

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2025.01.06

小行星 (2572) Annschnell 测光数据分析——相接双小行星模型参数测定

黄敬^{1,2}, 王晓彬^{1,2,3}, 窦江培^{4,5}

(1. 中国科学院 云南天文台, 昆明 650216; 2. 中国科学院大学, 北京 100049; 3. 中国科学院 天体结构与演化重点实验室, 昆明 650216; 4. 中国科学院 南京天文光学技术研究所, 南京 210042; 5. 中国科学院 天文光学技术重点实验室, 南京 210042)

摘要: 太阳系小行星的密度/质量是理解其起源和演化历史的重要参数。小行星密度的测量一直都是具有挑战性的工作, 双小行星系统正好提供了测量小天体密度的机会。相接双小行星是一种同步双小行星, 其轨道半长轴等于两个小行星(假设为椭圆形)的最大半长轴之和。在云南-香港宽视场巡天观测数据中发现, 小行星 (2572) Annschnell 的光变曲线展现出典型的双小行星光度特征。为此, 构建了一套相接双小行星光变曲线反演程序, 通过计算得到 (2572) Annschnell 的两个天体的密度(约为 3.15 g/cm^3), 结果与 CV 或 CK 陨石的密度接近, 证实该小行星系统应是 C 族小行星成员。从归一化转动角速度 ($\Omega = 0.34$) 和无量纲系统角动量 ($H = 0.48$) 推断, 该相接双小行星可能由单个小行星经转动裂变成形。

关键词: 太阳系小行星; 洛希双小行星; 相接双小行星; 光度模型

中图分类号: P141.2 **文献标识码:** A

1 引言

小行星是太阳系早期内层行星子的遗留物, 小行星上保留有太阳系行星形成时期的信息。现在的小行星基本物理性质(如大小、形状、自转、表面散射特性、物质组成、质量等)及其分布是小行星形成以来经历的碰撞和动力学演化的结果。因此, 小行星基本物理参数的测定研究不仅可以用于理解小行星的起源和各种演化过程, 还可为太阳系行星形成的理论研究提供约束^[1]。

自 20 世纪 80 年代以来, 太阳系小行星物理性质观测研究发展迅速。测光观测、偏振

收稿日期: 2024-03-08; 修回日期: 2024-04-12

资助项目: 国家自然科学基金 (12373069, U2031210); 国家重大科研仪器研制项目 (11827804); 中国载人航天工程巡天空间望远镜专项 (CMS-CSST-2021-B08, CMS-CSST-2021-A11, CMS-CSST-2021-B0)

通讯作者: 王晓彬, wangxb@ynao.ac.cn

观测、光谱观测、雷达观测、直接成像观测及掩星观测等多种观测手段被用于小行星基本物理性质的测定研究^[2-6]。目前, 小行星的测光数据和近红外数据的样本数最多: NEOWISE 的近红外巡天观测获得了 43 000 多颗小行星的反照率和直径^[7]; 基于小行星的测光数据, 已测定了约 10 000 颗小行星的自转周期, 3 000 颗左右小行星的形状、自转参数以及表面散射性质参数。目前, 小行星密度的测定仍非常困难。双小行星系统为我们提供了测量系统密度的机会。基于类地行星和月球表面上双陨石撞击坑等数据, 推测双小行星系统的比例约为 15%^[8, 9]。实际上近地小行星中只发现了 94 个双小行星系统, 按已发现近地小行星数目 34 712, 其占比仅为 0.3%。在已发现的约 1 350 000 颗主带小行星中, 也只发现了 245 个双小行星系统^①, 占比为 0.02%。这意味着数目可观的双小行星系统尚未被发现。

双小行星探测的主要方法有: 直接成像、光度测量、雷达探测、掩星方法以及探测器探测等。地面直接成像观测需要大口径望远镜加自适应光学系统 (AO), 观测目标局限在尺寸较大的小行星, 例如主带小行星 (45) Eugenia 的观测^[10]; 雷达观测通过所获得的时延和多普勒频率数据来分辨双小行星, 观测目标仅限于近地小行星^[11, 12]; 掩星观测的目标稀少, 且观测不可重复; 光度测量适合所有小天体, 它是通过小行星特殊光变曲线形状来探测。目前, 人们已经探测到 502 个双小行星系统: 地面成像观测 44 个、空间成像观测 100 个、雷达观测 51 个、掩星观测 6 个以及光度测量 301 个。可以看出测光观测方法探测到的双小行星样本最多。空间成像观测可以发现双小行星系统, 受可用观测时间的限制, 更多地用于双小行星的认证。专门用于研究太阳系小行星的空间探测器比较少, 伽利略号在飞往木星期间掠过小行星 (243) Ida 时发现这颗小行星拥有一颗卫星, 这也是人类发现的第一个双小行星系统^[13]。我国的空间探测器嫦娥二号成功地观测了近地小行星 (4179) Toutatis, 得到了 (4179) Toutatis 的高分辨率图像, 发现其具有相接双小行星结构^[14]。NASA 的 DART 是专门针对近地双小行星 (65803) Didymos 的撞击任务, 该任务实施了对其次小行星 Dimorphos 的撞击, 观测到 Dimorphos 的轨道变化, 证明动能撞击是一种有效地球防御技术^[15]。

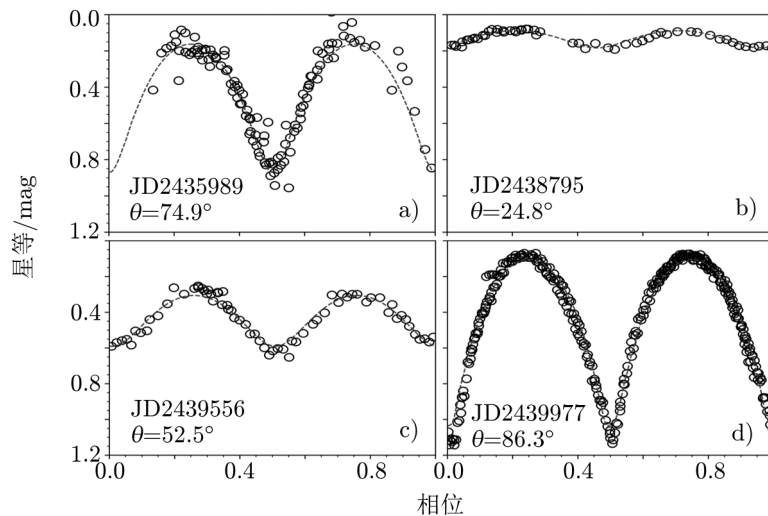
近年来, 国内外有很多不同核心科学目标的测光巡天项目, 例如位于美国夏威夷的 Pan-STARRS 巡天项目、Gaia 空间望远镜的巡天项目、针对近地小行星的 NEOWISE 巡天等。在巡天观测视场中, 除了巡天观测的核心科学目标, 还会包含大量太阳系小行星, 这些数据可用于小行星的轨道和小行星物理性质的研究。尤其是时序测光巡天观测, 可以提供视场中所包含小行星的整夜或更多时间覆盖的测光数据/光变曲线。现有多种成熟的 Python 工具, 能够协助我们在天文数据处理和光变曲线提取过程中进行天体测量位置处理和时间格式转换等关键步骤^[16]。从小行星的光变曲线形状可以探测是否为双小行星系统。本文的测光数据出自云南-香港宽视场巡天观测 (简称 YNHK 巡天)。YNHK 巡天项目的核心科学目标是搜寻新的凌星系外行星系统。巡天观测始于 2006 年, 至今发现了近百个系外行星候选体和各类变星^[17]。利用我们自己建立的巡天视场中移动天体识别的方法, 目前已从部分视场中提取出约 500 条太阳系小行星光变曲线^[18]。从 YNHK 巡天观测获得的主带小行星 (2572) Annschnell 的测光数据中, 我们发现它的光变振幅异常大 (约 0.83 mag), 且具有

^①<http://www.johnstonsarchive.net/astro/asteroidmoons.html>

“U”型最大值和“V”型最小值特征，这些特征反映该目标可能是相接双小行星系统。实际上，在近地小行星、特洛伊天体、柯伊伯带及冥族小天体中已发现了不少这类双小行星样本^[19-21]。

根据轨道周期，双小行星分为同步双小行星与非同步双小行星。同步双小行星是指两小行星相互绕转的周期与小行星的自转周期相同的系统，而不相等的系统被称为非同步双小行星。近似地，具有“碎石堆”结构的小行星可以被视为流体，其形状满足流体静力学转动平衡^[22]，也称为洛希椭球。作为 Chandrasekhar 的洛希双星理论^[23]拓展和延伸，人们提出了适用于双小行星的洛希双小行星理论^[19, 23]，用于描述同步双小行星中两个天体在彼此引力下的转动平衡状态。同步双小行星中不仅有分离双小行星（两个小行星相互分离），还有较为特殊的一类，即相接双小行星（两个小行星相互接触）。相接双小行星的轨道半长轴等于两个小天体最大半长轴之和。双小行星的相互掩食在光变曲线形成了“U”型的极大值和“V”型极小值特征。利用洛希双小行星理论，已成功地分析了太阳系各种类别相接双小天体的测光数据^[19-21, 24-26]。

特洛伊天体 (624) Hektor 是一个已被证实的相接双小行星。除了大的光变振幅，(624) Hektor 的部分光变曲线见图 1，显示了“U”型的极大值和“V”型极小值特征。早期，Dunlap 和 Gehrels^[27]用单个偏长椭球体分析了 (624) Hektor 的光变曲线；后来，多个研究团队应用洛希双小行星理论分析了 (624) Hektor 的光变曲线^[28-31]，估算出 (624) Hektor 的密度约为 2.48 g/cm^3 ；2006 年，Marchis 等人^[32]利用带有自适应光学系统的 Keck 望远镜对 (624) Hektor 进行直接成像观测，证实了 (624) Hektor 是相接双小行星并带有一个小卫星。小行星 (2572) Annschnell 的光变曲线形状与 (624) Hektor 的非常相似。



注：JD 为观测时的儒略日， θ 为观测时的视角（视线与转道法线之间的夹角）。

图 1 小行星 (624) Hektor 的光度观测值（空心散点）及双小行星模拟光度值（虚线）

小行星 (2572) Annschnell 是由德国天文学家 Reinmuth 在 1950 年 2 月 17 日发现的，

其绝对星等估计为 13.4 mag。Behrendr 的网站给出一个 6.3 h 的自转周期^①。NEOWISE 测定该小行星的反照率为 0.658, 估算的直径为 3.42 km^[33]。依据 SDSS 巡天和 Pan-STARRS 多色测光观测数据, (2572) Annschnell 被分类为 CX 类 (介于 C 类与 X 类之间)^[34-36]; 显然, NEOWISE 测定的高反照率与上述分类结果存在矛盾。目前, (2572) Annschnell 没有形状、自转和表面散射性质等物理参数的信息。

本文的研究目标就是结合 (2572) Annschnell 的新观测数据以及小行星中心下载的测光数据, 分析 (2572) Annschnell 洛希双小行星模型, 为未来利用中国空间站望远镜 (Chines Space Station Telescope, CSST) 的星冕仪 (CPI-C) 认证观测提供信息和制定观测计划做准备。第 2 章介绍 (2572) Annschnell 的测光观测与数据处理; 第 3 章介绍双小行星光度模型; 第 4 章对目标小行星光变曲线进行分析; 最后一部分对全文进行总结。

2 观测与数据处理

本文共分析了 12 条小行星 (2572) Annschnell 的光变曲线, 其中, 7 条来自 YNHK 巡天观测, 5 条来自国际小行星中心^②。

YNHK 巡天观测使用了丽江高美古观测站的 45 cm 口径宽视场望远镜 (观测站代码为 O45), 巡天观测的主要科学目标是搜寻新凌食系外行星与小行星。望远镜配备了一个 4000 × 4000 的 CCD 相机以及一个滤光片卡槽 (可用 Clear 和 R 两个滤光片), 巡天观测使用了 Clear 滤光片。望远镜的视场大小为 1.67° × 1.67°, 对应的空间分辨率为每像素 1.47''^[17]。YNHK 巡天观测是无人值守的观测模式。通过远程控制预先编辑的观测脚本, 使整夜的观测全自动执行 (包括本底、暗流和平场采样观测以及目标观测), 详细见参考文献 [17]。YNHK 巡天选取了六个观测区域以供全年的巡天观测, 每个区域包括至少四个天区, 观测时循环指向四个天区。单个指向的曝光时间为 8 s, 一个循环约 5 min。因此, 巡天观测数据的时间分辨率为 5 min。该巡天项目已持续进行了 7 a, 积累了大量天体的长时序测光数据 (包括小行星)。小行星 (2572) Annschnell 的测光数据来自 2017 年 02 月 26 日—04 月 08 日的巡天观测, 具体的观测信息列于表 1, 1—7 列分别为观测时间、小行星地心赤道坐标、地心距离、日心距离、太阳相位角、视星等以及观测的望远镜。

YNHK 巡天观测的单次曝光时间为 8 s, 可探测视场中包括 10 000 ~ 30 000 个天体。为了高效处理所获得的观测图像以及探测各种天文事件及小行星, 基于 IRAF 软件包和 Python 工具, 我们自主开发了一套集数据处理、凌食信号探测以及视场中小行星识别等功能的自动管线工具。自动管线的功能包括观测图像系统误差处理 (即观测图像检查、本底去除、暗流和平场改正、宇宙线识别和剔除)、观测图像天体测量校准、与其他星表的交叉匹配以及天体的光度和天体测量位置的测量, 数据处理流程见图 2。

针对 YNHK 望远镜及所配 CCD 相机, 我们选择了 14 个参数函数来描述 CCD 图像中

^①<https://obswww.unige.ch/behrend/page4cou.html>

^②<https://www.alcdef.org>

表 1 本文分析用到的 (2572) Annschnell 测光数据

时间 UTC	(α, δ) /($^{\circ}$)	Δ /AU	r /AU	Phase /($^{\circ}$)	V /mag	望远镜
2017-02-26 20:38:57	(217.98, -15.47)	1.526	2.161	24.1	17.1	YNHK
2017-02-27 21:09:47	(218.13, -15.47)	1.514	2.160	24.0	17.1	YNHK
2017-02-28 21:09:01	(218.30, -15.48)	1.502	2.158	23.8	17.1	YNHK
2017-03-02 19:05:08	(218.56, -15.50)	1.479	2.156	23.4	17.1	YNHK
2017-03-07 19:09:27	(218.69, -13.74)	1.166	2.113	11.8	16.1	YNHK
2017-04-06 17:21:19	(218.59, -13.62)	1.160	2.112	11.3	16.1	YNHK
2017-04-08 17:27:34	(218.31, -13.40)	1.149	2.110	10.3	16.0	YNHK
2017-06-08 04:58:04	(209.27, -7.28)	1.231	2.058	21.3	16.5	CS3
2017-06-09 04:52:38	(209.30, -7.29)	1.238	2.057	21.7	16.5	CS3
2017-06-10 04:36:11	(209.32, -7.24)	1.246	2.056	22.0	16.5	CS3
2017-06-11 04:43:09	(209.35, 7.25)	1.253	2.056	22.3	16.5	CS3
2018-09-29 04:53:53	(24.50, 10.50)	1.602	2.563	8.1	17.1	CS3
2018-09-30 07:28:35	(24.30, 10.38)	1.599	2.564	7.6	17.0	CS3

注: CS3 (Center for Solar System Studies) 拥有 7 架望远镜, 通常用于小行星族群研究项目。

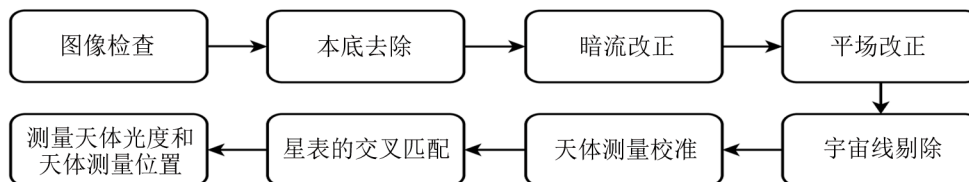
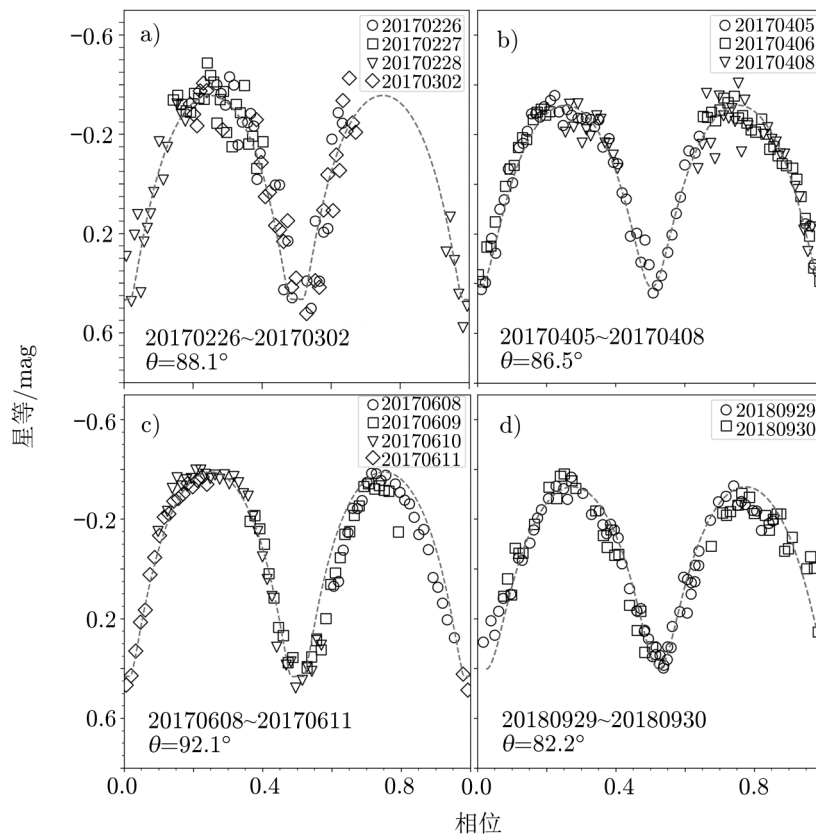


图 2 YNHK 巡天数据处理流程图

天体像元位置与 Gaia DR3 星表位置之间的转换关系 (也称天体测量校准), 转换的天体位置与星表位置的 $(O - C)$ 均方根在 $0.16''$ 之内 (详见文献 [18])。利用观测图像的天体测量解, 可以实现与其他星表的交叉匹配, 以获得视场中每个天体的物理信息。更重要的是, 可按科学目标预制每个天区的输入星表, 用于自动测光和数据提取。对于视场中的太阳系小行星, 我们利用自主开发的时域巡天中移动天体识别方法^[18], 获得视场中太阳系小天体的初始位置及运动速度。基于这些信息, 将小行星的视位置添加到输入星表中, 可以实现太阳系小天体的自动测光和数据提取。

应用 IRAF 的孔径测光可以测定图像中所含天体的光度。测量时需要选取最优的孔径大小, 以保证最优的测光精度。为了探测到光变曲线中暗弱的凌食信号 (食深通常在 $0.01 \sim 0.02$ mag), 我们还进行了测光数据中系统噪声改正 (也称红噪声改正)^[37, 38], 提高了光变曲线的信噪比。粗略统计, 通过系统误差改正后的数据产品中, V 波段光度高于 13.8 mag 的恒星测光精度高于 0.01 mag。经过数据处理后的 (2572) Annschnell 的 7 晚的测光数据用散点列于图 3。

为了便于统一, 我们将 YNHK 巡天中的小行星观测时间转换为日心儒略日 (HJD)。按



注: 各分图中分别标注了观测日期和视界角 θ 。

图 3 小行星 (2572) Annschnell 光变曲线 (散点) 和洛希双小行星模型拟合结果 (虚线)

照小行星的地心距离, 对小行星观测记录时刻做了小行星光行时改正。对于从小行星中心下载的测光数据也做了相应的光行时改正。由于该小行星的反照率与分类结果存在较大差异, 所以小行星大小的测量结果存在较大的不确定性。因此, 本文的分析仅用光变的相对变化 (扣除每条光变曲线的平均值) 来分析系统的物理参数。

(2572) Annschnell 测光数据分析共使用 12 条来自 2017 年和 2018 年的光变曲线。在一个较短的观测时间内 (例如几天内), 小行星的光变曲线形状的变化很小; 但当观测时间相隔较长时, 由于观测几何 (观测视界角和太阳相位角) 发生明显变化, 小行星光变曲线形状也发生明显变化。正是利用不同观测时期得到的不同的光变曲线, 我们可以测定小行星或双小行星的物理参数 (如小行星形状、自转参数/双小行星绕转的轨道参数等)。为了获得覆盖较完整的小行星转动相位曲线, 我们将这 12 条光变曲线分成 4 个时间段来拟合, 如图 3 所示。基于洛希双小行星理论, 我们建立了一个简单的相接双小行星光度模型, 并对 (2572) Annschnell 的光变曲线进行反演分析。

3 双小行星光度模型

3.1 洛希双小行星理论

近年来,随着越来越多的同步双小行星样本被观测到^[21, 26, 29, 39-42],人们对同步双小行星的研究兴趣越来越浓。同步双小行星的两个小行星相互绕转的周期与小行星的自转周期相同,小行星的光度表现为单一周期的变化。大多数小行星被认为具有较低密度的“碎石堆”结构(指颗粒以引力聚集,内部无张力或很低的张力,有中等的多孔度),可以将“碎石堆”结构小行星看成不可压缩的流体,这样就可以应用流体转动稳平衡理论研究小行星的形状。应用 Chandrasekhar 的洛希理论^[43],Lacerd 和 Jewitt 建立了双小行星洛希模型^[31],给出稳定的同步双小行星解满足式(1)和(2),即小行星的相互绕转角速度 ω 、两个小行星的质量比 q 、密度 ρ 以及两个小行星的洛希椭球形状(指双小行星中一个小行星受到自身引力和另一个小行星潮汐引力作用下的一种转动平衡形状)之间的约束关系:

$$\frac{(3+q)a_p^2 + c_p^2}{qb_p^2 + c_p^2} = \frac{A_1 a_p^2 - A_3 c_p^2}{A_2 b_p^2 - A_3 c_p^2}, \quad (1)$$

$$\frac{\omega^2}{\pi G \rho} = 2(a_p b_p c_p) \frac{A_1 a_p^2 - A_3 c_p^2}{(3+q)a_p^2 + c_p^2} (1+q). \quad (2)$$

在上两式中, $q = M_p/M_s$ 为主小行星与次小行星的质量之比,式(1)可用于计算主星处于次小行星潮汐引力下的洛希形状(a_p, b_p, c_p),式(2)则给出了主星洛希形状、轨道角速度 ω 以及天体密度 ρ 之间的约束关系。辅助量 A_1, A_2 和 A_3 是小行星洛希形状参数的函数,具体的计算解析式可参考文献[23]中的公式(12)-(17)。

如果将上两式中的质量比用 $1/q$ 替代,计算的则是次小行星 M_s 的洛希形状(a_s, b_s, c_s)。在洛希双小行星理论中,也将式(2)左边称为归一化的转动角速度,即 $\Omega = \frac{\omega^2}{\pi G \rho}$ 。有效的洛希双小行星解要求主小行星和次小行星两次计算的归一化的转动角速度相等^[31]。

3.2 相接双小行星光度模型

相接双小行星是同步双小行星的一种,这种双小行星相互绕转轨道半长轴等于两个天体最大半长轴之和 $D = a_p + a_s$,且两个小行星的自转角速度与相互绕转角速度相同,观测到的光变曲线显示为单一周期光变。简单地说,任一时刻观测到的双小行星的积分光度是两个小行星被照亮且可见表面反射太阳光的总和。理论上讲,如果给定小行星的形状、自转参数(自转轴指向和自转速率)、光源和观测者的方向,应用合适的散射律(如Lommel-Seeliger律)可以计算单个小行星的积分光度。对于双小行星,如果已知两小行星相互绕转的轨道参数,可以计算两小行星的相互位置,以判断是否有相互遮挡光线或视线事件。将相互遮挡引起的光度减少部分从两小行星总光度中扣除,即为双小行星的积分光度。反演问题则涉及依据观测的双小行星光变曲线测定光度模型中的参数。

双小行星光变模型中的参数比单个小行星的物理参数多。假设系统中两个天体处于洛希平衡状态,且利用洛希双小行星方程对双小行星的洛希椭球形状进行约束,可极大地减少

小行星形状参数个数。即便在这样的假设下, 求解洛希双小行星参数, 仍要求有观测几何跨度较大的多个可视期的光变曲线。

本文的研究目标小行星 (2572) Annschnell 的观测集中在 2017 年和 2018 年的 4 个时间段, 但观测几何的变化不大, 因此模数参数的求解仍存在困难。这里我们做了一些简化, 不考虑散律, 仅用小行星被照亮的视截面的大小来近似表征小行星的亮度。如式 (3) 表示, 双小行星积分光度 $F(t)$ 的计算分成三部分: 主小行星的光度 $F_1(t)$, 卫星的光度 $F_2(t)$, 因掩食被遮挡的光度 $F_m(t)$,

$$F(t) = F_1(t) + F_2(t) - F_m(t) . \quad (3)$$

在式 (3) 中, $F_1(t)$ 和 $F_2(t)$ 的计算需要小行星的形状、自转轴指向以及相应时刻的观测几何信息。双小行星的相互绕转轨道参数为: 轨道半长轴 D 、偏心率 e 、轨道法线指向 $(\lambda_{\text{orb}}, \beta_{\text{orb}})$ 、绕转角速度 ω 以及时刻 t_0 对应的绕转初相位角 ϕ_{m0} 。双小行星绕转轨道参数可以计算任一时刻两个小行星的相对位置, 当两个小行星中心连线在天空背景上的投影距离小于两个小行星的最大半长轴之和时, 掩食发生, 则可计算被遮挡的光度 $F_m(t)$ 。

本文的反演计算中, 假设双小行星的轨道为圆轨道 ($e = 0$)。 t_0 一般取为其中一个光度极小值发生时刻, 此时两小行星的最长轴的连线与视线方向重合。相接双小行星模型定义两个小行星的自转轴指向与绕转轨道的法线一致, 因此, 两个小行星的自转参数均取 $(\lambda_{\text{orb}}, \beta_{\text{orb}})$ 及 ω 。同时, 我们还定义 t_0 时刻两个小行星自转初相位也与绕转的初相位角相同 (即 $\phi_{p0} = \phi_{s0} = \phi_{m0}$)。

考虑洛希双小行星理论, 相接双小行星的光度模型参数 P 包含主小行星形状 (a_p, b_p, c_p) 、次小行星形状 (a_s, b_s, c_s) 、轨道参数 $(D, \lambda_{\text{orb}}, \beta_{\text{orb}}, \omega, \phi_{m0})$ 以及洛希双小行星参数 q 和 ρ 。基于所涉参数和洛希双小行星理论, 我们建立了一个简单的相接双小行星光度模型。按星等计算的双小行星的积分光度表示为:

$$\begin{cases} M_{\text{binary}}(t, P) = -2.5 \lg(S_{\text{binary}}) \\ S_{\text{binary}}(t, P) = S_1 + S_2 - S_{\text{occ}} \end{cases}, \quad (4)$$

其中, t 为观测时刻, P 为模型参数, S_1 和 S_2 为 t 时刻主小行星和卫星的视截面积。这里忽略了太阳相位角的影响 ($\alpha = 0^\circ$), 原因是主带小行星的相位角较小。 S_{occ} 的计算也仅考虑了两个小行星相互遮挡的视截面。后续的工作将开展包含散射律和小行星不规则形状的双小行星光度模型建立以及更多双小行星的光度反演研究。

3.3 相接双小行星光度模型测试

为了验证我们所建立的相接双小行星光度模型的可靠性, 我们模拟了特洛伊相接双小行星 (624) Hektor 在 1957—1968 年的 4 条可视期的光变曲线。如图 1 所示, 图中的虚线为用简化的相接双小行星模型计算的 (624) Hektor 的理论值, 图 1b) 中所列的 (624) Hektor 的洛希双小行星参数取自文献 [31, 44]。不同观测时间段的观测时间 (JD) 与观测视界角 (θ) 已经在图中标明。模拟值 (虚线) 与观测的光变曲线 (空心散点) 的一致性很好, 说明我们简化的相接双小行星模型可以描述观测数据。可以发现, 图 1a) 与图 1d) 的光变曲线拥有较

大的振幅，这是由于观测时拥有较大的视界角，视线接近小行星赤道平面，掩食产生的光度振幅较大，同时展现出“U”型最大值和“V”型最小值的特征；当观测视界角较小时（见图 1b) 和图 1c)），由于视线接近自转轴，难以观测到掩食事件，光变曲线振幅较小。

4 小行星 (2572) Annschnell 测光数据分析

4.1 光变周期分析

利用 Lomb-Scargle 周期图，我们对 YNHK 观测得到的 (2572) Annschnell 的 7 晚测光数据进行光变周期分析。由图 4 可知，周期的最大值位于 $7.585 \text{ cycle} \cdot \text{d}^{-1}$ 处。考虑到小行星光变的双峰性质，小行星 (2572) Annschnell 合理的光变频率应为 $3.7925 \text{ cycle} \cdot \text{d}^{-1}$ （对应的光变周期为 6.328 h）。

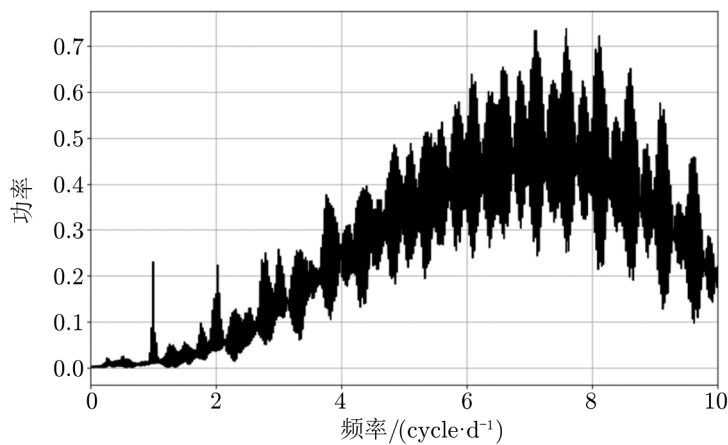


图 4 小行星 (2572) Annschnell 的新测光数据周期分析的 Lomb-Scargle 周期图

按得到的光变周期值，将 2 个时间段的观测数据折成转动相位光变曲线（图 3a) 和 b)）。用光度最大值与最小值的差进行计算可得，两个不同时段的光变振幅约为 0.83 mag 和 0.76 mag。光变振幅的变化主要由观测几何中视界角（观测视线与轨道法线之间的夹角）的变化引起。

4.2 反演数据生成

与单个小行星测光数据反演相比，双小行星的测光数据反演涉及的参数更多，意味着对反演所需的测光数据要求更苛刻。如果目标双小行星测光数据的几何跨度（视界角的变化范围）较小，参数之间会出现退化现象。为此，我们采用扫描参数空间的方法搜寻参数的最或然解，但是该过程非常耗时。考虑到在一个短的观测时段（例如连续几天），观测几何变化不大，光变曲线的形状变化可以忽略。为了提高扫描计算效率，实际拟合的是不同观测时段中的光变曲线形状。针对 (2572) Annschnell 测光观测情况，我们将 12 晚的观测分成 4 个观测时段。基于这 4 个时间段的观测数据，或准确地说是转动相位光变曲线（相位范围为 $0 \sim$

1), 对每个时间段的光变曲线进行了重采样, 即按均匀相位分布进行重采样。本研究均匀采样点数为 $n = 100$, 采样相位点对应的光度值则是通过对同一观测时段内光变相位曲线的傅里叶级数拟合函数进行计算而得到。对应地生成了 4 条用于反演计算的“采用光变曲线”, 该方法可以节省反演分析时间, 同时可以降低观测误差对反演分析的影响。

4.3 反演方法和计算流程

类似于单个小行星测光反演方法, 双小行星测光数据的反演也是通过对比给定参数的模型值与“采用观测值”的残差平方和。残差平方和 (用 χ^2 表示) 的最小值对应洛希双小行星模型参数的最或然解:

$$\chi^2 = \sum_{j=1}^{nlc} \sum_{i=1}^n [M_{\text{obs}}(i, j) - M_{\text{mod}}(P, i, j)]^2, \quad (5)$$

其中, $M_{\text{mod}}(P, i, j)$ 为洛希双小行星模拟星等, $M_{\text{obs}}(i, j)$ 为“采用观测值”, $P=(a_p, b_p, c_p, a_s, b_s, c_s, \lambda_{\text{orb}}, \beta_{\text{orb}})$ 为模型中含的待测参数。下标 (i, j) 指第 j 条相位光变曲线的第 i 个数据点。具体地, 反演共有光曲线数 $nlc = 4$, 每个相位光变曲线共取 $n = 100$ 个数据点。按一定的步长, 采用了网格扫描待测参数空间的方法, 获得待测参数值的 χ^2 后验分布。从参数的后验分布中得到双小行星系统待测参数的最或然解。由于前人所测量的小行星的反照率结果与由色指数分析的小行星分类结果对应的物质组成差异较大, 相应的小行星大小测量误差较大。在本文的分析中, 没有拟合小行星的大小, 而是将主小行星的最大半长轴设为 $a_p = 1$ 。实际的计算过程如下。

(1) 对选定的扫描参数 $(q, c_p, c_s, \lambda_{\text{orb}}, \beta_{\text{orb}})$, 以给定步长网格扫描设定的参数空间, 给出 5 个扫描参数的具体值。

(2) 按给定 $(q, c_p, c_s, \lambda_{\text{orb}}, \beta_{\text{orb}})$ 的值, 利用式 (1) 计算 (a_s, b_p, b_s) , 其中, a_s 由质量比 q 及 a_p 给出。

(3) 对所选任一组参数 P , 计算双小行星的理论模型光度, 以及与“采用观测值”的残差的平方和 $\chi^2(P)$ (如公式 (5))。

(4) 进行扫描参数的取舍。即将 (q, a_p, b_p, c_p) 和 $(1/q, a_s, b_s, c_s)$ 的值分别代入到式 (2) 中, 比较两个小行星的“归一化转动角速度” Ω 值是否相同, 如果相同则保存这个洛希双小行星解。

(5) 选取 χ^2 的最小值所对应的参数为双小行星参数的最或然解。

(6) 利用式 (2) 进行小行星密度估算。

为了节省扫描时间, 我们预先由小行星 (2572) Annschnell 的 4 个时间段的光变振幅值, 粗略地得到双小行星轨道面法线指向 $(\lambda_{\text{orb}}, \beta_{\text{orb}})$ 为 $(302^\circ, 22^\circ)$, 因此将 λ_{orb} 的扫描范围限制在 $285^\circ \sim 315^\circ$, β_{orb} 的扫描范围限制在 $17^\circ \sim 47^\circ$ 。依据文献 [45] 的研究结果, 考虑小行星 (2572) Annschnell 的测光数据的光变振幅、绕转角速度 ω 及小行星的密度范围 ($1 \sim 5 \text{ g/cm}^3$), 我们设定两个小行星的质量比 q 的扫描范围为 $0.4 \sim 1.0$, c_p 和 c_s 的扫描范围分别为 $0.6 \sim 0.99$ 和 $0.4 \sim 0.99$ 。参数 q 、 c_p 和 c_s 的扫描步长均为 0.01, λ_{orb} 和 β_{orb} 的扫描步长为 1° 。

4.4 反演结果

完成所选参数空间扫描后,我们会得到被扫描参数的 χ^2 分布(如图 5 所示)。图 5 中的 χ^2 值是经过归算的值,即由式 (5) 计算出的 χ^2 值除以最佳模型对应的 χ_{best}^2 值。其中,参数 (q, c_p, c_s) 给出的是参数值随 χ^2 的分布,轨道法线指向 $(\lambda_{\text{orb}}, \beta_{\text{orb}})$ 给出的是 χ^2 热力图。从图 5 可以看出,参数 q, c_p 的分布比较窄,说明观测结果对这两个参数约束较好,测量的精度也高于 c_s 。轨道法线指向 $(\lambda_{\text{orb}}, \beta_{\text{orb}})$ 的 χ^2 热力图反映出观测对参数的测定精度较差,这主要因为所用光变曲线观测的视界角 θ 的变化范围太小;这需要更多观测来提高该参数的准确度。从参数的 χ^2 分布中,我们得到小行星 (2572) Annschnell 的测光反演的最佳解,详细列于表 2。

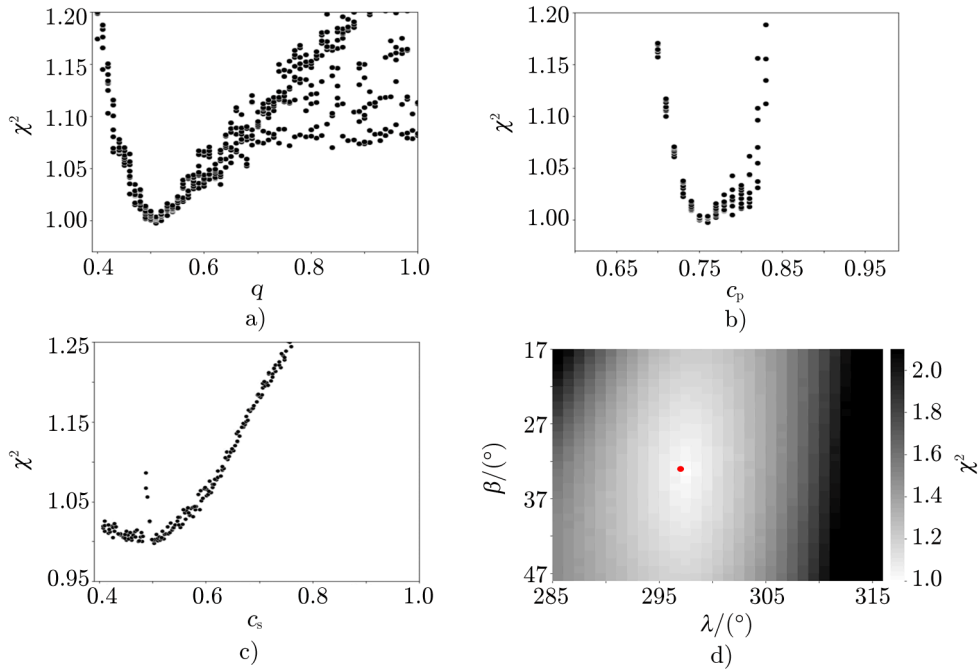


图 5 参数分布

表 2 小行星 (2572) Annschnell 测光分析结果

参数	值
质量比 q	0.51
主小行星形状 $(a_p : b_p : c_p)$	(1.00 : 0.84 : 0.76)
次小行星形状 $(a_s : b_s : c_s)$	(1.06 : 0.57 : 0.53)
轨道面法线 $(\lambda_{\text{orb}}, \beta_{\text{orb}})$	(297°, 33°)
历元 t_0, ϕ_{m0}	2 457 813.398, 90
绕转角速度 ω	3.792 5 cycle · d ⁻¹
密度 ρ	3.15 g/cm ³

图 3 展示了 (2572) Annschnell 的最佳洛希双小行星光度模型值 (虚线) 与观测数据 (散点) 的比较。可以看出, 所获得的相接双小行星理论模型能很好地模拟 4 个时间段观测的光变曲线。图中拟合不理想的地方是由于真实的小行星形状与理论的三轴椭球体有偏差, 例如, 小尺度的凸起和撞击坑之类的。无论如何, 目前所获得的洛希双小行星模型解为我们提供了了解小行星密度的机会。依据这个模型解, 估计小行星 (2572) Annschnell 的密度下限为 $\rho \approx 3.15 \text{ g/cm}^3$ 。

5 总结与讨论

在 YNHK 巡天观测中包含数目可观的小行星。时序巡天观测中所包含的小行星测光数据呈现为持续几晚的光变曲线。这样的数据非常有利于小行星物理性质研究, 如本研究中涉及的小行星 (2572) Annschnell 的物理性质。

(1) 由 YNHK 巡天得到的主带小行星 (2572) Annschnell 7 晚的光变曲线, 发现其具有明显的特征——大的光变振幅 (0.83 mag)、“U”型最大值和“V”型最小值, 说明 (2572) Annschnell 可能是一个相接双小行星。

(2) 应用洛希双小行星理论, 假设小行星的形状为洛希椭球, 我们建立了一个简单的双小行星光度模型, 然后分析了 (2572) Annschnell 的 12 条光变曲线 (其中 7 条为新观测得到的, 5 条是从国际小行星中心下载的), 得到该目标的洛希双小行星模型最佳解为 P_{best} = 主小行星形状 ($a_p = 1.0$, $b_p = 0.84$, $c_p = 0.76$)、次小行星形状 ($a_s = 1.06$, $b_s = 0.57$, $c_s = 0.53$)、轨道参数 ($D = 2.06$, $\lambda_{\text{orb}} = 302^\circ$, $\beta_{\text{orb}} = 22^\circ$, $\phi_{m0} = 0$) 以及洛希双小行星参数 ($q = 0.51$)。由洛希双小行星参数估算出 (2572) Annschnell 密度为 $\rho \approx 3.15 \text{ g/cm}^3$, 这个值接近于 CV 或 CK 陨石的密度, 推测小行星 (2572) Annschnell 是含碳的小行星, 与斯隆数据和 Pan-STARRS 的估算类别 CX 类一致。用碳类小行星的典型反照率 0.057 和绝对星等 13.3 mag 来计算, (2572) Annschnell 的等效球直径为 12.18 km, 对应的主小行星的椭球 3 个半轴为 (7.07, 5.93, 5.37) km; 第二小行星的椭球 3 个半轴为 (7.49, 4.03, 3.75) km。

(3) 依据所获得的小行星 (2572) Annschnell 的洛希模型解, 我们估算出双小行星的归一化转动角速度为 $\Omega = 0.34$, 无量纲系统角动量为 $H = 0.48$ (具体计算公式见文献 [46] 的附录 A); 按照文献 [46] 的研究结果, 我们推断相接双小行星 (2572) Annschnell 可能由单个小行星经转动裂变形成。

(4) 目前, 依据 (2572) Annschnell 的光变曲线进行双小行星特征的研究只是一种间接手段, 需要其他手段来证实所发现双小行星的真实性。我们希望借助具有高像质、强探测能力的 CSST 上配备的星冕仪 (CPI-C) 模块来实现双小行星的认证。例如, 星冕仪在遮挡周围亮星的情况下, 利用其高空间分辨率可观测双小行星星像轮廓的双峰; 也可以通过多次成像观测, 测量其光心位置变化, 从而实现 (2572) Annschnell 的双小行星结构的认证。

参考文献:

- [1] Michel P, Demeo F E, Bottke W F. *Asteroids IV*, 2015, 1(3): 1
- [2] Li J Y, Helfenstein P, Buratti B. *Asteroids IV*, 2015, 86: 277
- [3] Belskaya I, Cellino A, Gil-Hutton R, et al. *Asteroids IV*, 2015, 66: 151
- [4] Benner L A M, Busch M W, Giorgini J D, et al. *Asteroids IV*, 2015, 1: 165
- [5] DeMeo F E, Alexander C M O, Walsh K J, et al. *Asteroids IV*, 2015, 1: 13
- [6] Āurech J, Carry B, Delbo M, et al. *Asteroids IV*, 2015, 66: 183
- [7] Mainzer A, Bauer J, Grav T, et al. *ApJ*, 2011, 731(1): 53
- [8] Bottke J W F, Melosh H J. *Nature*, 1996, 381(6577): 51
- [9] Bottke W F, Melosh H J. *Icarus*, 1996, 124(2): 372
- [10] Merline W J, Close L M, Dumas C, et al. *Nature*, 1999, 401(6753): 565
- [11] Ostro J. *Reviews of Modern Physics*, 1993, 65(4): 1235
- [12] Magri C, Howell E S, Nolan M C, et al. *Icarus*, 2011, 214(1): 210
- [13] Belton M J S, Chapman C R, Veverka J, et al. *Science*, 1994, 265(5178): 1543
- [14] Huang J C, Ji J H, Ye P, et al. *Scientific Reports*, 2013, 3(1): 3411
- [15] Daly R T, Ernst C M, Barnouin O S, et al. *Nature*, 2023, 616(7957): 443
- [16] Ji J H, Tan D J, Bao C H, et al. *RAA*, 2023, 23(12): 125015
- [17] Gu S H, Wang X B, Yeung B, et al. *Astronomische Nachrichten*, 2022, 343(9): e20224022
- [18] Xu X Y, Wang X B, Muinonen K, et al. *MNRAS*, 2023, 521(3): 3925
- [19] Mann R K, Jewitt D, Lacerda P. *AJ*, 2007, 134(3): 1133
- [20] Sheppard S S, Jewitt D. *AJ*, 2004, 127(5): 3023
- [21] Thirouin A, Sheppard S S. *AJ*, 2018, 155(6): 248
- [22] Scheeres D J, Britt D, Carry B, et al. *Asteroids IV*, 2015, 66: 745
- [23] Chandrasekhar S, Lebovitz N R. *ApJ*, 1963, 137: 1172
- [24] Descamps P. *Planetary and Space Science*, 2008, 56(14): 1839
- [25] Thirouin A, Sheppard S S, Noll K S. *ApJ*, 2017, 844(2): 135
- [26] Thirouin A, Sheppard S S. *AJ*, 2017, 154(6): 241
- [27] Dunlap J L, Gehrels T. *AJ*, 1969, 74: 796
- [28] Cook A F. *International Astronomical Union Colloquium*, 1971, 12: 155
- [29] Hartmann W K, Cruikshank D P. *Icarus*, 1978, 36(3): 353
- [30] Weidenschilling S J. *Icarus*, 1980, 44(3): 807
- [31] Lacerda P, Jewitt D C. *AJ*, 2007, 133(4): 1393
- [32] Marchis F, Āurech J, Castillo-Rogez J, et al. *ApJL*, 2014, 783(2): L37
- [33] Masiero J R, Mainzer A K, Grav T, et al. *ApJ*, 2011, 741(2): 68
- [34] Ivezić Z, Juric M, Lupton R H, et al. *NASA Planetary Data System, US: NASA*, 2004: 1
- [35] Hasselmann P H, Carvano J M, Lazzaro D. *NASA Planetary Data System, US: NASA*, 2011: 1
- [36] Vereš P, Jedicke R, Fitzsimmons A, et al. *Icarus*, 2015, 261: 34
- [37] Collier C A, Pollacco D, Street R A, et al. *MNRAS*, 2006, 373(2): 799
- [38] Tamuz O, Mazeh T, Zucker S. *MNRAS*, 2005, 356(4): 1466
- [39] Descamps P, Marchis F, Michalowski T, et al. *Icarus*, 2007, 187(2): 482
- [40] Descamps P, Marchis F, Michalowski T, et al. *Icarus*, 2007, 189(2): 362
- [41] Campbell D B, Magri C, Giorgini J D, et al. *Science*, 2000, 288(5467): 836839
- [42] Descamps P, Marchis F, Pollock J, et al. *Icarus*, 2008, 196(2): 578
- [43] Chandrasekhar S. *British Journal of Cancer*, 1989, 4: 430
- [44] De Angelis G. *Planetary and Space Science*, 1995, 43(5): 649
- [45] Leone G, Paolicchi P, Farinella P, et al. *AA*, 1984, 140: 265
- [46] Descamps P, Marchis F. *Icarus*, 2008, 193(1): 74

Photometry Analysis of Asteroid (2572) Annschnell—— the Contact Binary Asteroids Model

HUANG Jing^{1,2}, WANG Xiaobin^{1,2,3}, DOU Jiangpei^{4,5}

(1. Yunnan Observatories, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China; 2. University of Chinese Academy of Sciences, Beijing100049, China; 3. Key Laboratory for the Structure and Evolution of Celestial Objects, Chinese Academy of Sciences, Kunming 650216, China; 4. Nanjing Institute of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China; 5. Key Laboratory of Astronomical Optics & Technology, Chinese Academy of Sciences, Nanjing 210042, China)

Abstract: The density of small solar system objects is very important for understanding their origin and evolutionary history. However, the determination of the densities of small solar system objects is still a challenging work so far. The binary asteroids provide an opportunity to infer their density. The contact binary asteroid is one type of synchronous binary asteroids, whose orbital semi-major axis is close to the sum of the maximum semi-major axes of two asteroids assuming ellipsoid shapes. Till now, similar systems have been discovered in other small object groups of the solar system, for example, Near-Earth asteroids, Trojans, and Kuiper Belt objects. Considering a rubble pile structure of asteroids, the Roche binary asteroid theory can be applied to determine the system parameters including density of asteroids. Asteroid (2572) Annschnell is found possible to be a contact binary asteroid due to special features in its lightcurves obtained by the Yunnan-Hong Kong Wide Field Survey in 2017. A brightness model of the contact binary asteroid is developed, with which the photometric data of (2572) Annschnell are analysed then. The most possible value of density of this binary asteroid is 3.15 g/cm^3 , which is close to that of CV and CK meteorites. Based on the estimate of the normalised rotation rate $\Omega = 0.34$ and the dimensionless total angular momentum $H = 0.48$, it is conjectured that this binary asteroid may be formed by the rotational fission of a spinning asteroid.

Key words: asteroids; Roche binary asteroid; contact binary asteroids; brightness model