



国家自然科学基金委员会理论物理专款资助

21世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书

宇宙学基本原理

(第二版)

龚云贵 编著



科学出版社

21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书

宇宙学基本原理

(第二版)

龚云贵 编著

科学出版社

北 京

内 容 简 介

宇宙早期暴涨引起的原初密度扰动是我们现在观测到的大尺度结构的种子. 对宇宙微波背景辐射进行更加深入的分析研究有助于我们深刻理解宇宙的演化历史, 同时宇宙暴涨机制的理论模型也对粒子物理基本理论提出了挑战. 另外天文学家在 1998 年利用超新星的观测发现宇宙现在处于加速膨胀阶段, 从而表明宇宙中存在一种看不见的反引力的被称为暗能量的物质; 而星系的旋转曲线及宇宙中的引力透镜等观测结果表明宇宙中还存在大量的不发光的暗物质. 本书同时从物理学和天文学的角度理解宇宙学的基本原理, 包括天文学及物理学中的宇宙学内容, 如宇宙学场方程的热力学对应、距离测量及数据拟合方法、宇宙原初核合成、密度扰动的自求解方法及增长因子、暴涨宇宙学模型及原初扰动谱的计算、宇宙微波背景辐射各向异性的计算、宇宙加速膨胀的超新星观测证据、暗能量参数化、吸引子解的动力学分析等.

本书可以帮助有兴趣的研究者很快进入该领域并开展高水平的研究工作.

图书在版编目(CIP)数据

宇宙学基本原理/龚云贵编著. —2 版. —北京: 科学出版社, 2016. 9
(21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书)

ISBN 978-7-03-049789-5

I. ①宇… II. ①龚… III. ①宇宙学 IV. ①P159

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2016) 第 208456 号

责任编辑: 钱 俊 / 责任校对: 彭 涛
责任印制: 张 伟 / 封面设计: 无极书装

科学出版社 出版

北京东黄城根北街 16 号
邮政编码: 100717
<http://www.sciencep.com>

北京教图印刷有限公司印刷

科学出版社发行 各地新华书店经销

*

2016 年 9 月第 一 版 开本: 720×1000 B5

2016 年 11 月第二次印刷 印张: 15

字数: 277 000

定价: 88.00 元

(如有印装质量问题, 我社负责调换)

《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》

编 委 会

主 编：夏建白

编 委：（按姓氏拼音排序）

蔡荣根	陈润生	董国轩	黄 涛
汲培文	李树深	梁作堂	刘 杰
刘 伟	楼森岳	卢建新	罗民兴
孟庆国	倪培根	欧阳钟灿	蒲 钊
任中洲	孙昌璞	陶瑞宝	王玉鹏
吴岳良	谢心澄	邢志忠	张守著
张卫平	赵光达	郑 杭	庄鹏飞

《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》

出版前言

物理学研究范畴很广,涉及从夸克到宇宙多层次的物质结构及其运动规律.物质结构从层次上讲,夸克-轻子-强子-原子核-原子-分子-团簇-凝聚态-生命物质-恒星-星系-宇宙,每个层次上都有自己的基本规律需要研究,而这些规律又是互相联系的.其分支学科涉及原子物理、分子物理、核物理、声、光、电、磁及其与物理学相关的跨学科的诸多方面内容.物理学又是许多学科(如化学、生物学、地球科学和工程学)的基础.因此,物理学是研究物质、能量、时间和空间以及其相互作用和运动规律的科学,也是最具基础性、前沿性、交叉性和综合性的学科.20世纪科学发展历史证明,理论物理学的一些重大突破(如量子力学和相对论)不仅常会带来新方向,产生新领域,推动新的学科交叉及技术革命,甚至能导致人类时空观、自然观的革命性变革.物理学研究成果深入到社会发展和人们日常生活中,社会财富的增长、经济的全球化、生命的质量和生活的标准在很大程度上依赖于技术,技术进步又在很大程度上依赖于物理学的创新研究.因此,各国政府非常重视物理学的发展,在新世纪纷纷制订物理学的发展计划,并采取一系列创新举措.

理论物理学是对自然界各个层次的物质结构和运动基本规律进行理论探索和研究的学科.由此建立的基本理论不仅成为描述和解释自然界已知的各种物理现象和运动规律的理论基础,而且还是预言和发现自然界未知的物理现象和基本规律的理论依据.理论物理学乃至整个物理学的发展是一个在概念、思想方式上不断变革的历史.历史上,当牛顿力学在19世纪取得了辉煌的成果之际,那种认为物理学甚至整个自然界的运动都可以而且应当归结为力学运动的机械自然观应运而生.1900年,普朗克在对黑体辐射能谱分布规律的研究中提出了“作用量子”的概念,这是从经典物理学迈进量子物理学的第一步.1905年,爱因斯坦又在对光电效应等问题的研究中,把普朗克的量子化关系推广到光,认为光在与物质相互作用时,每次交换一个能量为频率乘以普朗克常数的“光量子”.1913年,玻尔提出了原子的量子论,又称原子的玻尔模型.这项工作开创了微观物质系统量子理论的先河,并且为后来量子力学这门新的学科的兴起起到了不可缺少的桥梁作用.以后由于海森伯、玻恩、薛定谔、泡利、狄拉克等物理学家的奠基性工作,量子力学趋于成熟,得到了完善.戴森在评论量子力学发展历史时说:“在任何一门科学分支里,新概念难以掌握的原因常常是相同的;当时的科学家总要用先前已经存在的观念去描

绘新的概念. 发现者本人更是由于这一困难而受尽折磨; 他同旧的观念搏斗以得出新的概念, 而在以后的一段长时间内, 他思维的语言内仍然保留着旧的观念.” 只是在放弃了旧观念之后, 新的概念才变成“某种基本的和不可约简的东西. 一种以它自己的权利存在着的物理客体, 它不再需要什么别的东西来解释了”.

按照费曼的意见, 发现新的科学规律的过程是从猜想开始的, 其中使用的是尝试和纠错的方法. 他说: “猜想从何而来是完全不要紧的, 重要的是要同实验相符合.” 费曼还强调, 理论是不可能由经验直接推出来的, 因为“物理学定律常常同经验没有直接的关系, 现实经验的细节常常同基本定律相距甚远”.

恩格斯说过: “随着自然科学领域中每一个划时代的发现, 唯物主义必定要改变自己的形式.” 在 20 世纪物理学革命中, 相对论和量子力学的新理论运用了一些比以前更加不合乎常规经验的抽象思考方式, 这充分证明了科学实验是检验科学理论正确与否的唯一标准, 又充分发挥了人类精神的主观能动性, 宣告同以往的经验主义彻底决裂.

新世纪开始, 物理学面临了一次又一次新的挑战. 巨大的“哈勃”太空望远镜观测到了迄今所发现的银河系中最古老的白矮星. 这为确定宇宙年龄提供了一种全新的途径. WMAP 对微波背景辐射观测的结果告诉我们, 宇宙中普通物质只占 4%, 23% 的物质为非重子暗物质, 73% 是暗能量, 占宇宙成分的 95% 以上的暗物质和暗能量究竟是什么目前还不清楚. 中微子是一种暗物质粒子, 但它的质量非常小, 在暗物质中只能占微小的比例, 绝大部分应是所谓的冷或温的暗物质. 对基本粒子标准模型的研究取得了很大的成功, 然而它却无法解释暗物质和暗能量的本质, 不能解答宇宙中正、反物质不对称的疑难.

天文学上的发现总是让物理学家激动不已. 天文学家宣称可能已经发现两颗宇宙中最奇怪的星体——由夸克的亚原子粒子“浓汤”组成的星体, 称为奇异星, 又称夸克星. 此类星体将给物理学家提供一个弄清中子的组成成分——夸克和奇异夸克的机会.

新年伊始又传来了振奋人心的消息, 2016 年 2 月 11 日美国科学家宣布人类首次直接探测到引力波. 引力波是爱因斯坦广义相对论所预言的一种以光速传播的时空波动. 这次探测到的引力波是由 13 亿光年之外的两颗黑洞在合并的最后阶段产生的. 两颗黑洞的初始质量分别为 29 倍太阳和 36 倍太阳, 合并成了一颗 62 倍太阳质量高速旋转的黑洞, 亏损的质量以强大引力波的形式释放到宇宙空间, 被“激光干涉引力波天文台 (LIGO)”的两台孪生引力波探测器探测到. 引力波的探测, 不仅验证了广义相对论的预言, 其意义远远超出了检验广义相对论本身. LIGO 打开了一扇探索宇宙的新窗口, 人们将在未来探测到更多的未知的引力波源和原初引力波. 引力波的发现是科学史上的里程碑, 它将开创一个崭新的引力波天文学研究领域, 揭示宇宙奥秘.

此外,在近二三十年间物理学的其他领域也发展迅速,特别是与其他学科(如数学、化学、生物、信息、材料等)交叉的领域发展方兴未艾,具有巨大的发展前景.在凝聚态物理方面,有高温超导、量子 and 分数量子霍尔效应、自旋量子霍尔效应、电子隧道扫描显微镜、石墨烯和半导体微结构、巨磁阻效应和自旋电子学等.在原子、分子物理学方面有激光冷却和陷阱、原子玻色-爱因斯坦凝聚、超短光脉冲源以及量子光学、量子信息和量子计算机等.这些研究不仅具有重要的理论意义,而且具有重要的应用前景.量子信息技术是光学、原子物理、固体物理与计算机科学密切结合的交叉学科研究的极好例子.

当前国内正处于基础研究发展的最好时机,在国家自然科学基金委员会数理学部“理论物理专款”项目的支持下,我们编辑出版这套《21 世纪理论物理及其交叉学科前沿丛书》,目的是介绍现代理论物理及其交叉学科前沿领域的基本内容、最新进展和发展前景,以及中国科学家在这些领域中所取得的重大进展.希望本书能帮助大学生、研究生、博士后、青年教师和研究人员全面了解理论物理学研究进展,培养对物理学研究的兴趣,迅速进入有关的研究领域,同时吸引更多的年轻人投入和献身到理论物理学的研究中来,为发展我国的物理学研究并使之在国际上占有一席之地作出自己的贡献.

再版前言

《淮南子·原道训》注：“四方上下曰宇，古往今来曰宙，以喻天地。”宇是有实在而无一定处所，宙是有久延而无始终。在不断地探索中，人们的视野已达到一百多亿光年的宇宙深处。正所谓：浩瀚宇宙，膨胀不息，斗转星移百亿年；短暂暴涨，孕育种子，引力塌缩成星系；火球灰烬，盘古化石，尽显微波背景辐射中；上天入地，求索两暗，终教引力本质露端倪。

本书初版于 2014 年 1 月，笔者先后在华中科技大学、兰州大学、四川大学及北京师范大学等高校讲授宇宙学课程中发现了一些错误及表述不清楚的地方，同时宇宙学的研究仍然处于一个飞速发展的阶段，因此我们在本版中增添修订了如下内容：2.6 节中增加了用球状星团及白矮星年龄限制宇宙年龄的两个方法。增加了附录 A，讨论 3.1 节中涉及的粒子数密度、能量密度及压强与温度之间关系的详细计算。第一版中的 4.3 节调整到了本版的 4.2 节中。关于微扰非线性演化的 4.5 节中增加了微扰非线性增长的详细讨论。4.6.3 节中调整了对巴丁方程及标量扰动的讨论，详细讨论了密度扰动在辐射及物质为主时期的演化规律。第 5 章的内容做了很大的调整，几个常用的具体模型的详细计算被调整到新增加的 5.5 节中，5.5 节中还增加了对自然暴涨模型的讨论及利用参数化方式重构暴涨势函数的讨论。5.2 节中增加了两个小节来讨论暴涨吸引子解及 L_{yth} 约束，增加了附录 B 来详细讨论 ADM 公式计算微扰的方法，在附录 B 中同时增加了非高斯性的详细计算，增加了附录 C 来详细讨论如何计算原初引力波的频谱。6.4 节中增加了对功率谱奇数峰与偶数峰不对称等物理特性的详细讨论，增加了 6.5 节讨论光子扩散及阻尼振荡来理解功率谱在小尺度上的衰减。关于微波背景辐射极化的 6.7 节中增加了对 E 模及 B 模的更加详细的讨论，并增加了附录 D 来详细讨论球谐函数的性质及 E 模与 B 模的分解。第 6 章最后一节增加了一些具体计算过程。7.1 节中修改了对大爆炸不能发生及宇宙一直膨胀的讨论。7.4 节中增加了对一般动力学系统的介绍及 Λ CDM 模型的动力学分析。

“勿助勿忘，为学当如流水。”为学求知恰似流动不息的水，永无止境。作为一名教师和研究者，笔者在宇宙学领域还处在一个不断学习和探索的过程中，内容上难免存在谬误之处，因此，恳请读者对本书中的不足之处予以批评指正，以便更好地适应相关人员的学习研究需要。

在本书编写的过程中，感谢北京师范大学朱宗宏教授提出的富有建设性的意

见. 感谢西南大学邵青博士, 华中科技大学易竹、梁迪聪及戴宁同学所做的细致的验算和校正工作. 感谢国家自然科学基金对本书出版的资助. 同时, 也感谢科学出版社钱俊编辑, 他的热情协助使本书的再版得以顺利完成.

龚云贵

2016 年 5 月于华中科技大学

前 言

爱因斯坦在 1915 年提出广义相对论后,宇宙学才真正有了—个理论基础.哈勃定律的发现表明宇宙在向外膨胀,而宇宙微波背景辐射的发现证实了宇宙在大尺度上是均匀各向同性的这一宇宙学原理,对宇宙微波背景辐射的进一步精确测量发现了宇宙中的微小的各向异性,从而支持了 20 世纪 80 年代提出的暴涨宇宙学模型.天文学家利用超新星的观测在 1998 年发现宇宙现在处于加速膨胀阶段,从而表明宇宙中存在—种看不见的反引力的被称为暗能量的物质;而星系的旋转曲线及宇宙中的引力透镜等观测结果表明宇宙中还存在大量的不发光暗物质.这些都对物理学提出了挑战.对宇宙微波背景辐射进行更加深入的分析有助于我们深刻理解宇宙的演化历史,而暗物质及暗能量的研究也许会带来物理学的革命,所以详细而全面地介绍这些宇宙学的内容将帮助年轻—代更快地进入这一领域并开展这方面的研究工作.

目前国内宇宙学方面的书籍很少^[1-4],而且大部分为科普性的读物;少数几本宇宙学方面的书籍对于暴涨宇宙学及微波背景辐射等宇宙学的重要内容的介绍并不是很全面,更没有详细介绍宇宙的加速膨胀及暗能量等方面的内容.现代宇宙学发展的两个里程碑是宇宙暴涨模型的建立及现阶段宇宙加速膨胀的发现.正是由于有宇宙早期的暴涨导致的原初密度扰动,才有我们的大尺度结构,即宇宙早期暴涨引起的原初密度扰动是我们现在观测到的大尺度结构的种子.—方面,现代天文观测精确测量到的宇宙中很小的各向异性可以用来验证暴涨模型;另—方面,最近的观测结果表明宇宙现在处于加速膨胀阶段,这对现代物理学基本理论提出了挑战.这些最新的进展在国内的宇宙学书中没有作详细的讨论;本书的目的就是要弥补这方面的缺陷,为从事宇宙学研究的研究生及科研工作者提供—本相对全面的基础理论著作.本书的主要内容包括大爆炸标准模型、天文观测结果、宇宙的热演化历史、宇宙学微扰理论、暴涨宇宙学模型、宇宙微波背景辐射、暗能量模型等.重点阐述宇宙的演化过程、原初轻元素的合成、宇宙中的距离测量及数据拟合方法、宇宙中的物质密度扰动、暴涨宇宙学模型及原初扰动谱的计算、宇宙微波背景辐射的各向异性的计算、宇宙加速膨胀的超新星观测证据、暗能量参数化、吸引子解的动力学分析等.

笔者从 2007 年在重庆邮电大学开始本书的编著工作,并最终在华中科技大学完稿.在本书的编写过程中,作者参考了宇宙学方面的相关书籍^[5-16],在此对这些书籍的作者表示感谢.本书在 2007 年完成初稿后提供给重庆邮电大学理论物理专

业的研究生阅读,同时根据他们的反馈意见进行了修改.在本书的编著过程中,国内多位宇宙学专家对本书提出了很多宝贵意见.在此特别感谢中国科学院理论物理研究所的张元仲研究员和蔡荣根研究员、北京师范大学朱宗宏教授、上海交通大学王斌教授、重庆邮电大学陈希明教授、张益副教授以及我的研究生林建忙、费寝、赵宓、徐春、邵青.最后感谢我的家人对我工作的长期支持及帮助.

由于笔者的知识和水平有限,不妥之处在所难免,望读者批评指正.

龚云贵

2013 年 6 月于华中科技大学

目 录

第 1 章 标准宇宙学模型	1
1.1 宇宙学原理	2
1.2 牛顿宇宙学	3
1.3 罗伯逊-沃克度规	4
1.4 弗里德曼方程	5
1.5 物质为主的宇宙	8
1.5.1 爱因斯坦-德西特宇宙	9
1.5.2 开宇宙	10
1.5.3 闭宇宙	11
1.6 辐射为主的宇宙	11
1.6.1 平坦宇宙	12
1.6.2 开宇宙	13
1.6.3 闭宇宙	13
1.7 含有宇宙学常数的模型	13
1.7.1 静态 (Static) 宇宙	15
1.7.2 德西特宇宙	16
1.7.3 勒梅特模型	16
1.7.4 爱丁顿-勒梅特模型	17
1.8 视界及宇宙热力学	17
第 2 章 观测宇宙学	21
2.1 宇宙学红移	21
2.2 距离-红移关系	22
2.3 宇宙微波背景辐射	24
2.4 距离测量	27
2.4.1 三角视差	27
2.4.2 星团视差	28
2.4.3 视光度	29
2.4.4 土利-费什尔方法	30
2.5 哈勃常数	31
2.5.1 Ia 型超新星	31

2.5.2 哈勃空间望远镜重点计划	32
2.6 宇宙年龄	32
2.6.1 宇宙的年龄	33
2.6.2 放射性元素的年龄	34
2.6.3 恒星气体	35
2.6.4 白矮星冷却	36
2.7 宇宙中物质的密度及暗物质	37
2.8 星际吸收	40
2.8.1 冈-皮特森效应	41
2.8.2 AP 检验	42
2.9 χ^2 拟合方法与边缘化方法	43
2.9.1 边缘化方法	45
2.9.2 MINUIT 程序代码	46
第 3 章 宇宙的热历史	52
3.1 平衡态热力学	52
3.2 宇宙热历史	55
3.2.1 中微子温度及物质-辐射相等	57
3.2.2 重结合及退耦	59
3.3 原初核合成 (BBN)	60
3.3.1 原子核统计平衡	61
3.3.2 初始条件	61
3.3.3 轻元素的合成	64
第 4 章 宇宙学微扰理论	67
4.1 金斯理论	67
4.2 牛顿理论中的线性微扰动力学	68
4.2.1 物质为主时期的密度扰动	70
4.2.2 辐射为主时期的密度扰动	70
4.3 自求解方法	71
4.4 增长因子	73
4.5 微扰的非线性演化	76
4.5.1 临界密度	78
4.5.2 质量函数	79
4.6 相对论微扰理论	80
4.6.1 张量的分解	80
4.6.2 度规的标量扰动	81

4.6.3	共形牛顿规范下的标量微扰	84
4.6.4	同步规范下的标量扰动	90
4.6.5	规范变换	92
4.6.6	张量扰动	95
第 5 章	暴涨宇宙学	96
5.1	标准宇宙学中的困难	96
5.1.1	视界问题	96
5.1.2	平坦性问题	97
5.1.3	暴涨理论	97
5.2	标量场模型	98
5.2.1	吸引子	102
5.2.2	Lyth 约束	102
5.2.3	重新加热	103
5.3	标量场的量子微扰	103
5.3.1	量子化及两点相关函数	104
5.3.2	标量扰动谱指数	107
5.4	引力场的量子微扰	108
5.5	暴涨模型	110
5.5.1	幂次暴涨	110
5.5.2	幂次势	111
5.5.3	山顶势	112
5.5.4	双井势	114
5.5.5	自然暴涨模型	115
5.5.6	谱指数参数化及势重构	116
第 6 章	宇宙微波背景辐射	119
6.1	温度各向异性	119
6.1.1	偶极矩	120
6.1.2	萨克斯-沃尔夫效应	121
6.1.3	非高斯性	122
6.2	玻尔兹曼方程	124
6.2.1	光子的玻尔兹曼方程	125
6.2.2	张量微扰	128
6.2.3	中微子玻尔兹曼方程	128
6.2.4	递推方程	129
6.2.5	冷暗物质的玻尔兹曼方程	130

6.3 超视界密度扰动与初始条件	131
6.3.1 超视界冷暗物质的密度扰动	133
6.3.2 大尺度各向异性	133
6.4 紧耦合极限	134
6.5 光子扩散及阻尼振荡	136
6.6 沿视线积分方法	138
6.7 微波背景辐射的极化	141
6.7.1 斯托克斯参数	142
6.7.2 E 模及 B 模	143
6.7.3 汤姆孙散射	145
6.7.4 CMB 极化	146
6.8 张量微扰的玻尔兹曼方程	151
6.8.1 全角动量方法	152
6.8.2 积分解	155
第 7 章 暗能量模型	156
7.1 暗能量的观测证据	156
7.1.1 超新星与标准烛光	156
7.1.2 超新星观测结果	158
7.2 暗能量的参数化	162
7.3 标量场模型	170
7.3.1 标度解	170
7.3.2 追踪解及状态方程参数的演化速度	172
7.3.3 瓦解模型的近似解	174
7.4 动力学分析	175
7.4.1 Λ CDM 模型	176
7.4.2 指数势暗能量	178
7.5 最一般的标量场追踪解	181
7.6 全息暗能量模型	183
7.7 契浦利金气体模型	185
附录 A 统计积分计算	187
A.1 极端相对论极限	188
A.2 非相对极限	190
附录 B 标量扰动	191
B.1 二阶作用量	192
B.2 非高斯性	193

附录 C 引力波	201
附录 D 球谐函数	204
D.1 傅里叶变换	207
D.2 带自旋权重的球谐函数	207
D.3 E 模及 B 模的分解	210
参考文献	213

第1章 标准宇宙学模型

圣经中记载上帝创造了天、地、人和万物。上帝在第一天创造了白天和黑夜，然后创造了水和万物，并且在最后一天，即第六天按照自己的模样创造了人。然而我们不禁要问：上帝又是怎么来的？这在圣经中是一个不可回答的问题，而我们也不试图回答宇宙的起点问题，但是我们在本书中要学习宇宙产生后的演化历史及规律。

中国是世界上天文学发展最早的国家之一，几千年来积累了大量宝贵的天文资料。中国古代天文学萌芽于原始社会，到战国秦汉时期形成了以历法和天象观测为中心的完整体系。什么是宇宙？战国时期的尹佚认为“四方上下曰宇，古往今来曰宙”，即宇宙包括了所有的空间和时间。而古代关于宇宙的学说有盖天说、宣夜说、浑天说三种学说，这些在《晋书·天文志》中有记载：“古言天者有三家，一曰盖天，二曰宣夜，三曰浑天。”盖天说可以追溯到殷周时代，据《晋书·天文志》记载：“其言天似盖笠，地法覆槃，天地各中高外下。北极之下为天地之中，其地最高，而滂沱四隤，三光隐映，以为昼夜。天中高于外衡冬至日之所在六万里。北极下地高于外衡下地亦六万里，外衡高于北极下地二万里。天地隆高相从，日去地恒八万里。”这种盖天说后来被简化为天圆地方说，这在《周髀算经》中被表述为“天圆如张盖，地方如棋局”。

浑天说则认为天如球形，地球位于其中心。其代表性人物有发明了可以演示日、月、星辰运动的浑天仪的落下闳，及发明了地动仪的张衡。张衡在《浑天仪图注》写道：“浑天如鸡子。天体圆如弹丸，地如鸡子中黄，孤居于天内，天大而地小。天表里有水，天之包地，犹壳之裹黄。天地各乘气而立，载水而浮。周天三百六十五度又四分度之一，又中分之，则半一百八十二度八分度之五覆地上，半绕地下，故二十八宿半见半隐。其两端谓之南北极。北极乃天之中也，在正北，出地上三十六度。然则北极上规径七十二度，常见不隐。南极天地之中也，在正南，入地三十六度。南规七十二度常伏不见。两极相去一百八十二度强半。天转如车毂之运也，周旋无端，其形浑浑，故曰浑天。”

宣夜说认为，所谓“天”，并没有一个固体的“天穹”，而只不过是无边无涯的气体，日月星辰就在气体中飘浮游动。据《晋书·天文志》记载：“汉秘书郎郗萌记先师相传云：‘天了无质，仰而瞻之，高远无极，眼瞀精绝，故苍苍然也。譬之旁望远道之黄山而皆青，俯察千仞之深谷而窈黑，夫青非真色，而黑非有体也。日月众