

Road to IPhO

Первый открытый квазар: тайны источника 3C 273

Часть А. Видимое движение Луны относительно звезд (1.8 балла)

Луна совершает один оборот вокруг Земли относительно звёзд за 27.3 дня – период, известный как сидерический месяц. Хотя в телескоп заметить движение Луны легко, при наблюдениях невооружённым глазом на это может потребоваться несколько часов. Известно, что 3600 угловых секунд = 60 угловых минут = 1 градус. На сколько градусов / угловых минут / угловых секунд Луна сместится относительно звёзд за:

- | | | |
|-----------|--|------------|
| A1 | <ul style="list-style-type: none">• Один час?• Одну минуту?• Одну секунду? | 1.3 |
|-----------|--|------------|

- | | | |
|-----------|--|------------|
| A2 | За какое время Луна сместится относительно звёзд на расстояние, равное её диаметру?
Примечание: видимый угловой диаметр Луны равен 30 угловым минутам. | 0.5 |
|-----------|--|------------|

Часть В. Использование покрытий Луной для точного определения положения радиоисточников в случае 3C 273 (1.8 балла)

В конце 1950-х – начале 1960-х годов измерения положения радиоисточников с такой большой точностью были недоступны. Покрытия Луной уже использовались в астрономии, однако Хазард был заинтересован в их применении для определения положения и структуры радиоисточников с точностью до угловой секунды. Поскольку такие измерения делались в системе отсчёта далёких звёзд, источники можно было надёжно идентифицировать. Хазард обратил внимание, что в 1962 и 1963 годах должно произойти несколько покрытий Луной мощного источника класса II, 3C 273.

Покрытие 5 августа 1962 года наблюдалось на частотах 410 и 136 МГц. Наблюдалось как покрытие Луной, так и повторное появление из-за лунного диска, а результаты измерений указывали на наличие у источника двух компонентов А и В. На **Рис. 1** показаны результаты измерений на частоте 410 МГц во время покрытия (справа) и появления из-за лунного диска (слева).

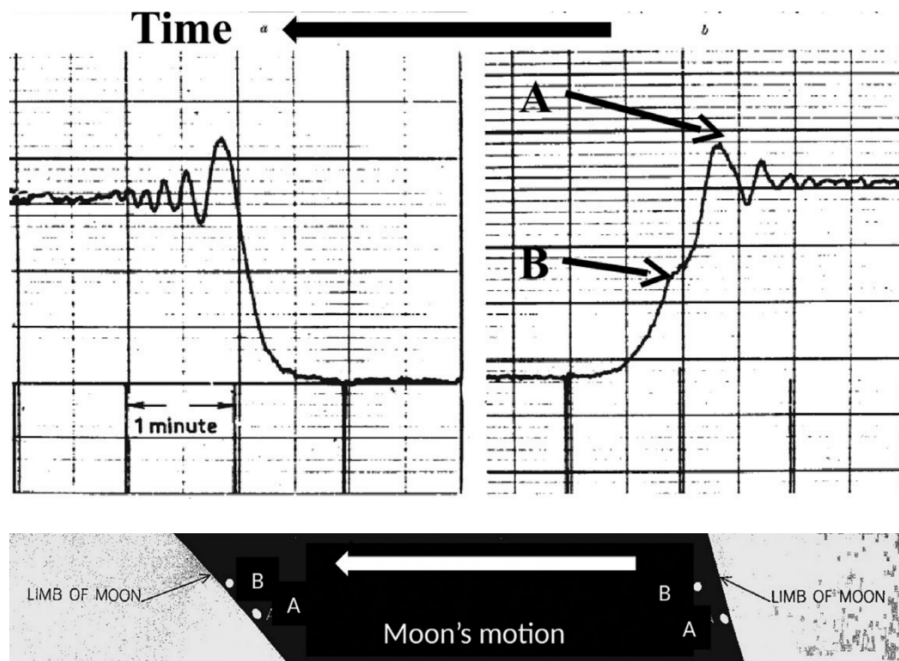


Рис. 1. Результаты измерений 5 августа 1962 года на частоте 410 МГц во время покрытия и появления из-за лунного диска, взятые из статьи Hazard et al. (1963). Время отсчитывается справа налево, Луна также движется справа налево. Снизу показаны положения компонентов источника А и В относительно диска Луны во время покрытия и повторного появления.

Road to IPhO

В1 Что вызывает колебания наблюдаемой интенсивности?

0.6

- A. Дифракционная картина.
- B. Неустойчивость в монтировке телескопа.
- C. Особенности поверхности Луны.
- D. Атмосферные условия Земли.

В2 Почему при повторном появлении источника из-за лунного диска на графике слева отсутствует бугорок от компонента В? Как это помогает в понимании структуры источника?

0.6

- A. Эти два компонента вращались вокруг Луны.
- B. Наша линия наблюдения изменилась по отношению к двум компонентам.
- C. При повторном появлении из-за лунного диска компоненты были выровнены относительно него.
- D. Временные масштабы физики, лежащей в основе светимости двух компонентов, были достаточно большими, чтобы один из них потускнел.

В3 Основываясь на ваших ответах в пунктах **A1** и **A2** и данных **Рис. 1**, оцените наблюдаемое угловое расстояние между двумя компонентами 3C 273.

0.6

Часть С. Открытие истинной природы 3C 273 (1.8 балла)

В 1962 году, в год этих наблюдений, Мартин Шмидт работал над программой оптической идентификации и спектроскопии радиоисточников. Как упоминает Уайтоак, в Калифорнийском техническом институте в этом время считали, что источник 3C 273 представляет собой звезду со странным джетом. Чтобы получить спектр джета, нужно было учесть влияние звезды, находящейся от него на расстоянии нескольких угловых секунд. Мартин Шмидт хотел решить этот вопрос, сначала получив спектр самой звезды. В ночь на 29 декабря ему удалось получить его, и в нём было заметно несколько слабых эмиссионных линий (**Рис. 2**), не соответствующих известным линиям звёздных спектров. И лишь когда Шмидт решил сравнить странный спектр с бальмеровскими линиями водорода, все стало ясно:

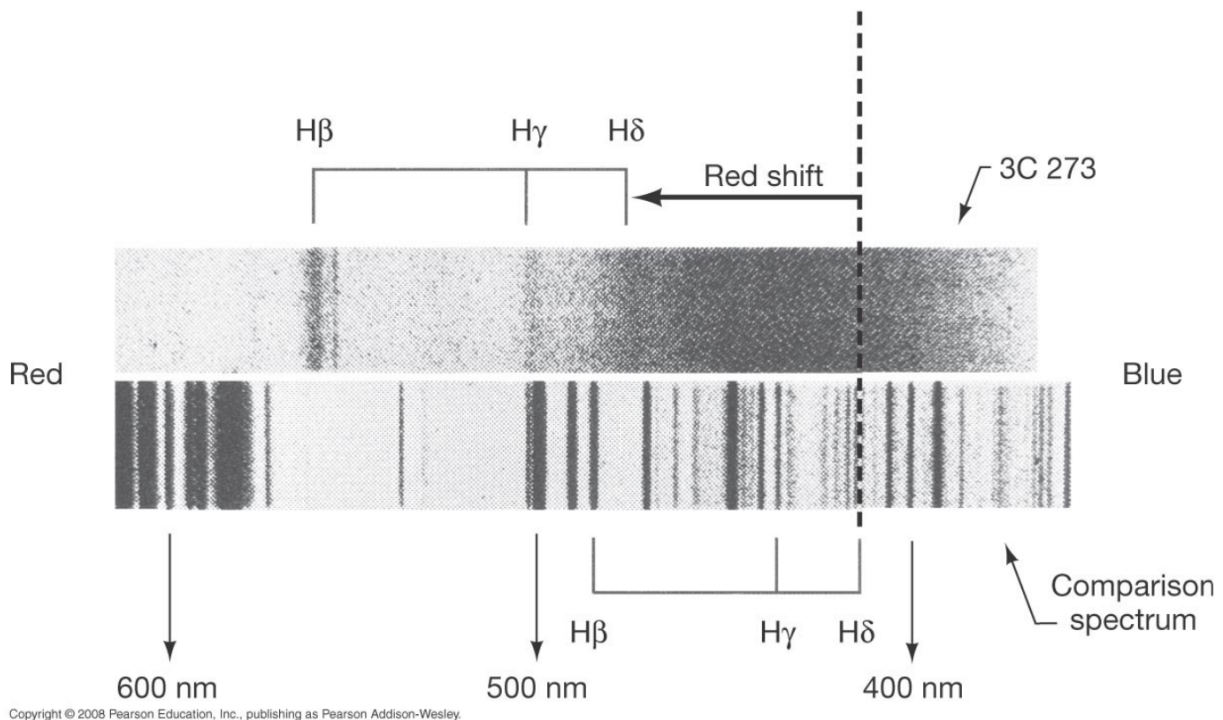


Рис. 2. Спектр 3C 273 в оптическом диапазоне (сверху) и спектр, полученный в лаборатории, для сравнения (снизу).

Road to IPhO

C1 Сравните длины волн линий на **Рис. 2**. Основываясь на этом, определите красное смещение $z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0}$ источника. **0.6**

C2 Предположим, что красное смещение возникает вследствие гравитации объекта. В этом случае оно будет задаваться выражением $z = \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{2GM}{c^2 r}}} - 1$. Покажите, что куда бы ни был помещён 3C 273 (к примеру, на край Млечного Пути, $r \sim 100$ кпк $\approx 3 \cdot 10^{21}$ м; на край Солнечной системы, $r \sim 100$ а.е. $\approx 1.5 \cdot 10^{13}$ м), его масса была бы достаточной, чтобы разрушить Галактику / Солнечную систему. **0.6**

C3 Согласно закону Хаббла, чем дальше от Земли находятся галактики, тем быстрее они удаляются от неё. Коэффициент пропорциональности между скоростью галактик и расстоянием до них называется постоянной Хаббла и равен $H = 75 \frac{\text{км}}{\text{с} \cdot \text{Мпк}}$. Если считать, что красное смещение обусловлено расширением Вселенной, оно будет равно $z \approx \frac{v}{c}$. Вычислите расстояние до объекта. Сравните ответ с размером Млечного Пути. **0.6**

Часть D. Светимость радиисточника 3C 273 (1.8 баллов)

Измеренную спектральную плотность потока энергии 3C 273 можно описать выражением $F_\nu \approx 25000 \cdot \nu^{-0.3}$ Ян, где ν – частота излучения в Герцах, а единица измерения Янский определяется как $1 \text{ Ян} = 10^{-26} \frac{\text{Вт}}{\text{м}^2 \cdot \text{Гц}}$. Поскольку источник излучает равномерно в сферу с радиусом, равным расстоянию до Земли, его светимость на единицу частоты задаётся выражением $L_\nu = 4\pi d^2 F_\nu$.

D1 Получите явное выражение для светимости источника на единицу частоты. **0.6**
Примечание: $1 \text{ пк} = 3.09 \cdot 10^{16} \text{ м}$.

D2 Вычислите полную светимость источника в радиодиапазоне (т.е. в диапазоне частот от 10^7 Гц до 10^{11} Гц). **0.6**

D3 Как светимость 3C 273 соотносится со светимостью Солнца ($L_{\text{Sun}} = 3.82 \cdot 10^{26}$ Вт) и Млечного Пути ($L_{\text{MW}} = 1.5 \cdot 10^{10} \cdot L_{\text{Sun}}$) в этом же диапазоне частот? **0.6**

Часть E. Источник энергии 3C 273 (1.4 балла)

Как видно, яркость 3C 273 слишком велика не только для одиночной звезды, но и для целой галактики. Следовательно, должен существовать другой механизм, производящий эту энергию, не такой как у звезд.

E1 Покажите, что производство энергии нельзя объяснить аннигиляцией материи с антиматерией (например, реакциями $e^+ + e^- \rightarrow 2\gamma$), поскольку в них создаются высокоэнергетические рентгеновские лучи, а не излучение в оптическом и радиодиапазонах. **0.7**

E2 Почти сразу было выдвинуто предположение, что энергия возникает в результате аккреции материи на сверхмассивную чёрную дыру. Проверим, что гравитационной потенциальной энергии будет на это хватать: Пусть сверхмассивная чёрная дыра ежегодно притягивает на свой Шварцшильдовский радиус ($R_s = \frac{2GM}{c^2}$) одну солнечную массу ($2 \cdot 10^{30}$ кг). Какую мощность это сможет произвести? Будет ли этого хватать для объяснения результатов пунктов **D1–D3**? **0.7**

Road to IPhO

Часть F. Современные наблюдения и природа компонентов ЗС 273 (1.4 балла)

Современные изображения, полученные с помощью различных телескопов (см., к примеру, **Рис. 3**), показывают, что два компонента А и В, обнаруженные во время покрытия Луной, на самом деле представляют собой компактное ядро с чёрной дырой и джет, простирающийся на посчитанное вами ранее расстояние. Считается, что этот джет образуется за счёт ускорения частиц, падающих на чёрную дыру, в сильном магнитном поле. Это похоже на северные сияния, создаваемые ускоряющимися в магнитном поле Земли частицами солнечного ветра, однако происходит на гораздо больших масштабах.

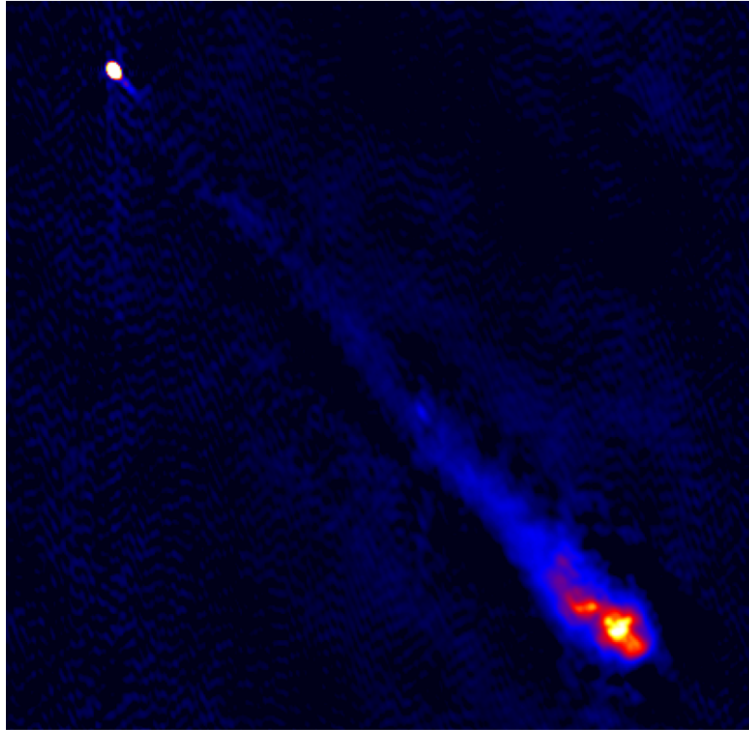


Рис. 3. Изображение ЗС 273 в радиодиапазоне, полученное с помощью телескопа MERLIN.

Плотность энергии, необходимая для создания такого джета, можно выразить через индукцию магнитного поля как сумму объёмных плотностей энергии частиц $U_e \propto B^{-3/2}$ и магнитного поля $U_B \propto B^2$.

F1 Покажите, что минимальная суммарная объёмная плотность энергии достигается при $\frac{U_e}{U_B} = \frac{4}{3}$. **0.7**

F2 Предположим, что полная энергия джета ЗС 273 равна половине энергии, выделяемой ЗС 273 за одну секунду согласно оценкам **D1** и **D2**, а объём джета равен 10^{45} м^3 . Оцените магнитное поле в джете. **0.7**

Подсказка: магнитная проницаемость вакуума равна $4\pi \cdot 10^{-7} \text{ Тл} \cdot \text{м} \cdot \text{А}^{-1}$.