

doi: <https://doi.org/10.15407/kfnt2021.02.019>

**Я. Павленко, О. Шубіна, І. Кулик,  
Ю. Кузнєцова, О. Захожай, П. Корсун,  
С. Борисенко, В. Крушевська, М. Андрєєв**

Головна астрономічна обсерваторія Національної академії наук України,  
вул. Академіка Заболотного 27, Київ, 03143, Україна  
ур@mao.kiev.ua  
shubina@mao.kiev.ua

### **Екзокометна активність навколо зір на різних стадіях еволюції: сучасний стан досліджень**

*Сучасні теорії формування планетних систем передбачають численну популяцію планетезималей (залишків первинної речовини протопланетної хмари та зародків малих тіл, що спостерігаються у Сонячній системі), які відіграють важливу роль у динамічній та фізичній еволюції планетної системи. Гравітаційне розсіяння багатих на леткі елементи планетезималей на ранніх етапах динамічної еволюції планетної системи, ймовірно, призводить до того, що леткі та органічні сполуки потрапляють у внутрішні частини системи, впливаючи на процес утворення планетних атмосфер та подальший розвиток життя. У внутрішніх частинах планетної системи малі тіла можуть випаровуватись у результаті зростання інсоляції на близьких відстанях від материнської зорі, що призводить до розвитку активності, спорідненої з активністю комет Сонячної системи. Дослідження кометної активності у Сонячній системі націлене переважно на вивчення фізичних процесів, які мали місце на ранніх стадіях розвитку протопланетної хмари. Донедавна не було можливості досліджувати малі тіла в інших планетних системах, тому що їхні малі розміри унеможливають детектування прямими методами. Протягом останніх 10 років дві космічні місії, «Кеплер» та TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite), були споряджені з метою безперервного фотометричного моніторингу для пошуку екзопланет методом транзитів (моніторинг зміни яскравості зорі*

© Я. ПАВЛЕНКО, О. ШУБІНА, І. КУЛИК, Ю. КУЗНЄЦОВА,  
О. ЗАХОЖАЙ, П. КОРСУН, С. БОРИСЕНКО, В. КРУШЕВСЬКА, М. АНДРЕЄВ, 2021

внаслідок проходження по її диску меншого за розмірами об'єкта). Наявність високоточних фотометричних вимірів кривих блиску близько 200 000 зір, які є у відкритому доступі, потенційно дає можливість ототожнити доволі незначні зміни у кривих блиску зір, зумовлені проходженням тіла, що має газопилову кому (екзокомети), по диску зорі. Розглянуто ряд питань, пов'язаних з відкриттям та дослідженням екзокомет. Описано основні методи детектування, які ґрунтуються на аналізі фотометричних та спектральних рядів спостережних даних космічних місій та наземних спостережних комплексів. Зроблено короткий огляд основних робіт, присвячених результатам теоретичного моделювання та експериментальних досліджень проявів екзокометної активності. Описано відомі випадки проявів екзокометної активності у планетних системах зір різних спектральних класів та наведено основні характеристики таких зір та їхніх планетних систем. Розглянуто перспективи подальших досліджень цих поки що вельми екзотичних об'єктів. Наголошено важливість таких досліджень для розуміння еволюційних процесів у Сонячній системі.

**Ключові слова:** комети, планетні системи, малі планети; затемнення, транзити, планети і супутники.

## ВСТУП

У наш час дослідження позасонячних планетних систем належать до важливих напрямків сучасної астрофізики. Протягом останніх десяти років спостереження, виконані з використанням орбітальних та наземних телескопів, призвели до відкриття понад 4300 екзопланет, що обертаються навколо батьківських зір [56]. Левова частка відкриттів екзопланет належить космічним місіям CoRoT [1], «Кеплер» [7] та TESS [54], які значно розширили наявні бази даних спостережень зір, уможливіючи детектування екзопланетних систем методами аналізу варіації радіальних швидкостей, кривих блиску та мікролінзування [4, 41, 45].

Водночас мало що відомо про популяції позасонячних субпланетних тіл у цих системах, таких як планетезималі, астероїди і комети. Сучасні теорії формування планетних систем передбачають численні популяції малих тіл, які є залишковими продуктами формування великих планет, і отже, мають реєструватися у масштабах, які спостерігаються у Сонячній системі. При цьому відносно малі маси та розміри таких об'єктів спричиняють значні труднощі при їхньому детектуванні за допомогою відомих методів транзитів чи радіальних швидкостей [51]. У цій роботі позасонячні комети та астероїди об'єднуються у групу малих тіл екзопланетних систем, за аналогією до номенклатури, прийнятої для нашої планетної системи. Загалом порівняль-

ний аналіз фізичних властивостей та еволюції екзопланетних систем з Сонячною системою становить окремий інтерес.

## КОМЕТИ СОНЯЧНОЇ СИСТЕМИ ТА ПЕРЕДУМОВИ ВІДКРИТТЯ ЕКЗОКОМЕТ

Розвиток кометної активності пов'язують з утворенням газопилової атмосфери комети при її наближенні до Сонця. Поступове зростання температури спричиняє сублімацію льодів, в основному водяного льоду, з поверхневого та підповерхневого шару кометного ядра. Відриваючись від ядра, газові молекули «тягнуть» за собою тверді частинки, з яких складається ядро комети, утворюючи таким чином пилову кому. Процес сублімації водяного льоду розпочинається при температурі біля 160 К, що відповідає геліоцентричній відстані приблизно 3 а. о. На такій же відстані ми спостерігаємо початок утворення видимої коми більшості комет.

Завдяки розвитку спостережної техніки в інфрачервоній, субміліметровій та міліметровій ділянках спектру та спостереженням орбітальних телескопів зараз доволі добре відомий «усереднений» хімічний склад кометних ядер, хоча будови окремих комет можуть бути дуже різними [6, 52]. Головною легкою складовою кометних ядер є водяний лід з домішками CO, CH<sub>3</sub>OH, H<sub>2</sub>CO, CH<sub>3</sub>CN, HC<sub>3</sub>N, HCN та ряду інших молекул, наявних у меншій концентрації, які вважаються первинними, «батьківськими» молекулами [15, 50]. Експерименти, здійснені в ході космічних місій до комет 1P/Halley, 81P/Wild 2, 67P/Churyumov-Gerasimenko дозволили оцінити елементний склад тугоплавкого компонента кометного ядра, ґрунтуючись на безпосередніх дослідженнях кометного пилу в комах цих комет [2, 19]. Наприклад, для комети 67P співвідношення масового вмісту мінерального компонента твердих частинок до органічного становить приблизно 55/45, де головними елементами мінеральної фази речовини є Si, Fe, Mg, Na, Al, Mn, Ca, Cr, K, S; тоді як головними елементами органічної фази є C та N, а O зустрічається рівною мірою в обох фазах [2].

У видимій ділянці кометних спектрів спостерігаються так звані дочірні молекули, які утворюються із батьківських молекул при розпаді останніх в результаті фотодисоціації, фотоіонізації, електронної іонізації та інших процесів, які мають місце у внутрішніх частинах кометної коми. Найінтенсивнішими у спектрах цього діапазону є лінії радикалів CN (фіолетова система смуг в околі 388 нм), C<sub>2</sub> (система смуг Свана), C<sub>3</sub> (емісії в околі 405 нм), які реєструються у більшості комет. Також дуже яскравими є лінії молекули OH в околі 308.5 нм, але вони недоступні для наземних спостережень через непрозорість земної атмосфери у цьому діапазоні. Яскраві емісійні деталі іона CO<sup>+</sup>

спостерігаються у діапазоні 300...500 нм. Кількісний вміст іона  $\text{CO}^+$  можна пов'язати із вмістом молекули  $\text{CO}$ , що є одним із класифікаторів комет. Особливо цікавими є спостереження комет, які наближаються близько до Сонця. У спектрах таких комет спостерігаються лінії деяких металів, зокрема лінії атомарного  $\text{Na}$  у кометах, які падають на Сонце [28], та іона  $\text{Ca}^+$ , який спостерігався лише у кількох кометах, але він є важливим для пошуків екзокомет спектральним методом.

Спостереження, отримані космічними апаратами SWAN та SOHO, дали можливість дослідити спектр комет в ультрафіолетовому діапазоні. Важливим тут є дослідження атомарного водню, який використовується для оцінки продуктивності молекул води [16].

Як було вище зазначено, головним фізичним механізмом, що призводить до утворення газопилових атмосфер комет, є сублімація водяного льоду, яка розпочинається в межах 3 а. о. від Сонця. Але вже давно було помічено, що іноді комети проявляють активність, перебуваючи значно далі від Сонця [46]. Різні фізичні механізми були запропоновані для пояснення цього феномену. Головним з них є, очевидно, фазовий перехід аморфного льоду всередині кометного ядра у кристалічну форму, в результаті чого можуть вивільнитися та сублімувати надлеткі компоненти. Наприклад, сублімація льодів, збагачених  $\text{N}_2$ ,  $\text{CO}$  або  $\text{CH}_4$ , може мати місце при температурах 22, 25 та 31 К, що відповідає геліоцентричним відстаням 160, 120 та 80 а. о. відповідно [3].

Варто згадати також відкрите нещодавно явище кометної активності серед астероїдів Головного поясу. Першим найяскравішим представником цієї групи є астероїд 133P/Elst-Pizarro. Наразі ж відомо 18 активних об'єктів, які рухаються орбітами Головного поясу астероїдів на відстанях між 2.5 та 3.1 а. о., демонструючи кометну активність [9, 24]. Не завжди така активність може бути пов'язана з сублімацією легких компонентів. Наразі пропонуються декілька альтернативних фізичних механізмів, що призводять до утворення пилових хвостів на близьких відстанях від Сонця [27].

Отже, враховуючи розмаїття проявів кометоподібної активності малими тілами Сонячної системи, ми можемо очікувати наявності екзокометної активності у позасонячних системах на різних відстанях від батьківської зорі. У залежності від будови кометних ядер можуть «включатись» різні фізичні механізми, що призводять до утворення газопилових ком. Отже, можна очікувати, що проходження такого об'єкта по диску «батьківської» зорі спричинить транзитне явище, тривалість, глибина, морфологічна форма кривої блиску якого буде опосередковано залежати від характеру кометної активності. З іншого боку, роблячи певні припущення про фізичні умови у позасонячній планетній системі, ми можемо спрогнозувати наявність деяких емісій у спектрі батьківської зорі, які можуть бути індикаторами кометної активності в цій системі.

## СУЧАСНІ КОСМІЧНІ КОМПЛЕКСИ ДЛЯ ДОСЛІДЖЕННЯ ЕКЗОПЛАНЕТНИХ СИСТЕМ

У 1984 р. опубліковано роботу [8], де висувалась ідея використання орбітальних обсерваторій для пошуку екзопланет фотометричним методом. Але пройшло майже 10 років, поки NASA розпочало обговорення програми, яка включала в себе кілька космічних місій, направлених на пошук і дослідження планет в інших зоряних системах. Наразі основні результати, одержані в ході космічних місій «Кеплер» та TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite), довели високу ефективність використання орбітальних телескопів, бази даних яких охоплюють основний масив спостережень зір із підтвердженими транзитами та ймовірних зір-кандидатів з екзопланетними системами. Віднедавна ці спостережні дані також використовуються для пошуку та вивчення проявів екзозометної активності у позасонячних системах. З огляду на повноту та важливість цих баз даних ми надаємо коротку інформацію про космічні місії «Кеплер» та TESS.

**Космічна обсерваторія «Кеплер».** 7 березня 2009 року космічну обсерваторію «Кеплер» було виведено на геліоцентричну майже колову орбіту з параметрами, близькими до параметрів орбіти Землі, але з дещо більшим ексцентриситетом. Це була перша місія, споряджена спеціально для відкриття та досліджень екзопланет, схожих на планети земної групи, які розташовані в зоні, придатній для життя, та для оцінки кількості таких планет довкола зір Молочного шляху, подібних до Сонця. З 2009 по 2012 рр. телескоп проводив неперервний фотометричний моніторинг змін блиску близько 170000 зір у межах ділянки неба розміром приблизно 115 квадратних градусів у площині екліптики з центром  $= 19^h 22^m 40^s$  та  $= +44.5$  [7]. Унаслідок пошкоджень системи орієнтації космічного апарата протягом 2012 та 2013 рр. космічну обсерваторію було переорієнтовано для спостережень ділянок неба, розташованих уздовж екліптики [23].

Спостереження провадились за допомогою 0.95-м телескопа системи Шмідта з ПЗЗ-фотометром у спектральному інтервалі 420...905 нм. 42 ПЗЗ-матриці фотометра були організовані у 21 електронний модуль [22]. Одна експозиція тривала приблизно 6 с, після чого інформація зчитувалась і тимчасово зберігалась у накопичувачі даних бортового комп'ютера [25]. Для моніторингу зміни блиску попередньо відібраних зірок, координати яких складали вхідний каталог місії «Кеплер», зображення зірок вхідного каталогу вирізались з кожного 6-с кадра за допомогою апертури із середнім розміром 32 пкл. Ці апертурні пікселі формували зображення під назвою TPFs (Target Pixel Files), які надалі слугували для розрахунку кривих блиску зір [14]. У накопичувачі формувались два типи даних у залежності від кількості підсумованих експозицій: 270 індивідуальних експозицій у сумі складали TPF-кадр із загальним часом експонування 29.424 хв; 9

експозицій у сумі складала 58.8-с кадри. Ці кадри слугували для обчислення кривих блиску зір вхідного каталогу з кроком 30 хв (long cadence data — LC) або 1 хв (short cadence data — SC). Один раз на місяць завантажувалася повний кадр усієї спостережуваної ділянки (FFIs — Full Frame Images). Для обчислення кривих блиску використовувався метод апертурної фотометрії. Точність фотометрії оцінювалася окремо для кожної кривої блиску за допомогою комбінованої точності відносної фотометрії (Combined Differential Photometric Precision — CDPP). Ця величина визначає глибину транзитного явища відносно сигналу від зорі, яке можна зареєструвати на рівні 1 . Наприклад, для зорі  $12^m$  спектрального класу G2V на рівні похибки 1 реєструється транзит, який триває протягом 6.5 год і призводить до падіння блиску зорі на 0.002 % [13, 26]. Загалом протягом кожного кварталу (у кінці кварталу відбувалася переорієнтація апарата) LC-криві блиску отримувались для більш ніж 160 000 зір, з них 512 зір також забезпечувались кривими блиску у режимі SC-data. Ці останні є особливо важливими для вивчення короткоперіодичних пульсацій зір.

Оригінальні дані, повномасштабні знімки, LC- та SC-криві блиску перебувають у вільному доступі в архівах STScI (Space Telescope Science Institute)\* та MAST (Mikulski Archive Space Telescope)\*\*.

**Космічна місія TESS.** Місію було споряджено для пошуку невеликих планет, радіус яких не перевищує чотири земних радіуси, довкола карликів спектральних класів F, G, K, M та зоряної величини від  $4^m$  до  $12^m$ , розташованих в околі Сонячної системи [54]. Варто зазначити, що результати місії планується використати для формування списку планет з атмосферами, які будуть серед об'єктів спостереження майбутнього космічного телескопа JWST (James Webb Space Telescope). Для космічного апарата TESS було вибрано високоорбітальну супутникову орбіту, на якій він перебуває в орбітальному резонансі 2:1 із Місяцем. Це дозволяє підтримувати оптимальний тепловий режим та необхідні геометричні умови для постійної видимості, вибраної для спостережень ділянки неба [20]. Місія стартувала у квітні 2018 р. і була спочатку розрахована на два роки: протягом першого року планувалось охопити спостереженнями південну півкулю, а протягом другого — північну. Зараз місію продовжено до кінця 2021 р.\*\*\*

Для спостережень використовуються чотири ширококутні камери, кожна з полем зору  $24^\circ \times 24^\circ$ . Камери орієнтовані таким чином, щоб одночасно отримувати зображення смуги небесної сфери розміром  $24^\circ \times 96^\circ$  від площини екліптики до її полюса. 15000...20000 зір спостерігаються в кожній смузі протягом 27 діб, але оскільки смуги перекриваються частково або суцільно (біля полюса екліптики), то сукупні періоди спостережень для різних ділянок різні — від 27 до 356 діб [59].

\* URL: [https://archive.stsci.edu/kepler/data\\_search/search.php](https://archive.stsci.edu/kepler/data_search/search.php)

\*\* URL: <https://mast.stsci.edu/portal/Mashup/Clients/Mast/Portal.html>

\*\*\* URL: <https://www.nasa.gov/tess-transiting-exoplanet-survey-satellite>

Смуга пропускання камер вирізає спектральну ділянку  $\lambda = 600 \dots 1040$  нм. Дані зчитуються кожні 2 с та завантажуються у бортовий процесор. Подібно до ідеології, розробленої для місії «Кеплер», 60 коротких експозицій інтегруються у 2-хв зображення, які є аналогом LC-та SC-даних телескопа «Кеплер». Однак для подальшого завантаження вирізаються апертури розміром  $11 \times 11$  пкл у середньому, координати яких відповідають положенню зір вхідного каталогу місії. 900 послідовних коротких експозицій складаються у 30-хв повноекранні FFIs-зображення [54]. Протягом часу спостережень одного сектора формується більше 1200 послідовних FFIs-зображень. Послідовність коротких 2-хв зображень використовується для розрахунку кривих блиску. Процедура обробки даних в основному ґрунтується на методах, розроблених для космічної місії «Кеплер» [25].

Усі спостереження перебувають у вільному доступі в архіві MAST. Очікувана фотометрична точність для більшості зір не перевищує 0.006 %. З оцінки величини CDPP для зірки  $10^m$  випливає, що на рівні 1 можна зареєструвати транзит, який триває одну годину та призводить до зміни блиску зорі у 0.023 %, а цього достатньо для детектування екзопланети типу суперЗемля [58].

## ДЕТЕКТУВАННЯ ЕКЗОКОМЕТНОЇ АКТИВНОСТІ

На сьогодні (листопад 2020 р.) чисельність спостережених проявів екзотометної активності є дуже незначною, всього близько 20 подій. Але швидке накопичення даних, яке відбувається, перш за все, завдяки роботі орбітальних телескопів, стимулює активні дослідження, направлені на виявлення та вивчення фізичних характеристик малих тіл у позасонячних системах.

**Фотометричні методи.** Робота [39], ймовірно, була першою, де було передбачено загальний вигляд фотометричних профілів транзитів по диску батьківської зорі кометоподібними об'єктами з пиловими хвостами [39]. Розраховані там теоретичні профілі дуже схожі на спостережні, які були відкриті та проаналізовані в роботі [51]. На сьогодні застосування фотометричних методів для виявлення малих тіл навколо зір, зокрема екзокомет, видається природним з огляду на те, що: а) метод транзитів є достатньо апробованим на великій кількості спостережень; б) накопичено величезний масив інформації, доступний для подальшого аналізу. Як наслідок, фотометричні криві блиску, отримані за допомогою апаратів «Кеплер» та TESS, стали основою для пошуку екзотометних транзитів. У таблиці наведено перелік зір із зареєстрованими транзитами екзокомет (див. нижче).

Кілька асиметричних профілів зміни кривих блиску зорі Pictoris (TIC 270577175), отриманих з 19 жовтня 2018 р. по 1 лютого 2019 р. за допомогою телескопа TESS (рис. 1), у роботі [64] були інтерпретовані

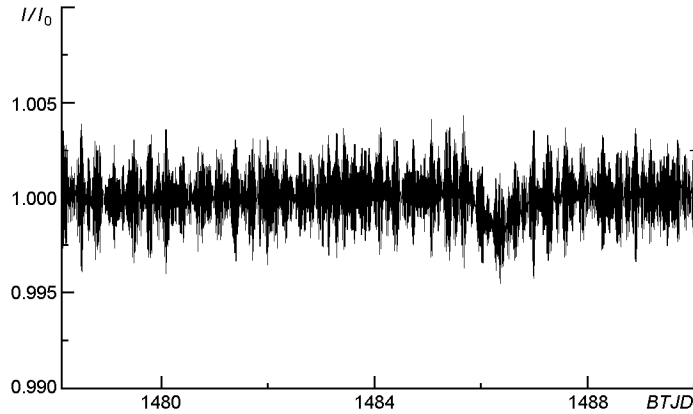


Рис. 1. Крива блиску зорі Pictoris (TIC 270577175), побудована за даними з архіву MAST. Видно височастотну модуляцію, характерну для пульсуючих зір типу Sct. BTJD (baricentric TESS Julian Data), — це формат, у якому представлений час у місії TESS

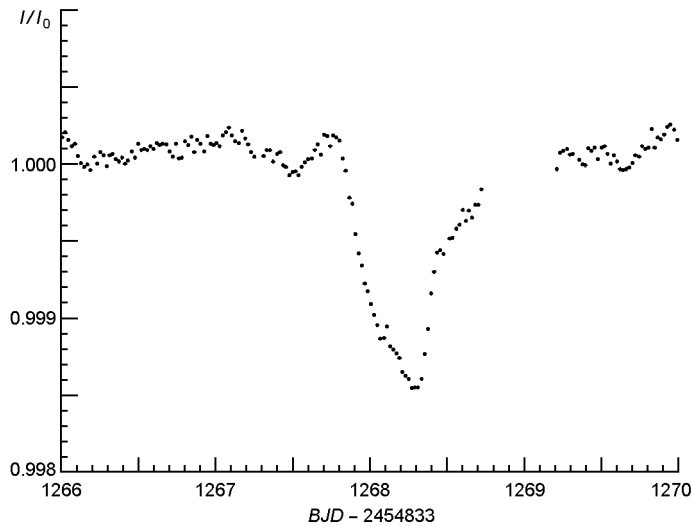


Рис. 2. Асиметричний профіль кривої блиску зорі KIC 3542116, зумовлений транзитом екзокомети, побудований за даними з архіву MAST. Тривалість транзиту близько 1.5 доби. BJD (baricentric Julian Data), — це юліанська дата, скоригована з врахуванням розбіжності у положенні Землі відносно барицентра Сонячної системи

явищами транзитів екзокомет. Для моделювання зміни блиску зорі автори використали метод Монте-Карло з набором таких вхідних параметрів: час транзиту, імпакт-параметр (або спроектована на небо відстань між центром зорі та планетним диском у момент сполучення), фізична довжина хвоста екзокомети, орбітальний період екзокомети. Таким чином було отримано оцінку швидкості екзокомети ( $19.6 \pm 0.1$  км/с) та ймовірної довжини хвоста ( $2 \cdot 10^8$  км) при відстані від зорі  $r = 1$  а. о.

У роботі [51] було досліджено 201 250 фотометричних кривих блиску зір з бази даних апарата «Кеплер». Для зір KIC 3542116 та KIC



11084727 було знайдено кілька асиметричних транзитів, інтерпретованих як екзокометні. Приклад екзокометного транзиту для зорі КІС 3542116 представлено на рис. 2.

Вважалося, що асиметрія профілів транзиту пов'язана з проходженням пилового хвоста комети, зміщеного у напрямку, протилежному руху екзокомети, по диску зорі. Беручи до уваги незначну фізичну ширину такого хвоста порівняно з розміром зорі, профіль інтенсивності вважався таким, що змінюється експоненційно. Період обертання, поперечна орбітальна швидкість та радіус-вектор екзокомети пов'язані між собою формулами, які наведені у роботі [51], і для кеплерівських орбіт мають вигляд

$$v_t = (2GM)^{1/3} P_{orb}^{-1/3} (1 - e \sin \omega) (1 - e^2)^{-1/3},$$

$$d = a(1 - e^2)(1 - e \sin \omega)^{-1} (2GM)^{1/3} P_{orb}^{-1/3} \sqrt{(1 - e^2)v_t^{-1}}.$$

Тут  $v_t$  — поперечна орбітальна швидкість екзокомети на момент транзиту,  $P_{orb}$  — орбітальний період обертання,  $e$  — ексцентриситет орбіти,  $d$  — відстань від зорі до екзокомети під час транзиту,  $a$  — велика піввісь орбіти,  $\omega$  — довгота периастра,  $G$  — гравітаційна стала,  $M$  — маса зорі.

Значення розрахованих швидкостей екзокомет лежать у межах 35.2...89.8 км/с, а довжини хвостів — у межах (3.1...5.9)  $10^5$  км. Ймовірну масу екзокомет було оцінено значенням  $M_c = 10^{17}$  г, яке сумірне зі значенням маси комети Галлея ( $2.2 \cdot 10^{17}$  г) [12].

У нещодавно опублікованій роботі [29] запропоновано метод пошуку асиметричних профілів кривих блиску транзитів, який було застосовано до бази даних телескопа «Кеплер». Головними оцінюваними параметрами були асиметрія форми транзиту та глибина транзиту. Для апроксимації форми транзиту застосовувалась звичайна функція Гаусса, яка добре описує симетричні планетні транзити, або модифікована функція Гаусса. Остання краще описує більш полого зростання яскравості зорі на виході з транзиту в порівнянні з дуже різким зменшенням блиску на початку транзиту. Статистичний аналіз неузгодженостей модельної та експериментальної кривих дозволив оцінити надійність параметрів вибраної функції для опису форми транзиту. У результаті застосування методу в автоматичному режимі було проаналізовано близько 68000 потенційних транзитів. Серед них виявлено тільки дві криві, які свідчать про можливий кометний транзит у системах зір КІС 3129239 та КІС 8027456 додатково до тих кількох, які вже були проаналізовані раніше в роботі [51].

**Спектральні методи.** Ще у 1998 р. були виявлені лінії  $\text{CO}^+$  у інфрачервоній ділянці спектру в напрямку на протозорю низької маси IRAS 16293-2422 [11]. Об'єкт спостерігався довгохвильовим спектрометром на борту ISO (Infrared Space Observatory). Це було по суті першою реєстрацією «кометного»  $\text{CO}^+$  у спектрі протозорі.

Останнім часом набула популярності концепція падаючих на зорю маломасивних тіл, оточених мініатмосферами (falling evaporating bodies — FEBs). Такі атмосфери, як вважається, утворюються внаслідок сублімаційних процесів на таких об'єктах після того як вони, у процесі одного чи кількох гравітаційних збурень, потрапляють на ексцентричні орбіти зі значенням малих півосей менше 0.5 а. о. [5]. У спектрі зорі це може проявлятися появою короткотривалих змін форми та глибини лінії поглинання, яка має червоний доплерівський зсув та іноді накладається на фотосферні лінії H та K Ca II. Саме таким чином у роботі [63] пояснено аномальні особливості ліній поглинання у спектрах принаймні 22 зір спектрального класу A. У своїй більшості, вказані ефекти проявляють себе в спектрах молодих A — B зір, таких як *Pictoris* [57], 49 *Ceti* [65], HD 42111 [61], HD 172555 [32] та *Leonis* [17]. Сама *Pictoris* (спектральний клас A6V) є прикладом молоді системи віком порядку 23 млн років [40], яка оточена уламковим диском, що складається з декількох кілець. Вона має, ймовірно, більш як одну екзопланету [36] — принаймні для однієї отримано прями зображення.

Спектральні спостереження упродовж восьми років виявили, що транзйентні особливості поглинання є бімодальними за глибиною, а отже, можуть виникати при транзитах по диску зорі двох різних популяцій екзокомет [31].

Іншим свідченням кометної активності є випромінювання в лініях CO, C та O у міліметровій ділянці спектру [21, 35], що у різній кількості спостерігалися в уламкових дисках телескопами ALMA (Atacama Large Millimeter Array) та APEX (Atacama Pathfinder Experiment). За останні 5 років було відкрито значно більше уламкових дисків з випромінюванням газу у міліметровому діапазоні, ніж зір з FEBs (що пов'язано з активними спостереженнями навколосоряних дисків після введення в експлуатацію ALMA). Проте наявність холодного газу в уламкових дисках не обов'язково пов'язана з кометною активністю. Потрібно враховувати, що він може бути залишком газу з первинного протопланетного диску [34, 49, 53].

**Моделювання фотометричних профілів транзити екзокомети по диску батьківської зорі.** Через значні відстані до зір з планетними системами і малі розміри самих екзокомет детектування транзитів цих об'єктів ускладнюється. Імовірність того, що транзит екзокомети буде помітний на міжзоряних відстанях, залежить від частки небесної сфери, яку перекриває тїнь від екзокомети. У нашому підході до моделювання профілів транзити ми будемо мати на увазі, що зменшення яскравості зорі внаслідок транзити екзокомети відбувається, коли вона перетинає промінь зору «зоря — спостерігач» (рис. 3).

Якщо побудувати пиловий хвіст екзокомети в кометоцентричній системі координат, де вісь напрямлена вздовж променю зору, і провести інтегрування для всіх пилових частинок, то ми матимемо сту-

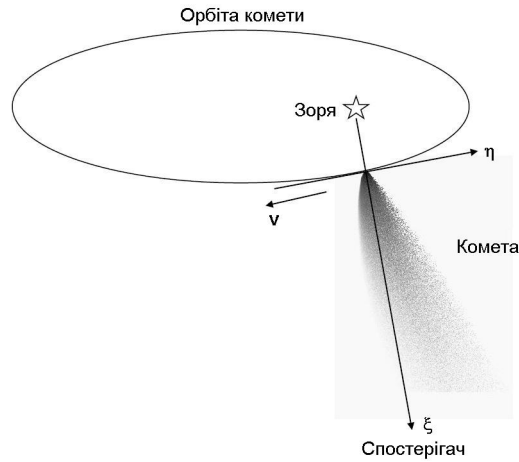


Рис. 3. Графічне зображення транзиту комети по диску зорі ( , — осі кометоцентричної системи координат,  $v$  — напрям руху комети)

пінь затінення зорі в одній точці. При інтегруванні пилових частинок необхідно враховувати як кількість частинок, так і розподіл частинок по розмірах. Віднявши отримані дані від фотометричної кривої блиску зорі, ми отримуємо одну із точок фотометричної кривої вздовж осі  $\xi$ , яка має напрям, протилежний до руху комети вздовж орбіти. Провівши аналогічні розрахунки в околицях нуль-пункту осі  $\xi$ , ми матимемо повний профіль покриття зорі екзокометою. Для відтворення ймовірних фотометричних кривих ми застосували модель формування пилових хвостів на основі статистичного методу Монте-Карло, розроблену в нашому колективі [33]. У моделі прослідковуються до  $10^{10}$  траєкторій окремих пилових частинок, які залишали ядро комети до моменту спостережень. Задавши фізичні та динамічні параметри пилинок як модельні параметри, можна оцінити розміри та розподіл пилинок по розмірах, швидкості їхнього вильоту, топографію активності ядра комети тощо.

Як приклад були використані наші модельні розрахунки для комети C/2006 S3 (LONEOS) [55]. Комета C/2006 S3 належить до сімейства комет, які проявляють значну активність на великих геліоцентричних відстанях. Ми проводили моделювання для комети, коли вона перебувала на геліоцентричній відстані 6 а. о. У модельних розрахунках пиловий хвіст комети формувався пилинками, які мали легкий компонент з водяного льоду та тугоплавкий компонент з силікатного ядра, покритого мінеральною речовиною. Пилінки мали розміри від 5 до 1000 мкм, а їхній розподіл по розмірах відповідав експоненціальному закону з показником степеня  $-3.0$ . Швидкість вильоту частинок із зони зіткнень становила 500 м/с. У випадку використання модельних параметрів, типових для комети C/2006 S3, ми отримаємо фотометричну криву, відображену на рис. 4а. Для порівняння приведено і фотометричну криву реальних спостережень зорі KIC 11084727 на рис. 4б

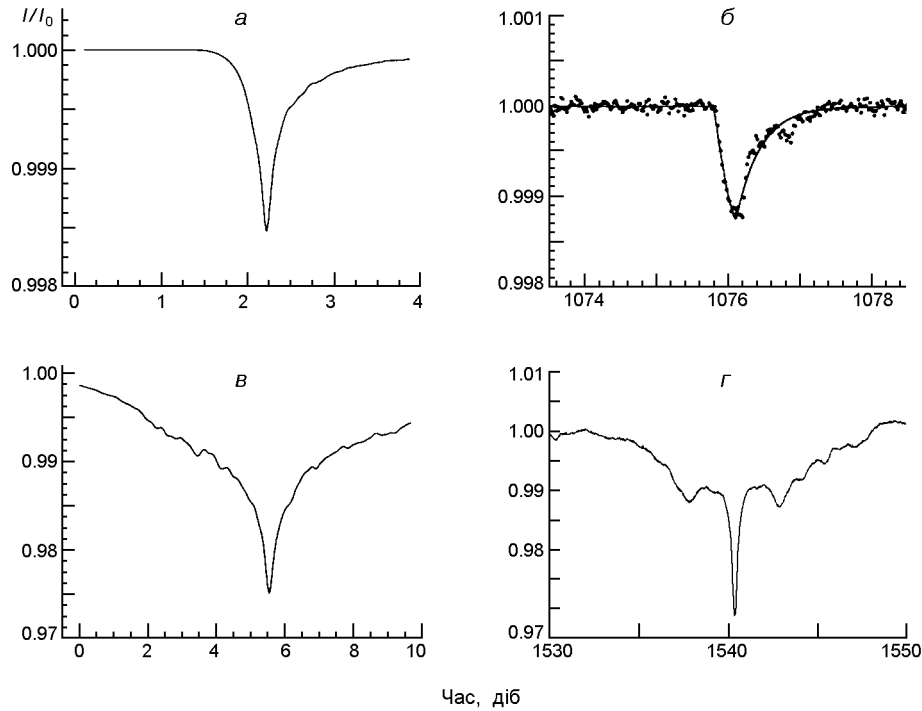


Рис. 4. Фотометричні криві двох екзокометних транзитів. Ліворуч — модельні дані, праворуч — спостережні: *a* — модельна крива, отримана з типовими для комети C/2006 S3 параметрами, *b* — те ж для збільшеної утричі швидкості вильоту пилинок, *в* — спостережна крива для зорі KIC 11084727, *г* — спостережна крива для зорі KIC8462852 [10]

(рис. 13 із роботи [51]). Інший тип екзокометного транзиту ми отримали, збільшивши швидкість вильоту пилинок утричі, результат наведено на рис. 4*в*. Схожий профіль був отриманий зі спостережень для зорі KIC8462852. Профіль наведено на рис. 4*г* (рис. 1 із роботи [10]). Представлені результати моделювання свідчать, що запропоноване пояснення спостережень екзокометних транзитів можна використовувати для інтерпретації спостережних фотометричних кривих.

#### ФІЗИЧНІ ХАРАКТЕРИСТИКИ ЗІР З ВІДОМИМИ ПРОЯВАМИ КОМЕТОПОДІБНОЇ АКТИВНОСТІ

У таблиці узагальнено основні фізичні характеристики зір, в системах яких спостерігались ймовірні прояви кометної активності спектральним чи фотометричним методами, а саме: зоряна величина  $m_V$  у спектральній смузі  $V$ , спектральний клас  $S_pT$ , відстань  $d$ , променева швидкість  $V_r$  та вік. Спектральний метод дозволив виявити ймовірні прояви кометної активності довкола зір, яскравіших від  $m_V = 7^m$ . Це зумовлено необхідністю отримувати спектри високої роздільної здатності. Очікується, що більш виразні прояви екзокометної активності можна

Зорі, навколо яких було зафіксовано прояви екзокометної активності та їхні фізичні характеристики: зоряна величина  $m_V$ , спектральний тип  $SpT$ , відстань до зорі  $d$ , променева швидкість  $V_r$ , вік зорі, спостережний метод (1 — спектроскопічний, 2 — фотометричний)

Зоря			$m_V$	$SpT$	$d$ , пк	$V_r$ , км/с	Вік, млн р.	Метод	Літературне джерело
HD 225200	00 <sup>h</sup> 04 <sup>m</sup> 20 <sup>s</sup>	-29 16 08	6.4 <sup>m</sup>	A1V	125		90	1	[63]
HD 256	00 07 18	-17 23 13	6.2	A2IV	180	-10.2 0.9	-	1	[37]
HD 9672	01 34 38	-15 40 35	5.6	A1V	57	10.3 0.7	40	1	[47]
HD 21620	03 31 29	+49 12 35	6.3	A0V	150	-21.4 2.0	80	1	[61]
HD 24966	03 56 29	-38 57 44	6.9	A0V	106		10	1	[63]
HD 38056	05 41 27	-33 24 03	6.3	B9.5V	121		250	1	[63]
HD 39060	05 47 17	-51 03 59	3.9	A6V	19	20.0 0.7	23	1,2	[18, 64]
HD 42111	06 08 58	+02 29 59	5.7	A3V	201	25.3 1	0.2	1	[47]
HD 56537	07 18 06	+16 32 25	3.6	A3V	31		550	1	[62]
HD 58647	07 25 56	-14 10 44	6.9	B9IVe	320		0.4	1	[62]
HD 64145	07 53 30	+26 45 57	5.0	A3V	68		-	1	[62]
HD 79469	09 14 22	+02 18 52	3.9	B9.5V	35		90	1	[63]
HD 85905	09 54 32	-22 29 15	6.2	A2—A3 III			-	1	[60]
HD 98058	11 16 40	-03 39 06	4.5	A5V	56		-	1	[17]
HD 108767	12 29 52	-16 30 56	2.9	A0IV	27		260	1	[62]
HD 109573	12 36 01	-39 52 10	5.8	A0V			8	1	[62]
HD 110411	12 41 53	+10 14 08	4.9	A0V	36	-0.7 2	10	1	[47]
HD 145964	16 14 29	-21 06 27	6.4	B9V	109	-7.8 2	5	1	[47]
HD 158643	17 31 25	-23 57 46	4.8	B9.5III	124	-12.0	0.3	1	[30]
HD 172555	18 45 27	-64 52 17	4.8	A7V	29	2 4.2	20	1	[30]
KIC 3542116	19 22 53	+38 41 42	10.0	F2V	260	-21.1 0.7	-	2	[51]
HD 182919	19 26 13	+20 05 52	5.6	A0V	83	-20.9 2.9	198	1	[47]
KIC 11084727	19 28 41	+48 41 15	10.0	F2V	250	1.5 0.5	-	2	[51]
HD 183324	19 29 01	+01 57 02	5.8	A0V	61		10	1	[48]
HD 217782	23 02 36	+42 45 28	5.1	F1V	129	2.1 2.4	100	1	[47]

zareestruvati na ranniĥ stadiĥ evolucii zĭr, otoceniĥ ulamkovimi diskami (z vĭkom vid dekil'koĥ mĭl'ĭoniv do 0.5 mlrd rokiv). Takozh виявлення кометної активності можна очікувати довкола зір ранніх спектральних класів А — F. Масивніші зорі можуть мати масивніші протопланетні (первинні) диски. Це збільшує вірогідність того, що довкола такої зорі залишиться більше вторинного матеріалу — уламків диску, які, у свою чергу, можуть стати джерелом кометного та астероїдного матеріалу в системі. Цікаво зазначити, що ані KIC 3542116, ані KIC 11084727 не показують жодних ознак молодого віку, таких як швидке обертання чи інфрачервоний надлишок, який міг би спостерігатись орбітальним інфрачервоним телескопом WISE. Також у цих системах не спостерігаються явні ознаки активності у навколосоряних дисках (якщо вони тут взагалі є) або докази наявності популяції тіл малої маси на орбітах, віддалених на значно більші відстані, ніж спостережувані радіуси кометних орбіт. Можна очікувати, що такі уламки будуть демонструвати викиди CO, як це можна бачити для зір HD 181327 [42], Corvi [43] та Фомальгаута [44]. Для цих зоряних систем радіоспостереженнями зареєстровано навколосоряні емісії CO, що свідчить на користь наявності значних популяцій малих тіл на великих орбітальних відстанях.

## ВИСНОВКИ

Вивчення зоряних систем з екзопланетами дає чудову можливість зрозуміти еволюцію нашої власної планетної системи. Відкриття екзопланет не тільки розширили наші знання про космос загалом, але й поставили нагальне питання про розуміння еволюції зоряно-планетних систем та природи фізичних процесів у Сонячній системі. На сьогодні не викликає сумнівів, що екзокомети та екзоастероїди є важливим «побічним продуктом» формування позасонячних планетних систем.

Невелика кількість детектування таких випадків пов'язана з їхньою епізодичністю, відносно невеликими розмірами екзокомет, спостережною селекцією та необхідністю розробки спеціальних методів для їхнього дослідження. У даній роботі наведено огляд сучасних спостережних методик, з використанням яких було відкрито перші екзокомети та проаналізовано фізичні характеристики систем. Ми запропонували новий підхід для інтерпретації кривих блиску транзитів екзокомет, моделюючи їхні пилові хвости в кометоцентричній системі координат, що у майбутньому допоможе краще зрозуміти природу комет у інших системах.

Це дослідження фінансувалося в рамках програми бюджетного фінансування інститутів Національної академії наук України. Дослідження частково підтримав грант системи 1230, програма 16.01.2020

№ 3/20 Національної академії наук та грант Національного Фонду досліджень України № 2020.02/0228.

1. Baglin A., Auvergne M., Barge P., et al. *Scientific Objectives for a Minisat: CoRoT. The CoRoT mission pre-launch status — stellar seismology and planet finding*, eds.: M. Fridlund, A. Baglin, J. Lochard, L. Conroy. ESA Publications Division. 2006. P. 33.
2. Bardyn A., Baklouti D., Cottin H., et al. Carbon-rich dust in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko measured by COSIMA/Rosetta. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. 469. P. S712—S722.
3. Bar-Nun A., Laufer D., Rebolledo O., et al. *Gas trapping in ice and its release upon warming*. 356 2013. P. 487.
4. Bennett D. P., Anderson J., Beaulieu J. P., et al. *An extrasolar planet census with a space-based microlensing survey*. arXiv e-prints. 2007. arXiv:0704.0454.
5. Beust H., Lagrange-Henri A. M., Madjar A. V., Ferlet R. The beta Pictoris circumstellar disk. X. Numerical simulations of infalling evaporating bodies. *Astron. and Astrophys.* 1990. 236. P. 202.
6. Biver N., Bockelée-Morvan D., Paubert G., et al. The extraordinary composition of the blue comet C/2016 R2 (PanSTARRS). *Astron. and Astrophys.* 2018. 619. A127.
7. Borucki W. J., Koch D., Basri G., et al. Kepler planet-detection mission: Introduction and first results. *Science*. 2010. 327(5968). P. 977.
8. Borucki W. J., Summers A. L. The photometric method of detecting other planetary systems. *Icarus*. 1984. 58(1). P. 121—134.
9. Borysenko S., Baransky A., Kuehrt E., et al. Study of the physical properties of selected active objects in the main belt and surrounding regions by broadband photometry. *Astron. Nachr.* 2020. 341(9).
10. Boyajian T. S., LaCourse D. M., Rappaport S. A., et al. Planet Hunters IX. KIC 8462852 — where's the flux? *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. 457(4). P. 3988—4004.
11. Ceccarelli C., Caux E., Wolfire M., et al. ISO detection of CO(+) toward the protostar IRAS 16293-2422. *Astron. and Astrophys.* 1998. 331. P. L17—L20.
12. Cevolani G., Bortolotti G., Hajduk A. Debris from comet Halley, comet's mass loss and age. *Nuovo cim. C Geophys. Space Phys. C.* 1987. 10. P. 587—591.
13. Christiansen J. L., Jenkins J. M., Caldwell D. A., et al. The derivation, properties, and value of Kepler's combined differential photometric precision. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 2012. 124(922). P. 1279.
14. Clarke B. D., Caldwell D. A., Quintana E. V., et al. *Kepler data processing handbook: Pixel level calibrations*. Kepler Science Document KSCI-19081-002 2017.
15. Cochran A. L., Levasseur-Regourd A.-C., Cordiner M., et al. The composition of comets. *Space Sci. Rev.* 2015. 197(1-4). P. 9—46.
16. Combi M. R., Lee Y., Patel T. S., et al. SOHO/SWAN Observations of short-period spacecraft target comets. *Astron. J.* 2011. 141(4). 128.
17. Eiroa C., Rebolledo I., Montesinos B., et al. Exocomet signatures around the A-shell star Leonis? *Astron. and Astrophys.* 2016. 594. L1.
18. Ferlet R., Hobbs L. M., Madjar A. V. The beta Pictoris circumstellar disk. V. Time variations of the CA II-K line. *Astron. and Astrophys.* 1987. 185. P. 267—270.
19. Flynn G. J., Bleuet P., Borg J., et al. Elemental compositions of comet 81P/Wild 2 samples collected by stardust. *Science*. 2006. 314(5806). P. 1731.
20. Gangestad J. W., Henning G. A., Persinger R. y. R., Ricker G. R. *A high Earth, Lunar* ISSN 0233-7665. *Кінематика і фізика небес. тіл.* 2021. Т. 37, № 2

- resonant orbit for lower cost space science missions*. arXiv e-prints. 2013. arXiv:1306.5333.
21. Greaves J. S., Holland W. S., Matthews B. C., et al. Gas and dust around A-type stars at tens of Myr: signatures of cometary breakup. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. 461(4). P. 3910—3917.
  22. Haas M. R., Batalha N. M., Bryson S. T., et al. Kepler science operations. *Astrophys. J. Lett.* 2010. 713(2). P. L115—L119.
  23. Howell S. B., Sobek C., Haas M., et al. The K2 mission: Characterization and early results. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 2014. 126(938). P. 398.
  24. Hsieh H. H., Denneau L., Wainscoat R. J., et al. The main-belt comets: The Pan-STARRS1 perspective. *Icarus*. 2015. 248. P. 289—312.
  25. Jenkins J. M. *Kepler data processing handbook: Overview of the science operations center*. Kepler Science Document KSCI-19081-002 2017.
  26. Jenkins J. M., Caldwell D. A., Chandrasekaran H., et al. Initial characteristics of Kepler long cadence data for detecting transiting planets. *Astrophys. J. Lett.* 2010. 713(2). P. L120—L125.
  27. Jewitt D., Hsieh H., Agarwal J. *The active asteroids*. 2015. P. 221—241.
  28. Jones G. H., Knight M. M., Battams K., et al. The science of Sungrazers, Sunskirters, and other Near-Sun Comets. *Space Sci. Rev.* 2018. 214 (1). 20.
  29. Kennedy G. M., Hope G., Hodgkin S. T., Wyatt M. C. An automated search for transiting exocomets. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2019. 482 (4). P. 5587—5596.
  30. Kiefer F., Lecavelier des Etangs A., Augereau J. C., et al. Exocomets in the circumstellar gas disk of HD 172555. *Astron. and Astrophys.* 2014. 561. L10.
  31. Kiefer F., Lecavelier des Etangs A., Boissier J., et al. Two families of exocomets in the beta Pictoris system. *Nature*. 2014. 514(7523). P. 462—464.
  32. Kiefer F., Lecavelier des Etangs A., Vidal-Madjar A. Exocomets in the disk of two young A-type stars. SF2A-2014: *Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, eds.: J. Ballet, F. Martins, F. Bournaud, R. Monier, C. Reyle. French Soc. of Astron. and Astrophys. 2014. P. 39—43.
  33. Korsun P. P., Kulyk I. V., Ivanova O. V., et al. Dust tail of the active distant Comet C/2003 WT42 (LINEAR) studied with photometric and spectroscopic observations. *Icarus*. 2010. 210(2). P. 916—929.
  34. Kóspál A., Moór A., Juhász A., et al. ALMA observations of the molecular gas in the debris disk of the 30 Myr old star HD 21997. *Astrophys. J.* 2013. 776(2). 77.
  35. Kral Q., Matrà L., Wyatt M. C., Kennedy G. M. Predictions for the secondary CO, C and O gas content of debris discs from the destruction of volatile-rich planetesimals. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. 469(1). P. 521—550.
  36. Lagrange A. M., Meunier N., Rubini P., et al. Evidence for an additional planet in the Pictoris system. *Nature Astron.* 2019. 3. P. 1135—1142.
  37. Lagrange-Henri A. M., Beust H., Ferlet R., Hobbs L. M., Madjar A. V. HR 10: a new beta Pictoris-like star? *Astron. and Astrophys.* 1990. 227. P. L13—L16.
  38. Lagrange-Henri A. M., Vidal-Madjar A., Ferlet R. The beta Pictoris circumstellar disk. VI. Evidence for material falling on to the star. *Astron. and Astrophys.* 1988. 190. P. 275—282.
  39. Lecavelier Des Etangs A., Vidal-Madjar A., Ferlet R. Photometric stellar variation due to extra-solar comets. *Astron. and Astrophys.* 1999. 343. P. 916—922.
  40. Mamajek E. E., Bell C. P. M. On the age of the Pictoris moving group. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2014. 445(3). P. 2169—2180.



41. Marcy G. W., Butler R. P., Williams E., et al. The planet around 51 Pegasi. *Astrophys. J.* 1997. 481(2). P. 926—935.
42. Marino S., Matrà L., Stark C., et al. Exocometary gas in the HD 181327 debris ring. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2016. 460(3). P. 2933—2944.
43. Marino S., Wyatt M. C., Panić O., et al. ALMA observations of the Corvi debris disc: inward scattering of CO-rich exocomets by a chain of 3–30 M<sub>J</sub> planets? *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. 465(3). P. 2595—2615.
44. Matrà L., MacGregor M. A., Kalas P., et al. Detection of exocometary CO within the 440 Myr old Fomalhaut belt: A similar CO<sup>+</sup>CO<sub>2</sub> ice abundance in exocomets and Solar system comets. *Astrophys. J.* 2017. 842(1). 9.
45. Mayor M., Queloz D. A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature.* 1995. 378(6555). P. 355—359.
46. Meech K. J., Svoren J. *Using cometary activity to trace the physical and chemical evolution of cometary nuclei.* 2004. P. 317.
47. Montgomery S. L., Welsh B. Y. Detection of variable gaseous absorption features in the debris disks around young A-type stars. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 2012. 124(920). P. 1042.
48. Montgomery S. L., Welsh B. Y. Unusually high circumstellar absorption variability around the Scuti / Bootis star HD 183324. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2017. 468(1). P. L55—L58.
49. Moór A., Henning T., Juhász A., et al. Discovery of molecular gas around HD 131835 in an APEX molecular line survey of bright debris disks. *Astrophys. J.* 2015. 814(1). 42.
50. Mumma M. J., Charnley S. B. The chemical composition of comets — emerging taxonomies and Natal Heritage. *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.* 2011. 49(1). P. 471—524.
51. Rappaport S., Vanderburg A., Jacobs T., et al. Likely transiting exocomets detected by Kepler. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2018. 474(2). P. 1453—1468.
52. Reach W. T., Kelley M. S., Vaubaillon J. Survey of cometary CO<sub>2</sub>, CO, and particulate emissions using the Spitzer Space Telescope. *Icarus.* 2013. 226(1). P. 777—797.
53. Rebollido I., Eiroa C., Montesinos B., et al. The co-existence of hot and cold gas in debris discs. *Astron. and Astrophys.* 2018. 614. A3.
54. Ricker G. R., Winn J. N., Vanderspek R., et al. Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). *J. Astron. Telescopes, Instruments, and Syst.* 2015. 1. 014003.
55. Rousselot P., Korsun P. P., Kulyk I. V., et al. Monitoring of the cometary activity of distant comet C/2006 S3 (LONEOS). *Astron. and Astrophys.* 2014. 571. A73.
56. Schneider J. *The extrasolar planets encyclopaedia.* URL: <http://exoplanet.eu/>
57. Smith B. A., Terrile R. J. A Circumstellar Disk around beta Pictoris. *Science.* 1984. 226 (4681). P. 1421—1424.
58. Swade D., Fleming S., Jenkins J. M., et al. *The TESS science data archive. Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems VII*, eds.: A. B. Peck, R. L. Seaman, B. C. R. SPIE. Digital library. 2018. P. 1070415.
59. Vanderspek R., Doty J., Fausnaugh M., et al. (2018). *TESS Instrument Handbook. Version 0.1.* URL: [https://archive.stsci.edu/missions/tess/doc/TESS\\_Instrument\\_Handbook\\_v0.1.pdf](https://archive.stsci.edu/missions/tess/doc/TESS_Instrument_Handbook_v0.1.pdf)
60. Welsh B. Y., Craig N., Crawford I. A., Price R. J. Beta Pic-like circumstellar disk gas surrounding HR 10 and HD 85905. *Astron. and Astrophys.* 1998. 338. P. 674—682.
61. Welsh B. Y., Montgomery S. Circumstellar gas-disk variability around A-type stars:

- The detection of exocomets? *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 2013. 125(929). P. 759.
62. Welsh B. Y., Montgomery S. L. The appearance and disappearance of exocomet gas absorption. *Adv. in Astron.* 2015. 2015. 980323.
63. Welsh B. Y., Montgomery S. L. Further detections of exocomet absorbing gas around Southern hemisphere A-type stars with known debris discs. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 2018. 474(2). P. 1515—1525.
64. Zieba S., Zwintz K., Kenworthy M. A., Kennedy G. M. Transiting exocomets detected in broadband light by TESS in the beta Pictoris system. *Astron. and Astrophys.* 2019. 625. L13.
65. Zuckerman B., Song I. A 40 Myr old gaseous circumstellar disk at 49 Ceti: Massive CO-rich comet clouds at young A-type stars. *Astrophys. J.* 2012. 758(2). 77.

## REFERENCES

1. Baglin A., Auvergne M., Barge P., et al. (2006) *Scientific Objectives for a Minisat: CoRoT. The CoRoT mission pre-launch status — stellar seismology and planet finding*, eds.: M. Fridlund, A. Baglin, J. Lochard, L. Conroy. ESA Publications Division. 33.
2. Bardyn A., Baklouti D., Cottin H., et al. (2017) Carbon-rich dust in comet 67P/Churyumov-Gerasimenko measured by COSIMA/Rosetta. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 469. S712—S722.
3. Bar-Nun A., Laufer D., Rebolledo O., et al. (2013) *Gas trapping in ice and its release upon warming*. 356. 487.
4. Bennett D. P., Anderson J., Beaulieu J. P., et al. (2007) *An extrasolar planet census with a space-based microlensing survey*. arXiv e-prints. arXiv:0704.0454.
5. Beust H., Lagrange-Henri A. M., Madjar A. V., Ferlet R. (1990) The beta Pictoris circumstellar disk. X. Numerical simulations of infalling evaporating bodies. *Astron. and Astrophys.* 236. 202.
6. Biver N., Bockelée-Morvan D., Paubert G., et al. (2018) The extraordinary composition of the blue comet C/2016 R2 (PanSTARRS). *Astron. and Astrophys.* 619. A127.
7. Borucki W. J., Koch D., Basri G., et al. (2010) Kepler planet-detection mission: Introduction and first results. *Science*. 327(5968). 977.
8. Borucki W. J., Summers A. L. (1984) The photometric method of detecting other planetary systems. *Icarus*. 58(1). 121—134.
9. Borysenko S., Baransky A., Kuehrt E., et al. (2020) Study of the physical properties of selected active objects in the main belt and surrounding regions by broadband photometry. *Astron. Nachr.* 341(9).
10. Boyajian T. S., LaCourse D. M., Rappaport S. A., et al. (2016) Planet Hunters IX. KIC 8462852 — where's the flux? *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 457(4). 3988—4004.
11. Ceccarelli C., Caux E., Wolfire M., et al. (1998) ISO detection of CO(+) toward the protostar IRAS 16293-2422. *Astron. and Astrophys.* 331. L17—L20.
12. Cevolani G., Bortolotti G., Hajduk A. (1987) Debris from comet Halley, comet's mass loss and age. *Nuovo cim. C Geophys. Space Phys. C*. 10. P. 587—591.
13. Christiansen J. L., Jenkins J. M., Caldwell D. A., et al. (2012) The derivation, properties, and value of Kepler's combined differential photometric precision. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 124(922). 1279.
14. Clarke B. D., Caldwell D. A., Quintana E. V., et al. (2017) *Kepler data processing handbook: Pixel level calibrations*. Kepler Science Document KSCI-19081-002.

15. Cochran A. L., Levasseur-Regourd A.-C., Cordiner M., et al. (2015) The composition of comets. *Space Sci. Rev.* 197(1-4). P. 9—46.
16. Combi M. R., Lee Y., Patel T. S., et al. (2011) SOHO/SWAN Observations of short-period spacecraft target comets. *Astron. J.* 141(4). 128.
17. Eiroa C., Rebollido I., Montesinos B., et al. (2016) Exocomet signatures around the A-shell star Leonis? *Astron. and Astrophys.* 594. L1.
18. Ferlet R., Hobbs L. M., Madjar A. V. (1987) The beta Pictoris circumstellar disk. V. Time variations of the CA II-K line. *Astron. and Astrophys.* 185. 267—270.
19. Flynn G. J., Bleuet P., Borg J., et al. (2006) Elemental compositions of comet 81P/Wild 2 samples collected by stardust. *Science.* 314(5806). 1731.
20. Gangestad J. W., Henning G. A., Persinger R. y. R., Ricker G. R. (2013) *A high Earth, Lunar resonant orbit for lower cost space science missions.* arXiv e-prints. arXiv:1306.5333.
21. Greaves J. S., Holland W. S., Matthews B. C., et al. (2016) Gas and dust around A-type stars at tens of Myr: signatures of cometary breakup. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 461(4). 3910—3917.
22. Haas M. R., Batalha N. M., Bryson S. T., et al. (2010) Kepler science operations. *Astrophys. J. Lett.* 713(2). L115—L119.
23. Howell S. B., Sobeck C., Haas M., et al. (2014) The K2 mission: Characterization and early results. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 126(938). 398.
24. Hsieh H. H., Denneau L., Wainscoat R. J., et al. (2015) The main-belt comets: The Pan-STARRS1 perspective. *Icarus.* 248. P. 289—312.
25. Jenkins J. M. () *Kepler data processing handbook: Overview of the science operations center.* Kepler Science Document KSCI-19081-002 2017.
26. Jenkins J. M., Caldwell D. A., Chandrasekaran H., et al. (2010) Initial characteristics of Kepler long cadence data for detecting transiting planets. *Astrophys. J. Lett.* 713(2). P. L120—L125.
27. Jewitt D., Hsieh H., Agarwal J. (2015) *The active asteroids.* 221—241.
28. Jones G. H., Knight M. M., Battams K., et al. (2018) The science of Sungrazers, Sunskirters, and other Near-Sun Comets. *Space Sci. Rev.* 214 (1). 20.
29. Kennedy G. M., Hope G., Hodgkin S. T., Wyatt M. C. (2019) An automated search for transiting exocomets. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 482 (4). P. 5587—5596.
30. Kiefer F., Lecavelier des Etangs A., Augereau J. C., et al. (2014) Exocomets in the circumstellar gas disk of HD 172555. *Astron. and Astrophys.* 561. L10.
31. Kiefer F., Lecavelier des Etangs A., Boissier J., et al. (2014) Two families of exocomets in the beta Pictoris system. *Nature.* 514(7523). P. 462—464.
32. Kiefer F., Lecavelier des Etangs A., Vidal-Madjar A. (2014) Exocomets in the disk of two young A-type stars. SF2A-2014: *Proceedings of the Annual meeting of the French Society of Astronomy and Astrophysics*, eds.: J. Ballet, F. Martins, F. Bouchard, R. Monier, C. Reyle. French Soc. of Astron. and Astrophys. 39—43.
33. Korsun P. P., Kulyk I. V., Ivanova O. V., et al. (2010) Dust tail of the active distant Comet C/2003 WT42 (LINEAR) studied with photometric and spectroscopic observations. *Icarus.* 210(2). P. 916—929.
34. Kóspál A., Moór A., Juhász A., et al. (2013) ALMA observations of the molecular gas in the debris disk of the 30 Myr old star HD 21997. *Astrophys. J.* 776(2). 77.
35. Kral Q., Matrà L., Wyatt M. C., Kennedy G. M. (2017) Predictions for the secondary CO, C and O gas content of debris discs from the destruction of volatile-rich planetesimals. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 469(1). P. 521—550.

36. Lagrange A. M., Meunier N., Rubini P., et al. (2019) Evidence for an additional planet in the Pictoris system. *Nature Astron.* 3. P. 1135—1142.
37. Lagrange-Henri A. M., Beust H., Ferlet R., Hobbs L. M., Madjar A. V. (1990) HR 10: a new beta Pictoris-like star? *Astron. and Astrophys.* 227. P. L13—L16.
38. Lagrange-Henri A. M., Vidal-Madjar A., Ferlet R. (1988) The beta Pictoris circumstellar disk. VI. Evidence for material falling on to the star. *Astron. and Astrophys.* 190. 275—282.
39. Lecavelier Des Etangs A., Vidal-Madjar A., Ferlet R. (1999) Photometric stellar variation due to extra-solar comets. *Astron. and Astrophys.* 343. P. 916—922.
40. Mamajek E. E., Bell C. P. M. (2014) On the age of the Pictoris moving group. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 445(3). P. 2169—2180.
41. Marcy G. W., Butler R. P., Williams E., et al. (1997) The planet around 51 Pegasi. *Astrophys. J.* 481(2). P. 926—935.
42. Marino S., Matrà L., Stark C., et al. (2016) Exocometary gas in the HD 181327 debris ring. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 460(3). P. 2933—2944.
43. Marino S., Wyatt M. C., Panić O., et al. (2017) ALMA observations of the Corvi debris disc: inward scattering of CO-rich exocomets by a chain of 3-30 M planets? *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 465(3). P. 2595—2615.
44. Matrà L., MacGregor M. A., Kalas P., et al. (2017) Detection of exocometary CO within the 440 Myr old Fomalhaut belt: A similar CO<sup>+</sup>CO<sub>2</sub> ice abundance in exocomets and Solar system comets. *Astrophys. J.* 842(1). 9.
45. Mayor M., Queloz D. (1995) A Jupiter-mass companion to a solar-type star. *Nature.* 378(6555). P. 355—359.
46. Meech K. J., Svoren J. (2004). *Using cometary activity to trace the physical and chemical evolution of cometary nuclei.* 317.
47. Montgomery S. L., Welsh B. Y. (2012) Detection of variable gaseous absorption features in the debris disks around young A-type stars. *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 124(920). P. 1042.
48. Montgomery S. L., Welsh B. Y. (2017) Unusually high circumstellar absorption variability around the Scuti / Bootis star HD 183324. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 468(1). P. L55—L58.
49. Moór A., Henning T., Juhász A., et al. (2015) Discovery of molecular gas around HD 131835 in an APEX molecular line survey of bright debris disks. *Astrophys. J.* 814(1). 42.
50. Mumma M. J., Charnley S. B. (2011) The chemical composition of comets — emerging taxonomies and Natal Heritage. *Annu. Rev. Astron. and Astrophys.* 49(1). P. 471—524.
51. Rappaport S., Vanderburg A., Jacobs T., et al. (2018) Likely transiting exocomets detected by Kepler. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 474(2). P. 1453—1468.
52. Reach W. T., Kelley M. S., Vaubaillon J. (2013) Survey of cometary CO<sub>2</sub>, CO, and particulate emissions using the Spitzer Space Telescope. *Icarus.* 226(1). P. 777—797.
53. Rebollido I., Eiroa C., Montesinos B., et al. (2018) The co-existence of hot and cold gas in debris discs. *Astron. and Astrophys.* 614. A3.
54. Ricker G. R., Winn J. N., Vanderspek R., et al. (2015) Transiting Exoplanet Survey Satellite (TESS). *J. Astron. Telescopes, Instruments, and Syst.* 1. 014003.
55. Rousselot P., Korsun P. P., Kulyk I. V., et al. (2014) Monitoring of the cometary activity of distant comet C/2006 S3 (LONEOS). *Astron. and Astrophys.* 571. A73.
56. Schneider J. *The extrasolar planets encyclopaedia.* URL: <http://exoplanet.eu/>

57. Smith B. A., Terrell R. J. (1984) A Circumstellar Disk around beta Pictoris. *Science*. 226 (4681). 1421—1424.
58. Swade D., Fleming S., Jenkins J. M., et al. (2018) *The TESS science data archive. Observatory Operations: Strategies, Processes, and Systems VII*, eds.: A. B. Peck, R. L. Seaman, B. C. R. SPIE. Digital library. 1070415.
59. Vanderspek R., Doty J., Fausnaugh M., et al. (2018). *TESS Instrument Handbook. Version 0.1*. URL: [https://archive.stsci.edu/missions/tess/doc/TESS\\_Instrument\\_Handbook\\_v0.1.pdf](https://archive.stsci.edu/missions/tess/doc/TESS_Instrument_Handbook_v0.1.pdf)
60. Welsh B. Y., Craig N., Crawford I. A., Price R. J. (1998) Beta Pic-like circumstellar disk gas surrounding HR 10 and HD 85905. *Astron. and Astrophys.* 338. 674—682.
61. Welsh B. Y., Montgomery S. (2013) Circumstellar gas-disk variability around A-type stars: The detection of exocomets? *Publ. Astron. Soc. Pacif.* 125(929). 759.
62. Welsh B. Y., Montgomery S. L. (2015) The appearance and disappearance of exocomet gas absorption. *Adv. in Astron.* 2015. 980323.
63. Welsh B. Y., Montgomery S. L. (2018) Further detections of exocomet absorbing gas around Southern hemisphere A-type stars with known debris discs. *Mon. Notic. Roy. Astron. Soc.* 474(2). 1515—1525.
64. Zieba S., Zwintz K., Kenworthy M. A., Kennedy G. M. (2019) Transiting exocomets detected in broadband light by TESS in the beta Pictoris system. *Astron. and Astrophys.* 625. L13.
65. Zuckerman B., Song I. (2012) A 40 Myr old gaseous circumstellar disk at 49 Ceti: Massive CO-rich comet clouds at young A-type stars. *Astrophys. J.* 758(2). 77.

*Ya. Pavlenko, O. Shubina, I. Kulyk, Y. Kuznyetsova, O. Zakhochay,  
P. Korsun, S. Borysenko, V. Krushevska, M. Andreev*

Main Astronomical Observatory of the National Academy of Sciences of Ukraine,  
Kyiv, Ukraine

#### EXOCOMET ACTIVITY AROUND THE STARS AT DIFFERENT EVOLUTION STAGES: CURRENT ISSUES

Modern theories of planetary system formation predict a large population of planetesimals, which are remnants of the primordial matter of the protoplanetary cloud and, at the same time, embryos of small bodies that we observe in our solar system. The planetesimals play an important role in the dynamic and physical evolution of the planetary system. Gravitational scattering of planetesimals which are enriched by volatile elements formed in planets at the early stages of the dynamic evolution of the system might cause these volatile and organic compounds to enter the interior of the planetary system, triggering the formation of planetary atmospheres and further development of life. Small bodies inside planetary systems can evaporate due to the increasing insolation at close distances from the mother star, leading to the development of activity akin to the activity of comets in our solar system. The study of cometary activity in our solar system is aimed primarily at the investigation of the physical processes in the early stages of the development of the protoplanetary cloud. Until recently, it was not possible to study small bodies in other planetary systems because their small size makes it very difficult to detect by direct methods. Over the past 10 years, two space missions, Kepler and TESS (The Transiting Exoplanet Survey Satellite), have been equipped for continuous photometric monitoring to find exoplanets by transit, i. e. monitoring the changes in brightness of a star due to the passage of a smaller object across its disk. The presence of high-precision photometric measurements of the brightness curves of about 200,000 stars, which are available in the public domain, potentially makes it possible to identify rather small changes in the brightness curves of stars due to the pas-

sage of a body with gas-dust coma (exocomet) across the stellar disk. The article considers a number of issues related to the discovery and study of exocomets. The main detection methods based on the analysis of photometric and spectral series of observational data of space missions as well as ground-based observational complexes are considered. We provide a brief review of the main projects devoted to the results of theoretical modeling and experimental studies of the manifestations of exocometic activity. Known cases of manifestations of exocometic activity in planetary systems of stars of different spectral classes are described and the main characteristics of such stars and their planetary systems are given. We discuss the prospects for further research of these still very exotic objects. The importance of such research for understanding evolutionary processes in our own solar system is emphasized.

**Keywords:** comets, planetary systems, minor planets; eclipses, occultations, planets and satellites.

Стаття надійшла до редакції 23.11.2020

Після доопрацювання 12.12.2020

Прийнята до друку 21.12.2020