

斯塔罗宾斯基与暴胀宇宙学

胡建伟[†] 杨润秋 王少江 季力伟
(中国科学院理论物理研究所 北京 100190)

2015-08-27收到

[†] email: jwhu@itp.ac.cn

DOI: 10.7693/wl20151004

Alexei Starobinsky and inflationary cosmology

HU Jian-Wei[†] YANG Run-Qiu WANG Shao-Jiang JI Li-Wei
(Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China)

摘要 俄罗斯国家科学院院士阿里可塞·斯塔罗宾斯基(Alexei Starobinsky)教授是现代宇宙学暴胀模型的最早提出者之一,文中回顾了他在暴胀模型形成初期的具体贡献,并表达了他对暴胀模型和宇宙学未来发展的最新看法。

关键词 宇宙学, 暴胀模型, 原初引力波

Abstract Alexei Starobinsky, Member of the Russian Academy of Sciences, is one of the earliest proponents of the inflation model in modern cosmology. This paper reviews his specific contribution in the early establishment the inflation model, and presents his latest ideas on the future development of inflation models and cosmology.

Keywords cosmology, inflation models, primordial gravitational wave

“有两种东西,我对它们的思考越是深沉和持久,它们在我心灵中唤起的惊奇和敬畏就会日新月异、不断增长,这就是我头上的星空和心中的道德定律。”两百多年前,伟大的哲学家康德(Kant)在长久的探寻与思索之后,面对浩瀚星辰曾发出如是感慨。而千年之前中国伟大的浪漫主义诗人屈原在其不朽名作《天问》的开篇也曾向天发问:“遂古之初,谁传道之?上下未形,何由考之?”可以说,在人类漫长的文明史中,人们对星空的思索与探寻从未停下。从中国古代质朴的“天圆地方”到托勒密(Ptolemy)的“地心说”,再到哥白尼(Copernicus)的“日心说”,即便在近代科学尚未充分发展的年代,人类也从未放弃探究宇宙的本源。从奥伯斯佯谬(Olbers' paradox)到马赫原理(Mach's principle),在被星空的壮美所深深震撼的同时,无数先贤用富有洞察力的思索,一步步加深了人们对于宇宙的认识。

整整一个世纪以前(1915年),伟大的理论物理学家阿尔伯特·爱因斯坦(Albert Einstein)提出了著名的广义相对论,使得人类对时空和引力的认识达到了一个前所未有的高度。直至今日,广义相对论所包含的深邃的物理思想仍然激励和启发着人们对时空本质的探索。在广义相对论发表不久之后的1917年,爱因斯坦发表了一篇题为《基于广义相对论的宇宙学考察》的论文,首次利用广义相对论研究宇宙的时空结构,从此人们对于宇宙的思考逐渐从模糊的哲学思辨转变为精确的科学计算,并随着现代天文观测技术的不断进步,观测数据不断丰富。时至今日,我们已经步入精确宇宙学时代,宇宙学已经是最精密的自然科学之一。我们对人类所处的最根本的环境——宇宙的认识已经有了实质性的提高。

在现代宇宙学一个世纪的发展过程中,现任职于俄罗斯科学院朗道理论物理研究所的俄罗

科学院院士阿里可塞·斯塔罗宾斯基(Alexei Starobinsky)教授,便是做出最重要贡献的人之一。作为现代暴胀宇宙学奠基者之一,斯塔罗宾斯基教授于1972年在雅科夫·泽尔多维奇(Yakov Zeldovich)教授的指导下获得了莫斯科国立大学学士学位,接着于1975年在俄罗斯科学院朗道理论物理研究所获得博士学位。博士期间他主要研究早期宇宙的粒子产生问题和旋转黑洞的霍金辐射问题。1979年,他在前苏联的实验和理论物理期刊(*Journal of Experimental and Theoretical Physics*, *JETP*)上发表了暴胀宇宙学的奠基性工作。1980年,康奈尔大学的美国物理学家阿兰·哈佛·古斯(Alan Harvey Guth)为了解决视界问题等也在美国的《物理评论: D》(*Physical Review D*)杂志上发表了关于暴胀的原始文章。由于其在暴胀宇宙学及其在宇宙暴胀期间原初引力辐射的开创性工作,斯塔罗宾斯基和维亚切斯拉夫·穆克哈诺夫(Viatcheslav Mukhanov)一起获得了2013年的Gluber奖。2014年,因在暴胀宇宙学方面的奠基性工作,又和古斯、安德烈·林德(Andrei Linde)一起获得了卡弗里(Kavli)奖。

2015年5月4日至8日,为纪念爱因斯坦提出广义相对论100周年,由中国科学院理论物理研究所/理论物理国家重点实验室以及卡弗里理论物理所和中国科学院大学牵头,在北京举办了国际引力和宇宙学学术会议/第四届伽利略—徐光启会议。斯塔罗宾斯基教授受邀参加会议并作了关于



图1 斯塔罗宾斯基教授在中国科学院理论物理研究所承办的国际引力和宇宙学学术会议/第四届伽利略—徐光启会议上做主题报告

宇宙暴胀理论的现状和未来的主题报告(见图1)。报告结束后,我们有幸采访了斯塔罗宾斯基教授。他虽年近古稀,斑白的头发多有岁月的痕迹,可跟他聊起问题来,无不惊叹其思维之敏捷,逻辑之严谨。我们与这位平易近人又风趣幽默的智者聊了将近3个小时。

斯塔罗宾斯基教授首先与我们详尽地分享了暴胀模型发展的历程。历史回到1978年,贝尔实验室的两位工程师阿诺·彭齐亚斯(Arno Penzias)和罗伯特·威尔逊(Robert Wilson)因早前偶然发现宇宙微波背景辐射(cosmic microwave background radiation, 简称CMB)而获得当年的诺贝尔物理学奖。宇宙微波背景辐射的发现堪称一个标志性的事件,这是对大爆炸模型的最有力的实验支持。宇宙可能起源于单一原子的爆炸的思想由比利时物理学家勒梅特(Georges Henri Joseph Édouard Lemaître)于1930年代首先提出,后来这一思想由乔治·伽莫夫(George Gamow)和他的学生等人不断发展和完善,形成了所谓的 $\alpha\beta\gamma$ 理论,但是在当时遭到稳恒态宇宙模型提出者弗雷德·霍伊尔(Fred Hoyle)的嘲笑,并称其为大爆炸模型,后来这个模型因此得名。大爆炸模型能够预言宇宙微波背景辐射的存在,并且通过适当的假设,可以算得目前宇宙的温度约为几个开尔文。可是当时这个预言没有引起大家的重视,直到1964年前后,这个预言被苏联的物理学家泽尔多维奇等人重新提起之后,才引起重视。正当宇宙学家准备着手探测的时候,上帝似乎开了一个玩笑。1965年,阿诺·彭齐亚斯和罗伯特·威尔逊在调试一具为通信卫星设计的天线时,发现一个跟方向和时间无关且无论如何也去不掉的噪声(有线电视的马赛克亦属这类噪音),相隔不远普林斯顿大学的宇宙学家迪克(R. H. Dicke)和皮伯斯(P. J. E. Peebles)等人立刻意识到这就是他们准备着手探测的宇宙微波背景辐射,两组人先后在《天体物理学报》上发表相关文章,CMB时代就此来临。在访谈中,斯塔罗宾斯基教授也跟我们强调,今年不仅是广义相对论发表100周年,也是CMB发现50周年。

虽然大爆炸模型能很好地符合目前观测到的宇宙微波背景辐射、原初核合成时期的轻元素丰度和哈勃定律，可是早在上世纪五六十年代宇宙学家就意识到它仍然面临着视界问题、平坦性问题、磁单极问题和奇点问题等根本疑难。如何克服这些疑难成为物理学家普遍关注的一个方向。视界问题(均匀性问题，最后散射截面上的粒子视界跟哈勃视界的不一致性)、平坦性问题(初速问题，早期宇宙的哈勃速度必须精细调节，使得宇宙的总动能跟引力势能在极高的精度上一致)都是关于大爆炸模型的初始条件问题。或者说，为什么观测到的来自没有因果联系区域的宇宙微波背景辐射温度几乎相同？为什么现在的宇宙的空间曲率如此之小？大爆炸模型本身无法回答我们，毕竟在不同的初始条件下，经过漫长时间的演化，现在的宇宙可以非常不同。跟天文观测结果符合的初始条件在大爆炸模型的框架下很特殊，这显得很不自在。根据大统一理论，大统一相变会产生一种零维的类点拓扑缺陷(磁单极)，它非常稳定，以致于目前宇宙中应当充斥着磁单极，但今天的宇宙中并未观测到任何磁单极的信号，这就是困扰物理学家的磁单极疑难。根据广义相对论，将宇宙的膨胀过程进行时间反演，可得出宇宙在过去有限的时间之前曾经处于一个密度和温度都无限高的状态，这一状态被称为奇点，奇点的存在意味着广义相对论理论在这里不适用，这就是奇点问题。

暴胀理论在这样的背景下应运而生。在跟斯塔罗宾斯基教授的交谈中，我们也仿佛经历了那段历史。在回忆他年轻往事的时候，斯塔罗宾斯基教授的脸庞似乎又洋溢起了青春的活力。事实上，在那段岁月里，年轻的斯塔罗宾斯基教授多产且富有创造力。斯塔罗宾斯基教授表示，正如很多其他物理理论的提出一样，在最初时期都伴随着激烈的思想碰撞，不同的物理学家从不同的角度切入，只有经过充分的交流讨论之后，才逐渐形成统一的认识。

斯塔罗宾斯基教授获得博士学位之后曾到剑桥大学访问，剑桥大学是国际引力理论研究的重

镇，活跃着一群聪明而富有远见的大脑(如刚刚发现霍金辐射的斯蒂芬·霍金(Stephen William Hawking)教授和同他一起证明奇点定理的罗杰·彭罗斯(Roger Penrose))。访问期间，斯塔罗宾斯基做出了一个重要发现，即如果考虑引力的量子修正，那么宇宙就会经历一个指数膨胀的时期。这是首次指出大爆炸之前宇宙可能有一个加速膨胀阶段。接着他又研究了这个时期的引力波的产生等问题。但当时这些研究工作在苏联以外的地方几乎不被人所知晓。

具体地，考虑引力的量子修正效应，即加入曲率标量的高次修正项之后，引力部分的作用量 S 可以写为

$$S = \int (R/(16\pi G) + R^2/b) \sqrt{-g} d^4x, \quad (1)$$

其中 g 是度规张量的行列式的值， R 是曲率标量(R 越大，代表时空弯曲越厉害)， G 是牛顿引力常数， π 是圆周率， b 是待定系数。在宇宙早期，如果 R 足够大，则 R^2 项变得重要，这样可以得到一个德西特的指数膨胀解，宇宙始于一个常曲率的德西特(de Sitter)时空，大爆炸模型不可避免的初始奇点问题因此得以解决。时隔不久(1980年)，在康奈尔大学做博士后的阿兰·古斯独立于斯塔罗宾斯基，意识到宇宙早期如果存在一个指数膨胀的时期，就可以解决均匀性问题和平坦性问题，并首次用暴胀一词来命名这一时期。古斯沿着大爆炸热力学所思考的角度，认为早期宇宙可能经历过相变(自发对称性破缺)，如果放弃熵守恒(绝热近似)的假设，可以一举解决均匀性和平坦性问题，结果是宇宙要经历一段指数膨胀时期(得益于此前理论物理学家对场论的研究，大统一理论已为众多物理学家所熟知，几乎与古斯提出的暴胀机制同一时间，德莫斯忒内斯·卡扎纳斯(Demosthenes Kazanas)，佐藤胜彦(Katsuhiko Sato)各自也发表类似观点的论文，文中指出大统一相变过程会导致早期宇宙有一个指数膨胀的时期)，这样就将均匀性和平坦性等带有哲学思辨意味的定性问题变成一个可以定量讨论的问题。不过，基于假真空到真真空衰变(量子隧穿机制)这一物理图像的暴胀模型，虽然可以驱动宇宙暴

胀,但是对于如何结束暴胀,使宇宙演化到以辐射为主的时期,他并没有给出合理的机制。很快,安德烈·林德,安德烈斯·阿尔布雷希特(Andreas Albrecht),保罗·斯泰恩哈特(Paul Steinhardt)等人受此观点启发,随后分别提出自己的暴胀模型,后被称为慢滚暴胀模型。慢滚暴胀模型给出的标量场势函数在暴胀期间非常平坦,暴胀子动能很小,处于慢滚阶段(而非量子隧穿);当到达势函数陡峭处,动能逐渐变大,暴胀(慢滚)结束,重加热过程开始,粒子产生,宇宙进入辐射为主时期,这就给出了大爆炸模型的初始条件一个合理的解释。

既然暴胀发生在如此高的能标下,量子涨落效应又会如何呢?在认真分析斯塔罗宾斯基模型后,同为苏联物理学家的维亚切斯拉夫·穆克哈诺夫和G.V.奇比索夫(G.V.Chibisov)最先注意到这个问题,并首先系统分析了这些涨落效应。1982年,在剑桥大学举办了为期三周的纳菲尔德极早期宇宙研讨会(1982 Nuffield Workshop on the Very Early Universe),会议期间,包括斯蒂芬·霍金、斯塔罗宾斯基、古斯等人也分别计算了暴胀时期的量子涨落。在他们的工作基础上,现在我们了解到,根据时空对称性(固定背景度规为FRW度规),这时的涨落可以分解为标量、矢量、张量类型,在一阶近似下,三者互不影响。其中矢量类型的涨落会随着时间迅速衰减,不产生可观效应;标量涨落会被暴胀拉出哈勃视界并冻结下来,暴胀结束之后,随着视界的变大又重新进入视界,并不断演化,形成现在宇宙中大尺度结构,比如星系团、星系、恒星、地球等。虽然量子涨落是一种“宇宙级”的现象,但事实上仅需要两个参数即可很好地刻画这个原初的标量涨落效应:一个是涨落的振幅,另一个是谱指标。前者表示涨落经过傅里叶分解之后,不同波长的波动幅度,代表扰动的强度;后者刻画了涨落的标度依赖关系。因为暴胀时期的时空是近德西特时空(德西特时空具有标度不变的功率谱),其谱指标也反映了暴胀模型所预测的功率谱偏离标度不变的程度。最新的普朗克卫星观测数据显示,

超过99.9999%的可能性功率谱偏离标度不变性(这正是暴胀模型的预言)。张量涨落有时也被称为原初引力波,广义相对论中,引力波是时空本身的扰动,扰动就像水波一样向外传播。早在1916年,爱因斯坦就预言了引力波的存在。对于局域的引力波源,已有间接的实验探测到(拉塞尔·赫尔斯(Russell Hulse)和约瑟夫·泰勒(Joe Taylor)因发现赫尔斯—泰勒脉冲双星(Hulse—Taylor binary)在螺旋式靠近而获得1993年诺贝尔物理学奖)。但直接探测原初引力波目前依然是各国科学家正在努力的方向,探测原初引力波不仅是检验广义相对论的一个重要手段,也是检验暴胀模型正确与否的一个必要途径。来自最后散射截面的CMB光子被称为宇宙当中的第一缕光,它能让我们了解大爆炸之后3800000年时候的宇宙演化信息;但是如果能够直接探测到原初引力波,由于引力子的散射截面很小,几乎不跟其他物质相互作用,所以我们可以将这个时间提前到大爆炸之后 10^{-24} s,甚至更早的时刻。在这么早的时刻,它所对应的能标比目前地球上最先进的加速器所能达到的能标还要高至少10个数量级。可以说,极早期宇宙是极高能标物理的理想实验室,通过原初引力波的探测、研究,可使我们获知近普朗克能标下物理的珍贵信息。

类似于标量涨落,也可定义张量原初功率谱,依旧可用两个参数描述:振幅和谱指标,其含义类似标量功率谱的情形。因为标量功率谱的振幅较大,一般用张量振幅对标量振幅之比 r (简称张标比)来刻画张量涨落的振幅,因此 r 是远小于1的无量纲量。由于暴胀模型预言张量的谱指标约为 $-r/8$,因此其值应更接近于零,在实验误差范围内,可将张量谱指标取零,从而减小计算复杂度(一般来说,明显偏离零的张量谱指标对应更复杂的暴胀模型)。图2即是在这样的情况下画出的示意图,其中 R^2 暴胀指的就是由斯塔罗宾斯基教授提出的暴胀模型。从图中可以看到, R^2 暴胀跟最新的实验观测数据符合非常好,它预言的相关参数位于实验观测数据允许范围的中心位置。当我们向他询问对此有何评价时,斯塔罗宾

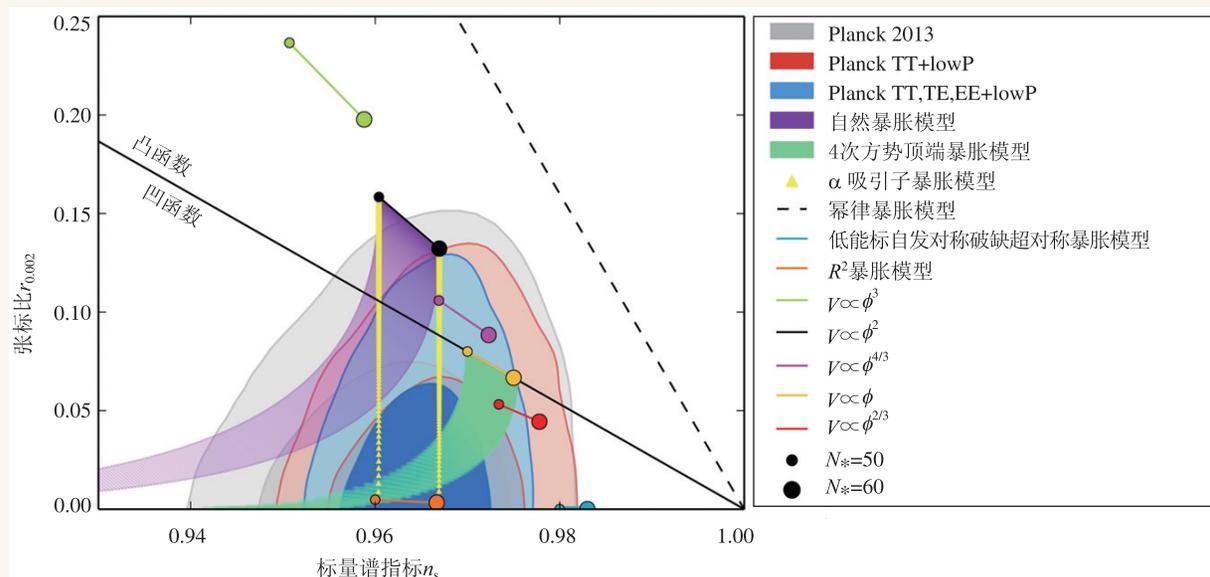


图2 图片来自普朗克实验组(Planck Collaboration)文章(预印本文库编号 1502.01589), 右边图例中 Planck 2013, Planck TT, TE, EE 和 lowP 分别代表不同的实验数据, 这些数据的不同组合给出不同的二维 n_s 和 r 值可能的范围, 在图中用对应颜色表示; 而自然暴胀以及后面的图例则是表示不同的暴胀模型对 n_s 和 r 的预言值, 其中 R^2 暴胀表示斯塔罗宾斯基暴胀模型; V 为暴胀势能函数, ϕ 为标量场; N_* 则表示宇宙到暴胀结束至少膨胀的倍数, 比如 $N_*=50$ 表示宇宙到暴胀结束至少膨胀了 e^{50} 倍

斯基教授欣然答道, 虽然 R^2 暴胀机制属最早提出之列, 也有很大的可能性被实验证实, 但他也表示, 这还需要等待未来实验观测数据的支持。图2总结了各种不同的暴胀模型对 r 值和 n_s 值(标量谱指标)的预言, 以及不同观测数据组合对这两个自由参数取值的限制。

由于慢滚暴胀模型要求张量扰动振幅至少比标量扰动振幅小一个数量级, 且限于目前实验观测的精度, 图2中对 r 值观测限定仍然过于宽泛, 斯塔罗宾斯基教授告诉我们, 如果希望进一步区分暴胀模型和非暴胀模型, 或者不同的暴胀模型, 对张标比 r 值的测量将是非常关键的。下一代的 CMB 探测计划中一个重要的目的就是探测张量信号, 这也是未来宇宙学研究的一个热点。目前最新的 Planck CMB 实验给出的张标比 $r < 0.11$ (在两个置信度下), 因为宇宙协方差的存在, 这几乎是 C_l^{TT} 谱(对 CMB 光子的测量原则上一共可以给出 6 个两点关联函数¹⁾, 分别是

$C_l^{TT}, C_l^{EE}, C_l^{BB}, C_l^{TE}, C_l^{TB}, C_l^{EB}$ 谱, 其中上标 T, E, B 可分别类比温度、电场、磁场, l 是与观测张角有关的一个量, l 越小张角越大, 最后两个两点关联函数如果不考虑可能的 CPT 破坏效应, 由于 B 模式不具有旋转对称性, 故它们的值为零)能够达到的极限。因此未来的 CMB 实验将重点放在探测 CMB 的极化信号(E 模式和 B 模式)。下一代 CMB 观测实验有望将探测精度提高到能够探测到 $r \sim 10^{-3}$ 量级的张量扰动。有必要指出, 探测 CMB 极化信号的意义不止如此, 原初扰动的非高斯性, 再电离时期的历史, 以及中微子质量等问题都可以从中寻找答案。当谈起未来宇宙学发展的看法时, 斯塔罗宾斯基教授表示很期待未来的实验, 他认为未来一段时间内引力波和暗物质很有可能将被实验直接探测到, 并表示, 不久的将来宇宙学的突破有赖于实验观测的进步。作为一个理论物理学家, 斯塔罗宾斯基教授还对前暴胀时间的物理问题非常感兴趣, 他说, 如果能跟未

1) 其中 C_l^{TT} 是宇宙微波背景辐射的温度功率谱, C_l^{EE} 是宇宙微波背景辐射的极化功率谱的电分量功率谱, C_l^{BB} 是宇宙微波背景辐射的极化功率谱的磁分量功率谱, C_l^{TE} 是宇宙微波背景辐射的温度—电分量交叉功率谱, C_l^{TB} 是宇宙微波背景辐射的温度—磁分量交叉功率谱, C_l^{EB} 是宇宙微波背景辐射的电—磁分量交叉功率谱。



微弱信号检测 半个世纪的骄傲

Model 7280
宽频数字锁相放大器

测试精确
用户信赖



Model 5113
低噪声前置放大器



生产商: 阿美特克商贸(上海)有限公司北京分公司
电话: 010-85262111-10 传真: 010-85262141-10
Email: infosi@ametek.cn
网址: www.signalrecovery.com.cn

中国代理商: 北京三尼阳光科技发展有限公司
电话: 010-65202180/81 传真: 010-65202182
Email: sales@sunnytek.net
网址: www.sunnytek.net

来的宇宙学家对话的话, 他希望听到未来宇宙学家们能够用一个美妙的理论描述这段时期。

美好的理论总是充满着迷人的魅力。当暴胀的观点被斯塔罗宾斯基、古斯等人提出之后, 很多物理学家受此思想启发, 也纷纷提出各种各样的暴胀实现机制。随着越来越多的物理学家对暴胀理论开展各个方面的研究, 迫切需要在更高的精度上检验相关的假设和预言。上世纪90年代, COBE卫星第一次观测到了CMB的微小涨落, 并测得涨落的幅度大概在 10^{-5} 量级。21世纪初的WMAP卫星在更高的精度上确认了COBE卫星的观测结果。最近的Planck卫星也在极高的精度上看到了偏离标度不变的原初标量功率谱。现代宇宙学紧随广义相对论的诞生而诞生, 发展至今也已经走过了100年的漫长岁月, 今天终于形成以“暴胀+暗能量+暗物质+发光物质”的现代宇宙学标准模型。在人类漫长的历史中, 虽然关于头上星空的深思仰望从未停下, 但是直到一百年前, 我们对宇宙的认识还是停留在定性讨论阶段。只有在借助广义相对论等基本物理理论之后, 并经过一代代人的努力, 才终于在观测上把宇宙学的各种参数值确定到了前所未有的精度。时至今日, 暴胀模型已经被绝大多数宇宙学家所接受。它所基于的几个假设当中, 许多已经被实验证实。如果其关于原初引力波的预言也被未来的实验证实, 那么暴胀理论将获得坚实的实验基础。这无疑是人类在理解宇宙演化上的重大进步。在此基础上, 物理学家对待暴胀理论的态度亦悄然发生着变化: 由研究暴胀本身实现的具体细节变成研究极高能标下引力量子化或其他基本物理理论的敲门砖。我们通过这一独特的理论, 对大自然的了解可以走得更远更深。

基础理论的研究并不能在当时就产生直接的社会效益, 但是却依然有着不可替代的价值。斯塔罗宾斯基认为, 对于公众而言, 研究宇宙学的必要性在于, 正如一个国家的发展有赖于对自身历史的了解一样, 整个人类的发展也有赖于对自身所处的宇宙的了解。

在30多年来对宇宙演化历史问题深入思索的同时, 斯塔罗宾斯基教授对人类本身的文明也饶有兴趣。他说中国是一个伟大的国家, 拥有着悠远和灿烂的文明史以及丰富的历史文化遗产, 并表示在会议结束后, 如果有时间, 将会参观北京的名胜古迹, 感受一下中国的历史文化。