

## 现代物理学基础的思考之七——热学与光学问题思考

李学生 (Li Xuesheng)

山东大学副教授, 理论物理教师, 中国管理科学院学术委员会特约研究员, 北京相对论研究联谊会会员, 中国民主同盟盟员 (作者为中国科学院高能物理所研究员)

[xiandaiwulixue@21cn.com](mailto:xiandaiwulixue@21cn.com), [1922538071@qq.com](mailto:1922538071@qq.com)

**摘要 (Abstract):** 物理学是科学的基本学科。本文章分析探讨了现代物理学的重要问题, **热学与光学**, 供参考。

[李学生 (Li Xuesheng). 现代物理学基础的思考之七——热学与光学问题思考. *Academ Arena* 2017;9(14s): 607-660]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 19. doi:[10.7537/marsaaj0914s1719](https://doi.org/10.7537/marsaaj0914s1719).

**关键词 (Keywords):** 质点; 电荷; 引力; 电力; 空间; 方程; 量子力学; **热学; 光学**

**目录**

## 第一章: 热学问题的讨论

- 1、经典物理学对于温度的定义
- 2、现代物理学对于温度认识的发展
- 3、温度与引力关系浅析
- 4、热的本质的思考

## 第二章: 光子的静止质量问题

1. 光子的静止质量问题的由来
- 2、光子的静止质量在物理学中的重要意义
3. 测量光子静止质量的方法

## 第三章: 光的电磁本质

- 1、把光子运动质量视为惯性质量的困难
- 2、光的电磁本质
- 3、光的电磁本质的实验基础
- 4、光的电磁本质的意义
- 5、光子与电子的比较
- 6、场强叠加原理解释
- 7、光的偏振
- 8、磁光效应
- 9、光的干涉与衍射
- 10、广义相对论红移危机的解决

## 第四章: 光速不变性原理

- 1、真空光速不变性原理解释
- 2、非惯性系中的真空光速不变性原理
- 3、真空光速不变性原理与相对性原理的关系
- 4、根据真空光速不变原理推导多普勒效应公式
- 5、群速度与相速度
- 6、“玻色-爱因斯坦”凝聚态简介

## 第五章: 关于超光速的争论

- 1、关于超光速的争论
- 2、“超光速”的定义
- 3、超光速对于宇宙探索的意义
- 4、量子力学中的超光速现象
- 5、超光速与狭义相对论的关系
- 6、快子理论简介

7、“超光速”的实例分析

8、中微子的“超光速”

## 第一章 热学问题

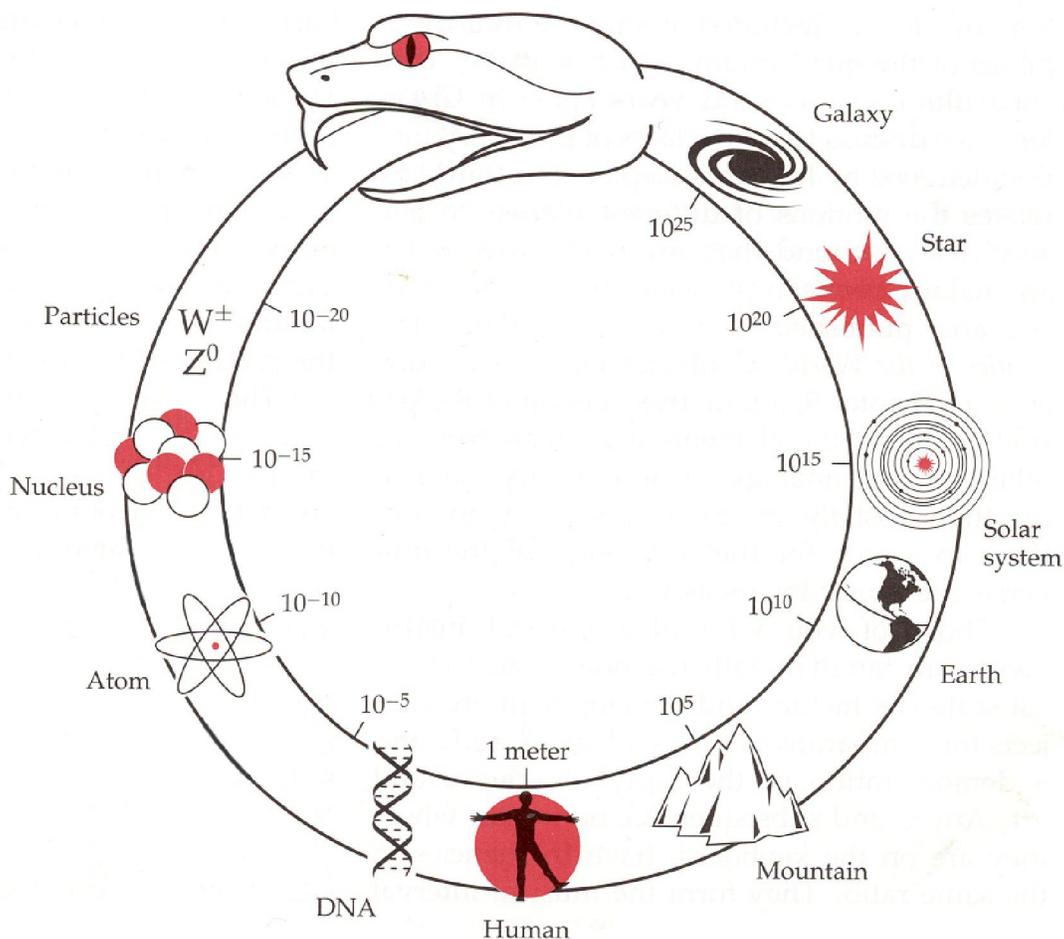
### 1、经典物理学对于温度的定义

现代物理学认为温度是表示物体冷热程度的物理量，与体系粒子平均动能近似成正比，就是体系粒子平均动能的宏观表现。分子运动论的思想方法是：将单原子理想气体分子视作弹性小球，这些弹性小球在重力作用下将发生加速运动，小球的动能将随着位移而变化，这种对位移的变化率，被称谓动能梯度。

$$\bar{\varepsilon} = \frac{1}{2} \mu \overline{v^2} = \frac{1}{2} \mu \cdot \frac{3kT}{\mu} = \frac{3}{2} kT$$

宏观物体是由大量的微粒——分子或原子组成的。一切

物质（气体、液体和固体）的分子都在做永不停息的无规则运动。就每个分子来说，它的具体运动过程具有很大的偶然性，但从总体上看，大量分子的运动却遵循统计平均规律。理想气体分子的平均平动动能每个分子平均平动动能只与温度有关，与气体的种类无关。



说明：(1) 温度是大量分子热运动平均平动动能的度量。它反映了宏观量  $T$  与微观量  $\varepsilon$  的统计平均值之间的关系。

(2) 温度是统计概念，是大量分子热运动的集体表现。对于单个或少数分子来说，温度的概念就失去了意义。

(3) 温度是某一系统的宏观性质，它决定了该系统与其它系统处于热平衡，一切彼此处于热平衡的系统有相同的温度。

分子的无规则运动叫做分子的热运动。对气体分子来说，根据分子热运动规律，采取统计平均的方法，

$$\bar{w} = \frac{3}{2} kT$$

可以导出热力学温度  $T$  与气体分子运动的平均平动动能的关系为： $\bar{w}$  中为分子的平均平动动能， $k=1.380662 \times 10^{-23} \text{JK}^{-1}$ ，为玻尔兹曼常数。上式说明气体分子的平均平动动能只与温度有关，并与热

力学温度成正比。它揭示了宏观量  $T$  与微观量  $\bar{w}$  之间的关系。从宏观上看，温度表示物质的冷热程度，从微观上看，温度是表征大量气体分子的平均平动动能的平均值的物理量。这表明温度标志着物体内部大量分子无规则运动的剧烈程度，温度越高，就说明物体内部分子热运动越剧烈。

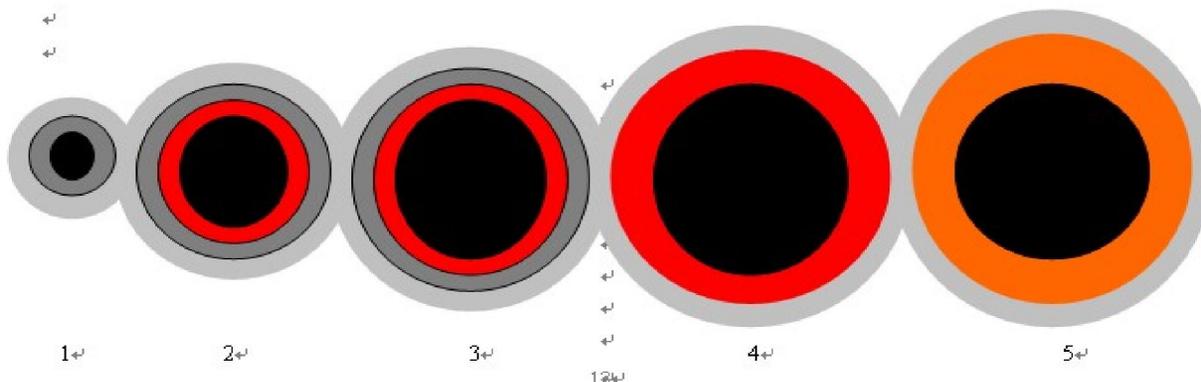
在海洋深处，液体的压强比较大，分子的平均动能比海平面高出一些，但是温度反倒低一些，当然需要考虑到太阳的照射因素。

## 2、现代物理学对于温度认识的发展

普朗克希望通过分析热辐射，能够解开热学和电磁学之间联系的奥秘。他想通过自己的研究，将物理学中这两个领域彼此不相矛盾地统一起来。

温度的实质就是使物质产生振动，这种振动是原子、粒子层次的，而不是物体的物理振动。这种振动，与出现声音的物理振动是不同的。

温度越高，粒子的振动频率就越大。当振动的频率达到一定的数值时，能破坏粒子内部的微粒的聚合力。这时根据温度的高低，会产生聚合和裂变两种状况：当温度达到摄氏三千多百度时，高温产生的极高的振动频率破坏了元素粒子内部结构的聚合力，使粒子重新组合。



核聚变反应开始，恒星内部将由氢元素开始，依次从较轻元素氢聚合成较重元素，直到铁元素的出现。如果温度继续升高，比如，达到了超新星爆炸的温度，同样道理，元素又会重新合成，生成了铁元素以上的自然界里存在的所有重元素，比如，金、铀、铜等。如果温度继续升高，则物极必反，事物的发展程序走向反面。

物理学中有很多概念和陈述并不是我们寻常经验的推论。例如，我们在实验室实现一个极高的温度，如上万度，我们并不是用寻常的温度计来测量的，而是通过光谱。光谱本身用来决定温度其实也暗含了一些假定，例如光的波长与温度成反比，或者倒过来，在某个温度之上，温度就是通过光来定义的。很多概念的延伸都超出了寻常的经验，但是，所有这些定义必须满足逻辑的自洽性。这样，在物理学中，我们可以定义非同寻常的高温，非同寻常的极小的距离，也可以定义非常寻常的极大的距离。

笔者认为现代物理学对于温度的认识已经突破经典物理学的限制，在没有实物粒子的真空也有温度的概念，而是通过光谱定义，波长与温度成反比。

## 3、温度与引力关系浅析

### (1) 现代物理学对于引力与温度关系的认识

在重力场中的三维空间中,介质在xyz 方向上温度均为常数,即终极态均温。如郎道、吉布斯、王竹溪的热力学著作中均有专门介绍,他们都是利用能量判据导出了在重力场中温度是到处一样的结论,即重力场不影响温度分布。热统界之所以一直认为力场只能导致物体(气体尤为明显)的密度作不均匀分布,但不能影响物系的温度分布,这不仅是因为力场所导致的温度梯度很微弱(《大气科学》早就明确指出绝热稳态的大气柱存在着大约0.97k/100m 的温度梯度;地热的研究也表明地球内部存在温度分布;宇宙无热寂迹象),不易检测;更是因为人们并没有从理论上予以清晰而严密的证明,更没有进行过质疑和讨论。

### (2) 当前温度与引力关系的实验

目前,关于温度-引力实验主要有三类:

1、物体之间的相互作用与物体相对于周围的环境温度有关:高于环境温度的产生引力,其温度越大,引力越大;低于环境温度的产生斥力,其温度越低,斥力越大。李华旺将万有引力常量实验仪的两个大铅球加热后放到仪器上,发现引力变大;两个大铅球的温度越高,引力越大。他将两个大铅球放到冰箱里,使它们降低温度,然后放到仪器上,发现引力成了排斥力;两个大铅球的温度越低,排斥力越大。他又把引力常量实验仪置于真空罐内,使实验室内的温度上升,真空罐内的温度没有变化,但大小铅球也相互排斥了。冯劲松也进一步做了类似的真空实验,结果相同。

2、物体的温度升高,重量变轻。几年前,冯劲松等通过加热不锈钢和铝试件显示了这一点。其实,早在1923年就有人进行过这方面的实验;2008年,俄罗斯科学家也发表了有关论文。

3、质量较大的物体,其质心温度较大。李华旺将1000KG和10KG的两个铜球放在温度变化极小的山洞里,用热敏电阻测得大球的中心温度比小球的高约0.015.C。

### (3) 重力场中介质的温度分布(朱顶余,何沛平)

这里只运用两个通俗的数学逻辑:其一,就是一组大小各异同向矢量之平均量肯定不等于零;其二,就是微商与累和这两种运算的结合与其次序无关。

其一,就是指一组大小各异同向矢量 $A_i$ 的平均量肯定不等于零:

$$\overline{\sum_i A_i} \neq 0 \quad (1)$$

且总有  $\alpha_{m,n} = 0$ ,  $|A_m| \neq |A_n|$

其中 $\alpha_{m,n}$ 表示任意两个矢量( $A_m$ 、 $A_n$ )之间的夹角。

这是一个最简单不过的数学逻辑;因为只有大小和方向都各异的一组矢量才有可能相互抵消为零;而大小各异同向矢量只能相互加强,除非全为零;又因其大小各异,所以不可能全为零,也就是说这第(1)式所示的结论毋庸置疑。

其二,就是“微商”与“平均”这两种复合运算的结合与(这两种运算的)次序无关(即若颠倒这两种运算的次序并不影响该复合运算的结果):

$$\overline{\sum_i \nabla e_i} = \nabla \overline{\sum_i e_i} \quad (2)$$

其实这就是代数学中常说的所谓的(“运算符”)“交换律”,究其实质也就是“(微商)分配律”;乃属一种常用的计算方式。

$$\text{如果 } A_i \equiv \nabla e_i, \text{ 则有: } \overline{\sum_i A_i} \equiv \overline{\sum_i \nabla e_i} = \nabla \overline{\sum_i e_i} \neq 0 \quad (3)$$

这第(3)式就是将第(1)、(2)两式所示的数学逻辑结合使用所得到的结论。这第(3)式所示的数学结论将是下面进行推理的逻辑基础。

若 $e_i$ 代表第*i*个分子的热运动动能,即若有  $e_i \equiv \frac{m_i u_i^2}{2}$ ;当然还须保持矢量  $\nabla \frac{m_i u_i^2}{2}$  的方向都相同;则必有

$$\overline{\sum_i A_i} \equiv \overline{\sum_i \nabla \frac{m_i u_i^2}{2}} = \nabla \overline{\sum_i \frac{m_i u_i^2}{2}} \neq 0 \quad (4)$$

又因为在热学中有（为了简便，这里不妨暂且只讨论单原子理想气体）：

$$\overline{\sum_i \frac{m_i u_i^2}{2}} = \frac{3}{2} kT \quad (5)$$

其中  $T$  表示物系某一点的热力学温度； $k$  则表示波耳兹曼常数；由此便得到了很有意义的结果：

$$\overline{\sum_i \nabla \frac{m_i u_i^2}{2}} = \nabla \overline{\sum_i \frac{m_i u_i^2}{2}} = \overline{\mu mg} = \beta \nabla T \neq 0 \quad (6)$$

这里的关键就是要求矢量  $\nabla \frac{m_i u_i^2}{2}$  的方向必须都保持相互一致！这意味着分子的动能梯度  $\nabla \frac{m_i u_i^2}{2}$  必须是由（宏观的）外场（含引力场、加速场）所导致的，即要求外场属于一种宏观力场；因为宏观的力场可以使（单原子）理想气体系统内的每个小局域（子系统）的各个分子具有方向一致的动能梯度。

一般而论，在重力场中的粒子始终受到重力的作用，所以在重力场中任何类型的物系（含非理想气体）的各分子也都必然始终叠加着同一方向的动能梯度

$$\nabla \frac{m_i u_i^2}{2} = m_i g \quad (7)$$

这里以重力方向为正方向；其中  $u_i$  则表示第  $i$  个粒子相对于体系（小局域）质心的平动速度也就是说，在重力场中分子还受到重力的作用，分子的动能在位移中必然发生附加的改变——具有所谓附加的“动能梯度”

$\nabla \frac{m_i u_i^2}{2}$ ；这附加的动能梯度正比于力场强度；这是一种（附加）矢量，其方向都与重力方向一致；所以重力场必然迫使（同一小局域的）各分子附加着方向一致的动能梯度。

依第(6)式得知，重力场（含加速场）必然导致物系内各点都叠加着正比于力场强度的温度梯度。

重力场（含加速场）虽然不能使同一个小局域（子系统）每个分子的热运动方向都保持相互一致；但却可以使各个分子附加着同一方向的加速度（即附加着同向的动能梯度），导致物系各点都叠加着一个正比于力场强度的温度梯度！

分子动能引力梯度的平均值  $(\sum \nabla E)/n$  就是分子动能平均值  $(\sum E)/n$  的引力梯度  $\nabla[(\sum E)/n]$ ；即有关系式： $(\sum \nabla E)/n = \nabla[(\sum E)/n]$ ；一般地有  $\sum \nabla B = \nabla \sum B$ ；即交换运算符次序不影响其结果（即运算符交换律）；而分子动能平均值正比其温度  $(\sum E)/n = \beta T$ ；其道理就这么简单。

运用“质点系”的相关理论处理单原子理想气体系统所得结果比波耳兹曼积分微分方程(H定理)的推论更朴实明了。在力场中每个（理想气体）分子（在自由程中）都服从（热运动）动能定理  $\nabla E = m(g-a)$ ；设分子的热运动动能表示成  $E = (mu^2)/2$ ；其中  $m$  为分子量， $u$  为分子相对于小局域气团的质心的运动速度，即有  $u = v - C$ ；其中  $v$  为分子的平动速度； $C$  则为气团质心的平动速度； $g$  表示外场加速度， $a$  为（小气团）质心加速度。

$(\sum E)/n = \beta T$  表示分子动能的平均值正比于其温度  $T$ ； $\beta$  为比例系数； $\sum$ “求和”的运算符； $n$  表示分子数， $T$  表示当地温度。 $\sum \nabla E = \nabla \sum E$  表示“求和”与“梯度”这两种“算符”位置的交换并不影响其结果；其中  $\nabla$  即表示“梯度”。 $\mu Mg = (\sum \nabla E)/n = \beta \nabla T = -\mu \nabla p$  中含有静力平衡条件  $\nabla p + Mg = 0$ ； $M = Nm$ ，其中  $N$  为摩尔分子数；因为  $g \neq 0$ ；故因有  $\mu Mg = (\sum \nabla E)/n = \beta \nabla T$ ，故知  $\nabla T \neq 0$ ；又因  $\nabla p + Mg = 0$ ，故知  $\nabla p \neq 0$ ，再由状态方程得， $\nabla p + p \nabla V = R \nabla T$ ；故知  $p \nabla V = R \nabla T - \nabla p = (1 - R\mu/\beta) Mg \neq 0$ ；即  $\nabla V \neq 0$ ；其中  $V$  表示摩尔体积，固有  $V\rho = 1$ ；这里  $\rho$  则表示摩尔数密度。这里  $\nabla V \neq 0$  表示，在力场中气体的密度梯度不等于零。

所有这些都是数理逻辑的结果；这里利用了：静力平衡条件，状态方程（含动能温度约定式【 $(\sum E)/n = \beta T$ 】），动能定理；获取力场温梯关联式（ $\mu Mg = \beta \nabla T \neq 0$ ）以及  $p \nabla V = (1 - R\mu/\beta) Mg \neq 0$ ， $\nabla p = -\mu Mg \neq 0$ 。

即使是波耳兹曼积分微分方程，也没有从理论上导出在重力场中不仅存在着压力梯度和密度梯度同时还必然存在着温度梯度，人们都可以利用静力平衡条件确定在力场中必然存在着压力梯度，至于究竟是否

存在着 密度梯度或温度梯度，那就只能靠“维象”经验，因为高空大气稀薄，所以就以为只存在着密度梯度，虽然也观测到了大气的温度梯度但由于太阳的辐射的干扰……因而掩盖了力场所贡献的那部分微小的梯度成分……

密度梯度，压力梯度，温度梯度这三个梯度 需要三个独立的关联式才能唯一定夺，人们仅仅注意到了状态方程与静力平衡这两个约束条件是不够的， 必须再注意到“（分子）动能定理”才能唯一确定。这里需要特别提出强调的是：即使如此 也只能得到定性的结论，因为其中尚存一个未知的比例系数“ $\mu$ ”，至于其中的“ $\beta$ ”则属于定体比容（这属于已知量），欲进一步澄清这个比例系数“ $\mu$ ”，必须再挖掘一个关系式……好在，现在已经可以定性地确定：在力场中的平衡态体系 不仅存在着压力梯度和密度梯度，还必然存在着温度梯度！这无疑是在迈出了突破性（挑战性）的一大步……

为了再挖掘出一个潜在着的参量关联式，我们不妨设想有这样一个过程：（在惯性空间）有一个气柱从匀速直线运动开始产生加速度且渐渐增大……这就相当于惯性空间产生外力场且渐渐增大力场强度。此时该气柱也从参量均匀分布状态开始产生且渐渐增大压力梯度、密度梯度以及温度梯度，而且这正比于力场强度的温度梯度一直没有伴生传导热流，即其各局域一直处于热孤立（绝热）状态，各个局域都一直在进行绝热（可逆）“压缩”……虽然各个局域的绝热（可逆）“压缩”的程度不尽相同，但却都具有共同的起点（初始状态）。或曰虽然各局域具有不同的“压缩”进程但却都处在同一条绝热曲线上。就是因为各个局域一直处于（无热流伴随的）绝热（可逆）“压缩”过程，尤其具有共同的起点（初始状态）。

换言之，在初始状态，体系的一切热力学参量都处处相等，当然 其摩尔熵也处处相等，当其出现加速度且逐渐增大过程，诚然遂即出现了（正比于加速度的）温度梯度但却并未伴生传导热流，故而各局域便开始进行绝热（可逆）“压缩”，依据熵增定律（绝热过程其摩尔熵永不减少，只有绝热可逆的过程才能保持其摩尔熵不再增加）这属于一种“定熵过程”，也就是说各局域的摩尔熵一直保持着初始值不改变，因为体系初始状态各局域具有相等的摩尔熵，所以这种等摩尔熵的关系一直保持不变。这就得到了一个重要结论：在力场中的平衡态各局域具有相等的摩尔熵（ $Cv \ln T + R \ln V = \text{常数}$ ）；即满足同一个绝热方程： $(T^{Cv}) V^R = \text{新常数}$ 。这个结论对（理想气体）自引力体系很必要；因为只有依据这个绝热方程，再结合 状态方程以及静力平衡条件这三个约束条件方可唯一确定自引力体系的三个未知函数：即压强分布函数，密度分布函数以及温度分布函数；若对其温度分布函数求导即得精确的温度梯度函数；这时所得的温度梯度已经不再是定性的结论了。顺便指出，人们在建立声学方程时早就使用着“绝热方程”（被人们称之为“泊松方程”）。（人们使用绝热方程的理由是，因为声振动过程太快，介质中出现的温度梯度瞬间即逝，来不及驱动（传导）热流，故而近似作一种绝热波动过程，也只有这样所得的声速计算公式才得到测量结果的支持。现在方知，并不是因为“介质中出现的温度梯度瞬间即逝，来不及驱动（传导）热流”，而是这种非惯性运动（振动）所导致的（正比于当地加速度的）温度梯度不管持续多久都不会导致传导热流的产生；因而在可逆的绝热波动过程，介质各点的热力学参量必然被同一个绝热方程所关联。

虽然分子在自由运动中受到重力的作用具有方向一致的动能梯度 但并不意味着此时气体整体质心必然在作加速运动，因为当且仅当分子具有方向一致的速度才会表现出气体整体质心的宏观运动。

众所周知，静止于地面的气柱（内盛气体的箱子）的质心相对于地面既无速度也无加速度，但该箱子内部的气体分子在自由运动中却一直保持着方向一致的动能梯度即具有方向一致的重力加速度，那么为什么整个气体的质心却没有重力加速度呢？因为整个气体质心的加速度应该等于各个分子的加速度的平均（只对于单元系），这里最容易被疏忽的就是器壁一膜层（分子直径的厚度）的分子却叠加着方向一致的器壁反弹加速度（器壁的托力所致），这些加速度的平均值恰好抵消了重力加速速度，但必须注意：这只出现在器壁的一膜层，而在气体内部分子的重力加速度的平均并没有被抵消，所以只是在气体内部存在着温度重力梯度，而在器壁的一膜层则存在着巨大的反弹温度梯度，因为假定器壁属于零度的刚性壁，

由于在气体所有分子的平动动量和等于零，所以气体质心没有速度，即没有宏观运动，但内部气体（器壁的一膜层气体例外）质心一直具有重力加速度，故而也一直具有温度重力梯度。气体质心一直具有加速度不等于一定具有速度，就好比 作匀速圆周运动的物体一直具有向心加速度，但一直不具有向心速度；所以万不可将方向一致的动能梯度与宏观运动相捆绑。同时依据作用力等于反作用力定律可知，分子之间的动能撞击梯度之和必然恒为零，所以不必担心动能重力梯度被撞击梯度所磨平。

器壁一膜层气体分子的平均动量虽然一直等于零，但其反弹加速度的平均值却一直不等于零，所以具有温度反弹梯度。

总之，一旦存在着宏观的力场热力学体系的分子必然叠加着方向一致的动能场力梯度，即必有温度场力梯度。但由热源引起的温度梯度却未必关联着宏观力场。

器壁层的那部分气体所遭受到的器壁反弹力之和正好等于气体系统的总重力。而容器内部气体的分子的相互碰撞并不能改变其总重量。所以容器内部气体的整体质心是一直具有重力加速度的，而且处处具有相同的重力加速度；所以处处具有动能梯度即处处具有温度梯度；但其处处不具有速度，所以没有宏观运动。

各分子都具有方向一致的动能梯度，即意味着气体的整体质心具有动能梯度，动能梯度即等于其重力，即气体内部处处具有重力；故其处处具有温度重力梯度。

器壁层内的分子受到刚性器壁反弹力的作用产生方向一致的动能弹力梯度，所以存在着温度弹力梯度，器壁层内分子所遭受到的反弹力的总和正好抗衡气体系统的总重力；因为气体系统内各分子所遭受到的外力冲量之和恒等于零，由于整个气体系统一直保持相对于地面静止（即系统质心的动量变化为零），这被分解为两部分，即器壁层与非器壁层这两部分各自都具有一定的冲力，只不过恰好互相抵消而已，所以气体的这两部分各自都具有一定的温度冲力梯度。器壁层的温度弹力梯度是很巨大的；而非器壁层内部的温度重力梯度几乎均匀一致且很微弱。这种分析很合乎事理。

在重力场中的粒子始终受到重力，重力场（含加速场）必然导致物系内各点都叠加着正比于力场强度的温度梯度。这仅在重力场(z)方向，而在水平(x、y)方向是没有温度梯度的。重力场（含加速场）虽然不能使同一个小局域（子系统）每个分子的热运动方向都保持相互一致，但却可以使各个分子附加着同一方向的加速度（即附加着同向的动能梯度），导致物系各点都叠加着一个正比于力场强度的温度梯度！因为微观粒子在重力作用下在重力方向存在着位移分量，这位移分量乘以微观粒子所受到的重力便等于重力对该微观粒子所作的功。依据（质点的）动能定理，这时重力对微观粒子所作之功等于微观粒子动能的改变。那么将微观粒子的动能的改变（微分）再除以位移（微分）就叫微观粒子的动能梯度。显然，微观粒子的动能梯度就等于微观粒子所受到的重力；而重力属于一种矢量，所以微观粒子的动能梯度也就属于一种矢量；又因为重力的方向在不太大的范围内是（近似）平行的同向矢量，所以微观粒子的动能梯度也总是（近似）平行的同向矢量；而同向矢量的平均量是不等于零的！除非这些同向矢量全为零，而微观粒子在重力场中的动能梯度显然不等于零，除非重力场强度等于零；所以微观粒子的动能梯度的平均量肯定不等于零！我们知道这些微观粒子的行为就是对单原子理想气体的个别分子在力场中的行为的写照，也就是说，单原子理想气体分子在重力场中受到重力的作用都存在着方向一致的动能梯度。这些分子的动能梯度的平均量肯定不等于零！我们都知道，只有分子的物理参量的平均量才属于可观察（测量）的宏观量，例如分子的动能的平均值正比于温度；温度是可观测量；也就是说分子的平均动能是可观测量；那么分子动能的梯度的平均量也必然是个可观测量，即属于一种宏观量。

如果将“（求）平均”的运算与“（求）微商”的运算交换次序，这并不会改变这两种复合运算的结果，那么我们就不妨来个次序交换：即先对分子的动能求平均，尔后再求其梯度，那么对分子的动能求平均就可或得气体该点的温度，再求其梯度，也就是再对其温度求梯度，这温度梯度就是分子动能梯度的平均量所对应的宏观量（即可观测量）；其结果当然也应该不等于零！因为上面已经得到结论：在重力场中理想气体分子动能梯度的平均量肯定不等于零；那么换言之也就等于说重力场中的理想气体内部肯定存在着不等于零的温度梯度。

**笔者认为如果把温度定义为电磁场中波长的倒数，引力质量与电磁质量没有作用力，上面的矛盾便不复存在。**

#### 4、热的本质问题

自古以来人们对热就有不同的看法。主要有两大学说：一是热质学说，二是运动学说。几百年来，先后出现了一些不同的实验现象，分别解释支持了这两种不相同的学说。目前，占上风的是运动学说。尽管如此，当我们深入一步认识热的本质的时候，就会发现这种解释是有质疑的，因此，热的本质有待进一步探讨，以使理论趋于统一【1】。

现代科学家们感觉到我们的这个世界是有限的物理理论，应该是热力学的第二定律。热力学第二定律的思想萌生于法国物理学家卡诺，他对此做出了不朽的建树。

1850年，德国物理学家克劳修斯从能量守恒所提供的新的角度描述了卡诺循环。热力学第二定律有克劳修斯说法及开尔文说法，虽然描述的是两类不同的现象，表述亦很不相同，但二者都强调了热事物的本质——不可逆过程：克劳修斯说法实质上是热传递过程的不可逆；开尔文说法是做功转变为热的过程不可逆。这两种说法是完全等价的。它们都可称为热力学第二定律。如果我们的宇宙在时间上是无限的，根据热力学第二定律：功或热的转化过程的不可逆性。那么，我们的宇宙早就应该是一个恒热的、不再有任何变化的世界了。但是，我们的宇宙现在还是生气勃勃，并没有“热寂”问题的显现，这是为什么呢？这个疑问已经困扰人类一个半世纪了，在这科学技术快速发展的一个半世纪里，人们为它苦苦地探寻着各种出路。如果宇宙开始

于一点，它也是解决以上热寂问题的办法之一。

1900年的10月7日，普朗克假设在一个特定大小的盒子里装满一定温度和波长的辐射，那么这个盒子能容纳的能量有多少？基于这样的思考，普朗克从完全不同的角度进行一些尝试。他想象有一个电荷振子——一个带电的粒子在电场的作用下来回震荡，那么所有电荷振子的集合所含能量是多少？普朗克的回答是，电荷振子集合的能量与辐射的能量是一样的。这个假设是解决问题的关键，因为解决电荷振子的问题比处理辐射的问题要简单得多。根据这些假设和推理，普朗克得出后来被称为普朗克辐射定律的物质和辐射共同平衡方程，他成功地用一个统一的定律完满地解决了所有波长辐射的能量和温度之间关系。通过这个定律，如果知道温度和辐射的波长，人们可以得出辐射的强度，即能量的大小。

**笔者认为，热的本质是电磁辐射，电磁能可以通过一定形式转化为引力能量，不存在所谓的热寂说。**例如在重力场中的三维空间中，介质在xyz方向上温度均为常数，即终极状均温。如郎道、吉布斯、王竹溪(2005热力学 北京大学出版社 P371)的热力学著作中均有介绍，他们都是利用能量判据导出了在重力场中温度是到处一样的结论，即重力场不影响温度分布。这也进一步验证了引力质量与电磁质量是独立的，它们之间没有相互作用。**一般说来，热的良导体也是电的良导体也证明了这一点。**

参考文献:

【1】解恩泽等编，《简明自然科学史手册》，山东教育出版社，1987年出版，P316。

## 第二章 光子的静止质量问题

### (1) 光子的静止质量问题的由来

狄拉克在1927年发表的《辐射的发射和吸收的量子理论》中，对辐射电磁场量子化进行了探讨，首次提出并应用了真空的思想。他说：“光子有一种特性，即当它处于定态亦即零态时，它就很快消失。所谓零态即这种态的动量、能量均为零。当一个光子被吸收的时候，这个光子可以被认为跃迁到了这种零态，而被发射时可以被认为从零态跃迁到了一种物理可观测态，这样它就产生了。因为被产生的光子没有限制，所以我们必须假定零态中有无限多的光子……”

19世纪物理学的重大胜利之一是Maxwell公式的建立，即对经典电磁场的数学描述，而Maxwell电磁场暗含的一个基本假定就是真空中的所有电磁辐射都以一个恒定的速度传播。实验研究在很高的精度上验证了在一个很宽的频带里所有电磁辐射都以光速 $c$ 传播，这就预示了光子没有静止质量。但其能量为 $h\nu$ ，动量为 $h\nu/c$ ，自旋角动量有两个特征值 $\pm h/2\pi$  ( $\equiv \pm \hbar$ )，其中 $h$ 表示Planck常量和电磁波的频率 $\nu$ 。量子电动力学的巨大成功导致了光子无静止质量这个概念几乎被完全接受了，现代规范理论又进一步确定光子没有静止质量。尽管理论上已经接受了光子没有静止质量这个事实，但仍然有必要对光子静止质量进行直接或间接的测量。由于光子的静止质量可能以现在实验不可能达到的极小的值存在。现在实验条件下只能是给出一个静止质量的上限，依照测不准原理光子静止质量的上限 $m_\nu$ 可以用 $m_\nu \approx \hbar / (\Delta t)c^2$ 来估算。狭义相对论的第二个假定具有有限质量的粒子的速度不可能到达光速，换言之静止质量为零的粒子在静止坐标系下是不存在的，这件事使人们相信光子静止质量为零的假定是合理的。在过去的近两个世纪里，基于麦克斯韦方程的电磁理论物理学取得了令人瞩目的成就，它描述了光子静止质量为零时的宏观现象。麦克斯韦的经典电磁场理论和爱因斯坦的狭义相对论都认为光在真空中以恒定的速度 $c$ 传播，这要求光子的静止质量必须等于零，因为根据狭义相对论，对于光子，速度为 $c$ ，而 $m$ 又不可能为无限大，所以光子的静止质量 $m_0 = 0$ 。然而，从理论上人们既不能肯定也不能否定光子具有非零的静止质量，因此只有通过大量的实验去检验光子的静止质量到底是否为零。Einstein说：“光子静止质量为零。由于光子以光速行进，不可能找到光子的静止惯性系，所以静止质量一词严格说来是不适用于光子的。”【1】

“我们的物理世界是由实体和场构成的。也就是说，光是场，不是实体。”【2】在一份纪念兰姆90岁生日兼讨论光的本质的专集上，量子光学专家Zajonc说：“我们对光量子的无知与Einstein当年的情况差不多”。

参考文献:

【1】《相对论导论》W·G·V罗瑟著 236页。

【2】《相对论的意义》Einstein著。

### (2) 光子的静止质量在物理学中的重要意义

光子没有静止质量，光子转化为电子和正电子意味着静止质量从运动质量中产生，这是一个极其普遍的

和根本的规律。在物体以与光的传播速度相比拟的高速运动时，粒子的质量比其静止质量增大成为重要的事情。在电子和正电子转化为光子的场合，静止质量完全转化为运动质量。这些效应已经不能称为相对论性的，而应称为超相对论性的了。——库兹涅佐夫

中国科学院理论物理学研究所研究员、相对论研究专家张元仲著的《狭义相对论实验基础》，在第 152~182 页中介绍世界各国科学家做的、证明光静质量定理的 19 个实验时说：“迄今对光子静质量所进行的各种检验都是以重电磁理论（Proca 方程）为基础的。”假设洛仑兹不变性成立，放弃相角规范(U(r)规范)不变性，从而对麦克斯韦方程进行修改，再附加上与光子静质量有关的项，就得到所谓的 Proca 方程。在这种情况下，洛仑兹变换中的常数 c 已不再代表通常意义下的光速，而只是一个具有速度量纲的普适常数，光速将于频率有关、静电场将发生偏转（附加了汤川势）、电磁波的纵向分量将不为 0。

历史上，德布罗意曾提出光子具有静止质量的设想，薛定谔在试图统一电磁与引力时也曾对有限光子质量感兴趣。应当指出，光子具有静止质量将导致一个严重的后果，那就是目前最成功的量子电动力学将是不可重整化的，从而将变得无效。

Coulomb's law 与光子静止引力质量  $m_\gamma$  是否为零有密切的关系。 $m_\gamma$  是有限的非零值还是等于 0，有本质的区别，并且会给物理学带来一系列原则问题。如果  $m_\gamma \neq 0$ ，那么：1. 电动力学的规范不变性被破坏，使电动力学的一些基本性质失去了依据；2. 电荷将不守恒；3. 光子的偏振态有 2 变为 3；4. 黑体辐射公式要修改；5. 会出现真空色散，即不同频率的光波在真空中的传播速度不同，真空光速不变性原理遭到了质疑；重电磁理论的最直接的结论是重光子( $\mu \neq 0$ )在真空中的速度色散效应。方程(1.2-6)在真空中无电荷电流存在时的自由平面波解是  $A_\nu = \exp\{i(\mathbf{k} \cdot \mathbf{r} - \omega t)\}$  (1.2-2.1)，其中，波矢  $\mathbf{k}$  ( $|\mathbf{k}| \equiv 2\pi/\lambda$ ,  $\lambda$  是波长), 角频率  $\omega$  同质量  $\mu$  之间必须满足关系  $k^2 - \omega^2/C^2 = -\mu^2$  (1.2-2.2)，这就是电磁波在真空中的色散关系。自由电磁波的相速度是  $\mu = \omega/|\mathbf{k}| = c(1 - \mu^2 c^2/\omega^2)^{-1/2}$ ，(1.2-2.3)，群速度定义为  $v_k = d\omega/d|\mathbf{k}| = c(1 - \mu^2 c^2/\omega^2)^{-1/2}$ ，(1.2-2.4)，光子质量  $\mu$  是一个有限的常数，所以在  $\omega \rightarrow \infty$  的极限情况下，自由电磁波的相速度和群速度都趋于常量  $c$ ，即  $\lim_{\omega \rightarrow \infty} \mu(\omega) = \lim_{\omega \rightarrow \infty} n_g(\omega) = c$  也就是说，Proca 方程中的常数  $c$  是频率趋于无限大的自由电磁波在真空中的传播速度。

由方程 (1.2-2.1) 和 (1.2-2.2) 可以看到，当  $\omega = \mu c$  时,  $k = 0$ ，即电磁波不再传播了：当电磁波的频率  $\omega < \mu c$ ,  $k^2 < 0$ , 即  $k$  是虚数。这样，方程(1.2-2.1)就要贡献出一个指数衰减因子  $\exp\{-|\mathbf{k}|r\}$ ，即电磁波的振幅是指数衰减的(evanescent)；只有  $\omega > \mu c$ ，波才能无衰减地传播出去，其相速度和群速度由第程(1.2-2.3)和(1.2-2.4)给出。

方程(1.2-2.4)表明，不同频率的电磁波在真空中传播的速度不同。这种传播速度随频率而变化的现象称为色散。显然，这给人们提供了利用电磁波的真空色散效应确立光子静质量的可能性(测量不同频率的光信号的速度，或者测量不同频率的光走过相同距离所用的时间之差)。

考虑角频率为  $\omega_1$  和  $\omega_2$  的二列电磁波，并假设  $\omega_1, \omega_2 \gg \mu c$ ，那么这二列波在真空中的速度之差可由方程(1.2-2.4)给出：

$$-\frac{\Delta v}{c} = \frac{(v_{g1} - v_{g2})}{c} \cong \frac{1}{2} \mu^2 c^2 \left( \frac{1}{\omega_2^2} - \frac{1}{\omega_1^2} \right) \quad (1.2-2.5),$$

最后一个等式中略去了  $(\mu^2 c^2 / \omega_2)^2$  以上的小项。在同样的近似下，由方程(1.2-2.2)可以得到

(1.2-2.6)

$$-\frac{\Delta v}{c} \cong \frac{\mu^2(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)}{8\pi^2}$$

用方程(1.2-2.6)，可将  $\Delta v$  用波长表达成  $-\frac{\Delta v}{c} \cong \frac{\mu^2(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)}{8\pi^2}$  (1.2-2.7)，如果这二列波通过相同的路程

$$\Delta t = \frac{L}{v_{g2}} - \frac{L}{v_{g1}} \cong \frac{L\mu^2(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)}{8\pi^2 c}$$

L，那么它们所用的时间之差便是  $\Delta t = \frac{L}{v_{g2}} - \frac{L}{v_{g1}} \cong \frac{L\mu^2(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)}{8\pi^2 c}$  (1.2-2.8)，方程(1.2-2.5)-(1.2-2.8)就是人们利用色散效应确立光子静质量  $\mu$  的出发点。6. 电磁力将不会是长程力，平方反比律应有偏差，如果  $m_\gamma$

$\neq 0$ , 则电磁力为非长程力, Coulomb's law 应有偏差, 即  $f \propto r^{-2 \pm \delta}$ ,  $\delta \neq 0$ ; 反之, 如果  $m_\gamma = 0$ , 则  $\delta = 0$ 。因此  $m_\gamma$  与 Coulomb's law 偏离平方的修正数有关。1930 年, Proca 指出, 如果  $m_\gamma \neq 0$ , 则真空中的 Maxwell 方程组应修改为

$$\left\{ \begin{array}{l} \nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho - (m_\gamma c/h)^2 \phi \\ \nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} = -c^{-1}(\sigma \mathbf{B} / \sigma t) \\ \nabla \times \mathbf{B} = c^{-1}(\sigma \mathbf{E} / \sigma t) + 4\pi/c \mathbf{J} - (m_\gamma c/h)^2 \mathbf{A} \end{array} \right.$$

式中  $\mathbf{A}$  和  $\phi$  分别是电磁场的矢势和标势,  $c$  是真空中的光速,  $h$  是普朗克常量。②式称为 Proca 方程, 采用的是高斯单位制。Proca 方程的解的形式为  $\phi \sim r^{-1} e^{-\mu r}$  ③, 式中的  $\mu$  为  $\mu = m_\gamma c/h$  ④。当  $m_\gamma \neq 0$  时,  $\mu \neq 0$ , 可见 Proca 方程的解比通常的 Maxwell 方程的解多了一个指数因子  $e^{-\mu r}$ 。当  $m_\gamma = 0$  时,  $\mu = 0$ , Proca 方程回复到 Maxwell 方程。有  $E \propto -\nabla \phi$ 、 $E \propto \gamma^{-2-\delta}$  及③④式, 可以找出  $\delta$  与  $\mu$  的关系, 即找出  $\delta$  与  $m_\gamma$  的关系。再利用 1971 年 William 等人的实验结果  $\delta < 3 \times 10^{-16}$ , 可得出  $m_\gamma < 2 \times 10^{-47} \text{g}$ 。这就是利用  $\delta$  的下限得出  $m_\gamma$  下限的方法。

### 3、测量光子静止质量的方法

直到现在, 人们对光子获得非零静止质量理论机制并没有定论, 所以只有通过大量的实验去检验光子的静止质量是否为零。由于光子的静止质量很小, 人们不可能直接测量光子的静止质量, 只有通过检验光子具有非零静止质量时所对应的物理效应, 从而推导出光子静止质量。光子静止质量不为零时所对应的物理效应有: 真空中光速的色散效应、静态电磁场的 Yukawa 势、纵向虚光子的出现、AB (Aharonov and Bohm) 和 AC (Aharonov and Casher) 效应、磁单极子的存在与否、Casimir 效应的修正和有限光子质量的引力偏折等等。所有这些效应都是人们检验光子静止质量的基础。长期以来, 人们做了大量的实验, 但是到目前为止, 所有检验光子静止质量的实验都是零结果, 人们只能根据他们的实验精度给出光子静止质量上限。真空中光速的色散效应是人们检验光子静止质量的一个常用方法, 除此之外, 与光子静止质量有关的色散效应还有等离子体的色散和星际磁流体力学波的色散等, 它们也曾被科学家们用来检验光子静止质量上限。

#### 1、星光到达地球的时间差

测量不同频率的光走过同一段路程所用的时间之差  $\Delta t$  的微元来确立光子的静质量  $\mu_0$ 。方程(1.2-2.8)表明,  $\Delta t$  与  $L$  成正比。路程  $L$  越长, 效应就越大。因此, 我们可以测量远方星体在同一时刻发射的不同频率的电磁辐射到达地球的时间差, 比如, 利用双星和脉冲星就可做这类观测。

需要强调的是, 星光的色散效应除了用光子静质量解释外, 还可以用电磁场的非线性效应和等离子体色散效应来解释。在远第星体与地球之间的巨大星际空间里存在着极其稀薄的星际介质(等离子体), 这些等离子体引起的色散与  $\mu$  引起的色散完全类似。这是利用星光色散确立光子静质量的主要障碍。下面我们先简略介绍一下电磁波在等离子体中的色散效应。

#### 1、星光到达地球的时间差

测量不同频率的光走过同一段路程所用的时间之差  $\Delta t$  的微元来确立光子的静质量  $\mu_0$ 。方程(1.2-2.8)表明,  $\Delta t$  与  $L$  成正比。路程  $L$  越长, 效应就越大。因此, 我们可以测量远方星体在同一时刻发射的不同频率的电磁辐射到达地球的时间差, 比如, 利用双星和脉冲星就可做这类观测。

需要强调的是, 星光的色散效应除了用光子静质量解释外, 还可以用电磁场的非线性效应和等离子体色散效应来解释。在远第星体与地球之间的巨大星际空间里存在着极其稀薄的星际介质(等离子体), 这些等离子体引起的色散与  $\mu$  引起的色散完全类似。这是利用星光色散确立光子静质量的主要障碍。下面我们先简略介绍一下电磁波在等离子体中的色散效应。

$$k^2 = \frac{\omega}{c^2} \left( 1 - \frac{\omega_p^2}{\omega^2 \pm \omega \omega_\beta} \right) \quad (1.2-3.1a),$$

通常, 麦克斯韦电磁波在等离子体中的色散方程是

$$\frac{\omega_p^2}{\omega^2} = \frac{4\pi n e^2}{m}, \quad \omega_\beta = \frac{cB}{mc} \cos \alpha \quad (1.2-3.1b),$$

其中,  $n$  是等离子体中电子的数密度,  $m$  是电子静质量,  $B$  是磁感应强度,  $\alpha$  是  $k$  与  $B$  之间的交角。星际空间的磁场  $B$  很小,  $\omega_\beta$  可以略去。于是方程(1.2-3.2) 给出电磁波在等离子体中的色散效应是  $V_g = d\omega/d|k| = c(1 - \omega_p^2/\omega^2)^{1/2}$ , (1.2-3.2), 将方程(1.2-3.2) 与 Proca 重电磁场的真空色散方程(1.2-2.4)比较, 可以看出, 等离子体的特征频率  $\omega_p$  引起的电磁色散效应与光子静质量  $\mu$  引起的色散效应是一样的。这就是说  $\omega_p$  的效果同  $\mu c$  的效果完全一样。因此, 如若不能用另外的方法获得星际离子体的密度, 就无法分辨星光的色散究竟是等离子体产生的还是光子静质量的效应。这就使我们在利用星光色散效应确立光子静质量  $\mu$  上受到了限制。根据银河系旋臂磁场范围对光子静质量上限做的估计约为  $10^{-59}$  克。

#### 2、双星观测

德布罗意 (deBroglie) 1940 年提出了利用双星来确立光子静质量的方法。双星是在一个椭圆轨道中不停地旋转的二颗星体(例如, 将它们分别叫做  $S_1$  星和  $S_2$  星)。在某一时刻,  $S_1$  星把  $S_2$  星挡住, 使我们看不到  $S_2$  星。随后,  $S_1$  星从  $S_2$  星背后显露出来, 此刻测量  $S_2$  星发射的不同频率的光波到达地球的时间之差。德布罗意使用的数据是:  $\lambda_2^2 - \lambda_1^2 \approx 0.5 \times 10^{-8}$  厘米<sup>2</sup>; 双星到地球的距离  $L = 10^3$  光年; 这两种颜色的光到达地球的

时间差  $\Delta t \leq 10^{-3}$  秒。如果光子静质量的贡献不能忽略的话，那么，由方程 (1-2-2.8) 便得到

$$\mu \cong \left[ \frac{8\pi^2 c \Delta t}{L(\lambda_2^2 - \lambda_1^2)^{\frac{1}{2}}} \right] \leq 2.3 \times 10^{-2} \text{ cm}^{-1} = 0.8 \times 10^{-39} \text{ g} \quad (1.2-3.3)$$

### 3、脉冲星观测

脉冲星的发现为检验光的色散现象提供了一种新的手段。虽然脉冲星在同一个脉冲里发射的频率相近的两列光波色散很小，但是脉冲星到地球的距离很远，这两列光波到达地球的时间差大得足以观测到。脉冲星发射的无线电波的色散效应通常是以等效平均电子密度  $\bar{n}_e$  给出的。对于脉冲星 NP0532 Staelin 等人(1968) 给出  $\bar{n}_e \leq 2.8 \times 10^2$  厘米<sup>-3</sup>, Feinbertg(1969) 假定观察到的 NPO532 脉冲星的色散效应主要是光子静质量引起的。从方程(1.2-2.4)和(1.2-3.2)的比较可知， $\omega_p / c = 4\pi e^2 \bar{n}_e / mc$  的等离子体的色散效应与光子静质量引起

的色散效应相同，因此有：
$$\mu = \frac{4\pi e^2 \bar{n}_e}{mc} \leq 3 \times 10^{-7} \text{ cm}^{-1} = 10^{-44} \text{ g} \quad (1.2-3.4)$$
，封伯格(Feinberg)认为，这种方法是对薛定谔静场方法的一种补充。

### 4、光子静止质量的最新测量结果

最近由于物理实验的重大新突破，即由于单个光子质量实验的精确测定结果和用原子的发射光谱对氢原子、氦离子、氦原子内电子的运动瞬时速度和轨道半径的精确测量结果的出现，迫切需要寻求一种新物理理论的新解释。

2003年3月的《物理学评论快报》发表了一篇文章，说中国科学家、武汉华中科技大学教授罗俊及同事通过实验在宇宙磁势造成的影响中寻找光子质量的痕迹，用精密扭秤检验出光子静止质量的上限为  $10^{-48}$  千克。在2010年2月28日出版的美国《物理学评论快报》(Physical Review Letters)上，有专文介绍说：“一项由中国科学家罗俊等完成的新的实验表明，在任何情况下，光子的静止质量都不会超过  $10^{-54}$  千克，这一结果是之前已知的光子质量上限的  $1/20$ 。”罗俊和他的同事通过一种新颖的实验方法，在一个山洞实验室里将光子静止质量的上限，进一步提高了至少一个数量级。它使我们再次认识到精确验证电力平方反比律，即确定  $\delta$  下限的重要性。描写电磁相互作用的局域规范理论称为阿贝尔规范场理论。光波是不应该有惯性质量的。如果有，则会产生一系列的问题。如：假设光波有惯性质量。则光波通过介质后其速度无疑会减少。但实际的情况恰恰相反。光波通过介质后速度不但不减少，反而其速度有时会增加。而这显然与光波具有惯性质量矛盾。所以光波哪怕是具有一点点惯性质量，都将与我们所观察到的物理事实相违背。长期以来，人们就试图利用各种电磁学现象检验麦克斯韦电磁理论的正确性，检验光子静质量是否为零。这些实验也是对真空光速不变原理的一种检验。

前几年，华中科技大学的罗俊教授和他的研究生涂成良就做了测定光子静止质量的实验。测定光子静止质量为  $1.5 \times 10^{-55}$  千克，论文“实验检验光子静止质量的研究进展”发表在2006年09期的物理杂志上。现代物理实验用天体物理的磁压法得出的  $m_\gamma$  的最强限制为  $m_\gamma < 10^{-60}$  克，既不能否定也不能肯定光子有引力静止质量。在麦克斯韦电磁场的拉格朗日理论中，电磁场的拉格朗日密度是由场变量(势函数)  $A_\mu$  的一阶导数  $\partial_\mu A_\nu$  构成的双线型的，在洛仑兹变换下的不变量(标量)和在相角变换  $U(r)$  规范变换下的不变量。用这样的拉格朗日量，通过对场变量变分得到的方程就是麦克斯韦电磁场方程。现在，我们放弃  $U(r)$  规范不变性这个条件，因此通常的拉格朗日量中需要增加一项  $\mu^2 A_\nu A_\nu$ ，这是与质量有关的项。由这样修改过的拉格朗日量得到的方程就是中子静质量  $\mu \neq 0$  的运动方程，即重电磁场方程或称为 Proca 方程(使用高斯单位制)：

$$\frac{\partial F_{\lambda\nu}}{\partial x_\lambda} - \mu^2 A_\nu = -\frac{4\pi}{c} J_\nu \quad (1.3-1)$$

$$-\frac{\Delta v}{c} = \frac{(v_{g1} - v_{g2})}{c} \cong \frac{1}{2} \mu^2 c^2 \left( \frac{1}{\alpha_2^2} - \frac{1}{\alpha_1^2} \right) \quad \text{其中} \quad \epsilon_{\lambda\nu\sigma} \frac{\partial F_{\sigma\alpha}}{\partial x_\lambda} = 0 \quad (1.3-2)$$

(1.3-3)，上面诸希腊指标均取 1, 2, 3, 4.  $\epsilon_{\lambda\nu\sigma}$  是单位全反对称张量，

$\vec{A} = (\vec{A}, i\phi)$  ( $\vec{x} = (\vec{x}, ict)$ ) ( $\vec{J} = (\vec{J}, ic\rho)$ )。  $\vec{A}$  是矢势，  $\phi$  是标势，  $\vec{J}$  是电流密度，  $\rho$  是电荷密度。方程

中的电流四矢  $J_\nu$  是守恒流，满足守恒方程  $\frac{\partial J_\nu}{\partial x_\nu} = 0$  (1.3-4)，对方程(1.3-1)做微分，利用定义，(1.3

-2) 和方程 (1.3-4) 可以得到  $\frac{\partial A_\nu}{\partial x_\nu} = 0$  (1.3-5)，此式表明，电荷守恒条件(方程(1.3-2))与洛伦兹条件(方程 (1.3-5))互相等价。

将方程 (1.3-2) 代入 (1.3-1)，并利用方程 (1.3-5)，可以得到电磁势  $A_\mu$  的波动方程。

$(\square - \mu^2) A_\nu = \frac{4\pi}{c} J_\nu$  (1.3-6)，其中  $\square \equiv \nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2}$  (达朗贝尔算子)。以上方程唯一

地确定了电磁势  $A_\nu$ 。相应于方程 (1.3-1) - (1.3-6) 的三维矢量形式是：  
(1.3-7a)

$$\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi\rho - \mu^2\phi \quad (1.3-7b), \quad \nabla \times \vec{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \vec{H}}{\partial t} \quad (1.3-8a), \quad \nabla \cdot \vec{H} = 0 \quad (1.3-8b), \quad \vec{H} = \nabla \times \vec{A}$$

$$\vec{E} = -\nabla\phi - \frac{1}{c} \frac{\partial \vec{A}}{\partial t} \quad (1.2-9a), \quad (1.2-9b)$$

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (1.2-10a), \quad \nabla \cdot \vec{A} + \frac{1}{c} \frac{\partial \phi}{\partial t} = 0 \quad (1.2-10b), \quad (\square - \mu^2) \vec{A} = -\frac{4\pi}{c} \vec{J} \quad (1.2-11a),$$

$(\square - \mu^2)\phi = -4\pi\rho$  (1.2-11b)，显然，当  $\mu = 0$  时，Proca 方程可简化为麦克斯韦方程。方程(1.3-1)是 Proca 在 30 年代初首先提出的，它是对麦克斯韦方程所做的(保持洛伦兹协变的)唯一推广形式。方程(1.2-7) - (1.2-11) 是用实验检验光子静质量的基础。实际上根据近代量子电动力学理论，并不存在尚未发出的静止光子，光子是在电子(或其他带电的基本粒子)做跃迁运动时产生出来同时发射出去的。

历史上对彗尾的尾巴现象解释首先是光压说，但是近代物理学家发现光根本不具有如此威力，甚至光是否存在压力都受到了人们的怀疑，军事专家的观点更支持我们，《军事学教程》中言：“激光武器的特点：不产生后坐力，是一种无惯性武器。”近代实验也发现原子核向外发射出能量极高的  $\gamma$  光子时并不做反冲运动(近代理论认为能量越大的光子其动量越大)。我们应该怀疑麦克斯韦所预言的光压了。经典物理后来又转用太阳风来解释彗尾，但目前的研究发现，地球外的宇宙射线是各向同性的，来源于太阳方向上是宇宙射线并不比其他方向上是多，而且宇宙射线来源于那里至今仍是谜，后来人们发现宇宙射线中有一些“低能质子”的多少与太阳黑子活动存在某种联系，于是认为“低能质子”就是太阳风，但仍然存在两个困难，一是“低能质子”也是各向同性的，二是我们还不清楚是“低能质子”的变化引起太阳黑子活动呢还是太阳黑子活动引起“低能质子”的变化。

## 第二章 光的电磁本质

### 1、把光子运动质量视为惯性质量的困难

#### (一)现代物理学对于光子本质认识的困惑

问题导引：1、光子是不稳定的吗？

各种观察和试验表明，光子的稳定时间至少在  $10^{33}$  次方年，然而，许多物理学家认为，如果这三种原子力确实是单个统一场的不同表现形式，前文所说的神秘变化的超大玻色子就会不时从夸克中演化出来，使夸克及其组成的光子衰退。如果一开始你认为这些物理学家脑子出了点毛病，那也是情有可原的，因为按理说微小的夸克不可能生成比它重这么巨大倍数的玻色子，但根据海森伯的测不准原理，我们不可能同时知道一个粒子的动量和位置，这就间接使这样一个大胆命题可以成立，因此，一个巨大的玻色子由一个夸克中生成，在很短时间内形成一个光子并使光子衰变是可能的。

2、光子是电中性粒子，为什么有电磁波的特性？光子具有运动质量，它们之间为何没有万有引力，如

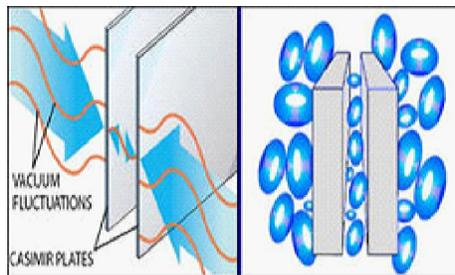
果存在万有引力，光速不变性原理是否仍然成立？

根据这里的假设，当一束光从点光源发出时，它的能量不是随着体积增大而连续分布，而是包含一定数量的能量量子，这些能量量子在空间上局域，不随运动而分裂，并只能作为一个整体被吸收和发射。依据我们今天的见解，物质的基本粒子按其本质来说，不过是电磁场的凝聚，而决非别的什么。整整 50 年有意识的思考还没有使我更接近光量子是什么这个问题的答案。---爱因斯坦

## (二)把光子运动质量视为惯性质量的困难

规范场负责传递相互作用，而场的量子化的稳定态对应了粒子，所以规范场的量子化必然就对应了某种场媒介粒子，比如电磁场的量子化对应了光子。传播相互作用的时候的光子，和独立被激发时候的光子还有不同，术语叫做“虚光子”和“实光子”。虚光子只在相互作用的过程中出现，对应到费曼图，就是虚光子只是费曼图中的内线，而实光子则对应了费曼图的外线。在量子力学中，粒子是场的激发态，而场传播力，所以这种激发态既可以是稳定的激发态，对应实光子，也可以是被别的粒子激发而导致的激发态，对应虚光子。在虚光子过程中，只要在相互作用过程中符合能量守恒（具体说来就是费曼图的顶角上能量总和不变），怎么样的光子都可以出现。量子理论中的激发态，如果是对应虚光子的被动激发态，那么其实是没有除了能量守恒以外更多的限制的——当然，严格说来还需要满足对称性与规范条件，以及反常消除条件等等，不过都是量子化以后的，没有经典对应。**实光子与虚光子有何区别，它们是如何转化的？**

根据 2011 年 6 月 3 日瑞典查尔姆斯理工大学在《自然》杂志公布的一项实验结果表明，实验成功的从真空中捕获到了不断出现和消失的光子，成功将虚拟光子转变成真实光子，制成了可测量的光，首次观测到 40 多年前就曾被预言的动力学卡西米尔效应，即平行金属板在辐射场真空态中存在吸引力的现象。下图为卡西米尔效应原理图：



根据光的电磁本质的观点，很容易判定爱因斯坦当年设计的理想实验是错误的——设想一个箱子，箱子有个孔，里面关着许多光子，在一定的条件下，每次以够快的速度打开箱子的门一次只放飞一个光子。因为时间极短， $\Delta t$  是足够小的，这时箱子里的光子少了一个，那么它就轻了一点。用个理想的秤来秤一下。假如箱子轻了  $\Delta m$ ，那么飞出去的光子重  $\Delta m$ ，根据相对论的质能方程  $E=mc^2$ ，就可以精确地算出箱子内部减少的能量  $\Delta E$ 。那么， $\Delta E$  和  $\Delta t$  都很确定，波尔的主将海森堡的公式  $E \times t > h$  也就不成立。

根据经典力学光子的动能为  $0.5mv^2, v=c$ , 即  $0.5mc^2$ ，可是根据质能方程为  $mc^2$ ，对于难道除了动能还有其它形式的能量？这显然存在着不协调？根据光的电磁本质，电磁质量的动能不能利用  $0.5mv^2$  计算，矛盾便自然解决了。笔者认为氢原子在能级跃迁与反氢原子在能级跃迁时释放的光子的性质应该不同。

当光源相对于观察坐标系运动时，光波产生多普勒效应频率变化；当光源作横向运动时，光波不产生非相对论的多普勒效应，但按相对论由洛伦兹变换引入一个因子使频率变快为兰移，反映光子能量增大。按狭义相对论，运动钟的时率变慢，光波频率变慢，应该产生红移，为什么横向多普勒效应得出结果为兰移。根据光的电磁本质的观点，光子具有电磁质量，不满足洛伦兹变换，矛盾本身就不存在。如果光子具有引力质量，那么光子在引力场中的运动速度改变，与光速不变性原理矛盾。

## 2、光的电磁本质

电磁波的本质结构必须能导出电磁波的所有性质。尽管科学家对电磁波的研究由来已久，前人的聪明才智使得性质如幽灵般的电磁波不再神秘，对它的应用已相当熟练。在理论上，量子的发现和相对论的问世，都让人们相信电磁波的理论已走上不可超越的颠峰。然而，仔细地审阅我们现有的电磁波理论就会发现，它还存在着很多重要问题。

其一，光量子的发现已有一个世纪，但光量子的物理本质却还是一个谜，这应该是理论物理学的最大问题之一。前人经过努力而没能将它解决，后人就不再关注它了，将它当作物质的固有本性。

其二，相对论有实验和现象的支持，但它不合常理且不能解释光速不变的物理过程。

其三，电磁波的性质具有多样性，我们的理论也就具有多样化，所有的理论都是在描述电磁波的属性和它表现出来的各种性质。它们都不能够用一个共同的简单的基本结构和一套基本理论，推演出电磁波所具有的一切性质。对它们的研究尚处在以实验科学为基础的水平上。

这些问题足以说明，目前的电磁波理论还没有到达最基本的层次。

#### (一) 光的电磁本质

描述电磁相互作用的量子电动力学(QED)将电磁场量子化，认为宏观上看来连续的电磁场，实际上是由光子组成的，作为创建“量子场论路径积分”的核心人物费曼先生，认为两个静电荷之间的相互作用的传递过程是交换虚光子来完成的，可用费曼图形象地表示。这样计算出来的结果，尽管采用的是一种微扰的近似方法，但与实验吻合到了一种惊人的程度。如果光子呈现电中性，那么它是如何表现为电磁场的排斥和吸引的性质呢？光子的能量是正定的，其动量也有确定的方向，为何能表现排斥和吸引的性质呢？其动力学的基础是什么？2：静电场是与时间无关的。假如如量子力学理论所云：他们的作用是通过交换光子产生。则要求光子在所有的方向发射光子，同时在无穷大的时间内不停地发射光子。场本身是如何保持稳定，物质与场构成的系统是如何保持能量守恒的呢？光子带微弱电量的话应该引起有相应的电磁场的变化量，即如果有电量的话必然导致有微弱的电流，导致存在一个磁场，如果是大功率激光的话，其磁场效应就更加明显。但实际上到目前为止，没有这方面的实验证据加以证实。列别捷夫的光压实验证实了光量子的能量动量与光的频率波长的关系式。

各种观察和试验表明，光子的稳定时间至少在  $10^{33}$  年（笔者注：因为电磁质量没有时间，所以稳定时间为无穷大），这也说明了上面观点的正确性。由于光子的衰变是根据 Heisenberg 的测不准原理得到，因此测不准原理具有一定的局限性。由于光只具有电磁质量，与引力质量没有相互作用，因此不能把电磁扰动看成 ether 介质的扰动，光波没有纵波，也不存在 ether 的切变模量极其大。物体在空间运动自如，得不出 ether 的密度极其小。由于光只具有电磁质量，因此光是 electromagnetic field 的一种，光学是电磁学的一个分支，Maxwell 的观点是正确的。引力红移的本质在于是引力场强的地方时钟运动慢，在引力场中观察光子的频率减小，与光子是否具有引力质量无关。在阿贝尔规范场理论中，电磁场称为规范场，它的量子，即光子，成为规范粒子。带电粒子间的相互作用是通过交换规范粒子来实现的。Maxwell 方程描写了在物质场（通过电流）的作用下电磁场的运动规律，而局域规范不变的狄拉克方程描写了在电磁场作用下物质场的运动规律。两个方程在局域规范变换下都保持不变。利用阿贝尔局域规范不变性，可以唯一地确定满足各种运动方程的带电粒子与电磁场的相互作用形式。它的正确性已得到实验的检验。注意到规范粒子的质量项  $m^2 A_\mu A_\mu$  不满足局域规范不变性，因此在严格规范不变的局域规范场理论中，规范粒子一定是零引力质量，只具有电磁质量。

通常，获得粒子之间量子纠缠的形式都是以非相对论极限为理论前提，以光与原子的相互作用为理论基础，而所有光与原子相互作用的力现象均属于四大基本作用力中的电磁相互作用力。光子是具有相对论性的麦克斯韦方程组二次量子化的产物，电子自旋和电子内禀磁矩原则上也是相对论效应的产物，Dirac 方程的二次量子化形式是描述多电子性质的运动学方程。

根据新南威尔士大学天文学家约翰·韦伯收集到的有关数据，一个距地球 120 亿光年的类星体发出的光，在到达地球的过程中从星云中吸收了错误类型的光子，但是根据现代物理的理论，它是不可能吸收这种类型的光子的。悉尼麦加里大学的理论物理学家戴维斯认为，造成这种现象的原因可能有两个方面：电子的电荷发生了变化或者光速不恒定，笔者认为电子在到达地球的过程中由于辐射了光子，中间电荷发生了变化，因此从星云中吸收了错误类型的光子，进一步说明了光子具有电磁质量。根据现代的光学理论，在入射点处，即使是全反射，在折射律的介质中也有电磁场的存在，不过是以  $\exp(-2iz\beta/\lambda)$  的形式衰减。1959 年，庞德与瑞布卡在哈佛塔做了一个著名的实验。他们把发射 14.4keV 伽玛光子的 57 钴(Co)放射源放在塔顶，而在塔

底测量它射来的伽玛光子频率  $\gamma'$ ，比较它与原频率  $\gamma$  的差别。他们的测量结果是  $\frac{\gamma' - \gamma}{\gamma} = (2.57 \pm 0.26) \times 10^{-15}$ ，这表明，光子在光传播媒介物质中表现出来的振动频率是由光子具有的绝对能量决定。1909 年 9 月 21 日，爱因斯坦在德国自然科学家大会作报告中说，“光的电磁波的表现是同奇点联系的，电磁场的全部能量可被看做是定域于这些奇点上，就像过去的超距理论一样，我们离开拥有一种合理的并符合事实的关于光和物质的理论还远得很呢？我觉得只有大胆的思辨而不是经验的堆积才能使我们进步。怎么可能把光化归为运动的物质元素呢？这曾经拼命地尝试过，但未获成功，最后终于放弃了这一企图。整整五十年有意识的思考还没有使我更接近于光子是什么的答案。当然，今天每一个不老实的人以为他知道了答案，但他是在欺骗自己。”

## (二) 光子的电磁质量的计算

光子不参与引力相互作用，而参与电磁相互作用，存在于一切带电粒子或具有磁矩粒子间的电磁相互作用过程中，说明光子的引力静止质量为 0，能量由电磁质量携带，光子能量  $h\nu = m_{\text{电磁}} c^2$ ，光子的电磁动量为  $m_{\text{电磁}} c$ 。

现代物理学认为光子不带电荷是错误的，只是其电荷的电量非常小，现代物理学的实验观察不到，笔者认为当光的强度达到一定程度时，在实验中一定能够观察到。假如说电磁场交换的光子，目前的实验上限是  $5 \times 10^{-30}$  电子的电量。浙江大学光学博士生导师沈建其教授认为，至少在介质中，可以看作光子带上等效电量，建立一个等效的描述理论。G.B. West 测量出 2eV 的光子带电约  $10^{-16}e$ ；G.L. Grodins 测量出 140eV 的光子带电约  $10^{-15}e$ 。

1900 年，普朗克宣告发现了量子，杰出的俄国科学家列别捷夫宣告做成功了证明光有压力的实验。列别捷夫认定光是极其细微的物质微粒流，光线射落到很轻巧的光车桨叶上，必定像最微小的水分子流射落到水车桨叶上，以冲压力使水车转动，实验中光车果然转动了。因此，如果进一步认定光线是最小的不可再行分割的物质基元粒子集群，同时这些被发射的基元粒子在空间中的运动轨迹是横波形态的，光的本源问题就可以得到基本解决。可惜，量子理论与光压的研究失之交臂，一直没有能够取得联系，笔者认为光压问题应该是光子所带电荷与物质所带电荷相互作用的结果。

### 3. 光的电磁本质的实验基础

测量光子的带电量或者检验质子与电子发出的光子带量性相反，可以验证笔者理论的正误。假设光子带有分数电荷  $Q$ ，则可以建立光子在磁场中受洛伦兹力运动方程的坐标分量形式。当光子在垂直于磁场方向运动时，光子的运动方向将发生改变。为此，加拿大的宁宝钢先生在北京 401 所进行了实验，该所薛丕友等人参加了实验，北师大的方福康、何香涛等人为实验提供了协助。实验中，激光束通过了具有 3,000 高斯的同位素分离器磁场。实验中得到的初步结果是  $Q \approx 10^{-21}e$ （电子电荷）。上述实验结果及光的本性、相对论等问题曾与周培源、王竹溪（北大校园），唐晓威（高能所），彭恒武（九十年代初在寓宅）进行过讨论，并在物理所举行过小型报告讨论会。

分数量子霍尔效应的发现使 Robert Laughlin 等人在 1998 年获得诺贝尔物理学奖，它暗示了电子可能不是基本粒子。以色列的科学家更宣称发现产生电子噪声的电荷可以是任意分数值，各国科学家对分数电荷的研究方兴未艾。然而，Einstein 在逝世的前几年在给朋友的信中还写道：“整整五十年的思考，并没有使我更接近‘光子’是什么的答案”（P. Speziali,……, Paris, 1972）。毫无疑问，人们对光子的无知和分数电荷的存在极大地冲击着光子和狭义相对论的理论基础和经典概念。在当前的形势下，光线在传播中强烈表现出的电磁本性，促使我们不能不联想到，光的电磁本性极可能产生于一个带有微小分数电荷的准粒子的运动结果。宁宝钢确信它的分数电荷值约在  $10^{-21} \sim 10^{-23}$  附近。上世纪 60 年代，国外一些实验物理学家，又观测到光子携带微量负电荷。例如 G.L. Grodins 在 1961 年，发表于《Bull.Am.Phys.Soc.V6.》中的论文，就宣称他观测到了能量为 14400eV 的光子带电约  $10^{-15}e$ 。G.B. West 在 1967 年，发表于《Phys.Rev.V162》中的论文又宣称，他已经测量出了 2eV 能量的光子带电约  $10^{-16}e$ 。中文期刊《科学》60 卷 1 期又报导：2005 年美国科学家 K.M. Birnbaum 等人在光学微腔中，观测到了光子与光子之间的有效排斥相互作用。《现代物理知识》2007 年 1 期也报导：2006 年 PVLAS 实验组观测到，光束在缓慢旋转的磁场中传播时，能够产生与磁场旋转频率成正比的微小频移。上述各种实验观测事实，均需要用光子带微量负电荷这种新观点来解释。笔者认为，因为我们观察到的光子主要是电子发出的，如果是质子发出的，应该带微量的正电荷。

目前交叉科学的发展使相对论的研究不能只停留在相对论之中，必须去寻找其它领域中可能有重大影响或突破的实验和理论，才能使相对论的理论不断发展和完善。如果光子被证实带有分数电荷，它不仅仅是一个诺贝尔物理奖的问题，更重要的是它能引起理论物理和相对论研究的一次革命。这项实验的原理和技术路线是成熟的，该实验的一个决定因素是光源。激光的准直性并不好，如果使用光学准直系统会使光线携带的原始信息损失或发生畸变。因此，实验中必须使用同步辐射光，特别是它具有的极好的偏振性，是测量光子分数电荷不可替代的光源。

附录：北京时间 2012 年 11 月 8 日消息，长久以来，人们都知道光既可以表现出粒子的形式，也可以呈现波动的特征，这取决于光子实验测定时的方法。但就在不久之前，光还从未同时表现出这两种状态。关于光是粒子还是波的争论由来已久，甚至可以追溯到科学最初萌芽的时候。艾萨克·牛顿提出了光的粒子理论，而詹姆斯·克拉克·麦克斯韦的电磁学理论认为光是一种波。到了 1905 年，争论出现了戏剧性的变化。爱因斯坦提出光是由称为“光子”的粒子组成，借此解释了光电效应。他也因此获得了诺贝尔物理学奖。光电效应的发现对物理学影响深远，并为后来量子力学的发展作出了重大贡献。量子力学在对微小粒子，如原子

和光子的行为预测上，具有惊人的准确性。然而，这些预测非常违反直觉。比如，量子理论认为类似光子的粒子可以同时在不同的地方出现，甚至是同时在无穷多的地方出现，就像波的行为一样。这种被称为“波粒二象性”的概念，也适用于所有的亚原子粒子，如电子、夸克甚至希格斯玻色子等。波粒二象性是量子力学理论系统的基础，诺贝尔奖获得者理查德·费曼将其称为“量子力学中一个真正的奥秘”。

刊于《科学》杂志上的两组独立研究，利用不同的方法对光从波形态向粒子态的转变进行了测定，以揭示光的本质面貌。两组研究都来源于理论物理学家约翰·惠勒于上个世纪 80 年代进行的经典实验。惠勒的实验提出，观察光子时应用的方法，将最终决定光子的行为是像粒子还是像波。阿尔贝托·佩鲁(Alberto Peruzzo)佐是布里斯托大学量子光子学中心的研究员，在他的带领下，一个由物理学家和量子理论物理学家组成的团队根据惠勒的实验设计了新的方法，以同时观测光的粒子性和波动性。他们利用光分离器使一个光子纠缠另一个光子。通过对第二个光子的测定，来决定对第一个光子的测定方法。这一过程使研究者得以探索光从波的形式向粒子态转变的过程。“这种测量装置检测到强烈的非定域性，证实了实验中光子同时表现得既像一种波又像粒子，”佩鲁佐说，“这对光或者是波形态，或者是粒子态的模型是非常有力的反驳。”量子光子学中心的主管杰里米·奥布莱恩(Jeremy O' Brien)说：“为了进行这项研究，我们使用了一项新颖的量子光子芯片技术。这种芯片具有可重构性，即它可以根据不同的电子环路来进行编程和操控。这项技术在今天的量子计算机研究中处于十分领先的地位，而在未来，它还将带来更多有关量子力学尖端研究的重要成果。”尼斯大学国家科学研究中心的弗洛里安·凯瑟(Florian Kaiser)利用纠缠光子对实现了惠勒的实验。一个光子通过干涉仪被探测到，使研究者能够测定第二个光子的状态，是像波的形式还是粒子形式，或者是二者之间。他们的实验也实现了光子从波的形式向粒子状态的连续转变。(来源：新浪科技 任天)

#### 4、光的电磁本质的意义

问题导引：光线在万有引力场作用下的弯曲现象，应理解为光子的运动轨道弯曲呢？还是所谓的空间弯曲？

从电荷分布的量子性——麦克斯韦的光的电磁说——普朗克量子辐射——爱因斯坦的光电效应——玻尔的原子轨道的量子化反映了人们在探索电磁质量的量子化进程，同时也是人们对于光的电磁本质认识不断深化的过程。

费马原理应当是这一现象的表现形式，根据最小作用原理，此时的总阻力最小为 0。为了对光的反射行为有更深刻的理解，费马提出了一个相当神秘的原理，被称着费马原理。这个原理说，光所选择的是使它到达目的地所花时间最短的那条路径。在这一基本思路的引导下，经莫培督及拉格朗日等人的努力，拓宽视野融入经典力学，形成“最小作用量原理”并上升为普遍的“自然经济原理”。在今天作用量原理已经对阿·热等基础理论物理学家们产生了深刻的影响，他们坚信自然的终极设计用到了简洁质朴的作用量原理。Cassini 飞船在其飞向土星的旅程中，它的轨道被太阳所偏转的状态已被测控的无线电波所测定，这又一次证实了 Einstein 广义相对论中关于 space-time 结构的论断。现在意大利位于三地 (Pavia,Rome,Bologna) 的三所大学以 Berotti 为首的科学家们，细致地核对了由 Cassini 飞船发回的无线电数据，并发现光波轨道的偏转完全符合广义相对论的规范理论。同时他们宣称，他们的测量仪器已达到非常灵敏的程度，可为其它引力模型提供精确的测试。【1】庞加莱 (Poincaré) 所说：“作为普遍的原理，最小作用量原理和守恒原理具有极高的价值，他们是在许多物理定律的陈述中寻求共同点时得到的，因此，他们仿佛代表着无数观察的精髓”。最小作用量原理应用于电磁学、热学、物理、化学（在化学中作用量是自由能 G）和量子力学等各科学领域，在各领域作用量 S 各有自己的退化方式。就连广义相对论也是建立在最小作用量的基础上；定性的说，光在弯曲的时空中走的是光程最短的路径，虽然在我们的眼中它并不是直线，但是就像在球面上划一条长度最短的线不是直线一样，光在弯曲时空中光程最短的路径也是弯曲的。

由于 space-time 是弯曲的，光子自由粒子，其运动轨迹是测地线——物体总是沿着四维空间——时间的直线走，与光子有无引力质量无关，因此光线弯曲是自然的，光线在天体附近的弯曲是由于引力质量引起空间的弯曲，进一步验证了广义相对论的正确。由于光子与引力质量之间没有相互作用，因此迈克尔逊——莫雷实验测得的光速没有变化，与前面所说的绝对时空并不矛盾，而且进一步验证了爱因斯坦的狭义相对论中真空光速不变性原理以及相对性原理，爱因斯坦的基本假设是完全正确的。

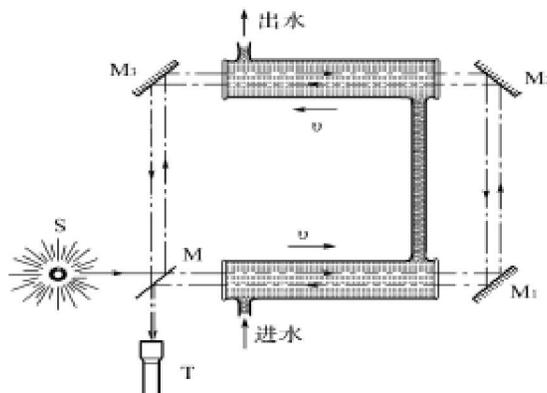
1851 年，裴索做了一个非常巧妙的实验，如下图，S 是光源，M 是镀银的（即半反射半透明的）玻片，M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub> 是反射镜，T 是观察望远镜，有一个弯曲的水管，其水平部分内部水的流动速度为 V。从 S 发出的光经过 M 时被分成两束，一束被 M 反射，经反射镜 M<sub>3</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>1</sub>、M 而到达 T，另一束透过 M 经反射镜 M<sub>1</sub>、M<sub>2</sub>、M<sub>3</sub> 再透过 M 而到达 T。它们通过管中流水时，前一束光与水流方向相反，后一束则相同，两束光在 T 内发生干涉。

实验开始时,使水流速度为 0,由于两束光的光程相同,干涉条纹是明亮的。然后使水流速度  $V$  逐渐增大,观察到干涉条纹有明暗交替的变化,这表示光在水流中相反的方向传播的速度不一样了,由条纹变化的数目可以确定在水中传播的光相对于地球的速度。

$$C' = \frac{C}{n} \pm f \cdot V$$

斐索实验中测量的在水中传播的光相对于地球的速度是:式中的“+”表示光顺着水流的情况,“-”表示光逆着水流的情况。其中,  $f = 0.434 \pm 0.002$ , 比 1 小。

斐索实验非常巧妙而精确,它反映出水可以带动光(说明了水中微弱的电磁场对于光传播的影响),然而不能完全带动光(说明了引力质量与电磁质量之间没有相互作用力)。



参考文献:

【1】《物理》第 32 卷 12 期 89 页 2003 年 北京。

附录:欧洲核子研究中心(CERN)科学家宣布,在实验中首次成功捕获反物质,取得了重大的物理学突破。他们在实验中创造了以反氢形式存在的反物质,证明捕获和释放反物质是有可能的。这项研究突破或许有助于科学家设计出相应的实验,以深入了解这种行踪诡异的物质。

反物质就是正常物质的镜像,正常原子由带正电荷的原子核构成,核外则是带负电荷的电子。但是,反物质的构成却完全相反,它们拥有带正电荷的电子和带负电荷的原子核。当物质和反物质相撞,它们会立即相互湮没,释放出能量。

从理论上讲,1 磅(约合 450 克)反物质的破坏力超过当量最大的氢弹。不过,制造和保存微量反物质是一件非常困难和耗资巨大的事情,用于制造超级武器的前景更是距离现实非常遥远。

在刊登于最新一期《自然》杂志上的最新研究中,欧洲核子研究中心的科学家使用反氢激光物理仪器(简称 ALPHA),冷却带负电荷的反质子(氢原子核的镜像),将其挤压至长 20 毫米、宽 1.4 毫米的火柴棍大小的云状物中,这些粒子云接着被导入类似的正电子(反物质电子)云中。两种粒子结合形成反氢原子,最终磁场在六分之一秒内成功捕捉到反氢原子。

卡尔加里大学物理学与天文学系主任罗布·汤普森教授说:"这是一项重要发现,可能有助于实施一些实验,使我们对当前物理学的基本看法产生巨大变化,证实我们当前了解到的知识。英国斯旺西大学教授麦克·查尔顿说:"氢原子是所有原子中结构最简单的,反氢是可以在实验室最容易制造的反物质类型。深入了解它将有助于揭开已知宇宙由物质而非反物质构成的几乎所有谜团。"英国理论物理学家保罗·狄拉克在 20 世纪 50 年代最早预测了反物质的存在。

### 5、光子与电子的特性比较

在各种粒子的相互作用中,动量守恒定律依然成立,Compton 效应与此理论并不矛盾。在光电效应中由于电子的电磁质量具有量子性,所以只有吸收一定频率的光子电子才能逸出。若频率小于该频率,也不能吸收多个光子使电子逸出,因为电子吸收一个光子后电磁能不在其量子态,这一现象用现代物理学理论无法解释。电子吸收光子后电磁质量增加,能级增大。如果频率进一步增大,多余的电磁能将转化为引力能,使电子具有一定的动能。

光子与电子的一个重要区别:光子的数目在传播中不守恒。在吸收介质中光子的数目会减少,而在增益介质(反转介质)中则增加。如果囚禁在反转介质中的光子获得的增益大雨损耗,就可能产生激光。

$e^-+e^+\rightarrow\gamma+\gamma$ ,偶尔也会转化为三个光子,一对几乎静止的正负电子,其总能量为  $2mc^2$ 。由于动量守恒的要求,两个光子必定以相同的能量朝相反的方向辐射出来。因此每个光子的能量为  $mc^2=0.51\text{Mev}$ ,其实它仅为电子的引力能量转化为电磁能量,正负 electric charge 中和电磁质量空间量子形式消失,它们激发的 electric field 的空间结构相互抵消。根据 bootstrap 关系,所有的基本粒子都是至少由两个基本粒子复合而成的,而且它们之间的关系是可逆的,其中没有哪一种粒子比其他粒子更优越。就是说,任何一种基本粒子都能够充当构成多种其他基本粒子的要素。当  $\pi^0$  介子衰变为两个光子时,由于光子的引力静止质量为 0,因此  $\pi^0$  介子内部蕴藏的全部引力能量被释放出来而转变为光子的电磁质量的空间量子形式。在适当条件下,它们还可以从激发 space-time 中获得,例如正负电子对的产生。Newton 讲:“物体变为光和光变为物体是符合自然进程的,自然界似乎以转化为乐”。

属性	电子	光子
字称	费米子	玻色子
自旋	1/2	1
静止质量	$m_0$	0
电量	e	0 (注3)
速度	$<c/n$	c/n
泡利不相容原理	服从	不服从
波函数	标量波	向量波
色散函数	抛物线性	线性
描述方程	薛定谔方程	麦克斯韦方程
敏感系数	电势场大小	介电常数 ( $\epsilon$ ) 和磁导率 ( $\mu$ )

	自由电子	晶体中的电子	自由光子	晶体中的光子
波函数	平面波	布洛赫波	平面波 (E 分量和 H 分量)	布洛赫波
能量本征值	$\hbar^2k^2/(2m_0)$	能带结构 $E_n(k)$	光子能量 $\hbar\omega = \hbar kc / \epsilon^{0.5}$	能带结构 $E_n(k)$
有效质量	$m_0$	$m^*$	$\mu_r$ 或 $\epsilon_r$ (注1)	$\mu_r$ 或 $\epsilon_r$ (注1)
速度	$\hbar k/m_0$	$\hbar k/m^*$	c/n	群速度
相互作用	库仑力	镜面库仑	无 (注2)	无 (注2)

特征	电子	光子
静止质量(m)	$m_0$	0
运动质量(m)	me	$h\nu/c^2$
传播特性	不能在自由空间传播	能在自由空间传播
传播速度	小于光速(c)	等于光速(c)
时间特性	具时间不可逆性	具一定的类时间可逆性
空间特性	高度的空间局域	不具空间局域性
粒子特性	费米子 (费米统计)	玻色子 (玻色统计)
电	荷	- e 0
自	旋	$l(\hbar)/2$ $l(\hbar)$

注1: 根据上面的观点,有效引力质量为 0,存在有效电磁质量;

注2: 根据上面的观点,存在库仑力,但是非常小。

注3: 根据上面的观点,电量不等于 0,但是非常小。

光电效应说明引力质量和电磁质量可以互相转化,在转化过程中能量不变,满足能量守恒定律。正如钱学森所言,“光子学是一门和电子学平行的科学,而不是在电子学之内的科学”。

## 6、场强叠加原理解释

因为 electric field 是物质存在的一种形态,它有特定的运动规律和物质属性,它和其它带电物质以一定形式发生相互作用,electric field 由光子组成,所以光子具有电磁质量,它的能量可以用  $h\nu$  表示,频率与波长为定值,相当于带有 electric charge。由于 electric charge 的电磁质量有正负之分,因此光子的电磁质量

也有正负之分，即正负 electric charge 辐射的光子应该不同，光子的频率也应当存在正负，这样就可以解释光子发射的原因，自然界不存在静止的光子。量子场论 需要把场论分解成正频和负频两部分。前者沿时间前进方向传播，而后者向后传播。由于正 electric charge 与负 electric charge 都是能量存在的方式，因此正 electric charge 激发或者辐射的光子为负光子，负 electric charge 激发或者辐射的光子为正光子，electric field 可以脱离 electric charge 而独立存在， electric charge 的电磁质量与 electric field 的能量应当相互影响。

根据 QED 理论，电磁力解释为光子的交换。两个 electric charge 位于距离为  $r$  的 A、B 两点，由静止开始作加速运动，两个 electric charge 分别辐射以保持电磁质量不变，由于做加速运动，产生引力场，空间曲率变大，引力质量增加，引力能量增加。根据能量最低原理可知，异种 electric charge 互相吸引，同种 electric charge 互相排斥。正 electric charge 在负 electric charge 形成的 electric field 中加速运动，能级增加，辐射 electromagnetic field；反之依然。减速运动时，能级降低，应该吸收 electromagnetic field 以保持电磁质量不变。正光子与负光子互为反粒子，所以同种 electric charge 形成的 electric field 加强，异种 electric charge 形成的 electric field 减弱，把 electric charge 的相互作用归结光子的相互作用，这也符合靴祥理论。

笔者认为能量最低原理可能是自然界的一个基本规律，例如普氏耗散结构的建立，使人们对自然界产生了一种新的认识，这就是当一个系统处于平衡态附近时，其发展过程主要表现为趋向平衡并伴随着熵增加（即无序度的增加——能量最低状态）和结构的破坏。可是当系统在远离平衡的条件下，如果系统是开放的且又与外界有能量、物质的交换，其发展过程可以经过突变而产生新结构并达到新的有序状态——能量最低状态。能量最低原理的背后是熵定律，偏离稳定状态就是偏离熵最大的状态，使用“基态”这个名词更好。

光子组成 electric field 的基本粒子，具有电磁质量，相当于带有 electric charge，但是 quantity of electricity 极小，例如  $\gamma$  光子的电磁质量仅相当于电子的电磁质量的  $2.04 \times 10^{22}$  分之一，因此在 electric field 中观察不到光子的电磁质量，与现代物理学的实验并不矛盾，但是高频率的光子在强 electric field 中运动光线应当弯曲，这一现象可以运用实验验证。宇宙线是由高空射来的带电高能粒子流，其能量的数量级为  $10^3$ — $10^5$  MeV，说明当能量达到一定的数量级时（因为此时高能粒子多），它的带电性才显现出来。electric field 可以脱离 electric charge 而独立存在，那么一个 electric charge 产生的 electric field 应当对它本身有影响，这可能是带电体的运动速度小于  $c$  的原因。

## 7、光的偏振

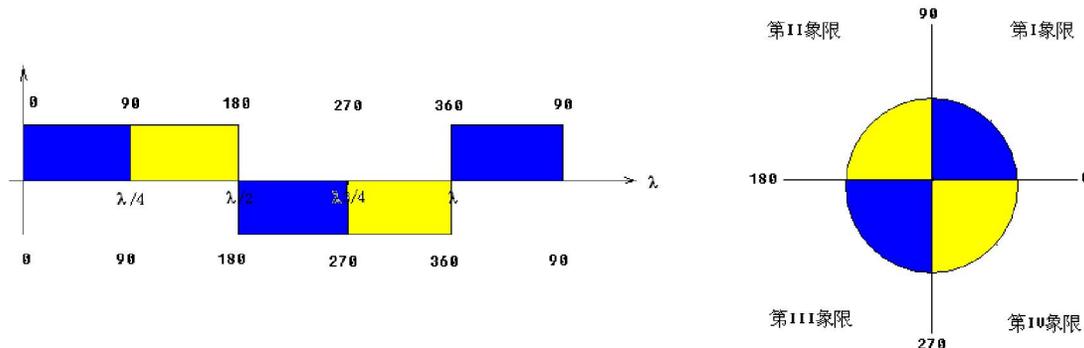


图 1

光的偏振是指光波电矢量振动的空间分布对于光的传播方向失去对称性的现象。只有横波才能产生偏振现象，故光的偏振是光的波动性的又一例证。在垂直于传播方向的平面内，包含一切可能方向的横振动，且平均说来任一方向上具有相同的振幅，这种横振动对称于传播方向的光称为自然光（非偏振光）。凡其振动失去这种对称性的光统称偏振光。偏振光包括如下几种：（1）线偏振光，在光的传播过程中，只包含一种振动，其振动方向始终保持在同一平面内，这种光称为线偏振光（或平面偏振光）。（2）部分偏振光，光波包含一切可能方向的横振动，但不同方向上的振幅不等，在两个互相垂直的方向上振幅具有最大值和最小值，这种光称为部分偏振光。自然光和部分偏振光实际上是由许多振动方向不同的线偏振光组成。（3）椭圆偏振光，在光的传播过程中，空间每个点的电矢量均以光线为轴作旋转运动，且电矢量端点描出一个椭圆轨迹，这种光称为椭圆偏振光。迎着光线方向看，凡电矢量顺时针旋转的称右旋椭圆偏振光，凡逆时针旋转的称左旋椭圆偏振光。椭圆偏振光中的旋转电矢量是由两个频率相同、振动方向互相垂直、有固定相位差的电矢量振动合成的结果。（4）圆偏振光，旋转电矢量端点描出圆轨迹的光称圆偏振光，是椭圆偏振光的特殊情形。人们利用光的偏振现象发明了立体电影，照相技术中用于消除不必要的反射光或散射光。光在晶

体中的传播与偏振现象密切相关，利用偏振现象可了解晶体的光学特性，制造用于测量的光学器件，以及提供诸如岩矿鉴定、光测弹性及激光调制等技术手段。下面是梁显隆、梁建中先生的分析——

**1、自然光**

把一个左旋光量子的波长等分 4 段，迎着光传播的方向看，在 0 到  $\lambda/4$  区段内的光矢量是在第 I 象限从  $0^\circ \rightarrow 90^\circ$  变化;在  $\lambda/4$  到  $\lambda/2$  区段内的光矢量是在第 II 象限从  $90^\circ \rightarrow 180^\circ$ ;在  $\lambda/2$  到  $3\lambda/4$  区段内的光矢量是在第 III 象限从  $180^\circ \rightarrow 270^\circ$ ;在  $3\lambda/4$  到  $\lambda$  区段内的光矢量是在第 IV 象限从  $270^\circ \rightarrow 360^\circ$ (见图 1)。

**2、偏振光**

调整偏振片的光轴，使自然光中光矢量在 I,III 象限上的亚光量子全部通过偏振片,则 II,IV 象限上的亚光量子全部被偏振片吸收(见图 2)。

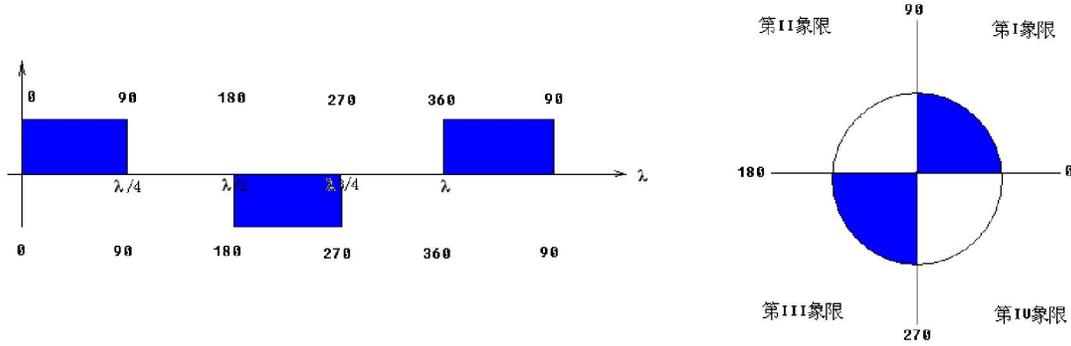


图 2

**3. 偏振光经检偏器后光振幅的变化规律(马吕斯定律)**

当起偏器与检偏器光轴之间的夹角为  $\theta$  时，在第 I, III 象限内由两坐标轴  $x, x'$  所围区域内的亚光量子被检偏器所吸收，所以通过检偏器的亚光量子是在第 I, III 象限内由两坐标轴  $x', y$  所围区域内的亚光量子(见图 3)。

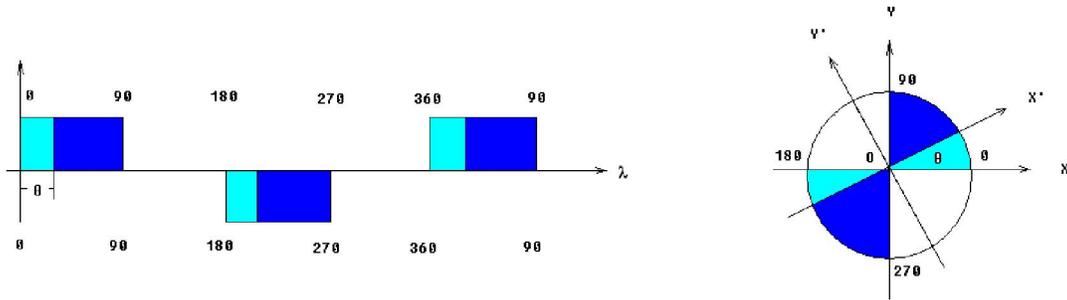


图 3

光振幅是指在光量子的一个周期内落在屏幕某一点上的亚光量子数总和，不难发现，求解偏振光的光振幅问题可以转化为计算圆面积或扇形面积的问题。

设圆面积为  $2S$ ，由两坐标轴  $x', y$  所围区域的面积  $S_1$  等于 2 倍的扇形面积  $S_{yox'}$ ，而扇形面积  $S_{yox'}$  等于扇形面积  $S_{yox}$  减去扇形面积  $S_{xox'}$ ，根据扇形面积=圆面积 $\cdot\theta/360^\circ$  可得到：

$$\begin{aligned} S_1 &= 2 \cdot S_{yox'} \\ &= 2 \cdot (S_{yox} - S_{xox'}) \\ &= 2 \cdot [S/2 - (2S \cdot \theta/360^\circ)] \\ &= S \cdot (1 - \theta/90^\circ) \end{aligned}$$

令  $A_0$  等于光通过起偏器后偏振光的振幅， $A_1$  等于偏振光经过检偏器后的光振幅。

则：

$$A_1 = A_0 \cdot (1 - \theta/90^\circ)$$

当  $\theta$  等于  $0^\circ$  时， $A_1 = A_0$ ，透过检偏器的光振幅最大，视场最强；当  $\theta$  等于  $90^\circ$  时， $A_1 = 0$ ，视场最弱，透过检偏器的亚光量子数为 0，当  $\theta$  等于  $45^\circ$  时， $A_1 = A_0/2$ ，透过检偏器的光振幅等于入射偏振光振幅的一半。

**4、偏振光通过晶片后的变化规律**

当一束线偏振光垂直入射于厚度为  $d$  且其光轴平行于表面的晶体薄片, 并使入射偏振光的偏振化方向恰与晶体薄片的主截面夹角为  $45^\circ$ 。入射的线偏振光进入晶体后, 被分解为相互垂直的沿同一方向传播的  $o$  光与  $e$  光, 由于  $o, e$  两光在晶体中行进速率不同, 当从晶体的另一个表面出射时两光间的光程差  $\delta=(n_o-n_e)d$ , 两光的夹角  $\Delta\Phi=2\pi(n_o-n_e)d/\lambda$ 。

当  $o$  光与  $e$  光通过晶片后所形成的光程差  $\delta=(n_o-n_e)d=\lambda\kappa$  时, 从晶片射出的  $o, e$  两光的光矢量为相互垂直的相干光, 合成后的光矢量端点轨迹是沿  $45^\circ \rightarrow 135^\circ, 225^\circ \rightarrow 315^\circ$  顺时针变化的线偏振光(见图 4)。

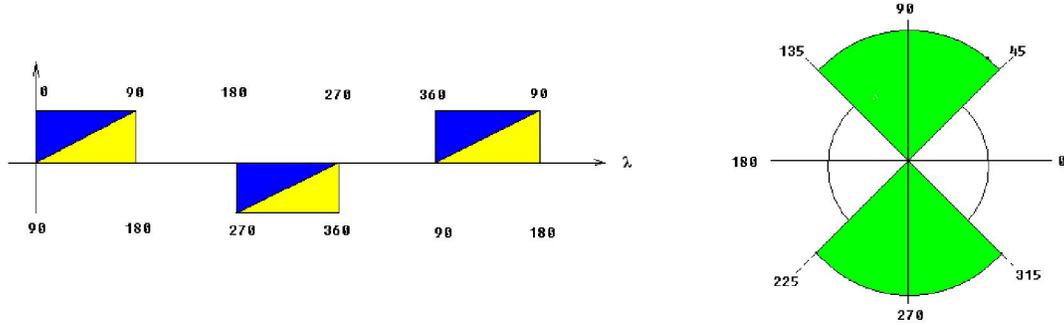


图 4

当  $o$  光与  $e$  光通过晶片后所形成的光程差  $\delta=(n_o-n_e)d=\lambda\kappa+\lambda/8$  时, 透射出的光为偏振光其光矢量端点轨迹是沿  $67.5^\circ \rightarrow 112.5^\circ, 45^\circ \rightarrow 90^\circ, 270^\circ \rightarrow 315^\circ, 247.5^\circ \rightarrow 292.5^\circ, 225^\circ \rightarrow 270^\circ, 90^\circ \rightarrow 135^\circ$  的顺序交错变化(见图 5)。

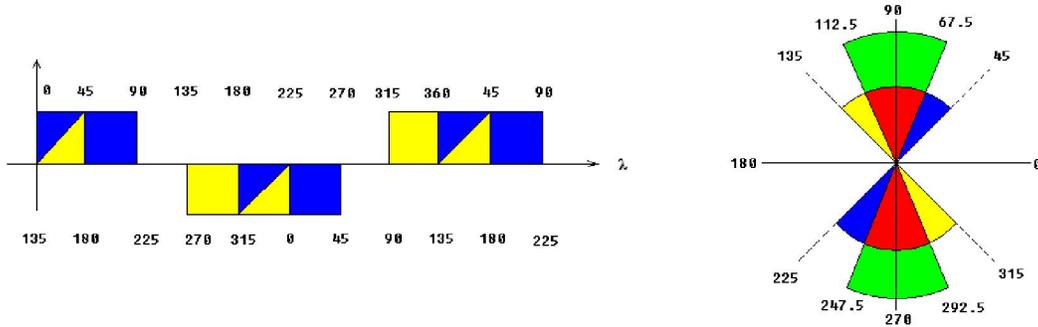


图 5

当  $o$  光与  $e$  光通过晶片后所形成的光程差  $\delta=(n_o-n_e)d=\lambda\kappa+\lambda/4$  时, 从晶片射出的  $o, e$  两光为非相干光, 透射出的光矢量端点的轨迹是沿着  $0^\circ \rightarrow 90^\circ, 270^\circ \rightarrow 360^\circ, 180^\circ \rightarrow 270^\circ, 90^\circ \rightarrow 180^\circ$  的顺序交错变化(见图 6)。

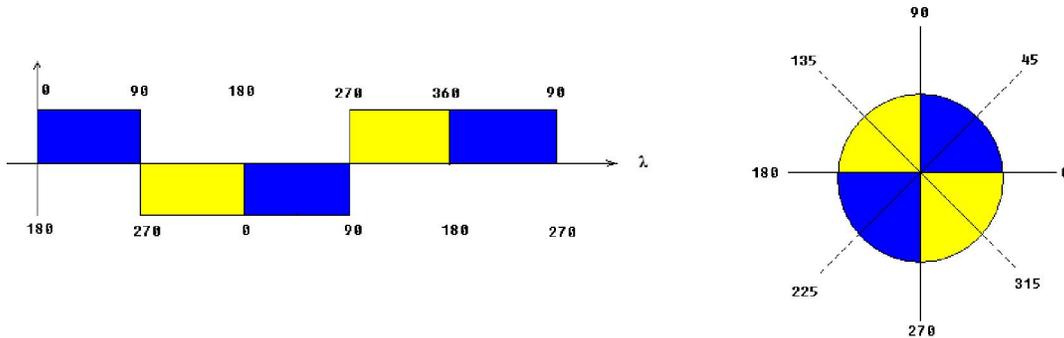


图 6

当  $o$  光与  $e$  光通过晶片后所形成的光程差  $\delta=(n_o-n_e)d=\lambda\kappa+\lambda3/8$  时, 从晶片透射出的光为偏振光其光矢量端点轨迹是沿  $0^\circ \rightarrow 45^\circ, 337.5^\circ \rightarrow 22.5^\circ, 315^\circ \rightarrow 0^\circ, 180^\circ \rightarrow 225^\circ, 157.5^\circ \rightarrow 202.5^\circ, 135^\circ \rightarrow 180^\circ$  的顺序交错变化(见图 7)。

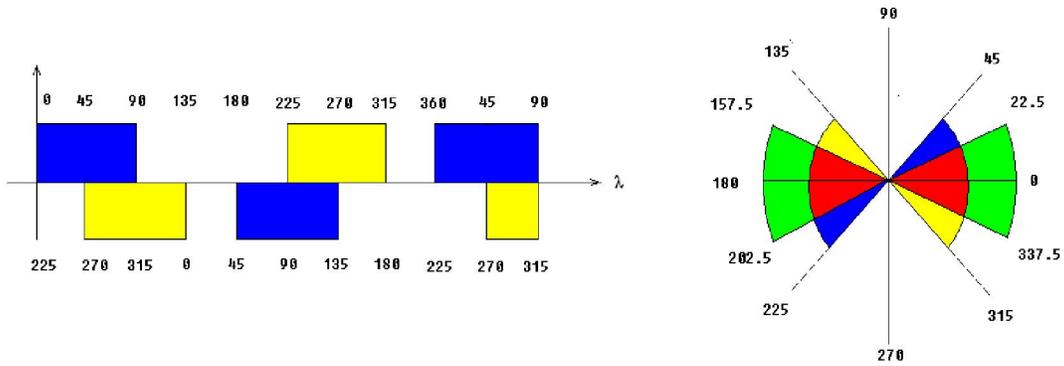


图 7

当 o 光与 e 光通过晶片后所形成的光程差  $\delta=(n_o-n_e)d=\lambda\kappa+\lambda/2$  时, 从晶片射出的 o, e 两光的光矢量为相互垂直的相干光, 合成后光矢量端点的轨迹是沿着  $315^{\circ}\rightarrow 45^{\circ}$ ,  $135^{\circ}\rightarrow 225^{\circ}$  顺时针变化的偏振光(见图 8)。

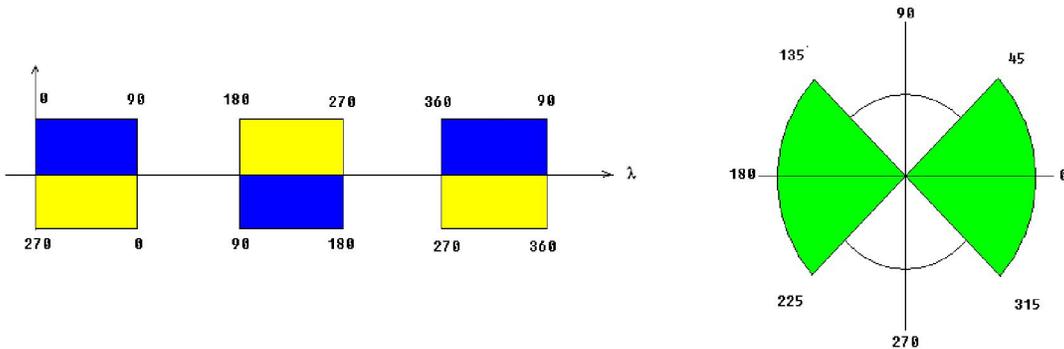


图 8

当 o 光与 e 光通过晶片后所形成的光程差  $\delta=(n_o-n_e)d=\lambda\kappa+\lambda/8$  时, 从晶片透射出的光矢量端点的轨迹是沿着  $337.5^{\circ}\rightarrow 22.5^{\circ}$ ,  $45^{\circ}\rightarrow 135^{\circ}$ ,  $157.5^{\circ}\rightarrow 202.5^{\circ}$ ,  $225^{\circ}\rightarrow 315^{\circ}$  顺时针变化(见图 9)。

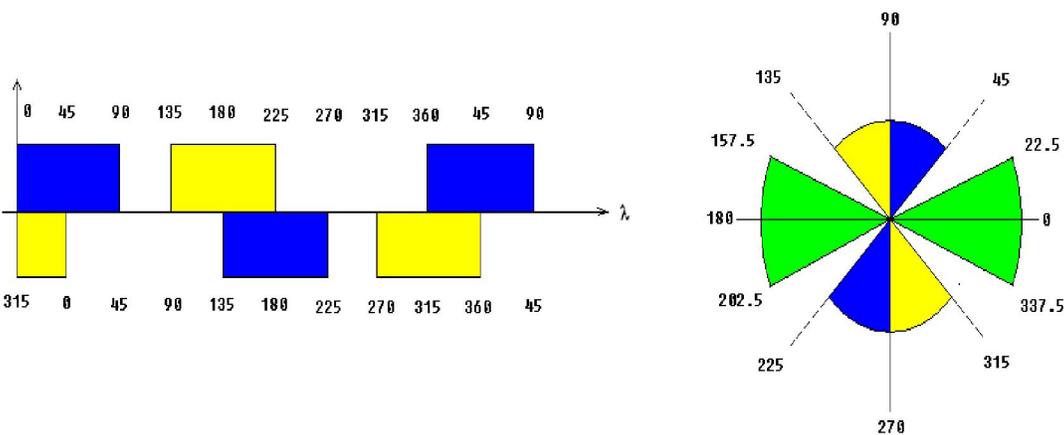


图 9

当 o 光与 e 光通过晶片后所形成的光程差  $\delta=(n_o-n_e)d=\kappa\lambda+\lambda/4$  时, 从晶片透射出的光矢量端点的轨迹是沿着  $0^{\circ}\rightarrow 90^{\circ}\rightarrow 180^{\circ}\rightarrow 270^{\circ}\rightarrow 360^{\circ}$  顺时针变化的圆偏振光(见图 10)。

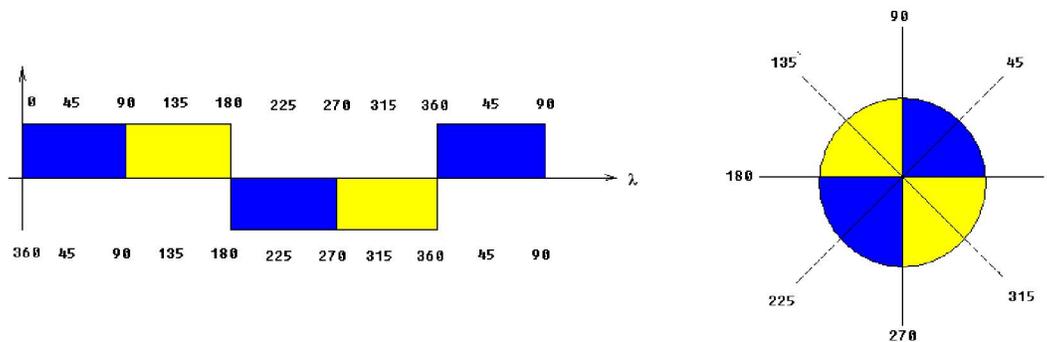


图 10

当 o 光与 e 光通过晶片后所形成的光程差  $\delta=(n_o-n_e)d=\kappa\lambda+\lambda/8$  时,从晶片透射出的光矢量端点的轨迹是沿着  $315^\circ\rightarrow 45^\circ$ ,  $67.5^\circ\rightarrow 112.5^\circ$ ,  $135^\circ\rightarrow 225^\circ$ ,  $247.5^\circ\rightarrow 292.5^\circ$  顺时针变化(见图 11)。

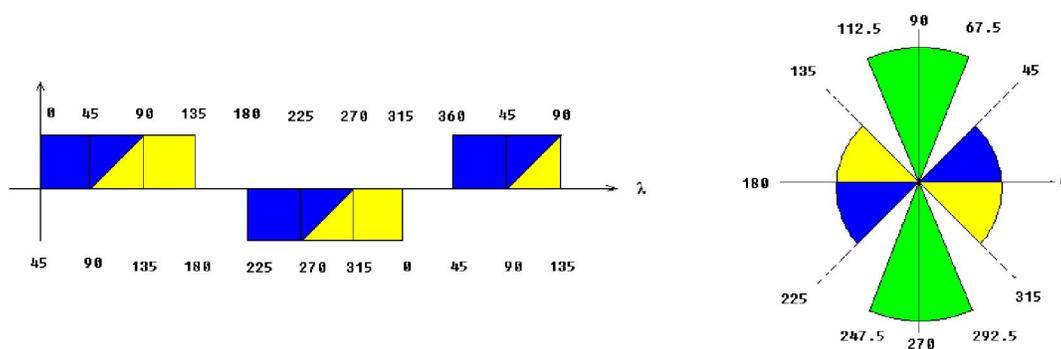


图 11

## 8、磁光效应

磁光效应是指处于磁化状态的物质与光之间发生相互作用而引起的各种光学现象。包括法拉第效应、克尔磁光效应、塞曼效应和科顿-穆顿效应等。这些效应均起源于物质的磁化,反映了光与物质磁性间的联系。笔者认为这些磁光效应实验进一步说明光子具有电磁质量。

### (一)、“法拉第效应”

1845 年 M. 法拉第发现,当线偏振光在介质中传播时,若在平行于光的传播方向上加一强磁场,则光振动方向将发生偏转,偏转角度  $\psi$  与磁感应强度  $B$  和光穿越介质的长度  $l$  的乘积成正比,即  $\psi=VBl$ ,比例系数  $V$  称为费尔德常数,与介质性质及光波频率有关。偏转方向取决于介质性质和磁场方向。上述现象称为法拉第效应或磁致旋光效应。该效应可用来分析碳氢化合物,因每种碳氢化合物有各自的磁致旋光特性;在光谱研究中,可借以得到关于激发能级的有关知识;在激光技术中可用来隔离反射光,也可作为调制光波的手段。

因为磁场下电子的运动总附加有右旋的拉穆尔进动,当光的传播方向相反时,偏振面旋转角方向不倒转,所以法拉第效应是非互易效应。这种非互易的本质在微波和光的通信中是很重要的。许多微波、光的隔离器、环行器、开关就是用旋转角大的磁性材料制作的。

“法拉第是很熟悉借助于偏振光来研究产生在透明固体中的协变的方法的。他作了许多实验,希望发现偏振光在通过内部存在着电解导电或介电感应的媒质时所受到的某种作用。然而他并没有能找到任何这种作用,尽管实验是用按照最适宜发现拉力的效应的方式装置起来的一一电力或电流和光线相垂直,并和偏振平面成  $45$  度角。法拉第用各种方式改变了实验,但是没有发现由电解电流或静电感应引起的对光的任何作用。

然而他在确立光和磁之间的关系方面却取得了成功,而他作到这一点的那些实验则描述在他的《实验研究》的第十九组中。我们将把法拉第的发现取作我们有关磁的本性的进一步探索的出发点。从而我们将描述一下他所观察到的现象。一条平面偏振的光线从一种透明的抗磁性媒质中通过;当从媒质中出来时,用一个检偏器截断它的路程,以测定它的偏振面。然后加上一个磁力,使透明媒质中的磁力方向和光线的方向相重合。于是光立即重新出现,但是如果把检偏器转过某一角度,光就又被截断。这就表明,磁力的效应就是使

偏振面以光线方向为轴而转过一个确定的角度，这个角度为了截断光线而必须使检偏器转过的那个角度来描述。偏振面转过的角度和下列各量成正比：（1）光线在媒质中超过的距离。因此偏振面是从它的原始位置开始而连续变化的。（2）磁力在光线方向上的分量。（3）转动角的大小依赖于媒质的种类。当媒质是空气或任何其他气体时，还没有观察到任何的转动。这三点说法被包括在一个更普遍的叙述中，那就是，旋转角在数值上等于光线从进入媒质的一点到离开媒质的一点的矢势增量乘以一个系数，而对抗磁性媒质来说，这个系数通常是正的。

在抗磁性物质中，偏振面被转向的方向（一般说来）和一个电流的正方向相同，那个电流就是为了产生和实际存在的磁力同方向的磁力而必须绕着光线运行的。然而外尔代特却发现，在某些铁磁性媒质中，例如在一种高氯化铁在木精或乙醚的浓溶液中，旋转方向却和将会产生磁力的电流运行方向相反。这就表明，铁磁性物质和抗磁性物质的区别不仅仅起源于“磁导率”在前一事例中大于而在后一事例中小于空气的磁导率，而这两类物体确实性质相反。

一种物质在磁力作用下获得的使光的偏振面发生旋转的能力，并不是恰好正比于它的抗磁的或铁磁的磁化率。事实上，抗磁性物质中的旋转为正而铁磁性物质中的旋转为负这一法则。是有例外情况的，因为中性的铬酸钾是抗磁性的，但它却引起负旋转。

也存在另外一些物质，他们不依赖于磁力的施加就能在光线通过物质时使偏振面向左或向右旋转。在某些这种物质中，性质依赖于一个轴，例如在石英的事例中就是如此。在另一些物质中，性质并不依赖于光线在媒质中的方向，例如在松节油、糖溶液等等中就是如此。然而，在所有这些物质中，如果任何一条光线的偏振面在媒质中是像一个右手螺旋那样地扭转的，则当光线沿相反方向通过媒质时偏振面仍将像右手螺旋似的扭转。当把媒质放在光线的路程上时，观察者为了截断光线就必须旋转他的检偏器，而不论光线是从南或从北向他射来，旋转的方向相对于观察者来说都是相同的。当光线的方向反向时，旋转在空间中的方向当然也会反向。但是当旋转是由磁作用引起的时，它在空间中的方向却不论光是向南还是向北传播都是相同的。如果媒质属于正类，则旋转方向总是和产生或将会产生实际的磁场状态的电流的方向相同，而如果媒质属于负类则旋转方向总是和该电流的方向相反。由此可以推知，如果光线在从北向南通过了媒质以后受到一个镜面的反射而从南向北返回媒质中，则当旋转是由磁作用引起的时，旋转就会加倍。当旋转只依赖于媒质的种类（而不依赖于光线的方向），就像在松节油等等中那样时，光线在被反射而回到媒质中再从媒质中出来时，它的偏振将是入射时在相同的平面上的，第一次通过时的旋转将在第二次通过时被恰好倒了回来。现象的物质解释带来了相当大的困难。不论是在磁致旋转方向，还是在某些媒质的表现方面，这些困难还几乎不能说已经解决。然而我们可以通过分析已经观察到的事实来给一种解释作些准备。

运动学中的一个众所周知的定理就是，两个振幅相同、振动周期相同、在同一平面上但沿相反方向转动的匀速圆周振动，当合成在一起时是和一个直线振动相等价的。这一振动的周期等于圆周振动的周期，它的振幅等于圆周振动的振幅的两部，它的方向是两个点的连线，那就是在同一圆周上沿不同方向描述圆周运动的两个质点即将相遇的两个点。因此，如果一个圆周运动的周相被加速，则直线振动的方向将沿着圆周运动的方向转过一个等于周相加速度的二分之一的角。也可以通过直接的光学实验来证明，两条沿相反方向而圆偏振的强度相同的光线，当合并在一起时就变成一条平面偏振的光线，而且，如果其中一条圆偏振光线的周相由于任何原因被加速了，则全光线的偏振平面会转过一个等于周相加速度之一半的角度。

因此我们可以表示偏振面的旋转现象如下：有一条平面偏振光线射在媒质上。这条光线和两条圆偏振光线相等价，其中一条是右手圆偏振的，而另一条是左手圆偏振的（对观察者而言）。通过了媒质以后，光线仍然是平面偏振的，但在两条圆偏振光线中，右手圆偏振的那一条的周相一定是在通过媒质时相对于另一条而被加速了。

换句话说，右手圆偏振的光线曾经完成了更多次数的振动，从而在媒质内部比周期相同的左手圆偏振的光线具有较小的波长。现象的这种叙述方式是和任何光的学说都无关的，因为虽然我们使用了波长、圆偏振等等的在我们头脑中可能和某种形式的波动学说相联系的术语，但是推理过程却和这种联系无关而只依赖于被实验证明了的事实。

其次让我们考虑其中一条光线在某一给定时刻的位形。每时刻的运动都是圆周运动的任何波动，都可以用一个螺旋线或螺旋来代表。如果让螺旋绕着它的轴线旋转而并不发生任何纵向运动，则每一个粒子都会描述一个圆，而与此同时，波动的传播则将由螺旋纹路上位置相似的各部分的表现纵向运动来代表。很容易看到，如果螺旋是右手的，而观察者是位于波动所传向的一端的，则在他看来螺旋的运动将显得是左手的，也就是说，运动将显得是逆时针的。因此，这样的一条光线曾经被称为一条左手圆偏振的光线；这名称最初起源于一些法国作者，现在已经在整个的科学界都通行。

一条右手圆偏振的光线可以按相似的方式用一个左手螺旋来表示。右侧的右手螺旋线 A 表示一条左手圆偏振的光线，而左侧的左手螺旋线 B 则表示一条右手圆偏振的光线。现在让我们考虑在媒质内部具有相同波长的两条这样的光线。他们在一切方面都是几何地相似的，只除了其中一条是另一条的“反演”，即有如另一条在镜子里的像一样。然而，其中一条，譬如说是 A，却比另一条具有较短的旋转周期。如果运动完全起源于由位移所引起的力，那么这就表明，当位形像 A 那样时，由相同的位移引起的力要比位形像 B 那样时大一些。因此，在这一事例中，左手光线将相对于右手光线而被加速，而且不论各光线是从北向南还是从南向北行进，情况都将是这样的。因此这就是松节油等等引起的那种现象的解释。在这些媒质中，当位形像 A 那样时，由一条圆偏振光线所造成的位移将比位形像 B 那样时引起较大的恢复力。于是这些力就只依赖于位形，而不依赖于运动的方向。”

“但是，各物体的性质是可以定量地测量的。因此我们就得到媒质的数据，例如一种扰动通过媒质而传播的那一速度的数值，而这一速度是可以根据电磁实验来算出的，也是在光的事例中可以直接观测的。如果居然发现电磁扰动的传播速度和光的速度相同，而且这不但在空气中是如此，在别的透明媒质中也是如此，则我们将有很强的理由相信光是一种电磁现象，而且光学资料和电学资料的组合也将产生一种关于媒质之实在性的信念，和我们在其他种类的物质的事例中通过感官资料的组合而得到那种信念相似。”[见《电磁通论》第二十章，光的电磁学说的第三自然段。]

### (二)、克尔磁光效应

1876年由J.克尔发现，入射的线偏振光在已磁化的物质表面反射时，振动面发生旋转的现象，克尔磁光效应分极向、纵向和横向三种，分别对应物质的磁化强度与反射表面垂直、与表面和入射面平行、与表面平行而与入射面垂直三种情形。极向和纵向克尔磁光效应的磁致旋光都正比于磁化强度，一般极向的效应最强，纵向次之，横向则无明显的磁致旋光。克尔磁光效应的最重要应用是观察铁磁体的磁畴。不同的磁畴有不同的自发磁化方向，引起反射光振动面的不同旋转，通过偏振片观察反射光时，将观察到与各磁畴对应的明暗不同的区域。用此方法还可对磁畴变化作动态观察。

### (三)、科顿-穆顿效应

1907年A.科顿和H.穆顿首先在液体中发现，光在透明介质中传播时，若在垂直于光的传播方向上加一外磁场，则介质表现出单轴晶体的性质，光轴沿磁场方向，主折射率之差正比于磁感应强度的平方。此效应也称磁致双折射。W.佛克脱在气体中也发现了同样效应，称佛克脱效应，它比前者要弱得多。当介质对两种互相垂直的振动有不同吸收系数时，就表现出二向色性的性质，称为磁二向色性效应。

### (四)刘武青旋光效应

早在20世纪初，人们就已经有了圆偏振光能够输运角动量以致引起旋转的概念。坡印亭(J.H. Poynting)于1909年将光与力学系统进行类比后，认为圆偏振光具有角动量。5年后，爱泼斯坦(P.S. Epstein)通过计算波作用在各向异性介质中感应电偶极子上的力，精确地得到引起旋转的力偶。如果假设引起光偏振的系统由波和起偏晶片组成，这个系统当然应符合角动量守恒这一普遍规律，所以，必须承认电磁波也具有角动量，而且它的变化与晶片的角动量变化相反。具体地说，光有三类：不旋转的、左向旋转的和右向旋转的光。1936年，首先是美国人贝思(Beth)，紧接着美国人霍尔朋(Holbourn)从实验上证明了上述结论的正确性。他们设计了一个圆筒型的暗箱，用一根极细的石英丝将一系列的波片和平面镜悬挂在暗箱中。将一束圆偏振光射入暗箱，结果发现波片发生了偏转。上述实验虽然验证了光线具有角动量，但是由于可见光和近红外光的频率大于 $10^{14}$ 赫，所以合力矩极小。即使在实验中采用扭转系数很小的扭丝，如石英细丝，这个偏转角也只不过 $10^{-3}$ 弧度。对这么小的变化进行定量测量，在当时几乎是不可能的。增大作用力矩的有效办法之一就是增大光线的波长，也就是必须提供频率相对低的电磁波。20世纪40年代，随着雷达技术的发展，射频波成为了理想的光源。它的波长要比我们眼睛能看到的可见光波长要大上千倍，作为有别于以前的新光源相当理想。意大利科学家卡拉拉(Carrara)于1949年利用射频波很容易地完成了定量测量光角动量的实验，他采用的装置类似于贝思的，只不过将波片替换成能吸收射频波的器件。当然，我们今天已经清楚地知道，光的能量传播以光子形式进行，能量 $P=h\nu$  ( $h$ 为普朗克常量)，因而它同时带有 $P/c=h\nu/c$ 的角动量。我们采用右手螺旋法则，定义沿磁场方向右手旋进的光为“+”偏振，反之为“-”偏振，角动量为零的是 $\pi$ 线偏振光。而在当初，得到这样定量的结果相当不容易。光具有角动量这一性质最终被应用于实际研究中，人们通过它得到原子、分子等的能级结构、能级寿命、电子的组态、分子的几何形状、化学键的性质、反应动力学等多方面物质结构的知识。

中国的刘武青先生发现光通过旋转透明介质，对光电池产生的电流、比光通过静止的透明介质时的要大，同时光波长也会发生变化。这一现象称为刘武青旋光效应。

早在 20 世纪初,人们就已经有了圆偏振光能够输运角动量以致引起旋转的概念。坡印亭(J.H. Poynting)于 1909 年将光与力学系统进行类比后,认为圆偏振光具有角动量。5 年后,爱泼斯坦(P.S. Epstein)通过计算波作用在各向异性介质中感应电偶极子上的力,精确地得到引起旋转的力偶。如果假设引起光偏振的系统由波和起偏晶片组成,这个系统当然应符合角动量守恒这一普遍规律,所以,必须承认电磁波也具有角动量,而且它的变化与晶片的角动量变化相反。具体地说,光有三类:不旋转的、左向旋转的和右向旋转的光。1936 年,首先是美国人贝思(Beth),紧接着美国人霍尔朋(Holbourn)从实验上证明了上述结论的正确性。他们设计了一个圆筒型的暗箱,用一根极细的石英丝将一系列的波片和平面镜悬挂在暗箱中。将一束圆偏振光射入暗箱,结果发现波片发生了偏转。上述实验虽然验证了光线具有角动量,但是由于可见光和近红外光的频率大于  $10^{14}$  赫,所以合力矩极小。即使在实验中采用扭转系数很小的扭丝,如石英细丝,这个偏转角也只不过  $10^{-3}$  弧度。对这么小的变化进行定量测量,在当时几乎是不可能的。增大作用力矩的有效办法之一就是增大光线的波长,也就是必须提供频率相对低的电磁波。20 世纪 40 年代,随着雷达技术的发展,射频波成为了理想的光源。它的波长要比我们眼睛能看到的可见光波长要大上千倍,作为有别于以前的新光源相当理想。意大利科学家卡拉拉(Carrara)于 1949 年利用射频波很容易地完成了定量测量光角动量的实验,他采用的装置类似于贝思的,只不过将波片替换成能吸收射频波的器件。-偏振,角动量为零的是  $\pi$  线偏振光。而在当初,得到这样定量的结果相当不容易。+偏振,反之为当然,我们今天已经清楚地知道,光的能量传播以光子形式进行,能量  $P=h\nu$  ( $h$  为普朗克常量),因而它同时带有  $P/c=h\nu/c$  的角动量。我们采用右手螺旋法则,定义沿磁场方向右手旋进的光为光具有角动量这一性质最终被应用于实际研究中,人们通过它得到原子、分子等的能级结构、能级寿命、电子的组态、分子的几何形状、化学键的性质、反应动力学等多方面物质结构的知识。

### (五) 塞曼效应

塞曼效应实验是物理学史上一个著名的实验,在 1896 年,塞曼(Zeeman)发现把产生光谱的光源置于足够强的磁场中,磁场作用于发光体,使其光谱发生变化,一条谱线即会分裂成几条偏振化的谱线,这种现象称为塞曼效应,塞曼效应的实验证实了原子具有磁矩和空间取向的量子化,并得到洛伦兹理论的解释。1902 年塞曼因这一发现与洛伦兹(H.A. Lorentz)共享诺贝尔物理学奖金。至今,塞曼效应仍然是研究原子内部能级结构的重要方法。本实验通过观察并拍摄 Hg (546.1nm) 谱线在磁场中的分裂情况,测量其裂距并计算

$$\frac{e}{m}$$

荷质比  $m$ 。由于外磁场对电子的轨道磁矩和自旋磁矩的作用,或使能级分裂才产生的。其中谱线分裂为 2 条(顺磁场方向观察)或 3 条(垂直于磁场方向观察)的叫正常塞曼效应;3 条以上的叫反常塞曼效应。在定强度的磁场中,分裂后谱线的间隔与磁场强度成正比;谱线成分沿磁场方向观察是左、右圆偏振光,而沿垂直磁场方向观察是互相垂直的两种线偏振光。塞曼效应的经典理论解释是 H.A. 洛伦兹首先提出的。历史上将符合洛伦兹理论的谱线分裂现象称为正常塞曼效应,而将其它不符合洛伦兹理论的谱线分裂现象称为反常塞曼效应。量子力学理论能够全面地解释塞曼效应。

#### 实验原理

##### 1. 谱线在磁场中的能级分裂

对于多电子原子,角动量之间的相互作用有 LS 耦合模型和 JJ 耦合某型。对于 LS 耦合,电子之间的轨道与轨道角动量的耦合作用及电子间自旋与自旋角动量的耦合作用强,而每个电子的轨道与自旋角动量耦合作用弱。

原子中电子的轨道磁矩和自旋磁矩合成为原子的总磁矩。总磁矩在磁场中受到力矩的作用而绕磁场方向旋进,可以证明旋进所引起的附加能量为  $\Delta E = Mg\mu_B B$  (1), 其中 M 为磁量子数,  $\mu_B$  为玻尔磁子, B 为磁感应强度, g 是朗德因子。朗德因子 g 表征原子的总磁矩和总角动量的关系, 定义为

$$g = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)} \quad (2), \text{ 其中 } L \text{ 为总轨道角动量量子数, } S \text{ 为总自旋角动量量子数,}$$

J 为总角动量量子数。磁量子数 M 只能取 J, J-1, J-2, ..., -J, 共 (2J+1) 个值, 也即  $\Delta E$  有 (2J+1) 个可能值。这就是说, 无磁场时的一个能级, 在外磁场的作用下将分裂成 (2J+1) 个能级。由式 (1) 还可以看到, 分裂的能级是等间隔的, 且能级间隔正比于外磁场 B 以及朗德因子 g。

能级  $E_1$  和  $E_2$  之间的跃迁产生频率为  $\nu$  的光,  $h\nu = E_2 - E_1$ , 在磁场中, 若上、下能级都发生分裂, 新谱线的频率  $\nu'$  与能级的关系为

$h\nu' = (E_2 + \Delta E_2) - (E_1 + \Delta E_1) = (E_2 - E_1) + (\Delta E_2 - \Delta E_1) = h\nu + (M_2 g_2 - M_1 g_1) \mu_B B$   
分裂后谱线与原谱线的频率差为

$$\Delta\nu = \nu - \nu' = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{\mu_B B}{h} \quad (3)$$

代入玻尔磁子  $\mu_B = \frac{eh}{4\pi m}$ ，得到

$$\Delta\nu = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{e}{4\pi m} B \quad (4)$$

等式两边同除以  $c$ ，可将式 (4) 表示为波数差的形式

$$\Delta\sigma = (M_2 g_2 - M_1 g_1) \frac{e}{4\pi mc} B \quad (5)$$

$$\text{令 } L = \frac{eB}{4\pi mc}$$

$$\text{则 } \Delta\sigma = (M_2 g_2 - M_1 g_1) L \quad (6)$$

$L$  称为洛伦兹单位，

$$L = B \times 46.7 m^{-1} \cdot T^{-1} \quad (7)$$

塞曼跃迁的选择定则为： $\Delta M = 0$ ，为  $\pi$  成分，是振动方向平行于磁场的线偏振光，只在垂直于磁场的方向上才能观察到，平行于磁场的方向上观察不到，但当  $\Delta J = 0$  时， $M_2 = 0$  到  $M_1 = 0$  的跃迁被禁止； $\Delta M = \pm 1$ ，为  $\sigma$  成分，垂直于磁场观察时为振动垂直于磁场的线偏振光，沿磁场正向观察时， $\Delta M = +1$  为右旋圆偏振光， $\Delta M = -1$  为左旋圆偏振光。

以汞的 546.1nm 谱线为例，说明谱线分裂情况。波长 546.1nm 的谱线是汞原子从  $\{6S 7S\}^3S_1$  到  $\{6S 6P\}^3P_2$  能级跃迁时产生的，其上下能级有关的量子数值列在表 2.1.1-1 中。在磁场作用下能级分裂如图 2.1.1-1 所示。可见，546.1nm 一条谱线在磁场中分裂成九条线，垂直于磁场观察，中间三条谱线为  $\pi$  成分，两边各三条谱线为  $\sigma$  成分；沿着磁场方向观察， $\pi$  成分不出现，对应的六条  $\sigma$  线分别为右旋圆偏振光和左旋圆偏振光。若原谱线的强度为 100，其他各谱线的强度分别约为 75、37.5 和 12.5。在塞曼效应中有一种特殊情况，上下能级的自旋量子数  $S$  都等于零，塞曼效应发生在单重态间的跃迁。此时，无磁场时的一条谱线在磁场中分裂成三条谱线。其中  $\Delta M = \pm 1$  对应的仍然是  $\sigma$  态， $\Delta M = 0$  对应的是  $\pi$  态，分裂后的谱线与原谱线的波数差

$\Delta\sigma = L = \frac{e}{4\pi mc} B$ 。由于历史的原因，称这种现象为正常塞曼效应，而前面介绍的称为反常塞曼效应。

表 2.1.1-1

	$^3S_1$			$^3P_2$				
$L$	0			1				
$S$	1			1				
$J$	1			2				
$g$	2			3/2				
$M$	1	0	-1	2	1	0	-1	-2
$Mg$	2	0	-2	3	3/2	0	-3/2	-3

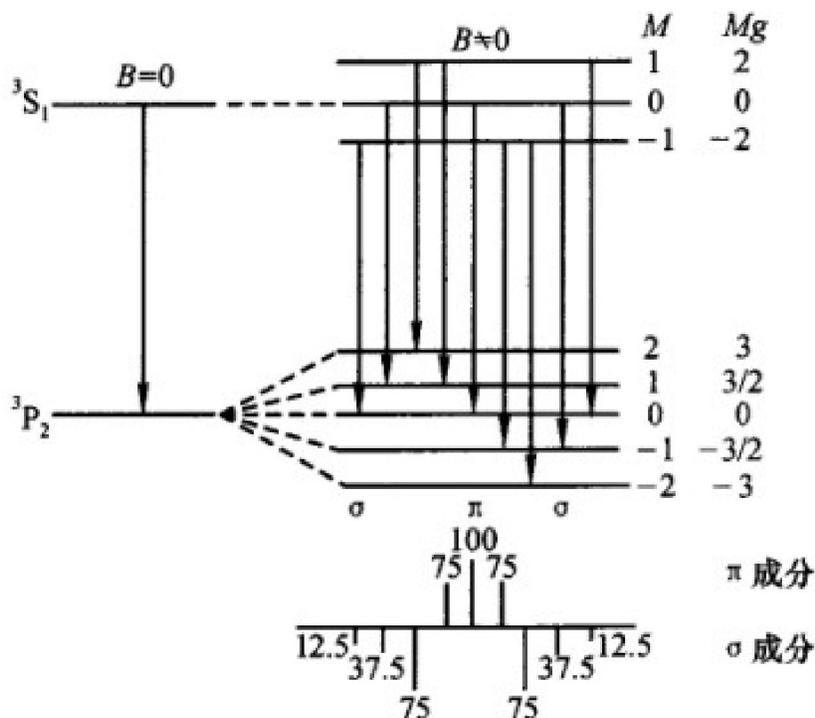


图 2.1.1-1 Hg(546.1 nm)谱线在磁场中的分裂

## 1. 2. 实验方法

### (1) (1) 观察塞曼分裂的方法

塞曼分裂的波长差很小，波长和波数的关系为  $\Delta\lambda = \lambda^2 \Delta\sigma$ 。波长  $\lambda = 5 \times 10^{-7} m$  的谱线，在  $B=1T$  的磁场中，分裂谱线的波长差只有  $10^{-11}m$ 。要观察如此小的波长差，用一般的棱镜摄谱仪是不可能的，需采用高分辨率的仪器如法布里-波罗标准具（简称 F-P 标准具）。

F-P 标准具是由平行放置的两块平面玻璃或石英板组成的，在两板相对的平面上镀有较高反射率的薄膜，为消除两平板背面反射光的干涉，每块板都作成楔形。两平行的镀膜平面中间夹有一个间隔圈，用热胀系数很小的石英或铟钢精加工而成，用以保证两块平面玻璃之间的间距不变。玻璃板上带有三个螺丝，可精确调节两玻璃板内表面之间的平行度。

标准具的光路如图 2.1.1-2 所示。自扩展光源 S 上任一点发出的单色光，射到标准具板的平行平面上，经过  $M_1$  和  $M_2$  表面的多次反射和透射，分别形成一系列相互平行的反射光束 1, 2, 3, 4, ... 和透射光束 1', 2', 3', 4', ... 在透射的诸光束中，相邻两光束的光程差为  $\Delta = 2nd \cos\theta$ ，这一系列平行并有确定光程差的光束在无穷远处或透镜的焦平面上成干涉像。当光程差为波长的整数倍时产生干涉极大值。一般情况下标准具反射膜间是空气介质， $n \approx 1$ ，因此，干涉极大值为

$$2d \cos\theta = K\lambda \quad (8)$$

$K$  为整数，称为干涉级。由于标准具的间隔  $d$  是固定的，在波长  $\lambda$  不变的条件下，不同的干涉级对应不同的入射角  $\theta$ ，因此，在使用扩展光源时，F-P 标准具产生等倾干涉，其干涉条纹是一组同心圆环。中心处

$\theta=0$ ,  $\cos\theta=1$ , 级次  $K$  最大,  $K_{\max} = \frac{2d}{\lambda}$ 。其他同心圆亮环依次为  $K-1$  级,  $K-2$  级等。

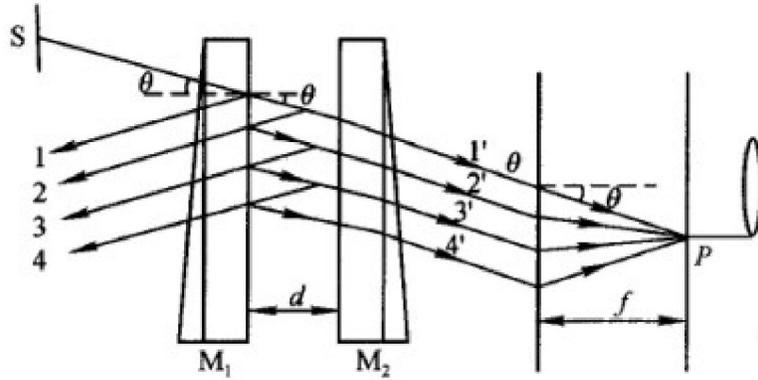


图 2.1.1-2 标准具光路图

标准具有两个特征参量：自由光谱范围和分辨本领，分别说明如下。

1) 1) 自由光谱范围

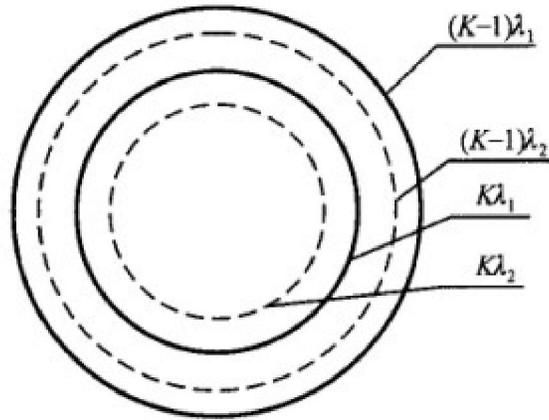


图 2.1.1-3 F-P 标准具等倾干涉图

考虑同一光源发出的具有微小波长差的单色光  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  (设  $\lambda_1 < \lambda_2$ ) 入射的情况，它们将形成各自的圆环系列。对同一干涉级，波长大的干涉环直径小，如图 2.1.1-3 所示。如果  $\lambda_1$  和  $\lambda_2$  的波长差逐渐加大，使得  $\lambda_1$  的第  $m$  级亮环与  $\lambda_2$  的第  $(m-1)$  级亮环重叠，则有

$$2d \cos \theta = m\lambda_1 = (m-1)\lambda_2$$

则 
$$\Delta\lambda = \lambda_2 - \lambda_1 = \frac{\lambda_2}{m}$$

由于 F-P 标准具中，在大多数情况下， $\cos \theta \approx 1$ ，所以上式中

$$m \approx \frac{2d}{\lambda_1}$$

因此

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda_1 \lambda_2}{2d}$$

$$\text{近似可认为 } \lambda_1 \lambda_2 = \lambda_1^2 = \lambda_2^2, \text{ 则 } \Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d}, \text{ 用波数差表示 } \Delta\sigma = \frac{1}{2d} \quad (9)$$

$\Delta\lambda$  或  $\Delta\sigma$  定义为标准具的自由光谱范围。它表明在给定的间隔圈厚度  $d$  的标准具中, 若入射光的波长在  $\lambda \sim \lambda + \Delta\lambda$  之间 (或波数在  $\sigma \sim \sigma + \Delta\sigma$  之间), 所产生的干涉圆环不重叠。若被研究的谱线波长差大于自由光谱范围, 两套花纹之间就要发生重叠或错级, 给分析辨认带来困难。因此, 在使用标准具时, 应根据被研究对象的光谱波长范围来确定间隔圈的厚度。

2) 2) 分辨本领

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$$

定义  $\frac{\lambda}{\Delta\lambda}$  为光谱仪的分辨本领, 对于 F-P 标准具, 分辨本领

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = KN \quad (10)$$

$K$  为干涉级数,  $N$  为精细度, 它的物理意义是在相邻两个干涉级之间能够分辨的最大条纹数。 $N$  依赖于平板内表面反射膜的反射率  $R$ ,

$$N = \frac{\pi\sqrt{R}}{1-R} \quad (11)$$

反射率越高, 精细度越高, 仪器能够分辨的条纹数就越多。为了获得高分辨率,  $R$  一般在 90% 左右。使

用标准具时光近似于正入射,  $\sin\theta \approx 0$ , 从式 (8) 可得  $K = \frac{2d}{\lambda}$ 。将  $K$  与  $N$  代入式 (10) 得

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = KN = \frac{2d\pi\sqrt{R}}{\lambda(1-R)} \quad (12)$$

例如, 对于  $d=5\text{mm}$ ,  $R=90\%$  的标准具, 若入射光  $\lambda = 500\text{nm}$ , 可得仪器分辨本领

$$\frac{\lambda}{\Delta\lambda} = 6 \times 10^5, \quad \Delta\lambda \approx 0.001\text{nm}$$

可见 F-P 标准具是一种分辨本领很高的光谱仪器。正因为如此, 它才能被用来研究单个谱线的精细结构。当然, 实际上由于 F-P 板内表面加工精度有一定的误差, 加上反射膜层的不均匀以及有散射耗损等因素, 仪器的实际分辨本领要比理论值低。

(2) (2) 测量塞曼分裂谱线波长差的方法

应用 F-P 标准具测量各分裂谱线的波长或波长差是通过测量干涉环的直径来实现的, 如图 2.1.1-2 所示, 用透镜把 F-P 标准具的干涉圆环成像在焦平面上。出射角为  $\theta$  的圆环的直径  $D$  与透镜焦距  $f$  间的关系为,

$$\tan\theta = \frac{D}{2f}, \text{ 对于近中心的圆环, } \theta \text{ 很小, 可认为 } \theta \approx \sin\theta \approx \tan\theta, \text{ 而}$$

$$\cos\theta = 1 - 2\sin^2\frac{\theta}{2} \approx 1 - \frac{\theta^2}{2} = 1 - \frac{D^2}{8f^2}$$

代入式 (8) 得

$$2d\cos\theta = 2d\left(1 - \frac{D^2}{8f^2}\right) = K\lambda \quad (13)$$

由上式可推得, 同一波长  $\lambda$  相邻两级  $K$  和  $(K-1)$  级圆环直径的平方差

$$\Delta D^2 = D_{K-1}^2 - D_K^2 = \frac{4f^2\lambda}{D} \quad (14)$$

可见  $\Delta D^2$  是与干涉级次无关的常数。

设波长  $\lambda_a$  和  $\lambda_b$  的第  $K$  级干涉圆环的直径分别为  $D_a$  和  $D_b$ ，由式 (13) 和 (14) 得

$$\lambda_a - \lambda_b = \frac{d}{4f^2 K} (D_b^2 - D_a^2) = \left( \frac{D_b^2 - D_a^2}{D_{K-1}^2 - D_K^2} \right) \frac{\lambda}{K}$$

将  $K = \frac{2d}{\lambda}$  代入，得

$$\Delta\lambda = \frac{\lambda^2}{2d} \left( \frac{D_b^2 - D_a^2}{D_{K-1}^2 - D_K^2} \right) \quad (15)$$

$$\Delta\sigma = \frac{1}{2d} \left( \frac{D_b^2 - D_a^2}{D_{K-1}^2 - D_K^2} \right) \quad (16)$$

测量时用 (K-2) 或 (K-3) 级圆环。由于标准具间隔厚度  $d$  比波长  $\lambda$  大得多，中心处圆环的干涉级数  $K$  是很大的，因此用 (K-2) 或 (K-3) 代替  $K$ ，引入的误差可忽略不计。

(3) (3) 用塞曼分裂计算荷质比  $\frac{e}{m}$   
对于正常塞曼效应，分裂的波数差为

$$\Delta\sigma = L = \frac{eB}{4\pi mc}$$

代入测量波数差公式 (16)，得

$$\frac{e}{m} = \frac{2\pi c}{dB} \left( \frac{D_b^2 - D_a^2}{D_{K-1}^2 - D_K^2} \right) \quad (17)$$

已知  $d$  和  $B$ ，从塞曼分裂的照片测出各环直径，就可计算  $e/m$ 。

对于反常塞曼效应，分裂后相邻谱线的波数差是洛仑兹单位  $L$  的某一倍数，注意到这一点，用同样的方法也可计算电子荷质比。

实验内容

通过实验观察 Hg (546.1nm) 绿线在外磁场中的分裂情况并测量  $\frac{e}{m}$ 。

### 1. 1. 调节光路共轴

实验装置如图 2.1. 1-4 所示。O 为光源，实验中用水银辉光放电管，其电源用交流 220V 通过自耦变压器用来调节放电管两端电压，从而调节放电管的亮度。

N、S 为电磁铁的磁极，电磁铁用直流电源供电。调节通过的电磁铁线圈的电流可改变磁感应强度  $B$ ，磁感应强度可用高斯计来测量。

$L_1$  为会聚透镜，使通过标准具的光强增强。P 为偏振片，用以鉴别偏振方向。F 为透射干涉滤光片，根据实际波长选择 F-P 标准具。 $L_2$  为成像透镜，使 F-P 标准具的干涉纹成像在暗箱的焦平面上。K 为 1/4 波片，

给圆偏振光以附加的  $\frac{\pi}{2}$  相位差，使圆偏振光变成线偏振光。波片上箭头指示的方向为慢轴方向，K 与 P 配合用以鉴别圆偏振光的旋向。 $L_3$ 、 $L_4$  分别为望远镜的物镜和目镜，用作观察干涉环纹。

仔细调节 F-P 标准具到最佳分辨状态，即要求两个镀膜面完全平行。此时用眼睛直接观察 F-P 标准具，当眼睛上、下、左、右移动时，圆环中心没有吞吐现象。

### 2. 2. 垂直于磁场方向观察塞曼分裂

(1) (1) 用间隔圈厚度  $d=2\text{mm}$  的 F-P 标准具观察 Hg546.1nm 谱线的塞曼分裂，并用偏振片区分  $\pi$  成分和  $\sigma$  成分；稍增加或减少励磁电流，观察分裂谱线的变化。

(2) (2) 换用间隔圈厚度  $d=5\text{mm}$  的 F-P 标准具，励磁电流调至最小值，缓慢增加励磁电流，观察第  $K$  级圆环与第 (K-1) 级圆环的重叠或交叉现象（主要观察  $\sigma$  成分的重叠或交叉）。

励磁电流及其对应的磁感应强度  $B$  的选择取决于谱线的裂距及标准具的自由光谱范围。Hg546.1nm 线在

磁场作用下分裂成 9 条谱线，总裂距为  $4L$ ，要使相邻两级不发生重叠， $B$  必须满足  $4L \leq \frac{1}{2d}$  (18)，

$$B \leq \frac{1}{2d \times 4 \times 46.7} T \cdot m \quad (18'), \quad (3) \quad \text{计算电子荷质比 } \frac{e}{m}.$$

选择适当的励磁电流(如 3A)，用相机拍摄 546.1nm 谱线塞曼分裂的  $\pi$  成分，测量底片上(K-3)或(K-4)

级圆环直径，计算  $\frac{e}{m}$ 。

3.

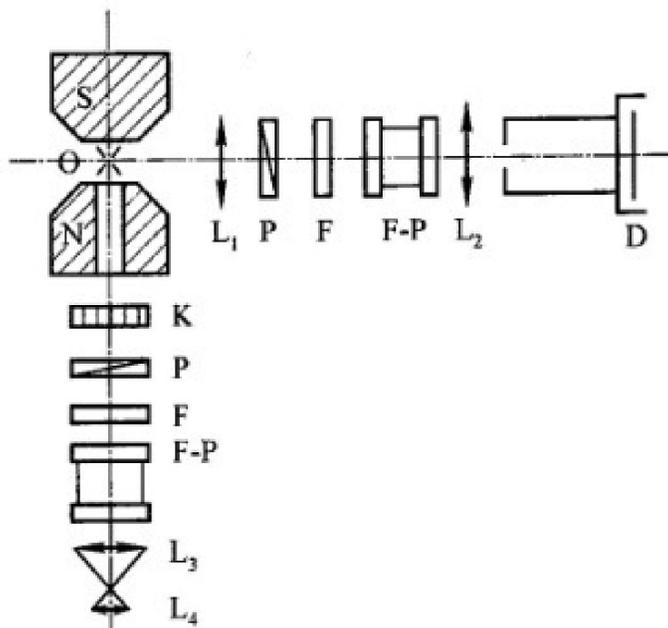
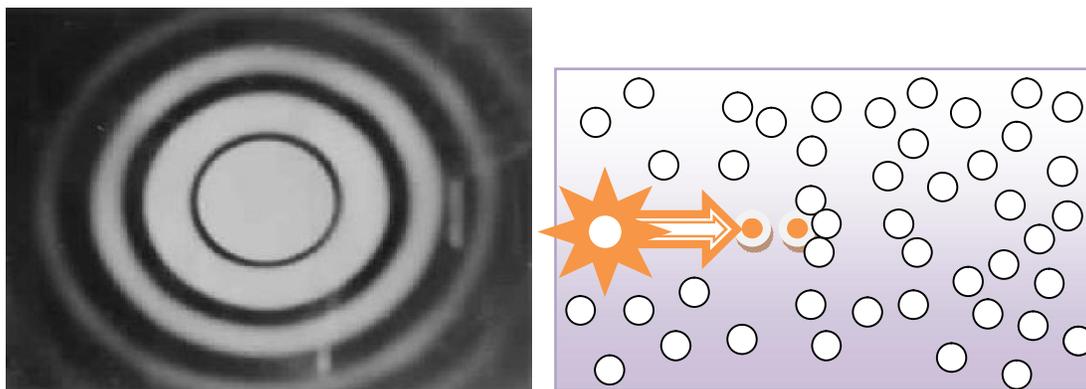
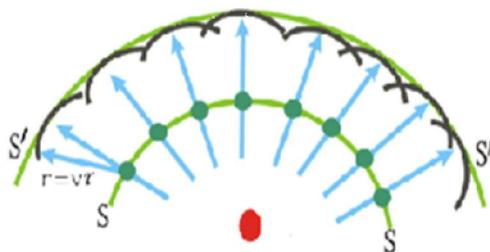


图 2.1.1-4 塞曼效应实验装置图

### 9、光的干涉与衍射

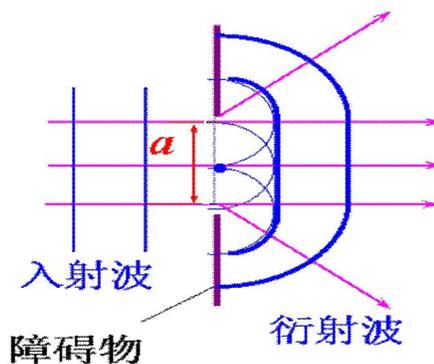
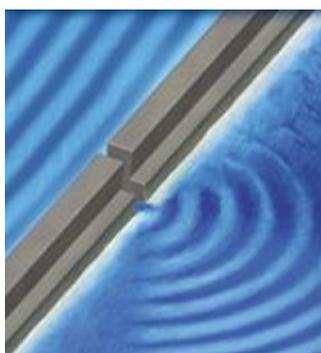
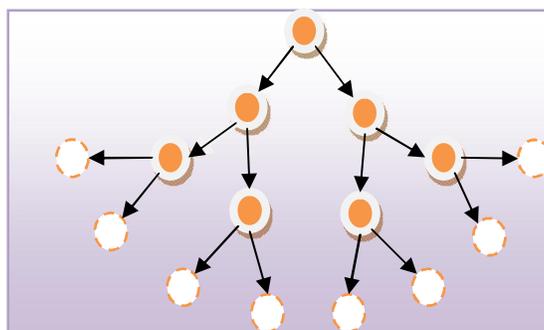
1909 年泰勒曾做了一个很奇特的实验。他先在强光下拍摄了一根细针的衍射像，然后减弱光束的强度，延长曝光时间，有一次达三个月之久。当他把光束衰减到只有一个光子进入仪器时，所得到的衍射像与强光短时拍摄的完全相同。





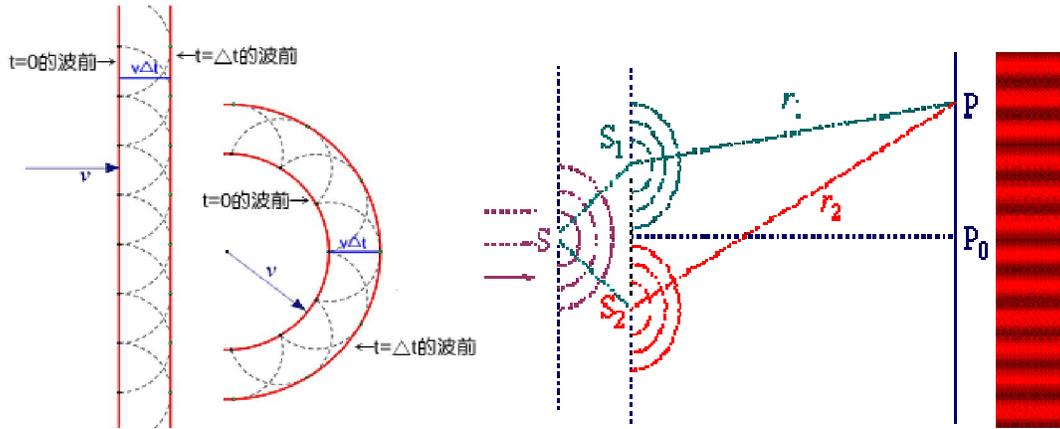
A: 惠更斯——菲耳衍射图像      B: 介质衍射原理及其图像      C: 惠更斯衍射原理

A: medium diffraction principle and image



泰勒的实验表明，干涉与衍射，并不象人们通常认为的那样，是多个光子同时存在并相互作用而产生的，相反，单个的光子也能产生干涉与衍射。此后，他又作了单光子的双缝干涉试验，结果相同。1970年狄拉克明确表明，对于单个光子干涉现象，完全可以用几率幅的概念作出回答。当光子射向双缝屏时，每一个光子穿过每一个缝都有一个几率幅，而在光屏上的每一点也将对应一定的几率幅，这些几率幅的叠加，就形成了干涉图样。激光出现以后，曼德尔等人进行了独立光束干涉试验。他们用两只脉冲式红宝石激光器作为两个独立的光源。为了保证条纹的可见度，采用了光电符合技术以消除各种频率漂移使信号产生的干扰。结果获得了条纹可见度为15%的干涉图样。经过改进，完成了高度减弱的两束独立激光之间的干涉。在这一试验中，高度减弱的两束独立激光每一束中一次只能有一个光子入射。也就是说，当一束激光发出一个光子时，另一束激光发光子的几率仅有万分之一。1971年，拉德罗夫又用另外的方法完成了类似的试验。独立光束干涉试验给光的粒子说带来一个致命的问题。因为独立光束的“单光子干涉”发生的是双光子干涉，当第一个激光器发出的光束中仅有一个光子奔向控制器时，第二个激光器还未发出光子，第一个光子就已经与第二个尚未到来的光子发生了干涉效应。然而，当把一束激光关掉时，这种干涉就消失了。吕锦华先生认为：二台激光器之间的相互作用属于度作用，度作用是以真空光速 ( $C_{\infty}=80$  万公里/秒) 传播，但光子却以相光速 ( $C = 30$  万公里/秒) 传播。从而，我们看第二台激光器的光子还没从激光器发出，它却已与第一台激光器发出的光子发生了干涉效应！事实上，第二台激光器的光子已经产生，只是还没从激光器发出而已。用这个实验也可检验真空光速  $C_{\infty}$  是否是 80 万公里/秒。这就要建立一个自动的高速光电计时器或高速摄影器，测定干涉发生与

第二光子到达干涉点的时间差 ( $\Delta t$ ) 以及第二台激光器发生光脉冲到第二光子到达干涉点的时间  $t_r / C_\infty = t - \Delta t$ ,  $r / C = t$ ,  $C_\infty = Ct / (t - \Delta t)$ ,  $\Delta t/t = 5/8$ , 或  $t = 1.6 \Delta t$ 。可是这些观点需要实验的检验。



D: Huygens principle      E: young's double-slit interference experiment

现代物理学认为光波是平面波。平面波的波动方程可用复数表示成如下形式：  
 $\psi(x,t) = e^{i(px - Et)/\hbar} = \cos(kx - \omega t) + i \sin(kx - \omega t) \dots (3.1)$ 。其中， $p = \hbar k, E = \hbar \omega$ 。式中  $i = \sqrt{-1}$ 。

凡是有 electric charge 的地方，四周就存在着 electric field，即任何 electric charge 都在自己周围的空间激发 electric field。带电体在电磁场中运动时若能级发生变化，则会辐射 electromagnetic field 以保持电磁质量不变，存在 Maxwell 理论中的脱离物体的携带能量的 electric field，所以 electromagnetic field 具有电磁质量，displacement current 与传导电流本质上都是电磁质量的传播。Newton 本人已经准备接受他的图象中躲藏在光的神秘行为后面的深刻问题。在物理学中因为看出了互不相关的现象之间有相互一致之点而加以类推，结果竟得到很重要的进展。【1】

**萨格纳克效应 (sagnac 效应)** —— 1911 年，Sagnac 发明了一种可以旋转的环形干涉仪。

实验原理如图 4.3 所示。

将同一光源发出的一束光分解为两束，让它们在同一个环路内沿相反方向循环一周后会合，然后在屏幕上产生干涉。

萨格纳克效应中条纹移动数与干涉仪的角速度和环路所围面积之积成正比。

二十世纪末英国科学家戴维多伊奇根据单光子衍射试验提出了平行宇宙的假设。

参考文献：

【1】Einstein 和英费尔德 著 周肇威译。《物理学的进化》上海科学技术出版社 1962 年。

### 10. 广义相对论红移危机的解决

牛顿万有引力公式和牛顿第二定律是经引力理论的两条基本定律。由这两条定律得到：当一个物体<sup>m</sup> (例如行星)在另一个物体<sup>M<sub>0</sub></sup> (例如太阳)的引力场中运动时，引力场引起的能量变化 $\Delta W$ 和引起的角动量变

化 $\Delta L$ 分别是  

$$\Delta W^{(M)} = GM_0 m \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \rightarrow \frac{GM_0 m}{c^2} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \quad (1-1), \quad \Delta L = 0 \quad (1-2)$$
，由这两条公式可以进一步推出行星绕太阳运动轨迹—椭圆运动。

19 世纪末就已经观察到行星的近日点缓慢移动(或它的椭圆轴在缓慢转动)。这是经典引力理论所不能解释的，这一理论面临极大困难。广义相对论认为：一个物体使自己周围 space-time 弯曲，另一物体在弯曲 space-time 中沿短程线运动，这就是引力的本质。由广义相对论引力场方程和短程线方程，在线性近似下得到

$$\Delta w^{(G)} = \frac{2GM_0 w}{c^2} \left( \frac{1}{r} - \frac{1}{r_0} \right) \quad (1-3), \quad \Delta L^{(G)} = 0 \quad (1-4)$$

另一组方程  
光子经过太阳附近时受到太阳的吸引而改变方向,由(1-3)—(1-4)式求出的光偏折角是牛顿理论预期值的一倍。实际观察结果是与广义相对论一致, Einstein 取得巨大胜利。随后人们观察到从太阳发出的光线到达地球时其

频率由  $\nu_0$  变为  $\nu$ ,  $\Delta \nu = \nu - \nu_0 = -\frac{GM_0 \nu_0}{c^2 R}$  (1-5), 广义相对论用引力势场中不同点时间间隔不同解释了  
这个实验结果。所以人们认为上述三个经典相对论引力实验支持广义相对论, 并且进一步得到 space-time 是  
弯曲的结论。然而根据 Einstein 的光子能量  $w$  与频率  $\nu$  的关系式  $w = h\nu$ , (1-5)式实际上是

$\Delta w = -\frac{GM_0 w_0}{c^2 R}$  (1-6), 这个式子是光红移实验结果的另一种表示形式。它恰好是  $r_0 = R, r = \infty$  情况下的  
(1-1)式, 而不是广义相对论所预期的(1-3)式。或者说光红移实验明确告诉人们, 物体在太阳引力场中运动时  
只有牛顿引力做功。长期以来人们对此迷惑不解。史坦福大学引力研究小组正式承认广义相对论只得到两个  
半实验的支持。半个不支持广义相对论的实验就是指(1-6)式与(1-3)式矛盾。半个不支持广义相对论的实验意  
味着什么呢? 光偏折实验和光红移实验都是观察同一物理过程—光子从太阳到地球的运动。因此不可能在两种  
观察中, 光子具有两种不同的能量变化。(1-6)式是实验结果, 因此它是正确的。由于不可能有另一种能量  
变化也是正确的, 所以应排除(1-3)式是正确可能性。

由行星近日点的移动和光偏角得出联立方程(1-1)—(1-2)是错的, 只有这三种可能: (a)  $\Delta w^{(M)}$  式错了; (b)  
 $\Delta L^{(M)}$  式错了; (c)  $\Delta w^{(M)}$  和  $\Delta L^{(M)}$  两式都错了。光红移实验告诉人们:  $\Delta w^{(M)}$  式没有错, 那么三种可能中只  
剩下一种可能,  $\Delta L^{(M)}$  式错了。广义相对论导出的(1-3)、(1-4)两个式子恰好相反, 把不应该改动的(1-1)式改  
了, 而应该改动的(1-2)式却没改。由于(1-3)—(1-4)式都错, 而两个错误产生的效果碰巧互相抵消, 导出一个与  
实验一致的行星近日点的移动和光偏角结果, 这点正是使人迷惑之处。无论如何, 广义相对论解释行星近日  
点移动和光偏折的一个前提(1-3)式已被另一个实验(光红移)否定了, 这种解释就不是本质的。这样本质上广  
义相对论将只得到这三个实验中半个实验的支持。科学家把红移实验暴露出来的困难称为广义相对论的红移  
危机。

庞德 (R.V.Pound) 与瑞布卡 (G.A.Rebka) 哈佛塔的著名实验证明了引力场可以使光子产生蓝移。从  
而间接地证明了 Einstein 广义相对论的引力红移的存在。这个实验运用光子在地面重力场中的能量守恒关系

得出方程  $\nu = \nu_0 \left( 1 + \frac{gh}{c^2} \right)$ 。其中  $\nu_0$  是光子在塔顶的频率,  $\nu$  是光子经过重力场后到达塔底的频率,  $h$  为塔  
高,  $g$  为重力加速度。从上式可以看出光子频率的变化与它在引力场中运动的距离有关。在这个实验中, 假  
设我们在塔顶与地面之间设定几个不同的测量点, 根据上式, 光子在这些不同的点上应当有不同的频率。我  
们做一个思想实验, 我们把测量间距变到一个波长的大小, 那么, 根据上式, 光子每越过一个波长就应当有  
一个不同的频率, 根据普朗克谐振子理论这个光子就应当有一个不同的能量。从哈佛塔实验还可以看到, 光  
子只有从引力势小的空间向引力势大的空间运动才可能发生红移。从力学角度看, 引力场自身不存在做负功  
的能力, 换句话说, 光子的红移不可能是引力场作用的结果。那么作为广义相对论的一个理论结果—引力红  
移又是怎样来的呢?

**笔者认为广义相对论是研究引力质量的, 而光子只具有电磁质量, 不存在广义相对论的红移危机。这是  
时空平权理论的体现, 因为引力势小的地方时空弯曲程度大。**

角动量反映在基本粒子的自旋方面, 同物理学的三个方面的内容有关。第一个是经典的转动概念, 即作  
旋转运动的物体总是具有角动量; 第二个是角动量子化。在微观领域, 基本粒子的角动量是量子化的, 这  
里要特别指出的是基本粒子的自旋角动量纯粹是粒子的内禀属性, 它与粒子的运动状态毫无关系。假如用经  
典的转动概念来解释微观粒子的自旋, 很容易得出如电子表面的切向速度远大于光速这样违背相对论理论的  
结论; 第三个是狭义相对论。1927年狄拉克写下了著名的狄拉克方程, 方程表明, 自旋乃是带电粒子的相对  
论性理论的一个自然特性。**笔者认为基本粒子的角动量与其电磁质量有关。**

量子信息学告诉人们: 量子态是指原子、中子、质子等粒子的状态, 它可表征粒子的能量、旋转、运动、  
磁场以及其他的物理特性。1993年, 美国物理学家贝尼特等人提出了“量子态隐形传输”的方案, 即将原

粒子物理特性的信息发向远处的另一个粒子，该粒子在接收到这些信息后，会成为原粒子的复制品。而在此过程中，传输的是原粒子的量子态，而不是原粒子本身。传输结束后，原粒子已经不具备原来的量子态，而有了新的量子态。因为制造量子计算机需要量子态的隐形传输，因此，实现原子间量子态隐形传输是奠定研制量子计算机的基础之一。2004年6月，美国和奥地利的物理学家在没有任何物理连接的情况下，实现了原子间的量子态隐形传输。与此同时，我国潘建伟教授等科学家已实现了五粒子纠缠态以及终端开放的量子态隐形传输，他们的实验方法在量子计算和网络化的量子通信中也有重要的应用。笔者认为在此过程中传输的只是电磁质量，而引力质量没有变化。电子不是实在性的自然态，仅仅是一种最为基本的体现能转化的过程性、结构性状态。是自然能态在其量转变，或说转化过程中的普遍构型、或和基本构型的抽象模式。更深入地讲，电子是一种自然能能量间的关联关系式；能量间相互转化过程中的全部关联性的总和反映形式。也即当今科学常言的电子形式。

### 第三章 光速不变性原理

#### 1、真空光速不变性原理解释

问题导引：为什么光速  $c$  刚好是  $299792458\text{m/s}$ ？

史蒂文·温伯格曾经说过：“我对基础物理学的进步的想法是，能带领我们更接近一种能够以自然的和统一的方式解释所有物理现象的简单理论。”英国科学哲学家波普尔主张，任何科学理论都是试探性的、暂时的、猜测的，它们是不能够被证明的，但是可以被证伪的。按照霍金的理解就是：如果理论只是假设意义上讲，任何物理理论总是临时性的，你永远不可能讲它证明……。一个好的理论的特征：它能够给出许多原则上可以被观测所否定或所证伪的语言。

#### (一) 爱因斯坦对于光速不变性原理解释

爱因斯坦在给达文波特的信中说：“在我本人的思想发展中，迈克尔孙的结果并没有引起很大的反响。”爱因斯坦认为：真空中光的传播定律必须由一个能与相对性原理一致的较为复杂的原则取代；这是因为相对性原理自然而简单并且在人们的思想中具有很大的说服力；但是，理论物理学的发展说明了我们不该遵循这一途径。他认为新的理论应该与电动力学的理论协调起来。于是，他较深入的分析了时间和空间的物理概念，让人们看到相对性原理和光的传播定律（真空中光速恒定定律）没有丝毫的抵触之处。这样他完成了他的狭义相对论，光也就有了新的参考原则。爱因斯坦在他的《狭义与广义相对论浅说》中说：“在物理学中几乎没有比真空中光的传播定律更简单的定律了。学校里的每个儿童都知道，或者相信他知道，光在真空中沿直线以速度 千米每秒传播。无论如何我们非常精确地知道，这个速度对于所有各色光线都是一样的。因为如果不是这样，则当一颗恒星为其邻近的黑暗星体所掩食时，其各色光线的最小发射值就不会同时被看到。荷兰天文学家德西特根据对双星的观察，也以相似的理由指出，光的传播速度不能依赖于发光物体的运动速度。”爱因斯坦在 1952 年第十五版本的《狭义和广义相对论浅说》中仍然如是说，“我们可以假定关于光（在真空中）的速度  $c$  是恒定的，这一简单的定律已有充分的理由为学校里的儿童所确信。谁会想到这个简单的定律竟会使思想周密的物理学家陷入智力上的极大困难呢？”

二十世纪末，在天文和微观的实验中都发现了一些现象，光速不变原理的经典解释遇到困难，关于此问题的理论探讨也很活跃，我国科学家在这个问题上也一直进行着摸索，物理学可以使用假设，并在假设的基础上建立理论，然而用实验检验其非假设成果的正确性，进而间接验证假设的正确性。之所以这样做，是因为在假设时代，该现象还得不到合理的解释，这说明假设的现象比当时物理能解释的东西更基本。因此，如能在以后对假设作出科学的解释，就是对物理学的重大突破。自从相对论发表以来，对它的争议就没有停止过。但相对论以其完美的数学表达形式和广泛的实验论证，已经被许多人接受。攻击相对论的人只能找到一些相对论不能解释的物理现象来证明它的局限性，而不能从根本上否定它。叫喊声一直不停的主要原因，是光速恒定的公设。没有人能够从理论上找到光速不变的原因，但对这一实测的结果心存不甘，因为它是伟大的相对论的基础条件。

他在 1922 年就真空光速不变原理写道：“相对论常遭指责，说它未加论证就把光的传播放在中心理论的地位，以光的传播定律作为时间概念的基础。然而情形大致如下：为丁赋予时间概念以物理意义，需要某种能建立不同地点之间的关系的过。为这样的时间定义，究竟选择哪一种过程是无关重要的。可是为了理论只选用那种已有某些肯定解的过程是有好处的。由于麦克斯韦与洛伦兹的研究之赐，和任何其他考虑的过程相比，我们对于光在真空中的传播是了解得更清楚的”。爱因斯坦 著《相对论》47 页“1、7 光的传播定律与相对性原理的表面抵触”，“在此种抵触下，似乎除了放弃相对性原理或真空中光的传播的简单定律外，我们别无他法。但保留相对性原理是仔细阅读上述论述的读者几乎一致的意见。这是因为如此自然而简单的相对性原理给予人们很大的说服力，因而真空中光的传播定律就必须由一个能与相对论原理一致的比较复杂

的定律所取代。然而，理论物理学的发展使我们不必继续这个进程。经典电子论的创立者、具有划时代意义的 H-A-洛伦兹对于与运动物体相关的电动力学领域中无可争辩的经验产生出关于电磁现象的一个理论，而又有该理论必然推出了真空中光速恒定定律理论。因此，尽管没有任何实验数据表明有与相对性原理相抵触之处，但许多著名的理论物理学家对相性原理还是比较倾向于舍弃的观点。相对论就是在这个关头出现的。由于以时间和空间物理概念的分析，相对性原理因而就与光的传播定律没有丝毫的抵触之处。”如果麦克斯韦方程正确，而且满足相对性原理，那么可以证明光速不变是正确的，但在爱因斯坦提出狭义相对论的时候还不知道麦克斯韦方程是否正确，于是才把光速不变作为基本假设。

## (二)、现代物理学对于光速不变性原理解释

在量子力学中可以看到，如果光子的静止质量为零那么光速不变是正确的，前面已经分析了光子只具有电磁质量，没有引力质量，因此光速不变性原理也是正确的。

厄瓦耳(Ewald1912)和俄辛(Oseen1915)的消光定理(Extinction theorem)认为：“不管光离开其光源时速率多大，由于媒质的介入，一个新的扰动来替代他，这个扰动的频率与光源光频率相同，但却以媒质的特征相速度来传播。这时，对媒质的光学性质进行修正以后，相对于媒质静止的观测者测得的光速都将等于这种媒质中的光速，使得源的运动和光相对于源的速率无关。”张元仲先生在《狭义相对论实验基础》一书中对各种检验光速不变性的实验进行了分析，结论是：“在实验中依靠光信号较钟，将会把可能的光速方向性效应抵消掉，……各种检验光速不变性的实验都只证明了回路光速的不变性，并没有证明单向光速的不变性。因此，通常所说的‘光速不变原理已为实验所证实’是不确切的。”

水中光速  $c/n$ 、雷达波延迟、GPS、Sagnac……，越来越多的实验证明：真空中引力场与光速的关系密切。光的速度与光源运动无关，不能认为运动的物体带动周围的 ether.Galileo 相对性原理和经典 transformation 可以应用于力学现象，但是不能用于光电现象的原因在于它们是奠定在绝对 space-time 观的基础上研究引力质量问题的，光子与中微子没有相互作用，ether 不影响光速，光子与引力场没有相互作用。狭义相对论的假设是正确的。实物运动时，能且只能带动属于它自身的万有引力场和电磁场。这一情况，同有关的实验结果是一致的。光行差现象显示，以太未被地球拖曳。这是因为，传播遥远恒星的引力场，主要是恒星间的引力场，地球的运行，对于绝对时空的影响微不足道；斐索实验的结果是以太要部分地被水流曳行。其实质是，水在流动时会带动属于它自身的场，而不会带动地球的引力场。

近百年来，人们对麦耳逊——Moley 实验、Maxwell 方程以及群论上的公理证明对真空光速不变性原理进行质疑，但是都没有取得实际的实验结果，说明了真空光速不变性原理的正确，也说明光只具有电磁质量。

广义相对论和狭义相对论的最大不同，在于对于真空绝对速度  $C$ （真空绝对速度和一般所言的“电磁波真空波速”不是一个概念，只不过后者在数学上恰好等于前者而已）只能在局部观测者上定义。也就是说，狭义相对论可以定义一个全局观测者，而在广义相对论中只能使用局部观测者，而参照系的选择就体现了观测者的选择（两者还不完全相同）。在广义相对论中，从始至终所说的是：在局部观测者自己看来，自己所在位置的电磁波的真空光速等于真空绝对速度  $C$ ，这才是广义相对论中对于光速所说的全部内容，不要将狭义相对论和广义相对论混淆。在非本地观测者看来，自己所在位置以外的别的地方的光速完全可以不是光速，这是广义相对论的一个很常见的结果。

由于光子只具有电磁质量，它在度量空间（相对空间）里运动电磁质量不变，引力质量与电磁质量之间没有相互作用，频率与波长不变，所以光速为定值。由于光子的引力质量为 0，因此引力场与 electromagnetic field 的速度相同。如果认为引力场的传播速度是由激发它的物体的引力质量决定，那么根据伽利略对于两个铁球同时落地的推理可以得出引力场的传播速度是定值，因此物理学中的真空光速不变性原理是指在仅有引力场的条件下，是有引力场的运动速度决定的，而在电磁场中光速是可变的，例如在介质中光速小于  $C$ ，这也符合相对绝对论的观点。

1902-1904 年，密勒和莫雷在地表用更精密的仪器做迈克尔逊-莫雷实验，实验结果比 1887 年迈克尔逊和莫雷所得更接近于零。后来，密勒超出了地表空间，得到了不同寻常的结果。到了 1921 年，密勒把迈克尔逊-莫雷实验装置安在威尔逊山上进行，所用方法和以前一样，但实验发现有 10Km/s 的正效应，也就是说光相对于地球在以 10Km/s 的速度做漂移运动。为了证实这一点，他采取了多种措施，包括撤换铁磁材料，用水泥座代替钢架，用铜、铝代替钢铁；将光源隔开，以防温度变化；并采用不同的光源；甚至故意用电炉加热以试验温度的影响等等……密勒还是得出确切的结论——光相对于地球在以 10Km/s 的速度做漂移运动。——摘自《著名经典物理实验》郭奕玲、沈慧君，北京科学技术出版社。密勒——担任过美国全国物理学会的主席，是美国科学院院士。但是，他自己不能很好地解释着个实验，后来很多人在地表又做迈克尔逊-

莫雷实验进一步得到的都是零结果,不同的实验结果空间高度不同。笔者认为这是由于地磁场的存在影响的结果。



迈克尔逊干涉仪

有人假设光波和声波一样,需要介质传播(如以太)。那么,设光线的频率为  $K$ ,光源相对介质的速度为  $V$ ,观测者相对介质的速度为  $U$ ,则有:  $K' = K \left[ \frac{1-U/C}{1-V/C} \right]$ ,对上式的  $1/(1-V/C)$  用二项式展开得:  $K' = K (1-U/C) (1+V/C+V^2/C^2+V^3/C^3+\dots)$ , 设  $M = V^2/C^2+V^3/C^3+\dots$ , 对上式整理如下:  $K' = K (1-U/C) (1+V/C+M) = K (1-U/C) (1+V/C) + KM = K[1-(U-V)/C] - K[UV/C^2+M]$ , 通过上面的数学推导,我们得到光多普勒效应公式为:  $K' = K[1-(U-V)/C] + K[-UV/C^2+V^2/C^2+V^3/C^3+\dots]$ , 分析如下: 由设顶的条件我们可知,  $(U-V)$  是我们相对光源的速度,是我们可知的。因此,在上面公式中,前面的频移部分  $K[1-(U-V)/C]$ , 与  $V$  和  $U$  是无关的。后面的频移部分  $K[-UV/C^2+V^2/C^2+V^3/C^3+\dots]$ , 是与  $U$ 、 $V$  有关的。这样我们通过不同的相对速度实验,就应该得到的频移,检验出  $U$ 、 $V$  的存在。实际情况是:实验结果的频移是一致的。当然,由于后面的频移部分是值很小的  $1/C$  高次项,对实验的精度要求很高。所以,实验结果的一致,并不完全可信。但随着实验精度的提高,这个问题是可以解决的。光的多普勒效应结果,已经经过无数次的天体观测和地面实验,没有发现任何与光源相对介质的速度、观测者相对介质的速度有关的数据。光速与介电系数及磁导率有关,声速与介质密度与弹性系数有关,光速与声速两者的确有可比性,因此这个“用声速代替光速”论难已经被无数人提出过。理由有三:

1) 声波波动方程满足 Galileo 不变性,但电磁波波动方程不满足 Galileo 不变性,所以两者不具有完全可比性。既然声波波动方程满足 Galileo 不变性,所以从逻辑上讲,不存在提出“声速不变原理”的必要性; 2) 作为潜在的研究,可以允许你去提出“声速不变原理”及以此为基础的“声速相对论”,但基于“声速不变原理”所提出的动力学理论结果明显与实验违背; 3) “光速不变原理”尽管在相对论发展历史上具有重要意义,但其实它是完全不必要的。几十年来,已经有很多人指出(见下面的文献),“光速不变原理”应该是相对性原理的一个推论,而不是出发点(基本假定)。这里,“光速不变原理”以一个推论“必然存在一个不变速度,它在时空变换下不变”的面貌出现。

波的传播速度决定于媒质的特性,对于弹性波来说,波的速度决定于媒质的惯性和弹性。液体和气体只有容变弹性,在液体和气体内部只能传播与容变有关的弹性纵波。现有理论证明在液体和气体中纵波的传播速度为  $C = \sqrt{\frac{B}{\rho}}$  (纵波), 式中  $B$  是媒质的容变弹性模量,  $\rho$  是媒质的密度。固体中能够产生切变、容变、长变等各种弹性形变,所以固体中既能传播与切变有关的横波,又能传播与容变或长变有关的纵波。在固体中,横波速度  $C = \sqrt{\frac{G}{\rho}}$ , 纵波速度  $C = \sqrt{\frac{Y}{\rho}}$ , 式中  $G$  和  $Y$  分别为媒质的切变弹性模量和杨氏弹性模量。

附录 1: 科学家首次成功地将一个光脉冲“冻住”了足足 1 秒钟的时间,这是以前最好成绩的 1000 倍。将冻住光束的时间大大延长,意味着可能据此找到实用方法,来制造光计算机或量子计算机用的存储设备。要使光停住脚步,需要一种特殊的陷阱,其中的原子温度极低,几乎静止,以至于每个原子都有着同样的量子态。通常情况下,这样一团冻结的原子是不透明的,但仔细校准后的激光能够在其中“切割”出一条通道,使得一个光脉冲从另一方向传播过来时,陷阱相对于它来说是透明的。一旦切断激光,陷阱立刻又变得不透明,光脉冲就被困在陷阱里了。恢复激光照射,光脉冲将继续传播。陷阱的秘密在于,它并不是普通陷阱困住物体那样困住光线,而是通过建立“量子冲突”(quantum conflict)来保存住光脉冲的信息。激光和光脉冲对原子的作用是相反的,导致原子发生“纠缠”,处于两种量子态的混合状态。切断激光时,原子吸收光脉冲,但光脉冲并没有丢失,原子仍然纠缠在不同量子态中,光脉冲的信息给它们留下了印记。只要原子不移动或改变,就能完全保有光脉冲的信息。以前的光陷阱只能坚持约 1 毫秒,随后就由于原子的移动而崩溃了。澳大利亚国立大学的物理学家 Jevon Longdell 及其同事利用掺有稀土元素镨的硅酸盐晶体,制造出一个“超级光陷阱”。由于晶体是固态的,而镨的磁稳定性非常好,这个陷阱保留光脉冲信息的时间比气体陷阱或不够稳定的晶体陷阱要长得多。科学家在 8 月 5 日的《物理评论通报》(PRL)上报告了这一成果。

附录 2: 中国科学家获得引力场以光速传播首个观测证据

2012 年 12 月 26 日下午,“引力场以光速传播的观测证据”新闻发布会在京举行。中国科学家在发布会上宣布,获得了“引力场以光速传播的第一个观测证据”。

由中国科学院地质与地球物理研究所汤克云研究员领导,中国地震局和中国科学院大学有关人员参加的科学团组,经过十多年的持续探索,在实施了多次日食期间的固体潮观测后,发现现行地球固体潮公式实际上暗含着引力场以光速传播的假定,从而提出了用固体潮测量引力传播速度的方法。“Observational evidences for the speed of the gravity based on the Earth tide”一文报道了利用西藏和新疆高质量地球固体潮数据测定引力传播速度的结果,即将发表于《科学通报》英文版。

近年来,中国科学院地质与地球物理研究所汤克云研究员及其团组先后实施了 1997 年漠河日全食观测、2001 年赞比亚日全食观测、2002 年澳大利亚日全食观测、2008 年嘉峪关日全食观测、2009 年上海-杭州-湖州日全食观测和 2010 年云南大理日环食观测,主要是重力固体潮观测。在多次的“日全食期间的重力观测”后该团组发现:“现今固体潮理论公式中隐含着引力场以光速传播的假定”,进而导出了引力传播速度方程,找到了求解引力场速度的有效方法;选择远离太平洋、大西洋、印度洋和北冰洋的西藏狮泉河站和新疆乌什站的固体潮数据作粘弹性滞后校正后,代入引力传播速度方程,获得了“引力场以光速传播的第一个观测证据”。历年来这项研究分别得到了国家科技部、国家基金委、中国科学院、中国地震局的支持。该项原始创新成果,对于引力场的理论和实验研究具有重要意义。

## 2、非惯性系中的真空光速不变性原理

真空光速不变包括两层含义,首先在同一参考系中,光速具有各向同性和均匀性;其次,在具有相同的 space-time 单位的参考系中,光速的数值相同,与参考系相对光源的运动状态无关。描述惯性系的空间是闵可夫斯基空间,其线元形式是  $dS^2 = \eta_{ab} d\xi^a d\xi^b$ , 其中  $d\xi^a$  是闵可夫斯基空间 space-time 仿射坐标改变元,是全微分量。惯性系之间变换的 space-time 几何要求是,space-time 线元长度在变换中不变,即  $dS^2 = \eta_{ab} d\xi^a d\xi^b = \eta_{\tilde{a}\tilde{b}} d\tilde{\xi}^{\tilde{a}} d\tilde{\xi}^{\tilde{b}}$ , 其中两惯性系的 space-time 坐标均是全微分,它体现了两惯性系 space-time 坐标之间存在 1—1 映射。对惯性系 space-time 坐标的物理要求是能描述真空光速不变。在所有惯性系中取相同的 space-time 单位,即相对静止时的钟和尺是相同的前提下,真空光速不变意味着光速的数值相同,因而惯性系的度规相同,space-time 线元的形式完全一样。

现代宇宙学的基础就是广义相对论,所以现代宇宙学的一个基本观念就是真空极限速度只在局部测量是光速,在 A 测量远处的 B 点的光速,则完全可以不是 A 点的光速,这是现代宇宙学的共识。现代宇宙学的另一个共识,就是除了没有物质没有宇宙常数的理论上的假想空间,真实宇宙不存在全局观测者。非惯性系即使有同一的 space-time 单位,也没有全时间、全空间统一的钟和尺。因此测量光通过非惯性系某 space-time 点的速度,只能用当地、当时的钟和尺。故测量只能在该点足够小的 space-time 邻域中进行,否则毫无意义。光速变与不变也只能在这个条件下判断,如果真空光速不变也适用于非惯性系,意味着光传播速度与非惯性系中的 space-time 点无关,与传播方向无关,与非惯性系相对光源的运动状态无关,而且其数值与惯性系相同。由实验检验真空光速不变原理适用于非惯性系几乎不可能。因为按理论的要求,测量只能在光通过 space-time 点的无限小的邻域中进行。其次,惯性系运动的状态只有一种,而非惯性系千变万化,即使同一非惯性系的每一个 space-time 点也不相同,无法通过实验去验证每一种非惯性系的每一个 space-time 点上的

真空光速不变。然而可以依据理论自恰原则给予判断，把真空光速不变原理推广到非惯性系是自然的。详细证明过程请参阅【1】

参考文献:

【1】王仁川 著 《广义相对论引论》49——57页。

### 3、真空光速不变性原理与相对性原理的关系

在相对论中，狭义相对性原理是大前提，而真空光速不变原理是小前提。在狭义相对性原理的前提下，所有惯性系之间的时空变换只有两个解：一是伽利略变换；二是具有公共正值的  $hh$ -洛伦兹变换。至此，真空光速不变原理在相对论中的作用已十分清楚，它仅是能够把这些变换群中的某个群分离出来，与相对性原理相协调、但与伽利略变换群不协调，并且它还具有定量性质的一种现象。“能量具有质量”这句话与伽利略变换群不协调，决定了同时性的相对性，但不具有定量的性质，因而它只决定了所有惯性系之间必定是以公共正值的  $hh$ -洛伦兹变换相联系。相对论早期用相对论质增或是质能公式、或是速度最大定理取代真空光速不变原理来建立洛伦兹变换的文献很多，Einstein 光速恒定原理：在“静止”坐标系统中，光线无论从静止物体还是从运动物体上发射出来，都以确定的速度  $c$  运动。

这条原理是我们认识自然界的基础，由光速恒定原理，我们将推导出洛伦兹变换，而“相对性原理”则是光速恒定原理的自然推论。通常认为相对论具有两条基本原理，这是不正确的。关于这个问题我国著名数学家华罗庚教授早就指出：“1946年作者研究矩阵几何学时，用了一个方法，这方法可以用来处理  $n$  维球空间的基本定理，也就是用球相切性可以推出球几何学的基本定理，也就是不必用变换的解析性，甚至连续性，就可以推导出其变换群是球几何学的 Lie 群，Loguerre 群。这几只讲三维空间的球几何学，其原因是一方面比较具体，易于接受，另一方面企图使这一成果能为一些物理工作者注意。实质上三维的球几何学就是狭义相对论的另一表达方式，而这点往往未被认识。例如 1961 年，В·А·Фок写的《Теория про сем рансмба, времена и теромения》一书（有中译本，1965 年，科学出版社），书中仍旧用的是 Riemann 几何、解析群论的老路子，而中、英、德等文的译本中也都未注意到这一点，而加以应有的注记。

对狭义相对论来说，原有两个假设：(A)、相对性原理中要求匀速直线运动还是匀速直线运动。(B)、真空光速不变原理是假设光以常速  $c$  作直线运动。

我们现在的处理方法是有了真空光速不变原理，就可以推出 Lorentz 群了，就是相对性原理中要求匀速直线运动还是匀速直线运动是推论而不是假设。这给我们提供了方便，如果要验证或推翻上述两点，只要用实验来检验真空光速不变性就够了”。【1】

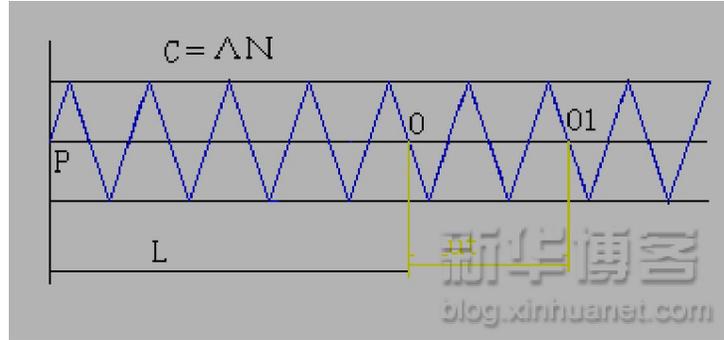
参考文献:

【1】华罗庚，《从单位圆谈起》，第 103 页，科学出版社，1977 年。

### 4、根据真空光速不变原理推导多普勒效应公式

下面是梁显进先生的研究-----据《光粒子说》：实际光速  $C$  相对并决定于光源；根据《光波说》：实际光速  $C$  相对并决定于以太。据此设：光源和以太相对静止，则实际光速  $C$  相对并决定于光源或以太；光的实际频率为  $N$ ，实际波长为  $\Lambda$ ， $C = \Lambda N$ 。

根据真空光速不变原理，设：光速  $c$  相对并决定于观测者，与光源和以太都无关；光频率为  $\nu$ ，光波长为  $\lambda$ ， $c = \lambda \nu$ ，如图，设：光源静止于  $P$  点，观测者以速度  $u$  远离光源，则  $C = c + u$ ；零时刻光从  $P$  点发出，观测者在  $O$  点， $PO = L$ ； $t$  时刻观测者运动到  $O_1$  点，光传播到  $O_1$  点。因为  $PO_1 = L + ut = Ct = (c + u)t$ ，所以  $\Lambda N = \lambda \nu + u$ ，整理得： $\lambda \nu = \Lambda N - u \dots \dots \dots \textcircled{1}$ ，在  $t$  时间内，观测者越过（减少）的波长数为  $ut / \Lambda$ ，减少的频率数为  $ut / \Lambda$ ，所以单位时间内减少的频率数为  $u / \Lambda = (C - c) / \Lambda = N - \nu$ ，所以  $\nu = N - u / \Lambda \dots \dots \dots \textcircled{2}$ ，当观测者远离光源时， $u = C - c > 0$ ， $N - \nu > 0$ ，产生红移。当观测者靠近光源时， $u = C - c < 0$ ， $N - \nu < 0$ ，产生紫移。



### 5、相速度与群速度

奥地利物理学家哈斯认为，光速是粒子机械运动速度的极限，但是机械波的传播速度可以超过光速，其描述公式为  $V_u = c^2/u$ ，式中  $c$  为光速， $V$  为机械速度， $u$  为与机械速度相伴产生的波动速度。在量子力学中，由于进入原子因的波包前端早已触发了原子的跃迁，群速度超过光速就不足为奇了。1932 年，贝尔实验室发现“光子在穿越势垒时不需要任何时间”。1991 年，意大利国家电磁波研究院做了一个实验，他们使一束微波通过波导管。随着波导管的加长，他们发现有一部分微波以超光速穿过了波导管。奥地利维也纳理工大学也做了类似实验，他们用高频大功率激光脉冲实现高精度时间解析后发现，不管势垒有多厚，光子穿越其间的时间都是固定的。美国加州大学赵雷蒙等人利用一种新发明的、极其巧妙的干涉仪，准确地测量出光在一种势垒中的速度是真空光速的 1.7 倍。

因为波粒二重性不仅光子有，而且任何微观粒子都具有波粒二重性，任何一个微观粒子都具有质量  $m$ ，

$$m = \frac{hf}{c^2}, \quad (1.1)$$

光子的电磁质量

上式(1.1)中  $h$  为普朗克常数， $f$  为光子的频率， $c$  为光速。实验表明上式(1.1)也适用于任何一个微观粒

$$f = \frac{mc^2}{h}, \quad (1.2)$$

子，由式(1.1)可推出任何一个微观粒子表现的波特性的频率为

$$\lambda = \frac{h}{P} = \frac{h}{mv}, \quad (1.3)$$

验也表明任何一个微观粒子表现的波特性的波长为

上式(1.3)中  $P$  为粒子的动量， $v$  为粒子的运动速度。那么这种表现出粒子波动特性的波（德布罗意波）

$$V = f\lambda = \frac{c^2}{v}, \quad (1.4)$$

的波速为，因为粒子的运动速度  $v$  是低于或等于光速  $c$  的，所以  $c^2/v \geq c$ ，即粒子的德布罗意波的波速是可超光速的。其实，这是群速度。对于微观粒子

$$\omega = \frac{\omega_0}{\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (2.1)$$

的德布罗意波的波的时间频率

$$\beta = \frac{v}{c}, \quad (v \text{ 为粒子运动速度, } c \text{ 光速。})$$

$$k = \frac{2\pi}{\lambda} = \frac{2\pi f}{V} = \frac{\omega}{V} = \frac{v\omega_0}{c^2\sqrt{1-\beta^2}}, \quad (2.2)$$

速度， $c$  光速。) 德布罗意波的波的空间角频率

从式 (2.1) 与 (2.2) 可求得德布罗意波的波速

$$v = \frac{\omega}{k} = \frac{\frac{\omega_0}{\sqrt{1-\beta^2}}}{\frac{v\omega_0}{c^2\sqrt{1-\beta^2}}} = \frac{c^2}{v} \geq v, \quad (2.3)$$

。因为从(2.1)与(2.2)式知  $\omega$  与  $k$  都是  $v$  或  $\beta$  的函数，现在我们来分析一下德布罗意波的波的波速变化的动态情况，对(2.1)式与(2.2)式求微商（导数）得

$$\frac{d\omega}{d\beta} = \frac{d \frac{\omega_0}{\sqrt{1-\beta^2}}}{d\beta} = \frac{\beta \omega_0}{(1-\beta^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2.4)$$

$$\frac{dk}{d\beta} = \frac{d \frac{v\omega_0}{c^2\sqrt{1-\beta^2}}}{d\beta} = \frac{\omega_0}{c(1-\beta^2)^{\frac{3}{2}}}, \quad (2.5)$$

那么从式(2.4)与(2.5)得，时间角频率  $\omega$  相对于空间角频率  $k$  的瞬时变化速率应为

$$\frac{d\omega}{dk} = \frac{\frac{d\omega}{d\beta}}{\frac{dk}{d\beta}} = c\beta = c \frac{v}{c} = v, \quad (2.6)$$

德布罗意发现德布罗意波是他一项伟大的贡献，他预期要找出德布罗意波与粒子运动速度的关系，他通过复杂的数学推导找到了式(2.6)，他把德布罗意波的波速  $V$  称为“相速度”，把德布罗意波的波的时间角频率  $\omega$  相对于空间角频率  $k$  的瞬时变化速率  $d\omega/dk$  称为“群速度”。

光速极限，简单说来就是信息的传递速度不得大于时空的极限速度——光速，而量子力学的非定域性是不能用来传递信息的，这是量子力学的一个基本原理。

#### 6、“玻色-爱因斯坦”凝聚态简介

现在国际上最热门的物理实验领域是对“玻色-爱因斯坦”凝聚态的研究。这里简要描述一下实验现象：……

当原子冷却到极低的温度时，会发生不可思议的变化。原子的尺寸会增大几千倍，原来像镜面一样清晰的表面变得模糊不清了，彼此可以像幽灵一样一穿而过，而不发生任何偏转。成千上万个原子可以重叠成一个较大的球体，该凝聚体有很多奇特的性质，如超流动性等等……科学家们让光穿过这种凝聚体，发现光在这种凝聚体中的传播速度只有十几米每秒，几乎和自行车的速度相仿……

**笔者认为，上述实验说明了光的电磁本质，光与原子电磁作用导致光速减慢。**

**附录：**中新网 2015 年 1 月 27 日电 据外媒 26 日报道，根据爱因斯坦的相对论，在任何参照系中，光在真空中的传播速度都是一个常数。但是科学家最近却成功让光在自由空间（free space，完美真空）中的速度降了下来。英国格拉斯哥大学和赫瑞瓦特大学的研究人员进行了一项实验。在实验中，科学家安装了一个特殊“隔层”，单个光子在通过这一装置时，形态会发生改变，而且速度出现了下降。奇妙的是，在通过这一特殊“隔层”之后，即便重新回到自由空间，光子仍会以较低的速度前行。这一实验说明，光的构造可能比人类知道的更为复杂。根据爱因斯坦的理论，光在自由空间中的速度约合每秒 30 万公里。在经过水、玻璃等介质时，光速会出现下降，但只要再次返回自由空间，光速就会回归正常。研究人员称，“降低光速”的方法可以被用于更多的物理学实验中，人类或能解开更多的自然界之谜。

## 第四章 关于超光速的争论

### 1、“超光速”的定义

一切物体都是由粒子构成的，如果我们能够描述粒子在任何时刻的位置，我们就描述了物体的全部“历史”。想象一个由空间的三维加上时间的一维共同构成的四维空间。由于一个粒子在任何时刻只能处于一个特定的位置，它的全部“历史”在这个四维空间中是一条连续的曲线，这就是“世界线”。一个物体的世界线是构成它的所有粒子的世界线的集合。

不光粒子的历史可以构成世界线，一些人为定义的“东西”的历史也可以构成世界线，比如说影子和光斑。影子可以用其边界上的点来定义。这些点并不是真正的粒子，但它们的位置可以移动，因此它们的“历史”也构成世界线。

四维 space-time 中的一个点表示的是一个“事件”，即三个空间坐标加上一个时间坐标。任何两个“事件”之间可以定义 space-time 距离，它是两个事件之间的空间距离的平方减去其时间间隔与光速的乘积的平方再开根号。狭义相对论证明了这种时空距离与坐标系无关，因此是有物理意义的。

space-time 距离可分三类：类时距离——空间间隔小于时间间隔与光速的乘积；类光距离——空间间隔等于时间间隔与光速的乘积；类空距离——空间间隔大于时间间隔与光速的乘积。一条光滑曲线，“局部”地看，非常类似一条直线。类似的，四维 space-time 在局部是平直的，世界线在局部是类似直线的，也就是说，可以用匀速运动来描述，这个速度就是粒子的瞬时速度。光子的世界线上，局部地看，相邻事件之间的距离都是类光的。在这个意义上，我们可以把光子的世界线说成是类光的。

任何以低于光速的速度运动的粒子的世界线，局部的看，相邻事件之间的距离都是类时的。在这个意义上，我们可以把这种世界线说成是类时的。而以超光速运动的粒子或人为定义的“点”，它的世界线是类空的。这里说世界线是类空的，是指局部地看，相邻事件的 space-time 距离是类空的。

因为有可能存在弯曲的 space-time，有可能存在这样的世界线：局部地看，相邻事件的距离都是类时的，粒子并没有超光速运动；但是存在相距很远的两个事件，其 space-time 距离是类空的。这种情况算不算超光速呢？

这个问题的意义在于说明既可以定义局部的“超光速”，也可以定义全局的“超光速”。即使局部的超光速不可能，也不排除全局超光速的可能性。全局超光速也是值得讨论的。

总而言之，“超光速”可以通过类空的世界线来定义，这种定义的好处是排除了两个物体之间相对于第三观察者以“超光速”运动的情况。

电磁场的运动速度会发生变化，强引力场附近的引力红移就是一个最明显的例证，还有转动黑洞周围的拖曳效应导致的星光偏折，这些都是天文学上观测了很久的东西。

附录：凤凰科技讯北京时间 2013 年 5 月 3 日消息，国外媒体报道，一直以来我们都认为光速是恒定的，但目前有些科学家正在探索光速会发生改变的可能性，这种改变或可能是宇宙空间真空性的结果。光速的定义对某些领域来说，具有更广义的内涵，例如宇宙学和天文学，这些领域假定光随着时间是保持恒定速度的。例如，当测量精细结构常数（阿尔法）时——它定义了电磁力的强度——就会涉及光速。不同的光速将会导致分子键以及核物质本身密度的改变。

光速不恒定意味着我们对宇宙大小的估计可能也是不准确的，但这并不意味着宇宙的速度极限能够超过光速，这是因为某些物理学理论，例如相对论的效应是光速的结果。

这两篇发表在欧洲物理学期刊 D 上的文章试图论证光速起源于空间本身的量子特性。两篇文章提出了略微不同的机制，但核心观点都是基于同一假设，也即基本粒子与辐射会发生相互作用，当这种相互作用发生变化时，光速也会发生改变。两个理论都认宇宙并非空洞的，而是由大量“虚粒子”组成，它们在几分之一秒的时间内会瞬间存在或消失。

### 宇宙真空与光速

第一篇研究是由法国巴黎第十一大学的物理学家马塞尔·乌尔班（Marcel Urban）负责的，该研究主要调查了宇宙真空，后者往往被认为是虚空的空间。定义亚原子粒子和所有微小事物的量子物理学定律认为，宇宙的真空其实是由大量例如夸克粒子的基本粒子组成，它们被称为“虚粒子”。这些物质粒子总是与相应的反粒子成对出现，存在瞬间便彼此相碰撞，当物质和反物质粒子相遇时，两者会立即湮灭。

光子在穿越宇宙空间时，会被虚粒子捕捉并重新放射出来。乌尔班和他的同事提出，这些粒子的能量——尤其是它们所携带的电量——会影响光的速度。由于光子撞击粒子时它所携带的能量是随机的，它对光子移动速度的影响也将各不相同。

因此，一定范围内光移动的速度也是不恒定的，尽管这种影响效应可能非常微弱，平均每平方米真空对光速的影响大约为 0.05 飞秒，一飞秒是一千万亿分之一秒。

研究人员表示，为了确定这微小的浮动，他们可以测量光在长距离范围内是如何分散的。有些天文现象，例如伽马射线爆发，从非常远的距离产生了辐射脉冲，因此可以检测到产生的辐射。研究作者还提出，利用激光在相距 91 米的镜子之间来回反射，并利用光束在镜子之间进行多次反射，从而寻找其中的微小变化。

### 粒子种类和光速

第二篇文章提出了另一种不同的机制，但结果大致相似，也即光速并非恒定的。德国埃朗根马克斯普朗克光学物理研究所的物理学家格尔德·勒克斯 (Gerd Leuchs) 和路易斯·L·桑切斯-索托 (Luis L. Sánchez-Soto) 认为，宇宙存在的基本粒子种类的数量可能是影响光速的重要因素。

勒克斯和桑切斯-索托表示，根据他们的计算，宇宙应该存在 100 种带电的粒子种类。目前统治粒子物理学的定律，也即标准模型，只定义了九种粒子：电子、 $\mu$  介子、微介子、六种夸克粒子、光子和玻色子。

所有这些粒子都对标准模型来说都至关重要，因为它们都带电。一种名为阻抗的特性依赖于所有这些带电量之和。阻抗又依赖于真空的介电常数，或者称它抵抗电场的能量，以及磁导率，也即它们支持磁场的能量。光波是由电波和磁波共同组成，因此改变这些特性（介电常数和磁导率）将会改变所测量的光速。

“我们测量了由这些短暂的虚拟不稳定基本粒子所引起的真空的介电常数和磁导率，”桑切斯-索托这样说道。“然而，结果发现，通过这样简单的模型我们可以辨别那些常数包含不同类型的带电粒子-反粒子对的平等分布。”

两篇文章都总结称光与虚拟粒子-反粒子对会发生相互作用。在勒克斯和桑切斯-索托的模型中，真空的阻抗（或可能加快和减慢光速）取决于粒子的密度。阻抗与光的电场与磁场比率有关；每一个光波是由电波和磁波共同组成，测量的数值，以及空间对磁场的介电常数，决定了光速大小。

然而，有些科学家对此表示怀疑。斯坦福直线加速器中心 (SLAC) 国家加速器实验室的粒子物理学家杰·瓦克尔 (Jay Wacker) 表示，他对研究所使用的数学方法并不是很确定，两篇文章中科学家所采用的数学工具似乎并非大多数科学家所常用的。“进行这类研究最合适的工具是费因曼图，”瓦克尔说道。“（光速）的确是个有趣的问题，”他补充说道。但两篇研究所使用的工具似乎并不足以调查这一问题。

另外一个存在的问题便是，是否真的存在大量标准模型以外的粒子？如果事实如此，那么这篇文章需要谨慎的修改。但目前为止这些预测还是被证实是正确的，尤其是希格斯玻色子的发现。但这并不意味着还有其它别的粒子等待发现——如果它们的确存在，那么它们的能量可能远超过粒子加速器目前所能获得的，此外这些粒子将非常重，科学家或可能在别处发现它们的存在。（编译/严炎刘星）

## 2、超光速对于宇宙探索的意义

### (1) 宇宙探索与超光速

2010 年 10 月 1 日我国发射了嫦娥 2 号探月卫星，3 年以后还将发射嫦娥 3 号，将来也会开展对火星和金星的探测。英国行星学家曾经预测，在我们的银河系至少有不少于 3.5% 的星球可能存在生命，而 2010 年 9 月，美国天文学家们的一项新发现似乎证明了他们的这一理论。卡耐基华盛顿研究所和加州大学的科学家们，用凯克-1 光学望远镜——目前世界上最大的光学望远镜，发现距离太阳系 20 光年远的天秤座星群中存在着一个表面覆盖着液态水以及具有引力的天体。科学家给这个天体命名为“581g”，它围绕红矮星葛利斯 (Gliese) 581 公转，自转周期为 37 天。这是科学家迄今为止发现的最适合生命存在的地外星球。然而，用现有的技术到达那里至少需要 35 万年之久。不论是从国家长远发展的战略，还是人类探索地外文明的需要考虑，进行超光速研究都有非常重要的意义。

2007 年 12 月 26 日宋健院士在写给国防科技大学谭暑生教授的信中有几句话：“说光速不能超过使航天人很不安。有人讲逛遍太阳系后我们无事可做了，怎么宇航？”另一位航天专家，中国运载火箭研究院 12 所的老科学家林金教授在 2010 年 10 月 16 日召开的第三届现代基础科学发展论坛上作学术报告时指出，传统的相对论理论对航天领域中的有关问题未能给出满意的答复。他用惯性导航理论进行计算证明，飞船相对于惯性坐标系做加速飞行只要时间够长，飞船相对于惯性系的速度可以超过光速。

### (2) 类星体的“超光速”

1960 年，射电天文学家用当时世界上最大的望远镜观测到一个叫 3Cg 和一个叫 3C273 的射电源。结果发现它们都是很暗的蓝色的星，尽管看起来象恒星，但又不是通常的恒星。天文学上称它们为类星射电源，简称类星体。1963 年，科学家施米特重新研究了 3C273 的光谱，发现了它有红移现象，且红移值很大。当一颗恒星背我们而离去时，从地球上看来，恒星的光波频率会降低，波长会变长。这就是红移现象。红移值越大，则离去速度越大，与我们距离越远。目前，人们对类星体的认识主要是：①类星体距离我们很远。最早

发现的类星体 3C273, 红移值仅为 0.158, 而它距我们也有 23 亿光年。②类星体无离速度极大。有一颗类星体 OQ72, 其红移值为 3.53, 速度每秒钟高达 270000 公里。③类星体的亮度极为惊人。如 3C273 亮度为 12.8 星等, 而太阳若放到其位置上, 我们根本就观测不到。此外, 类星体的体积很小, 直径仅有普通星系的  $1/100000 \sim 1/1000000$ 。更令人惊奇的是, 类星体的速度居然超过了光的速度。1972—1974 年美国一些天文学家发现塞佛特星 3C120 自身膨胀的速度达到光速的 4 倍。后来, 天文学家用分辨率极好的长基线射电干涉仪, 又发现了 10 个类星体的两子源分离速度均达到光速的 7 到 8 倍。1977 年以来的发现证实, 还是那颗 3C273, 它的内部有两个辐射源, 并且它们还在相互分离, 分离的速度竟高达每秒 2880000 公里, 是光速的 9.6 倍。不仅如此, 继此之后, 人们还相继发现了几个“超光速”的类星体。简直不可思议! 因为迄今为止地球上的人类普遍认为, 光速是不能超越的, 然而上述发现又是那样的奇特, 不能不让人感到困惑不解。

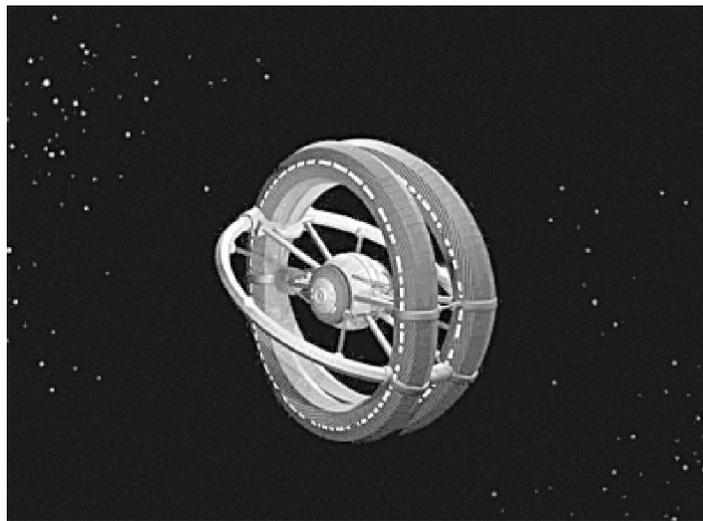
(3) 哈勃望远镜观测到一个超巨星以超光速膨胀

V838 莫诺色罗蒂斯星体强烈爆发——这组由美国航空航天局哈勃望远镜拍摄的照片显示一个非同寻常的星体爆发产生的光象水波一样在星体附近回荡。该星体名为 V838 莫诺色罗蒂斯(Monocerotis), 离地球两万光年, 位于我们银河系的独角兽(Unicorn)星座, 是一个罕见的正在爆发的超巨星(supergiant)。超巨星是一类大质量, 高亮度的星体, 质量一般是太阳的几百倍以上, 亮度也比太阳大得多。这次的异常爆炸发生在 2002 年 1 月, 在短短的四十多天里, 该星体的亮度增长了一万倍, 成为我们银河系中亮度最大的星体。照片中可以见到从这一奇异星体发出的光正在向四周的空间扩散, 在碰到四周包围着该星体的尘埃后又反射回来, 构成一副绚丽的、状似牛眼的多色图样。关于这一观测的研究结果刊登在 3 月 27 日的《自然》杂志上, 《科学》杂志在同一天发表了有关评论。照片显示从 2002 年 5 月到 12 月, 星体景象由于星体四周不同部分依次被照亮而发生了显著的变化。天文学家把这种效应称为“光回声”。星云中的不同颜色反映了星体颜色随着星体爆发的改变。在这段爆发过程中, 该星云的直径迅速由 4 光年增加到 7 光年。7 个月内直径增大了 3 光年, 其膨胀速度为 4.3 倍光速。目前科学家们对这次爆发的原因还不清楚, 天文学家称以前从没有观察到过类似的星体。

### 3、量子力学中的超光速现象

英国科学刊物《New Scientist》7 月 3 日说: “美国科学家 S.Lamoreaux 对在西非的核反应堆的实验数据所作分析表明, 在过去 20 亿年中精细结构常数 ( $\alpha$ ) 减小了  $4.5 \times 10^{-8}$ , 故在过去的光速  $c$  比现在略大”。

物理学界都知道, 处于纠缠态的两个光子之间具有超光速相互作用, 测定一个光子的自旋, 远处的另一个光子自旋立即相应改变。爱因斯坦称其为“怪异的超距作用”(spooky action at a distance)。瑞士日内瓦大学的一个研究组在光子纠缠实验中, 测得其速度至少超过光速一万倍。物理学是客观的, 纠缠光子之间具有超光速作用, 因被许多实验证明为客观存在而无法否定。早在 2000 年, Gisin 小组在瑞士的两个村庄(相距 10km)之间进行实验; 他们送出若干对的纠缠态光子, 在大约 5ps 时间间隔完成了测量, 据此算出纠缠态影响的传播速度是  $107c$  量级 ( $c$  是光速)。考虑到纠缠态影响相对于别的参考系(例如大爆炸后的微波残余)会有一固定速度, Gisin 等找出这个超光速速度是  $104c$  以上。



最近十几年来, 各国科学家做的一些超光速实验, 主要是用了两个原理, 一个是反常色散, 另一个是消

失态。正常色散是指物质的折射率随频率提高而加大，反常色散是指折射率随频率提高而减小。对于波的群速度而言，正常色散时是亚光速，反常色散时则有可能出现超光速。消失场或者消失波的特点是随距离增加衰减很快但相位基本不变，它可能存在于截止波导中，也可能存在于双三棱镜的间隙中。

上世纪 80 年代中期，有人提出了截止波导的量子理论模型，认为可以把截止波导当作势垒。90 年代初德国科隆大学教授尼米兹根据这个思想做成了群速超光速实验。1991 年，意大利国家电磁波研究院做了一个实验，他们使一束微波通过波导管。随着波导管的加长，他们发现有一部分微波以超光速穿过了波导管。奥地利维也纳理工大学也做了类似实验，他们用高频大功率激光脉冲实现高精度时间解析后发现，不管势垒有多厚，光子穿越其间的时间都是固定的。1993 年美国科学家加州大学赵雷蒙等人做成的一个实验对我们很有启发等人利用一种新发明的、极其巧妙的干涉仪，他们让光子通过一个势垒，使光子的速度在光速的基础上又增加了 70%。

1965 年，贝尔研究了对两粒子同时测量的各种结果之间可能存在的各种相关性，他用数学不等式的形式表达了寻找到的这类测量结果相关程度的理论限制。贝尔认为，可以想象存在着一个参照系，其中的事物速度比光快。实际上，在 EPR 实验中包含着，景象的背后有某种东西比光的行进更快。要理解这段话，莫过于把 EPR 效应称为纠缠效应。那么是否可以利用纠缠效应使信息的传输速度大于光速呢？由于量子法则的限制，对光子的每次局域测量在孤立地考虑时，产生的结果是完全随机的，因此不能携来自远处的信息，研究人员从中得知的仅仅是根据远处测量的物体了解那里测量结果的概率是多少。各种超光速实验的情况证实了这一点。例如 20 世纪 90 年代超光速的实验此起彼伏，1995 年德国人 G·Nimtz 等宣布做的实验，用音乐对微波源调制后，使音乐以  $4.7c$  穿过位垒。以上都是测量获得的某个超光速实验的结果，数据表明的多样性，说明超光速仅是一种概率，并且成功率很低。因为，超光速实质是一种“贝尔态测量”。

最近美国科学家在量子力学领域里做的一些实验，也发现了明显的超光速效应，这个发现在全世界引起了轰动。加利福尼亚大学的粒子物理学家亨利·斯塔普，在仔细研究了这些显示超光速效应的实验结果以后，只好说：“量子力学的确好象要求某种超光速联系”。美国物理学家杰克·萨弗蒂为了检验这些使人吃惊的实验，利用数学计算重现了量子力学实验的超光速效应。他最后说，他的数学计算表明，不仅确实存在一个超光速通讯的渠道，而且人类还能利用超光速来获得意想不到的好处。

意大利科学家 V.de Sabbata 在第 242 次香山科学会议上曾作了题为“强子物体内的超光速可能性及量子引力问题”的报告。实际上，早在 1981 年 V.de Sabbata 和 M.Gasperini 即在《Lett. al Nuovo Cimento》上发表文章，题为“光速可变性引起的自发对称性破缺”。文章涉及 Higgs 场、弱相互作用、Yang-Mills 方程、弯曲时空等多个领域；但其主要内容却是，在假定光速是一个变量的条件下，引用强引力耦合系数（strong gravity coupling constant）概念进行推导，结果算出在 hadron 宇宙内“光以  $75c$  的恒定速度传播”。文章认为，在早期宇宙时光速比  $c$  大得多；它随时间而变，逐渐降低到现在的值（即  $c$ ）。

2000 年 6 月，江兴流教授在《科技导报》上发表文章“电化学异常现象与挠场理论”。在 242 次香山科学会议上，他重申“挠场传播是超光速的”。早年，Einstein 曾和 Cartan 一起研究，搞所谓的挠场（Torsion field）理论。这是因为广义相对论在处理时空性质时只考虑了曲率，而未考虑挠率。此外，在引力理论中往往只重视物质的能量，而忽略了物质的自旋。因而，在开始时挠场理论的出现仿佛只是对广义相对论的补充和发展。但在近年来，这方面的研究发挥到别的方面，例如对真空中零点能（zero energy）的提取；因而在新世纪到来时重新引起人们的注意和重视。反映时空挠曲的理论由于对自旋的重视又被称为自旋场（Spin field），它和引力场、电磁场相并列而被看作是物理真空在不同条件下的不同表现。俄罗斯科学界认为，挠场产生于物体的自旋，它对物体的作用也只限于自旋状态的改变。由于任何物质均表现出综合的自旋，故物质均有挠场。这方面的研究工作，中国科学界还是很生疏的。值得注意的是，挠场的传播速度据说是  $V > 109c$ ；这种情况是量子力学中非局域性（Non-locality）的表现之一。

2001 年，焦克芳研究员曾采用磁挠场的观点来解释王力军的超光速实验。他认为，一般情况下铯原子气体是正常色散介质；但在外加磁场诱导下，双原子分子中两个电子将不同（一个与外磁场同向、另一个反向）。这时如用光脉冲通过的方式提供适当能量，将使上述二者发生跃迁而到达高能激发态。由于在单极耦合的反成键态周围存在磁挠场，对有了磁性的粒子产生加速作用。王力军实验成功的关键是维持磁挠场不消失，通过一定方法保持反成键态的连续存在。

附录 1：2007 年 08 月 16 日 14:16 来源：法制晚报

德科学家声称光量子穿越障碍速度快得惊人 违背爱因斯坦“光速无法超越”理论 挑战相对论 光量子超光速

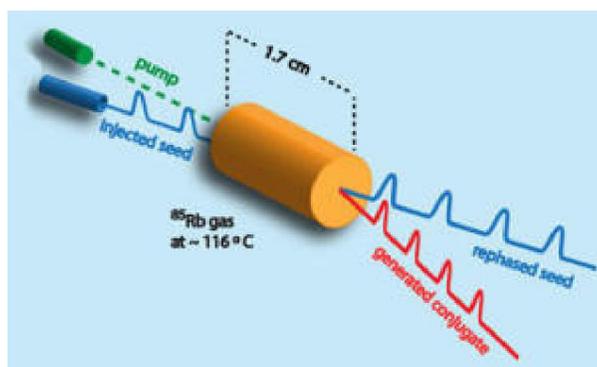
他们通过将光量子在两块间距为一英里的棱镜中来回反射并计算时间加以验证

本报讯（记者王燕）在爱因斯坦的相对论中，光速是一个不可超越的速度。但即将出版的美国《新科学家》杂志刊文指出，两名德国物理学家声称，他们可以使光量子的前进速度超过光速，这对狭义相对论中所说的“没有任何物体在任何环境下可以超越光速”的说法提出直接挑战。据悉，这两名物理学家分别名为 Günter Nimtz 和 Alfons Stahlhofen，他们都是科布伦茨大学的物理学家。他们一直在研究一种叫做“光子隧道”的现象，所谓的“光子隧道”是指一种微粒穿过一个显然不可穿越的障碍的现象。这两名物理学家声称，他们可以让光量子在瞬间穿过很多种大小的物体，从几毫米到几米，从而得出结论：光量子的穿越速度快得惊人，超过光速。为了证明这一理论的正确性，这两名物理学家进行了一系列实验，他们让微波光量子在两块棱镜间瞬间穿过，两块棱镜间的距离约有一英里长。

当把两块棱镜放置在一起时，光量子如预期般笔直地穿过棱镜。当把棱镜分开放置时，大部分光量子从它们遇到的第一块棱镜上被反射出去，然后被探测器捕捉到。但是一部分光量子还是会像穿过“隧道”一样从两块棱镜中的空隙中穿过，就像是把棱镜放置在一起时一样。科学家指出，虽然这些没有被反射的光量子的行进距离要比被反射的长，但它们到达探测器的时间和被反射的光量子到达的时间精确一致，所以科学家认为光量子的行进速度超过了光速。

（责任编辑：张寇）

## 附录 2：科学家研发出超光速脉冲



据外媒消息，美国国家标准和技术研究所的研究人员研发出一种全新方法，可以产生超光速脉冲。相关研究成果发表在国际权威学术期刊《物理评论快报》（PRL）上。

这种称作“四波混频”（four-wave mixing）的方法，有望被用于缩短信号通讯时间和研究量子关联传播。

根据爱因斯坦狭义相对论，光在真空中的传播速度是宇宙速度极限。但是此理论有一个小漏洞：短脉冲光是和钟声一样以对称曲线形式传播的；波曲线的前端速度不会超过光速，但是波峰可以向前或向后倾斜，因此会导致稍早于或晚于波本身到达的时间。

保罗·列特（Paul D. Lett）及其同事在研究中，通过四波混频方法，向加热小室发送 200 纳秒长的种子激光脉冲。该小室充斥原子铷蒸汽；铷蒸汽放大了种子激光脉冲，将其波峰前移，使其变得“超光速”。

与此同时，种子激光脉冲发出的光束与铷蒸汽互作产生第二束脉冲——共轭脉冲；第二束脉冲的波峰也可以比光速稍快或稍慢。

在此实验中，脉冲波峰比真空中光速快了 50 纳秒。

研究人员称该研究最直接的应用是测量量子失谐。通过测量脉冲之间的量子失谐，研究人员希望确定超光速脉冲在传播和处理量子信息中的作用。（科学网 任春晓/编译）

相关方法：四波混频法

完成人：保罗·列特课题组

实验室：美国国家标准和技术研究所 国家标准和技术研究所—马里兰大学联合量子研究所

### 4、超光速与狭义相对论的关系

《自然杂志》19卷4期的‘探索物理学难题的科学意义’的97个悬而未决的难题：59。超光速佯谬能否解决？60。快子佯谬能否解决？

狭义相对论基于相对性原理及光速不变原理这两个基本前提，旅美华裔物理学家沈志远提出：超光速难道不违反狭义相对论？许多物理学家认为“这并不违反狭义相对论，因为人无法用来传递信息。”人们所感兴趣的超光速，一般是指超光速传递能量或者信息。根据狭义相对论，这种意义下的超光速旅行和超光速通讯一般是不可能的。目前关于超光速的争论，大多数情况是某些东西的速度的确可以超过光速，但是不能用它们传递能量或者信息。但现有的理论并未完全排除真正意义上的超光速的可能性。天文学家在观测河外天体的时候，曾发现有许多双源结构天体其横向分离视运动速度有超光速现象，这种超光速视运动现象实际是一种假象，它是由于天体辐射的光波其波前在空间中传播速度与天体运动状态有关导致的一种视运动速度失真现象。

可是光子确实用来传递信息，否则纠缠光子怎么会“知道”远处的另一个光子自旋改变了呢？纠缠光子之间相互作用速度超过光速，这难道不违反狭义相对论？

美国的物理学家欧列克萨·迈伦·比兰纽克和 E·C·乔治·苏达山在 1962 年，吉拉德·费恩伯格在 1967 年分别提出：超光速运动的粒子不违反相对论物理学的任何基本准则。这样一个假设的粒子可能放出类似于轮船涡流的契伦科夫辐射，因此可能被探测到。超光速粒子的质量可能是假想的，就比如-1 的平方根是假想的一样。

1978 年 R.M. Santilli 创立了强子力学 (Hadronic Mechanics, HM)。它与量子力学 (QM) 不同之处在于，QM 把基本粒子视为点状粒子，互相之间总有一定距离；而 HM 视基本粒子为有一定尺寸的延展性粒子，即波包；粒子间可以有一定距离，但也可以相互重叠和接触。以 Dirac 方程为例，尽管它可以描述例如电子这种单粒子的运动，却无法描述组合在一起的（强子）粒子，例如质子和中子。2005 年 6 月 21 日~23 日在瑞典 Karlstad 大学召开了第 18 届强子力学国际讨论会，在会上 A.O. E. Animalu 教授论述了强子力学的主要特点，并指出“存在着扩展了相对论的情况，即真空中速度超过光速的状况”。

2005 年 6 月 18 日出版的《New Scientist》发表了 M.Buchanan 的文章“Double jeopardy”。该文说，近年来国际科学界针对 Bell 不等式与量子力学的矛盾问题做了新的实验，有瑞士的 N.Gisin 小组，美国的 P.Kwiat 小组和 D.Wineland 小组等。科学家们重申“针对 Bell 不等式的实验有很大的重要性”；并指出实验结果均与不等式相反，无一例外地证明了量子力学 (QD) 的正确。这是近 20 年来 (1985~2005 年) 的研究成果，表明相对论对时空的局域实在论描述有缺陷。例如，相对论假定“nothing can travel faster than light”是不妥的。由于一系列实验（其中有的实验艰难而出色，例如 Gisin 小组利用埋在 Geneva 湖的湖水下的光缆，把光子送到 25km 以外）均违反 Bell 不等式，使“超光速信号能在粒子间传送”得到确认。实际上，几年来的实验已证实量子纠缠态的影响以超光速（不是无限大）的速度传送。

附录 1：“超光速实验”引起全球关注 {转载}

2001 年 5 月起，一个消息在大报小报上炸响，至今还在网上延烧，那就是华裔科学家王力军主持的“超光速实验”。如果“超光速”得到验证，那就意味着现代物理学的基础理论爱因斯坦相对论的瓦解，因为相对论的基础之一是没有任何东西可以超越光速。然而 6 月份，在美国新泽西州 N E C 研究所做研究员的王力军站出来澄清了，所谓“超光速”是媒体以讹传讹的报导。他的实验只是利用铯原子气体的反常色散现象，成功地在实验中使激光脉冲群速度达到真空光速的 310 倍之多。这一现象表明光波群能以“超光速”传播。但凭这种现象并不能“推翻 Einstein 相对论”。

据报导，王力军和他的研究小组采用一种新方法，用激光将通常为 16 种量子状态下的铯原子置于仅一种量子状态之下，组建了一个长 6 厘米的铯原子气室。在气室入口和出口分别放置了探测器，然后将一束持续时间 3.7 微秒的激光脉冲射向气室。观察到在气室出口的探测器相比于真空状态下提前 62 纳秒测到了同样形状的光脉冲。这表明，强烈的反常色散使得脉冲顶在进入气室之前就已离开了气室。光脉冲在铯原子气体中的群速度为光速的 310 倍，脉冲能量及波形在介质传播中无较大改变。

就在王力军将他的研究成果交由《自然》杂志等待发表的期间，该项实验被《纽约时报》于 5 月 30 日抢先报道。其报道的用词震惊全球：“华裔科学家王力军和他的同事成功地打破光速极限，在实验室把光的速度提高了 300 倍。”此后随着各种媒体不断转载转述，标题越来越耸人听闻，描述也越来越与基本事实疏离。如他被描写成“发现超光速”的科学家，其实验“推翻爱因斯坦相对论”。而他发现的“超光速”传输方式，不但可以用来研发“没有时间差距”的电脑运送数据科技，甚至还有可能用来打造“时间飞行器”，进而打破自然界因果规律等等。

看到各种报章报道的王力军感到浑身不自在，6 月初，他在美国媒体上公开说出了自己的苦恼，担心自己会因这些报道而成为科学界的笑柄。王力军说，他的“超光速”研究，其实在过去已被证明过，这在光学研究界亦不是破天荒的发现。

王力军在接受新华社记者采访时解释了“超光速实验”到底是怎么回事。他说，虽然观察到的光脉冲波峰速度超过光速，但这并不意味着实现了信号的超光速传播。光波是有长度的，只有波头的传播速度才可以算是信号的传播速度，作为波峰传播速度的群速度不能用于计算信号传播速度。群速度有可能超光速，但波头的速度是始终超不过光速的，因而与狭义相对论是吻合的。王力军说，他的实验表明，在人工特制的透明介质中，光波群速度可以远远超过真空中的光速，这是自然界见不到的现象。传统物理学认为，任何有质量的物体的运动速度不会大于光速。“尽管这一结论依然正确，但以前被错误地应用于光的领域。我们的实验证明，光的群速度并不为它的真空速度所限，‘超光速现象’也可以在透明介质中发生。”不过他认为，这一现象“不违反狭义相对论的基本原则，也不违背因果律，即事件的原因发生在其结果之前。这种现象并不能用于超光速传递信息或超光速旅行。”

现在新泽西州普林斯顿的N E C基础研究所负责量子光学研究项目的王力军是中国旅美学者。1986年他从中国科技大学现代物理系毕业后，赴美国罗彻斯特大学攻读博士学位。1992年在获得博士学位后，又到北卡罗来纳州的杜克大学做博士后，进行原子物理研究。据报导，1996年间王力军看了加州大学伯克利分校一位赵教授的论文，对“超光速”产生了浓厚兴趣，开始了这方面的探索，曾先后发表了数十篇光学方面的专业论文。除了在新泽西州普林斯顿的N E C基础研究所进行研究工作外，王力军还兼任了美国光学学会权威杂志《光学通信》量子光学与激光光谱方面的专题编辑。

### 5、快子理论简介

费因伯格和苏达山（上世纪中叶物理学家）认为：狭义相对论并不排斥超光速，只是暗示假如真的存在超光速粒子，那么这种粒子将碰到另一种“光障”——速度永远也不能小于或等于光速。而且这些粒子的行为一定很怪异，如：失去能量时速度会变得更快，当能量接近于零时，速度将会变得无限大，他们称这种粒子为“快子”。

超光速理论工作一般从狭义相对论出发，将其推广，求得既适合于慢子(低于光速的粒子)和光子，又适合于快子的相对论理论。据理论上的推测，快子具有奇异的物理性质。它的质量是虚数，它的速度将随能量的耗散而无限增加，当它的能量趋于零时，则速度趋于无穷大。快子一旦产生，就具有大于光速的速度。要使它速度减小，必须供给它能量。如要减小到光速，则必须供给它无限大的能量才行，因此其速度不可能减小到光速或低于光速。快子的负能问题是一个复杂的问题。由于负能量的出现，将意味着任何一个物理系统，因为可能无限地释放快子而处于不稳定状态，系统将无限地增加自己的能量，从而导致永动机的出现。而且，更为使人惊异的是，即使无限地产生快子对，也不会破坏能量动量守恒定律，同时也不会改变真空中的总能量。另外，根据洛伦兹变换，快子从一个坐标系转换到另一个坐标系的过程中，可能改变时间的顺序，即时间倒流。这样一来，也许就要出现像打油诗“年青女郎名葆蕾，神行有术光难追，快子理论来指点，今日出游昨夜归”所描绘的“奇迹”。这两个困难问题虽然可以借助二次说明原理(即应该将一个具有负能量的粒子看作是先被吸收，然后再发射，这样一来，负能量与时间倒流和正能量与时间顺流的物理意义完全一样，因而变换坐标系后物理定律依然不变)来解释，但它并没有解决不变的因果律的问题。另外，快子有可能以无限大的速度传播，因而假若存在着快子，就可能瞬时传递作用信息，似乎又可能回到“超距作用”论的概念上去。

不过，近10多年来，虽说在理论方面和实验方面都作了不少的工作，但至今尚未取得重大突破。要使快子理论与现代物理学理论协调起来，还需要克服相当多的困难。不过，这却有可能迫使人们跳出目前的理论框架，克服早已习惯了的观念，从而产生巨大而深远的影响。

### 6、“超光速”的实例分析

1. 切伦科夫效应 媒质中的光速比真空中的光速小。粒子在媒质中的传播速度可能超过媒质中的光速，此时会发生辐射，称为切伦科夫效应，但这不是真正意义上的超光速，真正意义上的超光速是指超过真空中的光速。

2. 第三观察者 如果A相对于C以 $0.6c$ 的速度向东运动，B相对于C以 $0.6c$ 的速度向西运动。对于C来说，A和B之间的距离以 $1.2c$ 的速度增大。这种“速度”——两个运动物体之间相对于第三观察者的速度——可以超过光速。但是两个物体相对于彼此的运动速度并没有超过光速。在这个例子中，在A的坐标系中B的速度是 $0.88c$ 。在B的坐标系中A的速度也是 $0.88c$ 。

3. 影子和光斑 在灯下晃动你的手，你会发现影子的速度比手的速度要快。影子与手晃动的速度之比等于它们到灯的距离之比。如果你朝月球晃动手电筒，你很容易就能让落在月球上的光斑的移动速度超过光速。遗憾的是，不能以这种方式超光速地传递信息。

4. 刚体 敲一根棍子的一头，振动会不会立刻传到另一头？这岂不是提供了一种超光速通讯方式？很遗

憾，理想的刚体是不存在的，振动在棍子中的传播是以声速进行的，而声速归根结底是电磁作用的结果，因此不可能超过光速。

5. 相速度 光在媒质中的相速度在某些频段可以超过真空中的光速。相速度是指连续的（假定信号已传播了足够长的时间，达到了稳定状态）的正弦波在媒质中传播一段距离后的相位滞后所对应的“传播速度”。很显然，单纯的正弦波是无法传递信息的。要传递信息，需要把变化较慢的波包调制在正弦波上，这种波包的传播速度叫做群速度，群速度是小于光速的。（译者注：索末菲和布里渊关于脉冲在媒质中的传播的研究证明了有起始时间的信号[在某时刻之前为零的信号]在媒质中的传播速度不可能超过光速。）

6. EPR 悖论 1935 年 Einstein, Podolski 和 Rosen 发表了一个思想实验试图表明量子力学的不完全性。他们认为在测量两个分离的处于 entangled state 的粒子时有明显的超距作用。Eberhard 证明了不可能利用这种效应传递任何信息，因此超光速通信不存在。但是关于 EPR 悖论仍有争议。

7. 虚粒子 在量子场论中力是通过虚粒子来传递的。由于海森堡不确定性这些虚粒子可以以超光速传播，但是虚粒子只是数学符号，超光速旅行或通信仍不存在。

#### 8. 量子隧道

量子隧道是粒子逃出高于其自身能量的势垒的效应，在经典物理中这种情况不可能发生。计算一下粒子穿过隧道的的时间，会发现粒子的速度超过光速。（Ref: T. E. Hartman, J. Appl. Phys. 33, 3427 (1962)）一群物理学家做了利用量子隧道效应进行超光速通信的实验：他们声称以  $4.7c$  的速度穿过  $11.4\text{cm}$  宽的势垒传输了莫扎特的第 40 交响曲。当然，这引起了很大的争议。大多数物理学家认为，由于海森堡不确定性，不可能利用这种量子效应超光速地传递信息。如果这种效应是真的，就有可能在一个高速运动的坐标系中利用类似装置把信息传递到过去。Terence Tao 认为上述实验不具备说服力。信号以光速通过  $11.4\text{cm}$  的距离用不了  $0.4$  纳秒，但是通过简单的外插就可以预测长达  $1000$  纳秒的声信号。因此需要在更远距离上或者对高频随机信号作超光速通信的实验。

9. 卡西米(Casimir)效应 当两块不带电荷的导体板距离非常接近时，它们之间会有非常微弱但仍可测量的力，这就是卡西米效应。卡西米效应是由真空能(vacuum energy)引起的。Scharnhorst 的计算表明，在两块金属板之间横向运动的光子的速度必须略大于光速(对于一纳米的间隙，这个速度比光速大  $10^{-24}$ 。在特定的宇宙学条件下(比如在宇宙弦[cosmicstring]的附近[假如它们存在的话])，这种效应会显著得多。但进一步的理论研究表明不可能利用这种效应进行超光速通信。

10. 宇宙膨胀 哈勃定理说：距离为  $D$  的星系以  $HD$  的速度分离。 $H$  是与星系无关的常数，称为哈勃常数。距离足够远的星系可能以超过光速的速度彼此分离，但这是相对于第三观察者的分离速度。

11. 月亮以超光速的速度绕着我旋转！ 当月亮在地平线上的时候，假定我们以每秒半周的速度转圈儿，因为月亮离我们  $385,000$  公里，月亮相对于我们的旋转速度是每秒  $121$  万公里，大约是光速的四倍多！这听起来相当荒谬，因为实际上是我们自己在旋转，却说是月亮绕着我们转。但是根据广义相对论，包括旋转坐标系在内的任何坐标系都是可用的，这难道不是月亮以超光速在运动吗？

问题在于，在广义相对论中，不同地点的速度是不可以直接比较的。月亮的速度只能与其局部惯性系中的其他物体相比较。实际上，速度的概念在广义相对论中没多大用处，定义什么是“超光速”在广义相对论中很困难。在广义相对论中，甚至“真空光速不变”都需要解释。爱因斯坦自己在《相对论：狭义与广义理论》第 76 页说“真空光速不变”并不是始终正确的。当时间和距离没有绝对的定义的时候，如何确定速度并不是那么清楚的。尽管如此，现代物理学认为广义相对论中光速仍然是不变的。当距离和时间单位通过光速联系起来的时候，真空光速不变作为一条不言自明的公理而得到定义。在前面所说的例子中，月亮的速度仍然小于光速，因为在任何时刻，它都位于从它当前位置发出的未来光锥之内。

12. 量子场论 到目前为止，除引力外的所有物理现象都符合粒子物理的标准模型。标准模型是一个相对论量子场论，它可以描述包括电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用在内的三种基本相互作用以及所有已观测到的粒子。根据这个理论，任何对应于两个在有类空距离的事件处所作物理观测的算子是对易的(any pair of operators corresponding to physical observables at space-time events which are separated by a space like interval commute)。

原则上讲，这意味着任何作用不可能以超过光速的速度传播。但是，没有人能证明标准模型是自洽的(self-consistent)。很有可能它实际上确实不是自洽的。无论如何，它不能保证将来不会发现它无法描述的粒子或相互作用。也没有人把它推广到包括广义相对论和引力。很多研究量子引力的人怀疑关于因果性和局域性的如此简单的表述能否作这样的推广。总而言之，在将来更完善的理论中，无法保证光速仍然是速度的上限。

13. 虫洞 关于全局超光速旅行的一个著名建议是利用虫洞。虫洞是弯曲 space-time 中连接两个地点的捷径,从 A 地穿过虫洞到达 B 地所需要的时间比光线从 A 地沿正常路径传播到 B 地所需要的时间还要短。虫洞是经典广义相对论的推论,但创造一个虫洞 需要改变 space-time 的拓扑结构。这在量子引力论中是可能的。

开一个虫洞需要负能量区域,Misner 和 Thorn 建议在大尺度上利用 Casimir 效应产生负能量区域。Visser 建议使用宇宙弦。这些建议都近乎不切实际的瞎想。具有负能量的怪异物质可能根本就无法以他们所要求的形式存在。

Thorn 发现如果能创造出虫洞,就能利用它在 space-time 中构造闭合的类时世界线,从而实现时间旅行。有人认为对量子力学的多重性(multiverse)解释可以用来消除因果性悖论,即,如果你回到过去,历史就会以与原来不同的方式发生。Hawking 认为虫洞是不稳定的,因而是无用的。但虫洞对于思想实验仍是一个富有成果的区域,可以用来澄清在已知的和建议的物理定律之下,什么是可能的,什么是不可能的。

14. 曲相推进(warp drive) 曲相推进是指以特定的方式让 space-time 弯曲,从而使物体超光速运动。Miguel Alcubierre 因为提出了一种能实现曲相推进的 space-time 几何结构而知名。space-time 的弯曲 使得物体能以超光速旅行而同时保持在一条类时世界线上。跟虫洞一样,曲相推进也需要具有负能量密度的怪异物质。即使这种物质存在,也不清楚具体应如何布置这些物质来实现曲相推进。

15、超光速星系 朝我们运动的星系的视速度有可能超过光速。这是一种假象,因为没有修正从星系到我们的时间的减少(?)。

16、相对论火箭 地球上的人看到火箭以  $0.8c$  的速度远离,火箭上的时钟相对于地球上的人变慢,是地球时钟的  $0.6$  倍。如果用火箭移动的距离除以火箭上的时间,将得到一个“速度”是  $4/3 c$ 。因此,火箭上的人是以“相当于”超光速的速度运动。对于火箭上的人来说,时间没有变慢,但是星系之间的距离缩小到原来的  $0.6$  倍,因此他们也感到是以相当于  $4/3 c$  的速度运动。这里问题在于这种用一个坐标系的距离除以另一个坐标系中的时间所得到的数不是真正的速度。

#### 7、中微子的“超光速”

欧洲核子研究中心 2011 年 9 月 23 日宣布,他们发现一些粒子可能以快于光速的速度飞行,一旦这一发现被验证为真,将颠覆支撑现代物理学的爱因斯坦相对论。

整个实验工作的第一步始于欧洲核子研究中心内部一个充满氢气的大罐子。科学家们首先剥夺了氢原子的电子,使其成为一颗质子。随后,这些质子被一系列加速器接力加速,最后进入大型强子对撞机(LHC)设备内部运行。随后,一些质子被以  $10$  微秒的脉冲形式射向一个石墨靶标并产生一束介子脉冲。这些介子很快衰变成中微子,并穿越地层抵达格兰萨索的探测器。在这里,OPERA,即采用乳胶径迹装置的(中微子)振荡项目,所采用的乳胶寻迹设备可以感知中微子的抵达。

根据现有理论,在从欧核中心飞抵 OPERA 设备的数毫秒间,其中一部分中微子将发生振荡变形,从  $\mu$  中微子变为  $\tau$  中微子,而 OPERA 实验的“初衷”正是对这种中微子振荡进行研究,试图追寻到  $\tau$  中微子的踪迹。但出人意料的是,科学家们发现,中微子比光“跑”得快。

测量中微子速度的难点在于如何精确地测量距离和时间。在该研究中,距离通过 GPS(全球定位系统)测量得到,误差为  $20$  厘米;时间通过 GPS 和铯原子钟测量得到,精度是  $2.3$  纳秒(一秒的  $10$  亿分之一)。中微子实际传播了  $732$  公里,“旅行”时间为  $0.0024$  秒,计算结果表明,中微子的速度是  $299798454$  米/秒,比真空中的光速  $299792458$  米/秒快  $5996$  米/秒。

这一结果震惊了欧核中心的科学家。在仔细考虑了实验中其他各种因素的影响之后,他们认定,实验结果经得起检验,于是决定将其公开,恳请全球同行共同对实验结果进行验证。

其实,在科学史上,这并非科学家们首次观察到“中微子比光跑得快”这一现象。此前,科学家们在 1987 年对 SN1987A 超新星进行的研究、费米实验室进行的 MINOS(主注入式中微子振荡搜寻实验)等都表明,中微子似乎比光跑得快。但因为诸多原因,没有引发如此大的反响。

SN1987A 是科学家们于 1987 年发现的第一颗超新星,距离地球  $16.83$  万光年。事实上,它是在公元前  $16.81$  万年左右爆发的,但它的光直到 1987 年才抵达地球。在 SN1987A 爆发的光线来到地球的  $3$  小时前,世界各地有  $3$  台中微子探测器同时探测到一股中微子爆发,这似乎表明中微子比光快。

而在 2007 年美国费米实验室进行的 MINOS 高能物理实验中,物理学家们让主注入器产生的中微子束穿过该实验室位于伊利诺伊斯州的近程探测装置,然后击中位于数百英里外位于明尼苏达州的远程探测装置。该实验当时得出的结论是:记录到中微子的运动速度超过光速。但实验结果的误差范围太大,因此并没有引起多大注意。

### (1) 相对论称光速最快

当天，欧洲核子研究中心公布了一份研究结果，科研人员在让中微子进行近光速运动时，其到达时间比预计的早了 60 纳秒（1 纳秒等于十亿分之一秒），对此，研究者认为，这可能意味着这些中微子是以比光速快 60 纳秒的速度运行。根据爱因斯坦狭义相对论，光速是宇宙速度的极限，没有任何物质可以超越光速。如果此次研究结果被验证为真，意味着奠定了现代物理学的基础将遭到严重挑战。此次研究的中微子束源自位于日内瓦的欧洲核子研究中心，接收方则是意大利罗马附近的意大利国立核物理研究所。粒子束的发射方和接收方之间有着 730 公里的距离，研究者让粒子束以近光速运行，并通过其最后运行的时间和距离来判断中微子的速度。中微子束在两地之间的地下管道中穿梭。

### (2) 被观测到 1.6 万次

“这个结果十分令人震惊，”该研究项目发言人艾瑞迪塔托说，“我们在好几个月反复研究核对，并仔细考虑了实验中其他各种因素的影响。”艾瑞迪塔托说，科研人员反复观测到这个现象达 1.6 万次。“这是很令人感兴趣的结果，但它科学上的准确性，还要更多的实验才能来验证。”中科院高能物理研究所所长陈和生对本报记者说。他表示，目前物理学界也出现了一些对该实验结果的不同意见，一是怀疑粒子束飞行距离的准确性，二是粒子束本身长度的准确性。此次实验的研究者之一奥迪说，“尽管我们测量的系统不确定性很低，统计数据准确性也很高，但我们还是希望能与其他实验做对比。”根据研究者的声明，中微子束的发射地到接收地之间的距离，存在着 20 厘米的不确定性。对中微子束飞行时间通过高级 GPS 系统和原子钟等精密设备测量，精确度小于 10 纳秒级别。

### (3) 新发现潜在影响巨大

欧洲核子研究中心在一份声明中表示，这个结果的潜在影响巨大，急需其他实验的独立测量进行重复实验，接受更广泛、更严谨的考验，这才能最终验证或反驳是否真的存在超光速粒子。目前，研究中心已将此实验论文上传到公开网站上，并对全球物理学界进行在线说明。

“（研究）对科学产生的潜在影响实在太大了，我们无法立刻就给出结论，或做出物理解释。我的第一反应是，中微子实在太神秘，让我们惊喜。”艾瑞迪塔托说。欧洲核子研究中心研究主任贝托鲁奇说，如果这个研究被验证，将改变人类的物理观。

物理学家们认为，一旦这些粒子确实被证实跑过了光速，将彻底改变人类对整个宇宙存在的看法，甚至改变人类存在的模式。有分析人士认为，可能宇宙中的确还存在其他未知维度，中微子抄了其他维度的“近路”，才“跑”得比光快。中科院高能物理研究所所长陈和生说，希望研究方能够提供更多实验细节，也希望能看到其他的重复实验，“现在说爱因斯坦相对论受到挑战还太早。”

附录 1: OPERA 实验 2011 年 11 月 18 日公布了新的测量结果，消除了一个重要的误差来源，得到了与原测量一致的结果。

原来的结果公布后，测量的多个环节被质疑。其中最可能出错的是拟合误差。其发射的中微子束团长 10500 纳秒。当探测到一个中微子的时候，我们并不知道它是束团中的哪一个质子产生的，需要依靠时间结构拟合来确定时间差。为了消除这个误差，OPERA 实验重新进行了实验验证，特地将每个中微子束团缩短到 3 纳秒，相隔 524 纳秒。这样每个探测到的中微子都能找到准确的发射时间。新的实验 11 月 6 日结束，在十几天内共测到 20 个中微子，新的测量结果与原结果一致，即中微子比光快 60 纳秒，误差为 10 纳秒。原来的论文写好后，有 15 个作者拒绝签字。经过新的测量，以及对原来分析的重复检查，大部分人已同意签字。

附录 2: 本报讯 据英国《每日电讯报》2011 年 11 月 21 日报道，来自意大利格兰萨索国家实验室的一个科研小组表示，他们独立地重复了今年 9 月份进行的 OPERA 实验，结果发现中微子在行进的过程中并无能量损失，这表明，OPERA 实验得出的结论——中微子的行进速度比光快是错误的。

9 月 23 日，进行 OPERA 实验的科学家们表示，中微子在从欧洲核子研究中心前往意大利格兰萨索地下实验室的“旅行”中，竟然比光早到了 60 纳秒，实验误差约为 10 纳秒。因此，OPERA 团队的发现一经公布，就在科学界引发广泛关注和讨论。很多科学家质疑其正确性。

11 月 18 日（北京时间），该 OPERA 团队又发布消息称，他们进行了更精确的重复实验，获得了同样的结果，再从确认中微子的运动速度超过了光速。现在，来自意大利格兰萨索国家实验室的另一个科研团队使用同样的中微子束进行了名为 ICARUS 的实验。在实验中，他们不仅测量了中微子从欧核中心“旅行”到格兰萨索国家实验室的时间，还测量了这些中微子到达格兰萨索国家实验室时所拥有的能量。ICARUS 团队研究人员认为，行进速度即使只比光快一点点，都将导致粒子在整个“旅行”过程中失去大部分能量。但其计算

结果表明,在“旅行”过程中,这些中微子具有数量准确的以光速运行(一点都不多)的能量粒子,这表明中微子的能量没有损耗且其行进速度不比光速快。

物理学家托马斯·多里格同时在欧洲核子研究中心和美国费米国家实验室担任研究工作,他在一家科学网站上写道,ICARUS 团队的论文“简洁而明确”。他表示:“ICARUS 团队的研究证明,中微子的行进速度和光速之间的差异不可能如 OPERA 小组观察到的那样巨大,这种差异无疑要比 OPERA 小组宣称的数值至少小三个数量级,几乎接近零。”英国萨里大学的教授吉姆·卡利里说:“如果中微子的行进速度超过光速的话,它们会在行进过程中不断失去自己的能量。但最新实验结果表明,中微子的能量没有损耗,因此,可以驳斥中微子超光速这一结论。”

附录 3: 北京时间 2 月 23 日消息,据美国《科学》杂志报道,2011 年 9 月在意大利进行的 OPERA 实验宣称发现中微子速度超过光速。然而,这一“惊人发现”似乎因一个错误导致,罪魁祸首可能是 GPS 装置与电脑之间“接触不良”。实验中,物理学家发现中微子从欧洲核子研究组织(CERN)的实验室飞行到意大利拉奎拉附近格兰萨索国家实验室所用时间比光提前了大约 60 毫微秒。其他很多物理学家认为这一惊人发现因错误所致。爱因斯坦的狭义相对论认为,任何物质的速度都不可能超过光速,如果中微子的速度确实超过光速,狭义相对论便被推翻。几十年来,科学家进行了很多次实验,实验结果均支持狭义相对论。据熟悉此项实验的消息人士透露,提前 60 毫微秒似乎由连接 GPS 接收器(用于校正中微子飞行时间)的光缆与电脑内电子卡之间出现。新华网日内瓦 3 月 16 日电(记者刘洋 杨京德)欧洲核子研究中心 16 日公布最新测量结果显示,去年 9 月“中微子振荡实验”中,中微子运行速度并未超过光速,原测量结果存在误差。欧洲核子研究中心项目负责人塞尔吉奥·贝尔托卢奇通过公报向媒体证实,有证据显示,相关实验结果受到了测量误差干扰。贝尔托卢奇表示,欧洲核子研究中心将继续与意大利格兰萨索国家实验室合作,在今年 5 月进行新一轮“中微子振荡实验”,以期给出准确答案。去年 9 月,意大利格兰萨索国家实验室下属的一个名为“OPERA”的实验装置接收了来自欧洲核子研究中心的中微子,两地相距 730 公里,中微子跑过这段距离的时间比光速还快了 60 纳秒(1 纳秒等于 10 亿分之一秒)。消息一出,立刻引起轰动。然而,欧洲核子研究中心 2 月 23 日发布公报称,此前使用的中微子测速方法存在两处问题,可能导致测量结果出现偏差。

#### 附录 4: 吴岳良: 研究超光速可能性要从本质入手

诺贝尔物理学奖获得者卡罗·卢比亚在不久前的诺贝尔北京论坛上评论说,中微子振荡实验(OPERA)很重要,令科学家意外发现了中微子可以超越光速,但他认为他们过早地发表了结果,应该进一步研究,考虑各种可能性,更加认真地对待。

欧洲核子中心 OPERA 实验的研究人员自己也表示要继续研究系统误差,这个实验出现的反常很可能是系统误差引起的,不排除用系统误差进行解释。而我要讲的和强调的是:我们所有实验和理论研究都是朝着发现新现象和提出新理论,超越爱因斯坦和前人研究成果这个目标而努力的,爱因斯坦本身就超越了牛顿。我们知道,所有实验都是在一定条件下做的,当实验条件和环境等改变以后,物理现象也可能就会随之发生变化,这是科学家们在研究时的重要出发点和探索目标。

众所周知,相对论和量子论是上世纪建立的两个奠基性理论。爱因斯坦的贡献除了狭义相对论外还有广义相对论。狭义相对论实际上是纯运动学的理论,广义相对论是动力学理论,回答粒子受力或物质之间有了相互作用以后是怎么加速运动或改变运动状态的。狭义相对论的运动学理论加上量子力学,成功地建立了量子场论,并由此描述所有三种基本相互作用(即电磁相互作用、弱相互作用和强相互作用)而建立起粒子物理标准模型。参与电磁相互作用而稳定存在的粒子有光子、电子和夸克,只参加弱相互作用而稳定存在的粒子就是中微子,还有一个稳定存在的粒子是由参加强相互作用的夸克而形成的质子。需要一提的是狭义相对论中用到的洛伦兹变换,它本身是一个数学上的坐标变换,虽然其在爱因斯坦之前已经存在,但爱因斯坦的贡献在于解释洛伦兹变换所隐含的物理含义。

爱因斯坦认识到洛伦兹变换不只是数学上的四维坐标变换,当把其中的一维作为时间,其变换就把时间与空间联系起来,同时需引进一个对应于速度的物理量,而当把这个速度物理量看做是与坐标无关的不变常数时,时间与空间之间的变换关系将被唯一确定下来,这时洛伦兹变换就成为一个更基本的时空变换,若要求物理规律在洛伦兹变换下不变,那么,洛伦兹变换意味着时空的基本对称性,这个对称性称为洛伦兹对称性,而不变的常数就是大家熟知的光速。由此,爱因斯坦超越了牛顿关于时间与空间无关的绝对时空观。实际上,空间本身的对称性我们早已熟悉,如空间的转动对称性,它导致角动量守恒。事实上,每一个对称性都与一个守恒律相联系,如时间平移不变性与能量守恒联系起来,空间平移不变性与动量守恒联系起来。而洛伦兹变换除了包括空间本身的转动对称性外,还反映了时间与空间之间的对称性。如在一参考系

里同时发生而不在同一地点发生的事情，在另一以高速匀速运动的参考系里的观察者看来却不再是同时发生。这就是说，空间与时间之间实际是分不开的，它们是相互关联的。只有当洛伦兹变换的对称性受到破坏，才有可能发生超光速现象。而洛伦兹变换对称性和光速不变成立的条件，是在四维时空和没有相互作用的真空中，物质运动所遵循的规律。大家知道，光在介质中的速度与真空中的速度是不一样的，这是因为光与物质相互作用引起的。从目前认识到的相互作用和基本粒子，其相互作用都是由粒子的内禀规范对称性来支配，并以量子场论作为理论基础来描述，因此物理规律满足洛伦兹变换对称性，其理论预言是不会有超光速现象发生的。

为此，若要研究超光速的可能性，就要从本质上来研究。由目前的相互作用和基本粒子建立的粒子物理标准模型无法解释中微子的超光速现象，那么有没有新的相互作用和新的物态，特别是与中微子之间而不是与其他物质的特殊相互作用，这是需要进一步研究的问题。同时，研究时空的洛伦兹变换对称性的破坏，必须与粒子之间相互作用的内禀对称性一起考虑，只有把它们联系在一起研究，对中微子是否可能有超光速现象的认识才会更深入。我们知道，在粒子物理标准模型中，中微子与带电轻子(电子为其中之一)一起构成一个新的内禀对称性，即所谓的同位旋对称性(类似质子与中子之间的对称性)，这样自然就会提出一个新问题，为什么我们没有观察到其他轻子(电子)的超光速现象？这当然不再是一个能简单回答的问题。

在这个意义上，实际上我们所有的研究一直是在挑战能不能超越爱因斯坦、超越现有理论。大家知道，有关暗能量的问题，今年的诺贝尔奖颁给了宇宙加速膨胀的发现，这表明宇宙中存在一种新的物态，这种可能的物态就是所谓的暗能量，它的存在本质上也表明了要超越爱因斯坦。因此，要超越爱因斯坦的狭义相对论，就必须研究超越狭义相对论成立的条件，如超越四维时空，重新认识真空以及引入新的特殊相互作用等，必须有突破性的新想法。(本报记者 张巍巍 整理)

5/4/2017