

МГУ имени М.В. Ломоносова

Государственный астрономический институт имени П.К.Штернберга

№ госрегистрации  
115021270037

УТВЕРЖДАЮ  
Директор/декан

\_\_\_\_\_  
\_\_\_\_\_  
«\_\_» \_\_\_\_\_ Г.

УДК  
524.6 Галактика. Млечный Путь

ОТЧЕТ  
О НАУЧНО-ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКОЙ РАБОТЕ

Галактическая астрономия. Физика межзвездной среды  
по теме:  
Структура, динамика и эволюция Галактики  
(промежуточный)

Зам. директора/декана  
по научной работе

\_\_\_\_\_  
«\_\_» \_\_\_\_\_ Г.

Руководитель темы  
Расторгуев А.С.

\_\_\_\_\_  
«\_\_» \_\_\_\_\_ Г.

## СПИСОК ИСПОЛНИТЕЛЕЙ

Руководитель темы:

заведующий кафедрой, доктор  
физико-математических наук,  
профессор по кафедре

\_\_\_\_\_ (Расторгуев А.С.)

Исполнители темы:

аспирант

\_\_\_\_\_ (Атапин К.Е.)

ведущий научный со-  
трудник, доктор физико-  
математических наук

\_\_\_\_\_ (Бердников Л.Н.)

доцент, кандидат физико-  
математических наук, доктор  
физико-математических наук,  
доцент по кафедре

\_\_\_\_\_ (Глушкова Е.В.)

специалист, кандидат физико-  
математических наук

\_\_\_\_\_ (Горыня Н.А.)

ведущий специалист

\_\_\_\_\_ (Егорова Е.С.)

главный научный со-  
трудник, доктор физико-  
математических наук, про-  
фессор по специальности

\_\_\_\_\_ (Ефремов Ю.Н.)

старший научный сотру-  
дник, кандидат физико-  
математических наук

\_\_\_\_\_ (Заболотских М.В.)

кандидат физико-  
математических наук

\_\_\_\_\_ (Копосов С.Е.)

ведущий специалист

\_\_\_\_\_ (Кузнецов М.В.)

ведущий специалист

\_\_\_\_\_ (Леонова С.И.)

ведущий научный со-  
трудник, доктор физико-  
математических наук, кан-  
дидат физико-математических  
наук

\_\_\_\_\_ (Мельник А.М.)

ведущий специалист

\_\_\_\_\_ (Осташова М.Л.)

научный сотрудник, кандидат  
физико-математических наук

\_\_\_\_\_ (Пружинская М.В.)

доцент, кандидат физико-  
математических наук, до-  
цент/с.н.с. по специальности

\_\_\_\_\_ (Соловьев В.М.)

специалист

\_\_\_\_\_ (Сурдин В.Г.)

лаборант, студент

\_\_\_\_\_ (Уткин Н.Д.)

\_\_\_\_\_ (Чемель А.А.)

## РЕФЕРАТ

Ключевые слова:

шкала расстояний, лучевые скорости, звездные скопления, кинематика населений галактики, звездная динамика, цефеиды и переменные типа rr лиры

Ключевые слова по-английски:

kinematics of stellar population, galaxies, radial velocities, stellar dynamics, cepheids and rr lyrae variables, universal distance scale, star clusters

Предметом исследования являлись подсистемы нашей Галактики, Млечного Пути, включающие как молодые, так и старые объекты, а также другие галактики. Основное направление исследований – изучение кинематики и динамики населений Галактики с использованием всей совокупности современных наблюдательных данных: фотометрических, спектральных и астрометрических. Основным методом исследования был статистический анализ больших совокупностей данных об объектах галактического диска и гало с применением современных аналитических и вычислительных алгоритмов. Для этой цели использованы объекты, расстояния которых традиционно считаются неплохо известными, в первую очередь – пульсирующие переменные звезды, цефеиды и Лириды, а также рассеянные и шаровые звездные скопления. Изучение кинематики велось на основе пространственных скоростей объектов, т.е. их лучевых скоростей и собственных движений, причем для уточнения собственных движений был применен оригинальный алгоритм извлечения астрометрической информации из массовых каталогов, созданных на протяжении нескольких десятков лет, использующий также астрометрическую информацию первой версии каталога миссии GAIA (DR.1). Расчеты проводились методом статистических параллаксов, позволяющим найти систематические поправки к используемым шкалам расстояний объектов. Определялись физические характеристики цефеид, в том числе светимости, на основе данных об их эффективных температурах, фотометрии и лучевых скоростях. Исследованы свойства Сверхновых типа Ia как основных «стандартных свечей» в связи со свойствами родительских галактик, проведено моделирование Сверхновой SN 2013dx. Исследовались физические основания звездной динамики: роль фрактальных субструктур и кратности далеких звездных сближений.

В 2017 г. по тематике работы опубликовано 18 статей в рецензируемых изданиях и трудах конференций. В 2017 г. сделано 22 доклада на Всероссийских и международных конференциях.

## ВВЕДЕНИЕ

Работы по изучению кинематики и динамики Галактики особенно плодотворно ведутся на протяжении последних 20 лет, с 1997 г., со времени появления астрометрического проекта, HIPPARCOS (Perriman et al., A&A, 323, L49, 1997). По этой тематике опубликованы сотни статей, в том числе посвященных астрофизическим аспектам этого проекта (калибровкам физических характеристик звезд). Несмотря на сравнительно малое число звезд, тригонометрические параллаксы которых измерены с относительной точностью лучше 10% (их примерно 15000), проект привел к революционным изменениям в понимании динамики и эволюции Галактики. Через 10 лет результаты проекта, особенно для ярких звезд, были существенно уточнены с учетом апостериорных данных о движении космического аппарата (van Leeuwen, A&A, 474, 653, 2007). На эти работы в библиографической базе ADS имеется более 2500 ссылок. В настоящее время успешно выполняется новый астрометрический проект GAIA, обещающий увеличить астрометрическую точность примерно в 30-50 раз. В первом каталоге GAIA (DR.1) для 2.2 млн. звезд уже даются высокоточные собственные движения, выведенные по данным GAIA и TYCHO2 с разностью эпох порядка 25 лет (TGAS – Tycho-Gaia Astrometric Solution). Эти данные уже активно используются нами для кинематических исследований. В ожидании появления второй версии каталога GAIA (DR.2), которая, как предполагается, будет уже самосогласованной и не связанной с более старыми астрометрическими каталогами, наш коллектив разрабатывает новые подходы к изучению строения и динамики Галактики, ориентированные на оперативное использование новых данных о параллаксах, собственных движениях и лучевых скоростях разных населений Галактики. Следовательно, дальнейшее изучения строения и кинематики галактических населений – от тонкого диска до далеких объектов гало – является актуальным, а использование высокоточных астрометрических данных, в первую очередь тригонометрических параллаксов и собственных движений должно вывести наши знания о Галактике на качественно новый уровень.

## ОСНОВНАЯ ЧАСТЬ

В 2017 г. работы велись по следующим направлениям.

1. Уточнение кинематики и шкалы расстояний цефеид и определение кинематических параметров молодого галактического диска. Выборка цефеид с лучевыми скоростями (измеренными в основном нами) и собственными движениями из каталога GAIA DR.1 TGAS, определенными с характерной точностью 0.1-0.2 мсд/год (Michalik et al., *Astron. Astrophys.*, 574, A115, 2015; GAIA Collaboration, *Astron. Astrophys.*, 595, A1, A133, 2016) содержит 225 объектов. Расстояния до цефеид вычислены с помощью зависимости «период – светимость», выведенной по астрометрическим измерениям HST (Benedict et al., *Astron. J.*, 133, 181, 2007), при этом использовались параметры кривых блеска, определенные Berdnikov et al. (*Astron. Astrophys. Suppl.*, 143, 211, 2000) и средние значения избытков цвета, опубликованные в базе данных Fernie ([http://www.astro.utoronto.ca/DDO/research/cepheids/table\\_colourexcess.html](http://www.astro.utoronto.ca/DDO/research/cepheids/table_colourexcess.html), 1995). Выборка цефеид была разделена на две части по граничному значению периода пульсаций 7 суток (как известно, в БМО и ММО среди цефеид с периодам более 7 суток практически нет звезд, пульсирующих в обертонах). Расчеты кинематических параметров велись вначале отдельно с использованием разработанной нашим коллективом наиболее полной версии метода статистических параллаксов (Rastorguev et al., *Astron. Bull.*, 72, 122, 2017). Было найдено, что шкала расстояний короткопериодической группы цефеид на 4-5% короче шкалы для долгопериодической группы. Причиной различий служит, по видимому, наличие в короткопериодической группе ряда неотожествленных обертоновых цефеид, число которых, по нашим оценкам, может составить 15-20 из общего числа 120 объектов. По объединенной выборке цефеид найден полный набор кинематических параметров для составной модели поля пространственных скоростей, включающей как дифференциальное вращение, так и возмущения от 4-рукавного спирального узора. Систематические различия между параметрами (дисперсиями пекулярных скоростей, амплитудами возмущений скорости), определенными по цефеидам и мазерам (Rastorguev et al., *Astron. Bull.*, 72, 122, 2017), полностью объясняются различием возрастов этих двух популяций. Геометрия кинематического спирального узора хорошо согласуется с результатами изучения пространственного распределения около 600 цефеид (Dambis et al., *Astron. Let.*, 41, 489, 2015). Выведена плоская кривая вращения диска Галактики на интервале галактоцентрических расстояний от 5 до 13 кпк со скоростью вращения на солнечном расстоянии ( $238 \pm 8$ ) км/с.

В работах большого коллектива авторов (Luck & Andrievsky, *Astron. J.*, 128, 343, 2004; Kovtyukh et al., *Astron. J.*, 129, 433, 2005; Andrievsky et al., *Astron. J.*, 130, 1880, 2005; Luck et al., *Astron. J.*, 136, 98, 2008) на основании спектроскопических данных высокого разрешения методом LDR (Line Depth Ratio) были определены эффективные температуры 33 цефеид, причем в разных фазах пульсации. Нашим коллективом эти данные были использованы для независимого определения избытков цвета, средних радиусов, а также оптических и болометрических светимостей цефеид с помощью нового варианта метода Бааде-Беккера-Весселинка (Rastorguev, Dambis, *Astron. Bull.*, 66, 47, 2011; Rastorguev et al., *IAUS*, 289, 195, 2013), опирающегося на цветовые калибровки эффективных температур и болометрических попра-

вок. Выведены новые зависимости «период – оптическая светимость» и «период – болометрическая светимость», причем абсолютная величина цефеид с периодом 10 суток составляет в полосе V примерно -4.1 mag. По зависимости «период – радиус» отождествлено три новых оберточных цефеиды. По уточненным избыткам цвета выведены калибровки «эффективная температура – нормальный цвет – металличность [Fe/H] – ускорение силы тяжести  $\log g$ », имеющие относительную точность оценки температуры около 1.1%.

2. Уточнение абсолютных собственных движений звезд по астрометрическим данным, извлекаемым из современных массовых каталогов, на большом (до 50-60 лет) интервале времени. На кросс-платформенном языке JAVA реализована программа CROSSMATCH, основанная на технологиях Виртуальной Обсерватории и предназначенная для автоматического поиска и отождествления звезд в массовых («всенебесных») каталогах (USNOB1.0, 2MASS, ALLWISE, UCAC4/5, URAT1, IPHAS, VPHAS+, GAIA DR.1) и извлечения астрометрических данных, представленных в системе ICRS/ICRF. Это универсальная и гибкая программа, позволяющая варьировать набор каталогов и их приоритет, задавать вывод нужной информации. Она легко «встраивается» в пользовательские программы. На языке PYTHON реализован алгоритм уточнения собственных движений по всему набору координат звезд, извлеченных из «всенебесных» каталогов. С помощью этого комплекса программ удастся повысить точность абсолютных собственных движений до 1-2 мсд/год, что существенно выше точности собственных движений, включенных в каталоги UCAC4 и UCAC5. Одна из интереснейших и важнейших задач, для которой создано это программное обеспечение – это выделение звезд – членов рассеянных и шаровых звездных скоплений на основе уточненных собственных движений известным методом Сандерса. Большая статистика звезд обеспечивает беспрецедентную точность собственных движений самих скоплений еще до появления новых версий каталога GAIA. Эта задача кажется тем более важной, что имеющиеся «конвейерные» (pipe-line) методы массового определения параметров рассеянных скоплений (см., например, Kharchenko et al., *Astron. Astrophys.*, 438, 1163, 2005; Kharchenko et al., *Astron. Astrophys.*, 558, 53, 2013) во многих случаях, особенно в плотных звездных полях, принципиально не могут приводить к надежным оценкам параметров скоплений. Коллектив сконцентрировался на исследовании молодых (возрастом менее 300 млн. лет) рассеянных звездных скоплений, поскольку именно для скоплений этой возрастной группы коллективом разработан оригинальный метод оценки поглощения, возраста и расстояния, основанный на данных фотометрии в широких полосах SDSS  $r$ ,  $i$  и узкой полосе H-alpha (Dambis et al., *MNRAS*, 465, 1505, 2017) обзоров IPHAS/VPHAS+. По сути дела, этот метод является аналогом Q-метода, использующего трехцветные индексы, мало зависящие от поглощения. Использование уточненных собственных движений существенно «очистило» диаграммы «цвет – Q-индекс» и обеспечило значительное уточнение физических характеристик рассеянных звездных скоплений. К настоящему времени примерно для 200 молодых рассеянных скоплений по уточненным собственным движениям выделены члены и одновременно определены основные параметры скоплений – возрасты, избытки цвета, расстояния, собственные движения и размеры. Типичная точность средних собственных движений скоплений составляет 0.2-0.3 мсд/год. Это означает, что на расстоянии порядка 2 кпк ошибка тангенциальной скорости составляет всего 1-2

км/с. После поиска данных о лучевых скоростях членов скоплений эта однородная выборка наряду с другими представителями молодых подсистем Галактики, будет использована для исследования строения и кинематики диска Галактики по наиболее надежным и однородным данным. Аналогичная работа проведена для 120 шаровых звездных скоплений, причем выделение членов проводилось по уточненным собственным движениям ярчайших звезд: красных гигантов и звезд горизонтальной ветви. Показано, что среднее собственное движение всей системы центральных шаровых скоплений составляет около 6 мсд/год, что почти в точности равно угловой скорости вращения Солнца вокруг центра Галактики. Это обстоятельство лишний раз доказывает, что система шаровых скоплений Галактики практически не вращается. Проведены пробные расчеты орбит шаровых скоплений в модели Галактики с трехкомпонентным осесимметричным гравитационным потенциалом. В настоящее время проводится модификация программы с целью включения четвертого компонента – вращающегося бара.

3. Существенное повышение характерной точности абсолютных собственных движений с 4-5 мсд/год (в каталогах UCAC4/5) до 1-2 мсд/год заметно улучшило исходные данные практически для всех задач изучения кинематики, в том числе – для Лирид галактического поля. В настоящее время уточненные собственные движения имеются примерно для 4800 Лирид галактического гало (с металличностями  $[Fe/H] < -1$ ), исходные данные о которых взяты из работ Drake et al., *Astrophys. J.*, 763, id.32, 2013; Szczygiel et al., *Acta Astron.*, 59, 137, 2009; Torrealba et al., *MNRAS*, 446, 2251, 2015. Примерно для 800 из них имеются измерения лучевых скоростей, причем по большей части единичные, сделанные в какой-то фазе пульсаций. По этой причине было решено исследовать их кинематику по двумерному полю скоростей, т.е. по уточненным собственным движениям, с использованием максимально-правдоподобного подхода. Для типичного расстояния порядка 5 кпк ошибка тангенциальной скорости составляет 20-30 км/с, что существенно меньше дисперсии скоростей. Были определены основные кинематические параметры – компоненты скорости Солнца, дисперсии остаточных скоростей и параметр анизотропии. V-компонент скорости Солнца составляет, по этим данным,  $(226 \pm 4)$  км/с, а радиальная дисперсия скоростей –  $(150 \pm 5)$  км/с. Подтвержден результат о том, что галактическое гало практически не вращается. Параметр анизотропии систематически растет в интервале расстояний от 3-4 до 20 кпк от значения 0.4 до 0.7 (это означает, что с ростом расстояния увеличивается роль радиальных движений Лирид). На телескопе SALT проведены спектральные наблюдения 300 Лирид, причем для 260 звезд были впервые измерены лучевые скорости. По выборке из 600 Лирид с лучевыми скоростями и собственными движениями методом статистических параллаксов уточнена шкала расстояний, в которой модуль расстояния БМО близок к 18.40 mag. Оценены кинематические параметры Лирид гало и толстого диска. Показано, что радиальная дисперсия скоростей падает от значения около 180 км/с до расстояния 20 кпк от центра Галактики, и затем до расстояния 50 кпк остается примерно постоянной и равной 100 км/с (Dambis et al., EPJ Web of conf., 152, 02007, 2017).

4. Впервые по астрометрическим данным GAIA DR.1 (TGAS) изучена кинематика и внутренние движения звезд в 18 OB-ассоциациях Галактики, включающих не менее 10 звезд каталога TGAS (Melnik, Dambis, *MNRAS*, 472, 3887, 2017). По высокоточным собственным движениям сделана оцен-

ка одномерной дисперсии скоростей ( $\sim 4$  км/с), вириальной ( $\sim 10^5 - 10^7$  солнечных масс) и звездной массы и на этой основе - эффективность звездообразования (порядка 2%). Доказано расширение многих ассоциаций, и по скоростям и размерам двумя разными методами оценен их кинематический возраст (от начала расширения 7-10 млн. лет). Показано, что часть скорости расширения ассоциации Per OB1 связана с эффектом перспективы (из-за встречного движения).

5. В рамках работы по уточнению универсальной шкалы расстояний проведено детальное исследование большой выборки Сверхновых звезд типа Ia, включающей 192 объекта с красными смещениями менее  $z = 0.4$  и наилучшими фотометрическими данными. Основной целью работы стало изучение связей свойств Сверхновых со свойствами «родительских» галактик, а также уточнению значений параметров трансформации кривых блеска, используемой для приведения к «шаблону». Показано, что параметр расширения/сжатия (stretch-factor) коррелирует с морфологическим типом галактики, систематически немного увеличиваясь при переходе от спиральных галактик позднего типа к галактикам раннего типа и далее - к эллиптическим/линзовидным галактикам, в то время как цветовой член не показывает значимых изменений. Светимость Сверхновых в эллиптических/линзовидных галактиках также несколько выше. Вся совокупность данных согласуется со значением плотности массы-энергии «темной энергии» (космологического параметра  $\Omega_{\Lambda}$ ) около 0.705 (Henne, Pruzhinskaya et al., *New Astron.*, 51, 43, 2017).

6. Проведены исследования ряда галактик. Изолированная близкая спиральная галактика NGC6946 демонстрирует высочайший темп звездообразования, проявляющийся в обилии ярких областей ионизованного водорода и в рекордном числе - 10! - вспыхнувших в ней за столетие Сверхновых звезд. Магнитное поле диска этой галактики локализовано не в звездных спиральных рукавах, как в большинстве спиральных галактик, а между ними. Она содержит несколько уникальных объектов - гигантский звездный комплекс, имеющий с одного края резкую полукруглую границу, загадочный газовый «эллипс», яркий в линии водорода H $\alpha$  и, наконец, странную «сетку» правильных темных «нитей». Как и во многих других спиральных галактиках, в водородном диске NGC6946 много округлых пустот, причем поперечник подавляющего большинства из них превышает толщину этого диска. Механизм образования таких дыр остается неясным (Ефремов, *Природа*, 5 (1221), 3, 2017). Проведены оптические и радионаблюдения (на длине волны нейтрального водорода 21 см) богатого газом триплета UGC3672, расположенного вблизи центра voida в созвездиях Рыси и Рака. Самый слабый компонент триплета отличается особенным обилием газа с крайне низкой металличностью. По радионаблюдениям показано, что триплет галактик погружен в общую газовую оболочку с кинематикой, характерной для дисковых систем. Сделан вывод о том, что в разреженном окружении в voide образование структур в галактиках идет значительно медленнее, чем в областях с относительно высокой плотностью (Chengalur, Pustilnik, Egorova, *MNRAS*, 465, 2342, 2017).



## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В течение 2017 г. проведен большой объем исследований кинематики населений гало, толстого и тонкого диска Галактики. На основе оригинальных разработанных методик уточнения собственных движений звезд выделены члены 300 молодых рассеянных звездных скоплений и 120 шаровых звездных скоплений и составлен их каталог. По мере появления новых астрофизических и астрометрических данных, в первую очередь результатов миссии GAIA, открывается возможность оперативного использования тригонометрических параллаксов, собственных движений и лучевых скоростей для детального анализа пространственного распределения объектов и особенностей их кинематики. Применение метода статистических параллаксов привело к уточнению шкалы расстояний основных "стандартных свечей" - Лирид и цефеид Галактики. Изучены некоторые пекулярные галактики.

ПРИЛОЖЕНИЕ А  
Объем финансирования темы в 2017 году  
Таблица А.1

Источник финанси- рования	Объем (руб.)	
	Получено	Освоено собственными силами