

ОДЕСЬКИЙ НАЦІОНАЛЬНИЙ УНІВЕРСИТЕТ ІМЕНІ І. І.
МЕЧНИКОВА

(повне найменування закладу вищої освіти)

Факультет математики, фізики та інформаційних технологій

(повне найменування факультету)

Кафедра фізики та астрономії

(повна назва кафедри)

Кваліфікаційна робота
на здобуття ступеня вищої освіти «бакалавр»

«Об'єкти "Гарячої популяції" у Поясі Койпера»

«"Hot population" objects in the Kuiper Belt»

Виконала: здобувачка денної форми навчання

спеціальності 104- Фізика та астрономія

(код, назва спеціальності)

Освітня програма Фізика та астрономія

(назва)

Охотко Ганна Костянтинівна

(прізвище, ім'я, по-батькові здобувача)

Керівник к.ф.-м.н., Базєй О. А.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

_____ (підпис)

Рецензент к.ф.-м.н., Кошкін М. І.

(науковий ступінь, вчене звання, прізвище, ініціали)

Рекомендовано до захисту:

Протокол засідання кафедри

Фізики та астрономії

№ ____ від ____ . ____ . 20 ____ р.

Завідувач кафедри

_____ Гоцульський Володимир

(підпис)

(прізвище, ім'я)

Захищено на засіданні ЕК № ____

протокол № __ від ____ . ____ . 20 ____ р.

Оцінка _____ / _____ / _____

(за національною шкалою/шкалою ECTS/ бали)

Голова ЕК

(підпис)

Ваксман Юрій

(прізвище, ім'я)

Одеса 2023

ЗМІСТ

Перелік умовних позначень	3
Вступ	4
1. Походження «гарячої» популяції	5
1.1 Еволюція Сонячної системи	5
1.2 Популяції об'єктів у поясі Койпера	9
1.3. Невирішені питання за темою	11
2. Дослідження фізичних властивостей «гарячої» популяції	12
2.1 Бази даних малих тіл Сонячної системи	12
2.2 Фізичні параметри об'єктів «гарячої» популяції	13
Результати роботи та висновки	25
Список використаних джерел	27

ПЕРЕЛІК УМОВНИХ ПОЗНАЧЕНЬ

Місія «Nasa New Horizons» – космічна місія, головною метою якої є дослідження формування системи Плутона та його супутників, поясу Койпера і трансформації ранньої Сонячної системи.

Місія «Nasa Lucy» – космічна місія, яка досліджує шість троянських астероїдів Юпітера, які знаходяться у точках Лагранжа L4 та L5.

Точки Лагранжа L4 та L5 – точки в орбітальній конфігурації, де тіло з незначною масою, що зазнає гравітаційного впливу двох взаємопов'язаних масивних тіл, буде перебувати у незмінній позиції щодо одного з них на 60° попереду та на 60° позаду.

«IAU Minor Planet Center» (MPC) – є офіційною всесвітньою організацією, що відповідає за позначення малих тіл Сонячної системи.

«ALCDEF»: Asteroid Lightcurve Data Exchange Format – це база фотометричних даних та кривих блиску астероїдів Сонячної системи.

Астрономічна одиниця (а.о.) – позасистемна одиниця відстані, що дорівнює середній відстані Землі від Сонця. $1 \text{ а.о.} = 149\,597\,870\,700 \text{ м.}$

Планетезималі – малі об'єкти з щільним ядром, які утворилися 4.6 млрд. роки тому.

$M_\oplus$ – позасистемна одиниця маси, що дорівнює масі Землі. $1 M_\oplus = 5.97219 \cdot 10^{24} \text{ кг.}$

Транснептунові об'єкти (ТНО) – малі об'єкти Сонячної системи, що знаходяться за орбітою Нептуна.

Широкопasmогова фотометрична система Johnson-Cousins UBVRI (Ultraviolet, Blue, Visual, Red, Infrared) є загальним розширенням оригінальної системи Johnson UBV, яка забезпечує червоні смуги пропускання. Використовується для класифікації об'єктів за кольором.

ВСТУП

Дослідження «гарячої» популяції наразі є актуальним в сучасній астрономії та космічних дослідженнях, бо може допомогти у розумінні наступних тем:

- формування та еволюція Сонячної системи. Вважається, що пояс Койпера є залишком ранньої Сонячної системи, і вивчення об'єктів, що в ньому знаходяться, може дати розуміння умов і процесів, які призвели до формування планет;

- дослідження різноманітності малих тіл у Сонячній системі. Пояс Койпера містить широкий спектр об'єктів, тому вивчаючи «гарячу» популяцію, ми можемо більше дізнатися про властивості та характеристики цих об'єктів;

- визначення потенційних цілей для дослідження. Визначив та охарактеризував «гарячу» популяцію, можна допомогти визначити потенційні цілі для майбутніх космічних місій, наприклад, як космічні місії «Nasa New Horizons» та «Nasa Lucy».

Метою даної роботи є визначення фізичних властивостей об'єктів «гарячої» популяції поясу Койпера, які ймовірно мігрували раніше з області первісної орбіти Нептуна (первісна орбіта Нептуна розташована в межах від ~ 5.5 до ~ 14 а.о. від Сонця). Об'єктом дослідження даної роботи є транснептунові об'єкти (ТНО), які утворюють «гарячу» популяцію у поясі Койпера.

Основні завдання, що необхідно вирішити в даній роботі, наступні:

- інтерпретація даних з баз даних «IAU Minor Planet Center» [1] та «ALCDEF» [2];
- отримання розподілу обраних мною астероїдів «гарячої» популяції;
- визначення фізичних параметрів об'єктів «гарячої» популяції;

- перерахування фізичних параметрів на основі нових даних за останні роки;
- отримання обертового розподілу об'єктів «гарячої» популяції у зовнішній частині Сонячної системи.
- отримання статистичних залежностей параметрів абсолютної величини, діаметру, геометричного альбедо, фазової функції об'єктів «гарячої» популяції.

1. ПОХОДЖЕННЯ «ГАРЯЧОЇ» ПОПУЛЯЦІЇ

1.2 Еволюція Сонячної системи

Модель Ніцци або гіпотеза Ніцци, є одним з наукових пояснень еволюції Сонячної системи. Вона була запропонована науковцями в 2005 році. За даною моделлю еволюції Сонячної системи передбачається, що планети-гіганти спочатку перебувають на майже кругових і компланарних орбітах, та знаходяться в діапазоні від ~ 5.5 а.о. до ~ 14 а.о. Газові гіганти Юпітер і Сатурн розташовані ближче до Сонця, ніж крижані гіганти Уран і Нептун [3-5].

Вважається, що за орбітами планет-гігантів існує планетезимальний диск, зовнішній край якого становить ~ 34 а.о. Зокрема, було припущено, що об'єкти населяють лише ті регіони, де динамічний час життя окремих об'єктів має порядок часу життя газового диска, або довше. Було встановлено, що для найбільш точного відтворення характеристик зовнішньої планетарної системи загальна маса планетезимального диска повинна була становити $\sim 35 M_{\oplus}$ [3, 6].

Дана конфігурація планет-гігантів призвела до гравітаційної взаємодії між ними, яка змусила їх мігрувати. Через значний проміжок часу (від 60 млн. до 1.1 млрд.) Юпітер і Сатурн зрештою перетинають свій взаємний резонанс середнього руху 1:2. Резонансний перетин збуджує їхні

ексцентриситети до значень, трохи вищих за ті, що спостерігаються зараз. Невеликий стрибок в ексцентриситетах Юпітера і Сатурна збільшує ексцентриситети Урана і Нептуна до точки, де вони починають наближатися один до одного. Таким чином, коротка фаза жорстких зіткнень слідує за подією перетину резонансу (від ~878 до ~885 млн. у прикладі, показаному на Рис.1А). В результаті, обидва крижані гіганти розкидані на великі ексцентриситетні орбіти ($0.25 \leq e \leq 0.4$), які проникають глибоко в диск [3, 5].

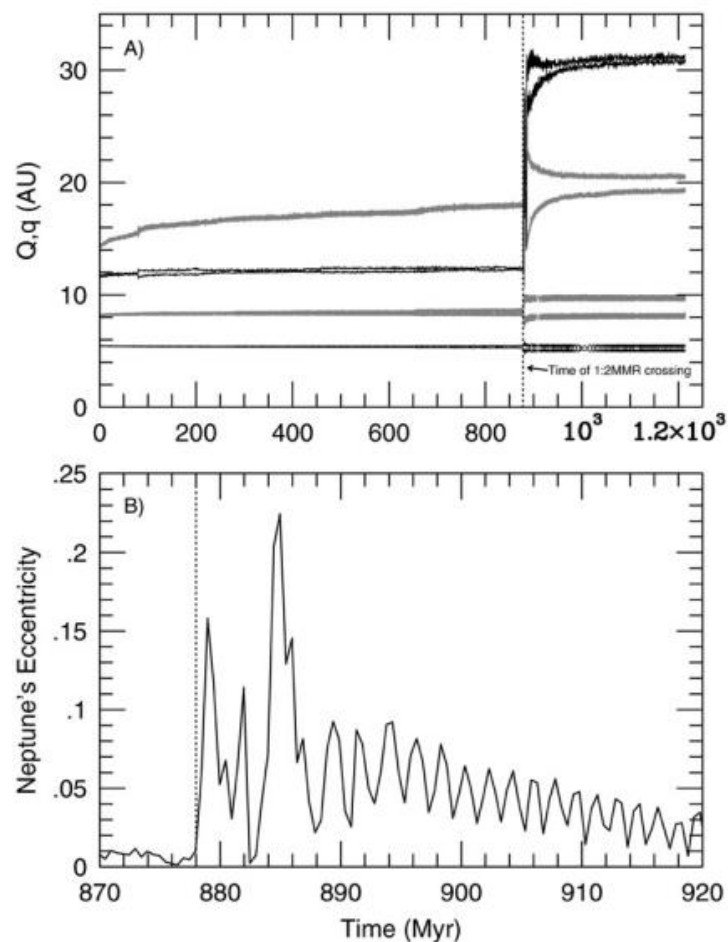


Рис.1. Еволюція планет-гігантів в моделі Ніцци. (А) Кожна планета представлена парою кривих — верхня та нижня криві — це відстані в афелії та перигелії відповідно. У цьому моделюванні Юпітер і Сатурн перетинають свій резонанс середнього руху 1:2 на 878 млн. років, що позначено пунктирною лінією. (В) Ексцентриситет Нептуна [3].

Це дестабілізує весь планетезимальний диск, і його частинки розсіюються по всій Сонячній системі. Ексцентриситети Урана і Нептуна і, меншою мірою, Юпітера і Сатурна затухають на часовій шкалі в кілька мільйонів через динамічне тертя планетезималей. У прикладі, показаному на Рис.1В, ексцентриситет Нептуна змінюється від піку 0.22 до менше ніж 0.05 за 2.4 млн. років [3, 7].

В результаті гравітаційного впливу планетезимального диска планети від'єднуються одна від одної, і фаза взаємних зустрічей швидко закінчується. Під час і після фази демпфірування ексцентриситету планети-гіганти продовжують свою радіальну міграцію і досягають кінцевих орбіт, коли більша частина планетезимального диска була усунена (Рис.1А) [3, 9].

Раптова дестабілізація планетезимального диска призводить до різкого сплеску потоку тіл із зовнішньої частини Сонячної системи, що входять у область планет земної групи. Крім того, міграція Юпітера і Сатурна до їхнього поточного положення дестабілізує приблизно 90% астероїдів, які на той час знаходяться в поясі астероїдів. Разом зовнішні планетезималі Сонячної системи та астероїди, що вилітають, спричиняють бомбардування планет земної групи тривалістю 100 млн. років [3, 8]. Схематичне зображення еволюції Сонячної системи з показано на Рис.2.

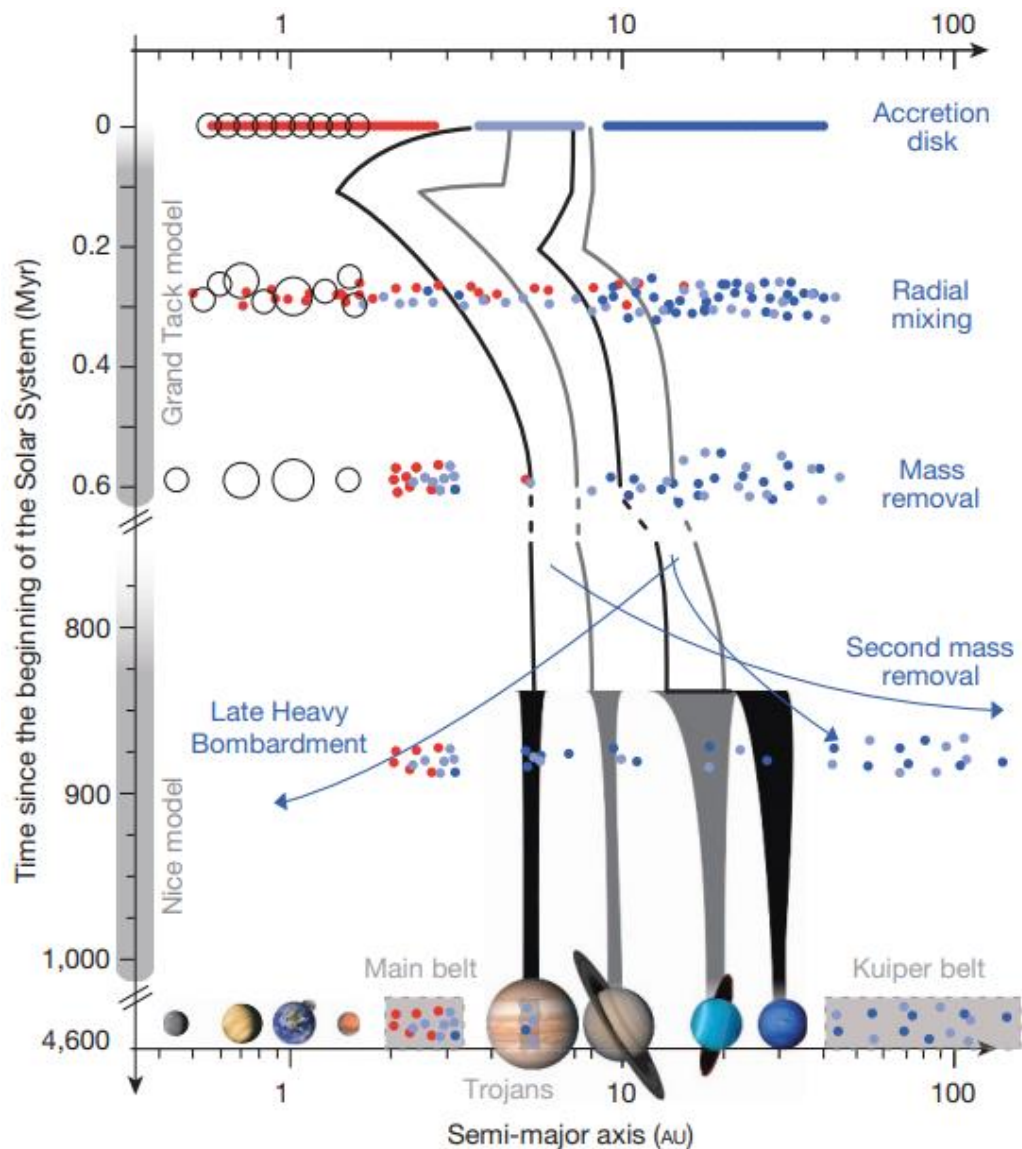


Рис.2. Зображення впливу міграції планет на пояс астероїдів і пояс Койпера. Відображає деякі основні етапи динамічної еволюції малих тіл у Сонячній системі [9].

В результаті гравітаційного впливу планет-гігантів велика частина планетезималей була гравітаційно викинута за межі Сонячної системи, але невелика частина залишилася, і була захоплена Юпітером у точках Лагранжа L4 та L5 і поясом Койпера. У результаті ми зараз можемо спостерігати таку різноманітність, з точки зору фізичних і динамічних

характеристик, у троянських астероїдів Юпітера і в поясі Койпера. Планетезималі, захоплені поясом Койпера, зараз є і «гарячою» популяцією.

Схематичне зображення міграції планетезималей представлено на Рис.3.

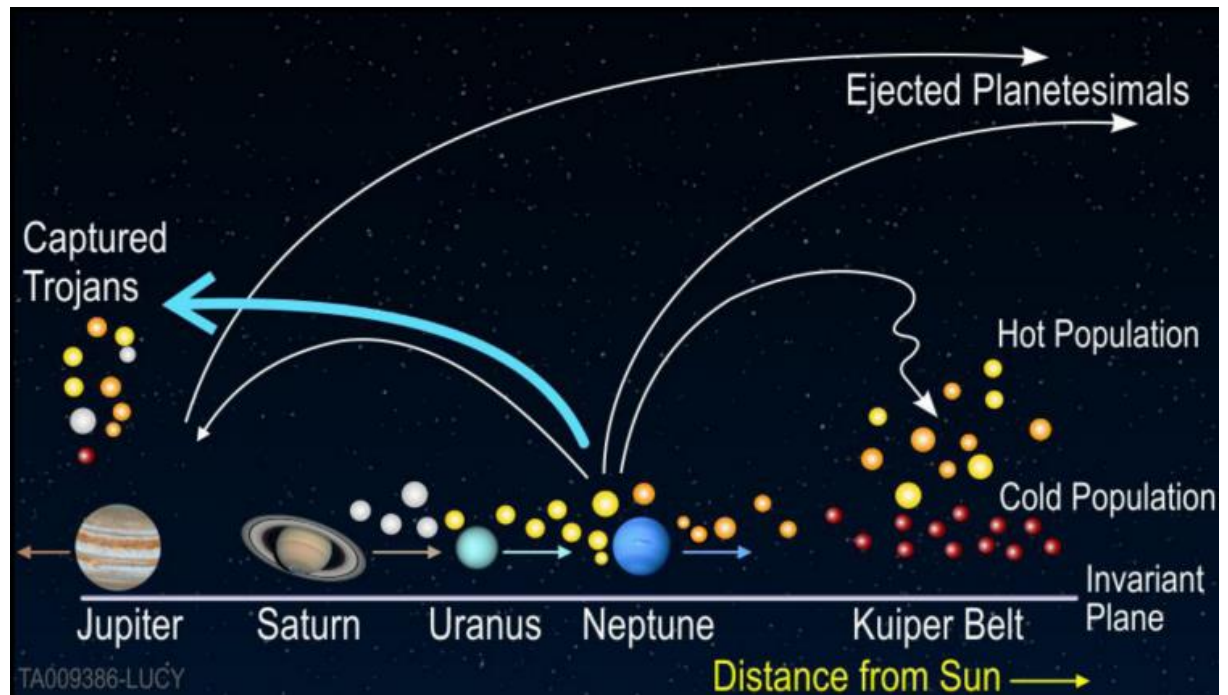


Рис.3. Схематичне зображення впливу міграції планет-гігантів на малі тіла Сонячної системи [10].

1.2. Популяції об'єктів у поясі Койпера

Перші виявлені об'єкти в поясі Койпера, такі як 1992 QB1, мають невеликі нахили. Однак пізніші відкриття включали велику кількість транснептунових об'єктів (ТНО) з більшим нахилом орбіти. Тому визнають, що існує дві популяції об'єктів у поясі Койпера. Популяція з нахилом $i \leq 4^\circ$ - «холодна», а популяція з нахилом $i > 4^\circ$ - «гаряча», значення можуть досягати до $30^\circ - 40^\circ$ і, можливо, вище (Рис.4) [3, 11, 12].

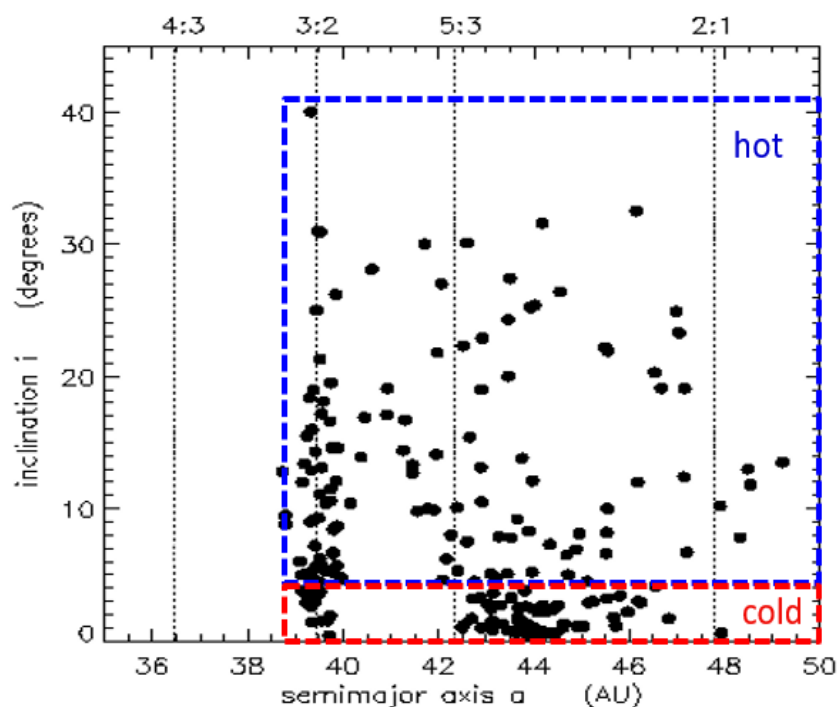


Рис.4. Схематичне зображення розподілу «гарячої» (синя) та «холодної» (червона) популяцій у поясі Койпера [13].

Орбіти об'єктів «гарячої» популяції поясу Койпера мають високий ексцентриситет ($e > 0.07$), деякі об'єкти перетинають орбіти Нептуна і входять у внутрішню частину Сонячної системи. Об'єкти «холодної» популяції мають кругові орбіти. Тому термін «гарячі» не відноситься до температури тіл, а характеризує орбіту об'єктів [14].

Перше припущення щодо фізичної різниці між «гарячими» та «холодними» об'єктами було в статті [15], де зазначено, що яскравіші об'єкти поясу Койпера переважно знаходяться на орбітах з великим нахилом.

Другою можливою фізичною відмінністю між «гарячими» та «холодними» об'єктами поясу Койпера є їхні кольори, які пов'язані зі складом поверхні та фізичними властивостями. Об'єкти з низьким нахилом мають тенденцію бути червонішими, ніж об'єкти з більшим нахилом [16].

Крім того, «холодна» популяція налічує велику кількість подвійних об'єктів, які не витримують близької зустрічі з Нептуном і зруйнуються. Це свідчить, що вірогідніше за все, «холодна» популяція утворилася в нинішньої області поясу Койпера, а не мігрувала до нього [11].

Наведені відмінності між «гарячими» та «холодними» об'єктами означають, що ці популяції відрізняються фізично, а також динамічно. Ймовірно, що «гаряча» популяція не була сформована в області поясу Койпера, а скоріше за все мігрувала до нього внаслідок взаємодії з гравітацією планет-гігантів [10, 11].

Підводячи підсумок, «гаряча» популяція в поясі Койпера відноситься до групи ТНО, які мають високий ексцентриситет орбіти та великі нахили, це відрізняє їх від більшості об'єктів у поясі Койпера.

1.3. Невирішені питання за темою

Пояс Койпера представляє залишок від первісного планетезимального диска. Був утворений в результаті різних динамічних процесів та зіткнень під час еволюції Сонячної системи до її поточної структури. Тому важливо переглянути питання про первинне утворення поясу Койпера в контексті моделі Ніцци. Це дослідження може надати додаткову підтримку або спростування моделі Ніцци, що допоможе покращити наше розуміння процесів, які відбувалися в ранній Сонячній системі. [3]

Крім того, залишаються невирішеними питання щодо:

- походження первісної органічної речовини;
- характеристик поверхні об'єктів, що належать до поясу Койпера;
- фізичних та динамічних властивостей об'єктів в поясі Койпера;
- розподіл залишків планетезималей у зовнішній частині Сонячної системи [3, 10].

Питання, що стосується фізичних характеристик об'єктів «гарячої» популяції розглядається у цій роботі, що наразі є одним з основних кроків для дослідження даних об'єктів. Фізичні параметри «гарячої» популяції є важливим ключем до розуміння походження даних об'єктів та їх класифікації.

2. ДОСЛІДЖЕННЯ ФІЗИЧНИХ ВЛАСТИВОСТЕЙ «ГАРЯЧОЇ» ПОПУЛЯЦІЇ

2.1. Бази даних малих тіл Сонячної системи

Для даної роботи були використані дані з баз даних «IAU Minor Planet Center» та «ALCDEF».

«IAU Minor Planet Center» (MPC) — є офіційною всесвітньою організацією, що відповідає за позначення малих тіл Сонячної системи: астероїди, карликові планети, комети, і природні супутники. MPC також відповідає за збір, обчислення, перевірку та розповсюдження астрометричних спостережень і орбіт малих тіл та комет. Організація знаходиться в Смітсонівській астрофізичній обсерваторії (SAO), яка є частиною Гарвард-Смітсонівського астрофізичного центру (CfA) спільно з Гарвардською обсерваторією (HCO) [1].

«ALCDEF»: Asteroid Lightcurve Data Exchange Format — це база фотометричних даних та кривих блиску астероїдів Сонячної системи. Включає в себе неперероблені дані у простому і зручному форматі та мінімум критичної інформації, щоб будь-який науковець міг правильно використовувати дані. Ця база даних стала важливим інструментом для тих, хто проводить дослідження астероїдів, де потрібні необроблені фотометричні дані [2].

2.2. Фізичні параметри «гарячої» популяції поясу Койпера

З MPC був завантажений архів з динамічними і фізичними параметрами для ТНО. За розташуванням та елементами орбіти була зроблена вибірка об'єктів з добре відомою орбітою аби підтвердити, що вони належать до «гарячої» популяції, а саме підходять під параметри: нахил орбіти $i > 4^\circ$ та велика пів вісь в межах $39.4 \text{ а.о.} \leq a \leq 55.8 \text{ а.о.}$

З 2000 відомих ТНО мною було обрано нумеровані об'єкти, діаметром $D > 100$ км. В результаті отримано 41 астероїд, що підходить під параметри «гарячої» популяції.

Обрані мною об'єкти наведені на Рис.5, де показано залежності ексцентриситета від великої пів осі та нахилу орбіти від великої пів осі об'єктів «гарячої» популяції.

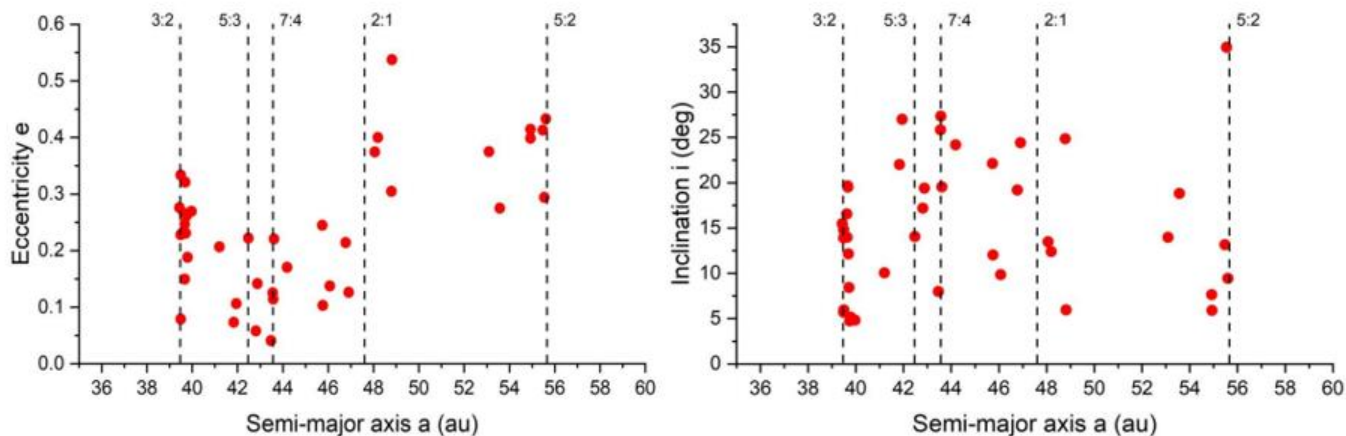


Рис.5. Розподіл астероїдів розглянутих у роботі [14].

Пунктирними лініями на графіках відзначені орбітальні резонанси Нептуна з об'єктами (3:2, 5:3, 7:4, 2:1, 5:2).

Орбітальний резонанс – це ситуація при якій два або більше небесних тіл мають періоди обертання, які відносяться як невеликі натуральні числа. Більшість ТНО знаходяться в резонансі з Нептуном 2:3 (два обороти

об'єкта навколо Сонця відповідають за часом трьом оборотам Нептуна навколо Сонця) [17].

З Рис.5 можна зробити висновок, що переважна частина об'єктів «гарячої» популяції перебуває в резонансі з Нептуном 2:3, а незначна частина перебуває в резонансах 4:7 та 2:5. Резонанс 2:3 наймінімальний по співвідношенню, тому більшість об'єктів «гарячої» популяції знаходяться саме в цьому орбітальному резонансі з планетою-гігантом. Це означає, що дані об'єкти зближаються з Нептуном частіше тих об'єктів, які перебувають в резонансі з меншим співвідношенню чисел. З цього випливає, що Нептун сильніше гравітаційно впливає на дані об'єкти, ніж на об'єкти з меншим по співвідношенню резонансом. Об'єкти, які не знаходяться в орбітальному резонансі з Нептуном, не зазнають сильного гравітаційного впливу від газового гіганта.

Важливо було отримати дані про період обертання, абсолютну величину, діаметр, геометричне альbedo та фазову функцію об'єктів «гарячої» популяції. Щоб отримати ці фотометричні дані, я користувалася базою даних «ALCDEF».

Однією з основних властивостей малих тіл є їхня швидкість обертання, яка зазвичай вимірюється у годинах. Наразі відомо періоди ~ 8300 малих тіл. На Рис.6 наведена більшість астероїдів Сонячної системи з відомим періодом обертання. Представлені залежністю частоти (цикли/день) від їхнього розміру (км) [18].

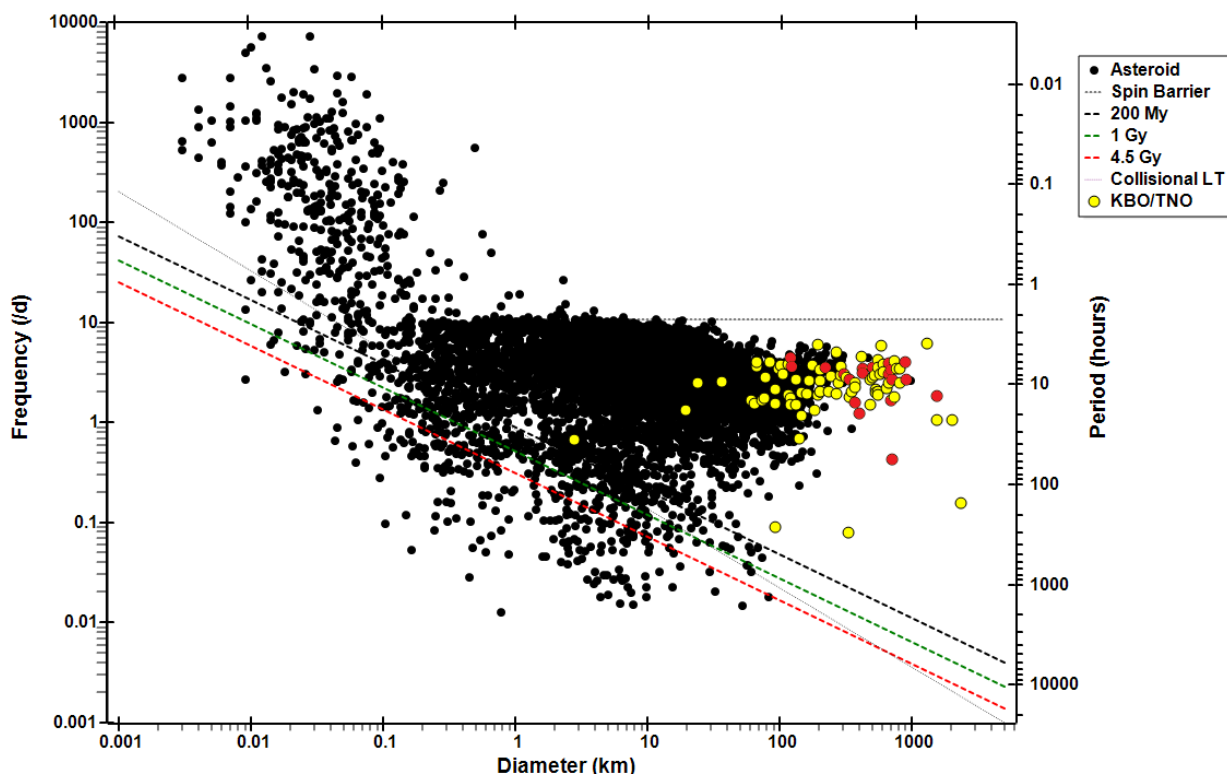


Рис.6. Розподіл малих тіл Сонячної системи на основі залежності швидкості обертання від діаметра [14, 18].

Ми вибрали об'єкти «гарячої» популяції, у яких відомий період обертання та представили їх червоним кольором на Рис.6. Можна побачити, що вони потрапляють в область ТНО, які відзначені жовтим кольором.

Визначення швидкості обертання малих тіл в основному здійснюється шляхом аналізу кривих блиску, які є графічними залежностями величини від часу. Застосування математичного аналізу, наприклад, Фур'є-аналізу, до цих даних дозволяє визначити період обертання. Такий аналіз також може виявити, чи є мале тіло подвійним або має незвичайну вісь обертання. У деяких випадках детальний аналіз періоду обертання певного малого тіла протягом тривалого періоду, наприклад, кількох років, може показати, що період змінюється з часом, стаючи швидшим або повільнішим [18].

Форму та орієнтацію осі обертання малого тіла можна встановити, якщо є достатня кількість даних кривих блиску. Може знадобитися значна тривалість спостережень для отримання точного зображення [18].

З графіку на Рис.6 можна зробити наступні висновки:

- об'єкти «гарячої» популяції знаходяться в області ТНО і не перевищують спін-бар'єр (~ 2.2 год);
- діаметр об'єктів «гарячої» популяції більше 100 км;
- період обертання об'єктів «гарячої» популяції в діапазоні від ~ 4 до ~ 60 год.

За отриманими даними про діаметр, абсолютну величину та геометричне альbedo з бази даних «ALCDEF» мною було побудовано залежності: діаметр від абсолютної величини, представленою на Рис.7. та геометричне альbedo від абсолютної величини, представленою на Рис.8.

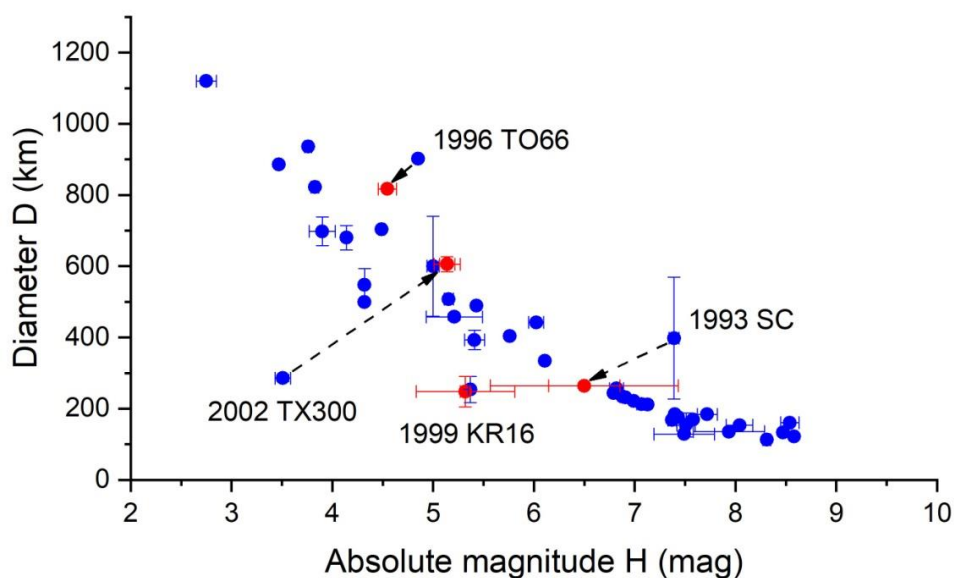


Рис.7. Розподіл астероїдів за діаметром від абсолютної величини.

Червоним позначені перераховані значення об'єктів 1993 SC, 1996 TO66, 1999 KR16, 2002 TX300 [14].

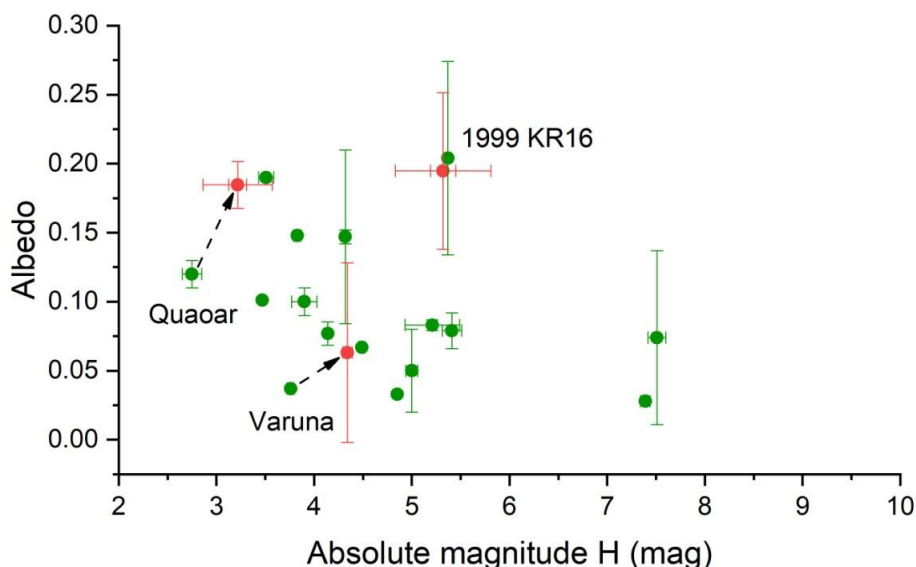


Рис.8. Розподіл астероїдів за альбедо від абсолютної величини. Червоним позначені перераховані значення об'єктів 1999 KR16, Quaoar, Varuna [14].

Залежність діаметру від абсолютної величини (Рис.7) має бути близької до логарифмічної. При побудові графіку я помітила, що об'єкти 1993 SC, 1996 TO66, 1999 KR16, 2002 TX300 вилітають. Тому мною було перераховано їхні значення за формулою зв'язку абсолютної величини H , діаметра D та геометричного альбедо p :

$$H = -5 \lg \frac{D \sqrt{p}}{1329} \quad (1) [19]$$

Абсолютна величина астероїда, H - визначається як видима зоряна величина, яку мав би об'єкт, якби він був на відстані однієї а.о. від Сонця та спостерігача [17].

Геометричне альбедо p - визначається як співвідношення його фактичної яскравості, яку ми спостерігаємо при нульовому фазовому куті, до яскравості ідеального плоского, повністю відбиваючого та дифузно розсіюючого диска з аналогічним розміром. Важливо відмітити, що фазовий кут відноситься до напрямку розповсюдження світла і не є фазовим кутом у його звичайному значенні в оптиці чи електроніці [17].

Дифузне розсіювання означає, що випромінювання відбивається ізотропно без збереження специфічного напрямку падаючого світла [20].

Фазовий кут визначається як кут між спостерігачем, об'єктом, який спостерігається, і джерелом світла. У Сонячній системі, Сонце є джерелом світла, а спостерігач зазвичай знаходиться на Землі. При нульовому фазовому куті Сонце розташовується безпосередньо за спостерігачем, а об'єкт розташовується попереду, повністю освітлений. Зменшення фазового кута об'єкта, освітленого Сонцем, призводить до швидкого зростання його яскравості [20].

Отримані дані за перерахунком по формулі (1) наведені у Таб.1.

Таблиця 1.

Результати перерахованих значень для об'єктів 1993 SC, 1996 TO66, 1999 KR16, 2002 TX300.

Назва	D [km]	H [Mag]
1993 SC	264.2±6.08	6.5±0.93
1996 TO66	817.09	4.55
1999 KR16	248.15±42.64	5.32±0.49
2002 TX300	605.82±21.2	5.14±0.076

З Рис.7 можна побачити, що об'єкти, діаметр і абсолютну величину яких перерахували за формулою (1), наблизилися до логарифмічної залежності. Для об'єкта 1999 KR16 бажано отримати нові покращені фотометричні дані, щоб перерахував їх за формулою (1) отримати значення, що впишуться у логарифмічну залежність.

Для ТНО (50000) Quaoar вийшли нові дані діаметра у статті [21], де описано, як за допомогою космічного телескопа «ЄКА» «CHEOPS» спостерігали затемнення зорі ТНО (50000) Quaoar. У статті [21] порівнювали отриману хорду з попередніми затемненнями цим об'єктом і

визначали його астрометрію з субмілісекундною точністю. Крім того, наземний телескоп в Австралії був використаний для обмеження лімба (50000) Quaoar. У поєднанні з результатами попередніх робіт, дані вимірювання дозволили отримати точне положення (50000) Quaoar в момент затемнення. Це спостереження важливо розглядати як підтвердження концепції використання космічних телескопів, що перебувають на орбіті Землі, для спостереження ТНО за допомогою зоряної окультивації. Це відкриває широкі перспективи для подальшого використання космічних телескопів у цій області [21].

Із статті [21] знаємо, що діаметр (50000) Quaoar $D = 871.61 \pm 0.99$ км. За формулою (1) перераховуємо значення абсолютної величини та геометричного альбедо. Отримані результати наведені в Таб.2.

Таблиця 2.

Результати перерахованих значень для об'єктів Quaoar, Varuna, 1999 KR16.

Назва	H [Mag]	Albedo
Quaoar	3.22 ± 0.09	0.18 ± 0.017
Varuna	4.34	0.063 ± 0.065
1999 KR16	5.32 ± 0.49	0.19 ± 0.057

Залежність геометричного альбедо від абсолютної величини також має бути близькою до логарифмічної. Тому мною було перераховані значення абсолютної величини та геометричного альбедо за формулою (1) для об'єктів (20000) Varuna та 1999 KR16. Перераховані значення наведені в Таб.2.

Залежність геометричного альбедо від абсолютної величини об'єктів «гарячої» популяції представлено на Рис.8.

У побудові залежності Рис.8 я не використовувала об'єкти з геометричним альбедо $p = 0.057$, тому що це значення передбачається для більшості астероїдів, як стандартна величина, коли геометричне альбедо не визначено із спостережень. На Рис.8 наведені лише об'єкти з відомим із спостережень геометричним альбедо. Логарифмічна залежність майже не прослідковується. Це свідчить про нестачу фотометричних даних для об'єктів «гарячої» популяції. Бажано отримати більше спостережень та інформації щодо об'єктів «гарячої» популяції, аби отримати логарифмічну залежність на графіку геометричного альбедо від абсолютної величини.

Ще одним важливим параметром для визначення фізичних характеристик «гарячої» популяції є фазова функція. Фазова функція G як правило, пов'язана з ефектом опозиції.

При фазовому куті нуль градусів (тобто Сонце знаходиться прямо за спостерігачем, а об'єкт знаходиться прямо попереду спостерігача, повністю освітлений) усі тіні зникають і об'єкт повністю освітлюється. Коли фазовий кут наближається до нуля, відбувається раптове збільшення видимої яскравості об'єкта, і це раптове збільшення називається ефектом опозиції [22].

Зазвичай основною причиною ефекту опозиції є те, що дрібні пори та ями на поверхні об'єкта, які інакше були б у тіні за інших кутів падіння, стають освітленими, коли спостерігач знаходиться майже на одній лінії з джерелом освітлення і самим об'єктом.

Залежність яскравості астероїда (приведеною до 1 а.о. від Сонця і спостерігача, і скоригованою на амплітуду кривої блиску) від геометрії розсіювання, яка визначається фазовим кутом називається фазовою кривою. Фазові криві є предметом загального інтересу, оскільки вони надають можливість:

- вивчати характеристики поверхні астероїдів, такі як розмір частинок реголіту, шорсткість поверхні та пористість;

- обчислювати абсолютну величину, яка пов'язана з розміром астероїда та його геометричним альбедо;
- встановлювати різні фізичні властивості астероїдів, такі як таксономічний тип [23, 24].

Фазові криві надають цінну інформацію для вивчення астероїдів та розуміння їх фізичних характеристик.

Фазова функція G відома точно лише для невеликої кількості астероїдів. Знайдені значення варіюються в межах від 0 до 0.60. Для ТНО використовують середнє загальноприйняте значення $G = 0.12$, якщо не було знайдено значення зі спостережень.

На Рис.9 та Рис.10 наведені приклади фазової кривої для об'єктів (50000) Quaoar та (20000) Varuna, які належать до «гарячої» популяції.

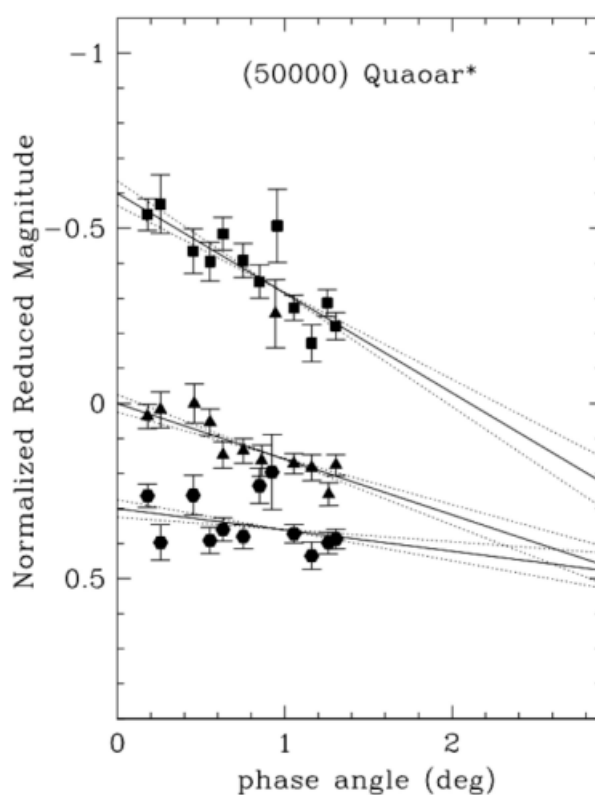


Рис.9. Нормована залежність приведеної величини від фазового кута у фільтрах Johnson-Cousins B (шестикутники), V (трикутники) та I (квадрати) для об'єкта (50000) Quaoar [25].

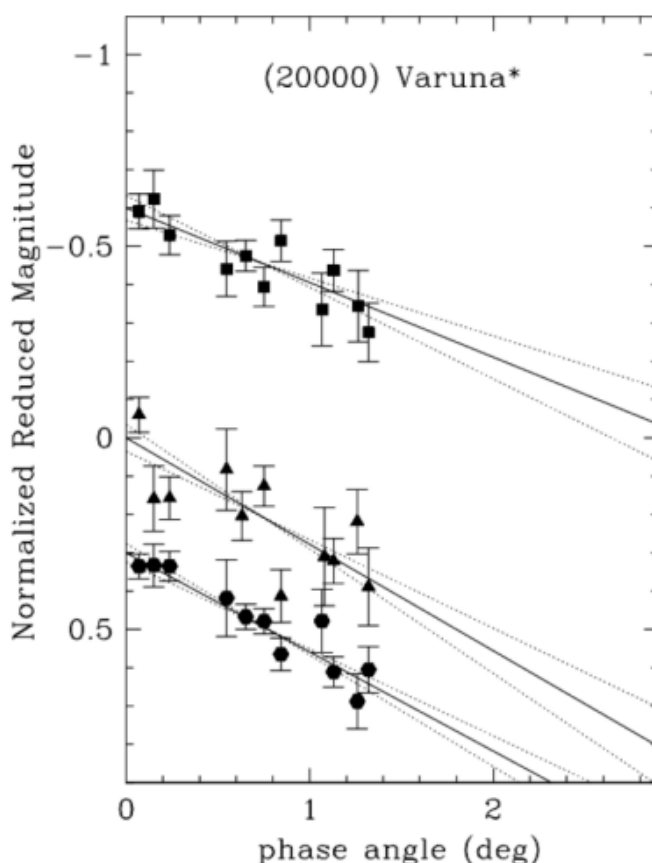


Рис.10. Нормована залежність приведенної величини від фазового кута у фільтрах Johnson-Cousins B (шестикутники), V (трикутники) та I (квадрати) для об'єкта (20000) Varuna [25].

На Рис.9 та Рис.10 для кожного фільтра кожного об'єкта наведено окрему фазову криву і окрему лінійну підгонку, яку показано суцільними лініями, а штриховими лініями показано діапазони невизначеностей. Для кращого візуального порівняння різних фазових кривих у [25] нормалізували дані, так щоб $B_0 = -0.3$, $V_0 = 0.0$ та $I_0 = 0.6$ mag для всіх ТНО.

З Рис.9 та Рис.10 можна зробити висновок, що у різних фільтрах отримаємо різні значення фазової залежності.

З бази даних «ALCDEF» були взяті значення фазової функції, які були отримані наземними спостереженнями та за спільними результатами космічних телескопів «Herschel and Spitzer observations» [25, 26].

«Herschel» та «Spitzer» - це назви космічних телескопів, які були використані для проведення спостережень у інфрачервоному діапазоні електромагнітного спектра [27, 28].

«Herschel Space Observatory» був запущений Європейським космічним агентством (ЄКА) в 2009 році. Цей інфрачервоний телескоп, який дозволяв проводити детальні спостереження в довгохвильовому і середньохвильовому інфрачервоному діапазоні (55 – 672 мкм). Завдяки здатності телескопа виявляти випромінювання в далекому інфрачервоному діапазоні та субміліметрових довжинах хвиль, можна була спостерігати затемнені пилом і холодні об'єкти, невидимі для інших телескопів. Він зосереджувався на дослідженні газу та пилу в космосі, формуванні та еволюції зір, галактик та інших астрономічних об'єктів [27].

«Spitzer Space Telescope» був третім космічним телескопом, присвяченим інфрачервоній астрономії, запущеним NASA в 2003 році. Це був перший космічний апарат, який використовував орбіту, що слідує за Землею. Телескоп був орієнтований на спостереження у всіх частотних діапазонах інфрачервоного випромінювання (3.6 – 160 мкм). Він був оснащений високочутливими інфрачервоними детекторами і використовувався для вивчення галактик, зіркових систем, екзопланет, малих тіл Сонячної системи, а також досліджень у космології [28].

За даними спостережень наземних і космічних телескопів ми побудували і отримали залежність від абсолютної величини, яку представлено на Рис.11.

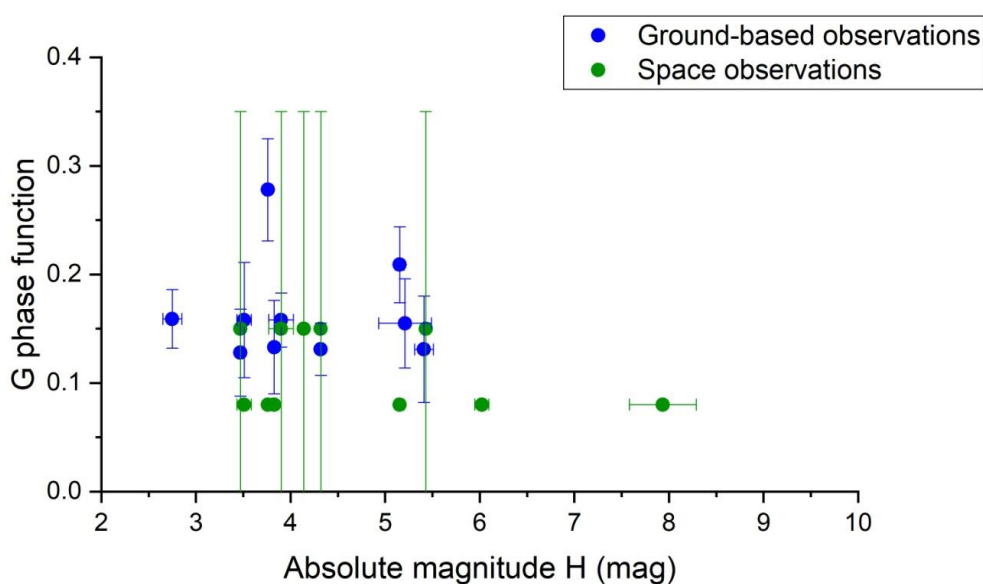


Рис.11. Залежність фазової функції від абсолютної величини [14].

При побудові залежності (Рис.11) значення фазової функції $G = 0.12$ не використовувалось, оскільки вона передбачається для більшості астероїдів поясу Койпера, як стандартне значення.

Також важливим було отримати середнє значення для фазової функції з наземних спостережень та зі спостережень «Herschel and Spitzer observations» для об'єктів «гарячої» популяції, яка дорівнює $\bar{G} = 0.137 \pm 0.048$. При майбутніх дослідженнях за середнім значенням фазової функції можна буде визначити відноситься об'єкт до «гарячої» популяції або ні.

Крім цього, для об'єктів «гарячої» популяції мною було визначено середнє значення геометричного альбедо, яке дорівнює $\bar{p} = 0.104 \pm 0.054$. З цього можна зробити висновок, що об'єкти «гарячої» популяції низькоальбедні.

РЕЗУЛЬТАТИ РОБОТИ ТА ВИСНОВКИ

Робота присвячена дослідженню фізичних властивостей об'єктів «гарячої» популяції у поясі Койпера.

Були отримані наступні результати:

1. Із статей [3, 11, 12] мною були підсумовані дані про орбіти «гарячої» популяції: нахил орбіти $i > 4^\circ$ та може досягати значень до 30° - 40° ; велика піввісь в межах $39.4 \text{ а.о.} \leq a \leq 55.8 \text{ а.о.}$

2. Було отримано обертальний розподіл об'єктів «гарячої» популяції. За обертальним розподілом, об'єкти знаходяться в області ТНО і не перевищують спін-бар'єр (~ 2.2 год).

3. Мною було перераховані значення альbedo для об'єктів «гарячої» популяції: 1999 KR16, Varuna, Quaoar. Значення абсолютної величини для об'єктів: 1993 SC, 1996 TO66, 1999 KR16, 2002 TX300, Varuna, Quaoar. Уточнено значення діаметра для об'єктів: 1993 SC, 1996 TO66, 1999 KR16, 2002 TX300.

4. Мною було побудовано графіки залежностей діаметру від абсолютної величини, альbedo від абсолютної величини, фазової функції від абсолютної величини.

5. Визначене мною середнє значення фазової функції для об'єктів «гарячої» популяції за наземними та космічними спостереженнями «Herschel and Spitzer observations», дорівнює $\bar{G} = 0.137 \pm 0.048$.

6. Визначене мною середнє значення альbedo для об'єктів «гарячої» популяції, яке дорівнює $\bar{p} = 0.104 \pm 0.054$.

З наведених результатів можна зробити висновок, що орбіти об'єктів «гарячої» популяції мають високий ексцентриситет і нахилені відносно площини Сонячної системи. Значна кількість об'єктів знаходиться в орбітальному резонансі з Нептуном 2:3 (орбіти астероїдів до орбіти Нептуна) і зазнає гравітаційного впливу від планети-гіганта. За моїми

результатами опрацювання баз даних, можна зробити висновок, що об'єкти, які я вивчаю низькоальбедні.

Результати зазначених досліджень доповідалися на конференції «Gamow International Conference» [29] та були опубліковані у журналі «Odessa Astronomical Publications» [14].

Отримані уточнені фізичні параметри даних об'єктів «гарячої» популяції будуть використані в подальших роботах. Таких як, чисельне моделювання, наприкладі, описаному у статтях [30, 31], орбіт на 4 млрд. років та порівняння фізичних властивостей «гарячої» популяції ТНО зі схожою за фізичними властивостями групою троянських астероїдів Юпітера. Це має підтвердити теорію міграції «гарячої» популяції з області орбіти Нептуна, описаної у [3, 9, 10].

Охотко Г.К

(Підпис автора роботи)

СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. <https://www.minorplanetcenter.net/about>
2. <https://alcddef.org/index.php>
3. Levison H.F., Morbidelli A., VanLaerhoven C. Origin of the structure of the Kuiper belt during a dynamical instability in the orbits of Uranus and Neptune. // *Icarus*. – 2008. – Vol. 196. – P. 258-273.
4. Pollack, J.B., Hubickyj, O., Bodenheimer, P. et al. Formation of the giant planets by concurrent accretion of solids and gas. // *Icarus*. – 1996. – Vol. 124. – P. 62-85.
5. Lubow S.H., Seibert M., Artymowicz P. Disk accretion onto high-mass planets. // *The Astrophysical Journal*. – 1999. - Vol. 526. – P. 1001-1012.
6. Gomes R.S., Morbidelli A., Levison H.F. Planetary migration in a planetesimal disk: Why did Neptune stop at 30 AU? // *Icarus*. – 2004. – Vol. 170. – P. 492-507.
7. Tsiganis K., Gomes R., Morbidelli A. et al. Origin of the orbital architecture of the giant planets of the Solar System. // *Nature*. – 2005. – Vol. 435. – P. 459-461.
8. Gomes R., Levison H.F., Tsiganis K., et al. Origin of the cataclysmic Late Heavy Bombardment period of the terrestrial planets. // *Nature*. – 2005. – Vol. 435. – P. 466-469.
9. DeMeo F. E., Carry B. Solar System evolution from compositionalmapping of the asteroid belt. // *Nature*. – 2014. – Vol. 505. – P. 629-634.
10. Levison H.F., Marchi S., Noll K. et al. NASA's Lucy Mission to the Trojan Asteroids // *IEEE Aerospace Conference (50100)*. – 2021. – P. 1-10.
11. Morbidelli A. Origin and dynamical evolution of comets and their reservoirs // *Lectures on comets dynamics and outer solar system formation*. – 2008. – 86 p.

12. Delsanti A., Jewitt D. The Solar System Beyond The Planets // Springer. – 2006. – P. 267-294.
13. Hermann Boehnhardt Max-Planck Institute for Solar System Research // Conference. – Katlenburg-Lindau/Germany, 2007.
14. Okhotko H., Troianskyi V., Bazyey O. Physical properties of “hot population” objects in the Kuiper belt // Odessa Astronomical Publications. – 2022. – vol. 35. – P. 74-76.
15. Levison H.F., Stern S.A. On the size dependence of the inclination distribution of the main Kuiper belt // The Astronomical Journal. – 2001. – Vol. 121. – P. 1730-1735.
16. Nesvorny D., Vokrouhlicky D., Alexandersen M. et al. OSSOS XX: The Meaning of Kuiper Belt Colors // The Astronomical Journal. – 2020 – Vol. 160. No. 1 – 46.
17. Астрономічний енциклопедичний словник / За заг. ред. Климишина І. А., Корсунь А. О. – Львів : Голов. астроном. обсерваторія НАН України : Львів. нац. ун-т ім. Івана Франка. – 2003. – С. 215.
18. https://alcdef.org/php/alcdef_aboutLightcurves.html
19. Tedesco E. F., Noah P. N., Noah M., et al. The Supplemental IRAS Minor Planet Survey // The Astronomical Journal. – 2002 – Vol. 123. No. 2 – 1056-1085 p.
20. Luciuk, M. Astronomical Magnitudes. // 2019. – 8 p.
21. Morgado B.E., Bruno G., Gomes-Junior A.R. et al. A stellar occultation by the transneptunian object (50000) Quaoar observed by CHEOPS. // Astronomy & Astrophysics. – 2022. – Vol. 664, No. 15. – P. 1-9.
22. Gehrels, T. Photometric Studies of Asteroids. V: The Light-Curve and Phase Function of 20 Massalia. // Astrophysical Journal. – 1956. – Vol. 195. – P. 331-338.
23. Shevchenko V.G., Belskaya I.N., Muinonen K., et al. Asteroid observations at low phase angles. IV. Average parameters for the new H,

- G_1 , G_2 magnitude system // Planetary and Space Science. – 2016. – Vol. 123. – P. 101-116.
24. Wilawer E., Oszkiewicz D., Kryszczyńska A., et al. Asteroid phase curves using sparse Gaia DR₂ data and differential dense light curves. // Monthly Notices of the Royal Astronomical Society. – 2022. – Vol. 513. – P. 3242-3251.
 25. Rabinowitz D.L., Schaefer B.E., Tourtellotte S.W. The diverse Solar phase curves of distant icy bodies. Photometric observations of 18 trans-neptunian objects, 7 centaurs, and nereid. // The Astronomical Journal. – 2007. – Vol. 133. – P. 26-43.
 26. Lellouch, E., Santos-Sanz, P., Lacerda, P. et al. "TNOs are Cool": A survey of the trans-Neptunian region. IX. Thermal properties of Kuiper belt objects and Centaurs from combined Herschel and Spitzer observations. // Astronomy & Astrophysics. – 2013. – Vol. 557. A60 – 19 p.
 27. <https://www.herschel.caltech.edu/>
 28. <https://www.spitzer.caltech.edu/mission/mission-overview>
 29. Gamow International Conference, August 2022.
 30. Troianskyi V., Bazyey O. Numerical simulation of asteroid system dynamics. // Contributions of the Astronomical Observatory Skalnaté Pleso. – 2018. – Vol. 48. No. 2. – P. 356-380.
 31. Troianskyi V., Kankiewicz P., Oszkiewicz D. Dynamical evolution of basaltic asteroids outside the Vesta family in the inner main belt. // Astronomy & Astrophysics. – 2023. – Vol. 672. No. A97. – 9 p.