

Міністерство освіти і науки України  
Департамент науки і освіти Харківської обласної державної адміністрації  
Комунальний заклад «Харківська обласна Мала академія наук  
Харківської обласної ради»

Відділення фізики і астрономії  
Секція: аерофізика та космічні дослідження

ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРОЯНЦІВ ЮПІТЕРА – ЦІЛЕЙ МІСІЇ LUCY ЗА  
ДАНИМИ КОСМІЧНОГО ТЕЛЕСКОПА JAMES WEBB

Роботу виконав:

Трофімов Оскар Олексійович, учень 9 класу  
Комунального закладу «Харківський науковий  
ліцей “Обдарованість”» Харківської обласної  
ради, вихованець Комунального закладу  
«Харківська обласна Мала академія наук  
Харківської обласної ради»

Наукові керівники:

Слюсарев Іван Григорович, доцент кафедри  
астрономії та космічної інформатики фізичного  
факультету Харківського національного  
університету імені В. Н. Каразіна; кандидат  
фізико-математичних наук;

Петренко Ірина Олександрівна, вчитель фізики  
Комунального закладу «Харківський науковий  
ліцей “Обдарованість”» Харківської обласної  
ради, спеціаліст вищої категорії, вчитель-  
методист

Харків – 2024

## ФІЗИЧНІ ВЛАСТИВОСТІ ТРОЯНЦІВ ЮПІТЕРА – ЦІЛЕЙ МІСІЇ LUCY ЗА ДАНИМИ КОСМІЧНОГО ТЕЛЕСКОПА JAMES WEBB

Трофімов Оскар Олексійович; Харківське територіальне відділення МАН України, Комунальний заклад «Харківська обласна Мала академія наук Харківської обласної ради», Комунальний заклад «Харківський науковий ліцей “Обдарованість”» Харківської обласної ради, 9 клас, м. Харків;

Слюсарев Іван Григорович, доцент кафедри астрономії та космічної інформатики фізичного факультету Харківського національного університету імені В.Н. Каразіна, кандидат фізико-математичних наук;

Петренко Ірина Олександрівна, вчитель фізики Комунального закладу «Харківський науковий ліцей “Обдарованість”» Харківської обласної ради, спеціаліст вищої категорії, вчитель-методист.

Мета роботи: порівняння інфрачервоних спектрів троянців – цілей місії Люсі, отриманих різними інструментами.

Актуальність роботи: Спостереження нового космічного телескопа Джеймса Уебба дозволили на недосяжному раніше рівні точності отримати ІЧ спектри троянців – цілей місії Люсі. Проаналізувавши ці дані стало можливим вперше побачити лінії поглинання, які раніше не фіксувалися для тіл D-типу, до яких відносяться більшість троянців. Така інформація може допомогти нам у розумінні ранніх етапів формування Сонячної системи, коли, як вважається, троянці були захоплені на сучасні орбіти із транснептунового регіону.

Об’єкт дослідження: астероїди-троянці, цілі місії NASA Люсі.

Предмет дослідження: ІЧ спектри астероїдів-троянців Юпітера, що є цілями місії NASA Люсі.

У результаті роботи побудовано спектри троянців та виконано порівняння особливостей спектрів троянців з іншими групами малих тіл Сонячної системи наближає нас до кращого розуміння Сонячної системи в цілому.

Завдання: знайти ІЧ спектри троянців та інших малих тіл Сонячної системи, після чого їх порівняти.

**Ключові слова:** троянці, ІЧ спектри, космічний телескоп Джеймса Уебба, космічна місія NASA Люсі.

## ЗМІСТ

ВСТУП .....	4
РОЗДІЛ 1. МЕТОДИ ОТРИМАННЯ І АНАЛІЗУ ДАНИХ .....	7
1.1. Прилади космічного телескопа Джеймса Уебба та космічного апарата Люсі .....	7
1.2. Методи розрахунку температури астероїдів .....	11
1.3. Спостереження ІЧ-спектрів на JWST .....	14
1.4. Метод аналізу отриманих даних .....	15
РОЗДІЛ 2. ПОРІВНЯННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОГЛИНАННЯ ТРОЯНЦІВ ТА ІНШИХ МАЛИХ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ .....	17
2.1. Аналіз діапазону 1,7 – 5,3 мкм .....	17
2.2. Порівняння Патрокла з астероїдами головного поясу в діапазоні 0,8 – 2,5 мкм .....	19
2.3. Порівняння особливостей поглинання троянців з астероїдами головного поясу в діапазоні 2,2 – 3,6 мкм .....	21
2.4. Порівняння троянців з кентавром Харікло .....	23
РОЗДІЛ 3. МІСІЯ ЛЮСІ .....	25
3.1. План польоту місії Люсі .....	25
3.2. Перспективи місії Люсі .....	28
ВИСНОВКИ .....	30
СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ .....	31

## ВСТУП

На початку дев'яностих років ХХ сторіччя стався прорив у розумінні Сонячної системи. Було відкрито цілий клас об'єктів – об'єкти поясу Койпера. Після цього прийшлося переглядати уявлення про динаміку газових гігантів Сонячної системи, з урахуванням того, що є повноцінний пояс астероїдів за орбітою Нептуна. Також було відкрито існування екзопланет та протопланетний дисків у інших зір. Різні зорі знаходяться на різних етапах своєї еволюції, і спостерігаючи за цим, стає можливим припускати і можливі варіанти еволюцію нашої планетарної системи.

У рамках моделей еволюції з міграцією було визначено, що джерелом походження троянців Юпітера є транснептунові тіла. Конкретно дана робота присвячена цілям місії Люсі, які відносяться саме до троянських астероїдів (якщо не вважати астероїди Дінкінеш та Дональдджохансон, які космічний апарат буде пролітати). Троянськими астероїдами Юпітера називають астероїди, розташовані в точках Лагранжа L4 та L5 системи Юпітер-Сонце.

Модель Ніцци, є сукупністю можливих динамічних схем еволюції тіл Сонячної системи, яка була створена, щоб пояснити би існуючу динамічну архітектуру Сонячної системи. Модель Ніцци була розроблена у 2005 році, однак перший варіант її був відкинутий. Зараз під цим терміном розуміють сукупність підходів до моделювання ранньої орбітальної еволюції планет та астероїдів із їх взаємною взаємодією. Виходячи з цієї концепції, раніше за орбітами Урана та Нептуна знаходився пояс планетезималей, припливна взаємодія із яким призвела до міграції газових гігантів назовні і частину планетезималей було вкинуто у внутрішню частину Сонячної системи.

Відповідно до такого погляду на походження троянців вони повинні мати значну долю летких компонентів, бо вони сформувалися у зовнішній частині протопланетного диску (за відстанями у 15 а.о.), Троянські астероїди Юпітера мають низьке альbedo, що може свідчити про наявність органічних речовин. У даній роботі буде проаналізовано спектри троянців в ІЧ діапазоні.

16 жовтня 2021-го року було розпочато місію Люсі. Вона проводиться для докладного дослідження троянських астероїдів Юпітера, до яких ще не відправляли космічні апарати. Траєкторія Люсі пролягає повз такі об'єкти як Еврібат і його супутник Квета, Полімела, Левкус, Орус та подвійну систему Патрокл-Менетій. Ці троянські астероїди Юпітера мають різноманітні параметри (табл.1), що дасть змогу об'єктивно зрозуміти сутність даної групи астероїдів.

Еврібат має особливість того, що належить до сімейства астероїдів (чого ще не спостерігалось для троянців), а також до спектрального класу С, більш характерного для головного поясу астероїдів, та має невеликий супутник Квета. Полімела має найменший діаметр серед цілей Люсі та належить типу Р. Левкус має найповільніший період обертання (близько 466 годин) та має високу амплітуду кривої блиску, що свідчить про неправильну форму об'єкта. Орус – класичний представник спектрального класу D, але в плані діаметра та характеристик орбіти подібний до Еврібата. А подвійна система Патрокл-Менетій має середні спектральні показники відносно Еврібата та Оруса. Також ця подвійна система має достатньо великі нахил орбіти та діаметр.

*Таблиця 1*

Характеристика цілей місії Люсі.

Об'єкт	Діаметр, км	Альbedo	Таксономія (Bus)	Таксономія (Толен)	Велика піввісь, а. о.
Еврібат	63.9	0.052±0.007	Немає даних	C	≈5,2
Полімель	21,10	0.091±0.017	Немає даних	P	≈5.18
Левкус	34.1	0.079±0.013	Немає даних	D	≈5,3
Орус	50.8	0.075±0.014	Немає даних	D	≈5,32
Патрокл	140.4	0.0471±0.003	Немає даних	P	≈5,23

Більшість троянців належать до спектральних класів Р і D, які іноді зустрічаються серед астероїдів головного поясу, але частіше вони трапляються за орбітою Юпітера. Спектральна група С також зустрічається серед троянців, яка вже навпаки – більш характерна для астероїдів головного поясу ніж до кентаврів та ТНО (транснептунових об'єктів).

Відносно нещодавно троянці Юпітера стали предметом досліджень телескопа Джеймса Уебба, запущеного в 2021-му році, і завдяки його роботі були отримані достатньо високоточні графіки поглинання електромагнітних хвиль троянців – цілей місії Люсі в діапазоні 1.7 – 5.3 мкм.

Після роботи Люсі можна буде підтвердити, спростувати або доповнити концепцію моделі Ніцци, але телескоп Джеймса Уебба вже надав нам певні дані, на ґрунті яких можна робити певні висновки. Докладна інформація щодо фізичних властивостей та хімічного складу троянців Юпітера може ввести певні обмеження щодо моделі динамічної еволюції Сонячної системи. Саме про спектральні дослідження Джеймса Уебба та можливі результати місії Люсі буде йтися в даній роботі.

Актуальність роботи: спостереження нового космічного телескопа Джеймса Уебба дозволили на недосяжному раніше рівні точності отримати ІЧ спектри троянців – цілей місії Люсі, та виявити лінії поглинання, які раніше не фіксувалися для тіл D-типу, до яких відноситься більшість троянців. Це відкриття може допомогти нам у розумінні ранніх етапів формування Сонячної системи, коли, як вважається, троянці були захоплені на сучасні орбіти із транснептунового регіону.

**Мета дослідження:** порівняти інфрачервоні спектри троянців – цілей місії Люсі та інших малих тіл Сонячної системи.

**Завдання:** знайти ІЧ спектри троянців та інших малих тіл Сонячної системи. Після цього проаналізувати та порівняти їх. На основі порівняння сформулювати висновки про відмінні риси троянських астероїдів Юпітера.

**Об'єкт дослідження:** астероїди-троянці, цілі місії NASA Люсі.

**Предмет дослідження:** ІЧ спектри астероїдів-троянців Юпітера, що є цілями місії NASA Люсі.

**Методи дослідження:** аналіз наукової літератури, використання каталогів спектрів, дослідження принципу порівняння спектрів малих тіл.

## РОЗДІЛ 1

### МЕТОДИ ОТРИМАННЯ І АНАЛІЗУ ДАНИХ

#### 1.1. Прилади космічного телескопа Джеймса Уебба та космічного апарата Люсі

Джеймс Уебб (Рис. 1.1) є найпотужнішим космічним телескопом, який працює в інфрачервоному діапазоні і спеціалізується не лише на астероїдах, а й на зорях, протопланетних дисках, галактиках, туманностях та на дослідженні історії еволюції Всесвіту.

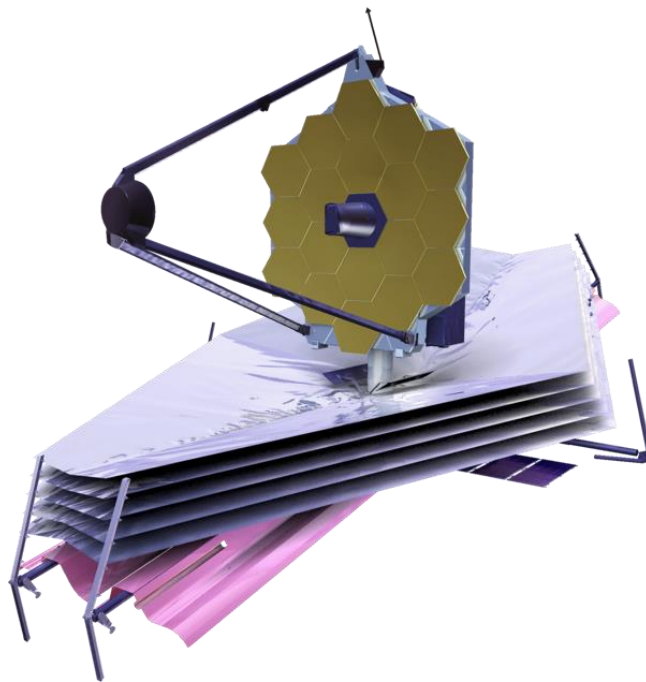


Рис. 1.1 Космічний телескоп імені Джеймса Уебба [10]

Джеймс Уебб оснащений такими приладами:

1. NIRSpec – спектрограф ближнього інфрачервоного діапазону. Проводить спостереження потоку електромагнітних хвиль у діапазоні 0,6 – 5 мкм. У даній роботі буде проаналізовано саме спостереження цього приладу. (Рис. 1.2).

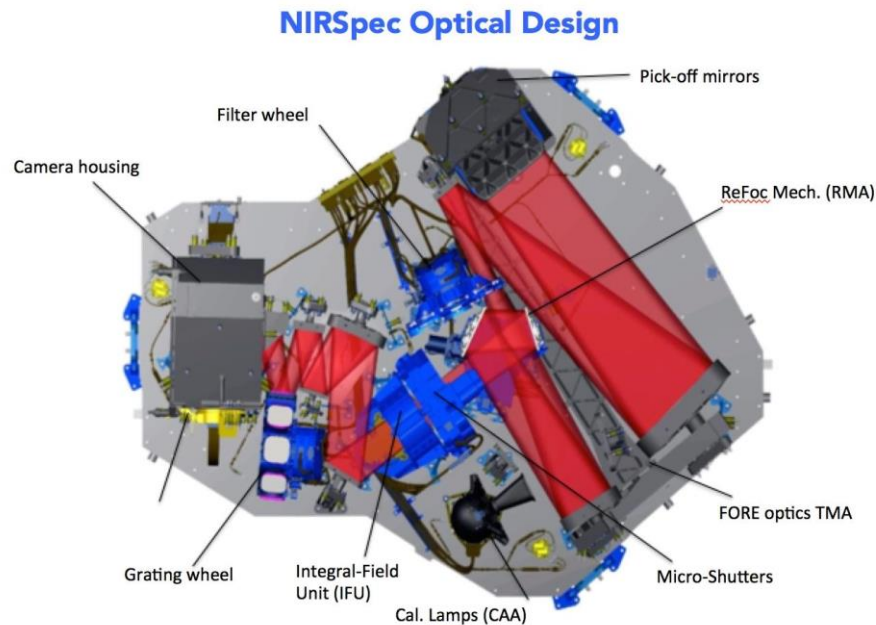


Рис. 1.2 NIRSpec, спектрограф космічного телескопа Джеймса Уебба [9]

2. NIRCam – камера ближнього інфрачервоного діапазону. Є основним блоком формування зображення Джеймса Уебба. Завдяки цьому приладу можна спостерігати об’єкти спостереження упродовж певного часу. Це дає можливість розраховувати червоне зміщення об’єктів за межами Сонячної системи та виявляти системи кілець об’єктів Сонячної системи [3].

3. MIRI – прилад середнього інфрачервоного діапазону. Прилад складається з камери з датчиком з роздільною здатністю  $1024 \times 1024$  пікселя та спектрографа. Даний прилад проводить спостереження в діапазоні 5-24 мкм.

4. FGS/NIRISS – датчик точного наведення з пристроєм формування зображення у ближньому інфрачервоному діапазоні та без щілинним спектрографом. Камера FGS може робити зображення  $2,4 \times 2,4$  кутової хвилини, чого достатньо для виявлення зірки для орієнтування з 95% ймовірності. Після цього телескоп зможе обернутися для детального спостереження цілей своїми приладами.

Обладнання космічного апарата Люсі розраховано на виконання детального спостереження близьких об’єктів. Прилади спостереження розміщені на платформі IPP.



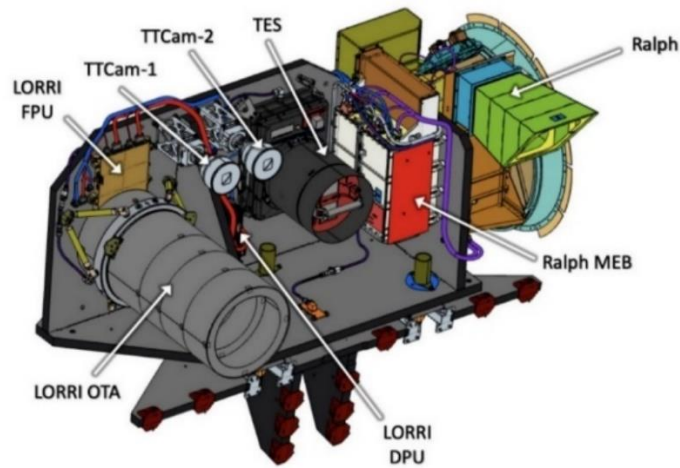


Рис. 1.3 Платформа направлення приладів Люсі (IPP) [2]

Космічний апарат Люсі має такі прилади:

1. L'LORRI – панхроматична камера Люсі. Проводить зйомку з роздільною здатністю 4.5 м/пікс, що дасть нам змогу отримувати чорно-білі зображення з гарною деталізацією. Вона буде використовуватися для виявлення супутників, дослідження поширеності кратерів та для оптичної навігації. Кожен піксель займає відстань 5 мкрад. Діаметр оптичного дзеркала: 20.8 см. Фокусна відстань: 262 см. Детектор: 1024×1024.

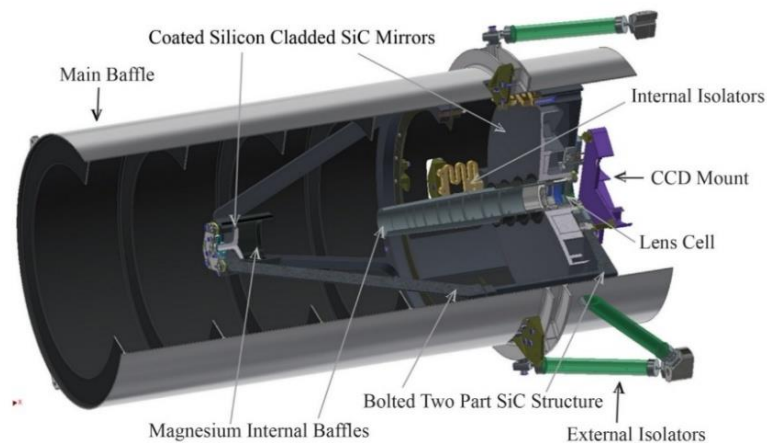


Рис. 1.4 L'LORRI - панхроматична камера Люсі [2]

2. L'Ralph – кольорова камера Люсі. Проводить зйомку з роздільною здатністю 15 м/пікс, що втричі менше ніж в L'LORRI, але кольорові зображення можуть нам допомогти знаходити ділянки з відмінним хімічним складом. Якщо на

цілях місії Люсі є ароматичні вуглеводні, то цей прилад зможе їх виявити. Прилад фактично є сукупністю MVIC та LEISA, які не вийде використовувати одночасно. (Рис. 1.5)

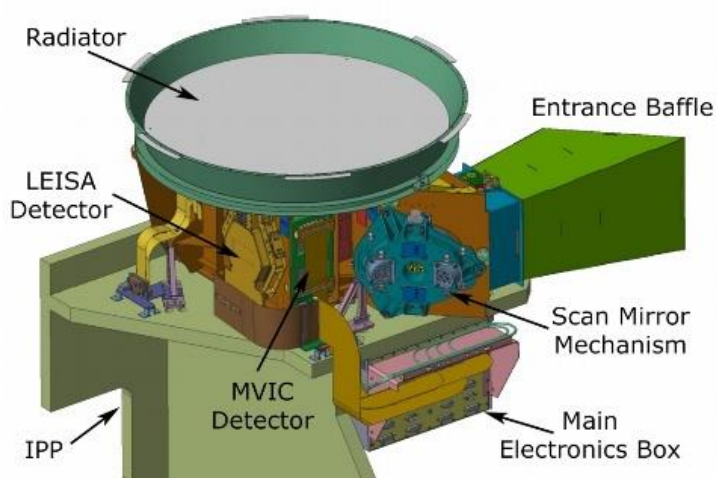


Рис. 1.5 L'Ralph - кольорова камера Люсі [2]

3. L'TES – спектрометр теплового випромінювання. Прилад працює у діапазоні 6 – 75 мкм. Для тіл з температурою  $>75$  К має похибку не більше 2 К. Цей пристрій зможе визначити теплову інерцію поверхні. Переважно буде використовуватися для визначення властивостей реголіту. Конкретно даний прилад починає працювати за день до максимального наближення. Даний прилад має лише один режим роботи: збирання інтерферограм за певної інтенсивності (0.5, 1 або 2 секунди). (Рис. 1.6).

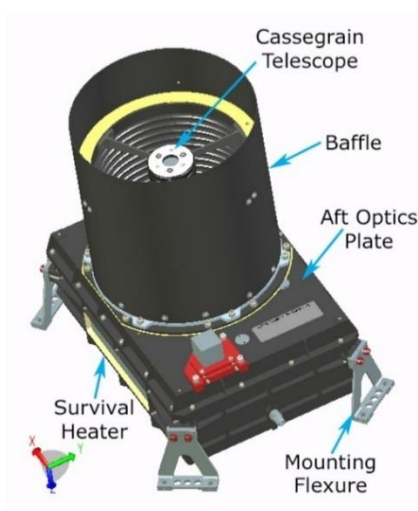


Рис. 1.6 L'TES спектрометр теплового випромінювання Люсі [2]

4. TTCam – дві камери термінального відстеження, які забезпечують навігацію до цільових об'єктів. Кут огляду:  $11^{\circ} \times 8,2^{\circ}$ . Цього кута огляду достатньо для того, щоб знімати всю освітлену частину цілі протягом польоту, чого не може L'LORRI. Цей прилад зможе робити зображення форми астероїдів. Вона буде збирати монохромні зображення в діапазоні 475-625 нм. Фокусна відстань: 29,7 мм. Датчик – монохромний пристрій з затвором, що прокручується, з активними пікселями  $2592 \times 1944$  (якщо вважати ще масковані темні пікселі –  $2759 \times 2004$ ). Кожен піксель має площу 72,1 мкрад. Основний режим роботи: отримання калібрувальних зображень з активними та маскованими темними пікселями у польоті (Рис. 1.7).

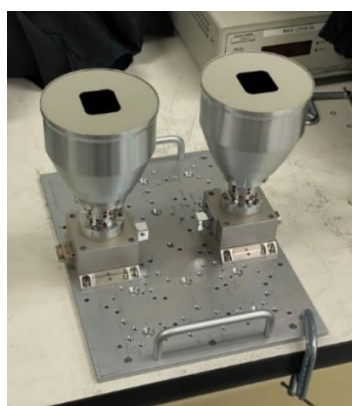


Рис. 1.7 TTCam - – дві камери термінального відстеження [2]

## 1.2. Методи розрахунку температури астероїдів

На довжинах хвиль 10 мкм та 20 мкм земна атмосфера прозора до ІЧ випромінювання. Тому ці вікна прозорості із 1960-х років використовуються для проведення наземних ІЧ спостережень астероїдів.

Якщо виміряно потік на довжинах хвиль 10 мкм та 20 мкм, то використовуючи просте співвідношення можна отримати температуру астероїда:

$$\frac{F_{10}}{F_{20}} = \frac{\pi B(\lambda_{10}, T)}{\pi B(\lambda_{20}, T)} \quad (1.1)$$

Де  $\pi B(\lambda, T)$  – функція Планка,  $F_{10}$  – електромагнітний потік на 10 мкм,  $F_{20}$  – електромагнітний потік на 20 мкм,  $\lambda_{10}$  – довжина хвилі, яка становить 10 мкм,  $\lambda_{20}$  – довжина хвилі, яка становить 20 мкм,  $T$  – температура абсолютно чорного.

Формула Планка (залежність потоку випромінювання від довжини хвилі та температури):

$$\pi B(\lambda, T) = \frac{2\pi c^2 h}{\lambda^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda kT}} - 1} \quad (1.2)$$

Підставимо (1.2) до (1.1)

$$\frac{F_{10}}{F_{20}} = \frac{\frac{2\pi c^2 h}{\lambda_{10}^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda_{10} kT}} - 1}}{\frac{2\pi c^2 h}{\lambda_{20}^5} \frac{1}{e^{\frac{hc}{\lambda_{20} kT}} - 1}},$$

$$\frac{F_{10}}{F_{20}} \left(\frac{\lambda_{10}}{\lambda_{20}}\right)^5 = \frac{e^{\frac{hc}{\lambda_{20} kT}} - 1}{e^{\frac{hc}{\lambda_{10} kT}} - 1} \quad (1.3)$$

Використаємо відомі дані, що  $\lambda_{10} = 10$  мкм,  $\lambda_{20} = 20$  мкм, виконаємо заміну  $\lambda_{10} = \frac{1}{2}\lambda_{20}$  до (1.3)

$$\frac{F_{10}}{F_{20}} \left(\frac{1}{2}\right)^5 = \frac{e^{\frac{hc}{\lambda_{20} kT}} - 1}{\left(\frac{e^{\frac{hc}{\lambda_{20} kT}}}{2}\right)^2 - 1} = \frac{1}{\left(e^{\frac{hc}{\lambda_{20} kT}} + 1\right)};$$

$$e^{\frac{hc}{\lambda_{20} kT}} = \frac{F_{20}}{F_{10}} \left(\frac{2}{1}\right)^5 - 1 \quad (1.4)$$

Прологарифмуємо (1.4) та виразимо  $T$ .

$$\frac{hc}{\lambda_{20}kT} = \ln \left( \frac{F_{20}}{F_{10}} \cdot \left( \frac{2}{1} \right)^5 - 1 \right);$$

$$T = \frac{hc}{\lambda_{20} \cdot k \cdot \ln \left( 32 \cdot \frac{F_{20}}{F_{10}} - 1 \right)} \quad (1.5)$$

Розглянемо загальний випадок, перепишемо (1.3) з іншими позначеннями – відповідно з індексами 1 та 2. Для наступних перетворень будемо вважати, що  $\lambda_1 > \lambda_2$ .

$$\frac{F_1(\lambda_1)^5}{F_2(\lambda_2)^5} = \frac{e^{\frac{hc}{\lambda_2 kT}} - 1}{e^{\frac{hc}{\lambda_1 kT}} - 1} \quad (1.7)$$

Вважаємо, що  $e^{\frac{hc}{\lambda kT}} \gg 1$  (бо ми розглядаємо інфрачервоний діапазон), доданком (-1) нехтуємо, тоді маємо:

$$\frac{F_1(\lambda_1)^5}{F_2(\lambda_2)^5} = \frac{e^{\frac{hc}{\lambda_2 kT}}}{e^{\frac{hc}{\lambda_1 kT}}} ; \quad (1.8)$$

$$\frac{F_1(\lambda_1)^5}{F_2(\lambda_2)^5} = \exp \left( \frac{hc}{\lambda_2 kT} - \frac{hc}{\lambda_1 kT} \right) ;$$

$$\exp \left( \frac{hc(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2 kT} \right) = \frac{F_1(\lambda_1)^5}{F_2(\lambda_2)^5} ;$$

$$\frac{hc(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2 kT} = \ln \left( \frac{F_1(\lambda_1)^5}{F_2(\lambda_2)^5} \right) ;$$

$$T = \frac{(\lambda_1 - \lambda_2)}{\lambda_1 \lambda_2} \cdot \frac{hc}{k} \frac{1}{\ln \left( \frac{F_1(\lambda_1)^5}{F_2(\lambda_2)^5} \right)} \quad (1.9)$$

Завдяки цим перетворенням ми виразили  $T$ . При наявності даних спостережень можна знайти температуру абсолютно чорного тіла з випромінюванням, подібним до об'єкту спостережень. Далі, маючи ці дані, можна відняти випромінення Сонця та інструмента спостереження від загальних спостережень і отримати потрібний нам спектр – власний спектр цільового об'єкта.

### 1.3. Спостереження ІЧ-спектрів на JWST

Наступна методика отримання спектрів космічним телескопом Джеймсом Уеббом описана за матеріалами статті [1].

Телескоп JWST (Джеймс Уебб) провів спостереження у ближньому інфрачервоному діапазоні п'яти троянських об'єктів – цілей місії Люсі за допомогою приладу ближнього інфрачервоного діапазону NIRSpec у рамках Програми загальних спостережень циклу 1 під номером 2574 під керівництвом M. Brown. Стратегія включала в себе експозиції з решітками G395M і C235M, охоплюючи діапазон довжин хвиль від 1,7 до 5,3 мкм. При аналізі отриманих даних для побудови спектрів було враховано власне теплове випромінення тіл. Кінцеві відбивні спектри, масштабовані між G235M та G395M, показали варіації видимого спектрального нахилу серед досліджених об'єктів. Застосовано корекції для систематичних зсувів потоку та артефактів за межами 5,0 мкм. Усереднені та кореговані від ІЧ випромінювання самого Джеймса Уебба і Сонця спектри представлені на правій частині Рис. 1.8. Невеликі коригування були внесені для більшості об'єктів, але для Оруса знадобилася більша корекція в розмірі  $\sim 2\%$  вниз, що було приписано систематичним зсувам потоку та вилученню однієї експозиції G235M через накладання фону зірки.

Різницю між спектрами з видаленням ІЧ випромінювання Сонця і самого космічного телескопа та без цього видалення показано на Рис. 1.8.

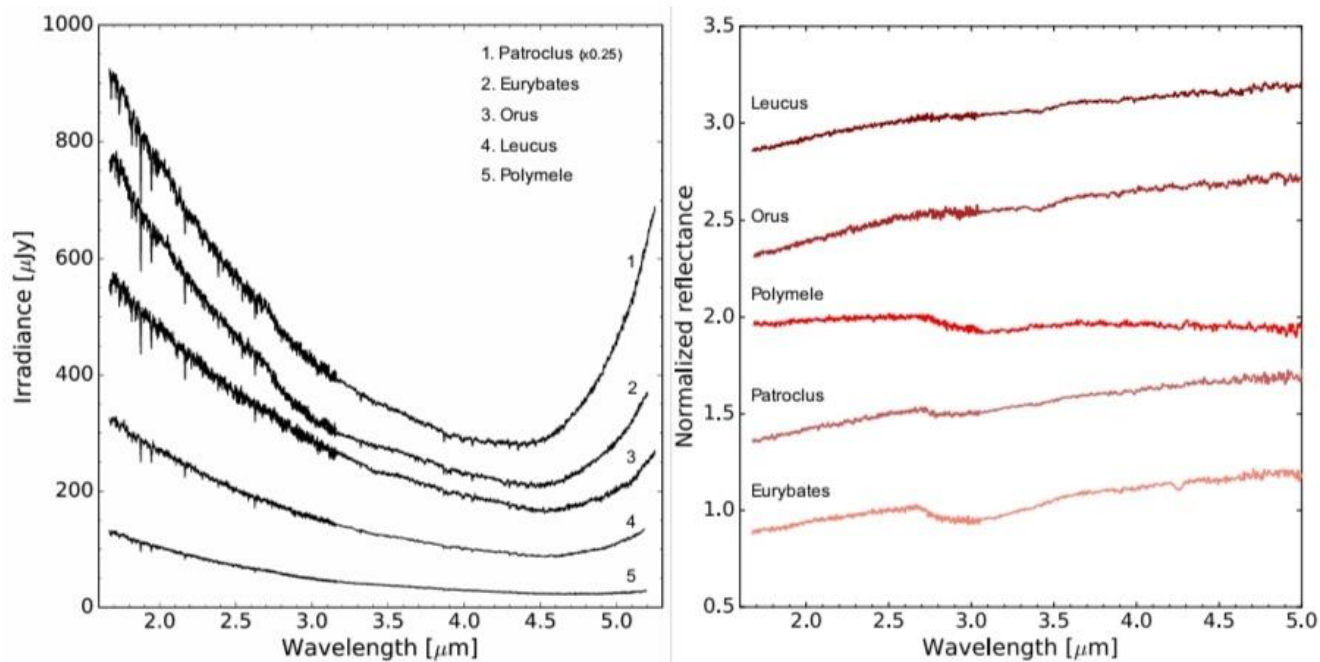


Рис. 1.8 Спектри поглинання без віднімання ІЧ випромінювання Сонця і самого Джеймса Уебба (зліва) і спектри після їх віднімання (справа) [1]

#### 1.4. Метод аналізу отриманих даних

Усе світло, яке потрапило на астероїд та не було розсіяне, було поглинуто. У різних хімічних елементів та сполук різне відносне поглинання, і завдяки цьому стає можливим припускати теорії щодо хімічному складу всіляких об'єктів. Найбільшою проблемою цього методу з визначення хімічного складу небесних тіл є те, що у світі існує безліч сполук, які мають деякі спільні та деякі різні риси поглинання, що робить неможливим робити однозначні висновки.

Виявлення спільних рис у спектрах небесних тіл може дати підстави припустити ймовірність їх спільного походження. Виходячи з сучасних уявлень про формування Сонячної системи, астероїди з відмінним хімічним складом формувалися на різних відстанях від Сонця. Тут знову постає проблема, але яка вже полягає в міграції астероїдів. Їх міграція «перетасовує» астероїди з різним хімічним складами, тим самим ускладнюючи задачу з виявлення зв'язку між спектром та походженням.

Існує проблема того, що є величезна кількість досліджених спектрів астероїдів у видимому діапазоні, але відносно небагато в інфрачервоному діапазоні. Це

викликано тим, що частіше за все докладне спостереження астероїдів проходить з обсерваторій, які знаходяться на Землі, а земна атмосфера блокує частину інфрачервоного випромінювання. Через це найбільш повноцінне дослідження інфрачервоного діапазону можна проводити завдяки потужним космічним телескопам, які працюють в інфрачервоному діапазоні.

У роботі будуть використовуватися спектри астероїдів з каталогів [6], [7], приведені до певного вигляду за допомогою програми Origin 2022.



## РОЗДІЛ 2

### ПОРІВНЯННЯ ОСОБЛИВОСТЕЙ ПОГЛИНАННЯ ТРОЯНЦІВ ТА ІНШИХ МАЛИХ ТІЛ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ

#### 2.1. Аналіз діапазону 1,7 – 5,3 мкм

Більшість троянських астероїдів належать до спектральних класів D, P і C. На Рис. 2.1 представлено залежність відносної відбивної здатності від довжини хвилі у діапазоні 2.55 – 3.8 мкм за даними JWST.

У троянців спектральних класів P і C можна чітко побачити широку смугу поглинання у районі 3 мкм, яка починається приблизно на довжині хвилі 2,7 мкм. Найбільш гарно виражена ця особливість в Еврібата, а в астероїдів спектрального класу D шум її перекриває. Дана особливість поглинання схожа на водяний лід, але у водяного льоду також повинно бути поглинання на довжині хвилі 1.5 та 2 мкм. У статті [1] дане протиріччя пояснюється можливістю наявності дрібнозернистого льоду та/або N-H у складі складних речовин.

У троянців спектрального класу D можна побачити відносно слабку, смугу поглинання на діапазоні 3,3 – 3,6 мкм. Ймовірно це пов'язано з наявністю СН в аліфатичних органічних сполуках [1]. Органічні сполуки, тобто сполуки в яких наявні атоми карбону та певні інші елементи, мають величезне різноманіття, що робить фактично неможливим точно визначити речовину (або речовини), яка відповідає за дану особливість спектра.

У Еврібата можна побачити відносно вузьку смугу поглинання на 4,25 мкм. Ймовірно вона викликана наявністю CO<sub>2</sub> [1]. Така особливість ще не спостерігалася серед інших досліджених Джеймсом Уеббом троянських астероїдів, тому вважається, що CO<sub>2</sub> потрапив на поверхню цього астероїда через зіткнення з іншим астероїдом (або астероїдами). Ця теорія у більшій частині тримається на тому, що Еврібат є частиною сімейства, що власне і підвищує ймовірність зіткнень.

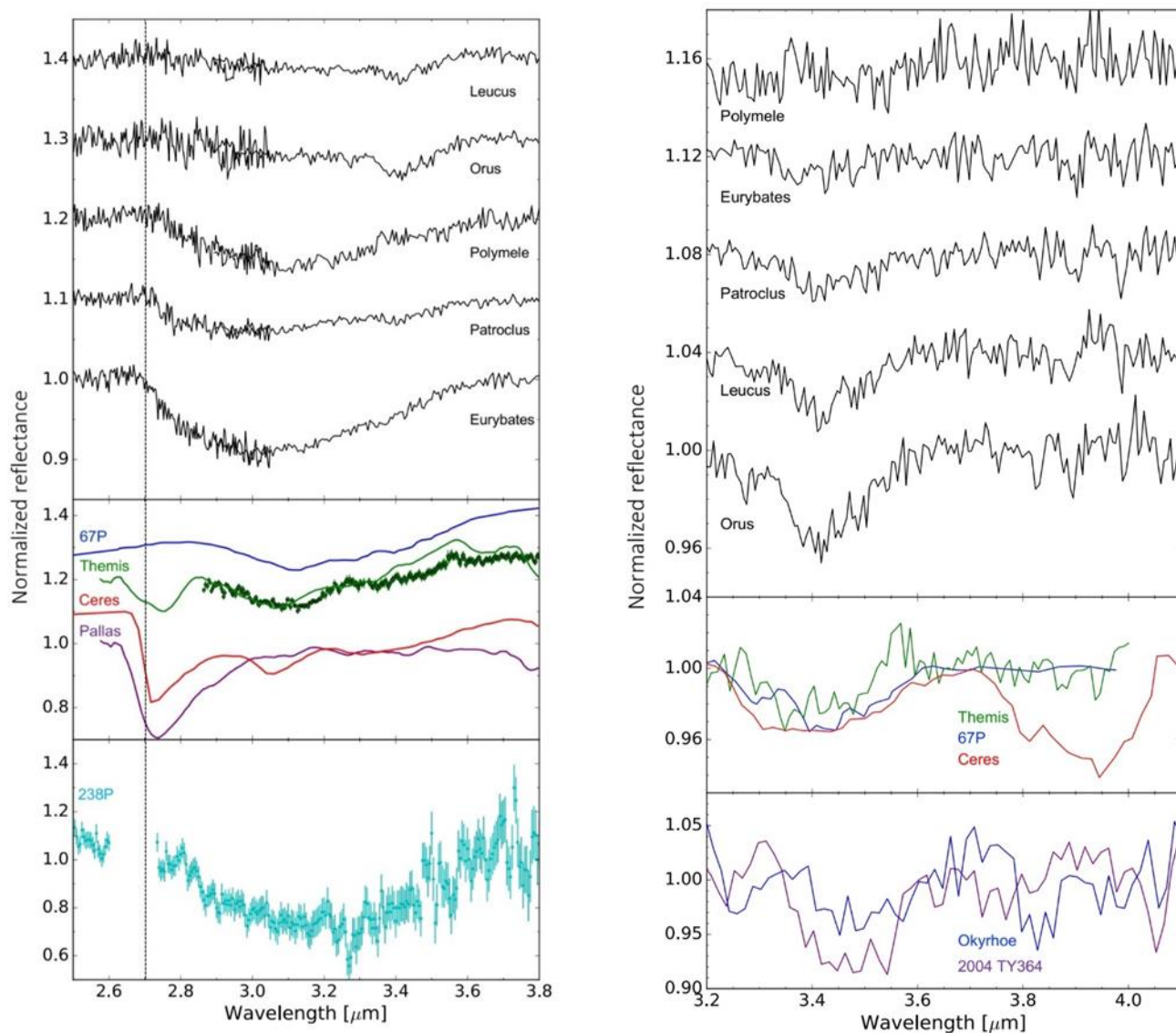


Рис. 2.1 Спектри поглинання троянців-цілей місії Люсі після віднімання континууму у порівнянні з деякими іншими малими тілами Сонячної системи. На правій частині показано більш конкретно особливість поглинання на 3,3 – 3,6 мкм [1]

Існують експерименти, які доводять можливість утворення аліфатичних сполук з льодів  $H_2O$ ,  $N_2$ ,  $CO$ ,  $NH_3$ ,  $CH_4$  та  $CH_3OH$  при опроміненні іонами сонячного вітру або УФ-випромінювання Сонця [1]. Коли астероїд наближається до Сонця, то є характерним збільшення інтенсивності іонного бомбардування та ультрафіолетового випромінювання. Ультрафіолетове випромінювання є одним з основних діапазонів випромінювання Сонця і при цьому воно може бути спрямоване на іонізацію молекул і атомів, тим самим руйнуючи їх (для УФ випромінювання теж властиве збільшення інтенсивності з наближенням до Сонця). Атоми, на які розбилися льоди раніше

згаданих речовин, потім формують аліфатичні сполуки, які вже здатні залишатися цілісними в умовах відносної близькості до Сонця.

Існує багато факторів, що можуть впливати на інтенсивність перетворення льодів на аліфатичні сполуки та ланцюг реакцій, а це в свою чергу робить практично неможливим точно визначити перетворення хімічного складу астероїдів. Місія Люсі зможе нам надати більш точні дані про хімічний склад своїх цілей, і вже знаючи в подробицях про кінцеві продукти реакцій можна буде створювати більш конкретні теорії. Також варто зазначити, що процес зміни хімічного складу в астероїдів в умовах троянців проходить дуже повільно.

## 2.2. Порівняння Патрокла з астероїдами головного поясу в діапазоні 0,8 – 2,5 мкм.

Одним із методів дослідження астрономічних об'єктів є його порівняння з іншими об'єктами. У цій частині розділу буде порівняно спектр Патрокла, як найбільш дослідженого серед цілей місії Люсі, з астероїдами головного поясу. Патрокл належить до спектрального класу P, тому його буде порівняно з представниками аналогічного спектрального класу (табл. 2.1).

Таблиця 2.1

Характеристики Патрокла, Гестії та Сільвії

Об'єкт	Діаметр, км	Альbedo	Таксономія (Bus)	Таксономія (Толен)	Велика піввісь, а. о.
Патрокл	140.4	0.0471±0.003	Немає даних	P	≈5,23
Гестія	124.1	0.055±0.002	Xc	P	≈2,52
Сільвії	253.1	0.043±0.002	X	P	≈3,48

На рисунку 2.2 можна чітко побачити, що не дивлячись на спільний спектральний клас, нахил Патрокла значно більше, ніж у Сільвії та Гестії.

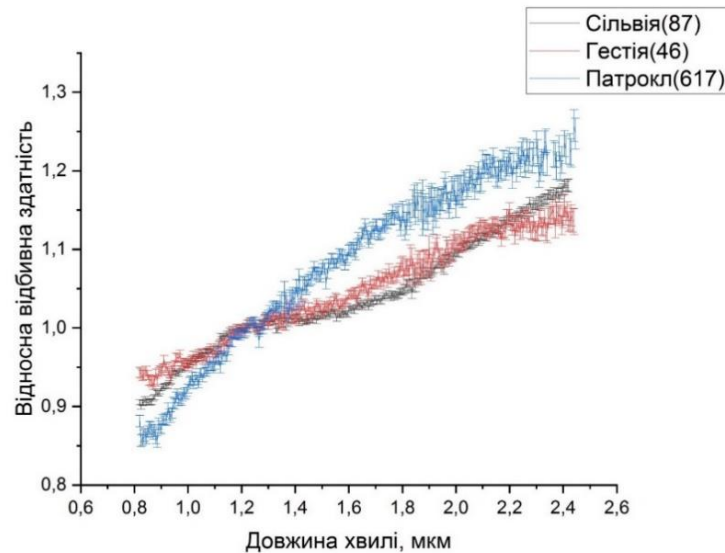


Рис 2.2 Спектри поглинання в ближньому інфрачервоному діапазоні астероїдів головного поясу Гестії (46), Сільвії (87) та троянця Патрокла (617)

Дані взяті з каталогів [6] і [7]

Також можна помітити спільну смугу поглинання у Сільвії та Гестії на довжині хвилі 1,2 – 2,1 мкм, якої в Патрокла немає. Логічно припустити, що ця смуга поглинання є характерною для багатьох астероїдів головного поясу спектрального класу Р, але яка не спостерігається у троянців. Дана особливість поглинання в астероїдів головного поясу може бути пов'язана з наявністю льодів  $H_2O$ , але в Патрокла ця особливість не спостерігається.

В цілому можна сказати, що, навіть якщо троянець має спільний спектральний клас з об'єктом головного поясу, то це не означає що вони будуть мати подібні спектри.

Упродовж довгого часу вважалося, що троянці не мають спектральних особливостей, як це наглядно можна було побачити на рис. 2.2. Але після спостережень космічних телескопів Спітцера (на середньому ІЧ діапазоні) [5] та Джеймса Уебба (на ближньому ІЧ діапазоні) [1] дане твердження було спростовано.

### 2.3. Порівняння особливостей поглинання троянців з астероїдами головного поясу в діапазоні 2,2 – 3,6 мкм

Для порівняння обираємо об'єкти, для яких є дані спостережень в ІЧ діапазоні (табл. 2.2)

Таблиця 2.2

#### Характеристики Гігеї, Феміди, Давиди та Харікло

Об'єкт	Діаметр, км	Альbedo	Таксономія (Bus)	Таксономія (Толен)	Велика піввісь, а. о.
Гігея	428.5	0.066±0.002	C	C	≈3,14
Феміда	176.8	0.084±0.003	B	C	≈3,14
Давида	270.3	0.07±0.002	C	C	≈3,17
Харікло	226.1	0.075±0.015	D	Немає даних	≈15,9

На рис 2.3 видалено частину спектра в діапазоні 2,5 – 2,8 мкм. [4]. Спостереження проводилися з Землі, а наша атмосфера насичена різноманітними газами, які теж мають своє поглинання. Через це у діапазоні 2,5 - 2,8 мкм був наявний великий шум і цю частину спектра було видалено, для більшої зосередженості на інших особливостях поглинання, які можна раціонально оцінювати.

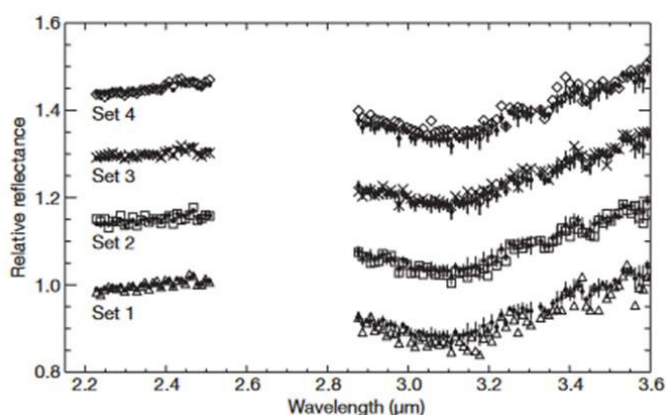


Рис. 2.3 Спектр поглинання Феміди (24) в діапазоні 2.2 – 3.6 мкм [4]

Можна чітко побачити поглинання близько 3 мкм, яке схоже на поглинання троянців. Феміда є представником класу C (табл. 2.2) і, як ми бачимо порівнюючи з

рис 2.1, особливість поглинання на довжині хвилі близько 3 мкм дещо відрізняється від поглинання троянців. А саме: у Феміди є характерним поглинання льодів  $H_2O$ , дещо зміщене в бік більших довжин хвиль порівняно з цілями місії Люсі, особливо у порівнянні Еврібатом та Патроклom.

Також у Феміди можна побачити певні спектральні особливості на довжинах хвиль близько 3,35 мкм і 3,45 мкм, але не можна нехтувати можливістю того, що це лише шум. У разі якщо це дійсно поглинання, то дана особливість може бути пов'язана з наявністю груп  $CH_3$  і  $CH_2$  відповідно, а можливо і з деякою іншою органікою. У троянських астероїдів дані дві особливості поглинання «злилися в одну» за рахунок аліфатичних органічних сполук. Варто зазначити, що у Полімели шум перевищує дану спектральну особливість, навіть якщо вона є.

В цілому, можна сказати, що троянці і астероїди головного поясу мають певні спільні риси у діапазоні більше 2,5 мкм, чого не можна сказати про діапазон менше цієї відмітки.

На рис. 2.4 зображено спектри поглинання Давиди та Гігеї. Вони теж належать до спектрального класу С. У Гігеї поглинання є більш схожим на групу  $CH_2$  у складних органічних сполуках, а в Давиди – на  $CH_3$ . Не можна виключати ймовірність наявності замість них іншої органіки. Дані дві особливості лише частково співпадають з особливістю поглинання троянських астероїдів, як це видно порівнюючи їх зі спектрами на рис 2.1.

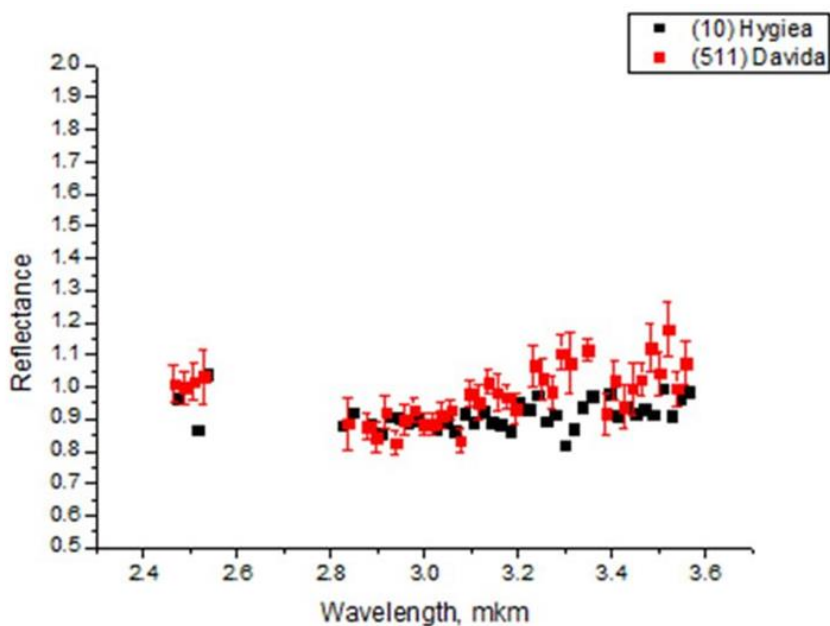


Рис. 2.4 Спектр поглинання Гігеї (10) та Давиди (511) у діапазоні 2,3 – 3,6 мкм.

Спектри мають не дуже велику точність, але для їх аналізу цього достатньо

Також у Гігеї та Давиди є поглинання близько 3 мкм, яке не настільки явне як у Феміди, але дуже схоже на нього. Ймовірно, дана смуга поглинання є у всіх або в багатьох астероїдів головного поясу спектрального класу С. І відповідно відмінності в поглинанні близько 3 мкм з троянцями схожі на відмінності в поглинанні між Фемідою та троянцями.

#### 2.4. Порівняння троянців з кентавром Харікло

Харікло є одним з найбільш досліджених кентаврів. Проблемою є те, що кентаври на даний момент є малодослідженими об'єктами, тому підібрати в даній роботі кентавра спектральної групи Р не вийшло. Тому порівнювати нахили спектра троянців Юпітера та Харікло немає сенсу.

На лівій частині рис.2.1 у Полімели, Еврібата і Патрокла ярко виражена особливість поглинання на довжині хвилі близько 3 мкм, яку також можна побачити у Харікло. Дана особливість поглинання викликана або наявністю дрібнозернистого льоду, або групи NH у складних сполуках. Також можна побачити, що смуга поглинання близько 3 мкм у Харікло значно більша, ніж у троянців, що може свідчити



про іншу конфігурацію та кількість водяного льоду в нього. Через цю особливість Харікло складно зрозуміти, чи є в нього поглинання аліфатичних органічних сполук з вмістом хлороводню і масштабність цього поглинання в разі його наявності.

Спектр поглинання Харікло (рис. 2.5) сильно залежить від його двох кілець, які ймовірно складаються з дрібних кристалів води та якихось темних речовин [3]. Ці кільця могли утворитися після зіткнень Харікло з якимось іншим тілом. Нам варто зрозуміти, що сам Харікло без його кілець, не має настільки ярко виражених смуг поглинання водяного льоду.

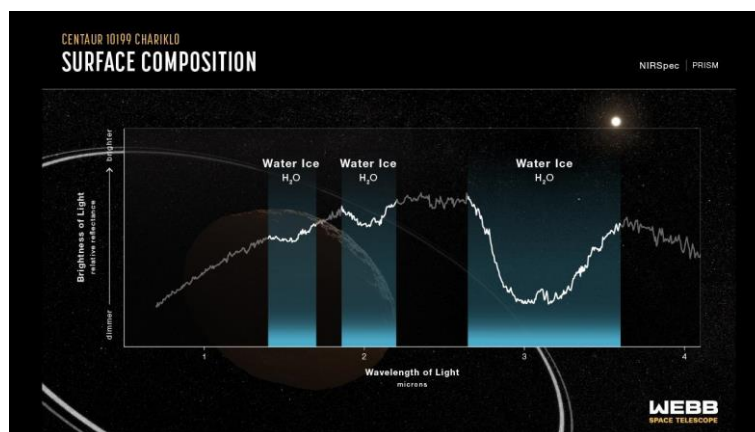


Рис. 2.5 Спектр поглинання кентавра Харікло у діапазоні 0,6 – 4,25 мкм, зроблений відповідно до спостережень космічного телескопа Джеймса Уебба [3]

Якщо притримуватися теорії, що троянці дійсно мають спільне походження з ТНО (транснептуновими об'єктами) та кентаврами, то в спектрі Харікло є «накладання» поглинання NH і льодів H<sub>2</sub>O один на одного, але потім, коли умовний кентавр потрапляє у розташування троянця, то H<sub>2</sub>O або частково вивітряється, або переходить у такий стан, щоб його поглинання на діапазоні менше 2,5 мкм було непомітним.

Також можна припустити, що на кентаврах, ТНО і троянцях немає NH, а їх спектральні особливості залежать лише від льодів H<sub>2</sub>O, але з сучасними даними це неможливо ані підтвердити, ані спростувати. Спостереження місії Люсі зможе накласти нові обмеження на даний аспект



## РОЗДІЛ 3 МІСІЯ ЛЮСІ

### 3.1. План польоту місії Люсі

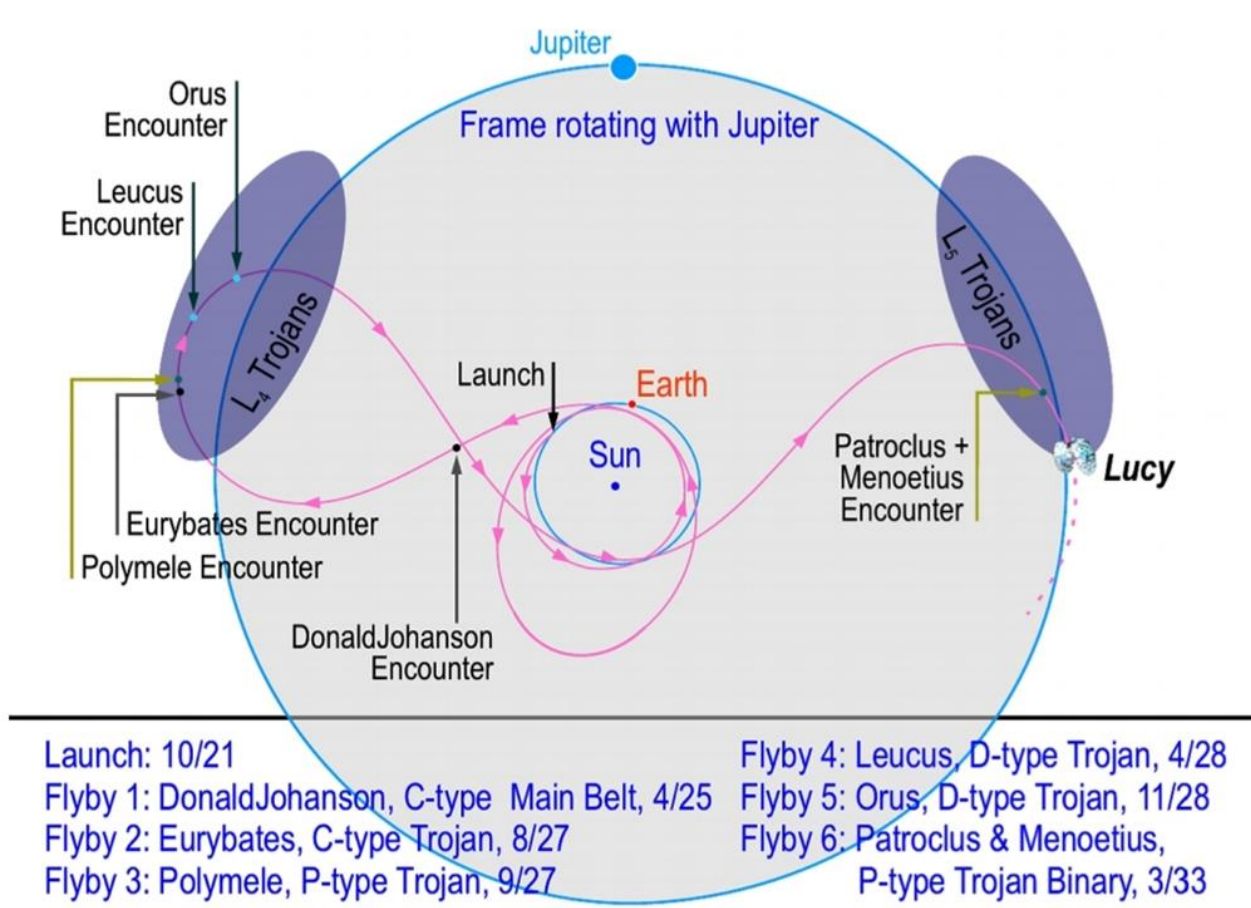


Рис. 3.1 План та траєкторія польоту Люсі [2]

Місія Люсі є першою експедицією до троянців Юпітера. Для якомога більш об'єктивного спостереження та подальшого аналізу треба щоб цілі місії Люсі були різноманітними, і при цьому щоб деякі з них можна було порівнювати як об'єкти схожих розмірів та траєкторій руху. Також важливим фактором для вибору цілей була наявність астероїдів – представників від основних спектральних у класів троянців – D, P і C.

Першими двома об'єктами, які обрали в якості цілі, були Еврібат та Орус. Вони задовольняють умові подібних розмірів та орбіт, але при цьому знаходяться в різних спектральних класах – C і D відповідно. Астероїди спектрального класу P мають

нахил, який більше ніж у об'єктів класу С, але менше ніж у об'єктів класу D, що робить їх дещо проміжним між ними. Можна сказати, що наявність об'єкта класу Р в якості цілі є обов'язковою умовою для місії Люсі, а інакше не буде можливим об'єктивно оцінювати троянців.

В якості ще однієї цілі було обрано подвійну систему Патрокл-Менетій, яка відноситься до класу Р. Зараз у нас немає окремих спектрів до Патрокла і Менетія, тому фактично у попередніх аналізах спектрів використовувався не сам Патрокл, а його подвійна система. І Патрокл, і Менетій мають діаметри більше ста кілометрів, що робить їх достатньо крупними об'єктами серед троянців. Також можливою причиною до вибору Патрокла і Менетія в якості цілі послугувало їх розташування у точці Лагранжа L5, в якій оціночна кількість малих тіл менша, ніж у точці L4, що в теорії означає меншу кількість зіткнень. Однією з причин по вибору подвійної системи Патрокла-Менетія став великий нахил орбіти, що знову зменшує ймовірність зіткнень. У теорії, чим менше зіткнень було в астероїда, тим більше він схожий на планетеземалі, чие дослідження є важливим для розуміння початкових етапів існування Сонячної системи. Саме на можливість того, що Патрокл мало як змінився з моменту свого становлення троянцем, і його проміжні спектральні характеристики відносно Еврібата і Оруса, зробили його ціллю з великими очікуваннями.

Після цього було обрано ще два об'єкти – Левкус і Полімела. Їх спостереження дасть змогу об'єктивно зрозуміти сутність троянців спектральних класів D і Р відповідно. Також дані два об'єкти мають певні особливості: Полімела має найменший діаметр серед цілей Люсі (якщо не вважати астероїдів головного поясу на шляху до троянців та супутник Еврібата – Квета). Спостереження такого малого самостійного тіла зможе нам надати концепцію більшості троянців спектрального класу Р. Левкус має період обертання 466 годин, що дуже багато порівняно з іншими малими тілами Сонячної системи, та високу амплітуду кривої блиску порівняно з іншими малими тілами. Його можна уявити як астероїд неправильної форми, який дуже повільно обертається. Дослідити такий об'єкт як Левкус є достатньо цікавою ціллю, бо скоріше за все його особливості пов'язані з певними зіткненнями.

Полімела та Левкус розташовані у точці L4 і їх розташування дозволяє пролетіти їх в період часу між зустрічами з Еврібатом та Орусом майже не змінюючи траєкторію руху. Подвійна система Патрокл-Менетій має великий нахил відносно екліптики і можливість пролетіти повз них не витрачаючи багато палива трапляється нечасто.

Також буде певний період часу, коли треба буде спостерігати одночасно два об'єкти. На рис. 3.1 показано, що найбільше наближення до Еврібата відбудеться у серпні 2027-го року, а до Полімели – у вересні 2027-го. Спостереження починаються за 60 днів до максимального наближення, тому певний період Люсі буде спостерігати одночасно дві цілі.

1 листопада 2023-го року космічний апарат Люсі пролетів повз астероїд головного поясу Дінкінеш. Під час цього прольоту було вдало перевірено справність обладнання Люсі. Також, як виявилось під час цієї перевірки, Дінкінеш має контактну-подвійний супутник Селам. До цього спостереження ще не було відкрито жодного контактну-подвійного супутника в астероїда.

Ймовірно, що окрім Дінкінеша будуть ще позапланові цілі. Дії для перевірки обладнання вже було проведено на астероїді Дінкінеш і буде ще раз перевірено на астероїді Дональдджохансон, але в разі, якщо у космічного апарата Люсі залишиться паливо для маневрів навіть після прольоту Патрокла, то можливим стає пролетіти ще повз деяких троянців.

Дати прольоту повз цілі місії Люсі: [8]

1. 20 квітня 2025 року – 52246 Дональдджохансон.
2. 12 серпня 2027 року – 3548 Еврібат.
3. 15 вересня 2027 року – 15094 Полімела.
4. 18 квітня 2028 року – 11351 Левкус.
5. 11 листопада 2028 – 21900 Орус.
6. 2 березня 2033 року – 617 Патрокл та його супутник Менетій .

### 3.2. Перспективи місії Люсі

Космічний апарат Люсі буде пролітати повз певні троянські астероїди Юпітера. на відстані приблизно 1000 км, а її дослідницькі можливості в деяких аспектах навіть краще космічного апарата New Horizons [2]. Це дасть нам нові гарні подробиці щодо троянців Юпітера.

Спираючись на [2] можна впевнено сказати, що космічний апарат Люсі зможе прояснити певні речі щодо троянців. Наприклад, фіксування їх віддзеркалення у різних діапазонах та на різних ділянках астероїдів дасть нам змогу створити нові обмеження на хімічний склад троянців, оцінити відсотковий склад льодів та приблизно зрозуміти їх геологічну структуру. Все це з великою ймовірністю дасть нам змогу удосконалювати динамічну модель Сонячної системи. На визначення хімічного складу також накладається умова густини, яку Люсі виміряє з близько 33% невизначеності.

Якщо вважати, що саме умови в розташуванні троянців, призводять до відсутності спектральних особливостей у діапазоні менше 2,5 мкм, то якщо в цілі місії Люсі буде помічено хоча б мінімальне поглинання на 1,5 мкм і 2 мкм, то це дасть підстави припустити, що цей об'єкт відносно нещодавно був кентавром. Розуміння кількості у відсотках таких мінімальних поглинань льодів  $H_2O$ , які на разі для нас непомітні, зробить поштовх у розумінні міграції малих тіл Сонячної системи. Стане можливим зрозуміти інтенсивність перетворення кентаврів на троянців Юпітера, або хоча б зрозуміти чи проходили вони такі перетворення взагалі.

Можливо нам вдасться зрозуміти конкретні органічні сполуки троянських астероїдів, а не лише те що вони містять групи  $CH_2$  і  $CH_3$ . Проводячи досліди на тему еволюції органіки в умовах наближення до Сонця, стане можливим припускати можливі органічні сполуки у транснептунових об'єктів.

Безумовно навіть після місії Люсі буде неможливо отримати дані абсолютно про все зв'язане з троянцями, але якщо подивитися на це з перспективою, що подібного роду місії будуть проводитися і по відношенню до інших малих тіл Сонячної системи, то стане можливо проводити велику кількість аналогій між ними і таки дійти до

моделі динамічної еволюції Сонячної системи, яка б задовольняла всім можливим умовам.

Найкращим можливим результатом місії Люсі може бути лише виявлення у троянців того, ймовірність чого ми навіть не припускали, бо це виведе нас на новий рівень розуміння популяції троянців.

## ВИСНОВКИ

Троянські астероїди є актуальними цілями для сучасної астрономії. Дослідження астероїдів в діапазоні 1,7 – 5,3 мкм проводять достатньо нечасто. У цьому плані телескоп Джеймса Уебба робить справжні прориви в розумінні малих тіл Сонячної системи. Місія Люсі зможе детально дослідити багато параметрів троянських астероїдів Юпітера, але навіть з сучасними, дещо обмеженими даними можна робити певні висновки.

В особливості варто відмітити такі моменти:

1) Серед популяції троянців Юпітера спостерігається певні відмінності в плані особливостей поглинання. У деяких троянців є поглинання близько 3 мкм, у деяких близько 3.4 мкм. Серед цілей місії Люсі спостерігається тенденція того, що чим більше поглинання близько 3 мкм, тим менше поглинання близько 3.4 мкм і навпаки (через великі шуми це твердження є лише теорією).

2) У астероїдів головного поясу та троянців поглинання близько 3.4 мкм викликане різними органічними речовинами.

3) У троянських астероїдів Юпітера та астероїдів головного поясу є певні відмінності у розташуванні смуги поглинання близько 3 мкм. Це може свідчити або про різну конфігурацію льодів  $H_2O$ , або про те, що поглинання троянців на цій довжині хвилі викликане іншими речовинами.

4) Якщо троянці дійсно мають спільне походження з транснептуновими об'єктами та кентаврами (що досить ймовірно), то вони пройшли дуже довгу еволюцію після відокремлення від них. Це можна аргументувати тим, що їх відмінності у спектрі швидко з'явитися не могли.

## СПИСОК ВИКОРИСТАНИХ ДЖЕРЕЛ

1. JWST near-infrared spectroscopy of the Lucy Jupiter Trojan flyby targets: Evidence for OH absorption, aliphatic organics, and CO<sub>2</sub> [Електронний ресурс]: arXiv / Ian Wong; Michael E. Brown; Joshua P. Emery; Richard P. Binzel; William M. Grundy; Simone Marchi; Audrey C. Martin; Keith S. Noll; Jessica M. Sunshine. 2023. – Режим доступу: <https://arxiv.org/abs/2311.11531>
  2. Lucy Mission to the Trojan Asteroids: Instrumentation and Encounter Concept of Operations [Електронний ресурс]: arXiv / Catherine B. Olkin, Harold F. Levison, Michael Vincent, Keith S. Noll, John Andrews, Sheila Gray, Phil Good, Simone Marchi, Phil Christensen, Dennis Reuter, Harold Weaver, Martin Patzold, James F. Bell III, Victoria E. Hamilton, Neil Dello Russo, Amy Simon, Matt Beasley, Will Grundy, Carly Howett, John Spencer, Michael Ravine, Michael Caplinger. 2021. – Режим доступу: <https://arxiv.org/pdf/2104.04575>
  3. Centaur Charliko 10199 Light Curve [Електронний ресурс]: ESA/Webb. 2022. – Режим доступу: <https://esawebb.org/images/charliko2/>
  4. Rotationally resolved near-infrared reflectance spectra of 24 Themis [Електронний ресурс]: Campins, H. & Hargrove, Kelsey & Pinilla-Alonso, Noemi & Howell, E. & Kelley, Monique & Licandro, Javier & Mothé-Diniz, Thais & Fernandez, Yerko & Ziffer, Julie. (2010). Water ice and organics on the surface of the asteroid 24 Themis. *nat.* 464. 1320-1321. – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/publication/43352150\\_Water\\_ice\\_and\\_organics\\_on\\_the\\_surface\\_of\\_the\\_asteroid\\_24\\_Themis](https://www.researchgate.net/publication/43352150_Water_ice_and_organics_on_the_surface_of_the_asteroid_24_Themis)
  5. Development of Regolith Simulants of Lunar Permanently Shadowed Regions and Jupiter Trojan Asteroids [Електронний ресурс]: Karlis Slumba – Режим доступу: [https://www.researchgate.net/figure/Spitzer-Space-Telescope-TIR-emission-spectra-of-Trojans-This-figure-is-reprinted-from\\_fig2\\_371608770](https://www.researchgate.net/figure/Spitzer-Space-Telescope-TIR-emission-spectra-of-Trojans-This-figure-is-reprinted-from_fig2_371608770)
- Каталоги спектрів:
6. [Електронний ресурс] – Режим доступу: <http://smass.mit.edu/catalog.php>

7. [Электроний ресурс] – Режим доступу:

<https://sbnapps.psi.edu/ferret/productDetail.action?dataSetId=EAR-A-M3SPEC-3-RDR-SMASS-V2.1&maxProductCount=320&productId=SMASS-SMASSPC-200012>

8. Люсі (космічний апарат) [Електроний ресурс]: Wikipedia. – Режим доступу:

[https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D1%8E%D1%81%D1%96\\_\(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9\\_%D0%B0%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82\)](https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%9B%D1%8E%D1%81%D1%96_(%D0%BA%D0%BE%D1%81%D0%BC%D1%96%D1%87%D0%BD%D0%B8%D0%B9_%D0%B0%D0%BF%D0%B0%D1%80%D0%B0%D1%82))

9. Checking Out the Mechanisms in Webb’s NIRSpec Instrument [Електроний ресурс] – Режим доступу: <https://blogs.nasa.gov/webb/2022/03/03/checking-out-the-mechanisms-in-webbs-nirspec-instrument/>

10. Джеймс Вебб (телескоп) [електроний ресурс]: Wikipedia. – Режим доступу:

[https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B6%D0%B5%D0%B9%D0%BC%D1%81\\_%D0%92%D0%B5%D0%B1%D0%B1\\_\(%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF\)](https://uk.m.wikipedia.org/wiki/%D0%94%D0%B6%D0%B5%D0%B9%D0%BC%D1%81_%D0%92%D0%B5%D0%B1%D0%B1_(%D1%82%D0%B5%D0%BB%D0%B5%D1%81%D0%BA%D0%BE%D0%BF))