

Посібник від AAVSO зі спостережень за допомогою цифрових дзеркальних камер



AAVSO
49 Bay State Road
Cambridge, MA 02138
email: aavso@aavso.org

Version 1.4
Copyright 2016 AAVSO
ISBN 978-1-939538-18-5

Вступне слово

Цей посібник дає базові знання та є початковим керівництвом із використання цифрових дзеркальних камер (DSLR) для спостереження за змінними зорями.

Цільова аудиторія — від початківців, що починають свої перші спостереження до спостерігачів середнього рівня, які використовують цифрові камери. Також це керівництво може виявитися корисним і для багатьох досвідчених спостерігачів.

Посібник від AAVSO зі спостережень за допомогою цифрових дзеркальних камер був створений завдяки великій зацікавленості у фотометрії з цифровими дзеркальними камерами з боку учасників програми AAVSO "Citizen Sky". Пристрої створення зображень побутового рівня швидко змінюються та удосконалюються, тому ми вирішили написати цей посібник якомога більш узагальнено. Питання, специфічні для певного програмного забезпечення та моделей камер винесені на форуми AAVSO, присвячені фотометрії з цифровими камерами. Якщо читачі мають думку щодо удосконалення змісту посібника, будь ласка, дайте нам знати. Будь ласка, надсилайте ваші відгуки та побажання на адресу aavso@aavso.org.

Більшість матеріалів, що ввійшли в попередні версії посібника, були написані упродовж третього семінару "Citizen Sky", який відбувався з 22 до 24 березня 2013 року у AAVSO. Нижче поданий список авторів відповідних розділів:

Частина 1 (Вступ): Colin Littlefield, Paul Norris, Richard (Doc) Kinne, Matthew Templeton

Частина 2 (Огляд обладнання): Roger Pieri, Rebecca Jackson, Michael Brewster, Matthew Templeton

Частина 3 (Огляд програмного забезпечення): Mark Blackford, Heinz-Bernd Eggenstein, Martin Connors, Ian Doktor

Частини 4 та 5 (Отримання зображень та їх обробка): Robert Buchheim, Donald Collins, Tim Hager, Bob Manske, Matthew Templeton

Частина 6 (Трансформація): Brian Kloppenborg, Arne Henden

Частина 7 (Програма спостережень): Des Loughney, Mike Simonsen, Todd Brown

Рисунки: Paul Valleli

Більша частина матеріалів попередніх версій ввійшла й в поточну версію, з уточненнями та розширеннями.

Велика подяка Arne Henden, Rebecca Turner, Brian Kloppenborg, Matthew Templeton, та Elizabeth Waagen за редагування та інший внесок у першу редакцію посібника.

Чистого неба та успішних спостережень!

Марк Блекфорд (Mark Blackford)

Член AAVSO, спостерігач та волонтер

Американська Асоціація Спостерегачів Змінних Зір

Кембрідж, Масачусетс

Березень 2016

Переклад з англійської Максима П'ятницького
Член AAVSO з 2017 року, код спостерігача: PMAK
Київ, 2017, 2020

Будь ласка, надсилайте ваші відгуки та побажання на адресу mpyat2@gmail.com

Зміст

Частина 1: Вступ.....	5
1.1 Пролог.....	5
1.2. Цільова аудиторія.....	5
1.3 Що, де, коли (і чому) в фотометрії за допомогою DSLR.....	5
1.4 Візуальні спостереження в порівнянні зі спостереженнями за допомогою DSLR- та CCD-камер.....	8
1.5 Чи ви готові? (передумови).....	9
1.6 Очікування.....	10
Частина 2: Огляд обладнання.....	12
2.1 Що таке DSLR?.....	12
2.2 Об'єктиви та телескопи.....	17
2.3 Штативи (триноги) та монтування.....	23
2.4 Налаштування камери.....	25
Частина 3: Огляд програмного забезпечення.....	30
3.1 Мінімальні вимоги до програм DSLR-фотометрії.....	30
3.2 Корисні функції програмного забезпечення.....	32
3.4 Інше корисне програмне забезпечення.....	37
Частина 4. Отримання зображень.....	41
4.1 Огляд процедури отримання зображень.....	41
4.2 Підготовча робота.....	41
4.3 Джерела шумів та постійне зміщення.....	42
4.4 Калібрувальні кадри (зсуву, темнові та плоского поля).....	48
4.5 Величина ISO та час експозиції.....	52
4.6 Пошук та кадрування поля.....	55
4.7 Деякі “хитрощі” в отриманні наукових даних.....	56
Частина 5: Обробка та оцінювання зображення.....	58
5.1 Огляд.....	58
5.2 Попередні приготування та оцінювання зображень.....	58
5.3 Застосування калібрувальних кадрів, складання та бінінг.....	59
5.4 Відокремлення кольорових каналів RGB.....	61
5.5 Оцінювання зображень після калібрування.....	61
Частина 6: Фотометрія: від вимірів до зоряних величин.....	67
6.1 Апертурна фотометрія.....	67
6.2 Інструментальні, диференційні та стандартизовані зоряні величини.....	70
6.3 Зорі порівняння та контрольні зорі.....	71
6.4 Спектральний відгук кольорових каналів DSLR.....	75
6.5 Традиційний підхід до корекції атмосферного поглинання та трансформації.....	80
6.6 Альтернативний метод корекції атмосферного поглинання та трансформації.....	83
6.7 Надсилання результатів.....	84
Частина 7: Розроблення програми спостережень з DSLR.....	88
7.1 Список цілей, які рекомендовані початківцям.....	88
7.2 Як вирішити, що спостерігати.....	92
7.3 Час починати.....	95
Додаток А: Тестування DSLR-камери.....	99
Додаток В: Перевірка рівномірності освітлення кадрів плоского поля (флетів).....	109
Додаток С: Ілюстрація первинного, вторинного та диференційного атмосферного поглинання.....	111
Додаток D: Зоряні зображення всередині та поза фокусом.....	118
Додаток Е: Перевірка лінійності.....	119

Частина 1: Вступ

1.1 Пролог

Однієї ночі, як завжди, ви біжите підтюпцем у парку. Темно, та ви знаєте місцевість, тому не боїтеся наштотхнутись на щось. Однак, цього вечору щось змінилось. Ви біжите й помічаєте когось поряд зі стежкою з фотокамерою на тринозі. Дивна річ, її погляд і камера спрямовані вгору, на небо над головою! Ви кидаєте погляд догори й бачите лише невиразні плямки світла в небі: світлове забруднення в місті ховає від ока зорі, окрім найяскравіших. Що такого вона робить? Ця жінка, що вдень викладає історію в школі, проводить вимірювання яскравості певних зірок; дані, що вона отримує, будуть корисними й зацікавлять професійних астрономів. Вона -- одна зі зростаючих груп людей, яких називають “громадянськими вченими”. Цей посібник покаже, як ви можете взяти участь в цьому русі.

Багато з нас, хто цікавиться астрономією, часто читають астрономічні журнали й бачать приголомшливі фотографії, що прикрашають їхні сторінки. Більшість цих фото зроблені камерами, що під'єднані до телескопів із гідуюванням і також піддані складній обробці, щоб вони виглядали так добре. Це -- царина астрофотографії. Цей посібник поведе вас у дещо іншому напрямку. В ньому ми збираємося розповісти, як ви можете робити фотографії, що мають наукову цінність, фотографії, за допомогою яких ви зможете виміряти яскравість змінних зірок, тобто зірок, чий блиск змінюється з часом. Мета цього посібника -- показати вам, як використати цифрові дзеркальні камери (ті самі, що ви використовуєте у звичайній фотографії) для того, щоб отримати дані наукової якості, які ви можете представити астрономічній спільноті.

1.2. Цільова аудиторія

Посібник із фотометрії за допомогою цифрових дзеркальних камер (далі DSLR) від AAVSO призначений для будь-кого, хто цікавиться використанням DSLR для вимірювання яскравості змінних зірок. Більшість інформації в цій книзі написана для новачків, однак описуються також деталі, що можуть виявитися цікавими і для більш досвідчених спостерігачів.

Астрономи-аматори можуть виявити, що вимірювання яскравості змінних зірок додає новий вимір їхньому хобі. Це справжнє задоволення -- бачити результати своїх власних вимірювань, побудувати “криву блиску” зорі, що змінює свою яскравість! Також, змінні зорі є чудовими цілями для студентських досліджень. Деякі проекти підходять для школи, інші можуть підійти для коледжів.

1.3 Що, де, коли (і чому) в фотометрії за допомогою DSLR

Фотометрія -- це розділ науки про вимірювання яскравості певних об'єктів неба. Спочатку це може не виглядати дуже захопливим, однак це дійсно галузь, що динамічно розвивається, у якій аматори можуть грати ключову роль. Хоча є багато типів об'єктів, фотометрія яких важлива, цей посібник

сфокусований на змінних зорях, тому що фотометрія зірок одна з найпростіших галузей для вивчення та одержання цінних (з наукової точки зору) результатів.

1.3.1 Що таке змінні зорі та чому ми їх спостерігаємо?

Зорі можуть змінювати свою яскравість завдяки фізичним процесам, що протікають всередині, на поверхні або навколо зорі. Ретельно спостерігаючи цю змінність, можливо одержати багато інформації про зорю, та, у більш загальному сенсі, про астрофізичні явища. У буквальному сенсі, змінні зорі схожі на фізичні лабораторії. Ті ж самі фундаментальні фізичні явища та процеси, що мають місце тут на Землі -- гравітація, механіка рідин, світло та тепло, хімія, ядерна фізика та інше -- поводять себе точно таким же чином будь де у Всесвіті. Спостерігаючи, як зорі змінюються з плином часу, ми можемо дізнатися, чому вони змінюються.

Хоча далеко не всі зміни блиску зірок можуть бути надійно визначені з земної поверхні через поглинання або спотворення атмосферою, існують сотні класів змінних зірок, що можуть спостерігатися з поверхні Землі, кожний клас включає від кількох одиниць до кількох тисяч відомих членів. Наприклад, зоря може змінювати свій розмір, форму або температуру з часом (пульсуючі змінні), вони можуть проходити через швидкі зміни випромінювання завдяки фізичним процесам навколо зорі (еруптивні змінні), або вони можуть бути затемнені іншими зорями чи планетами на орбітах довкола основної зорі (затемнювані змінні та зорі з екзопланетами). Ключова особливість, це те, що щось фізично відбувається в самій зірці або в безпосередній близькості до неї. (Ви можете бачити, як зоря миготить у небі, однак ці зміни блиску обумовлені виключно Земною атмосферою та ніяким чином не пов'язані із самою зорею).

Детальний список типів змінних зір, що використовуються в Індексі Змінних Зірок AAVSO (VSX) див. за посиланням <https://www.aavso.org/vsx/index.php?view=about.vartypes>

Різні типи зірок змінюють блиск із різною швидкістю. Для деяких зірок мають пройти тижні, місяці та навіть роки, щоби можна було помітити зміни. Для інших це забирає дні, години, хвилини, секунди або навіть коротші проміжки часу. Деякі зорі змінюються регулярно і ми можемо бачити закономірності у варіаціях, що повторюються з часом. Інші зорі проходять крізь хаотичні зміни, що їх ми ніколи не можемо передбачити точно. Деякі зорі змінюються однаковим чином впродовж століть, а інші -- такі, як наднові -- можуть швидко спалахнути, а потім зникнути, так що їх більше ніколи не буде видно.

DSLR Observations of Epsilon Aurigae

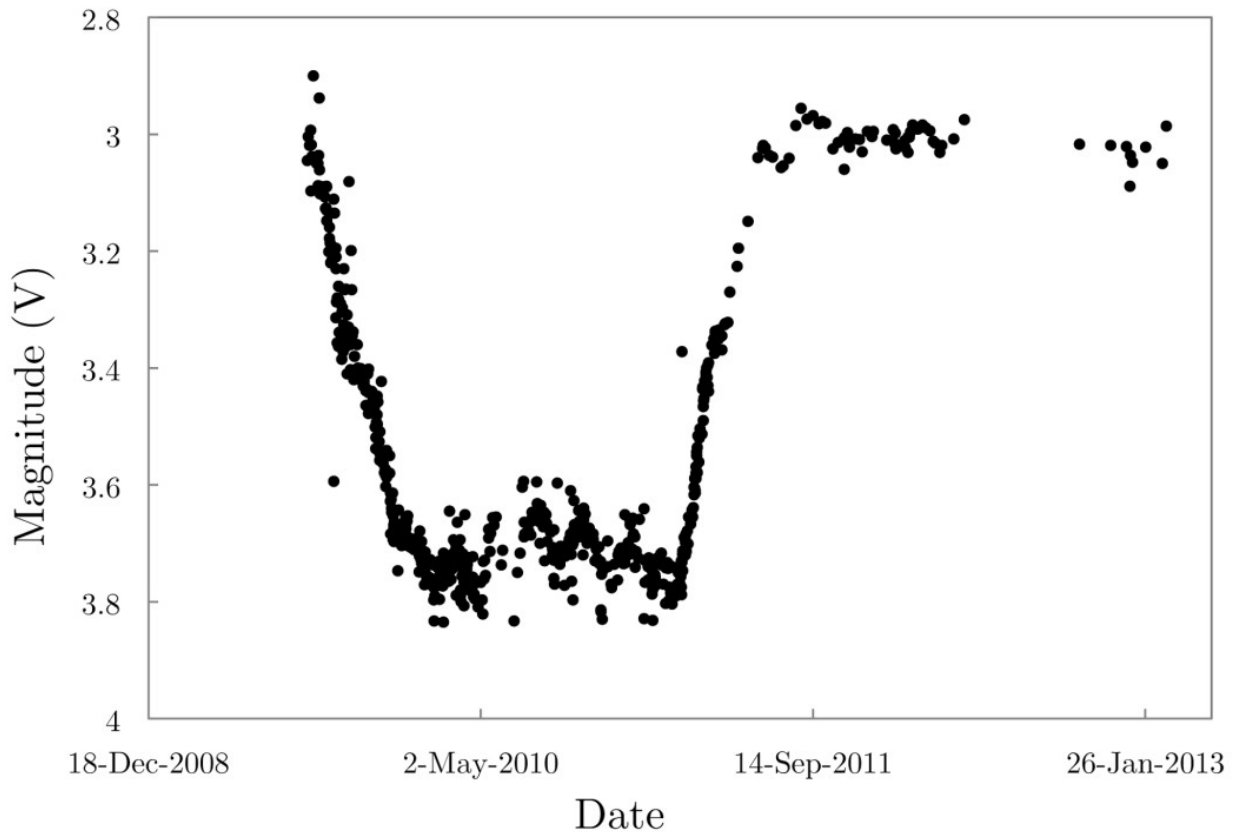


Рис. 1.1. Спостереження за допомогою DSLR зорі Епсілон Візничого під час її затемнення у 2009-2011 роках. Дані для кожної точки на графіку одержані аматорами.

Змінні зорі мають діапазон видимої яскравості (блиску) (наскільки яскравою вона здається нам) і, також, діапазон власної світності (скільки світла вона випромінює насправді). Зоря може бути сама по собі яскравою, однак, через те, що вона від нас віддалена на тисячі світлових років, вона може здаватися тьмяною. Зорі-змінні також мають діапазон амплітуд -- наскільки сильно їхня яскравість змінюється з часом. Деякі зорі можуть змінюватися на десять зоряних величин або більше, що еквівалентно зміні яскравостей у десятки тисяч разів, це величезні зміни! Деякі зорі змінюються лише на тисячні зоряної величини, або навіть менше, і такі зміни ми не зможемо зареєструвати. Є багато зірок із проміжними амплітудами й нема дефіциту цілей, з якими ви б змогли плідно працювати, незважаючи, яке ви маєте обладнання. За допомогою цього посібника, ви дізнаєтесь, як використовувати вашу DSLR-камеру, щоб одержати цінні з наукової точки зору виміри, та як повідомляти про ваші знахідки так, щоб вони були цінними для наукових досліджень.

Так як же аматори вписуються в цю картину? Професійні астрономи широко використовують фотометрію, однак через те, що час на спостереження лімітований, вони часто залежать від астрономів-аматорів, які роблять фотометрію об'єктів, цікавих для професіоналів. У результаті цього,

ваші спостереження дають матеріал, що задовольняє запити вчених. Вчені можуть нескінченно спекулювати про те, чому речі виглядають та поведуть себе певним чином, однак, у кінцевому підсумку, ці гіпотези мають бути перевірені для того, щоби розширити наше наукове розуміння. Якщо ви дасте науковцям надійні дані, вони можуть запропонувати точні моделі, які описують будову Всесвіту й наші знання поглибляться та розширяться. Наприклад, аматори використовують свої звичайні (неперероблені) DSLR-камери, щоби регулярно спостерігати за яскравістю Епсілон Візничого, відомою загадковою подвійною системою, що пройшла крізь довгоочікуване затемнення в період із 2009 до 2011 (див. Рис. 1.1). Дякуючи праці цих аматорів, астрономи-професіонали одержали значний масив корисних даних, з якого вони спромоглися розвинути нові уявлення про цю дивовижну подвійну зорю.

1.3.2 Як ми робимо фотометрію за допомогою DSLR?

Принципово, фотометрія за допомогою DSLR є простим процесом: після того, як ви належним чином підготували свою камеру, ви робите серію спеціальних знімків (що називаються “bias”, “dark” та “flat” кадри [я подаю тут ці назви без перекладу]), які використовуються в подальшій обробці. Після цього спрямовуєте камеру на небо та робите серію довгих (10 та більше секунд) експозицій відповідної ділянки неба. Ці зображення обробляються за допомогою спеціального програмного забезпечення для того, щоби одержати “інструментальні величини” [instrumental magnitudes] (яскравості, оцінені так, як виміряла камера). Інструментальні величини потім калібруються у такий спосіб, щоби вони були узгоджені з величинами відомих постійних (не змінних) зірок, які попали на зображення, за допомогою яких можна оцінити величину будь-якої змінної зорі. Етапи обробки більш детально описані у наступних частинах.



Рис. 1.2. Типова DSLR-камера на тринозі.

1.4 Візуальні спостереження в порівнянні зі спостереженнями за допомогою DSLR- та CCD- камер.

Перед тим, як винайшли електронний сенсор та фотометричне обладнання, астрономи мали лише свої власні очі для оцінки яскравості зірок. Хоча візуальна методика стара, вона все ще широко

використовується та залишається корисною для спостережень деяких типів змінних зірок, особливо тих, що є порівняно яскравими та мають великі коливання блиску. Крім того, якщо використовувати візуальні оцінки, не потрібно вартісне, складне обладнання, що робить цей метод спостереження змінних зірок дуже дешевим. Однак, візуальні оцінки схильні до похибок через різну кольорову чутливість людського ока, вік спостерігача, його досвід у проведенні візуальних спостережень та можливу упередженість. Внаслідок цього часто важко виявити слабкі коливання яскравості візуально й різні спостерігачі можуть сперечатися про точну яскравість змінної зорі на рівні кількох десятих величини. Посібник від AAVSO *по візуальним спостереженням змінних зірок* (див. посилання на нього в кінці цієї частини) деталізує процес таких візуальних спостережень.

З появою доступних, високоякісних DSLR-камер, громадянські вчені більше не обмежені лише візуальними методами оцінки яскравостей змінних зірок. За допомогою DSLR можливо компенсувати певні ефекти, які призводять до похибок, такі, як різний колір зірок, що часто перешкоджає точній візуальній оцінці яскравості. Користувачі DSLR можуть виявляти винятково слабкі коливання яскравості та надійно порівнювати свої оцінки з оцінками, які зроблені іншими спостерігачами, що використовують електронне обладнання -- однак лише тоді, коли вони ретельно дотримуються належних процедур, особливо тих, що описані в цьому посібнику.

Інша можливість -- використання CCD-камери та колеса фільтрів (зі встановленими фотометричними фільтрами), яка під'єднана до телескопа. Якщо не занурюватись у деталі, CCD-фотометрія подібна до DSLR-фотометрії. Професійні астрономи використовують CCD камери тому, що вони потенційно дають кращу якість зображення та більш універсальні (гнучкі), однак хороші CCD-камери, зазвичай, значно дорожчі, ніж DSLR-камери і з ними не так легко працювати без належного досвіду. З точки зору відношення ціни до функціональності, DSLR-камери більш вигідні в порівнянні з CCD-камерами. AAVSO опублікував детальне керівництво по CCD-фотометрії та її використанню для спостереження змінних зірок (див. посилання в кінці цієї частини).

1.5 Чи ви готові? (передумови)

Перед тим, як почати працювати з DSLR-фотометрією, ви маєте набути певний досвід роботи зі своєю камерою. Ви маєте:

- Знати, як управляти своєю камерою. Зокрема, ви маєте знати, як встановити формат зображення в режим RAW (CR2, NEF, та подібні), вимкнути додаткові (автоматичні) опції обробки зображення камерою, вимкнути автофокус, вміти налаштувати фокус вручну та монтувати вашу камеру на триногу, на телескоп верхи ("piggy back") або ставити її в головний фокус телескопу.
- Мати добрі навички роботи з комп'ютером та вміти інсталювати програмне забезпечення на вашу машину.
- Дуже бажано, хоч і не конче необхідно, мати деякий досвід візуальних оцінок яскравості зірок.

Візуальний досвід навчить вас, як ідентифікувати поля, як оцінити вплив кольору (це важливо в подальшому, коли ми будемо обговорювати фільтри), поведінці кривих блиску зірок, як подавати дані та, можливо це найважливіше -- терпінню! Також, візуальні спостереження приносять задоволення та

привабливі, так що ця практика допоможе вам зрозуміти, чи ви дійсно будете насолоджуватися спостереженням змінних зір. Врешті-решт, для більшості нас це ж хобі, чи не так?

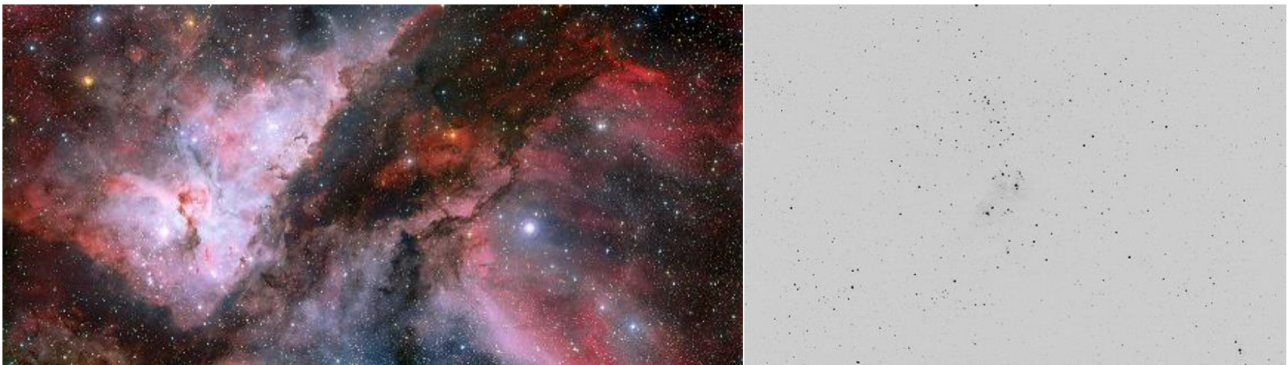
Завантажте копію чудового керівництва від AAVSO *Посібник із візуальних спостережень змінних зір* та ознайомтеся із ним. Оберіть деякі змінні, які можна легко спостерігати за допомогою бінокля, та слідкуйте за ними регулярно впродовж місяця або двох, порівнюючи свої оцінки з оцінками інших спостерігачів.

Спостереження за допомогою DSLR має багато спільного з візуальними спостереженнями. Кожен аспект візуального спостереження є тим мінімумом, якому ви маєте навчитися перед тим, як досягнути своєї головної мети -- DSLR-фотометрії.

1.6 Очікування

Загалом, цей посібник буде зосереджений на аспектах спостереження змінних зірок за допомогою DSLR-камер. Хоча ми використовуємо термін “DSLR” широко в цьому тексті, ми маємо на увазі більш широкий клас камер, які підходять для проведення фотометричних спостережень. Нещодавно, багато моделей компактних камер почали підтримувати деякі функції, необхідні для проведення астрономічної фотометрії. Отже, методи, які тут обговорюються, можуть бути застосовані й до вашої камери, навіть якщо вона не є DSLR.

У цьому керівництві ми зосереджені на змінних зорях, тому що зорі є одними з найлегших об’єктів для спостереження. Техніки, які ви опануєте, також підходять для більш широкого діапазону явищ (таких, як транзити екзопланет та активні галактичні ядра), але вони, можливо, не будуть доступні без додаткових інвестицій в обладнання. За деякими винятками, ми не розглядаємо деталі того, як DSLR працює або як працювати з конкретними моделями камер. Також, будь ласка, усвідомлюйте, що техніка, яка застосовується в DSLR-фотометрії, подібна, але не точно така, як у астрофотографії. Зокрема, розфокусування в DSLR-фотометрії призведе до розмитих зображень, що виглядають не дуже привабливо, однак цінні з наукової точки зору.



Не це....

Це!

Рис. 1.3. Те що ви маєте, а що не маєте очікувати побачити під час фотометрії з DSLR. Перше фото: чарівне зображення центрального регіону туманності Ета Кіля (телескоп ESO 2.2м з обсерваторії La Silla в Чілі). **Праворуч:** більш широке поле зору цього ж самого регіону, витримка 20 секунд, рефрактор 80 мм f/6 з DSLR камерою Canon 600D, зелений канал (Mark Blackford).

Мета цього керівництва -- розв'язати таємницю процесу отримання фотометрії наукової якості за допомогою DSLR-камер. Багатьох астрономів-аматорів відлякує вдавана складність вивчення процесу фотометрії; з DSLR-камерою можливо почати одержувати корисні дані практично одразу. З одного боку, отримання хороших фотометричних даних потребує ретельного аналізу та уваги до деталей, а з іншого боку, фотометрія -- це поле діяльності, що легко доступне аматорам, які не мають технічного

досвіду. Все, що потрібно -- це ентузіазм, терпіння й хороша техніка, а не глибокі математичні чи наукові здібності.

"Я відчуваю, що мій обов'язок -- попередити інших... щоби вони підходили до спостережень змінних зірок з особливою обережністю. Дуже легко стати залежним, і, як це часто буває, чим довше ми піддаємося цьому, тим важче зробити перерву та повернутися до нормального життя" Leslie C. Peltier (1900-1980)

Посилання

Посібник від AAVSO з візуальних спостережень: <https://aavso.org/visual-star-observing-manual>

Керівництво від AAVSO зі CCD-фотометрії: <https://aavso.org/ccd-camera-photometry-guide>

Частина 2: Огляд обладнання

DSLR-камери -- недорогий спосіб почати працювати з цифровою фотометрією. Щодо обладнання, є три основні необхідні речі: фотооб'єктив або телескоп для збору та фокусування світла зірок, камера, що може давати зображення без додаткової обробки (RAW) та якість монтування для утримання камери під час довгих експозицій. Це можуть бути такі прості пристрої, як компактні камери на штативі або камери професійного рівня, встановлені в головному фокусі телескопу. Перед тим, як обговорювати, як проводити спостереження та обробляти дані, розберемо, яке обладнання необхідно для DSLR-фотометрії. Ми обговоримо всі три згадані компоненти детально. Однак, спочатку ми опишемо деякі фізичні властивості DSLR камер, щоб ви краще розуміли, що відбувається, коли ви налаштуєте різні параметри камери.

2.1 Що таке DSLR?

Англійською, це “digital single-lens reflex camera” (цифрова однооб'єктивна дзеркальна камера, “digital SLR” або “DSLR”). Це цифрова камера, що об'єднує оптичні компоненти та механізми дзеркальної камери з цифровим зображуючим сенсором замість фотографічної плівки. Дзеркальна схема -- основна відмінність між DSLR та іншими цифровими камерами. У цій схемі світло проходить крізь об'єктив, потім відбивається від дзеркала, що спрямовує світло у видошукач або (коли дзеркало підняте) світло попадає на зображуючий сенсор. Альтернативна схема -- видошукач зі своїм власним об'єктивом, тому в назві використовується термін “одно-об'єктивна”. Маючи лише один об'єктив, ми бачимо у видошукач зображення, яке несуттєво відрізняється від того, що створює сенсор камери [Цей абзац -- вільний переклад визначення терміну DSLR з англійської Вікіпедії]

Нещодавно, компактні камери почали підтримувати функції, які необхідні для астрономічної фотометрії. Отже, це керівництво може підійти також для вашої не-DSLR камери [якщо вона має певні функції].

З Рис. 2.1 видно, що DSLR-камера поєднує оптичні та електронні компоненти, необхідні для реєстрації зображень. Багато сучасних DSLR-камер мають безліч різноманітних налаштувань, більшість із яких непотрібні або шкідливі для астрономічної фотометрії.

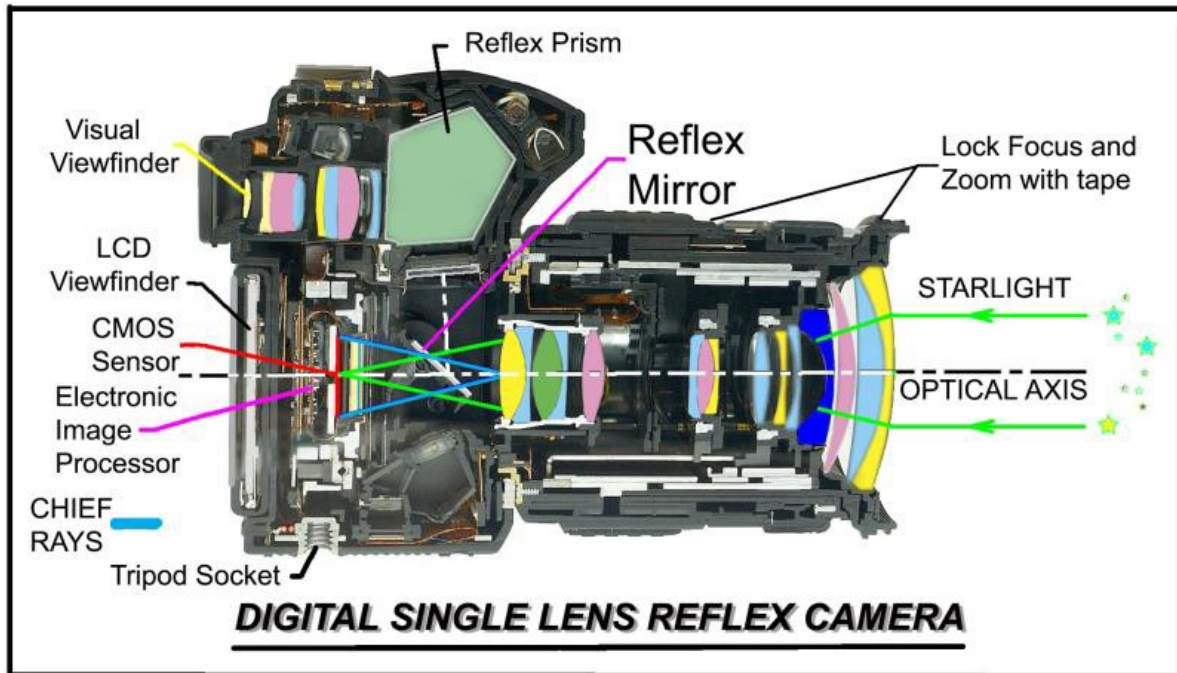


Рис. 2.1. Переріз DSLR-камери, на якому видно її складові частини.

У наш час, усі DSLR-камери на ринку мають сенсори, зроблені за технологією CMOS (Complementary Metal-Oxide-Semiconductor: комплементарна структура метал-оксид-напівпровідник), тож ми зосередимося на пристроях такого типу. Обговорення камер, зроблених за технологією CCD, наведено в *Посібнику з CCD-фотометрії* від AAVSO. Камери з матрицями Foveon (які мають три шари, чутливі до різних кольорів, замість одного шару, що складається з пікселів із різною кольоровою чутливістю) не дуже розповсюджені. Якщо у вас є питання щодо цих камер, будь ласка, задайте їх на форумі AAVSO з DSLR-фотометрії.

2.1.1 Оптичний шлях

Камера складається з об'єктиву, що кріпиться до передньої частини корпусу, затвору, кількох великих фільтрів, масиву мікролінз, додаткових фільтрів та детектору. Найбільш важливі оптичні компоненти схематично зображені на Рис. 2.2. Перший оптичний компонент -- це об'єктив. Його основне призначення -- проектувати та фокусувати зображення на сенсор. За (або між) лінзами об'єктива розміщена регульована діафрагма. Вона визначає повну апертуру, або поверхню об'єктива, що збирає світло. Ці компоненти, як правило, містяться в корпусі об'єктива.

Перший елемент на оптичному шляху всередині корпусу камери -- це, як правило, затвор. Призначення затвору -- контролювати кількість світла, що надходить у камеру (і попадає на сенсор).

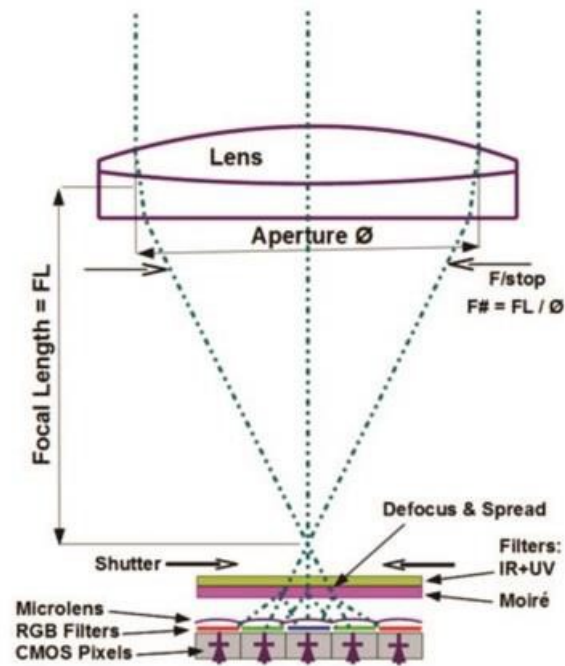


Рис. 2.2. Типова оптична схема DSLR із детектором типу CMOS та баєрівським масивом RGB (Roger Pieri)

За затвором розміщені кілька фільтрів, що виконують різні функції:

- Інфрачервоний барвник, що зменшує надмірну чутливість до темно-червоного та інфрачервоного світла
- Діелектричний інфрачервоний фільтр, що усуває інфрачервоне світло з довжиною хвилі, більшою за 700 нм
- Діелектричний ультрафіолетовий фільтр, що усуває ультрафіолетове світло з довжиною хвилі, меншою за 400 нм
- Фільтр низьких частот, що зменшує інтерференційний муар, зумовлений структурою баєрівського масиву (трохи зменшує роздільну здатність, однак зменшує проблему андерсемплінгу [недостатньої дискретизації] в фотометрії)

За цими фільтрами, безпосередньо перед детектором, є масив мікролінз (наклеєний на детектор), що фокусує світло для кожного пікселя в його найбільш чутливу частину, що покращує коефіцієнт заповнення пікселя майже до 100%.

2.1.2 Детектори типу CMOS

Детектори DSLR-камер CMOS-типу мають масив кольорових фільтрів, який часто називають баєрівським масивом (див Рис. 2.3), він складається з червоних, зелених і синіх (далі RGB -- Red/Green/Blue) пікселів. Як правило, число зелених пікселів подвоєно (є два набори зелених пікселів). Фільтри RGB виготовляються нанесенням різних барвників (пігментів) безпосередньо на поверхню кожного пікселя CMOS-сенсора, їх не можна зчистити або якимось іншим чином видалити [примітка від перекладача: є ентузіасти, що таке роблять!]. Отже, кожен піксель чутливий лише до світла певного кольору (червоного, зеленого або синього).

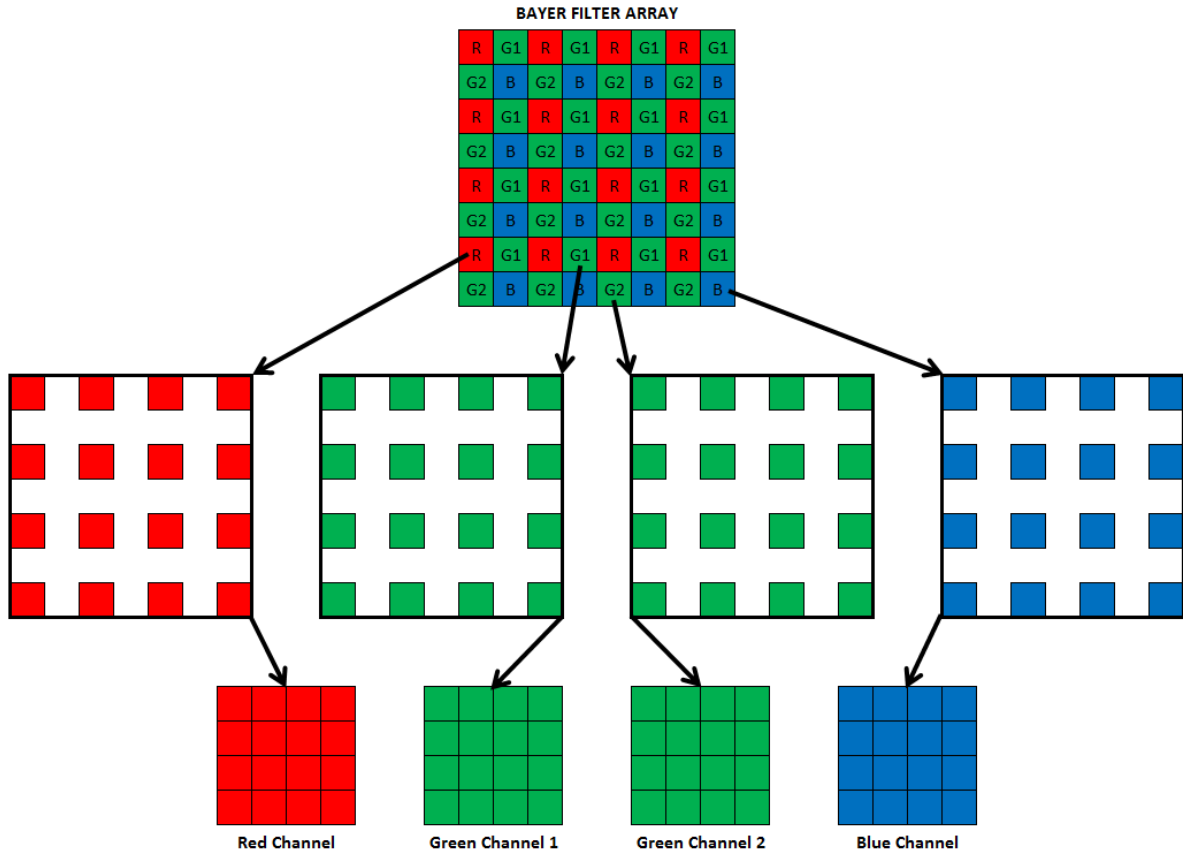


Рис. 2.3. Згорі: Схематичне зображення типового розташування кольорових фільтрів Баєровської матриці. Середня частина: кожен кольоровий канал може бути виділений окремо за допомогою відповідного програмного забезпечення, зверніть увагу на прогалини між пікселями. **Знизу:** Кожний канал зазвичай відображається з половинною розмірністю від такої, що має оригінальне RAW-зображення, за винятком AIP4Win, в якому відсутні пікселі заповнюються з використанням алгоритмів інтерполяції. (Mark Blackford)

Конкретна послідовність кольорів може змінюватись проміж виробниками камер, тому важливо визначити, який кольоровий канал у вашій DSLR-камері відповідає червоному, який синьому, а який зеленому кольору.

Традиційно у DSLR-фотометрії використовуються лише зелені канали для оцінювання величин у Джонсонівській V-смузі. Однак, це призводить до ігнорування інформації, що міститься в червоному і синьому каналах, яка в багатьох випадках може бути використана для точного виміру величин у B смузі Джонсона та R смузі Козінса, відповідно. Ми повернемося більш докладно до цієї теми в наступних частинах.

Важливо відмітити, що DSLR зображення у форматі RAW є чорно-білими, а не кольоровими. Горішня частина на Рис. 2.4 показує збільшений фрагмент RAW-зображення з зорею поза фокусом (несфокусоване зображення), на якому видно окремі пікселі та шахматний візерунок інтенсивності, що виникає завдяки баєрівському масиву фільтрів. Нижче -- зображення індивідуальних кольорових каналів, які виділені з RAW-зображення.

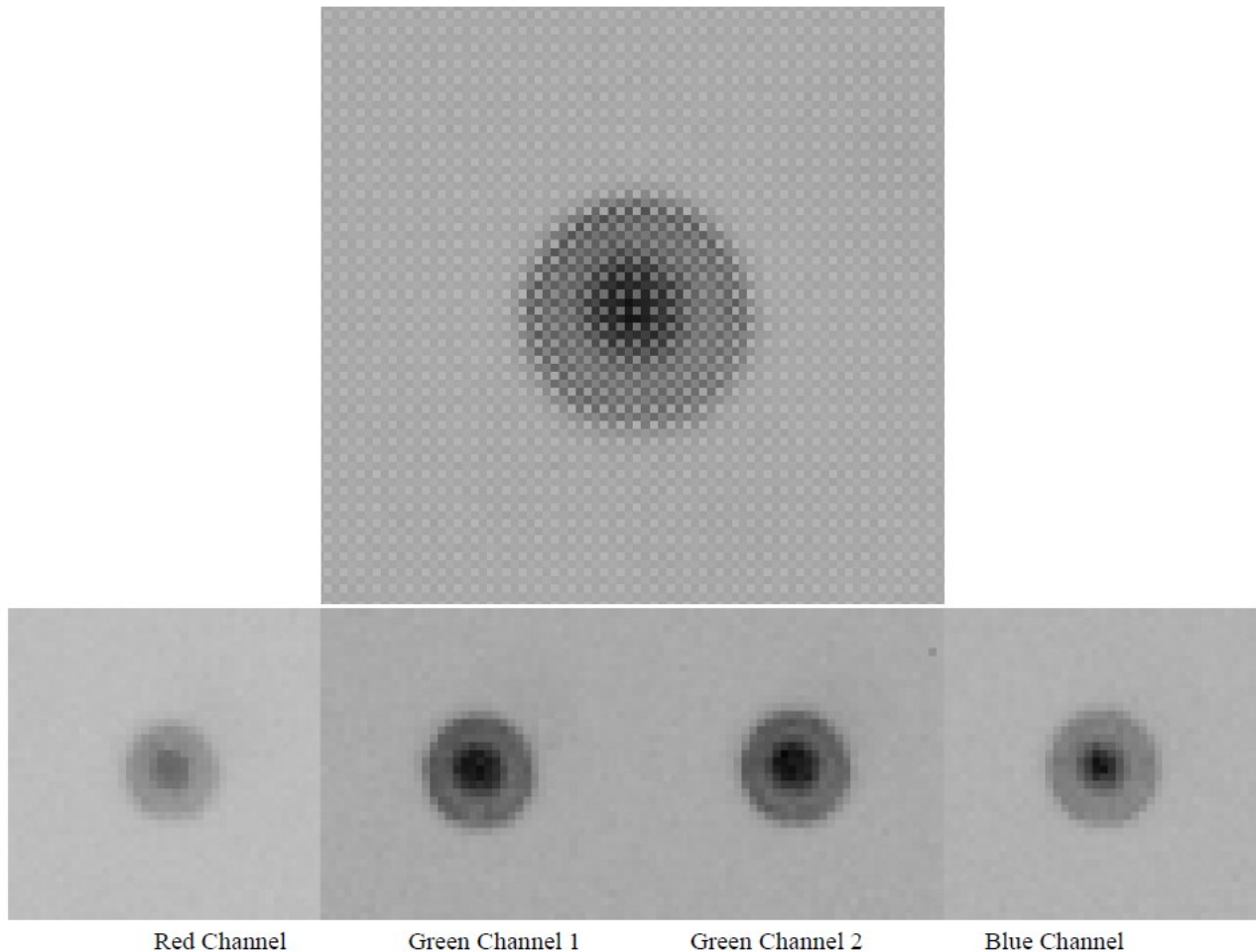


Рис. 2.4. Горішня частина: збільшене розфокусоване RAW-зображення зорі, на якому видно монохромний шахматний візерунок, що зумовлений масивом баєрівських фільтрів. **Нижня частина:** Індивідуальні кольорові канали, виділені з RAW-зображення. (Mark Blackford)

Зміна напруги внаслідок поодинокі фотоелектричної події досить мала; отже, накопичена конденсатором напруга також крихітна. Щоби прочитати сигнал, його спочатку пропускають крізь підсилювач, а потім обробляють аналого-цифровим перетворювачем (АЦП). Коефіцієнт підсилення визначає величину “ISO” (чутливість детектору), що ставить сигнал у відповідність до фіксованого діапазону перетворювача. Значення на виході АЦП -- ADU (analog-to-digital-units) -- пропорційне числу електронів, що зібрані фотодіодом кожного пікселя. Величини ADU, збережені у файлі даних RAW-формату, є основною вихідною інформацією, що використовується у DSLR-фотометрії. Обговорення цього буде продовжене більш детально в Розділі 2.4.

Функціональна схема електронної частини CMOS-детектору показана на Рис. 2.5. Сам по собі сенсор -- це кремнієвий чіп, що містить електричні ланцюги CMOS-детекторів. Елемент, чутливий до фотонів у кожному пікселі -- фотодіод (фотоелемент МОН-структури [метал-оксид-напівпровідник]). Ці елементи працюють на основі фотоелектричного ефекту, завдяки якому фотон, що попав на детектор, генерує в напівпровіднику пару електрон-дірка. Завдяки конструкції фотодіода, електрон швидко виходить з об'єму напівпровідника та переходить на конденсатор. На початку експозиції, конденсатор скидається в початковий стан та напруга на ньому зчитується. Під час експозиції кожний фотон, що попадає на фотодіод, призводить до невеликої зміни напруги на конденсаторі [примітка від перекладача: мабуть, усе ж таки не кожний, бо квантова ефективність не 100%]. У кінці експозиції, напруга на конденсаторі зчитується ще раз.

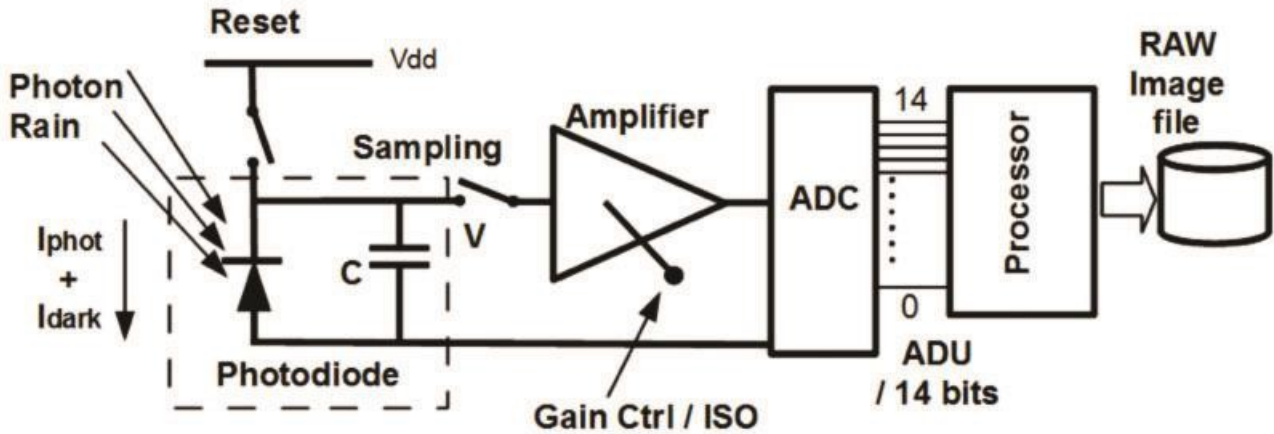


Рис. 2.5. Функціональна схема CMOS-детектору. (Roger Pieri)

Найбільш вживаний розмір сенсору DSLR-камери -- APS-C, тобто 14.9 x 22.4 мм, хоча інші формати також трапляються в камерах, що можуть бути використані для фотометрії: система 4/3 (13 x 17.3), формат 1" у деяких гібридних системах (8.8 x 13.2), розмір 1/1.7" в "expert" DSC (5.7 x 7.6). Повнокадровий (full frame) формат (24 x 36 мм) також існує, однак він не такий розповсюджений, порівняно дорогий та має більші проблеми з віньетуванням.

2.1.3 Які функції DSLR-камер мають бути відключені, коли камера використовується для фотометрії

Сучасні DSLR-камери мають безліч додаткових функцій та налаштувань, більшість із яких непотрібна, або навіть шкідлива у фотометричних вимірах. Насамперед, ніколи не використовуйте для астрономічної фотометрії зображення у форматі JPEG. Під час створення JPEG-зображення величини ADU з детектору (що містяться у RAW зображенні) перетворюються в нелінійний кольоровий простір sRGB (зовсім не-фотометричний), а потім стискаються у файл JPEG. Нелінійність та стискання призводять до суттєвої деградації точності даних (з ~14000 рівнів яскравості до не більш, ніж 256 рівнів), що перешкоджає точному виміру світлового потоку.

Деякі моделі камер мають функції пригнічення шуму, що змінюють початкові дані, можливо в процесі роботи руйнуючи фотометричні дані. Функції вимірювання освітлення сцени та автофокусування практично непотрібні для зоряної фотометрії. Функція збільшення у попередньому перегляді в реальному часі [live view] (5x, 10x та ін.) корисна під час фокусування/розфокусування за яскравою зорею, однак видошукач (можливо з кутовим адаптером) часто більш корисний під час вибору бажаної ділянки неба.

2.2 Об'єктиви та телескопи

Перший крок у процесі DSLR-фотометрії — реєстрація світла камерою. Світло зірок має бути сфокусоване на сенсорі за допомогою під'єднаного до камери об'єктиву, або під'єднанням камери до телескопа. Типовий асортимент об'єктивів для DSLR-камер показаний на Рис. 2.6.



Рис. 2.6. Різноманітні об'єктиви DSLR-камер. (Paul Valleli)

Об'єктив -- це перший елемент, необхідний для фотометрії. Загалом, об'єктиви можна описати двома характеристиками: апертурою та фокусною відстанню. Площа апертури визначає кількість фотонів, що можуть потрапити до оптичної системи за фіксований період часу. Більші апертури (менші значення діафрагми) збирають більше світла та дають змогу спостерігати тьмяніші об'єкти. Фокусна відстань визначає масштаб зображення. Разом із розміром детектору, фокусна відстань визначає поле зору (ПЗ, кутовий розмір ділянки неба, що може сфотографувати ваша камера) інструмента.

Поле зору має бути достатньо великим, щоб охопити необхідну кількість зірок порівняння на додачу до цільової зорі. Коротка фокусна відстань дає широке поле зору, що добре пасує для моніторингу яскравих змінних (яскраві зорі порівняння, зазвичай, розкидані на більших відстанях, ніж тьмяні), а також для реєстрації великої кількості зірок одночасно для масового аналізу. Чим більша фокусна відстань об'єктиву, тим більше "збільшення" ви маєте, що означає, що ви бачите меншу ділянку неба, однак більш детально. Отже, для тьмяних зірок необхідна довша фокусна відстань об'єктива або телескопа. Для заданого значення діафрагмового числа (діафрагмове число визначає відносний розмір апертури) фоновий рівень неба той самий для різних фокусних відстаней, однак площа апертури і відповідна кількість фотонів, що досягає детектора, пропорційна квадрату фокусної відстані. Отже, "збільшення" значно покращує ваші можливості у вимірюванні тьмяних зірок, тому що відношення сигнал-шум (ВСШ) (співвідношення сигналу від зірок до дробового шуму фону неба, більше про це в Частині 4) суттєво покращується.

Які об'єктиви використовувати? Тут є два підходи. Перший: використовувати ті об'єктиви, що ви вже маєте та вибирати цілі згідно до вашої камери та об'єктивів. Є дуже багато зірок, що потребують уваги, тож майже будь-яка комбінація об'єктива та камери може бути корисна. Інший підхід: вибрати конкретну зорю чи проект та придбати комбінацію об'єктив-камера, що добре підійде до потреб

вибраного проекту. У будь-якому випадку ваш вибір обладнання має бути збалансованим вибором між кількома параметрами об'єктиву. Ці параметри включають поле зору, розмір апертури, фокусну відстань, найбільшу потрібну зоряну величину та довжину експозиції, що можна досягти.

Майже всі проекти з дослідження змінних зірок за допомогою DSLR використовують “диференційну фотометрію”, у якій яскравість цільової змінної зорі порівнюється з яскравістю зорі з оточення з відомою постійною яскравістю – “зорі порівняння”. Щоби цей метод працював, як цільова зоря, так і зоря порівняння мають бути в одному полі зору та зоря порівняння має мати приблизно ту ж саму яскравість, як і цільова. Якщо ваша ціль яскрава (скажімо, така, що видна неозброєним оком), то, швидше за все, вам знадобиться поле зору (ПЗ) у кілька градусів (або більше, можливо від 10 до 30 градусів) для того, щоб знайти зорі порівняння з приблизно такою ж яскравістю на тому ж зображенні, що і ваша ціль. Широке ПЗ означає коротку фокусну відстань, яку, зазвичай, мають стандартні об'єктиви, що йдуть в комплекті з більшістю DSLR-камер.

Якщо ваша ціль тьмяна, ви можете вибирати між двома шляхами, щоб одержати зображення з високим рівнем сигналу. Ви можете зробити довгу експозицію, або використати об'єktiv із великою апертурою. Подвоєння експозиції подвоює число зібраних фотонів (за решти незмінних умов), однак це може бути проблематично, якщо ви перейдете до тьмянних цілей. Ви можете бути спроможні зробити чудове зображення з високим відношенням сигнал/шум зір, які доступні неозброєному оку (скажімо, 5-ї величини) за 10-секундну експозицію, використавши ваш стандартний 50-мм f/1.4 об'єktiv. Однак, те ж саме відношення сигнал/шум для зорі 10-ї величини (яка дає у 100 разів меншу кількість фотонів за секунду в порівнянні з першою зорею) потребує 1000-секундної експозиції (біля 17 хвилин), що означає, що вам потрібно з високою точністю слідувати за обертанням неба впродовж цієї довгої експозиції, це, у свою чергу, породжує низку інших проблем.

Стандартний об'єktiv із фокусною відстанню 50мм та відносним отвором f/1.4 має діаметр апертури біля 35мм -- не дуже великий! Приєднавши камеру до телескопа, ви можете досягти величезного збільшення апертури. Наприклад, скромних розмірів телескоп із 6-дюймовою [~150мм] апертурою дасть площу збору фотонів у 18 раз більшу, ніж стандартний об'єktiv 50мм f/1.4, дуже суттєво розширивши межу доступних зоряних величин. Звісно, такий телескоп буде, імовірно, мати досить велику фокусну відстань (десь від 30 до 60 дюймів [~750 - 1500мм]), отже, дасть досить вузьке ПЗ. Це значить, що, імовірно, ви не будете мати яскравих зірок у ПЗ (однак є висока ймовірність, що ви будете мати кілька тьмянних -- скажімо, 10-ї величини -- зірок порівняння, якраз те, що потрібно для цілі 10-ї величини). Вузьке ПЗ потребує якісного монтування з можливістю трекінгу (слідкування за небом).

Отже місце є для всього, починаючи від стандартних об'єktivів (яскраві зорі) до телеоб'єktivів (тьмяніші зорі з відповідними зорями порівняння в полі зору кілька градусів) та телескопів (тьмяні цілі з однією-двома зорями порівняння у вузькому полі зору).

Якщо ви знаєте фокусну відстань об'єктиву та розмір сенсору вашої камери (зверніться до інструкції до вашої камери), ви можете визначити розмір поля зору з Таблиці 2.1 або за допомогою Рівняння 2.1. Ця формула дає прийнятну точність для сенсорів формату APS-C та об'єktivів із фокусною відстанню від 50мм та більше.

$$\text{ПЗ (градуси)} = 57 \times \text{розмір сенсора (мм)} / \text{фокусна відстань (мм)} \quad [\text{Рівняння 2.1}]$$

Зручний спосіб безпосередньо визначити поле зору зображення з зоряним полем -- використати інтернет-сторінку Astrometry.net, що робить “сліпе розпізнавання поля” (тобто ідентифікує зорі на зображенні та визначає ПЗ без додаткової інформації від користувача -- використовуючи лише саме зображення). Наразі зображення з DSLR у RAW-форматі не підтримуються, тож ви маєте перетворити зображення у формат JPEG, GIF, PNG або FITS.

Перейдіть на сторінку завантаження <http://nova.astrometry.net/upload>. Натисніть кнопку “Вибрати файл” [Choose File], далі знайдіть та оберіть своє (перетворене у відповідний формат) зображення. Натисніть кнопку “завантажити” [Upload] (це може забрати деякий час, залежно від розміру файлу та швидкості вашого інтернет-з’єднання). За кілька секунд інтернет-сторінка зміниться на сторінку статусу. Процес розпізнавання поля може забрати від кількох секунд до кількох хвилин. Натисніть посилання “Перейти на сторінку результату” [Go to results page] для відображення результату розпізнавання (Рис. 2.7). Праворуч відображуються координати центру зображення, розмір поля зору, піксельний масштаб та орієнтація.

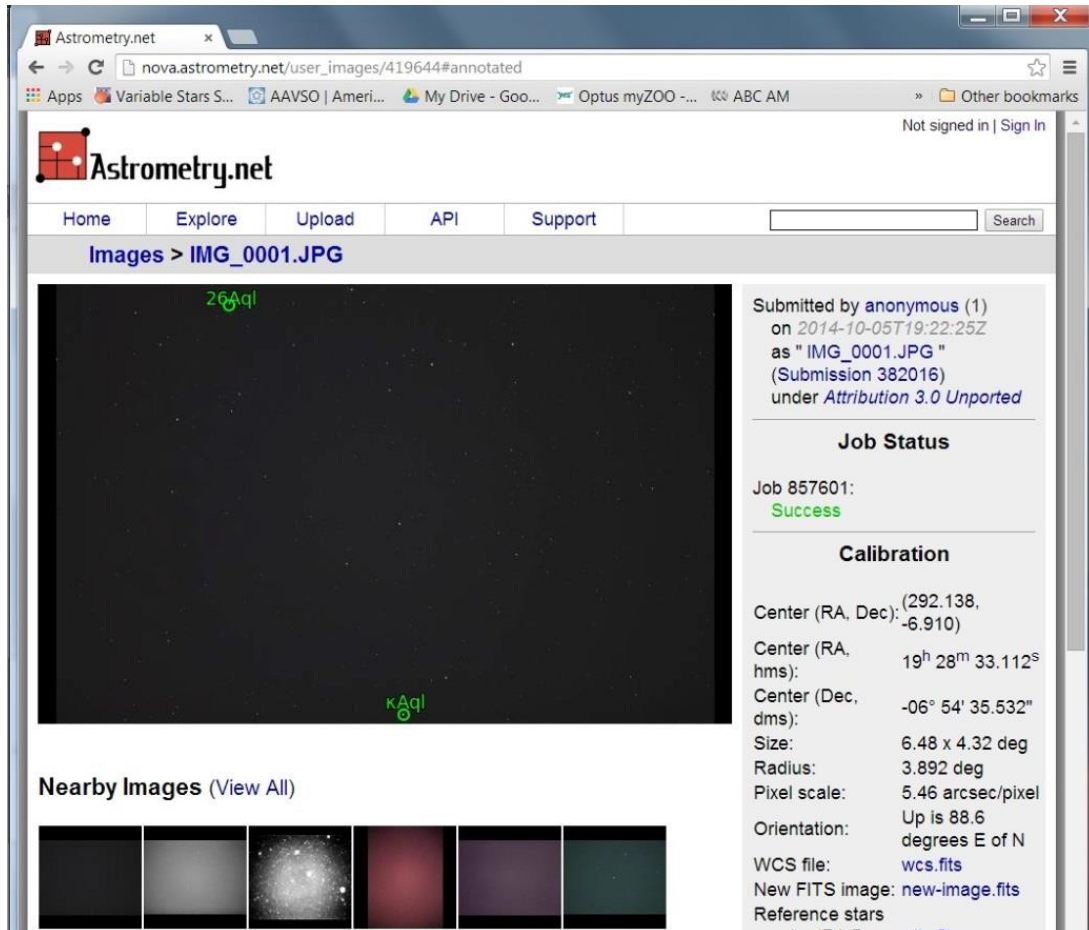


Рис. 2.7. Сторінка результатів сайту Astrometry.net, що показує координати центру зображення та поле зору, визначене з зображення, використовуючи процедуру “сліпе розпізнавання поля”. (Mark Blackford)

Рис. 2.8 показує добре відоме сузір'я Оріона та ілюструє, як розмір області неба, що його DSLR-камера може сфотографувати, залежить від фокусної відстані використаного об'єктиву.

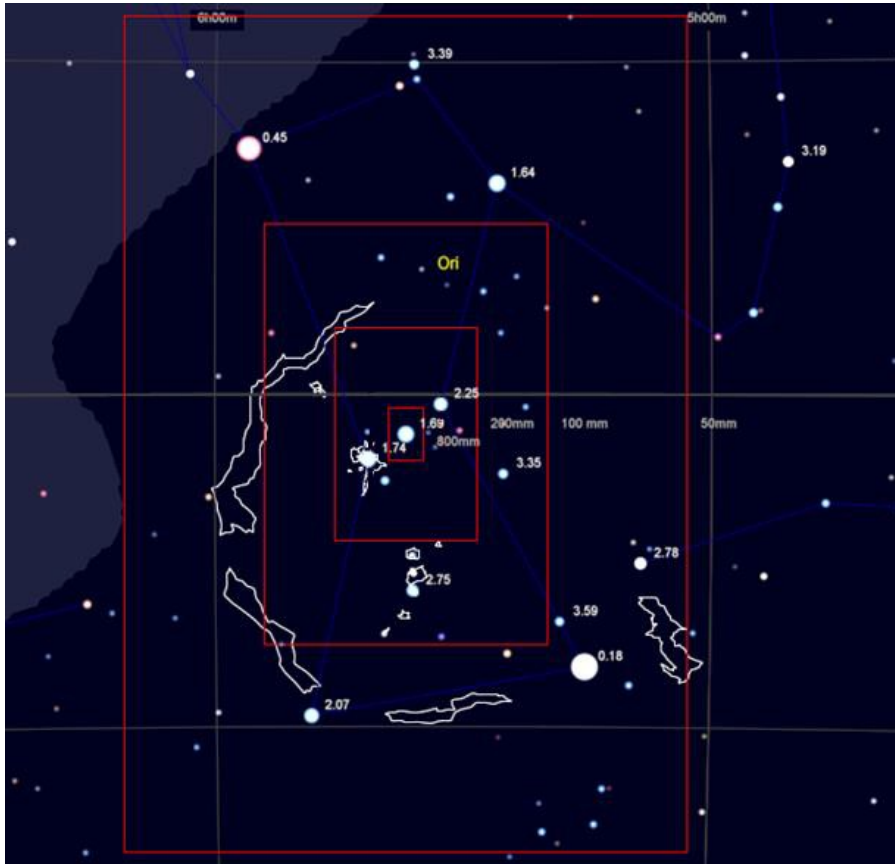


Рис. 2.8. Поле зору системи із сенсором формату APS-C для різних фокусних відстаней. (Roger Pieri)

Таблиця 2.2 показує площу апертури за відносного отвору $f/4$ для різних фокусних відстаней та типів сенсорів із таблиці 2.1. Чітко видно величезний діапазон величин світлового потоку, як функції ПЗ та розміру сенсору. Отже, відносний розмір діафрагми визначає спроможність кожної конфігурації досягти та виміряти широкий діапазон зоряних величин.

Таблиця 2.1. Приклади фокусних відстаней, що необхідні для покриття певного ПЗ для типових розмірів сенсорів. Блакитні комірки: дуже дорогі об'єктиви, в цих випадках краще використовувати телескоп, до якого під'єднаний корпус камери. (Roger Pieri)

Всі розміри в мм	APS-C 14,9 x 22,3	Система 4 / 3 13 x 17,3	Система 1" 8,8 x 13,2	1 / 1,7" 5,7 x 7,6	1 / 2,3" 4,6 x 6,1	Повний кадр 24 x 36
ПЗ, градуси	Ш/В= 1,5	Ш/В= 1,33	Ш/В= 1,5	Ш/В= 1,33	Ш/В= 1,33	Ш/В= 1,5
	Фокусна відстань	Фокусна відстань	Фокусна відстань	Фокусна відстань	Фокусна відстань	Фокусна відстань
64	18	14	11	6	5	29
48	25	19	15	9	7	40
32	39	30	23	13	11	63
24	52	41	31	18	14	85
16	79	62	47	27	22	128
8	159	124	94	54	44	257
4	319	248	189	---	---	515
2	639	496	378	---	---	1031

Таблиця 2.2. Площа апертури для відносного отвору (діафрагми) $f/4$ для різних фокусних відстаней та типів сенсору, що показані в Таблиці 2.1. (Roger Pieri)

Всі розміри в мм	APS-C 14,9 x 22,3	Система 4 / 3 13 x 17,3	Система 1" 8,8 x 13,2	1 / 1,7" 5,7 x 7,6	1 / 2,3" 4,6 x 6,1	Повний кадр 24 x 36
ПЗ, градуси	Ш/В= 1,5	Ш/В= 1,33	Ш/В= 1,5	Ш/В= 1,33	Ш/В= 1,33	Ш/В= 1,5
	Площа апертури, мм ²	Площа апертури, мм ²	Площа апертури, мм ²	Площа апертури, мм ²	Площа апертури, мм ²	Площа апертури, мм ²
64	16	9	5	2	1	41
48	31	19	11	4	2	80
32	74	45	26	9	6	193
24	135	81	47	16	10	352
16	309	186	108	36	23	805
8	1248	751	437	145	93	3253
4	5004	3012	1753	---	---	13042
2	20030	12055	7018	---	---	52200

Блакитні комірки: те ж саме, що і в Таблиці 2.1

Об'єктив камери повинен мати можливість фокусування вручну; автофокусування не буде працювати на зорях. Для привабливих з естетичної точки зору астрофотографій намагаються сфокусуватись якомога точніше, щоби зорі виглядали точками, однак для DSLR-фотометрії необхідно дещо розфокусувати зображення, щоби розподілити світло на більший регіон сенсору, для того, щоби досягти адекватної дискретизації кожного кольорового каналу. Не піддавайтеся спокусі використати різкий фокус у спробі зареєструвати дуже темні цілі, тому що це призведе до артефактів, які обговорюються в Розділі 5.5.

Єдиний виняток, це коли ми фотографуємо крізь телескоп із такою великою фокусною відстанню, що сфокусовані зображення зірок мають FWHM (Full Width at Half Maximum intensity: повну ширину на рівні половини максимальної інтенсивності) розміром 8 пікселів та більше.

Яскраві цілі можуть бути розфокусовані в більшій мірі, щоби можна було використовувати довші експозиції, які в іншому випадку призвели б до насичення пікселів.

Багато DSLR-камер обладнані стандартними комплектними об'єктивами-трансфокаторами, подібними до об'єктиву 18-55мм f/5 з Рис. 2.6. Ці типи об'єктивів мають порівняно малу світлосилу (велике значення діафрагмового числа) та низьку оптичну якість, якщо їх використовувати на повністю відкритій діафрагмі. Вони можуть давати краще зображення, якщо діафрагму трохи прикрити, однак загалом їх не рекомендують для використання у фотометрії.

Високоякісні (і, відповідно, порівняно дорогі) об'єктиви-трансфокатори підходять для DSLR-фотометрії, якщо уникати збиття збільшення та фокусування, що може трапитись, коли об'єктив спрямований високо в небо. Якщо трансфокатор змінить фокусну відстань впродовж сеансу спостереження, фокус зміститься й насиченість зір може змінитися, або близько розташовані зорі можуть змішатися (накластися одна на одну) і астрометрія та складання зображень можуть ускладнитися. Зміна фокусу може бути зумовлена як впливом довкілля, таким, як зміна температури, так і фізичними ефектами, такими, як вага самого об'єктиву, коли ціль піднімається з низького до високого положення на небі. Можна використати клейку стрічку, щоби перешкодити зміні фокусної відстані.

Для DSLR-фотометрії рекомендується використовувати об'єктиви з незмінною фокусною відстанню, тому що вони, взагалі кажучи, мають оптику кращої якості та більший відносний отвір у порівнянні з трансфокаторами того ж діапазону цін.

2.3 Штативи (триноги) та монтування

Камера має бути встановлена на якомусь монтуванні, щоб одержувати зображення належної якості; якщо камеру тримати в руках, не можна досягти тієї стабільності, що потрібна для зображень, які можна використовувати як фотометричні дані. Є багато способів встановлювати камеру, нерухомий штатив -- це найпростіший та найдешевший спосіб. Також можливо встановити камеру з фотооб'єктивом на екваторіальне монтування (монтування, що слідує за рухом неба), або встановити камеру верхи на телескоп ("piggy-back"), що сам встановлений на екваторіальному монтуванні. У цей спосіб ми забезпечуємо, що камера спрямована в одну й ту ж саму ділянку простору, що рухається небом упродовж ночі. Нарешті, ви можете під'єднати цифрову камеру до фокуса телескопа, перетворивши сам телескоп у об'єктив камери. Який саме з цих способів ви оберете -- це питання персональних уподобань та ресурсів. Ви можете одержати дані належної якості, використовуючи будь-який з цих способів монтування камери, однак обраний спосіб буде визначати, які об'єкти ви зможете, та як саме ви будете їх спостерігати.

Нижче ми опишемо найбільш розповсюджені типи монтувань.

2.3.1 Штатив (тринога) та інші нерухомі монтування

Штатив має стандартизоване кріплення для камери або іншого оптичного інструменту. Ваша камера, ймовірно, має невеликий різьблений отвір, у який вкручується гвинт штативної головки. Камера, закріплена на штативі, спрямована в одне й те ж саме місце на небі й не тремтить (від ледь помітних рухів ваших рук). Обмеження такого способу -- добовий рух зірок небом впродовж ночі через обертання Землі. Це прийнятно, однак обмежує час експозицій, які ви можете використовувати, щоби довжина треків зірок не перевищувала можливості програмного забезпечення, яке застосовується для вимірів.

2.3.2 Екваторіальне монтування

Екваторіальне монтування з моторами на осях дає змогу компенсувати обертання Землі, утримуючи ціль впродовж тривалого часу. Такі монтування зазвичай встановлюються замість фіксованих головок на триногу. Екваторіальне монтування часто використовується для встановлення телескопів, щоби слідувати за рухом неба та утримувати той же самий небесний об'єкт у полі зору впродовж ночі без необхідності постійно підлаштовувати телескоп вручну. Замість телескопу ви можете встановити на це монтування цифрову камеру з об'єктивом. Екваторіальні монтування накладають додаткові вимоги: вам потрібно джерело живлення, щоби монтування працювало, також ви маєте встановити полярну вісь монтування на Північний (або Південний) полюс світу, щоби монтування правильно відслідковувало рух неба. У принципі, добре налаштоване на полюс монтування дає змогу використовувати довші експозиції, ніж це можливо на нерухомому штативі. Це дає змогу вам спостерігати тьмяніші зорі, тому що чим тривалішу експозицію ви використовуєте, тим більше світла збирає камера. Таблиця 2.4 показує приклади експозицій для моторизованих монтувань.

2.3.3 Монтування камери верхи на телескоп

У випадку монтування верхи на телескоп ви прилаштовуєте камеру з об'єктивом на наявне оптичне обладнання, найчастіше на телескоп на екваторіальному монтуванні. Майте на увазі, що в такому способі телескоп не використовується для збору світла, він слугує просто точкою монтування для камери з об'єктивом. У цьому випадку головне питання для вас -- як приладнати вашу камеру до інструмента, а не до монтування. Деякі телескопи мають для цього спеціальне устаткування (або комплектне, або доступне для придбання), однак для інших вам, можливо, доведеться самому розробити та створити елементи кріплення. У будь-якому випадку, основна вимога -- камера має бути надійно та безпечно прикріплена до телескопа, щоби вона трималася на місці, без ковзання та зміщення під час руху телескопа. Також майте на увазі, що прилаштування камери на телескоп змінить ваговий баланс монтування і вам може бути потрібно наново збалансувати ваше екваторіальне монтування.

2.3.4. Невеликі моторизовані трекери за ПП (прямого піднесенню)

Наявні також пристрої (трекери), що призначені спеціально для DSLR-камер. Вони не використовують вісь схилення, лише мають моторизовану вісь Прямих Піднесенень, завдяки чому камера слідує за небом. Камера з об'єктивом монтується на цій платформі з використанням кульової штативної головки. Конструкція може бути спрямована в будь-якому напрямку на небо та відстежувати цей напрямок. Пристрій не має власного штатива та, як правило, кріпиться на достатньо міцний фотоштатив. Цей спосіб добре підходить для експозицій завдовжки пару хвилин з об'єктивом, а не телескопом. Вартість такого пристрою значно менша, ніж екваторіального монтування, також його значно легше транспортувати та встановлювати. Можливе дуже дешеве рішення -- побудувати класичне монтування типу "двері комори". Воно робиться з двох фанерних пластин, з'єднаних

дверними петлями та контролюється гвинтом, що крутиться або вручну, або за допомогою невеликого мотора з редуктором. Камера встановлюється на одну з пластин за допомогою кульової головки штативу. Вісь, що проходить крізь петлі, спрямовується на Північний (Південний) полюс світу. Нарешті, можна використати екваторіальне монтування початкового рівня типу EQ1 та обладнати його кроковим електромотором, цього має бути достатньо для експозицій у 60-90 секунд з використанням об'єктиву з фокусною відстанню 200мм. Загальна вартість такого пристрою має бути біля 200 доларів. Ці конструкції легкі, зручні для транспортування та можуть бути розгорнуті за пару хвилин.

2.3.5. Моторизоване альт-азимутальне монтування з комп'ютерним керуванням

Низка виробників та постачальників пропонують чудові альт-азимутальні монтування з комп'ютерним керуванням, що підходять для DSLR-фотометрії з використанням короткофокусних об'єктивів або об'єктивів із середньою фокусною відстанню. Ці монтування спроможні легко націлитися та супроводжувати ціль після простого процесу початкового налаштування. Прийнятна довжина експозицій, що обмежується обертанням поля, становить десь до хвилини та менше, залежно від схилення цілі, однак це однаково значно довші експозиції, ніж на монтуваннях без трекінгу (тобто без компенсації обертання неба).

2.3.6. Застереження

Будь-які з цих монтувань дадуть вам змогу одержувати корисні наукові дані, однак із монтуваннями без трекінгу -- фотоштативами або немоторизованими екваторіальними монтуваннями чи монтуваннями без належного вирівнювання полярної вісі згідно з Віссю Світу -- ви зможете робити лише короткі експозиції, зазвичай менші за 5-20 секунд (Таблиця 2.3). Це зумовлено зміщенням неба в полі зору вашої камери під час експозиції (добове обертання), що призведе до розтягування зір у лінії (зоряні треки). Якщо треки занадто довгі, надмірні фонові пікселі у фотометричній апертурі збільшать шум та знизять ВСШ (відношення сигнал/шум). Однак, деякі програми фотометрії дають змогу використовувати витягнуту апертуру вимірювання, що відповідає треку та дають чудові результати, якщо зоря достатньо яскрава. Інше обмеження довгих треків (або розфокусування) -- це ризик накладання зір одна на іншу, особливо, якщо ви використовуєте короткофокусні об'єктиви.

У наступному розділі наведені рекомендації щодо довжин експозицій, залежно від оптиці вашої камери і від того, чи ви використовуєте нерухоме монтування без трекінгу, чи екваторіальне монтування з трекінгом.

2.4 Налаштування камери

2.4.1 Ручний режим

Ваша DSLR має багато налаштувань, більшість із яких ви не будете використовувати. Камери сильно відрізняються одна від одної, тож ви маєте звернутися до інструкції до своєї камери, щоби знайти наступні налаштування, багато з яких доступні через послідовність меню. Ваша мета -- "спростити" камеру, вимкнути надлишкові функції й одержувати зображення у форматі RAW. Перший ваш крок -- увімкнути ручний режим налаштувань ("M", manual), щоб отримати повний контроль над експозицією та діафрагмою, як це описано нижче.

2.4.2 Відносний отвір (діафрагмове число f)

Наступний крок -- вибрати відповідну величину діафрагми. Діафрагмове число f -- це число, що дорівнює фокусній відстані об'єктива, поділеній на діаметр апертури, отвору, що пропускає світ до камери. Чим менше значення діафрагмового числа, тим більше світла входить в камеру, однак іноді об'єктив має дефекти, вплив яких можна зменшити, якщо не використовувати повністю відкриту діафрагму. Як правило, чим більше світла ви хочете зібрати, тим менше має бути значення діафрагмового числа, наприклад, $f/2$ або $f/4$. Якщо діафрагмування більше $f/7$, ви, мабуть, зменшили діафрагму занадто сильно.

2.4.3 Чутливість: ISO

Значення ISO вашої камери визначає коефіцієнт підсилення на виході сенсору. Великі значення ISO корисні, якщо ви працюєте з тьмяними зорями, однак для яскравих зір високі значення ISO збільшують ризик досягти насичення сенсору, яке виникає, коли пікселі сенсору отримують більше фотонів, ніж вони можуть точно підрахувати. З іншого боку, низьке значення дає змогу уникнути проблем із насиченістю, отже, можна робити виміри в ширшому діапазоні яскравостей. ISO 100 або 200 рекомендоване для яскравих зірок. Більші значення ISO можуть знадобитися для тьмянних зірок залежно від апертури, часу експозиції та числа пікселів, освітлених світлом зорі.

Як зазначено вище, величина ADU на виході АЦП пропорційна числу електронів, зареєстрованих фотодіодом кожного пікселя. Коефіцієнт калібрування e/ADU обернено пропорційний значенню ISO. Для більшості камер із сенсором APS-C, що мають 14-розрядний АЦП, ідеальний коефіцієнт калібрування в один електрон на ADU досягається для значень ISO між 100 та 300, залежно від розміру пікселя. Нижче цього діапазону ISO мінімальний інкремент (квантування) -- 1 біт (розряд) АЦП на кілька детектованих електронів, тобто чутливість втрачається. Цей режим квантування дає найліпшу точність фотометрії та динамічний діапазон у режимі великих світлових потоків (коли конденсатор може бути заповнений електронами), але поріг детектування обмежений парою електронів. У сучасних камерах АЦП у більшості випадках 14-розрядний, він може включати також деякий зсув кодування (наприклад, 1024 або 2048 у камерах Canon). Отже, із 16384 можливих відліків використовуються лише приблизно 14000. Для значень ISO 400 та більше, АЦП реагує на кожний електрон, зібраний фотодіодом. Отже, повне число електронів, що може бути зчитане, змінюється (пропорційно до значення ISO) разом зі зміною можливого динамічного діапазону та співвідношення сигнал/шум (SNR). Рис. 2.9 показує межі лінійності та насичення на прикладі зеленого каналу камери Canon 450D для різних значень ISO.

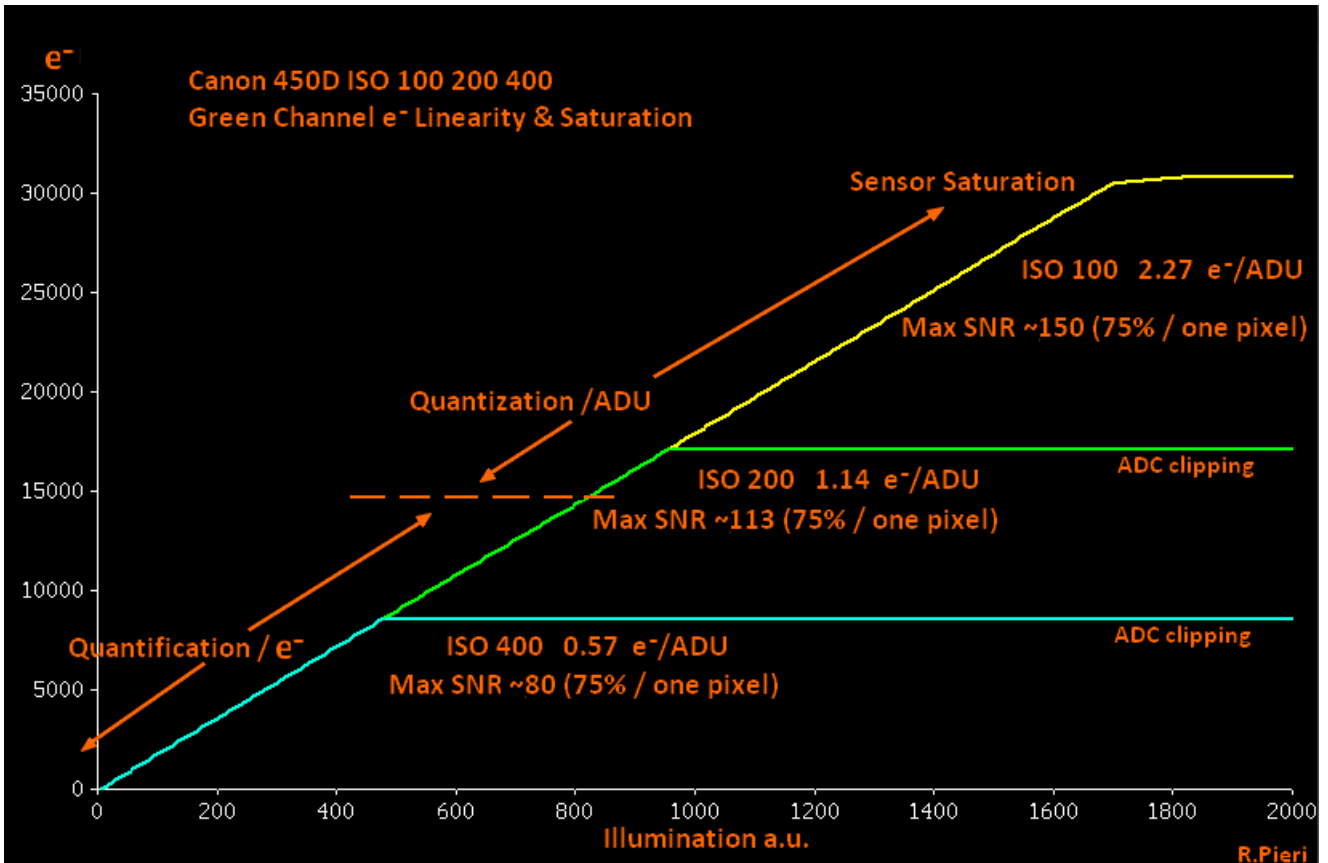


Рис. 2.9. Межі лінійності та насичення для зеленого каналу Canon 450D для різних значень ISO. (Roger Pieri)

До цього моменту ми припускали, що камера реагує лише на фотони від зірок, однак це надмірне спрощення. Необроблений сигнал, виміряний як ADU, пропорційний числу фотонів від зорі, з додаванням фотонів від фона неба плюс фотони, що породжуються кількома джерелами шумів. Шум породжується внутрішніми флуктуаціями джерела, атмосферною турбулентністю та електронікою камери. Зокрема, деякі виміряні значення ADU насправді є темновим струмом, що виникає зявдяки електронам, які породжені внаслідок теплових коливань у фотодіоді. У більшості випадків внесок темнового струму може бути зменшений використанням серії “темнових кадрів” (“dark frames”, зображень, знятих в умовах, коли в систему не проходить світло), які віднімаються від основного RAW-зображення. Шум підсилювача та дробовий шум також дають внесок до вимірюваного сигналу. Ці питання обговорюються в Частині 4.

2.4.4 Час експозиції

Час експозиції має бути не менш ніж кілька секунд. Довжина експозиції залежить від низки факторів, таких, як яскравість зорі, значення діафрагми, величина ISO та вашого бажання уникнути розтягування зірок у треки. Якщо зоря тьмяна, необхідна достатньо довга експозиція, щоби точно виміряти яскравість. Якщо зоря яскрава, довгі експозиції можуть призвести до насичення. Оскільки ширше відкрита діафрагма дає більше світла, менші значення діафрагмового числа дають змогу використовувати коротші експозиції. Чим менше значення ISO, тим більше необхідна довжина експозиції. Якщо ваша камера встановлена на штативі, час експозиції обмежений 5-20 секундами (Таблиця 2.3), інакше треки зірок будуть занадто довгі. Якщо камера на моторизованому монтуванні, ви можете досягти експозиції біля 60 секунд перед тим, як почне заважати надмірна яскравість фона неба або точність ведення. Для довгих експозицій вам, можливо, доведеться використовувати режим

“BULB” та спеціальний кабель для керування спуском затвору. Можливо, ви зробите кілька знімків за незмінній експозиції й потім скомбінуєте їх за допомогою програмного забезпечення (стекінг). Загальна експозиція зображення після “стекінгу” має бути не менша, ніж 60 секунд для того, щоби належним чином усереднити коливання сигналу, які виникають через атмосферну турбулентність, що виглядає, як мерехтіння зірок. Час накопичення (інтеграції) залежить від того, яка точність фотометрії достатня для конкретного спостереження, якості умов спостереження (“сінг”, “seeing”) та апертури інструмента. Вплив турбулентності суттєвий у випадку малих апертур та стає менш значущим із ростом апертури. Це ще один ефект “сінгу”, тобто впливу атмосферної турбулентності.

У Таблицях 2.3 та 2.4 на наступних сторінках наведені оцінки максимальної зоряної величини, яку можна досягти за найліпших умов спостереження з використанням різної оптики на максимальній апертурі. Ці величини розраховані в припущенні, що камера спрямована в зеніт, ISO дорівнює 400, для випадків нерухомого штативу та монтування з моторизованою віссю прямого піднесення. Відповідні довжини експозицій та рівня насиченості подані для випадку фотометричної апертури у 25 пікселів з ISO 400 та 100. Значно більшого динамічного діапазону можна досягти, використовуючи більшу ступінь розфокусування.

Слід зазначити, що, хоч зорі зазначеної граничної величини й можуть бути зареєстровані на фото, відношення сигнал/шум (ВСП) для них буде занадто низьким. Похибка фотометрії таких зірок буде велика і фотометрію треба робити лише у випадку, коли довші експозиції або інструменти з більшою апертурою недоступні. Усереднення (стекінг) кількох зображень збільшує ВСП, однак зменшується роздільна здатність у часі, тобто точність вимірів моментів змін.

2.4.5 Формат файлів

DSLR-камери дають змогу використовувати різні формати файлів. Формат, потрібний для фотометрії -- RAW, у ньому безпосередньо записується все, що детектує сенсор, та відсутня додаткова обробка або стискання програмним забезпеченням камери. Canon використовує для RAW файлів розширення .CR2, Nikon використовує .NEF. Зверніться до інструкції до своєї камери, якщо вона від іншого виробника. Формат RAW потребує величезного обсягу пам'яті, однак уся ця інформація необхідна для точної фотометрії.

Хоч JPG є більш вживаним форматом для фотографів, він не зберігає всю ту інформацію, яка прийшла зі Всесвіту до сенсору вашої камери. Рекомендується також уникати комбінованого режиму RAW+JPG, що присутній у багатьох DSLR-камерах. Формат JPG потребує великого навантаження процесору (зменшення шуму, застосування різноманітних внутрішньокамерних корекцій, дебаєризації, перетворення у sRGB та ін). Це призводить до швидкого розряду акумулятора та нагріву, який збільшує темновий шум.

Є низка інших налаштувань камери, що небажані для фотометрії. Необхідно уникати будь-яких функцій, які включають обробку зображень, наприклад, зменшення шуму. Також, можливо, може бути корисно зменшити яскравість ЖК-дісплею (навіть вимкнути його), щоби він не заважав вашому нічному баченню та не виснажував батарею. Автори цього посібника не можуть знати всі можливі налаштування вашої камери, тому, якщо ви сумніваєтесь, вибирайте те налаштування, яке здається вам менш екстравагантним.

Таблиця 2.3. Рекомендовані значення експозицій для нерухомого штативу (монтування без трекінгу). (Roger Pieri)

Об'єктив	ФВ, мм	Діафраг- ма	Площа апертури, мм ²	Макс. експозиція*	Гранична величина	Вели- чина наси- чення	Вели- чина наси- чення	ПЗ**, градуси
Трансфокатор 18-55мм f3,5-5,6	55	5,6	76	20 с	8	5,1	3,7	15,3 x 22,8
Трансфокатор 70-300мм f4-5,6	70	4	240	16 с	9	6,2	4,8	12 x 18
Телеоб'єктив 200мм f4	200	4	1963	5,5 с	10	7,3	5,9	4,24 x 6,36
Трансфокатор 70-300мм f4-5,6	300	5,6	2254	3,7 с	10	7,1	5,7	2,8 x 4,2
Рефрактор 400мм f5	400	5	5026	2,7 с	10,5	7,6	6,2	2,1 x 3,2

* Трек у 15 пікселів розміром 5,2 мікронів за схилення 0 градусів. Усереднення миготіння зірок (атмосферної турбулентності) типово вимагає повного часу інтеграції 60 секунд, отже, кілька зображень мають бути зібрані в стек або усереднені, щоби досягти часу 60 с для серії кадрів. Наявність кількох серій (5 або більше) робить можливим прийнятний статистичний аналіз; важливо оптимізувати налаштування.

** Сенсор формату APS-C

“ФВ” -- фокусна відстань.

“Гранична величина” -- це найтьмяніша зоряна величина, що може бути виміряна з інструментальною похибкою у 0,05 величини з фотометричною апертурою принаймні 25 пікселів на одному зображенні. Залежно від умов спостереження, середня похибка може збільшуватись.

“Величина насичення” -- це зоряна величина, що призводить до досягнення щонайменше одним пікселем рівня насичення у 75%.

Таблиця 2.4. Приклади експозицій для монтувань з трекінгом. (Roger Pieri)

Об'єктив	ФВ, мм	Діафраг- ма	Площа апертури, мм ²	Макс. експозиція*	Гранична величина	Вели- чина наси- чення	Вели- чина наси- чення	ПЗ**, градуси
Телеоб'єктив 200мм f4	200	4	1963	60 с	13	9,9	8,5	4,24 x 6,36
Трансфокатор 70-300мм f4-5,6	300	5,6	2254	60 с	13	10	8,6	2,8 x 4,2
Рефрактор 400мм f5	400	5	5026	60 с	14	10,9	9,5	2,1 x 3,2
Рефлектор 800мм f4	800	4	31416	60 с	16	12,9	11,5	1 x 1,6

Примітки ті ж самі, що й у Таблиці 2.3.

Частина 3: Огляд програмного забезпечення

Після пристрою для отримання зображень (камери), комп'ютер та програмне забезпечення -- найважливіші компоненти DSLR-фотометрії. Багато аспектів планування спостережень, отримання та калібрування зображень, вимірювання, аналізу та створення звітів проводиться за допомогою відповідного програмного забезпечення. Є багато вільних та комерційних варіантів, також на ринку час-від-часу з'являються нові пропозиції. Деякі програмні пакети багатофункціональні, інші більш спеціалізовані. Немає універсального пакету з усіма необхідними функціями, тож ви, можливо, підберете для себе невеликий комплект програм, кожна з яких буде виконувати конкретне завдання у вашому робочому процесі.

Оскільки програмне забезпечення постійно змінюється, цей посібник не описує в деталях ніякий конкретний програмний пакет. Натомість, ми подамо загальний огляд тих функцій, які вам будуть необхідні, тих, якими ви, можливо, захочете скористатися, та тих, які вам можуть бути доступні в процесі обробки фотометричних даних. Керівництво з фотометрії з використанням кількох популярних програмних пакетів доступне на інтернет-сайті AAVSO (<https://aavso.org/dslr-camera-photometry-guide>).

3.1 Мінімальні вимоги до програм DSLR-фотометрії

Обираючи програмне забезпечення для DSLR-фотометрії, необхідно мати на увазі чотири ключові особливості: можливість працювати з зображеннями у форматі RAW, здатність застосовувати кадри "зсуву", "темнові" та "плоского поля", виділяти окремі кольорові канали та проводити фотометричний аналіз. Неможливо назвати єдину "правильну" програму, можливо, ви будете використовувати кілька програм на різних етапах обробки. Наступні кілька параграфів присвячені обговоренню кожного етапу більш детально.

3.1.1 Підтримання формату RAW вашої камери

Як це описано в попередній частині, для того, щоби проводити точні фотометричні виміри на ваших зображеннях, абсолютно необхідно, щоби сирі необроблені дані, записані камерою, не були змінені будь-якою додатковою обробкою. Тому фотометричне програмне забезпечення має читати та вміти маніпулювати тим RAW форматом, який записує ваша камера. Універсального RAW-формату немає: Canon використовує файли типу CRW та CR2, Nikon -- файли типу NEF. Інші виробники використовують свої власні формати.

Коли ви купуєте програмне забезпечення (або нову камеру), беріть до уваги, що, у випадку камер найновішої конструкції, може пройти кілька тижнів або місяців, доки фотометричне програмне забезпечення буде адаптовано до нового RAW-формату. Ви маєте пересвідчитися, що ваша камера підтримується програмним забезпеченням (зверніться до інтернет-сайту виробника програми).

3.1.2 Підтримання функції калібрування зображень (корекція за допомогою кадрів "зсуву", "темнового струму" та "плоского поля" ("bias", "dark", "flat"))

Як пояснювалось у попередніх частинах, на додачу до основних зображень, необхідно зробити серію калібрувальних зображень. Ці "bias"-, "dark"- та "flat"-зображення відображують постійне зміщення, нерівномірне освітлення, зумовлене вашою оптикою та "гарячі пікселі" (або інші недоліки) детектору камери. Вплив цих чинників має бути усунений для точного оцінювання інтенсивності зірок. Отже,

ваше програмне забезпечення має не лише бути спроможним читати та відображати зображення, але і вміти застосовувати калібрувальні кадри до ваших основних зображень.

3.1.3 Виділення окремих кольорових каналів

Як описано в попередній частині, баєрівський масив кольорових фільтрів DSLR-камери дає змогу одночасно записувати червоний, зелений та синій канали на одному й тому ж зображенні. Кожний колір -- окремий канал або площина. Ваше фотометричне програмне забезпечення має вміти розділяти RAW-зображення на окремі зображення для червоного, зеленого й синього каналу. Насправді зелених каналів два, деякі програми, наприклад, AIP4Win, комбінують їх в одне зображення. Інші програми, наприклад, MaxIm DL, обробляють кожний зелений канал окремо. Наразі більшість програм виділяють лише один кольоровий канал за раз, тому, можливо, буде необхідно повторити процес виділення каналів, якщо потрібна інформація про всі три кольори.

Багато з розповсюджених програм фотометрії мають можливість виділяти кольорові канали з RAW файлів (приміром, MuniWin, IRIS, AIP4Win, MaxIm DL). Якщо у вас одна з них, ви можете використовувати єдину програму для виділення кольорових каналів, виконання калібрування зображень та проведення фотометричного аналізу. Деякі популярні фотометричні програми не підтримують DSLR RAW-файли (наприклад MPO Caporus, VPhot), або не мають можливостей виділення окремих кольорових каналів. Якщо вам подобаються інструменти фотометрії цих програм, ви маєте спочатку виділити та конвертувати зображення, що відповідає конкретному кольору у формат, який підтримується програмами MPO Caporus та VPhot.

Більшість програм виділяють зображення кольорових каналів у менші зображення, ніж RAW (наприклад, RAW зображення 5200 x 3460 пікселів дасть зображення для окремого кольорового каналу розміром 2600 x 1730 пікселів). AIP4Win, однак, виконує інтерполяцію та визначає, скільки червоного, зеленого та синього світла попало б на кожен піксель зображення. Ця програма робить інтерполяцію, наприклад, для зеленого, проглядаючи оточуючі зелені пікселі та оцінюючи, скільки зеленого світла попало б на червоні та сині пікселі. Тому виділене зображення кольорового каналу має той самий розмір, що і RAW-зображення. У програмі є кілька методів інтерполяції, важливо вибрати білінійну для максимальної точності.

Примітка: Залежно від того, яке програмне забезпечення ви використовуєте, може виявитися необхідним виділити кольорові канали перед калібруванням. Дуже важливо не змішувати калібрувальні кадри для різних кольорових площин.

3.1.4 Фотометричний аналіз

Фотометричний аналіз -- це вимірювання інтенсивності світла зорі, яке було зібране детектором під час експозиції. Найбільш поширений підхід у програмах, які використовуються аматорами -- апертурна фотометрія; це єдина техніка, що обговорюється в цьому керівництві. Детальний опис подається в Частині 5; якщо коротко, в апертурній фотометрії вимірюються два параметри як для цілі, так і для зорі порівняння. Перший -- загальна інтенсивність всередині невеликої кругової апертури з центром на зорі, це апертура вимірювання. Ця загальна інтенсивність включає фотони від зорі плюс фотони від фону неба. Другий параметр -- середня інтенсивність на піксель у регіоні, що не містить зір і називається кільцем неба [в оригіналі sky annulus], воно також центроване на зірці, але має більший радіус, ніж апертура вимірювання (див. Рис. 5.3). З цих двох параметрів програмне забезпечення обраховує інтенсивність кожної зорі, скориговану на інтенсивність фону. Багато програм мають засоби для пакетного виконання такої процедури (див. нижче обговорення пакетної обробки та застосування сценаріїв), що значно спрощує та прискорює аналіз, якщо обробляються кілька зображень.

3.2 Корисні функції програмного забезпечення

Далі описані додаткові функції, що присутні у деяких пакетах програмного забезпечення для фотометрії, які роблять процес обробки зображень більш ефективним. Вони не є обов'язковими, але з ними ваша робота буде легшою.

3.2.1 Пакетна обробка зображень

Щоб усунути роботизну ручної обробки кожного зображення індивідуально, більшість спостерігачів з DSLR віддадуть перевагу пакетній обробці зображень за один прохід. Залежно від способу отримання зображень та властивостей цільової зорі, вам може знадобитися записати десятки або сотні зображень того ж самого поля, не забувши про кілька калібрувальних кадрів. Обробляючи таку кількість кадрів один за одним, ви швидко втратите задоволення від DSLR-фотометрії. Пакетна обробка проводить операції калібрування та вимірів, що повторюються, на серії файлів.

3.2.2 Сценарії

Навіть краще, ніж пакетна обробка, сценарії дають змогу комбінувати декілька операцій у робочий процес, параметри якого можна налаштовувати. Деякі програмні пакети мають власну просту 'мову програмування', яка дає змогу користувачу писати сценарії (наприклад, IRIS), інші використовують графічний інтерфейс (GUI), щоби визначити робочий процес інтерактивно та застосувати його до набору файлів (наприклад, Fitswork). Ця розширена функціональність присутня лише в деяких програмних пакетах, особливо в тих, що також використовуються професійними астрономами. Початківці можуть не перейматися цією розширеною функціональністю (створенням та використанням сценаріїв), та на початку робити всю послідовність операцій вручну, однак досвідченим спостерігачам ця функціональність може виявитися корисною для підвищення продуктивності та уникнення почуття фрустрації, яке може виникнути від необхідності виконувати ті ж самі тривіальні процедури знову і знову. Вибираючи програмний пакет, ви можете забажати пересвідчитися, що в подальшій роботі є можливість використовувати сценарії, хоча на початку під час навчання вам, можливо, ця функціональність не знадобиться.

3.2.3 Вирівнювання та складання (стекінг)

Ефективний шлях підвищити відношення сигналу до шуму (ВСПШ) ваших зображень та/або досягти тьмяніших цільових зірок -- це процедура вирівнювання та стекінгу (тобто, складання або усереднення) зображень. Багато фотометричних програмних пакетів можуть вирівнювати та підсумовувати фото, хоч у деталях процедура може трохи відрізнитися. Загалом, програмне забезпечення спочатку реєструє кожне зображення, визначаючи кілька зірок, які є спільними для всіх зображень. На фазі вирівнювання окремі зображення обертаються та зміщуються, щоби зареєстровані зорі на послідовних зображеннях збіглися. На фазі складання обраховується медіанне або середнє значення кожного пікселя для набору зображень. Кінцеве зображення містить такі складені значення пікселів.

Шумова компонента кожного пікселя не є константою для всіх зображень, вона коливається навколо середнього значення, та може змінюватися від одного зображення до іншого. У сумарному зображенні відношення сигналу до шуму має тенденцію до поліпшення. Це тому, що, складаючи кілька зображень, ми досягаємо збільшення як сигналу, так і шуму, однак шум, оскільки він випадковий, росте більш повільно, ніж сигнал. У ділянках сумарного зображення, де немає зірок, результатом будуть значення пікселів, що близькі до постійного рівня фонового сигналу неба (близькі до нуля для коротких експозицій, зроблених у темному місці) і розкид даних зменшується в порівнянні з

індивідуальними зображеннями. Пікселі, з яких складаються зображення зір, не сильно змінюються від одного зображення до іншого, отже, у результаті вирівнювання та складання відносний шум зменшиться, у той час як зорі майже не зміняться.

3.2.4 Комп'ютерне керування фокусуванням та отриманням зображень

Процес отримання зображень може керуватися комп'ютером, якщо камера під'єднана до нього за допомогою USB кабелю (який зазвичай використовується для списування зображень з картки пам'яті камери). Canon надає програму EOS Utility, що працює з їхніми DSLR-камерами. Інші виробники камер також пропонують подібне програмне забезпечення, або безкоштовно, або за додаткову плату. Програмне забезпечення від сторонніх виробників також існує, приміром BackyardEOS, BackyardNIKON та MaxIm DL.

Таке програмне забезпечення суттєво полегшує кадрування цілі, встановлення відповідної міри розфокусування та тривалості експозиції. Ви можете швидко перевірити кадрування цільової зорі та зір порівняння, отримавши зображення та відобразивши його на комп'ютері. Якщо необхідно, напрямок, в якому дивиться камера, можна підлаштувати перед тим, як робити основні зображення. Зображення також може бути обміряне, щоби бути впевненим, що зорі, які становлять інтерес, не пере- або недоекспоновані та відповідно підібрати тривалість експозиції.

Автофокусування не буде працювати на нічному небі і його треба вимкнути. Фактично, для фотометрії зображення має бути трохи розфокусованим (див. Частина 4 -- Отримання зображень). Встановлення об'єктиву на нескінченність (∞) також навряд чи буде придатним, особливо якщо ви використовуєте об'єктиви-трансфокатори. Фокусування вручну може забрати надто багато часу та дратувати, тож для нього також бажане програмне керування. BackyardEOS -- одна з програм, що робить це з електронними об'єктивами Canon. Інше програмне забезпечення може бути доступним для конкретних камер.

BackyardEOS також автоматизує процес отримання зображень, як і інші програми. Це особливо корисне, якщо необхідно зробити знімки одного й того ж поля для подальшого складання (стекінгу) або для реєстрації зірок, що порівняно швидко змінюються, наприклад, затемнюваних подвійних. Програмне забезпечення може бути налаштоване на отримання встановленої кількості зображень за задані інтервали часу.

MaxIm DL -- це потужний пакет для отримання зображень та їхнього аналізу, популярний у користувачів як CCD, так і DSLR-камер. Однак, на відміну від більшості інших програм, MaxIm DL зберігає зображення у форматі FITS [див. розділ 3.2.6], а не RAW-форматі камери. Це не є проблемою, оскільки FITS -- це звичайний вхідний формат файлів для фотометричного програмного забезпечення.

3.2.5 Автоматичне розпізнавання зоряного поля (астрометрія)

Це процес автоматичної ідентифікації зір, виявлених на зображенні зіставленням із зоряними каталогами. Якщо ви готуетесь до вашого сеансу спостереження, спершу дивлячись на пошукову мапу (як ви маєте робити), ви швидко вчитеся ідентифікувати цільову зорю та зорі порівняння без допомоги автоматичного розпізнавання. Однак, у випадку деяких просунутих методик, таких, як автоматична фотометрія, або якщо ви вважаєте, що помітили зміну блиску однієї з зірок у полі зору, яка може навіть не бути частиною вашої оригінальної програми спостережень, автоматичне розпізнавання може бути корисним. Деякі просунуті пакети, такі, як MPO Canopus (<http://www.minorplanetobserver.com/MPOSoftware/MPOCanopus.htm>) навіть використовують цей метод для автоматичної ідентифікації змінних зірок (або астероїдів, тощо). Є інтернет-сайт

astrometry.net, що реалізує розпізнавання поля, також цей сайт пропонує автономне (працює під Linux) програмне забезпечення, яке ви можете завантажити та використовувати локально.

3.2.6 Перетворення зображень у формат FITS

Формат FITS (“Flexible Image Transport System”, система гнучкої передачі зображень) -- це відкритий стандарт для зображень (та деяких інших астрономічних даних, таких, як інформація в табличному вигляді), він дуже поширений в астрономічній спільноті. Цей формат зберігає дані без втрат (збережений у форматі FITS файл містить всю інформацію, що присутня в оригінальному файлі RAW); це є суттєвим для фотометрії. Згадайте, що JPG -- це стиснутий формат із втратами. Оскільки FITS підтримується практично всіма серйозними пакетами астрономічного програмного забезпечення, це вдалий вибір, якщо ви хочете обмінюватися зображеннями між різними програмними пакетами. Інша велика перевага формату FITS -- це те, що він дає змогу зберігати метадані зображення (такі, як час спостереження, місце, довжину експозиції, небесні координати поля зору, тощо) стандартизованим чином, так, що інші програми це зрозуміють. Також FITS -- це найкращий вибір формату для архівування ваших зображень. Однак, є декілька варіантів формату FITS, тому вам, можливо, доведеться трохи поекспериментувати, щоби знайти такий варіант, який підтримується всіма вашими улюбленими програмами.

Програма Fitswork (http://www.fitswork.de/software/softw_en.php) може перетворювати RAW-файли у формат FITS у пакетному режимі та навіть підтримує деяку функціональність зі створення сценаріїв.

3.2.7 Корекція різного поглинання атмосферою та трансформація спектрального відгуку

Як це буде пояснюватися більш детально в Частині 6, щоб одержати найбільш точні результати, до наших вимірних зоряних величин необхідно застосувати два різновиду корекцій. Перша корекція бере до уваги ефект різного атмосферного поглинання, що зумовлене тим, що світло від різних зірок проходить шлях різної довжини крізь атмосферу, якщо поле зору порівняно велике, а висота зір над обрієм порівняно мала. Ця ситуація часто виникає у DSLR-фотометрії з використанням фотооб'єктивів. Зорі в частині кадру, яка ближча до обрію, більш затемнені атмосферним поглинанням, ніж зорі, які ближче до зеніту й це може спотворити нашу оцінку величини цільової змінної зорі.

Друга корекція називається “трансформацією” й необхідна, тому що фільтри та CMOS-сенсори в DSLR-камерах мають не такі спектральні функції пропускання, як стандартні астрономічні фільтри та CCD-камери. Ця друга корекція -- процес трансформації вимірних інструментальних величин у стандартні астрономічні величини, наприклад, трансформація величини, виміряній у зеленому каналі DSLR у Джонсонівську V-величину.

Більшість фотометричних програм не робить таких корекцій; VPhot від AAVSO виконує трансформацію, але не має можливості корекції різного атмосферного поглинання. Зазвичай ці корекції виконуються за допомогою електронної таблиці.

3.2.8 Створення звітів та їх подання за допомогою інтернет-сайту

Спостереження можуть бути завантажені до Міжнародної Базы Спостережень AAVSO за допомогою сайту WebObs (<http://www.aavso.org/webobs>). Кілька фотометричних пакетів (наприклад, AIP4Win, MaxIm DL, VPhot та MPO Caporus) можуть генерувати відповідні текстові файли звітів.

Як альтернатива, спостереження можуть бути внесені у відповідним чином форматовану електронну таблицю для подальшого завантаження до WebObs (<https://www.aavso.org/aavso-extended-file-format>).

3.2.9 Синхронізація часу

Встановлення вручну дати та часу в камері за радіосигналами точного часу на початку сеансу спостереження зазвичай достатньо для спостережень довгоперіодичних змінних. В інших ситуаціях необхідні більш точні відмітки часу для зображень, наприклад, під час зйомки серій зображень затемнених змінних подвійних зірок, щоби визначити точний час мінімуму яскравості. Камери Canon, та, можливо, інші, можуть бути сконфігуровані, щоби синхронізуватися з годинником комп'ютера, коли вони під'єднані до нього за допомогою USB кабелю. Годинник комп'ютера може автоматично синхронізуватися через регулярні проміжки часу із сервером часу інтернету. Багато сучасних операційних систем роблять це автоматично; однак, для цього може бути використане спеціально призначене програмне забезпечення, таке, як Dimension 4 (<http://www.thinkman.com/>). Програмне керування DSLR (Розділ 3.2.4) дає змогу в зручний спосіб пересвідчитися, що годинник камери встановлений коректно до початку отримання кожного окремого зображення.

3.3 Порівняльна таблиця можливостей програмного забезпечення

Найбільш поширені програмні рішення, які використовуються в спостереженнях змінних зірок, розроблені для Windows або Linux. У Таблиці 3.1 нижче наведено порівняння чотирьох розповсюджених програмних пакетів для фотометрії. Примітка: Є кілька версій MaxIm DL. Для DSLR-фотометрії вам потрібна версія MaxIm DL Pro. Функції та ціни наведені на початок 2013 року.

Таблиця 3.1. Порівняльна таблиця програмного забезпечення

Функції	IRIS ⁴	Muniwin ⁵	AIP4WIN ⁶	MaxIm DL Pro ⁷
Фотометричний аналіз	✓	✓	✓	✓
Підтримка формату RAW	✓	✓ ¹	✓	✓
Застосування кадрів зсуву, темнових, плоского поля	✓	✓	✓	✓
Розділення кольорів	✓	✓	✓	✓
Пакетна обробка	✓	✓	✓	✓
Вирівнювання і складання	✓		✓	✓
Відображення дисплею камери	✓			✓
Фокусування та керування камерою	✓			✓
Перетворення в FITS	✓	✓	✓	✓
Сценарії	✓	✓		✓
Керування телескопом та монтуванням	✓			✓
Розпізнавання поля	✓		✓	✓
Створення звіту			✓	✓
Ціна	Безкоштовна	Безкоштовна	\$99 ²	\$499 ³

Примітки:

- 1) Підтримується обмежений набір форматів; зв'яжіться з автором щодо формату вашої камери (інтернет-сайт Muniwin).
- 2) Ціна в 99 USD включає книгу “Довідник з обробки астрономічних зображень” (The Handbook of Astronomical Image Processing).
- 3) Лише MaxIm DL Pro та Suite має всі функції, що потрібні у DSLR-фотометрії.
- 4) <http://www.astrosurf.com/buil/us/iris/iris.htm>
- 5) <http://c-munipack.sourceforge.net/>
- 6) <https://www.willbell.com/aip4win/aip.htm>
- 7) http://www.cyanogen.com/maxim_main.php

3.4 Інше корисне програмне забезпечення

3.4.1 Зоряні мапи та програми-планетарії

Друковані зоряні мапи, або мапи, відображені на електронному пристрої, корисні для пошуку ділянки неба для зйомки. Мапи, на яких позначена змінна зоря та зорі порівняння, можуть бути згенеровані онлайн за допомогою “Variable Star Plotter” від AAVSO (<http://www.aavso.org/vsp>). Рис. 3.1 показує сторінку введення даних для VSP; для детальних пояснень див. посилання на довідник із VSP в горішній частині сторінки.

Variable Star Plotter

[VSP Help Guide](#)
[Request a Sequence](#)
[Report chart errors](#)

PLOT A QUICK CHART

WHAT IS THE NAME, DESIGNATION OR AUID OF THE OBJECT?

Required if no coordinates are provided below

RIGHT ASCENSION

Allowed Formats: HH:MM:SS, HH MM SS, DDD.XXXX. Required if no name is given above

DECLINATION

Allowed Formats: ±DD:MM:SS, ±DD MM SS, ±DD.XXXX. Required if no name is given above

CHOOSE A PREDEFINED CHART SCALE

A is larger, slower; G is smaller, faster

CHOOSE A CHART ORIENTATION

Visual
 Reversed
 CCD

PLOT A FINDER CHART OR A TABLE OF FIELD PHOTOMETRY? *

Chart
 Photometry

CHART ID

A Chart ID will allow you to reproduce prior charts. Overrides all other fields in this form.

ADVANCED OPTIONS

FIELD OF VIEW

In Arcminutes. Must be between 0' and 1200'

MAGNITUDE LIMIT

Stars fainter than this magnitude will not be displayed

RESOLUTION

Resolution in dpi to render the chart (default 150)

WHAT WILL THE TITLE FOR THIS CHART BE?

Displayed at the top-center of the chart

WHAT COMMENTS SHOULD BE DISPLAYED ON THIS CHART?

Displayed beneath the chart star field

WHAT NORTH-SOUTH ORIENTATION WOULD YOU LIKE? *

North Up
 North Down

WHAT EAST-WEST ORIENTATION WOULD YOU LIKE? *

East Left
 East Right

WOULD YOU LIKE TO DISPLAY A DSS CHART?

Yes
 No

If yes, retrieves image from the Digital Sky Survey

WHAT OTHER VARIABLE STARS SHOULD BE MARKED?

None
 GCVS
 All

WOULD YOU LIKE ALL MAGNITUDE LABELS TO HAVE LINES?

Yes
 No

If Yes, this will force lines to be drawn from all magnitude labels to the stars

WOULD YOU LIKE A SPECIAL CHART?

None
 Binocular
 DSLR
 Standard Field

Binocular: Only labels comparison stars useful for binocular viewing
 DSLR: Only labels comparison stars useful for DSLR photometry
 Standard Field: Only labels photometric "standard stars" in the chart's field of view

SELECT WHICH FILTERS TO DISPLAY (PHOTOMETRY ONLY)

U
 B
 Rc
 Ic
 J
 H
 K
 P
 Z

V and (B-V) magnitudes are always displayed. Select any other bands you wish displayed below

Рис. 3.1. Сторінка введення даних для “Variable Star Plotter” (VSP). (Mark Blackford)

На побудованій за допомогою VSP мапі змінна зоря розташована в центрі, Рис. 3.2. Під час налаштування та фокусування ця мапа корисна для перевірки того, що змінна зоря правильно розташована на ваших зображеннях. Також вказані величини деяких сусідніх зірок і ви маєте пересвідчитися, що для деяких зірок, що попадають у поле зору, їхні величини близькі до величини цільової зорі, щоби їх можна було використати як зорі порівняння в процедурі фотометрії. Величини позначені без десяткової крапки (яку можна сплутати з позначкою слабкої зорі); отже, зоря величини 7,1 позначена як 71.

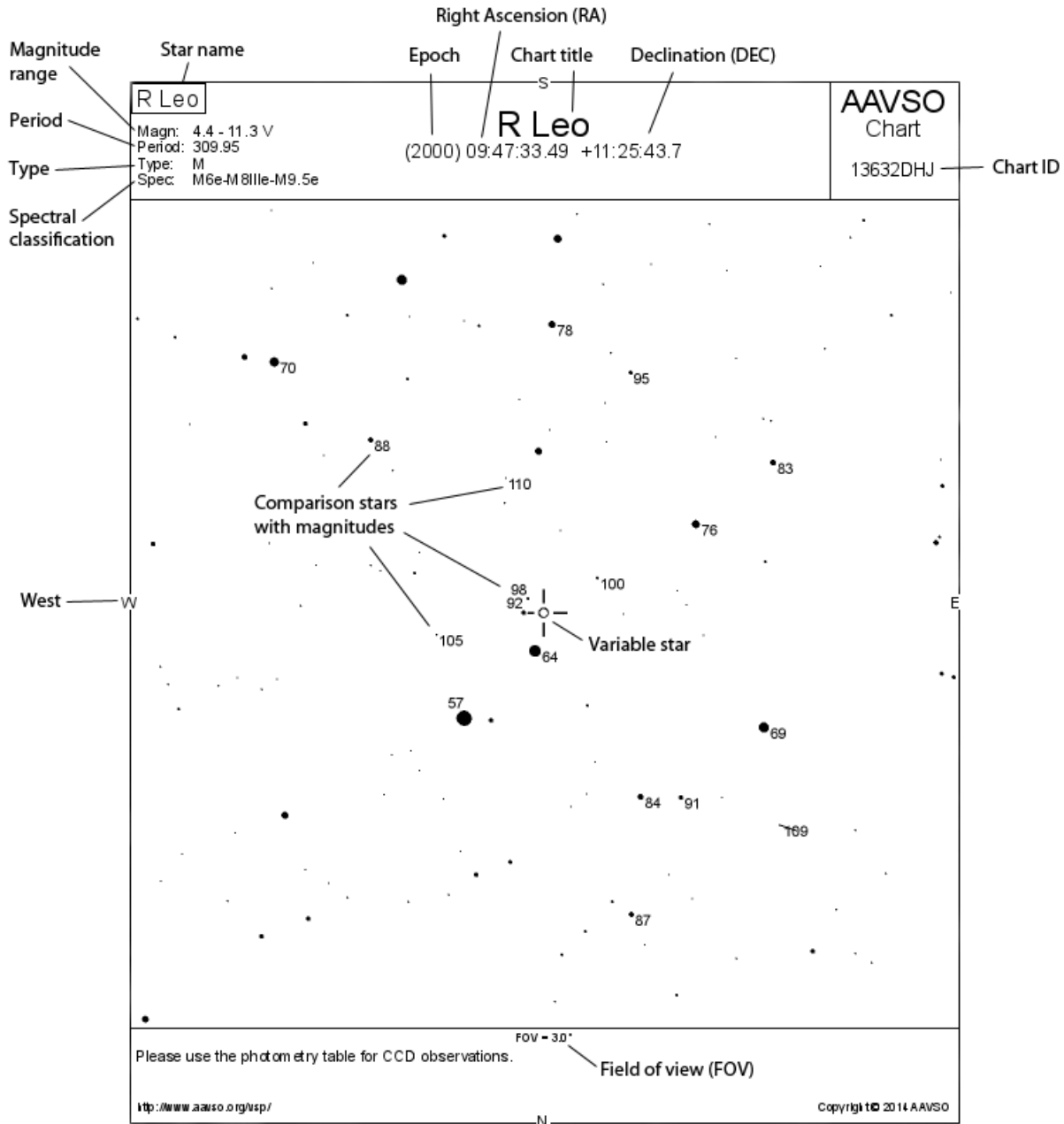


Рис 3.2. Мапа зоряного поля, згенерована за допомогою “Variable Star Plotter”, навколо змінної R Leo, разом із поясненням інформації, що міститься на мапі. (AAVSO)

Величини зір порівняння на VSP-мапі подаються лише з точністю до однієї десятої. Це, зазвичай, досить для візуальних спостережень, однак не підходить для DSLR-аналізу. Виберіть функцію VSP “Таблиця фотометрії”, щоби згенерувати детальний список зір порівняння для обраного зоряного поля. Зоряні величини та оцінка похибок подаються з точністю до трьох знаків після десяткової крапки.

Якщо ви використовуєте екваторіальне монтування з добре виставленою полярною віссю, координати зір, наведені в таблиці, можуть допомогти вам швидко навестися на потрібну ділянку неба.

Якщо ви використовуєте простий штатив, для спрямування камери вам може бути корисна мапа, яка відображує більше поле зору. Для цього можуть бути використані паперові мапи, які зображують великі ділянки неба, або зоряні атласи. Однак, більш зручно користуватися програмами-планетаріями, тому що мапи, які вони відображують, можуть бути масштабовані та орієнтовані відповідно до вашої зображуючої системи й ціль може бути легко знайдена та відцентрована. Багато з програмних пакетів-планетаріїв можуть також керувати монтуванням телескопу (див. “Керування телескопом та/або монтуванням” нижче). Є багато вільних та комерційних пропозицій, такі, як Stellarium, Cartes du Ciel або TheSky. Деякі програми-планетарії для мобільних пристроїв можуть визначати напрямок, у який спрямований пристрій, та підлаштовувати вигляд мапи так, щоби показувати зорі в цьому напрямку, що може бути дуже зручним.

Якщо ви використовуєте подібне програмне забезпечення, пам’ятайте, що змінні зорі можуть бути відображені з іншою яскравістю, ніж ви побачите в ніч спостережень, саме тому, що вони змінні!

3.4.2 Керування монтуванням

Багато монтувань для телескопів із функцією “GoTo” можуть керуватися за допомогою програм на вашому комп’ютері. Ці типи монтувань часто постачаються разом із драйверами або комунікаційними протоколами, які розуміють програми-планетарії, такі, як Stellarium або TheSky. Керування монтуванням за допомогою програм має, щонайменше, дві великі переваги. Перша: “ціль” спостережень можна порівняно легко знайти (якщо, звісно, її видно на небі в цей час). Друга: монтування з трекінгом утримує камеру на тій же самій цілі, компенсуючи обертання Землі. Це дає змогу використовувати довші експозиції та детектувати тьмяніші зорі. В ідеалі, камера має бути встановлена на екваторіальному монтуванні, однак багато монтувань з “GoTo” є азимутальними; вони простіше розгортаються й легко керуються з комп’ютера. Строго кажучи, використання азимутального монтування (без дорогого пристрою для компенсації повороту камери) призводить до того, що зображення трохи обертається. Більшість програмного забезпечення, що обробляє послідовності кадрів, може компенсувати цей ефект і, якщо для окремих зображень використовуються короткі витримки, це не є серйозною проблемою.

Частина 4. Отримання зображень

4.1 Огляд процедури отримання зображень

DSLR-фотометрія, у принципі, є дуже простим процесом: отримайте зображення неба, відкалібруйте його, видобуйте фотометричні дані, обрахуйте за цими даними зоряні величини та надішліть ваші виміри для довгострокового архівування. Крок отримання зображень у цій послідовності є найважливішим, оскільки з вхідних даних незадовільної якості неможливо отримати гарний кінцевий продукт.

У цій частині ми заглибимося в деталі підготовчої роботи, яку ви маєте виконати перед зйомкою вашого першого набору даних, розглянемо, як зробити калібрувальні кадри, як знайти потрібне вам зоряне поле за допомогою крихітного видошукача, як отримати зображення та оцінити їхню якість та, наприкінці, розглянемо деякі прийоми роботи та поради від досвічених DSLR-фотометристів.

4.2 Підготовча робота

4.2.1 Нотатники

Можливо, один із найбільш важливих аспектів наукових спостережень -- хороші записи про те, що ви зробили. Це може здаватись надмірним спрощенням, однак журнал ваших спостережень із записами про обладнання та хід сеансу не лише допоможе вам знайти проблеми у ваших даних або процедурі спостережень, але й дасть змогу іншим експериментаторам повторити ваш дослід, якщо в цьому виникне потреба.

Як мінімум, у записах ви маєте вказати дату та час, коли ви зробили зображення, об'єкт, до якого ці зображення відносяться, погодні умови та все те, що йде не так, як очікувалось, упродовж вашого сеансу спостережень. Також непогано було б періодично відмічати температуру, вологість, стан неба, оскільки все це може вплинути на якість ваших даних. Не забувайте занотовувати будь-що незвичне щодо сеансу або обладнання. Чи було ввімкнене світло в гаражі вашого сусіда цієї ночі, як це було попередньої? Чи сіла батарея в камері всередині сеансу і ви мали її замінити?

4.2.2 Місце спостережень, монтування та управління камерою

Як у будь-якому сеансі спостережень, більшість роботи виконується в темряві. Ви маєте знайти місце для спостережень, вільне від перешкод як з боку неба, так і з боку землі. Не важливо, чи ви використовуєте фотоштатив, чи монтування для телескопа, ви маєте заздалегідь ознайомитись із розташуванням та функціонуванням його елементів керування та особливостями, що можуть бути корисними. Наприклад, яка довжина ніг вашого штативу? Як ці ноги фіксуються? Як працюють фіксатори в головці штативу? Чи має головка штативу швидкоз'ємну платформу (для камери)? Спробуйте під'єднати камеру до монтування вдень та випробуйте екстремальні позиції (наприклад, напрямок у зеніт), щоби пересвідчитись, що ніщо не заважає позиціонуванню, не заплутається і мимоволі не зламається впродовж сеансу.

Щодо камери, ви маєте знайти та вміти користуватися такими елементами керування та функціями:

- Кільця фокусування та масштабування (на об'єктиві)
- Ручне фокусування (тобто вимкніть автофокус)
- Вимикач стабілізації зображення (вимкніть стабілізацію)

- Час експозиції
- Величина діафрагми
- Значення ISO
- Формат зображення (встановіть у RAW)

4.2.3 Живлення камери

Можливо, один з найбільш неясних “підводних каменів” у DSLR-фотометрії -- випадок, коли камера або втрачає живлення, або батарея наближається до повного розряду. Деякі спостерігачі у минулому зазначали, що фоновий шум камери різко збільшувався, коли заряд батареї зменшувався або після заміни батареї. Здається, це не є проблемою у випадку сучасних камер, однак це треба мати на увазі, якщо ви використовуєте обладнання, старіше, ніж кілька років. Якщо ви плануєте або виконуете довгий сеанс спостереження (наприклад, приблизно такий довгий, як тривалість роботи вашої батареї), буде доцільно використовувати зовнішнє джерело живлення або мати другу батарею наготові, якщо зовнішнє живлення недоступне (незручне) у вашому місці для спостережень.

4.2.4 Пошукові мапи

Пошук змінної зорі та зір порівняння без високоякісної пошукової мапи -- це зазвичай марнування часу, тому не забудьте взяти одну з таких мап із собою в поле. Практична порада: підготуйте пошукові мапи, що відображають ділянки різного поля зору, особливо з полем зору, більшим ніж у камери. Див. Розділ 3.5.1.

4.2.5 План спостережень

Успішний сеанс спостережень починається з добре визначеного плану. Ми пропонуємо створити контрольний список дій, які необхідні для отримання зображень наукової якості, особливо, якщо ви тільки почали працювати з DSLR-фотометрією. Які зоряні поля ви збираєтесь спостерігати? Розташування зірок порівняння відносно цілі (тут допоможуть пошукові мапи). Які потрібні налаштування камери? Скільки зображень необхідно зняти? Усі ці пункти мають бути записані у ваш журнал спостережень, який може бути або паперовим, або електронним.

4.3 Джерела шумів та постійне зміщення

Можна було б очікувати, що всі пікселі на зображенні мали б точно однакове значення ADU, якщо б камера освітлювалася повністю рівномірним джерелом світла. Однак, такого ніколи не буває. На детектований сигнал впливають кілька чинників, які включають віньєтування об'єктива або телескопа, нерівномірність чутливості пікселів сенсору, пил на різних оптичних поверхнях, статистика підрахунку електронів, зумовлена випадковим часом прильоту фотонів та шуми електроніки камери.

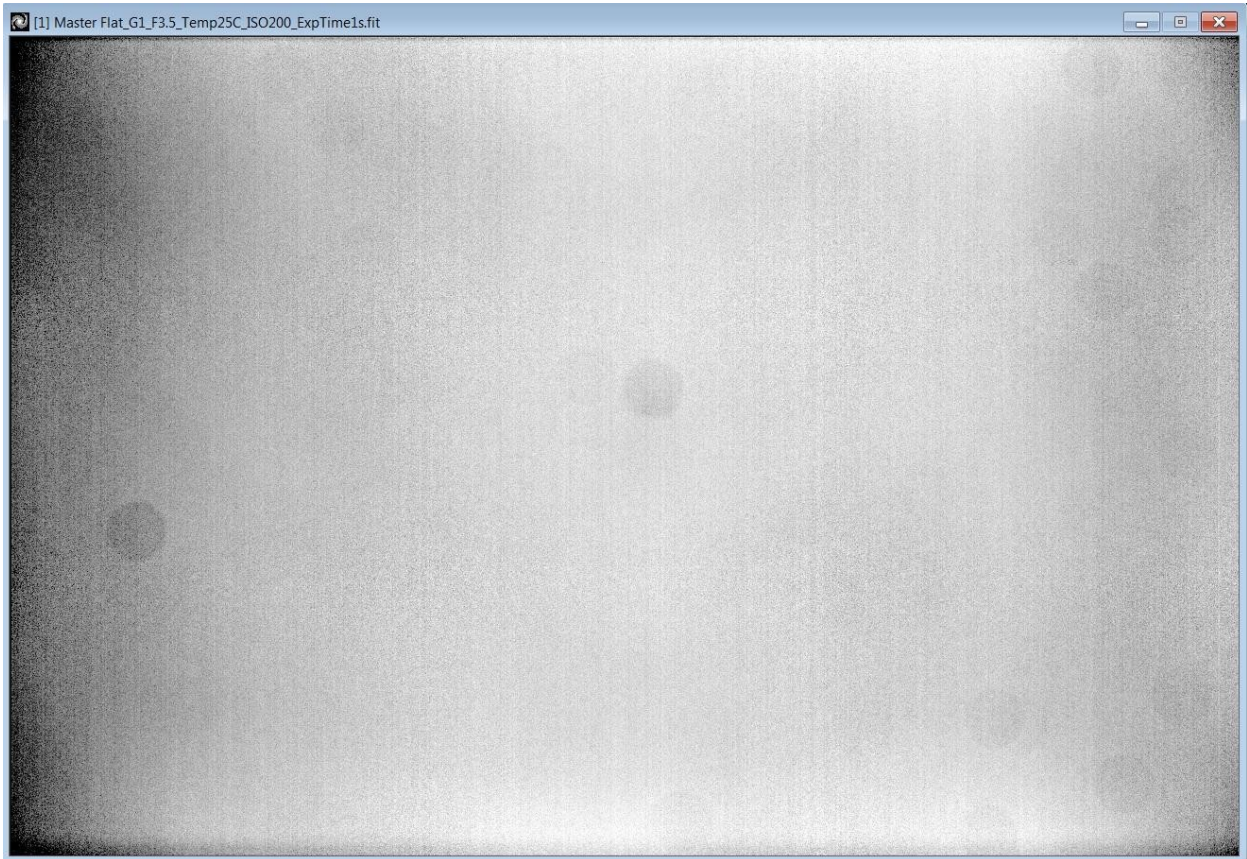


Рис. 4.1. Зображення з сильно розтягнутою гистограмою рівномірно освітленого лайтбоксу. (Mark Blackford)

На Рис. 4.1 ми можемо побачити кілька зі згаданих вище артефактів. Круглі плями зумовлені пилом на оптиці, знижена яскравість кутів зумовлена віньєтуванням, вертикальні та горизонтальні лінії виникають завдяки різній чутливості пікселів та шуму електроніки. Хоч це й не очевидно, ці артефакти також присутні в основних зображеннях і мають бути усунені перед фотометричними вимірами.

Щоби правильно врахувати ці ефекти, ви маєте зробити серії калібрувальних кадрів та виконати низку математичних операцій над вашими основними кадрами, які включають віднімання кадрів зсуву та темнових кадрів, щоб усунути постійну компоненту шуму та ділення результату на кадр плоского поля, щоб усунути ефект віньєтування та нерівномірної чутливості окремих пікселів, а також вплив тіней від пилу. Деталі, як виконувати ці операції, можуть бути знайдені в керівництві до вашого фотометричного програмного забезпечення. У цьому розділі подається детальний опис різноманітних артефактів, що їх намагаються усунути за допомогою калібрування. Для подальшого читання, ми відсилаємо читача до *Довідника з обробки астрономічних зображень* [*Handbook of Astronomical Image Processing* by Berry and Burnell (Willman- Bell Publishers)], або подібних джерел.

4.3.1 Випадковий шум

Найбільш легко зрозумілий артефакт зображень -- це випадковий шум. Випадковий шум повністю незалежний для кожного пікселя та кожного зображення. На кожному окремому зображенні візерунок випадкового шуму різний. Зернистість зображень (Рис. 4.2), які відзняті за великих значень ISO,

зумовлена цим шумом, який додає позитивну або негативну похибку до наших виміряних зоряних величин.

Є два основні джерела випадкового шуму DSLR-зображень. Перший -- шум Джонсона-Найквіста. Цей шум генерується електронікою камери та зумовлений хаотичним тепловим рухом електронів. Його часто називають “шум зчитування”. Друге джерело шуму -- дробовий шум, що відноситься до числа детектованих фотонів N і виникає зі статистичної природи емісії фотонів джерелом. Дробовий шум пропорційний квадратному кореню числа детектованих фотонів.

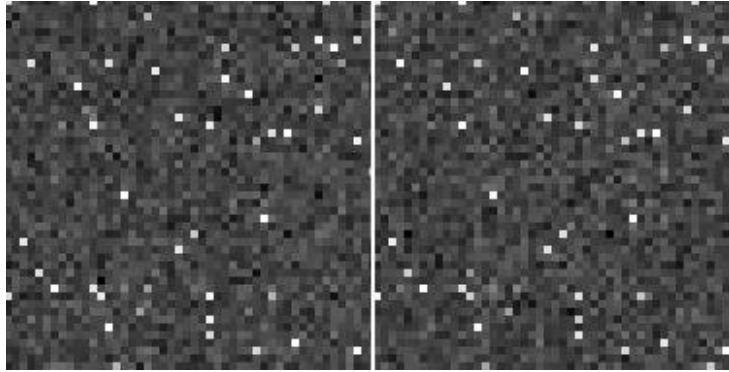


Рис. 4.2. Дві 120-секундні експозиції, ISO 400, 20°C, пікселі одного й того ж фрагменту двох RAW-зображень. Яскраві пікселі -- імпульси темного струму, вони однакові на обох зображеннях. Зернистий фон -- випадковий шум, він різний на різних зображеннях. (Roger Pieri)

Випадковий шум присутній як на калібрувальних, так і на основних зображеннях і його не можна усунути. Єдиний шлях зменшення впливу випадкового шуму -- збільшити сигнал (кількість фотонів), використовуючи довші витримки: або роблячи один знімок із довгою експозицією, або складаючи (додаючи один до одного) кілька зображень із коротшою витримкою, якщо є ризик насичення пікселів.

Багато моделей камер мають вбудовані програмні фільтри, які зменшують помітність цього шуму на зображеннях. Це корисно в повсякденній (побутовій) фотографії, однак ці фільтри змінюють оригінальні дані зображення й не мають використовуватися для фотометрії. Отже, отримуючи зображення для фотометрії, вимкніть будь-які функції внутрішньокамерного зменшення шуму.

4.3.2 Шум із фіксованим рисунком [*Fixed Pattern Noise*] (FPN)

На відміну від шуму Джонсона-Найквіста та дробового шуму, шум із фіксованим рисунком (FPN) не є випадковим; він зумовлений технологічними дефектами постійної природи. Якщо конкретні пікселі мають такі дефекти, вони формують рисунок, що повторюється від зображення до зображення. На відміну від випадкового шуму, FPN може бути видалений у процесі калібрування зображень.

Є кілька типів шумів із фіксованим рисунком, які включають зсув та постійне зміщення, “мертві” або “гарячі” пікселі, темновий струм та імпульсний темновий струм. У кількох наступних параграфах ми опишемо кожен із цих типів шуму більш детально.

4.3.3 Зсув та постійне зміщення

Зсув (bias) -- невелика зміна рівня чорного кожного пікселя, він часто пов'язаний з організацією пікселів у рядки та колонки. Він може бути або приблизно однаковий для всіх пікселів, або формувати смуги рівня чорного на зображенні (див. Рис. 4.3). На сучасних сенсорах амплітуда цього зсуву вкрай мала, зазвичай лише кілька ADU.

Примітка: На DSLR-зображеннях є подібні дефекти (смуги), які не повторюються від зображення до зображення й не можуть бути видалені за допомогою калібрування зображень. Ці завади, як правило, пов'язані з хибними сигналами, індукованими цифровими електронними ланцюгами у високочутливій аналоговій електроніці. Однак, вони мають дуже низький рівень ADU і не становлять великої проблеми.

Деякі камери мають постійне зміщення (systematic offset), передбачене конструкцією. Це однозначно визначене зміщення в кодуванні рівня чорного у файлі зображення. У сучасних камерах величина зміщення часто дорівнює 1024 або 2048 ADU. Це зміщення введено для того, щоби дати змогу записувати негативні значення шуму та деякого дрейфу рівня чорного. Цю особливість треба мати на увазі під час фотометричної обробки, тому що таке постійне зміщення має бути відняте перед виконанням будь-яких неадитивних математичних операцій над зображенням, таких, як корекція плоского поля (за допомогою flat-кадрів).

Зсув та постійне зміщення присутнє в усіх основних та калібрувальних зображеннях. Вони видаляються відніманням майстер-кадру зсуву (це обговорюється нижче в цьому розділі).

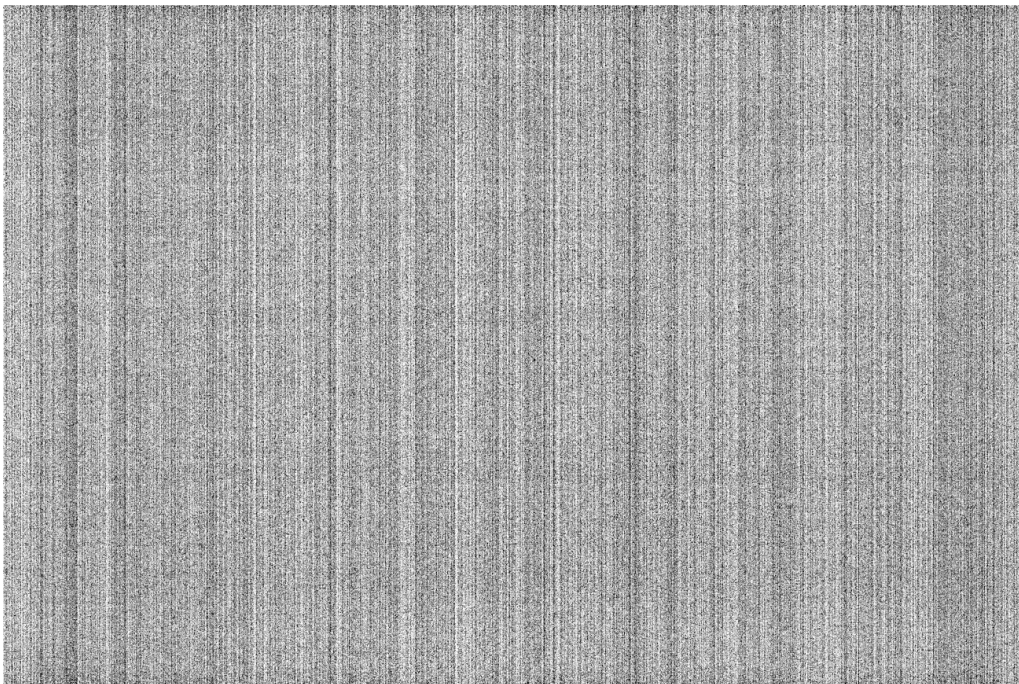


Рис. 4.3. Майстер-кадр зсуву із сильно розтягнутою гістограмою, на якому видно шум із фіксованим рисунком амплітудою в кілька ADU (ISO 200). Це зображення має як однорідний зсув від 0 ADU, так і смуги, пов'язані з організацією рядків та колонок адресуючої електроніки. (Mark Blackford)

4.3.4 “Мертві” та “гарячі” пікселі

“Мертві” та “гарячі” пікселі -- це пікселі, що не функціонують, як треба. “Мертві” пікселі не реагують на світло та зазвичай мають значення ADU, близькі до постійного рівня зміщення. Гарячі пікселі мають занадто великий темновий струм (див. нижче) та високі значення ADU у порівнянні з нормальними пікселями зображення. Це -- дефекти сенсору, вони допускаються на периферії сенсору, однак їх не має бути зовсім, або лише зовсім невелика кількість у центральних ділянках.

Рисунок дефектних пікселів повторюється від зображення до зображення й може бути скоригований: спочатку їхні координати записуються у файл (що називається мапою дефектних пікселів), а потім значення ADU цих пікселів замінюються в основних і калібрувальних зображеннях значеннями, які інтерполюються з найближчих нормальних пікселів. Процес такої корекції виконується перед будь-якими наступними кроками калібрування.

“Гарячі” пікселі детектуються в темнових [dark] зображеннях, а “мертві” -- у зображеннях плоского поля [flat]. Порогове значення ADU, що визначає, які саме пікселі будуть вибрані, встановлюється користувачем. Для ISO 100 порогове значення у 500~1000 ADU вище рівня чорного темнових зображень -- нормальна стартова точка. Використовуйте керівництво до вашого фотометричного програмного забезпечення, щоби знайти точний метод створення мапи дефектів.

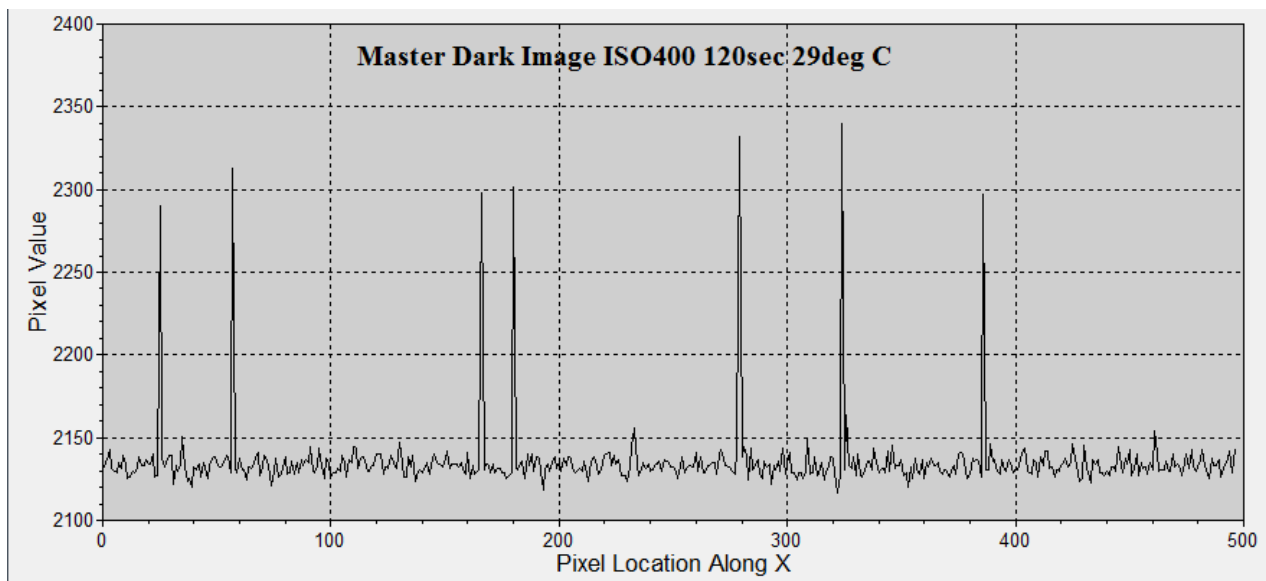


Рис. 4.4. Лінійний профіль, який показує значення ADU впродовж 500-піксельного фрагменту зображення з великою експозицією. Коливання навколо ~2140 відліків (ADU) зумовлені випадковим шумом. Виразні піки -- “гарячі” пікселі. (Mark Blackford)

Застосування мапи дефектів -- дуже результативний процес, для підготування такого файлу потрібно мало часу й цей процес не забирає час спостережень. Якщо така функція доступна у вашому фотометричному програмному забезпеченні, її рекомендується використовувати. Мапа дефектів може використовуватись упродовж кількох місяців. Її дійсність обмежена процесами старіння сенсору.

Важлива примітка: Коригування дефектних пікселів може провадитись, лише якщо дискретизація зображень зірок надлишкова (тобто вони займають багато пікселів). Якщо дефект виявився в профілі зорі, ви робите припущення щодо того, яке має бути належне інтерпольоване значення й це припущення буде помилковим, якщо сусідні пікселі сильно відрізняються за інтенсивністю.

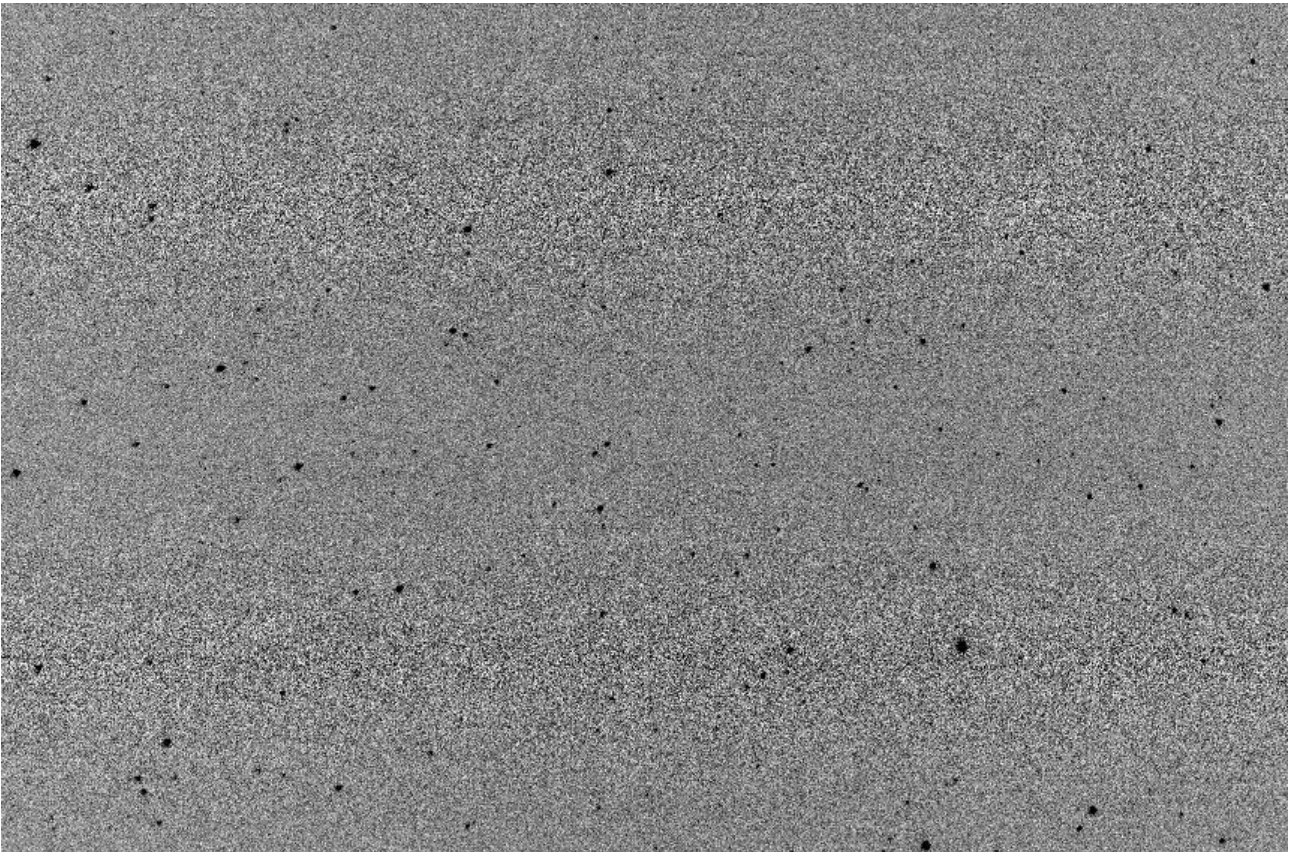


Рис. 4.5. На DSLR-зображеннях можуть з'являтися горизонтальні стрічки або смугастість. Ці смуги зазвичай мають дуже малий рівень (кілька ADU), вони зумовлені шумами аналогових ланцюгів сенсору, включених перед АЦП. Є алгоритми для усунення таких артефактів, однак вони не розповсюджені в астрономічному програмному забезпеченні. Віднімання фону, застосоване належним чином, має тенденцію зменшувати вплив цього джерела шумів. (Roger Pieri)

4.3.5 Темновий струм та темнові імпульси

4.3.5.1 Нормальний темновий струм

Фотодіоди в зображуючих CMOS-сенсорах включені в режимі зворотної полярності. Це означає, що позитивна напруга подається на катод відносно аноду. Струм від джерела напруги через елемент заблокований. Струм, що з'являється у фотодіоді, зумовлений електронами, які вивільняються фотонами, що попадають на фотодіод. Однак є ще додатковий крихітний струм, що також присутній у будь-якому діоді, це зворотний струм, свого роду струм витоків в режимі блокування. Сигнал від нього малий, приблизно 0,1-1,0 електронів за секунду, він призводить до невеликого збільшення вихідного рівня ADU для пікселя.

Нормальний зворотний струм зафіксований конструкцією сенсору і всі пікселі завдяки ньому мають однаковий позитивний зсув. Відповідне накопичення електронів у пікселі пропорційно часу експозиції. Це призводить до деякого підвищення глобального рівня чорного (більш-менш подібного до фону неба). Фактично це підвищення не помітне на наших зображеннях, оскільки воно компенсується електронікою DSLR-камери. Єдиний залишковий ефект -- це відповідний дробовий шум, який підвищує рівень випадкового шуму на довгих витримках.

Зворотний струм діодів також дуже чутливий до їхньої температури. Він, як правило, подвоюється з ростом температури на кожні 5 або 10° С. Отже, електричний заряд збільшується пропорційно часу експозиції й експоненційно залежить від температури сенсора. Хоч самі CMOS-сенсори зазвичай генерують дуже мало тепла (мають малу потужність розсіювання), процесор камери підвищує температуру камери навколо сенсора. Як правило, камера розігрівається на 10°С після години використання, значно менше, ніж CCD-камери, які потребують охолодження. Нормальний темновий струм є меншою проблемою для DSLR у порівнянні з CCD-камерами.

4.3.5.2 Імпульси темного струму

Астрофотографія за допомогою DSLR часто страждає від невеликої кількості (~3%) ненормальних пікселів, що мають значно більший темновий струм, ніж нормальні. Ці ненормальні пікселі виглядають на зображенні значно більш яскравими та часто називаються “гарячими” пікселями або “темновими імпульсами” (як приклад, яскраві пікселі на Рис. 4.2). Темнові імпульси не помітні на дуже коротких експозиціях, тому що їхній рівень нижче рівня випадкового шуму в більшості сучасних DSLR-камер; однак, вони стають проблемою на довших експозиціях.

Хоч темнові імпульси -- дійсно дошкульна аномалія в астрофотографії, вони мають менший вплив у фотометрії, якщо світло (навмисно) розподілене на кілька сотень пікселів [завдяки розфокусуванню]. Віднімання фону та складання/усереднення також зменшує вплив темнових імпульсів.

4.3.6 Калібрувальні майстер-кадри.

Це часто не враховують, однак, створення калібрувальних майстер-кадрів (що ми обстоюємо далі в цій частині), також вносить деякий додатковий випадковий шум в основні зображення. Щоби мінімізувати цей надлишковий шум, ми використовуємо майстер-кадри зсуву, темнові та плоского поля, які отримані з не менш ніж 16 індивідуальних кадрів, чим більше, тим краще. Сигнал від зображення лінійно росте зі збільшенням числа кадрів, у той час, як випадковий шум збільшується пропорційно квадратному кореню числа кадрів, отже, відношення сигналу до шуму (SNR) покращується зі збільшенням числа кадрів, що сумуються.

4.4 Калібрувальні кадри (зсуву, темнові та плоского поля)

4.4.1 Кадри зсуву

4.4.1.1 Класична корекція зсуву

Шум із фіксованим рисунком, зумовлений зсувом та постійним зміщенням зазвичай видаляється з основних зображень відніманням майстер-кадру зсуву. Майстер-кадр створюється складанням декількох знімків, які зроблені в абсолютній темряві, з дуже короткою експозицією та за того ж значення ISO, що й основні кадри.

Кадри зсуву можуть бути зроблені в будь-який час, тому що температура сенсора та налаштування фокусу в цьому випадку неважливі. Хмарні ночі -- ідеальний час для підготовки майстер-кадрів зсуву. Встановіть експозицію на найменшу величину, доступну для вашої DSLR-камери (зазвичай 1/4000 секунди), пересвідчитесь, що на сенсор не попаде світло (закрийте кришку об'єктива, заблокуйте видошукач, зайдіть у темну кімнату) та зробіть щонайменше 16, або навіть до кількох сотень експозицій. Зверніться до керівництва до вашого програмного забезпечення щодо того, як підготувати майстер-кадр зсуву з цих окремих кадрів. Окремий майстер-кадр зсуву має бути створений для кожного значення ISO, яке ви використовуєте для основних зображень. Ці кадри можуть

використовуватись впродовж місяців. Час використання обмежений можливим старінням електроніки.

4.4.1.2 Штучна корекція зсуву

Віднімання майстер-кадру зсуву неминуче додає деяку кількість випадкового шуму (навіть у випадку, коли для створення майстер-кадру зсуву використовується кілька сотень окремих кадрів). Натомість, деякі користувачі віднімають штучне зображення, на якому всі пікселі мають одне й те ж саме значення постійного зсуву, тобто 1024 або 2048 ADU. Тим самим з основних та калібрувальних зображень видаляється постійний зсув без додавання надлишкового випадкового шуму, однак на зображеннях залишається шум із фіксованим рисунком (FPN).

4.4.2 Темнові кадри

Є кілька підходів до корекції за допомогою темнових кадрів. Що ви оберете, залежить від характеристик конкретних зображень, які мають бути калібровані, та можливостей вашого фотометричного програмного забезпечення.

4.4.2.1 Відсутність корекції за допомогою темнових кадрів

Зображення, отримані за експозицій, менших за 30 секунд за низьких температур довкілля можуть не демонструвати значний темновий струм або темнові імпульси. Зазвичай це ситуація, яка має місце під час зйомки кадрів плоского поля, коли експозиції не перевищують кількох секунд. У цьому випадку корекція з використанням темнових кадрів не є необхідною і, фактично, лише додасть випадковий шум без значного покращення точності фотометрії. Рекомендується перевірити характеристики вашої камери за різних температур та значеннях експозиції перед тим, як відмовитися від темної корекції.

Проста перевірка -- обробка серії зображень із використанням та без використання темної корекції; якщо різниця буде складати лише кілька тисячних зоряної величини, це означає, що "гарячі" пікселі не є проблемою. Різниця в кілька тисячних зоряної величини може бути наслідком додавання випадкового шуму під час корекції за допомогою темного майстер-кадру.

4.4.2.2 Внутрішньокамерна темнова корекція

Багато моделей DSLR-камер мають можливість внутрішньокамерного зменшення шумів для довгих експозицій. Безпосередньо після зйомки основного зображення камера автоматично записує ще одне зображення з точно такою ж експозицією, але не відкриваючи затвор. Друге зображення віднімається від першого перед зберіганням відкоригованого зображення на картку пам'яті або комп'ютер. Ні оригінальне основне зображення, ні темнове не зберігаються.

На перший погляд це виглядає добре, однак на практиці це не так. Камера використовує лише одне темнове зображення для кожного основного, отже, додається значно більший випадковий шум, ніж у випадку темного майстер-кадру (хоч цей шум і послаблюється певним чином, якщо ви надалі складаєте кілька основних зображень). Більш важливо те, що половина часу спостережень марнується на темнові зображення й кількість основних зображень значно зменшується. Єдина перевага такого внутрішньокамерного процесу це те, що температури, за яких отримуються обидва зображення (основне та темнове) дуже близькі, однак це не є достатньою перевагою, щоби компенсувати всі недоліки такої процедури.

Взагалі, внутрішньокамерне пригнічення шуму для довгих експозицій та подібні опції мають бути вимкнені.

4.4.2.3 Класична темнова корекція

У класичному процесі корекції під час сеансу спостережень знімається щонайменше 16 темнових зображень, з використанням тих самих налаштувань, як і для основних зображень (ISO, довжина експозиції, температура). Будь-які можливі місця проникнення світла до камери мають бути заблоковані (треба закрити видошукач та надіти кришку об'єктиву). Темновий майстер-кадр створюється з цих окремих темнових кадрів. Зверніться до керівництва до вашого фотометричного програмного забезпечення щодо деталей.

Створити набір темнових зображень із таким самим рівнем темнових імпульсів, як і на основному зображенні, важко, тому що температура сенсору DSLR-камери не стабілізована. Щоби послабити вплив зміни температури, дехто робить половину темнових кадрів перед початком зйомки основних зображень, а половину -- після. Отже, охоплюється температурний діапазон, у якому зроблені основні зображення й це може поліпшити темнову корекцію.

У DSLR фотометрії рекомендується використовувати класичну темнову корекцію.

4.4.2.4 Темнова корекція, масштабована на довжину експозиції

Різні цільові об'єкти можуть вимагати різних експозицій, залежно від їхньої яскравості. Якщо використовується класична темнова корекція, вам необхідно мати темновий майстер-кадр для кожної довжини експозиції, витративши додатковий час на запис індивідуальних темнових зображень.

Деякі фотометричні програмні пакети мають можливість масштабувати майстер-кадр із довгою експозицією так, що його можна використати для темної корекції основних кадрів із коротшою експозицією. Це може працювати досить добре для CCD-камер, які утримують температуру сенсору фіксованою.

Однак, DSLR-камери Canon та Nikon застосовують деяку додаткову обробку, щоби зменшити ефект темного струму, навіть у випадку RAW-зображень. Вплив такої додаткової обробки полягає в тому, що, хоч дисперсія значень пікселів у темнових зображеннях збільшується зі збільшенням експозиції, як і очікується, однак середнє значення пікселів не збільшується лінійно; воно залишається на рівні кількох ADU вище значення системного зміщення. Отже, масштабована з урахуванням довжини експозиції темнова корекція не рекомендована для RAW-зображень Canon та Nikon. Для інших марок камер це може бути прийнятно, або ні; рекомендується перевірити поведінку темного струму вашої камери перед тим, як використовувати темнову корекцію, масштабовану з урахуванням довжини експозиції (див. Додаток А).

4.4.2.5 Темнова корекція з оптимізацією

У деяких фотометричних пакетах доступна більш складна процедура (наприклад, у IRIS та MaxIm DL): темновий майстер-кадр масштабується так, щоби мінімізувати середньоквадратичне відхилення шуму на фінальному зображенні. Ця процедура може врахувати різницю температури між темновими та основними кадрами, навіть зміну температури сенсору впродовж сеансу спостережень.

Знову ж, оптимізована темнова корекція не рекомендована для використання у випадку RAW-зображень із камер Canon або Nikon з тих же міркувань, що описані в розділі 4.4.2.4 вище.

4.4.3 Корекція плоского поля

Кадри плоского поля -- це зображення рівномірно освітленої поверхні (або іншого джерела, наприклад, неба в сутінках), які виявляють асиметрію та артефакти оптики вашої камери. На відміну від темної корекції, корекція плоского поля обов'язкова для фотометрії. Кадри плоского поля мають

бути записані з тією ж самою конфігурацією камери та телескопа/об'єктива (фокусування, значення діафрагми, ISO тощо), що використовувалася для основних зображень. Час експозиції має бути налаштований так, щоби запобігти насиченню.

Пошук або виготовлення однорідно освітленої поверхні -- несподівано складна задача, вона спричиняє різноманітні, скажімо так, цікаві онлайн-дискусії на форумі та на конференціях AAVSO. Тож ми не можемо (і не наважимося) агітувати за якусь конкретну методику. Перед тим, як представити кілька популярних рішень, ми пропонуємо кілька порад.

Необхідно стежити за тим, щоби кожен з RGB-каналів отримав достатньо світла на кожному зображенні. В ідеалі рівень має бути приблизно 2/3 максимального значення ADU вашої камери. Більшість DSLR-камер, доступних після (приблизно) 2008 року, мають 14-розрядні аналого-цифрові перетворювачі (АЦП) з максимальним значенням ADU $2^{14} = 16384$ ADU. Більш старі моделі DSLR-камер найчастіше мають 12-розрядний АЦП з максимальним значенням ADU $2^{14} = 4096$ ADU. Перевірте максимальне значення ADU вашої камери, вимірявши значення пікселів переэкспонованого зображення.

Експозиція кадрів плоского поля зазвичай має довжину кілька секунд, так що темновий струм не є помітним; однак сигнали зміщення та зсуву присутні й мають бути видалені в процесі калібрування. Ваше фотометричне програмне забезпечення має впоратись із цією процедурою.

Оскільки вважається, що кадри плоского поля є зображеннями рівномірно освітленої поверхні, вони коригують будь-яке віньєтування або варіації чутливості від пікселя до пікселя (ми припускаємо, що конфігурація камери та телескопу/об'єктива не змінюється). Однак, тіні від порошинок можуть змінюватися через рух пилу на оптичних поверхнях та зміни налаштувань фокусу. Щоби мінімізувати ці ефекти, вимкніть опції ультразвукової очистки сенсору камери. Кадри плоского поля мають зніматися регулярно, однак не має необхідності робити це кожен ніч, якщо ви не змінюєте фокусування або інші параметри.

Як і всі інші стадії корекції, кадри плоского поля привносять додатковий шум до відкаліброваного зображення. Щоби мінімізувати цей шум, майстер-кадр плоского поля робиться з кількох кадрів. Необхідно відзняти щонайменше 16 кадрів, або більше, якщо є час. Ваше фотометричне програмне забезпечення має можливість створювати майстер-кадр плоского поля з індивідуальних кадрів, використовуючи або усереднення, або медіанну комбінацію. Використання медіанного розрахунку -- зазвичай кращий вибір, тому що зображення зірок (якщо в якості рівномірно освітленого джерела використовується небо в сутінках) або треки космічних променів на окремих зображеннях не будуть негативно впливати на майстер-кадр плоского поля.

Незалежно від того, який метод ви оберете, ви маєте провести випробування, які описані в Додатку В, щоби перевірити рівномірність світності джерела світла.

4.4.3.1 Використання фону неба в сутінках у якості джерела світла

Якщо ви використовуєте для фотографування телескоп, поле зору зазвичай достатньо мале, так що зображення безхмарного неба в сутінках (воно досить однорідне в масштабі градуса або біля того) можуть бути використані у якості кадрів плоского поля. Час, упродовж якого ви можете робити знімки неба для використання в якості кадрів плоского поля, у вечірніх або ранішніх сутінках, обмежений, також, можливо, вам доведеться змінювати довжину експозиції для кожного кадру зі зміною рівня освітленості неба.

Якщо ви робите знімки плоского поля, використовуючи небо в сутінках, краще вимкнути трекінг, щоби будь-які зображення зірок розтягнулися й були по-різному розташовані на кожному кадрі; опція

“медіанного комбінування” (а не “усереднення”) вашого фотометричного програмного забезпечення ліквідує сліди зоряних треків на майстер-кадрі плоского поля.

Якщо поле зору більше, ніж градус, що має місце за використання стандартних або телеоб’єктивів, потрібно використовувати інші методи (непряме освітлення).

4.4.3.2 Кадри плоского поля під куполом обсерваторії

Для зйомки кадрів плоского поля може підійти біла матова дошка, освітлена небом у сутінках або дифузним штучним світлом. Переконайтеся, що ця дошка повністю і з деяким запасом заповнює зображення.

4.4.3.3 Кадри плоского поля за допомогою “лайтбоксу”

Як альтернативний метод, для зйомки кадрів плоского поля можна сконструювати “лайтбокс”, який розташовується перед об’єктивом камери. Такий пристрій дає змогу контролювати рівень освітлення й може бути використаний у будь-який час, замість того, щоби чекати належних умов освітлення в час сутінок. В інтернеті доступні інструкції з конструювання лайтбоксів. Одна з простих, але ефективних конструкцій описана в Довіднику з обробки астрономічних зображень Річарда Беррі та Джеймса Барнела [*Handbook of Astronomical Image Processing* by Richard Berry & James Burnell].

4.4.3.4 Кадри плоского поля за допомогою електролюмінесцентних панелей

В останні роки з’явилися доступні електролюмінесцентні (EL) панелі, дехто з успіхом використовує їх для отримання кадрів плоского поля. Вони не такі масивні, як традиційні лайтбокси, їх легко використовувати “в полі”, однак вони можуть бути порівняно дорогими. Однорідність світності деяких EL-панелей далека від ідеальної для використання у фотометрії, тож користувачам рекомендується перевірити однорідність світності так, як описано в Додатку В.

4.4.3.5 Кадри плоского поля за допомогою комп’ютерного монітора

Монітор комп’ютера може забезпечити поверхню з досить рівномірною світністю, яка підходить для отримання кадрів плоского поля. Зробіть білий екран (наприклад, відкрийте пустий документ Word) та розташуйте кілька листів білого паперу між екраном та об’єктивом камери, щоби зменшити інтенсивність та розсіяти світло. Експозиції мають бути довжиною в кілька секунд, щоби мінімізувати ефект мерехтіння екрану.

Підійдуть не всі монітори. Деякі мають нерівномірну інтенсивність вздовж екрану або мають залежність інтенсивності від кута зору. Дехто зазначає, що монітори дають погані результати з короткофокусними об’єктивами.

4.5 Величина ISO та час експозиції

Якщо скласти список з 10 найбільш популярних питань щодо DSLR-фотометрії, то питання про час експозиції, значення ISO та впевненість у тому, що зображення має фотометричну якість, безумовно, зайняли б місце вгорі списку. Щоби правильно вибрати ці налаштування, необхідно ретельно вивчити як шумові характеристики вашої камери, так і ту наукову мету, якої ви хочете досягти. У цьому розділі ми розглянемо, як досягти компромісу між чутливістю та точністю та надамо кілька порад, як визначити оптимальні налаштування.

4.5.1 Налаштування ISO, похибки квантування та динамічний діапазон

Обираючи правильне значення ISO, ми попадаємо між Скільою та Харібдою. Як це обговорювалось у Частині 2, налаштування ISO просто встановлює коефіцієнт підсилення схеми, яка використовується для зчитування значень пікселів. Можна було б очікувати, що великі значення ISO ідеальні для фотометрії, однак це не завжди так. Якщо значення ISO великі, камера покаже тьмяніші джерела світла, однак підсилиться не лише світло від зірок, а також і шум. Крім того, великі значення ISO зменшують динамічний діапазон камери (діапазон яскравостей зображення). Отже, великі ISO обмежують діапазон зоряних величин, які може детектувати камера.

Навпаки, якщо значення ISO замалі, невелика різниця в електричних зарядах не буде помітна й буде перетворена АЦП у одне й те ж саме значення, отже, ми втратимо в точності детектора. Остання ситуація називається “похибкою квантування”. Можна легко проілюструвати, що таке похибка квантування, у нетехнічній манері, за допомогою зображення чистого блакитного неба на пляжі (див. Рис. 4.6). З повсякденного досвіду ми знаємо, що яскравість ясного неба змінюється плавним градієнтом. Однак, якби камера не могла детектувати тонкі зміни яскравості, ми б одержали на виході зображення, що виглядає досить дивно, на якому небо має вигляд “сходинок”, як на Рис. 4.6.



Рис. 4.6. Небо на цьому зображенні поділено на дискретні інтервали через похибку квантування.

Такі артефакти більші, ніж просто потворні. У контексті DSLR-фотометрії це погіршує фотометричну цінність зображення. Зображення пляжу має використовувати сотні різних градацій інтенсивності, щоб адекватно відобразити небо, однак у нашому прикладі використовується лише п’ять градацій, саме тому небо поділено на п’ять зон нереалістичного вигляду. (Фактично, похибка квантування також має місце й за великих значень ISO, однак у цьому випадку вона виникає тому, що підсилення таке велике, що додавання одного електрону підвищує ADU на кілька одиниць).

Встановлення ISO у 200 або 400 має дати гарний баланс між точністю та шумом, менші значення ISO (приміром, 100) кращі для більш яскравих зірок. Отже, якщо предмет вашого наукового дослідження включатиме широкий діапазон зоряних величин, вам, можливо, потрібно використовувати низькі значення ISO. Подібним чином, якщо ви спостерігаєте поле з великою кількістю зірок із невеликим

розкидом величин, вам можуть підійти більші значення ISO, якщо, зі встановленими великими ISO, зорі не будуть пересвічені (не буде насичення сенсору).

4.5.2 Час експозиції, насичення та нелінійність

Збираючись робити фотометрію, маємо пересвідчитись, що зображення мають фотометричну якість. Питання того, чи здатен спостерігач встановити відповідну експозицію, щоб уникнути проблем із насиченням та нелінійністю, є критичним.

Розуміння концепції нелінійності потребує короткого, мінімального технічного відступу про те, як DSLR-камери детектують світло. Коли світло попадає на піксель сенсору, воно створює на пікселі електричний заряд, величина якого пропорційна інтенсивності світла. Отже, якщо зоря А удвічі яскравіша, ніж зоря В, вона має згенерувати на пікселях, на які попадає її світло, електричний заряд удвічі більший. Однак, є максимальна величина заряду, який може утримувати кожен піксель. Коли піксель досягає цієї границі, він не може утримувати додатковий заряд, отже, додаткові фотони не здатні збільшити заряд, що утримується цим пікселем. Це називається насиченням. У певному сенсі, будучи насиченим, піксель стає “сліпим” до кінця експозиції й більше не реагує на світло лінійно. Це не шкодить камері, однак означає, що для “насиченої” зорі неможливо отримати фотометрію, яка має сенс. Фотометрія для ненасичених зірок на тому ж самому зображенні не постраждає. На практиці, абсолютно необхідно бути впевненим, що ні цільова зоря, ні будь-яка зоря порівняння, ні контрольна зоря не насичені.

Концепція нелінійності тісно пов'язана з явищем насичення. У нормальних умовах, коли світло з незмінного джерела попадає на піксель, залежність між часом експозиції (який ми відкладемо на вісі x) та електричним зарядом (інтенсивністю, відкладемо її на вісі y) є прямою пропорційною. Наприклад, подвоєння часу експозиції має подвоїти інтенсивність конкретного пікселя. Однак, для детекторів CCD-типу, коли піксель наближається до насичення, лінійна залежність стає нелінійною. Для зображення зорі, близькому до насичення, наприклад, збільшення часу експозиції на 10% може призвести до збільшення заряду лише на 5% (а не на очікувану величину у 10%). Нелінійність навіть більш небезпечна у фотометрії, ніж насичення, тому що її не так просто виявити. Перевірка лінійності вашої камери -- корисна вправа, див. Додаток Е для більш детальної інформації.

Чому ми маємо перейматися насиченням чи нелінійністю? Фотометрія базується на припущенні, що є пряма, лінійна залежність між тим, наскільки яскравою виглядає зоря на зображенні і її фактичною яскравістю. Коли піксель втрачає свій лінійний відгук на світло, це припущення руйнується, тому що електричний заряд, який утримується нелінійним/насиченим пікселем не відповідає справжній яскравості зорі. На Рис. 4.7, зоря А на одну величину яскравіша за зорю В, однак, якщо зоря А досягає стану насичення, диференціальна величина зміниться з -1 до 0, хоч дійсна яскравість обох зірок не змінилася. Отже, важливо знати, за яких значень ADU для вашої камери настає насичення.

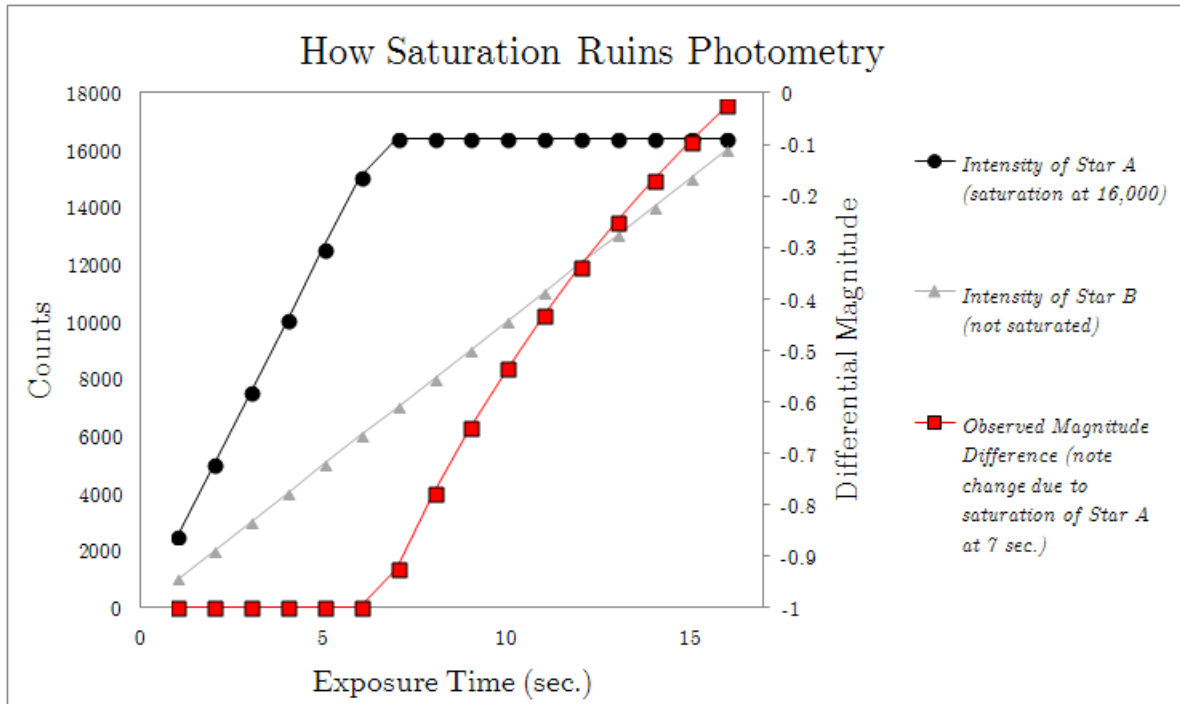


Рис. 4.7. Припущення про те, що яскравість зорі лінійно залежить від виміряного значення відліків порушується, якщо зоря починає насичувати детектор, як це видно для зорі А.

Найпростіший спосіб уникнути проблем, пов'язаних із насиченням, це утримувати максимальну інтенсивність цільової зорі, контрольної зорі та зір порівняння на рівні, що нижчий 75% максимального значення для камери. Якщо у вас стара 12-розрядна камера, максимальна інтенсивність буде 2^{12} або 4096 відліків, отже, ви маєте утримувати інтенсивність на безпечному рівні, який нижче приблизно 3100 відліків. Для 14-розрядної камери безпечним порогом буде 12300 відліків. Ці значення дещо занижені, однак вони дають деякий запас додаткових значень ADU для того, щоб у різних умовах спостереження, зі зміною умов видимості [seeing] або прозорості, зображення зорі не дійшло до стану насичення.

Вибір значень ISO та часу експозиції може забрати значний час. Вам треба звернутися до Таблиць 2.3 та 2.4 в Частині 2 щодо деяких початкових рекомендацій. Кілька ваших перших вечорів, проведених за DSLR-фотометрією, краще витратити на те, щоб отримати “відчуття” найкращих налаштувань камери для фотометрії цілей, які вас цікавлять.

4.6 Пошук та кадрування поля

На початку це може бути самою дратівливою частиною вашого навчального процесу, особливо, якщо ви використовуєте фотоштатив. Це якраз те, у чому досвід візуальних спостережень може суттєво допомогти. Ті ж самі проблеми, які виникають під час пошуку зоряного поля під час візуальних спостережень, виникають і у випадку DSLR-фотометрії. Різниця в тому, що в останньому випадку поле зору менше. Нижче наведені деякі рекомендації:

- Навчитися використовувати зоряні мапи для пошуку зоряних полів візуально та/або з використанням бінокля.
- Попрактикуйтесь у пошуку та кадруванні зоряних полів.

- Знайдіть найближчу до вашого цільового зоряного поля яскраву зорю. Використовуйте її для грубого налаштування.
- Дивитися у видошукач камери, яка спрямована високо в небо, складно для багатьох людей. Розгляньте можливість придбання кутового видошукача для камери.
- Придбайте шукач типу “червона точка”, який можна під’єднати до башмаку фотоспалаху вашої камери. Зробіть тестову експозицію та уважно вивчить її на [дисплеї] камери. Використовуйте функції збільшення зображення на дисплеї камери, щоб ідентифікувати астеризми, які можуть допомогти вам налаштуватися більш точно.

4.7 Деякі “хитрощі” в отриманні наукових даних

Перед кінцем цієї частини, ми б хотіли наголосити ще раз на деяких основних пунктах, які допоможуть вам успішно проводити продуктивні спостереження й отримувати гарні (тобто корисні для науки) результати.

Отримуючи наукові дані, пересвідчитесь, що:

- Налаштуйте камеру на формат RAW (тобто .nef або .lgw у випадку Nikon та .cr2 або .crw для Canon).
- Перевірте, чи встановлена на камері правильно дата та час. Якщо це можливо, встановіть час UTC, а не місцевий. Якщо ви змушені залишити в камері місцевий час, впевніться, що він встановлений максимально точно та акуратно (бажано з точністю до секунди) та ясно вкажіть у вашому журналі спостережень різницю між часом, який встановлений у камері, та часом UTC.
- Злегка розфокусуйте зображення зірок так, щоби вони набули круглої форми та займали кілька пікселів. Зображення зірок мають бути круглими та повністю заповненими. Якщо вони починають виглядати, як бублики, ви зайшли надто далеко [примітка від перекладача: у випадку рефлектора з великим центральним екрануванням, із розфокусуванням зорі майже одразу перетворюються в бублики, так що з цим доводиться миритися]. Зображення зірок можуть бути досить різними з обидвох боків від фокусу. Поекспериментуйте, щоби визначити, яке розфокусування краще для вашого об’єктиву -- всередині чи поза фокусом.
- Використовуйте функцію зображення в реальному часі вашої камери (live-view) для перевірки фокусування та кадрування зоряного поля, однак вимкніть її, коли ця функція не потрібна. Розігрів камери, коли функція зображення в реальному часі активована, може призвести до збільшення шуму сенсора, світло від дисплея може негативно вплинути на ваше нічне бачення та збільшити непотрібне використання енергії, що особливо важливо, якщо ви використовуєте батарею.
- Отримуйте зображення, використовуючи низькі значення ISO (зазвичай 200-400). Хоч більш високі значення ISO дають більшу чутливість, зображення страждають від втрати точності (динамічного діапазону).
- Вимкніть будь-які функції пригнічення шуму та інші вбудовані функції обробки зображень камери.
- Вимкніть будь-які функції автоматичної ультразвукової очистки оптики (сенсору) камери.
- Попрактикуйтесь із камерою в приміщенні, перед тим, як виносити її назовні в темряву.

- Працюйте з невеликим набором налаштувань ISO та діафрагми, щоби мінімізувати необхідну кількість наборів калібрувальних кадрів.
- Встановіть баланс білого у “денне світло”, хоч це і не має впливати на RAW-зображення.

Частина 5: Обробка та оцінювання зображення

5.1 Огляд

У цій частині буде поданий загальний опис, як перетворити ваші зображення в точну фотометрію, тобто вивірені виміри яскравості змінної зорі в певний момент часу. Основні етапи обробки після отримання зображення це: (1) перевірка, чи всі калібрувальні та основні зображення відповідають умовам фотометрії, (2) застосування калібрувальних кадрів, додатково — взаємне вирівнювання та складання зображень із метою підвищення відношення сигнал/шум (ВСП), (3) виділення окремих RGB-каналів із зображення/зображень, (4) проведення апертурної фотометрії цільової зорі та зір порівняння та (5) проведення фінального контролю якості. Майте на увазі, що етапи 2 та 3 залежать від можливостей вашого фотометричного програмного забезпечення і, можливо, мають бути виконані у зворотньому порядку.

Перед тим, як почати, ми припустимо, що ви слідували інструкціям з отримання зображень із Частини 4 та маєте повний набір калібрувальних кадрів разом із вашими основними зображеннями. Підбиваючи підсумок, будьте впевнені, що у вас є:

- Набір кадрів зсуву (bias), з яких буде утворений майстер-кадр зсуву (щонайменше 16, або, бажано, набагато більше)
- Набір темнових (dark) кадрів, з яких буде утворений темновий майстер-кадр (щонайменше 16, або, бажано, набагато більше)
- Набір кадрів плоского поля (flat), з яких буде утворений майстер-кадр плоского поля (щонайменше 16, або, бажано, набагато більше)
- Всі ваші основні кадри

Ми припускаємо, що під час зйомки основних та калібрувальних кадрів ви використовуєте відповідні тривалості експозицій, які забезпечують достатній сигнал, однак не допускають насичення зображень зір, які вас цікавлять. У цій частині буде, зокрема, описано, як перевірити, чи це дійсно так, однак більше ми не будемо обговорювати тут спосіб отримання зображень.

Перед тим, як ви почнете регулярно отримувати дані, вам треба перевірити лінійність камери — імовірно, ви зробите це одноразово для кожної камери, яку ви використовуєте, та збережете нотатки про результати для майбутніх спостережень. Також треба провести перевірки, які описані в Додатках А та В, щоби вивчити шумові характеристики камери та оцінити, чи достатньо “плоскі” кадри плоского поля ви отримуєте.

5.2 Попередні приготування та оцінювання зображень

Перед тим, як обробляти будь-які дані, найкраще зробити вибіркочку перевірку декількох зображень, щоби бути впевненим, що вони підходять для фотометрії. Найперше, що потрібно зробити, досить очевидне: перевірте, чи всі зображення мають правильний тип та коректну інформацію в заголовках зображень.

5.2.1 Заголовок зображення

Перед записом зображень ви вибираєте налаштування камери, які ви маєте намір використовувати (довжина експозиції, значення ISO, налаштування балансу білого, тип файлів, значення діафрагми

тощо). Перевірте заголовок зображення та впевніться, що ви дійсно отримали те, що хотіли. (Не такий рідкісний випадок, коли ви мали намір встановити діафрагму $f/4$, однак у холодну, темну глупу ніч ненавмисно встановили зовсім інше значення).

5.2.2 Формат оригінальних зображень

Впевніться, що формат оригінальних зображень -- “RAW” (розширення файлу для камер Canon, зазвичай, *.CR2, для камер Nikon -- *.NEF). Зі стисненими файлами “JPEG” формату (*.jpg) корисна фотометрія неможлива. Ваше програмне забезпечення для обробки зображень може перетворити RAW-файли у файли формату FITS. Це очікуване перетворення й це перетворення є повноцінним, воно зберігає всю інформацію оригінального зображення.

5.2.3 Дата та час отримання зображення

Впевніться, що відмітки часу в заголовках зображень є коректними. “RAW”-зображення має мати відмітку часу, що відповідає моменту, коли зображення записане. Візьміть до уваги неточності встановлення годинника камери, “літній час” та зміну дати опівночі.

Більшість камер записує час, коли затвор відкрився, тобто початок реєстрації зображення. Ваша фотометрична програма може підлаштувати відмітку часу зображення, або додати додаткове ключове слово в заголовок, щоби час, записаний у заголовку відкаліброваного зображення відповідав середньому часу експозиції:

$$T_{\text{середини_експозиції}} = T_{\text{початку}} + 0,5 * T_{\text{експозиції}} \quad [\text{Рівняння 5.1}]$$

Більшість програм фотометрії також намагаються перетворити відмітку часу зображення в UT (Universal Time, всесвітній час), на основі інформації про часовий пояс. Варто додатково перевірити, чи це перетворення зроблене правильно, принаймні перші кілька випадків використання програми, щоби бути впевненим, що перетворений в UT час запису зображення правильний.

Більшість програм також розраховують юліанську дату, що відповідає середньому часу експозиції для зображення. Це бажана система запису часу для надсилання результатів фотометрії до AAVSO. І знову, варто перевірити, що це перетворення проводиться правильно перші кілька разів використання програми, або якщо ви змінюєте будь-які пов’язані з часом налаштування в програмі або в камері.

5.3 Застосування калібрувальних кадрів, складання та бінінг

Калібрування необхідне для того, щоби виправити вплив віньєтування та тіней від пилу, вплив нерівномірної чутливості пікселів та зменшити шуми від різних джерел. Щоби правильно скоригувати систематичні проблеми зображень, калібрувальні майстер-кадри мають бути застосовані в такому порядку:

1. Створіть майстер-кадри зсуву (bias), темнові (dark) та плоского поля (flat)
2. Відніміть майстер кадр зсуву (bias) від темного (dark) майстер-кадру та майстер-кадру плоского поля (flat) та від усіх основних зображень.
3. Відніміть темновий (dark) майстер-кадр від усіх основних зображень (але не від майстер-кадру плоского поля (flat), тому що експозиції кадрів плоских полів зазвичай не довші кількох секунд, тому темнова корекція для них не є необхідною).
4. Поділіть усі основні кадри на нормалізований майстер кадр плоского поля.

Ваше фотометричне програмне забезпечення має вбудовані методи підготовки майстер-кадрів та застосування їх до основних кадрів. Простою мовою, як кадр зсуву, так і темновий кадр віднімаються від зображення (тому, що зсув та темновий струм призводять до додавання фону до сигналу), тобто, програмне забезпечення віднімає значення кожного пікселя в кадрах зсуву та темнових від значень відповідних пікселів кадру, до якого застосовується корекція.

Корекція плоского поля, з іншого боку, є мультиплікативною процедурою, тому що різниця в освітленості ділянок поля зору призводить до того, що в певні ділянки поля зору попадає лише частина середнього світлового потоку й ця частина змінюється зі зміною координати у фокальній площині. Програмне забезпечення нормалізує плоске поле в такий спосіб, що середнє значення пікселів стає рівним 1,000 (одиниці), а потім ділить значення кожного пікселя основного зображення на значення відповідного пікселя нормалізованого кадру плоского поля. Наприклад, якщо даний піксель кадру плоского поля має значення 97% від середнього, відповідний піксель основного зображення ділиться на 0,97. Знову ж таки, програмне забезпечення має це робити “за лаштунками”; зазвичай ви маєте лише вказати програмі імена кадрів зсуву, темнових та плоского поля, а потім виконувати інструкції, які вам пропонує програмне забезпечення, щоби застосувати кожну корекцію.

5.3.1 Вирівнювання та складання

У більшості проектів DSLR-фотометрії цільова зоря має достатню яскравість, так що її можна легко зареєструвати (тобто визначити її відносні координати на зображенні) на кожній окремій експозиції (кадрі), однак, у деяких випадках (наприклад, у випадку тьмяних цільових об’єктів), може бути необхідно вирівняти та скласти кілька зображень, щоби підвищити ефективне відношення сигнал/шум (БСШ). Більшість фотометричних програмних пакетів мають функції для виконання подібних операцій (майже) автоматично. У випадку RAW-зображень DSLR важливо спочатку відокремити кольорові канали RGB для кожного зображення перед вирівнюванням та складанням у єдине кольорове зображення, інакше може виникнути змішування кольорових каналів.

Є кілька методів взаємного вирівнювання окремих кадрів, деякі з них можуть давати косметично досконалі зображення зірок, однак шкодити фотометричній інформації. Вирівнюючи зображення для фотометрії, програмне забезпечення має використовувати зсув на цілу кількість пікселів або лінійну інтерполяцію інтенсивності у випадку субпіксельного зсуву.

Також є різні методи складання взаємно-вирівняних кадрів. У випадку фотометрії рекомендують медіанне складання, тому що в цьому методі події, зафіксовані лише на одному або декількох поодиноких кадрах, такі, як сліди від супутників або космічних частинок, не будуть небажано впливати на кінцеве сумарне зображення.

Якщо ви використовуєте складання окремих зображень, критично вивчіть отримане зображення. Перевірте, чи були окремі кадри коректно взаємно вирівняні та перегляньте заголовок зображення, щоби впевнитися, що відмітка часу має сенс. Відмітка часу має бути автоматично встановлена в середнє значення для групи зображень, які склалися.

5.3.2 Бінінг

Подібно до складання, бінінг не є обов’язковою процедурою. Сигнал у кількох суміжних пікселях комбінується та утворюється зображення меншого розміру (це і є бінінг), однак із дещо більшим відношенням сигнал/шум (БСШ). Більшість фотометричного програмного забезпечення має таку функціональність, однак не кожна програма належним чином обробляє баєрівський масив даних DSLR. Неправильна інтерпретація баєрівського масиву може призвести до змішування даних від сусідніх R, G та B пікселів, призводячи до того, що зображення після бінінгу стає непридатним для

фотометрії. Перед використанням бінінгу перегляньте документацію до вашого програмного забезпечення та розберіться, як саме він робиться, щоб уникнути небажаної поведінки такої процедури.

Щоб уникнути подібних проблем, відокремте кольорові канали RGB для кожного зображення (Розділ 5.4) перед бінінгом.

5.4 Відокремлення кольорових каналів RGB

Як обговорювалось у Частині 2, DSLR-камери мають масив червоних, зелених і синіх фільтрів, накладених на окремі пікселі сенсору, кожен піксель має свій власний фільтр певного кольору. Цей фіксований шаблон, який називається баєрівським масивом, є фундаментальною особливістю DSLR-камер. Для фотометричного аналізу необхідно розділити індивідуальні кольорові канали зображення та працювати лише з одним кольором за раз. Часто для DSLR-фотометрії використовують лише зелений канал, тому що він найбільш близько співвідноситься з астрономічним фільтром V. Однак, корисна фотометрія може бути також проведена з використанням каналів R (червоного) та B (синього).

Процес відокремлення зелених пікселів від червоних та синіх часто називають “дебаєризацією”, однак, це не зовсім правильно. Дебаєризація (або демозаїкізація) є процесом створення кольорового зображення (в якому кожен піксель несе значення ADU для R, G та B каналів) з інформації, закодованій у чорно-білому RAW-зображенні. Ми хочемо розділити кольорові канали R, G та B оригінального чорно-білого RAW-зображення, цей процес називається кольороподіл. Отримане зображення (кожного кольорового каналу) також чорно-біле.

Багато програм фотометрії можуть виділяти індивідуальні кольорові канали з RAW-зображень, хоч ця процедура може бути різною для різних програм. Наприклад, AIP4Win виділяє обидва зелені канали та подає їх як єдине зображення такого ж розміру, як вихідне зображення. Навпаки, MaxIm DL виділяє кожний зелений канал окремо. Найкраща процедура: виділити обидва зелені канали, усереднити їх та проводити фотометрію на отриманому зображенні. Впевніться, що цільова зоря та зорі порівняння не насичені на оригінальному або результуючому зображенні.

Кольороподіл може бути зроблений або до, або після калібрування зображень. Не має значення, у якій послідовності це робити, якщо всі дані (калібрувальні кадри та основні кадри) обробляються однаково.

5.5 Оцінювання зображень після калібрування

На етапі, коли ви записали та відкалібрували зображення, як це описано вище, важливо критично вивчити кілька кадрів, щоби мати впевненість, що вони підходять для фотометрії. Нижче подається список того, що треба перевірити. Кожна фотометрична програма має свою інструкцію, як перевірити зображення на відповідність цим критеріям.

5.5.1 Розмір та форма зображень зірок

Загалом, фотометричне програмне забезпечення очікує, що зображення зірок круглі або лише злегка еліптичні. Надмірна витягнутість (перетворення в треки) може вимагати більшої вимірювальної апертури, що вносить більше шуму. Якщо використовуються монтування без трекінгу, експозиція має бути достатньо коротка, щоби мінімізувати розтягування зображень зірок. Міцне монтування також мінімізує артефакти, які виникають унаслідок вібрацій (виляння).

Фотометричне програмне забезпечення, яке ви використовуєте, має мати функцію показу профілю інтенсивності зображень зірок у вигляді графіку. Профіль не має бути ні надто вузьким, ні надто широким. Ширина профілю зображення зорі описується параметром FWHM: повна ширина на половині максимуму (для більш детального опису див. сторінку Вікіпедії http://en.wikipedia.org/wiki/Full_width_at_half_maximum). Рекомендована величина FWHM зорі на RAW-зображеннях (перед калібруванням та розділенням на канали) має бути не меншою за 8-10 пікселів. Така величина вибирається для того, щоби бути впевненим, що зображення має достатню дискретизацію (семплювання) у всіх чотирьох кольорових каналах.

Розглянемо такий уявний експеримент. Якщо фокус достатньо різкий, усе світло від зорі може попасти лише на один-єдиний піксель, наприклад, червоний. Сусідні зелені та сині пікселі в такій ситуації взагалі не відреагують на світло зорі. Фотометрія такого зображення помилкового покаже, що в червоній частині спектру зоря яскрава, однак дуже тьмяна в синій та зеленій частинах. На практиці сфокусовані зображення зірок не точкові, вони мають циркулярно симетричний (приблизно) Гаусовий розподіл інтенсивності з яскравим центром і швидким згасанням до фонового рівня на ділянці діаметром кілька пікселів (Рис. 5.1). Більшість світла зорі попаде лише на кілька пікселів, частина інтенсивності буде розподілена по пікселям оточення. Фотометрія такого зображення покаже надлишок яскравості в кольорі центрального пікселя та зменшену яскравість у кольорах сусідніх пікселів.

Якщо зображення зорі дрейфує по сенсору з часом через недосконалість трекінгу, центральний пік буде проходити по багатьох пікселях. Отже, яскравість у різних кольорах буде змінюватись в залежності від того, який колір має піксель, на який попадає центроїд зоряного зображення. Рис. 5.2 показує виміряні зоряні величини BVR [Blue-Visual-Red] нової Центавра 2013 року (V1369 Cen), отримані на серії кадрів із надто сфокусованим зображенням, зняті 12 лютого 2014-го року. Криві яскравості B та R демонструють осциляції, які виникли внаслідок дрейфу та періодичної похибки приводу вісі прямого піднесення (RA) монтування. Крива яскравості у V-діапазоні демонструє осциляції з дуже слабкою амплітудою, тому що обидва зелені канали усереднюються, майже повністю пригнічуючи індивідуальні коливання яскравості.

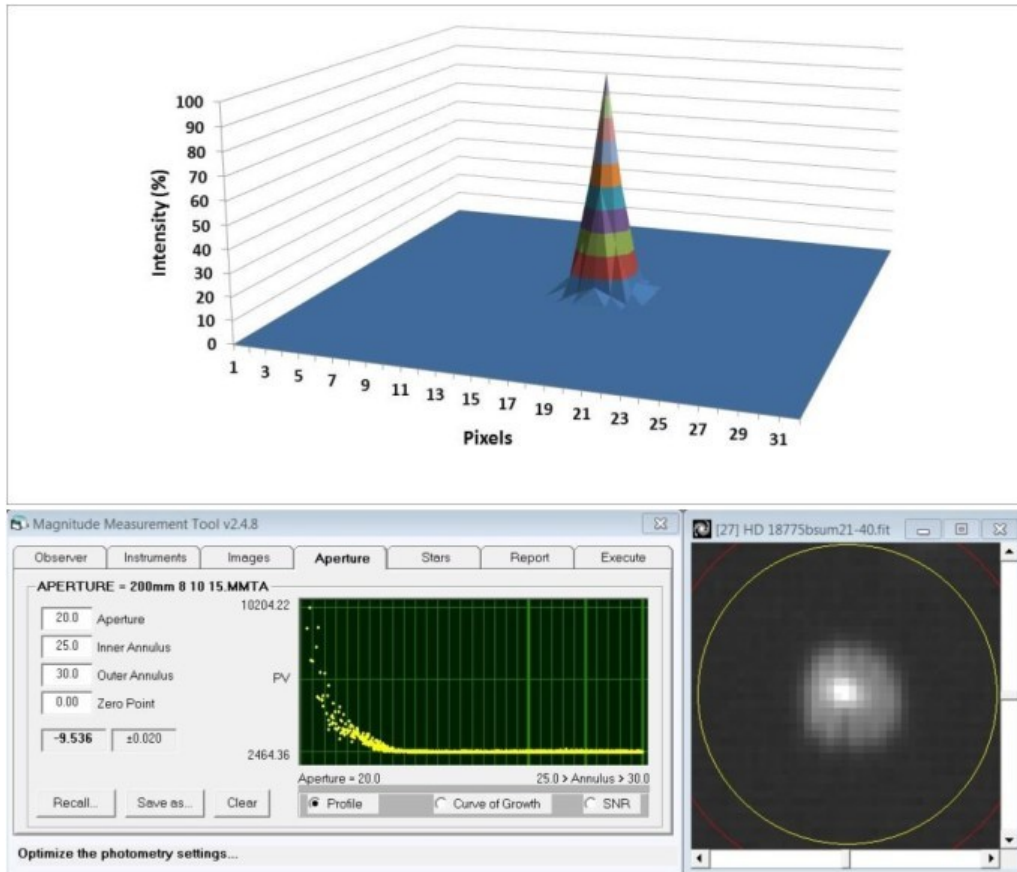


Рис. 5.1. Горішня панель: синтезований Гаусовий розподіл інтенсивності, що представляє різко сфокусоване зображення зорі з FWHM = 2 пікселя. **Нижня панель:** профіль зображення (ліворуч), що показує яскравий центр та широкі крила недостатньо розфокусованого зображення зорі (праворуч). (Mark Blackford)

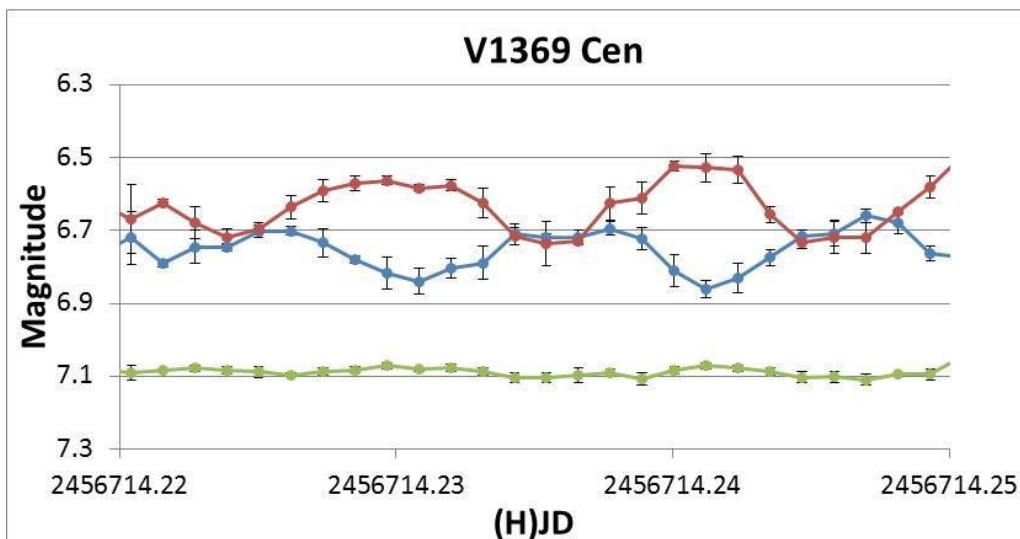


Рис. 5.2. Крива яскравості нової Cen 2013 (V1369 Cen) у В-каналі (синя лінія), V-каналі (зелена лінія) та R-каналі (червона лінія), отримана з зображень, відзнятих із недостатнім розфокусуванням. Осциляції -- артефакти, спричинені баєрівським масивом фільтрів, періодичною похибкою монтування та дрейфом через недостатнє встановлення полярної вісі. (Mark Blackford)

Експеримент та моделювання показують, що рекомендовані значення FWHM, до яких зображення зірок належить розфокусувати, мають бути не менші, ніж 8 пікселів, для того, щоб уникнути проблем, пов'язаних із недостатньою дискретизацією (семплюванням) (Variable Stars South Newsletter, January 2015, page 17).

Чи можуть ваші зображення зірок бути надто широкими? Загалом, зображення зірок, більші за приблизно 30 пікселів, можуть бути складними для обробки програмами фотометрії. Також, коли зображення зірок стають ширшими, підвищується ризик того, що світло однієї зорі змішається зі світлом інших та погіршить оцінку яскравості цих сусідніх зірок. Отже, перевірте значення FWHM цільової зорі, зір порівняння та контрольних зір, щоби бути впевненим, що вони достатньо великі, щоби уникнути недостатньої дискретизації (семплювання), однак, водночас, достатньо малі для того, щоби впевнено розмістити фотометричну вимірювальну апертуру навколо зорі й захопити практично все її світло. Оберіть розмір фотометричної вимірювальної апертури, який підходить до зірок, що мають бути обміряні.

Можливо, ваше фотометричне програмне забезпечення має відповідні інструменти для перевірки впливу зміни розміру апертури як на світловий потік, що вимірюється, так і на відношення сигналу до шуму (наприклад, інструмент фотометрії MMT у пакеті AIP4Win). Щоби швидко почати робити прийнятну фотометрію, як початкове значення, виберіть діаметр апертури в ≈ 2.5 -3 разів більше за FWHM, однак майте на увазі, для подальшої більш детальної роботи, що за вибором оптимального розміру апертури вимірювання стоїть певна наука (див. Розділ 5.6.1 [*примітка перекладача: такого розділу в цій редакції керівництва немає; скоріш за все, мається на увазі розділ 6.1.1*]).

5.5.2 Максимальне значення ADU та співвідношення сигнал/шум

Зображення цільової зорі, зір порівняння й контрольних мають бути достатньо яскраві, щоби співвідношення сигнал/шум було хорошим, однак не настільки яскраві, щоби настало насичення. Помістіть фотометричну вимірювальну апертуру по черзі на кожному з зір (цільову, порівняння та контрольну) та перевірте два параметри: максимальне значення ADU та відношення сигналу до шуму. Максимальне значення ADU має бути нижче рівня насичення камери. Якщо зображення зірок насичені, єдиний вихід -- відзняти зображення наново, підлаштувавши параметри зйомки так, щоби зменшити максимальне значення ADU. Можливо, треба використати коротшу експозицію, сильніше задіафрагмувати об'єктив, або трохи збільшити розфокусування, щоби розподілити світло зорі на більшу кількість пікселів. Відкалібровані основні зображення мають менше значення ADU, яке відповідає насиченню, тому що під час проведення корекції зсуву (bias) від зображення віднімається постійне зміщення (1024 або 2048 ADU).

До речі, вимога уникати насичення пікселів сенсору камери -- одна з найглибших різниць між фотографуванням небесних об'єктів заради "чудової картинки" та отриманням зображень для наукових вимірювань: такі зображення зазвичай виглядають надто м'якими, блідими та розмитими в порівнянні з красивими фотографіями (на яких, зазвичай, зорі пересвічені, щоби композиція виглядала більш привабливою візуально).

5.5.3 Змішування з зорями фону

Якщо одна (чи кілька) фонових зір розташована так близько до цільової зорі (або зорі порівняння чи контрольної), що вона частково чи повністю попадає в апертуру вимірювання, світло від такої зорі спотворить (або "забруднить") фотометрію. Тому критично вивчіть ділянки в безпосередній близькості до вашої цілі, зірок порівняння та контрольних зірок на предмет існування будь-яких зірок фону -- навіть достатньо тьмяних. Зверніть увагу на будь-які зорі фону, які потенційно можуть

перешкодити фотометрії та спробуйте вибрати діаметр апертури вимірювання так, щоб уникнути цих зір.

Корисно використовувати хорошу програму-планетарій, щоби подивитись, чи є будь-які зорі фону, що потенційно можуть заважати, у межах 5 зоряних величин відносно яскравості цільової зорі, зір порівняння та контрольних зір. Можливо, ви не побачите такі зорі на вашому зображенні, та, якщо вони є, вони додадуть сигнал до апертури вимірювання. Кращий підхід до фотометрії у випадку існування таких зірок -- утримувати їх за межами апертури вимірювання. Якщо це неможливо, занотуйте у вашому звіті, що такі зорі є.

Проблема “забруднення” фоновими зорями частіше виникає у випадках, коли використовується навмисне розфокусування. Також, використання монтувань або штативів без трекінгу може призводити до того, що зорі фону змішаються з цільовою зорею (або зорями порівняння чи контрольними). Використання більш коротких експозицій та складання зображень після калібрування може відновити відношення сигналу до шуму, яке було знижене внаслідок коротших експозицій.

5.5.4 Однорідність фону

Перевірте повне відкаліброване зображення за двома суб’єктивними критеріями якості: рівність фону та можливу наявність пір’ястих хмар. Збільшіть контраст зображення, щоби підкреслити дуже слабку різницю у яскравості, та подивіться, чи помітні сліди “бубликів” від пилу (кільця, що виникають на зображенні завдяки пилу на оптичних поверхнях) або суттєве невиправлене віньєтування (що може свідчити про те, що щось пішло не так під час коригування за допомогою кадрів плоского поля)? Якщо подібні ефекти помітні та вносять варіації, визначені у одиницях ADU, більші за кілька відсотків від величини ADU у максимумах цільової зорі, зір порівняння та контрольних, вам, можливо, треба визначити причину та переробити процедуру коригування за допомогою кадрів плоского поля.

Інша неоднорідність на зображеннях, яку варто пошукати, це неоднорідність неба як такого. Тонкі пір’ясті хмари та інверсійні сліди від літаків, що непомітні незброєним оком, можуть виглядати як зміни свічення неба або прозорості. Такі ефекти частіше виникають та становлять проблему у випадку широких полів зору, які характерні для знімків, зроблених стандартними об’єктивами фотоапаратів (тобто таких, які мають фокусну відстань меншу за кілька сотень міліметрів). У випадку зображень із вузьким полем зору, які отримуються за допомогою телескопа, поле зору може бути таким вузьким, що варіаціями свічення неба та поглинання можна знехтувати.

Іноді зображення може містити очевидні артефакти (вогні або інверсійні сліди від літаків, треки від супутників, пір’ясті хмари тощо), однак вони не лежать поблизу ні цільової зорі, ні зір порівняння, ні контрольних зір. У такій ситуації ймовірно безпечно ігнорувати ці артефакти та використати зображення для вимірювання. Якщо проблема дійсно в пір’ястих хмарах, то будьте готовими до пов’язаних із ними флуктуаціями в результатах фотометрії. Залежно від проекту, присутність пір’ястих хмар може вимагати від вас брати їхній можливий вплив до уваги та критично перевіряти результати вашої фотометрії на предмет впливу таких мінливих умов спостереження або -- у найгіршому випадку -- відкинути отримані зображення та спробувати ще раз наступної ночі.

Скільки зображень ви маєте перевірити? Це залежить, певною мірою, від вашої програми спостережень. Якщо ви вивчаєте зорю, яка змінює свою яскравість дуже повільно (скажімо, зорі типу Міри, характеристики яких змінюються у масштабі часу в кілька місяців), ви, можливо, робите лише кілька зображень впродовж однієї ночі. У цьому випадку критично перевірте одне чи кілька зображень. Як приклад іншого граничного випадку, припустимо, що ви вивчаєте затемнювану подвійну зорю, період якої становить кілька годин. У такому випадку ви робите зображення кожену

хвилину або біля того впродовж усієї ночі. Упродовж такої всенічної сесії все може змінюватися на додачу до зміни яскравості цільової зорі. Тому оберіть кілька зображень і критично їх вивчіть: декілька біля початку сеансу ввечері, біля середини та біля кінця сеансу спостережень. Якщо впродовж ночі зорі стають більш розфокусованими, це означає, що фокусування вашого об'єктиву змінюється зі зміною спрямування або температури.

У перші кілька ночей, та в перших кількох проектах, роблячи таке критичне оцінювання зображень, ви чимало дізнаєтесь про свою камеру та вибір налаштувань, які найліпше пасують до обраної цільової зорі (чи зір) та проекту. Занотуйте налаштування камери, який об'єктив використовувався та будь-які інші умови, які можуть впливати на якість кінцевого зображення. Після невеликої практики ви зможете легко обирати найкращий набір параметрів (особливо довжину експозиції) в залежності від зоряної величини цілі, зірок порівняння та контрольних, об'єктиву або телескопу, який використовується та типових умов вашого місця спостережень.

Тепер, коли ми маємо відкалібровані основні зображення, можемо переходити до наступного кроку: вимірювання сигналів, які отримані від цільової зорі, зір порівняння та контрольних зір. Докладно це буде описано в Частині 6.

Частина 6: Фотометрія: від вимірів до зоряних величин

Є кілька способів робити фотометрію; можливо, ви читали про два з них -- фотометрія з підгонкою функції розсіювання точки [PSF fitting] та з відніманням зображень [image subtraction], обидва з цих методів рідко входять до комерційних пакетів фотометричного аналізу, однак вони використовуються в професійній спільноті. Наприклад, ви можете зустріти згадку про те, що фотометрія була зроблена за допомогою пакета "DAOPHOT". Це дуже потужний (але складний) пакет, який виконує фотометрію за допомогою процедури PSF-fitting, він розроблений у 1980-х Петером Стетсоном із Домінійонської Астрофізичної Обсерваторії (Dominion Astrophysical Observatory). Переваги подібних методів у тому, що вони працюють на полях із дуже великою кількістю зірок, на яких зображення цільової зорі може перекриватися з зображеннями зір оточення, або на яких складно або неможливо виміряти інтенсивність фону неба без перешкоди від сусідніх тьмяних зірок. Обидва ці методи виходять за рамки цього посібника.

Метод, який ми обговоримо, називається апертурною фотометрією й це, безумовно, найпоширеніша техніка, яка використовується й аматорами, і професіоналами.

6.1 Апертурна фотометрія

У методі апертурної фотометрії довкола цільової зорі, контрольної зорі та зір порівняння проводять по три концентричні кола з центрами на цих зорях (Рис. 6.1). Площа внутрішнього кола називається вимірювальною апертурою або апертурою вимірювання. Проміжок між першим та другим колом називають проміжком [gap], площу між зовнішніми двома колами називають кільцем [фону] неба, або апертурою [фону] неба.

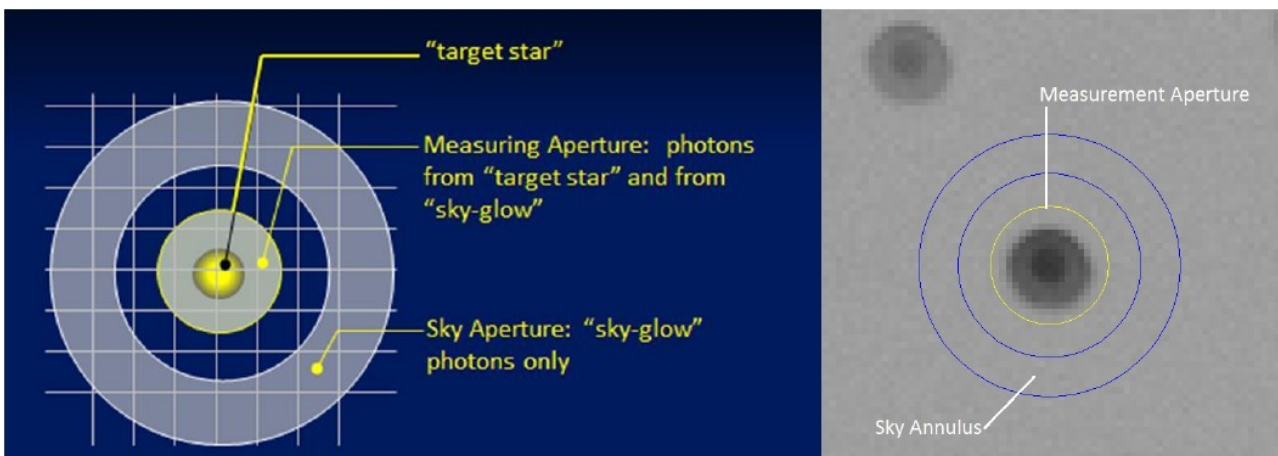


Рис 6.1 Ліворуч: схематичне зображення та **праворуч**: збільшений фрагмент каліброваного зображення, розділеного на кольорові канали. Видно апертуру вимірювання та кільце неба, розташовані на зірці, яка вимірюється. (Robert Buchheim та Mark Blackford)

Фотометричне програмне забезпечення вимагає, щоби користувач вказав радіуси цих трьох кіл та вказав зорі, інтенсивність яких буде вимірюватись, зазвичай кліком миші на кожній зірці на опорному зображенні. Програма визначає положення центроїда (центру зображення зорі) та малює кола навколо центроїда.

Для кожної зорі програма розраховує загальну суму всіх ADU в межах апертури вимірювання (що включає зорю та фон неба) та усереднює значення ADU для пікселів у кільці фону неба, також

враховуючи неповні пікселі в місцях, де квадратні пікселі матриці перетинаються круговою апертурою (Рис. 6.1, ліва частина). Завдяки тому, що зображення навмисно розфокусоване, кожна зоря займає багато пікселів (Рис 6.1, права частина).

6.1.1 Вибір радіусу апертури вимірювання

Радіус апертури вимірювання, зазвичай визначений у пікселях, має бути однаковим для всіх зірок, які обмірюються на конкретному зображенні. Радіус встановлюється так, щоби він містив переважну більшість сигналу від зорі та, водночас, мінімізуючи сигнал, що належить іншим джерелам, таким, як фон неба та зорі фону. Хороший спосіб вибору відповідного радіусу апертури -- це побудова профілю інтенсивності найяскравішої зорі з тих, що будуть вимірюватись, за допомогою інструментів, які зазвичай входять до фотометричного програмного забезпечення (наприклад, інструмент "Graph Window" в MaxIm DL). Рис. 6.2 показує профіль зорі з Рис. 6.1, видно, що інтенсивність сигналу від зорі спадає до рівня фонового сигналу від неба на радіусі 9 пікселів; отже, це придатний до вибору радіус.

Важливо побудувати саме графік профілю інтенсивності, а не просто оцінити радіус "на око", дивлячись на зображення зорі на дисплеї, тому що інтенсивність, яка відображується, може бути розтягнутою (зображення з розтягнутою гистограмою), щоби дати більш привабливе зображення на екрані комп'ютера, даючи при цьому помилкове уявлення про справжню ширину зображення зорі.

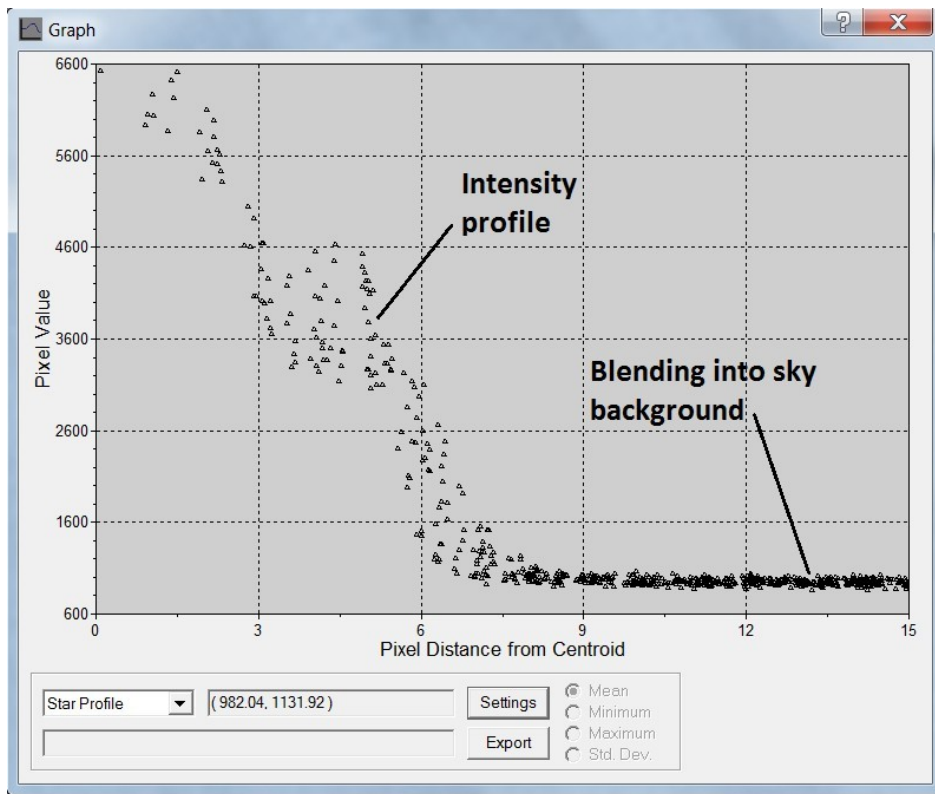


Рис. 6.2 Графік профілю цільової зорі з Рис. 6.1, побудований інструментом "Graph Window" програми MaxIm DL. (Mark Blackford)

Якщо ваше фотометричне програмне забезпечення нездатне показати графік профілю зорі, воно, принаймні, має бути здатне визначити повну ширину на половині максимуму (FWHM -- Full Width Half Maximum) зорі (див. Рис. 6.3, ліву панель). Корисне емпіричне правило: встановити радіус апертури, більший в 1,2 - 1,5 разів від FWHM найбільшого зоряного зображення. Якщо ви використовуєте нерухомі монтування без трекінгу, такі, як простий штатив для камери, краще

помилитися в бік більших значень апертури. З ростом радіусу апертури вимірювання відношення сигналу до шуму (ВСШ) спочатку росте до максимуму, а потім спадає, тому що зібраний сигнал від зорі більше не збільшується, а шум від надлишкових пікселів додається (Рис. 6.3, права панель). Пікове значення ВСШ відповідає радіусу у 6,5 пікселів, що менше за значення FWHM у 8,13 пікселів, отже, значна частина світла зорі не охоплюється. Краще трохи втратити у відношенні сигналу до шуму, однак повністю захопити світло зорі.

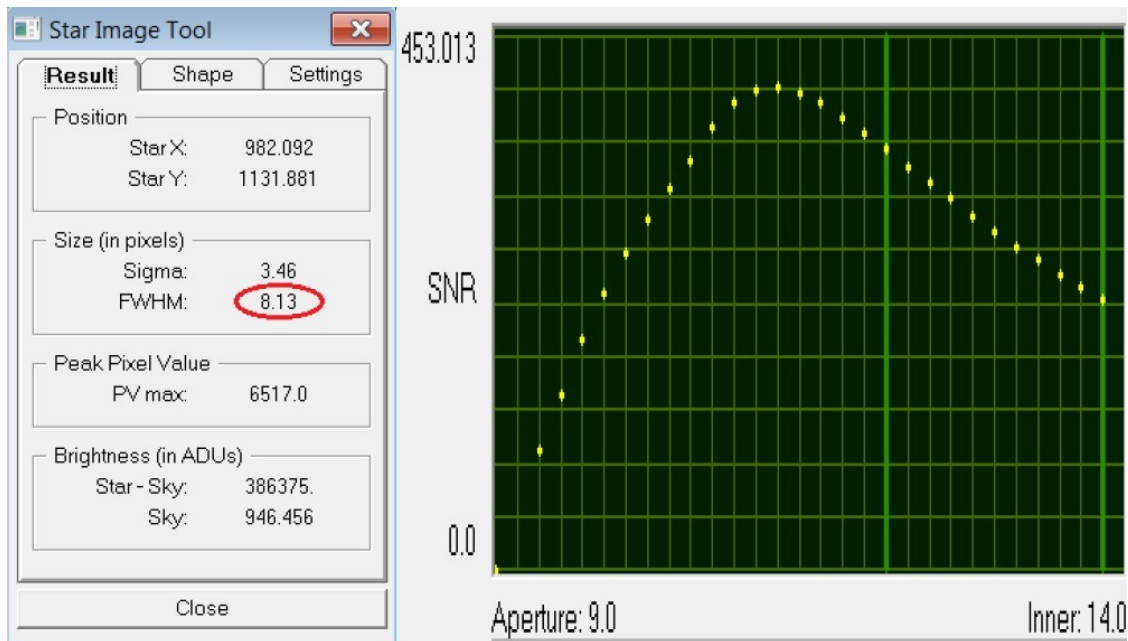


Рис 6.3. Ліворуч: Виміряні параметри цільової зорі з Рис. 6.1, отримані за допомогою інструменту “Star Image Tool” програми AIP4Win. Радіус апертури вимірювання був 9 пікселів, радіуси кільця неба дорівнювали 14 та 20 пікселів. **Праворуч:** Відношення сигналу до шуму (ВСШ), як функція радіусу апертури вимірювання, радіусу в 9 пікселів відповідає ВСШ ~ 360 . (Mark Blackford)

6.1.2 Вибір розміру та місця кільця фону

Кільце фону неба використовується для того, щоб визначити середню інтенсивність пікселів фону неба в околиці зорі, яка вимірюється. Внутрішній радіус має бути більшим на кілька пікселів за радіус апертури вимірювання, щоб гарантувати, що будь-яка залишкова інтенсивність від зорі буде повністю виключена з кільця неба. Оскільки інтенсивність фону неба розраховується як середнє значення пікселів кільця неба, це кільце має містити значну кількість пікселів. Як мінімум, кільце неба має містити ту ж саму кількість пікселів, що й апертура вимірювання, бажано більше. Це можна підлаштувати, змінюючи зовнішній радіус кільця.

Якщо можливо, ви маєте уникати великої кількості фонових зірок, які попадають у кільце неба. Більшість хороших фотометричних програм можуть компенсувати вплив кількох тьмяних зірок фону, однак краща практика -- уникати їх, якщо це можливо. Зазвичай фотометричне програмне забезпечення вимагає, щоб радіуси кільця неба були однакові для всіх зірок, які вимірюються на одному зображенні.

Після визначення радіусів апертури вимірювання та кільця неба наступний крок -- визначити, які саме зорі на відкаліброваному зображенні мають бути виміряні. Фотометричні програми дають змогу вибирати одну чи кілька цільових зірок, одну чи кілька зірок порівняння та одну чи кілька контрольних зірок на кожному зображенні та проводити всі відповідні розрахунки. На виході апертурної фотометрії ми отримуємо просто підрахунок, скільки ADU було згенеровано вхідними

фотонами від зірок, які вимірювались, після віднімання кількості ADU, які виникли завдяки свіченню неба. Ця величина називається зоряне ADU.

6.2 Інструментальні, диференційні та стандартизовані зоряні величини

6.2.1 Інструментальні величини

Традиційні одиниці, у яких вимірюється яскравість зорі -- зоряна величина, шкала зоряних величин логарифмічна, на відміну від значень зоряних ADU, шкала яких лінійна. Фотометричне програмне забезпечення перетворює величини зоряних ADU в інструментальні зоряні величини, використовуючи таку формулу:

$$\text{Інструментальна величина} = -2,5 \log_{10}(\text{зоряне ADU}) \quad [\text{Рівняння 6.1}]$$

Інструментальні величини специфічні для конкретної камери та об'єктиву, які використовувалися для запису зображень та умов, під якими цей запис здійснювався (наприклад, час експозиції, значення діафрагми, ISO, атмосферні умови тощо). Ці величини не можуть бути безпосередньо зіставлені з інструментальними величинами, отриманими іншими спостерігачами та навіть тим самим спостерігачем в інших умовах. Крім того, різне фотометричне програмне забезпечення може давати різні інструментальні величини для того ж самого каліброваного зображення, тому що вони використовують різну інструментальну початкову точку відліку. Однак, важлива лише різниця у величинах між зорею порівняння та змінною зорею, а не абсолютні значення інструментальних величин.

6.2.2 Диференційні величини

Диференціальна величина, Δmag , розраховується як різниця між інструментальною величиною змінної зорі v_{measured} та зорі порівняння c_{measured} :

$$\Delta mag = v_{\text{measured}} - c_{\text{measured}} \quad [\text{Рівняння 6.2}]$$

У цьому керівництві інструментальні величини позначені малими латинськими літерами. Отже, для синього, зеленого та червоного каналів ми маємо:

$$\Delta b = v_{\text{measured } b} - c_{\text{measured } b} \quad [\text{Рівняння 6.3}]$$

$$\Delta v = v_{\text{measured } g} - c_{\text{measured } g} \quad [\text{Рівняння 6.4}]$$

$$\Delta r = v_{\text{measured } r} - c_{\text{measured } r} \quad [\text{Рівняння 6.5}]$$

Δmag також може бути безпосередньо визначена зі значень ADU зір:

$$\Delta mag = -2,5 \log_{10}(\text{зоряне ADU}_{\text{змінної}} / \text{зоряне ADU}_{\text{порівняння}}) \quad [\text{Рівняння 6.6}]$$

Вочевидь, диференційна величина залежить від того, яку зорю порівняння ми використовуємо, це просто яскравість цільової зорі відносно незмінної зорі порівняння. Для деяких фотометричних проектів цього достатньо, наприклад, для визначення моментів мінімумів затемнюваних подвійних зір, або періодів обертання астероїдів.

6.2.3 Стандартизовані величини

Однак, інші проекти вимагають визначення "справжньої" яскравості цільової зорі на стандартній шкалі зоряних величин. Наприклад, ви можете забажати повідомити, що цільова зоря мала величину

8,45 на час вашого спостереження, що може бути безпосередньо зіставлено з подібними спостереженнями інших спостерігачів.

Щоби визначити стандартизовану величину, потрібен додатковий крок. Ми просто додаємо величину зорі порівняння з каталогу C_{catalog} до диференційної величини, яку ми виміряли:

$$\text{Стандартизована величина} \approx \Delta\text{mag} + C_{\text{catalog}} \quad [\text{Рівняння 6.7}]$$

Будемо позначати стандартизовані величини великими курсивними літерами, величини з каталогів -- великими не-курсивними літерами. Отже, для синього, зеленого та червоного каналів ми маємо:

$$B \approx \Delta b + C_{\text{catalog } B} \quad [\text{Рівняння 6.8}]$$

$$V \approx \Delta v + C_{\text{catalog } V} \quad [\text{Рівняння 6.9}]$$

$$R \approx \Delta r + C_{\text{catalog } R} \quad [\text{Рівняння 6.10}]$$

Отже, якщо ви виміряли, що цільова зоря на 0,40 величини тьмяніша за зорю порівняння в зеленому каналі і ви знаєте, що V-величина зорі порівняння з каталогу $C_{\text{catalog } V} = 8,05$, ви можете повідомити, що стандартизована V-величина цільової зорі є 8,45.

Такі спостереження підходять для подання до AAVSO, для включення в базу даних спостережень змінних зірок. Ці спостереження мають бути помічені як фотометрія з фільтром "TG", якщо був використаний зелений канал. "TG" вказує, що фотометрія представляє виміри з використанням лише зелених пікселів із триколіорового цифрового сенсору, стандартизовані з використанням V-величин із каталогів для зірок порівняння. Позначення "TB" має бути вибрано для величин, визначених із синього каналу та каталожних B-величин. Позначення "TR" має бути вибрано для величин, визначених із червоного каналу та каталожних R-величин.

Таке позначення фільтрів використовується у формах AAVSO для подання результатів, щоби відрізнити фотометрію, зроблену з використанням DSLR (та CCD з кольоровими матрицями) від кількох інших систем фільтрів.

Величини TG, TB та TR мають цінність та дають корисний внесок в аналіз багатьох коротко- та довго-періодичних змінних, нових та наднових.

Зазначте, що символ \approx використовується для того, щоби позначити, що стандартизовані величини є лише наближенням до істинних величин. Головним чином це тому, що DSLR-фільтри не ідеально збігаються з астрономічними фотометричними фільтрами, які використовуються для визначення каталожних величин зірок порівняння. Спектральний відгук синіх, зелених та червоних фільтрів вашої камери не точно такий самий, як Джонсонівські B та V смуги та R-смуга Козінса, відповідно, а під час розрахунків стандартизованих величин не було зроблено ніякого коригування цих різниць. Див. Розділи 6.4 та 6.5, в яких детально обговорюється спектральний відгук та як ми можемо скоригувати різницю між фільтрами.

Також ми неявно прийняли, що атмосферне поглинання однакове як для цільової зорі, так і для зір порівняння. Однак, якщо використовується порівняно широке поле зору, як у багатьох фотометричних проектах з DSLR, атмосферне поглинання, потенційно, значно різниться для різних частин зображення. Різниця в поглинанні далі обговорюється в розділі 6.5.

6.3 Зорі порівняння та контрольні зорі

Ми вже використовували терміни "зоря порівняння" та "контрольна зоря" в цьому керівництві, однак без повного пояснення, що ці терміни означають, тому давайте розберемо це зараз. Зорі порівняння --

це незмінні зорі в тому ж полі зору, що й цільова змінна зоря, для яких із високою точністю виміряні зоряні величини в одній чи кількох стандартних смугах пропускання. Вони використовуються для обрахунку стандартизованих зоряних величин цільової зорі так, як це описано в попередньому розділі. Контрольні зорі мають такі ж самі характеристики, що й зорі порівняння, однак обробляються так, як цільова змінна зоря. Їхня роль -- підтвердити, що обрані зорі порівняння насправді не є змінними.

Вибір відповідних зірок порівняння та контрольних -- це критично важливий та складний процес. Для багатьох змінних зірок пошукові мапи разом із фотометричними таблицями зірок порівняння вже підготовлені AAVSO; однак ви неминуче стикнетесь із цілями, для яких таблиці відповідних зірок порівняння ще не були складені. В таких випадках ви можете або надіслати запит до “AAVSO Sequence Team” (<https://www.aavso.org/request-comparison-stars-variable-star-charts>), або будьте готові самостійно виконати цю роботу. Наступний розділ 6.3.1 взятий безпосередньо з “Керівництва від AAVSO зі CCD-фотомерії” версії 1.1, яке доступне за посиланням: <https://www.aavso.org/ccd-camera-photometry-guide>.

6.3.1 Вибір контрольних зір та зір порівняння

Це дуже відповідальний крок, тому що результати, які ви отримаєте, будуть різними залежно від того, які зорі порівняння будуть використані. Взагалі, чим більше використати зірок порівняння, тим краще, тому що будь-які похибки та легка можлива змінність цих зірок будуть усереднені (та послаблені). Однак, важливо перевірити зорі порівняння, які ви плануєте використати, та вибирати їх обережно, щоби бути впевненим, що ви не виберете такі, які можуть погіршити результат.

Якщо це можливо, будь ласка, використовуйте послідовності зірок порівняння від AAVSO. Багато з програмних пакетів дають змогу завантажувати їх автоматично. Якщо такої функції немає, ви можете знайти рекомендовані зорі порівняння для кожного поля зору, використавши інструмент побудови зоряних мап AAVSO (VSP -- Variable Star Plotter), у якому можна отримати “таблицю фотометрії”. Ця таблиця містить координати кожної зорі порівняння разом із їхніми величинами та похибками визначення величини для кожної смуги пропускання.

Послідовності зірок порівняння від AAVSO ретельно розроблені і використовують зорі, величини яких визначені дуже точно та щодо яких відомо, що вони не змінюють блиск та не мають близьких компаньйонів та мають колір, близький до кольору змінної зорі. Ще одна перевага використання стандартного набору зірок порівняння це те, що ваші результати можна краще порівняти з результатами інших спостерігачів AAVSO, після того, як ваші результати завантажені в Міжнародну Базу AAVSO. Дослідники, які будуть використовувати ваші данні, вітають це.

Наведемо декілька правил, яких рекомендовано дотримуватися під час добору зірок порівняння:

- Намагайтесь обирати зорі порівняння близько до цільової зорі й не біля країв зображення, де вони можуть бути спотворені.
- Зорі порівняння мають бути близькі за кольором одна до одної, однак необов'язково до цільової зорі.
- Не використовуйте червоні зорі (багато з них самі є змінними) або дуже блакитні зорі. Хороше правило -- обирати послідовність із зірок, які мають показник кольору (B-V) між +0,3 та +1,0, показник (B-V) +0,7 -- хороше середнє значення. Однак, ви маєте розуміти, що ви обмежені зорями, які містяться в полі зору, тож ваш вибір не дуже широкий.
- Обирайте зорі порівняння з зоряною величиною, близькою до цільової зорі.

- Будьте впевнені, що в зірок, які ви обрали, нема компаньйонів.
- Обирайте зорі порівняння із відношенням сигналу до шуму (ВСП) не меншим, ніж 100.
- Обирайте зорі з близькими значеннями похибок визначення зоряної величини, бажано менших за 0,01 – 0,02
- Будьте впевнені, що зорі порівняння, які ви обрали, мають інтенсивності, далекі від рівня насичення матриці.

Контрольні зорі важливі, тому що вони допомагають перевірити, чи немає серед зірок порівняння змінних, або чи є ще якісь проблеми з зображенням. Контрольна зоря -- це просто незмінна зоря з відомою яскравістю, яка обробляється однаково з цільовою зорею. Ви маєте порівняти зоряну величину контрольної зорі, яку ви отримали, з опублікованими в каталогах величинами (у тому ж кольорі), різниця має бути дуже малою. Контрольна зоря має бути якомога близькою до змінної у термінах кольору та величини та має бути обрана зі списку зір порівняння на тому ж полі зору, що і цільова.

Якщо ви обробляєте декілька або багато зображень, отриманих для того ж поля зору в ту ж саму ніч (часовий ряд), буде корисно побудувати залежність величини контрольної зорі від часу. Якщо все нормально, результатом має бути пряма горизонтальна лінія. Якщо величина контрольної зорі змінюється, це означає, що щось не так. Можливо, коли ви не дивилися, пробігла хмаринка?

6.3.2 Де шукати каталожні зоряні величини

Якщо для вашої цільової зорі не існує мапи та таблиці величин AAVSO, зручне джерело стандартних величин -- база даних “Homogeneous Means in the UBV System (Mermilliod 1991)”, яка доступна в інтернеті на сайті VizieR (<http://vizier.u-strasbg.fr/viz-bin/VizieR>).

Введіть “II/168/ubvmeans” у поле “Find Catalogs”, координати або ім’я цілі в поле пошуку за координатами та радіус пошуку, який підходить до вашого поля зору; потім натисніть “go”. Приклад наведений на Рис. 6.4. Сторінка з результатами пошуку покаже всі зорі з каталогу в межах вказаного радіуса пошуку.

The screenshot shows the VizieR Service interface. The main search area is titled "Find catalogs among 13979 available". The search criteria are "II/168/ubvmeans". Below this, there are instructions: "Catalog, author's name, word(s) from title, description, etc. e.g.: AGN, Veron, I/239, or bibcodes...". There are also options to search by column descriptions (UCD) and catalogs containing additional data. A section for "Search by Position across 14662 tables" is active, with "Target Name (resolved by Sesame) or Position:" set to "XZ Cet", "Target dimension:" set to "3.5 deg", and "Go!" button. A "Find Catalogs" button is at the bottom right. On the left, there are "Search Criteria" and "Preferences" sections. At the top, there are navigation links like "Portal", "Simbad", "VizieR", "Aladin", "X-Match", "Other", and "Help".

Рис. 6.4. Сторінка сайту VizieR, з прикладом пошуку в каталозі “Homogeneous Means in the UBV System (Mermilliod 1991)” потенційних зірок порівняння навколо аномальної цефеїди XZ Cet. (Mark Blackford)

Інше дуже корисне джерело -- програма AAVSO SeqPlot (<https://www.aavso.org/seqplot>), яка містить фотометричні дані з низки каталогів, включно з “APASS”, “Tycho II” та “GCPD” (General Catalog of Photometric Data). Див. Рис. 6.5.

Вибір каталогу для використання не є очевидним. Для DSLR-фотометрії зір, які яскравіші за 10-ту зоряну величину, можливо, найбільш вдалий вибір -- це каталоги “Tycho II”, “Homogeneous Means in the UBV System” та “General Catalog of Photometric Data (GCPD)”.

The screenshot shows the SeqPlot software interface. The window title is "Sequence Plotter - Request Star". The main area is titled "Choose a catalog or catalogs (the 'source number' is given in parentheses):". There are several checkboxes for different catalogs: APASS (29), BSM - North (28), BSM - South (37), COKER30 (44), GCPD (20), NOFS (10), K35 (34), OCB1 (32), SRO35 (18), SRO50 (33), TMO61 (42), Tycho-2 (1), W28 (30), and W30 (31). The "Tycho-2 (1)" checkbox is checked. Below this, there is a "Star Name:" field containing "XZ Cet" and a "Find RA & Dec for Star" button. The results are displayed in a table: RA: 30.06929167, Dec: -16.34611111, Field Size: 7, Limiting Mag: 10.0. To the right, there are labels for "HH MM SS.SS or degs." and "(-)DD MM SS.SS or degs. degrees". A "Get Plot" button is at the bottom center, and "Cancel" and "Quit" buttons are at the bottom left and right respectively.

Рис. 6.5. Приклад пошуку за допомогою SeqPlot у каталозі “Tycho II” потенційних зірок порівняння навколо аномальної цефеїди XZ Cet. (Mark Blackford)

6.4 Спектральний відгук кольорових каналів DSLR

Астрономічна фотометрія -- це просто вимірювання інтенсивності конкретної частини зоряного спектру. Це досягається використанням фільтрів, які пропускають до детектору світло лише у визначеному інтервалі довжин хвиль; отже, ми отримуємо визначений спектральний відгук для конкретної фотометричної смуги.

Для того, щоби різні спостерігачі мали змогу порівнювати результати, вони мають використовувати фільтри та детектори з однаковим спектральним відгуком. Завжди існує деяка різниця між фільтрами та детекторами, тож астрономи використовують методику, яка називається “трансформацією”, щоби виправити ці (як сподіваються) невеликі розбіжності. Ми розглянемо методику “трансформації” більш детально пізніше.

Існують десятки астрономічних фотометричних фільтрів, які перекривають ультрафіолетовий, видимий та інфрачервоний діапазони електромагнітного спектру. Кожний із цих фільтрів розроблений для виділення конкретної астрофізичної інформації. Найбільш релевантними для нас є фільтри Джонсона В та V та фільтр Козінса R, які найбільш широко використовуються в частинах спектру, до яких чутливі детектори DSLR-камер.

Кожний кольоровий канал DSLR чутливий до специфічного діапазону довжин хвиль світла. Їхні спектральні відгуки визначаються пропусканням лінз та фільтрів, які розташовані перед CMOS-детектором (Рис. 2.2) та чутливістю детектора до фотонів різних довжин хвиль.

Однак, DSLR-камери були розроблені не для фотометрії і їхні кольорові (rgb) фільтри не точно відповідають стандартним фільтрам BVR. Це означає, що процедура трансформації потребує значно більших коригувань і для деяких типів зірок взагалі неможливо коректно провести трансформацію. Це зумовлено тим, що спектри таких зірок містять інтенсивні емісійні лінії або лінії поглинання, які попадають у смугу пропускання, скажімо, фільтру В Джонсона, однак не попадають у смугу b-фільтру DSLR-камери. Такі “патологічні” зорі також становлять проблему і для звичайної CCD-фотометрії з використанням фотометричних фільтрів, однак проблема значно ускладнюється у випадку DSLR-фотометрії.

На Рис. 6.6 показані смуги пропускання (криві відгуку) стандартних фотометричних фільтрів (горішня частина) та DSLR rgb-фільтрів у нижній частині. Довжина хвилі на піку чутливості g-фільтру DSLR лежить дуже близько до піку чутливості фільтру V Джонсона, однак смуга пропускання більш вузька. Смуги пропускання DSLR-фільтрів r та b також більш вузькі в порівнянні з відповідними астрономічними фільтрами і їхні піки чутливості значно ближчі один до одного. Отже, загалом спектральний відгук DSLR-камери більш стиснений у порівнянні зі стандартним набором фільтрів BVR.

На рисунку також показані положення ліній водню бета та альфа, які часто сильно виражені в спектрах деяких зірок. Вочевидь, немодифікована DSLR-камера значно менш чутлива до лінії H-альфа, ніж R-фільтр Козінса, однак більш чутлива до лінії H-бета, ніж фільтр В Джонсона.

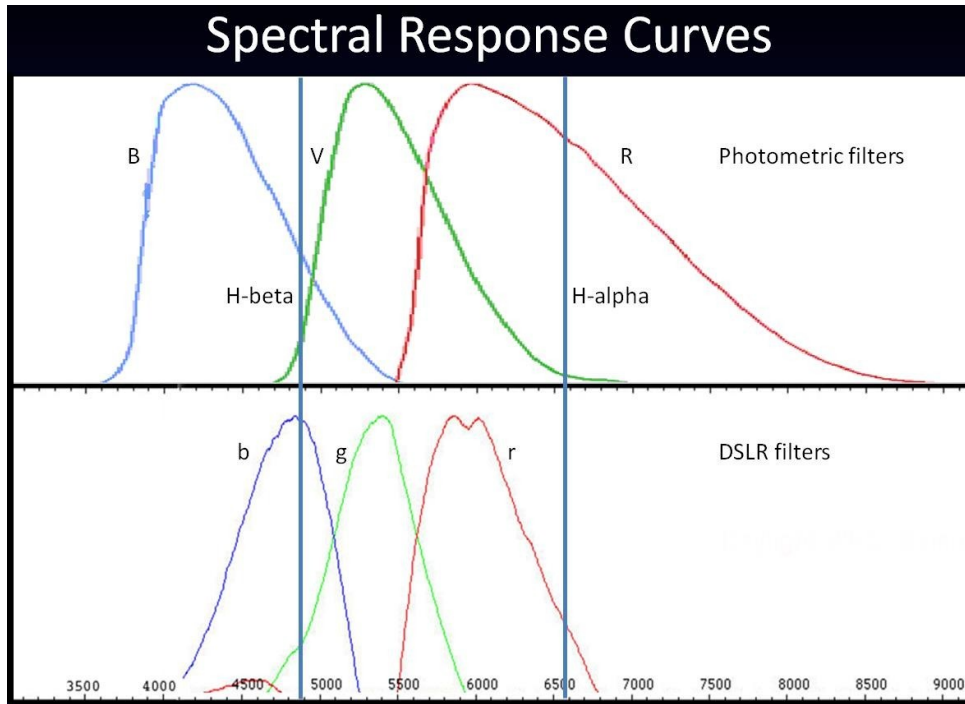


Рис. 6.6. Горішня частина: Криві відгуку фотометричних фільтрів Джонсона В, Джонсона V та Козінса R. **Нижня частина:** Криві відгуку rgb каналів DSLR камери. (Mark Blackford)

На Рис. 6.7 зображений спектр V1369 Cen (nova Centauri 2013), у якому помітні виразні емісійні лінії, зокрема, Н-бета та Н-альфа. Інтенсивність цих емісійних ліній сильно змінюється в залежності від того, які фізичні процеси переважають на різних стадіях еволюції нової.

На цьому етапі еволюції нової трансформована зоряна величина, отримана у R-фільтрі DSLR камери, має систематичну похибку: виміряна яскравість слабша на приблизно 0,43 величини, ніж така, що виміряна за допомогою CCD-камери з R-фільтром Козінса. Ця похибка зумовлена наявністю інтенсивної емісійної лінії H-alpha, до якої DSLR камера менш чутлива.

З іншого боку, трансформовані DSLR величини B та V мають протилежну за знаком систематичну похибку: виміряні величини яскравіші відповідно на приблизно $0,15^m$ та $0,07^m$, що переважно зумовлено емісійною лінією H-бета (Рис. 6.8).

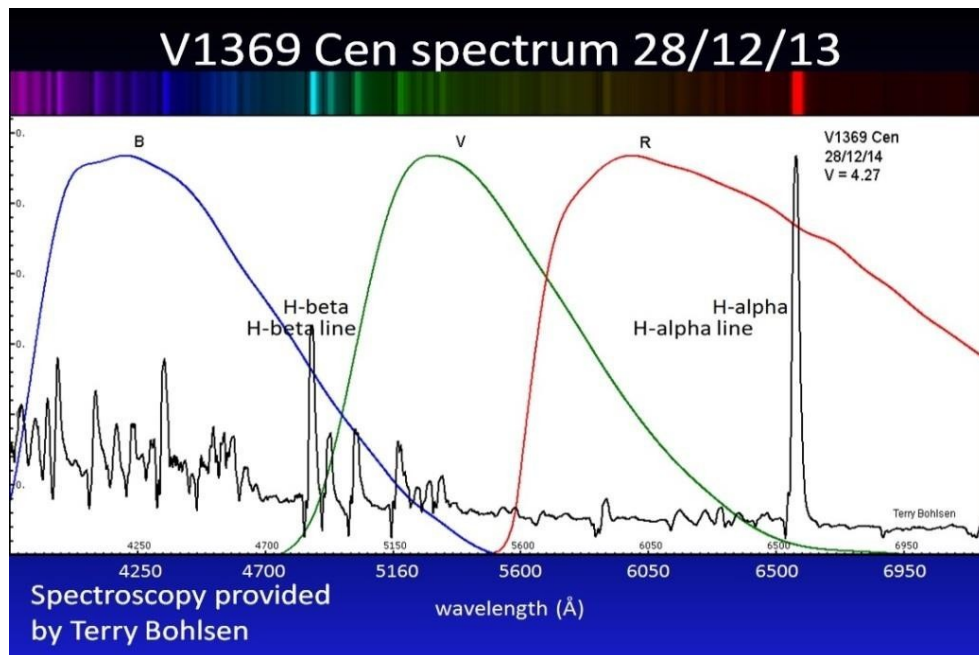


Рис. 6.7. Спектр V1369 Cen (nova Centauri 2013), отриманий приблизно за два тижні після піку яскравості, демонструє виразні емісійні лінії Н-альфа та Н-бета. На спектр накладнені криві пропускання фотометричних фільтрів Джонсона В та V та Козінса R. (Terry Bohlsen та Mark Blackford)

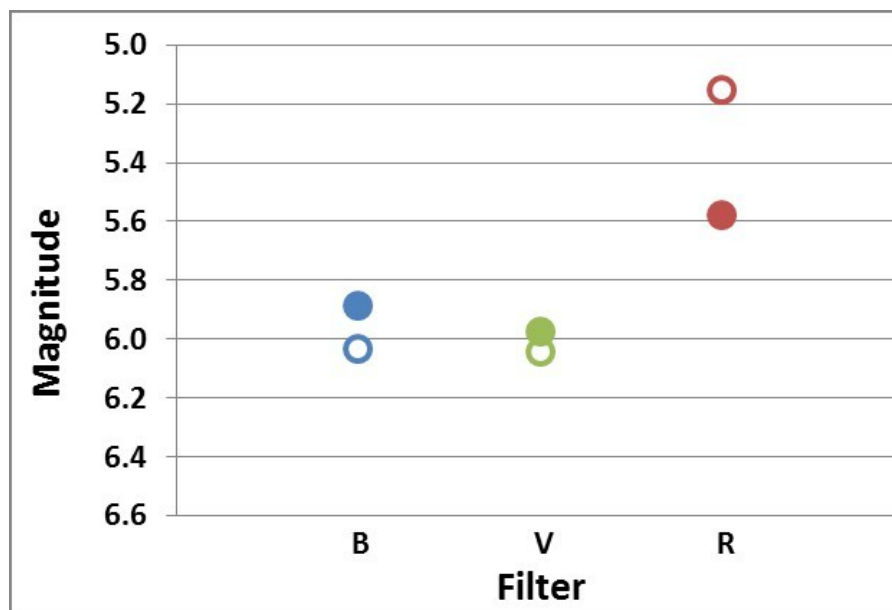


Рис. 6.8. Порівняння спостережень за допомогою DSLR (заповнені символи) та CCD (незаповнені символи) зорі V1369 Cen (nova Centauri 2013), отримані майже одночасно. Сині, зелені та червоні точки відповідають трансформованим величинам B та V Джонсона та R Козінса. (Mark Blackford)

Цей приклад ясно демонструє, чому інструментальні зоряні величини DSLR для деяких типів зір (з виразними емісійними лініями або лініями поглинання) не можуть та не мають бути піддані

процедурі трансформації. Їх, безумовно, корисно спостерігати [за допомогою DSLR], однак у звітах надавайте лише нетрансформовані зоряні величини.

Це були погані новини, однак для DSLR-фотометрії ще не все втрачено. Багато типів зірок мають спектри з менш виразними спектральними особливостями, їхній спектр загалом має форму, яка приблизно відповідає спектру випромінювання абсолютно чорного тіла. Інструментальні зоряні величини DSLR для цих типів зірок можна успішно трансформувати в стандартну фотометричну систему Джонсона-Козінса.

У Таблиці 6.1 показані трансформовані величини BVR для 15 фотометрично-стандартних зірок, виміряні за допомогою DSLR. У колонці з заголовком “ave” показані усереднені значення 30 вимірів, стандартні відхилення цих вимірів показані в колонці “stdev”. У колонці, поміченої як “delta”, показані різниці між значеннями, виміряними за допомогою DSLR, та каталожними значеннями.

Як видно, трансформовані величини DSLR V не відрізняються від каталожних більш, ніж на 0,02 величини й точність краща за 10 milimag для всіх зірок, окрім найтьмяніших. Відхилення та точність для величин B та R лише трохи гірші.

Таблиця 6.1. Трансформовані в систему BVR DSLR спостереження стандартних зірок Регіону E1 (Menzies, J.W., Cousins, A.W.J., Banfield, R.M., & Laing, J.D. 1989, South African Astron. Obs. Circ., 13, 1). (Mark Blackford)

Star	ID	B			V			R		
		ave	stdev	delta	ave	stdev	delta	ave	stdev	delta
E130	HD 7706	7.763	0.011	-0.021	6.569	0.007	-0.011	5.939	0.010	-0.027
E142	HD 10167	7.003	0.011	0.008	6.672	0.007	0.007	6.487	0.015	0.018
E134	HD 8001	8.254	0.012	0.005	6.767	0.006	0.001	5.984	0.011	0.012
E121	HD 9733	7.829	0.011	0.013	6.921	0.006	0.004	6.445	0.011	0.018
E132	HD 8963	8.456	0.012	0.001	6.955	0.006	-0.006	6.175	0.012	0.003
E131	HD 10121	8.116	0.012	-0.023	6.964	0.007	-0.011	6.374	0.012	-0.030
E143	HD 8391	7.353	0.010	-0.006	7.023	0.007	-0.001	6.837	0.015	0.006
E104	HD 8305	7.799	0.013	-0.018	7.437	0.007	-0.018	7.228	0.018	-0.014
E170	HD 10101	8.609	0.016	0.008	7.576	0.009	-0.003	7.049	0.017	0.004
E101	HD 8977	7.798	0.012	0.007	7.710	0.008	0.006	7.670	0.021	0.004
E146	HD 7795	7.764	0.012	-0.007	7.849	0.009	-0.008	7.887	0.024	-0.012
E122	HD 7886	9.023	0.021	0.007	8.019	0.011	0.009	7.489	0.025	0.008
E109	HD 9403	8.727	0.022	0.022	8.206	0.011	0.019	7.913	0.034	0.017
E173	HD 9160	9.355	0.032	0.012	8.322	0.014	0.019	7.777	0.032	0.009
E102	HD 8382	8.659	0.029	0.009	8.449	0.020	0.005	8.335	0.051	0.017

Отже, рекомендації такі:

- 1) Зорі, що мають виразні спектральні лінії емісії або поглинання, не підходять для DSLR-фотометрії у випадках, коли потрібні значення трансформованих зоряних величин, однак такі патологічні зорі можна спостерігати за допомогою DSLR, якщо ви подаєте у звітах нетрансформовані величини.
- 2) Є багато типів зір, які підходять для DSLR-фотометрії з подальшою трансформацією [зоряних величин].
- 3) Для фотометрії можна використовувати всі три кольорові канали DSLR камери.

6.5 Традиційний підхід до корекції атмосферного поглинання та трансформації

У попередніх розділах вказувалось, що вплив спектрального відгуку зображуючої системи та різне атмосферне поглинання мають бути скореговані для того, щоб отримати точні значення зоряних величин, які можна порівнювати з вимірами, зробленими іншими спостерігачами. У наступних розділах ми обговоримо способи корекції, які підходять для двох поширених випадків спостережень.

6.5.1 Випадок вузького поля зору та ситуація, коли об'єкти спостережень близькі до зеніту

У традиційній CCD-фотометрії різниця в атмосферному поглинанні вважається такою, що нею можна знехтувати, тому що типове поле зору телескопа з помірною або великою фокусною відстанню становить лише кілька десятків кутових хвилин. Використання DSLR з таким телескопом також дасть подібне мале поле зору. Навіть із фотографічними телеоб'єктивами (поле зору яких кілька градусів або більше) різниця в атмосферному поглинанні зазвичай незначна в межах приблизно 30 градусів навколо зеніту. У таких ситуаціях різницю в атмосферному поглинанні можна безпечно ігнорувати та застосовувати традиційну фотометричну трансформаційну корекцію, яка використовується у випадку CCD.

Керівництво від AAVSO з CCD фотометрії дає вичерпний опис вимірювання та застосування коефіцієнтів трансформації, отриманих із зображень стандартних фотометричних зоряних полів. Тому в цьому керівництві ми лише підсумуємо, як ці коефіцієнти застосовуються для трансформації інструментальних величин у систему стандартних величин.

В DSLR фотометрії три кольори рееструють одночасно. Отже, якщо можна знехтувати різницею в атмосферному поглинанні, рівняння трансформацій набувають такого вигляду:

$$B_{\text{var}} = \Delta b + T_{b_{bv}} * \Delta(B-V) + B_{\text{comp}} \quad [\text{Рівняння 6.11}]$$

$$V_{\text{var}} = \Delta v + T_{v_{bv}} * \Delta(B-V) + V_{\text{comp}} \quad [\text{Рівняння 6.12}]$$

$$R_{\text{var}} = \Delta r + T_{r_{bv}} * \Delta(B-V) + R_{\text{comp}} \quad [\text{Рівняння 6.13}]$$

$$\Delta(B-V) = T_{bv} * \Delta(b-v) \quad [\text{Рівняння 6.14}]$$

Де:

- B_{var} , V_{var} та R_{var} -- трансформовані зоряні величини B , V та R змінної зорі;
- Δb , Δv та Δr -- різниця між інструментальними величинами змінної та інструментальними величинами зір порівняння (тобто $b_{\text{var}} - b_{\text{comp}}$, $v_{\text{var}} - v_{\text{comp}}$ та $r_{\text{var}} - r_{\text{comp}}$);
- $T_{b_{bv}}$, $T_{v_{bv}}$ та $T_{r_{bv}}$ -- коефіцієнти трансформації величин B , V та R ;
- $\Delta(B-V)$ -- різниця між каталожним показником кольору $B-V$ змінної та каталожним показником кольору $B-V$ зорі порівняння;
- B_{comp} , V_{comp} та R_{comp} -- каталожні зоряні величини B , V та R зорі порівняння;
- T_{bv} -- коефіцієнт трансформації показника кольору $B-V$; та
- $\Delta(b-v)$ -- різниця між інструментальним показником кольору $b-v$ змінної зорі та інструментальним показником кольору $b-v$ зорі порівняння.

Раніше в практиці DSLR фотометрії сині та червоні канали, як правило, ігнорувались, тому що вважалося, що їхні спектральні відгуки дуже сильно відрізняються від фільтрів Джонсона В та Козінса R. Тож використовувалося лише рівняння 6.12, і значення $\Delta(B-V)$ розраховувалося із каталожних значень B-V для змінної зорі та зорі порівняння. Однак, цей метод не враховує той факт, що багато змінних зірок змінюють свій колір із часом, що може призводити до систематичних похибок у трансформованих зоряних величинах.

У розділі 6.4 було продемонстровано, що для багатьох зірок інструментальні величини DSLR b та r можуть бути з успіхом трансформовані у величини Джонсона В та Козінса R. Отже, рівняння 6.14 може бути використане для визначення $\Delta(B-V)$ з інструментальних величин b та v, та рівняння 6.11 та 6.13 використовуються для трансформації інструментальних величин b та r.

Щоби визначити коефіцієнти трансформації, нам необхідне зображення “стандартного поля”, яке містить багато зірок, для яких величини В Джонсона, V Джонсона та R Козінса точно виміряні. Керівництво від AAVSO з CCD фотометрії містить список кількох стандартних кластерів, деякі з яких підходять для DSLR фотометрії, яка використовує широкі поля зору. Для спостерігачів із Південної півкулі також рекомендується використовувати E-регіон Козінса, схилення якого -45 градусів. На Рис. 6.9 показане зображення M67, зроблене за допомогою камери Canon 600D та рефрактору 80mm f6 (поле зору 2.67 x 1.78 градусів).

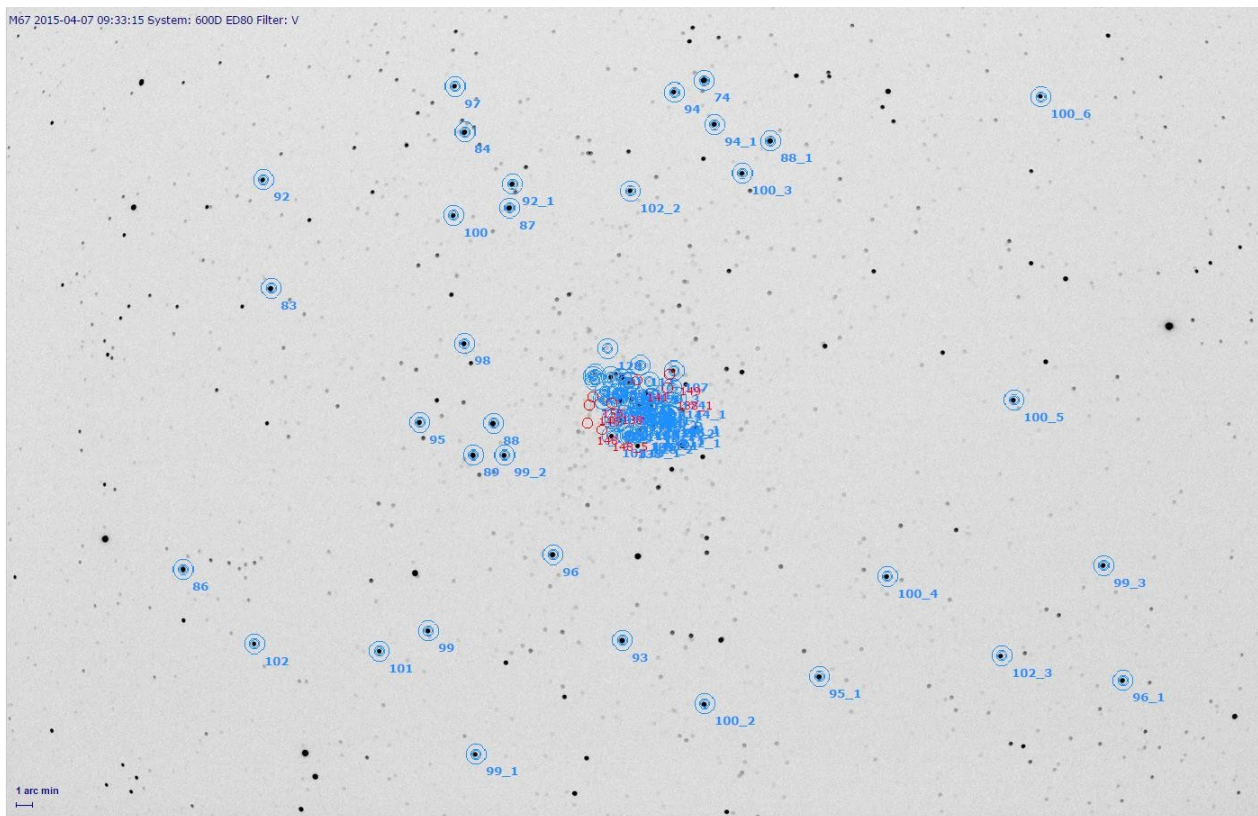


Рис. 6.9. Зоряне скупчення M67 з відміченими стандартними зорями. На зображенні в цьому масштабі зорі в центрі кластеру розташовані занадто густо, однак є кілька десятків стандартних зірок, достатньо віддалених від інших, які придатні для визначення коефіцієнтів трансформації. (Mark Blackford)

Після калібрування та відокремлення кольорових каналів, на зображеннях стандартних зоряних полів вимірюються інструментальні зоряні величини всіх стандартних зірок, які для цього підходять. Для розрахунку коефіцієнту трансформації для показника кольору T_{bv} використовується рівняння 6.15:

$$(b-v) = 1/T_{bv} * (B-V) + ZP_{bv} \quad [\text{Рівняння 6.15}]$$

Де $(b-v)$ -- інструментальний показник кольору, $(B-V)$ -- показник кольору з каталогу та ZP_{bv} -- довільне значення нульового рівня відліку. Для стандартних зірок будується графік залежності $(b-v)$ від $(B-V)$, потім за методом найменших квадратів проводиться пряма, яка апроксимує дані. Коефіцієнт T_{bv} визначається як обернене значення нахилу прямої.

Для розрахунку коефіцієнтів трансформації зоряних величин використовуються такі рівняння:

$$(B-b) = T_{b,bv} * (B-V) + ZP_b \quad [\text{Рівняння 6.16}]$$

$$(V-v) = T_{v,bv} * (B-V) + ZP_v \quad [\text{Рівняння 6.17}]$$

$$(R-r) = T_{r,bv} * (B-V) + ZP_r \quad [\text{Рівняння 6.18}]$$

Де $(X-x)$ -- різниця між зоряною величиною з каталогу та інструментальною величиною, інші члени визначені вище. Будуємо залежність $(V-v)$ від $(B-V)$ для зеленого каналу для стандартних зірок, потім проводимо за методом найменших квадратів пряму, яка апроксимує дані. Коефіцієнт $T_{v,bv}$ -- нахил прямої. Коефіцієнти трансформації для інших кольорів визначають подібним способом. Отже, ми отримуємо всю необхідну інформацію для визначення трансформованих величин змінних та контрольних зірок з використанням рівнянь 6.11 -- 6.14.

Керівництво від AAVSO зі CCD фотометрії більш детально описує, як виконувати традиційну CCD-трансформацію. У розділі 6.6 цього керівництва наводиться альтернативний метод.

6.5.2 Випадок широкого поля зору або поля, близького до обр'ю

Одною з переваг диференціальної фотометрії є те, що, якщо видимі позиції цільової зорі та зорі порівняння на небі близькі одна до одній і вони обидві не дуже близькі до обр'ю, світло від обох зірок проходить крізь, по суті, однаковий шар атмосфери (повітряну масу), тож зазнає, по суті, однакового розсіювання та поглинання.

Однак, якщо з DSLR-камерою використовуються звичайні фотооб'єктиви, поле зору виявляється достатньо широким, від кількох до більш ніж 30 градусів. У деяких проектах із дослідження яскравих зір таке широке поле необхідне, тому що цільова зоря й зорі порівняння, які до неї пасують, можуть бути розкидані далеко одна від одної. Якщо вони розділені більш, ніж кількома градусами й розташовані далі, ніж 30 градусів від зеніту, їхнє світло проходить крізь різну товщу атмосфери, тому різниця в атмосферному поглинанні може бути значною. Вплив цього ефекту росте (а) зі збільшенням кутової відстані між зорями та (б) зі збільшенням віддаленості одної з них або обох від зеніту. Майте на увазі, що тут ми нехтуємо іншим ефектом -- поглинанням другого порядку, який залежить від кольору кожної зорі, однак цей останній ефект значно менший, ніж ефект поглинання першого порядку.

У такому випадку "трансформація" має враховувати не лише вплив різниці в смугах пропускання фільтрів (спектральному відгуку), а також вплив різного атмосферного поглинання. Врахувати цей другий ефект можна, додавши ще один член до рівнянь диференціальної фотометрії:

$$B_{var} = -k_b * \Delta X + \Delta b + T_{b,bv} * \Delta(B-V) + V_{comp} \quad [\text{Рівняння 6.19}]$$

$$V_{var} = -k_v * \Delta X + \Delta v + T_{v,bv} * \Delta(B-V) + V_{comp} \quad [\text{Рівняння 6.20}]$$

$$R_{\text{var}} = -k_r * \Delta X + \Delta r + T_{r_{bv}} * \Delta(B-V) + R_{\text{comp}} \quad [\text{Рівняння 6.21}]$$

Де:

- k_b , k_v та k_r -- коефіцієнти поглинання першого порядку (у зоряних величинах на одиницю повітряної маси);
- ΔX -- різниця між повітряними масами для змінної зорі та зорі порівняння; та
- Інші члени визначені вище.

Повітряна маса X -- це довжина шляху, який світло зорі проходить крізь атмосферу на шляху до камери, ця величина визначена так, що в зеніті вона дорівнює одиниці ($X=1$). Для зенітного кута ζ , тобто кута між напрямком на зорю та напрямком на зеніт, якщо його величина менша за 60 градусів, величина повітряної маси приблизно дорівнює $X = \sec(\zeta)$. Більші значення зенітного кута потребують більш складних розрахунків. Багато програм фотометричного аналізу мають функцію розрахунку повітряної маси в залежності від розташування спостерігача та часового поясу, часу отримання зображення та екваторіальних координат зорі.

Традиційний метод визначення коефіцієнтів поглинання передбачає отримання зображень кількох стандартних зірок у різний час ночі, спочатку коли вони високо в небі (низьке значення повітряної маси), а потім коли вони будуть низько на небі (велике значення повітряної маси), або навпаки. Ми не будемо описувати цей метод тут, зацікавлених читачів відсилаємо до книги Henden, A. A., and Kaitchuck, R. H. 1990, *Astronomical Photometry*, Willmann-Bell. Натомість, в розділі 6.6 буде описаний альтернативний метод, який пасує до DSLR-фотометрії із широкими полями зору.

6.6 Альтернативний метод корекції атмосферного поглинання та трансформації

У цьому розділі ми представимо альтернативний підхід до корекції атмосферного поглинання та трансформації, який розроблений для кампанії AAVSO Citizen Sky 2009-2011 зі спостереження затемнення зорі Епсілон Візничого (Kloppenborg et al., *AAVSO Volume 40*, 2012). Для простоти, ми опишемо методику для зеленого каналу, однак вона також може бути застосована таким саме чином для синього та червоного каналів.

Рівняння 6.17 може бути розширене членом, який враховує корекцію поглинання:

$$(V-v) = -k_v * X + T_{v_{bv}} * (B-V) + ZP_v \quad [\text{Рівняння 6.22}]$$

Це рівняння має таку ж саму форму, як і рівняння площини в тривимірному просторі:

$$z = Ax + By + C \quad [\text{Рівняння 6.23}]$$

Якщо ми припустимо, що інструментальна величина v залежить лише від правої частини рівняння, наведеного вище, ми можемо отримати розв'язок для коефіцієнтів k_v , $T_{v_{bv}}$ та ZP_v , використовуючи мінімум три зорі порівняння на зображенні. Однак, якщо одна з зірок порівняння "погана" (можливо, вона сама є змінною, або некоректно ідентифікована, накладена на зорю з її ближньої околиці або для неї неправильно розрахована зоряна величина / повітряна маса) коефіцієнти будуть спотворені. З цих міркувань рекомендовано використовувати 6 або більше зірок порівняння, щоби мінімізувати ефект однієї "поганої" зорі.

Як роз'яснює Kloppenborg et al., для знайдення методом найменших квадратів площини, яка найкращим чином підігнана під n калібрувальних зірок, і яка відповідає рівнянню 6.23, треба

розв'язати наступний матричний вираз відносно матриці коефіцієнтів X , використовуючи обернення матриці A :

$$AX = B \quad [\text{Рівняння 6.24}]$$

або в повній формі:

$$\begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i^2 & \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n x_i \\ \sum_{i=1}^n x_i y_i & \sum_{i=1}^n y_i^2 & \sum_{i=1}^n y_i \\ \sum_{i=1}^n x_i & \sum_{i=1}^n y_i & \sum_{i=1}^n 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} -k_v \\ T_{v_bv} \\ ZP_v \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \sum_{i=1}^n x_i z_i \\ \sum_{i=1}^n y_i z_i \\ \sum_{i=1}^n z_i \end{bmatrix} \quad [\text{Рівняння 6.25}]$$

Однак ви не маєте заморочуватись із деталями матричних розрахунків, багато програм з обробки електронних таблиць та мов програмування мають відповідні вбудовані процедури. Наприклад, "Reduction-Intermediate spreadsheet", яка використовувалась у проекті AAVSO Citizen Sky, використовує функцію "LINEST" Excel. Оригінальна електронна таблиця та інструкція з її застосування розташована за адресою:

<http://www.citizensky.org/content/calibration-intermediate>

Однак, покращена версія тепер доступна за таким посиланням:

<https://www.aavso.org/dslr-camera-photometry-guide>

Нова електронна таблиця дає змогу аналізувати інструментальні величини із синього та червоного каналів на додачу до зеленого каналу. Також із її допомогою розраховується індекс кольору (B-V) цільової зорі з її інструментального кольорового індексу (b-v), використовуючи зорі порівняння та контрольну зорю як калібровані стандарти. Користувач може обирати наступне:

- 1) Відсутність корекції (тобто стандартизовані величини); або
- 2) Лише трансформаційну корекцію; або
- 3) Як корекцію атмосферного поглинання так і трансформаційну корекцію.

Приклади даних та інструкції з використання електронної таблиці додаються.

Стандартизовані або трансформовані величини з будь-якої згаданої вище електронної таблиці придатні для подання до AAVSO.

Більше деталей про атмосферне поглинання можна знайти в Додатку С.

6.7 Надсилання результатів

Будь-які наукові результати не мають цінності, якщо вони не опубліковані та не поширені в науковій спільноті. "Публікація" більшості результатів фотометричних вимірів змінних зірок означає додавання їх до добре відомої бази даних, такої, як Міжнародна База Даних AAVSO (AID: AAVSO's International Database). Дослідники будуть мати доступ до ваших даних, разом з будь-ким іншим, задаючи запит до бази даних за конкретною зорею та проміжком часу. Щоб ваші виміри були корисними, вони мають супроводжуватися інформацією, яка описує, що це за об'єкт, як інформація була отримана та інші дані, які відносяться до змісту та якості інформації.

Форма вводу даних до AID доступна зі сторінки "WebObs (Submit/Search Data)" на вкладці "Data" на домашній сторінці AAVSO. Ви маєте отримати офіційний Код Спостерігача (AAVSO Observer Code)

та увійти в систему за вашим логіном перед тим, як зможете вводити дані. Реєстрація та отримання коду спостерігача (<https://www.aavso.org/apps/register/>) безкоштовна та відкрита для будь-кого, не лише для членів AAVSO.

На початку ви (ймовірно) будете використовувати форму “Submit Observations Individually” на сторінці WebObs, яка дає змогу вводити одне спостереження за один раз. Оберіть “DSLR” зі списку “Choose Type of Observation”, після вибору цього типу спостережень стануть доступні відповідні поля вводу. Залежно від того, який тип спостережень обраний, відображуються дещо різні поля вводу.

На Рис. 6.10 показана форма вводу окремих DSLR-спостережень. Інформація, яку необхідно вводити до форми WebObs, більшою частиною не потребує пояснень, однак для кожного поля є посилання на більш детальний опис (“More help...”), якщо ви не впевнені, що саме треба вводити.

Якщо ви подасте стандартизовані величини (тобто HE-трансформовані величини), не активуйте прапорець (чекбокс) “transformed” під полем “Magnitude” та оберіть відповідний тип фільтру “Tri-Color...” з випадаючого списку фільтрів (Filter). Наприклад, оберіть “Tri-Color Green”, якщо стандартизовані величини були отримані з інструментальних величин зеленого каналу.

Для трансформованих спостережень (як із, так і без корекції атмосферного поглинання) не забудьте позначити чекбокс “transformed” та оберіть “Johnson B”, “Johnson V” або “Cousins R” з випадаючого списку фільтрів (Filter), залежно від того, який кольоровий канал DSLR використовувався.

Якщо використовувалася лише одна зоря порівняння, як у традиційній процедурі CCD-фотометрії, ви маєте вказати інструментальні зоряні величини в полях “Comp Mag” та “Check Mag”.

Якщо використовувався ансамбль зірок порівняння (як в електронній таблиці, згаданій у розділі 6.6), введіть у поле “Comp Label” значення “ensemble” та введіть “na” у поле “Comp Mag”. У поле “Check Mag” введіть трансформовану (не інструментальну) величину, розраховану за допомогою електронної таблиці. У поле “Airmass” введіть розраховану повітряну масу для цільової зорі на момент спостереження.

Якщо подаються зоряні величини B, V, R, отримані з окремих (або складених (stacked)) кадрів, позначте це, надавши цим трьом спостереженням однаковий ідентифікатор у полі “Group”. Це допоможе визначити, що ці величини були отримані одночасно. Ідентифікатор групи має бути цілим числом, однаковим для всіх спостережень цієї групи та унікальним для конкретного спостерігача та конкретної зорі в задану юліанську дату.

Enter Observations Individually

What type of observation are you submitting?: *

A different form will be shown depending on what type you choose.

DSLR Observation

Observer Code: BMGA
Your official AAVSO Observer Initials.

Star Identifier:*
The name, desig, or AUID of the star you observed. [More help...](#)

Date/Time of Observation:*
Exact time of observation in JD or yyyy/mm/dd/hh/mm/ss format. [More help...](#)
 Check this box if your date is in HJD. [More help...](#)

Magnitude:*
Magnitude of the variable star. A decimal point is required. [More help...](#)
 Check this box if your magnitude is a *fainter-than*.
 Check this box if your magnitude is *transformed*.

Mag Error:
Magnitude Error. [More help...](#)

Filter:*

Chart ID:*
Label on chart used to make observation. [More help...](#)

Comment codes: B U W L D Y
 K S Z I V
Optional field. Check as many that apply. [More help...](#)

Comp Label:* <input type="text" value="ensemble"/>	Comp Mag:* <input type="text" value="na"/>	Check Label:* <input type="text" value="000-BKS-894"/>	Check Mag:* <input type="text" value="8.823"/>
---	---	---	---

Comparison and Check Star Labels and Mags. [More help...](#)

Airmass: [What is this?](#) Group: [What is this?](#)

Comments:

Please be brief.

Рис 6.10. Сторінка WebObs для вводу індивідуальних спостережень із полями даних, необхідних для заповнення у випадку спостережень за допомогою DSLR. (Mark Blackford)

Поле “Comments” можна використати, щоби позначити зорі, які використовувались у ансамблі порівняння, та для іншої інформації, яка відноситься до спостереження, однак це поле має обмеження в 100 символів, з пропусками та знаками пунктуації, включно.

Уважно перевірте введену інформацію перед її надсиланням (надсилання виконується натисканням кнопки “Submit Observation”). WebObs має функцію пошуку та виправлення надісланої вами інформації, якщо ви пізніше усвідомите, що відправлена інформація некоректна.

Інший метод подання даних спостережень є більш складним та включає генерацію файлу, який містить кілька спостережень, на відміну від надсилання єдиного спостереження за один раз. Файл має бути у форматі “AAVSO Extended File format” (див. <https://www.aavso.org/aavso-extended-file-format>). Багато програмних пакетів генерують файли результатів у такому форматі, у програмі він може називатись “AAVSO Extended Format” або подібним чином. Якщо ви використовуєте інше програмне забезпечення або електронні таблиці, ви маєте створити відповідний текстовий файл самостійно. Перевірте, щоби параметр “OBSTYPE” у файлі звіту був встановлений у “DSLR”. WebObs має функцію вибору та завантаження вашого файлу.

Нарешті, після подання спостережень, використайте генератор кривої блиску (Light Curve Generator, <https://www.aavso.org/lcg>), щоби подивитись, як ваші дані виглядають у порівнянні з даними від інших спостерігачів. Це справжнє задоволення -- спостерігати, як крива блиску будується в реальному часі!

Частина 7: Розроблення програми спостережень з DSLR

Один із найбільших викликів, який чекає на спостерігача-новачка -- це вибір об'єкту спостережень із сотень тисяч відомих змінних зір. Де знайти списки або каталоги зір? Як вирішити, яка зоря підходить для спостережень на вашому інструменті? Як отримати мапу зі змінною зорею та зорями, що її оточують та як вибрати з них зорі порівняння?

На сторінці для спостерігачів вебсайту AAVSO є розділ секцій спостережень (<https://www.aavso.org/observers#sections>), це чудове місце, у якому ви можете почати шукати потенційні цілі. Там є чисельні посилання на інші ресурси, включно з тими, які показані на Рис. 7.1, вони особливо підходять спостерігачам-початківцям.

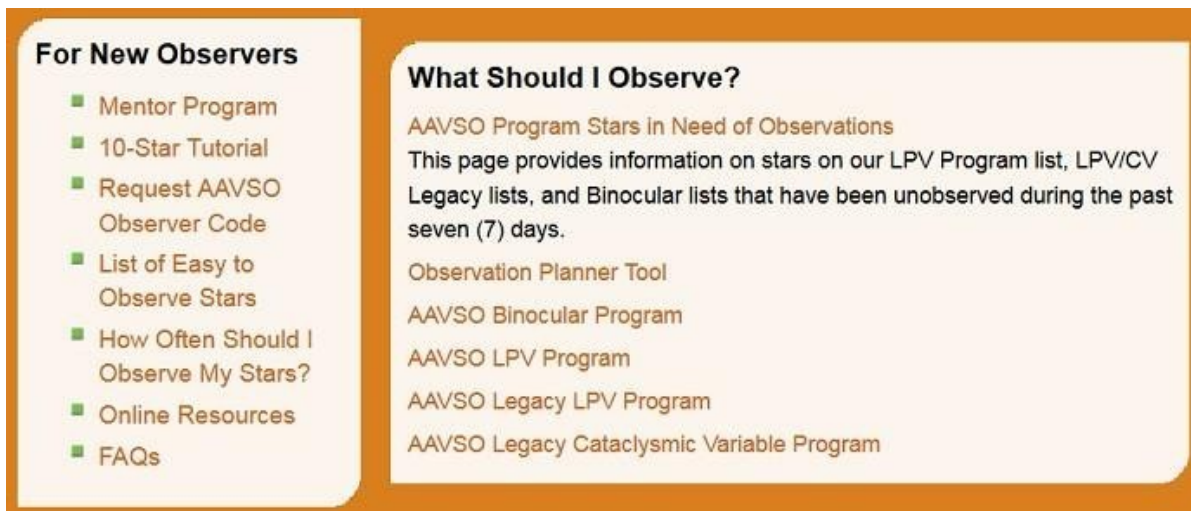


Рис. 7.1. Частина секції спостережень сторінки AAVSO для спостерігачів.

Зорі, перелічені в Програмі AAVSO для біноклів, більшою частиною мають діапазони величин, пошуку мапи та таблиці фотометрії, які пасують до DSLR-фотометрії. Також перегляньте різноманітні розділи спостережень AAVSO, особливо присвячені затемнюваним змінним, короткоперіодичним пульсуючим змінним та довгоперіодичним змінним.

Можна використати Інструмент Планування Спостережень (Observation Planner Tool), щоби визначити змінні, які видимі з вашого місця спостережень у конкретну ніч. Не забудьте уважно перечитати інструкції, щоби одержати максимум від цих інструментів та запобігти вибору менш відповідних цілей.

Щоби спростити процес вибору, ми заздалегідь обрали кілька цілей, які добре підходять новачкам. Однак, не всі з них підійдуть кожному спостерігачу.

7.1 Список цілей, які рекомендовані початківцям

Список цілей, які рекомендовані новачкам, включає 11 зірок для північних спостерігачів та 10 зірок для південних (Таблиці 7.1 та 7.2, відповідно). Вони були обрані за критеріями, які, як ми думаємо, роблять їх корисними як цілі для тренування. Усі вони мають амплітуди змін більші за 0,3 зоряної величини, за винятком однієї зорі з малою амплітудою змін, бети Цефея, яка є досить складною

ціллю. Більшість цих зірок достатньо яскраві, принаймні в частині їхніх кривих блиску, це робить їх порівняно легкими для знаходження та позиціонування у полі зору вашої камери.

Одна північна ціль та дві південні мають величину в максимумі приблизно 8 або тьмянішу, тож вони потребують деяких зусиль для кадрування зображення та досягнення розумної величини ВСШ (відношення сигналу до шуму).

Більшість цих зір також включена в керівництво від AAVSO для тренування візуальних спостерігачів (воно доступне за посиланням <https://www.aavso.org/10-star-training>). Ці зорі відмічені верхнім індексом 2 в Таблицях 7.1 та 7.2. “10-зоряне керівництво” включає мапи, на яких зображені цілі сузір’я, щоби допомогти спостерігачу зорієнтуватися та полегшити знаходження змінної. На Рис. 7.2 нижче наведений приклад такої мапи. Числові мітки відмічають зорі порівняння для візуальних спостерігачів; ці зорі порівняння, однак, можуть не підійти спостерігачам з DSLR. Ви маєте використати “Variable Star Plotter”, щоби побудувати відповідну CCD-мапу та таблицю фотометрії (див розділ 3.4.1).

Усі зорі зі списку цікаві та/або ‘знамениті’ і цікаві професійним астрономам. Усі вони ілюструють важливі стадії зоряної еволюції. *Mira*, яка була відкрита в 1596 році -- перша зоря, зареєстрована як змінна. Мю Цефея (у таблиці вона записана як *miu*, тому що це офіційний міжнародний астрономічний запис цієї грецької літери [латинськими літерами]) є великою зорею на кінцевих стадіях еволюції, яка незабаром вибухне як наднова. Ми вважаємо, що деякі з рекомендованих зірок підійдуть для проектів середньої школи або коледжу, для багатьох із них є велика кількість довідкових матеріалів в інтернеті, що може допомогти студентським проектам.

Деякі з цих зірок змінюються регулярно (такі, як цефеїди та затемнювані подвійні) і кілька з них мають періоди, які можна повністю дослідити за час, менший п’яти годин. Отже, повний період може бути зареєстрований упродовж одного сеансу спостережень.

Таблиця 7.1. Яскраві зорі, які рекомендовані новачкам Північної півкулі

ПІВНІЧНІ ЗОРІ					
Ім'я	Час спостережень	Діапазон величини	Тип змінної	Період (дні)	Примітки
Z UMa	Цілий рік	6,2 - 9,4	Напівправильна змінна	195,5	Можна спостерігати раз на п'ять днів. Можливо, необхідно буде міняти налаштування (камери), щоб охопити значний діапазон змін величини.
delta Cep ²	Цілий рік	3,49 - 4,36	Класична цефеїда	5,366266	Можна спостерігати двічі за одну ніч або один раз до опівночі. Знаменита історична змінна з регулярною характерною кривою блиску. Звітуйте спостереження як del Cep.
Algol (beta Per) ²	Із серпня до травня	2,09 - 3,30	Затемнювана подвійна	2,86736	Затемнення триває приблизно 8 годин. Виміри мають тривати впродовж, щонайменше, двох годин до та після передбаченого мінімуму. 10 або більше вимірів необхідні для побудови прийнятної кривої блиску; ці виміри можна робити кожні 15 хвилин. Звітуйте спостереження як bet Per.
beta Lyr ^{1,2}	Із квітня до листопада	3,30 - 4,35	Затемнювана подвійна	12,94061713	Напіврозділена затемнювана зоря, це означає, що вона постійно перебуває у фазі затемнення. Для більшості частини періоду достатньо одного виміру за ніч. Навколо первинного мінімуму (впродовж півтора дня) виміри можна робити кожну годину. Звітуйте спостереження як bet Lyr.
miu Cep ^{1,2}	Цілий рік	3,43 - 5,1	Напівправильна змінна	835	Достатньо одного спостереження за ніч. Звітуйте спостереження, використовуючи написання "miu", а не "mu".
eta Aql ²	Із квітня до листопада	3,49 - 4,30	Класична цефеїда	7,1769	Можна спостерігати двічі за одну ніч або один раз до опівночі. Знаменита історична змінна з регулярною характерною кривою блиску.
Mira1 (omicron Cet)	Із серпня до лютого	2 - 10,1	Міріда	331,96	Доступна для вимірів впродовж 100 днів до та після максимуму. Звітуйте результати як omi Cet.
R Lyr ^{1,2}	Із квітня до листопада	3,81 - 4,44	Напівправильна змінна	46:	Один вимір за ніч достатній.
beta Cep	Цілий рік	3,16 - 3,27	Пульсуюча змінна типу Бети Цефея	0,1904881	Має дуже малу амплітуду та потребує 30 зображень, щоби зробити виміри в хороших небесних умовах. Має регулярний період та постійно змінюється. Повний цикл може бути виміряний за одну сесію, виконуючи виміри кожні 5 хвилин. Звітуйте спостереження як bet Cep.
BE Lyr	Із жовтня до квітня	8,57 - 8,97	Високоамплітудна змінна типу дельти Щита (HADS)	0,09586954	Має короткий регулярний період, який може бути вивчений за один сеанс з 10 вимірів інтервалом 5 хвилин*.
V474 Mon	Із листопада до березня	5,94 - 6,31	Високоамплітудна змінна типу дельти Щита (HADS)	0,136126	Має короткий регулярний період, який може бути вивчений за одну сесію з 10 вимірів з інтервалом 5 хвилин*.

¹**Примітка:** Ця зоря червона, нетрансформовані зоряні величини DSLR можуть мати похибку в бік надмірної яскравості.

²**Примітка:** Мапа для цієї зорі є у 10-зоряному навчальному посібнику (північні зорі)

***Примітка від перекладача:** тут помилка. Зважаючи на значення періодів, за 50 хвилин повний період поспостерігати не вдасться.

Таблиця 7.2. Яскраві зорі, які рекомендовані новачкам Південної півкулі

ПІВДЕННІ ЗОРІ					
Ім'я	Час спостережень	Діапазон величини	Тип змінної	Період (дні)	Примітки
W Sgr ²	Із березня до жовтня	4,29- 5,14	Класична цефеїда	7,59503	Потрійна система, складається з Цефеїди, близько розташованого карлика класу F5 та більш віддаленої зорі класу A0.
каппа Pav ²	Із квітня до листопада	3,91 - 4,78	Ппульсуюча змінна типу W Діви	9,083	Найяскравіша представниця цефеїд зоряної популяції II-го типу (старих зірок). Маломасивні зорі, які мають меншу яскравість, ніж класичні цефеїди. Каппа Pavonis демонструє різкі зміни періоду. Постійні спостереження допомагають відстежувати ці зміни. Звітуйте спостереження як кар Pav.
beta Dor ²	Із вересня до квітня	3,41 - 4,08	Класична цефеїда	9,8426	Лише на 0.1m менш яскрава, ніж l Car та іде за нею в рейтингу. Класичні цефеїди -- це масивні зорі популяції I-го типу (молодих) зірок. Звітуйте спостереження як bet Dor.
l Car ²	Із грудня до липня	3,22 - 4,12	Класична цефеїда	35,562	Найяскравіша в небі після Полярної цефеїди, якщо рахувати за видимою зоряною величиною. Зауважте, що буква "l" -- це маленька L.
R Car ^{1,2}	Із грудня до серпня	3,9 - 10,5	Міріда	307	Потребує різних налаштувань камери, щоб охопити повний діапазон зміни яскравості.
V Pup ²	Із жовтня до травня	4,35 - 4,92	Затемнювана подвійна	1,4544859	Затемнювана змінна типу бети Ліри. Зміна блиску неперервна внаслідок еліпсоїдальної форми компонент системи.
R Dor ^{1,2}	Із жовтня до травня	4,78 - 6,32	Напівправильна змінна	172	Напівправильна змінна, яка демонструє два максимуми кривої блиску та сильну зміну амплітуди від періоду до періоду. Одна з найбільших зірок, діаметр яких виміряний методом інтерферометрії з Землі.
zeta Phe ²	Із липня до лютого	3,94 - 4,42	Затемнювана подвійна	1,6697671	Затемнювана подвійна змінна типу Алголю. Більшість часу перебуває на максимуму яскравості, тож реєстрація затемнення потребує терпіння.
RY Lep	Із жовтня до травня	8,05 - 8,46	Високоамплітудна змінна типу дельти Щита (HADS)	0,2251475	Повний цикл може бути досліджений за один сеанс, виконуючи виміри кожні 5 хвилин.
RS Gru	Із червня до січня	7,94 - 8,48	Високоамплітудна змінна типу дельти Щита (HADS)	0,1470117	Має короткий регулярний період, який може бути досліджений за один сеанс з 10 спостережень з інтервалом 5 хвилин*.

¹**Примітка:** Ця зоря червона, нетрансформовані зоряні величини DSLR можуть мати похибку в бік надмірної яскравості.

²**Примітка:** Мапа для цієї зорі є у 11-зоряному навчальному посібнику (південні зорі)

***Примітка від перекладача:** тут помилка. Зважаючи на значення періодів, за 50 хвилин повний період поспостерігати не вдасться.

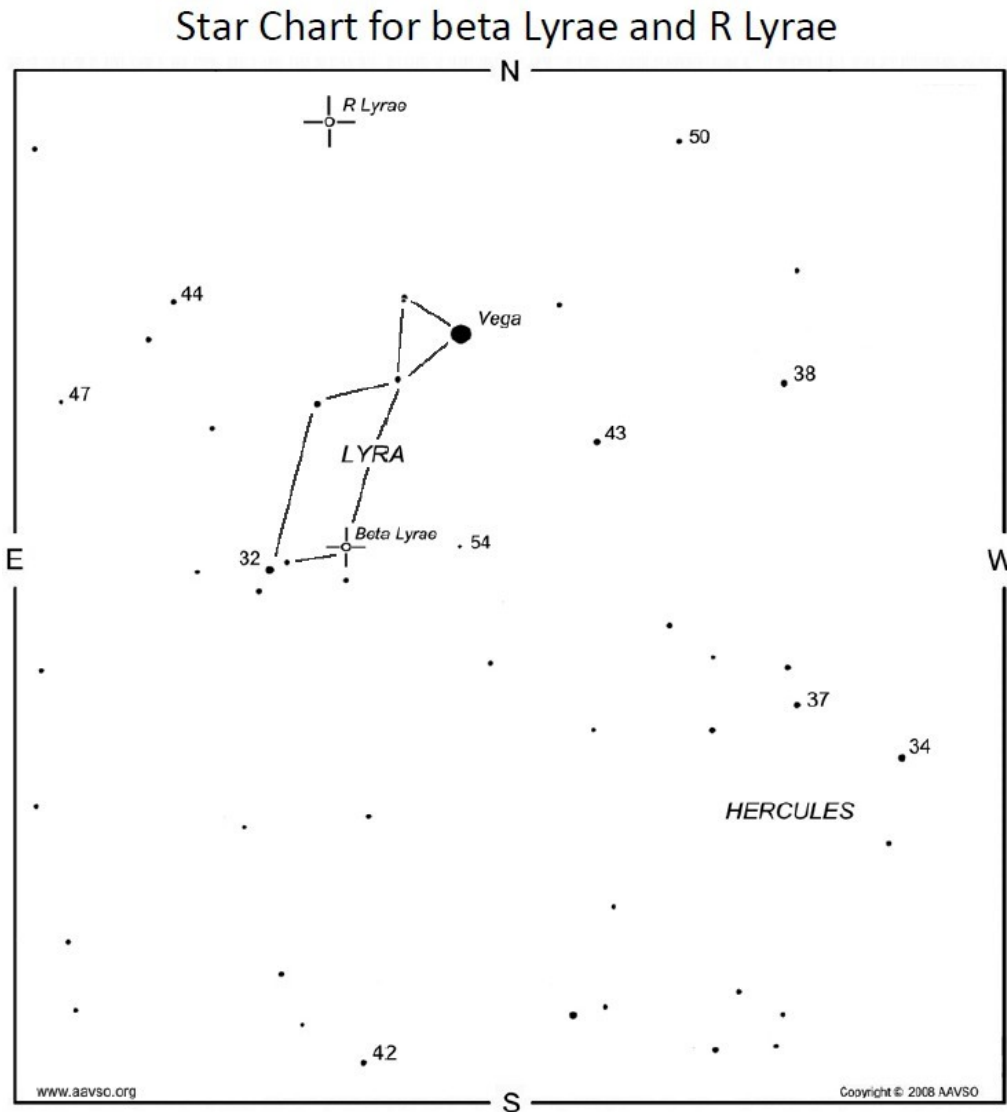


Рис. 7.2. Пошукова мапа для бети Ліри та R Ліри, відтворена з 10-зоряного тренувального керівництва від AAVSO для візуальних спостерігачів північної півкулі. (AAVSO)

7.2 Як вирішити, що спостерігати

Напевно, два основних чинники, які впливають на вибір вами цілей спостережень -- це об'єктив та монтування. Це та інші теми, пов'язані з обладнанням, були розглянуті в Частині 2. Також треба взяти до уваги характеристики місця спостережень (які ділянки неба доступні або перекриті?), стан неба (чи світлове забруднення особливо заважає в деяких напрямках?), як часто ви маєте змогу спостерігати і як довго може тривати кожний сеанс спостережень. Пізніше, коли ви вирішите розширити свій список цілей, буде доречно перевіряти, які програми спостережень та кампанії ініційовані або рекомендовані AAVSO або іншими організаціями зі спостережень змінних зірок.

Передусім, вибирайте цілі, які цікавлять саме вас. Якщо ви не отримуєте від цього задоволення, ви не будете робити це довго. Тож що саме є для вас найбільш цікавим? Може подолання технічно складних проблем та викликів? Або ви відчуваєте внутрішнє збудження, спостерігаючи, як крива блиску набуває форми, коли ви додасте до неї нові точки-спостереження? Або вам приємно бути під відкритим небом і відчувати контакт зі Всесвітом? Чи є якісь зорі, які вам подобається спостерігати просто із задоволення? Наскільки серйозним ви маєте бути? Чи щось із цього важливо для вас? Чи

можете ви відноситися до цього серйозно, робити певний внесок у науку й у той самий час отримувати задоволення? Напевно, так! Вірите ви, чи ні, усе це має значення. Ми хочемо, щоби ви були успішними, задоволеними та продуктивними. Якщо DSLR-фотометрія не буде для вас задоволенням, ви незабаром втратите цікавість.

7.2.1 Планування сеансу спостережень

Плануючи сеанс спостережень, треба брати до уваги низку міркувань. Основне міркування -- те, як довго ви можете спостерігати. Або у вас є лише годинна-дві, або ви можете спостерігати впродовж усієї ночі. Якщо ви маєте лише одну годину або біля того, ви не зможете зробити корисних спостережень затемнюваних подвійних -- такі спостереження зазвичай потребують чотири або більше годин. Однак, за одну годину ви можете спостерігати до п'яти зірок, які потребують лише одного спостереження за ніч. Пам'ятайте, що хороша практика полягає в тому, щоби зробити кілька знімків кожного поля зору, з яких потім можна отримати усереднене значення вимірної зоряної величини.

Якщо ви плануєте спостерігати кілька зір упродовж однієї сесії, обов'язково акуратно занотуйте будь-які зміни в налаштуваннях камери, які ви робите, коли переходите від однієї зорі до іншої. Дуже легко забути змінити налаштування або забути це відмітити, коли ви будете втомлені вночі.

Щоби мінімізувати ефекти диференційного атмосферного поглинання, цілі мають бути високо в небі в час, коли ви плануєте їхнє спостереження. Тут будуть дуже корисні якісні програми-планетарії. Цю вимогу можна пом'якшити у випадку спостережень, критичних до часу, таких, як спостереження нових та наднових зірок, коли цілі не дуже вдало розташовані на небі.

Якщо ви вже є спостерігачем-візуальщиком змінних зір, ви можете, звісно, провести DSLR-фотометрію вашої улюбленої зорі з використанням принципів, викладених у цьому керівництві.

7.2.2 Пошукові мапи та мапи зірок порівняння з таблицями фотометрії

Вміння знаходити змінну зорю -- це навичка, якій треба вчитися. Потрібно використовувати актуальні пошукові мапи та таблиці фотометрії з послідовностями зірок порівняння з добре визначеними величинами (Розділ 3.4.1). Спостерігачам рекомендовано використовувати такі мапи для того, щоби уникнути конфліктів, які виникають у випадках, коли зоряні величини тих самих зірок порівняння беруться з різних мап та джерел. Це може призвести до того, що різні спостерігачі вимірюють різні значення зоряної величини для тієї ж самої змінної зорі в одну й ту саму ніч.

7.2.3 Ефемериди, які передбачають, коли зоря, що є предметом спостережень, буде яскравою або тьмяною

Ефемерида (від грецького слова ἐφημερίς ephēmeris, тобто "щоденник", "журнал") -- це таблиця попередньо обчислених моментів часу та дат середини первинного затемнення затемнюваних подвійних або максимуму пульсуючих зір (цефеїд та мірид). Ефемериди для зір із наших рекомендованих списків можна знайти в базі AAVSO "International Variable Star Index" (VSX) за посиланням <http://www.aavso.org/vsx/>. Введіть назву зорі, яку ви хочете спостерігати, наприклад, W Sgr, та натисніть "search" ("пошук"). На сторінці результату буде посилання під назвою "Ephemeris" праворуч на рядку, поміченому як "Epoch" ("епоха"). Клацніть на це посилання, щоби відобразити вікно зі списком кількох наступних максимумів цієї цефеїди. Примітка: ефемерида покаже вам кілька наступних максимумів для пульсуючих зірок, подібних до цефеїд, та первинні мінімуми для затемнюваних подвійних.

Якщо епоха та період у базі VSX багато років не оновлювались, фактичні моменти максимумів/мінімумів можуть не відповідати передбаченим моментам часу. Основною причиною

продовження спостережень пульсуючих та затемнюваних зір є пошук змін періодів, які можуть бути зумовлені еволюційними змінами або іншими зорями, що обертаються навколо змінної.

7.2.4 Прогноз погоди, вологість, точка роси, температура

Перевірте прогноз погоди на ніч, у яку ви плануєте спостерігати. Вечір може бути багатообіцяючий, однак слабкі пір'ясті хмари, які невидимі в темряві, можуть перешкодити якісній фотометрії. DSLR-камера настільки чутлива, що слабкі пір'ясті хмари сильно впливають на результат. Іноді ми маємо задоволення насолоджуватися прозорим небом -- вільним від хмар, пилу та з низькою вологістю довкілля. Використовуйте такі ночі на повну, тому що вони бувають досить рідко в більшій частині світу. Залиште свої особливі/сімейні/робочі/суспільні обов'язки та підготуйтеся до спостережень!

Є низка спеціальних астрономічних вебсайтів та застосунків для смартфонів та планшетів, які надають додаткову інформацію, що доповнює загальний метеорологічний прогноз. Деякі ночі починаються гарними умовами спостереження, які псуються з проходженням погодних фронтів; інші починаються з хмар, які потім розходяться. Якщо спостереження добре сплановані, ви можете провести сеанс, навіть обмежений погодними умовами, і тим не менш отримати корисні результати. Якщо умови передбачаються сприятливими впродовж усієї ночі, ви можете підготуватися до довгих серій спостережень затемненої змінної (наприклад) або високоамплітудної змінної типу дельти Щита, якщо такі спостереження можливі з вашим монтуванням. Якщо ваше монтування не має функції трекінгу, отримання довготривалих серій зображень може бути серйозним викликом для вас, як у процесі зйомки, коли необхідно утримувати в кадрі цільову зорю разом із зорями порівняння протягом ночі, так і в подальшій обробці відзнятого матеріалу.

Якщо прогноз обіцяє туман, ваші камера та об'єктив можуть запотівати. Це може статися перед тим, як почнеться справжній туман, тому ви маєте спланувати спостереження на час перед початком того, як туман опуститься. На камері може випасти роса й без туману, тож будьте готові до цього, бо це зіпсує ваші виміри. Подібні проблеми можна мінімізувати, переносячи камеру до прохолодного, але більш сухого середовища (наприклад, до гаражу) між вимірами. Можна накривати камеру між вимірами пластиковим пакетом, всередині якого буде більш сухо.

Якщо температура зовні суттєво вище або нижче, ніж у домі, ми рекомендуємо винести камеру назовні на двадцять хвилин, щоби камера та об'єктив термічно стабілізувались.

Якщо ви живете біля океану, майте на увазі, що конденсат може бути також солоним, що дуже шкідливо як для камери, так і для об'єктиву.

7.2.6 Стан неба, фаза Місяця

У той час, як яскравий Місяць може суттєво впливати на візуальні спостереження змінних зірок, вплив на виміри з DSLR не такий значний. Яскравий Місяць не впливає на виміри в частині неба, протилежній до нього. Якщо об'єктив камери має бленду, виміри можливі навіть досить близько до яскравого Місяця, якщо до об'єктиву не попадають прямі або відбиті місячні промені.

7.2.8 Спостереження незмінних зірок

Цікавим та корисним може бути тестування обладнання та налаштувань, на що можна витратити деякий нічний час. Отримання зображень стандартних зоряних полів дасть змогу вам визначити коефіцієнти трансформації та перевірити акуратність та відтворюваність ваших вимірів. Інший експеримент, що має сенс провести, це подивитись, як покращується відношення сигналу до шуму зі складанням (або усередненням) десяти, двадцяти або тридцяти зображень у порівнянні з поодиноким зображенням.

Перед тим, як спробувати фотометрію змінних зір, дуже корисною вправою буде попрактикуватися у фотометрії зір, які не є змінними. Ви можете взяти дві близькі незмінні зорі, виміряти різницю у їхній яскравості, а потім порівняти ваші оцінки зі значеннями з каталогу. Може статися, що провівши кілька перших чистих ночей за цими вправами у DSLR-фотометрії, ви уникнете багатьох проблем, коли будете працювати з вашими першими змінними зорями.

Це дуже корисний метод оцінювання та набуття досвіду в роботі з вашим обладнанням. Поекспериментуйте з різним розфокусуванням, довжиною експозиції, значенням ISO та діафрагми. Знайдіть, які налаштування дадуть змогу отримати найбільш точні результати.

Поекспериментуйте з парами зірок, різниця у величинах між якими становить більше 0,5, біля 0,2 та біля 0,1. Може статися, наприклад, що ви можете порівнювати лише зорі з різницею між ними у 0,1 величини, коли умови спостереження дуже сприятливі. Набуваючи досвіду, ви зможете надійно вимірювати зміни у 0,01-0,02 величини для порівняно яскравих зірок.

Визначте найяскравіші та найтьмяніші зорі, фотометрія яких вам практично доступна з вашим об'єктивом та монтуванням.

Обирайте пари зір із близькими показниками кольору, інакше різниці в зоряних величинах, виміряних вами, можуть не узгоджуватися зі значеннями з каталогу, незважаючи на коректність ваших налаштувань та процедур.

7.3 Час починати

В цьому керівництві ми детально виклали, як цифрові дзеркальні (одно-об'єктивні) камери (DSLR) можуть бути використані для моніторингу коливань яскравості змінних зірок. Для багатьох типів змінних вимірювання з DSLR не поступаються CCD-фотометрії як точністю так і акуратністю. Отже, DSLR-камери є менш затратним (у грошовому еквіваленті) шляхом у відшліфовуванні навичок фотометрії та можливості робити цінний науковий внесок у Міжнародну Базу Даних Спостережень AAVSO.

Тож настав час винести вашу цифрову камеру під зорі та перевірити на практиці все, чому ви навчилися. Насолоджуйтесь!

7.2.7 Як часто я маю спостерігати зорі, які входять до моєї програми спостережень?

Таблиці 7.3 та 7.4 дають рекомендовану частоту спостережень (каденцію) для різних типів змінних.

Таблиця 7.3. Рекомендована каденція спостережень для кількох класів змінних зірок.

ТИП	ОПИС	КАДЕНЦІЯ (дні)
Активні галактики (AGN)	Активні Галактичні Ядра. Оптично змінні позагалактичні об'єкти, які включені в список лише з історичних міркувань або спостережних кампаній. Тип згідно з Загальним Каталогом Змінних Зір (General Catalogue of Variable Stars, GCVS) GAL,BLLAC,QSO.	1
Гамма Касіопеї (GCAS)	Еруптивні неправильні змінні типу γ Касіопеї. Це зорі зі швидким обертанням із витіканням маси з їхніх екваторіальних зон. Формування екваторіальних кілець або дисків супроводжується тимчасовим зростанням яскравості або потемнінням. Зміна яскравості може досягати значень до 1,5 величини в смузі V.	5 - 10
Неправильні	Повільні неправильні змінні. Зміни яскравості таких зір не демонструють ознак періодичності або будь-яку присутню періодичність дуже складно виявити і вона проявляється лише час від часу. Часто до цього типу відносять зорі, які недостатньо вивчені.	5 - 10
Міріди (LPVs) з періодом <300 днів	Змінні типу α Кита (Міри). Це довгоперіодичні змінні зорі-гіганти з амплітудою зміни яскравості від 2,5 до 11 зоряних величин у смузі V. Їхні періоди лежать у діапазоні від 80 до 1000 днів.	5 - 7
Міріди (LPVs) з періодом 300-400 днів		7 - 10
Міріди (LPVs) з періодом >400 днів		14
Нові (N)	Тісні подвійні системи з орбітальним періодом від 0,05 до 230 днів. Один із компонентів системи -- гарячий білий карлик, який раптово, упродовж часу від одного до кілька десятків або сотень днів збільшує яскравість на 7-19 величин у смузі V, потім поступово зменшує яскравість до попередніх значень упродовж місяців, років або десятків років.	1
Типу R Північної Корони (RCB)	Змінні типу R Північної Корони. Це зорі з дефіцитом водню, багаті на вуглець та гелій, які мають високу світність і належать до спектральних класів Вре-С, вони є одночасно еруптивними та пульсуючими змінними. Демонструють неперіодичні потемніння на 1-9 величини в смузі V, які тривають від місяця до кількох сотень днів.	1
Повторні (рекурентні) нові (NR)	Повторні нові, які відрізняються від типових нових тим, що для них спостерігалися два або більше вибухів (замість одного) розділені інтервалом у 10-80 років. Приклади: Т CrB, Т Рух.	1
RV Тельця (RV)	Змінні типу RV Тельця. Це радіально пульсуючі надгіганти. Криві блиску характеризуються присутністю подвійних хвиль зі змінними первинними та вторинними мінімумами, глибина яких може мінятися, так що первинний мінімум може ставати вторинним та навпаки. Повна амплітуда зміни може досягати 3-4 величин у смузі V. Періоди між двома сусідніми первинними мінімумами (формальні періоди) лежать у діапазоні 30-150 днів.	2 - 5

Таблиця 7.3. Продовження

ТИП	ОПИС	КАДЕНЦІЯ (дні)
S Золотої Риби (SDOR)	Змінні типу S Золотої Риби. Це еруптивні зорі з високою світністю, які демонструють нерегулярні зміни з амплітудою в діапазоні 1-7 величин у смузі V. Вони належать до найяскравіших блакитних зірок їхніх материнських галактик. Як правило, ці зорі пов'язані з дифузними туманностями та оточені оболонками, що розширюються. Приклади: P Cyg, η Car.	5-10
Наднові (SNe)	Наднові. Зорі, яскравість яких, унаслідок фінального вибуху, збільшується на 20 величин або навіть більше, потім повільно знижується. Зважаючи на форму кривої блиску та особливості спектру, наднові діляться на типи I та II.	1
Напівправильні (SR, SRA, SRB, SRC)	Напівправильні змінні, гіганти та надгіганти середніх або пізніх спектральних класів, які демонструють помітну періодичність у своїх кривих блиску, яка супроводжується або час від часу переривається різними нерегулярностями. Періоди лежать у діапазоні від 20 до >2000 днів, у той час як форма кривих різна і змінюється й амплітуди змін можуть бути від кількох сотих до кількох одиниць зоряних величин (зазвичай 1-2 величини в смузі V)	5-10
Карликові нові (NL, UG, UGSU, UGWZ, UGZ)	Змінні типу U Близнюків, або "карликові нові". Тісні подвійні системи, які складаються з зорі-карлика або субгіганта, що заповнила собою внутрішню порожнину Роша, та білого карлика, оточеного акреційним диском. Орбітальні періоди лежать у діапазоні 0.05-0.5 днів. Час від часу яскравість системи швидко збільшується на кілька зоряних величин (вибух), після цього впродовж інтервалу часу від кількох днів до місяця або більше зоря повертається до стану до вибуху. Зважаючи на характер зміни яскравості, змінні типу U Gem можуть бути поділені на три типи: типу SS Cyg (UGSS), типу SU UMa (UGSU), та типу Z Cam (UGZ)	1
Молоді зоряні об'єкти (YSO) у активному стані	Молоді зоряні об'єкти. Змінні зорі, які ще не вийшли на головну послідовність. Можуть бути типів T Тельця, UXor, FUor, або EXor.	1 або менша
Молоді зоряні об'єкти (YSO) у неактивному стані		2-5
Симбіотичні (ZAND)	Симбіотичні змінні типу Z Андромеди. Це тісні подвійні, які складаються з гарячих зірок, зірок пізніх класів у протягненій оболонці, що збуджена випромінюванням гарячих зірок. Яскравість системи демонструє нерегулярні варіації з амплітудою до 4 величин у смузі V.	1
Затемнювані подвійні (EB)		1 раз за хвилину
Високоамплітудні типу дельти Щита (HADS)		1 раз за хвилину

Таблиця 7.4. Каденції спостережень та точність реєстрації часу, рекомендовані для кількох класів змінних зірок.

ТИП ЗОРІ	ЧАСТОТА СПОСТЕРЕЖЕНЬ	ТОЧНІСТЬ ЗВІТУВАННЯ, У JD
Цефеїди	Кожну ясну ніч	4 цифри після коми
Катаклізматичні змінні	Кожну ясну ніч	4 цифри після коми
Змінні типу Міри	Раз на тиждень	1 цифра після коми
Напівправильні	Раз на тиждень	1 цифра після коми
Типу RV Тельця	Раз на тиждень	1 цифра після коми
Симбіотичні зорі*	Раз на тиждень	1 цифра після коми
Зорі типу R Північної Корони*	У максимумі раз на тиждень	1 цифра після коми
Зорі типу R Північної Корони	Під час потемніння кожна ясну ніч	4 цифри після коми
Неправильні змінні	Раз на тиждень	1 цифра після коми
Змінність яких під підозрою	Кожну ясну ніч	4 цифри після коми
Спалахуючі зорі	Безперервно протягом 10-15 хвилин для рідкісних вибухів.	4 цифри після коми
Затемнювані подвійні	Кожні 10 хвилин під час затемнення	4 цифри після коми
Зорі типу RR Ліри	Кожні 10 хвилин	4 цифри після коми
<p>Примітка: Симбіотичні змінні та змінні типу R Північної Корони можуть демонструвати можливу змінність малої величини та з коротким періодом. Якщо ви зацікавлені у пошуку такої змінності, спостереження мають проводитися кожна ясну ніч та звітуватись із точністю 4 цифр після коми.</p>		

Додаток А: Тестування DSLR-камери

Цей документ спирається на інформацію з таких джерел:

1. *The Handbook of Astronomical Image Processing*, Second Ed., Richard Berry and James Burnell, Willmann-Bell, Richmond, VA.
2. *Profiling the Long-Exposure Performance of a Canon DSLR* published on Cloudy Nights by Craig Stark. A PDF of this and other interesting articles are available from:

<http://www.stark-labs.com/craig/articles/articles.html>

Див. Додаток Е щодо інформації про перевірку лінійності сенсору DSLR.

Ми можемо визначити кілька основних параметрів вашої DSLR-камери з наборів кадрів зсуву (bias), темнових кадрів (dark) та плоского поля (flat field), які легко отримати. Згадані параметри включають коефіцієнт підсилення системи (system gain, визначається як $\{\text{число_електронів}\}/\text{ADU}$), максимальне значення ADU (рівень насиченості сенсору), повна глибина ями (full well capacity) та шум зчитування. Також ви можете виміряти, наскільки збільшується температура сенсору для довгих серій кадрів та визначити, як змінюється рівень шуму з температурою.

Такі виміри мають бути повторені для кожного значення ISO від 100 до 800, саме такий діапазон значень ISO ви маєте використовувати для фотометрії.

ПРИМІТКА: У цьому документі всі оцінки параметрів проводяться на одному з зелених каналів, виділених із зображення. Деякі фотометричні пакети, наприклад MaxIm DL, дають змогу виділяти обидва зелених канали окремо. Інші пакети комбінують дві зелені площини в одне зображення, наприклад AIP4Win. Якщо ваше програмне забезпечення дає на виході єдине зображення для зеленого каналу, вам належить використовувати або синій, або червоний канали для вимірювання параметрів камери. Ця вимога виходить із того, що об'єдане зображення з двох зелених каналів має менше стандартне відхилення (рівень шуму), ніж індивідуальні зелені канали, тож параметри, виведені з величини стандартного відхилення, будуть некоректними.

Максимальне значення ADU

Сучасні DSLR-камери мають 14-розрядний аналого-цифровий перетворювач (АЦП), який має давати максимальне значення ADU у $(214 - 1) = 16383$. Деякі старіші камери мають 12-розрядний АЦП, з номінальним максимальним значенням ADU у $(212 - 1) = 4095$. Однак, насправді максимальне значення буде дещо меншим і для ISO 100 може відрізнитися від максимальних значень для більших ISO.

1. Зніміть переэкспонований [так, щоби досягти насичення пікселів] кадр плоского поля (flat)
2. Виміряйте максимальне значення пікселів (воно має бути однаковим для всіх кольорових площин).

Результати вимірів для Canon 1100D:

ISO	Максимальне значення ADU [ADU]
100	13584
200	15304
400	15303
800	15304

Системне зміщення

Деякі камери мають передбачений конструкцією систематичний зсув рівня чорного. Це точно визначений зсув у кодуванні рівня чорного у файлі зображення. Часто він має значення 1024 або 2048 ADU у 14-розрядних камерах, або 256 у старіших 12-розрядних камерах. Це зміщення дає можливість записувати від'ємні значення шуму та деякого дрейфу рівня чорного.

1. Зніміть кадр зсуву (bias) так, щоби до камери не попадало світло (закрийте видошукач, закрийте об'єктив кришкою, затемніть кімнату), встановивши найменший час експозиції, доступний у вашій камері (наприклад, 1/4000 с).
2. Виміряйте медіану всіх пікселів; це й буде значення системного зміщення.

Результати вимірів для Canon 1100D:

ISO	Системне зміщення [ADU]
100	2048
200	2048
400	2048
800	2048

Системний гейн (або коефіцієнт перетворення)

Системний гейн вимірюється в кількості електронів на одне ADU (e^-/ADU) та описує число електронів, яке потрібне для того, щоби змінити інтенсивність пікселя на 1 Analogue-to-Digital-Unit (ADU), основну одиницю, що характеризує DSLR- або ПЗЗ(CCD)-зображення. Системний гейн має бути однаковим для кожної кольорової площини, однак різний для різних значень ISO.

1. Зніміть два кадри плоского поля (flat) з однаковим часом експозиції. Встановіть таку експозицію, щоби середня інтенсивність пікселів була на рівні приблизно $\sim 2/3$ від максимального значення ADU і щоби не було пікселів, які досягли насичення.
2. Відокремте одну з двох зелених площин із кожного з кадрів плоского поля та збережіть їх під іменами FG1 та FG2.
3. Обрахуйте суму зображень FG1 та FG2 та виміряйте середнє значення пікселів у ділянці, близької до центру, розміром приблизно 100 x 100 пікселів. Запишіть це значення як $(\overline{FG1} + \overline{FG2})$.
4. Відніміть FG2 з FG1, потім додайте 5000 (щоби бути впевненим у тому, що на отриманому зображенні не буде пікселів із від'ємними інтенсивностями).
5. Виміряйте стандартне відхилення в ділянці, близької до центру, розміром приблизно 100 x 100 пікселів. Запишіть це значення як $\sigma_{(FG1-FG2)}$.
6. Зніміть два кадри зсуву (bias).
7. Відокремте одну з зелених площин із кожного кадру зсуву та збережіть їх під іменами BG1 та BG2.
8. Обрахуйте суму зображень BG1 та BG2 та виміряйте середнє значення пікселів у ділянці, близької до центру, розміром приблизно 100 x 100 пікселів. Запишіть це значення як $(\overline{BG1} + \overline{BG2})$.
9. Відніміть BG2 від BG1, потім додайте 5000 (щоби бути впевненим у тому, що на отриманому зображенні не буде пікселів із від'ємними інтенсивностями).
10. Виміряйте стандартне відхилення в ділянці, близької до центру, розміром приблизно 100 x 100 пікселів. Запишіть це значення як $\sigma_{(BG1-BG2)}$.

$$\text{Системний гейн} = \frac{(\overline{FG1} + \overline{FG2}) - (\overline{BG1} + \overline{BG2})}{\sigma_{(FG1-FG2)}^2 - \sigma_{(BG1-BG2)}^2} \quad [\text{Електронів / ADU}]$$

Результати вимірювань для Canon 1100D:

ISO	Гейн [Електронів / ADU]
100	3,29
200	1,62
400	0,83
800	0,40

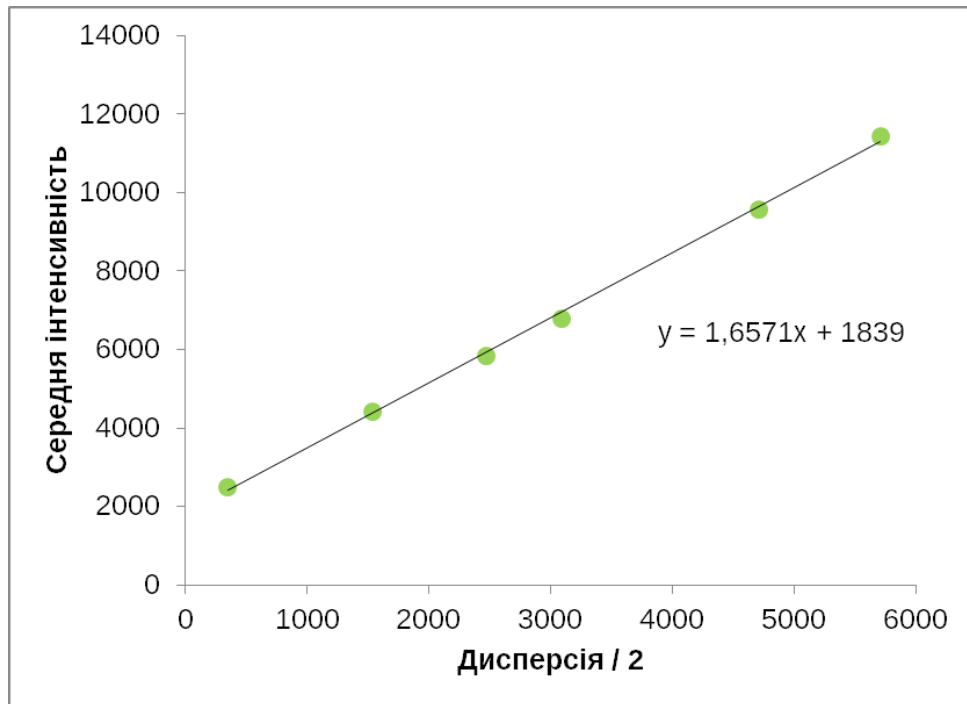
Системний гейн (альтернативний метод вимірювання)

Це більш складний, однак більш надійний метод.

1. Зробіть серію зображень плоского поля, по два зображення для кількох різних значень експозиції. На зображенні, яке було отримане з найбільшою експозицією, не має бути пікселів, інтенсивності яких перевищують максимально можливе значення ADU. На зображенні з найменшою експозицією середнє значення ADU має бути хоча б на кілька сотень ADU більшим за системне зміщення.
2. Відокремте одну з зелених площин із кожного кадру плоского поля.
3. Для одного зображення з кожної пари виміряйте середнє значення інтенсивності пікселів у ділянці близько до центру зображень розміром приблизно 100 x 100 пікселів. Запишіть це значення як $(\overline{FG1})$.
4. Для кожної пари зображень відніміть FG2 з FG1, потім додайте 5000 (щоби бути впевненим у тому, що на отриманому зображенні не буде пікселів із від'ємними інтенсивностями).
5. Виміряйте значення стандартного відхилення в ділянці, близької до центру, розміром приблизно 100 x 100 пікселів. Запишіть це значення як $\sigma_{(BG1-BG2)}$.
6. Розрахуйте дисперсію, взявши квадрат величини $\sigma_{(BG1-BG2)}$ і поділіть його на 2.
7. Побудуйте залежність середньої інтенсивності від дисперсії/2
8. Нахил прямої лінії, проведеної за методом найменших квадратів, дасть системний гейн для обраного ISO. Це значення має бути майже однаковим для кожної кольорової площини, однак різне для різних значень ISO.

Приклад даних, отриманих із Canon 1100D зі встановленим ISO 200 показаний у таблиці та на графіку нижче.

Номер пари зображень з ISO 200	$(\overline{FG1})$	$\sigma_{(BG1-BG2)}$	$\frac{\sigma_{(BG1-BG2)}^2}{2}$
1	11437,569	106,809	5704,1
2	9576,640	96,978	4702,4
3	6786,631	78,522	3082,9
4	5861,261	70,304	2471,3
5	4426,033	55,426	1536,0
6	2514,221	26,337	346,8



Значення системного гейну для кожного значення ISO від 100 до 800 показані в таблиці нижче. Ці значення дуже близькі до таких, отриманих першим методом.

ISO	Гейн [Електронів / ADU]
100	3,41
200	1,66
400	0,84
800	0,40

Шум зчитування

Єдине джерело шуму на кадрах зсуву (bias) є шум зчитування. Шум зчитування має бути однаковим для кожної кольорової площини, однак він залежить від значення ISO.

1. Зробіть два кадри зсуву.
2. Відокремте одну з зелених кольорових площин із кожного з кадрів зсуву та збережіть їх як BG1 та BG2.
3. Відніміть BG2 від BG1, потім додайте 5000 (щоби бути впевненим, що результуюче зображення не містить пікселів із від'ємними значеннями).
4. Виміряйте стандартне відхилення для результуючого зображення. Запишіть це значення як $\sigma_{(BG1-BG2)}$.

$$\text{Шум зчитування} = \frac{\sigma_{(BG1-BG2)}}{\sqrt{2}} \times (\text{гейн}) \text{ [середньоквадратичне значення (г.м.с.) в електронах]}$$

Результати, виміряні для Canon 1100D:

ISO	Шум зчитування [електронів]
100	23,7
200	12,5
400	7,0
800	3,1

Повна глибина ями

Повна глибина ями має бути однаковою для кожної кольорової площини, однак буде різною для різних ISO. Насправді, глибина ями, отримана для ISO 100, є істинною глибиною ями, для більших значень ISO виміряне значення -- максимальне число електронів, яке необхідне, щоби досягти максимально можливого значення ADU.

$$\text{Повна глибина ями} = (\text{системний гейн}) \times (\text{максимальне значення ADU}) \text{ [електронів]}$$

Результати вимірів для Canon 1100D:

ISO	Повна глибина ями [електронів]
100	46376
200	25603
400	12787
800	6088

Темновий струм

Виміри, виконані до цих пір, аналогічні тим, що використовуються для отримання характеристик CCD-камер. Темновий струм, однак, не може бути виміряний безпосередньо з використанням зображень DSLR таким способом, як це виконується для зображень CCD. У випадку CCD ми можемо спочатку зачекати, поки температура стабілізується, а потім зробити темновий кадр (D) з довгою витримкою t секунд. З цього кадру ми віднімаємо кадр зсуву (B), потім міряємо середнє значення пікселів у регіоні біля центру кадру: (D-B). Це значення множимо на гейн і отримуємо середній темновий струм:

$$\text{Темновий струм} = \frac{\text{гейн} \times (\overline{D-B})}{t} \text{ [електронів/піксель/секунду]}$$

Це число завжди має бути додатнім та збільшуватися зі збільшенням температури CCD. Якщо температура стабільна, повне число електронів, які з'являються в кожному пікселі завдяки темновому струму, має збільшуватися лінійно з часом.

RAW-зображення, створені за допомогою DSLR-камер Canon і, можливо, також іншими камерами, НЕ демонструють таку поведінку темного струму. Ось приклад для Canon 1100D зі встановленим ISO 400 (примітка: деякі програми для фотометрії додають зміщення до майстер-кадрів зсуву, MaxIm DL називає таке зміщення "п'єдесталом", тож будьте пильні й не забувайте відняти це значення, коли використовуєте майстер-кадр зсуву в розрахунках):

$$\text{Темновий струм} = \frac{0.84 \times (2045.90 - (2148.117 - 100))}{60} = -0.042 \text{ [електронів/піксель/секунду]}$$

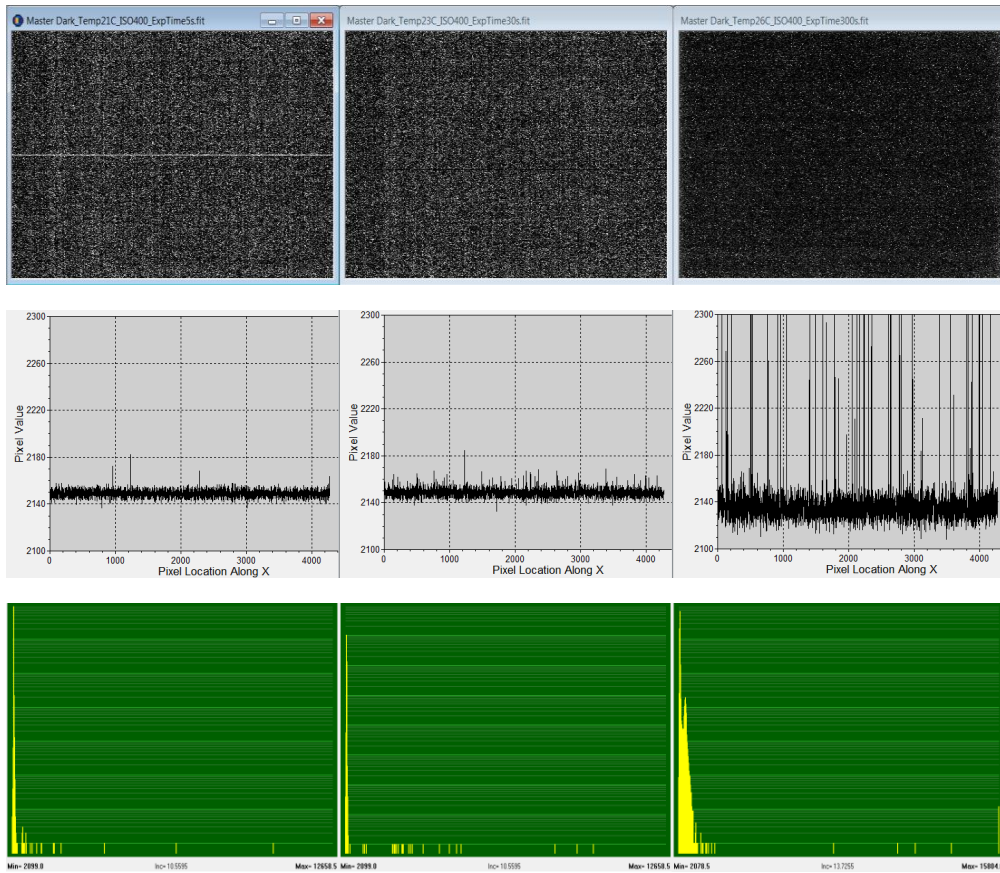
[Від перекладача: в оригіналі помилка, бо результат дорівнює -0.031, крім того, в оригіналі є непарна скобка]

Це не має фізичного змісту. Крейг Старк [Craig Stark] вивчив поведінку темного струму, використавши більш старий Canon 450D (Rebel XSi). Дисперсія [значень пікселів] у темнових зображеннях росте з ростом часу експозиції, як і очікується. Однак, середнє значення пікселів не росте лінійно; натомість, воно залишається в межах кількох ADU від значення зміщення. Він зробив висновок, що навіть RAW-зображення проходять деяку [внутрішньокамерну] обробку, що зменшує вплив темного струму. Тож як це впливає на фотометрію з використанням DSLR-камер? Мої [автора додатку] поточні думки такі:

1. Використовуйте темнові кадри, зняті з тією самою експозицією та за тієї самої температури, що й основні кадри
2. Можливо, краще буде використовувати фіктивні темнові кадри, щоби запобігти додавання шуму в каліброване зображення
3. Якщо використовується фіктивний темновий кадр, може бути корисним використання мапи дефектних пікселів, щоби зменшити ефект гарячих та мертвих пікселів

Однак, ці висновки мають бути підтверджені майбутніми експериментами.

Темнові майстер-кадри, лінійні профілі та гістограми для Canon 1100D з встановленим ISO 400 показані нижче.



Вгорі ліворуч: 5с, 21°C, **Вгорі всередині:** 30с, 23°C, **Вгорі праворуч:** 300с, 26°C.

Середина: лінійні профілі вздовж того ж самого рядка пікселів (показаного на зображенні вгорі ліворуч) для трьох темнових майстер-кадрів.

Внизу: Гістограми для трьох темнових майстер-кадрів. Значення пікселя в одиницях ADU (інтенсивність) відкладена на горизонтальній вісі, число пікселів із цим значенням ADU відкладене на вертикальній вісі (у логарифмічному масштабі).

Як видно з лінійних профілів, медіанна інтенсивність пікселів дорівнює 2148 ADU для зображень із витримкою 5с та 30с, що є значенням системного зсуву у 2048 ADU, який Canon додає до RAW-зображень плюс додаткові 100 ADU, додані MaxIm DL. Однак, медіанна інтенсивність для зображення з витримкою 300с дорівнює лише 2136 ADU. Здається, що Canon з певних міркувань підлаштовує системний зсув для довгих експозицій, навіть для зображень RAW. Це не шкодить фотометрії на зображеннях із довгою витримкою, однак корекція темновими кадрами під час калібрування зображень стає необхідною, щоби мінімізувати вплив додаткового сигналу від темного струму.

Переважає більшість пікселів на темнових майстер-кадрах із витримками 5с та 30с попадає в самий лівий пік на гістограмі, центрований на значенні 2148 ADU. Це представляє розподіл випадкового шуму темного струму.

Гістограма для кадру з витримкою 300с також містить цей пік, крім нього є ще вторинний пік праворуч від головного на відстані ~200 ADU, який представляє дещо іншу популяцію пікселів із

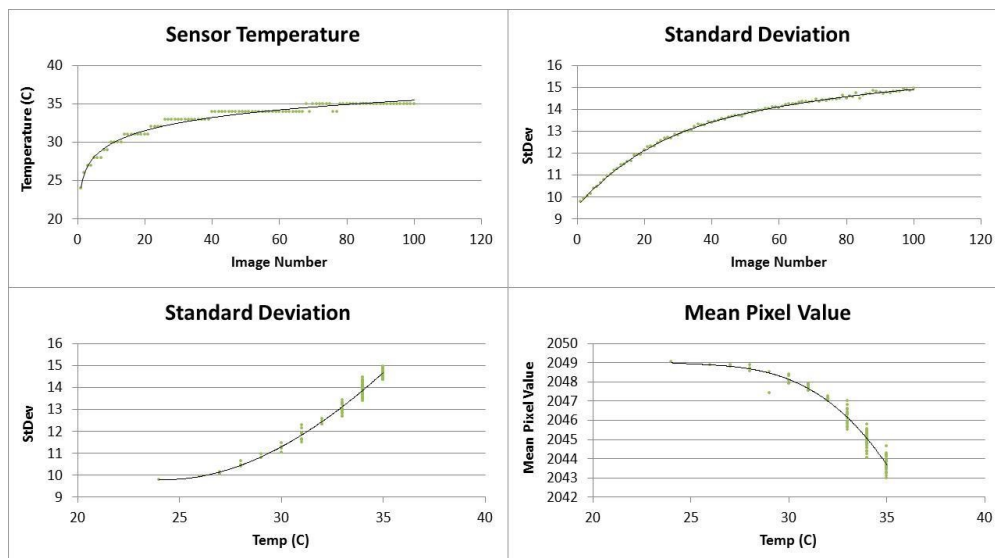
більшим темновим струмом. Ширина цих піків зростає зі збільшенням температури сенсору. Невелика кількість класичних гарячих пікселів (які демонструють значно більший темновий відгук, ніж більшість пікселів сенсору) лежить у правій частині гістограми.

Температурна стабільність

Стандартні DSLR-камери не мають активного охолодження, яке присутнє в астрономічних CCD-камерах. Температура сенсору залежить від температури довкілля та тепла, яке виділяє електроніка всередині камери. Ми можемо вивчити цей ефект, записуючи довгі серії темнових кадрів. Температура сенсору записується в інформаційному блоці EXIF зображення RAW, однак не всі програми можуть показати цю інформацію. Вільна програма для перегляду зображень IrfanView (доступна за адресою <http://www.irfanview.com/>) показує всі дані EXIF.

1. Оцініть максимальну очікувану експозицію основних зображень, скажімо, 8 с для камери, встановленої на штативі або 60 с для камери на монтуванні з трекінгом.
2. Зніміть 100 темнових кадрів, кожний з експозицією, визначеною на кроці 1
3. Визначте середнє значення пікселів, стандартне відхилення та температуру для кожного темного кадру
4. Побудуйте залежність температури сенсору від номеру зображення
5. Побудуйте залежність величини стандартного відхилення від номеру зображення
6. Побудуйте залежність величини стандартного відхилення від температури сенсору
7. Побудуйте залежність середнього значення пікселя від температури сенсору
8. Побудуйте залежність середнього значення пікселя від номеру зображення

Приклади для 60-секундних темнових кадрів з Canon 1100D з ISO 400 показані на графіках, наведених нижче:



Графік вгорі ліворуч показує, що температура швидко збільшується на початку серії зображень і досягає рівноважного значення після приблизно двох годин (100 зображень \times (60 + 10) [довжина експозиції плюс час на завантаження кадру]). Більш висока температура призводить до більшого темного струму та більшого стандартного відхилення й це підтверджується графіком вгорі праворуч та знизу ліворуч. Більший темновий струм має також призводити до збільшення середнього

значення пікселів із підвищенням температури, однак графік знизу праворуч явно показує зворотню тенденцію. Як це було описане в розділі “Темновий струм”, Крейг Старк приписує цю аномалію певній внутрішній обробці камерою, яка виконується, щоби компенсувати вплив температури, ця обробка застосовується навіть до RAW-зображень.

Додаток В: Перевірка рівномірності освітлення кадрів плоского поля (флетів)

Незалежно від методу, який використовується для отримання кадрів плоского поля, важливо перевірити, наскільки рівномірним є освітлення кадру. Зміна інтенсивності освітлення на один відсоток упродовж зображення може призводити до додаткової похибки вимірювання в приблизно 0,01 зоряної величини.

Простий спосіб перевірити рівномірність освітлення -- зробити майстер-кадри плоского поля з двох наборів зображень, другий набір зображень записується після повороту камери [разом з об'єктивом чи телескопом] (або лайтбоксу) на 90 градусів. Поділіть один майстер кадр на другий та виміряйте інтенсивність пікселів (значення ADU) упродовж діагоналей отриманого зображення (Рис В1). на профілі будуть присутні випадкові статистичні флуктуації, однак, в ідеалі, не має бути систематичного збільшення або зменшення інтенсивності впродовж профілю.

Один із прикладів наведений на Рис. В2, у цьому прикладі нерівномірне освітлення досягнуте видаленням однієї з восьми ламп із лайтбоксу. Графік праворуч демонструє систематичну зміну у 1% впродовж першої діагоналі (синій колір) та 0,2% впродовж другої діагоналі (червоний колір). Коли використовуються всі вісім ламп (графік ліворуч), систематична варіація впродовж першої діагоналі (синя) менша за 0,1%, однак упродовж другої діагоналі (червона) збільшується до 0,3%.

Ви маєте прагнути досягти систематичної варіації в освітленні різних ділянок майстер-кадрів плоского поля, меншої за 0,5%.

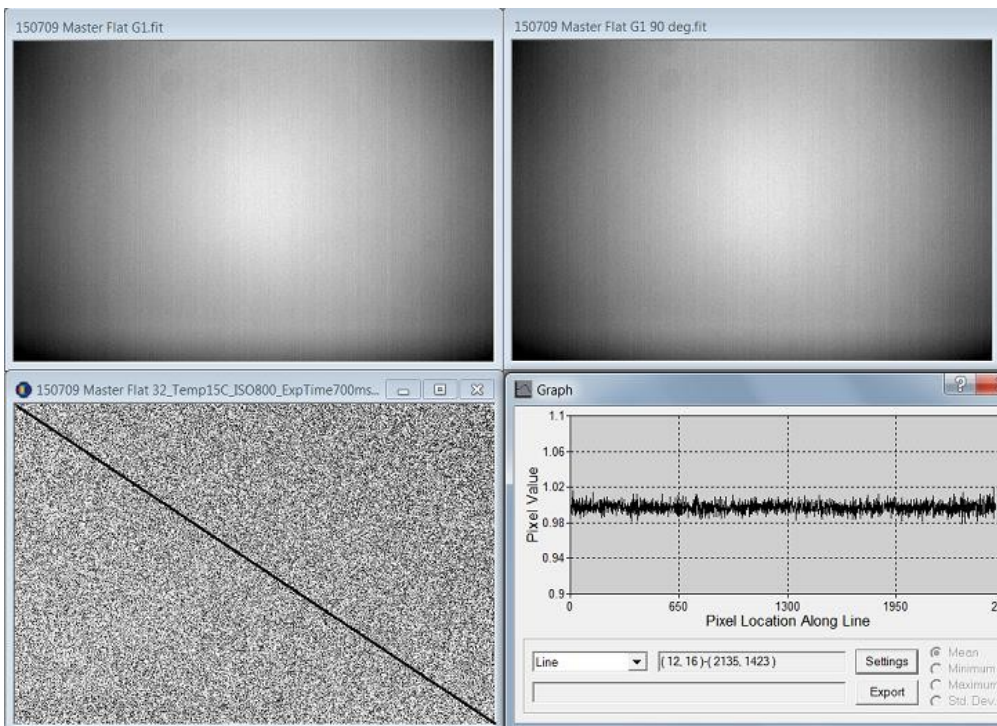


Рис В1. Зелений канал майстер-флету, знятий камерою, розгорнутою на 0° (згори ліворуч) та на 90° (згори праворуч) відносно лайтбоксу. На зображенні знизу ліворуч показаний результат ділення першого майстер-флету на другий. Знизу праворуч показаний профіль інтенсивності впродовж діагоналі. (Mark Blackford)

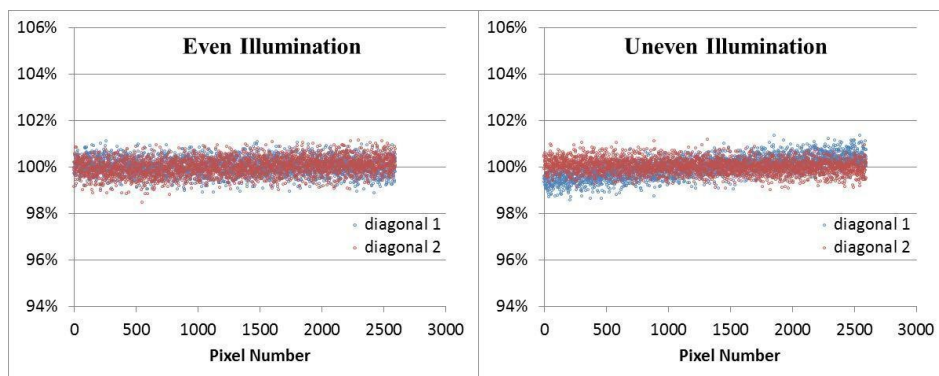


Рис. В2. Лінійні профілі, отримані діленням одного майстер-кадру на другий, як описано в тексті. Ліворуч: результати з рівномірно освітленого лайтбоксу. Праворуч: результати з нерівномірно освітленого лайтбоксу. (Mark Blackford)

Додаток С: Ілюстрація первинного, вторинного та диференційного атмосферного поглинання

(адаптовано зі статті: Mark Blackford, Variable Stars South Newsletter, October 2015)

Впливом атмосферного поглинання на CCD фотометрію з використанням телескопів із середніми та довгими фокальними відстанями можна, з певними застереженнями, знехтувати. Це не завжди так у випадку фотометрії з цифровими дзеркальними камерами (DSLR) зі стандартними телеоб'єктивами. Поле зору таких об'єктів порівняно широке й повітряна маса може бути досить різна для різних ділянок зображення. У статті автори намагаються пояснити деякі аспекти атмосферного поглинання та дати оцінку впливу цих ефектів на фотометрію з використанням типових комбінацій CCD/телескоп та DSLR/об'єктив.

Мабуть, найбільш очевидний ефект атмосферного поглинання -- це зменшення яскравості та почервоніння Сонця, коли воно заходить, подібним чином атмосфера впливає на зорі. Є низка чинників, що зумовлюють цей вплив: релєївське розсіювання, розсіювання на аерозолях, поглинання світла молекулами, головним чином, озоном. У нормальних атмосферних умовах превалює релєївське розсіювання на молекулах атмосферних газів.

Ступінь потемніння пропорційна довжині шляху світла крізь атмосферу (первинне поглинання). Світло з більш короткими хвилями (блакитніше) послаблюється сильніше, ніж світло з більшими довжинами хвиль. Крім того, показник кольору зорі також має додатковий невеликий вплив на ступінь потемніння (вторинне поглинання). У широкому полі зору зорі, що ближчі до обрїю, можуть мати значно більшу повітряну масу (тобто світло від них проходить більший шлях крізь атмосферу), ніж зорі далі від обрїю, тобто вони послаблюються в різний ступінь (диференційне поглинання). Нижче ми ілюструємо кожний із видів поглинання за допомогою часових рядів спостережень незмінних зір.

Первинне поглинання

У зеніті (зенітний кут $\zeta = 0^\circ$), повітряна маса, що відповідає шляху світла зорі крізь атмосферу, є, за визначенням, $X = 1$. Повітряна маса зростає разом зі зростанням зенітного кута ζ , на початку повільно, далі, з наближенням зорі до обрїю, усе швидше і швидше. На Рис. С1 показані необроблені інструментальні зоряні величини для кожного кольорового каналу DSLR для незмінної зорі як функція часу (горішня ліва панель) та як функція повітряної маси (горішня права панель). Якщо видимість (сінг [seeing]) незмінна та прозорість залишається тією ж самою впродовж ночі (фотометричної ночі), виміряна інструментальна зоряна величина буде лінійною функцією повітряної маси, як показано на графіку.

У першому наближенні нахил прямої дорівнює коефіцієнту первинного поглинання, він найбільший для найкоротших (тобто, більш синіх) довжин хвиль. Це краще видно на нижньому лівому графіку на рис. С1, на графіку подані інструментальні величини, приведені до величини 0 за $X = 0$, тобто за відсутності атмосфери (над атмосферою). Видно, що, навіть у зеніті, зоря затемнюється на 0,181, 0,220 та 0,296 величини в червоному, зеленому та синьому каналі, відповідно. Кожен фільтр має свій власний коефіцієнт первинного поглинання, який є функцією ефективної довжини хвилі фільтру. Це призводить до збільшення індексу кольору зорі (почервонінню) зі збільшенням повітряної маси (нижня права панель на Рис. С1).

Коефіцієнт первинного поглинання може змінюватися від ночі до ночі, навіть упродовж однієї ночі, зі зміною атмосферних умов. Основною причиною змін є зміни вмісту атмосферних аерозолів, тобто пилу, диму, водяних крапель, тощо.

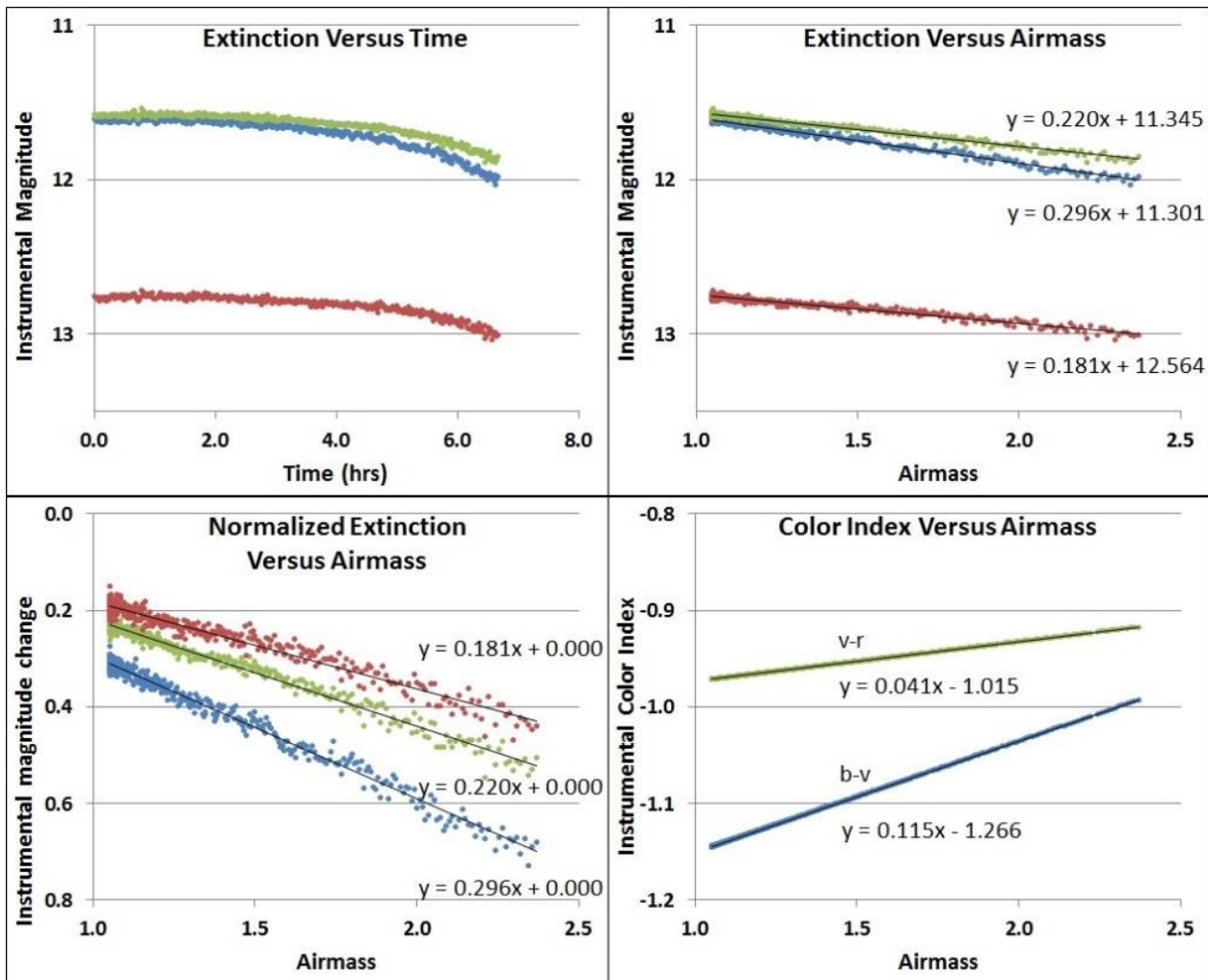


Рис С1. Вгорі ліворуч: Зміна інструментальної зоряної величини з часом, коли висота зорі над обрієм зменшується. Кольори відображають червоний, зелений та синій канали цифрової камери. **Вгорі праворуч:** Ті ж самі дані, побудовані, як функція від повітряної маси. **Знизу ліворуч:** Ті ж самі дані, приведені до величини 0, коли повітряна маса = 0, тобто, над атмосферою. **Знизу праворуч:** Зміна інструментальних індексів кольору (b-v) та (v-r) зі збільшенням повітряної маси. (Mark Blackford)

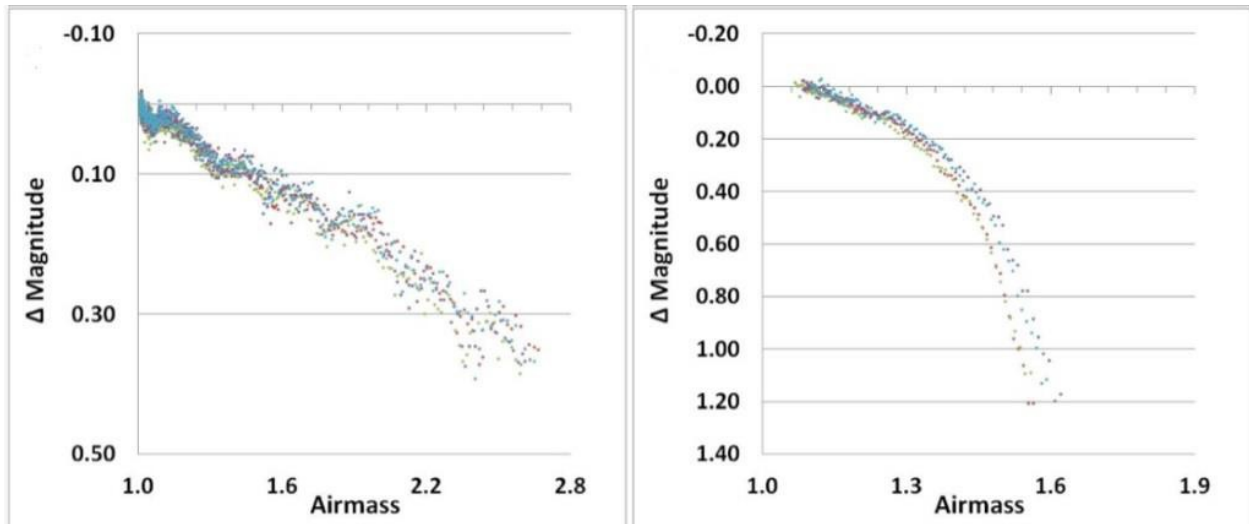


Рис С2. Зміна нормалізованої необробленої інструментальної величини, побудована як функція повітряної маси для двох ночей із різною прозорістю. **Ліворуч:** Впродовж сесії через поле зору проходили тонкі перисті хмари. **Праворуч:** Поглинання поступово зростає через збільшення густини диму. (Mark Blackford)

На Рис. С2 показані два приклади атмосферного поглинання для двох ночей зі змінною прозорістю. Аналітик-спостерігач має вирішити, чи прийнятні невеликі флуктуації прозорості перед застосуванням коефіцієнтів поглинання. Диференційна фотометрія з використанням некорегованих даних, отриманих у нефотометричні ночі, може дати менш точні, однак усе ж такі корисні вимірювання.

Вторинне поглинання

Вторинне поглинання залежить як від повітряної маси, так і індексу кольору зорі, що є наслідком кінцевої ширини спектральних кривих пропускання ширококутних RGB-фільтрів цифрових камер та фотометричних фільтрів CCD.

На Рис. С3 показані смуги пропускання зеленого фільтру цифрової камери та узагальнені криві розподілу енергії для блакитної та червоної зорі. З обговорення вище виходить, що більш короткі хвилі зазнають більшого ослаблення, тому блакитні зорі затемнюються трохи більше за червоні. Різні фільтри мають свої власні коефіцієнти вторинного поглинання.

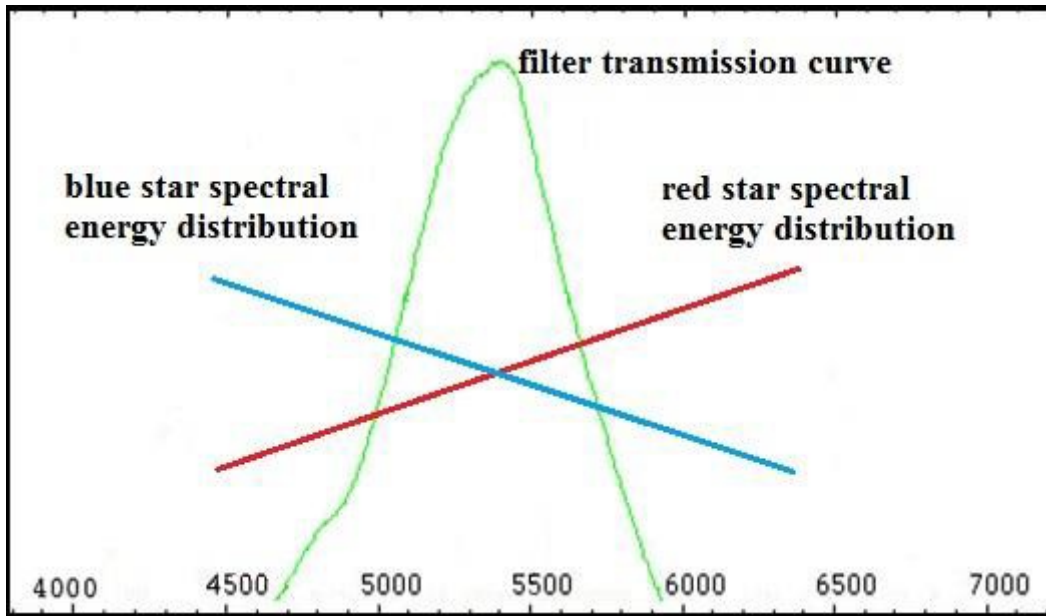


Рис С3. Схематичне зображення смуги пропускання широкополосного фільтру та розподілу енергії в спектрі червоної та блакитної зорі. (Mark Blackford)

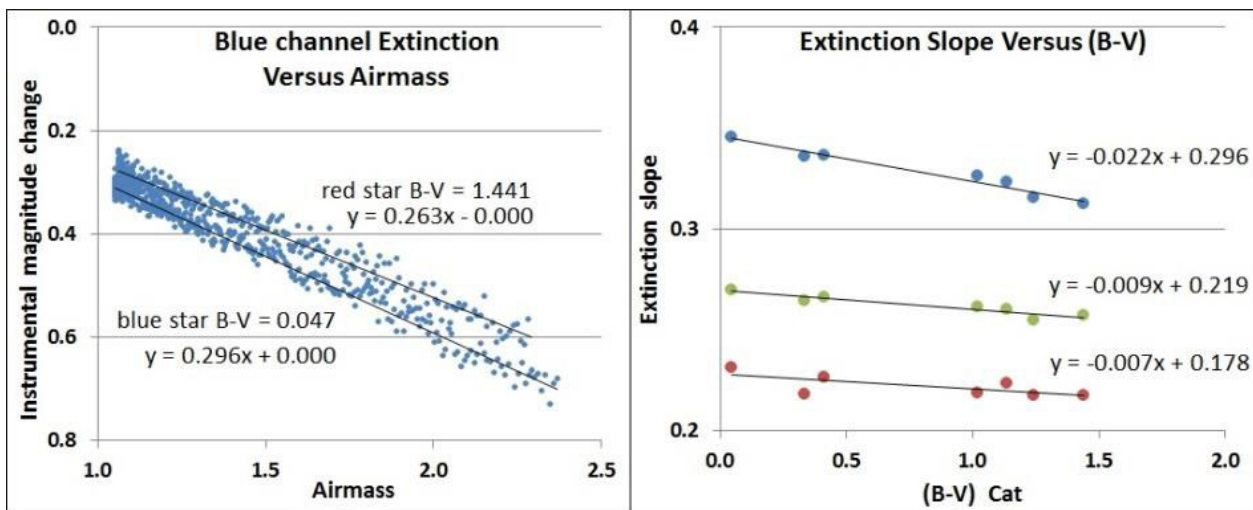


Рис С4. Ліворуч: Нормалізоване поглинання синього каналу для червоної та блакитної зорі на одній і тій самій серії зображень. Помітна різна ступінь поглинання (різні нахили прямих). **Праворуч:** Графік залежності ступеня поглинання від каталожного індексу кольору (B-V) для кожного з кольорових каналів. (Mark Blackford)

Графік ліворуч на Рис. С4 показує нормалізовану інструментальну величину синього каналу для червоної (B-V) = 1,441 та блакитної (B-V) = 0,047 зір як функцію від повітряної маси для кожної зорі, виміри проводилися на одних і тих самих зображеннях. Різниця в нахилі прямих є результатом вторинного поглинання.

Графік праворуч на рис. С4 показує залежність нахилу апроксимуючої прямої інструментальної величини як функції повітряної маси (extinction slope) від індексу кольору (B-V) для 7 незмінних зірок, виміри проведені на тих самих рядах зображень. Усі три кольорові канали показують невелику, однак помітну залежність від індексу кольору, синій канал демонструє найбільшу залежність.

Коефіцієнт вторинного поглинання є нахилом апроксимуючих прямих, коефіцієнт первинного поглинання визначається точкою перетину з віссю y .

Коефіцієнт вторинного поглинання (позначається k'') має бути приблизно постійним, якщо характеристики зображуючої системи залишаються незмінними (не змінюються фільтри, об'єктиви, сенсори, тощо).

Диференційна повітряна маса

Якщо всі зорі на зображенні мали б одну й ту ж саму повітряну масу та індекс кольору, вони б втрачали в яскравості однаково, бо світло від них проходило би шлях крізь атмосферу однакової довжини. У такому разі первинне та вторинне поглинання не становило би проблеми. Фотометрія у вузькому полі зору є наближенням до цього випадку, якщо зорі порівняння мають значення $(B-V)$ близьке до індексу кольору змінної зорі, яка досліджується.

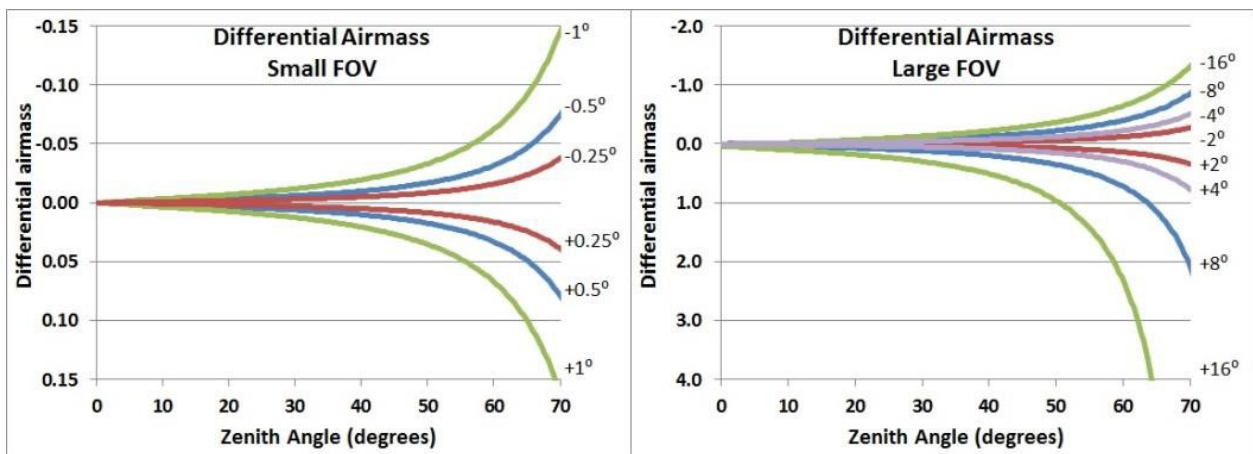


Рис С5. Ліворуч: Диференційна повітряна маса як функція зенітного кута першої зорі для типового поля зору телескопу. **Праворуч:** Те ж саме, однак для типового поля зору фотооб'єктиву цифрової камери. (Mark Blackford)

На лівій частині Рис. С5 показана різниця повітряних мас зірок, рознесених на кутову відстань, вказану на правій вертикальній вісі, залежно від зенітного кута першої зорі. Криві, помічені позитивними кутами, відповідають випадку, коли друга зоря знаходиться на захід від першої. Негативні кути відповідають другій зорі, яка розташована на схід від першої.

Диференційна повітряна маса, ΔX , зростає, коли зорі рухаються від зеніту до обрію, величина диференційної повітряної маси лише 0,07 для кутовій відстані 1° та $\zeta=60^\circ$. Величина ΔX навіть менша для менших кутових відстаней між зорями, характерних для полів зору телескопів із середніми та довгими фокусними відстанями.

Справи не такі добрі для широких полів зору, які характерні для фотометрії з цифровими дзеркальними камерами та стандартними, або телеоб'єктивами, як видно з графіку в правій частині рис. С5. Для кутової відстані між зорями $+16^\circ$ та $\zeta=60^\circ$ диференційна повітряна маса ΔX дорівнює $\sim 2,5$.

Диференційне поглинання: підбиваючи підсумки

Тож що це все значить для DSLR-фотометрії, наскільки сильно диференційне поглинання впливає на інструментальні зоряні величини, виміряні на широкому полі зору?

1. Випадок широкого поля зору

Візьмемо типовий випадок: об'єктив із фокусною відстанню 100мм та камеру із сенсором розміру APS-C (14,9 x 22,3мм). Поле зору такої системи буде 8,5° на 12,7°. Якщо цільова зоря має зенітний кут 60° та розташована в центрі зображення, то зоря порівняння може бути на відстані аж до 7° в куті кадру. З Рис. С5 ми можемо оцінити максимальну різницю в повітряних масах $\Delta X \sim 0,6$.

З Рис. С4 ми отримуємо такі коефіцієнти первинного поглинання для кожного кольорового каналу:

$$K^b = 0,296 \text{ mag/airmass}$$

$$K^v = 0,219 \text{ mag/airmass}$$

$$K^r = 0,178 \text{ mag/airmass}$$

Отже, диференційне первинне поглинання буде:

$$\Delta^b = 0,296 \times 0,6 = 0,178 \text{ mag}$$

$$\Delta^v = 0,219 \times 0,6 = 0,131 \text{ mag}$$

$$\Delta^r = 0,178 \times 0,6 = 0,107 \text{ mag}$$

Диференційне вторинне поглинання буде дорівнювати нулю, якщо обидві зорі мають однаковий колір. Однак, якщо, наприклад, одна з зір буде мати $(B-V) = 1,100$, а друга $(B-V) = 0,600$, тобто $\Delta(B-V) = 0,500$.

З Рис. С4 визначаємо коефіцієнти вторинного поглинання:

$$K''^b = 0,022 \text{ mag/airmass}/\Delta(B-V)$$

$$K''^v = 0,009 \text{ mag/airmass}/\Delta(B-V)$$

$$K''^r = 0,007 \text{ mag/airmass}/\Delta(B-V)$$

Отже, диференційне вторинне поглинання буде:

$$\Delta''^b = 0,022 \times 0,6 \times 0,500 = 0,007 \text{ mag}$$

$$\Delta''^v = 0,009 \times 0,6 \times 0,500 = 0,003 \text{ mag}$$

$$\Delta''^r = 0,007 \times 0,6 \times 0,500 = 0,002 \text{ mag}$$

Поглинання другого порядку (вторинне) має значно менший вплив, ніж первинне.

Повне диференційне поглинання в цьому випадку в цю конкретну ніч буде 0,185, 0,134 та 0,109 величин для синіх, зелених та червоних інструментальних величин, відповідно. Очевидно, що ми маємо зробити поправку щонайменше на первинне диференційне поглинання.

2. Випадок вузького поля зору

Тепер розглянемо випадок, коли змінна та зоря порівняння рознесені на $0,25^\circ$, що типово для фотометрії з використанням телескопу та CCD. Усі інші припущення та коефіцієнти поглинання залишимо тими самими. З Рис. С5 оцінюємо ΔX як $\sim 0,02$.

Отже, диференційне первинне поглинання буде дорівнювати:

$$\Delta'b = 0,296 \times 0,02 = 0,006 \text{ mag}$$

$$\Delta'v = 0,219 \times 0,02 = 0,004 \text{ mag}$$

$$\Delta'r = 0,178 \times 0,02 = 0,004 \text{ mag}$$

А диференційне вторинне поглинання:

$$\Delta''b = 0,022 \times 0,02 \times 0,500 = 0,00022 \text{ mag}$$

$$\Delta''v = 0,009 \times 0,02 \times 0,500 = 0,00009 \text{ mag}$$

$$\Delta''r = 0,007 \times 0,02 \times 0,500 = 0,00007 \text{ mag}$$

Диференційним вторинним поглинанням можна знехтувати, корекція на первинне поглинання необхідна лише у випадках, коли фотометрія вимагає найвищу точність.

Резюме

Зазвичай, диференційне поглинання не становить проблеми у випадку вузьких полів зору ($< 0,5^\circ$), якщо зорі порівняння мають приблизно той самий колір, що й цільова змінна, і не дуже низько над обрієм. З іншого боку, у випадку широкого поля зору, що типово для фотометрії з цифровими дзеркальними камерами, диференційне поглинання може бути доволі значним та має бути скореговане.

Додаток D: Зоряні зображення всередині та поза фокусом

На рисунку нижче показані зображення зорі всередині фокусу (фокус за матрицею) та поза фокусом (фокус перед матрицею), отримані за допомогою об'єктива Canon 200mm F2.8L. Зображення розділене на окремі кольорові канали, ліворуч -- червоний, далі зелений 1 та зелений 2, червоний праворуч.

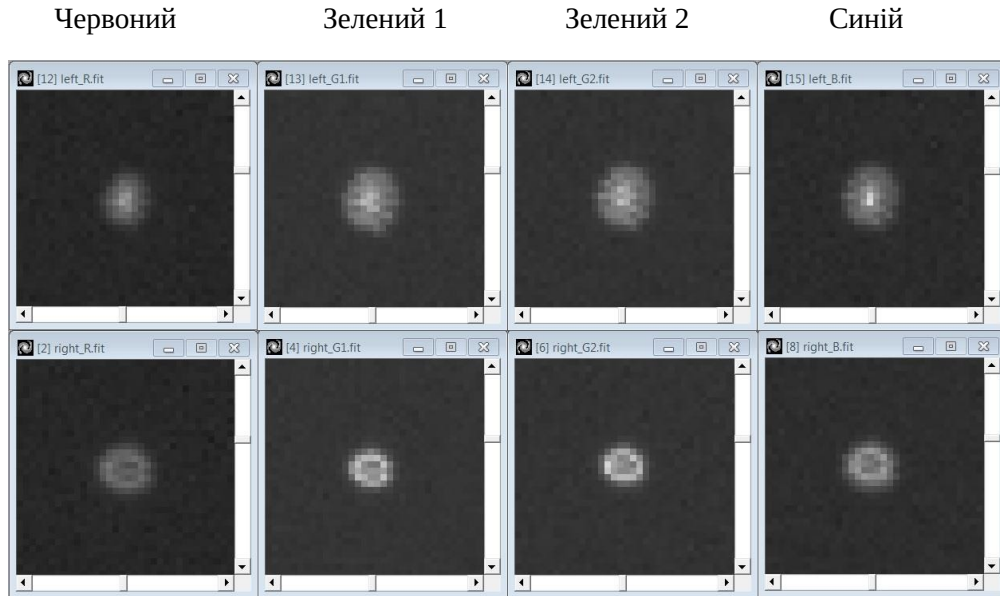


Рис D1: Форма зображення зорі всередині фокусу (горішній рядок) та поза фокусом (нижній рядок); зображення отримані з об'єктивом Canon 200mm F2.8L. (Mark Blackford)

Положення всередині фокусу (фокус за матрицею) призводить до появи яскравого центрального піку та широкої “спідниці” або гало, у той час як положення поза фокусом (фокус перед матрицею) призводить до появи яскравого кільця у формі бублика. Зображення в різних кольорах має дещо різні розміри та різкість.

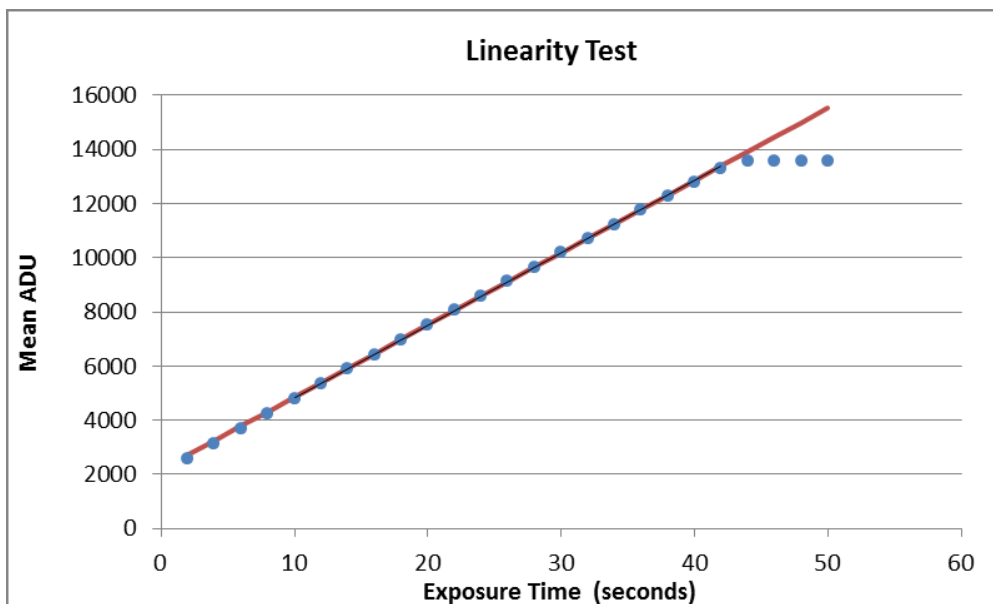
Я [автор додатку] виявив, що фотометрію з цим об'єктивом краще проводити на зображеннях, отриманих у положенні всередині фокусу і використовувати достатньо коротку витримку, щоби запобігти насиченню центрального піку.

Об'єктиви інших конструкцій будуть показувати іншу форму зображень всередині та поза фокусом. Ви маєте протестувати кожний об'єктив, який ви маєте намір використовувати, щоби визначити відповідне налаштування фокусу для DSLR-фотометрії.

Додаток Е: Перевірка лінійності

Процедура, описана нижче, є модифікацією подібної процедури, описаної у “InfoBox 3.1 – Як визначити лінійність вашої камери” в Керівництві з CCD фотометрії від AAVSO V1.1 (доступне до завантаження за посиланням <https://aavso.org/ccd-camera-photometry-guide>).

1. Встановіть джерело світла, освітивши білий екран. Нема потреби, щоб освітлення екрану було ідеально рівномірним, важлива стабільність яскравості. Ідеально підійдуть лайтбокси або електролюмінесцентні панелі з регульованою яскравістю.
2. Встановіть режим камери у RAW та ISO 100.
3. Надійно встановіть камеру так, щоби вона була направлена в одне й те саме місце екрану впродовж тестування.
4. Відрегулюйте яскравість екрану та/або встановіть таке значення діафрагми, щоби зелений канал тільки не починав насичуватися за експозиції, скажімо, у 40 секунд.
5. Зробіть серію зображень, починаючи з експозиції у 2 секунди з інкрементом 2 секунди (тобто 2, 4, 6, 8, і так далі) аж до кілька кроків за насиченням.
6. Повторіть послідовність ще два рази, щоби зробити по три зображення для кожної експозиції.
7. Заміряйте середнє значення ADU пікселів однакового для всіх зображень центрального регіону (скажімо, розміром 200 x 200 пікселів).
8. Якщо ваше джерело світла стабільне, усі три виміри мають дати дуже близькі результати. Якщо це не так, тест лінійності не буде дійсним.
9. Зробіть усереднення для кожної експозиції та побудуйте середнє значення ADU як функцію від часу експозиції. З цього графіку ви зможете визначити, коли ваша камера починає насичуватися та чи є будь-яка нелінійність сенсору. Рівень насичення для DSLR з цього прикладу для ISO 100 є приблизно 13500 ADU.

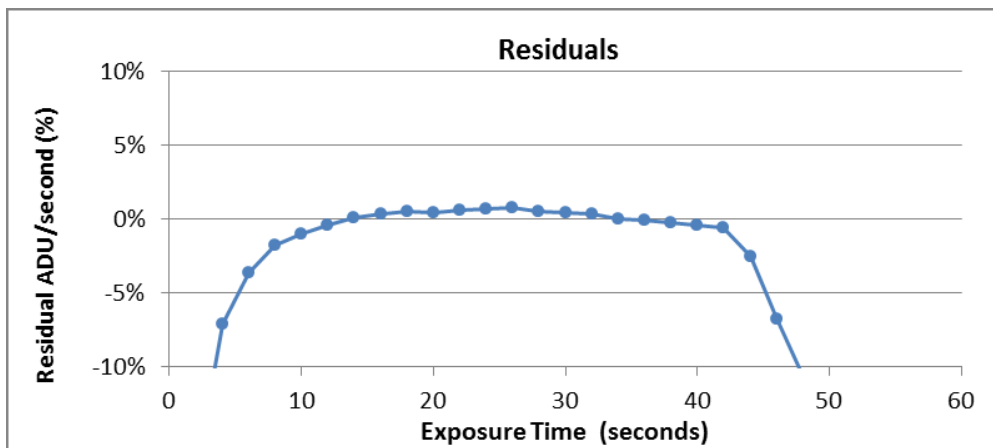


6. Далі ми обрахуємо дані для іншого корисного графіку, який покаже більш явно будь-які відхилення від ідеальної лінійності. На графіку, наведеному вище, пряма перетинає вісь у на значенні 1896,7.

Віднімемо це значення від середніх значень ADU для всіх експозицій, а потім поділимо ці значення на час експозиції в секундах. Це дасть нам значення ADU за секунду, яке має бути константою, якщо джерело світла стабільне і відгук детектору лінійний.

7. Далі обираємо одну з точок на лінійній ділянці графіку, який наведений вище, як опорну точку, наприклад, на 30 секундах, тобто 276,0 ADU за секунду. Віднімемо опорне значення від вимірних значень для кожної експозиції; це буде залишкове значення. Тепер поділимо це залишкове значення на опорне та отримуємо результат у форматі відсотків.

8. Побудуємо залишкове значення у відсотках від опорного як функцію від часу експозиції. Лінійний діапазон сенсору там, де залишкове значення близько до 0% (між 10 та біля 42 секунд на графіку, наведеному вище).



Від'ємне відхилення після 42 секунд виникає внаслідок насичення сенсору. Від'ємне відхилення за експозицій, менших за 10 секунд, можливо, виникає внаслідок того, що справжній час відкриття затвору трохи менший за встановлене значення. Тож для цієї конкретної цифрової камери та інтенсивності світла буде безпечно використовувати експозиції між 10 та 42 секундами, що відповідає рівням ADU від 4800 до 13300, відповідно.