

УДК 53.082.55

Фудулей Н.О.¹, Горбаньов Ю.М.²

¹Одеський національний університет імені І.І. Мечникова

²НДІ «Астрономічна обсерваторія», ОНУ імені І.І. Мечникова

вул. Дворянська 2, Одеса, 65082

E-mail: nata.fudulei@gmail.com

Використання астрономічної камери ZWO ASI120MM для дослідження молекулярного розсіяння світла

Молекулярне розсіяння світла – метод, який дозволяє визначати інтенсивність та коефіцієнт розсіяння світла. Для більшості водних розчинів, величина такого коефіцієнта співрозмірна з такою для бензолу, але на порядок більше ніж для води. Потому необхідно реєструвати інтенсивність випромінювання порядку $R_b \leq R \approx R_b$. Задля усунення перешкод, пов'язаних з фізико-хімічними процесами, при проведенні подібних експериментів, було запропоновано використовувати високочутливі астрономічні камери. Мета даної роботи полягає в застосуванні високочутливих камер ZWO ASI120MM при дослідженні молекулярного розсіяння світла. В астрономічних дослідженнях при вивченні об'єктів зі слабкими світловими потоками (комет, метеорів, астероїдів), зазвичай використовуються CCD-камери. Для порівняння приведені три типи камер, які використовуються в астрономічних спостереженнях. CCD-камера ВИДЕОСКАН-415-2001 використовуються для спостереження комет та астероїдів, вона має маленькі розміри та може проводити накопичення сигналу без системи охолодження. Камера Watec WAT-902H2 ULTIMATE має високу чутливість, що дозволяє їй фіксувати швидкопролітаючі астрономічні об'єкти, наприклад, метеори. CCD-камера DMK 21AU04.AS котра є аналогом ZWO ASI120MM, використовується для реєстрації швидкопротікаючих процесів. В даній статті, показане успішне застосування астрономічних камер ZWO ASI120MM при дослідженні молекулярного розсіяння світла. Представлена схема експериментальної установки, з використанням даної камери. Показано, що в результаті проведення експериментів можна визначити інтенсивність заломленого та основного променів й розрахувати коефіцієнт розсіяння R для досліджуваних розчинів. Для роботи зі зображеннями, отриманими в результаті досліджень, створено спеціальне програмне забезпечення. Розроблена програма «Light» дозволяє проводити вимірювання усередненого значення інтенсивності. В ході послідовних експериментів, при постановці нових задач, програмне забезпечення буде допрацьовуватися та вдосконалюватися. В подальшому, планується використовувати дану методику для дослідження водно-білкових розчинів.

Ключові слова: молекулярне розсіяння світла, астрономічні камери, коефіцієнт розсіяння, водні розчини.

Вступ. Як відомо, молекулярне розсіяння світла (MPC) – метод, який дозволяє отримувати інформацію про взаємодію світла з конденсованою речовиною. Для цього, на шляху падаючого світлового потоку повинні зустрічатися оптичні неоднорідності, наприклад: колоїдні частинки, пил або сажа [1]. Вивченню даного методу присвячена велика кількість робіт, з них можна виділити фундаментальні дослідження Фабелінського та Вукса [2,3].

Для дослідження молекулярного розсіяння світла необхідні три основні компоненти експериментальної установки: джерело випромінювання, система

для задавання кутів та фотоприймальний пристрій. Джерелом випромінювання зазвичай виступає лазер, в якості фотоприймального приладу використовують ФЕП (фотоелектронний помножувач), який працює в режимі лічення фотонів. В останній час, задля модернізації вимірювань в подібних установках, замість ФЕП почали використовувати різноманітні камери. Так в деяких статтях [4-6] представлено застосування CCD-камер для вивчення динамічного розсіювання світла.

За допомогою методу молекулярного розсіювання світла можна визначити інтенсивність та коефіцієнт розсіювання речовини R (коефіцієнт Релея). Таким чином, при дослідженні рідин [3] було визначено, що у води в 12 разів слабкіша світлорозсіювальна здатність, ніж у бензолу. Більшість досліджуваних водних розчинів мають коефіцієнт розсіювання співрозмірний з бензолом, тому необхідно забезпечити реєстрацію інтенсивності порядку $R_B \leq R \approx R_B$. Основними перешкодами при проведенні подібних експериментів є флуктуації інтенсивності джерела світла та забруднення (домішки) в розчині. Розділити зміну інтенсивності пов'язану з фізико-хімічними процесами та шуми, зазвичай, неможливо. Тому було запропоновано використовувати високочутливі астрономічні камери, та методики, які використовуються в астрономії при реєстрації слабких світлових потоків та об'єктів, що швидко змінюються (типу метеорів), для задач молекулярного розсіювання світла.

Метою цієї роботи є застосування високочутливої астрономічної камери ZWO ASI120MM для дослідження молекулярного розсіювання світла.

1. Застосування камер в астрономічних спостереженнях. В астрономічній практиці, досліджуючи об'єкти з малими світловими потоками, зазвичай застосовують CCD-камери з накопиченням, що дозволяє фіксувати такі об'єкти як: зорі, астероїди, комети і т.д. Як правило, досліджувані об'єкти мають слабкий світловий потік і базова задача приймача випромінювання - накопичити достатньо світла, щоб була можливість провести астрономічні та фотометричні вимірювання.

Але існують астрономічні явища з дуже коротким часом життя. Це метеорні явища – горіння пилових космічних частинок в атмосфері Землі на висоті 80-100 км. Влітаючи до земної атмосфери зі космічною швидкістю 11.2-72 км/с пилова метеорна частинка, масою до граму, зазвичай, породжує метеорне явище, яке продовжується менше секунди. В практиці метеорної астрономії, часові проміжки, яке потрібні для отримання миттєвого зображення, складають приблизно 10^{-3} - 10^{-4} с. Такого часового розділення можуть досягати тільки окремі моделі камер й тільки у випадку великих світлових потоків. В нашому випадку це можливо для великих метеороїдів, які породжують вже не метеорні явища, а болідні.

Для прикладу наведемо три типи камер, які використовуються нами для спостереження комет, метеорів та болідів, це CCD-камера ВИДЕОСКАН-415-2001, Watec WAT-902H2 ULTIMATE та CCD-камера DMK 21AU04.AS (одного класу з камерою ZWO ASI120MM).

1.1. CCD-камера ВИДЕОСКАН-415-2001. Представлена камера використовується нами на телескопі системи Шмідта, вона добре себе зарекомендувала для позиційних спостережень комет й астероїдів. Може використовуватися в якості метеорного патрулю в телевізійному режимі для яскравих метеорів та болідів.

На рис.1 представлено тестове зображення ділянки зіркового неба з експозицією 40 с, отримане за допомогою камери ВИДЕОСКАН-415-2001.

До переваг цієї камери можна віднести її невеликі розміри, можливість проводити накопичення сигналу без системи охолодження, наявність електронного затвору. До недоліків слід віднести той факт, що при малих експозиціях чутливість значно спадає в порівнянні, наприклад, з камерами Watec.



Рис. 1. Тестове зображення ділянки зіркового неба отримане на модернізованому телескопі системи Шмідта з CCD-камерою ВИДЕОСКАН-415-2001.

1.2. Камера Watec WAT-902H2 ULTIMATE та її модифікації. Дана модель в різноманітних модифікаціях використовується на спостережній станції Крижанівка Одеської астрономічної обсерваторії з 2003 року, як основний приймач випромінювання для метеорного телевізійного патрулю. Камери Watec WAT-902 незважаючи на достатньо скромні формати зображень, розмір пікселів, часове розділення, 8-біт розрядний аналогово-цифровий перетворював, мають одну важливу характеристику, яка недосяжна для інших камер. Це висока чутливість, яка робить ці камери можливо єдиними в цьому класі (з часовим розділенням 0.02 с) придатними для фіксації слабких метеорів або інших швидкопролітаючих об'єктів, наприклад штучних супутників Землі. Такі камери дозволяють отримувати зображення метеорів до 12 зіркової величини, що було досяжним для фотографічних спостережень у минулому. На рис.2 представлено комбіновані зображення різних типів метеорів, де кожний штрих представляє окрему експозицію в 0.02 с.

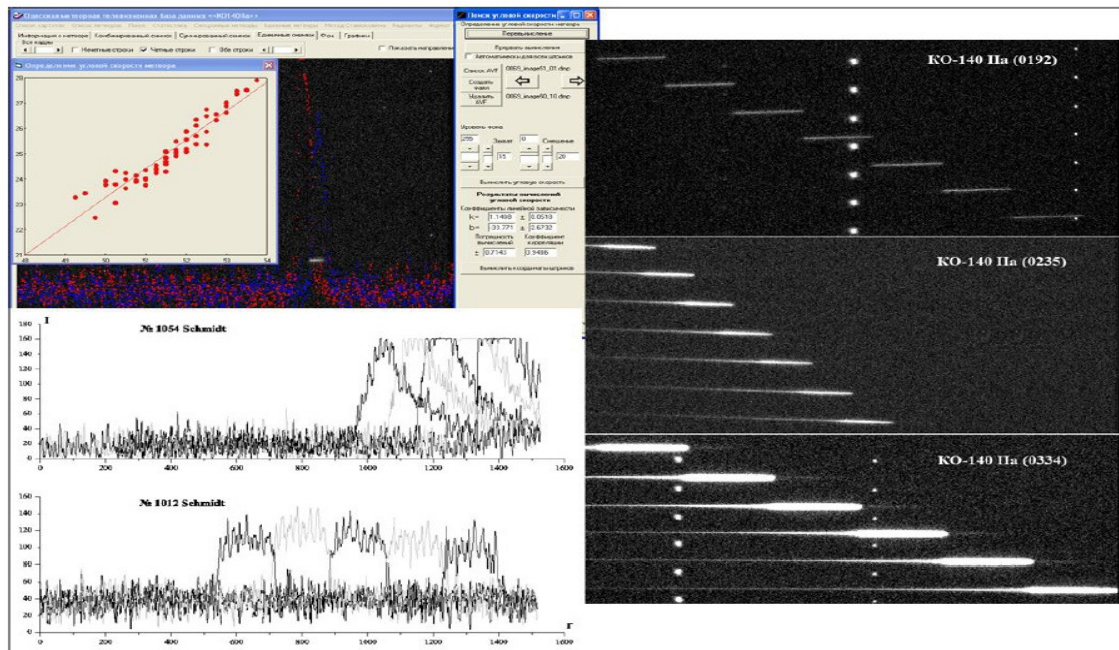


Рис.2. Комбіновані зображення різних типів метеорів.

Різниця у зображеннях метеорів пов’язана з їх різними походженнями: одні є частинами астероїдів, а інші – комет. Астероїдні пилові частинки представляють собою кам’яні або залізні пилінки та мають велику густину, в той час як частинки кометного походження представляють собою суміш пилу та льоду. У метеорів кометного походження, як правило, існує хвіст. Він показує інтенсивність руйнації частинки. CCD-камери Watec дозволяють надійно фіксувати динаміку такого процесу.

В лівій частині рис. 2 представлені результати обробки метеорних штрихів, які дозволяють отримувати високоточні величини кутових швидкостей метеорів. Таку можливість забезпечила стабільна робота камер. В одній з перших робіт по ці темі [7] було проведено спеціальні експерименти та протестовано камеру Watec 902K на предмет стабільності роботи. Обробка даних експериментів показала, що досягається стабільність частоти з точністю 0.05 мс^{-1} , стабільність інтенсивності сигналу не гірше 6%. Результати досліджень представлено у ряді публікацій [7-9].

Для ілюстрації роздільної здатності камер Watec на рис.3 наведено зображення метеора, що подрібнюється, отримані одночасно на двох інструментах.

Верхній знімок отримано за допомогою об’єктиву КО-140 (світлова сила 1:2, фокусна відстань 140мм), нижній – за допомогою телескопа системи Шмідта (світлова сила 1:2.24, еквівалентна фокусна відстань 500мм). Використовувались однотипні приймачі випромінювання CCD-камери Watec. Отримано унікальні знімки, які документально підтверджують процес подрібнення метеорів у земній атмосфері, по радіолокаційним спостереженням серед всіх інших метеорів, такі, що подрібнюються, займають лише 2%. За допомогою об’єктиву з короткою фокусною відстанню фіксуються лише два великих фрагменти, а з телескопом системи Шмідта можна фіксувати тонку структуру метеора. На рис.3 з правої сторони представлено графіки поперечних сканів відносно траек-

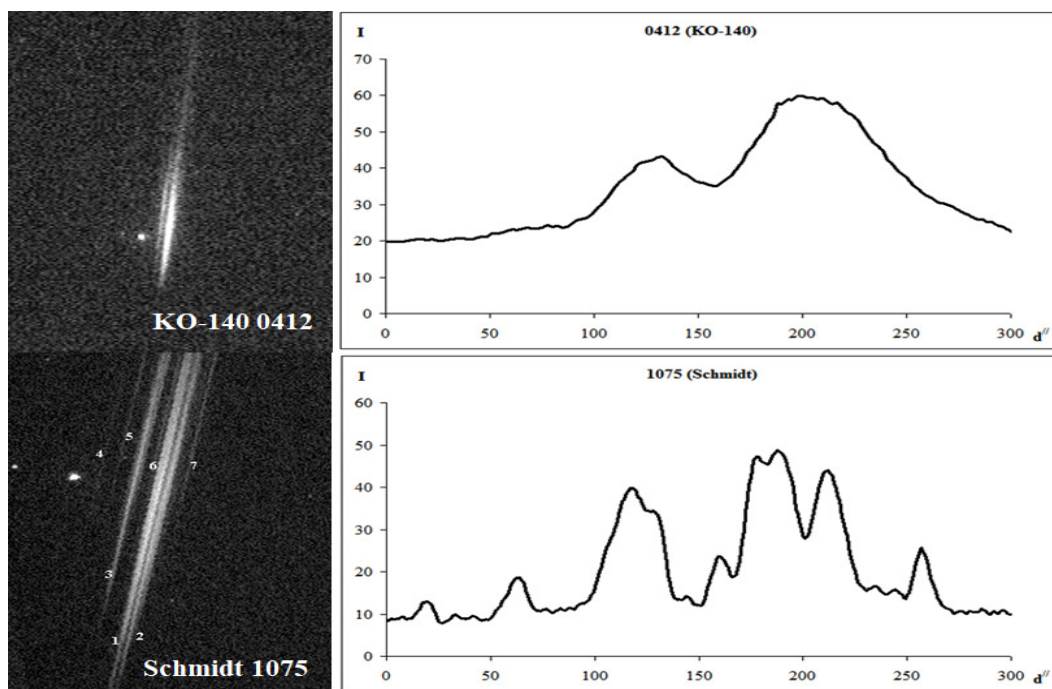


Рис.3. Подрібнення метеорних частинок в земній атмосфері

торії руху. У випадку телескопу системи Шмідта для того ж метеору зафіксовано не менше 10 фрагментів. Астрономічна обробка кожного зображення з позиційною роздільною здатністю в 1 кутову секунду та часовим розділенням в 0.02 с, дозволила визначити, що під час польоту в земній атмосфері відбулося три акти подрібнення. Це говорить про неоднорідну структуру яскравого метеору. В цілому, інформація отримана за допомогою камер Watec, дозволяє отримати унікальний матеріал для спостереження, інтерпретація якого відкриває нові можливості в метеорній астрономії.

1.3. CCD-камера DMK 21AU04.AS. CCD-камера DMK 21AU04.AS аналогічна камері ZWO ASI120MM. До переваг таких камер, можна віднести маленький розмір пікселів 5.6 мкм для DMK 21AU04.AS та 3.75 мкм для камери ZWO ASI120MM. Також, можна додати можливість працювати через USB-порт, що значно полегшує спостереження. Звісно, ці камери поступаються камерам ВИДЕОКАН-415-2001 та Watec WAT-902H2 ULTIMATE за чутливістю, але вони призначені для планетарно-місячних зйомок, для гідрування або спостереження яскравих болідів. Окрім того, подібні апарати можуть бути використані для реєстрації швидкопротікаючих процесів, в залежності від можливостей приймальної апаратури.

2. Застосування камери ZWO ASI120MM для MPC. Для дослідження молекулярного розсіяння світла використовувалась установка, блок-схема якої представлена на Рис.4. В нашій експериментальній установці використовується камера ZWO ASI120MM. Це монохроматична камера, яка має детекторну матрицю CMOS, розміром 1/3 дюйму з цифровим зображенням AR0130.

З лазера (1) виходить промінь, котрий ділиться на два промені (основний та заломлений). Основний проходить через систему коліматорів (2), далі напра-

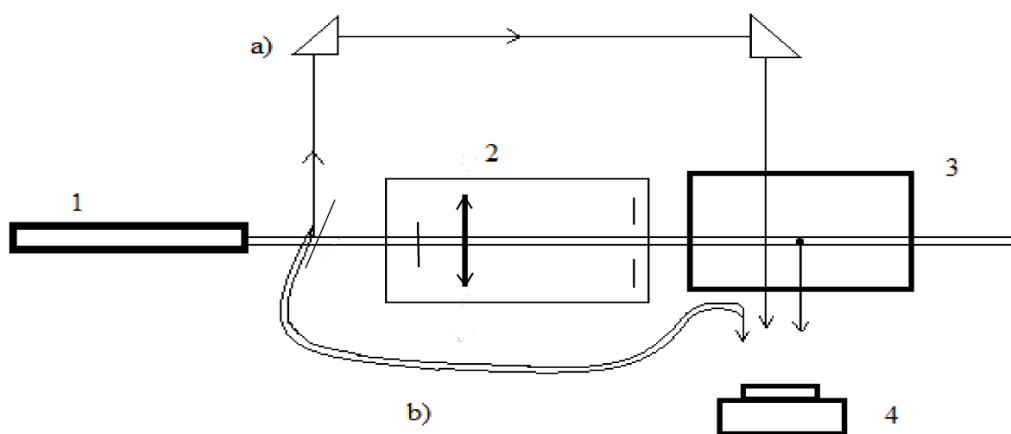


Рис.4. Схема експериментальної установки: 1 – джерело світла (лазер), 2 – система коліматорів, 3 – кювета з розчином, 4 – камера ZWO ASI120MM. Розділення лазерного променя за допомогою: а) системи опорного променя, б) оптоволокна

вляться на кювету з рідиною (3) та фіксується камерою (4). Заломлений промінь направляється за допомогою системи опорного променя (а) або оптоволокна (б), також на кювету та фіксується аналогічно. Далі інформація з камери передається на ПК, обробляється програмою, написаною та адаптованою для роботи зі зображеннями, отриманими на установці по розсіюванню світла.

По інтенсивності заломленого променя визначається I_0 , а по інтенсивності основного, який проходить через кювету – I . Подібне розділення променів дозволяє визначити відносну інтенсивність розсіяного світла I/I_0 . При молекулярному розсіянні світла можуть спостерігатися флуктуації різних величин: анізотропії, концентрації або тиску. Розсіяння світла на подібних флуктуаціях призводить до зміни частоти та відповідно інтенсивності розсіяного світла. Коefіцієнт розсіяння рідини визначається наступним виразом $R = \frac{I r^2}{I_0 V}$ [3], де r – відстань, V – об'єм розсіяння. За допомогою даної установки за тестові зразки досліджувались бензол та дистильована вода.

3. Програмне забезпечення для обробки зображень отриманих за допомогою камери ZWO ASI120MM. Використовуючи розробки програмного забезпечення для обробки зображень метеорних явищ, ми створили просту програму, котра дозволяє проводити вимірювання по зображенням, які отримані за допомогою камери ZWO ASI120MM. Програмне забезпечення написано на мові програмування Visual Basic 6.0.

На рис.5 та рис.6 представлений інтерфейс програми «Light», при обробці зображень тестових зразків, дистильованої води та бензолу відповідно, отриманих за допомогою експериментальної установки представленої вище. Світлові точки на зображеннях – заломлений промінь.

При порівнянні зображень бензол та дистильованої води Рис.7, видно, що інтенсивність розсіяного світла в дистильованій воді набагато менша ніж в бензолі, як ми й зазначали раніше.

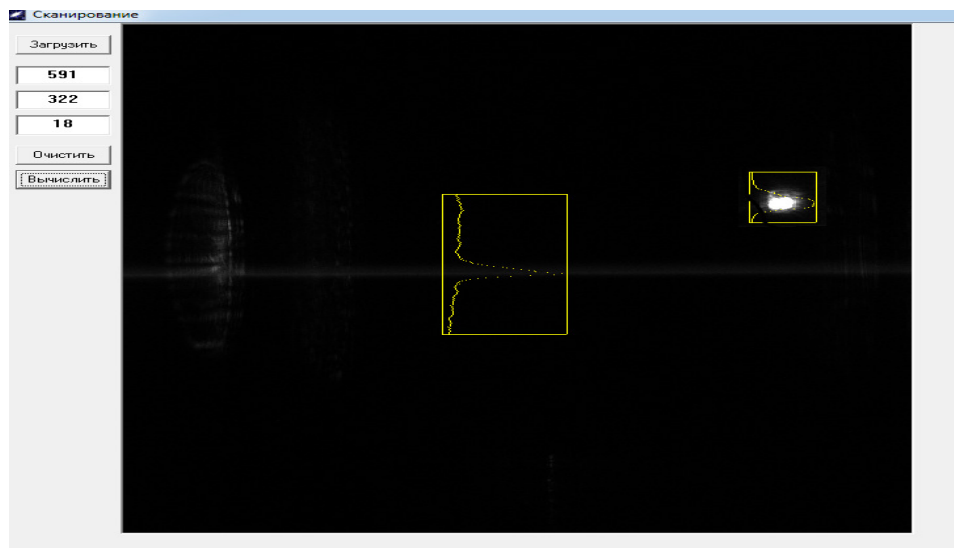


Рис.5. Інтерфейс програми «Light» при обробці зображення дистильованої води отриманої камерою ZWO ASI120MM на експериментальній установці.

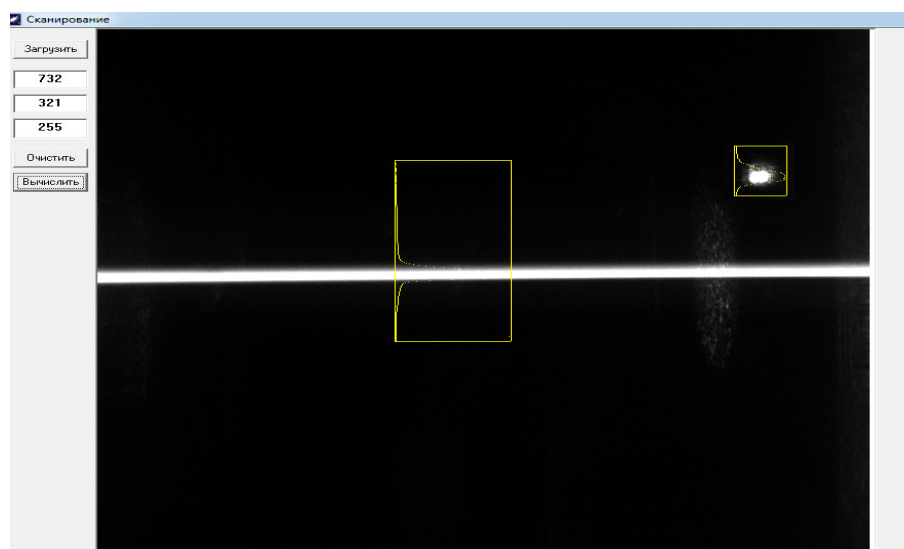


Рис.6. Інтерфейс програми «Light» при обробці зображень бензолу.

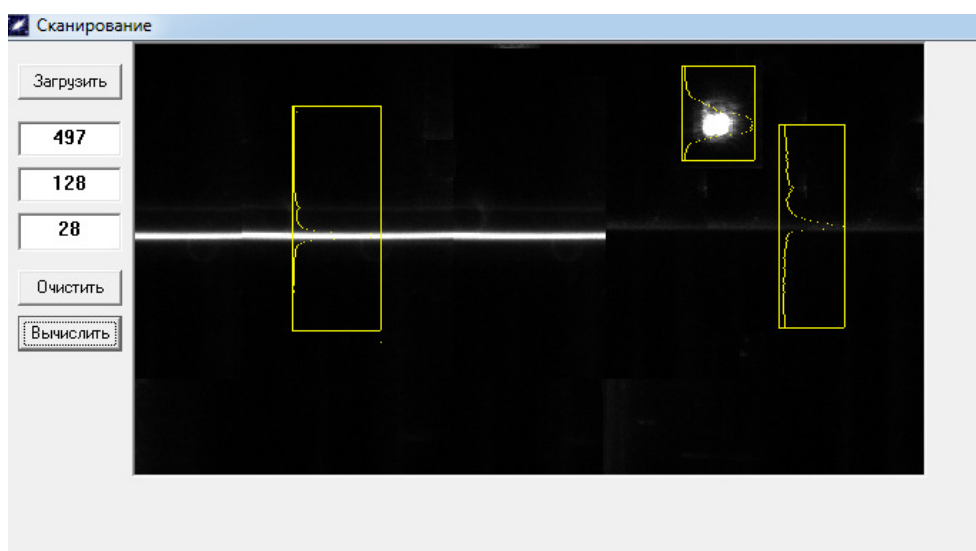


Рис.7. Порівняння зображень дистильованої води та бензолу.

Результатом роботи з камерою є файли в форматі BMP з розрядністю 8 біт. При натисканні кнопки «Загрузити» відбувається зчитування файлу в форматі BMP та створення числового масиву, з котрим й відбувається подальша обробка. При русі курсором комп'ютерної миші по зображенню, відображаються точні координати та інтенсивність вибраного пікселя. Наступною процедурою є виділення робочого вікна, в якому буде відбуватися сканування вибраної зони зображення. Натиснув ліву кнопку миші, відображається точка, вона відповідає одному з кутів прямокутного робочого вікна. Змістивши курсор та натиснув праву кнопку миші, ми відмітимо протилежний по діагоналі робочого вікна кут прямокутника, котрий після натискання кнопки відобразиться в вигляді жовтого прямокутника. Після цього можна натиснути кнопку «Вирахувати», що приведе до сканування зображення, і в робочому вікні відобразиться графік скану. Результати автоматично записуються в форматі CSV. Кожна точка на скані відповідає усередненому значенню інтенсивності по горизонтальному ряду пікселів. У випадку, якщо потребується повторити процедуру, можна натиснути кнопку «Очистити» і потім виділити нове робоче вікно. Дану методику плануємо застосовувати для дослідження молекулярного розсіяння водно-білкових розчинів. Так як по їх абсолютній інтенсивності можна визначити молекулярну масу макромолекул протеїнів[2]. В подальшому, по мірі появи нових задач, програмне забезпечення буде допрацьовуватись.

Висновки. В даній роботі проаналізовано три види камер, які найчастіше використовуються в астрономічних спостереженнях. Також показане успішне застосування астрономічної камери ZWO ASI120MM при дослідженні молекулярного розсіяння світла розчинами. Розроблено програмне забезпечення для обробки зображень отриманих в процесі експерименту. Загалом, подібні камери також можуть використовуватися і в інших розділах експериментальної фізики, де досліджуються достатні світлові потоки. Наприклад, таку методику вимірювання можна запропонувати при застосуванні астрономічних відеокамер в лічильнику частинок [10].

Література:

1. *Фабелинский И.Л.* Спектроскопия молекулярного рассеяния свет // Сорский образовательный журнал. – 2004. – Т.8, №2. – С. 99-105.
2. *Фабелинский И.Л.* Молекулярное рассеяние света. – М.: Высшая школа, 1965. – 512 с.
3. *Вукс М.Ф.* Рассеяние света в газах, жидкостях и растворах. – Л.: Изд-во ЛГУ, 1977. – 320 с.
4. *Zakharov P., Bhat S., Schurtenberger P., Scheffold F.* Multiple scattering suppression in dynamic light scattering based on a digital camera detection scheme // *Appl. Opt.* – 2006. – Vol.45. – P. 1756-1764.
5. *Zakharov P., Scheffold F.* Advances in dynamic light scattering techniques // in A.A. Kokhanovsky, ed. *Light Scattering Reviews* 4. Heidelberg: Springer – 2009. – P.433-468.

6. Бункин Н.Ф., Суязов Н.В., Ципенюк Д.Ю. Малоугловое рассеяние лазерного излучения на стабильных образованиях микронного масштаба в дважды дистиллированной воде // Квантовая электроника. – 2005. – Т.35, №2. – С. 180-184.
7. Gorbanev Yu.M., Golubaev A.V., Zhukov V.V., Knyaz'kova E.F., Kimakovskii S.R., Kimakovskaya I.I., Podlesnyak S.V., Sarest L.A., Stogneeva I.A., Shestopalov V.A. Methods and statistics of TV observations of telescopic meteors. // Sol. Syst. Res. – 2006. – Vol. 40. Iss. 5. – P. 412-426.
8. Gorbanev, Yu.M. Odessa Television Meteor Patrol // Odessa Astronomical Publications. – 2009. – Vol. 22. – P. 60-67.
9. Gorbanev Yu.M., Golubaev A.V., Zhukov V.V., Kimakovskaya I.I., Kimakovskiy S.R., Knyazkova E.F., Podlesnyak S.V., Sarest L.A., Stogneeva I.A., Shestopalov V.A. Techniques for positional measurements of telescopic meteor TV images // Sol. Syst, Res. – 2008. – Vol. 42. Iss. 1. – P. 35-50.
10. Контуш С.М., Щекатолина С.А., Дыханов С.М. Применение лазерного счетчика частиц для измерения чистоты воздуха // Холодильна техніка та технологія. – 2013. – №6 (146). – С. 60-65.

Fudulei N.O., Gorbanev Yu.M.

Employment of astronomical cameras ZWO ASI120MM for investigation of molecular light scattering

SUMMARY

Molecular light scattering – the method allow to determine the intensity and coefficient of scattering of the substance. For most of aqueous solutions, the value of this coefficient is comparable to that for benzene, but an order of magnitude more than for water. Therefore, it is necessary to register the emitting intensity of the order of $R_B \leq R \approx R_B$. For provide such experiments it has been proposed to used the high sensitive astronomical cameras, for eliminate interference, which allowed with physical-chemical processes. The aim of this work is to apply the high sensitive cameras ZWO ASI120MM in the investigation of molecular light scattering. In astronomical research for study the objects with weak light flows (comets, meteors, asteroids), usually used the CCD-cameras. For comparison three types of cameras, which used in the astronomical observations, are given. The CCD-camera VIDEOSCAN-415-2001 has been used for observation of the comets and asteroids, it has a small sizes and can to accumulate the signal without a system of refrigeration. The camera Watec WAT-902H2 ULTIMATE has high sensitive, that allow to fix the fast flying astronomical objects, meteors for example. The CCD-camera DMK 21AU04.AS, which is an analogue of ZWO ASI120MM, has been used for registration of fast processes. This article shows a successful application of the astronomical cameras ZWO ASI120MM in the investigation of molecular light scattering. The scheme of experimental setup using that camera is presented. It is shown that as a result of the experiments, it is possible to determine the intensity of the refracted and main ray and calculate the scattering coefficient R for the solutions under study. For work with images obtained as a result of experiments, special software has been created. The developed program “Light” is allowed to conduct to measure the average value of the intensity. In the course of subsequent experiments, when setting new tasks, the software will be refined and improved. In the future, it is planned to use this technique for investigation the water-protein solutions.

Keywords: *molecular light scattering, astronomical cameras, coefficient of scattering, aqueous solutions.*

Фудулей Н.А., Горбанёв Ю.М.

Использование астрономической камеры ZWO ASI120MM для исследования молекулярного рассеяния света

АННОТАЦИЯ

Молекулярное рассеяние света – метод позволяющий определять интенсивность и коэффициент рассеяния вещества. Для большинства водных растворов, величина этого коэффициента соизмерима с таковой для бензола, но больше чем для воды. Поэтому необходимо регистрировать интенсивность излучения такого порядка. Для устранения помех, связанных с физико-химическими процессами, при проведении подобных экспериментов, было предложено использовать высокочувствительные астрономические камеры. Цель данной работы заключается в применении высокочувствительных камер ZWO ASI120MM при исследовании молекулярного рассеяния света. В астрономических исследованиях при изучении объектов со слабыми световыми потоками (комет, метеоров, астероидов), обычно используют CCD-камеры. Для сравнения приведены три типа камер, которые используются в астрономических наблюдениях. CCD-камера ВИДЕОСКАН-415-2001 используется для регистрации комет и астероидов, она имеет малые размеры и проводит накопление сигнала без системы охлаждения. Камера Watec WAT-902H2 ULTIMATE имеет высокую чувствительность, что позволяет ей фиксировать быстролетающие астрономические объекты, например метеоры. CCD-камера DMK 21AU04.AS, которая является аналогом ZWO ASI120MM, используется для регистрации быстропротекающих процессов. В данной статье, показано успешное применение астрономических камер ZWO ASI120MM при исследовании молекулярного рассеяния света. Представлена схема экспериментальной установки, с применением данной камеры. Показано, что в результате проведения экспериментов можно определить интенсивность преломленного и основного луча и рассчитать коэффициент рассеяния R для исследуемых растворов. Для работы с изображениями, полученными в результате исследований, создано специальное программное обеспечение. Разработанная программа «Light» позволяет проводить измерения усредненного значения интенсивности. В ходе последующих экспериментов, при постановке новых задач, программное обеспечение будет дорабатываться и совершенствоваться. В дальнейшем, планируется использовать данную методику для изучения водно-белковых растворов.

Ключевые слова: молекулярное рассеяние света, астрономические камеры, коэффициент рассеяния, водные растворы.