

# 利用FAST探索宇宙 中性氢分布

王 杰

(中国科学院国家天文台 100101)

## 1. 宇宙中性氢的分布

我们知道太阳的主要元素成分是氢和氦,其他原子数更大的元素占比不超过2%。其实太阳的元素丰度大致反映了宇宙元素成分的比例。根据当前的标准宇宙大爆炸模型预测,在原初的大爆炸核合成过程中,主要的元素为氢和氦,另外少量的轻元素,比如锂元素。而后在恒星的演化过程中,慢慢产生了更多的元素,特别是恒星内部的核聚变反应以及其死亡时的快速爆发的物质抛射过程中产生了比铁轻或者差不多的元素,而更多重的元素则大部分来自两个中子星的并合。图1展示了太阳系内元素周期表中不同元素的宇宙来源。宇宙虽然

演化了136亿年,但通过消耗氢而产生的别的元素依然非常稀少,宇宙元素的比例依然非常接近宇宙大爆炸时候的比例。当前宇宙重子物质中,氢元素占73.9%,氦元素占了近24%,氧元素占了将近1%,而余下的元素约为1.1%。

因此,我们可以看见氢元素将在宇宙的不同时期,不同尺度上广泛存在。在宇宙大尺度上,宇宙中的引力由暗物质主导,受暗物质引力的作用,因此氢元素的分布与宇宙物质的总体分布有密切的相关性。而在较小的尺度上,氢是恒星、星系形成的基本原料,对于氢的观测将可以让我们了解星系形成过程中的诸多复杂物理过程。

这些氢元素将以不同电离态的离子氢、中性氢

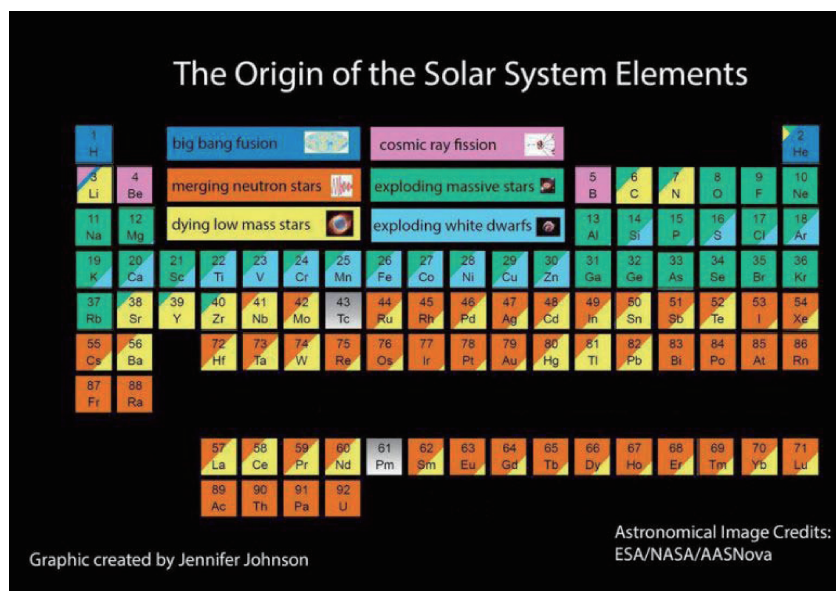


图1 太阳系内不同元素的宇宙来源。在宇宙早期只存在氢、氦以及微量的比如锂等轻元素(图片来源:Jennifer Johnson)

原子以及氢分子的形式存在。其中氢的电离过程会辐射莱曼-阿尔法光子从而在光学波段被看到。氢分子( $H_2$ )是由两个相同的氢原子组成的,因此不存在偶极矩,没有偶极跃迁。最低的震动跃迁谱线都是禁线,且需要很高的激发温度,因此不容易被探测,需要借助CO等别的示踪分子来观测。氢原子(atomic neutral Hydrogen gas HI)也被称为中性氢气。对于中性氢气的探测则只能通过一种电子态的超精细分裂(hyperfine splitting)所辐射的21 cm辐射光子来探测。

## 2. 中性氢的21厘米辐射

处于基态的中性氢原子,其电子自旋所产生的磁矩相对氢核(质子)自旋所产生的核磁矩有两种可能的取向:平行或反平行。前者的能量高于后者,当处于上能级(两个磁矩平行)的中性氢原子跃迁到下能级(两个磁矩反平行)时,发出一个频率为1420.406兆赫的光子,这就是21厘米氢谱线辐射(图2)。因为这对电子能级的超精细结构的变化,其辐射的光子要远比主量子数变化辐射的光子能量低很多。而且在没有外界扰动情况下,它的自发跃迁概率为 $2.876 \times 10^{-15} \text{秒}^{-1}$ 。这意味着一个处于基态高能级的中性氢原子要在长达1,100万年中才有一次跃迁到低能态的机会。但是如果中性氢云团中的密度足够高,而且离我们足够近,则辐射的总光子数

将会非常显著。银河系中60%的气体都是中性氢,因而很多业余天文爱好者用自制的简单天线就可以捕获这些光子。1944年,荷兰天文学家范德胡斯特(H.van de Hulst)首先提出可以在银河系中观测到星际氢原子的这条21厘米谱线。1951年,美国哈佛大学的H.Ewn& E. Purcell就首先探测到了这一谱线,这也是射电天文学看到的第一条谱线,从而开创了射电天文谱线研究的新纪元(图3)。

而人类第一次探测到河外的中性氢21厘米谱线信号仅在约70年前,是由麦哲伦云(the Magellanic Clouds)发出的,被Kerr Hindman (1953)用一个36英尺大小的射电望远镜观测到的。此外值得一提的是,曾有业余天文学家在自己家院子搭建3米左右的天线从而成功探测到远在两百万光年之外的M31星系以及M33星系中的21厘米谱线辐射([https://flahn.pagesperso-orange.fr/fr/f\\_radioastro.htm](https://flahn.pagesperso-orange.fr/fr/f_radioastro.htm))。

当21厘米谱线观测的背景为强的连续辐射射电源(如HII区)时,我们可以观测到21厘米的吸收谱线。从吸收谱线也可以测得有关的中性氢的分布、密度、激发温度以及连续辐射源跟观测者之间的距离(下限)。

中性氢的吸收线在星系宇宙学,以及恒星形成等科学问题上都展示了其独特的优势。类星体光谱的莱曼吸收系统提供了迄今为止对于暗物质质量的最严格的质量下限的限制;而FAST首席科学

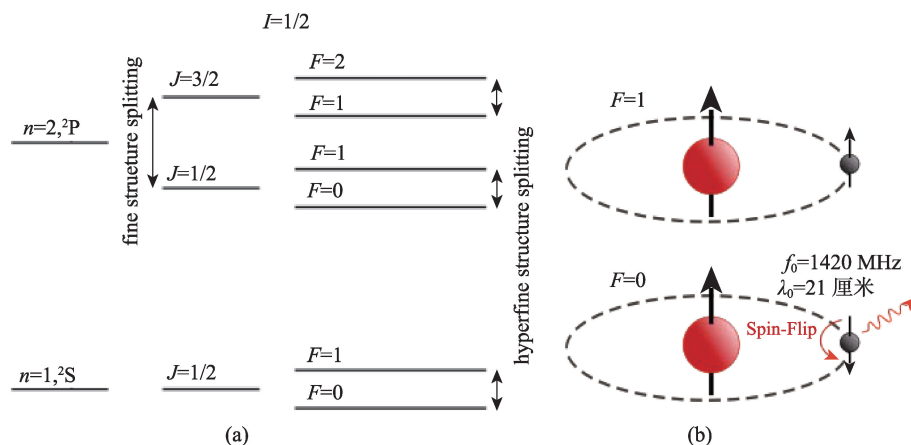


图2 (a)氢原子核外辐射21厘米谱线的电子能级示意图;  
(b)辐射21厘米光子前后电子自旋产生的磁矩与氢原子核自旋产生的磁矩的示意图(图片来自网络)



图3 第一次观测到太空中的中性氢21厘米谱线的号角状接收天线(图片来自网络)

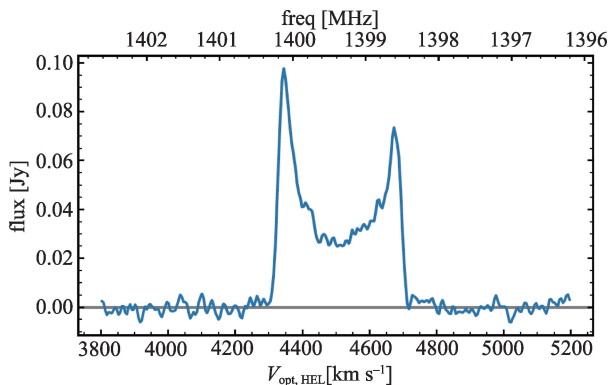


图4 FAST对侧向涡旋星系UGC542观测得到中性氢谱线,可见明显的双峰结构

家李菂老师创建的中性氢窄线自吸收方法(HINSA)不仅成为研究星际分子云形成的化学时钟,而且通过其塞曼效应的观测还可以精确限制恒星形成区的磁场(详细情况见李菂老师的文章)。

本文主要集中于利用中性氢发射谱线研究星系宇宙学的科学问题。

### 3. 中性氢21厘米发射谱线蕴含的物理信息

首先我们以一个河外星系的中性氢谱线为例,看看我们能从对其的观测中获得那些物理信息。

图4展示的是FAST对一个典型的涡旋星系UGC542观测得到的中性氢21厘米谱线,我们可以发现该谱线有两个峰状结构。21厘米谱线的自身宽度非常小,由于星际空间物质密度很低,谱线的碰撞阻尼致宽可以忽略。因此,21厘米谱线轮廓主要取决于中性氢原子运动的多普勒效应。从该谱线轮廓我们可以获得该星系的诸多信息,比如,通过计算谱线频率的中心值相对于21厘米谱线的多普勒位移,就可以得到该谱线相对的视向速度,这一视向速度反映了中性氢相对于星系的本地运动速度和伴随宇宙碰撞的退行速度。如果参考一定的星系动力学模型,可以将这两个速度分别给出限制,对于后者,则可以获得星系的红移。把邻近星系21厘米谱线红移量测量结果同光学红移进行比较,二者相当一致,这为测定邻近星系的距离提供了一种射电方法。此外,从谱线内的积分总流量我们可以获得中性氢的质量。而谱线的展宽则预示着星系内部具有不同运动速度的中性氢成分,因此从谱线的展宽可以测量星系内部中性氢的速度弥散。如果定义谱线流量的峰值为HI谱线轮廓上的最大值的流量,一般用谱线两翼对应谱线峰值的50%的位置之间的速度差为速度宽度(W50)。因此,由HI的谱线,我们可以获得HI星系的速度、红移(也即位置)、流量和速度宽度等信息。

### 4. 中性氢探测银河系结构

通过对这些信息的物理解读,首先获得的重大进展来自于1952年Jan Oort团队利用21厘米谱线对银河系结构的测量。我们太阳系处于银河系恒星盘中,而在银河系盘上存在诸多的中性氢分布,如果我们对银河系某一方向上进行以21厘米为中心的频谱观测,就可以得到这一方向上的21厘米谱线轮廓。由于氢云以不同的视向速度运动,谱线轮廓中有多峰出现。通过对谱线强度的测定,可以得到氢云的密度和质量。测定与每一个谱线峰值对应的多普勒频移,就可以得到氢云的视向速度。如果对银河系上所有方向的中性氢进行观测,则可以

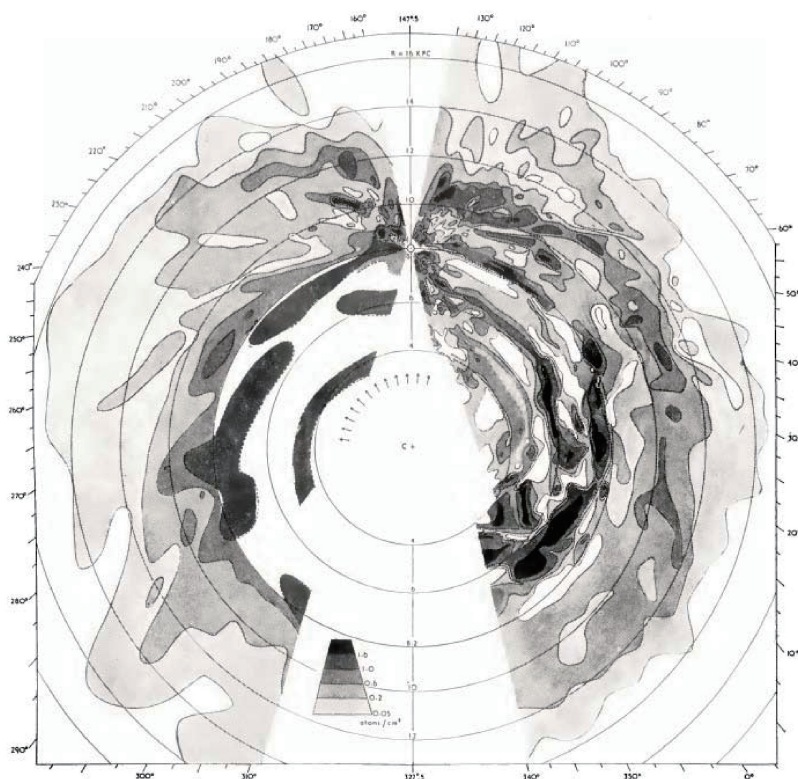


图5 1958年Jan Oort团队获得的银河系盘结构的中性氢分布,颜色越深,密度越大,可以看见银河系的悬臂结构

得到银河系盘上中性氢的分布以及运动速度。由此,1958年,Jan Oort团队发现了银河系的多个悬臂结构(图5)。

此后,通过21厘米谱线对银河系的研究表明,氢确实是星际物质中最丰富的元素,其质量大约为银河系总质量的1.4%~7%。近年来利用21厘米谱线,我们得以研究银河系的更多局部细节。

## 5. 中性氢探测星际间介质

星际空间的物质大部分位于低温、低压、低密度区域,这里的绝大部分原子、分子都处在最低能级的基态上。在这种条件下,它们几乎不可能辐射可见光,而且诸如尘埃、暗云、黑云一类的星际物质对可见光是不透明的,因此,用光学手段研究星际区域存在很大困难。但是,这些区域的氢原子却可以辐射21厘米谱线,它也不会被那些星际物质吸收,所以21厘米谱线成了探测宇宙空间的有力武器。

比如M82、M81、NGC3077三个星系在光学观

测上看似乎相对独立,之间没有关联,见图6(a),但是在射电波段观测星际空间的中性氢(图6(b)),则可以知晓它们背后真正的秘密——三个星系正在或将经历剧烈的碰撞并合过程。并合过程是塑造星系形成历史以及各种属性的重要物理过程,中性氢分布不仅是星系并合历史的直接证据,还能带来这一重要物理过程是如何塑造星系的诸多重要细节:比如这些冷气体如何加速或者减缓并合星系的演化历史等等。

## 6. 利用中性氢星系探索宇宙物质分布

我们已经知道氢元素自宇宙诞生时即为宇宙中最丰富的元素,存在于宇宙历史的所有阶段以及宇宙的几乎每个角落。比如宇宙早期黑暗时代(Dark Age)以及随后的宇宙再电离(Reionization)的详细历史迄今依然是宇宙学未解的重要问题,而中性氢却是这段历史几乎唯一的见证者。包括未来

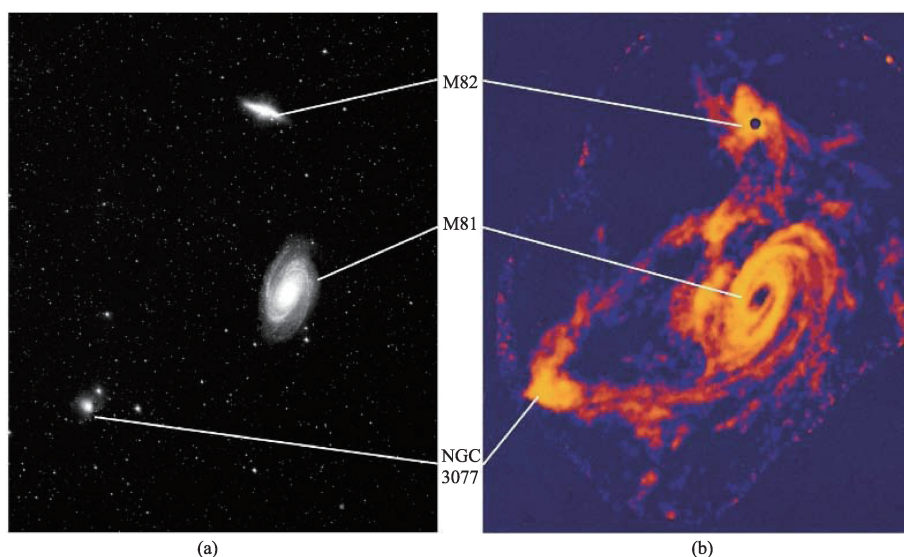


图6 (a)著名的三姊妹星系 M82-M81-NGC3077 的光学图像;(b)中性氢分布图

的最重要的射电望远镜——平方公里射电阵(SKA)都将对于这一时期的中性氢的探测列为最重要的科学目标之一。

中性氢也是宇宙引力势阱以及物质分布最佳的示踪物之一,因为它在宇宙中有着最为广泛的分布和存在,其可能是对物质大尺度分布偏离最小的示踪物。但因为21厘米信号特别微弱,而且前后背景的干扰又特别严重,因此利用中性氢探测宇宙的大尺度分布一直非常艰难。但因为科学意义重大,包括我国21CMA、天籁等望远镜阵列在内的国内外诸多射电望远镜或者阵列均正积极开展对中性氢在大尺度性质上的探测。

## 7. 中性氢星系巡天

如何充分利用中性氢发射谱线研究以上科学问题,天文研究人员常常设计两类中性氢星系巡天。第一类为目标巡天,即望远镜直接对着目标或者附近天区观测获得中性氢谱线数据;另外一类巡天则为盲巡天,即对特定天区进行扫描式搜寻,而为了提高对暗弱天体的探测能力,有时候还会对该天区安排多次扫描以提高灵敏度。

随着望远镜探测效率的提升,国际上出现了很多取得诸多重要成果的中性氢巡天。例如,针对特

定星系以及周边介质进行观测的比较成功的巡天有VIVA、THINGS、HALOGAS等。特别是THINGS巡天(Walter et al. 2008)利用射电干涉阵VLA对邻近30余个近邻星系的中性氢发布了高精度的清晰图像,如图7所示,这让我们对冷气体在星系中的分布有了更深刻的认识,这些观测帮助我们加深了对星系演化和灭亡中的诸多复杂物理过程的认识。此外,利用对其旋转速度的测量,我们得以测量其中的暗物质成分,这是理解暗物质在星系形成过程中扮演角色的必要条件。

而在中国天眼之前,世界最大的单口径射电望远镜美国阿雷西博望远镜展开了多项成功的HI巡天,包括ALFALFA、AGES、GASS,尤其以ALFALFA(Haynes et al. 2018)最为成功,该巡天为第二代中性氢盲巡天,覆盖了超过7000平方度天区,找到了三万以上的中性氢星系,结合别的波段信息,该巡天给我们系统地揭示了星系中冷气体与星系各属性的相关性,特别是环境对于星系中恒星形成的影响。

## 8. FAST开展中性氢的优势和进展

相比于以前的望远镜,FAST的高灵敏度以及为其配备的19波束L波段接收机带来的快速巡天能力使其对宇宙中的中性氢21厘米谱线具有独一



图7 THINGS 巡天对邻近星系中性氢给出了清晰的刻画(Walter et al. 2008)

无二的解析能力。在FAST之前,我国在中性氢巡天领域几乎处于空白,而FAST为改变这一局面提供了一次宝贵的机会。

在开展类似ALFALFA巡天方面,FAST首席科学家李菂研究员领导的CRAFTS巡天将对北方适合观测的天区做盲巡天,相对ALFALFA的样本,中性氢星系的样本将获得量级的提升。这对研究星系演化中的重要物理过程,乃至宇宙学带来前所未有的机遇(详细情况见本期李菂老师的文章)。

在中性氢深度巡天方面,目前国内外已开展的巡天天区因为望远镜效率低而普遍偏小,大多小于20平方度。而FAST的高灵敏度以及快速巡天能力将使我们能对更大天区,比如100平方度以上的区域进行中性氢深度巡天,为此FAST将进行M31晕区(近800平方度)中性氢深度巡天、北天区延展源深度巡天(FEASTS)、百平方度中性氢深度巡天等诸多深度巡天项目。这些项目完成后,都将成为世界上同类型巡天中的最大样本数据。目前世界领先的射电望远镜,特别是下一代射电望远镜SKA的两个先导阵ASKAP和MeerKAT等正进行多项深度巡天包括MIGHTEE-HI、DINGO、MeerKAT-Fornax

Survey等,但因为仍处早期阶段,科学成果不多。FAST如果能快速完成自己的深度巡天,将在与这些世界优秀项目的竞争中处于领跑地位。

目前,我们已经完成对FAST中性氢数据处理流程的软件开发,并大幅提高了其谱线质量,图8展示的为我们最近的邻居——仙女座星系M31中的中性氢分布图(图8)。已经为开展中性氢的各项巡天做好了充足准备。

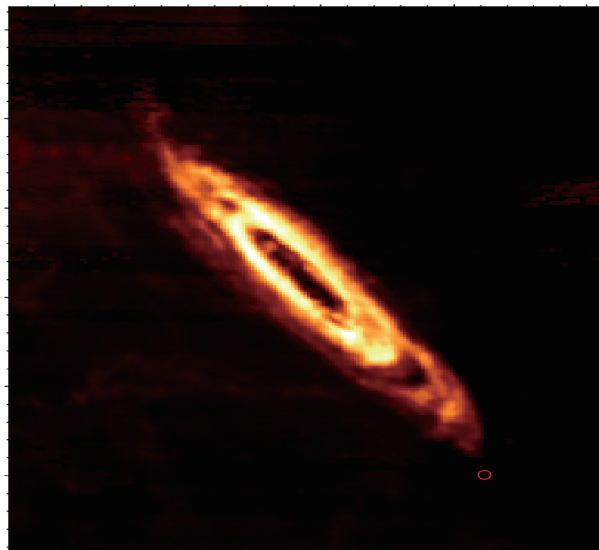


图8 FAST对邻近的仙女座星系M31中的中性氢获得的分布图

## 9. 展望

氢是宇宙中最为丰富的元素,而且是形成恒星、星系的原料,从而生成其他更重的元素,才有了丰富的多彩世界。对宇宙中的中性氢进行探测是我们探究宇宙奥秘的一种重要手段。

因为观测设备的缺乏,我国在该领域一直处于落后的状态。随着FAST的顺利运行,我们拥有了世界上探测中性氢最为先进的观测设备。中性氢科学是FAST主要科学目标之一,在该领域,我们将获得世界最优的巡天观测数据,并有信心做出诸多

重大科学成果。

### 参考文献

- ① Kerr, F. J., and Hindman, J. V. Preliminary report on a survey of 21 CM radiation from the Magellanic Clouds. *The Astronomical Journal* 58 (1953), 218.
- ② Oort, J. H. ; Kerr, F. J. ; Westerhout, G. The galactic system as a spiral nebula, *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*, 1958, Vol. 118, p.379
- ③ Walter et al. THINGS: The H I Nearby Galaxy Survey, 2008, *AJ*, 136, 2563
- ④ Haynes, et al, The Arecibo Legacy Fast ALFA Survey: The ALFALFA Extragalactic H I Source Catalog, 2018, *ApJ*, 861, 49



封底说明

## 皮皮虾助力仿生科技

博文

说起皮皮虾,这可是餐桌上深受人们欢迎的美味。皮皮虾学名:虾蛄,又叫琵琶虾、虾爬子、螳螂虾,属虾蛄科。皮皮虾虽然叫虾,但却不是虾,一般人们所说的虾是十足目,而皮皮虾却是口足目类动物。今天向大家介绍的是皮皮虾家族中的一员,叫雀尾螳螂虾,最近正引起科学家们的注意。雀尾螳螂虾是个外表颜值超高的家伙,身长十几厘米,披着五颜六色的铠甲,光芒四射,斑斓耀眼。同时它还长有一对像螳螂样的鳌足,甚是威武帅气。雀尾螳螂虾绰号“功夫虾”,这可不是浪得虚名,你千万不要被它美丽的外表所迷惑,它在大自然中可是个脾气暴躁的狠角色,小鱼、小虾、螃蟹、蛤蜊都是它的菜。捕猎时它会用前鳌足猛烈地向猎物敲击,而其出击的速度和打击力度之高令人咂舌!据科学家用仪器测试,雀尾螳螂虾可在1/50秒击出鳌足,其速度可达80千米/小时,速度堪比出膛的子弹,可产生60千克的冲击力,高速的摩擦竟然使得周围海水瞬间蒸腾并冒出电火花,所产生的水下冲击波所造成的伤害也极具破坏力,可以轻易敲开螃蟹、蛤蜊坚硬的外壳,是许多甲壳类动物的梦魇。雀尾螳螂虾生性好斗,尤其是雄性间更是冤家相见分外眼红,非杀个天昏地暗不罢休,但是它们

在打斗时是如何防护住对方的重击呢?这就要谈谈雀尾螳螂虾身上的那层铠甲。原来它们身上的甲壳是由3层结构组成,其坚硬程度堪比工程陶瓷,可与防弹衣媲美。让科学家感兴趣的还有雀尾螳螂虾的眼睛,其眼睛能够辨识16种颜色,这与其独特的视觉系统有关。它拥有着一双与蜻蜓、蜜蜂一样的复眼,能依靠较广的色谱范围辨别更多的颜色。尤其是它通过其独特的视觉结构,还能感知偏振光,这就使它和一些能够辨别方向的昆虫和鸟类一样具有导航能力。科学家还发现由于雀尾螳螂虾复眼中光感细胞的独特排列方式,使得它能够看见呈螺旋状传播的圆偏振光。这种偏振光是其他动物看不到的,从而使其行动更加的隐秘,最终达到躲避天敌伤害的目的。雀尾螳螂虾的这些高效技能对人类的仿生科技有着很好的启迪,特别是在通讯、导航、探测、成像、材料及军事等领域有着重要的意义。目前人们依据雀尾螳螂虾的视觉系统已经研制出一款能够感知颜色和偏振光的超级敏感照相机,该相机可以对早期的癌症病人进行筛查,还可以应用在对水下环境的监测。相信不久的将来,会有更多的相关技术和产品诞生,为人类造福。