

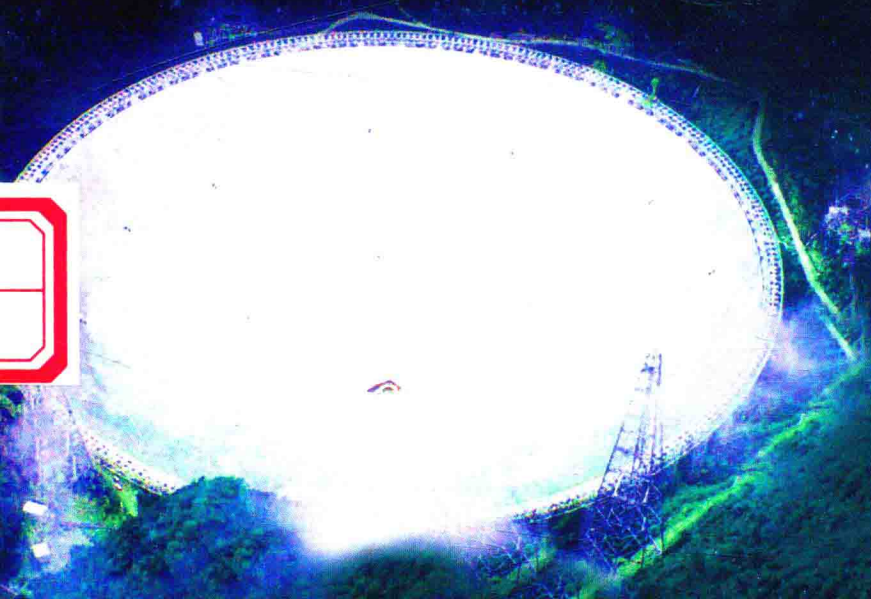
张承民 编著

中
国
天
眼
科
普

神秘的脉冲星

FAST

谨以此书向南仁东老师致敬
他坚忍不拔的科学勇气一直激励着我们前行



清华大学出版社



中国天眼科普
神秘的脉冲星

张承民 编著

清华大学出版社
北京

版权所有，侵权必究。侵权举报电话：010-62782989 13701121933

图书在版编目（CIP）数据

中国天眼科普：神秘的脉冲星 / 张承民编著. — 北京：清华大学出版社，2019
ISBN 978-7-302-53553-9

I. ①中… II. ①张… III. ①脉冲星—普及读物 IV. ①P145.6-49

中国版本图书馆CIP数据核字（2019）第180065号

责任编辑：鲁永芳

封面设计：常雪影

责任校对：赵丽敏

责任印制：丛怀宇

出版发行：清华大学出版社

网 址：<http://www.tup.com.cn>, <http://www.wqbook.com>

地 址：北京清华大学学研大厦A座 邮 编：100084

社总机：010-62770175 邮 购：010-62786544

投稿与读者服务：010-62776969, c-service@tup.tsinghua.edu.cn

质量反馈：010-62772015, zhiliang@tup.tsinghua.edu.cn

印 装 者：三河市宏图印务有限公司

经 销：全国新华书店

开 本：165mm×230mm 印 张：8.25 字 数：127千字

版 次：2019年9月第1版 印 次：2019年9月第1次印刷

定 价：29.00元

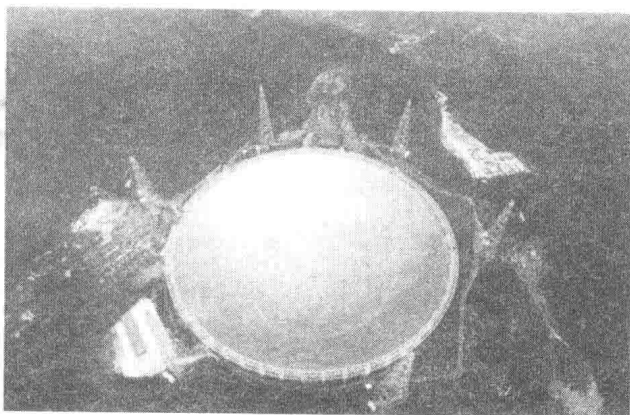
产品编号：083613-01

谨以此书向南仁东老师致敬

他坚忍不拔的科学勇气一直激励着我们前行

铭记他的箴言：

“宁可少活二十年，也要拿下中国天眼”



时代楷模南仁东（1945—2017年）与其领衔建造的FAST望远镜

前 言

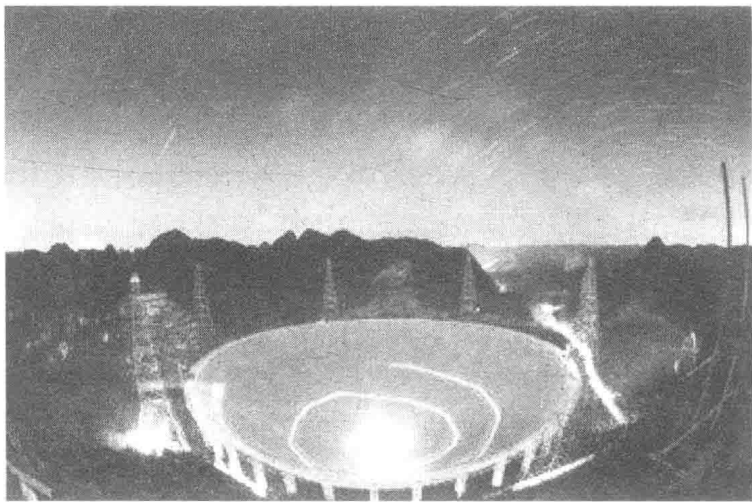
脉冲星最初是由英国剑桥大学的博士研究生乔瑟琳·贝尔女士（Jocelyn Bell）发现的。1967年夏，她在搜索射电望远镜天线的数据带时，注意到一个奇怪的周期信号，流量每隔1.33秒变化一次，后经仔细认证意识到这是一个未知的宇宙信号，来自后来称为脉冲星的天体。脉冲星是物理学家曾经预言的一种超级致密的中子星。脉冲星的发现是20世纪重大的天文学事件。经过50多年的研究，我们已经知道脉冲星是一种极端致密的天体，源于8~25倍太阳质量^①的恒星演化到末期，经历超新星爆发后形成，中心物质坍缩成中子星，约一个太阳质量，其物质密度大约是水密度的千万亿倍。脉冲星的射电辐射来自其磁场强大的极冠区，每当中子星的极冠转到地球视线方向时，我们便能收到其辐射的脉冲信号。脉冲星好比航海中的灯塔，当其辐射束扫过地球时即可以观测到一次脉冲。脉冲星半径约10 km，自旋很快，目前在射电波段观测到的旋转周期在1.39毫秒~23秒之间。

天文学家注意到，脉冲星在基础科学研究领域具有极其重要的学术意义。由于脉冲星的大质量和小半径，其表面引力场非常强，使得脉冲星成为爱因斯坦广义相对论验证的绝好场所。根据爱因斯坦的预言，双星系轨道在引力波辐射下将收缩，而轨道周期为几小时的双中子星系统每年将缩短几百厘米。1974年，美国天文学家赫尔斯和泰勒发现了一对互相绕转的双中子星系统，他们利用此系统证实了引力波的预言。由于脉冲星的超强磁场，为研究磁层粒子加速机制、高能辐射、射电辐射过程提供了一个理想的场所。在应用研究方面，脉冲星因其自转周

^① 太阳质量：用于测量恒星等大型天体的质量单位。它的大小等于太阳的总质量，约 1.989×10^{30} 千克。

期的高度稳定性，在时间标准和航天器导航上有着非常重要的应用前景。部分脉冲星自转周期的长期稳定性已经赶上甚至超过了氢原子钟。对脉冲星的研究涉及多学科协作，多波段探测，多信使研究，所以其研究已成为当今天体物理学最活跃的领域之一。

脉冲星自发现以来，在 50 年间取得了令世人瞩目的巨大成就。天文学家已经观测到 3000 多颗脉冲星，至今已积累了一大批宝贵的资料，同时也存在不少现象和问题尚待解决。随着中国“天眼”工程球面射电望远镜（FAST）大型装置的建设 and 观测手段的进一步发展，人类必将逐步揭示脉冲星所涉及的一系列新问题。虽然现在天文学家已经观测到 18 对双中子星系统，但尚未发现脉冲星+黑洞系统，FAST 有望在接下来的若干年内探测到这类奇特双星，这将为精确确定黑洞性质获得关键信息，同时也可以检验引力波在此类系统的辐射性质。目前，观测到的毫秒脉冲星最快自旋周期是 1.39 毫秒，低于 10 毫秒的脉冲星有 300 多颗。根据理论计算，最快的脉冲星周期可达不足 1 毫秒，如果能探测到这类亚毫秒脉冲星，那么我们确定其物态很有可能是夸克物质，这将是核力起主导作用的一种新天体。此外，银河系以外脉冲星的探测也将作为 FAST 未来观测的重点。随着 FAST 射电望远镜灵敏度的提高，探测其他星系短时间内产生巨脉冲信号脉冲星也成为可

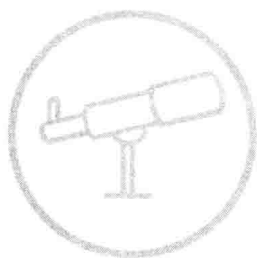


我国已经建成的 FAST 全景

能，这对于研究脉冲星奇特的辐射机制非常有利。另外，对于一些“年老”的脉冲星，其辐射的强度较低，星体自旋周期大于 10 秒。一般来说，自旋周期越大，其年龄越老，越不容易被探测到。在 FAST 高灵敏度的前提下，探测年老脉冲星变为可能，这对于研究脉冲星晚期演化特性是至关重要的。总之，在 FAST 时代，可以预知的脉冲星观测将突破原有的样本数目，各种新型脉冲星天体将不期而至，我们正在迎接一个中国自主大科学装置发现的时代。

目 录

1	脉冲星发现的故事	1
2	脉冲星认证过程	6
3	脉冲星命名方式	11
4	脉冲星距离估计	16
5	脉冲星的质量和密度	24
6	那些错失脉冲星发现的故事	27
7	脉冲星与诺贝尔奖的恩怨情仇	31
8	宋朝“客星”与脉冲星	33
9	脉冲星与超新星爆发	38
10	脉冲星是转动中子星	44
11	蟹状星云的神秘信号	50
12	中子星早期猜想	58
13	脉冲星速度来源	68
14	中子星极端态：高温、高压、高密度、强磁场和强引力	73
15	脉冲星精准钟：导航	80
16	毫秒脉冲星奥秘	85
17	脉冲星双星系统	93
18	强磁场中子星	99
19	寡妇星与脉冲星行星系统	108
20	脉冲星磁场	112
21	脉冲星引力场	116
22	脉冲星的质量范围	119



1 脉冲星发现的故事

(1) 贝尔发现脉冲星的过程

1967年8月，剑桥射电天文台的博士研究生乔瑟林·贝尔（Jocelyn Bell）（图1）在纷乱的记录纸带上察觉到一个奇怪的“干扰”信号，经多次反复研究，她成功地认证：每隔1.33秒地球接收到一个脉冲信号，它来自天体源（之后被命名为PSR 1919+21）。得知这一惊人消息，她的研究生导师休伊什（Antony Hewish）教授曾怀疑这可能是外星人——“小绿人”——发出的摩尔斯电码。但是，进一步的观测表明，这个天体发出脉冲的频率精确得令人难以置信。接下来，贝尔又找出了另外2个类似的源，所以排除了外星人信号的可能，因为不可能有3个“小绿人”在同一时间、不同方向向地球发射信号。再经过认真仔细的研究，1968年2月，贝尔和休伊什联名在英国《自然》杂志上发表了脉冲星的发现，并认为脉冲星就是物理学家预言的超级致密的中子星（也许是夸克星）。这是20世纪的一个重大发现，为天文学研究开辟了新的领域，而且对现代物理学的发展产生了深远影响，



图1 乔瑟林·贝尔，脉冲星发现者

成为 20 世纪 60 年代天文学的四大发现之一（另三个发现是星际分子、类星体和微波背景辐射）。贝尔的导师休伊什因此获得 1974 年的诺贝尔物理学奖。

我们可以看到，贝尔发现脉冲星，只是科学研究过程中的一个“意外”，并不在预料之中。在科学史上这种意外也是较常见的，但是带有很大的运气成分，如伦琴 X 射线、青霉素等的发现。但是在科学研究中运气虽然是一个重要的因素，却不是全部因素。任何一个新的科学发现都源自于科学家连续不断、长期夜以继日的辛勤研究。现在让我们跟随贝尔的故事，重新回到那一段让人无比留恋的天文学的黄金时代。

这个故事开始于 20 世纪 60 年代中期，当时已经发现了行星际闪烁（interplanetary scintillation, IPS），是太阳带电粒子导致射电辐射的无线电信号强度出现明显的波动。光学闪烁是因为恒星投来的光波穿过地球上空一团团湍动的气流时受到了影响，例如夜晚看到的星星在“眨眼”。而天体无线电的“行星际闪烁”（表现为射电望远镜录下来的强度的快速起伏），是因为无线电波穿过太阳系空间也就是“行星际空间”时受到太阳抛出的一团团湍动的电子气体的影响而发生的衍射现象。致密的无线电源，如类星体，它们的射电流量受到星际介质影响。休伊什教授认为这种闪烁技术将是一种有效识别类星体的方法，于是他设计了一架大型射电望远镜（包括特殊的天线和接收机）来做这一工作。幸运的是，当这个望远镜即将开始建造时，贝尔成为了他的博士研究生。课题是利用行星际闪烁来估计类星体的角径（太阳、月亮和行星看上去是大小不一的圆盘，而角径指的是盘的直径张开的角度。对于同一天体，距离越远，角径就越小）。

为了能够记录到类星体电波的快速闪烁，望远镜的覆盖面积必须建造得很大。为此休伊什教授专门设计了一个覆盖面积约为 2 万平方米的射电望

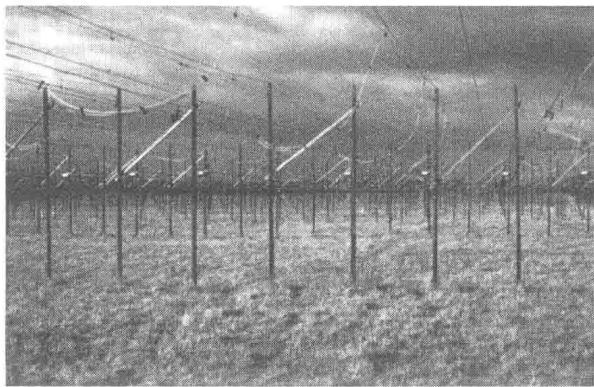


图 2 行星际闪烁阵列望远镜

望远镜，可容纳 57 个标准网球场。这个望远镜由天线组成，天文学家将其称为多普勒阵。望远镜的天线主体是由 1000 多个柱子和它们之间架设的 2000 多个普通电视天线，并用 19 万米的电线将单个天线连接起来组成的巨型网络。整个望远镜的建造工作是由贝尔和其他四个同学亲自完成的，其间他们兴致勃勃地敲大锤、拉电线，不辞辛劳的工作。直到 1967 年 7 月，耗费了约两年的时间，望远镜终于建造完成，并开始运行。最不可思议的是，建造这样一个“庞然大物”才花费了约 1.5 万欧元，可以说是相当便宜。贝尔说，我们自己完成了这项工作——大约有五个人——在几个热衷于度假的学生的帮助下，在一个夏天里兴致勃勃地敲大锤。

望远镜建成后，贝尔在休伊什的指导下，负责望远镜的运行和数据分析。在观测时望远镜的四个波束同时使用，其视场对准南北方向的天空，每四天扫描一次 $+50^\circ$ 到 -10° 之间的天空。为了帮助贝尔和她的助手们尽快熟悉望远镜和更好地检查及分析数据，休伊什让她们使用四个三轨笔录器来记录观测信号，这些信号纸带长度每天可达约 29 米。

经过对几百米的纸带进行分析训练后，贝尔已经可以很快地识别出信号中的闪烁源和干扰（射电望远镜是非常敏感的仪器，而地球上的无线电产生的干扰，很容易湮没宇宙无线电信号；不幸的是，这是所有射电天文望远镜的一个特点）。如图 3 最上面部分第三个射电天体的闪烁记录，从左到右分别是无闪烁、强闪烁和不太强的闪烁。在开始观测的六周至八周后，贝尔发现纸带有时会记录一些“乱七八糟的东西”，这看起来并不像闪烁的信号，但也不完全像人为的干扰。此外，贝尔突然意识到，之前在记录这片天空（CP1919）信号的纸带上也看到过这种“特殊噪声”，如图 3 中部所示。

这个噪声信号是在晚间出现的，但是此时行星际闪烁强度最小，因此贝尔认为，这应该是一个点源发出的信号。无论它是什么，贝尔都认为这值得进行更仔细的检查，因此提高了记录信号的频率，使得噪声信号的结构更加清晰地展现在纸带上。到了 10 月底，在完成了类星体 3C273 的测试后，贝尔便每天去天文台作快速的信号记录，此时笔录器可以 0.1 秒的反应速度记录下观测信号。但在接下来的几个星期，并没有再次记录到那个信号。直到有一天贝尔因为去听讲座放

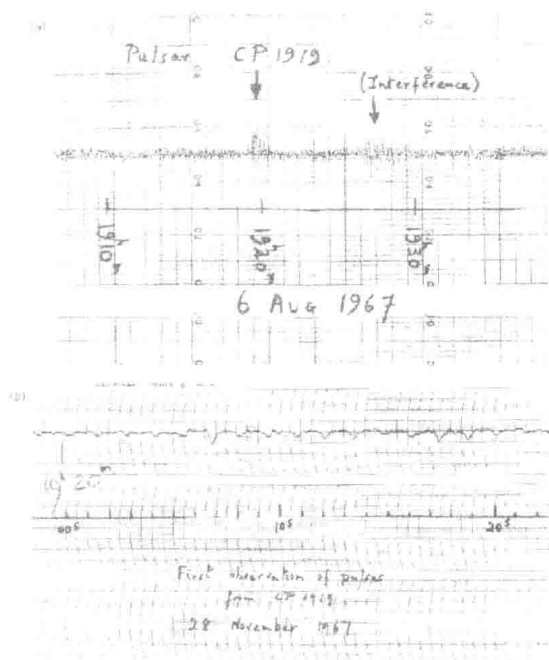


图3 脉冲星信号示意图

弃了观测，在第二天的正常观测记录中，那个噪声信号又一次出现了。在那之后的几天，也就是1967年11月底，贝尔在检查纸带时发现，那个特殊噪声信号居然是一系列的脉冲，而且间隔时间相等，为1.33秒。发现这一情况后，贝尔马上联系了正在剑桥大学教书的休伊什教授，但教授的第一反应是，这些信号一定是人为制造的。在当时来说，休伊什的反应是对的，但贝尔却想为什么它们不能来自遥远的宇宙呢？第二天当教授来到天文台时，那个脉冲又出现了。在仔细检查了纸带后发现，每次记录到的脉冲信号其脉冲周期只有1.33秒，这很像地球信号，但又保持着恒星时间，说明其只能来自天体。因此当时也有人戏称其为“小绿人”，即外星人发出的信号。

贝尔坚持己见，执意认为脉冲信号来自天体，最后终于发现了脉冲星。

(2) 15岁女生发现新脉冲星

贝尔的故事后来有了继任者。

2009年美国西弗吉尼亚州的一个15岁高中生布洛克斯顿(Shay Bloxton),参加了一个脉冲星搜索合作实验室(The Pulsar Search Collaboratory, PSC)的项目。该项目由世界著名天文学家麦克劳林博士(Maura McLaughlin)和洛里默尔(Duncan Lorimer)领导,通过在线课程的方式,教授学生脉冲星和射电天文学知识。学生接受训练后,就可以获得绿岸射电望远镜(Green Bank Telescope, GBT)的观测数据。10月15日布洛克斯顿在处理望远镜数据时发现了一个可能是脉冲星的天体。在查阅信息后发现,目前并没有该天体的记录,这让她感到十分震惊和高兴,因为这有可能是一颗新脉冲星。一个月后她怀着无限憧憬前往美国国家天文台,与天文台的科学家们一起使用绿岸射电望远镜对该天体进行跟踪观测后,证实其确实是一个新的脉冲星。

看来脉冲星青睐女子天文学家!

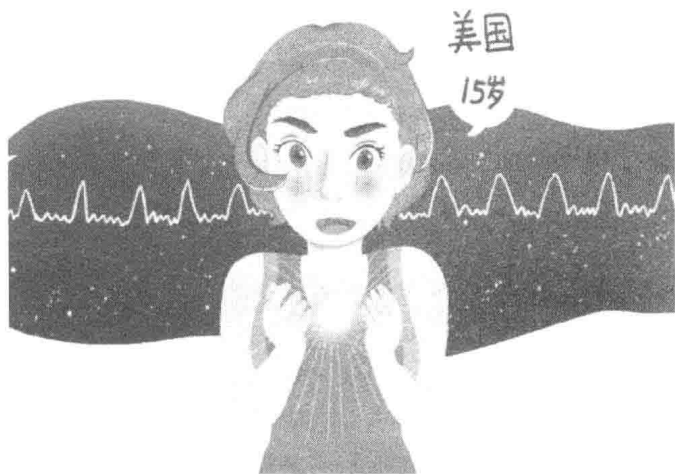
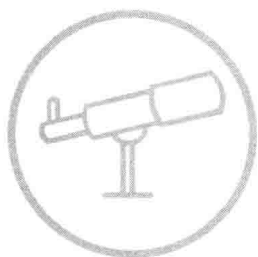


图4 15岁高中生发现脉冲星



2 脉冲星认证过程

然而，贝尔进一步查找观测数据表明，这个脉冲信号的频率极其精确。接下来，贝尔和同事又发现了不同天区的另外 2 个周期各异的脉冲信号源，这排除了外星人信号的可能，因为不可能有 3 个“小绿人”在不同方向、同时向地球发射不同的脉冲信号。接着，经过进一步观察后，他们分析发现，这个脉冲信号的频率精确得令人难以置信，其变化率约为 10^{-15}s^{-1} ，亦即几千万年内的时间变化大约 1 s，这是精准的氢原子钟精度。再经过射电望远镜的色散测量（不同的频率信号到达地球的时间不同），贝尔得出脉冲星距离地球大约是几万光年，这意味着脉冲信号源于银河系的天体。经过一番努力，贝尔和休伊什在英国《自然》杂志上发表了发现脉冲星的论文，并认为脉冲星可能就是物理学家预言的超级致密的中子星。这是一个意外的重大发现，消息很快轰动了国际科学界，为天文学和天体物理研究开辟了新的领域，而且对现代物理学的验证产生了深远影响。

(1) 仪器效应

从贝尔发现脉冲信号到证实其为脉冲星，这期间经历了一段漫长的过程。发现脉冲信号后，贝尔马上联系了导师休伊什教授，看到周期如此规则的脉冲信号，教授的第一反应是，这些信号一定是人为制造的。为了验证这一想法，贝尔和同事们查遍了伦敦当时所有的无线电发射频率，很快就排除了这种可能。他们还检查了设备，并没有发现产生周期信号的源头。

(2) 确认其为天体信号

那么这个脉冲信号到底来自哪里呢？我们知道射电望远镜是一种高灵敏的仪器，任何细微的变化都可能对观测结果产生影响。望远镜的自身仪器效应也可能产生干扰信号。为了解决这个问题，贝尔将观测结果告诉了斯科特和柯林斯，他们用另外一台射电望远镜对同一天区进行了重复观测，也发现了这些脉冲信号。从而确认脉冲信号不是来自于仪器自身。

做完这些后，贝尔惊奇地发现，这个每隔 1.33 秒发射一个脉冲的精准时间的脉冲信号，真有可能来自于宇宙。贝尔意识到，这个脉冲信号在观测记录中是重复出现的，在仔细检查了所有纸带后发现，每次记录到的脉冲信号，都能准确地保持在恒星日（按时间推算，每次正好相隔 23 小时 56 分钟，和其他天体出没的周期相同）。我们都知道地球自转一周所用的时间是一天，即 24 小时。但这并不完全准确，一天即一个太阳日，即以地球为参考系，太阳运动一周所需的时间，但是实际上地球是在围绕太阳公转，因此太阳日要比地球实际自转周期长 3 分 56 秒。以地球为参考系，恒星也是在围绕地球作周期运动，而且周期正是地球的自转周期，即 23 小时 56 分 4 秒。因此从脉冲信号出现周期为一个恒星日可以推断，这个信号源一定在太空。

(3) 小 绿 人

当确定这一事实后，约翰·皮尔金顿测量了该信号的色散，由测量结果显示信号源距离地球大约几万光年^①，这意味着脉冲信号源于在太阳系之外，但在银河系内部起源的天体。这一脉冲信号一定是外星人制造的——向地球发出的摩尔斯电码，这是当时人们下意识的反应，因此便有了“小绿人”的戏称。小绿人是当

^① 光年是天文学中的长度单位，是一年内光在真空中走过的距离，1 光年 = 9.46×10^{15} 米，也就是 94600 万亿千米。

时人们对外星人的一种称呼，在 20 世纪五六十年代，小绿人在地球上的活动非常频繁，世界各地时不时的便会有小绿人身影的报道，当然到现在为止，外星人到底存不存在，他们长什么样子，仍然是个谜，因此在发现了可能是外星生命制造的脉冲信号后，便被人们冠以小绿人的称呼。

那么我们真的发现外星生命了吗？我们都知道宇宙中的天体大致可以分为恒星、行星和卫星，以太阳系为例，太阳是恒星，地球是行星，月球是卫星。我们虽然不知道外星生命是一种怎样的存在，但是他们的生存环境也应该和地球差不多，生活在一个围绕着恒星公转的行星上。如果是轨道运动，那么此脉冲信号发射点有时远离地球，有时靠近地球，这就应该显示出多普勒频移。休伊什教授开始



图 5 贝尔对于小绿人猜想的反驳

对脉冲周期进行精确测量以研究这个问题，数据显示只有地球围绕太阳公转。对脉冲信号进一步分析也发现，这些摩尔斯电码并不能传递什么信息，如果按照电脑二进制解码的话，就是 0101…。也就是说，小绿人的可能性已经微乎其微，因为外星人不可能向外界传递出这种傻瓜式的信号。

(4) 脉冲星——中子星

与此同时，贝尔依然在进行常规的纸带分析。在圣诞节前夜，贝尔拜访了休伊什教授，并参加了一个会议，讨论如何向外界公布这些结果。他们并不相信接收到的是来自另一个文明的信号，但是也没有办法证明这个信号是由天体辐射出

来的，直到会议结束也没能解决这个问题。当天夜晚，贝尔回到实验室后做了更多的纸带分析，在实验室将要关闭前，贝尔在下中天（1133）的仙后座 a 发出的强烈、高度调制的信号中，发现了一些脉冲信号的痕迹。贝尔意识到这可能是另一个小绿人，接着她又将之前那部分天空的记录，重新分析了一遍，发现确实有脉冲信号的痕迹。几小时后，贝尔冒着寒冷的天气，星夜赶回天文台，运行望远镜对这片天区再次进行观测，严寒使望远镜只正常工作了 5 分钟。此时纸带上记录了一系列非常规整的脉冲，脉冲间隔为 1.2 秒。贝尔兴奋得在回家过圣诞节时还将纸带遗忘在了同事的桌子上。这次的发现解决了是否是外星文明的问题，因为不太可能两个小绿人选择相似的频率，并同时向地球发出信号。

在圣诞节期间，贝尔的同事许好心地帮她继续做观测，并把记录信号的纸带放在她的桌子上。假期一结束，贝尔便开始对纸带进行分析处理。很快地，在一个纸带上又发现了两个小绿人 CP 0834 和 CP 0950。为了查看是否有遗漏，贝尔又重新查阅了以前所有的纸带，总计有几千米长。又发现了几个候选体，但是没有像前面四个一样被确认。四个小绿人的发现使得外星文明的设想破灭，因为在宇宙中，这些天体相互之间距离达成百上千光年，相互之间毫无联系，而且它们与地球的距离同样非常遥远，当时接收到的信号其实是在几百甚至几千年前发出的。因此根本不可能有多个完全不相干的外星文明，同时向地球发出类似于时钟那样规律却又不包含任何信息的脉冲星信号。因为这些都是恒星世界里的目标，相互之间毫无联系，各自与我们相距成百上千光年，我们收到的是相应的几百年前、几千年前的信号。很难想象会有好几个各不相干的“地外文明制造者们”，在极其悬殊的地点和时间，整齐划一地向我们发出这种类似于时钟那样规律却又不含其他“智慧信息”的信号！这些小绿人最后被人们统一命名为脉冲星。

到底是怎样的天体才能辐射出如此精准、稳定、高频率的无线脉冲信号呢？通过对恒星的认知，我们知道，辐射的脉冲周期稳定，说明脉冲星的质量很大，而且其脉冲周期小，说明脉冲星的自转快，半径小。通过牛顿万有引力定律的粗略计算，以 CP1919 为例，其物质密度大约为 8.1×10^{10} 克每立方厘米，也就是说其每立方厘米的物质重达八万多吨。如此超高的密度与当时已知的所有天体都不