

Задача 2. В поисках тёмной материи

[75 баллов]

Галактики низкой поверхностной яркости — Low Surface Brightness (LSB) — диффузные галактики с поверхностной яркостью, которая при земных наблюдениях по крайней мере на 1^m слабее фоновой яркости ночного неба.

Некоторая доля их материи относится к барионному типу, это, например, нейтральный водород и звёзды. Однако, большая часть вещества невидима и называется «тёмной материей». В этой задаче вы исследуете массу тёмной материи в галактике, её влияние на кривую вращения и распределение по галактике.

В таблице ниже представлены данные, касающиеся LSB-галактики UGC4325. Предположим, что галактика наблюдается с ребра. Для каждого из указанных расстояний от центра галактики измерены:

1. λ_{obs} — наблюдаемая длина волны эмиссионной линии $\text{H}\alpha$. Поправка на хаббловское расширение Вселенной уже осуществлена.
2. V_{gas} — вклад газовой компоненты во вращение галактики, обусловленный массой газа M_{gas} , определяемой по поверхностной плотности HI.
3. V_* — вклад звёздной компоненты во вращение галактики, обусловленный массой звёзд M_* , определяемой по фотометрии в полосе R .

Скорости вращения пробной частицы под влиянием газовой (V_{gas}) и звёздной (V_*) компонент определяются как скорости в плоскости галактики, которые обеспечивались бы заданной компонентой в отсутствие внешних возмущений. Эти скорости получены из наблюдаемого распределения барионной материи.

r , кпк	λ_{obs} , нм	V_{gas} , км/с	V_* , км/с
0.70	656.371	2.87	20.97
1.40	656.431	6.75	32.22
2.09	656.464	14.14	40.91
2.79	656.475	20.18	46.75
3.49	656.478	24.08	50.10
4.89	656.484	28.08	47.94
6.25	656.481	29.25	45.47
7.10	656.481	27.03	47.78
9.03	656.482	25.90	45.32
12.05	656.482	21.03	42.30

Масса тёмной материи $M_{\text{DM}}(r)$ в объёме радиуса r может быть выражена через вклад этой компоненты в скорость вращения галактики V_{DM} , радиус r и гравитационную постоянную G ,

$$M_{\text{DM}}(r) = \frac{r V_{\text{DM}}^2}{G}. \quad (1)$$

Для лучшей оценки наблюдаемая скорость вращения V_{obs} представляется как

$$V_{\text{obs}}^2 = V_{\text{gas}}^2 + V_*^2 + V_{\text{DM}}^2 \quad (2)$$

и зависит от массы $M(r)$, заключённой в объёме радиуса r , измеряемого от центра галактики.

Плотность тёмной материи ρ_{DM} в этом объёме может быть представлена в виде профиля плотности

$$\rho_{\text{DM}}(r) = \frac{\rho_0}{1 + \left(\frac{r}{r_C}\right)^2}, \quad (3)$$

где ρ_0 и r_C — центральная плотность и радиус ядра галактики соответственно. Согласно этой модели, масса M_{DM} в пределах рассмотренного объёма есть

$$M_{\text{DM}}(r) = 4\pi\rho_0 r_C^2 \left(r - r_C \arctan \frac{r}{r_C} \right). \quad (4)$$

Масса тёмной материи и кривые вращения галактики

D2.1 [21 балл] В земных лабораториях H_α имеет длину волны $\lambda_{\text{emit}} = 656.281$ нм. Вычислите наблюдаемую скорость вращения галактики V_{obs} и компоненту скорость вращения, вызванную наличием тёмной материи, V_{DM} на расстоянии r в км/с.

Для различных значений r , приведённых в таблице, рассчитайте динамическую массу $M(r)$ и массу тёмной материи $M_{\text{DM}}(r)$ в солнечных массах.

D2.2 [16 баллов] Получите кривые вращения галактики на листах для графиков, построив графики зависимостей V_{obs} , V_{DM} , V_{gas} , V_* от радиуса r и проведя гладкие кривые через отмеченные точки (поставьте свой график как D2.2).

Расположите вклады различных компонент в наблюдаемую скорость V_{obs} в порядке убывания.

Распределение тёмной материи

D2.3 [7 баллов] Оцените ρ_0 и r_C , взяв точки при малых и при больших r . Обратите внимание, что если x велико, то $\arctan x \approx \pi/2$, а если мало, то $\arctan x \approx x - x^3/3$.



Практический тур

Стр. 3 из 3

D2.4 [19 баллов] При сравнении уравнения (4) с линейной функцией становится понятно, что центральная плотность ρ_0 может также быть найдена методом линейной аппроксимации. Нарисуйте соответствующий график так, чтобы проведённая прямая могла быть использована для нахождения значения ρ_0 . Выразите ρ_0 в $M_\odot/\text{кпк}^3$ (пометьте свой график как D2.4). Если вы не можете найти r_C из предыдущей части, используйте $r_C = 3.2$ кпк в качестве оценочного значения.

D2.5 [12 баллов] Рассчитайте логарифм плотности тёмной материи, $\ln[\rho_{\text{DM}}(r)]$, и постройте график распределения тёмной материи в галактике как функцию радиуса r на листе для графиков (пометьте свой график как D2.5).