

暗物质和暗能量

—写于广义相对论 100 周年

作者：张天蓉

科学家们探索物质结构，追溯世界本源，提出了许多假说，建立了种种模型。从古希腊的原子论、中国古代的五行说，到现代物理理论中的行星模型、电子云模型、夸克模型。从门捷列夫发现的元素周期表，到标准模型中的基本粒子表。人类自认为对宇宙中的“所有”物质的各个层次，已经了解得差不多了。然而，天文观测的最新结果给了我们当头一棒。物理学家们忙乎了一大阵子之后，不久前才发现，原来我们所研究分类的所谓“物质”，只占宇宙中整个构成成分中的百分之五都不到。其余的百分之九十五是些什么呢？是我们看不见摸不着的“暗货”，科学家们将它们称作“暗物质和暗能量”。

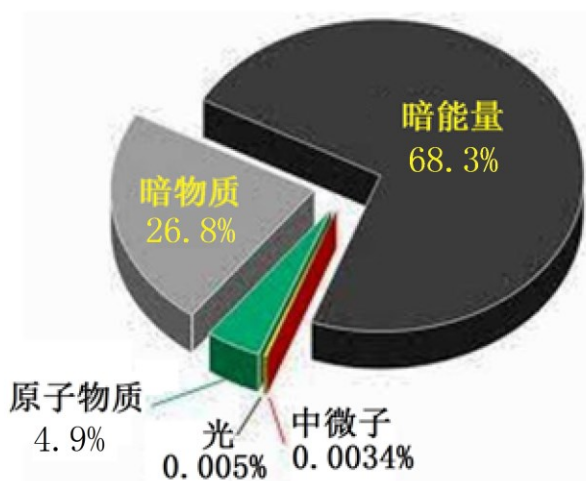


图 1：宇宙中各种物质成分所占的百分比

图 1 所示的是 2013 年普朗克卫星给出的数据，在我们观测所及的宇宙中，人类有所认识的通常物质，包括由原子分子构成的物质、光波、中微子、各种介子等在内，大约只占 4.9%，另外有大约四分之一（26.8%），是一种至今我们尚未弄清楚其结构和性质的“暗物质”。更不可思议的是，其余剩下的 68.3%，连物质都谈不上，是某种无孔不入无处不在的所谓“暗能量”。

暗物质和暗能量，不像普通物质那样对光波或者电磁波有所反应。我们平时熟悉的普通物质，无论藏身何处，灯光一照便现出原形。即使是普通的灯光照不见，人类还掌握了紫外线、红外线、x 射线、伽马射线、各种频率的无线电波，种种的现代科技探测手段。但是，暗物质和暗能量，似乎对这些“光”都完全无动于衷。

既然我们不能看见“暗物质”和“暗能量”，又如何知道它们的确存在呢？这是因为它们具有万有引力作用，它们逃过了光波的追踪，却逃不过引力的束缚。

1. 引力之谜

现代物理学认为，宇宙中存在 4 种基本相互作用：电磁力、引力、强相互作用、弱相互作用。电磁力是我们所熟知的，强弱相互作用是短程力，只在极短的、小于原子尺度的微观范围内起作用。目前，这三种力都可以用理论物理中的“标准模型”来描述。只有人类早就认识了引力，看起来历史最古老，我们对它的本质却知之甚少。

虽然引力的本质至今仍然是个谜，它与其它作用之统一也似乎遥遥无期，但它的理论和两位大师的名字紧密相连：牛顿发现了万有引力定律，爱因斯坦的广义相对论则将引力和时空的几何性质联系在一起。

100 年前，1915 年 11 月 25 日，爱因斯坦向柏林普鲁士科学院提交了一篇题为“引力场方程”的论文，凭借这篇划时代的文章，他愉快地向全世界宣告了广义相对论的诞生。

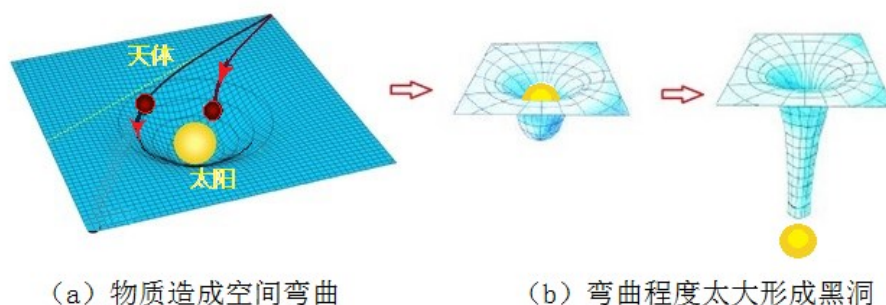


图 2：物质使得周围空间弯曲，弯曲程度太大形成黑洞

广义相对论的中心思想可用著名物理学家约翰·惠勒（John Archibald Wheeler，1911 年-2008 年）的名言来概括：

“物质告诉时空如何弯曲，时空告诉物质如何运动”。

这句话的意思是说，因为物质的存在，时空是弯曲的，而因为时空的弯曲，又影响到物质的运动。这句话也说明了广义相对论与牛顿引力理论之不同。比如说，太阳附近的其它小天体（图 2a 中的小球）将朝着太阳所在的位置移动。如何解释小天体的这种运动呢？牛顿的经典引力理论说：因为小天体被太阳施加的万有引力所吸引。而按照广义相对论的解释，是因为太阳的巨大质量使得它周围的时空弯曲，小天体按照时空的弯曲轨道运动而已。就像一个放在橡皮筋弹性网上的铅球，它的重量使网格下陷，如图 2a 所示。网格下陷影响到附近小球的运动，使小球“自然地”滚向了铅球所在的位置。

试想一下，如果橡皮筋网上铅球的重量增加，网格的弯曲变形程度也会增加，如果铅球太重了，橡皮筋网可能被撑破，形成一个洞，小球掉入洞中再也捡不起来，这在引力场的情形，便相当于引力塌缩形成黑洞，如图 2b 所示。

爱因斯坦和牛顿的引力理论，不仅仅需用不同的几何图景来诠释，计算结果也有很大差异。比如说，两个理论都预言光线弯曲，但牛顿理论计算的结果仅为广义相对论的一半，实验值与爱因斯坦理论精确地符合。一百年来，广义相对论的所有预言都已经被大量的实验和天文观测资料所证实。诸如时间膨胀、光波频率红移、时间延迟等引力效应均被检验和证实。实验资料充分，理论光彩依旧。广义相对论已经成为天体物理和宇宙学研究必不可少的理论基础。

广义相对论所描述的时空弯曲等现象，只在宇宙中天体及星系运动的大尺度范围内，才有明显的观测效应。近年来，因为科学技术的进步，观测方法的改进，宇宙学中的大爆炸理论，黑洞物理，宇宙膨胀，这些与广义相对论密切相关的领域，蓬勃发展，日新月异，成果不断，它们既为证实广义相对论提供了数据，也向现有物理理论提出了许多新的问题和挑战，暗物质和暗能量就是其中之一。

2. 暗物质

暗物质的说法早已有之，最新观测数据只是再次证实它们的存在而已。早在 1932 年，暗物质就由荷兰天文学家扬·奥尔特提出来了。著名天文学家兹威基在 1933 年在他对星系团的研究中，推论出暗物质的存在。

弗里茨·兹威基（Fritz Zwicky, 1898 年—1974 年），是一直在加州理工学院工作的瑞士天文学家，他对超新星及星系团等方面作出了杰出的贡献。兹威基对搜捕超新星情有独钟，他是“个人发现超新星”的冠军，进行了长达 52 年的追寻，总共发现了 120 颗超新星。

兹威基在推算星系团平均质量时，发现获得的数值远远大于从光度得到的数值，有时相差上百倍。因而，他推断星系团中的绝大部分的物质是漆黑看不见的，也就是如今所说的“暗物质”。

暗物质存在的最有力证据有两点，一是“星系自转问题”。二是引力透镜效应。

星系自转问题，是由美国女天文学家薇拉·鲁宾（Vera Rubin, 1928 年-）观测星系时首先发现和研究的。她在研究星系自转速度曲线时发现，星系中远处恒星具有的速度要比理论预期值大很多。恒星的速度越大，拉住它所需要的引力就越大，这更大的引力是哪儿来的呢？人们假设，这份额外的引力就是来自于星系中的暗物质。

天文学家在研究我们自己所在的银河系时，也发现它的外部区域存在大量暗物质。

银河系的形状像一个大磁盘，对可见物质的观察表明其大小约为 10 万光年。根据引力理论，靠近星系中心的恒星，应该移动得比边缘的星体更快。然而，天文测量发现，位于内部或边缘的恒星，以大约相同的速度绕着银河系中心旋转。这表明银河系的外盘存在大量的暗物质。这些暗物质形成一个半径是明亮光环 10 倍左右的巨大“暗环”。

暗物质的引力作用也符合广义相对论，因而能造成时空的弯曲。光线透过弯曲的时空后会偏转，类似于光线在透镜中的“折射”现象。根据这个原理，爱因斯坦最先提出了“引力透镜”的设想，因而有人将它们称为“爱因斯坦的望远镜”。兹威基在 1937 年曾经指出，有暗物质的星系团可以做为实现引力透镜的最好媒介。可想而知，由较为均匀分布散开在星系中的暗物质形成的透镜，肯定要比密集的星体形成的透镜“质量”好得多，见图 3。不过，直到 1979 年，这种引力透镜的效应才在天文观测中获得证实。

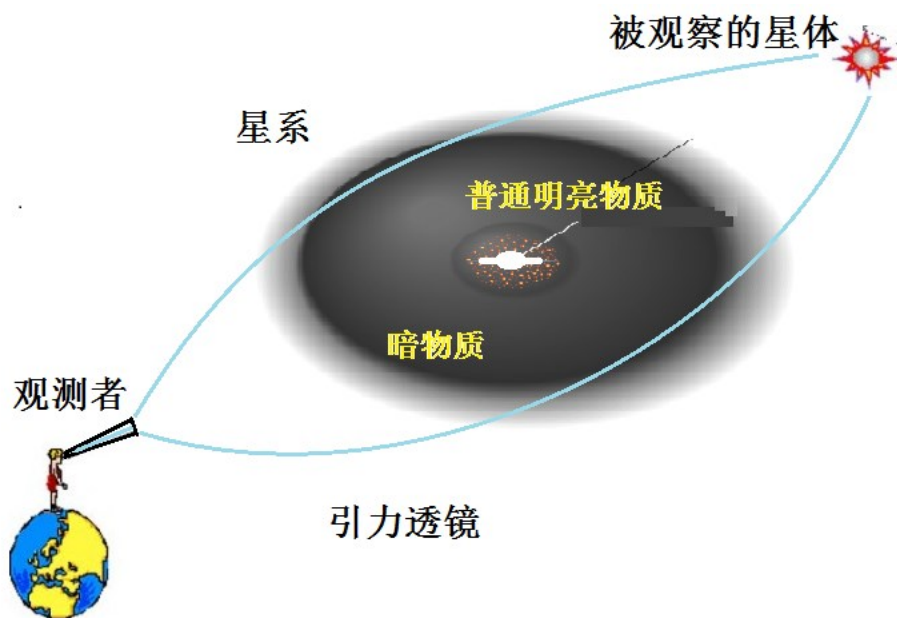


图 3：星系作为引力透镜

也就是说，暗物质对光线没有直接反映，既不吸收也不发射，这点表明它们不能被看见的“暗”性质。但是，暗物质却能通过引力效应，间接影响到光的传播，使光线弯曲，成为引力透镜的“介质”。

众所周知，望远镜的发明对天文观测十分重要，因为人眼观测的范围极度有限。可谁也没有想到，大自然早就造好了许多天文尺寸的望远镜。它们赫然挂在黑暗的天边，等待人类去使用它们。那就是刚才描述的“爱因斯坦的望远镜”。

暗物质形成的引力透镜，天文学家们能用它们做些什么呢？应该可以有两个方向的用途：研究背景天体和中间天体。背景源就像一个手电筒，既能照亮中间物体，又能传过来自身的信息。目前应用最广的，便是从分析背景光源的扭曲，研究中间做为“透镜”的引力场的性质，也就是研究其中暗物质的性质和分布情况。

进一步来说，引力透镜还可以真正发挥其“望远”“放大”的功能，从而扩大人类的眼界，帮助天文学家们观望遥远的星系。对遥远星系的观测有助于研究宇宙的演化情形，因为我们接收到的，是这些星系若干年之前发出来的光线。某种意义上说，观察遥远星系就观察到了宇宙的一部分“过去”。比如说，根据大爆炸模型，宇宙起始于 137 亿年之前。那么，

如果观察距离我们 100 亿光年远处的天体，实际上看到的是该天体 100 亿年之前的景象，那不就是宇宙 37 亿岁时候的部分情况么。

3. 暗能量

读者可能会说：就算你刚才说的天文观测资料证实了宇宙中除了看得见的星体之外，还有暗物质，你又怎么能够知道暗物质有多少呢？更奇怪的是还有暗能量又是哪里来的？比如说在图 1 中各种成分的比例中，暗能量的比例也列在那儿。普朗克卫星是如何得到这些数值的？

这确实是一个有意思的问题。想想平时是如何得到各种物质材料质量之比的，我们使用的是天平或者“秤”。可是，普朗克卫星又不能把天体拿到“秤”上去称，它报告的物质比例从何而来呢？

首先，简单地说，暗能量来源于宇宙加速膨胀的事实。

在天文学中估算天体质量时，人们利用的是在引力理论上建立的各种数学模型，无论是行星、恒星、星系，以及各种天文现象，都有其相应的数学模型。这些模型，便是“称量”宇宙的秤。数学模型中有许多未知的参数，需要由天文观测的数据来决定。普朗克卫星主要是通过测量微波背景辐射中的细微部分来获得这些参数，然后，研究人员将这些数据送入计算机，解出数学模型，最后得到各种成分之比例。

这是一个相当复杂的过程，包括了很多物理理论、数学知识、计算技术、工程设计等等方面的知识。就物理概念的大框架来说，科学家们大概用如下方法估计这个比例。

从观测星系的恒星旋转速度与引力理论计算之差距，还有以星系作为引力透镜的效果，可以计算该星系中暗物质相对于正常物质的比值。普朗克卫星可以巡视整个可见宇宙中所有的星系，因而可以估计出整个宇宙中暗物质相对于正常物质的比值。天文学家早有方法计算宇宙中“明”物质的总质量。然后，从“明暗”物质的比例便能算出宇宙中暗物质的总质量。

从宇宙学的角度，天文学家有两种方法估计“宇宙的总质量”。一是从宇宙膨胀的速度和加速度，二是根据宇宙的整体弯曲情况。

根据广义相对论的结论，在大质量天体附近，时空是弯曲的，那是时空的局部性质。广义相对论的应用也可以扩大到研究宇宙的整体形态。局部和整体的差别从图 4a 中的莫比乌斯带和平凡柱面的例子中一目了然。局部而言，两种情形都是“平坦”的，但两种几何形状的整体拓扑却迥然不同。图 4b 则给出了宇宙作为一个整体时的三种可能弯曲形态。

宇宙学研究宇宙的大尺度结构和形态，用来估算宇宙作为一个整体的曲率和形状：宇宙是开的，还是闭的？是像图 4b 中的球面？马鞍面？还是更像平面？这个整体模型涉及到一

个“临界质量”。如果宇宙的总质量大于临界质量，比较大的引力效应使得宇宙的整体形状成为球面；如果宇宙的总质量小于临界质量，引力效应更弱一些，宇宙的整体形状是马鞍面；如果宇宙的总质量等于临界质量，则对应于整体平坦的宇宙。

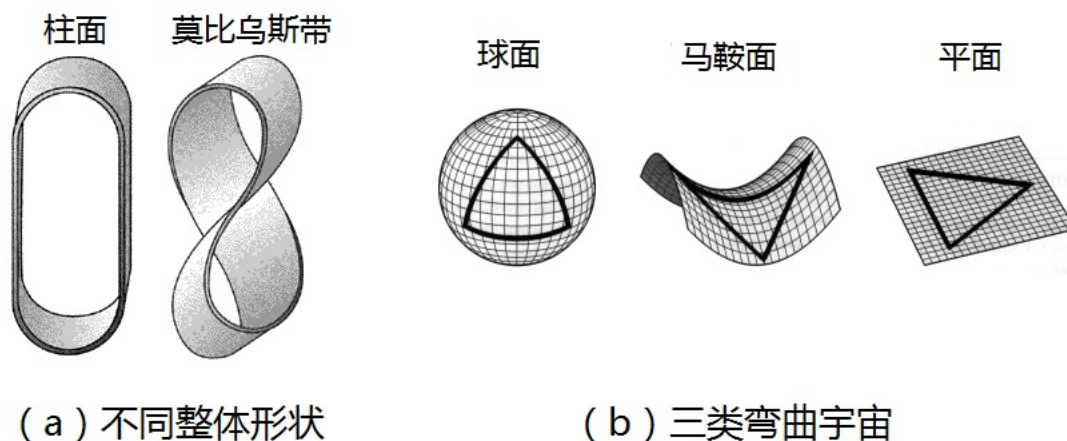


图 4：局部性质和整体拓扑

根据宇宙学得到的天文观测资料，宇宙在大尺度范围内是平坦的，说明宇宙的总质量大约等于临界质量。

但是，从宇宙加速膨胀得到的宇宙总质量，或者考虑平坦宇宙应该具有的临界质量，都大大超过观测所估计的“明暗物质”之总和。物理学家提出的“暗能量”，便是为了解释这个宇宙组成中所缺失的大部分。如此便有了图 1 中所画的比例图。

既然提出暗能量的假说，那么，至少总要根据理论的需要描述一下它是个什么玩意儿吧。

暗能量像是存在于宇宙中的一种均匀的背景，在宇宙的大范围中起斥力作用，加速宇宙的膨胀，但是，又不能严格地说它是一种斥力，因此，只能称其为能量。而在现在的物理理论中，也不见具有如此秉性的“能量”，因而称其为“暗能量”。

天文学家用暗能量来解释宇宙加速膨胀及宇宙整体平坦的观测事实。而暗能量作为一种物理实在，其本质又如何解释呢？对此又有两种说法：一是认为其是弥漫于宇宙中的某种标量场，二是认为它类似某种“真空能”，真空不空，且具有能量，但人们很难探测到它的存在。

第二种说法实际上与爱因斯坦在引力场方程中引入的“宇宙常数”有关。广义相对论与其他物理理论类似，数学模型用微分方程表示，根据已知条件求出方程的解。引力场方程是联系物质分布与时空几何的方程，已知条件是空间中的物质分布，方程的解则是时空的几何。当初爱因斯坦提出广义相对论时，物理界普遍认为宇宙是整体静态的，即既不膨胀也不收缩。爱因斯坦在他的方程中加上了“宇宙常数”一项，其目的是用以维持一个静止宇宙的图景。

之后，哈勃证实了宇宙不是静止的，而是在不断地膨胀，这个观测结果使得爱因斯坦懊恼不已，为引入了那个宇宙常数耿耿于怀，要将“宇宙常数”收回去，认为是自己所犯的“最大的错误”。再后来，到了爱因斯坦早已去世的 1998 年，天文学家又证实了宇宙不但在膨胀，还是加速膨胀。为了解释加速膨胀，为了解释暗能量，天文学家和物理学家又把爱因斯坦丢弃的宇宙常数，当宝贝一样捡了回来。不知道如果爱因斯坦在天之灵，听到这个意外的消息，将作何表情？

4. 暗物质和暗能量的拉锯战

因为都是“暗货”，人们经常将暗物质和暗能量混淆。并且，根据爱因斯坦的质能关系式： $E=mc^2$ ，质量和能量可以看作是物质同一属性的两个方面，那么，为什么还要将两种暗货区别开来呢？其中原因很难说清，基本上还是因为我们尚未明白它们到底是什么？

两种暗货在宇宙中的具体表现大不相同。也就是说，暗物质和暗能量两个概念在本质上有区别。虽然他们也许有关系，什么关系，没人知道。人们知道更多的是两者之不同。暗物质吸引，暗能量排斥。暗物质的引力作用与一般普通物质之间的引力一样，使得它们彼此向内拉，而暗能量却推动天体互相向外分离。暗物质的影响表现于个别星系，而暗能量仅仅在整个宇宙尺度起作用。可以如此总结宇宙不同成分的作用：宇宙由明物质和暗物质组成，因暗能量而彼此分开。

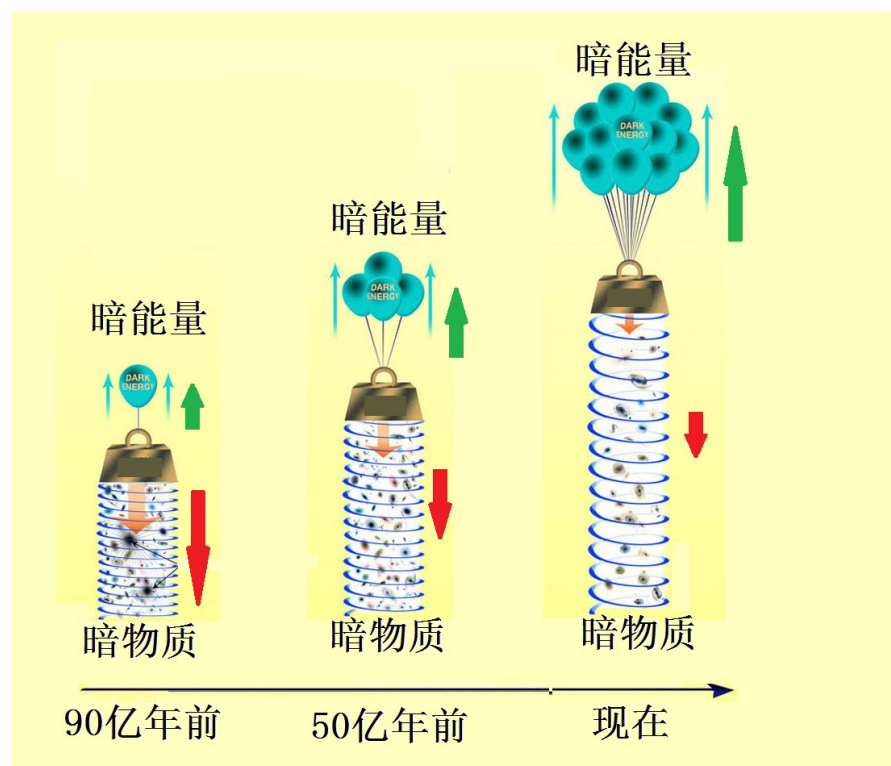


图 5：暗物质和暗能量的“拉锯战”

宇宙中各种成分的比例，并非一成不变的。除了因为不同地点、不同卫星、不同年代，提供不同数据而算出不同比值的人为差距之外，理论模型还预言该比值在大时间范围内的变化，如图 5 所示。

图 5 中可见，暗质量增加宇宙中的质量，使得天体互相拉近，图中将它们的作用比喻为向下拉的弹簧。而暗能量在图中被比喻为升空的气球，欲将控制宇宙大小之“弹簧”拉长，使得其间的天体互相分离。这两种作用不停地进行这种“拉锯战”。图 5 中分别形象地表示出了 90 亿年前、50 亿年前，以及现在的宇宙大小及两种作用的大小。

尽管我们还不知道暗物质究竟由什么构成，也不清楚暗能量的作用机制，但通过天文观测的结果，对它们有所认识。比如说，天文学家们可以模拟暗物质的引力效应，研究它们如何影响普通物质，得出暗物质一般来说，运动速度大大小于光速的结论。构成暗物质的粒子应该是电中性的，也许具有很大的质量。

2015 年初，暗物质领域又传来了与我们过去认识有所不同的新消息，暗物质添加了新内容，除了暗物质和暗能量之外，可能还有一种未知的暗相互作用，由某种“暗光子”传递？如此推论下去，也许暗物质是由数种粒子组成的，它们会相互作用，组成暗原子、暗分子甚至暗星系？一个暗世界？然而，这些都还是假说和推测，我们等待着更多的实验和观测。

也有可能，我们的理论出了问题，广义相对论在宇宙学的大尺度下需要修正？总之，有关暗能量和暗物质，还有很多未解之谜，科学家们仍在继续努力。可以说，对暗物质和暗能量的探索 and 解释是对 21 世纪物理学最严峻的挑战！