

# 公式 $F = ma$ 中的力从哪来?(之二)

Frank Wilczek

(Massachusetts Institute of Technology, Cambridge, USA)

黄 姚 译 曹则贤 校

(中国科学院物理研究所 北京 100080)

## 2 赋予合理性

我在先前的专栏(Physics Today 2004年10月,第11页)<sup>1)</sup>里论述了那些关于力和质量的假设是怎样为公式  $F = ma$  的内涵赋予实质的. 我将这一系列的假设称为“力的文化”. 我提到, 尽管“力的文化”中的一些元素经常被称为“定律”, 但是用近代物理的观点来看却显得非常奇怪. 在此, 我将讨论其中某些假设是在什么样的情况下如何作为近代 <物理><sup>2)</sup>基本原理之必然推论出现的——或者根本就不是!

### 第零定律批判

具有讽刺意味的是; “力的文化”中最原始的第零定律, 也即质量守恒定律, 同近代 <物理> 基本原理之间存在着非常微妙的关系.

经典力学中的质量守恒是狭义相对论中能量守恒的一个结果吗? 表面上, 这个例子或许显得很直白. 从狭义相对论我们知道, 物体的质量等于静能量除以光速的平方 ( $m = E/c^2$ ); 对于缓慢移动的物体大约来说也是这样. 因为能量是一个守恒量, 于是这个方程似乎为“力的文化”中质量这一角色提供了一个合适的候选者  $E/c^2$ .

但是, 这个想法经受不住严格的推敲. 考虑到我们通常是怎样处理基本粒子之间的反应和衰变时, 它就明显地表现出逻辑上的漏洞.

为了测定可能的运动, 我们必需确定所有进出粒子的质量. 质量是孤立粒子的内禀性质, 也就是说, 所有的质子都具有相同的质量, 而所有的电子又具有另一个相同的质量, 等等(用专家的话说; “质量”是彭加勒群不可约表示的标记). 而且, 就不存在单独的质量守恒原理. 实际上, 这些粒子的能量和动量都是由质量和速度通过众所周知的公式给出,

运动是由能量守恒和动量守恒来约束的. 认为进入 <某个运动状态> 的质量的总和与离开的质量的总和相等基本上是不正确的.

当然, 当所有的物体都缓慢运动的时候, 质量确实减少到大致等于  $E/c^2$ . 于是, 质量不守恒的问题可以藏掖起来, 因为只有不易觉察的(细小而缓慢运动的)暂时变动才昭显它的存在. 可问题是力学问题的研究注意力就放在那些暂时变动上. 也即我们还是利用能量守恒, 减去质能项(或者, 实际上忽略它), 而只保留动能部分  $E - mc^2 \cong \frac{1}{2}mv^2$ . 但是你不能问心无愧地从一条(相对论能量)守恒定律挤出两条(质量和非相对论能量)守恒定律来. 将质量守恒归因于它与  $E/c^2$  近似地相等, 这需要解释一个关键的问题: 为什么在各种不同的情况下, 质能被有效地禁闭, 而不是变成能量的其他形式?

为了具体地从数学上描述这个问题, 考虑核反应  ${}^2\text{H} + {}^3\text{H} \rightarrow {}^4\text{He} + n$ , 这个反应是实现可控核聚变的关键. 氘加上氚的总质量比  $\alpha$  粒子加上质子的总质量多出 17.6 Mev. 假设氘和氚初始时刻处在静止状态, 那么  $\alpha$  粒子和质子分别具有  $0.4c$  以及  $0.17c$  的速度.

在氘氚反应中, 质量不严格守恒, 虽然粒子的运动速度并不接近光速, 但仍然在此过程一开始就产生了(非相对论的)动能. 相对论的能量当然守恒, 可尽管如此, 却不存在有效的方法将它分成各自守恒的两部分. 在假想实验中, 通过调整质量, 我们能够使这个问题在任意低速的情况下出现. 另外一个实现缓慢运动的方法是让释放出的质能分配到众多物体中去.

\* 2005-07-18 收到

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

1) 中译文见《物理》2005, 34(2) 93

2) 括号内的字为译校者所加, 下同

## 重建第零定律

狭义相对论允许质量向能量转化,从而原则上消灭了第零定律。但为什么大自然在是否动用这个自由的问题上却又左顾右盼?而拉瓦锡在开辟近代化学的历史性实验中,又是怎样强化这个实际上并不正确的中心原理(质量守恒)的呢?

为第零定律存在合理性的适当辩护需要求助于一些有关物质特定的、深奥的事实。

为了解释为什么一般物质的大部分能量都以质量的形式被精确地锁定,我们首先需要了解一些有关原子核的基本性质,因为几乎所有的质量存在于原子核中。原子核最重要的性质是其稳定性以及动力学隔离。单个原子核的稳定性是重子数守恒、电荷守恒以及核力性质的结果,因此造就一系列的准稳态的同位素。原子核之间的物理距离及它们之间的静电排斥(库仑阻碍)确保了它们之间近似的动力学隔离。原子核基态与激发态之间的巨大能隙就是有效地利用了这种近似的动力学隔离。因为原子核的内能级不能作小的改变,所以微扰下它就一点也不变化。

由于绝大部分质量也即一般物质的能量都集中在原子核,原子核的独立和完整——它们的稳定性以及缺乏有效的内部结构——都为第零定律提供了合理性依据。但注意到,要达到这一步,我们需要量子理论和核现象的某些特殊性!在量子理论中才有能隙的概念,是核力的某些特殊性才保证了基态之上的能隙是如此大。如果原子核个头可以很大,而且像液滴或者气体那样几乎不具有结构,能隙就会变小,质能也不会如此完全地被禁闭。

放射性是破坏原子核完整性的一个例外。更一般地说,在核物理与粒子物理研究中遇到的那些极端情况下,动力学隔离的假设也必须摒弃。在那些场合,质量守恒完全失效。例如常见的衰变反应  $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$  中,大质量的  $\pi^0$  粒子衰变成零质量的光子。

单个电子的质量如同它所带的电荷一样,是一个普适量。电子不具有内部激发,电子数也守恒(如果我们忽略弱相互作用和电子对的产生的话)。这些事实都根植于量子场论。它们一起确保了电子质能的整体性。

在将原子核和电子组装而成一般物质的过程中,静电力起到了主要的作用。我们从量子理论知道,活跃的外层电子以  $\alpha c = e^2/4\pi\hbar \approx 0.07c$  数量级的速度运动。这表示量级上化学能量是电子质能的  $m_e(\alpha c)^2/m_e c^2 = \alpha^2 \approx 5 \times 10^{-5}$  倍,而电子质能只是原

子核质能的一小部分。所以化学反应只在十亿分之几的程度上改变质能,于是拉瓦锡质量守恒定律成立!

注意到重元素的内壳层电子以  $Z\alpha$  量级的速度运动,可能具有相对论效应。但重原子的内核(原子核加上内壳层电子)一般保持了它的整体性,归因于它是空间分离的并且具有大的能隙。于是,尽管原子内核的质能不是严格等于组成它的电子与原子核质能的总和,但它是守恒的。

综合以上讨论,我们通过考察原子核、电子和重原子的内核的完整性以及这些“积木”的缓慢运动,从而确立了牛顿第零定律的合理性,导致大能隙的量子理论为完整性提供了的基础,而精细结构常数  $\alpha$  为一小数值则保证了运动的缓慢。

牛顿将质量定义为“物质的量”,并且假设它守恒。这种表述的内涵是构造物质的过程仅表现为“积木”的重新排布,不涉及产生或消灭;同时,物体的质量是全体“积木”质量的总和。我们现在可以明白,何以从现代基本理论的观点来看,如果“积木”是原子核、重的原子内核和电子的话,前述这些假设依然构成绝佳的近似。

然而,故事讲到这里就结束是不对的。在接下来关于物质的分析中,我们将离开熟悉的地面:首先掉下悬崖,然后进入光辉的飞行。如果我们试着用更基本的“积木”(质子和中子)代替原子核,会发现质量并不是严格可加的。如果我们再前进一步到夸克和胶子层次,就像我在先前的专栏讨论中指出的那样,则发现原子核的质量很大程度上来自纯能量。

## 质量和重力

表面上,对经典力学中质量的概念进行复杂而不精确的辩护形成了一个悖论:这个摇摇晃晃的结构怎样成功地支撑起极其精确而又成功的天体力学的预言的呢?答案是,它绕开了质量的概念。天体力学中的力是引力,并且与质量成正比,于是方程  $F = ma$  两边的  $m$  就可以消去。从描述引力引起的运动的方程两边消去质量是广义相对论的基本原理。在广义相对论中,路径被视为弯曲时空中的测地线,而不涉及到质量。

不同于粒子对重力的响应,粒子施加的引力只是近似正比于其自身的质量;严格版本的爱因斯坦场方程将时空曲率与能量-动量密度联系起来。就重力而言,还没有能绕开能量的对物质的量的测量;一般物质的能量由质能关系来支配是不切实际的。

### 第三和第四定律

第三和第四定律分别是动量守恒和角动量守恒的近似说法。(第四定律表述的是所有的力都是二体中心力。)在近代物理的基本原理中,这些伟大的守恒律反映了物理定律在平移和旋转下的对称性。因为这些守恒律比通常用来“推导”出力的那些假设要精确和深刻得多,则假设就真正成了“不合时宜”。我相信它们应该带着应有的荣誉退出舞台了。

牛顿为他的第三定律这样争辩:具有未被平衡的内力的系统会自发地开始加速,然而“这一现象从未被观察到”。但这种辩解实际上是直接导出了动量守恒定律。类似地,可以从物体不会自发旋转起来这一现象“推导”出角动量守恒。当然,纯粹从教育的观点,可以指出作用-反作用系统以及二体中心力是满足守恒律的简单途径。

### 默认的简单性

一些关于力这个简单事实的默认假设在我们头脑中已经根深蒂固了,以至于我们很容易就认为它

们是理所当然的。然而,它们具有深奥的基础。

在计算力的时候,我们只将临近的物体考虑在内。为什么可以这样?包含了狭义相对论和量子力学基本要求的量子场论之局域性原理给出了某点上能量和动量(当然了,也就是力)的只依赖于临近该点的物体位置的表达式。甚至,所谓的长程电相互作用和引力(实际上  $1/r^2$  仍然随着距离增大而迅速减小)也不过反映了耦合规范场及其协变导数局域的特殊性质

类似地,不存在相当大的多体作用力与恰当的(可重整化的)量子场论不能支持它们这一事实相联系。

在本期专栏里,我强调了,或许是过分强调了“力的文化”与近代<物理>基本原理之间的关系。在这个系列的最后一篇文章中,我将讨论力作为一个持续的、广泛的研究对象以及一个哲学模型的双重重要性。

(未完待续)



### · 物理新闻和动态 ·

## 诺贝尔奖得主 Ketterle 领导的小组又获重要进展

在实现了<sup>23</sup>Na的玻色-爱因斯坦凝聚(BEC)后不久,1997年 Ketterle W 领导的小组即以原子干涉实验证实了 BEC 所具有的相干性。他们将一团 BEC 原子云劈成两半,然后令它们在重力场中下落,每一半在下落过程中自由膨胀,并且逐步形成彼此的重叠。此时,通过吸收成像,实验者观察到了与原子密度相应的明暗相间条纹。测得的条纹间距是  $\sim 15\mu\text{m}$ ,这意味着,作为物质波 BEC 原子的德布罗意波长(水平分量)  $\sim 30\mu\text{m}$ 。

最近,来自 MIT-哈佛超冷原子研究中心的 Ketterle 小组,利用<sup>87</sup>Rb 原子的 BEC,测量了原子因吸收光子而获得的反冲动量,从而为色散介质中的原子相干提供了定量描述。在真空中,原子因吸收一个光子而获得的动量是  $\hbar k$ ,  $k$  是其空波矢。然而,对于原子 BEC,因原子密度的增大,原子云成为色散介质。此时,光场的动量将分为电磁动量和介质的机械动量两部分。在后一种情况下,关于原子反冲色散关系(反冲频率  $\omega$  作为波矢  $k$  的函数)尚无统一认识。

Ketterle 小组此次证实,原子在吸收了一个正向光子并发射了一个反向光子之后,其反冲频率  $\hbar\omega$  正比于  $\frac{(2n\hbar k)^2}{2m}$ ,其中  $n$  是色散介质的折射率,  $m$  是原子质量。这表明,在色散介质中一个光子的行为就像是它具有动量  $n\hbar k$ ,而非真空环境中的  $\hbar k$ 。实验者使用两束同频激光对射的方法,在 BEC 原子云中产生驻波光栅。第一激光脉冲使部分原子(第一批)进入  $1 \pm 2n\hbar k$  动量态。在延时  $\tau$  以后,原子云被施以第二激光脉冲。第二批获得动量  $1 \pm 2n\hbar k$  的原子与第一批原子相干,形成与原子密度分布相应的干涉条纹。由于在延时期间,  $1 \pm 2n\hbar k$  态与  $10n\hbar k$  态的位相以不同的速率演化,干涉条纹的清晰或隐退是随延时  $\tau$  而振荡的。振荡频率  $\omega$  (也即原子经驻波光栅衍射的反冲频率)可以通过拟合确定。另一方面,根据实验参数,可以导出与  $\omega$  相对应的凝聚体折射率  $n$ 。最后有  $\hbar\omega = \frac{(2n\hbar k)^2}{2m} + (\text{偏移参数})$ 。显然,干涉条纹的间距  $d = \lambda_{\text{介质}}/2 = \lambda_{\text{真空}}/2n$ ,光栅周期因波矢从  $k$  增至  $nk$  而变短。

(戴闻 编译自 Phys. Rev. Lett., 2005, 94 :170403)