

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

xiandaiwulixue@21cn.com, 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): 676-700]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 22. doi:[10.7537/marsaaj0914s1722](https://doi.org/10.7537/marsaaj0914s1722).

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

第一章 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、光子是中电中性粒子, 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

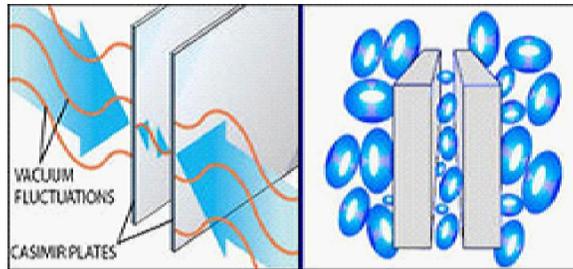
规范场负责传递相互作用, 而场的量子化的稳定态对应了粒子, 所以规范场的量子化必然就对应了某种场媒介粒子, 比如电磁场的量子化对应了光子。传播相互作用的时候的光子, 和独立被激发时候的光子还有不同, 术语叫做“虚光子”和“实光子”。虚光子只在相互作用的过程中出现, 对应到费曼图, 就是虚光子只是费曼图中的内线, 而实光子则对应了费曼图的外线。在量子力学中, 粒子是场的激发态, 而场传播力, 所以这种激发态既可以是稳定的激发态, 对应实光子, 也可以是被别的粒子激发而导致的激发态, 对应虚光子。在虚光子过程中, 只要在相互作用过程中符合能量守恒(具体说来就是费曼图的顶角上能量总和不变), 怎么样的光子都可以出现。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, Δt 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 Δm , 那么飞出去的光子重 Δm , 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 ΔE 。那么， ΔE 和 Δt 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的呢?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 γ' ，比较它与原频率 γ 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 5×10^{-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学奖的问题，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。

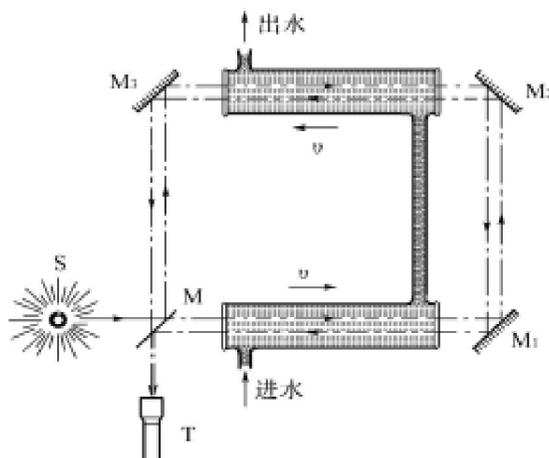
由于space-time是弯曲的，光子自由粒子，其运动轨迹是测地线——物体总是沿着四维空间——时间的直线走，与光子有无引力质量无关，因此光线弯曲是自然的，光线在天体附近的弯曲是由于引力质量引起空间的弯曲，进一步验证了广义相对论的正确。由于光子与引力质量之间没有相互作用，因此迈克尔逊——莫雷实验测得的光速没有变化，与前面所说的绝对时空并不矛盾，而且进一步验证了爱因斯坦的狭义相对论中真空光速不变性原理以及性对性原理，爱因斯坦的基本假设是完全正确的。

1851年，斐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_1 、 M_2 、 M_3 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_3 、 M_2 、 M_1 、M而到达T，另一束透过M经反射镜 M_1 、 M_2 、 M_3 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。

斐索实验中测量的在水中传播的光相对于地球的速度是：
$$C' = \frac{C}{n} \pm f \cdot V$$
，式中“+”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

属性	电子	光子
宇称	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 (ϵ) 和磁导率 (μ)

	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	$\hbar^2 k^2 / (2m_0)$	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^*	μ_r 或 ϵ_r (注 1)	μ_r 或 ϵ_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)

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 π^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 π^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”。

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”。

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	$l(h)/2$	$l(h)$

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。

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 γ 光子的电磁质量仅相当于电子的电磁质量的 2.04×10^{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

—— 10^5MeV ，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

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 λ 区段内的光矢量是在第 IV 象限从 $270^\circ \rightarrow 360^\circ$ (见图 1)。

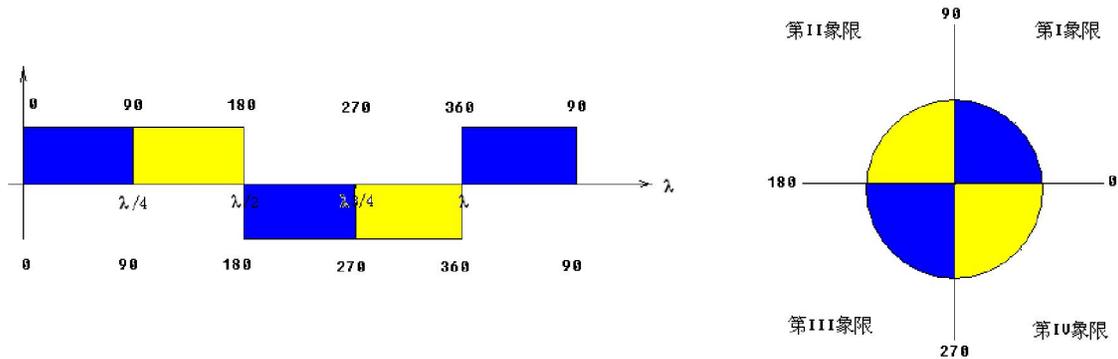


图 1

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)。

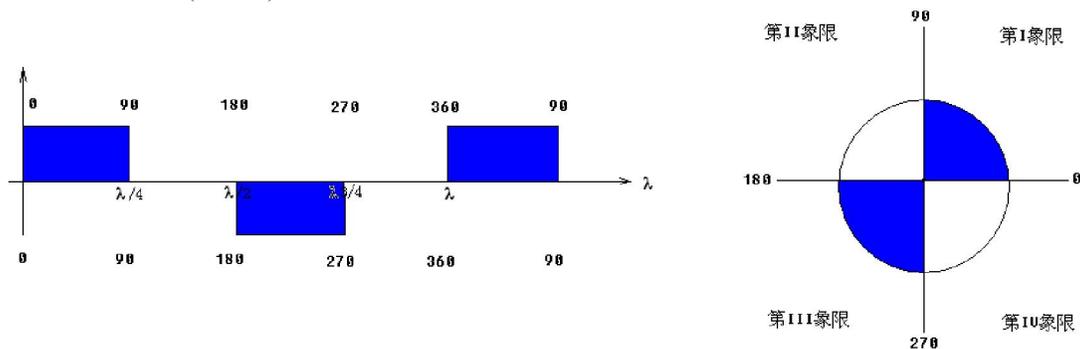


图 2

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 θ 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)。

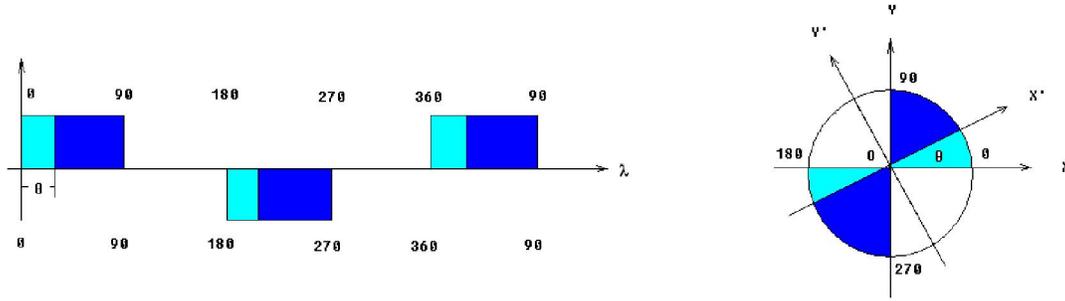


图 3

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 θ 等于 0° 时, $A_1 = A_0$, 透过检偏器的光振幅最大, 视场最强; 当 θ 等于 90° 时, $A_1 = 0$, 视场最弱, 透过检偏器的亚光量子数为 0, 当 θ 等于 45° 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° 。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 两光在晶体中行进的速率不同, 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)。

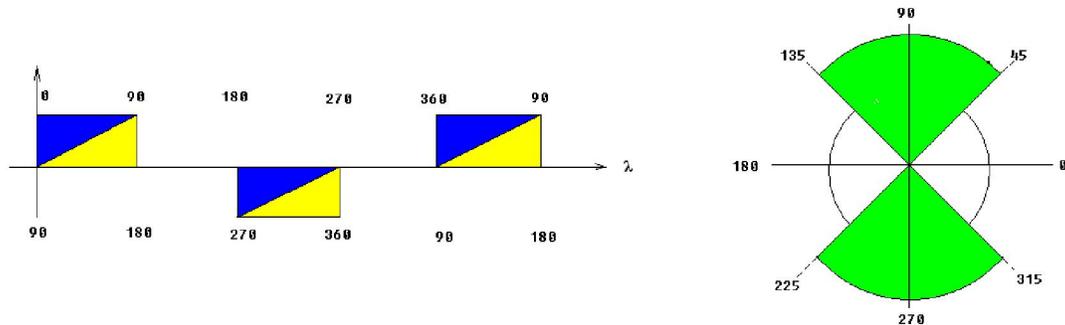


图 4

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)。

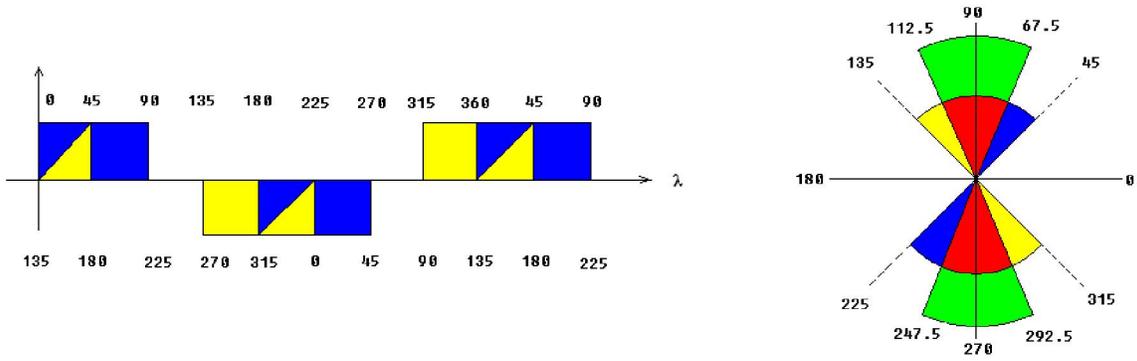


图 5

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 $0^0 \rightarrow 90^0, 270^0 \rightarrow 360^0, 180^0 \rightarrow 270^0, 90^0 \rightarrow 180^0$ 的顺序交错变化(见图 6)。

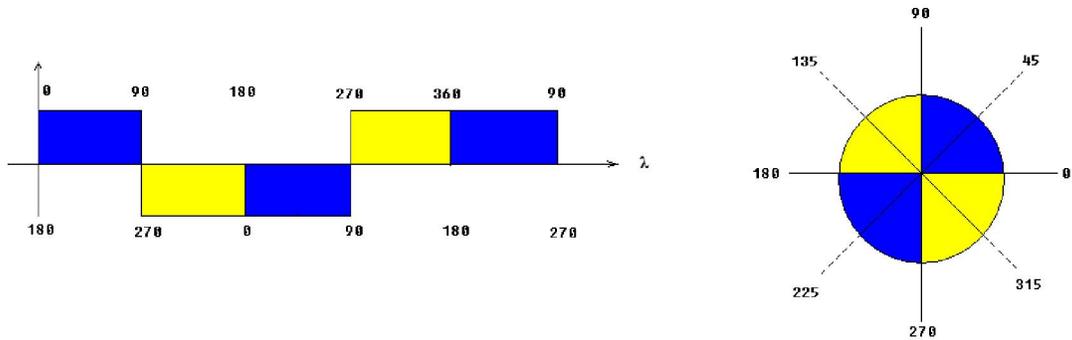


图 6

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

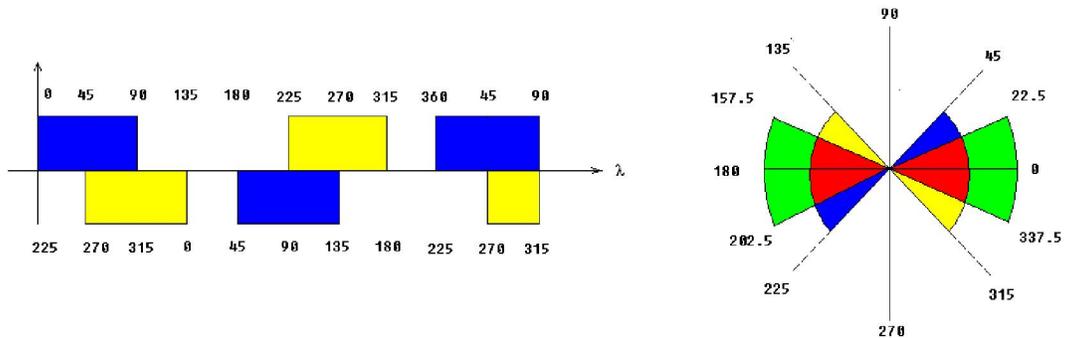


图 7

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 $315^0 \rightarrow 45^0, 135^0 \rightarrow 225^0$ 顺时针变化的偏振光(见图 8)。

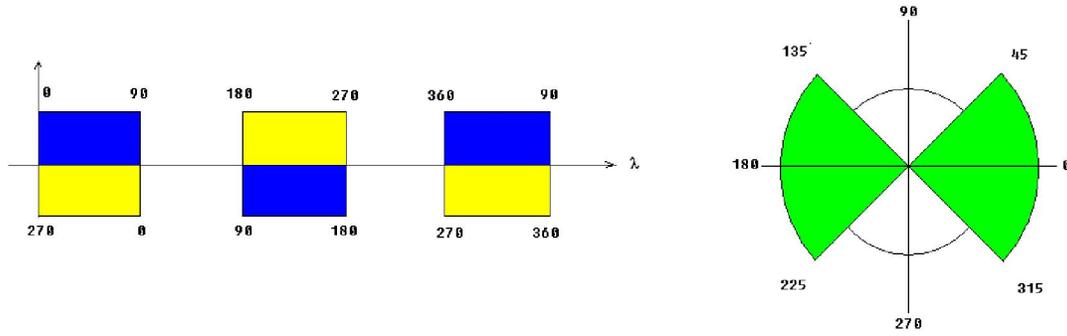


图 8

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)。

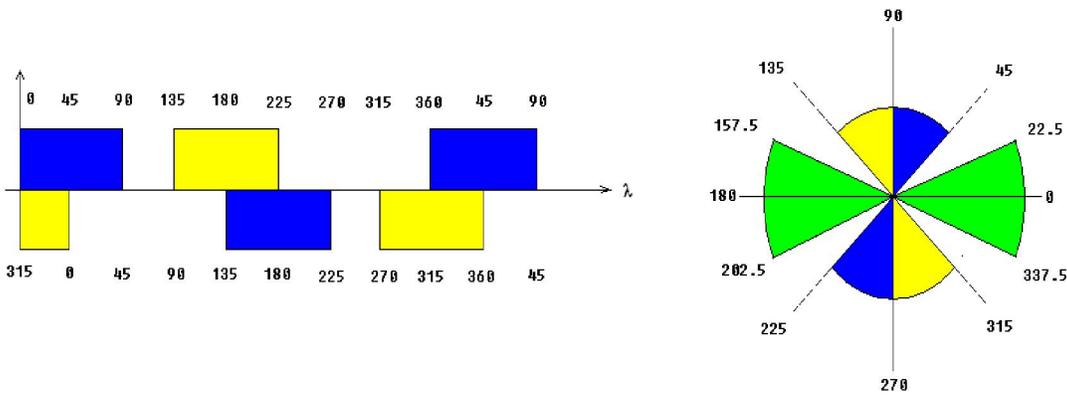


图 9

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)。

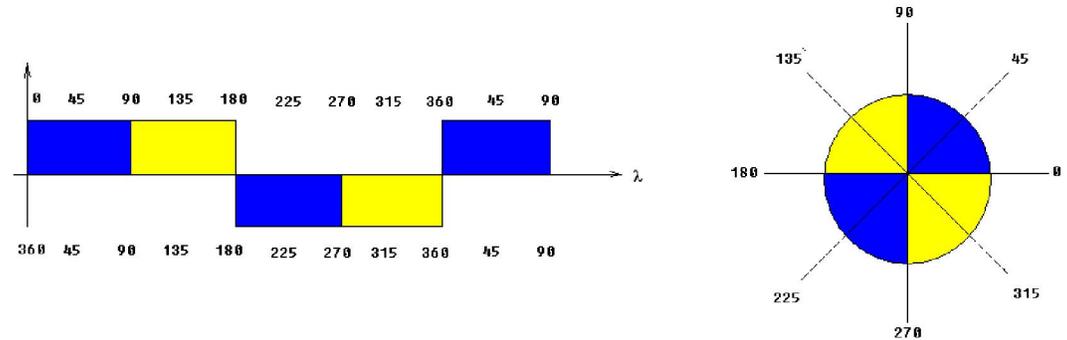


图 10

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)。

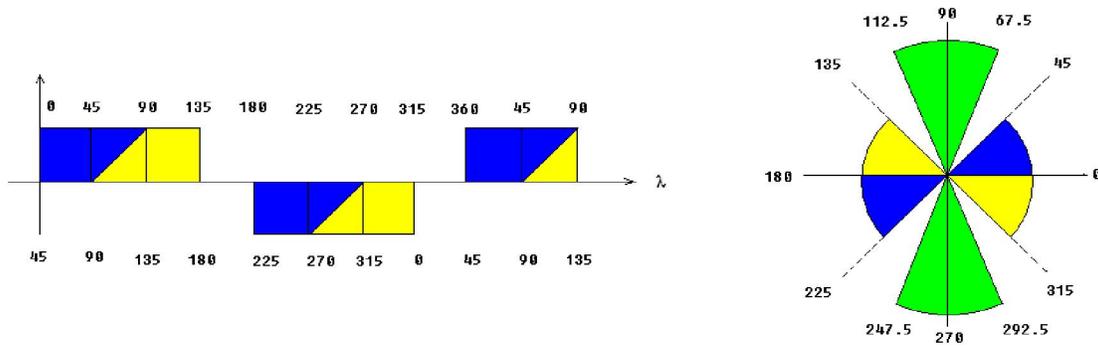


图 11

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 ψ 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——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施转的能力，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条直线振动相等价的。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 $+\pi$ 偏振，反之为 $-\pi$ 偏振，角动量为零的是 π 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，只不过将波片换成能吸收射频波的器件。-偏振，角动量为零的是 π 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 $P=h\omega/2\pi$ (h 为普朗克常量)，因而它同时带有 $P/\omega=h/2\pi$ 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

荷质比 $\frac{e}{m}$ 。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， μ_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 $g = 1 + \frac{J(J+1) - L(L+1) + S(S+1)}{2J(J+1)}$ (2)，其中 L 为总轨道角动量量子数， S 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 $J, J-1, J-2, \dots, -J$ ，共 $(2J+1)$ 个值，也即 ΔE 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 ν 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 ν' 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

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

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

令

$$\Delta\sigma = (M_2g_2 - M_1g_1)L \quad (6)$$

L 称为洛伦兹单位,

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

塞曼跃迁的选择定则为: $\Delta M = 0$, 为 π 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 σ 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 π 成分, 两边各三条谱线为 σ 成分; 沿着磁场方向观察, π 成分不出现, 对应的六条 σ 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 σ 态, $\Delta M = 0$ 对应的是 π 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

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 λ 不变的条件下, 不同的干涉级对应不同的入射角 θ , 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。

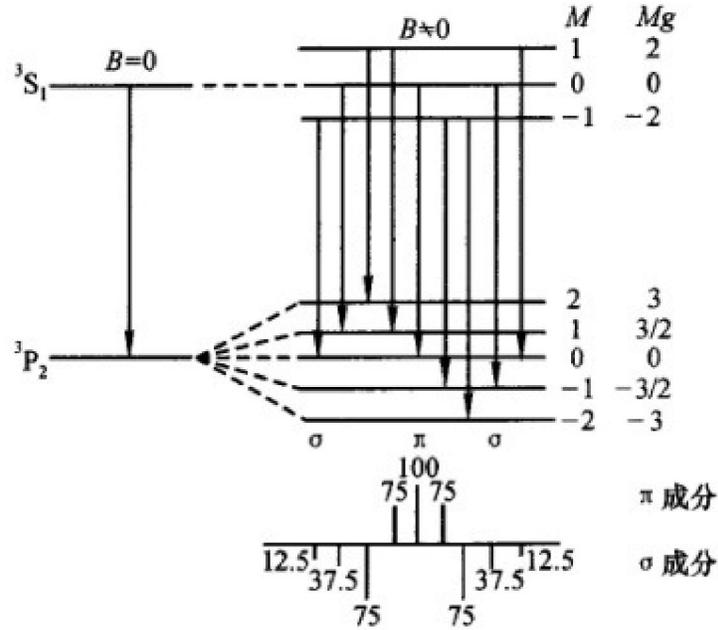


图 2.1.1-1 Hg(546.1 nm)谱线在磁场中的分裂

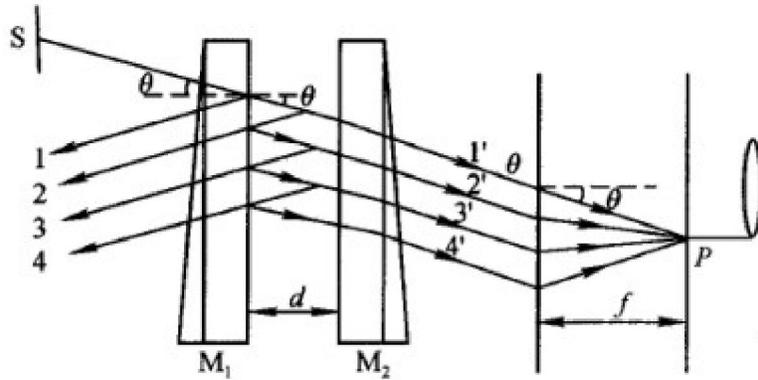


图 2.1.1-2 标准具光路图

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

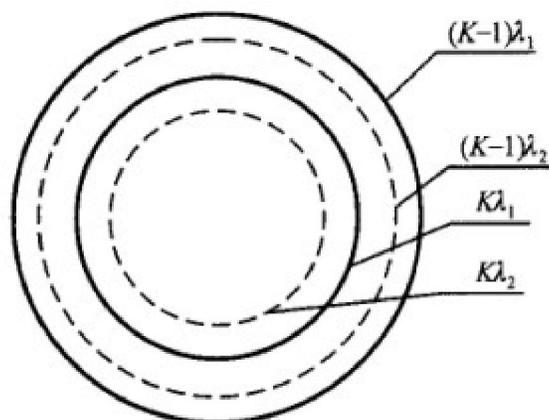


图 2.1.1-3 F-P 标准具等倾干涉图

考虑同一光源发出的具有微小波长差的单色光 λ_1 和 λ_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 λ_1 和 λ_2 的波长差逐渐加大, 使得 λ_1 的第 m 级亮环与 λ_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

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

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

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 θ 的圆环的直径 D 与透镜焦距 f 间的关系为,

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

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

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 λ 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 ΔD^2 是与干涉级次无关的常数。

设波长 λ_a 和 λ_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 λ 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

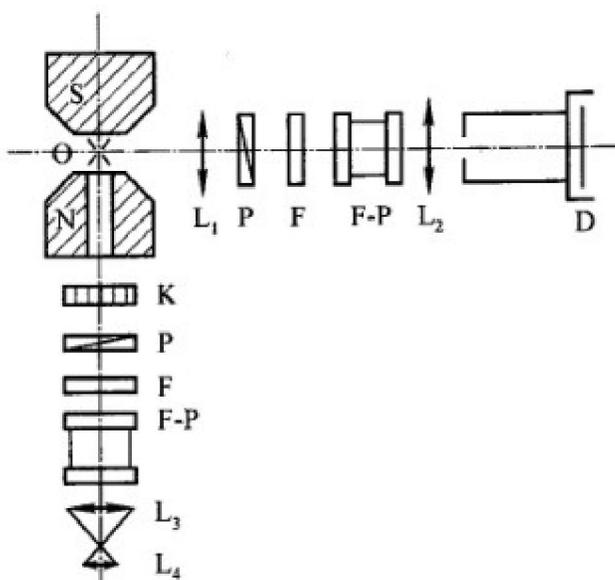


图 2.1.1-4 塞曼效应实验装置图

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 π 成分和 σ 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 σ 成分的重叠或交叉)。

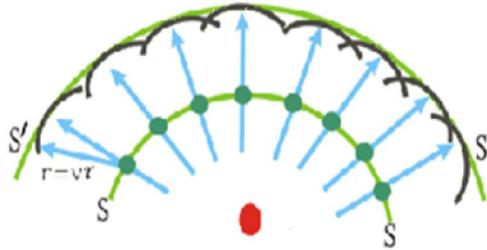
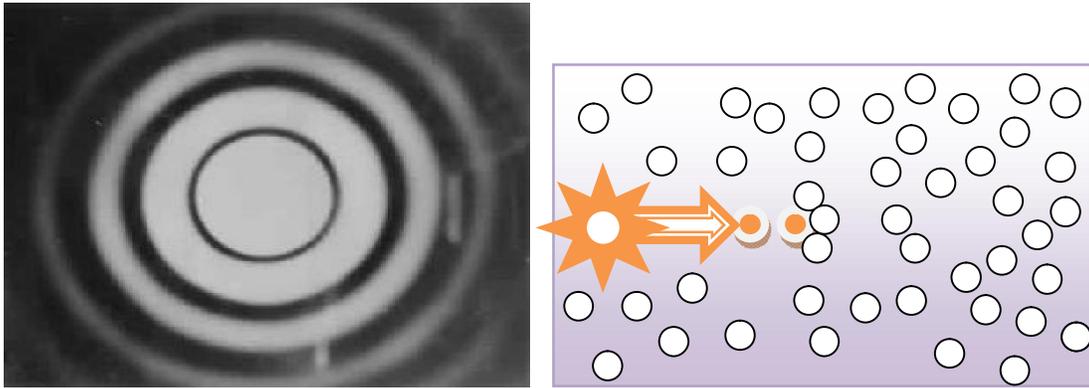
励磁电流及其对应的磁感应强度 B 的选择取决于谱线的裂距及标准具的自由光谱范围。Hg546.1nm 线在磁场作用下分裂成 9 条谱线, 总裂距为 $4L$, 要使相邻两级不发生重叠, B 必须满足 $4L \leq \frac{1}{2d}$ (18),

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

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 π 成分, 测量底片上 $(K-3)$ 或 $(K-4)$ 级圆环直径, 计算 m 。

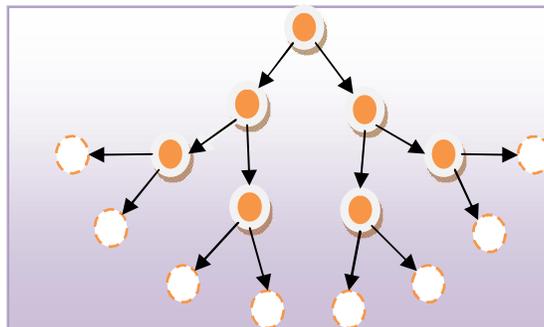
9、光的干涉与衍射

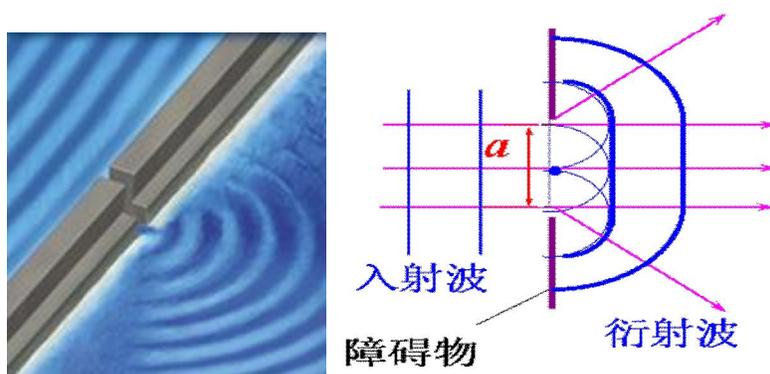
1909 年泰勒曾做了一个很奇特的实验。他先在强光下拍摄了一根细针的衍射像, 然后减弱光束的强度, 延长曝光时间, 有一次达三个月之久。当他把光束衰减到只有一个光子进入仪器时, 所得到的衍射像与强光短时拍摄的完全相同。



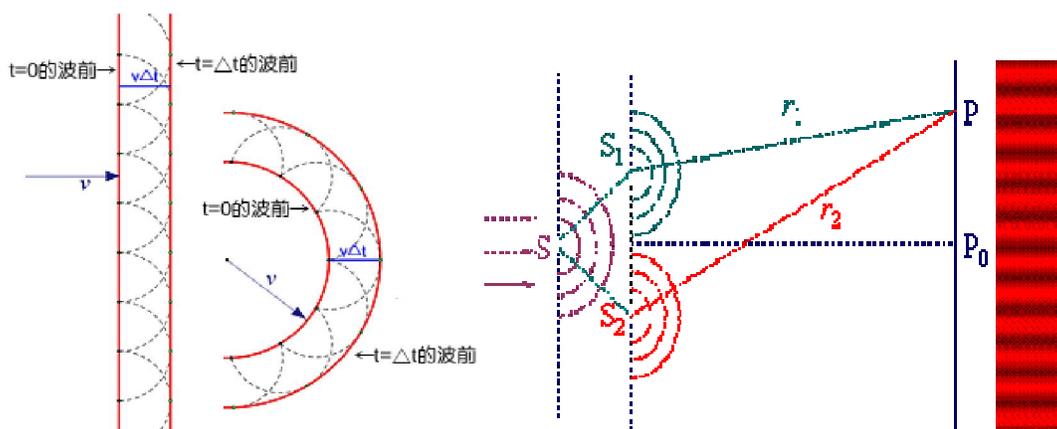
A: 惠更斯——菲耳衍射图像 B: 介质衍射原理及其图像 C: 惠更斯衍射原理

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_{∞} 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 (Δt) 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: 惠更斯原理 E: 杨氏双缝干涉实验

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^m (例如行星)在另一个物体^{M₀} (例如太阳)的引力场中运动时, 引力场引起的能量变化 Δw 和引起的角动量变

化 ΔL 分别是

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

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

另一组方程

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

这组方程成功解释了行星近日点的移动。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 ν_0 变为 ν , $\Delta \nu = \nu - \nu_0 = -\frac{GM_0 \nu_0}{c^2 R} \quad (1-5)$, 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 ν 的关系式 $w = h\nu$, (1-5)式实际上是

$\Delta w = -\frac{GM_0 w_0}{c^2 R} \quad (1-6)$, 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)式是正确的可能性。

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 ν_0 是光子在塔顶的频率, ν 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。

作者 (Author):

李学生 (Li Xuesheng), 男, 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, 中国科学院高能物理所研究员。2002年撰写的论文《数学归纳法的拓广》在《济南教育学院学报》上发表, 2004年8月撰写的理论物理学论文《引力质量与电磁质量之间的关系新探》在北京相对论研究联谊会第三届年会上发表, 得到了与会专家的初步认可; 2005年12月至今我撰写的论文《现代理论物理学的九个问题》、《真空不空》、《以太的发展史》在《香港新科技杂志》上发表。2007年在《格物》上发表论文《暗物质、暗能量和宇宙常数问题》; 2007年12月在《新科技》(香港)杂志上发表论文《以太的发展史》; 2002年在《山东师范大学学报(自然科学版)》教学科研上发表《在物理教学中注意培养科学美的观念》; 多篇有关文章在学术争鸣杂志 (Academia Arena, <http://www.sciencepub.net/academia>)上发表。 xiandaiwulixue@21cn.com, 1922538071@qq.com。

主要深入理解阅读的部分文献:

1. [日] 浅野四郎 浅野诚一 著 师华译。《狭义相对论的新图示法——space-time 圆图法——》 高等教育出版社 1992 年版。
2. 《介质浮力存在的普遍性》 段灿光著 本文集。
3. 《没有太阳辐射, 大气将静止吗?》 段灿光著 本文集。
4. 《以太浮力论》 段灿光著 本文集。
5. 《再论以太浮力 —— 关于万有引力变化的讨论》 段灿光著 本文集。
6. Baidu. <http://www.baidu.com>. 2016.
7. Google. <http://www.google.com>. 2016.
8. H.C. 瓦尼安, R. 鲁菲尼, 引力与时空, 科学出版社, 北京, 2006, pp150-153。
9. Ma H, Cherng S. Nature of Life. Life Science Journal 2005;2(1):7 - 15.
10. Ma H. The Nature of Time and Space. Nature and science 2003;1(1):1-11. Nature and science 2007;5(1):81-96.
11. National Center for Biotechnology Information, [U.S. National Library of Medicine. http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed](http://www.ncbi.nlm.nih.gov/pubmed). 2015.
12. Wikipedia. The free encyclopedia. <http://en.wikipedia.org>. 2015.
13. 狄拉克。《现代物理学参考资料》第 3 集[C]。科学出版社,1978.38。
14. 王存臻、严春友 著。《宇宙全息统一论》山东人民出版社 1995 年版。
15. 《彗星漫谈》 徐登里编著 32K、P107 1975 年 7 月科学出版社。
16. 《数学在天文学中的运用》 刘步林编著 32K、P316 1979 年 9 月科学出版社。
17. 《中国大百科全书·天文学》 主编: 张钰哲 1980 年 12 月中国大百科全书出版社。
18. 《哈雷彗星今昔》 张钰哲著 32K、P97 1982 年 3 月知识出版社。
19. 《天体力学浅谈》 [苏]尤·阿·里五波夫著, 李五行、陈晓中译 32K、P201 1984 年 11 月科学普及出版社。
20. 《地学基本数据手册》 主编: 张家诚, 副主编: 李文范 16K、P1377 1986 年 3 月海洋出版社。
21. 《彗星十讲》 胡中为、徐登里编著 32K、P158 1986 年 4 月科学出版社。
22. 《中国百科年鉴·1986》 1986 年 10 月中国大百科全书出版社。
23. 《简明天文学词典》 叶叔华主编 32K、P880 1986 年 12 月上海辞书出版社。
24. 《中国百科年鉴·1987》 1987 年 12 月中国大百科全书出版社。
25. 《哈雷彗星及彗星-地球关系》 天地生综合研究论文集 胡中为、阎林山 16K、P471. 1989 年 11 月中国科学技术出版社。
26. 1995 年 6 月 21 日 《中国青年报》。
27. 1997 年 12 月 19 日 《中国科学报》。
28. Einstein 著, 方在庆、韩文博、何维国 译。《Einstein 晚年文集》 海南出版社 2000 年 3 月第 1 版。

5/4/2017