

ОБЗОРЫ

МИСТИЧЕСКАЯ ВОЛНА РЭДКЛИФФА

В.В.БОБЫЛЕВ¹, А.Т.БАЙКОВА¹, Ю.Н.МИШУРОВ²

Поступила 25 июля 2022

Принята к печати 11 ноября 2022

Обзор посвящен волне Рэдклиффа, открытой недавно Алвесом и др. из анализа расположения молекулярных облаков. Эти авторы выделили узкую цепочку из молекулярных облаков, вытянутых практически в одну линию, расположенную под наклоном около 30° к галактической оси y . Собственно, волна Рэдклиффа очерчивает затухающие осцилляции в вертикальном распределении молекулярных облаков с максимальной амплитудой колебания около 160 пк и характерной длиной волны около 2.5 кпк. В настоящее время наличие волны Рэдклиффа подтверждено в вертикальном распределении: а) межзвездной пыли, б) источников мазерного излучения и радиозвезд, которые являются очень молодыми звездами и протозвездами, тесно связанными с молекулярными облаками, в) маломассивных звезд типа Т Тельца, г) более массивных ОВ-звезд и д) молодых рассеянных скоплений звезд. Волна Рэдклиффа прослеживается и в вертикальных скоростях молодых звезд. Большинство из рассмотренных результатов анализа вертикальных скоростей различных молодых звезд показывает, что колебания вертикальных положений и вертикальных скоростей звезд в волне Рэдклиффа происходят синхронно. Природа волны Рэдклиффа до конца не ясна. Многие исследователи связывают ее с предположением о внешнем гравитационном воздействии на галактический диск ударника типа карликовой галактики-спутника Млечного Пути.

Ключевые слова: волна Рэдклиффа: молекулярные облака: молодые звезды

1. *Открытие волны Рэдклиффа.* Вблизи Солнца известна волна Рэдклиффа, распространяющаяся приблизительно вдоль Местного рукава (рукава Ориона). Впервые она была обнаружена Алвесом и др. [1] из анализа распределения молекулярных облаков. Первые авторы этого научного коллектива являются представителями Института перспективных исследований Рэдклиффа в Кембридже, Массачусетс. Поэтому волну они называли в честь родного института.

Алвес и др. [1] выделили узкую цепочку из молекулярных облаков, вытянутых практически в одну линию, расположенную под наклоном около 30° к галактической оси y . Собственно волна наблюдается в вертикальных координатах z облаков. Таким образом, структура является трехмерной. Согласно Алвесу и др. [1], волна является затухающей и максимальное значение амплитуды наблюдается в непосредственной близости от Солнца, где расположен пояс Гулда [2]. Как отмечено в [1], волна Рэдклиффа должна

играть важную роль в понимании причины образования пояса Гулда. В частности, они считают, что наличие вертикальных возмущений закрывает гипотезу Блау [3] о взрыве гиперновой.

Обнаружение волны Рэдклиффа оказалось возможным благодаря работам Цукер и др. [4,5] по оценке расстояний до молекулярных облаков в области Местного рукава, расположенных на гелиоцентрических расстояниях от 150 пк до 2.5 кпк. Авторы разработали метод, объединяющий фотометрические данные с тригонометрическими параллаксами звезд из каталога Gaia DR2 [6]. По их оценке, расстояния до молекулярных облаков в итоге определены со средней ошибкой около 5%.

На рис.1 даны вертикальные координаты, выделенных Алвесом и др. [1], молекулярных облаков, расположенные вдоль оси y' , которая ориентирована под углом 30° к галактической оси y . На рисунке показан целый ряд моделей волны Рэдклиффа из работы этих авторов.

В настоящей работе мы рассматриваем гелиоцентрическую прямоугольную систему координат x, y, z , в которой ось x направлена от Солнца в центр Галактики, направление оси y совпадает с направлением вращения Галактики, а ось z направлена в северный галактический полюс, а также галактоцентрическую прямоугольную систему координат X, Y, Z , в которой ось X направлена от центра Галактики на Солнце, направление оси Y совпадает с направлением вращения Галактики, а ось Z направлена в северный галактический полюс. Таким образом, в этих двух системах координат различаются только направления осей x и X . При этом ориентация волны Рэдклиффа по отношению к осям y и Y отличается только знаком. Например, в гелиоцентрической системе координат переход к штрихованной оси y' осуществляется следующим образом:

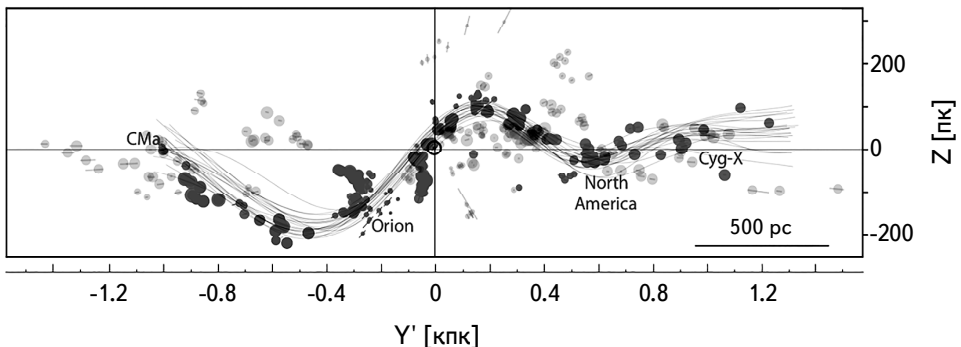


Рис.1. Вертикальные координаты молекулярных облаков z в зависимости от положения на оси y' (эта ось расположена под углом -30° к галактической оси y), темными кружками даны облака, трассирующие волну Рэдклиффа, светлыми кружками даны облака поля, серыми пунктирными линиями даны модели волны Рэдклиффа. Это рисунок из работы [1], к которому мы добавили более подробную шкалу y' .

$$y' = y \cos 30^\circ + x \sin 30^\circ. \quad (1)$$

В свете сказанного можем отметить, что при цитировании работ различных авторов мы не различаем обозначения z и Z , а также y' и Y' . Кроме того, пространственные скорости, направленные вдоль осей x, y, z обычно обозначаются как U, V, W . При этом на графиках из некоторых цитируемых работ вертикальные скорости обозначены как V_z .

Моделирование волны Рэдклиффа в работе [1] производилось с использованием квадратичной функции в пространстве координат x, y, z , заданной тремя наборами "опорных точек" (x_0, y_0, z_0) , (x_1, y_1, z_1) и (x_2, y_2, z_2) . Волнообразное поведение относительно центра волны описывалось синусоидальной функцией относительно плоскости XY с затухающим периодом и амплитудой:

$$\Delta z(t) = A \exp \left[-\delta \left(\frac{d(t)}{\text{кпк}} \right)^2 \right] \sin \left[\left(\frac{2\pi d(t)}{P} \right) \left(1 + \frac{d(t)/d_{\max}}{\gamma} \right) + \phi \right], \quad (2)$$

где $d(t) = \|(x, y, z)(t) - (x_0, y_0, z_0)\|$ - расстояние конкретного облака от начала волны, заданное параметром t , d_{\max} - расстояние от конца волны, A - амплитуда волны, P - период волны, ϕ - фаза волны, δ задает скорость затухания амплитуды, а γ задает скорость затухания периода. В итоге Алвес и др. [1] нашли следующие параметры модельной волны:

$$\begin{aligned} \lambda &= 2.7 \pm 0.2 \text{ кпк}, & A &= 160 \pm 30 \text{ пк}, \\ \sigma_{\text{scatter}} &= 60 \pm 15 \text{ пк}, & \text{Масса} &\geq 3 \cdot 10^6 M_{\odot}, \end{aligned} \quad (3)$$

где λ - длина волны, σ_{scatter} - среднеквадратическое отклонение облаков от модели (радиус волны), приведенные ошибки параметров в (3) соответствуют уровню 95% ($\pm 2\sigma$).

К настоящему времени уже опубликовано около десятка статей, посвященных определению геометрических и кинематических характеристик волны Рэдклиффа по данным о различных молодых объектах, а также гипотезам ее происхождения. Целью настоящей работы является обзор этих публикаций.

2. Подтверждение наличия волны Рэдклиффа.

2.1. *Молодые звезды, РЗС и пылевые облака.* Донада, Фигуэрос [7] проанализировали выборку очень молодых ОВ-звезд и рассеянных звездных скоплений (РЗС) моложе 30 млн лет из окрестности Солнца радиусом около 2 кпк. Авторами были разработаны критерии для перекрестного сопоставления этих объектов с идентифицированными комплексами облаков, принадлежащих волне Рэдклиффа. В работе уделено большое внимание оценке качества использованных астрометрических и фотометрических данных, на основе

которых были получены оценки расстояний до ОВ-звезд и РЗС. Авторы впервые попытались найти связь между структурными и кинематическими свойствами молодой звездной популяции, связанной с волной Рэдклиффа, и пришли к следующим выводам: 1) идентифицировано 13 РЗС, каждое из которых физически связано с молекулярными облаками (МО) вероятными членами волны Рэдклиффа; 2) по сравнению с РЗС одиночные ОВ-звезды хуже представляют собой вытянутую структуру, которая трассирует волну Рэдклиффа, поэтому основной упор в своей работе авторы сделали на анализе РЗС; 3) вертикальное движение 11 пар вида "РЗС-МО", связанных с волной Рэдклиффа, не противоречит простой модели гармонического движения в вертикальном направлении, и 4) траектории 13 РЗС, проинтегрированные в прошлое, с использованием гравитационного потенциала Галактики, не предполагают начала координат, связанного ни с точкой, ни с прямой линией в плоскости XZ . Из рис.2, взятого из [7], хорошо просматривается связь между вертикальными координатами z и вертикальными скоростями W одиннадцати РЗС, принадлежащих структуре волны Рэдклиффа.

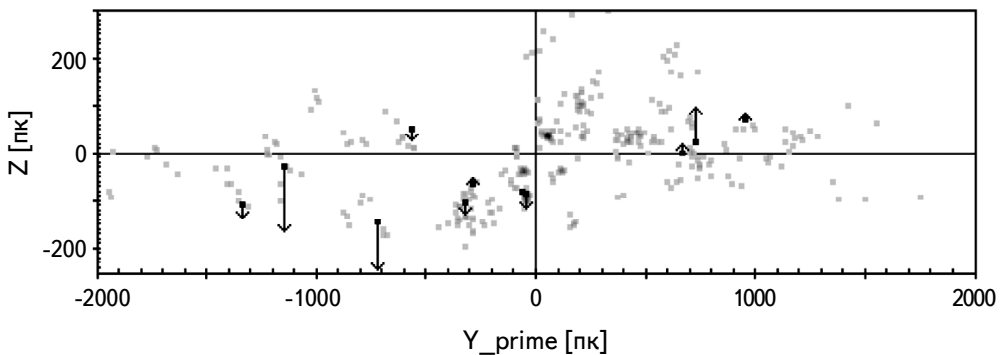


Рис.2. Вертикальные координаты z молодых РЗС в зависимости от расстояния y' , вертикальные скорости W одиннадцати пар вида "РЗС-МО" показаны черными стрелками, рисунок взят из работы Донады, Фигуэроса [7]).

Свиггум и др. [8] попытались выяснить пространственную связь между волной Рэдклиффа и Местным рукавом. Для этого были использованы данные о звездах высокой светимости и молодых РЗС из каталога Gaia EDR3 [9] в сочетании с трехмерными картами пыли. Набор этих данных был исследован в контексте цветовых градиентов, наблюдаемых в спиральных рукавах других галактик, где предсказания теории волн плотности и моделей инициированного звездообразования применялись для интерпретации конкретного расположения газопылевых облаков и ОВ-звезд. Авторы пришли к заключению о том, что волна Рэдклиффа представляет собой газовый резервуар в Местном рукаве, являющийся лабораторией по изучению образования звезд

и молекулярных облаков в Млечном Пути.

На рис.3 видно, что цепочка молекулярных облаков, которая ассоциируется с волной Рэдклиффа, расположена вдоль внутреннего края структуры P21. Структура P21 выявлена в работе [10] из анализа распределения молодых звезд, P3С и классических цефеид. Для этих объектов были использованы данные из каталога Gaia EDR3. Конечно, эта структура является частью Местного рукава. Неожиданностью является довольно большой угол, около 30° , под которым эта структура наклонена к оси Y .

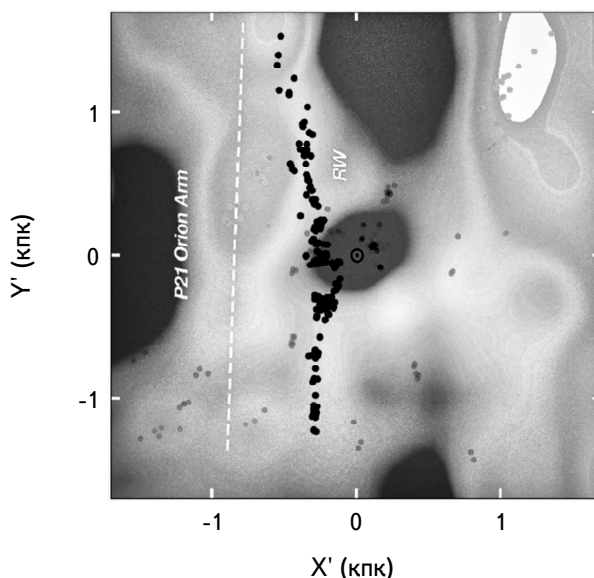


Рис.3. В повернутой (примерно на 30° относительно системы координат XY) системе координат $X'Y'$ дано распределение звездной плотности черно-серо-белой заливкой, серыми кружками дано распределение областей звездообразования, согласно [5], черными кружками отмечены облака, принадлежащие волне Рэдклиффа по [1], пунктирная белая линия показывает соответствие пикам избыточной звездной плотности вдоль структуры P21 [10], положение Солнца отмечено символом Солнца. Рисунок взят из работы Свиггума и др. [8].

Согласно определениям различных авторов, угол закрутки четырехрукавного спирального узора в Галактике заключен в интервале 10° - 15° [11-16]. Хотя Местный рукав не является спиральным рукавом "grand design", но он тесно связан со спиральной структурой Галактики. Значения угла закрутки, найденные по объектам Местного рукава, также лежат в довольно узком интервале значений, 9° - 16° [15-17]. Скорее всего, структура P21 указывает на локальное уклонение от общей ориентации Местного рукава.

В работе Лаллемента и др. [18] были объединены фотометрические данные о звездах из каталога Gaia EDR3 с инфракрасными измерениями из каталога 2MASS [19] для построения высокоточной трехмерной карты

межзвездного поглощения. На рис.4, взятом из работы [18], показано вертикальное распределение межзвездной пыли в четырех узких в горизонтальном направлении разрезах. Как можно видеть из этого рисунка, волнообразные отклонения от галактической плоскости в вертикальном направлении с амплитудой до 300 пк наблюдаются в различных направлениях. Для нас же наибольший интерес представляет разрез номер 3, ориентированный в направлении $l=60^\circ$ (таким образом проходит под углом -30° к галактической оси Y), ясно показывающий наличие волны Рэдклиффа в распределении межзвездной пыли.

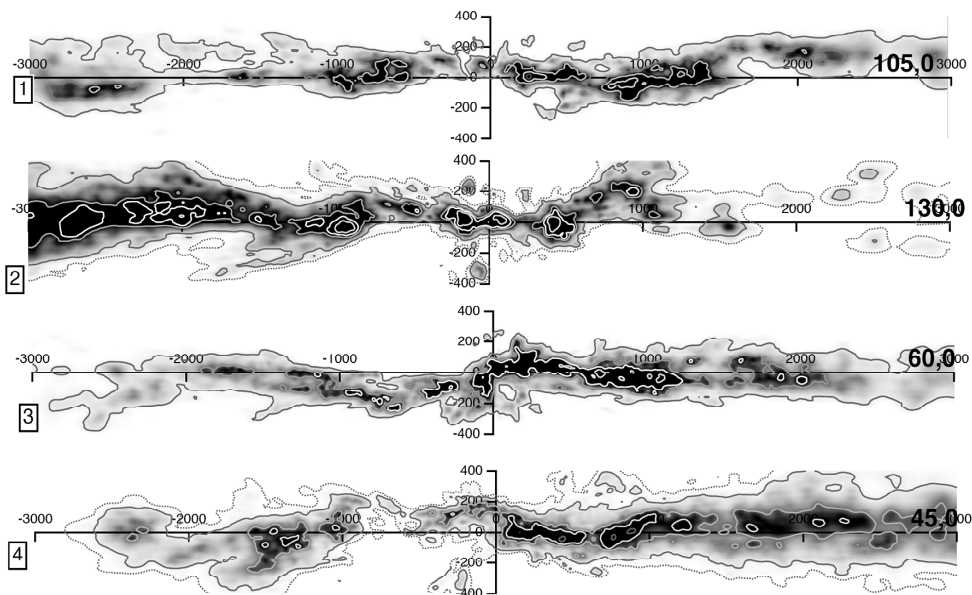


Рис.4. Распределения межзвездной пыли по вертикали в четырех разрезах, проходящих вблизи Солнца, где справа указана галактическая долгота конца разреза, слева указан номер разреза, рисунок взят из работы Лаллемента и др. [18].

В работе Туласидхарана и др. [20] по молодым звездам, расположенным в околосолнечной области радиусом 3 кпк, изучены их вертикальные скорости. Анализировались три выборки: ОВ-звезды, звезды из верхней части ГП (это главным образом звезды спектрального класса А) и выборка красных гигантов. В итоге было показано, что амплитуда вертикальных колебаний с длиной волны около 2.5-2.7 кпк (вдоль оси y') зависит от возраста звездного населения. Максимальную амплитуду вертикальных скоростей с величиной 3-4 км/с демонстрируют ОВ-звезды. По мнению авторов [20], основным механизмом обнаруженных таких вертикальных колебаний может служить реакция галактического диска на внешнее возмущение.

На основе изучения пространственного распределения в околосолнечной окрестности ОВ-звезд с высокоточными оценками расстояний, Гонсалес и др. [41] выделили интересную структуру, которую они назвали шпорой Цефея. Эта структура находится внутри Местного рукава, но расположена она под значительно большим углом к оси Y (под углом примерно 45°), чем сам рукав. По мнению авторов, эта структура связана с волной Рэдклиффа, так как наблюдается волнообразный характер в распределении вертикальных координат вдоль шпоры Цефея (рис.7 в работе Гонсалеса и др. [41]). Они также высказали предположение о том, что вертикальные колебания в галактическом диске могут быть ответственными за недавнее усиленное звездообразование на соответствующих гребнях и впадинах волны.

Ли и Чен [21] по данным о большом количестве молодых звезд, трассирующих волну Рэдклиффа, нашли связь между их возмущенными вертикальными положениями и вертикальными скоростями. Для этой цели были использованы маломассивные звезды, еще не достигшие стадии ГП. При этом вертикальные скорости звезд вычислялись без использования лучевых скоростей (из-за отсутствия таких измерений в используемой выборке). Поэтому результаты этих авторов следует считать предварительными.

2.2. Метод на основе Фурье анализа. Для изучения периодической структуры в координатах и скоростях звезд в работе Бобылева и др. [22] было предложено использовать спектральный анализ на основе стандартного преобразования Фурье исходной последовательности $z(y')$:

$$F(z(y')) = \int z(y') e^{-j2\pi y'/\lambda} = U(\lambda) + jV(\lambda) = A(\lambda) e^{j\varphi(\lambda)}, \quad (4)$$

где $A(\lambda) = \sqrt{U^2(\lambda) + V^2(\lambda)}$ - амплитуда спектра, а $\varphi(\lambda) = \arctan(V(\lambda)/U(\lambda))$ - фаза спектра. Особенностью настоящего подхода является поиск не просто монохроматической волны с постоянной амплитудой, а волны, наиболее точно описывающей исходные данные, спектр которого совпадает с главным пиком (лепестком) вычисленного спектра в диапазоне длин волн от λ_{min} до λ_{max} (внутри этих границ мощность спектра плавно уменьшается, начиная с максимального значения, а вне - начинает увеличиваться).

В итоге имеем искомую плавную кривую, аппроксимирующую исходные данные, которая вычисляется по формуле обратного преобразования Фурье в определенном нами диапазоне длин волн:

$$z(y') = 2k \int_{\lambda_{min}}^{\lambda_{max}} A(\lambda) \cos\left(\frac{2\pi y'}{\lambda} + \varphi(\lambda)\right) d\lambda, \quad (5)$$

где k - коэффициент, вычисляющийся из условия минимума невязки.

2.2.1. Фурье анализ данных Алвеса и др. Вначале мы решили

протестировать метод Фурье анализа с использованием данных о молекулярных облаках, по которым Алвесом и др. [1] была обнаружена волна Рэдклиффа.

В объединенной выборке нами использованы два набора данных, которые анализировались в [1], и находящихся в открытом доступе: а) данные о плотных облаках взяты из <https://doi.org/10.7910/DVN/07L7YZ> и б) данные о более разреженных структурах взяты из <https://doi.org/10.7910/DVN/K16GQX>. Всего Алвесом и др. [1] были проанализированы 380 структур с оценками расстояний до них. Причем, случайные ошибки оценки расстояний до этих молекулярных облаков, согласно авторам, составляют около 5%.

На рис.5 дано распределение 380 молекулярных облаков в проекции на галактическую плоскость XY . Для изучения волны Рэдклиффа из них мы отобрали 189, расположенных в узкой зоне, наклоненной под углом -30° к оси Y , как показано на рисунке. Таким образом, имеем выборку, очень близкую к той, что анализировалась Алвесом и др. [1]. На рисунке показаны фрагменты четырехрукавного спирального узора с углом закрутки $i = -13^\circ$, согласно работе [11]. Здесь этот спиральный узор построен со значением расстояния от Солнца до центра Галактики $R_0 = 8.1$ кпк. Значение $R_0 = 8.1 \pm 0.1$ кпк было выведено

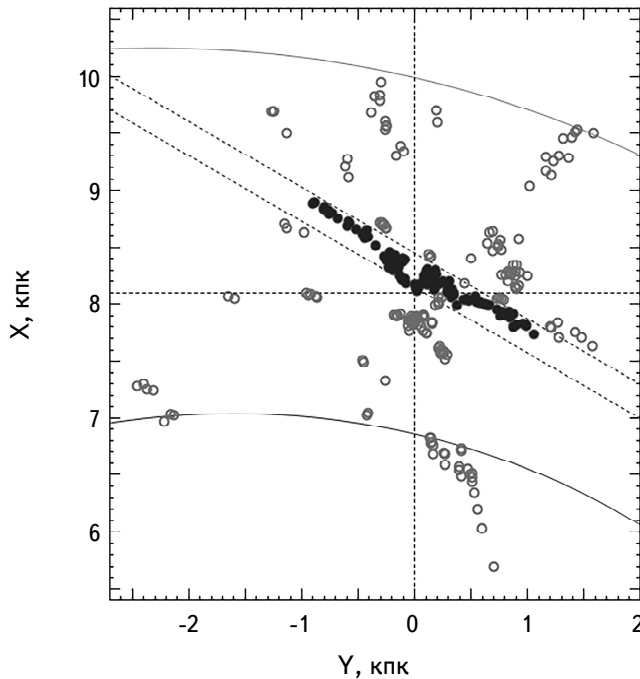


Рис.5. Распределение 380 молекулярных облаков из работы [1] в проекции на галактическую плоскость XY - серые кружки, 189 облаков из узкой зоны, проходящей под углом -30° к оси Y , даны черными кружками, отмечены два фрагмента четырехрукавного спирального узора с углом закрутки $i = -13^\circ$.

как средневзвешенное из большого количества современных индивидуальных оценок в работе [39].

Затем положения отобранных молекулярных облаков были спроецированы на ось y' , расположенную под углом -30° к оси y . В повернутой таким образом системе координат выполнен Фурье анализ их положений. Причем анализ проведен для двух случаев: а) для монохроматической волны, когда в спектре мощности берется одна частота, соответствующая максимуму спектра и б) для полихроматической волны, когда в спектре мощности взяты частоты, соответствующие интервалу от λ_{min} до λ_{max} , согласно выражению (5). Для каждого случая вычисляется значение среднеквадратического отклонения σ_z .

В случае монохроматической волны получены следующие оценки параметров волны:

$$\lambda = 2.5 \pm 0.1 \text{ кпк}, \quad z_{max} = 120 \pm 4 \text{ пк}, \quad \sigma_z = 60 \text{ пк}. \quad (6)$$

Ошибки параметров, которые мы даем здесь и далее, соответствуют уровню 68% ($\pm 1\sigma$). В случае полихроматической волны найдено:

$$\lambda = 2.5 \pm 0.1 \text{ кпк}, \quad z_{max} = 150 \pm 4 \text{ пк}, \quad \sigma_z = 46 \text{ пк}. \quad (7)$$

Здесь так же, как и в (6), значение длины волны λ соответствует максимуму спектра мощности (рис.6d). Отметим, что на рис.6d заштрихован главный лепесток спектра. При этом положение λ_{min} четко видно, а вот положение λ_{max} находится далеко за пределами рисунка.

В нашем методе мы отказались от обозначения амплитуды символом A ,

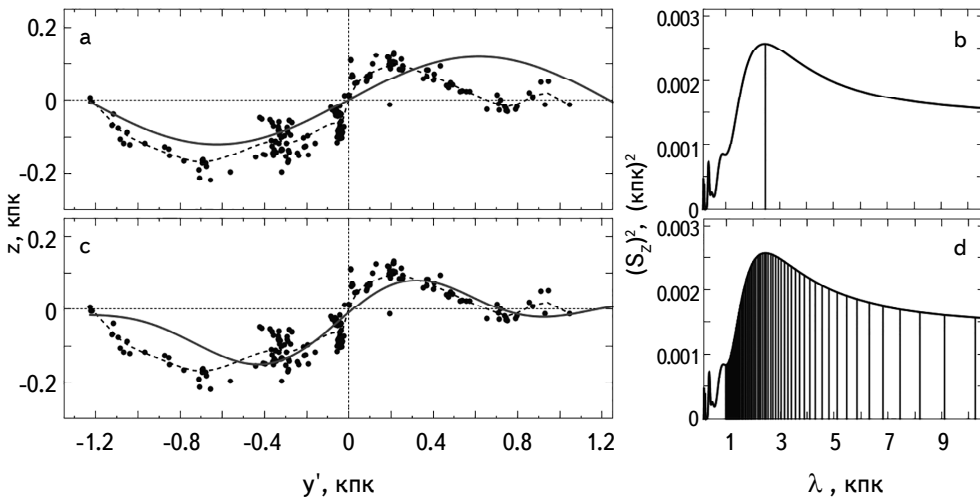


Рис.6. Вертикальные координаты z избранных молекулярных облаков из работы [1] в зависимости от расстояния y' (а) и (с), их спектры мощности (b) и (d), периодические жирные линии на графиках (a) и (с) отражают соответствующие результаты спектрального анализа, а пунктирные линии показывают сглаженные средние значения координат.

так как указываем максимальное значение волны z_{max} , которое в данном случае достигается при $y' = -0.43$ кпк. В решении (7) имеем меньшее по сравнению с (6) значение дисперсии σ_z . Таким образом, полихроматическая волна лучше согласуется с данными. Кроме того, она лучше согласуется и с результатами анализа Алвеса и др. [1], что можно видеть из сравнения рис.1 и рис.6, а также из сравнения найденных параметров (6) и (7) с (3). Отметим, что Алвес и др. [1] также отказались от использования монохроматической волны в пользу волны с затухающими амплитудой и периодом (2).

Оценки ошибок искомых параметров найдены с применением статистического моделирования методом Монте-Карло на основе выполнения 100 циклов вычислений. При этом числе циклов средние значения решений практически совпадают с решениями, полученными по исходным данным без добавления ошибок измерения. Ошибки измерения добавлялись в координаты источников x , y и z .

2.2.2. Фурье анализ выборки мазеров. Источниками мазерного излучения являются звезды с протяженными газопылевыми оболочками, в которых возникает эффект накачки. Эффектом мазерного излучения обладают как очень молодые звезды и протозвезды различной массы, так и старые звезды, например, мириды. В работе Бобылева и др. [22] для изучения волны Рэдклиффа были использованы РСДБ-наблюдения только молодых объектов, которые тесно связаны с областями активного звездообразования.

Важно отметить, что астрометрические РСДБ-наблюдения мазерных источников и радиозвезд очень точны. Так, ошибка определения тригонометрического параллакса составляет в среднем около 10 микросекунд дуги. Это позволяет, в частности, анализировать кинематику мазеров, расположенных вплоть до центра Галактики, с относительными ошибками расстояний около 10%.

Основные данные о мазерах содержатся в двух крупных компиляциях - Рида и др. [14] и Хироты и др. [23]. Ридом и др. [14] дана информация о 199 мазерах с результатами РСДБ-наблюдений различными авторами на нескольких радиочастотах в рамках проекта BeSSeL (The Bar and Spiral Structure Legacy Survey¹). В работе [23] описан каталог из 99 источников мазерного излучения, наблюдавшихся на частоте 22 ГГц по программе VERA (VLBI Exploration of Radio Astrometry²). Между выборками Рида и др. [14] и Хироты и др. [23] имеется большой процент общих измерений. Известен также ряд новых результатов определения параллаксов мазеров, выполненных после 2020г. [17,24,25].

Кроме собственно источников мазерного излучения, радионаблюдения

¹ <http://bessel.vlbi-astrometry.org>

² <http://veraserver.mtk.nao.ac.jp>

которых осуществляются в узких линиях, в нашем списке имеются радиозвезды, наблюдения которых выполнены РСДБ-методом в континууме на частоте 8.4 ГГц [26-29]. Это очень молодые звезды и протозвезды типа Т Тельца, расположенные главным образом в области пояса Гулда и Местного рукава. Они являются наиболее близкими по возрасту к молекулярным облакам, которые анализировались Алвесом и др. [1].

Как можно видеть из рис.7, взятом из работы [22], в интересующей нас зоне мазеров не так много, чтобы выбирать их в узкой зоне. Поэтому были отобраны практически все источники, расположенные в Местном спиральном рукаве. Четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$ дан согласно работе [11]. Здесь этот узор построен со значением $R_0 = 8.1$ кпк, римскими цифрами пронумерованы следующие четыре спиральных рукава: I - Щита, II - Киля-Стрельца, III - Персея и IV - Внешний рукав. Черными кружками отмечены 68 отобранных для анализа источников. Из-за сильной скученности ряда ближайших мазеров в районе ассоциаций Ориона, Тельца или Скорпиона-Центавра, на рисунке их проекции сливаются в соответствующую

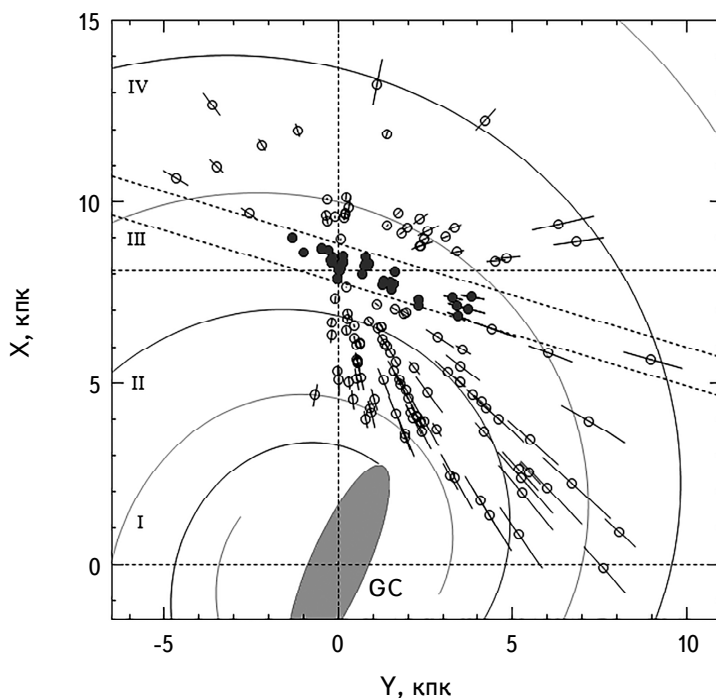


Рис.7. Распределение мазеров и радиозвезд с ошибками тригонометрических параллаксов менее 15% в проекции на галактической плоскости XY , 68 отобранных для анализа волны Рэдклиффа мазеров и радиозвезд отмечены черными кружками, показан четырехрукавный спиральный узор с углом закрутки $i = -13^\circ$ [11], отмечен центральный галактический бар, GC - центр Галактики. Рисунок взят из работы Бобылева и др. [22].

каждой ассоциации точку. Двумя параллельными пунктирными линиями, расположенными под наклоном -16° к оси Y , обозначены границы области отбора источников. Ширина зоны отбора составляет около 1.2 кпк. Также было использовано ограничение на гелиоцентрическое расстояние звезд, $r < 4$ кпк.

Положения мазеров были спроектированы на ось y' . И уже в этой, повернутой, системе координат был проведен спектральный анализ положений и вертикальных скоростей отобранных мазеров. В итоге были получены следующие оценки максимального значения координаты z (z_{max} , которое достигается при $y' = -0.28$ кпк) и длины волны λ :

$$z_{max} = 87 \pm 4 \text{ кпк}, \quad \lambda = 2.8 \pm 0.1 \text{ кпк} \quad (8)$$

из анализа положений источников. Из анализа же вертикальных скоростей W мазеров получена оценка максимального значения их скорости возмущения W_{max} (которое достигается при $y' = 1.4$ кпк) и длина волны этих возмущений λ :

$$W_{max} = 5.1 \pm 0.7 \text{ км/с}, \quad \lambda = 3.9 \pm 1.6 \text{ кпк}. \quad (9)$$

Результаты спектрального анализа отражены на рис.8. Пунктирными линиями на рис.8а и в показаны сглаженные средние значения данных. Хорошее

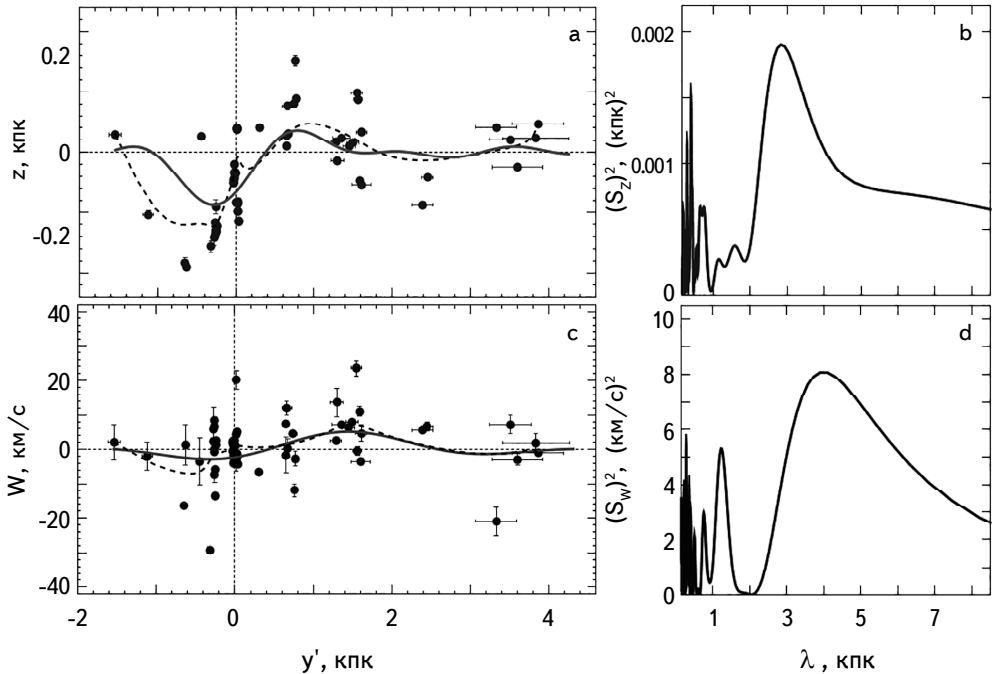


Рис.8. Координаты мазеров z в зависимости от расстояния y' (а) и их спектр мощности (б), вертикальные скорости мазеров W в зависимости от расстояния y' (с) и их спектр мощности (д), периодические кривые, показанные сплошными линиями, отражают результаты спектрального анализа, пунктирными линиями показаны сглаженные средние значения. Рисунок взят из работы Бобылева и др. [22].

согласие в поведении сплошных и пунктирных линий в околосолнечной области говорит о надежности проведенного спектрального анализа. Отметим также согласие в характере распределения вдоль волны вертикальных скоростей на рис.8с и рис.2.

2.2.3. *Фурье анализ звезд типа Т Тельца.* В работе Бобылева и др. [22] для изучения волны Рэдклиффа были использованы данные о звездах типа Т Тельца. Основой выборки послужила работа Мартона и др. [30], в которой был произведен отбор молодых галактических звездных объектов из комбинации орбитальных наблюдений космических спутников - WISE [31], Planck [32] и Gaia [33]. Эта база имеет название Gaia DR2 × AllWISE. Она содержит более 100 млн объектов различной природы, которые разделены на 4 основных класса - молодые звездные объекты (Young Stellar Objects, далее YSO), звезды ГП, проэволюционировавшие звезды и внегалактические объекты. Для каждой звезды определена вероятность принадлежности к каждому из четырех рассматриваемых классов. Оценки вероятности были найдены с использованием звездных величин G из каталога Gaia DR2 [6], инфракрасных фотометрических полос W1-W4 из каталога WISE и J, H, K из каталога 2MASS. Чтобы решить, как источник связан с пылевой областью, Мартон и др. [30] использовали индекс прозрачности пыли (τ) для каждого объекта из карты Planck.

Параллаксы, собственные движения и лучевые скорости звезд из базы Gaia DR2 × AllWISE были взяты из каталога Gaia DR2 в работе [34]. Оказалось, что имеется очень мало измеренных лучевых скоростей для этих звезд. Это не позволяет вычислить полноценные пространственные скорости звезд. Поэтому было проанализировано только пространственное распределение отобранных молодых звезд.

Для отбора из базы Gaia DR2 × AllWISE наиболее молодых звезд, не достигших стадии ГП, были применены следующие критерии:

$$LY > 0.95, \quad SY > 0.98, \quad LMS < 0.5, \quad SMS < 0.5, \quad SE < 0.5, \quad SEG < 0.5, \quad (10)$$

где SY - вероятность того, что звезда является YSO, найденная без привлечения фотометрических полос W3 и W4 из каталога WISE, LMS - вероятность того, что звезда находится на стадии ГП, найденная с привлечением всех фотометрических полос из каталога WISE, SMS - вероятность того, что звезда находится на стадии ГП, найденная без привлечения фотометрических полос W3 и W4 из каталога WISE, SE - вероятность того, что это эволюционирующая звезда, найденная без привлечения фотометрических полос W3 и W4 из каталога WISE и SEG - вероятность того, что это внегалактический источник, найденный без привлечения фотометрических полос W3 и W4 из каталога WISE.

Известно, что тригонометрические параллаксы звезд из каталога Gaia DR2 имеют систематический сдвиг относительно инерциальной системы координат [35]. В частности, в работе [35] было показано, что значение такой поправки составляет $\Delta\pi = -0.029$ мсд. Это значение мы использовали при вычислении расстояний r до звезд через их параллаксы, $r = 1/\pi_{true}$. Причем, использование поправки уменьшает расстояния до звезд, т.к. $\pi_{true} = \pi + 0.029$.

Для изучения волны Рэдклиффа, на галактической плоскости XY звезды были отобраны из узкой зоны, расположенной под углом -25° к оси Y. Использовались звезды с ошибками тригонометрических параллакссов менее 10%. Всего в выборке оказалось около 600 звезд. Отметим, что в работе Туласидхарана и др. [20] при анализе трех выборок молодых звезд также поворот к оси y' производился на 25° . Дело в том, что при большем угле в выборке оказывается очень мало далеких звезд.

На рис.9 дана диаграмма показатель цвета-абсолютная звездная величина, построенная по выборке звезд из зоны, проходящей под углом -25° к оси Y. Показанная на рисунке ГП проведена согласно работе [36]. Мелкие детали нас интересуют мало, поэтому диаграмма построена без учета поглощения. Главное здесь то, что использование критериев отбора (10) позволяет отобрать действительно очень молодые звезды, не достигшие стадии ГП.

На основе Фурье анализа этой выборки были получены следующие оценки амплитуды z_{max} (которая достигается при $y' = -0.4$ кпк) и длины

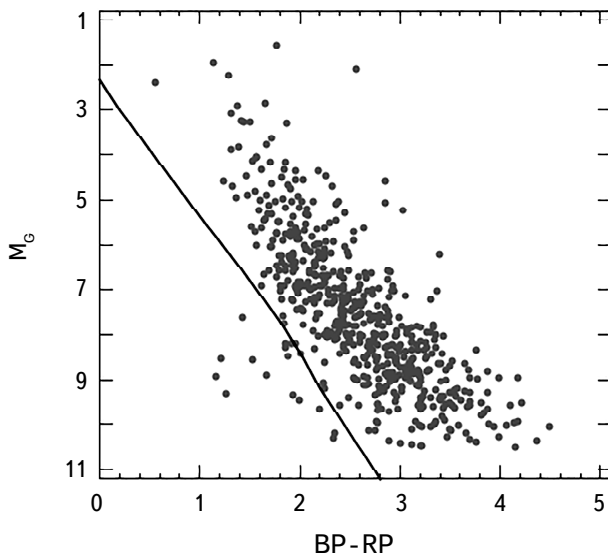


Рис.9. Диаграмма показатель цвета-абсолютная звездная величина, построенная по звездам из базы Gaia DR2 x AllWISE с относительными ошибками параллакссов менее 10%, сплошной линией отмечена ГП. Рисунок взят из работы Бобылева и др. [22].

волны λ :

$$z_{max} = 118 \pm 3 \text{ пк}, \quad \lambda = 2.0 \pm 0.1 \text{ кпк}. \quad (11)$$

Эти результаты отражены на рис.10.

Отметим работу Ли и Чена [21], в которой с целью изучения волны Рэдклиффа также анализировались очень молодые звезды, не достигшие стадии ГП. В отличие от нашей, здесь основой для классификации молодых звезд послужила более ранняя работа Мартона и др. [37]. Для анализа кинематики использовались собственные движения звезд из каталога Gaia DR2. При этом вертикальные скорости звезд вычислялись без использования лучевых скоростей. Применялся оригинальный метод поиска параметров наблюдаемой волны в положениях и вертикальных скоростях звезд. Авторы [37] заключили, что вертикальные положения и скорости звезд демонстрируют почти одинаковую периодичность с длиной волны λ около 1.5 кпк, оба колебания имеют затухающий характер, амплитуда колебаний относительно

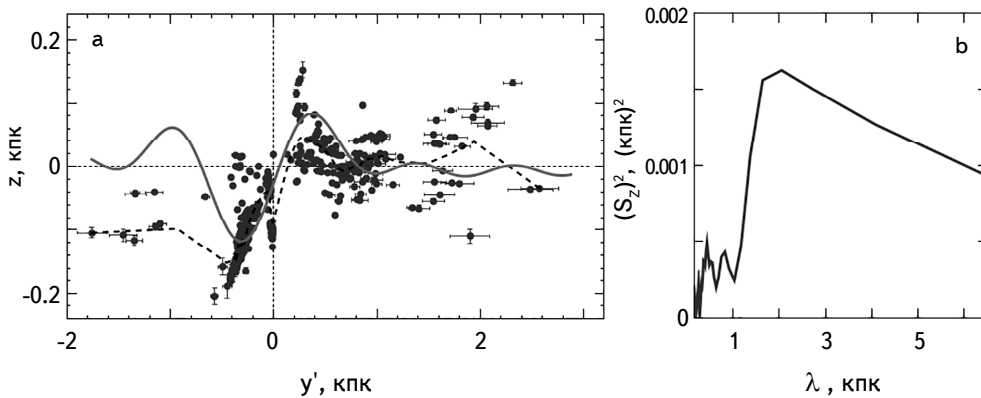


Рис.10. Координаты YSO z в зависимости от расстояния y' (а) и их спектр мощности (б), кривая отражает результаты спектрального анализа, периодическая жирная линия отражает результат спектрального анализа, пунктирная линия показывает сглаженные средние значения координат. Рисунок взят из работы Бобылева и др. [22].

средней плоскости диска Млечного Пути составляет $z_{max} = 130 \pm 20$ пк. Видно, что имеется неплохое согласие в оценках значений λ и z_{max} , найденных Ли и Ченом [21] и нами в решении (11).

2.2.4. Вертикальные скорости в волне Рэдклиффа. Обратим внимание на рис.2 и рис.8, из которых видно, что колебания вертикальных координат и вертикальных скоростей звезд практически синхронны. Похожий характер поведения координат и вертикальных скоростей молодых звезд получен в работе Туласидхарана и др. [20].

Анализ скоростей трех выборок молодых звезд, выполненный в работе

[20], отражен на рис.11. Символ "С" в левом верхнем углу на этом рисунке означает, что звезды принадлежат узкой полосе, ориентированной под углом 25° к оси Y . Вертикальные скорости выборок даны различными символами: скорости ОБ-звезд даны сплошным квадратом, скорости звезд из верхней части ГП (UMS) даны квадратом с белым кругом, скорости гигантов даны квадратом с белой полосой. Отметим хорошее согласие волны вертикальных скоростей ОБ-звезд и мазеров (рис.8).

А вот Ли, Чен [21] из анализа собственных движений звезд, не достигших стадии ГП, нашли разницу фаз с величиной около $2\pi/3$ между волной вертикальных координат и волной вертикальных скоростей. Это продемонстрировано на рис.12, который взят из работы [21] с небольшой заменой в обозначении оси абсцисс. При этом амплитуда вертикальных скоростей возмущений, $W_{max} = 7 \pm 0.6$ км/с, находится в хорошем согласии с оценками

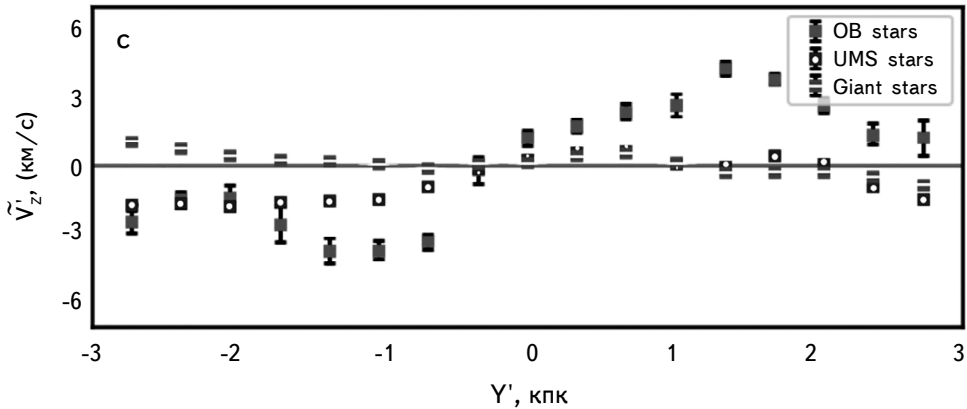


Рис.11. Вертикальные скорости трех выборок молодых звезд в зависимости от расстояния y' , положение Солнца здесь примерно соответствует значению $y' = 0$ кпк, рисунок взят из работы Туласидхарана и др. [20].

других авторов. Еще раз отметим, что авторы [21] вертикальные скорости звезд вычислили без использования лучевых скоростей. Эти звезды очень слабые, их спектры получить пока не удается. Поэтому массовые измерения лучевых скоростей этих звезд пока отсутствуют. К анализу Ли, Чена [21] вертикальных скоростей молодых звезд необходимо отнестись с осторожностью.

Можем с большой уверенностью говорить о том, что колебания вертикальных положений и вертикальных скоростей звезд в волне Рэдклиффа происходят синхронно.

Отметим работу Ту и др. [42], в которой выполнен трехмерный анализ положений и скоростей около 1100 молодых звезд, не достигших стадии ГП, связанных с волной Рэдклиффа. В отличие от работы [21], для вычисления пространственных скоростей звезд Ту и др. [42] использовали звезды с изме-

ренными лучевыми скоростями (из каталога Gaia DR2), собственными движениями и параллаксами. Основой работы послужил каталог молодых звезд из работы Зари и др. [43], где все звезды расположены не далее 500 пк от Солнца. Ту и др. [42] нашли хорошее согласие между известным из [1] поведением газа и пыли вдоль волны Рэдклиффа и поведением вертикальных координат молодых звезд. При этом эти авторы отмечают, что амплитуда вертикальных возмущений, найденная по выборке молодых звезд, немного меньше, чем у газа и пыли.

Этими авторами проведен довольно сложный анализ скоростей избранных молодых звезд - строились галактические орбиты в нескольких потенциалах.

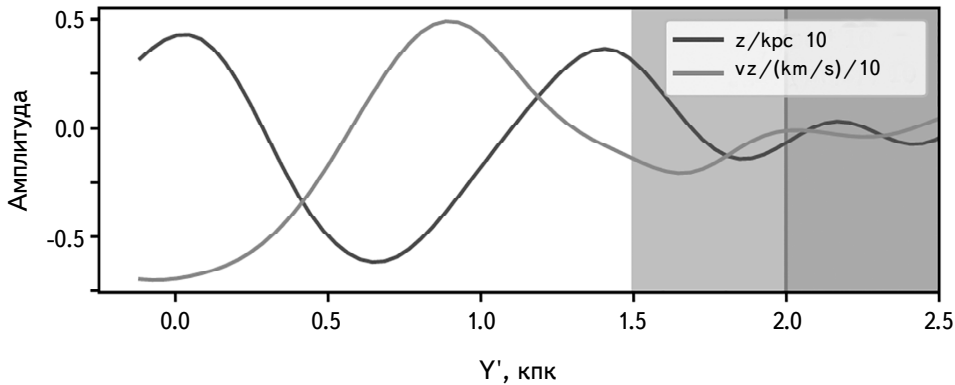


Рис.12. Поведение вертикальных координат (черная линия) и вертикальных скоростей (серая линия) звезд типа Т Тельца в зависимости от расстояния y' , положение Солнца здесь примерно соответствует значению $y' = 1.0$ кпк, рисунок взят из работы Ли и Чена [21].

Затем положения и скорости звезд выражались в терминах угол-действие и далее рассматривалась тенденция к изменению вертикального угла звезды (Ω_z) в зависимости от ее положения вдоль волны Рэдклиффа (y нас вдоль оси y'). Главный вывод Ту и др. [42] по кинематике молодых звезд заключается в том, что они не обнаружили значительных изменений вертикальных скоростей в зависимости от положения звезд вдоль волны Рэдклиффа. Они связывают это с качеством лучевых скоростей рассматриваемых звезд и выражают надежду на появление более точных массовых лучевых скоростей слабых звезд (например, в каталоге Gaia DR3).

3. Гипотезы происхождения волны Рэдклиффа. Согласно Флеку [38], происхождение волны Рэдклиффа могло быть вызвано неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца, возникшей на границе раздела между галактическим диском и гало, вращающимися с разными скоростями. Упрощая, можно сказать, что эффект подобен волнам от ветра на реке. Критика подхода Флека заключается в том, что в случае работы эффекта, волны типа волны

Рэдклиффа должны наблюдаться по всему галактическому диску.

В работе Туласидхарана и др. [20] с использованием данных о молодых звездах в качестве индикаторов волны Рэдклиффа исследована возможность того, что это колебание является частью более масштабной вертикальной моды. Согласно этим авторам, в Галактике имеется кинематическая волна с амплитудой колебаний, зависящей от возраста звездного населения. На основе N-body моделирования изучено гравитационное воздействие на галактический диск карликовой галактики-спутника Млечного Пути типа известной карликовой галактики в Стрельце с массой около $2 \cdot 10^{10} M_{\odot}$. Авторы [20] нашли, что воздействие такого ударника вызывает кинематическую волну, распространяющуюся в радиальном от центра Галактики направлении с амплитудой вертикальных колебаний 4-5 км/с в области Солнца. Однако был получен слишком большой угол закрутки модельной волны по сравнению с необходимой для объяснения появления волны Рэдклиффа. Окончательный вывод авторы отложили до появления более совершенных наблюдательных данных.

Отметим, что в качестве ударника может выступать и шаровое скопление. Например, в работе Бобылева, Байковой [40] было показано, что шаровое скопление ω Сеп могло спровоцировать возникновение пояса Гулда. Правда, пролет этого шарового скопления через галактический диск, согласно полученным оценкам, должен был состояться около 90 млн лет назад. Чтобы оценить связь этого эффекта с волной Рэдклиффа, необходимо знать возраст волны. Проявление волны Рэдклиффа наблюдается в распределении ОВ-звезд [20]. Поэтому можно говорить о том, что возраст волны Рэдклиффа составляет не менее 40-50 млн лет. В принципе, это сопоставимо с возрастом пояса Гулда, ~ 60 млн лет.

В настоящее время известен ряд явлений различной природы, демонстрирующих наличие вертикальных осцилляций в диске Галактики. Например, хорошо установлено крупномасштабное искривление диска [44], наблюдаемое в распределении и кинематике газовых, пылевых облаков, а также звезд [45-49]. Вероятность связи волны Рэдклиффа с этим явлением ничтожно мала из-за характерного масштаба.

Возможны вертикальные колебания, связанные с возмущениями от галактической спиральной волны плотности [50,51]. Характерная длина волны таких колебаний (23 кпк) близка к найденной для волны Рэдклиффа. Однако ориентация волны Рэдклиффа (наклон к оси z) сильно отличается от угла закрутки спирального узора Галактики (10° - 15°). Поэтому связь волны Рэдклиффа с возмущениями от спиральной волны плотности, хотя и не исключена, но пока представляется маловероятной.

В работах [52,53] описаны периодические возмущения плотности и скоростей звезд, имеющие асимметричный характер для северного и южного

галактического полушария. В этих исследованиях использовались близкие к Солнцу звезды, принадлежащие ГП. Были задействованы звезды с возрастaми в сотни млн лет. Такое нарушение равновесия в галактическом диске обычно связывают с каким-то внешним воздействием на диск Галактики (падение карликовой галактики-спутника, сгустка темной материи, массивного высокоскоростного газового облака, шарового скопления и т.д.).

В итоге можно заключить, что волна Рэдклиффа обладает уникальными характеристиками. Такие характеристики трудно объяснимы. Имеется ряд вопросов на которые пока нет ответа. Во-первых, нет полной уверенности, что это есть волна. Во-вторых, откуда известно, что волна затухающая? Если она движется в направлении вращения галактики, то да, волна затухающая. А если против вращения Галактики, то волна уже не затухающая.

4. *Заключение.* В 2020г. Алвесом и др. [1] по данным о молекулярных облаках была обнаружена волна Рэдклиффа - волна затухающих вертикальных колебаний. Характерный масштаб волны составляет около 2.5 кпк, максимальное значение амплитуды составляет 160 пк. В настоящей работе дан обзор целого ряда публикаций, которые подтверждают наличие волны Рэдклиффа как в положениях, так и в вертикальных скоростях различных молодых звезд. Мы постарались отметить все доступные на сегодняшний день публикации, в которых либо в названии, либо в ключевых словах фигурирует термин волна Рэдклиффа.

Донада, Фигуэрос [7] проанализировали выборку очень молодых ОВ-звезд и РЗС из околосолнечной окрестности радиусом около 2 кпк. Авторы, по-видимому, впервые обнаружили связь между вертикальными координатами и вертикальными скоростями молодых объектов, принадлежащих структуре волны Рэдклиффа. При этом были использованы вертикальные скорости всего лишь 11 РЗС.

В работе Лаллемента и др. [18] по современным фотометрическим данным о звездах построены высокоточные трехмерные карты межзвездного поглощения и показано наличие волны Рэдклиффа в распределении межзвездной пыли.

В работе Туласидхарана и др. [20] выполнен анализ: а) ОВ-звезд, б) звезд из верхней части ГП и в) красных гигантов. Показано, что амплитуда вертикальных колебаний зависит от возраста звездного населения. Подтверждена связь между возмущенными вертикальными положениями и вертикальными скоростями молодых объектов. Максимальную амплитуду вертикальных скоростей с величиной 3-4 км/с демонстрируют ОВ-звезды. Причем здесь уже были исследованы вертикальные скорости большого количества звезд.

Анализ молодых звезд типа Т Тельца, проведенный в работах Ли, Чена [21], а также Бобылева и др. [22], показал наличие волны Рэдклиффа в

положениях этих звезд.

Помимо звезд типа Т Тельца, в работе Бобылева и др. [22] изучена выборка из 68 мазерных источников и радиозвезд, расположенных в Местном рукаве, с высокоточными РСДБ-измерениями их тригонометрических параллаксов и собственных движений. Анализ их положений и скоростей выполнен на основе Фурье анализа. Использование этого метода позволяет вписать в наблюдательные данные как монохроматическую, так и полихроматическую волну. Специально для настоящей работы Фурье анализ был применен к данным о молекулярных облаках, с использованием которых была обнаружена волна Рэдклиффа. Метод показал отличные результаты.

При анализе собственных движений звезд, не достигших стадии ГП, Ли, Чен [21] получили парадоксальный результат и нашли разницу фаз с величиной около $2\pi/3$ между волной вертикальных координат и волной вертикальных скоростей. В настоящей работе фактически проведено обсуждение результатов анализа вертикальных скоростей звезд, связанных с волной Рэдклиффа, полученных в работах Донады, Фигуэросы [7], Туласидхарана и др. [20], а также Бобылева и др. [22]. В итоге мы заключили, что колебания вертикальных положений и вертикальных скоростей звезд в волне Рэдклиффа происходят синхронно.

Для объяснения природы возникновения волны Рэдклиффа к настоящему моменту выдвинуты две гипотезы. Флек [38] предлагает связать происхождение волны Рэдклиффа с неустойчивостью Кельвина-Гельмгольца. Большая же часть исследователей придерживается предположения о внешнем гравитационном воздействии на галактический диск ударника типа карликовой галактики-спутника Млечного Пути.

¹ Главная (Пулковская) астрономическая обсерватория РАН, С.-Петербург, e-mail: bob-v-vzz@rambler.ru

² Южный Федеральный Университет, Ростов-на-Дону

REVIEWS

THE MYSTERIOUS RADCLIFFE WAVE

V.V.BOBYLEV¹, A.T.BAJKOVA¹, Yu.N.MISHUROV²

The review is devoted to the Radcliffe Wave recently discovered by Alves et al. from the analysis of molecular clouds. These authors singled out a narrow chain

of molecular clouds, elongated almost in one line, located at an inclination of about 30° to the galactic axis y . The Radcliffe Wave itself outlines damped vertical oscillations of molecular clouds with a maximum oscillation amplitude of about 160 pc and a characteristic wavelength of about 2.5 kpc. To date, the presence of the Radcliffe Wave has been confirmed in the vertical distribution of a) interstellar dust, b) sources of maser radiation and radio stars, which are very young stars and protostars closely associated with molecular clouds, c) low-mass stars of the T Tau type, d) more massive OB stars and e) young open clusters of stars. The Radcliffe Wave is also traced in the vertical velocities of young stars. Most of the considered results of the analysis of the vertical velocities of various young stars show that the oscillations of the vertical positions and vertical velocities of stars in the Radcliffe Wave occur synchronously. The nature of the Radcliffe Wave is completely unclear. The majority of researchers associate its occurrence with the assumption of an external gravitational impact on the galactic disk of a striker such as a dwarf satellite galaxy of the Milky Way.

Keywords: *Radcliffe Wave; molecular clouds; young stars*

ЛИТЕРАТУРА

1. *J.Alves, C.Zucker, A.A.Goodman et al.*, Nature, **578**, 237, 2020.
2. *V.V.Bobylev*, Astrophysics, **57**, 583, 2014.
3. *A.Blaauw*, Koninkl. Ned. Akad. Wetenschap., **74**, No. 4, 1965.
4. *C.Zucker, J.S.Speagle, E.F.Schlaflly et al.*, Astrophys. J., **879**, 125, 2019.
5. *C.Zucker, J.S.Speagle, E.F.Schlaflly et al.*, Astron. Astrophys., **633**, 51, 2020.
6. Gaia Collab. (*A.G.A.Brown, A.Vallenari, T.Prusti et al.*), Astron. Astrophys., **616**, 1, 2018.
7. *J.Donada, F.Figueras*, arXiv: 2111.04685, 2021.
8. *C.Swiggum, J.Alves, E.D'Onghia et al.*, arXiv: 2204.06003, 2022.
9. Gaia Collab. (*A.G.A.Brown, A.Vallenari, T.Prusti et al.*), Astron. Astrophys., **649**, 1, 2021.
10. *E.Poggio, R.Drimmel, T.Cantat-Gaudin et al.*, Astron. Astrophys. Suppl. Ser., **651**, 104, 2021.
11. *V.V.Bobylev, A.T.Bajkova*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **437**, 1549, 2014.
12. *J.P.Vallée*, Astron. J., **135**, 1301, 2008.
13. *J.P.Vallée*, New Astron. Rev., **79**, 49, 2017.
14. *M.J.Reid, N.Dame, K.M.Menten et al.*, Astrophys. J., **885**, 131, 2019.
15. *C.J.Hao, Y.Xu, L.G.Hou et al.*, Astron. Astrophys., **652**, 102, 2021.
16. *L.Martinez-Medina, A.Pérez-Villegas, A.Peimbert*, Mon. Not. Roy. Astron. Soc., **512**, 1574, 2022.

17. *Y.Xu, L.G.Hou, S.Bian et al.*, *Astron. Astrophys.*, **645**, L8, 2021.
18. *R.Lallement, J.L.Vergely, C.Babusiaux et al.*, *Astron. Astrophys.*, **661**, 147, 2022.
19. *M.F.Skrutskie, R.M.Cutri, R.Stiening et al.*, *Astron. J.*, **131**, 1163, 2006.
20. *L.Thulasidharan, E.D'Onglia, E.Poggio et al.*, *Astron. Astrophys.*, **660**, 12, 2022.
21. *G.-X.Li, B.-Q.Chen*, arXiv: 2205.03218, 2022.
22. *V.V.Bobylev, A.T.Bajkova, Yu.N.Mishurov*, *Astron. Lett.*, **48**, 436, 2022.
23. VERA Collab. (*T.Hirota, T.Nagayama, M.Honma et al.*), *Publ. Astron. Soc. J.*, **70**, 51, 2020.
24. *N.Sakai, H.Nakanishi, K.Kurahara et al.*, *Publ. Astron. Soc. J.*, **74**, 209, 2022.
25. *S.B.Bian, Y.Xu, J.J.Li et al.*, *Astron. J.*, **163**, 54, 2022.
26. *R.M.Torres, L.Loinard, A.J.Mioduszewski et al.*, *Astrophys. J.*, **671**, 1813, 2007.
27. *S.Dzib, L.Loinard, L.F.Rodriguez et al.*, *Astrophys. J.*, **733**, 71, 2011.
28. *G.N.Ortiz-León, L.Loinard, S.A.Dzib et al.*, *Astrophys. J.*, **865**, 73, 2018.
29. *P.A.B.Galli, L.Loinard, G.N.Ortiz-León et al.*, *Astrophys. J.*, **859**, 33, 2018.
30. *G.Marton, P.Ábrahám, E.Szegedi-Elek et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **487**, 2522, 2019.
31. *E.L.Wright, P.R.M.Eisenhardt, A.K.Mainzer et al.*, *Astrophys. J.*, **140**, 1868, 2010.
32. Planck Collab. (*R.Adam, P.A.R.Ade, N.Aghanim et al.*), *Astron. Astrophys.*, **594**, 10, 2016.
33. Gaia Collab. (*T.Prusti, J.H.J. de Bruijne, A.G.A.Brown et al.*), *Astron. Astrophys.*, **595**, A1, 2016.
34. *O.I.Krisanova, V.V.Bobylev, A.T.Bajkova*, *Astron. Lett.*, **46**, 370, 2020.
35. Gaia Collab. (*L.Lindgren, J.Hernandez, A.Bombrun et al.*), *Astron. Astrophys.*, **616**, 2, 2018.
36. *E.Zari, H.Hashemi, A.G.A.Brown et al.*, *Astron. Astrophys.*, **620**, 172, 2018.
37. *G.Marton, L.V.Tóth, R.Paladini et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **458**, 3479, 2016.
38. *R.Fleck*, *Nature*, **583**, 24, 2020.
39. *V.V.Bobylev, A.T.Bajkova*, *Astron. Rep.*, **65**, 498, 2021.
40. *V.V.Bobylev, A.T.Bajkova*, *Astron. Rep.*, **62**, 557, 2018.
41. *M.P.González, J. Maiz Apellániz, R.H.Barbá et al.*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **404**, 2967, 2021.
42. *A.J.Tu, C.Zucker, J.S.Speagle et al.*, arXiv: 2208.06469, 2022.
43. *E.Zari, H.Hashemi, A.G.A.Brown et al.*, *Astron. Astrophys.*, **620**, 172, 2018.
44. *G.Westerhout*, *Bull. Astron. Inst. Netherlands*, **13**, 201, 1957.
45. *D.Russeil*, *Astron. Astrophys.*, **397**, 133, 2003.
46. *I.Yusifov*, astro-ph/0405517, 2004.
47. *R.Drimmel, R.L.Smart, M.G.Lattanzi*, *Astron. Astrophys.*, **354**, 67, 2000.
48. *M.López-Corredoira, A.Cabrera-Lavers, F.Garzón et al.*, *Astron. Astrophys.*, **394**, 883, 2002.
49. *L.N.Berdnikov*, *Astron. Lett.*, **13**, 45, 1987.
50. *Yu.N.Mishurov*, *Astron. Rep.*, **50**, 12, 2006.
51. *V.V.Bobylev, A.T.Bajkova*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **447**, L50, 2015.
52. *L.M.Widrow, S.Gardner, B.Yanny et al.*, *Astrophys. J. Lett.*, **750**, L41, 2012.
53. *M.Bennett, J.Bovy*, *Mon. Not. Roy. Astron. Soc.*, **482**, 1417, 2018.