

北京師範大學

博士学位论文

论文题目：DA 型脉动白矮星的星震学研究

作者：李春
导师：付建宁 教授
系别年级：天文系 2010 级
学号：201031160004
学科专业：天体物理
完成日期：2017 年 6 月

北京师范大学研究生院

北京师范大学学位论文原创性声明

本人郑重声明：所提交的学位论文，是本人在导师的指导下，独立进行研究工作所取得的成果。除文中已经注明引用的内容外，本论文不含任何其他个人或集体已经发表或撰写过的作品成果。对本文的研究做出重要贡献的个人和集体，均已在文中以明确方式标明。本人完全意识到本声明的法律结果由本人承担。

学位论文作者签名：

日期： 年 月 日

学位论文使用授权书

学位论文作者完全了解北京师范大学有关保留和使用学位论文的规定，即：研究生在校攻读学位期间论文工作的知识产权单位属北京师范大学。学校有权保留并向国家有关部门或机构送交论文的复印件和电子版，允许学位论文被查阅和借阅；学校可以公布学位论文的全部或部分内容，可以允许采用影印、缩印或其它复制手段保存、汇编学位论文。保密的学位论文在解密后适用于本授权书。

本人签名： _____

日期： _____

导师签名： _____

日期： _____

DA 型脉动白矮星的星震学研究

摘 要

作为目前已知的唯一可以探测恒星内部结构的手段，星震学近年来成为恒星天体物理学研究的热点之一，被广泛应用于研究处在各个演化阶段的恒星，包括白矮星。白矮星是银河系中绝大部分恒星演化的最终产物，而脉动白矮星因为其相对简单的内部结构而成为星震学理想的研究对象。DA 型脉动白矮星 (DAV, ZZ Ceti 型变星) 是脉动白矮星中有效温度最低的一类，其基本特征为具有氢大气谱线，而不稳定带的纯洁性使其成为 DA 型白矮星内部结构研究的样本。

脉动白矮星恒星参数和脉动性质的统计工作对于了解这类变星的研究现状和特征具有重要意义。我们从文献中收集了截至 2017 年 4 月发现的总共 205 颗 DA 型脉动白矮星的信息，并对其中的普通单星的参数分布和参数之间的相关性进行了统计和归纳，同时形成了一个 DA 型脉动白矮星的最新星表。

此外，我们选择了两颗 DA 型脉动白矮星 KUV 08368+4026 和 WD 0246+326 进行多站时序测光观测，由数据分析给出它们的脉动性质，频率分析得到脉动模式的球谐函数参数，并利用这些模式对恒星理论模型进行限制，得到有效温度、质量等恒星参数的精确值。

KUV 08368+4026 的脉动性质发现于 1996 年。我们从 1999 年以及 2008-2012 年期间进行的多站观测数据中共发现了 30 个模式，其中包含 6 个多重频率结构，并被证认为 $l=1$ 和 $l=2$ 的模式。通过构建理论模型和拟合脉动频率得到这颗星的最佳拟合模型，通过模型给出的该星的有效温度 $11825 \pm 25\text{K}$ 和质量 $0.692 \pm 0.002M_{\odot}$ ，其自转周期为 5.52 ± 0.02 天。

WD 0246+326 的脉动性质发现于 2001 年。我们在 2014 年对其进行了为期 8 天的国际联测，从中发现了 11 个脉动模式。与 2009 年文献中给出的 6 个频率相结合，我们共得到了 1 个三重频率结构和 3 个双重频率结构，并将其他频率证认为 $l=1$ 和 $l=2$ 的模式。由其较小的周期间隔，我们认为这是一颗大质量的 DA 型脉动白矮星，并且利用理论模型拟合给出了恒星有效温度 $11700 \pm 100\text{K}$ 和质量 $0.98 \pm 0.01M_{\odot}$ 。

以上研究结果，给出了两颗 DA 型脉动白矮星的脉动性质，利用星震学手段精确确定了恒星参数，发现了一颗新的大质量 DA 型脉动白矮星，为深入探索目标星的内部结构和物理过程，研究大质量白矮星的内部核结晶现象奠定了基础。

关键词：脉动白矮星，星震学，时序测光，傅立叶频率分析

ASTEROSEISMOLOGY OF PULSATING DA WHITE DWARFS

ABSTRACT

As a unique tool of exploring the internal structures of stars, asteroseismology is one of active subjects in stellar astrophysics, and is widely used in diagnosing stars during all stages of the evolution, including white dwarfs. White dwarfs are the final remains of most stars in the Galaxy from evolution. The relatively simple structures make them excellent targets of asteroseismology. Pulsating DA White dwarfs(also called DAV, ZZ Ceti stars) are the kind of pulsating white dwarfs with the lowest effective temperatures. They have hydrogen atmospheres and the purity of the instability strip makes them the perfect samples of DA white dwarfs which can be utilized to investigate the internal structures.

The statistic study targets on the stellar parameters and pulsating properties helps one to understand this kind of stars. We collect information of 205 pulsating DA white dwarfs known by April 2017 from archives and make statistic analysis. A latest pulsating DA white dwarfs catalog is built.

Through the multi-site time series observations of two pulsating DA white dwarfs KUV 08368+4026 and WD 0246+326, we find their pulsating properties, identify the pulsation mode with period analysis, and finally constrain precisely the stellar parameters with theoretical models.

The pulsation of KUV 08368+4026 was discovered in 1996. We carried out observations for this target in 1999 and from 2009 to 2012 from either single site or multiple sites. Thirty frequencies are extracted from the data, including four triplets, two doublets, one single mode and further signals. The independent modes are identified as either $l=1$ or $l=2$ modes. Theoretical models are built and a best fit model is found with the effective temperature of $11825 \pm 25K$ and total mass of $0.692 \pm 0.02M_{\odot}$. The stellar rotation period is derived as 5.52 ± 0.02 days.

WD 0246+326 was announced as a DAV in 2001. We made time series photometric observations during 8 nights in 2014 with a bi-site observation campaign for this target. Eleven eigen modes are detected including 1 triplet, 2 doublets, and 4 single modes. With complementarity of frequencies provided in the literature, the modes are identified with either $l=1$ or $l=2$ modes. The

average period spacing of the $l=1$ modes suggests that WD 0246+326 may be a massive ZZ Ceti star. Preliminary theoretical analysis through stellar modeling construction implies the effective temperature of $11700 \pm 100K$ and stellar mass of $0.98 \pm 0.01M_{\odot}$.

Through the research of the thesis, we derived the pulsation properties of two DAVs, determining precisely the stellar parameters with asteroseismology, revealing a new massive DAV, which provide the research basis for exploring the internal structure and physic processes of the two target stars. Our study presents a new target for understanding the core crystallization of white dwarfs.

KEY WORDS: Pulsating White dwarfs, asteroseismology, ZZ Ceti stars, time series observations, Fourier analysis

目 录

摘 要	I
ABSTRACT	III
插图索引	VIII
表格索引	X
第 1 章 引言	1
1.1 白矮星	1
1.1.1 白矮星的结构	1
1.1.2 白矮星的形成	2
1.1.3 白矮星的演化	2
1.1.4 白矮星的分类	2
1.1.5 白矮星的研究意义	3
1.2 脉动白矮星	4
1.3 DA 型脉动白矮星	6
1.4 研究意义、现状和当前热点	9
1.4.1 寻找新个体的尝试	9
1.4.2 理论模型研究	10
1.4.3 全球望远镜联测	11
1.4.4 白矮星脉动性质随时间变化	11
1.4.5 DA 型脉动白矮星不稳定带纯洁性讨论	11
1.4.6 多星系统内的脉动白矮星	12
1.4.6.1 极低质量脉动白矮星 (ELMV) 和 p 模式振动	12
1.4.7 极端物理条件实验室和白矮星核心结晶	13
1.4.8 热 DA 型脉动白矮星 (Hot-DAV)	14
1.4.9 Outbursting 脉动白矮星	14
1.5 论文主要内容	14
第 2 章 DA 型脉动白矮星统计研究	16
2.1 研究意义	16
2.2 统计参数	16
2.3 研究背景	18
2.4 数据收集	19

2.4.1	SDSS 组	19
2.4.2	AFSDSS 组	21
2.4.3	BG04 组	21
2.4.4	多星系统内的 DA 型脉动白矮星	22
2.4.4.1	普通多星系统内的 DA 型脉动白矮星	22
2.4.4.2	极低质量 DA 型脉动白矮星 (ELM-DAV)	22
2.4.5	热 DA 型脉动白矮星	23
2.4.6	Outbursting 脉动白矮星	23
2.5	统计研究	23
2.5.1	计数分布	23
2.5.2	周期随有效温度的分布	24
2.5.3	振幅随有效温度的分布	26
2.5.4	划分亚组的可能性	27
2.6	不稳定带的重新确定	29
2.7	Gianninas 星表的分析	29
2.8	讨论	31
2.9	小结	34
第 3 章	DA 型脉动白矮星 KUV08368+4026 星震学研究	35
3.1	简介	35
3.2	观测和数据处理	35
3.3	周期分析	36
3.4	星震学分析	44
3.4.1	线性组合和谐频	44
3.4.2	模式证认	44
3.4.3	自转分裂	44
3.4.4	周期间隔	47
3.4.5	模式俘获	47
3.5	振幅变化	47
3.6	理论模型构建和拟合	50
3.7	小结	51

第 4 章 DA 型脉动白矮星 WD0246+326 星震学研究	55
4.1 简介	55
4.2 之前的研究情况	55
4.3 观测	56
4.4 频率分析	59
4.4.1 光变曲线的傅立叶分析	59
4.4.2 频率分析和初步模式证认	59
4.5 星震学分析	61
4.5.1 频率间隔和自转速度	61
4.5.2 平均周期间隔	63
4.6 理论模型限制	64
4.6.1 理论模型工具 WDEC	64
4.6.2 模型拟合	65
4.6.3 模式证认	66
4.7 关于恒星参数的讨论	66
4.8 小结	69
第 5 章 总结与展望	70
5.1 总结	70
5.2 未来工作展望	75
参考文献	76
附录 1 DA 型脉动白矮星星表	84
学术成果	103
致谢	104

插图索引

图 1	恒星脉动赫罗图	5
图 2	DA 型脉动白矮星平均周期间隔分布特点	8
图 3	ELMV 的在赫罗图上的位置	13
图 4	Mukdam 文中给出的 WMP 随有效温度的分布	19
图 5	DA 型脉动白矮星参数分布	24
图 6	三组数据的 WMP 分布	25
图 7	三组变星的脉动总功率分布	26
图 8	不同脉动总功率的 DAV 在赫罗图上的分布	27
图 9	不同功率的 DAV 随有效温度的分布	28
图 10	不同 WMP 的 DAV 在赫罗图上的分布	28
图 11	DA 型脉动白矮星的赫罗图	29
图 12	GIAN 组与本次工作的星表的有效温度和 $\text{Log } g$ 的差异	31
图 13	GIAN 组与本工作星表中公共样本恒星的有效温度和 $\text{Log } g$ 之差随有效温度 (上) 和 $\text{Log } g$ (下) 的分布	32
图 14	GIAN 组数据的 WMP 随有效温度的分布	33
图 15	KUV08368+4026 的图像	36
图 16	KUV 08368+4026 的光变曲线	37
图 17	五组数据光变曲线的傅立叶变换	38
图 18	三个 $l=1, m=0$ 频率的线性拟合	48
图 19	所有被辨认为 $l=1$ 模式周期的线性拟合残差按周期值的分布。	48
图 20	从数据组 3 给出的 25 个频率在三周之间的振幅变化	50
图 21	KUV 08369+4026 细网格的 χ^2 测试结果	52
图 22	最佳拟合模型的模式俘获分析	53
图 23	WD 0246+326 的 CCD 图像	56
图 24	WD 0246+326 在 2014 年 10 月的光变曲线	57
图 25	WD 0246+326 光变曲线的傅立叶功率谱	58
图 26	对 4 个被证认为 $l = 1$ 模式的周期的线性拟合	63
图 27	10 颗 DA 型脉动白矮星的 $l = 1$ 模式的周期间隔与其最佳模型质量的关系	64

图 28 WD 0246+326 细网格的 χ^2 测试结果67

表格索引

表 1	白矮星光谱分类	3
表 2	已知所有 DA 型脉动白矮星数据来源	20
表 3	KUV 08368+4026 观测日志	39
表 4	5 组数据的频率和振幅 (数据组 1)	40
表 5	5 组数据的频率列表 (数据组 2-3)	41
表 6	5 组数据的频率列表 (数据组 4-5)	42
表 7	5 组数据的振幅和频率的对比	43
表 8	KUV 08368+4026 模式证认	45
表 9	$l=1$ 的模式证认	46
表 10	$l=2$ 的模式证认	47
表 11	数据组 3 的三周的振幅表	49
表 12	KUV 08368+4026 粗网格参数	51
表 13	KUV 08368+4026 细网格参数	51
表 14	KUV 08368+4026 的最佳拟合模型的参数	52
表 15	Bognár 报告的 WD 0246+326 的脉动频率列表	55
表 16	WD 0246+326 在 2014 年 10 月的观测日志	58
表 17	光变曲线解析出的频率列表	59
表 18	WD 0246+326 的频率列表	60
表 19	WD 0246+326 的脉动模式证认	62
表 20	10 颗 DA 型脉动白矮星的质量与其 $l = 1$ 模式平均周期间隔	64
表 21	为寻找 WD 0246+326 最佳拟合模型所建立的粗网格和细网格的参数列表	65
表 22	WD 0246+326 的最佳拟合模型的参数	66
表 23	WD 246+326 的模式证认	68

第 1 章 引言

白矮星是银河系中绝大多数恒星演化的最终阶段。对于白矮星的研究可以对其前身星的质量、演化时标、元素构成等方面进行限制。由于白矮星在银盘银晕中均广泛存在，因此对它们的研究对了解银河系结构和演化有重要意义。星震学是目前探知恒星内部结构的唯一手段，因此对脉动白矮星的星震学研究对于恒星和银河系的研究有重要的学术价值。

1.1 白矮星

白矮星是具有电子简并核的星，其内部没有核反应，颜色上呈现蓝白色。这类星的质量较低（绝大部分分布于 $0.15 \sim 1.36M_{\odot}$ ，平均质量约为 $0.593 \pm 0.016M_{\odot}$ ^[1]），光度较低（典型值为 $10^{-2} \sim 10^{-3}L_{\odot}$ ^[2]），半径较小（典型值为 $0.008 \sim 0.02R_{\odot}$ ^[3]），密度很大。

1.1.1 白矮星的结构

白矮星是电子简并星。电子简并意为其内部的电子不受原子核束缚而具有更高的能量状态。这样形成的自由电子气体压力与白矮星本身引力相抗衡，是白矮星维持整体流体静力学平衡和结构稳定的基础。然而电子的速度不能超过光速，即存在电子简并压力的上限，造成白矮星的质量存在一个上限。如果白矮星的质量超过这个上限，则白矮星的电子简并压力不足以抵抗引力，将会发生坍塌，从而使白矮星内部温度迅速升高达到碳氧燃烧条件，发生急剧热核反应，短时间内放出大量能量形成 Ia 型超新星。白矮星质量上限由 Chandrasekhar 利用电子简并的物态方程计算得出，即 Chandrasekhar 极限，对碳氧核白矮星这个上限大约为 $1.43M_{\odot}$ ^[4,5]。同时，Chandrasekhar 也得到了著名的白矮星质量-半径关系，即白矮星质量越大，半径越小。

白矮星的基本结构为内部碳氧核和外部大气。由于电子简并压与温度无关，因此白矮星的内核半径与温度无关，仅与质量相关。由于简并电子气体的导热性极好，可以认为内部碳氧核是一个近似的等温核。在外部大气由于这类星半径小密度大，引力沉降会造成明显的元素分层状态，几乎所有的氢和氦都存在于白矮星外层，分别形成氢外壳和氦层。

1.1.2 白矮星的形成

白矮星主要是由中小质量恒星在氢燃烧结束后经由内核简并塌缩形成，其内部化学组成由前身星的不同质量决定了氢燃烧结束后内部金属元素是否达到燃烧条件而有所不同。

(1) 前身星质量小于 1 个太阳质量

这类星的质量很小，在主序演化结束后达不到氦燃烧阶段，因此会形成氦核电子简并白矮星^[6]。其中质量小于 0.5 太阳质量的前身星，其恒星演化时标太长，超过目前宇宙年龄，理论上还不能以单星形式存在，但是可以在双星演化中出现。

(2) 前身星质量为 1.0-8 太阳质量

这类星的质量可以支持主序演化结束后的氦燃烧，因此最终会形成一个碳氧简并核，外面覆盖氦层和氢壳层。目前观测到的大部分白矮星属于这种类型。

(3) 前身星质量为 8 太阳质量以上

这类星在主序演化结束之后质量可以满足点燃碳点燃的条件，因此最后形成的白矮星中会含有更多种的金属成分，成为氧/氖/镁核白矮星^[7]。

1.1.3 白矮星的演化

已经形成的白矮星其内部不再有核反应，因此其演化过程就是白矮星不断冷却收缩最后无法被观测到的过程。对白矮星而言，其有效温度和光度直接相关，可以据此绘制出由光度的能量损失造成的白矮星冷却过程在赫罗图上的冷却轨迹。虽然可以通过白矮星内部原子核热能和白矮星温度和光度来估算白矮星大致冷却时标，但是白矮星的能量释放过程不止于此。可能对冷却过程造成影响的包括表面对流，外层大气的残留核反应、对流、引力塌缩等等。在白矮星刚形成之初，等离子中微子光度在能量损失过程中占了很大份额，甚至在某些情况下超过光子损失^[8,9]。

1.1.4 白矮星的分类

白矮星中的绝大部分约 80% 属于 DA 型^[1]。这种类型的白矮星最外层是纯氢大气，中间是一个氦层，内部为简并电子核。这类白矮星的温度范围极广，根据 McCook et al.(1999)^[10] 的结论，富氢白矮星的有效温度在 4500K-117000K 都有分布。因此，为了具体根据温度对 DA 型脉动白矮星进行划分，又在 DA 后面的用数字表示根据具体有效温度范围划定的分类。如 DA.5, DA1, DA1.5, DA2, DA2.5 等等直到 DA13。举例来说，其

表 1 白矮星光谱分类

光谱型	特征
DA	仅具有 Balmer 线, 无 He I 或金属线
DB	仅具有 He I 谱线, 无氢或金属线
DC	连续谱, 光谱任何部位都没有超过 5% 的谱线
DO	He II 线较强, 同时也存在 He I 和 H 线
DZ	只有金属线, 没有 H 和 He 谱线
DQ	具有碳原子或分子的谱线
P	观测到偏振的磁白矮星
H	没有观测到偏振的磁白矮星
X	特殊或不能分类
E	具有发射线
V	具有光变

中 DA2 的有效温度范围为 22400 到 28800K, DA2.5 的有效温度范围为 18327 到 22400K 等等。DB 型白矮星的表面为氦大气。这类白矮星约占白矮星总数的 20%, 有效温度一般在 22000-30000K。这类白矮星同样可以在 DB 符号后加上数字表示温度范围。温度更高约 45000K 以上的白矮星, 其大气中氦被电离, 而仅有少量中性氦和氢线, 被称为 DO 型。此外, 还有数量更少如仅有金属谱线的 DZ, 光谱中富碳的 DQ 等等。目前白矮星依其光谱特征的主要分类列于表1^[10]。

表中所列出的为基本分类, 实际工作中还经常遇到它们的混合型如混合大气的 DAB, DAO, DAZ, DAmag 等^[11] 或是由其他角度分类的如 DA+dM^[11], DA+MS^[12] 双星等等。

1.1.5 白矮星的研究意义

作为中小质量恒星演化的最终阶段, 白矮星的研究可以为其前身星的演化提供信息。利用星团的观测可以对白矮星前身星的质量上限做出估计, 由于模型算法不同而结论有所差异。现在一般认为这个上限为 5-9 M_{\odot} 。甚至有研究认为大质量白矮星的前身星质量上限可达 10.5 M_{\odot} ^[13]。由此带来的一个结论是银河系中 98% 的恒星都会以白矮星作为演化终点, 太阳也是其中之一。由白矮星前身星质量上限带来的另一个结论是, 对于较大质量 (大于 2 M_{\odot}) 的恒星, 在演化的最终阶段大部分物质抛射回星际之间而不是留存于残余的白矮星内。这样的物质回收过程的影响有待研究。同时, 目前对于主序阶段之后、白矮星阶段之前的恒星演化过程中的能量质量损失过程的研究也仍在进行。恒星依其前身星情况的不同会经历复杂的演化过程, 最后形成化学元素丰度迥异的白矮星。因此白矮星的观测和研究, 对于这些过程的理论和模型有重要的印证和限制作用。

Ia 型超新星是宇宙学研究使用的标准烛光之一，而白矮星是 Ia 型超新星的前身天体，因此白矮星的研究对于宇宙学也很有意义。白矮星的结构、元素构成、动力学时标、核结晶、能量损失过程等对于超新星爆发的过程的理解具有很大帮助。白矮星在星系中的广泛存在，使它的光度成为测量星团等系统的距离的一个指针。同时由于它们是宇宙中可以直接观测到的最古老的天体之一，且又分布广泛，使白矮星成为星团星系年龄的一个指针。尤其是对于银河系的银盘银晕各部分存在的球状星团的年龄限制，对于银河系各结构的形成时间和演化过程的研究也有十分重要的作用^[14]。

白矮星具有重要的研究意义，脉动白矮星和星震学则为白矮星的研究提供了重要的突破口和手段。

1.2 脉动白矮星

天文学研究不同于一般的物理学研究，无法对研究目标展开实验，只能被动获取信息。对于非脉动恒星而言，光谱和测光观测仅可以得到来自最外层的大气的信息，内容十分有限。光谱观测可以获得的恒星参数包括大气元素成分、光谱型、有效温度、光度，并由谱线分析得到表面重力加速度和质量等，而星震学则是一个可以反映恒星内部结构信息的工具。对于脉动变星而言，由于不同的模式到达恒星内部不同深度，由此产生的光度变化就包含了恒星内部结构不同深度的有效信息。星震学正是利用时序测光得到恒星的脉动频率和振幅，进而对恒星内部结构进行分析。

通过对脉动信息的分析可以直接获取一些恒星参数，并可以通过构建理论模型的方法探测恒星内部结构。这种方法在利用时序测光活变星脉动信息的前提下，通过理论工具构建恒星模型，计算其本征频率，再将观测频率与理论模型频率进行对比，选择出最符合的模型。这个模型可以认为是反映了白矮星内部的真实情况，由此可以对恒星参数进行进一步的限制，得到更加精确的恒星有效温度、光度、表面重力加速度、质量、元素丰度、内部结构包括不同深度的温度和元素丰度等。

脉动白矮星是白矮星中具有光度变化的种类，是利用星震学探测白矮星内部结构的重要突破口，而且作为白矮星相对简单的内部结构也为理论模型的建立和探索提供了方便。图11展示了脉动变星在赫罗图上的位置，从中可以看到脉动白矮星不稳定带。脉动白矮星依其温度和光谱特点主要分为以下几种：

(1) DAV

DA 型脉动白矮星即氢大气脉动白矮星，也称为 ZZ Ceti 型变星。第一颗 DA 型脉动白矮星 HL Tau 76 发现于 1968 年^[16]。1970 年第二颗这类变星 R548 被发现。这颗星又

名 ZZ Ceti, 之后成为了 DA 型脉动白矮星的原型星^[17,18]。这类变星的脉动周期一般在 100 到 1500 秒^[19], 有效温度为 10850-12270K^[20]。DA 型脉动白矮星目前是所有脉动白矮星中发现数量最多的。按照本文的总结, 截止 2017 年 4 月, 已知的数量为 205 颗。

(2) DBV

第一颗 DB 型脉动白矮星 GD358 发现于 1985 年^[21], 而在此之前它们的存在已被

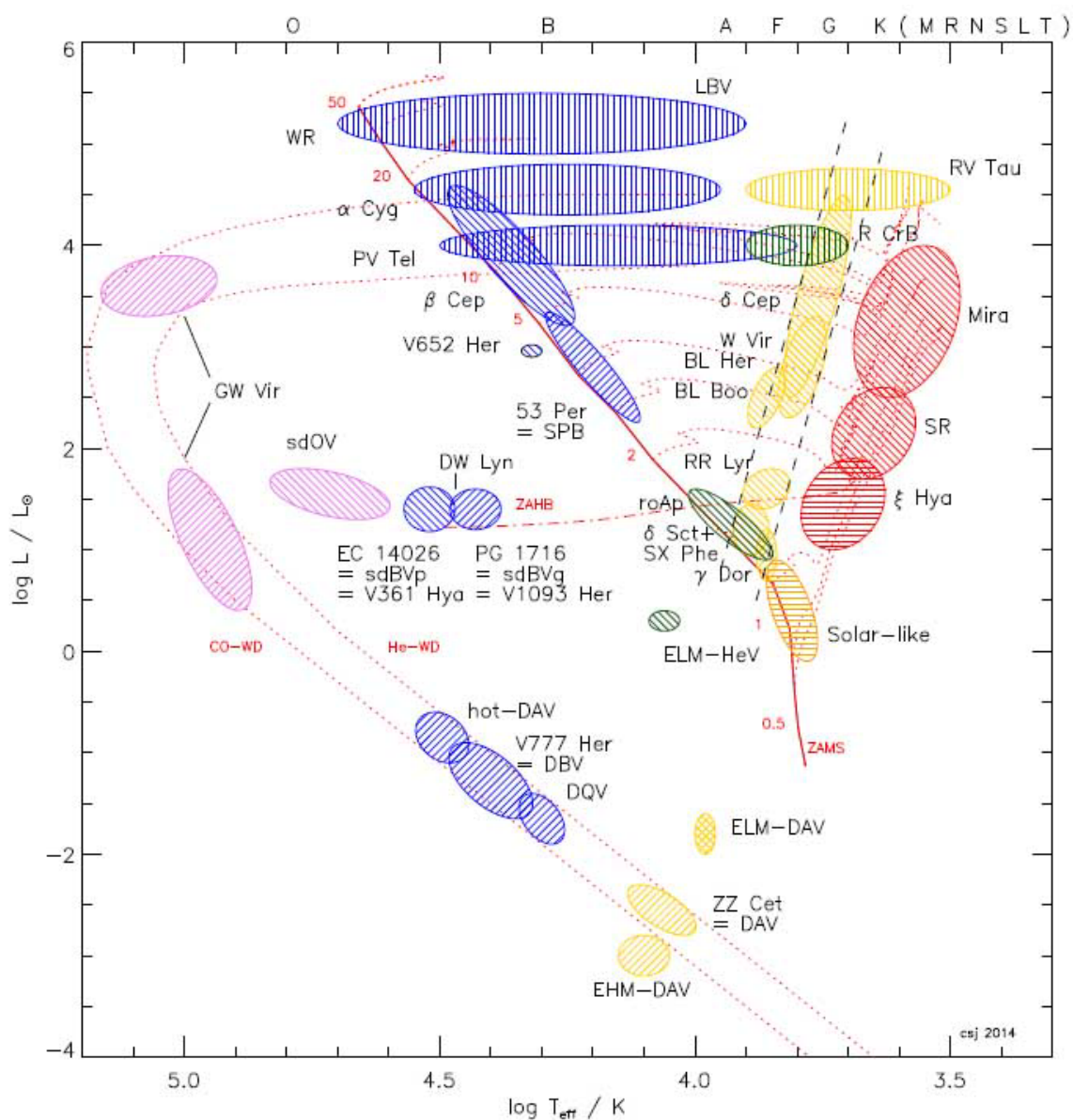


图 1 恒星脉动赫罗图, 请注意脉动白矮星的不稳定带^[15]。

Winget et al. 通过理论计算预言^[22]。这类变星也被称为 V777 Her 型变星^[23]，通常具有氦大气，脉动周期一般为 100 到 1000 秒^[23]，脉动不稳定带范围为 22000-29000 K^[24]。

(3) DOV

DO 型脉动白矮星的原型星 PG 1159-035 (又名 GW Vir) 的光变发现于 1985 年，因此这类星也被称为 PG 1159 型变星或 GW Vir 型变星。这类变星如果处在行星状星云的核中则被称为 PNNV (planetary nebula nucleus variable)。这两种变星曾经被归类为两类脉动白矮星，现在则合称为 GW Vir 型变星。这类变星的脉动周期为 300-1000 秒^[19]，有效温度在 75000K 以上^[25]。这类变星在赫罗图上的位置位于恒星演化序列上的渐进巨星分支之后白矮星之前。

(4) DQV

光谱型为 DQ (即表面为碳) 的脉动白矮星，其有效温度略低于 DBV。第一颗这类变星 SDSS J142625.71+575218.3 发现于 2008 年^[26]。

1.3 DA 型脉动白矮星

DA 型脉动白矮星即具有氢大气的脉动白矮星。只要脉动白矮星大气光谱特征符合仅具有氢线而不具有其他谱线的特征，即使其有效温度超出 A 型星的范围，也归入这一类型。

由于 DA 型脉动白矮星具有纯净的不稳定带，即所有有效温度落于脉动不稳定带的白矮星均具有脉动性质，说明这类白矮星的脉动是其演化的一个必经阶段而非具有其他恒星参数上的特质。因此 DA 型脉动白矮星可以作为 DA 型白矮星结构样本的代表，通过星震学进行详细研究。

对脉动白矮星的时序测光观测后，利用星震学进行频率分析可以得到以下几种参数：

(1) 脉动模式证认

恒星的自转会使得特定模式的振动频率 $\omega_{l,n}$ 分裂为 $2l+1$ 个频率，其频率公式为

$$\sigma_{k,l,m} = \sigma_{k,l} + m \times (1 - C_{k,l})\Omega \quad (1-1)$$

其中 $C_{k,l} = 1/(l+1)$ ， Ω 为自转角速度。由于振动所满足的球谐函数的特点，对白矮星而言可以观测到的频率大多属于 $l=1$ 和 $l=2$ 的模式。由以上公式可知， $l=2$ 模式的自转分裂频率间隔为 $l=1$ 模式的间隔的 1.67 倍。因此如果在观测中发现了频率的多重结

构，就可以由分裂的数量和分裂间隔值综合考虑，辨认出模式的 l 值和分裂频率的 m 值。

(2) 自转周期

由辨认出 l 值的模式的自转分裂的频率间隔，可以得到恒星自转周期，其公式为

$$P_{rot} = \frac{2\pi}{\Omega} \quad (1-2)$$

(3) 恒星总质量

对于 g 模式振动有如下渐进关系

$$P_{l,k} \approx \frac{2\pi^2 k}{\sqrt{l(l+1)}} \left(\int_0^R \frac{N}{r} dr \right)^{-1} \quad (1-3)$$

其中 N 为 Brunt-Väisälä 频率， $P_{l,k}$ 为对特定球谐函数 l 、 k 的模式的振动周期，对于相同 l ，相邻 k 的模式，平均周期间隔为

$$\langle \Delta P_l \rangle \propto \left(\int_0^R \frac{N}{r} dr \right)^{-1} \propto M_*^{-1} \quad (1-4)$$

由此，在判定模式的 l 值的基础上，可以通过同一 l 值不同 n 值的模式的周期间隔来估算白矮星的总质量。

实际上，根据恒星脉动理论和理论模型在一定参数范围内的模拟结果，脉动白矮星的平均周期间隔与多项恒星基本参数有关^[27]。本人使用理论模型工具在一定有效温度、总质量和氢壳层质量的参数范围内遍历了 DA 型脉动白矮星的模型，计算了每个模型的 $l=1$ 模式的平均周期间隔，并绘于图2上，以说明其变化趋势。从图中可以看出平均周期间隔随白矮星的质量增大而减小，随温度升高而减少，随氢壳层质量的增加而减少。虽然受到诸多参数的影响，平均周期间隔在一定条件下仍然是估算脉动白矮星质量的一个重要参量，在第四章的工作中我们就实际应用到这种分析。

此外，由渐进关系可得知 $l=1$ 模式与 $l=2$ 模式的平均周期间隔之比近似为 $\sqrt{3}$ 。在实际分析中可以此为依据，结合自转分裂情况综合考虑，对脉动模式球谐函数的参数进行判定。

(4) 俘获模式

如果白矮星的化学组成丰度均匀，则相同 l 值、相邻 k 值的频率之周期间隔应该与 $\langle \Delta P_l \rangle$ 非常接近。然而由于恒星内部的元素分层会形成分子量梯度，使得 N 值不连续，

造成对特定层的 ΔP_l 与平均值有较大的偏差，即模式俘获。具体体现为该模式的周期与平均周期间隔预计的周期的残差，与相邻 k 值的周期残差相比，呈现一个极小。模式俘获可以用于估算白矮星内部各壳层的位置。

(5) 磁场

白矮星的磁场会造成自转分裂的频率移动。但是，与自转分裂的向频率谱的两侧分裂

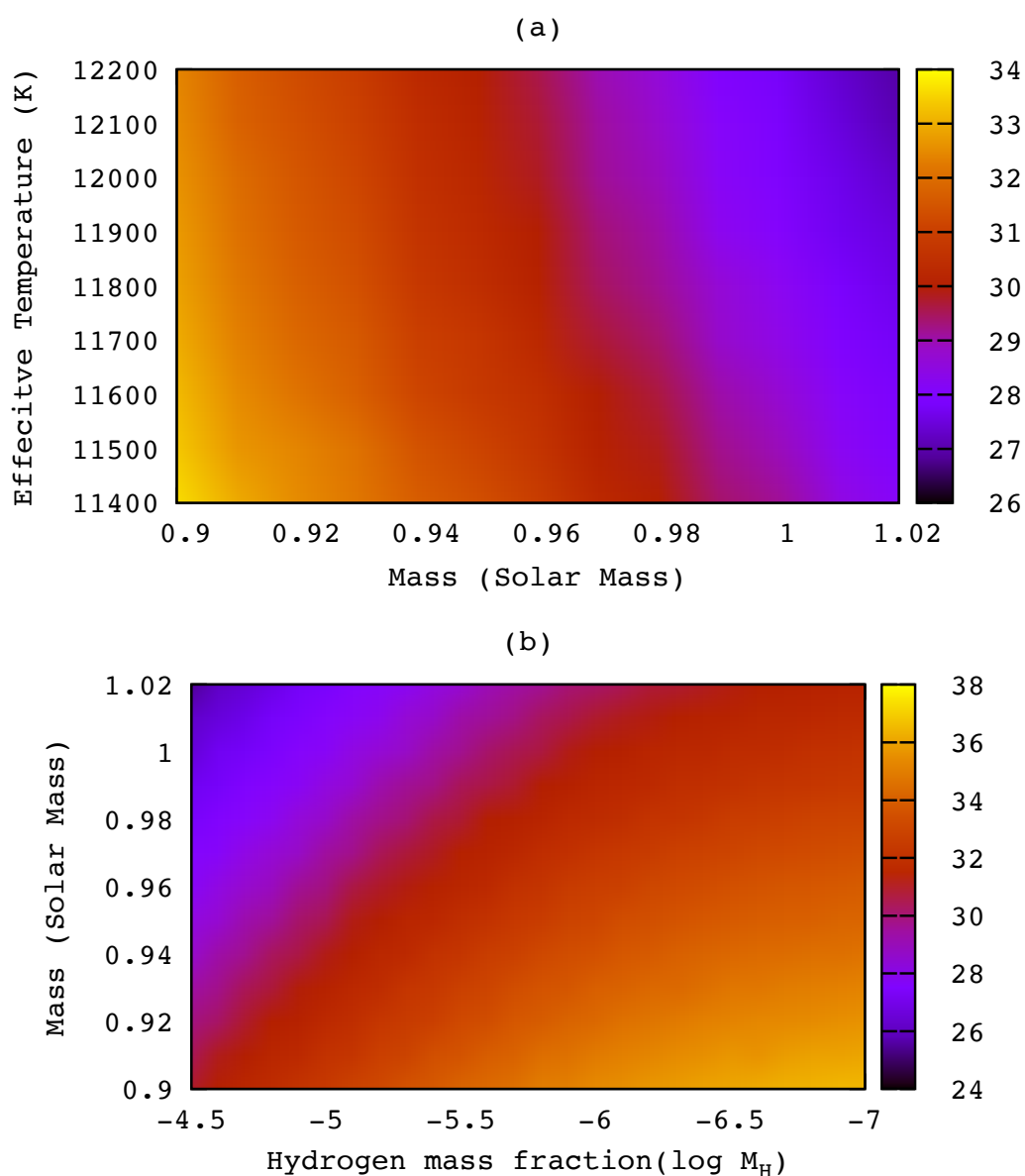


图2 DA 型脉动白矮星平均周期间隔分布特点。每张图的右侧灰度为 $l=1$ 模式的平均周期间隔，(a) 为固定氢壳层质量为 $10^{-5.1}$ 的平均周期间隔分布，(b) 为固定有效温度为 11700K 的平均周期间隔分布。

不同，磁场造成的分裂会导致模式的频率向相同方向移动。因此最后观测到的本征模式的 $m = \pm 1$ 两个分裂频率发生频率间隔不相等的现象。我们可以依据观测到的自转分裂不等间隔，推测白矮星磁场的强度^[28]。

(6) 较差自转

由于脉动白矮星的不同频率到达白矮星内部不同深度，球谐函数参数不同的模式在自转分裂中如果表现出不同分裂间隔，有可能反映了恒星内部不同深度的自转速度并不相同，即存在较差自转。

(7) 周期变化率

演化导致的周期变化率可以表示为

$$\frac{\dot{P}}{P} \approx -\frac{1}{2} \frac{\dot{T}_m}{T_m} + \frac{\dot{R}}{R} \quad (1-5)$$

其中 T_m 为白矮星中心温度。理论上白矮星的周期变化率可以通过在不同时间直接测量的振动频率差计算而得，也可以通过 $O-C$ 方法测得。如果能测定脉动白矮星的周期变化率，可以限制其在演化中的阶段，进而得到恒星年龄。

除了演化以外，脉动白矮星的周期变化还与白矮星的自行和如果处于双星系统内的轨道光时效应有关。

以上是理想情况下从脉动变星频率谱中可以由星震学直接进行的分析。在实际研究过程中，对 DA 型白矮星进行时序观测获得的频率谱受到观测条件限制，往往并不完美。例如，经常存在自转分裂的频率缺失，造成模式认证困难；连续 k 值的模式缺失，造成无法评估俘获模式等等。在实际研究过程中，甚至出现恒星的自转分裂造成的频率间隔大于不同 k 值模式之间的频率间隔的情况。因此在星震学研究中，模式认证是非常重要的也往往是难度很大的一个环节。

1.4 研究意义、现状和当前热点

针对 DA 型脉动白矮星的研究，主要有以下几个研究方式和讨论热点。

1.4.1 寻找新个体的尝试

这类工作主要由光谱或多色测光巡天项目给出的恒星参数，找出恒星参数落于脉动不稳定带内部或附近的个体，作为这类脉动白矮星的候选体，再通过时序测光确定其是否

具有脉动性质，以期发现新的脉动成员星。这种观测一般在选出候选体后，对目标进行时长为数小时的观测。其光变曲线经傅立叶变换，如果有显著的信号即可确定脉动性质的发现，也可由这种工作发现新类型的脉动白矮星。

2004 年之前，寻找新的脉动白矮星的工作主要是偶然发现，或者基于多色测光的巡天工作寻找候选体，参见 Vauclair et al. (1997)^[29]。由于观测和数据处理条件问题，在 2003 年之前，共发现 DA 型脉动白矮星不到 50 颗，多为一次报告 1-2 颗新个体，且大部分新发现个体的光度和脉动振幅较大。

2003 年后，SDSS 数字巡天项目陆续释放了大量光谱巡天数据^[30]，为这类工作提供了很好的条件。研究者们从释放的星表中找到了众多的脉动白矮星候选体，经观测研究报告了一大批新的 DA 型脉动白矮星的发现，参见 Mullally et al. (2005)^[31]，Castanheira et al. (2006)^[32] 等等。这部分 DA 型脉动白矮星的数量较多，但是大部分光度较低。

2010 年后，在 Kepler 项目^[33]中也发现了新的 DA 型脉动白矮星^[34]。近年来，LAMOST 巡天中，又有数量众多的恒星光谱数据被不断获得和释放^[35]，这对发现更多 DA 型脉动白矮星非常有利。

1.4.2 理论模型研究

利用理论模型工具可以对这类变星的脉动性质进行研究。目前使用较多的模型工具主要有 Toulouse 白矮星模型^[36]，WDEC 模型^[37,38]，恒星演化程序 MESA^[39] 等等。而其中又有两种侧重不同的工作。

(1) 对特定 DA 型脉动白矮星进行专门观测研究

首先，对已知具有脉动性质的 DA 型脉动白矮星，进行长时间或多站或两者皆有的时序测光，获得变星分辨率较高的频率谱，再对频率谱中表现出来的自转分裂、周期间隔等性质进行分析，辨认出其球谐函数参数。从而获取关于变星自转、磁场、质量等信息；然后基于分析所得出的球谐函数，使用理论模型进行拟合比对，得到与变星脉动性质符合最佳的模型，并由模型的参数对变星参数进行精确限定。最后，对结果进行分析讨论。目前经过上述过程研究的 DA 型脉动白矮星约有十几颗。本论文后面所做的针对两颗 DA 型脉动白矮星的观测和理论模型研究正属于此种类型。

(2) 对已知频率的白矮星基于理论模型限定其恒星参数。

这类工作往往一次对大量的 DA 型脉动白矮星进行研究。在这种研究过程中，用于与理论模型进行对比的变星脉动参数，多数情况下仅是变星脉动性质被报告时所发现的

少量频率。由于这种情况下对目标进行的观测时间较短通常只有数小时，频率分辨率很差，只有数个频率报告且很少观测到自转分裂，因此脉动模式分析无法进行。基于这些数据进行的理论模型工作，只能先利用光谱给出的恒星参数限定参与拟合的模型的恒星参数范围，再由拟合从限制过的小范围中选出最佳拟合模型，才能更进一步限定恒星参数。由于观测到的频率的球谐函数参数完全无法确定，通常只能用观测频率与计算出的全部 $l=1$ 和 $l=2$ 的频率进行对比，因此一般认为其可靠性不如针对单一目标经过长时间多站观测进行的星震学分析。这类工作参见 Romero et al. (2012)^[40]。

以上研究尤其是对单一目标进行长时间多站测光观测，可以对 DA 型脉动白矮星的恒星参数和内部结构作出较为精确的限定，而进一步的研究则可获知其前身星和演化轨迹情况，对于恒星演化理论也具有检验作用。

1.4.3 全球望远镜联测

全球望远镜 (Whole Earth Telescope, 缩写为 WET)^[41] 始于 1990 年，是一个利用全球望远镜主要针对脉动白矮星的联测计划。这个项目通常每次在为期几十天的观测周期中，利用全球二十台左右口径在 1-2 米的望远镜，对数个目标星进行集中观测。WET 发展至今 27 年，已对数十颗脉动白矮星和其他脉动变星进行了联测，是一个对单一脉动白矮星进行长时间深入观测的非常有力的研究项目。^[42-50]

1.4.4 白矮星脉动性质随时间变化

虽然早期研究者普遍认为 DA 型脉动白矮星的振幅和频率都非常稳定，而且有理论学者认为由于其特别稳定的特点，可以利用光时效应来寻找脉动白矮星周围的行星^[51] 和探测白矮星的自行^[14]，但是，近年来很多研究表明，许多 DA 型脉动白矮星的脉动振幅存在时标为年以至于周的显著变化^[52]。这种情况造成白矮星的脉动傅立叶谱在短时标内发生巨大变化，而 O-C 方法则难以应用。唯有通过长时间观测，方能精确探测其频率及其稳定性，因此针对短时间内的频率变化情况探测难度极大。

1.4.5 DA 型脉动白矮星不稳定带纯洁性讨论

针对 DA 型脉动白矮星不稳定带是否纯净的讨论曾经进行过很长时间。在仅发现二十颗左右 DA 型脉动白矮星的时候，并没有发现有非脉动白矮星存在于脉动不稳定带里^[53]。随着 SDSS 数字巡天数据的释放，开始陆续发现在不稳定带内的非脉动白矮星^[51]。然而，也有人认为出现这种情况的很大一部分原因，是 SDSS 数字巡天的恒星参数误差，甚至与

其他测定恒星参数方法存在系统差^[54]。很明显，DA 型脉动白矮星的不稳定带的纯净性的确定很大程度上取决于恒星参数的准确度，尤其是其误差大小涉及了处于脉动不稳定带边缘的个体是否落于脉动不稳定带内部的判定，以及时序测光观测的灵敏度（涉及是否具有脉动性质的判定）。随着测光手段的发展，也有之前被认为是落在脉动不稳定带内的非脉动白矮星被证实具有脉动性质^[20]。目前一般认为 DA 型脉动白矮星确实具有纯净的不稳定带。

1.4.6 多星系统内的脉动白矮星

最早在双星系统内发现的脉动白矮星报告于 2006 年^[55]，它以及后面发现的处于双星系统内的 DA 型脉动白矮星都是在 SDSS 巡天项目中发现的。相比内部不包含脉动变星的双星和不处于双星系统内的脉动白矮星，这种类型的系统都能提供更多的信息来限制恒星参数。

此外，由于双星系统内的恒星的演化不同于单星，在这种系统中可以发现一些特殊的脉动白矮星例如极低质量的脉动白矮星 (ELMV)。

1.4.6.1 极低质量脉动白矮星 (ELMV) 和 p 模式振动

ELMV(Extremely low mass variable) 是一类具有极低质量的简并氦核脉动白矮星。这类白矮星都处于双星或多星系统内，其 g 模式脉动周期多为数千秒量级。因为这类星的自然演化时标超过了当前的宇宙年龄，理论上不可能以单星形式被发现^[56]。第一颗氦大气 ELMV 是在 2012 年由 Hermes et al. 发现的 SDSS J184037.78+642312.3^[57]，其质量为 $0.17M_{\odot}$ 。在此之后研究者们进行了 ELM 的搜寻^[58,59]，陆续发现了 6 颗氦大气 ELMV^[60-63]，其中甚至包括一颗与毫秒脉冲星为伴星的 ELMV^[63]。从第二颗 ELMV 的发现开始，研究者报告可能发现了白矮星 p 模式脉动^[60]，而在此之前探测到的白矮星脉动模式都为 g 模式，因对普通白矮星而言 p 模式脉动的周期仅为数秒，在目前的观测条件下无法探测。之前有在小质量脉动白矮星中存在可观测到的 p 模式脉动的理论预言，寻找其观测证据是白矮星星震学的课题之一^[14]。因此，在小质量脉动白矮星中发现 p 模式是一个很重要的进展。

2016 年前发现的 7 颗 ELMV 都具有氦大气，符合光谱型为 DA 的特点，因此当时一些研究者把 ELMV 也归纳为 DAV。然而 Gianninas et al.(2016)^[56] 报告了 3 颗氦氮混合大气的 ELMV 的发现，因此不能认为 ELMV 都属于 DA 型脉动白矮星，而仅能将之前发现的符合氦大气条件的 7 颗定义为 ELM-DAV。从赫罗图上的位置来看，这 7 颗 ELM-DAV

位于传统 DA 型脉动不稳定带沿着造父不稳定带向低质量高光度的方向延伸，Gianninas 等人新发现的 3 颗低质量混合大气的白矮星则位于这些低质量 DA 型脉动白矮星演化序列向高温方向的延伸，因此这些白矮星被称为 per-ELM 白矮星，图3展示了 ELMV 在赫罗图上的相对位置^[56]。在这些混合大气的 ELMV 中人们也发现了 p 模式脉动的存在。目前国际上针对 ELMV 的搜寻和研究正在如火如荼地进行中。

1.4.7 极端物理条件实验室和白矮星核心结晶

白矮星具有高温高密度电子简并态的特点，是地球上的物理实验室难以达到的物理状态。白矮星提供了极端物理条件，可以称为天上的实验室，而星震学则为这种类型的研究

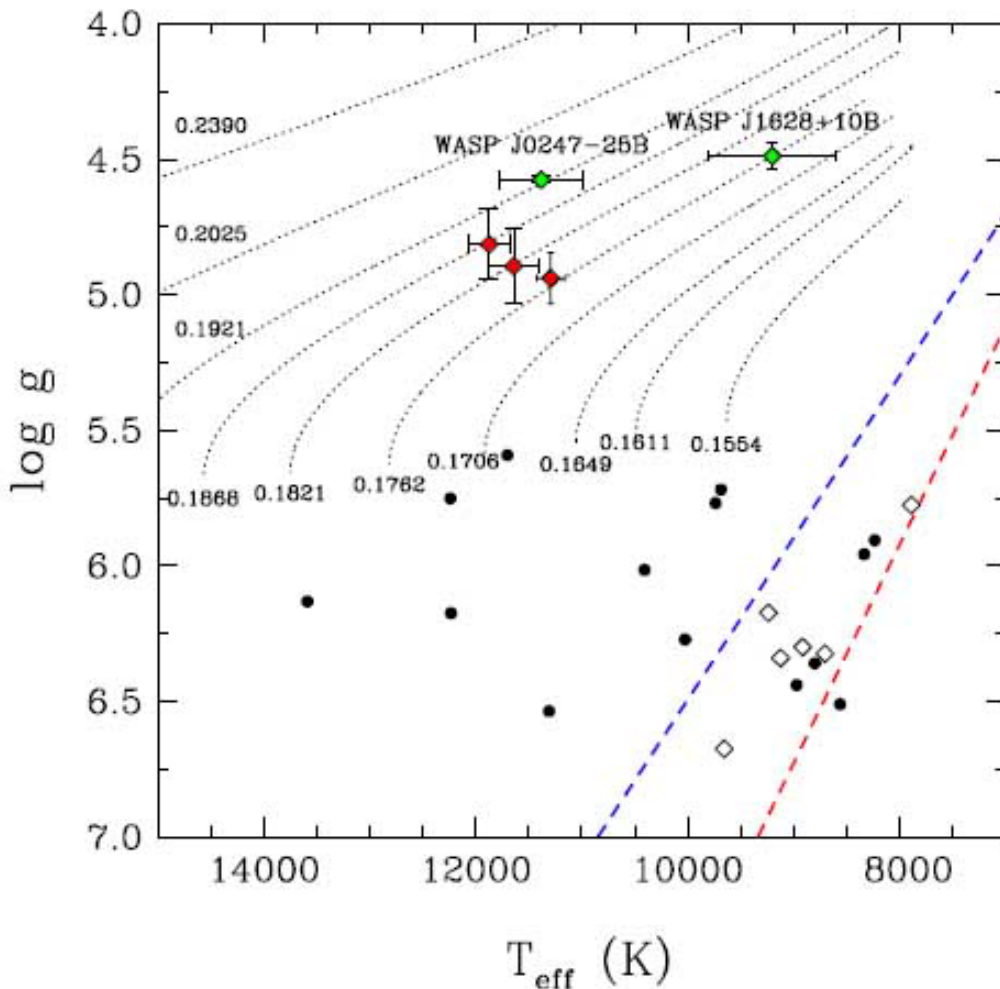


图3 ELMV 的在赫罗图上的位置。图中右下 6 个空心菱形为 6 颗 ELM-DAV，左上三个没有标明名称且带误差棒的为 Gianninas et al.(2016) 报告的 3 颗混合大气 ELMV，上方的两颗 WASP 则是 EL CVn 型系统里的两颗脉动变星。右下两条直虚线示意脉动不稳定带^[56]。

提供了便利。具体对于 DA 型脉动白矮星而言，一个典型的例子就是核结晶现象的发现和讨论。

多年来，研究者们由理论认为白矮星随冷却可能出现核结晶。对此比较有代表性的是关于 DA 型脉动白矮星 BMP 37093 的讨论。这颗星的脉动性质发现于 1992 年，其质量为 $1.1M_{\odot}$ ，是当时已知的最大质量 DA 型脉动白矮星。之后 Winget et al. 认为这颗星的内部已经出现了核结晶，自此众多研究者们对这颗星进行了多次光谱观测和时序测光观测包括 WET 联测等，并通过各种脉动分析和模型构建，得出了其核心已经发生结晶的结论并就其化学构成和结晶程度得到了不同的分析结果，进行了激烈的讨论^[44,64-69]。目前针对这颗星的研究仍在继续。由于白矮星的碳氧核结晶的结构和成分与金刚石非常类似，也有人称这颗星为所谓的“钻石星”，并在公众中引起了热烈的反响。

1.4.8 热 DA 型脉动白矮星 (Hot-DAV)

这类星最早被 Kurtz et al.^[70] 在 2013 年宣告发现。这类星的温度极高，为 30000K 左右，最早发现于白矮星演化序列中 DB 型脉动白矮星的蓝边缘之外的 DB 缺口中^[71]。因此，这类星与普通 DA 型脉动白矮星的脉动不稳定带的距离极远，其温度甚至高于 DB 型脉动白矮星的有效温度范围。但是，由于其具有氢大气，也被归类为 DA 型脉动白矮星。

1.4.9 Outbursting 脉动白矮星

Outbursting 脉动白矮星 (Outbursting DA White Dwarf Pulsators) 是近年新发现的一类 DA 型脉动白矮星^[72]。这类星的特点，是在普通 DA 型脉动白矮星的脉动特点基础上存在间隔数天至数十天的光度突然增量跳变，持续数小时。由于这类光变是时隔几天才突然发生的，在短时间时序观测中可能无法发现，因此也有先前被数小时观测报告为普通 DA 型脉动白矮星的个体，经长时间观测被发现为 Outbursting 脉动白矮星^[73]。这类变星目前共发现 6 颗^[74]。

1.5 论文主要内容

本文主要对 DA 型脉动白矮星进行研究。首先，对现有的 DA 型脉动白矮星进行调研，从文献中收集已知 DA 型脉动白矮星的恒星参数以及脉动性质，进行统计分析。最后我们共收集了 205 颗 DA 型脉动白矮星的数据，并建立了一个星表。对其中的普通个体（非处于多星系统内，无特殊光变，不属于热 DA 型脉动白矮星）的恒星参数和脉动性质进行统计研究，并得出了一些结论。我们确认了具有长周期的 DA 型脉动白矮星在赫罗图

上的位置靠近不稳定带红边缘而短周期的 DA 型脉动白矮星则靠近蓝边缘的结论，并且证实了不稳定带蓝边缘的脉动功率随温度降低的逐渐升高，而在红边缘则提前下降的现象。后针对新发表的 Gianninas 星表进行讨论。

之后，我们选取了两颗较亮的 DA 型脉动白矮星分别进行了观测研究。其中 KUV08368+4026 的脉动性质发现于 1997 年。我们获得了 1999 年的观测数据，并在 2009-2012 年的 4 年间对这颗星进行了数次观测，包括国际联测。基于大量观测数据，得到了 6 组多重结构，并证认它们为 $l=1$ 和 $l=2$ 频率。最后，由理论模型工作给出了目前关于这颗星的最佳拟合模型。我们在观测中还发现了这颗星具有脉动振幅在年和月的时标上发生变化的现象。

WD0246+326 的脉动性质发现于 2001 年。我们于 2014 年对该星进行了双站国际联测，并结合文献中的数据，获得了一个三重频率结构，三个双重频率结构和若干单频率模式。经由频率分裂和周期间隔的多重证认，我们将它们证认为 $l=1$ 和 $l=2$ 的模式，并得出了其 $l=1$ 模式周期间隔较短的结论。进一步研究表明，WD 0246+326 很可能是一颗大质量 DA 型脉动白矮星。我们由理论模型工具给出了其最佳拟合模型。

本章为 DA 型脉动白矮星相关背景的综述，第二章介绍关于 DA 型脉动白矮星的统计分析工作，第三章阐述关于 KUV 08368+4026 的观测及星震学分析工作，第四章则是关于 WD 0246+326 的观测及分析研究，最后在第五章对全文进行总结和展望。

第 2 章 DA 型脉动白矮星统计研究

2.1 研究意义

DA 型脉动白矮星是一类具有纯净不稳定带的脉动变星。对已发现的个体进行信息收集, 并进行恒星参数和脉动性质的统计研究, 有助于对这类变星的观测条件、特征、理论研究现状的深入理解。建立 DA 型脉动白矮星星表, 也为此后对单一目标星进行观测和模型研究的目标选取提供了便利。

2.2 统计参数

针对单个白矮星, 我们从文献中对如下信息进行收集和整理

(1) 名称

目前广泛使用的是一个 WD 星表^① 编号, 从 SDSS 项目中发现的个体则大多使用 SDSS 编号。即使同一颗星在不同星表里也常常有不同的命名, 如 DA 型脉动白矮星的原型星 ZZ Ceti, 在不同星表内出现的编号包括: 2MASS J01361358-1120327, PLX 268, BPS CS 22180-0018, CSI-11-01337, Ci 20 111, EGGR 10, G 272-52, G 271-106, GEN# +9.80271106, LAWD 9, LTT 873, NLTT 5358, PHL 1062, Ross 548, UBV 1659, USNO 298, V* ZZ Cet, WD 0133-11, WD 0133-116, PLX 332.01, PLX 268.00, USNO-B1.0 0786-00015517^②。在 DA 型脉动白矮星的研究中, 通常使用一两个最常用的名称指代, 如 ZZ Ceti 本身作为文献的研究目标时最常用的名称是 R548。

(2) 位置

赤经和赤纬, 在星表中可用于观测可能性的分析, 方便后续研究根据适宜观测季节和望远镜条件, 选择观测目标。

(3) 亮度

^① <http://www.astronomy.villanova.edu/WDCatalog/index.html>

^② http://www.montrealwhitedwarfdatabase.org/WDs/V*%20ZZ%20Cet/V*%20ZZ%20Cet.html

一般给出 **B** 或者 **V** 星等，有助于结合观测条件对观测目标进行选取。

(4) 有效温度

白矮星的基本恒星参数之一，体现白矮星的演化进度。

(5) 表面重力加速度

白矮星的基本恒星参数之一，体现白矮星的质量，而质量对于白矮星的演化轨迹和内部元素构成及分布都有极其重要的影响。

(6) 脉动振幅和周期

脉动白矮星脉动性质的重要部分。其中振幅目前对脉动白矮星广泛使用 **mma** 进行度量，其意义为千分之一光度。

(7) 加权平均周期 (Weighted Mean Period, WMP)

白矮星统计中体现白矮星总体脉动周期的参数。使用每个脉动周期的振幅作为对应周期的权重，公式为

$$WMP = \frac{\sum_i P_i A_i}{\sum_i A_i} \quad (2-1)$$

其中参数 P_i 是每颗星独立模式的周期值，而 A_i 是对应该独立模式的振幅。^[75]

(8) 脉动总功率 (Total Power)

体现白矮星总体脉动功率的参数，由所有脉动频率的频率值和振幅计算，公式为

$$Total\ Power = \sum_i A_i^2 F_i \quad (2-2)$$

其中而 A_i 是独立频率的振幅， F_i 则为频率值。

(9) 总功率平方根 (Square Root of Total Power)

是之前研究者用于表征恒星脉动功率的参数，公式为

$$Square\ Root\ of\ Total\ Power = \sqrt{\sum_i A_i^2} \quad (2-3)$$

而 A_i 是对应该独立频率的振幅。由于我们定义的新参数总功率包含了脉动频率的信息，在计算总功率的过程中是合理的。总功率比总功率平方根具有更明显的物理意义，因此在统计中我们使用总功率作为脉动功率的估计，而放弃使用总功率平方根。

(10) 脉动频率的个数

脉动频率的个数和线性组合之间的情况，对于 DA 型脉动白矮星是十分重要的参数和性质，以往的研究者也对此进行了讨论。但是，很明显这个参数受观测条件的影响过于巨大。我们认为，当前没有对 DA 型脉动白矮星的脉动频率个数进行统计的条件。

2.3 研究背景

第一章已经简要介绍了搜寻 DA 型脉动白矮星的历史。2006 年 Mukadam et al. 曾做过对 DA 型脉动白矮星的性质进行归纳和统计^[75]。其取样是基于被分为 SDSS 和 BG04 两组的约 80 颗 DA 型脉动白矮星。其中，由 SDSS 数字巡天发现并由其光谱确定恒星参数的 DA 型脉动白矮星被归为 SDSS 组，而在此之前发现的其他 DA 型脉动白矮星则被归为 BG04 组。同时，该工作为进行统计研究而定义了 WMP 和总功率平方根两个新的参数。他们得到了如下结论：

- (1) WMP 的增加随着有效温度的递减，呈现线性关系。图4为他们给出的两个参数的线性拟合结果。
- (2) 建议使用 WMP 作为 DAV 的温度标度，比光谱温度更加准确。
- (3) 观测到不稳定带蓝端的总功率平方根随有效温度的下降而上升，而在红边缘附近则随有效温度的下降而下降。
- (4) 对于不同温度的 DAV 所观测到的独立模式数量，热 DAV 比冷 DAV 平均多一个模式。

对于 WMP 和光谱温度的关系，他们的主要观点是，对于 DA 型脉动白矮星，由于光谱方法对温度的测量并不可靠，尤其是变星的表面温度在不断变化，更加大了准确测定温度的难度，而对其脉动周期及振幅的确定却有比较高的精度。由文章所提出的 WMP 与有效温度的关系，建议以 WMP 作为 DA 型脉动白矮星的温度标度。该工作给出的 WMP 与有效温度的关系如下：

$$\text{WMP}_{\text{SDSS}} = -0.835^{\pm 0.089} \times T_{\text{effSDSS}} + 10060^{\pm 1200} \quad (2-4)$$

$$\text{WMP}_{\text{BG04}} = -0.830^{\pm 0.079} \times T_{\text{effBG04}} + 10240^{\pm 920} \quad (2-5)$$

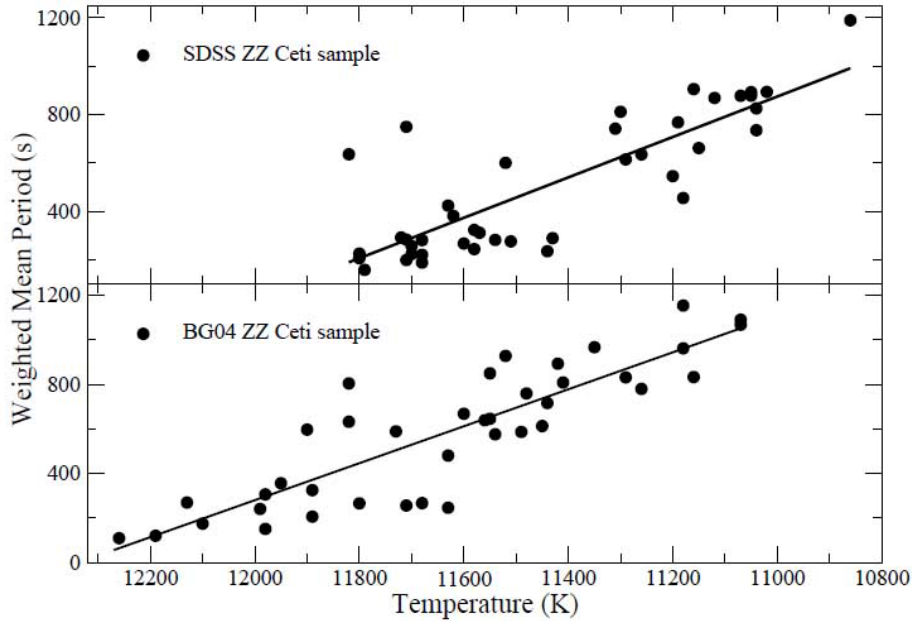


图 4 Mukdam 文中给出的 WMP 随有效温度的分布。

本文中，我们收集了新发现的 DA 型脉动白矮星的数据，并使用与 Mukadam et al. (2006) 类似的方式进行分析。并与其结果进行比较。

Mukadam et al. (2006) 中只利用独立频率被用来计算统计所用的参数。对于确定脉动总功率这样做是合理的，我们也使用相同的方法。

2.4 数据收集

我们从文献中收集数据，共得到了 205 颗 DA 型脉动白矮星的信息，并将结果简要归纳于表 2。其中除了 Mukadam et al. (2006) 中提到的 81 颗样本之外，我们补充了近年来新发现的样本，完整的星表请见附录。我们将这些样本分为以下几组：

2.4.1 SDSS 组

SDSS 组的成员与 Mukadam et al. (2006) 相同，值得一提的是 Mukadam et al. (2006) 中提到其中 5 颗被认为缺少可信的恒星参数。在这些星中，HS0951+1312 和 HS0952+1816 是从 Hamburg Quasar Survey 巡天得到，认为其误差较大。WD 1443+0134 和 WD 1524-0030 没有完整的光谱。WD 2350-0054 被认为比不稳定带温度低了 650K ^[51]。文中没有对这颗星具有异常性质的原因作出解释。这颗星的有效温度、脉动周期、脉动能量等各方面都与其他 DA 型脉动白矮星具有不同的性质。

表 2 已知所有 DA 型脉动白矮星数据来源

分组	总数	计数	数据来源
BG04	72	36	Mukadam et al. (2006) ^[75]
		1	Fontaine et al.(2001) ^[76]
		1	Gianninas et al.(2005) ^[77]
		2	Silvotti et al. (2005) ^[78]
		1	Hermes et al. (2011) ^[34]
		7-1*	Voss et al. (2006) ^[79]
		6-1**	Voss et al. (2007) ^[80]
		6**	Gianninas et al. (2006) ^[81]
		4	苏杰由 LAMOST 数据找到
		1	Greiss et al. (2014) ^[82]
	9	Greiss et al. (2016) ^[83]	
SDSS	46	41	Mukadam et al. (2006) ^[75]
		5***	Mukadam et al. (2006) ^[75]
AFSDSS	59	14	Kepler et al. (2005) ^[84]
		11	Castanheira et al. (2006) ^[32]
		7	Castanheira et al. (2007) ^[20]
		11	Castanheira et al. (2010) ^[85]
		6	Gianninas et al. (2015) ^[86]
		1	Hermes et al. (2013) ^[87]
		4	Curd et al. (2017) ^[88]
		5	Castanheira et al. (2013) ^[89]
多星系统	19	1	Gänsicke et al. (2006) ^[55]
		2	Mukadam et al. (2007) ^[90]
		1	Hermes et al. (2012) ^[57]
		2	Hermes et al. (2013) ^[60]
		2	Hermes et al. (2013) ^[61]
		7	Pyrzas et al. (2015) ^[12]
		2	Uthas et al. (2012) ^[91]
		1	Bell et al. (2015) ^[62]
		1	Kilic et al. (2015) ^[63]
Hot-DAVs	3	3	Kurtz et al. (2013) ^[70]
Outbursting	6	6	Bell et al. (2017) ^[74]
DAV 总数	205	205	

*: 其中一颗后被证实为一颗 outbursting 变星。

**：有一颗重复。

***: 文章中指出这 5 颗星的参数不可靠。

2.4.2 AFSDSS 组

在 Mukadam et al. (2006) 中提到在 SDSS 组之外有从 SDSS 巡天项目中发现的其他 DA 型脉动白矮星，但是由于恒星参数的算法不同无法与其他样本放在一起进行统计。因此除了按照 Mukadam et al. (2006) 中分的两类以外，我们将此后从 SDSS 项目中发现的 DA 型脉动白矮星归纳为 AFSDSS 组。其中包括

- (1) Castanheira et al. 在 2010 年从 SDSS 数据中发现 11 颗^[85]。
- (2) Castanheira et al. 在 2007 年发现 7 颗^[20]。
- (3) Castanheira et al. 在 2006 年发现 11 颗^[32]。
- (4) Kepler et al. 在 2005 年发现 14 颗^[84]。
- (5) Gianninas et al. 在 2015 年报告 6 颗^[86]。
- (6) Hermes et al. 报告发现一颗大质量的 DA 型脉动白矮星^[87]。
- (7) Curd et al. 在 2017 年报告 4 颗^[88]。
- (8) Castanheira et al. 在 2013 年报告 5 颗^[89]。

共计 59 颗。

2.4.3 BG04 组

Mukadam et al. (2006) 中被归类为 BG04 组，以及之后并非从 SDSS 数字巡天中发现的新 DA 型脉动白矮星被归为此类。

- (1) Mukadam et al. (2006) 中归类的 36 颗 DA 型脉动白矮星。
- (2) Mukadam et al. (2006) 之前被发现，但是并未被 Mukadam 纳入统计的两颗 DA 型脉动白矮星 WD 0246+326^[76] 和 WD 2148+539^[77]。
- (3) Silvotti et al. 在 2005 年报告两颗^[78]。
- (4) Hermes et al.^[34] 报告的第一颗从 Kepler 视场中发现的 DA 型脉动白矮星。
- (5) Greiss et al.^[82] 报告的第二颗从 Kepler 视场中发现的 DA 型脉动白矮星。

- (6) Greiss et al. 在 2016 年报告从 Kepler 视场中发现了 9 颗 DA 型脉动白矮星^[83]。
- (7) Gianninas et al.(2006) 报告的 6 颗 DA 型脉动白矮星^[81]。
- (8) Voss et al.(2007) 报告 6 颗新的 DA 型脉动白矮星^[80]，其中一颗与前一条的重复。
- (9) Voss et al.(2006) 报告 7 颗新的 DA 型脉动白矮星^[79]，其中一颗后被发现为 Outbursting 脉动白矮星。
- (10) 苏杰等人 2017 年报告从 LAMOST 光谱巡天的星表中搜寻候选体，找到 4 颗新的 DA 型脉动白矮星。其中包含两颗光谱温度显示超过 14000K 的个体，远远超过目前已知的 DA 型脉动白矮星的脉动不稳定带。出现这种情况的原因还需要继续研究。(这项研究成果的发表正在准备中。)

共计 72 颗。

2.4.4 多星系统内的 DA 型脉动白矮星

2.4.4.1 普通多星系统内的 DA 型脉动白矮星

- (1) Gänsicke et al. 在 2006 年报告第一颗以主序星为伴星的 DA 型脉动白矮星^[55]。
- (2) Mukadam et al. 在 2007 年报告 2 颗^[90]。
- (3) Uthas et al. 在 2012 年报告 2 颗^[91]
- (4) Pyrzas et al. 在 2014 年报告 7 颗^[12]

2.4.4.2 极低质量 DA 型脉动白矮星 (ELM-DAV)

- (1) Van Grootel et al. 在 2013 年报告第一颗 ELMV^[92]。
- (2) Hermes et al.(2013a) 报告第 2-3 颗 ELMV^[60]。
- (3) Hermes et al.(2013b) 报告第 4-5 颗 ELMV^[61]。
- (4) Bell et al. 在 2015 年报告第 6 颗 ELMV^[62]。
- (5) Kilic et al. 在 2015 年报告第 7 颗 ELMV。这颗星以一颗毫秒脉冲星为伴星^[63]。

两类共计 19 颗。

2.4.5 热 DA 型脉动白矮星

- (1) Kurtz et al. 报告 2 颗热的 DA 型脉动白矮星^[71]。
- (2) Kurtz et al. 报告第 3 颗热的 DA 型脉动白矮星，并与前两颗一道正式宣布为新的类型^[70]。

共计 3 颗。

2.4.6 Outbursting 脉动白矮星

- (1) Bell et al.(2015) 报告发现^[72] 第一颗 Outbursting 脉动白矮星。
- (2) Hermes et al. 在 2015 年将之前被证认为一颗普通 DA 型脉动白矮星的 WD 1149+057 报告为一颗 Outbursting 脉动白矮星^[73]。
- (3) Bell et al.(2016) 报告第 3-4 颗的发现^[93]。
- (4) Bell et al.(2017) 报告第 5-6 颗的发现^[74]。

共计 6 颗。

为了统计工作的合理性，我们仅对其中的单一普通 DA 型脉动白矮星进行统计，即 SDSS 组，BG04 组，AFSDSS 组。其余双星系统内的 DA 型脉动白矮星、热 DA 型脉动白矮星和 Outbursting 型脉动白矮星均不纳入统计。

2.5 统计研究

2.5.1 计数分布

图5显示 DA 型脉动白矮星对于 T_{eff} ， $\text{Log } g$ ，WMP 和总功率的计数分布。从图中可以看到如下特征：

- (1) 从上面两子图看出，大多数星的有效温度和表面重力加速度 $\text{Log } g$ 位于不稳定带的中间，而不稳定带边缘则数量较少，其中 $\text{Log } g$ 的分布接近高斯分布。
- (2) WMP 的分布显示出 DA 型脉动白矮星的周期在向 300s 和 800s 附近集中，在 500 秒附近则少有分布。由此可能可以进行子类的划分。
- (3) 总功率的分布图显示出变星的数目随能量变大而呈指数下降，可见大部分 DA 型脉动白矮星脉动能量较小，只有极小数量个体具有较大脉动能量。

2.5.2 周期随有效温度的分布

与 Mukadam et al. (2006) 一样，我们在图6中给出 3 组 DA 型脉动白矮星 WMP 相对于有效温度的分布图。

中间格所示 SDSS 组与 Mukadam et al. (2006) 完全一致。

BG04 组与之前相比包含了增加的 36 颗星。它与新增加的 AFSDSS 组的分布都呈现非常弥散的特点，几乎没有显示出令人信服的 WMP 与温度相关的特征。但是作为对比我们给出每一组进行线性拟合的结果及其相关系数。

$$\text{WMP}_{\text{BG04}} = -0.379^{\pm 0.062} \times T_{\text{effBG04}} + 5010^{\pm 718} \quad r = -0.59 \quad (2-6)$$

$$\text{WMP}_{\text{SDSS}} = -0.833^{\pm 0.089} \times T_{\text{effSDSS}} + 10033^{\pm 1014} \quad r = -0.83 \quad (2-7)$$

$$\text{WMP}_{\text{AFSDSS}} = -0.513^{\pm 0.121} \times T_{\text{effAFSDSS}} + 6413^{\pm 1392} \quad r = -0.52 \quad (2-8)$$

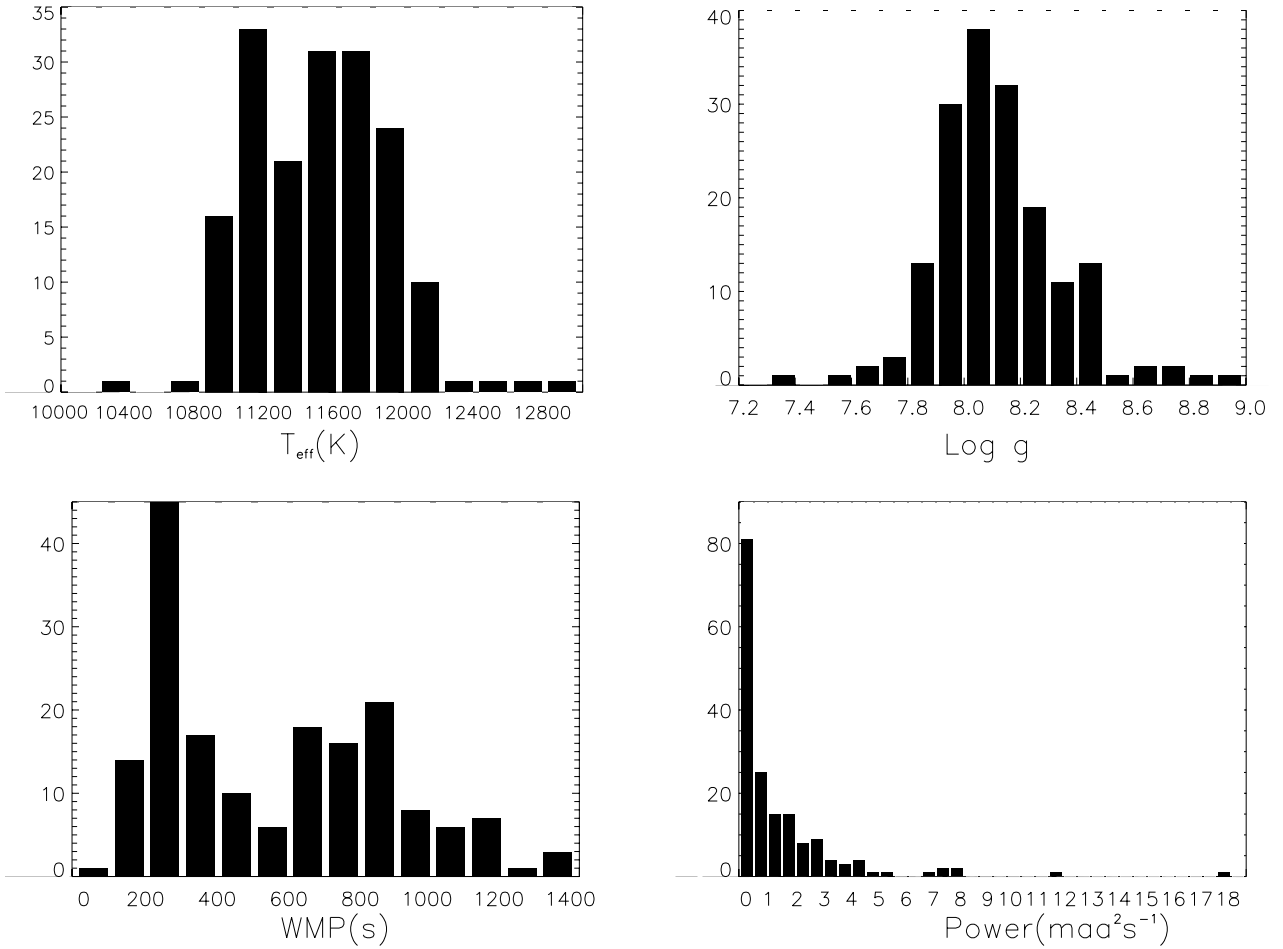


图 5 DA 型脉动白矮星参数分布。

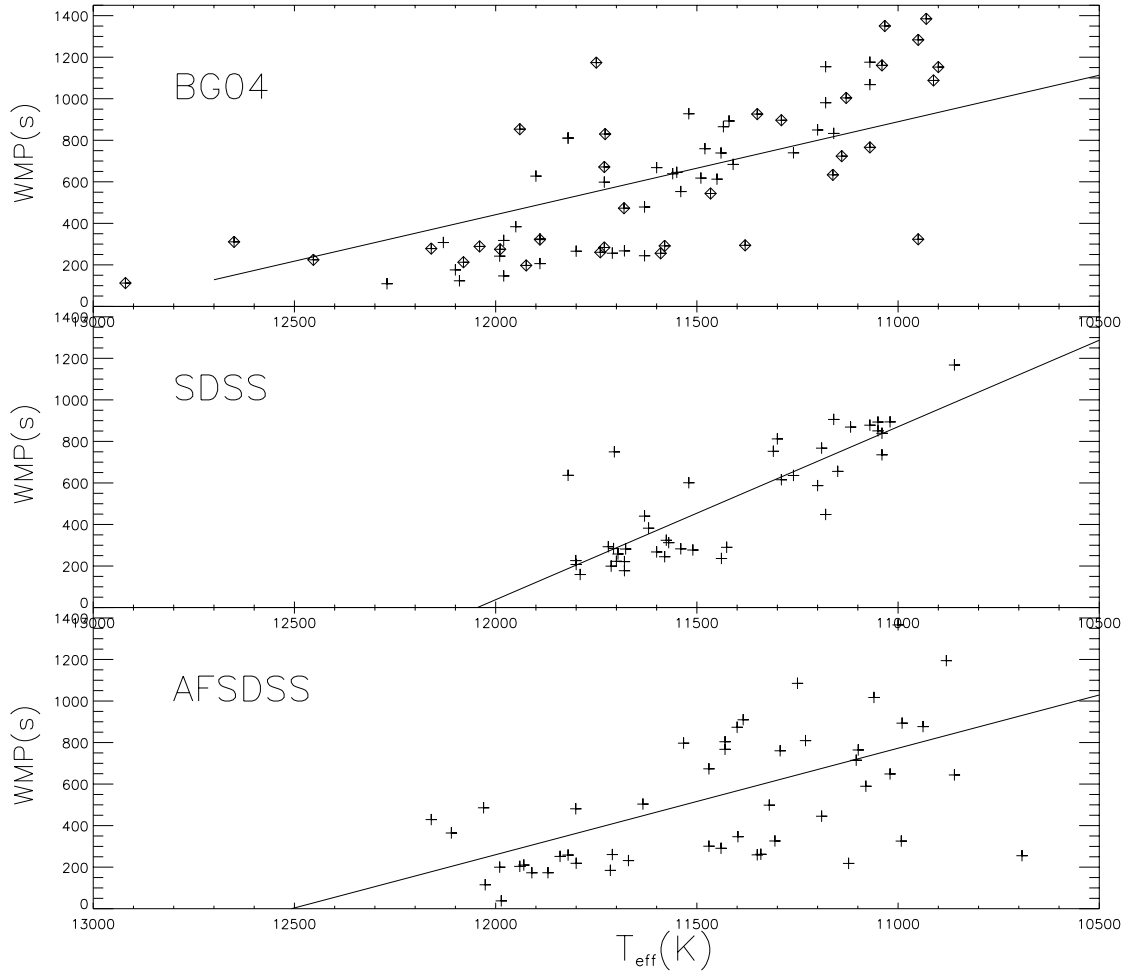


图 6 三组数据的 WMP 随有效温度的分布，最上一组为 BG04 组，中间为 SDSS 组（与 Mukadam et al. (2006) 相同），最下为本文增加的 AFSDSS 组。

由相关系数给出了两个系数的相关程度的计量。容易看出对于更新后的样本列表，BG04 和 AFSDSS 组的 WMP 和有效温度的线性相关性较低。

由于与 Mukadam et al. (2006) 的样本相比，本工作星表补充了新近发现的大量 DA 型脉动白矮星，BG04 组的样本有较大变化，而 AFSDSS 组完全由新发现的个体构成。新发现的 DA 型脉动白矮星个体大多较暗，而大多数又只有时长为数小时的观测光变曲线，因此脉动参数测量可能有较大误差。另外，由于一部分 DA 型脉动白矮星具有相近的频率，有可能出现拍频的现象，故而短时间测光观测有可能造成测量振幅与真实振幅之间的较大差异，从而影响 WMP。这可能是本次构成的星表所表现出的有效温度与 WMP 拟合不如 Mukadam et al. (2006) 好的原因之一。

另一方面，从图6中也能较清晰地看出 BG04 组，SDSS 组和 AFSDSS 组的有效温度

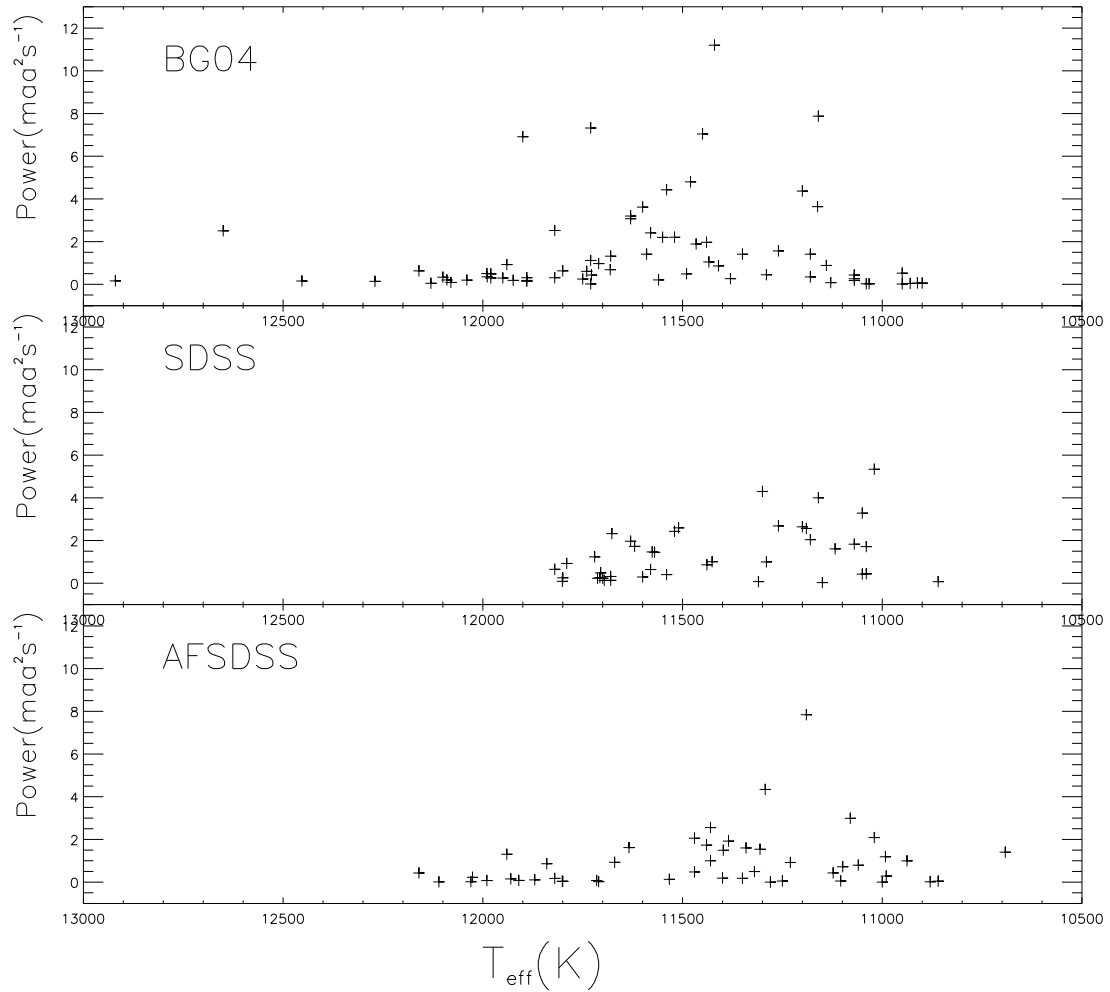


图 7 三组变星的脉动总功率分布。

范围存在明显差异，证实了不同方法得出的恒星参数的系统差的确实存在，以及对这三组分开进行统计分析是具有根据和意义的。

2.5.3 振幅随有效温度的分布

图7显示了三组的总脉动功率相对于温度的分布图。与 Mukadam 的结论相同，所有图都显示出在不稳定带蓝端的变星其脉动振幅随温度下降而上升，而在红边缘附近则随温度下降而下降。

为了检查不同功率的 DA 型脉动白矮星在赫罗图上的分布情况，我们以脉动总功率值 $2.0\text{ma}^2/\text{s}$ 为界，将 DA 型脉动白矮星分为高功率和低功率两类，并以不同符号标注于赫罗图上（图8）。结果显示具有较大脉动总功率的星一般位于不稳定带的中心附近，而位于不稳定带边缘附近的则普遍具有较小脉动功率。

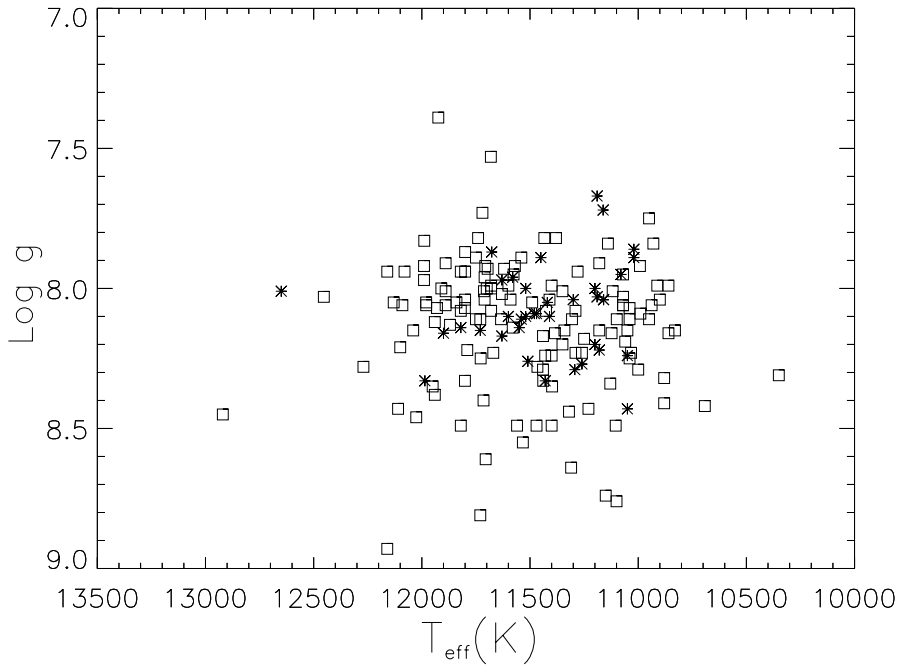


图 8 不同脉动总功率的 DAV 在赫罗图上的分布。中方块为小功率 DAV，而叉号为大功率，以 $2.0\text{mma}^2/s$ 为界限。

图9显示了所有 DA 型脉动白矮星的脉动总功率相对于有效温度的分布，与 Mukadam et al. (2006) 的结论相一致，这显示了 DAV 在演化冷却的过程中，总在蓝边缘开始脉动振幅逐渐上升，而后在接近红边缘时则逐渐衰减。但也有少量个体表现出异常的性质。

2.5.4 划分亚组的可能性

WMP 的计数分布图中提示有可能划分亚组，所以我们将所有的样本以 WMP 值 500 秒为界划分成两组并用不同符号标注于 $T_{\text{eff}} - \text{Log}g$ 图上，如图10所示。

图中显示短周期的样本更靠近不稳定带的蓝边缘，而长周期的样本则更多靠近脉动不稳定带红边缘，但也有少量样本显示出相反的特征。

这个亚组的划分与 Mukadam et al. (2006) 的建议 (依据 WMP 将 DA 型脉动白矮星划分为三组，热、冷和中间) 不同。但是根据本文的统计，在当前样本下有效温度与 WMP 并不呈现明显的线性关系。因此 Mukadam et al. (2006) 的建议亚组划分也失去了其意义。

2.6 不稳定带的重新确定

在已知的 205 颗 DA 型脉动白矮星中，我们除去 3 颗热 DA 型脉动白矮星，再除去 LAMOST 项目中发现的两颗有效温度过高的 2 颗，剩余的 200 颗普通 DA 型脉动白矮星

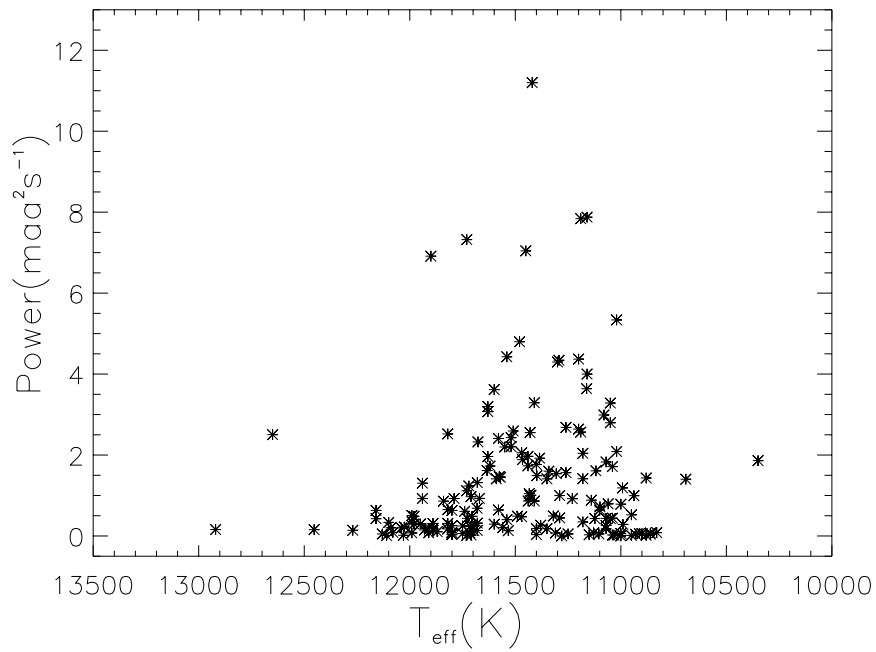


图 9 不同功率的 DAV 随有效温度的分布。

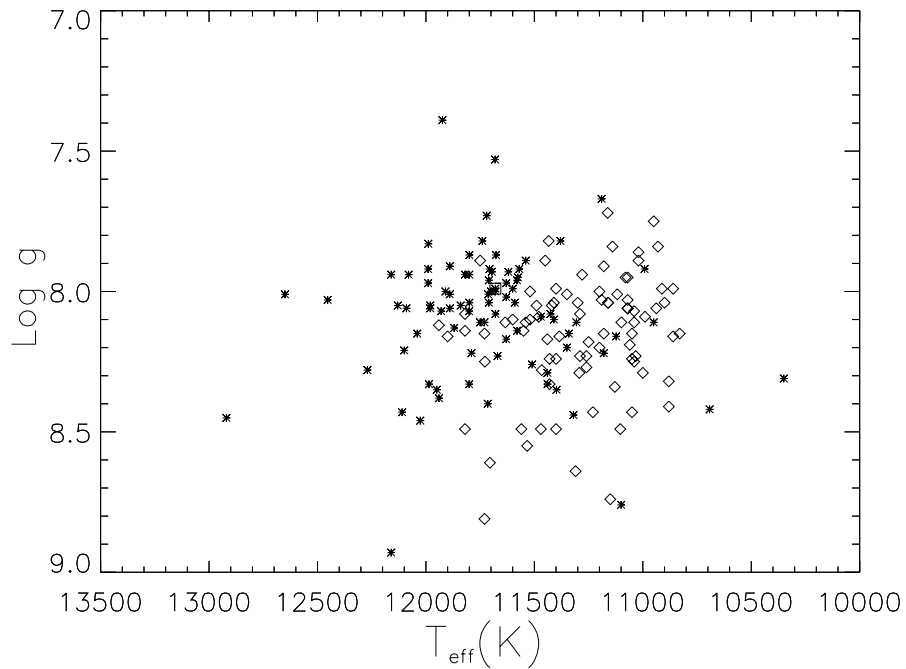


图 10 不同 WMP 的 DA 型脉动白矮星在赫罗图上的分布图，其中菱形表示 WMP 较长的星，而星号代表 WMP 较短的星，之间以 500 秒为界限。

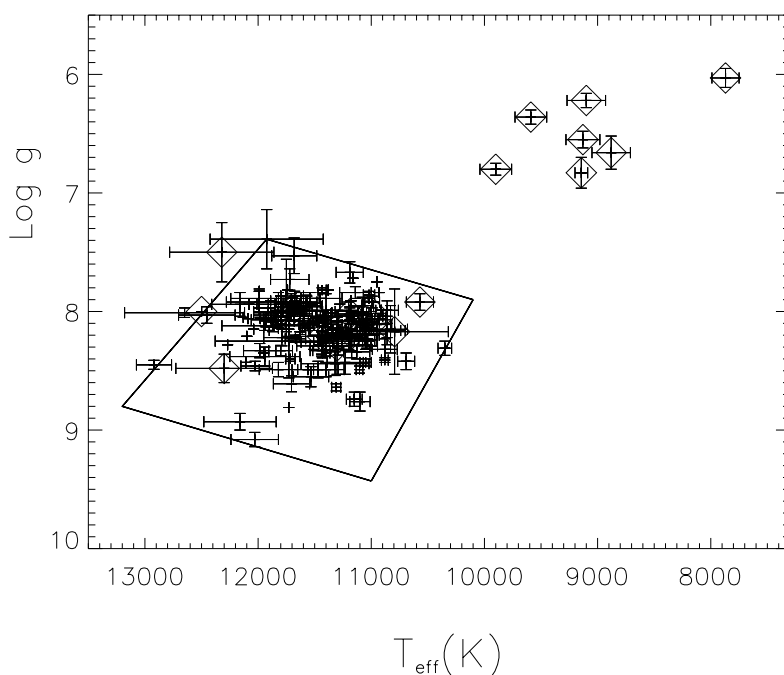


图 11 DA 型脉动白矮星的赫罗图。

画于赫罗图 (图11) 上。并在图上绘出重新确定的 DA 型脉动白矮星构成的脉动不稳定带。所有特殊 DA 型脉动白矮星 (处于双星系统内的, **Outbursting** 型) 由菱形标出, 这些星未用于不稳定带的确定, 其中位于图11上部的 7 颗星即为目前已发现的 7 颗极低质量 DA 型脉动白矮星。可以看出它们处于传统 DA 型脉动白矮星脉动不稳定带向造父不稳定带方向的延长线上。

通过本次统计研究重新确定的不稳定带有效温度范围是 12920-10350K。

2.7 Gianninas 星表的分析

Gianninas 等人在 2011 年公布了一个样本超过 1300 颗亮的富氢白矮星的星表^[11]。这来源于一个对亮白矮星进行的高信噪比光谱巡天。我们从中找出了 56 颗已知的 DA 型脉动白矮星。其中 54 颗来源于 BG 组, 2 颗来自 SDSS 组, 后面这两颗是 Mukadam et al. (2006) 中的 5 颗被认为参数不可靠的之中的两颗。我们将这 56 颗 DA 型脉动白矮星单独分为一组, 称为 GIAN 组。

GIAN 组是一个比较好的统计样本。原因如下

- (1) 这个星表可被认为是均一来源的, 因为该巡天包含的所有星都是在几乎相同的条件进行观测的, 而且对所有数据采取了相同的大气模型对谱线进行拟合以得出恒星参数,

因此数据之间由于数据来源不同造成的差异可以忽略。而本文工作形成的星表中恒星的大气参数来源不一，且被测定于数十年间的不同时期，无论其观测条件还是所用模型大气参数都可能有较大的差异，因而使不同数据之间可能存在系统差。

- (2) 由于该星表只收录亮白矮星，其中很多个体都被仔细研究过，并有较长时间的观测数据。我们认为其脉动参数的不确定度较小。而本工作的星表中被长期观测过的个体的比例则小很多，如 SDSS 组，AFSDSS 组都只有发现脉动待的光变曲线，一般时长仅有数小时。由于现在已经发现很多 DA 型脉动白矮星尤其是靠近不稳定带红边缘的个体，其脉动振幅等性质常常具有时标为数周乃至数天的变化，因此在短时间时序观测中得到的脉动参数很可能不能完整体现该星的脉动性质。

总的来说这组恒星不论从恒星参数还是脉动性质参数都有比较好的质量。这些恒星不仅可以与本工作所形成的星表进行对比，其单独构成的样本也具有良好的统计意义。

图12显示了 GIAN 组与本工作星表中公共样本数据的有效温度和 $\text{Log } g$ 值的差异。从中可见，与本工作的星表相比，大多数星的 T_{eff} 都提高了数百 K，而 $\text{Log } g$ 则稍有提高。在温度上显示出的如此巨大的差异，主要原因可能是在确定有效温度和表面重力加速度时所用的模型光谱不同。但是，由于这个显著差异，我们无法将 GIAN 组参数与其他方法得到的参数的星绘于同一 $T_{\text{eff}} - \text{Log } g$ 图上进行比较。而且很明显，由于这个差异的存在，如果使用 GIAN 组的参数确定 DA 型脉动白矮星的不稳定带范围，会与之前的结果有显著差异。

图13显示了两组数据之间的有效温度和 $\text{Log } g$ 的差分别相对于 GIAN 组参数上的关系。从图中的上图可以看出，在低温区两组数据的差异较小，而温度较高的星差异则在较大范围内变动。下图则显示 $\text{Log } g$ 的差则在 $\text{Log } g$ 值居中的星中变动较大，在较大质量和较小质量的星中则变化较小。

图14了显示 GIAN 组数据的 T_{eff} 与 WMP 的关系。可以看出，与之前伴随有效温度下降 WMP 值增大的结论相符。

虽然上一章所得出的结论之一，是对于新发现个体，有效温度与 WMP 的线性关系不存在显著的线性关系。但是，之前提出对于新发现个体由于观测上的不足造成的偏差，而 GIAN 组数据不论其恒星参数还是脉动参数方面的统计意义均好于本工作的星表，因此我们认为 DA 型脉动白矮星的有效温度与 WMP 之间的线性关系仍具有一定意义。

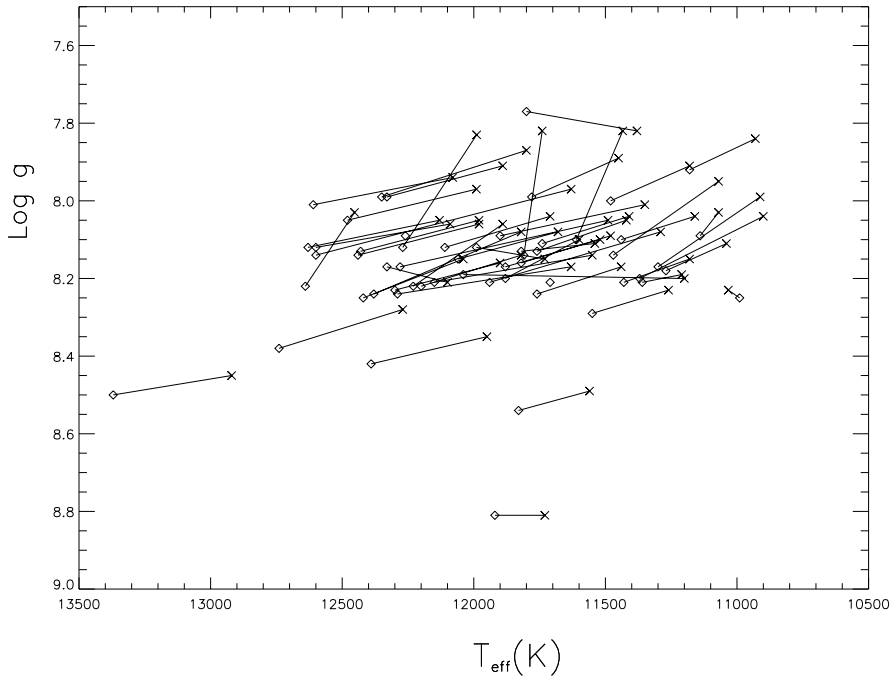


图 12 GIAN 组数据与本次工作的星表的有效温度和 $\text{Log } g$ 的差异。其中菱形为 GIAN 星表数据，叉号为本次工作的星表数据。

2.8 讨论

本工作的意义首先是构建了 DA 型脉动白矮星星表，其信息可以为今后对于这类天体研究和选源参考。

在研究中发现对于新增加的样本，WMP 与有效温度并未如之前研究者的结论那样呈现线性关系。这可能是由于新样本的恒星大气参数与脉动参数的测量误差较大所致。

对于现有的 DA 型脉动白矮星，不可忽视的是由于光度低、脉动周期短、脉动性质具有短时标变化等等。这些都导致恒星光谱参数和脉动参数的测定具有较大不确定性，具体表现为。

- (1) 白矮星的光度较低，在巡天项目中往往信噪比较低，误差较大。而一般以提供恒星参数为目标的光谱巡天项目多是针对普通恒星而非脉动变星。对于脉动变星，由于其表面有效温度在不断变化，因此短时间的观测所测定的有效温度很可能与其平均温度有较大偏差，因而进一步加大了误差。这种情况造成对一些 DA 型脉动白矮星在不同的光谱观测中所得出的恒星参数差异很大。从星表中可见，光谱巡天项目中给出的恒星有效温度的误差普遍在 100-200K。此外还存在不同时期使用不同算法对白矮星进行恒星参数的测定带来的系统差异。这些因素不仅造成单个白矮星的大气参数测量值

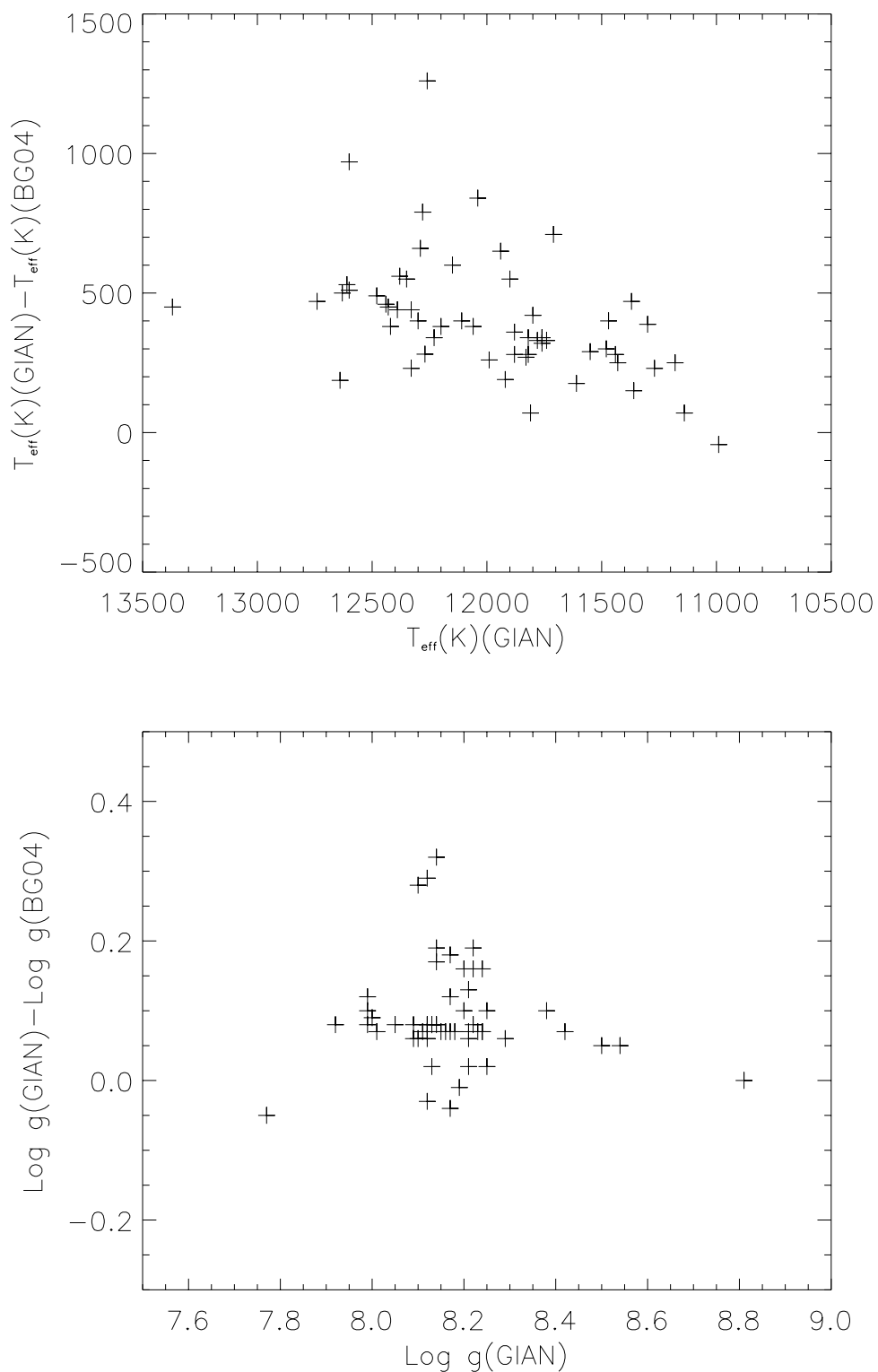


图 13 GIAN 组与本工作星表中公共样本恒星的有效温度和 $\text{Log } g$ 之差随有效温度 (上) 和 $\text{Log } g$ (下) 的分布。

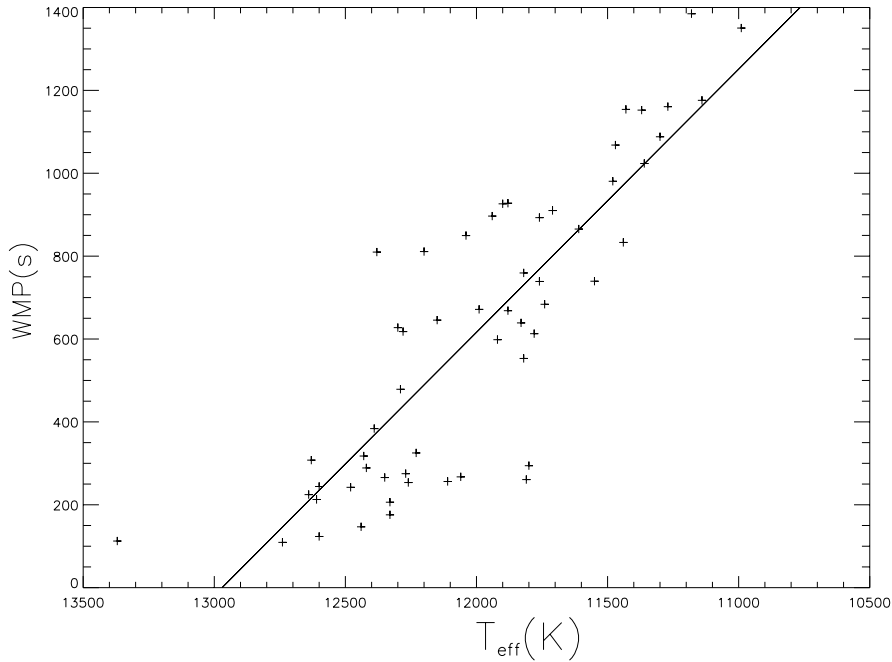


图 14 GIAN 组数据的 WMP 随有效温度的分布。

不准确，更是导致 DA 型脉动白矮星不稳定不确定的重要原因。

- (2) 由于 DA 型脉动白矮星的光变周期短，脉动性质有短时标变化。白矮星脉动周期短，为保证采样频率，在观测中不能使用长时间曝光。然而其光度较小，因此对 DA 型脉动白矮星的观测必须使用较大口径望远镜，进行长时间国际联测，才能有比较全面和分辨率较好的频率列表供后续研究。因此若要对单一 DA 型脉动白矮星进行细致研究，在观测上需要耗费大量的人力和望远镜时间。基于这些原因，利用发现脉动性质而进行的，时长仅为数小时的观测数据，给出脉动频率和振幅无法全面显示目标星实际的脉动性质。实际上，发现脉动性质时所观测到的频率和振幅，与后续长时间细致观测所探测到的频率和振幅差异巨大的情况也常有发生。

综上所述，对于 DA 型脉动白矮星而言，由光谱获得的恒星大气参数和短时间时序观测取得的脉动性质都具有较大的不确定性。目前，由于光谱巡天数据的释放，新发现的 DA 型脉动白矮星数量很大。本次研究相比 Mukadam et al. (2006)，样本多了一倍以上。由大量新增加的短时标观测数据所构成的样本，表现出来有效温度与 WMP 不符合线性关系，可能由这些原因造成。

另一方面，GIAN 组的样本相比其他星表其恒星参数没有系统差，且时序测光观测时间相对较长。这样的样本虽然个体数量较少，相比整体样本却具有更好的统计意义。该组

样本所表现出 WMP 与有效温度的可能的线性关系，说明这种关系可能确实存在。

2.9 小结

- (1) 本文收集了文献中各种类型共计 205 颗 DA 型脉动白矮星，构建了 DA 型脉动白矮星星表。
- (2) 本文统计工作的一部分结论与 Mukadam et al. (2006) 相同。对于近期新发现的 DA 型脉动白矮星，由于其恒星参数的计算方法与之前不同，且观测较少数据不足，并没有显示出与以前结论相同的有效温度与 WMP 的线性关系。
- (3) 关于长周期的 DA 型脉动白矮星靠近不稳定带红边缘，而短周期的靠近蓝边缘的结论被证实。
- (4) 证实了白矮星演化降温通过不稳定带时，在蓝边缘附近脉动总功率随温度降低下降而上升，在红边缘附近的随温度降低而下降。
- (5) 针对新发表的 Gianninas 星表进行了分析。由于使用了新的大气光谱模板，该星表给出了比之前其他算法得出的有效温度更高的白矮星大气参数。这对白矮星整体统计性质并无太大改变。但是，作为恒星参数和脉动参数其统计性都比较好的样本，却显示了有效温度和 WMP 之间存在线性关系的可能性。

第 3 章 DA 型脉动白矮星 KUV08368+4026 星震学研究

3.1 简介

KUV 03368+4026 在 1997 年被发现是一颗 DA 型脉动白矮星^[29]。1998 年, Dolez et al. 进行了三站联测^[94]。Fontaine et al.^[95] 给出一组恒星参数包括有效温度 11490K、表面重力加速度 $\text{Log } g=8.05$ 、总质量 $0.64M_{\odot}$ 和绝对星等 11.85。但是, 2011 年 Gianninas et al.^[11] 给出另一组恒星参数为有效温度 $12280 \pm 192\text{K}$, 表面重力加速度 $\text{Log } g = 8.17 \pm 0.05$, 总质量 $0.71 \pm 0.03M_{\odot}$ 。

Dolez et al. 在 1998 年使用光电光度计进行了一次三站, 为期一周的联测^[94]。从这次观测数据进行分析得到了 6 个独立频率, 没有找到多重结构。当时未对这些频率进行进一步处理。

为了研究这颗星的脉动, 1999 年在法国 Haute-Provence 天文台对它进行了为期一周的观测。2009 年到 2012 年, 我们从不同天文台址对它进行了共计 4 次观测。

3.2 观测和数据处理

我们对该星获得的观测数据如下

- (1) 1999 年在法国 Haute-Provence 天文台 1.93 米望远镜, 使用 Chevreton 光电光度计收集了 6 夜的数据 (数据组 1)。这部分是我们从法国合作者处取得的未发表的原始数据, 并自行进行数据处理和分析。
- (2) 从 2009 年到 2012 年使用 CCD 相机和 Johnson B 滤光片进行了 4 次观测。数据组 2 的观测是 2009 年, 在丽江观测站使用 2.4 米望远镜进行的。
- (3) 数据组 3 是从 2009 年 12 月到 2010 年 1 月的国际联测, 使用的是兴隆 2.16 米望远镜、丽江 2.4 米望远镜和墨西哥 San Pedro Mártir (SPM) 天文台的 1.5 米望远镜。
- (4) 数据组 4 是使用兴隆 80 厘米、85 厘米望远镜、2.16 米望远镜和墨西哥 Guillermo Halo 天文台 (OAGH) 的 2.1 米望远镜进行的国际联测。

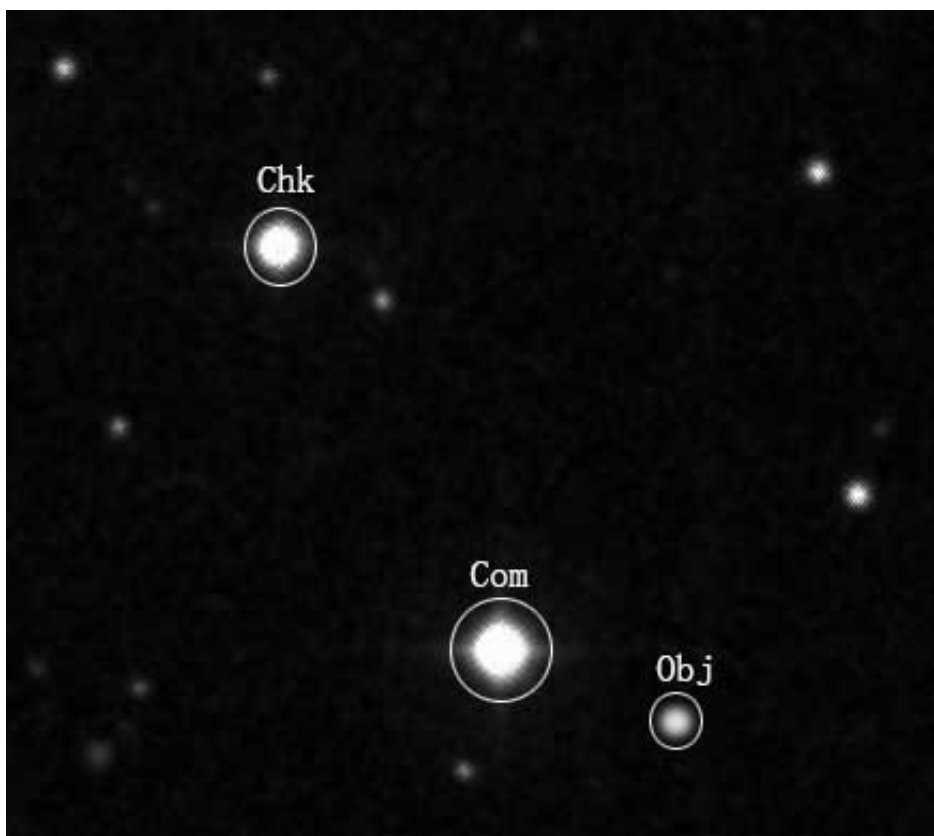


图 15 KUV08368+4026 的图像。图中 Obj 为目标星，Com 为比较星，Chk 为校验星，图像约 $3' \times 3'$ ，向上为北。

(5) 数据组 5 本来计划进行兴隆 2.16 米望远镜和 SPM1.5 米望远镜的两站联测。遗憾的是墨西哥的观测因为技术原因未能进行。最后只取得了兴隆的观测数据。

表3列出了观测日志。除了光电光度计观测以外的数据使用 IRAF DAOPHOT 包，应用标准程序处理。图15展示了一副观测图像。因观测时间长，使用的望远镜、探测仪器种类较多，条件不一，获得的观测图像视场不一，只能使用位置非常靠近的星作为比较星和校验星。图16展示了经处理后的光变曲线。

3.3 周期分析

我们使用 Period04^[96] 对光变曲线进行周期分析。我们对全部 5 组数据进行了傅立叶变换。图17是傅立叶功率谱，从中可发现同一频率的振幅在不同观测季有明显变化。这将在第五小节进行讨论。

依照如下步骤进行数据处理：

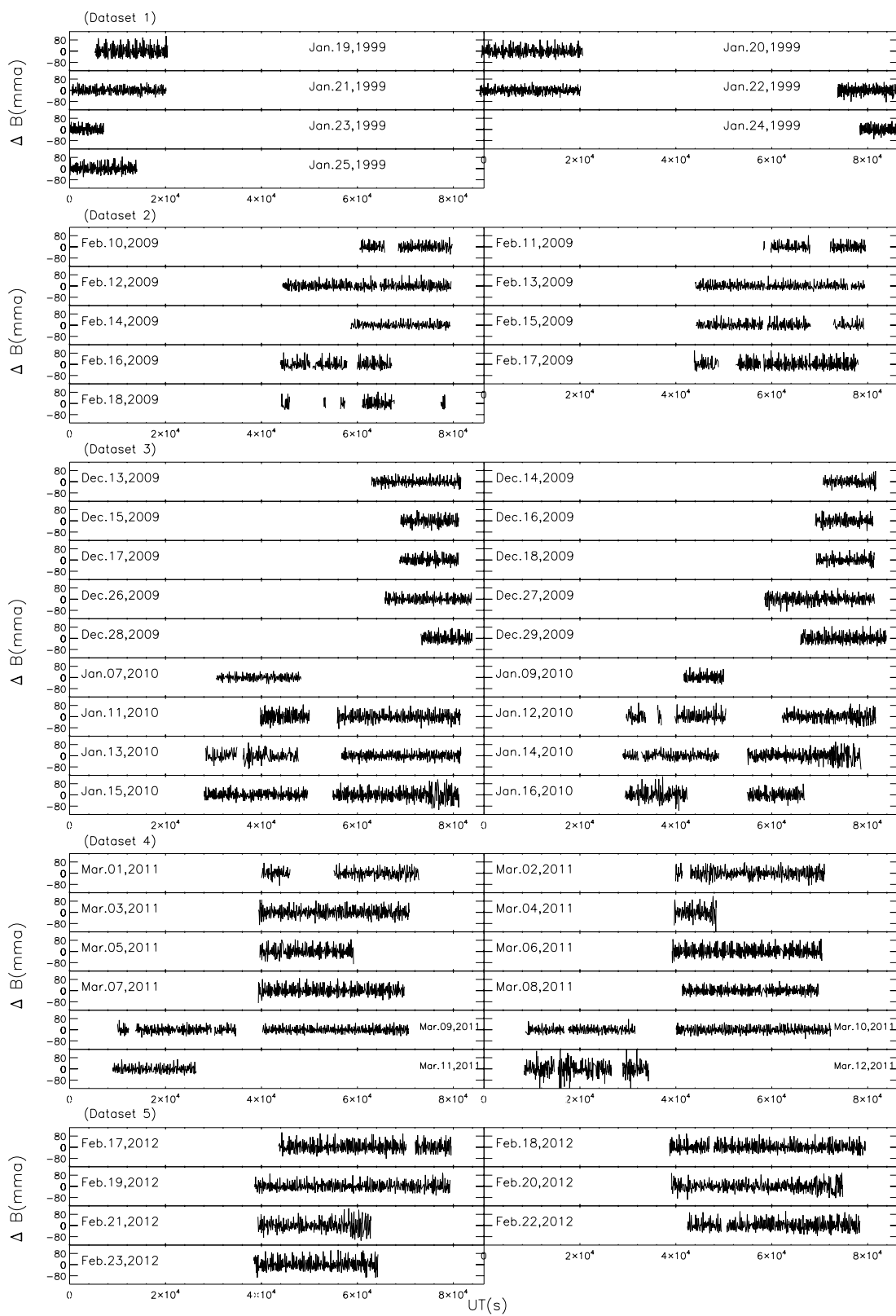


图 16 KUV 08368+4026 的光变曲线。

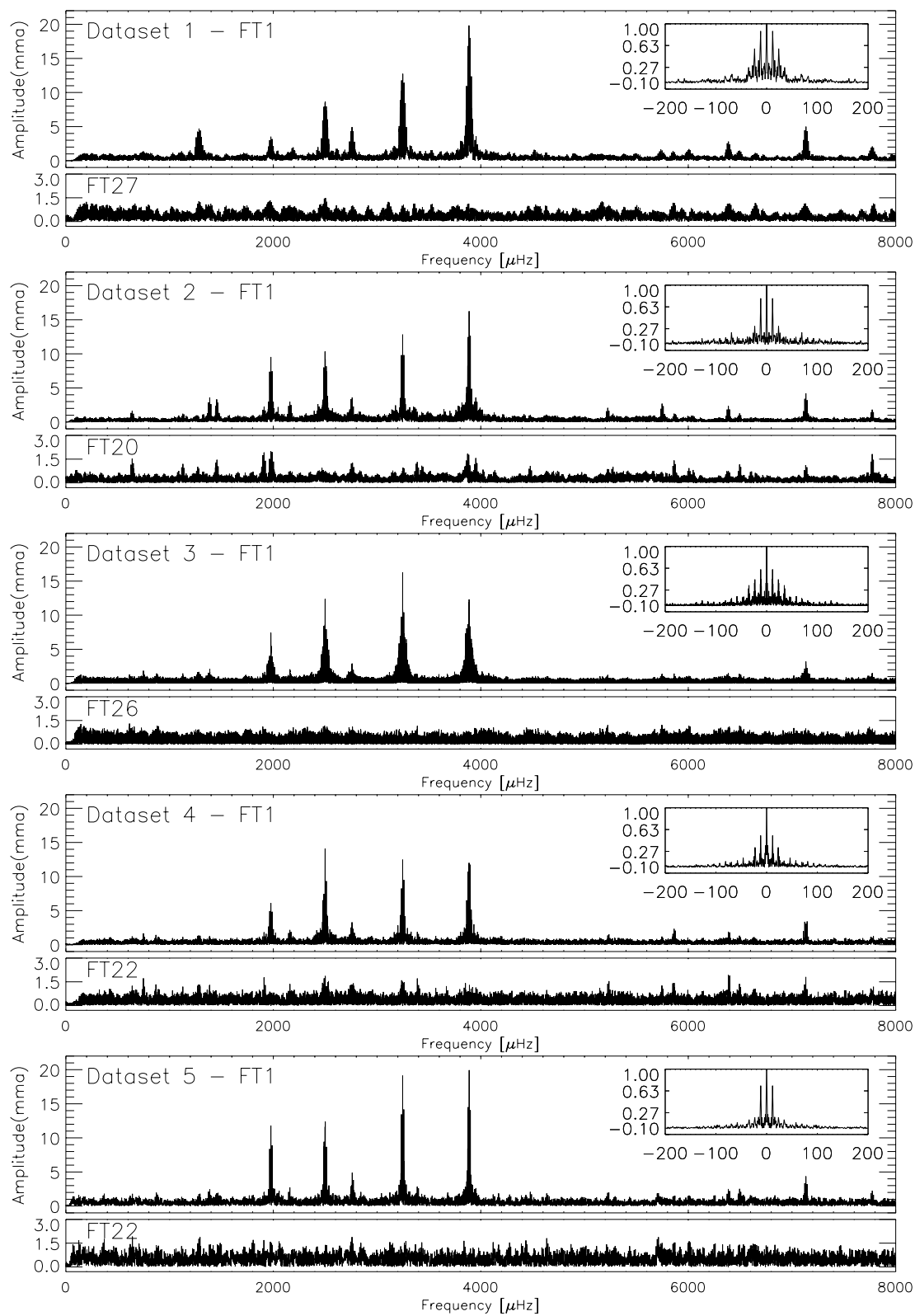


图 17 五组数据光变曲线的傅立叶变换。由上至下分别为每组数据的傅立叶谱。白化前的完整频谱在上方而白化后的在下方，谱窗分别在内嵌显示。

表 3 KUV 08368+4026 观测日志

Dataset	Date	Observatory	Telescope	Frame
1	Jan.19-25,1999	Haute-Provence	1.93m	-
2	Feb.10-18,2009	Lijiang	2.4m	6805
	Dec.12-18,2009	Xinglong	2.16m	1651
	Dec.26-31,2009	Lijiang	2.4m	2328
3	Dec.27-28,2009	Xinglong	2.16m	815
	Jan.07-17,2010	SPM	1.5m	2771
	Jan.12-19,2010	Xinglong	2.16m	2745
	Mar.01-03,2011	Xinglong	80cm	1516
	Mar.04-07,2011	Xinglong	85cm	1746
4	Mar.08-10,2011	Xinglong	2.16m	1655
	Mar.08-11,2011	OAGH	2.1m	1556
5	Feb.17-23,2012	Xinglong	2.16m	3976

- (1) 提取傅立叶功率谱中振幅最高的频率，得到其频率和振幅的初始值，由拟合计算出频率、振幅和相位值。
- (2) 利用取得的频率、振幅和相位将该正弦函数白化掉，对残差再进行傅立叶变换以搜索下一个频率。
- (3) 重复以上过程直到所有信噪比大于 4 的频率都被提取。

表4-表6展示了 5 组数据分别提取出来的频率和振幅。我们使用了蒙特卡罗算法来估计频率和振幅的误差。关于蒙特卡罗算法请参见^[97]。

对数据组 3，在白化过程中我们发现在主频率周围有许多频率值非常接近的低振幅频率。仔细检查数据之后，我们发现这是由于同一频率有以周为时间尺度的振幅变化，因此在白化时仅以单一的振幅和相位不能够完全白化掉一个频率。因此我们使用了 Period04 的子程序“Calculate amplitude/phase variations”来解决这个问题。对于每个频率，我们对每个数据组分别计算各自的振幅和相位并用来白化，而残差则被合并到一起进行傅立叶变换以得出下一个频率。

我们在表4-表6列出了对所有频率组得到的频率，并比较从不同数据组提取的相同频率，见表7。

表 4 5 组数据的频率和振幅 (数据组 1)

(Dataset 1)			
ID	f	A	Note
a24	747.31 ± 0.22	1.56 ± 0.73	a2-a4
a26	1115.80 ± 0.33	1.55 ± 0.67	
a16	1278.72 ± 0.21	2.44 ± 0.80	
a10	1280.51 ± 0.14	4.23 ± 0.78	
a9	1283.64 ± 0.13	5.24 ± 0.77	
a21	1961.68 ± 0.53	1.70 ± 0.82	a14-a9
a12	1976.10 ± 0.15	3.32 ± 1.05	
a20	2191.49 ± 0.39	1.80 ± 0.94	
a6	2498.85 ± 0.05	7.33 ± 0.87	
a4	2501.15 ± 0.07	7.42 ± 0.71	
a19	2606.27 ± 0.58	1.77 ± 0.99	
a8	2758.81 ± 0.10	5.12 ± 0.79	
a22	2760.75 ± 0.28	1.74 ± 0.80	a18-a3
a14	3244.98 ± 0.25	3.24 ± 0.90	
a3	3246.43 ± 0.10	9.83 ± 0.83	
a2	3248.13 ± 0.08	12.91 ± 0.73	
a11	3249.32 ± 0.24	4.24 ± 0.93	
a1	3886.25 ± 0.02	20.68 ± 0.77	
a5	3888.25 ± 0.06	7.35 ± 0.62	
a23	4526.86 ± 0.73	1.59 ± 0.77	a16+a2
a25	5735.79 ± 0.33	1.54 ± 0.82	
a18	6007.03 ± 0.24	1.87 ± 0.88	a8+a2
a13	6387.46 ± 0.10	3.04 ± 0.64	a4+a1
a17	6495.03 ± 0.33	1.93 ± 0.72	a3+a2
a7	7134.46 ± 0.08	5.27 ± 0.85	a2+a1
a15	7774.32 ± 0.17	2.29 ± 0.81	a1+a5

表 5 5 组数据的频率列表 (数据组 2-3)

(Dataset 2)				(Dataset 3)			
ID	f	A	Note	ID	f	A	Note
b9	1386.90±0.05	3.63±0.61	b1-b6	c16	747.51±0.08	1.84±0.66	c1-c2
b11	1454.67±0.08	3.36±0.59		c22	875.50±0.09	1.42±0.72	
b4	1976.48±0.03	9.92±0.65		c20	1127.55±0.13	1.53±0.59	c4-c11
b13	2159.09±0.07	2.75±0.63		c15	1270.98±0.04	1.85±0.75	c1-c21
b3	2498.76±0.02	9.71±0.62		c13	1387.15±0.06	2.27±0.71	c4-c2
b6	2500.71±0.02	8.03±0.70		c21	1975.43±0.05	3.07±0.91	
b19	2757.87±0.08	2.12±0.58		c5	1976.44±0.02	7.64±0.90	
b10	2759.99±0.05	3.34±0.64		c12	1977.42±0.05	3.16±0.65	
b16	3245.51±0.11	2.73±0.52		c14	2159.25±0.08	2.21±0.72	
b2	3246.74±0.03	11.95±0.72		c2	2498.91±0.01	12.60±0.77	
b8	3247.77±0.06	4.85±0.69		c6	2500.62±0.03	5.90±0.96	
b17	3249.11±0.11	2.50±0.58	b1+b2-b5	c11	2758.44±0.04	2.74±0.67	
b5	3885.53±0.02	10.09±0.47		c10	2760.33±0.08	2.97±0.82	
b12	3886.75±0.04	4.35±0.85		c1	3246.39±0.01	15.41±0.98	
b1	3887.73±0.02	15.31±0.76		c25	3247.29±0.03	2.40±0.97	c9-c3
b18	5223.79±0.07	2.17±0.61	b4+b8	c8	3248.56±0.02	5.39±0.82	
b14	5747.68±0.07	2.74±0.70	b6+b2	c4	3886.01±0.01	11.12±0.78	
b15	6386.52±0.06	2.40±0.60	b3+b1	c3	3887.13±0.02	9.76±0.91	
b7	7134.37±0.05	4.28±0.70	b2+b1	c7	3888.02±0.02	8.28±0.74	
				c23	5747.48±0.09	1.43±0.72	c6+c1
				c19	5863.48±0.06	1.48±0.61	c12+c4
				c18	6385.99±0.13	1.64±0.74	c2+c3
				c24	6492.81±0.09	1.41±0.75	
				c9	7134.27±0.03	3.32±0.69	c1+c7
				c17	7774.06±0.08	1.66±0.87	c4+c7

表 6 5 组数据的频率列表 (数据组 4-5)

(Dataset 4)				(Dataset 5)			
ID	f	A	Note	ID	f	A	Note
d17	1975.23±0.49	2.68±1.60		e21	872.54±0.25	2.08±1.20	
d6	1976.33±0.22	7.87±2.89		e13	1387.16±0.19	2.71±1.47	e1-e3
d9	1977.21±0.35	4.92±3.78		e22	1454.68±0.34	2.05±1.14	
d21	2159.12±0.36	2.07±0.92		e15	1911.02±0.68	2.32±1.31	e1-e4
d12	2488.34±0.14	3.46±0.92	d1-ia	e4	1976.51±0.06	12.06±1.34	
d1	2498.94±0.06	14.15±0.98		e11	2159.33±0.28	2.69±1.52	
d10	2509.96±0.12	4.11±0.86	d1+ia	e5	2498.65±0.09	9.47±1.17	
d16	2514.12±0.16	2.67±0.92		e3	2500.66±0.06	10.69±1.45	
d18	2748.33±0.35	2.30±0.77	d14-ia	e8	2760.33±0.14	4.79±1.37	
d14	2758.30±0.27	3.22±0.83		e2	3246.46±0.04	18.69±1.45	
d7	3245.72±0.14	6.21±2.26		e7	3248.44±0.10	6.90±1.32	
d2	3246.79±0.22	14.55±1.84		e10	3387.63±0.18	3.18±1.42	
d8	3247.96±0.53	5.82±1.80		e6	3885.75±0.09	9.16±1.52	
d15	3874.58±0.55	4.94±0.96	d5-ia	e1	3887.78±0.04	18.02±1.40	
d11	3885.73±0.19	7.15±5.69		e18	3952.66±0.26	2.22±1.28	
d3	3886.81±0.21	17.06±2.28		e20	4477.19±0.20	2.10±1.13	e4+e3
d5	3888.04±0.23	8.64±1.60		e19	5234.48±0.29	2.21±1.08	
d4	3897.58±0.27	6.30±1.67	d3+ia	e12	6386.16±0.26	2.61±1.20	e5+e1
d20	5863.43±0.41	2.13±0.78	d6+d3	e14	6494.87±0.20	2.55±1.27	e2+e7
d19	7122.88±0.35	2.64±1.09	d8+d15	e16	7132.20±0.23	2.34±1.17	e2+e6
d13	7145.87±0.53	2.52±0.85	d8+d4	e9	7134.29±0.16	4.26±1.34	e2+e1
				e17	7773.71±0.51	2.23±1.1019	e6+e1

注：表中 f 是以 μHz 为单位的频率，A 是以 mma 为单位的振幅，“note”列出了可能的线性组合和谐频。每个数据组的频率编号是依据其振幅降序排列。

表 7 5 组数据的振幅和频率的对比

ID	(Dataset 1)		(Dataset 2)		(Dataset 3)		(Dataset 4)		(Dataset 5)	
	f	A	f	A	f	A	f	A	f	A
F1									872.54	2.08
F2					875.50	1.42				
F3	1115.80	1.55								
F4	1278.72	2.44								
F5	1280.51	4.23								
F6	1283.64	5.24								
F7			1454.67	3.36					1454.68	2.05
F8					1975.43	3.07	1975.23	2.68		
F9	1976.10	3.32	1976.48	9.92	1976.44	7.64	1976.33	7.87	1976.51	12.06
F10					1977.42	3.16	1977.21	4.92		
F11			2159.09	2.75	2159.25	2.21	2159.12	2.07	2159.33	2.69
F12	2191.49	1.80								
F13	2498.85	7.33	2498.76	9.71	2498.91	12.60	2498.94	14.15	2498.65	9.47
F14	2501.15	7.42	2500.71	8.03	2500.62	5.90			2500.66	10.69
F15							2514.12	2.67		
F16	2606.27	1.77								
F17	2758.81	5.12	2757.87	2.12	2758.44	2.74	2758.30	3.22		
F18			2759.99	3.34	2760.33	2.97			2760.33	4.79
F19	3244.98	3.24	3245.51	2.73			3245.72	6.21		
F20	3246.43	9.83	3246.74	11.95	3246.39	15.41	3246.79	14.55	3246.46	18.69
F21	3248.13	12.91	3247.77	4.85	3248.56	5.39	3247.96	5.82	3248.44	6.90
F22	3249.32	4.24								
F23									3387.63	3.18
F24	3886.25	20.68	3885.53	10.09	3886.01	11.12	3885.73	7.15	3885.75	9.16
F25			3886.75	4.35	3887.13	9.76	3886.81	17.06		
F26	3888.25	7.35	3887.73	15.31	3888.02	8.28	3888.04	8.64	3887.78	18.02
F27									3952.66	2.22
F28									5234.48	2.21
F29	5735.79	1.54								
F30					6492.81	1.41				

表中 f 是以 μHz 为单位的频率, A 是以 mma 为单位的振幅。

3.4 星震学分析

3.4.1 线性组合和谐频

由于大多数观测都是单站观测，在图17中可以看见明显的谐频，尤其是数据组 1, 2 和 5。表4-表6中的“Note”一栏列出了线性组合和谐频的分析。

3.4.2 模式证认

去除了所有的线性组合和谐频之后，我们把余下的频率列于表8。其中表现为多重结构的，大振幅的或者在多个观测季被探测到的频率被认为是独立频率。而单独频率且振幅较小的，或者仅在一个观测季探测到的则被列为其他频率。对 $3249.32\mu\text{Hz}$ 这个频率，虽然它与一个三重频率接近，但是由于它仅从一个单站数据组得到，且数据由光电光度计观测，振幅较小，我们将其归类其他频率。我们在表8总结了所有的独立频率和其他频率。对于在多个观测季获得到的频率，我们取了频率的平均值。

从表8中可以辨认出 4 组三重结构。f1-f3 是不等间距的三重结构。由于 f3-f2 的间距几乎是 f1-f2 的两倍，我们认为它是 l=2 的模式。其他三组三重结构的间距非常接近，大约为 $1\mu\text{Hz}$ ，很可能是 l=1 的模式。我们也注意到有两组双重结构的间距大约为 $2\mu\text{Hz}$ ，因此我们认为是 m=0 频率缺失的 l=1 频率。

由渐进规则公式：

$$\sigma_{k,l,m} = \sigma_{k,l} + m \times (1 - C_{k,l})\Omega \quad (3-1)$$

其中 $C_{k,l} = 1/l(l+1)^{[98]}$ ，可以得知 l=2 模式的分裂间隔为 l=1 模式的 1.67 倍。由于 $1280.51\mu\text{Hz}$ 的模式的两组频率间隔分别为 1.6 和 $3.2\mu\text{Hz}$ ，与之前对 l=1 的频率分裂值约为 $1\mu\text{Hz}$ ，以及他们为 l=2 模式的判定相符合。

关于 $2158.20\mu\text{Hz}$ 模式的讨论将在后面单独进行。

3.4.3 自转分裂

由 5 组 l=1 模式的多重分裂，可以得到自转分裂为 $1.049 \pm 0.041\mu\text{Hz}$ ，由此得出的这颗星自转周期为 5.52 ± 0.22 天。

表 8 KUV 08368+4026 模式证认。 f 和 A 的单位与表 7 相同, P 为周期 (单位为秒)。

ID	f	A	P
Independent signals			
f1	1278.72	2.44	782.0
f2	1280.51	4.23	780.9
f3	1283.64	5.24	779.0
f4	1975.33	2.88	506.2
f5	1976.37	8.16	506.0
f6	1977.31	4.04	505.7
f7	2159.20	2.43	463.1
f8	2498.82	10.65	400.2
f9	2500.79	8.01	399.9
f10	2758.35	3.30	362.5
f11	2760.22	3.70	362.3
f12	3245.61	4.47	308.1
f13	3246.56	14.09	308.0
f14	3248.17	7.17	307.9
f15	3885.85	11.64	257.3
f16	3886.90	10.39	257.3
f17	3887.96	11.52	257.2
Further signals			
f18	872.54	2.08	1146.1
f19	875.50	1.42	1142.2
f20	1115.80	1.55	896.2
f21	1454.68	2.70	687.4
f22	2191.49	1.80	456.3
f23	2514.12	2.67	397.8
f24	2606.27	1.77	383.7
f25	3249.32	4.24	307.8
f26	3387.63	3.18	295.2
f27	3952.66	2.22	253.0
f28	5234.48	2.21	191.0
f29	5735.79	1.54	174.3
f30	6492.81	1.41	154.0

表 9 $l=1$ 的模式证认

f	δf	P	δk	m	DP
1975.33		506.2		-1	
	1.04				
1976.37		506.0	+ 5	0	1.38
	0.94				
1977.31		505.7		+1	
2159.20		463.1	+4	0?	7.77
2498.82		400.2		-1	
	0.99				
<i>2499.81</i>		400.0	+ 3	0	-6.10
	0.98				
2500.79		399.9		+1	
2758.35		362.5		-1	
	0.94				
<i>2759.29</i>		362.4	+ 2	0	5.52
	0.93				
2760.22		362.3		+1	
3245.61		308.1		-1	
	0.95				
3246.56		308.0	+ 1	0	0.36
	1.61				
3248.17		307.9		+1	
3885.85		257.3		-1	
	1.05				
3886.90		257.3	+ 0	0	-1.15
	1.06				
3887.96		257.2		+1	

注：表中 f 为频率（单位为 μHz ）， A 为振幅（单位为 mma ）， P 为周期（单位为秒）。DP 为 5 个观测到的 $l=1$ 模式的周期与其线性拟合之间的残差。对于周期为 400 秒和 362 秒的两个 $m=0$ 模式未被探测到的双重结构， $m = \pm 1$ 模式的中间值被估算为 $m=0$ 频率，并用斜体字表示。

表 10 $l=2$ 的模式证认

Table b			
f	δf	P	m
1278.72		782.0	-1
	1.79		
1280.51		780.9	0
	3.13		
1283.64		779.0	+2

注：表中 f 为频率（单位为 μHz ）， δf 为频率间隔（单位为 μHz ）。 P 为周期（单位为秒）。

3.4.4 周期间隔

表7中有一些频率既不属于双重结构也不属于三重结构，而其振幅很小且只在五个观测季中的一个被探测到，我们在表8中将其定义为其其他信号。注意其中小振幅的 $2159.20\mu\text{Hz}$ 频率由于在 4 个观测季都被探测到而列为独立频率。

表9和表10分别列出了所有被辨认为 $l=1$ 和 $l=2$ 的频率。利用 3 个三重结构里的 $l=1$ 且 $m=0$ 的频率，我们进行了线性拟合，得到了 49.2 秒的平均周期间隔，如图18所示。我们同时将被认为是 $l=1$ 但是 $m=0$ 频率缺失的估计频率值，以及 $f = 2159.20\mu\text{Hz}$ 的单频率也绘于图上。发现 $2159.20\mu\text{Hz}$ 的单频率正好填补了其中缺失的 k 值空隙，与拟合直线符合较好，因此我们估计这这也是一个 $l=1$ 的模式。

3.4.5 模式俘获

图19展示了 3 个三重结构中的 $m=0$ 模式的周期线性拟合的残差，同时也画出了表9中两个双重结构中未被探测到的 $m=0$ 模式以及 $f = 2159.20\mu\text{Hz}$ 的单模式。从图19 可以看出，在 400 秒左右存在一个可能的俘获模式。

3.5 振幅变化

之前已经提及，KUV 08368+4026 存在不同观测季之间的振幅变化。经仔细检查，我们发现这个变化不仅存在于年的时间尺度上也存在于周的尺度上。表11 列出了数据组 3 中抽取到的 25 个频率从 2009 年 12 月到 2010 年 1 月的 3 个观测周之间的振幅变化，图20则显示了每个频率的振幅在三周之间的变化。这些频率的振幅在一个月之内变化非常显著。我们同时也为每一周的频率谱计算了其脉动总功率列于表11的末尾，可以看出不同周之间的总功率也存在变化。

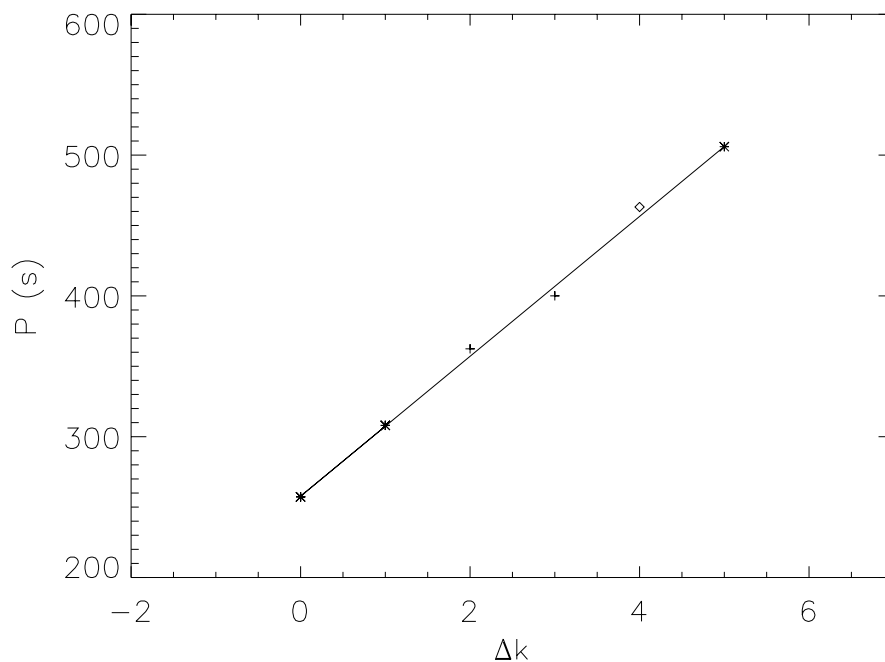


图 18 三个 $l=1$, $m=0$ 频率的线性拟合。其中 “ \times ” 标志为三重频率结构中的三个 $l=1$, $m=0$ 频率, “ $+$ ” 为两个双重频率结构, 空心菱形为 $f = 2159.20\mu\text{Hz}$ 的单模式。

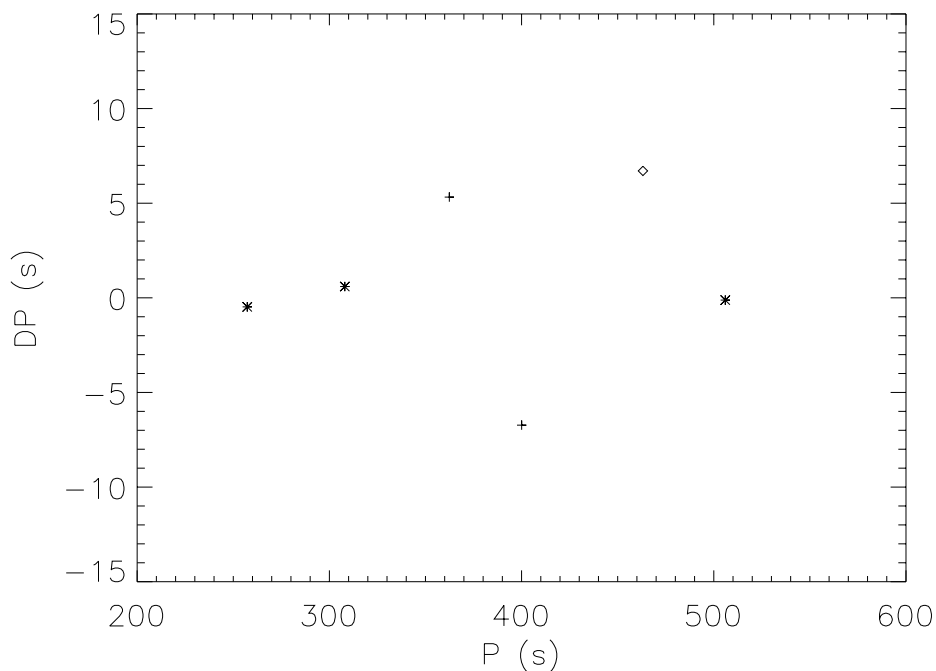


图 19 所有被辨认为 $l=1$ 模式周期的线性拟合残差按周期值的分布。其中 “ \times ” 标志为三重频率结构中的三个 $l=1$, $m=0$ 频率, “ $+$ ” 为两个双重频率结构, 空心菱形为 $f = 2159.20\mu\text{Hz}$ 的单模式。

表 11 数据组 3 的三周的振幅表

ID	f	Week1	Week2	Week3
		A		
c16	747.51	1.202	0.860	2.427
c22	875.50	1.686	0.343	1.846
c20	1127.55	0.821	1.465	1.730
c15	1270.98	3.770	1.804	1.731
c13	1387.15	2.352	2.346	2.304
c21	1975.43	3.123	4.394	2.929
c05	1976.44	8.510	5.013	7.637
c12	1977.42	3.442	1.616	3.216
c14	2159.25	1.594	1.242	2.882
c02	2498.91	12.749	17.280	11.541
c06	2500.62	4.455	2.898	6.990
c11	2758.44	2.838	4.389	2.222
c10	2760.33	1.427	2.022	3.892
c01	3246.39	11.886	18.218	16.682
c25	3247.29	7.266	6.284	2.792
c08	3248.56	6.243	6.943	4.699
c04	3886.01	11.633	9.866	11.345
c03	3887.13	8.581	15.438	9.120
c07	3888.02	9.229	13.032	11.119
c23	5747.48	1.218	0.812	1.858
c19	5863.48	2.051	1.013	1.529
c18	6385.99	0.964	1.827	1.877
c24	6492.81	0.491	0.891	1.930
c09	7134.27	3.904	3.391	3.222
c17	7774.06	1.822	1.150	1.985
		E		
		2.780	4.399	3.193

注： f 是以 μHz 为单位的频率， A 是以 mma 为单位的振幅，三周分别是 2009 年 12 月 12-18 日，2009 年 26-31 日，2010 年 1 月 7-19 日。E 是脉动总功率，单位为 mma^2/s 。

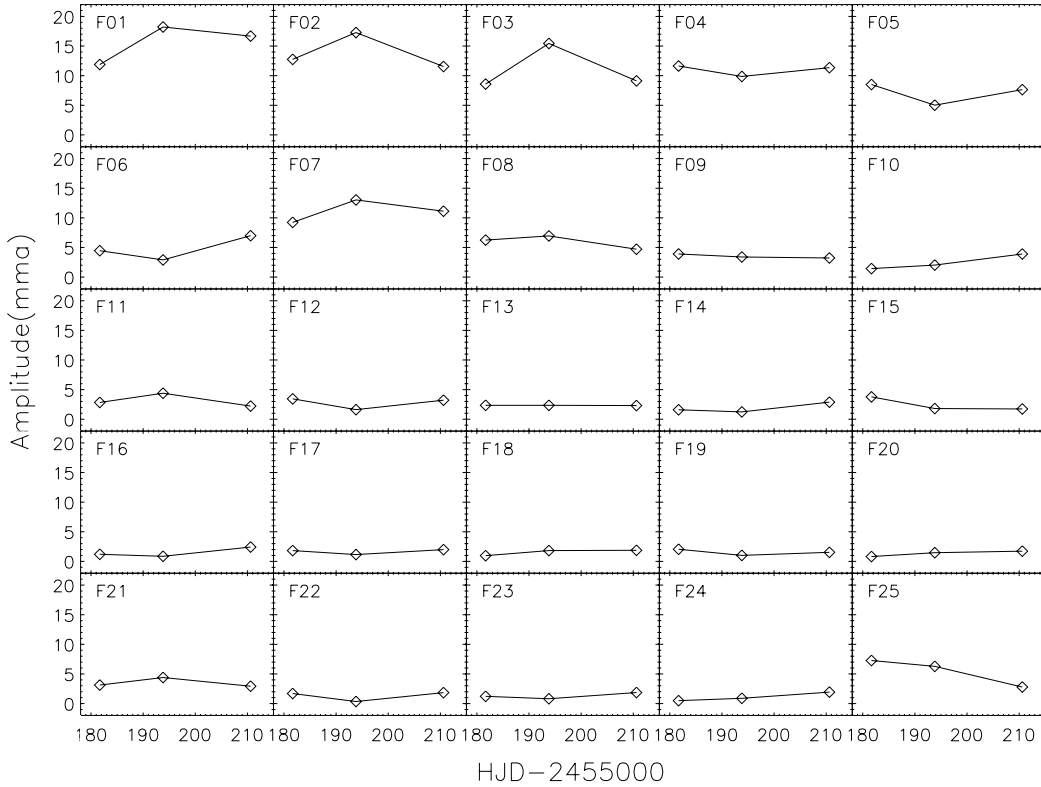


图 20 从数据组 3 给出的 25 个频率在三周之间的振幅变化

本文所观测到的 KUV 08368+4026 的脉动振幅变化，可能是由于脉动能量在不同模式之间的分配变化，而其本身也在发生变化。目前这种现象已在多颗 DA 型脉动白矮星上发现，而对此并没有很好的理论解释。

3.6 理论模型构建和拟合

我们使用 Toulouse 白矮星模型^[99] 来限制这颗星的恒星参数。这是一个静态理论模型，有四个输入参数，即总质量、光度、氢壳层质量和氦层质量丰度。首先，我们建立了一个参数范围比较大的网格，来选择可能的拟合较好的模型。表12列出了这个粗网格的范围和步长。我们对 5 个 $l=1$ 模式和一个 $l=2$ 模式使用 χ^2 测试来检验模型的好坏。

$$\chi^2 = \sum_n (P_n^{the} - P_n^{obs})^2 \quad (3-2)$$

其中 P^{the} 为理论模型的周期， P^{obs} 是观测到的周期。

粗网格中共计算了超过八千个模型。我们使用 Gianninas et al.(2011)^[11] 和 Fontain et al.

表 12 KUV 08368+4026 粗网格参数

	Range	Step
Mass(M_{\odot})	0.60 ~ 0.84	0.01
Luminosity(L_{\odot})	$2.0 \sim 4.5 \times 10^{-3}$	0.1×10^{-3}
$\log M_H/M_*$	-3.5 ~ -10	0.5
$\log M_{He}/M_*$	-2	

表 13 KUV 08368+4026 细网格参数

	Ranges	Steps
Mass(M_{\odot})	0.67 ~ 0.71	0.002
Luminosity(L_{\odot})	$2.7 \sim 3.1 \times 10^{-3}$	0.02×10^{-3}
$\log M_H/M_*$	-4.0	
$\log M_{He}/M_*$	-2	

(2003)^[95] 给出的有效温度和表面重力加速度参数来进行限制，最后从三倍不确定度的范围内选出了一个 χ^2 的最小点。随后，围绕这个最小点，我们使用更精细的参数建立了一个模型的细网格。表13 列出了细网格的参数。

图21展示了对独立频率的观测模式和理论模型计算模式的周期的 χ^2 拟合结果，其中 χ^2 值用不同的灰度表示。我们从中找到了一个最佳模型。表14 展示了最佳模型的恒星参数。

我们尝试对最佳拟合模型进行模式捕获的探索并且将结果展示于图22。

我们认为这个模型是最佳模型的理由如下：

- (1) 这个模型的 χ^2 测试结果显示它是与观测模式的频率最接近的模型。
- (2) 它显示出了在 400 秒附近的俘获模式，与观测结果相符。
- (3) 这个模型的有效温度和表面重力加速度处于两组光谱得到的结果之间，与光谱观测的结果相符。

因此我们认为这个模型是对这颗星的最佳拟合模型。

3.7 小结

本项工作的小结如下：

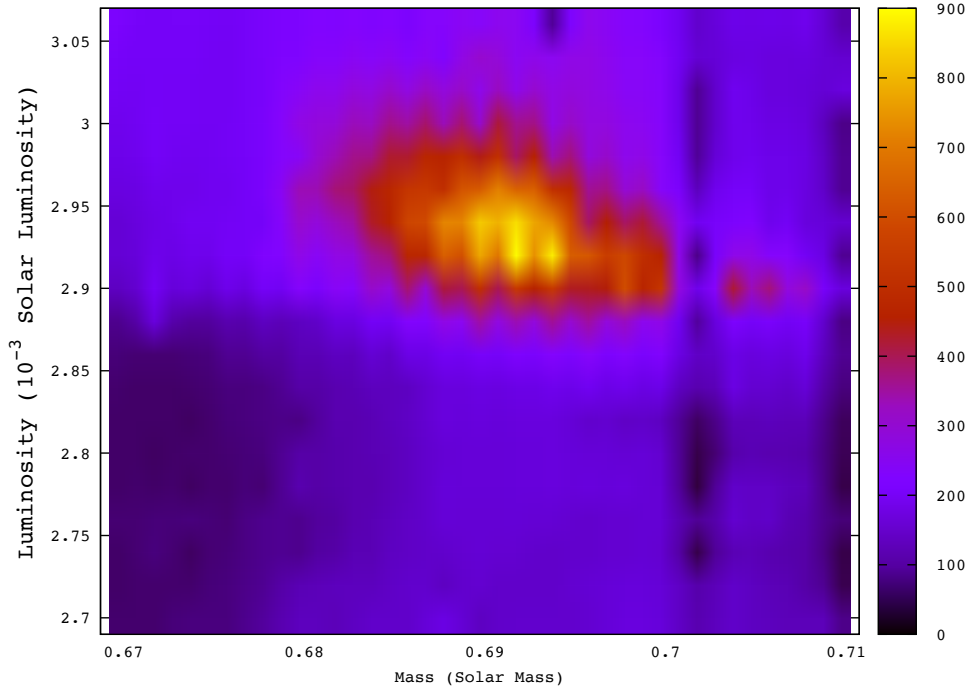


图 21 KUV 08368+4026 细网格的 χ^2 测试结果。

表 14 KUV 08368+4026 的最佳拟合模型的参数

$T_{\text{eff}}(K)$	11825.1
$\log g$	8.06
$L(L_{\odot})$	$(2.92 \pm 0.02) \times 10^{-3}$
$M(M_{\odot})$	0.692 ± 0.002
$q_H(M_*)$	10^{-4}
$q_{\text{He}}(M_*)$	10^{-2}

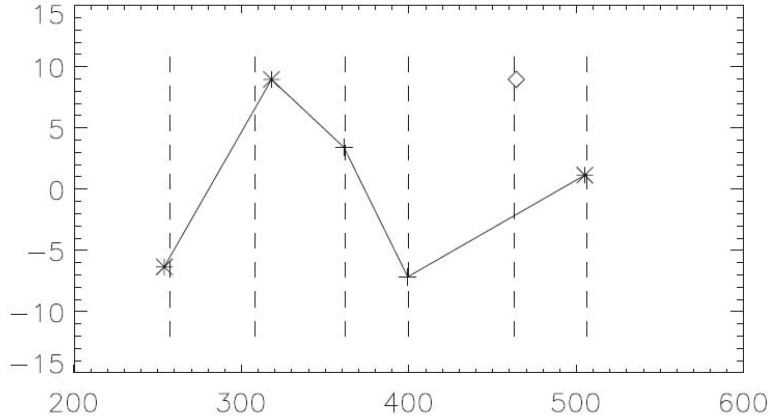


图 22 最佳拟合模型的模式俘获分析，图上的符号与图19相同。

- (1) 我们对 DA 型脉动白矮星 KUV 08368+4026，在其脉动性质被发现以后进行了首次大规模观测研究，得到了 1999 年和 2009-2012 年的单站和多站时序测光数据，从中得出了 30 个独立频率，包括 6 组多重结构和一个单模式以及 13 个其他模式。这些独立频率被证认为 $l=1$ 和 $l=2$ 的模式以及它们的自转分裂。同时，我们也探测到一些线性合并和一些无法辨别的低振幅频率。
- (2) 由 6 组多重结构，我们确定了 $l=1$ 模式的自转分裂间隔为 $1.049 \pm 0.041 \mu\text{Hz}$ ，并由此得出该星的自转周期为 5.52 ± 0.22 天。
- (3) 由所有的 $l=1$ 、 $m=0$ 模式我们得到了这颗星的平均周期间隔 49.2 秒。
- (4) 经检查数据发现，1998 年联测^[94] 探测到的 6 个脉动频率，与本文观测数据抽取出的 6 个多重结构的中心频率相符。而报告脉动性质发现的观测中所报告的 619 秒和 494.5 秒频率在之后的观测中未能再观测到。
- (5) 我们发现 KUV 08368+4026 的振幅存在年和周的时间尺度上的显著变化。在 2009 年 12 月到 2012 年 1 月的三周间，其脉动总功率也存在变化。对于此现象目前尚没有很好的理论解释。
- (6) 我们由理论模型工作得到了最佳拟合模型。模型参数为质量 $0.692 \pm 0.002 M_{\odot}$ ，光度 $(2.92 \pm 0.02) \times 10^{-3}$ 太阳光度，氢壳层质量 $10^{-4} M_{*}$ 和氦层质量 $10^{-2} M_{*}$ 。
- (7) Romero et al.(2012)^[40] 基于理论模型工作给出了该星的恒星参数，包括表面重力加速度 $\text{Log} g$ 8.02 ± 0.03 ，质量 $0.609 \pm 0.012 M_{\odot}$ ，有效温度 $11230 \pm 95 \text{K}$ 和氢壳层质量 $(1.42 \pm 0.52) \times 10^{-5} M_{*}$ 和氦质量丰度 $2.45 \times 10^{-2} M_{\text{I}}$ 。然而，这项工作是基于该星脉动性

质被发现时所报告的两个频率，因此我们认为本文基于多年多站联测数据的分析结果应该更加可信。

第 4 章 DA 型脉动白矮星 WD0246+326 星震学研究

4.1 简介

脉动白矮星 WD0246+326 (KUV 02464+3239, $V = 15.8$) 的脉动性质于 2001 年被 Fontaine et al.^[76] 报告。这些研究者利用光谱观测数据选取候选体, 在 1999 年 8 月进行了的时长为 2900 秒的时序测光观测, 获得了一个周期约为 832 秒脉动的模式。基于变星的大振幅长周期, 其脉动性质符合一颗典型的靠近 DA 型脉动白矮星不稳定带红边缘的变星。Bergeron et al.(1995)^[100] 给出一组恒星参数, 有效温度为 $11290 \pm 200K$, 表面重力加速度为 $\log g = 8.08 \pm 0.05$ 。此后又有 Gianninas 星表^[11] 给出其恒星参数为 $11940 \pm 180K$ 和 $\log g = 8.21 \pm 0.05$ 。这两组参数分别处于 DA 型脉动白矮星不稳定带的红边缘和蓝边缘, 且没有互相覆盖。这种情况使得判定这颗星的恒星参数非常困难, 需要利用较大口径望远镜进行长时间观测, 以获得更多脉动频率, 再通过脉动白矮星理论模型来对其恒星参数进行限制。

4.2 之前的研究情况

在 2006 年和 2007 年, 匈牙利研究者 Bognár 等人使用 Konkoly 天文台的 1 米望远镜在数月中, 陆续对该星进行了约 97 小时的单站观测^[101], 最后获得了 6 个频率如表 15。由于各频率之间相距很大, 可以看到其中没有多重频率结构。

基于这 6 个频率, Bognár 等人使用 WDEC 程序进行 (后文将对此程序进行说明) 了理论模型计算工作, 并给出了三个最佳拟合模型其参数分别为 0.645、0.650 和 0.680 太阳

表 15 Bognár 报告的 WD 0246+326 的脉动频率列表, 表中 ID 为频率编号, f 为脉动频率 (单位为 μHz), P 为周期 (单位为秒), A 为振幅 (单位为 mma)。

ID	$f(\mu\text{Hz})$	$P(\text{s})$	$A(\text{mma})$
b1	799.838	1250.253	4.4
b2	1006.804	993.242	13.2
b3	1154.532	866.151	9.5
b4	1206.733	828.684	11.6
b5	1285.989	777.611	5.5
b6	1614.765	619.285	4.0

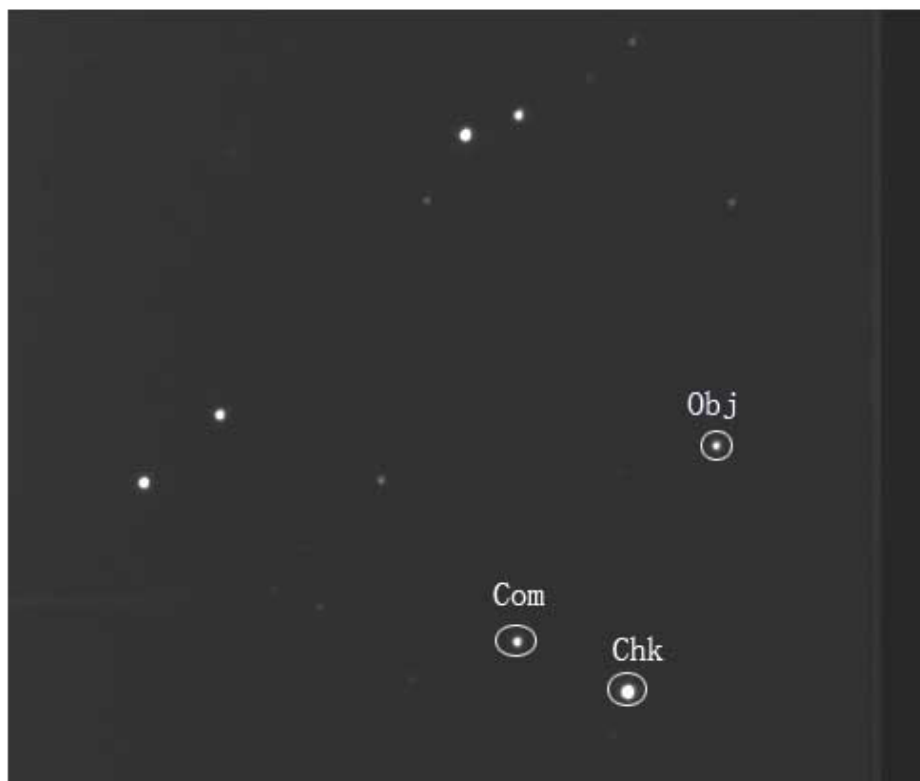


图 23 WD 0246+326 的 CCD 图像。图中 Obj 为目标星，Com 为比较星，Chk 为校验星，图像约 $3.5' \times 3.5'$ ，向下为北

质量，氢壳层质量的范围 $2.5 \times 10^{-5} \sim 6.3 \times 10^{-6}$ 。并且由模型给出的绝对星等和观测星等估算了该目标的距离。

4.3 观测

我们在 2014 年 10 月对该星进行了两站国际联测。表 16 列出了观测日志。这次观测使用的是国家天文台兴隆观测站 (XL) 2.16 米望远镜和墨西哥 San Pedro Martír 天文台 (SPM) 1.5 米望远镜。兴隆使用的是 BFOSC 终端和 V 滤光片，SPM 使用的则是 RATIR 终端 (Reionization and Transients Infrared Camera, Butler et al. (2012)^[102])。图 23 展示了一幅从 2.16 米望远镜观测到的 CCD 图像。这些观测的时长和获取的图像数都在表 16 里列出。

数据处理使用 IRAF DAOPHOT 包的标准步骤。图 24 展示了处理观测数据获得的光变曲线。

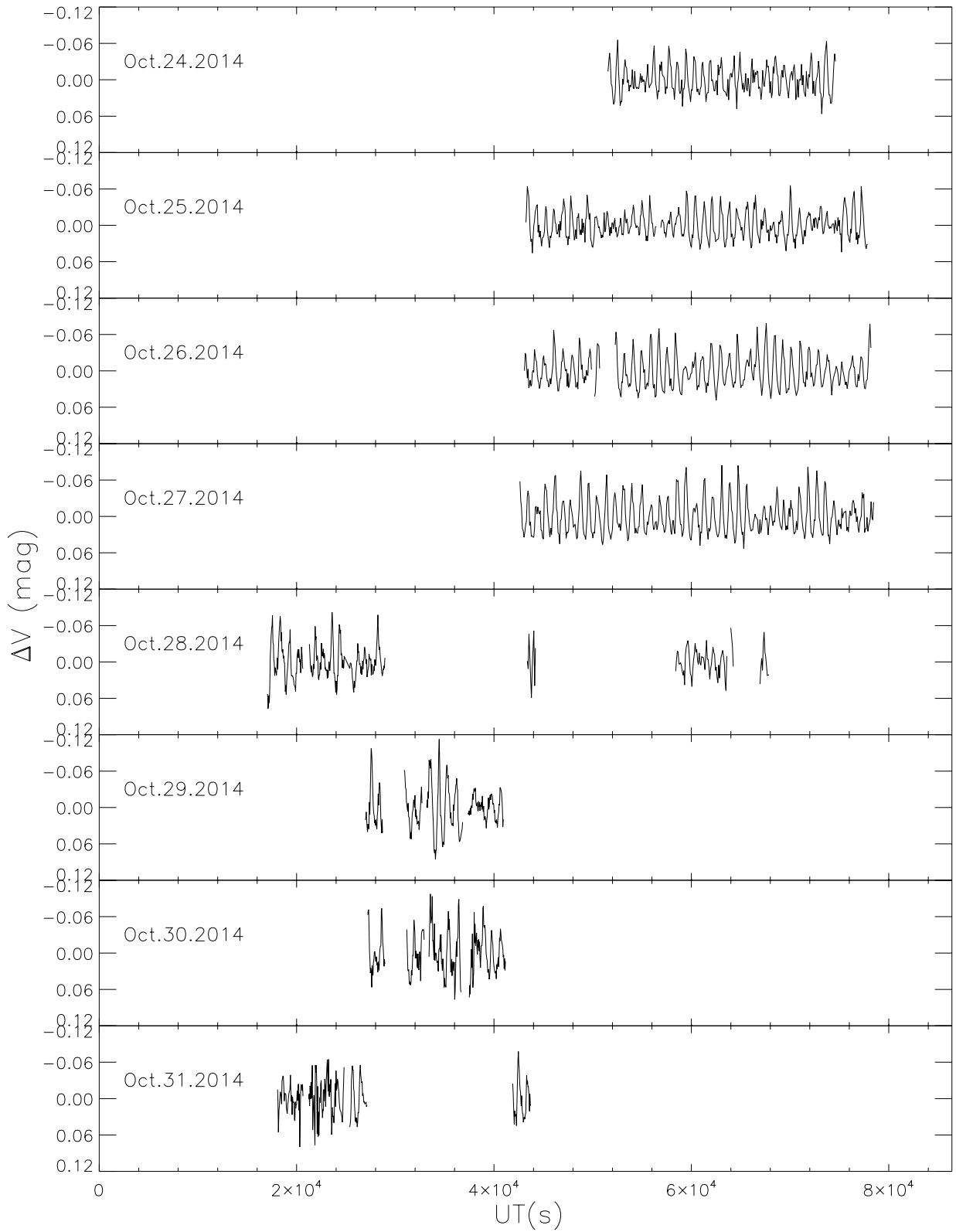


图 24 WD 0246+326 在 2014 年 10 月的光变曲线。

表 16 WD 0246+326 在 2014 年 10 月的观测日志

Observatory/ Telescope	Date	Frame Number	Length (hour)
	24	280	6.4
	25	468	9.5
XL/ 2.16m	26	397	9.2
	27	436	9.9
	28	83	1.2
	28	236	3.1
SPM/ 1.5m	29	231	3.0
	30	230	2.9
	31	210	2.7

使用的滤光片均为 Johnson V。XL 为国家天文台兴隆观测站，SPM 为墨西哥 SPM 天文台。

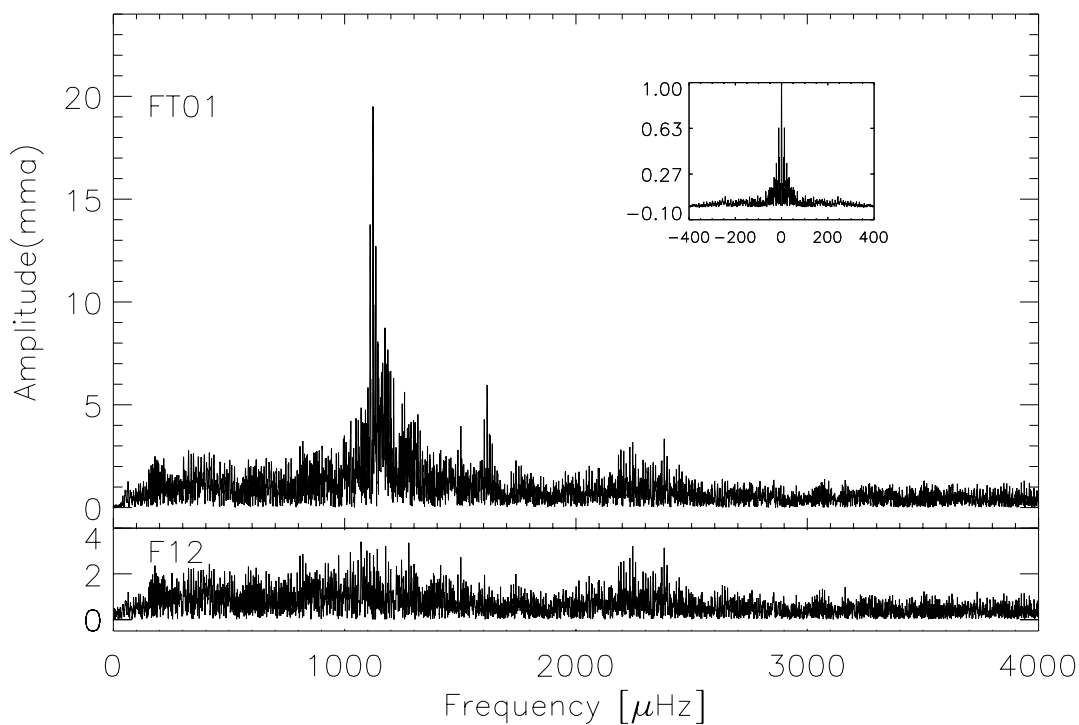


图 25 WD 0246+326 光变曲线的傅立叶功率谱。其中上图为完整傅立叶谱，内嵌小图为谱窗，下图为白化掉 11 个频率之后的残差功率谱。

表 17 光变曲线解析出的频率列表

ID	$f \pm 3\sigma(\mu\text{Hz})$	$A \pm 3\sigma(\text{mma})$	S/N
a7	1049.27 ± 0.22	5.1 ± 1.2	5.9
a1	1122.67 ± 0.07	20.6 ± 1.3	24.2
a3	1131.46 ± 0.20	5.8 ± 1.6	6.8
a2	1174.21 ± 0.22	7.6 ± 1.4	9.0
a10	1179.43 ± 0.27	4.8 ± 1.4	5.7
a11	1181.93 ± 0.32	4.3 ± 1.4	5.1
a5	1211.75 ± 0.27	5.0 ± 1.3	6.0
a9	1213.53 ± 0.54	3.5 ± 1.4	4.2
a6	1259.24 ± 0.16	6.5 ± 1.3	7.8
a8	1304.32 ± 0.24	5.0 ± 1.3	6.1
a4	1616.03 ± 0.19	6.6 ± 1.1	8.1

注：表中 f 为频率（单位为 μHz ）， A 为振幅（单位为 mma ），S/N 为信噪比，ID 为频率编号。

4.4 频率分析

4.4.1 光变曲线的傅立叶分析

我们同样使用 Period04 进行频率分析，并利用蒙特卡罗算法进行误差估计，具体操作请参见上章。图25给出了光变曲线的傅立叶功率谱。

根据信噪比 S/N 大于 4 的原则^[103]，我们共抽取出了共 11 个频率，列于表17，可以看出其中没有探测到任何线性组合及谐频。

4.4.2 频率分析和初步模式证认

我们结合了匈牙利研究者给出的 6 个频率与我们得到的 11 个频率一起进行分析，见表18。我们将至此得到的全部 17 个频率列于表18，并按照其频率值较靠近的方式进行了分组。

频率辨认过程如下

- (1) 从表18中可以看到两组非常接近的频率：a5-a9 和 b6-a4，它们的频率间隔都接近或小于 $1.78\mu\text{Hz}$ 。另两组频率 a1-a3 和 a2-a10-a11，也都具有近似或小于 $8.8\mu\text{Hz}$ 的频率间隔。b4 与 a5-a9 之间的频率差也很小，但是我们并未判定它属于这个多重频率结构，其原因我们将在后面进行解释。

表 18 WD 0246+326 的频率列表

No.	ID	$f(\mu\text{Hz})$	$\delta f(\mu\text{Hz})$	$P(\text{s})$	$\Delta P(\text{s})$
	b1	799.84		1250.3	
			206.97		257.0
G1	b2	1006.80		993.2	
			42.47		40.2
	a7	1049.27		953.0	
			73.40		62.3
	a1	1122.67		890.7	
G2			8.80		6.9
	a3	1131.46		883.8	
			23.07		17.7
G3	b3	1154.53		866.2	
			19.68		14.5
	a2	1174.21		851.6	
			5.22		3.8
G4	a10	1179.43		847.9	
			2.50		1.8
	a11	1181.93		846.2	
			24.80		17.4
G5	b4	1206.73		828.7	
			5.02		3.43
	a5	1211.75		825.3	
G6			1.78		1.2
	a9	1213.53		824.0	
			45.72		29.9
	a6	1259.24		794.1	
			26.75		16.5
G7	b5	1285.99		777.6	
			18.33		10.9
	a8	1304.32		766.7	
			310.45		147.4
	b6	1614.77		619.3	
G8			1.27		0.5
	a4	1616.03		618.8	

注：表中 f 为频率（单位为 μHz ）， δf 为相邻两频率之间的频率间隔（单位为 μHz ）， P 为周期（单位为秒）， ΔP 为相邻频率之间的周期间隔（单位为秒）。其中频率编号为 b 的来自 Bognár et al. (2009)^[101]。No. 为频率组的编号。

(2) a2-a10-a11 之间的频率间隔分别为 $5.2\mu\text{Hz}$ 和 $2.5\mu\text{Hz}$ ，比例近似于 2:1，因此我们认为这一组频率应该是一个 $l=2$ 频率，其 m 值为 $(+2,+0,-1)$ 或 $(+1,-1,-2)$ 。

(3) 从公式

$$\sigma_{k,l,m} = \sigma_{k,l} + m \times (1 - C_{k,l})\Omega \quad (4-1)$$

其中 $C_{k,l} = 1/l(l+1)$ ^[98]， $l=2$ 频率的平均自转分裂频率差应该为 $l=1$ 模式的 1.67 倍。由于我们已经证认了 a2-a10-a11 这个频率组为 $l=2$ 频率，其平均频率间隔大约为 $2.5\mu\text{Hz}$ ，则可以估算 $l=1$ 频率的平均周期间隔约为 $1.5\mu\text{Hz}$ 。而 a1-a3 这组模式的频率间隔约为 $8.8\mu\text{Hz}$ ，可以排除这些频率是 $l=1$ 而判定它们为 $l=2$ 模式。

(4) 由于 a5-a9 和 b6-a4 的频率间隔分别为 $1.78\mu\text{Hz}$ 和 $1.27\mu\text{Hz}$ ，接近所估算的 $l=1$ 模式的频率分裂，我们辨认为 $l=1$ 模式。由于 b4-a5 的频率间隔为 $5.02\mu\text{Hz}$ ，比所估算出来的 $l=1$ 模式的频率分裂大很多，我们不认为 b4 是 a5-a9 这组频率的一个分裂。

(5) 由第一章所提到的渐进理论， g 模式的脉动中相同 l 值连续 k 值的模式的周期间隔近于固定值。我们发现 a6 和 a9 之间及 a6 和 a8 之间的周期间隔分别为 29.9s 和 27.4s，这可能成为 a8 和 a6 也是 $l=1$ 模式的证据。因此我们对 a9, a6, a8 和 b6 进行了线性拟合，对应的 k 值分别为 +7, +6, +5 和 +0。图26展示了线性拟合。

(6) 由渐进理论，可以得知 $l=1$ 模式和 $l=2$ 模式的平均周期间隔之比近似于 $\sqrt{3}$ 。由 4 个 $l=1$ 模式得到的平均周期间隔为 $29.3 \pm 0.2 \text{ s}$ ，因此可得 $l=2$ 模式的平均周期间隔应为约 16.9s。我们发现 a1-a3 与 a2-a10-a11 这两个多重结构中 $m=0$ 频率的周期差为 39.3s，与所推断出来的 $l=2$ 频率的周期间隔的两倍相差近。这也支持了对这些频率 l 值的判断。

(7) 其他观测到频率的 l 值不能被直接定出，我们列为其他频率。

表19列出了频率证认的结果。

4.5 星震学分析

4.5.1 频率间隔和自转速度

从表19中我们判断出两组 l 值为 1 的多重结构，从中推断出对 $l=1$ 的频率，由于自转分裂造成的平均频率间隔为 $1.52 \pm 0.13 \mu\text{Hz}$ 。由两组判定的 $l=2$ 的模式，我们发现 a10-a11 的频率间隔接近于 F2-F10 的一半。这表示 a2, a10 和 a11 的 m 值分别为 $(+2,+0,-1)$ 或

表 19 WD 0246+326 的脉动模式证认

ID	$f(\mu\text{Hz})$	δf	$P(s)$	$\Delta P(s)$	δk	δm
$l = 1$						
a5	1211.75		825.3			
		1.78				
a9	1213.53		824.0		+7	
				29.9		
a6	1259.24		794.1		+6	
				27.4		
a8	1304.32		766.7		+5	
				147.4		
b6	1614.77		619.3		0	
		1.27				
a4	1616.03		618.8			
$l = 2$						
a1	1122.67		890.7			+2?
		8.80			+2	
a3	1131.46		883.8			-2 or -1
				32.2		
a2	1174.21		851.6			+2 or +1
		5.22				
a10	1179.43		847.9		0	0 or -1
		2.50				
a11	1181.93		846.1			-1 or -2
Further signals						
b1	799.84		1250.3			
b2	1006.80		993.2			
a7	1049.27		953.0			
b3	1154.53		866.2			
b4	1206.73		828.7			
b5	1285.99		777.6			

注：表中的各量与表18相同。

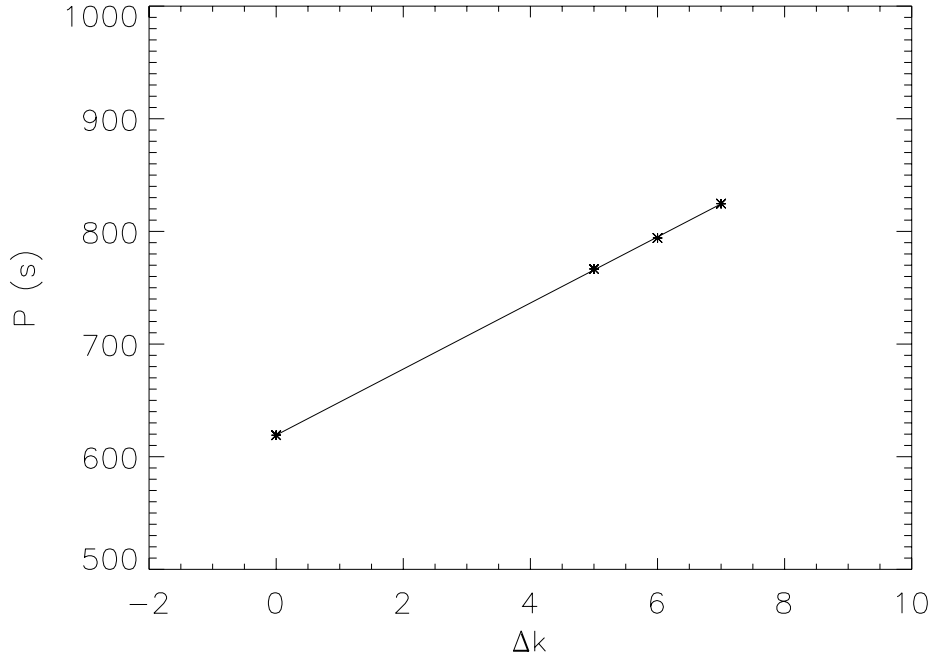


图 26 对 4 个被证认为 $l = 1$ 模式的周期的线性拟合。

(+1,-1,-2)。因此自转造成的 $l=2$ 模式的频率分裂估算为 $2.51 \pm 0.01 \mu\text{Hz}$ 。由于 a_1 和 a_3 的 m 值目前无法得知，我们没有使用 a_1 - a_3 来估算 $l=2$ 模式的自转分裂。

利用 $l=1$ 模式的自转分裂 $1.52 \pm 0.13 \mu\text{Hz}$ 和 $l=2$ 模式的自转分裂 $2.51 \pm 0.01 \mu\text{Hz}$ ，我们得到白矮星 WD 0246+326 的自转周期为 3.78 ± 0.11 天。

4.5.2 平均周期间隔

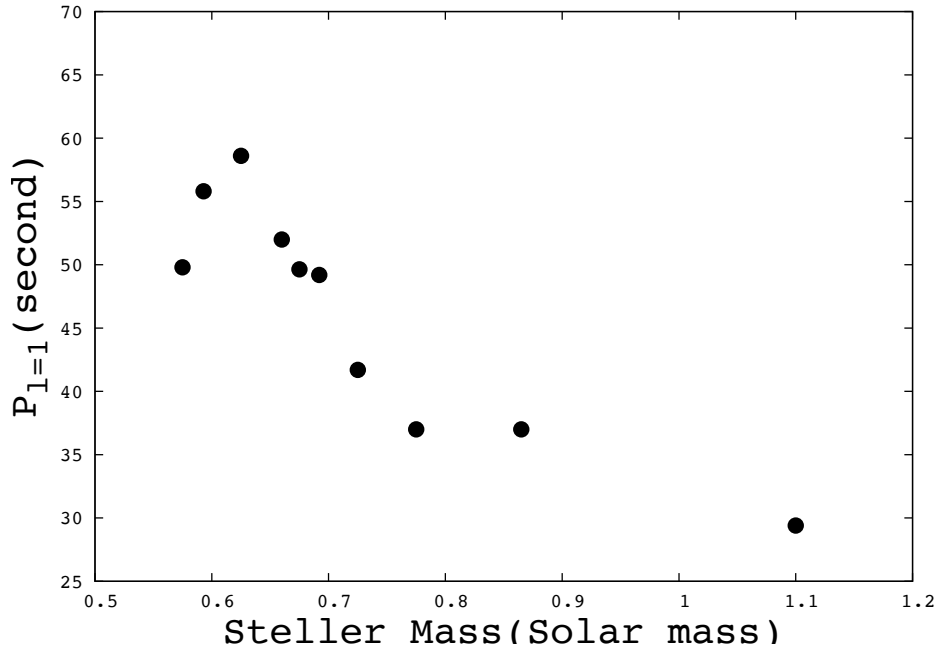
如图26所示，我们对 4 个被认为是 $l=1$ 的模式进行了一个线性拟合，得到了 29.3 ± 0.2 s 的平均周期间隔。

如第一章所言，脉动白矮星的平均周期间隔对于其恒星总质量非常敏感。Kawaler et al. (1994)^[104] 的图 2 展示了不同质量的 PG1159 型星的模型结果。Brassard et al. (1992)^[27] 在图 38 中也基于模型对 DA 型脉动白矮星证明了类似的性质。

因此，我们收集了经过理论模型研究的 DA 型脉动白矮星信息进行调研，检查由观测得到的 $l=1$ 模式的平均周期间隔，与经理论模型研究得到的恒星质量之间的关系。所涉及的样本和数值列于表20 (Kanaan et al. 2005^[44], Li et al. 2015^[105], Fu et al. 2013^[97], Su et al. 2014^[106], Su, Li & Fu 2014^[107], Pakštienė et al. 2013^[108], 2014^[109], Córscico et al. 2012^[110], Pech, Vauclair, & Dolez 2006^[99], Lin, Li & Su 2015^[111]), 并将结果画于图27。在该图可以观察到的趋势是恒星质量越大其平均周期间隔越小。WD 0246+326 的 $l=1$ 模式的平均周期间

表 20 10 颗 DA 型脉动白矮星的质量与其 $l = 1$ 模式平均周期间隔

ID	Stellar Mass(M_{\odot})	$\Delta P_{l=1}(s)$
GD1212	0.775	37
KUV 08368+4026	0.692	49.2
HS 0507+0434B	0.675	49.63
PG 2303+243	0.66	52.0
G117-B15A	0.593	55.8
HL Tau 76	0.575	49.8
BPM37093	1.1	29.4
G207-9	0.725	41.7
LP 133-144	0.865	37
KUV 11370+4222	0.625	58.6


 图 27 10 颗 DA 型脉动白矮星的 $l = 1$ 模式的周期间隔与其最佳模型质量的关系。

隔为 29.3 s, 我们保守估算其总质量应该大于 $0.75M_{\odot}$ 。

4.6 理论模型限制

4.6.1 理论模型工具 WDEC

我们使用 WDEC (White Dwarf Evolution Code) 程序来计算这颗星的模型。这是一个演化模型构建软件, 最早由 Schwarzschild 编写^[37,38,112], 后经多次修改和升级。这个模型

表 21 为寻找 WD 0246+326 最佳拟合模型所建立的粗网格和细网格的参数列表

	Coarse Grid		Fine Grid	
	Range	Step	Range	Step
Mass(M_{\odot})	0.75 – 1.20	0.02	0.9 – 1.02	0.01
$T_{\text{eff}}(K)$	11000 – 14000	200	11400 – 12200	100
$\log M_{\text{H}}/M_{*}$	-4.0 – -8.0	0.5	-4.5 – -7.0	0.1
$\log M_{\text{He}}/M_{*}$	-2		-2	

是从一个输入的零年龄白矮星演化降温到指定的温度。目前这个模型在简并电子状态的恒星内部使用的是 Lamb^[113] 的物态方程，而外壳使用 Saumon et al.^[114] 的物态方程。传导不透明度表采用 Itoh et al.^[115]，辐射不透明度表采用 OPAL 不透明度表^[116]，中微子造成的能量损失参照 Itoh et al.^[117]。对流使用的混合长参数 $\alpha = 0.6$ ，后又采用了 Thoul et al.^[118] 来计算其中的元素扩散。

之所以使用 WDEC 而未使用 Toulouse 白矮星模型程序，是由于 WD 0246+326 的质量较大，超出了 Toulouse 白矮星程序的参数范围。为运行 WDEC 程序所需要对应质量的零年龄白矮星作为输入参数，我们采用了 MESA(Modules for Experiments in Stellar Astrophysics)^[39] 来生成所需要的模型。

这个模型构建软件的有 4 个可以限制的输入参数，分别为恒星总质量、有效温度、氢壳层质量和氦层质量。

4.6.2 模型拟合

Bergeron et al.^[100] 给出了 WD 0246+326 的一组恒星参数包括有效温度 $11290 \pm 200 K$ 和表面重力加速度 $\text{Log } g = 8.08 \pm 0.05$ 。Gianninas et al.^[11] 由光谱观测给出其参数为有效温度 $11940 \pm 180 K$ 和表面重力加速度 $\log g$ 为 8.21 ± 0.05 。这两组参数使 WD 0246+326 在赫罗图上的位置从红边缘变到了蓝边缘，因此使用现有的光谱资料来对计算模型参数上下限进行限制非常困难。但是正如上一节所述，由于该星的 $l=1$ 频率的周期间隔为 $29.3 \pm 0.2 s$ ，由此得出其质量大于 $0.75M_{\odot}$ 的结论。我们在此基础上，在尽量大的参数范围内使用较大的参数步长建立了一个参数网格。我们在此将它称为粗网格，列于表21。

我们采用 4 个 $l=1$ 模式，2 个 $l=2$ 模式和 6 个 l 值未定的模式的周期，与模型计算得到的独立模式的周期进行对比，与 KUV 08368+4026 的工作相同，我们使用 χ^2 来寻找最佳拟合模型。

我们从粗网格中得到了一个 χ^2 值最小的模型，恒星质量为 $0.95M_{\odot}$ 而有效温度为

表 22 WD 0246+326 的最佳拟合模型的参数

$T_{\text{eff}}(K)$	11700 ± 100
$\log g$	8.66 ± 0.02
$M(M_{\odot})$	0.98 ± 0.01
$\log M_H/M_*$	-5.1 ± 0.1
$\log M_{\text{He}}/M_*$	-2

11700K。为了更好地限制模型的参数，围绕这个最佳模型我们建立了参数范围更小而步长也更小的细网格，其参数也列于表21。

在这一步的拟合中，我们注意到部分观测频率的 m 值不能确定。因此，对于由每一个理论模型得到的频率，利用观测得到的恒星自转频率，我们计算出由于转分裂得到的多重结构，并且用得到的全套频率与观测频率进行对比。观测到且被证认为 $l = 1$ 的模式与，计算的 $l = 1$ 的模式及其自转分裂进行对比；观测到的被证认为 $l = 2$ 的模式，与计算的 $l = 2$ 的模式及其自转分裂进行对比；观测到的 l 值不确定的模式则与计算的 l 值为 1 和 2 的所有频率及其自转分裂进行对比。最终我们发现了一个最佳拟合模型，并将其参数总结于表22。图28 分别为固定了质量、有效温度和氢壳层质量的 χ^2 分布。

4.6.3 模式证认

我们找到的最佳拟合模型为观测到的所有频率证认出了相应的 l , k , m 值，结果见表23。

从表中可以看出，所证认出的模型的球谐函数与之前通过星震学所认定的结论，如 a_8 , a_6 , a_9 这三个频率的连续 k 值， a_{10} - a_{11} 与 a_1 - a_3 - a_2 一组的相差 2 的 k 值，都完全吻合。我们因此认为这个模型是 WD 0246+326 的最佳拟合模型，模型给出的恒星参数可靠。

4.7 关于恒星参数的讨论

本章第一节已经提到，对这颗星文献中所给出由光谱观测得到的两组恒星参数差异较大。这可能是两次光谱拟合中使用了不同模板造成的。Bognár et al. (2009)^[101] 的工作中也通过理论模型方法给出了一组恒星参数。但是，那项理论模型工作仅使用了当时观测到的 6 个独立频率，没有自转分裂导致的多重频率结构。因此，观测到的模式的 l 值，只能使用理论模型里的所有 $l = 1$ 和 $l = 2$ 的模式进行对比。且由于理论模型给出的为 $m=0$ 的周期，而观测到的有可能是 m 为其他值的自转分裂模式周期，这也对理论模型的拟合造成偏差。基于这两个原因，我们认为这项理论模型工作给出的恒星参数，其结果不如本次工

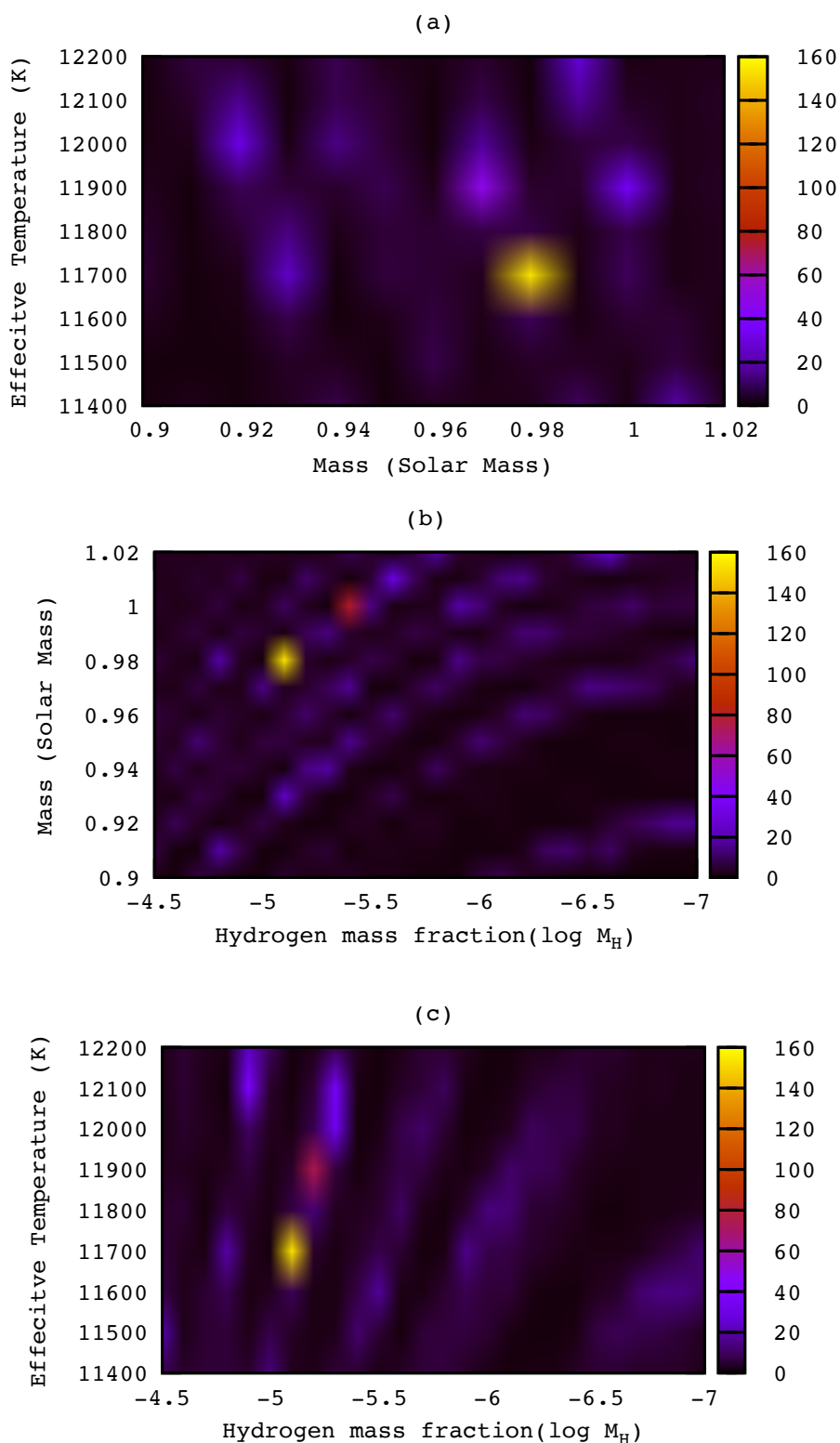


图 28 WD 0246+326 细网格的 χ^2 测试结果。每张图的右侧灰度为 χ^2 值的倒数。(a) 为固定氢壳层质量为 $10^{-5.1}$ 的恒星质量与有效温度的分布。(b) 为固定有效温度为 11700K 的恒星质量与氢壳层质量的分布。(c) 为固定恒星质量为 $0.98M_{\odot}$ 的氢壳层质量与有效温度的分布。

表 23 WD 246+326 的模式证认

	$P_o(s)$	$P_c(s)$	(l, k, m)
l=1			
a4	618.8	619.5	(1,19,-1)
b6	619.3	620.1	(1,19,0)
a8	766.7	766.8	(1,24,0)
a6	794.1	793.5	(1,25,+1)
a9	824.0	824.5	(1,26,0)
a5	825.3	825.5	(1,26,1)
l=2			
a11	846.9	846.6	(2,47,-2)
a10	847.9	848.4	(2,47,-1)
a2	851.6	852.0	(2,47,+1)
a3	883.6	884.2	(2,49,-1)
a1	890.7	890.2	(2,49,+2)
further signal			
b1	1250.3	1248.5	(2,68,0)
b2	993.2	993.2	(1,32,-1)
a7	953.0	954.6	(2,53,-2)
b3	866.2	865.8	(2,48,-1)
b4	828.7	828.2	(2,46,-2)
b5	777.6	777.8	(2,43,0)

注：其中 P_o 为观测到的模式的周期值， P_c 为参数为表22的理论模型理论周期值。

作的可靠。

我们所得到的 WD 0246+326 参数与之前光谱测量的两组恒星参数均有较大的区别。发生此种现象的原因，除了之前所提到的、目前对脉动变星的恒星参数的光谱测量存在不足之外，也由于这颗星具有大质量的判定是由星震学分析脉动性质直接得来。对于 DA 型脉动白矮星的遍历式网格搜寻最佳拟合模型的过程而言，一般使用光谱测得的恒星参数对模型网格进行限制，再由最佳拟合模型对恒星参数做出更加精确的限制，这种过程是十分合理且有效的。但是，针对 WD 0246+326，两次光谱观测所给出的两组恒星参数差异太大，失去了参考意义。而由星震学方法分析得到的周期间隔值得出了大质量的结论，而最终的模型构建确实给出了与观测到的模式符合得很好的结论。因此我们认为，虽然与光谱方法确定的恒星参数不同，星震学方法确定的恒星参数具有很好的可信度。

4.8 小结

- (1) 我们在 2014 年 10 月对 WD 0246+326 在两个站点进行观测，得到了 8 夜的时序测光数据，由数据处理和分析得到了 11 个脉动频率。
- (2) 我们从文献 Bognár et al.(2009)^[101] 中得到了 6 个频率，将它们补充到频率列表后共得到了 17 个频率，其中包括一个三重结构，3 个双重结构和 8 个单频。
- (3) 以上频率经脉动分析被证认为 4 个 $l=1$ 的模式和 2 个 $l=2$ 模式。
- (4) 从多重结构中得出 $l=1$ 模式的自转分裂为 $1.52 \pm 0.05 \mu\text{Hz}$ ，因此得到其自转周期为 3.78 ± 0.11 天。
- (5) 由被认定为属于 $l=1$ 的 4 个模式，计算这些模式的平均周期间隔为 29.3 秒。根据 DA 型脉动白矮星的总质量和平均周期间隔的关系，我们认为 WD 0246+326 可能是一颗大质量的 DA 型脉动白矮星。
- (6) 我们对这颗星进行了理论模型研究，获得的最佳拟合模型的质量为 $0.98 \pm 0.02 M_{\odot}$ ，有效温度为 $11700 \pm 100 K$ ，氢壳层质量 M_H/M_* 为 $10^{-5.1}$ 。
- (7) 基于最佳拟合模型的计算频率与观测到的频率进行相比因而对 WD 0246+326 所有观测到的模式进行了证认。
- (8) 虽然 DA 型脉动白矮星的数量在 4 种已知的脉动白矮星中是最多的，其中由星震学确定恒星参数的样本仍然很少。因此我们由星震学确定 WD 0246+326 为一颗大质量白矮星是非常有意义的。特别是，它是继 $1.1 M_{\odot}$ 的 DA 型脉动白矮星 BPM37093 之后，第一颗由星震学发现的大质量脉动白矮星，而 BPM37093 被认为正在发生核结晶。到目前为止，对于这颗星的核结晶及其核的化学组成的讨论仍未得到最终结论 (Kannan et al. 2005^[44], Brassard & Fontaine 2005^[27])。我们这项研究也为白矮星核结晶的研究提供了一个新的候选体。
- (9) 我们同时注意到有一些 DA 型脉动白矮星由光谱研究被认为具有大质量^[87,88]，但是这些质量的确定并没有由已知的测光数据通过星震学证明。因此，WD 0246+326 的质量被定为 $0.98 \pm 0.01 M_{\odot}$ ，是第二颗由星震学方法研究发现的大质量 DA 型脉动白矮星。
- (10) 为了更细致地对这颗大质量 DA 型脉动白矮星进行研究，我们希望能对这颗星进行后续的高质量光谱观测和多站测光联测。

第 5 章 总结与展望

5.1 总结

本论文的主要内容，首先是对于 DA 型脉动白矮星的综述，然后是收集截至 2017 年 4 月已发表的 DA 型脉动白矮星的恒星参数和脉动参数，进行统计分析。再针对两颗 DA 型脉动白矮星个体，进行时序观测研究，经数据处理、脉动分析和理论模型工作，得到了由星震学方法限制的、更准确的恒星参数，取得了有意义的结果。

(1) 对于白矮星统计工作，总结如下：

- (a) 收集了文献中共计 205 颗 DA 型脉动白矮星，构建了 DA 型脉动白矮星星表。
- (b) 统计工作的一部分结论与 Mukadam et al. (2006) 的工作相同。对于近期新发现的 DA 型脉动白矮星，由于其恒星参数的计算方法与之前不同，且观测较少数据不足，并没有显示出与以前相同的有效温度与 WMP 的线性关系。
- (c) 证实了关于长周期的 DA 型脉动白矮星靠近不稳定带红边缘，而短周期的靠近蓝边缘的结论。
- (d) 证实了白矮星演化降温通过不稳定带时，在蓝边缘附近脉动总功率随温度降低而上升，在红边缘附近随温度降低而下降。
- (e) 针对新发表的 Gianninas 星表进行了分析。由于使用了新的大气光谱模板，该星表给出了比之前其他算法得出的有效温度更高的白矮星大气参数。这对白矮星整体统计性质并无太大改变。但是，作为恒星参数和脉动参数的统计性都比较好的样本，却显示了有效温度和 WMP 之间存在线性关系的可能性。

(2) 对于 KUV 08368+4026 的工作总结如下：

- (a) 我们得到了 1999 年和 2009-2012 年对 DA 型脉动白矮星 KUV 08368+4026 的时序测光数据，从中得到了 30 个独立频率，包括 6 组多重结构和一个单模式以及 13 个其他模式。这些独立频率被证认为 $l=1$ 和 $l=2$ 的模式和它们的自转分裂。同时，也探测到一些线性合并和一些无法辨别的低振幅频率。

- (b) 由 6 组多重结构, 我们确定 $l=1$ 模式的自转分裂间隔为 $1.049 \pm 0.041 \mu\text{Hz}$, 并由此得到了该星的自转周期为 5.52 ± 0.22 天。
- (c) 由所有的 $l=1$, $m=0$ 模式得到这颗星的平均周期间隔为 49.2 秒。
- (d) 这次观测到的全部 6 个多重结构都在 1998 年的联测中被探测到, 但由于观测条件的限制, 那次联测中未能发现多重频率结构。报告脉动性质发现的观测中所得到的 619 秒和 494.5 秒两个周期值在之后的观测中未能再观测到。
- (e) 发现 KUV 08368+4026 的振幅存在年和周尺度的变化。在 2009 年 12 月到 2012 年 1 月的三周间, 其脉动总功率也存在变化。
- (f) 由理论模型构建和频率拟合得到了最佳拟合模型, 其参数为质量 0.692 ± 0.002 太阳质量, 光度 $(2.92 \pm 0.02) \times 10^{-3}$ 太阳光度, 氢壳层质量 10^{-4} 和氦层质量 10^{-2} 恒星质量。
- (3) 对于 WD 0246+326 的工作, 总结如下:
- (a) 在 2014 年 10 月对 DA 型脉动白矮星 WD 0246+326 在两个站点进行了观测, 取得了 8 夜的时序测光数据, 由数据处理得到了 11 脉动个频率。
- (b) 从文献 Bognár et al.^[101] 中得到了 6 个频率, 将它们补充到频率列表后共得到了 17 个频率, 其中包括 1 个三重频率结构, 3 个双重频率结构和 8 个单频。
- (c) 以上频率经脉动分析共证认出 4 个 $l=1$ 的模式和 2 个 $l=2$ 模式。
- (d) 从多重结构中得出 $l=1$ 模式的自转分裂为 $1.52 \pm 0.05 \mu\text{Hz}$, 因此得到其自转周期为 3.78 ± 0.11 天。
- (e) 被认定为属于 $l=1$ 的 4 个模式的平均周期间隔为 29.3 秒。由 DA 型脉动白矮星的质量和平均周期间隔的关系, 说明 WD 0246+326 可能是一颗大质量的 DA 型脉动白矮星。
- (f) 对这颗星进行了理论模型研究, 获得的最佳拟合模型为 0.98 太阳质量, 有效温度 11700K, 氢壳层质量 M_H/M_* 为 $10^{-5.1}$ 。
- (g) 基于最佳拟合模型的计算频率与观测到的频率进行比较, 对 WD 0246+326 第一次进行了模式证认。
- (4) 整个工作过程中遇到的问题和得到的经验

- (a) 在选择了 DA 型脉动白矮星作为攻读博士学位期间的主要研究课题后，本人首先选择对现有已知的 DA 型脉动白矮星进行大规模调研和统计。这样既可以调查该领域的研究背景和历史，也了解了当前该领域的研究前沿和现状，并且对这类天体的整体性质有一个全面的把握。当然这也是得益于这类天体当时发现的数目仅为 100 余颗，可以逐个阅读文献进行归纳总结。我认为对于像 DA 型脉动白矮星这类，整体发现数目较少的天体的研究，在初期进行这样的基础调研非常有益。而最后所形成的 DA 型脉动白矮星星表，对于后续研究和选源都有重要的参考价值。
- (b) 在对 DA 型脉动白矮星进行整体样本调研的过程中，也了解到关于这类天体目前的研究中存在的困难和问题。其一是这类变星本身光度太小，且光度在不断变化，造成由光谱观测得到的恒星大气参数的不确定度较大。其二是相比其他类型的脉动变星和双星，DA 型脉动白矮星的脉动频率很高，脉动参数也存在短时标变化，导致短时间时序测光观测所取得的脉动参数，难以体现变星脉动性质的全貌。总的来说，对这类变星，观测的难度造成的各种参数不确定度较大，由此对脉动不稳定带的确定，以及恒星各种参数之间相关性研究带来了不利影响。要消除这种影响，需要获取准确的恒星大气参数和脉动参数，因而要进行高质量的光谱和长时间多站时序测光观测。但是，目前难以对大量 DA 型脉动白矮星中进行这种观测。这是目前对这类天体整体性质了解的一大瓶颈。
- (c) 对于 DA 型脉动白矮星 KUV 08368+4026 的研究，是对这类变星比较典型的观测-分析-理论模型分析，从而对恒星参数进行限制的过程。我们对这颗变星进行了大量长时间的观测，获取了大量观测数据。在数据处理和分析中，首次遇到脉动参数随时间变化的情况，造成了数据处理过程中很大的困难。然而这个问题解决之后取得的脉动频率谱极其清晰，自转分裂也比较完整，因而对脉动模式的球谐函数的推测十分顺利。后续理论模型的工作也获得成功，尤其是使用了光谱取得的恒星参数限制模型网格范围，最终模型所给出的参数反过来精确限制恒星参数，对于这类星的研究非常有利。在本人的研究工作中，首次在构建理论模型的过程中使用粗网格和细网格两次限制参数，为同类研究提供了合理的方法。同时这项研究也证明了 DA 型脉动白矮星具有不同时间尺度上脉动性质的变化。
- (d) 在对 WD 0246+326 的研究过程中，数据受观测条件所限相对较少，观测到的频率谱不完整。虽然有了先前研究者报告的观测的频率作为补充，在模式证认和分析上仍遇到了造成了较大的困难。这也是这颗星本身的模式比较复杂所致。然而

最终得出了一个从周期间隔和频率间隔上都能自洽的结论，并且得到了这颗星可能具有大质量的结论。此后在理论模型构建的工作中又遇到了之前使用的白矮星静态模型软件不能处理大质量恒星的问题，于是改用另一个白矮星演化模型软件，最后得到了与观测频率的球谐函数参数相吻合的模式证认结果。这对于这颗星的大质量结论是一个比较有力的佐证。WD 0246+326 具有大质量的结论，为当前的研究重点之一的白矮星的核结晶现象，提供了候选观测和研究目标，具有重要的科学意义。

- (e) 在对具体 DA 型脉动白矮星的恒星参数进行精确限制的过程中，我们遇到了在这种研究中经常出现的几种典型情况。首先虽然同是确定恒星基本参数的方法，但是星震学建模，与通过光谱吸收线进行模板拟合是两种截然不同的方法。目前没有证据表明这两种方法的优劣和可靠性。对于 WD 0246+326 的研究过程，就是完全独立地利用两种方法，得出了差别很大的结论。这主要是由于这颗星的特殊情况，由其周期间隔较小的推测直接得出大质量结论，而否定了光谱方法得出的结论。对于大多数脉动性质较为“普遍”的 DA 型脉动白矮星，在通过构建模型网格对观测模式进行拟合，以期获得最佳拟合模型的工作中，使用光谱确定的恒星参数辅助进行最佳模型的筛选，是十分合理的，且已经在大量研究中被使用的。在对 KUV 08368+4026 的工作中，正是使用了这一方法，而最终在光谱参数的一定误差范围内给出了最佳拟合模型，说明在这颗星上两种方法所确定的恒星参数符合较好。

有一些研究者，使用较少的未经模式证认的观测模式作为限制，通过模型对恒星参数进行限定。这种方法光谱参数在最佳拟合模型的选取中起了几乎是决定性的作用。因为在这类研究工作中，所使用的恒星脉动频率多是基于短时间的时序测光，获得的频率较少，几乎无法探测到自转分裂，使脉动模式的球谐函数参数 l , k , m 值无法判定。这种情况下研究者通常会使用理论模型的所有 $l=1$ 和 $l=2$ 模式的频率与观测模式进行比对，很容易有多个模型都出现相符。要从中选取最佳拟合模型，必须使用其他参数进行限制，因此作为限制的恒星光谱参数的作用非常大。而对于对单一个体进行多站长时间时序测光的研究工作中，由于获取了较多精确的脉动频率，解析出自转分裂频率，因此对独立模式的球谐函数参数多了额外的限制，非常有利于最佳拟合模型的选取，也使其模型给出的恒星参数限制更加可靠。在脉动参数较为“特殊”的情况下，可以完全依靠星震学方法得到结果，而脱离恒星光谱参数给出恒星参数限制。WD 0246+326 的研究工作正

是此种情况。

- (f) 论文在引言和统计工作部分所阐述的一些观点在两颗 DA 型脉动白矮星的观测研究中也得到了证实和体现。例如
- i. DA 型脉动白矮星的脉动参数的变化。在 KUV 08368+4026 的研究中，我们在实际观测中发现并指出脉动参数（尤其振幅）存在以年和周为时间尺度的巨大变化。而且，通过对这颗星长时间多站观测所抽取的频率谱，与发现脉动性质时所报告的两个模式截然不同，也证实了短时间测光对于 DA 星脉动白矮星的脉动性质无法完全掌握的观点。
 - ii. 由光谱获得的 DA 型脉动白矮星的恒星大气参数测定的不确定度较大。在对 WD 0246+326 进行文献调研时，我们发现了基于光谱观测而测定的两组差异巨大的温度参数。
 - iii. 由不同算法和大气模板得到的恒星大气参数的系统差。由第二章中的三组样本的差异，以及该章最后讨论的 GIAN 组样本表现出的有效温度差异，证明确实存在系统差。
 - iv. 关于不同周期的 DA 型脉动白矮星在赫罗图上分布于不同位置的结论。我们利用最佳理论模型，为 WD 0246+326 限制的有效温度虽然高达 11700K，但是由于这颗星质量较大，在赫罗图上的位置较低，仍位于脉动不稳定带的红边缘。而由其脉动性质可以看出这颗星 WMP 较高，与第二章所提到的，长周期的 DA 型脉动白矮星在脉动不稳定带里的位置靠近不稳定带红边缘的结论相符。
 - v. 本论文引言部分中所提到的，利用白矮星相同 l 值连续 k 值模式的平均周期间隔估算白矮星质量的方法，固然是白矮星脉动分析的基本原理之一，但是按照恒星脉动原理和理论模型模拟的结论，除总质量以外，这个平均周期间隔同样受到恒星有效温度和氢壳层质量等参数的影响。因此，对于平均周期间隔比较“普遍”的 DA 型脉动白矮星，如 KUV 08368+4026（平均周期间隔为 49.2 秒），不能通过此方法对质量进行估计。而对于 WD 0246+326 的情况，由于其平均周期间隔很小。虽然理论上这种小周期间隔，除了大质量以外也可能由高温或高氢壳层质量来解释，但是实际上对 DA 型脉动白矮星而言，所有这些参数都不可能非常大。质量上限受 Chandrasekhar 极限的限制，有效温度受脉动不稳定带范围约束，而氢壳层质量不能超过 10^{-4} 否则会发生核反应。因此，我们发现在这颗星的具体情况下，只有大质量才能给出

符合该平均周期间隔，而又结构稳定的脉动白矮星模型。因此，在星震学的研究过程中，理论基础固然重要，然而在实际分析过程中要结合观测数据，从多方面综合考虑，方能得出合理的结论。

5.2 未来工作展望

- (1) 对未来新发现的 DA 型脉动白矮星个体和种类进行跟进，并对目前星表中缺失数据进行补充，增加和丰富 DA 型脉动白矮星星表内容。
- (2) 对于两颗 DA 型脉动白矮星 KUV 08368+4026 和 WD 0246+326，进行 WET 联测和后续研究。
- (3) 作为第二颗由星震学方法认定的大质量 DA 型脉动白矮星 WD 0246+326，具有非常重要的学术价值。我们拟申请进行较高分辨率光谱观测，以取得更准确的恒星大气参数和其他信息。对这颗星已经在 2016 年进行了一次 WET 联测，其数据正在处理和分析中，有望取得更丰富更精确的脉动信息。在这些基础上进行理论模型研究，以验证其具有大质量的结论，并通过理论模型和脉动分析等方法对其可能存在的核结晶进行探索。
- (4) 对其他新发现的 DA 型脉动白矮星，进行时序测光观测和理论模型构建工作。本文选取的目标 KUV 08368+4026 位于 DA 型脉动白矮星不稳定带的中心附近，而 WD 0246+326 则位于红边缘附近。后续工作中将考虑从 DA 型脉动白矮星星表中，选取一颗观测位置季节均合适，亮度较大且位于脉动不稳定带蓝边缘附近的 DA 型脉动白矮星作为目标，分析其脉动性质。
- (5) 在目前针对其他类型的变星的研究工作中，对变星进行时序光谱观测的方法非常热门。如有条件使用大口径望远镜对脉动白矮星也进行时序光谱观测，必能对此类天体的了解有重大的推进作用。

参考文献

- [1] S. O. Kepler, S. J. Kleinman, A. Nitta, et al. White dwarf mass distribution in the SDSS[J]. MNRAS, 2007, 375:1315–1324.
- [2] G. Fontaine, P. Brassard, P. Bergeron. The Potential of White Dwarf Cosmochronology[J]. PASP, 2001, 113:409–435.
- [3] H. L. Shipman. Masses and radii of white-dwarf stars. III - Results for 110 hydrogen-rich and 28 helium-rich stars[J]. ApJ, 1979, 228:240–256.
- [4] S. Chandrasekhar. The highly collapsed configurations of a stellar mass[J]. MNRAS, 1931, 91:456–466.
- [5] S. Chandrasekhar. The highly collapsed configurations of a stellar mass (Second paper)[J]. MNRAS, 1935, 95:207–225.
- [6] G. Laughlin, P. Bodenheimer, F. C. Adams. The End of the Main Sequence[J]. ApJ, 1997, 482:420–432.
- [7] K. Werner, N. J. Hammer, T. Nagel, et al. On Possible Oxygen/Neon White Dwarfs: H1504+65 and the White Dwarf Donors in Ultracompact X-ray Binaries[C]. In: D. Koester, S. Moehler, (eds.). Proceedings of 14th European Workshop on White Dwarfs, volume 334 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2005. 165.
- [8] D. E. Winget, D. J. Sullivan, T. S. Metcalfe, et al. A Strong Test of Electroweak Theory Using Pulsating DB White Dwarf Stars as Plasmon Neutrino Detectors[J]. ApJ, 2004, 602:L109–L112.
- [9] A. Kim, D. E. Winget, M. H. Montgomery. Measuring plasmon neutrino rates using DBVs[J]. Mem. Soc. Astron. Italiana, 2006, 77:460.
- [10] G. P. McCook, E. M. Sion. A Catalog of Spectroscopically Identified White Dwarfs[J]. ApJS, 1999, 121:1–130.
- [11] A. Gianninas, P. Bergeron, M. T. Ruiz. A Spectroscopic Survey and Analysis of Bright, Hydrogen-rich White Dwarfs[J]. ApJ, 2011, 743:138.
- [12] S. Pyrzas, B. T. Gänsicke, J. J. Hermes, et al. Discovery of ZZ Ceti in detached white dwarf plus main-sequence binaries[J]. MNRAS, 2015, 447:691–697.
- [13] I. Iben, Jr., C. Ritossa, E. García-Berro. On the Evolution of Stars that Form Electron-degenerate Cores Processed by Carbon Burning. IV. Outward Mixing During the Second Dredge-up Phase and Other Properties of a 10.5 M_☉ Model Star[J]. ApJ, 1997, 489:772–790.
- [14] D. E. Winget, S. O. Kepler. Pulsating White Dwarf Stars and Precision Asteroseismology[J]. ARA&A, 2008, 46:157–199.

- [15] C. S. Jeffery, H. Saio. Radial pulsation as a function of hydrogen abundance[J]. MNRAS, 2016, 458:1352–1373.
- [16] A. U. Landolt. A New Short-Period Blue Variable[J]. ApJ, 1968, 153:151.
- [17] B. M. Lasker, J. E. Hesser. High-Frequency Stellar Oscillations.VI. R548, a Periodically Variable White Dwarf[J]. ApJ, 1971, 163:L89.
- [18] B. V. Kukarkin, P. N. Kholopov, N. P. Kukarkina, et al. 58th Name-List of Variable Stars[J]. Information Bulletin on Variable Stars, 1972, 717.
- [19] D. E. Winget. Asteroseismology of white dwarf stars[J]. Journal of Physics Condensed Matter, 1998, 10:11247–11261.
- [20] B. G. Castanheira, S. O. Kepler, A. F. M. Costa, et al. Towards a pure ZZ Ceti instability strip[J]. A&A, 2007, 462:989–993.
- [21] D. E. Winget, E. L. Robinson, R. D. Nather, et al. Photometric observations of GD 358 - DB white dwarfs do pulsate[J]. ApJ, 1982, 262:L11–L15.
- [22] D. E. Winget, H. M. van Horn, M. Tassoul, et al. Hydrogen-driving and the blue edge of compositionally stratified ZZ Ceti star models[J]. ApJ, 1982, 252:L65–L68.
- [23] P. N. Kholopov, N. N. Samus, E. V. Kazarovets, et al. The 67th Name-List of Variable Stars[J]. Information Bulletin on Variable Stars, 1985, 2681.
- [24] A. Beauchamp, F. Wesemael, P. Bergeron, et al. Spectroscopic Studies of DB White Dwarfs: The Instability Strip of the Pulsating DB (V777 Herculis) Stars[J]. ApJ, 1999, 516:887–891.
- [25] S. O. Kepler. Observational white dwarf seismology[J]. Communications in Asteroseismology, 2007, 150:221.
- [26] M. H. Montgomery, K. A. Williams, D. E. Winget, et al. SDSS J142625.71+575218.3: A Prototype for a New Class of Variable White Dwarf[J]. ApJ, 2008, 678:L51.
- [27] P. Brassard, G. Fontaine, F. Wesemael, et al. Adiabatic properties of pulsating DA white dwarfs. IV - an extensive survey of the period structure of evolutionary models[J]. ApJS, 1992, 81:747–794.
- [28] P. W. Jones, C. J. Hansen, W. D. Pesnell, et al. On the possibility of detecting weak magnetic fields in variable white dwarfs[J]. ApJ, 1989, 336:403–408.
- [29] G. Vauclair, N. Dolez, J. N. Fu, et al. New ZZ Ceti variables from the KISO survey.[J]. A&A, 1997, 322:155–158.
- [30] C. Stoughton, R. H. Lupton, M. Bernardi, et al. Sloan Digital Sky Survey: Early Data Release[J]. AJ, 2002, 123:485–548.
- [31] F. Mullally, S. E. Thompson, B. G. Castanheira, et al. Eleven New DA White Dwarf Variable Stars from the Sloan Digital Sky Survey[J]. ApJ, 2005, 625:966–972.

- [32] B. G. Castanheira, S. O. Kepler, F. Mullally, et al. Discovery of eleven new ZZ Ceti stars[J]. *A&A*, 2006, 450:227–231.
- [33] R. H. Østensen, R. Silvotti, S. Charpinet, et al. First Kepler results on compact pulsators - I. Survey target selection and the first pulsators[J]. *MNRAS*, 2010, 409:1470–1486.
- [34] J. J. Hermes, F. Mullally, R. H. Østensen, et al. Discovery of a ZZ Ceti in the Kepler Mission Field[J]. *ApJ*, 2011, 741:L16.
- [35] J. K. Zhao, A. L. Luo, T. D. Oswalt, et al. 70 DA White Dwarfs Identified in LAMOST Pilot Survey[J]. *AJ*, 2013, 145:169.
- [36] D. Pech, G. Vauclair. The ZZ Ceti star G 185-32: new insight from asteroseismology[J]. *A&A*, 2006, 453:219–227.
- [37] M. Schwarzschild, R. Härm. Thermal Instability in Non-Degenerate Stars.[J]. *ApJ*, 1965, 142:855.
- [38] G. S. Kutter, M. P. Savedoff. Evolution of Initially Pure ^{12}C Stars and the Production of Planetary Nebulae[J]. *ApJ*, 1969, 156:1021.
- [39] B. Paxton, L. Bildsten, A. Dotter, et al. Modules for Experiments in Stellar Astrophysics (MESA)[J]. *ApJS*, 2011, 192:3.
- [40] A. D. Romero, A. H. Córscico, L. G. Althaus, et al. Toward ensemble asteroseismology of ZZ Ceti stars with fully evolutionary models[J]. *MNRAS*, 2012, 420:1462–1480.
- [41] R. E. Nather, D. E. Winget, J. C. Clemens, et al. The whole earth telescope - A new astronomical instrument[J]. *ApJ*, 1990, 361:309–317.
- [42] J. L. Provencal, M. H. Montgomery, A. Kanaan, et al. Empirical Determination of Convection Parameters in White Dwarfs. I. Whole Earth Telescope Observations of EC14012-1446[J]. *ApJ*, 2012, 751:91.
- [43] J. L. Provencal, M. H. Montgomery, A. Kanaan, et al. 2006 Whole Earth Telescope Observations of GD358: A New Look at the Prototype DBV[J]. *ApJ*, 2009, 693:564–585.
- [44] A. Kanaan, A. Nitta, D. E. Winget, et al. Whole Earth Telescope observations of BPM 37093: A seismological test of crystallization theory in white dwarfs[J]. *A&A*, 2005, 432:219–224.
- [45] S. D. Kawaler, E. M. Potter, M. Vučković, et al. Whole Earth Telescope observations of the pulsating hot white dwarf PG 1707+427[J]. *A&A*, 2004, 428:969–981.
- [46] G. Handler, D. O’Donoghue, M. Müller, et al. Amplitude and frequency variability of the pulsating DB white dwarf stars KUV 05134+2605 and PG 1654+160 observed with the Whole Earth Telescope[J]. *MNRAS*, 2003, 340:1031–1038.
- [47] D. W. Kurtz, S. D. Kawaler, R. L. Riddle, et al. Discovery of the ‘missing’ mode in HR1217 by the Whole Earth Telescope[J]. *MNRAS*, 2002, 330:L57–L61.

- [48] G. Handler, H. Pikall, D. O'Donoghue, et al. New Whole Earth Telescope observations of CD-24 7599: steps towards delta Scuti star seismology[J]. MNRAS, 1997, 286:303–314.
- [49] S. D. Kawaler, M. S. O'Brien, J. C. Clemens, et al. Whole Earth Telescope Observations and Seismological Analysis of the Pre-White Dwarf PG 2131+066[J]. ApJ, 1995, 450:350.
- [50] S. O. Kepler, O. Giovannini, M. A. Wood, et al. Whole Earth Telescope Observations of the DAV White Dwarf G226-29[J]. ApJ, 1995, 447:874.
- [51] A. S. Mukadam, F. Mullally, R. E. Nather, et al. Thirty-Five New Pulsating DA White Dwarf Stars[J]. ApJ, 2004, 607:982–998.
- [52] Z. Bognár, M. Páparó, L. Molnár, et al. G 207-9 and LP 133-144: light-curve analysis and asteroseismology of two ZZ Ceti stars[J]. MNRAS, 2016, 461:4059–4070.
- [53] P. Bergeron, G. Fontaine, M. Billères, et al. On the Purity of the ZZ Ceti Instability Strip: Discovery of More Pulsating DA White Dwarfs on the Basis of Optical Spectroscopy[J]. ApJ, 2004, 600:404–408.
- [54] S. O. Kepler, B. G. Castanheira, A. F. M. Costa, et al. Gemini spectra of 12000 K white dwarf stars[J]. MNRAS, 2006, 372:1799–1803.
- [55] B. T. Gänsicke, P. Rodríguez-Gil, T. R. Marsh, et al. A ZZCeti white dwarf in S-DSSJ133941.11+484727.5[J]. MNRAS, 2006, 365:969–976.
- [56] A. Gianninas, B. Curd, G. Fontaine, et al. Discovery of Three Pulsating, Mixed-atmosphere, Extremely Low-mass White Dwarf Precursors[J]. ApJ, 2016, 822:L27.
- [57] J. J. Hermes, M. H. Montgomery, D. E. Winget, et al. SDSS J184037.78+642312.3: The First Pulsating Extremely Low Mass White Dwarf[J]. ApJ, 2012, 750:L28.
- [58] A. Gianninas, M. Kilic, W. R. Brown, et al. The ELM Survey. VI. Eleven New Double Degenerates[J]. ApJ, 2015, 812:167.
- [59] W. R. Brown, A. Gianninas, M. Kilic, et al. The ELM Survey. VII. Orbital Properties of Low-Mass White Dwarf Binaries[J]. ApJ, 2016, 818:155.
- [60] J. J. Hermes, M. H. Montgomery, D. E. Winget, et al. Discovery of Pulsations, Including Possible Pressure Modes, in Two New Extremely Low Mass, He-core White Dwarfs[J]. ApJ, 2013, 765:102.
- [61] J. J. Hermes, M. H. Montgomery, A. Gianninas, et al. A new class of pulsating white dwarf of extremely low mass: the fourth and fifth members[J]. MNRAS, 2013, 436:3573–3580.
- [62] K. J. Bell, S. O. Kepler, M. H. Montgomery, et al. SDSS J1618+3854: The Sixth Extremely Low-Mass White Dwarf Pulsator[C]. In: P. Dufour, P. Bergeron, G. Fontaine, (eds.). Proceedings of 19th European Workshop on White Dwarfs, volume 493 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2015. 217.

- [63] M. Kilic, J. J. Hermes, A. Gianninas, et al. PSR J1738+0333: the first millisecond pulsar + pulsating white dwarf binary*[J]. *MNRAS*, 2015, 446:L26–L30.
- [64] E. García-Berro, P. Lorén-Aguilar, A. H. Córscico, et al. The gravitational wave radiation of pulsating white dwarfs revisited: the case of BPM 37093 and PG 1159-035[J]. *A&A*, 2006, 446:259–266.
- [65] P. Brassard, G. Fontaine. Asteroseismology of the Crystallized ZZ Ceti Star BPM 37093: A Different View[J]. *ApJ*, 2005, 622:572–576.
- [66] T. S. Metcalfe, M. H. Montgomery, A. Kanaan. Testing White Dwarf Crystallization Theory with Asteroseismology of the Massive Pulsating DA Star BPM 37093[J]. *ApJ*, 2004, 605:L133–L136.
- [67] A. Nitta, A. Kanaan, S. O. Kepler, et al. Mode Identification of BPM 37093 with the HST[J]. *Baltic Astronomy*, 2000, 9:97–112.
- [68] A. Kanaan, A. Nitta-Kleinman, D. E. Winget, et al. BPM 37093: Preliminary Results from XCOV 16 and XCOV 17[J]. *Baltic Astronomy*, 2000, 9:87–96.
- [69] A. Kanaan, S. O. Kepler, O. Giovannini, et al. BPM 37093: the way to the Interior of Crystallized Stars[J]. *Baltic Astronomy*, 1998, 7:183–196.
- [70] D. W. Kurtz, H. Shibahashi, V. S. Dhillon, et al. Hot DAVs: a probable new class of pulsating white dwarf stars[J]. *MNRAS*, 2013, 432:1632–1639.
- [71] D. W. Kurtz, H. Shibahashi, V. S. Dhillon, et al. A search for a new class of pulsating DA white dwarf stars in the DB gap[J]. *MNRAS*, 2008, 389:1771–1779.
- [72] K. J. Bell, J. J. Hermes, A. Bischoff-Kim, et al. KIC 4552982: Outbursts and Asteroseismology from the Longest Pseudo-continuous Light Curve of a ZZ Ceti[J]. *ApJ*, 2015, 809:14.
- [73] J. J. Hermes, M. H. Montgomery, K. J. Bell, et al. A Second Case of Outbursts in a Pulsating White Dwarf Observed by Kepler[J]. *ApJ*, 2015, 810:L5.
- [74] K. J. Bell, J. J. Hermes, M. H. Montgomery, et al. The First Six Outbursting Cool DA White Dwarf Pulsators[C]. In: P.-E. Tremblay, B. Gaensicke, T. Marsh, (eds.). *Proceedings of 20th European White Dwarf Workshop*, volume 509 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2017. 303.
- [75] A. S. Mukadam, M. H. Montgomery, D. E. Winget, et al. Ensemble Characteristics of the ZZ Ceti Stars[J]. *ApJ*, 2006, 640:956–965.
- [76] G. Fontaine, P. Bergeron, P. Brassard, et al. Discovery of Two New Pulsating DA (ZZ Ceti) White Dwarfs[J]. *ApJ*, 2001, 557:792–797.
- [77] A. Gianninas, P. Bergeron, G. Fontaine. Toward an Empirical Determination of the ZZ Ceti Instability Strip[J]. *ApJ*, 2005, 631:1100–1112.

- [78] R. Silvotti, B. Voss, I. Bruni, et al. Two new ZZ Ceti pulsators from the HS and HE surveys[J]. *A&A*, 2005, 443:195–199.
- [79] B. Voss, D. Koester, R. Østensen, et al. Discovery of seven ZZ Ceti stars using a new photometric selection method[J]. *A&A*, 2006, 450:1061–1070.
- [80] B. Voss, D. Koester, R. Østensen, et al. Six New ZZ Ceti Stars from the SPY and the HQS Surveys[C]. In: R. Napiwotzki, M. R. Burleigh, (eds.). *Proceedings of 15th European Workshop on White Dwarfs*, volume 372 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2007. 583.
- [81] A. Gianninas, P. Bergeron, G. Fontaine. Mapping the ZZ Ceti Instability Strip: Discovery of Six New Pulsators[J]. *AJ*, 2006, 132:831–835.
- [82] S. Greiss, B. T. Gänsicke, J. J. Hermes, et al. KIC 11911480: the second ZZ Ceti in the Kepler field[J]. *MNRAS*, 2014, 438:3086–3092.
- [83] S. Greiss, J. J. Hermes, B. T. Gänsicke, et al. The search for ZZ Ceti stars in the original Kepler mission[J]. *MNRAS*, 2016, 457:2855–2863.
- [84] S. O. Kepler, B. G. Castanheira, M. F. O. Saraiva, et al. Discovery of fourteen new ZZ Ceti stars with SOAR[J]. *A&A*, 2005, 442:629–634.
- [85] B. G. Castanheira, S. O. Kepler, S. J. Kleinman, et al. New developments of the ZZ Ceti instability strip: the discovery of 11 new variables[J]. *MNRAS*, 2010, 405:2561–2569.
- [86] E. M. Green, M.-M. Limoges, A. Gianninas, et al. High-speed Photometric Observations of ZZ Ceti White Dwarf Candidates[C]. In: P. Dufour, P. Bergeron, G. Fontaine, (eds.). *Proceedings of 19th European Workshop on White Dwarfs*, volume 493 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 2015. 237.
- [87] J. J. Hermes, S. O. Kepler, B. G. Castanheira, et al. Discovery of an Ultramassive Pulsating White Dwarf[J]. *ApJ*, 2013, 771:L2.
- [88] B. Curd, A. Gianninas, K. J. Bell, et al. Four new massive pulsating white dwarfs including an ultramassive DAV[J]. *MNRAS*, 2017, 468:239–249.
- [89] B. G. Castanheira, S. O. Kepler, S. J. Kleinman, et al. Discovery of five new massive pulsating white dwarf stars[J]. *MNRAS*, 2013, 430:50–59.
- [90] A. S. Mukadam, B. T. Gänsicke, P. Szkody, et al. Discovery of Two New Accreting Pulsating White Dwarf Stars[J]. *ApJ*, 2007, 667:433–441.
- [91] H. Uthas, J. Patterson, J. Kemp, et al. Two new accreting, pulsating white dwarfs: SDSS J1457+51 and BW Sculptoris[J]. *MNRAS*, 2012, 420:379–387.
- [92] V. Van Grootel, G. Fontaine, P. Brassard, et al. The Newly Discovered Pulsating Low-mass White Dwarfs: An Extension of the ZZ Ceti Instability Strip[J]. *ApJ*, 2013, 762:57.

- [93] K. J. Bell, J. J. Hermes, M. H. Montgomery, et al. Outbursts in Two New Cool Pulsating DA White Dwarfs[J]. *ApJ*, 2016, 829:82.
- [94] N. Dolez, G. Vauclair, Z. Xiao-Bin, et al. New observations of the DA variable KUV 08368+4026[C]. In: S.-E. Solheim, E. G. Meistas, (eds.). *Proceedings of 11th European Workshop on White Dwarfs*, volume 169 of *Astronomical Society of the Pacific Conference Series*, 1999. 129.
- [95] G. Fontaine, P. Bergeron, M. Billères, et al. A Confirmation of the Optical Spectroscopy Approach: Discovery of Two More Pulsating DA (ZZ Ceti) White Dwarfs[J]. *ApJ*, 2003, 591:1184–1191.
- [96] P. Lenz, M. Breger. *Period04 User Guide*[J]. *Communications in Asteroseismology*, 2005, 146:53–136.
- [97] J.-N. Fu, N. Dolez, G. Vauclair, et al. Asteroseismology of the ZZ Ceti star HS 0507+0434B[J]. *MNRAS*, 2013, 429:1585–1595.
- [98] A. J. Brickhill. The gravity oscillations of white dwarfs.[J]. *MNRAS*, 1975, 170:405–421.
- [99] D. Pech, G. Vauclair, N. Dolez. Asteroseismological constraints on the structure of the ZZ Ceti star HL Tau 76[J]. *A&A*, 2006, 446:223–235.
- [100] P. Bergeron, F. Wesemael, R. Lamontagne, et al. Optical and Ultraviolet Analyses of ZZ Ceti Stars and Study of the Atmospheric Convective Efficiency in DA White Dwarfs[J]. *ApJ*, 1995, 449:258.
- [101] Z. Bognár, M. Páparó, P. A. Bradley, et al. Characterizing the pulsations of the ZZ Ceti star KUV 02464+3239[J]. *MNRAS*, 2009, 399:1954–1963.
- [102] N. Butler, C. Klein, O. Fox, et al. First Light with RATIR: An Automated 6-band Optical/NIR Imaging Camera[C]. *Proceedings of Ground-based and Airborne Instrumentation for Astronomy IV*, volume 8446 of *Proc. SPIE*, 2012. 844610.
- [103] M. Breger, J. Stich, R. Garrido, et al. Nonradial Pulsation of the Delta-Scuti Star Bu-Cancri in the Praesepe Cluster[J]. *A&A*, 1993, 271:482.
- [104] S. D. Kawaler, P. A. Bradley. Precision asteroseismology of pulsating PG 1159 stars[J]. *ApJ*, 1994, 427:415–428.
- [105] C. Li, J.-N. Fu, G. Vauclair, et al. Asteroseismology of the ZZ Ceti star KUV 08368+4026[J]. *MNRAS*, 2015, 449:3360–3369.
- [106] J. Su, Y. Li, J.-N. Fu, et al. Asteroseismology of the ZZ Ceti star KUV 11370+4222[J]. *MNRAS*, 2014, 437:2566–2576.
- [107] J. Su, Y. Li, J.-N. Fu. Preliminary identification of the observed pulsation modes of ZZ Ceti star KUV 03442+0719[J]. *New A*, 2014, 33:52–56.

- [108] E. Pakštienė. Identification of PG 2303+243 pulsation modes[C]. Proceedings of European Physical Journal Web of Conferences, volume 43 of *European Physical Journal Web of Conferences*, 2013. 05012.
- [109] E. Pakštienė, V. Laugalys, J. Qvam, et al. New analysis of ZZ Ceti star PG 2303+243[C]. In: J. A. Guzik, W. J. Chaplin, G. Handler, et al., (eds.). Proceedings of Precision Asteroseismology, volume 301 of *IAU Symposium*, 2014. 469–470.
- [110] A. H. Córscico, L. G. Althaus, M. M. Miller Bertolami, et al. The rate of cooling of the pulsating white dwarf star G117-B15A: a new asteroseismological inference of the axion mass[J]. *MNRAS*, 2012, 424:2792–2799.
- [111] L. Guifang, L. Yan, S. Jie. The Asteroseismology of ZZ Ceti star GD1212[J]. ArXiv e-prints, 2015.
- [112] D. Q. Lamb, H. M. van Horn. Evolution of crystallizing pure C-12 white dwarfs[J]. *ApJ*, 1975, 200:306–323.
- [113] D. Q. Lamb, Jr. Evolution of Pure Carbon-12 White Dwarfs.[D]. THE UNIVERSITY OF ROCHESTER., 1974.
- [114] D. Saumon, G. Chabrier, H. M. van Horn. An Equation of State for Low-Mass Stars and Giant Planets[J]. *ApJS*, 1995, 99:713.
- [115] N. Itoh, S. Mitake, H. Iyetomi, et al. Electrical and thermal conductivities of dense matter in the liquid metal phase. I - High-temperature results[J]. *ApJ*, 1983, 273:774–782.
- [116] C. A. Iglesias, F. J. Rogers. Updated Opal Opacities[J]. *ApJ*, 1996, 464:943.
- [117] N. Itoh, H. Mutoh, A. Hikita, et al. Neutrino energy loss in stellar interiors. IV - Plasma neutrino process for strongly degenerate electrons[J]. *ApJ*, 1992, 395:622–631.
- [118] A. A. Thoul, J. N. Bahcall, A. Loeb. Element diffusion in the solar interior[J]. *ApJ*, 1994, 421:828–842.

附录 1 DA 型脉动白矮星星表

星表项目说明:

(1) WD

白矮星编号, 首选为 WD 编号, 如果没有 WD 编号的白矮星则采用其他编号。

(2) Alternative Names

白矮星在相关领域研究时经常使用的其他编号。注意由于第一列首选为 WD 编号, 一部分研究较多的目标常用的其他编号也列于此列, 如 ZZ Ceti、HL Tau 76、BPM37093 等。

(3) RA/DE

白矮星的赤经和赤纬。文中列出的大部分为历元 2000。

(4) T_{eff}

白矮星有效温度 (单位为 K)。

(5) Log g

白矮星表面重力加速度 Log g。

(6) B(V)

白矮星 B 星等。有的个体没有 B 星等则列出 V 星等, 已在表中标明。

(7) g

白矮星 g 星等。

(8) Period, Amplitude

白矮星脉动周期 (单位为秒), 每个周期后面方括号内为对应的脉动振幅 (单位为 mma)。

(9) 注意

部分发表工作由于讨论侧重点不同或其他原因，没有直接给出某些参数数值，因此在收集数据时采用了一些估计（如从功率谱上估计频率和振幅的数值）。因此表中的数值仅供参考，如需引用请参阅原文献。

(10) 其他

数据表按照白矮星的赤经顺序排列。目前有一部分 DA 型脉动白矮星的多项参数尚不完整，有待进一步补充。

DA 型脉动白矮星星表

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
WDJ 0000-0046	SDSS J000006.75	00:00:06	10880± 110	18.3	611.42[23.00] 584.84[15.92] 601.35[8.97]
	-004654.0	00:46:54	8.32± 0.09	18.8	
WD J0018+0031	SDSS J001836.11	00:18:36	11696± 76	17.5	257.9[5.8]
	+003151.1	00:31:51	7.93± 0.05	17.4	
WD 0016-258	MCT 0016-2553	00:18:44	10900	16.1(V)	1152.4[8.1]
		-25:36:39	8.04		
HE 0031-5525		00:33:36	11480± 30		276.9[4.8] 329.5[2.5] 274.9[1.5]
		-55:08:37	7.65± 0.02	15.9	
WD 0036+312	G132-12	00:39:03	12080	15.2	212.7[4.3]
		31:31:37	7.94		
SDSS J004345.78		00:43:45	11820± 190		258.24[6.69]
		+005549.9	00:55:49	7.94± 0.10	
LAMOST J004628.		00:46:28	11681± 199		473[18]
		31+343319.90	34:33:19	7.53± 0.15	
WD 0048+1521	SDSS J004855.17	00:48:55	11290± 116	17.8	615.3[24.8]
	+152148.7	15:21:48	8.23± 0.08	18.7	
SDSS J0052-0051		00:52:08	12300± 427		1077.2[4] 1098[4]
		00:51:34	8.48± 0.12	18.3	
WD 0102-0032	SDSS J010207.17	01:02:07	11050± 100	18.3	830.3[35.1] 926.3[34.7] 752.2[19.4]
	-003259.4	00:32:59	8.24± 0.08	18.2	
LAMOST J010302.		01:03:02	11750± 492		1174[17]
		46+433756.2	43:37:56	7.89± 0.33	
SDSS J010415.99		01:04:16	29982± 392		159[3.72]
		+144857.4	14:48:57		

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
WD 0104-464	BPM30551	01:06:53 -46:08:53	11260± 200 8.23	15.6	741.4[21.7] 920.5[18.5] 655.4[17.4] 442.8[6.5]
WD 0111+0018	SDSS J011100.63 +001807.2	01:11:01 00:18:07	11510± 110 8.26± 0.06	18.9 18.8	292.3[21.9] 255.3[15.6]
SDSS J0111+0009		01:11:23 00:09:35	12321± 461 7.50± 0.25	18.4	883.6[15.9] 631.6[28] 583.2[16.3] 510.2[18.9] 366.5[9.1]
SDSS J012234.68 +003025.8		01:22:34 00:30:25	11800± 50 7.94± 0.02	17.3	121.07[1.53] 200.75[1.25] 358.61[1.23]
SDSS J012950.44 -101842.0		01:29:50 -10:18:42	11910± 130 8.00± 0.03	18.3	193.76[2.88] 147.42[2.33]
LAMOST J013033. 90+273757.9		01:30:33 27:37:57	14127± 334 7.69± 0.07	18.6	310[15]
WD 0133-116	R548, ZZ Ceti	01:36:13 -11:20:32	11990 7.97	14.3	213.1[7.4] 274.3[4.8] 212.8[4.7] 274.8[3.8] 318.0[0.9] 187.3[0.9] 333.6[0.6]
WD 0145-221	MCT0145-2211	01:47:21 -21:56:51	11550 8.14	15.3	462.2[25] 727.9[19] 823.2[17]
SDSS J0203+0040		02:03:51 00:40:25	10794± 475 8.17± 0.36	19.4	957.0[38.5] 683.9[15.2] 398.8[11.9]
HS0210+3302		02:13:06 33:15:10	11924± 500 7.39± 0.25	15.8	189.4[4.74] 207.5[3.68]
WD 0214-0823	SDSS J021406.78 -082318.4	02:14:07 -08:23:18	11570± 90 7.92± 0.05	17.9	297.5[16.0] 348.1[8.4] 347.1[8.2] 263.5[7.1]
SDSS J023520.02 -093456.3		02:35:20 -09:34:56	30108± 252	17.8	705[14.4]
WD 0235+069		02:38:33	10950	16.6	1283.7[4.21]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
		07:08:10	7.75		
SDSS J024922.30 -010006.7		02:49:22 -01:00:06	11060± 110 8.31± 0.10		1045.2[10.9] 1005.6[5.6]
WD 0246+326	KUV 02464+3239	02:49:27 32:51:12	11290 8.08	15.0(V)	1250.253[4.1] 993.242[12.2] 866.151[8.8] 828.684[10.7] 777.611[5.1] 619.285[3.7]
SDSS J030153.81 +054020.0		03:01:53 05:40:20	11470± 50 8.09± 0.03	18.0	300.83[24.87]
WDJ 0303-0808	SDSS J030325.22 -080834.9	03:03:25 -08:08:34	11400± 110 8.49± 0.06		707[4.1] 1128[3.5]
WD 0318+0030	SDSS J031847.09 +003029.9	03:18:47 00:30:30	11040± 70 8.07± 0.05		826.4[27.3] 844.9[15.3] 536.1[11.1] 587.1[10.6] 695.0[8.9]
WD 0332-0049	SDSS J033236.61 -004918.3	03:32:37 00:49:18	11040± 70 8.25± 0.06		765.0[15.2] 1143.7[7.4] 938.4[6.7] 402.0[4.1]
WD 0341-459	BPM31594	03:43:29 -45:49:04	11540 8.11	15.2	617.9[48] 401.6[16] 416.1[5]
WD 0344+073	KUV 03442+0719	03:46:51 07:28:03	10930 7.84	16.1(V)	1384.9[7.6]
HE 0344-1207		03:47:06 -11:58:09	11466 8.28	15.8	392.9[21.14] 762.2[18.92] 461.0[11.37]
WD J0349+1036	SDSS J034939.35 +103649.9	03:49:39 10:36:49	11715± 41 8.40± 0.02		184.5[3.76]
WD 0416+272	HL Tau 76	04:18:56 27:17:48	11450 7.89	15.4	541[40.5] 494[30.2] 933[25.2] 383[21.8] 781[9.9] 796[9.7]
WD 0417+361	G38-29	04:20:17 36:16:27	11180 7.91	15.8	938.0[26.5] 1024.0[26.1]
WD 0455+553	G191-16	04:59:27	11420	16.0	892.9[100]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
		55:25:21	8.05		
WD 0502+540		05:02:99 54:99:99	11400 8.24	99.0	873.6[12.7]
WD 0507+045	HS0507+0435B	05:10:13 04:38:44	11630 8.17	15.4(V)	355.8[22.7] 557.7[18.7] 743.0[13.9] 444.8[13.6] 446.2[11.0] 354.9[6.8] 286.1[3.6]
WD 0517+307	GD66	05:20:38 30:48:24	11980 8.05	15.8	271.7[8.4] 301.7[6.7] 196.5[3.6] 649.4[2.2] 441.9[1.6]
WD 0532-560	HE0532-5605	05:33:06 -56:03:53	11560 8.49	15.7	688.8[8.3] 586.4[7.9]
LAMOST J062159. 49+252335.9		06:21:59 25:23:35	11728± 651 8.25± 0.31	17.6	830[19]
WD 0702+440		07:02:99 44:99:99	11000 8.29	15.1(V)	1366.4[1.0]
HS 0733+4119		07:37:07 41:12:28	11162 7.72	15.9	656.2[38.73] 747.4[20.30] 468.8[19.39]
SDSS J074531.91 +453829.5		07:45:31 45:38:29	11000 8.00	19.0	1216.9[60.8]
WD 0756+2020	SDSS J075617.54 +202010.2	07:56:17 20:20:10	11713± 116 8.01± 0.06	18.2	199.5[6.8]
WD 0815+4437	SDSS J081531.75 +443710.3	08:15:32 44:37:10	11620± 170 7.93± 0.09	19.3	311.7[18.9] 309.0[10.2] 787.5[7.2] 258.3[6.8]
WD 0818+3131	SDSS J081828.98 +313153.0	08:18:28 31:31:53	11801± 77 8.07± 0.03	16.8 17.4	202.3[3.3] 253.3[2.9]
SDSS J0824+1723		08:24:29	11433± 358		987.9[12.0] 807.2[13.9] 623.7[20.4]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
		17:23:45	8.21± 0.18	18.3	513.9[9.2]
WD 0825+0329		08:25:18 03:29:27	11801± 105 8.33± 0.04	17.5	481[4.5]
WD 0825+4119	SDSS J082547.00 +411900.0	08:25:47 41:19:00	11820± 170 8.49± 0.06	18.2 18.5	653.4[17.1] 611.0[11.2]
WD 0836+404	KUV08368+4026	08:40:08 40:15:04	11490 8.05	15.8	618.0 [17.4]
SDSS J084021.23 +522217.4		08:40:21 52:22:17	12160± 320 8.93± 0.07	18.2	326[7.1] 797.4[6.3] 172.7[6.2]
EPIC 211629697	SDSSJ 084054.14 +145709.0)	08:40:54 14:57:09	10570± 120 7.92± 0.07		486.97[1.61]
WD 0842+3707	SDSS J084220.73 +370701.7	08:42:21 37:07:02	11720± 170 7.73± 0.09	18.8	309.3[18.0] 212.3[5.2] 321.1[4.4]
WD 0843+0431		08:43:14 04:31:31	11250± 63 8.18± 0.04	17.9	1085[7.42]
WD 0847+4510	SDSS J084746.81 +451006.3	08:47:47 45:10:06	11680± 110 8.00± 0.07	18.5 18.3	200.5[7.0] 123.4[3.0]
WD 0851+0605		08:51:28 06:05:51	11306± 48 8.11± 0.03	17.1	326[22.4]
WDJ 0853+0005	SDSS J085325.55 +000514.2	08:53:25 00:05:14	11750± 110 8.11± 0.06	18.2	264.35[3.99]
WDJ 0855+0635	SDSS J085507.29 +063540.9	08:55:07 06:35:40	11050± 50 8.43± 0.03	16.7 17.3	850[44] 433[15]
WD 0858+363	GD99	09:01:48 36:07:08	11820 8.08	14.9	1058.0 [8.3] 1007.0[6.5] 228.9[4.5] 1088.0[4.3] 223.6[2.9] 976.0[2.1] 976[2.1] 633.1[2.0]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
					104.2[2.0] 1151.0[1.9]
WD 0906-0024	SDSS J090624.26 -002428.2	09:06:24 00:24:28	11520± 90 8.00± 0.06	17.1 17.7	769.4[26.1] 574.5[23.7] 457.9[9.8] 618.8[9.3] 266.6[7.6]
WD 0911+0310		09:11:18 03:10:45	11634± 126 8.11± 0.08	18.4	347[17.4] 757[16.4] 388[12.3]
WD 0913+4036	SDSS J091312.74 +403628.8	09:13:12 40:36:28	11677± 78 7.87± 0.04	17.3 17.6	260.3[16.5] 320.5[14.7] 288.7[12.4] 203.9[3.8]
WDJ 0916+3855	SDSS J091635.07 +385546.2	09:16:35 38:55:46	11410± 50 8.10± 0.03	16.6	485.09[32.89] 447.70[14.44] 238.10[10.76] 747.20[9.06]
WD 0917+0926		09:17:31 09:26:38	11341± 64 8.15± 0.04	18.1	289[16.1] 259[10.2] 212[8.0]
SDSS J091945.10 +085710.0		09:19:45 08:57:10	13000±1000	18.2	261.46[12.7]
WD 0923+0120	SDSS J092329.81 +012020.0	09:23:29 01:20:20	11150± 70 8.74± 0.06	17.9 18.3	655.7[4.4]
WD 0921+354	G117-B15A	09:24:15 35:16:51	11630 7.97	15.7	215.2[23.9] 304.4[8.2] 271.0[7.3]
SDSS J092511.60 +050932.4		09:25:11 05:09:32	10880± 30 8.41± 0.02	15.2	1127.14[3.17] 1264.29[3.05]
WD 0939+5609	SDSS J093944.89 +560940.2	09:39:45 56:09:40	11790± 160 8.22± 0.07	18.3 18.7	249.9[7.2] 48.5[5.9]
WD J0940+0052)	SDSS J094000.27 +005207.1	09:40:00 00:52:07	10692± 75 8.42± 0.07	18.1	254.98[17.13] 255.75[8.02]
WD 0942+5733	SDSS J094213.13 +573342.5	09:42:13 57:33:43	11260± 70 8.27± 0.05	17.0 17.4	694.7[37.7] 550.5[12.3] 273.0[9.0] 909.4[7.7]
WD 0949-0000	SDSS J094917.04	09:49:17	11180± 130	18.1	516.6[16.2] 365.2[17.7] 363.2[12.5]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
	-000023.6	00:00:24	8.22± 0.11	18.8	364.1[7.3] 711.6[6.0] 534.2[5.1]
HS0951+1312		09:53:45 12:58:29	11000± 500		208.0[9.4] 282.2[9.0] 258.0[3.6] 311.7[2.7]
HS0952+1816		09:55:10 18:02:15	11000± 500		1150[4.8] 883[3.6] 674.7[3.0] 790[2.9]
WD 0958+0130	SDSS J095833.13 +013049.3	09:58:33 01:30:49	11680± 60 7.99± 0.03	16.4 16.7	264.4[4.7] 203.7[2.5] 121.2[1.6]
SDSS J095936.96 +023828.4		09:59:36 02:38:28	11840± 110 8.05± 0.06	18.1	283.41[12.95] 194.68[7.23]
WD 1002+5818	SDSS J100238.58 +581835.9	10:02:38 58:18:35	11707± 131 7.92± 0.07	17.8 18.3	268.2[6.8] 304.6[5.3]
WD 1007+5245	SDSS J100718.26 +524519.8	10:07:18 52:45:19	11426± 130 8.08± 0.08	18.9	258.8[11.0] 323.1[10.4] 290.1[7.7]
WD 1015+5954	SDSS J101519.65 +595430.5	10:15:20 59:54:31	11630± 110 8.02± 0.06	18.0	401.7[21.4] 453.8[15.5] 292.4[8.6] 769.9[5.7]
SDSS J101540.14 +234047.4		10:15:40 23:40:47	11320± 300 8.44± 0.10	18.7	498.5[15.7]
WD 1015+0306	SDSS J101548.01 +030648.4	10:15:48 03:06:48	11580± 30 8.14± 0.02	15.2 15.7	270.0[8.4] 255.7[7.3] 194.7[5.8]
WD 1017-138		10:19:52 -14:07:34	31880± 481 8.03± 0.67	14.4	615.5[0.9]
HS 1039+4112		10:42:33 40:57:16	11200± 270 8.20± 0.12	15.9	855.5[55.2] 837.3[26.0]
SDSS J1043+0603		10:43:58 06:03:20	11173± 299 8.19± 0.20	18.8	634.4[8.5] 324.7[28.8] 292.5[5.3] 164.9[6.6]
WD 1047+335		10:47:99	11430	17.0(V)	767.5[27.7]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
		33:99:99	8.24		
WD 1054+5307	SDSS J105449.87 +530759.1	10:54:49 53:07:59	11118± 76 8.01± 0.05	17.9	869.1[37.4]
WD 1056-0006	SDSS J105612.32 -000621.7	10:56:12 00:06:22	11020± 50 7.86± 0.03	17.7 17.5	925.4[60.3] 1024.9[31.6] 670.6[12.0] 603.0[11.5]
SDSS J110525.70 -161328.5		11:05:25 -16:13:28	11670± 90 8.23± 0.03	17.5	192.66[12.09] 298.25[7.09]
WD 1106+0115		11:06:23 00:05:01	10990± 62 8.09± 0.05	18.4	822[12.2] 980[10.1]
SDSS J111215.82 +111745.		11:12:15 11:17:45	9590± 140 6.36± 0.06	16.2	2258.5[7.49] 2539.7[6.77] 1884.6[4.73] 2855.7[3.63] 1792.9[3.31]
SDSS J1117-1255		11:17:10 -12:55:40	11302± 357 8.29± 0.24	19.6	835.8[21.9]
WD 1116+026	GD133	11:19:12 02:20:33	12090 8.06	14.8	120.4[4.6] 115.9[1.5] 146.9[1.1]
WD 1122+0358	SDSS J112221.10 +035822.4	11:22:21 03:58:22	11070± 80 8.06± 0.06	18.1	859.1[34.6] 996.1[17.3] 740.1[10.0]
WD 1125+0345	SDSS J112542.84 +034506.3	11:25:43 03:45:06	11600± 120 7.99± 0.07	18.1	265.5[7.1] 265.8[3.3] 335.1[2.8] 208.6[2.8]
WD 1126-222	EC 1126-2217	11:29:11 -22:33:44	11989 7.83	16.5	277.6[7.04] 234.1[4.49] 215.7[3.68] 402.7[3.01]
SDSS J113604.01 -013658.1		11:36:04 -01:36:58	11710± 70 7.96± 0.04	17.8	260.79[2.45]
SDSS J1136+0409		11:36:55 04:09:52	11699± 152 7.99± 0.01	17.1	276.5[8.3] 182.2[4.4]
WD 1137+423	KUV11370+4222	11:39:41	11890	16.8	257.2[5.8] 462.9[3.5] 292.2[2.7]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
		42:05:20	8.06		
WD 1149+057	PG 1149+057	11:51:54 05:28:39	11210 8.19	15.1	1023.5[10.47]
WD 1150-153	EC 11507-1519	11:53:15 -15:36:36	12453± 250 8.03± 0.07	16.0	249.4[4.73] 191.7[3.59]
WD 1157+0553	SDSS J115707.43 +055303.6	11:57:07 05:53:04	11050± 50 8.15± 0.04	17.6	918.9[15.9] 826.2[8.1] 1056.2[5.8] 748.5[5.6]
WD J1200-0251	SDSS J120054.55 -025107.0	12:00:54 -02:51:07	11986± 143 8.33± 0.06	18.1	304.78[23 72] 271.3[13.09] 257.1[6.69]
WD 1159+803	G255-2	12:01:44 80:04:59	11440 8.17	15.9	681.2[24.9] 775.2[15.2] 607.9[13.1] 819.7[11.3] 855.4[11.2] 898.5[9.4] 568.5[6.6]
WD 1216+0922		12:16:28 09:22:46	11293± 109 8.29± 0.08	18.6	840[42.0] 570[24.6] 626[21.6] 967[20.5]
WD 1218+0042		12:18:30 00:42:16	11123± 98 8.16± 0.07	18.7	259[8.2] 152[5.1]
WD 1222-0243		12:22:29 -02:43:32	11398± 33 8.35± 0.03	16.7	396[22.0] 198[7.3]
WD 1236-495	BPM37093, LTT 4 816	12:38:49 -49:48:00	11730 8.81	14.1	636.7[1.7] 565.5[1.2] 633.2[1.1] 538.4[1.1] 613.5[1.1] 582.0[1.0] 600.7[0.9]
WD 1247+310		12:47:99 31:99:99	12110 8.43	17.2(V)	364.6[2.0]
HS 1249+0426		12:52:15 04:10:42	12040 8.15	15.5	288.9[7.55]
WD 1255+0211		12:55:35	11385± 154		897[31.7] 1002[21.7] 812[16.4]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
		02:11:16	8.16± 0.11	19.1	
SDSS J125710.5+ 012422.9		12:57:10 01:24:22	11520± 160 8.36± 0.09		905.8[46.7] 18.6
WD 1301+0107		13:01:10 00:04:30	11099± 34 8.11± 0.02		882[17.6] 628[15.2] 16.3
WD 1258+013	HE1258+0123	13:01:10 01:07:39	11410 8.04	16.5	744.6[23] 528.5[9]
WD 1307+354	GD154	13:09:57 35:09:47	11180 8.15	15.5	1186.5[16.7] 1190.5[6.3] 1084.0[5.6] 1088.6[5.0] 1183.5[4.6] 1092.1[3.0]
WD 1310-0159		13:10:07 00:07:59	10992± 65 7.92± 0.05		349.6[17.6] 280[9.2] 17.7
WD 1337+0104		13:37:14 01:04:43	11533± 156 8.55± 0.09		797[10.2] 18.6
SDSS J133831.74 -002328.0		13:38:31 00:23:28	11870± 80 8.13± 0.04		196.93[3.97] 119.72[1.75] 17.1
SDSS J133941.11 +484727.5		13:39:41 48:47:27	12500 8.00		642[23.3]
EPIC 229227292	ATLASJ 134211.6 2-073540.1	13:42:11 -07:35:40	11190± 170 8.02± 0.05		1000[1.0] 371[0.99] 514[0.4]
WD 1342-237	EC 13429-2342	13:45:46 -23:57:11	10912 7.99	16.1	1177.0[6.17] 982.0[5.17]
WD 1345-0055	SDSS J134550.93 -005536.5	13:45:51 00:55:37	11800± 60 8.04± 0.03		195.2[5.5] 195.5[3.9] 254.4[2.4] 16.7
WD 1349+552	LP133-144	13:51:20 54:57:42	11800 7.87	15.5	209.2[10] 327.3[4] 306.9[4] 304.5[4]
WD 1350+656	G238-53	13:52:11	11890	15.7	206.2[8]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
		65:24:57	7.91		
WD 1354+0108	SDSS J135459.89 +010819.3	13:55:00 01:08:19	11700± 50 8.00± 0.02	16.4	198.3[6.0] 291.6[2.2] 322.9[1.9] 127.8[1.5] 173.3[1.1]
WD 1355+5454	SDSS J135531.03 +545404.5	13:55:31 54:54:04	11576± 144 7.95± 0.09	18.6	324.0[21.8]
WD 1401-147	EC14012-1446	14:03:57 -15:01:10	11900 8.16	15.7	610[57] 724[21] 530[15] 399[13] 937[11]
WD 1408+0445		14:08:59 00:19:03	10938± 64 8.06± 0.04	17.9	849[24.3] 1038[12.0] 764[11.1]
WD 1417+0058	SDSS J141708.81 +005827.2	14:17:09 00:58:27	11300± 80 8.04± 0.05	18.0	894.6[42.8] 812.5[32.1] 749.4[17.9] 522.0[14.9] 980.0[11.3]
WD 1422+095	GD165	14:24:39 09:17:14	11980 8.06	14.5	120.36[4.8] 192.7[2.4] 192.6[1.9] 120.4[1.8] 120.3[1.4] 192.9[0.9] 114.3[0.6] 146.4[0.5] 166.2[0.4] 107.7[0.4]
HE 1429-0343		14:32:03 -03:56:38	11434± 36 7.82± 0.02	15.8	829.3[18.3] 1084.9[16.3] 969.0[12.7] 450.1[10.2]
WD 1425-811	L19-2	14:33:07 -81:20:14	12100 8.21	13.0	192.6[6.5] 113.8[2.4] 118.5[2.0] 118.7[1.2] 350.1[1.1] 193.1[0.9] 192.1[0.8] 143.4[0.6] 113.3[0.6] 348.7[0.5] 114.2[0.3] 143.0[0.3]
WD 1443+0134	SDSS J144330.93 +013405.8	14:43:31 01:34:06	10830± 150 8.15± 0.20	18.7	969.0[7.5] 1085[5.2]
WD 1502-0001	SDSS J150207.02 -000147.1	15:02:07 00:01:47	11200± 120 8.00± 0.08	18.7	629.5[32.6] 418.2[14.9] 687.5[12.0] 581.9[11.1]
SDSS J151826.68		15:18:26	9900± 140		2799.1[35.4] 2268.2[21.6] 2714.3[21.6]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
+065813.2		06:58:13	6.80± 0.05	17.5	1956.3[18.1] 3848.2[15.7] 1335.3[13.6] 2134.0[14.2]
WD 1524-0030		15:24:03 00:30:23		16.0	873.3[110.8] 717.5[28.3] 489.6[21.6] 255.2[17.9]
WD 1526+558		15:26:99 55:99:99	11020 7.89	17.0(V)	648.9[36.8]
HS 1531+7436		15:30:35 74:26:04	12920± 155 8.45± 0.04	16.2	112.5[4.23]
SDSS J153332.9- 020600.0		15:33:32 -02:06:00	11350± 40 8.20± 0.02	16.6	260.6[5.3] 257.8[4.3]
WD 1541+650	PG1541+651	15:41:44 64:53:56	11600 8.10	15.7	689[45] 564[15] 757[14] 467[3]
SDSS J155438.35 +241032.6		15:54:38 24:10:32	11470± 230 8.49± 0.07	17.5	673.6[17.9]
WD 1559+369	R808	16:01:23 36:48:35	11160 8.04	14.5	833[81]
WD 1607+205		16:07:99 20:99:99	11280 7.94	17.4(V)	1928.5[1.8]
WD J1612+0830	SDSS J161218.08 +083028.1	16:12:18 08:30:28	12026± 126 8.46± 0.04	17.8	115.17[5.06] 117.21 4.05
SDSS J161431.28 +191219.4		16:14:31 19:12:19	8880± 170 6.66± 0.14	16.4	1262.7[5.94] 1185.1[3.2]
WD 1617+4324	SDSS J161737.63 +432443.8	16:17:38 43:24:44	11190± 100 8.03± 0.07	18.3	889.7[36.6] 661.7[21.2] 623.3[15.4]
SDSS J161831.69		16:18:31	9144± 56		4935.21[56.3] 6125.9[0.2] 2543[16]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
+385415.15		38:54:15	6.83± 0.13	19.7	
SDSS J161837.2- 002302.7		16:18:37 00:23:02	10860± 160 8.16± 0.12		644.0[5.4] 19.3
HS 1625+1231		16:28:13 12:24:56	11730 8.15		862.9[48.87] 533.6[23.60] 385.2[16.99] 2309.8[14.27] 425.8[13.90] 268.2[13.34] 325.5[13.31] 353.0[10.69] 248.9[9.87] 203.7[7.77]
SDSS J164115.5+ 352140.6		16:41:15 35:21:40	11230± 160 8.43± 0.10		809.3[27.3] 19.0
WD 1647+591	G226-29	16:48:25 59:03:22	12270 8.28	12.4	109.5[2.8] 109.1[2.5] 109.3[1.1]
WDJ 1650+3010	SDSS J165020.53 +301021.2	16:50:20 30:10:21	11100± 90 8.76± 0.08	17.4 18.1	339.06[14.71]
GD 518	WD J165915.11+6 61033.3)	16:59:15 66:10:33	12030± 210 9.08± 0.06		440.2[2.38] 513[1.21] 583[0.78] 17.2
WD 1700+3549	SDSS J170055.38 +354951.1	17:00:55 35:49:51	11160± 50 8.04± 0.04		893.4[54.3] 955.3[20.3] 1164.4[11.4] 17.3 552.6[9.3]
WD 1711+6541	SDSS J171113.01 +654158.3	17:11:13 65:41:58	11310± 40 8.64± 0.03		606.3[5.2] 690.2[3.3] 1248.2[3.2] 16.9 234.0[1.2]
WD 1714-547	BPM24754	17:19:01 -54:45:49	11070 8.03	15.8	1176[22.6]
WD 1724+5835	SDSS J172428.42 +583539.0	17:24:28 58:35:39	11540± 80 7.89± 0.05		279.5[8.3] 337.9[5.9] 189.2[3.2] 17.5
WD 1732+5905	SDSS J173235.19 +590533.4	17:32:35 59:05:33	10860± 100 7.99± 0.08		1122.4[8.0] 1248.4[4.5] 18.7
HS 1824+6000		18:24:44	11380		294.3[8.84]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
		60:01:59	7.82		
SDSS J184037.78 +642312.3		18:40:37 64:23:12	9100± 170 6.22± 0.06	18.8	4445.9[65.9]
WD 1855+338	G207-9	18:57:30 33:57:25	11950 8.35	14.8	318.0[6.4] 557.4[6.3] 292.0[5.0] 259.1[1.7]
KIS J1908+4316	KIC 7594781	19:08:35 43:16:42	11730± 140 8.11± 0.04	18.2	283.8[17.8]
KIS J1913+4709	KIC 10132702	19:13:40 47:09:30	11940± 380 8.12± 0.04	19.1	853.5[28.1]
KIC 4552982	WD J191643.83+3 93849.7	19:16:43 39:38:49	10860± 120 8.16± 0.06		950.45[0.39] 866.11[0.37] 828.29[0.36] 907.59[0.35]
WD J1916+3938		19:16:43 39:38:49	11129± 115 8.34± 0.06		968.9[4.4] 823.9[3.8] 934.5[3.6] 834.1[3.2] 1089.0[2.5] 1436.7[2.4] 1169[2.3]
KIS J1917+3927	KIC 4357037	19:17:19 39:27:18	10950± 130 8.11± 0.04	18.3	323.4[13.0]
KIS J1917+4413	KIC 8293193	19:17:55 44:13:26	12650± 530 8.01± 0.04	18.4	310.9[27.9]
KIS J1920+5017	KIC 11911480	19:20:24 50:17:22	11580± 140 7.96± 0.04	18.1	291.5[26.5]
KIC 11911480		19:20:24 19:16:43	12160± 250 7.94± 0.10	18.1	290.8[11.87] 259.3[5.8] 324.3[1.85] 172.9[1.13]
KIS J1923+3929	KIC 4362927	19:23:48 39:29:33	11140± 140 7.84± 0.05	19.4	723.6[25.3]
WD 1935+276	G185-32	19:37:13 27:43:18	12130 8.05	13.1	215.7[1.9] 370.2[1.6] 141.9[1.4] 301.4[1.1] 299.8[1.0] 651.7[0.7]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
					537.6[0.6] 264.2[0.5] 72.9[0.4] 454.6[0.4]
KIS J1939+4533	KIC 9162396	19:39:07 45:33:33	11070± 140 8.06± 0.05	18.5	766[14.1]
KIS J1944+4327	KIC 7766212	19:44:05 43:27:21	11890± 150 8.01± 0.04	16.7	321.95[6.71]
KIS J1945+4455		19:45:42 44:55:10	11590± 140 8.04± 0.04	17.1	255.92[19.0]
WD 1950+250	GD385	19:52:27 25:09:29	11710 8.04	15.1	256.1[11.4] 256.3[10.9]
WD 1959+059		20:02:12 06:07:35	11033 8.23	16.4	1350.4[5.69]
SDSS J203857.52 +771054.6		20:38:57 77:10:54	11940± 310 8.38± 0.08	19.0	203.7[16.3]
SDSS J212808.4- 000750.8		21:28:08 00:07:50	11440± 100 8.29± 0.07	18.0	302.2[17.1] 274.9[11.0] 289.0[9.7]
SDSS J213530.3- 074330.7		21:35:30 -07:43:30	11190± 120 7.67± 0.09	18.6	565.4[49.8] 299.9[22.9] 510.6[16.8] 281.8[13.3] 323.2[13]
SDSS J214723.73 -001358.4		21:47:23 00:13:58	11990± 290 7.92± 0.11	19.0	199.77[3.88]
WD 2148+539	G232-38	21:49:59 54:08:38	11350 8.01	16.4(V)	884.0[25] 1147[19] 741.6[17]
WD 2148-291	MCT 2148-2911	21:51:39 -28:56:42	11740 7.82	16.1(V)	260.8[12.6]
SDSS J215354.1-		21:53:54	11930± 130		210.2[5.6]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
073121.9		-07:31:21	8.07± 0.06	18.5	
WD 2159+1322	SDSS J215905.52 +132255.7	21:59:05 13:22:55	11705± 160 8.61± 0.07		801.0[15.1] 683.7[11.7] 18.9
WD J2208+0654	SDSS J220830.02 +065448.7	22:08:30 06:54:48	11104± 29 8.49± 0.03		757.23[4.46] 668.07[4.05] 17.9
SDSS J220915.84 -091942.5		22:09:15 -09:19:42	11430± 110 8.33± 0.06		894.71[43.94] 447.94[10.80] 789.31[10.37] 18.9
WD 2214-0025	SDSS J221458.37 -002511.7	22:14:58 00:25:11	11439± 78 8.33± 0.05		255.2[13.1] 195.2[6.1] 17.9
SDSS J222859.93 +362359.6		22:28:59 36:23:59	7870± 120 6.03± 0.08		4178[6.26] 3254[2.34] 6234.9[1.9] 16.9
SDSS J223135.7+ 134652.8		22:31:35 13:46:52	11080± 100 7.95± 0.07		627.0[26.3] 619.7[18.9] 707.5[17.1] 384.2[14.6] 548.7[13.7]
WD 2254+126	GD244	22:56:46 12:52:50	11680 8.08	16.0	307.0[14] 203.3[10.5] 294.6[5.5] 256.3[3]
WD 2303+242	PG2303+243	23:06:17 24:32:10	11480 8.09	15.5(V)	794.5[56] 900.5[16] 623.4[15] 675.4[8] 570.7[8]
SDSS J230726.6- 084700.2		23:07:26 -08:47:00	11060± 110 8.19± 0.09	18.8	1212.2[25.6] 617.0[12.5]
WD 2326+049	G29-38	23:28:47 05:14:54	11820 8.14	13.2	930.9[25.7] 824.7[20.2] 612.9[20.0] 677.0[17.6] 1015.5[14.5]
WDJ 2334+0103	SDSS J233458.71 +010303.1	23:34:58 01:03:03	11400± 210 7.99± 0.14	18.4 19.2	923.15[40.37]
WD 2336-079	GD 1212	23:38:51 -07:41:24	11040 8.11	13.3(V)	1160.7[5.4]
WD 2347+128	G30-20	23:49:53	11070	15.9	1068[13.8]

WD	Alternative Names	RA DE	$T_{eff}(K)$ Log g	B g	Period(s),Amplitude(mma)
		13:06:12	7.95		
WD 2350-0054	SDSS J235040.72 -005430.9	23:50:41 00:54:31	10350± 60 8.31± 0.06		304.1[16.3] 272.8[16.2] 391.1[3.1]
WD 2348-244	EC23487-2424	23:51:22 -24:08:17	11520 8.10	15.5	993.0[37.7] 804.5[19.3] 868.2[12.8] 989.3[11.0]
BW Scl	RX J2353.0-3852			17.3	
	SDSS J1457+51			19.5	
PSR J1738+0333B			9130± 150 6.55± 0.07		1788[1.27] 3057[1.22] 2656[1.15]
	EPIC 220453225				
	EPIC 229228364				

学术成果

1. **Li, C.**, Fu, J.-N., Vauclair, G., Dolez, N., Fox-Machado, L., Michel, R., Chavez, M., Bertone, E., 2015, Asteroseismology of the ZZ Ceti star KUV 08368+4026, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 449, 3360-3369.
2. **Li, C.**, Fu, J., Fox-Machado, L., Su, J., Chen, F., 2017, Asteroseismology of the ultramassive ZZ ceti star WD 0246+326, New Astronomy 55, 48-54.
3. Su, J., Li, Y., Fu, J.-N., **Li, C.**, 2014., Asteroseismology of the ZZ Ceti star KUV 11370+4222, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 437, 2566-2576.
4. Fu, J.-N., Dolez, N., Vauclair, G., Fox-Machado, L., Kim, S.-L., **Li, C.**, Chen, L., Alvarez, M., Su, J., Charpinet, S., Chevreton, M., Michel, R., Yang, X.H., Li, Y., Zhang, Y.P., Molnar, L., and Plachy, E. 2013, Asteroseismology of the ZZ Ceti star HS 0507+0434B, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society 429, 1585-1595.
5. **Li, C.**, Fu, J., Fox-Machado, L., Su, J., 2017, Asteroseismology of the ZZ Ceti Star WD 0246+326, 20th European White Dwarf Workshop 509, 295.
6. **Li, C.**, Fu, J.N., Vauclair, G., Fox Machado, L., Alvarez, M., Su, J., Chevreton, M., Michel, R., Yang, X.H., Li, Y., Zhang, Y.P., and Dolez, N. 2010, Preliminary result of Asteroseismology Study for the ZZ Ceti Star KUV 08368+4026, American Institute of Physics Conference Series 1273, 496-499.

致 谢

李春衷心感谢导师付建宁教授多年来对本人研究工作的精心指导。在我的学习期间他不仅在学术上给予我热情的指导，而且从各方面为我提供了充足的学习条件。虽然在学习过程中我曾经遇到很多困难犯下很多错误，但是付老师一直以来不断的鼓励和帮助，令我深受感动且深感惭愧。付老师严谨的治学态度，精益求精的学术风格，正直负责的为人处世无不成为我的榜样。我仰慕付老师的这些美德，希望能成为和付老师一样的人。

感谢法国天文研究所图卢兹大学的 Gérard Vauclair 高级研究员，Sylvie Vauclair 教授，Noel Dolez 研究员在我赴图卢兹访问学习期间给予的指导和帮助。

感谢墨西哥国家天文台的 Lester Fox-Machado 博士和 Raúl Michel 博士协助完成国际联测，他们提供的观测数据对于我的科研成果的完成意义重大。

感谢国家天文台兴隆观测站，国家天文台丽江观测站，墨西哥 San Pedro Mártir 天文台，墨西哥 Guillermo Halo 天文台，法国 Haute-Provence 天文台提供观测条件，为论文工作提供观测数据。

感谢国家天文台的蒋世仰研究员、张孝斌研究员，云南天文台的李焱研究员在研究过程中给予的学术建议和技术帮助。

感谢同组的同学苏杰、刘念、彭沙克、任安炳、苍天启、陈芳芳、杨小虎、李春乾在学习期间与我进行学术讨论，帮助我解决各种科学问题。

感谢国家天文台张博在论文撰写上的帮助。

感谢北师大天文系全体教职工在学习期间给予的帮助。

感谢余恒同学制作维护北师大学位论文模板。

李春

2017年6月