

“跑动”精细结构常数的物理意义到底是什么？*

——与倪光炯先生商榷

艾小白¹⁾

(中国科学院上海原子核研究所 上海 201800)

摘要 面对同样的物理实验事实,本文提出了与倪光炯先生完全不同的看法:“跑动”精细结构常数仅仅意味着基本的电子电荷值 e_0 不是洛伦兹不变量,它既不反映“电荷是某种流体的观念不正确”,由此也不能逻辑地得到“自然界不存在电荷守恒定律”这样的论断.

关键词 电荷,守恒定律,狭义相对论,洛伦兹不变量

倪光炯先生在“思维的惯性——电荷守恒吗?”^[1]一文中提出“一个粒子的电荷 q 不再是常数了,自然界不存在关于 q 的守恒定律”.见到这一看法,的确在自己思想中引起了倪先生所预料的“一怔的感觉”.经过100多年的实践考验,直到80年代以前,在一切已经发现的宏观过程和微观过程中,在任何相互作用中,从来没有出现违反电荷守恒定律的事件.而狭义相对论不仅阐明只要时空坐标的变换用洛伦兹变换,麦克斯韦方程组(包括电荷守恒定律)对任何惯性系都正确,而且证明电子电荷 e_0 是洛伦兹不变量^[2-4].1982年后的实验^[1],包括最近的报告^[5]却揭示高能时精细结构常数 $\alpha = e_0^2/\hbar c$ 的数值达1/128,比低能时的 $\alpha = 1/137$ 增大了7%.其中的物理内涵是否就是倪光炯先生所断言的“电荷守恒定律不再成立了”呢?面对100年来物理学研究进展中所观察到的同样的实验事实,我的千虑之一得与倪光炯先生的论断大相径庭,特写出来与倪光炯先生商榷.

(一) 电荷守恒定律的重要性

物理学是一个统一的整体,在基本问题上开刀,往往牵一发而动全身,非同小可.让我们先换个角度来思考.

天体物理学的研究已指出了宇宙的电中性和保持这种宇宙电中性即(总)电荷守恒的重要性.已经证明,哪怕电子与质子的电荷值只相差 $2 \times 10^{-18} e_0$,原子、分子的非电中性将造成宇宙的非电中性,而宇宙的非电中性将导致宇宙中的静电排斥力超过引力,从而不能形成行星、恒星和星系.没有星体就没有生物赖以生存的地方,我们也都不存在了.很显然,生物存在的一个必要条件是不能轻易地否定电

荷守恒定律.

(二) 电荷不守恒在物理上会出什么问题?

从经典力学中的诺特(Noether)定理起,人们已了解自然界中的对称性和守恒定律之间有对应的关系.与普适的电荷守恒相对应的是第一类规范变换不变性,即描写强相互作用、弱相互作用和电磁相互作用的过程的动力学方程(比如量子力学中的薛定谔方程)在位相变换 $\psi \rightarrow e^{iq\theta} \psi$ 之下保持不变,式中的 ψ 是波函数,其物理意义是粒子带电态波函数相对于粒子中性态波函数的相对相位具有不可测量性.如果“电荷守恒定律不再成立了”,那就意味着带不同电荷态之间的相对相位是可观察量了,应当能在巧妙设计的实验中检验出来,这一点对物理学可是严峻的考验!

(三) 问题出在哪里?

倪光炯先生正确地指出精细结构常数的可变性意味着 e_0^2 是可变的,因为“光速 c 是普适常数”是实验事实,而普朗克常数 \hbar 是普适常数虽无令人信服的实验事实,却可以严格证明.只要注意到光波的频率和波矢量也构成类似于四动量的四矢量,应用光的二象性便可以严格地证明普朗克常数 \hbar 是一个与观察者无关的普适常数.然而前面已述,狭义相对论诞生以后,人们已论证了电子电荷 e_0 是洛伦兹不变量.比如,在诺贝尔奖金得主泡利的名著《相对论》(1958版)中的第27节就是从电荷守恒定律论证电子电荷 e_0 是洛伦兹不变量^[2]的内容.此处的确存在着尖锐的矛盾.我们知道,电荷守恒定律和电子电荷

* 上海市自然科学基金资助项目

1) 江苏昆山硅湖大学客座教授

e_0 的绝对性不是一回事,它们之间既有严格的区别,又有紧密的联系.前者说的是电荷在物质的运动中守恒,后者说的是电荷在时空坐标的变换中保持不变.如前所述,电荷守恒定律不能轻易否定,那么问题就可能出在实际上“我们是不可能从电荷守恒定律证明电子电荷 e_0 是洛伦兹不变量的”.在下面的论述中让我们将粒子数的、流体力学(质量)的和电流的连续性方程统一考虑,便可以很容易地看出问题所在.

为了讨论的方便,让我们先建立坐标系.设一面积为 dV_0 ,其中的粒子数为 N ,单个粒子质量为 m_0 ,单个粒子荷电量 e_0 ,总质量 $M_0 = N m_0$,总电荷 $Q_0 = N e_0$ 的均质、均匀带电体相对于坐标系 Σ_0 静止.选定坐标系 Σ' 以匀速 \mathbf{u} 沿 $x - x'$ 轴正向相对坐标系 Σ_0 运动, $o'y', o'z'$ 轴分别与 oy, oz 轴平行.在坐标系 Σ' 中,上述均质、均匀带电体的体积变换为 dV' ,单个粒子质量变换为 m' ,总质量为 $M' = N m'$;不失一般性,设单个粒子荷电量变换为 e' ,总电荷则变换为 $Q' = N e'$.在坐标系 Σ_0 中粒子数密度、质量密度、电荷密度分别为 $\rho_{N_0}, \rho_{m_0}, \rho_0$,在坐标系 Σ' 中粒子数密度、质量密度、电荷密度分别为 $\rho'_N, \rho'_m, \rho'_e$.

(1)在坐标系 Σ_0 与 Σ' 中,粒子数密度、质量密度、电荷密度的定义分别为

$$\begin{aligned} \rho_{N_0} &= N/dV_0 \\ \rho_{m_0} &= N m_0/dV_0 = m_0 \rho_{N_0} \\ \rho_0 &= N e_0/dV_0 = e_0 \rho_{N_0} \\ \rho'_N &= N/dV' \\ \rho'_m &= N m'/dV' = m' \rho'_N \\ \rho'_e &= N e'/dV' = e' \rho'_N \end{aligned}$$

(2)从时空四矢量 $(dx, dy, dz, icdt)$ 出发,乘以洛伦兹标量 N 和洛伦兹不变量四度体积元 $d\tau dV_0$,可以构成如下四矢量:

$$\begin{aligned} (Ndxd\tau dV_0, Ndyd\tau dV_0, \\ Ndzd\tau dV_0, icNdt/d\tau dV_0), \end{aligned} \quad (1)$$

即

$$(\rho_{N_0} dx/d\tau, \rho_{N_0} dy/d\tau, \rho_{N_0} dz/d\tau, ic\rho_{N_0} dt/d\tau), \quad (2)$$

或

$$(\gamma\rho_{N_0} u_x, \gamma\rho_{N_0} u_y, \gamma\rho_{N_0} u_z, ic\gamma\rho_{N_0}), \quad (3)$$

其中 \mathbf{u} 是坐标系 Σ_0 与坐标系 Σ' 之间的相对速度, $\gamma^{-1} = dt/d\tau = \sqrt{1 - u^2/c^2}$.

29 卷(2000 年)4 期

(3)粒子的静止质量 m_0 与静止荷电量 e_0 是洛伦兹不变量,分别乘以(1)式,可以构成另外两个四矢量

$$(\gamma\rho_{m_0} u_x, \gamma\rho_{m_0} u_y, \gamma\rho_{m_0} u_z, ic\gamma\rho_{m_0}), \quad (4)$$

$$(\gamma\rho_0 u_x, \gamma\rho_0 u_y, \gamma\rho_0 u_z, ic\gamma\rho_0). \quad (5)$$

(4)用 ρ_m 表示 $\gamma\rho_{m_0}$,用 ρ 表示 $\gamma\rho_0$, (4)式与(5)式分别改写为

$$(\rho_m u_x, \rho_m u_y, \rho_m u_z, ic\rho_m), \quad (6)$$

$$(\rho u_x, \rho u_y, \rho u_z, ic\rho). \quad (7)$$

(6)与(7)式就是泡利书中所构成的四流密度矢量.然而,四质量密度 ρ_m 与四电荷密度 ρ 显然不是 Σ' 中粒子的三维质量密度 ρ'_m 与三维电荷密度 ρ'_e .不过,我们很容易求得 ρ_m, ρ 与 ρ'_m, ρ'_e 之间的关系.

(5)即使我们不知道精细结构常数可变的事实,不失论证的普遍性亦可假设 e' 与 e_0 之间有一个靠物理学其他分支理论才能决定的关系 $e' = e_0 f(u)$,注意到 $m' = m_0/\sqrt{1 - u^2/c^2}$, $dV' = dV_0 \sqrt{1 - u^2/c^2}$,其中 $u = |\mathbf{u}|$,那么

$$\rho'_N = N/dV' = \gamma\rho_{N_0}, \quad (8)$$

$$\rho'_m = N m'/dV' = \gamma^2 \rho_{m_0} = \gamma\rho_m, \quad (9)$$

$$\rho'_e = N e'/dV' = f(u) \gamma\rho_0 = f(u) \rho. \quad (10)$$

应用 Σ_0, Σ' 中的三维粒子数密度、三维质量密度,我们可以得到

$$\rho'_N dV' = \rho_{N_0} dV_0 = N, \quad (11)$$

即总粒子数 N 是洛伦兹不变量及熟知的相对论关系:

$$\rho'_m dV' = N m' = M' = \gamma M_0. \quad (12)$$

而对三维电荷密度只能循环得到初始的假设:

$$\rho'_e dV' = N e' = Q' = N f(u) e_0 = f(u) Q_0. \quad (13)$$

当 $N=1$ 时, $e' = f(u) e_0$.即我们从“单个粒子荷电量 e_0 不是洛伦兹不变量”的假设出发,应用狭义相对论,只能回到初始的假设“单个粒子荷电量 e_0 不是洛伦兹不变量”,仍求不出 $f(u)$ 的具体形式,也无法决定 $f(u)$ 是否严格地等于 1.或者说,应用狭义相对论,实际上“我们是不可能从电荷守恒定律证明电子电荷 e_0 是洛伦兹不变量”.

(6)泡利等人的证明^[2-4]中有什么问题吗?他们误用 ρ 替代 ρ'_e ,则有

$$\rho dV' = N e' = \gamma\rho_0 dV_0/\gamma = \rho_0 dV_0 = N e_0, \quad (14)$$

当 $N=1$ 时, 获得电子荷电量 e_0 是洛伦兹不变量的结论. 从本文的论述可见其证明完全是一场历史性误会. 因为遵从“泡利论证”的相同思路, 应用流体力学的连续性方程我们甚至会得到粒子的质量 m 是洛伦兹不变量的错误结论, 比如在以下操作中, 只要误用 ρ_m 替代 ρ'_m , 则有

$$\begin{aligned} \rho_m dV' &= Nm' = \gamma \rho_{m_0} dV_0 / \gamma \\ &= \rho_{m_0} dV_0 = Nm_0, \end{aligned} \quad (15)$$

即 $M' = M_0$, $m' = m_0$, 根本就得不到 $m = m_0 / \sqrt{1 - u^2/c^2}$ 的熟知关系. 为什么会造成“误用”的错误而长期不能发现呢? 其原因在于人们忽视了下述问题: 如果有一个 ρ 满足连续性方程

$$\frac{\partial \rho}{\partial t} + \text{div}(\rho \mathbf{u}) = 0. \quad (16)$$

只要 $|\mathbf{u}|$ 不随空间、时间变化, 任意函数 $g(u)$ 与 ρ 的乘积 $g(u)\rho$ 也必定满足连续性方程(16). 然而乘积 $g(u)\rho$ 构成的无数个函数中仅有一个函数能用来构成四矢量, 如 $\rho_m (= \gamma \rho_{m_0})$ 、 $\rho (= \gamma \rho_0)$. 但是 ρ_m 、 ρ 并不是坐标系 Σ' 中的三维质量密度 ρ'_m 与三维电荷密度 ρ'_e , 人们不可以误用四流密度矢量中的 ρ_m 与 ρ 替代三维质量密度 ρ'_m 与三维电荷密度 ρ'_e 来计算 M' 与 Q' , 如(14)式与(15)式所做的那样. 否则, 论证所得的结论是荒谬的. 惊人的是这样的历史性误会居然沿袭了近一个世纪, 真是不可思议.

(四)经典的电流连续性方程能够写成协变形式

(1)我们每天都在不自觉地证明狭义相对性原理的正确性, 在原则上将普适的电荷守恒定律改写成对洛伦兹变换协变的形式应当不成问题.

19世纪中, 人们把能量守恒与转换定律看成一切自然规律必须服从的普遍的原则. 狭义相对论问世后, 人们认识到一切物理学规律, 无论宏观的、微观的、精确的、近似的、已发现的、待发现的, 都要符合狭义相对性原理. 近一个世纪的实践已使得我们可以将上述认识再向前推进一步. 地球的公转轨道是椭圆轨道, 地球每时每刻的轨道速度都不同于前一时刻. 我们发现自然规律有什么变化吗? 没有. 我们进行物理学研究, 常常会在春夏秋冬的不同时刻重复某一实验并得到重复性很好的结果. 我们的这些熟视无睹的经验已一而再, 再而三地证明: 在不同惯性系中自然规律是不变的. 这就是说, 狭义相对性原理不仅是一切物理学规律, 而且是一切自然规律

必须服从的普遍的原则. 虽然狭义相对论不能独立地解决某学科中的具体问题, 但对没有时间显函数关系的化学规律、生物规律等规律, 规律的时间平移不变性已给出了能量守恒的要求, 对有时间显函数关系的具体的物理学规律, 不仅要求能量-动量守恒, 并且又加上了一条严格的限制: 要求将已发现的及未来可能发现的物理学具体规律的方程式改造成对洛伦兹变换协变的形式(注意: 许多考虑相对论效应后所揭示的新规律正是在上述“改造”中才被认识到的). 所以, 在原则上将普适的电荷守恒定律改写成对洛伦兹变换协变的形式应当不成问题.

(2)如何将经典的电流连续性方程改写成对洛伦兹变换协变的形式?

我们知道从时空四矢量 $(dx, dy, dz, icdt)$ 出发, 乘以洛伦兹标量 m_0 和除以原时 $d\tau$, 可以构成四动量; 从时空四矢量 $(dx, dy, dz, icdt)$ 出发乘以洛伦兹标量 m'/γ 和除以原时 $d\tau$, 同样也可以构成四动量. 只要模仿上述操作, 就可以方便地将倪先生文章中的(9)式(四维协变的流守恒方程)

$$\partial_\mu (\overline{\Psi} \gamma^\mu \Psi) = 0 \quad (17)$$

改写成对洛伦兹变换协变的经典的电流连续性方程: 先用洛伦兹标量 e_0 左乘(17)式并移到微商号后, 在括号内再除以 $f(u)$ 即可. 这个操作相当于用 $\rho'_e/f(u)$ 替代四电流密度 ρ ; 直接用洛伦兹标量 $e/f(u)$ 左乘(17)式并移到微商号后亦可. 当然在粒子的平均质心能量 (\sqrt{s}) 小于 57.77 GeV 左右^[5], $f(u) \approx 1$, 我们可得通常情况下的协变的经典的电流连续性方程.

(五)倪先生文章中的其他观点, 如高速运动粒子“内部会产生隐藏的反粒子态”, 隐藏的反粒子态的表现“正是粒子质量的增大和运动钟的变慢等狭义相对论效应”等等, 都是本作者不敢苟同的, 因与本文的论述关系不密切, 将另处另文商榷.

参 考 文 献

- [1] 倪光炯. 物理, 1998, 27: 508—509 [NI Guang-Jiong. Physics, 27: 508—509 (in Chinese)]
- [2] Pauli W. Theory of Relativity. London: Pergamon Press, 1958. 76—78
- [3] Møller C. The Theory of Relativity. Oxford: 1955. 139—141
- [4] Synge J L. Relativity: The Special Theory. New York: John Wiley & Sons, Inc., 1965. 402—404
- [5] Levine I, Koltick D et al. Phys. Rev. Lett., 1997, 78: 424—427