

Астрономічна фотометрія [1]

Астрономічна фотометрія займається вимірюванням потоку випромінювання від небесних об'єктів з використанням оптико-електронних засобів. Протягом розвитку астрономії використовувалися різні види фотометрії: візуальна, фотографічна, фотоелектрична та ПЗЗ-фотометрія. Це може бути вимірювання потоку випромінювання далекої галактики, туманності, астероїда, планети або зорі.

Світло має двояку природу. Іноді воно поводить як хвиля, що не має чіткої локалізації в просторі, в інший час - як індивідуальна частинка з цілком певними координатами. У фотоелектричній фотометрії використовуються корпускулярні властивості світла, коли світло розглядається як потік дискретних частинок, фотонів.

Спостерігаючи за допомогою телескопа зображення галактик, туманностей, планет, ми отримуємо естетичну насолоду. Виконуючи точні вимірювання потоку фотонів, що прибувають від віддаленої зорі, ми можемо отримати об'єктивні відомості про те, що цікавить нас у небесних тілах: відстанях до них, розмірах, хімічного складу, внутрішній будові, віку і т.і.

Приймачі випромінювання

Є декілька пристроїв, які можна використовувати для вимірювання слабких світлових потоків від небесних об'єктів. Найпопулярніший детектор у фотометрії - фотопомножувач на основі електровакуумної технології. Фотопомножувачі дуже чутливі і здатні виявляти окремі фотони. Фотопомножувачі мають широкий динамічний діапазон із лінійними характеристиками, що робить їх ідеальним приладом для фотометрії.

Прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) також знаходять широке застосування в астрономічній фотометрії. ПЗЗ - матричні напівпровідникові приймачі випромінювання - це продукт високих технологій, головна їх перевага в астрономічних застосуваннях - висока ефективність реєстрації квантів (до 90%). Їх швидкий

розвиток пов'язаний з широким застосуванням в цифрових фотоапаратах, мобільних телефонах і веб-камерах.

Крім вимірювання інтегрального потоку світла, фотоелектрична фотометрія може також використовуватися для отримання додаткової інформації про об'єкт. Поміщаючи фільтри між детектором і джерелом випромінювання, можна отримати дані про спектр випромінювання об'єкту. В астрономії широко використовується термін «UBVRI фотометрія». Він відображає характеристики світлового потоку в ультрафіолетовій (Ultraviolet), блакитній (Blue), видимий (Visual), червоній (Red) та близькій інфрачервоній (Infrared) областях спектру.

Вимірювання блиску зірок

З давніх часів людина, що дивиться на нічне небо, бачила зорі різної яскравості. Так було до тих пір, поки вона не спробувала навести порядок у порівнянні блиску зірок.

Перше вдала спроба була зроблена понад 2000 років тому, коли грецький астроном Гіпарх (Hipparchus) вирішив класифікувати зорі за їх яскравістю. Він грубо розділив зорі на декілька класів за їх яскравістю. Близько 150 року нової ери греко-єгипетський астроном в місті Олександрії Клавдій Птолемеї розширив цю класифікацію. За його класифікацією найяскравіші зорі назвали зорями першої величини. Зорі наступного рівня яскравості були названі зорями другої величини і так далі аж до найслабкіших, ще видимих неозброєним оком. Найслабкіші зорі були класифіковані як зорі шостої величини.

Нескладний математичний розрахунок дозволяє визначити різницю в зоряних величинах. Відмінність між першою і шостою величинами складає 5 одиниць, а відмінність в яскравості складає 100. Різниця в одну зоряну величину відповідає різниці в яскравості, рівній кореню п'ятого ступеня з 100, тобто 2.512. Звідси, зоря другої зоряної величини в 2.512 разів яскравіша, ніж зоря третьої величини і зоря третьої величини в 2.5 разів яскравіша, ніж четвертої, і так далі.

Якщо одна зоря на поверхні землі дає освітленість E_1 , а друга – E_2 для зоряних величин m_1 і m_2 можна записати

$$E_1 / E_2 = 10^{2/5 (m_2 - m_1)}$$

Цей вираз може бути переписано як

$$m_1 - m_2 = -2.5 \log_{10} (E_1 / E_2)$$

Ця формула називається формулою Погсона. Вона дозволяє вимірювати блиск зір в кількісній формі, в зоряних величинах.

Інший чинник, що має відношення до блиску зір, – довжина світлової хвилі випромінювання, зорі мають різну температуру, а отже і різний колір. Для об'єктивного визначення кольору зір виконують фотометрію з використанням світлофільтрів. В сучасних каталогах зорі характеризуються зоряними величинами в трьох фільтрах – V, B і U (візуальна, блакитна і ультрафіолетова величини). Наприклад, Вега, (зірка альфа в сузір'ї Ліри), має видимі величини $V = 0.03$, $B = 0.03$, $U = 0.02$, а Полярна зірка (альфа Малої Ведмедиці) має видимі величини $V = 2.02$, $B = 2.62$ і $U = 3.0$

Лічба фотонів

Коли фотон падає на поверхню металу або напівпровідника він, з певною ймовірністю, вибиває електрон. Це явище, назване зовнішнім фотоефектом, використовується в роботі фотоелектронних помножувачів (ФЕП), електровакуумних приладів для вимірювання світлових потоків.

ФЕП влаштований таким чином, що кожен електрон, вибитий з фотокатода, проходить процес помноження. Потік помножених і прискорених електронів потрапляє на анод, де утворюється імпульс електричного струму, який може бути підсилений і виміряний. Таким чином, кожен первинний фотоелектрон, породжений фотоном, може бути зареєстрований. На цьому заснована техніка лічби фотонів в астрономічній фотометрії.

Астрономічне устаткування для фотометрії

Фотоелектронні помножувачі

Фотопомножувач є одним з найбільш чутливих пристроїв в світлотехніці. Як вже наголошувалося, він здатний виявляти поодинокі фотони. Вихідний сигнал ФЕП прямо пропорційний величині вхідного світлового потоку. Конструкція ФЕП розміщується у вакуумній скляній трубці. Типовий вигляд фотоелектронного помножувача показаний на рис. 1.

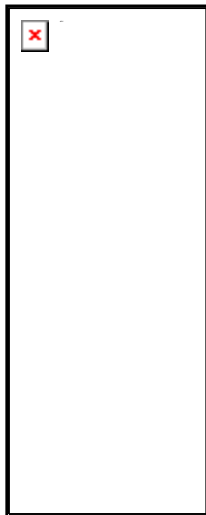


Рис. 1.

Фотоелектронний помножувач (ФЕП) [3] – електровакуумний прилад, в якому потік електронів, що вибивається з фотокатода під дією оптичного випромінювання (фотострум), посилюється в помножувальній системі в результаті вторинної електронної емісії; струм в колі анода (коллектора вторинних електронів) значно перевищує первинний фотострум (зазвичай в 10^5 разів і більше). Вперше був запропонований і розроблений Л. А. Кубецким в 1930–34.

Прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ)

Прилади із зарядовим зв'язком (ПЗЗ) стають з кожним днем все більш популярними. На відміну від ФЕП, які можуть реєструвати потік випромінювання лише від одного об'єкта, ПЗЗ матриці є багатоелементними приймачами зображення і вони дуже зручні для реєстрації великого числа слабких зірок, що знаходяться у полі зору телескопа. Більшість приладів із зарядовим зв'язком чутливі в В, V і R (від Red – червоний) областях спектру. Використання ПЗЗ камер вимагає значно складнішої електронної техніки, ніж у разі ФЕП. ПЗЗ камери мають менший динамічний діапазон, меншу швидкодію і меншу фотометричну точність порівняно із фотопомножувачами. Зразок камери наведений на рис. 2.



Рис. 2

ПЗЗ камера фірми Sony ICX405AL SUPERHAD [4] є панорамним фотоприймачем, що складається з 290 тисяч світлочутливих елементів розміром близько 5 мікрон кожен. Камера може безпосередньо підключатися до PC через USB 2.0 інтерфейс і виконувати фотометричні вимірювання в автоматичному режимі.

Телескоп

Практично будь-який телескоп може бути використаний для фотометрії. Розмір апертури (діаметру об'єктиву) не так вже і важливий, якщо мова не йде про вивчення слабких зірок. Серед любителів астрономії апертури від 10 до 20 см є найпопулярнішими. Для фотометрії в ультрафіолетовій частині спектру потрібно уникати оптичних схем, що містять велику кількість елементів зі скла, яке поглинає ультрафіолетове випромінювання. Тому рефрактори - не кращий вибір для астрономічної фотометрії. З цієї ж причини телескопи системи Максутова далекі від ідеалу. Телескопи системи Шмідта-касегрена з тонкими корегувальними пластинками із скла набагато кращі. Найкращі телескопи для фотометрії - телескопи системи Касегрена і Ньютона.

На рис.3 наведена фотографія фотометричного устаткування Обсерваторії Норкінс в США, яке включає 8 дюймовий телескоп Celestron C-8 системи Шмідта-касегрена.

На рис. 4 крупним планом показані деталі фотометра: контейнер фотопомножувача, окуляр підгляду зображення у полі зору телескопа, турель UVB фільтрів, джерело високовольтного живлення ФЕП, сигнальні кабелі та ін.

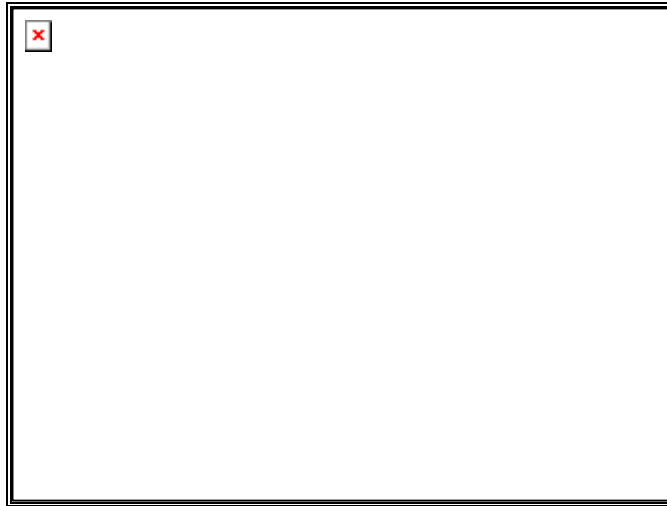


Рис. 3

[20 см телескоп Celestron](#) C-8 системи Шмідта-касегрена Обсерваторії Норкінс з фотоелектричним фотометром [1].



Рис. 4

[UBV фотометр](#) Обсерваторії Норкінс [1].

Застосування астрономічної фотометрії

Пошук і дослідження екзопланет

В останнє десятиліття було виявлено майже 300 екзопланет, що обертаються на орбітах навколо сусідніх зірок. Виявити таку планету можна, спостерігаючи періодичне ослаблення блиску, коли невидима планета проходить по диску зорі.

Трансатлантичний Огляд екзопланет (TRES) в 2004 році оголосив про відкриття планети, яка обертається навколо червоної карликової зорі GSC02652-01324, $V = 11.8$, і має масу рівну 0.75 маси Юпітера. На рис. 5 можна бачити, як планета, яка проходить по диску зорі, ослабляє її блиск приблизно на 2 відсотки. Затемнення триває близько трьох годин.

Таким чином, за допомогою фотометричних спостережень зробили одне з фундаментальних відкриттів в історії астрономії – було експериментально доведено існування планетних систем навколо інших зірок.

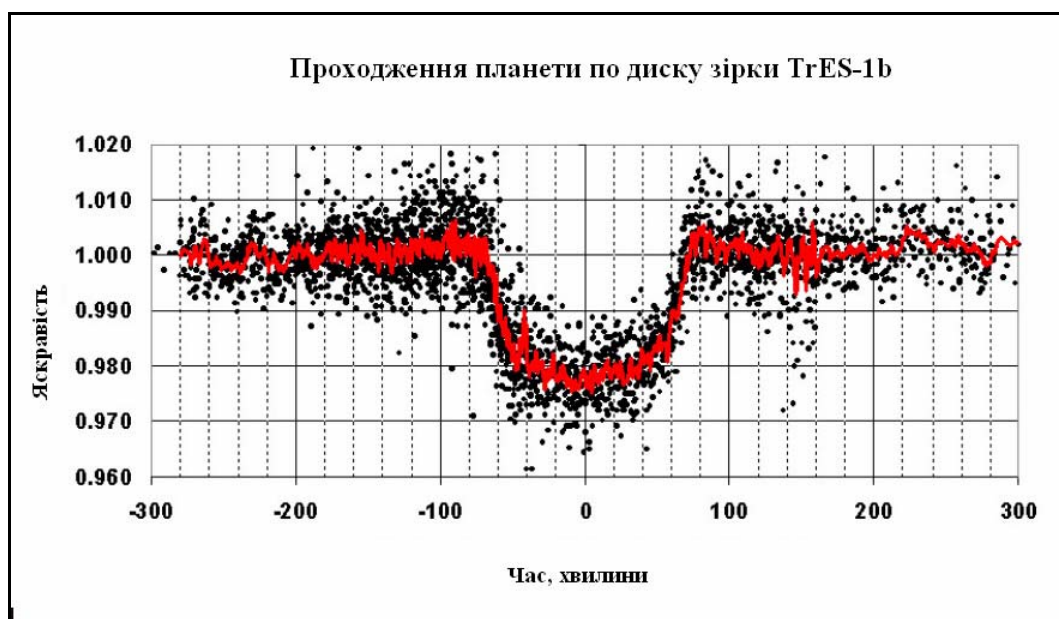


Рис. 5

[Спостереження затемнення диска зорі екзопланетою TrES-1b.](#) Спостереження проводилися на 14-дюймовому телескопі Meade з ПЗЗ камерою SBIG ST10 з часом експозиції 20 секунд [5].

Фотометричні спостереження астероїдів ²

ПЗЗ камери ідеально підходять для вивчення астероїдів. Фотометричні дослідження астероїдів включають побудову кривих блиску і так званих фазових кривих. Ці спостереження дають інформацію про склад, форму, орієнтацію осі обертання астероїдів. Позиційні вимірювання астероїдів з метою визначення

їх орбіт також легко можуть бути виконані з ПЗЗ фотоприймачами навіть на малих телескопах.

Варіації блиску астероїдів на малих проміжках часу (години) пов'язані з їх формою, а на великих (тижні) - з властивостями поверхні. Періоди обертання астероїдів складають в основному від 4 до 12 годин. Амплітуди варіацій кривих блиску - 0.1...0.3 зоряних величин.

Фазові криві блиску (залежність амплітуди коливань від кута між напрямками на Сонце і астероїд) дозволяють зробити висновок про мінералогічний склад астероїдів, про мікроструктуру їх поверхонь. До теперішнього часу лише для 15% астероїдів вивчені криві блиску і фазові криві. На рис. 6 наведена крива блиску астероїда 694 (Ekard).

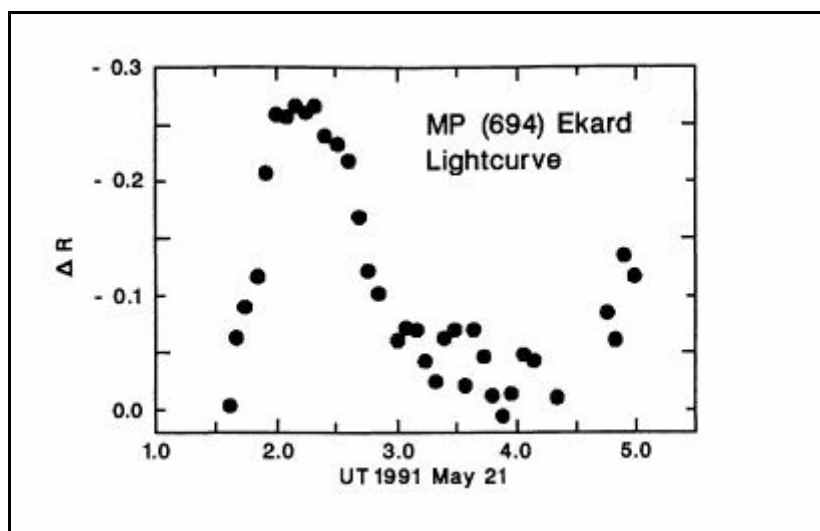


Рис. 6

Крива блиску астероїда 694 (Ekard), отримана 21 травня 1991г. з ПЗЗ камерою в червоному фільтрі R. По горизонтальній осі відкладений час в годинах в шкалі часу UTC [2].

Фотометрія спалахів зірок

Спалахи на червоних карликових зірках інтенсивно спостерігаються на протязі декількох десятиліть. Сонячні спалахи і сонячна

активність в цілому мають багато загального з активністю карликових зірок. Проте спалахи на червоних карликах мають набагато більш чітко виражену структуру, ніж спалахи на Сонці. Це пояснюється двома чинниками: по-перше, світимість Сонця більша, ніж світимість карликів і, по-друге, спалахи на карликових зірках в абсолютних одиницях набагато могутніші, ніж на Сонці. Тому червоні карликові зірки – прекрасний полігон для вивчення Сонячної активності. Відзначимо також, що теорія все ще не в змозі пояснити багато властивостей як сонячних, так і зоряних спалахів і особливо механізми їх виникнення.

На рис. 7 приведені криві блиску спалаху карликової зорі EV Lacertae 12 жовтня 2007 р. Спалах зареєстрований одночасно на двох телескопах – в Кримській астрофізичній обсерваторії і на піку Терскол. Синхронні спостереження дають можливість вивчити деталі кривих блиску під час спалаху з малими амплітудами, які дуже часто залишаються прихованими в шумах вимірювань.

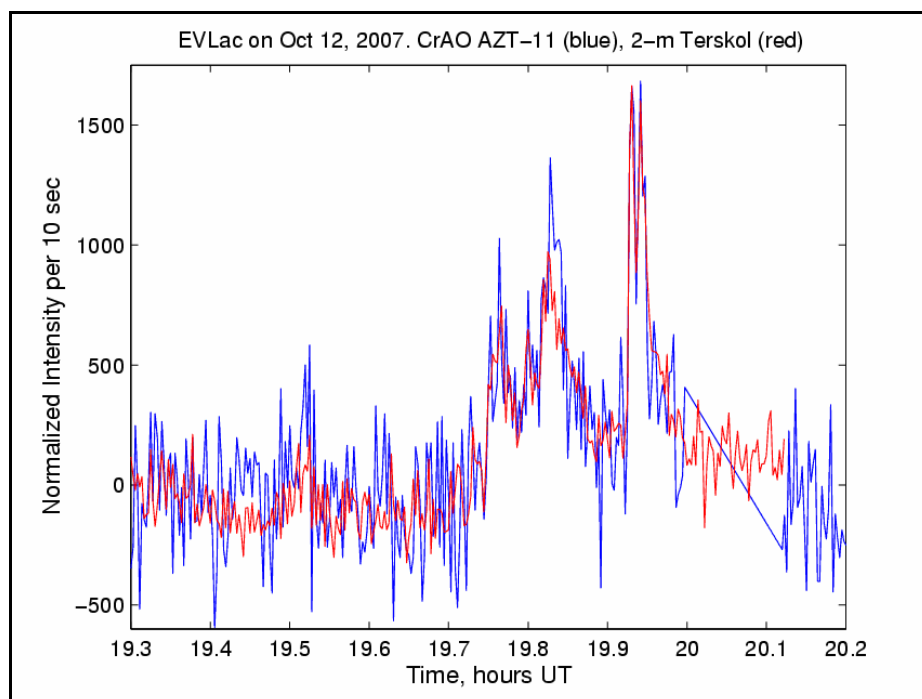


Рис. 7

Крива блиску карликової зорі EV Lacertae 12 Жовтня 2007 р. у фільтрі U. Синім кольором зображені дані, отримані на телескопі АЗТ-11 в Криму, червоним - на 2 метровому телескопі на піку Терскол на Північному Кавказі. По горизонтальній осі відкладений час в годинах в шкалі часу UTC [6].

Спостереження покрить зір Місяцем.

Під час руху Місяця по небу, він час від часу закриває зорі, які знаходяться на його шляху (рис. 8). Це явище називається покриттям.



Рис. 8

Фотометричні спостереження зорі в момент покриття є джерелом цінної астрономічної інформації. Визначення точного моменту дає можливість уточнити параметри руху Місяця, профіль його лімбу. Іноді при фотометричній реєстрації покриття виявляється подвійність зорі з дуже близьким розташуванням компонентів (0,01-0,5 кутових секунди). Подібні системи не розділяються навіть при допомозі великих телескопів. Роздільна здатність всіх великих телескопів обмежується атмосферою Землі. Навіть при найкращих умовах через вплив атмосфери розмір зорі рідко буває меншим 1 кутової секунди.

Фотометричний запис яскравості одиночної зорі під час покриття є по суті записом дифракційної картинки від зорі на краю Місяця

[7]. Для того, щоб її побачити, потрібно фіксувати яскравість зорі з високою часовою роздільною здатністю. Типовий час покриття 20-30 мс. Тому часова роздільна здатність апаратури реєстрації, щоб детально записати дифракційну картинку, повинна бути не гірше ніж 1-5 мс. Такі системи побудовані або на базі ФЕП, або на спеціальних швидкісних матрицях. Опрацьовуючи отриманий запис дифракційної картинки можна оцінити кутовий розмір зорі з точністю до 0.001".

Література

1. За матеріалами книги J. Hopkins, *Астрономічна Фотоелектрична Фотометрія, 2004*
2. S.J. Ratcliff, *Asteroid observations with CCDs, J. AAVSO, V. 21, 1992*
3. *Фотоэлектронный умножитель*. Материал из Википедии
4. Compact and Light Sensitive Monochrome CCD Camera. Матеріали фірми OPTICSTAR
5. Ron Bissinger et. Al., Detection of Possible Anomalies in the Transit Lightcurve of Exoplanet TrES-1b Using a Distributed Observer Network, <http://www.ucolick.org/~laugh/TrES-1b.pdf>
6. Матеріали спостережень М.Ловкої та Б.Жиляєва

¹ Матеріал підготувала І.А.Верлук по матеріалам сайтів цитованих в списку літератури.

² Розділ «Спостереження покрить зір Місяцем» підготував В. Клешонок