arXiv:2302.00661v2 [physics.hist-ph] 6 Feb 2023

磁场存在时真空中的光速

Jonathan Agil[1*]、R´emy Battesti[1] 和 Carlo Rizzo[1]

[1]法国国家强磁场实验室（UPR 3228，法国国家科学研究中心-UPS-UGA-INSA），Rangueil 大道 143 号，图卢兹，31400，法国。

*通讯作者。电子邮箱：jonathan.agil@lncmi.cnrs.fr ;

摘要

光的本质、磁的存在以及真空的物理意义，都是与哲学有着如此深刻联系的问题，以至于人们已经讨论了数千年。在本文中，我们将集中讨论一个涉及这三者的问题：当存在磁场时，真空中的光速是否会发生变化？即使这个基本问题以现代术语表述已有一个多世纪，实验上仍未给出答案。为了充分理解这样一个问题在《物理学》中的重要性，我们从历史的角度回顾主要事实和概念。

1 引言

在本文中，我们从历史的角度回顾光在真空中与电磁场的相互作用，尤其是磁场导致的光速变化。即使这个基本问题以现代术语表述已有一个多世纪，实验上仍未给出答案。正如我们将在下文所展示的，这不仅是一个技术问题。几个世纪以来，哲学家和科学家一直努力以这样的方式表述物理学概念，使人们能够提出这样一个问题。

我们的研究主题既十分古老，也具有很强的现实意义，因为它有望在地面实验室和/或天体物理观测中检验标准模型，甚至超越标准模型。

为了充分认识研究磁场对光速影响的重要性，有必要追溯科学家用来描述光、磁场和真空本质的基本物理概念的起源。这正是本文的目标；我们以略显任意的方式，将内容划分为讨论不同时代的章节。

古代章节介绍从古代到托里拆利发现气动真空这一时期的事实。近代章节则介绍截至 Iacopini 和 Zavattini (1979年) 提出实验方案之前的相关事实。该方案开创了所有现有的实验室测量这一基本效应的尝试，也是当代章节的自然起点；后者着眼于当今的发展。最后一节讨论结论与展望。

2 古代

自史前时代以来，人们就已认识到光与磁。

显然，光自古以来就广为人知，因为它在日常生活中至关重要。欧几里得于 −300 年前后撰写了第一部论述光及其性质的著作。他总结了当时关于光的反射、扩散和视觉等主题的基础知识，并将其编成一本名为《光学》欧几里得(-300)，（另见 Darrigol(2012年及其中所引参考文献）。

磁这种现象之所以得名，是因为有人发现了一种石头，它具有奇特的性质，能吸引其他同类石头和铁矿石。这种石头因产自马格尼西亚而被称为磁体。马格尼西亚是古希腊的一个地方，显然以开采这种石头而闻名。

关于磁现象的早期书面记载之一，见于柏拉图的一篇对话作品《《伊翁》》，写于约 −400：“这块石头不仅能吸引铁环，还能赋予它们类似的力量，使它们吸引其他铁环；有时你会看到许多铁片和铁环彼此悬挂，形成一条相当长的链条：它们悬挂的力量都源自最初的那块石头。”柏拉图(-400），见图1。

事实上，柏拉图写的并非物理学，而是诗歌；他所要论证的是：“正如缪斯首先亲自启发人，受启发的人又形成一条链，其他人从他们那里获得灵感。”柏拉图(-400）。

但是，两者之间究竟有何关系？直到19世纪，答案都很直接：毫无关系！例如，在1600年出版的一本著作中，这本书可被视为磁学的奠基之作，《论磁石》中，威廉·吉尔伯特指出：“正如光瞬间即至（正如光学家所教导的那样），磁力在其作用范围内出现得更为迅速；由于它的活动比光微妙得多，且与非磁性物质不相容，因此它与空气、水或任何非磁性物质都没有交涉；……正如光不会停留在蒸气和流出物上方的空气中，也不会从那些空间反射回来，磁射线也不会停留在空气或水中。……然而，磁力

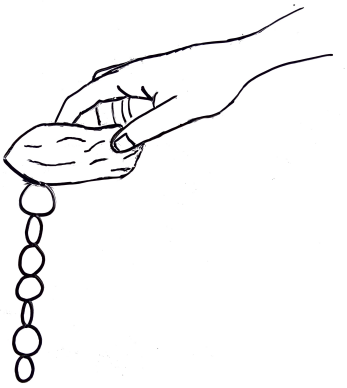


图 1 柏拉图的圆环实验。具有磁性的石头能够吸引铁环，并使它们具有相同的磁性。然而，拿走石头后，铁环便会掉落，因为它们不再相互吸引。

胜过光之处在于，它不会受到任何不透明物体或固体物质的阻碍，而是自由传播，并向四面八方施展其力量。”吉尔伯特(1600年）。据我们理解，在吉尔伯特看来，由于光是一种非磁性物质，它与磁力毫无交涉，因此光与磁力遍布整个空间，彼此互不干扰。

吉尔伯特在这几行文字中还将光和磁力瞬间传来作为众所周知的事实，即用现代术语来说，光速是无限的。笛卡尔认为这一点如此显而易见，以至于他在1634年 写给艾萨克·贝克曼的信中写道：“光的瞬时传播对我来说是如此确凿；倘若有人能证明它不成立，我就愿意承认自己对哲学一无所知。”笛卡尔(1634年), Darrigol(2012年)。

首次测得有限光速可追溯至 1676年。罗默通过观测木星的卫星艾奥在地球日心轨道不同位置时发生的食，完成了这项测量罗默(1676年，1677年), 如图 2所示。这项观测记载于罗默(1677年)：“光延迟新方程的必要性，已由皇家科学院和天文台八年来所作的全部观测确立；而最近，在巴黎于上年十一月 *9* 日夜间 *5* 时 *35* 分 *45* 秒观测到第一颗卫星复现，其时间比根据地球离木星较近的八月观测结果推算的预期时间晚了 *10* 分钟，这一现象又为该方程提供了印证。罗默早在九月初便已向上述科学院预告了这一点。”

罗默当时在巴黎，担任卡西尼和皮卡尔的助手。两人都是“科学学院”的天文学家成员。卡西尼尤其发表过一份详尽的木星卫星运动表。该表旨在利用对木星卫星的观测，确定地球表面某一点的经度。这个想法出自木星卫星的发现者伽利略本人：把木星当作一种主时钟。经度

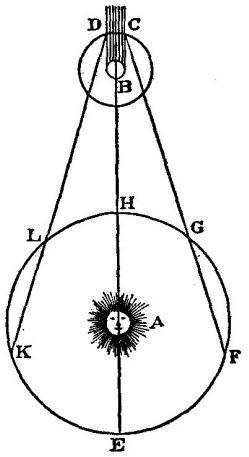


图 2 17世纪，奥勒·罗默观察到，木星卫星艾奥的两次食之间的时间间隔会随地球在轨道上的位置而变化。由于地球与木星之间的距离发生变化，他得出结论：光具有有限的速度。图片摘自对 罗默 (1676年、1677年) 的再版，见 Magie (1935年)。

通过比较巴黎等地与地球上其他地点的卫星观测结果来确定经度。当时，欧洲船只正忙于探险航行，因此确定经度是一个亟待解决的重大问题Cohen (1940年).

17世纪末，光速有限这一观点仍受到质疑 Darrigol (2012年)。1729年，布拉德利通过观测恒星光行差，最终证实了这一点，即 恒星视位置的移动；这种现象只能用地球运动与有限光速的共同作用来解释 布拉德利 (1728年)。

事实上，几个世纪以来，这篇论文的标题一直会被简单地视为无稽之谈。不仅因为我们谈论光速，还因为我们假定真空存在，而在亚里士多德学说之后的几个世纪里，真空一直被认为是不可能存在的。大约 −350亚里士多德认为，真空是科学中的一个基本概念，他在名为《物理学》的著作中写道：“关于真空问题的研究必然属于物理学家的职责——也就是说，真空是否存在、如何存在以及它是什么”亚里士多德(公元前350年)，但他得出的结论是“既然我们已经确定了处所的性质，而虚空若存在，就必定是没有物体的处所；我们也已经阐明了处所以何种意义存在、又以何种意义不存在，那么显然，照此看来，虚空并不存在。”亚里士多德(公元前350年)。在将近两千年的时间里，亚里士多德始终拥有最后的话语权。

值得一提的是，亚里士多德也曾提出一项关于物体运动的观察，以证明真空不可能存在：“此外，事实上，抛出的物体会继续运动，即使赋予它们推动力的东西已不再与它们接触；有些人认为这是由于相互替代，或者是因为被推动的空气以一种运动推动着它们，



图 3 托里拆利实验。将一根装满水银的管子倒置在盛有同一种液体的容器中。可以观察到，管内水银液面下降，最终停在固定高度。玻璃管顶部的空间不再充满水银。那里是真空吗？插图摘自加诺 (1859)。

其速度快于抛射体朝其适当处所运动时的自然位移速度。但在虚空中，这些情况都不可能发生，也不可能有任何东西运动，除非像被运载的物体那样运动。”亚里士多德 (公元前350年)。换言之，所有空间都必须由某种物质填满，否则任何运动都不可能发生。正是由于这种支撑介质的作用，物体在与赋予其推动力的源头分离后才能继续运动。

直到 1644年，真空才因托里拆利及其著名实验而成为一种物理实体托里拆利 (1644年)，如图 3所示。帕斯卡对此进行了大量重复实验，并取得了丰硕成果 帕斯卡 (1869年)。

托里拆利的目标是 “并非只是创造一个真空，而是要建造一种仪器，展示空气的变化：有时更重、更稠密，有时更轻、更稀薄。”托里拆利(1644年). 尽管托里拆利实验证明空气重量的事实很快得到全世界的认可，但真空是否存在立即受到了质疑。尤其是，笛卡尔对世界的看法是，整个宇宙都充满了一种微妙的物质，即以太；它能够穿过构成托里拆利管的玻璃孔隙，从而阻止真空的形成 笛卡尔(1647年). Jacqueline Pascal（他的妹妹）记述了1647年一次会面中，笛卡尔本人向帕斯卡作出的解释：“随后我们谈到了真空。笛卡尔先生以十分严肃的态度，在听说

[托里拆利的]实验，并问他认为管内进入了什么东西，他回答说是他的微妙物质。”帕斯卡 (1647年）。事实上，笛卡尔也用他的微妙物质填满了宇宙，以便让光得以传播，就像亚里士多德为物体运动寻找依据那样。如今，以太是光传播所必需的这一事实“将使那些相信真空存在的人有可能注意到，托里拆利 [的]管子上部并不存在真空，而水银留下的空间被某种物质填满，因为另一侧的可见物体仍然作用于我们的眼睛，使我们产生和先前相同的感觉；若那里是真空，它们便做不到这一点，因为它们的作用会被阻断；即使把眼睛贴在管子上，也不应该看到任何东西，只会一片漆黑，或者仿佛前面有一个不透明的物体；但事实并非如此。”罗奥 (1671年）。这段话出自罗奥撰写的一部17世纪物理学论著，他是笛卡尔的追随者之一。

以太的概念源于古代，但在笛卡尔之前，它并不具备机械性质。笛卡尔可被视为第一个将以太引入现代科学的人惠特克（1989年）。

3 现代时期

但是，充满整个宇宙的物质究竟是什么性质？它具有什么性质？它会运动吗？它如何与其他物质体相互作用？

从古典哲学的观点来看，真空比以太更容易定义。真空从字面上说就是什么都没有，不必赋予它任何性质。

从牛顿引力理论的观点来看，由于我们没有观察到以太在天体上造成的任何摩擦力，真空或自由以太，即未受扰动的以太，从现象学观点来看是相同的惠特克（1989年）。

当光参与其中时，事情变得更加复杂。为了探究与以太有关的各个方面，人们进行了数个世纪的理论研究和实验惠特克（1989年）。就光而言，人们认为光是以太本身的振动，正如声音是物质体的振动一样Darrigol（2012年）。

此外，1845年，法拉第观察到，当光在磁场存在的情况下沿着与其传播方向平行的方向穿过介质时，光的线偏振会发生旋转。法拉第（1846b，a）。这被视为光与磁之间存在联系的明确证据。惠特克（1989年）。事实上，法拉第深信“物质力所呈现的各种形式有着共同起源；换言之，它们彼此直接相关、相互依存，仿佛可以彼此转化，并且在作用中具有功的当量。”（参见Darrigol （2003年）及其中所引文献）。如今我们称为法拉第效应的这一发现，对他而言，其意义在于“照亮一个

磁力线或力线，以及使光线磁化。”（参见Darrigol（2003年）及其中的参考文献）。

麦克斯韦在其1873年的著作《电磁学论》中这样解释光传播：“根据发射说，能量传递是通过光微粒从发光物体实际转移到受照物体而实现的，这些微粒携带着自身的动能，以及它们可能容纳的任何其他形式的能量。根据波动说，两物体之间的空间充满了一种物质介质，能量通过该介质相邻部分的作用，从一部分传递到下一部分，直至到达受照物体。因此，光在以太中传播时，以太就是能量的载体。在惠更斯、菲涅耳、杨、格林等人发展起来的波动理论中，这种能量被认为部分是势能，部分是动能。势能被认为源于介质的振动。因而，我们必须认为介质具有有限的密度”麦克斯韦（1873年）。

没有以太，没有电磁波，但电和磁又该如何解释？它们可以通过以太本身的平移或旋转来解释 惠特克 (1989年）。现在，如果电场或磁场扰动了自由以太，而某些光在其中传播，那么光速也必然会受到影响并发生变化。

据我们所知，最早试图通过实验观察光的折射率发生变化，即 也就是 光速发生变化的实验尝试，是 H. Wild 于 1864年 报道的：当光在带电物体附近传播时， Wild (1865）。作者这样解释他发表这项工作的动机：“最近，几位物理学家直接或间接地认为，光以太和电流体是同一种东西，这体现了对电本质的统一看法。一个直接后果是，带正电物体中的以太密度必然大于或小于带负电物体中的以太密度。自*1860*年*11*月以来，我进行了一些实验，以实验检验这一假设的后果。由于这些实验全都得出了否定结果，而且其中一些使用的仪器不太合适，我一直没有发表它们。此后，我与几位物理学家朋友讨论时发现，其他人也曾以同样不成功的结果对这一假设进行实验检验。因此，我认为有必要向公众报告我在这一问题上的研究；这些研究在今年秋天已基本完成，尽管它们所做的不过是进一步确认了我先前得到的否定结果。”

几年后，即1873年，A. Roiti通过实验检验了另一种假设，即电流就是以太流Roiti (1873年b，a）。如果确实如此，沿电流方向传播的某些光，其速度会因与以太速度相加而增大。实验并未观测到光速发生变化，因此估算以太速度小于200米每秒，远低于电路中的电传播速度。

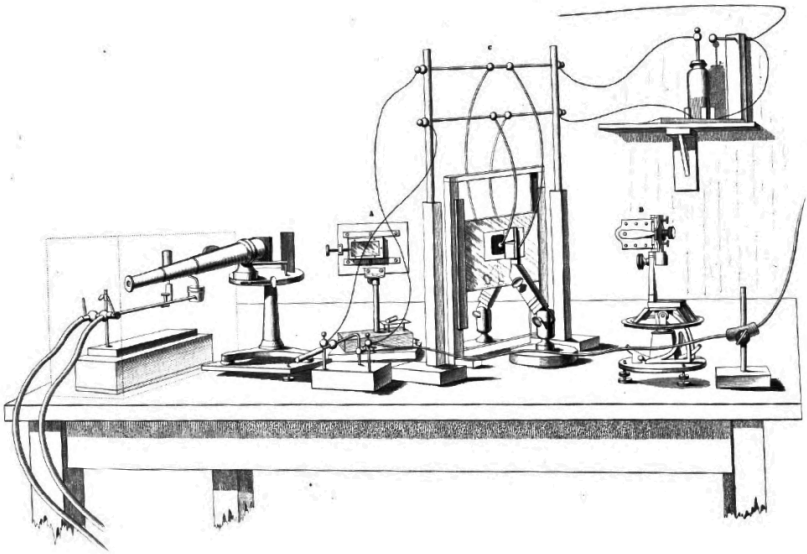


图 4 Wilberforce 用于改进 Rioti 实验结果的装置。该干涉仪由一面厚镜（图中的 A）和两面直角镜（B）组成，位移电流可施加于其间的电介质（C）。借助望远镜观察到了干涉条纹。摘自 Wilberforce (1887年)。

还要指出，1884年 Lecher 报道了Lecher（1884年）重复进行 Roiti 实验，结果仍为阴性；他还尝试探测圆偏振光通过螺线管时所感应出的电流。其动机是“想知道电流引起的光偏振面的旋转究竟是可逆现象还是不可逆现象”。结果同样为阴性。

Wilberforce 于 1887年得到了比 Rioti 的结果（41 米/秒）更精确的结果 Wilberforce (1887年)，他采用了更先进的干涉测量技术，并使用电容器在光传播的电介质中产生位移电流。实验装置如图 4所示。作者指出：“根据麦克斯韦对电磁场的看法，存在一种以太或介质，遍布整个空间；普通物质的分子以相同的方式与之关联或相连，而它是一切电力和电磁力的载体，.....我们必须同时假定，如果导电物质的任何部分开始运动，与之关联的介质也会以相同的速度运动。”由于实验结果是否定的，实际情况并非如此。

磁场以及电场的作用也由 Lodge 进行了测试，相关报告发表于 1897年 Lodge(1897年）。以下是作者的结论“我不再赘述，得出结论：无论电场还是磁场，横向场都不会赋予以太黏度，也不能使运动物质抓住以太并使其旋转。”

所有这些实验都采用干涉测量技术进行，从某种意义上说，其目的实际上是探测与电磁现象相对应的以太运动，而非观测光速的变化；后者被认为是以太运动直接导致的结果。

另一方面，就在几年前，物理学家们以一种更现代的态度，在一次正式会议上讨论了本文的主题，却完全没有提及以太。事实上，1889年，在美国科学促进会多伦多会议上，H.T. Eddy提出了关于磁场存在时光速可能发生变化的理论结果。“在随后的讨论中……*Morley*教授提出了一种装置，用以探测人们所怀疑的速度变化……此事引起了极大兴趣，因此该协会的分会……从研究经费中拨出一笔款项，用于建造装置并进行实验……装置的光学部分采用了*Michelson*在其实验中使用的干涉折射仪；那些实验旨在确定光在太阳系不同方向上的传播速度是否相同。”Morley用这番话告诉我们，他于1889年至1898年间进行的这项实验的缘起 Morley等人(1898年)。

19世纪后半叶发生了什么，足以证明可以放弃以太概念？在测量光速的实验中，只要考虑物质相对于以太的相对运动，以太理论就无法解释实验结果。

物理学家知道，光在物质介质中的光速为 c/n，其中 n 是折射率，取决于介质。那么，如果介质以速度 v_m运动呢？如果以太不随介质运动，光应继续以 c/n传播；如果以太随介质运动， c/n和 v_m 就应相加。

为了找到正确答案，Fizeau 于 1851 年进行了一项实验，结果令人困惑 Fizeau（1851），图 5 展示了部分实验装置。5。Fizeau 的实验结果表明，以太被“部分”拖曳，因为光速 v_l 介于两个预期值之间。如果光传播方向与物体速度平行 $v_l \approx c/n + v_m\left(1 - 1/n^2\right)$。

那么，人们甚至可以接受这一点；但在1887年，Michelson和Morley发表了他们在寻找以太漂移时得到的零结果，他们著名的干涉仪如图6所示。在运动参考系中测得的光速始终为 c ，与相对于以太的相对运动无关，也就是说，以太与物体一起运动。这与Fizeau的实验结果不相容，最终，Einstein的狭义相对论使以太概念变得多余。

在他们题为《《物理学的进化》》的著作中，爱因斯坦和英费尔德阐述了他们的观点 爱因斯坦和英费尔德 （1966）：“所有关于以太的假设都毫无结果！实验判决始终是否定的。回顾物理学的发展，我们看到，以太诞生后不久，就成了物理物质家族中的

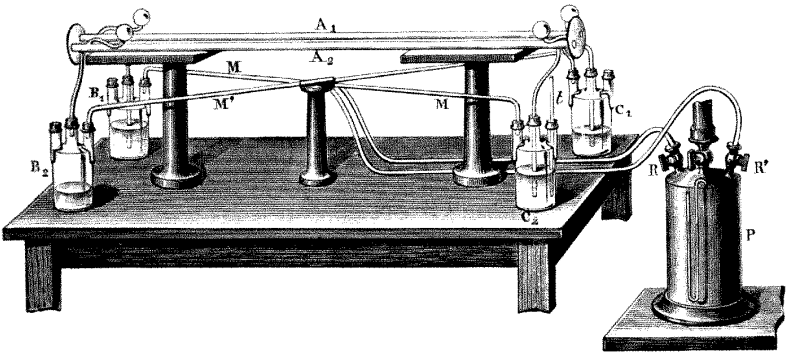


图 5 用于测量运动流体中光速的菲索装置。此处仅展示液体系统，流体可在管道 A 中循环流动$_1$和 A$_2$。装置利用镜子使光在两条管道中循环传播；沿一个方向传播的光与沿另一方向传播的光发生干涉。根据流体流动情况，可通过条纹位移计算光速。摘自 Mascart (1889年)。

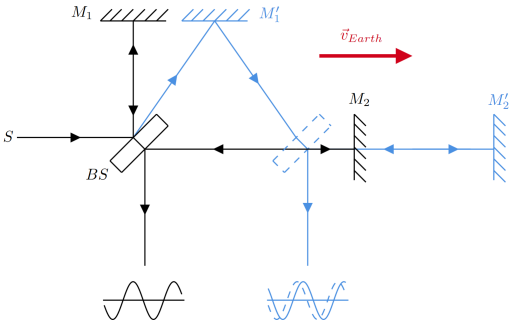


图 6 迈克耳孙-莫雷实验：利用分束器将一束光分开，并使其沿两个互相垂直的方向传播后重新合并。如果存在因地球相对于以太的速度而产生的“以太风”，就会导致可观测的条纹位移。

“害群之马”。首先，构建简单的以太力学图景被证明是不可能的，因此这一设想被抛弃。这在很大程度上导致了力学观点的崩溃。其次，我们不得不放弃这样的希望：以太的存在能够使某个坐标系脱颖而出，从而确认绝对运动，而不只是相对运动。除了以太能够承载波之外，这本是以太表明并证实其存在的唯一方式。我们让以太成为现实的一切尝试都失败了。”

让我们回到莫雷实验。一篇发表于《物理评论》的论文Eddy等人（1898年）也发表于1898年，对理论动机作了更多解释。实验旨在检验Eddy的预测：圆偏振光的传播速度不同于线偏振光。在其中一个

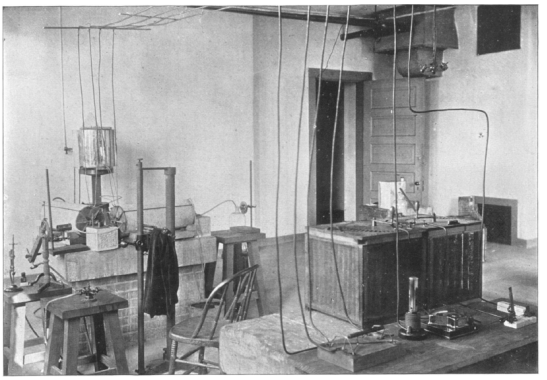


图7 Eddy、Morley 和 Miller 的实验，他们在 Eddy等人 （1898年）中描述了他们的装置：*“At the extreme right are seen the commutator, amperemeter, and resistancecoils, used in managing the electric current. The wooden stand at the extreme left carries the source of light and the condensing lens. The adjacent stone pier carries the coils; between them is seen the cubical block of stone which supports the diagonally placed mirrors ... Apparently just above this block, but really some yards to the rear, is a double tank supplying water and carbon bisulphide to the apparatus. The reading telescope with which the observations were made is marked by the hanging cloth. On the left edge of the pier is seen an iron stand carrying a Nicol's prism for polarizing the ray of light sent through the apparatus; on the wooden stand to the right of the pier is seen the analyzer, by means of which the rotation produced was measured while the current was adjusted so as to secure the rotation desired.”* 1898 。摘自Eddy等人（ ）。

干涉仪的两条光路，使偏振因充满二硫化碳的容器中的法拉第效应而发生旋转。干涉仪的另一条光路中也放置了一个类似的容器，但没有磁场；图 7 是他们装置的照片。

他们写道，结果再次是否定的：“在美国科学促进会波士顿会议上报告的结果是：我们确信，当与太阳*D*线对应的光穿过处于磁场中的一百二十厘米长的二硫化碳时，该磁场使其偏振平面旋转半周，但速度变化并未达到六千万分之一，甚至很可能也没有达到一亿分之一。”Eddy等人(1898年)。

以我们今天的知识来看，其理论基础并不十分清楚。实际上，磁场只是这种假设效应的间接成因；据我们理解，这种效应也应存在于糖溶液等旋光介质中，因为在这些介质中，无需磁场也能观察到偏振旋转。

最后值得一提的是，两位实验物理学家之一 Miller 曾花数年时间尝试重复迈克耳孙-莫雷实验，并于 1925年 报告了一项阳性结果，由此掀起了以太漂移实验的复兴 Navarro （2018年），而这些实验最终确认了明确的阴性结果。

直到1929年，才有报道称有人再次尝试观测磁场对光的影响。当时，Watson在皇家学会会刊上发表了

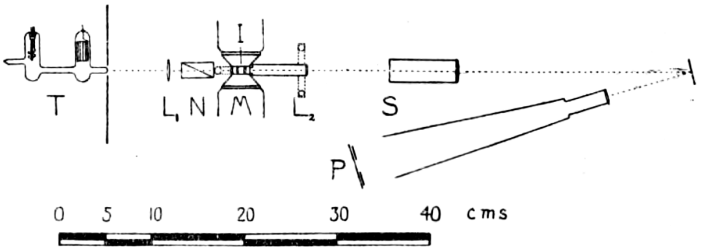


图 8 Watson 搜寻横向磁场对真空中光速影响的实验。他使用氖管放电作为光子源 T，并用尼科尔棱镜 N 对其进行偏振，随后将其置于磁体 M 内的法布里-珀罗干涉仪 I 中，以产生干涉图样。他预期会出现条纹展宽，但测得的结果在不确定度范围内没有变化。摘自 Watson (1929年)。

伦敦学会进行了实验的结果，该实验是在卡文迪许实验室完成的Watson (1929年）。自Morley上次尝试以来的三十年间，相对论和量子力学理论相继诞生。Watson的理论动机考虑到了这一点：“现代物理学发展出了两种互补、却显然相互矛盾的描述方式，用以描述辐射过程以及分子、原子、电子和质子的运动……光子与第二类实体（原子、电子等）之间类比的发展，已达到这样的阶段：在所有情况下，都可以用波动描述来描述粒子的运动，并在海森堡原理的限制范围内，为粒子赋予一个能量—动量四矢量。然而，当前理论中仍存在一项根本区别：第二类的所有实体都具有电磁粒子性质，而光子却尚未被赋予这种性质……本研究旨在尽可能探测光子的磁矩是否存在。”Watson的实验如图8所示。

经尼科尔棱镜偏振的光穿过法布里-珀罗干涉仪，并观测其中的干涉条纹。在法布里-珀罗干涉仪内部，存在一个垂直于传播方向的磁场 $\mathbf{B}$ ($B \approx 1$ 特斯拉)；若光子具有磁矩 $\boldsymbol{\mu}$，则相互作用能 ΔE必然为 $\Delta E = -\boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}$，这也对应于幅度为 $\Delta\nu/\nu = \boldsymbol{\mu} \cdot \mathbf{B}/h\nu$的频率变化。开启磁场后，如果存在这种效应，就应当能看到干涉条纹移动。Watson 得出的结果为零，折射率的变化 Δn 小于 4×10^{-7}。值得注意的是，根据当今的标准模型，预期光子的磁矩为零 Workman 等人 (2022年)。

显然，这项实验广为人知。根据Kapitza的回忆，得知这一点颇为有趣 Kapitza (1980年）：“*20*世纪*30*年代，在卡文迪什实验室，我开发了一种获得磁场的方法，其强度比此前达到的高出一个数量级。 [参见 Kapitza (1927年)] 在一次谈话中，爱因斯坦试图说服我通过实验研究这种影响

磁场对光速的影响。此类实验曾经进行过，但没有发现任何影响。在我的磁场实验中，由于效应取决于磁场强度的平方，测量精度的上限得以提高两个数量级。我向爱因斯坦提出异议：按照当时关于电磁现象的认识，我看不出这种可测量的现象会从何而来。爱因斯坦发现无法证明进行这类实验的必要性后，最终说道：“我认为仁慈的上帝不可能以这样的方式创造世界，以至于磁场无法影响光速。”当然，这种论点很难反驳。”爱因斯坦很可能于1932年访问过Kapitza的实验室；当时他在剑桥逗留了一段时间，与爱丁顿交谈并发表劳斯·鲍尔讲座 Fox (2018年)。Watson当时已不在那里，他于1931年前往加拿大麦吉尔大学任职 大学(1931年)。

需要指出的是，Watson 寻找的是$\mathbf{B}$ 效应，而首次提及真空中的$\mathbf{B}^2$ 效应要追溯到 1961 年 Erber (1961年)，但阿尔伯特·爱因斯坦似乎比其他人都更早理解到，磁场对光速的影响必然取决于$\mathbf{B}^2$。一种可能的解释是，爱因斯坦深信c 不可能被超越，因此磁场只能使其降低，也就是说，在真空中存在磁场时，折射率必须大于 1，无论$\mathbf{B}$的符号为何。$\mathbf{B}^2$ 因此，而非$\mathbf{B}$。

同期，Farr 和 Banwell 在新西兰研究同一现象 Farr 和 Banwell(1932年)，其理论动机与 Watson 的相似。研究结果发表于 1932 年：“本研究在 *Watson* 的论文发表时正在进行，采用了不同的实验方法，所研制的装置得出了与他相同的结论，但灵敏度是他所报告结果的二十倍”。后来，Banwell 和 Farr (1940年)于 1940 年发表的文章介绍了一种灵敏度更高的改进装置，因此测得的结果仍为零，但精确度提高了 30 倍： $\Delta n < 2 \times 10^{-9}$。Farr 和 Banwell 的装置是一台迈克耳孙干涉仪，其中一条光路受到约 2 T 的磁场作用，磁场方向与光传播方向垂直，见图 9。

在 Farr 和 Banwell 的第一篇和第二篇论文之间，理论层面的一切都发生了变化。狄拉克 狄拉克 (1935年）、欧拉Euler 和 Kochel(1935年）、海森堡 海森堡和欧拉 (1936年）、WeisskopfWeisskopf(1936年）发展了真空量子理论，也就是说，他们推导出一种理论关系，将真空中的矢量 $\mathbf{D}$、$\mathbf{H}$ 与麦克斯韦方程中出现的矢量 $\mathbf{E}$、$\mathbf{B}$联系起来，这一切是在新量子理论的框架下完成的。

Weisskopf 1936年的文章Weisskopf （1936年），题为《基于电子量子理论的真空电动力学》，极具启发性。质能等价起着非常重要的作用：一个光量子可以在真空中被吸收并转化为物质

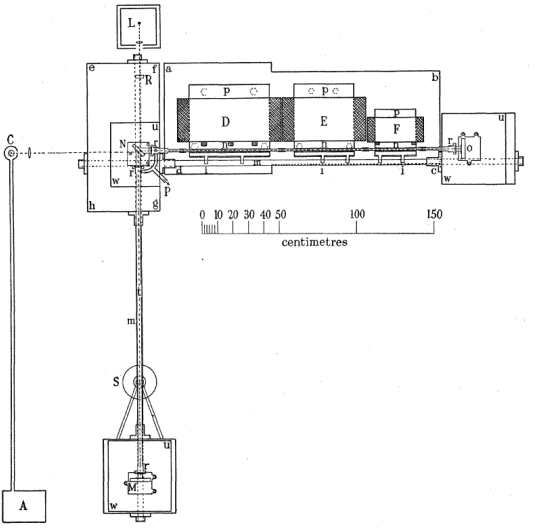


图 9 Farr 和 Banwell 的实验旨在探测真空中横向磁场是否会改变光速。实验物理学家使用了迈克耳孙-莫雷装置，并在其中一条光路上放置了一个可产生强度接近 2 特斯拉的磁场的磁线圈。如果磁场会影响光速，就应当能观察到干涉条纹的位移。实验结果表明，真空中光速的变化小于 14 米每秒。图中，干涉仪由 L（光源）、N（分束器）以及 M 和 O（反射镜）构成。电磁铁为 D、E 和 F，观测在 C 处进行。图片摘自 Banwell 和 Farr (1940年)。

在其他电磁场存在时，这种转化是通过产生电子-正电子对实现的。真空中的光吸收现象与经典电动力学不相容。按照经典理论，多个场可以叠加而互不相互作用。Weisskopf 对这一现象作了如下概述：“当光穿过电磁场时，其表现就好像真空在这些场的作用下具有不同于单位值的介电常数。”因此，磁场 $\mathbf{B}$ 对真空中光的传播的影响，就是使 ε 和 μ，从而使 v 和 n成为$\mathbf{B}$的函数。要计算电磁场能量的新表达式，我们需要一种本质上非线性的理论。这就要求为狄拉克方程所预言的电子负能态找到物理意义。狄拉克本人在他于1934年提交给狄拉克(1935年）的报告中，向第七届索尔维物理学会议：原子核的结构与性质 ´和 ´，题为《 ´正电子理论》，写道：“负能态中的电子是一种完全异于我们经验的事物，但我们仍然可以从理论角度对其加以研究；……让我们承认，在我们所知的宇宙中，负能态几乎全都被电子占据，而由此形成的分布由于在整个空间中均匀一致，无法被我们观测到。在这些条件下，任何未被占据的负能态都代表着这种均匀性的破缺，必然会以某种空穴的形式显现于观测之中。它

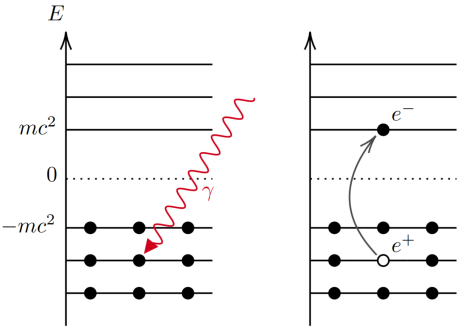


图 10 狄拉克对其方程所导出的负能态作出的诠释。无数电子占据着这些负能态，激发其中一个能态便可产生一个虚电子。留下的虚空穴是一种质量相同但电荷相反、当时尚待发现的新粒子——正电子。

可以认为这些空缺构成了正电子”。狄拉克所描述情形的示意图见图10。

狄拉克的量子真空模型无法完全自洽，因为真空中的电子集合具有无限的电荷密度和电流密度。尽管如此，该模型表明，电子对产生这一现象可以解释为：在电磁场的作用下，真空电子跃迁至正能态（电子），同时在真空中产生一个空穴（正电子）。

量子真空相关的计算显然因这种不自洽性而变得复杂。要描述真实情形，我们需要用一个无穷量（未受扰动的真空能量）减去另一个无穷量（受扰动的真空能量，例如受到磁场扰动时的真空能量）。狄拉克狄拉克(1935年）、欧拉Euler 和 Kochel(1935年）、海森堡海森堡和欧拉(1936年）、WeisskopfWeisskopf (1936年）找到了一种毫无疑问可行的相减方法。该方法基于这样一种考虑：当不存在场时，真空中电子的能量、电流密度和电荷密度，以及真空的电极化率和磁极化率，都是对应于发散级数的量；然而，仍然可以赋予它们明确的物理意义（另见Schweber (1994年））。因此，可以计算电磁场存在时真空的性质，并给出**D**、**H** 与**E**、**B**之间的关系。真空的电磁特性可以用电容率和磁导率来描述，它们取决于所存在的场Weisskopf (1936年）。

事实上，描述波与场之间相互作用的有效拉格朗日量，其数学形式由必须满足相对论不变量这一要求所确定。因此，它必定是电磁场的相对论不变量的组合 $\left(\epsilon_0 E^2 - B^2/\mu_0\right)$ 以及$\sqrt{\epsilon_0/\mu_0}\mathbf{E}\cdot\mathbf{B}$ Bat- testi 和 Rizzo~~(2013)~~。可以看出，对于在真空中传播的平面波，由于 $E = B/c$ 并且$\mathbf{E}\cdot\mathbf{B} = 0$ 不可能产生非线性效应。

对于经典麦克斯韦电动力学，叠加原理成立。与光相关的电磁场只需与外部电磁场相加，两者之间不可能发生相互作用。麦克斯韦理论本质上是线性的，场的能量密度可以写成

$$U_0 = \frac{1}{2}\left(\epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0}\right). \tag{1}$$

现在，Weisskopf 的预测是Battesti和Rizzo （2013）

$$U \approx \frac{1}{2}\left(\epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0}\right) + \frac{2\alpha^2\hbar^3}{45 m_e^4 c^5}\left(\epsilon_0 E^2 - \frac{B^2}{\mu_0}\right)\left(3\epsilon_0 E^2 + \frac{B^2}{\mu_0}\right) + \frac{14\alpha^2\hbar^3}{45 m_e^4 c^5}\frac{\epsilon_0}{\mu_0}(\mathbf{E}\cdot\mathbf{B})^2. \tag{2}$$

20世纪50年代，Feynman、Schwinger 和 Tomonaga 提出了量子电动力学（QED），该理论至今仍然大获成功。1949年，Feynman 提出了一种新的正电子理论Feynman （1949）：“通过重新诠释狄拉克方程的解，以取代空穴理论，分析了在给定外部势、忽略正电子与电子之间相互作用时，正电子和电子的行为问题。在这种解法中，‘负能态’以一种可以这样描绘的形式出现……在时空中，它们是从外部势向外传播、并沿时间反向行进的波。从实验上看，这种波对应于一个正电子接近该势并湮灭电子。”从这些话中，我们认出了通常所说的费曼图。同一篇文章的附录中Feynman （1949）写道：“证明了这种方法与空穴理论等价……”这意味着，采用 Feynman 的新方法，再次得到了海森堡和欧拉给出的结果。

Schwinger 后来也证实了光在真空中的传播具有非线性。关于量子电动力学诞生的详尽历史研究，可参见 Schweber(1994年。在他于1950年发表的文章中，Schwinger(1951年) 写道：“量子电动力学具有若干形式上的不变性，尤其是相对论不变性和规范不变性。然而，采用常规方法进行的具体计算可能会得出违背这些要求的结果，这是当前场论中固有的发散所导致的……在恒定场以及以光速传播的平面波场这两种情况下，可以得到显式解。对于恒定场（即缓慢变化的场），对场强和电荷进行重整化后，可得到一个经过修正的拉格朗日函数。它与麦克斯韦场的拉格朗日函数不同，差异项意味着电磁场具有非线性行为。这一结果与不久前通过其他方法、从略有不同的观点得出的结果完全一致”，即海森堡和欧拉的研究结果。

因此，真空中的非线性光学效应有着坚实的现代物理学基本原理基础。

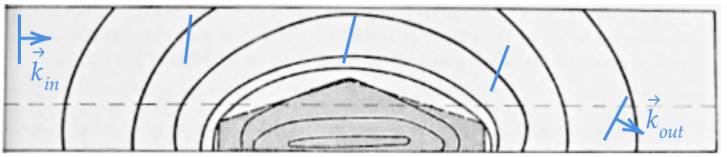


图 11 琼斯实验：磁极产生强磁场梯度，以场强恒定的等值线表示；在磁极附近传播的光波前比远离磁极传播的波前速度更慢。因此，平面波发生偏折。为便于说明，图中夸大了光路的偏折程度；实际光路以虚线表示。摘自 琼斯 (1961年)。

量子电动力学中的真空与经典真空截然不同，后者不过是虚无。量子真空具有可被电磁场改变的性质。1951年，狄拉克致信《自然》的编辑，信件标题为“存在以太吗？”狄拉克 (1951年）文中写道：“我们现在可以看到，我们很可能确实有一种以太，它遵循量子力学并符合相对论，前提是我们愿意将完美真空视为一种理想化状态，认为它在实践中无法达到。从实验角度来看，似乎没有什么理由反对这一点。我们必须对关于真空的理论观念作出一些深刻的改变。它不再是一种平凡的状态，而是需要精密的数学才能描述。”（另见 Navarro (2018年））。

狄拉克未能让物理学家对一种新的以太理论产生兴趣，但无论如何，真空在量子物理学中的定义确实很复杂。例如，艾奇逊 艾奇逊(1985年)给出了以下论述：“这里把基本的理论实体——量子场——视为类似于具有（无穷多个）自由度的量子力学系统。于是，相互作用的量子场系统类似于固体物理学中的复杂系统；它可以处于不同的能态，即基态和各种激发态。场系统的激发态以激发量子的存在为特征，这些激发量子就是构成我们物质世界的粒子（电子、夸克、光子.....）。在场系统的基态中，不存在激发量子，因此也不存在粒子：真空就是基态。”

六十年代，人们再次尝试探测折射率的变化n ，研究对象是在磁场存在时的真空；这项工作由苏格兰阿伯丁大学的 R. V. 琼斯开展琼斯(1961年)“原则上，实验装置是让一束白光在真空中穿过一个横向磁场‘棱镜’，其设计类似于拉比（*1929*年）改进斯特恩–盖拉赫实验时所用的装置，并以光电方式探测磁场对光束造成的任何偏转”。

偏振白光经过一个 0.8 特斯拉磁极附近。磁场梯度应会引起 n 的空间变化，并使光发生相应的偏转，见图 11。琼斯装置对折射率的灵敏度约为 2×10^{-13}。

本文作者还声称：“有形的效应将违背经典电磁学的原理，而且似乎……迄今为止，量子电动力学尚未对此作出任何预测。如果发现了这种效应，那将会非常有趣。因此，尽管该实验不太可能得出阳性结果，但它属于基础性零结果实验，只要灵敏度有了显著提升，就值得重复进行。”。

琼斯的实验方法对于地面实验室而言颇具独创性，但同一现象在宇宙中相当常见，尤其是在脉冲星周围。脉冲星是磁场高达 10^9 特斯拉的天体。从脉冲星发出的或经过其附近的电磁辐射无法沿直线传播，而必须像琼斯实验中那样沿着场梯度前进（例如，参见Dupays 等人(2005年)及其中的参考文献）。

另一方面，1961年，T. Erber 在《自然》上发表了一篇关于“磁场中的光速”Erber (1961年的期刊论文。Erber 介绍了已经开展的实验，并提出了其他不同的方法。此外，在理论层面，他建立了该效应与 Euler 和 Kochel 的拉格朗日量之间的联系Euler 和 Kochel (1935年)，同时还引用了 Weisskopf Weisskopf (1936年)，以及标准介质中的科顿-穆顿效应与真空中的该效应之间的联系。

事实上，物质介质中垂直于光的传播方向的磁场效应早在20世纪初就已被发现。Kerr 在1901年和 Majorana 在1902年观察到，在水中悬浮的 Fe_3O_4 中，垂直于光的传播方向的横向磁场所产生的微弱双折射 Kerr (1901年)以及在 Fe 的胶体溶液中 Majo-rana (1902b,a)。这种效应也被称为科顿-穆顿效应，因为在1905年至1907年间，Cotton 和 Mouton 至少发表了21篇关于液体和胶体溶液中该效应的论文 Cotton (1923年)。在受到磁场 $\mathbf{B}$作用且磁场垂直于传播方向的介质中传播的线偏振光会变为椭圆偏振光。

换句话说，平行于磁场偏振的光，其速度 $v_{\parallel}$ 和折射率 $n_{\parallel}$，与垂直于磁场偏振的光的速度 $v_{\perp}$ 和折射率 $n_{\perp}$ 不同。$n_{\parallel}$ 与 $n_{\perp}$ 之间的差值Δn 与$\mathbf{B}^2$成正比。用更一般的光学术语来说，这就是所谓的线性双折射。

事实上，对 Δn 的计算直到七十年代才完成，由 Bialynicka-Birula和 Bialynicki-Birula (1970年)完成；Adler (1971年)给出的期望值为：

$$\Delta n_{VCM} = \frac{2\alpha^2\hbar^3}{15m_e^4c^5}\frac{B_0^2}{\mu_0} \approx 4\times10^{-24}\,B_0^2 \tag{3}$$

其中 B_0 以特斯拉单位表示。此外，这种效应与光波长无关Battesti和Rizzo (2013)。

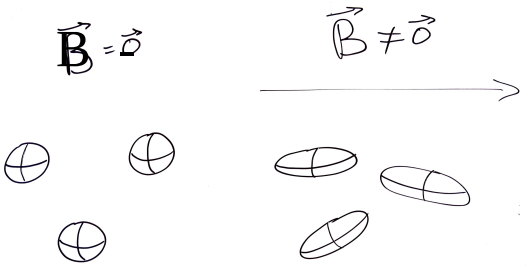


图 12 真空如同一种气体：根据量子电动力学，真空具有非零的科顿-穆顿效应，因此其表现如同一种低压惰性气体，其电子云会被磁场扭曲。

需要强调的是，电场 E_0 也会产生类似的线性双折射

$$\Delta n_{VK} = \frac{2\alpha^2\hbar^3}{15m_e^4c^5}\epsilon_0 E_0^2 \tag{4}$$

因此，1 特斯拉的磁场产生的效应与约 300 MV/m 的电场相同，换算系数为 c。因此，实验物理学家将工作重点放在了 B 上，因为产生 1 特斯拉的磁场在技术上远比产生 300 MV/m 的电场简单。

因此，量子电动力学预言真空中会出现与物质介质中类似的效应，但这一数值与标准介质效应相比如何？它是否小到无法测量？

科顿-穆顿效应最弱的气体，是原子序数较小的稀有气体：氖和氦 Rizzo等人 (1997)。氦的首次测量始于 1991 年 Cameron等人 (1991年a)；在温度为 20°C、压强为 1 bar 且存在 1 特斯拉磁场的条件下，预期的 Δn 值约为 2.4×10^{-16}。在相同条件下，约 2×10^{-5} mbar，即 密度约为 5×10^{17} 个氦原子每立方米^3,时，产生的效应与真空中预期的效应相同。从这个角度来看，真空的“原子”效应是宏观的，其效应如此显著，以至于即使在残余气体压强为 2×10^{-9} mbar 的 O_2 Rizzo等人(1997)的条件下也能测量。从这个角度来看，真空因此表现得像一种极其微妙的惰性气体，其原子电流分布会因磁场的存在而发生形变，见图12。

将真空类比为气体存在一个问题：气体总是伴随着热运动，而真空或许应被视为一种完全透明、均匀且各向同性的晶体。固态标准介质在压强作用下无论如何都会产生双折射。这就是所谓的应力双折射。实际上， B^2/μ_0 的量纲是压强。例如，10 T约对应于 8×10^6 Pa。因此，真空 Δn 可以写成 $\Delta n = C(B^2/\mu_0)$，其中 $C\approx5\times10^{-30}\,\mathrm{Pa}^{-1}$。为了便于讨论，我们将其与BK7玻璃进行比较。对于这种材料， C 约为$2.7\times10^{-12}\,\mathrm{Pa}^{-1}$ Brandi等人 (2001年)。从这一角度来看，真空

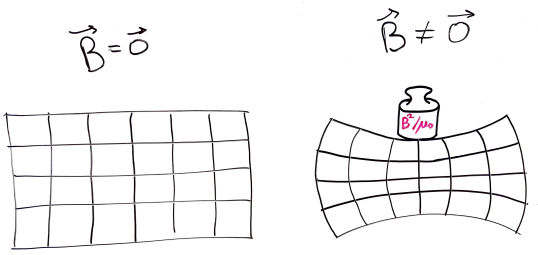


图 13 真空如同晶格：根据量子电动力学，真空存在非零的应力双折射。沿某一轴受到压强作用时，会 B^2/μ_0 产生双折射。

表现得仿佛存在一种受磁场压强扰动的晶格，见图 13。

气体或晶体都是富有想象力的类比，但必须非常谨慎，不能让以太再次出现在物理学中。

4 当代

该 Δn 数值的发表标志着一项重要且持续开展的实验活动的开始，同时也有多项实验方案相继发表。因此，近年来及更早些年间发表了许多综述，从历史和技术角度详细介绍了理论方面、不同的实验方法及其结果（例如 例如 Battesti和Rizzo (2013);Battesti等人 (2018年)），其中也介绍了天体物理学测试的相关信息。

主要事件发生在1979年，当时 E. Iacopini 和 E. Zavattini 发表了一项方案 Iacopini 和 Zavattini (1979年)，该方案于1993年最终完成 Cameron等人 (1993)，这得益于他们与 A. Melissinos 的合作。目前正在开发的实验 Cad`ene 等人 (2014年)；Fan等人 (2017) 是这一原始构想的不同版本，而报告了真空磁场双折射最佳限值的实验 PVLAS 也由 Zavattini 发起 Ejlli 等人 (2020年)。

1979年提出的实验设计 Iacopini 和 Zavattini (1979年) 是对 Buckingham、Prichard 和 Whiffen 最初使用的装置的改进版本 Buckingham等人 (1967年)，之后不同团队也用该装置测量气体中的科顿-穆顿效应Rizzo等人 (1997)，如图14所示。

放弃直接测量$v_\parallel$ ($n_\parallel$)或 $v_\perp$ ($n_\perp$)，转而通过测量波长为 λ 的光沿长度为 L 的光程传播时获得的椭圆率 Ψ，来测量折射率 Δn 的各向异性；此时存在磁场**B**

$$\Psi = \pi \frac{L}{\lambda} \Delta n. \tag{5}$$

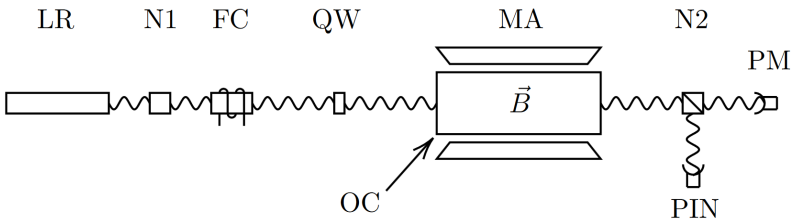


图 14 Iacopini 和 Zavattini 提出的利用偏振测量技术测量真空磁双折射的方案。激光器 LR 发出的光经过第一个偏振片 N1 偏振，随后由椭圆率调制器——由法拉第元件 FC 和四分之一波片 QW 组合而成——进行调制；光学腔 OC 用于增强由磁体 MA 提供的横向磁场 $\vec{B}$ 所产生的信号。最后，利用第二个偏振片 N2 和两个光电二极管 PIN 与 PM 对出射光的偏振进行分析。

光在进入磁场区域之前，先通过一个光学系统，该系统以载波频率 ν_{ca}调制椭圆率。最后，使用与初始偏振方向成 90° 角的偏振棱镜分析偏振，并由光电二极管探测光信号。Rizzo等人(1997指出，光电二极管输出的信号中含有频率为 ν_{ca} 的调制分量，其振幅与 Ψ 成正比（零差技术）。这种装置主要受光学系统中始终存在的静态双折射限制。Rizzo等人(1997）。使用这种装置，H¨uttner的团队将测量 Δn的灵敏度提高到 2.5×10^{-16}，对应的 B^2 为 1 T^2 （H¨uttner等人(1987年）。

1979年的方案 Iacopini 和 Zavattini（1979）的主要创新，是通过调制产生磁场 B 的磁体供电电流，使待测椭圆率 Ψ以频率 ν_m 进行调制（Cameron 等人，1993）。这项技术称为外差技术，光电二极管信号中包含频率为 $\nu_\pm = \nu_{ca} \pm \nu_m$ 的调制（Rizzo等人，1997）。通过使用光学腔，磁场作用区域内的光程也得以延长：在实验的原始版本中，光学腔不处于共振状态（Iacopini 和 Zavattini，1979；Cameron等人，1993），而在 PVLAS 版本中则处于共振状态（Ejlli 等，2020）。因此，该装置的灵敏度得到提升，并且通过在布鲁克海文国家实验室（美国纽约州）开展的实验，首次测量了氖（Cameron等人，1991年b）和氦（Cameron等人，1991年a）的科顿-穆顿效应（Cameron等人，1993）。 B^2 的数值约为 4 特斯拉^2 ，光程超过一公里；结果仍与零相符。不过，实验物理学家仍将量子电动力学预测的科顿-穆顿效应测量到了“仅仅”五个数量级的差距。

实际上，布鲁克海文实验的动机不仅是量子电动力学效应，还在于标准模型之外所预言的粒子存在，因此光速可能会受到磁场的影响。正如 Maiani 等人（1986年）最早报告的那样，轴子等粒子可以通过磁场与光子耦合。光子在其

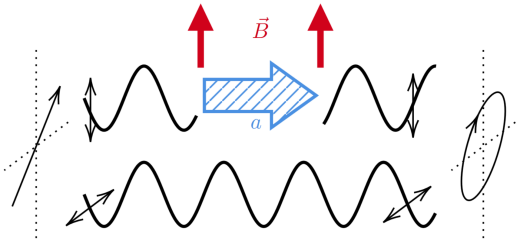


图 15 假想的轴子粒子可能对真空磁双折射产生贡献。事实上，横向磁场可以产生沿着光偏振方向传播的轴子。由于轴子具有质量，其传播速度低于光速；当其重新转化为光子时，只会在一种偏振中引起相移。这对应于双折射。

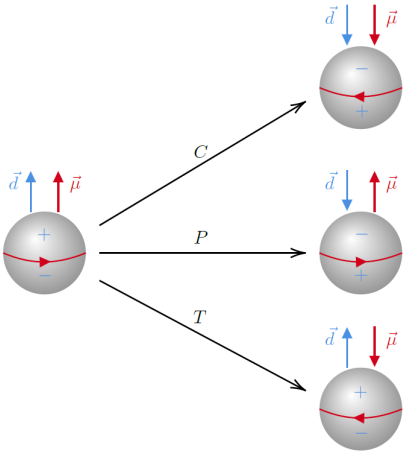


图 16 在具有磁偶极矩和电偶极矩 $\boldsymbol{\mu}$ 以及$\mathbf{d}$的中子上表示对称变换 P 和 T。标准模型预言存在CP对称性破缺，因此也预言中子具有非零电偶极矩。但是，实验结果为零：这就是强CP问题。

在磁场中传播时，可能转变为以较低速度传播的类轴子粒子（ALP），因为类轴子粒子可能具有质量；随后它与磁场相互作用，再次变为光子。只有偏振方向平行于磁场的光子才能振荡转化为类轴子粒子，因此 $n_{\|} \neq n_{\perp}$ 这对应于双折射，见图 15。

轴子是由Peccei和 Quinn(1977年) 即 为了解决所谓的强CP问题而引入的：为什么量子色动力学似乎保留了CP对称性？这一问题表现为实验测得中子电偶极矩为零，而理论预言其应为非零值，除非对某些理论参数进行极不可能的精细调节。图 16 展示了中子的电偶极矩如何破坏CP对称性。

布鲁克海文实验的结束伴随着一项新实验 PVLAS 的启动，其最终结果已于2020年发表

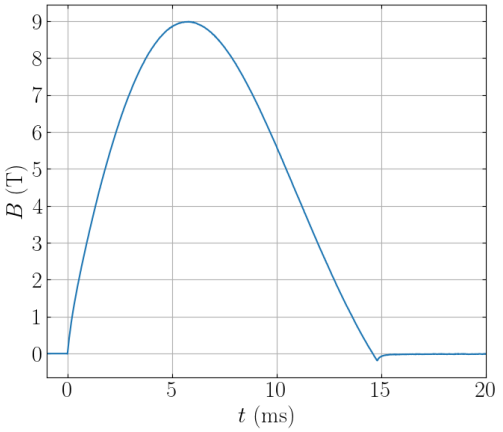


图17 BMV实验中脉冲磁场的典型时间变化，磁场上升时间约为6毫秒，最高可达9特斯拉。

历经 25 年多的研究 Ejlli 等人 (2020年)。报告的极限是迄今达到的最佳水平：$\Delta n \leq 2 \times 10^{-23}$ 对于 1 特斯拉的磁场。PVLAS 的结果仍与零相容，但其水平已清楚表明，量子电动力学对真空磁双折射的预测并非小到无法测量。这项实验的一项特点是使用直流磁铁（超导磁铁或永磁体），并通过旋转磁铁来调制效应，而不是像布鲁克海文实验那样调制磁铁的驱动电流。旋转磁体相当于旋转双折射轴，因此可以调制待测的椭圆率。

如今，尽管已有许多实验方案被提出 Battesti等人(2018年），目前只有两项实验正在开展 Cad`ene等人 (2014年）；Fan等人(2017）。两项实验均采用脉冲场，这一技术最早由 Rizzo (1998)提出，原则上可实现高于10特斯拉的快速调制磁场，见图17。

如 B´eard等人 (2021)所述，这种方法固然有一定优势，但也带来了一系列技术问题，因此迄今仍无法利用脉冲场达到PVLAS的水平。

5 结论

那么，在磁场中，真空中的光速会发生变化吗?

按照量子电动力学，答案是肯定的。在 10^{24} 1 特斯拉磁场中，光的偏振会使其变化约几个百分点。遗憾的是，我们尚未能通过实验加以证明。量子电动力学对带电粒子和束缚系统的预测已得到非常精确的验证（参见 Sailer等人 （2022年）及其中的参考文献）。在所有这类实验中，通常使用电磁波及其组成粒子——光子，作为

例如，用于测量能级的量子电动力学修正。在这里，电磁场本身的行为会按照量子电动力学发生改变；此外，尽管其他现象都是微观的，但这里预测的光速变化却是量子电动力学罕见的宏观表现之一。如果实验成功，那么在 PVLAS 这类实验中，预期的椭圆率将通过在磁场中传播约 500 千米而累积起来。从概念上说，这与为了正确写出电子电偶极场的数学形式而必须在经典表达式中加入量子电动力学修正（例如 Fouch´e 等人 (2016)），截然不同；后者则是说，真空在宏观层面上的表现与物质介质完全一样。从某种意义上说，量子电动力学以狭义相对论为基础，而狭义相对论本意在于摒弃以太观念，但结果却产生了一种新形式的同一以太概念，而且它还会像宏观数量的氦气那样，对电磁场的存在产生敏感响应。这令人颇感困惑。

由于量子电动力学对带电粒子和束缚系统的预测似乎总是正确的，我们也预期它对电磁波同样适用；然而，在量子真空中，一切都存在于虚态之中，包括我们已知的和尚未知的一切。轴子粒子就是一个例子，我们在上一节中讨论过，并指出在磁场存在时，它们的虚存在会影响光在真空中的传播。因此，实验结果或许能为探索宇宙打开一扇新的窗口，再次改变我们用来描述宇宙的方式，并让未来的物理学家有机会为本文回顾的历史增添几页新篇章。

参考文献

Adler SL（1971年）强磁场中的光子裂变与光子色散。《物理年鉴》**67** 599–647。https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0003-4916(71)90154-0

Aitchison IJR（1985年）空虚中的丰盛'：现代量子场论中的真空。《当代物理学》**26**(**4**)333–391。https://doi.org/10.1080/00107518508219107

亚里士多德（公元前350年）《物理学》。http://classics.mit.edu/Aristotle/physics.html

Banwell CJ、Farr CC（1940年）对横向磁场中真空内光传播速度的进一步研究。《伦敦皇家学会会刊 *A* 辑》**175页**1–25。https://doi.org/10.1098/rspa.1940.0040

Battesti R，Rizzo C（2013）量子真空的磁性和电学性质。《物理学进展报告》**76** 016401。https://doi.org/https://doi.org/10.1088/0034-4885/76/1/016401

Battesti R, B´eard J, B¨oser S, 等人（2018年）基础物理学中的强磁场。《物理学报告》**765-766** 1–39。https://doi.org/10.1016/j.physrep.2018.07.005

B´eard J, Agil J, Battesti R, 等人（2021年）用于测量磁性线性双折射的新型脉冲磁体。《科学仪器评论》**92(10)** 104710。https://doi.org/10.1063/5.0064111

Bialynicka-Birula Z, Bialynicki-Birula I（1970年）量子电动力学中的非线性效应：外场中的光子传播与光子裂变。《物理评论*D*》**2** 2341–2345。https://doi.org/10.1103/PhysRevD.2.2341

Bradley J（1728年）IV. 牛津大学萨维尔天文学教授、英国皇家学会会士James Bradley牧师致天文学家皇家埃德蒙·哈雷博士的信，介绍新发现的恒星运动。《伦敦皇家学会哲学汇刊》**35**（**406**）637–661。https://doi.org/10.1098/rstl.1727.0064

Brandi F、Polacco E、Ruoso G（2001年）应力光学调制器：一种用于高灵敏度线性双折射测量的新型器件。《测量科学与技术》**12**（**9**）1503–1508。https://doi.org/10.1088/0957-0233/12/9/317

Buckingham AD、Prichard WH、Whiffen DH（1967年）若干抗磁性气体的磁致双折射。法拉第学会汇刊**63** 1057–1064。https://doi.org/10.1039/TF9676301057

Cad`ene A, Berceau P, Fouch´e M 等（2014）利用脉冲磁场测量真空磁致线性双折射：BMV实验的现状。*Eur. Phys. J.D* **68** 16.https://doi.org/10.1140/epjd/e2013-40725-9

Cameron R、Cantatore G、Melissinos AC 等（1991年a）首次测量氦气的磁致双折射。*Phys. Lett. A* **157** 125–128.https://doi.org/10.1016/0375-9601(91)90083-K

Cameron R、Halama H、Nezrick FA 等（1991年b）测量氖气的磁致双折射。*J. Opt. Soc. Am. B* **8** 520–524. https://doi.org/10.1364/JOSAB.8.000520

Cameron R, Cantatore G, Melissinos AC 等（1993）通过光学技术寻找近乎无质量、弱耦合的粒子。《物理评论*D*》**47**3707–3725。https://doi.org/10.1103/PhysRevD.47.3707

Cohen IB（1940年）《罗默与首次测定光速》（1676年）。《伊西斯》**31**（**2**）327–379。https://doi.org/10.1086/347594

Cotton MA（1923年）科学工作报告。法国大学出版社，巴黎，
https://www.academie-sciences.fr/pdf/dossiers/Cotton/Cotton
pdf/Cottonnotice.pdf

Darrigol O（2003年）从安培到爱因斯坦的电动力学

Darrigol O（2012年）从古希腊到十九世纪的光学史

笛卡尔 R（1634年）笛卡尔致 Beeckman，1634年8月22日，见 Tannery 1908，第307–12页。https://www.dbnl.org/tekst/beec002jour0401/beec002jour0401
0042.php

笛卡尔 R（1647年）《哲学原理》。第二部分，第10和第11段，
https://www.unicaen.fr/puc/sources/prodescartes//tdm/descartes/Oeuvres/Traductions/principes.xml

狄拉克 (1935年)《原子核的结构与性质：1933年10月22日至29日在布鲁塞尔举行的第七届索尔维国际物理学研究所物理会议报告与讨论》´，´第`十 `届物理会议于1933年10月22日至29日在布鲁塞尔举行，由索尔维国际物理学研究所主办，第203页。
https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k5696894m.texteImage

狄拉克 (1951年)《有以太吗？》《自然》**168卷**906–907页。
https://doi.org/https://doi.org/10.1038/168906a0

Dupays A、Robilliard C、Rizzo C 等 (2005年)《观测中子星双星系统中的量子真空透镜效应》。《物理评论快报》**94**（**16**）161101页。
https://doi.org/10.1103/physrevlett.94.161101

Eddy HT、MorleyEW、Miller DC (1898年)《磁场中的光速》。《物理评论》（第一辑）**7**（**5**）283–295页。https://doi.org/10.1103/physrevseriesi.7.283

爱因斯坦 A，英费尔德 L（1966）《物理学的进化》。（纽约：西蒙与舒斯特）第175页

Ejlli A，Della Valle F，Gastaldi U，等（2020）PVLAS实验：历经25年测量真空磁双折射。《物理学报告》**871卷**1–74页。
https://doi.org/10.1016/j.physrep.2020.06.001

Erber T（1961年）磁场中的光速。《自然》**190**(**4770**) 25–27。
https://doi.org/10.1038/190025a0

欧几里得（-300）《光学》。
http://philomatica.org/wp-content/uploads/2013/01/Optics-of-Euclid.pdf

¨Euler H，Kochel B（1935年）狄拉克理论下光与光的散射。《自然科学》**23** 246–247。https://doi.org/10.1007/

BF01493898

Fan X, Kamioka S, Inada T, 等 (2017) OVAL 实验：一种利用高重复频率脉冲磁体测量真空磁双折射的新实验。*The European Physical Journal D***71**(**11**) 308. https://doi.org/10.1140/epjd/e2017-80290-7

Faraday M (1846a) I.《电学实验研究》——第十九辑。《伦敦皇家学会哲学汇刊》**136** 1–20. https://doi.org/10.1098/rstl.1846.0001

Faraday M (1846b) XLIX.《电学实验研究》——第十九辑。伦敦、爱丁堡和都柏林哲学杂志与科学期刊 **28**(**187**) 294–317. https://doi.org/10.1080/14786444608645086

Farr CC, Banwell CJ (1932年) 横向磁场中真空里的光的传播速度。《伦敦皇家学会会刊 *A* 辑》**137** 275–282. https://doi.org/10.1098/rspa.1932.0135

Feynman RP (1949) 正电子理论。《物理评论》**76**(**6**) 749–759.https://doi.org/10.1103/physrev.76.749

Fizeau H (1851) 关于光以太的假˙设 ˙以 ´太，以及一项似乎能够证´明物体的运动会改变光在其´内部传播速度的实˙验。科学院每周会议记录 ´ ´科学院 **33**(**13**) 349–355,https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k29901/f351.item

Fouch´e M, Battesti R, Rizzo C（2016）非线性电动力学的限制。《物理评论》*D* **93**（**9**）093020。https://doi.org/10.1103/physrevd.93.093020

Fox R（2018）牛津的爱因斯坦。《札记与记录：皇家学会科学史期刊》**72**（**3**）293–318。https://doi.org/10.1098/rsnr.2018.0002

Ganot A（1859）纯实验物理学课程´： ˙供 ´不具备˙数学知识的人士´使用。https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k205797p/f1.item

Gilbert W（1600年）《论磁》。https://www.lancaster.ac.uk/fass/projects/gilbert/works/demagnete.htm

Heisenberg W, Euler H（1936年）狄拉克正电子理论的推论。物理学杂志 ¨ **98** 714–732. https://doi.org/10.1007/BF01343663

H¨uttner W, Tr¨auble H, Wieland HU 等（1987）分子氢的磁超极化率各向异性。《化学物理快报》**140** 421–426。https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0009-2614(87)80759-5

Iacopini E、Zavattini E（1979）检测磁场诱导真空双折射的实验方法。《物理快报*B*辑》**85** 151–154。https://doi.org/10.1016/0370-2693(79)90797-4

琼斯 RV（1961年）横向磁场中的光速。伦敦皇家学会学报。*A*辑。数学与物理科学**260**(**1300**)47–60。https://doi.org/10.1098/rspa.1961.0012

Kapitza PL（1980年）阿尔伯特·爱因斯坦。《苏联哲学研究》**19**(**3**) 3–10。https://doi.org/10.2753/rsp1061-196719033

Kapitza P（1927年）获取强磁场方法的进一步发展。《伦敦皇家学会会刊》*A*辑：数学与物理类论文**115**(**772**) 658–683。https://doi.org/10.1098/rspa.1927.0116

Kerr J（1901年）《英国科学促进会第七十一次会议报告》。（Spottiswoode and Co. LTD.）第568页，https://www.biodiversitylibrary.org/item/93257#page/692/mode/1up

Lecher E（1884年）一些未获成功的电学实验。《物理学汇编》**20** 151–153，https://www.google.fr/books/edition/Repertoriumder Physik/W-gTAAAAcQAAJ?hl=fr&gbpv=1&pg=PA151&printsec=frontcover

Lodge OJ（1897年）关于以太与物质之间不存在机械联系的实验。《伦敦皇家学会哲学汇刊》*A*辑，刊载数学或物理性质的论文**189** 149–166。https://doi.org/https://doi.org/10.1098/rsta.1897.0006

Magie WF（1935年）《物理学资料集》。麦格劳-希尔，纽约和伦敦，https://archive.org/details/in.ernet.dli.2015.449479/mode/2up

Maiani L、Petronzio R、Zavattini E（1986年）近乎无质量的自旋为零粒子对磁场中光传播的影响。《物理快报*B*辑》**175页**(**3**) 359–363。https://doi.org/http://dx.doi.org/10.1016/0370-2693(86)90869-5

马约拉纳 Q（1902年a）《科学院周报》´第´135卷，第159页。https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k64435428

马约拉纳 Q（1902b）在力线垂直方向上观察到的两种新磁光现象。*RendicontiAcc.Lincei* **XI**(**1**) 374–376, http://operedigitali.lincei.it/rendicontiFMN/rol/visabs.php?lang=it&type=mat&fileId=1580

Mascart E（1889年）《光学论》´第3卷。https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9620853q/f11.item

麦克斯韦 JC（1873年）《电磁学论》第2卷。https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k95176j/f410.item

Morley EW、Eddy HT、Miller DC（1898年）磁场中的光速。*Bul. Western Reserve U.* **1(3)** 50

Navarro J（2018年）《以太与现代性》

帕斯卡 B（1869年）《全集》，卷3`https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k6459589t/f11.item

帕斯卡 J（1647年）Jacqueline Pascal 致 Mme P´erier 的信，写于1647年9月25日（《书信、短文与 ´帕斯卡姐妹回忆录等， ´Faug`ère 编，1845年，第311页）。https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k294479/f339.item.texteImage

Peccei RD、Quinn HR（1977年） *CP* 存在赝粒子时的守恒。《物理评论快报》**38**（**25**）1440–1443。https://doi.org/10.1103/physrevlett.38.1440

柏拉图（公元前400年）《伊翁》。http://classics.mit.edu/Plato/ion.html

Rizzo C（1998）利用100特斯拉脉冲磁体测量真空磁双折射。《欧洲物理快报》（*EPL*）**41**（**5**）483–488。https://doi.org/10.1209/epl/i1998-00178-y

Rizzo C、Rizzo A、Bishop DM（1997）气体中的科顿-穆顿效应：实验与理论。《国际物理化学评论》**16** 81–111。https://doi.org/https://doi.org/10.1080/014423597230316

Rohault J（1671年）物理学论´。https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k9616431b，第82页

Roiti A（1873年a）电流是以太流吗？《物理学年鉴》**150** 164–171, https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k152347/f176.item

Roiti A（1873年b）电流是否为以太流。《新物理学》**9**（**1**）148–153。https://doi.org/10.1007/bf02807909

罗默 O（1676年）“关于光的运动的论证，由科学院的罗默先生发现”´¨，《学者杂志》., ´1676年12月7日，233–6。
https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k56527v/f234.image.r

罗默 O（1677年）关于光的运动的论证，来自巴黎的通讯，刊载于《学者杂志》，此处译为英文版。《伦敦皇家学会哲学汇刊》**12**(**136**) 893–894。
https://doi.org/10.1038/rstl.1677.0024

Sailer T、Debierre V、Harman Z 等（2022年）耦合离子中束缚电子的 g 因子差值测量。《自然》**606**(**7914**) 479–483。https://doi.org/10.1038/s41586-022-04807-w

Schweber SS（1994年）《量子电动力学及其缔造者：戴森、Feynman、Schwinger 和 Tomonaga》

Schwinger J（1951年）论规范不变性与真空极化。《物理评论》**82**(**5**)664–679. https://doi.org/10.1103/physrev.82.664

托里拆利 E（1644年）托里拆利致米开朗基罗·里奇的信，佛罗伦萨，1644年7月11日。http://www.imss.fi.it/multi/torricel/etorat34.html

University Q（1931年）昆士兰大学档案馆。
http://db-archives.library.queensu.ca/index.php/william-heriot-watson-fonds

Watson WH（1929年）横向磁场对真空中光传播的影响。《伦敦皇家学会会刊》。*A*辑，数学与物理类论文**125**(**797**)345–351.
https://doi.org/10.1098/rspa.1929.0172

魏斯科普夫 V（1936年）基于电子量子理论的真空电动力学。丹麦皇家科学院数学与物理学部年刊**14N6** 1– 39,
http://neo-classical-physics.info/uploads/3/0/6/5/3065888/weisskopf-electrodynamics.pdf

W惠特克 SE（1989年）《以太与电学理论史》

Wilberforce LR（1887年）关于一种获得干涉条纹的新方法，以及该方法在确定电的位移电流是否涉及电磁介质平移运动方面的应用。剑桥哲学学会会刊**14** 170–187，https://books.google.fr/books?id=ZTk8AAAAMAAJ&hl=fr&pg=PA170#v=onepage&q&f=false

Wild H（1865）关于光 ¨的同一性¨的研究¨与电流体《物理学年鉴》**200**（**3**）507–512，https://gallica.bnf.fr/ark:/12148/bpt6k152091/f527.item

Workman RL、Burkert VD、Crede V 等（2022年）《粒子物理学评论》。理论与实验物理进展**2022年**（**8**）。https://doi.org/10.1093/ptep/ptac097