

现代物理学基础的思考之六——引力质量与电磁质量之间的关系新探

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, 引力质量与电磁质量之间的关系, 供参考。

[李学生 (Li Xuesheng). 现代物理学基础的思考之六——引力质量与电磁质量之间的关系新探. *Academ Arena* 2017;9(14s): 583-597]. (ISSN 1553-992X). <http://www.sciencepub.net/academia>. 17. doi:[10.7537/marsaaj0914s1717](https://doi.org/10.7537/marsaaj0914s1717).

关键词 (Keywords): 质点; 电荷; 引力; 电力; 空间; 方程; 量子力学; 引力质量; 电磁质量

目录

第一章: 电子的电磁质量不是电子静止质量的一部分

- 1、等效原理的适用范围
- 2、希格斯机制的由来
- 3、现代物理学对于希格斯粒子的实验探究
- 4、希格斯机制的局限性
- 5、电子的电量与电荷运动速度之间的关系
- 6、电的本质的思考
- 7、能量均分定理与布朗粒子
- 8、Einstein 科学美学观
- 9、电子的电磁质量不是电子静止质量的一部分
- 10、规范场的新认识

第二章: 电磁质量的能量

- 1、库仑定律的发现
- 2、引力质量与电磁质量的等价关系
- 3、四个基本假设
- 4、电磁质量的能量
- 5、类星体问题初探
- 6、电磁质量与引力质量的能量转化问题
- 7、电磁质量与引力质量的转化实例分析

第三章: 电磁质量的量子分布

- 1、夸克理论的提出过程回顾
- 2、现代物理学探求夸克的实验
- 3、现代物理学对于夸克理论的探究
- 4、夸克禁闭问题的由来
- 5、现代物理学对于量子化的困惑
- 6、电磁质量量子化认识过程简要回顾
- 7、经典电动力学电磁波辐射理论的质疑
- 8、磁单极子的存在性问题
- 9、现代物理学实验对于磁单极子的寻找
- 10、电磁质量的几何空间结构
- 11、广义相对论与量子力学没有统一的原因

第四章: 电磁质量的波粒二象性

- 1、现代物理学中的三类波

- 2、物质波的验证
 - 3、电磁质量的波粒二象性
 - 4、EPR 悖论的根本性解决
- 第五章：电磁作用与强相互作用之间的关系
- 1、强相互作用的提出过程回顾
 - 2、现代粒子结构的发展
 - 3、强相互作用的研究进展
 - 4、电磁作用与强相互作用之间的关系
 - 5、强相互作用不是短程力
 - 6、电子的结构和质子自旋危机的解决
 - 7、强相互作用和电磁相互作用关系的实验根据
 - 8、惯性概念的发展

第一章 电磁质量的波粒二象性

1、现代物理学中的三类波

机械波是周期性的振动在媒质内的传播，电磁波是周期变化的电磁场的传播。物质波既不是机械波，也不是电磁波，即因为电磁波有周期性，在空间的分布能测定其位置与时间的关系，所以电磁波不是物质波（几率波）。

在当前物理学观念中，波一般划分为三类：第一类是经典介质波，在日常生活中极为多见，譬如水波、声波等等。这类波的产生有两个必要条件：介质和振源。波动方程的经典形式为

$$\frac{\partial^2 \xi}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial y^2} + \frac{\partial^2 \xi}{\partial z^2} = \frac{1}{V^2} \frac{\partial^2 \xi}{\partial t^2} \quad (1.1),$$

其中 V 代表波速，是一个常数，不能分解和迭加。它由介质的性质决定，与振源无关。当空气温度为摄氏零度时，空气中声波的速率为 331m/s，而空气分子的最可几速率是 395m/s，平均速率为 445m/s，方均根速率为 485m/s，空气分子是超声速分子。物理学上波动概念一直沿用弹性介质中机械振动的传播过程所产生的现象，并以惠更斯 1690 年所建立的原理解释之。惠更斯原理：介质中波动传到的各点，不论在同一波阵面或不同波阵面上，都可以看作是发射子波的波源；在任一时刻，这些子波的包迹就是新的波阵面。解释了波动的折射、反射、干涉、衍射等一系列机械波动与声学的现象，并建立波动方程与能流密度方程 $w = \rho A^2 \omega^2 \sin^2 \omega(t - r/v)$ ，其中 ρ 为质量密度， A 为振动幅度， ω 周期变换角速度。在宏观世界，粒子主要表现为引力质量，一个粒子在某地，它就不能同时在另一地，一地被一粒子所占据，另外的粒子就不能占据。机械波是引力场的表现形式，一列波通过某地，另一列波同样也能通过某地，两列波在同一地点是可以叠加的。

$$\nabla^2 E = \frac{1}{C^2} \frac{\partial^2 E}{\partial t^2} \quad (1.2)$$

第二类波是电磁波，方程 (1.2) 中， C 为定值，不存在速度迭加。1905 年 Einstein 提出的“光子”理论，通过赋予电磁场粒子性的方案；“使得光的瞬时效果表现粒子性，而时间平均效果表现波动性”；“电磁场以独立物理实体的地位，能够从源发射出来并且在空间不耗散地传播”。【1】洛伦次变换站在纯粹数学的观点来看，其实是场变换，把相对论称为场论没有错。场和波是天生的一对，场是波的运动空间，二者都是四维。当然，常见的定态场都是三维的。连续介质力学、柔性力学、结构力学、流体力学、电动力学、旧量子力学、其中的很多定态场都是三维的。自然其中的方程也就都不遵守洛伦次变换了。其中涉及到的定态波也是三维的。当然，场也可以是二维、一维的，甚至是 0 维的。场根据数学可以分成矢量场和标量场两大类。以经典力学的观点看，场和波是天生一对；粒子和波则是天生的对头。宏观粒子的维数最多是 3；宏观波的维数最多是 4。有波的存在则一定有场的存在。反之，则不一定。有粒子的存在则一定有场的存在。反之，则不一定。波和场的空间属性和时间属性都是全域性的；而粒子的空间属性和时间属性则是局域性的。以量子力学的观点看，波-粒-场三者是天生的三胞胎。空间维数都是四。有波的存在则一定有场的存在。反之，则亦然。有粒子的存在则一定有场的存在。反之，则亦然。波和场的空间属性和时间属性是全域性的也可以是局域性的；而粒子的空间属性和时间属性既可以是局域性的也可以是全域性的。不论是以经典力学的观点看，还是以量子力学的观点看，波-粒-场三者的关系是现有全部物理学所有分支的基本家当。对于电磁波、物质波，在实验上，微观与宏观没有截然的界限，也没有任何区别。对于粒子，在实验上，

微观与宏观有截然的界限，区别明显。宏观粒子都是三维的性质的，没有波动性，尽管流行的做法是根据海森堡的测不准关系，说宏观粒子的波动性很小，比如，地球、太阳等等。

第三类波是量子力学物质波，以德布罗意物质波方程为代表：
$$p = \frac{h}{\lambda} \quad (1.3)$$
 经典电动力学在微观领域受到局限的主要原因在于，它对带电物质的描述只反映其粒子性的一面，而对 electric field 的描述则只反映其波动性的一面。在量子理论中，把 electric field 的 Maxwell's equation 量子化后，发展为量子电动力学。目前量子电动力学对各种物理过程的理论计算和实验结果在很高精确度下相符，表明它有反映客观规律的正确性的一面。德布罗意天才预测到：“一束电子通过一个非常小的孔时会产生衍射现象，这也许可以证明我的观点。” Einstein 对于德布罗意的观点给予极高的赞誉，称之为“揭开了一幅大幕的一角。”

现代物理学的实验表明，电子、原子、分子、质子和中子等一切微观粒子都具有波粒二象性，而且其波长、频率、动量和能量都有德布罗意关系式联系起来。苏联物理学家 V. 法布里康教授和他的同事们已完成了一个实验，在这个实验里观察到单电子的衍射。在微观世界例如电子，在云室里它象个粒子，但在晶格衍射时它又象是波；在双缝干涉实验中通过双缝时它象是波，而落在屏幕上时它又象粒子。数学上描述微观客体波粒二重性的实验事实是容易的。海森堡的矩阵力学，薛定谔的波动力学达到了近乎完美的程度，计算与实验的精确吻合也令人惊叹。1927 年，美国物理学家戴维逊、革末用电子束投射到镍单晶上，观察到和 X 射线照射同样的衍射现象。同年英国物理学家 G·P·汤姆生通过快速电子穿过薄金属片，也观察到了衍射图样。他们的实验证实了德布罗意的假设。德布罗意讲：“我的研究始终围绕这样的思想，对于物质和辐射（尤其是光），必须同时引入粒子的概念和波的概念，即在任何情况下粒子的存在必然伴随着波动。因此，必须首先建立起粒子的运动和波动传播之间的对应关系。” **笔者认为物质波通过电子的衍射验证进一步证明了电磁质量具有波粒二象性，中微子不具有电磁质量，应该观察不到衍射现象。**

相速用 u 表示，群速用 v_g 表示。相速是等相面运动的速度，群速是波包中心运动的速度。由德布罗意公式：
$$E = \hbar\omega = h\nu \quad (1)$$

$$P = \hbar k = \frac{h}{\lambda} \quad (2)$$

引入：
$$v = \frac{u}{\lambda}, \quad p = mv_g \quad (3)$$

又由质能公式：
$$E = mc^2 \quad (4)$$

(1) (2) (3) (4) 四式联立得到：
$$E = \hbar\omega = h\nu = h \frac{u}{\lambda} = mc^2 \quad (5)$$

$$p = \hbar k = \frac{h}{\lambda} = mv_g \quad (6)$$

把 (6) 式代入 (5) 得到相速与群速的乘积等于光速的平方：即

$$u \cdot v_g = c^2 \quad (7)$$

又由相速的定义：
$$u = \frac{\omega}{k} = \frac{\hbar\omega}{\hbar k} = \frac{E}{P} = \frac{mc^2}{mv_g} = \frac{c^2}{v_g} \quad (8)$$

我们同样得到 (7) 式：
$$u \cdot v_g = c^2$$

下面由相对论质能公式进行验证：

$$E = mc^2 = \sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4} \quad (9)$$

由相速定义：
$$u = \frac{\omega}{k} = \frac{\hbar\omega}{\hbar k} = \frac{E}{p} = \frac{\sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}}{p} \quad (10)$$

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{d(\hbar\omega)}{d(\hbar k)} = \frac{dE}{dp} = \frac{1}{2} \cdot \frac{2c^2 p}{\sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}} = \frac{c^2 p}{\sqrt{p^2 c^2 + m_0^2 c^4}} \quad (11)$$

由群速定义：

$$u \cdot v_g = c^2$$

因此(3)式的引入是正确的。

又由自由粒子德布罗意波可以验证以上公式：

$$u = \frac{\omega}{k} = \frac{\hbar k}{2m} \quad (12)$$

$$v_g = \frac{d\omega}{dk} = \frac{\hbar k}{m} \quad (13)$$

(12)式乘(13)式同样得到(7)式：即

$$u \cdot v_g = \frac{\hbar^2 k^2}{2m^2} = \frac{p^2}{2m^2} = c^2$$

所以对自由粒子上式可以写成：

$$\frac{p^2}{2m} = mc^2 \quad (\text{自由粒子 } m = m_0, v \ll c) \text{ 得证}$$

参考文献：

【1】董光璧等著 世界物理学史 吉林教育出版社 1994年。

2、物质波的验证

莫里斯是一位研究 X 射线的实验物理学家，当时 X 射线的研究是一个非常热门的课题，莫里斯十分熟悉同行的工作成果。例如莫斯利用 X 射线验证了玻尔原子模型，提出了 X 射线的微粒性。劳厄于 1912 年发现了晶体的 X 射线衍射，既可用于决定 X 射线的波长又证明了原子的点阵结构。布喇格曾经指出要探索一种理论能阐明 X 光的波动和粒子的两重性。布里渊在关于玻尔量子条件的研究工作中，设想了一种存在于原子核近旁的“以太”层，电子在其中运动，这运动在“以太”层内部掀起的波因相互干涉而形成环形的驻波。这一情况的发现，布里渊认为，可以作为对玻尔的神秘的量子条件的一种物理解释。但是，布里渊的理论要借助于当时物理学已经摒弃了的“以太”介质，并且在数学上也遇到了困难，使得物理学家难以接受。然而由于一种尚未明了的原因，布里渊把自己的上述工作寄给了德布罗意，从而使德布罗意从中吸收了布里渊的物理思想的精华，并认真地把光的二象性假说同对玻尔模型的研究结合在一起考虑。德布罗意提到物质波方程是说明了一切物质都具有粒子性，联系了宏观和微观。Einstein 的质能方程则是由狭义相对论演算出来的，其实本质上并没有什么联系，但是德布罗意方程中的一个 $P=h/\lambda$ 是由 $E=mc^2$ 推出来的步骤如下 $p=mc=hv/c^2 \times c=hv/c$ 。考虑到 $c=hv$ ，所以 $p=h/v$ 。

德布罗意曾设想，晶体对电子束的衍射实验，有可能观察到电子束的波动性。人们希望能够实现这一预见。耐人寻味的是，正在这个时候，有两个令人迷惑不解的实验结果也在等待理论上作出正确的解释。这两个实验就是冉绍尔(C.W. Ramsauer)的电子-原子碰撞实验和戴维森(C.J. Davisson)的电子散射实验。

1913 年，德国物理学家冉绍尔发展了一种研究电子运动的实验方法，人称冉绍尔圆环法，用这种方法可以高度精确地确定慢电子的速度和能量，粒子间相互碰撞的有效截面概念就是冉绍尔首先提出来的。第一次世界大战后，冉绍尔继续用他的圆环法进行慢速电子与各种气体原子弹性碰撞的实验研究。1920 年，他在题为：《气体分子对慢电子的截面》一文中报道了他发现氩气有特殊行为。

冉绍尔在腔室中分别充以各种不同的气体，例如氢、氦、氮和氩。他经过多次测量，发现一般气体的截面“随电子速度减小均趋于常值，唯独氩的截面变得特别小”。由氩的这一反常行为，冉绍尔得出的结论是：“在这个现象中人们观察到最慢的电子对氩原子是自由渗透的。”

冉绍尔综合多人实验结果而作出的惰性气体 Xe、Kr、Ar 对电子的散射截面随电子速度变化的曲线，图中横坐标是与电子速度成正比的加速电压平方根值，纵坐标是散射截面 Q，用原子单位，其中 α_0 为玻尔原子半径。三种惰性气体的曲线具有大体相同的形状。约在电子能量为 10eV 时，Q 达极大值，而后开始下降；

当电子能量逐渐减小到 1eV 左右时, Q 又出现极小值; 能量再减小, Q 值再度上升。事实确凿地证明, 低能电子与原子的弹性碰撞是无法用经典理论解释的。这就是当年令人不解的冉绍尔效应。

戴维森的电子散射实验比冉绍尔的电子碰撞实验更早得到奇特的结果。戴维森是美国西部电气公司工程部(即后来的贝尔电话实验室)的研究员, 从事热电子发射和二次电子发射的研究。1921年, 他和助手孔斯曼(Kunsman)在用电子束轰击镍靶时, 发现从镍靶反射回来的二次电子有奇异的角度分布, 出现了两个极大值。戴维森没有放过这一现象, 反复试验, 并撰文在 1921 年的《科学》(Science)杂志上进行了讨论。他当时的看法是认为极大值的出现可能是电子壳层的象征, 这一研究也许可以找到探测原子结构的又一途径。

这件事引起了德国著名物理学家玻恩(M.Born)的注意, 他让一名叫洪德(F.Hund, 后来是著名光谱学家)的研究生, 根据戴维森的电子壳层假设重新计算电子散射曲线的极大极小值。在一次讨论班上洪德作了汇报, 引起另一名研究生埃尔萨塞(W.Elsasser)的兴趣。埃尔萨塞的思想特别活跃, 非常关心物理学各个领域的新进展, 当他得知 Einstein 和玻色(Bose)新近发表了量子统计理论, 就想找到 Einstein 的文章来阅读。Einstein 在文章中特别提到了德布罗意的物质波假说, 使埃尔萨塞获得很大启发。不久, 埃尔萨塞又读到了德布罗意给玻恩寄来的论文。他的思想突然产生了一个飞跃, 会不会戴维森和孔斯曼的极大极小值, 就是电子波动性造成的? 他迅即按德布罗意公式用计算尺估算了最大值所需的电子能量, 发现数量级正确。几个星期之后, 他写了一篇通讯给德文《自然科学》杂志, 题为《关于自由电子的量子力学的说明》^①。在这篇短文中, 他特别提到用波动性的假说不但可以解释戴维森和孔斯曼的实验, 还可以解释冉绍尔效应, 在文章最后, 他申明要取得定量验证, 有待于他自己正在准备的进一步实验。他花了三个月的时间考虑实验方案, 终因技术力量不足而放弃。

戴维森从 1921 年起就没有间断电子散射实验, 一直在研究电子轰击镍靶时出现的反常行为。他仍沿着电子壳层的方向进行研究, 没有注意埃尔萨塞的论文。1925 年, 一次偶然的事使他的工作获得了戏剧性的进展。有一天, 他的助手革末(Germer)正准备给实验用的管子加热去气, 真空系统的炭阱瓶突然破裂了, 空气冲进了真空系统, 镍靶严重氧化。过去也曾发生过类似事故, 整个管子往往报废, 这次戴维森决定采取修复的办法, 在真空和氢气中加热, 给阴极去气。经过两个月的折腾, 又重新开始了正式试验。在这中间, 奇迹出现了。1925 年 5 月初, 结果还和 1921 年所得差不多, 可是 5 月中曲线发生特殊变化, 出现了好几处尖锐的峰值, 如图 9-10 所示。他们立即采取措施, 将管子切开看看里面发生了什么变化。经公司一位显微镜专家的帮助, 发现镍靶在修复的过程中发生了变化, 原来磨得极光的镍表面, 现在看来构成了一排大约十块明显的结晶面。他们断定散射曲线反常的原因就在于原子重新排列成晶体阵列。

这一结论促使戴维森和革末修改他们的实验计划。既然小的晶面排列很乱, 无法进行系统的研究, 他们就作了一块大的单晶镍, 并切取一特定方向来做实验。他们事前并不熟悉这方面的工作, 所以前后花了近一年的时间, 才准备好新的镍靶和管子。有趣的是, 他们为熟悉晶体结构做了很多 X 射线衍射实验, 拍摄了很多 X 射线衍射照片, 可就是没有将 X 射线衍射和他们正从事的电子衍射联系起来。他们设计了很精巧的实验装置, 镍靶可沿入射束的轴线转 360°, 电子散射后的收集器也可以取不同角度, 显然他们的目标已从探索原子结构, 转向探索晶体结构。1926 年继续做电子散射实验, 然而结果并不理想, 总得不到偶然事件之后的那种曲线。

这时正值英国科学促进会在牛津开会。戴维森参加了会议。在 1926 年 8 月 10 日的会议上, 他听到了著名的德国物理学家玻恩讲到, “戴维森和康斯曼……从金属表面反射的实验”是德布罗意波动理论所预言的电子衍射的“证据”。戴维森没有想到自己三年前的实验竟有这样重要的意义。

会议之后, 戴维森找到玻恩和其他一些著名的物理学家, 让他们看新近得到的单晶散射曲线, 跟他们进行了热烈的讨论。玻恩建议戴维森仔细研究薛定谔有关波动力学的论文。这次讨论对戴维森的工作有决定性的影响。回到纽约后, 他重新制定了研究方案。有了明确的探索目标, 工作进展相当迅速。这时, 戴维森已经自觉接受波动理论的指导, 有效地发挥自己的技术专长。戴维森和革末的实验装置极其精巧, 整套装置仅长 5 英寸, 高 2 英寸, 密封在玻璃泡里, 经反复烘烤与去气, 真空度达 10^{-8} 托, 即 10^{-6} 帕。散射电子用一双层的法拉第筒(叫电子收集器)收集, 送到电流计测量。收集器内外两层之间用石英绝缘, 加有反向电压, 以阻止经过非弹性碰撞的电子进入收集器, 收集器可沿轨道转动。仔细备制的样品是从晶体生产的单晶镍切割下来, 经过研磨、腐蚀, 取(111)面正对电子束, 这是由于镍是面心型晶体, (111)面是这类晶体点阵最为密集的方向。晶体安装在沿入射束方向的轴上, 可以随意改变方位。

散射电流取决于四个因素: 轰击电流、方位、散射角和轰击电压。已知散射电流与轰击电流之间有简单的正比关系, 实验主要考察散射电流跟后面三项的关系。他们做了大量的测试工作。

他们综合几十组曲线, 肯定这是电子束打到镍晶体发生的衍射现象。于是, 他们进一步做定量比较。然

而，不同加速电压下，电子束的最大值所在的散射角，总与德布罗意公式计算的结果相差一些。他们发现，如果理论值乘 0.7，与电子衍射角基本相符。

他们的论文发表在《自然》杂志 1927 年 4 月 16 日的一期上。这篇论文立即引起了人们的注意。不久依卡尔特(Eckart)指出，理论和实验之间的偏差可能是由于电子在晶体中受到折射。戴维森继续实验，发现随着轰击电压增加，偏差越来越小。戴维森和革末在 1928 年 4 月发表的曲线表明电子束反射后的强度随波长改变的关系，随着波长变短，也即加速电压增大，偏差越来越小。根据戴维森的数据，贝特(W.Bethe)推算出金属表面存在内电势，对于镍，内电势约为 15 伏。如果考虑这一因素，理论值和实验值就吻合一致了。至此，戴维森完全证实了电子衍射的存在，为德布罗意的物质波假说提供了重要证据。如果说戴维森发现电子衍射走的是一条曲折的道路，那末，G.P. 汤姆生就是走了一条直路。他是电子的发现者 J.J. 汤姆生的独生子，从小接受到良好的科学教育，在父亲的指导下做气体放电等方面的研究工作。1922 年，30 岁的 G.P. 汤姆生当了阿伯登(Aberdeen)大学教授，继续做他父亲一直从事的正射线的研究，实验设备主要是电子枪和真空系统。他很欣赏 1924 年德布罗意的论文，并于 1925 年向《哲学杂志》投过一篇论文，试图参加有关物质波的讨论。1926 年在牛津召开的英国科学促进会他也参加了，不过当时没有见到戴维森。是玻恩的报告引起他对德布罗意物质波假说的进一步兴趣，促使他按照埃埃尔萨塞的方案去探讨电子波存在的可能性。他的实验室有优越的条件可以进行电子散射实验。果然当他把正射线的散射实验装置作些改造，把感应圈的极性反接，在电子束所经途中加一赛璐珞薄膜作为靶子，让电子束射向感光底片，不久就得到了边缘模糊的晕环照片。这就是最早电子衍射花纹。

G.P. 汤姆生的电子衍射实验原理的特点是：电子束经高达上万伏的电压加速，能量相当于 10—40keV，电子有可能穿透固体薄箔，直接产生衍射花纹，不必象戴维森的低能电子衍射实验那样，要靠反射的方法逐点进行观测，而且衍射物质也不必用单晶材料，可以用多晶体代替。因为多晶体是由大量随机取向的微小晶体组成，沿各种方向的平面都有可能满足布拉格条件，所以可以从各个方向同时观察到衍射，衍射花纹必将组成一个个同心圆环，和 X 射线德拜粉末法所得衍射图形类似。

1937 年，G.P. 汤姆生和戴维森一起，由于电子衍射方面的工作共获诺贝尔物理奖。物质波理论不仅得到电子束实验的证实，还可以从分子束甚至中子束获得验证。

1930 年，分子束方法的创始人斯特恩(O.Stern)和他的合作者用氢分子和氦原子证实普通原子和分子也具有波动性，成功的关键是他们做成了极其灵敏的气压计，可用于检测分子束。原子和分子是中性的，无法用电场加速，只能从平衡态的热分布中选择某一范围速度内的部分粒子，所以能量非常低，一般只有百分之几电子伏特，相当于波长为 1\AA 左右。

氦原子束或氢分子束经准直缝投向氟化锂(LiF)单晶，散射后被检测器（即气压计）接收。检测器可以绕轴旋转测不同方位的粒子数。当方位角 $\psi=0$ 时，反射束与入射束处于同一平面，强度最大；改变 ψ 角，强度锐减；当 $\psi=11^\circ$ 时，出现第一衍射峰。

1931—1933 年，斯特恩等人在分子束所经的途中加了一道速度选择器，实验结果大为改善。速度选择器是由两只同轴齿轮组成，轮上沿辐向各刻有 400 多个轮齿。齿轮的转速可以调节，不同的转速选择不同速度的分子（实际上是速度间隔为 $V \rightarrow v + \Delta v$ 的分子）自由地穿过轮齿，到达 LiF 晶体。用这个方法，斯特恩证明氦原子束经 LiF 晶体衍射所得结果与德布罗意关系一致，实验误差不超过 1—2%。

这项精采实验有很深远的意义。自由电子具有波动性可能还比较容易被人们接受，因为电子本身就是一种难以捉摸的微观粒子，波动性也许就是它的某种特性。当证明氢分子和氦原子一类的中性物质同样也具有波动性时，就不能不使人们确信波粒二象性是物质的普遍属性了。

另一项值得提到的是核粒子的波动性，其中尤以中子衍射的研究最有价值。中子是 1932 年发现的，1936 年就有人观测到中子的衍射现象。不过那时中子束是从最原始的中子源即镭铍源获得的。

40 年代以后，各种反应堆发展起来了，有可能获得较强的中子束。这时中子衍射不但又一次提供了物质波实验的证据，而且被利用于探测物质结构，成了材料科学中的一门重要实验技术。

3、电磁质量的波粒二象性

前苏联科学家瑞德尼克在他的《量子力学史话》一书中更是一针见血地指出：“今天，决定微观世界统一的最深刻本质的全部问题，就是物理学所面临的尚未征服的山峰中的最高峰：物质的两种基本形式——实物（粒子）和场（波）——之间的相互关系。” Einstein 曾说过：‘科学的现代发展中所发生的最基本的问题之一是：怎样把物质和波这两种对立的观点统一起来。这是一个最基本的困难问题之一，一旦解决了，一定会导致科学的进展。’（《物理学的进化》）

Einstein 多次强调：物理学目前的局面是：有一些现象可以用量子论来解释，但不能用波动说来解释，光

电效应就是这样一个例子" 又有一些现象只能用波动说来解释而不能用量子论来解释, 典型的例子是光遇到障碍物会弯曲的现象" 还有一些现象, 既可用量子论又可用波动说来解释, 例如光的直线传播" 我们以前曾经提出过: 光到底是波还是一阵微粒? 现在我们又问: 电子是什么? 是一阵粒子还是一阵波? 电子在外电场或外磁场中运动时的行为像粒子, 但在穿过晶体而衍射时的行为又像波" 对于物质, 我们又遇到了在讨论光时所遇到的同一困难". Einstein和玻尔们虽然接受了马赫的思想, 但并未充分认识经验实践主义对形而上学对立性批判的伟大意义, 他们挺枪跃马冲破了形而上学重围, 却在最后一道壁障前止步, 仍限于微观与宏观的对立。玻尔提出了互补原理(或称并协原理), 认为微观粒子具有波粒二象性, 波动性和粒子性不能同时同一实验中表现出来, 只能在互斥的两类实验中分别表现出来。玻尔的互补原理参考了中国的阴阳理论, 玻尔认为太极图可以图示互补性, 并把太极图作为自己的徽章。其实波粒二象决不能看作是波与粒两种孤立形式放在一起, 也不能认为是此时为波, 彼时为粒, 它是一个不可分割的整体。从局部看为粒, 从整体看为波、为场。

1926年德国物理学家玻恩提出物质波的某个地方的强度跟在该处粒子痴线几率成正比, 物质波是一种几率波。

量子力学认为宏观物体存在物质波, 显然这与广义相对论是矛盾的, 由于广义相对论反映了引力质量的物理特性, 引力质量不具有波粒二象性, 因此不能利用相对论解释波粒二象性, 德布罗意的假设不适用于宏观物体, 广义相对论的基础更加牢靠, 文章开始时的矛盾不存在。现代物理学实验中观察的电子的物质波原因在于电子具有电磁质量, 说明电磁质量具有波粒二象性, 而非群体效应。

麦克斯韦方程组描述了电磁场与带电粒子之间的相互作用关系。在真空中的表达式为:

$$\nabla \times \vec{E} = -\frac{\partial \vec{B}}{\partial t} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{B} = \mu_0 \vec{J} + \frac{1}{c^2} \frac{\partial \vec{E}}{\partial t} \quad (2)$$

$$\nabla \cdot \vec{E} = \frac{\rho}{\epsilon_0} \quad (3)$$

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

对(2)式取旋度, 并利用(1)式及(4)式, 用矢量分析公式化简后可得:

$$\nabla^2 \vec{B} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{B}}{\partial t^2} = -\mu_0 \nabla \times \vec{J} \quad (5)$$

对(1)式取旋度, 并利用(2)式及(3)式, 用矢量分析公式化简后可得:

$$\nabla^2 \vec{E} - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \vec{E}}{\partial t^2} = \frac{1}{\epsilon_0} \nabla \rho + \mu_0 \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} \quad (6)$$

根据能量守恒定律可知, 在仅考虑电磁相互作用时, 如果带电粒子在运动过程中既不辐射也不吸收电磁波, 那么其能量将保持不变。在这种情形下, 由(5)式和(6)式可知, 带电粒子的运动必须满足下面的两个基本条件:

$$\nabla \times \vec{J} = 0 \quad (7)$$

$$\frac{1}{\epsilon_0} \nabla \rho + \mu_0 \frac{\partial \vec{J}}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

根据矢量分析, 可由(7)式引入一个标量场 φ , 使得:

$$\vec{J} = \nabla \varphi \quad (9)$$

把(9)式代入(8)式可得 $\nabla(\rho + \epsilon_0 \mu_0 \frac{\partial \varphi}{\partial t}) = 0$ 。从电磁场理论本身所固有的对称性来看, 应该令该式括号内的部分为零。于是有:

$$\rho = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial \varphi}{\partial t} \quad (10)$$

另外，电荷守恒定律是自然界的精确规律之一，其表达式为：

$$\nabla \cdot \vec{J} + \frac{\partial \rho}{\partial t} = 0 \quad (11)$$

把(9)式和(10)式代入(11)式，可得波动方程：

$$\nabla^2 \varphi - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \varphi}{\partial t^2} = 0 \quad (12)$$

上述论证表明，在能量保持不变的情形下，带电粒子的运动必须采用波动方式来描述，而且波的相速度应为光速。

质子和中子不是点粒子，它们都具有内部结构。在 30 年代，理论物理学家认为作为核子的质子和中子是基本粒子，应该象点粒子，根据狄拉克的相对论性波动方程，质子的磁矩是一个单位核磁子，中子由于不带电，因而磁矩是零。但出乎意料的是，实验家斯特恩测得的质子磁矩却为 5.6 个单位核磁子，中子磁矩也不是零，而是 -3.82 个单位核磁子，与点粒子理论相悖。这些都清楚地说明质子、中子并不是我们想象的那样简单，它们可能是具有内部结构的。60 年代，霍夫斯塔特等人用高能电子轰击核子，证明核子电荷呈弥散分布，核子的确具有内部结构。既然核子并不是点粒子，那么其内部的物质是怎样分布的呢？也许有三种情形：或者核子内有一个硬核，核子象一枚桃子；或有许多颗粒，象石榴一样有许多子；或没有颗粒，疏松如棉絮状。具体属哪一种情形，要靠深度非弹性散射实验来作进一步决定。深度非弹性散射实验指用极高能电子去撞击质子或中子，使后者激发到一个个分立的能级即共振态，甚至达到使 π 介子离化出来的连续激发态。非弹性散射实验会改变质子、中子的静止质量。实验表明，质子、中子内部有一个个点状的准自由的粒子，它们携带有一定动量和角动量。

中子虽然不带电，没有轨道磁矩，但实验表明中子具有自旋磁矩。中子具有自旋磁矩这个事实说明，中子作为一个整体虽然不带电，但其内部却存在电荷分布，并且其自旋磁矩与自旋角动量的方向相反，与电子的情形相似。现代的精确测量表明，质子的磁矩 $m_p = 2.79285 \text{ mN}$ ，中子的磁矩 $m_n = -1.91304 \text{ mN}$ 。现代物理学认为中子有一个上夸克和两个下夸克组成，外观上看电量为 0，由于每个夸克均激发电磁场，因此电磁质量不等于 0。在原子物理中中性粒子的变速运动并不是绝对地不辐射电磁波，事实上现代物理使用中就是利用中性粒子的磁矩辐射来探索其中的电荷分布的。中性粒子的变速运动不辐射电磁波，只是在低速情况下的低阶近似而已。任何微观粒子都有自旋，有自旋就有自旋磁矩，这个是中子场的内禀旋转对称性造成的。因此**在实验上可以观察到中子的波动性，如果换成只有引力质量的中微子应该没有波动性，鉴于此笔者认为物质波和电磁波应该是同一种波。**

2008 年 2 月，瑞典龙灯大学的一组物理团队首先拍摄到电子能量分布的视讯影像。科学家使用非常短暂的闪光，称为阿托秒脉冲，率先捕捉到电子运动的实际运动状况。**笔者认为这主要是电子不但具有引力质量也具有电磁质量的缘故。**

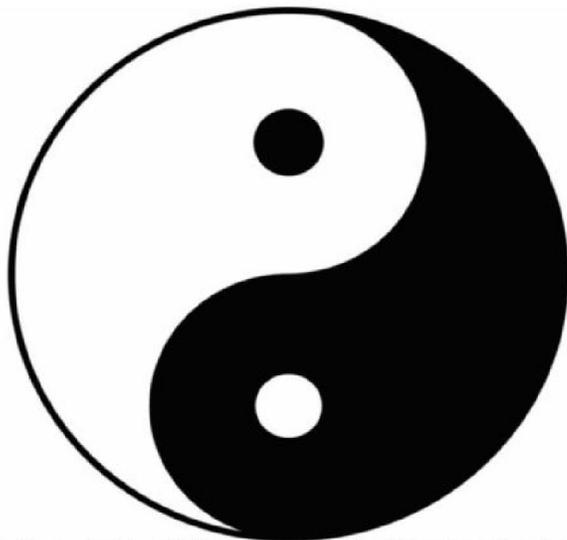
甘永超给出了“波粒二象关系式（简称‘甘永超公式’）”：

$$\begin{bmatrix} \varepsilon \\ p \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \hbar & 0 \\ 0 & \hbar \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \omega \\ k \end{bmatrix}$$

波粒二象关系式（Gan 矩阵与Gan 变换）

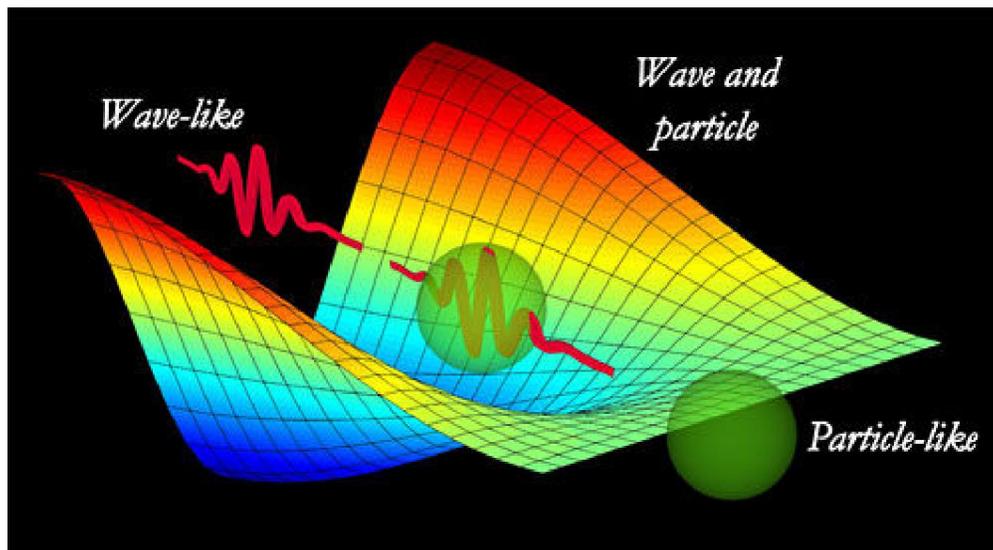
公式 $\varepsilon = \hbar\omega$ 获1918 年诺贝尔物理学奖

公式 $p = \hbar k$ 获1929 年诺贝尔物理学奖

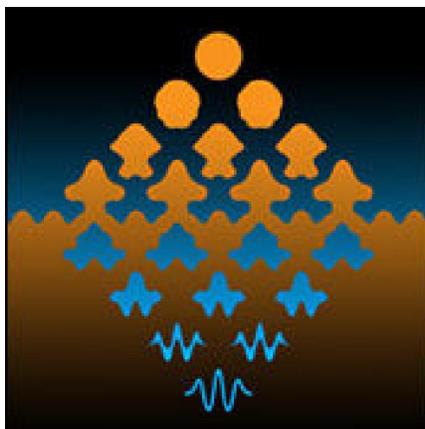


最基本的物质单元——太极粒子(黑)波(白)

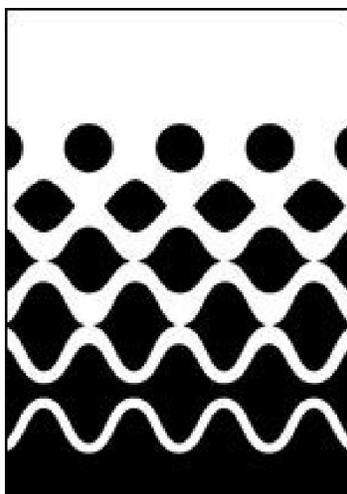
附录：科学家同时观察到光的波粒二象性



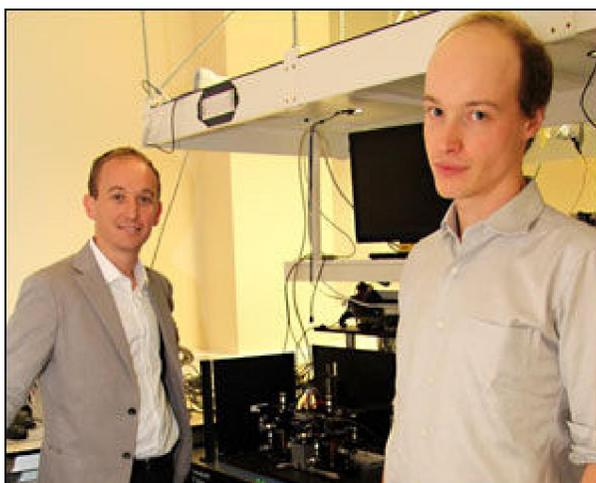
上面的想象图演示的是单光子穿过干涉仪时的情景，干涉仪的输出端装有量子分光镜。图中远处可以看到正弦振荡的波形，表示的是单光子干涉，是一种波动现象。而在图片近处，观察不到振荡，说明只表现出粒子的特性。在两种极端之间，单光子的行为连续不断地从波的形式向粒子形式转变，图中显示了这两种状态的重叠。



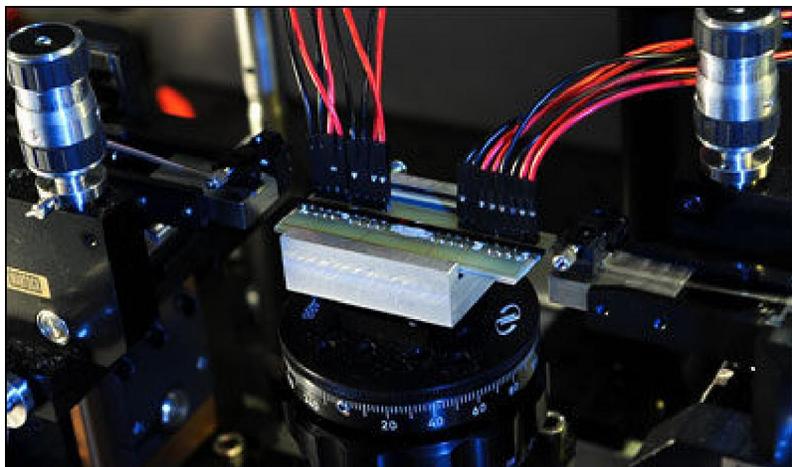
受艺术家毛里茨·科内利斯·埃舍尔作品的启发绘制的艺术图，显示了光在粒子态和波形态之间的连续变化。



受艺术家毛里茨·科内利斯·埃舍尔作品的启发绘制的艺术图，显示了光在粒子态和波形态之间的连续变化。



阿尔贝托·佩鲁佐(左)和彼得·夏伯特(右)，研究论文的并列第一作者。



实验中用以检测波粒二象性的量子光子芯片。单光子通过光纤进入环路，在输出端被极其敏感的探测器检测到。

北京时间 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。Einstein 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）

特别声明：本文转载仅仅是出于传播信息的需要，并不意味着代表本网站观点或证实其内容的真实性；如其他媒体、网站或个人从本网站转载使用，须保留本网站注明的“来源”，并自负版权等法律责任；作者如果不希望被转载或者联系转载稿费事宜，请与我们联系。

4、EPR 悖论的根本性解决

《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：36。薛定谔的猫是死还是活？37。EPR之谜能否解决？量子力学诠释的另一派系是所谓的决定论诠释。它的代表人

物是薛定谔、德布罗意、Einstein、马德隆、玻姆、玻普尔、布洛欣采夫等人。薛定谔把电子看作实质上是一团带电物质作松紧振动的实体波，物质波完全可以象电磁波、声波那样在时空上传播，原子发光就象无线电发射机的天线发射无线电波那样容易地解释。这就排除了量子跃迁之类含糊不清的粒子概念。薛定谔在赋予 ψ 电磁意义的同时，把 $m|\psi|^2$ 当作物质密度分布，把 $e|\psi|^2$ 当作电荷密度分布， $|\psi|^2$ 被理解为“权值函数”，电的“流动行为”遵从连续性方程，电子的粒子性和波动性分别由“波包”和“密度分布”来体现。

薛氏的电磁解释面临四大困难：一是波包扩散，二是波包收缩，三是对动量和位置表象变化的理解，四是波函数多维空间困难。薛定谔完全放弃粒子图景，把电子看成一团带电物质的连续分布或一个波包实体的观点，不能被哥本哈根学派所接受。

德布罗意是决定论的又一重要代表人物。德布罗意认为，量子力学的波动方程具有两种不同的解，一个是具有统计意义的连续波 ψ 函数，另一个是奇异解。奇点构成所讨论的粒子。具有统计意义的连续解 ψ 为平面单色波，它起着导航作用，指导电子的行动。在德布罗意那里，构成物理实在的不是波或粒子，而是粒子和波。粒子和波既不是分离物，也不是有机的统一体，而是一种混和物，粒子骑在波上，波引导粒子而行。德布罗意模型中粒子骑在波上，波是什么？从哪里而来？当粒子遇到障碍或照相底片时波又哪里去了？凡此种种德布罗意难以提供任何有说服力的解释。1927年夏，在布鲁塞尔索耳威大会上，德布罗意模型遭到了大会全体一致的否定。“从形而上学的角度看，Einstein过去一直在努力发现上帝的意图，找出上帝是怎样创立这个世界的。现在Einstein进一步扩展了自己的视野，他想证明上帝在创造世界时是否真的有所选择。他经常说：‘我最感兴趣的是上帝在建造这个世界时是否有所区别，换句话说，这种对逻辑简单性的追求是否有所遗漏。’”【1】1935年5月，在Physical Review上Einstein和他的两位同事B. Podolsky和N. Rosen共同发表了一篇名为「Can Quantum-Mechanical Description of Physical Reality Be Considered Complete?」(量子力学对物理世界的描述是完备的吗?)三个人异口同声地回答：「不!」。在这篇著名的文章中，作者首先阐述了他们对物理理论的看法：一个严谨的物理理论应该要区别「客观实体」(object reality)以及这个理论运作的观点。客观实体应独立于理论而存在。在判断一个理论是否成功时，我们会问自己两个问题：(1)这个理论是否正确?(2)理论的描述是否完备?只有当这两个问题的答案是肯定时，这样的理论才是令人满意的。理论的正确性当由实验来决定。而关于量子力学的描述是否完备则是这篇文章探讨的主题。在进一步讨论理论的完备性之前，我们必须先定义什么是完备性。作者们提出了一项判别完备性的条件：每一个物理实体的要素必须在理论中有一对应物(every element of the physical reality must have a counterpart in the physical theory)因此我们决定了什么是「物理实体的要素」，那么第二个问题就容易回答了。那么，究竟是什么「物理实体的要素」呢?作者们以为：「如果，在不以任何方式干扰系统的情况下，我们能准确地预测(即机率为一)某一物理量的值，那么必定存在一个物理实体的要素与这个物理量对应。」他们认为，只要不把这个准则视为一必要条件，而看成是一充分的条件，那么这个判别准则同样适用于古典物理以及量子力学中对实在的概念。举例来说，在一维系统中，一个以波函数 $\varphi(x) = \exp(ip_0x/2\pi\hbar)$ (其中 p_0 是一常数， i 表纯虚数， \hbar 为Planck常数)描述的粒子。其动量的算符为 $\hbar d/dx$ ，因此： $pFI(x) = p_0FI(x)$ ，所以动量有一确定的值 p_0 。因此在这种情形下动量是一物理实体。反之，对位置算符 q 而言， $qFI = xFI \neq aFI$ ，因此粒子的位置并没有一确定的值。它是不可预测的，仅能以实验测定之。然而任何一实验的测定都将干扰到粒子而改变其状态，被测后的粒子将再也不具动量 p_0 了。对于此情况，我们说当一粒子的动量确定时，它的位置并非一物理实体。一般来说在量子力学中，对两个不可对易的可观察量(observable)而言，知道其中一个物理量的准确知识将排除对另外一个的准确知识。任何企图决定后者的实验都将改变系统的状态而破坏了对前者的知识。至此，作者们发现我们面临了如下的两难局面：(1)或者，在量子力学中波函数对物理实在的描述是不完备的。(2)或者，两个对应于不可对易算符的物理量不能同时是实在的(即具有确定的值)。因为，若两个不可对易的物理量同时具有确定的值，根据作者们对完备性的条件，在波函数的描述中应包含这些值。但事实上并非如此，因此波函数的描述是不完备的。在量子力学中，通常假设了波函数包含了描述物理系统一切完备的资讯。乍看之下，这样的假设似乎很合理。然而，Einstein等人指出，在这个假设之下，配合他们对物理实体的判别准则，将导出(2)也是错的。因此这是一个矛盾。这就是著名的EPR悖论(EPR paradox或EPR dilemma)。

Einstein等设计了一个理想实验来证实他们的观点。假设现在有两个粒子在 $t=0$ 到 $t=T$ 的时间之内相互作用，但在 $t>T$ 之后分开，不再有任何交互作用。根据Schrodinger方程式，我们仍然可以算出以后任何时刻两个粒子的状态。现在，注意到两个粒子动量和算符 p_1+p_2 及位置差算符 x_1-x_2 是可对易的。因此可以同时具有确定的值，即有共同的本征态(eigenstate)。例如 $FI(x_1, x_2) = D(x_1-x_2-a)$ ， D 是Dirac的delta函数。这代表了动量和为零以及位置差为 a 的本征态。现在假如我们去测量粒子1的位置，而得到结果 x_1 ，那么，

我们可以同时地肯定粒子 2 的位置必定是 x_1-a 。换言之，在不扰动粒子 2 的情形之下我们便可确定粒子 2 的位置。因此，根据 EPR 的判别准则，粒子 2 的位置是实在的。同样的，若是我们去测量粒子 1 的动量而得到结果 p ，我们也能肯定粒子 2 具有动量 $-p$ 。因此粒子 2 的动量也是实在的。由于两个粒子已经足够地分开，而没有任何交互作用，粒子 2 不可能知道我们究竟要测量粒子 1 的位置还是动量，从而「决定」它要在位置 x_1-a 或具有动量 $-p$ ，这两个量必定是同时存在的(即使我们不能同时去量它们)。换言之，就是违反了前面 (2) 的条件。

在假设 (1) 错的情形之下，Einstein 等推出了 (2) 也是错的结论，而这是不可能的。因此(1)一定是对的。所以 Einstein 等大胆的宣布，量子力学的描述必是不完备的。在获得了这样的结论之后，Einstein 等同时期待了一个新而完备的理论将会出现。

纵观 Einstein 的论证，我们发现他们的推论中隐含了两项假设：(1)物理实在是独立于观测者而客观地存在的。(2)两粒子间传递讯息的速度不能超过光速，不存在超距作用(action-at-a-distance)。这项假设后来被称为 Einstein 定域性原理(locality principle)。

将 Einstein 的物理实在观与光速极限性结合起来，可以得出 Einstein 可分隔性原理或定域性原理，它可以表述为：不存在瞬时超距作用；若没有以不大于光速的速度传递的物理信号建立联系，空间中分离的客体的实在状态是彼此独立的。为了论证量子力学的不完备性，早在 1935 年，Einstein 和波多尔斯基、罗森一起提出了一个假想实验(通称为 EPR 理想实验或 EPR 论证)。他们考虑两个自旋为 $\pm 1/2$ 的粒子 A 和 B 组成的总自旋为零的体系。设在 t_0 之前的一段时间内两个粒子之间存在相互作用，然后用不影响每个粒子自旋的方法使其分开，当 $t > t_0$ ，二者在空间上相距甚远，不再有相互作用。按照 Einstein 可分隔性原理，在这种情况下，对粒子 A 的测量不应当立即对粒子 B 发生任何影响。量子力学预言，只要测出 A 自旋的某一分量，就能立即得知 B 自旋的同一分量值。按照量子力学理论，微观客体在测量之前一般并不处于确定的本征态，测量操作得出粒子 A 自旋在某一方向上的分量，粒子 A 本身也就进入取该自旋分量值的本征态。可是，相距甚远的粒子 B，既不与粒子 A 也不与仪器有相互作用，怎么会使自己的自旋在同一方向上立即取相反的值呢？考虑到上面的叙述对任意方向的自旋测量都成立，即可以任意改变仪器测量的方位都得到上述结论，问题就变得更为严重。这意味着仪器测量 A 自旋的事件对粒子 B 产生了影响，并且这种影响是超光速瞬时传递的。这在 Einstein 看来是不可接受的。Einstein 认为，为了消除上述悖论，人们只能肯定下述两个论断中的一个：“要么量子力学不完备，要么就必须假设存在超距作用。”我们知道，Einstein 断然维护了定域性原理，否定了量子力学的完备性。

同年十月，Bohr 也在 Physical Review 上发表了一篇同名的论文，反驳 Einstein 等人的观点。Bohr 首先批评了 EPR 对物理实体的判别准则。Bohr 以为一个物理量只有在当它被测量之后才是实在的。在 EPR 的理想实验中，虽然我们对粒子的测量的确会得到预期的结果，然而只有在我们安排此一实验测量之后，该物理量(位置或动量)才是实在的。所以 EPR 的判别准则是有问题的。其次 Bohr 分析了 EPR 的理想实验，认为两个粒子在分开之后，仍然存在着某种关联性。因此在对粒子 1 做测量时，仍应视为对整个系统的扰动。换言之，Bohr 并不赞同 Einstein 的定域性原理。量子力学是一个和谐的数学形式体系。它的预测与微观领域的实验结果都符合得很好。既然一个物理理论的预测都能够被实验所证实，而且实验又不能得出比理论更多的东西，那么，我们还有什么理由对这个理论提出更高的「完备性」要求呢？量子力学确实描述了微观客体对宏观仪器的度量表现，这种巨观度量只能得出微观客体运动的统计结果。量子力学也只能透过这些巨观表现去猜测微观客体的某些属性，它确实反映了以作用量子为下限的客体之运动状况。因此，从它自身逻辑的相容性与和经验符合的程度来看，Bohr 认为，量子力学是完备的。

量子移物最现实的应用是量子计算领域，它的优点是使接收者可以立即收到传输的信息，而无须等待信息以普通方式传输，因此倍受重视。而量子移物实验，正是 Einstein 与玻尔的争论直接引发的。Einstein 主张，应该尝试把握独立存在于观测之外的现实，但他也意识到，当把独立的物理现实赋予缠结对中个体粒子时，就会落入玻尔对整个系统考虑的主张。即对缠结对而言，就是必须把两个粒子的组合放在一起考虑，这样 Einstein 所需要的每个粒子的独立真实状态对于缠结的量子系统来说毫无意义。同样，这对海森伯也是一个冲击。海森伯测不准原理决定了不可能同时知道某一物体的精确位置和它的动量，因此也就不可能对远距离传送的物体进行理想的扫描，每个原子和电子的位置和速度都可能出现误差。这也适用于其它成对的量，从而使人们不可能准确而全面地测定任意物体的量子状态，但这种测量又必须获得全部必要信息才能准确地描述物体。然而运用量子学的缠结特性，却能回避海森伯测不准原理所施加的限制，而不违反其法则。这就是 1993 年由 IBM 科研组的 Charles H · Bennett 等人发现的可运用量子力学本身来进行传送的途径。

这道理是：两个光子偏振的缠结是随机的，但却是完全一致的，因此它们的相速度与群速度也是随机的，但在真空中又是一致。光束甚至单个光子都由电磁场振荡构成，而偏振与电场振荡的取向有关。当一束激光通过如 硼酸钡之类的晶体时产生缠结的光子对，晶体有时把单个的紫外线光子转变为两个低能光子，一个垂直偏振，一个水平偏振。如果光子恰好沿锥面交线通过，那么两个光子的偏振都不确定，但它们的相对偏振是互补的，因而它们产生缠结现象。而非偏振的光包括在各个方向上振动的光子。在偏振光中光子的电场振荡全部具有相同的方向。方解石晶体把一束光线一分为二，其偏振方向与它的轴平行的光子形成一束光线，而偏振方向与它的轴垂直的光子形成另一束光线。处于中间角度的光子则进入两束光线的量子叠加状态。每个这样的光子都能够在这束或那束光线中探测到，其概率依它的角度而定。由于涉及到概率问题，我们不能确切地测出单个光子的未知偏振状态。因此理想的量子移物过程，是依靠发送者（她）和接收者（他）分享一对缠结粒子 A 和 B 来完成。发送者有一个处于未知量子状态 X 的粒子，她对粒子 A 和 X 进行了贝尔态测量，得出 4 种可能结果中的一种。她使用普通方法把结果告诉接收者。接收者根据发送者的结果使粒子保持不变（1）或者让它改变（2、3、4）。两种方法都可以产生初始粒子 X 的理想复制品。这里，发送者获得这四种可能结果中的哪一种是完全随机的，不依赖于光子 X 的初始状态。因此接收者在了解发送者的测量结果之前一直不知道如何处理他的光子。可以说，接收者的光子在一瞬间便包含了来自发送者的初始态光子、并通过量子力学原理的作用传输过来的所有信息。然而，要知道如何解读信息，接收者还必须坐等经典信息传输过来，此信息包含两个比特，其传输速度不能大于光速。这里是否可以说，传输的东西仅仅是光子的偏振，或者是它的量子状态，而不是光子“本身”呢？不能，由于光子的量子状态就是它的明确特征，所以传输光子的量子状态便等同于传输光子本身。但由于完全复制量子信息是不可能的，因此发送者的测量实际上使得光子 A 和光子 X 缠结，而光子可以说失去了所有有关它初始状态的记忆。作为缠结对中的一个光子，它没有单独的偏振。所以，光子 X 的初始状态从发送者处消失了。

此外，光子 X 的状态是在发送者和接收者都完全不了解的情况下传输给接收者的。发送者的测量结果是完全随机的，没有显示有关光子状态的任何信息。测量过程就这样避开了海森伯原理，即只要不试图去测量其状态，这个原理并不影响整个状态的传输。并且，传输的量子信息实质上没有从发送者传到接收者。实际传输的所有信息只是有关发送者测量结果的消息，它告诉接收者如何处理他的光子，却没有传送关于光子 X 状态本身的信息。

在四种情形中的一种情况下，发送者顺利地完成了测量，接收者的光子便立即变得与发送者的光子的初始状态完全相同。看起来似乎是信息立即从发送者传到了接收者，从而打破了 Einstein 的速度限制。但是这个奇怪的特征不能用于发送信息，因为接受者没法知道他的光子已经变成了发送者的光子的复制品。这又说明，即使量子力学在相隔一定距离的情况下幽灵般地发生瞬时作用，也不能以大于光速的速度传送有用信息。

量子移物还可以是一种搭骑在发送者的辅助光子 A 背上的量子状态：辅助光子对根据光子的位置缠结，光子 A 被分束器分裂后，发送到发送者的装置的两个不同部分，而这两部分通过缠结与接收者的光子 B 的相似分裂联系起来，要传输的状态也被发送者的光子 A 所携带，即它的偏振状态。1997 年罗马第一大学的研究组成功地演示了这一方案。他们所利用的光子偏振特性是离散的量，其中任何偏振状态都可以恰好表示为两个离散状态（例如垂直偏振和水平偏振的叠加）。和光相联系的电磁场同样具有等于无穷多个基本状态的叠加的连续特性。比如，光速能够被“压缩”，这意味着可以把光的一个特性变得极其精确，或是无噪声，但付出的代价是另一个特性变得更加不确定。这里又把缠结同模糊联系起来，确定的界是与模糊的界缠结在一起的。1998 年加州理工学院的 Jeffrey Kimble 研究组将这样一个压缩状态从一束光传输给另一束光，由此演示了连续特性的传输。

缠结在量子计算领域的运用是跟采用量子比特有关。例如量子逻辑可以是 0 和 1 的量子叠加态，就像光子可以是水平偏振和垂直偏振的叠加态一样。事实上，三旋正是能够同时将许多不同输入的叠加进行工作，从而说明它具有缠结的特性。从缠结特征出发，来审视物理学中从经典到现代前沿的平衡、对称、守恒等概念，它们全都有相通之处。例如，如果把汤川秀树说的基本粒子的自旋是一种内禀现象，和卡鲁扎--克莱因遗产中的第五维是微小圈结合起来，就是我们说的 50 年前萌生的三旋环量子理论。一个环量子类圈体能作面旋（如圈体的滚动）、体旋（如圈体的翻动）、线旋（如圈体表层绕中心的免动）。线旋又分为平凡线旋（如普通的圈体免动）、不平凡线旋（如墨比乌斯体类扭动）、收敛线旋（如克莱因瓶类反馈）、节点线旋（如艾根指的从化学进化到生物学进化阶段中的超循环运动）、孤立线旋（如水中的孤波）。因收敛线旋、节点线旋和孤立线旋不具有全对称性，计算自旋态时应除开外，在存在一个不动点质心的情况下，一个全对称的环量子类圈体能不相矛盾具有 62 种自旋状态，即 31 倍于球量子粒子客体自旋态。所以波姆对隐秩序的维数计算，从环量子类圈体模型的角度也是可以理解的，即隐秩序存在于非粒子环量子圈态客体中。有

了隐秩序这种三旋模型，反过来对于 Einstein、波多尔斯基、罗森发现的量子 EPR 效应也好理解。

笔者认为，波粒二象性是电磁质量的物理特性，对于宏观物体主要表现为引力质量，薛定谔的猫是死还是活以及 E P R 之谜根本就不存在。

参考文献:

【1】《Einstein 传》 744 页【美】A·弗尔辛 著 薛春志 遥遥 译 时代文艺出版社出版，1998 年 10 月第 1 版。

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《数学归纳法的推广》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>. 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