

УДК 524.882

Калугін В.В., Назаров С.В., Шиманська Л.А., Белошанка О.Я.

<sup>1</sup> *учень 11 класу КЗ «Маріупольський технічний ліцей» Маріупольської міської ради Донецької області*

ORCID 0000-0001-6670-9600

<sup>2</sup> *науковий співробітник Кримської астрофізичної обсерваторії*

ORCID 0000-0002-9893-4252

<sup>3</sup> *старший учитель, учитель фізики та астрономії КЗ «Маріупольський технічний ліцей» Маріупольської міської ради Донецької області*

e-mail: poshtaukr71@ukr.net, ORCID 0000-0003-0256-4355

<sup>4</sup> *старший викладач кафедри фізики, ДВНЗ «ДДПУ»*

e-mail: kafedrafiziki2018@gmail.com, ORCID 0000-0001-7448-3832

## ДОСЛІДЖЕННЯ АКТИВНИХ ЯДЕР ГАЛАКТИК

Стаття присвячена дослідженню характеристик активного ядра галактики 3С 382 в сузір'ї Ліри. У процесі дослідження проведені фотометричні вимірювання за допомогою програми Maxim DL Pro 6, у якій застосовувався метод апертурної фотометрії, побудовано графік залежності зоряної величини від часу, за допомогою програми WinEFFECT знайдено середній період обертання аккреційного диску та розраховані маса ядра галактики 3С 382, гравітаційний радіус. Отримані результати збігаються з відповідними значеннями, що зберігаються в Центрі астрономічних даних в Страсбурзі.

**Ключові слова:** *галактика, активне ядро галактики, аккреційний диск, гравітаційний радіус, період обертання, чорна діра, квазар, блазар, сейфертовська галактика, радіогалактика, блиск.*

### Вступ

Галактики з активними ядрами є найбільш незвичайними й загадковими об'єктами Всесвіту. Від спокійних звичайних галактик вони відрізняються величезним викидом енергії, що виробляється в ядрах таких галактик. Це неможливо пояснити стандартною теорією, пов'язаною з викидом енергії з ядер зірок унаслідок термоядерних реакцій в їхніх надрах. Вони мають змінність випромінювання в дуже широкому хвильовому діапазоні: від гамма-випромінювання до радіохвиль.

Дослідження активних ядер галактик наблизить людство до розуміння ранніх етапів розвитку нашого Всесвіту — того часу, коли ще тільки зароджувалися зірки, галактики, а надмасивні чорні діри, можливо, уже існували. Не виключено, що ці об'єкти стали центрами, навколо яких поступово утворилися галактики.

Явище, що ми можемо спостерігати в галактиках з активними ядрами, а саме величезний викид енергії з ядер, становить дуже великий інтерес з точки зору безпеки нашої цивілізації: якщо такий спалах станеться в сусідній з нами галактиці, то існування людства може стати під загрозою.

Тому за мету ставимо дослідження характеристик активного ядра галактики 3C 382 в сузір'ї Ліри: побудова графіку зміни блиску ядра галактики, визначення середнього періоду обертання аккреційного диску, визначення маси ядра галактики, визначення гравітаційного радіусу.

## Основна частина

Активні ядра галактик — це найяскравіші джерела світла у Всесвіті. Їхня світність коливається від  $10^{33}$  до  $10^{41}$  Вт, що в 103 рази більша, ніж у багатьох так званих спокійних галактик. Джерело, що випромінює таку потужну енергію, повинно мати розміри порівняні із розміром Сонячної системи.

Ці небесні тіла, зазвичай, виглядають як зореподібні об'єкти, з потужним випромінюванням у діапазоні від радіо- до  $\gamma$ -хвиль з періодичністю випромінювання від кількох хвилин до кількох років. Природа цього випромінювання нетеплова. У більшості активних ядер галактик присутні високошвидкісні вузькі викиди газу у вигляді струменів, які називають джетями (від англ. jet). Джети, як правило, мають у кілька разів більші розміри, ніж сама галактика. Значення видимої швидкості розповсюдження джетів коливається від кількох відсотків швидкості світла до швидкості світла.

Виділяють такі характерні ознаки активних ядер галактик.

1. Нетепловий вид спектру: випромінювання лежить у діапазоні від радіо до гамма випромінювання.
2. Змінність, тобто зміна видимого блиску з періодом від 10 хвилин (у рентгенівському діапазоні) до 10 років (в оптичному та радіодіапазонах).
3. Наявність широких ліній у спектрі, що свідчить про рух гарячого газу з великими швидкостями.
4. Морфологічні особливості (викиди, «гарячі плями»).
5. Спектральні та поляризаційні особливості, які можуть, наприклад, свідчити про наявність магнітного поля та про його структуру.

Існує декілька теорій, що намагаються пояснити активність ядер. Перша теорія передбачає наявність у центрі галактики щільного масивного зоряного скупчення, у якому багато молодих зірок з великою світністю. Згідно з другою теорією джерелом ядерної активності є дуже масивний об'єкт, подібний до зірок з потужним магнітним полем. Третя та четверта теорії пов'язані

з таким об'єктом, як чорна діра. В одній теорії передбачається наявність однієї чорної діри в центрі галактики, а в іншій передбачається наявність у неї супутника. У результаті падіння речовини на чорну діру (цей процес називається акрецією) відбувається виділення величезної кількості енергії. Надмасивні чорні діри, можливо, є однією з причин виникнення загадкових гамма-сплесків — найпотужніших вибухів, що відбуваються на космологічних відстанях від нашої галактики. Ці явища мають великий інтерес, адже якщо такий спалах станеться в сусідній з нами галактиці, то існування людства може стати під загрозою.

Галактики з активними ядрами класифікують на сейфертовські галактики, радіогалактики, квазари та блазари. У 1940-х рр. К. Сейферт виявив у спектрах 12 яскравих ядер спіральних галактик широкі лінії водню, гелію та іонізованого заліза. Дослідження щодо розширення цих ліній дозволила виявити, що швидкість руху випроміненого газу в них має становити від кількох сотень до кількох тисяч км/с. Такі галактики отримали назву сейфертівські. Згодом, на основі спектральних характеристик їх було поділено на два основні типи: Сейферти 1 та Сейферти 2. Сейфертовські галактики — це гігантські спіральні галактики. Для блиску цих галактик властива змінність з амплітудою близько однієї зоряної величини й періодом від декількох днів до декількох тижнів.

Майже одночасно з відкриттям сейфертовських галактик сталося відкриття радіогалактик, яким властиве потужне радіовипромінювання ( $10^{33}$  –  $10^{38}$  Вт) та дуже малий кутовий розмір джерела. Зазвичай це великі еліптичні галактики, розташовані в центрах груп та скупчень. З них виділяють: *D*-галактики (з протяжними газовими оболонками й потужною радіосвітністю близько  $10^{36}$  Дж/с), *cD*-галактики (гігантські еліптичні радіогалактики з масою  $10^{13}$  мас Сонця, абсолютною зоряною величиною  $M = -24$  та світністю у радіодіапазоні  $10^{38}$  Дж/с), *N*-галактики (з дуже яскравим ядром і туманною оболонкою).

У 1950-60-і рр. було відкрито квазари (від англ. *quasistellar object* — квазізоряний об'єкт), тобто джерела радіовипромінювання, що візуально схожі до зірок, але відзначаються змінністю видимого блиску й значною потужністю випромінювання ( $10^{38}$  –  $10^{41}$  Вт). Аналіз спектрів квазарів показує, що за хімічним складом вони мало чим відрізняються від звичайних зірок. Розподіл інтенсивності випромінювання в неперервному спектрі квазара й значна поляризація випромінювання вказують на те, що більшість цієї енергії генерується синхротронним механізмом.

Блазари — це потужні джерела електромагнітного випромінювання в ядрах деяких галактик, які асоціюють з надмасивними чорними дірами. Для них характерні досить швидкі зміни світності у всіх діапазонах спектру протягом кількох діб, висока змінність блиску ( $4 - 5^m$ ), значна поляризація випромінювання (30 – 40%), відсутність в спектрах емісійних ліній.

Сучасна астрономія, а саме астрофізика, не обмежується інформацією, отриманою від оптичних зображень, а займається вивченням випромінювань, що йдуть від небесних об'єктів у досить широкому діапазоні. Серед методів астрофізики велике значення мають такі методи, як астрометрія, астроспектроскопія та фотометрія.



**Рис. 1:** Телескоп АДТ-8 у КрАО

Об'єктом дослідження було обрано галактику з активним ядром ЗС 382 у сузір'ї Ліри. За допомогою телескопа АДТ-8 (рис. 1), що знаходиться у Кримській астрофізичній обсерваторії, протягом 112 діб була зроблена серія фотографій галактики ЗС 382 у сузір'ї Ліри (рис. 2). Параметри телескопу: монтування — екваторіальне, параболічне дзеркало діаметром 0,7 м і фокусною відстанню 2820 мм, фотометр на базі Apogee AP7p ПЗС-камери. Безпосередньо зйомка проводилась науковим співробітником Кримської астрофізичної обсерваторії С.В. Назаровим. Отримана ним серія фотографій була надана для дослідження.

За допомогою фотометричних вимірювань можна отримати багато інформації про досліджуваний об'єкт. У роботі фотометричні вимірювання виконувались за допомогою програми Maxim DL Pro 6, у якій використовується метод апертурної фотометрії.

Перший крок — це калібрування отриманих фотографій, завдяки якому значно зменшується вплив багатьох процесів, які погіршують якість зображення. Це можуть бути електромагнітні перешкоди, тепловий рух електронів усередині приймача, нерівномірність чутливості матриці камери тощо.

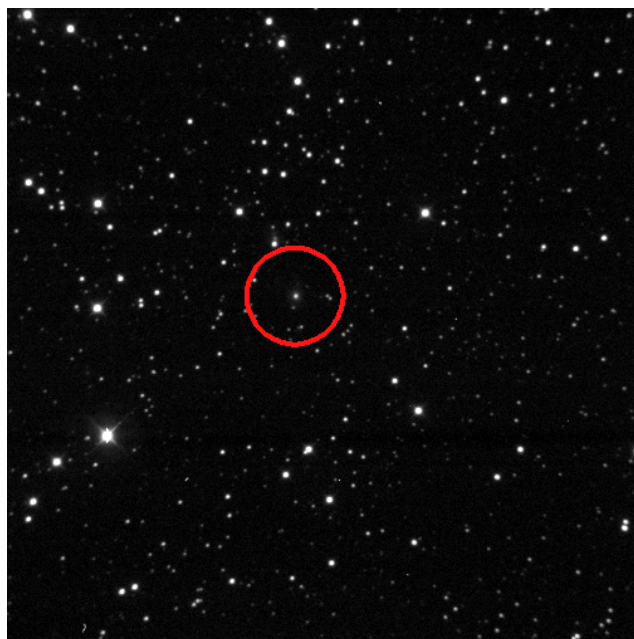


Рис. 2: Фотографія галактики ЗС 382 у сузір'ї Ліри

Другий крок — це безпосередньо фотометричні вимірювання (рис. 3). Для цього потрібно відмітити сам об'єкт «New object», опорні зорі «Reference star», блиск яких повинен бути сталим, бо відносно них визначається зоряна величина об'єкта та перевірючу зорю «Check star», за допомогою якої визначається якість атмосфери, гідрування та інших факторів, що заважають.

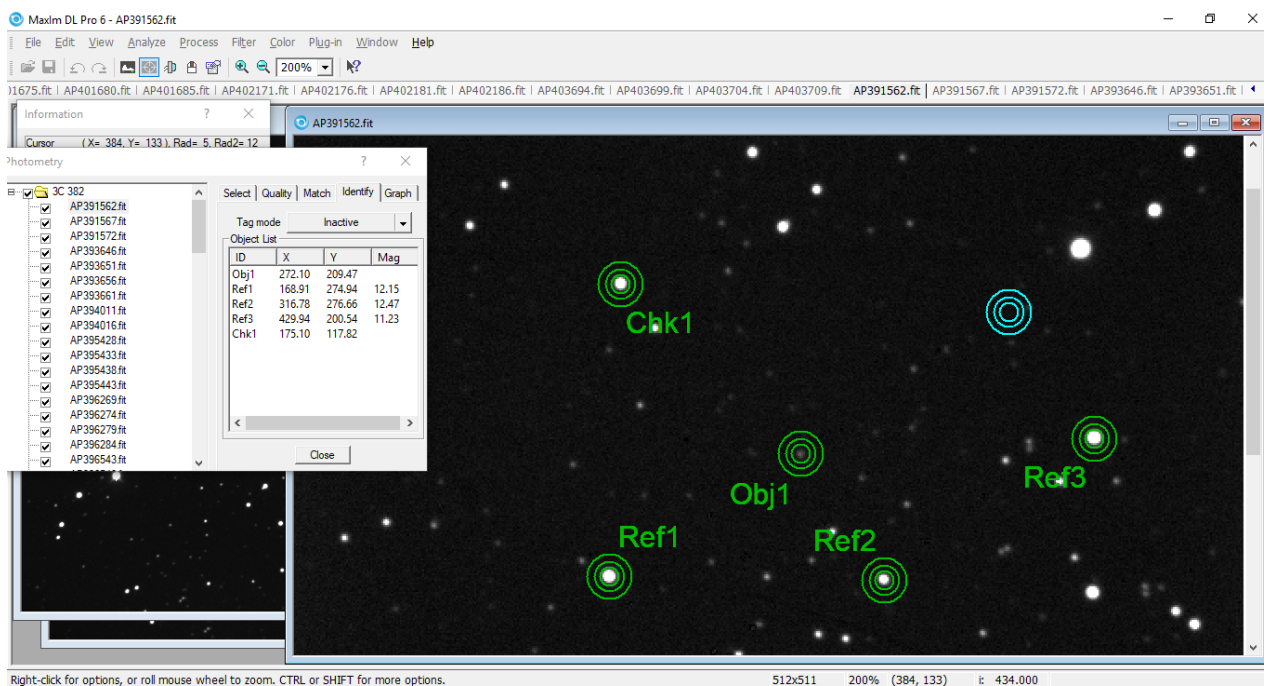


Рис. 3: Калібрування та фотометрія

Для побудови графіка залежності зоряної величини від часу результати, отримані після фотометрії, завантажуються до програми Microsoft Excel (рис. 4).

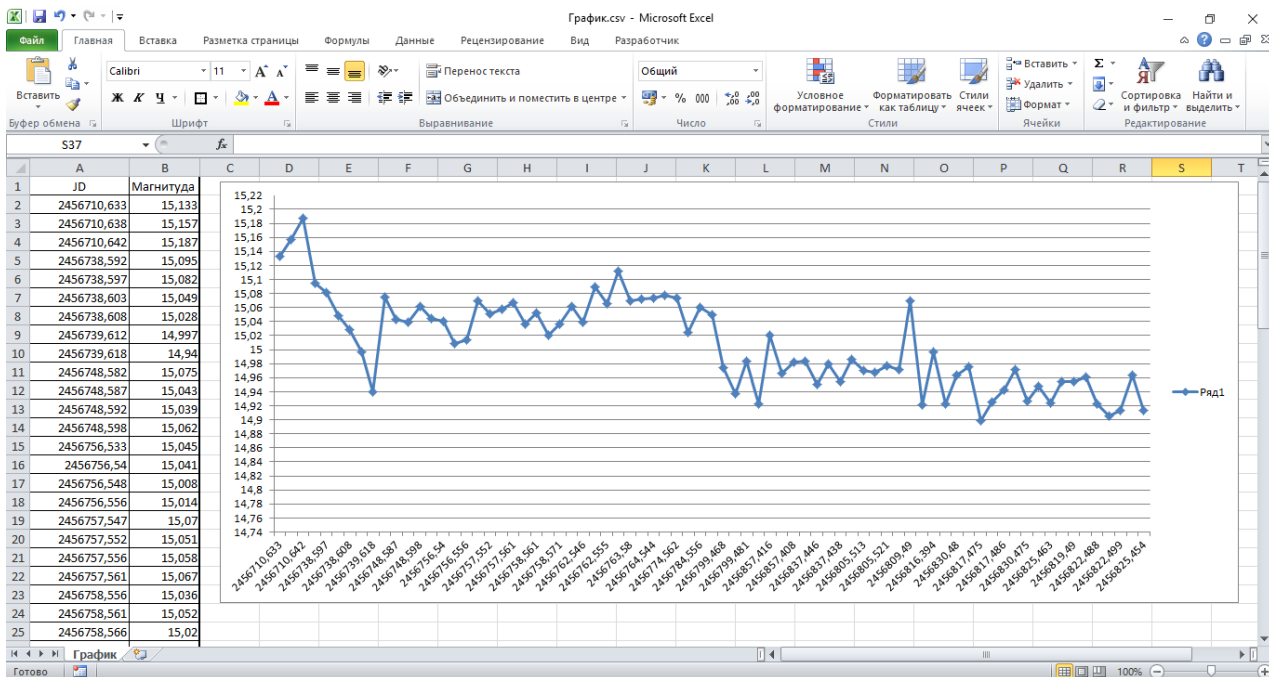


Рис. 4: Побудова графіка залежності зоряної величини від часу

У результаті отримуємо графік залежності зоряної величини ядра галактики 3C 382 (рис. 5).

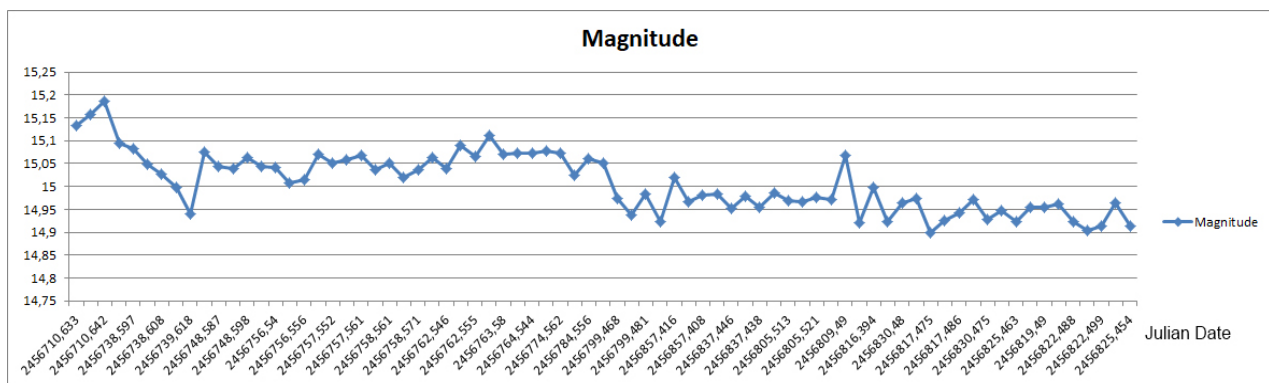


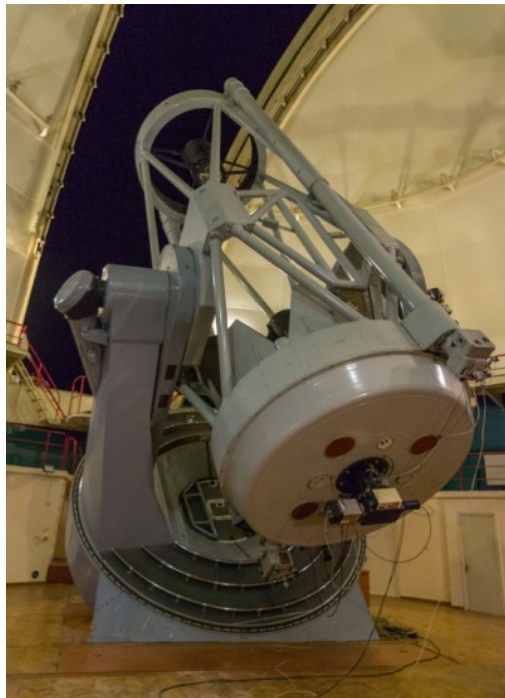
Рис. 5: Графік залежності зоряної величини ядра галактики 3C382

Для визначення середнього періоду обертання аккреційного диску дані, отримані після фотометрії в Maxim DL 6 pro у форматі dat або csv, завантажуються в програму WinEFFECT або її онлайн аналог.

Далі програмі задається одиниці виміру часу (дата), у яких межах може коливатися період обертання аккреційного диску та чи потрібно замінити юліанську дату на григоріанську. Після цього натискаємо «Compute», і програма

завантажує сторінку з результатом. Отриманий середній період дорівнює  $T = 52,07$  доби. Зйомка велась у фільтрі  $V$ , у якому добре видно сам аккреційний диск чорної діри. Можна стверджувати, що отримане значення  $T$  — це і є середній період обертання аккреційного диску.

За даними, що отримані на спектрографі ДТШ (рис. 6), було визначено середню віддаленість аккреційного диску від чорної діри:  $a = 0,554$  а.о.



**Рис. 6:** Телескоп ДТШ в КрАО

Параметри телескопа ДТШ: екваторіальне монтування, діаметр дзеркала 2,6 м, фокусна відстань 41,6 м), розташований в КрАО.

Для розрахунку маси ядра галактики можна скористатись третім законом Кеплера  $\frac{T^2(M + m)}{a^3} = \frac{4\pi^2}{G}$ . Якщо знехтувати масою самого диску, можна обчислити масу чорної діри за такою формулою

$$M = \frac{4\pi^2 a^3}{GT^2}, \text{ де:}$$

$M$  — маса чорної діри,

$a$  — середня віддаленість аккреційного диску,

$G$  — гравітаційна стала,

$T$  — середній період обертання.

$$M = \frac{4 \cdot 3,14^2 \cdot 82897691672,6^3 \text{ м}^3}{6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \cdot 4498848^2 \text{ с}^2} = 16,67 \cdot 10^{30} \text{ кг} = 8,31 M_{\odot}$$

Для розрахунку гравітаційного радіуса можна скористатись законом збереження і перетворення енергії. Зміна кінетичної енергії частинки дорівнює зміні її потенціальної енергії:  $\Delta E_K = \Delta E_{\Pi}$ , тобто

$$\frac{mv^2}{2} = \frac{mGM}{R_G},$$

звідки гравітаційний радіус можна розрахувати за формулою

$$R_G = \frac{2GM}{c^2},$$

де

$R_G$  — гравітаційний радіус,

$G$  — гравітаційна стала,

$M$  — маса ядра галактики,

$c$  — швидкість світла.

Тобто

$$R_G = \frac{2 \cdot 6,67 \cdot 10^{-11} \frac{\text{Н} \cdot \text{м}^2}{\text{кг}^2} \cdot 16,67 \cdot 10^{30} \text{кг}}{(3 \cdot 10^8 \frac{\text{м}}{\text{с}})^2} = 26,67 \cdot 10^3 \text{ м}.$$

Розраховані значення маси ядра галактики ЗС 382 та гравітаційного радіусу збігаються з відповідними значеннями, які були отримані в астрофізичних обсерваторіях за допомогою телескопів АДТ-8, які займаються моніторингом активних ядер галактик. Ці дані зберігаються в Центрі астрономічних досліджень в Страсбурзі (The Centre de données astronomiques de Strasbourg – CDS), що є електронним сховищем даних, який збирає і поширює астрономічну інформацію.

## Висновки

1. Активні ядра галактик характеризуються нетепловим видом спектра, змінністю видимого блиску, широкими спектральними лініями, спектральними та поляризаційними особливостями.
2. Було проведено фотометричні вимірювання за допомогою програми Maxim DL Pro 6, у якій застосовувався метод апертурної фотометрії.
3. У результаті фотометричних вимірювань було побудовано графік залежності зоряної величини від часу, за допомогою програми WinEFFECT, знайдено середній період обертання аккреційного диску та розраховані маса ядра галактики ЗС 382, гравітаційний радіус:

$$\Delta T = 52,07 \text{ доби}, \quad M = 16,67 \cdot 10^{30} \text{ (кг)} = 8,31 M_{\odot}, \quad R = 26,67 \cdot 10^3 \text{ м}.$$



4. Отримані результати збігаються з відповідними значеннями, що зберігаються в Центрі астрономічних даних в Страсбурзі.
5. Дослідження активних ядер галактик необхідне для розуміння людством ранніх етапів розвитку нашого Всесвіту, перевірки фундаментальних фізичних законів.

## Література

1. Активні галактики, радіогалактики і квазари. Астрономічний сайт — ЗОПІ / Галактики.  
URL: <http://zori.org.ua/halaktyky/50-aktyvni-halaktyky-radiohalaktyky-i-kvazary.html>
2. Астрономічні спостереження.  
URL: [https://kern29.at.ua/index/astronomichni\\_sposterezhennja/0-11](https://kern29.at.ua/index/astronomichni_sposterezhennja/0-11)
3. Квазари та блазари. Астрономія.  
URL: [https://my-astronomy.ucoz.ua/index/kvazari\\_ta\\_blazari/0-44](https://my-astronomy.ucoz.ua/index/kvazari_ta_blazari/0-44)
4. Модели активних ядер галактик. CollectedPapers. Вісник ЧНУ ім. Юрія Федьковича / Нестационарные явления в галактиках.  
URL: [https://collectedpapers.com.ua/ru/non\\_stationary\\_phenomena\\_in\\_galaxies/modeli-aktivnix-yader-galaktik](https://collectedpapers.com.ua/ru/non_stationary_phenomena_in_galaxies/modeli-aktivnix-yader-galaktik)
5. Фотометрия. Энциклопедия физики и техники / Новости науки и техники. URL: [http://femto.com.ua/articles/part\\_2/4371.html](http://femto.com.ua/articles/part_2/4371.html)
6. Фотометрия в MaxIM DL.  
URL: <https://astrotourist.info/fotometriya-v-maxim-dl>
7. Period search service. URL: <http://scan.sai.msu.ru/lk/>
8. SIMBAD Astronomical Database — CDS (Strasbourg).  
URL: <http://simbad.u-strasbg.fr/simbad/sim-> (дата звернення: 29.10.2019)
9. The astrophysical journal.  
URL: <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/1538-4357/aa6d52/meta>

---

### **Kaluhin V., Nazarov S., Shymanska L., Beloshapka O.**

Municipal Institution «Mariupol technical lyceum» of Mariupol Citi Council, Donetsk region, Ukraine;

Crimean Astrophysical Observatory, Scientific town, Bakhchisarai district, Crimea, Ukraine;

Donbas State Pedagogical University, Sloviansk, Ukraine.

### **Research of active galaxis nuclears**

The article is devoted to the study of the characteristics of the active nucleus of the galaxy 3C 382 in the constellation Lyra. During the study, photometric measurements were made using Maxim DL Pro 6 software, which used the aperture photometry method, plot the stellar magnitude versus time, using the WinEFFECT program to find the average accretion disk rotation period and calculate the mass of the galaxy 3C 382, the gravitational radius. The results obtained coincide with the corresponding values stored in the Astronomical Data Center in Strasbourg.

**Keywords:** *galaxy, active nucleus of the galaxy, accretion disk, gravitational radius, rotation period, black hole, quasar, blazar, Seyfert galaxy, radio galaxy, glitter.*

---