

狭义相对论的欧氏假定与暗宇宙的启示

郭汉英¹ 徐湛²

(¹ 中国科学院理论物理研究所,北京 100080)

(² 清华大学物理系和高等研究中心,北京 100084)

(收稿日期:2005-10-8)

摘要 本文分析爱因斯坦相对论中关于一类没有相对运动的惯性系中刚性量杆的欧氏假定,以及相对性原理与宇宙学间的不协调. 简单介绍我国学者提出的德西特不变的相对论,以及由暗宇宙启示的马赫原理. 该相对论提供一个加速膨胀的观测宇宙所渐近趋向的模型. 这里,不存在相对性原理与宇宙学间的不协调,存在一类相对于宇宙背景静止的优越惯性系,3维宇宙空间是闭的,宇宙常数起到惯性运动起源的作用. 同时,这个模型提供观测宇宙的熵界,与全息原理的猜测一致. 当曲率半径趋于无限时,这类优越惯性系仍然存在,不完全是爱因斯坦狭义相对论.

关键词 相对性原理;欧氏假设;宇宙学原理;德西特不变性;暗宇宙;马赫原理;熵界

THE EUCLIDEAN ASSUMPTION IN SPECIAL RELATIVITY AND IMPLICATIONS FROM THE DARK UNIVERSE

Guo Hanying¹ Xu Zhan²

(¹ Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing, 100080)

(² Department of Physics and Center for Advanced Study, Tsinghua University, Beijing, 100084)

Abstract We analyze the Euclidean assumption on rigid ruler in a kind of inertial systems without relative motions in special relativity, and the inconsistencies of the principle of relativity with cosmology in Einstein's theory of relativity. We introduce briefly the de Sitter invariant relativity and the Mach principle inspired by the dark universe proposed by Chinese scholars. The relativity provides such a model that should asymptotically describe our universe accelerated expanding feature. In this model, there should be no the inconsistencies, but there is a kind of preferred inertial frames rested with respect to the cosmic background that is a closed 3-d sphere and the cosmological constant plays a role as the origin of inertial motions. The model also provides entropy bound for our universe in consistent with the holographic principle conjecture. Under the contraction of the curvature radius being infinity, the model tends to the one with the preferred inertial frames rather than the complete Einstein's special relativity.

Key Words principle of relativity; Euclidean assumption; cosmological principle; de Sitter invariance; dark universe; Mach principle; entropy bound

爱因斯坦于1905年提出狭义相对论^[1],引起物理学的变革;1915年基本上建立了广义相对论,引起更加深刻的变革;1917年,提出宇宙学原理,

并且为了建立静态宇宙模型引进“宇宙学项”,开创了现代宇宙论的先河.

有关空间和时间、物质和运动、引力和宇宙等

的相对论体系,是近代科学的伟大体系,对人类文明的深刻影响一直持续至今.当前,有关暗宇宙的观测结果,向数据分析的基础提出疑难.这是对物理学空前的挑战.物理学正面临变革.

相对论的提出,已届百年.分析相对论的一些基本假定,思索暗宇宙的启示,有助于我们更好地面对物理学的变革.

狭义相对论的建立和基本假定

为了解释“以太漂移”的零结果,洛伦兹等提出种种假定.例如,对“以太”高速运动的尺,会沿着匀速运动方向发生“动力学”收缩,因而测不出“以太漂移”等.洛伦兹等并找到了从相对于“以太”和绝对空间静止的一类惯性系到一类运动系的变换.彭加勒把伽利略相对性原理推广,提出包括电磁场方程不变的相对性原理;并证明一般的洛伦兹变换构成群.但是,他们都没有放弃牛顿的绝对空间和绝对时间观念,也没有放弃“光以太说”.

爱因斯坦则放弃“以太”,他从相对性原理和光速不变原理出发,提出新的空间和时间、物质和运动的观念和理论,建立了相对论.相对性原理要求:非引力的物理规律,在任何惯性系中的形式不变.光速不变原理要求:在任何惯性系中,光速 c 不变,与光源运动速度无关.其实,这个原理等价于要求在任何惯性系中,光速 c 是普适常数.按照这个理论,不存在绝对时间和绝对空间;由于必须用光讯号对钟和测量,同时性完全是相对的;彼此以接近光速相对匀速运动的观测者会发现对方的尺收缩、钟延缓,根本没有“以太”漂移.

1908年,闵可夫斯基提出,相对论的空间-时间变换下,存在不变的 $1+3$ 维空时,后来称为闵氏空时 $M^{1,3}$.换言之,从惯性系 $S(x^\mu)$ 到惯性系 $\tilde{S}(\tilde{x}^\mu)$ 的坐标变换,即彭加勒变换下,闵氏空时不变,且具有不变度量

$$ds^2 = g_{\mu\nu} dx^\mu dx^\nu,$$

$$(g_{\mu\nu})_{\mu, \nu=0,1,2,3} = \text{diag}(1, -1, -1, -1) \quad (1)$$

这里,重复指标表示求和,时间坐标 $x^0 = ct$, c 为真空中的光速.彭加勒变换包括空时平移和齐次洛伦兹变换:

$$x^\mu = \tilde{x}^\nu = L^\mu_{\nu} (x^\nu - a^\nu), \quad (L^\mu_{\nu})_{\mu, \nu=0,1,2,3} \in SO(1,3) \quad (2)$$

这里, a^ν 为任意事件 A 的坐标,该变换将事件 A 平移到原点; $SO(1,3)$ 是齐次洛伦兹群.

当光速 c 可以近似看作无限大时,彭加勒变换“收缩”(或退化)为伽利略变换,闵氏空时退化为牛顿的绝对空间和绝对时间.彭加勒或爱因斯坦相对性原理也就包含了伽利略相对性原理作为极限情形.

实际上,和牛顿力学一样,这里假定了在没有相对运动的惯性系中的“刚性量杆”满足欧氏几何,在相对性原理的意义下,这相当于假定 3 维空间和 1 维时间都是欧氏的^[1].于是,闵氏空时具有空时坐标的平移不变性.对于质量为 m_0 的自由粒子,可以定义 4-动量

$$p^\mu := m_0 \frac{dx^\mu}{ds}, \quad p^0 := E, \quad p^i = p, \quad i=1,2,3 \quad (3)$$

由此可以导出著名的爱因斯坦公式

$$E^2 - p^2 c^2 = m_0^2 c^4 \quad (4)$$

这个公式与闵氏空时,以及其中物质运动的平移不变性有着密切的关系.

这样,当时就有两种理论:承认“以太”、具有优越惯性系、认为洛伦兹收缩是动力学效应的洛伦兹-彭加勒理论;以及否认“以太”、没有优越惯性系、认为洛伦兹收缩是运动学效应的爱因斯坦相对论.由于爱因斯坦理论与忽略引力而且不涉及宇宙学效应的实验和观测都一致,并且优美和简捷;因而得到公认,成为当代物理学的基础之一.

爱因斯坦认为,“相对论是一种原理的理论.”与“构造理论”不同,原理理论“应用分析而不是综合的方法.其出发点和基础不是假设的要素,而是经验上观察到的现象的一般性质、一般原理;从这些性质和原理导出这样一些数学公式,使其用于每一自身出现之处.”“原理理论的优点,是它们逻辑上的完善,和它们基础的稳固.”(《时间、空间和引力》)但是我们即将看到,其实相对论同样包含重要的“假设要素”.而且,相对论体系的一些基本观念、基本原理之间甚至并不协调.

与牛顿体系的伽利略相对性原理一样,无论是彭加勒或爱因斯坦相对性原理,都以惯性运动和惯性系为前提.因而,都无法解决惯性系和惯性运动的起源.

爱因斯坦指出:“惯性原理的弱点在于它含有

循环的论证: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。”(《相对论的意义》)事实上,存在惯性运动是从大量实验和观测抽象出来的“假设”。这正是他后来突破狭义相对论,发展广义相对论的重要动机之一。

为了解释惯性运动的起源和建立体系的需要,牛顿引进绝对空间和绝对时间。然而,伽利略相对性原理与此不协调。在满足伽利略相对性原理的牛顿力学中,不出现相对于绝对空间的“绝对速度”。麦克斯韦电磁理论或者光的传播规律中,出现光速 c 。按照“以太说”,麦克斯韦方程仅在相对于绝对空间静止的惯性系中成立。于是,从伽利略相对性原理到彭加勒或爱因斯坦相对性原理,是一个飞跃和变革。惯性系之间的变换也从伽利略变换过渡为彭加勒变换。

然而,推广伽利略相对性原理,并不意味着一定要放弃牛顿的空间和绝对时间观念。洛伦兹和彭加勒就没有放弃:他们认为存在相对于绝对空间静止的一类“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”或者“局域”时间;尺缩钟慢是“以太”的动力学效应。爱因斯坦则认为,所有惯性系都是平权的,同时性是相对的;尺缩钟慢是运动学效应。于是,这两种理论在物理上孰是孰非,也存在“假说要素”。应该指出,能否通过物理实验或者观测检验相应的“假说要素”,无疑是非常重要的问题。

前面提及,无论在彭加勒的相对性原理,或者在爱因斯坦的相对性原理中,都有一个重要的“假说要素”:在没有相对运动的惯性系中,“刚性量杆”服从欧氏几何。这是来源于牛顿关于绝对空间服从欧氏几何的假定。对于钟的固有时,也是如此。

为什么说这是“假说要素”呢?爱因斯坦一直强调,几何源于测量。的确如此,在几何公理体系下,只要把欧氏几何的第五公设稍加改动,就可建立与欧氏几何几乎完全平权,然而“非欧”的几何,即罗巴切夫斯基的双曲几何与黎曼的椭圆几何,描述两种非零常曲率空间。对于这两种几何,同样可以引进“刚性量杆”进行测量,只不过“刚性量杆”的长度与坐标距离的关系不再是欧氏的,而是非欧的。这样,选取欧氏的(而不是罗氏或黎曼的)“刚性量杆”,就是“假设的要素”。我们要强调

的是,这个“假说要素”的真伪,在原则上应由实验或观测来判断,而我们现在所看到的暗宇宙的观测结果对此给出了强烈的启示。

光速不变原理也包含重要的“假说要素”:单程光速不变。有关“以太漂移”以及光速测量的所有实验表明,作为“经验上观察到的现象的一般性质、一般原理”而言,应该是闭合回路的平均光速不变,或者说往返平均光速不变。其实,要测量“单程光速”,必须先对好起点和终点的钟;然而,用什么来对钟?如果不采用其他假定,就只能用光讯号。但是,要测量的就是单程光速,这就陷入了循环。

通常以为,由于空间是均匀各向同性的,因而,回路或往返平均光速不变,就是单程光速不变。不过,空间均匀各向同性是要通过测量来确定的;特别是均匀性,恰恰涉及到“刚性量杆”满足什么几何的问题。在上述三种几何中,都有相应的均匀性观念。那么,是否可以先在起点对好两个钟,再把其中一个无限缓慢地移动到终点,这样不就可以不依赖于光讯号而对钟了吗?其实,这里也有假定:无限缓慢地移动很长一段距离,不影响钟的速率;而如何测量距离,又要假定采用满足什么几何的量杆。

实际上,爱因斯坦非常清楚这些问题。他认为,必须采取“约定”的方法来避免这类循环。不过,“约定”就是一种基于实验和观测,而又高于实验和观测的“假定”。有没有直接的实验或观测可以验证这个“假定”的真伪呢?至今还没有!如果在一定条件下把这个假定与空间均匀性的假定等同,那么,这个假定的检验就与“欧氏假定”的检验联系起来。于是,暗宇宙的观测结果也间接与此相关。

不仅在狭义相对论中存在上述这些重要的“假说要素”,在广义相对论和宇宙论中,也都存在着重要的“假说要素”。不过,这已经超出了本文的范围。

其实,“假说”是科学发展其自身的一种形式。被爱因斯坦称为“原理理论”的相对论不会例外,也并不例外。

爱因斯坦相对性原理的宇宙学疑惑

在暗宇宙以及宇宙在加速膨胀、渐近于德西

特空时的观测事实基本被确认之后,著名弦理论家威腾指出:“局域粒子物理量在德西特空间中不能如通常那样具有精确意义。”^[2]其实,有关问题早已存在,不过由于德西特宇宙没有渐近平坦空时区域,问题更加尖锐。

这就是在相对论体系中,相对性原理和宇宙学之间的不协调。事实上,这也反映了爱因斯坦狭义相对论的空时观念与宇宙学的空时观念之间的不协调。

按照相对性原理,与引力无关的物理规律在惯性系之间的彭加勒变换(2)之下不变。彭加勒变换(2)中有10个参数:空时平移 a^μ 包括4个参数, L^μ 中包括6个参数:3个由速度确定的推进和3个空间转动。爱因斯坦认为,这些惯性系没有自身的优越速度,空间和时间都不存在特殊的方向。在相对论中,空时测量、同时性定义以及一些基本的物理量的定义,全都基于彭加勒不变性。在相对论性经典力学和量子力学中,能量、动量和质量的定义和守恒,以及质能公式等,都与空时平移密切相关。在相对论性场论中,情况同样如此。用数学的语言来说,不同的场属于彭加勒群不同的不可约表示;这些表示以彭加勒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。只要不管引力和宇宙学效应,闵氏空时和彭加勒不变的物理理论与所有实验和观测符合。

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,或者测量这些相互作用的效应,就会出现问題。河外星系的红移表明空间具有优越速度并暗示宇宙在膨胀;宇宙膨胀又给出时间箭头。微波背景辐射大体上可以代表宇宙背景空间的性质,不过要扣除我们的实验室对于微波背景辐射的“漂移”。这类实验和观测结果的分析表明:在大尺度下,宇宙背景空间近似是均匀的和各向同性的,具有6个参数的变换群;宇宙背景空时的度量是弗里德曼-洛伯孙-沃克度量:

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R(t) \left[\frac{dr^2}{1 - kr^2} + r^2 (d\theta^2 + \sin^2 \theta d\phi^2) \right] \quad (5)$$

这个度量依赖于标度因子 $R(t)$ 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 $k = -1, 0, 1$;标度因子仅依赖于宇宙时

, $R(t)$ 的形式以及 k 的取值由宇宙物质的能量-动量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;按照彭加勒群的不可约表示对于物质场的区分和有关物理量的定义失去严格的意义。

著名学者邦迪早在上个世纪60年代初就明确提出,“在宇宙学和通常的物理学之间,看来存在着明显的冲突。”^[3]微波背景辐射发现以后,问題更加突出。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”^[4]。

但是,在相对论体系中分析宇观效应的数据,仍然采用以相对性原理和彭加勒不变性为基础的物理量和物理规律。这就出现了问題:在什么意义下可以这样做?它的近似程度如何?在相对论体系中二者如何协调?

事实上,一切实验和观测都是在观测宇宙之中进行的,如果找不到观测宇宙所近似满足的宇宙学原理和惯性系所满足的相对性原理之间的关系,由相对论引申出来的观念和理论在宇观尺度上就会失去严格的基础。更何况,物理学当前的一个重要趋势,是将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。所以,必须解决相对性原理与宇宙学间的不协调。然而,这在爱因斯坦的相对论体系中却难以做到。

事实上,这种不协调甚至可以追溯到伽利略。在他的划时代巨著《关于托勒密和哥白尼两大世界体系的对话》(1632年)中,伽利略论述了在平静水面上静止或平稳匀速航行的大船中,人们通过在船舱内的任何实验和观测,都无法发现大船是在静止还是在航行。他以此来反驳托勒密学派对于哥白尼学说的非难:如果地球在绕着太阳转动,为什么我们丝毫没有觉察?这就是后来称之为伽利略相对性原理的著名论述。但是,伽利略要求:“把你和你的朋友关在大船甲板下的主舱里面。”换句话说,实验者不能向外观望。显然,如果向外观望,就可以从大船与岸边的相对运动,或者通过天文观测,来判断大船的运动状态。然而,如果存在“以太漂移”,即使在封闭的船舱内,也能够判断大船的运动。其实,以伽利略相对性原理为基础的牛顿力学体系,无法建立自洽的宇宙图景,因而也无法解决这些不协调。

不过,这种不协调却值得深究.自然界是统一的,反映基本自然规律的基本原理之间应该相互协调;因此,应该存在排除这种不协调的空间-时间和宇宙的理论描述.从这个角度看来,宇宙学原理应该成为作为相对性原理基础的惯性运动的保障或者起源;同时也会在满足相对性原理的惯性系中,“挑选”出相对宇宙背景静止的一类“优越”惯性系.或者说,消除这两个原理的不协调,有可能在给出惯性运动的宇宙学起源的同时,回到存在一类“优越”惯性系的观点.当然,这并不意味着回到牛顿,因为牛顿体系根本不能建立自洽的宇宙图景;也不意味着回到洛伦兹和彭加勒,因为这里不仅没有以太及其“动力学”效应,而且宇宙根本就没有渐近平坦局域.

或许可以这样来“协调”这两个基本原理:通过一些天文或宇宙学观测,可以得到局域洛伦兹参考系相对于共动参考系的“漂移”速度,扣除这一速度,就可以得到一类与共动参考系相对静止、时间方向一致的局域洛伦兹参考系;这类洛伦兹参考系就是与共动参考系或者宇宙背景相对静止的“优越”参考系;而相对于这类参考系运动的局域洛伦兹参考系,其运动速度恰恰就是对于共动参考系或者宇宙背景的“漂移”速度.这样,与宇宙学原理相互“协调”的局域洛伦兹参考系,在一定程度上就似乎相对于“绝对空间”静止的参考系;不过,不是绝对空间和绝对时间,也没有“以太”,而是宇宙背景和宇宙时标.换言之,存在一类“优越”惯性系的相对性原理,反而与现代宇宙学并不那么尖锐地不协调.但是,并没有据此建立相应的引力理论,更谈不上给出自洽的宇宙图景.而在广义相对论中,局域洛伦兹参考系并没有空时平移,在局域的意义,并没有完整的相对性原理.因此,问题依然存在.当然,这些都超出了爱因斯坦的相对论体系和相应的空时观念.

其实,早在马赫对牛顿绝对空间的批判中,已经隐含地提出了应该消除这一不协调的要求.针对惯性运动和惯性系,马赫提出,质点不是相对于绝对空间,而是相对于宇宙运动:“如果我们说,物体保持其在空间的方向和速度不改变,我们的这一断言只不过是相对于整个宇宙的简略说法.”“我们怎么能够确定这样的参照系?只能参照于宇宙中的其他物体.”^[5]这就隐含着这样的思想:应该建立自洽的宇宙图景;而且,相对性原理与宇

宙图景之间,应该相互协调.否则,马赫的观点就毫无意义.

暗宇宙的一个启示:马赫原理及其推论

马赫对于牛顿力学和绝对空间、绝对时间的评述,涉及的问题很多,往往又缺乏确切的概念和明确的数学表述;因而,后人对于马赫原理的叙述自然会有所不同,但大都并非马赫的原意.其实,我们可以而且应该把问题首先限制在惯性运动和惯性系的起源上.

一方面,观测并不支持马赫关于“惯性质量起源于全部遥远星系对物体的作用”的观点;另一方面,物理学的发展,特别是量子物理的发展表明,惯性质量的起源至今虽然是一个没有根本解决的重大问题;但却可以肯定并非全然来自相对运动和引力.例如,在具有引力势的薛定谔方程中,惯性质量与引力质量地位不同;因而,二者的起源也不应相同.电子的物理质量,是通过电磁场自作用,并经过“质量重整化”的结果,虽然与“真空”的性质密切相关,但在通常的能量标度下,与引力并不相干.三代夸克-轻子谱也说明了这一点:各代的夸克或轻子,除了质量之外的所有其他量子数都相同,质量的不同怎么会仅仅与相对于宇宙的运动和引力作用有关呢?弱作用中间玻色子的质量来源于对称性破缺.超导中库珀对的有效质量和能隙,虽然与相对于环境的运动和相互作用有关,但同样与引力毫不相干.因而,惯性质量应该与物质形态自身的内在性质、与环境(包括真空)的相互作用等密切相关.而惯性运动却不然;静止质量为零的光子,也可以光速进行惯性运动.

惯性运动和惯性系的起源与“局部惯性运动”和广义相对论中“局部惯性系”的起源,也应有所区别.其实,描述有引力存在的空时,应该时时处处局域地存在狭义相对论.这应该是等效原理的实质.换言之,“局部惯性运动”和“局部惯性系”应该是惯性运动和相应的惯性系局域化的结果.没有引力时有什么惯性运动,存在引力时就应该有相应的“局部惯性运动”.在广义相对论中,与等效原理相关的测地线运动,就是一类“局部惯性运动”.不过,广义相对论对惯性运动的局域化是不完全的,没有考虑彭加勒变换中空时平移的局域化.

基于宇宙是暗的观测结果,如果把惯性质量的起源问题与惯性运动的起源问题区分开来,马赫有关惯性运动是相对于“整个宇宙”的观点,可以表述为一个原理,称之为暗宇宙的马赫原理^[7]:惯性运动和相应的局部惯性运动,应该主要由暗物质,暗能量或宇宙常数决定;在大范围内,星体和通常的物质的作用是微小的.后者(与暗物质一起)作为局部引力场的源,对局部运动应起更大作用.这是暗宇宙的一个重要启示.

无论这个暗宇宙的马赫原理正确与否,都有一个关于惯性运动及其起源的逻辑推论:对于没有任何物质,仅仅存在最简单的暗能量(宇宙常数)的“空”的德西特空时,应该存在惯性运动,而且,这类惯性运动的起源就是宇宙常数.

由我国著名学者陆启铿首创的德西特和反德西特不变的相对论表明,德西特和反德西特空时恰恰具有这样的性质.但是,这已经超出了爱因斯坦的相对论体系.

暗宇宙的另一启示:德西特相对性原理及其宇宙学意义

既然在一类参考系中“刚性量杆”服从欧氏几何在本质上是一个假定;既然爱因斯坦相对性原理与宇宙学并不协调;既然观测宇宙在加速膨胀、很可能渐近于德西特空时;既然暗宇宙启示我们马赫关于惯性运动起源的观点应该重新表述,而且德西特和反德西特空时中可能存在惯性运动,宇宙常数应该是其起源;那么,为什么不考虑放弃“刚性量杆”服从欧氏几何这一假定,仿照罗巴切夫斯基和高斯,用更大尺度上的观测来确定“刚性量杆”的几何特征呢?这是暗宇宙的另一重要启示.

其实,我国著名学者陆启铿早就建议,应该把惯性运动和惯性系的观念以及相对性原理推广;这与“刚性量杆”服从什么几何的问题密切相关.随后,他与合作者把狭义相对论推广到了德西特和反德西特空时^[7].最近,受到观测的推动,我国学者又进一步开展了有关的研究工作^[6,8].

德西特不变的相对论

惯性定律、惯性运动和惯性系的观念,以及相对性原理,可以推广到德西特和反德西特空时吗?完全可以.

相对性原理的表述与彭加勒或爱因斯坦的相对论原理一致:在惯性参考系中,不考虑引力的物理定律形式相同.这个原理与彭加勒或爱因斯坦的相对性原理的不同,在于惯性参考系的变换群不同:从彭加勒群 $ISO(1,3)$ 变为德西特群 $SO(1,4)$,或者反德西特群 $SO(2,3)$.

光速不变原理则要推广为普适常数原理^[6]:在惯性参考系中,具有光速 c 和曲率半径 R 这两个普适常数.

这样,与具有彭加勒不变性的相对论相应,以这两个原理为基础,可以建立在德西特变换或在反德西特变换下不变的相对论.而当曲率半径 R 趋于无限时,德西特变换或反德西特变换都“收缩”为彭加勒变换.这两个原理也回到爱因斯坦相对论的两个原理.

值得注意的是,在具有这两种相对论的德西特和反德西特空时中,相对性原理和宇宙学原理之间存在着内在联系,宇宙常数恰恰起着惯性运动起源的作用.这正好映证了前面提出的暗宇宙中的马赫原理的逻辑推论.不过,这里的宇宙学原理的对称性仍然是德西特或反德西特群.

在这两种空时中,为什么会存在惯性运动、惯性系和相对性原理呢?

前面提到,与欧氏几何基本平权,存在常曲率空间的黎氏几何和罗氏几何.在这些几何中,都存在点、线和面,存在直线;不同之处在关于平行线的第五公设.因此,物理测量中的“刚性量杆”以及标准钟的固有时,既可能服从欧氏几何,也可能服从黎氏或罗氏几何.在通常的相对性原理中,假定了前者.如果放弃这一假定,要求通过实验和观测来确定“刚性量杆”以及标准钟的固有时所服从的几何,那么就应该有与这三种基本平权的几何相对应的三种相对性原理.由于这三种几何分别是零、正和负的常曲率空间的几何,零曲率对应于闵氏空时,德西特和反德西特空时分别具有正和负的常曲率,因此,在后二者中就应该存在相对性原理.

还可以从场论中常用的维克转动来看.通常的维克转动,是把闵氏度量“转为”欧氏.如果从4维欧氏、黎氏和罗氏空间出发,作反维克转动,这三种空间就分别成为闵氏、德西特和反德西特空时,前者中的点和直线,分别成为后者中的事件和直的世界线.由于在闵氏空时中,世界线为直线的

运动恰恰是匀速直线运动,即惯性运动;那么,在德西特和反德西特空时中,沿这类直的世界线的运动是否也是匀速直线运动呢?答案是肯定的.因此,在德西特和反德西特空时中存在惯性运动,相应的参考系是惯性系.

其实,贝特拉米曾经提出罗巴切夫斯基几何的模型,后来由克莱因所完善.在这个模型中,测地线恰恰是直线.一个直观的图像是绘制地图时常用的球心投影:通过球心投影,3维欧氏空间中的2维球面上的大圆(在球面几何中就是测地线),用映射到切于南极或北极的平面上的坐标表示,就成为直线;限制在球面上的3维欧氏度量就映射为贝特拉米度量.

德西特空间 $H^{1,3}$ 是常曲率空间,可以表示为在5维闵氏空时 $M^{1,4}$ 中的“伪球面”:

$$\begin{aligned} H^{1,3}: \\ g_{AB} = -R^2, \\ (g_{AB})_{A,B=0,1,2,3,4} = \text{diag}(1, -1, -1, -1, -1); \\ ds^2 = g_{AB} dx^A dx^B \end{aligned} \quad (6)$$

这里 R 是德西特空时的曲率半径.显然,这些关系是在德西特群 $SO(1,4)$ 的变换下不变的,因为形象地说 $SO(1,4)$ 就是 $M^{1,4}$ 空时的“旋转”,而 g_{AB} 是 $M^{1,4}$ 中矢径 A 的“长度”.

有趣的是,对于在 $H^{1,3}$ 中运动的质量为 m 的粒子,可以引进一组可观测量

$$\hat{L}^{AB} := m \left(x^A \frac{dx^B}{ds} - x^B \frac{dx^A}{ds} \right) \quad (7)$$

它们可以称作是5维空间中的“角动量”,并满足关系

$$-\frac{1}{2R^2} \hat{L}^{AB} \hat{L}_{AB} = m^2 c^4, \quad \hat{L}_{AB} := \epsilon_{ACBD} \hat{L}^{CD} \quad (8)$$

在 $H^{1,3}$ 中,考虑自由粒子的“匀角动量”运动,满足

$$\frac{d\hat{L}^{AB}}{ds} = 0 \quad (9)$$

它们的轨迹在 $M^{1,4}$ 中看来就是伪球面上的“大圆”.为了描述这类运动,需要定义同时性.由于在这里, x^0 是类时坐标,因此,事件 A 与 B “同时”的充要条件是

$$x^0|_A = x^0|_B \quad (10)$$

值得注意的是, x^0 相同也意味着固有有时 s/c 相同,所以这个同时性就是固有时的同时性.

考虑4维黎曼几何的贝特拉米模型,取其反维克转动,恰恰得到德西特空时的贝特拉米度量,

我们称这样的空时为贝特拉米-德西特空时.首先引入贝特拉米坐标

$$x^\mu = R \frac{\mu}{4}, \quad \mu = 0, 1, 2, 3 \quad (11)$$

这就是 $H^{1,3}$ 的球心投影给出的坐标. $\mu = 0$ 表明,只用一个坐标邻域来描述整个贝特拉米-德西特空时是不够的,要有多个坐标邻域才能做到^[6].在贝特拉米坐标下, $H^{1,3}$ 的度量和伪球面条件分别变为

$$\begin{aligned} ds^2 &= (g^{-1}(x))_{\mu\nu} + R^{-2} (g^{-1}(x))_{\mu\nu} x^\mu x^\nu dx^\mu dx^\nu, \\ (g^{-1}(x))_{\mu\nu} &:= 1 - R^{-2} x^\mu x^\nu > 0 \end{aligned} \quad (12)$$

这个度量是在德西特群 $SO(1,4)$ 的分式线性变换下不变的:

$$\begin{aligned} x^\mu \rightarrow \tilde{x}^\mu &= \frac{\sqrt{(a)}}{(a, x)} D^\mu (x - a), \\ (a, x) &:= 1 - R^{-2} a x; \\ D^\mu &= L^\mu + \frac{R^{-2}}{(a) + \sqrt{(a)}} a a L^\mu, \\ (L^\mu) &SO(1,3) \end{aligned} \quad (13)$$

值得注意的是,由于放弃了欧氏假定,“空时平移”不再成为德西特群的子群,所以狭义相对论中的爱因斯坦“质-能公式”需要推广.可以证明,推广的爱因斯坦公式正是(8)式,它现在写为

$$E^2 - p^i p_i - \frac{1}{2R^2} L^\mu L_\mu = m^2 c^4 \quad (14)$$

这里,能量 E , 3-动量 p^i , 4-角动量 L^μ 共同构成了前面引进的5维角动量:

$$E := m (x)^{-1} \frac{dx^0}{ds} = p^0,$$

$$p^i := \hat{L}^{Ai} = m (x)^{-1} \frac{dx^i}{ds}, \quad i=1,2,3; \quad p_\mu = g_{\mu\nu} p^\nu;$$

$$L^\mu := \hat{L}^{\mu\nu} = x^\mu p^\nu - x^\nu p^\mu, \quad L_\mu = g_{\mu\nu} L^\nu \quad (15)$$

当德西特曲率半径 R 趋于无限时,所有这些公式都回到狭义相对论.

可以证明,对于沿着贝特拉米度量的测地线运动的自由粒子,这些物理量都是守恒量;反之亦然.进而, p^i 与 p^0 之比恰恰给出

$$\frac{dx^i}{dt} := v^i = \text{const.} \quad i=1,2,3 \quad (16)$$

这表明,这些自由粒子的坐标速度为常数.因此,在贝特拉米-德西特空时中存在惯性运动,贝特拉米系统是惯性系.

然而,爱因斯坦的相对论体系却难以容纳这一基本事实:按照广义相对论,空时一旦弯曲就意

味着出现了引力,就只存在局部惯性运动和局部惯性系,不再存在惯性运动和惯性系.这怎么解释呢?

在德西特相对论中,具有两种时间标度:贝特拉米坐标时在和贝特拉米系统空间原点静止的惯性观测者的固有时.可以证明,二者之间的关系为

$$c = R \sinh^{-1} (R^{-1} \cdot^{1/2} (x) x^0), \quad x^0 = ct \quad (17)$$

这样,就有两种同时性:贝特拉米时间坐标 $x^0 = ct$ 相同的同时性,以及固有时 相同的同时性.在球心投影之后, $H^{1,3}$ 上的这两种同时性不再一致.坐标 0 的同时性,投影为贝特拉米时间坐标 $x^0 = ct$ 的同时性,描述惯性运动和惯性系,以满足相对性原理的要求.至于固有时同时性,同样应该存在,然而这类同时性不再描述惯性运动.那么,这类同时性描述什么运动呢?

德西特相对论的宇宙学意义:惯性运动起源、闭宇宙、熵界和全息原理

如果取前面提到的那类标准钟的固有时为新的时间坐标,贝特拉米度量立即变为

$$ds^2 = c^2 dt^2 - R(\cdot) d\tilde{h}^2, \quad R(\cdot) = \cosh^2 (R^{-1} c) \quad (18)$$

其中, $d\tilde{h}^2$ 是半径为 R 的 3 维球面的贝特拉米度量.显然,这个度量是弗里德曼-罗伯孙-沃克型度量,不过相当于 $k=1$ 且标度因子是固定的.这个度量尽管仍然在德西特群的变换下不变,在形式上却满足宇宙学原理,恰恰与常曲率空时中的宇宙学观测的要求一致.换言之,如果取静止惯性观测者标准钟的固有时 为时间坐标,贝特拉米度量就变为弗里德曼-罗伯孙-沃克型的度量;同时,惯性观测者也就成为共动观测者.

这样,这两种时间的关系(17)式以及相应的同时性的关系,就给出相对性原理和宇宙学原理之间的联系,恰恰映证了暗宇宙中的马赫原理的逻辑推论.于是,宇宙学原理或者宇宙常数,就成为惯性运动的起源或者其存在的保证.当然,在没有与宇宙学的观测相联系之前,这仅仅是一种模型.

形象地说,对于贝特拉米-德西特空时中的观测者,他们有一种刻有两种时间标度的计时器,一种是惯性系的坐标时,另一种是标准钟的固有时.进行局部实验时,他们只记坐标时;因而,所有的规律都与相对性原理的要求相吻合;他们是惯性观测者.进行宇宙学观测时,他们则只记标准钟的

固有时,同时,他们也就从惯性观测者变为共动观测者.

对于反德西特空时,同样可以建立类似的模型.

由于闵氏空时是贝特拉米-德西特空时的曲率半径 R 趋于无限时的退化情形,因而,洛伦兹-彭加勒理论和爱因斯坦相对论的若干重要结论应该作为极限情形,包含在德西特相对论中;不过,并没有原来意义上的“以太”.而且,一旦回到极限情形,这两种同时性就合而为一,相对性原理与宇宙学原理之间的内在关系,也就无法显示.

观测表明,我们的宇宙渐近于德西特空时.如果把贝特拉米-德西特空时的曲率半径与观测的宇宙常数相联系,即取 $R = (3 \cdot^{-1})^{1/2}$;那么,德西特相对论就应该是描述不考虑引力的大尺度物理的出发点.这样,我们的宇宙空间应该渐近于一个 3 维球面,只不过半径很大,与德西特空时的曲率半径 R 同一量级.这是一个重要的,可以通过观测来检验的推论.同时,也与爱因斯坦 1917 年的猜想一致.不过这样一来,观测宇宙也就在满足相对性原理的贝特拉米-德西特空时中,“挑选”出了一类相对于宇宙背景静止的“优越”的惯性系.

有趣的是,如果此时再取 R 趋于无限,即宇宙常数趋于零时的极限,回到闵氏空时;那么就仍然存在一类相对“优越”的惯性系,从而回到没有“以太”却具有“优越”惯性系的理论,而不完全是爱因斯坦相对论.当然,这并不意味着回到牛顿的绝对空间和绝对时间,也不意味着回到“光以太说”;尺缩钟慢仍然是运动学效应,而不是动力学效应.不过,在一定程度上,可以把这些看成是存在宇宙常数(或者最简单的暗能量)的“后果”.

还可以考虑与相对论的牛顿极限 $c \rightarrow \infty$ 相对应的牛顿-胡克极限 $c \rightarrow R$.然而牛顿-胡克常数 $:= c/R$ 固定^[9].尽管此时空间和时间分离,但是相应的牛顿-胡克空间-时间并非牛顿的绝对空间和绝对时间,变换群也不是伽利略变换群.有意义的是,在这里仍然存在牛顿-胡克相对性原理,存在惯性运动、惯性系和惯性定律;存在坐标同时性与固有时同时性,并且与贝特拉米-德西特空时类似,前者与牛顿-胡克相对性原理的要求一致,后者与牛顿-胡克宇宙学一致.在这个意义上,牛顿-胡克常数 $:= c/R$ 也起着惯性运动起源的作用.

不仅如此,如果观测到的宇宙确实渐近于德西特空时,那么按照这里介绍的有关理论,贝特拉米-德西特空时对应的弗里德曼-罗伯孙-沃克类型的度量,就会提供观测宇宙的熵界,而且,这与近来提出的全息原理的猜想在一定意义上是一致的。

从贝特拉米坐标时与固有时的关系(17)式出发,经过维克转动把他们变为虚时间,就得到:

$$\dot{x}^{1/2}(x)dx^0 = R \sinh(R^{-1}ct) \quad (19)$$

由于贝特拉米时间轴是直线,虚的贝特拉米坐标时轴也应该是直线,因而没有周期。但是,虚固有时则有周期。按照虚时格林函数理论,虚时周期的倒数就是温度。假如这里仍然可以采取这一结论,那么,贝特拉米-德西特空时及其视界的温度为零,而弗里德曼-罗伯孙-沃克型的度量(18)式及其视界就有温度

$$T_H = (2R)^{-1} \quad (20)$$

这一结果恰恰与静态德西特宇宙视界的温度一致。由于视界的2维类空截面为-2维球面,其面积为 $A = 4R^2$ 相应的面积熵为

$$S = A/4 = R^2 \quad (21)$$

这与静态德西特宇宙视界的熵也一致。与此相反,贝特拉米-德西特空时的视界没有温度,因而也没有熵的概念。照我们的理解,这是由于在贝特拉米-德西特空时中存在惯性运动,因而没有引力。但是,弗里德曼-罗伯孙-沃克型的度量(18)式和静态德西特宇宙中虽然也没有“引力”却有惯性力,观察到的“引力效应”应该是惯性力效应。温度和熵也是一样。所以,这些德西特空时中的热力学,实际上与黑洞热力学非常不同;却与闵氏空时与 Rindler 空时之间的热力学性质相似。^[10]

如果观测宇宙的加速膨胀,并趋于德西特空时,其度量就应该趋于弗里德曼-罗伯孙-沃克型的度量(18)式,后者(具有非引力起源的)面积熵恰恰给出(具有引力的)观测宇宙的熵界。由于视界可以作为是否具有因果联系的边界,这就在因果联系的意义,与全息原理关于边界全息地反映内部的猜想一致。当然,这些都是暗宇宙给我们的启示的延伸。

总之,我们看到,贝特拉米-德西特空时中的德西特相对论及其宇宙学意义;这已经超出了爱因斯坦体系。当然,相应的引力理论和宇宙论的细节都还有待进一步建立。

应该指出,在这里宇宙常数是作为基本常数来对待的。简单的量纲分析指出:由这个常数、光速、牛顿引力常数和普朗克常数,可以得到一个无量纲常数,它应该是引力特征的一个表达,其量级是10的负120次方。有趣的是,这个量级恰恰就是把宇宙常数作为“真空”能量的估算中,观测值与理论值的巨大差异。

当然我们也可以进一步再问:宇宙常数(或者上述的无量纲常数)的起源是什么?与其他基本常数或其他无量纲常数的起源一样,这个问题是更为基本的,需要更加深入的研究。

德西特相对论的实验与观测检验

德西特不变的相对论是否正确,必须经过实验与观测的检验。其实,我们已经提及了两类有关的检验。

一是观测宇宙的渐近行为。如果德西特相对论的弗里德曼-罗伯孙-沃克型度规的确描述观测宇宙的渐近行为,并将参数 R 与观测宇宙的宇宙常数值相联系;那么,观测宇宙应该是一个闭的3维球面,其偏离平坦的程度非常小,仅仅为宇宙常数的量级;这是一个重要的预言。这虽与标准宇宙模型不同,却与2003年美国发射的威尔金森微波各向异性探测器(WMAP)第一年的数据是一致的;而且,很可能得到进一步的数据的支持。

另一类检验与考察是否存在一类相对于宇宙背景静止的“优越”的惯性参考系的实验有关。这是因为,如果与观测宇宙的渐近行为相联系,当 R 趋于无限时,德西特相对论的退化形式应该是存在宇宙背景静止的“优越”惯性参考系的理论,而不完全是爱因斯坦狭义相对论。当然,这并不意味着完全回到牛顿的绝对空间和绝对时间;但是,存在一类相对宇宙背景静止的“优越”惯性系。因此,区分是否存在这类相对“优越”的惯性参考系的任何实验,在这个意义上,都是检验德西特相对论的实验。

有没有其他直接或者间接检验德西特相对论的实验和观测呢?毫无疑问这是一个非常重要的问题,需要继续深入研究。

爱因斯坦强调,相对论“并不是起源于思辨;它的创立完全是要使物理理论尽可能适应于观测到的事实。”“同空间、时间和运动有关的概念,

(下转第25页)

注意掌握管理的人本原则,承认教师教学的个性特征,充分肯定教师对教学研究的投入。

学校对教学改革的重视程度体现在系列相关政策上。现今我校颁布的关于专业技术职务评聘的通知进一步强化了鼓励教师参与教学改革的政策,允许教师有一篇教学研究论文可提升一档予以承认。我系依托国家工科物理课程教学基地的建设,将教学研究作为对教师的基本要求,将参与教改项目作为教师的考评依据之一。学校和院系有利于改革的政策,极大地调动教师研究教学投身改革的积极性。

教师教学的评价也包括三个方面,主要表述如下。

1) 教学业务 教师是否按照基本要求进行教学,是否不断学习、关注物理学的前沿与发展,积极提高自己业务能力和信息技术能力;

2) 研究能力 是否积极参加教学改革研究,能团结同事和学生共同进行有一定价值的教学课题研究;

3) 敬业精神 是否充分能利用已有教学条件,并积极为学生创造个性发展的学习条件,满腔热情帮助每位学生在知识、能力、素质上获取最大可能的进步。

在全面创建现代化的探究型大学物理课程体系,我们建设精品课程。这是一项涉及人的艰巨的工作,来不得半点浮躁。我们十分注意改革的坚定性、渐进性和策略性,把握推进节奏,营造平和与进取的研究氛围。我们在工作中提出了意识先行、政策保证、技术支持、手段科学等推广发展探究型学习引导的思路与措施。我们认为教学改革的深入发展与推广必须符合中国国情,必须科学设计教学环节,在不断提高教师自身素质,健全教学组织的基础上,以现代教育技术支持教学改革、共享教育资源、整合教育信息,创造全国物理学习探究大环境,使物理探究型学习的研究与实践得以在中国可持续发展。

(完)

(上接第 15 页)

决不能认为是随意的,而只能认为是由观测到的事实所决定的。”(《关于相对论》,1921年)这无疑至理名言。我们今天面对“加速膨胀的暗宇宙渐近于德西特时空”这个“观测到的事实”,重温这一名言是很有意义的事情。

总结以上的论述,我们从观测事实所引出的思考是:应该考虑放弃相对性原理中的欧氏假定,建立基于德西特时空的相对论、引力理论和宇宙论;深入考查、认真分析和实践实验与观测的检验。这就是暗宇宙给我们的重要启示。

作者感谢与陆启铿、邹振隆、黄超光等教授和田雨、周彬等博士的早期和近期的有意义的讨论与富有成果的合作和讨论。本工作得到了国家自然科学基金的部分支持(批准号 10375087, 90103004, 90503002)。

参 考 文 献

- [1] A. Einstein. *Ann. d. Physik*, **18** (1905) 639-641
- [2] E. Witten. Quantum gravity in de Sitter space, hep-th/0106109
- [3] H. Bondi. *Physics and cosmology*, *Observatory* (London),

82 (1962) 133

- [4] P. G. Bergmann. *Cosmology as a Science*, *Found. Phys.* **1** (1970) 17
- [5] E. Mach (1883). *Die Mechanik in Ihrer Entwicklung Historisch-Kritisch Dargestellt* (1912) *Broc. Leipzig. The Science of Mechanics-A Critical and Historical Account of Its Development*, (1966) La Salle, Illinois
- [6] H.-Y. Guo, C.-G. Huang, Z. Xu and B. Zhou. *Phys. Lett. A* **331** (2004) 1; 郭汉英,黄超光,田雨,徐湛和周彬. *物理学报*, **54** (2005) 2494; H.-Y. Guo, C.-G. Huang, Z. Xu and B. Zhou. *Chinese Phys. Lett.* **22** (2005) 2477
- [7] 陆启铿. 为什么一定要用闵氏度量? (1970) 未发表; 陆启铿、邹振隆、郭汉英. *物理学报*, **23** (1974) 225; 郭汉英. *科学通报*, **22** (1977) 487; 邹振隆, 陈建生, 黄珊, 张历宁, 郭汉英. *中国科学* (1979) 588; 陆启铿, 邹振隆, 郭汉英. *自然杂志增刊, 近代物理* **1** (1980) 97; H.-Y. Guo, *Nucl. Phys. B* **6** (Proc. Supp) (1989) 381
- [8] Q. K. Lu. Dirac's conformal spaces and de Sitter spaces, in memory of the 100th anniversary of Einstein special relativity and the 70th anniversary of Dirac's de Sitter spaces and their boundaries, MCM-Workshop series. Vol. **1**. March, 2005
- [9] Y. Tian, H.-Y. Guo, C.-G. Huang, Z. Xu and B. Zhou. *Phys. Rev. D* **71** (2005) 044030
- [10] H.-Y. Guo, C.-G. Huang and B. Zhou. *Europhys. Lett.* **72** (6) (2005) 1