

СТРУКТУРА И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ НА ГАЛАКТИЧЕСКИХ И КОСМОЛОГИЧЕСКИХ МАСШТАБАХ, СКРЫТАЯ МАССА И ТЕМНАЯ ЭНЕРГИЯ: ТЕОРЕТИЧЕСКИЕ МОДЕЛИ И РЕЗУЛЬТАТЫ НАБЛЮДЕНИЙ

Берцик П.П., Вавилова И.Б., Жданов В.И., Жук А.И., Караченцева В.Е.,
Минаков А.А. (посмертно), Новосядлый Б.С., Павленко Я.В., Пелых В.А., Пилюгин Л.С.

АННОТАЦИЯ

Работа охватывает широкий спектр теоретических и наблюдательных проблем эволюции Вселенной, решение которых получено в результате коллективных усилий авторов, и является значительным вкладом в развитие украинской школы внегалактической астрономии и космологии. Впервые получен ряд результатов, играющих существенную роль при построении Стандартной космологической модели и ее обобщений, в том числе с использованием дополнительных измерений и скалярных полей. Предложены новые подходы для обнаружения и изучения пространственного распределения галактик, их структуры и состава. Получены приоритетные результаты в области кинематики, динамической и химической эволюции Галактики и других галактик, а также физической и химической эволюции ультрахолодных звезд как важного компонента скрытой барионной материи. Созданы новые каталоги галактик, широко используемые для изучения распределения темной и видимой материи во Вселенной.

Введение

В течение последних десятилетий получены новые астрономические данные, которые радикально изменили представления о современном этапе космологического расширения и поставили новые задачи перед фундаментальной физикой. Изучение структуры Вселенной показывает, что доля видимого барионного вещества (из которого состоят планеты, звезды и галактики; межпланетный и межгалактический газ и пыль) составляет не более 5% от средней плотности материи во Вселенной. Основная часть в этом распределении принадлежит т. н. “темной энергии” (ТЭ, – приблизительно 73%) и “темной материи” (ТМ, – приблизительно 22%). Перед современной наукой предстали проблемы идентификации и изучения этих невидимых компонент материи. Работы в этом направлении активно развиваются во всем мире и принадлежат к наиболее приоритетным исследованиям.

Общеизвестно, что единственными источниками экспериментальных данных, которые подтверждают существование ТМ и ТЭ, остаются астрономические исследования. Это обстоятельство стимулировало развитие нового научного направления, известного под названием «космомикрофизика» («астрофизика элементарных частиц»), в основе которого лежит как использование астрономических данных для изучения материи на микроскопическом уровне, так и данных физики элементарных частиц для понимания эволюции Вселенной. Именно при рассмотрении космологических и астрофизических систем могут быть получены ограничения на микроскопические модели ТМ и теоретико-полевые модели ТЭ. Отмечая важность исследований элементарных частиц в наземных лабораториях, следует подчеркнуть, что пока что ни один из ускорителей не способен воспроизвести физические условия, существовавшие на ранних стадиях эволюции Вселенной. Однако, эти условия и особенности фундаментальных взаимодействий повлияли на характеристики реликтового излучения, на спектры мощности контраста плотности массы на различных масштабах, с которыми связаны распределения определенных классов астрономических объектов, и на химический состав барионного вещества в галактиках. Эти данные о структуре Вселенной на галактических и космологических масштабах являются также единственным источником нетривиальной информации о ТМ и ТЭ, поэтому разработка новых астрономических методов для получения и интерпретации этой информации совершенно необходима. Будучи непростой задачей как таковой, она дополнительно осложняется еще и тем,

что значительная часть наблюдений соответствует современной эпохе и требует экстраполяции на более ранние времена развития Вселенной. Тем более ценными являются результаты относительно астрофизических объектов, содержащих первичное вещество, например, таких как G-карлики или карликовые иррегулярные галактики, или ТМ в гало галактик, в гало групп и скоплений галактик.

Представленная работа отражает существенный вклад авторского коллектива в развитие обсуждаемых направлений внегалактической астрономии и космологии. Задачи этого обширного исследования можно условно разделить в соответствии с пространственными и временными масштабами изучаемых объектов на три частично пересекающихся уровня.

1. **На глобально-космологическом уровне** возникает необходимость анализа Стандартной космологической модели и фильтрации нежизнеспособных теорий, разработок моделей ТМ и ТЭ.

2. **На внегалактических масштабах** изучение структуры Вселенной стимулирует разработку теоретических предсказаний космологической модели с холодной тёмной материей и космологической постоянной, а также их обобщений. С другой стороны, это делает необходимым подробный анализ новейших наблюдений крупномасштабных структур во Вселенной и разработку новых методов получения космологических данных.

3. **На галактических масштабах** возникает ряд задач, относящихся к исследованию и интерпретации физико-химических свойств галактик, моделированию их эволюции. Это требует разработки эффективных методов для получения характеристик как отдельных галактических объектов, так систем галактик в целом.

Глобальная модель структуры и эволюции Вселенной: теория и наблюдения

В современной физике существует четкое понимание того, что рассмотрение самых ранних этапов эволюции Вселенной, в частности, инфляционного, а также природы ТЭ и ТМ связано с коренным изменением Стандартной космологической модели. В работах авторов эти приоритетные вопросы рассматриваются в рамках моделей с дополнительными пространственно-временными измерениями и с дополнительными космологическими полями.

Многомерная космология, имеющая основополагающее значение не только для космологии и астрофизики, но и для физики элементарных частиц, — это новое направление в науке о Вселенной. Приоритетные и широко признанные результаты в этом направлении были получены в работах А. Жука. Среди этих результатов – новые точные решения многомерных классических космологических моделей, ценность которых состоит в том, что они позволяют детально исследовать динамическое поведение внешних и внутренних пространств и сравнить это поведение с наблюдаемой картиной Вселенной. Приоритетные результаты получены также в направлении квантования многомерных моделей и поиска новых квантовых решений. Полученные точные решения были первыми из ныне известных решений квантового уравнения Уилера-ДеВитта для многомерной космологии. Еще одно направление исследований связано с фундаментальной проблемой совместимости многомерных моделей Калуцы-Клейна с классическими гравитационными тестами. Определены физические критерии, которым должны удовлетворять жизнеспособные теории. Предложена модель «гравитационных экситонов» как кандидатов на роль частиц ТМ, при этом роль ТЭ принадлежит эффективному потенциалу, возникающему в этих теориях после размерной редукции. Получен также ряд новых важных результатов для классических гравитационных тестов в многомерных гравитационных теориях.

В работах Б. Новосядлого для моделей ТЭ со скалярным полем впервые были получены параметры ТМ, которые вытекают из данных наблюдений сверхновых звезд типа Ia, характеристики крупномасштабной структуры Вселенной и анизотропии температуры реликтового излучения. Показано, что скалярное поле как динамическая тёмная энергия с переменной плотностью и параметром уравнения состояния, позволяет получить лучшее согласование с наблюдениями, чем стандартные модели с космологической постоянной; в тоже время, модели без ТЭ необходимо отбросить на уровне достоверности больше 99,99%.

Выдающиеся открытия в области астрофизики и космологии часто сопровождаются критическим анализом базовых концепций общей теории относительности (ОТО). Одним из них является понятие гравитационной энергии в ОТО. В работах В. Пельха создан и обоснован новый тензорный метод доказательства теоремы о положительности гравитационной энергии в асимптотически плоских пространствах ОТО. Показан геометрический характер спинорного поля Виттена, используемого в исследованиях энергии в ОТО; указано, что этот вывод сохраняет свою силу с учетом наличия ТЭ. Принципиальным моментом любой теории является однозначность и существование решений уравнений, а также обоснованность используемых приближенных методов. В работах В. Жданова эти вопросы рассмотрены в динамике с конечной скоростью расширения взаимодействий (свойственной любой релятивистской теории), а также в релятивистской гидродинамике. В релятивистской динамике для модельных уравнений движения тел, которые учитывают запаздывание взаимодействий, доказана сходимость итерационной процедуры, обосновывающей применение стандартных приближенных методов. В релятивистской магнитогидродинамике обоснованы условия существования ударных волн в средах с общим уравнением состояния в понимании Бете и Вейля, – эти результаты представляют интерес при рассмотрении сверхплотных астрофизических объектов в окрестности фазовых переходов.

Теоретические расчеты параметров крупномасштабных неоднородностей в моделях с ТМ и ТЭ

В работах авторов важные результаты получены для определения параметров космологической модели, спектра мощности первоначальных возмущений плотности на основе сопоставления теории с наблюдательными данными о функции масс скоплений галактик, пекулярных скоростей галактик, пространственном распределении галактик и анизотропии реликтового излучения. Б. Новосядлым в пионерских работах (задолго до общего признания существования ТЭ) было показано, что количественное согласование теории и наблюдений достигается в моделях с ТМ и космологической постоянной. Для определения типа ТМ проанализировано формирование первоначального спектра мощности скалярных возмущений плотности в моделях с ТМ с горячей (активные нейтрино) и холодной (аксионы, слабо взаимодействующие массивные частицы) тёмной материей. Предложены аналитические аппроксимации для расчета спектра мощности в смешанных моделях, которые использовались другими группами исследователей.

Показано, что наблюдаемое пространственное распределение галактик, их пекулярные скорости и функции масс скоплений галактик находят объяснение в моделях, содержащих нейтринную компоненту тёмной материи в количестве, не превышающем 10% от полной плотности Вселенной; установлен верхний предел для массы покоя вырожденных активных нейтрино: $< 0,3$ эВ на уровне достоверности 95%. Важными также являются результаты расчетов нелинейной стадии эволюции крупномасштабных неоднородностей плотности, полученные с использованием разработанных авторами полуаналитических методов. Показано, что предсказания моделей с известным из наблюдений составом ТМ и ТЭ и практически масштабно-инвариантным спектром первоначальных возмущений согласуются с данными по функции масс скоплений галактик, спектром мощности контраста плотности на всех масштабах и распределением квазаров по красным смещениям. Авторы одними из первых объяснили поток галактик на Великий аттрактор как результат крупномасштабного пика возмущений плотности материи, изучили зависимость рентгеновской светимости межгалактического газа в центральной части от первоначальных амплитуды и характерного масштаба первоначальной неоднородности, а также смоделировали влияние таких структур на анизотропию температуры реликтового излучения. Получен принципиально важный вывод, что тензорная мода в реалистичных моделях ранней Вселенной может дать вклад только на больших угловых масштабах (сферические гармоники < 10) не более 60% от основного вклада, обусловленного скалярной модой. Открытие в марте 2014 года реликтовых гравитационных волн и подтверждение существования ранней

инфляционной стадии расширения Вселенной в эксперименте WMAP2 хорошо согласуется с этим результатом: вклад тензорной моды оказался равным $20 \pm 7\%$.

Результаты авторов имеют важное значение в эпоху становления прецизионной космологии, где существенным является развитие методов совместного определения параметров космологических моделей одновременно с учетом всех имеющихся данных.

Крупномасштабные распределения материи: методы и анализ наблюдений

Физические и кинематические характеристики вещества на масштабах групп и скоплений галактик являются одним из основных источников, которые «питают» космологические теории, дают экспериментальную базу для определения космологических параметров и тестирования моделей ТЭ и ТМ. В этой связи авторами получен и обработан большой объем наблюдательного материала, чем создан надежный фундамент для сравнения с теоретическими расчетами. Результаты имеют важное значение для дальнейшего изучения ТМ и определения параметров крупномасштабных неоднородностей, они уже нашли широкое применение в международных программах для картографирования Местной Вселенной.

Уникальным «материалом» для исследования этих проблем являются карликовые галактики низкой поверхностной яркости (КГНПЯ), составляющие наибольшую популяцию населения галактик во Вселенной. Они считаются идеальными лабораториями для изучения процессов звездообразования в галактиках и проблемы тёмной материи. Карликовые галактики важны и как «пробные частицы» для изучения структуры Вселенной на расстоянии в несколько мегапарсек, происхождения и эволюции галактик. Работы по поиску и изучению карликовых галактик низкой и экстремально низкой поверхностной яркости начаты В. Караченцевой в 1968 году. В результате поисков карликовых галактик на первом Паломарском обзоре неба было обнаружено около 400 объектов, большинство из которых не были ранее каталогизированы. На основе оригинальных результатов и критического анализа известных на 1986 год наблюдательных данных создан реферативный Каталог карликовых галактик низкой поверхностной яркости (1500 галактик), охватывающий все небо, разработана схема морфологической классификация КГНПЯ. Разработанный И. Вавиловой для этого каталога кластерный анализ впервые позволил получить количественные характеристики и показать фундаментальные различия в распределении этих галактик с различным типом населения на масштабах скоплений галактик Дева и Печь и в объеме Местного сверхскопления. Позже В. Караченцевой с соавторами на обзорах неба POSS-II, ESO/SERC и SERC/EJ были впервые обнаружены 327 новых членов популяции КГНПЯ; проведены наблюдения в линии H α 21 см на больших радиотелескопах и получены их лучевые скорости, ширины линий и потоки. Эти результаты стали основой крупных международных проектов на Космическом телескопе Хаббла, на котором, при участии В. Караченцевой, проведены наблюдения КГНПЯ на расстояниях до 10 Мпк и получены фундаментальные результаты – построена трехмерная картина распределения галактик в Местном объеме.

На основе оригинальных наблюдений и литературных данных В. Караченцевой с соавторами создан Каталог соседних галактик (CNG), который охватывает все небо и содержит 451 галактику Местного объема с оценками лучевых скоростей, индивидуальных расстояний, оптическими и радио- характеристиками. Эти данные имеют основополагающее значение для выбора космологических моделей и широко используются для исследования физических свойств галактик. Первый и в настоящее время признанный как наиболее репрезентативный и полный каталог изолированных галактик (KIG) был создан В. Караченцевой на основе оригинального критерия изолированности галактик. Впервые была определена каталожная доля изолированных галактик, около 4%, что накладывает условия на процесс формирования крупномасштабной структуры. Изолированные галактики являются своеобразными эталонными объектами, поскольку не подвергались динамическому воздействию от соседних галактик на протяжении последних 1-2 млрд. лет, т.е. их свойства обусловлены собственными процессами эволюции. На материале

инфракрасного обзора 2MASS создан новый каталог изолированных галактик, 2MIG, содержащий 3227 объектов. Обратим внимание, что в настоящее время в мире существует только три выборки изолированных галактик, охватывающих все небо, к которым принадлежат CNG (глубина до 10 Мпк), новый каталог LOG (45 Мпк) и 2MIG (80 Мпк).

Авторами разработаны новые методы для изучения крупномасштабной структуры и кластеризации внегалактических объектов с использованием фрактального и вейвлет анализов. В частности, разработанный в работах И. Вавиловой с соавторами программный код мозаики Вороного позволил впервые обнаружить зависимости между морфологическим типом, показателем цвета и другими параметрами галактик, входящих в группы различной населенности, для выборок галактик из обзоров SDSS и Местного сверхскопления. Полученные надежные отношения «масса-светимость» галактик позволили оценить медианное содержание ТМ в малочисленных группах (от 20 до 50 $M_{\text{Сол}}/L_{\text{Сол}}$ в зависимости от состава группы) и сделать вывод, что в группах, где преобладают галактики поздних типов, ТМ концентрируется в гало галактик, а в группах, где преобладают галактики ранних типов, – преимущественно в гало групп галактик. Разработан новый метод для оценки кластеризации, который учитывает эффекты наблюдательной селекции; этот метод оказался эффективным даже в применении к гетерогенным каталогам, существовавшим до появления широкомасштабных обзоров SDSS и 2dF. Позже этот метод был модифицирован и применен к различным версиям SDSS, что позволило получить параметры корреляционных функций квазаров на масштабах от 2 до 50 Мпк.

К немногим средствам, которые дают информацию о строении самых отдаленных объектов и распределении массы во Вселенной, принадлежит гравитационное линзирование. Одним из основателей этого направления в Украине был А. Минаков: его первая работа (1975, в соавторстве) на двадцать лет опередила аналогичные работы западных ученых. Пионерской была также первая в мире монография (П.В. Блюх, А.А. Минаков, 1989) по проблемам гравитационного линзирования. Этими и последующими исследованиями были созданы основы теории гравитационного линзирования с использованием наработок харьковской радиофизической школы. Развитые подходы позволили авторам получить ряд важных результатов, в частности, исследовать структуры критических и каустических кривых гравитационно-линзовой системы (ГЛС), выполнить анализ вариаций блеска линзированных изображений при критических значениях поверхностной плотности массы макролинзы-галактики.

В работах с участием авторов разработаны новые приближенные методы решения уравнения гравитационной линзы, предсказано и детально исследовано возникновение нового эффекта, связанного с линзированием переменного во времени источника. Применение теоретических разработок к анализу и интерпретации результатов наблюдений гравитационно-линзовых систем позволило получить оценку относительного содержания темной материи в общей массе дефлектора ГЛС Q2237+0305. Для этой же ГЛС получены характеристики суммарного рентгеновского спектра. Новой является также верхняя оценка массы возможной субструктуры темной материи в ГЛС PG1115+530.

В работах В. Жданова по астрометрическому микролинзированию впервые показано, что во внегалактических ГЛС движения изображений микролинзированных квазаров могут быть сопоставимыми по величине с собственными движениями самих квазаров. В случае стохастической разреженной системы микролинз впервые найдены аналитические соотношения для распределения вероятностей движений изображений; благодаря простой конечной форме этот результат можно считать хрестоматийным. В работах авторов впервые обращено внимание на то, что, кроме случайного движения, коллективное движение звезд в ГЛС индуцирует дополнительное движение изображения удаленного источника; этот результат имеет принципиальное значение для построения астрометрической системы отсчета, основанной на удаленных источниках. Также впервые, одновременно с другими авторами, показано, что траектория центра яркости изображения качественно меняется при учете неточности источника.

Это открывает дополнительные возможности по изучению структуры источника при достижении необходимой точности астрометрических наблюдений.

Химическая эволюция галактик: новые методы и результаты

Как известно, космологическое (догалактическое) содержание химических элементов (дейтерий, гелий) используется для определения содержания барионной материи. Именно на этой основе, путем исключения, были получены наиболее точные оценки содержания небарионной компоненты, т.е. ТМ. Таким образом, кроме важной самостоятельной роли, оценки содержания элементов косвенным образом связаны с изучением ТМ. Исследование химического состава объектов в галактиках позволяет делать выводы о формировании и эволюции различных галактик. Этому посвящены приоритетные работы Л. Пилюгина, где разработаны новые методы определения химического состава межзвездной среды в галактиках, построены модели химической эволюции спиральных и иррегулярных галактик.

В работах Л. Пилюгина предложен новый метод определения химического состава (содержание кислорода и других элементов) в областях ионизованного водорода (области HII). Показано, что точность определения содержания кислорода новым методом не уступает классическому методу, а его преимуществом является то, что он базируется на интенсивности только сильных небулярных линий, тогда как использование классического метода требует измерения очень слабой авроральной линии кислорода. На основе нового метода переопределено содержание кислорода в гигантских спиральных галактиках и показано, что содержание кислорода в галактиках в два-три раза ниже, чем принималось ранее.

Показано, что каноническая модель химической эволюции Галактики не в состоянии объяснить имеющиеся наблюдаемые данные. Построена мультифрагментная модель химической эволюции Галактики, которая позволяет согласованно объяснить наблюдаемые данные для гало и диска Галактики, чего не удавалось сделать в рамках канонической модели. Развита концепция обогащенного галактического ветра, суть которой заключается в том, что часть обогащенного синтезированными тяжелыми элементами вещества, выбрасываемого в межзвездную среду массивными звездами при вспышках сверхновых, покидает галактику, не смешиваясь с межзвездной средой. Показано, что эффекты воздействия обычного галактического ветра и обогащенного галактического ветра на химическую эволюцию галактик принципиально различаются. Найдено, что модели химической эволюции галактик с учетом обогащенного галактического ветра лучше объясняют известную зависимость «светимость - металличность» для карликовых галактик, чем модели с обычным галактическим ветром.

Установлена временная шкала синтеза азота во Вселенной. Найдено, что отношение содержания азота к содержанию кислорода в галактике зависит от истории звездообразования. Это отношение является индикатором времени, прошедшего от момента окончания активного звездообразования в галактике.

Численное моделирование комплексной эволюции галактических систем

Методы численного моделирования приобретают сегодня большое значение в расчетах "из первых принципов" эволюции крупномасштабного строения Вселенной и ее элементов, что дает возможность проверки фундаментальных космологических постулатов. Современные вычислительные системы позволяют не только эффективно обрабатывать большие массивы наблюдательных данных, но и моделировать сложные астрофизические системы с ранее недостижимым числовым разрешением. В связи с этим исключительную важность приобретает разработка эффективного программного обеспечения, что позволяет максимально использовать доступные вычислительные ресурсы.

В работах П. Берцика впервые проведен анализ 3D-газодинамического коллапса трехосных протогалактических фрагментов методом крупных частиц (SPH). Разработаны численные модели, которые позволяют в наиболее общем виде описать начальный процесс формирования

галактических структур. Показано, что разработанный метод позволяет самосогласованно учитывать процессы формирования звездного компонента практически независимо от исходного разбиения газового компонента на фрагменты (количество SPH-частиц). Также впервые показано, что этот алгоритм позволяет с достаточной точностью интерпретировать результаты, полученные при весьма умеренных количествах начальных SPH-частиц, и использовать их для всей галактики, которая содержит гораздо большее количество газовых фрагментов, чем можно использовать для модельных расчетов.

Впервые использование “энергетического критерия” эффективности звездообразования позволило построить адекватную модель для количественного анализа хемодинамической эволюции нашей Галактики. Предложенный газодинамический код позволил самосогласованно описать как глобальную, так и локальную, в окрестности Солнца, динамическую и химическую эволюции дисковой галактики (с общими параметрами, близкими к нашей Галактике). Численная модель, предложенная П. Берциком, впервые в рамках общей самосогласованной модели описала глобальные динамические и химические свойства диска. Именно комплексное рассмотрение газодинамической эволюции и обмена веществом между звездами и газовой фазой позволили впервые предложить адекватный механизм решения так называемой «проблемы G-карликов» в окрестности Солнца. Показано, что газовые компоненты галактик имеют разную историю обогащения тяжелыми элементами; проведено сравнение с современными наблюдениями карликовых галактик.

Впервые с использованием современных компьютерных технологий проведены беспрецедентные (по количеству частиц и временному отрезку интегрирования) работы по высокоточному динамическому моделированию эволюции галактического центра, включая движение сверхмассивной черной дыры. Эти работы позволили существенно уточнить ранние аналитические расчеты «гравитационного броуновского движения» черной дыры в распределении поля звезд и дать оценки массы центрального невидимого тела, которые хорошо совпадают с прямыми измерениями. Показано, что характерное время при слиянии черных дыр в центре галактик при типичных параметрах масс и угловых моментов орбит черных дыр составляет примерно 1 миллиард лет. Также впервые проведено высокоточное численное интегрирование эволюции двойной черной дыры в центре галактик с использованием массивно-параллельного phi-GRAPE кода. Показано, что, независимо от количества «звездных» частиц (N – от 25 тыс. до 1 млн.), производная по времени величины, обратной к большой полуоси двойной черной дыры (так называемый "hardening rate"), не зависит от количества звезд.

Проведены расчеты движения звездных скоплений в гравитационном комплексном потенциале Галактического диска с максимально высоким разрешением («одна звезда – одна частица»), которые показали, что видимые эллиптичности наблюдаемых звездных скоплений хорошо согласуются с результатами нашего численного моделирования. В работах впервые подробно исследованы динамическая эволюция и энергетика потерь скоплениями звезд за счет приливных сил в галактическом диске.

Физика и эволюция маломассивных звезд

Указанные в названии объекты являются важной составляющей скрытой барионной материи. Напомним, что в конце прошлого века одной из приоритетных проблем был вопрос о роли компактных объектов (MACHO) в структуре галактического гало, и претендентом на эту роль являлись именно маломассивные холодные звезды, в частности, коричневые карлики. В дальнейшем было обнаружено, что эти объекты, хотя и не дают основной массовый вклад в гало, являются самыми многочисленными звездами в нашей Галактике. В пионерских работах Я. Павленка по исследованию спектров ультрахолодных карликов и коричневых карликов была показана возможность реализации так называемого «литиевого теста» для определения подмножества коричневых карликов среди маломассивных звезд диска Галактики. Прямые спектральные наблюдения области резонансного дублета лития впервые показали наличие линии

лития в атмосфере первого из открытых коричневого карлика Teide1, даже при наличии сильного поглощения в полосах поглощения TiO. В работах 1997-2008 годов разработаны и реализованы методики расчетов спектров звезд поздних спектральных классов и коричневых карликов с учетом поглощения атомами и молекулами. Это позволило определить содержание лития в атмосфере Teide1 и ряда молодых коричневых карликов из рассеянных звездных скоплений. Предложенная Я. Павленком концепция «псевдоэквивалентных ширин» с успехом продолжает применяться и в наше время. Проведенные исследования процессов формирования спектров карликов спектрального класса L показали возможность применения «литиевого теста» для определения субзвездной природы маломассивных L-карликов. Разработана методика расчетов профилей сверхсильных линий поглощения натрия и калия, которые доминируют в оптическом диапазоне спектров L-карликов. Предложена новая версия «дейтериевого теста».

Выполнены пионерские исследования по изучению формирования линий лития в атмосферах молодых маломассивных звезд диска Галактики и его гало с учетом отклонений от условий локального термодинамического равновесия. Полученные результаты, в частности, по содержанию лития в атмосферах классических и слабых звезд типа T Tau являются классическими и сохраняют актуальность до настоящего времени. Изучена природа рекуррентных Новых звезд и объектов со сверхбыстрой эволюцией, впервые найдены эволюционные характеристики для ряда таких объектов.

Новые приоритетные результаты, полученные со времени предыдущего представления работы

Для многомерных космологических моделей Калуцы-Клейна впервые показано, что вариация полного объема внутренних пространств генерирует пятую силу, что приводит к искажению гравитационного взаимодействия. Абсолютно новым результатом является доказательство отсутствия калуце-клейновских частиц в рассматриваемых моделях. Показано, что наиболее оптимальное значение параметра состояния скалярно-полевых моделей темной энергии соответствует фантомной области; этот результат может существенно изменить современные представления о космологической эволюции. Получены параметры зависимостей Талли-Фишера для изолированных галактик из каталога 2MIG, что важно для понимания эволюции крупномасштабной структуры. Получена оценка содержания пар, групп и скоплений галактик в Местной вселенной и их характеристик, которые можно будет использовать для сравнения разных сценариев происхождения структуры. Для изолированных галактик 2MIG с активными ядрами Вавиловой И.Б. проанализированы их мультиволновые свойства и впервые получены оценки масс черных дыр в их центрах, показавшие, что массы изолированных АЯГ систематически меньше масс АЯГ, находящихся в составе групп и скоплений галактик. Обобщен разработанный ранее авторами метод анализа гравитационно-линзового отображения в окрестности устойчивых особенностей, в том числе, при наличии темной материи. Предложен новый метод определения содержания кислорода в областях ионизированного водорода HII, для которых отсутствуют измерения линии ионизированного кислорода [OII] 3727. Это позволяет, в частности, исследовать химсостав большого количества областей HII в близких галактиках на основе спектров, где линия [OII] 3727 находится за пределами наблюдаемого спектрального интервала. Исследован химсостав звезд диска Галактики, прежде всего, звезд с планетными системами.

В 2012 г. по теме работы опубликованы 44 статьи в журналах с общим импакт-фактором 127, 5 разделов в коллективных монографиях и 4 – в сборниках трудов. Подготовлены 3 кандидата наук под руководством А. Жука, Л. Пилюгина, В. Цветковой (первый руководитель – А. Минаков). Подготовлена монография в 3-х томах “Dark Energy and Dark Matter in the Universe”: том 1 “Dark Energy: Observational Evidence and Theoretical models” (Novosyadlyj B.S., Pelykh V.I., Shtanov Yu.V., Zhuk A.I. Ed. V.M. Shulga. – К.: Akadempriodyka, 2013, 380 pp.); том 2 “Dark Matter: Astrophysical Aspects of Problem” (Shulga V.M., Zhdanov V.I., Berczik P.P., Pavlenko E.P., Pavlenko Ya.V., Pilyugin L.S., Tsvetkova V.S.) – в печати. Опубликованы монографии: “Ионизированный газ в галактиках: физическое состояние и химический состав” (Пилюгин Л.С. – К.: Наукова думка, 2013, 288 с.); “Загальна теорія відносності: горизонти випробувань” (Яцків Я.С., Александров О.М., Вавилова И.Б., Жданов В.И., Жук О.И., Кудря Ю.М., Парновський С.Л.,

Федорова О.В., Хміль С.В. – К.: ВАІТЕ, 2013, 264 с.). В 2013 г. по теме работы авторами опубликовано 48 статей в реферируемых журналах.

Выводы

Полученные результаты существенно расширяют наши знания о строении и эволюции Вселенной на галактических и космологических масштабах, создают теоретическую и экспериментальную основу для понимания природы темной материи и темной энергии. Основные достижения авторского коллектива, имеющие приоритетный характер, следующие:

- Созданы новые теоретические модели глобального строения Вселенной с дополнительными измерениями, найдены новые классические и квантовые решения многомерных космологических моделей, получены наблюдательные ограничения на параметры этих моделей; предложены механизмы возникновения ТМ и ТЭ на основе моделей многомерной гравитации.

- Разработаны космологические модели со скалярным полем в качестве динамической ТЭ и впервые установлены ограничения на параметры ТМ, вытекающие из данных наблюдений сверхновых типа Ia, крупномасштабной структуры Вселенной и анизотропии температуры реликтового излучения. На этой основе, задолго до публикации известных результатов относительно ускорения космологического расширения, сделан вывод о ненулевом значении космологической постоянной.

- Разработаны принципиальные вопросы общей теории относительности, которые имеют значение для обоснования базовых принципов стандартной модели.

- Созданы оригинальные каталоги галактик (карликовых, изолированных и др.). На этой основе получены качественные и количественные характеристики локальной неоднородности материи на масштабах до 10 Мпк. Указанные каталоги составили основу международных программ наблюдений с использованием Космического телескопа Хаббла, они широко используются в работах других авторов.

- Предложены новые подходы к анализу кластеризации внегалактических объектов.

- Одними из первых в мире авторами разработан последовательный теоретический аппарат гравитационного линзирования; предсказаны новые фотометрические и астрометрические эффекты, которые составляют основу для оценок распределения массы в гравитационно-линзовых системах.

- Предложены новые методы определения химического состава межзвездного газа в галактиках: показано, что содержание кислорода в галактиках в два-три раза ниже, чем считалось ранее.

- Впервые построена мультифрагментная модель химической эволюции Галактики, которая преодолела несогласованности старой (канонической) модели.

- Впервые разработана самосогласованная численная модель хемодинамической эволюции галактики; проведено беспрецедентное по числовому разрешению моделирование эволюции галактического центра.

- Разработана новая методика расчетов спектров звезд поздних спектральных классов и коричневых карликов; выполнены приоритетные исследования по изучению формирования линий лития в атмосферах молодых маломассивных звезд, которые составляют наиболее многочисленную популяцию компактных объектов Галактики.

Результаты наших исследований **имеют не только научное, а и значительное мировоззренческое значение**, поскольку касаются наиболее фундаментальных вопросов на грани современных физических теорий, связанных с строением и эволюцией Вселенной. В частности, полученные результаты являются важными для **физики звезд и галактик**; они представляют значительный интерес с точки зрения выяснения природы **темной материи и темной энергии**, которая является фундаментальной проблемой современного природоведения. Разработанные обобщения космологической модели чрезвычайно важны для **проверки современных теорий фундаментальных взаимодействий**.

Представленная работа является весомым вкладом в развитие украинской школы внегалактической астрономии и космологии, которая достойно представляет науку Украины на международной арене. Исследования авторов были неоднократно поддержаны и поддерживаются в рамках международных программ, целевых научных программ НАН Украины и проектов ГФФИ Украины.

Авторский коллектив сделал значительный вклад в формирование современных представлений о структуре и эволюции Вселенной. Показателями этого вклада является более 1000 работ авторов, выполненных за более чем сорокалетний период, из которых в представленную работу включены 471 научная публикация и 4 базы данных. Список публикаций содержит 5 монографий, 25 авторских разделов в коллективных монографиях и 419 статей в рецензируемых журналах, 13 работ в сборниках научных трудов. Авторы активно используют свои наработки для подготовки молодых ученых, опубликованные 9 учебников и учебных пособий активно используются в системе университетского образования. Уровень исследований и международный авторитет авторского коллектива подтверждается публикациями в ведущих изданиях с высокими импакт-факторами. Количество ссылок на работы авторов в базах данных SAO/NASA/ADS свыше 9500; индекс Хирша $h = 44$. По результатам работы защищено 9 докторских и 25 кандидатских диссертаций.