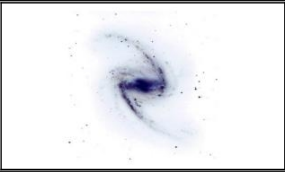
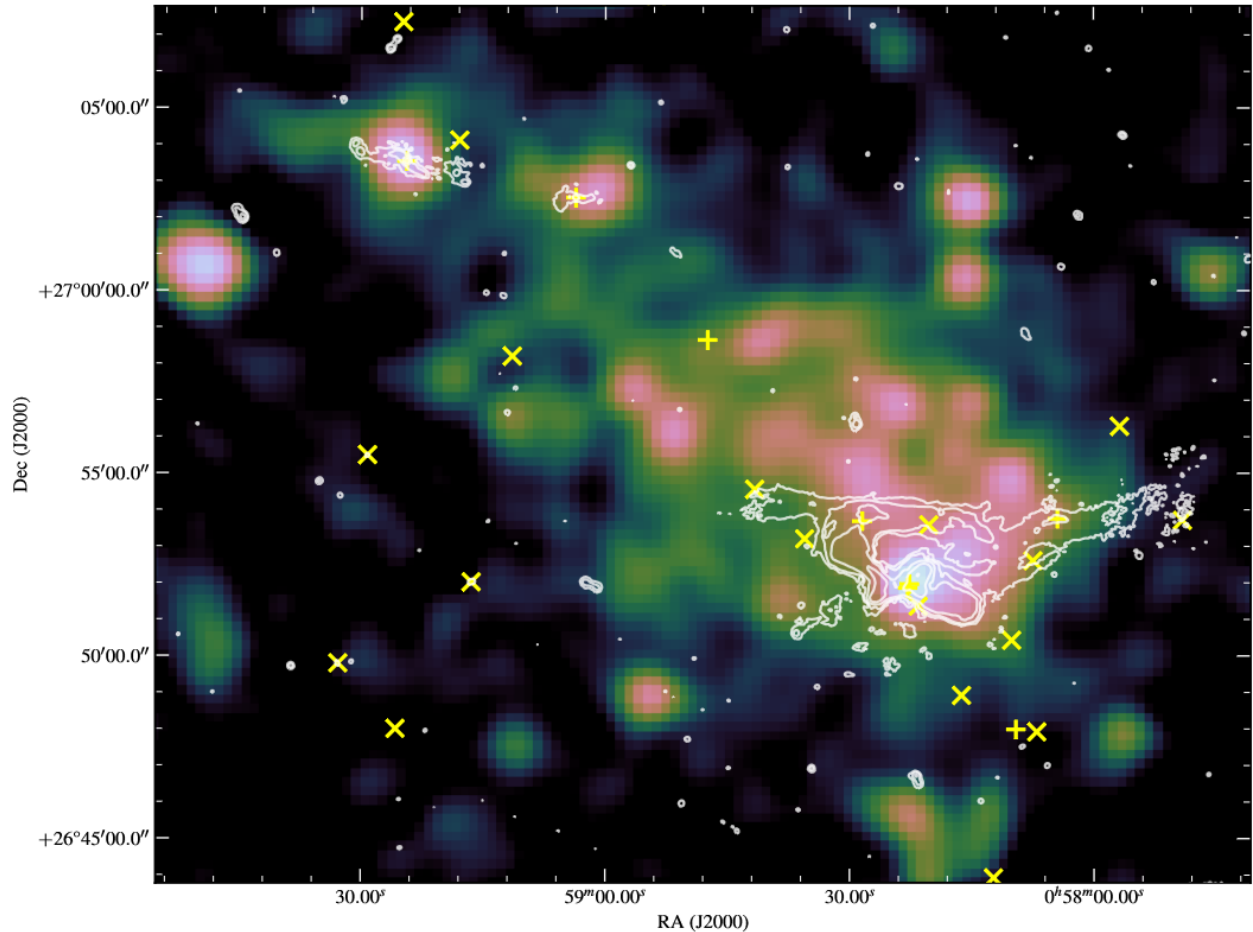


<p>Обласна олімпіада</p> <p>з астрономії</p> <p>м. Львів, 8 лютого 2025 р.</p>		<p>Практичний тур</p> <p>11 клас</p>
---	--	--

5. **Скільки важать галактики?** На зображенні нижче можна побачити галактику NGC 326, а також навколишні супутні галактики. Вважається, що всі зображені галактики належать до одного скупчення. Також наведена таблиця з деякими об'єктами скупчення та їхніми параметрами.



Зобр. 1. Частина неба, яка включає NGC 326, отримана спостереженнями LOFAR. Наведене зображення після цифрової обробки. Яскравішим ділянкам відповідають області з більшою густиною речовини.

Код об'єкту	Назва об'єкту	Схилення	Пряме сходження	Червоне зміщення
G1-1	NGC 0326-1	+26d51m58.5s	00h58m22.6s	0.04873
G1-2	NGC 0326-2	+26d51m52.4s	00h58m22.8s	0.04944
G2	UGC 613	+27d03m32.6s	00h59m24.4s	0.04593
G3	MCG +04-03-030	+27d02m32.8s	00h59m03.6s	0.04860
G4	2MASS J00584743+2658393	+26d58m39.3s	00h58m47.4s	0.04509
G5	MGC +04-03-024	+26d53m45.6s	00h58m04.5s	0.04620
G6	2MASX J00582840+2653420	+26d53m42.0s	00h58m28.4s	0.05200
G7	2MASX J00580956+2647596	+26d47m59.6s	00h58m09.6s	0.04670
G8	2MASX J00592575+2647599	+26d48m00.7s	00h59m25.8s	0.04950
G9	UGC 585	+27d00m34.8s	00h59m49.4s	0.04649

Табл. 1. Деякі об'єкти скупчення із вказаними координатами (J2000) та червоним зміщенням.

А) Знайдіть відстань до скупчення.

Б) Існує метод визначення маси скупчення за допомогою дисперсії швидкостей галактик у ньому. Що важливо, для цього не обов'язково знати повні вектори швидкостей, достатньо лише проекцій швидкостей на промені зору v_{rad} . Нехай у нас є деяка вибірка галактик зі скупчення, розмір вибірки - N . Якщо для окремих галактик відома їх радіальна швидкість $v_{rad,i}$, обчислена відносно руху скупчення як цілого, то дисперсію можна обчислити за формулою:

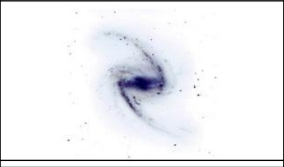
$$\sigma^2 = \frac{1}{N-1} \sum_{i=1}^N v_{rad,i}^2 \quad (1)$$

Теоретичні обчислення дозволяють отримати такий результат для маси скупчення:

$$M_d = k \frac{\sigma^2 \cdot r_{out}}{G}, \quad (2)$$

де r_{out} - поперечна відстань від центру скупчення до найвіддаленішого об'єкту з вибірки, G - гравітаційна стала, k - безрозмірний коефіцієнт порядку одиниці, який залежить від форми скупчення та розподілу речовини в ньому. Для оцінки маси скупчення, можна прийняти $k=1$. Маса, обчислена по формулі (2), дає оцінку повної маси матерії, яка знаходиться в межах відстані r_{out} від центру; її називають динамічною масою скупчення.

Оцініть динамічну масу даного скупчення галактик (у масах Сонця).

Обласна олімпіада з астрономії м. Львів, 8 лютого 2025 р.		Практичний тур 11 клас
---	--	---------------------------

Розв'язання

А) Як бачимо з таблиці, всі галактики мають досить близькі значення червоних зміщень. Це зрозуміло, оскільки скупчення віддаляється від нас як одне ціле через розширення Всесвіту, а малі відхилення червоного зміщення від середнього викликані пекулярними швидкостями галактик відносно центру скупчення.

Щоб знайти швидкість віддалення скупчення як цілого, знайдемо середнє значення червоного зміщення для всіх об'єктів:

$$\bar{z} = 0.04788$$

Це відповідає швидкості віддалення

$$v_0 = 14354 \text{ км/с}$$

Використовуючи закон Габла-Леметра, знаходимо відстань до скупчення

$$D = 210 \text{ Мпк}$$

(5 балів)

Б) Перед тим як знайти масу, нам потрібно спочатку відняти рух скупчення як цілого, щоб отримати пекулярні (власні) швидкості галактик (а точніше їх проекції на промені зору). Результати подано у таблиці:

Код об'єкту	Назва об'єкту	Червоне зміщення	Повна швидкість v , км/с	Пекулярна швидкість $v - v_0$, км/с
G1-1	NGC 0326-1	0.04873	14619	255
G1-2	NGC 0326-2	0.04944	14832	468
G2	UGC 613	0.04593	13779	-585
G3	MCG +04-03-030	0.04860	14580	216
G4	2MASS J00584743+2658393	0.04509	13527	-837
G5	MGC +04-03-024	0.04620	13860	-504
G6	2MASX J00582840+2653420	0.05200	15600	1236
G7	2MASX J00580956+2647596	0.04670	14010	-354
G8	2MASX J00592575+2647599	0.04950	14850	486
G9	UGC 585	0.04649	13947	-417

Отримані у останньому стовпчику значення і будуть проекціями пекулярних швидкостей на промені зору $v_{rad,i}$. Дисперсія швидкостей тоді

$$\sigma = \sqrt{\frac{1}{10-1} \sum_{i=1}^{11} v_{rad,i}^2} = 640 \text{ км/с} \quad (5 \text{ бали})$$

Залишається лише визначити r_{out} , тобто відстань від центру скупчення до найвіддаленішого об'єкту з вибірки. Під центром скупчення беремо об'єкт G1-1 (або G1-2), оскільки там найбільша густина речовини. На роль найвіддаленішого об'єкту претендує об'єкт G9 (це можна зрозуміти, нанісши об'єкти на зображення в умові, або порахувавши кутову відстань кожного об'єкту від центру скупчення). Оскільки координати всіх об'єктів близькі між собою, то кутові відстані можна знайти за допомогою "теорема Піфагора". При цьому пряме сходження потрібно перевести в градусну міру, наприклад використовуючи, що $4'' = 1'$.

Тоді кутова відстань

$$\Delta \varphi = \sqrt{(\Delta \delta)^2 + \left(\frac{\Delta \alpha}{4 s} \cdot 1' \right)^2}$$

В результаті отримаємо таку кутову відстань між G1-1 та G9:

$$\Delta \delta = 8' 36.3'', \Delta \alpha = 21.85', \Delta \varphi = 23.5'$$

Фізична відстань між G1-1 та G9:

$$r_{out} = D \cdot \Delta \varphi = 1.4 \text{ Мпк}$$

(3 бали)

Нарешті для динамічної маси скупчення отримуємо

$$M_d = \frac{\sigma^2 \cdot r_{out}}{G} \approx 2,7 \cdot 10^{44} \text{ кг} \approx 10^{14} M_{\odot} \quad (2 \text{ бали})$$

Можна відзначити, що ми отримали дещо занижену оцінку через те, що прийняли безрозмірний коефіцієнт $k=1$. Насправді цей коефіцієнт зазвичай приймає більші значення, що залежить від форми скупчення та розподілу речовини в ньому.