定的内状态,具有很高的能量和熵的壁垒从而限制了能够被激发的自由度。我们可以将注意力转向那些数目很

少的有效自由度,其他的不过是为演员提供的舞台而已。

虽然力本身不出在现代物理的基本方程中,但这些方程显然包含着能量和动量,而力与这二者有着紧密的联系。粗略地说,力是前者的空间导数和后者的时间导数( $F = ma$ 只是强调了这两个定义的一致性!)。所以力的概念没有远离现代物理的基础,就像 Tait 和 Russell 所说:“它的出现也许毫无道理,但并不奇怪。”不改变经典力学的内容,我们可以将力放入拉格朗日力学的语境中,只是在其中它不再是一个基础的量。但这实际上只是一个技巧问题,更深一层的问题是:“力的文化”反映出哪些基本的东西?什么样的近似导致了它的出现?

某些近似,即对物质的动力学行为的截断式描述,不仅是必须的而且是可行的,因为它更易应用而且有针对性。为了解释构成“力的文化”的特定概念和理想化的有效范围以及起源,我们必须考虑它们的详细内容。一个如同“力的文化”自身那样的合适的答案,必然很复杂而且具有开放性。例如,从分子的角度来解释摩擦仍然是一个很值得研究的课题。在得出一些概括性结论之前,我将在下部分就上述提出的问题作简单的讨论。

在这部分的结尾我将谈谈有关的心理学上的问题——为什么从逻辑的角度来看,能量能解释力所

能解释的一切,甚至可以证明比力做得更好,而力曾经而且仍然被引入到力学的基础中去?动量的改变——对应于力——是显而易见的,而能量的改变通常不易被察觉,这当然是一个主要的因素。另外,在静力学中作为一个主动的参与者,当我们举起一个重物时,虽然没有做功,可我们很明确地感觉到我们在做着某件事情。力的概念就是从这种用力时的感官体验中提取出来的。D'Alembert 提出的替代概念,即对微小位移响应所做的虚功,很难与此产生联系(具有讽刺意味的是,正是不断做实了的虚功,解释了我们吃力的感觉。当我们稳稳地举起一个重物时,作为对手臂发出信号的一种回应,肌肉纤维丛收缩;手臂感受到了微小的位移,并在这个位移增大之前作出补偿<sup>[4]</sup>)。类似的理由也许可以解释为什么牛顿用“力”的概念。“力”持续被使用的原因很大一部分是由于精神上的惯性。

#### 参 考 文 献

- [1] Tait P G. Dynamics. Adam & Charles Black. London, 1895
- [2] Russell B. The ABC of Relativity(5th rev. ed.). Routledge, London, 1997
- [3] Newton I. The Principia. Cohen I B, Whitman A trans. U. of Calif. Press, Berkeley, 1999
- [4] Vogel S. Prime Mover: A Natural History of Muscle. Norton, New York, 2001. 79

#### · 信息服务 ·



# Rensselaer

## 美国伦斯勒理工学院招生信息

Troy, New York, U. S. A.

February, 2005

JOIN OUR GRADUATE SCHOOL IN PHYSICS

Ph. D. in Department of Physics, Applied Physics, and Astronomy

Areas of research: Terahertz Imaging and spectroscopy, Terascale Electronics and photonics, Nano-Particles Physics, Bio-physics, Origins of Life, Astronomy, Elementary Particles Physics. Teaching, research assistantships, and fellowships are available.

**Application** : <http://www.rpi.edu/dept/grad-services/>

**Information** : <http://www.rpi.edu/dept/phys/>

**Email** : [gradphysics@rpi.edu](mailto:gradphysics@rpi.edu)