

# 宇宙中的幽灵——暗物质

袁 强



爱因斯坦曾经有一句名言：“宇宙最不可理解的是它竟然是可以理解的！”自从爱因斯坦写下他的可以理解宇宙的方程以及做出关于“宇宙是可以理解的”这个惊异的发现至今

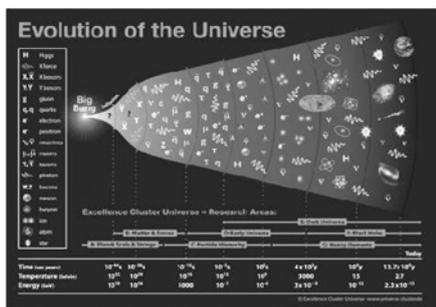
已有近一百年。一百年来，我们继承着爱因斯坦的衣钵，以及其“宇宙可以认识”的信念，在认识宇宙的道路上行进。冒昧地揣测，爱因斯坦大概不会对于我们一百年的努力取得的成绩失望：建立了大爆炸宇宙学模型；对宇宙演化过程取得近乎标准化的认识；精确测量出宇宙的物质组分等等(图1)。然而，即便有这样可喜的成绩，我们却还不能驻足观赏。只需看一下对于宇宙中物质组分的认识就可以明白还有多么艰巨的任务：构成星系恒星等我们所知道的普通物质(或者言之重子物质)占4%，暗物质占23%，暗能量占73%。换句话说，96%的宇宙成分还几乎不了解，这也就是为什么称之为“暗”物质和能量的原因。通常我们是通过观察光(这里的“光”指广义的电磁波辐射，即能够被仪器记录的电磁波也算在内)来认识遥远的天体的，而暗物质和暗能量几乎不发光，所以很难直接看到它们。它们通过引力效应影响那些发光物质，间接地宣告其存在性。暗物质和暗能量就像两个自负的做了坏事的黑衣人，隐藏得很深却又故意露出一蛛丝马迹，

试图考察我们的破案能力。然而它们终究没有“暗”得完全不可捉摸，人们总会努力想到一些办法去捕捉和认识它们。在此我们可以稍微细致地来看看对于其中之一的暗物质的认识历程，现状以及前景。

## 幽灵闪现——暗物质的发现

上个世纪30年代，瑞士的天文学家弗雷兹·茨威基(Fritz Zwicky)在美国加州理工学院以及帕洛马(Palomar)山天文台从事天文学研究。茨威基测量了后发星系团(图2左)的一些成员星系的运动状态，用熟知的牛顿万有引力定律一计算却惊异地发现这些星系的本动速度远远大于预期，由此得到的结论是后发团质量显然应该比可见的星系部分大上200倍。茨威基将多出的这部分不可见的质量称为“暗物质”。从此之后，“暗物质”这个名称便进入了现代宇宙学的词汇表。然而，或许是由于茨威基的个性——在他同时代的人看来，聪明却显得古怪——直到40年后发现星系质量必需要大量“暗”质量才能解释时，人们才开始严肃对待暗物质。

转折点发生在20世纪70年代早期，华盛顿卡内基研究所的女天文学家维拉·鲁宾(Vera Rubin)发表第一个清晰的观测证据表明暗物质在星系中普遍存在。通过星际气体的H $\alpha$ 发射线的多普勒频移的测量，鲁宾研究了M31(仙女星系)等60多个星系的星际物质轨道速度随距星系中心距离的变化关系。就像八大行星围绕太阳公转一样，人们预期恒星以及星际物质围绕星系中心旋转也服从类似于行星运动的开普勒定律。如果星系的质量主要集中于星系核心部分——就如观测表明的那样，那么我们会预



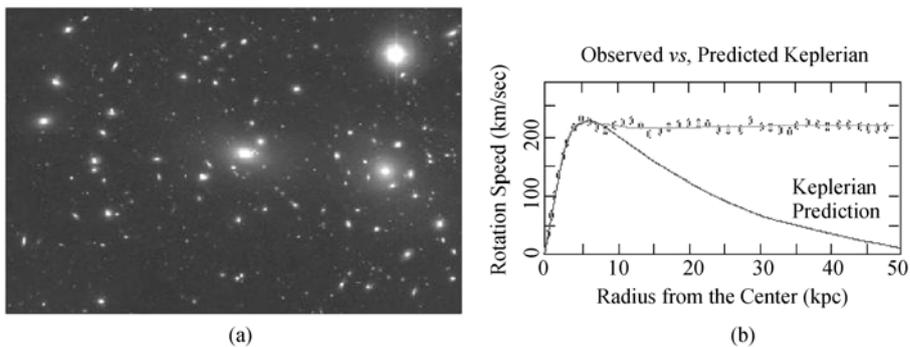


图 2 (a) 后发星系团，当年茨威基就是在研究它时发现存在暗物质的；(b) 一个典型星系的旋转曲线。

期随着半径的增大绕转速度将以反比于半径的平方根的形式下降。然而鲁宾却发现随着半径增加这些星际物质的轨道速度基本上保持为常数，有的甚至还有些许增大，如图 2(b)所示。这和预期的开普勒运动是相矛盾的！为了解释观测到的现象，鲁宾假设星系被某种看不见的物质晕包围着，对于好多星系这种暗物质晕质量超出发光物质质量 10 余倍。

自此之后，科学家们才开始认真地对待我们宇宙中存在的这种幽灵般的物质。进一步的天文学观测发现了越来越多的暗物质存在的证据，包括星系团的 X 射线测量，原子氢 21 厘米射电辐射的观测，引力透镜效应的测量等等。今天人们已经习惯了在存在暗物质的框架下研究和思考问题，而且惊奇地发现好多时候加入暗物质之后情况会变得异常自恰和漂亮！大家的关注重点已经从暗物质是否存在转向暗物质是什么了。

### 暗物质是什么——猜测和证据

自然而然，人们会问：暗物质既然存在，为什么以往的天文观测“看”不见它？它究竟又是什么东西？以什么形态存在？未来我们能否想出办法看见它？下面我们来一个一个地看这些问题，并且按照我们现在的认识试图给出部分的解答。

为什么看不见它，简单地说就是因为暗物质不发光，或者说发光很弱，我们现有的探测仪器还不够灵敏来探测到它。我们现在已经知道自然界有四种相互作用力：万有引力，电磁力，强相互作用力和弱相互作用力。相应于这四种相互作用可以有四种手段来获取遥远天体的信息：引力波，电磁波，宇宙线以及中微子。我们进行天文观测最常用的，也是目前最切实可行的手段就是探测其电磁辐射，利用的是天体内部的电磁相互作用过程发射的电磁波以及该电磁波和探测器之间的电磁相互作用。现

在的探测能力允许我们进行几乎是全电磁波段的观测，在这些观测中都没有直接地看到暗物质。那么，或许我们可以大胆地认为暗物质大概不参与电磁相互作用。因此，在数百年的天文学研究中我们都对其视而不见！

当然保守一点，我们可以认为暗物质发光很弱。宇宙中确实存在发光很弱的天体，例如褐矮星，白矮星，中子星，以及黑洞等，其本质和我们所知道的物质如恒星等没有两样，都是由质子，中子等重子构成的。这一类物体人们称之为大质量致密晕状天体(massive compact halo object, MACHO)。天文学家已经开展了一系列实验来搜寻 MACHO 天体，其方法是观测这些天体对其后面恒星的引力透镜光放大效应。天文学家观测了数百万颗恒星，只发现了极少量的 MACHO 候选天体。得到的结论是：MACHO 质量总和与银河系中暗物质质量相去甚远。

更进一步，根据观测到的轻元素丰度，从氦直到锂，以及大爆炸核合成理论可以预期宇宙中重子物质的丰度只占宇宙总能量密度的 4% 左右。而多种宇宙学测量手段一致给出暗物质比重占 23% 左右。这说明构成暗物质的粒子将不可能是我们所熟知的重子物质！

即便如此，人们还是希望在标准模型里面看看能不能找到可能成为暗物质的粒子。遍历标准模型，发现有一种粒子还有可能作为暗物质粒子候选者，那就是中微子。中微子稳定，没有电磁相互作用，如果能够有足够的质量和数目的话，则不失为一个恰当的暗物质候选粒子。但是，由于中微子质量毕竟微小，在宇宙早期能量比较高的时候中微子处于相对论性状态，不容易在自引力作用下成团形成结构，因此可以预期，如果中微子构成暗物质的话，在宇宙早期的小尺度的密度扰动将由于中微子的相

对论性运动而抹平,只有在很大尺度上(大到中微子变得非相对论性时其自由流动还没有影响到的尺度)的扰动可以保留下来并且形成结构。这种结构形成模式我们称之为“自上而下”模式,即先形成大尺度结构,大尺度结构再逐渐碎裂形成小结构,相应的暗物质称为“热”暗物质。然而观测到的情况恰恰相反:我们观测到了很多高红移的星系,而星系团大都是低红移的。这表明星系团形成时间普遍比较晚,结构形成模式是“自下而上”的,即先形成小尺度结构,小尺度结构再并合形成大尺度结构!因此,宇宙中的暗物质将不可能主要是由中微子构成的,而应该是以一种质量更大的“冷”的粒子为主!根据宇宙的大尺度结构以及微波背景辐射的观测我们可以给出类似于中微子的热暗物质的质量比重不超过几个百分点。几乎可以肯定,暗物质粒子应该来源于标准模型以外的某种还不为我们所知的粒子。

### 暗物质的结构——数值模拟

关于暗物质的存在形态,虽然不能直接看到一个直观的图景,但是通过其体现出来的引力效应可以间接地推测其空间分布特性。例如根据星系的旋转曲线测量可以反推星系周围暗物质应该是以弥漫的晕状形态存在。引力透镜效应提供给我们一种描绘宇宙更大尺度上暗物质分布的手段。一个名为 STAGES 的合作组利用哈勃空间望远镜对超星系团 Abell901/902 进行深场巡天,根据引力透镜效应重建得到了该超团天区的二维暗物质分布(图 3(a))。另一个叫 COSMOS 的组提出一个星系巡天项目,试图通过星系的弱引力透镜效应来重构三维暗物质分布。结合哈勃空间望远镜,地面大型光学望远镜以及 X 射线望远镜等多种观测手段,COSMOS 组成功地构建出了宇宙中某个天区的三维暗物质分布。他们发现,可见部分物质如星系和气体物质可以示踪暗物质分布,而且随着宇宙年龄增加暗物质结团程度也增大。这和前面所阐释的“自下而上”结构形成模式是相一致的。

计算机技术的发展提供给我们另一个非常强有力的研究暗物质结构的工具——数值模拟。利用大型计算机,我们可以在某个空间范围内洒下大量的暗物质“粒子”,赋予一定的初始条件例如密度扰动等,然后根据牛顿引力定律逐步计算其在膨胀的宇宙中在自引力作用下的演化过程,得到我们今天的

状态。这里的“粒子”加上引号是因为它们并非真正意义上的暗物质粒子,而是数值模拟过程中的一个单元,这样的单元包含非常多的暗物质粒子(粗略做一估计,如果每个单元的质量为  $10^8 M_{\odot}$ ,暗物质粒子质量为  $100 \text{ GeV}$  的话,一个单元将对应于约  $10^{63}$  个暗物质粒子)。这样做的原因是受限于计算机的能力,通常现在的超级计算机能够承受的“粒子”数目不超过  $10^{24}$ ,要真实完全模拟宇宙尺度上的暗物质系统是远远不可能达到的任务。因此只好利用这样的一个个伪“粒子”来代替暗物质粒子的行为。这样的做法恰当与否,则需要通过模拟的结果和观测到的引力效应比对来检验,例如根据我们已经有的旋转曲线以及星系大尺度分布的观测,甚至还有从引力透镜直接重建出的暗物质分布等。令人欣慰的是数值模拟可以很好地重现观测结果,因而可以相信我们所采用的数值模拟方法是可靠的(图 3(b))。相比较间接的引力观测而言,数值模拟可以提供更加精细的暗物质分布信息,而且对于很多目前还没有很好观测结果的对象,如矮星系等,数值模拟则几乎成为了关于其暗物质分布前期研究的唯一手段。

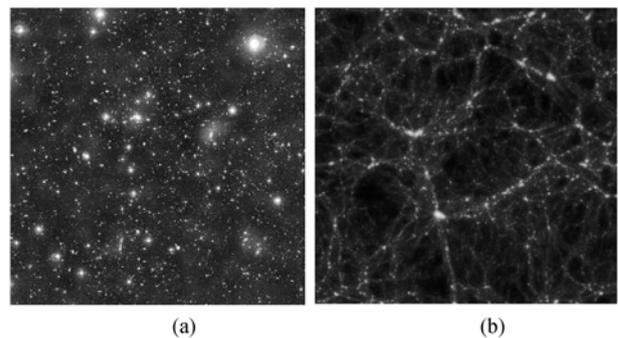


图 3 (a) STAGES 合作组利用哈勃空间望远镜对超星系团 Abell901/902 进行深场巡天,根据引力透镜效应重建得到的暗物质分布,图中的亮斑是可见的星系,而模糊的晕状结构则为暗物质分布;(b) 数值模拟给出的暗物质分布。

然而数值模拟仍然有些问题存在。质量分辨率是一个主要的问题。前面讲到我们实际上进行数值模拟是用伪“粒子”来代替暗物质粒子的,那么显然我们能够探讨的质量尺度应该至少大于该伪“粒子”的质量。更小尺度上的信息,我们通常是通过大质量尺度的平均以及外推得到。这样必然导致一定的不确定性,而目前不同的数值模拟的分歧也大都出现在分辨率所不及的地方。

## 暗物质不“暗”——捕捉暗物质

我们已经知道暗物质粒子的基本性质：稳定，中性，以及大质量(其质量通常会大出质子质量的数十倍)。关于其相互作用特性，我们知道有引力相互作用，没有强和电磁相互作用，否则它将与普通物质有足够强的耦合从而容易被我们观测到。那么暗物质是否可能参与弱相互作用呢？如果答案是肯定的，那将是一件令人欣喜万分的事情：暗物质或许不“暗”！其弱相互作用特性将有可能给我们传递出一缕缕捕捉到暗物质的“曙光”。有另一个线索大概也表明暗物质存在弱相互作用。根据宇宙的演化历程，我们知道在极早期宇宙中各种成分是耦合在一起的，随着宇宙的膨胀冷却，不同成分逐次退耦成为残存组分而保存下来。退耦的时间是和相互作用强度直接相关的，相互作用越强，退耦越晚发生，那么残存密度就将越低。根据我们今天测量到的暗物质密度推知暗物质粒子相互作用强度正好处于弱相互作用尺度。如果暗物质真的存在弱相互作用，那么我们就可以设计一些实验来捕捉这样的弱作用信号。信号的微弱使得这样的实验艰难而且耗资巨大，但是这件事情本身足够重要而值得去做这样的尝试。如果最后发现暗物质粒子根本就没有我们津津乐道的这些弱相互作用，这些“徒劳”的实验也意义重大，就像发现能量守恒定律之前的无数失败的永动机的尝试一样。

目前人们认为暗物质粒子最有可能是弱作用的大质量粒子(weakly interaction massive particle,

WIMP)，标准模型里面没有这样的粒子。理论家们构建了很多超出标准模型的理论，并且提供了为数众多的暗物质候选粒子。最为大家看好的是一种称作超对称的理论，该理论模型中的最轻的超对称粒子，称作 **neutralino**，将是一种很有吸引力的暗物质候选粒子。当然，理论需要实验来检验，形形色色的理论也需要实验来区分！

基于我们现在对暗物质的认识，科学家们设计了一系列有针对性的实验来寻找暗物质粒子，其中大多数实验是针对于 **WIMP** 而设计的，当然也有少数的搜寻其它类型暗物质粒子的实验。大体说来暗物质搜寻实验可以分为直接搜寻和间接搜寻两种。直接搜寻就是利用大体积探测器，探测地球周围的暗物质粒子和探测器核子之间的散射。由于相互作用很弱，因此需要很大的探测器才有可能看到这种散射信号。此外，实验还需要尽可能地排除本底的干扰，宇宙线和岩石放射性都将成为实验本底，所以通常选择在地底下进行这类实验，而且还要选择低放射性区域或者屏蔽放射性。其中之一有一个叫作 **DAMA** 的实验(图 4(a))，是由意大利和中国科学家合作开展的，该实验在长达数年的运行中发现存在一个周年信号，可能是由于地球在绕太阳公转过程中和暗物质粒子之间存在周期性的相对运动而导致的。但是，遗憾的是这个结果没有能得到其它实验的证实。很多的暗物质直接探测实验都没有看到探测器和暗物质的散射信号。这也使得暗物质的直接探测前景依然不明，我们或许还有很长的路要走。



图 4 (a) DAMA 实验；(b) LHC 实验；(c) 羊八井宇宙线观测站。

直接搜寻以外的实验则统称为间接搜寻。除了和探测器核子的直接散射，暗物质粒子之间也可以发生自湮灭，产生出能够捕捉到的宇宙线粒子，例如 $\gamma$ 光子，正反质子，正负电子以及中微子等等。现在已有很多宇宙线实验可以开展此类的暗物质搜寻工作。目前正在运行或者已完成运行的实验中同样没有发现明显的暗物质湮灭信号。主要的问题在于探测器灵敏度不够高以及天体物理过程提供的本底太强。下一代高性能探测器将有效地推动对暗物质问题的理解，其中著名的探测器有丁肇中先生领导的探测宇宙线带电粒子的 AMS02 实验，有探测 $\gamma$ 射线的 GLAST，探测中微子的南极 IceCube 等。还有许多地面的宇宙线实验，在暗物质搜寻工作中也将大展拳脚。位于我国西藏羊八井的宇宙线观测基地现在运行有中日合作 Tibet-AS $\gamma$  实验和中意合作 ARGO-YBJ 实验(图 4(c))。我们期望我们自己的实

验也能够在暗物质搜寻这个举世瞩目的工程中发挥出积极的作用。另一种间接搜寻的方法来自于对撞机实验。与暗物质粒子湮灭过程互逆的是，普通粒子碰撞也可能产生暗物质粒子对，当然前提是要能量高到足以产生这样重的粒子。而产生的暗物质粒子将不留痕迹地跑掉，看上去就是有些能量无缘无故地消失了。位于西欧核子中心的大型强子对撞机 LHC(图 4(b))已于近期开始运行，在不远的未来也将为暗物质粒子搜寻提供很有价值的信息。

总的看来，目前所开展的各项搜寻暗物质的实验都还没有看到很明显的暗物质信号，暗物质的探测举步唯艰。但是，我们也看到，人类的智慧是无穷的，在大家几十年的努力下，暗物质的真实面貌也逐步地呈现出来。我们有理由相信，捕捉到暗物质的时间将不会太远！

(中国科学院高能物理研究所 100049)