



量子动态宇宙

兼论宇宙学中若干基本问题

邵丹 邵亮 邵常贵 宗军 著

长江出版传媒
湖北科学技术出版社

内 容 简 介

本书基于由广义相对论与量子力学相结合发展出的量子化空间、时间及引力,从物理学的角度,并以简练和通俗的笔法,阐述一种统一适于微观、宏观和宇观尺度的宇宙理论——量子动态宇宙。

描述了构成这一宇宙的空时与引力的性状和体制及二者间的区别和联系。展示了物质与空时之间各自的可能独立性。探讨了 Minkowski 空时、广义相对论以及 Robertson—Walker 度规在该理论中的地位与作用。

关于大爆炸宇宙起源、宇宙膨胀、暗能量与暗物质、宇宙学红移、黑洞等宇宙学中的若干问题,本书也阐明了来自这一宇宙理论的基本观点。

该书以全新的视野和普适的手法,精髓式地论述了一种宏观开放、微观全面量子化的动态组合宇宙;系宇宙论中,关于宇宙空时的一种全新看法。书中概念新颖、体制深刻、语言及内容贴切;适合对相对论和宇宙论感兴趣的研究者与爱好者阅读。

前 言

根据广义相对论和量子力学基本原理,本书不采用其他假设与相关论说,对宇宙中的空时与引力展开探索。以各由一个变量表述的空时与引力的双变量度量统一理论为基础,从空时与引力的角度,提出一种宇宙理论,即量子动态宇宙。该理论对宇宙中的空时与引力进行了分离表述,对二者的微观性状、宏观运动规律,以及它们之间的联系与量子化等问题,分别做出了原则上的阐述,并以此为基础建立了一种新的宇宙图景。宇宙在这一图景中,是一种宏观开放,微观全面量子化的空时、引力与物质的动态组合系统。

在对量子动态宇宙进行描述的同时,从双变量统一理论出发,对表述该宇宙理论遇到的当前宇宙学中的若干有广泛争议的基本问题,也简要表明了本书的观点。

第1章,作为起引,对宇宙和有关宇宙的现行理论,做了简略的介绍。第2章,提出了当前宇宙学中与时空和引力有关的十个标志性问题,并简述了一些不同观点。第3章申明了量子动态宇宙理论的建立原则,并介绍了理论中空间时间的形成及其量子化。阐述了时空是一种 $SU(2)$ 代数描述下自旋结网圈引力态的激发与跃迁形成的量子动力学开放体系。第4章,介绍了引力的生成及自由引力扰动的组合分布与持续跃迁,同时指出了时空与引力在跃迁过程中的相容性。第5章对量子动态宇宙理论的体制、特征及基本纲略,进行了较为全面的介绍。在介绍这一理论时空与引力的宇宙图景的同时,阐明了它与狭义相对论的 Minkowski 时空、广义相对论的引力以及 R-W 度规等的关系,得到了这种动态宇宙中描述时空与引力系统的各一组场方程,并论述了物质对引力的决定作用以及时空相对物质与引力的独立性。同时,提出了时空自身由于引力存在产生的度量增长可能导致宇宙膨胀的机制。第6章,对本书所涉及的目前宇宙学的一些基本问题,简略表述了这一宇宙理论的主张与看法。例如,对于宇宙是否产生于大爆炸,广义相对论黑洞是否存在,是否存在时空奇点及霍金辐射等问题,我们依据时空与引力的量子理论,开展了长期的探索,得到的均是与当前国际上某些流行理论相悖的否定或不同结果。

这样一些类似的结果,以不同形式,散见在作者以往关于宇宙论研究和著述之中。这也是对这些观点需要进行系统整理,并促成本书以及《空间与时间的量子理论》、《空间与时间——从经典到量子理论》两书问世的初因。

后二书为本书诞生的基础,与本书共属同一理论体系。本书于 2012 年 10 月完成初稿,后经一定使用与交流。另一部著作《量子引力——空时与引力的新体制》,为本书观点与体制上的全面支承,初稿于 2012 年春节完成,正在试用与交流之中,待出版。

此书以深入浅出的笔法,对空时与引力的来源,其度量的可能物理作用与效应,空时、引力、物质间的关系,以及宇宙的形成等基本问题,从根本上进行了别开理念的系统论述,属于宇宙论中提出的一种新理论。

邵丹 邵亮
武汉汤逊湖玉龙岛
2013 年 10 月

目 录

第 1 章 传统宇宙论	(3)
1.1 宇宙	(3)
1.2 宇宙论的相对论基础	(5)
1.2.1 广义相对论	(5)
1.2.2 R-W 度规	(6)
1.3 关于宇宙大爆炸	(7)
第 2 章 宇宙论中的指标性问题	(11)
2.1 典型宇宙学理论对空时的一般看法	(11)
2.2 宇宙学理论中的指标性问题	(13)
第 3 章 空间时间的生成描述	(25)
3.1 量子动态宇宙理论体制构建原则	(25)
3.2 量子化的 3 维组合宇宙空间	(26)
3.2.1 空间体积的量子化图景	(26)
3.2.2 量子化面积的计算	(27)
3.2.3 组合空间量子体积的计算	(28)
3.3 时间	(30)
3.4 4 维宇宙空时的度量	(32)
第 4 章 引力	(37)
4.1 引力的生成	(37)
4.1.1 引力与空时的分离表述	(37)
4.1.2 引力扰动的生成	(38)
4.2 引力扰动的空间分布	(41)
4.2.1 3 维空间中的引力自旋网 Γ^4	(41)
4.2.2 3 维空间中引力自旋网的组合结构	(41)
4.3 引力自旋网的跃迁	(44)
4.3.1 引力自旋网的 Pachner(1 \rightarrow 4)跃迁	(45)

4.3.2 引力自旋网的 Pachner(2→3)跃迁	(46)
第5章 量子动态宇宙	(51)
5.1 宇宙中空时与引力形成的统一二元世界	(51)
5.1.1 空时与引力	(51)
5.1.2 宇宙空时与引力的组合度量	(53)
5.1.3 空时与引力统一理论的作用量	(53)
5.1.4 空时与引力统一理论的两组场方程	(58)
5.1.5 空时、引力、物质间的关系	(60)
5.2 空时度量扰动参量 $\epsilon^{\mu\nu}$ 的宇宙学意义	(62)
5.2.1 宇宙学中的 R-W 度规	(63)
5.2.2 R-W 度规与扰动参量 $\epsilon^{\mu\nu}$ 的关系	(65)
5.2.3 空时度量扰动存在的普遍性	(68)
5.3 空时与引力统一理论的体制与宇宙膨胀	(69)
5.3.1 空时与引力统一理论的体制	(71)
5.3.2 双变量度量与宇宙膨胀	(75)
5.4 空时与引力统一理论的基本战略	(80)
5.4.1 二元世界及其尺度物理	(80)
5.4.2 量子动态宇宙理论发展概略	(89)
5.4.3 相对论的尺度延伸	(93)
5.4.4 双变量度量理论应用算例	(96)
5.5 等价类与微分同胚不变性	(98)
5.5.1 广义相对论与量子力学的结合	(98)
5.5.2 宇宙中的规范对称性图景	(101)
5.5.3 微分同胚等价类	(103)
第6章 关于宇宙学中的若干问题	(111)
6.1 方法论与基本观念	(111)
6.2 若干基本问题	(116)
6.3 狭义与广义相对论在宇宙中的地位	(125)
参考文献	(133)

宇宙之大，人类搏
击的，只是一个角落。

第 1 章 传统宇宙论

1.1 宇宙

宇宙,这一人类认识史上最为宏大的概念,它是由空间、时间和一切物质形态构成的复杂体系。由于宇宙过于庞杂,我们在阐述有关它的概念与理论时,常用空时与物质这两个方面作为形成它的代表,来对其进行表述。对本书而言,着重表达的则是侧重在关于空间时间、引力以及与其关系密切的物质存在与演化形式方面。

在对宇宙空时的探索上,我们知道,人类空时观经历了一个长期的充满传奇和波澜壮阔的发展历程。关于宇宙的观念,也在伴随着人类空时观的发展,不断地改变与前进。不过,由于宇宙不仅是自然科学探索的对象,也早已成为了人类其他学科了解的对象,对于人类关于宇宙的认识而言,历史上超越自然科学的思想、观念与探索方法,也大量地涌入到了有关宇宙概念的形成和宇宙学的研究之中。这使得关于宇宙的研究,不可避免地也遭到了其他势力,例如宗教、神学和权势等的侵入,千百年来形成的宇宙观则是形形色色、五花八门。不同宇宙观之间,经常充斥着对立,甚至是十分尖锐的对立。近几个世纪以来,不乏出现代表新的宇宙观的探索者,以自身的自由和生命作为代价,来对抗强权的可悲事件。

上世纪初,爱因斯坦(Einstein)相对论的发现,为人类对空时与宇宙的认识,开启了划时代的大门。从那时以后,宇宙学冲破了伪科学及权势的桎梏,开始了对自身以自然科学为基础的新的认识阶段。爱因斯坦方程及相对论空时观,奠定了现代宇宙学的理论基础。如今,传统宇宙研究中,支配宇宙空时的基本原理的溯源,仍是爱因斯坦的广义相对论。以广义相对论为根据发展出来的Robertson-Walker(R-W)度规理论,以及哈勃(Hubble)建立的宇宙观测理论,是现代宇宙学在理论上进一步发展的根据。以此为基础,对于宇宙的研究,在

诸多著名物理学家推动下,获得了长足的并令世人惊奋的发展。目前,它已经成为涉及物理学、天文学、数学、信息科学等诸多学科的最为活跃的自然科学领域之一。

在关于宇宙中的物质结构、形态,以及空时性状的理论研究上,值得关切的是,目前宇宙学中出现了不少关于这些根本问题的研究成果与预言。如,宇宙大爆炸、空时奇点、暗物质与暗能量、黑洞、空间整体形状、空间均匀与各向同性、空时中的马赫(Mach)原理等等。如上这一些,都将是影响着宇宙学自身发展的重大课题,同时又是为世人可接及的有关宇宙的乐道问题。然而,由于对宇宙的研究过于复杂和人类知识与科学技术发展水平的有限以及观念上的不同,在宇宙、空时以及其中可能存在的物质形态与性状的研究上,一直存在着诸多不同探索途径及理念上的差别,甚至是根本差别。关于宇宙的探索中,对这些基本问题的研究,当前也呈现出了大量的不同观点与结果,可谓比比皆是,蔚为大观。

例如,关于宇宙的来源问题,传统宇宙观认为,宇宙起源于大爆炸事件;而以研究量子引力而著称于世的 Ashtekar(阿希泰客)却认为,宇宙并非来自大爆炸,宇宙中从未有过大爆炸。著名物理学家潘若斯(Penrose)和霍金(Hawking)等人认为,空时可真实存在曲率无穷大的奇点;但也有人认为,这是认为空时从微观尺度直到宏观和宇观尺度都必须是连续的经典思维所造成的结果;否则,就不应把这一思考当作原理来统治空时在不同尺度上的研究。目前,关于形成宇宙的3维空间自身是否是均匀的和各向同性的问题,也开始有了不少学者在进行着不同(或相反)兴趣的研究。人们开始觉察到,空间在微观的基本特征可能不是各向同性和均匀的,而是非各向同性和非均匀的(但并不排除各向同性与均匀性的局部存在),等等,类似的事例还很多。甚至有人认为,由于对宇宙探求的深刻性、广泛性,现代自然科学集中多方面的前沿研究,将会使宇宙的探索走向新的重大发现的前夜。

总之,对宇宙的研究,如今已经形成了一个充满陌生对象,思维十分活跃,不乏研究理念与方法,呈现的理论结果可为世人惊叹的一个领域。

在诸多关于宇宙的研究成果之中,本书根据作者对空时与引力理论、特别是量子化的空间、时间和引力理论的有关研究,对宇宙的如上问题也进行了某些方面的探索,得到了若干理论上的可能结果。其中一些结果,与目前关于宇宙研究中的热点结果不尽相同。本书将着重把与大爆炸宇宙为代表的传统宇宙论中不同的观点与结果,加以概括并公之于世。这些结果中,有的与现行宇宙学研究中的某些结果形成对立,有的与其平行,而有的是对其重解。通过对这样一些具有指标意义问题的探知,书中提出了一种描述宇宙的不同理论——

量子动态宇宙。对于这样的宇宙,它在空时与物质的构成与演化行为上,从根本而言,都是量子组合与开放离散的。

这种宇宙中,除形形色色的物质集团在引力掌控下进行着永不停息的万千演绎之外,空间时间自身也具有独立改变的潜在能力,这种能力也可影响着宇宙中物质的运动。这样的宇宙中,空时与引力是根本不同的两种概念,二者不允许混淆,并具有各自的运动规律。然而,又是由于它们二者的不解之缘,在共同地决定着充满传奇的现实世界。第 3~5 章,将专门用于对这种量子动态宇宙的阐述。

1.2 宇宙论的相对论基础

1.2.1 广义相对论

在广义相对论出现之前,众多对宇宙的看法中有一种是值得提起的,那就是**静态宇宙**的思想。静态(或稳态)宇宙说也不止一种,不过大体而言,它认为宇宙是一直静止地存在着,总体上不存在体制的改变。日、月的轮回以及群星的分布是各守其职,岁岁相同,不曾发生改变。宇宙的生存状态,过去、现在和将来都是一样,永远不会发生变化。排除上帝和宗教的介入之后,静态宇宙说之中,存在有宇宙是**空间无限和时间永恒**的观点。我们认为,这是人类生产力较低、认识能力不高的条件下,朴素思维产生的一种具有积极意义的对宇宙的看法。

1915 年爱因斯坦始创广义相对论。它提出的后来以他的名字命名的**爱因斯坦方程**如下:

$$R^{\mu\nu} - \frac{1}{2}g^{\mu\nu}R = k^2 T^{\mu\nu}。 \quad (1.1)$$

该方程左边是由描述空时与引力共同形成的 4 维流形(以下记以 \mathcal{M}')的几何量,即流形 \mathcal{M}' 的度规张量 $g^{\mu\nu}$ 、黎曼曲率标量 R 和 Ricci 张量 $R^{\mu\nu}$ 构成。方程右边除 k 为常数外, $T^{\mu\nu}$ 是表达空时中决定几何量的物质存在特征的张量,我们称为质量张量。广义相对论认为整个空时中不存在物质的条件下,流形 \mathcal{M}' 是平坦的,这里记为 M' , M' 为闵可夫斯基(Minkowski)空间,其度规记为 $\eta^{\mu\nu}$ 。当空时中存在物质时,按着广义相对论,并通过方程(1.1)可知,物质存在的区域内部和外部的空时都将受到弯曲,这种弯曲可由 \mathcal{M}' 的度规形式

$$g^{\mu\nu} = \eta^{\mu\nu} + h^{\mu\nu} \quad (1.2)$$

在根本意义下做表征。(1.2)式中的 $h^{\mu\nu}$ 则是存在于空时中的有效引力扰动。由(1.2)式可知,当空时中不存在引力扰动(或引力场)时,即当

$$h^{\mu\nu} \rightarrow 0$$

时,将有

$$g^{\mu\nu} \rightarrow \eta^{\mu\nu}, \quad (1.3)$$

$$\mathcal{M}' \rightarrow M'. \quad (1.4)$$

而当空时中存在引力场时,由于(1.2)式的存在,使得空时度规离开了平坦状态, $\eta^{\mu\nu}$ 而变成了 $g^{\mu\nu}$, 从而广义相对论的某些研究认为,空时受到了弯曲,并通常把这种空时叫做“弯曲时空”。

可以讲,这种“弯曲时空”的观念几乎贯穿着全部广义相对论,并且在宇宙空时的研究中,也贯穿至今。也就是说,宇宙论中的空时(或时空)指的就是这种意义下的空时,它的弯曲也是这种意义下的弯曲。从上面的论述可知,这种弯曲实际上是由于空时中存在有引力扰动 $h^{\mu\nu}$ 所造成,故这里称之为引力弯曲。换言之,广义相对论就是以如上的体制和引力弯曲机制进入到了宇宙论的研究,目前宇宙学研究所谈及的时空弯曲,通常指的就是这种意义下的引力弯曲。

我们知道,广义相对论是种在宏观定域条件下建立并在宇宙局部范围内得到验证的一种成功的关于空时与引力的理论。它向微观尺度的发展以及在宏观更宏大尺度上的适应性,是个尚待进一步解决的物理学和宇宙学基本问题。不过尽管如此,正如前面所述,是广义相对论使宇宙学的研究走上了以自然科学为基础的道路,并获得了快速发展。

1.2.2 R-W 度规

R-W 度规是宇宙论的理论支柱。它是以广义相对论为根基,引入 5 条假设后,被建立起来的。这 5 条假设如下:

- a) 4 维空时中存在整体坐标,可供标定空时(3+1)一分解的时间;
- b) 属于 1 维时间坐标值的 3 维空间,是局部各向同性的;
- c) 3 维空间中属于一个固定时刻的任何两点,均等价;
- d) 物质均匀分布在宇宙空间之中;
- e) 3 维空间几何由物质分布决定。

这里指出,离开这些假设,我们并不能从广义相对论直接得到这种满足爱因斯坦方程的 R-W 度规。在上述 5 条假设下,4 维宇宙空时的 R-W 度规在通常球极坐标系 $(x^0, x^1, x^2, x^3) \equiv (x^0 = ct, r, \theta, \varphi)$ 中,可以用如下线元形式给出:

$$ds^2 = (dx^0)^2 - \lambda^2(t) \left(\frac{dr^2}{1 - Kr^2} + r^2 d\theta^2 + r^2 \sin^2 \theta d\varphi^2 \right), \quad (1.5)$$

这里, c 为光速, $\lambda^2(t)$ 为空间尺度因子。 $K = 0$, $K < 0$, $K > 0$ 分别表征形成宇宙的 3 维空间是平坦开放的、双曲面开放的、球面封闭的三种状态。这一结果, 将导致对宇宙空时中的 3 维空间被赋予了具有模型意义的整体几何形状。我们将看到, 这种对宇宙的描述, 一方面使宇宙学获得了向前深入探索的理论通道; 另一方面也似乎具有使固定模式下对宇宙的描述取代对真实宇宙全面探索的倾向。R-W 度规在空时研究上的意义在于, 它在一定意义下使 3 维空间的演化得到了相对独立的描写, 同时又树立了整体宇宙的概念, 并使整体宇宙空时的度规得到了离开物质的质量张量具体特征的一般表述。这种表述使 R-W 度规在相当程度上成了对空时整体性状探索的有力工具。例如, 利用空间尺度因子 $\lambda^2(t)$ 表达的空间膨胀与收缩, 时间的可能起点, 以及宇宙中不同物质形态的组成与数量分布等前沿研究, 都离不开 R-W 度规, 且都促使了当今宇宙学的研究获得了相当高热度的发展。R-W 度规理论不仅是发展宇宙学研究强而有力的理论基础, 同时许多宇宙学研究中的重大问题的提出, 如宇宙大爆炸、宇宙膨胀、暗物质与暗能量、空时整体几何等著名宇宙学命题, 都直接或间接依据 R-W 度规。

然而, 不能不指出, 当前宇宙学研究中, 也出现了与 R-W 度规主流研究不同的探索方向。例如, R-W 度规建立时的 5 条假设中的“空间均匀与各向同性问题”、“物质分布均匀问题”等, 已开始受到质疑, 并展开了新的探索。它们在求解爱因斯坦方程和建立 R-W 度规理论过程中, 发挥了至关重要的作用, 不过由于它们毕竟是假设, 有的研究者认为, 真实的宇宙应当在摆脱这些人为假设的条件下, 获得更加自由和多面的探索, 以假设条件下得到的结果代替对整体宇宙的认识, 并不具有逻辑上的充分性。

1.3 关于宇宙大爆炸

人们知道, 宇宙膨胀是一个少有的被确立了的宇宙观测事实。利用这一事实, 借助于 R-W 度规, 可把宇宙追溯为由一个奇点经大爆炸而产生。这一理论由伽莫夫(Gamov)率先于 1948 年提出。理论认为, 宇宙空时与物质都来源于约 137 亿年前的一次大爆炸事件。这一事件大致在 Planck(普朗克)时间尺度(10^{-43} 亿秒)和 Planck 空间尺度(10^{-33} 厘米)之内, 以超光速的速率完成。接着宇宙经不断膨胀及伴随的演化而呈现了至今的面貌。宇宙来源于大爆炸, 在宇

宙学的一些研究中占有举足轻重的地位,当前,宇宙学的某些理论、甚至一些主要有影响理论的研究,几乎都不能离开宇宙大爆炸事件作为溯源推理的逻辑根据。所以,尽管国内外许多学者对宇宙大爆炸持有异议,甚至强烈的非议,宇宙大爆炸理论的研究者也认为这一理论存在问题,然而宇宙大爆炸理论仍然可若无其事的流行。目前,大爆炸理论几近成了占主导地位的宇宙模型理论。国际上,宇宙大爆炸理论几乎成了传统宇宙论的熟知代言人。这也就是说,宇宙大爆炸不仅成了宇宙学研究领域的热门话题,而且也甚至被拿来当作宇宙学理论研究的支承点。

不过,这里需要指出的是,在宇宙大爆炸理论盛行的当代背景下,以量子力学和量子化空时观念为基础的一种无大爆炸宇宙模型——圈量子宇宙学模型,已经在二十余年前被 Ashtekar 等人提出。这一模型中,以量子大反弹取缔了空时大爆炸。圈量子宇宙学的问世说明,新的宇宙学理论也在层出不穷地出现,并且与必须承认宇宙大爆炸并无关系。我们后面将进一步指出,也有人认为,所谓空时大爆炸事件,其实将是宇宙学研究中的一个技术与精神误区。

目前,对宇宙大爆炸而言,一方面是理论的变化和演绎形式层出不穷;一方面则是质疑的声势越发高涨。它已经形成了宇宙学乃至自然科学的一个重大悬念频出,但理论上的结果仍然不断再现的发展方向。

当前，正处在宇宙学观念深刻变革的前夜。

第2章 宇宙论中的指标性问题

第1章中曾指出,由于宇宙学的特殊性,在关于宇宙的理论研究中,出现了许多关系到具有重大科学意义的研究课题。它们的出现,不仅对宇宙学、物理学,乃至对自然科学的发展也可能产生深远影响。然而,由于问题过于特殊,实验观测难度过大,以及基础理论的不足,这些在自然科学上具有指标意义课题的提出,虽然会对科学探索具有导向作用,并为世人所瞩目,但其中也往往存在着未解问题,甚至许多根本性问题。关于它们的探讨,在宇宙学研究中也广泛地存在着争议,甚至是不可调和的争议。宇宙学,在其发展历史上,是存在争议和未解问题颇多的一种理论,就目前而言,这样一些充斥着挑战的基本问题,依然大量地存在,而且已经形成了宇宙学研究的现代特征和诸多前沿热点。本章将着重从与空时特征有关的方面,简要介绍这样一些基本问题。

2.1 典型宇宙学理论对空时的一般看法

我们知道,宇宙学是由人类对宇宙的看法汇集而成的理论。关于这些看法的产生,可以追溯到远古时期。那时,当人们在生活、生产实践活动中,不可避免地对外围环境、日月星辰以及昼夜与四季交替等自然现象有了一定了解之后,便自然地开始了对宇宙的思索与认知。近千百年以来,不断探索、累积与波澜壮阔的发展,使得这种了解形成了人类认识史上最为古老、又最为年轻的一门科学——宇宙学。人类对宇宙的认识,代表了人类知识的结晶,宇宙学在人类文明史上,也一直是一种具有综合性的前沿学科。它发展至今,得到的人类对宇宙空时及其中物质结构与运行和演化的看法,已浩如烟海。它所形成的典型的关于宇宙的理论,也已不胜枚举,并正在充满活力地向前推进着。

目前,各种各样的关于宇宙的理论研究,对空间时间及与其相伴的引力的探索,是产生不同宇宙学观点和理论的热门策源地。物理学和宇宙学的发展史一再表明,不同的空时理论不仅决定着与其相适应的物理理论的建立,同时也