

УДК 524.5:524.622

УСОВЕРШЕНСТВОВАННЫЙ МЕТОД ОПРЕДЕЛЕНИЯ РАССТОЯНИЙ ПО МЕЖЗВЕЗДНЫМ ЛИНИЯМ ИОНИЗОВАННОГО ТИТАНА

© 2023 Г. А. Галазутдинов^{1,2*}, Т. А. Сантандер^{3**}, Е. В. Бабина^{1***}, Я. Креловски^{4****}¹Крымская астрофизическая обсерватория РАН, Научный, 298409 Россия²Специальная астрофизическая обсерватория РАН, Нижний Архыз, 369167 Россия³Северный католический университет, Антофагаста, 1249004 Чили⁴Жешувский университет, Жешув, 35-310 Польша

Поступила в редакцию 30 мая 2023 года; после доработки 12 июля 2023 года; принята к публикации 12 июля 2023 года

Мы измерили эквивалентные ширины (EW) межзвездных линий поглощения $Ti\ II\ \lambda 3383.759$ для более 250 звезд с межзвездным покраснением и обнаружили хорошую корреляцию между значениями EW и расстояниями до звезд, оцененными с помощью параллаксов по данным Gaia DR3. Для очень ярких объектов, которые не наблюдались космическим телескопом Gaia, были использованы тригонометрические параллаксы Hipparcos. Процедура оценки расстояния по линиям $Ti\ II$ аналогична хорошо известному $Ca\ II$ -методу. Однако у $Ti\ II$ -метода есть, как минимум, три преимущества: в отличие от межзвездных H и K линий $Ca\ II$, нет блендирования линий $Ti\ II$ со звездными линиями даже для V-звезд поздних классов; линии $Ti\ II$ в гораздо меньшей степени подвержены влиянию эффекта насыщения; измеряется только одна линия, то есть учитывается только одна погрешность измерения. Связь между эквивалентной шириной линии $Ti\ II$ и расстоянием задается простым уравнением $d \sim 30EW$, где d — расстояние в парсеках, а EW — эквивалентная ширина линии $Ti\ II\ 3383.759$ в \AA .

Ключевые слова: межзвездная среда: облака — атомы: звезды — расстояния

1. ВВЕДЕНИЕ

Почти 100 лет назад Struve (1928) предложил использовать зависимость между звездными параллаксами в Галактике и интенсивностью межзвездных линий $Ca\ II$ в качестве метода измерения расстояний. Beals and Oke (1953) опубликовали простые уравнения, связывающие звездные расстояния с эквивалентными ширинами межзвездных линий натрия и калия. По оценкам Beals and Oke (1953) ошибки определения расстояний этим методом не превышали 25%. Позже были опубликованы работы по определению расстояний по линиям межзвездного поглощения, в том числе по линиям $Ca\ II$, $Ti\ II$, $Na\ I$ и другим. Упомянем лишь некоторые относительно недавние, тесно связанные с данным исследованием. Galazutdinov (2005) обнаружил взаимосвязь между расстоянием, оцененным по тригонометрическим параллаксам Hipparcos, и эквивалентной шириной линий $Ca\ II$, а также слабую зависимость между расстояниями и интенсивностью других межзвездных линий. Megier et

al. (2005; 2009) разработали широко известный $Ca\ II$ -метод, позволяющий оценивать расстояние на основе измерений эквивалентных ширин межзвездных линий дублета H и K ионизованного кальция. Несмотря на ограничения метода, он эффективен в сочетании с другими методами оценки расстояний, в частности, в случаях пекулярных звезд (например, двойных), объектов с неточными измерениями тригонометрического параллакса и в случаях со звездами, имеющими сложный спектр, для которых калибровка светимости по спектральной классификации неточна. Метод, предложенный Megier et al. (2005; 2009), можно использовать для объектов, расположенных в галактическом диске на достаточно больших расстояниях (до нескольких килопарсек).

Согласно Welsh et al. (1997), отношение обилия ионов $Ti\ II/Ca\ II$ практически постоянно при различных условиях межзвездной плотности. Этот вывод позже подтвердили Welty and Crowther (2010) как для нашей Галактики, так и для Магеллановых Облаков. Таким образом, естественно ожидать хорошей корреляции между интенсивностью линий ионизованного межзвездного титана (EW или лучевой концентрацией) и расстоянием. Stokes (1978) в своем обзоре по исследованию линии $Ti\ II$

*E-mail: runizag@gmail.com

**E-mail: tatiana.araya@alumnos.ucn.cl

***E-mail: helenka_truth@mail.ru

****E-mail: jacek@umk.pl

$\lambda 3883.759$, наблюдаемой в 68 объектах, отметил, что Ti II является доминирующим состоянием межзвездного титана в областях H I из-за почти точного совпадения потенциала ионизации однократно ионизованного титана и нейтрального водорода H I (13.57 эВ и 13.595 эВ соответственно). Hunter et al. (2006) сообщили о тесной корреляции между лучевой концентрацией межзвездного Ti II и расстоянием, но уравнение, связывающее эти параметры, не привели.

В настоящее время предлагается четыре различных метода оценки расстояния до молодых звезд, находящихся в диске Галактики:

1. *Тригонометрический параллакс*. Метод требует измерения положения каждого рассматриваемого объекта не менее чем в две эпохи и точного знания положения наблюдателя в эти моменты. Первым тригонометрический параллакс измерил Bessel (1838) для звезды 61 Cyg. Тогда этот метод позволял измерять расстояния, не превышающие 25 пк. Орбитальные телескопы (Hipparcos, Gaia) позволили измерять параллаксы с более высокой точностью до объектов на расстояниях в тысячи парсек.
2. *Спектрофотометрический параллакс*, основанный на определении видимых и абсолютных звездных величин наблюдаемых объектов, а также учете поглощения межзвездным веществом, расположенным на луче зрения. Однако требуется откалибровать абсолютные величины по ближайшим звездам с известным тригонометрическим параллаксом. Кроме того, измерение полного поглощения до каждого объекта может быть недостаточным точным, поскольку в том числе зависит от оптических свойств межзвездных облаков (пылинок, содержащихся в них), различающихся от объекта к объекту.
3. *Ca II-метод*, который предложил Struve (1928). Очевидно, что лучевая концентрация химических элементов должна быть пропорциональна расстоянию до наблюдаемых объектов. Однако межзвездное вещество распределено в пространстве неравномерно; в пределах диска нашей Галактики его гораздо больше, чем вдали от него (в высоких галактических широтах), что накладывает ограничение на применимость метода.
4. *Ti II-метод*, предложенный Hunter et al. (2006) и представленный в этой статье. Межзвездная линия Ti II $\lambda 3883.759$ обычно не блендрована с звездными линиями и не подвержена эффекту насыщения; в основе метода — измерения EW только по одной линии, а не по двум, как в предыдущем случае.

В данной статье мы приводим самую большую на данный момент выборку измерений интенсивностей линии Ti II $\lambda 3884$ (EW), даем анализ некоторых пекулярных случаев, а также обсуждаем ограничения предлагаемого Ti II-метода измерения расстояний.

2. НАБЛЮДАТЕЛЬНЫЙ МАТЕРИАЛ

Наши измерения, представленные в таблице 1, основаны как на наших собственных спектрах, так и на спектрах из архива ESO (обработанных нами с нуля), полученных с помощью двух эшелле-спектрографов высокого разрешения:

- UVES (Ultraviolet and Visual Echelle Spectrograph), работающем на 8-м зеркале Кьюеен VLT (Dekker et al., 2000). Спектральное разрешение до $R = 80\,000$ в диапазоне $\lambda \sim 300\text{--}500$ нм¹). Размер телескопа позволяет получать спектры с высоким отношением S/N даже для довольно слабых звезд. Некоторые из выбранных спектров были получены в рамках программы EDIBLES (ESO Diffuse Interstellar Bands Large Exploration Survey).
- Спектрограф MIKE (Bernstein et al., 2003) на 6.5-м телескопе Magellan обсерватории Лас-Кампанас (Чили). Спектры наблюдались с шелью $0''.35 \times 5''$. Мы оценили разрешающую способность по одиночным линиям тория. Разрешение составляет $R \approx 56\,000$ ($\Delta v \sim 5.4$ км с⁻¹) в спектральном диапазоне $\lambda \sim 330\text{--}505$ нм.

Мы обрабатывали исходные данные и проводили измерения в обработанных спектрах с помощью собственного программного обеспечения DECH (Galazutdinov, 2022). Для обработки данных с помощью DECH мы сначала усредняли изображения bias для последующей коррекции всех остальных изображений. Рассеянный свет был определен как двумерная функция сложной формы, которая индивидуально рассчитывается для каждого спектрального изображения звезды и плоского поля с помощью двумерной аппроксимации кубическим сплайном по областям минимумов между спектральными порядками. Затем корректировалась неоднородность чувствительности пикселей ПЗС-матрицы путем деления всех спектральных изображений звезд на усредненное и нормализованное спектральное изображение плоского поля. Одномерные звездные спектры извлекались посредством простого суммирования в направлении поперечной дисперсии каждого спектрального порядка с переменной апертурой в направлении основной дисперсии. Извлеченные спектры одного

¹) Подробнее см. <https://www.eso.org/sci/facilities/paranal/instruments/uves.html>

Таблица 1. Данные измерений и расстояния: EW_1 — эквивалентная ширина межзвездной линии Ti II λ 3383,759; EW_2 — эквивалентная ширина межзвездной линии Ti II λ 3241,983; d_{Ti} — расстояние, оцененное Ti II-методом; d_{DR3} , d_{DR2} , d_{Hip} — расстояние, оцененное с помощью параллаксов Gaia DR3, DR2 и Hipparcos; d_{Ca} — расстояние, оцененное Ca II-методом; l и b — галактические координаты. Приведен фрагмент таблицы; полная версия прилагается как Дополнительный материал

Звезда	EW_1 , мÅ	d_{Ti} , пк	EW_2 , мÅ	d_{DR3} , пк	d_{DR2} , пк	d_{Hip} , пк	d_{Ca} , пк	l , град	b , град
BD –14 5037	100.4 ± 5.7	3013 ± 171	74 ± 9	1850^{+87}_{-83}	2000^{+220}_{-181}	625^{+2708}_{-280}	2521 ± 375	16.9	-1.0
CD –32 4348	105.3 ± 1.7	3160 ± 52	69.5 ± 3	3158^{+135}_{-159}	3059^{+348}_{-285}		2145 ± 383	248.2	-4.5
CD –33 4141	100.6 ± 6.3	3019 ± 190	66 ± 11	1934^{+130}_{-134}	1644^{+131}_{-114}		2763 ± 501	248.6	-4.1
CD –59 3300	83.4 ± 3.4	2501 ± 101		2503^{+151}_{-157}	4925^{+1132}_{-780}		2756 ± 190	287.6	-0.7
CD –59 2603	110.8 ± 5.4	3325 ± 162		2611^{+121}_{-154}	3645^{+581}_{-446}		3236 ± 175	287.6	-0.7
HD 22951	17.7 ± 1.0	531 ± 31		369^{+20}_{-18}	329^{+27}_{-24}		437 ± 19	158.9	-16.7
HD 23016	1.7 ± 0.4	50 ± 12	1 ± 0.4	159^{+2}_{-2}	155^{+3}_{-3}		172 ± 4	169.0	-27.5
HD 23180	5.4 ± 0.3	163 ± 10	5.1 ± 1.1	345^{+50}_{-50}	256^{+72}_{-46}		357 ± 9	160.4	-17.7
HD 23466	5.1 ± 1.1	152 ± 33	3.4 ± 1.5	180^{+3}_{-3}	188^{+9}_{-8}		238 ± 4	181.3	-36.4
HD 24263	15.5 ± 2.8	495 ± 180		221^{+3}_{-4}	222^{+7}_{-7}		699 ± 12	182.1	-34.9

и того же объекта, наблюдавшиеся в одну и ту же ночь, были усреднены для достижения наибольшего отношения S/N . Нормализация на континуум была основана на интерполяции кубическим сплайном через интерактивно указанные опорные точки.

Спектры MIKE подвержены влиянию эффекта наклонной щели, что уменьшает разрешающую способность экстрагированного спектра и искажает профиль спектральных линий при использовании традиционных методов выделения спектров. Отметим, что величина наклона линий изменяется как вдоль спектральных порядков, так и с длиной волны. Программное обеспечение DECH предлагает следующее решение этой проблемы: на основе спектров ThAg-лампы с высокой щелью (тогда эффект наклона наиболее контрастен) строится карта величины наклона. Эта карта используется для компенсации наклона на этапе извлечения спектров (см. детали алгоритма в работе Galazutdinov (2022)).

Очевидным недостатком Ti II-метода является ограниченное количество спектрографов, работающих в ближнем УФ-диапазоне, в котором видна линия Ti II λ 3383.759. Отсутствие наблюдательных данных для объектов Северного полушария приводит к тому, что на карте, приведенной на рис. 1, виден пробел. Линия Ti II не очень сильная, поэтому точность предлагаемого метода критически зависит от спектрального разрешения и отношения S/N полученных спектров. Низкая эффективность спектрографов в УФ-диапазоне требует использования больших телескопов, необходимых для сбора большего количества света.

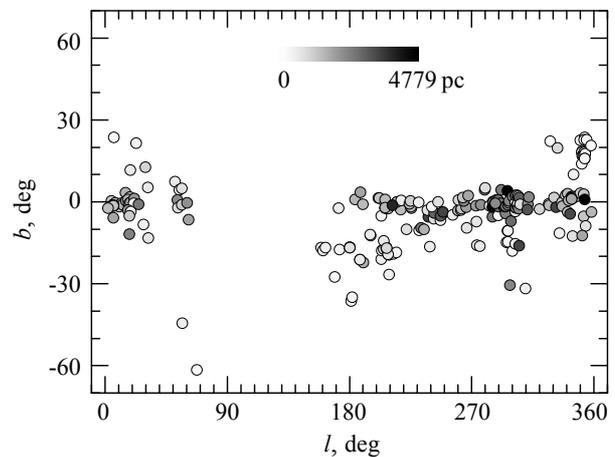


Рис. 1. Местоположение исследуемых объектов в галактических координатах. Тригонометрическое расстояние показано серой шкалой.

Мы оценили погрешности измеренных эквивалентных ширин с помощью уравнения (7) из работы Vollmann and Eversberg (2006), где учитывается S/N измеренного спектра и неопределенность нормализации на континуум. Последний фактор имеет меньшее значение из-за незначительной ширины межзвездных линий атомов.

3. РЕЗУЛЬТАТЫ

На рис. 2 показано соотношение между тригонометрическими расстояниями и эквивалентными ширинами межзвездных линий Ti II и Ca II. Коэффициент корреляции Пирсона для титана ($R = 0.9$) даже выше, чем для кальция ($R = 0.8$). Вероятно, это различие обусловлено тем, что линии Ca II

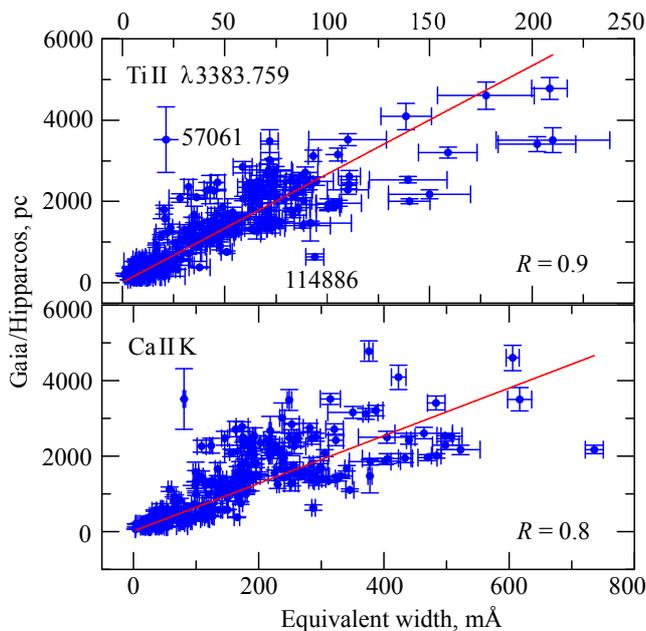


Рис. 2. Линейная зависимость между эквивалентными ширинами межзвездных линий Ti II λ 3383.759 (a) и Ca II K (b) и оценками расстояний, найденных по данным Gaia/Hipparcos. Также указаны коэффициенты корреляции Пирсона R и HD-идентификаторы для двух отскоков (выбросов).

часто бывают насыщенными, а линии Ti II — нет. График для линии Ca II на рис. 2 явно нелинейный. Линейность заканчивается примерно при 2.5 кпк, тогда как линейная зависимость Ti II от расстояния сохраняется примерно до 4 кпк. Это еще один аргумент в пользу использования Ti II в качестве оценки расстояния.

Чтобы продемонстрировать слабое влияние эффекта насыщения на измерение линии ионизованного титана, мы сравнили эквивалентную ширину линии Ti II λ 3383.759 с шириной другой, более слабой линии Ti II λ 3241.983. Почти идеальное линейное соответствие (коэффициент корреляции Пирсона $R = 0.99$) показывает наклон 0.64 ± 0.01 (рис. 3), идентичный отношению сил осцилляторов этих двух линий ($f_{3241.983} = 0.232$ и $f_{3383.759} = 0.358$ (Morton, 2003)). Таким образом, наши измерения точны, а линии не насыщены, что указывает на их надежность при использовании в качестве индикатора расстояния.

Результирующее соотношение между эквивалентной шириной Ti II и расстоянием описывается уравнением:

$$d = 30(\pm 1) \times EW(\text{Ti II}) - 30(\pm 2),$$

где эквивалентная ширина Ti II дана в мÅ. Значение первого коэффициента зависит от выборки данных, поэтому упрощенное уравнение $d \approx 30(\pm 1) \times EW(\text{Ti II})$ является более предпочтительным.

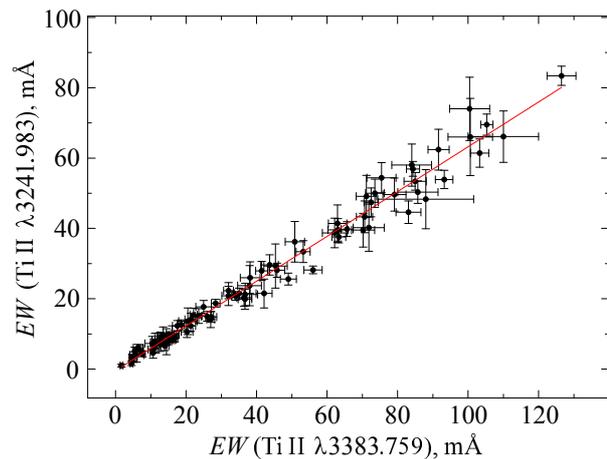


Рис. 3. Сравнение эквивалентной ширины двух межзвездных линий ионизованного титана.

В таблице 1 мы приводим основные данные для более чем 250 объектов и наши измерения EW межзвездной линии поглощения λ 3383.759 в каждом спектре. В частности, мы указываем расстояния, основанные на тригонометрических параллаксах, доступных в базе данных Gaia DR3. Для нескольких звезд имеются параллаксы из более ранних версий базы данных. Удивительно, но некоторые объекты демонстрируют сильный разброс по расстоянию в различных версиях данных Gaia (например, для HD 73882 $d_{\text{DR1}} = 485$ пк, $d_{\text{DR2}} = 358$ пк, $d_{\text{DR3}} = 755$ пк, $d_{\text{Hip}} = 460$ пк, $d_{\text{Ca II}} = 1212$ пк, $d_{\text{SpL}} = 1020$ пк). Напомним, что метод Ca II был откалиброван с использованием параллаксов Hipparcos. Более свежие данные должны быть более точными, но различия настолько велики, что трудно решить, какое из измерений является правильным. Однако, используя нашу большую выборку, можно полагать, что усредненные соотношения между интенсивностью межзвездных линий и расстояниями достаточно точны.

Интересной проблемой является наличие «отскоков», то есть объектов, которые на рис. 2 серьезно отклоняются от средних значений. Некоторые очевидные «отскоки» перечислены в таблице 2. Это объекты, в которых либо межзвездные линии, либо покраснение выглядят явно слишком сильными или слишком слабыми. Это объекты, в которых взаимосвязи между межзвездными линиями сильно отличаются от средних.

В таблице 2 мы приводим множество возможных измерений расстояния для выборки «отскоков». Среди перечисленных расстояний есть такие, которые основаны на тригонометрических параллаксах Hipparcos (van Leeuwen, 2007) и трех выпусках данных Gaia (DR1 — Astraatmadja and

Таблица 2. Объекты с сильным отклонением от средней зависимости «эквивалентная ширина – расстояние». В столбцах: спектральный тип и класс светимости, показатель цвета, оценки расстояния в кпк по данным Gaia DR3, DR2, DR1 и Hipparcos (d_{DR3} , d_{DR2} , d_{DR1} , d_{Hip} соответственно); спектральный параллакс d_{SpL} ; оценки расстояний методами Ca II и Ti II

Звезда	Sp/L	$E(B - V)$, зв. вел.	Оценки расстояний, кпк						
			d_{DR3}	d_{DR2}	d_{DR1}	d_{Hip}	d_{SpL}	$d_{Ca II}$	$d_{Ti II}$
HD 57061	O9 II	0.16	3.52	5.50	–	0.92	0.91	0.52	0.64
HD 60479	O9.5 Ib	0.56	2.84	3.42	1.70	0.63	3.79	2.07	1.76
HD 73882	O8.5 IV	0.69	0.76	0.36	–	0.46	1.02	1.13	1.53
HD 75309	B2 II	0.14	1.80	1.93	1.00	–	2.69	1.32	0.61
HD 114886	O9.5 II	0.36	0.64	2.00	–	0.47	2.16	2.11	2.82
HD 116852	O8.5 II+	0.16	3.49	6.21	–	2.86	5.98	1.75	2.16
HD 146285	B8 V	0.32	1.55	1.56	0.16	0.15	0.28	0.32	0.62
HD 168076	O4 III	0.76	1.47	5.06	–	–	2.65	3.01	2.75
HD 177989	B2 II	0.07	2.36	2.40	–	0.65	6.23	1.49	0.97

Bailer-Jones (2016), DR2 — Bailer-Jones et al. (2018) и DR3 — Bailer-Jones et al. (2021)). Мы также оценили расстояния по спектрофотометрическим параллаксам и с помощью двух «межзвездных» методов: по дублету Ca II и по эквивалентной ширине линии (Ti II λ 3383.759), представленному в этой статье. Видно, что перечисленные семь расстояний могут серьезно различаться для одного и того же объекта. Даже в трех версиях Gaia значения параллакс могут отличаться в три раза. Конечно, оценки спектрального параллакса зависят и от точности спектральной классификации, которая может быть ошибочной в случаях пекулярных или переменных спектров.

Наиболее очевидным случаем «отскока» является HD 57061. По оценкам Gaia объект находится гораздо дальше, чем следует из «межзвездной» шкалы расстояний и спектрального параллакса. Последний хорошо согласуется с измерениями Hipparcos. Очевидно, этот спектрально-двойной объект ($V = 4^m 4$) слишком яркий для Gaia и должен быть удален из рассмотрения в соотношении «Gaia – Ti II».

Еще один интересный случай — HD 177989. В его спектре видны слабые линии Ti II, хотя объект находится явно дальше 1 кпк. Точное значение расстояния до него определить непросто из-за сильного разброса оценок расстояний, полученных разными методами. Sterling et al. (2002) оценивают расстояние по спектральному параллаксу как 4.9 кпк. Однако это противоречит и тригонометрическому — 2.36 кпк (Gaia DR3), и «межзвездному» — 1.49 кпк (Ca II-метод) расстояниям. Любопытно, что Sterling et al. (2002) рассматривали HD 177989 как фоновый источник света для изучения свойств сверхоболочки Scutum, которая находится на кинематическом расстоянии порядка

3.3 кпк (Callaway et al., 2000). Другой объект — HD 175754 — демонстрирует аналогичные межзвездные линии, подтверждающие его расположение за сверхоболочкой Scutum (Callaway et al., 2000). Мы оценили Ca II-расстояние до HD 175754 в 1.9 кпк, что согласуется с величиной, полученной Gaia DR3 (Bailer-Jones et al., 2021). К сожалению, линия Ti II лежит вне диапазона имеющегося спектра HD 175754, поэтому мы не можем подтвердить наличие линии Ti II и совпадение ее интенсивности с таковой в спектре HD 177989.

Тем не менее сходство HD 177989 и HD 175754 ставит под сомнение расстояние до сверхоболочки Scutum, но этот вопрос выходит за рамки нашей статьи. Как бы то ни было, большой разброс расстояний, рассчитанных для HD 177989, выглядит странно. То же самое можно сказать, например, о HD 116852 и расстояниях до этого объекта по Gaia DR2 и спектральному параллаксу.

Таким образом, известные в настоящее время тригонометрические параллаксы, а также спектральные классы и классы светимости звезд ранних типов в ряде случаев остаются неопределенными. Различия измеренных расстояний неприемлемо велики и, очевидно, требуются дополнительные исследования.

4. ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Метод измерения расстояния до объектов по линиям межзвездного ионизованного титана подобен известному Ca II-методу, но Ti II-метод демонстрирует лучшую корреляцию со значениями известных тригонометрических параллакс. Подчеркнем, что Ca II-метод неприменим для медленно вращающихся звезд позднего B-класса, у которых

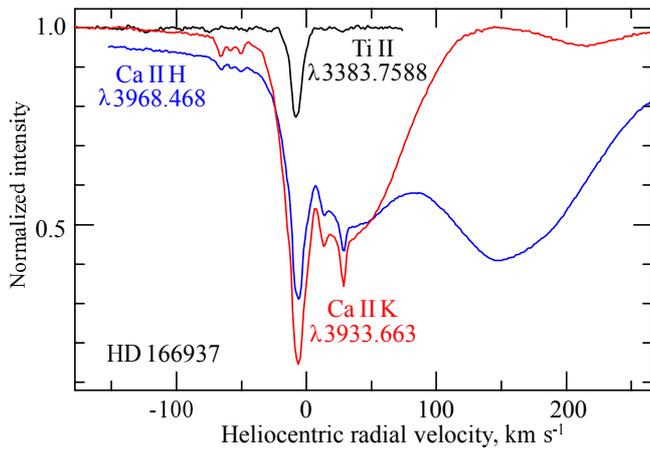


Рис. 4. Пример сильного зашумления профилей линий Ca II звездными линиями, затрудняющего точные измерения EW . Показаны профили межзвездных линий Ti II $\lambda 3383.759$, Ca II H и K.

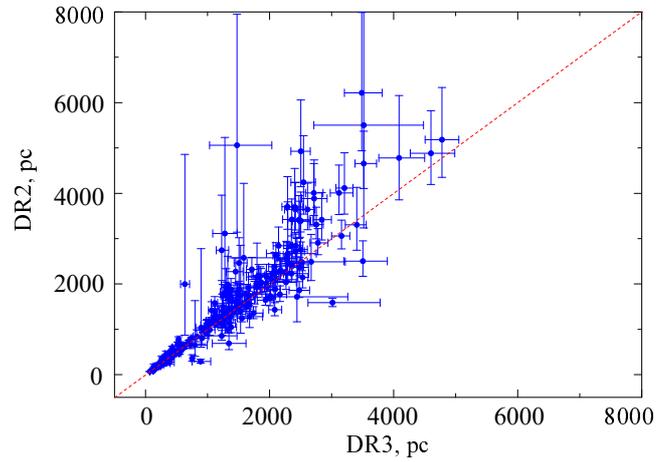


Рис. 6. Сравнение расстояний для изучаемых объектов по данным Gaia DR2 и DR3. Красная пунктирная линия $y = x$ приведена для наглядности.

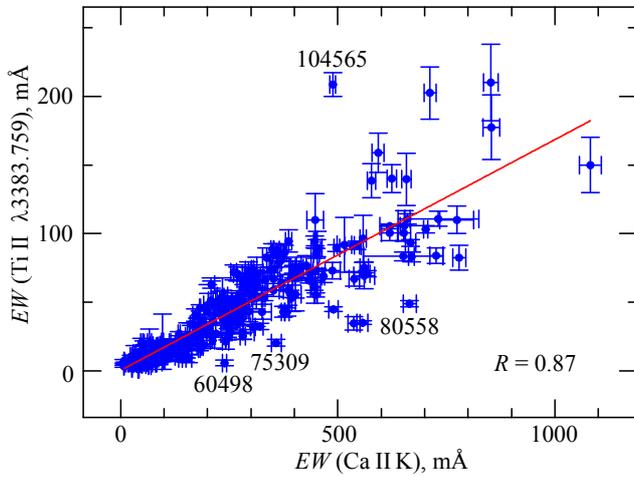


Рис. 5. Сравнение эквивалентной ширины межзвездного ионизованного кальция и титана. Отмечены HD-идентификаторы объектов с большим отклонением от среднего отношения эквивалентных ширин.

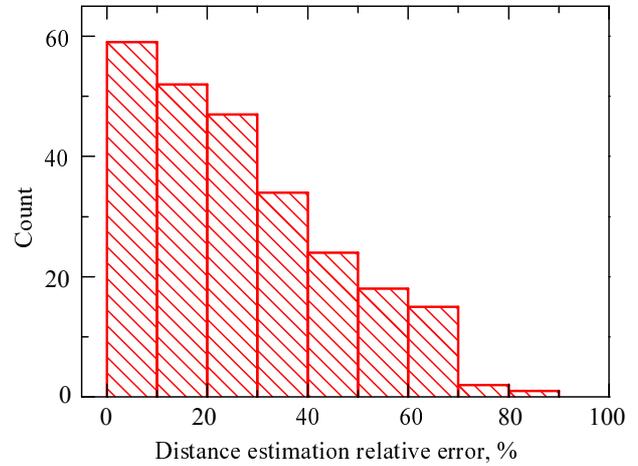


Рис. 7. Относительное отличие (в процентах) расстояний, определенных по линиям Ti II, от тригонометрических расстояний.

межзвездные линии Ca II могут быть сильно блендированы звездными линиями (пример приведен на рис. 4). При сравнении эквивалентных ширин межзвездного ионизованного кальция и титана (рис. 5) видно достаточное количество «отскоков». Например, спектры HD 60498, HD 80558 содержат сложные профили линий Ca II, смешанные со звездными линиями; в спектрах HD 104565 и HD 75309 видны некоторые особенности в линиях Ca II и т.д.

Несмотря на хорошую корреляцию с расстоянием, расхождения во многих случаях наблюдаются как для Ca, так и для Ti. С другой стороны, тригонометрические расстояния демонстрируют существенный разброс. Мы сравнили расстояния, полученные в релизах Gaia DR2 (Bailer-Jones et al., 2018) и DR3 (Bailer-Jones et al., 2021), и во

многих случаях эти различия достаточно велики (рис. 6). Было бы интересно проверить будущие релизы базы данных Gaia и сравнить их с последним выпуском DR3.

Рисунок 7 позволяет оценить точность Ti II-метода — в большинстве случаев относительная погрешность не превышает 30 процентов. Очевидно, что метод, который мы здесь предлагаем, может быть использован в качестве дополнительной независимой оценки расстояния, особенно полезной для сложных случаев с неопределенными тригонометрическими и/или спектроскопическими параллаксами. Это особенно полезно для объектов, не имеющих тригонометрических оценок параллакса, например, HD 319718 (см. таблицу 1). Наконец, было бы интересно дополнить выборку с учетом наблюдений объектов в Северном полушарии.

БЛАГОДАРНОСТИ

В этом исследовании использовались сервисы ESO Science Archive Facility и база данных SIMBAD, работающая в CDS, Страсбург, Франция. Часть наблюдений проведены на Европейской южной обсерватории в рамках программ ESO 65.I-0379(A), 68.C-0024(A), 078.C-0403(A), 194.C-0833(A), 0102.C-0699(A), 106.20WN.001.

ДОПОЛНИТЕЛЬНАЯ ИНФОРМАЦИЯ

Дополнительные материалы, представленные онлайн, включают полную версию таблицы 1.

ФИНАНСИРОВАНИЕ

ГАГ провел обработку и анализ данных с помощью приборов, разработанных в Специальной астрофизической обсерватории при финансовой поддержке гранта № 075-15-2022-262 (13.МНПМУ.21.0003) Министерства науки и высшего образования Российской Федерации.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Авторы данной работы заявляют, что у них нет конфликта интересов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. T. L. Astraatmadja and C. A. L. Bailer-Jones, *Astrophys. J.* **833**, 119 (2016).
2. C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, G. Mantelet, R. Andrae, *Astron. J.* **156**, 58 (2018).
3. C. A. L. Bailer-Jones, J. Rybizki, M. Fouesneau, M. Demleitner, R. Andrae, *Astron. J.* **161**, 147 (2021).

4. C. S. Beals and J. B. Oke, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **113**, 530 (1953).
5. R. Bernstein, S. A. Shectman, S. M. Gunnels, S. Mochmacki, A. E. Athey, *SPIE*, **4841** 1694 (2003).
6. F. W. Bessel, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **4**, 152 (1838).
7. M. B. Callaway, B. D. Savage, R. A. Benjamin, L. M. Haffner, S. L. Tufte, *Astrophys. J.* **532**, 943 (2000).
8. H. Dekker et al., *SPIE*, **4008** 534 (2000).
9. G. A. Galazutdinov, *J. Korean Astron. Soc.*, **38** 215 (2005).
10. G. A. Galazutdinov, *Astrophysical Bulletin*, **77**, 519 (2022).
11. I. Hunter, J. V. Smoker, F. P. Keenan, C. Ledoux, E. Jehin, R. Cabanac, C. Melo et al., *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **367**, 1478 (2006).
12. F. van Leeuwen, *Astron. and Astrophys.*, **474**, 653 (2007).
13. A. Megier, A. Strobel, A. Bondar, F. A. Musaev, I. Han, J. Krełowski, G. A. Galazutdinov, *Astrophys. J.* **634**, 451 (2005).
14. A. Megier, A. Strobel, G. A. Galazutdinov, J. Krełowski, *Astron. and Astrophys.* **507**, 833 (2009).
15. D. Morton, *Astrophys. J. Suppl.*, **149**, 205 (2003).
16. N. C. Sterling, B. D. Savage, P. Richter, D. Fabian, K. R. Sembach, *Astrophys. J.* **567**, 354 (2002).
17. G. M. Stokes, *Astrophys. J. Suppl.* **36**, 115 (1978).
18. O. Struve, *Astrophys. J.* **67**, 353 (1928).
19. K. Vollmann, T. Eversberg, *Astronomische Nachrichten* **327**, 862 (2006).
20. B. Y. Welsh, T. Sasseen, N. Craig, S. Jelinsky, C. E. Albert, *Astrophys. J. Suppl.* **112**, 507 (1997).
21. D. E. Welty and P. A. Crowther, *Monthly Notices Royal Astron. Soc.* **404**, 1321 (2010).

The Interstellar Ti II Distance Scale

G. A. Galazutdinov^{1,2}, T. A. Santander³, E. Babina¹, and J. Krełowski⁴

¹Crimean Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nauchny, 298409 Russia

²Special Astrophysical Observatory, Russian Academy of Sciences, Nizhnii Arkhyz, 369167 Russia

³Universidad Católica del Norte, Antofagasta, 1249004 Chile

⁴University of Rzeszów, Rzeszów, 35-310 Poland

We measured the equivalent widths (*EW*s) of interstellar Ti II absorption lines at λ 3383.759 for about 250 reddened objects and found a good correlation of the *EW*s with distances to the background stars, estimated using Gaia DR3 parallaxes. Hipparcos trigonometric parallaxes were used for very bright objects which were not observed by Gaia. The Ti II based distance estimation procedure is similar to the well known Ca II-method (Megier et al., 2005, 2009). However, there are at least 3 advantages of the Ti II method: in contrast to interstellar Ca II H and K lines, blending of Ti II with stellar lines is not an issue even for late B stars; Ti II is to a much less extent influenced by the saturation effect; only a single line must be measured, i.e. there is only a single measurement error to be taken into account. The relation of between Ti II *EW* and distance is given by simple equation $d \approx 30 EW$, where d is the distance in pc and *EW* is the equivalent width of the Ti II λ 3383.759 line in mÅ.

Keywords: *ISM: clouds—atoms: stars—distances*