

光子的互能流理论的回顾

摘要

互能流理论简称“互能论”是包括互能定理，互能流定理互能原理，自能原理的一套从微观到宏观的电磁理论。该理论的目的是告诉我们光子是怎样由波构成的。宏观的电磁波又是怎样由光子进一步构成。因此对量子力学的波粒二象性悖论给出了一个很好的解决方案。按照互能论，构成光子的波有滞后波，超前波，还有两个时间反转波。滞后波超前波满足麦克斯韦方程。滞后波同超前波叠加其能流由两部分互能流和自能流构成。自能流是滞后波自身的能量流和超前波自身的能量流。互能流是滞后波同超前波的相互作用的附加能量流。自能原理告诉我们电磁场有两个时间反转波抵消了滞后波的自能流和超前波的自能流。这样自能流不传递能量。因此光源发出的滞后波是概率波，不是能流波。能量只是由互能流传递的。互能流经过归一化构成光子。因此能量流是由光子携带。互能流满足互能定理，和互能流定理。互能定理告诉我们，辐射源电荷的滞后波对吸收体电荷做的功正好等于吸收体产生的超前波在辐射体上吸允的功。互能流定理告诉我们在辐射体同吸收体之间有一个能量流，这个能量流所携带的能量通过在辐射体同吸收体之间的任何一个截面都是相同的。从互能原理可以推导互能定理，互能流定理，麦克斯韦方程，时间反转的麦克斯韦方程。互能原理，自能原理是这套电磁场理论的新公理。本文回顾作者完成这套理论的全过程。这个过程分为两个部分，第一部分是作者 1987 年到 1989 年间发表的互能定理。第二部分是 2014 年开始到 2019 年作者第二次进入这个课题最终彻底完成的互能论。在完成了电磁场的互能论后，作者把这一理论也推广到量子力学。这样任何一给粒子都是由互能流构成的。互能流是由对应粒子的波比如满足薛定谔方程的波的滞后波同超前波构成的。归一化后互能流就是粒子。构成粒子也有时间反转波。时间反转波抵消了所有自能流的能流，使得波成为概率波，而非能量波。能量是由粒子传递。反粒子由时间反转波的互能流构成。粒子的情况同光子近似。

1.引言

麦克斯韦总结了电磁场的理论，提出了麦克斯韦方程，由麦克斯韦方程可以推出波动方程，因此辐射电磁场是波。普朗克发现光在辐射时，是以能量包的形式辐射的。爱因斯坦发现光在被接收时是以能量包的形式完成的。爱因斯坦猜测光在空间也是以能量包的形式运动。这个能量包被称为光子。

可是光子和波仍然不能统一到一个理论框架里面来。哥本哈根学派认为波的振幅的平方给出了粒子出现的概率。哥本哈根学派认为粒子是由波塌缩而来的。但是人们如果要问为什么波幅的平方给出了粒子的概率？塌缩的数学描述是什么，这些问题就不好回答了。进一步的解释有许多种，

(1) 粒子是波的核心，波是粒子的导航波，因此有了量子力学的德布罗意的导航波诠释。除此之

外还有很多不同的诠释，比方说多世界多历史的诠释。不过没有一个诠释可以满意的解释所有的问题。作者认为最靠谱的应该是 John Cramer 的量子力学交易诠释。

麦克斯韦方程的解有两种电磁波，一种是滞后波，一种是超前波。滞后波大家都清楚。超前波被认为不在自然界中存在，因此是一个纯数学的波。两位物理前辈惠勒和费曼在他们 1945 年关于吸收体的理论中赞成电流会产生一半滞后波，一半超前波。因此它们认为超前波也是物理上存在的波。John Cramer 在此基础上建立了量子力学的交易诠释。交易诠释中滞后波被称为出价波，超前波被称为回价波。辐射体产生出价波，出价波作用到吸收体上，吸收体产生了回价波。交易诠释的核心是出价波只能同一个回价波交易。这个交易过程称为握手。辐射粒子的出价波同某一个吸收体的回价波握了手，就不能同其他粒子的回价波握手了。为什么是这样的？John Cramer 也不知道原因，他说人们的交易过程，就是这样的过程，A 把某个货物卖给 B，B 付了钱，实现了交易。现在 A 就不能把货物再卖给其他的 C 了。滞后波也是一样，只能和一个超前波交易。

在量子力学里，著名的实验有双缝实验。这个实验表明即使在光的能量密度非常低，因此只能有一个光子同过双缝系统时，仍然可以产生干涉。因此即使一个光子的光也是以波的形式出现的。另一方面光是以能量包的形式被一个吸收体电荷所吸收。因此光似乎既是波又是粒子，这就是波粒子二象性悖论。现有的量子力学理论，量子场论对波粒子二象性悖论无解，或者有很多不同的解。下面谈谈我是怎样无意中正好找到了这个问题的正确答案（我认为他是正确的，读者可有自己判别）。

2.互能定理的提出

我不是一个物理学家。我是一个电磁场天线工程师，我是偶然的机会被卷入波粒子二象性悖论的研究。1985 年初我提出了电磁场的互能定理，那时我正在西安电子科技大学读硕士研究生。后来论文在 1987 年初发表在中国的电子科学学报上[1]，下面是互能定理：

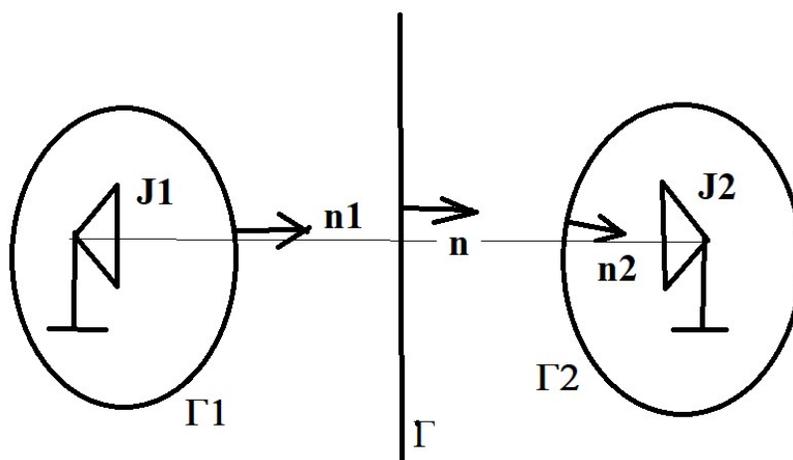


图 1. 两个天线的系统，发射天线辐射电磁场滞后波，接收天线辐射超前波。

$-\iiint_{V_1} \mathbf{E}_2^* \cdot \mathbf{J}_1 dV = \iiint_{V_2} \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2^* dV$	(1)
--	-----

E_1 是发射天线的电磁场矢量。 E_2 是接收天线的电磁场矢量。“ \cdot ”是电磁场矢量的点积。 J_1 是发射天线的电流元。 J_2 是接收天线的电流元。“ $*$ ”是复变量的共轭函数。 J_1 在 V_1 上不为零。 J_2 在 V_2 上不为零。互能定理所处的环境可参见图 1。

该论文提出了互能的概念。互能是相互作用能，是发射天线同接收天线的相互作用能。这其实意味着除了发射天线辐射电磁场以外，接收天线也辐射电磁场。这个定理告诉我们发射天线的电磁场对接收天线电流源做的功正好等于接收天线的电磁场从发射天线电流元上吸允的功。除此之外我定义了两个电磁场在曲面上的内积。有了这个内积互能定理被应用到波球面波的展开中去。另外我有两篇关于互能定理的论文也被《电子科学学刊》接受[2][3]，后来在 1989 年发表。互能定理可以被用来求解发射天线的方向图。可以用来简化电磁场的计算。当时不少我的同行不赞成互能定理的提法，他们认为电磁场理论中能够发现的定理早就被发现完了，不会再有新的定理。我自己也不十分看好自己的这些论文。1987 年我从西电研究生毕业后，在电子部 39 所从事了 3 年天线研究，1990-1996 年在德国尤里西科学院电子所从事 CT 和脑磁图的研究。1998 年获得西安交大生物医学专业博士学位。以后在德国，加拿大美国不同公司主要从事生医工程方面的工作。电磁场的互能定律同波粒子二象性有什么联系，那时我还没有发现。

3.查找与互能定理相关的论文

我对互能定理这个课题总觉得有些事情没有做完，一晃快 30 年过去，还是觉得它是那么的诡异。在电磁场教书都讲，坡印廷矢量和坡印廷定理描述了电磁场的能量流密度和能量流的定律，可我觉得互能定理也在电磁场中描述能量的定理。到底能量应该是由坡印廷定理描述还是由互能定理描述？其实我也回答不了这个问题。到了 2014 年，我觉得这个问题不能再拖下去了，我必须在我有生的时间里完成对互能定理的研究。我开始查找同互能定理相关的论文。首先发现了 de Hoop 关于相关互易定理（1987 年底发表）[4]。这个定理是互能定理的时域对应定理。互能定理是定义在傅里叶频率域上，相关互易定理定义在时域上。因此相关互易定理同互能定理是同一个定理。相关互易定理有 50 多个人引用，可见是一个很重要的电磁理论。互能定理当时只有几个人引用（因为是在中文期刊上发表的，看到的人不多），考虑它同相关互易定理公式只差一个傅里叶变换，并且比相关互易定理刚好发表地早了一点，因此也非常有意义。我从相关互易定理的引用文献中发现了 Welch 的时域互易定理（1960 发表）[5]。Welch 的时域互易定理是 de Hoop 互易定理的一个重要特殊例子，它已经包含了 de Hoop 时间相关互易定理的主要思想。Welch 的互易定理提出了超前波的概念。在 Welch 的互易定理里，发射天线同滞后波相联系，接收天线同超前波联系。Welch 的互易定理作为互易定理，发射天线的电磁场，和接收天线的电磁场，两者不必都是物理现实的电磁场。因此即便接收天线包含有一个超前波，这个超前波可以是虚拟的电磁场。因此对于 Welch 的接收天线上的超前波，大家并不感觉奇怪。互能定理同 de Hoop 的相关互易定理以及 Welch 的互易定理其实可以统一看成一个定理。如果我认为这个定理是一个能量定理，那么在这个定理中出现的两个电磁场，发射天线的滞后波，接收天线的超前波都必须是物理真实的电磁波才行。因此当时我想，我必须第一步解决互能定理是不是一个能量定理的问题。

4.互能定理是一个能量定理

2015 年我从坡印廷定理证明了互能定理。因此互能定理是坡印廷定理[6]的一个子定理。1987 年我引入互能定理时的证明是从麦克斯韦方程出发证明的。这种证明还不能保证它是一个能量定

理。1987年其实我已经想到从坡印廷定理证明互能定理。我选择从频域坡印廷定理证明互能定理。没有达到目的。实际上频域坡印廷定理同时域坡印廷定理是两个独立的定理，而不是由傅里叶变换联系起来的一个定理。2015年我从时域坡印廷定理出发，很容易地证明了互能定理。证明的思路大致是首先把辐射源的电磁场同吸收源的电磁场叠加，对叠加后的电磁场使用时域坡印廷定理。从叠加场的时域坡印廷定理减去辐射体和吸收体自身的坡印廷定理，剩下部分就是 Welch 的时域互易定理。由 Welch 的时域互易定理推广可得 de Hoop 的相关互易定理，做傅里叶变换可得到互能定理。坡印廷定理是公认的能量定理。互能定理作为其子定理当然也就是一个能量定理了，即是一个物理定理。这个能量定理中包含超前波，这意味着超前波也必须是物理中真实存在的量。超前波的概念违反我们习惯中时空观念，因为这种波，随着波传向远方，时间流向过去。出现了时间向负方向运动的情况。大多数科学家认为超前波只是一个虚拟的波，并不是一个真实的电磁波。超前波到底是不是一个真实的物理波呢？

5.超前波的理论

我开始研究超前波，想搞清楚这个超前波到底是数学波还是一个物理上真实存在的波。首先发现了惠勒费曼的吸收体理论（1945，1949年发表两篇）惠勒费曼认为电流产生的波是一半滞后 [7][8]，一半超前。超前波是物理存在的波。惠勒费曼的理论是建立在远程作用（action at a distance）的理论 [9][10][11] 之上。同时也发现了 John Cramer 的量子力学交易诠释 [12][13]。这些论文使我坚定了超前波是物理存在的观念。因此也坚定了我互能定理的确是能量定理的信心。超前波总是同滞后波一起作用的，它并不单独存在。或者我们并不能测量到单独存在的超前波。图 2 给出了与滞后波同步的超前波。这里滞后波从辐射体（发射天线）发出，超前波同吸收体（接收天线）发出。

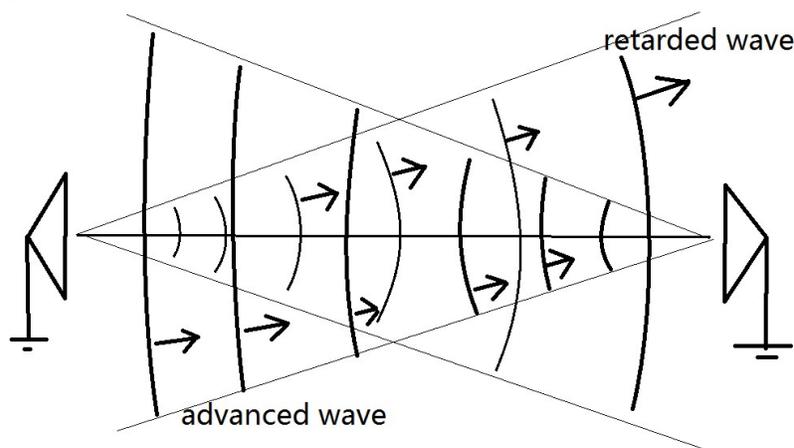


图 2. 发射天线的滞后波同接收天线的波超前波的不同步。

明白了互能定理是一个物理定理，而且是一个能量定理，我想互能定理应该像坡印廷定理一样，有一个能量流密度或者能量流。

6.互能流定理

很快我在互能定理的基础上推导出了互能流定理。2016 年完成[14][15]。

$-\iiint_{V_1} \mathbf{E}_2^* \cdot \mathbf{J}_1 dV = (\xi_1, \xi_2) = \iiint_{V_2} \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2^* dV \quad (2)$

J_1 是发射天线的辐射源。 J_2 是接收天线的辐射源。 ξ_1 是发射天线的辐射电磁场, $\xi_1 = \{\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1\}$, ξ_2 是接收天线的辐射电磁场, $\xi_2 = \{\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2\}$ 。 (ξ_1, ξ_2) 是曲面 Γ 上的内积。 Γ 是在辐射源同吸收体之间的任何一个曲面上的积分。互能流定义如下。

$(\xi_1, \xi_2) = \oiint_{\Gamma} (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2^* + \mathbf{E}_2^* \times \mathbf{H}_1) \cdot \hat{n} d\Gamma \quad (3)$
--

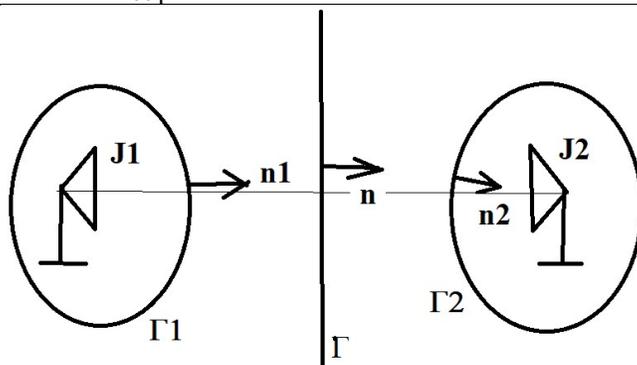


图 3) 互能流定理。 \hat{n} 是曲面的法线。

互能流的环境可参阅图 3) 。

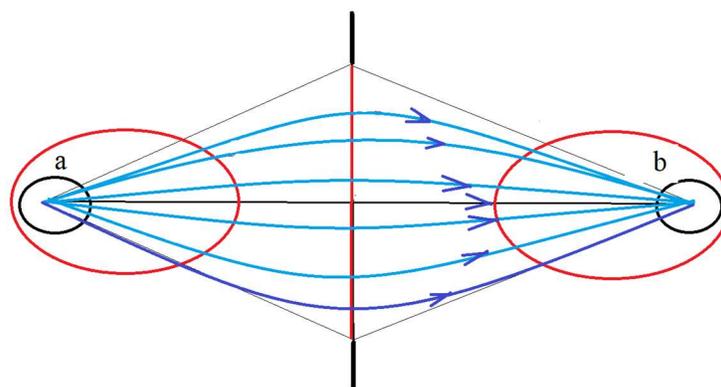


图 4) 互能流的形状。

互能流是由滞后波同超前波构成的, 见图 4。因此互能流的形状是发射天线的滞后波同接收天线的超前波重叠的那部分。互能流在发射天线和接收天线处小, 在发射天线同接收天线中间的隔板处变得比较粗大。

互能流定理告诉我们互能流从辐射天线发出到接收天线, 在其中的任何一个曲面上穿过的能量是相等的, 例如图 3 中的曲面 $\Gamma_1, \Gamma, \Gamma_2$ 。因此互能流的性质同滞后波完全不同。滞后波从源发出后波

幅会随距离衰减。互能流在能量传播方向上并不随距离衰减。这个性质正是光子所要求的。因此我开始了用互能流解释光子。认为光子不是别的其实就是互能流。

7. 自能流

如果互能流传递电磁场的能量，而且光子就是互能流，其实另一个问题就自然来了。那就是自能流传递不传递能量。自能流是指发射天线产生的滞后波所携带的能量，以及接收天线产生的超前波所携带的能量。初看来自能流肯定也传递能量。但是如果互能流可也传递能量，其实自能流就没有必要也传递能量，这是因为互能流传递能量不需要波塌缩的概念。自能流传递能量离不开波的塌缩，现在有了超前波，超前波也得塌缩。因此必须滞后波同超前波都塌缩。这被称为双塌缩。很难想象互能流传递的能量正好同自能流滞后波超前波塌缩刚好在一个方向上。如果自能流传递的能量同互能流传递的能量不在一个方向上就需要两种不同的光子。互能流的光子，自能流的光子。这两种光子大小很可能不一样。另外有人还甚至建议滞后塌缩产生光子，超前波塌缩产生反光子。如果这样就有3种不同的光子。我们现实中只看到一种光子。因此我猜测只有互能流才是真正传递能量的光子。自能流不知什么原因并不传递能量。因此我猜测自能流把能量传出去但后来又撤了回来。但是这只是猜测，没有更多的根据。自能流互能流示意图见图5。

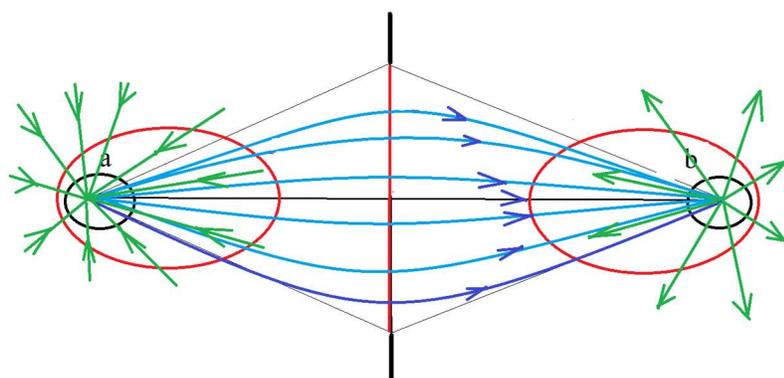


图 5. 自能流互能流，时间反转波的能量流。

8. N 个电荷的能量守恒定律

我开始研究多个电荷的系统，假定空间（或者宇宙）中只有 N 个电荷。假设 N 个电荷所在的区域为 V，V 是有限的（宇宙是有限的）。再区域 V 之外可以建立一个无限大的球面 Γ 。下面介绍这套理论[16].

很显然一个电荷 i 的辐射的电磁能量，只可能被其余的电荷 j ($j \neq i$) 接收。我假定电荷 i 能量不会辐射到空间外面去，即不会离开 Γ 。对应这样的电磁场系统我可以施加一个能量守恒定律。

所有电荷。发射的能量同所有电荷接收的能量应该是大小相等符号相反的。比如

$\int_{t=-\infty}^{\infty} \iiint_V \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{J}_j dV dt$ 是电流元 i 对电流源 j 做到功。电流元 j 对电流源 i 做到功一定是上述功的负值，即， $\int_{t=-\infty}^{\infty} \iiint_V \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{J}_j dV dt = - \int_{t=-\infty}^{\infty} \iiint_V \mathbf{E}_j \cdot \mathbf{J}_i dV dt$ 。这样就有一部分能量从电荷 i 转移的

电荷*j*。电荷*i*少了的能量正好是电荷*j*增加了的能量。因此有 $\int_{t=-\infty}^{\infty} \iiint_V \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{J}_j dV dt + \int_{t=-\infty}^{\infty} \iiint_V \mathbf{E}_j \cdot \mathbf{J}_i dV dt = 0$ 。因此所有电荷的功其和一定为零。

$\sum_{i=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \int_{t=-\infty}^{\infty} dt \iiint_V \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{J}_j dV = 0$	(4)
--	-----

上述能量守恒定律应该看成是自明的。如果我们可以从麦克斯韦方程推导出能量守恒定律 (4)，说明能量守恒定律同麦克斯韦方程是一致的。否则，能量守恒定律同麦克斯韦方程冲突。如果存在冲突，我们又坚信能量守恒是正确的，那么我们就必须修改麦克斯韦方程。

下面我尝试从麦克斯韦方程推导上面的能量守恒定律。首先假设麦克斯韦方程成立。电荷运动应该满足麦克斯韦方程。因此对所有 N 个电荷的场叠加的电磁场 $\xi = (\mathbf{E}, \mathbf{H})$ ，再真空中应该满足坡印廷定理（坡印廷定理可以从麦克斯韦方程推得），见下式。

$-\oint_{\Gamma} (\mathbf{E} \times \mathbf{H}) \cdot \hat{n} d\Gamma = \iiint_V \mathbf{E} \cdot \mathbf{J} dV + \iiint_V (\epsilon \mathbf{E} \cdot \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t} + \mu \mathbf{H} \cdot \frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}) dV$	(5)
---	-----

ϵ 式真空介电常数。 μ 式真空磁导率。 \mathbf{J} 为电磁场的电流源。在上述坡印廷定理中代入叠加原理，

$\begin{aligned} \mathbf{E} &= \sum_{j=1}^N \mathbf{E}_j \\ \mathbf{H} &= \sum_{j=1}^N \mathbf{H}_j \\ \mathbf{J} &= \sum_{j=1}^N \mathbf{J}_j \end{aligned}$	(6)
---	-----

$\xi_i = (\mathbf{E}_i, \mathbf{H}_i)$ 是第 *i* 个电荷的电磁场，将 (6) 式代入 (5) 式我们得到：

$\begin{aligned} & - \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \oint_{\Gamma} (\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_j) \cdot \hat{n} d\Gamma \\ & = \sum_{i=1}^N \sum_{j=1}^N \left(\iiint_V \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{J}_j dV + \iiint_V (\epsilon \mathbf{E}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{E}_j}{\partial t} + \mu \mathbf{H}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_j}{\partial t}) dV \right) \end{aligned}$	(7)
--	-----

想从上述 N 个电荷的坡印廷定理推导出能量守恒定律公式 (4) 需要下面三个步骤：

(一) 自能项对电磁场辐射不能有贡献，下面是所有自能项的贡献。

$- \sum_{i=1}^N \oint_{\Gamma} (\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i) \cdot \hat{n} d\Gamma = \sum_{i=1}^N \left(\iiint_V \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{J}_i dV + \iiint_V (\epsilon \mathbf{E}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{E}_i}{\partial t} + \mu \mathbf{H}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_i}{\partial t}) dV \right)$	(8)
---	-----

将 (8) 式从 (7) 式减去得到，

$-\sum_{j=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \oiint_{\Gamma} (\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_j) \cdot \hat{n} d\Gamma$ $= \sum_{j=1}^N \sum_{j=1, j \neq i}^N \left(\iiint_V \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{J}_j dV + \iiint_V \left(\epsilon \mathbf{E}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{E}_j}{\partial t} + \mu \mathbf{H}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_j}{\partial t} \right) dV \right)$	(9)
--	-----

这个公式不妨称其为互能公式，因为它只含相互作用项，不含自能项。式中 Γ 是 V 的任意外表面。通常 Γ 被取在无穷大球面上。上式的另一形式，即对称形式为：

$-\sum_{i=1}^N \sum_{j < i} \oiint_{\Gamma} (\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_j + \mathbf{E}_j \times \mathbf{H}_i) \cdot \hat{n} d\Gamma = \sum_{i=1}^N \sum_{j < i} \left(\iiint_V \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{J}_j + \mathbf{E}_j \cdot \mathbf{J}_i \right) dV$ $+ \iiint_V \left(\epsilon \mathbf{E}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{E}_j}{\partial t} + \epsilon \mathbf{E}_j \cdot \frac{\partial \mathbf{E}_i}{\partial t} + \mu \mathbf{H}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_j}{\partial t} + \mu \mathbf{H}_j \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_i}{\partial t} \right) dV$	(10)
--	------

(二) 证明：在无限远的大球面 Γ 上电磁场为零：

$\sum_{j=1}^N \sum_{j < i} \oiint_{\Gamma} (\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_j + \mathbf{E}_j \times \mathbf{H}_i) \cdot \hat{n} d\Gamma = \mathbf{0}$	(11)
--	------

如果，电磁场 \mathbf{E}_i 和 \mathbf{H}_j 都是滞后波，或者都是超前波， $\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_j$ 在大球面 Γ 上一般不会为零。但是如果 \mathbf{E}_i 和 \mathbf{H}_j 中一个是滞后波，另一个是超前波，滞后波同超前波到达无限大球面 Γ 的时间一个在 $t = \infty$ ，一个在 $t = -\infty$ ，两者不能同时不为零。因此乘积 $\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_j$ ， $\mathbf{E}_j \times \mathbf{H}_i$ 一定为零。因此只要我们假定电磁场 $\xi_i = (\mathbf{E}_i, \mathbf{H}_i)$ 和 $\xi_j = (\mathbf{E}_j, \mathbf{H}_j)$ 正好一个是滞后波，另一个是超前波，则公式(11)必为零。为了使(11)式满足，电磁场必须是滞后波同超前波成对的出现。一个电荷发出的滞后波同另一个电荷发出的超前波同步地出现。

(三) 空间储存的电磁场能量为零。即，

$\sum_{i=1}^N \sum_{j < i} \int_{t=-\infty}^{\infty} dt \iiint_V \left(\epsilon \mathbf{E}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{E}_j}{\partial t} + \epsilon \mathbf{E}_j \cdot \frac{\partial \mathbf{E}_i}{\partial t} + \mu \mathbf{H}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_j}{\partial t} + \mu \mathbf{H}_j \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_i}{\partial t} \right) dV = 0$	(12)
---	------

上式比较容易证明，因为

$\sum_{i=1}^N \sum_{j < i} \iiint_V \left(\epsilon \mathbf{E}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{E}_j}{\partial t} + \epsilon \mathbf{E}_j \cdot \frac{\partial \mathbf{E}_i}{\partial t} + \mu \mathbf{H}_i \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_j}{\partial t} + \mu \mathbf{H}_j \cdot \frac{\partial \mathbf{H}_i}{\partial t} \right) dV$ $= \frac{d}{dt} \sum_{i=1}^N \sum_{j < i} \iiint_V \frac{1}{2} (\epsilon \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{E}_j + \mu \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{H}_j) dV = \frac{dU}{dt}$	(13)
--	------

此处， $U = \sum_{i=1}^N \sum_{j < i} \iiint_V \frac{1}{2} (\epsilon \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{E}_j + \mu \mathbf{H}_i \cdot \mathbf{H}_j) dV$ ，是真空电磁场的能量。因此(12)式左边有

$\int_{t=-\infty}^{\infty} \frac{dU}{dt} dt = \int_{t=-\infty}^{\infty} dU = U(\infty) - U(-\infty)$	(14)
--	------

在上式中我们假定空间中的总的电磁场能量在 $t = -\infty$ 和 $t = \infty$ 两个时间是没有增加。因此有

$U(\infty) - U(-\infty) = 0$	(15)
------------------------------	------

将式 (12) , (11) 代入 (9) 我们得到能量守恒定律式 (4) 。

值得一提的是上述证明只是证明了公式 (4) 作为一个物理公式成立。其实并没有证明它是一个能量守恒定律。因此, 我们可以称其为 N 个电荷的互能公式。如果要它称为能量守恒定理, 还需要进一步证明除了互能以外, 所有自能项必须统统为零, 即:

$-\oint_{\Gamma} (\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i) \cdot \hat{n} d\Gamma = 0$ $\iiint_V \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{J}_i dV = 0$ $\iiint_V \left(\mathbf{E}_i \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}_i + \mathbf{H}_i \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}_i \right) dV = 0$	(16)
---	------

上式比公式 (8) 的要求更强。因为如果公式 (8) 的项目不为零, 空间中除了互能以外还有自能项。公式 (4) 就不再是能量守恒定律。最多称其为什么公式或者定理。互能公式中描述了空间中能量的一部分。可是如果上面公式 (16) 成立, 第 (i) 个电荷坡印廷定理:

$-\oint_{\Gamma} (\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i) \cdot \hat{n} d\Gamma = \iiint_V \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{J}_i dV + \iiint_V \left(\mathbf{E}_i \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}_i + \mathbf{H}_i \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}_i \right) dV$	(17)
---	------

的各项为零, 电磁场全为零的解没有了意义, 因此坡印廷定律不再成立。坡印廷定理不成立代表其对应的麦克斯韦方程也不成立。

$\nabla \times \mathbf{E} = -\mu \frac{\partial \mathbf{H}}{\partial t}$	(18)
--	------

$\nabla \times \mathbf{H} = \mathbf{J} + \epsilon \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}$	(19)
---	------

即上式不成立。这样我们用反正方法证明了麦克斯韦方程同能量守恒定律冲突。我把这个冲突称为坡印廷定律的漏洞[16].

我发现这个所有 N 电荷的坡印廷定理同前面提到的能量守恒定理 (4) 矛盾。其实这表明麦克斯韦方程联合叠加原理同 N 个电荷的宇宙系统的能量守恒矛盾。我认识到这意味着, 必须修改麦克斯韦方程或者叠加原理。因为, 宇宙的能量守恒定律更加重要。坡印廷定理 (或者麦克斯韦方程) 是有漏洞的。由此我提出了自能流时间反转塌缩的概念, 也就是发射天线发出的滞后波塌缩到发射天线上, 接收天线发出的超前波塌缩到接收天线上。这样自能流并不传递能量了。能量只是由互能流传递, 这样可以免除两种 (或三种) 不同光子的羞竟。时间反转塌缩得引入时间反转麦克斯韦方程。

$\nabla \times \mathbf{e} = \mu \frac{\partial \mathbf{h}}{\partial t}$	(20)
---	------

$\nabla \times \mathbf{h} = -\mathbf{j} - \epsilon \frac{\partial \mathbf{e}}{\partial t}$	(21)
--	------

时间反转麦克斯韦方程是由麦克斯韦方程做 $t \rightarrow -t$ 的变换而得到的。再这个变换下 $\frac{\partial}{\partial t} \rightarrow -\frac{\partial}{\partial t}$,

$\mathbf{E} \rightarrow \mathbf{e}, \mathbf{H} \rightarrow \mathbf{h}$ 。考虑到 $\mathbf{J} = \rho \mathbf{v}$ 。 ρ 是电荷密度，而 $\mathbf{v} = \frac{d\mathbf{x}}{dt}$ 是速度。 $\mathbf{J} \rightarrow -\mathbf{j}$ 。时间反转波可以有对应的的时间反转波的坡印廷定理：

$$-\sum_{i=1}^N \oiint_{\Gamma} (\mathbf{e}_i \times \mathbf{h}_i) \cdot \hat{n} d\Gamma = -\sum_{i=1}^N \left(\iiint_V \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{j}_i dV - \iiint_V \left(\epsilon \mathbf{e}_i \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{e}_i + \mu \mathbf{h}_i \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{h}_i \right) dV \right) \quad (22)$$

上述时间反转麦克斯韦方程可以由时间反转的麦克斯韦方程 (21) 推导。但是也可以从上述时间反转变换直接从坡印廷定理 (8) 式得到。补充上时间反转波后虽然我不能得到 (16) 式。但是我么可以得到：

$$\begin{aligned} -\oiint_{\Gamma} (\mathbf{E}_i \times \mathbf{H}_i) \cdot \hat{n} d\Gamma - \sum_{i=1}^N \oiint_{\Gamma} (\mathbf{e}_i \times \mathbf{h}_i) \cdot \hat{n} d\Gamma &= 0 \\ \iiint_V \mathbf{E}_i \cdot \mathbf{J}_i dV - \iiint_V \mathbf{e}_i \cdot \mathbf{j}_i dV &= 0 \\ \iiint_V \left(\mathbf{E}_i \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}_i + \mathbf{H}_i \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}_i \right) dV - \iiint_V \left(\epsilon \mathbf{e}_i \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{e}_i + \mu \mathbf{h}_i \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{h}_i \right) dV &= 0 \end{aligned} \quad (23)$$

上式表明时间反转波可以把自能项的每一项的抵消掉。因此自能也不传递能量。自能不传递能量。能量只是由互能传递。这样一来互能公式 (9) 或 (10) 就不再仅仅是互能公式。而且是所有的能量的公式。我们进一步由该公式推导而得的公式 (4) 就是能量定律了。由此我们推导得到了能量守恒定律。条件是修改了麦克斯韦方程。增加了时间反转麦克斯韦方程。

7.互能原理，自能原理

2017 年我把上面这套理论总结为互能原理，自能原理[17]。自能原理是公式 (23) 说明存在时间反转波。时间反转波满足时间反转麦克斯韦方程 (20 和 21)。时间反转波抵消所有的滞后波，超前波的能量和能量。互能原理是 (9) 或 (10) 式。如果 N=2 互能原理为：

$$\begin{aligned} -\oiint_{\Gamma} (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 + \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) \cdot \hat{n} d\Gamma &= \iiint_V \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2 + \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 dV \\ + \iiint_V \left(\epsilon \mathbf{E}_1 \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}_2 + \epsilon \mathbf{E}_2 \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}_1 + \mu \mathbf{H}_1 \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}_2 + \mu \mathbf{H}_2 \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}_1 \right) dV & \end{aligned} \quad (24)$$

从上述公式容易推导 Welch 的互易定理。假定电磁场 $\xi_1 = (\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1)$ 是滞后波， $\xi_2 = (\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2)$ 是超前波，因此再大球面 Γ 上有

$$\oiint_{\Gamma} (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 + \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) d\Gamma = 0 \quad (25)$$

考虑

$$\int_{t=-\infty}^{\infty} dt \iiint_V \left(\epsilon \mathbf{E}_1 \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}_2 + \epsilon \mathbf{E}_2 \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{E}_1 + \mu \mathbf{H}_1 \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}_2 + \mu \mathbf{H}_2 \cdot \frac{\partial}{\partial t} \mathbf{H}_1 \right) dV \quad (26)$$

$= \int_{t=-\infty}^{\infty} dt \frac{dU}{dt} = U(\infty) - U(-\infty) = 0$	
---	--

其中, $U = \iiint_V \frac{1}{2}(\epsilon \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{E}_2 + \mu \mathbf{H}_1 \cdot \mathbf{H}_2) dV$ 。对式 (24) 考虑时间积分 $\int_{t=-\infty}^{\infty} dt$ 我们可以得到:

$\int_{t=-\infty}^{\infty} dt \iiint_V \mathbf{E}_1 \cdot \mathbf{J}_2 + \mathbf{E}_2 \cdot \mathbf{J}_1 dV = 0$	(27)
--	------

考虑 \mathbf{J}_2 定义在 V_2 上, \mathbf{J}_1 定义在 V_1 有,

$\int_{t=-\infty}^{\infty} dt \iiint_{V_2} \mathbf{E}_1(t) \cdot \mathbf{J}_2(t) dV = - \int_{t=-\infty}^{\infty} dt \iiint_{V_1} (\mathbf{E}_2(t) \cdot \mathbf{J}_1(t)) dV$	(28a)
---	-------

上式就是 Welch 的时域互易定理[5]。从这个定理可以进一步推广到 De Hoop 的互易定理[4]:

$\int_{t=-\infty}^{\infty} dt \iiint_{V_2} \mathbf{E}_1(t + \tau) \cdot \mathbf{J}_2(t) dV = - \int_{t=-\infty}^{\infty} dt \iiint_{V_1} (\mathbf{E}_2(t) \cdot \mathbf{J}_1(t + \tau)) dV$	(28b)
---	-------

对 de Hoop 的互易定理做傅里叶变换, 得到互能定理式 (2)。我对公式 (28a) (28b) 中的负号, 做如下解释。假设 $\mathbf{J}_1(t)$ 是发射天线或辐射源, $\mathbf{J}_2(t)$ 是接收天线或吸收井。 \mathbf{E}_1 是滞后波, \mathbf{E}_2 超前波。电流 $\mathbf{J}_1(t)$ 对超前波 $\mathbf{E}_2(t)$ 做的功就是天线 $\mathbf{J}_1(t)$ 发出的功。这部分功相当是电源对系统做到功。我们把损耗的功定义为正, 这部分功取负值, $|\iiint_{V_1} (\mathbf{E}_2(t) \cdot \mathbf{J}_1(t)) dV| = - \iiint_{V_1} (\mathbf{E}_2(t) \cdot \mathbf{J}_1(t)) dV$ 。 $\mathbf{E}_1(t)$ 对电流 $\mathbf{J}_2(t)$ 做的功是损耗。因此取正值。 $|\iiint_{V_2} \mathbf{E}_1(t) \cdot \mathbf{J}_2(t) dV| = \iiint_{V_2} \mathbf{E}_1(t) \cdot \mathbf{J}_2(t) dV$ 。这样就解释了上述公式 (28) 中的负号。

从上面推导我们知道 Welch 时域互易定理, 也可以称为互能定理。这个定理是互易定理不假, 更重要的它是能量定理。因此我在 1987 年称它为互能定理是正确的。其实它不仅仅是互能定理。上一节和这一节的讨论告诉我们它是电荷数 $N=2$ 时的能量守恒定律。这是因为自能流不传递能量。我们仍把它称为互能定理, 以免同坡印廷定律混淆。在电磁场理论中常常认为坡印廷定理是能量守恒定律。在时域从互能定理进一步可以推导得到时域的互能流定理:

$\begin{aligned} & \int_{t=-\infty}^{\infty} dt \iiint_{V_2} \mathbf{E}_1(t) \cdot \mathbf{J}_2(t) dV \\ &= \oiint_{\Gamma} (\mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2 + \mathbf{E}_2 \times \mathbf{H}_1) \cdot \hat{n} d\Gamma \\ &= - \int_{t=-\infty}^{\infty} dt \iiint_{V_1} (\mathbf{E}_2(t) \cdot \mathbf{J}_1(t)) dV \end{aligned}$	(29)
---	------

式中 Γ 是介于电流源 $\mathbf{J}_1(t)$ 和电流元 $\mathbf{J}_2(t)$ 之间的任何曲面。法线 \hat{n} 由 (1) 指向 (2)。公式 (29) 是互能流定理 (2) (3) 的傅里叶逆变换。互能流定理是我建立光子模型的根据。

8. 粒子化, 光子是归一化的互能流

互能流的性质同光子其实还是有一点不一致。2019 年我在研究路径积分时注意到这一点。事情时这样的。要研究互能流的流线, 沿着整个流线应该能量应该保持不变。这样我就可以建立一个有效电磁场, 这个电磁场就像波导管中的电磁场, 在波导管的每一个截面上通过的能量是相等的。在研究这个问题中我注意到光源和光井的互能流会同源和井之间的距离变大而变小。光源是辐射

体，或发射天线。光井是吸收体或接收天线。这是因为当距离增加后，滞后波辐射场对吸收体的作用随距离增加而减小了。超前波的辐射场对辐射体的作用也随这个距离增加而减小了。如果原来互能流可以传递一个光子的能量，当源和井之间距离增加后就不能再传递一个光子了。这显然是不对的。必须对此进行归一化。归一化是要求互能流的能量必须正好是一个光子。这个归一化同量子力学要求波函数的平方积分必须为 1 有些类似。因此光子是归一化的互能流。这个归一化是一个物理过程。这个归一化是不能放入原来互能原理的框架中，更不能放入麦克斯韦方程的理论框架里。是一个量子化的过程。因为量子化这个词，二次量子化这些短语已经用来表示从粒子的力学方程猜测它的波动方程的过程。我就不能再用量子化这个词了。其实我认为量子力学中的量子化其实应该被称为波动化，因为它是一个由牛顿力学方程猜测波动方程的过程。既然量子化这个词已经被使用。我就使用“粒子化”这个词表示互能流的归一化。互能流归一化后，互能流的性质就同光子完全一致了。因此光子就是归一化后的互能流。的互能流的归一化可被称为粒子化。归一以后的互能流就是光子。由薛定谔方程，狄拉克方程出发，归一化互能流就是其他粒子比如电子[18]。

我是想用互能流解释光子。互能流不像波那样在真空中随着从光源到场点的距离增加波幅不断地衰减。互能流定理保证了经互能流传递的能量在任何介于辐射体（源）到光子的吸收体（井）的能量都是相等的。互能流定理应该被称为能量流定理，即取得互能这个形容词。为了同坡印廷定理区别，我还是只称它为互能流定理。互能流同光子完全相同吗？我在 2019 年发现其实它们之间还是有区别的[18]。从互能流定理可以看出，互能流传递的能量为 $\int_{t=-\infty}^{\infty} dt \iiint_{V_2} \mathbf{E}_1(t) \cdot \mathbf{J}_2(t) dV$ ，考虑 $\mathbf{E}_1(t) \propto \frac{1}{r}$ ， $r = \|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1\|$ ， $\mathbf{x}_1 \in V_1$ ， $\mathbf{x}_2 \in V_2$ 。r 是光源到光井的距离。这表明互能流随着光源和光井距离增加而衰减。互能流定律只是保证了当光源同光井确定以后，在光源光井之间的任何一个截面上传递的能量是恒定的，并没有保证如果不光源同光井之间的距离改变以后传递的能量也恒定。也就是说如果用互能流来描述光子，当光源同吸收源距离很大时光子的能量会变得很小。远远小于 $\hbar\omega$ (\hbar 是衰减的 Plank 常数， ω 是圆频率) 这显然是不对的。我们知道光子的能量是一个恒定的量，不会随着光源到光井的距离有变化。为了把互能流同光子可以统一起来。互能流应该归一到具有一个光子的能量。我假定，光子内的电磁场同经典电磁场不一样。光子的电磁场计算方法是把电流元乘上光源到光井的距离即，即用下述方程描述电流，

$\begin{aligned} \mathbf{J}_1(t) &\leftarrow k \ \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1\ \mathbf{J}_1^c(t) \\ \mathbf{J}_2(t) &\leftarrow k \ \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1\ \mathbf{J}_2^c(t) \end{aligned}$	(30a)
--	-------

k 是一个常数。上式是把电流的幅度放大。因此光子的互能流的计算需要把电流元放大，放大倍数同距离 $\|\mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1\|$ 成正比。 $\mathbf{J}_1^c(t), \mathbf{J}_2^c(t)$ 是经典电流。 $\mathbf{J}_1(t), \mathbf{J}_2(t)$ 是互能流计算公式中应代入的电流。这个电流是用来计算互能流的等效电流。我们必须用 (30a) 式提供的电流元计算电磁场。这样光子内的电磁场，

$\begin{aligned} \mathbf{E}_1(t) &\leftarrow k \ \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1\ \mathbf{E}_1^c(t) \\ \mathbf{E}_2(t) &\leftarrow k \ \mathbf{x}_2 - \mathbf{x}_1\ \mathbf{E}_2^c(t) \end{aligned}$	(30b)
--	-------

此处 $\mathbf{E}_1^c(t)$ 式由 $\mathbf{J}_1^c(t)$ 计算出的经典电磁场。 $\mathbf{E}_1(t)$ 是光子内的电磁场。同理对磁场 $\mathbf{H}_1(t)$ 也有类似的关系。同理对 $\mathbf{H}_2^c(t)$ 和 $\mathbf{H}_2(t)$ 。

两种可能性，

(1) 光子中的电磁场可以无限制的加倍。我们假定通过互能流可以从光源到光井传播很小的能量。由于形成这样的一个能量通道。尽管可以通过的能量很小，更多的能量可以通过这个通道从光源传递到光井。按照这种理解我们可以用增强电流元的强度的方法来计算光子的滞后波和超前波的电磁场，滞后波传播仍然随场点到光源的距离而衰减，超前波随场点到光井的距离衰减。

(2) 由于超前波对滞后波形成一个导引波。滞后波对超前波形成一个导引波电磁场从光源到光井形成一个波导。称为自然波导。滞后波在波导中传播时并不随光源到场点的距离而衰减。超前波也不随场点到吸收点的距离而衰减。这样一来在光源到光的吸收点之间的波导内，滞后波同超前波是完全一样的。这样在这个波导中的电磁场计算可以按照有效电磁场方法计算。即波导中的电磁场为：

$\begin{aligned} \ \mathbf{E}\ &= \sqrt{\ \mathbf{E}_1\ \cdot \ \mathbf{E}_2\ } \\ \ \mathbf{H}\ &= \sqrt{\ \mathbf{H}_1\ \cdot \ \mathbf{H}_2\ } \end{aligned}$	(31)
--	------

式中 \mathbf{E}, \mathbf{H} 是有效电磁场， $\mathbf{E}_1, \mathbf{H}_1$ 是用公式 (30) 计算滞后波的电磁场， $\mathbf{E}_2, \mathbf{H}_2$ 是用公式 (30) 计算的超前波的电磁场。在这个假设中我们认为光子里的电磁场就是这个有效电磁场。假定计算出的有效电磁场是真实的物理量。这个波导被称为自然波导，在这个自然波导中的互能流计算涉及，

$\begin{aligned} \ \mathbf{E} \times \mathbf{H}\ &= \ \mathbf{E}\ \cdot \ \mathbf{H}\ = \sqrt{\ \mathbf{E}_1\ \cdot \ \mathbf{E}_2\ } \sqrt{\ \mathbf{H}_1\ \cdot \ \mathbf{H}_2\ } \\ &= \sqrt{\ \mathbf{E}_1\ \cdot \ \mathbf{H}_2\ } \sqrt{\ \mathbf{E}_2\ \cdot \ \mathbf{H}_1\ } = \ \mathbf{E}_1 \times \mathbf{H}_2\ \end{aligned}$	(32)
--	------

不过光子中的电磁场并不重要，光子中的电磁场是无法测量的，关键是光子传递的能量，上述两种方法得到的光子传递的能量是一致的。计算方法是一样的。有效电磁场的计算还得依赖滞后波超前波的计算，除非以后找到一种直接计算这种等效电磁场的方法，目前我们不妨暂时放弃有效电磁场的理论。

考虑到量子化这个词已经被量子力学使用，用来表示从粒子的力学方程猜测波动方程的方法，我把上互能流归一化的方法用“粒子化”这个词来表示。因此，本节所讲的互能流的归一化，是粒子化过程。粒子化过程是从波动方程的滞后波解，超前波解构造互能流，再将互能流归一化的过程。因此粒子化同量子化是完全不同的。量子化为了得到了波动方程，对应静态问题，比如氢原子模型就可以找到各个能级。这是因为量子力学静态问题相当于波导中的电磁场，在波导中滞后波同超前波不可区分。可以只用滞后波进行计算。在量子力学静态问题时，电子在轨道上运动同在电磁场在波导管中一样，滞后波同超前波不可分割。因此我们可以只考虑滞后波即可。这就是为什么在量子力学静态问题时，我们只需要求解薛定谔方程即可。因此这种情况下只需要这个量子化得到波动方程即可。在真空中，滞后波同超前波完全是两个不同的物理量因此就必须区分滞后波同超前波，并由这两个波构成互能流。进一步归一化互能流就可描述在真空中运动的光子。

因此我们说，在 3 维真空空间中，滞后波由光源发出。超前波由光井发出。两者有完全不同的形态。在 3 维空间用这里讲的粒子化就可以构造粒子。从而使得波和粒子的二象问题或者悖论得到解决。图 6 给出了电磁场波构成光子的系统。辐射体向吸收体辐射能量这个过程是如图中所示。辐射体产生滞后波和对应的时间反转波。吸收体产生超前波和对应的时间反转波。滞后波的自能流同时间反转波的自能流抵消。超前波的自能流同超前波时间反转波的自能流抵消。滞后波同超前波产生微观互能流，互能流归一化产生光子。无数光子构成宏观的互能流，宏观互能流其实同微观互能流是相等的（光子的互能流因为归一化比这个微观或宏观的互能流强很多倍）。无数宏

观的互能流进一步可以构成宏观的滞后波。这个滞后波满足麦克斯韦方程。这个滞后波必须有一个条件吸收体必须均匀分布在无穷大球面上。

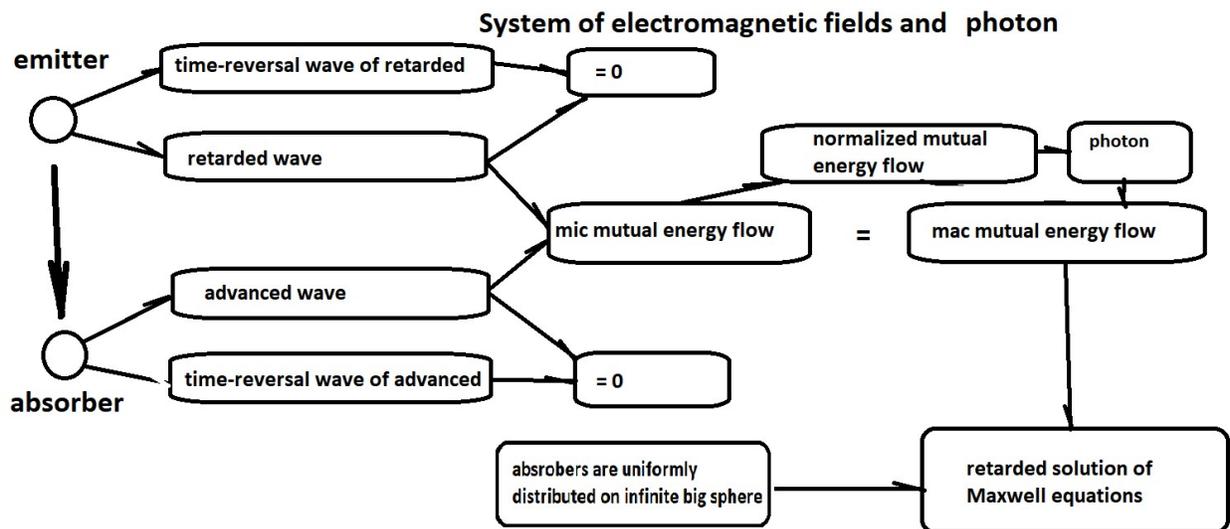


图 6. 电磁波构造光子的系统。

9. 微观电磁波，光子，宏观电磁场系统。

我们在电磁场理论中一直使用宏观的电磁场理论这个电磁场理论中只有滞后波，滞后波满足麦克斯韦方程和叠加原理。由我上述互能原理，归一化的互能原理可以不可以把宏观的电磁场推导出来。

前面，我们已经讨论了光子是怎样由滞后波超前波构成。可是宏观世界里其实我们可以使用麦克斯韦滞后波的理论处理宏观的电磁场问题，比如计算发射天线发出的电磁波。如果上述光子的理论正确，宏观的电磁场理论应该可以由上述理论在光子数目很大的极限情况推得。2018年我也实现了用数目很大的互能流证明坡印廷定理。坡印廷定理其实同麦克斯韦方程的两个包含旋度的方程是等价的。因此当推导得到坡印廷定理后，麦克斯韦方程中的两个包含旋度的方程也就被证明了。这个麦克斯韦方程是纯滞后波的宏观麦克斯韦方程。值得注意的是为了上述推导成功，我得增加一个条件，即所有吸收体均匀分布在无限大球面上。值得一提的是，其实在吸收体理论 [7][8] 中惠勒和费曼就已经注意到，如果吸收体均匀分布，超前波同滞后波就一致了。我的证明在于假定能量是由互能流构成的，成千上万个互能流合在一起就构成了宏观的电磁场，它是满足麦克斯韦方程的滞后波。归一化后的互能流数目可能比互能流的数目少得多，但是当归一化的互能流的数目也已经足够大时，归一化后的互能流同互能流的效应是一致的。我们用归一化的互能流描述光子，这就证明了无数给光子构成了满足麦克斯韦方程宏观的电磁场，这个场是滞后波。

当吸收体均匀分布到无限大球面上时，可以证明所有吸收体产生的超前波同光源产生的滞后波完全一样。因此超前波同滞后波可以都被看成滞后波。这样经典电磁场理论仍然可以看成互能流理论（光子理论）在 N 很大时的极限。注意，我们发现，微观的电荷的电磁场满足麦克斯韦方程，时间反转的麦克斯韦方程。这两个方程描述了四个电磁场波，滞后波，超前波和两个时间反转波。波的能量流互相抵消。滞后波同超前波产生的互能流并不因上述自能流的抵消而抵消。互能

流传递电磁场能量。互能流从辐射体电荷到吸收体电荷建立了一个通道，多次利用这个通道后一个光子的能量可以建立起来。多个光子的效应又构成了宏观的电磁场。由互能流理论证明这多个光子的宏观电磁场满足麦克斯韦方程。注意这个宏观的麦克斯韦方程同前面微观的麦克斯韦方程不一样，这个宏观的麦克斯韦方程式没有超前波只有滞后波的麦克斯韦方程。整个麦克斯韦的理论可以建立在再这个宏观的麦克斯韦方程之上。因此互能流理论是麦克斯韦的理论的基础。图 6 描述了整个电磁系统。描述了宏观滞后波的麦克斯韦理论的基础。宏观滞后波的麦克斯韦理论是建立在这个基础之上的。这个基础包括了这个宏观滞后波是由许多光子构成的。光子又是归一化的互能流。互能流又是由滞后波同超前波同步构成的。滞后波的自能流，超前波的自能流同时间反转波的自能流的能量抵消。

10. 互能流理论的价值所在

上述互能流的理论如果正确，意味着发现了两个时间反转的波，这些波是物理存在着的真实物理量。这些物理量定发现同麦克斯韦发现位移电流一样，并不是靠实验，而是靠整个理论的自洽性。是靠发现坡印廷定理同 N 个电荷的能量守恒定律冲突而发现的。在我们的假设中，用到了宇宙有限，宇宙中的电荷数目 N 有限。如果宇宙无限， N 无穷大，似乎我的推论就不正确了。其实我做如下推论还是基于对光子的理解。光子是一个两个电荷的体系，有一个辐射体电荷，一个吸收体电荷。对于这一个 $N=2$ 的体系，其实能量就是从辐射体传递到吸收体。并没有能量从辐射体传递的整个空间，甚至飞离宇宙。一个辐射电荷的麦克斯韦方程导致了一个电荷的坡印廷定理。这个定理告诉我们总有能量流一直驶向无穷远，最终飞离宇宙，这显然是极端错误的。我把这个问题称为坡印廷定理的漏洞。引进了时间反转波，其实就修复了这个漏洞。

时间反转波也可以被看成一种波的塌缩。这种塌缩同量子力学中提到的塌缩是完全不同的。量子力学的波塌缩对滞后波是塌缩到波的吸收点。时间反转波这种塌缩对滞后波是塌缩到波的辐射源。时间反转的塌缩是可以数学描述的，这同哥本哈根学派提出的波塌缩概念中的塌缩完全不同。哥本哈根学派的波塌缩是无法用数学描述的。如果存在时间反转波，而且满足时间反转麦克斯韦方程。那么麦克斯韦方程已经不能作为整个的电磁场理论公理。电磁场理论的公理必须修正。我所完成的就是对电磁场的公理体系的修正。提出了新的电磁场公理：互能原理，自能原理。其中自能原理告诉我们滞后波的自能流，同其时间反转波能量流抵消；超前波的自能流同其时间反转波的自能流抵消。因此自能流不传递能量。互能原理是从前面提到的能量守恒定律，互能流定理总结出来。互能原理可以推导出 N 个电荷的能量守恒定律，也可以推导互能流定理。互能原理也可以推导麦克斯韦方程。互能原理推导的麦克斯韦方程，同原来麦克斯韦方程是有区别的，互能定理推导的麦克斯韦方程必须两组麦克斯韦方程同时成立。一组对应辐射体产生的滞后波，一组对应吸收体产生的超前波。这样的滞后波同超前波必须同步，这一点非常重要。同步了的滞后波同超前波才可以构成互能流。才能把能量从光源带到光井。相反从麦克斯韦方程只能得到分别是滞后波同超前波的解。滞后波同超前波的解没有联系，因此大多数人只承认滞后波的解，不承认超前波的解。

互能流经过归一化就可以描述光子了。光子不是别的就是归一化的互能流。光源发出的滞后波，光井发出的超前波如果没有同步，各自会通过时间反转波抵消。我们也可以说自能流时间反转地塌缩了。宇宙中大多数电荷尽管它们加速运动，或者从一个能级跳到另一个能级，但是并不能产生光子，那是因为发出的滞后波没有遇到一个来自吸收体电荷的超前波。

其实即使上面的理论把互能原理，自能原理定义为公理并不是必要的。我们当然可以把麦克斯韦方程，补充上时间反转的麦克斯韦方程作为电磁场理论的公理，另外补充上叠加原理。但是由此推导能量守恒和互能流定理并不是那么直截了当，必须在添加很多物理意义的描述。特别是必须把超前波存在作为条件。还要要求滞后波同超前波同步。如果从互能原理出发事情就简单得多。因为互能原理可以推导出超前波，以及超前波必须同滞后波同步。另外互能原理和自能原理作为公理可以省略掉叠加原理作为公理。其形式比起以麦克斯韦方程，时间反转麦克斯韦方程更加简单明瞭了。我把互能原理自能原理的理论总结为一篇量子力学的互能流诠释的论文[17]。注意，这篇论文中还没有提出互能流的归一化的概念。互能流的归一化，尽管它同量子力学波函数的归一化相类似，但是从电磁场理论上考虑，互能流归一化是一个物理概念，不仅仅是一个数学概念。从互能原理并不能推导出归一化的互能流。不进行归一化又得不到光子。因此归一化其实也是电磁场理论的一个公理。这样新的电磁场理论有三大公理，（1）互能原理，（2）自能原理，（3）互能流归一化。

这些理论又都可以推广到量子力学中的其他粒子，比如电子，质子。电子，质子以及其他粒子都是归一化的互能流。这里的互能流是由滞后波同超前波构成的，这里的滞后波超前波满足的是薛定谔方程，狄拉克方程，Klein-Gordon 方程。

11. 互能流理论在量子力学中的应用

2018 年我把互能原理自能原理推广到薛定谔方程，这意味着我认为对应于薛定谔方程一定也存在滞后波同超前波。还有时间反转波。对应薛定谔方程滞后波，时间反转波都很容易建立，但是超前波遇到了困难。似乎薛定谔方程没有超前波的解。即便支持超前波存在的论文，其中薛定谔方程的超前波其实是时间反转波。滞后波以波函数 $\psi(x)$ ，这些学者比如 Cramer 说波函数的共轭 $\psi^*(x)$ 即是超前波。如果 $\psi^*(x)$ 是超前波，那么超前波的时间反转波怎样表示？难道超前波的时间反转波同滞后波具有完全相同的形式？我们知道时间反转 $t \leftarrow -t$ 在傅里叶变换下等于取共轭。因此，时间反转波是 $\psi^*(x)$ 。这样，即便支持超前波理论的作者也把超前波同时间反转波搞混了。这一困难在我引进了负的半径而得以解决。在表示超前波时，半径可以取负值。这里半径是从场点 x 到空间光源点 x' 的距离。因此在薛定谔方程中把距离取为负值，就可以得从滞后波得到超前波[19]。

其实 $\psi(x, t) = \psi(r, t)$ 即表示滞后波，又表示超前波。当时间 $t < 0$ 时， $r = -||x - x' ||$ ，就可以得到超前波。如果 $t \geq 0$ 时 $r = +||x - x' ||$ ， $\psi(x, t)$ 是滞后波。滞后波发生在 $t \geq 0$ 。超前波发生在 $t < 0$ 。这样滞后波，超前波 $\psi(x, t)$ 都满足薛定谔方程。

2018 年我研究路径积分的路径。费曼的路径积分必须考虑所有可能的路径。这个路径非常复杂。费曼认为大多数多余的路径的贡献都抵消掉了。我认为其实大多数路径并不是粒子能量流经过的路线。我认为所有粒子的路径是互能流的流线。互能流的流线是粒子路径中的一个子集。原则上用滞后波，超前波构成的互能流的流线是粒子的真实路径[20]。费曼的路径积分是一种求解薛定谔方程的方法。因此用它以求得滞后波同超前波。然后用这个滞后波同超前波构成互能流，再进一步求得互能流的流线。这个流线就是粒子的能量流线。

正像费曼所证明的其实同薛定谔方程求解等价。也就是说费曼的路径积分并不能比薛定谔方程的解更好。但是我们会发现，路径积分的应用中其实经常会把辐射源和吸收并代入，并且忽略自能

项，只保留相互作用项，其实这已经不自觉用到了互能原理的概念。忽略自能项，其实需要自能原理来保证。这一点其实同在电磁场理论中使用坡印廷定理，代入源的场（滞后波）同井的场（超前波），然后忽略自能项，只保留相互作用项（互能流项）是一样的。因为超前波不被认为是一种真实的物理波。可以含糊的称为源产生的波和井产生的波即可。尽管这样含糊的做法可以很好的解题，这并不意味着我们可以不需要明确的提出互能原理，和自能原理，时间反转波的概念。总之粒子的真实路径是可以由互能流的流线给出的。因此互能流的理论同薛定谔方程求解不是一回事。互能流的理论是在量子力学薛定谔方程求解之后进一步由滞后波同超前波构成粒子的理论。

12. 互能流理论在正则量子化中的应用

我们知道量子力学中的正则量子化是从力学方程得到波动方程的过程。在量子化过程中只要把动量力学方程中的动量换成动量算符，把能量换成能量算符，或者哈密顿算符就得到波动方程。量子化过程中定义了能量算符的平均值为

$$\langle \hat{p} \rangle = \int \psi^*(x) \hat{p} \psi(x) dx \quad (33)$$

$$\langle \hat{H} \rangle = \int \psi^*(x) \hat{H} \psi(x) dx \quad (34)$$

上面的这个定义，把量子力学变得非常神秘。从对应薛定谔的互能流定理出发我们可以证明，

$$-\int_{t=-\infty}^{\infty} dt \int_{V_1} \psi_2^*(\hat{H}\psi_1) dx = (\psi_2, \psi_1) = \int_{t=-\infty}^{\infty} dt \int_{V_2} (\hat{H}\psi_2)^* \psi_1 dx \quad (35)$$

式中 $\psi_1 = \psi_1(\mathbf{x}, t)$, $\psi_2 = \psi_2(\mathbf{x}, t)$ 。 (ψ_2, ψ_1) 是 ψ_2, ψ_1 的内积，也是互能流流过的能量。当 $\psi_2 = \psi_1$ 时，即滞后波同超前波完全一样，这种情况发生在波沿着波导前进。有，

$$-(\psi, \psi) = \int_{t=-\infty}^{\infty} dt \int_{V_1} \psi^*(\hat{H}\psi) dx = \int_{t=-\infty}^{\infty} \langle \hat{H} \rangle dt \quad (36)$$

在互能流定理中负号代表能量时从源 V_1 发出指向 V_2 的。如果方向反过来符号就吸收了。上式告诉我们粒子的能量的确是 $\int_{t=-\infty}^{\infty} \langle \hat{H} \rangle dt$ 。 $\langle \hat{H} \rangle$ 不仅是粒子的“平均”功率，而且就是粒子的功率。同理，我证明了粒子的动量算符的平均值是粒子的动量[19]。这样一来，量子化的定义就不在那么神秘了。量子化就同经典的定义达到一致。再真空中式 (35) 代表粒子的能量，它是哈密顿算符平均值 $\langle \hat{H} \rangle$ 的推广。

互能流定理应用到薛定谔方程上可以得到结论自由空间中哈密顿算符的平均值正是粒子的能量，动量算符的平均值是粒子的动量。在原来的量子力学中并没有给出这个结论。原来量子力学中哈密顿算符的平均值就是哈密顿算符的平均值，是一个定义。只是对于定态问题，例如势井中的粒子有这个结论。光在光纤导中，电磁场在波导管中，电子在原子轨道上，滞后波同超前波是相同

的，因此可以不考虑超前波。但是在自由空间中就不同了，光源发出的滞后波同光井发出的超前波是不一样的。因此需要不同的理论。

13.超前波的实验和思想实验。

我提出了检验超前波实验[21]。改变接收天线的阻抗。观察发射天线的功率变换。如果发射天线的功率变化出现在接收天线阻抗变换之前，就可以说明超前波是存在的。

我也提出了其实牛顿第三定律已经包含了超前波[22]。超前波总是同滞后波一起出现，因此很难检测到。但是如果没有超前波，我们很难解释很多现象，包括牛顿第三定律。顺便说一说，爱因斯坦是支持超前波学说的。他在1910年左右就同当时的电磁场领域的教授瑞兹进行了一场关于时间是否可以反演辩论，爱因斯坦认为没有一个物理的定律阻碍了时间的反向流动，时间不能反演可能是因为某种统计学上的原因造成的。瑞兹认为一定存在一个物理定律阻碍了时间的反演。因此时间是不可能反演的。不过瑞兹也没有给出一个阻碍时间反转的物理定律。超前波当然同时间的反演有着根本的联系。爱因斯坦也是赞成超前波存在的。他在费曼演讲了他同导师惠勒的吸收理论后，明确表示支持，据说保利就表示反对并希望爱因斯坦也表示反对。爱因斯坦认为相对论的一个出发点马赫原理很可能牵扯到超前波。关于超前波，还可以参考 Stephenson 的论文[23]，该文给出了许多关于超前波概念。我本人也受到他的影响。

14.量子力学的互能流诠释[17]

基于互能原理，自能原理的电磁场理论同经典麦克斯韦的电磁场理论的区别在什么地方。区别在于经典的电磁场理论其实只在吸收体可以看成均匀分布在无限远大球面才真正精确成立。这一点很容易证明。加上发射天线在球面的中心。宇宙无穷远处的电荷可以看出均匀分布的。如果在系统中距离发射天线不远处再放入一个接收天线，对于发射天线来讲，吸收体就不再可以看成是均匀分布的。接收天线破坏了吸收体的均匀性。这时发射天线的电磁场不满足麦克斯韦方程。这一点可由不满足坡印廷定理证明。坡印廷定理其实同麦克斯韦方程等价，因此不满足坡印廷定理，也就不满足麦克斯韦方程了。为什么我们说坡印廷定理不满足呢？因为这时常见的方法是引入一个量，称为有效散射截面。这个有效散射截面的概念其实就是修正了坡印廷定理的偏差。本来应该用天线的截面乘上坡印廷能流就是接收天线吸收到的电磁场能量。可是我们必须用天线的有效散射截面面积乘上坡印廷能流去计算天线的接收的能量。要知道对于一个线天线，有效散射截面往往比天线的实际截面大100甚至1000倍，可见用坡印廷定理计算天线的能量的误差可能达到1000倍。由此证明在吸收体不可以看成均匀分布时，其实这种情况真实的电磁场并不由麦克斯韦方程支配。这时的电磁场理论就需要互能定理，互能流定理和互能原理。

总之根据互能流理论，归一化互能流构成了光子。互能流满足自能原理和互能原理。因此这套理论全面的诠释了光子同时也给出了具体的计算公式。计算公式包括麦克斯韦方程，时间反转麦克斯韦方程。互能原理，自能原理。互能流定理，互能定理。N个电荷系统的能量守恒定律。这套理论，包括四个波，滞后波，超前波，两个时间反转波的理论可以轻松的推广到光子以外的其他粒子，比如电子。因此构成了量子理论波粒子二象性问题的全面解决。

这套理论也解释了惠勒费曼吸收体理论中的一些疑点。比如惠勒费曼吸收体理论中提出一个电流产生了一半滞后波一半超前波，为什么我们实际遇到的电荷总是要么只辐射光子，要么只吸收光

子？我们没有遇到电荷在吸收一个光子时必须发射一个光子的事实。这个问题由于引入了时间反转波而得到解决。对于一个辐射体，它辐射的超前波被时间反转波抵消了。对于一个吸收体，它辐射的滞后波也被时间反转波抵消了。这样吸收体可以只产生超前波因此吸收光子，辐射体可以只产生滞后波，因此只辐射光子，而电流源确是同时辐射了滞后波和超前波。惠勒关于电流元辐射一半滞后一半超前波仍然成立。光子是互能流，由辐射体的滞后波同吸收体的超前波构成。这样就解释了为什么看起来辐射体只发出了滞后波，吸收体只发出了超前波的问题。

我们举几个粒子看看这套理论是怎样诠释量子力学的一些实验，概念的。

1. 波的塌缩：波的塌缩是两个概念构成的，（1）滞后波超前波的自能流被时间反转波的能流抵消，（2）能量由归一化的互能流传递。这两个概念合在一起的效果同滞后波塌缩到吸收体是一致的。

2. 光子被吸收的位置是随机出现的。辐射体（光源）随机辐射滞后波，吸收体（光井）随机辐射超前波。滞后波同超前波同步构成互能流，这个互能流也是一个随机事件，因此光子被吸收的位置也是随机出现的。吸收体辐射超前波不是在接收到滞后波时被感应出来的。超前波时随机发生的。与滞后波有无没有关系。只是两个随机事件正好同步就可以产生互能流，也就是光子。

3. 反粒子：粒子是归一化的互能流。反粒子是时间反转波的归一化的互能流。时间反转波也是一种电磁场波，它们的性质应该同麦克斯韦的正常电磁场相似且对称。因此时间反转波也可以构成互能流。这个互能流就构成了反粒子。

4. 为啥没有半个光子出现：如果吸收体只得到不足一个光子能量，这个能量可以通过时间反转的互能流返回辐射体。如果辐射的能量够一个光子，一个光子的能量会被吸收体吸收。吸收体内电子从一个低能级跃迁到一个较高的能级。由于这部分能量被吸收体锁死，能量不能返回光源。不再产生时间反转的互能流。如果者部分能量大于一个光子，一个光子的能量被吸收体锁死。剩余的能量同过时间反转波的互能流返回光源。

5. 为啥么双缝实验中光子出现的概率同波函数平方成正比：在吸收点附近的吸收体吸收的能量可能不足一个光子他们最后同时间反转互能流返回辐射体，然后重新发射。重新发射时能量被这个吸收点的电荷吸收。因此附近的吸收体接收到的能量可以通过时间反转的互能流汇集一起。这样这一点接收的能量就同这点的场强平方成正比了。

6. 光子在从光源发射的时候已经有一个确定的目的地。这个目的地就是将来要吸收这个光子的吸收体。将来的吸收体同辐射体两个电荷时构成了光子的体系不可分割的部分。没有光井只有光源的光子是不存在的。光子是在进行测量时形成的。但是光子却可以出现在测量之前。光子历史是测量后补上去的。

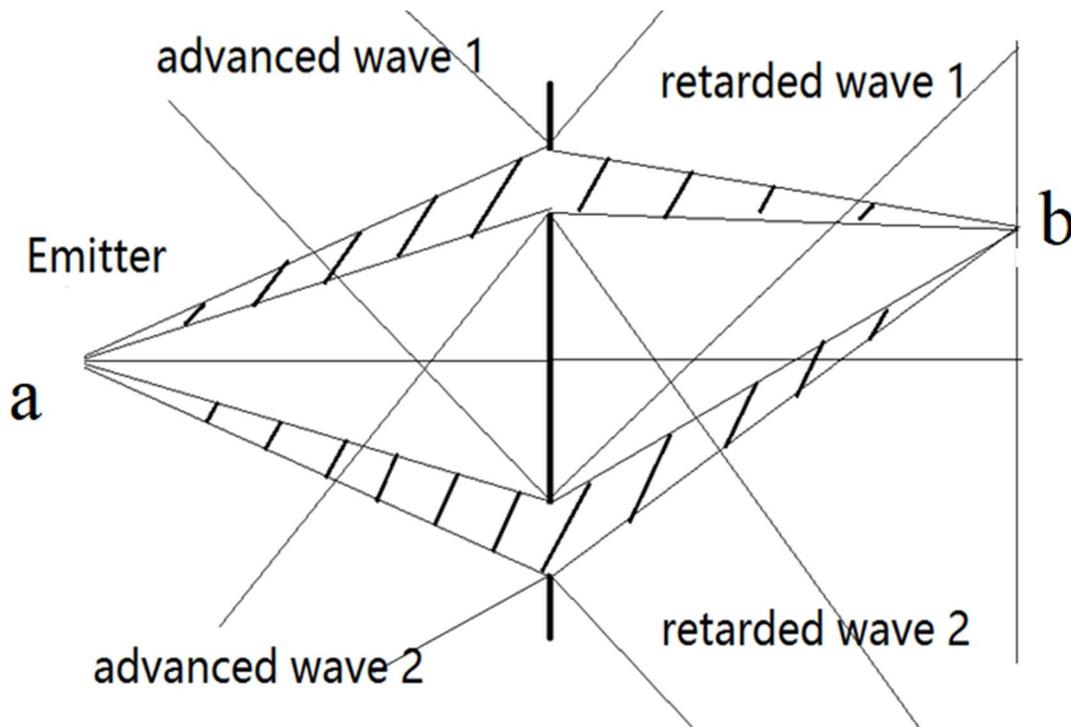
7. 由于有了超前波的概念，量子纠缠，惠勒的推迟选择实验都可以同量子力学 John Gramer 的交易诠释有相同的解答。互能流理论与交易诠释主要的区别在于，交易诠释认为波是连续塌缩，波塌缩到光线上的。但是互能流诠释认为，波没有塌缩，而是由时间反转波抵消了滞后波和超前波。能量由归一化的互能流所代表的光子传递的。两外在交易诠释中能量从光源流向光井后空间中的剩余电磁波（光井处的滞后波，光源处的超前波）是由巧妙的相消干涉清除掉的。在我的互能原理自能原理中空间的剩余能量是由引入了时间反转波清楚的。这种清除不需要交易诠释中那

种巧妙的干涉。另外在互能原理自能原理的理论中，光源和光井产生的是球面波，两个球面波，一个滞后，一个超前构成了互能流，互能流其实可以看出是一个准平面波。量子力学中经常用平面波描述一个光子。准确的做法应该是用互能流描述一个光子。

8. 同哥本哈根学派的诠释的根本区别在于，互能流理论用到了超前波，和时间反转波。另外对波是概率波的原因做了进一步的解释。概率的出现是由于辐射源随机辐射滞后波，吸收体随机辐射超前波。对互能流，滞后波和超前波两个随机事件必须同步。另外所有粒子都是由滞后波同超前波的互能流构成的。所有反粒子都是由时间反转波的互能流构成的。哥本哈根学派的量子诠释认为粒子在测量前以叠加态的形式出现的，测量后粒子塌缩到其中一个态上。互能流诠释认为粒子在测量前根本不存在。测量使吸收体产生的超前波同辐射体的滞后波同步产生的粒子，因此测量参与了粒子的创造过程。比如眼睛看某个物理时，接收到的光子不是完全由光源产生的，眼睛发出的超前波是产生光子的必要条件。因此观察或测试参与了光子的创造。其他粒子也一样，测量是要参与粒子的创造的。因此在测量以前粒子并不存在。粒子的历史是在测量以后补充上去的。补充了历史后粒子好像是从光源运动到光井。实际上光子是由超前波滞后波同步构成的。滞后波是从光源随正时间运动到光井。超前波时是从光井延负时间从光井运动到光源的。

9. 这个理论同经典电磁理论的区别在于，经典电磁理论认为电磁场可以驱动导体中的电荷流动，构成了电流。互能流理论认为导体中的电荷随机的运动，这个随机的运动产生的超前波同发射天线的滞后波正好同步时就可以接收滞后波的能量。如果吸收体电荷运动方向正好同辐射体的电磁场方向一致，这个电荷就吸收到能量从而使得这个随机的运动得到肯定。如果随机运动同辐射体的电磁场不同步，该电荷通过随机的运动基本返回到原来的位置。对于一个非常遥远的吸收体电荷，它只能接收非常小的互能流能量，这个能量即使按照互能流的计算也不足产生一个光子。可是实验证明这个遥远的吸收体总是有可能以一定的概率接收到一个光子。这是因为光子其实不是由互能流描述的而是由归一化的互能流描述的。归一化后，互能流刚好具有一个光子的能量。比如本来一个辐射体同一个遥远的吸收体只能建立一个很小的互能流，这个互能流的能量远远小于一个光子，但是这个归一化过程要求在辐射体同吸收体之间的通道上这个能流可被利用任意次，因此可以通过的能流就可以达到一个光子的能量了。

10. 量子力学的双缝实验也就容易解释了。下图是互能流通过双缝时的图像。



从 a 发出的互能流可以通过两个缝隙，根本没有必要讨论粒子究竟是从哪一个缝隙通过的。在通过缝隙后，两束光能量流又汇聚在吸收点 b。互能流在 a 点同 b 很像粒子，在中间隔板双缝处互能流很像波。

11. 互能流理论有一个疑问，时间反转波可以构成时间互能流，时间反转互能流可以抵消互能流。这样互能流也被抵消掉了。因此该理论并不能给出一个传递能量的电磁场理论。我是这样认为的，如果互能流的电磁场的滞后波同超前波同步，滞后波的时间反转波同超前波的时间反转波可能不同步。时间反转波返回牵扯到宇宙边缘的性质。时间的正无穷同时间的负无穷很可能不完全对称，使得两个时间反转波返回时稍微有一点差别。比如宇宙是膨胀的，那么对应滞后波和对应超前波的两个时间反转波会有一个时间差。这个时间差使得时间反转波不同步因此不能产生时间反转的互能流。但是如果两个自然界中的时间反转波正好同步，就产生时间反转的互能流，这就是反粒子。其实反粒子的自能流会被其时间反转波的时间反转波抵消。这个时间反转波的时间反转波就是滞后波同超前波。这个滞后波同超前波也不会产生互能流，因为它们由于宇宙边缘的性质可能不同步。

15. 总结

作者经过了 30 年间两个时间段的努力，终于建立了从电磁场到光子再到其他量子力学中的粒子的互能流理论。按照这个理论所有粒子都是由互能流构成的。互能流是辐射源的滞后波同吸收井的超前波构成的相互作用。互能流一般比一个粒子的能量小，通过归一化过程，归一化后的互能流正好同粒子的能量相等。除了滞后波和超前波以外，构成粒子的波还有两个，一个是对应滞后波的时间反转波；一个是对应超前波的时间反转波。时间反转波的作用是抵消滞后波和超前波的能量流，这样滞后波同超前波本身就不再传递能量

了。能量的传递仅由互能流完成。时间反转波也可以有互能流，是时间反转的互能流。时间反转的互能流描述反粒子。互能原理和互能流归一化是由波构成粒子的关键。自能原理告诉我们自能流不传递能量，因此波不是能量波，而是数学波或者概率波。自能原理中所有的自能流都抵消了，互能原理告诉我们互能流可以传递能量，互能原理同自能原理合在一起解释了波的塌缩现象。互能流理论诠释了几乎所有的量子现象。只一个至今为止唯一可以做到自洽的电磁场量子力学理论。

- [1] Shuang ren Zhao. The application of mutual energy theorem in expansion of radiation fields in spherical waves. ACTA Electronica Sinica, P.R. of China, 15(3):88_93, 1987.
- [2] Shuangren Zhao. The application of mutual energy formula in expansion of plane waves. Journal of Electronics, P. R. China, 11(2):204_208, March 1989.
- [3] Shuangren Zhao. The simplification of formulas of electromagnetic fields by using mutual energy formula. Journal of Electronics, P.R. of China, 11(1):73_77, January 1989.
- [4] Adrianus T. de Hoop. Time-domain reciprocity theorems for electromagnetic fields in dispersive media. Radio Science, 22(7):1171_1178, December 1987.
- [5] W. J. Welch. Reciprocity theorems for electromagnetic fields whose time dependence is arbitrary. IRE trans. On Antennas and Propagation, 8(1):68_73, January 1960.
- [6] J. H. Poynting. On the transfer of energy in the electromagnetic field. Philosophical Transactions of the Royal Society of London, 175:343_361, JANUARY 1884.
- [7] Wheeler. J. A. and Feynman. R. P. Rev. Mod. Phys., 17:157, 1945.
- [8] Wheeler. J. A. and Feynman. R. P. Rev. Mod. Phys., 21:425, 1949.
- [9] K. Schwarzschild. Nachr. ges. Wiss. Göttingen, pages 128,132, 1903.
- [10] H. Tetrode. Zeitschrift für Physik, 10:137, 1922.
- [11] A. D. Fokker. Zeitschrift für Physik, 58:386, 1929.
- [12] John Cramer. The transactional interpretation of quantum mechanics. Reviews of Modern Physics, 58:647_688, 1986.
- [13] John Cramer. An overview of the transactional interpretation. International Journal of Theoretical Physics, 27:227, 1988.
- [14] Shuang ren Zhao, Kevin Yang, Kang Yang, Xingang Yang, and Xintie Yang. Explanation of the duality of the light (wave and photon) by using the mutual energy current composed of retarded and advanced potentials, 2016.
- [15] Shuang ren Zhao, Kevin Yang, Kang Yang, Xingang Yang, and Xintie Yang. The photon model and equations are derived through time-domain mutual energy current, 2016.
- [16] Shuang ren Zhao. Photon models are derived by solving a bug in Poynting and Maxwell theory, 2017.
- [17] Shuang ren Zhao. A new interpretation of quantum physics: Mutual energy flow interpretation. American Journal of Modern Physics and Application, 4(3):12_23, 2017.
- [18] Shuang-ren Zhao, Photon is Interpreted by the Particleization/normalization of the Mutual Energy Flow of the Electromagnetic Fields, <https://vixra.org/abs/1910.0079> 2019.
- [19] Shuang-ren Zhao, The Relation Between the Particle of the Mutual Energy Principle and the Wave of Schrödinger Equation. <https://vixra.org/abs/1908.0517>
- [20] Shuang-ren Zhao, Update the Path Integral in Quantum Mechanics by Using the Energy Pipe Streamline. <https://vixra.org/abs/1808.0287>
- [21] Shuang-ren Zhao, Experiment About Advanced Wave or Advanced Potential by Classical Method. <https://vixra.org/abs/1702.0028>
- [22] Shuang-ren Zhao, New Recognition for the Newton's Third Law: the Reaction Force is Advanced According to the Mutual Energy Principle. <https://vixra.org/abs/1908.0080>
- [23] Lawrence M. Stephenson. The relevance of advanced potential solutions of Maxwell's equations for special and general relativity. Physics Essays, 13(1), 2000.

Review of Photon's Theory of Mutual Energy Flow

Shuang-ren Zhao

Abstract: The theory of mutual energy flow referred to as "mutual energy theory" is a set of electromagnetic theories from micro to macro including the theory of mutual energy, the principle of mutual energy, and the principle of self energy. The purpose of this theory is to tell us how photons are made up of waves. Therefore, a good solution is given to the wave-particle duality paradox of quantum mechanics. According to the theory of mutual energy, the waves that make up a photon include a retarded wave, an advanced wave, and two time-reversing waves. The retarded wave and the advanced wave satisfy the Maxwell equation. The energy flow of a retarded wave and an advanced wave is composed of two parts of a mutual energy flow and a self-energy flow. The self-energy flow is the energy flow of the retarded wave itself and the energy flow of the advanced wave itself. Mutual energy flow is the energy flow that interacts with a retarded wave and an advanced wave. The principle of self-energy tells us that two time-reversed waves in an electromagnetic field cancel out the self-energy flow of the retarded wave and the self-energy flow of the advanced wave. In this way, self-energy flow does not transfer energy. Therefore, electromagnetic waves are probability waves, not energy waves. Energy is only transferred by mutual energy flow. Mutual energy flows are normalized to form photons. So the energy flow is carried by photons. The mutual energy flow satisfies the mutual energy theorem, and the mutual energy flow theorem. The mutual energy theorem tells us that the work of the retarded wave of the emitting source charge on the charge of the absorber is exactly equal to the work that the advanced wave generated by the absorber absorbs on the emitter. The mutual energy flow theorem tells us that there is an energy flow between the emitter and the absorber. The energy carried by this energy flow is the same through any cross section between the emitter and the absorber. By using the principle of mutual energy, the mutual energy theorem, the mutual energy

flow theorem, Maxwell's equation, and Maxwell's equation of time reversal can be derived. The principle of mutual energy and the principle of self-energy are the new axioms of this electromagnetic field theory. This article reviews the author's entire process of completing this theory. This process is divided into two parts. The first part is the mutual energy theorem published by the author from 1987 to 1989. The second part is the theory of mutual energy that the author entered this topic for the second time from 2014 to 2019. After completing the theory of mutual energy of electromagnetic fields, the author extended this theory to quantum mechanics. In this way, any given particles are composed of mutual energy flows. The mutual energy flow is composed of the retarded wave and the advanced wave of the wave of the corresponding particle, such as a wave satisfying the Schrodinger equation. The normalized mutual energy flow is the particle. The constituent particles also have time-reversed waves. Time-reversed waves cancel out all the energy flows of the self-energy flow, making the wave a probability wave rather than an energy wave. Energy is delivered by particles. Antiparticles consist of a mutual energy flow of time-reversed waves. The situation of particles is similar to that of photons.