

## 暗物质不会全是黑洞

(北京大学 徐仁新 编译自 Simeon Bird, *Physics*, October 1, 2018)

搜寻超新星的引力透镜(黑洞为透镜天体)事件无果而终。研究人员因此得出结论: 黑洞无法解释宇宙中所有的暗物质。

暗物质约占宇宙物质的85%。人们很早就怀疑它就是黑洞, 但尚不清楚黑洞总质量能否足以解释所有的暗物质。最近, 有关超新星的一项研究给出否定的答案。若视线附近有一颗质量足够大的黑洞, 超新星看起来会显得更亮, 从而显露黑洞的存在(图1)。加州大学的 Zumalacárregui 和 Seljak 观测了一千多颗超新星以发现这一效应, 然而一无所获。他们因此得到结论: 重于  $0.01M_{\odot}$  的所有黑洞最多只占宇宙暗物质的40%。

霍金于1974年提出一个想法: 黑洞可能就是宇宙中的暗物质。这个看法不需假设理论上推测的新粒子(至今在加速器和暗物质实验中均未发现), 因而很受关注。诚然大质量恒星核心塌缩时会形成黑洞, 但这类黑洞并不足以解释所有的暗物质。新的理论研究表明, 宇宙极早

期密度涨落导致的引力坍缩或可造就大量的原初黑洞, 其总质量也许足以解释暗物质。不过, 我们目前对宇宙那个时代的认识还很肤浅; 如果原初黑洞真的存在的话, 推测其质量会在  $10^{-5}g$  至  $10^9M_{\odot}$  之间。

对于星核坍缩产生的黑洞而言, 其周围往往残留气体或尘埃。然而, 那些原初黑洞则诞生于原子形成之前, 其周围没有可见物质, 因而彻底黑暗。为发现这样的黑洞, 我们需借助黑洞引力场对光的弯曲, 即引力透镜效应。之前关于黑洞引力透镜效应的搜寻已经排除存在  $(10^{-8}-10)M_{\odot}$  之间的大量原初黑洞, 从而约束了暗物质的黑洞模型。2015年, LIGO—Virgo 合作组探测到首例双黑洞并合的引力波信号, 其中每颗黑洞的质量均大于  $25M_{\odot}$ , 比预期的大质量恒星死亡时产生的黑洞重得多。这一发现让人怀疑 LIGO—Virgo 合作组已经探测到了原初黑洞, 再次激发大家探讨黑洞作为暗物质候选体的兴趣。

Zumalacárregui 和 Seljak 也利用引力透镜效应来寻找黑洞。引力透镜这一手段在以前的研究中已成功实施; 比如在一颗恒星和地球之间存在某一天体(如黑洞), 该

星的光线将被引力场弯曲, 从而产生这种类似透镜的效果。如图1所示, 黑洞充当透镜时将使恒星看起来更亮, 增亮的程度取决于黑洞的质量。此前的引力透镜实验只是在大小麦哲伦云中搜寻黑洞对恒星的增亮。而这次观测持续时间跨度较大, 可监测几分钟到五年尺度上的光变, 因而足以发现几十倍  $M_{\odot}$  的黑洞经过恒星视线附近时导致的引力透镜效应。

不过, 该方法要探测更大质量的黑洞则需要十年或更长时间内监测一颗恒星的光变, 显得不切实际。不同的是, Zumalacárregui 和 Seljak 考虑引力透镜导致超新星的增亮。Ia 型超新星被看作标准烛光, 可通过测量光极大后衰减的快慢来确定其内禀光度。由于引力透镜效应, 在一颗黑洞背后偶然爆发的超新星要比预期看起来更亮。扣除黑洞经过时对超新星光变衰减的影响, 这项研究有能力发现 0.01 到几千  $M_{\odot}$  的黑洞。

这两位学者分析了一千多颗的 Ia 超新星观测数据, 但没有发现显著的增亮效应。假定黑洞有一定的质量分布并在地球和超新星之间随机运动, 他们可计算引力透镜的事件率, 并据此得出结论: 这些黑洞的总质量最多仅占暗物质的40%(图2)。原初黑洞是非相对论性运动的, 可充当冷暗物质的角色。虽然没在加速器中发现, 但原初黑洞还

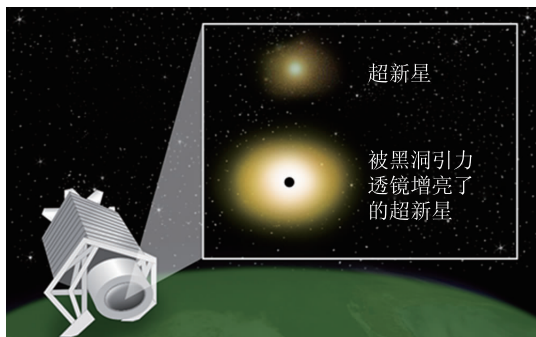


图1 若超新星视线附近存在一颗黑洞, 那么看到的爆发就会显得更亮些。这颗黑洞的引力场会弯曲超新星发来的光线, 正如一面凸透镜那样增亮了背后的光源

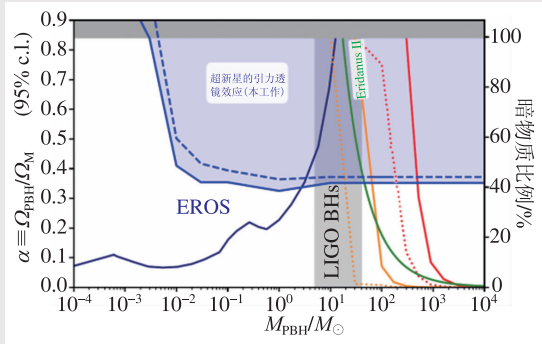


图2 在95%置信度上对宇宙原初黑洞的限制。横轴是原初黑洞的质量，纵轴是原初黑洞占物质(左)或暗物质(右)的比例。蓝色的实线和虚线都是超新星引力透镜观测给出的限制，只是所用样本不一。LIGO给出的限制很不确定(灰色区域)。其他限制曲线由EROS、Eridanus II、CMB(未标记)等观测项目给出

会导致其他后果(例如充当星系超大质量黑洞的种子，宇宙大小尺度上结构的形成，甚至影响宇宙的热演化)。依据某些天体物理观测效应而给出的原初黑洞限制也标记于图2中。

Zumalacárregui 和 Seljak 的研究表明，重于  $0.01M_{\odot}$  的黑洞不足以解释全部暗物质。但也有可能黑洞只占暗物质的一

小部分，其余成分可能包括弱相互作用重粒子(WIMP)、惰性中微子、轴子等。鉴于此，未来可继续通过探测超新星增亮来进一步约束宇宙中黑洞的总量。比如，即将启动的大型综合巡天望远镜(Large Synoptic Survey Telescope)项目能够在3天内对全天区进行成像，从而极大地提升观测瞬变源的能力，必将有助于发现黑洞作为透镜天体(背景源可以是超新星、恒星甚至其他发光天体)的事件。

更多内容详见：M. Zumalacárregui and U. Seljak, *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 121: 141101。

## ANITA 观测到另一个逆向类宇宙射线事件

(中国原子能科学研究院 周书华 编译自 Katherine Wright. *Physics*, October 18, 2018)

高能宇宙射线粒子不断地轰击地球。当其中某个粒子与大气层中的分子发生碰撞时，产生级联的次级粒子，统称为宇宙射线大气簇射。但这并不是高能粒子与地球相互作用的唯一方式。2006年12月28日，南极脉冲瞬态天线(ANITA)探测到一种“向上的”空气簇射——

一股从南极冰面喷发出来的高能粒子。研究团队如今报道了发生在2014年12月12日的第2个这样的事件。

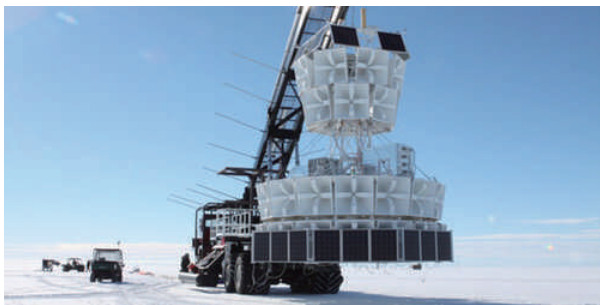
ANITA通过宇宙射线大气簇射所发射的无线电信号来探测这种簇射。ANITA或者在无线电波下行中，或者，更多时候，在无线电波

从冰上反弹回来后上行中探测无线电波。这种反弹使无线电波的相位发生反转，可以通过这两种无线电波的方向和相位将它们区分开。

但是在2006和2014年ANITA探

测到一种未预料到的信号——来自冰面上具有无反转相位的无线电波。探测结果显示，这些信号来自穿过地球向上运动的粒子。但是，预期这种宇宙射线的数量不会很大，这些信号的来源成了谜。有一种可能性是来自明亮的超新星爆发的宇宙射线穿过地球产生的，但是只有2014年的探测结果与这种事件相符合。另一种可能性是，ANITA探测到的无线电波是由一种新粒子发射的，这种粒子没有包括在标准模型中。研究团队认为在对这些神秘的信号来源做出明确结论之前，需要对这些信号进一步探测。

更多内容详见：P. W. Gorham et al. *Phys. Rev. Lett.*, 2018, 121: 161102。



ANITA 准备下一次飞行实验