

# Proca 电磁理论的若干问题

黄志洵

(中国传媒大学, 北京 100024)

**[摘要]** 2004年6月, 位于西非 Oklo 的美国 Los Alamos 实验室的核反应堆对实验数据做再分析后得出结论说, 近20亿年内精细结构常数减小了  $4.5 \times 10^{-8}$ 。常数不常, 意味着光速有很小的变化。这是最新的与狭义相对论不符的实验报告。另一方面, 光子如有静止质量, Maxwell 方程组将被 Proca 方程组所取代, 而磁矢位(势)  $A$  将成为可观测量。而过去和现在都有许多方法测量光子的静止质量。

文章的主要目的是在 Proca 理论框架内研究电磁波波速, 发现即使在自由空间(真空)条件下也会出现超光速传播; 同时又对波导与 Proca 波的截止现象做了比较, 给出了相应的结果。

**[关键词]** 狭义相对论; Maxwell 方程组; Proca 方程组; 电磁波波速; 光子的静止质量

**[中图分类号]** O431.1; O442 **[文献标识码]** A **[文章编号]** 1009-1742(2005)03-0006-07

## 1 引言

如所周知, 狭义相对论 (special relativity, SR) 立足于两个公设的基础上<sup>[1]</sup>: 第一公设是狭义相对性原理, 第二公设是“光速不变原理”。第二公设决定了不会有光子的静止系, 由此推论光子的静止质量  $m_0 = 0$ 。光速不变原理与 Maxwell 电磁理论是一致的(光速为何“不变”? Maxwell 理论已开了头); “光速不变原理”推论光子静质量为零, 故 Maxwell 理论隐含一个前提—— $m_0 = 0$  ( $m_0$  是电磁波粒子的静质量, 即光子的静质量)。

1936年, A. Proca 在假定  $m_0 \neq 0$  的条件下, 推导出与 Maxwell 方程组不完全相同的方程组(见: Compt. Rend., 1936, 202: 1420; Jour. de Phys., 1936, 7: 7)。但是, Proca 电磁场方程组并不是对 Maxwell 方程组的全盘否定, 而是前者比后者更全面。或者说, Proca 方程组的出现揭示了 Maxwell 方程组的近似性。由于  $m_0 \neq 0$  的假设与 SR 理论不符, 也与 Maxwell 理论不符, 故 A. Proca 进行推导的本身, 就是迈出了与主流物理理

论不同的一步。

20世纪末, 不断有人提出光速可变理论 (theory of varying speed of light, VSL)<sup>[2, 3]</sup>; 它既违反 SR, 又与 Maxwell 电磁理论不符。光速究竟是“不变”还是“可变”, 对我们评价 Proca 方程组的意义和价值, 显然至关重要。当然, 最根本的是要由实验决定  $m_0$  是否等于零。上述两个基本科学问题, 也就成了自然科学发展的前沿之一。

## 2 对基本物理常数的讨论

光速在不同物质中是不同的。例如, 在水中传播时光速约为  $0.75c$ , 在金刚石中约为  $0.4c$ 。即使在空气中, 光速也会有所减慢(在  $25^\circ\text{C}$ ,  $101.33\text{ kPa}$  的干燥空气中, 光速为  $c/1.00026397$ <sup>[4]</sup>)。但这些并不是 Einstein 的“光速不变原理”和近年来的 VSL 理论的光速不变或变化的含意, 因为这些理论所讨论的是真空中的光速。

1865年, J. C. Maxwell 提出光是电磁波的一种<sup>[5]</sup>, 其根据是在 1865 年之前的 3 个光速测量数据 (J. Bradley 的值  $301000\text{ km/s}$ , A. Fizeau 的值

**[收稿日期]** 2004-08-11; **修回日期** 2004-08-30

**[作者简介]** 黄志洵 (1936-), 男, 北京市人, 中国传媒大学教授, 博士生导师, 中国科学院电子学研究所客座研究员

303000 km/s, J. Foucault 的值 298000 km/s), 与 Maxwell 由下式的真空中光速计算值非常接近:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\epsilon_0 \mu_0}} \quad (1)$$

式中  $\epsilon_0$ ,  $\mu_0$  分别为真空的介电常数及导磁率,  $c$  是真空中光速。按照国际科学技术数据委员会 (CODATA) 1998 年公布的基本常数平差值<sup>[6]</sup>, 有

$$\epsilon_0 = 8.854187817 \times 10^{-12} \text{ F/m} \quad (2)$$

$$\mu_0 = 4\pi \times 10^{-7} = 1.2566370614 \times 10^{-6} \text{ N/A}^2 \quad (3)$$

$$c = 299792458 \text{ m/s} \quad (4)$$

对这些常数的恒定性一直无人怀疑, 即  $\epsilon_0, \mu_0, c$  应与时间没有关系。而且, 真空中光速  $c$  的值也应当与光的行进方向没有关系。

1905 年 A. Einstein 发表了相对论的第一篇论文“论动体的电动力学”<sup>[1]</sup>; 正如该文及 Einstein 后来的著作所阐明的, SR 的基础是两个公设和一个变换; 第一公设说“物理定律在一切惯性系中都相同”, 第二公设说“光在真空中总有确定的速度, 与观察者或光源的运动无关, 也与光的颜色无关”<sup>[7]</sup>; 后者被 Einstein 称为 L 原理。为了消除以上两个公设在表面上的矛盾 (运动的相对性和光传播的绝对性), SR 认定“L 原理对所有惯性系都成立”; 或者说, 不同惯性系之间的坐标变换必须是 Lorentz 变换 (LT)。

因此,  $c$  作为一个恒定不变的普通常数, 它与光源的运动、观察者的运动、光频、光传播方向以及时间都应当毫无关系。任何一个因素对  $c$  不变性的微小破坏都将构成对 SR 理论基础的破坏, 甚至影响到 Maxwell 电磁理论。

另一个基本物理常数是精细结构常数 (fine structure constant, FSC), 常用  $\alpha$  表示:

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \quad (2)$$

式中  $e$  是电子电荷,  $\hbar = h/2\pi$  ( $h$  是 Planck 常数)。许多物理学家用  $c$  的变化来解释实验中发现的  $\alpha$  的微小变化<sup>[8]</sup>; 澳大利亚新南 Wales 大学的 V. Flambaum 解释说, 这样看问题是一种有根据的简化。但是, 有的物理学家从维护 SR 出发, 认为“在尚未排除  $\alpha$  变化与  $h, e$  无关之前, 不应轻易说该变化是由  $c$  变化造成的”<sup>[9]</sup>。这样讲固然有理, 但我们亦无法排除  $\alpha$  的变化就是来源于  $c$  的变化。文献 [9] 认为  $\alpha$  的变化可能是电子电荷  $e$  变

化造成的; 但  $e$  为常数正是 SR 理论的要求或一个推论, 说“ $e$  具有可变性”对维护 SR 同样不利! 总之, 必须重视“ $\alpha$  随时间而变”的实验发现, 这方面的情况可列举如下:

(1) 1996 年, 位于西非加蓬 Oklo 的放射性同位素反应堆的实验认为, 在最近 20 亿年中,  $\alpha$  的变化在  $1 \times 10^{-7}$  以内;

(2) 1998 年, 新南 Wales 大学的 J. Webb, V. Flambaum 等人组成的研究组, 对遥远的类星体的光进行观测, 从而挑战  $\alpha$  的不变性。2001 年公布研究结果<sup>[10]</sup>, 认为在过去 120 亿年前  $\alpha$  值比现在小十万分之几 (详情见文献 [8, 10])。

(3) 2004 年 6 月, 美国 Los Alamos 实验室 (LANL) 的科学家 S. Lamoreaux 在重新分析了 Oklo 反应堆的实验数据 (它们是在研究铯原子、氢原子的光辐射时获得的) 后发现, 迄今 20 亿年内  $\alpha$  减小了  $4.5 \times 10^{-8}$ 。

(4) 以上情况引起了许多物理学家的重视, 例如美国 Berkeley 加州大学的 D. Budder 说, 这些实验为科学发展“打开了一扇新的大门”。2004 年 7 月 3 日出版的 New Scientist 杂志发表了 E. S. Reich 的文章“假如光速可变”<sup>[11]</sup>, 指出 LANL 在 Oklo 的实验使人惊讶, 由于其精确度高, 可以肯定真空中光速  $c$  不是零变化, 而是在过去比  $c$  值略大。值得注意的是, Oklo 实验断定  $\alpha$  是在 20 亿年前改变的, 而不是 120 亿年前 (从理论上讲, 如果过去的光速值较高, 有利于解释宇宙学中的某些问题)。另外, 变化并非发生在宇宙的遥远角落, 而是在地球这里就有。

由上述情况可以看出, 现在我们重提 Proca 方程组并做研究, 是很有意义的。

### 3 光子静止质量是零吗

电磁场方程组在规范变换下的不变性称为规范不变性 (gauge invariance), 与电磁场对应的规范粒子 (光子) 的静止质量总保持为零。这一原理的另一推论是, 矢量位 (势)  $A$  不是可观测量 (Aharonov-Bohm 效应另作别论)。但事情并不那么简单; 对于光子有静质量的情况, 规范不变性受破坏, 而  $A$  成为可观测量!

科学家们进行了许多实验以期确定光子静质量上限<sup>[12]</sup>。例如, 1940 年 de Broglie 用双星观测方法,  $m_0 \leq 8 \times 10^{-40} \text{ g}$ ; 1969 年, G. Feinberg 利用

脉冲星光进行观测,  $m_0 \leq 10^{-44}$  g; 1975年 L. Davies 等利用木星磁场进行观测, 结果为  $m_0 \leq 7 \times 10^{-49}$  g; 等等。另有许多研究者利用对 Coulomb 定律的检验来求取光子的静质量, 结果为  $m_0 \leq 3.4 \times 10^{-44}$  g,  $3 \times 10^{-46}$  g,  $1.6 \times 10^{-47}$  g, 等。还有一些人从 Ampere 定律出发做实验, 得到的结果有  $2 \times 10^{-47}$  g,  $8 \times 10^{-48}$  g,  $4 \times 10^{-48}$  g, 等。进入 21 世纪以后, 科学家仍在设计实验以求测量光子的静质量, 例如 Phys. Rev. Lett. 杂志于 2003 年 2 月 28 日出版的一期上刊登了中国学者罗俊等的文章, 报道他们用精密扭秤方法的检测结果是  $m_0 \leq 10^{-48}$  g<sup>[13]</sup>。美国物理学家 R. Lakes (一位曾进行过光子静质量实验的专家) 对此评论说, “你决不能肯定地说什么东西绝对是零。”显然, Lakes 认为光子应该有静质量。

1998 年, R. Lakes 创建了一套独特的实验装置, 被称为 “galactic experiment on photon mass of Lakes”, 基于考虑宇宙磁矢位 (势) 的影响, 而该位 (势) 来源于星系和星系团的磁场。如果光子有静质量, 该位 (势) 将与一组仪器产生的磁场相互影响。仪器的设计为, 把金属丝缠绕在一个悬浮的铁环上, 并通入直流电流; 而缠绕的金属丝的扭矩非常小。由于仪器转动就有可能探测由宇宙位 (势) 产生的信号, 扭矩的变化一旦测出就能设法算出光子的静质量。图 1 是仪器装置的示意, 磁屏蔽对防止外部环境的电磁干扰是非常重要的。

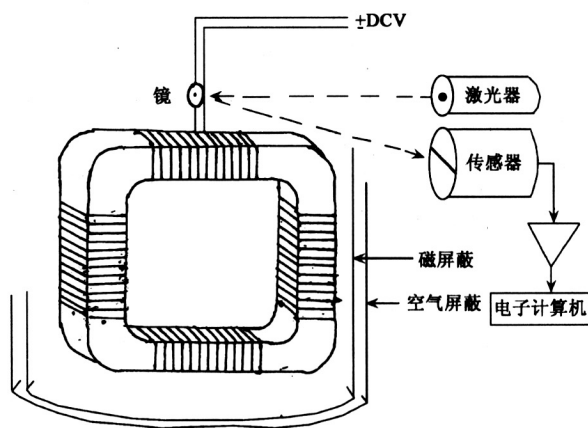


图 1 Lakes 光子静质量测量装置

Fig.1 Photon rest-mass measurement setup of R. Lakes

从 20 世纪末到 21 世纪初, 国际科学界已解决了单光子的制备 (产生), 单光子的光纤传输以及

单光子检测技术, 是非常了不起的成就。但光子有无静质量的问题, 至今尚无最后结论。1998 年多国科学家在日本的实验确定了  $\mu$  中微子有静质量 ( $m_0 \cong 10^{-33}$  g)<sup>[14]</sup>, 这对光子静质量问题的研究有很大的促进作用。

#### 4 Proca 电磁波的相速和群速

在 Proca 理论框架内讨论其特性的电磁波, 可称为 Proca 电磁波, 又可简称为 Proca 波。光子的静质量 ( $m_0 \neq 0$ ) 时, 数学上的变分原理和物理上的量子电动力学思维导致下述的方程组成立:

$$\nabla \cdot \mathbf{D} = \rho - \kappa^2 \epsilon_0 \Phi \quad (3a)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4a)$$

$$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \frac{\partial \mathbf{D}}{\partial t} - \frac{\kappa^2}{\mu_0} \mathbf{A} \quad (5a)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6a)$$

这是量子电动力学的扩展的 Maxwell 方程组, 即 Proca 方程组。式中  $\mathbf{A}$  是磁矢位 (势),  $\Phi$  是电标位 (势), 系数  $\kappa$  为

$$\kappa = \frac{m_0 c}{\hbar} \quad (7)$$

取  $\mathbf{D} = \epsilon_0 \mathbf{E}$ ,  $\mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{H}$ , 该方程组又可写作

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} - \kappa^2 \Phi \quad (3b)$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \quad (4b)$$

$$\nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} - \kappa^2 \mathbf{A} \quad (5b)$$

$$\nabla \times \mathbf{E} = -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \quad (6b)$$

如果光子无静质量 ( $m_0 = 0$ ), 则立即得到人们熟悉的 Maxwell 方程组。

我们知道, 电磁场方程组在规范变换下的不变性称为规范不变性, 这种变换形成局部规范群  $U(1)$ , 意思是代表变换的矩阵是一维的, 即在  $U(1)$  下场方程的不变性。在 Maxwell 场方程的 Lagrange 理论中, 用电磁场的 Lagrange 密度这样的量, 对场变量变分即得到 Maxwell 方程。如放弃  $U(1)$  规范不变性, Lagrange 量需要修改——增加一个与  $m_0$  有关的项, 由此进行推导就得到 Proca 方程组。这时, 规范变换失去了意义, 规范不变性受破坏。这大概是许多物理学家长期以来对 Proca 方程组不予重视的原因。尽管如此, 有的科学著作仍然认为<sup>[15]</sup>, 建筑在 “光子有静质量” 基

础上的 Proca 理论, 有广泛而深远的影响。

可以证明, 在使用 Proca 方程组的情况下, 电磁波的相速、群速为

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\kappa c}{\omega}\right)^2}} \quad (8a)$$

$$v_g = c \sqrt{1 - \left(\frac{\kappa c}{\omega}\right)^2} \quad (9a)$$

令

$$\omega_c = \kappa c = \frac{m_0 c^2}{\hbar} \quad (10a)$$

$\omega_c$  称为截止角频率, 其意义将在后面说明; 故得

$$v_p = \frac{c}{\sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2}} \quad (8b)$$

$$v_g = c \sqrt{1 - \left(\frac{\omega_c}{\omega}\right)^2} \quad (9b)$$

令  $p = \omega/\omega_c$ ,  $q = p/\sqrt{p^2 - 1}$ , 得

$$v_p = qc \quad (8c)$$

$$v_g = \frac{c}{q} \quad (9c)$$

故有

$$v_p v_g = c^2 \quad (11)$$

可见在 Proca 方程有效时, 相速与群速之积为恒定值 ( $c^2$ )。

由上述公式可进行计算, 得到图 2; 可见, 在截止点 ( $\omega = \omega_c, p = 1$ ) 时,  $v_p = \infty, v_g = 0$ ; 当频率增高, 波速很快地向  $c$  值靠近; 例如, 当  $p = 10$ , 计算得到  $q = 1.005, 1/q = 0.995$ , 与 1 的差别只有 0.5%。实际上,  $p$  的值比 10 要大很多 (例如  $p = 10^6 \sim 10^{10}$ ), 故  $v_p, v_g$  与  $c$  值是非常接近的。从理论上讲, 在真空条件下  $v_p, v_g$  亦与  $\omega$  有关, 呈现“真空中电磁波速的色散效应”; 只有  $\omega \rightarrow \infty$  时, 真空中相速、群速才与  $c$  取得一致。显然, “真空中光速不变”的原理已失去意义。

在 Proca 理论体系中, 在不同频率测得的电磁波速度不同, 属于正常的现象。为了取得与  $c$  尽量靠近的值, 在光频段测量就比在微波波段测量效果更好, 因为前者的频率更高。由此推论, 在可见光以上的波段 (例如 X 射线或  $\gamma$  射线所处频段) 进行测量, 其结果会更接近  $c$  值。

另外, 在真空条件下 (即在完全的自由空间传播条件下), Maxwell 理论表示  $v_p = v_g = c$ ; 而 Proca 理论则说,  $v_p > c$  (超光速),  $v_g < c$  (亚光

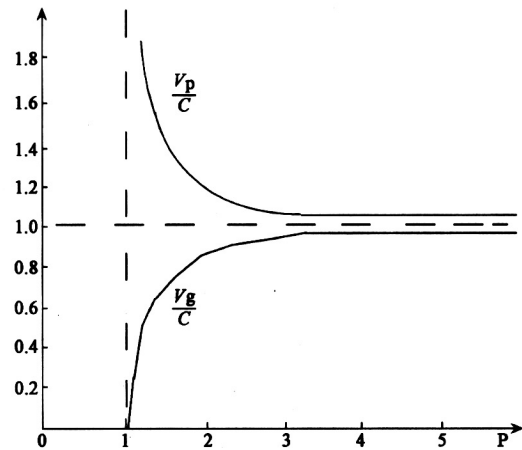


图 2 Proca 理论体系中的相速和群速

Fig.2 The phase velocity and group velocity in Proca's theory

速)。两个不同的理论体系的认知有很大差别。

上述均为  $\omega > \omega_c$  的情况。当  $\omega < \omega_c$ , 根据式 (8b) 和式 (9b),  $v_p, v_g$  均为虚数。虚速度没有物理意义, 亦证明这些公式不适用于  $< \omega_c$  的频段。

### 5 Proca 电磁波的等效截止波导理论

在微波技术中, “波导”是一种重要的传输线, 其截止区 ( $f < f_c$ ) 则利用“场幅随距离按指数规律下降”的性质做成一种衰减器 (截止衰减器), 其设计和理论研究都有巨大进展<sup>[16,17]</sup>。

Proca 电磁理论所呈现的波的规律, 提供了与截止波导理论作类比的可能, 即一种带有中间截止点的 (非全频域的) 波传播, 并且在截频以下表现为消失场 (evanescent field)。以下稍作分析。

Proca 方程在真空中的平面波解可写作

$$\Psi = \Psi_0 e^{j(k \cdot r - \omega t)} \quad (12)$$

式中  $k$  是波矢量,  $r$  是位置矢量,  $\Psi$  可为  $E$  或  $B$ ; 可以证明有下述关系存在:

$$\left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - k^2 = \kappa^2 \quad (13a)$$

亦即

$$k^2 = \left(\frac{\omega}{c}\right)^2 - \kappa^2 \quad (13b)$$

因此, 即便是自由空间 (真空中) 传播, 亦会出现类似微波技术中的截止波导的状态。在截止频率的上、下两个区域的情况见表 1, 而截频的算式为

$$f_c = \frac{\kappa c}{2\pi} \quad (10b)$$

$f < f_c$  区域称为截止下的状态 (situation below-



cutoff), 相当于微波技术中波导频域中的截止区。

表1 Proca 波 的 两 种 状 态

Table 1 Two situations of the Proca waves.

频率	区域	$k^2$	$k$	波的状态
$f > f_c$	$\frac{\omega}{c} > \kappa$	$> 0$	正实数	传播波 ( $r$ 向的行波)
$f < f_c$	$\frac{\omega}{c} < \kappa$	$< 0$	虚数	消失波 (指数衰减场, 按 $e^{- k r}$ 规律衰减)

从文献[12]搜集的情况看, 光子静质量上限的测量值(或估计值)悬殊很大, 范围在  $8 \times 10^{-40} \text{ g} \sim 4 \times 10^{-59} \text{ g}$ 。据此作粗略计算,  $\omega_c = 10^9 \sim 10^1 \text{ Hz}$ 。因此, 对截止频域进行研究, 并非没有意义。然而, 在波导理论中, 是对非理想情况(波导壁的金属导电率  $\sigma \neq \infty$ ) 作研究而取得突破的<sup>[17]</sup>; 对于 Proca 波来讲, 所谓“非理想状态”指的是什么? 仍是令人困惑的问题。

## 6 几个待研究的问题

公式(4)反映的是 Coulomb 静磁定律, 写作  $\nabla \cdot \mathbf{B} = 0$ ; 然而, 在矢量代数中, 对任意矢量  $\mathbf{A}$  有

$$\nabla \cdot \nabla \times \mathbf{A} = 0$$

故可提出磁的矢量位(势)的定义:

$$\mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A} \quad (14)$$

但多个  $\mathbf{A}$  可确定同一个  $\mathbf{B}$ , 即  $\mathbf{A}$  不具有唯一性。把上式代入(6), 得

$$\nabla \times \left( \mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \right) = 0$$

据另一矢量运算公式(对任意标量  $u$ )

$$\nabla \times \nabla u = 0$$

故可假定一个标量  $\Phi$ , 满足

$$\mathbf{E} + \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} = -\nabla \Phi$$

故有

$$\mathbf{E} = -\nabla \Phi - \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} \quad (15)$$

式(14)和式(15)用位(势)函数表示电磁场。

由于式(14)、(15)不能由给定的  $\mathbf{E}$  和  $\mathbf{B}$  完全确定  $\mathbf{A}$  和  $\Phi$ , 故 H. A. Lorentz 曾引入下述关系式<sup>[18]</sup>:

$$\nabla \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad (16)$$

这称为 Lorentz 规范 (Lorentz guide), 特点是  $\nabla \cdot \mathbf{A} \neq 0$ 。上式可化为<sup>[15]</sup>

$$\mathbf{k} \cdot \mathbf{A} = 0 \quad (17)$$

式中  $\mathbf{k}$  是波矢; 故在  $m_0 = 0$  的电磁理论中,  $\mathbf{A}$  与波传播方向垂直, 即电磁波是横波。或者说, 光子的极化方向与  $\mathbf{k}$  垂直(只有横向极化), 对应  $\mathbf{A}$  的 3 个分量中只有 2 个独立的偏振态。

如果  $m_0 \neq 0$ , 规范变换受破坏, (16) 式不再成立,  $\mathbf{A}$  的独立偏振态数为 3, 故出现了纵波, 光波将像声波一样会产生纵向振动, 即存在纵光子。这就使我们对光子的认识更趋复杂化。

此外, 人们对静电场的认识也会有大的改变。由公式(13b), 令  $\omega = 0$ , 得到

$$k = j\kappa \quad (18)$$

这就出现了消失波状态, 场强按  $e^{-\kappa r}$  规律呈指数下降。造成的影响是, Coulomb 定律中的“平方反比规律”受到破坏, 两个点电荷之间的作用力将为

$$F \propto r^{-n} \quad (n > 2) \quad (19)$$

尽管  $n$  与 2 很接近, 静电场的 Coulomb 定律需要修正却是不争的事实。对于静磁场理论, 也有类似的影响。

除上述之外, 其他影响也不少。例如, 笔者目前思考: 由于广义上的光子是电磁场(电磁波)的量子, 而场和波又是弥漫于空间的连续性的非实体物质, 因此, 当我们说“每个场量子的静质量可能不为零”, 又说“可能有以太存在”时, 便会觉得这两句话之间存在着联系。因此我们必须做两件事, 一是考虑“光子有静质量是否有实验基础”, 从而看出这个问题的深入讨论是否有意义; 二是对 Maxwell 电磁理论的近似性作检查, 看是否还有比它更全面、更完备的理论。我们知道, 在 19 世纪后期, 即 J. C. Maxwell 研究电磁理论的时代, 尚无“光子”的概念。如果要求 Maxwell 在创立电磁理论时就考虑到光子可能有静质量, 并在理论分析推导中预作考虑, 不仅绝无可能, 而且提出这种要求的本身就成了笑话。在 J. C. Maxwell 的杰出工作的 70 年后, A. Proca 提出对 Maxwell 方程组的修正和扩展, 其实是合乎逻辑和科学发展规律的事情。对今天的科学家来讲, 在考虑“以太观念的回归”时<sup>[19]</sup>, 也就多了一些有份量的根据。

总之, 光子静质量即使不为零, 其值也非常小。这个“非常小的静质量”却对传统的物理理论产生了巨大的冲击! 表 2 是两种理论体系的比较。

表2 两种理论的比较

Table 2 Comparison between two theories

	Maxwell 电磁场理论	Proca 重电磁场理论
光子的静止质量	$m_0=0$	$m_0 \neq 0$
矢位(势)的独立偏振态数	2	3
波的特征	横波	横波、纵波
规范变换	是规范场	无意义 (规范不变性破坏)
真空中光速值	$c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2}$	在 $\omega \rightarrow \infty$ 时, $c = (\epsilon_0 \mu_0)^{-1/2}$
光速不变原理	遵守	不遵守
对静态场 Coulomb 定律的态度	完全承认	部分承认(要修改)
与狭义相对论(SR)比较	基本一致	不一致

## 7 结语

关于光速是不变还是可变,光子静质量是否为零,规范变换是否可以违反,这些都是重大的、悬而未决的问题。科学家们虽反复做了实验和讨论,至今仍未得到令人信服的共识。不过我们注意到,近年来有一些高水平的研究论文出现<sup>[20~22]</sup>,标志着对 Proca 方程组的研究进入了新阶段。

V. Majernik 1999 年讨论了经典电磁场的复四元代数分析方法<sup>[20]</sup>,其中不仅考虑了 1936 年的 Proca 方程,而且考虑了 T. Ohmura 1956 年提出的方程,并在理论中计入了如果磁单极子(magnetic monopoles)存在对理论产生的影响。

2001 年, S. I. Kruglov<sup>[21]</sup> 论述了广义 Maxwell 方程组(generalized Maxwell equation)及其求解方法,所推导的广义 Maxwell 方程组包括了 Proca 方程组。2004 年, S. I. Kruglov<sup>[22]</sup> 讨论了 Proca 方程的平方根,从而得到自旋 3/2 的场方程;文章涉及了超光速、负能量、超引力等问题。

笔者认为,理论分析是重要的;但考虑到“实践是检验真理的唯一标准”的原则,我们必须等待关于光速是否可变和关于光子是否有静质量这两方面的进一步的实验发展。

目前,国际上对涉及物理学根本问题的研究日趋活跃;最近,甚至提出了严重质疑 Einstein 光子学说的理论与实验<sup>[23]</sup>。尽管该质疑可能不对,但一切都表明,我们可能正处在一场科学革命的前夜。

致谢:作者衷心感谢赵贵祯教授在文献查阅方面给予的帮助。

## 参考文献

- [1] Einstein A. 论动体的电动力学 [A]. 范岱年, 赵中立, 许良英译. 爱因斯坦文集 [M]. 北京: 商务印书馆, 1983. 83~115
- [2] Albrecht A, Magueijo J. Time varying speed of light as a solution to cosmological puzzles [J]. Phys Rev D, 1999, 59 (4): 1~3
- [3] Magueijo J. Faster than the speed of light [M]. Cambridge: Persus Publishing, 2003
- [4] 黄志洵. 关于空气的相对介电常数和折射率的理论 [J]. 北京广播学院学报(自然科学版), 1996, 3 (3): 1~10
- [5] Maxwell J C. A dynamic theory of electromagnetic fields [J]. Phil. Trans., 1865, (155): 459~612
- [6] 刘瑞珉, 张钟华, 沈乃激. 基本物理化学常数的 CODATA 最新推荐值 [J]. 物理, 2000, 29 (10): 602~612
- [7] Einstein A. 相对论 [A]. 方在庆, 韩文梅, 何维国译. 爱因斯坦晚年文集 [M]. 海口: 海南出版社, 2000
- [8] 黄志洵. 究竟是谁在变——由精细结构常数变化引发的问题和挑战 [J]. 科技导报, 2003, (6): 15~17
- [9] 艾小白. 演化的精细结构常数是宇宙连续加速膨胀的证据 [J]. 北京广播学院学报(自然科学版)增刊, 2004, 11: 63~70
- [10] Webb J, et al. Further evidence for cosmological evolution of the fine structure constant [J]. Phys. Rev. Lett., 2001, 87 (9): 091301 1~4
- [11] Reich E S. If the speed of light can change [J]. New Scientist, 2004, (3 Jul.): 6~7
- [12] 张元仲. 狭义相对论实验基础 [M]. 北京: 科学出版社, 1979 (初版), 1994 (重印)
- [13] 赵路. 光子到底有多重 [N]. 科学时报, 2003-2-28
- [14] 周国荣. 中微子的静止质量及其在物理学和宇宙学上的意义 [J]. 物理, 1999, 28 (5): 290~294
- [15] 陈秉乾, 舒幼生, 胡望雨. 电磁学专题研究 [M]. 北京: 高等教育出版社, 2001
- [16] 古乐天, 黄志洵. 截止波导与截止衰减器 [M]. 北京: 人民邮电出版社, 1977
- [17] 黄志洵. 截止波导理论导论 [M]. 北京: 中国计量出版社, (一版) 1981; (二版) 1991
- [18] 黄志洵. 四维电磁位与电磁场的量子化 [J]. 北京广播学院学报(自然科学版), 2001, 8 (2): 1~8
- [19] 黄志洵. EPR 思维研究中的若干问题 [J]. 北京广播学院学报(自然科学版)增刊, 2004, 11: 27~38

- [20] Magernik V. Quaternionic formulation of the classical fields [J]. Appl. Clifford Algebras, 1999, 9 (1): 119~130
- [21] Kruglov S I. Generalized Maxwell equations and their solutions [J]. Ann. de la Fondation Louis de Broglie, 2001, 26 (4): 725~734
- [22] Kruglov S I. Square root of the Proca equation: spin-3/2 field equation [J]. arXiv: hep-th/0405088, 2004, (27 May): 1~12
- [23] Chown M. Quantum rebel [J]. New Scientist, 2004, (24 July): 30~35

## Some Scientific Problems in Proca's Theory Study

Huang Zhixun

(Communication University of China, Beijing 100024, China)

**[Abstract]** In June 2004, re-analysis of Oklo (in Gabon, West Africa) LANL nuclear reactor data finds that, the Fine Structure Constant ( $\alpha$ ) has decreased by 4.5 parts in  $10^8$  in last 2 billion years (Phys. Rev. D, Vol. 69, P. 121701), that translates into a very small increase in the speed of light. This is the experimental situation against the classical special relativity (SR) recently, but there are problems of interpretation. In other-wise, for a massive photon the Maxwell equations get replaced by the Proca equations. And then, the magnetic vector potential  $A$  becomes observable. There are old methods and recent measurements about the rest mass of photon, so we believe that, in fact the photon is massive.

The main, linear extensions of Maxwell equations are the Proca equations (1936) and the Ohmara equations (1956). The purpose of this paper is to study the EM-wave velocity in the Proca's theory frame. And it is found that there is superluminal speed of the electro-magnetic waves which propagate in the free-space (vacuum). In the paper, a comparison is made between the cut-off phenomenon of waveguide and the Proca waves, the significant results is presented.

**[Key words]** special relativity; Maxwell equations; Proca equations; velocity of EM-waves; rest mass of photon

## 《中国工程科学》2005年第7卷第4期要目预告

- |                              |       |                              |      |
|------------------------------|-------|------------------------------|------|
| 发展我国生物柴油产业的探讨 .....          | 闵恩泽等  | 变压器的研究 .....                 | 王 萍等 |
| 生物质制取液体燃料技术发展趋势与分析 .....     | 郑冀鲁等  | 基于最大熵原理的复合形法及其在边坡 .....      | 李 亮等 |
| 厦金大桥地区地震危险性远景探讨 .....        | 彭阜南等  | 稳定分析中的应用 .....               | 李 亮等 |
| 科技自主创新与中西文化互补之我见 .....       | 李世焯   | 智能阀门定位系统的设计 .....            | 吴爱国等 |
| 稳态等离子体发动机磁场设计的发展 .....       | 于达仁等  | 炉内废气循环气体浓度新模型检测 .....        | 沈远胜等 |
| 及其展望 .....                   | 于达仁等  | 方法研究 .....                   | 沈远胜等 |
| 中国农业新发展与食物安全新动态 .....        | 卢良恕   | 基于 GA-ANFIS 在石灰矿技术经济系统 ..... | 杨仕教等 |
| 非规则时序信息的结构转换及演化的 .....       | 卢良恕   | 中的参数优化研究与应用实践 .....          | 杨仕教等 |
| 细化分析 .....                   | 欧阳首承等 | 省级图书发行集团连锁经营的问题与 .....       | 曹 杰等 |
| 基于 $\mu$ 综合鲁棒控制的四轮转向车辆 ..... | 殷国栋等  | 对策分析 .....                   | 曹 杰等 |
| 操纵稳定性研究 .....                | 殷国栋等  | MST-S 型摩托车道路试验仪设计与研制 .....   | 贾贵玺等 |
| 矿山数字化信息系统及其应用研究 .....        | 秦德先等  | 铸钢粗晶的成因及消除方法的研究 .....        | 邹安全等 |
| 一种低电流纹波的低压大电流 DC-DC .....    | 秦德先等  | 关联规则挖掘算法综述 .....             | 毕建欣等 |