

## Закономерности распространения волн оптического диапазона в межгалактической среде

Н.П. Чубинский

*Федеральное государственное автономное образовательное учреждение высшего образования «Московский физико-технический институт (национальный исследовательский университет)», E-mail: nchub940@yandex.ru*

*Рассмотрены физические факторы, влияющие на дисперсионные искажения спектра волн оптического диапазона в межгалактическом пространстве. Проанализирован вклад каждого из них в формирование регистрируемого на Земле спектра. Сформулирована гипотеза о природе «красного смещения», обусловленного дисперсионным смещением спектра источников.*

*Physical factors affecting dispersion distortions of the optical spectrum in intergalactic space are considered. The contribution of each of them to the formation of the spectrum recorded on Earth is analyzed. A hypothesis about the nature of the "red shift" caused by the dispersion shift of the source spectrum is formulated.*

### Введение

Рассмотрена задача распространения цуга волн оптического диапазона на межгалактических трассах, учитывающая дисперсионные свойства среды в рэлеевском приближении. Это обусловлено тем, что основными рассеивателями являются атомы водорода, размеры которых много меньше средней длины волны тестового сигнала. Были оценены ожидаемые доплеровские смещения спектра, связанные с радиальными относительными скоростями галактики и входящих в нее звезд относительно приемника на Земле. Приведен критический обзор устоявшихся представлений о природе красного смещения спектра.

### Естественная ширина спектра и дисперсионные свойства разреженной среды

Для идеальной спектральной линии (бесконечный цуг) оптического сигнала дисперсионные искажения при распространении в материальной среде отсутствуют. Естественная полуширина спектра  $\Delta f_0 \approx 20$  МГц реальной линии излучения связана с определенной длительностью цуга  $\tau$ , причем  $\Delta f_0 \tau \approx \pi/2$ . Частотный спектр интенсивности цуга в видимой части спектра описывается соотношением:

$$I(\Delta f) = I_m \frac{\left(\frac{\Delta f_0}{2}\right)^2}{(f-f_0)^2 + \left(\frac{\Delta f_0}{2}\right)^2} = I_m \frac{(\Delta f_0)^2}{4(\Delta f)^2 + (\Delta f_0)^2} \quad (1)$$

Спектр цуга в плотной среде имеет и доплеровское уширение, связанное с хаотическим движением рассеивателей, мы не будем его учитывать.

Рассмотрим общую геометрию эксперимента по измерению доплеровских спектров наиболее удаленных галактик (рис. 1). Выделим референтскую плоскость  $PI$ , ортогональную радиус-вектору визирования галактики. Не снижая общности, будем считать галактику дискообразной, плоскость которой составляет углы  $\theta$  и  $\varphi$  с плоскостью  $PI$  (рис. 2). Выделим проекции отдельных звезд  $Z_n$  (рис. 1), находящихся на поверхности галактики. Разобьём далее проекции каждой звезды  $Z_n$  на элементарные площадки единичного сечения  $S_{nk}$ . Выделим цилиндрические каналы, связывающие каждый элемент внешней поверхности одной из звезд галактики с приемной апертурой на Земле

$Rx$ . Скорость относительного перемещения галактики и отдельных звезд относительно пункта регистрации складывается из поступательной  $V_n$  и вращательной  $V_e$  компонент. Первая составляет  $V_n=200\dots400$  км/с, а вторая –  $V_e$  около 40 тысяч км/с. Таким образом, величина доплеровского смещения частоты регистрируемого сигнала при движении галактики и ее звезд определяется в основном вектором  $V_n$ . Более точно она связана с проекцией полного вектора на ось  $r-(V_n+V_e)_r$ .

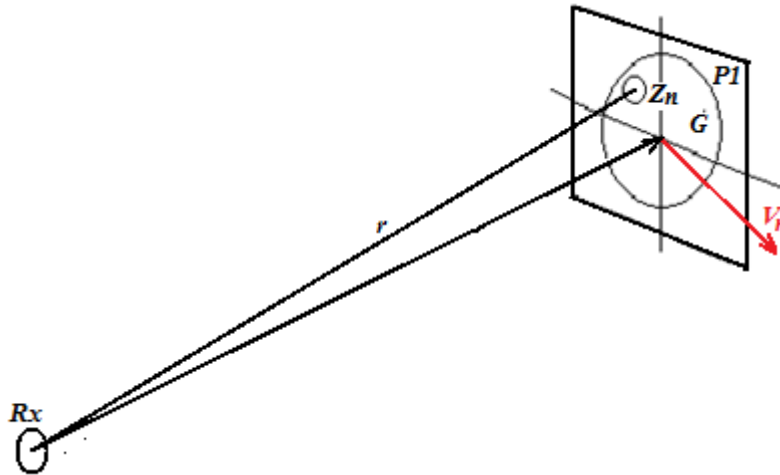


Рис. 1. Общая схема измерения доплеровских спектров удаленных галактик.

В дальнейшем решение задачи сводится к определению элементарного вклада единичной площадки  $k$  каждой  $n$ -ой звезды  $S_{nk}$  (Рис. 1) в регистрируемый сигнал. Причем, учитывая не когерентность отдельных пучков, суммирование вкладов каждого выполняется по интенсивности. Таким образом, вначале определяется спектр мощности отдельной звезды суммированием по  $k$ , а затем суммируются спектры всех  $n$  звезд галактики.

Дисперсионные свойства элементарного канала определяются средней концентрацией рассеивателей в единице объема среды, которая составляет около  $N \approx 3 \cdot 10^6$  1/м<sup>3</sup>, это преимущественно атомы водорода. В нашем случае идеально подходит приближение Рэлея, поскольку размеры рассеивателей (радиус атома водорода  $a \approx 0,656 \cdot 10^{-10}$  м) много меньше длины волны оптического диапазона  $\lambda_0 \approx 0,53 \cdot 10^{-6}$  м. Тогда частотная зависимость сечения рассеяния одного атома водорода равна:

$$\sigma_s = \frac{128\pi^5 a^6}{3\lambda^4} \approx \frac{43\pi^5 a^6 f_0^4 (1 + \Delta f_0 / f_0)^4}{c^4}, \quad (2)$$

где  $f_0$  – средняя частота спектра пучка волн,  $c$  – скорость света. Соотношение (2) можно упростить:

$$\sigma_s \approx A f_0^4 (1 + \Delta f_0 / f_0)^4. \quad (2a)$$

Результирующий спектр мощности, регистрируемый приемником, определяется произведением исходного спектра (1) и функции, описывающей дисперсионные свойства среды распространения,  $I_0 \cdot \exp(-\sigma_s N r)$ . где  $\sigma_s N$  – коэффициент затухания.

Выражение для частотной зависимости интенсивности сигнала на расстоянии  $r$  от элемента звезды на единичной площади приемной апертуры определяется соотношением:

$$P(r, \Delta f_0) = P_0 \cdot \exp(-\sigma_s N r). \quad (3)$$

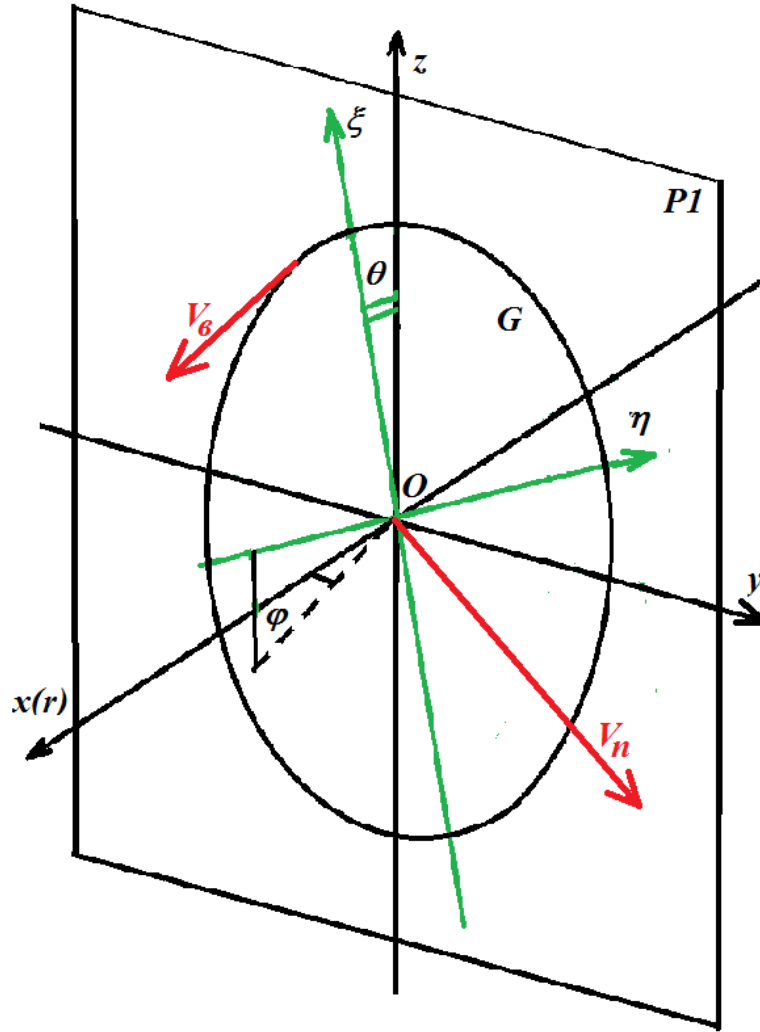


Рис. 2. Ориентация плоскости галактики G относительно плоскости P1

### Формирование доплеровских спектров далеких галактик

Локализация доплеровских спектров каждой элементарной площадки определяется проекциями полного вектора скорости галактики  $V=V_n+V_\theta$  (Рис. 2) на ось визирования  $r$ . В зависимости от ориентации оси вращения звезды  $\theta$  и  $\varphi$  возможны различные варианты:

1. при  $(V_n)_r=0$  и  $\theta=\pi/2$  доплеровское смещение, обусловленное только проекцией  $(V_\theta)_r$ , отсутствует для всех  $\varphi$  и наблюдается только исходная линия возбуждения  $f_0$ ,
2. для остальных углов  $\theta<\pi/2$  величина доплеровского смещения  $f_{дв}(V_\theta)_r \leq (f_{дв})_{\max} \cdot \cos\theta \cdot \cos\varphi$ , при этом регистрируются две группы линий  $\pm f_{дв}$ , причем при суммировании сигналов от различных элементарных площадок  $S_{nk}$  каждой из  $n$  звезд с разным угловым положением на референтской плоскости боковые компоненты спектра будут относительно спадать по амплитудам в направлениях к центральной частоте  $f_0$ ;
3. если  $(V_n)_r \neq 0$ , то к оценкам доплеровского сдвига в пп 1,2 добавится составляющая, связанная с поступательным движением звезды, она, как правило, больше (существенно больше).

Таким образом, величину измеряемого доплеровского смещения определяет только проекцией скорости  $(V_n+V_\theta)_r$ , а не полная скорость и ее ориентацию относительно оси визирования. Здесь надо отметить тот важный факт, что  $(V_n)_r$  меняет знак в зависимости

от положения вектора  $V_n$  относительно референтской плоскости: если он лежит в полупространстве между Землей и галактикой ( $r>0$ ), то соответствующий спектр смещается вверх, а в противоположном случае ( $r<0$ ) – вниз.

Поскольку нам необходимо определить полный вектор  $V_n+V_g$ , то следует знать не только измеряемую проекцию  $(V_n+V_g)_r$ , но и соответствующие углы  $\theta$  и  $\varphi$ . Можно ли определить  $\theta$  и  $\varphi$ ? Ответ отрицательный, поскольку изменение углового положения галактик происходит весьма медленно в масштабах времени нашего бытия. Ведь полный оборот галактики происходит за сотни миллионов лет. Таким образом, реально мы можем определить только  $(V_n+V_g)_r$  и установить – приближается она или удаляется. Такая же ситуация и с другими далекими галактиками.

Максимальные доплеровские смещения спектра обусловлены радиальной составляющей  $(V_n+V_g)_r$ ,  $f_{dm}\leq f_0(V_n+V_g)_r/c$ . Отдельно для радиальной составляющей поступательного движения  $f_{dm}\leq f_0(V_n)_r/c$  – около 535 ГГц, а для вращательного – около 53 ГГц. Это многократно превышает естественную ширину спектральной линии, равную 40 МГц.

Теперь необходимо скорректировать указанный частотный спектр, используя соотношение (2а). Верхняя оценка отношения амплитуд верхней и нижней составляющих спектра составляет не более 1%, что вряд ли может быть достоверно зарегистрировано, учитывая малую амплитуду сигнала на предельно больших расстояниях до дальних галактик. Поэтому надо ориентироваться на знак доплеровского смещения: если он отрицательный, то галактика удаляется, а значит необходимо отбросить верхнюю часть спектра. При положительном знаке – галактика приближается и рассматривать следует только верхнюю часть спектра.

Выражение (3) дает исчерпывающее объяснение природе доплеровского смещения. Его знак определяет направление смещения, соответствующего удалению галактики, а величина – пропорциональна скорости удаления

$$P_0 \cdot \exp(-\sigma_s N r). \quad (4)$$

На небольших расстояниях, когда  $\sigma_s N r$  существенно меньше единицы,  $P(r) \sim P_0 \sigma_s N r$  пропорционально расстоянию  $r$  (классический закон красного смещения). При увеличении расстояния этот закон переходит в экспоненциальный.

### **Критический обзор устоявшихся представлений о природе красного смещения**

После обнаружения Хаблом в 1920 году красного смещения спектральных линий видимого диапазона наиболее удаленных от Земли звездных образований, было принято считать, что оно связано с расширением Вселенной и обусловлено эффектом Доплера. Это вполне правдоподобно и в рамках классической физики. Другая группа ученых из Принстонского университета предложила и продолжает развивать квантовую теорию, а расширение Вселенной связывают с её образованием из сингулярного состояния по модели Большого Взрыва, где все звездные объекты однородно разлетаются друг от друга. Причем для этого пришлось ввести новые понятия: темную материю и темную энергию. Они не могут быть обнаружены и измерены традиционными методами классической физики, а их существование косвенно подтверждается практически линейным увеличением скорости удаления от расстояния. Хотя в научной и научно-популярной литературе упоминалось исключительно увеличение скорости удаления, а не наличие постоянного ускорения. Вот для этого и потребовалась постоянная сила, источником которой стала темная энергия. Однако предсказанные скорости удаления стали достигать релятивистских скоростей и для дальнейшего наращивания скорости

удаления будут необходимы все большие затраты темной энергии и ее запасы во вселенной будут полностью исчерпаны.

Ниже вместо библиографии приведена краткая история формирования современных представлений о Большом взрыве.

- 1916 — вышла в свет работа физика Альберта Эйнштейна «Основы общей теории относительности», в которой он завершил создание релятивистской теории гравитации<sup>[16]</sup>.
- 1917 — Эйнштейн на основе своих уравнений поля развил представление о пространстве с постоянной во времени и пространстве кривизной (модель Вселенной Эйнштейна, знаменующая зарождение космологии), ввёл космологическую постоянную  $\Lambda$ . (Впоследствии Эйнштейн назвал введение космологической постоянной одной из самых больших своих ошибок<sup>[17]</sup>; уже в наше время выяснилось, что  $\Lambda$ -член играет важнейшую роль в эволюции Вселенной). В. де Ситтер выдвинул космологическую модель Вселенной (модель де Ситтера) в работе «Об эйнштейновской теории гравитации и её астрономических следствиях».
- 1922 — советский математик и геофизик А. А. Фридман нашёл нестационарные решения гравитационного уравнения Эйнштейна и предсказал расширение Вселенной (нестационарная космологическая модель, известная как «решение Фридмана»). Если экстраполировать эту ситуацию в прошлое, то придётся заключить, что в самом начале вся материя Вселенной была сосредоточена в компактной области, из которой и начала свой разлёт. Поскольку во Вселенной очень часто происходят процессы взрывного характера, то у Фридмана возникло предположение, что и в самом начале её развития также лежит взрывной процесс — Большой взрыв.
- 1923 — немецкий математик Г. Вейль отметил, что если в модель де Ситтера, которая соответствовала пустой Вселенной, поместить вещество, она должна расширяться. О нестатичности Вселенной де Ситтера говорилось и в книге А. Эддингтона, опубликованной в том же году.
- 1924 — К. Вирц обнаружил слабую корреляцию между угловыми диаметрами и скоростями удаления галактик и предположил, что она может быть связана с космологической моделью де Ситтера, согласно которой скорость удаления отдалённых объектов должна возрастать с их расстоянием<sup>[18]</sup>.
- 1925 — К. Э. Лундмарк и затем Штрёмберг, повторившие работу Вирца, не получили убедительных результатов, а Штрёмберг даже заявил, что «не существует зависимости лучевых скоростей от расстояния от Солнца». Однако было лишь ясно, что ни диаметр, ни блеск галактик не могут считаться надёжными критериями их расстояния. О расширении непустой Вселенной говорилось и в первой космологической работе бельгийского теоретика Жоржа Леметра, опубликованной в этом же году.
- 1927 — опубликована статья Леметра «Однородная Вселенная постоянной массы и возрастающего радиуса, объясняющая радиальные скорости внегалактических туманностей». Коэффициент пропорциональности между скоростью и расстоянием, полученный Леметром, был близок к найденному Э. Хабблом в 1929. Леметр был первым, кто чётко заявил, что объекты, населяющие расширяющуюся Вселенную, распределение и скорости движения которых и должны быть предметом космологии — это не звёзды, а гигантские звёздные системы, галактики. Леметр опирался на результаты Хаббла, с которыми он познакомился, будучи в США в 1926 г. на его докладе.

- 1929 — 17 января в Труды Национальной академии наук США поступили статьи Хьюмасона о лучевой скорости NGC 7619 и Хаббла, называвшаяся «Связь между расстоянием и лучевой скоростью внегалактических туманностей». Сопоставление этих расстояний с лучевыми скоростями показало чёткую линейную зависимость скорости от расстояния, по праву называющуюся теперь законом Хаббла.
- 1948 — выходит работа Г. А. Гамова о «горячей Вселенной», построенная на теории расширяющейся Вселенной Фридмана. По Фридману, вначале был взрыв. Он произошёл одновременно и повсюду во Вселенной, заполнив пространство очень плотным веществом, из которого через миллиарды лет образовались наблюдаемые тела Вселенной — Солнце, звёзды, галактики и планеты, в том числе Земля и всё что на ней. Гамов добавил к этому, что первичное вещество мира было не только очень плотным, но и очень горячим. Идея Гамова состояла в том, что в горячем и плотном веществе ранней Вселенной происходили ядерные реакции, и в этом ядерном котле за несколько минут были синтезированы лёгкие химические элементы. Самым эффективным результатом этой теории стало предсказание космического фона излучения. Электромагнитное излучение должно было, по законам термодинамики, существовать вместе с горячим веществом в «горячую» эпоху ранней Вселенной. Оно не исчезает при общем расширении мира и сохраняется — только сильно охлаждённым — и до сих пор. Гамов и его сотрудники смогли ориентировочно оценить, какова должна быть сегодняшняя температура этого остаточного излучения. У них получалось, что это очень низкая температура, близкая к абсолютному нулю. С учётом возможных неопределённостей, неизбежных при весьма ненадёжных астрономических данных об общих параметрах Вселенной как целого и скудных сведениях о ядерных константах, предсказанная температура должна лежать в пределах от 1 до 10 К. В 1950 году в одной научно-популярной статье (*Physics Today*, № 8, стр. 76) Гамов объявил, что скорее всего температура космического излучения составляет примерно 3 К.
- 1955 — Советский радиоастроном Тигран Шмаонов экспериментально обнаружил шумовое СВЧ-излучение с температурой около 3 К<sup>[19]</sup>.
- 1964 — американские радиоастрономы А. Пензиас и Р. Вилсон открыли космический фон излучения и измерили его температуру. Она оказалась равной именно 3 К. Это было самое крупное открытие в космологии со времён открытия Хабблом в 1929 году общего расширения Вселенной. Теория Гамова была полностью подтверждена. В настоящее время это излучение носит название реликтового; термин ввёл советский астрофизик И. С. Шкловский.
- 2003 — спутник WMAP с высокой степенью точности измеряет анизотропию реликтового излучения. Вместе с данными предшествующих измерений (COBE, Космический телескоп Хаббла и др.), полученная информация подтвердила космологическую модель  $\Lambda$ CDM и инфляционную теорию. С высокой точностью был установлен возраст Вселенной и распределение по массам различных видов материи (барионная материя — 4 %, тёмная материя — 23 %, тёмная энергия — 73 %)<sup>[20]</sup>.
- 2009 — запущен спутник Планк, который в настоящее время измеряет анизотропию реликтового излучения с ещё более высокой точностью.