

脉冲星与脉冲星计时阵

李柯伽[†] 徐仁新^{††}

(北京大学物理学院 北京 100871)

2024-07-15 收到

[†] email: kjlee@pku.edu.cn

^{††} email: r.x.xu@pku.edu.cn

DOI: 10.7693/wl20240801

Pulsars and pulsar timing arrays

LEE Ke-Jia[†] XU Ren-Xin^{††}

(School of Physics, Peking University, Beijing 100871, China)

摘要 文章简要介绍脉冲星研究的历史以及利用脉冲星计时阵探测纳赫兹引力波的基本原理。人类正接近打开纳赫兹引力波的天文窗口，有望窥探伴随着星系形成的黑洞并合历史，甚至测量宇宙早期各种相变过程残留至今的引力波。

关键词 脉冲星，计时，引力波，中子星，黑洞

Abstract The history of pulsar research and the basic principle underlying the observation of nanohertz gravitational waves with pulsar timing arrays are overviewed. We are close to opening a window onto the astronomy of these gravitational waves, to peer into the history of black hole mergers and galaxy formation, and even to measure the gravitational waves left over from the phase transitions in the early Universe.

Keywords pulsar, timing, gravitational wave, neutron star, black hole

1 引言

众所周知，创新驱动人类文明和进步。所谓“创新”是指：发现未知的客体(实验/观测研究)或提出此前不存在的概念(理论探索)。我们将会看到，这两点在脉冲星相关的研究中体现得淋漓尽致。

确实，缺少了 Jocelyn Bell 年轻时的细心和坚持，人们可能不会这么快地领略脉冲星的神奇和研究它所带来的快乐¹⁾。在 1967 年秋天，还是剑桥大学 Antony Hewish 博士生的 Jocelyn Bell 注意到一些看似干扰的无线电信号，但每天却在同一恒星时出现。如果这种信号源于地面无线电干扰，

那就要求干扰发生的时间持续提前，并正好补偿地球围绕太阳的公转效应。这太离奇了！要是假设这类信号来自地球以外的遥远天体，那就比较合理了。为了弄清楚该信号的起源，团队找来高速纸带记录仪以看清信号的细节，结果却令人吃惊：这些信号其实是间隔 1.33 秒的非常有规律的脉冲信号！后来，人们将发射如此规则脉冲信号的天体称为脉冲星。就这样，人类无意中发现了脉冲星。

自发现脉冲星以来，围绕它们的基础科学和工程应用研究从未停息。在科学层面，自然界四种基本相互作用在脉冲星上都被极端地体现。在应用层面，脉冲星自转周期精确的稳定性是一种重要的宇宙“资源”，可用于建立精确的时间标准

1) 作者跟资深脉冲星研究学者 R. Manchester 和 J. Taylor 同感。他们在合著的 *Pulsar* 一书扉页上写到：“The book is dedicated to Jocelyn Bell, without whose perceptiveness and persistence we might not yet have had the pleasure of studying pulsars”。

以及航天飞行器的导航。本文所关注的脉冲星计时阵(pulsar timing array)²⁾就是利用脉冲星自转周期的稳定性：不仅是探测纳赫兹引力波的利器，也在确定星历表甚至银河系内湍动等离子体特性等方面具有特殊角色。本专刊拟全面介绍国际上几个脉冲星计时阵(简称“PTA”)的研究组织及其进展情况，以飨读者并鼓励更多年轻学子进入这一新兴的科学和工程前沿领域展示才华。

2 脉冲星是什么？

坦率地讲，即使在发现脉冲星后半个或多个世纪的今天，人们依然不能给出明确的回答。该问题的答案涉及基本强相互作用的低能行为，对其认识的不足导致了当今的困境。从发现的角度来看，脉冲星是一种意外的、未被规划搜寻的天体；同样地，关于脉冲星内部组成物质的研究还完美地诠释了“理论创新”的科学逻辑。

关于构成自然界物质基本单元的探索跨越了百余年(从18世纪中叶至20世纪初)，直至1911年卢瑟福依据 α 粒子大角度散射实验建立原子的“有核模型”。原子核由何构成？鉴于原子质量几乎都是氢原子的整数倍、电子远轻于氢原子核(即质子)，易于猜测原子核含有 A 个质子；而各种物理测量却发现原子核的电荷仅约 $A/2$ 。因此，如下观点开始普遍流行：原子核含 A 个质子和 $(A-Z)$ 个电子(其中核电荷数 $Z \sim A/2$)。那些存在于原子核内的电子会紧密地跟质子粘合在一起，形成质量近乎质子但电荷为零的“束缚态”。1920年卢瑟福在题为“原子核组成”的讲座¹⁾中鼓励人们实验寻找这种束缚态。我们现在知道，这就是中子！它其实并非束缚态，而是地位跟质子一样的、构成原子核的单元。这些都是后话。不过，在查德威克宣称²⁾发现中子之前有一段小插曲，它跟本文的主题紧密相关。

这段故事涉及量子论的早期发展史。1913

年，玻尔假设绕原子核运动的稳定轨道(后称为量子态)的角动量是 \hbar 的整数倍，角动量越大则能量越高。为何若干核外电子不都处于能量最低的基态？1925年泡利提出不相容原理³⁾：任一量子态最多容纳一个电子，这样就能理解原子核外电子在不同量子态上的排布以及各种元素表现出来的周期性的化学性质了。泡利原理在统计物理上的后果很快就被意识到了：经典统计物理认为微观单元是可分辨的、“小球”似的粒子，从而建立起麦克斯韦—玻尔兹曼统计并成功地解释热力学定律；而黑体腔中光波的重叠使得光子是不可区分的、全同的，玻色考虑全同性但类似麦克斯韦—玻尔兹曼统计的计算给众多普朗克公式的推导画上完美的句号！满足泡利原理的电子却拥有不一样的统计行为，即费米—狄拉克统计：包括电子在内的费米气体即使在零温情形也具有很高的动能。这一内能受到福勒的重视并被用于揭示白矮星之谜³⁾，只是在计算状态方程时采用了非相对论能-动量关系。

这点瑕疵被钱德拉塞卡尔弥补⁴⁾，他计算发现：质量过高的白矮星不能因费米—狄拉克统计的电子简并压抵抗自身引力！超过钱德拉塞卡尔极限质量时如何？这正是在1931年2、3月份朗道、玻尔和罗森菲尔德一次自由讨论的话题。讨论之后建议朗道写一篇相关论文，但未有下文；不过朗道回国后次年1月投稿并于1932年2月发表了一篇文章，声称⁵⁾：(1)质量过大的恒星内部的原子核会挤成一片，形成“巨核”(gigantic nucleus)；(2)在巨核内，原先的核外电子将与质子紧密结合以降低满足费米—狄拉克统计的电子所具有的极高动能(用现代的语言表述，即“中子化”)。巨核实质上就是“中子星”的雏形。可见，朗道的这个思想并不依赖于是否发现中子。该文跟中子发现的论文同月发表，致使学术界不少同行误认为朗道在查德威克发现中子之后才提出中子星的概念⁶⁾。Baade和Zwicky在超新星和宇

2) 在《汉英天文学词汇》(中国天文学会名词审定委员会审定，上海科技教育出版社，1991)中，将“计时”翻译为“timing”，而“测时”为“time determination”；不过，很多文献中也将“timing”译为“测时”。在阅读过程中，请读者注意这点差异。

3) 经爱因斯坦提名，泡利因此获得1945年度诺贝尔物理学奖，“for the discovery of the Exclusion Principle, also called the Pauli Principle”。

宙线研究过程中曾推测过中子星的形成^[7]，而脉冲星发现后很快被证认为是快速旋转的中子星^[8]。

脉冲星果真就是中子星吗？很遗憾，这依旧是个开放问题。随着20世纪六、七十年代以来粒子物理标准模型的建立，人们认识到核子(质子和中子的统称)并非基本粒子，而是由更基本的夸克和胶子组成。在这个框架下，满足朗道降低电子化学势(即遵循泡利原理的致密电子气所具有的极高动能)的途径并非仅有中子化一条途径，奇子化也可能是条路^[9]。

3 脉冲星计时与计时阵

观测到的脉冲来源于脉冲星自身的旋转：类似于灯塔，扫过我们就能记录到脉冲辐射。脉冲星自转及自转减慢的稳定性使得它被奉为“稳定时钟”。事实上，脉冲星自转确实非常稳定，特别是毫秒脉冲星的长期转动稳定性堪比现在投入使用的国际原子钟组的性能^[10]。这些转动稳定的毫秒脉冲星散布在银河系内，构成可以通过射电天文观测读出的高精密“时间”信号，其良好的时间稳定性将脉冲星塑造为“基础物理实验室”。

那么射电天文观测如何去获取脉冲星时间的“读数”呢？这种专门的技术在天文学上叫做脉冲星计时观测。包括如下几个步骤：首先，人们用无线电望远镜接收脉冲星信号，然后取出不同频率的信号成分；其次，按照脉冲星信号的色散大小重新把不同通道的脉冲信号加以延迟并对齐，叠加以后的信号就变成了一维时间序列信号。对于较强的脉冲星，这个时候就能看到脉冲了。然而大部分脉冲星信号实在是太弱了，即使消除了色散的影响，脉冲信号大多在这一步还是不可见的。接下来让脉冲信号变明显的办法叫做“周期折叠”，即按照脉冲周期把数据分段，然后再叠加起来。这样把一段频率和时间上的脉冲信号贡献都加起来以后，脉冲就变得明显起来。图1示意了这个过程的

基本原理。测量到脉冲信号之后再比对信号模版，人们就能确定脉冲到达望远镜处的时间了。

脉冲星自转规律相当稳定。对于孤立的脉冲星来说，它的自转可以通过一个多项式模型很好地拟合。测量到的脉冲到达时间和这个多项式模型的差异往往很小；不过由于测量误差和其他物理因素，这个差异并非为零。我们把这一差异称作“计时残差”，它包含了额外的物理信息。凡是那些不在我们上述描述中的、会影响脉冲达到时间的其他所有物理因素都会在计时残差里面留下痕迹。

问题是每颗脉冲星自转并非绝对稳定，我们如何区分计时残差究竟是来源于脉冲星自身的不稳定性还是来自原子时的误差呢？观测多颗脉冲星是条路径：若没有“阴谋论”的话，可预期每个脉冲星的自转特性是完全独立的，一颗脉冲星自转周期变化的时候不会影响其他的脉冲星。若计时残差来源于相关的系统差，情况则不一样了。以国际原子时偏差为例，假设由于某些原因，国际原子时提前了一秒。那么我们用这个国际原子时作为基准去测量脉冲星的脉冲到达时间，将会观察到所有脉冲星的到达时间都推迟了一秒钟，也即所有脉冲星的计时残差都会出现一秒的跳变。按照这个逻辑，如果我们利用一些数学处理的手段，把脉冲星计时残差中公有的那部分提取出来，就可以用于校准国际原子时的系统误差了。这种对多颗脉冲星进行计时观测并综合起来分析处理的技术，就叫做脉冲星计时阵(PTA)。

4 观测宇宙的纳赫兹引力波窗口

脉冲星计时阵还可以用于直接探测引力波，这又是如何实现的呢？

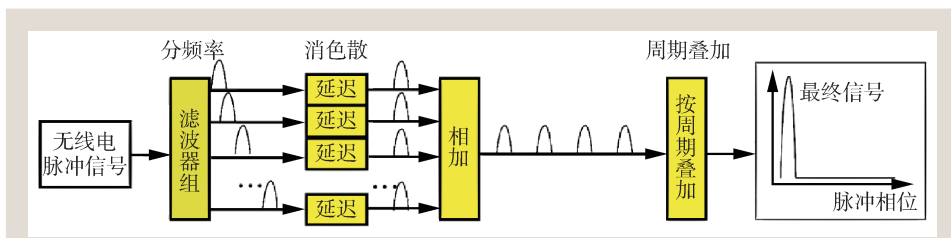


图1 脉冲星计时测量示意图

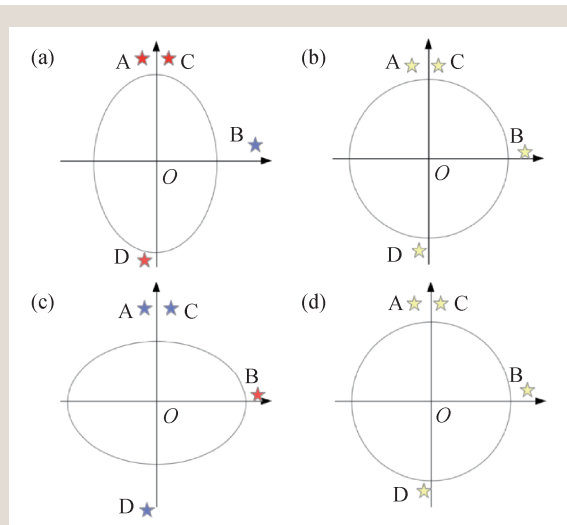


图2 脉冲到达时间受引力波影响的示意图。图中A、B、C、D为4颗脉冲星，引力波垂直于纸面传播，脉冲星观测者站在O点。4张图分别表示不同时期的引力波对电磁脉冲信号红移或者蓝移的影响

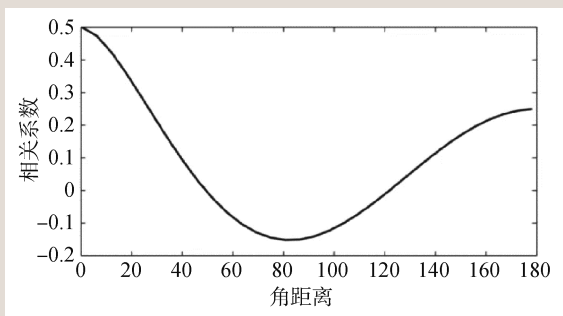


图3 HD函数。横坐标是一对脉冲星在天球面上的夹角，纵坐标为任意两颗脉冲星到达时间的相关系数

引力波会影响脉冲星发出的脉冲信号到达地球的时间。在脉冲星计时阵探测引力波的过程中，脉冲星被当成了标准的脉冲信号发生器来使用，其发出的脉冲信号穿过几万光年来到地球。如果宇宙中存在引力波，银河系的时空结构就被改变，从而影响信号的到达时间(图2)。广义相对论认为，作为时空的“涟漪”，引力波是横波，在垂直于波传播方向上的空间被拉伸或者压缩，在压缩空间水平方向的同时会拉伸垂直方向(或相反)。这种时空的拉伸和压缩将导致相应方向上距离的改变，从而使得脉冲到达地球的时间提早或者延迟。如图2所示，A、B两颗脉冲星的到达时间具有“反相”的特点：若一颗星的脉冲到达地球提

前了，则另外一颗星的脉冲就会延迟。类似地，两颗位置相似的脉冲星(A和C)脉冲信号是“同相”的(即两颗星的信号同时延迟或者提前)；而位置相反的两颗脉冲星(A和D)脉冲信号也是同相的。数学上，通过相关运算来描述信号同相还是反相。完全同相的信号，计算出来的相关系数为1；完全反相的信号，相关系数为-1。具体计算表明，来自宇宙四面八方的引力波都会导致每对脉冲星的信号有相关性(图3)，而且这个相关性依赖于脉冲星之间的角距离^[1]。引力波引起的脉冲星到达时间序列的相关函数叫做 Hellings—Downs (HD)函数，也称作HD曲线。该函数依赖于脉冲星对之间的角距离，函数形状如图3所示。

脉冲星计时阵能够探测什么样的引力波呢？引力波类型众多，不同频率的引力波起源于不同极端天体物理过程。地面激光干涉仪 LIGO 探测的引力波在百赫兹到千赫兹波段⁴⁾，其研究对象为恒星级致密天体的并合事件。脉冲星计时阵的特点决定了它能够探测的引力波是极低频的纳赫兹引力波，其波动周期长达数年。这种引力波可能起源于星系中心1亿到100亿倍太阳质量的超大质量黑洞并合、宇宙弦振动甚至宇宙早期暴涨等过程。星系级黑洞的并合在宇宙结构的形成和演化方面起着关键作用，其他可能的引力波源则跟基础物理前沿密切相关。

脉冲星计时阵能够直接探测这类重要的引力波源，其中最引人瞩目的是无数纳赫兹引力波叠加而成的引力波背景(GWB)。探测GWB的数据分析中主要包括两个方面：GWB谱分析和脉冲星空间相关分析。后者关注HD曲线的测量，能够给出探测信号是否由引力波导致的明确证据；而前者在假设GWB真实存在的情况下，推断GWB的强度以及谱形。谱分析对于理论上研究纳赫兹引力波来源以及相关宇宙学研究至关重要。原初引力波、超大质量双黑洞并合引力波、宇宙弦和筹壁等激发的引力波导致的GWB谱各不相同，因而可以依据探测给出的谱形推断引力波的物理来源。此外，GWB强度测量可以限制相应的物理过程，例如提供宇宙历史上超大质量双黑洞质量谱及并合率的限制，进而约束星系并合的演化史。

4) 一百赫兹以下的频段，探测灵敏度显著下降。

5 小结

虽然半个多世纪之前就意外地发现脉冲星了，但是至今尚未澄清其本质。不过，脉冲星可以作为稳定的时钟，由若干脉冲星组成的计时阵是打开纳赫兹引力波窗口的利器。计时阵以相距上千光年远的脉冲星作为探测装置，而探测的引力波波长仅光年量级。有鉴于此，未来更高精度的脉冲星计时阵有望直接进行引力波点源和成像观测。

目前不少国家或组织都依托自身大型射电天文望远镜建立起脉冲星计时阵合作项目，包括欧洲的EPTA、澳大利亚的PPTA、美国的NANO-Grav，等等。我国已经成功建设并运行全球最大的500米单口径望远镜FAST，也相应地成立了中国的CPTA合作组。这些脉冲星计时阵都取得了较好的进展，特别是最近几个合作团队都得到了纳赫兹引力波存在的关键证据，逼近“发现”纳赫兹引力波的水平^[12-15]。为介绍这一激动人心的

研究领域、憧憬纳赫兹引力波宇宙学的未来，特组织本专刊以飨读者。专刊文章将进一步分别介绍各个PTA组的历史脉络、设备现状以及取得的主要科学进展。

参考文献

- [1] Rutherford E. Proc. Roy. Soc., A, 1920, 97:374
- [2] Chadwick J. Nature, 1932, 129:312
- [3] Fowler R H. Mon. Not. R. Astron. Soc., 1926, 87: 114
- [4] Chandrasekhar S. Astrophys. J., 1931, 74:8
- [5] Landau L. Phys. Z. Sowjetunion, 1932, 1:285
- [6] Yakovlev D G, Haensel P, Baym G *et al.* Physics-Uspekhi, 2013, 56(3):289
- [7] Baade W, Zwicky F. Physics Review, 1934, 46: 76
- [8] Hewish A, Bell S J, Pilkington J D H. Nature, 1968, 217: 709
- [9] Lai X, Xia C, Xu R. Advances in Physics X, 2023, 8(1):2137433
- [10] Hartnett G J, Luiten N. Review of Modern Physics, 2011, 81: 1
- [11] Hellings W R, Downs S G. Astrophysical Journal, 1983, 625:39
- [12] Xu H *et al.* Research in Astronomy and Astrophysics, 2023, 23: 5024
- [13] EPTA collaboration *et al.* Astro. & Astrophys., 2023, 678:50
- [14] Agazie G *et al.* Astrophysical Journal Letters, 2023, 951:1
- [15] Reardon D *et al.* Astrophysical Journal Letters, 2023, 951:6



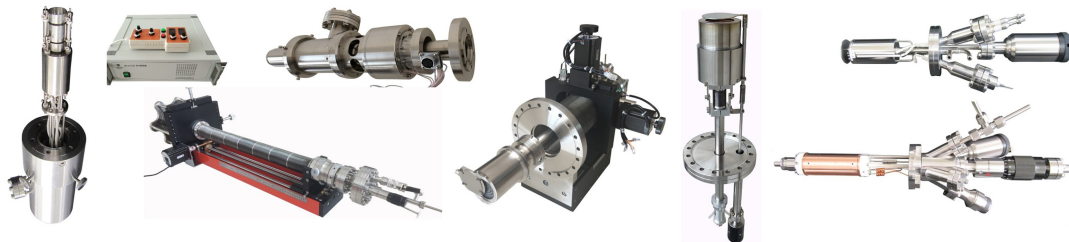
大连齐维科技发展有限公司

地址:大连高新园区龙头工业园龙天路27号

电话: 0411-8628-6788 传真: 0411-8628-5677

E-mail: info@chi-vac.com HP: <http://www.chi-vac.com>

表面处理和薄膜生长产品: 氩离子枪、RHEED、磁控溅射靶、束源炉、电子轰击蒸发源、样品台。



超高真空腔室和薄膜生长设备: PLD系统、磁控溅射系统、分子束外延系统、热蒸发镀膜装置。

