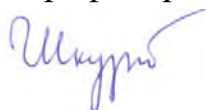


Міністерство освіти і науки України
Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна
Фізичний факультет
Кафедра астрономії та космічної інформатики

«Допущено до захисту»
Зав. кафедри астрономії та
космічної інформатики
проф. Юрій ШКУРАТОВ



16.05.2025 р.

Оцінка « Відмінно »

Голова ЕК
проф. Олександра ІВАНОВА



22.05.2025 р.

Солов'ян Катерина Олександрівна

«Обертальні властивості астероїдів, що входять до сімейств»

Кваліфікаційна робота на здобуття
освітньо-кваліфікаційного рівня
«Магістр» спеціальність
Е5 – «фізика та астрономія»
освітньо-наукова програма
«астрономія»



(підпис студента)

Науковий керівник – доцент кафедри
астрономії та космічної інформатики,
к.ф.-м.н. І. Г. Слюсарев



(підпис керівника)

Рецензент – провідний
науковий співробіт. НДІ астрономії,
доктор ф.-м.н. О. А. Голубов



Харків, 2025

АНОТАЦІЯ

Солов'ян К.О. Обертальні властивості астероїдів, що входять до сімейств

Дипломна робота на здобуття ступеня вищої освіти «магістр» за спеціальністю Е5 «Фізика та астрономія». Харківський національний університет імені В.Н. Каразіна, Харків, 2025.

У дипломній роботі проведено аналіз обертальних та оптичних властивостей 29 найбільших сімейств астероїдів головного поясу. Списки членів сімейств були взяті з бази даних Nesvorný (2015). Для обраних сімейств астероїдів побудовано розподіли параметру a^* , альbedo від a^* , амплітуд кривих блиску, періодів обертання та V-shape. Проведений аналіз показав що найбільші відмінності знайдено у розподілі амплітуд кривих блиску. У більшості сімейств головний максимум на графіку розподілу амплітуд між 0.25 та 0.35 магнітуд. У 18 сімейств максимумами на графіку розподілу періоду спостерігається на 5-10-15 годинах. Для випадку Juno низькоальбедні та середньоальбедні підгрупи мають однаковий розподіл періодів але показують слабку відмінність у розподілі амплітуд (середньоальбедні мають більшу амплітуду). Для випадку Hungaria астероїди з великими амплітудами кривих блиску (>0.45) мають довші періоди обертання. Було виявлено що 13 сімейств які демонструють наявність різних таксономічних класів у своєму складі. При цьому у 2 сімействах наявні чіткі рівноцінні за кількістю об'єктів групи різної таксономічної природи (Juno, Baptistina). Для восьми сімейств V-shape мають не чітку форму (Juno, Phocaea, Adeona, Erigone, Ursula, Hansa, Gefion). Розрахована оцінка віку сімейств (від 130 млн. років до 3,7 млрд. років) добре узгоджується із попередніми роботами (Spoto et al., 2015) [21].

Ключові слова: орбетальні властивості, сімейства астероїдів, бази даних, V-shape, статистичний аналіз, таксономія, вік сімейств астероїдів.

Abstract

Solovian K.O. Rotational properties of asteroids belonging to the families

Diploma thesis for the degree of higher education "Master" in specialty E5 "Physics and Astronomy". V. N. Karazin Kharkiv National University, Kharkiv, 2025.

In this thesis, we analyze the rotational and optical properties of the 29 largest families of asteroids in the main belt. The lists of family members were taken from the Nesvorný (2015) database. The distributions of the parameter a^* , albedo from a^* , light curve amplitudes, rotation periods, and V-shape were constructed for the selected asteroid families. The analysis showed that the largest differences were found in the distribution of the light curve amplitudes. In most families, the main maximum on the amplitude distribution plot is between 0.25 and 0.35 magnitudes. For 18 families, the maximums on the period distribution plot are observed at 5-10-15 hours. For the case of Juno, the low-albedo and medium-albedo subgroups have the same period distribution but show a weak difference in the amplitude distribution (medium-albedo have a larger amplitude). For the Hungaria case, asteroids with large light curve amplitudes (>0.45) have longer rotation periods. It was found that 13 families demonstrate the presence of different taxonomic classes in their composition. At the same time, 2 families have clear equivalent groups of different taxonomic nature in terms of the number of objects (Juno, Baptistina). For eight families, the V-shape is not clear (Juno, Phocaea, Adeona, Erigone, Ursula, Hansa, Gefion). The estimated age of the families (from 130 million years to 3.7 billion years) is in good agreement with previous studies (Spoto et al., 2015) [21].

Key words: orbital properties, asteroid families, databases, V-shape, statistical analysis, taxonomy, age of asteroid familie.

ЗМІСТ

ВСТУП	4
РОЗДІЛ 1. Особливості сімейств астероїдів	6
1.1 Власні елементи орбіт астероїдів. Динамічні властивості астероїдів	6
1.2 Сімейства та їх вік	7
1.3 Таксономічна класифікація	9
РОЗДІЛ 2. Дані та методика	13
2.1 Каталоги SDSS та SkyMapper (SMASS)	13
2.2 Каталог Nesvornyy (2015)	17
2.3 Визначення віку сімейства за побудовою V-shape	20
2.4 Формула обчислення віку	24
РОЗДІЛ 3. Результати	26
3.1 Графіки розподілів в сімействах	26
3.2 Розподіл віку від амплітуд	69
ВИСНОВКИ	77
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ	79

ВСТУП

Понад століття тому японський астроном Кійоцугу Хіраяма помітив, що деякі астероїди обертаються навколо Сонця по незвично близьких траєкторіях (Hirayama 1918) [11]. Хіраяма назвав їх сімействами астероїдів, ймовірно, спільного походження, ймовірно, не до кінця усвідомлюючи, наскільки важливу тему в науці про астероїди він започаткував. З цього моменту розпочався плідний напрямок досліджень зв'язків груп астероїдів. Зіткнення між малими тілами Сонячної системи мають низьку ймовірність і тому малоімовірні протягом життя людини. Однак за час існування системи відбулося багато таких зіткнень, які відіграли ключову роль у формуванні нашої планетної системи. Датування сімейств астероїдів дає нам історію зіткнень головного поясу (Spoto et al. 2015) [21]. Це дає можливість відмотати час назад і зрозуміти, що відбувалося на початку формування Сонячної системи та її подальшої еволюції.

Крім того, сімейства несуть на собі відбитки впливу вікових резонансів та резонансів за середнім рухом із Юпітером та іншими планетами. Можливо найбільшу роль у еволюції орбіт членів сімейств відіграє негравітаційний ефект Ярковського (Nesvorný et al. 2015) [17]. Принаймні деякі розташовані поблизу люків Кірквуда сімейства, ймовірно, постачають певну кількість фрагментів у навколосезну область, поповнюючи, таким чином, популяцію астероїдів, що наближуються до Землі, частина із яких випадає на Землю у вигляді метеоритів.

Метою даної роботи є пошук зв'язку обертальних властивостей астероїдів, що входять до обраних сімейств із їх таксономією та віком.

Об'єкт дослідження: 29 сімейств астероїдів (Juno, Hygiea, Eunomia, Massalia, Themis, Phocaea, Euphrosyne, Nemesis, Adeona, Koronis, Erigone, Maria, Eos, Baptistina, Padua, Ursula, Hungaria, Hansa, Veritas, Dora, Alauda, Merxia, Agnia, Gefion, Tirela, Rafita, Hoffmeister, Henan, Witt).

Предмет дослідження: обертальні властивості астероїдів що входять до обраних сімейств: періоди обертання та амплітуди кривих блиску.

Для досягнення цієї мети ставилось і вирішувалося наступні завдання:

1. Провести відбір сімейств та створення бази даних для оптичних (альbedo, показники кольору) та обертальних властивостей (період та амплітуда кривих блиску).
2. Аналіз таксономічного різноманіття обраних сімейств за допомогою розподілів a^* та альbedo.
3. Аналіз розподілів періодів та амплітуд для обраних сімейств.
4. Побудова V-shape для обраних сімейств та оцінка віку.
5. Пошук кореляційних залежностей середніх обертальних властивостей обраних сімейств із їх віком.

Актуальність дипломної роботи полягає в тому, що вивчення періодів обертання та амплітуд кривих блиску астероїдів, що входять до обраних сімейств, поставити та вирішити питання про те, чи змінюються із часом обертальні властивості астероїдів. Такі дослідження сімейств дозволяють обмежити моделі зіштовхувальної еволюції астероїдів в головному поясі.

РОЗДІЛ 1. Особливості сімейств астероїдів

1.1 Власні елементи орбіт астероїдів. Динамічні властивості астероїдів

Як свідчать сильно кратеровані поверхні, досліджені космічними апаратами, основним фактором, що впливає на астероїди, є зіткнення. Місця таких космічних аварій заповнюються астероїдами-уламками, які гравітаційно накопичуються у більшій конгломерати і дрейфують зі швидкістю, приблизно співмірною зі швидкістю відриву від початкового материнського тіла (V_{esc}). Спочатку всі орбіти подібні, оскільки $V_{esc} \ll V_{orb}$, де $V_{orb} \ll 15-20 \text{ км/с}^{-1}$ - орбітальна швидкість астероїдів головного поясу. На довгих часових масштабах, однак, орбіти змінюються під впливом гравітаційних збурень від планет, і елементи орбіт окремих тіл починають розходитися від початкових. Тому може здатися, що ідентифікувати астероїди після катастрофічного зіткнення, яке сталося мільярди років тому, дуже складно. На щастя, починаючи з піонерської роботи К. Хіраями (Hiroyama, 1918) [11], астрономи розробили різні методи для вирішення цієї проблеми.

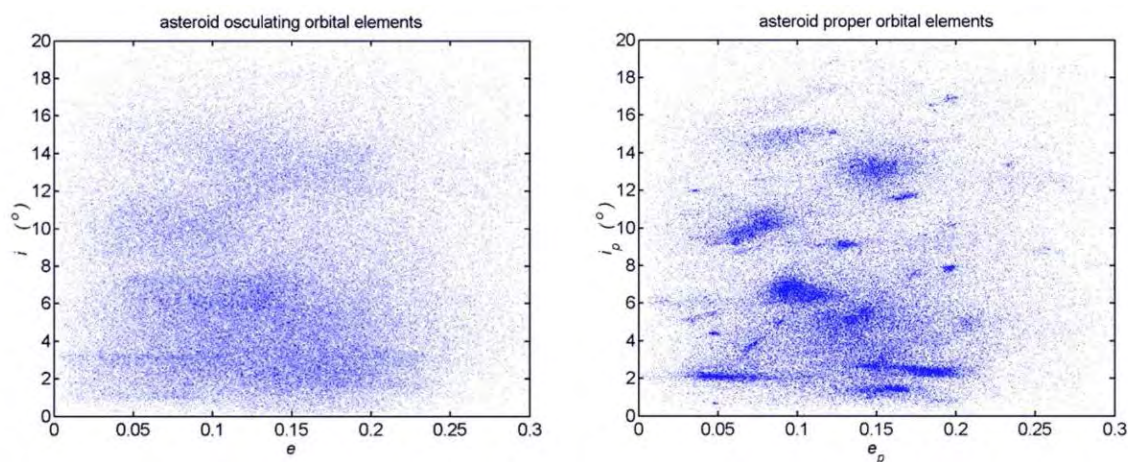


Рис. 1.1 Графік зміни оскулюючих та орбітальних елементів.

Грубо кажучи, ці методи полягають у перетворенні, яке приводить орбітальні елементи в момент спостереження до стандарту, який називається власними елементами (Knežević et al., 2002) [13], тобто незмінними в часі (або, принаймні, незмінного, якщо ігнорувати хаотичну динаміку, негравітаційні сили та інші збурення, тобто квазіпостійними). Таким чином, менші астероїди,

утворені при розпаді материнського астероїда, залишаються пов'язані між собою як групи астероїдів зі схожими орбітальними елементами навіть через мільярди років після початкового зіткнення. Ці групи називають астероїдними сім'ями, або динамічними сім'ями, щоб підкреслити, що вони були ідентифіковані з динамічних міркувань. Огляди неба та дані з телескопів та супутників, такі як Sloan Digital Sky Survey (SDSS), Wide-field Infrared Survey Explorer (WISE) та AKARI All-Sky Survey, надають багато даних про фізичні властивості астероїдів головного поясу.

Вони були використані для перехресного зв'язування вимірювань кольору та альbedo зі списками динамічних сімейств, подібно до того, як раніше для цієї мети застосовували спектроскопічні та таксономічні дані. Ця робота корисна для фізичної характеристики сімейств астероїдів, включно з випадками, коли дві або більше динамічних сімейств перекриваються, та для ідентифікації віддалених членів сімейства «гало», які інакше можна було б сплутати з місцевим фоном (Brož & Morbidelli, 2013) [1]. Враховуючи, що каталоги SDSS та WISE зараз містять дані для понад 100 000 унікальних астероїдів, стало також практичним проводити пошук сімейств у розширеному просторі, де дані про колір та/або альbedo враховуються одночасно з орбітальними елементами.

Трьома найбільш корисними власними елементами є: власна велика піввісь (a_p), власний ексцентриситет (e_p) і власний нахил (i_p). Вони є близькими еквівалентами до своїх аналогів з обчислювальних елементів, оскільки визначають середній розмір, видовження та нахил орбіт, відповідно.

1.2 Сімейства та їх вік

Вивчення сімейств астероїдів відіграє вирішальну роль у розумінні довготривалої динамічної та колізійної еволюції Головного астероїдного поясу. Ці сімейства, що утворилися внаслідок руйнування материнських тіл, зберігають відбитки фізичних процесів, які формували пояс протягом мільярдів років. Один з найкращих підходів до відстеження цієї еволюції полягає у вивченні просторового розсіювання членів сімейства астероїдів у просторі орбітальних елементів, особливо за допомогою побудови V-shape, на яких велика піввісь

відкладається від абсолютної зоряної величини. Ці V- shape виникають, головним чином, внаслідок ефекту Ярковського – теплового імпульсу, який спричиняє орбітальний дрейф. Оскільки напрямок і величина дрейфу залежать від таких факторів, як обертання, властивості поверхні та розмір, стає можливим статистично оцінити вік сім'ї, моделюючи розподіл її членів.

Хоча ефект YORP (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack) також впливає на спін астероїдів і, опосередковано, на їхню довготривалу динамічну поведінку, його вплив залишається складнішим для кількісної оцінки через складні залежності від форми та особливостей поверхні. З цієї причини часто продуктивніше розглядати комбіновану дію Ярковського-YORP, оскільки вплив ефекту Ярковського краще зрозуміти і побачити за допомогою V-shape.

Основним обмеженням сучасних методів визначення віку є їхня залежність від припущень про теплові властивості та обертання, які можуть суттєво відрізнятись для різних таксономічних типів. Щоб краще зрозуміти це, корисно порівняти дві родини астероїдів близького віку, але з різним складом - наприклад, вуглецеву (C-типу) і кремнієву (S-типу). Навіть якщо вони піддаються однаковим динамічним силам, відмінності в альбедо, густині і тепловій інерції можуть призвести до помітних відмінностей у формі і нахилі їхніх V-shape. Такий порівняльний аналіз допомагає уточнити нашу інтерпретацію еволюції астероїдів і підвищити надійність оцінок віку, отриманих на основі динамічного розсіювання.

1.3 Таксономічна класифікація

Метою таксономії астероїдів (термін походить від давньогрецьких слів *taxis*, тобто розташування, і *nomia*, тобто метод) є виявлення груп об'єктів, які мають схожий склад. Класифікаційну схему визначають шляхом статистичної обробки спектрофотометричних, спектральних і поляриметричних даних значної кількості об'єктів. Перші визначені таксони (тобто таксономічні категорії) астероїдів були позначені літерами відповідно до інтерпретації складу, зробленої на основі спостережень у видимому діапазоні довжин хвиль: C - вуглецеві, астероїди з властивостями, подібними до вуглецевих хондритних

метеоритів, і S - кам'янисті, астероїди, які показали чітку сигнатуру (тобто смугу в 0.9 мкм) сумішей піроксену або олівіну (Chapman et al., 1975) [8]. Вони помітили, що понад 90% спостережуваних ними малих планет потрапляють у ці дві великі групи. Цей спосіб позначення груп продовжував застосовуватись і надалі, коли з'являлись нові дані. Наприклад, E позначає такі об'єкти, як енстатитові метеорити, M - металеві астероїди, а R - об'єкти з найчервонішими кольорами і помірно високим альбедо (Bowell et al., 1978) [3]. Зростання кількості спектральних даних у видимій і ближній інфрачервоній області довжин хвиль збільшило кількість таксонів за рахунок врахування тонких особливостей. Дві останні і широко використовувані таксономії - (Bus & Binzel, 2002a) [4], які визначили 26 класів, використовуючи дані в спектральному інтервалі 0,44-0,92 мкм, і (DeMeo et al., 2009) [9], які визначили 24 класи на основі даних в діапазоні довжин хвиль 0,45-2,45 мкм. Основні групи, визначені спочатку, були переведені в широкі комплекси (S-комплекс, C-комплекс і X-комплекс), за якими слідували типи кінцевих членів (A, D, K, L, O, Q, R і V).

Однак точність класифікації в таксономічній схемі залежить від наявних даних спостережень. Якщо виміряно лише частину даних (наприклад, спектр у короткому спектральному інтервалі або лише спектрофотометричні дані), все ще можна визначити тип, але рівень достовірності знижується. Для цього можуть застосовуватись різні методи. Ці методи варіюються від безпосереднього вбудовування даних спостережень у схему до різних параметризацій і перетворень (наприклад, аналіз головних компонент) спостережуваних значень. Проблему класифікації нових даних можна підсумувати як визначення параметрів, які будуть використовуватись, картографування регіонів, що відповідають різним групам, і вибір визначення для відстані в цьому просторі. Небесні огляди надають велику кількість даних для об'єктів Сонячної системи (Ivezic' et al., 2001) [12]. Але, за винятком спектроскопічних досліджень астероїдів, які спостерігали кілька тисяч об'єктів, великі набори даних спостережень обмежені широкосмуговими фотометричними фільтрами. У цьому випадку класифікація за розширеною схемою, як у (DeMeo et al., 2009) [9],

неможлива. Для отримання інформації про склад було розроблено кілька версій таксономій, що відповідають широким класам (Carvano et al., 2010) [7] у тісному зв'язку з відомими таксономіями (DeMeo et al., 2009) [9].

(Carvano et al., 2010) [7] розробили метод класифікації астероїдів як правило, спостережуваних SDSS, пов'язуючи їхні фотометричні кольори з відомими спектральними таксономіями, використовуючи еталонний набір, що складається з раніше класифікованих астероїдів (з SMASS та S3OS2), спектрів відбиття метеоритів і синтетичних моделей, таким чином уможливаючи спектральну класифікацію лише на основі даних про колір.

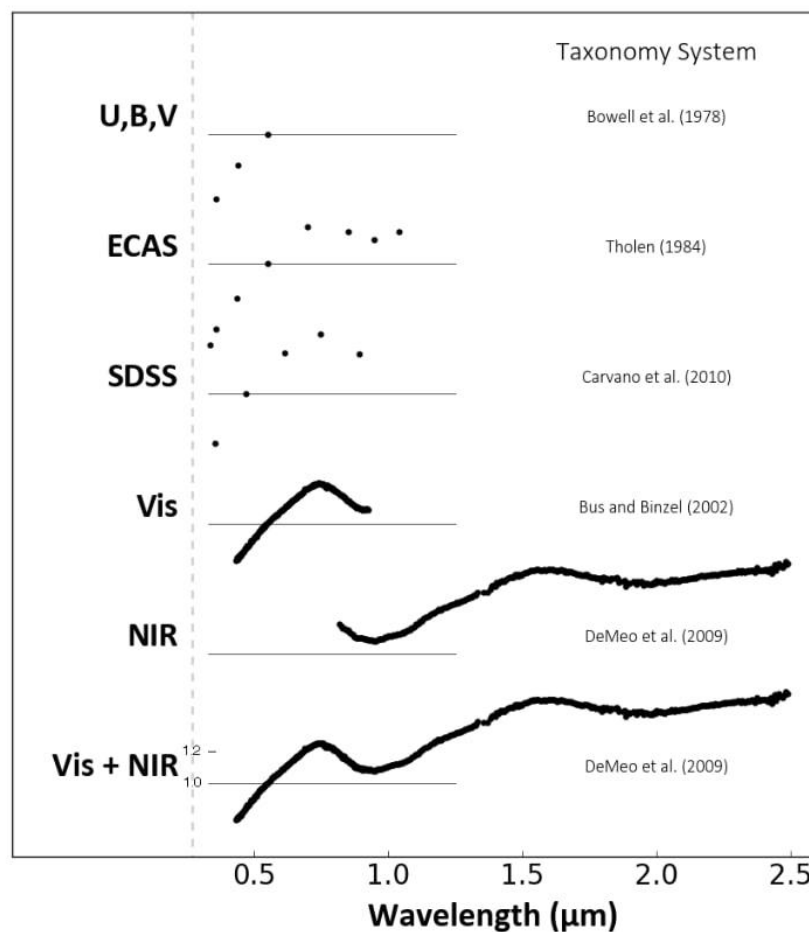


Рис. 1.2 Композиційні розподіли та еволюційні процеси для популяції навколоземних об'єктів: Результати спектроскопічного дослідження навколоземних об'єктів MIT-Hawaii (MITHNEOS). DOI: 10.1016/j.icarus.2018.12.035

На рисунку представлено порівняльний огляд різних систем таксономії астероїдів, розроблених за останні кілька десятиліть, що підкреслює поступове

покращення спектрального покриття даних і вдосконалення методів класифікації. Кожен рядок представляє окрему таксономічну систему, засновану на конкретних наборах спостережних даних, з горизонтальною віссю, що показує охоплення довжин хвиль у мікронах (мкм) від приблизно 0,3 до 2,5 мкм.

Ранні таксономії, такі як розроблені (Bowell et al., 1978) [3] і (Tholen, D. J. 1984) [23], спиралися на фотометричні спостереження в обмеженій кількості дискретних діапазонів, включаючи систему Джонсона-Казінса U, B, V і Восьмиколірний огляд астероїдів (Eight-Color Asteroid Survey, ECAS). Ці системи забезпечували лише розріджену вибірку спектра відбиття астероїдів, переважно у видимому діапазоні (~0,3-1,0 мкм), що обмежувало точність ідентифікації типу астероїда.

Класифікація (Bus & Binzel, 2002a) [4] знаменувала собою значний зсув, оскільки включала повну спектроскопію у видимому діапазоні довжин хвиль (Vis), а не лише широкосмугову фотометрію. Це дало змогу тонше розрізняти типи астероїдів на основі тонких особливостей спектрального нахилу і смуг поглинання.

Робота (DeMeo et al., 2009) [9] розширила спектральне покриття до ближньої інфрачервоної (NIR) області, що дозволило зробити ще детальнішу мінералогічну характеристику. Показано дві криві: одна представляє лише дані NIR, а інша - комбінований видимий + ближній інфрачервоний (Vis + NIR) спектр, що охоплює діапазон від ~0,4 мкм до ~2,5 мкм.

Ця прогресія наочно ілюструє, що зі збільшенням спектральної роздільної здатності та охоплення довжин хвиль - від простих фотометричних точок до повних спектрів відбиття у видимому та інфрачервоному діапазонах - наша здатність таксономічно класифікувати астероїди стала більш досконалою і фізично значущою. Ширші спектральні дані дозволяють вченим краще ідентифікувати діагностичні особливості поглинання, наприклад, пов'язані з

силікатами, вуглецевими матеріалами та вмістом металів, що дає змогу точніше оцінювати склад поверхні і вдосконалювати схеми класифікації астероїдів.

Впровадження даних SDSS (Sloan Digital Sky Survey), використаних (Carvano et al. 2010) [7], значно розширило кількість астероїдів, спостережуваних за допомогою послідовної п'ятисмугової фотометрії (фільтри u, g, r, i, z), все ще у видимому діапазоні, але з більш систематичною спектральною дискретизацією. Таксономічна класифікація побудована на основі показників кольору надає приблизну інформацію про склад поверхні астероїда. Точна мінералогічна характеристика вимагає високоякісних спектрів. Однак, з точки зору спостережень, віднесення об'єкта до класу на основі спектрофотометричних даних має кілька переваг порівняно зі спектральними дослідженнями: воно вимагає менше часу для спостережень, можна охарактеризувати слабкі об'єкти (тобто малі об'єкти або ті, що знаходяться на великих геліоцентричних відстанях), а також доступні великі масиви даних, отримані під час зйомок неба. Саме тому у нашій роботі ми використовували п'ятисмуговий каталог SDSS у обробці (Sergeyev et al., 2021) [20] та SkyMapper оскільки, хоч в них ми і мали менше кольорів але статистично даних було більше що компенсувало недостачу даних.

РОЗДІЛ 2. Дані та методика

2.1 Каталоги SDSS та SkyMapper (SMASS)

Каталог рухомих об'єктів Цифрового огляду неба Слоуна (SDSS MOC), містить астрометричні та фотометричні дані для астероїдів, які спостерігаються 2,5-метровим телескопом Слоуна, розташованим в обсерваторії Апач-Пойнт в Санспоті, штат Нью-Мексико. На сьогоднішній день дослідження детально картографує одну восьму всього неба, визначаючи положення, яскравість і п'ятиколірну фотометрію 471 569 рухомих об'єктів.

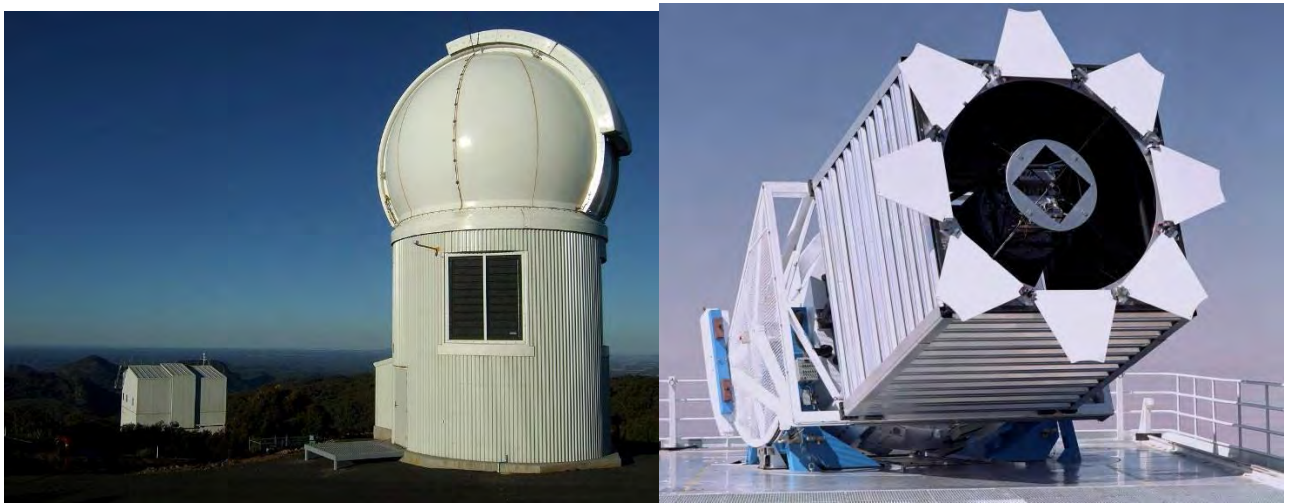


Рис. 1.3 На лівому фото 1.35 м телескоп SkyMapper, а на правому - 2.5 м телескоп SDSS.

З них 220 101 пов'язані зі 104 449 унікальними об'єктами, виявленими під час обробки даних (тобто близько 22% від загальної кількості), було зіставлено з відомими астероїдами, переліченими у файлі ASTORB. Потік, відбитий виявленими об'єктами, вимірювався майже одночасно у п'яти діапазонах (вимірювання у двох послідовних діапазонах були розділені в часі 72 с) з ефективними довжинами хвиль 3557 Å (u діапазон), 4825 Å (g діапазон), 6261 Å (r діапазон), 7672 Å (i діапазон) та 9097 Å (z діапазон), і з шириною смуги 0.1-0.3 мкм. Ці дані надають важливу та унікальну інформацію про астероїди, оскільки SDSS MOC включає на один-два порядки більше об'єктів, ніж інші каталоги, які використовувалися в минулому для вивчення спектрів видимого відбиття

астероїдів. Наприклад, Спектроскопічне дослідження малих астероїдів головного поясу I (SMASS I і II), які є найбільшими на сьогодні спектроскопічними дослідженнями у видимому діапазоні довжин хвиль, створили набір спектрів у видимому діапазоні довжин хвиль для 1447 астероїдів.

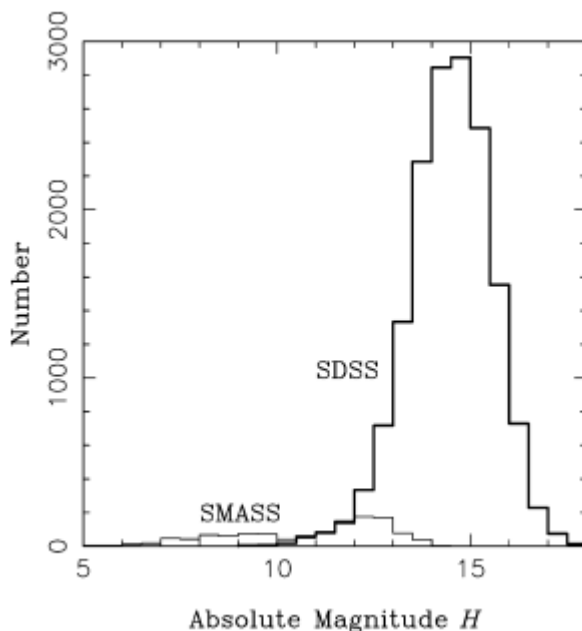


Рис. 1.4 Гістограми абсолютної зоряної величини (H) астероїдів головного поясу, що спостерігаються SDSS та SMASS (Nesvorný et al., 2005) [16]

До цього перший випуск SDSSMOC включав усі дані, отримані до 15 грудня 2001 року. Каталог містить дані для 58 117 рухомих об'єктів з 87 спостережень, які приблизно охоплюють територію, включену в SDSS Data Release 1 (1 січня 2003 року). Другий реліз SDSSMOC включає 134 335 рухомих об'єктів з 194 сесій спостережень, отриманих до 11 березня 2003 року. Об'єкти з першого релізу включено до другого, оскільки фотометричний конвеєр і вектори плоского поля дещо змінилися між двома релізами. А третій реліз SDSSMOC містить 204 305 рухомих об'єктів з 301 сеансу спостережень, отриманих до червня 2004 року. До третього релізу включено об'єкти з перших двох випусків. Тобто, ми бачимо суттєве збільшення даних з першого релізу до останнього в трохи більше ніж 7 разів [26]. Потім, починаючи з 2008 року була велика «перерва» у публікаціях та обробці даних до поки у 2021 році не було проведено

обробку (Sergeyev et al., 2021) [20] для збільшення вибірки об'єктів Сонячної системи, які мають багатофільтрову фотометрію та композиційну таксономію.

На основі нової екстракції рухомих об'єктів у SDSS і після застосування набору фільтрів для мінімізації забруднення (Sergeyev et al., 2021) [20] випустили каталог з 1 542 522 записів, що складається з 1 036 322 спостережень 379 714 відомих і унікальних SSO, а також 506 200 спостережень рухомих джерел, не пов'язаних з жодним відомим SSO, який і був використаний у цій роботі. Каталог містить ідентифікацію SDSS, астрометрію, фотометрію, ідентифікацію SSO, геометрію спостереження, таксономію і позначення якості для кожного спостереження. Повнота каталогу оцінюється на рівні близько 95%, а чистота - вище 95% для відомих SSO. Цей каталог містить 399 502 (85%) з 471 569 джерел, оприлюднених в ADR4, і 93% SSO і марсоходів. Відсутні джерела виявилися джерелами з фіксованими координатами (ідентифікованими шляхом порівняння їхніх координат з каталогом Pan-STARRS) у 58 381 випадку. Решта 13 686 джерел були розташовані на полях, позначених як такі, що постраждали від несприятливих погодних умов, які ми виключили з цього аналізу.

На рисунку (рис. 1.4) показано порівняння між загальною кількістю та розподілом зоряних величин астероїдів головного поясу, які спостерігали SDSS та SMASS. Ці два огляди надають додаткову інформацію, оскільки кожне з них спостерігає різні діапазони зоряних величин; SDSS спостерігає менші астероїди, ніж SMASS.

Спостережувані розбіжності між кольорами SDSS і спектрами SMASS, найімовірніше, пов'язані з фундаментальними відмінностями в способах збору та обробки цих наборів даних. Зокрема, значення кольорів SDSS, показані але однак, не доцільно безпосередньо порівнювати ці широкосмугові інтегровані значення з вузькосмуговими вимірюваннями відбиття, наданими SMASS на тих самих довжинах хвиль. Це пов'язано з тим, що фільтри SDSS інтегрують спектральне відбиття у відносно широких інтервалах довжин хвиль (приблизно 0,1-0,3 мкм), тоді як спектри SMASS представляють більш локалізовані вимірювання з високою роздільною здатністю.

Для того, щоб виконати ретельне порівняння, потрібно було б згорнути спектри SMASS з функціями відгуку фільтра SDSS, моделюючи таким чином, як SDSS записав би ті самі спектральні особливості. На жаль, у цьому випадку така процедура неможлива, оскільки система фільтрів SDSS охоплює ширший діапазон довжин хвиль (~0.3-1.2 мкм), ніж набір даних SMASS (~0.45-1.0 мкм). Лише центральні смуги SDSS, зокрема r та i, потрапляють у спектральний діапазон, який охоплює SMASS.

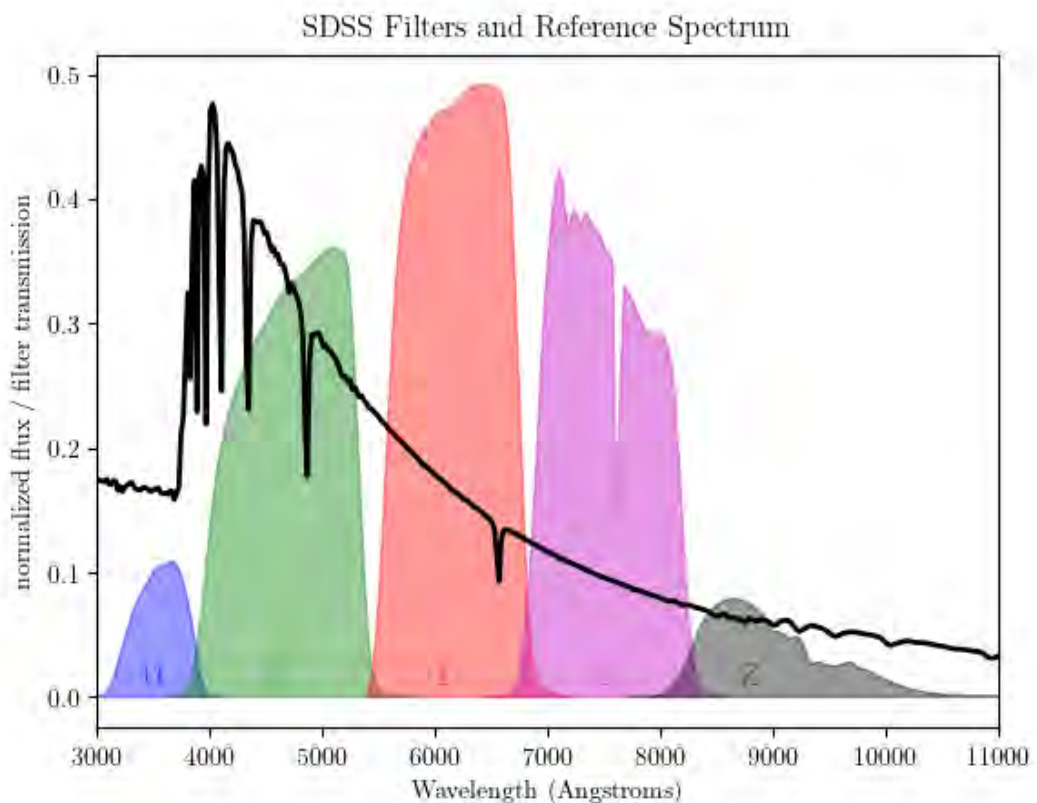


Рис. 1.5 Фільтри SDSS

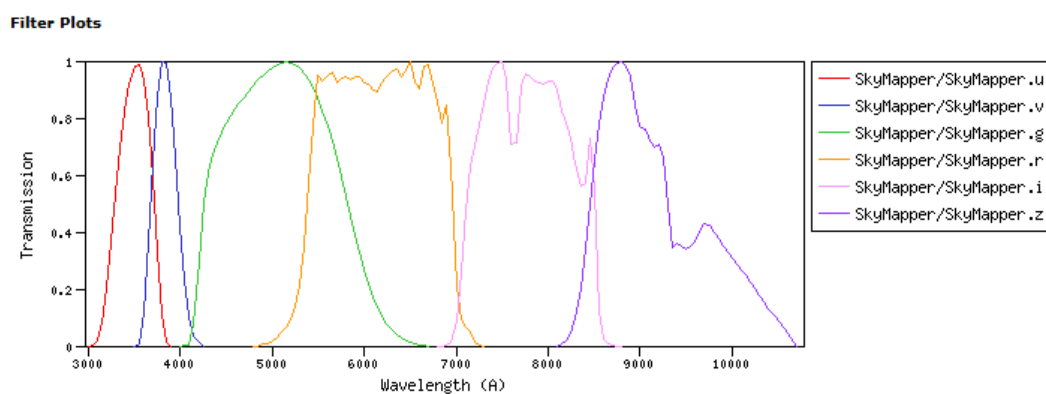


Рис. 1.6 Фільтри SkyMapper

Щоб перевірити це пояснення, спектри SMASS слід згорнути за допомогою фільтрів SDSS і лише потім порівняти з кольорами SDSS. На жаль, це неможливо зробити, оскільки фільтри SDSS охоплюють більший діапазон довжин хвиль, ніж дані SMASS (~ 0.3-1.2 мкм проти ~ 0.45-1.0 мкм у SMASS), і лише центральні r та i смуги SDSS розташовані в межах діапазону довжин хвиль SMASS. Щоб перевірити, чи можуть ці відмінності вплинути на наш аналіз, ми провели кілька тестів. Дані SMASS стали основою для розробки нової таксономічної системи астероїдів, яка класифікує спектри відбиття на кілька груп, що інтерпретуються як різні за мінералогічним складом поверхні астероїдів. Наприклад, S-тип характеризується спектральним почервонінням, яке зазвичай приписується властивостям відбивання Fe/Mg-містких силікатів, таких як олівін і піроксен. А спектри C-типу містять помірне ультрафіолетове поглинання на довжинах хвиль приблизно від 0,4 мкм до 0,5 мкм, тоді як на довших довжинах хвиль вони здебільшого злегка червонуваті. Також присутня так звана "водяна" особливість поглинання близько 3 мкм, яка може свідчити про вміст води в мінералах.

Тому важливим питанням є те, чи достатньо п'ятисмугової фотометрії, яку надає SDSS, для надійного розрізнення основних таксономічних типів астероїдів. Аналіз показує, що, незважаючи на нижчу спектральну роздільну здатність даних SDSS, фотометричні вимірювання цього огляду справді здатні ідентифікувати таксономічні класи з достатньою точністю. Таким чином, фотометрія SDSS дає можливість розділити основні таксономічні класи особливо коли включити в аналіз також альbedo астероїдів.

2.2 Каталог Nesvorný (2015)

Каталог Nesvorný (2015) - це комплексний набір даних, який містить динамічно ідентифіковані сімейства астероїдів на основі методу ієрархічної кластеризації (HCM). Цей метод базується на припущенні того, що члени сімейств астероїдів розташовані близько один до одного в просторі власних орбітальних параметрів через спільне походження, як правило, розпад материнського тіла внаслідок зіткнення з іншим астероїдом.

Метод базується на використанні власних елементів орбіти астероїдів, включаючи велику піввісь (a), ексцентриситет (e) та кут нахилу (i). Ці власні елементи є довгостроковими усередненими значеннями, які залишаються відносно постійними з часом, що робить їх ідеальними для ідентифікації гравітаційно пов'язаних сімейств, які виникли внаслідок минулих зіткнень.

При аналізі НСМ у цій версії використовуються власні елементи з бази даних власних елементів, наданої AstDyS (Asteroids - Dynamic Site) [27], спеціально розрахованої для пронумерованих астероїдів. Ці власні елементи обчислюються шляхом чисельного інтегрування і є більш точними, ніж аналітичні наближення.

Стандартний метод ідентифікації сімейств астероїдів складається з (1) обчислення власних елементів або інших елементів, незмінних з часом, для астероїдів з відомими орбітами, (2) визначення концентрацій або груп астероїдів у просторі власних елементів і (3) встановлення статистичної значущості виявлених груп.

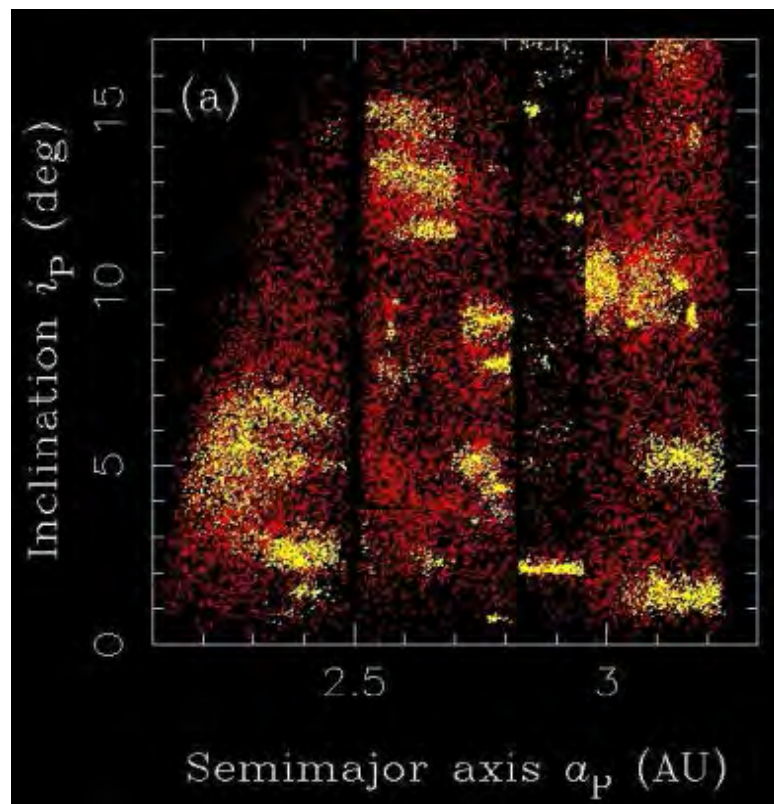


Рис. 1.7 Алгоритм кластеризації, застосований до поясу астероїдів, відокремлює динамічні сім'ї (жовтий) від фону (червоний).

Коли ці методи застосовуються до поясу астероїдів, у фокусі уваги опиняються десятки очевидних скупчень, сімейств астероїдів, що виринають з фону (рис. 1.7).

Щоб ідентифікувати сімейство астероїдів, дослідники застосовують алгоритм кластеризації до розподілу астероїдів у (a_p, e_p, i_p) просторі. Найчастіше використовується метод ієрархічної кластеризації (НСМ; Zappal`a et al., 1990) [25], який визначає відстань відсікання, d_{cut} , і вимагає, щоб довжина зв'язку між двома сусідніми орбітами, кластеризованими алгоритмом, була $d = d(a_p, e_p, i_p) < d_{cut}$. Загальне визначення відстані: $d^2 \equiv (na_p)^2 (k_a(\delta a_p/a_p)^2 + k_e(\delta e_p)^2 + k_i(\delta i_p)^2)$, де n - орбітальна частота, $(\delta a_p, \delta e_p, \delta i_p)$ - вектор відстані між орбітами в 3D просторі власних елементів, а (k_a, k_e, k_i) - коефіцієнти порядку одиниці.

Основна перевага НСМ над іншими методами полягає в тому, що в ньому не закладено сильного припущення про форму астероїдної сім'ї у відповідному просторі елементів. Це тому, що ланцюжок, створений шляхом з'єднання сусідніх орбіт, може відстежувати членів сім'ї, навіть якщо їхні орбіти динамічно еволюціонували і набули незвичної загальної форми. Яскравим прикладом цього є випадок родини Корони, яка розділяється на дві частини світовим резонансом $g + 2g_5 - 3g_6 = 0$ на відстані $\approx 2,92$ а.о., де g - апсидальна частота астероїда, а g_5 і g_6 - 5-а і 6-а апсидальні частоти планетної системи. Частина родини Koronis з $a_p > 2.92$ а.о. має більший ексцентриситет, ніж частина з $a_p < 2.92$ а.о., тому що члени родини, які дрейфують за ефектом Ярковського від $a_p < 2.92$ а.о., мають більший ексцентриситет, взаємодіючи з резонансом $g + 2g_5 - 3g_6 = 0$ (Bottke et al., 2001) [2].

Основним недоліком стандартної НСМ, який стає дедалі важче подолати з включенням численних малих астероїдів до нових каталогів, є проблема ланцюжків. Ця проблема виникає через те, що малі фрагменти, як правило, викидаються на більших швидкостях і мають більшу рухливість через ефект Ярковського. Тому вони більше розлітаються, мають тенденцію до більш однорідного розподілу по головному поясу і створюють містки між різними

сімействами, якщо використовується єдине (велике) значення d_{cut} . Очевидно, що d_{cut} має бути пропорційним розміру астероїда або обернено пропорційним абсолютній зоряній величині H . Однак вираження цієї залежності додає додаткові параметри до HCM і робить всю процедуру ідентифікації складнішою. Тому на практиці проблему ланцюгового зв'язку воліють обходити штучними засобами (наприклад, розрізами у власному просторі елементів, які застосовують для розгляду окремих випадків), або ж пропорційність апроксимують двоступеневим методом з різними відсіченнями для малих і великих тіл (Milani et al., 2014) [15].

Складною частиною алгоритму HCM є вибір відстані відсікання (d_{cut}). Якщо значення d_{cut} занадто мале, багато розрізаних, але реальних сімейств залишаться непоміченими, а великі сім'ї будуть штучно розбиті на частини. Якщо значення занадто велике, алгоритм об'єднає різні родини разом і виявить нерелевантні скупчення, спричинені випадковими флуктуаціями. Хоча багато сімейств астероїдів можна ідентифікувати для широкого діапазону значень d_{cut} , і вони є реальними без сумніву, деякі випадки вимагають специфічного вибору d_{cut} і можуть бути сплутані з випадковими флуктуаціями. Очевидно, що треба зважати на статистичну значущість ідентифікованих груп.

2.3 Визначення віку сімейства за побудовою V-shape

Точна ідентифікація найяскравіших або найбільших членів сімейства астероїдів важлива з кількох наукових причин. Спектроскопічні дослідження, наприклад, зазвичай обмежені яскравістю об'єктів, а це означає, що лише для найяскравіших членів сімейств можуть бути отримані детальні спектри, які дозволять надійно їх класифікувати. Як наслідок, інтерпретація композиційної узгодженості або таксономічного різноманіття у сімействі буде невизначеною без спектрів менших членів сімейства. Тут на допомогу приходять спектрофотометрія великих оглядів (SDSS, SkyMapper, Gaia), оскільки вони надають показники кольору для навіть для малих астероїдів-членів сімейств, на основі яких можна провести таксономічну класифікацію.

Крім того, великі члени сімейства є ключовими в дослідженнях зіткнень з астероїдами, де розподіл за розмірами (SFD) є основою для побудови моделей і калібрування лабораторних експериментів зіткнень. Невизначеності щодо включення цих великих тіл у сімейство також суттєво впливають на оцінки початкового розміру зруйнованого материнського тіла (Durda et al., 2007) [10].

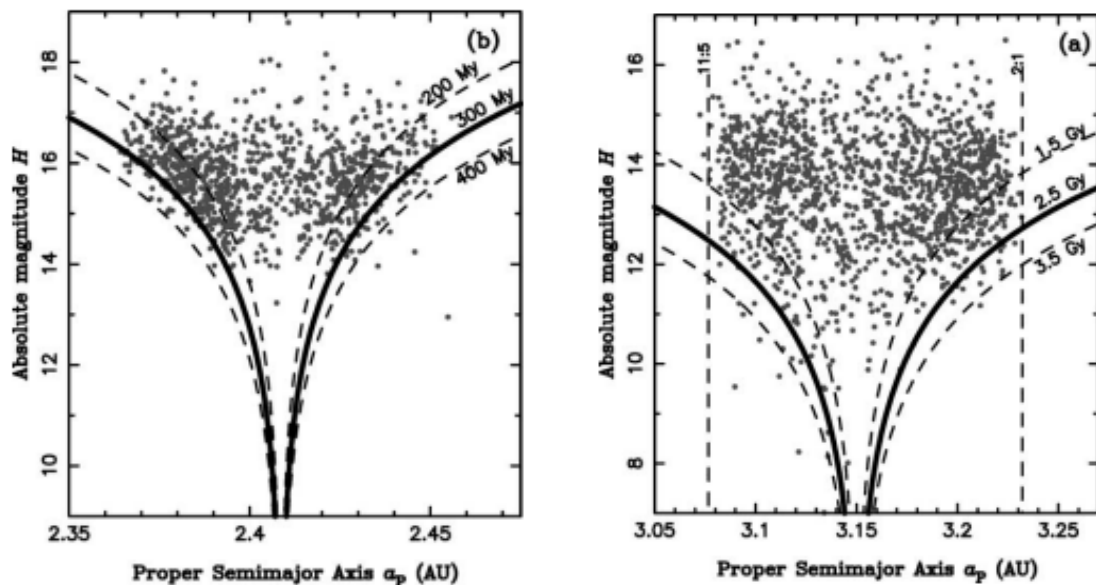


Рис. 1.8 Абсолютні величини (H) та власні півосі (a_p) членів родини Themis (а) та Massalia (б) (крапки). V-shape показують положення тіл, що дрейфують за Ярковським, які еволюціонували з центру сімейств протягом зазначених інтервалів часу, припускаючи максимальні теоретичні швидкості дрейфу всередину і назовні. (Nesvorný et al., 2005) [16]

Сімейства окрім того що кластеризуються в просторі власних елементів також мають характерну особливість як V-shape. Спостерігається на графіках залежності абсолютної зоряної величини (H) проти великої півосі (a_p) членів сімейства.

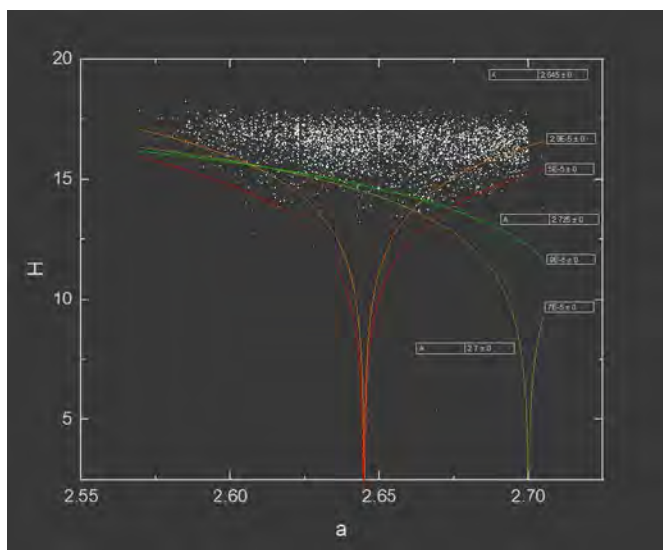
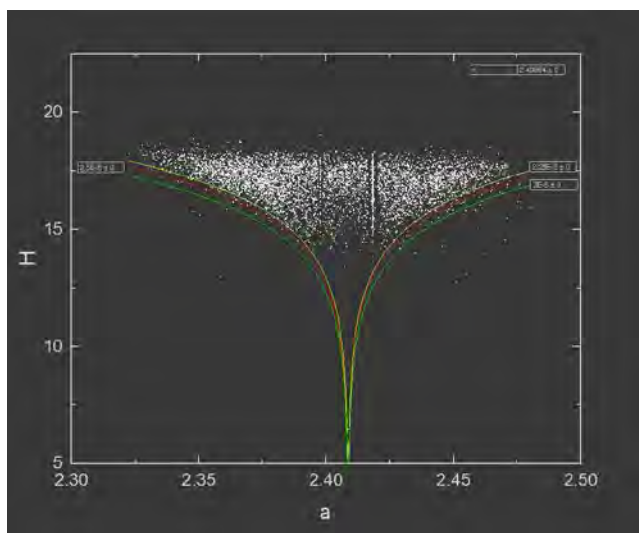


Рис. 1.9 Застосування методу V-shape на сімействі 20 Massalia (зліва) та 3 Juno (зправа).

V-shape прослідковується внаслідок двох домінуючих механізмів. По-перше, швидкість викиду фрагментів з материнського тіла залежить від їх розмірів - більші фрагменти зазвичай викидаються повільніше і залишаються ближче до центру сімейства, тоді як менші фрагменти розлітаються далі. По-друге, ефект Ярковського – не гравітаційним ефектом, який діє на тіло що обертається, причиною появи якого є нерівномірне теплове випромінювання з поверхні астероїда та його осьове обертання що поступово змінює його велику піввісь. Через цей дрейф великої піввісі збільшується для прогресивних ротаторів і зменшується для ретроградних та його дія накопичується з часом.

Однак застосування цього методу має практичне обмеження: сильні резонанси поблизу сім'ї можуть видаляти дрейфуючі члени, створюючи штучні краї у розподілі (a_p , H). Тому, V-shape не слід застосовувати занадто жорстко.

Важливою відмінністю дії ефекту Ярковського є його кумулятивний характер – його дія накопичується з часом. Загальна формула, що описує цей дрейф, має вигляд : $da_p/dt = \text{const} \cdot \cos(\theta) / (a_p^2 D)$, де θ – нахил вісі обертання до площини орбіти, а D - ефективний діаметр.

В результаті, межі розподілу (a_p , H) зазвичай відповідають виразу на кшталт:

$|a_p - a_c| = C_{YE} 10^{H/5}$, де a_c - центр сімейства, а C_{YE} - константа, на яку впливає вік сімейства. Цікаво, що якщо швидкість викиду $\delta V \propto 1/D$, як це спостерігається в дуже молодих сім'ях (Nesvorný et al., 2006a) [18] та експериментальних зіткненнях, то отриманий розподіл також задовольняє умовам : $|a_p - a_c| = C_{EV} 10^{H/5}$, де C^{EV} залежить від початкових швидкостей викиду.

Більш гнучкий підхід передбачає розрахунок $C_0 = 10^{-H/5} |a_p - a_c|$, який найкраще відповідає V-shape сім'ї, і відношення C_j/C_0 , де $C_j = 10^{-H_j/5} |a_{p,j} - a_c|$, для кожного члена сім'ї j , визначеного НСМ. Астероїди, для яких $|C_j/C_0| > 1$, можуть бути позначені як потенційні інтерлопери (хоча і не виключені одразу). Для перевірки ці позначені об'єкти можна потім порівняти за спектроскопічними даними, кольоровими показниками або альbedo із основною популяцією сімейства. Наприклад, (Vokrouhlický et al., 2006a) [24] застосували цей метод до сімейства Eos і виявили, що багато з позначених великих тіл мають фізичні властивості (наприклад, темні спектри С-типу), несумісні з домінуючими характеристиками сімейства (переважно К-типу).

Для побудови V-shape була використана така нелінійна крива:

$$5 \log \log |(x - A)/C|,$$

де A – велика піввісь материнського тіла, C – критерій, який визначає ширину V-shape.

2.4 Формула обчислення віку

Метод зворотного орбітального інтегрування (Nesvorný et al., 2015) [17] ефективний лише для відносно молодих сімейств астероїдів, віком приблизно до 10 мільйонів років. Це обмеження виникає через непередбачуваність довготривалої орбітальної еволюції в головному поясі астероїдів, на яку суттєво впливають негравітаційні сили, що важко піддаються точному моделюванню.

Після того як константа C_0 визначена за характеристиками сімейства та за даною формулою може бути зроблена оцінка віку сімейства:

$$t_{age} \cong 1 \text{ г. у.} \times \left(\frac{C_0}{10^{-4} \text{ AU}} \right) \left(\frac{a}{2.5 \text{ AU}} \right)^2 \times \left(\frac{\rho}{2.5 \text{ г см}^{-3}} \right) \left(\frac{0.2}{p_V} \right)^{\frac{1}{2}}$$

де C_0 – визначена нами апроксимаційна константа, a – середня велика піввісь головного тіла, ρ – густина, p_V – геометричне альbedo.

Примітно, що хоча формула відкалібрована для астероїдів S-типу, коригування для темніших астероїдів C-типу (наприклад, з використанням $\rho = 1.5 \text{ г/см}^3$ і $p_V = 0.05$) призводить до компенсаційних коефіцієнтів, які значною мірою зберігають оцінку віку. Однак найбільше джерело невизначеності полягає в невідомій об'ємній густині. Теплопровідність поверхневої речовини (K), яка входить у чисельне значення константи 1 млрд років на початку формули є ще набагато гірше відомою величиною ніж густина, а тому може сильно впливати на швидкість дрейфу астероїду через ефект Ярковського і вносити додаткову невизначеність у оцінку віку. Загалом, перехід від параметра дрейфу за Ярковським (C_0) до оцінки віку (t_{age}) несе в собі невизначеність в кілька разів.

Крім того, прості формули оцінки віку зазвичай нехтують впливом початкових швидкостей викиду і близьких резонансів. Коли загальний розкид членів є результатом як дрейфу Ярковського (C_{YE}), так і швидкостей викиду (C_{EV}), ці дві складові неможливо легко розділити, що призводить до переоцінки реального віку сім'ї. Ці спрощені методи враховують лише зовнішню огинаючу розподілу в сімействі.

Для вирішення цієї проблеми Вокроуліцкі та ін. (2006a, b) розробили більш комплексний статистичний підхід. Їхня модель «Yarkovsky-YORP» (YY) моделює повну динамічну еволюцію сімейств астероїдів. Спочатку генерується синтетичне сімейство, де розподіл швидкостей викинутих фрагментів слідує гаусівському профілю зі стандартним відхиленням $\delta V = V_5(5 \text{ км/D})$, залежним від діаметра фрагмента (D). Це формулювання узгоджується як з даними спостережень за молодими сім'ями, так і з моделюванням зіткнень (Nesvorný та ін., 2006) [18].

Потім YY-модель еволюціонує орбіти фрагментів, моделюючи дрейф піввісей внаслідок ефекту Ярковського та еволюцію спінового стану через ефект YORP (Rubincam, 2000) [19]. Хоча оригінальна модель не враховує планетарні збурення для скорочення часу обчислень, останні версії (Masiero et al., 2012) [14] включають повну динаміку N-тіл.

РОЗДІЛ 3. Результати

3.1 Графіки розподілів в сімействах

3 Juno

Розподіл нахилу спектру нормальний але має у від'ємній частині значень зростаючий максимум і зміщений вправо відносно нуля. На графіку альbedo і показника кольору спостерігаються дві рівнозначні групи астероїдів, які відносяться до двох різних таксономічних типів: низькоальбедні (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2 та середньоальбедні (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2. У амплітуди бачимо максимум на 0.25 і лінійний спад після цього. Максимум в періоді припадає на 5^h і далі майже лінійно спадає. На графіку V-shape не можна однозначно сказати чи це повноцінна форма чи ми бачимо лише одне «крило». Також видно слабкі резонанси через вертикальні згущення точок. На графіку амплітуд від періодів не спостерігається чіткої залежності, що підштовхує до більш детального аналізу у майбутньому, оскільки на даний момент розділити ці дві групи астероїдів за конкретним критерієм не є можливим.

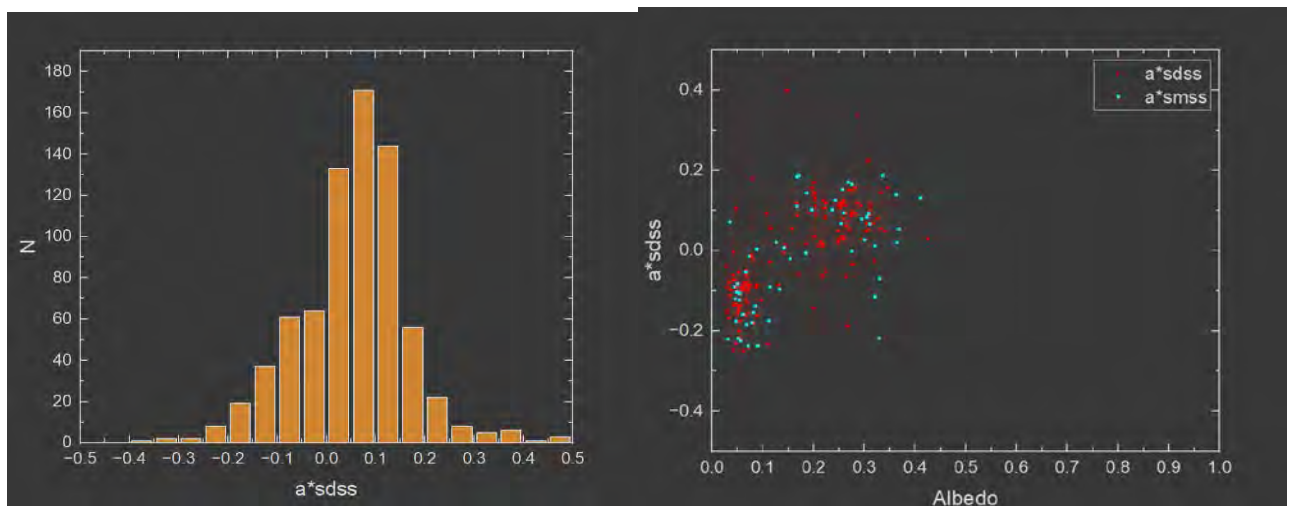


Рис. 2.1 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo Juno (зправа).

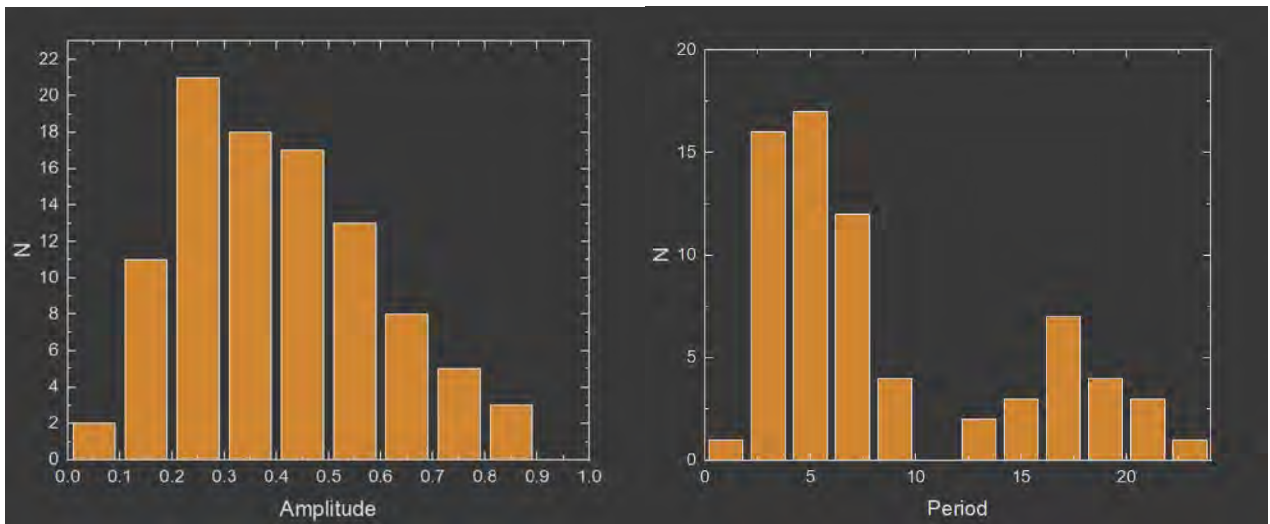


Рис. 2.2 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Juno.

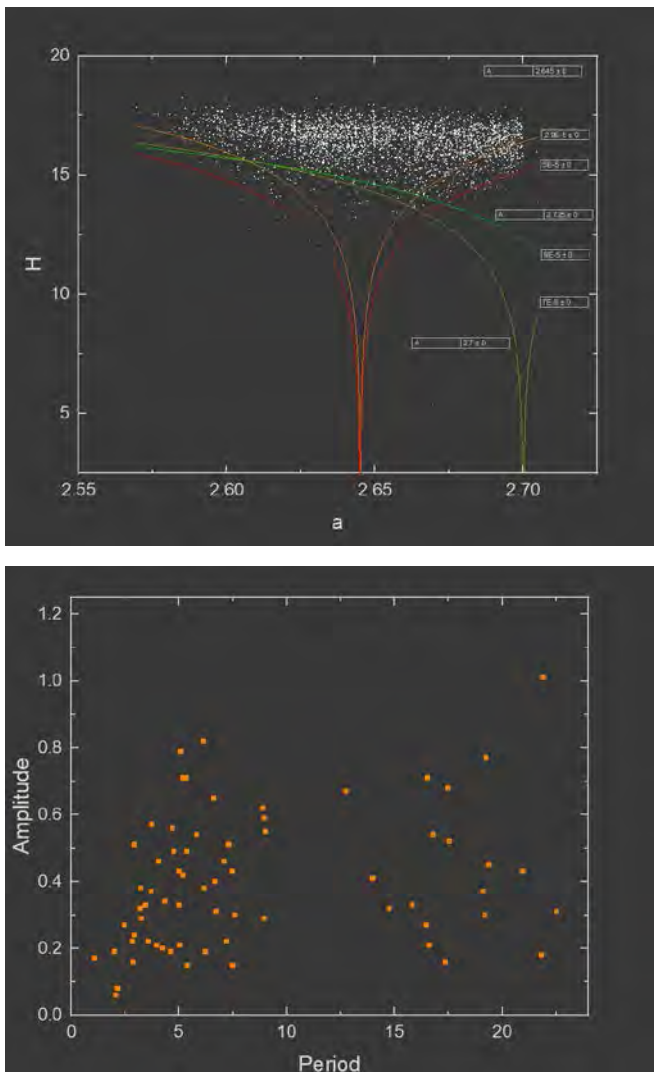


Рис. 2.3 Графік V-shape сімейства (зліва) та розподілу амплітуд кривих блиску від періоду (зправа) Juno.

Також ми провели додатковий аналіз у випадку цього сімейства в який входило розділення астероїдів за альбедо (альбедо <0.1 – С тип та альбедо >0.1 – S тип) та побудова графіків розподілу періодів та амплітуд цих двох підгруп. Аналіз показав, що максимум у розподілі амплітуд у S типу залишився на 0.25 але у С типу змістився на 0.35, хоча розподіл періодів не сильно змінився але через брак статистичних даних цей висновок ще потребує підтвердження в майбутньому. Ще для впевненості ми побудували розподіл астероїдів, з відомими періодами, за великою піввіссю та синусом їх нахилу аби підтвердити те, що ці дві підгрупи рівномірно розподілені у сімействі і не можуть бути пов'язані між собою орбітально.

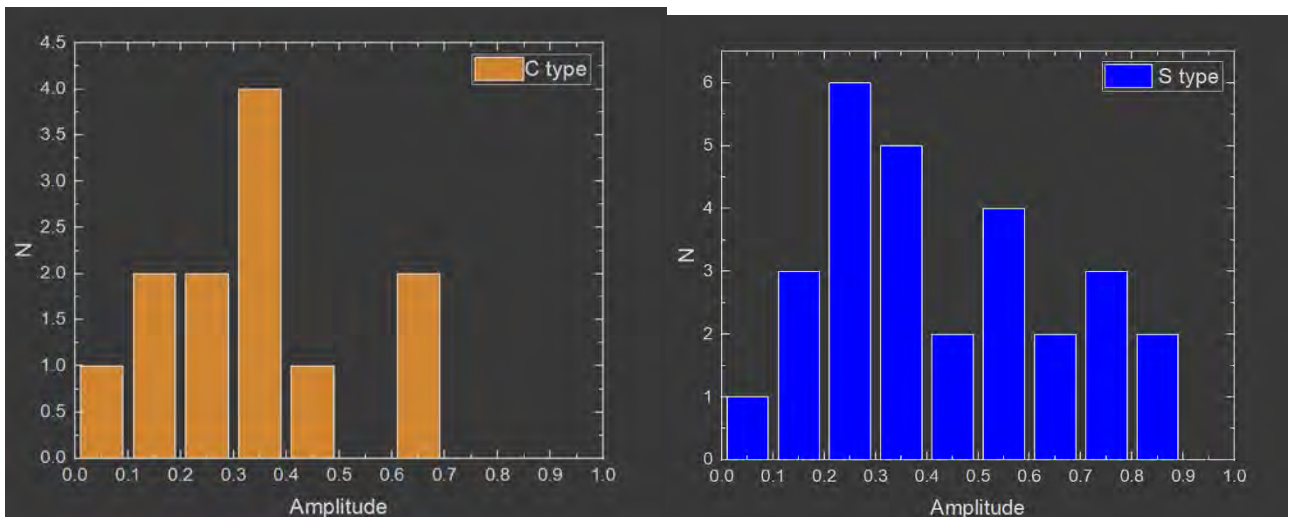


Рис. 2.4 Розподіл амплітуд кривих блиску двох підгруп Juno.

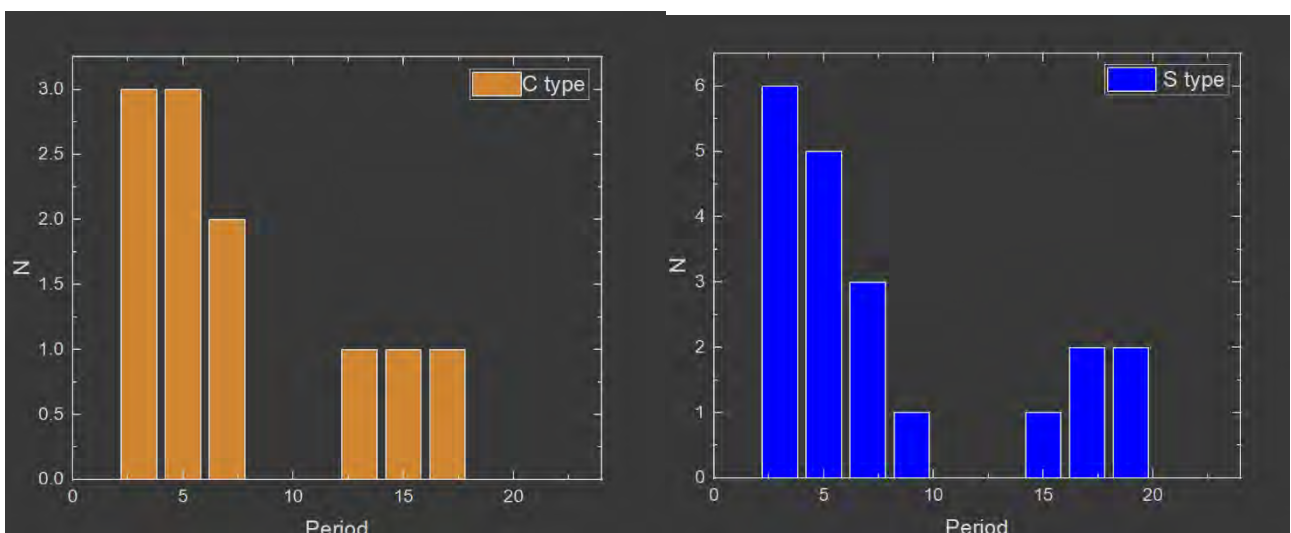


Рис. 2.5 Розподіл періодів двох підгруп Juno.

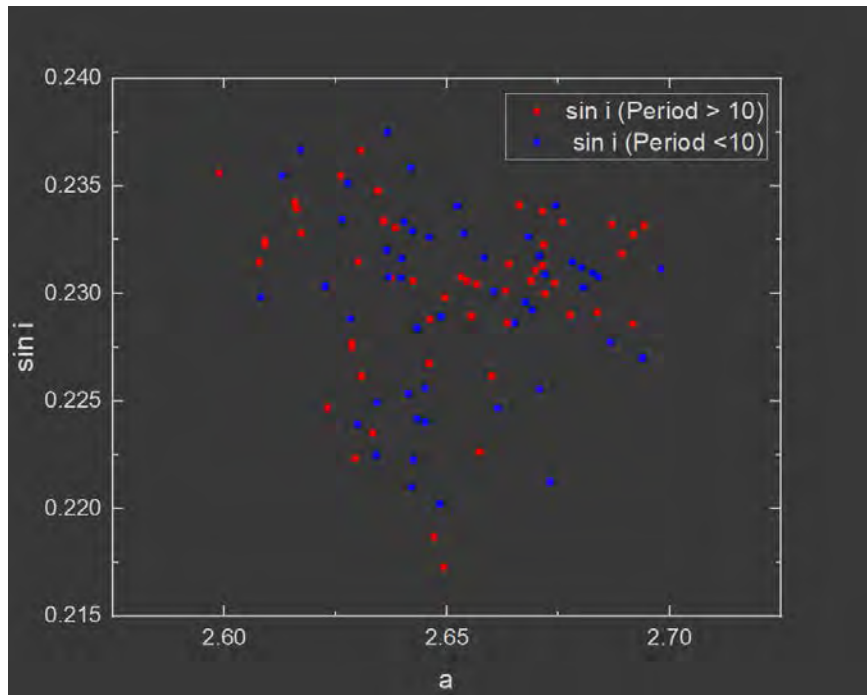


Рис. 2.6 Розподіл за власною піввіссю та синусом нахилу.

10 Hygiea

Розподіл нахилу спектру нормальний, має зміщення вліво відносно нуля. Спостерігається висока концентрація нізькоальбедних астероїдів (льбе до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо маскимум на 0.25 і лінійний спад після цього. Максимум в періоді припадає на 5^h і далі майже лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Також видно слабкі резонанси через вертикальні згущення точок.

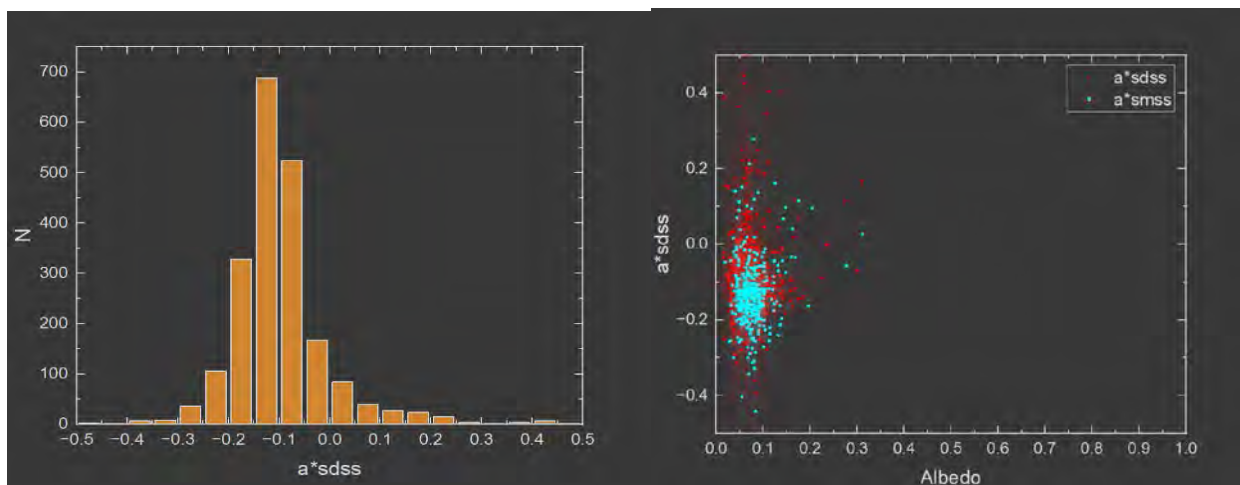


Рис. 2.7 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбеда (зправа) Нугієа.

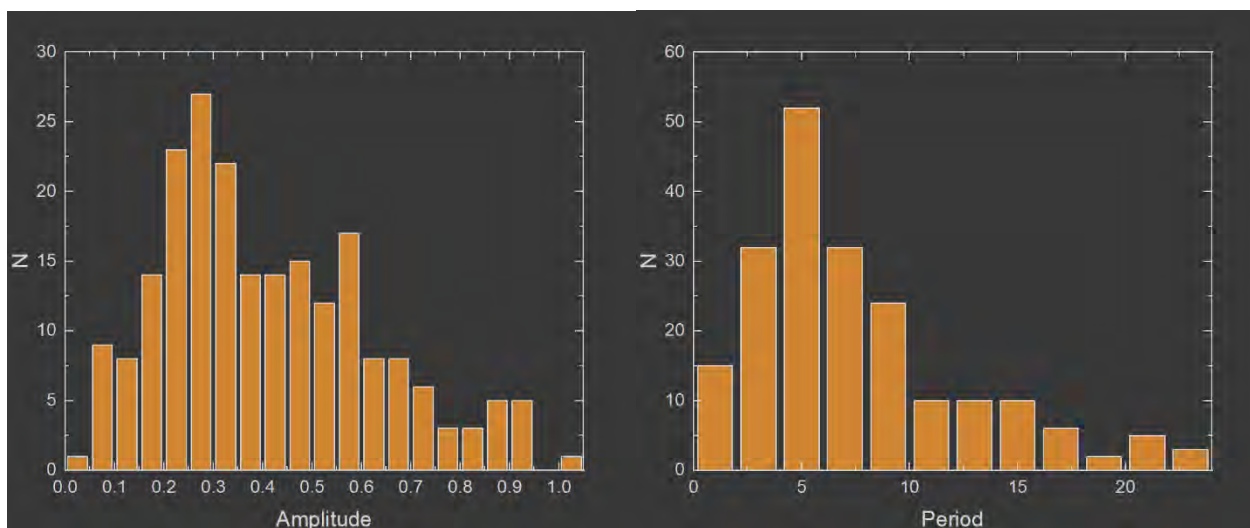


Рис. 2.8 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Нугіа.

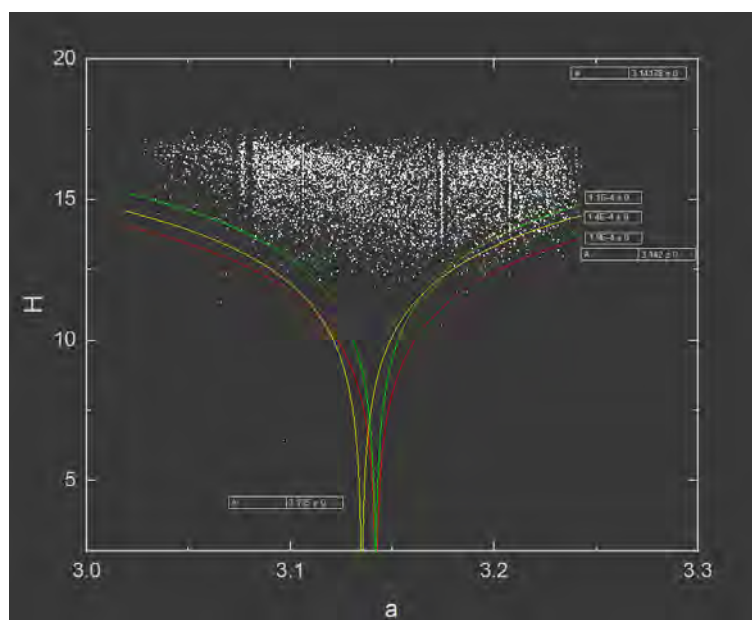


Рис. 2.9 Графік V-shape сімейства Нугіа.

15 Eunomia

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вправо відносно нуля. Спостерігається велика концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2. У амплітуди бачимо максимум на 0.275 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 3^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Резонансів не спостерігається.

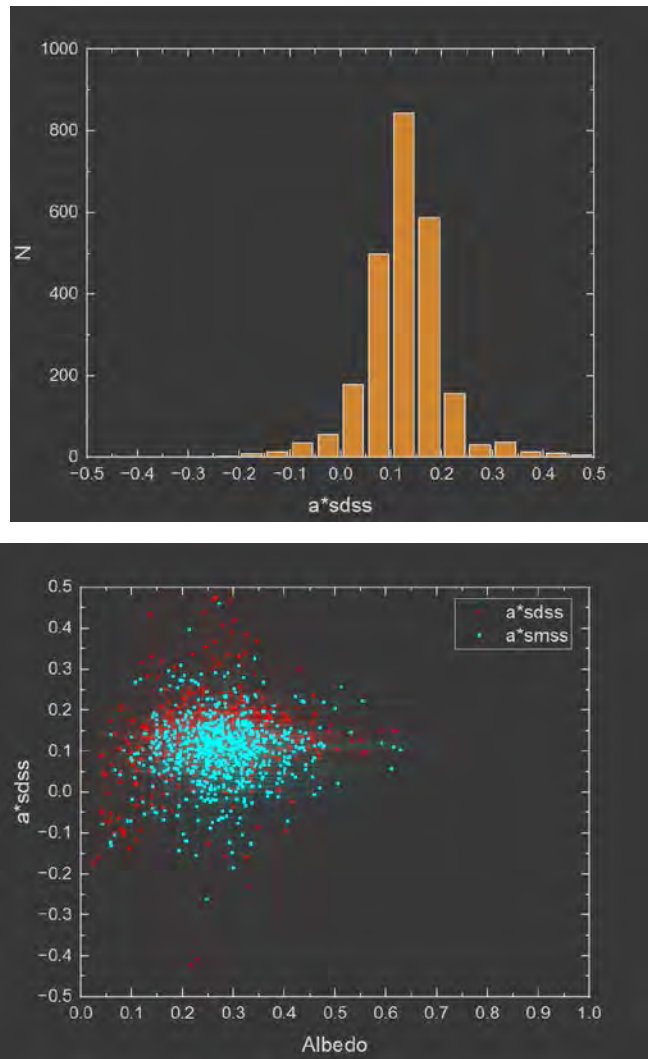


Рис. 2.10 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Eupomia.

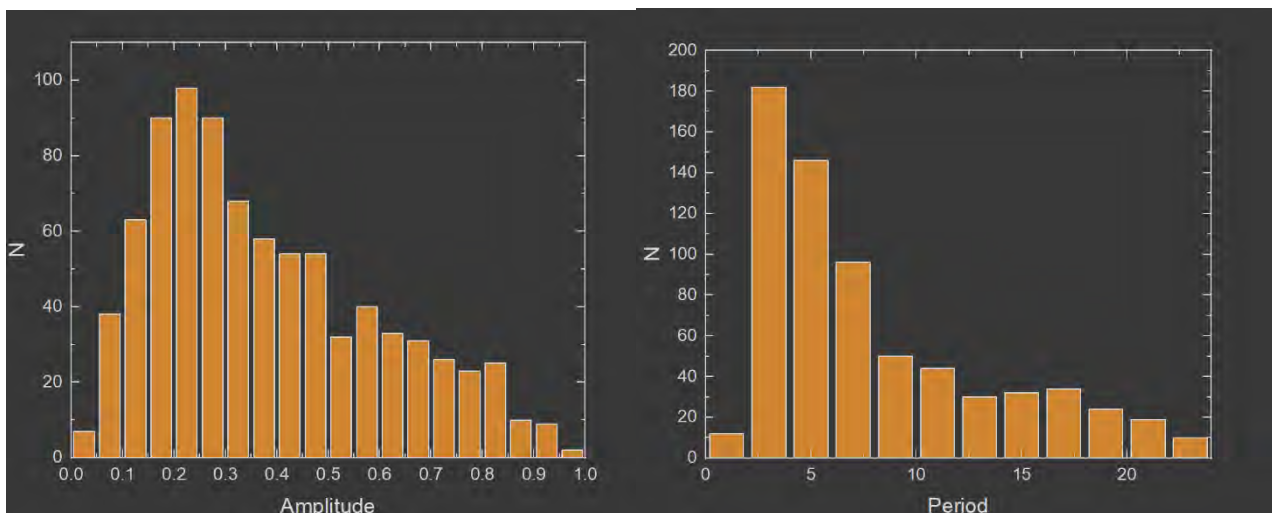


Рис. 2.11 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Eupomia.

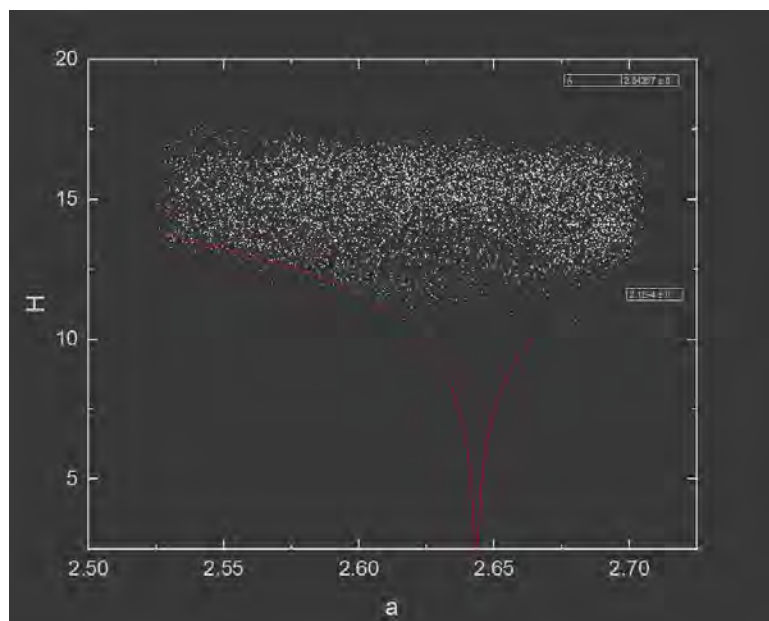


Рис. 2.12 Графік V-shape сімейства Eunomia.

20 Massalia

Розподіл нахилу спектру нормальний, має зміщення вправо відносно нуля. Спостерігається середня концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2 і мала концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо три максимуми в 0.15, 0.35 і 0.65 і після лінійний спад. Максимум в періоді припадає на 5^h і далі лінійний спад але статистичних даних мало як і для амплітуд. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Маємо декілька слабких резонасів.

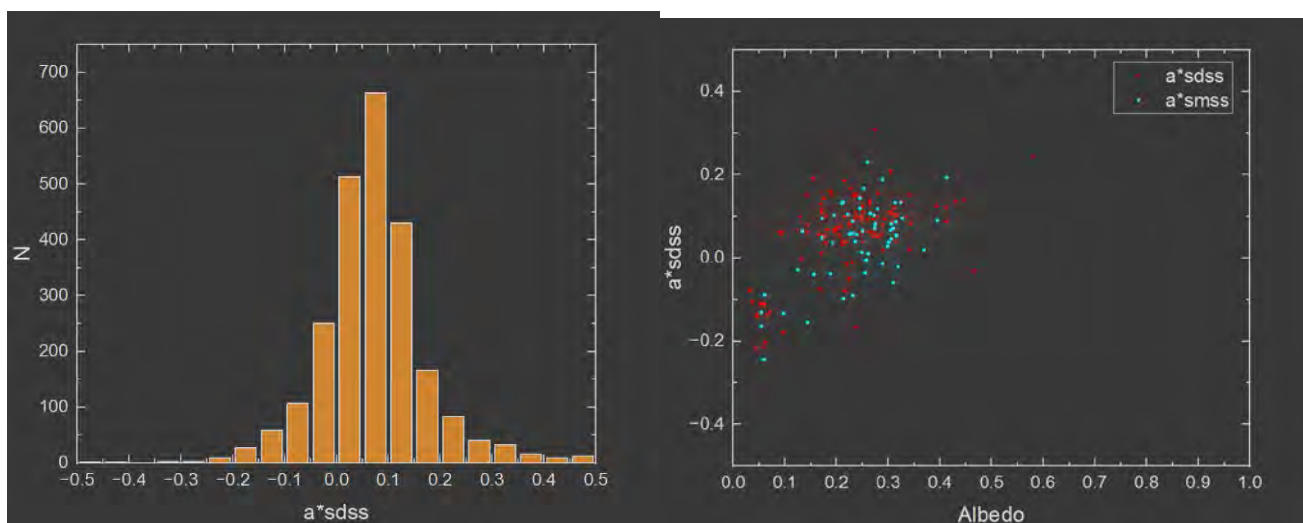


Рис. 2.13 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Massalia.

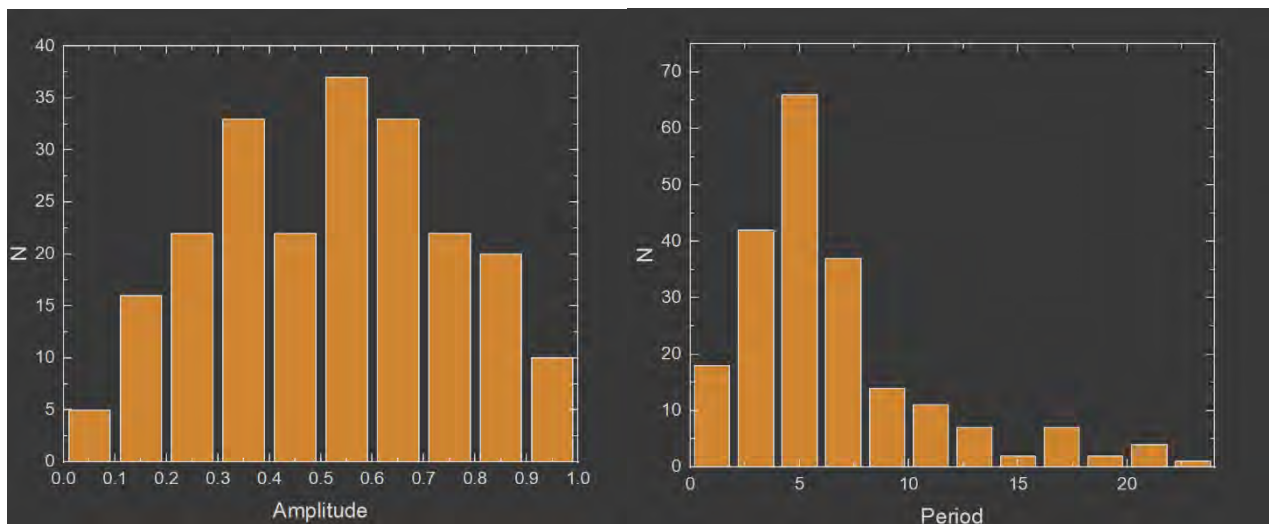


Рис. 2.14 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Massalia.

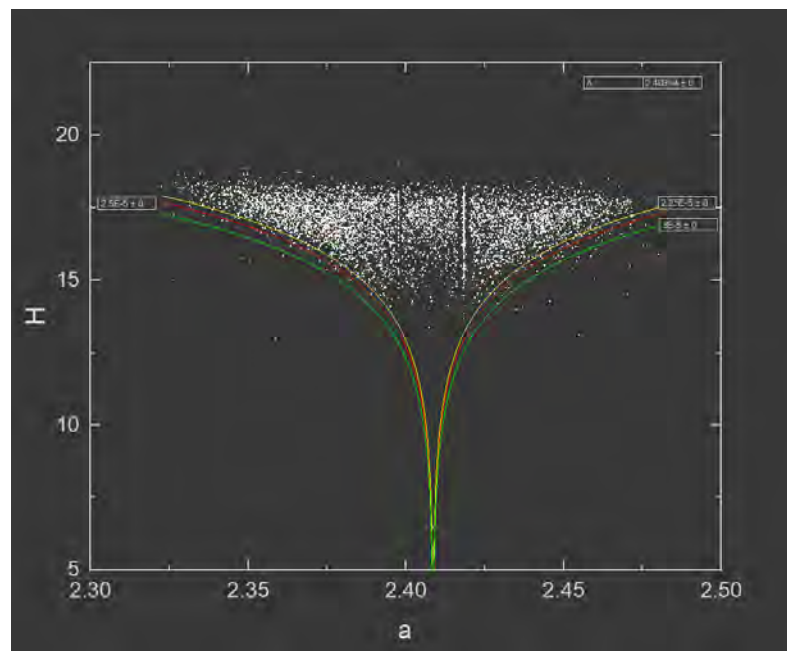


Рис. 2.15 Графік V-shape сімейства Massalia.

24 Themis

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно нуля. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуді бачимо максимум на 0.25 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 7^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Маємо декілька слабких резонансів.

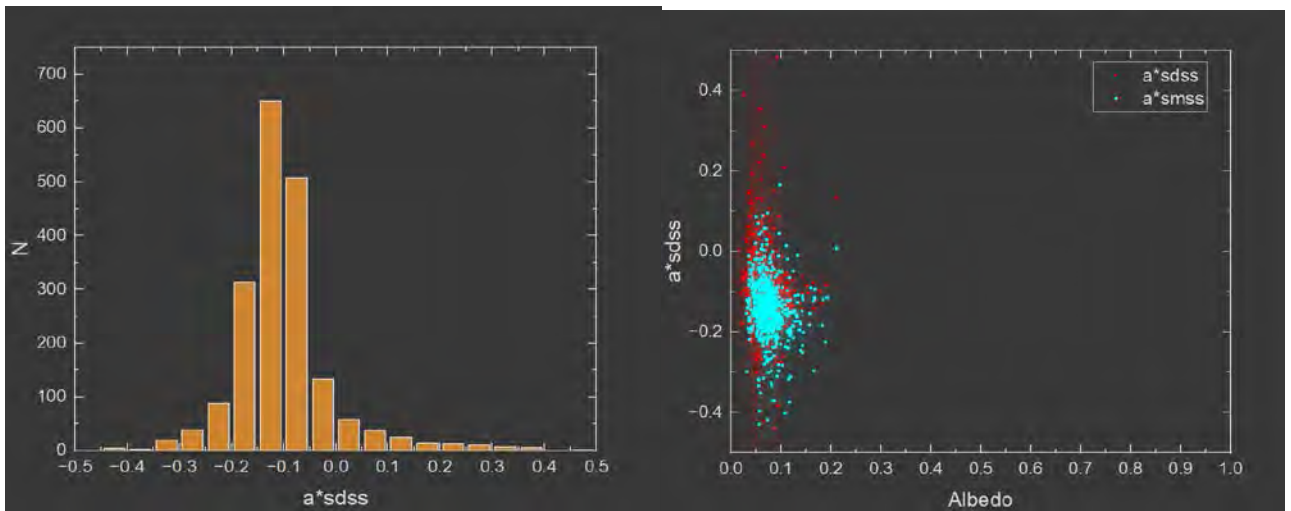


Рис. 2.16 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Themis.

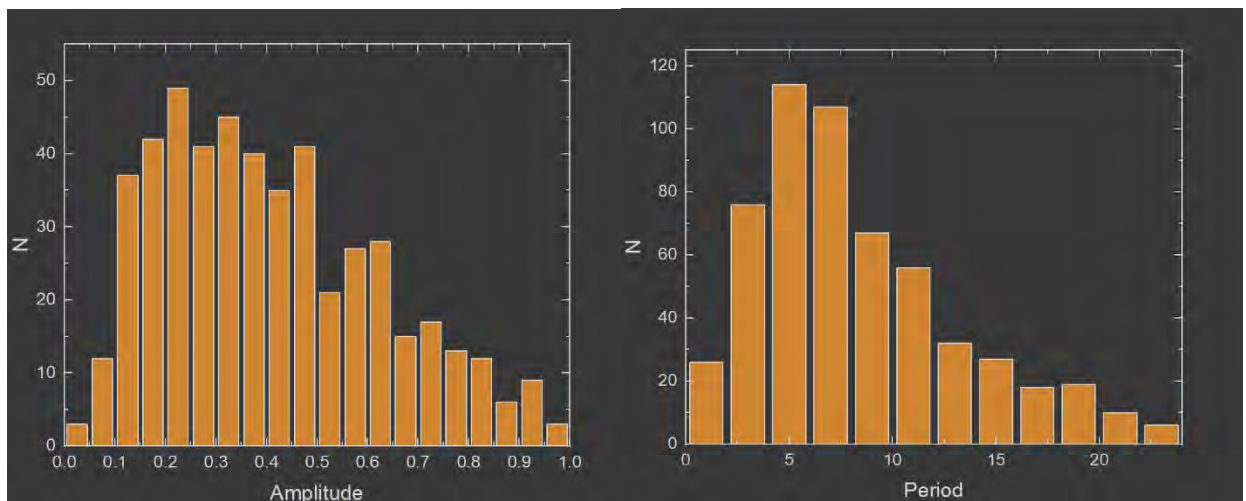


Рис. 2.17 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Themis.

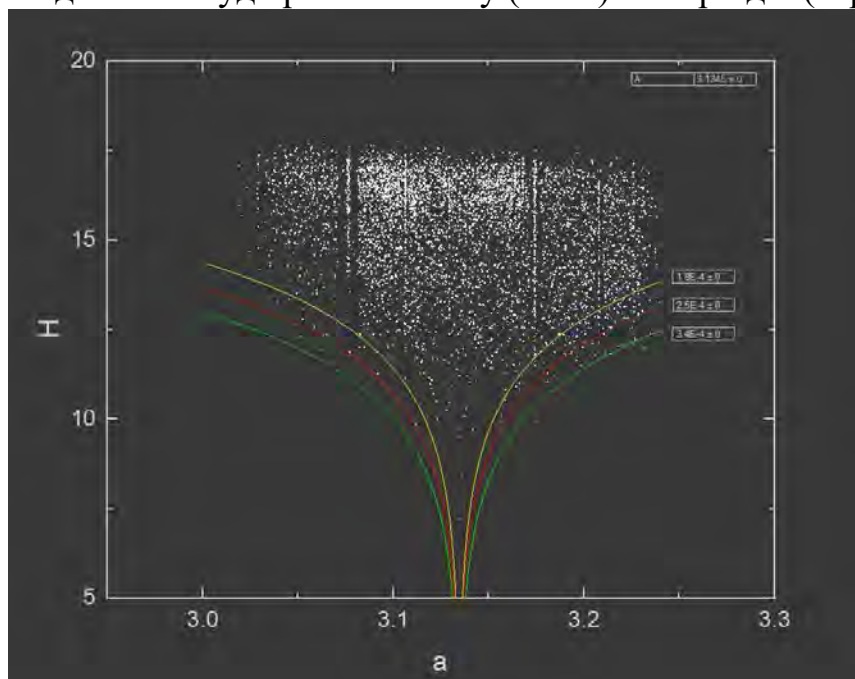


Рис. 2.18 Графік V-shape сімейства Themis.

25 Phocaea

Розподіл нахилу спектру нормальний але має пологую ліву частину та більш різкоспадаючу праву, зміщений вправо відносно нуля. Спостерігається велика концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2 та низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо різкий максимум на 0.25 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 3^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Резонансів не спостерігається.

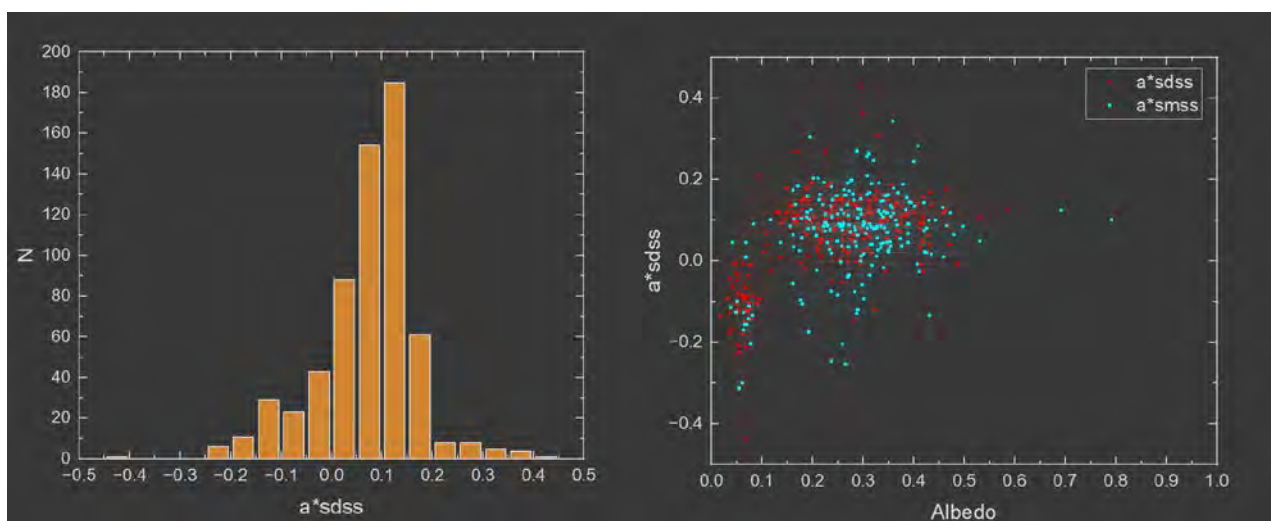


Рис. 2.19 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Phocaea.

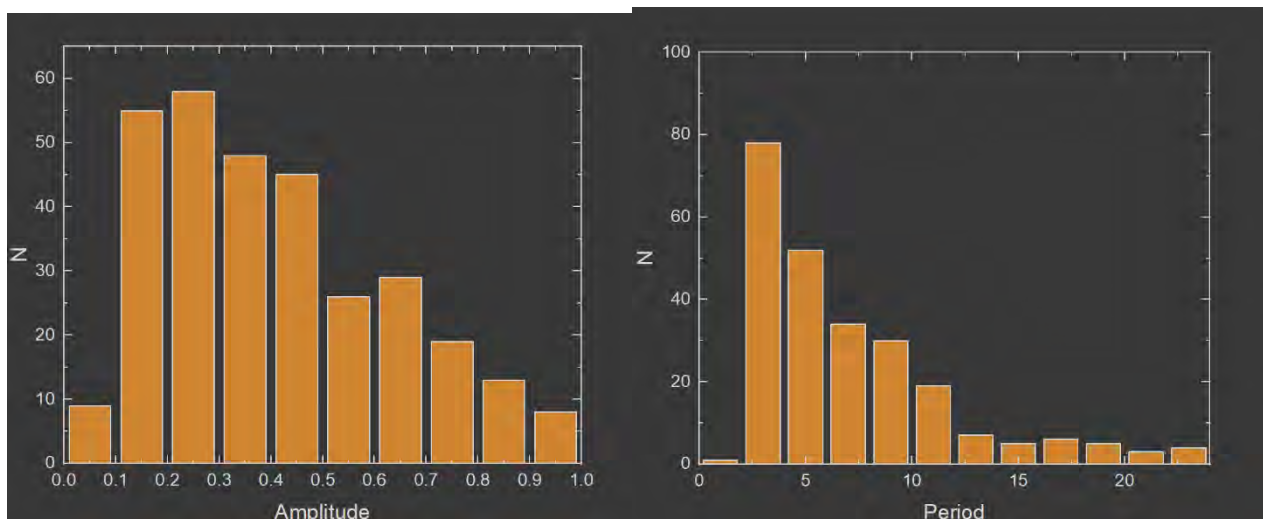


Рис. 2.20 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Phocaea.

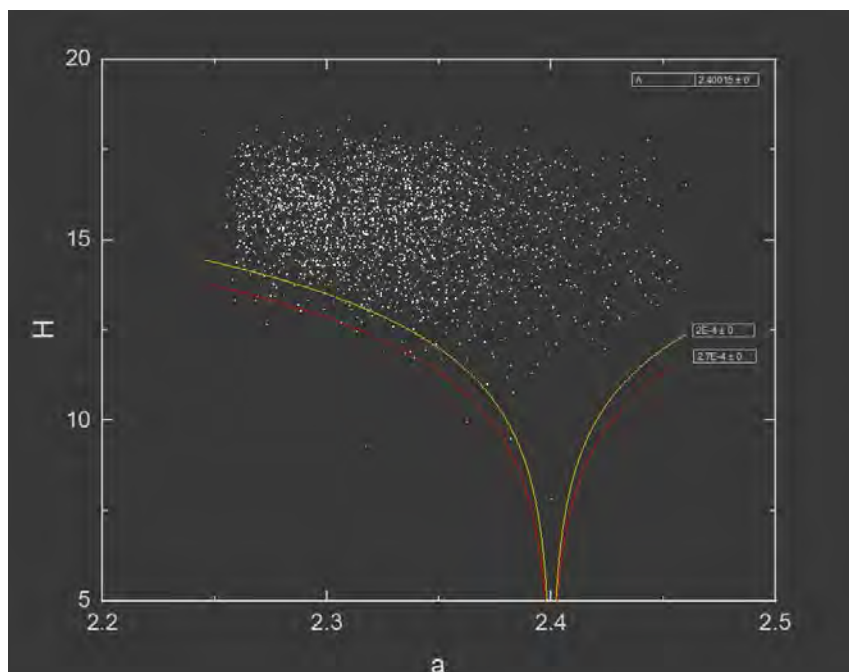


Рис. 2.21 Графік V-shape сімейства Phocaea.

31 Euphrosyne

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно нуля. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо максимум на 0.45 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 7^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Маємо декілька слабких резонасів.

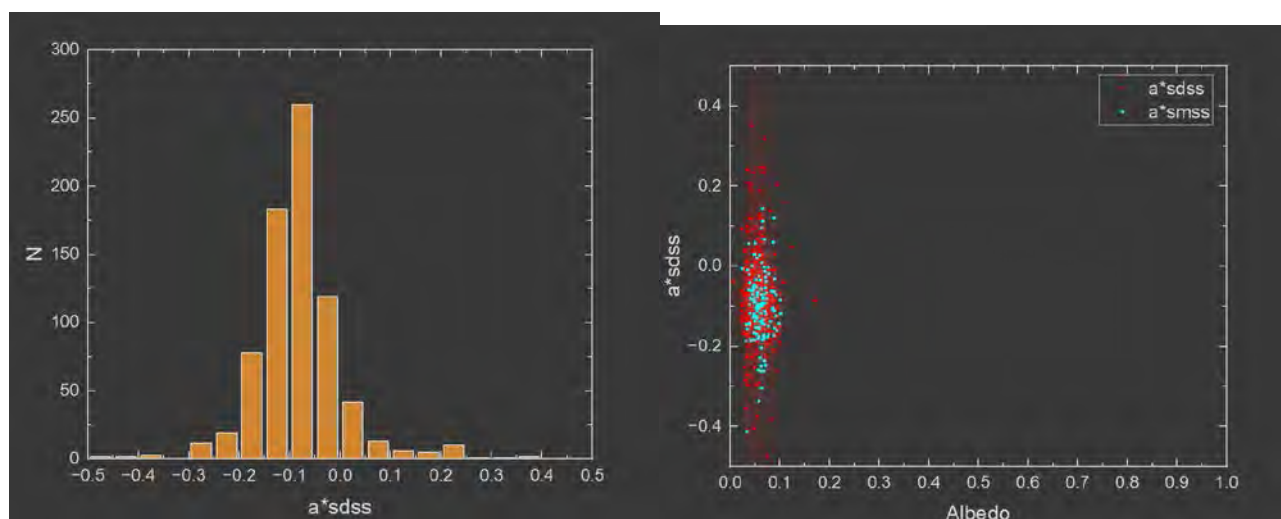


Рис. 2.22 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Euphrosyne.

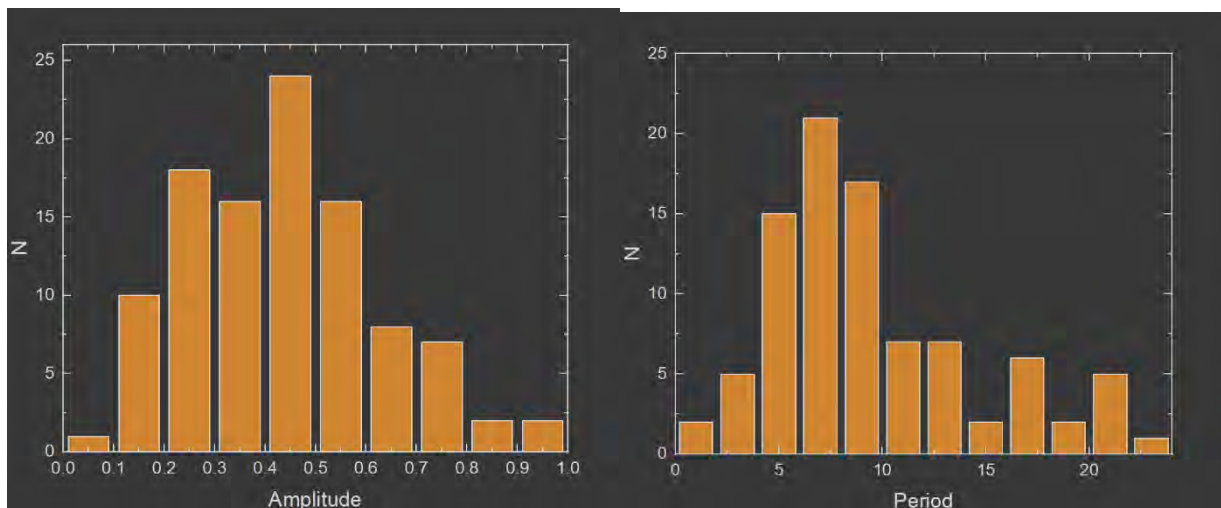


Рис. 2.23 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Euphrosyne.

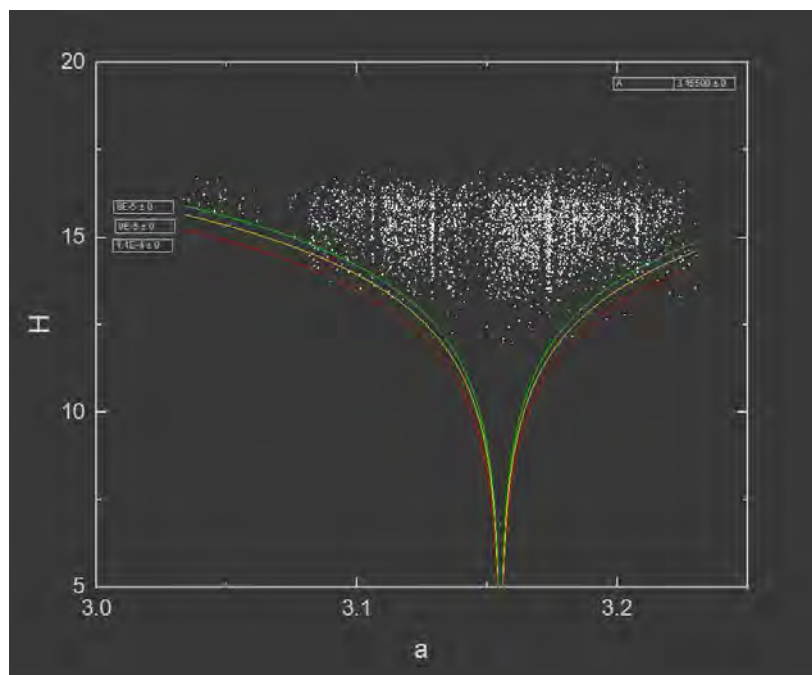


Рис. 2.24 Графік V-shape сімейства Euphrosyne.

128 Nemesis

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно нуля. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо максимум на 0.225 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 5^h і далі лінійно спадає але

статистичних даних мало як і для амплітуд. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму із згущенням у лівому «крилі». Резонансів не спостерігається.

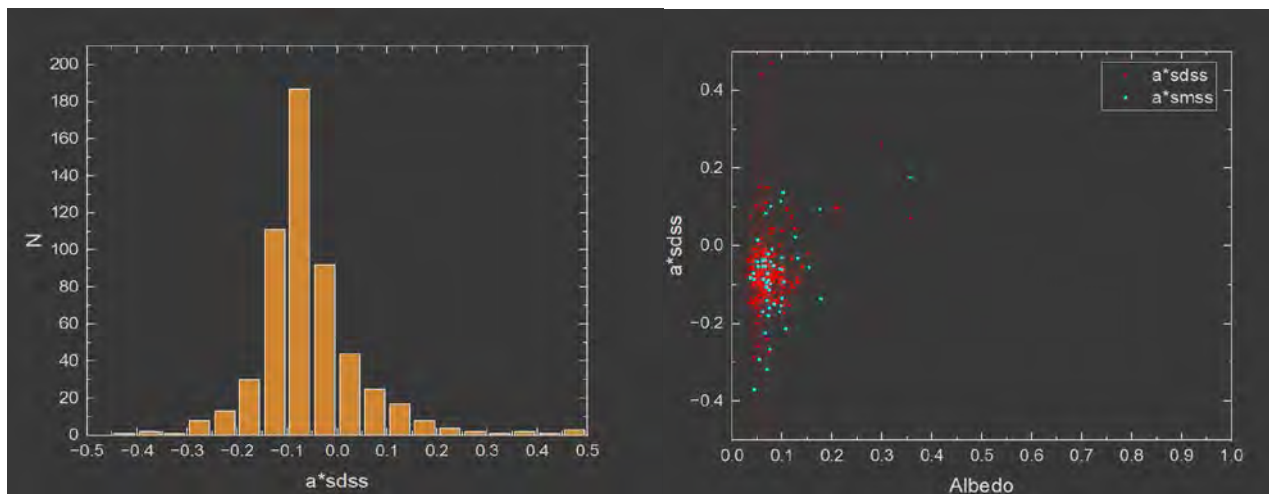


Рис. 2.25 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Nemesis.

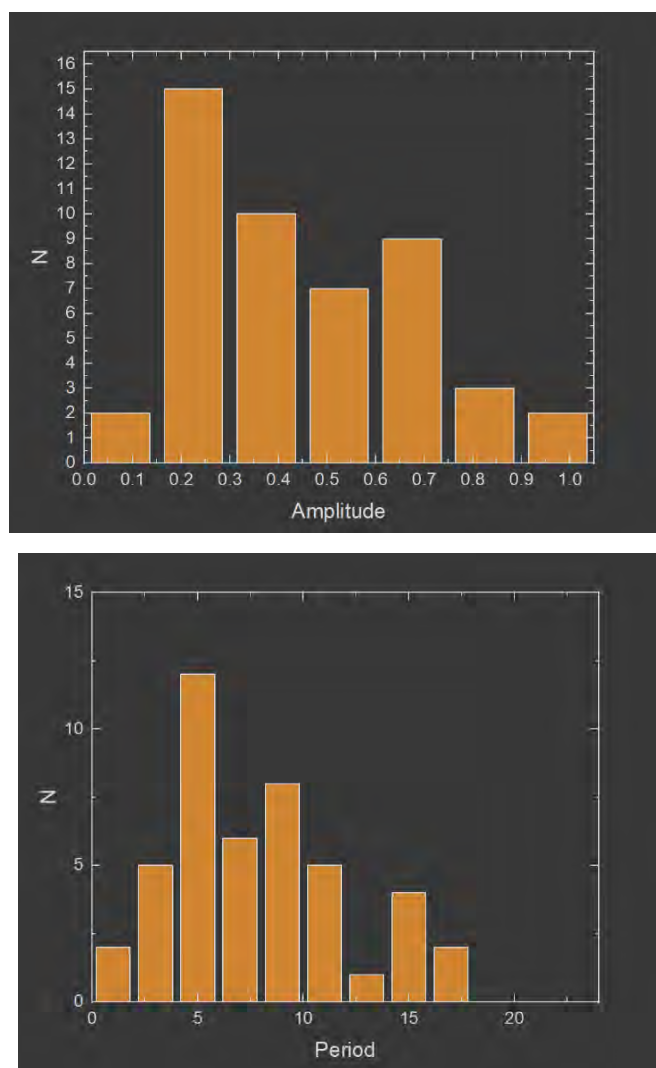


Рис. 2.26 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Nemesis.

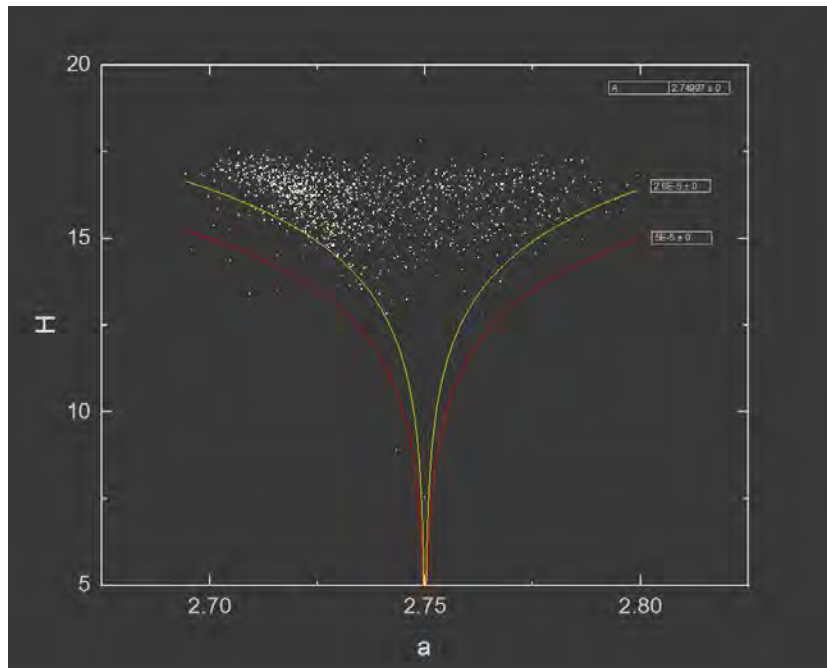


Рис. 2.27 Графік V-shape сімейства Nemesis.

145 Adeona

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно нуля і має ще один малий максимум в правій частині на 0.15. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2 та мала концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2. У амплітуди бачимо максимум на 0.35 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 5^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму із зменшенням згущенням густини у правому «крилі». Спостерігається сильний резонанс на 2.7.

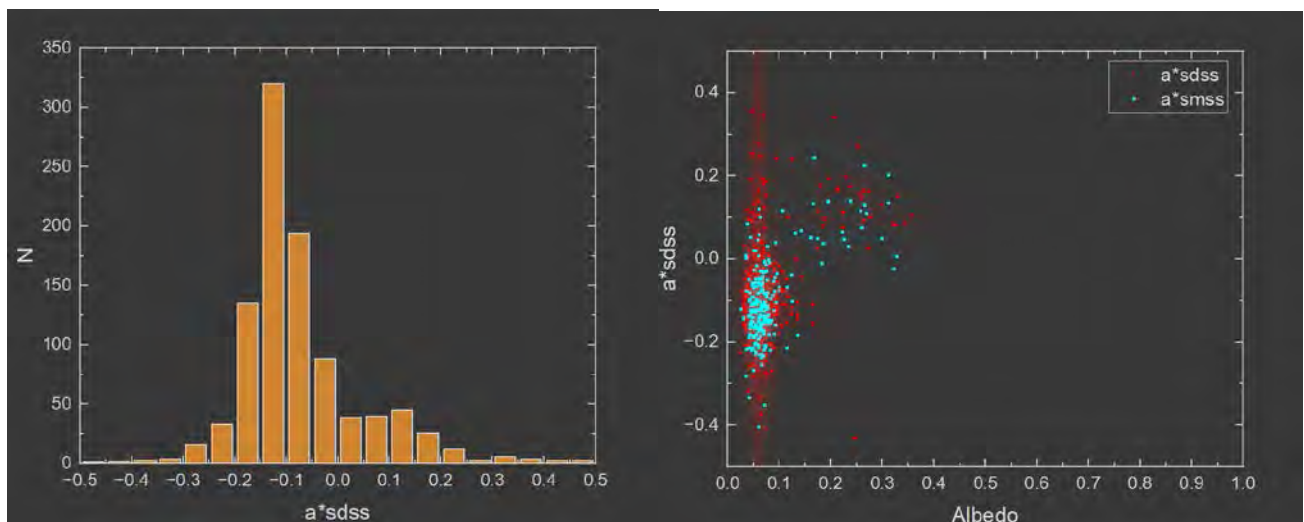


Рис. 2.28 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Adeona.

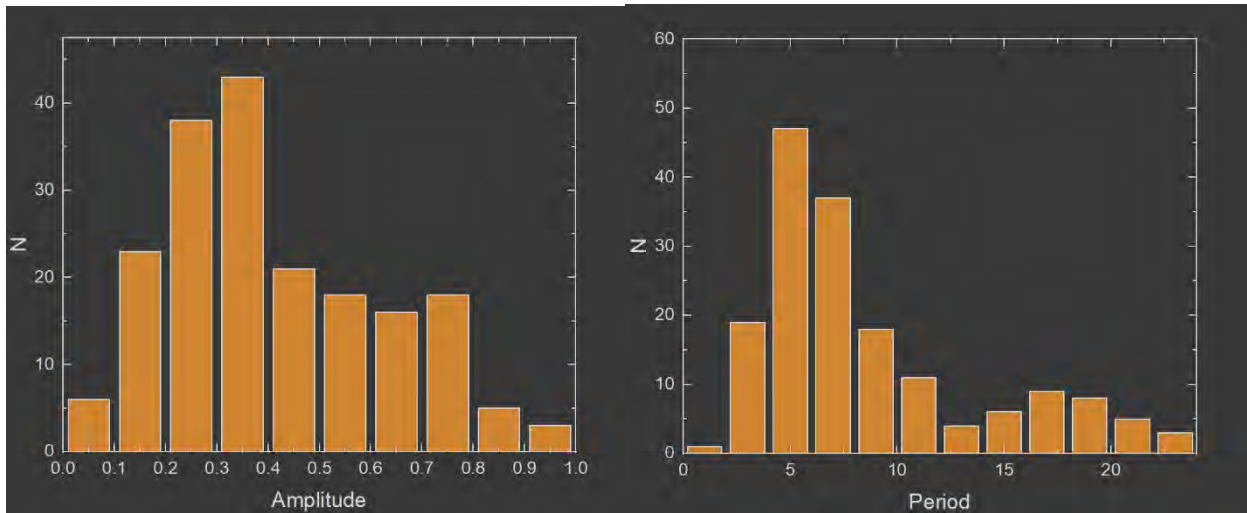


Рис. 2.29 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Adeona.

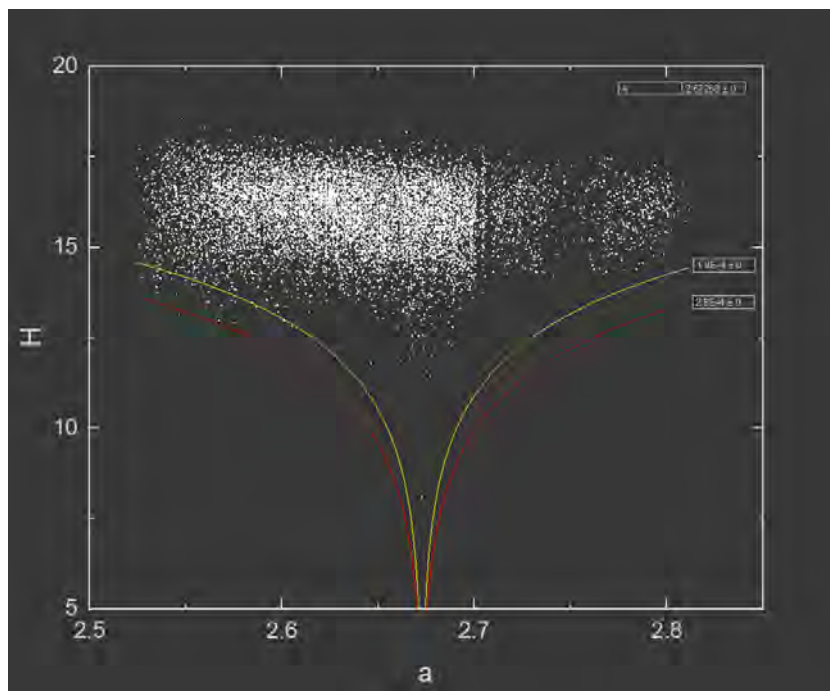


Рис. 2.30 Графік V-shape сімейства Adeona.

158 Koronis

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вправо відносно нуля. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо максимум на 0.25 і подальший спад «сходінками». Максимум в періоді припадає на 3^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму із згущенням в центрі. Резонансів не спостерігається.

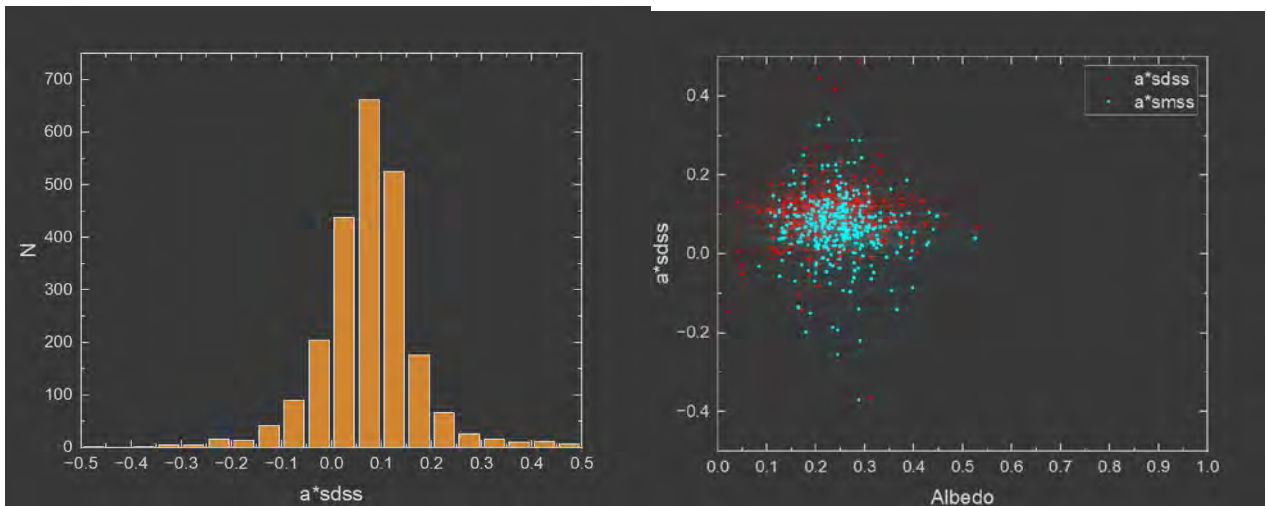


Рис. 2.31 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Koronis.

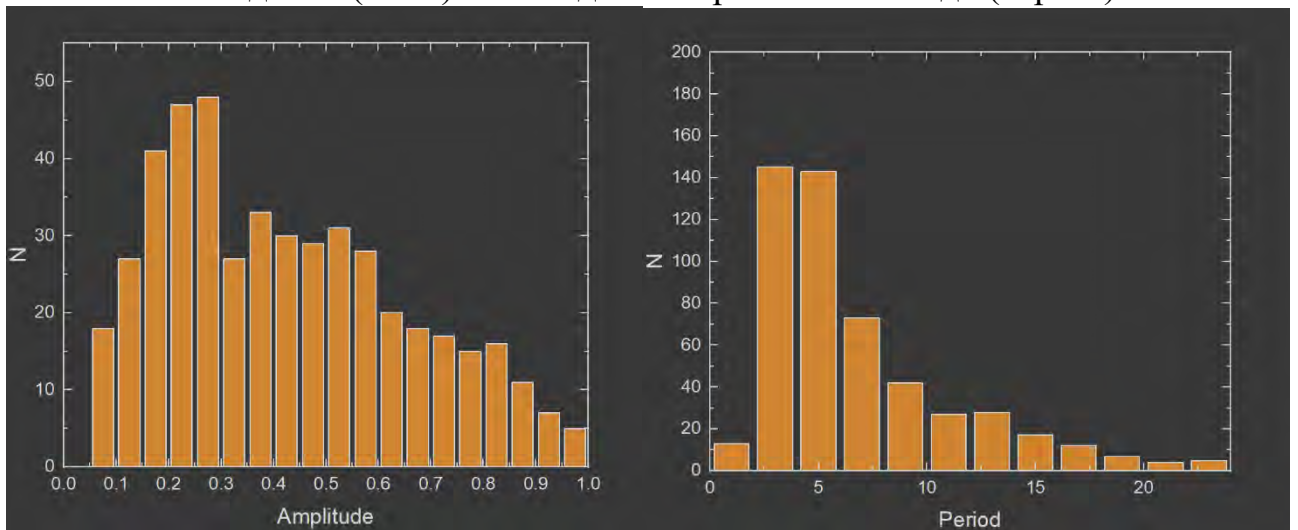


Рис. 2.32 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Koronis.

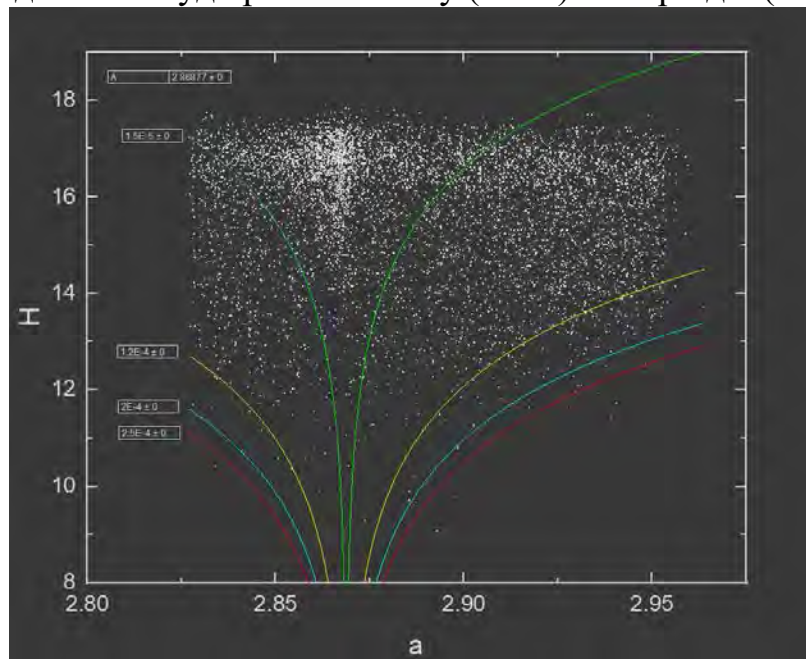


Рис. 2.33 Графік V-shape сімейства Koronis.

163 Erigone

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно нуля і має ще один малий максимум в правій частині на 0.125. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2 та малий згусток середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.35 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 5^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Маємо декілька слабких резонасів.

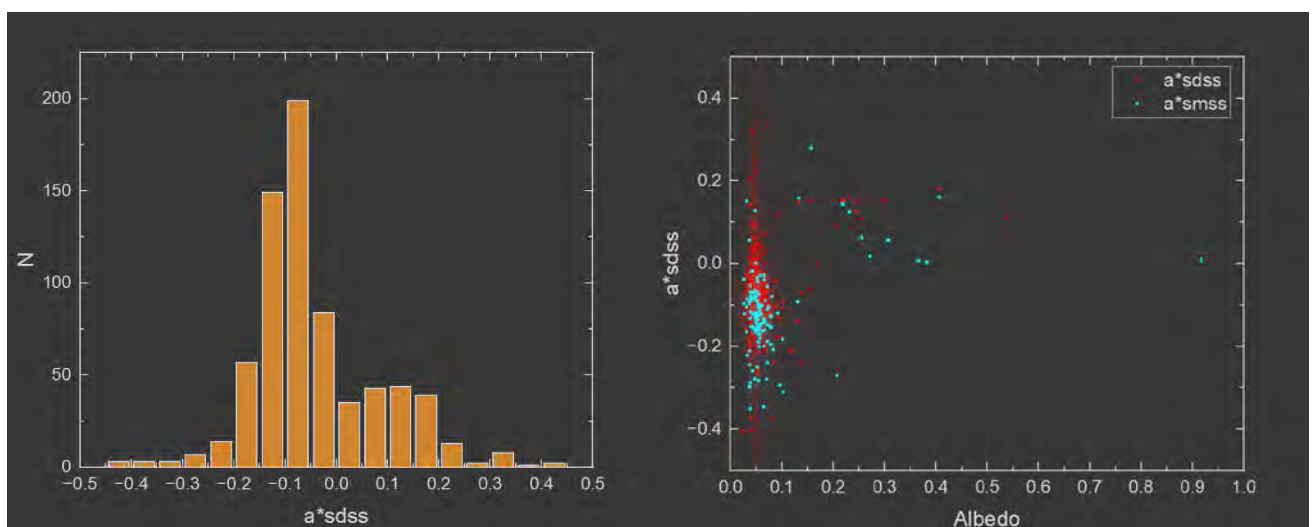


Рис. 2.34 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Erigone.

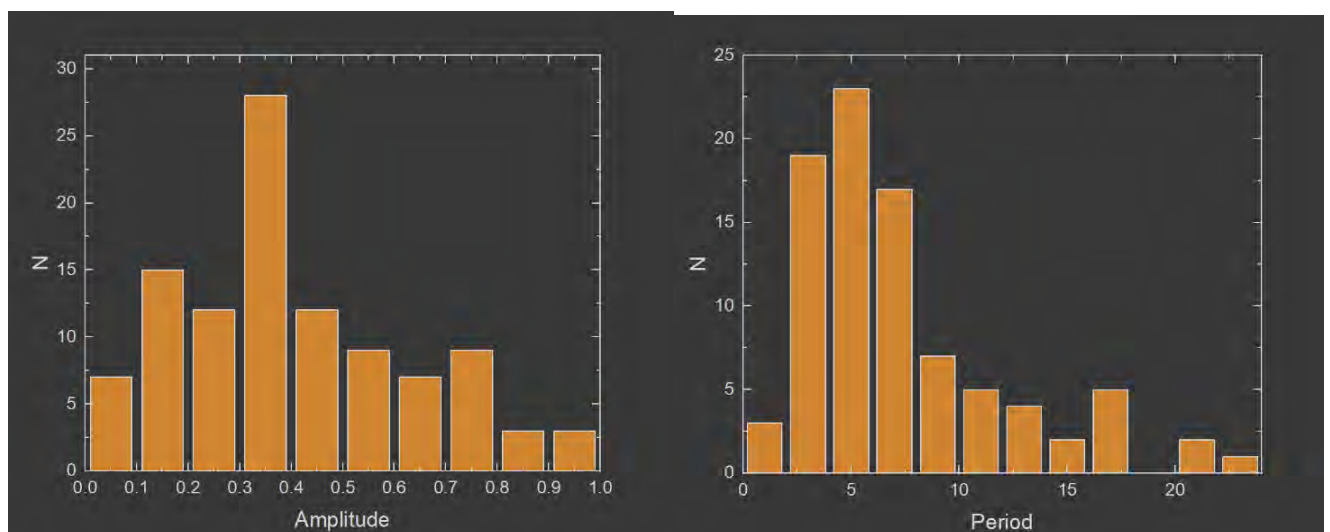


Рис. 2.35 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Erigone.

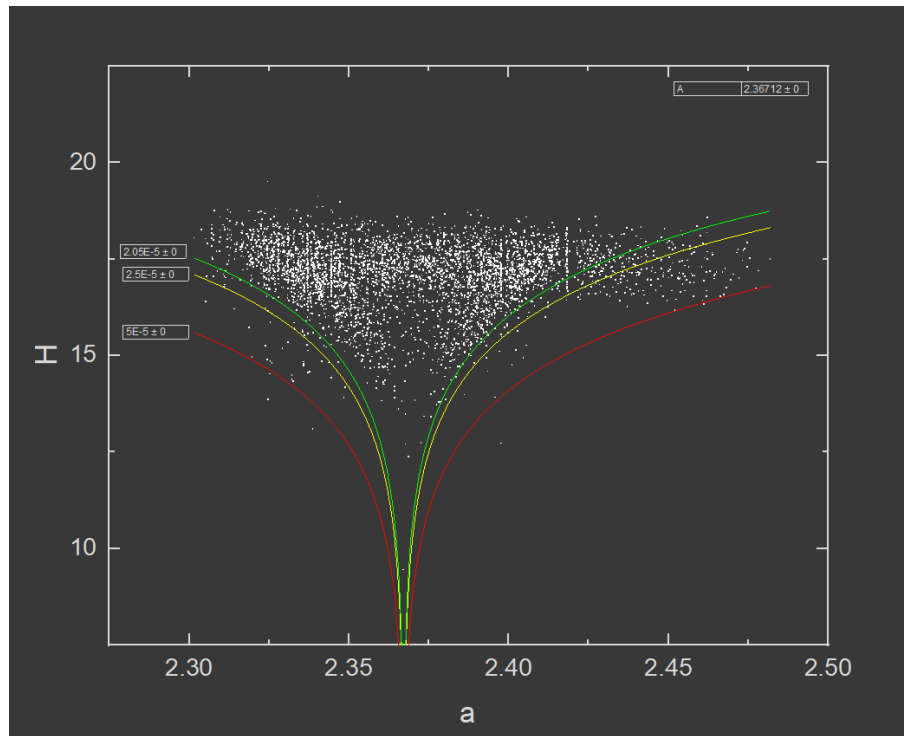


Рис. 2.36 Графік V-shape сімейства Erigone.

170 Maria

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вправо відносно нуля. Спостерігається велика концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.25 та малий другий максимум на 0.65 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 3^h і другий на 15^h, а далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Резонансів не спостерігається.

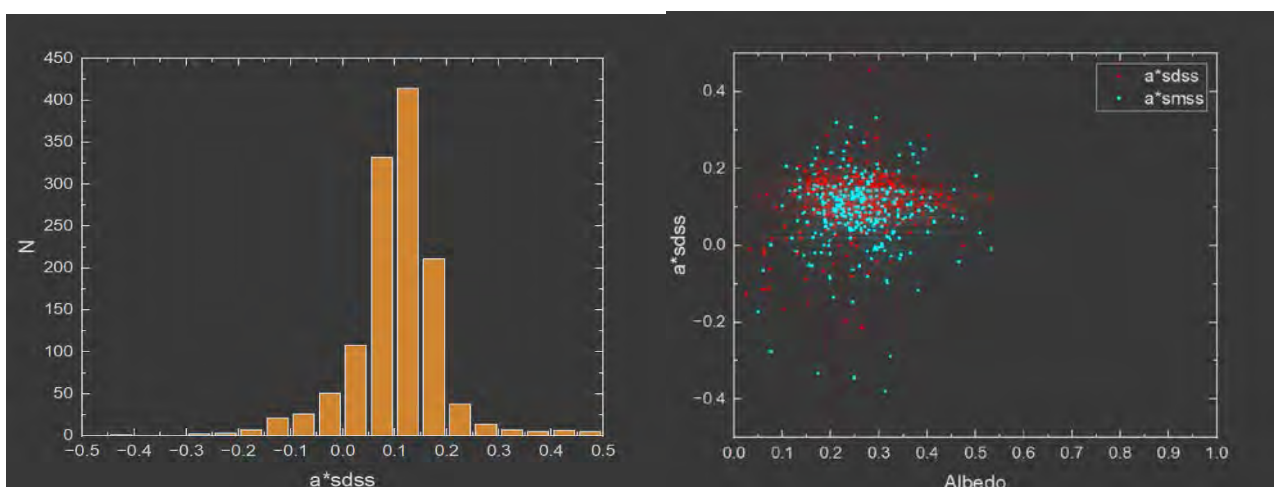


Рис. 2.37 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Maria.

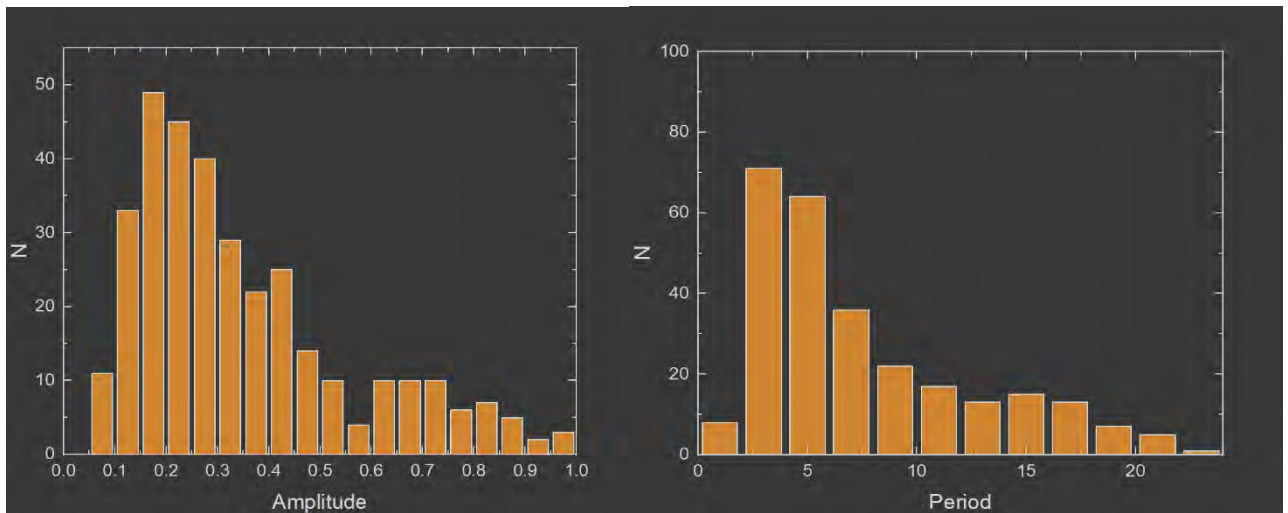


Рис. 2.38 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Maria.

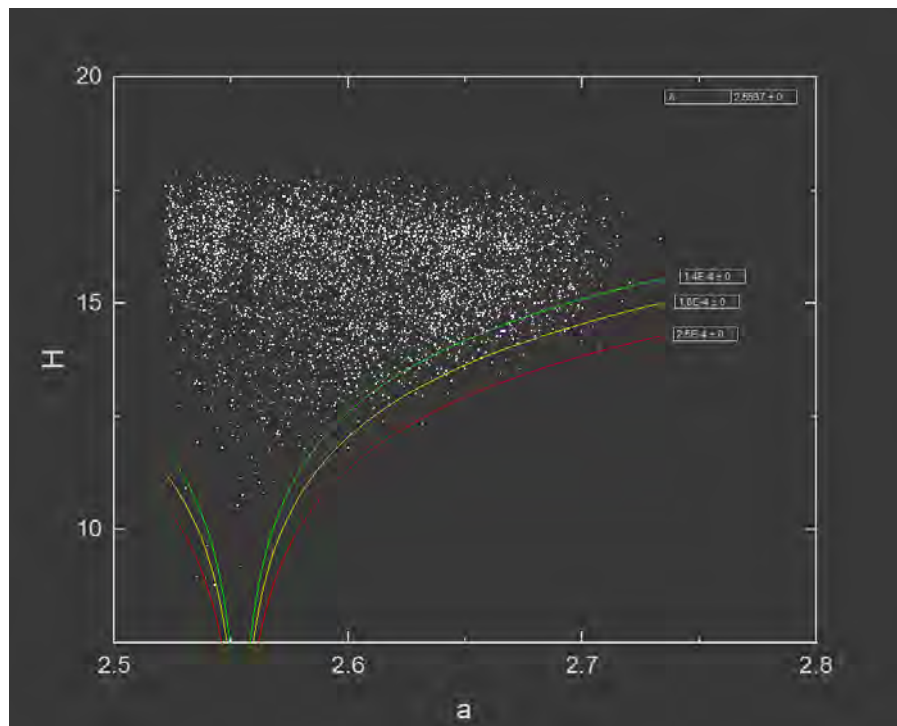


Рис. 2.39 Графік V-shape сімейства Maria.

221 Eos

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вправо відносно. Спостерігається велика концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2 та середня концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.35 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді

припадає на 5^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Маємо декілька слабких резонасів.

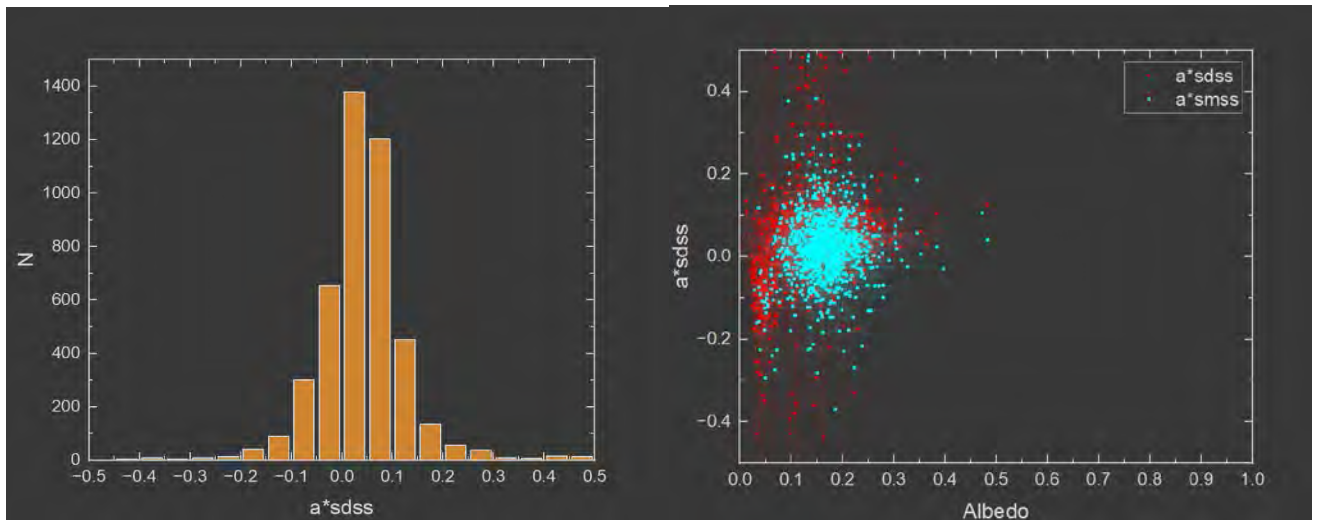


Рис. 2.40 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Eos.

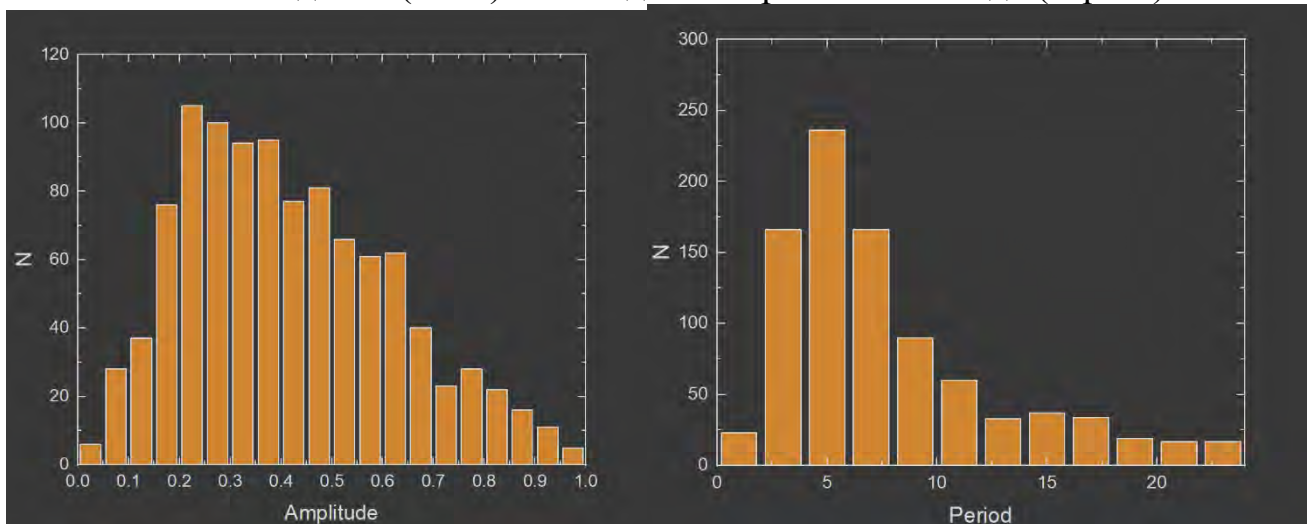


Рис. 2.41 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Eos.

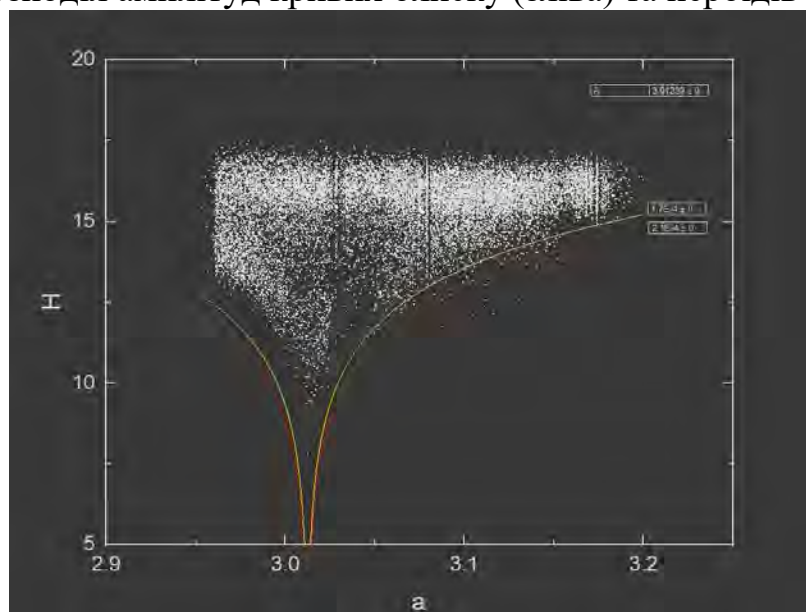


Рис. 2.42 Графік V-shape сімейства Eos.

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно нуля і має ще один максимум в правій частині на 0.125. На графіку альbedo і показника кольору спостерігаються дві рівнозначні групи астероїдів, які відносяться до двох різних таксономічних типів: низькоальбедні (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2 та середньоальбедні (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2. У амплітуді бачимо виразний максимум на 0.35 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 5^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму та ймовірний другий в центральній частині першого V-shape із згущенням на правому «крилі». Резонансів не спостерігається.

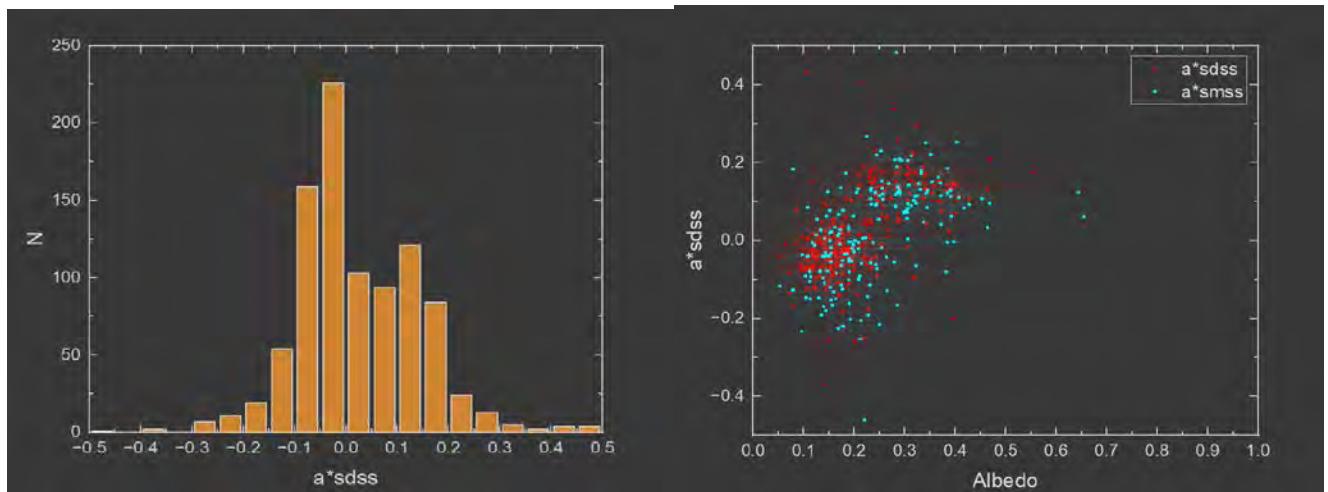


Рис. 2.43 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) *Baptistina*.

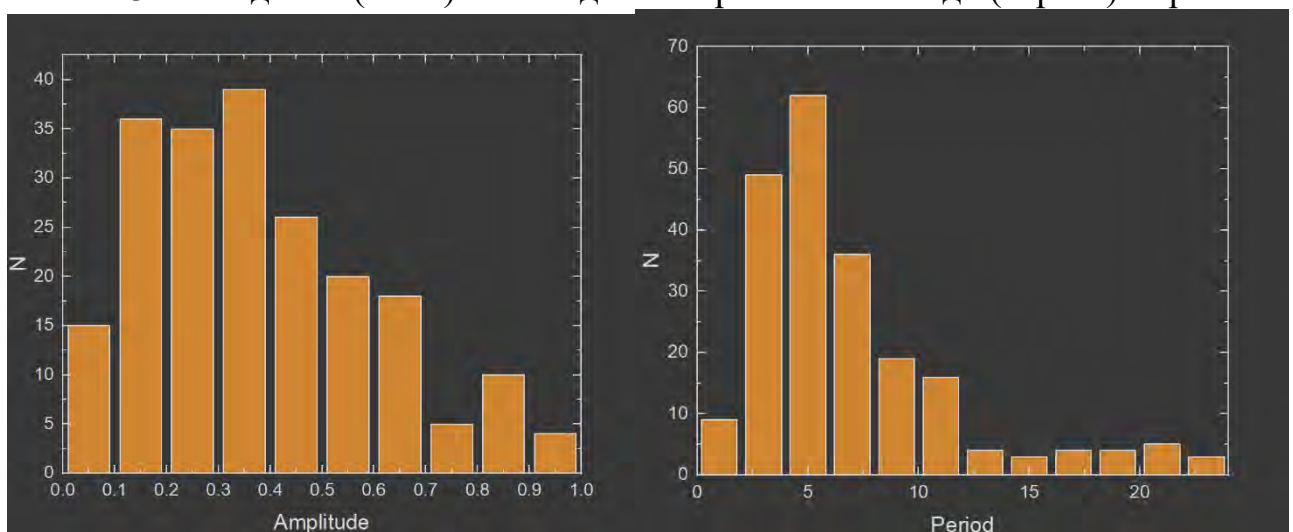


Рис. 2.44 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа)

Baptistina.

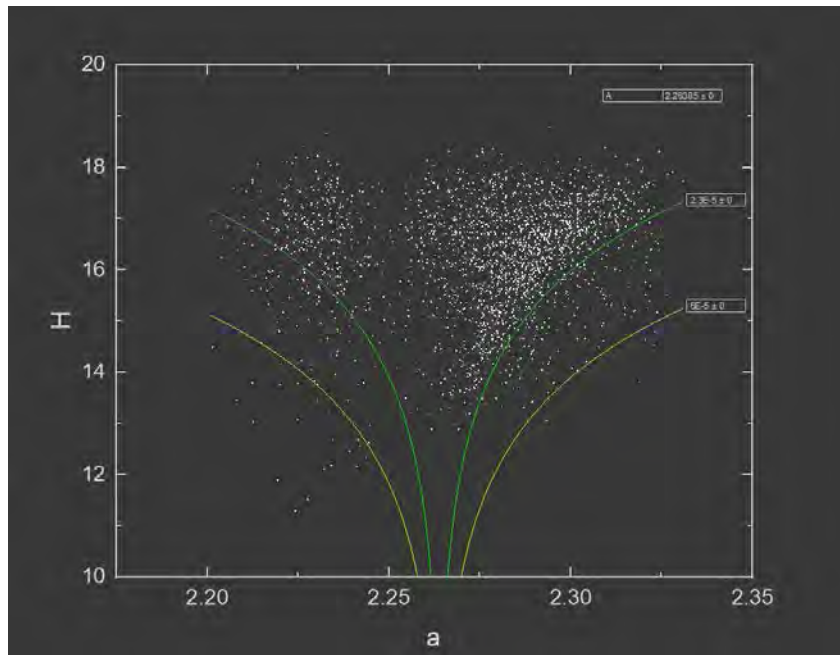


Рис. 2.45 Графік V-shape сімейства Baptistina.

363 Padua

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно нуля. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.35 і другий на 0.55 та майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 5^h і другий на 9^h далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Резонансів не спостерігається.

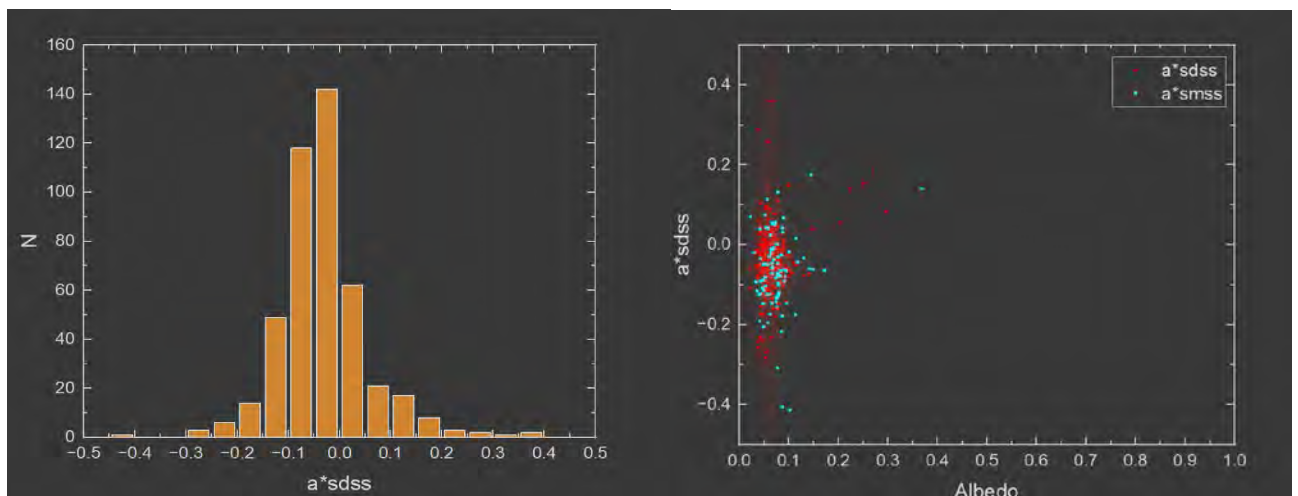


Рис. 2.46 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Padua.

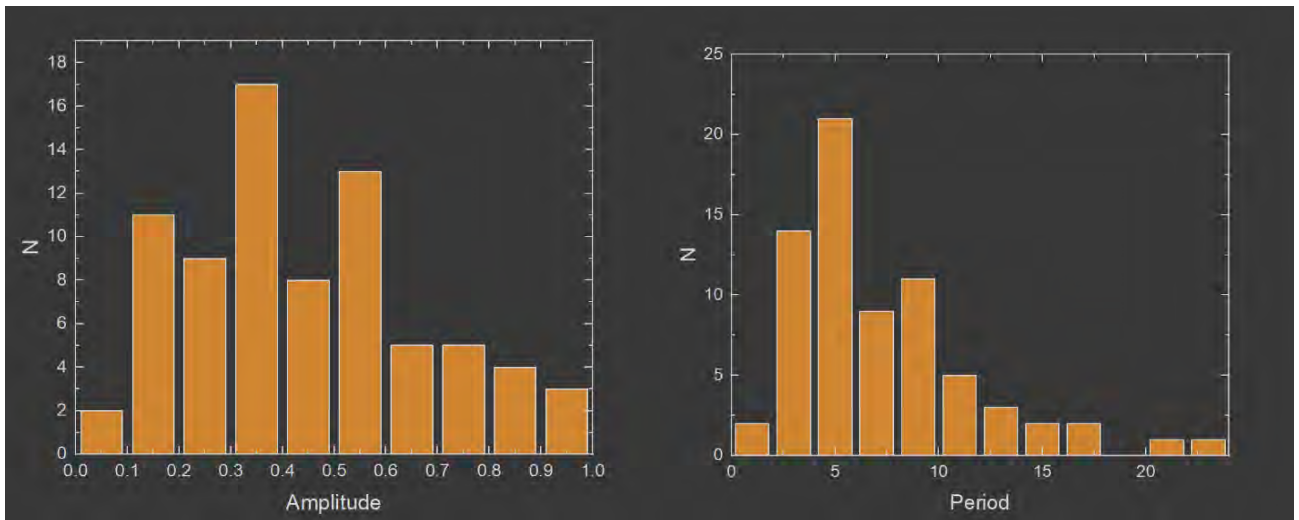


Рис. 2.47 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Padua.

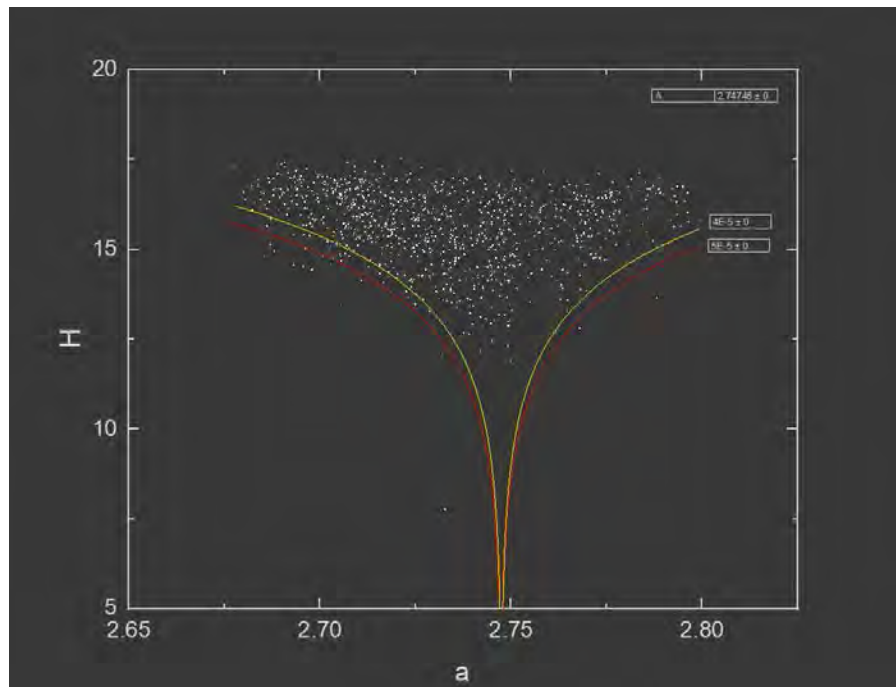


Рис. 2.48 Графік V-shape сімейства Padua.

375 Ursula

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2 та «хмара» середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.45 і майже лінійний різкий спад після нього. Максимум в періоді припадає на 7^h і ще один на 15^h далі лінійно спадає. На графіку V-shape не можна однозначно сказати чи це повноцінна форма чи ми бачимо лише одне «крило». Маємо декілька слабких резонансів.

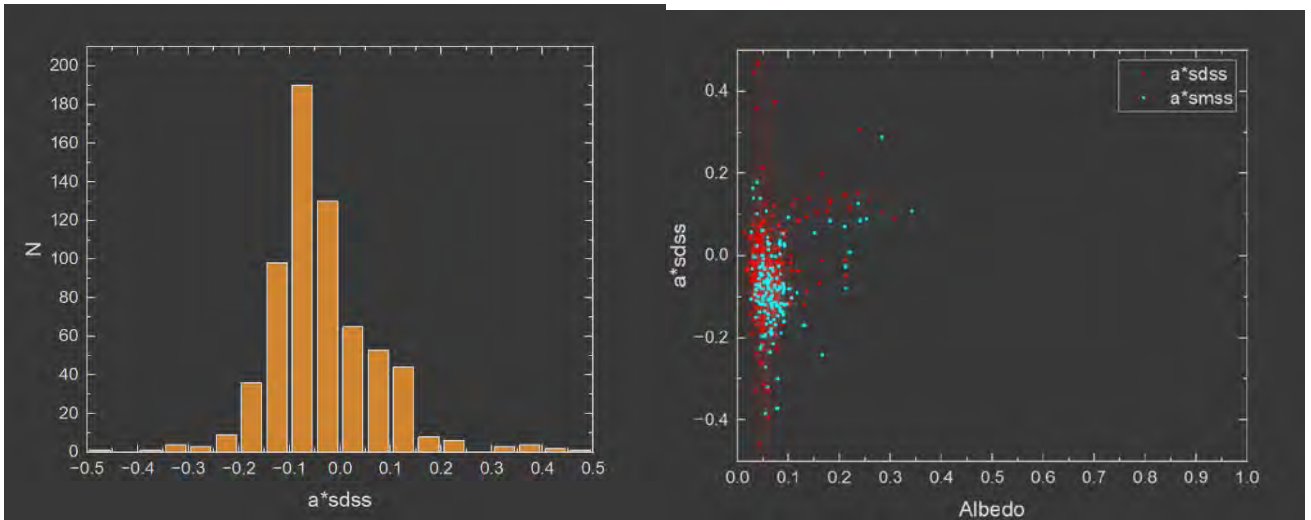


Рис. 2.49 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Ursula.

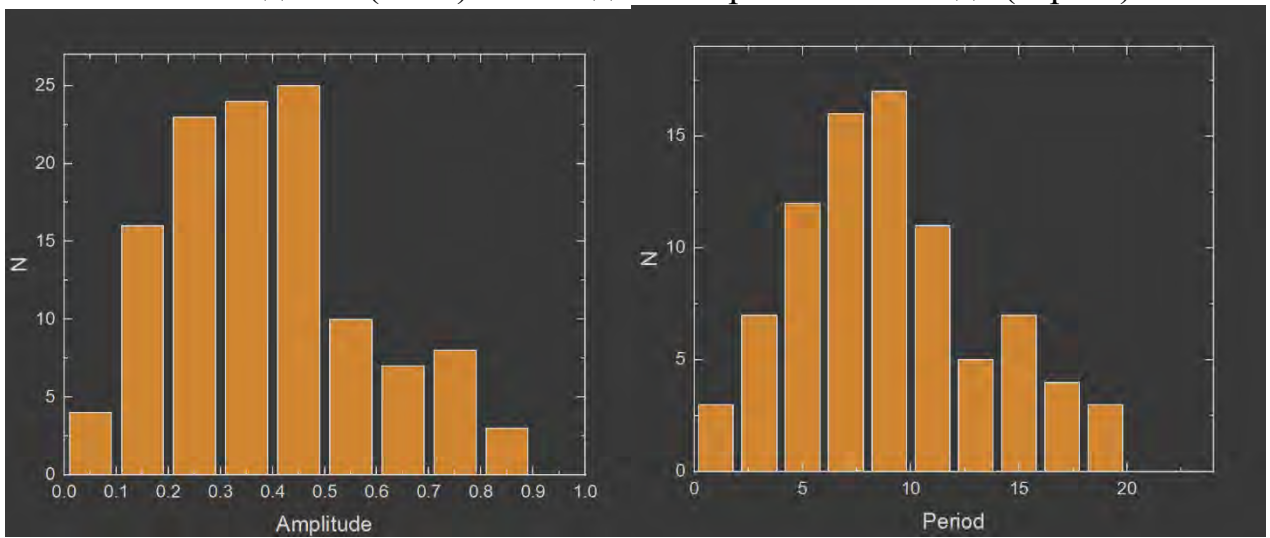


Рис. 2.50 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Ursula.

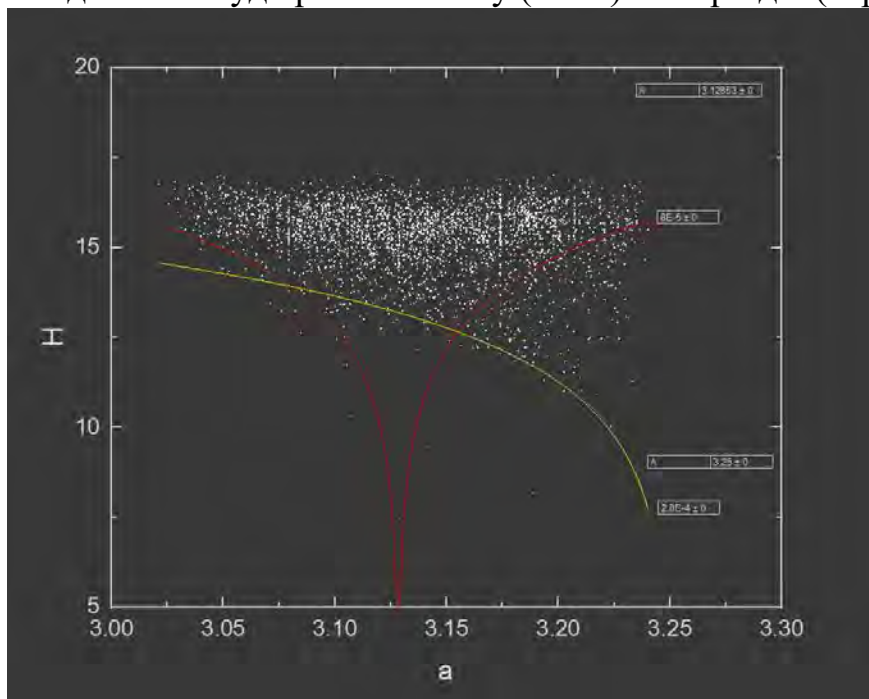


Рис. 2.51 Графік V-shape сімейства Ursula.

434 Hungaria

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно нуля і має ще один малий максимум в правій частині на 0.125. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2 та малий згусток середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.35 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 5^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Резонансів не спостерігається.

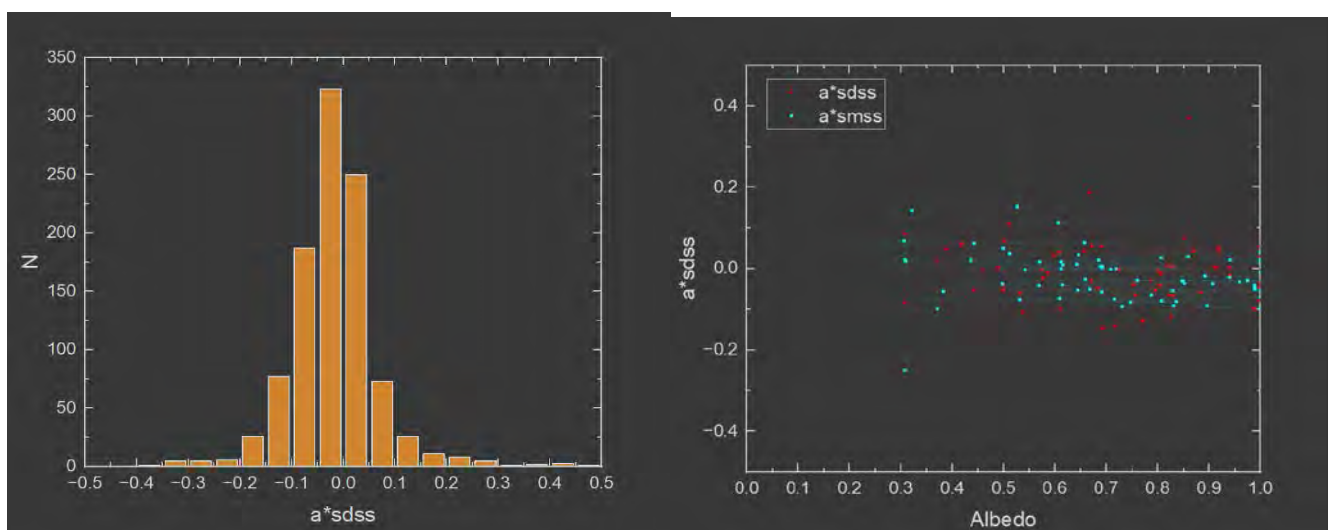


Рис. 2.52 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Hungaria.

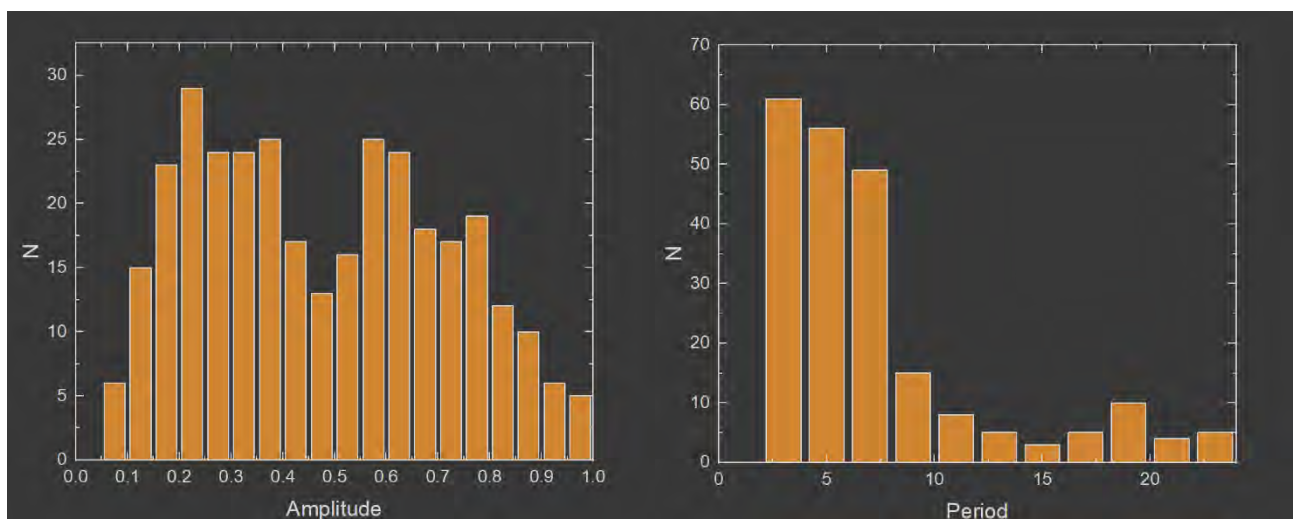


Рис. 2.53 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Hungaria.

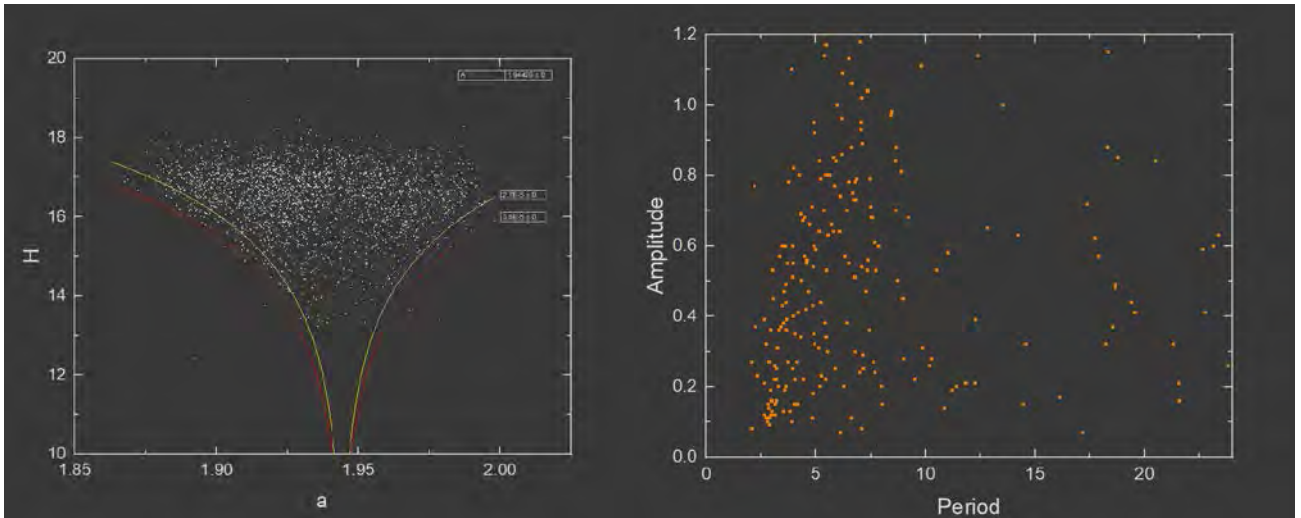


Рис. 2.54 Графік V-shape сімейства (зліва) та розподілу амплітуд кривих блиску від періоду (зправа) Hungaria.

Також ми провели додатковий аналіз у випадку цього сімейства в який входило розділення астероїдів за амплітудами (амплітуди <0.45 та (амплітуди >0.45) та побудова графіків розподілу періодів цих двох підгруп. Аналіз показав, що максимум у розподілі періодів у однієї групи залишився на 3 годині але у іншій змістився на 7-му годину. Ще для впевненості ми побудували розподіл астероїдів, з відомими амплітудами, за великою піввіссю та синусом їх нахилу аби підтвердити те, що ці дві підгрупи рівномірно розподілені у сімействі і не можуть бути пов'язані між собою орбітально.

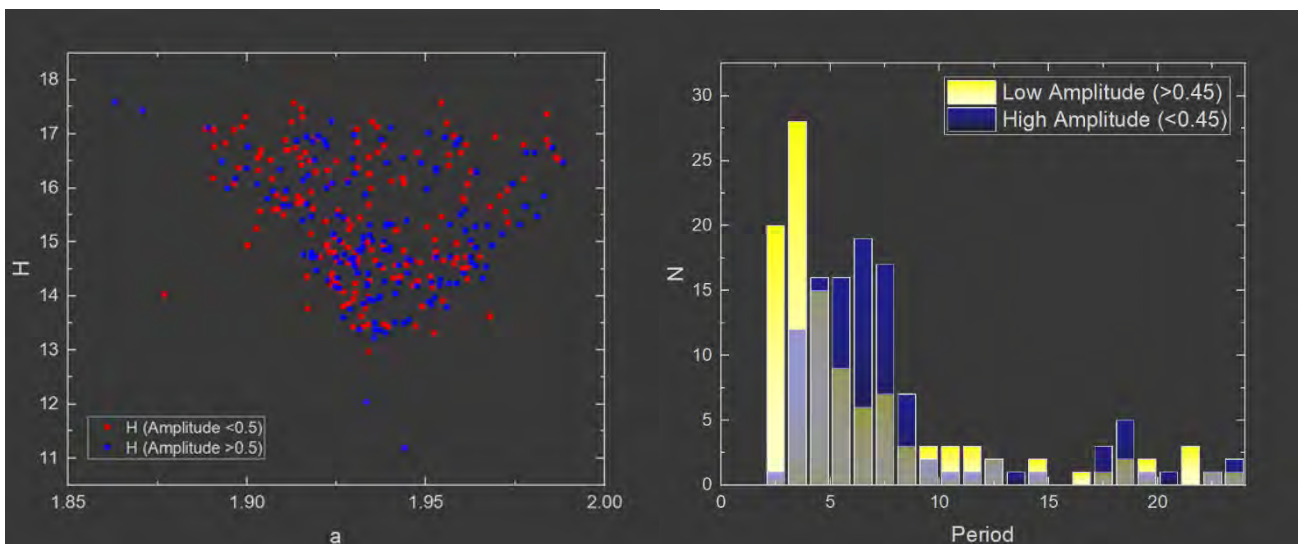


Рис. 2.55 Розподіл астероїдів за великою піввіссю та синусом їх нахилу та графік накладення періодів астероїдів двох підгруп.

480 Hansa

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вправо відносно. Спостерігається велика концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.325 та широкий другий на 0.6 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 5^h і далі лінійно спадає але статистичних даних мало як і для амплітуд. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму та ймовірний другий в центральній частині першого V-shape із згущенням на правому «крилі». Резонансів не спостерігається.

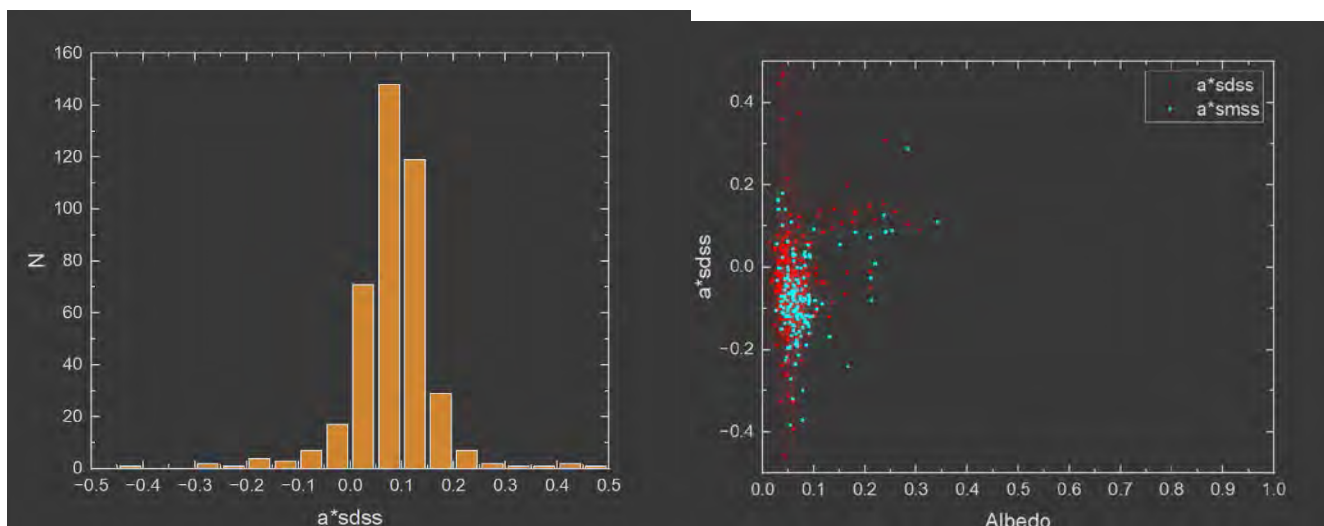


Рис. 2.56 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Hansa.

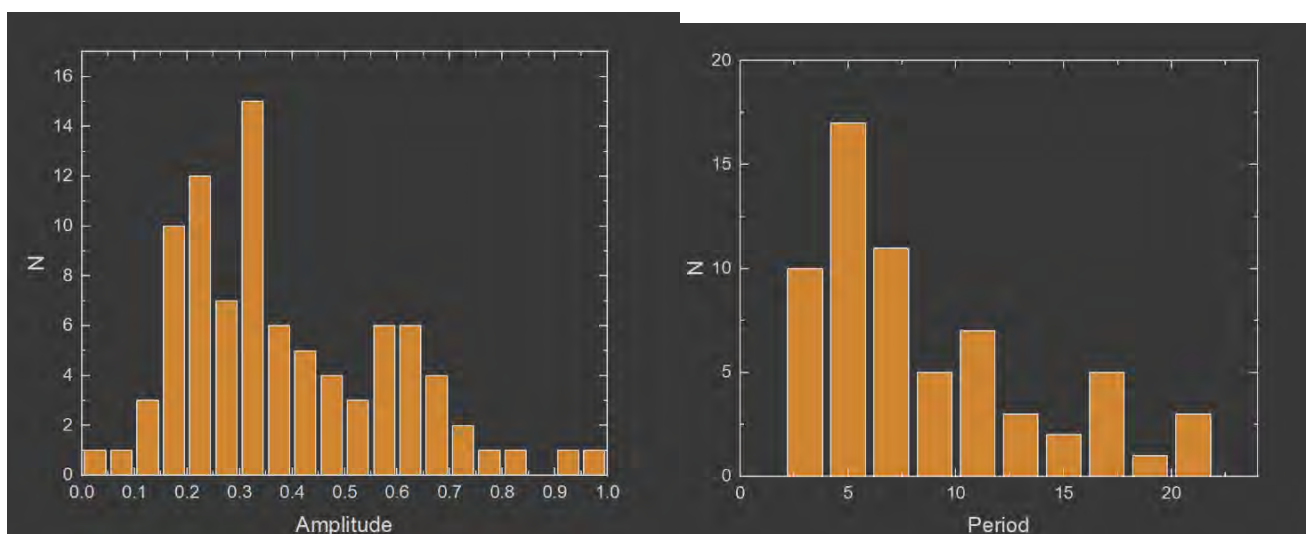


Рис. 2.57 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Hansa.

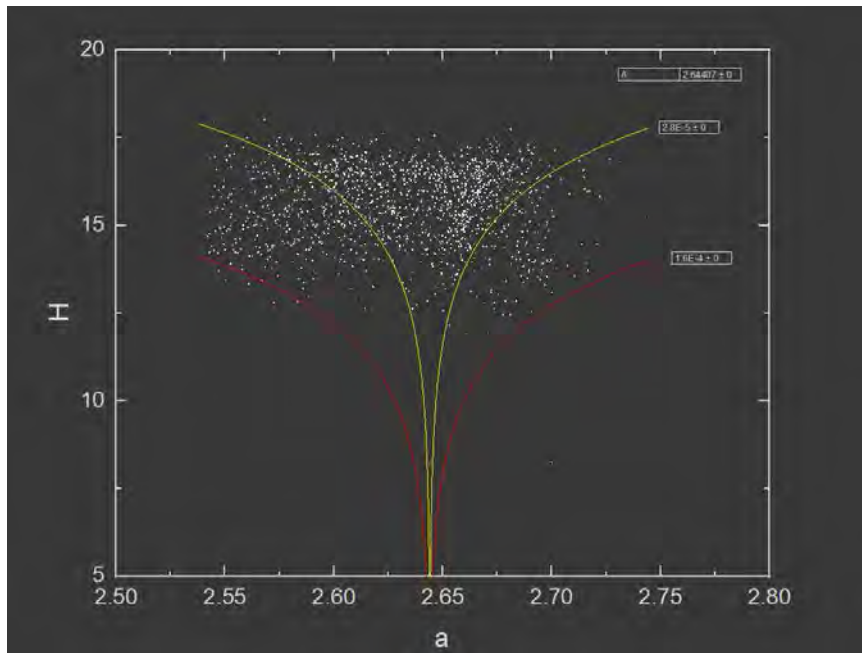


Рис. 2.58 Графік V-shape сімейства Hansa.

490 Veritas

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно нуля. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуді бачимо виразний максимум на 0.35 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 11^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо не дуже чітку форму, праве «крило» майже відсутнє. Маємо один резонанс по прямій лінії до материнського тіла.

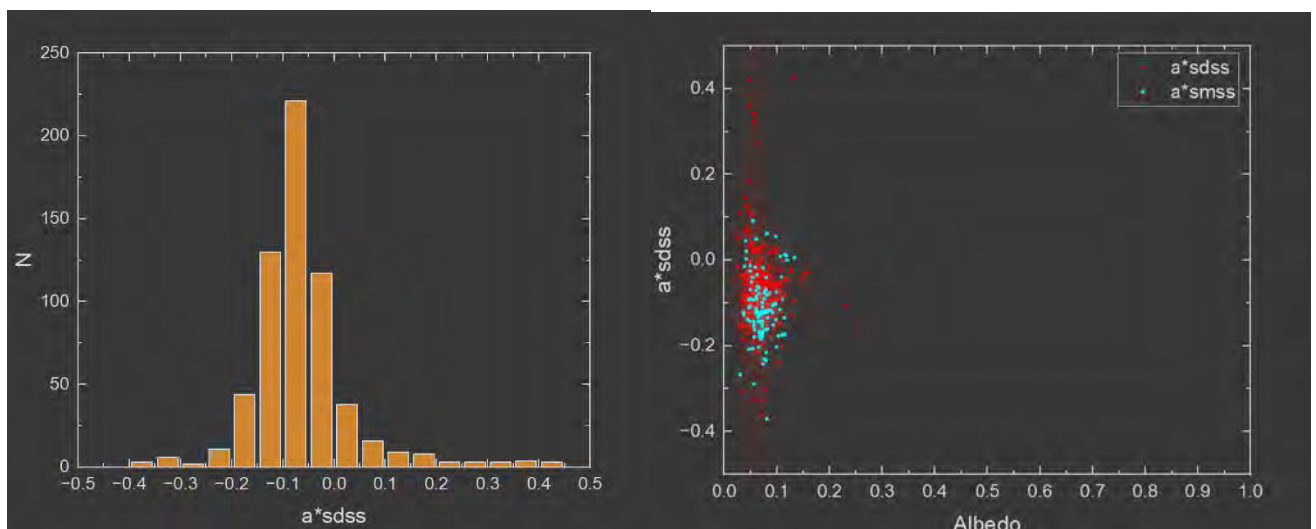


Рис. 2.59 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Veritas.

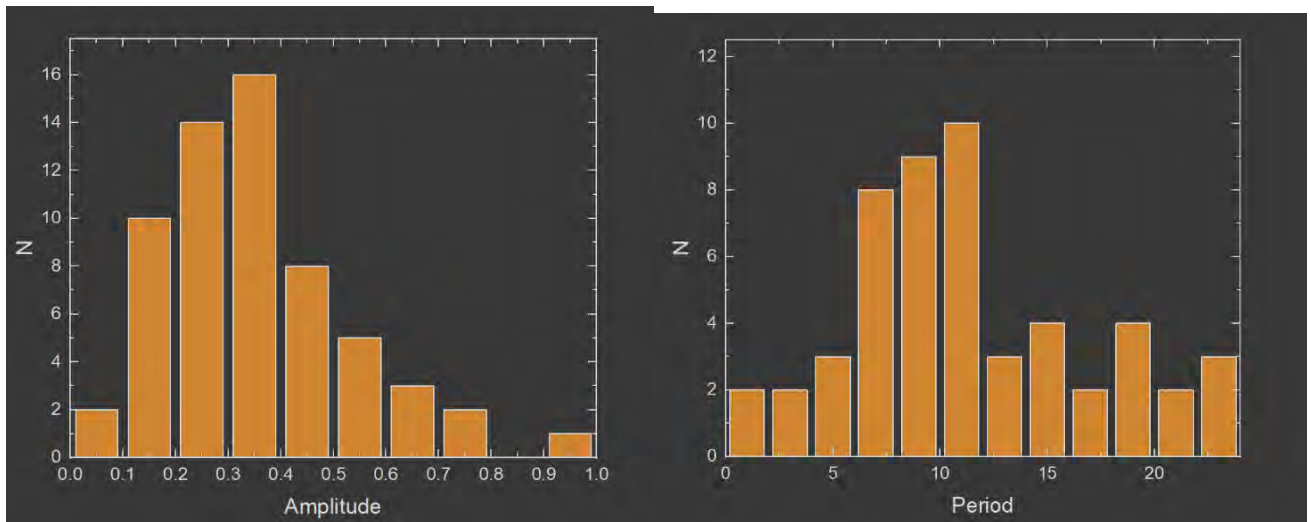


Рис. 2.60 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Veritas.

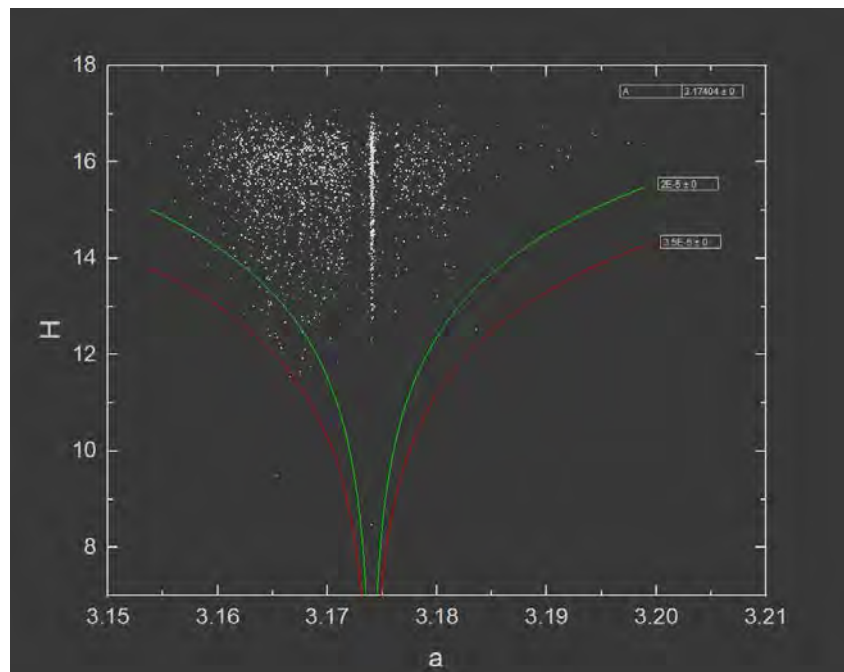


Рис. 2.61 Графік V-shape сімейства Veritas.

668 Dora

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.35 і другий на 0.65 та майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 5^h і другий на 8^h далі лінійно спадає але статистичних даних мало як і для амплітуд. На графіку V-

shape ми бачимо доволі чітку форму та ймовірний другий в центральній частині першого V-shape. Резонансів не спостерігається.

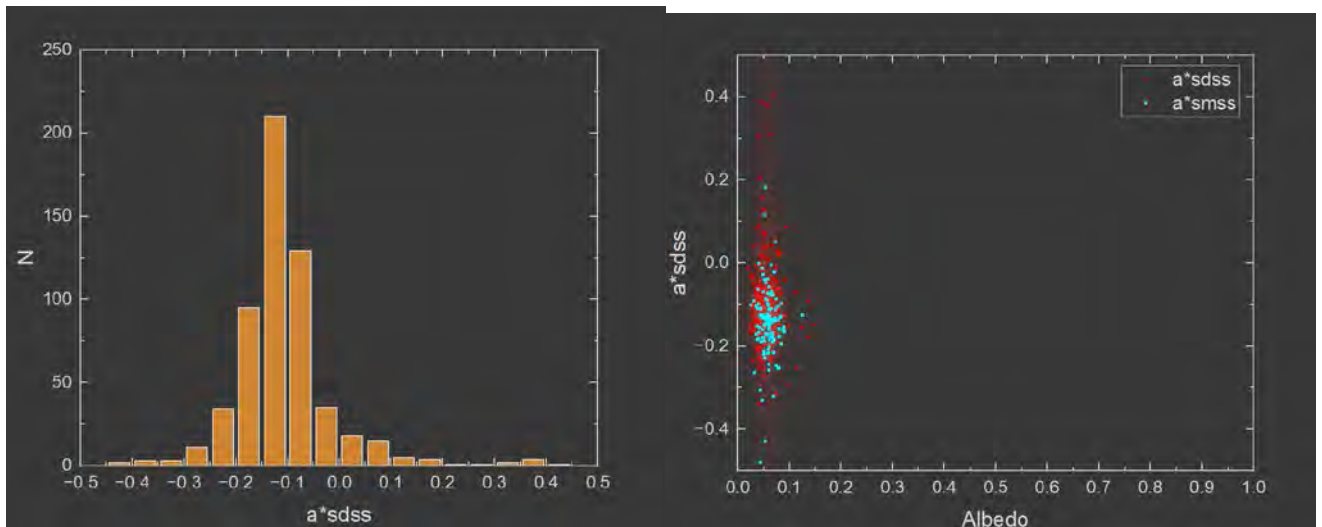


Рис. 2.62 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Dora.

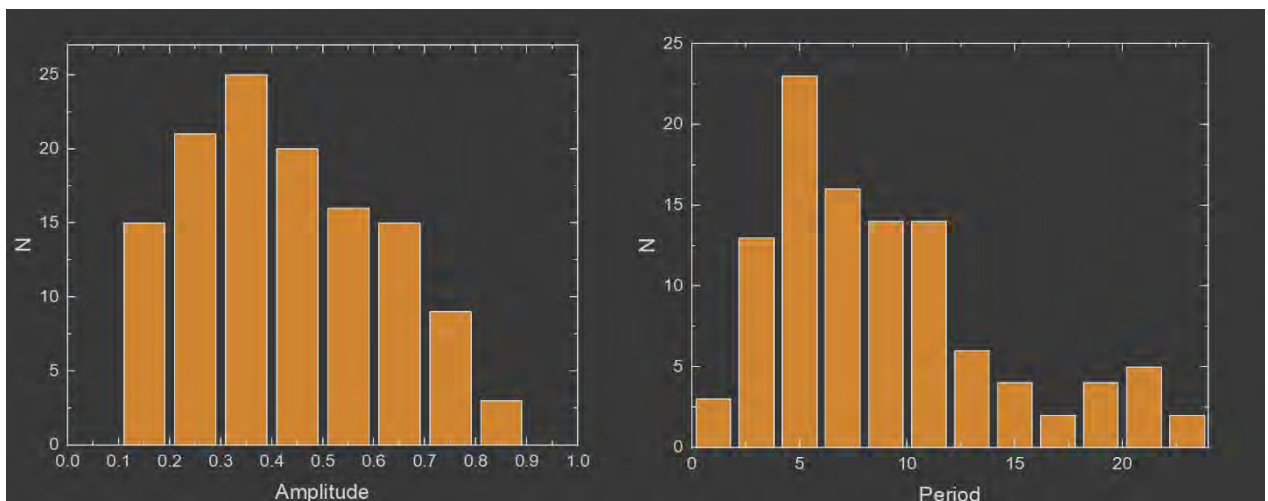


Рис. 2.63 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Dora.

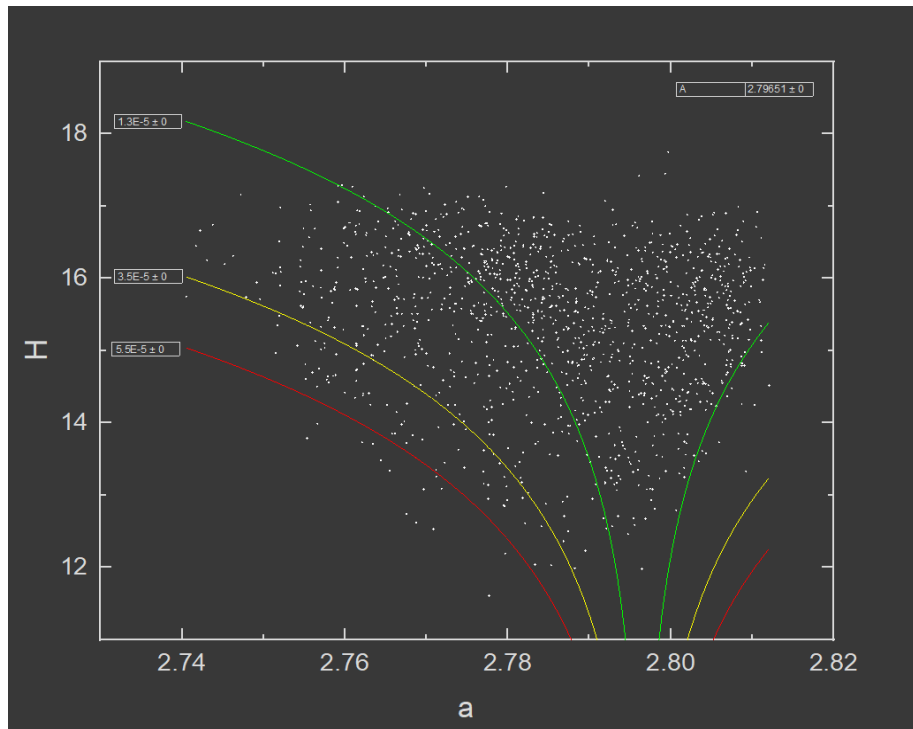


Рис. 2.64 Графік V-shape сімейства Dora.

702 Alauda

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно нуля і має широкий максимум. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.25 і майже лінійний спад після нього. Широкий максимум в періоді припадає на 5^h і ще на 15^h, а далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Резонансів не спостерігається.

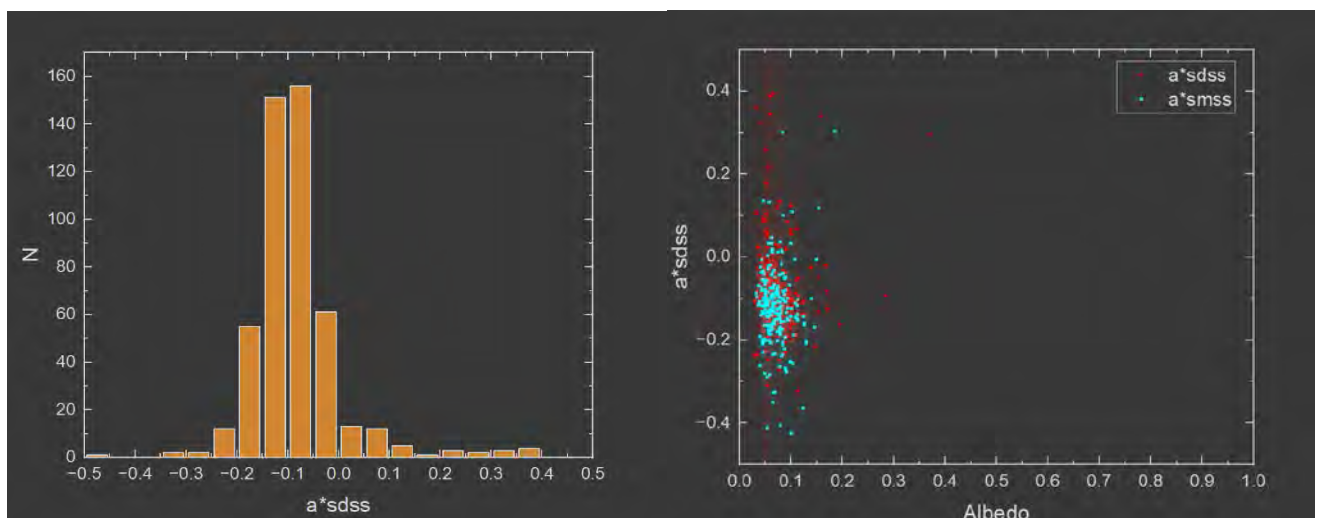


Рис. 2.65 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Alauda.

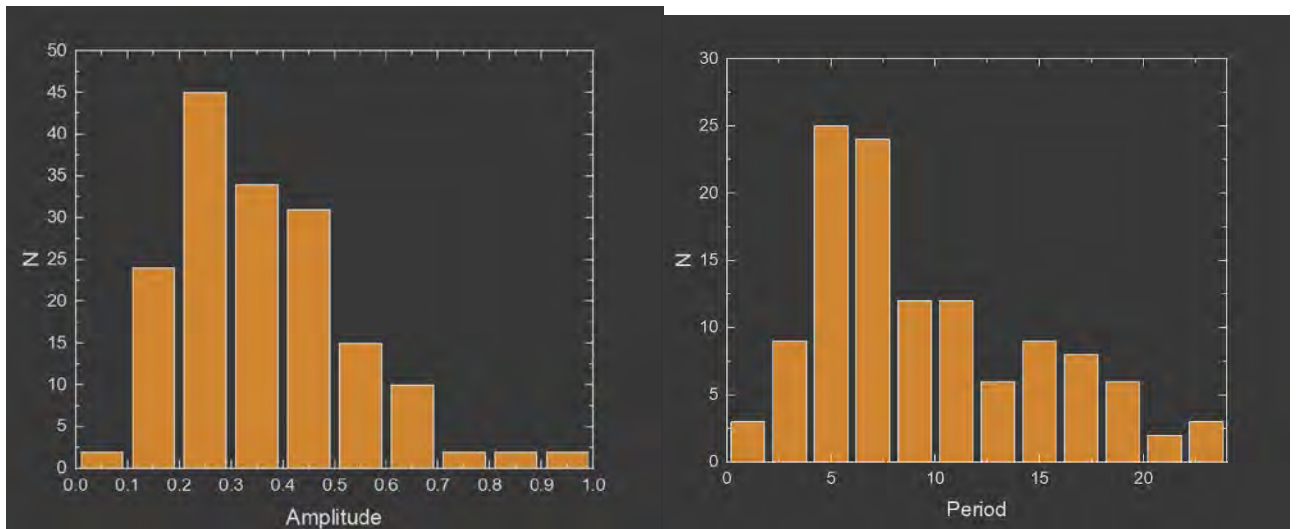


Рис. 2.66 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Alauda.

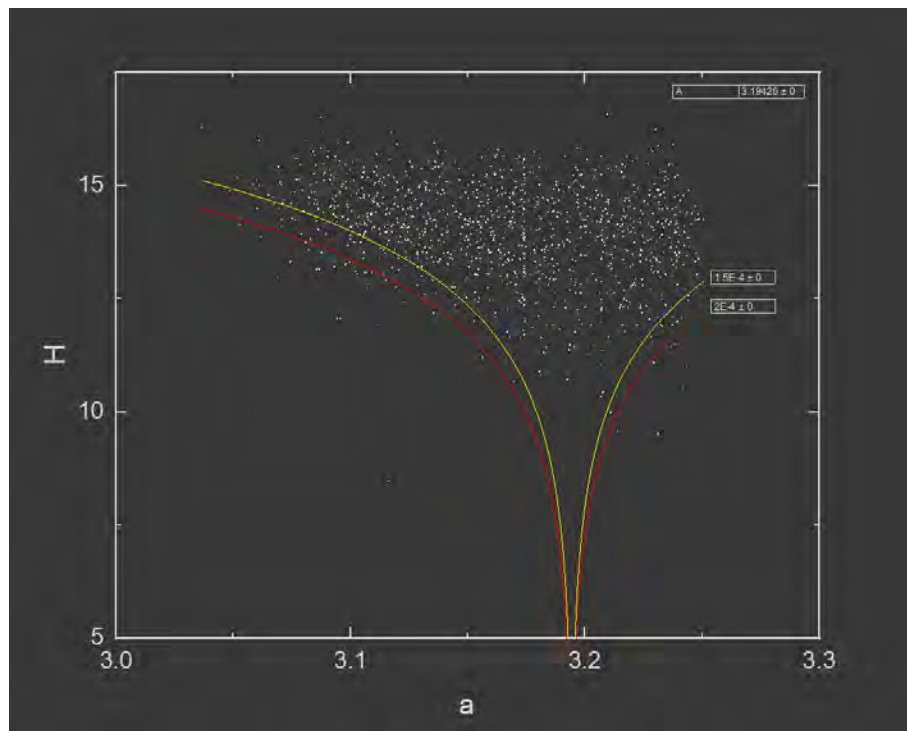


Рис. 2.67 Графік V-shape сімейства Alauda.

808 Merxia

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вправо відносно нуля. Спостерігається невелика концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2 та мала «хмара» низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.25 та ще один на 0.65 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді

припадає на 5^h і далі лінійно спадає але статистичних даних мало як і для амплітуд. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Резонансів не спостерігається.

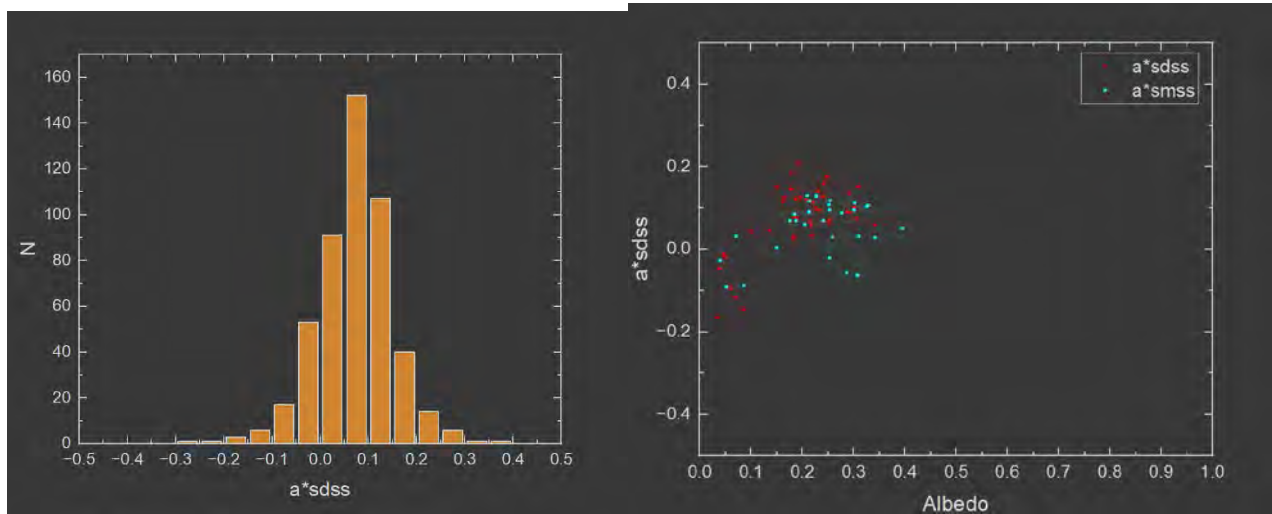


Рис. 2.68 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Мерхія.

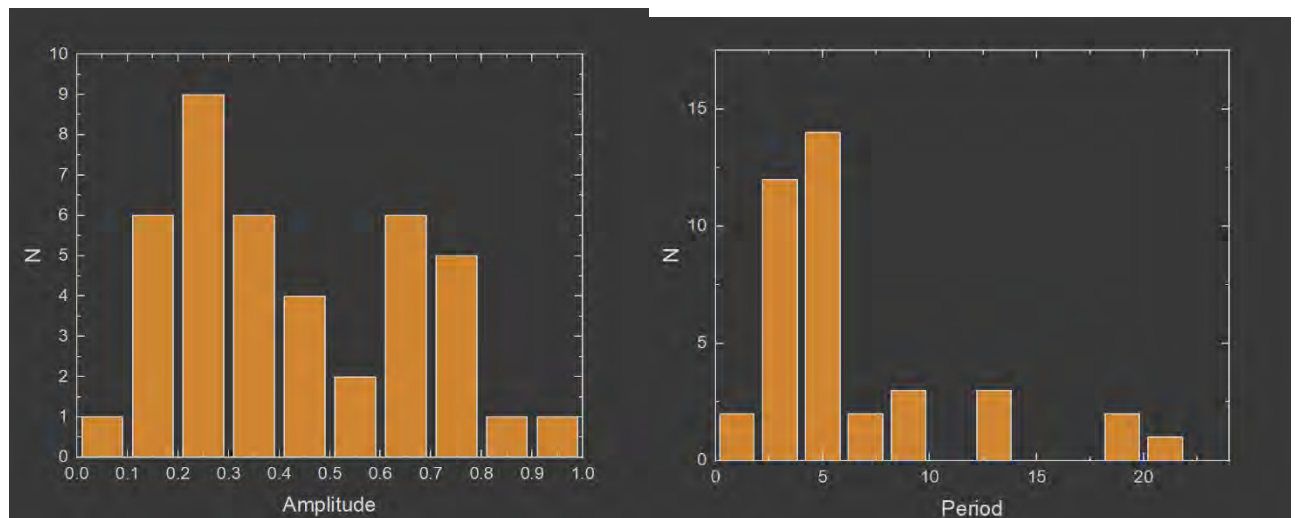


Рис. 2.69 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Мерхія.

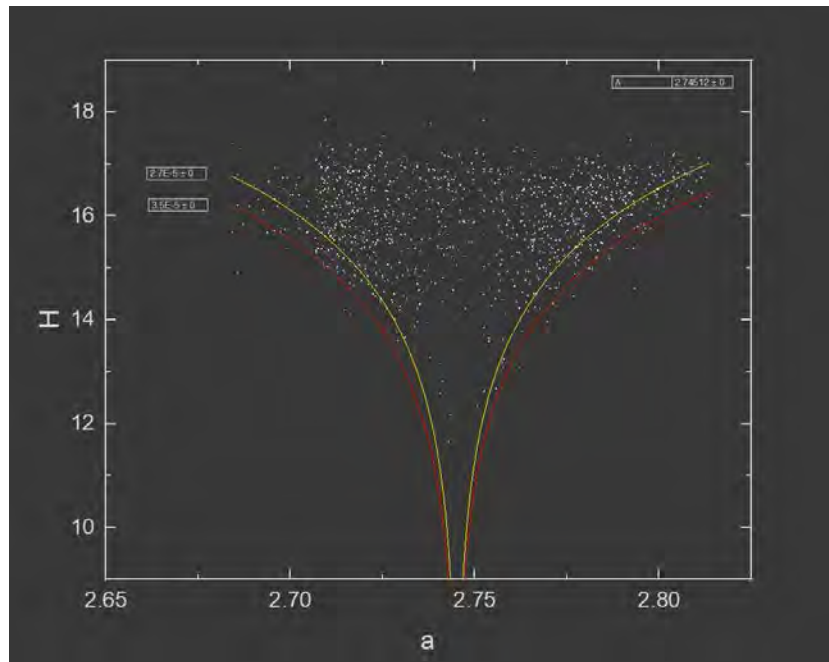


Рис. 2.70 Графік V-shape сімейства Мерхія.

847 Agnia

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вправо відносно нуля. Спостерігається середня концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.45 і ще один на 0.25 та лінійний спад після 0.45. Максимум в періоді припадає на 3^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Резонансів не спостерігається.

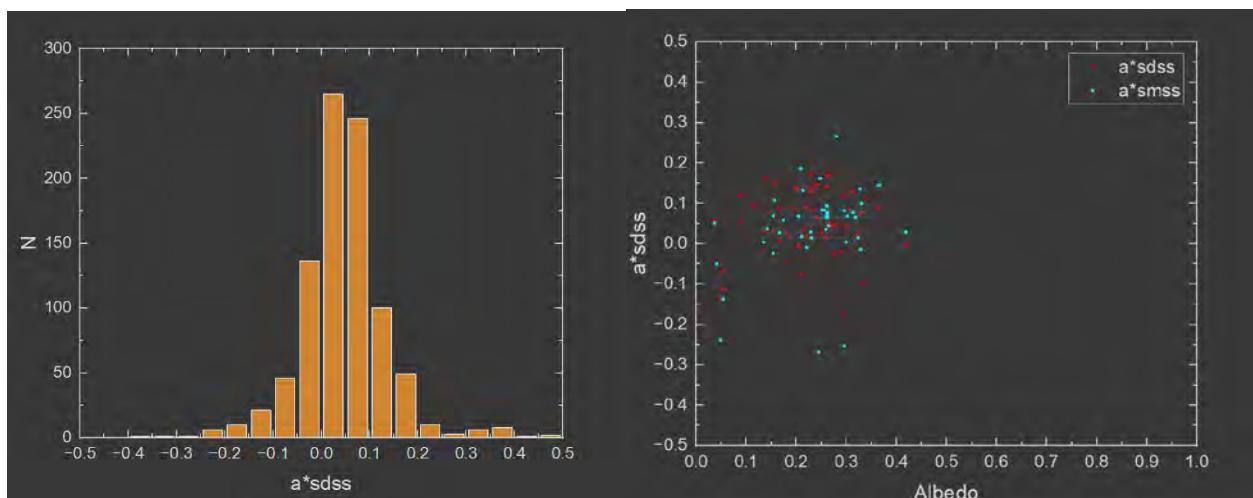


Рис. 2.71 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Agnia.

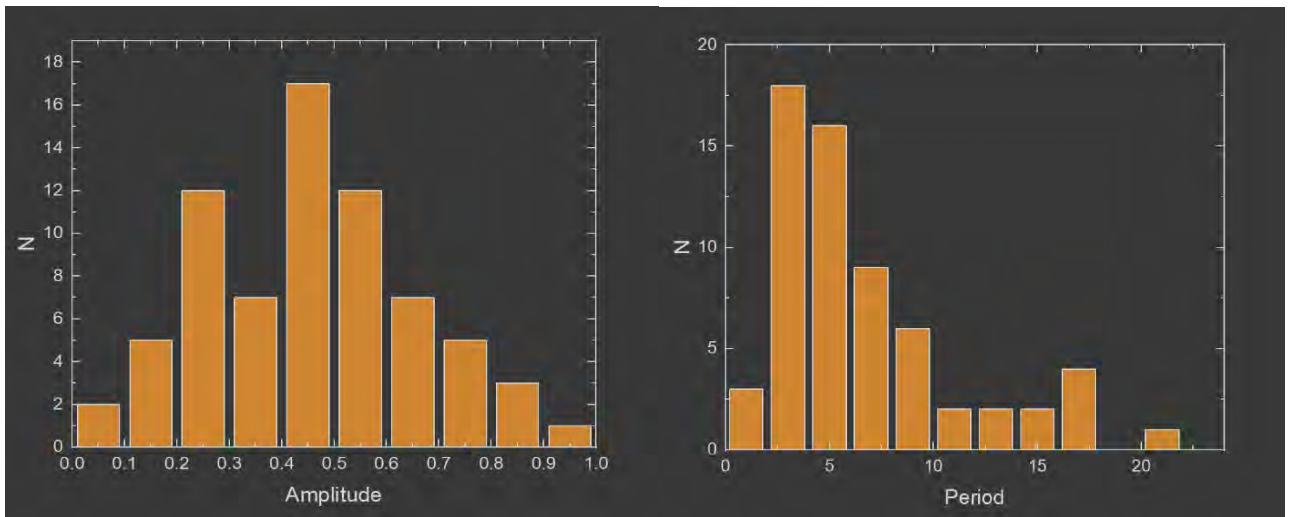


Рис. 2.72 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Agnia.

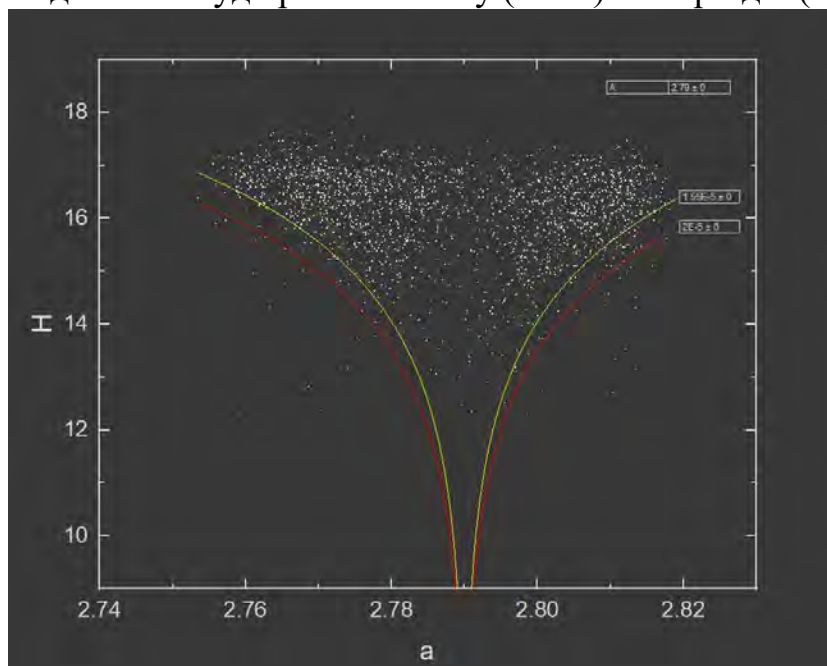


Рис. 2.73 Графік V-shape сімейства Agnia.

1272 Gefion

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вправо відносно нуля. Спостерігається велика концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2 та малий згусток низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.35 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 3^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape не можна однозначно сказати чи це повноцінна форма чи ми бачимо лише одне «крило». Маємо один слабкий резонанс.

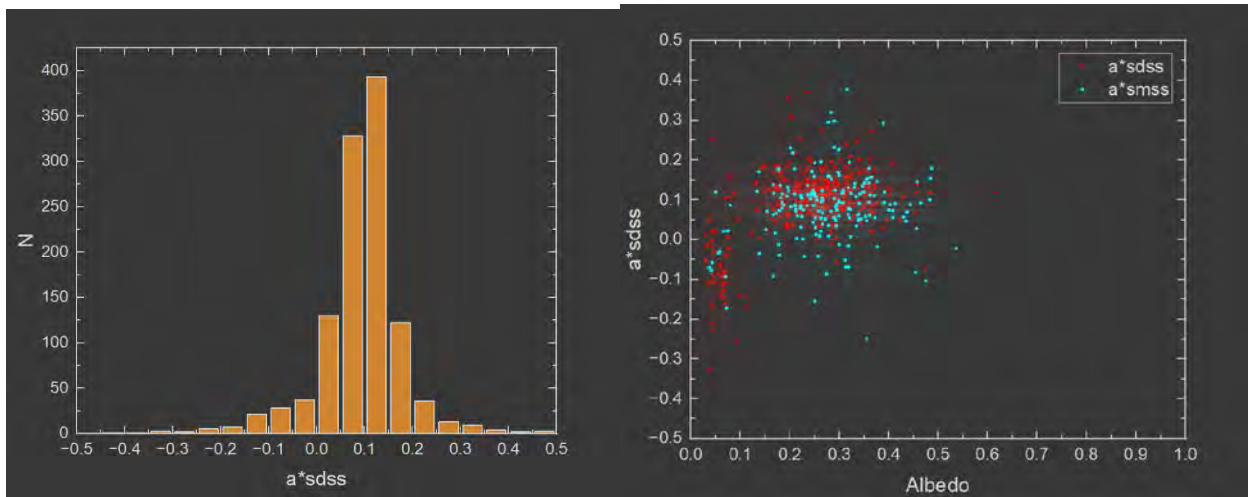


Рис. 2.74 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Gefion.

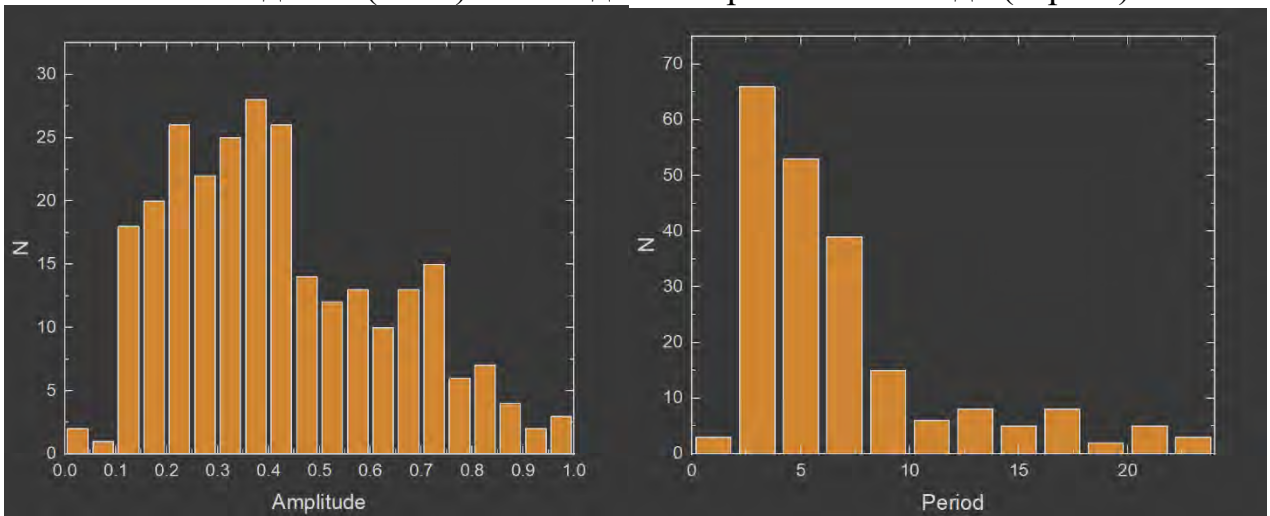


Рис. 2.75 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Gefion.

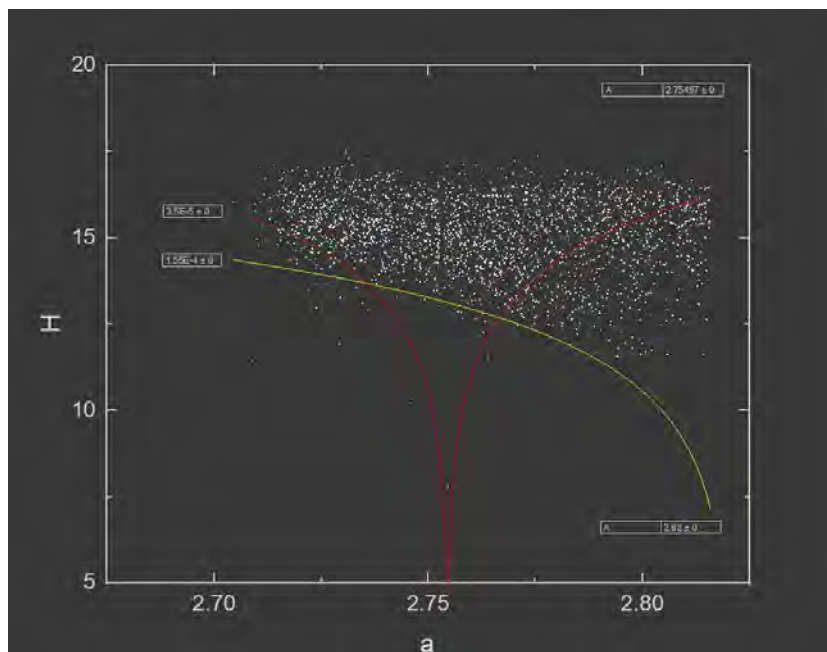


Рис. 2.76 Графік V-shape сімейства Gefion.

1400 Tirela

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вправо відносно нуля і має широкий максимум. Спостерігається велика концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2 та малий згусток низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо широкий максимум на 0.3 і майже лінійний спад після нього. Широкий максимум в періоді припадає на 6^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Маємо декілька слабких резонасів.

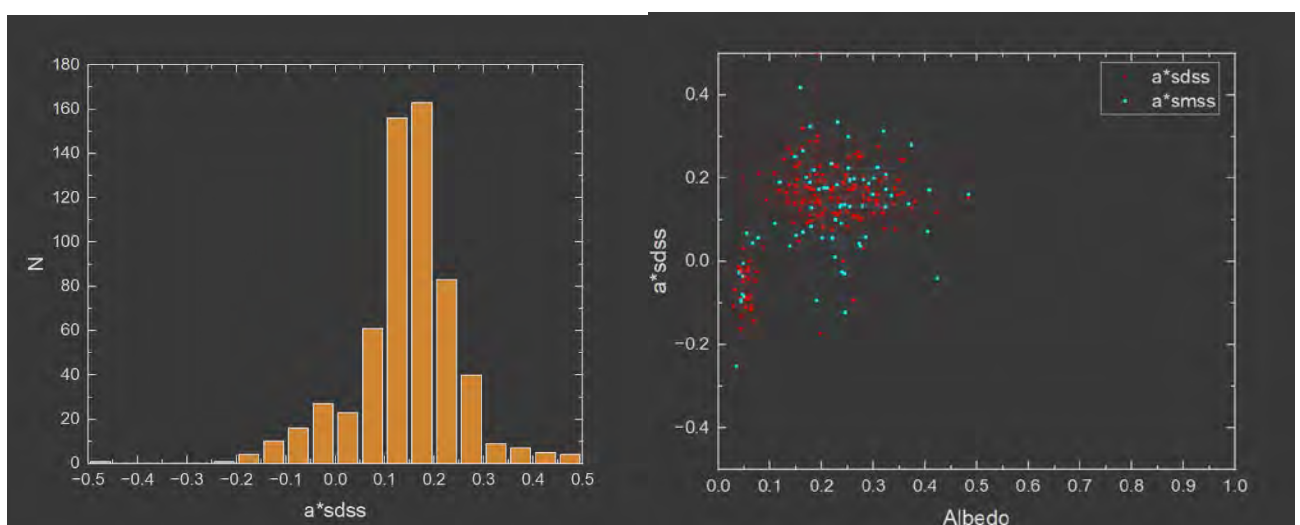


Рис. 2.77 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альbedo (зправа) Tirela.

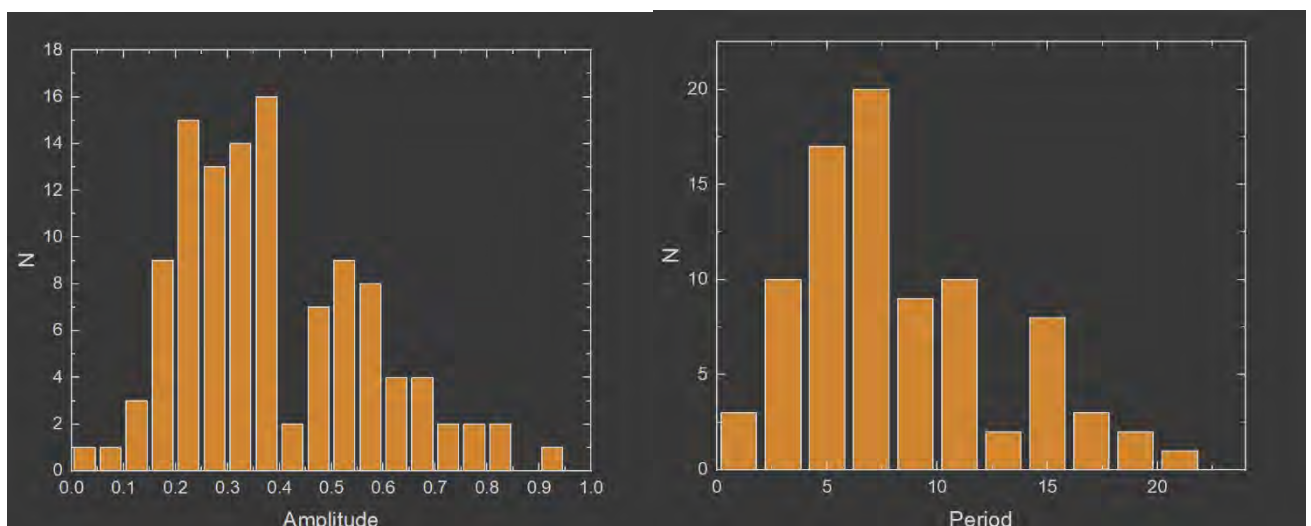


Рис. 2.78 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Tirela.

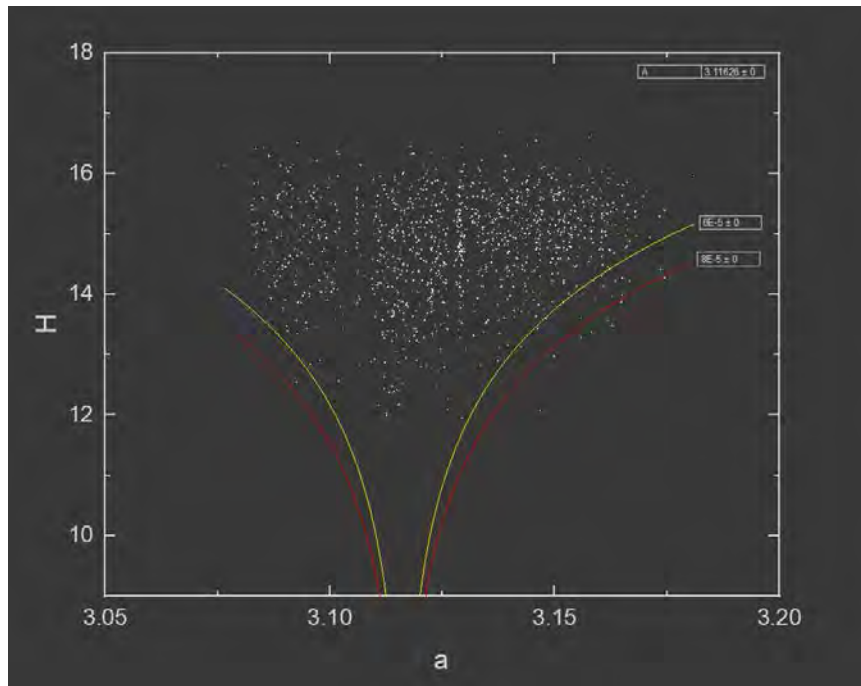


Рис. 2.79 Графік V-shape сімейства Tirela.

1644 Rafita

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вправо відносно нуля. Спостерігається велика концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2 та малий згусток низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.25 і другий на 0.65 і лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 5^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Резонансів не спостерігається.

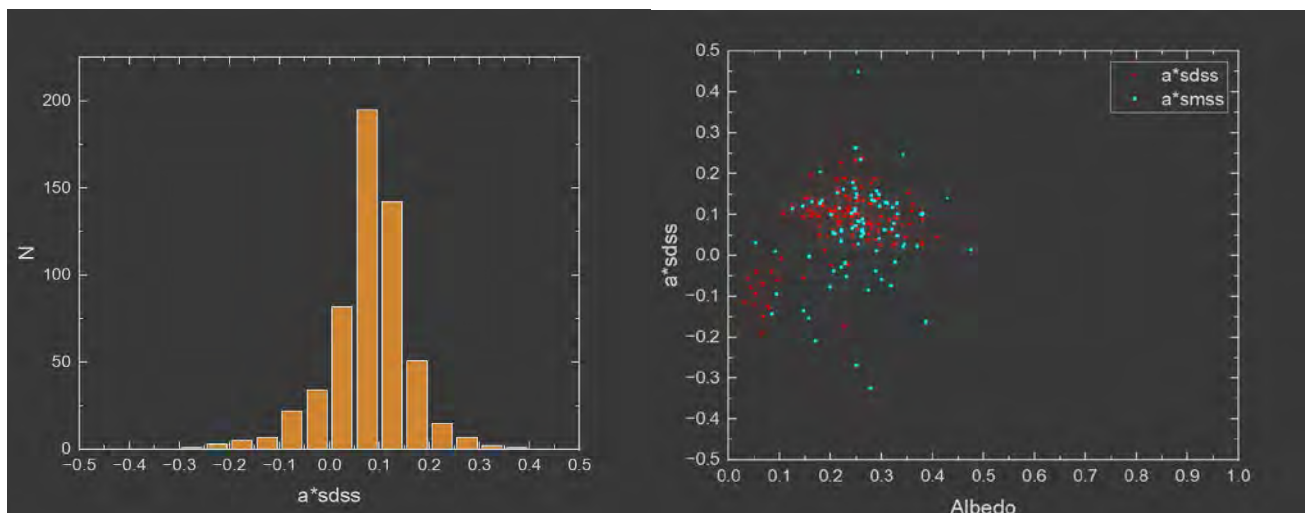


Рис. 2.80 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Rafita.

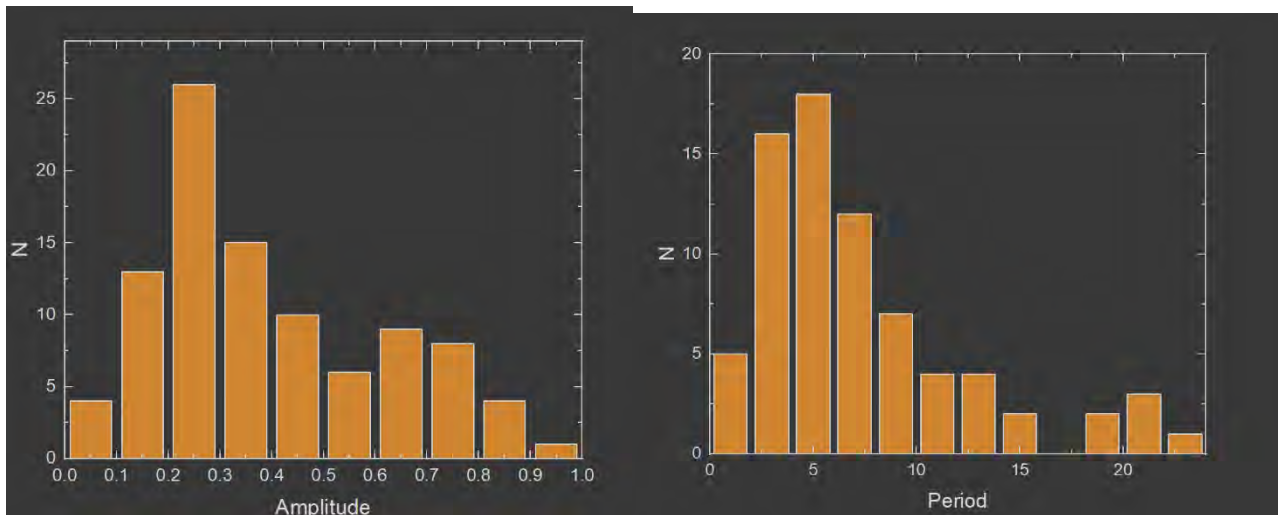


Рис. 2.81 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Rafita.

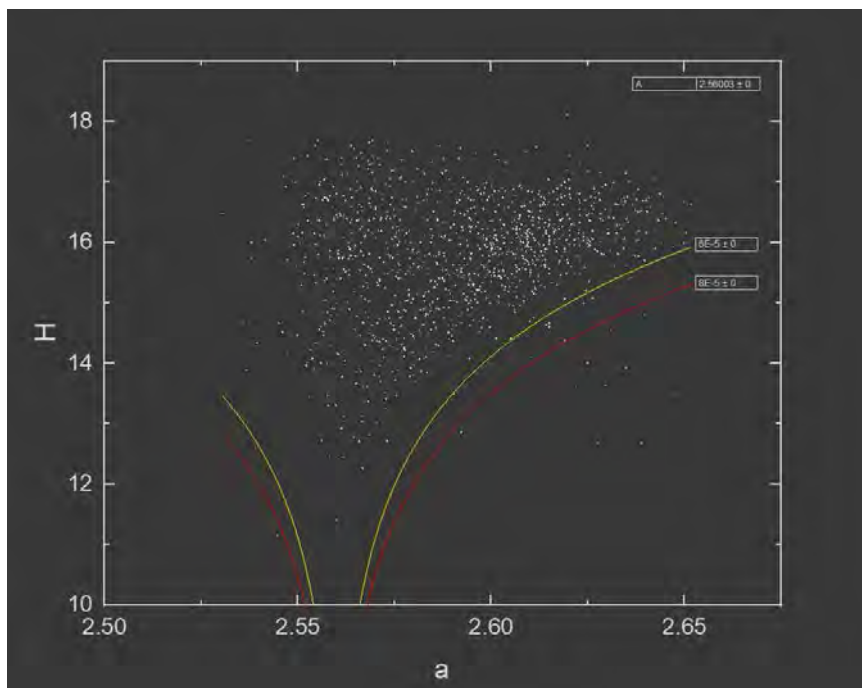


Рис. 2.82 Графік V-shape сімейства Rafita.

1726 Hoffmeister

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вліво відносно нуля. Спостерігається велика концентрація низькоальбедних астероїдів (альбедо до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо максимум на 0.25 та головний на

0.55 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 5^h і далі лінійно спадає але статистичних даних мало як і для амплітуд. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Резонансів не спостерігається.

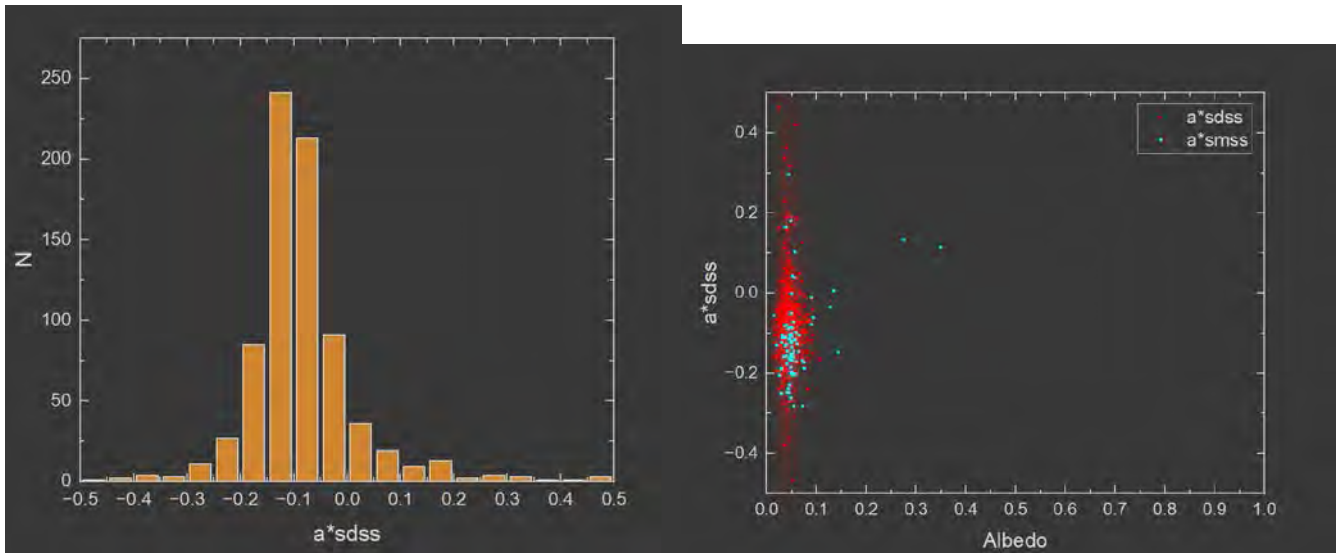


Рис. 2.83 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Hoffmeister.

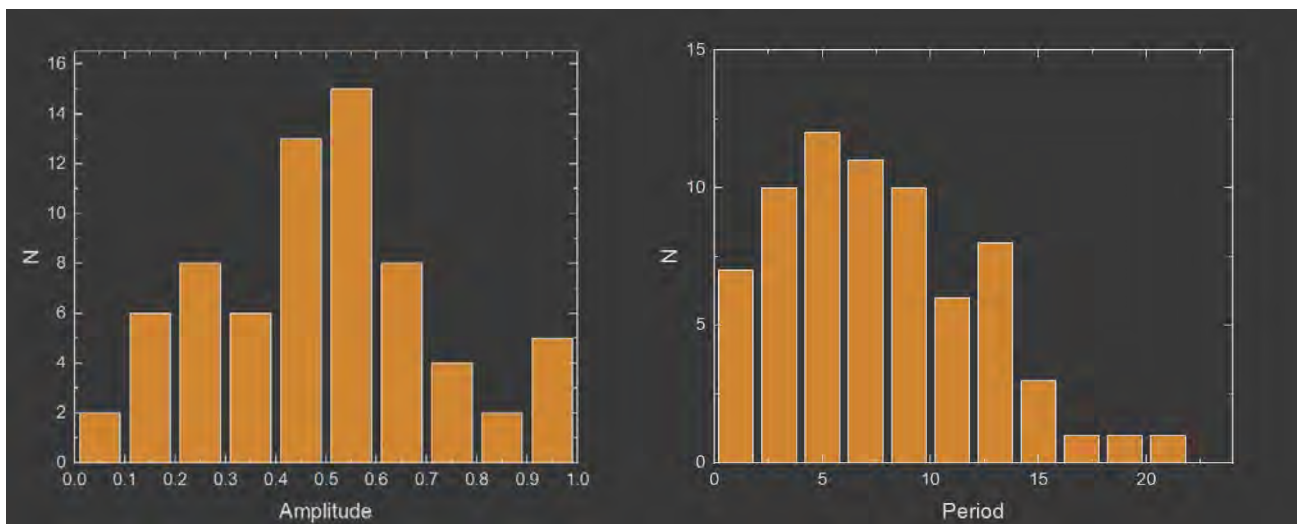


Рис. 2.84 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Hoffmeister.

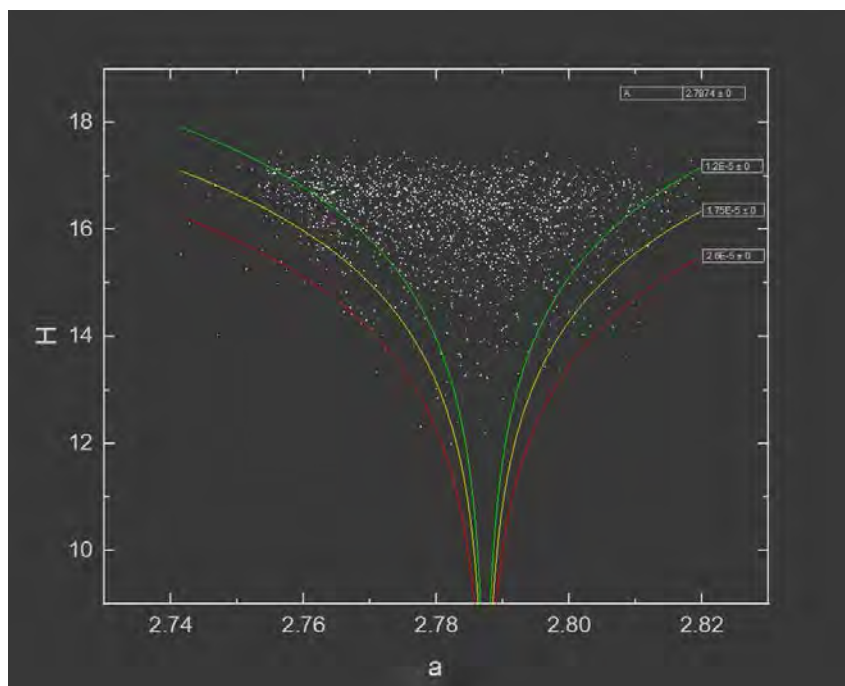


Рис. 2.85 Графік V-shape сімейства Hoffmeister.

2085 Henan

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вправо відносно нуля і має широкий максимум. Спостерігається невелика концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2 та малий згусток низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на 0.25 і майже лінійний спад після нього. Максимум в періоді припадає на 5^h і далі лінійно спадає. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Резонансів не спостерігається.

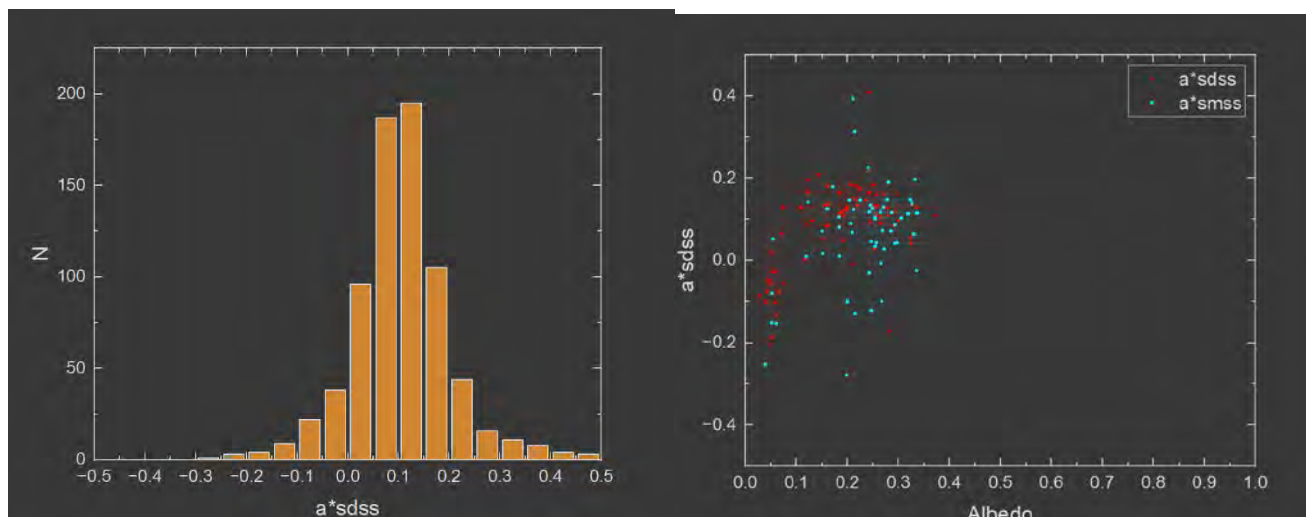


Рис. 2.86 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Непан.

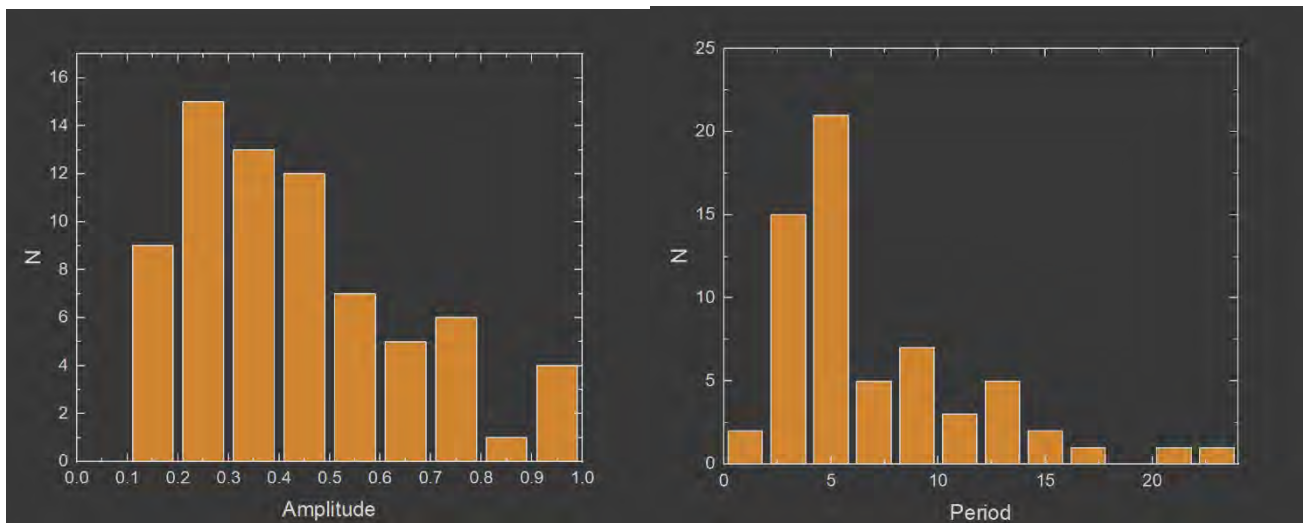


Рис. 2.87 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Непан.

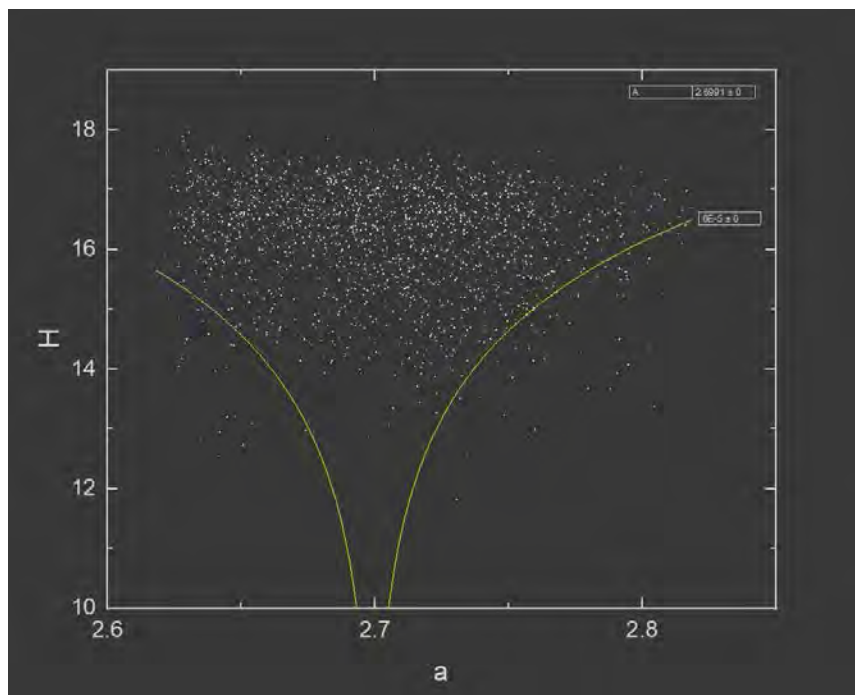


Рис. 2.88 Графік V-shape сімейства Непан.

2732 Witt

Розподіл нахилу спектру нормальний, зміщений вправо відносно нуля. Спостерігається велика концентрація середньоальбедних астероїдів (альbedo від 10% до 40%) із a^* від 0 до 0.2 та малий згусток низькоальбедних астероїдів (альbedo до 10%) із a^* від 0 до -0.2. У амплітуди бачимо виразний максимум на

0.25 і другий на 0.55 та спадання «сходінками». Максимум в періоді припадає на 3^h і далі лінійно спадає але статистичних даних мало як і для амплітуд. На графіку V-shape ми бачимо доволі чітку форму. Резонансів не спостерігається.

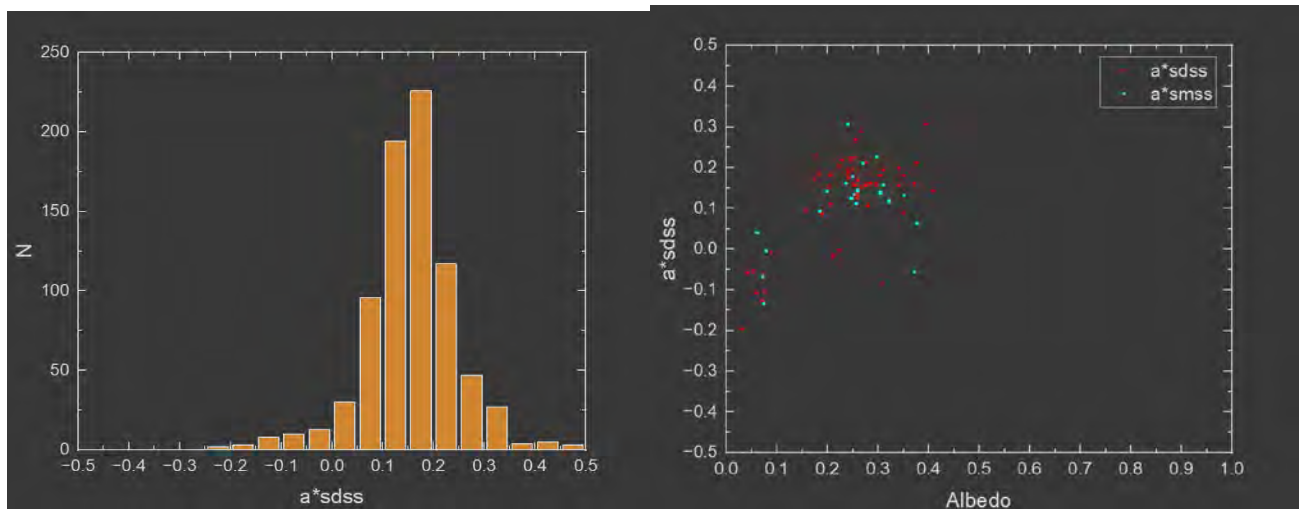


Рис. 2.89 Розподіл a^* (зліва) та a^* від геометричного альбедо (зправа) Witt.

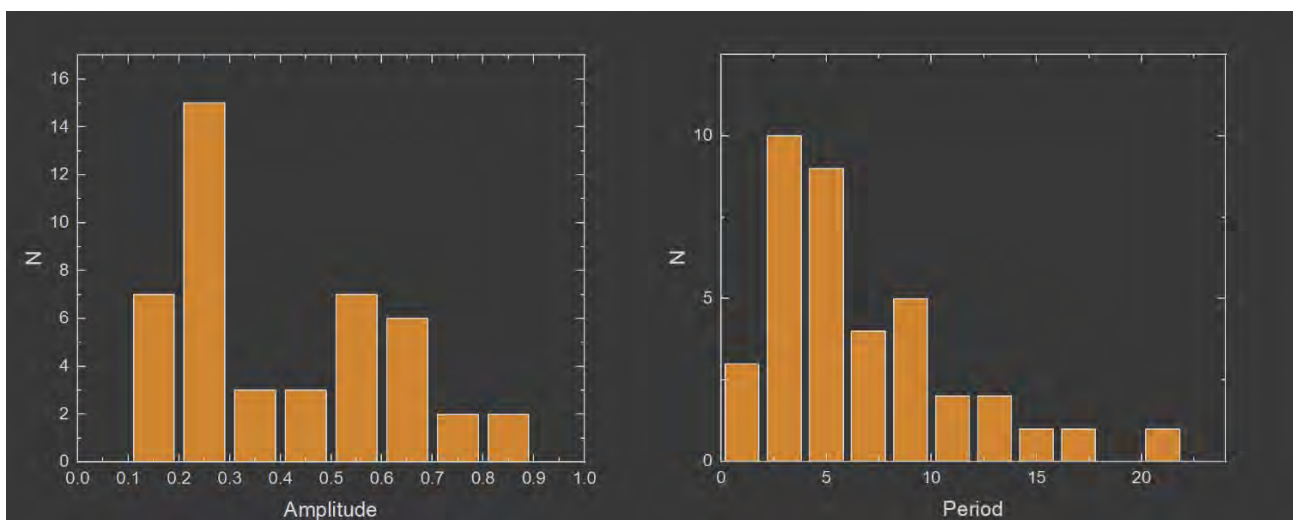


Рис. 2.90 Розподіл амплітуд кривих блиску (зліва) та періодів (зправа) Witt.

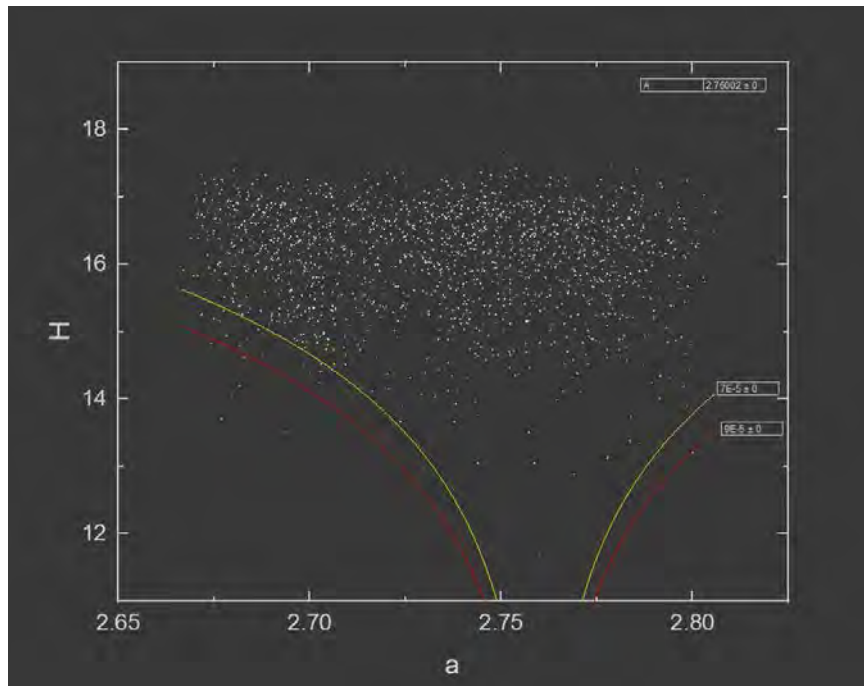


Рис. 2.91 Графік V-shape сімейства Witt.

3.2 Розподіл віку від амплітуд

Метою моделювання (Nesvorný et al., 2015) [17] є визначення значень V_s і t_{age} , які найкраще відтворюють спостережуваний розподіл членів сімейства. Оскільки модель не включає зміни в розмірно-частотному розподілі (SFD), вона безпосередньо відповідає спостережуваному розподілу параметра дрейфу C . Отримані результати вважаються надійними, особливо для таких сімейств, як Erigone, чий розподіл C має чіткі особливості, такі як порожнеча поблизу $C = 0$, пік при проміжних значеннях C і круте падіння при великих C . Ці особливості є наслідком того, що ефект YORP нахиляє спінові вісі астероїдів, тим самим збільшуючи швидкість дрейфу через залежність $\cos(\theta)$ в ефекті Ярковського.

Ці особливості надають деяким сімействам астероїдів чітких візуальних форм у площині (a_p, H) , які часто описують як «вуха», «крила» або «пелюстки». Однак не всі сімейства мають такі чіткі форми. Багато з них демонструють більш рівномірний C -розподіл від 0 до C_{max} , що, ймовірно, пов'язано з довготривалим впливом YORP, змінами поверхні або стохастичними переорієнтаціями спіну.

Метод YY і простіша техніка V-shape стають менш ефективними, коли на сімейства впливають близькі резонанси середнього руху або коли компонент викиду (C_{EV}) домінує над дрейфом Ярковського (C_{YE}). Це трапляється, наприклад, у сімействах, що утворилися з великих материнських тіл (наприклад, сім'я Vesta) або відносно молодих (наприклад, Datura, Karin, Veritas).

Нижче наведено список родин, для яких метод YY був успішно застосований:

Agnia: $t_{age} \approx 100 \pm 100$ млн років, $V_s \approx 15$ м/с

Massalia: $t_{age} \approx 150 \pm 50$ Myr, $V_s \approx 20$ м/с

Baptistina: $t_{age} \approx 160 \pm 50$ Myr, $V_s \approx 40$ м/с

Merxia: $t_{age} \approx 250 \pm 100$ Myr, $V_s \approx 25$ м/с

Astrid: $t_{age} \approx 250 \pm 100$ Myr, $V_s \approx 15$ м/с

Erigone: $t_{age} \approx 300 \pm 100$ Myr, $V_s \approx 30$ м/с

Eos: $t_{age} \approx 1,3 \pm 0,5$ Гр, $V_s \approx 70$ м/с

Tina: $t_{age} \approx 170 \pm 50$ Myr, $V_s \approx 20$ м/с

Ці оновлені значення включають ширші поля похибок, ніж у оригінальних публікаціях (Vokrouhlický et al., 2006a) [24]. Зокрема, вони не враховують подвійну невизначеність, що виникає через невідомі значення густини і провідності. Масьєро та ін. (2012) [14] виявили, що оцінка віку родини Baptistina може варіювати від 140 до 320 млн років через ці невизначеності.

Загалом, оцінені швидкості викиду (V_s) коливаються в межах 15-50 м/с, за винятком Eos, яка утворилася з дуже великого материнського тіла ($D_{pb} \approx 300$ км). Ці висновки узгоджуються з дослідженнями родини Karin ($D_{pb} \approx 35$ км, $V_s \approx 15$ м/с). Швидкості викидів дають 20-50% спостережуваного рознесення сімейства по піввісі. Таким чином, нехтування цим компонентом, як у спрощеному рівнянні, може призвести до значного переоцінювання віку сім'ї - на 20-50% для

молодих сімей. Однак для старших сімей вплив початкової швидкості викиду стає відносно незначним.

У статті (Spoto et al., 2015) [21] були отримані такі результати оцінки віку сімейств (представлені лише ті, розрахунок віку яких, також було зроблено в цій роботі) :

Juno: $t_{\text{age}} \approx 370/550 \pm 161/156$ Myr

Hygiea: $t_{\text{age}} \approx 1.330/1368 \pm 0.300/0.329$ Gyr

Eunomia: $t_{\text{age}} \approx 1.144/1.955 \pm 0.236/0.421$ Gyr

Massalia: $t_{\text{age}} \approx t_{\text{ge}} \approx 174/189 \pm 35/41$ Myr

Themis: $t_{\text{age}} \approx 2.447/3.782 \pm 0.836/0.958$ Gyr

Euphrosyne: $t_{\text{age}} \approx 1.160/1.309 \pm 0.272/0.312$ Gyr

Koronis: $t_{\text{age}} \approx 1.708/1.792 \pm 0.399/0.444$ Gyr

Erigone: $t_{\text{age}} \approx 212/230 \pm 68/50$ Myr

Maria: $t_{\text{age}} \approx 1.932 \pm 0.422$ Gyr

Eos: $t_{\text{age}} \approx 2.7 \pm 0,2$ Gyr

Baptistina: $t_{\text{age}} \approx t_{\text{ge}} \approx 150 \pm 70$ Myr

Ursula: $t_{\text{age}} \approx 3.483 \pm 1.035$ Gyr

Hungaria: $t_{\text{age}} \approx 205/208 \pm 62/65$ Myr

Hansa: $t_{\text{age}} \approx 763/950 \pm 346/223$ Myr

Dora: $t_{\text{age}} \approx 471/532 \pm 184/159$ Myr

Merxia: $t_{\text{age}} \approx 321/338 \pm 69/73$ Myr

Agnia: $t_{\text{age}} \approx 669/1003 \pm 288/167$ Myr,

Gefion: $t_{\text{age}} \approx 1.103 \pm 0.386 \text{ Gyr}$

Hoffmeister: $t_{\text{age}} \approx 328/337 \pm 92/96 \text{ Myr}$

Де «/» значить розділення верхнього та нижнього значення оцінки віку і відповідно, нижньої та верхньої похибки (Myr – мільйони років, а Gyr – мільярди років).

Також в цій статті було зазначено, що корисні дані для опрацювання є але модель еволюції розподілу астероїдів в сімействах спричиненою взаємодією між YORP і ефектом Ярковського немає.

(Szabó et al., 2022) [22] у своїх результатах для кількох старих сімей мають лише верхню оцінку віку, тому додали їх на графік зі стрілкою, що вказує на верхню оцінку, і з відкритими символами для меншої візуальної ваги. Ці точки також узгоджуються з отриманою залежністю, а також їхній розподіл узгоджується з верхньою оцінкою віку; однак більше половини з них, здається, є досить хорошою оцінкою. Однак при виведенні формули $Q(A, \text{median}) = 0.328 - 0.02067 \cdot \text{age}[\text{Gyr}] \pm 0.025$, не було враховано верхню межу оціночного віку для сімейств.

З огляду на графік (рис. 2.88) зі статті (Szabó et al., 2022) [22] результати нашого дослідження підтверджують зниження амплітуд у сімейств із віком (рис. 2.89).

Результати наших розрахунків віку сімейств представлені на рис. 2.90.

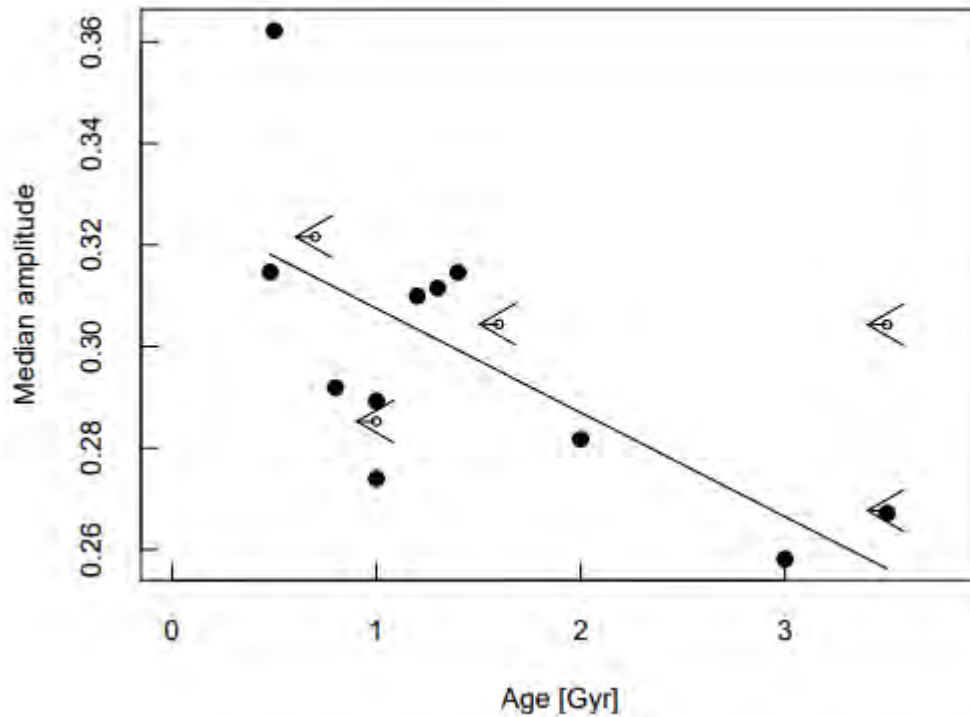


Рис. 2.92 Графік кореляції медіанної амплітуди із віком, який отримали (Szabó et al., 2022) [22].

Результати оцінки віку обраних сімейств, які було отримано в цій роботі:

Juno: $t_{\text{age}} \approx 620 \pm 160$ Myr

Hygiea: $t_{\text{age}} \approx 1,62 \pm 0,8$ Gyr

Eunomia: $t_{\text{age}} \approx 2.22 \pm 0.57$ Gyr

Massalia: $t_{\text{age}} \approx t_{\text{gc}} \approx 230 \pm 60$ Myr

Themis: $t_{\text{age}} \approx 3.73 \pm 1.8$ Gyr

Phocaea: $t_{\text{age}} \approx 1.76 \pm 0.45$ Gyr

Euphrosyne: $t_{\text{age}} \approx 1.49 \pm 0.73$ Gyr

Nemesis: $t_{\text{age}} \approx 282 \pm 138$ Myr

Adeona: $t_{\text{age}} \approx 1.89 \pm 0.93$ Gyr

Koronis: $t_{\text{age}} \approx 2.61 \pm 0.67$ Gyr

Koronis II: $t_{\text{age}} \approx 196 \pm 50$ Myr

Erigone: $t_{\text{age}} \approx 220 \pm 110$ Myr

Maria: $t_{\text{age}} \approx 1.79 \pm 0.46$ Gyr

Eos: $t_{\text{age}} \approx 2.7 \pm 0,2$ Gyr

Baptistina: $t_{\text{age}} \approx 150 \pm 70$ Myr

Padua: $t_{\text{age}} \approx 650 \pm 324$ Myr

Ursula: $t_{\text{age}} \approx 1.21 \pm 0.59$ Gyr

Hungaria: $t_{\text{age}} \approx 132 \pm 41$ Myr

Hansa: $t_{\text{age}} \approx 1.32 \pm 0.45$ Gyr

Hansa II: $t_{\text{age}} \approx 230 \pm 80$ Myr

Veritas: $t_{\text{age}} \approx 307 \pm 150$ Myr

Dora: $t_{\text{age}} \approx 720 \pm 353$ Myr

Dora II: $t_{\text{age}} \approx 170 \pm 80$ Myr

Alauda: $t_{\text{age}} \approx 3.54 \pm 1.22$ Gyr

Merxia: $t_{\text{age}} \approx 340 \pm 90$ Myr

Agnia: $t_{\text{age}} \approx 200 \pm 50$ Myr,

Gefion: $t_{\text{age}} \approx 416 \pm 106$ Myr

Tirela: $t_{\text{age}} \approx 1.02 \pm 0.26$ Gyr

Rafita: $t_{\text{age}} \approx 632 \pm 162$ Myr

Hoffmeister: $t_{\text{age}} \approx 250 \pm 122$ Myr

Henan: $t_{age} \approx 603 \pm 207$ Myr

Witt: $t_{age} \approx 450 \pm 220$ Myr,

де символ «II» - використовується в сімействах, у яких наявний другий, внутрішній, V-shape і тому окремо пораховано оцінку віку цих малих сімейств всередині більших.

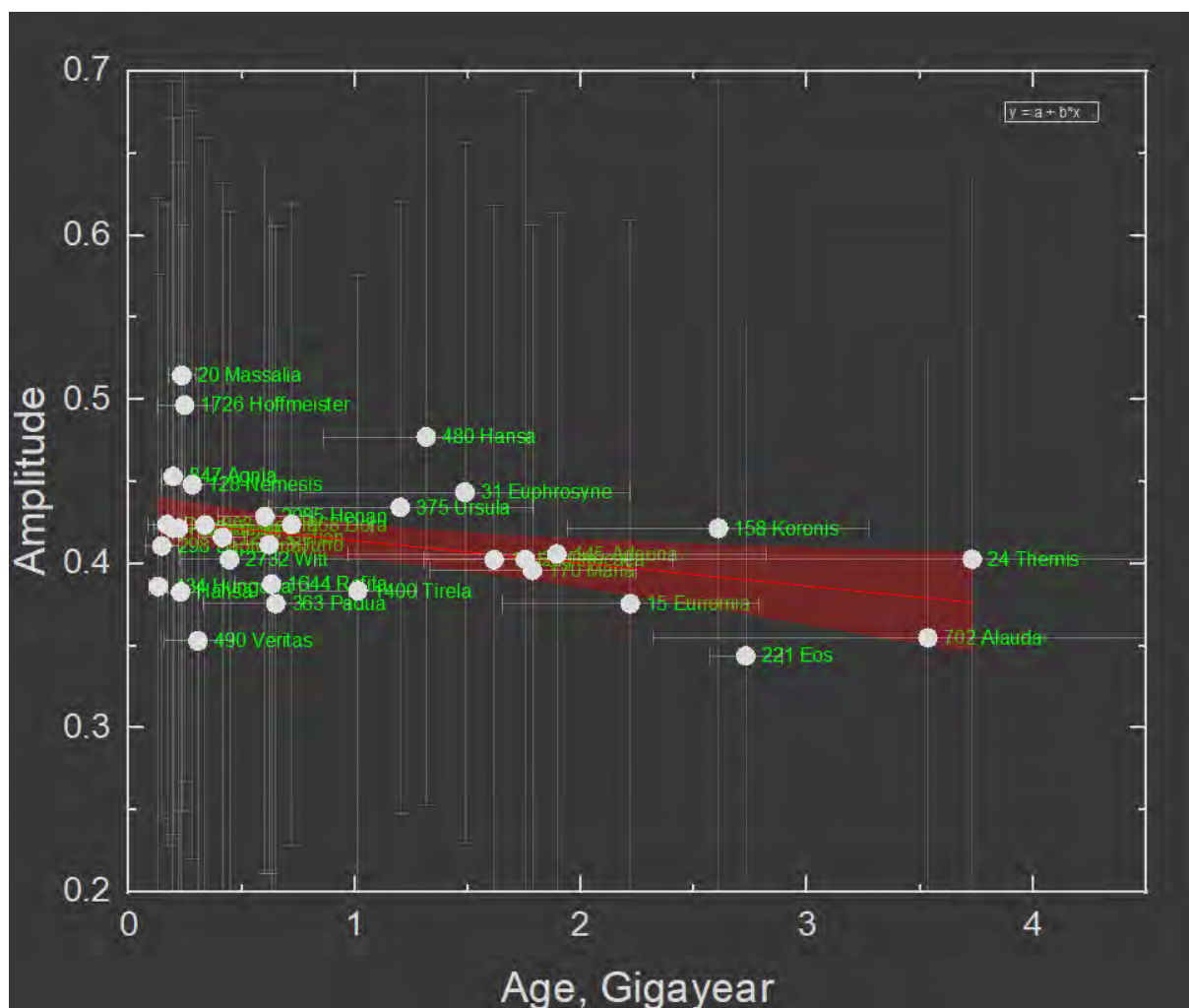


Рис. 2.93 Графік залежності амплітуд із віком у сімейств з нашої вибірки (у мільярдах років).

Name	Type	C	Average a	Average Albedo	Average p50	Error p50	Age 50	Error Age 50	Amplitude
3 Juno	S	5E-5	2.645	0.18955	2.7	0.69	0.6209	0.15867	0.4116
10 Hygiea	C, B	1.1E-4	3.14178	0.07348	1.41	0.69	1.61649	0.79105	0.40242
15 Eunomi	S, C	2.1E-4	2.64367	0.26125	2.7	0.69	2.21904	0.56708	0.37564
20 Massali	S	2.5E-5	2.40864	0.22664	2.7	0.69	0.23544	0.06016	0.51466
24 Themis	C	2.5E-4	3.1345	0.07057	1.41	0.69	3.73148	1.82604	0.40273
25 Phocae	S	2E-4	2.40015	0.25743	2.7	0.69	1.75483	0.44846	0.40234
31 Euphro	C	9E-5	3.15508	0.0591	1.41	0.69	1.48725	0.7278	0.4434
128 Neme	C	2.6E-5	2.74997	0.07895	1.41	0.69	0.2824	0.1382	0.44813
145 Adeon	C	1.8E-4	2.67268	0.07506	1.41	0.69	1.89398	0.92685	0.40571
158 Koroni	S	2E-4	2.86877	0.23789	2.7	0.69	2.60791	0.66646	0.42155
Koronis II	S	1.5E-5	2.86877	0.23789	2.7	0.69	0.19559	0.04999	0.42155
163 Erigon	C	2.5E-5	2.36712	0.06585	1.41	0.69	0.2203	0.10781	0.42155
170 Maria	S	1.8E-4	2.5537	0.25791	2.7	0.69	1.78623	0.45648	0.3959
221 Eos	K	1.7E-4	3.01239	0.328	3.54	0.21	2.72918	0.1619	0.34385
298 Baptist	X	2.3E-5	2.26385	0.21055	1.99	0.99	0.14632	0.07279	0.41071
363 Padua	X	4E-5	2.74746	0.06971	1.99	0.99	0.65136	0.32405	0.37563
375 Ursula	C	8E-5	3.12853	0.06912	1.41	0.69	1.20194	0.58818	0.43429
434 Hunga	E	2.7E-5	1.94426	0.7066	3.79	1.18	0.13171	0.04101	0.38608
480 Hansa	B	1.6E-4	2.64407	0.27351	2.15	0.74	1.31617	0.45301	0.47706
Hansa	B	2.8E-5	2.64407	0.27351	2.15	0.74	0.23033	0.07928	0.3827
490 Veritas	C	2E-5	3.17404	0.07014	1.41	0.69	0.30703	0.15025	0.35295
668 Dora	C	5.5E-5	2.79651	0.05802	1.41	0.69	0.72064	0.35266	0.42371
Dora	C	1.3E-5	2.79651	0.05802	1.41	0.69	0.17033	0.08336	0.42371
702 Alauda	B	1.5E-4	3.19426	0.07098	2.15	0.74	3.53506	1.21672	0.35479
808 Merxia	S	2.7E-5	2.74512	0.21791	2.7	0.69	0.33683	0.08607	0.42366
847 Agnia	S	1.55E-5	2.79	0.22366	2.7	0.69	0.19715	0.05039	0.45306
1272 Gefio	S	3.5E-5	2.75467	0.24387	2.7	0.69	0.41561	0.10621	0.41603
1400 Tirela	S	6E-5	3.11626	0.19699	2.7	0.69	1.01451	0.25926	0.38336
1644 Rafita	S	6E-5	2.56003	0.2311	2.7	0.69	0.63212	0.16154	0.3875
1726 Hoff	C	1.75E-5	2.7874	0.04879	1.41	0.69	0.24842	0.12157	0.49643
2085 Hena	B	6E-5	2.6991	0.1992	2.15	0.74	0.60267	0.20743	0.42875
2732 Witt	C	7E-5	2.76002	0.23207	1.41	0.69	0.44671	0.2186	0.40244

Рис. 2.94 Таблица результатів оцінки віку сімейств «Age50» із похибкою «Error Age50» у мільярдах років.

ВИСНОВКИ

Проведений аналіз таксономічного різноманіття, розподілів періодів і амплітуд у 29 сімейств різної таксономії та віку.

Аналіз отриманих розподілів показав:

- наявність бімодальності у розподілі a^* для сімейств Juno, Phocaea, Adeona, Erigone, Baptistina, Ursula, Tirela;
- наявність чіткої бімодальності у розподілі періодів обертання для сімейств Juno, Hygiea, Maria, Eos, Dora, Alauda. Також можлива бімодальність у сімействах Massalia, Koronis, Padua, Ursula але даних для остаточного висновку недостатньо даних;
- наявність чіткої бімодальності у розподілі амплітуд для сімейств Themis, Maria, Hungaria, Dora, Merxia, Agnia, Gefion, Rafita, Hoffmeister. Також можлива бімодальність Euphrosyne, Nemesis, Adeona але даних для остаточного висновку недостатньо;

Найбільші відмінності між сімействами знайдено у розподілі амплітуд кривих блиску. У більшості сімейств (23 з 29) головний максимум на графіку розподілу амплітуд між 0.25^m та 0.35^m , а вторинний максимум між 0.6^m та 0.8^m .

У розподілі періодів 17 сімейств максимумами на графіку розподілу періоду спостерігається на 5^h . Але цей максимум зміщений у більшу або меншу сторону значення у сімействах: Eunomia, Phocaea, Euphrosyne, Koronis, Maria, Ursula, Hungaria, Veritas, Agnia, Gefion, Tirela, Witt. У бімодальних наявний максимум на 10^h та інколи на 15^h .

Для сімейств з бімодальним розподілом амплітуд (Hungaria) та періодів (Juno) проведено детальне порівняння фізичних властивостей таксономічних підгруп у випадку Juno та підгруп з різними амплітудами кривих у випадку Hungaria. Для Juno низькоальбедні та середньоальбедні підгрупи мають однаковий розподіл періодів але показують слабку відмінність у розподілі амплітуд (середньоальбедні мають більшу амплітуду). Для Hungaria астероїди з

великими амплітудами кривих блиску (>0.45) мають довші періоди обертання, і загалом розподіл періодів в них відрізняється від розподілу для астероїдів з меншими амплітудами.

Було виявлено що 13 сімейств які демонструють наявність різних таксономічних класів у своєму складі. При цьому у 2 сімействах наявні чіткі рівноцінні за кількістю об'єктів групи різної таксономічної природи (Juno, Baptistina).

Для восьми сімейств V-shape мають не чітку форму (Juno, Phocaea, Adeona, Erigone, Ursula, Hansa, Gefion).

Розрахована оцінка віку сімейств (від 130 млн. років до 3,7 млрд. років) добре узгоджується із попередніми роботами (Spoto et al., 2015).

Наявна кореляція між середньою амплітудою кривих блиску із їх віком у сімействах. (Szabó et al., 2022) отримали залежність : $Q(A, \text{median}) = 0.328 - 0.02067 \cdot \text{age}[\text{Gyr}] \pm 0.025$, але слід зауважити, що вони використовували медіанну амплітуду, тоді як ми використовували середню амплітуду та лінійну криву : $y = a + b \cdot x$ із нахилом -0.013 ± 0.006 . Зі збільшенням віку сімейства середня амплітуда зменшується, що в цілому узгоджується із результатами статті (Szabó et al., 2022) [22]. Серед проаналізованої вибірки сімейств 3 молодих сімейства мають суттєво більшу амплітуду у порівнянні із сімействами того ж віку (Massalia, Hoffmeister, Veritas).

Оскільки астероїдні сімейства знаходяться у різних частинах головного поясу на різних відстанях від Сонця, має місце певна різниця у зіштовхувальній еволюції цих сімейств через різницю у кількості астероїдів з якими можливі зіткнення та у відносних швидкостях. Як ці фактори впливають на розподіл витягнутості форм астероїдів (а отже, і на амплітуди їх кривих блиску) достеменно не відомо.

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. Brož M. et al. / Constraining the cometary flux through the asteroid belt during the late heavy bombardment / *Astronomy & Astrophysics*. 2013. Vol. 551. P. A117. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/201219296>
2. Bottke Jr. W. / Dynamical Spreading of Asteroid Families by the Yarkovsky Effect. *Science*. 2001. Vol. 294, no. 5547. P. 1693–1696. URL: <https://doi.org/10.1126/science.1066760>
3. Bowell, E., Chapman, C. R., Gradie, J. C., Morrison, D., & Zellner, B. / Taxonomy of asteroids / *Icarus*. 1978. Vol. 35, no. 3. P. 313–335. URL: [https://doi.org/10.1016/0019-1035\(78\)90085-4](https://doi.org/10.1016/0019-1035(78)90085-4)
4. Bus, S., & Binzel, R. P. 2002a, *Icarus*, 158, 146. URL: https://ui.adsabs.harvard.edu/link_gateway/2002Icar..158..146B/doi:10.1006/icar.2002.6856
5. Carry B. / Density of asteroids. *Planetary and Space Science*. 2012. Vol. 73, no. 1. P. 98–118. URL: <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.03.009>
6. Carruba V. et al. / The quest for young asteroid families: new families, new results / *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society*. 2018. Vol. 479, no. 4. P. 4815–4823. URL: <https://doi.org/10.1093/mnras/sty1810>
7. Carvano J. et al. / SDSS-based taxonomic classification and orbital distribution of main belt asteroids / *Astronomy and Astrophysics*. 2010. Vol. 510. P. A43. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/200913322>
8. Chapman C. Asteroids as meteorite parent-bodies: the astronomical perspective. *Geochimica et Cosmochimica Acta*. 1976. Vol. 40, no. 7. P. 701–719. URL: [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(76\)90024-7](https://doi.org/10.1016/0016-7037(76)90024-7)
9. DeMeo F. et al. / An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared *Icarus*. 2009. Vol. 202, no. 1. P. 160–180. URL: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2009.02.005>
10. Durda D. et al. / Size–frequency distributions of fragments from SPH/N-body simulations of asteroid impacts: Comparison with observed asteroid

- families / *Icarus*. 2007. Vol. 186, no. 2. P. 498–516.
 URL: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.09.013>
11. Hirayama K. / Groups of asteroids probably of common origin. *The Astronomical Journal*. 1918. Vol. 31. P. 185.
 URL: <https://doi.org/10.1086/104299>
 12. Ivezić Ž. et al. / Solar System Objects Observed in the Sloan Digital Sky Survey Commissioning Data / *The Astronomical Journal*. 2001. Vol. 122, no. 5. P. 2749–2784. URL: <https://doi.org/10.1086/323452>
 13. Knežević Z., Pavlović R.: Young age for the veritas asteroid family confirmed? *Earth Moon Planets* 88(3), 155–166 (2002). URL: <https://doi.org/10.1023/A:1016527229935>
 14. Masiero J. et al. / PRELIMINARY ANALYSIS OF WISE /NEOWISE 3-BAND CRYOGENIC AND POST-CRYOGENIC OBSERVATIONS OF MAIN BELT ASTEROIDS / *The Astrophysical Journal*. 2012. Vol. 759, no. 1. P. L8. URL: <https://doi.org/10.1088/2041-8205/759/1/18>
 15. Milani A., Cellino, A., Knežević Z., Novaković B., Spoto, F., Paolicchi, P.: Asteroid families classification: exploiting very large datasets. *Icarus* 239, 46–73 (2014). URL: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2014.05.039>
 16. Nesvorný D. et al. / Evidence for asteroid space weathering from the Sloan Digital Sky Survey *Icarus*. 2005. Vol. 173, no. 1. P. 132–152.
 URL: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2004.07.026>
 17. Nesvorný D., Broz M., Carruba V. Identification and Dynamical Properties of Asteroid Families. *Asteroids IV*. 2015.
 URL: https://doi.org/10.2458/azu_uapress_9780816532131-ch016
 18. Nesvorný D., Vokrouhlický D. New Candidates for Recent Asteroid Breakups. *The Astronomical Journal*. 2006. Vol. 132, no. 5. P. 1950–1958.
 URL: <https://doi.org/10.1086/507989>
 19. Rubincam D. / Radiative Spin-up and Spin-down of Small Asteroids. *Icarus*. 2000. Vol. 148, no. 1. P. 2–11. URL: <https://doi.org/10.1006/icar.2000.6485>

20. Sergeev A. V., Carry B. A million asteroid observations in the Sloan Digital Sky Survey. *Astronomy & Astrophysics*. 2021. Vol. 652. P. A59. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202140430>
21. Spoto F., Milani A., Knežević Z. Asteroid family ages. *Icarus*. 2015. Vol. 257. P. 275–289. URL: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2015.04.041>
22. Szabó G. et al. / Rotation periods and shape asphericity in asteroid families based on TESS S1-S13 observations / *Astronomy & Astrophysics*. 2022. URL: <https://doi.org/10.1051/0004-6361/202142223>
23. Tholen D. J. 1984, PhD Thesis (Tucson, AZ: University of Arizona).
24. Vokrouhlický, D., Brož, M., Bottke, W.F., Nesvorný, D., Morbidelli, A.: The peculiar case of the Agnia asteroid family. *Icarus* 183(2), 349–361 (2006a). URL: <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.03.002>
25. Zappala V. et al. / Asteroid families. I - Identification by hierarchical clustering and reliability assessment / *The Astronomical Journal*. 1990. Vol. 100. P. 2030. URL: <https://doi.org/10.1086/115658>
26. Сайт SDSS
URL: <https://faculty.washington.edu/ivezic/sdssmoc/sdssmoc.html>
27. Сайт AstDys
URL: <https://newton.spacedys.com/astdys2>