

有关原初黑洞的故事

(中国科学院国家天文台 邓舒夏、苟利军 编译自 Ian Randall. *Physics World*, 2022, (5): 33)

认为黑洞可能在大爆炸后不久就形成的想法可以追溯到1966年,当时物理学家 Yakov Zel'dovich 和 Igor Novikov 首次提出了黑洞的存在。到20世纪70年代中期,史蒂芬·霍金和他的同事 Bernard Carr 提出并发展了这一概念。

我们目前关于宇宙如何形成的理论是不允许黑洞在早期宇宙中被创造出来的。相反,恒星和星系最初是由宇宙的早期波动而形成。黑洞的形成时间要晚得多,要等到第一批远古恒星死亡之后。

但是,如果原初黑洞(primordial black holes)真的在大爆炸后一秒就形成,那么情况就会不同了。霍金和 Carr 认为,原初黑洞的形成可能是早期宇宙密度波动的结果。在他们的模型中,宇宙中质量略高于平均质量的区域可能会自行坍塌,形成这些种子黑洞。两人在1974年的一篇论文中写道:“今天星系的存在意味着早期宇宙一定是不均匀的。一些区域可能被压缩得非常致密,以至于它们经历了引力坍塌,从而产生了黑洞。”

霍金和 Carr 预测,原初黑洞的大小可能有多种,从小到 $10 \mu\text{g}$ 到大到1万个太阳质量。这与恒星形成的黑洞非常不同,它往往在5到10个太阳质量之间,并受到坍塌形成它们的恒星大小的限制。

20世纪90年代,宇宙膨胀理论的发展,最终解释了宇宙最初的密度波动可能来自哪里。这一概念最近又吸引了人们的关注,因为 LIGO-Virgo 在2016年首次探测到了

由双星黑洞合并引起的引力波。所涉及到的黑洞大小(在10—50个太阳质量的范围内)比预期的要大,这让一些人猜测这对黑洞是原初起源的。

从那时起, LIGO 到目前已经探测到了几十个黑洞合并。根据日内瓦大学的宇宙学家 Gabriele Franciolini 及其同事去年发表的贝叶斯分析结果,这些双星黑洞中有多达24个很可能是在早期宇宙中形成的。

很久以前

今年耶鲁大学的 Priyamvada Natarajan 及其同事的一项研究进一步推动了“原初黑洞真的是宇宙中暗物质”的想法。她们提出,如果原初黑洞的大多数是由大约1.4倍太阳质量形成的,那么它们可以解释宇宙中所有的暗物质。模型表明这些原初黑洞能提供引力锚,围绕着这些原初黑洞形成了第一批恒星和星系。事实上,根据该团队的说法,这些早期的黑洞可能已经消耗了它们附近的恒星和气体,使它们成为今天位于星系中心的超大质量黑洞的前身。

Natarajan 说:“如果原初黑洞确实存在的话,它们很可能是所有超大质量黑洞形成的种子,包括银河系中心的那个。我个人觉得这个想法非常令人兴奋,因为它巧妙地将我正在研究的两个真正具有挑战性的问题(暗物质的性质和黑洞的形成和增长)完美地结合在一起,并一举解决了它们。”

原初黑洞的存在还可能解决另一个长期存在的宇宙学难题,即天文学家探测到的来自宇宙中的各种

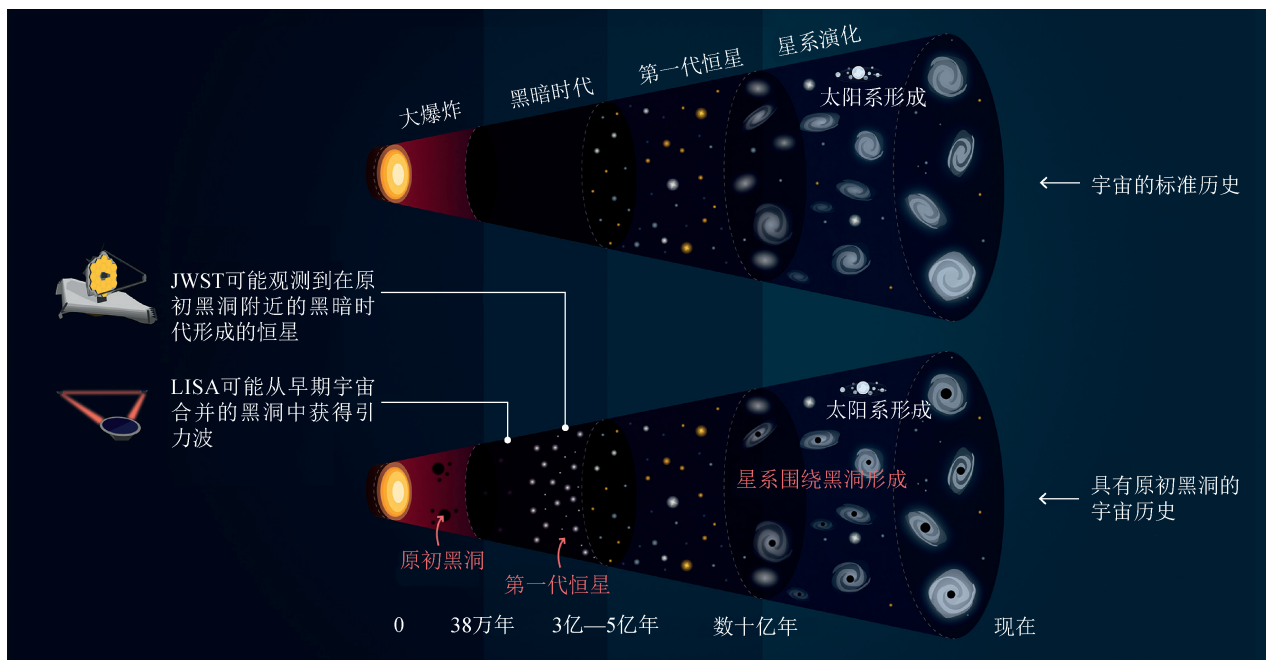
微弱、遥远的过量红外辐射。根据 Natarajan 团队的说法,她们的模型完美地预测了,因为物质吸积,原初黑洞的增长将产生完全相同的辐射特征。

离家更近

考虑到原初黑洞可能在宇宙中大量存在,那么它撞击地球的可能性有多大,如果真的发生了,会发生什么?伊朗谢里夫理工大学的 Sohrab Rahvar 假设原初黑洞可以解释银河系中银晕和暗盘中的所有暗物质,他计算得到地球大约每10亿年会与一个质量为 10^{12} 千克的原初黑洞相撞一次。他解释说,这是在宇宙当前寿命内、霍金辐射蒸发后可能幸存下来的、质量较低的原初黑洞范围之内的(任何在大爆炸后不久诞生的质量小于 10^{11} 千克的原初黑洞现在都已经蒸发了)。虽然更大的黑洞可能仍然存在,但它们与地球相撞的概率在我们地球整个生命周期中遇不到一次。

“当地球正在穿过黑暗的银晕时,可以吸引原始黑洞。” Rahvar 说。正如他所指出的那样,原初黑洞会穿过地球,因为它的动能太高,不能被困在里面。由于与行星物质的引力相互作用产生的动态摩擦力,以及物质向黑洞吸积产生的动量转移,原初黑洞将被减慢。

由此,关于黑洞与地球的碰撞,人们可以想象出两种可能的结果。一种可能性是,它会穿越地球并到地球的另外一侧,在这个过程中转移它的一些能量。另外一种可能是,黑洞的速度会变得如此之慢,以至



黑洞效应。在宇宙历史的标准模型中，一方面，暗物质仍然是一个悬而未决的谜团，原初黑洞并不是其中的一部分。另一方面，如果暗物质确实主要由大爆炸后不久形成的黑洞组成，那么在早期宇宙中，会有更多的恒星和星系会围绕它们而形成。去年发射的詹姆斯·韦布太空望远镜(JWST)在研究早期星系和恒星的形成时，将重点关注的正是这个时代。如果原初黑洞存在的话，激光干涉仪太空天线(LISA)将于21世纪30年代发射，它将能够从原初黑洞的早期合并中提取引力波信号，为我们提供更多的证据

于它会螺旋式下降到行星的核心。Rahvar解释说，此时，地球将注定灭亡。黑洞中物质的吸积将加热地球内部，使黑洞不断生长。最终，整个地球都将被黑洞所吞噬。

很幸运的是，他的计算表明，如果原初黑洞确实构成了我们银河系的暗物质，它们将具有如此高的弥散速度(大约200 km/s)，以至于只能飞经我们的家，而不会停在地球上。Rahvar说：“我们预计，在地球的一生中，可能会有多达四次的原始黑洞碰撞，”他补充说，“幸运的是，即使在碰撞的情况下，将一个黑洞困在地球内部的可能性几乎为零。”

太空杀手的碰撞

即使原初黑洞不会摧毁地球，我们可能仍然想知道当一个原初黑洞在我们的星球上呼啸而过时会发生什么，以及它是否会留下任何我们可以检测到的作为它们存在的痕迹。考虑到这一点，Rahvar计算出，小行星的撞击释放的能量实际上是

同等质量原初黑洞的五倍。即使它们能量大小相等，黑洞引发世界末日的可能性也远远低于小行星。

然而，Rahvar继续指出，原初黑洞将会对局部产生显著的影响。原初黑洞的通过可能会熔化地球内部半径近10 cm的圆柱体。在很短的时间内，这条隧道就会冻结，从理论上讲，这将在岩石记录中产生明显的变质指纹。但考虑到在地球的一生中可能只会发生8次类似的这种事件(每一次碰撞事件在地球两侧各产生一个)，Rahvar承认，“我认为这样的地质痕迹很难检测到。”

无限小的可能，但致命的结局

地球在我们的有生之年被黑洞击中的可能性是微乎其微的，更不用说一个人了，但它从来都不是零。那么，如果你被原初黑洞击中会发生什么呢？研究人员提出，原子大小的原初黑洞大约需要0.01 ms才能穿过人体。尽管这个过程非常快，但原初黑洞的引力效应会导致

人体缩小很多，造成严重损害并立即死亡。

与此同时，Rahvar指出了不同但同样致命的结果：原初黑洞会在其路径上焚烧身体。“会导致人类死亡的不是直接吞噬人体到原初黑洞内。死亡的主要原因是，物质被黑洞吸积会释放出很多高能光子，这些光子使得身体被烧伤。”

随着初步研究的完成，Rahvar现在正在研究是否有可能利用太空望远镜探测到银河系中的原初黑洞，方法是利用它们对前景恒星的微透镜效应。他解释说：“有了罗曼太空望远镜(Roman Space Telescope)或詹姆斯·韦布望远镜(JWST)这样的太空望远镜，我们可能会在不久的将来探测到或排除小质量的原始黑洞。”

Rahvar还在模拟原初黑洞如何与位于太阳系外围的奥尔特云相互作用，以及这些微小但质量巨大的天体是否能够将冰物质从外围抛入太阳系的中心。