

探索我们的宇宙 发展相对性原理

——国际天文年暨爱因斯坦诞辰 130 周年纪

郭汉英

一、引言

今年是国际天文年，主题为“探索我们的宇宙”。以纪念 400 年前伽利略开始用望远镜进行天文观测所开启的人类对宇宙的科学探索。今年又恰逢爱因斯坦这位上个世纪最伟大的科学家诞辰 130 周年。在国际天文年纪念爱因斯坦诞辰 130 周年，具有特殊的意义。

物理学史上几乎每一次重大突破，都与对我们宇宙的探索休戚相关。“以天之道，解物之道”，李政道先生高度概括了“探索我们的宇宙”对物理学的重大作用。

爱因斯坦对于物理学、科学，乃至人类文明的贡献极其辉煌。对于由哥白尼和伽利略开创、牛顿集其大成之后的近代科学来说，在牛顿之后，爱因斯坦首屈一指。他的贡献遍及相对论和宇宙论、量子论以及统计物理等诸多领域；而以相对论和宇宙论的贡献最大。19 世纪末以来，在为当代物理学和天文学奠定基础的诸多学者的重大成就中，爱因斯坦的种种成就，堪称划时代的里程碑。

在国际天文年纪念爱因斯坦诞辰 130 周年的今天，我们还沉浸在 2005 国际物理年中再次展现的爱因斯坦辉煌而全面的贡献之中，另一方面又不得不面对当代物理学所面临的新的挑战，这恰恰是来自“探索我们的宇宙”的精确宇宙学，主要对于爱因斯坦贡献最大的相对论和宇宙论，同时涉及物理学其他基础理论。

我们的宇宙并不趋向于平坦的闵可夫斯基时空。上个世纪末以来，精确宇宙学进一步表明，宇宙几乎是“暗”的，在加速膨胀，很可能趋向于一个常曲率为正的德西特时空。爱因斯坦相对论，包括狭义相对论和广义相对论及其宇宙理论，是以平坦的闵氏时空为基础的，这就不得不面对极其尖锐的，也是涉及到物理学其他有关领域的全面挑战。

如何面对这一挑战？

爱因斯坦认为，与构造性理论不同，他的狭义和广义相对论同热力学理论一样，属于“原理理论”，

“逻辑上完整和基础巩固”（《什么是相对论？》1919）。上个世纪 30 年代，他指出：“物理学构成一种在不断进化过程中的思想逻辑体系”，“进化的方向是增加逻辑基础（原理）的简单性”（《物理学与实在》1936）。在这之前，他指出：“我们应该准备改变这些概念，即物理的原理基础，以便以逻辑上最完美的方式审视已认识到的事实”（《麦克斯韦对物理实在观念发展的影响》1931）。

遵照爱因斯坦的思想，面对精确宇宙学所揭示的重要事实以及由此而来的挑战，我们应该重新考察相对论的基本原理，“以便以逻辑上最完美的方式审视已认识到的事实。”而首当其冲的，应该是相对性原理即惯性原理。这恰恰是相对论所引起的上世纪物理学革命的起点：从伽利略相对性原理发展到具有庞加莱不变性的相对性原理。

在历史上，近代力学和物理学的发端与相对性原理作为它们的基准密切相关；其重大发展更离不开对这个问题的再认识。然而，恰恰是一些既简单又极其重要的问题：相对性原理是否应该进一步发展，能否作为宇宙尺度物理学的基准？却往往被忽略。

我们不妨再一次回顾和分析相对性原理的确立与发展的历史，特别是分析以爱因斯坦相对论为代表的途径以及引起的问题，加深对有关问题的认识；考察这些问题与当前精确宇宙学挑战的关系。进而分析一条延续历史，而又面对最新事实的可能出路：再一次发展相对性原理，从庞加莱群的不变性拓展到德西特群的不变性，建立德西特不变的狭义相对论；将德西特相对性原理局域-整体化，进而描述引力和宇宙。

二、从伽利略相对性原理到庞加莱相对性原理

在牛顿力学中，惯性定律对于其他力学量和定律的定义和引进，极其关键。后人将牛顿力学的基础概括为以惯性定律为要素之一的伽利略相对性原理，或伽利略惯性原理。

这个原理的要素还包括惯性观测者、惯性系及

其相互变换的伽利略对称性。原理要求，力学规律在不同惯性系之间的伽利略变换下不变。这是从大量实验和观测中提炼出来的。

17世纪30年代，伽利略利用在平稳行驶大船甲板下主舱内的乘客无法断定大船的静动，来驳斥托勒密学说维护者对哥白尼的非难，对以他命名的相对性原理给出了最初的表述。

其实，钱临照先生和戴念祖先生在《中国大百科全书·物理学》（中国大百科全书出版社，1987年）的“《尚书·考灵曜》中关于相对性原理的概念”条目中指出，早在我国汉代就有类似记载：“地恒动而人不知，譬如闭舟而行不觉舟之运也。”这是在地动观点来说明地日关系，把“地动人不知”比喻为“闭舟行而不觉”；这是人类文明史上有关相对性原理最早的萌芽。

不过，完全限制为“闭舟”或者在“甲板下主舱内”，就无法知道舟船的静动；然而，不加以限制，原则上就可以向外观测，包括天文观测来直接加以区分。事实上，这个运动的相对性和相对性原理与天文观测、宇宙探索之间的疑难，一直延续至今。

开普勒发现行星三个定律，并引进惯性的观念；笛卡儿最早描述了惯性定律。著名科学史家李约瑟认为，墨子的“止，以久也”等是表述惯性运动先驱。对此，虽有不同看法，但值得进一步考察。牛顿集前人之大成并加以发展。毋庸置疑，牛顿力学和万有引力定律的成就是划时代的，极其伟大。后来知道，牛顿理论能够描述的是宏观物体运动及其引力的两个极端情形：低速运动与瞬时超距作用。

为了体系的完善，牛顿引进绝对时间和绝对空间的观念。然而，牛顿体系无法建立自洽的宇宙图景，这就是著名的：“引力佯谬”和“夜黑疑难”。发端于天文观测，却又难过探索宇宙这一关，牛顿对此几乎一无所知。后人总结出伽利略相对性原理，牛顿定律在伽利略变换下不变。这才认识到牛顿力学的这个极其重要的基础。

最近发现，在空间坐标原点和时间坐标原点，还有一组保持这些原点不变的、正比于有长度量纲参数 R 的负二次方的伽利略变换，其速度变换恰恰相应于瞬时传递^①。这两组伽利略变换在空间和时间中构成一个在伽利略相对性原理意义下的伽利略对，其意义值得进一步研究。

法拉第、麦克斯韦电磁学的建立是另一座伟大

的里程碑。电磁场观念的引入突破了牛顿体系中质点和刚体的观念，为相对论物理学的发展提供了观念基础。

电磁理论中出现真空中的光速 c ，破坏了通常伽利略变换下的不变性，直接与伽利略相对性原理冲突。当时广泛以为，只对静止于充满“以太”的绝对空间的惯性系而言，这个理论才严格成立。于是，能否测出“以太漂移”便成为解决问题的关键。

19世纪末，物理学面临一系列挑战。“以太漂移”的零结果就是其中之一。出路何在？

1904年，庞加莱最先提出相对性原理应该是自然界的基本原理之一；要求不仅力学规律，而且真空电磁学的规律，在惯性系的变换下都不变；改变的应该是原理的对称性，而不是原理本身。1905年，庞加莱和爱因斯坦在洛伦兹等人工作的基础上，把相对性原理从具有伽利略群的不变性改变为具有庞加莱群 $ISO(1,3)$ 的不变性，各自建立理论。问题才得以解决。爱因斯坦在光行差的启发下，提出光速与光源速度无关的光速不变原理，利用光信号来确定同时性，否定了牛顿的绝对时间和绝对空间，引起了时间和空间观念的革命。

这样，相对性原理仍然是物理学的基准。不过，对称性必须由伽利略群的不变性，改变为庞加莱群的不变性，其中包括真空中的光速 c ，这是一个普适常数。1908年闵可夫斯基提出，在相对论中，具有惯性系的空间和时间构成平坦的4维时空。然而，最近发现，在狭义相对论中，还应有保持惯性系原点光锥不变的另一组庞加莱群的不变性。后者涉及另外一个前面引进的不变参数 R 的负二次方。在闵氏时空上，这两组庞加莱变换构成庞加莱对，在通常的庞加莱变换下，这一庞加莱对可变换到任意时空点，其意义同样值得进一步研究。由于局部实验对于通常的庞加莱不变性有极高精度的验证， R 的数值必须很大，使得后一庞加莱不变性的影响，对于局部实验来说极小，可以忽略不计。然而，自然界并不允许我们将 R 取为无限大，从而消除这一庞加莱对称性的影响；因为作为“暗能量”的宇宙学常数恰恰给出 R 的上限： $R \approx \sqrt{3/\Lambda}$ ；或者，局域实验可以忽略这个对称性的、由时间测量表征的精度 $v^2 \approx 10^{-35} \text{ sec}^{-2}$ ($v := c/R$)^①。后面我们还将回到这些限制，及其重要意义。

狭义相对论取得一系列巨大成功，包括静止能

量与不变质量的著名关系，对于人类文明的贡献至今难以估量。

对于量子力学和量子场论而言，相对性原理及其对称性的作用似乎不那么直接和明显。但是，只要回顾如何从经典力学或经典场论，经过量子化到量子力学或量子场论，相对性原理及其对称性作为基础的重要性是不言而喻的。然而，直到1939年维格纳提出庞加莱群对于相对论物理学，特别是质量为零的粒子和场的重要性，庞加莱群的作用才完全明确。当然，忽略的另外一组伽利略变换和庞加莱变换，对于量子理论会起到什么作用，值得研究。

狭义相对论与量子理论的结合取得一系列巨大进展。虽然存在一些理论上诸如微扰展开是否收敛等重大疑难，相对论量子场论和粒子物理一起，至今仍为最强有力的物理理论之一；在能量不断提高、尺度不断扩展的实验和观测的推动下，不断推进对微观物质世界的现象和规律的认识，并运用到宏观尺度和宇宙学。不过，在宇宙尺度上，却不得不面对诸如真空零点能之类的佯谬：如果把在爱因斯坦理论中可有可无的宇宙常数当作真空零点能密度，一些理论值要比观测值大一百二十几到几十个量级。

前面已经提及，那个忽略的伽利略对称性和庞加莱对称性中不变参数 R 的负二次方恰恰与宇宙常数的量纲相同，二者之间应该存在必然联系。研究表明正是这样^①。看来，从庞加莱和爱因斯坦到闵可夫斯基，对于这保持原点光锥不变的庞加莱群的忽略，以及相应的另一伽利略群的丢失，或许是物理学中最遗憾的忽略。

三、爱因斯坦的进一步发展：广义相对论和宇宙论

为了描述引力，爱因斯坦放弃了相对性原理

对于牛顿引力理论，伽利略相对性原理仍然起着基础的作用。

既然狭义相对论取得了成功，能否以相对性原理为基本原理进而描述引力呢？爱因斯坦对此进行了深入思考。

爱因斯坦考察了为什么会存在惯性系，如何确定惯性系等基本问题。他认为，牛顿力学和狭义相对论对于这些问题都无法给出满意的回答。按照牛顿，惯性运动的存在归结为绝对时间和绝对空间。那么，对于狭义相对论，就应该归结为“绝对的”四维闵氏时空。然而，他认为，承认“时空连续区

域是绝对的”，这“违反科学上的思维方式”^②。爱因斯坦指出，对于惯性系的确定，存在着“循环论证”：“惯性原理的弱点在于它含有循环论证：如果一个质量离开其他物体足够遥远，它就做没有加速度的运动；而我们却又只能根据它运动时没有加速度的事实才知道它离其他物体足够遥远。在相当大部分的时空连续体，或者整个宇宙，是否存在这些惯性系呢？可以认为对我们的天体系统的空间，只要忽略太阳和行星的扰动，惯性原理在高的精度上是成立的。更加严格地说，存在一些有限的区域，对于适当选取的参照空间，物质粒子没有加速度的自由运动；并且在这些区域内，狭义相对论的定律以极高的精度成立。……这些区域称为‘伽利略区域’。”^③

对整个宇宙是否存在惯性系？爱因斯坦是否定的。因为，在他看来只有能够忽略引力，在时空连续区内才存在一些有限的“伽利略区域”；对于作为特殊坐标系的惯性系，惯性定律成立；狭义相对论的定律在这些有限的“伽利略区域”中，以“极高的精度成立”。

为了描述引力，也为了避免惯性原理的“循环论证”，爱因斯坦放弃了以惯性系和惯性运动为重要概念的相对性原理，即惯性原理，提出等效原理和广义相对性原理^④。他认为惯性力与引力等效；并试图在加速运动与惯性运动之间也建立相对性，似乎这就推广了；这样，相对性原理也就称为狭义相对性原理。

1915年底，爱因斯坦和大数学家希尔伯特几乎同时提出引力场方程。爱因斯坦解释了牛顿理论无法解释的水星近日点的进动。1919年，爱丁顿领导的日全食观测证实了爱因斯坦关于光线偏折的预言，随即轰动世界。

1917年，爱因斯坦提出宇宙学原理，认为宇宙空间在大尺度上，大体是均匀各向同性的。为了建立静态宇宙模型，他在场方程中引进了可有可无的宇宙常数。同年，德西特就发现了具有宇宙常数且膨胀的真空解，即德西特时空。20世纪20年代弗里德曼和勒梅特分别得到没有宇宙常数、却含物质的膨胀宇宙解；1929年，哈勃发现河外星系红移与距离成正比；20世纪40年代宇宙大爆炸模型建立，并逐渐成为宇宙学的标准模型。尽管爱因斯坦错过了预言宇宙膨胀，随后又放弃了宇宙常数，他仍然

是现代宇宙学的主要开拓者。

认识到宇宙作为一个演化的物理体系，这是 20 世纪自然科学的伟大成果之一。

毫无疑问，爱因斯坦广义相对论及其宇宙论取得的一系列巨大成功，深刻地变革了物理学、天文学，乃至人类文明的空间和时间观念。

然而，巨大的成功却掩盖着一些根本问题一直没有得以解决。其中之一便是从牛顿理论就遗留下来的运动的相对性与宇宙观测之间如何协调一致的疑难。如邦迪、伯格曼等人指出的，相对性原理与宇宙学观测不一致。但是，如果真是这样，那么又如何自恰地、逻辑上一贯地描述局部物理和宇宙作为整体的行为呢？

爱因斯坦体系的成功所掩盖的问题

爱因斯坦多次用著名的“转动圆盘”的思想实验来论证为什么惯性力会使得时空弯曲，由黎曼几何描述^⑧。进而，按照他的等效原理，这一由“自由下落”升降机的“启发”提出的引力与惯性力等价的原理，引力也必然使时空弯曲。

然而，对这个“转动圆盘”思想实验一直有不同看法。事实上，如果确切地定义同时性，转动圆盘仍然服从欧氏几何。换言之，惯性力其实并不能导致时空弯曲。而且，惯性力与引力也并不等价^⑨。就升降机而言，如果在使得空间弯曲的引力场中自由下落，只要测量曲率是否为零，在原则上就能区分是引力场、还是惯性力场。其实，爱因斯坦放弃了“时空连续区域是绝对的”，这才是他成功的关键^⑩。因此，虽然“转动圆盘”的论证并不正确，惯性力与引力并不等价，其结论却在广义相对论中保持下来：引力表现为时空几何的改变，其性质应该由在其中运动的物质通过引力场方程加以确定。

虽然这些原理的实质和爱因斯坦的初衷几乎南辕北辙，引力场方程也存在打不开的“戈尔迪结”^⑪，广义相对论毕竟突破了牛顿的万有引力理论，取得巨大的成功。

应该指出，广义相对论在理论上做到的只是运动规律对于任意（连续可微）坐标系之间变换的协变性即“广义协变性”，并没有实现任意运动之间的广义相对性。其实，对于包括物理规律、初始条件和边界条件的运动过程而言，并不存在广义的相对性。著名学者惠勒等在他们于 20 世纪 70 年代初出版的名著《引力》一书中明确指出，所谓“广义协

变性”的要求，仅仅带来半个世纪的混乱^⑫。其实，这种混乱一直延续至今。

在广义相对论中，与“广义协变性”相应的局域对称性是一般线性群 $GL(4, R)$ ，其元素就是任意坐标变换的变换矩阵；或者，与之等价的局域闵氏时空的局域惯性系的局域齐次洛伦兹群 $SO(1, 3)$ ；并以它们来定义物理量、引进物理规律^⑬。与狭义相对论相比较，庞加莱群 $ISO(1, 3)$ 尽管包含齐次洛伦兹群，但还有时空平移。在引力场中的局域对称性却不是完全的局域庞加莱对称性，而仅仅是局域齐次洛伦兹对称性。这样，在引力场中定义的物理量、引进物理规律，与狭义相对论中的尽管形式一样，但对称性的基准却不完全一致。换言之，在爱因斯坦相对论体系中，引力可以忽略时定义物理量与引进物理规律的对称性基准，与引力不能忽略时不完全相同。如果所要描述的是同一对象在引力能否忽略时的性质和规律，那么，根据这些不完全相同的对称性基准所引进的物理量和物理规律之间是什么关系呢？

爱因斯坦没有意识到这个问题。长期以来，这个问题也没有引起足够重视。事实上，相对论和引力物理学界花费了几十年的时间才意识到这是重要问题。而问题本身，时至今日仍未有满意答案。其实，在广义相对论的框架内是无法解决的。

认识到有问题，花费了几十年的时间；至今仍没有共识，还有争论。这生动地展示什么是真实的物理学。至于在狭义相对论就忽略的另一组庞加莱变换，由于只保持原点光锥，在广义相对论引力场处处存在的局域闵氏时空中仍然存在。其效应如何？这当然需要研究。

爱因斯坦之后，广义相对论的研究取得了一系列重要的理论进展，但是，这些基本问题一直没有解决。此外，还有奇点问题，量子化等问题。这些问题之间，或许存在着内在联系。

本来，爱因斯坦试图放弃把惯性原理作为“绝对的时空连续区域”的性质，也是要实现马赫的观点，即惯性运动源于“宇宙间所有其他质量的中心”^⑭。虽然在广义相对论中，时空几何不再完全是绝对的，但并没有实现马赫的思想^⑮。爱因斯坦后来也承认这一点。

其实，要在宇宙尺度上一致地使用物理量和物理规律，就应把相对性原理与宇宙学原理联系起来。

可是，如果在整个宇宙中并不存在庞加莱不变的惯性系，仅存在局域齐次洛伦兹惯性系，又如何使庞加莱不变的惯性系与宇宙相联系呢？而且，如前所述，邦迪和伯格曼等人指出，在爱因斯坦的理论中，宇宙学原理与狭义相对性原理之间并不协调。于是，惯性系的起源问题依然存在，又多出局域惯性系的起源问题。

现在，以爱因斯坦相对论为基础的物理理论和宇宙论，不得不面对越来越精确与丰富的天文观测数据的检验和所提出的挑战。如若不改变爱因斯坦相对论体系的基本原理，又如何“以逻辑上最完美的方式审视已认识到的事实”？

四、相对性原理的进一步发展：德西特相对性原理及其局域-整体化

把相对性原理推广到德西特不变性并进而局域-整体化

如果宇宙常数可有可无，何以描述以其为特征的宇宙尺度上的物理学？

必须考虑能否从原理上引进宇宙常数，进而探讨宇宙尺度物理学的基本原理。探讨能否使得存在引力时与引力可以忽略时，引进物理规律与定义物理量的对称性基准一致；能否把我们的宇宙及其演化与惯性坐标系的确定联系起来。

事实上，精确宇宙学揭示着，物理学发展到了以宇宙常数为特征的宇宙尺度。在这个尺度上，如果有新的物理规律，首先就可能新的运动学。这就意味着，相对性原理应该进一步发展。物理学发展到今天，这是不得不面对的问题。

我们多次阐述，并在学术论文中指出^④，应该把相对性原理推广到德西特与反德西特不变性；因而，应该存在三种狭义相对论。而且，它们分别具有完全不同的宇宙学内涵：对于爱因斯坦狭义相对论中的闵氏时空，其宇宙尺度的内涵是平庸的。德西特狭义相对论则不同，如果把作为真空的德西特时空的半径 R 与宇宙常数相联系，其宇宙尺度的内涵为一个加速膨胀的三维球面，曲率极小，为宇宙常数量级。这样，宇宙常数作为自然界的一个普适常数，就在原理的意义上引进了。“真空”变了，真空能密度问题也就应重新考虑。不仅如此，具有宇宙学原理形式度规的德西特时空，与具有惯性运动的贝尔特拉米-德西特度量之间的变换，并不是惯性系之间的变换；这表明，前者不是具有惯性系的空

时。然而，前者却因此具有视界温度和视界熵，其起源并不是引力，而是相对于贝尔特拉米-德西特惯性系的非惯性运动。反德西特狭义相对论在常曲率为负的反德西特时空上，同样包含曲率半径，但相应的宇宙常数是负的；其宇宙学内涵是一个振荡的三维罗巴切夫斯基空间，并没有视界、因而也没有视界熵。

为了描述引力，应该以相对性原理的局域-整体化为基础建立引力理论，即把狭义相对论，包括相应的没有引力的时空、其中的物理规律及完整的对称性，首先一起局域化：即对于各个惯性观测者，有自己的（局域）相对性原理及其（局域）对称性；然后，彼此自洽地连接起来，建立整体的时空几何。这称之为狭义相对论的局域-整体化原理。进而，应引入与这个原理一致的动力学来描述引力。于是，就应该有三种引力理论，即局域庞加莱、局域德西特与局域反德西特不变的相对论性引力理论。

这样，相对性原理及其对称性，以及局域相对性原理及其局域对称性，分别作为不存在或存在引力的物理基准，在对称性及其局域-整体化的意义上，它们就是一致和自洽的。

在三种狭义相对论及其局域-整体化的引力理论之中，应该有一种能够描述我们的宇宙。观测表明，我们的宇宙在加速膨胀，宇宙常数对暗能量密度起主导作用，具有不断增加、与引力密切相关的热力学熵。这表明，我们的宇宙必然选择德西特情形。于是，宇宙不仅必然渐近于德西特时空，而且大致是加速膨胀着的三维球面，不过半径很大、对平坦的偏离在宇宙常数的量级；这与一系列观测事实基本一致。而且，我们的宇宙具有熵界——即它所渐近趋向的宇宙学德西特度规的非引力的视界熵。

为什么应该存在三种狭义相对论？

不妨再来考察，为什么应该存在三种狭义相对论？

早在 20 世纪 50 年代，对比投影几何与欧氏几何与非欧几何的关系，意大利学者就提出“投影相对论”^⑤，把相对论推广到德西特或反德西特时空。不过，四维投影几何不可定向，而物理的时空要求定向；当时并没有考虑到。1970 年，我国著名学者陆启铿独立地提出应该把相对性原理推广到常曲率时空，即德西特或反德西特时空。70 年代初，以陆启铿为首的中国学者就德西特或反德西特时空的狭

义相对论开展了研究。近年来，在精确宇宙学的推动下，进一步开展研究，并取得一些有意义的成果^④。

其实，要实现爱因斯坦的主张，放弃把相对性原理作为“绝对的时空连续区域”的性质，就应使相对性原理与宇宙建立联系，整个宇宙就应该存在惯性系或与其完整对称性一致的局域惯性系。正因为宇宙可能渐近于德西特时空，就应考虑德西特时空中是否存在惯性系。

答案是肯定的。这可以从两个密切联系的角度来看。

对于作为投影几何的子几何，欧氏几何、黎曼球几何与罗巴切夫斯基伪球几何，都有点、直线、度量，各自在笛卡儿或贝尔特拉米-克莱因坐标系中，度量的测地线就是直线；这些性质在各自变换群的线性变换或线性分式变换下不变。对于四维情形，在物理上与它们对应的分别是闵氏时空、德西特时空与反德西特时空；都有事件、直的世界线、具有物理号差的度量，在相应的闵氏坐标系或贝尔特拉米-克莱因坐标系中，度量的测地线就是直的世界线；同样，这些性质在各自的变换群的变换下不变：庞加莱群的线性变换、德西特群与反德西特群的线性分式变换。为了保持时空的定向，只要不像投影几何那样取对径点认同即可。

在爱因斯坦狭义相对论中，沿着直的世界线的运动就是惯性运动，相应的坐标系就是惯性系。那么，在德西特时空与反德西特时空中，沿着直的世界线的运动为什么不是惯性运动，相应的坐标系为什么不是惯性系呢？

其实，德西特早在 1917 年、泡利早在 1920 年、薛定谔早在 20 世纪 50 年代初，都曾经注意到这类坐标系，但是，却错过了发现德西特与反德西特相对性原理的机会。

另一方面，不妨考虑惯性运动即匀速直线运动，以及相应的惯性坐标系的最一般的变换性质，可以得到同样的结果。事实上，乌莫夫、外尔和福克^⑤等早就考虑过这一问题。数学大师华罗庚也早在 1962 年的《从单位圆谈起》的讲义中，探讨了这个问题，并大大简化了福克等的证明。他们得到，最一般的变换是线性分式变换，构成具有 24 个参数或者生成元的群。我们称之为惯性运动变换群。这恰恰包含刚刚提及的德西特时空与反德西特时空中的贝尔特拉米-克莱因坐标系的线性分式变换。然而，

外尔和福克等却仅仅直接回到闵氏时空中的庞加莱变换，而后者只具有 10 个参数。

上述二者的关键，就是在测绘学中早已熟知的“球心投影”或“圆直变换”的推广：球面上的大圆，在球心投影下变为直线；推广到作为具有正或负常曲率的四维伪球面的德西特时空或反德西特时空，伪球面上的匀速伪大圆运动，在球心投影下变为匀速直线运动，即惯性运动；保持伪球面及其上的匀速伪大圆运动不变的线性（旋转）变换，在球心投影下，就变成线性分式变换。不过，在物理上要考虑到时空是否可定向等问题。

总之，在德西特时空与反德西特时空中应该存在惯性系与相对性原理；即应把相对性原理从庞加莱对称性推广到德西特和反德西特对称性，在后两种常曲率时空中建立狭义相对论。其中，除了真空中的光速 c 之外，曲率半径 R 也是普适常数。

除了上面这两个相互联系的方面之外，还可以直接从爱因斯坦狭义相对论出发。这或许是最简单、最直接的方式。首先，必须把忽略的保持原点光锥不变的另一组庞加莱变换考虑进来。于是，在闵氏时空上，就应该存在一个庞加莱对：原来的庞加莱变换和保持原点光锥不变的庞加莱变换。这个庞加莱对在整个闵氏空时上可以变换到任意时空点。而且，这个庞加莱对的封闭代数恰恰就是前面提到的惯性运动群的代数。这样，由庞加莱对的两个庞加莱代数在洛伦兹代数的表示空间中的线性组合，就可以直接得到贝尔特拉米-德西特和反德西特时空中的德西特和反德西特代数；反之亦然。这样，就从忽略的庞加莱对出发，从爱因斯坦相对论就可以至少在局部直接得到德西特和反德西特相对论。

这里，引进的德西特与反德西特空时的曲率半径 R ，与在闵氏时空中丢失的另一组保持原点光锥不变的庞加莱群中的长度量纲参数，自然是一致的。

惯性运动变换群、运动学对称性之间的关系

其实，上述两个方面的探索并没有结束。如果先考虑相对性原理的运动学部分，即惯性运动与惯性系最一般的变换，即乌莫夫-外尔-福克-华罗庚线性分式变换构成的惯性运动变换群。通常具有匀速直线运动的运动群应该与伽利略变换、庞加莱变换等一样，具有 10 个参数或者生成元。于是，可以先考虑所有包含 10 个参数的运动学变换，显然，它们都应该是惯性运动变换群的子变换。最近发现，

与三种几何相对应的三种狭义相对论之间，必然存在着内在联系^①。这是因为，由于各自的变换群都有 10 个参数，如果没有关系，一共就有 30 个参数。然而，与四维投影变换群相应的惯性运动变换群只有 24 个参数。

事实上，对于三种狭义相对论而言，三者共有表征时空各向同性的齐次洛伦兹群 $SO(1,3)$ 的变换，后者具有 6 个参数；这样，三者变换群的参数就要减去 12 个。不仅如此，三者的时空平移并不像过去以为的那样是相互独立的；它们之间存在着组合关系，独立的只有两组时空平移，共 8 个参数。这是因为，这些平移都是表征时空各向同性的齐次洛伦兹代数的矢量表示，在这个表示空间中可以进行线性组合；同时，作为惯性运动群的子群的德西特群和反德西特群中出现的曲率半径应该一样，那么，其二者贝尔特拉米平移之和就给出通常的庞加莱时空平移；而且，其二者贝尔特拉米平移之差则给出另外一组庞加莱平移，称为赝平移；所以这样称呼，是因为它们虽与齐次洛伦兹代数共同组成 10 个参数的代数，与通常的庞加莱代数同构；然而，它们却只在惯性系的原点作用，保持原点的闵氏光锥不变。不过，这样一来，对于三种狭义相对论的变换群——庞加莱群 $ISO(1,3)$ 、德西特群 $SO(1,4)$ 和反德西特群 $SO(2,3)$ ，独立生成元的数目只有 14 个。惯性运动变换的另外 10 个生成元起什么作用呢？其实，其作用是使得贝尔特拉米-德西特平移和贝尔特拉米-反德西特平移之间相互变换，于是，三种狭义相对论在惯性运动变换下成为三位一体。对于三种几何，有类似的性质。

至于具有庞加莱赝平移的，保持原点光锥不变的另一组庞加莱变换，在 1905 年狭义相对论提出时就忽略了。不过，正如前面指出，从量纲分析知道，其作用在宇宙常数量级，仅对宇宙学物理明显。显然，这个庞加莱对称性在物理和数学上的作用都值得深入研究。

值得强调，在表征空时各向同性的齐次洛伦兹群的表示空间中，庞加莱平移与庞加莱赝平移之和，就给出贝尔特拉米-德西特平移，之差给出贝尔特拉米-反德西特平移；反之亦然。这样，如果保持原点闵氏光锥不变的另一组庞加莱变换不被忽略，如刚才所说，就有可能通过两组庞加莱变换平移生成元的组合得到德西特与反德西特空时中的惯性运动之

间的代数，从而建立另外两个相对论。

不仅如此，如果仅仅考虑表征三维空间各向同性的转动群 $SO(3)$ 的代数，不同惯性系之间的时间平移、空间平移和速度变换，就分别是转动群的标量和矢量表示。那么，所有已知的非相对论运动群的代数，都可以通过在转动群的表示空间中不同的时间平移、空间平移和速度变换之间的组合得到。而且，光速 c 与半径 R 不变。由于存在时间赝平移和空间赝平移，同样可以得到已往忽略的一些 10 个参数的代数。于是，所有这些运动学都应该在相对性原理的基础上、在光速 c 和半径 R 的不变的条件下重新考虑，它们各自的惯性系及其对称性，都会与德西特时空中的贝尔特拉米惯性系通过这类组合关系相联系。反之亦然。

值得一提的是对应于熟知的伽利略变换，还有前面提到的第二组伽利略变换，二者的代数完全一样，除了共有的表示空间各向同性的 $SO(3)$ 群的 3 个生成元相同之外，时间平移、空间平移和速度变换都不相同：通常的伽利略变换具有与庞加莱变换相同的时间平移与空间平移，以及与洛伦兹速度变换所不同的伽利略速度变换；第二组伽利略变换则具有时间赝平移、空间赝平移和卡洛尔(Carroll)速度变换；而卡洛尔速度变换恰恰是洛伦兹速度变换与伽利略速度变换之差。这样，伽利略速度变换与卡洛尔速度变换之和就是洛伦兹速度变换，之差则是几何速度变换。有趣且重要的是，在各向同性的 $SO(3)$ 群的表示空间中，通常的伽利略代数与第二个伽利略代数生成元之和，恰恰给出德西特代数的生成元。这样，就可以直接从两个伽利略代数构成的伽利略对，直接得到德西特代数，而后者与我们宇宙的渐近行为相联系。对于两组卡洛尔变换，也有类似的情形。当然，这也是为什么作为德西特空是曲率半径的 R ，应该与闵氏空时中忽略的另一组庞加莱变换中的长度量纲参数是一样的原因。

至于不同运动学所对应的动力学内容，则应该进一步在新的基础上考虑。

相对性原理的宇宙学意义与惯性系的确定

如前所述，由于三种狭义相对论分别具有不同的宇宙学内涵：与爱因斯坦狭义相对论平庸的宇宙学内涵不同，对于德西特和反德西特狭义相对论，如果把曲率半径 R 直接与宇宙常数相联系，即取 $R^2 \cong 3/\Lambda \approx 10^{56} \text{ cm}^2$ ，宇宙常数作为基本的普适常数，

就可以在原理的意义上引进；而且，通过改变同时性，最直接和最简单地从坐标同时性改为固有时同时性，就分别得到它们的宇宙学内涵：加速膨胀的三维球面或者震荡的三维罗巴切夫斯基空间，半径极大、曲率极小。

同时，宇宙常数的起源问题，就并非在闵氏时空中的真空能密度。而且，由于忽略了一组庞加莱变换，其中涉及长度量纲参数 R 的负二次方。后者恰恰给出一个红外截断；在计算闵氏时空的真空能密度时，并没有考虑这一截断。另一方面，宇宙常数的起源，也会与牛顿引力常数 G ，光速 c 和普朗克常数 h 的起源一样，是更深刻的问题。由这些常数可以构成一个无量纲常数 g ，其平方即普朗克尺度的平方与宇宙常数之积，恰恰为 10 的负 122 次方。真空能疑难就成为这个无量纲常数能否计算的问题。

精确宇宙学表明，我们的宇宙很可能以其渐近行为选择了德西特情形。其实，其实强调，根据上述分析，我们的宇宙必然选择德西特。

这样一来，由于宇宙演化的时间箭头趋向于德西特宇宙的宇宙时间轴，后者的方向就确定了。进而，通过变换同时性，将德西特宇宙时换到贝尔特拉米坐标时，就可确定德西特时空中贝尔特拉米惯性系的时间轴的方向，这样，惯性系也就确定了。于是，宇宙的演化就恰恰确定了德西特狭义相对论中的惯性系和惯性运动。在这个意义上，演化的宇宙也就成为惯性运动的起源。在这里，惯性系的确定并不涉及爱因斯坦指出“循环论证”时的质量和加速度，其起源也不涉及“宇宙间所有其他质量的中心”这类含混的概念。总之，在确切的意义上，德西特相对性原理绕开了爱因斯坦所指出的“循环论证”，而由宇宙的演化所确定。从而也解决了从牛顿以来，一直存在的惯性运动的相对性与宇宙观测之间不协调的疑难。

显然，如果仅仅停留在忽略了保持原点光锥不变的另一组庞加莱变换的爱因斯坦狭义相对论，当然不可能做到这一点。

对于庞加莱惯性系，以及非相对论的伽利略惯性系等，都通过它们与德西特时空中的贝尔特拉米惯性系的上述那种内在的组合联系，间接地由宇宙演化确定，从而也就绕开了爱因斯坦所指出的“循环论证”。

应该指出，所有这些惯性系的时间轴的方向都是由宇宙的时间箭头确定的。在这个意义上，比起其他时间方向的惯性系而言，它们是“优越的”。然而，这种“优越性”并不破坏相对性原理：相对性原理仅仅对于物理规律而言，严格说来，并不涉及包括其他因素的物理过程，特别是与宇宙演化有关的过程。事实上，这种“优越性”仅在宇观尺度上，对与宇宙演化有关的过程或效应才有所表现。除此之外，在测量精度的范围内，是否有一些局域效应会有所表现？当然值得进一步考察。

引力理论与相对性原理的局域-整体化

既然在德西特和反德西特时空中都存在狭义相对论，那么，在这两种常曲率时空中就都不存在引力。如何描述引力呢？能否使得可忽略与不可忽略引力时的物理基准一致？

正如我们多次指出的，只要以狭义相对论的局域-整体化原理为基础建立引力理论，就可以做到这一点。

其实，爱因斯坦的“伽利略区域”对此具有重要提示作用。

由于“伽利略区域”是“有限的”，因此是“局域的”，其中物理规律的对称性本质上应该是局域庞加莱对称性。那么，如何联系这些在不同地方的“伽利略区域”呢？如果不同的“伽利略区域”之间的局域对称性不是局域庞加莱对称性，能够自洽地相互联系吗？不能。在不同的“伽利略区域”之间要建立自洽的联系，只有把狭义相对论的相对性原理连同庞加莱对称性首先一起局域化，然后自洽地连接起来；否则，就不可能做到。也就是说，引力可以忽略时相对性原理成立，引力不能忽略时，相对性原理处处局域成立、且自洽地连接为时空整体。这样，相对性原理及其惯性系与局域相对性原理及其局域惯性系，在对称性及其局域-整体化的意义上相同，引力可否忽略的物理基准也就一致了。而且，由于惯性系和局域惯性系是一致的，演化的宇宙在确定惯性系的同时，也确定了局域惯性系。

显然，具有引力的时空几何由其中物质运动通过场方程来确定，爱因斯坦这一核心思想在局域-整体化原理中继承了下来。进而，为了避免爱因斯坦方程或引力场动力学的“戈尔迪结”^⑧，并且与局域-整体化原理一致，不妨尝试局域对称性一致的几何量与物理量之间的动力学联系。

这样，对应于三种狭义相对论，就应该有三种具有相应的局域对称性的引力理论。我们的宇宙以其加速膨胀的渐近行为，选择了德西特相对论及其局域-整体化。

如何更好地实现局域-整体化，建立相应的引力理论，还有不少问题在研究之中。不过，对一个以无量纲常数 g 表征引力强度的模型的考察已经表明，这些考虑很可能是合理的。

五、历史地发展地对待物理学与科学

爱因斯坦在指出“物理学构成一种处在不断进化过程中的思想逻辑体系”之后，马上强调，“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。这个体系的正当性（真理内容）在于其在感觉经验基础上导出的定理的有用性，而后者与前者的关系只能直觉地领悟”（《物理学与实在》）。

事实正是这样。物理学的一系列未完成的逻辑系统，处在“进化”的历史过程之中，基本概念和基本原理的更新，并没有逻辑桥梁；因而难以避免含混、误解甚至错误。有关相对性原理即其对称性的作用，惯性系与惯性运动的起源，引力与惯性力是否等价，时空的几何性质与物质及其运动的关系，质量、能量-动量、角动量与自旋等物理量的引进及其相互关系等问题都是这样。同样不能忽视广义相对论中的这类问题，以及广义相对论与狭义相对论之间不完全自洽的问题。

一般以为，物理学和自然科学讲究逻辑、讲究数学推导，需要实验检验。但是，这仅仅是一个重要方面，是在基本概念业已大体形成，基本原理已经大体确立的前提下的重要方面。更为重要的是作为基础的基本概念与基本原理等等，这些都不是从逻辑和数学中来的，而是“从经验中提取，而只能通过自由创造得到”。实验检验当然重要，但是，任何实验检验的都是具体的结论或者具体定理的“有用性”，而不完全是“这个体系的正当性（真理内容）”本身；二者之间的关系也“只能直觉地领悟”。几年前，著名物理学家温伯格在《四点忠告》（*Nature* 426, 389, 27 Nov. 2003）中，指名对从培根、库恩和波普尔等哲学家的科学模式进行批评，认为这些过于简单的模式有碍科学的发展。这与爱因斯坦的思想是一致的。温伯格认为，避免这类危害的办法是“学习科学发展的历史”。

事实上，如果仅仅把逻辑的自洽性、可检验性、可证伪性和可测量性等作为“科学标准”，就会否定物理学的基础，从而否定物理学的发展，甚至会最终否定物理学。作为最严谨的自然科学的物理学如此，自然科学也不例外。

狭义相对论是在 1905 年提出的，爱因斯坦广义相对论是在 1915 年基本完成。而表征对称性与守恒量关系的诺特定理发表于 1918 年，维格纳关于庞加莱群的重要工作发表于 1939 年。而且，微分几何、群论及在物理中应用的发展，与相对论和量子论的成功推动有密切关系。

这是物理学与有关数学分支发展的事实。要认识爱因斯坦相对论体系的基本观念的引进、基本原理之间的关系究竟如何，是否完全自恰，是相对论物理学以及与其相关的数学研究的重要内容，没有几十年的发展、没有最近精确宇宙学的启示，是不可能做到的。

当然，忽略了保持原点光锥不变的另一组庞加莱变换，自然遗憾。然而，在相应的几何学和数学的其他分支中，与此相应的变换也已忽略。现在，随着这一组庞加莱变换，以及相应的伽利略变换、卡洛尔变换等的回归，在相应的几何学和数学的其他分支中，与此相应的变换也应该逐一回归。

爱因斯坦对于当代物理学的贡献极为全面。就量子理论而言，他的光量子论是量子论的重要突破，尽管他后来对于量子力学，特别是哥本哈根学派，一贯质疑和反对，但他对于量子理论的发展却起到推动作用。1936 年他与合作者发表著名的 EPR 佯谬的论文，同年，薛定谔提出著名的薛定谔猫的思想实验，以质疑量子理论。他们的目的并没有达到，然而，对量子力学的发展却起到重要作用，甚至开辟了全新的研究和应用领域。这是爱因斯坦完全想象不到的。

这是物理学的真实发展，也是科学的真实发展。总之，必须从历史的观点和发展的观点对待物理学和科学。

苛求前人是荒唐的，包括上世纪最伟大的科学家爱因斯坦。重要的是，应该了解物理学正是这样不断地发展着。任何创造都难以避免错误，何况是革命性的开创。应该不断地认识和澄清前人——包括开创者和奠基人的某些含混、错误的表述，而不是拘泥于其言论或表述。唯有这样，才能更好地继

承爱因斯坦等伟大学者开创的相对论物理学的精髓，更好地面对当前物理学所面临的挑战。

事实上，这还涉及与科学发展密切相关的重要问题：什么是科学的认识主体？科学发展表明，科学家个人的作用固然重要，甚至至关重要；但是，科学的发展绝不仅仅依赖于科学家个人，科学家群体的作用，抑或潜在的作用极其明显。对于实验科学，这一点更为明显。

不断强化历史的和发展的科学观，这是极为长期和艰巨的任务，并将自始至终伴随着科学发展。

六、结语

从近代科学诞生起，哥白尼、伽利略等先驱就一直追求学术民主与科学精神。爱因斯坦继承和发扬了这些伟大先驱的传统。他不仅盛赞伽利略的伟大人格和科学成就，而且赞赏这些成就所体现的主导思想。他在 1953 年《为德雷克英译伽利略的〈对话〉所写的序言》中这样写道：“竭力反对任何根据权威而产生的教条。而只承认经验和周密的思考才是真理的标准。”他认为，“把经验的态度与演绎的态度截然对立起来，是错误的，也并不代表伽利略的思想。”其实，爱因斯坦对伽利略的赞赏，恰恰包含着从伽利略到爱因斯坦所极力争取的学术民主，以及他们身体力行的科学方法和科学精神，也恰恰是从近代科学诞生起就一直伴随着社会进步的密切相关的两个方面：民主与科学。

在面对精确宇宙学的问题和挑战的今天，这些当然值得我们继承、汲取和发扬。

为了探索我们的宇宙、认识在宇宙尺度上物理学的基本原理，应该重视相对性原理在不同尺度上的表现及其发展。

相对性原理及其发展，至少存在两条不同的途径。

把伽利略相对性原理扩充到庞加莱相对性原理，爱因斯坦和庞加莱几乎同时建立了狭义相对论。然后，爱因斯坦放弃了相对性原理，以广义相对性原理和等效原理为基础研究引力与宇宙学。在取得一系列辉煌成功的同时，也带来一些困惑或不得不回答的问题。面对精确宇宙学观测事实的挑战，爱因斯坦相对论体系如何解决这些困惑或问题？

另一条途径则是延续从伽利略相对性原理到庞加莱相对性原理的发展，找回忽略的变换，进而发展为常曲率时空的相对性原理；考虑相对性原理及其对称性的局域-整体化，描述引力相互作用，并与

宇宙相联系。这样，就应有三种狭义相对论及其局域-整体化；由观测来确定哪一种描述真实的宇宙。

“探索我们的宇宙”必将证实，我们的宇宙必然选择德西特相对论、引力和宇宙论。

尽管沿着这一途径，还有很多工作要做；但是已经取得一些进展。

是不是存在其他途径呢？当然值得探索。

哪一条途径较为符合爱因斯坦指出的物理学进化的方向，能以逻辑上比较完美的方式审视精确宇宙学不断揭示的事实呢？这是我们应该不断探讨并与观测进行比较的问题。

汲取爱因斯坦这位世纪伟人的科学方法与科学精神的实质，继承他与同辈从哥白尼、伽利略和牛顿，以及其他先辈继承而来的深刻思想，又加以创造性地开创的当代物理学和科学；在面对精确宇宙学挑战的今天，批判地继承先辈的精神遗产，不断实其事、求其是，进一步创造性地发展物理学和科学。这是在国际天文年纪念爱因斯坦这位世纪伟人的诞辰 130 周年，作为后继者理应采取的态度。

（中国科学院理论物理研究所 100190）

- ① H.-Y. Guo, H.-T. Wu and B. Zhou, Phys.Lett. B 670 (2009) 437-441; ArXiv: 0809.3562; 及所引文献。H.-Y. Guo, C.-G. Huang, H.-T. Wu and B. Zhou, ArXiv: 0812.071v3; 及所引文献。
- ② A. Einstein, The Meaning of Relativity, 5th Ad. Princeton, Princeton Univ. Press, 1953.
- ③ 参见 C. Misner, K. Thorne and J.A. Wheeler, Gravitation, W.H. Free. & Com., 1972.
- ④ 参见“de Sitter invariant special relativity” Wikipedia, the free encyclopedia 及其所引文献。http://en.wikipedia.org/wiki/De_Sitter_relativity. 应该指出，狭义相对论这一术语的运用，在这个条目中和其他许多场合含混不清。狭义相对论必然首先以相对性原理为基本原理，从惯性运动与惯性系出发。而不仅是没有引力就是狭义相对论。这一含混反映着当前物理学的认知状况，远未从伴随着爱因斯坦伟大成就的错误与含混中解脱出来。
- ⑤ 福克，《空间、时间和引力的理论》，科学出版社（周培源等译），1965；及所引文献。

