

时间标度与甚早期宇宙疑难问题

汪克林¹ 曹则贤^{2,†}

(1 中国科学技术大学应用物理与天文系 合肥 230026)

(2 中国科学院物理研究所 北京 100190)

摘要 注意到绝对时间和绝对温标分别是在牛顿第二定律和卡诺定理引理成立的前提下所确立的时标和温标, 则引力理论方程与大统一理论的动力学方程, 比如关于电磁学的麦克斯韦方程组, 可能实际上也规定了两个不同的时标. 大统一理论时标和引力时标之间在宇宙演化历史不同时期的差异也许能为最近的一些宇宙学观测提供合理的解释. 文章将表明, 如果两者之间存在合适的差异, 则视界问题可以得到自然的解决而暗能量概念的引入也变得没有必要. 考察距离观察者不同远近的双星体系中由引力行为决定的转动周期和由大统一理论决定的某个衰变动力学过程特征时间, 比如来自 X 射线双星体系的 X 射线辐射, 比照两者在宇宙不同历史时期的差异, 或能为我们的猜想提供观测证据.

关键词 时间标度, 动力学方程, 大统一理论, 引力, 视界问题

Time scales and their implication to some problems concerning the very early universe

WANG Ke-Lin¹ CAO Ze-Xian^{2,†}

(1 *Department of Applied Physics and Astronomy, University of Science and Technology of China, Hefei 230026, China*)

(2 *Institute of Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China*)

Abstract In recognition of the fact that the absolute temperature and Newton's absolute time only gain meaning with respect to the physical laws wherein they are introduced and thus defined, we speculate that the theory of gravitation and the grand unified theory may imply two differing time scales that might manifest their difference in the history of the Universe. With a proper incongruity between the two time scales, the horizon problem may find a solution in a rather natural way, and the concept of dark energy may become dispensable. A mutual reference of the period of revolution for a binary star system versus the decay time of some physical processes thereon governed by the grand unified theory, say the X-ray emission from X-ray binaries, and measured in such a system at various distances from now, is anticipated to provide an observational verification to the speculation.

Keywords time scale, dynamical equations, the grand unification theory, gravity, horizon problem

1 引言

在自然科学发展的早期, 人们把时间当作是一种独立于自然规律的绝对存在, 今天人们已注意到事实并非如此. 时间, 或者确切地说关于时间的具体

观念与描述, 是内置于动力学方程和时空结构中的. 虽然理论发展的实际脉络是我们依据模糊的时间认识达成了今天我们所接受的物理定律的形式, 但这

2009-03-20 收到

† 通讯联系人, Email: zxcao@aphy. iphy. ac. cn

不妨碍对如下物理事实的认知,即:是对物理规律的选择决定了对时间性质的选择.所谓的牛顿绝对时间,就是让牛顿第二定律成立的时间;可以说是我们选择了牛顿第二定律,才在此基础上以数学形式定义了所谓的牛顿绝对时间,才赋予了绝对时间以具体的物理内容.由牛顿第二定律支配的周期运动所提供的时间,是经典力学语境中的好时间(good time). Magueijo 指出,牛顿第二定律是告诉你,根据某些尺规和时钟这个定律会成立.它没有强迫你使用这个定律,也没告诉你这将由实验能证明^[1]. 惠勒也曾明确指出,时标的选择就是要使得物理定律是简单的,现在从物理学之外给入的时间将来也可以从物理学中推导出来^[2].

时间总是由具体的动态体系提供的.用运动才能将时间数字化,而这个数字化方案,取决于我们所选择的体系将时间同可测量的运动量相联系的动力学方程(以对时间微分的形式出现). Reichenbach 强调正确的时间概念应该表现在关于自然的数学物理方程里,就是这个意思^[3]. 可以作为时钟的某个具体物理事件的滴答声,是以在该理论的框架里滴答声的周期性为前提的.

我们对物理定律形式的选择一直受简单性原理的指导,这也是爱因斯坦所一直坚持的原则.但物理学是由通过不同模式、从不同侧面得来的一些物理定律所支撑的,整体上的自洽性是对物理学最终形式的强约束.如何调适各个领域中的物理定律,以便在统一的、自洽的概念基础上构成一套完备的理论,是一个当前可以也应该考虑的问题.其中,一个值得仔细考察的重要概念就是时标.

本文所谈及的时标(time scale),不是一般意义上的关于时间单位的选择,类似摄氏温标同华氏温标这样的关于一个线性变换等价的两种标尺,而是基于物理定律的选择所确立的关于时间的标度,它包括关于一个物理参数所应具有的空间和测度两方面的内容,是一个具有空间结构的讨论对象.我们所谈论的时标的校准,不是指遵照同一物理规律动力学时标的两个钟表之数值上的校准¹⁾,也不是狭义相对论式的计时钟零点的校准,而是不同物理动力学所决定的、具有相异结构的标准时标之间的校准.

为了避免歧义,我们多赘述几句.时标,同温标一样,不只是具有数值上的意义,更重要的是它还具有拓扑^[4]或几何上的意义.比如,牛顿的绝对时间,没有起点,没有终点,均匀地流淌着,因此它具有实数轴 R^1 的结构.而绝对温标,则不包括零点的正

半实数轴有相同的拓扑结构.前者同牛顿第二定律相联系,而后者同热力学第二定律和卡诺定理的引理相联系.本文中讨论的时标,是同物理学基本定律形式的选择相联系的一个有结构的物理量;对这个时标的任何线性变换不带来新的物理,因此同线性变换相联系的所谓不同时标的概念,英文为 time standard,不在本文讨论的范围.也就是说,我们所关切的是时标之英文词 time scale 更多地同 metric 贴近的意义,研究的是由不同动力学方程所规定的时标结构之比较.

关于时间是在确立了使用它的动力学方程时才规定了它的结构这一观点,虽然来得很晚,却也很好理解.任何物理事件在我们具有自洽的理论之前都不先天具备作为钟表的资格,但我们又需要时间的概念来构造我们的理论.这样,理论的自洽性必定是在一个演化和自我完善的过程中得以实现的.如今,电磁、强和弱相互作用已可以由大统一理论来描述,引力也有了自己的一套理论.有必要审视一下理论物理中所使用的各种时间的内在结构了.

我们认识到,实际上是选择物理定律的形式决定了我们有什么样的物理学;而时空的标度是第二位的事情.在思考时间被引入物理学理论中的方式和时间的拓扑结构等问题时,我们注意到时间概念的引入并不是一件显而易见的、平凡的事情,量子引力理论中引入时间的困难足以说明这一点.此外,选择定律的事情显然也并不只有一次,不排除不同的动力学方程赋予了时间不同拓扑的可能性.如果时标是通过两个不同物理领域的不同方程所建立的,没有理由认为这两种时标是先验地等同的.历史上,为力学选择的牛顿定律和为电磁学选择的麦克斯韦方程组,两者的时间拓扑都是实数轴, $t \in R^1$, 其时标的校准问题隐藏在基本常数的选择中而未引起注意.今天,电磁和强、弱相互作用都已归入大统一理论,而牛顿力学已让位于广义相对论为基础的引力理论.在宇宙学的语境中,时间具有起点并且是演化的一个内禀标记^[5],其与牛顿的绝对时间和麦克斯韦方程组所含的时间是有区别的,拓扑也不一样了.一个有意义的问题是,广义相对论内含的引力时标,同大统一理论的时标,在宇宙历史不同时期的比较很可能是有差别的.启发我们思考这个问题的一

1) 钟表并不就是时间,日常生活中人们已经注意到了两者之间的差别.这一点可以从阿富汗谚语“你们有时钟,我们有时间”中看出——笔者注

个有趣话题,是关于早期宇宙结构常数的观测结果.

2001—2002年前后,澳大利亚的John Webb研究小组通过对来自遥远的类星体的碱金属双线光谱数据的分析,发现宇宙早期的精细结构常数可能比现在的值小约百万分之七左右^[6,7].而所谓的精细结构常数测量 $\alpha = e^2/\hbar c$,从形式上看,是几个物理常数的组合.从实验和实验依据的理论来看,它们都属于电动力学的范畴,即由麦克斯韦方程组所描述.如果精细结构常数发生了改变,那么至少有一个物理量发生了改变,这其中就有真空中的光速 c .纠缠于哪个数是改变的,哪个保持常数似乎没有强烈的道理,因为这几个常数值都是在当前的电动力学框架下得到的,是相关的.2002年另一组澳大利亚科学家在上述实验数据的基础上,论证了电子的电荷不太可能发生变化(Davies, Davis)^[8],因而更可能是光速发生了改变.Magueijo认定若设定光速不恒定(而非本文这里的时间标度不恒定),就不需要暴涨理论^[1].而狭义相对论的一条基本假设就是光速不变,是电动力学理论中物质传递速度的上限;但对某一宇宙时期所有观察者是常数,并没有强求它在整个宇宙历史上是一个不变的值!在此过程中,研究者提出了如下的问题“自然定律是随时间改变的吗?”^[6]不过在这个问题里,提问者指的是自然定律中的一些常数值是否是随宇宙历史变动的,而未涉及定律的表述形式以及定律的形式对时标拓扑的约定.

本文中我们将指出,考察大统一理论同引力理论的时标在宇宙演化历史中的差异,对于理解如视界问题、暗能量等内容会提供新的视角和自然的解决方案.回想一下,在物理学的发展历史中就曾有关于惯性质量和引力质量之性质差异的讨论,直到爱因斯坦提出等效原理将两者统一这一疑难才得以解决.两相对比,如果自然界存在几种不同的基本动力学规律,那么讨论由它们确立的绝对时标可能不同的这种假设就显得很有意义了.

2 温度与温标

在考察时标之前,讨论一下热力学定律的关系和温标的确立有助于对时间问题的理解.注意,绝对温标不是建立在具体的物质体系上的.

热力学第零定律告诉我们,热平衡的物理系统相互接触时有以下的规律:

(1)可以将所有的其宏观量不随时间(不管时间

是如何定标的)改变的平衡系统划分为不同的类,同一类中的任意两个系统接触时仍处于平衡态,两者之间的热流为零;

(2)不同类的两个系统接触时,系统的平衡会被打破,系统间的热交换会将系统最终带至新的平衡;

(3)可以将所有的系统类排序,序列的方向依热流方向而定.

基于上述关于平衡态的规律,物理上引入了温度这一物理量来表征这些不同的系统类.但是,若欲将各个系统类赋予确定的温度数值,即把不同的系统类投影到温度的数轴上,上述规律尚不充分,温度在此阶段上还存在一定的任意性(图1).此处我们看到,对于温标的选择来说,给出正确的系统类序列(热流方向)是第一位的,而确立具体的数值是第二位的.显然,要做到后一点还需要依赖其他的物理事实或规律;且根据不同规律定出的温标,相互之间可能有非线性的变换关系.

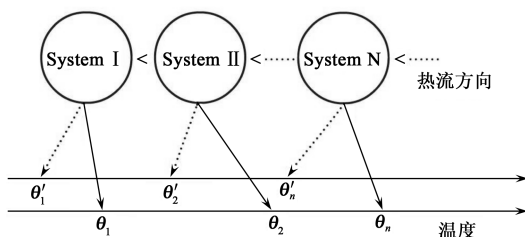


图1 不同的系统类按接触时发生热流的方向排序,热流的方向指向温度低的体系.此时,任意能正确地给出系统类顺序的温度标签都是好的温标

所谓的温度测量,一直是用某种物质体系的某个物理量,比如水银温度计中水银柱的高度,来表征温度的,其前提条件是该物理量在给定的温区内随温度单调地变化(不存在能测量所有温度的温度计).但单调性不足以确定对变化的定量描述,热力学发展史上曾引入不同的经验温标,虽然都满足了所采用的物理量在工作范围内随温度单调变化的要求,但物理量随温度变化的定量关系的确立显然需要一个独立于具体物理量的温标.绝对温标的引入成为必要.在热力学第二定律发现以后,由可逆热机的效率公式

$$\eta_{Carnot} = 1 - \frac{T_2}{T_1}, T_2 \leq T_1. \quad (1)$$

定出了绝对温标,从而避免了使用经验温标造成的温度值的任意性.确切地说,有:

(1)用绝对温标作温度测量,可逆热机的效率才能表示为(1)式;使用其他温标获得的温度值比如摄

氏温度,公式(1)就不成立;

(2)反过来说,若对可逆热机选择了(1)式那样不能更简单的效率表达,则描述理想热机的参数 T 给出了一个绝对的温标。

我们还要进一步指出,公式(1),加上其背后的热力学第二定律,要求绝对温度是非负的,即暗含了绝对温度 T 不可以为零的约定。也就是说,绝对温度的完全形象是,它对应正半实数轴(图 2),其测度应使得可逆热机效率可表达为公式(1)的形式。实际上,在讨论理想气体状态方程 $PV=NkT$ 时,这里的理想气体温度 T 虽然在测度上同绝对温度相比有任意性(反映在存在待定常数 k 的事实上),但它和绝对温度有相同的拓扑,即规定了 $T \neq 0$ 。绝对温度的概念原来就是 1703 年 Guillaume Amontons 根据对理想气体状态方程的研究这么引入的。“绝对零温度不能达到”被当作热力学第三定律专门地强调,那里有如何引入另一个热力学广延量熵的考量。

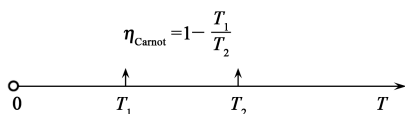


图 2 绝对温标的完整图像:正半实数轴,其上测度的选择使得在温度 T_1 和 T_2 之间工作的可逆热机,其效率可表示为 $\eta=1-T_1/T_2$ 。这个公式注定了 $T>0$

我们看到,是选择了一个物理定律(热力学第二定律,卡诺引理)的表达而后才确立了温标的,即温标是由对物理定律表达式的选择所决定的。还应该看到,即使热力学确立了一个绝对温标,温度的测量也是一件需慎重对待的事情。温度的测量实际上总是对作为温度计的某个物理体系的一个特征物理量的测量,其前提是我们知道该物理量同温度值之间的一一对应关系。而获得这样的一一对应关系,是存在一个理想化的过程的,比如把对实际发热体的辐射分布理想化为同绝对温度建立了联系的黑体辐射公式。黑体辐射的概念,黑体辐射的表达式,即对绝对温度的依赖关系,实际上都是理想化了的理论形式。这解释了物理研究的一个现象,即关于一个温度依赖的物理现象,比如 ^4He 的超流相变,开始时报道的温度是差别较大的,随后因为认识到该现象应该发生在很窄很窄的范围内,大家逐渐接受了一个标准值。而一些这样的典型物理事件发生的标准温度值,又反过来成了校验温度计的标准。

我们认为,时间的标度同温度的标度之间有着许多共通的东西。时间的标度也是由物理定律的选

择所决定的,时间的测量首先要选定一个在指定的规律下为周期性的物理事件,然后用它标定其他事件的时间过程,也存在理想化的问题。所谓理想,或绝对,都来自一个严格理想的数学表达式。注意到对不同领域物理基本规律的表达可能选择了不同的时间标度,这为我们理解一些基本物理面临的困难提供了新的视角。

3 时间与时标

时间概念来自对物理系统状态的不断变化(becoming)的认识,没有事物状态的变化,就不会产生时间的观念。确立温度顺序的判据是平衡态系统接触时的能流方向;对于时间,确立其顺序的一个强判据是因果关系。如果两个事件可以构成因果关系,则可以定义称为“因”的事件在时间上先于称为“果”的事件。这里因果之间存在时间上的非对称性,即莱布尼茨所谓的 causal asymmetry^[4]。但是,能流可以在所有热力学体系间建立,从而可以将体系按照温度作普适的分类,而事件之间并不总是存在因果关系^[9]。在狭义相对论里,某两个事件发生的先后顺序是在观察者那里判断的,观察者根据自事件发生处到来的光信号到达他所在位置的时间差,扣除发生地到观察者之间距离差距(这依赖于所处空间的结构)的因素,来判断的。我们看到,关于时间,我们又遇到了处理温度时所面临的蛇吞尾(ouroborous)的局面,即确立时间顺序需要先确立一个关于事件的时空结构,一个理想的、由数学公式明确表达了的存在。按照狭义相对论,不同运动状态下的观测者对两事件发生的时间间隔会得到不同的测量值;但是,我们知道,狭义相对论不颠倒因果关系。在接下来的讨论中,我们假设有许多其间存在明确时间顺序的事件链,对其时间序列的确定满足狭义相对论原理且维持事件之间的因果关系,我们关切的问题是,描述这些不同物理事件的动力学方程是否采用了,或意味着,不同的标准时标?

和温度及温标的情形一样,所谓选择时间的标度,是指如何把一个事件序列中不同的事件向时间数轴上投影。只要能反映正确的因果关系,就是好时间,同样存在不唯一的问题。和经验温标一样,历史上也的确出现过各种经验的时标和计时器,例如铜壶滴漏、地球的自转与公转等,其所反映的哲学基础就是有了物质和物质性事件的存在,才有时间的概念(图 3)。那么,对比经验温标过渡到标准温标的情

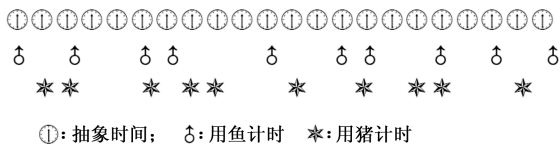


图3 原始人的结绳记事(计时)法.若两原始部落分别以捉到一条大鱼或猎到一头野猪这些事件来标志时间,显然两者的时间,如加以量化的话,有非线性的关系.这种计时法在几十年前还存在于中国社会^[10]

形,也存在标准时标的问题.标准时标是按照什么样的基本的物理规律制定的?答案是标准的时标是用基本的动力学规律制定出来的.

在经典力学领域,规定时间标度的就是牛顿第二定律:

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = f(t, x, \frac{dx}{dt}), \quad (2a)$$

式中右侧是称为力的物理量,源于物体受环境的影响.公式(2a)的意思是运动是由空间对时间的二阶微分方程描述,驱动力只包括到空间对时间的一阶微分项,这样选择的唯一理由是简单性^[11].在引力场里,力是牛顿引力势的梯度 $-\nabla\varphi(x)$,则方程(2a)变为

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} = -\nabla\varphi(x). \quad (2b)$$

它的含义是:使用牛顿的绝对时间和绝对空间的概念,牛顿第二定律(2b)成立;或反过来说,公式(2b)定义了绝对时空,此时间与实数轴是等拓扑的.关于上述观点,许多文献都曾隐约提到^[11].

讨论到这里,我们会立即想到物理学中还存在着其他的基本动力学规律,例如麦克斯韦的电磁场理论.那么它是否定义了另一个标准时标呢?按照麦克斯韦的电磁场理论,自由空间中的电磁场满足如下形式的波动方程:

$$(\nabla^2 - \frac{1}{c^2} \frac{\partial^2}{\partial t^2})A = 0. \quad (3)$$

它告诉我们电磁波以速度 c 传播并具有洛仑兹变换的对称性,这里光速 c 是一个内禀常数.正如(2)式那样,电磁学理论中的时间类似牛顿绝对时间,也是和实数轴等拓扑的.我们会问,这两者是等同的呢还是会出现两种不同的标准时标?这个问题一直未得到充分的关注.

回顾一下牛顿力学同电磁理论之间的相互影响

是有益的.我们注意到:(1)在牛顿第二定律表达式(2a)里,力只是一个形式,没有具体的内容^[12].只有给出了具体的力的表示,牛顿第二定律才是一个完整的基本动力学规律.宏观现象中除引力以外,其他的如表面张力、摩擦力、吸附力和弹性力等等,不过都是电磁力的净余现象.这些力的表达式基本是经验层次上的近似表达,无须作为基本定律加以讨论.但洛仑兹力值得仔细推敲,洛仑兹力的形式 $q(E + V \times B)$ 就是一种近似.从电磁理论得到的带电粒子在电磁场中的受力并不仅仅包含空间对时间的一阶微分,高阶量被忽略不仅只因为它是高阶小量,而是同(2a)式的形式相冲突.这一点,并没有得到足够的重视.(2)爱因斯坦的狭义相对论力学将力学改造成了和麦克斯韦方程一样满足洛仑兹变换的形式,实际上是放弃了牛顿方程.因此,在此语境中,不同动力学规律是否确立不同的绝对时标的问题,没有变得十分迫切或有必要.

我们知道,自然界存在电磁相互作用、弱相互作用、强相互作用和引力四种基本相互作用.那么,与它们相联系的基本动力学规律确定的标准时标会不会是几种不同的标准时标呢?若两种不同的标准时标之间不能线性地关联,则意味着规定它们的基本动力学规律的不同.容易想到,如果两种标准时标是线性相关的,则它们实质是同一个标准时标,它意味着必然存在将两种基本的动力学规律统一的方式.换句话说,如果两个不同的基本动力学规律无法统一,则可以合理地设想存在两种不同的标准时标.目前,电磁、弱以及强相互作用已经被统一在大统一理论(Grand Unification Theory)的框架中,这种理论已为一系列实验证实,因此这种大统一理论的基本动力学规律只需确定一种标准的时标.

回想一下,当年寻求建立大统一理论的物理动机是什么?当时提到的多是希望看到物理规律具有更大的对称性和自然规律取最简单形式的美学观点.我们以为,这种努力似乎还应该有一个更为实质性的内容,即确定一个唯一的标准时标,从而使得物理的动力学规律可以采用一套统一的描述语言.我们也有理由猜想爱因斯坦晚年专注于统一场论的研究的真实目的也许是基于这一考虑.

现在的问题是:引力理论和大统一理论能否最终统一于一个万有理论(Theory of Everything),其关于基本相互作用的动力学规律只采用,或规定了,唯一的标准时标?当前量子引力理论如何引入时间概念的困难,如何构思一个对动力学规律普适

的标准时标应是一个关键问题. 下面举几点理由论证这种可能存在两种标准时标之设想的合理性.

其一、尽管人们经过长期的努力已提出了许多理论与模型, 至今仍未得到一个将所有基本相互作用包括在内的统一理论. 若将宇宙当作一个闭合体系考虑, 欲建立一个万有理论, 则遵循将物理学理解为存在的集合加元素之间关系(Set with Relations)的哲学, 万有理论只能以内在的互为参照的方式建立. 显然, 在物理学发展的过程中, 一直是从不同侧面建立对自然现象的局域的思考的. 存在过不同温标和时标以及物理学一直在忙着调和各种不完备理论, 一直是物理学研究的现实. 在万有理论出现并解决了其内在时间困难之前, 我们没有理由接受标准时标已统一了的观点.

其二、广义相对论的等效原理将引力与时空的弯曲联系起来, 而电磁、弱和强作用以物质荷的形式出现, 它们的物理机制不相同. 因而把后三种相互作用统一起来和把四种作用统一起来可能有本质上的不同, 后者类似将戏曲同舞台的统一^[13].

其三、有趣的是, 如果我们接受当前引力和其他几种基本相互作用未最终统一的现实意味着可能存在两种不同的标准时标的话, 则目前宇宙学中存在的一些疑难可以以一种自然的方式得到解决.

当然, 在讨论上述最后一点前, 我们必须首先回答一个重要且最易产生的疑问, 即存在两种标准时标的设想是否违背广义相对论的基本原则. 广义相对论的原则是已被广泛确认了的, 并且它的原理已为水星的进动及光线经过太阳时的弯曲等观测结果所证实. 要是两种时标的设想和广义相对论的基本理论相冲突, 则这种设想必须放弃. 下面我们简略回顾一下广义相对论的重要内容, 并指明在什么地方两个标准时标的设想才需要加入进来考虑, 从而判断这种设想是否与广义相对论有不自洽的地方以及会带来什么样的新内容.

相对论的基础是狭义相对性原理, 即所有的基本物理规律在任一惯性系中具有相同的形式, 后来爱因斯坦把它推广为广义相对性原理, 即任一参考系在表述物理规律上都是等价的. 基于这一考虑提出了惯性质量与引力质量等价的推论, 即任何力学实验都无法区分重力的效果或惯性力的效果的等效原理; 爱因斯坦继而提出强等效原理, 即任何物理实验都不能判别引力场中的惯性系和不受引力的加速系, 也即无法区分引力和惯性力.

从广义相对性原理出发, 既然所有的坐标系都

是等价的, 因此得到粒子在时空中的动力学方程应是测地线方程:

$$\frac{d^2 x^\mu}{ds^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^\mu \frac{dx^\alpha}{ds} \frac{dx^\beta}{ds} = 0, \quad (4)$$

广义相对论中的另一个重要的基本方程是动力学性质的引力方程:

$$G_{\mu\nu} + \lambda g_{\mu\nu} = -8\pi GT_{\mu\nu}. \quad (5)$$

最后应提到的是广义相对论的测量理论: 在一个局域参考系中, 观测者的世界线的切矢量构成四轴系的时间轴, 在与之正交的空间中选定三空间轴, 两者加在一起构成观测者的四轴系 ω_μ^α . 任一个张量对应的标量性的物理观测量是:

$$T_{\beta_1 \dots}^{\alpha_1 \dots} = (\omega_{\mu_1}^{\alpha_1} \dots \omega_{\mu_n}^{\alpha_n} \dots) T_{\nu_1 \dots}^{\mu_1 \dots}. \quad (6)$$

对于一个确定的时空间隔 dx^μ , 按照上式, 观测者测得的时间间隔是:

$$\Delta T = dx^\mu \omega_\mu^0, \quad (7)$$

这里, 方程里的时间是关于引力的动力学方程所规定的时间, 是时空间隔 dx^μ 的一部分. 空间间隔为

$$\Delta L = [(dx^\mu \omega_\mu^1)^2 + (dx^\mu \omega_\mu^2)^2 + (dx^\mu \omega_\mu^3)^2]^{1/2}, \quad (8)$$

ΔL 是观测者的局域刚架测量的长度^[14].

(7)式中的时间间隔 ΔT 是由方程(4)和(5)规定的, 虽然理论上我们认为它应该是广义相对论框架下观测者测得的时间, 但如何给出它的数值? 局域观测者使用的时钟应该是某个这个理论所描述的周期性事件, 一如牛顿力学下的单摆和电磁学下的原子钟(当然都是近似意义下的). 如果我们用电磁学的手段对 ΔT 进行观测, 观测值可能和方程(4)和(5)规定的值有区别. 这个当前时间点上的数值差别并不很重要, 重要的是有可能在不同的宇宙演化阶段测得的 ΔT 的数值会不相同. 这后一点是我们所说的存在两种相互独立的基本动力学规律所规定的不同标准时标的意思. 以观测双子星绕行一周的时间间隔为例, 如观测者用的是由引力规律制定出时标的时钟去测量, 则周期 ΔT 是一个恒定值. 而如他用大统一动力学规律制定的时钟去测量时可能会得到一个不同的 ΔT 值, 且该数值还会在不同的宇宙时期中取不同的数值.

上述讨论中, 未触动广义相对论的基本原则——等效原理没有改变, 测地线方程和引力场方程不受影响, 测量理论也仍然不变. 因此, 证实广义相对论理论的有关水星进动和光线在太阳附近偏折的观测结果不会改变. 同时, 由于观察者测得的时间和长度是标量, 没有坐标变换的含义, 存在两种时标

的概念不会破坏物理理论的协变性。

尽管两种时标的设想,或不同动力学方程所设定的时标相互间需要校准的思想,并不违背广义相对论的基本原则,但仍然会带来某些新的内容和观念.主要的仍然是如我们在前面讨论标准时标的制定时所指出的那样,基于不同的动力学规律制定出的时标,观测标量性物理量相应地会得到不同的数值;并且反过来由此会得出两种基本动力学规律不同步的结论.进一步地,我们会得出如下的一个推论,即如果我们用引力时标去讨论引力的动力学规律,则引力动力学的规律或数学表达形式不会随时间的推移(宇宙的演化)而改变;但是,如果我们用大统一规律制定出的时标去考察引力规律,即对引力现象用电磁学手段观察时,由于两种规律的不同步,就会发现引力动力学的规律在大统一时标的表述下,其数学形式不能保持不随时间不变.反之亦然.

这个新结论和霍金在《时间简史》一书的序言中谈到的一个看法有共同之处^[15].霍金这样写到,根据协同学的研究可以得出这样的看法,要么,我们能够找到一个途径,用一个统一的理论框架描写全部的自然规律,要么我们只能用一个理论框架描写一部分自然规律而对另一部分自然规律需要用另一个理论框架.他还用了譬喻:对于地球的三维地理,当用二维平面绘制地图时,我们只能对地球上的某一地区用一张地图来描绘,对另一地区必须用另一张地图来描绘.上述的两种标准时标只能分别用来表述不同的动力学规律正是这种论断的更为具体的一种表述.也许,目前存在基于不同时标的理论只是暂时的.

4 甚早期宇宙疑难问题

有了以上关于两种时标的存在与广义相对论基本原理不矛盾的讨论之后,我们探讨两种时标的设想如何能自然地解决宇宙学上目前存在的若干疑难问题.

4.1 视界疑难

大爆炸理论认为到今天为止宇宙的寿命是有限的,因此我们今天原则上能观测到的宇宙范围是有限的,这一范围也恰好是光在宇宙寿命的这段时间里能传播的距离——视界.显然,视界的大小,即因果区的大小,是随时间 t 线性地改变的.另一方面,往早期追溯,观测宇宙中的物质所占的范围是与 $t^{1/2}$ 成比例地缩小的.今天我们能观测的宇宙范围接

近于当前的视界,但在今天以前的时刻,视界必然小于当时的观测宇宙的尺度,并且时间越往前推,差别越大(图4).早期宇宙的视界和观测宇宙相比小许多这一点,即视界太小,造成了均匀性疑难以及结构性疑难等一系列问题.这个问题的本质是将局部变化趋势向全局推广所遭遇的困难.后来才有人提出了暴胀宇宙的理论^[1,15],其基本思想是,在宇宙生成约 10^{-35} s 后,宇宙经历了一个暴胀时期,使得物质分布的范围超过了当时的视界;而在此前,物质分布的范围是小于当时的视界的,从而宇宙不同部分之间可建立因果关系以解决均匀性的问题.

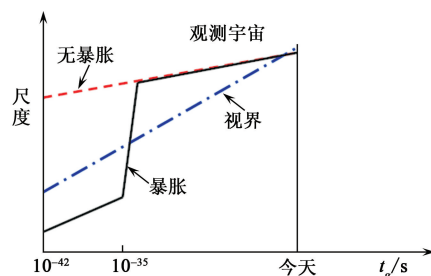


图4 视界疑难的暴胀理论解决方案.这里不区分引力时标和大统一时标

但是,如果引力动力学规律和大统一场论的动力学规律是两个独立的未统一的规律,从而存在两种标准的时标,则上述的视界疑难即可得到更加自然的解决.宇宙的膨胀是纯引力问题.对观测宇宙尺寸的回溯应该按照引力时间计算,而视界是依据光的传播应按大统一理论时间计算.关于存在两个时标所导致的可能局面,分析如下:

(1) 尽管是两种不同的时标,但在今天总可以将它们取相同的单位,即不同理论通过自然常数的取值将各自的时标校准了.

(2) 在过去任一时刻两种时标的单位就不再是相同了.为了区别起见我们用 t_g 表示用引力时标测得的时间,用 t_e 表示大统一时标测得的时间,并假定时标不同的情形时对同一空间间隔测得的 Δt_g 和 Δt_e 在宇宙开始不久即总能满足关系 $\Delta t_g < \Delta t_e$.那么,若两种时标之间呈某种非线性相关,使得视界和观测宇宙呈类似如图5所示的关系,即在某个时刻以后视界总是大于观测宇宙,于是不再存在视界过小的问题.

(3) $\Delta t_g < \Delta t_e$,但比值 $\Delta t_e / \Delta t_g$ 并不是恒定的,合理的假设是这一比值越是靠近宇宙早期会越大(图6).这种设想,若选择合适的 $dt_e = f(t_g) dt_g$ 关系,比如 $dt_e = \frac{t_g^{(0)}}{t_g} dt_g$,且在今天 $t_g^{(0)}$ 时有 $dt_e = dt_g$,

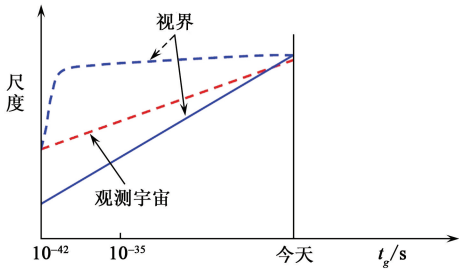


图5 若在宇宙不同时期大统一时标和引力时标呈某种合适的非线性相关,则总可以有观测宇宙一定在视界(虚线)内的情形

即时标是校准了的. 这样得到的两种时间的关系是 $t_g = e^{t_e/t_g^{(0)}}$, 有 $t_g \rightarrow 0$ 对应 $t_e \rightarrow -\infty$. 按两个时标的看法, 在“宇宙起点”附近, 从引力时标来看, 宇宙的尺度或状态几近保持不变 ($t_g \rightarrow 0$), 但大统一的动力学过程始终在进行 ($t_e \rightarrow -\infty$), 因此避免了“宇宙起点之前物理是什么”这样的疑问. 又或者选择 $t_e = (e^{at_g} - 1)$, 则不仅可以在当前 $t_g^{(0)}$ 时有 $dt_e = dt_g$, 且两者有相同的零点. 当然, 两种时标之间究竟有什么样的关系有待进一步的研究. 我们给出上述例子只是想指出, 若存在两种时标, 则根据时标之间的关系和当前的观测可以对宇宙演化的问题给出不同的解读.

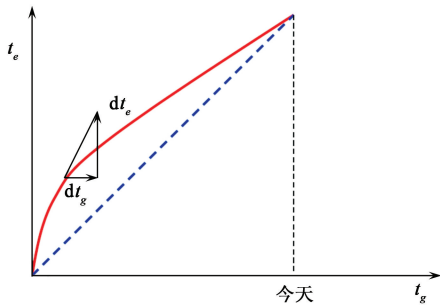


图6 引力时标对大统一时标. 两个时标在今天可以通过物理常数的选择显得是校准了的, 即有 $dt_e = dt_g$

4.2 宇宙的加速膨胀和暗能量问题

大爆炸理论认为在“宇宙起点”以后宇宙一直在膨胀着. 根据物质间引力的性质, 膨胀应当是在减速, 但从观测结果得到的结论却是加速膨胀²⁾. 根据宇宙模型的物态方程:

$$\frac{\ddot{a}}{a} = -(\rho + 3p), \quad (9)$$

其中 a 是宇宙的尺度因子, ρ 和 p 分别是密度和压强, 加速膨胀意味着 $\ddot{a} > 0$. 由于 $\rho > 0$, (9)式要成立只能要求有产生负压的暗能量的存在. 不过暗物质或暗能量的存在始终未得到证实, 更何况负压的存在明显违背了热力学的平衡判据——在关于宇宙学

的讨论中我们是大胆地使用了平衡态热力学公式的.

如果我们认为存在两个标准时标, 则可以合理地推测, 宇宙加速膨胀是只用一种时标分析的后果, 而用两种时标的设想从观测的结果出发, 并不必然得出宇宙在加速膨胀的结论, 膨胀依然可能是以等速或减速方式进行的. 这样, 存在暗物质与暗能量的假定就没有必要了. 下面, 我们就一个简单的情形来加以阐述.

宇宙膨胀的理论根据是宇宙学模型中的动力学方程, 方程里的时间是引力的时间. 作为大爆炸宇宙学最重要的观测根据是星系红移的哈勃定律, 但涉及的观测手段纯粹是电磁学的. 两个动力学中的时标未被区分. 显然, 基于对温标和牛顿绝对时间概念发展的认识, 我们至少可以认为, 这个时间的标度是否同一是一个可以探讨和需要论证的问题!

考察一个相对观察者运动的光源, 速度为 V , 发出的光频率为 ν , 观察者接收到的频率是 ν' , 则有

$$\nu' = (1 + \frac{V}{c}) \cdot \nu, \quad (10)$$

其中 c 为光速. 如果光源以 V 离观察者而去, 则

$$\nu' = (1 - \frac{V}{c}) \cdot \nu, \quad (11)$$

即红移量是

$$\Delta\nu = \nu - \nu' = \frac{V}{c} \cdot \nu. \quad (12)$$

由于宇宙加速膨胀的结论来自对超新星红移的观测, 可以用以下的简单例子来说明. 假定有两颗与地球成一线的超新星(图7), 今天我们接收到它们的光, 是在过去某个时刻发出的. 设当时它们离我们的距离分别是 d 和 $2d$, 离开速度分别是 V_A 和 V_B , 则我们接收到的光的红移量分别是

$$\begin{aligned} (\Delta\nu)_A &= \frac{V_A}{c} \cdot \nu, \\ (\Delta\nu)_B &= \frac{V_B}{c} \cdot \nu. \end{aligned} \quad (13)$$

观测数据应有

$$\frac{(\Delta\nu)_B}{(\Delta\nu)_A} < 2, \quad (14)$$

才能得出宇宙加速膨胀的结论.

现在, 我们分析一下不同时标下对宇宙膨胀过程

2) 1929年哈勃(Edwin Hubble)对河外星系的视向速度与距离的关系进行研究的只有46个河外星系的视向速度可以利用, 而其中又仅有24个有推算出的距离. 哈勃就是利用这些数据得出了视向速度与距离之间大致的线性正比关系, 但所涉及的尺度比判定均匀性所要求的尺度小得多, 因为毕竟观测条件有限

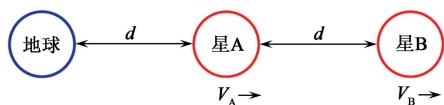


图7 等间距的地球和两颗超新星

观测结果的判定.

(1)单一时标

因为星 B 距离我们为 $2d$, 星 A 距离我们为 d , 所以星 B 发光到我们的时间间隔 T_B 与星 A 发光的时间到我们的时间间隔 T_A 的关系应为

$$T_B = 2T_A . \tag{15}$$

宇宙膨胀时任一星球远离我们的速度 V 与它与我们的距离 l 成正比, 即有

$$V = H_0 l , \tag{16}$$

其中 H_0 是哈勃常数. 由于星 B 发光时间在星 A 之前, 因此宇宙是减速膨胀、维持膨胀速度不变还是加速膨胀对应以下三种情形: $\frac{(\Delta\nu)_B}{(\Delta\nu)_A} > 2$, $\frac{(\Delta\nu)_B}{(\Delta\nu)_A} = 2$ 和 $\frac{(\Delta\nu)_B}{(\Delta\nu)_A} < 2$. 因为观测的结果是(14)式, 在一个统一时标的假定下得出的结论是宇宙在加速膨胀.

(2)两个时标

如前述用两个时标解释视界疑难时, 已假定两时标的关系为一个合适的函数 $dt_e = f(t_g)dt_g$ (图6). 在过去的时间里, 如两事件的时间间隔用两个时标去测定, 分别为 $\Delta t_g, \Delta t_e$, 且总有

$$\frac{\Delta t_e}{\Delta t_g} > 1 , \tag{17}$$

并且时间越早, 比值越大. 在这种情况下, 即便我们的电磁学观测结果有 $\frac{(\Delta\nu)_B}{(\Delta\nu)_A} < 2$, 我们是否一定就能得出宇宙加速膨胀的结论呢?

这里的关键之处是讨论宇宙膨胀时, 星体离我们远去的速度属于引力规律(体现在测地线方程里), 所以应该用引力时标去量度的, 即(16)式中的速度 V 应定义为

$$V_g = \frac{\Delta l}{\Delta t_g} , \tag{18}$$

而在(13)式中出现的速度是采用电磁规律时标的

$$V_e = \frac{\Delta l}{\Delta t_e} . \tag{19}$$

这样, 即使根据引力红移量的测量结果 $\frac{(\Delta\nu)_B}{(\Delta\nu)_A} < 2$ 我们能够得出 $V_{e,B} < 2V_{e,A}$, 但是由于星 B 发光时间更早, 应有

$$\left(\frac{\Delta t_e}{\Delta t_g}\right)_B > \left(\frac{\Delta t_e}{\Delta t_g}\right)_A . \tag{20}$$

所以 $V_{e,B} < 2V_{e,A}$ 并不意味着一定有 $V_{g,B} < 2V_{g,A}$, 即宇宙是在加速膨胀的. 根据(20)式, 它可能是等速膨胀, 甚至减速膨胀也是可能的. 后一种情况下, 就没有必要引入具有负压的暗能量的概念.

5 观测建议

以上基于存在两个未校准的时标的推测, 讨论了视界疑难以及由超新星红移的观测是否可以得出宇宙在加速膨胀的结论这两个问题. 为了直接验证大统一理论和引力理论是否意味着规定了两种需要校准的不同时标, 我们提出如下观测建议.

显然, 如果一个体系既表现出由纯引力的动力学规律决定的行为, 又能观察到某种由电磁或者强、弱相互作用控制的物理过程, 且这个体系可观察到不同历史时期的样本, 那么比较不同历史时期这个体系所表现的引力动力学的时间特征和大统一理论决定的时间特征, 分析两者之间标度上的差异, 就能对上述猜想提供肯定或否定的证据. 我们看到, X 射线双星(X-ray binaries)是一个合适的选择. X 射线双星发射一定频谱的 X 射线, 其射线的特征频率, 或者其他的间接地依赖于时标的物理量, 应由大统一理论制定的时标来表示; 相应地, 双星绕行的周期应是以引力理论决定的时标给出的. 如果存在可观察的与我们有不同距离的, 也即处于宇宙不同时期的 X 射线双星样本, 那么分析比较不同时期电磁学特征的时间, 或如精细结构常数这样间接依赖于电磁学时标的物理量, 与绕行周期的比值(当然是关于双星质量、距离等因素剔除以后的), 或许能推测引力时标和大统一时标是否同一的证据.

设若我们能观测到一个距离我们很遥远的双子星, 那么我们观测到的它的双子星的绕行情况一定是很早以前发生的. 由于双星的绕行是由引力的动力学规律决定的, 其周期现象是纯引力行为, 所以如果用引力时标测量或表示, 则很早期的绕行周期 $T_{g,f}$ 和与我们相距很近的(全同的, 或关于质量约化的)双子星, 即现在的绕行周期 $T_{g,n}$ 应当是一样的, 即

$$T_{g,f} = T_{g,n} . \tag{21}$$

假定在该双子星系中我们还能观察到某种由电磁或者强、弱相互作用控制的衰变现象, 则它的衰变规律应当应用大统一理论制定的时标, 则在远处和

近处双星体系的半衰期分别记为 $T_{e,f}$ 和 $T_{e,n}$ (相对于研究时间的跨度, 此处的四个周期都是小量, 可看作同当时的时标成正比). 比较远处和近处双星体系上衰变的半衰期同绕行周期的比值, 作为实验观察, 即观察一个绕行周期内远处和近处双星上所选物理过程的衰变程度, 或者观察一个半衰期内远处和近处双星的绕行情况, 从而可以得出 $T_{g,f}/T_{g,n}$ 同 $T_{e,f}/T_{e,n}$ 间的比较. 若有差异, 则证明两个定律确定的时标确实随宇宙的演化历史而改变. 我们预期, 设定 $T_{e,n}/T_{g,n}=1.0$, 即两者在当前校准, 则在宇宙早期(远处)应该有 $T_{e,f}/T_{g,f}>1.0$ 的结果. 这个结果告诉我们, 遥远的双子星在绕行一周时的衰变量会大于距离我们, 很近的双子星绕行一周时其上的同一衰变现象的衰变量. 上面的讨论是以符合引力动力学规律的双子星绕行一周的现象为依据得到的结论, 反之, 如果以该衰变现象为依据, 则对应于一个半衰期内遥远双子星的绕行量会比近处双子星的绕行量少. 如果上述的建议观测或类似的观测得到证实, 两种时标的存在就得到了验证.

6 结论

时间是近代物理必须认真对待的、但又远未看见最终方案的严肃课题. 如同绝对温标和牛顿的绝对时间都是由约定了物理定律才得以规定的那样, 引力理论的动力学方程和大统一理论框架下的动力学方程可能规定了两个不同的时标. 当前物理常数是将以目前这两个时标统一的方式制定的. 若确实存在这样的两个时标, 且这两个时标之间有适当的差异, 则视界问题可以一种自然的方式得到解决而无需引入暴胀理论, 暗能量概念的引入也是不必要的. 考察距离我们不同远近的两个双星体系, 比

较其引力行为(转动周期)和大统一理论决定的某个衰变动力学过程的关系, 其间的差异或许能为我们的猜想提供观测证据. 此外, 欧洲的大型重子对撞机预计能再造大爆炸后几纳秒甚至 10^{-10} s 以内的宇宙条件, 也许能为其他形式的验证实验提供机会. 退一步说, 即使存在两种时标的猜想未能为视界问题和宇宙膨胀问题提供一种正确的、自然的解释, 它也开启了对时间标度这样一个基本问题的思考!

参考文献

- [1] Magueijo J. *Faster than the Speed of Light*. Perseus Publishing, 2003
- [2] Misner C W, Thorne K S, Wheeler J A. *Gravitation*. W. H. Freeman, 1973
- [3] Reichenbach H. *The Direction of Time*. University of California Press, 1956. 17
- [4] Futch M J. *Leibniz's Metaphysics of Time and Space*. Springer, 2008
- [5] Ridderbos K. *Time*. Cambridge: Darwin College, 2002. 6-26
- [6] Webb J K. *Physics World*, 2003, 33:38
- [7] Webb J K *et al.* *Phys. Rev. Lett.*, 2001, 87: 091301
- [8] Davies P, Davis T, Lineweaver C. *Nature*, 2002, 418: 602
- [9] Bohm D. *Causality and Change in modern physics*. London: Routledge & Kegan Paul, 1984
- [10] 韩少功.《马桥词典》之‘马疤子’及‘一九四八(续)’.北京:人民文学出版,2004
- [11] José J V, Saletan E J. *Classical Dynamics*. Cambridge University Press, 1998
- [12] Wilczek F. *Fantastic Realities*. Singapore: World Scientific, 2006. 37
- [13] Carroll S. *Spacetime and Geometry. General Relativity* San Francisco: Addison Wesley, 2004
- [14] 俞允强. 广义相对论. 北京:北京大学出版社,1997
- [15] Hawking S. *A Brief History of Time*. Bantam Books, 1998. Foreword