

# 公式 $F = ma$ 中的力从哪来?(之三)\*

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)

(上接 2005 年第 11 期第 786 页)

## 3 文化差异

如我们所见,力的概念定义了一种文化.在先前发表的此系列的专栏文章(Physics Today, 2004 年 10 月,第 11 页以及 2004 年 12 月,第 10 页)中<sup>1)</sup>,我说明了通过对力这一概念的诠释(实际上是关于力的附加假设),公式  $F = ma$  是如何被赋予意义的.这样的诠释有点民间传说的味道.它既包含了在适当条件下我们可以从近代 <物理><sup>2)</sup>基础得到的近似,也包含了从经验中抽象出的略嫌粗放的推广(例如关于摩擦力和弹性行为的所谓的“定律”).

上述讨论过程也让我们清楚地明白,关于质量  $m$  也存在着一个较小的但非平凡的文化.确实,一般物质的质量守恒为 <物理>定律的呈展<sup>3)</sup>提供了一个绝佳而又有启发性的例子.一句简单的表述就抓住了大范围规律性的要点,而此规律性的近代 <物理>基础是坚实的但也是复杂的.在近代物理中,质量守恒的想法是非常错误的.近代量子色动力学的一大成就就是用质量严格为零的胶子和质量非常小的  $u$  夸克、 $d$  夸克构建了在一般物质中占质量 99% 的质子和中子.为了用近代的观点来解释为什么质量守恒通常是一个正确的近似,我们需要用到量子色动力学和量子电动力学的特别的、深层次的性质,包括量子色动力学中大能隙的出现以及量子电动力学中精细结构常数是一个小的数值.

当然,牛顿和拉瓦锡对所有的这一切一无所知.他们将质量守恒视为一个基本的原理.不过,他们这样做对了.运用这一原理,他们得以在分析运动和化学变化中取得了非凡的进步.尽管这一原理根本不成立,可它是(而且一直都是)许多定量应用的一个

恰当的基础.抛弃这一原理是不可想像的.它本身是一件无价的文化的产物,而且,尽管(实际上部分是因为)其呈展的特性,它还提供了我们对世界运转方式的深刻认识.

### 3.1 加速度的文化

那么关于加速度呢?加速度也同样被附上一种文化.为了得到加速度,我们被教导去考虑物体空间位置随时间的变化,去求二阶微商.用现代的观点来看,这个“处方”存在着严重的问题.

量子力学中,物体不具有确定的位置;量子场论中,粒子不停地产生和湮灭;而在量子引力中,空间存在涨落而时间难以定义.显然,就算为了让加速度的定义不太离谱也要引入问题重重的假设和近似.

然而,我们却清楚地知道这些概念的适用范围.关于物体我们将有一个呈展的、近似的概念.物理空间也会用承载欧氏几何的欧氏三维空间  $R^3$  加以模型化.这一非常成功的空间模型早在欧氏几何成型以前,在测量<sup>4)</sup>以及民用工程上就被持续使用了上千年.

时间由一维的连续实数  $R^1$  进行模拟.在拓扑学

\* 2005-08-01 收到

“Reprinted with permission from Physics Today, July 2005, Copyright 2005, American Institute of Physics.”

1) 本文前两篇在《物理》上的页码分别为 2005 年第 2 期第 93 页和第 11 期第 779 页

2) 括号内的字为译者所加,下同

3) 英文为 emergent, 应是逐步演化从而在高的层次或大的尺度上表现出来的意思.目前,国内的一些科学家把 emergent phenomenon 译为呈展现象.一个更能为大家接受的翻译可能要等些时日.下文出现的呈展也是对 emergent, emergence 的翻译——译者注

4) 原文为 conveying, 应指包括土地丈量、地图/海图/星图绘制等诸多观测性的活动.——译者注

的层次上来讲,时间的这一模型进入了我们原始的直觉——直觉上我们将世界分成过去和将来.我相信,时间具有可度量的结构,即时间不仅可以被排序,而且也可以被分成具有确定大小的间隔,是一个不太久远的创意.这个想法只在伽利略运用钟摆(以及他的脉搏)的时候才开始出现<sup>5)</sup>.

相关的数学结构是如此为人熟知并且发展完善,以至于它们可以(事实也是如此)在计算机程序中被常规地使用.但这绝不意味着它们是想当然的.“连续”的概念就让古希腊人大为苦恼.著名的芝诺悖论就反映了这样的思想斗争.古希腊人对实数的代数处理从来没有从心里感到舒服过.连续量通常被表示为几何上的间隔,即使这种表示方法意味着为实施简单的代数操作须作笨拙的几何构造.

近代数学分析的奠基人(笛卡尔、牛顿、莱布尼兹、欧拉等)大体上都不受这样的思想约束,他们处理缺乏严格定义的无穷小量时相信自己的直觉.(在《原理》一书中,牛顿以古希腊人的风格,运用几何进行处理.这成为《原理》对于今天的我们而言显得难以理解的原因.《原理》也包含了以极限为基础的关于导数的成熟的讨论.从该讨论中,我推测有可能牛顿以及早期其他的数学分析奠基人对于如何使他们工作中至少是简单的那部分变得严格起来有着清醒的认识,只不过他们不愿意放慢脚步去做罢了.)在现今普通数学课程中讲授的程度上之适当严密性(意指被抱怨得很多的 $\varepsilon$ 和 $\delta$ ),19世纪已被引入该领域.

20世纪,当实数和几何得以建立的基本概念上升到集合论以及最终的数理逻辑的层次上时,“不适当”的严密性也被引入了.在《数学原理》中,罗素和Whitehead在证明 $1+1=2$ 以前展开了长达375页的密集的数学讨论.公平地说,如果得到那样一个结果是最终目的的话,他们的处理可以缩减很大一部分.但是,无论如何,从数理逻辑出发,对实数做出合适的定义需要做艰苦而复杂的工作.有了整数,下一步就该考虑有理数以及它们的排序.然后要填补他们之间的空白,使得任何有界的递增数列都有一个极限.那样才算完整地构造了实数.最终(这也是最困难的部分),你必须证明得到的系统能支撑代数,并且是自洽的.

也许这种复杂性暗示着时空的实数模型是一个呈展的概念,某一天可以藉由逻辑上简单的为物理而提出的本源性的东西将其推导出来.同时,对实数构造的详细考察发现实数的一些自然变种,著名的

有Conway的包括无穷小量(比任何有理数都小!)的超实数,都可以看作合法的量<sup>[1]</sup>.这些形式上的、性质与普通实数同样自然和优雅的量或许会帮助我们描述自然界?时间会给出答案.

即使是数理逻辑的这种“不适当的严密性”也没有达到理想的严密程度.Gödel证明了理想的严密程度是不可能达到的,因为不存在适度复杂的、自洽的公理系统可以用来证明它自身的自洽性.

但是,对“加速度的文化”加以定义和合理化时所遇到的不易理解的缺陷,与将“力的文化”合理化时遇到的相对平庸和显而易见的困难,显然产生于不同的层次.加速度的文化可以不太失真地转换成C语言或者Fortran语言.这种<翻译的>完整和精确给我们设定了一个鼓舞人心的基准.

### 3.2 计算机指令

在开始之前,大多数计算机科学家认为教会一台计算机象高段棋手那样下棋比起教会一个人去做普通的事情(例如安全驾驶汽车)要更具挑战性.事实却不然.造成这一令人惊讶的结果很大的一个原因是下棋就是个算法的问题,而开车却不是.在象棋中,规则是完全清楚明白的,我们具体而且明确地知道自由度是什么,又是如何表现的.驾驶就非常不同:当你开始试图分析“其他司机的预计”以及“步行者”这样很重要的概念时马上就变成“文化”的问题.我不会信任波士顿大街上的计算机司机,因为它不可能知道怎样解释“胁迫”和“顺从”的复杂混合,而这些通常由人类司机通过打手势、动作<sup>6)</sup>和眼神交流传达出来.

当然,教授一台电脑学会经典力学有着学术以外更重要的意义.我们想要机器人能四处行走、处理事务,计算机游戏玩家要得到更真实的图象;工程师和天文学家需要聪明的硅基合作者——我想,这还只是提及了一点.

伟大的逻辑学家和哲学家Carnap除去许多其他成就之外,还为构造基础力学的公理体系作出了勇敢的、开创性的努力<sup>[2]</sup>.Hayes发表了一篇有影响力的论文《天真的物理宣言》,向人工智能研究者们挑战,看看如何能将对材料和力的直觉以一种显性的方式编码<sup>[3]</sup>.基于物理的计算机作图是一件生动

5)1604年,伽利略用音乐节拍度量时间从而确定了自由落体的公式.这时没有钟表,没有微积分,没有万有引力.作者此处可能暗指此事.——译校者注

6)原文为maneuvers

的、快速进步的工作；各种不同的计算机辅助设计也是一样。我在 MIT 的同事 Sussman 和 Wisdom 发展了一套很强的针对力学的计算方法<sup>4)</sup>，每一步都可以由清晰的程序支持。也许，把特定材料经验性质、有用机理的已知成功设计和一般力学行为的定律都囊括入一个  $F = ma$  的计算文化中的时机现在已经成熟。工作着的机器人可能不需要比大多数足球运动员明白更多的力学；但是设计一个能够踢球的机器人，只能由一个非常聪明并且知识丰富的人机团队来完成。

### 3.3 污点和焦点

这个系列文章的主题是公式  $F = ma$ ，一个有时被表示成可以描述自然界运算法则的缩影，但实际上它并不是一个可以被机械（双关语，故意的<sup>7)</sup>）套用的运算法则。它更像是一门语言，我们可以通过它轻松地表达关于世界的重要事实。然而，这不是暗示它缺乏内容。它被赋予了内容，首先，通过这门语言中一些强有力的一般性陈述（例如第零定律、动量守恒定律、万有引力定律、力与附近源之间的必要关联），然后通过唯象的观察。后者包括许多（虽然不是所有）有关材料科学的定律，都是用力的语言更容易表达的。

另一主题是说  $F = ma$  不是任何意义上的最终真理。从近代基础物理我们能理解，它是如何在广泛但却有限的情况下作为近似出现的。同样，这并不妨碍它特别有用：它的一个主要优点是使我们免于承受

为了追求不相关的精确而带来的不必要的麻烦。

这样看来，物理定律  $F = ma$  要比通常认为的那样显得柔性一点。它与其他律条<sup>8)</sup>确实具有一系列共同之处。例如法学和道德上的律条，其中术语的意思都是在使用中逐渐成形的。在那些领域中，宣称最终真理都会受到广泛的质疑；可是虽然如此，我们仍然积极地力图把〈这些律条〉的明白易懂和显而易见推向极致。客观地说，我们物理学中力的文化就具有相当克制但实际上也野心勃勃的特点。一旦它不再被视作僵死的塑像，给它安上腿，将之隔开来看待，它便成为一个对更一般意义上的求知者来说非常鼓舞人心的模型。

### 参 考 文 献

- [ 1 ] Knuth D. Surreal Numbers. Reading, MA :Addison - Wesley , 1974
- [ 2 ] Carnap R. Introduction to Symbolic Logic and Its Applications. New York :Dover , 1958
- [ 3 ] Hayes P. In Expert Systems in the Microelectronic Age. Michie D. ed. ,Edinburgh , UK :Edinburgh U. Press , 1979
- [ 4 ] Sussman G , Wisdom J. Structure and Interpretation of Classical Mechanics. Cambridge MA : MIT Press 2001

（全文完）

7)英语 mechanically 有“力学意义上”、“机械地”两重意思。作者指明他用的是双关语，是强调  $f = ma$  在力学里也没什么用。参见此文的第一部分——译者注

8)英语 law 有定律、法律的意思，作者提及法律时为了回避歧义法律用了 jurisprudence 一词，而中文中我们为了表达定律和法律中通用的东西，用了律条这个词，可能比较牵强——译者注

· 物理新闻和动态 ·

## 超冷费米原子气体的超流动性

最近美国 MIT 的 Ketterle W 教授和他的同事们对超冷费米原子气体具有超流动性作出了实验论证，他们观察到在锂 - 6 原子气体形成玻色 - 爱因斯坦凝聚时会出现涡流运动，涡流呈现出持久的无摩擦的流动特性。Ketterle 研究组用激光束将冷冻的原子固定在各自的位置上，然后再分离出若干激光束来激发出涡流。通常玻色原子与费米原子在低温下的量子行为是很不相同的。能呈现出超流动性的费米原子到目前为止只有两种，一种是这次实验显示的锂 - 6 原子气体，另一种是众所周知的液氦 - 3 原子。

作为实验对象，气态的费米原子出现超流动性要比液态的费米原子具有更多的优点。一是因为气态费米原子的密度比较低，它与星际空间内介质的密度相接近，这时原子间的散射比较简单；二是原子配对（相当于超导中的库珀对）的相互作用力可以利用外部磁场来调控。Ketterle 教授曾因玻色 - 爱因斯坦凝聚方面的研究工作获得过诺贝尔奖金，现在他认为，研究费米原子气体的超流动性显示出比研究玻色气体的有更丰富的物理内涵。研究者可以通过控制外部的力来改变原子配对间的强度与性质，还可以将原子填充到光学晶格上。

从某种观点来看，超冷锂 - 6 原子气体可以算是一种高温超流体。因为对于一般的超导体，它们发生超流转变的临界温度  $T_c$  与它们的费米温度  $T_F$  之比约为  $10^{-4}$ ，而对于液氦 - 3 来说， $T_c/T_F \approx 10^{-3}$  对于高温超导体， $T_c/T_F \approx 10^{-2}$ ，但现在的锂 - 6 气体  $T_c/T_F \approx 0.3$ ，所以可以说这是一种高温超流体。

（云中客 摘自 Nature , 23 June 2005）