

# 电磁学以及相对性原理和狭义相对论的变革

郭汉英

19世纪的物理学在热力学、光学、电磁理论和统计力学等方面取得了重大进展。以至到19世纪末，不少学者以为物理学已经基本完成。著名物理学家迈克尔逊就认为：“当然无法绝然肯定物理科学不再会有像过去那么惊人的奇迹，但非常可能的是大部分宏伟的基本原理业已确立，而今后的进展仅在于将这些原理严格地应用于我们所关注的现象上。在这里测量科学的重要性就显示出来了——量化的结果比定性的结果更为可贵。一位卓越的物理学家曾经说过，物理科学未来的真理将在小数点六位数字上求索。”然而，恰恰是他为首的以太漂移实验的零结果和黑体辐射与理论的冲突，成为晴朗天空中的“两朵乌云”。

其实，当时物理学天空中的“乌云”并不只这两朵，夜黑和引力佯谬早就是“乌云”，只不过深藏在山坳里；放射性的发现，更是革命性地动摇了以

往关于物质一成不变的概念。可以说，19、20世纪之交的物理学其实是“山雨欲来风满楼”。理论概念体系和基本原理的一些潜在基本问题，也没有任何实质性的进展。在这些问题和冲突中，相对性原理、绝对空间和“以太”论与“以太漂移”零结果之间的冲突；以及黑体辐射、放射性等向经典的物质和辐射观念的挑战，很具代表性。前者主要涉及空间、时间和宇宙，以及物质和运动在宏观尺度上的奥秘，后者则主要涉及在微观尺度上物质及其运动规律的奥秘。显然，这两个方面具有密切联系。特别是有关相对性原理的惯性运动、惯性参考系等观念，以及有关对称性的作用等等，作为力学和物理学的基础，对于这两个方面都具有重要意义。

总之，物理学面临其发展带来的挑战，物理学家面对巨大“危机”。而以上述两方面为代表的“危机”的解决，便导致以狭义相对论和量子论的提出



也许有人会问，在粒子标准模型和宇宙谱和模型中不能由理论定出的那许多参数，是否能被将来更基本、更统一、更完善的理论计算出来？弦与M理论就是一个被人们寄予厚望的“万物理论”。但是30年来的研究表明，情况可能有些令人意外。弦与M理论似乎也无法“计算”出我们宇宙所需的特殊参数。这些理论大大改变了我们对宇宙的认识。以前认为，宇宙包涵一切、宇宙是唯一的。但是新理论却往往向我们暗示，我们的宇宙可能不只一个，而是许许多多，各个宇宙的参数可能很不相同。我们宇宙所取的特殊参数值很可能与我们的存在有关。从原则上讲，就不可能从这个多宇宙的基本理论中计算出我们这个特殊宇宙的基本参数。因此通过研究万物图找出我们宇宙参数的特殊性是一个非常重要的问题。

这个问题太深刻和深奥了，这几乎是整个科学的重要目标之一，即要解释这个世界。今天要全面满意地回答这个问题的条件可能不够成熟，但是也可能存在我们应该能发现却忽略了的或分析不够充分的线索。这张万物图就有可能潜藏着揭开奥秘的

重要线索。通过这张万物图，我们已经初步发现了区域的划分方法和三个黄金分割，我们将继续仔细观察和分析这张万物图及其中万物间的相互关系，使我们有可能得出崭新的看法和结论。我们将在以后的讲解中阐明我们的新看法和新结论，为“解释这个世界”的重要科学目标做出努力。

(中国科学院研究生院 100049)

## 作者简介



章德海，1946年生于四川成都，1964年考入北京大学技术物理系，1978年考入北京大学物理系理论物理专业，研究生导师为胡宁院士。1981年硕士毕业后留北大任教，1990年调入中国科学院研究生院物理学院，现为教授、博士生导师。主要教学和研究量子场论、规范场论、粒子大统一理论、广义相对论与宇宙学、弦与M理论。研究兴趣广泛，试图理解一些基本问题，以加强教学交流，并在探寻中怡然自乐。

和发展为代表的物理学革命。

这里，主要讨论由于电磁理论与伽利略相对性原理冲突，伽利略相对性原理不得不过渡到庞加莱相对性原理，使其不仅是力学的基准，而且也是电磁学、进而所有没有引力的物理学的基准；从而导致从牛顿力学到爱因斯坦狭义相对论的重大变革。然而，相对性原理与宇宙图景的佯谬却延续下来；一直到今天，暗宇宙再次提醒我们，必须认真面对这个问题。而问题的核心是：相对性原理如何在宇观尺度上仍能成为物理学和天文学的基准，以及这个原理与引力和暗宇宙演化的关系。

### 一、法拉第-麦克斯韦电磁学和“以太漂移”

1785年，发现静止电荷之间相互作用力与距离平方成反比的库仑定律。1819年奥斯特发现电流可使磁针偏转的磁效应，又发现磁铁能使电流偏转，开始揭示电和磁的关系。1822年，安培发现了电流与电流之间相互作用的规律。然后，19世纪40年代，法拉第进行了大量试验，发现电磁感应等定律，提出电磁场的力线等概念，电与磁连成一体。19世纪50年代起，在法拉第大量实验和重要观念的基础上，麦克斯韦建立了电磁理论。这是19世纪物理学一个伟大的理论成就。法拉第-麦克斯韦电磁学统一了电、磁现象和规律，预言了电磁波，描述了带电体、光和电磁波的运动，取得了巨大成功；光学也因而成为电磁学。不过，法拉第-麦克斯韦电磁学，仅仅是真空中的电磁学；一旦涉及介质，介电常数和磁化率会成为电磁场强的函数，问题就变得非常复杂。至今仍有重要的意义和广泛的应用前景。

应该指出，对于光、电和磁的研究，从一开始就超出了经典力学；突出的特征是光速 $c$ 的出现。然而，绝大多数研究者却试图与经典力学、与绝对空间和绝对时间观念相协调。

为了协调在麦克斯韦方程光速 $c$ 的出现与牛顿的空间和时间观念，不得不认为光速 $c$ 应该是相对于绝对空间的“绝对速度”。这样，麦克斯韦方程应该仅在相对于绝对空间静止的惯性参考系中严格成立。当时普遍认为，电磁波是充满绝对空间的“以太”的波动。地球绕太阳运动、太阳系又在银河系中运动；因而地球不是相对于绝对空间静止的，应该能够测量出地球相对于“以太”的“漂移”。然而，所有关于“以太漂移”可靠的实验结果都是否定的，著名的迈克尔逊-莫雷实验在内的这类实验，前后延续了几十年。

事实上，试图通过局部试验来测量大尺度背景对于局部的影响，是“以太漂移”试验的重要特征。这一特征和牛顿的水桶实验相似。如果在“闭舟”（即伽利略船舱）进行“以太漂移”实验，如果存在“以太漂移”，就应该能测量到大船随着地球的“以太漂移”。于是，即使“闭舟”，在原则上也可以通过实验判断出伽利略大船相对于绝对空间的运动状态。不过，“以太漂移”的零结果否定了这一点。伽利略大船代表的惯性参考系和相对性原理与牛顿的绝对空间和“以太”，以及电磁理论和实验之间，处于一种极其尴尬的境地。

### 二、庞加莱相对性原理和爱因斯坦狭义相对论

为了说明“以太漂移”实验的否定结果，洛伦兹、费兹杰惹提出和“以太”相互作用引起“尺缩”和“钟慢”等假说；洛伦兹导出了与之相应的对“以太”相对静止和相对运动的不同惯性系之间的变换，后人称为洛伦兹变换。庞加莱证明，洛伦兹变换构成群；引进空间和时间的平移变换后，仍然成群；称为庞加莱群，即非齐次洛伦兹群。

庞加莱最先提出，应该把相对性原理作为自然界的普适原理之一，而把伽利略变换推广，变成非齐次洛伦兹变换；并证明麦克斯韦电磁方程在相对性原理下的不变性。他在1904年提出<sup>①</sup>：“按照相对性原理，物理现象的定律对于静止和匀速平动观测者必须是相同的，因此没有办法、也不会有办法确定观测者处在哪一种运动状态。”

在1905年的著名论文<sup>②</sup>中，爱因斯坦写道，他是“以相对性原理和光速不变原理为依据的，这两条原理规定如下：“1. 物理体系的状态据以变化的定律，同描述这些状态变化时所参照的坐标系究竟是用两个在互相匀速移动着的坐标系中的哪一个并无关系。2. 任何光线在‘静止的’坐标系中都是以确定的速度 $c$ 运动着，不管这道光线是由静止的还是运动的物体发射出来的。”

爱因斯坦以此论证同时性的相对性，否定经典的“以太”，解释“以太漂移”的零结果，建立了他的理论。随后，他又导出重要的质能关系；通常把这个著名公式表述为 $E=mc^2$ ，这里 $m$ 为质量、 $E$ 为与之相应的能量。然而，通常对于这个公式的理解涉及所谓运动质量的引进，引起极大混乱，我们将另文澄清这个问题。1908年，闵可夫斯基利用度规具有符号差的4维欧氏时空（即闵氏时空），重新描

述了爱因斯坦理论的全部运动学和动力学内容。闵氏时空  $M^{1,3}$  上的惯性坐标系  $S(x^\mu)$  中具有度量  $ds^2=c^2dt^2-dx^2-dy^2-dz^2=\eta_{\mu\nu}dx^\mu dx^\nu$ 、 $(\eta_{\mu\nu})_{\mu\nu=0,1,2,3}=\text{diag}(1, -1, -1, -1)$ 。这里，重复指标表示求和。

考虑最简单的洛伦兹变换：即两个具有同样空间和时间坐标轴和原点，而相互在一个空间方向  $x$  上具有相对速度  $v$  的两个惯性系  $S(x)$  和惯性系  $S'(x')$  之间的变换。从这个变换就可导出同时性的相对性、尺缩钟慢等重要观念和效应。其实，这两个系统之间的变换为  $t'=(t+vx/c^2)\gamma$ 、 $x'=(x+vt/c^2)\gamma$ 、 $y'=y$ 、 $z'=z$ 。其中， $\gamma=(1-v^2/c^2)^{-1/2}$ 。显然，由此出发，假定可以把光速看成无限大  $c\rightarrow\infty$ ，则  $\gamma\rightarrow 1$ ，那就回到最简单的伽利略变换  $t'=t$ 、 $x'=x+vt$ 、 $y'=y$ 、 $z'=z$ 。同时，闵氏时空回到牛顿的 3 维欧式空间和 1 维欧式时间。

最一般的洛伦兹变换为将惯性坐标系  $S(x^\mu)$  变为惯性坐标系  $S'(x'^\mu)$  的具有 10 个参数的庞加莱变换： $x'^\mu\rightarrow x'^\mu=(x^\nu-a^\nu)L_\nu^\mu$ ， $(L_\nu^\mu)_{\mu\nu=0,1,2,3}\in SO(1,3)$ 。这里， $a^\nu$  表示 4 个参数的时空平移， $L_\nu^\mu$  为具有 6 个参数的齐次洛伦兹群  $SO(1,3)$  的元素（3 个表征空间转动和 3 个表征由相对速度表述的推进）。所有这些变换构成庞加莱群  $ISO(1,3)$ 。闵氏度规在这组变换下不变。

同样，如果可以把光速看成无限大  $c\rightarrow\infty$ ，最一般的庞加莱变换在此极限下回到同样具有 10 个参数的伽利略变换。

不过，庞加莱变换并不是最一般的惯性系之间的变换。乌莫夫、外尔和福克等人很早就研究过这个问题：如果在惯性坐标系  $S(x^\mu)$  中，自由粒子做惯性运动，即匀速直线运动  $x^i=v^i(t-t_0)+x_0^i$ 、 $v^i=dx^i/dt=\text{const}$ （其中  $i=1, 2, 3$ ），变换到另一惯性坐标系  $S'(x'^\mu)$ ，仍然是惯性运动，即  $x'^i=v'^i(t'-t'_0)+x_0'^i$ 、 $v'^i=dx'^i/dt'=\text{const}$ 。

最一般的变换是什么变换？答案是：具有共同分母的分式线性变换。庞加莱变换作为惯性系之间的变换，作为仿射变换，并不是最一般的形式。如果进一步要求闵氏度量不变，则回到庞加莱变换。这暗含着相对性原理还有可能进一步推广。以后我们将指出，在常曲率时空中存在惯性系，这些惯性系之间的变换恰恰就是这类具有共同分母的分式线性变换。

事实上，如果相对性原理的内容不包括庞加莱变换，而把庞加莱变换作为推论；那么，只需再要求具有光速  $c$  作为普通常数就够了。如果相对性原理包括庞加莱变换，而且庞加莱变换中的速度参数就是光速  $c$ ，那么就不必再另外要求光速不变原理。

不过，把相对性原理从伽利略不变性推广到庞加莱不变性，并不意味着一定要放弃牛顿的绝对空间和绝对时间观念。据说，庞加莱甚至知道闵氏度量在非齐次洛伦兹变换下的不变性，但是他仅仅把这个度量看成是数学表述。洛伦兹和庞加莱认为，存在一类相对于绝对空间静止的“优越”惯性系，其时间是绝对时间，或“真实时间”；运动系的时间则是“表观时间”。

爱因斯坦则放弃了牛顿的绝对空间、绝对时间和绝对同时性。他认为，所有惯性系不仅对于描述物理规律，而且对于时空测量，都是平权的。这导致了著名的同时性的相对性。事实上，这两种理论的基本公式相同；然而，物理概念和时空观念却完全不同。于是，这在物理上孰是孰非，能否通过物理实验或者观测来进行检验，无疑是一个相当重要的问题。通常以为，试验支持的是爱因斯坦的狭义相对论。然而，有一种具有代表性的观点是：问题并没最终解决，仍需探讨。爱因斯坦全集的主编斯塔切（J. Stachel）教授综合了现代物理学的发展，他的观点与此相似，具有代表性<sup>⑧</sup>。

爱因斯坦的理论虽然有普朗克等人的支持，却与所有在基本概念和原理上具有创新的人和基本理论一样，也受到非常激烈的反对，甚至当时“主流学者”的反对。一直到 1919 年日全食时光线偏折证实了爱因斯坦广义相对论的预言，轰动整个世界，爱因斯坦的时空观和理论才逐渐为物理学界普遍接受。当然，反对者仍然不乏其人。

在庞加莱和爱因斯坦提出的相对性原理中，延续了伽利略相对性原理的一个假定，那就是 1 维时间和 3 维空间、或者刚体的位形空间服从欧氏几何。这在当时是很自然的。在爱因斯坦的光速不变原理中，包含了另一个假定，即单程光速是不变的。

事实上，现在所有可以忽略引力效应，与宇观尺度现象无关的宏观尺度上的实验和观测，都与狭义相对论的理论预言相符合。不过，就上述两个假定的实验基础而言，后者无法直接为实验所证实；前者则不够坚实。也就是说，对于时间和自由空间或刚体的位形空间，服从欧氏几何的假定，实验和观测依据并不充分。然而，这一点很快就被广义相对论的提出和成功所掩盖了。

单程光速不变在原则上无法直接证实。这是因为，要测量单程光速，就必须对钟；而现在一切对

钟手段，说到底都与光的传播有关。这一点，与是否存在超光速讯号无关。如果存在超光速讯号，虽然可以用这种讯号对钟，来测量单程光速；但是，只要具体测量这种讯号的速度，仍然需要对钟。于是，问题不过是从单程光速转移到这类讯号的单程速度。其实，实验能够证明的是回路光速不变。爱因斯坦对此非常清楚。他指出：物理学作为“一种在进化中的思想逻辑体系，其基础不能由任何归纳法从经验中提取，而只能通过自由创造得到。”（物理学和实在，1936）单程光速不变对于爱因斯坦来说，就是在一些实验观测基础之上，“自由创造”的“约定”。

不过，如果回路是在真空的空间和时间之中，而且都满足欧氏几何的均匀性，那么回路光速不变就意味着单程光速不变。因此，这个假定与静止的尺和钟服从欧氏几何的假定有密切关系。

应该指出，伽利略在论述“闭舟”时，列举的全部是过程和状态，而不直接是规律；规律对于不同惯性运动的“闭舟”相同这一点是隐含的。其实，当时大概也并不完全清楚规律与状态之间的区别。到了庞加莱和爱因斯坦，相对性原理提及的是规律的不变性以及绝对静止或运动是否可以测量。庞加莱利用含有光速  $c$  的麦克斯韦方程的不变性，建立他的理论。爱因斯坦的光速不变原理尽管涉及光源的运动，从而涉及过程，但是对于建立狭义相对论，这一点并没有直接的关系。事实上，光速与光源运动速度无关，可以作为一个推论。

爱因斯坦强调光行差的重要性；特别是对于他认识到光速与光源运动速度无关并提出光速不变原理的意义。然而，这却与“闭舟”，即从伽利略以来关于相对性原理“不能向外看”的约定不一致。现在，如果在观测光行差时也观测红移，那么会怎么样呢？还存在爱因斯坦意义下的相对性原理吗？这与我们进一步要探讨的相对性原理和宇宙学的关系问题密切相关。

其实，不妨提出的一个假想的问题：假如河外星系红移、微波背景辐射和作为“暗能量”的宇宙常数在 1905 年就已发现，那么爱因斯坦会怎么办？

### 三、相对性原理和宇宙学观测之间如何协调？

著名学者邦迪早在 1962 年就明确提出<sup>④</sup>，相对性原理要求惯性系之间没有优越的速度；河外星系红移等却具有优越速度；满足相对性原理的基本物理规律没有时间方向；宇宙演化本身就给出时间方向。因此，“在宇宙学和通常的物理学之间，看来存

在着明显的冲突”。微波背景辐射发现后，问题更加突出。这是由于微波背景辐射在扣除地球相对于“共动”参考系的漂移后，基本上是均匀各向同性的，基本上符合宇宙学原理的要求。1971 年，爱因斯坦的学生和追随者伯格曼认为，“宇宙环境对于局部实验的影响导致相对性原理的等效破坏”<sup>⑤</sup>。

正如邦迪、伯格曼等所指出，在相对论体系中，相对性原理和宇宙学的不协调非常突出。当然，也有人认为，宇宙环境并不破坏相对性原理<sup>⑥</sup>。但是，却没有见到什么有力的论述。

在爱因斯坦相对论体系中，相对性原理要求与引力无关的物理规律在惯性系之间的庞加莱群的变换下不变；和伽利略变换群一样，都有 10 个参数。按照爱因斯坦，这些惯性系没有自身的优越速度、时间没有方向性。因此，只要不管引力和宇宙学效应，闵氏时空和庞加莱不变性是相对论物理和实验分析的基准，所有实验都与理论符合。爱因斯坦狭义相对论中，时空测量、同时性定义以及一些基本物理量的定义，全都与庞加莱不变性密切相关。

在相对论性经典和量子力学中，能量、动量和质量的定义和守恒，以及质能公式等，都与时空平移密切相关。在相对论性经典和量子场论中，相应的物理量和公式同样如此。不同场的定义和区分，在于它们是庞加莱群不同的不可约表示，这些不可约表示以庞加莱群的两个不变算子的本征值来表征，分别是质量平方和质量自旋的平方。第一个算子由平移群的生成元给出，第二个算子依赖于平移群和齐次洛伦兹群的生成元，它们共同构成庞加莱群的代数。

然而，如果要进行宇宙学观测或者进行与宇宙背景有相互作用的实验，或者要测量这些相互作用的效应，就会出现问题。河外星系红移表明，具有优越速度、暗示宇宙在膨胀；宇宙膨胀又给出时间方向。微波背景辐射大体上可以代表 3 维宇宙背景空间的性质，不过要扣除地球实验室相对于微波背景辐射的“漂移”。这类实验和观测的结果表明：适当扣除我们实验室的“漂移速度”、忽略原初扰动，在一定近似下，大尺度的宇宙背景空间是均匀各向同性的，具有 6 个参数的变换群。按照广义相对论，这样的宇宙背景空时的度量是弗里德曼-罗伯孙-沃克度量，依赖于标度因子和一个标记 3 维宇宙空间为开放的伪球面、欧氏空间还是闭合球面的参数  $k=-1, 0, 1$ ，对应的对称性分别是“转动群”  $SO(3,1)$ ，欧几里德

群  $E(3) = ISO(3)$  和“转动群”  $SO(4)$ ；标度因子仅依赖于宇宙时，其形式以及  $k$  的数值由宇宙中物质分布的能动张量通过爱因斯坦场方程决定。在这种背景空时里，由于存在优越速度和时间方向，相对性原理不再成立；按照庞加莱群的不可约表示对于物质场的区分和有关物理量的定义，也失去严格的意义。

但是，在相对论体系中分析宇观效应的数据，仍然要用以相对性原理和庞加莱不变性为依据的基本物理量和有关物理规律。这就出现问题：在什么意义下可以利用闵氏时空和庞加莱不变性下的物理量和物理规律，来分析有关宇宙效应的数据？近似程度如何？在相对论体系中二者如何协调？

一般以为，这些不协调是对于两类不同的物理问题所引起的，没有本质的冲突。这就像其他物理理论，往往可以用来研究具有不同对称性的物理系统。然而，狭义相对论与宇宙学的关系却并非如此：两者都是关于时空的理论，作为宇宙学基础的广义相对论，在一定意义上是以狭义相对论为基础建立起来的；而相对性原理却又明显与宇宙学观测不相容。事实上，一切实验和观测都是在我们的宇宙之中进行的，如果找不到我们的宇宙所近似满足的宇宙学原理和相对性原理之间的关系，在宇观尺度上，由庞加莱相对性原理以及庞加莱不变性为基准，引伸出来的观念和建立起来的理论，就会失去严格的基础。宇宙起源和演化的探索，暗宇宙观测的挑战，使得当前物理学的一个重要趋势，是把宇观尺度与微观尺度的物理联系起来，由相同的物理规律来描述；这就应该解决相对性原理与宇宙学间的不协调。然而，在爱因斯坦相对论体系中却无法做到。

这种不协调，同样可以追溯到“闭舟”或伽利略船舱。不过，这种不协调却值得反思。其实，我们提到，就“闭舟”即伽利略船舱而言，只要找到“不向外看”和“向外看”的结果之间的联系和区别，加以区分即可。对于“闭舟”或伽利略船舱，这是很容易做到的。然而，由于无法建立宇宙图景，牛顿体系无法做到。对于爱因斯坦相对论体系，尽管可以建立宇宙图景，但是也无法消除这种不协调。果真如此吗？我们将在后文分析这个问题。

### 结语

爱因斯坦指出：“相信世界在本质是有秩序的和可以认识的信念，是一切科学工作的基础。”这样，反映基本自然规律的基本物理原理之间，应该是相互

协调的。因此，在一定意义上，应该存在排除这种不协调的空间-时间和宇宙理论。既具有相对性原理，又可以“向外看”、观测和描述宇观现象；二者之间具有一定的联系。也就是说，在这类相对性原理和宇宙学原理相互协调的理论中，应该存在两类时空度量：一类是相对性原理所要求的，另一类则反映宇宙学原理的要求；而且，二者之间应该存在着内在联系。

这样一来，宇宙学背景就有可能成为作为相对性原理基础的惯性运动的保障或者起源，甚至会在一定意义上确立这些惯性系统。另一方面，宇宙学背景也会在满足相对性原理的惯性系中，“挑选”出一类时间方向与宇宙演化的时间方向一致的，相对“优越的”惯性系。于是，消除二者的不协调，既有可能在给出惯性运动的宇宙学起源、在一定意义上确立惯性系统，同时也有可能所有的惯性系统之中，确立一类与宇宙演化方向一致的“优越的”惯性系。当然，这既不意味着回到牛顿，也并不意味着回到经典“以太”。于是，爱因斯坦的同时性的相对性，只对于相对性原理有关的实验室测量成立。而对于宇宙学观测，相对于表征宇宙演化的宇宙时标而言，并不存在这类相对性。

我们在前面的文章中提及，在马赫对牛顿绝对空间的批判中，就隐含着要求相对性原理与宇宙图景之间相互协调。不过，马赫要求这是通过宇宙总体或远方星体总和的引力来实现的；马赫当然不可能知道，按照现在的引力理论，一旦出现引力，惯性运动就不再存在，存在的是惯性运动的局域化，或者局部惯性运动。

是否存在相对性原理和宇宙学相互协调的理论呢？应该存在。进而，在区分惯性运动和局部惯性运动的意义上，也应该存在。这是相对性原理应该进一步发展到陆启铿提出的常曲率空时相对性原理，并进而考虑在常曲率空时相对性原理局域化基础上描述引力的一个重要原因。而这恰恰为描述加速膨胀的暗宇宙，提供了更为自恰的物理基准。

(中国科学院理论物理研究所 100080)

① H. Poincaré, The present and future of mathematical physics. Talk to Congress of arts and science at Saint-Louis (Sept. 1904), *Bulletin des Sciences Mathématiques*. Dec. 1904. **28**, [2] 302.

② Einstein, *Ann. d. Physik* **18** (1905) 639.

③ J. Stachel, 1905 and all that, *Nature*, **433** (2005) 215. 私人电子邮件：“Re: How to distinguish Lorentz-Poincare theory and Einstein's special relativity by experiments?” Sept. 5, 2005.

④ H. Bondi, *Observatory* (London) **82** (1962) 133.

⑤ P. G. Bergmann, *Found. Phys.* **1** (1970) 17.