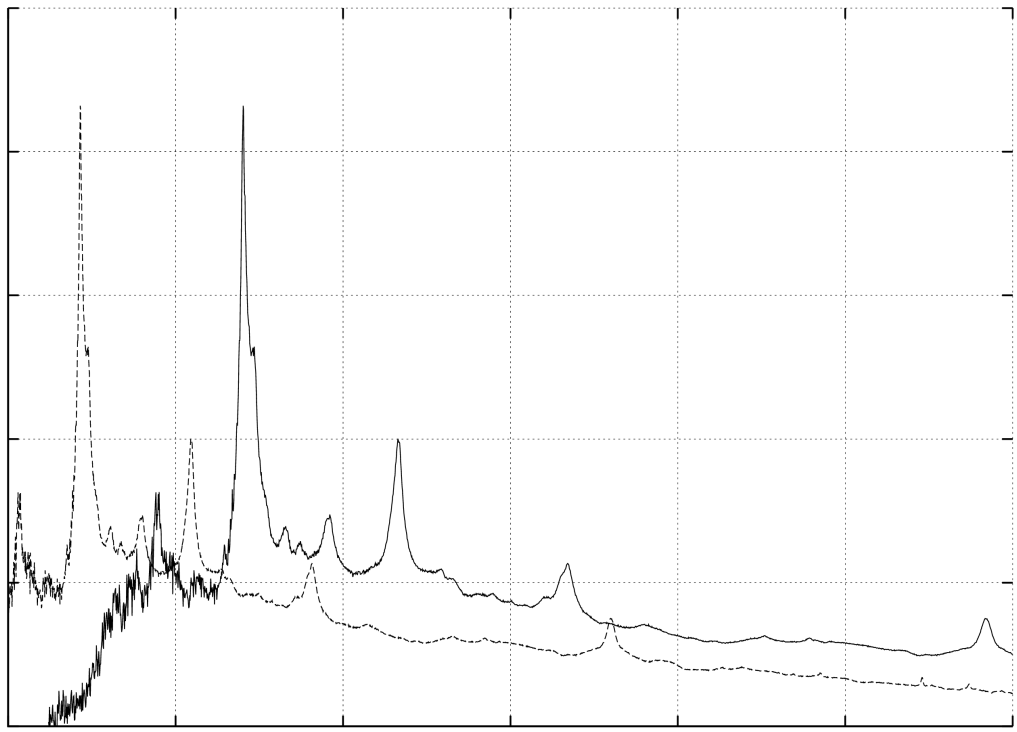
XXI Санкт-Петербургская астрономическая олимпиада

практический тур, решения

2014

16 февраля

11 класс



Вам дан наблюдаемый спектр некоторого квазара, обозначенный сплошной линией, а также его истинный спектр (который был бы у этого квазара, если бы он находился на небольшом расстоянии от нашей Галактики), обозначенный пунктирной линией. Для обоих спектров масштаб по оси абсцисс (на которой отложены длины волн) одинаков. Определите расстояние до квазара, оцените погрешность определения.

Решение:

Как известно, расстояния до квазаров оцениваются по космологическому красному смещению их спектров. Если бы были известны длины волн в наблюдаемом и истинном спектрах, то задача была бы очень простой: измеряется красное смещение z:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{v}{c} = \frac{H \cdot r}{c},$$

где H — постоянная Хаббла ($H \approx 72$ км/с/Мпк), и вычисляется расстояние r.

Однако для такого решения задачи не хватает данных: на оси абсцисс приведенного графика не указаны длины волн. Следовательно, нужно каким-то образом обойтись без них. Существуют по меньшей мере два варианта решения этой проблемы.

Можно вспомнить, что в спектрах квазаров практически всегда наблюдается особенность, именуемая «L_α-лесом» — многочисленные линии поглощения, соответствующие переходу электронов в атомах водорода с 1-го на 2-й уровень, появляющиеся при прохождении излучения квазара через межгалактические водородные облака, находящиеся между квазаром и нами.

Длины волн этих линий различаются из-за разных расстояний (и, как следствие, красных смещений) до облаков, причем вся эта система линий должна располагаться между эмиссионной линией (линией излучения) L_α самого квазара (так как все межгалактические облака, формирующие «лес», должны находиться ближе к нам, чем квазар) и длиной волны, соответствующей линии L_α в спектре без красного смещения.

В наблюдаемом спектре L_α-лес очень хорошо заметен. Исходя из этого, самую заметную эмиссионную линию в спектре можно отождествить как линию L_α, а следующую перед ней яркую эмиссионную линию — как следующую линию лаймановской серии L_β. Вычислив их «лабораторные» длины волн по формуле Ридберга

$$\lambda_{ik} = L_c \cdot \left(\frac{1}{k^2} - \frac{1}{i^2}\right)^{-1},$$

где $L_c = 912\,\mathring{A}$, мы получим возможность прокалибровать шкалу длин волн на графике, после чего задача сведется к уже рассмотренной выше.

Однако есть и намного более простой путь решения, для которого отождествление линий вообще не требуется. Пусть в спектре наблюдаются две линии с «лабораторными» длинами волн λ_1 и λ_2. В результате красного смещения длины волн меняются на λ_1' и λ_2' соответственно. Тогда, поскольку красное смещение в спектре квазара должно быть одинаковым для всех линий, верно утверждение

$$z = \frac{\lambda_1' - \lambda_1}{\lambda_1} = \frac{\lambda_2' - \lambda_2}{\lambda_2}.$$

Отсюда следует, что

$$\lambda_1' = (1+z) \cdot \lambda_1,$$
$$\lambda_2' = (1+z) \cdot \lambda_2.$$

Вычитая первое равенство из второго, получаем

$$\lambda_2' - \lambda_1' = (1+z) \cdot (\lambda_2 - \lambda_1),$$

а это означает, что расстояния между линиями $l = \lambda_2 - \lambda_1$ при красном смещении преобразуются так же, как и сами линии:

$$z = \frac{\Delta l}{l}.$$

При этом, что существенно, совершенно неважно, в каких единицах измеряется расстояние между линиями и его изменение, главное, чтобы единицы были одинаковыми. Найти линии, соответствующие друг другу в смещенном и несмещенном спектрах несложно, и простое измерение расстояний между двумя парами линий в двух спектрах сразу же дает искомый результат, который можно уточнить, выполнив промеры для нескольких разных пар и усреднив получающиеся значения.

Оба метода должны дать один и тот же результат для красного смещения квазара $z = 0.4$. Вычислив по нему расстояние, получим итоговый ответ: 1.7 Гпк.

Займемся теперь оценкой точности ответа. Максимальное измеряемое расстояние составляет около 10 см, при использовании обычной линейки абсолютная погрешность его измерения — 1 мм, т.е. относительная погрешность около 1%, для меньших измеряемых расстояний она окажется равной 2%–3%. При делении относительные погрешности складываются, поэтому итоговая относительная погрешность составит около 5%, возможно, ее удастся несколько улучшить за счет подсчета среднего значения нескольких измерений. Примерно такой же вклад в погрешность итогового результата внесет неопределенность значения постоянной Хаббла, и итоговая относительная погрешность результата окажется в пределах 10%.