

探索与发现

中国天眼是怎么探测到引力波的

中国天眼FAST(500米口径球面射电望远镜)又立功！近日,由中国科学院国家天文台等单位科研人员组成的中国脉冲星测时阵列(CPTA)研究团队利用中国天眼FAST,探测到纳赫兹引力波存在的关键性证据,表明我国纳赫兹引力波研究已与国际同步达到领先水平。相关论文在线发表于我国天文学术期刊《天文与天体物理研究(RAA)》上。

人类终于站在了期盼已久的纳赫兹引力波宇宙观测窗口前。那么,FAST是怎么探测到引力波的?纳赫兹引力波探测与获得2017年诺贝尔奖的引力波探测有何不同?此次研究成果有什么重大意义?我们今天就来详细了解。



“时空的涟漪”助寻宇宙暗物质

想知道引力波为何物,得先从一个多百年前说起。

1915年,爱因斯坦发表了广义相对论,这个全新的理论告诉我们,引力是时空弯曲产生的结果——时空告诉物质如何运动,物质告诉时空如何弯曲。简言之,广义相对论里的引力不是“力”,是时空的一种弯曲效果。

我们可以把时空想象成平静的水面,有质量的物体能让时空本身发生弯曲。如果宇宙中有质量的物体发生剧烈的加速运动,如超新星爆发、两个巨大星体发生碰撞、两个致密星体并合(中子星与黑洞这类星体的碰撞与并合),就像是往平静的水面扔进了石头,让时空本身泛起“涟漪”。“涟漪”携带着波源天体激烈动荡的信息和关于引力本质的线索,以光速向远处传播,这种时空“涟漪”就是引力波。

宇宙中发光的物质非常少,大部分(95%左右)都是真正的、永恒的“黑暗”——暗物质和暗能量,不管造多么先进的望远镜,这些“黑暗”人类都看不到。而引力波给人类提供了一种探索宇宙的新方式,让我们知道在看不到的宇宙空间里发生了什么。

引力波可以直接跟踪宇宙中有质量物体的运动(不管是否可见),利用引力波观测,我们就能够捕捉到“黑暗”的蛛丝马迹。比如,2015年人类第一次探测到的引力波GW150914,就是距离地球10亿光年之外的一个遥远星系中两个恒星级黑洞发生了并合。在以前,人类能知道这个过程,是不可想象的。

引力波不但大大扩展了我们对宇宙的感知,对物理学也有重要意义。通过对引力波的探测,可以检验目前的引力理论,检验人类对时间和空间的基本认知是否正确。

探测引力波需要不同的“尺子”

探测引力波的基本原理是“引力波所经过的区域,空间的长度会被周期性地拉伸和收缩”。换言之,引力波经过时,与之垂直的平面会处于不断伸缩的状态:横向收缩,纵向就拉伸;横向拉伸,纵向就收缩。空间本身的形变会让置身其中的物体也跟着形变。一旦探测出这种形变,就能说明观测到了引力波。

也许有人会问,美国科学家不是已经借助LIGO(激光干涉引力波天文台)探测到引力波,还获得诺贝尔奖了吗?为什么还需要其他装置(如FAST)来探测呢?答案是:不同的天文事件会产生不同频率的引力波,需要不同的“尺子”来测量。引力波的频率越低,波长就越长,所以承担测量功能的“尺子”也越长。

频率在10~1000赫兹波段的引力波由恒星级双黑洞、双中子星并合产生,这些波源离地球相对较近,通过前文提到的激光干涉引力波天文台可以探测到,它的“尺子”是两条相互垂直、

长度达4公里的管道,激光在管道中穿行。具体来说,在引力波的影响下,激光走过的“路途”长度会发生规律性的变化,而激光干涉仪能把引力波导致的长度变化,转变为激光干涉结果的光强变化,因此可以通过测量激光干涉结果的变化来捕捉引力波。

把同样原理的激光干涉装置放到天上,“尺子”可长达数百万公里,捕捉毫赫兹频段的引力波(由双星绕转、大质量黑洞俘获致密星产生的)。欧洲的LISA计划和中国的太极计划、天琴计划等空间引力波探测装置,都是用卫星组成干涉仪网络进行长距离干涉测量的。

那么,想要探测到宇宙中更远处由超大质量双黑洞、宇宙弦引发的更低频率引力波(也就是周期在年量级的纳赫兹引力波),就需要更长的“尺子”了。目前已知的唯一探测手段是利用大型射电望远镜观测宇宙中的脉冲星,很多人可能无法想象,中国天眼FAST探测引力波时利用的脉冲星测时阵列其实有银河系那么大。至于极低频段(10~16赫兹)的引力波探测,就要利用宇宙微波背景辐射了,比如南极BICEP2、西藏阿里观测项目等。

所以,各种探测装置分别探测不同的引力波信号,彼此互为补充,不能相互替代。

探测纳赫兹引力波有多难

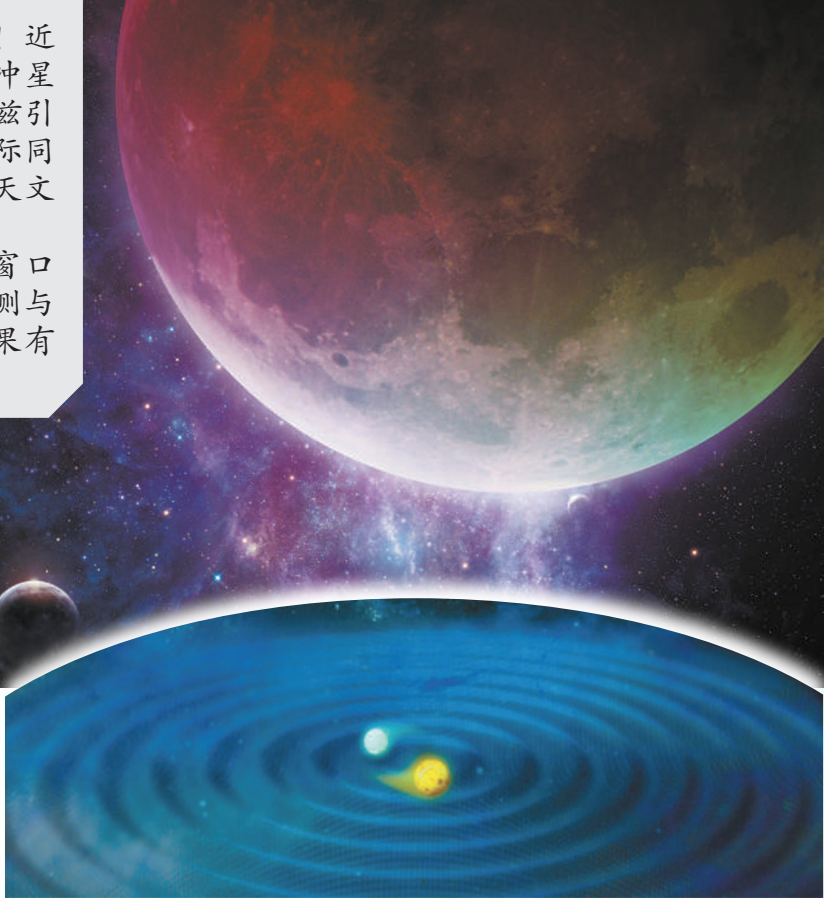
对频率低至纳赫兹的引力波进行探测,可以观测更深远的宇宙,有助于天文学家理解宇宙结构的起源,探测宇宙中最大质量的天体即超大质量黑洞的增长、演化及并合过程,也有助于物理学家洞察时空的基本物理原理。

当前,想要探测纳赫兹引力波,必须利用脉冲星,准确地说,是一群脉冲星。

脉冲星是一类磁场强且高速自转的中子星,它的自转很稳定,每隔固定的时间就会发出一个脉冲信号。如果不受其他因素影响,那么我们在地球上就能稳定地收到这种信号。

脉冲星的脉冲到达地球的时间极其规律,而引力波所经过的区域,空间的相对长度会被周期性地拉伸和收缩,这自然催生了一种设想:如果一系列引力波经过了地球和脉冲星中间的区域,那么脉冲星发出的信号就会发生改变,从而改变该信号到达地球的时间。这样一来就很好理解了,只要观测到这种脉冲信号到达地球时间的变化,就等于探测到了引力波。这就是利用脉冲星测时(PTA)探测引力波的基本原理。

NANOGrav、EPTA、PPTA 利用各自的大型射电望远镜,已分别开展了长达20年的纳赫兹引力波搜寻。在这个领域,中国脉冲星测时阵列研究



引力波示意图

为什么不能只观测一颗脉冲星来探测引力波呢?因为仅凭一颗脉冲星,我们不知道探测到的信号是引力波、脉冲星噪声,还是其他的假信号,必须利用多颗脉冲星相关的方法,来寻找相关信号以区分引力波和噪声。如果发现多颗脉冲星同时发生某种规律性变化,就可以证明探测到引力波了。其中,利用大型射电望远镜对一批自转极其稳定的毫秒脉冲星进行长期测时观测,是纳赫兹引力波目前已知的唯一探测手段。

纳赫兹引力波探测,在国际上是一个竞争激烈的领域,相关思想早在1983年便已提出。国际上的探测团组有北美纳赫兹引力波天文台(NANOGrav)、欧洲脉冲星测时阵列(EPTA)、澳洲帕克斯脉冲星测时阵列(PPTA),以及印度脉冲星测时阵列(IndPTA)、南非脉冲星测时阵列(SAPTA)和中国脉冲星测时阵列(CPTA)。

但是,由于纳赫兹引力波引起的时空改变非常微弱,引力波的周期也达到了年量级(时空的改变以年度为单位)。对它的探测在物理尺度和时间尺度上都很“大”,不但需要造银河系尺度探测器(脉冲星测时阵列),还需要观测很长时间,才能把时间周期长达数年的信号找出来。

在此次中国天眼FAST探测到纳赫兹引力波存在的关键性证据之前,国际上还没有一个团组得到过确切的探测结果。

“天眼”拿到了什么关键证据

2016年6月,中国科学院启动了纳赫兹引力波预研究,联合北京大学、中国科学院新疆天文台、云南天文台、上海天文台、国家授时中心、广州大学等多家相关单位组建了“中国脉冲星测时阵列研究团队”。2019年上半年,中国天眼FAST开展了试观测,由此拉开了探测纳赫兹引力波的序幕。

不过,脉冲星测时阵列探测纳赫兹引力波的灵敏度强烈依赖于观测时间跨度,即灵敏度随着观测时间跨度的增长而迅速增加。

NANOGrav、EPTA、PPTA 利用各自的大型射电望远镜,已分别开展了长达20年的纳赫兹引力波搜寻。在这个领域,中国脉冲星测时阵列研究

团队虽然是“后来者”,但以数据精度、脉冲星数量和数据处理算法上的优势,弥补了时间跨度上的差距。

中国天眼FAST是目前全球最大且最灵敏的射电望远镜,也是全球搜寻脉冲星效率最高的射电望远镜,截至目前,已发现740余颗新脉冲星。中国脉冲星测时阵列研究团队面对观测时间跨度远短于美、欧、澳3个国际团队的不利局面,充分利用FAST灵敏度高的优势,可监测脉冲星数目多、测量精度更高的优势,长期系统地监测了57颗毫秒脉冲星,并将这些毫秒脉冲星组成了银河系尺度大小的引力波探测器,来搜寻纳赫兹引力波。团队自主开发独立数据分析软件,对中国天眼FAST收集的时间跨度3年5个月的数据进行分析研究,发现了具有纳赫兹引力波特征的四极相关信号的证据。

本次测量到的引力波特征幅度很小,约为4×10⁻¹⁵,这意味着,它造成的时空改变极其微弱。在距离上,1公里尺度引力波引起的扰动约为百分之一个氢原子大小;在时间上,千万年尺度上才变化1秒。也就是说,对纳赫兹引力波的探测,是在挑战人类精密测量的极限。

本次关键性证据由4个国际团队分别独立获得、独立发表、相互印证,说明我国纳赫兹引力波探测灵敏度达到了与美、欧、澳相当的水平,从而同时实现此次重大科学突破。

中国脉冲星测时阵列研究团队暂时无法确定纳赫兹波段引力波的主要物理来源,其他国际团队也无法确定。不过,这个问题将随着中国天眼FAST后续观测数据时间跨度的增加得到解决。由于中国脉冲星测时阵列研究团队现有数据时间跨度较短,所以数据时间跨度增长带来的效果会更明显,例如,如果数据时间跨度再增长3年5个月,中国脉冲星测时阵列研究团队的数据时间跨度将翻倍,而其他国际团队仅增长不到20%。

未来将建成纳赫兹引力波天文台

作为目前世界上最大、最灵敏的单口径射电望远镜,中国天眼FAST将让中国在射电天文领域领先世界20年。从跟跑到领跑,这背后,是中国不断崛起的科技力量。

未来我们还将看到中国天眼FAST进行扩展和升级,基于脉冲星测时阵列方法实现纳赫兹引力波事件的常规观测,从而建成纳赫兹引力波天文台,并开启更高灵敏度和更高分辨率的低频射电观测研究新纪元。

2003年6月29日,一个中国的博士生前往澳洲,在那里开始了他利用脉冲星探测引力波的科研生涯。20年后的今天,当年的博士生已经成为中国脉冲星测时阵列研究团队的领军人物,利用中国天眼FAST发现了纳赫兹引力波存在的关键性证据,他就是李柯伽研究员。他的经历也许又一次印证了那句话:“FAST最大的意义是把人类的视野向前扩展了一大步,也让中国的天文学家第一次站在了人类视野的最前沿。”

没有人知道中国天眼FAST还能给天文学理论带来怎样的贡献,但可以确定的是,它一定会有更多贡献。

(据《北京日报》)

“看起来像是昨天死去的”

5亿年化石可能改写脊椎动物起源

在7月6日发表于《自然-通讯》的一篇论文中,美国哈佛大学古生物学家Karma Nanglu与合著者报告说,一块保存完好的5亿年前的化石与今天一些被囊动物非常相似,即用两根虹吸管过滤水中的有机颗粒,复杂的肌肉组织则用来控制虹吸管。这一发现为早期被囊动物的出现时间和发育提供了线索,甚至可能推迟被囊动物的“姐妹”——包括人类在内的脊椎动物起源时间。

“它看起来就像一只昨天死去的被囊动物,只是碰巧摔倒在岩石上。”没有参与这项研究的美国普林斯顿大学发育生物学家Nicholas Treen说。

2019年,一块手指大小的化石落在Nanglu的桌子上。他专门研究寒武纪和奥陶纪,今天的许多动物形态都是在那个时期出现的。这个标本在美国盐湖城自然历史博物馆的抽屉里放了很多年。人们从犹他州西部一个富含化石的寒武纪石灰岩层中发现了它,并认为它可能是一种海鞘或被囊动物——一种与所有脊椎动物有着共同远祖的海洋无脊椎动物。

“在整个5亿年的历史中,这种动物基本上没有化石记录。”Nanglu兴奋地说。

如今,大约有3000种被囊动物生活在几乎所有的海洋栖息地。它们大多数的生命周期由两部分组成——一个自由游动的蝌蚪状幼体,再定居并蜕变成静止的成体。被囊动物的幼体有脊索,是脊柱的前身,也是脊索动物的决定性特征,而脊索动物包括所有脊椎动物。但由于古生物学家无法解释的原因,目前只有少数被囊动物化石存在。

然而,这个新的标本将柔软的身

体细节保存下来,毫无疑问是一种被囊动物。“这张化石的照片真是太棒了。”Treen说。Nanglu和同事将其命名为Megasiphon thylakos,因为它有巨大的虹吸管和囊状的身体。现代被囊动物使用这些虹吸管帮助其过滤食物。Nanglu说,Megasiphon肌肉组织的细节看起来几乎与现代被囊动物肠鞘虫完全相同。

“Megasiphon的肌肉意味着它可能已经有了类似心脏的东西,尽管它的内部结构没有得到保护。”Treen说,“既然你能看到这些心房虹吸肌,你可以理所当然地认为,这个生物体内有一颗脊椎动物般跳动的心脏。”

这一发现表明,被囊动物由两部分组成的生活史和变形能力是该群体祖先的特征。

这样一个完整且可识别的被囊动物的存在也可能将脊椎动物的起源时间前移。现在人们认为脊椎动物的起源大约在4.5亿年前。没有参与这项工作的美国马里兰大学帕克学院发育生物学家William Jeffery说:“如果被囊动物的身体结构在5亿年前就已形成,并且被囊动物实际上是脊椎动物的姐妹群,那么脊椎动物也可能更古老。”

其他化石也为这一观点提供了支持:Megasiphon很可能与一种名为Metaspriggina的会游泳的类鱼动物生活在一起,这种动物的历史可以追溯到5.05亿年前。Metaspriggina有眼睛和肌肉,可能还有脊索。

尽管如此,Nanglu说,现有的化石不足以改变脊椎动物进化的故事。他说:“人类自然会被这个起源问题所吸引,这有助于故事的发展,但我们需要更多的化石证据。”

(据《中国科学报》)

气候骤冷,迫使人类祖先从森林走向草原

最新研究显示,320万年前的人类祖先“露西”,能够像现代人一样站立和直立行走,同时也擅长爬树,学会直立行走的人类祖先长期保留树栖生活。那么,古人类为何最终放弃两栖生活?



近日,发表在英国《皇家学会开放科学》杂志上的一篇论文研究,引发了人们的好奇:人类祖先“露西”在学会直立行走时,为何仍长期保留上树摘果采叶,乃至睡眠休息的生活方式?人类祖先这种半地面直立行走、半树栖爬树生活的历史究竟延续了多久?古人类的两栖生活方式与环境有何关联?他们是什么时候真正走向地面生活的?

腿部肌肉比现代人发达

“露西”是20世纪70年代在埃塞俄比亚发现的南方古猿,保存有40%的骨骼,故它是南方古猿中最完整的化石之一。“露西”身材比我们矮小,有类似猿类的面部和较小的大脑,但能够用两条腿行走,适应了树木和草原两种生活环境。

科学家经过长达20年的研究,形成了一个共识:“露西”是直立行走的。近来,剑桥大学威斯曼博士首次利用数字技术重建了320万年前的“露西”下肢和骨盆肌肉,进一步确证了“露西”是直立行走的。

威斯曼根据人类是现在唯一能够用直立姿势站立并伸直膝盖的动物,对现代女性和男性的肌肉和骨骼结构进行数字影像扫描,绘制出“肌肉路径”,并建立数字肌肉骨骼模型。然后,使用了现有的“露西”骨骼的虚拟模型来重新连接关节,即将骨骼重新拼合起来。

这一模型揭示了“露西”腿部脂肪与肌肉的比例,表明其腿部肌肉比现代人发达得多,在结构上类似于倭黑猩猩。威斯曼发现,“露西”的腿部可能有74%是肌肉,高于现代人的50%肌肉,而它的脂肪含量比现代人低。

300万年前仍保留直立爬行兼有现象

研究还发现,“露西”的膝关节伸展肌能像健康人一样将膝关节伸直。因此,通过重建的腿部肌肉来判断,“露西”在双足行走方面与我们并无二致,并不像黑猩猩那样蹲伏着蹒跚前

行。

新研究也表明,南方古猿不仅像我们一样习惯双足行走,还可能擅长爬树。由此可见,“露西”能够适应从茂密森林到稀树草原的多种栖息地。这种两栖生活从新近披露的2100万年前的莫罗托古猿就开始了。

另外,科学家对“露西”时代一位年仅3岁的南方古猿“塞拉姆”的死亡研究发现,这个“年轻女孩”可能是从树上跌落下来死亡的。这也表明人类祖先直立和爬行的兼有现象直到300万年前仍然保留着。

气候骤冷改变环境,影响人类演化

科学家最新的研究结果显示,推动人族在陆地双足行走的适应行为,可能削弱了南方古猿安全高效地爬树的能力,使其失去一些有利于攀登的解剖学特征。

人类和黑猩猩的身体骨骼十分相似,但在足部上显示了微小的差别。科学家发现,成年南方古猿已进化成非常接近人类的足部,前者的足部非常适应行走,甚至年幼的南方古猿也是双腿直立行走。但即使是成年南方古猿也有弯曲的、类人猿大脚趾。“塞拉姆”脚趾特征介乎两者之间,它长着大而长的脚趾,要比现代人类更有抓握能力,但不像黑猩猩脚趾那么长。

人类诞生和演化阶段正值地球进入晚新生代气候不断趋冷的时代,尤其在距今258万年前进入第四纪大冰期,全球气候骤冷,导致全球森林大面积萎缩,大型树木接连死亡甚至灭绝,非洲原本稀疏的林地演化为广阔的草原和沙漠。当人类祖先失去林地,失去了森林的庇护,不得不放弃树栖生活,从而开始适应完全的草原生活。

因此,第四纪冰期彻底改变和影响了人类演化,人类祖先开始走出非洲。最终有一种智人在走向世界中,交往了尼安德特人和丹尼索瓦人,成为带有其他人种基因的现代人。

(据《科普时报》)



中国天眼FAST示意图