

Співвідношення Хаббла

Мета

Навчитися знаходити співвідношення між червоним зміщенням ліній у спектрах віддалених галактик і швидкістю розширення Всесвіту.

Завдання

Отримати спектри та видимі зоряні величини галактик на модельному спектрометрі.

Визначити відстані до них на основі знань про видимі та абсолютні їх величини.

Виміряти доплерівський зсув H та K ліній у спектрі для визначення їх швидкостей.

Обчислити швидкість розширення Всесвіту.

Обчислити вік Всесвіту.

Деякі терміни, знання яких обов'язкове

Ангстрем	Абсолютна величина	Видима величина	Довжина хвилі
Доплерівський зсув	Закони випромінювання	Закон Віна	Закон Планка
Інтенсивність	Континуум	Лінії поглинання	Міжзоряне поглинання
Модуль відстані	Спектр	Спектрометр	Спектральні лінії
Стани іонізації	Температура	H	K

Вступ

Відомий біолог Дж.Холдейн (1860-1936, праці з фізіології дихання, кессонній та висотній хворобах) якось сказав: “Всесвіт не тільки дивніший, ніж ми уявляємо, він дивніший навіть, ніж ми можемо уявити”. Одна з найдивніших речей про Всесвіт полягає в тому, що фактично всі галактики в ньому (за виключенням деяких найближчих) рухаються від нашої Галактики, Молочного Шляху. Цей цікавий факт вперше був відкритий на початку 20-го століття астрономом Весто Слайфером, який помітив, що лінії поглинання в спектрах більшості спіральних галактик мають більші довжини хвиль (“червоніші”), ніж такі ж лінії нерухомих об’єктів. Припустивши, що червоне зміщення викликане ефектом Доплера, Слайфер дійшов висновку, що всі галактики з червоним зміщенням рухаються від нас.

В двадцятих роках Едвін Хаббл вперше вимірював відстані до галактик. Коли він відклав на графіку ці відстані в залежності від швидкості кожної галактики він помітив ще дещо, що було значно дивніше: чим далі галактика від Молочного Шляху, тим швидше вона рухається від нас, рис.7 (див. дискету, файл Figs\Pic07.gif). Що ж таке з нашим місцем у просторі, що робить його центром всезагального відштовхування?

Астрофізики були готові проінтерпретувати співвідношення Хаббла як доказ загального розширення Всесвіту. Відстані між всіма галактиками у Всесвіті збільшуються з часом, подібно до родзинок у зростаючій з тіста у печі хлібині. Спостерігач у будь-якій, не тільки нашій Галактиці, побачить що галактики розбігаються, і більш далекі галактики біжать швидше.

Це було надзвичайне відкриття. Розширення Всесвіту, як вважають зараз, є результатом “Великого Вибуху”, який стався між 10 та 20 мільярдами років тому, у момент, який можна обчислити, виконавши вимірювання, подібні до хабблових. Швидкість розширення Всесвіту розповідає нам, як довго він уже розширюється. Ми визначимо швидкість розширення, будуючи графік залежності швидкості галактик від відстані, і визначивши нахил прямої, яка відбиває цю залежність. Цю величину прийнято називати сталою Хаббла, H_0 . Вона показує як швидко віддаляється від нас галактика, що знаходиться на заданій відстані. Відкриття Хабблом кореляції між швидкістю та відстанню до галактик, має фундаментальне значення для заглиблення в історію Всесвіту.

Використовуючи сучасні методи цифрової астрономії, ми повторимо експеримент Хаббла. Методика, яку ми використаємо, була основною в космологічних дослідженнях тих часів. Але хоча з часу експериментів Хаббла пройшло три чверті століття, ми навіть зараз маємо виміряні швидкості та відстані лише для дуже невеликого відсотка видимих галактик. Цих даних дуже мало для того, щоб вивести, чи залежить стала Хаббла від місця та напрямку у просторі.

Метод

Програма для лабораторної роботи дозволяє вам імітувати спостереження з великим оптичним телескопом, обладнаним телекамерою та електронним спектрометром. Використавши це обладнання ви повинні визначити відстань та швидкість для кількох галактик, розташованих у вибраних скупченнях по цілому небу. З цих даних ви повинні побудувати графік залежності швидкості (ордината) від відстані (абсциса).

Ось як працює це обладнання. Приєднана до телескопа телекамера дозволяє вам бачити галактики та “вести” їх так, щоб їх світло попадало на щілину спектрометра. Далі вмикаємо спектрометр який починає збір фотонів від галактики. На екрані відтворюється спектр – залежність інтенсивності світла від довжини хвилі. Як тільки буде зібрано достатню кількість фотонів, ви зможете побачити чіткі галактичні спектральні лінії (H та K кальцію), і зможете виміряти їх довжини хвиль, використавши можливості програми. Довжини хвиль будуть більшими, ніж довжини хвиль H та K, виміряні для нерухомих об’єктів (3970 \AA та 3933 \AA), оскільки галактика віддаляється від нас. Спектрометр також

вимірює видиму зоряну величину галактики, виходячи з інтегрального потоку фотонів від галактики. Отже, для кожної галактики ми матимемо спостережні значення довжин хвиль H та K ліній та видиму зоряну величину.

З цих даних ми можемо обчислити швидкість галактики (виходячи з закону Доплера), відстань до неї, порівнюючи знайдену видиму зоряну величину з абсолютною величиною типової галактики (-22^m). Результати, як правило, це швидкість у км/сек, та відстань у Мпс. Вибрані для спостереження скупчення галактик розташовані на різних відстанях від Молочного Шляху, що дає вам можливість побудувати велику частину прямої лінії, побудованої вперше Хабблом. Нахил цієї лінії дасть нам значення H_0 , так званої сталої Хаббла, що є мірою швидкості розширення Всесвіту. Це значення дає нам змогу обчислити вік Всесвіту.

Процедура

Ви працюєте у модельній обсерваторії, і повинні провести спостереження з метою збору даних для визначення швидкості розширення Всесвіту. Для цього необхідно провести спостереження принаймні чотирьох – п’яти об’єктів. Далі потрібно проаналізувати ці дані, сформулювати свої висновки, і скористатись ними для оцінки віку Всесвіту.

Збір даних

У основному вікні роботи доступними пунктами меню є **Start** та **Quit**. Вибирайте **Start** та починайте роботу. Програма моделює керований комп’ютером спектрометр, приєднаний до телескопа на великій гірській обсерваторії. За своєю побудовою ця програма досить реалістична і призначена для того, щоб ви могли відчути справжню серйозну роботу астронома – спостерігача. На екрані комп’ютера маємо панель управління та вікно зображення, так, як воно звичайно виглядає в “теплій кімнаті” обсерваторії. Зверніть увагу, що купол (**dome**) закритий, а годинниковий механізм (**tracking**) вимкнений.

Спочатку відкрийте купол (**dome**). Купол відчиняється і у вікні зображення ви бачите те, що “бачить” гід телескопа, рис.8. (див. дискету, файл Figs\Pic08.gif). Цей маленький телескоп направлений у тому ж напрямку, що і головний телескоп. Оскільки поле зору гіда значно більше, ніж поле зору основного телескопа, він, як правило, використовується для початкової установки на об’єкт. У його полі зору встановлена ПЗЗ-камера, зображення знімається з неї та передається на дисплей. Отже, астроному зовсім не потрібно шукати об’єкт, заглядаючи у окуляр гіда). Знайдіть кнопку **Monitor** на панелі

управління та зверніть увагу на її стан; як правило, нею встановлено поле зору гіда (Finder у текстовому полі трохи нижче, ніж кнопка).

Як бачимо, зірки рухаються у полі зору. Це відбувається внаслідок добового обертання Землі. При великих збільшеннях це явище буде дуже заважати. Тому ввімкніть годинниковий механізм (**tracking**). Тепер зірки залишатимуться у полі зору телескопа а також на щілині спектрометра і не будуть “втікати” з нього внаслідок добового руху неба.

Отже, телескоп слідкує за добовим рухом неба. Перед тим, як почати реєстрацію спектра, виберемо поле для спостереження (одне вже вибране), а у ньому виберемо об’єкт для дослідження.

Щоб побачити поле, призначене для вечірніх спостережень, виберіть пункт меню **Change field**. Ви отримаєте список полів галактик, доступних для досліджень. Для модельних спостережень підготовлено п’ять полів з галактиками. Ви повинні провести спостереження по одній галактиці з кожного з п’яти полів (загалом 5 галактик). Щоб побачити як телескоп працює змініть поле на Ursa Major II, за його координатами $\alpha = 11^h 00^m$, та $\delta = 56^\circ 48'$. Переконайтесь, що телескоп встановлюється на вказані координати. Вікно показує те, що в цей момент бачить ПЗЗ камера, приєднана до телескопа.

Це вікно має два збільшення: **Finder View** - це поле зору гіда (2.5°), широке поле, хрест ниток, рамка, що показує поле основного інструмента, та **Spectrometer View** - поле зору основного інструмента ($15'$) з червоними лініями, що вказують на положення щілини спектрометра. Зображення яскравих галактик легко виділити на зображеннях нічного неба, на яких зірки є точковими об’єктами. Але от далекі, слабкі галактики можуть бути подібними до зірок, тому що ми не можемо бачити їхньої форми.

Тепер виберіть поле **Ursa Major I** після чого натисніть на **Ok**.

Знайдіть кнопку **Monitor** у лівій нижній частині екрана. Натисніть цю кнопку і замініть поле зору гіда на поле зору спектрометра. Акуратно встановіть щілину спектрометра на об’єкт, який ви плануєте дослідити – довільну з галактик, видимих у полі зору. Зробіть це користуючись кнопками **N**, **S**, **E**, **W**. Натискати кнопки треба за допомогою миші. Більше того, телескоп рухається тільки тоді, коли одна з цих кнопок натиснута. Червоні кружечки біля кнопок вказують напрямок, у якому відбувається рух. Якщо телескоп рухається надто повільно, швидкість можна змінити кнопкою **Slew rate**.

Як і під час проведення справжніх спостережень, цей процес потребує деякого досвіду і терпіння. Якщо ви закінчили встановлювати телескоп, натисніть кнопку **take reading** у правій частині екрана.

Чим більше світла попадає на щілину спектрометра, тим сильніший сигнал на виході і тим менше потрібно часу для отримання придатного для роботи спектра. Постарайтесь встановити щілину на найяскравішу частину галактики. Якщо щілина буде на слабкій ділянці зображення галактики, ви зможете отримати спектр, але для цього знадобиться значно більше часу. Якщо ж щілина виявиться за межами зображення галактики, ви отримаєте спектр нічного неба, який буде в основному випадковим шумом.

Отже, отримуємо спектр галактики, зображення якої перетинає щілина спектрометра. В ньому обов'язково будуть характерні лінії H та K іонізованого кальцію, які знаходяться на довжинах хвиль 3968.847 Å та 3933.67 Å відповідно, за умови, що галактика нерухома. Однак, лінії H та K в спектрі галактики будуть зсунуті у область більших довжин хвиль, залежно від того, наскільки швидко галактика віддаляється.

Фотони збираються один за одним. Щоб правильно ідентифікувати лінії ми мусимо зібрати досить велику кількість фотонів, для цього необхідно накопичувати їх протягом певного часу. Це дозволить виміряти спектр досить точно, що в свою чергу дозволить зробити необхідні висновки. Чим більше зібрано фотонів, тим менший рівень шуму у спектрі і тим легше ототожнити лінії поглинання. Керуйте процесом збору фотонів кнопкою **Start/Resume Count**.

Щоб зупинити лічбу фотонів і побачити результат, натисніть кнопку **stop count**. Комп'ютер нанесе спектр на графік, базуючись на отриманій інформації. Ця ж кнопка переводить курсор у режим вимірювання: курсор миші розташовують на довільній точці спектра, натискають та утримують ліву кнопку. При цьому курсор міняє свою форму на хрест і внизу вікна з'являється інформація про точку спектра з вказаною довжиною хвилі, рис.9 (див.дискету, файл Figs\Pic09.gif).

У нижній частині вікна також з'являється інша інформація:

Object - назва об'єкта, що вивчається.

Apparent magnitude - видима зоряна величина об'єкта у смузі V.

Photon Count - загальне число зібраних фотонів, середнє їх число на піксель.

Integration (seconds) - тривалість інтервалу збирання фотонів, або час експозиції.

Wavelength (Å) - довжина хвилі, на якій стоїть курсор.

Intensity - відносна, або нормалізована інтенсивність спектра в позиції курсора.

Signal to Noise Ratio (S/N) – відношення сигнал/шум - міра якості отриманих даних. Добийтеся того, щоб це відношення було не менше 10. Для слабких галактик це може зайняти досить довгий час.

Збирайте фотони поки на спектрі не буде добре видно лінії H та K іонізованого кальцію. Ці дві лінії знаходяться на віддалі близько 40 Å одна від одної. Як правило, вони

добре помітні на фоні шуму. Вам ще потрібна інформація, якої немає у вікні спектрометра: абсолютна величина всіх галактик, спектри яких отримувались, лабораторні довжини хвилі лінії К (3933.67Å) та Н (3968.847Å).

Запишіть отримані значення: назву об'єкта, кількість фотонів, видиму величину та виміряні довжини хвиль ліній у таблицю. Очікується, що лінії Н та К будуть зміщені у червону область спектра.

Опрацювання результатів

Теорія

Тепер ви вже вмiєте користуватись телескопом, щоб збирати інформацію. Знайдемо для кожної галактики відстань та швидкість. Для цього скористаємося співвідношеннями:

$$M = m + 5 - 5 \log D, \quad \text{або} \quad \log D = (m - M + 5) / 5, \quad (\text{a})$$

тут m - видима величина галактики (знаходиться),

M - абсолютна величина, (приймається рівною -22^m для типової галактики),

D - відстань, пс.

$$v_H = c \Delta \lambda_H / \lambda_H \quad \text{і} \quad v_K = c \Delta \lambda_K / \lambda_K \quad (\text{b})$$

Як бачимо, для знаходження швидкості треба виміряти $\Delta \lambda$:

$$\Delta \lambda_{H,K} = \lambda_{H,K}^m - \lambda_{H,K}^l \quad (\text{c})$$

де індекс m для виміряних, а l для лабораторних значень.

Завдання

Використавши модельний телескоп, виміряйте та запишіть довжини хвиль ліній Н та К кальцію для однієї галактики в кожному з запропонованих для спостереження полів. Не забудьте записати назву об'єкта, його видиму величину, кількість фотонів. Закругліть числа до двох десяткових знаків. Зберіть досить фотонів (десь близько 40000), щоб точно визначити довжину хвилі.

Взявши видимі та абсолютні величини, обчисліть відстані до галактик. Виразіть їх у парсеках.

Визначіть та запишіть зміщення довжин хвиль для Н та К ліній.

За законом Доплера знайдіть швидкість кожної з галактик за кожною з ліній.

Швидкість руху галактики покладіть рівною середньому арифметичному значенню за двома лініями.

Нанесіть значення на діаграму. Абсциса – відстань у Мпс, ордината – швидкість у км/сек. Знайдіть сталу Хаббла методом найменших квадратів, вважаючи залежність лінійною.

Визначення віку Всесвіту

Цю частину роботи не будемо описувати детально, а покажемо тільки принцип. Маючи галактику на деякій віддалі, ми одночасно маємо її швидкість віддалення від нас. Задачу визначення віку Всесвіту, фактично можна перефразувати так: якщо зараз швидкість відома і відомий закон її зміни з відстанню, то коли почався цей рух?

Усі математичні викладки та обчислення проведіть самостійно. Свій результат та аргументи і коментарії сформулюйте письмово.

Для більш детального ознайомлення з предметом познайомтесь з роботами [8,9,10].