

# 天空的神秘闪光——快速射电暴

大约一年前（2015年4月）的一天，我们照常参加GBT中性氢巡天合作组的每周例会。位于美国西弗吉尼亚州绿岸(Green Bank)的GBT是目前世界上最大的可动望远镜，其反射面直径达110米。几年来，我们这个由来自全世界各地学者组成的合作组，每年都会申请大量的GBT时间进行巡天观测，试图绘出宇宙中最常见的氢原子在大尺度上的三维分布。但是，虽然我们知道这些氢原子产生的21cm波长的谱线肯定存在，但它却淹没在银河系强烈的同步辐射中，这就仿佛是要在灯火通明的城市中看到微弱的星光一样困难。年复一年，我们积累了越来越多的数据，尝试新的数据处理方法，结果在逐渐改进，但还未能实现中性氢探测的突破。于是，在一边继续中性氢观测的同时，我们也开始试着看这些数据还可以获得些什么别的有趣结果。这一天传来了一个颇为激动人心的消息：卡耐基梅隆大学的台湾留学生林秀贤在我们积累的观测数据中发现了一个疑似“快速射电暴”信号。

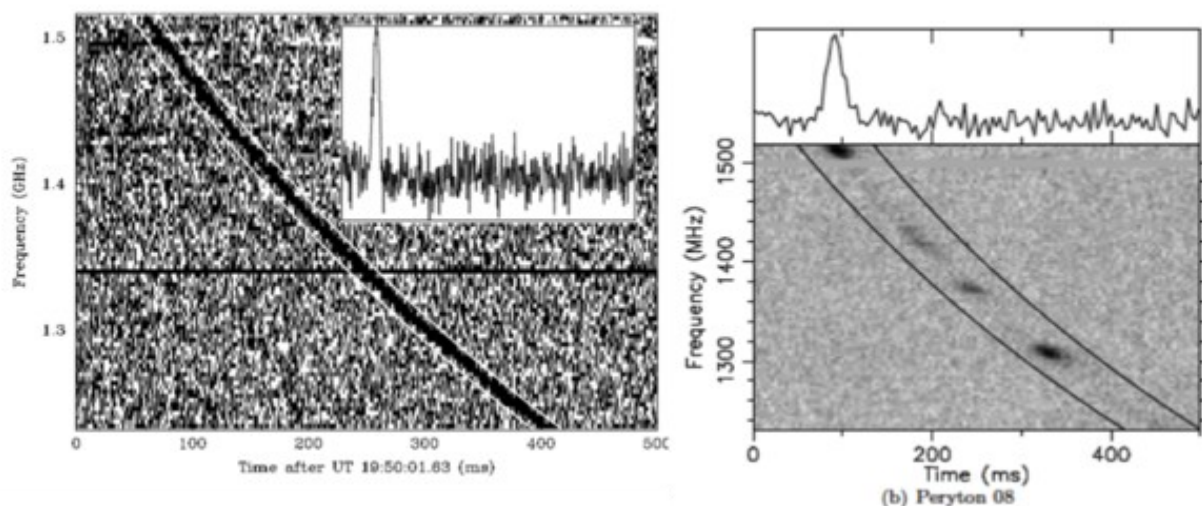
“快速射电暴”(Fast RadioBurst，简称FRB)是近年来天文观测中发现的一种未知的神秘的、短促而明亮的射电脉冲。人们对它非常好奇，因为它很容易让人想起另一个类似的现象——伽玛射线暴。上世纪60年代，为了监测苏联的秘密核爆炸，美国发射了伽玛射线卫星，却意外地发现宇宙中经常会发生某种神秘的爆炸，产生明亮的伽玛射线闪光，后来称之为伽玛射线暴(GRB)，但究竟是什么导致了这些神秘爆炸，很长时间都是个谜，学者们曾提出过上百种不同的猜测。现在一般认为有两种伽玛暴，分别来自大质量恒星的坍缩或两颗中子星的碰撞，但是其实这些也都还是并未完全证实的假说，可以说直到今天这个谜也还没有完全解开。就持续时间而言，GRB虽短，一般也会达到秒的量级，而FRB却仅持续毫秒量级，这意味着这种爆发发生在非常小的空间（几十千米）范围内。这究竟是什么？显然，这是一个非常有意思的问题。

## 真假射电暴

快速射电暴最初是在分析脉冲星巡天数据时发现的。脉冲星是射电天文学在上世纪60年代最重大的发现之一，它的发现本身完全是一个意外——当时剑桥大学的女研究生贝尔意外地发现了一种规则的脉冲信号。由于这个信号如此规则，她一开始以为是一种人为产生的电磁波信号，后来经过仔细分析确认信号来自太空后，还一度开玩笑地把它叫做“小绿人”——科幻小说中外星人发来的信号，后来人们认识到这是高速旋转的中子星产生的。为了寻找更多的脉冲星，许多望远镜进行了脉冲星巡天观测。美国西弗吉尼亚大学的Lorimer等人在分析澳大利亚的帕克斯射电望远镜(Parkes Telescope)脉冲星巡天数据时，发现了2001年7月24日的一个奇怪信号，它持续了只有短短几毫秒，但其强度却相当高，而之后也没有像脉冲星那样重复发生。后来根据爆发的日期它被命名为FRB010724，不过，Lorimer等人是在随后几年对存档数据进行分析时才发现它的，正式发表时已经是2007年了，它被称为Lorimer暴。

当然，突然出现的脉冲信号未必真的来自天体，更多时候这样的信号其实是人工产生的电磁干扰——附近的居民拨打手机、空中飞机反射雷达回波、太空中卫星向地面站发送数据，汽车的火花塞打火等等，这些过程产生的电波都会被灵敏的射电望远镜探测到。不过很多干扰我们可以根据其明显的特征把它们过滤掉：通讯、雷达等信号通常都有特定的频率，或者有明显的时间周期，很容易被识别为人工信号。但是也有一些干扰信号没有特定的频率，因此无法完全滤除。

不过，来自天体的脉冲信号还有一个相当独特的特征，是一般的人工信号所没有的：色散延迟。不同频率的电磁波在介质中的传播速度不同，这个现象叫做色散。我们熟悉的雨后彩虹就是一种色散现象——不同颜色的日光在穿过水滴时有略微不同的速度，从而形成不同的折射角，最终就形成了彩虹。我们一般把地球之外的太空说成是真空，其实太空并不是完全的真空，而是也分布着稀薄的、电离化的气体，只是它们的密度比地球大气低很多。从脉冲源发出的射电信号在穿过这些等离子体时也会发生色散，到达地球的时间也会随频率而有所不同，低频率的到达会晚一些，这就是所谓色散延迟，延迟的时间反比于频率的平方。地面人为干扰信号的色散延迟一般很小，而来自宇宙深空的电磁波信号则有相当可观的色散延迟。Lorimer 等人发现的脉冲信号就有明显的色散延迟，提示我们它来自太空。



左：Lorimer burst,横坐标是时间，纵坐标是频率。可以看到一条明显超出噪声之上的黑色弧形，频率越高的信号到达时间越早，插入的小图绘出了经过消色散处理后还原的脉冲信号波形（Lorimer et al. 2007）。右：2008 年的一个 Peryton 信号，上面是还原的脉冲信号，可以看到它也大致符合平方反比色散关系，但其辐射集中在某些频率上。

### Peryton 与微波炉

但是，有色散延迟的信号是否就一定来自太空呢？从 1998 年以来，Parkes 望远镜就不时探测到一些奇怪的信号，这些信号看上去也有色散延迟，尽管延迟时间有时并不完全与频率平方成反比，并且信号在某些频率强，某些频率弱。这些信号被命名为 Peryton。经过多年的研究后，2015 年它们最终被确认是附近的微波炉产生的。

在一些新闻媒体的报导中，这被说成是天文学家闹乌龙，比如有一篇文章就把 Peryton 与超光速中微子、冷核聚变、小保方晴子的干细胞等等放在一起，列为学术圈的 13 出经典乌龙事件，研究它们的人成了被嘲笑的对象。但是其实这并不是一个乌龙事件：几乎从一开始，研究它们的天文学家们就认为这些脉冲很可能是地球上的电磁干扰，而不是真实的天文信号。这是因为，Parkes 望远镜是用十三波束接收机探测这些信号的，这十三个波束指向略有不同的方向，但之间也略有重叠。如果信号来自太空，那么其中一个或少数几个应该有很强的信号，而其它波束则没有信号，或只有很弱的信号，Lorimer 暴以及后来发现的其它快速射电暴就正是如此。然而 Peryton 事件则不同，13 个波束收到的信号强度都差不多，说明信号可能并不来自天线所指的方向，而是某种近处的干扰电波。正因为如此，天文学家们才给它起了 Peryton 这个名字——这是传说中的一种四不像怪兽的名字。

但是，虽然天文学家早有这种怀疑，却并未随便把这一现象放过去，而是对它进行了仔细的研究。

然而，要弄清其确切的来源并不容易。望远镜附近的微波炉是一个很容易想到的干扰源，但微波炉其实和雷达一样，都有特定的工作频率，而且其本身有设计良好的法拉第笼屏蔽着，正常工作时并不会产生 Peryton 那种含有宽频并具有色散延迟特征的信号。后来天文学家们与制作微波炉的技术专家交流，并经过进一步的分析和实验才发现，当微波炉正常工作时确实并不产生 Peryton 信号。但是，偶尔人们会不等到微波炉的预定加热结束就拉开微波炉的炉门，这时微波炉的控制电路会自动切断供电，但每个学过交流电路的人都知道，这时电流不会马上消失，而是会持续一个由电路阻抗决定的短暂时间；同时，产生微波的磁控管内的电子也需要一点时间才会完全消失，因此在零点几秒内微波炉还会产生一些辐射，而恰恰此时微波炉门打开，微波可以逃逸出来，并且这一过程还有一定的随机性，从而产生了这些奇怪的脉冲信号。天文学家们是经过仔细的分析排查，才最终发现了 Peryton 信号的来源。因此，Peryton 并非乌龙事件，恰恰相反，正是靠着这种坚持不懈、不放过任何一点蛛丝马迹的研究，真相才最终得以澄清。

Lorimer 之后，2013 年 Thornston 等又发现了 4 个快速射电暴事件。与 Peryton 不同，这些事件都严格遵守频率平方反比关系的色散延迟和并有确切的爆发方向，人们开始相信确实存在快速射电暴。通过后来的观测以及搜索之前的存档数据，到了去年已发现了 11 个事例。我们在巡天数据中筛选了六千多个疑似信号后，也终于找到了一个发生于 2011 年 5 月 23 日的信号，完全满足色散延迟关系。这是 GBT 望远镜发现的第一个快速射电暴信号，根据爆发的日期命名为 FRB110523。

## 来自何方

在排除了地球来源后，下一个问题就是这些射电暴究竟来自何处？然而这一问题并不容易回答。由于波长很长，单天线射电望远镜受到电波衍射极限的限制，分辨率一般都不高。像我们使用的 GBT 望远镜，已经是目前最大的可动单天线望远镜了，但在我们观测的这一频段内波束宽度也达  $1/4$  度——这是一个相当大的角度，在这个范围内有很多天体，无法判断快速射电暴来自其中的哪一个。不过，虽然如此，已发现的射电暴都远离银道面，说明它们很可能与银河系没有太大关系——要不它们就是远在银河系之外，要不它们就是很靠近太阳系。但是，如何定出快速射电暴的距离？这是个难题。要知道，当年可是花了二十多年才最终证实 GRB 来自宇宙距离！

### 1

## 色散的启示

回答这一问题的第一个线索就是我们上面谈到的色散延迟：这些电波穿越的等离子体越多，引起的色散延迟就越大。我们早就知道，银河系内的脉冲星都有一定程度的色散延迟，这是银河系内的星际介质造成的。快速射电暴的色散延迟远大于银河系内的许多脉冲星，这意味着它们很可能比这些脉冲星更加遥远——远超出银河系之外。银河系外的宇宙空间中也分布着比星际介质更为稀薄的气体，称为星系际介质，如果假定这些色散是由星系际介质引起的，那么这些信号需要穿越非常远的距离才能产生如此强的色散。不过，如果它们距离这么遥远，这也意味着这些射电暴非常亮，那么它可以应用于很多未来的天文学研究，包括测定宇宙距离、测量宇宙中的电子密度、甚至检验爱因斯坦等效原理乃至量子引力理论等。将来观测的数量多了以后，还可以通过色散延迟空间的畸变分析宇宙物质分布的成团性，测量宇宙大尺度结构。

但是，也存在另一种可能：信号穿过了一团密度比较高的等离子体云，那么即使距离不大，也同样可以产生强色散信号。许多天体本身就被包裹在一些较高密度的云中，因此这些大色散也可能是在射电爆发生之处产生的，那么它们也许离我们并不那么遥远。哈佛大学的 Loeb 教授甚至提出，也许这些射电

暴就来自我们附近的恒星耀斑，这些恒星周围存在类似我们太阳周围的日冕那样的高密度等离子体，这些等离子体产生了大色散延迟。

2

### 偏振效应

那么，究竟哪一种是实际发生的情况呢？FRB110523 的观测数据能否帮助解开这个谜团呢？与之前发现的十几个快速射电暴相比，FRB110523 同样具有很大的色散延迟，而其独特之处是，我们在这次观测中获得了完整的偏振信息。

电磁波是一种电磁场的振荡，偏振指的是其电场振荡的方向。此前的许多观测只给出了信号的总强度，而没有对不同偏振分别记录。我们探测到的这一射电暴记录了不同的偏振信息，并探测到了明显的线偏振，也就是说这一电波的电场是沿着某一条直线的方向。更有意思的是，当改变频率时，这个方向会不断旋转，这就是我们熟悉的法拉第效应，是电磁波穿过有磁场的等离子体造成的。实际上，法拉第效应也是一种色散延迟效应。在磁场的作用下，电波的传播速度不仅与频率有关，也与偏振有关，从而造成了线偏振方向的旋转。因此，如果同时能测定色散延迟和法拉第效应的大小，并且假定这两种效应是由同一团等离子体产生的，就可以测出等离子体平均磁场强度。

对 FRB110523 的测量表明，其平均磁场强度大约是 0.38 微高斯——这是地磁场强度的百万分之一，但比宇宙的平均磁场强度高几倍。从这一结果我们推测，FRB110523 的法拉第旋转很可能来自其周边爆发源周围的气体，而不是宇宙长距离传播中遇到的稀薄星系际介质。如果它的色散也来自这些气体，那么 FRB110523 的距离可能并不那么遥远——在银河系之外，但并非宇宙距离。然而遗憾的是，这种推论并不严格，因为也存在另一种可能性，那就是信号的法拉第旋转来自一团有较强磁场但色散不大的等离子体（比如爆发源周围的星云或它所处的星系），而大部分色散则来自宇宙距离的传播。单单这一个快速射电暴的数据还无法让我们区分这两种情况。不过，将来如果我们能测到更多快速射电暴的法拉第旋转，通过比较这些源的法拉第旋转量与色散延迟量的统计关系，也许可以回答这个问题。

虽然 FRB110523 的数据还无法完全解开快速射电暴之谜，但它还是得到了一个比较明确的结论：快速射电暴不可能是来自银河系内的耀星。耀星周边的等离子体密度又太高了，色散延迟与频率的平方反比关系只对稀薄的等离子体成立，耀星周边的高密度等离子体会产生偏离这一关系的色散延迟。但我们观测表明，这一关系非常精确地成立，可以排除这种模型。

3

### 闪烁和散射

FRB110523 还展现了另外两个有趣的现象，在脉冲星研究中通常称为闪烁和散射。实际上这两种现象是同一种物理机制导致的：电磁波经过不均匀的星际介质时发生偏折，使得到达射电望远镜时的电磁波经过了不同的路径。这种路径差使得观测到的信号时而干涉相加、时而干涉相消，称之为闪烁现象。闪烁现象其实非常普遍，我们通常说的星星“眨眼睛”便是光学波段的闪烁现象。但是，当这种偏折产生的路程差太大时，电磁波就不再相干了，而会产生一些不相干的波包，使时间序列信号的形状不再是对称的脉冲，而是在脉冲过后幅度缓慢下降，出现一个“小尾巴”。我们在 FRB110523 的脉冲信号中同时发现了闪烁和散射现象。

其实无论是散射，还是闪烁，在脉冲星的观测中都是习以为常的现象，通常是因为脉冲星信号穿越银河系星际介质产生的。既然如此，我们便比较了 FRB110523 天空方向一颗脉冲星的类似特征。我们发

现，FRB110523 的闪烁现象与这颗脉冲星的闪烁现象相似，说明产生闪烁的介质应该是银河系的星际介质。闪烁现象发生要求这一源的视尺寸非常小（这就是为什么恒星会眨眼睛而行星不会）。然而这一快速暴的散射与闪烁现象具有非常不同的时标特征，因此推断其散射应源于另外的介质，很有可能是快速射电暴源附近的气体，或者是它所在的宿主星系内的星际介质。关于 FRB20110523 的分析结果最终于 2015 年 12 月发表在 Nature 上。

## GBT 观测到的快射电暴（艺术想象图，喻京川绘）

### 外星人、脉冲星、黑洞和引力波

伽玛射线暴(GRB)当年曾有过上百种解释。快速射电暴(FRB)的模型虽然没有那么多，但也是众说纷纭。其中，最令人脑洞大开的解释是认为它是外星人的信号。去年 4 月 1 日，德国的 Micheal Hippke 等人发表的一篇论文预印本称，当时已知的 11 个 FRB 事件的色散延迟量都是 187.5 的倍数，这是极不可能自然发生的，因此这也许说明 FRB 并非自然事件，而是外星人通过某种机制产生的，许多媒体在报导快速射电暴时都首先提起这一解释，却没注意到这其实是个愚人节玩笑。

射电望远镜的视场很狭小，因此绝大部分快速射电暴我们都错过了，只观测到了很少的一部分。按照目前发现的快速射电暴数目推算，每天都会产生几千甚至上万次快速射电暴，而这些爆发又必须具有巨大的能量才能被我们观测到。此外，这些事件发生的时标必须相当短，才可能产生如此短促的脉冲。天文学家据此提出了许多可能的理论模型，但大部分都基于致密天体，如中子星、白矮星、黑洞等。例如，磁星体(magnetar) 闪耀、年轻脉冲星的强脉冲爆发等，与脉冲星发生的一些爆发现象有类似性。其实，脉冲星的某些爆发到底是什么原因，迄今也并不清楚。所以，快速射电暴来自这些爆发也是完全有可能的。

也有些研究人员认为，快速射电暴可能起源于更剧烈的事件，例如两个中子星的并和。之前有人研究分析了双中子星并和时产生射频电波可能的辐射机制，但是这些辐射机制不会产生像快速射电暴这样尖锐的脉冲。

Totani (2013) 的分析指出，如果在双中子星并和的最后阶段，中子星磁偶极子错位断裂，或者其磁层中的等离子体效应有可能产生巨大的射电脉冲辐射，他推算的这种事件的产生率与快速射电暴的爆发率相当。也有研究人员认为，双白矮星并和也可以产生类似的射电脉冲，其爆发几率、辐射流量以及脉冲宽度在一定的条件下都可以与快速射电暴吻合。黑洞在满足某些条件时，也可以产生巨大的能量辐射。比如有研究认为宇宙中存在的微型黑洞在湮灭时、或者黑洞在吞噬中子星时都有可能产生强烈的射电脉冲辐射。

2015 年 9 月，升级后的 LIGO 探测器首次捕捉到来自双黑洞并和产生的引力波信号，这一结果于 2016 年 2 月公布后，在国际上产生了巨大的影响。天文学家推算宇宙中普遍存在这种双黑洞并和事件。但是与双中子星合并、或者是黑洞吞噬中子星伴星不同，通常认为双黑洞并和不会产生强烈的电磁辐射，而只会产生引力波，因此初看起来引力波与快速射电暴似乎没有什么关系。然而，拉斯维加斯内华达大学的张冰教授指出，如果并和的两个黑洞中的一个或两个带有微量电荷，在黑洞并合时就会产生强烈的射电爆发，这样的话大部分的黑洞并和都可能会伴随快速射电暴信号；如果黑洞携带更多的电量，还可能产生伽马暴。这是一种非常有意思的可能性。如果同时观测到引力波和快速射电暴，这将为我们了解黑洞提供非常多的信息。

## 新进展

近来有一系列关于快速射电暴的新发现，我们的 FRB110523 只是其中之一。就在我们在存档数据中发现 FRB110523 的前后，帕克斯射电望远镜又发现了一颗快速射电暴，FRB150418。由于这一发现是当时做出的，因此人们马上用澳大利亚紧密阵(ATCA)对其所在的位置进行了后续观测，发现了一个射电变源信号，有可能是这一快速射电暴的余辉。由于干涉阵列有更高的分辨率，研究人员迅速锁定了这个“余辉”所在的星系，进而根据光学波段观测数据，得到了星系的红移：这一星系的红移是 0.49。不过，在随后的分析中发现，这一星系有个活跃的活动星系核，所谓余辉也许只是这一活动星系核碰巧此时开始变亮而已，而未必真的与那一快速射电暴有关。不过关于这一案例仍有不同的意见，当初观测到的射电信号是快速射电暴的余辉可能性也不能排除。

快速射电暴与脉冲星有诸多的相似之处，而最大的不同是脉冲星会按照一定的频率重复出现脉冲信号，而快速射电暴不会。但我们也知道，脉冲星的每个脉冲并不一样，有时一些脉冲星会突然产生一次特别强的脉冲。那么，快速射电暴是否有可能就是遥远的河外星系中某个脉冲星产生的这种特别强的脉冲？

最近，Paul Scholz 在阿雷西博 (Arecibo)望远镜的数据中发现了 10 次快速射电暴脉冲，而这次发现的 10 次脉冲信号，与此前发现的 FRB121102 具有一致位置与色散延迟，因此可以推断它们来自同一天体。**这是首次发现具有重复脉冲的快速射电暴，迅速拉近了快速射电暴与中子星的关系，这很有可能是一颗位于遥远的河外星系中年轻、并且高度磁化的中子星。**不过，其它快速射电暴暂时还没有发现重复脉冲，因此是否所有快速射电暴都是如此？还是快速射电暴有可能存在多种不同的起因，有的重复、有的不重复？这还有待进一步的研究。

## 展望未来

在短短的几年中，快速射电暴这种来自宇宙深处的神秘信号引起了天文学界广泛而热烈的讨论，许多射电天文台开始留意并重新检索存档的观测数据；几个大型的射电望远镜也正加装实时触发设备，以捕捉到更多的快速射电暴信号。

我们的研究小组也在讨论如何更多、更快的搜索到快速射电暴信号。大视场的望远镜可以同时监视更大范围的天空，更有利于搜寻到大量的快速射电暴信号。我们在新疆巴里坤红柳峡建设的暗能量射电探测实验阵列（又名天籁阵列）是为观测大尺度结构和暗能量研制的，具有监视大面积天区的能力。目前这一阵列刚刚建成，如能添加必要的设备，也可同时具备探测快速射电暴的能力。我们希望有关领导和管理部门能予以重视，及时予以支持。

宇宙为天文学家们安排了种种意想不到的惊喜，快速射电暴也正是这样一种奇妙的事件。随着研究的深入，她的神秘面纱将逐渐被揭开。

## 作者简介

李毅超：现为中科院国家天文台助理研究员，即将赴南非夸祖鲁-纳塔尔大学从事博士后研究。

牛晨辉：华中师范大学与国家天文台联合培养博士生。

陈学雷：国家天文台宇宙暗物质暗能量团组首席研究员、中国科学院大学教授。从事宇宙学研究，主持暗能量射电探测实验(又称“天籁计划”)，已发表论文一百余篇。获国家杰出青年科学基金，入选中科院“百人计划”、国家“百千万人才工程”等。