

PHYSICS

IN
THREE-BODY

《三体》

中的物理学

李淼 著

$$T = 2.7255 \text{ K} \quad c = 299792458 \text{ m/s}$$
$$a(t) = a(t=0) e^{Ht} \quad \hbar = 6.626 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s} \quad G = 6.67 \times 10^{-11} \text{ m}^3/\text{kg}\cdot\text{s}^2$$
$$t = 10^{-32} \text{ s} \quad \text{inflation!} \quad e = 1.602 \times 10^{-19} \text{ C}$$
$$\rho = 3M_p^2 H^2 \quad e^{Ht} = 10^{26} \quad m_1/m_e = \dots$$

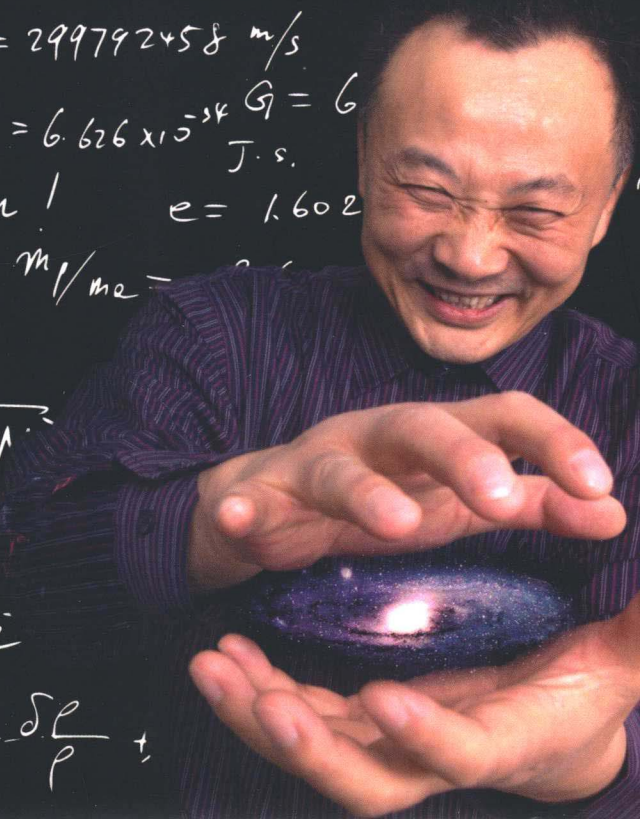
$$\rho_s(k) = \frac{H^2}{4\pi^2 \varphi^2} = \frac{H^2}{8\pi^2 \epsilon_1}$$

$$B_{en} = \int_0^R \psi_{in}(r) dr$$

$$F_{en} e^{-i\omega_{en}t} e^{i\omega_{en}t}$$

技术出版社

$$\frac{\delta \epsilon}{G} = \frac{\delta \rho}{\rho} + \dots$$



《三体》中的物理学

李淼 著



四川科学技术出版社

图书在版编目(CIP)数据

《三体》中的物理学 / 李森 著.

- 成都: 四川科学技术出版社, 2015.4

ISBN 978-7-5364-8068-1

I. ①三… II. ①李… III. ①物理学—普及读物 IV. ①04-49

中国版本图书馆 CIP 数据核字(2015)第 057493 号

《三体》中的物理学

SANTI ZHONG DE WULIXUE

出品人 钱丹凝

著者 李 森

责任编辑 肖 伊 姚海军

封面设计 李 鑫

版面设计 李 鑫

责任出版 欧晓春

出版发行 四川科学技术出版社

成都市三洞桥路 12 号 邮政编码: 610031

成品尺寸 160mm × 228mm

印 张 14.25

字 数 170 千

插 页 2

印 刷 四川省南方印务有限公司

版 次 2015 年 4 月第一版

印 次 2015 年 4 月第一次印刷

定 价 32.00 元

ISBN 978-7-5364-8068-1

■ 版权所有 翻印必究 ■

■ 本书如有缺页、破损、装订错误,请寄回印刷厂调换。

比科幻更神奇的科学

刘慈欣

科幻小说能够引发读者对科学的兴趣，进而投身于科学研究事业，这样的例子有许多。但科幻小说本身却并不是以科学家为读者对象的，造就了硬科幻类型的坎贝尔曾经声称，他的杂志上发表的科幻小说是给工程师看的，但也没说是给科学家看。显然，科幻小说中的科学对于专业科学家而言过于幼稚简陋了，其中的硬伤也常常让他们难以容忍。在20世纪80年代，我曾经读过大量的包括科幻小说在内的西方类型文学，深知写出好小说不容易，但在小说里在某个领域显得很专业并不是一件难事，西方类型文学作家们深谙此道，像科幻中的迈克尔·克莱顿、军事小说中的汤姆·克兰西和专写各专业领域的阿瑟·黑利都是此中高手，他们在小说中所表现的专业程度真的能把读者唬得五体投地。但这种“专业”只是对一般读者而言，在真正的专业人士面前无疑是千疮百孔的。所以，当我得知李森老师在看《三体》系列，后来又得知他在写这本书时，心里很是不安。

但在读完《〈三体〉中的物理学》的书稿后，我对李老师的眼界和胸怀深为敬佩和折服。他并没有像一般的读者和网友一样，专注于挑小说中的硬伤（在这方面他无疑是最有资格的），而是以《三体》中的科幻内容作为引子和起点，描绘了一幅现代物理学和宇宙学的宏伟图景。从牛顿力学到相对论，从量子力学到弦论，从多维空间到黑洞，从宇宙

的诞生到最后的终结，甚至还从物理学的角度探讨了自由意志的命题。本书几乎涉及物理学和宇宙学前沿的所有方面，在一本篇幅不长的书中展现了如此广阔的视野，呈现出如此丰富的内容，令人赞叹。同时，书中对各个话题的探讨并非浮光掠影，也不是仅仅满足于用简单的比喻对复杂的理论进行粗略的描述，而是很快抓住了其科学和哲学的内涵，处处可见作者思想的犀利和深刻。在对理论内容的叙述中，作者的语言准确而生动，更难能可贵的是，为了照顾不同的读者，还对一些复杂的理论进行了不同次层的描述。

《〈三体〉中的物理学》给人印象最深的地方还在于，作者没有局限于知识的叙述，而是在《三体》的背景上提出了许多富有创意的想法和推论。比如在超光速航行的状态下，在不同时间多个自我的出现；在四维空间中，电磁波能量的衰减与距离的立方成反比，以及黑域中低光速对精细结构常数产生的影响，都可能导致分子和原子解体，使从三维世界进入其中的一切都灰飞烟灭；还有关于水滴和降维攻击的可能性，创造小宇宙的可能性等，都十分震撼和新奇，让我们有读科幻小说的快感，但这些推论又都是建立在严谨的科学理论基础上，建立在作者对物理学和宇宙学深刻的理解上，有科学幻想的神奇，却比其高一个层次。

最初我是从《新发现》杂志上知道李森老师的。在这本由欧洲引进中国的著名科学传播杂志上有他的一个专栏，当时他正在专栏上发表《中国神话中的现代物理学》的系列文章，用现代宇宙学理论演绎中国古代神话，从盘古到玉皇大帝，都在现代的宇宙演化图景中扮演着自己的角色，构筑了一幅色彩奇异的画卷。作为一名物理学家，作者对中国文化的广博知识自然让人印象深刻，但最令人惊叹的是作者在文中所表现出来的想象力，天马行空，汪洋恣肆，又不乏幽默风趣，让我这样的科幻作者也不得不叹服。而这样的想象力与他精深的专业知识相结合，更是难能可贵。后来，我又看到了李森更多的文章，也常看他的微博，发现他的知识面很广，特别是对文学和音乐都有广泛的涉猎和修养，还是一位诗人，在微博上贴出了许多现代诗，那些诗精致而意境深远，读后回味无穷。

穷。其实这样的科学家在国外并不罕见，就我读过的科学传播著作而言，像彭罗斯、刘易斯、加来道雄等人，都是知识广博、文理俱佳的自然科学学者。但在国内则不同，以前我也接触过一些国内的科学家，他们留给我的印象是严谨认真，勤奋努力，但总感到缺少一种灵气，在自己的专业领域之外视野比较窄，对专业本身也缺少一种超越性的眼界，这可能是中国文理分科的教育环境所造成的。所以知道李森老师后，我和《新发现》的主编严锋教授一样发出感叹：原来我们也有这样的科学家！李老师所研究的弦论是物理学最前沿的理论，这个理论体系具有强烈的未来物理学的色彩，正如有人评论说，弦论很可能像古希腊德莫克里特的原子论，要到两千年后才可能在实验中得到证实。研究这样的课题，必需有开阔的视野和灵动而深刻的思想，以及美学上的敏感和悟性，我想本书的作者就是这样的科学家。

回到《〈三体〉中的物理学》上来，科学与文学的结合能给我们带来什么？

从狭义上看，科学能够给处于困境中的文学带来丰富的故事资源。当今的文学可以分为两部分：主流文学和类型文学，两者日益分化。主流文学最明显的现状就是，怎么说比说什么更重要，具有高度形式化的特点。特别是后现代文学，它的形式已经掩盖了故事的内容，变得晦涩与破碎，以至于和普通大众的距离越拉越远。主流文学的形式化可以找出种种深刻的原因，但有一个简单的原因在里面：文学的故事讲完了。现代文学有很重要的两种手法：解构和拼贴，这两种手法和故事资源有着密切的联系。解构和拼贴都是把以往大家熟悉的东西打乱重组，赋予一个新的意义，这其实是对已经开发过的故事资源进行再利用，充分反映了文学故事资源的枯竭。对类型文学而言，虽然没有走主流文学的路子，因形式化而晦涩和远离大众，但是其故事构型已经为大家所熟知，因此故事要征服、震撼读者已经越来越困难。除非将情节极度扭曲，否则读者脑海里总有一种似曾相识的感觉。正因如此，有创意的能够征服读者的故事越来越难以出现。

对于科学与文学的关系，人们一直有一个很大的误解，认为科学对文学是一种束缚。这种误解在把奇幻与科幻两种幻想文学体裁进行对比时表现得最明显。人们倾向于认为，与科幻相比，奇幻在想象力上要自由得多，因为不受科学规律的束缚。但现代科学所展现出来的大自然和宇宙的可能性，已经远远超出了人们的经验和直觉，这种可能性给文学带来的恰恰是更大的自由度。以奇幻和科幻中的超能力为例：奇幻固然可以自由地赋予人物各种超能力，不受自然规律的限制，但迄今为止在奇幻文学中我们能想到的最强的超能力，就是造物主的能力：上帝在7天内创造了世界。那么科学的创世图景是什么样子呢？按照宇宙学中的暴胀理论，宇宙曾经由一个比原子还小的奇点瞬间膨胀到我们现在的宇宙尺度，可见半径有一百多亿光年，这个过程只需一个普朗克时间，也就是 10^{-43} 秒。如此巨大的力量对我们常人来说完全不可想象，上帝的7天创世根本无法与之相比。但更为震撼的是，这个创世图景不是虚假的幻想，而是基于现有的对宇宙的观测数据所做的严格的科学推论。由此看到，科学其实是对文学的解放，而不是束缚。

科学的故事资源可分为两类：一类基于古典科学，另一类基于现代科学，这两者在物理学上大体以相对论为分界。

古典科学在文学上的最大特点是符合人们的日常经验和直觉，其故事资源虽然已经被大量开发，但仍有巨大的潜力。在2012年成都《科幻世界》举办的创作笔会上，李森老师曾提出，科幻应该从最简单最基本的科学原理推导出精彩的故事，这是一个很高明的见解。像《冷酷的方程式》《追赶太阳》等，都是这样的经典作品，已经过去的科幻小说的黄金时代在很大程度上是建立在这样的创作理念上的。但要做到这点也十分困难，需要超强的想象力和创意，是对科幻作者真正的考验。

现代前沿科学理论中的故事资源，是目前很少被开发的处女地。本书中涉及的物理学和宇宙学，都是探求世界最根本的原理、最终极的本源，这其中蕴藏着丰富的故事宝库。但它目前提供的世界图景，跟我们的常识有很大的差异，许多的知识，如弦论中的11维空间，也只能用艰深的

数学语言才能精确地描述，一般的科幻作者很难从数学层面真正理解这些理论，更不用说把它们变成生动的故事。这样的科幻小说，只能由科学家来写，所以我们还是期待李森老师的科幻作品早日问世。

从广义上看，科学与文学的结合有着更为深远的意义。现代科学前沿离大众越来越远，比如量子力学的思想清末民初时已经在欧洲出现，但直到今天，它的世界观对大众而言仍然十分陌生和遥远。把现代科学的最新发现和理论向社会传播，对文明的发展是至关重要的。

我一直认为，科幻文学无力承担科学传播的重任，因为科幻中的科学不是真正的科学，而是科学在文学中的一种映象和变形，这一点相信大家看过《〈三体〉中的物理学》后都会认可；但科幻却能够表现宇宙和大自然的神奇，激发人们对科学探索的兴趣，进而提升人们对科学的关注程度。《三体》系列中的科幻想象与真正的科学有很大距离，但它的出版能够引发读者对前沿物理学和宇宙学的兴趣，进而引出了《〈三体〉中的物理学》这样一本比科幻小说更神奇的科学传播著作，作为科幻作者，这无疑是我最大的安慰。

目录

1/	第1章 宇宙与智慧
5/	第2章 时间与空间(上)
16/	第3章 时间与空间(下)
29/	第4章 黑洞和黑域
39/	第5章 宇宙的生与死
55/	第6章 不确定的世界
68/	第7章 实在性,诡异的“超距作用”和贝尔不等式
81/	第8章 智子和量子通信(上)
90/	第9章 智子和量子通信(下)
101/	第10章 神奇的水滴
114/	第11章 物质的深层结构
128/	第12章 思想钢印和自由意志——人类有自由意志吗?(上)
137/	第13章 思想钢印和自由意志——人类有自由意志吗?(下)
149/	第14章 三维人进入四维会发生什么?
153/	第15章 曲率驱动星际旅行
165/	第16章 二向箔、空间灾变以及宇宙大爆炸
173/	第17章 彭加莱回归和熵增
176/	第18章 引力波天线
193/	第19章 宇宙永生?
205/	第20章 黑暗森林
216/	结束语

第1章 宇宙与智慧

刘慈欣的《三体》三部曲，是迄今在中国出版的影响最大的华语科幻小说。这一杰作的魅力，主要来自于作者宏大的想象、难以预测的情节以及幻想的主题。

开始读《三体》三部曲的时候，我并未特别喜欢，主要是觉得作者的三观（世界观、人生观、价值观）有点“主流”，比如说某个政府的形态可以延续到未来的一百年后，而其中一些我们熟悉的称谓，如首长和同志之类，也显得有些过时。可随着阅读的深入，我慢慢改变了看法，也许作者不可避免地受到了主流三观的影响，但其实这部小说真正的目的是探索文明与文明之间的关系，文明将如何延续，以及智慧在宇宙中的位置。

换句话说，刘慈欣写这部小说，除了过他的科幻瘾之外，还想顺便探讨一下人类的一些终极问题：宇宙如何发展？宇宙在智慧的影响下如何发展？时空可变吗？文明的归宿是什么？……因此在故事展开过程中，就不免涉及各门各类科学与技术。他在这部恢宏的巨著中用到了物理学、社会学以及计算科学，但细读全书，会发现他用到的物理学的设定最多，这是为

什么？

原因只有一个，20 世纪的物理学发展彻底颠覆了人类对世界的看法，同时也改变了人类的生活。量子论与相对论改变了我们对客观世界实在性的认识，改变了我们对时间和空间的认识，使得宇宙本身变得更加奇妙，不像牛顿机械论中那样冷冰冰且永恒不变。在 20 世纪，物理学在某种程度上更加接近于哲学，这使得一些早已被科学界主流抛弃的哲学命题得以回归。至于说到物理学改变了人类的生活这一话题，我们只要举几个例子就能明白这种改变有多么巨大：航空与航天、核能、计算机与网络。

因此，如果你要写一部设定宏大的科幻小说，借助物理学是最方便快捷的。

保罗·戴维斯在他的名著《上帝与新物理学》中写道：“具有讽刺意味的是，一直走在各种学科之前的物理学现在正对精神越来越倾向于肯定；而生命科学则仍旧走在上一个世纪的物理学老路上，现在正试图完全取消精神。”心理学家哈罗德·莫洛维茨对物理学和生命科学如此转换对精神的看法提出了如下的评论：

“实际情况是，生物学家们以前认为人的精神在自然界的分类等级之中占有一个特殊地位，现在则义无反顾地走向赤裸裸的唯物论；而 19 世纪的物理学就是以唯物论为其特色的。与此同时，面对着咄咄逼人的实验证据的物理学家们则脱离严格的、机械的种种宇宙模型，转而把精神看作在一切物理事件中扮演着一个与事件不可分离的角色。这两个学科就像是坐在两列交错而过的火车上的乘客，彼此都没注意到对面开过来的火车上正在发生什么事。

“在下面的几章中，我们将要看到新物理学如何赋予‘观察者’在物理学意义上的自然中的中心地位。越来越多的人认为，基础科学近来的进展更有可能揭示出存在的更深一层的意义，而不是投合传统的宗教。总之，宗

教对这些科学进展不可能视而不见。”

《三体》一开始就展示了三体人的令人不可思议的技术,从发射智子到派出以百分之一光速飞行的太空舰队。这支太空舰队之后还出现了可以直接进入光速飞行的第二太空舰队。可是,三体人的技术与后来的“神一样的文明”相比,完全是小巫见大巫。那种神一样的文明可以改变空间维度,甚至改变物理学规律。改变物理学规律成了文明之间战争的终极武器。最后,宇宙不得不在文明的干涉之下完全改变了演化进程。

改变物理学规律,这可能吗?智慧生物将成为无所不能的神?其实,刘慈欣不是在科幻中涉及这个话题的第一人。波兰科幻作家、哲学家斯坦尼斯拉夫·莱姆在《宇宙创生新论》中探讨的就是这个问题。

《三体》中的终极设定和莱姆的设想其实在超弦理论中原则上是可以实现的,这是目前最为流行的物理基础理论。弦论作为一个统一所有物理学基本规律的理论,并未预言一个唯一的宇宙。在弦论中,我们的宇宙只是所有可能的宇宙中的一个,它所遵循的物理学规律,它包含的物质形态,都是弦论中无数可能的一种。因此,设想超级智慧可以改变宇宙,改变物理学规律,并不像看上去那么异想天开。当然,物理学家还不知道弦论是否是正确的。很多实验家和理论家还在努力证明弦论就是描述这个世界的理论。

随着年纪的增大,我对人在宇宙中的位置的兴趣越来越大。倒不是因为我也想知道人类的未来是什么,人类是否会飞向其他恒星甚至飞出银河系,也不是因为想知道人类在未来是否会遭遇外星文明,不同文明之间的相遇是友好的还是敌对的……所有这些对我来说都不重要。对我来说更加重要的是,我们到底能不能够认识世界的终极规律?宇宙是怎么来的,宇宙的宿命是什么?意识,乃至智慧是这个宇宙发展过程中的偶然现象,还是必然?我们有着唯一的宿命,还是可以改变自己的未来?这些都是一些科学上的终极问题。这些终极问题,当然不可避免地会在科幻写作中出现。也许,

我和华语科幻作家视人类为一个整体稍有不同的是,我更加关心个人,关心人的生存状态和意义,说到底,这与关心自己有关。

解决自己心中的问题有很多不同的途径。有人直接去研究科学,比如物理学,比如认知科学,比如天文学中的一个特异的分支——寻找外星文明。另一种方式就是用小说的形式描述自己的猜想,这是刘慈欣的道路。除《三体》三部曲之外,几乎所有他的小说都和飞出太阳系有关,或者与寻找终极真理有关,前者如《流浪地球》《赡养上帝》,后者如《朝闻道》《镜子》。《三体》三部曲是综合了两者,指出文明最终的出路是星际旅行,但星际旅行又会带来难以预料的后果,那就是文明之间的碰撞。既然要专写这些,物理学就不可避免地成为刘慈欣的主要灵感来源。

话说回来,这本书所关心的话题,还是物理学的基本规律。在后面的各章节中,我们将慢慢地从量子论和相对论开始,然后谈到《三体》三部曲中涉及的很多现代物理学以及还在发展中的物理学,如弦论中的时空观。一些更加技术性的话题,如量子涉及的量子通信,时空维度的改变,制造黑域等,将放在书的后半部分。

第2章 时间与空间(上)

关于空间的基本事实

一切存在都不能脱离空间,这是我们的经验事实。

小时候,我读过那时最流行的科普作品——《十万个为什么》,首先接触的就是一个基本事实:我们生活在地球上,地球是圆的。

地球是圆的这个事实,古希腊人就知道了。毕达哥拉斯学派从球形是最完美的这个理念,推测地球是球形的。当然,地球在转动,并且不是完美的球形,而是梨子形。后来,亚里士多德从月食现象论证地球是球体:造成月食的原因是地球在月亮上的投影,由于月食的分界线总是弧形,所以地球是球形的。

后世学科学的学生总有些瞧不起亚里士多德,因为他提出了错误的力学观。其实,亚里士多德有很多科学贡献。单就地球是球形的论点,除了来自月食的支撑外,他还有另外两个论据。其一,夜间从北向南走,或从南向北走,总看到前方有新的星星在地平线上出现,另一些却在后方消失;其

二,风平浪静的时候,我们在船上看大海总是一个有限的圆,并且,远处的船总是桅杆先出现,船身后出现。这个现象还可以帮助我们计算地球的半径!当然,你也可以通过估算我们在大海上看到的海球面的半径,用你在海面上的身高推出地球的半径。这是一个很简单的几何学问题,留给读者做练习。这里我们给一个例子,假如你身高是2米,直接站在海面上,由于地球的直径约为12742千米,那么你能看到的最远处在5千米左右。

因为人类一直被束缚在地球上,我们很难推出空间的真正性质。首先,地球有重力,这使得人类从牛顿到爱因斯坦花了将近250年才弄清空间本身不像三角几何学告诉我们的那样是平坦的,三维空间是可以弯曲的。三维空间的弯曲不容易想象,但我们容易想象二维的弯曲空间,球面本身就是,马鞍面也是。我们在数学上将球面和马鞍面推广,就能用数学来刻画三维弯曲空间。

高斯本人就曾经猜测三维空间类似地球表面,不是平坦的,也就是说在我们生活的空间中,三角形的内角和不等于 180° (在球面上,一个三角形的内角和大于 180°)。高斯发展了两维曲面理论,他的理论后来被黎曼推广到任意空间维度。一直等到爱因斯坦崭露头角,我们才知道三维空间真的不是平坦的,原则上与万有引力的强度有关。

当然,地球的引力不足以使空间弯曲得太厉害,我们在后面谈到黑洞和黑域时再讨论地球引力场中的空间的弯曲程度。

如果空间是弯曲的,那么,原则上我们就可以超越牛顿以及他的前人,想象一个几何上十分复杂的宇宙。首先,在最大尺度上想象,宇宙可能是闭合的,也就是说由于空间是弯曲的,我们沿着短程线向前走,走着走着就回来了。打个比方,我们在地球上走短程线,其实就是大圆,我们沿着大圆走,路径不断地向下弯,弯着弯着,我们就绕着地球走了一圈回到了原点。

因为我们生活在三维空间中,就难以想象三维空间是弯曲的,但在数学

和物理上却证明这都是可能的。即使没有爱因斯坦,在牛顿力学中,我们都可以假设生活在一个三维弯曲空间中,只是,在宇宙尺度上我们要修改牛顿力学。

现在我们知道,宇宙是非常非常大的,大到它的可观测半径超过 400 亿光年。这是多大的一个宇宙?我们就用航天来想象了,直接用宇宙包含的物体来看它大到什么程度。在用物体来解释宇宙的大小之前,我必须说明一下,当我说宇宙的半径是 400 亿光年的时候^①,是假设宇宙在空间上并不弯曲^②,这个半径就是我们看到的最远处而已,是我们视线所及的一个球状范围的半径,而说不说宇宙空间本身是一个三维超球面。至于为什么我们只能看到这么远,在后面介绍宇宙学时我们再作解释。

我们生活在地球上,一开始我就说我小时候就知道这个事实了。地球又是太阳系中的一颗行星,固态,密度大,体积小,自转也不快。宇宙中类似于地球的行星,我们统称为类地行星。在距地球 1.5 亿千米外,是太阳。太阳发出的光要旅行 8 分钟以上才能到达地球。被开除出行星队列的冥王星距离太阳是地球距离太阳的 40 倍左右,光从太阳发出抵达那里需要走 5 小时 30 分。当然,冥王星远远不是太阳系的边界。如果我们将太阳到地球的平均距离称作一个天文单位,那么从海王星开始向外走 50 个天文单位之中,我们会发现很多小行星,直径小的有数千米,大的有上千千米,这个区域叫柯伊伯带。

但柯伊伯带仍然远远不是太阳系的边缘。太阳引力统治的最远的地方是奥尔特云,距离太阳有 5 万 ~10 万天文单位,最远处超过了 1 光年。奥尔特云中存在很多彗星。可以说,这些物质是 50 亿年前太阳和行星形成之

① 由于宇宙的空间在膨胀,所以可观测宇宙的半径要大于宇宙的年龄乘以光速。

② 上文说三维空间可以弯曲,是说物质和能量可以令它附近的局部三维空间(以及时间)发生弯曲。但在宇宙的尺度上测量,人们发现三维空间整体上是平坦的。