

Великомасштабна структура Всесвіту

Мета

Навчитися використовувати спостереження червоних зміщень галактик разом з їхніми координатами на небі для отримання тривимірної карти найближчої області неба. Зрозуміти як матерія розташована у Всесвіті на великих масштабах. Оцінити деякі специфічні труднощі, що виникають при побудові та інтерпретації великомасштабної просторової карти Всесвіту.

Завдання

Знайти галактики в окремій області неба згідно списку, складеного попередниками.

Отримати спектри цих галактик, використовуючи модельні телескопи та спектрометри.

Виділити головні риси спектрів галактики.

Виміряти довжини хвиль головних спектральних ліній спектра галактики.

Обчислити червоні зміщення z та радіальні швидкості галактик.

Нанести радіальні швидкості і положення на клиновидній діаграмі для створення тривимірної карти околиць нашої Галактики.

Інтерпретувати розподіл галактик, який відображено на діаграмі, як прояв великомасштабної структури.

Знайти та оцінити типові розміри великомасштабних структур - надскупчень та пустот.

Деякі терміни, знання яких обов'язкове

Ангстрем	Абсолютна величина	Видима величина	Галактика
Довжина хвилі	Доплерівський зсув	Еліптичні галактики	Клиновидна діаграма
Класифікація галактик	Лінії поглинання	Місцева група	Мегапарсек
Модуль відстані	Неправильні галактики	Парсек	Радіальна швидкість
Спектр	Спектрометр	Скупчення Coma	Скупчення галактик
Співвідношення Хаббла	Спиральна галактика	Стала Хаббла	Суперскупчення
Схилення	Пряме піднесення	Фотон	Цефеїди
Червоне зміщення, Z	Ca II K, Ca II H		

Великомасштабний розподіл матерії

Побудова карти Всесвіту нелегка задача, але зрозуміти, чому це важко, насправді досить просто. Досить важко визначити форму та протяжність лісу, якщо ви стоїте всередині нього. Дерева навколо, куди не глянь, але наскільки довго вони тягнуться? Де межа лісу, якщо вона взагалі є? І що за ліс? Чи він виглядає посадженим випадково та

рівномірно, чи може в ньому зустрічаються галявини та зарослі? Наземний спостерігач може знайти відповіді на ці питання, мандруючи лісом, озброївшись компасом та GPS приймачем, і наносячи на карту все, що зустрінеться по дорозі на листок масштабного паперу. Але уявімо собі значно складнішу задачу: спостерігач прив'язаний до дерева і не може відійти від свого місця. З такою ж проблемою стикається наземний спостерігач коли мова йде про огляд Всесвіту. Ми мусимо робити огляд (галактик, звичайно, а не дерев), з окремої точки, - нашої Сонячної системи, - розташованої десь на 2/3 шляху від центра Галактики до її краю.

Дві з трьох необхідних для цього координат справді дуже легко отримати. Це кутові небесні координати, пряме піднесення та схилення, що зразу показують нам у якому місці небесної сфери розташована галактика. На протязі років, вивчаючи астрофотографії, астрономи склали великі каталоги, що містять координати сотень тисяч галактик. Вони також знайшли, що в межах, доступних для наших телескопів, можна знайти сотні мільярдів галактик.

Однак, цього мало. Дві небесні координати вказують нам лише напрям на галактику. Третя координата, - відстань, - так необхідна для складання надійної просторової карти, на жаль знаходиться дуже непросто. Малі, слабкі галактики, розташовані близько, виглядають так само, як великі і яскраві, але далекі. За винятком найближчих галактик, ми не розрізняємо в галактиках окремих зірок, які можна було б використати для знаходження відстаней. Як же надійно знаходити відстані до галактик?

Розв'язок цієї проблеми полягає в використанні *розширення Всесвіту* щоб отримати відстань. Під розширенням Всесвіту ми розуміємо, що з часом відстані між окремими галактиками зростають. Будь-який спостерігач на будь-якій галактиці буде бачити теж: всі галактики розбігаються, і чим далі вони, тим швидше втікають.

Зростання швидкості розбігання галактик з відстанню вперше було помічено астрономом Едвіном Хабблом в 1920 році, який виміряв відстані до найближчих галактик виходячи з яскравості цефеїд, які він знайшов у них. Він знайшов швидкості (радіальні швидкості), вимірявши довжини хвиль ліній поглинання у спектрах цефеїд. Завдяки ефекту Доплера, довжини ліній поглинання виявляються тим більшими (зміщеними у червону ділянку спектра), чим швидше рухається галактика. Один з перших графіків Хаббла наведено тут для ілюстрації (див.дискету, файл Figs\Pic07.gif).

Співвідношення Хаббла дає нам ключ до визначення третьої координати. Оскільки відстань до галактики пропорційна зміщенню хвиль у напрямку червоного кінця спектра, ми можемо просто отримати спектр, знайти зсув лінії і використати його як міру відстані. Таким чином можна будувати трьохвимірні графіки у координатах: пряме піднесення,

схилення, відстань. Будемо сподіватися, що такий графік покаже всі основні великомасштабні структури Всесвіту.

Звичайно, тільки отримавши спектри великої кількості галактик, можна побудувати контури світу. Спочатку, звичайно, це був дуже тривалий процес. Хаббл деколи експонував пластинку на протязі кількох годин тільки щоб отримати спектр однієї галактики. Але уже в 80-х роках методи спектроскопії зробили можливим отримання спектрів не за години, а за хвилини і кілька груп астрономів почали створення оглядів галактик. Одною з найважливіших серед цих піонерських робіт була робота Дж.Хукри та М.Геллер з Гарвардського центру астрофізичних досліджень у Кембріджі. Цей спектральний огляд [21] містить інформацію про всі яскраві галактики в обмеженій області простору в напрямі сузір'я Волосся Вероніки.

Карти, які можна отримати на основі оглядів галактик, показують, що галактики розміщені у просторі далеко не рівномірно, навпаки, вони концентруються в великих листах, скупченнях, розділених пустотами в яких галактик мало, або немає зовсім. Один з таких величезних листів, "Велика стіна", очевидно, проходить через весь огляд.

Навіть сучасні методи, що дозволяють працювати з тисячами галактик, вимагають для цього досить багато часу і тому робота ще дуже далека від завершення. Тільки невелика частина, (близько 10^{-4}) всього видимого Всесвіту уже картографована. Описання великомасштабної структури Всесвіту за такою малесенькою вибіркою нагадує спробу описати нашу планету за картою одного острова. Однак, деякі основні висновки вже можна зробити. В нашій роботі ви аналізуватимете ту ж ділянку неба, що покривається Гарвардським оглядом. Кількість галактик в каталозі, однак, зменшена, а управління інструментом спрощене, але головні процеси такі ж, якими користуються зараз при детальному дослідженні тонкої структури Всесвіту.

Загальна методика

Програма для лабораторної роботи надає вам можливість управління одним з трьох оптичних телескопів, кожен з яких обладнаний телекамерою (щоб бачити область неба, на яку направлено телескоп), та електронним спектрометром для отримання спектра світла, зібраного телескопом. З цим обладнанням ви повинні провести огляд галактик в обмеженій області неба. Ви повинні отримати спектри усіх галактик цієї області, виміряти довжини хвиль визначних ліній їх спектрів, використати ці дані для отримання червоних зміщень та радіальних швидкостей усіх галактик. Маючи ці дані, ви повинні побудувати карту розподілу всіх галактик області неба. На карті повинні проявитися деякі з головних

крупномасштабних утворень Всесвіту, після чого ви повинні визначити характерні форми та розміри цих утворень шляхом повного вивчення та вичерпного аналізу.

Шматок неба, який ви повинні вивчити, займає 60 градусів з сходу на захід (пряме піднесення від 12 до 16 годин) та 5 градусів з півночі на південь (схилення від +27 до +32). Цей район вибраний в першу чергу для зручності: він високо в небі північної півкулі, його випромінювання не поглинається газом та пилом нашої Галактики. Більше того, в цьому напрямку розташовані деякі з найбагатших груп галактик, що належать до скупчення Волосся Вероніки. Список галактик, які підлягають вивченню, наведений у Додатку 4.

У списку понад 200 галактик. Для нашої роботи будемо вважати, що це всі галактики, які можна побачити у телескоп. Фактично, їх значно більше, але ми викинули зі списку більшість з них, щоб робота не була такою монотонною та довготривалою. Такий підхід теж досить реалістичний, оскільки навіть при найкращих умовах, астрономічні каталоги галактик не можуть включати всі галактики виділеного об'єму простору. Слабкі галактики, широко представлені у просторі, важко побачити і порахувати. Однак, наш список містить досить галактик, щоб показати великомасштабні утвори видимого Всесвіту у вибраному напрямку.

Спостереження двохсот галактик вимагають досить довгого часу для однієї аудиторної роботи. Як ця робота буде виконуватися, залежить від вашого викладача. Можна, наприклад організувати роботу так, щоб кожна лабораторна група проспостерігала, скажімо, 20 галактик зі списку. Далі групи об'єднують свої результати, щоб отримати єдиний ряд спостережень, з якого отримують спільну карту великомасштабної структури. Таке об'єднання зусиль характерне для всієї сучасної астрономії, вчені часто об'єднують зусилля, розділяючи великі “важкопідйомні” проекти на менші частини, розділяючи ці частини між різними групами вчених, в тому числі і на основі міждержавних договорів. Ви можете виконувати роботу на протязі кількох занять, або виділивши для роботи додатковий час.

Область неба, що підлягає вивченню, нагадує сектор, або шматок торта. Товщина його визначається різницею схилень, кут при вершині – різницею прямих піднесень, а його радіус – відстаню до найдальшої галактики вибірки.

Деталі методики

Телескоп можна направити у вказаному напрямку або кнопками **N, S, E, W**, або набравши значення координат у відповідних текстових полях та задавши команду установки на об'єкт. Ви маєте список всіх галактик з їх координатами в нашій області, тому ви можете просто набрати координати, вибравши їх зі списку. Телекамера,

приєднана до телескопа, дозволить побачити галактику, на яку ми направили інструмент, і за допомогою кнопок тонкого наведення ми можемо встановити телескоп так, щоб світло галактики проходило у щілину приєданого до телескопа спектрометра. Після цього вмикаємо спектрометр, який починає процес збору фотонів від галактики і на екрані потроху з'являється спектр – графік залежності інтенсивності світла від довжини хвилі. Збирається все більше та більше фотонів і ви отримуєте можливість вирізнити спектральні лінії галактики (H та K лінії кальцію) і вимірювати їх довжини хвиль, встановлюючи на них курсор миші. Довжини хвиль будуть більші, ніж лабораторні довжини цих ліній, (3970 і 3933 ангстрем відповідно), так як галактики віддаляються. Спектрометр також дає видиму зоряну величину галактики, знаходячи її з інтенсивності потоку фотонів, що приходять від галактики. Отже, для кожної галактики ви отримуєте довжини H та K ліній кальцію та зоряну величину.

Оце і всі необхідні вам дані. З них ви можете обчислити **червоне зміщення, z**, **радіальну швидкість, v**, (за формулами ефекту Доплера), **відстань**, (за формулами закону Хаббла). Щоб зекономити трохи часу, можна не обчислювати відстані для всіх галактик. Оскільки відстані пропорційні до червоного зміщення або швидкості, ми можемо наносити для кожної галактики z або v , при цьому ми отримаємо досить добру картину розташування галактик у просторі. Свою карту покажемо як двовимірну клиновидну діаграму, рис.10. (Див.дискету, файл Figs\Pic10.gif). На ній бачимо сектор простору, так, як ми його побачили зовні. Відстані нанесені по радіусу від вершини сектора, пряме піднесення – проти годинникової стрілки. Поступово наносячи свої дані та дані своїх товаришів, будемо отримувати все детальнішу картину загальної форми скупчень та пустот.

Отримання спектрів за допомогою модельних приладів

Програма моделює роботу сучасного цифрового телескопа і спектрометра. Отримаємо спектр галактики і виміряємо її червоне зміщення. Доступними пунктами меню головного вікна програми є пункти **Run** та **Quit**. Виберемо **Run** та почнемо роботу. На екрані комп'ютера з'явиться панель управління і вікно зображення, яке імітує монітор керування реальним телескопом. Зверніть увагу, що купол телескопа (**dome**) закритий, а годинниковий механізм (**tracking**) вимкнений. Відкрийте купол (**dome**). Тепер ви маєте змогу спостерігати об'єкти. Купол відчинено і на екрані зображення неба, яке дає гід телескопа. 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 з неї передається на дисплей. (Астроному зовсім не потрібно шукати об'єкт, заглядаючи у окуляр гіда). Знайдіть кнопку **View** на панелі

управління та зверніть увагу на її стан: на ній вістановлено поле зору гіда (**Finder** у текстовому полі трохи нижче, ніж кнопка).

Детально управління спектрометром було описано у попередній роботі, тому поторювати її тут ми не будемо. Щоб не загубити об'єкт, ввімкніть годинниковий механізм, рис.11 (див дискету, файл Figs\Pic11.gif).

Обчислення результатів

Занотуйте важливу інформацію

лабораторна довжина хвилі К лінії кальцію $\lambda_K = 3933.67 \text{ \AA}$

лабораторна довжина хвилі Н лінії кальцію $\lambda_H = 3968.85 \text{ \AA}$

Обчисліть абсолютне червоне зміщення

$$\Delta\lambda_K = \lambda_{K \text{ measured}} - \lambda_{K \text{ laboratory}}$$

$$\Delta\lambda_H = \lambda_{H \text{ measured}} - \lambda_{H \text{ laboratory}}$$

Обчисліть відносне червоне зміщення

$$z_K = \Delta\lambda_K / \lambda_K,$$

$$z_H = \Delta\lambda_H / \lambda_H$$

Обчисліть радіальну швидкість віддалення галактики по кожній з ліній за формулою Доплера

$$v_K = cz_K,$$

$$v_H = cz_H$$

Знайдіть середнє значення швидкості віддалення галактики як середнє арифметичне значень, отриманих по кожній з ліній.

Обчислення для однієї галактики закінчені. Для нанесення на клиновидну діаграму нам досить однієї з кутових координат галактики, а саме пряме піднесення, та її швидкість. Це пов'язано з тим, що сектор простору, який ми аналізуємо дуже тонкий (5 градусів) по схиленню, і тому ми будемо вважати, що всі галактики лежать у одній площині.

Запис даних у комп'ютер

Тепер ви можете занести дані у комп'ютер щоб потім можна було їх надрукувати. Вибирайте **Record Meas.** в меню спектрометра. Відкривається вікно, призначене для занесення результатів, рис.12 (Див.дискету, файл Figs\Pic12.gif). Занесемо виміри довжин хвиль Н та К ліній і обчислені швидкості. У цьому вікні комп'ютер перевірить правильність внесених значень швидкостей, обчислить середню швидкість. Для цього треба натиснути **Verify/Average** а якщо все правильно – **Ok**.

Тепер можна спостерігати інші галактики. Вибирайте пункт меню **Return**. Якщо ви не занесли дані, комп'ютер перепитає вас, чи не забули ви занести дані для даної галактики. Ви можете повернутися у вікно запису результатів, або залишити його і

перейти у вікно спектрометра, але при цьому вся інформація, зібрана, та не записана, буде втрачена. Дані, які вже записано у комп'ютер, можна переглядати і редагувати. Це можна зробити з вікна управління телескопом вибравши з меню **File** можливість **Data**, а далі **Review**. З'являється вікно з уже введеними даними, рис.13, (див.дискету, файл Figs\Pic13.gif). Тут назва об'єкта, його видима величина, пряме піднесення та схилення, - ці позиції заповнюються комп'ютером автоматично, коли ви заносите інформацію. Крім того, приводиться введене вами значення швидкості галактики. Останні три стовпчики містять зірочки, які послідовно означають, (1) що ви ввели виміряні значення довжин хвиль хоча б для трьох ліній, (2) що ви ввели реальне значення швидкості галактики, (3) що дані для цієї галактики записані вами для відображення на клиновидній діаграмі. Ця остання зірочка означає, що вводити дані для цієї галактики вже більше не треба. (Це для того, щоб випадково не виявилось двох значень для однієї галактики).

Якщо ви хочете видалити деяку інформацію з цього списку, клацніть на рядочку, він виділиться і після цього натісніть кнопку **Delete** внизу вікна. Якщо ж ви хочете редагувати дані, натисніть кнопку **Edit**, яка відкриє для вас вікно редагування.

Клиновидна діаграма

Після того, як спостереження проведені, дані зібрані та занесені у комп'ютер ви можете проаналізувати, переглянути та відредагувати зібрану інформацію (кнопка **Edit**), надрукувати її у вигляді паперової копії (**Print**), чи зберегти дані для подальшого нанесення на клиновидну діаграму (**Save results to Plot**). В останньому випадку ви отримаєте попередження, якщо не всі дані зібрані.

У роботі передбачається два можливих шляхи отримання клиновидної діаграми.

По-перше, це можна зробити вручну. Надрукуйте поданий у додатку 5 листок з заготовкою діаграми. Радіальні лінії відповідають різним значенням прямого піднесення, дуги – швидкості. Для кожної з 218 виміряних галактик нанесіть на діаграму одну точку. На малюнку показано галактику, для якої $\alpha = 13^{\text{h}}15^{\text{m}}$, а швидкість віддалення – 7000 км/с. Як тільки ви все нанесете, розподіл галактик у просторі буде добре видимий. Звичайно, можна виготовити діаграму і самостійно: циркуль, лінійка, трохи здорового глузду і рис.10 для довідок.

По-друге, можна скористатися спеціальною програмою для малювання таких діаграм, яка входить у програмне забезпечення. Ця програма називається **Wedge Plot** і викликається з меню головного вікна роботи. З'являється відповідне вікно, рис.14, (див.дискету, файл Figs\pic14.gif). Найцікавіші для нас можливості програми **Wedge Plot** можна коротко перерахувати так. Завантаження файлу даних (**File->Open**), друкування

даних з вашого файла (**File->Print**), відображення його на діаграмі (**Plot->Plot data file**), додати точку на діаграму у ручному режимі (**Plot->Manual data entry**), друкування діаграми (**Plot->Print the plot**). Пункт меню **Options** призначений для зміни стилю вашої діаграми, а саме в ньому можна вибрати колір, розмір та вигляд точок діаграми.

Аналіз отриманих результатів

Уважно проаналізуйте отриману діаграму. Хоча на ній всього близько 200 галактик, основні риси навколишнього Всесвіту можна розрізнити. Виходячи з діаграми дайте відповідь на питання: чи можна говорити про рівномірний розподіл матерії у Всесвіті? Найгустіша частина діаграми, яка чимось нагадує фігуру худої людини, це центр скупчення галактик у сузір'ї Волосся Вероніки. Які координати центра скупчення?

За співвідношенням Хаббла (згадайте) знайдіть відстані до кількох об'єктів на діаграмі. Для сталої Хаббла прийміть значення 75 км/с/Мпс. Обчисліть відстань до скупчення.

Яка відстань до найдальшої галактики, нанесеної на діаграму? Скільки ще до границь відомого Всесвіту? ($4.6 \cdot 10^9$ пс).

Розгляньте проблему повноти нашої вибірки. Порівняйте нашу вибірку з фотографічним каталогом галактик. Які об'єкти можуть бути відсутні у нашій вибірці? Як покращити повноту?

За скупченням Волосся Вероніки через всю діаграму тягнеться утворення, відоме як Велика стіна. Знайдіть відстань до Великої стіни. Знайдіть довжину великої стіни. Якими спостереженнями можна підтвердити, що це справді стіна, а не окреме волокно?

Зберіть всі записи та приготуйте роботу до здачі.

Заключні зауваження

Хоча у цьому огляді представлена мініатюрна частина Всесвіту, астрономи вважають, що така великомасштабна структура пронизує весь Всесвіт. Щоб це підтвердити, вони розширюють свої огляди все далі і далі, включають в них все слабкіші та більш віддалені галактики. Зараз є автоматизовані телескопи, що дозволяють отримувати спектри багатьох об'єктів в полі зору телескопа одночасно ("Медуза"). Але чим більше галактик наноситься на карти, тим краще видно, що порожнини та скупчення зустрічаються повсюди. Однією з найбільших загадок сучасної космології є пояснення того, як великомасштабна структура Всесвіту утворилася з майже однорідного розподілу густини первинної матерії.

Сучасна астрономія дуже багато уваги приділяє розглянутій у роботі проблемі. Ознайомтесь з статтями [11-14] для більш детального огляду проблеми.