

分类号 0175.2 密级 公开

UDC 004.72

学 位 论 文

巡天时域光变序列分析与 太阳系外热木星统计

(题名和副题名)

孟泽洋

(作者姓名)

指导教师姓名、职务、职称、学位、单位名称及地址 周济林 教授

南京大学天文与空间科学学院 南京市仙林大道 163 号 210089

申请学位级别 博士 专业名称 天文学

论文提交日期 2017 年 3 月 10 日 论文答辩日期 2017 年 5 月 25 日

学位授予单位和日期 _____

答辩委员会主席: _____

评阅人: _____



南京大學

研究生毕业论文 (申请博士学位)

论 文 题 目 巡天时域光变序列分析与
太阳系外热木星统计

作 者 姓 名 孟泽洋

学 科、专 业 方 向 天文学

指 导 教 师 周济林 教授

联 合 导 师 林潮 教授

研 究 方 向 太阳系外行星的探测与统计

2017 年 5 月 22 日

学 号：**DG1326007**

论文答辩日期：**2017 年 5 月 25 日**

指导教师： (签字)

Light Curve Analysis in Optical Survey and Statistics of Hot Jupiters

by

Meng Ze-Yang

Supervised by

Professor Zhou Ji-Lin (NJU)

Co-supervised by

Professor Douglas Lin (UCSC) & Alice Quillen (UofR)

A dissertation submitted to
the graduate school of Nanjing University
in partial fulfilment of the requirements for the degree of
DOCTOR OF PHILOSOPHY
in
Astronomy



Department of Astronomy and Space Science
Nanjing University

May 1, 2017

南京大学研究生毕业论文中文摘要首页用纸

毕业论文题目： 巡天时域光变序列分析与
太阳系外热木星统计

天文学 专业 2013 级博士生姓名： 孟泽洋
指导教师（姓名、职称）： 周济林 教授

摘 要

天文学是一门建立在观测基础之上的研究，系外行星领域也同样不例外。探测与刻画系外行星必须依赖精确稳定的光子捕捉系统、广域的空间覆盖度以及更长的时间基线。从第一颗主序星周围的行星 51 Peg b 被人类捕捉探测，至如今总共约 3500 颗已知的系外行星，强大的探测仪器和精确的数据处理已经逐步将行星科学从太阳系推向了太阳临近的星际空间，与此同时一大批全新的科学疑问也接踵而至。

在本文的第一章节，首先引入南极天文相关的观测特点，接着我们从「中国之星」小型望远镜阵列出发，通过分析该望远镜于 2008 年极夜在南极 Dome A 站点观测得到的总数超过三十万张的 i 波段测光图片数据，我们发现其中的「鬼像」效应会在很大程度上影响恒星的测光精度。所以我们从该望远镜的设计光路图出发，摸索出「鬼像」产生的原因后。从源头上，将产生「鬼像」的亮源一一找出，并且对比得到两者的强度关系。接着从每一张原始数据出发，定量求得被「鬼像」影响的背景恒星流量的变化和两者之间距离的经验关系。最后回归到星表数据中修复「鬼像」对测光精度带来的影响。经过「鬼像」以及其他处理修正后释放的新数据被成功地应用在时域天文双星、系外行星以及恒星耀斑等多种搜索研究上。诸如此类的后续数据分析也将更有利定制下一代南极天文望远镜 AST3-2 的系外行星搜索计划。

随后，我们便在第二章节中展开了对光学引力透镜实验三（OGLE-III）望远镜数据中掩食盘相关的时域光变搜索。探测星周盘对于研究恒星与行星的早期形成过程具有非常重要的意义，利用 OGLE-III 中大、小麦哲伦云以及银盘观测得到的掩食双星（EBs）数据，我们从大麦云中共挑选出 2823 个高测光精度、不相接、深掩食的子样本。在分析过主、次掩食内星等分布的统计二极矩后，我们发现峰度（kurtosis）和斜度（skewness）可被用来区分部分掩食盘候

选体与普通 EB 系统。在判据 $|S| < 0.5$ 和 $K > 0$ 下，数据中两个掩食盘候选体 OGLE-LMC-ECL-11893 与 OGLE-LMC-ECL-17782 被程序成功识别。而与此同时，在小麦云和银盘样本中并未发现同类掩食盘候选。在所有 I 波段星等小于 19 等的大麦云 EB 样本中，我们估算得出此类不寻常的掩食盘发生的概率大约为 1/1000，而且此概率随着样本恒星年龄的增长会显著减小。另外，在详细拟合分析过 OGLE-LMC-ECL-17782 后，我们发现由于此系统周期为 13.3 天，其内的掩食盘距离主星（B 型星）仅有约 0.1 AU，因而主星的高光度将会导致星周盘温度（6000 K）超过内部固体物质的升华点，因此急迫需要额外的观测与物理解释。

此外，本文于第四章节内汇总统计了现如今所有已被发现的系外行星系统。对于其中的热木星系统（HJs），以往的研究显示它们的起源对于理解行星形成的动力学演化过程十分重要。然而观测显示有效温度较高的中等质量恒星（HS）与温度较低的类太阳恒星（CS）周围这些系统有着截然不同的性质。Rossiter-McLaughlin 效应的测量统计显示 HS 周围恒星自转与行星轨道法向角度 (Ψ) 为随机分布在 0 至 180° 之间，而 CS 系统取向则一致 ($\Psi \approx 0$)。其中一种解释认为以上现象是由于这两类恒星的对流外包层厚度不同，从而主星的弱摩擦近似下的平衡潮汐耗散因子 Q 值有所差异而导致。比如 CS 潮汐耗散率较高且自转速度偏慢，所以主星自转轴的取向更容易通过行星的潮汐作用而被重新扭转。本文重新回顾了这些机制，并且同时考虑了恒星星风与平衡潮汐作用这两个效应。我们发现对于 HS，观测得到的 Ψ 角并没有与恒星的自转呈现相关性，且 CS 中行星的轨道位置也并不足以能够改变主星的自转角动量。这些发现与以往的理论解释十分不符，因而现有的单一的 Q 值来源理论不能解释所有的 HJ 系统。另外，我们的结果可将这些恒星的潮汐参数 Q 值限定为 10^6 或更大。

结尾部分，本文总结了如今系外行星的部分观测趋势，也提出一小部分理论上需要去完善的问题，包括如何在全局上更完整地了解行星系统的演化历史。最后，讨论了迈入更智能切高精度的数据处理方案。在不久的将来，对单个系外行星的认知一定将会更加科学完善，刻画亦会愈发细致，「另一个地球」的迷雾已被逐步驱散，生命起源以及系外生命新发现与许就近在咫尺，等着人类用崭新的思路去开拓与挖掘。

关键词：方法：数据分析；双星：掩食；列表；行星与卫星：动力学演化和稳定性；行星—恒星相互作用

南京大学研究生毕业论文英文摘要首页用纸

THESIS: Light Curve Analysis in Optical Survey and
Statistics of Hot Jupiters

SPECIALIZATION: Astronomy

POSTGRADUATE: Meng Ze-Yang

MENTOR: Professor Zhou Ji-Lin (NJU)

Abstract

As one of the most active and fast growing field in astronomy, exoplanetology has boosted itself in the past few decades through stable observational facilities, large space coverage and long time baseline. Ever since the first discovery of the first hot Jupiter (51 Peg b) detected around solar-type star, thousands of newly discovered exoplanets has been detected nearby our solar system. It is the detailed observations as well as accurate photometric pipelines that has been made possible for us to reveal the nature of both our solar system and alien worlds.

We began by analyzing ghost image within a total of over 300,000 images observed during the Polar Night of 2008 at Dome A site (Antarctica). The Chinese Small Telescope ARray (CSTAR) gathered *i*-band photometric information of the 20 deg² sky vicinity around the South Pole automatically and continuously. We carry out a series of elaborate analyses and study on the origin and influence of the ghost images in each frame. The point source catalog has also been amended by removing the ghost image effects from the real overlapped stars. Thus, we are able to provide a generalized ghost reduction pipeline and improve the photometric precision of the stars in the CSTAR FOV for astronomic researches like transiting exoplanets, variable stars and stellar flares. Importance has been drawn from our work for the next generation surveys in Dome A site, like Antarctic Survey Telescopes (AST3-2).

Then in our next chapter, new search for systems hosting eclipsing discs are introduced by using a complete sample of eclipsing binaries (EBs) in the third phase of the Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE-III). Within a subsample of 2823 high-cadence, high-photometric precision and large eclipsing depth detached EBs previously identified in the Large Magellanic Cloud (LMC), we find that the skewness

and kurtosis of the light-curve magnitude distribution within the primary eclipse can distinguish EBs with a complex-shaped eclipse from those without. Two systems with previously identified eclipsing discs (OGLE-LMC-ECL-11893 and OGLE-LMC-ECL-17782) are identified with near zero skewness ($|S| < 0.5$) and positive kurtosis. No additional eclipsing disc systems were found in the OGLE-III LMC, Small Magellanic Cloud or Galactic Disc EB light curves. We estimate that the fraction of detached early-type LMC EBs (which have a primary with an I-band magnitude brighter than ≈ 19 mag) that exhibit atypical eclipses and so could host a disc is approximately 1/1000. As circumstellar disc lifetimes are short, we expected to primarily find eclipsing discs around young stars. In addition, as there is more room for a disc in a widely separated binary and because a disc close to a luminous star would be above the dust sublimation temperature, we expected to primarily find eclipsing discs in long-period binaries. However, OGLE-LMC-ECL-17782 is a 13.3 d period B star system with a transient and hot (~ 6000 K, ~ 0.1 au radius) disc and Scott et al. (2014) estimate an age of 150 Myr for OGLE-LMC-ECL-11893. Both discs are unexpected in the EB sample and impel explanation.

In chapter 4, known information of exoplanets are gathered for statistical ways of testing hot Jupiter theories. Recent observations of hot Jupiter obliquities has shown a dichotomy between those planets around hot and cool stars: hot Jupiters around hot stars have random obliquities, while those around cool stars are generally aligned. This dichotomy has been used as evidence that hot Jupiters form by a scattering process, with variations between hot and cool stars due to variations in the tidal dissipation efficiency (Q_s' -value) and/or the stellar rotation speed between those stars. In particular, it is expected that cool stars have more efficient tidal dissipation and slower rotation and therefore, can re-align more efficiently. We revisit these scenarios taking into account the effects of equilibrium tides and stellar winds. We find that obliquity is anti-correlated with stellar spin around hot stars and that there is no correlation between stellar spin and orbital period for systems around cool stars. Both of these findings are inconsistent with the hypothesis that slowly spinning stars may re-align their obliquity more easily. Our analyses demonstrates that a single value of Q_s' can not explain all hot or cool star systems. Finally, using planets locked outside co-rotation with low obliquity we are able to constrain Q_s' to be greater than 10^6 .

Last, Conclusion remarks are drawn in our final chapter by summarizing current and future plans of detecting more exoplanets and characterizing each individual planet. More physical processes and properties are in great demands. By placing samples of exoplanets within the historical environment of planetary formation, it could be possible to unlock more puzzles of our solar system and life itself in the near future.

keywords: methods: data analysis, binaries: eclipsing, catalogs, planets and satellites: dynamical evolution and stability, planet–star interactions

前　　言

... Der bestirnte Himmel über mir, und
das moralische Gesetz in mir.

Immanuel Kants

自诞生以来，人类就从未停止向外界探索以及反思自我。从技术层面上看，在望远镜分辨率与灵敏度被推向极限的同时，科学家们也在考究着生命与宜居行星存在的合理性。现如今太阳系外行星（简称：系外行星）科学领域，与传统的行星科学相比，虽然诞生并未满半个世纪，但也正尝试以「它山之石」—其它恒星周围的行星们，来内窥太阳系行星系统以及生命本身。

近二十年来，随着观测技术的迭代更新，被探测到的系外行星样本也在正加速地扩大，以往得到的基于太阳系行星系统的传统行星形成理论也随之不停地被改进、更正。正当行星的形成阶段一次次地被观测到（如行星形成早期的原行星盘），一些看似与太阳系大不同的系外行星系统（如周期小于十天的热木星）也不断地完善并细化着已知的行星系统动力学作用理论。系外行星领域也正随之如此恰似涓涓细流般启发着人类对太阳系起源与系外生命的认知。

而以上这一切里程碑，正离不开高精度数据预处理与前卫的理论分析和计算，如基于地面的高精度光谱仪 HIRES 和 *Kepler* 太空望远镜等仪器的数据处理流程。此册博士论文也借此尝试从高精度数据处理入手（「中国之星」中的「鬼像」处理），去探寻可能的系外原始行星盘（搜索大麦哲伦云星系中的掩食盘候选体），并且从统计上对现有的热木星系统的形成与潮汐演化作出部分限制（平衡潮汐模型下，热木星轨道法向与宿主恒星自转轴取向不一致性在统计上的物理性质）。

作为一门跨学科领域，如今系外行星也正通往着融合了天体生物和行星大

气等多科学的方向发展。Spitzer 太空望远镜也已观测到数十颗系外行星大气存在的证据。在不久的将来，光合化学与有机分子化学也会被有效地应用到如何将观测到的光信号转化成生命存在的证据。科学家们也正在摸索中走出一条通往太阳系的起源与太阳系外生命之路，而此刻的人类是否已蓄势待发准备好迎接新的纪元…

孟泽洋

丁酉年正月廿七

南京大学

目 次

前 言	vii
目 次	ix
插图清单	xiii
附表清单	xxiii
公式清单	xxv
1 绪论	1
1.1 引言	1
1.1.1 地球与人类，无独有偶?	1
1.1.2 系外行星的定义	2
1.1.3 系外行星扼要史	3
1.2 探测方法	5
1.2.1 视向速度	6
1.2.2 凌星法	7
1.2.3 天体测量	8
1.2.4 直接成像	9
1.2.5 其他方法	10
1.3 行星形成理论	10
1.3.1 基于太阳系的经典形成理论	13
1.3.2 经典理论新挑战：系外行星	15
1.4 本文立意	21
2 基于南极的天文数据观测与处理	23
2.1 南极天文背景	23
2.2 CSTAR 以及其测光数据中的鬼像处理	25

2.2.1 CSTAR 望远镜光学设计和预数据处理.....	25
2.2.2 鬼像简介以及修正 CSTAR 数据中的鬼像	26
2.3 AST3-2 项目中系外行星的巡天策略	35
3 利用掩食搜索双星中的星周盘	39
3.1 研究背景	39
3.1.1 星周盘简介	39
3.1.2 双星中星周盘研究背景	41
3.2 利用双星掩食光变曲线搜索星周盘.....	43
3.2.1 搜索掩食盘的方法	43
3.2.2 掩食窗口内星等分布	46
3.2.3 LMC 中掩食盘候选体的性质.....	51
3.3 掩食盘概率估算	56
4 热木星统计性质	59
4.1 系外行星统计列表	59
4.2 HJs 出现概率	59
4.3 HJs 形成	61
4.3.1 轨道迁移	62
4.4 引力潮汐作用	64
4.5 Rossiter-McLaughlin 效应	67
4.6 热木星的自转轨道倾角	67
4.6.1 统计数据筛选	71
4.6.2 行星公转—恒星自转潮汐演化	72
4.6.3 中等质量恒星	75
4.6.4 类太阳恒星	77
4.6.5 总结与讨论	80
5 总结与展望	83
5.1 更丰富的行星样本	83
5.2 全局的行星系统演化	85
5.3 具现代化的范式转换	87
5.4 细致刻画单个系统	87

致 谢	89
参考文献	91
A 文内常用约定	133
A .1 物理符号含义	133
A .2 首字母缩写	134
B 二体运动	135
C 赫罗图	137
简历与科研成果	139
学位论文出版授权书	143

插图清单

- 1-1 人类从太空看到的赖以居住和生存的母亲行星 — 地球。**(a)** Apollo 17 号飞船航向月球的途中宇航员们回望并拍摄到的地球。这张图被称作「蓝宝石」，图中可以清晰的看到南半球的大气云层与被冰雪覆盖的南极点，另外还可看到非洲与亚洲大陆。**(b)** Voyager 1 航天器在距离太阳四十亿公里外拍摄到的地球。在最右侧的太阳散射光柱中，地球就只是不到一个像素的小白点，而在这颗蔚蓝的星球上曾居住并流逝着所有的人类足迹。 2
- 1-2 1995 年，日内瓦天文台天文学家 Mayor 和 Queloz 连续观测恒星 51 Pegasi 得到的视向速度曲线图，观测点已全数叠加至其伴星的周期 4.23 天。该系统主星是一颗类太阳恒星，因此视向速度曲线振幅所对应的最小质量为 $0.47 M_J$ ，系人类首次发现到类太阳恒星周围的短周期类木行星。 4
- 1-3 系外行星发现数量趋势图，不同颜色代表不同的探测方法（参照 § 1.2），可以看出该数目呈现指数式增长。（图片取自 Open Exoplanet Catalogue） 5
- 1-4 行星对主星造成的视向速度曲线示意图，从左至右分别代表不同的行星偏心率和轨道近心点取向。此图版权归 Perryman M. 所有。 .. 6
- 1-5 凌星法探测行星示意图，上半部分表示不同的轨道时刻。下方则为整个系统观测到的流量变化。版权 Joshua Winn。 7
- 1-6 由于行星的存在，宿主恒星的天球坐标随着时间的变化示意图，版权所有：Perryman M. 8
- 1-7 直接成像法探测系外行星。**(a)** 仪器接受类太阳恒星在 10 pc 以外的黑体辐射强度，其余为太阳系行星与热木星在此恒星周围黑体发射与发射的叠加流量。**(b)** Keck 望远镜利用角向较差与自适应光学技术直接成像观测到的 HR 8799 系统。 9
- 1-8 系外行星探测方法大全，图片版权 Michael Perryman。 11

1-9 YSOs 按照红外谱指数划分的四种主要类别, 版权所有: Armitage P.	12
1-10 原行星盘演化中由 (a) 至 (d) 四个主要过程, 分别为活跃吸积 阶段、固体沉降阶段、盘消散阶段与残骸盘阶段。图片版权 Williams 和 Cieza。	13
1-11 不同星团红外超等效的原 (恒) 行星盘占所有星团成员的比例。 此图可推断星团年龄老于 10 Myr 后, 恒星周围的气体盘已近乎完 全消散。此图版权所有: Hernández J. 等人。	14
1-12 基于太阳系的传统行星形成理论模型在不同阶段的说明图, 其中「米级障碍」属于至今为止的重大难题。图片版权 Michael Perryman。	16
1-13 现今探测到系外行星的周期 – 质量散点图。其中不同颜色分别 代表不同的探测方法: 青色代表视向速度法, 灰色是凌星法, 黄 色指代微引力透镜法, 红色代表直接成像法, 紫色则表示其他方 法。黑色字母 Me, V, E, Ma, J, S, U, N 则分别表示太阳系 内水星, 金星, 地球, 火星, 木星, 土星, 天王星和海王星。本文将系外行星进行人为类别划分包络在封闭曲线内, 分别为热木 星族 (椭圆实线), 冷木星族 (方框实线) 和超级地球族 (椭圆 虚线)。	17
1-14 已知双星内卫星型 (S-Type) 与行星型 (P-Type) 行星系统中双 星和行星轨道半长径分布图, 数据来自 http://openexoplanetcatalogue.com 。	18
1-15 所有拥有热木星的已确认多行星系统汇总图, 点的相对大小正比 于行星的质量。数据同样来自 http://openexoplanetcatalogue.com 。 ...	20
1-16 不同的恒星环境对系外行星系统形成结果的影响示意图, 图片版 权 Malmberg 2011。	21
2-1 南极地理位置图, 暗咖啡色曲线表示地形等高线。可以看到 Dome Argus (或称冰穹 A) 台址 (中国, 以红星标注) 位于南极大陆最 高点, 另外冰穹 C (澳洲) 和 F (日本) 分别以灰色圆点表示。此 地图版权 Australian Antarctic Division。	24

- 2-2 CSTAR 多镜面结构光路设计图。入射平板镜（最左侧）由改正镜与滤镜组成，最右侧的镜片为中空反射球面镜，中间子镜的右侧面涂有反射材料，该图与实际大小不成比例。 25
- 2-3 周天鬼像叠加图，也即「脏」图。图中的圆弧结构为鬼像所致，黑色十字标注的是南极点。为了更好的看清鬼像的结构，我们已经将已确认的恒星从本图中剔除。视场边缘散点增多是因为畸变导致的模式低匹配效率，此外图中线状物为人造卫星。 27
- 2-4 CSTAR 视场内坐标为 R.A.: $23^{\text{h}}24^{\text{m}}28.4^{\text{s}}$, Decl.: $-89^{\circ}25'10.6''$ 恒星的光变曲线。通常特定的鬼像会在一个恒星日内遭遇该被影响的恒星一次，从而将恒星的亮度提高半个星等。 28
- 2-5 坐标相对固定的恒星（绿色标志）遇到鬼像（红色标注的模糊状弥散源）前后，恒星星等的变化程度原始图片数据示意。 29
- 2-6 上栏为产生鬼像的源恒星（R.A.: $21^{\text{h}}08^{\text{m}}44.2^{\text{s}}$, Decl.: $-88^{\circ}57'21.6''$ ）在一天内的星等变化图；中间栏为该源对应鬼像在这天内的星等变化；下栏为两者星等的差量。 32
- 2-7 光学对称轴在 CCD 上像素坐标的统计直方图，直方图格点宽度为一个像素点。图中实线为本地 x 坐标像素值，虚线则为 y 坐标。 32
- 2-8 选定的图片文件名为「16RE0312.fit」中光学对称轴示意图。方框选中的亮源（拥有光子溢出竖线）与圆环内的弥散鬼像相交于同一个像素点，即光学对称点（轴）。 33
- 2-9 鬼像影响因子 $f_1(d)$ 与被影响背景恒星和鬼像之间距离的依赖关系。实线为形式如方程 2-3 的拟合曲线，当两者之间的距离大于约 6 个像素时，鬼像几乎不对该星的亮度造成影响。相反，当鬼像完全重叠在背景恒星上时，鬼像自身高达 97% 的光子流量都会被算入恒星的孔径测光亮度中。 34
- 2-10 鬼像修正前后（分别为点和圆）恒星的光变曲线。此恒星坐标为 R.A.: $23^{\text{h}}24^{\text{m}}28.4^{\text{s}}$, Decl.: $-89^{\circ}25'10.6''$ 。当鬼像距离恒星达到 6 个像素点的临界值后，鬼像修正程序便会自动在恒星的光变曲线基础上计算影响值并做修正。如图所示，此方法可以大幅度减小恒星光变曲线的弥散误差。 34
- 2-11 AST3-2 望远镜（左侧）就位于南极天穹 A 观测站。本图拍摄者为天文科考科考人员杜福嘉。 36

2-12 AST3-2 观测策略。整体流程包括初始化输入，观测，容错以及数据处理共四个环节。	37
3-1 原行星盘从早期、过渡到晚期三个不同的形态，其中 (a) HH 30 侧向视角的临变增厚盘，双极喷流清晰可见（版权：NASA, Alan Watson）(b) HL Tau （版权：ALMA - ESO/NAOJ/NRAO）(c) Formalhaut 残骸盘（版权：NASA, ESA 和 P. Kalas 等）。	39
3-2 行星形成的不同时期快照，从左至右分别为物理时间、形成阶段、系外行星系统实例与太阳系历史，版权所有人 Perryman。	40
3-3 AB Aurigae 系统理论谱能量分布图。从左至右分别表示恒星、有效温度为 1500 K 的星周内侧盘与外侧行星形成区域的黑体辐射组分。该图利用 Dullemond 开发的 CGPlus 程序制作。	42
3-4 OGLE-III LMC EBs 样本 i 波段星等与该波段掩食外的星等标准偏差散点图。为了着重显示高信噪比的系统，我们人为去除了 i 波段星等大于 19.3 的 EBs。另外实线上侧的掩食外星等弥散度 $\sigma_L > 0.1$ 也被舍去。此外，虚线表示 $\sigma_L > \sigma_c + 0.1$ ，其中 σ_c 为极限星等误差。我们也尝试过该选择判据，结果显示两种方法并不能影响图 3-5 中的实线方框内的点。	45
3-5 由 LMC 中 2823 个低噪声 EBs 样本计算得到的主掩食内斜度和峰度分布图。OGLE-LMC-ECL-17782 和 OGLE-LMC-ECL-11893 分别用实心方块与三角形标注。为了区分不同性质的系统，我们将该图划分为四个不同的区域：虚线、实线、点线以及点虚线，它们分别代表着拥有不同掩食内光变曲线形状的 EBs — 实线区域内为掩食盘的候选体，而点虚线（近似 $K = S^2 - 1$ 抛物线）则为星等分布的整体形状。EE Cep 和 ϵ Aur 也分别用倒三角与菱形标注，可以看到斜度峰度方法并不能很好的区分 EE Cep 和 ϵ Aur 和其他 EBs。	46
3-6 OGLE-LMC-ECL-02192 的周期 ($P = 1.59$ d) 叠加光变曲线（左侧），该系统属于 ED，并且其中一颗恒星的洛希瓣被充满。右栏为掩食内星等分布柱状图，入食与出食相位分别为 0.1 和 0.5。该系统入出掩食较缓慢，星等分布拥有明亮尾巴，因而拥有正斜度 ($S = 1.94$, $K = 4.98$)，在图 3-5 中处于点线方框内。	47

- 3-7 与图 3-6 相同, 但为系统 OGLE-LMC-ECL-12966 ($P = 239.6$ d)。该系统同样为 ED, 但不同的是由于掩食内光变曲线呈方波形状, 从而右侧星等分布集中在暗端, 斜度也因此为负值 ($S = -1.35$, $K = 1.21$)。在图 3-5 中位于虚线框内。 48
- 3-8 与图 3-6 相同, 但为系统 OGLE-LMC-ECL-11893 ($P = 468.045$ d)。该系的星等分布拥有斜度接近于零和正峰度 ($S = -0.45$, $K = 0.25$), 这是因为掩食内中央区域有一段平台期, 在图 3-5 中位于实线框内。 48
- 3-9 与图 3-6 相同, 但为系统 OGLE-LMC-ECL-17782 ($P = 13.353$ d)。此系统为前人已识别的掩食盘候选体。由于该系统的掩食内星等分布同样拥有平台阶段, 因而斜度与峰度值接近系统 OGLE-LMC-ECL-11893 ($S = 0.12$, $K = 0.89$)。可以从图中看到该系统拥有变化的掩食轮廓和深度。 49
- 3-10 与图 3-6 相同, 但为系统 OGLE-LMC-ECL-17138 ($P = 11.1$ d)。它是在图 3-5 实线框中的唯一的污染源。此系统拥有与掩食盘候选体 OGLE-LMC-ECL-11893 与 OGLE-LMC-ECL-17782 类似的掩食内星等分布斜度与峰度统计值 ($S = -0.36$ and $K = -0.02$), 这是由系统的掩食深度变化所导致的。 49
- 3-11 与图 3-5 相同, 此图样本为 SMC EBs。我们同样检验了掩食盘在斜度峰度图上的可能区域, 发现所有的点几乎都没有任何掩食盘的迹象, 除了用三角形标注的系统 OGLE-SMC-ECL-0007 (参见图 3-12)。虽然该系统在实线方框之外, 光变曲线掩食内部分有些微的不对称性。 50
- 3-12 与图 3-6 相同, 但为系统 OGLE-SMC-ECL-0007 ($P = 1.211$ d)。此系统为 SMC EBs 中可能的掩食盘例子。它掩食内星等分布统计显示出不对成性 ($S = 0.57$ and $K = -0.15$)。可以看出来主掩和次掩都为不对称结构, 应为该系统为短周期双星, 因此我们怀疑它同样存在 ETV。 50

- 3-13 LMC 低噪声 EB 样本的颜色 — 星等分布图，其中 $V - I \leq 0.5$ mag 定义为主序系统。那么前文提到的掩食盘候选系统 OGLE-LMC-ECL-17782 (实心方框) 和 OGLE-LMC-ECL-11893 (实心三角) 的多波段测光性质与主序正好吻合。叠加在其上的曲线为主序星从 $\log_{10}(\text{age}/\text{yr}) = 7.0 - 8.4$ 步长为 $\Delta \log_{10}(\text{age}) = 0.2$ 的等年龄线 (Marigo et al. 2008)。并且这些等年龄线的红化已经通过 0.55 星等的消光与 18.48 星等的距离模数修正过，另外图中的箭头为 $A_V = 1$ mag 的消光矢量。 52
- 3-14 周期叠加后的 OGLE-III 系统 OGLE-LMC-ECL-17782 以及拟合的光变曲线图。不同点代表不同的时间测得的数据，图中的时间定义为 $t = \text{HJD}-2450000$ 。关于此 Nightfall 程序的拟合参数请参见表格 3-2。为了显示，我们将此图主掩极大的相位移动了 $\theta_p = -0.2$ 。 54
- 4-1 已确认系外行星的色指数与光度分布图，墨蓝色点为伊巴古星表临近太阳 150 pc 以内的恒星 (图 C-1)，红五角星为太阳，绿色点为所有行星，黄色点则为热木星。如今被探测到的系外行星以及热木星明显集中在类太阳恒星附近，为观测选择效应。 60
- 4-2 已被确认的系外行星在赤道坐标下的天球分布。图中蓝色虚线为银道面，可以看到巡天一般会远离银盘面 (CoRoT 与 OGLE 除外)。绿色与黄色点如图 4-1，点大小正比于 V 波段星等，从此图未见南北天的观测选择效应，Kepler 视场 ($\text{RA}=19h\ 22m\ 40s$, $\text{Dec}=+44^\circ\ 30' 00''$) 为已确认系外行星最密集的区域之一。 61
- 4-3 热木星系统的周期与轨道偏心率分布图。可以看到系外行星样本 (未经过选择效应修正) 在三天周期分布达到热木星的峰值，虚线为类太阳恒星周围行星拥有近心点距离 $a(1 - e) = 0.03$ AU 的轨道。右侧图为 SB9 光谱双星星表的类似分布图，图片取自 Winn 和 Fabrycky。 62
- 4-4 典型的第二型轨道迁移数值模拟，大质量行星可以在盘内打开空缺，并且往靠近恒星的盘内侧迁移。图片版权 ArmitageRice。 63

- 4-5 引力潮汐形变示意图, 其中 (r, θ, ϕ) 是以中心天体赤道为基准面的球坐标参考系。 L, S 分别为扰动体 m 的轨道角动量与潮汐形变体 M 的自转角动量。为了显示, 此图的潮汐鼓包被大大地夸张了, 并且没有考虑 M 自转产生的鼓包。 65
- 4-6 系外行星 Rossiter-McLaughlin 效应示意图。由于行星在凌星过程中遮挡主星的部分区域从而导致主星红移与蓝移的相应部分减小, 图中不同的自转—公转倾角以及影响因子均会影响到 RM 效应的视向速度曲线波动轮廓, 本图版权 Gaudi/Winn。 66
- 4-7 HD 189733 行星系统凌星内观测到的 RM 效应。上栏为凌星光变曲线, 中栏为系统的 RV 曲线周期叠加图, 而下栏则为凌星时刻内的 RM 效应, 该图版权 Winn 等。 68
- 4-8 上栏为 HJs 的主星有效温度与投影自转—公转夹角 λ 的统计图, 下栏为恒星的投影自转速度与有效温度的统计关系。可以看到有效温度较高的恒星明显拥有较大的自转速度, 而这部分恒星正好对应几乎均匀分布的 λ 值。图片版权 Winn 和 Fabrycky。 70
- 4-9 已知系外气巨星的轨道周期与主星有效温度分布图, 点的大小正比于主星投影自转速度的对数。在此图的左上角分别标注了对应行星周期 P 为 1、3、10 天处, 一个太阳质量恒星的同步自转速度 V_s (分别为 50.6、16.8、5.0 km/s)。从图中可以看到大部分类太阳系统拥有 $\Omega_s < n$, 除了少部分较热恒星周围行星轨道角速度小于恒星自转速度, 此图中不同温度的恒星自转速度与行星周期的相关性应该为观测选择效应。 71
- 4-10 所有中等质量恒星周围已知 $\lambda (\Psi)$ 的 HJs 散点图。图中点的大小代表行星的质量 M_p , 颜色则代表 Ω/n 。可以看到自转偏慢的恒星反而拥有比较大的 λ 。而且图中至少有七个系统拥有 $\Omega > n$, 这代表了这些系统内行星轨道发生了外迁。 75
- 4-11 根据公式 4-12 与 4-13 计算得到的热恒星对应的临界 Q_{orbit} 与 Q_{spin} 值分布图。黑色的实心圆与空心圆分别代表自转轨道法向吻合 ($\lambda < 30^\circ$) 与不吻合 ($\lambda > 30^\circ$) 的系统, 对于 $\Omega_s > n$ 的系统则用菱形来表示, 灰色的点则表示没有 λ 的观测数据信息。 76

- 4-12 类太阳主星与其热木星的 $v \sin i - P$ 图。由于这部分稍冷的恒星受星风与潮汐的同时影响，因此首先我们在右侧纵轴上分别标注了 V_s 在不同恒星年龄 ($\tau_s = 1, 3, 10$ Gyr, 见公式 4-15) 的值。灰色的实线代表类太阳恒星的旋同步曲线 ($\Omega_s = n$)，在此线的下方则表示行星的潮汐作用会使得行星的轨道收缩而恒星的自转加速。蓝色的实线表示 $L \approx 2S$ ，也即轨道演化时标与自转轴演化时标相当 ($\tau_a = \tau_\Psi$)。红色的虚线表示不同的恒星 Q 值下的潮汐星风平衡态（公式 4-16），点的标记和图 4-11 一致。 78
- 4-13 与图 4-11 类似的，此为低温恒星的 Q_{orbit} 与 Q_{spin} 分布图。我们对所有系统采用了 $\tau_s = 4$ Gyr 的恒星年龄，该值的不确定度则为会导致数据点朝着与对角线 ($Q_{\text{spin}} = Q_{\text{orbit}}$) 平行的方向平移。与热恒星周围类似的是，这些系统不太可能在轨道显著变化的同时改变恒星的自转轴方向。 79
- 4-14 自转—轨道的指向两种主流解释的示意图。**1.** 行星轨道取向与主星的自转角动量均保持在原初角动量的位置，有效温度较高的主星的自转轴通过 IGW 激发并改变取向，从而导致观测中的非零 Ψ 角，该理论中的 HJs 往往通过盘迁移而形成，且不依赖于潮汐耗散；**2.** 行星公转与主星的自转在形成时保持一致，然而由于高偏心率迁移过程中行星的轨道取向被改变，从而导致类太阳恒星系统中有效的潮汐耗散而重新将 Ψ 角减小。 81
- 5-1 凌星探测法对行星物理性质的后续观测示意图。从主掩食 (Transit) 到次掩食 (Occultation) 可以分别看到行星大气随着相位变化以及行星大气所蕴含的半径和大气成分等重要信息。图片版权 Sara Seager。 84
- 5-2 凌星法探测的行星的质量与半径关系图（包括其主星）。从恒星、矮星到气态巨行星与类地行星半径质量关系呈现处的不同变化向我们反映了它们内部结构与物质状态的不同。此图数据源自网站 TEPCat。 85

5-3 恒星在多星系统中的形成环境对行星系统的影响：三星系统由于三体不稳定性会导致其中两颗恒星发生密近交汇，这种剧烈的动力学过程会导致行星系统发生不稳定性，此效应更会对恒星周围其他的行星如类地行星产生恶性连锁反应，因而气巨星对类地行星存在几乎是种灾难。	86
B-1 二体在轨道平面内的椭圆运动示意图，图片来源 Perryman。	135
B-2 椭圆二体运动轨道在三维空间内的示意图，图内标识分别为轨道根数与参考系。图片来源 Perryman。	136
B-3 双星中洛希瓣的示意图，伴星主星质量比 $\mu_2/\mu_1 = 0.2$ ，其中 L_1 被称为第一朗格朗日点，穿过它的等引力势面（用数字 1 来标注）分别被称作两颗星的洛希半径。图片版权 C. D. Murray, S. F. Dermott.....	136
C-1 赫罗图示意图，数据采自 ESA/Hipparcos/Tycho	137

附表清单

1-1 太阳系八大行星物理参数与轨道参数，轨道根数取值依照 J2000 平赤道参考系，数据源自 NASA/JPL 网站。	15
2-1 CSTAR 星表中主要产生鬼像的亮星列表。	31
3-1 OGLE-LMC-ECL-17782 系统宽带测光信息表	53
3-2 OGLE-LMC-ECL-17782 系统的光变曲线拟合参数	55
4-1 按照主星性质分类下，不同行星系统的统计数据	72

公式清单

1-1 探测系外行星中视向速度法引起的主星速度振幅	6
1-2 天体测量法探测系外行星	9
1-3 最小质量太阳星云气体面密度分布表达式	14
1-4 最小质量太阳星云固体面密度分布表达式	14
2-1 修正鬼像星等差的基本公式	30
2-2 鬼像半径与南极点以及光学对称轴之间的几何关系	33
2-3 鬼像影响因子参数 $f_1(d)$	35
3-1 黑体辐射	41
3-2 多黑体盘总辐射量	41
3-3 样本高阶矩 — 斜度的计算公式	45
3-4 样本高阶矩 — 峰度的计算公式	45
4-1 系外行星数目的出现概率分布	61
4-3 二体运动中的能量与角动量	62
4-4 希尔半径或洛希半径的表达式	63
4-5 非球形引力势展开	65
4-6 平衡潮汐模型下的 Q 参数	66
4-7 Rossiter-McLaughlin 效应产生的视向速度波动振幅	67
4-8 恒星的自转角动量	72
4-9 潮汐对行星轨道以及恒星自转的影响	73
4-10 典型的潮汐演化时标	73
4-11 潮汐对行星轨道以及恒星自转的影响	73
4-12 行星轨道演化所需求的平衡潮参数	74
4-13 恒星自转演化所需求的平衡潮参数	74
4-14 潮汐演化中恒星自转速度的临界取值	75
4-15 类太阳恒星在星风作用下的自转速度损失率	77
4-16 低质量恒星星风与潮汐演化的平衡态	77
4-17 低质量恒星自转演化潮汐参数临界值	78

5-1 不同天体的质量半径关系	84
B-1 二体运动的径向距离与轨道根数的关系	136

第一章 緒論

... Onde possiamo stimare che de stelle
innumerabili sono altre tante lune, altre
tanti globi terrestri, altre tanti mondi
simili a questo.

Giordano Bruno

1.1 引言

1.1.1 地球与人类，无独有偶？

由古至今，人类在宇宙中的所处的位置就一直魂牵梦绕着人们的思绪。这个难题既包括了人类居住的地球在空间上究竟是否独特，另一方面也包含人类（或生命）在宇宙中的唯一性与否。而正因人类拥有了实证与思考的能力，因而在这些问题上的观测与探索也从未曾停歇。

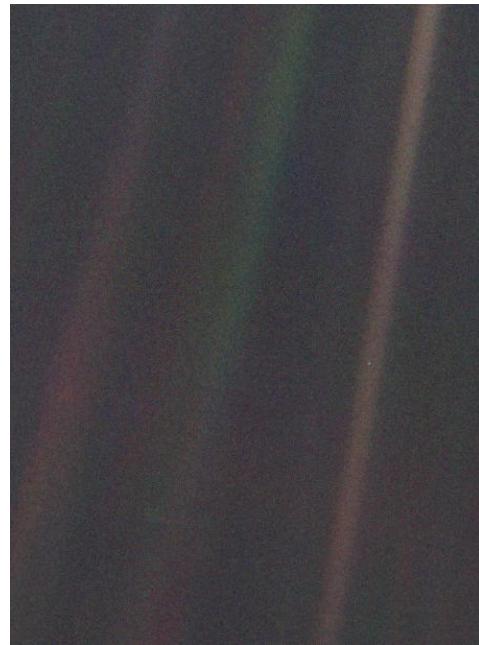
首先，行星科学（*Planetology*）是一门古老的以观测为基础的科学。早在公元前，古希腊等各大文明已有天文学家（如伊巴谷）统计了相当可观的夜空发光天体的运行与方位^[1,2]。而在以托勒密为代表所提倡的地心说主导了这个星球一千多年后，文艺复兴时期的哥白尼等人也通过观测提出了日心说^[3]。自此地球在空间位置谜团便开始层层被揭开，地球的面貌（图 1-1）也愈发完整地展现在了人类面前。

此外，人们往往会展开哲学角度来思考地球与生命在宇宙中普遍与否。比如原子论的宇宙描述早已开端于古希腊与古印度。随后，意大利哲学家 Bruno 亦于 1584 年提出无穷宇宙论：太阳与地球在宇宙中并不特殊，不计其数的其他星体也和地球相差无几（文献 [4]）。

历史一脉相承至今，随着人们对太阳系内行星与地球的运动探求愈来愈充分，也许便不难理解搜索系外行星与系外生命为何如此举足轻重。而且从技术



(a) Apollo 17 号船员拍摄的南半球^①，拍摄日期为 1972 年 12 月 7 日。（图片版权：NASA）



(b) Voyager 1 于 1996 年 9 月 12 日拍摄到的多色合成地球肖像照^②。（图片版权：NASA/JPL-Caltech）

图 1-1：人类从太空看到的赖以生存的母亲行星 — 地球。**(a)** Apollo 17 号飞船航向月球的途中宇航员们回望并拍摄到的地球。这张图被称作「蓝宝石」，图中可以清晰的看到南半球的大气云层与被冰雪覆盖的南极点，另外还可看到非洲与亚洲大陆。**(b)** Voyager 1 航天器在距离太阳四十亿公里外拍摄到的地球。在最右侧的太阳散射光柱中，地球就只是不到一个像素的小白点，而在这颗蔚蓝的星球上曾居住并流逝着所有的人类足迹。

层面上，人类也已经有足够的能力将「第二颗地球」与「地外生命」放入可见的未来计划中^[5]。

1.1.2 系外行星的定义

二十一世纪以前，由于对冥王星的测量并不充分，科学界从传统层面上也似乎没有必要争论如何去界定行星。尔后，随着更多的海外天体（Trans-Neptunian Objects，简称 TNOs）被发现，冥王星是否还是太阳系第九大行星的争辩也愈演愈烈^[6]。终于，国际天文学联合会（International Astronomical Union，简称 IAU）于 2006 年在「B5 决议^③」中给太阳系内的行星做出如下定义：

1. 必须拥有围绕太阳的轨道；

^①<https://www.nasa.gov/content/blue-marble-image-of-the-earth-from-apollo-17>

^②<http://photojournal.jpl.nasa.gov/catalog/PIA00452>

^③https://www.iau.org/static/resolutions/Resolution_GA26-5-6.pdf

2. 质量应充分大，使得其自引力足够克服刚性力，以形成（近）球外形；
3. 另外，行星必须清空轨道临近的其它天体。

根据此定义，冥王星不再属于行星范畴，而被称作一颗矮行星。那如今观测到的近 3500 颗^①系外行星呢？从词源学上，行星（planet）一词取名自希腊语，那么系外行星（exoplanet）自然也该遵循上述 2006-B5 决议。然而部分系外气态巨行星（gas giant）质量已经大于十个木星质量（ M_J ），此类行星的质量上限在 IAU 决议中也并未给出。实际上，早于冥王星争辩，IAU 系外行星工作小组就已规定真实质量小于 $13 M_J$ （或行星内部氘元素热核反应的质量下限^[7]）的行星才被称作系外行星^②。在本文亦一律遵循以上两者来定义系外行星。

1.1.3 系外行星扼要史

人类从诞生之始就默默地注视着夜空的「神行者」——行星。而作为专注于研究系外行星系统的科学（Exoplanetology），其研究对象则跳脱出传统可观测的太阳系各大行星，转向了银河系内太阳周围临近的恒星。回顾历史，这门领域的兴起也并非一蹴即成，而是融入许多先人不停探索、试错与更新的艰辛历程。

近代系外行星搜索开始于十九世纪中页，Jacob 在对 70 Ophiuchi 的天体测量数据中找到类似行星的信号^[8]，然而 Moulton 后续观测立即证否了这颗行星^[9]。在随后的一个世纪内，对木星质量的系外行星探索逐渐变得活跃，如 van de Kamp 于 1963 年将仪器系统信号误认为一颗围绕巴纳德恒星的行星（文献 [10]）。

另外一面，Struve 在 1952 年提出短周期类木系外行星可同时通过视向速度与测光探测的设想^[11]。然而科学界当时理所当然都以为木星只能处在距离主星 5 AU 轨道上，因此需要太长的时间跨度来确认探测^③。不过，恒星光谱学依然在其间飞速发展，如 HD 114762 被发现拥有一颗非常接近系外行星质量上限的褐矮伴星^[12]。

此时，来自美国的二人团队 Wolszczan 和 Frail 于 1992 年利用射电脉冲信号的周期变化率在脉冲星 PSR1257+12 周围率先成功探测到包含两颗约 $3 M_{\oplus}$ 行

^① 来源 NASA Exoplanet Archive <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/index.html>，数据库更新至 2017 年 2 月 14 日

^② 请查看链接 <http://home.dtm.ciw.edu/users/boss/IAU/div3/wgesp/>

^③ 一般来说，由于引力所造成的周期信号被连续确认三个周期以上便被认为是真实的天体信号。

星的行星系统^[13]。而此时 Walker 等人则在对主序恒星长达 12 年的视向速度监测中，宣布没有迹象表明他们嗅探到系外木星信号^[14]。

同一年，来自瑞士日内瓦天文台的 Mayor 和 Queloz 做出了系外行星领域里程碑式的发现（文献 [15]）：他们利用坐落在法国 Haute-Provence 天文台的 ELODIE 光谱仪从 150 颗恒星样本中成功探测到第一颗类太阳恒星周围的行星 — 51 Peg b（见图 1-2）。这颗轨道周期只有 4.23 天的类木行星于同一年被美国 Marcy 和 Butler 团组证实，随后便引起了对此类行星（即热木星）形成理论机制广泛而又深远的讨论（§ 1.3），一直延续至今。

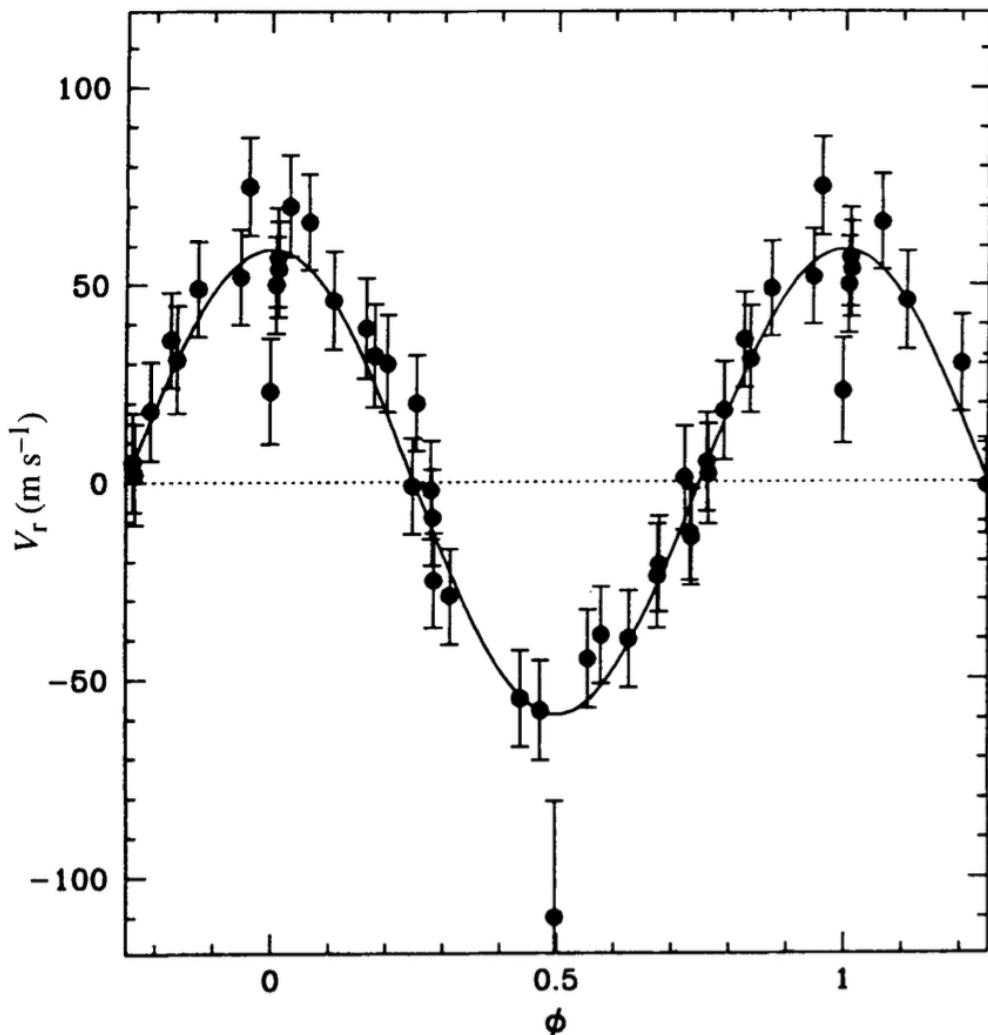


图 1-2：日内瓦天文台天文学家 Mayor 和 Queloz 连续观测恒星 51 Pegi 得到的视向速度曲线图，观测点已全数叠加至其伴星的周期 4.23 天。该系统主星是一颗类太阳恒星，因此视向速度曲线振幅所对应的最小质量为 $0.47 M_J$ ，系人类首次发现到类太阳恒星周围的短周期类木行星。图片取自他们于 1995 年发表在自然杂志的文献 [15]。

紧随其后的二十年内，系外行星领域各大新奇发现此起彼伏。图 1-3 为年度新发现系外行星数目柱状图，该数目明显呈现出指数式增长，尤其是 2009 年 *Kepler* 太空望远镜^[16] 的发射新带来了大批通过凌星法发现的系外行星。图 1-3 中所展现的愈加多样化的样本也极大地丰富了我们对系外行星的认知。

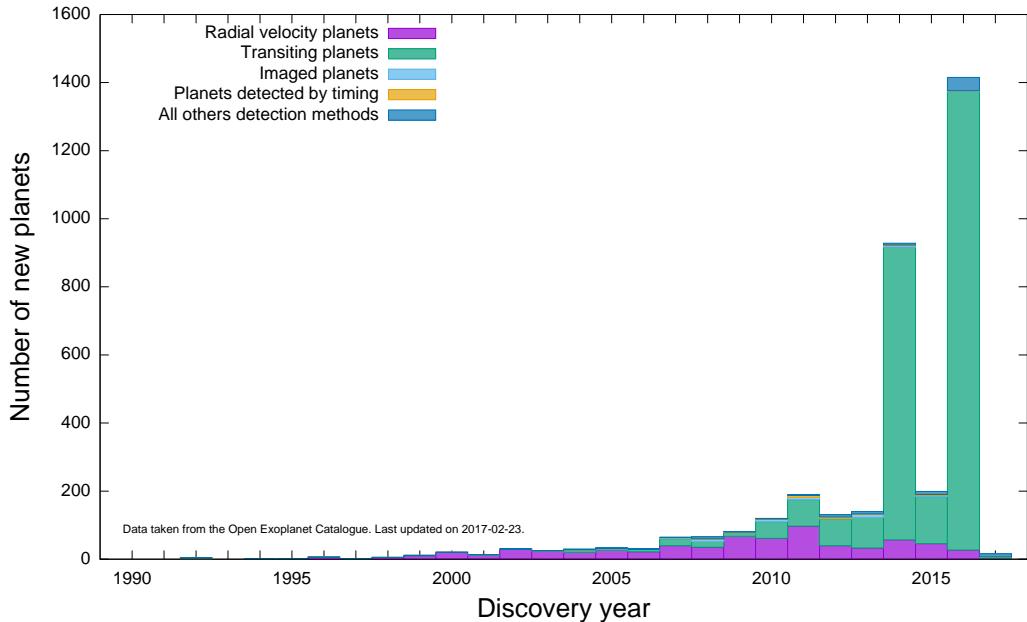


图 1-3: 系外行星发现数量趋势图，不同颜色代表不同的探测方法（参照 § 1.2），可以看出该数目呈现指数式增长。（图片取自 Open Exoplanet Catalogue）

1.2 探测方法

天文学所研究的天体普遍离地球遥远，因而观测手段也主要集中在分析天体发射的光子上。观测系外行星相较恒星或太阳系内行星，通常需要用到非常高分辨率、灵敏度和稳定性的仪器，也因而会遇到诸多困难，甚至还得排除恒星自身活动的干扰。比如测量围绕类太阳的系外地球需要精度为 $1 \text{ m}\text{s}^{-1}$ 的视向速度测量，相当于使用分辨率为 $R = 100,000$ 的光谱仪器探测主星光谱约 10^{-6} 的移动大小。参考书籍 [17]，本文大致罗列目前主要探测系外行星的方法如下：

1.2.1 视向速度

假使恒星周围存在行星，那么它们便会同时绕着公共的质心（Center Of Mass，简称为 COM）做开普勒运动。在观测中，这种三维运动可分解为视线平面内的二维运动与视线方向上的运动。视向速度（Radial Velocity，简称 RV）法就是通过测量视线方向上恒星谱线的多普勒红（蓝）移来探测周围行星的存在。

在简单的二体运动中（§ B），可以得到一颗轨道半长径为 a ，质量为 M_p 的行星，可对质量为 M_s 的宿主恒星造成如下大小的半振幅视向速度 K_1 （单位：米每秒）：

$$K_1 \simeq \frac{28.4}{\sqrt{1-e^2}} \frac{M_p \sin i}{M_J} \left(\frac{M_p + M_s}{M_\odot} \right)^{-1/2} \left(\frac{a}{1\text{AU}} \right)^{-1/2}, \quad (1-1)$$

其中各物理量的意义参见附录 B。由上式可知，视向速度方法最重要的缺陷即它只能测量（或拟合）出行星的最小质量（minimum mass，即 $M_p \sin i$ ），因为行星的轨道倾角 i 或视线方向夹角无法被测量。但与此同时，视向速度最明显优势是它可以精确测量行星的轨道偏心率 e （图 1-4）。

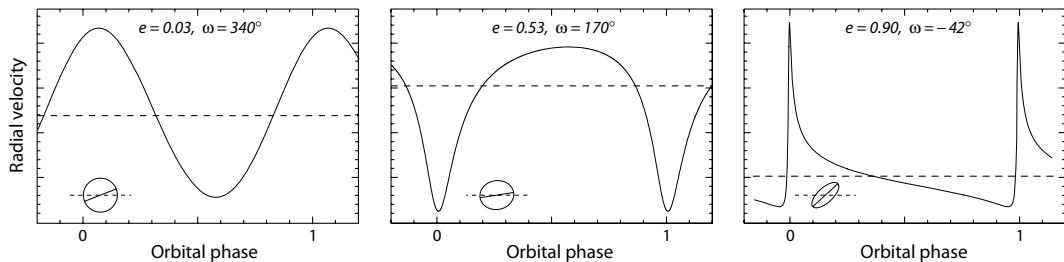


图 1-4：行星对主星造成的视向速度曲线示意图，分别代表不同的行星偏心率和轨道近心点取向。从左至右分别示意系统 HD 73256^[18]，HD 142022^[19] 和 HD 4113^[20]。此图取自文献 [21]。

另外由于视向速度需要通过尽可能多的主星谱线来确认谱线的位移，因而往往更容易探测到 FGKM 型主序星附近的大质量行星。在这里值得一提的是，由 Murphy 等人提出的激光频率梳法^[22]与 Molecule Iodine Cell 或 ThAr Lamps 等传统的光谱仪器定标方法相比，可以更稳定重复的覆盖同样的谱线区间，因此未来在视向速度方法上有相当可观的应用前景。

1.2.2 凌星法

从原理上来说，凌星法是通过测量行星遮挡主星时主星亮度（流量）的变化来探测行星的。如图 1-5 所示，系外行星处于恒星与地球的连线时被称作凌星（transit）或主掩食（primary eclipse），而当恒星处于系外行星与地球的连线时则被称为掩星（occultation）或次掩食（secondary eclipse）^①。

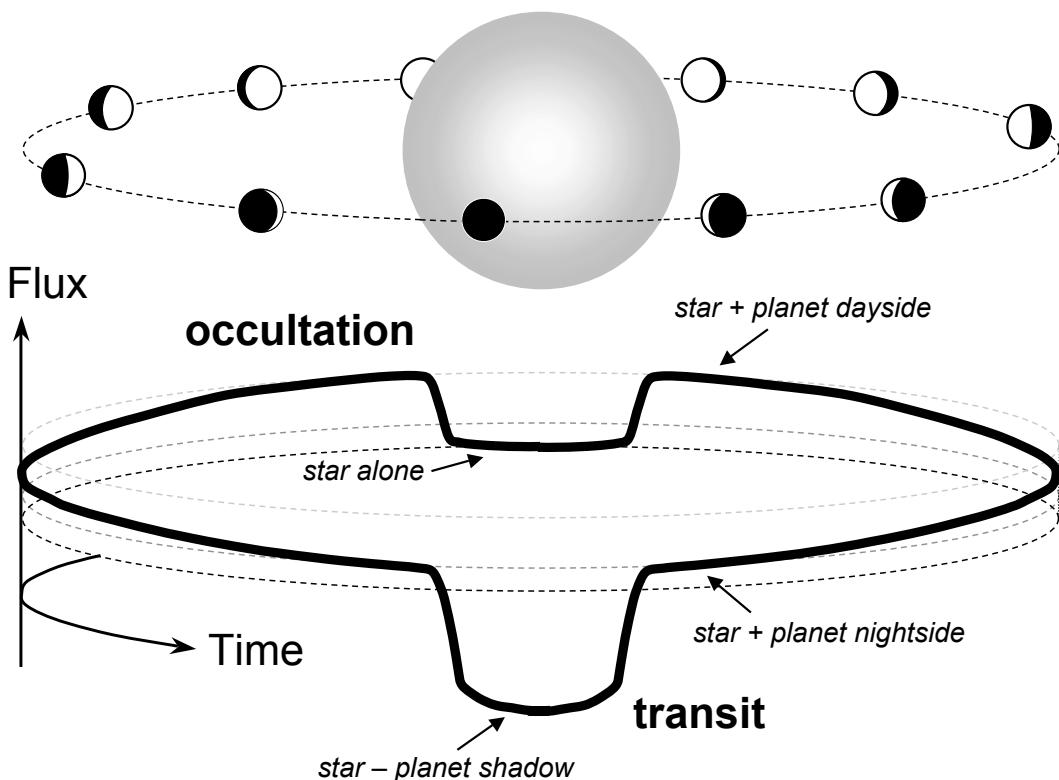


图 1-5: 凌星法探测行星示意图，凌星法探测行星示意图，上半部分表示不同的轨道时刻。下方则为整个系统观测到的流量变化。此图取自书籍 [23]。

事实上，掩食在太阳系内已属屡见，比如日、月食和金星凌日现象。虽然凌星法探测与视向速度法在原理上被 Struve 于同一年提出^[11]，但真正意义上的第一次观测到系外凌星却比视向速度晚了五年^[23]。当时视向速度已经发现了 64 颗系外行星，在对其中 6 颗行星系统的凌星监测中，行星 HD

^①凌星被约定特指半径较小天体遮挡大天体，而掩星则相反。双星中的掩食通常只用于大小相近天体的互相遮挡

209458 b 的主掩食成功被观测到^[24,25]。这种滞后主要是因为凌星发生的几何空间概率较低 ($p = R_s/a$)，与此同时还要求观测的相对测光精度至少达到 5 % (对应于木星凌太阳)。凌星法也因此通常结合巡天计划 (尤其是大视场巡天) 展开，因而提高测光精度、处理数据和去除假阳性信号也成了该方法的技术难关^①。目前地面上比较成熟的巡天项目，包括 The Trans-atlantic Exoplanet Survey (TrES)^[26]，XO^[27]，The Hungarian-made Automated Telescope Network (HAT)^[28] 以及 Wide Angle Search for Planets (SuperWASP)^[29]，相应空间巡天项目也有 Convection, Rotation and planetary Transits (CoRoT)^[30] 与 Kepler^[16]。

1.2.3 天体测量

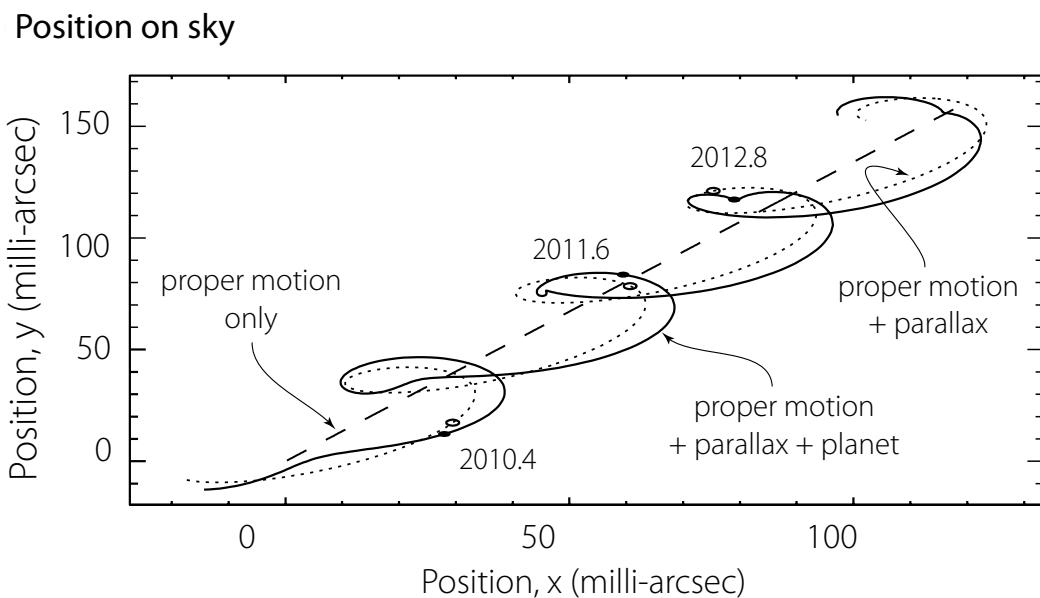


图 1-6：由于行星的存在，宿主恒星的天球坐标随着时间的变化示意图。此图取自文献 [21]。

和视向速度探测主星前后摆动不同，天体测量法 (astrometry) 着重于观测恒星在天球上的左右摆动。行星对宿主恒星造成的来回振幅大小可用如下公式估算

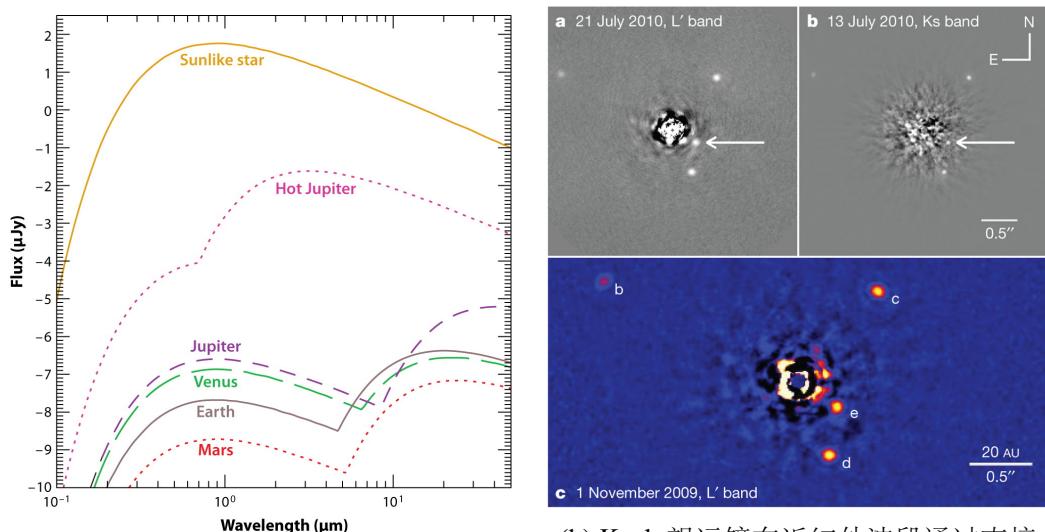
$$\alpha \simeq \left(\frac{M_p}{M_s} \right) \left(\frac{a}{1\text{AU}} \right) \left(\frac{d}{1\text{pc}} \right)^{-1} \text{arcsec} . \quad (1-2)$$

^①凌星法只能得到系外行星的候选体，一般还需额外使用其他方法联合认证该行星，如凌星计时变化 (Transit Timing Variation, 简称 TTV) 或者 RV。

如图 1-6 所示，天体测量法只需要恒星在天球球面上的经度纬度信息就可探测到行星，它也对主星的性质没有任何依赖，因而有其独特的优势，如可探测轨道倾角参数 i 。2013 年，Gaia 天体测量卫星成功发射，虽然目前来看科学数据尚未达到探测系外行星的精度^[31]，期待今后几年会有振奋人心的成果。

1.2.4 直接成像

中国古话有道是「耳听为虚，眼见为实」，直接成像法便可把行星直观地展示出来。技术上这其实并非易事：距太阳系几十个秒差距以外的行星与其主星的空间张角（angular separation）往往远小于望远镜分辨率。即使空间上能分辨，恒星的黑体辐射也往往比行星高近十个量级（图 1-7a）。在实际的观测中，对行星直接成像往往需要星冕仪（coronagraph）或干涉仪（interferometer）的辅助（如图 1-7b）。



(a) 可见光波段行星与主星的对比度可差至十个量级，因而直接成像法一般选择在长波范围（如红外波段）观测系外行星。图片摘自文献 [32]。

(b) Keck 望远镜在近红外波段通过直接成像得到的 HR 8799 系统。中心恒星的大部分光已被星冕仪遮挡，留下小部分噪声，与远处四颗行星。图片取自文献 [33]。

图 1-7：直接成像法探测系外行星。**(a)** 仪器接受类太阳恒星在 10 pc 以外的黑体辐射强度，其余为太阳系行星与热木星在此恒星周围黑体发射与发射的叠加流量。**(b)** Keck 望远镜利用角向较差与自适应光学技术直接成像观测到的 HR 8799 系统。

直接成像方法往往偏向于探测年轻的系统，如 HR 8799^[34]，Fomalhaut^[35] 和 β Pictoris^[36]，这是因为行星在其形成早期会拥有较强的近红外辐射。目

前用于此方法的望远镜有 Hubble Space Telescope (HST) , Keck, Very Large Telescope (VLT) 和 Gemini Planet Imager (GPI) 等^[34,37,38]。

1.2.5 其他方法

微引力透镜 (microlensing) : 本方法原理可以追溯到 1936 年, Einstein 发表了一篇计算前景星对视线方向上背景星引力放大率的文章^[39]。而且在第一颗用微引力透镜观测得的行星前, Mao 和 Paczynski 就已经从理论上提出了行星能在恒星引力透镜基础上造成额外的微引力透镜效^[40]。如今已经有 42 个通过微引力透镜发现的系外行星系统, 包括 2 个双行星系统^①。在役的仪器主要有 Optical Gravitational Lensing Experiment (OGLE)^[41] 和 Microlensing Observations in Astrophysics (MOA)^[42], 它们一般会监测恒星密度较大的区域如银河系核球 (Galactic Bulge, 简称 GB) 。

计时法 (timing) : 传统计时法最典型的例子就是最早被发现的系统 — 脉冲星 PSR1257+12 行星系统^[13]。除了传统的 Pulsar Timing Variation 之外, 可以说任何理论上拥有稳定周期信号的恒星计时变化都可以用来探测潜在的系外行星: 如凌星计时变化 TTV^[43,44] 和星震时变^[45,46]。此方法应用前景也非常可观, 特别是针对多行星系统动力学特征刻画^[47]。

除此以外, Perryman 列出了更为系统且详细的探测方法, 对应的探测能力以及它们在将来可能的应用^[48], 请参见下页图 1-8。

1.3 行星形成理论

星际空间并不是空无一物的, 英国天文学家 William Herchel 在 18 世纪末观测到恒星周围冷暗物质吸收带, 我们的原太阳就是在这般空间环境中孕育而成^[49]。随着原初分子云坍缩, 核心区域会演化成原恒星, 而周围的物质会由于原初角动量守恒而沉降成盘状结构以及双极喷流 (bipolar jets), 比如观测到的 Herbig-Haro 型天体^[50]。

在恒星形成的早期, 现有的观测证据主要集中在 T-Tauri 型天体上 (又叫 Young Stellar Objects, 简称 YSOs) 。YSOs 通常会按照红外谱指数 ($\alpha_{\text{IR}} = \log \lambda F_\lambda / (\log \lambda)$) 分为 Class 0, Class I, Class II, Class III 四种类型^[51] (见图 1-9) , 它们恰恰各自对应着不同的原恒星演化阶段。

^①数据截至 2017 年 2 月, 参见 NASA Exoplanet Archive: <http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/>

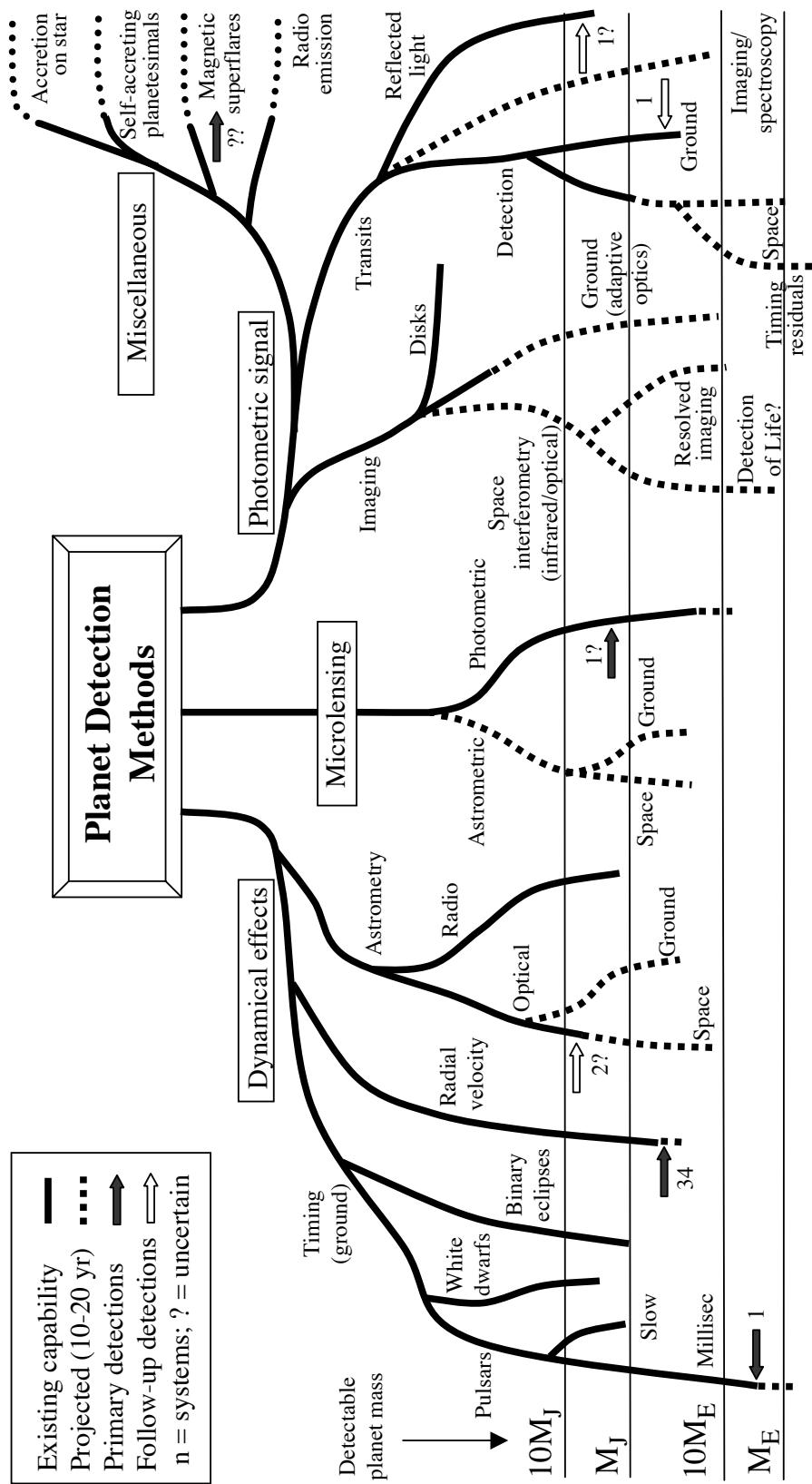


图 1-8 系外行星探测方法大全，关于图片说文明请参见文献[48]，此图摘录自该文献的第一幅插图。

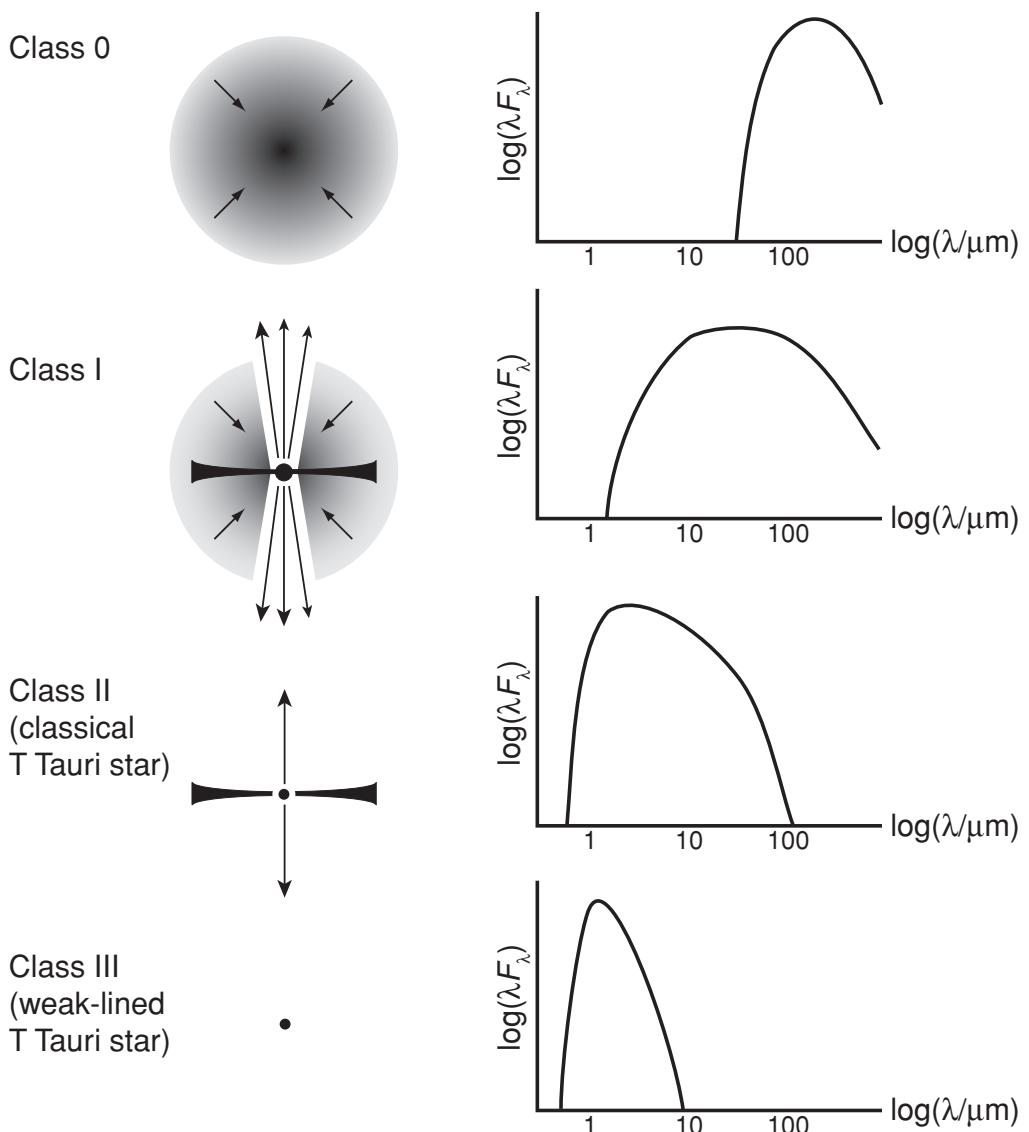


图 1-9: YSOs 按照红外谱指数划分的四种主要类别, 图中背离黑体谱的红外突起部分又被称作红外超, 它也是恒星是否存在盘的重要判据之一。此图取自书籍 [52]。

从某种程度上说, 此刻的原恒星盘 (protostellar disk) 已可被称作原行星盘^① (ProtoPlanetary Disk, 简称 PPD)。根据文献 [53], 由于恒星对周围气体的吸积^[54]、恒星的高能辐射^[55,56], 以及气体盘自身的粘滞性^[57,58], 角动量会从从气体盘的内侧向外转移, 原行星盘也会逐渐耗散 (图 1-10)。2001 年 Haisch 等人则通过统计不同星团中的红外超恒星比例^[59], 发现原行星盘的存活时标在不到百万年 (约 10 Myr) 的量级 (见图 1-11)。这对类木行星行形有着非常

^①一般而言在恒星形成的早期, 当恒星处于活跃吸积阶段时星周盘被称作原恒星盘, 而在随后的行星形成阶段则被称作原行星盘。

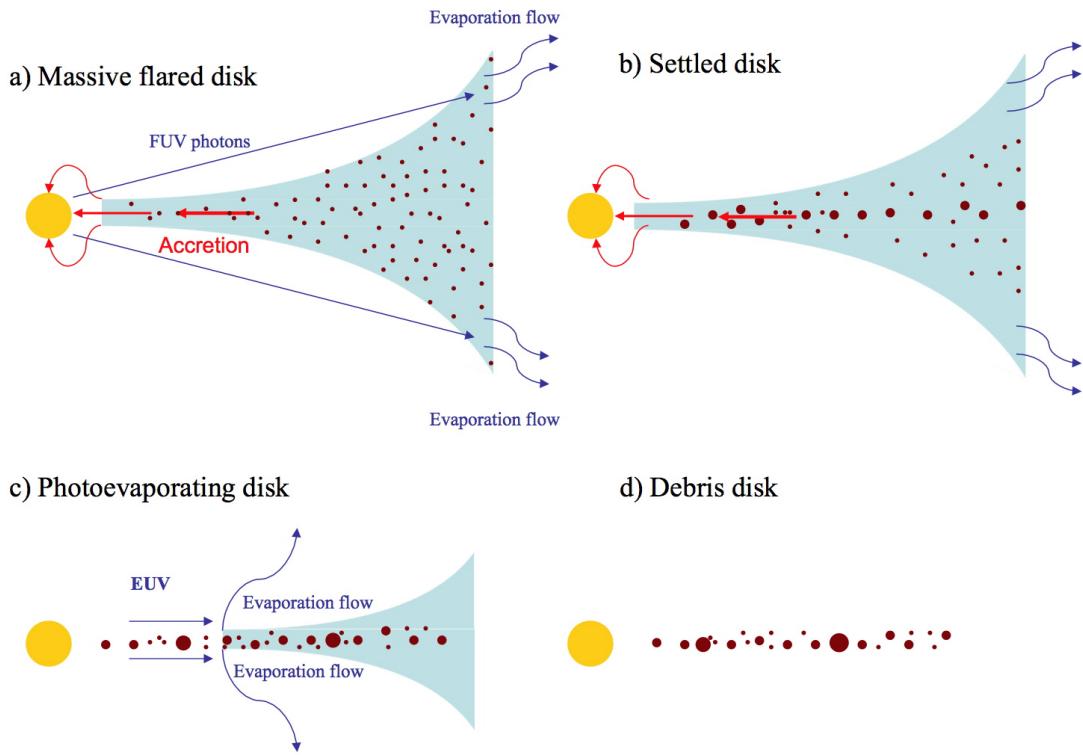


图 1-10: 原行星盘演化中由 (a) 至 (d) 四个主要过程，分别为活跃吸积阶段、固体沉降阶段、盘消散阶段与残骸盘阶段。图片取自文献 [60]。

重要的限制，因为如今普遍认为木星必须在气体盘消散前吸收足够的气体以长成如今的质量大小^[60]。关于星周盘的详细介绍请参考 § 3。

1.3.1 基于太阳系的经典形成理论

早在 18 世纪中页，关于行星形成假说就已纷繁多样。其中康德、拉普拉斯等人提出的「星云假说」因可较好应用至太阳系行星系统中而发展壮大。表 1-1 给出了太阳系八大行星的物理参数，由此表可粗略看出太阳系各大行星具有非常好的一致共面性，除了水星以外都处于近圆轨道，且在火星和木星之间存在明显的物态性质差异。如果将每个行星的重元素平均到打散至行星之间的空隙中，并且混入适量的氢、氦使得新的混合物拥有与太阳相等的金属丰度^① ($[Fe/H]$)，这样得到的最小质量原太阳行星盘被称作 Minimum Solar Mass Nebula^[62,63]，MMSN 气体盘的面密度拥有如下的幂率函数形式：

^①在天文学中，金属元素特指氢和氦以外的所有重元素。

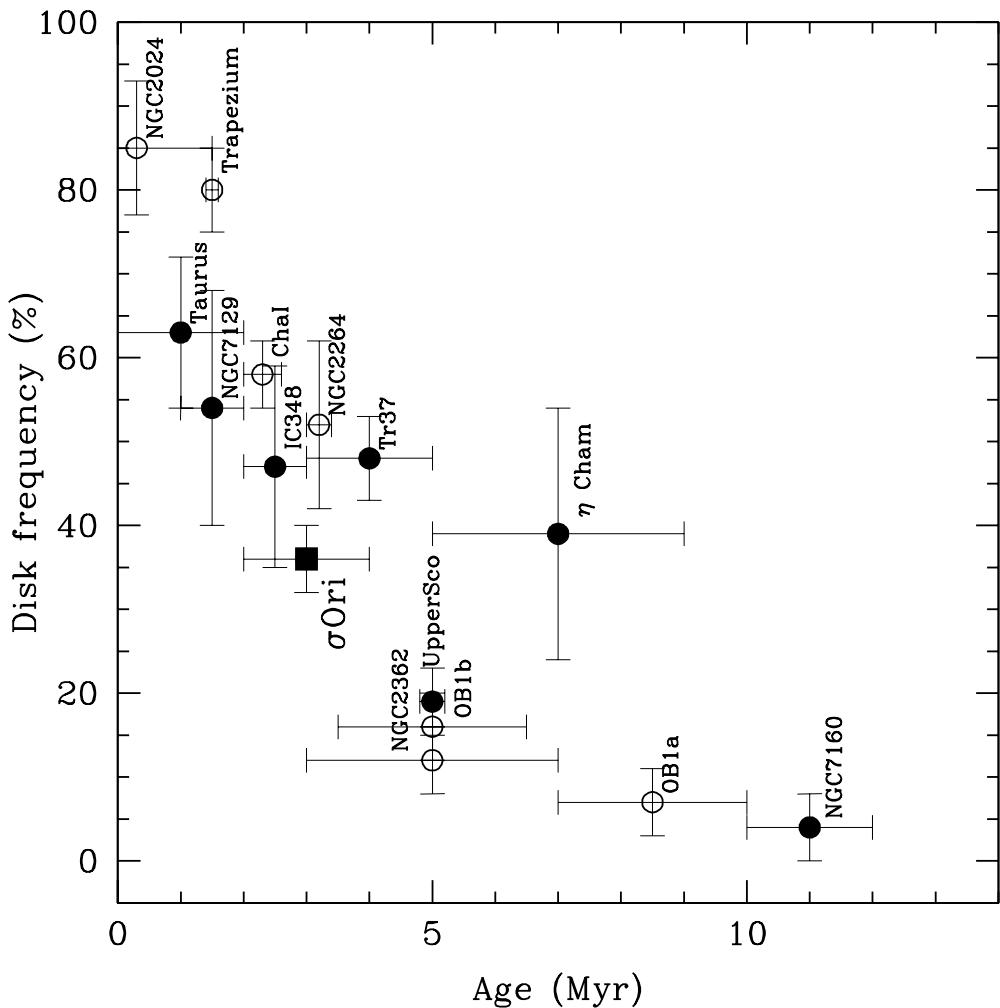


图 1-11: 不同星团红外超等效的原（恒）行星盘占所有星团成员的比例。此图可推断星团年龄在 5 Myr 左右，恒星周围的气体盘已近乎消散。此图取自文献 [61]。

$$\Sigma_g = 1.7 \times 10^3 \left(\frac{r}{\text{AU}} \right)^{-3/2} \text{ g cm}^{-2}; \quad (1-3)$$

相应的固体盘的面密度分布同样可描述为：

$$\Sigma_s = 7.1 f_{\text{ice}} \left(\frac{r}{\text{AU}} \right)^{-3/2} \text{ g cm}^{-2}, \quad (1-4)$$

其中 f_{ice} 为雪线因子。在距离太阳 2.7 AU 以外，水分子等会凝结成冰雪等固体物质，因而此因子会从 1 增加至约 4.2^[64]。从此最小太阳星云模型出发，假若在垂直方向上给它一个标高使其变为三维盘，这就是经典太阳系行星形成

表 1-1: 太阳系八大行星物理参数与轨道参数，轨道根数取值依照 J2000 平赤道参考系，数据源自 NASA/JPL 网站。

	$a(\text{AU})$	$P(\text{days})$	$M_p(M_\oplus)$	e	$i(\text{deg})$	$R_p(R_\oplus)$	$\rho(\text{g cm}^{-3})$
水星	0.3871	88.0	0.0553	0.2056	7.00	0.383	5.427
金星	0.7233	224.7	0.815	0.0068	3.39	0.949	5.243
地球	1.000	365.2	1	0.0167	0.00	1	5.514
火星	1.524	687.0	0.107	0.0934	1.85	0.532	3.933
木星	5.203	4331	317.8	0.0484	1.30	11.2	1.326
土星	9.537	10,747	95.2	0.0539	2.49	9.45	0.687
天王星	19.19	30,589	14.5	0.0473	0.77	4.01	1.271
海王星	30.07	59,800	17.1	0.0086	1.77	3.88	1.638

模型的开端。根据文献 [65]，重元素物质（以微米到厘米级尘埃形式存在）会最先开始在垂直方向上沉降到盘的中平面；紧接着固体物质（dust）开始碰撞结合^[66–68] 或引力坍缩^[69–72] 成星子（planetesimal）。

在 MMSN 模型下，星子的半径大概为公里量级。这样大小的星子和尘埃性质不同，它可以脱离气体的阻尼力并通过自引力保持其结构。此时星子相互之间的引力作用变得显著，它们会经过雪崩增长与寡头生长两个时期成长为原行星^[73–76]。原行星（protoplanet，亦称做行星胚胎）会在接下来分别演化成气态巨行星和类地行星，其中形成气态巨行星一般被认为原行星核通过吸积气体（core accretion）而形成^[77–79]，而类地行星则需要经历更多的动力学作用过程才能形成^[80]。

当然，行星形成也还存在很多问题与挑战，解释太阳系太行星还存在许多难关^[81,82]，数值模拟如 Nice 模型^[83] 也并不能解释太阳系细节构型（尤其是水的来源^[84]），本文仅能作粗略介绍，图 1-12 为上述经典形成模型的核心各阶段过程的总结。

1.3.2 经典理论新挑战：系外行星

由于观测极限，太阳系行星如今尚身处观测能力范围以外。如图 1-13 所示，系外行星种类遍布多样，堪称百花齐放，且已确认数量仍在日趋增加。抛开观测选择偏差（observational selection bias），太阳系与之相比似乎显得有些「格格不入」。按照图 1-13，本文将系外行星按照其集中区域大致分为三类：

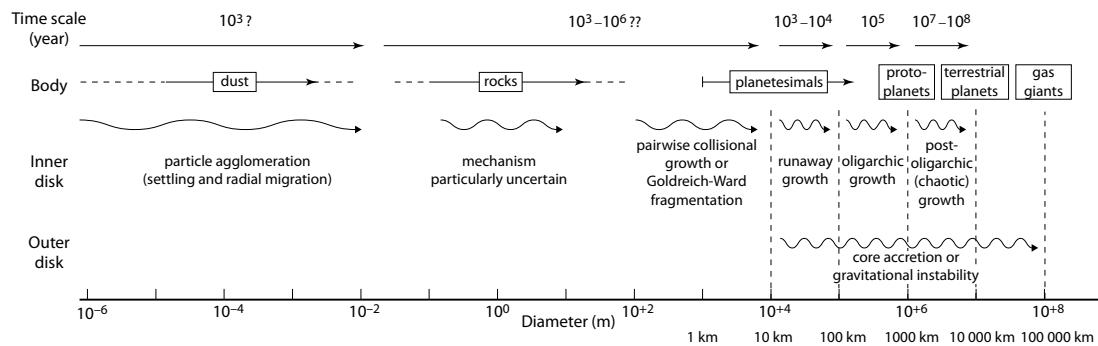


图 1-12: 基于太阳系的传统行星形成理论模型在不同阶段的说明图，其中「米级障碍」属于至今为止的重大难题。此图取自文献 [21]。

热木星族（椭圆实线），冷木星族（方框实线）和超级地球族（椭圆虚线）。

1.3.2.1 热木星族 Hot Jupiter Population

当 Mayor 和 Queloz 与 1995 年发现第一颗围绕类太阳的系外行星 51 Peg b 时^[15]，整个行星学界都为之震惊，因为这颗类木星的轨道周期只有 4.23 天。51 Peg b 单独用经典行星形成理论根本无法解释。由于此类行星非常靠近其主星（轨道周期 $P \leq 10$ 天），质量大于土星质量 ($0.3 M_J$) 故而得名曰热木星。作为本册论文重要的研究对象，此类行星详细的介绍内容请参见 §4。

1.3.2.2 冷木星族 Cold/Normal Jupiter Population

与轨道距离主星较近的热木星相对应有一类行星被称作冷木星（或者常规类木星）。此类行星在观测上拥有长于约一百天的轨道周期，有效温度也比热木星低得多，太阳系木星就属于一颗典型冷木星。相比短周期行星，确认此区域的行星通常需要望远镜连续观测几年甚至数十年，因而样本完备性也相对较差^[85]。根据使用 Keck 望远镜进行的 Lick-Carnegie 行星搜索项目，Rowan 等人通过观测样本估算得到此类行星的出现概率大概只有约 3%（文献 [86]），因而木星在人类想法中先入为主、见惯非惯的概念也许并不周全。

另外值得提的一点是直接成像法（§ 1.2.4）可以观测到更长周期行星，如 HR 8799 系统（文献 [34]，详见图 1-7b）等屈指可数的样本。传统的核吸积模型需要花很长时间来形成此类气巨星的胚胎核心。相比之下，另辟蹊径的引力不稳定（Gravitational/Disk Instability，一般简称 GI）模型^[87-89]则可比较合理地解释这些巨行星是如何形成于距离主星几十个天文单位的轨道上^[90]。

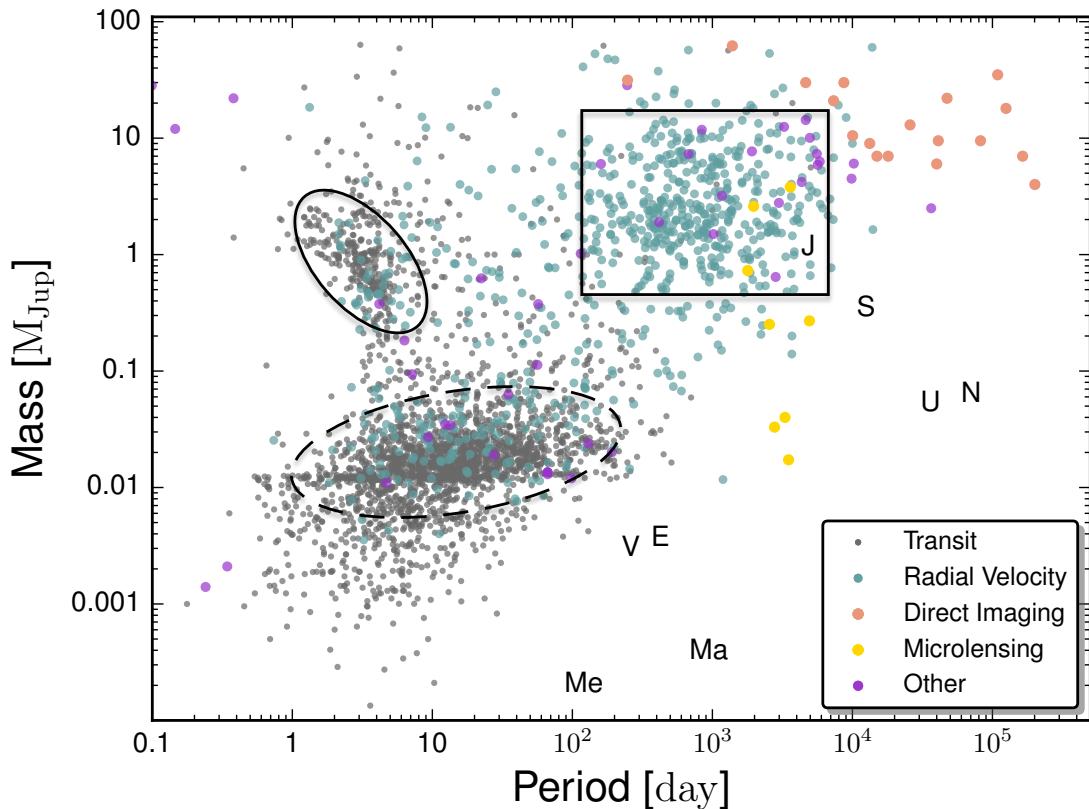


图 1-13: 现今探测到系外行星的周期 - 质量散点图。其中不同颜色分别代表不同的探测方法：青色代表视向速度法，灰色是凌星法，黄色指代微引力透镜法，红色代表直接成像法，紫色则表示其他方法。黑色字母 Me, V, E, Ma, J, S, U, N 则分别表示太阳系内水星，金星，地球，火星，木星，土星，天王星和海王星。本文将系外行星进行人为类别划分包络在封闭曲线内，分别为热木星族（椭圆实线），冷木星族（方框实线）和超级地球族（椭圆虚线）。

1.3.2.3 超级地球族 Super-Earth Population

超级地球，有时又称迷你海王星（mini-Neptune），对于 RV 探测到的系外行星一般定义为介于十个地球质量与海王星质量之间，或者对于凌星法探测到的行星，则其半径大约介于二到四个地球半径^[91]。在图 1-13 中，不难发现超级地球十分常见与 1 天至 100 天之间的轨道，Batalha 等人利用 *Kepler* 前 16 个月的数据也推断超级地球为银河系最常见的行星类别^[92]。

那么超级地球的形成历史究竟为何般？它们又是否可归至类地行星范畴呢？前面 § 1.3.1 提到在核吸积模型下，气态巨行星首先会成长为约 $10 M_{\oplus}$ 的固态核心后通过吸积气体而成长^[93]。超级地球质量也正好估算为此值附近^[94]，因而很自然的假设便是此类行星在雪线之外形成并且轨道迁移至如今的位置^[95-97]。然而也有争论认为在 M 型矮星周围，超级地球完全可以于当地形成

(*in situ* formation, 文献 [98–102])。或许随着越来越多的超级地球内部结构被观测所限制后，此难题才可被解答^[103]。

另外，超级地球一般存在于多行星系统中^[104]，而且 Fabrycky 等人发现这些行星倾向于聚集在平运动共振 (Mean Motion Resonance, 简称 MMR) 的内边缘，尤其是 3:2 和 2:1 平运动共振^[105]。一时之间包括潮汐作用、共振结构等解释众说纷纭^[106–111]，到如今也尚未弄清其中的动力学机制，以及此现象是否依赖于超级地球的形成过程。

1.3.2.4 值得一提的行星系统

除了以上三大类系外行星系统，本文额外汇总了一些有趣的行星系统 (Planet of Interest, POI)，它们诡怪的轨道构型在某种程度上令人叹为观止，甚至挑战了现有的行星形成理论。

共振系统 — GJ 876。 2001 年，Marcy 等人发现 GJ 876 b 和 c 两颗类木行星周期比接近 2:1^[112]。几年后，Rivera 等人更是发现 GJ 876 的额外一颗行星 d 与前两颗处于 Laplace MMR^[113]。这和太阳系木星的内侧内伽利略卫星 Io, Europa 以及 Ganymede 的构型堪称如出一辙。理论上，此类轨道构型很有可能

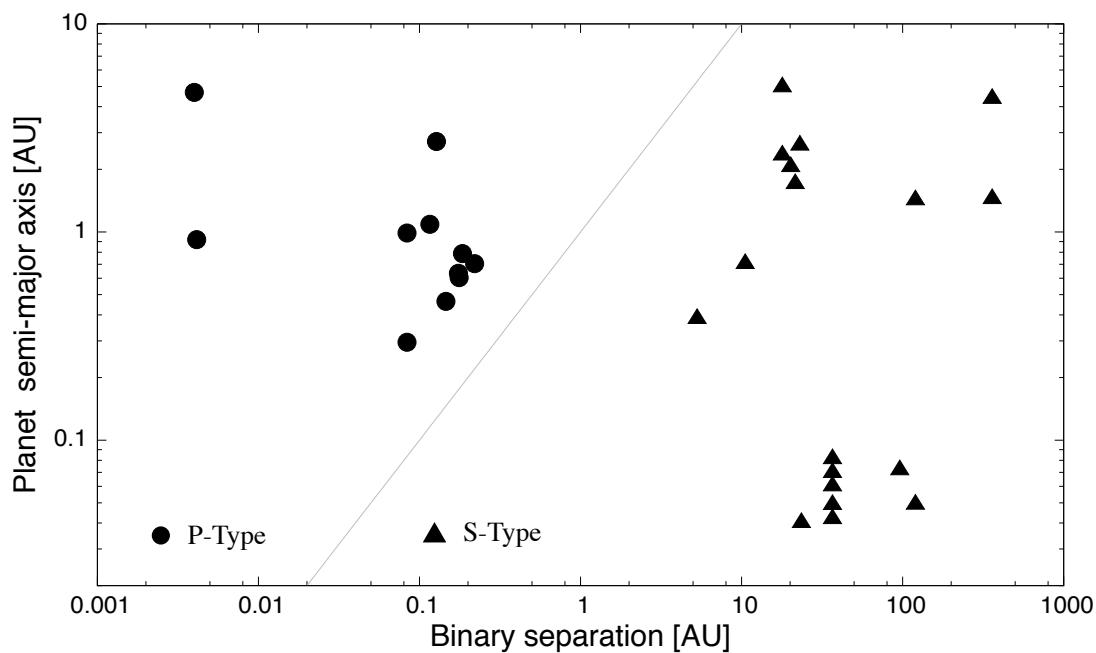


图 1-14: 已知双星内卫星型 (S-Type) 与行星型 (P-Type) 行星系统中双星和行星轨道半长径分布图，数据来自 <http://openexoplanetcatalogue.com>。

是行星在气体盘中迁移所致^[114,115]，关于此原理的简单介绍请参考 § 4.3.1.1。

紧凑系统 — Kepler-11。它因其 6 颗行星的紧密轨道构型^[116]而被称作太阳系的孪生子系统^[117]。行星在如此紧凑的系统几乎处于稳定的边缘^[118]。此紧密构型起源也是一直处于争辩中，关于 Kepler-11 行星系统形成理论详见文献 [119]。此类系统还有另外一些有代表性的例子，如 HD 10180^[120] 与 TRAPPIST-1^[121]。

双星系统行星 — γ Cephei b。，双星系统中的行星分为卫星型与行星型^①，其中 γ Cephei^[122] 系前者，而 Kepler-16^[123] 则属后者。如图 1-14，近距离双星中的行星系统与单恒星周围相差迥异，这是因为存在伴星的引力干扰，导致行星系统形成过程大相近庭。关于此类行星系统，请详见书籍 [124]。

高偏心率系统 — HD 80606。作为偏心率最大的几个系统之一，HD 80606 拥有 0.93 的轨道偏心率^[125]，远心点居然是近心点距离的近三十倍。同属此类的系统还有 HD 4113^[126]，HD 80606 行星轨道法向和主星自转轴方向测量（spin-orbit measurement）^[127] 表明它的起源很可能与 Lidov-Kozai 机制^[128,129] 有着密切关联^[130]，或许是热木星系统高偏心率迁移的证据（详见 § 4.3.1.2）。

极短周期行星 — Kepler-78 b。 极短周期行星又称（Ultra Short Period Planets, USPs），它们因周期通常在一天以内，和主星表面的距离非常近而得称。代表性行星有 Kepler-78 b（周期为 8.5 小时^[131]），Kepler-70 b（周期仅 5.8 小时^[132]）等。由于它们受到主星强烈的辐射与引力作用，因而通常拥有非常大的密度，近年来也越发成为行星与主星物理性质新实验基地^[133,134]。

主序后恒星 — HD 13189^[135]。虽然利用 RV 探测主序后恒星周围行星的效率并不高^[136]，但是此类行星依然对检验行星对恒星的质量、演化历史依赖度极为重要^[96,137,138]。观测显示巨星周围的行星普遍距离主星较远 ($a > 1 \text{ AU}$)，这也许正是主星演化吞噬近距轨道行星的证据^[139,140]。

其他诡怪系统 — WASP-47。该行星系统拥有一颗典型的热木星^[141]，然而后续长期检测显示该系统有另外两颗小质量行星^[142,143]以及一颗长周期冷木行星^[144]。这和传统的认为热木星更倾向于成单的想法截然不同^[145]，并且即使与其他包含热木星的多行星系统相比，WASP-47 也大有不同（如图 1-15），现有的理论并不能完全解释该系统的构型，因而更完善的形成理论与观测限制也更加迫在眉睫。

^① 卫星型又称 Satellite/Circumprimary Type，构型为行星围绕双星中的一颗运转；行星型或称 Planet/Circumbinary Type，构型为行星轨道围绕双星的质心。

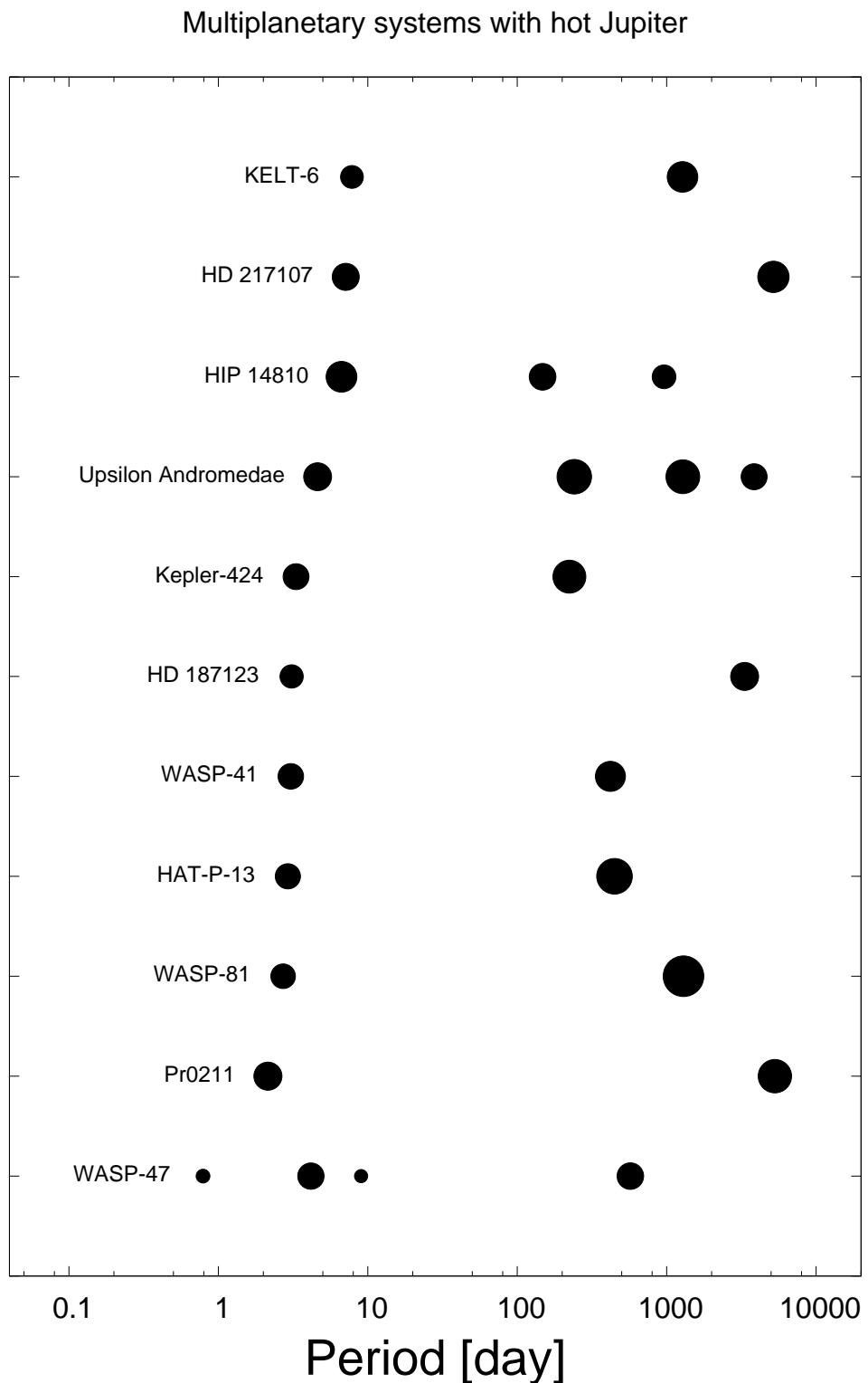


图 1-15: 所有拥有热木星的已确认多行星系统汇总图，点的相对大小正比于行星的质量。
数据同样来自 <http://openexoplanetcatalogue.com>。

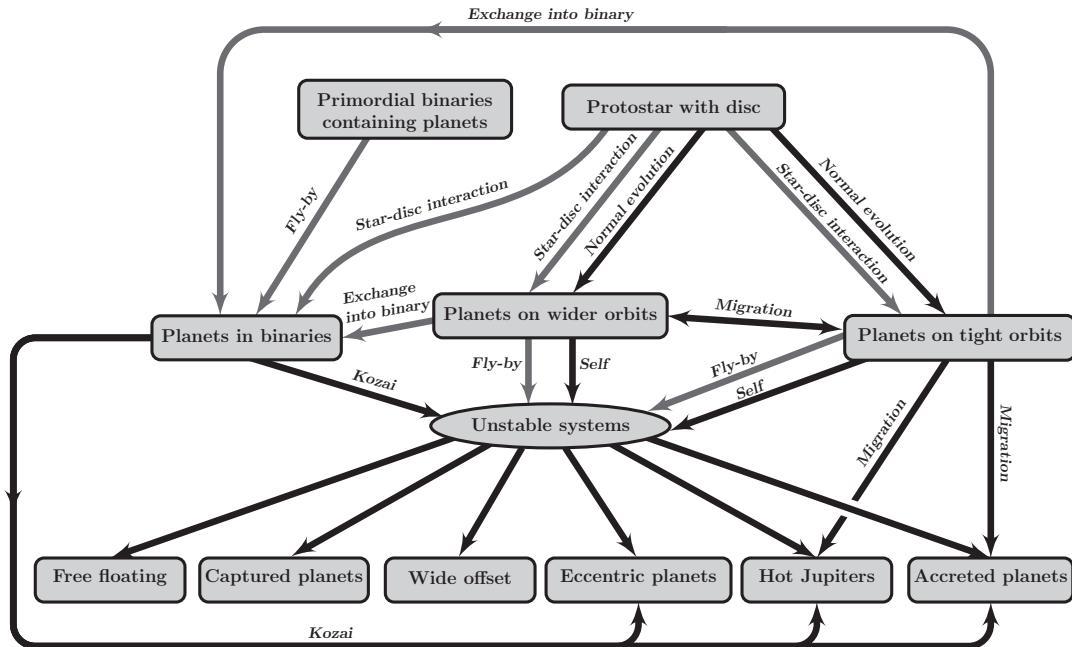


图 1-16: 不同的恒星环境对系外行星系统形成结果的影响示意图, 图片源自文献 [151]。

另外对疏散星团以及球状星团的巡天显示, Free-floating Planets (FFPs) 也许是潜在的数量最多的行星质量天体^[146-148], 星团环境作为系外(内)行星的出生环境^[149,150], 也必须考虑该环境对行星形成过程的反馈作用(图 1-16)。

1.4 本文立意

系外行星从无到有, 再到现如今样本越来越丰富, 正是因此前人不断去进化仪器、细化观测流程以及大胆探索数据。因此本文亦从观测作为出发点, 讲述怎么利用南极望远镜观测、如何去处理测光数据处理、如何提高数据的精度(§2)从而服务于后续行星探测以及原恒星盘搜索等科学目标(§3)。

此外, 本文将于 §4 章详细探讨系外热木星系统的统计性质, 回顾解释这类行星形成的困难之处。最后还包括如何利用轨道-自转不共面性 (spin-orbit misalignment) 来限制这些系统的潮汐演化过程和参数, 以及这些过程和参数蕴含或还原了哪些系统演化的物理效应。在本文的最后一部分, 将会总结与展望系外行星领域的未来计划。而如何从宏观层面研究行星系统的形成与演化以及从微观层面去细致描述行星的性质, 这些研究将有利于击破现有的系外行星难关。

第二章 基于南极的天文数据观测与处理

2.1 南极天文背景

搜索系外行星需要长时间基线和高精度的天文观测，然而因为地球在做周日自转并且存在大气包层，因而在地球上很难同时满足这些严苛的观测条件。

§ 1.2.2 中曾提到空间望远镜 CoRoT^[30] 与 *Kepler*^[16]，它们花费了昂贵的代价（数十亿美元）才能得到满足上述观测条件的数据，事实证明它们也取得了令人瞠目的科学成果。而横向对比，南极台址（Antarctic plateau）作为理想的地面台址可在花费相对较少经费的同时，依然拥有良好的观测条件 — 这得归功于此台址以下几点优势：

- 南极高台地址拥有大陆上最冰冷、干燥^①的空气（文献 [152]）。此气候条件尤为适合进行光学、红外以及亚毫米波段的天文观测^[153]。
- 南极高台水平高度高，因而空气层厚度薄，大气湍流少，空气状况也更稳定^[154]。
- 极夜（Polar nights）为观测提供了长达 3 个月的连续观测条件，这也是对于系外行星探测最重要的优势^[155]。

得益于拥有如此得天独厚的先天条件，南极台址在短短 30 年内就已吸引了大批的天文开拓实验与项目（南极天文的历史相关细节请查阅综述文献 [156]）。Grec 等人于 1980 年开启首个地处南极的光学实验^[157]。随后一大批天文学成果相继涌现^[152]，以高精度测光科学为例：ASTEP（Antarctic Search for Transiting Extrasolar Planets）项目先后于 Dome C 观测台址捕捉到 WASP-19 b 次掩食的证据^[158]，并对该台址在凌星法探测系外行星领域的可行性作出测试^[159]。

Dome A（位于昆仑站附近，坐标 80°37' S、77°53' E，如图 2-1）作为南

^①以绝对水气值来衡量。



图 2-1: 南极地理位置图, 暗咖啡色曲线表示地形等高线。可以看到 Dome Argus (或称冰穹 A) 台址 (中国, 以红星标注) 位于南极大陆最高点, 另外冰穹 C (澳洲) 和 F (日本) 分别以灰色圆点表示。此地图版权 Australian Antarctic Division。

极大陆最高的台址 (海拔高度 4093m) 在南极天文领域有着特殊的地位。Saunders 在比较过云层覆盖率、空气对流层厚度和视宁度 (seeing) 后, 指出 Dome A 也许是地面潜在的最佳天文观测台址 (文献 [160])。中国南极天文中心也于 2008 年成功将中国之星小望远镜阵 (Chinese Small Telescope ARray, 简称 CSTAR) 成功安装就位于冰穹 A 台址。在极地冰寒的环境下需要克服许多的障碍^①, CSTAR 经过了一代人的奋斗, 也取得了丰硕的成果, 本文将于 § 2.2 中详细介绍如何通过修正鬼像 (ghost image) 来提高数据精度。另外 § 2.3 将简单描述 AST3 (Antarctic Survey Telescopes) 巡天项目中系外行星搜寻计划的

^①关于南极天文科考支撑平台, 请参见网址 http://www.ccaa.pmo.cas.cn/njtwt/201312/t20131203_144501.html。

观测策略。

2.2 CSTAR 以及其测光数据中的鬼像处理

2.2.1 CSTAR 望远镜光学设计和预数据处理

作为 PLATO 平台^[161,162]下一台子设备，CSTAR 望远镜由南京天文光学技术研究所（Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology，即 NIAOT）承担设计工作。CSTAR 阵列由 2×2 共四面施密特卡式（Schmidt-Cassegrain）望远镜组成，每面镜子大小 145 mm 口径：其中三面拥有与斯隆数字化巡天类似的 g, r, i 宽带滤镜，第四面无滤镜。望远镜被设计固定于地表，因而采用指向天顶附近南天极天区的凝视观测模式，考虑此做法也是因为这样更有利研究天文变源。CSTAR 成像后端匹配了 Andor DV435 型号 $1k \times 1k$ 的 CCD，联合望远镜 $4.5^\circ \times 4.5^\circ$ (20 deg^2) 的视场（Field Of View，或 FOV）大小，由此可知一个像素（pixel）对应于天球 $15''$ 的张角^[163]。图 2-2 展示的是 CSTAR 内部光路结构，在已有的 i 波段数据中，入射镜的表面覆盖了滤光片，且子镜（中间镜）也涂有反射膜，恒星的光线容易在两面涂层之间反射，从而导致鬼像的产生。

CSTAR 于 2008 年 1 月份，正式跟随南极科考队抵达冰穹 A 站点，可惜的是在第一个观测季度结束后，望远镜只剩下 i 波段镜面能正常观测。于是从 2008 年 3 月 4 日至 8 月 8 日（冰穹 A 站极夜），CSTAR 共以 20 秒或 30 秒的曝光时间拍摄了超过 310,000 张图片。多亏了极夜创造的连续不间断观测条件，这些总曝光时间长达 1728 小时的图片数据表现出良好的科学状况与条件。

随着极昼的到来，科考人员取回了 CSTAR 的原始观测数据，国内两个小组分别开始了独立的分析工作，国家天文台南极天文小组于 2010 年分别计算了台址当地 i 波段的天光背景以及大气透明度^[165]，并释放出超过 10,000 颗恒星点源星表^[166]。Wang 等人^[167]则于来年在光变数据中找出了 157 颗变星（这高于该天区先前所知数量 6 倍）。随后 Wang 分别在随后分别对测光给出大气消光、不均匀云层和周天效应的修正（文献 [168, 169]）。

下面，本文将简要介绍文献 [166] 中主要的数据处理流程。在完成扣除本底和平场等预数据处理后，Zhou 对每张原始图片采用了以 3, 4 和 5 为半径的孔径测光（aperture photometry）。接着，一张测光条件较好的图被选用作为标准参考，并用模式匹配来认证不同图内相同参考星的位置变化，并同时矫正其他图片内点源的星等偏差量。以上操作得到标准星表后，其中 48 颗恒星被挑选

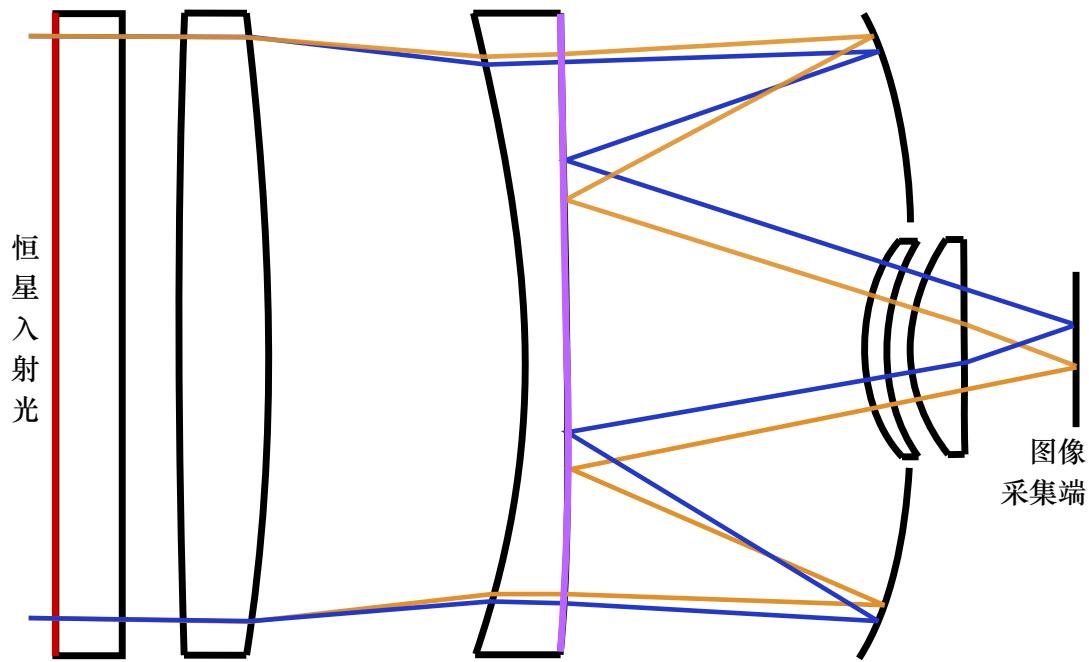


图 2-2: CSTAR 多镜面结构光路设计图。入射平板镜（最左侧）由改正镜与滤镜组成，最右侧的镜片为中空反射球面镜，中间子镜的右侧面涂有反射材料。作图时未按照实际比例，参考自文献 [164]。

出来和 USNO-B1.0 参考星表对比从而得到最终星表。在以上的工作中，作者也发现数据中的鬼像修正对于进一步提高测光精度有着非常重要的作用。

2.2.2 鬼像简介以及修正 CSTAR 数据中的鬼像

2.2.2.1 鬼像以及 CSTAR 中的鬼像

正如前文（§2.2.1）提到，鬼像在光学系统中并不罕见，尤其是拥有大视场的施密特望远镜。U.K. 施密特望远镜单元（UKSTU）将鬼像的产生原因共归为五类，分别是乳化剂涂层、滤片修正镜、改正镜、滤光片以及尖状鬼像。CSTAR 在设计上采取施密特卡式光学设计，因而鬼像很可能产生于恒星入射光传播、折射与反射的过程中。UKSTU 手册^[170]将此类鬼像定性形容成弥散状的斑点，且鬼像光斑坐标与产生鬼像的亮源位置关于光学轴对称。对于 CSTAR 而言，鬼像修正十分必要，因为鬼像不仅会被误认证成一颗恒星源，还会叠加在背景恒星上从而造成额外的测光误差。

作为第一代南极天文望远镜，CSTAR 采取相对安全的凝视模式 — 望远镜支撑点固定在冰层上，并且对淮南天极附近的天区观测。当恒星做周日运动

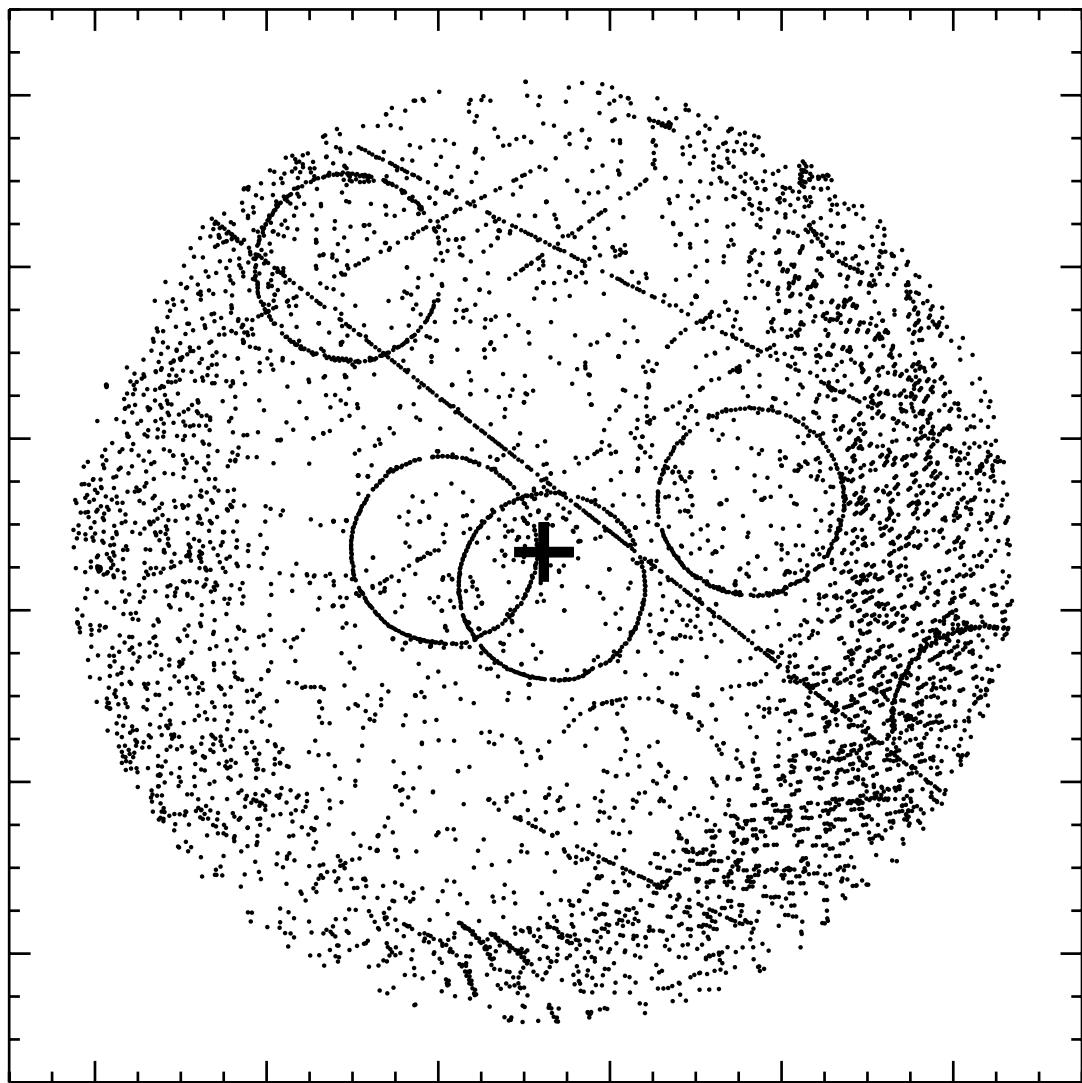


图 2-3: 周天鬼像叠加图, 也即「脏」图。图中的圆弧结构为鬼像所致, 黑色十字标注的是南极点。为了更好的看清鬼像的结构, 我们已经将已确认的恒星从本图中剔除。视场边缘散点增多是因为畸变导致的模式低匹配效率, 此外图中线状物为人造卫星。

时, 星象斑也会在 CCD 上绕着南极点做近圆周运动。若选取图「A5CH5029」作为标准参考图, 那么经过恒星图案模式匹配 (pattern match) 后, 其余所有图相对于标准参考图的旋转角度便可被计算出。从而不同时间测得的图像内相同位置的恒星可被识别认证。此时将相同恒星的本地坐标 (pixel coordinate) 通过旋转缩放等操作转化成标准参考图内的坐标后, 便可得到与其对应的主坐标 (master coordinate)。从上一段文字中, 已经得知鬼像 (假恒星) 与产生鬼像的亮星关于光学轴对称, 所以当恒星们时时刻刻被匹配上的同时, 鬼像却只能经过一个周天后才能匹配上自己。若把一天之内所有拍摄的图片作叠加, 然后

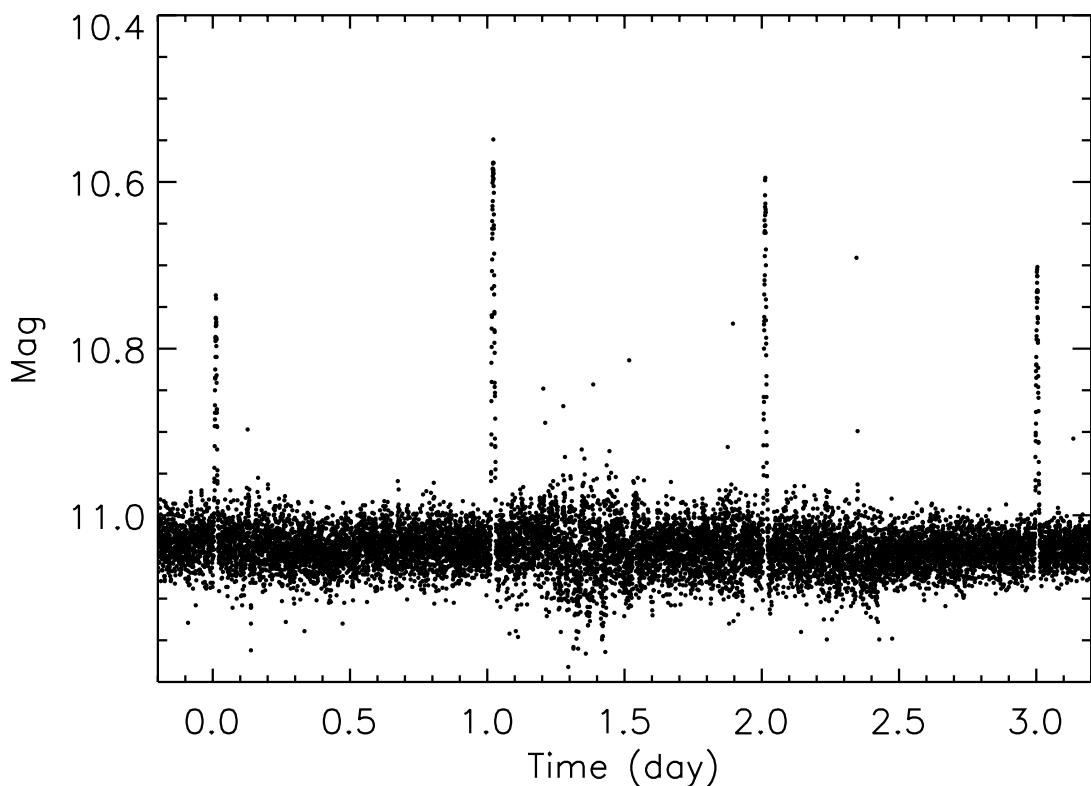


图 2-4: CSTAR 视场内坐标为 R.A.: $23^{\text{h}}24^{\text{m}}28.4^{\text{s}}$, Decl.: $-89^{\circ}25'10.6''$ 恒星的光变曲线。通常特定的鬼像会在一个恒星日内遭遇该被影响的恒星一次, 从而将恒星的亮度提高半个星等。

将同一颗恒星给抹去后, 我们可得到周天鬼像叠加图 (请查阅图 2-3)。从图中可以看出, 鬼像的转动方向与周日运动方向相反, 鬼像因此也很可能周期性地「撞」到恒星。当然, 如果将南极冰川板块的微弱移动^[171] 与恒星自身的运动考虑在内, 鬼像很有可能在一天内遭遇到多颗恒星, 从而对恒星亮度造成多达约 1.0 星等的变化 (如图 2-4 与图 2-5)。若不仔细地处理这种变化则很可能被误认为恒星自身的性质, 例如恒星耀斑^[172], 因此修正鬼像是后续天体物理研究, 如搜寻系外行星^[173] 以及变星^[174] 等等的前期基础工作。

2.2.2.2 CSTAR 鬼像修正方法

为了扣除所有被影响的恒星流量中鬼像的污染, 我们首先得确认产生这些鬼像的前身, 即视场中的亮源。之所以采取此途径是因为鬼像通常为暗弱的延展源, 背景噪声对它们的孔径测光影响很大, 直接扣除被影响恒星中鬼像的孔径测光流量的做法会变得非常不可靠。找到产生鬼像的亮源后, 我们会将被影响恒星的星等变化程度极短出来, 最后就可以对 CSTAR 的数据进行系统性

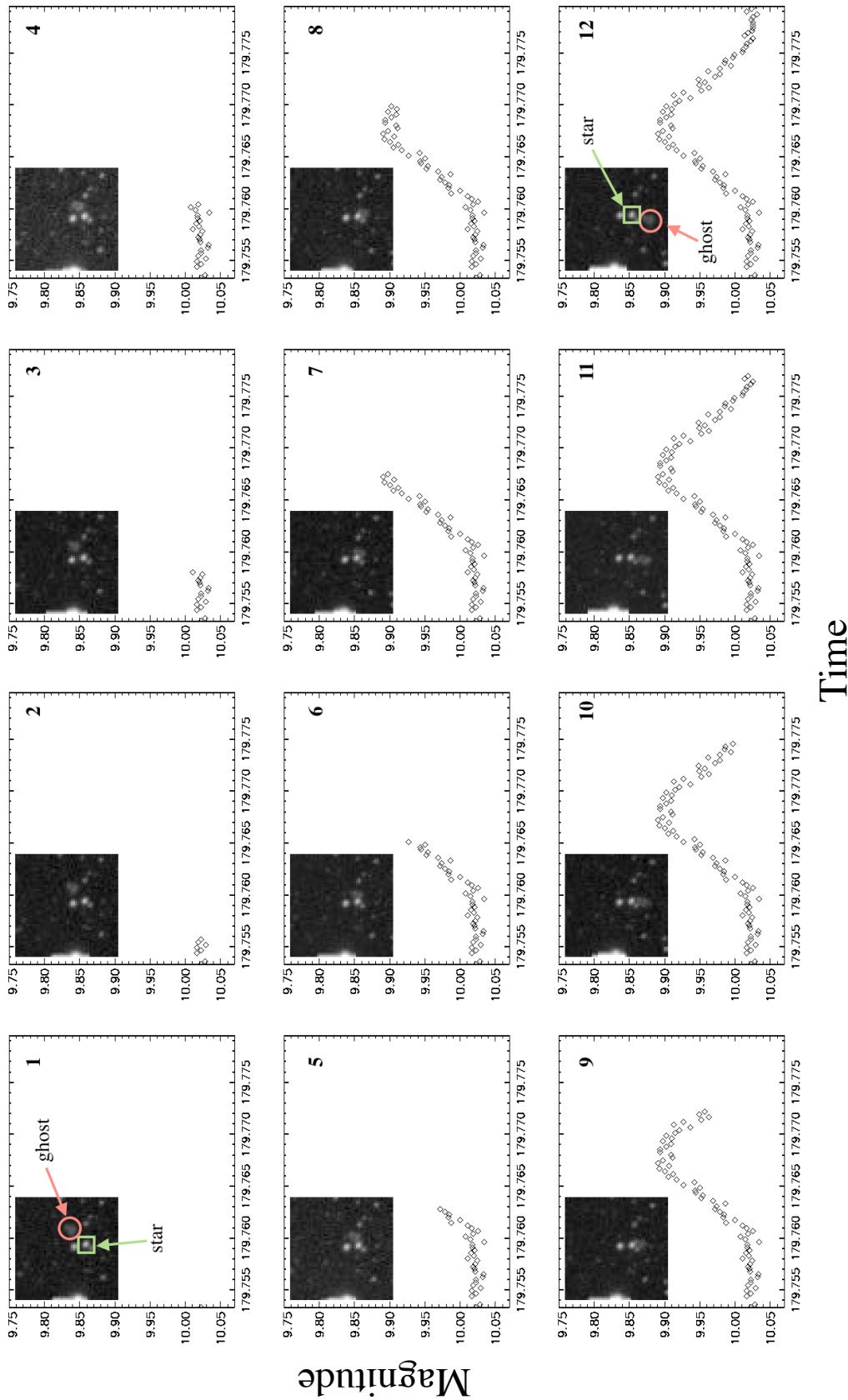


图 2-5: 坐标相对固定的恒星（绿色标志）遇到鬼像（红色标注的模糊状称散源）前后，恒星等的变化程度原片图片数据示意。每张快照的纵坐标为星等值，横坐标为时间，如需查看此图清晰的动画版本请前往网址 https://github.com/meldonization/PhD_Dissertation/blob/master/figures/chapter2/ghost_animation.gif。

的修正。

我们因此发展了一整套识别、处理、计算并消除鬼像对恒星星等影响的流程。具体如下：

1. 确定光学系统对称轴和产生鬼像的亮源。CSTAR 视场较大，点源密集，因而对每个鬼像每张图做修正几乎是不可能完成的任务，这里我们只查找星场中最显著的鬼像环。此种考虑也是由于望远镜观测的极限星等限制，因而只有最亮的恒星才会产生鬼像。当我们将星表中的前 100 颗亮星与最明显的鬼像环圆心做位置匹配，那么成功被匹配的亮星也就是产生鬼像的源。一旦产生鬼像的源被确定后，我们便可将鬼像的主坐标 $[X, Y]$ 转换成每张图片中的本地坐标 $[x, y]$ 。通过交叉联立此本地坐标和上文提到的亮星坐标，可以进一步得到望远镜系统的光学对称轴在 CCD 上的像素坐标值。
2. 定量的描述鬼像对背景星的影响。在知晓系统的光学对称轴后，我们可以从文献 [168] 中找到产生鬼像的恒星、鬼像以及被鬼像影响恒星的星等数值，且这三者中最后一个物理量会随着鬼像和恒星之间的距离变化而发生改变。下文统一用 d 替代鬼像中心与被鬼像影响恒星中心之间的距离，用 m_g, m_{gs}, m_s^0 和 m_s^1 分别表示鬼像的星等、鬼像源亮星的星等、被鬼像影响前后背景星的星等。本文采取两个基本假设：一、鬼像源亮星流量与鬼像流量的转化率为 f_0 ，即 $F_g = f_0 \cdot F_{gs}$ ；二、鬼像对背景星造成的光子数影响比例 f_1 只是距离 d 的函数， $\Delta F_s = F_s^1 - F_s^0 = f_1(d) \cdot F_g$ 。若此时带入流量与星等之间的转换关系 $m = -2.5 \lg F + m_0$ ，我们可以得到如下两个等式：

$$\begin{cases} m_g = -2.5 \lg f_0 + m_{gs} \\ f_1(d) \cdot f_0 \cdot C^{m_{gs}} = C^{m_s^1} - C^{m_s^0} , \end{cases} \quad (2-1)$$

其中常数 $C = \lg 2.5$ 。从统计上，我们可从鬼像、源恒星以及被影响的背景星的列表中拟合两个自由参数 f_0 和 $f_1(d)$ 。这里需要指出的是不同亮星产生的鬼像之间的参数并不完全一致，为了方便起见，我们归一化处理了第二个参数 $f_1(d)$ 。

3. 修正星表中的鬼像影响。以上两步完成后，我们可估算每张图内的未知参数 f_0 和 $f_1(d)$ 。假设图片拍摄时间为 t ，那么在带入每张图内每个恒星的修正量后，可得到去除鬼像污染的新光变曲线序列 (t, d, mag_s, mag_{gs}) 以及全

表 2-1: CSTAR 星表中主要产生鬼像的亮星列表。

CSTAR ID	R.A. (h:m:s)	Decl. (d:m:s)	masterX (pixel)	masterY (pixel)	<i>i</i> (mag)
00003	49:03.3	-88:16:34.99	7497.2864	1386.2566	6.1357
00004	15:58.6	-87:33:53.25	1350.1814	8661.678	6.1444
00006	34:34.0	-89:46:18.97	5129.6065	5103.6644	6.3055
00007	08:26.2	-88:57:34.07	2812.204	4118.1307	6.3671
00008	15:55.2	-87:58:09.94	1740.2338	1388.6649	6.4489
00009	42:07.6	-89:27:37.16	6386.3986	4679.7432	6.4995
00011	20:07.4	-88:14:48.27	8033.5867	7374.1179	6.5395
00012	39:55.7	-88:39:19.55	4151.218	7494.304	6.5944
00018	45:45.4	-88:48:57.98	2940.9191	3000.1653	6.8181

新的星表。

2.2.2.3 鬼像修正结果及讨论

当拟合鬼像环半径数值（约 107 像素大小）、圆心位置坐标，并通过 match 程序^①和文献 [168] 给出的参考新表对比后，我们得到了一批产生鬼像的恒星列表（表格 2-1）。由图 2-6 可知鬼像与源恒星 *i* 波段的星等差约为 5.5，考虑到 CSTAR *i* 波段的极限星等约为 14 等，因而在接下来计算背景恒星星等受影响量的过程中，我们仅需考虑 *i* < 8.5 的亮星产生的鬼像。

然而在实际情况中，并不是所有星等量过 8.5 的恒星均会产生鬼像。亮星产生鬼像有很多条件，最重要的两个因素是这些亮源距离视场中心以及光学对称轴的距离。原理上讲，当亮星距离视场中心或者对称轴中心太远，它在镜面反射层之间被反射的光需要经过更长的光学路径来传播，产生的鬼像也因此而更暗弱。

在得到鬼像源亮星列表后，我们将该列表和鬼像环内的所有恒星做比较。这样做可以得到每张图中真正的鬼像和 CSTAR 系统的光学对称轴在 CCD 上的像素坐标。如图 2-7 所示，光学对称轴的本地坐标为 $[477 \pm 2, 297 \pm 2]$ 。该值也同样经过真实图像的测试（图 2-8）。考虑到鬼像以及其对应产生亮源之间的

^①源代码链接 <http://spiff.rit.edu/match/>

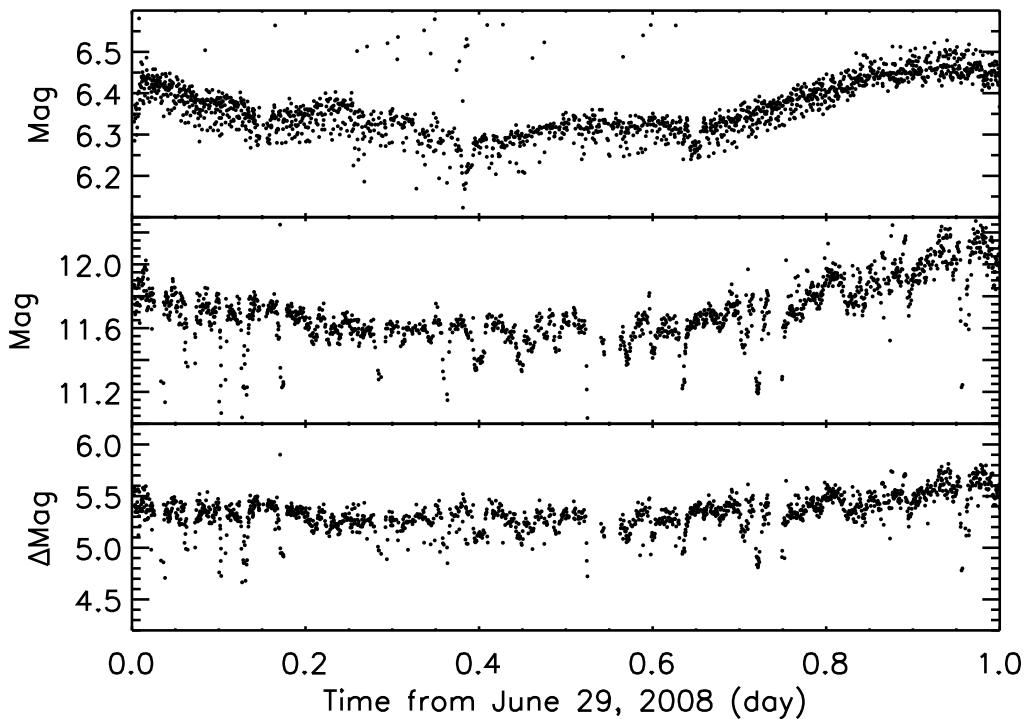


图 2-6: 上栏为产生鬼像的源恒星 (R.A.: $21^{\text{h}}08^{\text{m}}44.2^{\text{s}}$, Decl.: $-88^{\circ}57'21.6''$) 在一天内的星等变化图; 中间栏为该源对应鬼像在这天内的星等变化; 下栏为两者星等的差量。

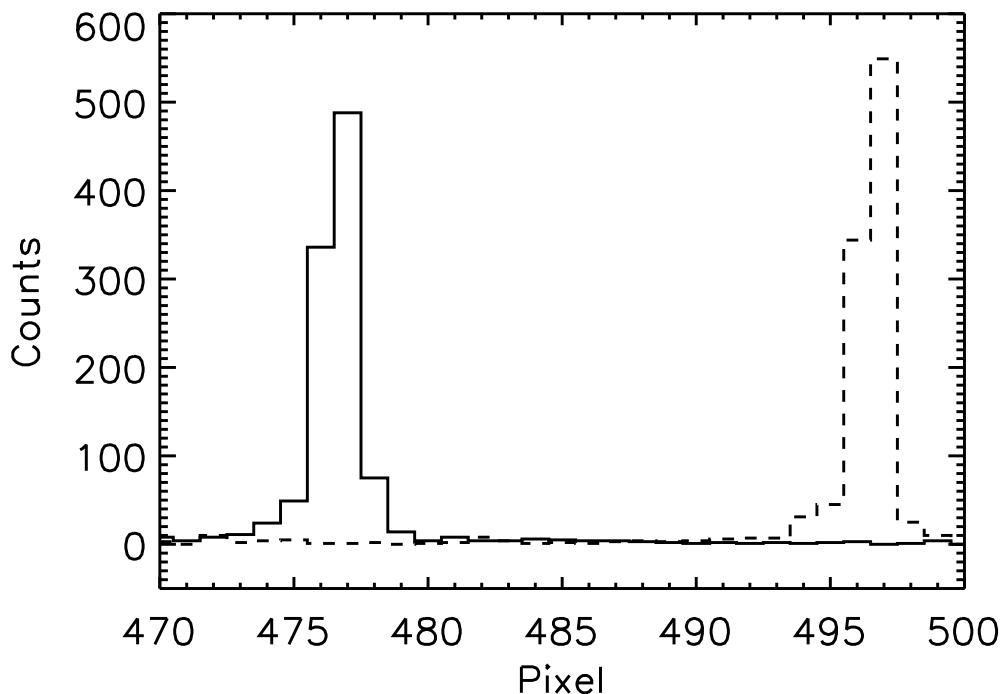


图 2-7: 光学对称轴在 CCD 上像素坐标的统计直方图, 直方图格点宽度为一个像素点。图中实线为本地 x 坐标像素值, 虚线则为 y 坐标。

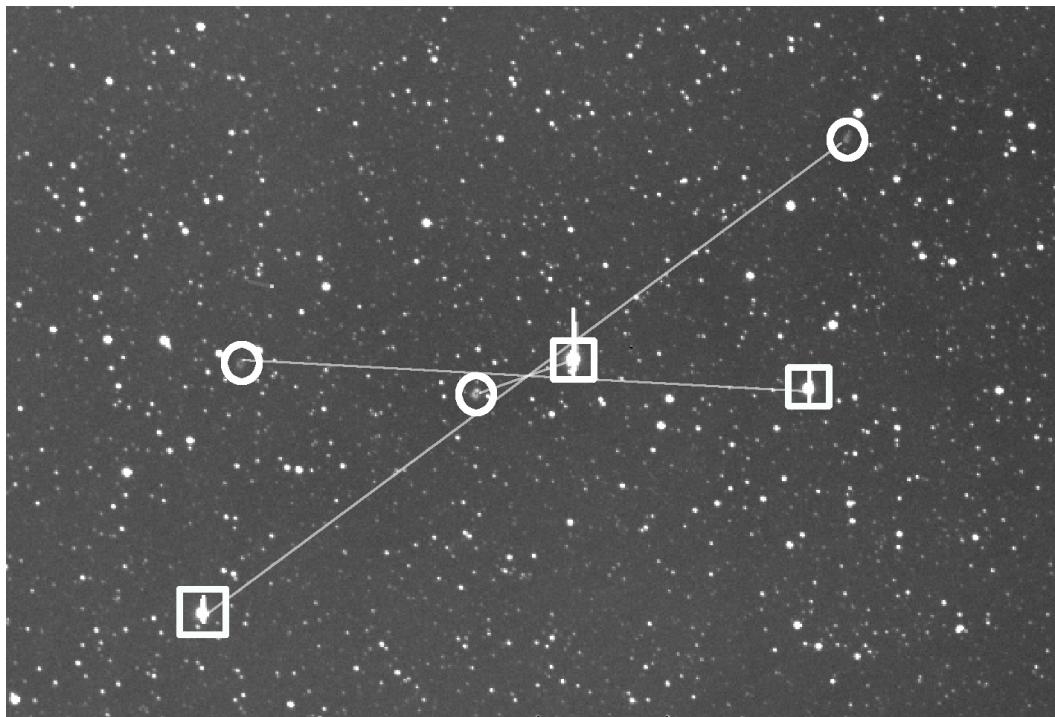


图 2-8: 选定的图片文件名为「16RE0312.fit」中光学对称轴示意图。方框选中的亮源（拥有光子溢出竖线）与圆环内的弥散鬼像相交于同一个像素点，即光学对称点（轴）。

几何构造，不难得到鬼像环半径与光学对称轴和南极点之间距离的关系式：

$$r_{\text{ghost}} = 2 \cdot d_{\text{Pole, axis}} . \quad (2-2)$$

如果将南极点的本地坐标值（即 [523, 467]）与上文提到的光学对称轴坐标值（即 [477, 497]）带入上式，可算得鬼像的半径理论值为 109 像素，这也和前面的拟合值一致。

至于第一个影响因子 f_0 ，图 2-6 已经展示了鬼像与亮星之间的亮度变化基本趋于一致，这个差别值大概为 5.4 星等，即对应亮星 0.7% 的光子流量被反射再聚集成鬼像。但与此同时，我们应该意识到实际中的鬼像更加复杂：不同的位置、星等都会给 f_0 因子带来不确定性。

如此一来，在计算第二影响因子的过程中，我们一律假设 $f_0 = 0.7\%$ 。在对星象班等天文观测数据中，自然的假设便是此函数为高斯函数。因为鬼像与恒星之间的距离减小到临界值时，恒星的亮度才开始被影响，而这个临界值就是

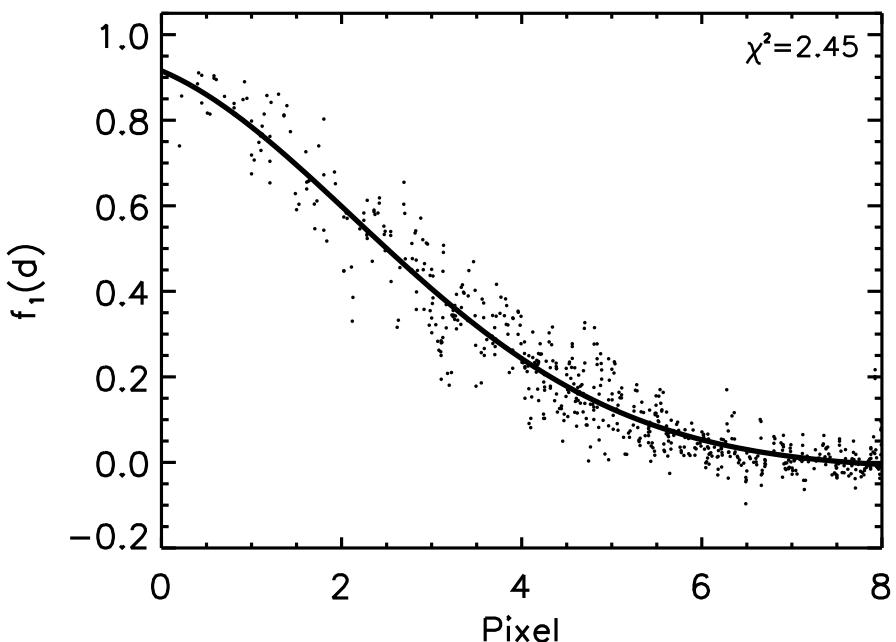


图 2-9: 鬼像影响因子 $f_1(d)$ 与被影响背景恒星和鬼像之间距离的依赖关系。实线为形式如方程 2-3 的拟合曲线, 当两者之间的距离大于约 6 个像素时, 鬼像几乎不对该星的亮度造成影响。相反, 当鬼像完全重叠在背景恒星上时, 鬼像自身高达 97% 的光子流量都会被算入恒星的孔径测光亮度中。

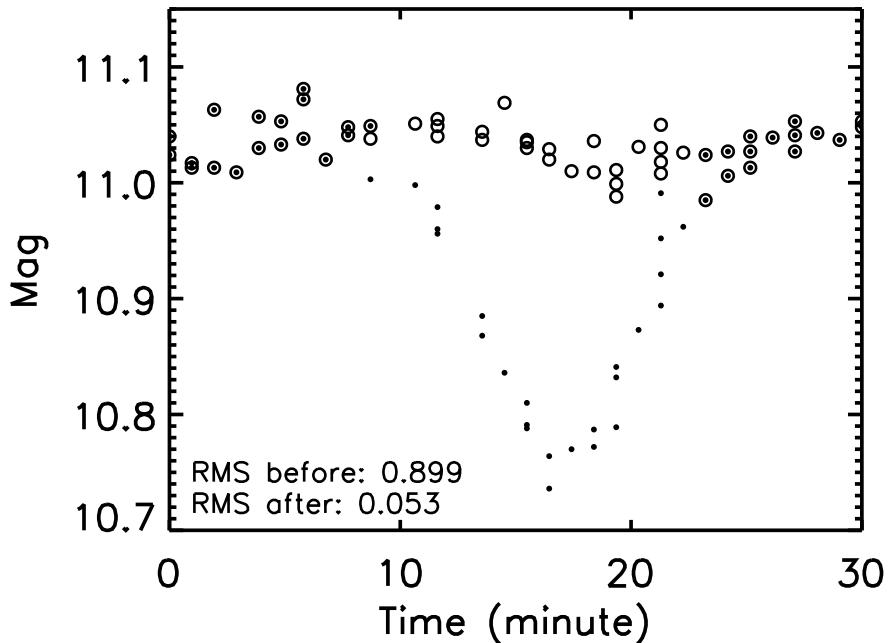


图 2-10: 鬼像修正前后 (分别为点和圆) 恒星的光变曲线。此恒星坐标为 R.A.: $23^{\text{h}}24^{\text{m}}28.4^{\text{s}}$, Decl.: $-89^{\circ}25'10.6''$ 。当鬼像距离恒星达到 6 个像素点的临界值后, 鬼像修正程序便会自动在恒星的光变曲线上计算影响值并做修正。如图所示, 此方法可以大幅度减小恒星光变曲线的弥散误差。

鬼像展源半径的大小。上述高斯函数具有如下形式：

$$f_1(d) \simeq A_0 \cdot e^{-Z^2/2} , \quad (2-3)$$

其中 $Z = (d - A_1)/A_2$, $A_0 \approx 0.97$, $A_1 \approx -0.86$, $A_2 \approx 2.99$ 。这边需要强调的是由于并不知道背景星被鬼像遮挡后的真正星等值, 因而我们假设星等值为固定值(取自文献[168])。上述高斯函数也正好说明鬼像的典型半径为 6 个像素点, 这明显大于孔径测光所选取的孔径大小^[166], 这也从侧面说明了利用孔径测光直接求鬼像星等来修正星表的做法在此处并不适用(如图 2-9 所示)。

最后一步, 我们需要将表达式 2-3 中的关系带入每张图中, 并对在鬼像和任意恒星靠近时修正对应的鬼像流量值即可得到无鬼像版本的星表数据^①。前文中给出的例子表明本文的鬼像修正是真实且有效的, 当然也还有部分误差来源无法还原, 比如 f_0 因子的不确定性, 以及最初的星表位置精度可能并不能达到 2 个像素半径。

包括鬼像修正在内的各种预数据处理工作都对提高测光精度有着极为重要的作用。修正鬼像并提高精度后的数据有利于研究耀斑、变星以及系外行星搜寻^[172-174]。另外对于今后的巡天工作, 例如为下文提到的 AST3 望远镜做出铺垫^[175]。

2.3 AST3-2 项目中系外行星的巡天策略

在天文学研究中, 观测是最基础也是最重要的环节。科学项目中, 观测台址, 选源以及策略直接决定了预定科学价值的实现程度, 天穹 A 台址的优势之处我们从前文已经有大概了解。紧随着 CSTAR 项目, AST3 望远镜同样为一个大视场广角巡天项目。大视场优势就在于望远镜能够同时利用多波段检测一大片天区, 本来相对低效的巡天项目可以有许多丰富的科学成果(如利用凌星法探测系外行星)。AST3 顾名思义, 由三个 50/68 cm 的修正施密特望远镜组成。后端装备的是 $10k \times 10k$ 的帧转移 CCD 相机。其中第一台 AST3-1 于 2012 年 3 月正式安装就位并投入使用。但不幸的是该台望远镜于当年 5 月份停止工作。一批关于变源搜索的成果也已经浮现, 如文献[176, 177]。

而经过两年多的测试, AST3-2 也于 2015 年正式着陆南极领土并投入工

^①星表文件请访问网址 <http://explore.china-vo.org/data/cstar/>

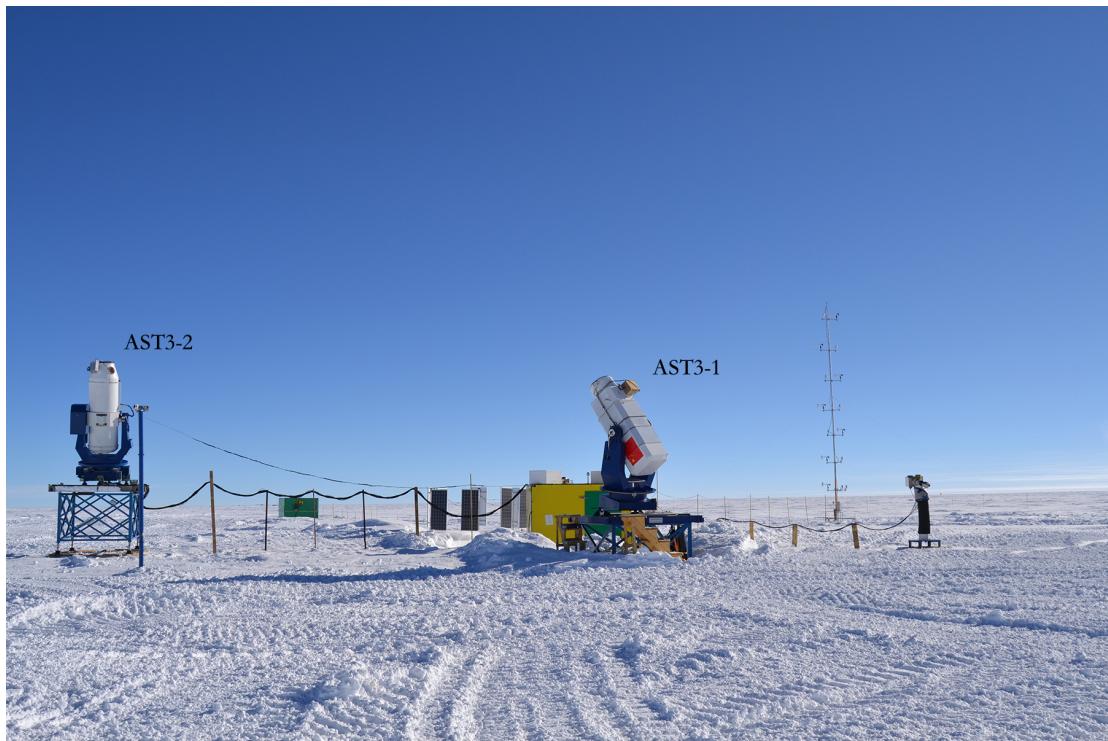


图 2-11: AST3-2 望远镜（左侧）就位于南极天穹 A 观测站。本图拍摄者为天文科考科考人员杜福嘉。

作。图 2-11 为前两台 AST3 望远镜在南极冰穹 A 站点的合影。系外行星搜索作为本次观测的科学目标之一，也因此而得到 2016 极夜一个多月的观测时间。下面将主要介绍 AST3-2 望远镜的观测策略（strategy and pipeline）。整个脚本自动化观测的流程（如图 2-12）包括初始化输入、自动观测、报错系统以及预数据处理四个主要环节：

- **初始化输入** 整个观测自动化程序从这里开始。首先观测开始会生成当天的日志记录。紧接着读取输入参数并检查文件系统是否正常。如果正常则读取我们的目标观测天区信息文件，跳转到下一步自动观测流程。
- **观测操作** 因为 AST3 有了一整套的望远镜跟踪系统，因而观测操作除了正常的 CCD 曝光采集恒星图像文件以外，还额外需要控制望远镜的正常指向和信息反馈。特别是对与风雪恶劣的天气，需要额外小心操作并及时采集错误。
- **数据处理** 为了实时检测系统的工作状况，除了有一套实时摄像头对准 AST3 之外^①，我们还额外加入了远程定位（astrometry）与测光（photome-

^①远程实时检测网址<http://aag.bao.ac.cn/klaws/>。

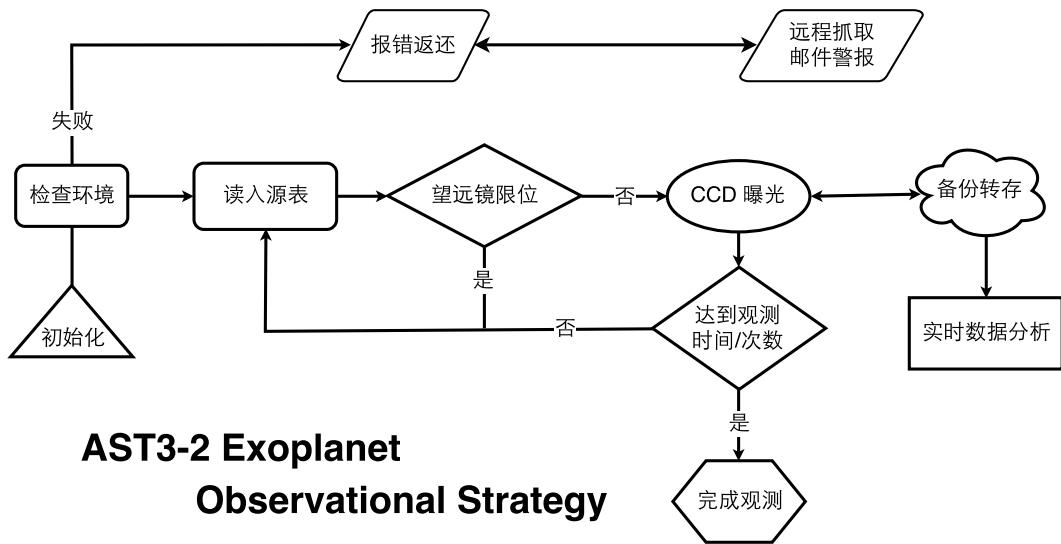


图 2-12: AST3-2 观测策略。整体流程包括初始化输入，观测，容错以及数据处理共四个环节。

try) 模块。这部分环节和观测模块各自独立运行，可返回非常实用的实时消光以及望远镜指向跟踪精度等信息。

- **报错系统** 容错子系统是观测策略中必不可少的成分。以上描述的各个流程都会对错误守护进程实时反馈，一旦有错误报错系统会在当前操作结束后中断观测并向远程（如南京大学天文与空间科学学院远程观测实验室本地终端）传送错误信息。本地系统抓取到错误后也会立即通过邮件系统通知相关人员。

充分完善以上流程^①对于保证观测（尤其是极地环境连续黑夜）非常重要，尤其是在 § 1.3.2.4 提到的极短周期行星探测以及性质刻画（Zhang et al. in prep.）。经过以上的充分实验，我们也完全有理由相信，随着今年科考人员采集数据归来，一批新的科学成果即将涌现。现有的包括 CSTAR 和 AST3 在天穹 A 台址的天文望远镜必定能助力今后即将诞生的昆仑暗宇宙巡天望远镜（KDUST），前人的观测以及数据处理也会一同作为试金石，辅助南极科学日益精进。

^①源代码链接 <https://github.com/meldonization/exoSurvey>。

第三章 利用掩食搜索双星中的星周盘

3.1 研究背景

3.1.1 星周盘简介

盘在天体物理中十分常见：从星系尺度的气体盘^[178,179]到致密星周围的吸积盘^[54]，再小至行星形成的原行星盘（§ 1.3）以及形成卫星摇篮 — 环行星盘^[180–182]。早在 17 世纪初盘，笛卡尔为了解释太阳系的行星构型就引入了盘的概念，尽管那时候人类并未真正了解原恒星盘的模样^[183]。如今已迈入中年的太阳系依然尚有黄道尘埃盘^[184]、主小行星带以及库依柏带星子盘，这些也都是太阳系纷乱历史留下的残骸^[185]。

正如前文（参考 § 1.3）提到，行星孕育在星周盘内。此过程（如图 3-1 与 3-2 所示）包括早期分子云坍缩、恒星吸积盘内固体沉降、气体消散行星形成和最终演化为残骸盘（Debris disk，又称碎屑盘）几个阶段。一般而言，描述气体的过程为内盘区域等离子磁层作用与外层气体辐射转移两个过程^[187]，而脱离气体耦合作用后的固体盘一般则为 N 体引力作用（§ 1.3.1）。

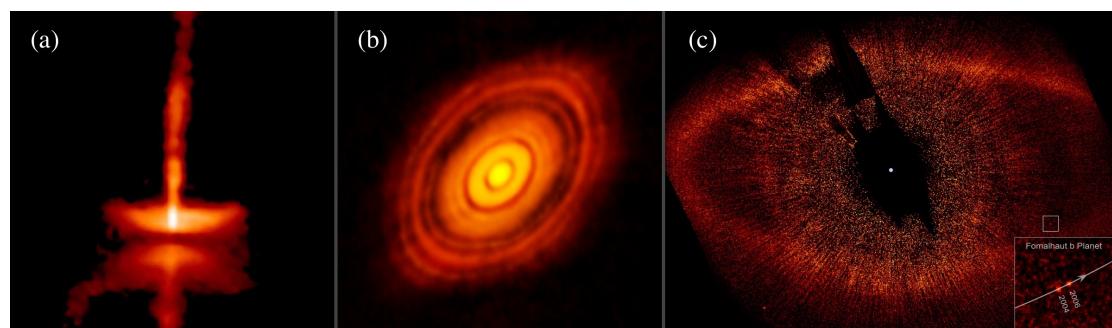


图 3-1：原行星盘从早期、过渡到晚期三个不同的形态，其中 (a) HH 30 侧向视角的临变增厚盘，双极喷流清晰可见（版权：NASA, Alan Watson）(b) HL Tau （版权：ALMA - ESO/NAOJ/NRAO）(c) Formalhaut 残骸盘（版权：NASA, ESA 和 P. Kalas 等）。

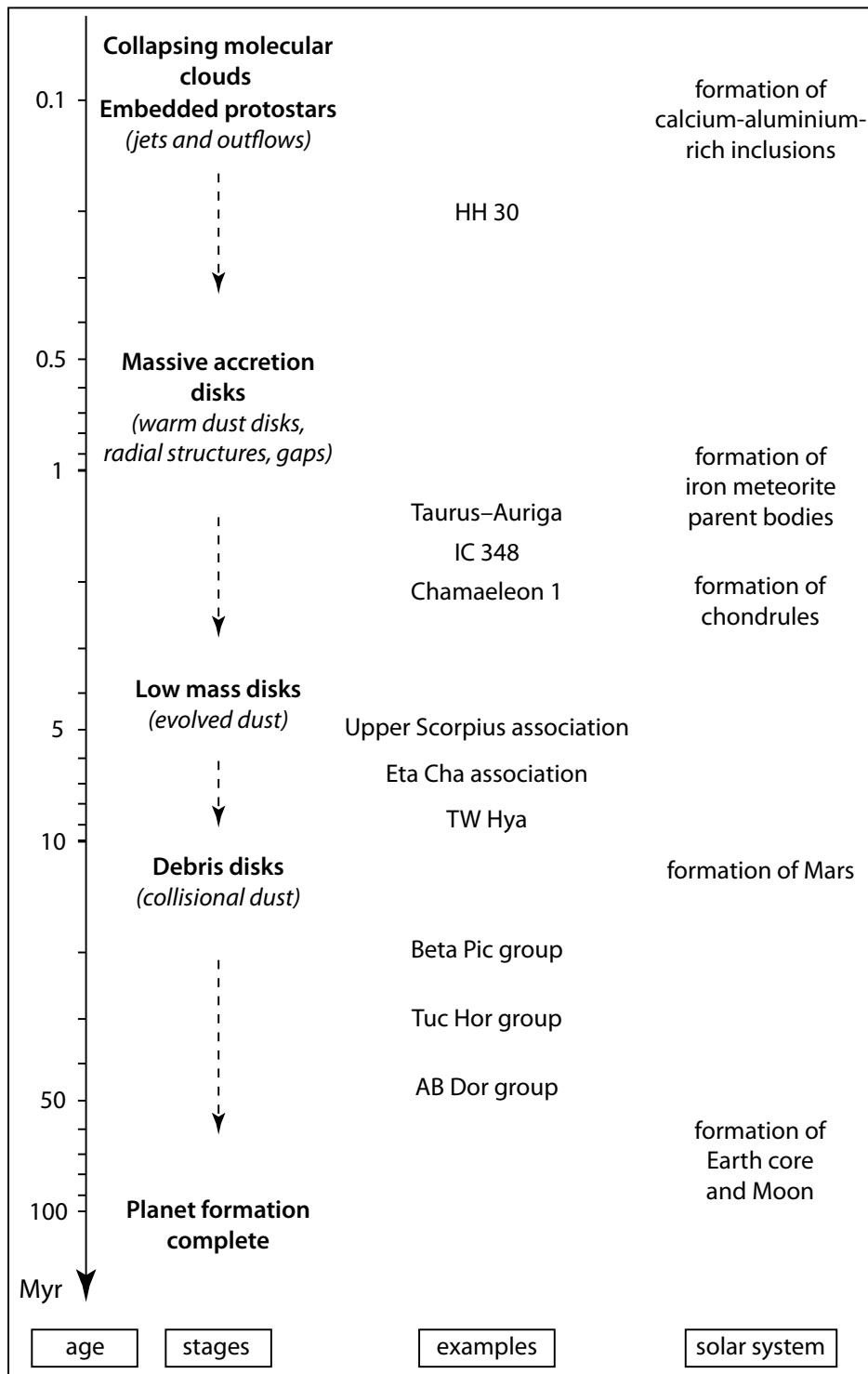


图 3-2: 行星形成的不同时期快照, 从左至右分别为时间、形成阶段、系外行星系统实例与太阳系历史。图片采取自书籍 [17], 更详细的图请查看书籍 [186]。

星周盘（Circumstellar disk）观测到的辐射在理论上一般会用多黑体辐射谱来拟合。普朗克黑体谱（Black body）有如下形式：

$$B_\nu(T) = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1} \quad (3-1)$$

同样，径向对称且几何薄的星周盘总辐射可看作每个环状细盘黑体辐射的积分叠加，形式如下：

$$F_\nu = \frac{\cos\theta}{D^2} \int B_\nu(T_d) (1 - e^{-\tau}) 2\pi r dr, \quad (3-2)$$

其中 θ 为观测者的视角， D 为观测者和源之间的距离。光深 τ 与盘内尘埃的不透明度（opacity）以及盘的面密度分布有关，因而上述公式所描述的星周盘谱能量分布（SED）函数是高度简并的函数。

图 3-3 为我们展示的为一个典型的原初恒星盘（Primordial disk）的能谱分布。此时从内至外（波长由短至长），该 SED 主要包括四种成分：主星（9000 K）的黑体辐射，星周盘内侧区域有效温度约 1500 K 的黑体辐射（近红外突起），行星形成区域（约从 1 AU 至 10 AU 的尘埃连续谱）以及最外侧亚毫米波段的盘最外侧。盘的演化是一个自内向外的消散过程，在观测中随着星周盘从原初恒星盘演化至内侧区域最先被清空从而成为过渡盘（耗散相对快速，可被 ALMA 连续谱或成像观测^[60]），再最终演化成残骸盘（可被 HST 观测^[188]）。需要说明的是，由于星周盘的尘埃辐射主要集中在红外或更长的波段，所以观测中一般也将上述流量描述为红外光度比例 L_{IR}/L_s 。

3.1.2 双星中星周盘研究背景

双星和多星系统在银河系中非常普遍，巡天显示类太阳恒星的成双概率大致为 45%，并且其中约有 10% 为三星或更多星系统（文献 [189]）。在双星系统形成早期，某一颗恒星可能会拥有星周盘^[190]，当观测者从远处观测时，会有一定的概率看到星周盘遮挡住此系统另外一颗恒星。由于盘的尺度相比于恒星的尺度高出许多量级，因而一个随机取向的含盘系统可能具有非常高的几何掩食概率^[191]。这样的掩食盘可以存在于行星形成中的双星系统（文献 [192]）或卫星形成中的行星系统（文献 [191]）。掩食盘可以为我们提供非常丰富的独

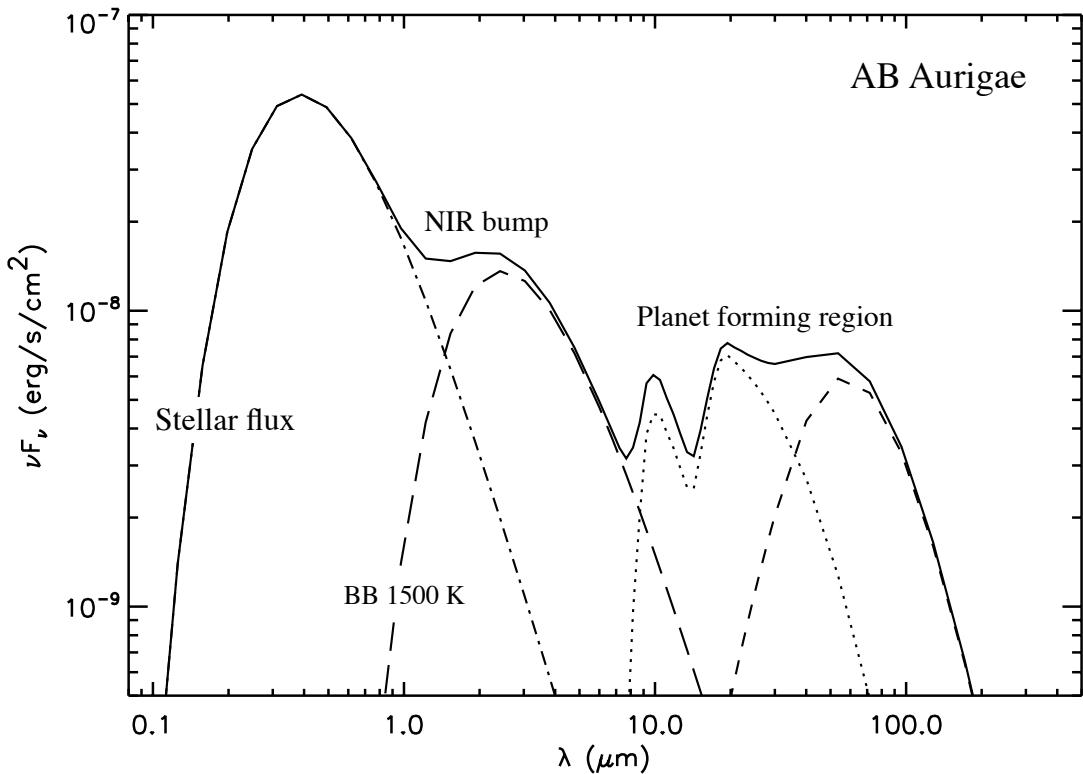


图 3-3: AB Aurigae 系统理论谱能量分布图。从左至右分别表示恒星、有效温度为 1500 K 的星周内侧盘与外侧行星形成区域的黑体辐射组分。此图利用 Dullemond 开发的 CGPlus 程序^①制作。

到信息，如盘的不透明度以及三维立体结构（如土星环掩食，文献 [193]）。

在观测上， ϵ Aurigae^[194–196] 与 EE Cephei^[192,197–199] 是两个相对熟知的盘状掩食双星系统。最近 Mamajek 探测到太阳质量主序前恒星周围长时间、大深度的复杂盘掩食事件^[191]。

在大麦云（Large Magellanic Cloud，下文简称 LMC）的掩食双星（EBs）中，Udalski 等人^[200,201] 利用 OGLE-III 巡天发现了周期为 13.3 天的光变曲线中存在疑似盘结构的系统 OGLE-LMC-ECL-17782，文献 [202] 曾认为此系统是不接食双星（Eclipsing Detached Binary，简称 ED）。在同一巡天计划样本中，拥有 468 天周期的系统 OGLE-LMC-ECL-11893 也被怀疑为掩食盘^[203]。下文，我们将利用 OGLE-III 巡天数据中 LMC 与小麦云（Small Magellanic Cloud，或简称 SMC）以及银盘（Galactic Disc，下文统称 GD）观测到的 EB 样本^[201,204,205]光变曲线中分析额外可能的掩食盘事件。

近年来，对太阳附近恒星以及恒星形成区的红外以及毫米波段巡天显示

^①链接 <http://www.mpi-a.de/~homes/dullemon/radtrans/fitcgplus/>。

恒星的年龄、质量以及伴星的存在会影响恒星周围是否存在可探测的盘状结构^[59,61,206,207]。在对 OGLE-III EB 的研究显示 EB 系统在大型巡天中是一个近乎确定、完备的样本^[201,204,205]。另外，我们还将本文 LMC EB 掩食盘的搜寻概率与近年已有的银河系红外（毫米波）的盘探测率做了对比。这种另辟蹊径的做法也可能为今后搜寻活动提供新的导向。

3.2 利用双星掩食光变曲线搜索星周盘

文献 [208] 提到利用光变曲线中星等分布（或者统计矩阵）可以区分不同的变星以及 EBs。根据他们的方案，我们在 EBs 的光变曲线的在食区间使用同样的方法，目标是将以往 EB 系统中可能的掩食盘结构区分并探测出。在 EBs 中，其中一颗掩食另外一颗星通常会造成一个三角、方形或者高斯轮廓的掩食光变曲线。在本文，我们则利用光变曲线中和这些普通情况不同的掩食形状来区分可能的掩食盘系统。这些结构包括不对称型（EE Cep 或 J1407，文献 [191, 192]），W-型掩食形状 (ϵ Aurigae，文献 [194]) 或者宽平台型（如 OGLE-LMC-ECL-17782，文献 [201]）。如果探测到此类特殊结构，我们则会将该系统标注为掩食盘候选体，尽管我们并未真正看到盘本身的旋转结构。

3.2.1 搜索掩食盘的方法

下面我们将简要介绍搜索掩食盘的过程，该过程不仅可以利用于 OGLE-III LMC, SMC 和 GD 的 EB 样本，也可以推广至任何其他的巡天中。

1. 提取 OGLE-III 巡天中被识别成 ED 系统的相位叠加光变曲线，并计算该曲线的平均星等值与掩食外光变曲线平台的弥散值；
2. 抛弃信噪比太低、观测点数太少或光变曲线平台部分弥散值太大（暗示此源可能为变星）的系统；
3. 利用程序自动识别主掩食和次掩食以及它们彼此互掩开始（初亏）和结束（复圆）的位置，这样便可确定光变曲线掩食内的窗口；
4. 计算掩食内光变曲线的斜度（Skewness）与峰度（Kurtosis）以及星等的分布统计值。

这里，我们并没有考虑低信噪比、观测点太少的光变曲线，因为此类系统的在食部分并不能被有效地识别出。这部分系统的斜度和峰度参数也不能被很好的反演，从而造成成倍的额外掩食盘「假阳性」候选体。而如何计算这些

EBs 系统掩食外的星等标准差以及识别进食 (ingress) 和出食 (egress) 粗略介绍如下：

1. 首先，我们将 OGLE-III 巡天计划中的 LMC, SMC 和 GD 得到的 EDs 光变曲线在它们各自的轨道周期^[201,204,205] 上做折叠；
2. 接下来计算整条光变曲线（掩食内以及掩食外）的中值（median value），并记作 μ_L 。因为这边取的是中值，从而此值应大约为 EB 光变曲线掩食外的平均星等；
3. 然后对整条光变曲线进行宽度为五个点的滑动平均（box smoothing），将最暗（星等值最大）的点标记为主掩食甚（伴星遮挡主星面积最大的时刻），用 θ_p 表示。而次掩食甚时刻 θ_s 则定义为在 θ_i 处， $|m(\theta_i) - m(\theta_m)|$ 达到最大值，其中 θ_m 等于 $(\theta_i + \theta_p)/2$ ，而 $m(\theta)$ 为相位 θ 处的星等值；
4. 选取 $[\theta_m - 0.05, \theta_m + 0.05]$ （也即绝对相位宽度为 0.1）区间，计算其内光变曲线的标准差： σ_L ，也即掩食外光变曲线的弥散度；
5. 而光变曲线的主掩部分则定义为星等值比平均值低 1σ ，即 $m > \mu_L + \sigma_L$ 并且区间内包含 θ_p 。同样的方法也可以定义包含 θ_s 的次掩食部分。
6. 最后将上步得到的两段主次掩食内的光变曲线从整条光变曲线中扣除，并重新计算第 2 步中的中值以及弥散。这样做可以得到更加真实的光变曲线掩食外部分。利用新得到的 μ_L 和 σ_L ，我们可以在再次回到上一步划分主次掩内的光变曲线。值得注意的是这里得到的 μ_L 和 σ_L 两者之值将被用来计算掩食内光变曲线的斜度和峰度。

下面我们将以 OGLE-III LMC 内共 26,121 个 EB 样本^[201] 为例，介绍如何得到可靠的斜度和峰度。图 3-4 为对该样本计算得到的 σ_L 与 i 波段星等的分布函数图。从图中可以明显看到信噪比较差的系统总是暗源，这也很自然，因为测光误差总是依赖于星等。为了避免用来搜寻掩食盘的样本性噪比太低，我们将 i 波段测光星等大于 19.3 以及弥散大于 0.1 的系统从样本中剔除。

另外，如果掩食窗口内的观测点数太少，我们也同样不能精确的计算星等分布的多极矩。如果在掩食窗口内光变曲线的点数为 N_{ecl} ，那么 $N_{ecl}/N \leq 0.25$ 的系统也会被排除在外，其中 N 为整个光变曲线的观测点数。此选择条件还可以将我们的样本限制为 EDs。而且为了保证斜度和峰度计算值的可靠度，只有 $N_{ecl} > 20$ 的系统才会被留下来用作下一步的计算。最后，我们还将分析的系统限制在较深的掩食中。为了寻找主掩食盘（即伴星的星周盘），我们的分析中只留下光变曲线主掩深度 $|m(\theta_p) - \mu_L| > 4\sigma_L$ 的系统，其中 $|m(\theta_p) - \mu_L|$ 用来衡量

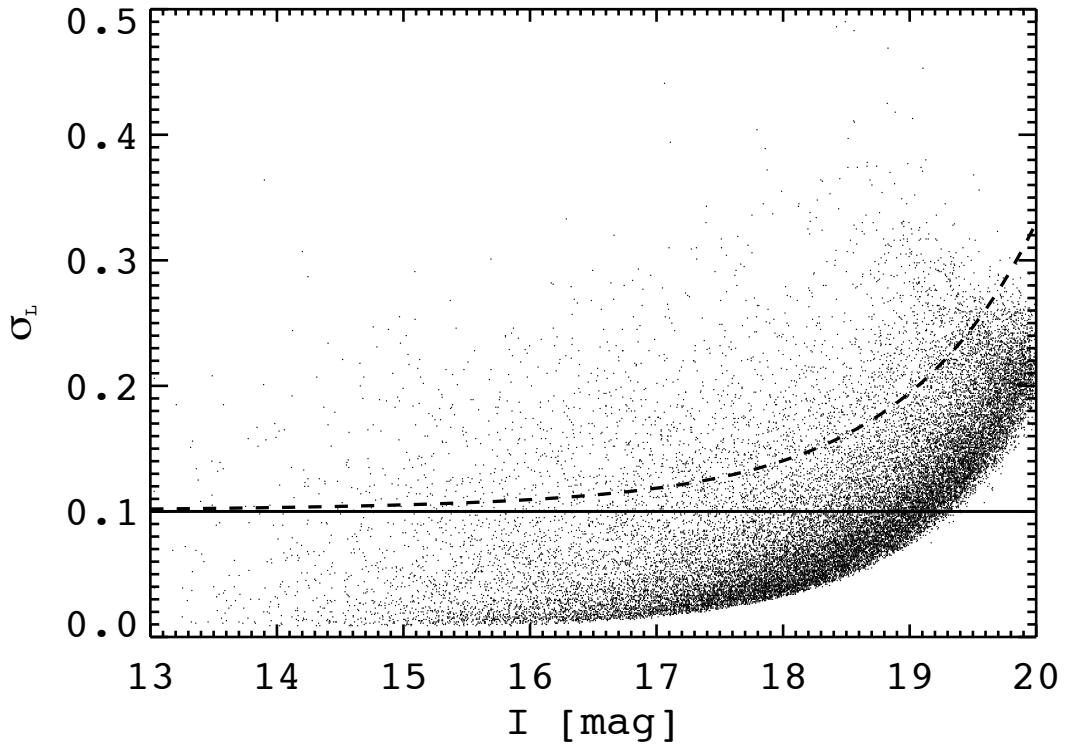


图 3-4: OGLE-III LMC EBs 样本 i 波段星等与该波段掩食外的星等标准偏差散点图。为了着重显示高信噪比的系统，我们人为去除了 i 波段星等大于 19.3 的 EBs。另外实线上侧的掩食外星等弥散度 $\sigma_L > 0.1$ 也被舍去。此外，虚线表示 $\sigma_L > \sigma_c + 0.1$ ，其中 σ_c 为极限星等误差。我们也尝试过该选择判据，结果显示两种方法并不能影响图 3-5 中的实线方框内的点。

主掩食深度。同样次掩食盘（主星的星周盘）判据则定为 $|m(\theta_s) - \mu_L| > 3\sigma_L$ 。之所以这样选取是因为当以上两个判据变得不那么严格时，最后的结果中会包含相当多的污染源以至于掩食盘候选体被淹没在其他系统中，这些系统并没有掩食盘而只是星等分布接近掩食盘系统。

在主掩和次掩食内，星等分布的斜度 S 以及峰度 K 的计算公式如下：

$$S = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{m_i - \mu}{\sigma_L} \right)^3 \quad (3-3)$$

$$K = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} \left(\frac{m_i - \mu}{\sigma_L} \right)^4 - 3 , \quad (3-4)$$

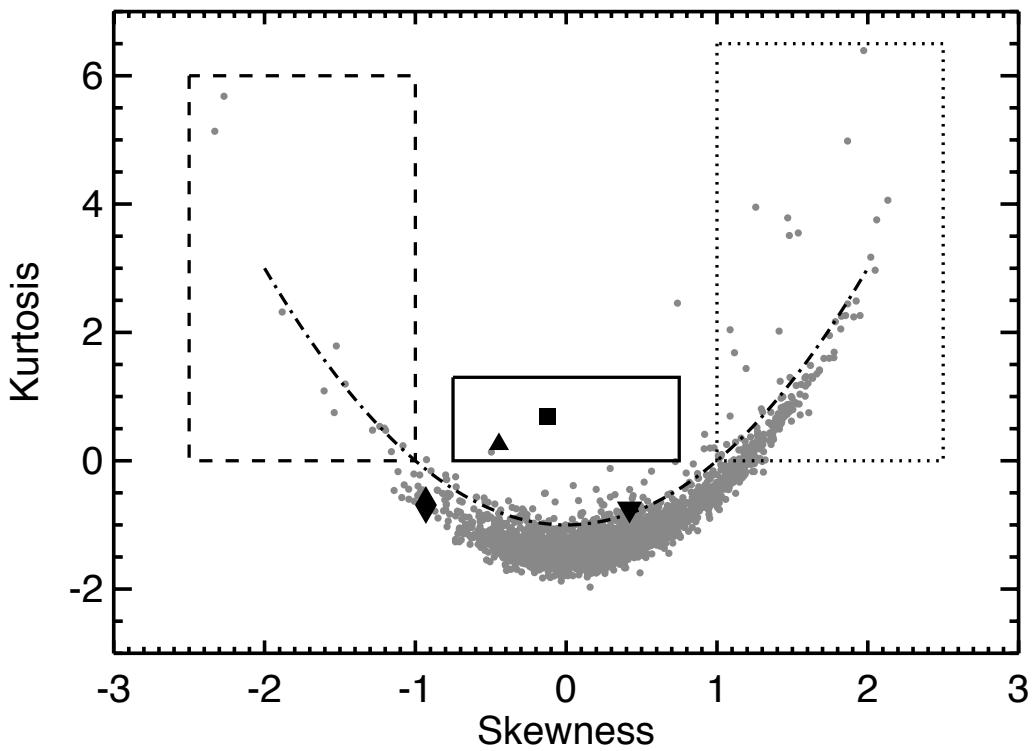


图 3-5: 由 LMC 中 2823 个低噪声 EBs 样本计算得到的主掩食内斜度和峰度分布图。OGLE-LMC-ECL-17782 和 OGLE-LMC-ECL-11893 分别用实心方块与三角形标注。为了区分不同性质的系统，我们将该图划分为四个不同的区域：虚线、实线、点线以及点虚线，它们分别代表着拥有不同掩食内光变曲线形状的 EBs — 实线区域内为掩食盘的候选体，而点虚线（近似 $K = S^2 - 1$ 抛物线）则为星等分布的整体形状。EE Cep 和 ϵ Aur 也分别用倒三角与菱形标注，可以看到斜度峰度方法并不能很好的区分 EE Cep 和 ϵ Aur 和其他 EBs。

其中掩食窗口内的星等平均值 $\mu = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^{N-1} m_i$ 。需要留意的是这边的平均星等 μ 和前一小节的中值 μ_L 不能混为一谈。 N 为掩食窗口内折叠后光变曲线的观测点数目，而 m_i 则是它们中每一个观测点的星等值。

3.2.2 掩食窗口内星等分布

我们首先尝试将上述方法运用到 OGLE-III 巡天中 LMC EBs 的样本^[201]。OGLE-III 巡天在凝视 LMC 的视场大约有 40 平方度的大小，视场内也探测到近 320 万个源^[209]。其中 26,121 个源被证认为 EBs^[201]。为了从大量数据中搜索这些双星，Graczyk 和 Eyer 将 i 波段的星等限制在 20 以内，至少拥有 120 个测光点，并且周期限定在 $1.0015 < P < 475$ 天^[208]，他们搜索这些双星的周期运用了 Stellingwerf 提出的 phase dispersion minimization 方法^[210]。

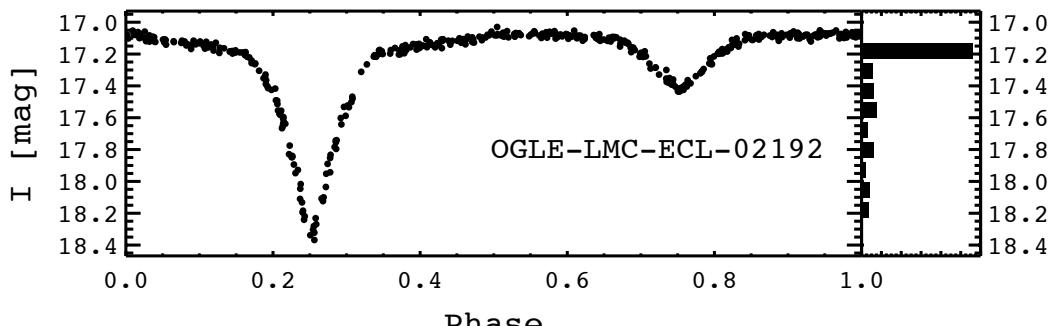


图 3-6: OGLE-LMC-ECL-02192 的周期 ($P = 1.59$ d) 叠加光变曲线 (左侧)，该系统属于 ED，并且其中一颗恒星的洛希瓣被充满。右栏为掩食内星等分布柱状图，入食与出食相位分别为 0.1 和 0.5。该系统入出掩食较缓慢，星等分布拥有明亮尾巴，因而拥有正斜度 ($S = 1.94$, $K = 4.98$)，在图 3-5 中处于点线方框内。

上一小节提到选取限定条件，于是我们从 LMC 26, 121 个系统中挑选出了 2823 个高测光连续度且测光精度较好的 EB 系统，这些系统被成为高信噪比 LMC EBs。计算出这些高信噪比 LMC EBs 的斜度以及峰度后（图 3-5 中），之前两个已发现的掩食盘系统 OGLE-LMC-ECL-17782 和 OGLE-LMC-ECL-11893 落在了实线方框区域 ($|S| < 1.0$, $K > 0$)。同样，我们定了双曲线 $K = S^2 - 1$ (以指代普通 EBs) 来区分主掩和次掩食内是否明显有平台期。这里明显的判断标准则落在了 $S = 0$ 和 $K = 0$ 附近。类似的对于系统 EE Cep 与 ϵ Aur，我们采用了 Galan 等人^[192] 观测到的 V 波段掩食数据^① 和 Parthasarathy 于 1982 至 1988 年之间^[211] 观测的 V 波段数据^② 来计算斜度和峰度，然而他们并没有把它和其他系统很好地分离开。

那么究竟什么原因导致上述 OGLE-LMC-ECL-17782 和 OGLE-LMC-ECL-11893 两个系统在斜度 – 峰度分布图中明显突出呢？从方程 3-3 和 3-4 出发，在统计中峰度可以用来指示星等分布的集中度，而斜度则用可类比为星等分布的不对称度（即星等峰值在其平均值的明或暗两端）。正是如此，我们才将图 3-5 划分成四个区域：实线、点线、虚线和其余区域。点线区域内 EBs 掩食内星等的分布集中在进出掩食附近，因此拥有正斜度（例如系统 OGLE-LMC-ECL-02192，参考图 3-6）。而虚线方框内 EBs 则因拥有方形平台底部贯穿最大掩食（食甚）而正好拥有相符号反的斜度（例如系统 OGLE-LMC-ECL-12966，参考图 3-7）。

如果系统中拥有可能的掩食盘候选体，那么光变曲线中掩食内的星等统计

^①<http://vizier.cfa.harvard.edu/viz-bin/VizieR?-source=J/A+A/544/A53>

^②<http://www.hposoft.com/campaign09.html>

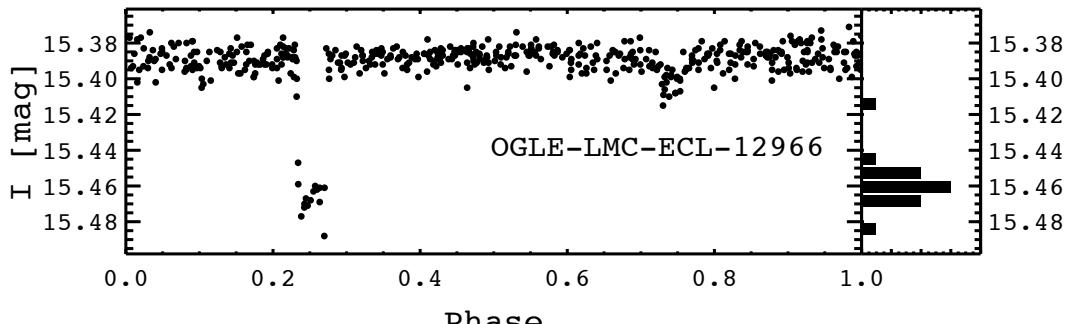


图 3-7: 与图 3-6 相同, 但为系统 OGLE-LMC-ECL-12966 ($P = 239.6\text{ d}$)。该系统同样为 ED, 但不同的是由于掩食内光变曲线呈方波形状, 从而右侧星等分布集中在暗端, 斜度也因此为负值 ($S = -1.35$, $K = 1.21$)。在图 3-5 中位于虚线框内。

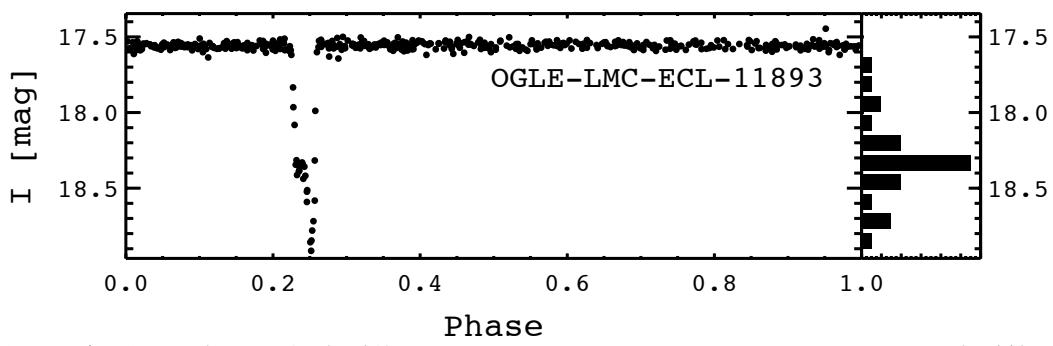


图 3-8: 与图 3-6 相同, 但为系统 OGLE-LMC-ECL-11893 ($P = 468.045\text{ d}$)。该系的星等分布拥有斜度接近于零和正峰度 ($S = -0.45$, $K = 0.25$), 这是因为掩食内中央区域有一段平台期, 在图 3-5 中位于实线框内。

分布则与上述两种情况完全不同。通常而言这样的系统会在光变曲线侧翼中（掩食半遮掩状态）包含平台状的结构。这也并不难理解, 因为盘的几何尺度往往比恒星尺度大, 在伴星掩食主星之前, 伴星周围的盘会先开始掩食。如果盘的结构不复杂（多环、倾斜或单边状）, 那么在恒星掩食开始前会有一段盘掩食的平坦光变区间, 这也正是系统 OGLE-LMC-ECL-11893（图 3-8）和 OGLE-LMC-ECL-17782（图 3-9）与图 3-5 中其他 EBs 的不同之处。

需要说明的是, 峰度斜度的筛选法并不能区分出以往类似 EE Cep 的进出掩食不对称结构, 同样对诸如 ϵ Aur 的 W 型掩食结构也无法分离与识别, 因为峰度斜度只能用来描述掩食内观测点的不均匀性。从图 3-5 中, 还有另外一个系统 OGLE-LMC-ECL-17138 也在前面提到的实线方框（即掩食盘可能区域）内。该系统的光变曲线以及掩食内星等统计如图 3-10, 似乎该系统并未显示盘状掩食结构, 那么为什么它的统计多极矩计算值和两个候选体类似呢? 这里, 我们将此峰度归结于这颗系统存在掩食深度变化（Eclipsing Depth Variation, 简

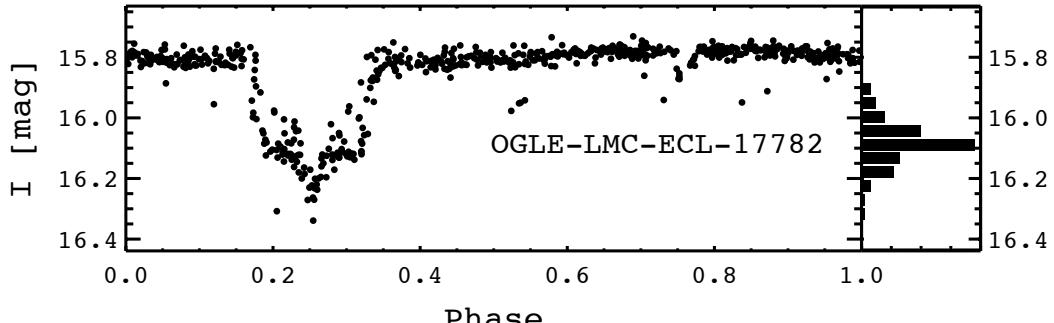


图 3-9: 与图 3-6 相同, 但为系统 OGLE-LMC-ECL-17782 ($P = 13.353\text{d}$)。此系统为前人已识别的掩食盘候选体^[201]。由于该系统的掩食内星等分布同样拥有平台阶段, 因而斜度与峰度值接近系统 OGLE-LMC-ECL-11893 ($S = 0.12$, $K = 0.89$)。可以从图中看到该系统拥有变化的掩食轮廓和深度。

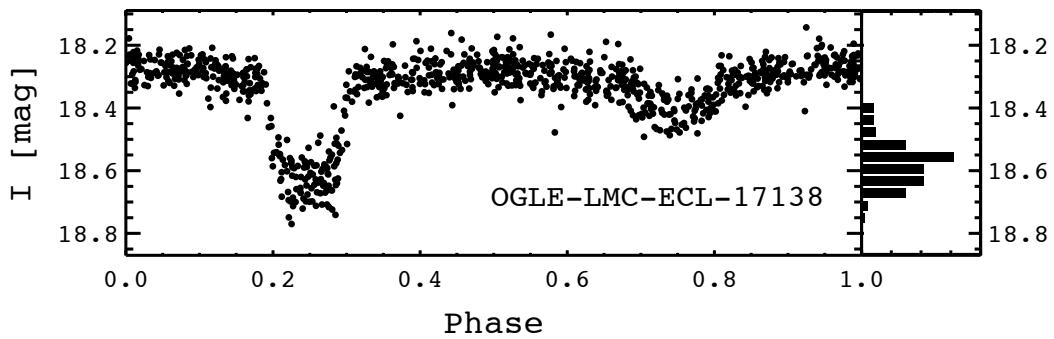


图 3-10: 与图 3-6 相同, 但为系统 OGLE-LMC-ECL-17138 ($P = 11.1\text{d}$)。它是在图 3-5 实线框中的唯一的污染源。此系统拥有与掩食盘候选体 OGLE-LMC-ECL-11893 与 OGLE-LMC-ECL-17782 类似的掩食内星等分布斜度与峰度统计值 ($S = -0.36$ and $K = -0.02$) , 这是由系统的掩食深度变化所导致的。

称 EDV)。当我们在该系统单个周期内检查光变曲线时, 发现它的掩食内是明显的方波形状(峰度较小)。然而在周期折叠后的光变图中, 该系统不同掩食深度叠加后的确会成为该方法的例外, 因而我们通过眼睛查看确认后将该系统排除出掩食盘候选体。

接下来, 我们将该方法流程应用到 OGLE-III LMC EBs 次掩食, SMC EBs 主、次掩食以及 GD EBs 样本中。在 LMC EBs 样本中, 我们运用同样的方法总共找到 418 个高信噪比次掩食系统, 然而在这些系统中并没有找到掩食盘的候选体。而对与 SMC 中 EBs 样本, 我们将 6,138 个系统缩小至 748 个高信噪比主掩食, 同样计算出斜度和峰度分布图并分析后我们得到了一个疑似掩食盘系统 OGLE-SMC-ECL-0007, 由于该双星周期为 1.211d 并且主次掩食都发现了同样的非对称结构, 因此猜测两颗星同时拥有掩食盘的概率应该不会大。与此同时, 文献 [204] 的研究显示该系统为前景视线方向上的晚型恒星, 单独查看周

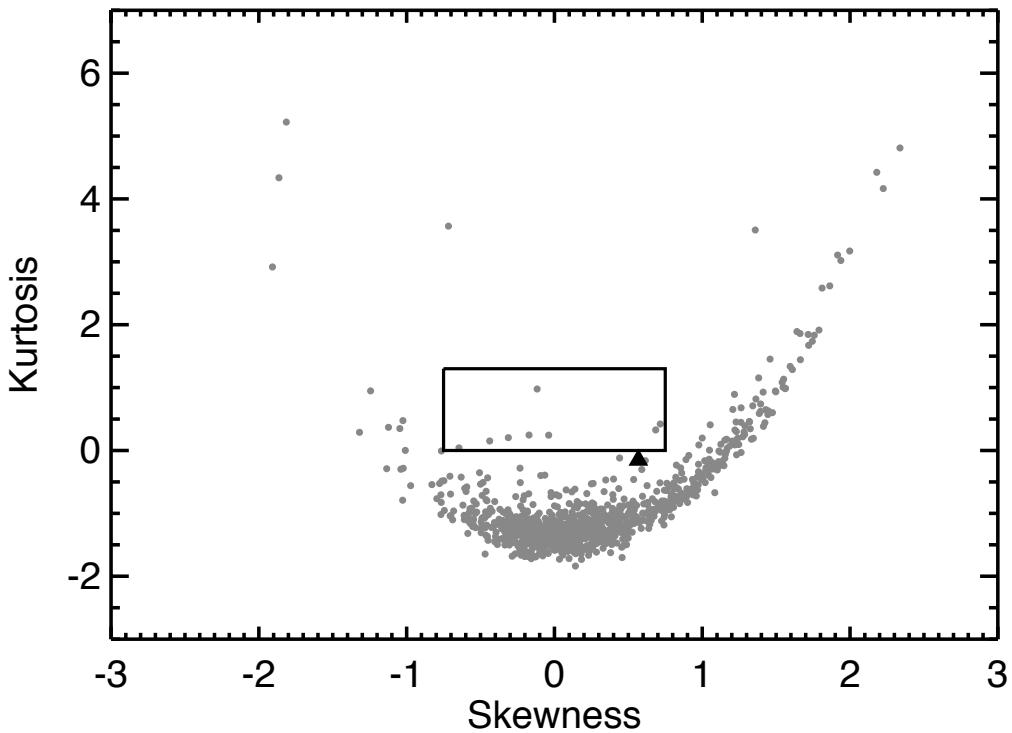


图 3-11: 与图 3-5 相同, 此图样本为 SMC EBs。我们同样检验了掩食盘在斜度峰度图上的可能区域, 发现所有的点几乎都没有任何掩食盘的迹象, 除了用三角形标注的系统 OGLE-SMC-ECL-0007 (参见图 3-12)。虽然该系统在实线方框之外, 光变曲线掩食内部有些微的不对称性。

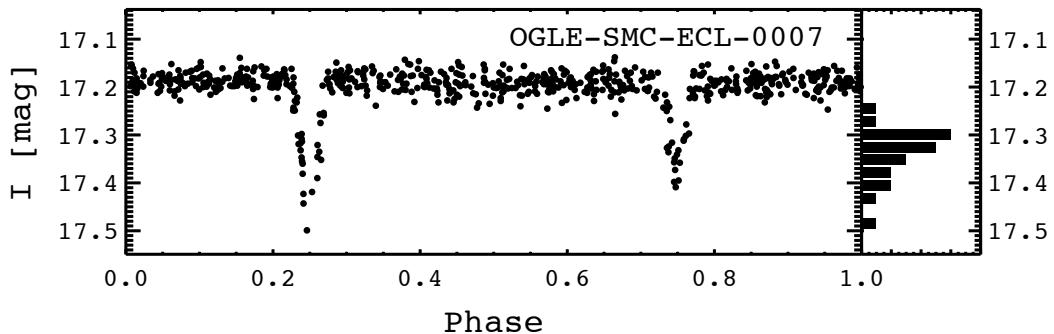


图 3-12: 与图 3-6 相同, 但为系统 OGLE-SMC-ECL-0007 ($P = 1.211\text{d}$)。此系统为 SMC EBs 中可能的掩食盘例子。它掩食内星等分布统计显示出不对称性 $S = 0.57$ and $K = -0.15$)。可以看出来主掩和次掩都为不对称结构, 应为该系统为短周期双星, 因此我们怀疑它同样存在 ETV。

期发现光变曲线在掩食内仅拥有 3–4 个测光点, 因此我们怀疑该双星有 ETV 或者存在星风, 但也并不能对该系统下定论。

最后, 前文提到的方法被应用到 GD EBs 样本中, 同样未发现明显的掩食

盘信号（共 570 个高信噪比系统）。这可能是因为 GD 样本的掩食深度噪声比相对于 LMC 甚至 SMC 都要差一些，并且在 GD 样本中大部分恒星都偏年老，而盘的年龄要远远小于恒星的年龄。需要说明的是，在 GD EBs 样本中，最长周期仅为 $P = 103.502$ 天，在掩食盘搜索工作中，双星的间距越大，那么它们周围盘的洛希半径也就越大，充满洛希半径的盘也更容易被巡天发现（关于洛希瓣请参考附录图 B-3。）。

3.2.3 LMC 中掩食盘候选体的性质

文献 [201, 202] 中提到 LMC 中 EBs 的色指数组等分布图具有双峰结构，分别为偏蓝的近主序星和偏红的红巨星、超巨星（参见附录 C，图 C-1）。那么在 OGLE-III 的 EBs 中有多少为主序星呢？如果在这里我们定义 $V - I \leq 0.5$ mag 为主序，那么在这 2823 个高信噪比的 LMC EBs 中，一共有 2471 对在主序附近。

我们将所有高信噪比 LMC EBs 的色指数—星等画在图 3-13 中，可以看到 OGLE-LMC-ECL-17782（实心方框）和 OGLE-LMC-ECL-11893（实心三角）拥有接近与主序性质。此图采用文献 [212] 提供的 Pandova internet server^① 来制作金属丰度为 $Z = 0.006$ (LMC 的经典丰度值) 年龄跨越 $\log_{10}(\text{age}/\text{yr}) = 6.0 - 9.0$ 且步长为 $\Delta \log_{10}(\text{age}) = 0.1$ 的颜色—星等图。图中我们保留原始的 LMC EB 样本的星等与色指数组值不变，而是将等年龄线做了消光红移修正。修正量为 $A_V = 0.55$ (文献 [213])，距离模数为 $\delta m = 18.48$ mag ([214])。下面我们将详细分析这两个系统。

3.2.3.1 OGLE-LMC-ECL-17782

对于 OGLE-LMC-ECL-17782 系统，我们将现有的测光信息汇总于表格 3-1。然而文献 [213] 与文献 [215] 二者观测的星等与颜色并不相符，因此很难直接限定这个系统的年龄。这也许是由于观测时间正好相互不重叠导致的。文献 [215] 中的观测一共包括在 Cerro Tololo Inter-American Observatory (稍早于 UT 时间) 观测的五个夜晚，UT 1999 年 1 月 8 日，UT 2001 年 3 月 28–30 日与 UT 2001 年 4 月 1 日。通过文献 [201] 提供给的星历表，可知该系统周期为 13.352899 天，主掩极小值开始于 Heliocentric Julian Date (HJD) 2453563.2912，因而掩食可能发生在 UT 1999 年 1 月 7 日 23 时或者 UT 2011 年

^①<http://stev.oapd.inaf.it/cgi-bin/cmd>

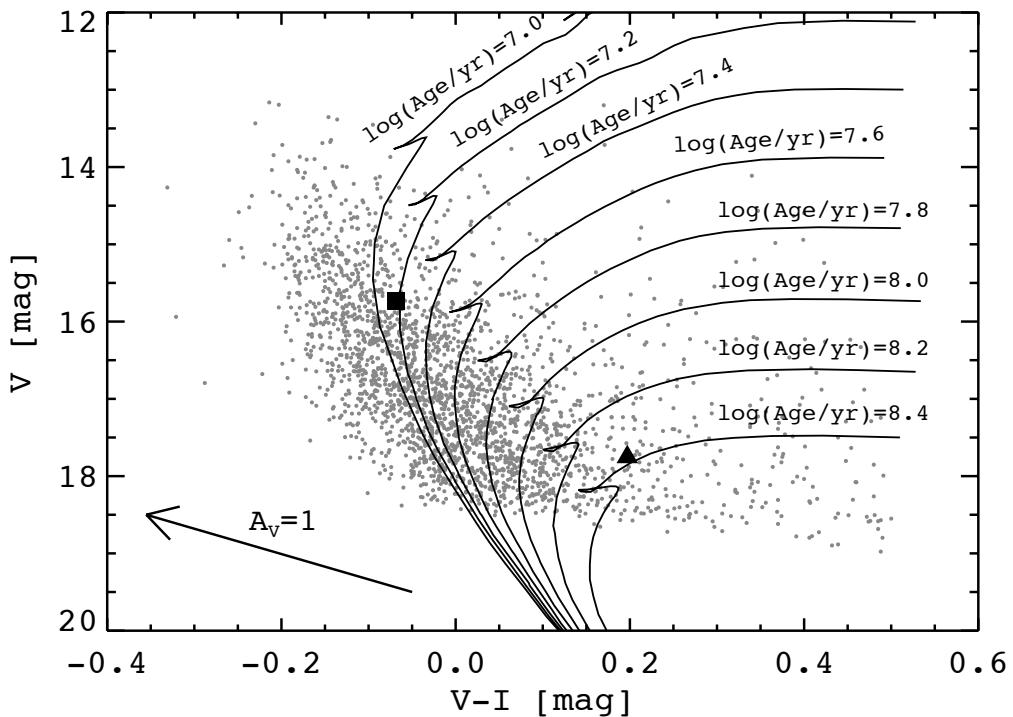


图 3-13: LMC 低噪声 EB 样本的色指数 – 星等分布图, 其中 $V - I \leq 0.5$ mag 定义为主序系统。那么前文提到的掩食盘候选系统 OGLE-LMC-ECL-17782 (实心方框) 和 OGLE-LMC-ECL-11893 (实心三角) 的多波段测光性质与主序正好吻合。叠加在其上的曲线为主序星从 $\log_{10}(\text{age}/\text{yr}) = 7.0 - 8.4$ 步长为 $\Delta \log_{10}(\text{age}) = 0.2$ 的等年龄线^[212]。并且这些等年龄线的红化已经通过 0.55 星等的消光与 18.48 星等的距离模数修正过, 另外图中的箭头为 $A_V = 1$ mag 的消光矢量。

4月1日中午时刻, 故文献[215]中给出的观测时间很可能落在主掩食内(文献[213]并未给出他们的观测时间)。然而掩食内此系统会明显偏暗(星等值会变大), 因而文献[215]与文献[213](与文献[202]以及文献[209]一致)拥有不相符的UBV波段星等并不能认为是盘遮挡住主星的原因, 但也不能排除盘在文献[215]观测的时间内遮挡伴星的量少了一些。OGLE-III的观测显示该系统并没有明显的掩食外亮度变化。值得一提的是, 文献[216]曾提到一些B型恒亮度的确会偶尔突然增大, 这背后的机制也还有待解释。

虽然UBV波段的星等稍有争议, 但在I波段以及红外波段观测却出奇的一致。该系统主掩与次掩的时间相差0.5个相位, 因此轨道有很大几率为圆形的。同时, 掩食最深处的光变曲线形状为尖角形预示着主星与伴星拥有相近的半径大小(伴星半径大于主星2倍以上, 稍稍有观测倾角的很少数情况也可能造成类似的掩食形状)。为了更好地反演出该星的物理性质, 本文使用

表 3-1: OGLE-LMC-ECL-17782 系统宽带测光信息表

波段	星等	参考文献	星等	参考文献
<i>U</i>	15.356 ± 0.027	Z04	14.38	M02
<i>B</i>	15.563 ± 0.062	Z04	15.13	M02
<i>V</i>	15.711 ± 0.027	Z04	15.784	U12
<i>V</i>	15.793	D07	15.21	M02
<i>V</i>	15.737	G11	15.793	D07
<i>R</i>	15.888	D07		
<i>I</i>	15.855 ± 0.035	Z04	15.895	U12
<i>I</i>	15.805	G11		
<i>J</i>	15.97 ± 0.02	K07	15.913 ± 0.039	C06
<i>H</i>	15.98 ± 0.02	K07	15.916 ± 0.074	C06
<i>K_s</i>	15.92 ± 0.07	K07	15.907 ± 0.137	C06
[3.6]	15.951 ± 0.076	M06		
[4.5]	15.853 ± 0.088	M06		

此表格使用的测光值引自参考文献列表如下: Z04 — 文献 [213]; K07 — 文献 [218]; M06 — 文献 [219]; C06 — 文献 [220]; U12 — 文献 [209]; M02 — 文献 [215]; G11 — 文献 [201]; D07 — 文献 [202]。

NIGHTFALL 程序^①来拟合该系统的光变曲线。我们的模型内包含三个组分：主星、伴星以及星周盘，并通过手动调整参数来使得恒星的物理参数最好的拟合光变曲线。

拟合的结果展示在图 3-14 中，拟合过程中我们发现即使假设盘已经完全延展到伴星的洛希瓣，伴星的质量几乎必须得和主星差不多大 ($M_2 \gtrsim 0.8M_1$) 才能比较好的拟合光变曲线主掩最大值两侧的宽翼部分。考虑到 Nightfall 并不能调整盘的不透明度参数，因此我们假设盘为纯粹的黑体辐射，并且通过调整盘的轨道倾角以及几何厚度来更好的符合主掩食极大两侧的宽翼部分。根据图 3-13 给出的该系统的绝对 V 波段视星等（即亮星亮度之和）以及统一幅图中得到的初始输入有效温度与大体质量（假设两颗星年龄相同），我们将 OGLE-LMC-ECL-17782 系统的物理参数限定在有效温度约 29000 K，光度为 $1.4 \times 10^4 L_\odot$ 匹配的总质量为 $14.3 M_\odot$ ，年龄 50 万年，消光大约为 $A_V \sim 0.4$ 星等。考虑到主星和伴星的总光度，可得到系统经过消光修正后的绝对星等 M_V

^①更多信息请参见 Nightfall 用户手册^[217]，链接 <http://www.hs.uni-hamburg.de/DE/Ins/Per/Wichmann/Nightfall.html>，该程序考虑了临边昏暗、引力昏暗（增量）以及恒星等势面形状等因素。

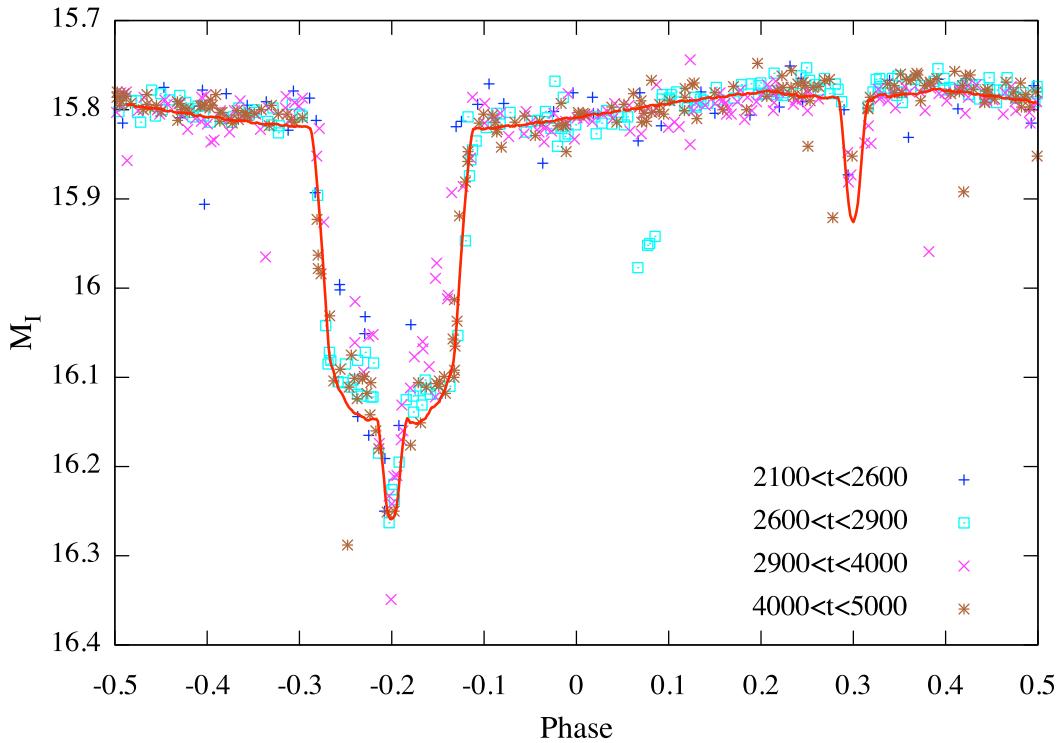


图 3-14: 周期叠加后的 OGLE-III 系统 OGLE-LMC-ECL-17782 以及拟合的光变曲线图。不同点代表不同的时间测得的数据，图中的时间定义为 $t = \text{HJD} - 2450000$ 。关于此 Nightfall 程序的拟合参数请参见表格 3-2。为了显示，我们将此图主掩极大的相位移动了 $\theta_p = -0.2$ 。

为 -3.1 。从而可以计算得到 $U - B = -0.92$ 星等, $V - I = -0.12$ 星等。该值与表格 3-1 中所列的文献 [213] 以及文献 [209] 相符合。这里拟合得到的消光值比文献 [213] 估算的平均消光值稍微偏小, 如果消光值比拟合值偏大那么 $V - I$ 色指数久无法很好地匹配上文献中给出的值; 相反如果消光减小至 0.3 星等, 主星的年龄会明显的增加 (为了拟合系统的光度), 从而掩食的时长将会明显大于观测值。

该系统除了主掩食有浅一些的盘掩食迹象, 次掩食也同样可以看到类似的结构, 拟合程序 Nightfall 看似并未考虑次掩时盘对主星的反射, 但次掩两侧的浅掩食宽侧翼也似乎正提现了该反照效应。我们考虑了该系统中正弦相位导致的亮度变化 (振幅大小为 0.025 星等), 这正是由于伴星在不同轨道相位上的反射光导致的。同时为了检测该伴星究竟是否为致密星, 我们通过 XMM-Newton 的 LMC 曝光照确认 X-rays 流量为否定的结果。

如果该掩食盘在主掩时彻底遮挡住主星, 那么通过该掩食深度可以估算得到该盘的光深大概为 $\tau \sim 0.3$ 。而部分盘遮挡住主星的情况将会对应更大的光

表 3-2: OGLE-LMC-ECL-17782 系统的光变曲线拟合参数

Orbital Period	13.3525 days
Primary T_{eff}	29,000 K
Secondary T_{eff}	25,500 K
Disk T_{eff}	6000 K
Primary Roche Fill	0.176
Secondary Roche Fill	0.158
Disk Roche Fill	0.97
Orbit Inclination	87.5°
Orbital eccentricity	0.0
Disk aspect ratio H/R	0.03
Mass ratio M_2/M_1	0.8
Primary mass M_1	$14.3M_{\odot}$
Total mass	$26M_{\odot}$
Primary Radius	$4.6R_{\odot}$
Secondary Radius	$3.7R_{\odot}$
Disk Radius	$32.6 R_{\odot}, 0.15 \text{ AU}$
Semi-major axis	$70.0 R_{\odot}, 0.33 \text{ AU}$
Primary Luminosity	$1.3 \times 10^4 L_{\odot}$
Secondary Luminosity	$5000L_{\odot}$

对 OGLE-LMC-ECL-17782 系统主星、伴星以及掩食盘的 Nightfall 拟合物理量表格（光变曲线拟合见图 3-14）。

深。通过恒星的总质量 ($26M_{\odot}$) 我们同样可以估算该盘的大小为 $\sim 0.15 \text{ AU}$ 。这时考虑到主星的光度 ($\sim 1.3 \times 10^4 L_{\odot}$)，盘吸收了主星 30% 的光子能量后，对应于在 0.33 AU 处的温度至少为 $\sim 5500 \text{ K}$ (尚未考虑伴星的辐射)。如果通过盘在整个掩食周期上所花的时间，则对应于不到 10% 的遮挡横截面。不管如何，这样的吸收在 Be 恒星周围都很有可能造成红外超^[221,222]。而温度高达 5500 K 的盘已经完全可以升华所有的盘内固体物质 (即使光变曲线形状更接近于弥散的尘埃盘)。而在如此高的盘遮挡面积下，根据盘的大小以及温度和掩食深度，不透明度的来源极有可能为 Thompson 散射，以及自由—束缚辐射 (如 HI 的光致电离) 而不是自由—自由辐射^[216]。而这里我们得到的光变曲线

拟合模型并不能很好的限制此系统的性质是因为没有视向曲线的测量（包括光谱型以及发射谱）。

3.2.3.2 OGLE-LMC-ECL-11893

正如文献 [223] 中讨论到的，OGLE-LMC-ECL-11893 的光谱显示系统的主星光谱型为 B9III。该系统的光谱显示主星刚离开主序阶段，也拥有稍稍大于 LMC EB 系统的平均消光。该系统的年龄大约为 150 Myr，消光以及绝对 V 波段星等，对于光谱型 B9 的恒星而言，该星的绝对光度比主序星阶段常见值明显大一些。虽然该系统双星的周期为 468 天，但主星的温度非常高，因而星周盘的温度也很可能超过固体升华点。关于该系统的具体讨论以及掩食盘的详细拟合请参见文献 [223]。

3.3 掩食盘概率估算

与以往 OGLE-II 巡天^[224]相比，OGLE-III LMC 巡天的观测时间几乎整整多了一倍，而且归功于测光精度的提升，OGLE-III LMC 发现的 EBs 数目也比以往多出了一倍。根据文献 [201]，LMC EB 样本星表的完备度几乎达到 90%（对于 i 波段视星等亮于 18 等的子样本完备度还会更高）。由于 OGLE-III LMC 高置信的完备度，我们将于下文讨论 LMC EB 样本探测掩食盘的完备度问题。

从文献 [59] 中可知，银河系内年轻恒星团的盘出现概率与年龄成反相关性，而且早型恒星盘的寿命也会明显短过晚型星族，如不足 10% 的 A-F 型恒星在 3 Myr 年龄内拥有盘，而 T-Tauri 恒星却可高达 30–35%^[61]。另外年轻恒星是否拥有盘以及盘存活的时间也依赖于恒星的是否处于多星系统中。在对 1–2 Myr 年龄的 Taurus-Auriga 恒星形成区的搜寻中，Harris 等人发现多星系统的恒星仅有三分之一的比例拥有能够被探测到星周尘埃盘的毫米波段辐射 ($\gtrsim 10$ mJy)，与之相比的单星系统却有三分之二的比例^[207]。考虑到这些因素，我们保守估算在年龄不到 1 Myr 的早型星样本中，大概只有 5% 左右的双星能够拥有星周盘，而对于 10 Myr 的系统比例则会下降到 1/10。

正是由于这些系统中星周盘存活时标相对较短，因而才会在 LMC 的样本中看到拥有星周盘的双星系统候选体仍处于主序阶段（当然盘也可能通过后期的质量交换而形成）。在我们分析筛选得到的 2471 个高信噪比早型 EB 系统中，至少应该有两个可能的掩食盘候选体（两个通过掩食中平台而发现的盘，

如果通过查找 W 型或者不对称型的掩食内光变曲线还可以找到类似 ϵ Aur 和 EE Cep 的系统）。如此我们得到的概率 $\gtrsim 1/1000$, 应该和前人在 EBs 中找到盘的比例没有明显的不一致性。然而这里, 我们搜索到的两个掩食盘候选体 OGLE-LMC-ECL-11893 以及 OGLE-LMC-ECL-17782 都应该不是原初恒星盘。可能是由于恒星星风作用^[201] 或者快速自转的恒星周围抛射出的喷射盘^[216]。相比于 OGLE-LMC-ECL-17782 系统 13.3 天的较短周期, 我们更秦翔宇在距离更远的双星周围找到类似的尘埃盘。

最后需要考虑的是, 由于我们探测掩食盘的方法并不能有效的探测 W 型或者不对称型的掩食内光变曲线系统如 ϵ Aur 和 EE Cep, 因而这边估算的 LMC EB 样本中掩食盘的出现概率还会减少额外的 50%。通过掩食中平台的方法来探测 OGLE-LMC-ECL-17782 并不能适用于每个系统 OGLE-LMC-ECL- 11893, 因此我们不推荐增加 3-5 图中的实线方框区域来包括更多的系统, 或许更好的做法是利用其他的方法来探测掩食盘可能出现的特殊形状。

第四章 热木星统计性质

4.1 系外行星统计列表

在引言部分 §1.3.2，我们曾提到在如今已探测的系外行星中，有一群周期小于十天却拥有大于土星质量的行星种群，被称为热木星^①。为了研究此类行星的统计性质，本文汇总了现有的四大系外行星数据库网站 <http://exoplanets.eu/>、<http://exoplanets.org/>、<http://exoplanetarchive.ipac.caltech.edu/> 和 <http://openexoplanetcatalogue.com/>，并整理出比较统一规范的系外行星列表^②。如图 4-1 与图 4-2 所示，在这行星数目为 3701 的样本中，共有 375 颗系外热木星系统（后文简称 HJs）。系外行星在南北天球分布并没有太多不均匀性（除了巡天观测密集的几个区域以外），而 HJs 却在巨星分支中出现概率偏小（在 §5.2 中讨论），且大多数集中在类太阳恒星周围（下文介绍此为观测选择效应）。本章节后续分析将统一建立在此 HJ 列表的范畴内讨论。

4.2 HJs 出现概率

按照已有的数据，现今探测到的 HJ 总数目约占已确认行星的 10% 之多，这也是为什么在图 1-13 中，明显可以观察到一群质量在木星质量周期小于十天的行星族。然而这与观测的选择效应密不可分：一个完备的统计必须建立在限定体积样本（Volume-limited sample）之上（文献 [225]）。在一个限定体积的样本中，热木星出现的概率实则并不高。Cumming 等人于 2008 年对限定体积 RV 巡天中的 600 颗 FKGM 恒星监测了 8 年后的结果显示^[85]，对于 $M_p > 100M_\oplus$, $P < 5.5 \text{ years}$ 的行星的出现概率可用如下公式描述：

$$\frac{dN}{d \ln M_p d \ln P} \propto M_p^\alpha P^\beta , \quad (4-1)$$

^①若按照热木星的定义，其准确叫法应为短周期类木星，因为行星的有效温度不仅仅与主星的距离有关，而且还与主星的有效温度有关。

^②<https://github.com/EXONJU/ExoPlanetList>

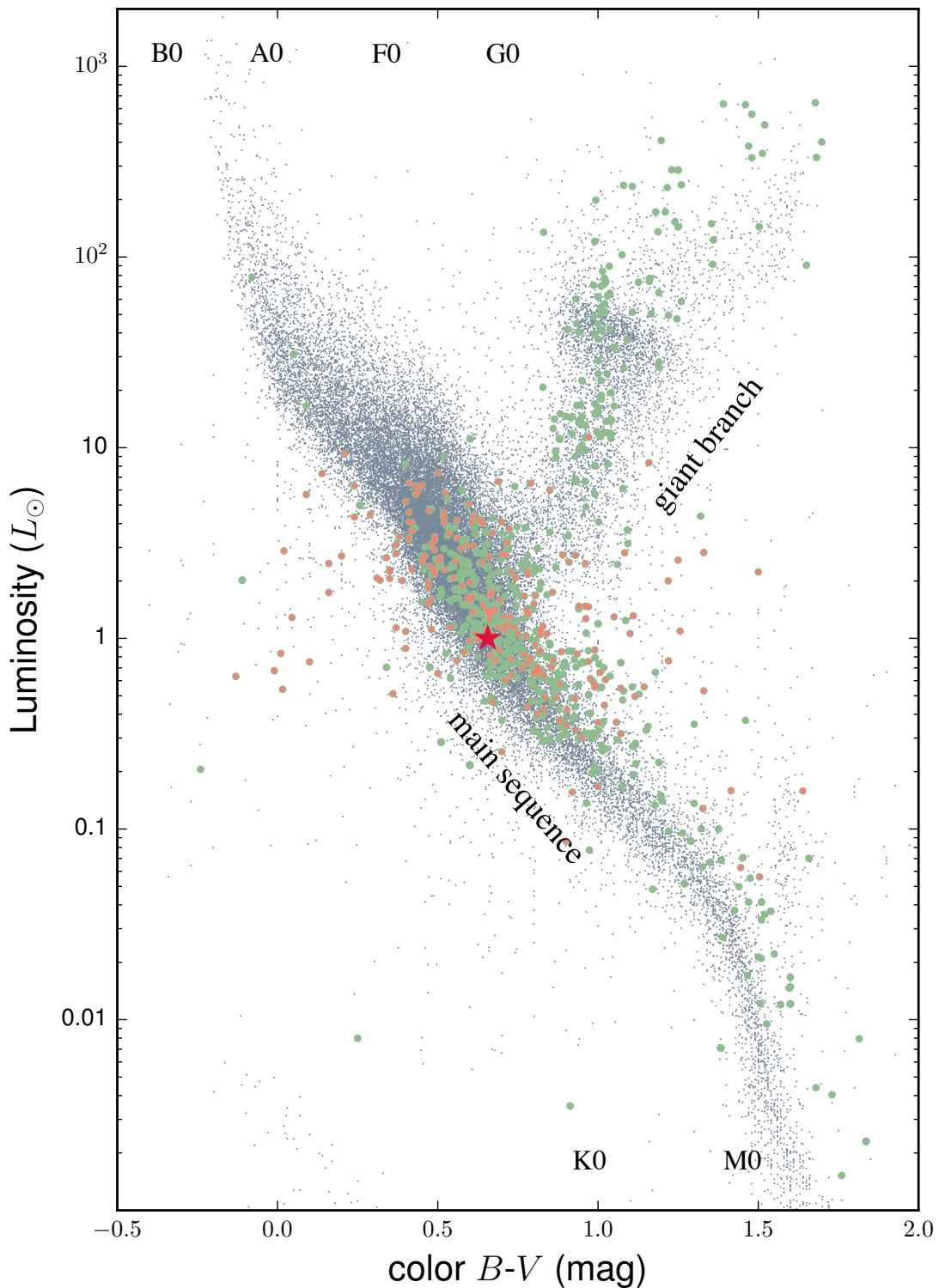


图 4-1: 已确认系外行星的色指数与光度分布图, 墨蓝色点为伊巴古星表临近太阳 150 pc 以内的恒星 (图 C-1), 红五角星为太阳, 绿色点为所有行星, 黄色点则为热木星。如今被探测到的系外行星以及热木星明显集中在类太阳恒星附近, 为观测选择效应。

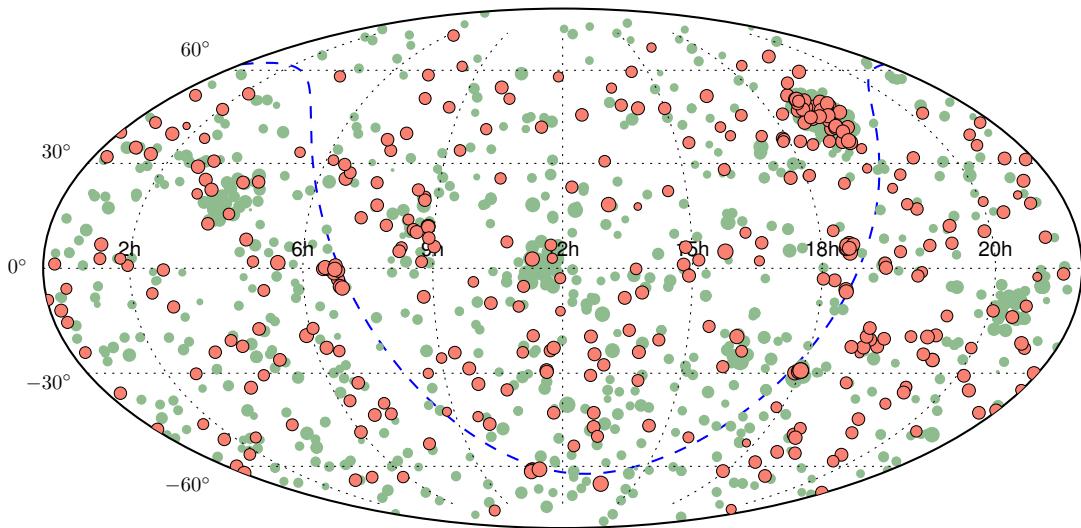


图 4-2: 已被确认的系外行星在赤道坐标下的天球分布。图中蓝色虚线为银道面, 可以看到巡天一般会远离银盘面 (CoRoT 与 OGLE 除外)。绿色与黄色点如图 4-1, 点大小正比于 V 波段星等, 从此图未见南北天的观测选择效应, *Kepler* 视场 (RA=19h 22m 40s, Dec=+44° 30' 00'') 为已确认系外行星最密集的区域之一。

其中指数 $\alpha = -0.31 \pm 0.20$, $\beta = 0.26 \pm 0.10$ 。结合其他种类的巡天项目, 对应的 HJs 的出现概率大致为 0.5 % 到 1.5 % 之间不等^[226–229]。此概率的不同和恒星的星族选择密切相关^[229], 比如恒星的金属丰度和类木星出现的概率有明显的正相关性^[230–236], 这也恰好佐证了 § 1.3.1 中描述的气巨星重元素核吸积模型。

4.3 HJs 形成

在传统的核吸积模型中^[237], 气巨星往往需要在距离主星几个天文单位的地方才能有足够的原材料 (绝大部分由冰组成) 供固态核形成。然而在观测中, HJs 的统计分布于 3 天附近存在峰值 (见图 4-3)。因此需要解释 HJ 的形成, 大致上有两大种途径: 在传统的行星形成基础上引入木星的轨道迁移 (*orbital migration*) 或直接于当地形成 (*in situ. formation*)。关于热木星的本地形成理论请参见文献 [238, 239], 本文分析的主要讨论对象主要基于前者。

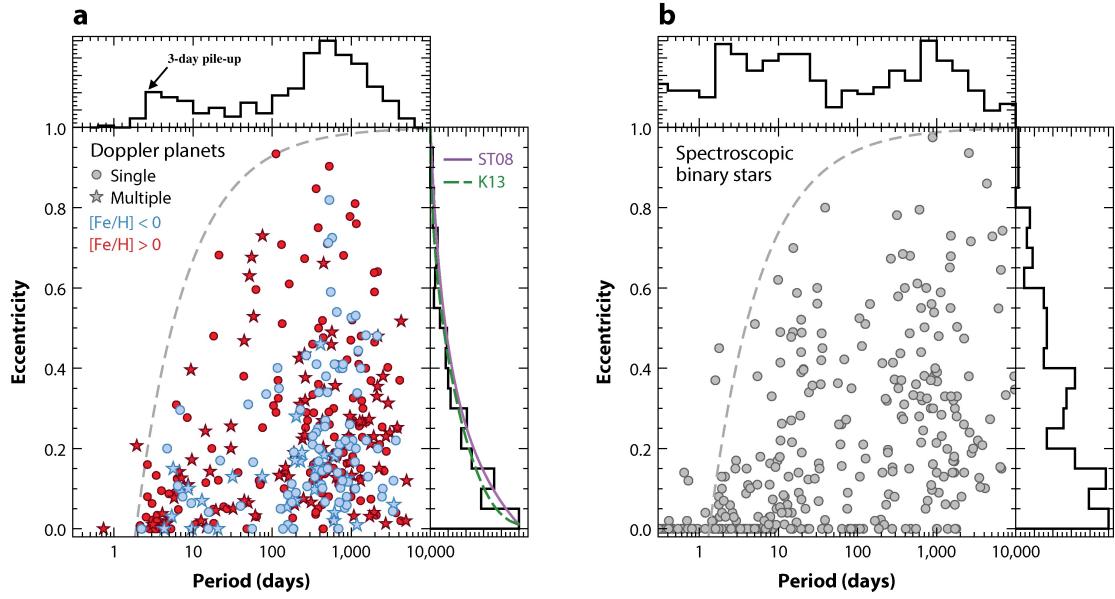


图 4-3: 热木星系统的周期与轨道偏心率分布图。图片取自文献 [225]，可以看到系外行星样本（未经过选择效应修正）在三天周期分布达到热木星的峰值，虚线为类太阳恒星周围行星拥有近心点距离 $a(1 - e) = 0.03$ AU 的轨道。右侧图为 SB9 光谱双星星表的类似分布图。

4.3.1 轨道迁移

在传统的行星形成的基础上，行星的轨道迁移并不需要引入额外的行星核心生长以及气体吸积机制。轨道迁移代表着轨道半长径 a 发生了变化，在椭圆二体运动中行星的角动量与能量拥有如下表达式（本文内均假设 $M_p \ll M_s$ ）：

$$E = -M_p \frac{\mu}{2a} \quad (4-2)$$

$$J = M_p n a^2 \quad (4-3)$$

其中 n 为平均轨道角速度，满足开普勒第三定律 $n^2 a^3 = \mu$ ，其中 $\mu = GM_s$ 。如此轨道迁移势必意味着角动量（Angular Momentum，简称 AM）与能量的交换，因此必须有其它物体与行星之间发生 AM 与能量传递。这样一来，我们又可将轨道迁移大致分为两种情况：气体盘迁移（disk migration）和高偏心率迁移（high-e migration）。

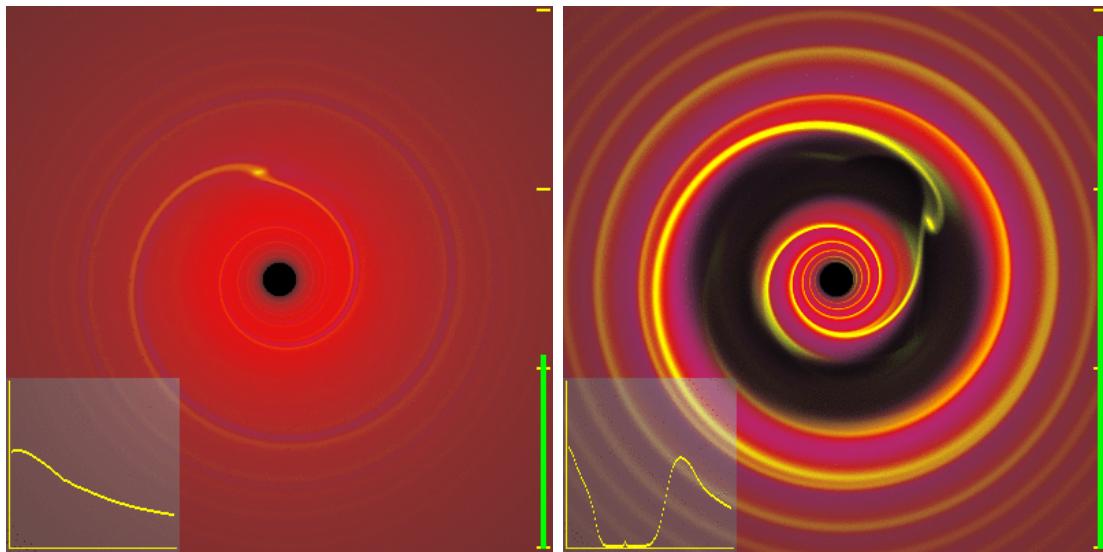


图 4-4: 典型的第二型轨道迁移数值模拟, 大质量行星可以在盘内打开空缺, 并且往靠近恒星的盘内侧迁移。图片取自文献 [245]。

4.3.1.1 气体盘迁移

由于木星质量的行星核心形成后会依然嵌套在恒星周围的气体盘内, 因而由于盘的气体和之间会存在 AM 交换。这样的的 AM 交换通常是通过处于 Lindblad 共振的气体的 co-rotational 力矩来实现^[178,240], 比如土星环的结构^[241]。简单来说第 m 阶共振距离主星半径与行星轨道之间的关系为 $r_L = (1 \pm 1/m)^{2/3} a_p$ 。在二体问题中希尔半径（或洛希半径）可描述为:

$$r_H = a \left(\frac{M_p}{3M_s} \right)^{1/3} \quad (4-4)$$

如果行星的质量足够大, 使得希尔半径大于盘的标高 ($r_H > h$) , 那么盘可能被被打开缺口。与此同时, 由于气体盘的粘性, 此缺口也可能被气体重新填上。1986 年, Lin 等人通过比较盘缺口由于粘性重新被填补上以及由于 Lindblad 共振又再被打开的时标, 得出在经典的原行星盘参数下, 一个木星质量的行星就足以打开空缺, 而土星则处于打开空缺的临界质量^[242,243]。后来该理论被成功地在人类发现的第一颗类太阳系外 HJ — 51 Peg b 上^[244], 比如在 5 AU 附近的木星, 在标准的行星盘打开缺口后, 将在时标为 0.5 Myr 左右迁移至原行星盘的内边界。这样的气体盘迁移又被称作第二型 (Type II) 轨道迁移 (见图 4-4)。

4.3.1.2 高偏心率迁移

行星在气体盘中的迁移往往受气体的阻尼作用而不那么剧烈（保持小偏心率轨道来交换 AM）。相比之下，其它天体造成的引力扰动则会显得更为直接，之所以称此类作用为高偏心率迁移也正是如此得名。一旦类木星的偏心率达到能使得其轨道近心点距离达到当前观测 HJs 几天轨道周期的位置，那么潮汐演化便可将其作用成热木星（§ 4.4）。高偏心率作用的天体可以是一群小天体（单个小质量的天体几乎不能改变木星），如散射星子盘导致的行星迁移^[246–249]，或者更多的则是质量相当或更大天体的强引力扰动（如木星与土星的长期摄动^[250]）。目前此类别下主流的解释因素包括以下几种：

伴星级扰动。早在 1962 年，木星的存在对高轨道倾角太阳系小天体的轨道影响就已被提出^[128,129]。而后 Wu 和 Murray 于 2003 年将此 Lidov-Kozai 效应效应引入解释系外热木星^[251]，即当引入一颗行星系统外具有较大轨道倾角的伴星时，行星的轨道偏心率（以及轨道倾角）会发生周期性的 Kozai 共振^[252]。然而观测中伴星存在的概率是否能解释所有的 HJ 系统^[253,254]，共振的最高偏心对伴星的质量和轨道要求也值得进一步讨论^[255,256]。甚至在恒星形成的星团环境中，其它天体的飞掠（flyby）也可能会对行星系统造成一定的影响^[257]。

行星级扰动。多行星系统内行星之间无处不存在着扰动，如果行星之间动力学足够不稳定，那么可能发生行星—行星散射（planet-planet scattering 简称 PPS，参见文献 [258]）。对于一般有规律并排（orderly spaced）的行星系统，动力学作用会产生中等偏心率的行星^[259–263]，而若要产生能够形成 HJs 的大偏心率，则需要长期作用下的混沌效应^[264]。

另外，形成热木星高偏心率还有一些混合以上盘迁移以及高偏心率迁移的其他理论，详见文献 [265–267]。理论虽多，但迁移的总体思路实则不变：拥有能够与 HJ 交换 AM 的另外一颗天体以及整个系统初始的角动量亏损（Angular Momentum Deficit, AMD）。正是如此才需要观测和统计去区分不同的物理作用过程并且打破观测中不同理论的简并度（图 1-16）。

4.4 引力潮汐作用

前文提到在高偏心率迁移的框架下，需要额外引入潮汐过程才能解释如今观测到 HJs 几乎全体近圆的轨道统计分布（见图 4-3）。在 51 Peg b 发现的第二年，Rasio 与 Ford 就意识到潮汐因素在 HJs 的形成演化中起了非常重要的作

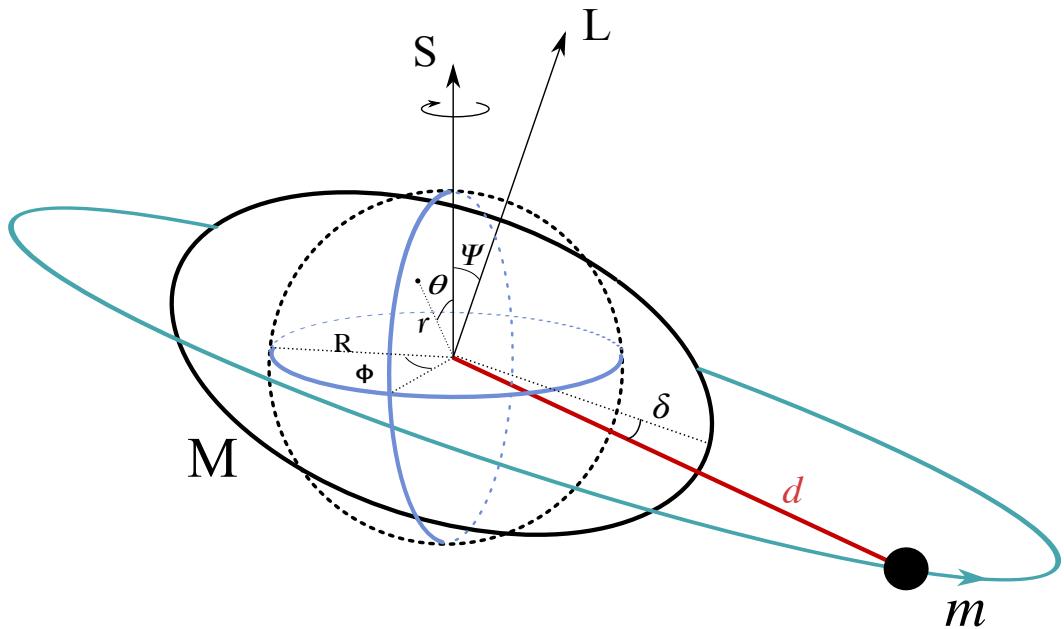


图 4-5: 引力潮汐形变示意图，其中 (r, θ, ϕ) 是以中心天体赤道为基准面的球坐标参考系。 L, S 分别为扰动体 m 的轨道角动量与潮汐形变体 M 的自转角动量。为了显示，此图的潮汐鼓包被大大地夸张了，并且没有考虑 M 自转产生的鼓包。

用^[268]。而事实上，在近距离的二题问题中（轨道周期在几天附近），由于天体并非质点，因而引力潮汐导致的形变效应的确是一项不可忽略的非开普勒（non-keplerian）作用项。潮汐现象在我们太阳系甚至地月系统都很常见，月球的公转自转潮汐锁定，以及地球上海洋的涨潮落潮，也都是潮汐的体现。现代的潮汐理论主要基于 Darwin 在 1880 年基于球谐函数下对天体非开普勒引力势展开^[269]：

$$U(r) = \sum_{l=2}^{\infty} \sum_{p=0}^l \sum_{q=-\infty}^{\infty} \frac{Gm}{a} A_{l,p,q}(e, \Psi) \left(\frac{r}{a}\right)^l Y_l^p(\theta, \phi) e^{-iqn t}. \quad (4-5)$$

各物理量的定义如图 4-5 所示， n 为平均轨道角速度， a, e 为轨道根数（有时也会用二体之间的距离 d 来作为展开基数）， Ψ 为 m 体轨道法向 L 与 M 体自转法向的夹角（又称 obliquity）， $A_{l,p,q}$ 系数则依赖于天体 m 的轨道，对应的潮汐力矩以及能量耗散均可从上式得到（参见综述 [270]）。

在上面描述的基础上，如果将潮汐展开精确到二阶 ($l = 2$)，并且取角向模数 $p, q = 0$ ，便可得到最常用的平衡潮汐（equilibrium tide）模型的近似解。此时形变天体可以用常数滞后角度（constant phase lag）或滞后时间来参数化描

述复杂的潮汐模型：

$$Q^{-1} = \frac{1}{2\pi E_0} \oint \left(-\frac{dE}{dt} \right) dt = \tan 2\delta, \quad (4-6)$$

其中 Q 为潮汐的能量耗散无量纲参数因子， E 与 E_0 分别为系统的当前能量以及初始能量， δ 则为上述常数滞后角。

Goldreich 和 Soter 于 1966 年将上述模型用在计算太阳系内行星的潮汐耗散率中^[271]，同样的理论也用在近距离双星潮汐演化中^[272,273]。对于系外行星而言，HJs 的产生和演化包括两个过程：两者轨道圆化（circularization）以及两个天体的轨道自转同步过程（synchronization）。其中每个过程恒星与行星的物质组成以及内部结构都会影响能量耗散和角动量交换的效率，在弱摩擦假设下的平衡潮汐模型通常额外引入 Love 数 k_2 来描述不同物质结构的耗散率。

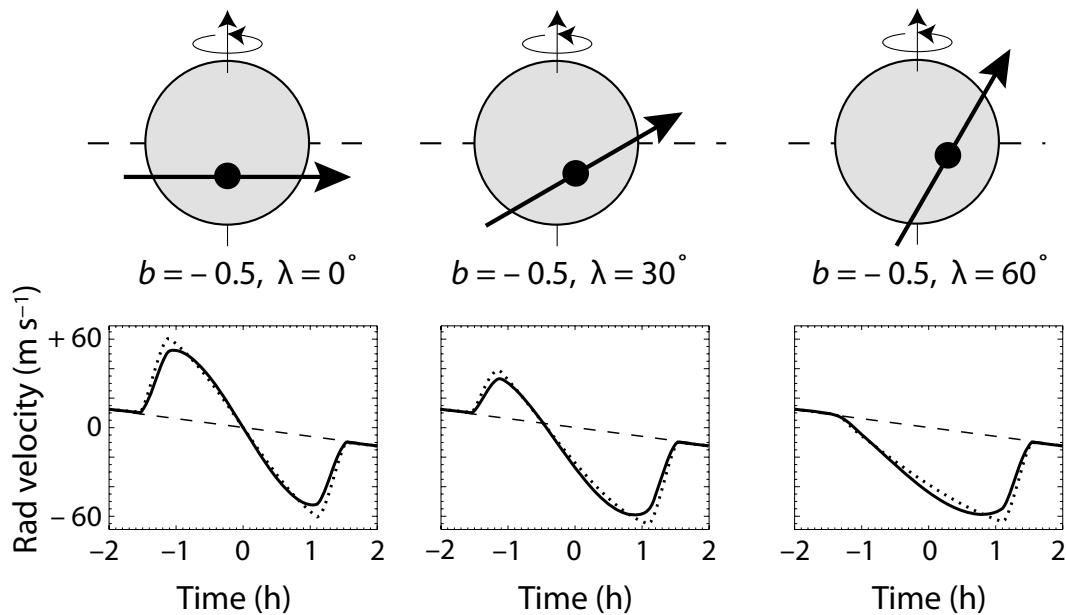


图 4-6：系外行星 Rossiter-McLaughlin 效应示意图。由于行星在凌星过程中遮挡主星的部分区域从而导致主星红移与蓝移的相应部分减小，图中不同的自转—公转倾角以及影响因子均会影响到 RM 效应的视向速度曲线波动轮廓，本图骄傲地取自文献 [274]。

4.5 Rossiter-McLaughlin 效应

Rossiter-McLaughlin 效应 (RM 效应) 最早可能是被 Holt 于 1893 年预言并在双星中观测证实^[275]。后来 Rossiter 与 McLaughlin 分别详细描述了此过程，并且常常被引用为 RM 效应^[276,277]。在原理上如果一个天体遮挡住另一天体，那么背景天体的光谱的视向速度的蓝移与红移部分会分别被遮挡，从而造成视向速度在掩食内有如下振幅的波动：

$$\Delta V_{\text{RM}} = (R_p/R_s)^2 \sqrt{(1 - b^2)} v \sin i \quad (4-7)$$

其中 $(R_p/R_s)^2$ 约为凌星深度， b 为凌星最大时刻两天体之间的距离影响因子， $v \sin i$ 为主星的视向投影自转速度。图 4-6 所示为不同的 b 与 λ 参数下恒星视向速度的理论波动， λ 在系外行星领域被称作投影行星轨道法向与恒星自转轴夹角（后文统称自转—公转夹角），为观测测量可拟合量。前文提到的 Ψ 则为真实的自转—公转夹角，并且本文定义 $0 \leq |\Psi| < 90^\circ$ 为顺行 (prograde) 轨道， $90^\circ \leq |\Psi| < 180^\circ$ 则为逆行 (retrograde) 轨道。

系外行星第一颗被观测到 RM 效应的是 HD209458 系统^[278]，后来陆续有一大批 HJs 的凌星内 RM 效应被探测到，比如其中非常精确的例子 — HD 189733 (如图 4-7 所示)。在数量稀少的 HJs 系统中，大批量地测量 RM 效应对于研究其演化过程具有非常重要的作用（将被讨论于下文）。

4.6 热木星的自转轨道倾角

在已发现的约 370 颗 HJs 系统中，大约有 100 颗拥有 RM 效应测量数据^①。在 §4.3.1 中，我们曾提到 HJs 两种主要形成机制气体盘迁移与高偏心率迁移。而这两种形成过程能够产生截然不同的自转—公转夹角分布。对于传统的盘迁移模型，行星的轨道处于盘的平面内，而主星的自转轴向量 S 被认为和它们的星周盘相互平行，因而 Ψ 角应该比较小。当然，在一些特殊情况下 Ψ 也可能被激发，比如：恒星形成后期湍动分子云的内流导致盘平面改变^[279]、磁场—星周盘作用^[280] 以及伴星的扰动^[281]。在绝大部分情况下 Ψ 值应当比较小。相比之下，高偏心率迁移理论（如 Lidov-Kozai 效应）中，由于伴星的扰

^①<http://www.astro.keele.ac.uk/jkt/tepcat/rossiter.html>

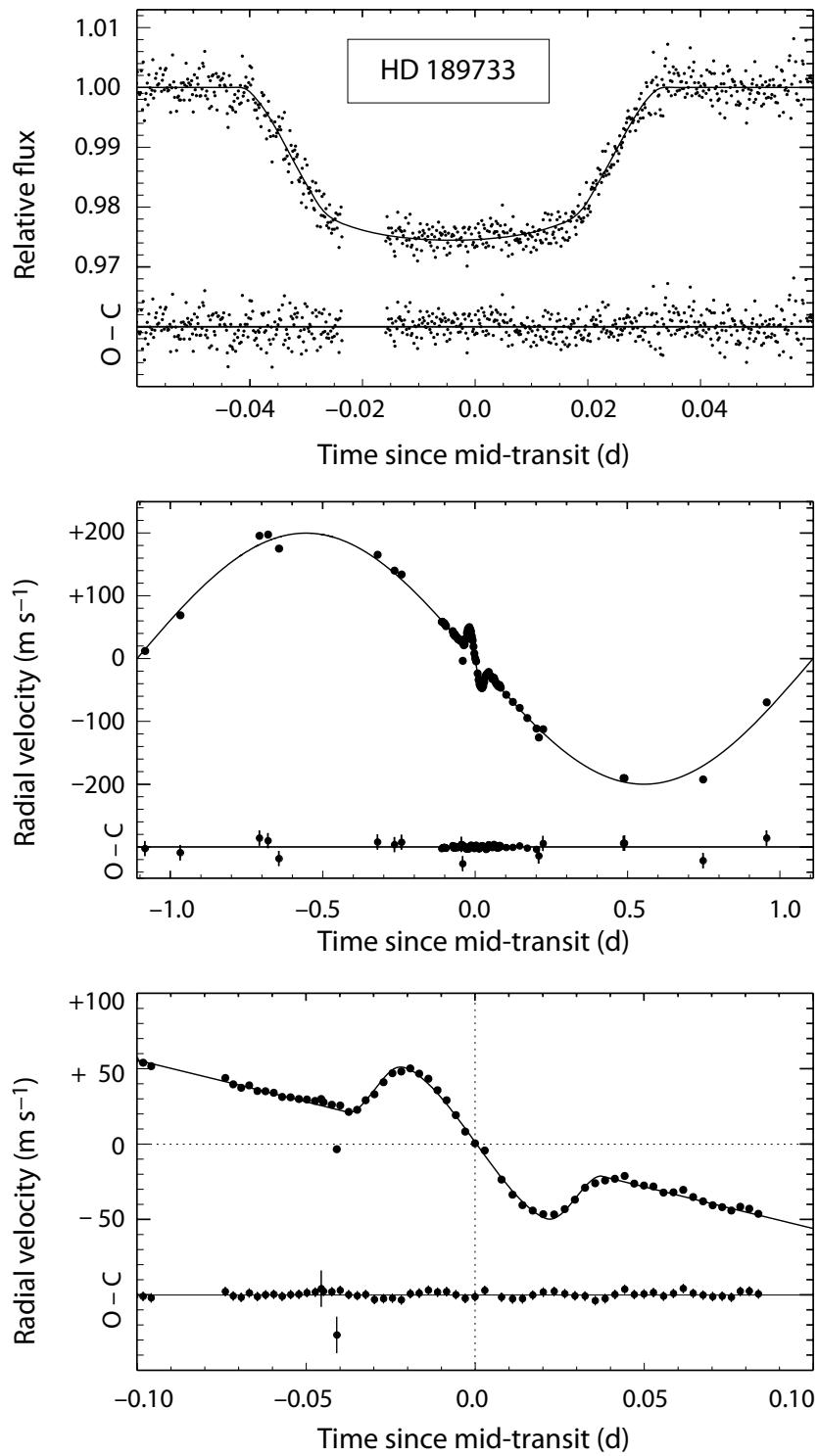


图 4-7: HD 189733 行星系统凌星内观测到的 RM 效应。上栏为凌星光变曲线，中栏为系统的 RV 曲线周期叠加图，而下栏则为凌星时刻内的 RM 效应，该图取自文献 [282]。

动，类木星的轨道倾角则会与偏心率一并大幅度震荡。这样 Ψ 的期望值应该在 $[0^\circ, 180^\circ]$ 之间随机分布。

随着越来越多 HJs 的 RM 效应被探测到，这两种理论也看似总算得以被区分开。Winn 等人于 2011 年发表了一篇对凌星 HJ 系统 RM 效应统计结果显示：类太阳恒星（GK type, $T_{\text{eff}} \lesssim 6250$ K）周围测量得到的 $\lambda \sim 0$ 。与之对应的，在偏热 F 型主星 ($T_{\text{eff}} \gtrsim 6250$ K) 的行星系统中，观测到的 HJs 轨道—自转投影倾角 λ 则在 0 到 π 之间几乎均匀分布，甚至还包括一些逆行的轨道（文献 [283]，另参见图 4-8）。Albrecht 随后便给出解释：由于有效温度较低的恒星拥有最外表的对流层，因而它们的潮汐因子 Q 较小，因此能有效的降低 Ψ 角^[284]，当然前提是初始的 Ψ 角随机分布（也因此说明 HJs 更倾向于通过高偏心率迁移模型形成）。

而对于 Albrecht 等使用的潮汐模型，正如前文（§4.4）所提到的，其中 Q 值的引入是一个参数化的模型。这样的模型依赖于类太阳恒星内部对流包层的「混合长」湍动粘滞理论，是通过不同星团中双星的圆化时标来估算得出^[273,285]，因而模型对类太阳的潮汐耗散率会由于对流层的存在而显著地增大（中等质量恒星的外表则为辐射包层）。在这样的平衡潮汐模型下，假设潮汐鼓包处于平衡态之内，那么 Ψ 以及 Ω_s 将会以相同的速率演化。而潮汐演化通常引来行星半长径 a 的演化。对于低质量恒星，其周围的木星公转轨道角速度 $n = 2\pi/P > \Omega_s$ ，因此木星将会转移角动量给主星，因而轨道会内迁。在 Albrecht 等人的理论中，此轨道内迁速度必须得慢于 Ψ 减小的速度。对于有效温度稍高的主星 ($\Omega_s > n$)，它们的角动量会转移给热木星，因此这类 HJs 必须在从距离主星半径 (R_s) 更近的位置演化^[286]。

为了解决这里的自转公转的共面演化与轨道退化时标问题，一些不同的理论也被相应地被提出，包括：（1）Lai 建议将动力学潮汐（dynamical tide）模型将 Ψ 的演化与平衡潮汐的演化区分开^[287]，也即除了处于流体静力学的平衡潮汐以外，内引力（internal gravity）与惯性波（inertial wave）同样可以在稍热恒星的内部被激发^[270,288,289]。此类机制的潮汐响应频率与振幅和热恒星内部的结构以及耗散机制有关^[289]。由于潮汐扰动频率不同，因而对应于轨道圆化、轨迹同步以及自转—公转同步演化的等效 Q 值可能会大不相同。甚至在某些 Ω_s/n 的特定取值下， Ψ 可在轨道几乎不变的同时衰减为零^[287]，类似的演化会将 Ψ 的分布集中在 $0^\circ, 90^\circ$ 与 180° 三个值附近^[286,290]，然而观测却没有相关的证据来符合此分布。（2）Dawson 于 2014 年提出类太阳恒星的磁阻尼（magnetic

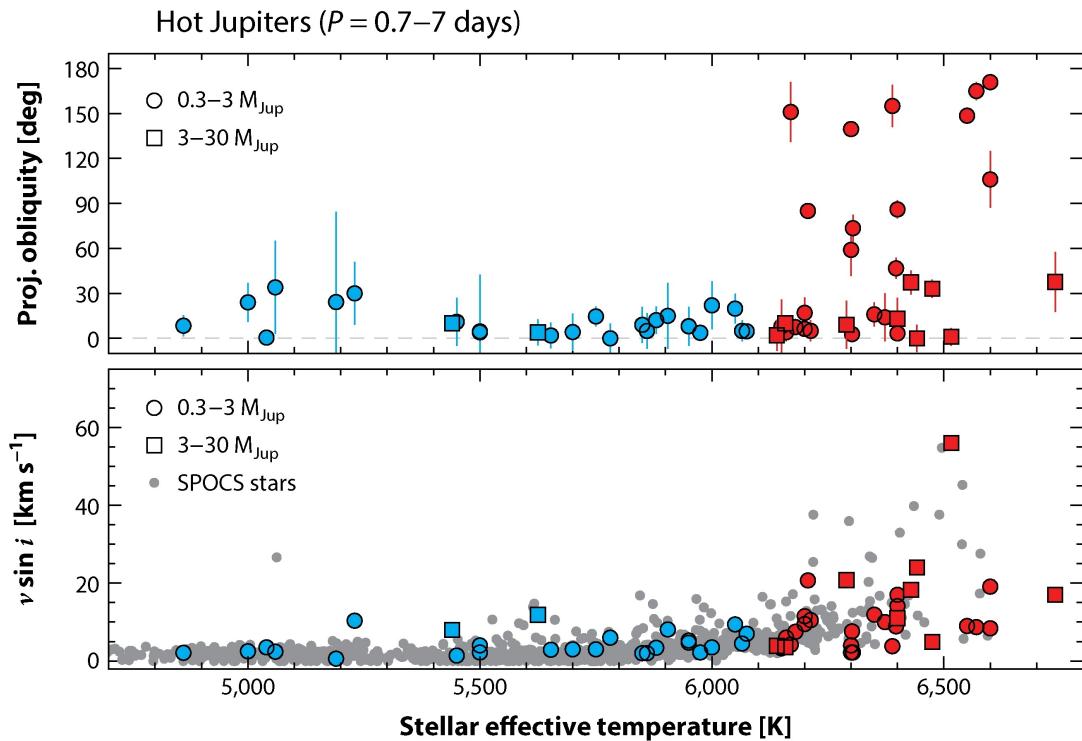


图 4-8：上栏为 HJs 的主星有效温度与投影自转—公转夹角 λ 的统计图，下栏为恒星的投影自转速度与有效温度的统计关系。可以看到有效温度较高的恒星明显拥有较大的自转速度，而这部分恒星正好对应几乎均匀分布的 λ 值。图片取自文献 [225]

breaking) 效应^[291] 会使得它们的自转角动量大大减小，因而 HJs 只需要很小部分的角动量即可使得恒星的自转与 HJs 公转指向一致。这样 HJs 的轨道半长径不会在 Ψ 被减小至零之前就小于恒星的半径（被主星吞噬）^[292]。

当然，前文我们提到高偏心率迁移并不是唯一能解决观测到的自转—轨道指向不一致的问题，然而这些机制中的 HJs 虽然可以通过盘的迁移达到主星附近几天周期的轨道，但是若想解释两种恒星中 Ψ 值的差异还是得需要引入潮汐。在这些理论中，唯一不依赖于潮汐耗散率的解释便是 Rogers 于 2012 年提出的理论：温度较高的恒星自转轴会由于内部重力波（internal gravity wave，简称 IGW）而被重新指向。由于中等质量的恒星外层为辐射包层，内核则对流的，而 IGWs 则能够在对流辐射层分界面上产生并且向外部传播截至于恒星的确表面并改变恒星外层的转动方向^[293,294]。在慢速自转的恒星中，此机制可以在观测中产生明显的非零 Ψ 值（即使初始值为零），而同样在低质量类太阳恒星中，此机制却不能被激发，因而可以解释观测中的两种恒星的 Ψ 统计分布。

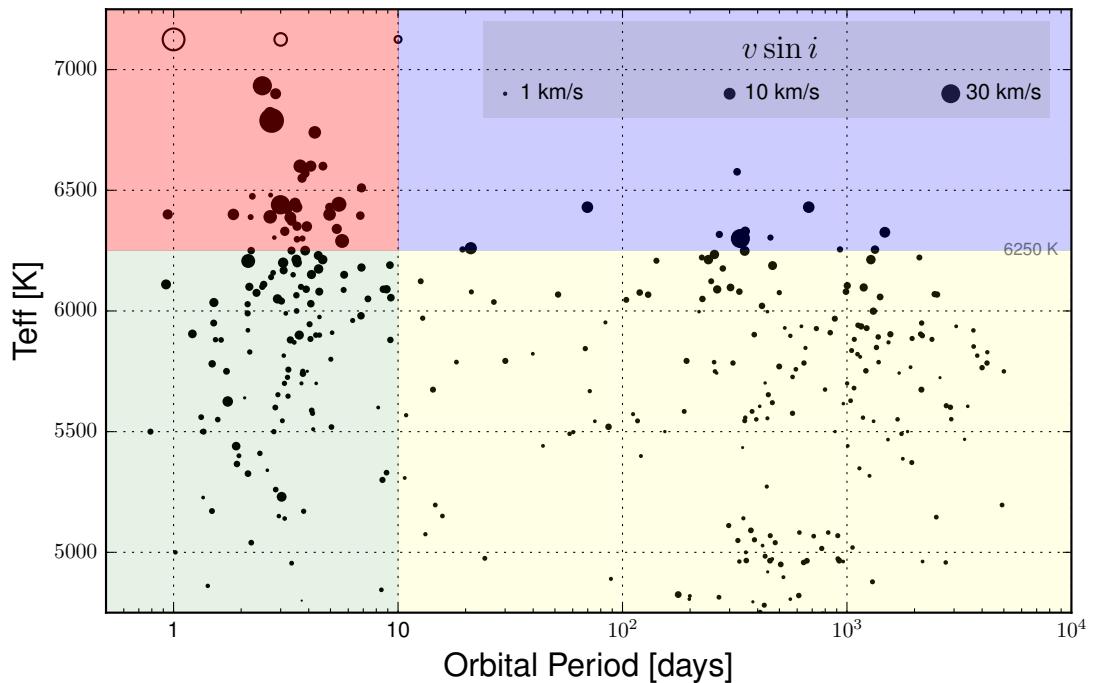


图 4-9: 已知系外气巨星的轨道周期与主星有效温度分布图, 点的大小正比于主星投影自转速度的对数。在此图的左上角分别标注了对应行星周期 P 为 1、3、10 天处, 一个太阳质量恒星的同步自转速度 V_s (分别为 50.6、16.8、5.0 km/s)。从图中可以看到大部分类太阳系统拥有 $\Omega_s < n$, 除了少部分较热恒星周围行星轨道角速度小于恒星自转速度, 此图中不同温度的恒星自转速度与行星周期的相关性应该为观测选择效应。

4.6.1 统计数据筛选

为了检验已有的相关理论, 本文利用本章开始所整合的 HJs 数据, 并且综合 RM 效应, 通过以下条件筛选现有数据以提供给后文分析:

1. 每个行星系统必须包括行星质量 (M_p) 或最小行星质量 ($M_p \sin i$)、轨道周期 (P) 或轨道半长径 (a) 这两类观测量。
2. 由于超级地球的质量并不足以通过潮汐来改变主星的自转性质, 因此我们将样本限制在大于土星质量的系外行星。
3. 该行星系统的宿主恒星必须有较好的质量 M_s 、半径 R_s 、有效温度 T_{eff} 以及投影自转速度 $v \sin i$ 的测量。
4. 每个上述物理量 ξ 需要拥有小于它测量值一半的误差, 即 $\Delta\xi \leq 0.5\xi$ 。

以上挑选后的数据在图 4-9 中被分成四种不同的类别: 较热恒星 ($T_{\text{eff}} > 6250$ K)、较冷类太阳恒星 ($T_{\text{eff}} < 6250$ K) 分别被短周期 ($P < 10$ 天)、长周期 ($P > 10$ 天) 的气巨行星环绕。本文将这四种不同类型的行星数目以及平

表 4-1: 按照主星性质分类下, 不同行星系统的统计数据

Regimes	Mean $v \sin i$ [km/s]	Number of systems
Hot star, Short period planet	16.7	38
Hot star, Long period planet	11.5	12
Cold star, Short period planet	4.5	129
Cold star, Long period planet	2.9	196

均恒星自转速度统计在列表 4-1 中, 它们分别为高温度短周期 (HS)、高温度长周期 (HL) 低温度短周期 (CS) 与低温度长周期 (CL)。热恒星在长周期上观测到的行星数目明显偏少是由于 RV 观测的选择效应导致的, 并且 RV 以及凌星都偏向于观测自转偏慢恒星周围的行星。在图中, 热恒星自转速度明显要快于冷恒星的自转 ($v \sin i - T_{\text{eff}}$) 则是因为有低质量恒星的星风磁阻尼效应^[291]。

4.6.2 行星公转—恒星自转潮汐演化

对于热木星系统而言, 系统的总角动量主要是由主星的自转角动量与行星轨道角动量组成的 (行星自己的自转角动量与主星绕质心公转的角动量均小两个量级以上, 因此可以忽略)。主星的自转角动量为

$$S = \gamma_s M_s R_s^2 \Omega_s , \quad (4-8)$$

其中 γ_s 为恒星转动惯量系数。行星的轨道角动量则为 $L = M_p n a^2$ (参见公式 4-3)。在潮汐力矩的作用下, 整个系统的总角动量 ($S + L$) 守恒, 因此可以得到恒星的自转角动量变化率与行星公转角动量变化率满足关系式 $\dot{J} = \dot{S}$ 。

不失一般性, 取 Ψ 为恒星自转与行星公转法向任意夹角, 行星对主星的平衡潮作用将会使得行星的轨道半长径、主星的自转与行星轨道法向角度以及主星的自转速度有如下变化

$$\dot{\Psi} = -\frac{L \sin \Psi f_\Psi(\Psi)}{2S_{\tau_e}} \quad (4-9a)$$

$$\frac{\dot{a}}{a} = -\frac{f_a(\Psi)}{\tau_e} \quad (4-9b)$$

$$\frac{\dot{\Omega}}{\Omega} = \frac{Lf_\Omega(\Psi)}{2S_{\tau_e}} \quad (4-9c)$$

其中 $f_\Psi(\Psi) = 1 - (\Omega_s/2n)(\cos \Psi - S/L)$, $f_a(\Psi) = 1 - (\Omega_s/n) \cos \Psi$, $f_\Omega(\Psi) = \cos \Psi - (\Omega_s/2n)(1 + \cos^2 \Psi)$ (文献 [271, 288, 295])。典型的潮汐演化时标则为:

$$\tau_e \equiv \left(\frac{Q_s}{3k_2} \right) \left(\frac{M_s}{M_p} \right) \left(\frac{a}{R_s} \right)^5 \left(\frac{P}{2\pi} \right) \quad (4-10)$$

在方程 4-10 中, 一般会采用 Goldreich 与 Stoer 的潮汐参数记号 $Q'_s \equiv 3Q_s/2k_2$, 其中 $k_2 = 1.5/(1 + \tilde{\mu})$, 且 $\tilde{\mu} = 19\mu/(2\rho_s g_s R_s)$ 为等效刚性系数, μ , ρ_s 和 g_s 则分别为主星的刚性系数、密度以及表面重力。

对于中等大小的 Ψ , 可有 $f_\Psi \approx 1 - (\Omega/2n)(1 - S/L)$, $f_a \approx f_\Omega \approx 1 - \Omega/n$ (精确到 Ψ 的二阶), 从而有

$$\tau_a \approx -\frac{L}{2S} \tau_\Omega \approx \frac{L}{2S} \frac{f_\Psi}{f_a} \tau_\Psi \quad (4-11a)$$

$$\tau_\Psi \approx -\frac{f_\Omega}{f_\Omega} \tau_\Omega \quad (4-11b)$$

其中我们定义 $\tau_a \equiv a/\dot{a}$, $\tau_\Omega \equiv \Omega/\dot{\Omega}_{s,t}$, $\tau_\Psi \equiv \Psi/\dot{\Psi}$ 为典型的行星轨道、恒星自转以及自转-公转夹角演化时标。

在本文内, 我们考虑了将不同系统的 Q'_s 值, 因为该参数依赖于何种湍动粘滞机制^[273,296,297]、内部结构^[298,299] 以及自转速率^[289,300] 密切相关。在弱摩擦近似下的平衡潮汐模型下, Q'_s 与潮汐强迫震动频率无关, 因而在处理 \dot{a} , $\dot{\Omega}_s$, $\dot{\Psi}$ 时并不需要加以区分, 因而 τ_a/τ_Ψ 也并依赖于 Q'_s 值的选择。

观测中, 大部分围绕低质量低温慢速自转类太阳恒星的 HJs 都满足 $n >$

Ω_s , 也即它们的公转同步自转半长径 $a_{cr} = (GM_s/\Omega_s^2)^{1/3} = (GM_s R_s^2/V_s^2)^{1/3}$, 加上符号后, $\tau_a (< 0)$, $\tau_\Omega (> 0)$ 以及 $\tau_\Psi (< 0)$ 分别对应于轨道收缩, 恒星自转加速和轨道自转同向。在这样的极限下 f_a, f_Ω 和 f_Ψ 均趋近于单位一, 与之对应的角动量比值 $L/2S$ 可从零取值到一。

进一步延伸公式 4-11 后, 可以得到对于快速自转的主星 ($L < 2S$) 周围的行星轨道会在自转—公转夹角演化前便显著收缩 ($\tau_a < \tau_\Omega, \tau_s$)。若要使得这部分在它如今的轨道上存活, 就必须要求半长径演化的时标 τ_a 能够大于或者与恒星的年龄相当 ($\tau_s \sim \tau_\odot$ 其中 $\tau_\odot = 4.6$ Gyr 为太阳如今的年龄), 也即

$$Q'_s > Q_{\text{orbit}} \equiv \frac{9\tau_s}{2} \frac{M_p}{M_s} \left(\frac{GM_s}{R_s^3} \right)^{1/2} \left(\frac{R_s}{a} \right)^{13/2}. \quad (4-12)$$

其中我们引入 Q_{orbit} 来指示过去行星轨道的平衡潮演化参数。这里我们将前文提到的恒星内部的耗散参数 Q'_s 全部记成 Q 以示美观。

然而另一方面, 对于缓慢自转的恒星 ($L > 2S$), 情况则会有所不同。这部分恒星的自转轴—行星的轨道法向夹角 Ψ 会有显著的演化, 尽管行星轨道并未发生变化 ($\tau_a > \tau_\Omega, \tau_s$)。对于这部分系统而言, 改变主星 Ω_s 或者 Ψ 则仅需要轨道少量变化即可。因而只有满足 $\tau_s > \tau_\Psi \simeq 2S\tau_e/L$ 的系统才能使得恒星自转与自转—轨道夹角有显著的演化 (参见公式 4-9), 也即对应于

$$Q'_s < Q_{\text{spin}} \equiv \frac{9GM_s\tau_s}{4\gamma_s R_s^2 V_s} \left(\frac{M_p}{M_s} \right)^2 \left(\frac{R_s}{a} \right)^6. \quad (4-13)$$

这里的 Q_{spin} 为过去主星自转 (以及自转—公转夹角) 的平衡潮演化参数, 其中公式 4-12 与公式 4-13 之间满足关系 $Q_{\text{spin}} = (L/2S)Q_{\text{orbit}}$ 。

对于满足 $L < 2S$ 的系统, 它们不可能在 HJs 的轨道不显著内缩的同时, 对主星的自转速度以及自转轴取向造成可观的改变量。相反当 $L > 2S$ 时, 我们便可找到对应的 Q'_s 来同时满足公式 4-12 与公式 4-13, 也即 $Q_{\text{orbit}} < Q'_s < Q_{\text{spin}}$ 。在此范围内热木星公转法向与主星自转轴方向可被潮汐趋同化。需要说明的是, 这里的条件和真实的恒星 Q 值并不相关。

在这两种情况之间, 我们可以计算得到自转—公转的临界值, 它定义为 $L = 2S$ 时, 主星的临界自转速率

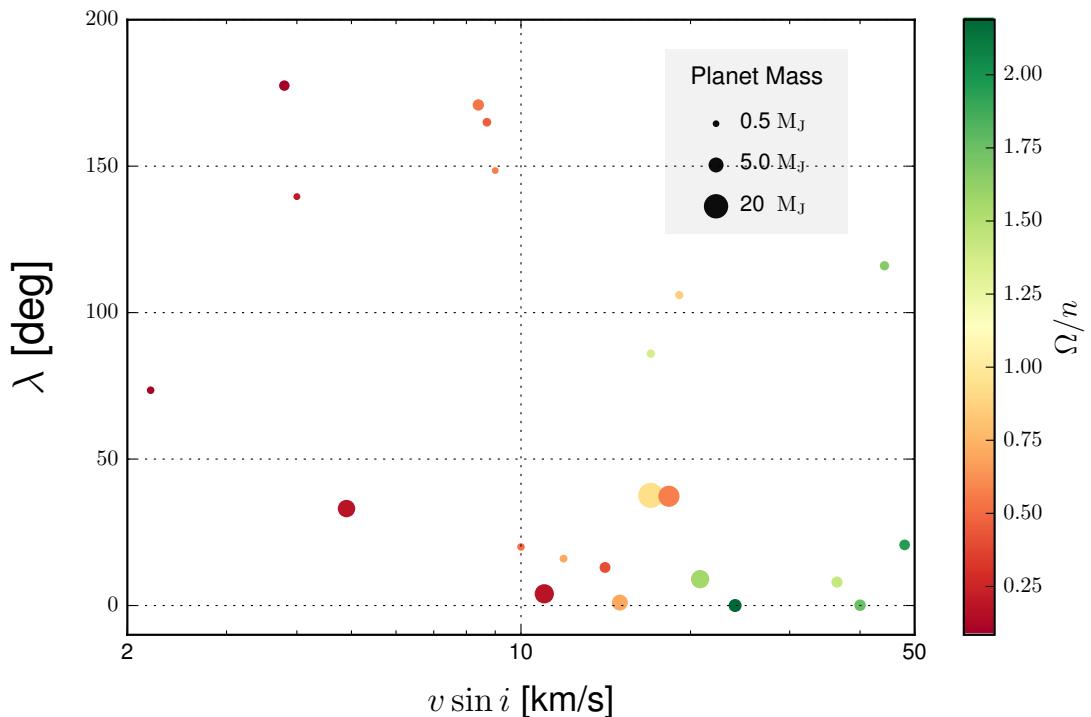


图 4-10: 所有中等质量恒星周围已知 λ (Ψ) 的 HJs 散点图。图中点的大小代表行星的质量 M_p , 颜色则代表 Ω/n 。可以看到自转偏慢的恒星反而拥有比较大的 λ 。而且图中至少有七个系统拥有 $\Omega > n$, 这代表了这些系统内行星轨道发生了外迁。

$$V_c \equiv M_p \sqrt{GM_s a} / (2\gamma_s m_s R_s). \quad (4-14)$$

对于在快速旋转恒星 ($\Omega_s > n$) 周围的行星, 若其轨道半长径满足 $a > a_{cr}$, 那么它将会接受来自恒星的角动量, 轨道也将扩张至当前观测的位置附近。而由于在方程 4-10 中 $\tau_a \propto \tau_e$ 是十分敏感依赖于 a 值的函数, 因此公式 4-13 能比较好限定当前主星的潮汐参数 Q 值。下面我们将对中等质量的恒星以及低质量类太阳恒星分别分析统计的结果。

4.6.3 中等质量恒星

首先我们将如上分析应用至热恒星中, 这部分恒星周围不太可能有很强的星风。在图 4-10 中, 我们将此类系统中观测到的 HJs 投影 Ψ 角 λ 和主星的有效温度分别画在纵轴与横轴上。在平衡潮汐的模型下, 红色的系统 ($\Omega_s < n$) 中行星轨道将会收缩, 而少数绿色的系统 ($\Omega_s > n$) 则会膨胀, 且这些快速自

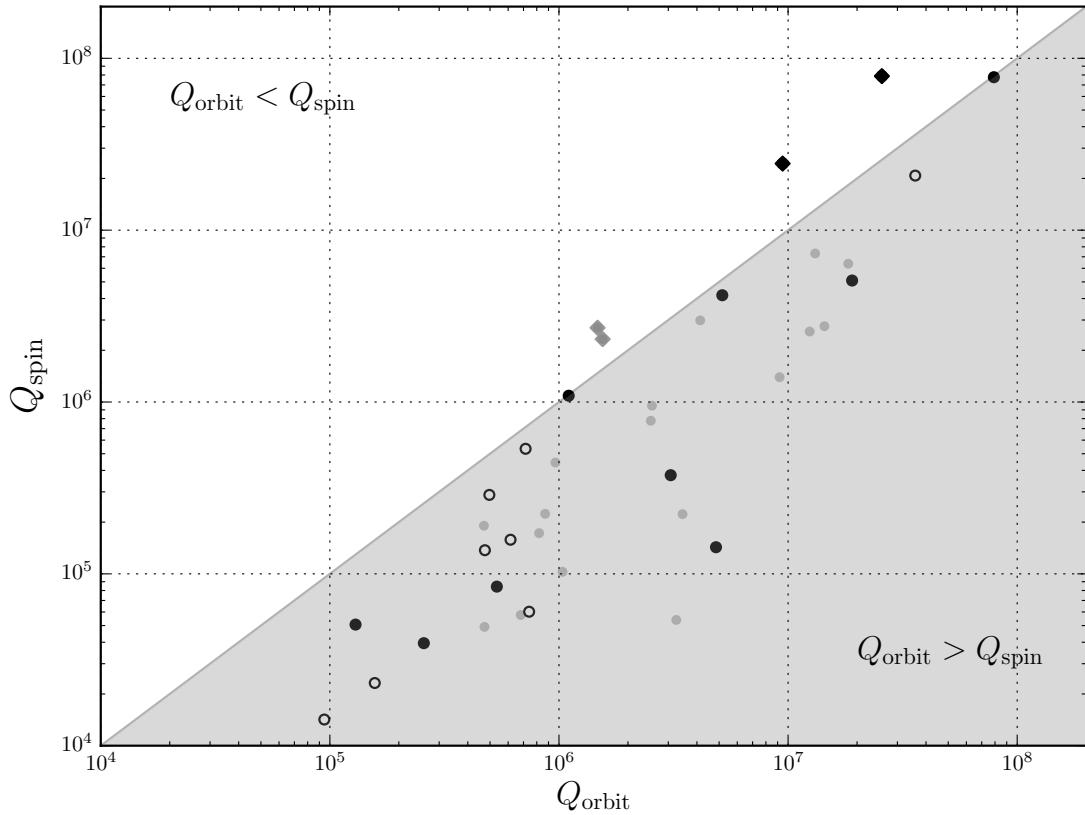


图 4-11：根据公式 4-12 与 4-13 计算得到的热恒星对应的临界 Q_{orbit} 与 Q_{spin} 值分布图。黑色的实心圆与空心圆分别代表自转轨道法向吻合 ($\lambda < 30^\circ$) 与不吻合 ($\lambda > 30^\circ$) 的系统，对于 $\Omega_s > n$ 的系统则用菱形来表示，灰色的点则表示没有 λ 的观测数据信息。

转系统的 Ψ 值相对较小。与此同时自转—公转高度不吻合的系统 (Ψ 值较大) 反而和自转偏慢的系统相关。在文献 [292] 的描述中，自转偏慢的恒星拥有较小的角动量，因此这些主星的自转轴应该会更容易受其行星的潮汐作用影响。从这些系统中发现的自转—公转不一致性和自转速度的反相关性和以往普遍认为的慢速自转恒星更容易受潮汐作用的影响是不自洽的^[286,301]。

同样这些系统的 Q_{orbit} 与 Q_{spin} (公式 4-12 和 4-13) 也被对应地画在图 4-11 中：黑色点 ($\Psi < 30^\circ$)，黑色空心点 ($\Psi > 30^\circ$) 以及灰色点标注的没有测量数据的系统。不失一般性，我们采取 $\tau_s \sim \tau_\odot = 4 \text{ Gyr}$ ，以及 $\gamma_s = 0.2$ 不同恒星这些值可能会有所差别，但是并不会让它们穿越对角线 ($Q_{\text{orbit}} = Q_{\text{spin}}$)。

如果潮汐能够在这些系统中起作用的同时行星也不会坠入主星内，那么主星的潮汐值参数 Q'_s 应该在区间 $Q_{\text{orbit}} < Q'_s < Q_{\text{spin}}$ 以内。从图中可以明显的看到大部分系统都落在了灰色区域 $Q_{\text{orbit}} > Q_{\text{spin}}$ 内，因而这些系统不能在不显著缩小轨道的同时，通过潮汐作用改变主星的自转取向（参见章节 §4.6.2）。

也有小部分系统处在 $L > 2S$ 的边界处，这样的系统都是快速自转的系统 ($\Omega_s > n$, 菱形的数据点)。对于这些系统，行星的轨道处于共转半长径以内，过去的潮汐作用只会导致该系统 $L/2S$ 的值增加。而 Q 也会随着时间的增长而增加（即过去恒星的 Q 值更小），因此过去这些系统的潮汐作用会更强。而从它们的 Ψ 偏大表示过去更强潮汐作用并没有在它们之中起主导作用。甚至有些系统的潮汐演化时标已经明显长于主星的年龄（在图 4-11 中 $Q \gtrsim 10^{6-8}$ ），这也进一步支持了行星与恒星之间的潮汐作用可能比双星之间的作用弱得多^[289]。

4.6.4 类太阳恒星

对于有效温度较低的类太阳主星，它们自转的速度明显小于上文提到的高温恒星（见图 4-9），这是因为此类恒星可通过星风来流失质量与损失原初角动量。这样的效应在观测上则一般引用文献 [302, 303] 中的经验公式来定量描述，具体形式如下

$$V_s \simeq V_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^{-1/2} \quad (4-15)$$

这里的 t_0 与 V_0 在本文分别取为 ≈ 1 Gyr 与 ≈ 4 km s⁻¹。在星风与潮汐的同时作用下^[292, 304]，对恒星自转速度影响的总效应则为： $\dot{\Omega}_s \simeq \dot{\Omega}_{s,t} + \dot{\Omega}_{s,w}$ ，其中 $\dot{\Omega}_{s,t}$ 为潮汐带来的自转变化率， $\dot{\Omega}_{s,w}$ 则为星风相应的贡献。利用公式 4-15，我们可以得到 $\dot{\Omega}_{s,w} = -\Omega_s^3 R_s^2 / 2t_0 V_0^2$ 。星风作用仅仅体现在减慢恒星的自转速度上，当自转速度衰减的同时，转速的变化率 $\dot{\Omega}_{s,t}$ 和 $\dot{\Omega}_{s,w}$ 也一并减少，直到最终 $\dot{\Omega}_s \approx 0$ 。在此情况下，所有的低质量恒星以及其热木星都会演化至星风与潮汐平衡的状态，也即 $\dot{\Omega}_{s,t} = -\dot{\Omega}_{s,w}$ 或者：

$$\frac{V_e}{V_0} \equiv \frac{\Omega_e R_s}{V_0} = \left(\frac{9GM_s t_0}{2\gamma_s Q'_s R_s^2 V_0} \right)^{1/3} \left(\frac{M_p}{M_s} \right)^{2/3} \left(\frac{R_s}{a} \right)^2. \quad (4-16)$$

假使 f_a, f_Ω 和 f_Ψ 接近单位一，那么不管是初始自转快过公转 ($L < 2S$) 的系统还是相反的 ($L > 2S$) 均可达到上述自转公转平衡态 $L = 2S$ 或者 $\Omega_s = 2\pi/P_{\text{orb}}$ ，前提是行星初始在公转自转同步半长径之内；即使对于 f_a, f_Ω 和 f_Ψ 不接近于一的状况，我们发现只要初始行星在该半长径之外，也可以达到该

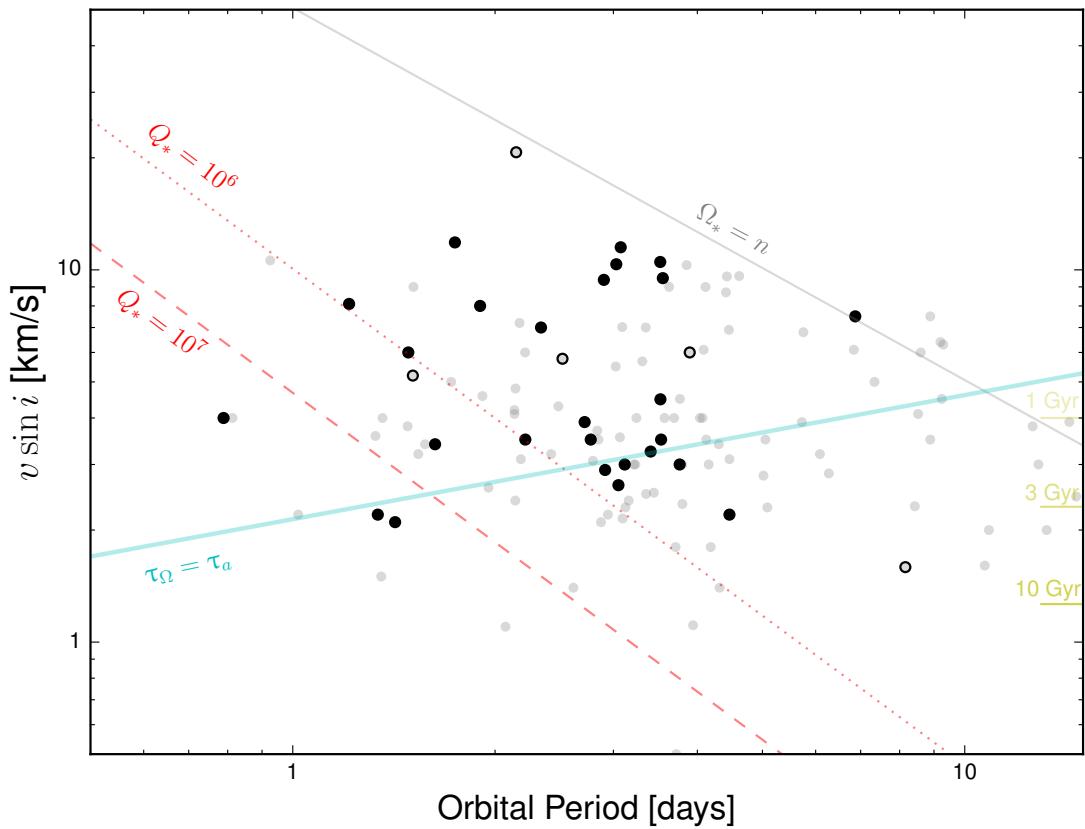


图 4-12: 类太阳主星与其热木星的 $v \sin i - P$ 图。由于这部分稍冷的恒星受星风与潮汐的同时影响，因此首先我们在右侧纵轴上分别标注了 V_s 在不同恒星年龄 ($\tau_s = 1, 3, 10$ Gyr, 见公式 4-15) 的值。灰色的实线代表类太阳恒星的旋同步曲线 ($\Omega_s = n$)，在此线的下方则表示行星的潮汐作用会使得行星的轨道收缩而恒星的自转加速。蓝色的实线表示 $L \approx 2S$ ，也即轨道演化时标与自转轴演化时标相当 ($\tau_a = \tau_\Psi$)。红色的虚线表示不同的恒星 Q 值下的潮汐星风平衡态（公式 4-16），点的标记和图 4-11 一致。

平衡态。因此无论如何，公式 4-16 都将带来两种最终的状态，即自转公转平衡态或者行星坠毁于主星之内。

虽然有了公式 4-16 来定定义最终星风、潮汐的合并演化态，但是某些年轻的恒星也许并不能达到上述状态。该时间在量级上约为 $t_0(V_0/V_e)^2$ ，因而对于这部分低质量恒星而言，既需要满足能够使得他们演化至平衡态（特别是 Ψ 角的演化），而且还要保证周围的行星能够被我们观测到。故从公式 4-13 出发，我们重新定义了自转状态的潮汐演化临界值如下：

$$Q'_s < Q_{\text{spin}} \equiv \left(\frac{9GM_s t_0}{4\gamma_s R_s^2 V_0} \right) \left(\frac{M_p}{M_s} \right)^2 \left(\frac{t}{\tau_s} \right)^{3/2} \left(\frac{R_s}{a} \right)^6. \quad (4-17)$$

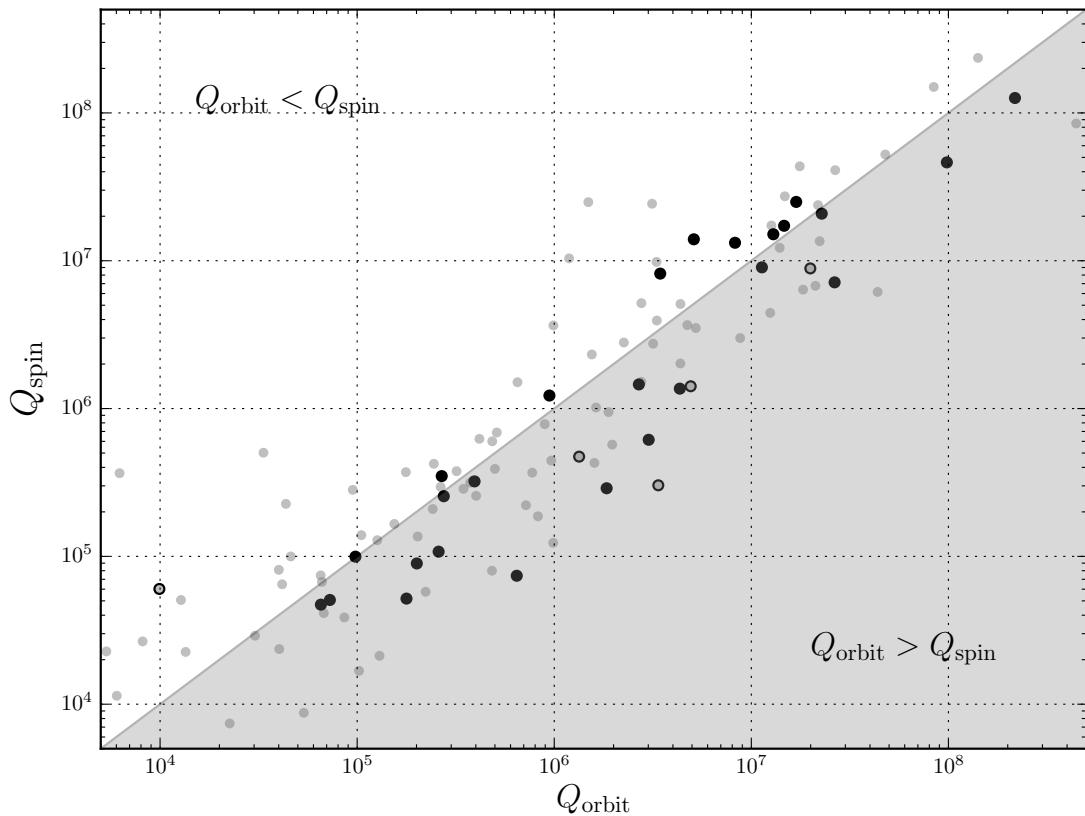


图 4-13: 与图 4-11 类似的, 此为低温恒星的 Q_{orbit} 与 Q_{spin} 分布图。我们对所有系统采用了 $\tau_s = 4 \text{ Gyr}$ 的恒星年龄, 该值的不确定度则会导致数据点朝着与对角线 ($Q_{\text{spin}} = Q_{\text{orbit}}$) 平行的方向平移。与热恒星周围类似的是, 这些系统不太可能在轨道显著变化的同时改变恒星的自转轴方向。

从而, 在恒星自转减速 ($Q_{\text{spin}} \propto t^{3/2}$) 的同时, 公式 4-17 也将变得越来越容易被满足, 因而此自转潮汐参数值为恒星真实值的上限。

我们将类太阳主星的自转速度 $v \sin i$ 与行星的周期 P 画在图 4-12 中, 点的含义与前文中图 4-11 中保持一致。首先可以看出来在这类系统中, 主星的自转速度与行星的周期并没有相关性。与热恒星相比, 这部分系统主星的自转速度明显首星风的影响而更小。然而尽管这些恒星的星风效应, 绝大部分系统依然在平衡状态之上 ($L = 2S$), 即这些行星在共转半径 (灰色线) 之内同时, $L < 2S$ 。由于这些行星在共转半径之内, 因此行星会持续不断的通过潮汐损失角动量来加速恒星自转 (以和星风抗衡), 从而轨道不断收缩直到主星内部。

另外该图右侧纵轴上不同年龄的星风损失率也说明了这一点, 可以看到在典型的太阳年龄 ($\tau_s \sim \tau_\odot \simeq 4 \text{ Gyr}$) 时刻, 星风对恒星角动量损失后的自转速

度值已经明显低于现如今观测到的绝大部分系统，这也说明了潮汐在此类系统中的确起到了一定的作用。然而折中潮汐作用并没有体现在对 Ψ 的演化上，因为并不能看到 $\Psi > 30^\circ$ 的实心黑点系统与空心黑点系统之间的系统性差异。所以，我们将此类系统的 Q_{orbit} 与 Q_{spin} 画在了图 4-13 中，可以看到大部分系统主星的潮汐演化 Q 参数并没有落在允许的区域 ($Q_{\text{orbit}} < Q_{\text{spin}}$) 内，这也说明了潮汐在对这些系统的演化起作用的期间，却无法从物理上同时允许自转—轨道也一起被影响。

4.6.5 总结与讨论

自转—公转夹角的测量为我们打开了一扇新的检验热木星形成机制的窗口。在对于热木星究竟是通过盘迁移模型还是高偏心率迁移的模型而形成的争辩上，双方均各执一词。如图 4-14 所示，从传统的行星形成模型出发，行星系统的轨道角动量方向一般被认为与原初行星盘的方向一致，并且恒星自转轴也一同取向。这在冷恒星周围看到了，但是在热恒星周围却明显不一致 ($\Psi > 0$)。其中一种理论解释认为无论对于那种恒星，由于它们周围的热木星的形成过程为高偏心率迁移过程，因此它们周围行星的初始 Ψ 角总是随机分布在空间内，但由于潮汐作用在低质量恒星（对流外包层）的耗散效率要比在中等质量恒星（辐射外包层）大得多，因而才会有如此的观测现象^[284]。但是从图 4-11 和 4-13 中我们发现：

1. 没有任何迹象表明 $\Psi - Q_{\text{spin}}$ 具有潮汐效应导致的相关性。因为潮汐作用较强的系统 ($Q < Q_{\text{spin}}$) 并没有与 Ψ 接近于零的系统呈现相关。
2. 绝大多数系统在图中的「禁区」，即 $Q_{\text{orbit}} > Q_{\text{spin}}$ 。在半平衡潮模型下，这些系统 Ψ 的演化时标要远大于 a 的时标 ($\tau_a < \tau_\Psi$)，这些系统的行星在完成对主星自转轴的重新潮汐化指向时轨道已经演化至小于主星半径的轨道上。而且对于少部分沿着对角线 ($Q_{\text{orbit}} = Q_{\text{spin}}$) 的系统，它们的 Q 值也是有很大的弥散，因此不能用同样一个潮汐参数来描述所有的系统。
3. 对于大部分观测到了热木星的系统，正说明它们的主星的潮汐参数 Q 的值会在 10^{4-8} 之间分布。这样的分布与主星的有效温度没有必然关联。并且处于轨道同步轨道以内 ($\Omega < n$) 的系统，当前观测到的行星位置极有可能不是它们的最终潮汐演化的结果^[305]。本文得到的 Q_{orbit} 只是该系统的最小可能值。对于处于轨道同步之外的热木星系统，由于它们向外迁移，因此此 Q_{orbit} (10^{6-8}) 则为观测值上限。这样的估算值也与 WASP-12 b 和 HATS-18

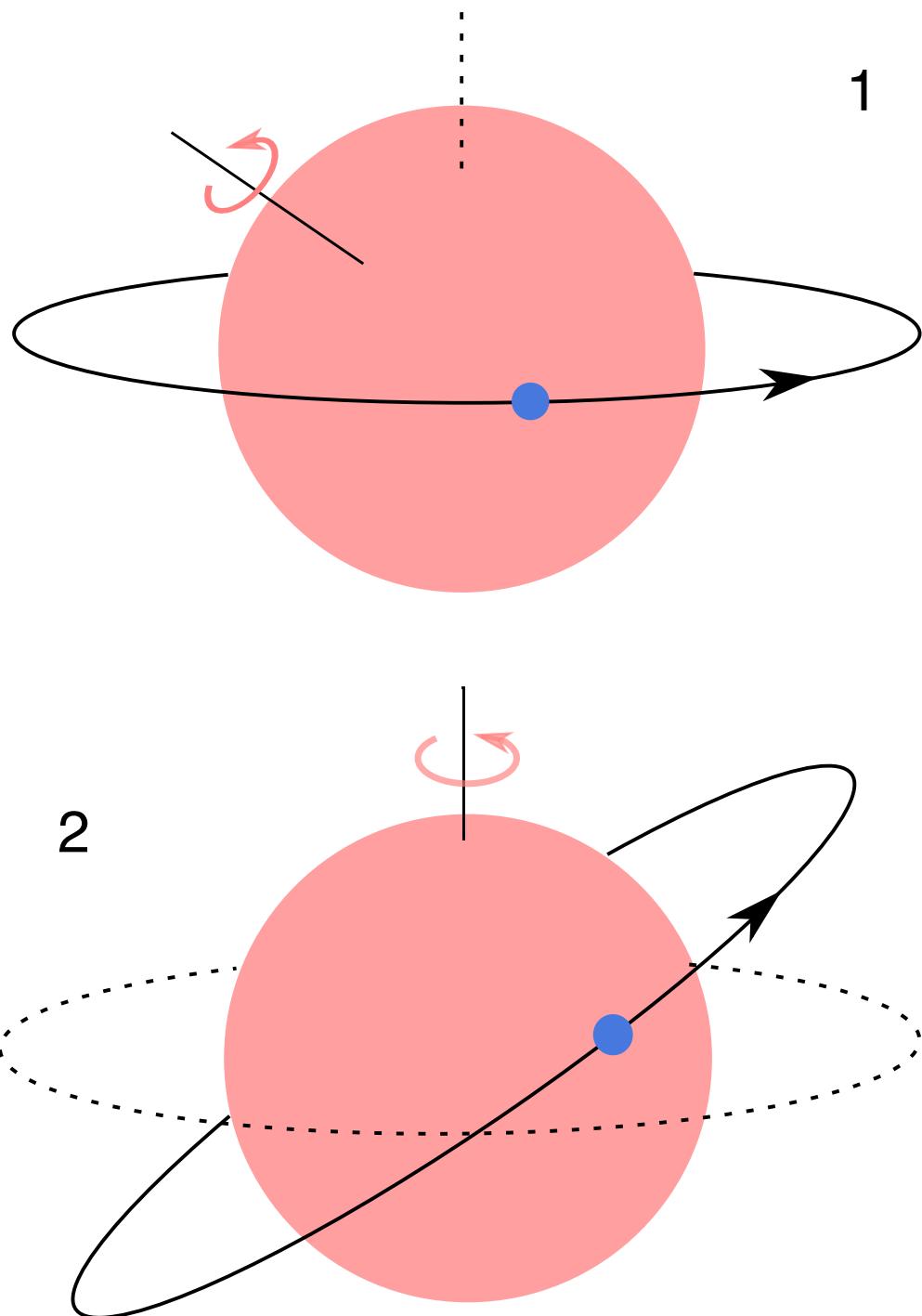


图 4-14: 自转—轨道的指向两种主流解释的示意图。1. 行星轨道取向与主星的自转角动量均保持在原初角动量的位置，有效温度较高的主星的自转轴通过 IGW 激发并改变取向，从而导致观测中的非零 Ψ 角，该理论中的 HJs 往往通过盘迁移而形成，且不依赖于潮汐耗散；2. 行星公转与主星的自转在形成时保持一致，然而由于高偏心率迁移过程中行星的轨道取向被改变，从而导致类太阳恒星系统中有效的潮汐耗散而重新将 Ψ 角减小。

b 的轨道周期变化率估算得到的 Q 值相符合^[306,307]。

在我们的计算中，并没有考虑恒星自转速度中的 i 带来的简并。恒星的年龄也只假定为统一值，类太阳恒星的星风作用弥散度也未考虑。 γ_s 对热恒星影响并不大，但是在类太阳恒星的内部可能会最多差至一个量级。虽然如此，在测量恒星自转轴^[308] 以及 Ψ 角度的绝对值上，星震学可能会大有作为^[309,310]，而测光中黑子与行星的互掩^[311–313] 以及恒星自转效应如引力昏暗^[314,315] 也会对打破这些值的角度简并大有用武之地。

值得一提的是，Mazeh 于 2015 年发现类太阳恒星周围的长周期行星也拥有比较一致的自转与轨道法向取向^[316]。而在潮汐作用中，能量耗散与角动量转移的强度十分依赖于行星的半长径 a ，因此高偏心率迁移理论以及后续的潮汐作用并不能解释此类系统。另外对于热木星周围的伴星存在肯可能性，一些巡天显示在这些 HJs 系统周围并没有找到额外的行星级或恒星级伴星^[317,318]。在这样的背景下，也许 Triaud 于 2010 年提出高偏心率迁移来解释这类系统并不必定可取^[319]。

而对于图 4-14 中第二种解释机制^[293]，并不要求潮汐在产生公转—自转不重叠上起主导作用，因此也是非常有前景的解释。比如 Triana 近期提出通过星震学探测由于 IGW 产生的较差自转现象，纬度方向上的较差自转和自转轴指向的变化也同样可能在这些热木星系统的主星上被探测到^[320]。

第五章 总结与展望

... the ways by which men arrive at
knowledge of the celestial things are
hardly less wonderful than the nature
of these things themselves

Johannes Kepler

5.1 更丰富的行星样本

在短短二十年内，系外行星领域在仪器方面可谓发生了质的飞跃，新发现的系统也一次又一次地打翻了以往我们对于行星陈旧的认知。可我们在系外行星这条探索之路上才刚刚启程，下一步科学研究依旧得依赖更多与更深的挖掘。在仪器方面，传统的视向速度依然在稳步中不断提高仪器的谱分辨率与可靠度（如 TESS^[321] 与 PLATO^[322]）以尝试去发现更多的中长周期行星，这包括温木星（warm Jupiter）以及更长周期的冷木星。其中对温木星的探测与刻画是通往解释它们自身以及热木星形成的必经之路^[323–328]。在目前形成热木星的机制中，盘迁移能够解释低偏心率以及处于共振的系统，偏心率较中等的系统则往往只能通过行星—行星散射形成，而更高偏心率的则很可能正处于强烈的潮汐圆化过程。如何区分不同的机制以及温木星究竟是不是失败的热木星，都是非常值得探究的问题。这群特殊的木星在解开行星形成密钥的同时，也对恒星的演化有着重要的暗示，具体请见 § 5.2）。

再者，利用已知行星系统去寻找发现质量更小的超级行星也十分有趣。类似 WASP-47 这样的系统在观测中又究竟还有多少遗漏，而小质量行星的信号到底会不会被掩埋在已存在巨行星的 RV 信号中呢？这些问题必须得联合利用多观测手段同时查漏来解答，比如 *Gaia* 卫星的天体测量数据可用来解除拟合参数中轨道倾角 i 与真实质量的简并^[329]，并且在探测一些处于共振的行星系统也有独特的优势^[330]。

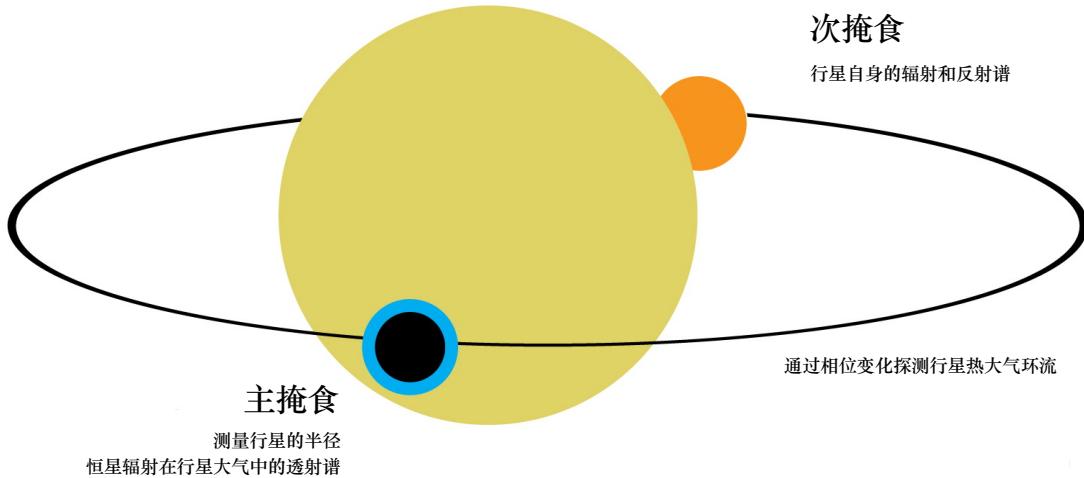


图 5-1：凌星探测法对行星物理性质的后续观测示意图。从主掩食（Transit）到次掩食（Occultation）可以分别看到行星大气随着相位变化以及行星大气所蕴含的半径和大气成分等重要信息。图片版权 Sara Seager。

相比之下，凌星法在探测系外行星的密度，表层大气环流以及压强温度垂直分布轮廓有着独特的先机（如图 5-1），直接成像法亦可直接测量行星的光谱。如今这部分系统只有三十颗行星成功利用 *Spitzer* 与 *Hubble* 观测到其高层大气结构和垂直温度分布，如系统 HD 189733 b^[331]。利用凌星法测得的行星半径与 RV 得到的质量还可以初步限定行星的密度（如图 5-2）。对诸多天体研究^[332,333] 显示从恒星级天体到类地行星，质量与半径的关系呈现出截然不同的指数系数：

$$R \propto \begin{cases} M & \text{恒星} \\ M^{-1/8} & \text{褐矮星} \\ M^{1/10} & \text{气巨行星} \\ M^{1/3} & \text{类地行星} \end{cases} \quad (5-1)$$

这些关系恰恰可以反映行星内部的成分以及物态方程^[334]。同样的，超级地球中大气与固体组成构造的差别也将能很好的解释类似超级地球等「过渡型」行星究竟是失败的气巨星（mini Neptune）还是大个头的地球^[103,335]（super Earth），这也能帮助我们了解超级地球在原行星盘中的形成地点和演化吸积过程^[336,337]。

除了研究这些特殊的行星之外，另一个更重要的目标就是将行星质量探测下限延伸至类地行星甚至系外卫星。目前系外卫星探测率至今仍为零^[338]，

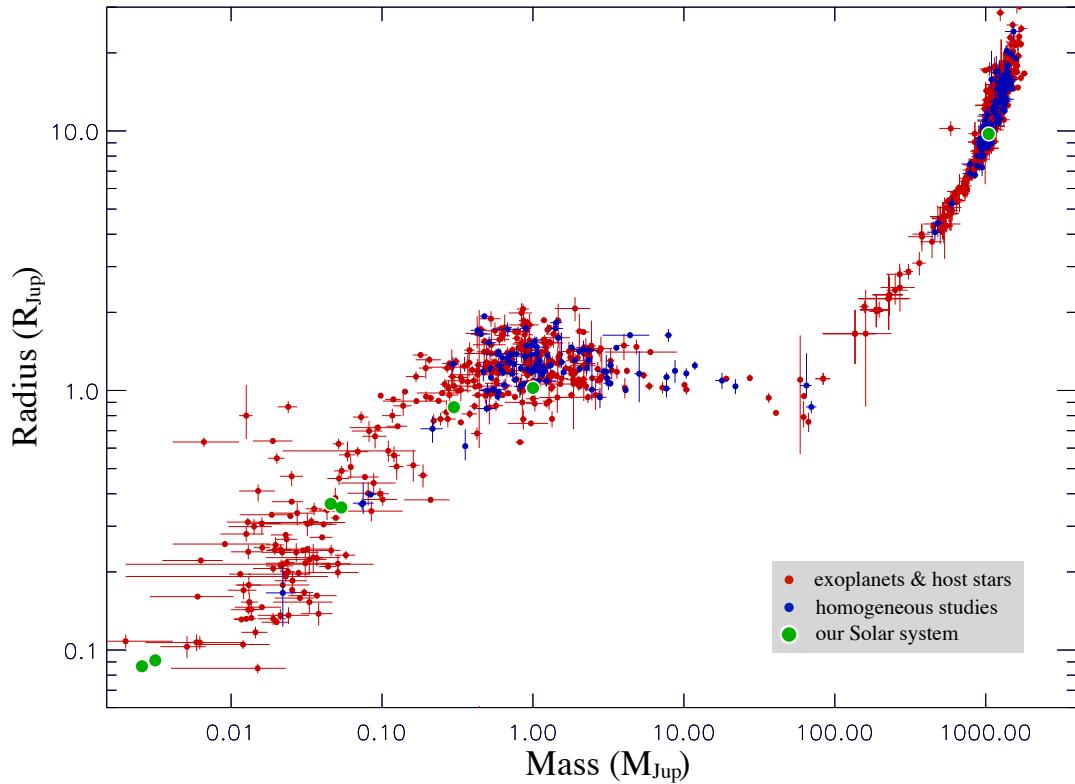
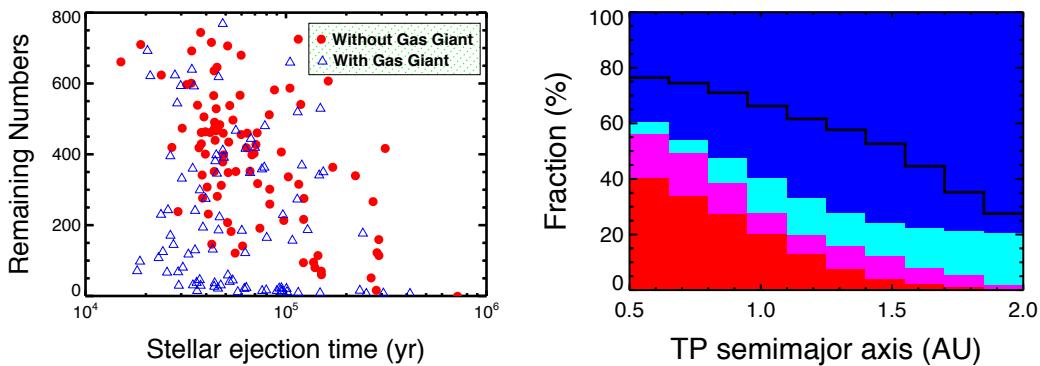


图 5-2: 凌星法探测的行星的质量与半径关系图（包括其主星）。从恒星、矮星到气态巨行星与类地行星半径质量关系呈现处的不同变化向我们反映了它们内部结构与物质状态的不同。此图数据源自网站 TEPCat。

而在探测极限允许的条件下，这很可能与主星的光致蒸发与动力学作用相关^[339]。探测地球质量与大小的行星对于技术而言非常具有挑战性，比如类太阳主星的 P 模震荡以及表面米粒组织所引起的 Doppler Jitter 能直接掩盖等同类地行星造成的 RV 振幅。正因为通往发现类太阳周围的类地行星任务非常艰巨，从而许多未来的科学目标均广泛集中在 M 型矮星周围，甚至太阳系内更外围的第九大行星^[340]。

5.2 全局的行星系统演化

作为行星原材料的摇篮，恒星以及诞生恒星的分子云和周边的星际空间在支配恒星以及后续的行星演化有着至关重要的作用。一些研究显示不同的质量以及金属丰富的主星会对其中行星出现的概率和质量其决定性因素^[233]，比如 M 型矮星周围的气巨星形成率会偏低，而类地行星则正好相反^[85,96,137]，而随着恒星质量的增加大质量行星出现的概率也会偏大，比如对于巨星和亚巨星分



(a) 恒星发生不稳定的时标对于行星系统内行星的存活率造成的影响。图中三角形表示质量为零的测试粒子 (Testing Particle, TP) 情况，而红色圆点则表示在系统中加入一颗木星质量的行星后木星的存活对 TPs 的影响。

(b) 在不同半长径下红色（气巨星逃逸, TPs 存活）、紫色（气巨星 TPs 均存活）、浅蓝色（气巨星存活, TPs 逃逸）与深蓝色（气巨星与 TPs 均逃逸）的概率。黑色线则表示未添加气巨星, TPs 的存活比例。

图 5-3: 恒星在多星系统中的形成环境对行星系统的影响：三星系统由于三体不稳定性会导致其中两颗恒星发生密近交汇，这种剧烈的动力学过程会导致行星系统发生不稳定性，此效应更会对恒星周围其他的行星如类地行星产生恶性连锁反应，因而气巨星对类地行星存在几乎是种灾难。

支，这类恒星周围更容易观测到大质量行星^[341]。但与此同时，巨星周围的短周期热木星出现的概率却又偏少（共 99 个系外行星处于巨星周围，其中周期小于 10 天的却只有 2 颗^①）。这很可能是因为主星半径膨胀后潮汐作用将行星吞噬后的演化结果^[342,343]。

此外，在双星或者多星系统环境中行星形成过程和对类地行星的影响也不可小觑^[344]。太阳系内木星与地球可以同时存活，可是在双星系统中（如图 5-3 所示）情况却大有不同，在三体不稳定模型下^[345]，由于混沌效应，行星产生的概率明显随着恒星的交汇次数以及时间而减小，同样若行星系统中存在类似木星的长周期行星，那么将对内行星系统造成更强的摧毁效应，而且散射至外围的行星也可能是环双星行星候选体的一种形成机制^[346]。

随着恒星与行星系统的演化，灾难在所难免。比如在白矮星周围，光谱观测看到了其表面的重金属污染^[347]，这样的污染很可能因为行星系统被潮汐撕裂后留下的残骸撞击中心致密性导致的^[348,349]。对于一些紧密间隔的行星系统，行星的不稳定时标大大缩短^[116,120,350]，而就连太阳系内长期演化后都可能导致各大行星之间的不稳定性发生，从而造成轨道交错以致最后彼此互相摧毁，化为碎屑^[351,352]。

^①<https://www.lsw.uni-heidelberg.de/users/sreffert/giantplanets/giantplanets.php>

5.3 具现代化的范式转换

当今的科学是一项重任，取之于民同时用之于民。全民参与以为着新的时代已经悄然到来（Citizen Science），其中 Zooniverse^① 旗下的 Planet Hunters 已经发表了十二篇文章，包括第一篇被认证的系外行星（参见文献 [353]）。更多计划也提供了额外能够让人们参与进来的提议，包括命名系外行星^② 以及其它越来越丰富的可能性^[354,355]。在软件层面，整合源代码网站 ASCL^③ 以及越来越多建立在 Python 之上的开发工具也在极大程度上降低了数据分析的门槛，如 Astropy^④ 与 Rebound^⑤。

另外利用机器学习（machine learning）分析以及深度挖掘数据（data mining）也将会在天文领域有相应的一席之地^[356–358]。若要结合大数据（big data）来反馈到系外行星领域，星族合成方法（population synthesis）也许是最能够还原众多系外行星集体性质与演化的途径之一^[359,360]。

5.4 细致刻画单个系统

随着样本的增多，统计结果越来越丰富。然而如若想清楚地知道行星是否可能存在生命，我们还得通过研究刻画单个系统的宜居性来得出结论。在 HEC 列表^⑥ 中，总共也列出约 50 颗的潜在宜居行星（habitable exoplanets），那么我们究竟该如何定义宜居性^[361]，而宜居性又是否与行星本身的质量、温度、大气与液态水、其他行星以及主星的活动之间（尤其是 M 型恒星）有必然关联^[362–364]? 其中包括对距离我们最近的行星系统 Proxima Centauri b 的主星、伴星、行星性质以及空间天气环境对宜居性的讨论（参见 [365] 以及其引用文献）。

而为了得到更精确的行星内部结构，未来则可通过分析太阳系内气巨星以及类地行星的深层内部结构以及 USPs 或者 HJs 来了解其它行星的性质。此外系外生命的存在信号（即系外生物信号，biosignature）以及她们的存在是否真的依赖类似地球大气中的 O₂ 等等。这些问题或许都值得去等待诸如 James

^①<https://www.zooniverse.org>

^②<http://nameexoworlds.iau.org/>

^③<http://ascl.net/>

^④<http://www.astropy.org/>

^⑤<https://github.com/hannorein/rebound>

^⑥<http://phl.upr.edu/projects/habitable-exoplanets-catalog>

Webb Space Telescope (JWST) 卫星的发射来揭晓，系外行星科学在下一个纪元的里程碑也许就在前方的迷雾之中。

致 谢

感谢我的导师 — 南京大学周济林教授。「世有伯樂，然後有千里馬。千里馬常有，而伯樂不常有」。周老师处处为人师表，万事皆与人为善，平日视学生如己出，为课题组包括我提供了诸多机遇和资源。尤记大三下学期的天体力学基础课，周老师风采奕奕、旁征博引，令台下皆无不酣畅淋漓，有幸我能同与之。感激能得周老师的信任与栽培，我才能开启系外行星研究这扇大门。平日，他坚定不移地让我遨游于宽松自在的科研环境中，又同时对科研无处不严谨细致。所谓「以銅為鏡，可以正衣冠；以史為鏡，可以知興衰；以人為鏡，可以知得失」。周老师的指导与恩泽，我定将永铭于心，秉承光扬。

感谢我的联合导师 Douglas Lin, Alice Quillen 与周旭老师，是她们的细心指导让我明白了科研并非一蹴而就，多注重积累与思维方能有为。她们更在我举目无亲之时对我生活关爱照顾，感激涕零，将爱予之。在读博之初，正因有谢基伟副教授的入门指导，我才能飞速地学到新知识，充实了本硕交界的关键时期。同样，如若没有同组孙义遂院士，张辉副教授、刘慧根副教授的指导；陈媛媛、杨佳祎、王颖、王松虎等师姐师兄的讨论，王楠、杨明等同学的照应与吴东红、余周毅、梁恩思等学妹学弟的陪伴，我应当难以完成这段研究生时光。感谢学院所有科研人员与行政人员悉心对待我读博期间发生的大小琐事。同样，也感谢部分天文同行在本人博士期间提供的帮助与讨论，正是这种交流才能带来不倦的灵感火花。

另外，本文作者感谢其父母在计划生育政策下毅然绝然地将我诞生到人世间，才不至错失人间的种种。谢谢我的两位姐姐以及我的伴侣，我爱你们赤忱如灿星。与此同时，也要感谢所有的亲朋好友，郑重地对你们一如既往的支持说声谢谢。最后，感谢此论文模板 NJU-Thesis 的开发者胡海星。

另附上文致谢中未提及名字的人员详细清单（与本人接触先后排序）如下：宗玉凤、孟彩安、孟红梅、孟红珠、孟慧正、孟淑芬、孟惠敏、陈鹏、丁伟、童希、徐斌、陆鹏、冯小春、李彦哲、梁钊宁、胡一鸣、向俊夫、张宁潇、张迪衡、张津维、王凯、白云高、高宇翔、呼延宗泊、刘逸清、花玉龙、宋彧、杨艳、郝奇、侯锡云、吴伟、顾秋生、宋晨晖、郭艳、王鑫、周鑫、王平、赵刚、王素、宫衍香、李道海、Rob Wittenmyer、王子逸、欧建文、Serafini John、Cameron Bell、伍业刚、Areeya Chantasri、Manuel Aguilar、王崇旭、Cassius Ellis、Alice Chi、Laura Lorber、Terri Quint、Ramez Malek、张晓佳、张曦、王卓骁、Florence Koh、Thomas Trio、Lesley Harrison、Alex Santana、Mark Vee、宋禹、吴沛刚、苏湘宁、陈迪昌、朱佳鹏、王奇等。感谢她们在我博士期间给予的各类支持、关心与照顾。

参考文献

- [1] 宣煥灿. 天文学史 [M]. [S.l.]: 北京高等教育出版社, 1992.
- [2] Wikipedia contributors. 天文学家 [EB/OL]. Wikipedia, The Free Encyclopedia, 2015 [2017/02/12].
https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_astronomers.
- [3] COPERNICUS N. De revolutionibus orbium coelestium[EB]. Johannes Pe-
treius, 1543.
- [4] BRUNO G. De l'Infinito, Universo e Mondi[EB]. 1584.
- [5] Woolf N, Angel J R. Astronomical Searches for Earth-Like Planets and Signs of
Life[J/OL]. ARA&A, 1998, 36 : 507 – 538.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.astro.36.1.507>.
- [6] Stern A, Mitton J. Pluto and Charon: Ice Worlds on the Ragged Edge of the Solar
System[M]. 2005.
- [7] Baraffe I, Chabrier G, Barman T S, et al. Evolutionary models for cool brown
dwarfs and extrasolar giant planets. The case of HD 209458[J/OL]. A&A, 2003,
402 : 701 – 712.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20030252>.
- [8] Jacob W S. On certain Anomalies presented by the Binary Star 70 Ophi-
uchi[J/OL]. MNRAS, 1855, 15 : 228.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/15.9.228>.
- [9] Moulton F R. The limits of temporary stability of satellite motion, with an ap-
plication to the question of the existence of an unseen body in the binary system
70 Ophiuchi[J/OL]. AJ, 1899, 20 : 33 – 37.
<http://dx.doi.org/10.1086/103096>.

- [10] van de Kamp P. Astrometric study of Barnard's star from plates taken with the 24-inch Sproul refractor.[J/OL]. AJ, 1963, 68 : 515 – 521.
<http://dx.doi.org/10.1086/109001>.
- [11] Struve O. Proposal for a project of high-precision stellar radial velocity work[J]. The Observatory, 1952, 72 : 199 – 200.
- [12] Latham D W, Stefanik R P, Mazeh T, et al. The unseen companion of HD114762 - A probable brown dwarf[J/OL]. Nature, 1989, 339 : 38 – 40.
<http://dx.doi.org/10.1038/339038a0>.
- [13] Wolszczan A, Frail D A. A planetary system around the millisecond pulsar PSR1257 + 12[J/OL]. Nature, 1992, 355 : 145 – 147.
<http://dx.doi.org/10.1038/355145a0>.
- [14] Walker G A H, Walker A R, Irwin A W, et al. A search for Jupiter-mass companions to nearby stars.[J/OL]. Icarus, 1995, 116 : 359 – 375.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1995.1130>.
- [15] Mayor M, Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star[J/OL]. Nature, 1995, 378 : 355 – 359.
<http://dx.doi.org/10.1038/378355a0>.
- [16] Borucki W J, Koch D, Basri G, et al. Kepler Planet-Detection Mission: Introduction and First Results[J/OL]. Science, 2010, 327 : 977.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1185402>.
- [17] Perryman M. The Exoplanet Handbook[M]. 2014.
- [18] Udry S, Mayor M, Clausen J V, et al. The CORALIE survey for southern extrasolar planets. X. A Hot Jupiter orbiting HD 73256[J/OL]. A&A, 2003, 407 : 679 – 684.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20030815>.
- [19] Eggenberger A, Mayor M, Naef D, et al. The CORALIE survey for southern extrasolar planets. XIV. HD 142022 b: a long-period planetary companion in a wide binary[J/OL]. A&A, 2006, 447 : 1159 – 1163.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20053720>.

- [20] Tamuz O, Ségransan D, Udry S, et al. The CORALIE survey for southern extra-solar planets. XV. Discovery of two eccentric planets orbiting <ASTROBJ>HD 4113</ASTROBJ> and <ASTROBJ>HD 156846</ASTROBJ>[J/OL]. *A&A*, 2008, 480 : L33–L36.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20078737>.
- [21] Perryman M. Resource Letter Exo-1: Exoplanets[J/OL]. *American Journal of Physics*, 2014, 82 : 552–563.
<http://dx.doi.org/10.1119/1.4830455>.
- [22] Murphy M T, Udem T, Holzwarth R, et al. High-precision wavelength calibration of astronomical spectrographs with laser frequency combs[J/OL]. *MNRAS*, 2007, 380 : 839–847.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2007.12147.x>.
- [23] Seager S. *Exoplanets*[M]. 2010.
- [24] Henry G W, Marcy G W, Butler R P, et al. A Transiting “51 Peg-like” Planet[J/OL]. *ApJL*, 2000, 529 : L41–L44.
<http://dx.doi.org/10.1086/312458>.
- [25] Charbonneau D, Brown T M, Latham D W, et al. Detection of Planetary Transits Across a Sun-like Star[J/OL]. *ApJL*, 2000, 529 : L45–L48.
<http://dx.doi.org/10.1086/312457>.
- [26] Alonso R, Brown T M, Torres G, et al. TrES-1: The Transiting Planet of a Bright K0 V Star[J/OL]. *ApJL*, 2004, 613 : L153–L156.
<http://dx.doi.org/10.1086/425256>.
- [27] McCullough P R, Stys J E, Valenti J A, et al. The XO Project: Searching for Transiting Extrasolar Planet Candidates[J/OL]. *PASP*, 2005, 117 : 783–795.
<http://dx.doi.org/10.1086/432024>.
- [28] Bakos G Á, Noyes R W, Kovács G, et al. HAT-P-1b: A Large-Radius, Low-Density Exoplanet Transiting One Member of a Stellar Binary[J/OL]. *ApJ*, 2007, 656 : 552–559.
<http://dx.doi.org/10.1086/509874>.

- [29] Pollacco D L, Skillen I, Collier Cameron A, et al. The WASP Project and the SuperWASP Cameras[J/OL]. *PASP*, 2006, 118 : 1407 – 1418.
<http://dx.doi.org/10.1086/508556>.
- [30] Barge P, Baglin A, Auvergne M, et al. Transiting exoplanets from the CoRoT space mission. I. CoRoT-Exo-1b: a low-density short-period planet around a G0V star[J/OL]. *A&A*, 2008, 482 : L17 – L20.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:200809353>.
- [31] Gaia Collaboration, Prusti T, de Bruijne J H J, et al. The Gaia mission[J/OL]. *A&A*, 2016, 595 : A1.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201629272>.
- [32] Seager S, Deming D. Exoplanet Atmospheres[J/OL]. *ARA&A*, 2010, 48 : 631 – 672.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081309-130837>.
- [33] Marois C, Zuckerman B, Konopacky Q M, et al. Images of a fourth planet orbiting HR 8799[J/OL]. *Nature*, 2010, 468 : 1080 – 1083.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature09684>.
- [34] Marois C, Macintosh B, Barman T, et al. Direct Imaging of Multiple Planets Orbiting the Star HR 8799[J/OL]. *Science*, 2008, 322 : 1348.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1166585>.
- [35] Kalas P, Graham J R, Chiang E, et al. Optical Images of an Exosolar Planet 25 Light-Years from Earth[J/OL]. *Science*, 2008, 322 : 1345.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1166609>.
- [36] Lagrange A-M, Bonnefoy M, Chauvin G, et al. A Giant Planet Imaged in the Disk of the Young Star β Pictoris[J/OL]. *Science*, 2010, 329 : 57.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1187187>.
- [37] Chauvin G, Lagrange A-M, Dumas C, et al. Giant planet companion to 2MASSW J1207334-393254[J/OL]. *A&A*, 2005, 438 : L25 – L28.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:200500116>.

- [38] Macintosh B, Graham J R, Ingraham P, et al. First light of the Gemini Planet Imager[J/OL]. *Proceedings of the National Academy of Science*, 2014, 111: 12661–12666.
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1304215111>.
- [39] Einstein A. Lens-Like Action of a Star by the Deviation of Light in the Gravitational Field[J/OL]. *Science*, 1936, 84: 506–507.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.84.2188.506>.
- [40] Mao S, Paczynski B. Gravitational microlensing by double stars and planetary systems[J/OL]. *ApJL*, 1991, 374: L37–L40.
<http://dx.doi.org/10.1086/186066>.
- [41] Udalski A, Paczynski B, Zebrun K, et al. The Optical Gravitational Lensing Experiment. Search for Planetary and Low-Luminosity Object Transits in the Galactic Disk. Results of 2001 Campaign[J]. *AcA*, 2002, 52: 1–37.
- [42] Bond I A, Udalski A, Jaroszyński M, et al. OGLE 2003-BLG-235/MOA 2003-BLG-53: A Planetary Microlensing Event[J/OL]. *ApJL*, 2004, 606: L155–L158.
<http://dx.doi.org/10.1086/420928>.
- [43] Ford E B, Rowe J F, Fabrycky D C, et al. Transit Timing Observations from Kepler. I. Statistical Analysis of the First Four Months[J/OL]. *ApJS*, 2011, 197: 2.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/197/1/2>.
- [44] Xie J-W. Transit Timing Variation of Near-resonance Planetary Pairs: Confirmation of 12 Multiple-planet Systems[J/OL]. *ApJS*, 2013, 208: 22.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/208/2/22>.
- [45] Silvotti R, Schuh S, Janulis R, et al. A giant planet orbiting the ‘extreme horizontal branch’ star V391 Pegasi[J/OL]. *Nature*, 2007, 449: 189–191.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature06143>.
- [46] Murphy S J, Bedding T R, Shibahashi H. A Planet in an 840 Day Orbit around a Kepler Main-sequence A Star Found from Phase Modulation of Its Pulsar

- tions[J/OL]. ApJL, 2016, 827 : L17.
<http://dx.doi.org/10.3847/2041-8205/827/1/L17>.
- [47] Holman M J, Murray N W. The Use of Transit Timing to Detect Terrestrial-Mass Extrasolar Planets[J/OL]. Science, 2005, 307 : 1288 – 1291.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1107822>.
- [48] Perryman M A C. Extra-solar planets[J/OL]. Reports on Progress in Physics, 2000, 63 : 1209 – 1272.
<http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/63/8/202>.
- [49] Spitzer L. Physical processes in the interstellar medium[M/OL]. 1978.
<http://dx.doi.org/10.1002/9783527617722>.
- [50] Lequeux J. The Interstellar Medium[M/OL]. 2005.
<http://dx.doi.org/10.1007/b137959>.
- [51] Andre P, Ward-Thompson D, Barsony M. From Prestellar Cores to Protostars: the Initial Conditions of Star Formation[J]. Protostars and Planets IV, 2000 : 59.
- [52] Armitage P J. Astrophysics of Planet Formation[M]. 2010 : 294.
- [53] Armitage P J. Lecture notes on the formation and early evolution of planetary systems[J]. ArXiv Astrophysics e-prints, 2007.
- [54] Pringle J E. Accretion discs in astrophysics[J/OL]. ARA&A, 1981, 19 : 137 – 162.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.aa.19.090181.001033>.
- [55] Johnstone D, Hollenbach D, Bally J. Photoevaporation of Disks and Clumps by Nearby Massive Stars: Application to Disk Destruction in the Orion Nebula[J/OL]. ApJ, 1998, 499 : 758 – 776.
<http://dx.doi.org/10.1086/305658>.
- [56] Hollenbach D, Johnstone D, Lizano S, et al. Photoevaporation of disks around massive stars and application to ultracompact H II regions[J/OL]. ApJ, 1994, 428 : 654 – 669.
<http://dx.doi.org/10.1086/174276>.

- [57] Shakura N I, Sunyaev R A. Black holes in binary systems. Observational appearance.[J]. *A&A*, 1973, 24 : 337 – 355.
- [58] Gammie C F. Layered Accretion in T Tauri Disks[J/OL]. *ApJ*, 1996, 457 : 355.
<http://dx.doi.org/10.1086/176735>.
- [59] Jr Haisch K E, Lada E A, Lada C J. Disk Frequencies and Lifetimes in Young Clusters[J/OL]. *ApJL*, 2001, 553 : L153 – L156.
<http://dx.doi.org/10.1086/320685>.
- [60] Williams J P, Cieza L A. Protoplanetary Disks and Their Evolution[J/OL]. *ARA&A*, 2011, 49 : 67 – 117.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081710-102548>.
- [61] Hernández J, Hartmann L, Megeath T, et al. A Spitzer Space Telescope Study of Disks in the Young σ Orionis Cluster[J/OL]. *ApJ*, 2007, 662 : 1067 – 1081.
<http://dx.doi.org/10.1086/513735>.
- [62] Weidenschilling S J. The distribution of mass in the planetary system and solar nebula[J/OL]. *Ap&SS*, 1977, 51 : 153 – 158.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF00642464>.
- [63] Hayashi C. Structure of the Solar Nebula, Growth and Decay of Magnetic Fields and Effects of Magnetic and Turbulent Viscosities on the Nebula[J/OL]. *Progress of Theoretical Physics Supplement*, 1981, 70 : 35 – 53.
<http://dx.doi.org/10.1143/PTPS.70.35>.
- [64] Ida S, Lin D N C. Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. I. A Desert in the Mass and Semimajor Axis Distributions of Extrasolar Planets[J/OL]. *ApJ*, 2004, 604 : 388 – 413.
<http://dx.doi.org/10.1086/381724>.
- [65] Dullemond C P, Dominik C. Dust coagulation in protoplanetary disks: A rapid depletion of small grains[J/OL]. *A&A*, 2005, 434 : 971 – 986.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20042080>.

- [66] Beuther H, Klessen R S, Dullemond C P, et al. Protostars and Planets VI[J/OL]. *Protostars and Planets VI*, 2014.
http://dx.doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816531240.
- [67] Weidenschilling S J, Spaute D, Davis D R, et al. Accretional Evolution of a Planetesimal Swarm[J/OL]. *Icarus*, 1997, 128 : 429–455.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1997.5747>.
- [68] Blum J, Wurm G. The Growth Mechanisms of Macroscopic Bodies in Proto-planetary Disks[J/OL]. *ARA&A*, 2008, 46 : 21–56.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.astro.46.060407.145152>.
- [69] Safronov V S. Evolution of the protoplanetary cloud and formation of the earth and planets.[M]. 1972.
- [70] Goldreich P, Ward W R. The Formation of Planetesimals[J/OL]. *ApJ*, 1973, 183 : 1051 – 1062.
<http://dx.doi.org/10.1086/152291>.
- [71] Youdin A N, Shu F H. Planetesimal Formation by Gravitational Instability[J/OL]. *ApJ*, 2002, 580 : 494 – 505.
<http://dx.doi.org/10.1086/343109>.
- [72] Chiang E, Youdin A N. Forming Planetesimals in Solar and Extrasolar Nebulae[J/OL]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2010, 38 : 493 – 522.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-earth-040809-152513>.
- [73] Greenberg R, Hartmann W K, Chapman C R, et al. Planetesimals to planets - Numerical simulation of collisional evolution[J/OL]. *Icarus*, 1978, 35 : 1 – 26.
[http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(78\)90057-X](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(78)90057-X).
- [74] Kokubo E, Ida S. On Runaway Growth of Planetesimals[J/OL]. *Icarus*, 1996, 123 : 180 – 191.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1996.0148>.
- [75] Rafikov R R. The Growth of Planetary Embryos: Orderly, Runaway, or Oligarchic?[J/OL]. *AJ*, 2003, 125 : 942 – 961.
<http://dx.doi.org/10.1086/345971>.

- [76] Lissauer J J. Planet formation[J/OL]. *ARA&A*, 1993, 31 : 129 – 174.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.aa.31.090193.001021>.
- [77] Mizuno H. Formation of the Giant Planets[J/OL]. *Progress of Theoretical Physics*, 1980, 64 : 544 – 557.
<http://dx.doi.org/10.1143/PTP.64.544>.
- [78] Bodenheimer P, Pollack J B. Calculations of the accretion and evolution of giant planets The effects of solid cores[J/OL]. *Icarus*, 1986, 67 : 391 – 408.
[http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(86\)90122-3](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(86)90122-3).
- [79] Pollack J B, Hubickyj O, Bodenheimer P, et al. Formation of the Giant Planets by Concurrent Accretion of Solids and Gas[J/OL]. *Icarus*, 1996, 124 : 62 – 85.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1996.0190>.
- [80] Chambers J E, Wetherill G W. Making the Terrestrial Planets: N-Body Integrations of Planetary Embryos in Three Dimensions[J/OL]. *Icarus*, 1998, 136 : 304 – 327.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1998.6007>.
- [81] Walsh K J, Morbidelli A, Raymond S N, et al. A low mass for Mars from Jupiter's early gas-driven migration[J/OL]. *Nature*, 2011, 475 : 206 – 209.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature10201>.
- [82] Morbidelli A, Levison H F, Tsiganis K, et al. Chaotic capture of Jupiter's Trojan asteroids in the early Solar System[J/OL]. *Nature*, 2005, 435 : 462 – 465.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature03540>.
- [83] Gomes R, Levison H F, Tsiganis K, et al. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets[J/OL]. *Nature*, 2005, 435 : 466 – 469.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature03676>.
- [84] Raymond S N, O'Brien D P, Morbidelli A, et al. Building the terrestrial planets: Constrained accretion in the inner Solar System[J/OL]. *Icarus*, 2009, 203 : 644 – 662.
<http://dx.doi.org/10.1016/j.icarus.2009.05.016>.

- [85] Cumming A, Butler R P, Marcy G W, et al. The Keck Planet Search: Detectability and the Minimum Mass and Orbital Period Distribution of Extrasolar Planets[J/OL]. PASP, 2008, 120 : 531.
<http://dx.doi.org/10.1086/588487>.
- [86] Rowan D, Meschiari S, Laughlin G, et al. The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: HD 32963 – A New Jupiter Analog Orbiting a Sun-like Star[J/OL]. ApJ, 2016, 817 : 104.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/817/2/104>.
- [87] Kuiper G P. On the Origin of the Solar System[J/OL]. Proceedings of the National Academy of Science, 1951, 37 : 1 – 14.
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.37.1.1>.
- [88] Cameron A G W. Physics of the primitive solar accretion disk[J/OL]. Moon and Planets, 1978, 18 : 5 – 40.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF00896696>.
- [89] Boss A P. Giant planet formation by gravitational instability.[J/OL]. Science, 1997, 276 : 1836 – 1839.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.276.5320.1836>.
- [90] Durisen R H, Boss A P, Mayer L, et al. Gravitational Instabilities in Gaseous Protoplanetary Disks and Implications for Giant Planet Formation[J]. Protostars and Planets V, 2007 : 607 – 622.
- [91] Haghighipour N. Super-Earths: a new class of planetary bodies[J/OL]. Contemporary Physics, 2011, 52 : 403 – 438.
<http://dx.doi.org/10.1080/00107514.2011.598370>.
- [92] Batalha N M, Rowe J F, Bryson S T, et al. Planetary Candidates Observed by Kepler. III. Analysis of the First 16 Months of Data[J/OL]. ApJS, 2013, 204 : 24.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/204/2/24>.
- [93] Guillot T. THE INTERIORS OF GIANT PLANETS: Models and Outstanding Questions[J/OL]. Annual Review of Earth and Planetary Sciences, 2005, 33 :

- 493–530.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.earth.32.101802.120325>.
- [94] Lissauer J J, Ragozzine D, Fabrycky D C, et al. Architecture and Dynamics of Kepler's Candidate Multiple Transiting Planet Systems[J/OL]. ApJS, 2011, 197 : 8.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/197/1/8>.
- [95] Terquem C, Papaloizou J C B. Migration and the Formation of Systems of Hot Super-Earths and Neptunes[J/OL]. ApJ, 2007, 654 : 1110 – 1120.
<http://dx.doi.org/10.1086/509497>.
- [96] Kennedy G M, Kenyon S J. Planet Formation around Stars of Various Masses: Hot Super-Earths[J/OL]. ApJ, 2008, 682 : 1264 – 1276.
<http://dx.doi.org/10.1086/589436>.
- [97] Ida S, Lin D N C. Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. V. Accumulation Near the Ice Line and Super-Earths[J/OL]. ApJ, 2008, 685 : 584 – 595.
<http://dx.doi.org/10.1086/590401>.
- [98] Laughlin G, Bodenheimer P, Adams F C. The Core Accretion Model Predicts Few Jovian-Mass Planets Orbiting Red Dwarfs[J/OL]. ApJL, 2004, 612 : L73 – L76.
<http://dx.doi.org/10.1086/424384>.
- [99] Kennedy G M, Kenyon S J, Bromley B C. Planet Formation around Low-Mass Stars: The Moving Snow Line and Super-Earths[J/OL]. ApJL, 2006, 650 : L139 – L142.
<http://dx.doi.org/10.1086/508882>.
- [100] Hansen B M S, Murray N. Testing in Situ Assembly with the Kepler Planet Candidate Sample[J/OL]. ApJ, 2013, 775 : 53.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/775/1/53>.

- [101] Chiang E, Laughlin G. The minimum-mass extrasolar nebula: in situ formation of close-in super-Earths[J/OL]. *MNRAS*, 2013, 431 : 3444–3455.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stt424>.
- [102] Boss A P. Rapid Formation of Super-Earths around M Dwarf Stars[J/OL]. *ApJL*, 2006, 644 : L79–L82.
<http://dx.doi.org/10.1086/505533>.
- [103] Lissauer J J, Dawson R I, Tremaine S. Advances in exoplanet science from Kepler[J/OL]. *Nature*, 2014, 513 : 336–344.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature13781>.
- [104] Borucki W J, Koch D G, Basri G, et al. Characteristics of Planetary Candidates Observed by Kepler. II. Analysis of the First Four Months of Data[J/OL]. *ApJ*, 2011, 736 : 19.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/736/1/19>.
- [105] Fabrycky D C, Lissauer J J, Ragozzine D, et al. Architecture of Kepler's Multi-transiting Systems. II. New Investigations with Twice as Many Candidates[J/OL]. *ApJ*, 2014, 790 : 146.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/790/2/146>.
- [106] Lithwick Y, Wu Y. Resonant Repulsion of Kepler Planet Pairs[J/OL]. *ApJL*, 2012, 756 : L11.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/756/1/L11>.
- [107] Lee M H, Fabrycky D, Lin D N C. Are the Kepler Near-resonance Planet Pairs due to Tidal Dissipation?[J/OL]. *ApJ*, 2013, 774 : 52.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/774/1/52>.
- [108] Batygin K, Morbidelli A. Dissipative Divergence of Resonant Orbits[J/OL]. *AJ*, 2013, 145 : 1.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/145/1/1>.
- [109] Baruteau C, Papaloizou J C B. Disk-Planets Interactions and the Diversity of Period Ratios in Kepler's Multi-planetary Systems[J/OL]. *ApJ*, 2013, 778 : 7.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/778/1/7>.

- [110] Delisle J-B, Laskar J, Correia A C M. Resonance breaking due to dissipation in planar planetary systems[J/OL]. *A&A*, 2014, 566 : A137.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201423676>.
- [111] Chatterjee S, Ford E B. Planetesimal Interactions Can Explain the Mysterious Period Ratios of Small Near-Resonant Planets[J/OL]. *ApJ*, 2015, 803 : 33.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/803/1/33>.
- [112] Marcy G W, Butler R P, Fischer D, et al. A Pair of Resonant Planets Orbiting GJ 876[J/OL]. *ApJ*, 2001, 556 : 296–301.
<http://dx.doi.org/10.1086/321552>.
- [113] Rivera E J, Laughlin G, Butler R P, et al. The Lick-Carnegie Exoplanet Survey: a Uranus-Mass Fourth Planet for GJ 876 in an Extrasolar Laplace Configuration[J/OL]. *ApJ*, 2010, 719 : 890–899.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/719/1/890>.
- [114] Kley W, Nelson R P. Planet-Disk Interaction and Orbital Evolution[J/OL]. *ARA&A*, 2012, 50 : 211–249.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081811-125523>.
- [115] Zhang H, Zhou J-L. On the Orbital Evolution of a Giant Planet Pair Embedded in a Gaseous Disk. I. Jupiter-Saturn Configuration[J/OL]. *ApJ*, 2010, 714 : 532–548.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/714/1/532>.
- [116] Lissauer J J, Fabrycky D C, Ford E B, et al. A closely packed system of low-mass, low-density planets transiting Kepler-11[J/OL]. *Nature*, 2011, 470 : 53–58.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature09760>.
- [117] Zhou J-L, Xie J-W, Liu H-G, et al. Forming different planetary systems[J/OL]. *Research in Astronomy and Astrophysics*, 2012, 12 : 1081–1106.
<http://dx.doi.org/10.1088/1674-4527/12/8/010>.
- [118] Mahajan N, Wu Y. Stability of the Kepler-11 System and Its Origin[J/OL]. *ApJ*, 2014, 795 : 32.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/795/1/32>.

- [119] D'Angelo G, Bodenheimer P. In Situ and Ex Situ Formation Models of Kepler 11 Planets[J/OL]. *ApJ*, 2016, 828 : 33.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/828/1/33>.
- [120] Lovis C, Ségransan D, Mayor M, et al. The HARPS search for southern extra-solar planets. XXVIII. Up to seven planets orbiting HD 10180: probing the architecture of low-mass planetary systems[J/OL]. *A&A*, 2011, 528 : A112.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201015577>.
- [121] Gillon M, Triaud A H M J, Demory B-O, et al. Seven temperate terrestrial planets around the nearby ultracool dwarf star TRAPPIST-1[J/OL]. *Nature*, 2017, 542(7642) : 456 – 460.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature21360>.
- [122] Hatzes A P, Cochran W D, Endl M, et al. A Planetary Companion to γ Cephei A[J/OL]. *ApJ*, 2003, 599 : 1383 – 1394.
<http://dx.doi.org/10.1086/379281>.
- [123] Doyle L R, Carter J A, Fabrycky D C, et al. Kepler-16: A Transiting Circumbinary Planet[J/OL]. *Science*, 2011, 333 : 1602.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1210923>.
- [124] ANON. Planets in Binary Star Systems[M/OL] // Haghighipour N. *Astrophysics and Space Science Library*, Vol 366 : Planets in Binary Star Systems. 2010.
<http://dx.doi.org/10.1007/978-90-481-8687-7>.
- [125] Naef D, Latham D W, Mayor M, et al. HD 80606 b, a planet on an extremely elongated orbit[J/OL]. *A&A*, 2001, 375 : L27 – L30.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20010853>.
- [126] Tamuz O, Ségransan D, Udry S, et al. The CORALIE survey for southern extra-solar planets. XV. Discovery of two eccentric planets orbiting <ASTROBJ>HD 4113</ASTROBJ> and <ASTROBJ>HD 156846</ASTROBJ>[J/OL]. *A&A*, 2008, 480 : L33 – L36.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20078737>.

- [127] Pont F, Hébrard G, Irwin J M, et al. Spin-orbit misalignment in the HD 80606 planetary system[J/OL]. *A&A*, 2009, 502: 695–703.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200912463>.
- [128] Lidov M L. The evolution of orbits of artificial satellites of planets under the action of gravitational perturbations of external bodies[J/OL]. *Planet. Space Sci.*, 1962, 9: 719–759.
[http://dx.doi.org/10.1016/0032-0633\(62\)90129-0](http://dx.doi.org/10.1016/0032-0633(62)90129-0).
- [129] Kozai Y. Secular perturbations of asteroids with high inclination and eccentricity[J/OL]. *AJ*, 1962, 67: 591.
<http://dx.doi.org/10.1086/108790>.
- [130] Wu Y, Murray N. Planet Migration and Binary Companions: The Case of HD 80606b[J/OL]. *ApJ*, 2003, 589: 605–614.
<http://dx.doi.org/10.1086/374598>.
- [131] Sanchis-Ojeda R, Rappaport S, Winn J N, et al. Transits and Occultations of an Earth-sized Planet in an 8.5 hr Orbit[J/OL]. *ApJ*, 2013, 774: 54.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/774/1/54>.
- [132] Charpinet S, Fontaine G, Brassard P, et al. A compact system of small planets around a former red-giant star[J/OL]. *Nature*, 2011, 480: 496–499.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature10631>.
- [133] Lopez E D. Born Dry in the Photo-Evaporation Desert: Kepler’s Ultra-Short-Period Planets Formed Water-Poor[J]. *ArXiv e-prints*, 2016.
- [134] Moutou C, Donati J-F, Lin D, et al. The magnetic properties of the star Kepler-78[J/OL]. *MNRAS*, 2016, 459: 1993–2007.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stw809>.
- [135] Hatzes A P, Guenther E W, Endl M, et al. A giant planet around the massive giant star HD 13189[J/OL]. *A&A*, 2005, 437: 743–751.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20052850>.

- [136] Sato B, Kambe E, Takeda Y, et al. Radial-Velocity Variability of G-Type Giants: First Three Years of the Okayama Planet Search Program[J/OL]. *PASJ*, 2005, 57: 97–107.
<http://dx.doi.org/10.1093/pasj/57.1.97>.
- [137] Johnson J A, Butler R P, Marcy G W, et al. A New Planet around an M Dwarf: Revealing a Correlation between Exoplanets and Stellar Mass[J/OL]. *ApJ*, 2007, 670: 833–840.
<http://dx.doi.org/10.1086/521720>.
- [138] Jones M I, Jenkins J S, Bluhm P, et al. The properties of planets around giant stars[J/OL]. *A&A*, 2014, 566: A113.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201323345>.
- [139] Johnson J A, Fischer D A, Marcy G W, et al. Retired A Stars and Their Companions: Exoplanets Orbiting Three Intermediate-Mass Subgiants[J/OL]. *ApJ*, 2007, 665: 785–793.
<http://dx.doi.org/10.1086/519677>.
- [140] Bowler B P, Johnson J A, Marcy G W, et al. Retired A Stars and Their Companions. III. Comparing the Mass-Period Distributions of Planets Around A-Type Stars and Sun-Like Stars[J/OL]. *ApJ*, 2010, 709: 396–410.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/709/1/396>.
- [141] Hellier C, Anderson D R, Collier Cameron A, et al. Seven transiting hot Jupiters from WASP-South, Euler and TRAPPIST: WASP-47b, WASP-55b, WASP-61b, WASP-62b, WASP-63b, WASP-66b and WASP-67b[J/OL]. *MNRAS*, 2012, 426: 739–750.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.21780.x>.
- [142] Becker J C, Vanderburg A, Adams F C, et al. WASP-47: A Hot Jupiter System with Two Additional Planets Discovered by K2[J/OL]. *ApJL*, 2015, 812: L18.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/812/2/L18>.
- [143] Sanchis-Ojeda R, Winn J N, Dai F, et al. A Low Stellar Obliquity for WASP-47, a Compact Multiplanet System with a Hot Jupiter and an Ultra-short Period

- Planet[J/OL]. ApJL, 2015, 812 : L11.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/812/1/L11>.
- [144] Neveu-VanMalle M, Queloz D, Anderson D R, et al. Hot Jupiters with relatives: discovery of additional planets in orbit around WASP-41 and WASP-47[J/OL]. A&A, 2016, 586 : A93.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201526965>.
- [145] Steffen J H, Ragozzine D, Fabrycky D C, et al. Kepler constraints on planets near hot Jupiters[J/OL]. Proceedings of the National Academy of Science, 2012, 109 : 7982–7987.
<http://dx.doi.org/10.1073/pnas.1120970109>.
- [146] Lucas P W, Roche P F. A population of very young brown dwarfs and free-floating planets in Orion[J/OL]. MNRAS, 2000, 314 : 858–864.
<http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.2000.03515.x>.
- [147] Bihain G, Rebolo R, Zapatero Osorio M R, et al. Candidate free-floating super-Jupiters in the young σ Orionis open cluster[J/OL]. A&A, 2009, 506 : 1169–1182.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200912210>.
- [148] Sumi T, Kamiya K, Bennett D P, et al. Unbound or distant planetary mass population detected by gravitational microlensing[J/OL]. Nature, 2011, 473 : 349–352.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature10092>.
- [149] Adams F C. The Birth Environment of the Solar System[J/OL]. ARA&A, 2010, 48 : 47–85.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081309-130830>.
- [150] Liu H-G, Zhang H, Zhou J-L. Configurations of Bounded and Free-floating Planets in Very Young Open Clusters[J/OL]. ApJ, 2013, 772 : 142.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/772/2/142>.

- [151] Malmberg D, Davies M B, Heggie D C. The effects of fly-bys on planetary systems[J/OL]. *MNRAS*, 2011, 411 : 859 – 877.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.17730.x>.
- [152] Burton M G. Astronomy in Antarctica[J/OL]. *A&A Rv*, 2010, 18 : 417 – 469.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00159-010-0032-2>.
- [153] Lawrence J S. Infrared and Submillimeter Atmospheric Characteristics of High Antarctic Plateau Sites[J/OL]. *PASP*, 2004, 116 : 482 – 492.
<http://dx.doi.org/10.1086/420757>.
- [154] Bonner C S, Ashley M C B, Cui X, et al. Thickness of the Atmospheric Boundary Layer Above Dome A, Antarctica, during 2009[J/OL]. *PASP*, 2010, 122 : 1122.
<http://dx.doi.org/10.1086/656250>.
- [155] Rauer H, Fruth T, Erikson A. Prospects of Long-Time-Series Observations from Dome C for Transit Search[J/OL]. *PASP*, 2008, 120 : 852.
<http://dx.doi.org/10.1086/590519>.
- [156] Indermuehle B T, Burton M G, Maddison S T. The History of Astrophysics in Antarctica[J/OL]. *PASA*, 2005, 22 : 73 – 90.
<http://dx.doi.org/10.1071/AS04037>.
- [157] Grec G, Fossat E, Pomerantz M. Solar oscillations - Full disk observations from the geographic South Pole[J/OL]. *Nature*, 1980, 288 : 541 – 544.
<http://dx.doi.org/10.1038/288541a0>.
- [158] Abe L, Gonçalves I, Agabi A, et al. The secondary eclipses of WASP-19b as seen by the ASTEP 400 telescope from Antarctica[J/OL]. *A&A*, 2013, 553 : A49.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201220351>.
- [159] Crouzet N, Guillot T, Agabi A, et al. ASTEP South: an Antarctic Search for Transiting ExoPlanets around the celestial south pole[J/OL]. *A&A*, 2010, 511 : A36.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200913629>.

- [160] Saunders W, Lawrence J S, Storey J W V, et al. Where Is the Best Site on Earth? Domes A, B, C, and F, and Ridges A and B[J/OL]. PASP, 2009, 121 : 976.
<http://dx.doi.org/10.1086/605780>.
- [161] Lawrence J S, Ashley M C B, Hengst S, et al. The PLATO Dome A site-testing observatory: Power generation and control systems[J/OL]. Review of Scientific Instruments, 2009, 80(6) : 064501–064501.
<http://dx.doi.org/10.1063/1.3137081>.
- [162] Yang H, Allen G, Ashley M C B, et al. The PLATO Dome A Site-Testing Observatory: Instrumentation and First Results[J/OL]. PASP, 2009, 121 : 174.
<http://dx.doi.org/10.1086/597547>.
- [163] Yuan X, Cui X, Liu G, et al. Chinese Small Telescope ARray (CSTAR) for Antarctic Dome A[C/OL] // Proc. SPIE, Vol 7012 : Ground-based and Airborne Telescopes II. 2008 : 70124G.
<http://dx.doi.org/10.1117/12.788748>.
- [164] Zhou X, Wu Z-Y, Jiang Z-J, et al. Testing and data reduction of the Chinese Small Telescope Array (CSTAR) for Dome A, Antarctica[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2010, 10 : 279–290.
<http://dx.doi.org/10.1088/1674-4527/10/3/009>.
- [165] Zou H, Zhou X, Jiang Z, et al. Sky Brightness and Transparency in the i-band at Dome A, Antarctica[J/OL]. AJ, 2010, 140 : 602–611.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/140/2/602>.
- [166] Zhou X, Fan Z, Jiang Z, et al. The First Release of the CSTAR Point Source Catalog from Dome A, Antarctica[J/OL]. PASP, 2010, 122 : 347.
<http://dx.doi.org/10.1086/651526>.
- [167] Wang L, Macri L M, Krisciunas K, et al. Photometry of Variable Stars from Dome A, Antarctica[J/OL]. AJ, 2011, 142 : 155.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/142/5/155>.

- [168] Wang S, Zhou X, Zhang H, et al. The Inhomogeneous Effect of Cloud on CSTAR Photometry and Its Correction[J/OL]. PASP, 2012, 124 : 1167.
<http://dx.doi.org/10.1086/668617>.
- [169] Wang S-H, Zhou X, Zhang H, et al. The correction of diurnal effects on CSTAR photometry[J/OL]. Research in Astronomy and Astrophysics, 2014, 14 : 345–356.
<http://dx.doi.org/10.1088/1674-4527/14/3/008>.
- [170] ANON. UKSTU handbook: the U.K. Schmidt telescope of the Royal Observatory, Edinburgh[M/OL]. 1983.
<https://books.google.com.hk/books?id=80YoNQEACAAJ>.
- [171] Zhou X, Ashley M C B, Cui X, et al. Progress and Results from the Chinese Small Telescope ARray (CSTAR)[C/OL] // Burton M G, Cui X, Tothill N F H. IAU Symposium, Vol 288 : Astrophysics from Antarctica. 2013 : 231–238.
<http://dx.doi.org/10.1017/S1743921312016936>.
- [172] Liang E-S, Wang S, Zhou J-L, et al. Stellar Flares in the CSTAR Field: Results from the 2008 Data Set[J/OL]. AJ, 2016, 152 : 168.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-6256/152/6/168>.
- [173] Wang S, Zhang H, Zhou J-L, et al. Planetary Transit Candidates in the CSTAR Field: Analysis of the 2008 Data[J/OL]. ApJS, 2014, 211 : 26.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/211/2/26>.
- [174] Yang M, Zhang H, Wang S, et al. Eclipsing Binaries From the CSTAR Project at Dome A, Antarctica[J/OL]. ApJS, 2015, 217 : 28.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/217/2/28>.
- [175] Cui X, Yuan X, Gong X. Antarctic Schmidt Telescopes (AST3) for Dome A[C/OL] // Proc. SPIE, Vol 7012 : Ground-based and Airborne Telescopes II. 2008 : 70122D.
<http://dx.doi.org/10.1117/12.789458>.
- [176] Li G, Fu J, Liu X. Variable stars observed with the AST3-1 telescope from dome A of antarctica[J]. ArXiv e-prints, 2015.

- [177] Wang L, Ma B, Li G, et al. Variable Stars Observed in the Galactic Disk by AST3-1 from Dome A, Antarctica[J/OL]. AJ, 2017, 153 : 104.
<http://dx.doi.org/10.3847/1538-3881/153/3/104>.
- [178] Binney J, Tremaine S. Galactic dynamics[M]. 1987.
- [179] Gilmore G, Wyse R F G, Kuijken K. Kinematics, chemistry, and structure of the Galaxy[J/OL]. ARA&A, 1989, 27 : 555 – 627.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.aa.27.090189.003011>.
- [180] Smith B A, Soderblom L, Beebe R F, et al. Encounter with Saturn - Voyager 1 imaging science results[J/OL]. Science, 1981, 212 : 163 – 191.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.212.4491.163>.
- [181] Latter H N, Ogilvie G I, Rein H. Planetary rings and other astrophysical disks[J]. ArXiv e-prints, 2017.
- [182] Mosqueira I, Estrada P R. Formation of the regular satellites of giant planets in an extended gaseous nebula I: subnebula model and accretion of satellites[J/OL]. Icarus, 2003, 163 : 198 – 231.
[http://dx.doi.org/10.1016/S0019-1035\(03\)00076-9](http://dx.doi.org/10.1016/S0019-1035(03)00076-9).
- [183] Kawabe R, Ishiguro M, Omodaka T, et al. Discovery of a rotating protoplanetary gas disk around the young star GG Tauri[J/OL]. ApJL, 1993, 404 : L63 – L66.
<http://dx.doi.org/10.1086/186744>.
- [184] Dermott S F, Jayaraman S, Xu Y L, et al. A circumsolar ring of asteroidal dust in resonant lock with the Earth[J/OL]. Nature, 1994, 369 : 719 – 723.
<http://dx.doi.org/10.1038/369719a0>.
- [185] Dohnanyi J S. Collisional Model of Asteroids and Their Debris[J/OL]. J. Geophys. Res., 1969, 74 : 2531 – 2554.
<http://dx.doi.org/10.1029/JB074i010p02531>.
- [186] Apai D, Lauretta D S. Planet Formation and Protoplanetary Dust[M] // Apai D A, Lauretta D S. Protoplanetary Dust: Astrophysical and Cosmochemical Perspectives. 2010 : 1 – 26.

- [187] Dullemond C P, Monnier J D. The Inner Regions of Protoplanetary Disks[J/OL]. *ARA&A*, 2010, 48 : 205 – 239.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081309-130932>.
- [188] Wyatt M C. Evolution of Debris Disks[J/OL]. *ARA&A*, 2008, 46 : 339 – 383.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.astro.45.051806.110525>.
- [189] Duquennoy A, Mayor M. Multiplicity among solar-type stars in the solar neighbourhood. II - Distribution of the orbital elements in an unbiased sample[J]. *A&A*, 1991, 248 : 485 – 524.
- [190] Bate M R, Bonnell I A, Price N M. Modelling accretion in protobinary systems[J/OL]. *MNRAS*, 1995, 277 : 362 – 376.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/277.2.362>.
- [191] Mamajek E E, Quillen A C, Pecaut M J, et al. Planetary Construction Zones in Occultation: Discovery of an Extrasolar Ring System Transiting a Young Sun-like Star and Future Prospects for Detecting Eclipses by Circumsecondary and Circumplanetary Disks[J/OL]. *AJ*, 2012, 143 : 72.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-6256/143/3/72>.
- [192] Gałan C, Mikołajewski M, Tomov T, et al. International observational campaigns of the last two eclipses in EE Cephei: 2003 and 2008/9[J/OL]. *A&A*, 2012, 544 : A53.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201016235>.
- [193] Hedman M M, Nicholson P D, Salo H, et al. Self-Gravity Wake Structures in Saturn's A Ring Revealed by Cassini VIMS[J/OL]. *AJ*, 2007, 133 : 2624 – 2629.
<http://dx.doi.org/10.1086/516828>.
- [194] Guinan E F, Dewarf L E. Toward Solving the Mysteries of the Exotic Eclipsing Binary ϵ Aurigae: Two Thousand years of Observations and Future Possibilities[C] //Tout C A, van Hamme W. Astronomical Society of the Pacific Conference Series, Vol 279 : Exotic Stars as Challenges to Evolution. 2002 : 121.

- [195] Kloppenborg B, Stencel R, Monnier J D, et al. Infrared images of the transiting disk in the ϵ Aurigae system[J/OL]. *Nature*, 2010, 464 : 870 – 872.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature08968>.
- [196] Chadima P, Harmanec P, Bennett P D, et al. Spectral and photometric analysis of the eclipsing binary ϵ Aurigae prior to and during the 2009–2011 eclipse[J/OL]. *A&A*, 2011, 530 : A146.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201116739>.
- [197] Mikolajewski M, Graczyk D. Is the eclipsing variable EE CEP a cousin of epsilon Aur?[J/OL]. *MNRAS*, 1999, 303 : 521 – 524.
<http://dx.doi.org/10.1046/j.1365-8711.1999.02257.x>.
- [198] Graczyk D, Mikołajewski M, Tomov T, et al. The 2003 eclipse of EE Cep is coming. A review of past eclipses[J/OL]. *A&A*, 2003, 403 : 1089 – 1094.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20030430>.
- [199] Mikolajewski M, Galan C, Gazeas K, et al. Preliminary Photometric Results for the 2003 Eclipse of Ee Cep[J/OL]. *Ap&SS*, 2005, 296 : 445 – 449.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10509-005-4874-4>.
- [200] Udalski A, Szymanski M K, Soszynski I, et al. The Optical Gravitational Lensing Experiment. Final Reductions of the OGLE-III Data[J]. *AcA*, 2008, 58 : 69 – 87.
- [201] Graczyk D, Soszyński I, Poleski R, et al. The Optical Gravitational Lensing Experiment. The OGLE-III Catalog of Variable Stars. XII. Eclipsing Binary Stars in the Large Magellanic Cloud[J]. *AcA*, 2011, 61 : 103 – 122.
- [202] Derekas A, Kiss L L, Bedding T R. Eclipsing Binaries in the MACHO Database: New Periods and Classifications for 3031 Systems in the Large Magellanic Cloud[J/OL]. *ApJ*, 2007, 663 : 249 – 257.
<http://dx.doi.org/10.1086/517994>.
- [203] Dong S, Katz B, Prieto J L, et al. OGLE-LMC-ECL-11893: The Discovery of a Long-period Eclipsing Binary with a Circumstellar Disk[J/OL]. *ApJ*, 2014, 788 : 41.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/788/1/41>.

- [204] Pawlak M, Graczyk D, Soszyński I, et al. Eclipsing Binary Stars in the OGLE-III Fields of the Small Magellanic Cloud[J]. AcA, 2013, 63 : 323 – 338.
- [205] Pietrukowicz P, Mróz P, Soszyński I, et al. Eclipsing Binary Stars in the OGLE-III Galactic Disk Fields[J]. AcA, 2013, 63 : 115 – 133.
- [206] Bouwman J, Lawson W A, Dominik C, et al. Binarity as a Key Factor in Protoplanetary Disk Evolution: Spitzer Disk Census of the η Chamaeleontis Cluster[J/OL]. ApJL, 2006, 653 : L57 – L60.
<http://dx.doi.org/10.1086/510365>.
- [207] Harris R J, Andrews S M, Wilner D J, et al. A Resolved Census of Millimeter Emission from Taurus Multiple Star Systems[J/OL]. ApJ, 2012, 751 : 115.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/751/2/115>.
- [208] Graczyk D, Eyer L. The Light Curve Statistical Moments Analysis: The Identification of Eclipsing Binaries[J]. AcA, 2010, 60 : 109 – 119.
- [209] Ulaczyk K, Szymański M K, Udalski A, et al. Photometric Maps Based on the OGLE-III Shallow Survey in the Large Magellanic Cloud[J]. AcA, 2012, 62 : 247 – 268.
- [210] Stellingwerf R F. Period determination using phase dispersion minimization[J/OL]. ApJ, 1978, 224 : 953 – 960.
<http://dx.doi.org/10.1086/156444>.
- [211] Parthasarathy M, Frueh M L. Epsilon Aurigae in eclipse - The light and colour variations[J/OL]. Ap&SS, 1986, 123 : 31 – 48.
<http://dx.doi.org/10.1007/BF00649121>.
- [212] Marigo P, Girardi L, Bressan A, et al. Evolution of asymptotic giant branch stars. II. Optical to far-infrared isochrones with improved TP-AGB models[J/OL]. A&A, 2008, 482 : 883 – 905.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20078467>.
- [213] Zaritsky D, Harris J, Thompson I B, et al. The Magellanic Clouds Photometric Survey: The Large Magellanic Cloud Stellar Catalog and Extinction Map[J/OL].

- AJ, 2004, 128 : 1606 – 1614.
<http://dx.doi.org/10.1086/423910>.
- [214] Walker A R. The Large Magellanic Cloud and the distance scale[J/OL]. Ap&SS, 2012, 341 : 43 – 49.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10509-011-0961-x>.
- [215] Massey P. A UBVR CCD Survey of the Magellanic Clouds[J/OL]. ApJS, 2002, 141 : 81 – 122.
<http://dx.doi.org/10.1086/338286>.
- [216] Rivinius T, Carciofi A C, Martayan C. Classical Be stars. Rapidly rotating B stars with viscous Keplerian decretion disks[J/OL]. A&A Rv, 2013, 21 : 69.
<http://dx.doi.org/10.1007/s00159-013-0069-0>.
- [217] Wichmann R. Nightfall: Animated Views of Eclipsing Binary Stars[J], 2011.
- [218] Kato D, Nagashima C, Nagayama T, et al. The IRSF Magellanic Clouds Point Source Catalog[J/OL]. PASJ, 2007, 59 : 615 – 641.
<http://dx.doi.org/10.1093/pasj/59.3.615>.
- [219] Meixner M, Gordon K D, Indebetouw R, et al. Spitzer Survey of the Large Magellanic Cloud: Surveying the Agents of a Galaxy’s Evolution (SAGE). I. Overview and Initial Results[J/OL]. AJ, 2006, 132 : 2268 – 2288.
<http://dx.doi.org/10.1086/508185>.
- [220] Cutri R M, Skrutskie M F, van Dyk S, et al. VizieR Online Data Catalog: 2MASS 6X Point Source Working Database / Catalog (Cutri+ 2006)[J]. VizieR Online Data Catalog, 2012, 2281.
- [221] Waters L B F M, van den Heuvel E P J, Taylor A R, et al. Evidence for low-velocity winds in Be/X-ray binaries[J]. A&A, 1988, 198 : 200 – 210.
- [222] Dougherty S M, Waters L B F M, Burki G, et al. Near-IR excess of Be stars.[J]. A&A, 1994, 290 : 609 – 622.
- [223] Scott E L, Mamajek E E, Pecaut M J, et al. Modeling Transiting Circumstellar Disks: Characterizing the Newly Discovered Eclipsing Disk System OGLE

- LMC-ECL-11893[J/OL]. ApJ, 2014, 797 : 6.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/797/1/6>.
- [224] Wyrzykowski L, Udalski A, Kubiak M, et al. The Optical Gravitational Lensing Experiment. Eclipsing Binary Stars in the Large Magellanic Cloud[J]. AcA, 2003, 53 : 1 – 25.
- [225] Winn J N, Fabrycky D C. The Occurrence and Architecture of Exoplanetary Systems[J/OL]. ARA&A, 2015, 53 : 409 – 447.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-082214-122246>.
- [226] Howard A W, Marcy G W, Bryson S T, et al. Planet Occurrence within 0.25 AU of Solar-type Stars from Kepler[J/OL]. ApJS, 2012, 201 : 15.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/201/2/15>.
- [227] Marcy G, Butler R P, Fischer D, et al. Observed Properties of Exoplanets: Masses, Orbits, and Metallicities[J/OL]. Progress of Theoretical Physics Supplement, 2005, 158 : 24 – 42.
<http://dx.doi.org/10.1143/PTPS.158.24>.
- [228] Mayor M, Marmier M, Lovis C, et al. The HARPS search for southern extra-solar planets XXXIV. Occurrence, mass distribution and orbital properties of super-Earths and Neptune-mass planets[J]. ArXiv e-prints, 2011.
- [229] Wright J T, Marcy G W, Howard A W, et al. The Frequency of Hot Jupiters Orbiting nearby Solar-type Stars[J/OL]. ApJ, 2012, 753 : 160.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/753/2/160>.
- [230] Gonzalez G. The stellar metallicity-giant planet connection[J/OL]. MNRAS, 1997, 285 : 403 – 412.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/285.2.403>.
- [231] Santos N C, Israelian G, Mayor M. The metal-rich nature of stars with planets[J/OL]. A&A, 2001, 373 : 1019 – 1031.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20010648>.

- [232] Santos N C, Israelian G, Mayor M. Spectroscopic [Fe/H] for 98 extra-solar planet-host stars. Exploring the probability of planet formation[J/OL]. *A&A*, 2004, 415 : 1153 – 1166.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20034469>.
- [233] Fischer D A, Valenti J. The Planet-Metallicity Correlation[J/OL]. *ApJ*, 2005, 622 : 1102 – 1117.
<http://dx.doi.org/10.1086/428383>.
- [234] Udry S, Santos N C. Statistical Properties of Exoplanets[J/OL]. *ARA&A*, 2007, 45 : 397 – 439.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.astro.45.051806.110529>.
- [235] Sozzetti A, Torres G, Latham D W, et al. A Keck HIRES Doppler Search for Planets Orbiting Metal-Poor Dwarfs. II. On the Frequency of Giant Planets in the Metal-Poor Regime[J/OL]. *ApJ*, 2009, 697 : 544 – 556.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/697/1/544>.
- [236] Sousa S G, Santos N C, Israelian G, et al. Spectroscopic stellar parameters for 582 FGK stars in the HARPS volume-limited sample. Revising the metallicity-planet correlation[J/OL]. *A&A*, 2011, 533 : A141.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201117699>.
- [237] Ida S, Lin D N C. Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. II. The Formation and Retention of Gas Giant Planets around Stars with a Range of Metallicities[J/OL]. *ApJ*, 2004, 616 : 567 – 572.
<http://dx.doi.org/10.1086/424830>.
- [238] Batygin K, Bodenheimer P H, Laughlin G P. In Situ Formation and Dynamical Evolution of Hot Jupiter Systems[J/OL]. *ApJ*, 2016, 829 : 114.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/829/2/114>.
- [239] Boley A C, Granados Contreras A P, Gladman B. The In Situ Formation of Giant Planets at Short Orbital Periods[J/OL]. *ApJL*, 2016, 817 : L17.
<http://dx.doi.org/10.3847/2041-8205/817/2/L17>.

- [240] Goldreich P, Tremaine S. The excitation of density waves at the Lindblad and corotation resonances by an external potential[J/OL]. *ApJ*, 1979, 233: 857–871.
<http://dx.doi.org/10.1086/157448>.
- [241] Goldreich P, Tremaine S. Disk-satellite interactions[J/OL]. *ApJ*, 1980, 241: 425–441.
<http://dx.doi.org/10.1086/158356>.
- [242] Lin D N C, Papaloizou J. On the tidal interaction between protoplanets and the protoplanetary disk. III - Orbital migration of protoplanets[J/OL]. *ApJ*, 1986, 309: 846–857.
<http://dx.doi.org/10.1086/164653>.
- [243] Ward W R. Protoplanet Migration by Nebula Tides[J/OL]. *Icarus*, 1997, 126: 261–281.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1996.5647>.
- [244] Lin D N C, Bodenheimer P, Richardson D C. Orbital migration of the planetary companion of 51 Pegasi to its present location[J/OL]. *Nature*, 1996, 380: 606–607.
<http://dx.doi.org/10.1038/380606a0>.
- [245] Armitage P J, Rice W K M. Planetary migration[J]. *ArXiv Astrophysics e-prints*, 2005.
- [246] Malhotra R. The origin of Pluto's peculiar orbit[J/OL]. *Nature*, 1993, 365: 819–821.
<http://dx.doi.org/10.1038/365819a0>.
- [247] Murray N, Hansen B, Holman M, et al. Migrating Planets[J/OL]. *Science*, 1998, 279: 69.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.279.5347.69>.
- [248] Morbidelli A, Tsiganis K, Crida A, et al. Dynamics of the Giant Planets of the Solar System in the Gaseous Protoplanetary Disk and Their Relationship to the

- Current Orbital Architecture[J/OL]. AJ, 2007, 134 : 1790 – 1798.
<http://dx.doi.org/10.1086/521705>.
- [249] Thommes E W, Bryden G, Wu Y, et al. From Mean Motion Resonances to Scattered Planets: Producing the Solar System, Eccentric Exoplanets, and Late Heavy Bombardments[J/OL]. ApJ, 2008, 675 : 1538 – 1548.
<http://dx.doi.org/10.1086/525244>.
- [250] Murray C D, Dermott S F. Solar system dynamics[M]. 1999.
- [251] Wu Y, Murray N. Planet Migration and Binary Companions: The Case of HD 80606b[J/OL]. ApJ, 2003, 589 : 605 – 614.
<http://dx.doi.org/10.1086/374598>.
- [252] Innanen K A, Zheng J Q, Mikkola S, et al. The Kozai Mechanism and the Stability of Planetary Orbits in Binary Star Systems[J/OL]. AJ, 1997, 113 : 1915.
<http://dx.doi.org/10.1086/118405>.
- [253] Wu Y, Murray N W, Ramsahai J M. Hot Jupiters in Binary Star Systems[J/OL]. ApJ, 2007, 670 : 820 – 825.
<http://dx.doi.org/10.1086/521996>.
- [254] Fabrycky D, Tremaine S. Shrinking Binary and Planetary Orbits by Kozai Cycles with Tidal Friction[J/OL]. ApJ, 2007, 669 : 1298 – 1315.
<http://dx.doi.org/10.1086/521702>.
- [255] Naoz S, Farr W M, Lithwick Y, et al. Hot Jupiters from secular planet-planet interactions[J/OL]. Nature, 2011, 473 : 187 – 189.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature10076>.
- [256] Nagasawa M, Ida S. Orbital Distributions of Close-in Planets and Distant Planets Formed by Scattering and Dynamical Tides[J/OL]. ApJ, 2011, 742 : 72.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/742/2/72>.
- [257] Spurzem R, Giersz M, Heggie D C, et al. Dynamics of Planetary Systems in Star Clusters[J/OL]. ApJ, 2009, 697 : 458 – 482.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/697/1/458>.

- [258] Rasio F A, Ford E B. Dynamical instabilities and the formation of extrasolar planetary systems[J/OL]. *Science*, 1996, 274: 954–956.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.274.5289.954>.
- [259] Zhou J-L, Lin D N C, Sun Y-S. Post-oligarchic Evolution of Protoplanetary Embryos and the Stability of Planetary Systems[J/OL]. *ApJ*, 2007, 666: 423–435.
<http://dx.doi.org/10.1086/519918>.
- [260] Ida S, Lin D N C, Nagasawa M. Toward a Deterministic Model of Planetary Formation. VII. Eccentricity Distribution of Gas Giants[J/OL]. *ApJ*, 2013, 775: 42.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/775/1/42>.
- [261] Lin D N C, Ida S. On the Origin of Massive Eccentric Planets[J/OL]. *ApJ*, 1997, 477: 781–791.
<http://dx.doi.org/10.1086/303738>.
- [262] Jurić M, Tremaine S. Dynamical Origin of Extrasolar Planet Eccentricity Distribution[J/OL]. *ApJ*, 2008, 686: 603–620.
<http://dx.doi.org/10.1086/590047>.
- [263] Chatterjee S, Ford E B, Matsumura S, et al. Dynamical Outcomes of Planet-Planet Scattering[J/OL]. *ApJ*, 2008, 686: 580–602.
<http://dx.doi.org/10.1086/590227>.
- [264] Wu Y, Lithwick Y. Secular Chaos and the Production of Hot Jupiters[J/OL]. *ApJ*, 2011, 735: 109.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/735/2/109>.
- [265] Weidenschilling S J, Marzari F. Gravitational scattering as a possible origin for giant planets at small stellar distances[J/OL]. *Nature*, 1996, 384: 619–621.
<http://dx.doi.org/10.1038/384619a0>.
- [266] Nagasawa M, Ida S, Bessho T. Formation of Hot Planets by a Combination of Planet Scattering, Tidal Circularization, and the Kozai Mechanism[J/OL]. *ApJ*, 2008, 678: 498–508.
<http://dx.doi.org/10.1086/529369>.

- [267] Chen Y-Y, Liu H-G, Zhao G, et al. Mechanism for Exciting Planetary Inclination and Eccentricity through a Residual Gas Disk[J/OL]. *ApJ*, 2013, 769 : 26.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/769/1/26>.
- [268] Rasio F A, Tout C A, Lubow S H, et al. Tidal Decay of Close Planetary Orbits[J/OL]. *ApJ*, 1996, 470 : 1187.
<http://dx.doi.org/10.1086/177941>.
- [269] Darwin G H. On the Secular Changes in the Elements of the Orbit of a Satellite Revolving about a Tidally Distorted Planet[J]. *Philosophical Transactions of the Royal Society of London Series I*, 1880, 171 : 713 – 891.
- [270] Ogilvie G I. Tidal Dissipation in Stars and Giant Planets[J/OL]. *ARA&A*, 2014, 52 : 171 – 210.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081913-035941>.
- [271] Goldreich P, Soter S. Q in the Solar System[J/OL]. *Icarus*, 1966, 5 : 375 – 389.
[http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(66\)90051-0](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(66)90051-0).
- [272] Hut P. Tidal evolution in close binary systems[J]. *A&A*, 1981, 99 : 126 – 140.
- [273] Zahn J-P. Tidal friction in close binary stars[J]. *A&A*, 1977, 57 : 383 – 394.
- [274] Gaudi B S, Winn J N. Prospects for the Characterization and Confirmation of Transiting Exoplanets via the Rossiter-McLaughlin Effect[J/OL]. *ApJ*, 2007, 655 : 550 – 563.
<http://dx.doi.org/10.1086/509910>.
- [275] Holt J R. Spectroscopic Determination of Stellar Rotation[J]. *Astronomy and Astro-Physics (formerly The Sidereal Messenger)*, 1893, 12 : 646.
- [276] Rossiter R A. On the detection of an effect of rotation during eclipse in the velocity of the brighter component of beta Lyrae, and on the constancy of velocity of this system.[J/OL]. *ApJ*, 1924, 60.
<http://dx.doi.org/10.1086/142825>.

- [277] McLaughlin D B. Some results of a spectrographic study of the Algol system[J/OL]. ApJ, 1924, 60.
<http://dx.doi.org/10.1086/142826>.
- [278] Queloz D, Eggenberger A, Mayor M, et al. Detection of a spectroscopic transit by the planet orbiting the star HD209458[J]. A&A, 2000, 359 : L13–L17.
- [279] Bate M R, Lodato G, Pringle J E. Chaotic star formation and the alignment of stellar rotation with disc and planetary orbital axes[J/OL]. MNRAS, 2010, 401 : 1505 – 1513.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.15773.x>.
- [280] Lai D, Foucart F, Lin D N C. Evolution of spin direction of accreting magnetic protostars and spin-orbit misalignment in exoplanetary systems[J/OL]. MNRAS, 2011, 412 : 2790 – 2798.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.18127.x>.
- [281] Lai D. Star-disc-binary interactions in protoplanetary disc systems and primordial spin-orbit misalignments[J/OL]. MNRAS, 2014, 440 : 3532 – 3544.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stu485>.
- [282] Winn J N, Johnson J A, Marcy G W, et al. Measurement of the Spin-Orbit Alignment in the Exoplanetary System HD 189733[J/OL]. ApJL, 2006, 653 : L69 – L72.
<http://dx.doi.org/10.1086/510528>.
- [283] Winn J N, Fabrycky D, Albrecht S, et al. Hot Stars with Hot Jupiters Have High Obliquities[J/OL]. ApJL, 2010, 718 : L145 – L149.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/718/2/L145>.
- [284] Albrecht S, Winn J N, Johnson J A, et al. Obliquities of Hot Jupiter Host Stars: Evidence for Tidal Interactions and Primordial Misalignments[J/OL]. ApJ, 2012, 757 : 18.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/757/1/18>.

- [285] Mathieu R D. Pre-Main-Sequence Binary Stars[J/OL]. *ARA&A*, 1994, 32: 465–530.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.aa.32.090194.002341>.
- [286] Rogers T M, Lin D N C. On the Tidal Dissipation of Obliquity[J/OL]. *ApJL*, 2013, 769 : L10.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/769/1/L10>.
- [287] Lai D. Tidal dissipation in planet-hosting stars: damping of spin-orbit misalignment and survival of hot Jupiters[J/OL]. *MNRAS*, 2012, 423 : 486–492.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2012.20893.x>.
- [288] Ogilvie G I, Lin D N C. Tidal Dissipation in Rotating Giant Planets[J/OL]. *ApJ*, 2004, 610 : 477–509.
<http://dx.doi.org/10.1086/421454>.
- [289] Ogilvie G I, Lin D N C. Tidal Dissipation in Rotating Solar-Type Stars[J/OL]. *ApJ*, 2007, 661 : 1180–1191.
<http://dx.doi.org/10.1086/515435>.
- [290] Xue Y, Suto Y, Taruya A, et al. Tidal Evolution of the Spin-Orbit Angle in Exoplanetary Systems[J/OL]. *ApJ*, 2014, 784 : 66.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/784/1/66>.
- [291] Kraft R P. Studies of Stellar Rotation. V. The Dependence of Rotation on Age among Solar-Type Stars[J/OL]. *ApJ*, 1967, 150 : 551.
<http://dx.doi.org/10.1086/149359>.
- [292] Dawson R I. On the Tidal Origin of Hot Jupiter Stellar Obliquity Trends[J/OL]. *ApJL*, 2014, 790 : L31.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/790/2/L31>.
- [293] Rogers T M, Lin D N C, Lau H H B. Internal Gravity Waves Modulate the Apparent Misalignment of Exoplanets around Hot Stars[J/OL]. *ApJL*, 2012, 758 : L6.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/758/1/L6>.

- [294] Rogers T M. On the Differential Rotation of Massive Main-sequence Stars[J/OL]. ApJL, 2015, 815 : L30.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/815/2/L30>.
- [295] Eggleton P P, Kiseleva L G, Hut P. The Equilibrium Tide Model for Tidal Friction[J/OL]. ApJ, 1998, 499 : 853 – 870.
<http://dx.doi.org/10.1086/305670>.
- [296] Goldreich P, Nicholson P D. Tidal friction in early-type stars[J/OL]. ApJ, 1989, 342 : 1079 – 1084.
<http://dx.doi.org/10.1086/167665>.
- [297] Penev K, Sasselov D, Robinson F, et al. On Dissipation inside Turbulent Convection Zones from Three-dimensional Simulations of Solar Convection[J/OL]. ApJ, 2007, 655 : 1166 – 1171.
<http://dx.doi.org/10.1086/507937>.
- [298] Terquem C, Papaloizou J C B, Nelson R P, et al. On the Tidal Interaction of a Solar-Type Star with an Orbiting Companion: Excitation of g-Mode Oscillation and Orbital Evolution[J/OL]. ApJ, 1998, 502 : 788 – 801.
<http://dx.doi.org/10.1086/305927>.
- [299] Goodman J, Lackner C. Dynamical Tides in Rotating Planets and Stars[J/OL]. ApJ, 2009, 696 : 2054 – 2067.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/696/2/2054>.
- [300] Barker A J, Ogilvie G I. On the tidal evolution of Hot Jupiters on inclined orbits[J/OL]. MNRAS, 2009, 395 : 2268 – 2287.
<http://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2009.14694.x>.
- [301] Li G, Winn J N. Are Tidal Effects Responsible for Exoplanetary Spin Orbit Alignment?[J/OL]. ApJ, 2016, 818 : 5.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/818/1/5>.
- [302] Skumanich A. Time Scales for CA II Emission Decay, Rotational Braking, and Lithium Depletion[J/OL]. ApJ, 1972, 171 : 565.
<http://dx.doi.org/10.1086/151310>.

- [303] Soderblom D R. Rotational studies of late-type stars. II - Ages of solar-type stars and the rotational history of the sun[J/OL]. *ApJS*, 1983, 53 : 1 – 15.
<http://dx.doi.org/10.1086/190880>.
- [304] Dobbs-Dixon I, Lin D N C, Mardling R A. Spin-Orbit Evolution of Short-Period Planets[J/OL]. *ApJ*, 2004, 610 : 464 – 476.
<http://dx.doi.org/10.1086/421510>.
- [305] Schlaufman K C, Lin D N C, Ida S. A Population of Very Hot Super-Earths in Multiple-planet Systems Should be Uncovered by Kepler[J/OL]. *ApJL*, 2010, 724 : L53 – L58.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/724/1/L53>.
- [306] Maciejewski G, Dimitrov D, Fernández M, et al. Departure from the constant-period ephemeris for the transiting exoplanet WASP-12[J/OL]. *A&A*, 2016, 588 : L6.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201628312>.
- [307] Penev K, Hartman J D, Bakos G Á, et al. HATS-18b: An Extreme Short-period Massive Transiting Planet Spinning Up Its Star[J/OL]. *AJ*, 2016, 152 : 127.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-6256/152/5/127>.
- [308] Hirano T, Sanchis-Ojeda R, Takeda Y, et al. Measurements of Stellar Inclinations for Kepler Planet Candidates[J/OL]. *ApJ*, 2012, 756 : 66.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/756/1/66>.
- [309] Chaplin W J, Sanchis-Ojeda R, Campante T L, et al. Asteroseismic Determination of Obliquities of the Exoplanet Systems Kepler-50 and Kepler-65[J/OL]. *ApJ*, 2013, 766 : 101.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/766/2/101>.
- [310] Benomar O, Masuda K, Shibahashi H, et al. Determination of three-dimensional spin-orbit angle with joint analysis of asteroseismology, transit lightcurve, and the Rossiter-McLaughlin effect: Cases of HAT-P-7 and Kepler-25[J/OL]. *PASJ*, 2014, 66 : 94.
<http://dx.doi.org/10.1093/pasj/psu069>.

- [311] Désert J-M, Charbonneau D, Demory B-O, et al. The Hot-Jupiter Kepler-17b: Discovery, Obliquity from Stroboscopic Starspots, and Atmospheric Characterization[J/OL]. *ApJS*, 2011, 197 : 14.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/197/1/14>.
- [312] Nutzman P A, Fabrycky D C, Fortney J J. Using Star Spots to Measure the Spin-orbit Alignment of Transiting Planets[J/OL]. *ApJL*, 2011, 740 : L10.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/740/1/L10>.
- [313] Sanchis-Ojeda R, Winn J N. Starspots, Spin-Orbit Misalignment, and Active Latitudes in the HAT-P-11 Exoplanetary System[J/OL]. *ApJ*, 2011, 743 : 61.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/743/1/61>.
- [314] Barnes J W, Linscott E, Shporer A. Measurement of the Spin-Orbit Misalignment of KOI-13.01 from Its Gravity-darkened Kepler Transit Lightcurve[J/OL]. *ApJS*, 2011, 197 : 10.
<http://dx.doi.org/10.1088/0067-0049/197/1/10>.
- [315] Szabó G M, Szabó R, Benkő J M, et al. Asymmetric Transit Curves as Indication of Orbital Obliquity: Clues from the Late-type Dwarf Companion in KOI-13[J/OL]. *ApJL*, 2011, 736 : L4.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/736/1/L4>.
- [316] Mazeh T, Perets H B, McQuillan A, et al. Photometric Amplitude Distribution of Stellar Rotation of KOIs - Indication for Spin-Orbit Alignment of Cool Stars and High Obliquity for Hot Stars[J/OL]. *ApJ*, 2015, 801 : 3.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/801/1/3>.
- [317] Schlaufman K C, Winn J N. The Occurrence of Additional Giant Planets Inside the Water-Ice Line in Systems with Hot Jupiters: Evidence Against High-Eccentricity Migration[J/OL]. *ApJ*, 2016, 825 : 62.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/825/1/62>.
- [318] Knutson H A, Fulton B J, Montet B T, et al. Friends of Hot Jupiters. I. A Radial Velocity Search for Massive, Long-period Companions to Close-in Gas Giant

- Planets[J/OL]. ApJ, 2014, 785 : 126.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/785/2/126>.
- [319] Triaud A H M J, Collier Cameron A, Queloz D, et al. Spin-orbit angle measurements for six southern transiting planets. New insights into the dynamical origins of hot Jupiters[J/OL]. A&A, 2010, 524 : A25.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201014525>.
- [320] Triana S A, Moravveji E, Pápics P I, et al. The Internal Rotation Profile of the B-type Star KIC 10526294 from Frequency Inversion of its Dipole Gravity Modes[J/OL]. ApJ, 2015, 810 : 16.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/810/1/16>.
- [321] Ricker G R, Winn J N, Vanderspek R, et al. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS)[J/OL]. Journal of Astronomical Telescopes, Instruments, and Systems, 2015, 1(1) : 014003.
<http://dx.doi.org/10.1117/1.JATIS.1.1.014003>.
- [322] Rauer H, Catala C, Aerts C, et al. The PLATO 2.0 mission[J/OL]. Experimental Astronomy, 2014, 38 : 249 – 330.
<http://dx.doi.org/10.1007/s10686-014-9383-4>.
- [323] Petrovich C, Tremaine S. Warm Jupiters from Secular Planet-Planet Interactions[J/OL]. ApJ, 2016, 829 : 132.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/829/2/132>.
- [324] Huang C, Wu Y, Triaud A H M J. Warm Jupiters Are Less Lonely than Hot Jupiters: Close Neighbors[J/OL]. ApJ, 2016, 825 : 98.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/825/2/98>.
- [325] Dong S, Katz B, Socrates A. Warm Jupiters Need Close “Friends” for High-eccentricity Migration a Stringent Upper Limit on the Perturber’s Separation[J/OL]. ApJL, 2014, 781 : L5.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/781/1/L5>.

- [326] Frewen S F N, Hansen B M S. The effect of stellar evolution on migrating warm jupiters[J/OL]. *MNRAS*, 2016, 455 : 1538 – 1552.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stv2322>.
- [327] Dawson R I, Chiang E. A class of warm Jupiters with mutually inclined, apsidally misaligned close friends[J/OL]. *Science*, 2014, 346 : 212 – 216.
<http://dx.doi.org/10.1126/science.1256943>.
- [328] Antonini F, Hamers A S, Lithwick Y. Dynamical Constraints on the Origin of Hot and Warm Jupiters with Close Friends[J/OL]. *AJ*, 2016, 152 : 174.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-6256/152/6/174>.
- [329] Gaia Collaboration, Prusti T, de Bruijne J H J, et al. The Gaia mission[J/OL]. *A&A*, 2016, 595 : A1.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201629272>.
- [330] Wu D-H, Liu H-G, Yu Z-Y, et al. Detecting Planet Pairs in Mean Motion Resonances via the Astrometry Method[J/OL]. *ApJ*, 2016, 825 : 76.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/825/1/76>.
- [331] Knutson H A, Charbonneau D, Allen L E, et al. A map of the day-night contrast of the extrasolar planet HD 189733b[J/OL]. *Nature*, 2007, 447 : 183 – 186.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature05782>.
- [332] Baraffe I, Chabrier G, Barman T. Structure and evolution of super-Earth to super-Jupiter exoplanets. I. Heavy element enrichment in the interior[J/OL]. *A&A*, 2008, 482 : 315 – 332.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20079321>.
- [333] Fortney J J, Marley M S, Barnes J W. Planetary Radii across Five Orders of Magnitude in Mass and Stellar Insolation: Application to Transits[J/OL]. *ApJ*, 2007, 659 : 1661 – 1672.
<http://dx.doi.org/10.1086/512120>.
- [334] Zapolsky H S, Salpeter E E. The Mass-Radius Relation for Cold Spheres of Low Mass[J/OL]. *ApJ*, 1969, 158 : 809.
<http://dx.doi.org/10.1086/150240>.

- [335] Rogers L A. Most 1.6 Earth-radius Planets are Not Rocky[J/OL]. *ApJ*, 2015, 801 : 41.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/801/1/41>.
- [336] Miguel Y, Kaltenegger L, Fegley B, et al. Compositions of Hot Super-earth Atmospheres: Exploring Kepler Candidates[J/OL]. *ApJL*, 2011, 742 : L19.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/742/2/L19>.
- [337] Haghhipour N. The Formation and Dynamics of Super-Earth Planets[J/OL]. *Annual Review of Earth and Planetary Sciences*, 2013, 41 : 469 – 495.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-earth-042711-105340>.
- [338] Kipping D M. The Transits of Extrasolar Planets with Moons[D]. [S.l.] : PhD Thesis, 2011, 2011.
- [339] Yang M, Xie J-W, Zhou J-L, et al. Global Instability of the Exo-moon System Triggered by Photo-evaporation[J/OL]. *ApJ*, 2016, 833 : 7.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-637X/833/1/7>.
- [340] Batygin K, Brown M E. Evidence for a Distant Giant Planet in the Solar System[J/OL]. *AJ*, 2016, 151 : 22.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-6256/151/2/22>.
- [341] Johnson J A, Fischer D A, Marcy G W, et al. Retired A Stars and Their Companions: Exoplanets Orbiting Three Intermediate-Mass Subgiants[J/OL]. *ApJ*, 2007, 665 : 785 – 793.
<http://dx.doi.org/10.1086/519677>.
- [342] Sato B, Izumiura H, Toyota E, et al. Planetary Companions around Three Intermediate-Mass G and K Giants: 18 Delphini, ξ Aquilae, and HD 81688[J/OL]. *PASJ*, 2008, 60 : 539 – 550.
<http://dx.doi.org/10.1093/pasj/60.3.539>.
- [343] Lillo-Box J, Barrado D, Correia A C M. Close-in planets around giant stars. Lack of hot-Jupiters and prevalence of multiplanetary systems[J/OL]. *A&A*, 2016, 589 : A124.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/201527683>.

- [344] Desidera S, Barbieri M. Properties of planets in binary systems. The role of binary separation[J/OL]. *A&A*, 2007, 462 : 345 – 353.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20066319>.
- [345] Marzari F, Barbieri M. Planets in binary systems: is the present configuration indicative of the formation process?[J/OL]. *A&A*, 2007, 467 : 347 – 351.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361:20077102>.
- [346] Gong Y-X, Zhou J-L, Xie J-W. Terrestrial Planet Formation around the Circumbinary Habitable Zone: Inward Migration in the Planetesimal Swarm[J/OL]. *ApJL*, 2013, 763 : L8.
<http://dx.doi.org/10.1088/2041-8205/763/1/L8>.
- [347] Barstow M A, Barstow J K, Casewell S L, et al. Evidence for an external origin of heavy elements in hot DA white dwarfs[J/OL]. *MNRAS*, 2014, 440 : 1607 – 1625.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stu216>.
- [348] Vanderburg A, Johnson J A, Rappaport S, et al. A disintegrating minor planet transiting a white dwarf[J/OL]. *Nature*, 2015, 526 : 546 – 549.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature15527>.
- [349] Boyajian T S, LaCourse D M, Rappaport S A, et al. Planet Hunters IX. KIC 8462852 - where's the flux?[J/OL]. *MNRAS*, 2016, 457 : 3988 – 4004.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stw218>.
- [350] MacDonald M G, Ragozzine D, Fabrycky D C, et al. A Dynamical Analysis of the Kepler-80 System of Five Transiting Planets[J/OL]. *AJ*, 2016, 152 : 105.
<http://dx.doi.org/10.3847/0004-6256/152/4/105>.
- [351] Laskar J. Secular evolution of the solar system over 10 million years[J]. *A&A*, 1988, 198 : 341 – 362.
- [352] Laskar J. The chaotic motion of the solar system - A numerical estimate of the size of the chaotic zones[J/OL]. *Icarus*, 1990, 88 : 266 – 291.
[http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035\(90\)90084-M](http://dx.doi.org/10.1016/0019-1035(90)90084-M).

- [353] Schwamb M E, Orosz J A, Carter J A, et al. Planet Hunters: A Transiting Circumbinary Planet in a Quadruple Star System[J/OL]. *ApJ*, 2013, 768 : 127.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/768/2/127>.
- [354] Hessman F V, Dhillon V S, Winget D E, et al. On the naming convention used for multiple star systems and extrasolar planets[J]. *ArXiv e-prints*, 2010.
- [355] Marshall P J, Lintott C J, Fletcher L N. Ideas for Citizen Science in Astronomy[J/OL]. *ARA&A*, 2015, 53 : 247–278.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev-astro-081913-035959>.
- [356] Ball N M, Brunner R J. Data Mining and Machine Learning in Astronomy[J/OL]. *International Journal of Modern Physics D*, 2010, 19 : 1049 – 1106.
<http://dx.doi.org/10.1142/S0218271810017160>.
- [357] McCauliff S D, Jenkins J M, Catanzarite J, et al. Automatic Classification of Kepler Planetary Transit Candidates[J/OL]. *ApJ*, 2015, 806 : 6.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/806/1/6>.
- [358] Thompson S E, Mullally F, Coughlin J, et al. A Machine Learning Technique to Identify Transit Shaped Signals[J/OL]. *ApJ*, 2015, 812 : 46.
<http://dx.doi.org/10.1088/0004-637X/812/1/46>.
- [359] Benz W, Ida S, Alibert Y, et al. Planet Population Synthesis[J/OL]. *Protostars and Planets VI*, 2014 : 691 – 713.
http://dx.doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816531240-ch030.
- [360] Mordasini C, Alibert Y, Benz W. Extrasolar planet population synthesis. I. Method, formation tracks, and mass-distance distribution[J/OL]. *A&A*, 2009, 501 : 1139 – 1160.
<http://dx.doi.org/10.1051/0004-6361/200810301>.
- [361] Kasting J F, Whitmire D P, Reynolds R T. Habitable Zones around Main Sequence Stars[J/OL]. *Icarus*, 1993, 101 : 108 – 128.
<http://dx.doi.org/10.1006/icar.1993.1010>.

- [362] Kasting J F, Catling D. Evolution of a Habitable Planet[J/OL]. *ARA&A*, 2003, 41: 429–463.
<http://dx.doi.org/10.1146/annurev.astro.41.071601.170049>.
- [363] Segura A, Kasting J F, Meadows V, et al. Biosignatures from Earth-Like Planets Around M Dwarfs[J/OL]. *Astrobiology*, 2005, 5: 706–725.
<http://dx.doi.org/10.1089/ast.2005.5.706>.
- [364] Scalo J, Kaltenegger L, Segura A G, et al. M Stars as Targets for Terrestrial Exoplanet Searches And Biosignature Detection[J/OL]. *Astrobiology*, 2007, 7: 85–166.
<http://dx.doi.org/10.1089/ast.2006.0125>.
- [365] Anglada-Escudé G, Amado P J, Barnes J, et al. A terrestrial planet candidate in a temperate orbit around Proxima Centauri[J/OL]. *Nature*, 2016, 536: 437–440.
<http://dx.doi.org/10.1038/nature19106>.
- [366] De Rosa R J, Patience J, Wilson P A, et al. The VAST Survey - III. The multiplicity of A-type stars within 75 pc[J/OL]. *MNRAS*, 2014, 437: 1216–1240.
<http://dx.doi.org/10.1093/mnras/stt1932>.
- [367] 李竞, 余恒, 崔辰州. 英汉天文学名词 An English-Chinese Dictionary of Astronomy[M]. [S.l.]: 中国科学技术出版社, 2015.
- [368] NEWTON I. *Philosophiæ Naturalis Principia Mathematica*[M] // . 1687.
- [369] ESA. ESA Special Publication, Vol 1200 : The HIPPARCOS and TYCHO catalogues. Astrometric and photometric star catalogues derived from the ESA HIPPARCOS Space Astrometry Mission[C]. 1997.

附录 A 文内常用约定

A.1 物理符号含义

a	轨道半长径	U, B, V, I	Johnson 波段
d	质点二体间距离	u, i	SDSS 波段
P	轨道周期	A_V	V 波段消光系数
n	平均轨道角速度	μ	折合质量或刚性系数
e	轨道偏心率	Q, Q'_s	平衡潮耗散参数
i	轨道倾角	δ	平衡潮常数滞后角
M_\odot	太阳质量	G	万有引力常数
R_\odot	太阳半径	r_H	希尔（洛希）半径
M_J	木星质量	$U(r)$	非质点天体引力势
M_\oplus	地球质量	Ψ	行星轨道—恒星自转夹角
M_s	恒星质量	λ	Ψ 角的天球投影
R_s	恒星半径	S	自转角动量
M_p	行星质量	L	轨道角动量
m	视星等	Ω_s	恒星自转角动量
c	真空光速	V_s	恒星自转速度
ν	光子频率	b	凌星影响因子
k	玻尔兹曼常数	ρ_s	恒星密度
h	普朗克常数	g_s	恒星表面重力
T_d	星周盘温度	τ_s	恒星年龄
T_{eff}	有效温度	γ_s	恒星转动惯量系数
L	光度	a_{cr}	行星临界共转半长径
L_{IR}	红外光度	V_e	潮汐平衡恒星自转速度
Z	金属丰度	V_c	潮汐平衡恒星临界自转速度

A.2 首字母缩写

文内出现的首字母缩写主要参考自书籍 [367]，按照字母先后顺序排列如下：

ALMA	阿卡塔马大型毫米波阵	HJD	日心儒略日
AM	角动量	HST	哈勃空间望远镜
AMD	角动量亏损	IAU	国际天文学联合会
ASCL	南极巡天望远镜	IGW	内部重力波
AST3	天体物理源代码库	IR	近红外波段
AU	天文单位	JWST	詹姆斯韦伯太空望远镜
BB	黑体	LMC	大麦哲伦云
CS	环恒星	MMR	平运动共振
CCD	电荷耦合器件	MMSN	最小太阳星云质量
COM	质心	NASA	美国国家航空航天局
CSTAR	南极之星望远镜阵列	NIAOT	南京天文光学技术研究所
EB	掩食双星	NIR	近红外波段
ED	不接食双星	OGLE	光学引力透镜实验
EDV	掩食深度变化	PPD	原行星盘
ESA	欧洲航天局	PPS	行星—行星散射
ESO	欧洲南方天文台	RV	视向速度
ETV	掩食计时变化	RM	Rossiter-McLaughlin
EUV	极紫外线	SDSS	斯隆巡天
FFP	自由飘游行星	SED	光谱能量分布
FOV	视场	SMC	小麦哲伦云
FUV	远紫外线	TDV	凌星深度变化
GB	银核球	TNO	海外天体
GD	银盘	TP	测试粒子
GI	引力不稳定	TTV	凌星计时变化
HEC	宜居行星列表	UT	世界时
HJ	热类木星	YSO	初期恒星体

附录 B 二体运动

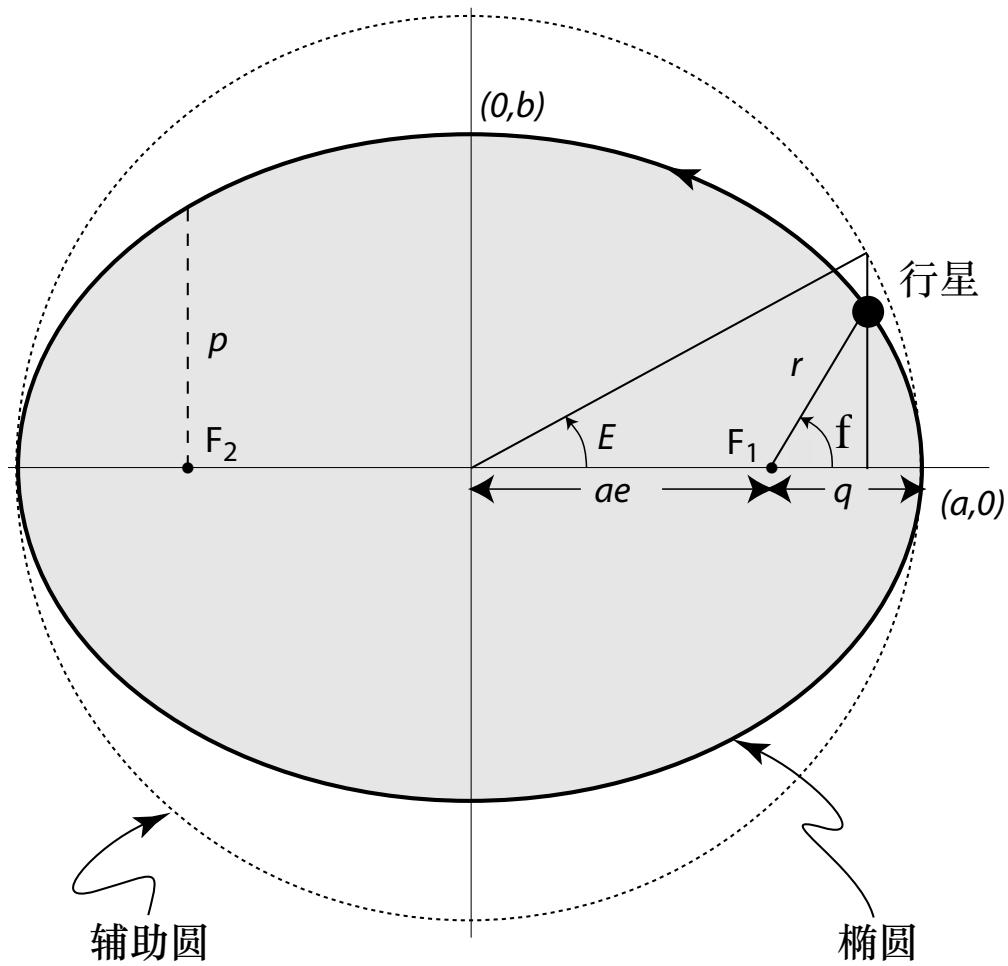


图 B-1: 二体在轨道平面内的椭圆运动示意图，图片来源 Perryman。

在次方反比的中心引力作用下，二体的运动轨迹为封闭的圆锥曲线^[368]。图 B-1 和 B-2 展示的是椭圆二体运动示意图，其中 $a, e, i, \omega, \Omega, f$ 被称作描述椭圆二体运动的六个轨道常数，文内符号几乎均沿袭自书本 [250]。在中心天体坐标系中，行星距离主星的标量距离 r 可表示为：

$$r = \frac{a(1 - e^2)}{1 + e \cos f} \quad (\text{B-1})$$

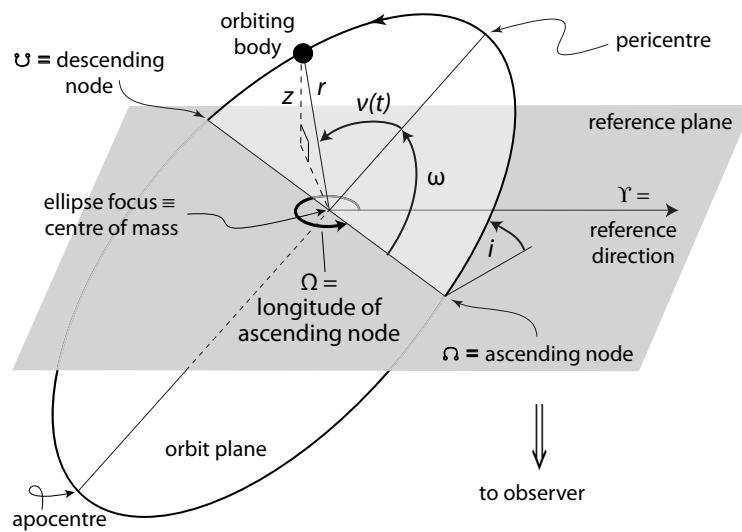


图 B-2: 椭圆二体运动轨道在三维空间内的示意图，图内标识分别为轨道参数与参考系。
图片来源 Perryman。

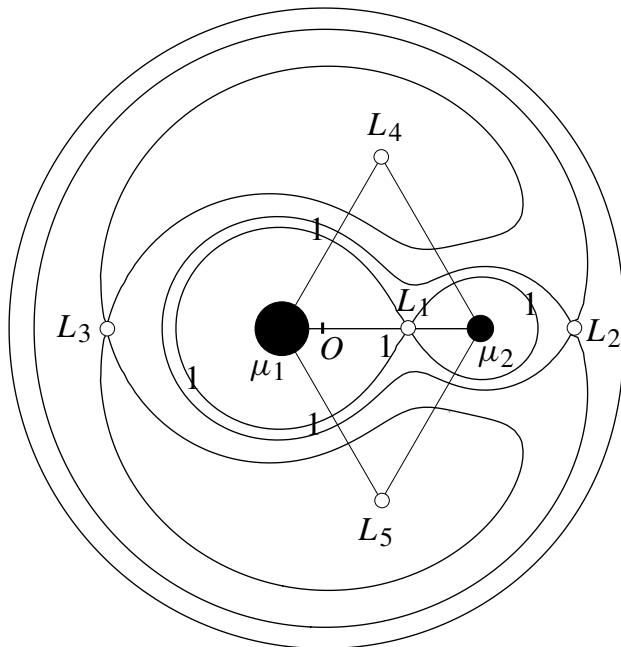


图 B-3: 双星中洛希瓣的示意图，伴星主星质量比 $\mu_2/\mu_1 = 0.2$ ，其中 L_1 被称为第一朗格朗日点，穿过它的等引力势面（用数字 1 来标注）分别被称作两颗星的洛希（希尔）半径。
图片来源书籍 [250]。

附录 C 赫罗图

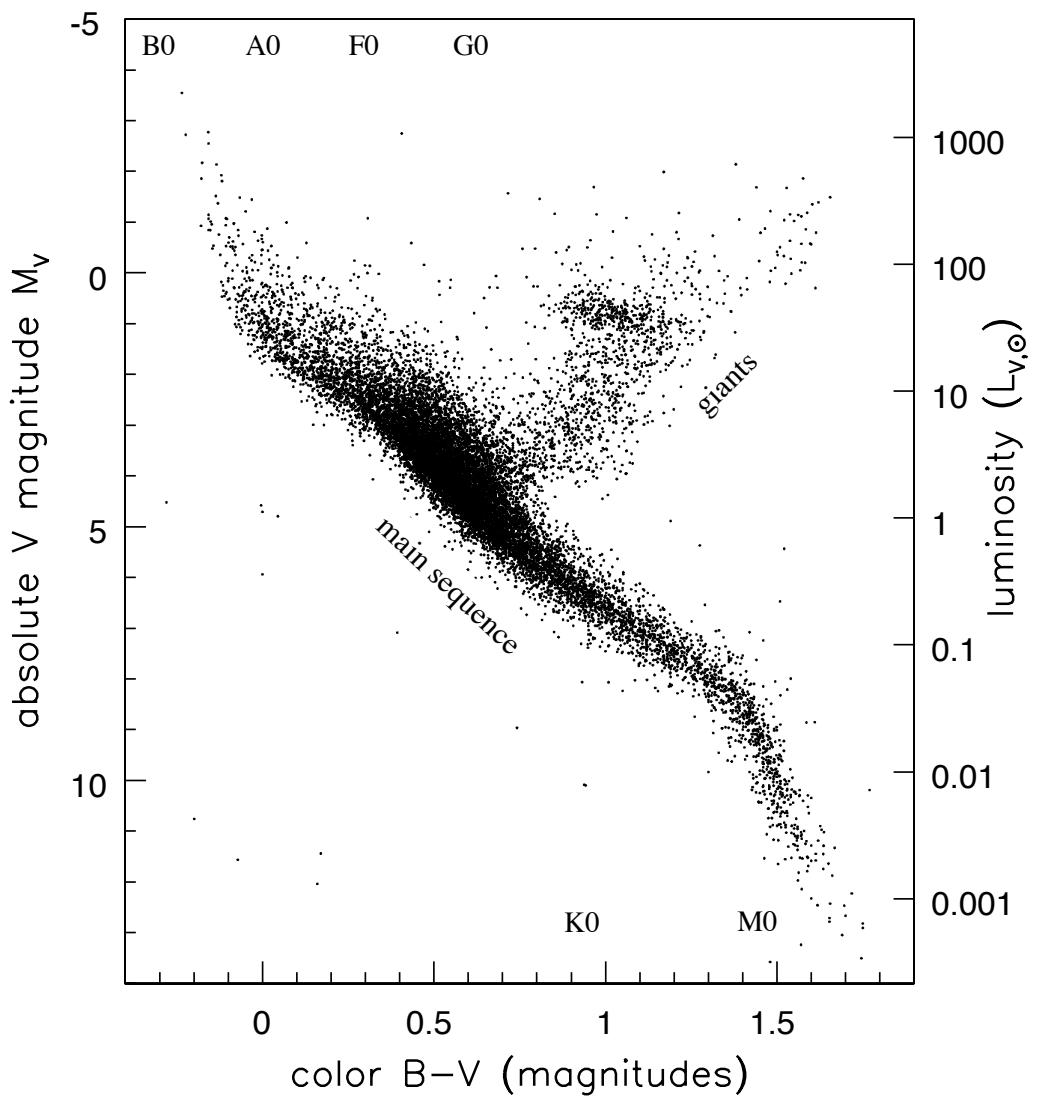


图 C-1: 太阳附近恒星赫罗图示意图，纵坐标 V 波段绝对星等，横坐标 B-V 色指数。另外按照色指数不同分别标注了恒星光谱型 (BAFGKM – 0)，以及绝对星等对应的恒星光度 (右侧纵坐标)，可以看到临近恒星主要分为主序以及巨星支。数据来源文献 [369]。

简历与科研成果

个人信息

姓名	孟泽洋
性别	男
出生年月	1989 年 8 月 25 日
籍贯	江苏省东台市
通讯地址	江苏省南京市栖霞区仙林大道 163 号 南京大学仙林校区天文与空间科学学院, 210089
联系方式	(+86) 15950459632
邮箱	mengzy1989@gmail.com
个人主页	https://meldonization.github.io

教育背景

09/1995 - 06/2001	江苏省东台市五烈镇木港小学
09/2001 - 06/2004	江苏省东台市五烈镇同安初级中学
09/2004 - 06/2007	江苏省东台市高级中学
09/2007 - 06/2011	南京大学天文系, 获理学学士学位, 江苏省南京市
09/2013 - 01/2014	University of Rochester, NY, USA
10/2015 - 10/2016	University of California, Santa Cruz, CA, USA
09/2011 - 现在	南京大学天文与空间科学学院天体力学与天体测量专业

获奖情况

2010	优秀学生
2010	国家励志奖学金

2012 研究生优秀奖学金

2014 研究生优秀奖学金

学术会议

2011 引力透镜暑期班暨研讨会

2011 中国天文学会 2011 年学术年会（报告）

2012 国际天文学联合会 2012 年大会（海报）

2013 中国天文学会 2013 年学术年会（报告）

2015 基本天文学的现状与挑战学术研讨会

2016 美国天文学年会 AAS meeting 228

2016 中国天文学会 2016 年学术年会（报告）

实测经历

2009 盱眙观测站实测天体物理 V 波段测光数据处理

2010 紫金山天文台太阳塔实测以及 H α 吸收线光谱数据分析

2011 国家天文台暑期实习光谱数据时间序列分析

2015 南极 Dome A 观测站 AST3-1 望远镜极夜远程观测 20+ 夜晚

2016 南极 Dome A 观测站 AST3-2 望远镜极夜远程观测 60+ 夜晚

专业技能

Python（熟练） • 中英双语（中文母语以及六级英语） • C 语言（计算机二级） • Fortran（数值计算） • Linux（精通） • 数据收集与分析（信号处理、远程操作与时间序列分析）

其他

2011 南京大学青年志愿者协会渊声巷小学主题活动

2015 ifanr/AppSolution Genius Writer

2016 Volunteer at Diversity Center Santa Cruz County

2017 Exoplanets Database 与 Telegram Query Bot 创造者

论文发表

- [1] **Meng, Zeyang**, Zhou, Xu, Zhang, Hui, Zhou, Jilin, Wang, Songhu, Ma, Jun, Zhang, Tianmeng, Fan, Zhou, and Zou, Hu: *Ghost Image Correction in CSTAR Photometry*, PASP, 125, 1015 (2013)
- [2] **Meng, Zeyang**, Quillen, Alice C., Bell, Cameron P. M., Mamajek, Eric E., Scott, Erin L., and Zhou, Ji-Lin: *A search for eclipsing binaries that host discs*, MNRAS, 441, 3733 (2014)
- [3] **Meng, Zeyang**, Xie, Ji-Wei, and Zhou, Ji-Lin: *Planetary Survival and Ejection in Transient Multiple Star Systems*, Formation, Detection, and Characterization of Extrasolar Habitable Planets, 293, 174 (2014)
- [4] **Meng, Zeyang**, D.N.C. Lin, T.M. Rogers and Zhou, Ji-Lin: *Evidence of tides as irrelevant roles in stellar obliquity damping by hot Jupiters*, in prep. (2017)

此外共有非一作 SCI 文章 6 篇，其中包括变源搜索与掩食行星候选体搜索（罗列如下）。更详细的列表请参见此链接。

- [5] Yang, Ming, Zhang, Hui, Wang, Songhu, and 26 co-authors including Meng, Zeyang: *Eclipsing Binaries From the CSTAR Project at Dome A, Antarctica*, ApJS, 217, 28 (2015)
- [6] Quillen, Alice C., Ciocca, Marco, Carlin, Jeffrey L., Bell, Cameron P. M., and Meng, Zeyang: *Variability in the 2MASS calibration fields: a search for transient obscuration events*, MNRAS, 441, 2691 (2014)
- [7] Wang, Songhu, Zhang, Hui, Zhou, Ji-Lin, and 24 co-authors including Meng, Zeyang: *Planetary Transit Candidates in the CSTAR Field: Analysis of the 2008 Data*, ApJS, 211, 26 (2014)

学位论文出版授权书

本人完全同意《中国优秀博硕士学位论文全文数据库出版章程》（以下简称“章程”），愿意将本人的学位论文提交“中国学术期刊（光盘版）电子杂志社”在《中国博士学位论文全文数据库》、《中国优秀硕士学位论文全文数据库》中全文发表。《中国博士学位论文全文数据库》、《中国优秀硕士学位论文全文数据库》可以以电子、网络及其他数字媒体形式公开出版，并同意编入《中国知识资源总库》，在《中国博硕士学位论文评价数据库》中使用和在互联网上传播，同意按“章程”规定享受相关权益。

作者签名：_____
____年____月____日

论文题名	(论文标题)				
研究生学号	DG1326007	所在院系	天文与空间科学学院	学位年度	2013
论文级别	<input type="checkbox"/> 硕士 <input type="checkbox"/> 硕士专业学位 <input checked="" type="checkbox"/> 博士 <input type="checkbox"/> 博士专业学位 (请在方框内画勾)				
作者电话	15950459632	作者 Email	mengzy1989@gmail.com		
第一导师姓名	周济林 教授	导师电话	13512540416		

论文涉密情况：

不保密

保密，保密期：____年____月____日至____年____月____日

注：请将该授权书填写后装订在学位论文最后一页（南大封面）。

