

What drove cosmic inflation?

是什么驱动宇宙暴胀?

黄庆国

中国科学院理论物理研究所, 北京 100190

E-mail: huangqg@itp.ac.cn

2017-10-10 收稿, 2017-10-23 修回, 2017-10-24 接受, 2017-12-19 网络版发表

摘要 尽管热大爆炸宇宙学取得了巨大的成功, 它所预言的轻元素丰度以及宇宙微波背景辐射等都得到了大量观测的支持, 但是热大爆炸宇宙学依然面临诸如平坦性和视界等无法克服的疑难问题. 在热大爆炸之前, 宇宙历经暴胀, 在极短时间内膨胀了极大的倍数, 抹匀了宇宙初期的不均性和拉平了宇宙空间几何, 从而简单合理地解决了热大爆炸宇宙学面临的诸多疑难问题. 并且, 起源于暴胀时期的量子涨落可以自然地提供导致形成宇宙大尺度结构和微波背景辐射各向异性的原初密度涨落. 目前被广泛接受的图像是: 暴胀由标量场(也被称为暴胀子)的一段较为平缓的势能驱动, 期间暴胀子的动能远小于它的势能. 然而, 暴胀子的物理起源依然不清楚, 需要通过未来更多的理论研究和观测来揭示宇宙暴胀的机制.

关键词 暴胀, 量子涨落, 大爆炸宇宙学, 宇宙微波背景辐射

热大爆炸宇宙学的诸多预言, 比如哈勃定律、轻元素丰度以及宇宙微波背景辐射等, 都得到了众多宇宙学观测的证实. 尽管热大爆炸宇宙学取得了巨大的成功, 但是这个理论本身存在一些不可克服的困难. 比如, 基于标准的热大爆炸宇宙学, 几乎完全各向同性的宇宙微波背景辐射天图可以分割成数万个在宇宙早期没有因果联系的区域演化而来, 那么为什么这些没有因果联系的区域具有几乎完全相同的温度? 这个问题被称为“视界问题”. 此外, 尽管现有的宇宙学观测表明宇宙空间是平坦的, 但是空间平坦的宇宙是非常特殊的, 它需要非常精细地调节宇宙中所有物质的总能量密度, 使其恰好等于临界密度. 是什么样的物理机制自动地把宇宙几何调整成平坦的情形? 这个问题被称为“平坦性问题”.

为解决热大爆炸宇宙学中的视界和平坦性等问题, Guth^[1]在20世纪80年代初明确提出宇宙在热大爆炸前还经历了一段近指数的加速膨胀过程, 这个宇宙剧烈膨胀的过程也被称为“暴胀”. 正是由于暴胀时期

宇宙的剧烈膨胀将宇宙早期的不均匀性和各向异性给抹匀了, 并且同时自然地将宇宙空间几何拉平. 反过来, 空间平坦的宇宙可以看成是宇宙暴胀的预言之一, 并且已经得到了现有宇宙学观测的强力支持^[2].

到底是什么驱动了宇宙暴胀呢? 由于引力一般总是表现为吸引的, 因此引力应当让宇宙膨胀逐渐地减慢下来. 宇宙加速膨胀需要一种特殊的能量推动, 这种能量就是真空能. 真空能完全不同于人们所熟知的普通物质, 它的一个重要特性是它的能量密度随宇宙膨胀保持不变. 为了对抗宇宙膨胀带来的能量密度变小的趋势, 真空能具有一个非常特别的性质, 即它具有负的压强. 真空能负的压强产生等效的斥力, 从而推动宇宙在极早期的暴胀.

最早的时候, Guth提出宇宙一开始处在一个具有较大真空能的亚稳真空态中, 这个亚稳真空态的真空能驱动了宇宙暴胀. 由于这个真空态是亚稳的, 因此它迟早会发生衰变. 宇宙从亚稳真空态通过量子隧穿到真正稳定的真空态, 并且将亚稳真空态中的

引用格式: 黄庆国. 是什么驱动宇宙暴胀? 科学通报, 2017, 62: 4216–4219

Huang Q G. What drove cosmic inflation (in Chinese)? Chin Sci Bull, 2017, 62: 4216–4219, doi: 10.1360/N972017-01065

真真空能释放出来, 伴随产生宇宙热大爆炸的辐射和物质. 然而这个机制存在一个致命的缺点: 为了解决热大爆炸宇宙学的视界和平坦性等问题, 这个亚稳真空态的寿命不能太短, 因此要求它的衰变率不能太大, 从而导致宇宙不同区域发生衰变的时间很不一致, 从而最终形成一个不均匀的宇宙. 由此可见 Guth 最早提出的这个暴胀模型并不能最终产生一个均匀的宇宙, 明显与观测的结果不相符. 这个由 Guth 最早提出的暴胀模型也被称为“老的暴胀模型”, 这个模型存在严重的暴胀退出机制问题. 目前, 被广泛接受和采用的是所谓的“慢滚暴胀模型”^[3~5]. 在慢滚暴胀中, 宇宙并不处于亚稳真空态中, 而是由一个标量场(也被称为暴胀子)的势能提供等效的真真空能驱动宇宙暴胀. 为了解决热大爆炸宇宙学的诸多问题, 暴胀需要持续足够长的时间, 因此要求暴胀子的势能有一段较为平缓的区间. 当暴胀子在这段较为平缓的势能区间运动时, 暴胀子很缓慢地向势能更低的地方滚动, 期间它的动能相较于它的势能几乎可以忽略不计. 这也正是“慢滚暴胀”名称的由来. 在慢滚暴胀模型中, 暴胀的退出机制完全不同于 Guth 最早提出的老的暴胀模型. 慢滚暴胀的退出发生在暴胀子滚动到它的势能很陡峭的地方, 这时暴胀子在很短时间内被加速到快速运动的状态, 暴胀子也就由势能为主转变为动能为主, 从而自然地结束暴胀.

暴胀发生在宇宙极早期, 人们不可能回到暴胀时期去直接观测暴胀的物理过程, 而只能通过在宇宙中搜寻暴胀遗留下来的痕迹来了解和检验暴胀模型. 量子效应一般与一个系统的大小成反比, 这也就是为什么量子效应往往在微观系统变得很重要. 暴胀时期宇宙尺度很小, 因而量子效应不可忽略. 由于暴胀时期宇宙处于近指数的膨胀状态, 宇宙哈勃视

界的大小几乎不随时间变化. 哈勃视界是暴胀时期宇宙因果视界的大小, 暴胀子的量子涨落反比于哈勃视界的大小, 因此也近似为一个常数, 而与扰动模式的波长几乎无关, 这一特性被称为近标度不变性. 由于暴胀时期宇宙的能量密度由暴胀子的势能主导, 因此暴胀子的量子涨落会带来宇宙能量密度的涨落. 暴胀结束后, 起源于暴胀子量子涨落的宇宙原初密度涨落在引力的作用下最终演化出今天所观测到的宇宙的结构. 由于暴胀子的量子涨落是近标度不变的, 因此暴胀预言导致宇宙结构形成的原初密度涨落也是近标度不变的. 基于现有的宇宙学观测, 原初密度涨落的大小约为十万分之一, 而且暴胀所预言的原初密度涨落功率谱的近标度不变性也已经得到了观测强有力的支持^[2]. 除此之外, 引力自身的基本自由度(即引力波)的量子涨落也会遗留下来, 产生原初引力波涨落. 引力波是张量自由度, 它会在微波背景辐射中产生一种特殊的偏振模式, 即B-模式偏振. 2014年3月 BICEP2 观测组测量到大角度微波背景辐射B-模式偏振^[6]. 一开始 BICEP2 观测组宣称他们找到了原初引力波存在的证据, 然而遗憾的是在扣除银河系热尘埃物质造成的对微波背景辐射B-模式偏振的前景污染后并没有发现原初引力波存在的踪迹^[7,8]. 尽管目前仍未探测到原初引力波, 但是当前对原初引力波涨落幅度的严格限制强烈暗示暴胀其实是由一个等效的宇宙学常数主导的宇宙极早期加速膨胀过程^[9].

总之, 暴胀不仅简单地解决了热大爆炸宇宙学的诸多疑难问题, 而且它所预言的宇宙空间平坦性和近标度不变的原初密度涨落都已经得到了观测的强有力支持. 对暴胀动力学过程的更多研究将最终帮助人们解开“是什么驱动暴胀”之谜.

参考文献

- 1 Guth A. The inflationary Universe: A possible solution to the horizon and flatness problems. *Phys Rev D*, 1981, 23: 347–356
- 2 Planck Collaboration. Planck 2015 results. XX. Constraints on inflation. *Astron Astrophys*, 2016, 594: A20
- 3 Linde A. A new inflationary universe scenario: A possible solution of the horizon, flatness, homogeneity, isotropy and primordial monopole problems. *Phys Lett B*, 1982, 108: 389–393
- 4 Albrecht A, Steinhardt P. Cosmology for grand unified theories with radiatively induced symmetry breaking. *Phys Rev Lett*, 1982, 48: 1220–1223
- 5 Starobinsky A. A new type of isotropic cosmological models without singularity. *Phys Lett B*, 1980, 91: 99–102
- 6 BICEP2 Collaboration. BICEP2 I: Detection of B-mode polarization at degree angular scales. *Phys Rev Lett*, 2014, 112: 241101
- 7 Cheng C, Huang Q G, Wang S. Constraint on the primordial gravitational waves from the joint analysis of BICEP2 and Planck HFI 353 GHz dust polarization data. *J Cosmol Asrtopart Phys*, 2014, 12: 044

- 8 BICEP2/Keck, Planck Collaborations. Joint analysis of BICEP2/Keck Array and Planck data. Phys Rev Lett, 2015, 114: 101301
- 9 Huang Q G, Wang K, Wang S. Inflation model constraints from data released in 2015. Phys Rev D, 2016, 93: 103516



黄庆国

2000 年于中国科学技术大学获学士学位, 2004 年于中国科学院理论物理研究所获博士学位. 2010 年入选中国科学院引进国外杰出人才(百人计划)到中国科学院理论物理研究所工作, 先后获中国科学院卢嘉锡青年人才奖, 国家自然科学基金委员会优秀青年科学基金, 并入选国家万人计划青年拔尖人才. 主要研究领域: 宇宙学、量子引力理论.

Summary for “是什么驱动宇宙暴胀?”

What drove cosmic inflation?

HUANG QingGuo

Institute of Theoretical Physics, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100190, China
E-mail: huangqg@itp.ac.cn

Inflation is the leading paradigm for the early Universe. Not only it solves several major puzzles of the Hot Big Bang model, such as the flatness puzzle, the horizon puzzle, and so on, but it offers a natural mechanism to explain the origin of cosmic structures. The quantum fluctuations generated by the inflation field during inflation finally seeded the formation of large-scale structure and the anisotropies of cosmic microwave background observed today. The simplest setup of inflation is the so-called slow-roll inflation model in which the inflation in the early universe is supposed to be driven by the potential energy of inflation field, and ended when the potential became steep and the kinetic energy of inflation field became dominant. In order to solve the puzzles of the Hot Big Bang model, the inflation should last for 60 e-foldings at least, and then the potential of inflation field should be flat enough. On the other hand, since the energy density of the Universe during inflation is dominated by the potential of inflation field, the quantum fluctuations of inflation will finally generate the primordial density perturbations which seed the formation of large-scale structure and the anisotropies of cosmic microwave background radiation. Due to the almost un-evolving Hubble parameter during inflation, the inflation model predicts a nearly scale-invariant power spectrum of density perturbations which has been confirmed by observations at a high confidence level. In addition, the gravitational waves should be excited and finally generated a non-zero power spectrum of primordial gravitational waves. Unfortunately, up to now, the primordial gravitational waves have not been detected. However, the origin of the inflation field and how to embed the inflationary scenario into a fundamental theory are still open questions. In this sense, more studies and more observations are needed before we can finally answer what drove cosmic inflation.

inflation, quantum fluctuation, big bang cosmology, cosmic microwave background

doi: 10.1360/N972017-01065