

黑体辐射公式的多种推导及其在近代物理构建中的意义(IX)

曹则贤[†]

(中国科学院物理研究所 北京 100190)

说质能关系 $E=mc^2$ 是爱因斯坦的成就是对爱因斯坦的羞辱。——作者

2021-12-03收到

[†] email: zxcao@iphy.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20220705

(接 51 卷第 6 期)

17 黑体辐射与相对论

黑体辐射的学问从一开始就是相对论统计，因为它的对象是光。实际上，1905年狭义相对论甫一问世，普朗克即将之用于在相对论热力学方向上培养博士，且学生于1906年即毕业了[Kurd von Mosengeil, Theorie der stationären Strahlung in einem gleichförmig bewegten Hohlraum (匀速运动空腔内静态辐射的理论), *Annalen der Physik* **22**, 867-904 (1907)]。热的传导方式之一是热辐射，黑体辐射也叫热辐射，因此用相对论的眼光看热力学是自然的。没有 relativistic thermodynamics 一章的热力学教程是不完备的。粗略算来，相对论热力学应该至少包括如下三方面的内容：(1)黑体辐射公式的推导；(2)运动空腔辐射体的运动学问题，这指向质能关系；(3)温度 T 的洛伦兹变换。

研究运动物体热辐射的主角当推奥地利物理学家哈森诺尔(Friedrich Hasenöhr, 1874—1915)。哈森诺尔是维也纳大学毕业的物理天才，英年早逝，一生中培养过两个博士，其中之一是薛定谔。哈森诺尔在1904年即开始研究运动物体的辐射理论，发表过系列论文。在 Mosengeil 1907 年文章后面的 791—792 页上有哈森诺尔的题为 Zur Theorie der stationären Strahlung in einem gleichförmig bewegten Hohlraum¹⁷⁾ 的点评。哈森诺尔指出，die (wahre) relative Strahlung das Lambertsche Kosinus Gesetz befolgt (遵循 Lambert cosine-律的相对运动的辐射)，是我觉得唯一同热力学契合的假设。

17) Hohlraume, 原文如此。

Mosengeil 的工作表明另一个假设也是可能的。此外，亚布拉罕(Max Abraham, 1875—1922)也有自己的关于运动空腔辐射的理论。这些信息可以作为研究此一问题的起点。

哈森诺尔以及普朗克等人的关于空腔辐射和热力学的论文有：

[1] Friedrich Hasenöhr, Zur Theorie der Strahlung bewegter Körper, Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Wien 113 Ila, 1039 (1904). 有英文本 On the Theory of Radiation of Moving Bodies.

[2] Friedrich Hasenöhr, Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern, *Annalen der Physik* **15**, 344-370 (1904). 有英文本 On the Theory of Radiation in Moving Bodies.

[3] Friedrich Hasenöhr, Zur Theorie der Strahlung in bewegten Körpern. Berichtigung, *Annalen der Physik* **16**, 589-592 (1905). 有英文本 On the Theory of Radiation in Moving Bodies. 有勘误。

[4] Friedrich Hasenöhr, Zur Thermodynamik bewegter Systeme and Zur Thermodynamik bewegter Systeme (Fortsetzung) (1907-1908), Sitzungsberichte der mathematisch-naturwissenschaftlichen Klasse der kaiserlichen Akademie der Wissenschaften, Wien. 116 Ila (9): 1391-1405 (1907); 117 Ila(2): 207-215 (1908). 有英文本 On the Thermodynamics of Moving Systems.

[5] Kurd von Mosengeil, Theorie der stationären Strahlung in einem gleichförmig bewegten Hohlraum, *Annalen der Physik* **327**(5), 867-904 (1907).

[6] Max Planck, On the Dynamics of Moving Systems, Sitzungsberichte der Königlich-Preussischen Akademie der Wissenschaften, Berlin. Erster. Halbband (29), 542-570 (1907).

[7] Max Planck, Notes on the Principle of Action and Reaction in General Dynamics, *Physikalische Zeitschrift* 9(23), 828-830 (1908).

[8] Max Planck, General Dynamics & Principle of Relativity, *Eight lectures on theoretical physics*, Columbia University Press (1915).

这几篇文章在一起足以了解相对论初起时相对论热力学的大概。

在相对论角度下讨论黑体辐射，如果坚持普朗克公式的形式不变的话，那剩下可讨论的对象就是体系的绝对温度了。绝对温度在不同惯性参照系中的表现，目前有绝对温度满足 $T' = T$, $T' = T/\gamma$ (Planck & Einstein), $T' = \gamma T$ (Otto & Arzeliès) 等三种观点[Kamran Derakhshani, Black body radiation in moving frame, arXiv:1908.08599v1]。观点之乱，反映的是我们还没能建立起相对论热力学的现实。{不知道遥远宇宙黑乎乎区域的背景辐射到底是什么意思。估计是没用相对论}至于广义相对论热力学，目前有 Tolman 的 $T\sqrt{-g_{00}}$ 是不变量的说法[Richard C. Tolman, On the extension of thermodynamics to general relativity, *PNAS* 14, 268-272 (1928)], 应该是指 Tolman—Ehrenfest 关系 (见下)。愚以为，绝对温度是统计量不是力学量，它是一个多体体系骤生出来的概念(a statistical quantity emerging in a complex system)，对于绝对温度 T 这种非力学量如何在相对论语境下处理，可能是建立相对论热力学的一个困难，但不是关键所在。建立相对论热力学的关键是如何协调力学之关于作用量共轭的理论框架和热力学之关于能量共轭的理论框架。不解决这个框架性问题，笔者看不到相对论热力学建立的可能。

相对论甫一建立，就被用到热力学体系物理量的变换上了。爱因斯坦 1907 年的文章就有相关讨论[Albert Einstein, Relativitätstprinzip und die aus demselben gezogenen Folgerung, *Jahrbuch der*

Radioaktivität 4, 411-462(1907)], 其第 13 节为 Volumen und Druck eines bewegten Systems(运动系统的体积与压力)，第 15 节为 Entropie und Temperatur bewegter Systeme (运动体系的熵与温度)，结论是压力是不变量，但 $V = V_0\sqrt{1-v^2/c^2}$ ；熵是不变量，但 $T = T_0\sqrt{1-v^2/c^2}$ 。论证用到了可逆绝热过程。但是，尽管有 Tolman 等人的努力，相对论热力学、统计力学一直未能建立起令人信服的理论体系[H. Otto, Lorentz-Transformation der Wärme und der Temperatur (热与温度的洛伦兹变换), *Zeitschrift für Physik* 175, 70-104 (1963)]。基于频率的洛伦兹变换 $\nu' = \nu\sqrt{1-v^2/c^2}$ ，闵可夫斯基在 1915 年给出了体积为 V 、以速度 v 运动的空腔，其中辐射的能量为 $E = \frac{1+v^2/3c^2}{(1-v^2/c^2)^3} VT^4$ [Hermann Minkowski, Das Relativitätsprinzip (相对性原理), *Annalen der Physik* 352(15), 927-938 (1915)。此文原发表于 Göttinger Mathematischen Gesellschaft am 5. November 1907], 但这远不足以给出黑体辐射问题的相对论版。

笔者最近注意到了一篇从相对论变换导出普朗克谱分布的工作 [Timothy H. Boyer, The Planck blackbody spectrum follows from the structure of relativistic spacetime, arXiv:1609.06178v1], 兹简述如下，供参考。

在经典相对论物理的框架内，是可以得到普朗克谱分布的。在非惯性参照框架内，正温度下的黑体辐射和经典零点辐射直接联系，{注意这个词，经典零点辐射，不知道他说的是不是普朗克的推导。是零温度下的辐射，不是谐振子能级 $E_n = (n + 1/2)h\nu$ 中的参数 $n = 0$ 对应的辐射。如果只是我一个人误解过，那太好了}后者取决于时空的测地线结构。时间膨胀变换把零点辐射转变成正温度下的黑体辐射。{这让笔者联想起 $T+it$ 的连接，但我没能力把中间的细节补齐}从相对论标量场的零点辐射 ($\epsilon_0(\nu) = \frac{1}{2}h\nu$) 之关联函数 $\langle \phi_0 \phi_0 \rangle = \frac{-hc/2\pi}{c^2(t-t')^2 - (x-x')^2 - (y-y')^2 - (z-z')^2}$ 出发，

这里的 h 和量子力学没有任何关系，就是一个系数而已。时间膨胀变换可理解为 $\bar{\phi}(ct, x, y, z) = \sigma\phi(\sigma ct, \sigma x, \sigma y, \sigma z)$ ，则关联函数是此变换下的不变量。对于闵可夫斯基空间，无法从零点辐射通过这个时间膨胀变换得到热辐射。但是，在平直空间中的静态非惯性参照框架内，比如 Rindler frame 内，那就不一样了。此时，

$$\langle \phi_0(\eta, \xi, y, z) \phi_0(\eta', \xi', y', z') \rangle = \frac{-hc/2\pi^2}{2\xi\xi' \cosh(\eta - \eta') - \xi^2 - \xi'^2 - (y - y')^2 - (z - z')^2},$$

在同一空间点上的关联函数约化为

$$\langle \phi_0(\eta, \xi, y, z) \phi_0(\eta', \xi, y, z) \rangle = \frac{-hc/\pi}{2\xi^2 \cosh(\eta - \eta') - 2\xi^2} = \frac{-hc/2\pi^2}{4\xi^2 \sinh^2[c(t - t')/2\xi]},$$

这个零点关联函数获得了关于时间坐标的特征。注意，在一般框架中，绝对温度和空间度规由 Tolman—Ehrenfest 关系 $T(g_{00})^{1/2} = \text{const.}$ 相连接 [R. C. Tolman, P. Ehrenfest, Temperature equilibrium in a static gravitational field, *Phys. Rev.* **36**, 1791-1798 (1930); R. C. Tolman, *Thermodynamics and Cosmology*, Dover (1987), p.318]。对关联函数作傅里叶分析即可得到热辐射谱， $\varepsilon(\nu, T) = \frac{1}{2} h\nu \coth\left(\frac{h\nu}{2kT}\right)$ 。这个公式就是带零点能以后的普朗克谱分布啊， $\frac{h\nu}{e^{h\nu/kT} - 1} + \frac{1}{2} h\nu = \frac{1}{2} h\nu \coth(h\nu/kT)$ 。

{零点能带来的发散一直没解决。好像是来自一些研究者的概念理解错误。零点能应该是 $T = 0$ 时还表现出来的能量。笔者未深入了解过，不敢妄言}

此文中推导的一些中间步骤，笔者有些拿不准，但是感觉作者的许多观点很靠谱。该作者指出：(1)人们也不理解经典零点辐射的概念，当前辐射理论基于相对论和非相对论之不自洽的混用；{执其一端，按照自己掌握的那点儿技术、方法一通发挥。没有问题，就制造问题，管它是什么性质的问题。至于物理该是什么样，于我何干？}(2)热平衡就是 featureless, of no-structure, random；{忽然想到，激光来自黑体辐射研究，但激光恰恰是黑体辐射的 antipode}(3)物理学家们没认识到，普朗克谱分布反映的恰是相对论的时空结构。最

后一点笔者觉得非常正确。空腔里的辐射，那是个纯由速度为 c 的存在所组成的体系，它应该是相对论的舞台！它的性质，热力学的、相对论的，应该都在那里。如果没有，那我们就构造！

运动空腔的黑体辐射自然指向质能关系——漏光了它就是一个运动的光源，是相对论的研究对象。质—能关系在庞加莱 1900 年的文章“洛伦兹理论与反作用原理” [La Théorie de Lorentz et le Principe de Réaction, *Archives néerlandaises des sciences exactes et naturelles* **5**, 252-278 (1900)] 中是同电磁能的湮灭与产生的一个悖论相关联的。庞加莱提出了辐射动量的概念：若一定体积内封闭了电磁能量 dE ，则这种假想流体有动量，对应的质量为 dE/c^2 。在“论电子的动力学” [Sur la dynamique de l'électron, *Comptes rendus hebdomadaires des séances de l'Académie des sciences* **140**, 1504-1508 (1905)] 一文中，庞加莱为电子引入的拉格朗日量形式为 $L = mc^2 - \frac{1}{2}mv^2$ ，也即电子的势能为 $U = mc^2$ ，静止的电子具有能量 mc^2 。{一些文献有此一说，但所引的庞加莱的文章里似乎没有。笔者希望有，待考证。相关内容，可参阅法文版维基百科 Théorie de l'éther de Lorentz (洛伦兹的以太理论) 条目} 根据经典电磁学，一个粒子在电磁场中被电场加速做功，在 dt 时间内吸收能量为 dW (来自电场方向)，获得往前的动量 p (来自洛伦兹力) 为 dW/c 。可以认定这些都来自电磁波，电磁波于是有关系 $p = E/c$ ，这是个后来影响了量子力学建立的重要关系。19 世纪末到 20 世纪初的一段时间里，为了解带电物体的质量如何依赖于静电场，那时已有电磁质量的说法，甚至还分为纵向质量 $m_L = m_0/(1 - v^2/c^2)^{3/2}$ 和横向质量 $m_T = m_0/(1 - v^2/c^2)^{1/2}$ 的说法。这些是物理理论发展过程的真实内容，质量随运动改变的陈旧观念早已被抛弃。质量如同电荷，是粒子的标签，是不变量 (参阅拙著《相对论—少年版》)。

1904 年，哈森诺尔计算空腔里热的辐射压力效果，得出的结果是，拥有辐射能量的空腔的质量有一个明显的增量 $\Delta m = \frac{8}{3} E/c^2$ ，后来又被修正

为 $\Delta m = \frac{4}{3} E/c^2$ 。据说自 J. J. Thomson (1881 年) 以后, 维恩(1900)、亚布拉罕(1902)、洛伦兹(1904) 等人都用过所谓的电磁质量 $m_{em} = \frac{4}{3} \frac{E}{c^2}$ 来描述电磁能对一个物体质量的贡献, 此处不作深入探讨。1907 年, 普朗克指出吸收或者发射了热能的物体, 其惯性质量变化为 $m - M = E/c^2$ 。普朗克讨论了运动体系的动力学问题, 给出过 $M = (E_0 + pV_0)/c^2$ 形式的质能等价表达式, 为的是给出一个不依赖于速度的体系质量。这些论证和公式多有可訾议之处, 但都指向了能量和质量存在一定的对应关系 [Max Planck, Zur Dynamik bewegter systeme, *Annalen der Physik*, Vierte Folge 26(6), 1-34 (1908). 讨论见 Stanley Goldberg, Max Planck's philosophy and his elaboration of the special theory of relativity, *HSPS* 7, 125-160 (1976)].

18 浑身都是物理的普朗克谱分布公式

普朗克谱分布公式就是一头猪, 浑身上下都是宝。普朗克谱公式

$$\rho_\nu d\nu = \frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/k_B T) - 1}$$

可进一步地写成

$$\rho_\nu d\nu = 2 \frac{4\pi}{c} \frac{\nu^2 d\nu}{c^2} \frac{h\nu}{\exp(h\nu/k_B T) - 1}$$

的样子。将普朗克公式拆成不同部分的看, 能看到不同的物理, 也就看到了一部黑体辐射的研究史。

(A) $h\nu$ 。 $h\nu$ 是频率为 ν 的光的能量量子。 $\frac{h\nu}{\exp(h\nu/k_B T) - 1}$ 是在温度为 T 的平衡态下频率为 ν 的光的能量平均值;

(B) 因子 2。从前基于经典电磁学推导时, 说它是光束的两种偏振。等到了量子时代, 面对光子的概念, 偏振的概念不好使了, {也许还好使, 但是应该在动量空间或者相空间?} 这个 2 就被解释为光子的两种自旋态。光子有自旋为 1。自旋为 1 的粒子, 根据量子力学, 自旋角动量应该有三种投影, 1, 0, -1。那为什么光子的投影

只有 1 和 -1 呢? 据说, 因为光子是光子啊, 这是相对论效应。注意, 在玻色那里, 他想把这个 2 理解为类似螺旋性的两值性。愚以为, 这个问题估计得等我们真明白光是咋回事了才能理解。关于光, 目前我们还处于理解得越多就越糊涂的阶段;

(C) $\frac{4\pi}{c}$ 。这是三维空间照射到一个壁上的流强度同粒子数密度之间的关系, $j = \frac{c}{4\pi} \rho$, $\rho = \frac{4\pi}{c} j$ 。在黑体辐射的语境下, 那是关系 $\rho_\nu = \frac{4\pi}{c} B_\nu$ 。这里的 4π 是三维空间的立体角, 出现在库仑力公式 $F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 里, 其实把 $F_{12} = \frac{1}{4\pi\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{r^2}$ 写成 $F_{12} = \frac{1}{\epsilon_0} \frac{q_1 q_2}{4\pi r^2}$ 的形式, 图像才正确。牛顿的万有引力公式也该这么写, $F_{12} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2}$ 应写成 $F_{12} = -G \frac{m_1 m_2}{4\pi r^2}$ 的形式才对。这两个公式都是描述三维空间任何源的强度随距离衰减的现象, 它们之间的差别在于 m 是无极性的标量而 q 是个有极性的标量。这个写与没写 4π 因子的问题, 给初学牛顿力学和电磁学的同学带来很多困惑;

(D) 函数 e^x 。这是最神奇的函数, 人人都该深入理解的函数。它的逆函数是 $\ln x$ 。关系式 $(x \ln x - x)' = \ln x$ 简直就是统计物理的核心;

(E) 函数 $\frac{1}{e^x - 1}$ 。这是普朗克谱公式的核心, 是表征玻色—爱因斯坦分布的函数, 它是无穷多量子台阶函数之和。两个量子台阶函数之和为 $\frac{1}{e^x + 1}$, 是表征费米—狄拉克分布的函数。对于黑体辐射, 此函数为 $\frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$; 对于理想气体, 此函数为 $\frac{1}{e^{(\epsilon - \mu)/kT} - 1}$, μ 是化学势。光子的化学势为 0。

对于辐射场加二能级分子的体系, $\frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$ 中是受激辐射同自发辐射概率之比, “-1” 来自受激辐射。对于辐射场加无内能级粒子的体系, $\frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$ 中的 “-1” 来自散射问题的二次项 $\rho_\nu \rho_\nu$;

(F) $\frac{8\pi\nu^2 d\nu}{c^3}$, 量纲与体积倒数相同, 在驻波模型中会被解释为单位体积内的模式数;

(G) h 。 h 是普朗克常数, 是作用量子, 是一维世界的相空间体积量子。物理的几何化着落在它身上;

(H) 其它。估计还有什么物理, 但我没悟到。

19 光是局域量子化存在的新简单论证

一个物理理论是否正确, 首先要经受住逻辑判断的考验。一个存在内在逻辑矛盾的理论肯定是不正确的。物理史上有一个绝妙的例子, 就是落体实验。从前亚里斯多德的物理学主张在地面上重的物体下落较快。传说中伽利略曾经从比萨斜塔抛下两个铁球, 证明了不同重量物体同步下落(图27)。后世有许多所谓或真或假的落体实验, 比如比较震撼的俺也不知道真假的月球表面上的锤子与羽毛同步下落的视频。不管这些实验是真还是假, 实验都无力证明“引力场中物体同步下落”(同步与否是个原则性问题而不是测量误差问题)。且不说永远没有令人信服的同步开始下落以及到达落点的判定等问题, 即便一切无碍, 设测得的两个物体的下落时间分别为 t_1, t_2 , 无论 $|t_1 - t_2|/(t_1 + t_2)$ 多小, 都可以被诠释为“看, 竟然有那么大的误差”, 不能得出同步下落的结论。反过来, 以逻辑推论的方式来论证。假设不同重量物体下落不同步, 重的物体下落得快, 则将两物体侧面硬连接得到一个更重的物体, 它下落的要比构成它的两块物体都快。然而, 原来的两个物体连接一起下落, 不是一个下落慢的拖着一个下落快的吗? 怎么反而更快了呢? 这是什么神奇的世界, 真实世界不是这样的。反过来, 若两物体同步下落, 则将两物体侧面硬连接得到一个更重的物体, 其下落方式与单个物体下落方式同。这样看来, 两物体无论轻重同步下落的图像是免于逻辑矛盾的。不管实验多粗糙, 测量的 $|t_1 - t_2|/(t_1 + t_2)$ 值有多大, 两物体无论轻重同步下落的理论才可能是正确的理论。

黑体辐射的普朗克公式以及能量量子概念的出现, 更加激起人们理解光的本性的兴趣。以普朗克公式为出发点, 那对辐射的构成(Konstitution der Strahlung)能推知点儿什么呢? 在这一点上, 爱因斯坦又做到了直击问题的本质, 他1905年到1909年的论文都强调黑体辐射问题必然牵扯到光的吸收与发射的问题。根据爱因斯坦1909年得到的关于黑体辐射场涨落的结果, 涨落由两项之和构成, 其中一项来自辐射的粒子性, 另一项来自辐射的波动性。很多年前, 笔者隐约意识到光的波粒二象性更应该看作是高频时光表现为粒子, 而在低频时更多地表现为波。如今从爱因斯坦的黑体辐射场涨落公式来看, 瞬间就合理了。

受此启发, 笔者于2021年10月20日想到关于波粒二象性, 也许还可以作如下诠释: 自点光源出发的辐射, 在近处(能量)密度大时, 波动性明显, 到远处密度变得稀疏时, 粒子性明显。这是笔者对波粒二象性的一个诠释, 即便有错也令人鼓舞。与此相应, 在《科学的价值》一书里庞加莱曾论及数学的物理目的与美学目的, 他认为我们不可牺牲任何一个。这两个目的是不可分的, 达成其一的最佳办法是瞄准另一个, 至少绝不可让另一个逸出视野(ces deux buts sont inséparables et le Meilleur moyen d'attendre l'un c'est de viser de l'autre, ou du moins de ne jamais le perdre de vue)。庞加莱如是说。而这, 愚以为是对光的波粒二象性的一个贴切的表述。

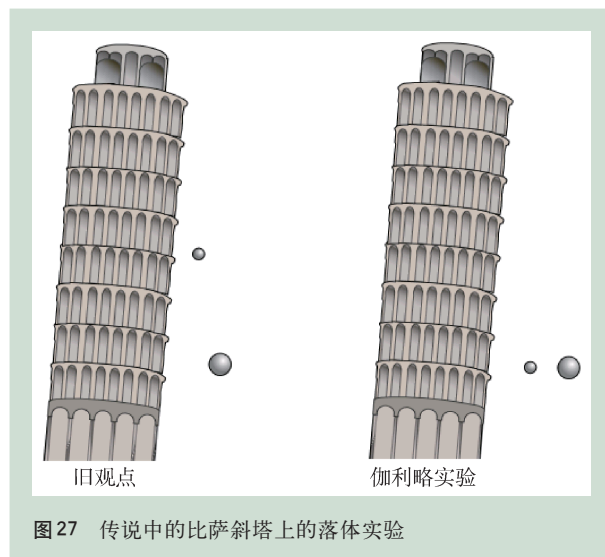


图27 传说中的比萨斜塔上的落体实验

由此可以给出光必然是量子化分立存在，用爱因斯坦的原话说是 lokalisierten Energiequanten 的一个简单的逻辑论证。考察如下情景，从光源向外发出一列光，持续时间为 τ 。因为空间的各向同性，在 t 时刻后， $t \gg \tau$ ，所发出去的光可以认为分布在半径约为 ct 、厚度为 $c\tau$ 的球壳内，球壳体积为 $4\pi c^3 t^2 \tau$ 。权且将这个球壳称为被照明了的空间。如果光是某种连续体(continuum)，则其能量密度以及相关其它物理量随着时间推移在照明了的空间都单调地趋于零。这样，在照明了的空间中任何有限体积内，可能都无法感知光的存在，这和我们的经验，或者我们的期望，不符。再者，一个密度越来越小趋于零的连续体如何存在，也是一个不易回答的问题。就经验而言，一个越来越大的物质的球壳(比如气球)是无法持续存在的——气球被吹得足够大时必然会爆。这可以理解为，那个让气球可以被看作continuum的内在结构无法维持了。这样看，辐射是连续体的物理图像会带来明显的困难。反过来，如果我们认为从源发出的辐射是局域化的类粒子流，至少在离光源稍远一些这个图像是正确的话，则随着时间的推移在远处的照明了的空间内趋于零的只是粒子数密度，一个此处表示为 $N/4\pi c^3 t^2 \tau$ 的数学量而已。它不为辐射的物理图像带来上述的那些困难，虽然关于辐射我们还没有最终的物理图像。其实，光的发射现象即要求辐射是局域量子化的

存在还有一层证据——光有动量。在光源处发生一个发射事件，发出能量脉冲 ε ，对应的必有反冲动量 ε/c 个，故发射出去的辐射不可以以球对称的形式存在，因为那样总动量为0，无法保证动量守恒。各向同性空间中自一点发出的连续体必是球对称的，故辐射不可以是连续体。顺便提一句，康普顿实验证明光的粒子特性是因为它是吸收端的实验。康普顿把光量子当成具有能量和动量的经典弹球(!)，得到了正确的X-射线被电子散射后波长(!)改变的规律。

上述论证基于一个简单的事实，辐射有个发射的过程。太阳的升起，让我们知道光有个发射的过程，这个说法未必正确，但是我们人类自己操控的柴火、电灯让我们确信光有个发射的过程，有一个从无到有的过程。上述论证还是用了球波(spherical wave. 不是球面波)的概念。从一个光源连续发出的光充满以源为中心、半径为 ct 的球形空间。在三维物理空间中，点源发出的辐射，假设在近处可以用波近似的话，是球波。如果用平面波想象一束光，平面波的假象则会限制这个想法，因为平面波没有无限延展变稀薄的问题。笔者想通这一点，来自福格特(Woldemar Voigt, 1850—1919)对爱因斯坦1909年论文点评的启发。三维空间的平面波，从字面上看就是个降维产物。平面波是个很坏的模型，极具误导性。

(未完待续)

新书推荐

读者和编者

《磅礴为一》是中国科学院物理研究所曹则贤研究员继《一念非凡》和《惊艳一击》之后创作的“科学教育一字系列”的第三本，书名语出庄子《逍遥游》“磅礴万物以为一”，副标题“通才型学者的风范”则明确了本书的主角为科学史上一些被称为 polymath 的巨擘。本书包括序言、引子(庄周与李白——兼论学者的气象)以及正文十二篇，正文每篇介绍一位通才型学者，内容包括小传、主要学术

成就分析及其在科学史上的影响等，力图揭示这些科学巨擘做出改变世界的发现背后的思想渊源，涉及人物有伽利略、帕斯卡、欧拉、托马斯·杨、克里福德、格拉斯曼、哈密顿、勒庞、庞加莱、薛定谔、彭罗斯等。本书力求传达一个观念：渊博，渊博，欲成渊之深，必先为其博。认真探讨通才型学者的教育过程、成长过程及其创造生涯，对于未来学者的培养或有些许启发意义。

