

“暗宇宙”之谜

傅承启

(上海天文台 200030)

夜幕降临,星光灿烂,银河、星斗与皎洁的月光交辉相映,编织出美丽的夜空,这就是我们从小获得的知识:恒星、星云、星系……构成的浩瀚宇宙。然而,这只是个错觉,我们的宇宙实际上是“暗无天日”的,这就是2003年过去一年最新的科学成就:宇宙是黑暗的,或者说是个“暗宇宙”(请参阅封二精美彩图)。

什么是暗宇宙?那是指组成宇宙的绝大多数物质和能量是不可见的,发光的物质和辐射只占宇宙物质的极小部分,这种不可见的物质和能量称为暗物质和暗能量。根据最新的测量,暗能量和暗物质合计占宇宙质量密度的96%,而我们熟知的恒星、星系等发光物质或重子物质仅仅只占4%。也许有人会问:既然暗物质和暗能量都是看不见的,我们怎么知道它们的存在呢?究竟什么是暗物质,什么是暗能量?为什么说宇宙主要由它们组成……要回答这些问题得从宇宙膨胀说起。

宇宙在膨胀

1929年,哈勃与他的助手赫马森在《美国国家科学院进展》上发表了一篇题为“河外星云的速度与距离关系”的论文,第一次发表了遥远的星系都在远离我们的结论,他们指出:星系远离(退行)的速度与其距离成正比,星系越远,远离的速度越快。两年后即1931年,他们在《天体物理杂志》第一期上再次发表了同样的论文,文中宣称,尽管他们新增加了40个河外星云,距离扩大了18倍,但是原先发现的速度与距离关系依然成立。哈勃的发现成为了开创现代观测宇宙学的标志,被誉为20世纪最伟大的宇宙学发现。因为从哈勃的发现可以直接推出宇宙膨胀的结论。

在哈勃的年代,宇宙被认为是永恒不变的,其中的恒星有生有死,而宇宙却永恒地存在,这种静止宇宙的观念集中反映在爱因斯坦引入“宇宙学常数”这件事上。1917年爱因斯坦在导出他的场方程时发现宇宙不可避免地要膨胀或收缩,为了保持宇宙的静止,就在方程中人为地加入了一个抵制引力的因

子,以平衡引起膨胀或收缩的引力,并称之为“宇宙学常数”。所以,当获悉哈勃的发现后,爱因斯坦后悔莫及,自责干了件“一生中最大的蠢事”。其实,当年不乏提出宇宙膨胀的学者。苏联气象学家兼物理学家弗里德曼就是其中之一,他在场方程中抛弃了爱因斯坦的宇宙学常数,提出了非静止宇宙模型。遗憾的是,他因患伤寒过早地离开了人世。比利时神父勒梅特也提出过宇宙膨胀模型,后来成为伽莫夫1948年提出的大爆炸宇宙论的原初思想。德西特的空宇宙更不同于爱因斯坦的静止宇宙,所以他不得不将爱因斯坦宇宙模型称之为A解,自己的模型贬低为B解,以避免爱因斯坦的非难。

宇宙的膨胀意味着宇宙是有开端的。假如沿时间轴反演宇宙的膨胀,立即会发现宇宙在100多亿年前处于一个尺度极小而灼热、高密的状态。当时发生了一次巨大的爆炸,造成了宇宙的急速膨胀,造就了今天的宇宙,这就是宇宙大爆炸理论。除了星系退行以外,大爆炸理论还得到宇宙微波背景辐射和宇宙轻元素丰度的印证。既然宇宙是有开端的,并不断地膨胀,那么显然会产生这样的问题:宇宙会永远地膨胀下去吗,还是有朝一日停止膨胀转为收缩?这关系到我们宇宙命运的大问题。

黑幕后的暗物质

将一个皮球向上抛,皮球最终将落回地面,但是,如果皮球的初速度达到一定的数值,它将不再落回地面。这个初速度或者说逃逸速度取决于地球的引力,或者说取决于地球的质量。星球的质量越大,逃逸速度也越大。宇宙也不例外,宇宙是否继续膨胀取决于宇宙所包含的物质质量或者宇宙的物质密度,当宇宙物质密度超过某个数值——我们称为临界密度时,宇宙最终将变膨胀为收缩,如同掉回地面的皮球一样,这种宇宙称为闭宇宙。当宇宙物质密度低于这个临界值,宇宙将永恒地膨胀,这称为开宇宙。当宇宙物质密度等于这个临界值,宇宙将在惯性下膨胀,这称为平直宇宙。根据宇宙的能量守恒可以得出临界密度值,它大约等于每立方米内有6个氢原子或 10^{-23} 克。

那么我们的宇宙究竟包含多少物质呢？这是宇宙学最关键的问题。以前认为，宇宙中的物质以两种形式存在：一种是普通的物质，也就是我们看到的发光的物质，它们都由重子构成；还有一种是辐射能，也就是存在于空间的各种电磁波。天体的发光强度与它们的质量存在一定的关系，因此，宇宙中有多少发光的普通物质是可以估计的，这种方法获得的质量称为光度质量。至于宇宙中的辐射能可以完全忽略，是因为今天的宇宙是以物质为主的，根据宇宙微波背景辐射可以发现宇宙的能量密度远小于物质密度。估计的结果是令人吃惊的，我们眼睛看到的宇宙物质密度比起临界密度来说少得太，还不到后者的5%。

这是不是说明宇宙物质密度远远低于临界密度呢？答案是不确定的，因为天文学家还发现宇宙中还有许多不可见的物质。天文学上还有一些估计天体质量的方法，其中有一种通过天体系统内成员运动的分析获得系统质量的方法，这种质量称为动力学质量或维里质量，它建立在牛顿万有引力定理的基础上。1933年瑞士天文学家兹维基首先发现星系团的光度质量远小于维里质量，这说明星系团内部有许多不发光物质，它们只在引力上表现出来。天文学家不清楚这是些什么样的物质，因此后来将它们统称为暗物质。暗物质是什么，现在还不能回答。它们肯定又冷又暗，而且主要不是星系际气体尘埃、褐矮星、死亡的恒星、行星或黑洞之类，因为这些成分通过观测还是能够察觉的，而且数量也很少。现在认为一种大质量的弱相互作用粒子或超弱相互作用粒子可能是暗物质的主要成分，中微子、轴子、引力微子、引力子等都可能是其中的成分。

暗物质存在的证据是确凿的，它们在银河系自转中明显地反映出来。自转是所有天体和天体系统的共同特征，就像地球、太阳和太阳系的转动一样，银河系和所有的星系都在转动。不过，星系与太阳系的转动有很大的不同，太阳系99%以上的质量集中在太阳，因此，太阳系的转动基本上遵循开普勒定律或牛顿万有引力定律，我们称为开普勒运动。至于星系，它的物质分散在它的各个部分：核球、星系盘、星系晕和星系冕。以银河系为例，核球是个直径约2万光年的一个球状体，银盘呈扁平状，直径约10万光年，在银盘周围是直径达几十万光年的银晕和银冕。因为质量较为分散，离银河系中心不同距离上的天体以不同的方式和不同的速度转动，这种

转动方式称为较差转动。在银河系中心，转动类似刚体，最大达到240公里/秒左右，然后向外速度先缓缓下降又缓缓上升，在距银心2.6万光年的太阳处又上升到220公里/秒，以后稍稍下降后就慢慢地持续上升。天文学家对这种旋转感到很理解，因为根据银河系内发光物质的分布，太阳处的转动速度应当只有160公里/秒，而太阳以外的区域应当呈现开普勒转动，距离越远速度越小，因为反银心方向上只有很少的发光物质，但是实际的情况恰好相反。能够解释这种现象的惟一可能，就是在银晕里存在大量不可见物质，也就是暗物质，它们对太阳及其外部天体的吸引，加快了它们的转动。附近星系的转动也证实了暗物质的存在。根据现在的估计，星系暗物质占星系总质量的90%以上。

星系在宇宙空间集聚成更大的结构，叫星系团。星系团是非常稳定的，一定有强大的引力将它们保持稳定的形态，否则，星系就会像气体分子的布朗运动那样，很快地使星系团瓦解。但是星系团内的发光物质太少，显然不足以产生这么强的引力。因此，天文学家认为星系际一定存在着大量的暗物质。

暗物质的存在也得到了证实。

还可举出许多证据证明暗物质的存在，比如星系的引力透镜观测、X射线观测、微波背景辐射各向异性的观测等等。现在面临的问题是暗物质究竟有多少？或者宇宙中包括亮暗物质在内的物质密度究竟多大？这是宇宙学家长期以来争论不休的问题。以前，人们并不知道暗能量的存在，所以在谈到宇宙物质密度时就是指宇宙中亮物质、暗物质和充满宇宙的辐射能。长期的观测表明，宇宙物质密度始终徘徊在1附近，时而比1大，时而比1小，但是始终不是比1小许多量级或大许多量级。这种情况使宇宙学家产生一种想法：宇宙物质密度很可能就是等于临界密度！这就是说我们的宇宙是平直的。

幽灵般的宇宙学常数

宇宙膨胀速度逐渐减慢，是许多宇宙学家长期持有的观点，这是宇宙物质引力作用的必然结果。不过，从场方程解可知，推动或阻止宇宙膨胀的还有宇宙学常数和宇宙曲率。如果宇宙是平直的，曲率等于零，那还有宇宙学常数这个因子。

宇宙学常数是爱因斯坦引进的，他本人也不喜欢宇宙学常数，甚至说过他这样做“有被送进疯人院的危险”。英国天文学家爱丁顿在《膨胀的宇宙》中写道：“爱因斯坦也像其他人一样，是他自己建议的

严厉批评者,他并没有一味地坚持他原来的建议。”1931年爱因斯坦发表文章宣布放弃宇宙学常数,否定了静态宇宙模型。然而,潘多拉盒子已经打开,幽灵已经逸出。每当宇宙学出现危机、观测与理论出现矛盾时,宇宙学常数就被搬出来拯救世界;一旦矛盾解决,又被弃之。宇宙学常数这个幽灵,数度徘徊于科学的边缘。

哈勃当年是用享有“量天尺”美名的造父变星测定星系距离的,由于当时并不清楚造父变星有若干种不同的次型,它们的光变周期与光度有不同的关系,所以哈勃确定的哈勃常数比今天的采用值几乎大了8倍,导出的宇宙年龄只有20亿年,甚至小于地球的年龄。于是宇宙学常数再度被搬出,以缓解哈勃常数和宇宙年龄的矛盾。20世纪50年代以后,天文观测得到了改进和提高,改善后的哈勃常数减小到原先的 $1/5 \sim 1/10$,矛盾大为缓和,宇宙年龄增大到100亿~200亿年,宇宙学常数再一次从方程中被清扫出门。这种情况曾经多次发生,虽然近一二十年来哈勃常数有了很大的改进,但是宇宙年龄一直徘徊在120亿~150亿年之间,有时会出现比最老的球状星团年龄小的情况。

尽管宇宙学家和物理学家一直试图设法使宇宙学常数为零,希望将它扫出场方程,但是一直没有得逞。正如宇宙学家伽莫夫写道的:“(爱因斯坦)强调引进宇宙学项是他一生干过的最大蠢事。但是,直至今天还有宇宙学家不时地使用着爱因斯坦抛弃的‘蠢家伙’,这个宇宙学常数一次又一次地昂起它丑陋的脑袋”

按照量子理论,真空是具有能量的,即零点能。它使人们想起德西特宇宙——没有任何物质的空宇宙。因此,物理学家和宇宙学家认为,宇宙空间本身应当具备能量,这种能量来自量子真空本身,宇宙学常数就代表了这种真空能,推动宇宙膨胀。这样,宇宙学常数再次昂起了它的脑袋,出现在爱因斯坦的方程之中。

神秘的暗能量

在观测取得极大成就的同时,近20年来理论也同样取得了极大的进展。

宇宙为什么这么均匀?宇宙为什么恰好是平直的?这两个问题就是所谓的视界问题和平直性问题,作为宇宙起源和演化标准理论的宇宙大爆炸论始终不能解释这两个事实,它只能将它们作为大爆炸的初始条件。但是,宇宙学家发现,宇宙处于这种

情况的几率小到微乎其微,要真是这样的话,宇宙相当于一支能够倒立几百万年不倒的笔尖,任何一丝“风吹草动”,就会偏离这种临界状态。什么力量能使宇宙自我调谐得如此完美?于是,一种称为暴涨的理论应运而生。

1981年美国物理学家古斯提出了宇宙暴涨理论。这种理论认为在大爆炸发生后的 10^{-36} 秒时宇宙发生了暴涨,宇宙以极大的速度向各个方向暴涨,结果使宇宙不同方向上的不均匀全部被抹平了,变得非常地均匀,它就像吹一个大气球,随着气球的迅速膨胀皱纹消失了,表面变得非常均匀、光滑,或者说现在的宇宙当初极其微小,完全处于视界之内,而且宇宙经过充分的伸展,即使早期是弯曲的,经过暴涨也变得平直了。古斯的暴涨理论在解释宇宙大尺度上的均匀性和平直性上取得了极大的成功,完善古斯理论的各种暴涨理论也因此应运而生。

至此,我们似乎可以回答宇宙未来的命运了:平直的宇宙将永恒地膨胀下去,这种膨胀将逐渐地减慢,最后变成惯性膨胀。但是,10年前情况发生了变化。宇宙学家根据新的观测资料终于测出了宇宙中包括暗物质在内的物质密度,它们约为临界密度的 $1/3$,我们的宇宙原来是个低物质密度的宇宙!这个结果使宇宙学家再度陷入观测与理论的困惑:欠缺的 $2/3$ 宇宙物质密度在哪里?于是有人猜测,剩下的物质密度可能以能量形式而不以物质形态呈现,因为按照质能公式,能量和物质是等同的。由于这种能量的无影无踪,故而称之为暗能量。

然而,暗能量是否真的存在?

宇宙膨胀在加速

就在同一时期,上世纪90年代中后期,另一条观测战线也获得了新的进展,那是关于遥远的超新星的。

超新星是某些恒星即将终其一生时所发生的灾难性爆发,短短几天内它突然变亮千万倍乃至百亿倍,甚至超过所在星系的亮度。超新星十分罕见,一个星系通常一二百年才出现1颗,每10年全世界也只能发现20颗左右。超新星出现的时间和地点都是未知的,由于不知何时何地出现,所以大望远镜一般都不愿给宇宙学家观测时间去作超新星的普查,那只会浪费时间。只是当天空中出现了一颗超新星时,才去进行观测,这时超新星的亮度往往已经过了最亮时刻,开始下降。所以,为了确定超新星的最大亮度,不得不持续跟踪超新星几十天,乃至上百天,

记录下亮度变暗的全过程,然后根据整个光变曲线的形状来推测超新星的**最大视亮度**。

超新星非常有价值,除了本身有研究价值外,对宇宙学也非常重要。特别是其中有一类称为 Ia 型的超新星,它最亮时的本征光度非常一致,可用作标准烛光,测定它们的最大视亮度就可以确定超新星所在星系的距离。遥远星系的距离通常是用红移来确定的,拍摄一个星系的光谱,测量谱线的红移,然后利用哈勃常数计算出星系的距离。不过,这种方法基于下面的假设:宇宙膨胀是匀速的。要是宇宙是非匀速膨胀,那么红移确定的距离就有偏差了。Ia 型超新星正可以用来检验这种假设。1988 年美国一些宇宙学家开始了这样一项计划,叫做“超新星宇宙学探测计划”,在遥远的星系中寻找超新星,即寻找宇宙早期爆发的超新星,特别是 Ia 型超新星。不过, Ia 型超新星很稀少,平均说来,一个星系在 1 千年中才出现 2 个。所以,他们最初的进展很缓慢。

到了 90 年代中期,这些宇宙学家获得了两项重要的进展。一是如何快速地找到超新星,只要相隔两周的两个晚上对同一个星系区拍摄两张照片即可找到那里有没有超新星,这样他们每拍摄 50 ~ 100 个星系区可以找到 20 颗左右的超新星。大量 Ia 型超新星的发现使他们能够做出第二项发现:超新星光谱中某些谱线的特征与超新星最大视亮度之间有很稳定的对应关系。这样,只要拍摄一张超新星的光谱,就能根据这些谱线的特征确定超新星的**最大视亮度**,并确定它的距离,而无需长期的跟踪。超新星样本的迅速扩大带来了完全意外的结果:超新星的视亮度比红移指示的平均要暗 25%,这就是说,超新星距离实际上比红移指示的更远。由此立即可以得出:宇宙的膨胀不是宇宙学家们原先所想的在减速,恰恰相反,宇宙膨胀在加速!

宇宙加速膨胀,马上会想到的问题是“什么力推动宇宙加速的?”此前的理论与观测都告诉我们:宇宙是平直的,物质密度等于临界密度,而物质形态的密度又低于临界密度,现在观测又告诉我们:宇宙在加速膨胀,宇宙中一定存在一种神秘的力。显然,要同时解释所有这些观测的惟一可能就是宇宙中存在着能量形态的物质,这就是暗能量。这种暗能量推动了宇宙膨胀的加速,它又以能量的形式填补了物质密度的缺口。

开始,其他的宇宙学家们对这个结果尚有怀疑,1998 年新的超新星观测再度证实了宇宙暗能量的

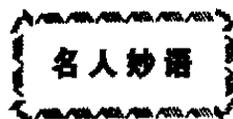
存在。暗能量的发现被美国《科学》杂志评选为 1998 年最大的爆炸性科学新闻,甚至被誉为 20 世纪第二个最伟大的宇宙学发现。

2001 年 6 月 30 日发射的威尔金森微波背景各向异性探测卫星,在 2003 年发布了它第一年观测的结果,结果表明,宇宙有 4% 的重子物质,23% 的暗物质,剩下 73% 则是暗能量,同时还得出我们的宇宙相当准确的年龄——137 亿年。暗能量居然占了宇宙物质密度的 2/3,比产生引力的物质密度高了一倍,成为宇宙中最举足轻重的成分。暗物质与暗能量合计构成了宇宙质量的 96%,这就是我们的宇宙,“黑暗”的宇宙!

暗能量与普通的辐射能、热能(它们的压力是正的,它们与引力一样都起阻止膨胀的作用)不同,它起的是对抗引力的作用,所以呈现的是负压特性,而且宇宙尺度越大暗能量的压力也越大。正因为这种特性,当宇宙早期尺度很小时,暗能量很微弱甚至可以忽略,星系也得以形成,才会有今天灿烂的星空,而随着宇宙的膨胀暗能量才逐渐“称霸”宇宙。

“暗能量”的出现即使人联想到了爱因斯坦的宇宙学常数,宇宙学常数似乎得以“借尸还魂”,我们不知爱因斯坦是否会再次后悔,若是他地下有知的话。与宇宙学常数联系的能量是真空的零点能,不过,经过计算发现量子力学的真空零点能太大了,大几十甚至上百的数量级,要是真空能就是暗能量的话,宇宙早就被吹散了。至于暗能量的其他可能来源还有多种猜测,一种认为暗能量是一种充满空间的叫宇宙场的东西(如希格斯场),那是为解释宇宙暴涨引进的物理量。还有认为存在一种叫“第五元素”的能量,它借自古希腊学者的学说,认为世界是由水、气、火、土四种元素构成的。当然,第五元素的能量必须很低,而且须随时间而演变,以符合观测事实。还有人提出了快子模型来解释暗能量。迄今为止,暗能量究竟是什么,根本不清楚。

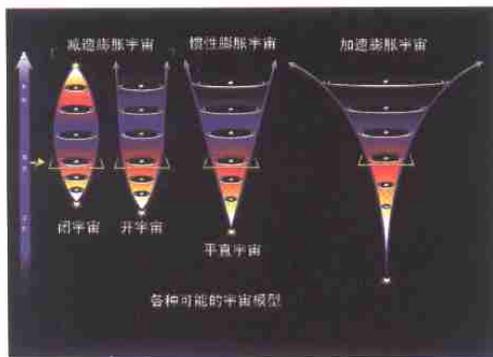
暗能量的发现极大地震撼了天体物理界和物理界,向它们发出了巨大的挑战,它不仅改变了人类对宇宙的认识,而且很可能将开创一门新的物理学领域,物理学甚至会面临一场新的革命。



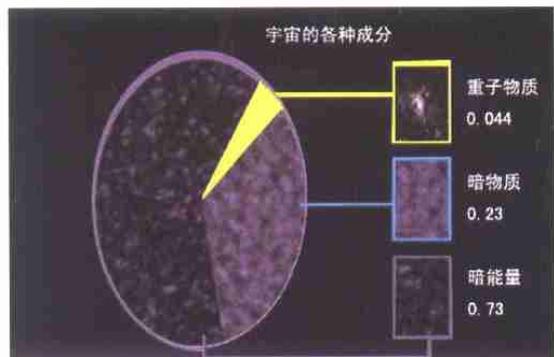
借芦苇的摆动我们才认识风,但风还是比芦苇更重要。

——纪德

“暗宇宙”之谜



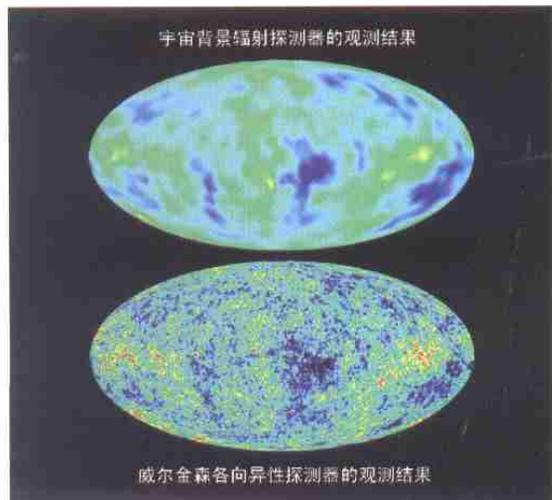
各种宇宙模型



宇宙的组成



大爆炸时间史



COBE 与 WMAP 的比较