



ТЕМНАЯ МАТЕРИЯ
И ТЕМНАЯ
ЭНЕРГИЯ

14

КРИВИЗНА
ПРОСТРАНСТВА-
ВРЕМЕНИ

30

ВЕНДОР
БЕЛОРУССКОЙ
ЭЛЕКТРОНИКИ

56

КАК ИЗ 100 000 000 000
ВАРИАНТОВ ВЫБРАТЬ
НУЖНЫЙ?

74

Наука и инновации

№4 (254)
АПРЕЛЬ 2024

научно-
практический
журнал

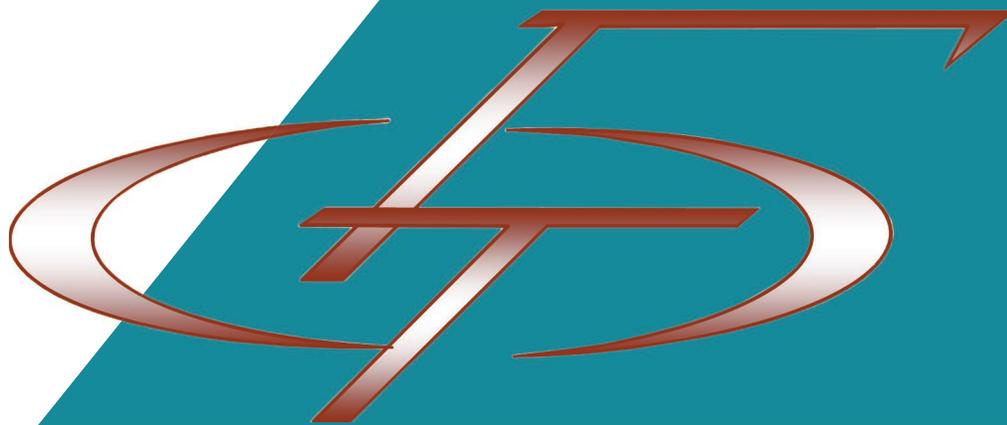


ISSN 1818-9857



9 771818 985001 04
ISSN 2412-9372 (online)

**ЧЕРНЫЕ ДЫРЫ,
ГРАВИТАЦИОННЫЕ ВОЛНЫ
И ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ**



Белорусское физическое общество (БФО) – одна из первых в Республике Беларусь общественных организаций, созданных для объединения и поддержки ученых. БФО было учреждено в 1990 г. для содействия развитию физики в стране, распространению научных знаний и защиты интересов ученых и специалистов, работающих в этой области науки.

<https://master.basnet.by/bfo/>
t.me/BelPhysSoc



Международное
сотрудничество

Поддержка и проведение
физических олимпиад
и турниров юных физиков



Физика
для детей

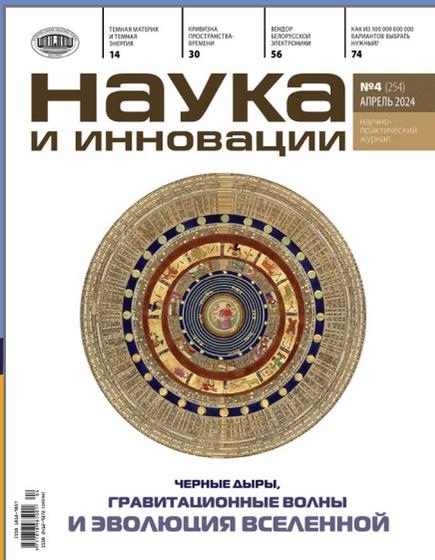
Фестивали науки



Открытые лекции
о современных
проблемах
физики из
«первых
уст»

Конгрессы физиков
Издания БФО





Зарегистрирован в Министерстве информации Республики Беларусь, свидетельство о регистрации №388 от 18.05.2009 г.

Учредитель:

Национальная академия наук Беларуси

Редакционный совет:

- | | |
|--|------------------|
| В.Г. Гусаков –
председатель
совета | А.И. Иванец |
| П.А. Витязь –
зам. председателя | Н.С. Казак |
| С.А. Чижик –
зам. председателя | А.В. Кильчевский |
| Ж.В. Комарова | Э.И. Коломиец |
| В.Ф. Байнев | С.А. Красный |
| О.Ю. Баранов | М.В. Мясникович |
| А.И. Белоус | О.Г. Пенязьков |
| В.Г. Богдан | Ф.П. Привалов |
| С.В. Гапоненко | С.П. Рубникович |
| В.Л. Гурский | О.О. Руммо |
| А.Е. Дайнеко | С.В. Харитончик |
| | И.П. Шейко |
| | А.Г. Шумилин |
| | С.С. Щербаков |

Главный редактор:
Жанна Комарова

Ведущие рубрик:

- | | |
|-------------------|------------------|
| Ирина Емельянович | Татьяна Жданович |
| Наталья Минакова | Юлия Василичина |

Дизайн и верстка:
Татьяна Аверкова

Адрес редакции:
220072, г. Минск, ул. Академическая, 1-129.
Тел.: (017) 351-14-46,
e-mail: nii2003@mail.ru,
www.innosfera.belnauka.by

Подписные индексы:
007 532 (ведомственная)
007 53 (индивидуальная)

Формат 60x84 1/8. Бумага офсетная.
Усл. печ. л. 9,8. Тираж 492 экз.
Цена договорная.
Подписано в печать 17.04.2024.

Издатель: РУП «Издательский дом «Беларуская навука». Свид. о гос. рег. №1/18 от 02.08.2013. г. Минск, ул. Ф. Скорины, 40. Заказ № 76.

© «Наука и инновации»

При перепечатке и цитировании ссылка на журнал обязательна.
За содержание рекламных объявлений редакция ответственности не несет.
Мнение редакции не всегда совпадает с мнением авторов статей.
Рукописи не рецензируются и не возвращаются.

В дизайне обложки использована иллюстрация из знаменитого Каталонского Атласа – карты мира, созданной в 1375 г.

Содержание

ОСВОБОЖДЕНИЕ. ХРОНИКА СОБЫТИЙ

Алексей Литвин

КОД «БАГРАТИОНА» (ч. 1) 4

Третий материал совместного проекта журнала «Наука и инновации» и Института истории НАН Беларуси «Освобождение. Хроника событий», посвященного 80-летию освобождения Беларуси от немецко-фашистских захватчиков, раскрывает события апреля 1944 г.: героического сопротивления партизан вражеским карательным операциям и подготовки к готовящемуся наступлению Красной Армии.

ТЕМА НОМЕРА: ЭВОЛЮЦИЯ ВСЕЛЕННОЙ

Григорий Верещагин

Астрономия: история и перспективы 10

Проанализировано значение астрономии для современной цивилизации. Отмечена высокая способность белорусских ученых внести свой вклад в научный прогресс.

Геннадий Бисноватый-Коган

Темная материя и темная энергия: ранняя и поздняя Вселенная, проблема параметра Хаббла 14

Приведены космологические решения моделей Вселенной, рассмотрены возможности исследований флуктуации плотности.

Юрий Выблый

Космология: прошлое и будущее 19

Дан краткий обзор современного состояния космологии. Рассмотрены основные представления о расширяющейся Вселенной, темной энергии и темной материи и связи космологии, астрофизики и теории гравитации.

Иван Рыбак

К физике высоких энергий на гравитационных волнах. Точная космология и наблюдательные данные 22

Автор рассматривает эволюцию Вселенной и роль научных наблюдений и идей в познаний самого раннего периода космоса, вплоть до момента его «рождения».

Сергей Черкас, Владимир Калашников

Археология Вселенной: от плазменной эры к микроволновому излучению 27

Обсуждаются проблемы космологического нуклеосинтеза и перспективы космологии с медленным расширением.

Станислав Комаров

Кривизна пространства-времени: о чем говорят изображения черных дыр 30

На примере значимого астрофизического открытия последнего времени – первого прямого наблюдения черной дыры автор показывает, какое влияние оно оказало как на физику в целом (теоретическую и экспериментальную), так и на теорию гравитационного взаимодействия в частности.

Евгений Деришев

Гамма-всплески – ярчайшие вспышки во Вселенной 35

Проанализированы гамма-всплески как весьма необычный процесс, преподнесший немало сюрпризов наблюдателям и теоретикам. Представлены общепринятые теоретические модели данного явления.

Николай Прокопья

Как извлекать энергию из вращающейся черной дыры 41

В статье обсуждается история развития идеи об извлечении энергии из черной дыры. Представлены элементарные понятия о черных дырах и их связь с наблюдаемыми астрофизическими явлениями.

Олег Бояркин, Виктор Махнач

Осцилляции солнечных нейтрино 45

Рассматривается поведение пучка электронных нейтрино в солнечном веществе. Излагается метод прогнозирования высокоэнергетических солнечных вспышек, основанный на ослаблении пучка электронных нейтрино при прохождении магнитного поля спаренных солнечных пятен.

ИННОВАЦИОННАЯ ЭКОНОМИКА

Валентина Щетко

Направления регионализации высокотехнологичной сферы Республики Беларусь 50

Раскрывается значение интеграционных объединений в сфере высоких технологий и их преимущества для развития производства и экономики, проведен анализ наиболее перспективных для углубления сотрудничества с Республикой Беларусь государств в указанном формате.

Ирина Емельянович

Вендор белорусской электроники 56

Интервью с академиком Николаем Казаком о деятельности инновационно-промышленного кластера «Микро-, опто- и СВЧ-электроника» – флагмана отечественной микроэлектроники.

В ЦЕНТРЕ ВНИМАНИЯ

Юлия Василишина

Республиканский научный центр углеводородного и альтернативного сырья: максимум эффективности при использовании ресурсов 62

Представлены работы в области создания новых лесохимических технологий и повышения эффективности нефтепереработки, ведущиеся в Республиканском научном центре углеводородного и альтернативного сырья Института химии новых материалов НАН Беларуси.

ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ

Валерий Гончаров, Наталья Янкевич

Технологические аспекты электромобильности (ч. 2) 67

Продолжение обзора тенденций развития мирового электроавтопрома, в котором авторы отвечают на вопросы, хватит ли вырабатываемой электроэнергии и зарядной инфраструктуры для перевода мирового и отечественного автопарка с бензинового и газового топлива на электрическое.

INVENTA MATHEMATICORUM

Владимир Сарванов, Евгений Макаров

Как из 100 000 000 000 вариантов выбрать нужный, если перебрать успеваешь только 100 из них? 74

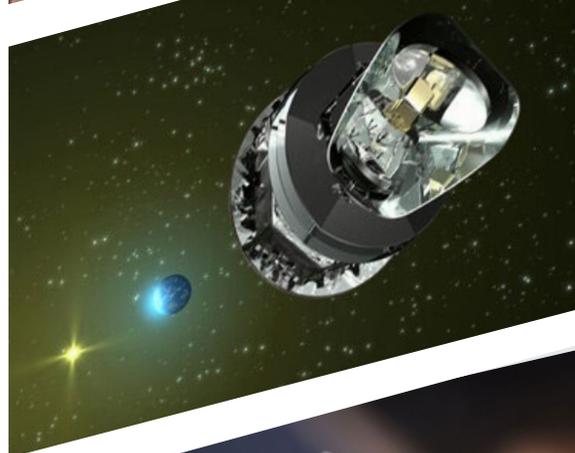
Во второй части статьи авторы продолжают рассказ об истории развития теории графов и вариантах ее практического применения.

ГЕНЕЗИС ИНФОРМАЦИИ

Виктор Шарак

Научные гипотезы 81

Предлагается толкование понятия «информация» с позиции ее пользователя. Обосновывается значимость информации как атрибута моделируемой ситуации в конкретный момент времени.





М. Савицкий, «Витебские ворота», 1967 г.

КОД «БАГРАТИОНА»

ч. 1

апрель 1944 г.



Алексей Литвин,
заведующий
центром военной
истории Беларуси
Института истории
НАН Беларуси,
доктор исторических
наук, профессор



Третий материал совместного проекта журнала «Наука и инновации» и Института истории НАН Беларуси «Освобождение. Хроника событий», посвященного 80-летию освобождения Беларуси от немецко-фашистских захватчиков, касается главных событий на пути к Победе, имевших место в апреле 1944 г., раскрывает детали героического сопротивления партизан вражеским карательным операциям и подготовки к готовящемуся наступлению Красной Армии.

Вынужденная передышка на фронтах Белорусского направления

Запланированные Ставкой ВГК задачи войскам на зимне-весеннюю кампанию 1943–1944 гг. на главных стратегических направлениях были выполнены. Войсками 1, 2, 3 и 4-го Украинских фронтов в ходе Днепровско-Карпатской операции (24 декабря 1943 г. – 17 апреля 1944 г.) были разгромлены основные силы групп армий «Юг» и «А» и освобождена территория Правобережной Украины. 26 марта 1944 г. советские войска вышли на юго-западную границу СССР и продолжили боевые действия на территории Румынии. Войска 1-го Украинского, 1-го и 2-го Белорусских фронтов, наступая на Ровно и Луцк, достигли Луцка. На западном направлении в результате охвата оборонявшейся группы армий «Центр» создавались условия для полного освобождения территории Беларуси [1].

Отметим, что в 1942 и 1943 гг., в связи с весенней распутицей, наступления на советско-германском фронте не проводились. В 1944 г. эта традиция с явным успехом была нарушена.

Однако с середины апреля 1944 г. Ставкой ВГК было приказано войскам 1-го Прибалтийского, 1, 2 и 3-го Белорусских фронтов закрепиться на достигнутых рубежах, перейти к обороне и готовиться к будущим наступательным действиям [2]. Таким образом, на западном стратегическом направлении на неопределенное время наступила оперативная пауза, которая по-разному была воспринята сражающимися сторонами.

Германское командование предполагало, что главные события лета 1944 г. произойдут на южном участке фронта, где советские войска будут стремиться овладеть румынскими нефтяными источниками, а также осуществить глубокий прорыв на Балканы. При этом допускалась также возможность наступления советских войск в Прибалтике и Беларуси, но оно, по расчетам Берлина, не могло преследовать решительных стратегических целей. Поэтому, учитывая важное значение «белорусского балкона», силу и опыт частей и соединений группы армий «Центр» в ведении наступательных и оборонительных операций, а также благоприятные для организации прочной обороны условия местности, гитлеровцы, широко используя принудительный труд местного населения, активизировали строительство оборонительных рубежей. Второй задачей, которую постаралось решить германское командо-

вание, была нейтрализация и уничтожение основных партизанских районов, разгром партизанских формирований, захват и вывоз в Германию трудоспособного населения, экономических и сырьевых ресурсов.

Воплощению этих планов в жизнь способствовал ряд факторов. Территория БССР, находящаяся под оккупацией, сократилась на 20%, что значительно увеличило плотность вражеских охранных и фронтовых войск. Здесь сконцентрировались силы группы армий «Центр» в составе одной танковой и трех полевых армий – 63 дивизии и 2 бригады, а на ее флангах – дивизии, входившие в состав армейских групп «Север» и «Юг». Численность войск составляла 1 млн 200 тыс. человек, из общего количества 4,3 млн на восточном фронте. На вооружении противник имел 9,5 тыс. орудий и минометов (из 59 тыс. на восточном фронте), 900 танков и штурмовых орудий (из 7,8 тыс.) и 1350 самолетов (из 3,2 тыс.) [3].

Общая обстановка для партизан, подпольщиков и населения Беларуси в 1944 г. значительно изменилась в худшую сторону: им приходилось действовать и выживать в более неблагоприятных условиях, чем в 1943 г., поскольку сюда, вместе с отступившими немецкими войсками, переместились немецкие спецслужбы и полицейские части, в которых было много лиц, сотрудничавших с оккупантами из освобожденных областей РСФСР и БССР. Так в Минске оказались сотрудники Смоленского СД, которые вскоре приобрели печальную известность. Под видом беженцев и бежавших военнопленных они втирались в доверие к жителям и подпольщикам с целью «установления связей с партизанами». Такая же картина была и в других городах. В результате по всей стране прокатилась волна арестов.

Карательные акции

Главным и наиболее эффективным способом борьбы с партизанами и местным населением гитлеровское руководство считало карательные акции. Они проводились постоянно, с первых дней войны. Их целью было вытеснение партизан с контролируемых ими территорий, обеспечение транспортных коммуникаций, создание благоприятных условий для маневрирования войсками и военными грузами. Особенностью карательных операций, осуществляемых с началом освобождения территории Беларуси, было более широкое привлечение, кроме охранных и полицейских частей, регулярных фронтовых воинских частей и соединений, а также авиации,

артиллерии и танков. В январе 1944 г. в боевых действиях против партизан принимали участие 30 тыс., в феврале – до 40 тыс., марте – до 60 тыс., апреле – до 80 тыс., в мае – до 100 тыс., июне – до 60 тыс. солдат и офицеров противника [5].

С февраля до конца апреля 1944 г. осуществлялась карательная экспедиция против партизан Полесской и южных районов Минской обл. Подразделениям врага удалось в ходе упорных боев отеснить партизан от линии фронта и в районе Альбинска и Зыслова, часть бригад Полесского соединения вместе с минскими партизанами попали в окружение. В ночь на 12 апреля 1944 г. из окружения вышла 123-я Октябрьская им. 25-летия Октября бригада (командир – Герой Советского Союза Ф.И. Павловский) и 130-я Петриковская партизанская бригада (командир – М.А. Волков). При прорыве окружения погиб командир 161-й бригады А.С. Шашура. В оперативной сводке Белорусского штаба партизанского движения (БШПД) от 19 апреля сообщалось, что они «ведут успешную разведку, стараясь установить связь со штабом соединения и остальными бригадами и отрядами, оставшимися в окружении, с целью оказания им помощи» [5].

С первых дней апреля 1944 г. противник силами 5-й Венгерской дивизии, нескольких отрядов СС и полиции, при поддержке танков, артиллерии и авиации начал операцию с целью ликвидации 11-тысячной группировки партизан Брестского партизанского соединения, дислоцировавшейся в районе озер Черное и Споровское. 6 апреля противник атаковал оборонительный рубеж бригады «Советская Белоруссия» (командир – Н.В. Бобков), имея намерение занять здитовскую переправу через р. Дорогобуж, открыв путь к основным партизанским базам. 14 суток партизаны вели изнурительные бои, защищая зону. Врагу, имевшему численное превосходство в живой силе и особенно в оружии и боеприпасах, ценою больших потерь удалось вытеснить партизан и занять ряд населенных пунктов. Однако полностью выполнить поставленную задачу они не смогли. Прекратив наступление, каратели сожгли занятые ими деревни, жестоко расправились с мирным населением и отошли на прежние позиции [6, 7].

По сведениям Х. Герлаха, в период с 7 по 17 апреля 1944 г. в районе Бобруйска была проведена карательная операция против партизан и населения под условным названием «Глухарь», в результате которой было убито около 1 тыс. человек и взято 290 пленных, 2428 человек угнано на принудительные работы в Германию [8].

Самая крупная операция против народа Беларуси

Самая крупномасштабная военная операция за годы войны против белорусских партизан под кодовым названием «Frühlingsfest» («Весенний праздник») проводилась с 11 апреля по 12 мая 1944 г. в Полоцко-Лепельской партизанской зоне, располагавшейся на освобожденной партизанами в тылу захватчиков территории всего Ушачского и части Полоцкого, Глубокского, Лепельского, Бешенковичского, Докшицкого и Шумилинского р-нов Витебской обл. Начиная с октября 1943 г. в этой зоне стали концентрироваться партизанские бригады и отряды в связи с планируемой советским военным руководством десантной операцией. Туда была направлена оперативная группа ЦК КП(б)Б во главе с Героем Советского Союза В.Е. Лобанком для проведения подготовительных мероприятий для высадки десанта. В зону забрасывалось оружие, боеприпасы, строились оборонительные рубежи. Однако по ряду причин операция не состоялась.

Партизаны удерживали территорию площадью 3245 км² (это больше чем, например, территория государства Люксембург), на которой находилось 1200 населенных пунктов и проживало более 80 тыс. человек.

Руководство группы армий «Центр», особенно командование 3-й танковой армии, осознавало угрозу, которую представляла зона. Поэтому и была разработана масштабная операция с целью обезопасить единственный путь подвоза живой силы и техники для этой армии, дорогу Витебск – Лепель – Парафьяново. Гитлеровцы понимали, что крупные партизанские силы и удерживаемая ими территория в непосредственной фронтовой полосе могут быть использованы как удобный плацдарм в случае наступления советских войск. Операция проводилась в два этапа. На первом (11–17 апреля, получившем название «Regenschauer» – «Моросящий дождь») главной задачей было отбросить партизан в западную часть зоны; затем, в ходе операции «Весенний праздник», не вводимые до особого распоряжения войска должны были завершить их окружение. Руководили операцией командующий 3-й танковой армией генерал-полковник Ганс Рейнгардт и генеральный комиссар «Белорутении» группенфюрер СС и генерал-лейтенант полиции Курт фон Готтберг [9].

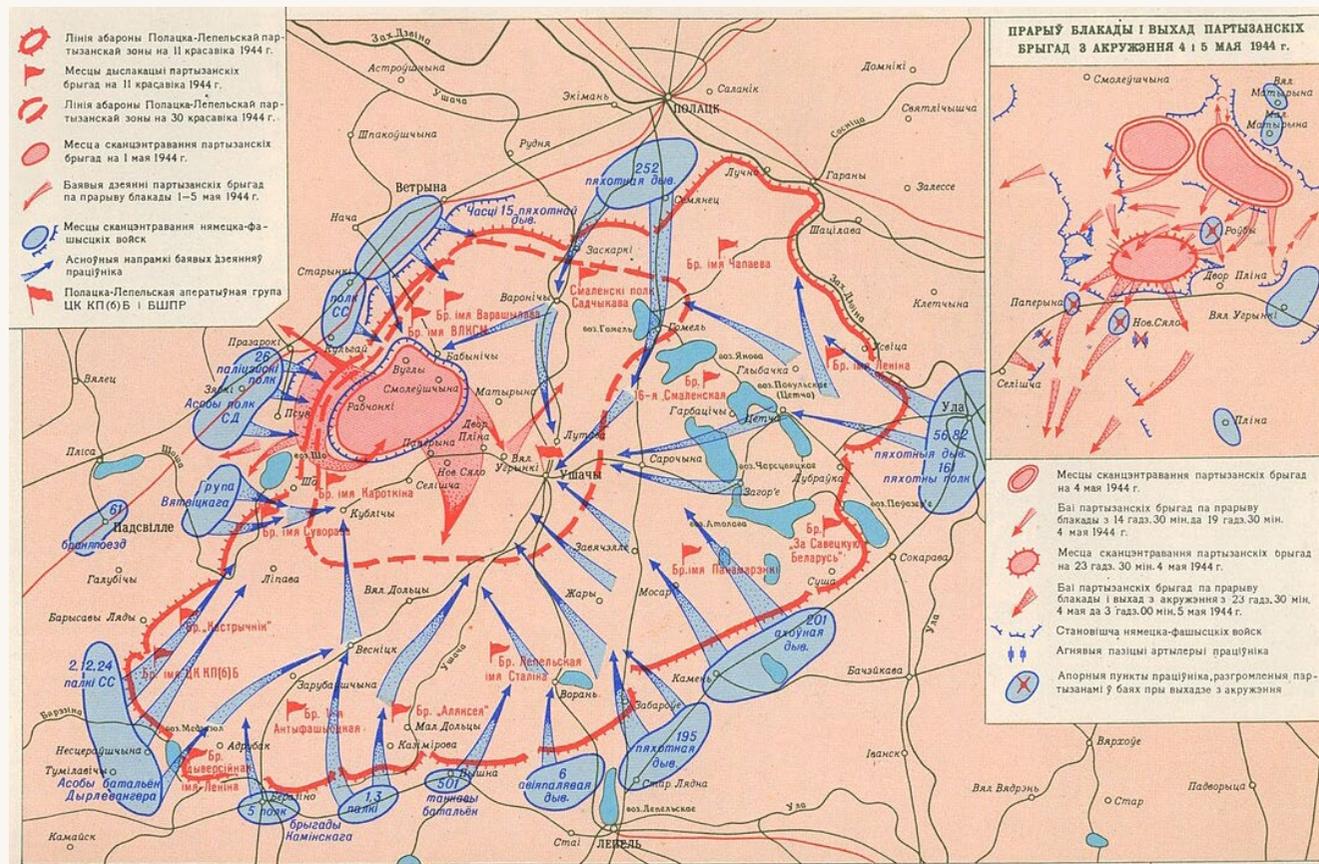
Общая численность привлекавшихся для нее оккупационных подразделений составила до 60 тыс. человек, в том числе войсковых частей вермахта до 20 тыс. человек. В качестве основного технического обеспечения имелось 137 танков, 235 орудий, около 70 самолетов, 2 бронепоезда. Им противостояли 16 партизанских бригад общей численностью 17 185 человек, имевшие на вооружении 9344 винтовки, 1544 автомата, 624 ручных и 97 станковых пулемета, 151 противотанковое ружье, 143 миномета, 21 орудие. Общая протяженность партизанских оборонительных линий составляла 230 км. К началу сражения они имели глубину до 15–20 км. Узлы сопротивления были оборудованы так, что могли отражать нападение противника с любого направления. При этом умело использовались естественные препятствия: реки, болота, система озер и лесные массивы [10].

На первом этапе планировалось вытеснить партизан из лесов и овладеть левобережьем Западной Двины, разбить их на открытой местности и при поддержке бронепоездов уничтожить при попытке

прорваться за железную дорогу. В процессе происходило ограбление, истребление и угон в Германию мирного населения. Операцию предполагалось закончить до полной распутицы в течение 8–10 дней [5].

Операция началась 11 апреля частями 56-й пехотной дивизии на участке бригады имени В.И. Ленина (командир – Н.А. Сакмаркин). Жаркие бои развернулись на участках всех отрядов бригады, а также бригады «За Советскую Белоруссию», где пришлось отражать натиск полка пехоты и 10 танков при сильном артиллерийско-минометном огне противника. Партизаны отрядов им. С.Г. Лазо и им. Н.А. Щорса неоднократно контратаковали и сходились врукопашную. Со стороны Полоцка партизан атаковали части 252-й пехотной дивизии. В последующие дни активизировались боевые действия на всех направлениях по окружению Полоцко-Лепельской партизанской зоны, чтобы вынудить партизан отойти к Ушачам.

С 16 апреля с юго-западного направления наступление повели части и соединения боевой группы



Оборона Полоцко-Лепельской партизанской зоны

фон Готтберга: 64-й охранный полк Крегана, 1, 12, 24-й полицейские полки, бригада РОНА Б. Каминского, особый батальон СС Дирлевангера; с юго-восточной – части 201-й охранный дивизии, 95-й пехотной и 6-й авиационной дивизий; на северо-западном и западном наступали подразделения 286-й охранный дивизии, 26-й полицейский полк, 2-й и 3-й латышские полицейские полки, 5-й латышский пограничный полк.

Героическим действиям партизан, стойкости и жертвенности мирного населения зоны посвящено много страниц в книгах и статьях руководителя Оперативной группы ЦК КП(б)Б Героя Советского Союза В.Е. Лобанка, а также в книгах П.К. Пономаренко, П.З. Калинина и А.И. Брюханова. За ходом боев внимательно следили БШПД, командование Красной Армии. Защитники зоны имели устойчивую радио- и авиасвязь с Большой Землей. В период с 11 апреля по 1 мая 1944 г. им было доставлено около 58 т боевых грузов, советская авиация по просьбе партизан бомбила расположения наступавших групп противника.

Итоги

«Весеннего праздника»

По завершении операции «Frühlingsfest» штаб боевой группы фон Готтберга составил отчет, в котором по дням показан ход событий, состав и деятельность подчиненных ему групп, трудности и неудачи, а также приводятся многочисленные примеры стойкого сопротивления со стороны партизан, факты оказания им помощи со стороны советской авиации.

Приведем отдельные выдержки из документа.

17.04.1944 г. «В ночь на 17.04.1944 г. авиация противника нанесла мощный воздушный удар по населенному пункту и району Лепель. Одновременно с началом операции заметно возросло воздушное снабжение противником Ушачского района».

19.04.1944 г. «На рассвете группа Каминского заняла населенный пункт Ветче и расположенные севернее его высоты. В связи с подброской противником крупных резервов завязались тяжелые бои с переменным успехом, в ходе которых населенный пункт неоднократно переходил из рук в руки. Наконец, в связи с сильным давлением противника Ветче пришлось сдать».

20.04.1944 г. «В ночь на 20.4.44 удалось благодаря ложному направлению посадить вражеский планер с 17 центнерами взрывчатки в районе Черница II.



Партизаны отряда им. Н.А. Щорса читают боевую газету, 1944 г.



Командиры партизанских отрядов Лепельско-Полоцкого соединения уточняют планы боевых действий, 1943–1944 гг.

Налеты авиации противника с целью снабжения банд в Ушачском районе за одну ночь достигли цифры 180».

27.04.1944 г. «Рано на рассвете 27.4. противник нанес контрудар в районе дер. Юзофатово, который был отражен. В ночь на 27.4. авиация противника предприняла мощные воздушные нападения и в течение дня штурмовики противника неоднократно атаковали наши наступающие группы. Возникший уже несколько дней тому назад в районе групп Каминского и Анхальта кризис, связанный с сильным сопротивлением противника, нельзя было недооценивать».

28.04.1944 г. «В ночь на 28.4. вновь зарегистрированы многочисленные прилеты авиации противника с целью снабжения в Ушачский район, и одно-

временно советская авиация наносила тяжелые бомбовые удары по позициям группы Анхальта, а также по населенным пунктам Тартак, Рудня и Логи.

Группа Крегана на рассвете, сломив сильное сопротивление противника, захватила переправу в Замошье, заняла западную часть населенного пункта и создала здесь плацдарм, который в течение дня смогла расширить. В ходе дальнейшего продвижения на запад была взята дер. Церковище и расположенная юго-западнее от деревни высота 183,4. Наступающим войскам противник оказывал сильное сопротивление, упорно защищая каждый метр земли, и медленно отступая на вновь оборудованные позиции».

Весьма показательна запись: «Важность, с которой советское руководство относилось к этому партизанскому центру, показывают факты постоянных интенсивных действий авиации с целью снабжения партизан и подавления наших атакующих частей, а также отвлекающих атак на ближайшем участке фронта. В период 17 апреля – 10 мая 1944 г. враг (имеются в виду белорусские партизаны. – Авт.) потерял: 5955 убитых, 6145 пленных, 346 перебежчиков. В эти цифры не входит множество задержанных гражданских лиц. Захвачено или уничтожено множество стрелкового оружия, большое количество боеприпасов, одна рация и один самолет. Уничтожено: 102 лагерей-стоянок, 182 бункера, 52 огневых точки...» [12].

По данным БШПД, гитлеровцы потеряли в этой операции до 20 тыс. солдат и офицеров, 50 танков, 116 автомобилей и 7 бронемашин, 22 орудия и 2 самолета. Партизаны, значительно обескровив противника, также понесли огромные потери. Оккупанты уничтожили более 7 тыс. человек, захватили 6928 пленных, 11 233 человек были угнаны на принудительные работы в Германию [7, 11].

«Мне хорошо помнится, – вспоминал бывший командующий 1-м Прибалтийским фронтом Маршал Советского Союза И.Х. Баграмян, – что в ту тяжелую пору Военный совет и штаб нашего фронта принимал все возможные меры, чтобы облегчить положение партизан в районе Ушачей. Наша помощь выразалась главным образом в том, что мы доставляли самолетами некоторые виды вооружения, боеприпасов, взрывчатку, средства радиосвязи, медикаменты и эвакуировали через линию фронта раненых и тяжелобольных партизан... наша штурмовая авиация и ночные бомбардировщики наносили удары с воздуха по скоплениям фашистских войск» [13].

В боях в апреле – мае 1944 г. со стороны советских партизан погибли комбриги Герои Советского Союза А.Ф. Данукалов и П.М. Романов, комбриги Д.Т. Короленко, В.В. Гиль-Родионов, комиссары бригад Н.Г. Жижов, И.Ф. Корневский, В.С. Свирид, член оперативной группы БШПД капитан И.И. Зиненко, многие командиры отрядов, рот, взводов, рядовые партизаны, а также кинооператор Маша Сухова.

Главным итогом боевых действий партизанских формирований Полоцко-Лепельской зоны в апреле – мае 1944 г. было то, что несмотря на подавляющий перевес противника в силах и средствах, они благодаря мужеству и самоотверженности, умело организованной обороне в условиях постоянно сжимавшегося кольца окружения сумели организованно выйти из «мешка» в Ушачах и сохранить свою боеспособность. По свидетельству И.Х. Баграмяна, с началом наступления Красной Армии летом 1944 г. партизаны оказывали войскам неоценимую помощь в наиболее ответственные моменты операции [13]. ■

Иллюстрации из открытых интернет-источников

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Великая Отечественная война 1941–1945 годов. В 12 т. Т. 4. Освобождение территории СССР 1944 год. – М., 2012.
2. История второй мировой войны, 1939–1945. В 12 т. Т. 8. Крушение оборонительной стратегии фашистского блока. – М., 1977.
3. Рокоссовский К.К. Солдатский долг. – М., 1997.
4. Стратегический очерк Великой Отечественной войны 1941–1945 гг. – М., 1961.
5. Всенародная борьба в Белоруссии против немецко-фашистских захватчиков в годы Великой Отечественной войны. В 3 т. / гл. редкол.: А.Т. Кузьмин и др. Т. 3. – Минск, 1985.
6. Национальный архив Республики Беларусь (далее НАРБ). Ф. 1450. Оп. 3. Д. 306.
7. Партизанское движение (По опыту Великой Отечественной войны 1941–1945 гг.). – М., 2001.
8. Gerlach Ch. Kalkulierte Morde Die deutsche Wirtschafts- und Vernichtungspolitik in Weißrussland 1941 bis 1944. – Hamburg, 1999.
9. Нацистская политика геноцида и «выжженной земли» в Белоруссии, 1941–1944. – Минск, 1984.
10. Лобанок В.Е. Партизаны принимают бой. – Минск, 1976.
11. Нямецка-фашысцкі генацыд на Беларусі (1941–1944). – Минск, 1995.
12. НАРБ. Микрофильм, арх. №147.Т.-311, ролик 218. Кадры 000845–000859.
13. Баграмян И.Х. Воины – прибалтийцы в сражениях за Белоруссию. В кн.: Освобождение Белоруссии 1944. Под ред. А.М. Самсонова. Изд. 2-е испр. и доп. – М., 1974.

Астрономия: История и перспективы



Григорий Верещагин,
профессор международной
научной организации
ИКРАНет (сеть международных
центров релятивистской
астрофизики), доктор
физико-математических наук

В современном обществе представление об астрономии по-прежнему ассоциируется со звездами, кометами, планетами и со странными людьми, посвящающими свою жизнь изучению неба над головой и проводящими ночи за телескопами. Такое мнение сложилось не в последнюю очередь благодаря знаниям, полученным в школе, программа которой достаточно инертна и невосприимчива к переменам. Частично ответственны за такое положение дел и сами астрономы, неохотно занимающиеся популяризацией своей науки. Лишь некоторые из последних достижений – открытие планет вне Солнечной системы и гравитационных волн – проникли в медиaproстранство в достаточной степени, чтобы о них стало известно широкой общественности. Между тем за последние десятилетия в астрономии, по большей части ставшей астрофизикой, произошли кардинальные перемены как в методах, так и в принципах работы. Это привело к радикальному изменению наших представлений о динамике Вселенной, формах и состояниях заполняющей ее материи, а также о физических процессах в далеких ее уголках, отголоски которых доходят до нашей планеты и непосредственно влияют на происходящие на ней события.

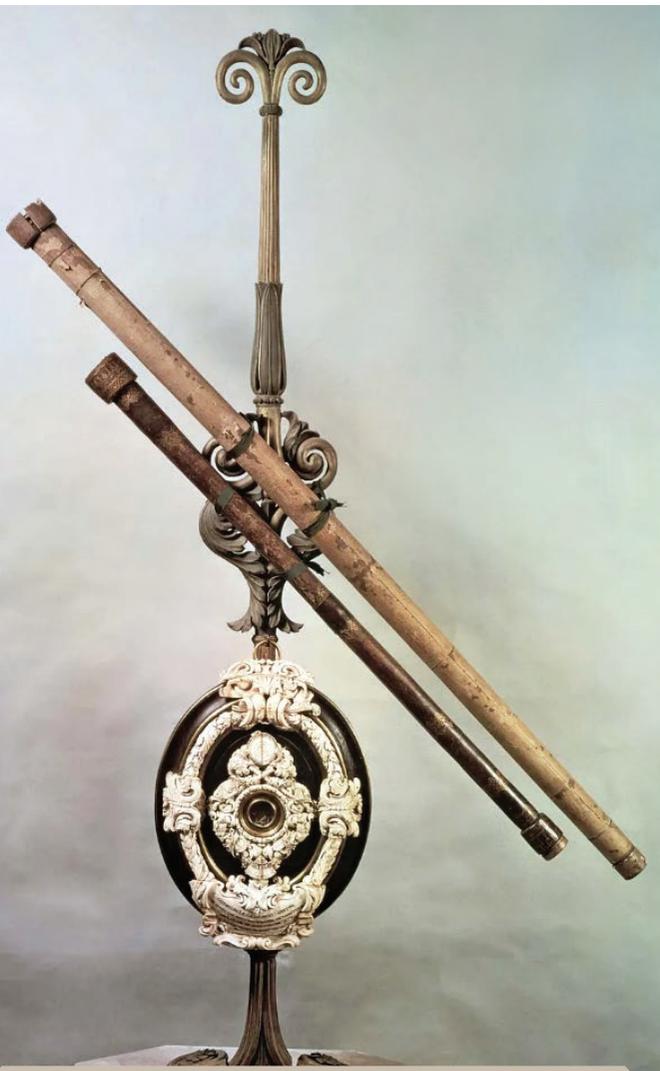


Рис. 3. Телескоп Галилео Галилея «Perspicillum» с диаметром объектива 4,5 см и увеличением 32х (доступном в современной любительской цифровой фотокамере), позволивший ему совершить революционные для своего времени открытия



Рис. 1. Камень Солнца, изображающий космогонию ацтеков. В центре – Бог Солнца, его окружает изображение календаря. Национальный музей антропологии, Мехико



Рис. 2. Антикитерский механизм, (приблизительно 100-й г. до н. э.). Этот «аналоговый компьютер» использовался для расчета движения небесных тел и позволял узнать дату астрономических событий. Археологический музей в Афинах. Фото автора

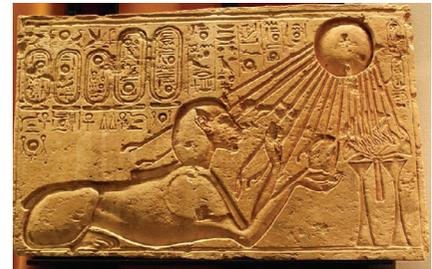


Рис. 4. Фараон Эхнатон как сфинкс и Солнце с лучами, заканчивающимися ладонями. Амарна, 18-я династия, 1340 г. до н.э. Музей Кестнера, Ганновер

Издrevле люди подмечали связь событий на небе с тем, что происходит на Земле. Первым важным достижением любой древней цивилизации наряду с письменностью было создание календаря (рис. 1), необходимого для сельскохозяйственной деятельности, то есть для обеспечения, как сегодня выражаются, продовольственной безопасности. Для его разработки необходимо было проводить длительные и систематические наблюдения за небом. Мегалитические сооружения типа знаменитого Стоунхенджа, а также сложные артефакты вроде Антикитерского механизма (рис. 2) позволяют судить о роли астрономии в жизни древних обществ и о прогрессе соответствующих технологий. Уточнения календаря, невозможные без развития астрономии, продолжались до недавних пор. Так, сейчас мы живем по григорианскому календарю (хотя православная церковь еще использует юлианский, введенный в Римской империи Юлием Цезарем), созданному при папе Римском Григории XIII благодаря организации Ватиканской обсерватории (кстати, Великое Княжество Литовское в составе Речи Посполитой перешло на него одним из первых, в 1582 г., а Россия – одной из последних, чуть больше 100 лет назад, в 1918 г.).

Обращение к современной астрономии (и науке в целом) совпало с коперниканской революцией и утверждением гелиоцентрической системы мира. Уже применение телескопа Галилеем (рис. 3) позво-

лило ему открыть горы на Луне, спутники Юпитера, кольца Сатурна, фазы Венеры и обнаружить, что Млечный Путь состоит из множества звезд. Теория всемирного тяготения, созданная Ньютоном, подвела под астрономические наблюдения физическую базу. Она объяснила эмпирические законы движения небесных тел, установленные Кеплером, и позволила открыть новые планеты в Солнечной системе. В XIX в. при помощи спектроскопических методов удалось установить химический состав поверхности Солнца и других звезд. Настоящий расцвет астрофизики последовал за революцией в физике в первой половине XX в.

Именно благодаря развитию физики, давшей миру, в частности, ядерную энергетику и ядерное оружие, удалось установить, что источником энергии Солнца и других звезд являются термоядерные реакции. Оказалось, что звезды – одни из самых стабильных объектов во Вселенной – способны генерировать излучение в оптической (видимой) области электромагнитного спектра на протяжении миллиардов лет. Именно свет в видимом диапазоне длин волн способен переводить молекулы в возбужденное состояние (а не разрушать их как более жесткое излучение) и осуществлять гидролиз воды, лежащий в основе цепи химических реакций фотосинтеза, который, в свою очередь, является ключевым для поддержания разнообразия жизни на Земле. То, что свет Солнца для этого важен, понимали еще древние египтяне (рис. 4), но то, как именно он образуется, удалось понять совсем недавно. Излучение

и тепло в ядре светила выделяются благодаря превращению водорода в гелий, причем это излучение очень жесткое и находится в гамма-области спектра. По мере распространения внутри Солнца излучение остывает и доходит до его поверхности по прошествии сотен тысяч лет, уже находясь в видимой области спектра; в этом качестве оно и излучается звездой. Таким образом, Солнце – это очень простой и стабильный «светильник», питающийся термоядерной энергией и существующий за счет гравитации. Кстати, в результате цикла жизнедеятельности звезды ее масса уменьшается на несколько процентов (вследствие дефекта массы), а большая часть водорода не выгорает. Этот водород, выброшенный в окружающее пространство взрывом сверхновой звезды либо мощным звездным ветром, может быть использован следующей звездой, которая сформируется из такого «пепла». Так и образовалась наша Солнечная система со всеми планетами, включая Землю.

Известно, что для получения информации о процессах, происходящих в солнечном ядре, электромагнитное излучение не подходит, поскольку плазма Солнца непрозрачна для него. На помощь приходят солнечные нейтрино, регистрируемые в подземных лабораториях. Их исследование подтвердило правильность представлений о ходе термоядерных реакций в центре светила, за что в 2002 г. была присуждена Нобелевская премия по физике. Сейчас усилия ученых сосредоточены на возможности использования термоядерной энергии, ведь ее источник – водород, из которого состоят океаны Земли, – практически неисчерпаем. Дальнейшее развитие нейтринной астрономии позволило обнаружить нейтринные осцилляции, за что в 2015 г. была присуждена еще одна Нобелевская премия по физике. Дело в том, что это явление свидетельствует о наличии массы у нейтрино, что не согласуется со стандартной моделью физики частиц, наиболее полной физической теорией, объясняющей все известные свойства микромира. Более того, ограничения на массу нейтрино, полученные из анализа космологических данных, намного сильнее, чем данные длительных и скрупулезных лабораторных измерений. Очевидно, астрономия давно перестала полагаться лишь на наблюдения за небом в оптический телескоп: регистрируются все доступные сигналы, а не только электромагнитное излучение. В этом смысле говорят о наступлении эры полисигнальной астрономии (multi-messenger astronomy) с регистрацией электромагнитных, нейтринных, гравитационных сигналов и космических лучей.

Но звезды – не совсем стационарные объекты. Даже у Солнца существуют циклы активности, когда яркость звезды незначительно изменяется; наиболее известен из них 11-летний цикл. На основе изучения закономерностей движения замагниченной плазмы внутри Солнца была создана модель, позволяющая понять причины возникновения и поддержания циклов на этой звезде. Известно, что это оказывает глобальное влияние на климат и, возможно, даже порождает такие явления, как Эль-Ниньо. Более длительные вариации солнечной активности, вероятно, также связаны с изменением климата. Кроме циклов хорошо известны нерегулярные события на Солнце: вспышки и корональные выбросы, способные вызывать геомагнитные бури на Земле, которые приводят к помехам в радиосвязи и могут привести к блэкаутам на больших территориях. Сильные бури, хоть и случаются редко, могут привести к выходу из строя космических аппаратов и серьезным авариям в работе наземных электрических сетей. А последствия таких событий для современной цивилизации сложно переоценить. К счастью, для нас Солнце – относительно спокойная звезда. Оказывается, что взрывы, происходящие на других, значительно более удаленных от нас звездах, настолько сильны, что способны отозваться и на Земле. Конец эволюции массивной звезды сопровождается катастрофическим взрывом, при котором внешние ее слои выбрасываются в космическое пространство. При этом ее яркость возрастает в сотни миллионов раз, поэтому такие взрывы сверхновых звезд в нашей Галактике, происходящие примерно раз в 400 лет, можно видеть даже невооруженным глазом (рис. 5). Еще более мощные взрывы, так называемые гамма-всплески (см. статью Е. Деришева в этом выпуске), происходящие на границе видимой нами области Вселенной, способны вызывать сильные возмущения в ионосфере Земли. Исследования показывают, что Земля подвержена влиянию различных космических событий. В 1994 г. мир взволнованно наблюдал за последствиями падения частей кометы Шумейкер-Леви-9 на Юпитер. Образовавшиеся в атмосфере планеты-гиганта структуры, размером сравнимые с Землей, не исчезали месяцами (рис. 6). Какие будут последствия, если подобное столкновение произойдет с Землей? Известно, что вымирание динозавров 65 млн лет назад совпало по времени с падением большого метеорита в районе нынешнего полуострова Юкатан, в результате чего образовался кратер Чиксулуб диаметром около 200 км. А на территории Беларуси находится один из крупнейших ударных кратеров Европы – Логойская астроблема

диаметром около 15 км. Ввиду такой космической угрозы идут активные разработки программы обнаружения потенциально опасных астероидов, а здесь необходима глобальная координация усилий ученых. Большинство таких объектов могут прибыть из области между Марсом и Юпитером, называемой поясом астероидов, либо из пояса Койпера за орбитой Нептуна. Однако недавно был обнаружен космический объект П/Оумуамуа, попавший в Солнечную систему из межзвездного пространства. Кстати, первый рукотворный объект (зонд «Вояджер-1», запущенный в далеком 1977 г. и посетивший окрестности Юпитера и Сатурна) недавно достиг границ Солнечной системы и вышел в межзвездное пространство.

Кроме электромагнитного излучения на Землю из космоса приходят также заряженные частицы высоких энергий – космические лучи, открытые в начале XX в. Большая часть относительно медленных частиц долетают к нам от Солнца; частицы более высоких энергий поступают от различных объектов Галактики. Источники самых быстрых частиц расположены далеко за ее пределами. Энергии таких космических лучей намного превышают энергии частиц, достигаемые в лабораторных ускорителях, таких как Большой адронный коллайдер. Существуют предположения, что молнии связаны с космическими лучами. Более того, возможно, даже климат на планете зависит от интенсивности бомбардировки Земли космическими лучами, возникающими при взрывах далеких сверхновых звезд.

Все эти открытия указывают на то, что события, происходящие в космосе на огромных расстояниях от нас, оказывают непосредственное влияние

на климат и биосферу и могут представлять потенциальную опасность как для человеческой цивилизации, так и для самого существования жизни на Земле. Некоторые ученые утверждают, что единственный способ спастись от космических угроз – покинуть Землю и начать колонизировать далекие миры. Такого мнения придерживался, в частности, Стивен Хокинг. Но каковы эти миры и как до них добраться?

До сих пор космические путешествия, живописно представленные фантастами в XX в., не стали обыденностью. Полеты на орбите Земли стали рутинной, но дальше Луны космонавты еще не забирались. Даже вторая попытка отправиться на Луну спустя 50 лет – очень серьезный и дорогостоящий международный проект. К тому же кроме финансового аспекта есть еще один.

Дело в том, что именно космические лучи, или космическая радиация, являются наиболее серьезной угрозой для межпланетных перелетов, а также для создания обитаемых баз в космосе. На поверхности Земли мы защищены ее сильным магнитным полем, а также плотной атмосферой. Последние исследования Марса не только подтвердили существование водяного океана на поверхности этой планеты, образовавшегося более 3,5 млрд лет назад, но и наличие магнитного поля и плотной атмосферы в ее далеком прошлом, что указывает на высокую вероятность существования жизни в ту эпоху. Будучи намного менее массивным, чем Земля, Марс остыл быстрее, а в его недрах прекратилось движение вещества и перестало генерироваться магнитное поле, без которого солнечный

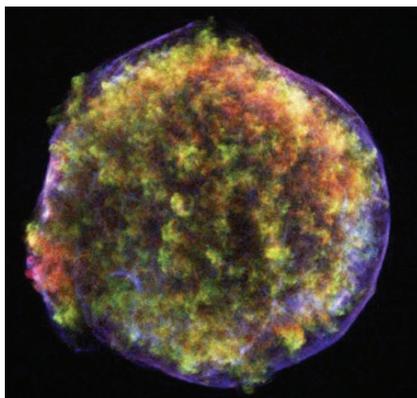


Рис. 5. Рентгеновское изображение остатка сверхновой звезды, взрыв которой в 1572 г. наблюдал Тихо Браге, полученное космической обсерваторией «Чандра»



Рис. 6. След от падения осколка кометы Шумейкер-Леви-9 на поверхности Юпитера. Изображение получено космическим телескопом «Хаббл»

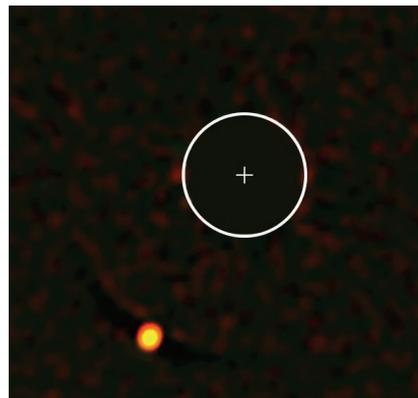


Рис. 7. Прямое изображение (внизу слева) экзопланеты HIP 65426 b, полученное консорциумом SPHERE при помощи телескопа «VLT», Чили

ветер «сдул» атмосферу, что и превратило планету в холодную пустыню.

Наблюдения недавно запущенного инфракрасного космического телескопа «Джеймс Уэбб» уже привели к революции в физике и химии экзопланет (рис. 7), поскольку с его помощью удалось впервые обнаружить метан и углекислый газ в атмосферах планет, вращающихся вокруг других звезд. Например, в атмосфере планеты K2-18b найдены органические молекулы, в частности диметилсульфид CH_3SCH_3 , производимый фитопланктоном на Земле, причем это у планеты, расположенной в так называемой зоне обитаемости, то есть имеющей такую орбиту, для которой возможно существование воды в жидком виде. Будущие наблюдения наверняка позволят найти экзопланеты, условия на которых очень близки к тем, что имеются на Земле.

Значение астрономии для современной цивилизации трудно переоценить. Она не только оказывает прямое влияние на повседневную жизнь (уже упоминавшийся календарь, системы глобального позиционирования), но и изменяет наше восприятие окружающего мира, а вместе с ним и наше философское его осмысление (переход от геоцентрической к гелиоцентрической системе; понятие динамической Вселенной, связь микро- и макромира). Призвание ученых состоит не только в выполнении исследований, но и в распространении знаний, популяризации науки и борьбе с невежеством. Эта миссия, как показала история, особенно актуальна для астрономов. Ведь именно таким великим людям, как Копернику и Галилею, пришлось отстаивать свои выводы, полученные в результате наблюдений за небом, и доказывать их истинность в противовес бытовавшим в то время представлениям, опирающимся на религиозную догму. Научная революция позволила заменить религиозно-мифическую космогонию окружающего нас мира, существовавшую с зарождения цивилизации, на физическую космологию, основанную на научных фактах. Все началось с необходимости уточнения календаря, а со временем привело к осознанию глобальной структуры и динамики Вселенной, сложности и утонченности разнообразных физических процессов, протекающих в ней. Но эти знания еще недостаточно распространены. Беларусь, имея высокий индекс человеческого развития, способна принимать активное участие в международной научной деятельности на равных с другими высокоразвитыми государствами и вносить свой вклад в научный прогресс. Как в свое время Европа стояла на пороге эпохи географических открытий, сегодня мы стоим на пороге великих открытий во Вселенной. ■

Темная материя и темная энергия:

ранняя и поздняя
Вселенная, проблема
параметра Хаббла



Геннадий Бисноватый-Коган, главный научный сотрудник Института космических исследований РАН, профессор Московского инженерно-физического института (МИФИ), доктор физико-математических наук, профессор

Со времен Коперника, и особенно Джордано Бруно, Вселенная рассматривалась учеными как бесконечная, покоящаяся субстанция, в которой действуют законы физики. В рамках ньютоновской гравитации построить ее статическую модель не удавалось, поэтому Эйнштейн пересмотрел ньютоновскую модель и заменил ее теорией, получившей название





«общая теория относительности» (ОТО). В нашей окрестности, вплоть до размеров скоплений галактик, эта теория сводилась к ньютоновской, но в применении к сколь угодно большим расстояниям, включая бесконечные, ньютоновская теория приводила к абсурду. В частности, вступала в противоречие с уже признанной специальной теорией относительности и ее постулатом ограничения величины скорости – скоростью света. Главной целью Эйнштейна при создании ОТО было построение на основе своих уравнений непротиворечивой модели бесконечной статической Вселенной. В первом варианте теории этого сделать ему не удалось. Тогда он дополнил ее космологической постоянной Λ , которая не нарушала стройности всей концепции и давала надежду на достижение цели. Эйнштейн получил в статической модели решение для бесконечной Вселенной, но оно оказалось неустойчивым, так как малейшее возмущение в ней приводило либо к неограниченному сжатию, либо к постоянному ее расширению. Статическое решение существовало только при одном выделенном значении

плотности материи, гравитация которой везде компенсирует действие Λ , создающей антигравитацию. Ввиду постоянства этой величины случайное увеличение плотности приведет к преобладанию гравитации, что влечет неограниченное сжатие, а уменьшение – к антигравитации и переходу к состоянию неограниченного расширения.

Антигравитационное действие Λ было обнаружено голландским астрономом и физиком В. де Ситтером, который построил экспоненциально расширяющуюся модель пустой Вселенной с космологической постоянной, названной его именем. Эта модель послужила, видимо, отправной точкой для создания А.А. Фридманом расширяющихся моделей. Его космологические решения были опубликованы в 1922–1924 гг. и поначалу были отрицательно восприняты Эйнштейном, который продолжал верить в стационарность Вселенной, хотя потом он признал правоту Фридмана. После открытия Хабблом закона расширения в однородной Вселенной с линейной зависимостью скорости разбегания галактик от расстояния ($v=Hr$), Эйнштейн окончательно поверил в ее нестационарность, закон расширения которой следовал из решений Фридмана, подтвержденных через несколько лет в Европе бельгийским космологом, аббатом Ж. Леметром. Его работы получили популярность и на время оставили в тени пионерные работы А.А. Фридмана. Космологические решения Фридмана включали в себя большой круг моделей, в том числе открытые, плоские (бесконечные) и закрытые (конечные) модели Вселенной, а также однородные модели с веществом и космологической постоянной. Физиче-

скими параметрами, их разделяющими, являются параметр Хаббла H , определяющий скорость разбегания галактик, и усредненная плотность вещества в нашей окрестности однородной Вселенной ρ_0 . Оба они зависят от космологического времени, но на протяжении отрезков времени, измеряемых годами, веками, тысячелетиями, меняются так мало, что их можно считать постоянными. В связи с этим параметр Хаббла H в современную эпоху принято называть постоянной Хаббла H_0 . В течение почти 50 лет работа над определением этих двух параметров была основной задачей физической космологии, так как от их соотношения зависит структура Вселенной и ее дальнейшая судьба. Определение постоянной Хаббла H_0 требует независимых измерений скоростей как можно более далеких галактик и расстояний до них. Скорости разбегания вычисляются довольно просто, по красному смещению линий, наблюдаемых в спектрах улетающих галактик. Намного более трудной задачей является оценка расстояний, чем многие годы занимаются различные научные группы. При этом используется метод «лестницы расстояний», в котором задействованы все более яркие стандартные свечи – объекты с известной светимостью. Этот метод позволяет вычислить расстояния до относительно близких объектов (в пределах тысяч парсек) и не свободен от систематических ошибок, связанных с неизбежным разбросом светимостей стандартных свечей. Применение разных ступеней в этой лестнице разными группами привело в 1972–1974 гг. к существенному расхождению значений H_0 у разных групп исследователей: от ~50 км/с/Мпс – Сэндеджа-Таммана, до ~100 км/с/Мпс – Вокулера.

Со временем измерения H_0 на красных смещениях вплоть до десятков мегапарсек были существенно улучшены благодаря созданию больших телескопов, включая измерения на аппарате миссии Хаббла, что позволило сузить интервал значений до $H_0 \approx 72-75$ км/с/Мпс.

Наблюдательное определение средней плотности Вселенной представляет собой еще более сложную задачу. Это связано с сильной неоднородностью видимого распределения плотности, температуры вещества, которое, наряду с неоднородным газообразным состоянием, представлено в виде звезд, галактик различного типа, скоплений и сверхскоплений галактик. Открытия, благодаря которым было установлено, что наша Вселенная горячая, и теоретические расчеты нуклеосинтеза химических элементов на ранних стадиях расширения помогли сделать определенный вывод о том, что современная плотность барионного вещества составляет примерно 4% от критической плотности ρ_c , при которой Вселенная является плоской.

Этот вывод основывался на наблюдательных определениях содержания дейтерия в различных звездах и газовых туманностях. Считается, что со времени Большого взрыва данное значение может только уменьшаться, поэтому максимальная измеренная величина соответствует нижнему пределу плотности первичного дейтерия. Его содержание растет с уменьшением плотности барионов, поэтому величина в 4% считается ее верхней границей, принимаемой сейчас за истинную.

Выводы о том, что средняя плотность барионов во Вселенной столь мала, приводили в смущение некоторых теоретиков-кос-

мологов. Это может свидетельствовать о том, что мы живем в открытой Вселенной, и ее полная энергия положительна. Полуфилософские рассуждения о возможном рождении в результате огромной квантовой флуктуации Вселенной из вакуума имели какой-то смысл в том случае, если она появилась плоской. Обладая нулевой полной энергией, ее рождение не нарушало бы законов сохранения.

После открытия реликтового излучения появилась возможность исследований флуктуаций плотности, приводящих к образованию окружающей нас неоднородной Вселенной. Их рост происходит в результате гравитационной неустойчивости, определяющей увеличение амплитуды малых возмущений, существующих в однородной Вселенной из-за квантовых эффектов и достигающих больших амплитуд на нелинейных стадиях развития. После рекомбинации вещества в расширяющейся Вселенной на больших $z \sim 1100$ излучение, не подверженное гравитационной неустойчивости, свободно проходит расстояние вплоть до нашего времени. При этом сохраняется относительная амплитуда возмущений реликтового излучения, которая примерно равнялась возмущениям плотности барионов на то время. Рост этих возмущений после рекомбинации приводит к образованию современной крупномасштабной структуры Вселенной. Для того чтобы это произошло, необходимо, чтобы на момент рекомбинации амплитуда возмущений была достаточной для возможности достижения наблюдаемой нелинейной стадии. В модели Фридмана с пылевым веществом необходима относительная амплитуда возмущений плот-

ности оценивалась не менее 10^{-4} . В 1973 г. на радиотелескопе РАТАН в САО были получены результаты измерений, позволившие выявить верхнюю оценку амплитуды флуктуаций температуры (плотности) реликта в $\Delta T/T \sim 4 \cdot 10^{-5}$, что противоречило теоретическим требованиям более чем в 2 раза. Кроме того, теоретические работы по росту квантовых возмущений известной начальной амплитуды показали, что к моменту рекомбинации теоретическая величина относительной амплитуды возмущений во фридмановской модели оказывалась на несколько порядков меньше необходимой.

В 1981 г. была предложена существенная модификация модели Фридмана, в рамках которой были решены основные противоречия теории с наблюдениями. В новой модели, получившей название инфляционной, предлагалось допустить, что при своем рождении Вселенная не содержит вещества, а состоит только из гипотетического скалярного поля. Его действие эквивалентно действию (Λ) и приводит к экспоненциально быстрой начальной стадии расширения, в процессе которого энергия скалярного поля превращается в вещество, и в итоге Вселенная переходит к классической фридмановской стадии. Модификация здесь касалась не космологического решения Фридмана, а состояла в использовании нового тензора энергии импульса в правой части уравнений Эйнштейна, в котором начальное скалярное поле при экспоненциальном расширении (стадия де Ситтера) превращается в вещество и продолжает расширение по модели Фридмана.

В последующие годы началось интенсивное экспериментальное изучение Вселенной с помощью наблюдений со спутников и боль-

ших земных телескопов. Основные исследования касались временности параметра Хаббла со временем, значений флуктуаций реликтового излучения, зависимости их амплитуд от размера возмущений, а также определения других параметров Вселенной, состава вещества, его плотности, плотности энергии различных ее компонент в зависимости от космологического времени. На основе теоретического анализа все эти данные, включая параметр Хаббла, были установлены при анализе наблюдений флуктуаций реликтового излучения на спутниках WMAP (2001–2009 гг.) и Planck (2009–2013 гг.). С помощью сложной процедуры, включающей пересчет характеристик, измеренных на стадии рекомбинации при $z \approx 1100$ к настоящему времени $z=0$, используя полученную модель Вселенной, на основе данных со спутника Planck были получены значения следующих параметров:

- современное значение постоянной Хаббла, измеренное по реликтовому излучению, $H_0^{Dist} \approx 67,5 \text{ км/с/Мпк}$;
- космологическая постоянная, полученная из тех же дистанционных измерений, $-\Lambda = 8\pi G\rho_\Lambda/c^2 \approx 1,4 \times 10^{-56} \text{ см}^{-2}$.

Следует отметить, что первые пионерные наблюдения флуктуаций реликтового излучения были проведены экспериментом «Реликт» на борту советского спутника «Прогноз-9» в 1983–1984 гг. Он обладал довольно ограниченными возможностями, поэтому создавался другой, гораздо более совершенный прибор, но воплотить в жизнь эти планы не удалось.

В последние годы прошлого века были выполнены два больших наземных международных проекта по оценке измене-

ний параметра Хаббла со временем. Для этого измеряли скорости разлета далеких объектов (галактик), а также независимо определяли расстояния до них. Было задействовано несколько больших оптических телескопов из различных стран, проводивших спектральные наблюдения сверхновых СН Ia для нахождения скоростей разлета v , и наблюдательные построения кривых блеска, по форме которых для СН Ia можно было найти их собственные светимости L . Все это позволяло рассчитывать расстояния до этих объектов.

Важнейший вклад в решение этой проблемы сделан российским астрофизиком Ю.П. Псковским, который решил две фундаментальные астрономические проблемы. В 1968 г. ученым отождествлены линии в спектрах сверхновых звезд этого типа, не поддававшиеся идентификации в течение 84 лет. Вторая фундаментальная работа 1977 г. устанавливала связь кривой блеска сверхновой СН Ia с ее полной светимостью, позволяя независимо определить расстояние до нее. Зависимость $L(v, z)$ и $L(z)$ различны для разных моделей Вселенной, поэтому, зная теоретически эти зависимости, можно подобрать теоретическую модель, для которой эта зависимость лучше всего совпадает с наблюдаемой. Оказалось, что модель должна содержать член, эквивалентный постоянной Эйнштейна, названный темной энергией – dark energy ($T\mathcal{E}$ – DE). Из последующих наблюдений флуктуаций реликтового излучения было получено наиболее точное к настоящему времени значение плотности DE , указанное выше. Из этого же следовало, что полная средняя плотность равна критической ρ_c , а основной вклад

в нее в настоящую эпоху вносит темная энергия, так что $\Omega_\Lambda = \rho_\Lambda / \rho_c \approx 0,7$. Из независимых измерений плотности барионов получалось, что $\Omega_b = \rho_b / \rho_c \approx 0,04$, а примерно 26% плотности вещества составляет TM – DM , вещество неизвестной природы, проявляющей себя только в гравитации $\Omega_{dm} = \rho_{dm} / \rho_c \approx 0,26$. Наблюдательные указания на существование невидимой гравитирующей субстанции были впервые получены в конце 30-х гг. прошлого столетия швейцарским астрофизиком Ф. Цвикки, который обнаружил, что скорости движения галактик в скоплениях намного превышают скорости, рассчитанные по теореме вириала для равновесных скоплений при известной величине отношения светимости галактик к их массе. Это указывало на существование невидимой гравитирующей материи, которая была названа *скрытой массой*. Примерно через 30 лет были проанализированы наблюдения скоростей движения карликовых спутников вокруг больших галактик, в частности вокруг Млечного пути. Эти скорости сильно отклонялись от кеплеровских, которые ожидалось ввиду значительного превышения массы Галактики над ее спутниками. Тем не менее скорость вращения спадала значительно медленнее кеплеровской, что указывало на наличие невидимого гравитирующего вещества за ее пределами.

Проведены специальные наблюдения по выявлению зависимости от радиуса скоростей вращения вещества в дискообразных галактиках. Измерения делали там, где она предположительно полностью определялась тяготением массивного сферического гало исследуемых галактик. И здесь в большинстве объектов все скорости вращения спадали

значительно медленнее кеплеровских (вириальных), что также указывало на присутствие невидимого гравитирующего вещества, которое сейчас называется темной материей.

Ввиду большого разброса в формах кривых вращения и неопределенности значений многих параметров не было возможности определить средние количественные характеристики ТМ, необходимые для построения космологической модели. Как отмечалось выше, количественные значения были получены из анализа флуктуаций реликтового излучения. После этого возникло представление о том, что картина расширяющейся Вселенной, построенная на основе этих результатов, близка к реальности. Тот факт, что природа ТМ непонятна, а природа ТЭ в виде постоянной Эйнштейна, как следует из наблюдений, допускает возможность небольших отклонений от постоянной величины, не очень тревожил космологов. Для создания модели достаточно было знать наблюдательные проявления, связанные с существованием ТМ и ТЭ вне зависимости от их физической природы.

Эта благостная картина, на основе которой оптимисты называют наше время «эрой точной космологии» («precision cosmology era»), несколько лет назад столкнулась с противоречием, которое не объясняется на основе данной модели. Проблема, возникшая в последние годы, состоит в различии значений постоянной Хаббла в настоящую эпоху, получаемых в различных экспериментах. Анализ наблюдений миссии Planck, измеряющей флуктуации реликтового излучения в период рекомбинации, приводит к современному значению постоянной Хаббла:

$$H_0^{Dist} \approx 67,5 \text{ км/с/Мпк.}$$

В то же время наблюдательные значения H_0^{Loc} , полученные с использованием сверхновых типа CN Ia (SN Ia), с калибровкой расстояния по цефеидам и других локальных измерений, дают значение $H_0^{Loc} \approx 73 \text{ км/с/Мпк}$. Анализ данных на малых и больших красных смещениях показывает, что несоответствие между результатами Planck и любыми независимыми измерениями в поздней Вселенной, названное хаббловским несоответствием – *Hubble tension (HT)*, лежит в интервале между 4σ и 6σ, то есть является статистически значимым. Было предложено много объяснений возникновения HT, часть из которых уже опровергнута наблюдательными данными. Общепринятого и доказанного экспериментального решения данной проблемы в настоящее время нет. Имеется около сотни предложений, которые меняют процесс эволюции Вселенной до или после рекомбинации либо представляют идеи, основанные на модификациях ОТО.

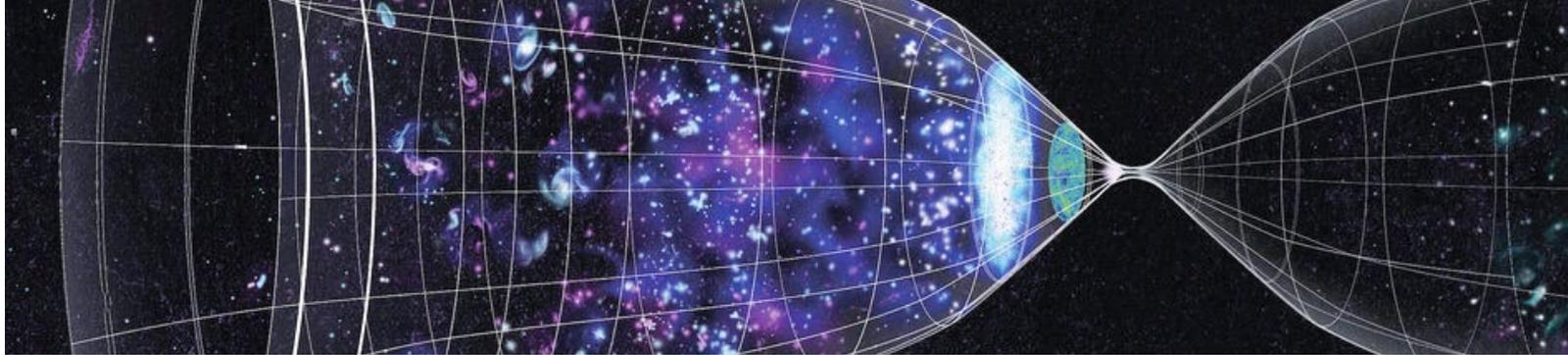
В нескольких работах автор данной статьи рассматривает космологическую модель, в которой DE может иметь два компонента, один из которых – постоянная Эйнштейна (Λ), а другой – меньший переменный компонент DEV (Λ_V) – связан с остатком вызвавшего инфляцию скалярного поля после того, как основная его часть превратилась в вещество. Анализировались только стадии эволюции Вселенной после рекомбинации ($z \leq 1100$), где DM – преобладающий компонент вещества. Предполагается, что взаимные превращения скалярного поля в вещество и обратно продолжаются и в современную эпоху. Получено решение для космологической модели в предположе-

нии линейной связи между плотностями DM и DEV после рекомбинации $\rho_{DM} = \alpha \rho_{DEV}$, а также варианты с зависимостью величины α от красного смещения z коэффициента $\alpha(z)$. В данной схеме HT может быть объяснено отклонением существующей космологической модели от применяемой общепринятой Λ CDM плоской Вселенной, действием добавочного компонента темной энергии DEV на стадиях после рекомбинации. При этом истинной принимается усредненная величина H_0 , полученная в локальных измерениях.

Для того чтобы определить влияние малой добавки DEV на результат расчета современного значения H_0 из измерений на момент рекомбинации, были рассчитаны космологические модели с учетом компонента DEV на интервале $0 < z < 1100$.

Рассчитывая современную H_0^{Dist} с использованием космологической модели, находим значение постоянного параметра α_{HT} , при котором $H_0^{Dist} = H_0^{Loc}$, что решает HT-проблему. Из расчетов следует, что при сохранении постоянного отношения плотности скалярного поля к плотности вещества после рекомбинации HT-проблема устраняется при $\alpha_{HT} \approx 24$. Это соответствует современному значению $\Omega_{DEV} \approx 0,0125$, что составляет менее 2% от современного вклада DE в плотность энергии Вселенной. Было показано, что при переменной функции $\alpha(z)$ ее современное значение, устраняющее парадокс, может быть уменьшено еще в ~3 раза при соответствующем выборе $\alpha(z)$.

Подробное изложение указанного решения HT-парадокса можно найти в статье автора с А.М. Никишиным, опубликованной в «Астрономическом журнале» в 2023 г. 



КОСМОЛОГИЯ: ПРОШЛОЕ И БУДУЩЕЕ



Юрий Выблый,
ведущий научный
сотрудник Центра
теоретической физики
Института физики
им. Б.И. Степанова
НАН Беларуси,
кандидат физико-
математических наук

Космологические модели, то есть решения уравнений гравитационного поля, описывающие Вселенную, рассматривались сразу после появления общей теории относительности. В основе этих моделей лежит так называемый космологический принцип – построенное на астрономических наблюдениях предположение о пространственной однородности и изотропности Вселенной в больших масштабах.

В 1922 г. русский ученый А. Фридман предложил версию нестационарной расширяющейся Вселенной, в которой расстояния между космическими объектами менялись с течением времени. Эта модель приводила к эффекту красного космологического смещения частот в спектрах галактик и получила наблюдательное подтверждение после открытия американским астрофизиком Э. Хабблом в 1929 г. пропорциональности величины красного смещения в спектрах галактик расстоянию до них (закон Хаббла).

Важным подтверждением данной идеи является существование реликтового микроволнового излучения, которое в высокой степени изотропно, то есть имеет одинаковую энергию (или температуру) по всем направлениям в пространстве. Оно образовалось на ранней стадии эволюции Вселенной, когда электромагнитное излучение смогло отделиться от вещества. В 1948 г. этот

феномен предсказали физики Г. Гамов, Р. Альфер и Р. Герман, а в 1965 г. он был открыт их американскими коллегами А. Пензиасом и Р. Вильсоном [1].

Реликтовое излучение изотропно только с точностью примерно 0,01%. В 1992 г. на основании анализа данных эксперимента РЕЛИКТ-1 российские ученые объявили об открытии анизотропии такого излучения. Чуть позднее флуктуации температуры обнаружили американские астрофизики благодаря данным спутникового эксперимента COBE и WMAP. Результаты исследования анизотропии реликтового излучения, а также его возможной поляризации весьма важны для построения теоретических моделей ранних стадий космологической эволюции [2].

Благодаря однородности и изотропности пространства метрический тензор для космологического решения уравнений в общем виде содержит одну неизвестную функцию времени, называемую масштабным фактором, и один параметр,

обуславливающий постоянную кривизну трехмерного пространства, которая может быть положительной, отрицательной или равной нулю. Указанные неизвестные величины должны быть найдены с помощью системы уравнений Эйнштейна и уравнения состояния материи, которая существует на разных этапах эволюции Вселенной. Требуемая информация должна быть получена путем астрофизических наблюдений.

Исторически первый и очень важный способ определения этих величин – измерение красного смещения источников излучения света в зависимости от расстояния до них, позволяющее установить, как меняется со временем скорость изменения масштабного фактора, называемая параметром Хаббла, и параметр ускорения расширения. Возникает вопрос: как измерять расстояние от источника излучения до наблюдателя? Для относительно близких к нам источников астрономы предложили ряд косвенных методов, которые, однако, не пригодны для очень далеких звезд и галактик, а именно такие нужны для космологии. Решение задачи было найдено в сравнении видимой и абсолютной яркости источника (энергия, излучаемая звездой во всех направлениях за секунду). Оказалось, что существуют звездные объекты, у которых в силу одинакового механизма их свечения абсолютная яркость одинакова, где бы они ни находились. Такими наиболее удобными источниками оказались так называемые сверхновые типа Ia [1], получившие название «стандартных свечей», и, измерив их видимую светимость, можно определить расстояние до них. Оно называется фотометрическим, а его зависимость от параметра красного смещения – диаграммой Хаббла.

Измерения красного смещения далеких источников и ряд других экспериментов хорошо под-

тверждали космологический сценарий общей теории относительности, согласно которому в нынешнюю эпоху Вселенная расширяется с постоянным замедлением. Однако в 1998 г. при наблюдениях за совокупностью сверхновых типа Ia было обнаружено, что на диаграммах Хаббла они имеют меньшую, чем предсказывалось, яркость [3, 4]; в дальнейшем эти результаты были неоднократно подтверждены. Отсюда следует вывод, что Вселенная расширяется не замедленно, как этого требуют уравнения общей теории относительности при наличии обычной материи, а ускоренно. Дальнейшие измерения подтвердили это открытие, за которое в 2011 г. астрофизики С. Перлмуттер, Б.П. Шмидт и А. Рисс получили Нобелевскую премию по физике.

Для моделирования этого явления было введено в рассмотрение понятие «темной энергии» – однородной и изотропной субстанции, обладающей только гравитационным взаимодействием и отрицательным давлением, если рассматривать ее как идеальную жидкость. Наиболее естественно введение в уравнения Эйнштейна так называемого Λ -члена (где Λ – постоянная величина, называемая космологической константой).

Точные измерения темпа ускорения расширения должны сыграть решающую роль в установлении модели темной энергии. Именно она в современную эпоху вносит основной вклад в энергетический состав Вселенной. Имеющиеся наблюдательные данные и космологические парадигмы вместе с теорией элементарных частиц позволили создать сценарий эволюции мироздания: наблюдаемая нами сейчас Вселенная возникла приблизительно 13,8 млрд лет назад из некоторого начального состояния, названного Большим взрывом, и с тех пор непрерывно расширяется и охлаждается. В раннем своем состоя-



Рис. 1. Изображение остатка сверхновой типа Ia, сделанное при помощи космической обсерватории «Чандра»
Источник: <http://spacegid.com>

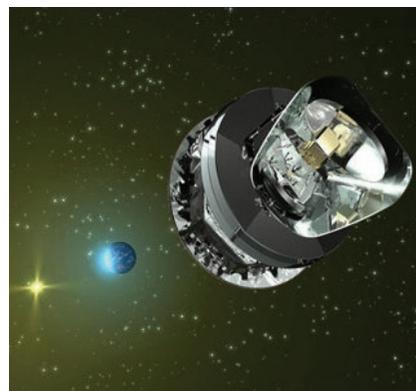


Рис. 2. Космическая обсерватория «Планк» на пути к точке Лагранжа L_2
Источник: http://esa.int/Enabling_Support/operations/Planck

нии она представляла собой высокооднородную и изотропную среду с очень высокими плотностью энергии, температурой и давлением (горячая Вселенная) [5]. В результате расширения и охлаждения в ней происходили фазовые переходы, приводящие к образованию различных элементарных частиц, частиц темной материи, барионов (протонов и нейтронов), атомов, а затем сгущений барионной материи в виде звезд, планет и галактик. По мере космологического расширения и падения плотности остальных видов материи начинает доминировать темная энергия.

Для того чтобы описать космологический сценарий – эволюцию Вселенной от ее рождения до настоящего времени, – необходимо знать, как устроена правая часть уравнений Эйнштейна, то есть понимать эволюцию материи. Эту информацию дает нам астрофизика. Наиболее важной здесь является ее часть, касающаяся очень далеких высокоэнергетических звездных объектов, галактик и их соединений. Таким образом, астрофизики получили информацию о другой весьма существенной и загадочной компоненте Вселенной – темной материи [6].

Исследование скоплений галактик в начале 1930-х гг. привели американского астрофизика Ф. Цвикки к выводу о существовании скрытой массы, ненаблюдаемой в электромагнитном диапазоне Вселенной. В начале 1970-х гг. было показано значительное несоответствие масс и светимостей в таких скоплениях, а также получены данные о движении материи во внешних областях самих галактик. Оказалось, что скорость их кругового движения не уменьшается по мере движения от центральных областей к периферийным, как должно быть при сосредоточенности массы в светящихся областях в соответствии с ньютоновским приближением общей теории относительности. Эти и ряд других наблюдательных данных сформировали в середине 1970-х гг. мнение о наличии темной материи, природа которой неизвестна. Согласно одной модели, горячая темная материя называется так потому, что она отщепляется от обычного вещества, будучи релятивистской. С другой стороны, к началу 1980-х гг. изучались новые гипотетические частицы, которые могли составлять холодную темную материю, отделяемую от другого вещества Вселенной, будучи нерелятивистской. Было продемонстрировано, что только в таких моделях появляется тонкая структура сверхскоплений (так назы-

ваемые филаменты, или нити из галактик), что стало решающим аргументом в ее пользу. Совокупность наблюдательных данных по измерению пекулярных скоростей галактик (дополнительных к хаббловскому расширению) указывали, что плотность темной материи составляет примерно 0,2–0,3 критической космологической плотности, а барионной материи – около 0,05, так что большая часть гравитирующей массы во Вселенной имеет небарионный характер.

После открытия и подтверждения ускоренного космологического расширения и учета существования темной материи сформировалась стандартная космологическая Λ CDM-модель (модель с Λ -членом и холодной темной материей), в которой, согласно опубликованным в 2015 г. данным наблюдений космической обсерватории «Планк», общая энергия Вселенной состоит (с точностью до округлений) на 69,1% из темной энергии, на 25,9% из темной материи и только на 5% из барионной материи.

Очень важную информацию о структуре ранней Вселенной и о космологических параметрах дает исследование анизотропии реликтового излучения. В 2018 г. после обработки данных космической обсерватории «Планк» было получено уточненное значение постоянной Хаббла H_0 [7], которое значительно отличается от ее современного значения, полученного из анализа диаграмм Хаббла [8]. Это различие получило название H_0 -расхождение (H_0 -tension), оно соответствует более чем четырем стандартным отклонениям (4σ) и пока не получило удовлетворительного объяснения. В физике элементарных частиц в таких случаях говорят о «возможном выходе за рамки Стандартной модели» и об «указании на новую физику».

Следует отметить, что Λ CDM-модель – не единственная в рамках общей теории относительности. Ее определенным недостатком является отсутствие физической интерпретации Λ -члена. В настоящее время она удовлетворяет всей совокупности наблюдательных данных, но увеличение точности астрофизических измерений должно показать, действительно ли Λ -член должен быть постоянным. Если окажется, что это не так, в правую часть уравнений Эйнштейна придется добавить тензор энергии-импульса какой-то другой материальной субстанции. Наиболее простым и естественным кандидатом на эту роль является действительное скалярное поле, которое не взаимодействует с электромагнитным. В литературе

такие теории гравитации называются скалярно-тензорными, они рассматриваются применительно к космологии на протяжении длительного времени [5]. Проблема этого подхода состоит в выборе уравнения скалярного поля, то есть в неоднозначности теории. С другой стороны, скалярно-тензорные теории являются более гибкими, чем Λ CDM-модель, где ускоренное расширение в дальнейшем будет происходить вечно.

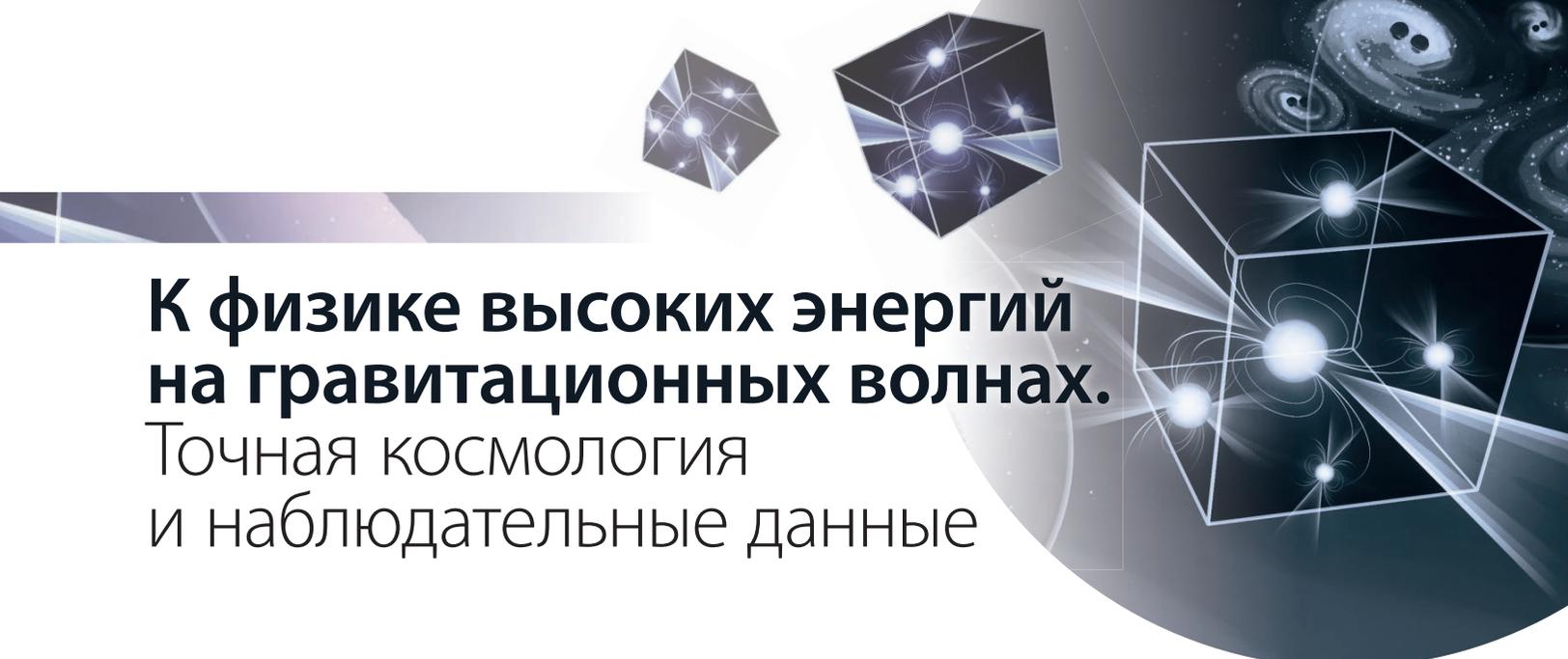
В частности, эти теории допускают модель пульсирующей Вселенной, когда расширение сменяется сжатием и последующим «отскоком», который является аналогом Большого взрыва [9]. Не исключено, что скалярное поле как дополнительная компонента гравитационного взаимодействия – это и есть «новая физика». Конечно, нужно иметь в виду, что сценарии будущей космологической эволюции могут обсуждаться только на основе моделей, хорошо подтвержденных наблюдательными данными в прошлом.

Космология, основанная на эйнштейновской теории гравитации и огромном массиве астрофизических наблюдений, продолжает активно развиваться, ставя перед учеными все новые вопросы. Важнейшие проблемы, такие как природа темной энергии и темной материи, проблемы ранней Вселенной и будущей эволюции, ждут своего решения. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Вейнберг С. Космология. – М. УРСС, 2013.
2. Смут Дж. Ф. Анизотропия реликтового излучения: открытие и научное значение // Успехи физических наук. 2007. Т. 177, №12. С. 1294–1317.
3. Riess A.G. [et al.]. Observational evidence from supernovae for an accelerating universe and a cosmological constant // The Astronomical journal. 1998. Vol. 116. P. 1009–1038.
4. Perlmutter S. Measurements of Omega and Lambda from 42 high redshift supernovae // The Astrophysical journal. 1999. Vol. 517. P. 565–586.
5. Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: теория горячего Большого взрыва. – М. 2016.
6. Drees M., Gerbier G. [Particle Data Group] 26. Dark matter // Chinese Physics C, 2016. Vol. 40. 100001.
7. Aghanim N. [et al.]. [Planck Collaboration] Planck 2018 results, VI Cosmological parameters. Astronomy and Astrophysics // 2020. Vol. 641. P. A6.
8. Riess A.G. [et al.]. Large Magellanic Cloud Cepheid Standards Provide a 1% Foundation for the Determination of the Hubble Constant and Stronger Evidence for Physics Beyond Lambda CDM // The Astrophysical journal. 2019. Vol. 876. P.85
9. Горбунов Д.С., Рубаков В.А. Введение в теорию ранней Вселенной: Космологические возмущения. Инфляционная теория. – М. 2016.

В отличие от других областей физики, астрономия лишена возможности проводить эксперименты в строгом смысле этого слова и полагается на регистрацию и анализ наблюдательных данных, полученных из космоса. По сути, сама Вселенная является огромным экспериментом, наблюдение за которым помогает ученым понять физические процессы. За последние полвека благодаря прогрессу технологий, которые помогают воплотить научные идеи в измерения астрономических событий, произошло стремительное развитие этой области науки. Об этом свидетельствует, например, список нобелевских лауреатов по физике, где результаты, полученные учеными в астрономии, все чаще заслуживают высокую оценку научного сообщества. Эти успехи можно объяснить двумя ключевыми факторами. Во-первых, Вселенная выступает привлекательным «испытательным полигоном» для проверки всевозможных теоретических идей в физике: здесь есть возможность наблюдать физические процессы в экстремальных условиях, недоступных в экспериментальных установках, созданных человеком на Земле. Во-вторых, современное развитие технологий позволяет получать сведения с невероятной точностью.



К физике высоких энергий на гравитационных волнах. Точная космология и наблюдательные данные

Накопление сведений к концу XX в. привело к формулировке современной стандартной космологической модели – Λ CDM, которая описывает эволюцию Вселенной, используя всего лишь 6 независимых параметров, и наилучшим образом соответствует всем известным наблюдательным данным.

Согласно этой модели, эволюция Вселенной началась из состояния плотной горячей плазмы, где все пространство было заполнено частицами высокой энергии, взаимодействующими между собой. В это раннее время космическое пространство расширялось монотонно в соответствии с теорией гравитации Эйнштейна. Со временем пространство увеличилось в размерах, что привело к понижению температуры плазмы. Когда Вселенная достигла возраста около 380 тыс. лет, энергия плазмы упала до такого уровня, что электроны и протоны начали объединяться, образуя первые атомы в процессе рекомбинации. Дальнейшее расширение и соответствующее остывание привели к уменьшению вероятности рассеяния фотонов, что сделало космическое пространство прозрачным для видимого света. Именно эти ранние фотоны, начавшие свое свободное путешествие по мирозданию после процесса рекомбинации, получили название реликтового излучения. Современные наблюдательные установки сегодня регистрируют эти реликтовые фотоны после их странствий на протяжении 13 млрд лет в виде космического микроволнового излучения.

Его исследование стало ключевым шагом в понимании эволюции Вселенной от периода рекомбинации до наших дней, фактически заложив основу для «точной космологии» [1]. Анализ данных, полученных от реликтового излучения, позволил ученым достичь большой точности космологических



Иван Рыбак,
научный сотрудник Центра
астрочастиц и физики высоких
энергий университета
Сарагосы (Испания), Института
астрофизики и космических
наук, Порту (Португалия), Ph.D

параметров нашей Вселенной. Например, на *рис. 1* иллюстрируется, как миссии WMAP (Wilkinson Microwave Anisotropy Probe) и «Планк» значительно улучшили точность определения постоянной Хаббла.

Стандартная космологическая модель Λ CDM предоставляет нам хорошее теоретическое описание практически всех явлений, происходящих от образования первых атомов водорода до настоящего момента. Однако большой фундаментальный интерес вызывают процессы, происходившие в самом раннем периоде Вселенной, задолго до рекомбинации. Этот период должен описываться физикой высоких энергий. Но человеческие знания о фундаментальных взаимодействиях во многом ограничены ресурсами ускорителей частиц в лабораториях. Таким образом, отсутствие прямого доступа к изучению таких явлений представляет сложную задачу для теоретиков, которым приходится экстраполировать имеющиеся знания на физику высоких энергий. Недавние открытия в области гравитационных волн могут помочь преодолеть эту преграду и позволить заглянуть в самый ранний период Вселенной для изучения фундаментальных взаимодействий.

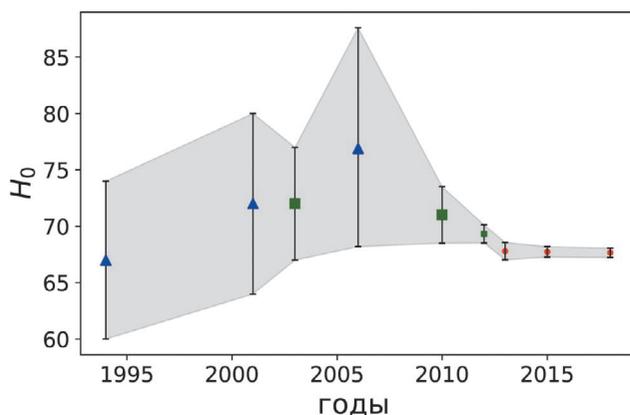


Рис. 1. Данные, отображающие значения постоянной Хаббла на протяжении различных лет: треугольниками обозначены данные от телескопов «Хаббл» и «Чандра», квадратами – от миссии WMAP, точками – от миссии «Планк» [1]

Гравитационные волны

Коллаборация LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory) и VIRGO (франко-итальянский детектор гравитационных волн, расположенный в Европейской гравитационной обсерватории EGO) 11 февраля 2016 г. анонсировала первое непосредственное детектирование гравитационных волн, вызванных слиянием черных дыр с массами, примерно равными 36 и 29 масс Солнца, на расстоянии 410 мегапарсек. Это историческое событие получило название GW150914, поскольку было зафиксировано 14 сентября 2015 г. [2]. В настоящее время регистрируется множество других событий прямого обнаружения гравитационных волн от двойных систем.

Такие волны являются прямым следствием теории гравитации Эйнштейна. Согласно ей, ускоренное движение массивных объектов вызывает возмущения в пространстве-времени, которые распространяются в виде излучения со скоростью света. Двойные системы звезд или черных дыр, вращающиеся вокруг центра масс, выступают источником таких возмущений. Распространяясь, гравитационные волны приводят к эффективному сжатию пространства в одном направлении и его растяжению в другом. В случае прохождения светового сигнала через зону воздействия гравитационной волны время достижения им детектора может различаться в зависимости от ориентации: при движении в одном направлении это происходит быстрее, чем в перпендикулярном ему [3]. Именно этот эффект был зафиксирован аппаратурой лазерно-интерфе-

рометрической гравитационно-волновой обсерватории LIGO и стал абсолютно новым методом изучения Вселенной.

В дополнение к привычному электромагнитному излучению, которое служило практически единственным источником информации для астрономических наблюдений до 2015 г., сегодня человечеству стало доступно использование гравитационного излучения, что буквально «открывает глаза» на ранее недоступные астрономические объекты. Кроме того, гравитационные волны, испущенные в процессах ранней Вселенной, которые происходили задолго до момента рекомбинации атомов, имеют потенциальную возможность быть обнаруженными в будущих миссиях. Это излучение позволит заглянуть в самый ранний период космоса, вплоть до момента его «рождения».

Совокупность гравитационных сигналов от различных астрономических источников формирует стохастический гравитационный фон, который предполагается существующим повсюду, подобно реликтовому электромагнитному излучению.

Детектирование и изучение этого фона может привести к такому же скачку развития физики и понимания Вселенной, которое случилось благодаря реликтовому излучению фотонов. Возможно, что это открытие случится уже в ближайшее время вследствие изучения массива данных от миллисекундных пульсаров. Наблюдательные миссии NANOGrav (North American Nanohertz Observatory for Gravitational Waves), EPTA (European Pulsar

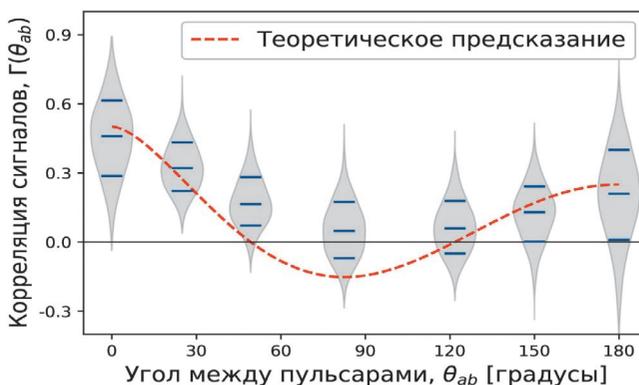


Рис. 2. Нормированная кривая Хеллингса – Даунса (штриховая линия), полученная на основе Байесовского анализа данных, собранных миссией NANOGrav за 15 лет. Вертикальные графики изображают апостериорные функции плотности с горизонтальными чертами, соответствующими их медианному значению и стандартному отклонению. График построен с использованием общедоступных данных, предоставленных NANOGrav на ресурсах <https://nanograv.org/science/data> и <https://github.com/nanograv>

Timing Array), PPTA (Parkes Pulsar Timing Array) и CPTA (Chinese Pulsar Timing Array) анонсировали возможность детектирования стохастического гравитационно-волнового фона в июне 2023 г. [4].

Идея использования пульсаров для регистрации гравитационного излучения была впервые предложена космологом и астрофизиком Михаилом Сажиным еще в 1978 г. [5]. Дальнейшее развитие этой концепции, связанной с набором пульсаров, расположенных под разными углами, привело к однозначному предсказанию, которое должно проявиться в виде квадрупольной корреляции, представленной кривой Хеллингса – Даунса (рис. 2) [6]. Данный метод наблюдения гравитационного фона основан на физическом принципе, аналогичном применяемому в лазерно-интерферометрической гравитационно-волновой обсерватории LIGO. Пульсары в данном случае служат источниками электромагнитных сигналов, проходящих на Землю с очень точной периодичностью. Их прохождение от пульсаров через гравитационные волны вызывает запаздывание или опережение прибытия импульса на Землю из-за пространственно-временной «ряби», обусловленной наличием стохастического гравитационного фона. Если рассматривать сигналы от пульсаров в одном направлении, то их запаздывание или опережение должно коррелировать положительно. В то же время сигналы от пульсаров, находящихся в перпендикулярных направлениях, будут иметь отрицательную корреляцию, известную как квадрупольная. Это ее характерное проявление – уникальный признак наличия стохастического гравитационного фона, предсказанный в работе [6]. Результаты сбора данных о корреляциях сигналов от пульсаров в течение 15 лет наблюдений миссией NANOGrav показано на рис. 2. Дальнейшее накопление информации от пульсаров позволит подтвердить или опровергнуть открытие стохастического гравитационного фона.

Массивы пульсаров по своей сути представляют собой природные интерферометры, аналогичные тем, которые используются в обсерватории LIGO на Земле. Однако расстояние между источником сигнала – пульсаром и приемником – Землей несоизмеримо больше, чем в случае лабораторных интерферометров LIGO. В результате гравитационные волны, обнаруживаемые с помощью пульсаров, имеют низкие частоты на уровне нГц, в то время как LIGO работает с частотами около 100 Гц. Для охвата диапазона гравитационных волн с промежуточными частотами между LIGO и массивами пульсаров предполагается использование проекта LISA (Laser Interferometer Space Antenna), который

будет ориентирован на частоты гравитационных волн порядка мГц. В таблице и на рис. 3 приведены диапазоны частот различных наблюдательных установок и источников гравитационных волн [7].

Детекторы	Частоты	Источники
Наземные установки: LIGO, VIRGO, KAGRA	104 – 1 Гц	Слияние черных дыр звездной массы, слияние нейтронных звезд в ближайших галактиках
Космические обсерватории: LISA, DECIGO	1 – 10-5 Гц	Слияние черных дыр звездной массы в удаленных галактиках
Массивы пульсаров: EPTA, IPTA, SKA	10-6 – 10-10 Гц	Слияние сверхмассивных черных дыр

Таблица. Диапазоны частот наблюдательных установок и источников гравитационных волн

Отпечаток физики высоких энергий на гравитационном фоне

Астрономы и ранее обладали знаниями о черных дырах и нейтронных звездах. Однако благодаря обнаружению гравитационных волн, исходящих от двойных систем этих объектов, ученым удастся глубже понять их свойства и эволюцию. Гравитационное излучение может возникать не только от уже известных и хорошо изученных астрономических объектов. Высокоэнергетические процессы, происходившие на первоначальном этапе эволюции Вселенной задолго до рекомбинации, также могут быть потенциальными источниками гравитационных волн. Явления, происходившие в ней, представляют особый интерес с точки зрения фундаментальной физики, поскольку энергии в этот период значительно превосходят то, чего можно достичь с помощью ускорителей частиц. Благодаря гравитационным волнам (от ранней Вселенной) исследователи получают возможность изучения физики высоких энергий, которая ранее была им недоступна.

В ранней Вселенной выделяются 3 основных гипотетических источника гравитационных волн, обладающих наибольшим потенциалом для обнаружения: космологическая инфляция, фазовые переходы и космические струны. Ожидается, что частотный диапазон гравитационных волн, испускаемых этими процессами, будет находиться в пределах области исследования будущей миссии LISA.

Космическая инфляция представляет собой экспоненциально быстрое расширение Вселенной в самый ранний период ее существования. Уже в 1980-х гг.

стало очевидно, что для того, чтобы объяснить несколько ключевых наблюдательных характеристик (близкой к нулю кривизны Вселенной, однородности реликтового излучения и генерации первичных флуктуаций, которые послужили основой для формирования ее крупномасштабной структуры), необходима новая теория – инфляция. Она успешно решила эти проблемы и стала неотъемлемой частью стандартной модели космологии. Однако на сегодняшний день нет наблюдательных данных, подтверждающих предсказания модели ранней Вселенной. Флуктуации, возникшие в результате инфляции, также могут служить источником гравитационного стохастического фона. Некоторые ее реализации благодаря гравитационному излучению попадают в область чувствительности детекторов миссии LISA, что открывает перспективу исследования этого процесса в ближайшие 10 лет [8].

Другим физическим явлением, которое может стать источником гравитационного стохастического фона в ранней Вселенной, выступают фазовые переходы. Множество теоретических концепций, выходящих за рамки Стандартной модели физики частиц, предсказывают такую возможность при высоких значениях энергии. Если эти идеи верны, то фазовые переходы должны проявиться в высокоэнергетическом периоде эволюции Вселенной. В случае фазового перехода первого рода в ней образуются пузыри с новой фазой. Они расширяются и сталкиваются с пузырями, образовавшимися в других областях пространства, подобно кипячению воды. Эти процессы вызывают флуктуации в пространстве, создавая стохастический гравитационно-волновой фон – один из потенциальных кандидатов на обнаружение миссией LISA [8].

С ее же помощью потенциально возможно выявление одномерных топологических дефектов – космических струн, предсказанных еще в 1970-х гг. Интерес к данному объекту в космологии основывается на том, что высокоэнергетические расширения Стандартной модели физики частиц предполагают их существование на определенных этапах эволюции Вселенной. Например, один из способов разрешения сильной CP-проблемы в квантовой хромодинамике – объяснение, почему сильные взаимодействия инвариантны относительно зарядового сопряжения C и четности P , – предсказывает частицы под названием аксионы. Наличие этих частиц в ранней Вселенной связано с появлением космических струн. Некоторые модели, объясняющие наличие массы у нейтрино за счет механизма «качелей», сценарии теории великого объединения, такие как модели Пати – Салама и теория струн, также предполагают образование одномерных топологических дефектов [9].

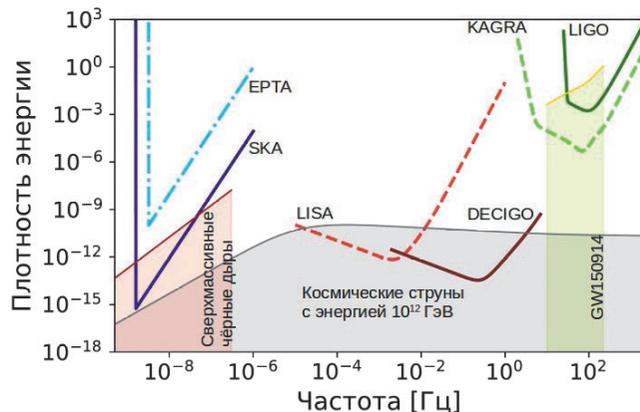


Рис. 3. Графики чувствительности детекторов гравитационного излучения. Наземные установки LIGO и KAGRA ориентированы на гравитационные волны высоких частот. Космические обсерватории LISA и DECIGO покрывают средний диапазон частот, а данные от массивов пульсаров, обозначенные проектами EPTA и SKA, исследуют низкочастотные гравитационные волны. Закрашенными областями отмечены источники гравитационных волн [7]

При построении использовались общедоступные данные, предоставленные платформой Gwplotter: <https://github.com/robsci/Gwplotter>

Таким образом, если космические струны будут обнаружены, они обеспечат грандиозный прорыв в понимании физики высоких энергий и позволят открыть явления, которые имели место во Вселенной. В противном случае это исключит множество моделей физики высоких энергий [8]. Пример теоретического предсказания стохастического гравитационно-волнового фона от космических струн изображен на рис. 3. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Turner M.S. The road to precision cosmology / M.S. Turner // Annu. Rev. Nucl. Part. Sci. 2022. Vol. 72. P. 1–35.
2. Abbott B.P. Properties of the Binary Black Hole Merger GW150914 / LIGO Scientific Collaboration and Virgo Collaboration / B.P. Abbott // Phys. Rev. Lett. 2016. Vol. 116. 241102.
3. The LIGO Scientific Collaboration, Advanced LIGO // Class. Quantum Grav. 2015. Vol. 32. 074001.
4. Agazie G. The NANOGrav 15 yr Data Set: Evidence for a Gravitational-wave Background / G. Agazie et al // ApJL. 2023. Vol. 951. L8.
5. Сажин М.В. Возможности детектирования сверхдлинных гравитационных волн / М.В. Сажин // Астрономический журнал. 1978. Т. 55, №1. С. 65–68.
6. Hellings R.W. Upper limits on the isotropic gravitational radiation background from pulsar timing analysis / R.W. Hellings, G.S. Downs // Astrophys. J. 1983. Vol. 265. P. L39–L42.
7. Moore C.J. Gravitational-wave sensitivity curves / C.J. Moore, R.H. Cole, C.P.L. Berry // Class. Quantum Grav. 2015. Vol. 32. 015014.
8. Caprini C. Cosmological backgrounds of gravitational waves / C. Caprini, D.G. Figueroa // Class. Quantum Grav. 2018. Vol. 35. 163001.
9. Copeland E.J. Cosmic strings and superstrings / E.J. Copeland, T.W.B. Kibble // Proc. R. Soc. 2010. Vol. 466. P. 623–657.

Археология Вселенной: от плазменной эры к микроволновому излучению



Сергей Черкас,
ведущий научный
сотрудник
Института ядерных
проблем БГУ,
кандидат физико-
математических
наук



Владимир Калашников,
научный сотрудник
Норвежского
научно-технического
университета, кандидат
физико-математических
наук

Археологи прилагают огромные усилия, изучая реликвии древнего мира, и задаются вопросом, имеют ли смысл их изыскания, если, согласно известной метафоре, невозможно войти в одну и ту же реку дважды. Кажется, что ответ кроется в понимании того, что будущее, настоящее и прошлое тесно переплетены, объединенные общими идеями или концепциями. В античном мире космос рассматривался как последний абсолют, источник самодостаточности. Следовательно, гармония с ним и его понимание считались ключом к истинному счастью. Однако стоит помнить, что это лишь античная, языческая и дохристианская перспектива, которую не следует воспринимать слишком буквально.

В глубине своей Вселенная складывается из удивительно простых элементов: она есть не что иное, как вспышка плазмы. Занимательно, что подобные явления мы можем воспроизвести и на нашей планете. Так, на *рис. 1* представлен момент, когда пропущенный через две тонкие медные проволоки электрический ток вызывает взрыв. Этот процесс порождает практически чистую медную плазму с температурой около 5000 К, богатую ионами меди различной валентности и электронами.

Величественная эволюция мироздания началась с момента, когда ее температура была невообразимо высока – достигала величины, сопоставимой с массой Планка, оцениваемой по порядку в 10^{19} ГэВ, что эквивалентно примерно 10^{32} К. С течением времени эта цифра снизилась до скромных 3 К реликтового излучения, окутывающего нас сегодня. Отталкива-

ясь от школьных знаний, мы понимаем температуру как меру средней кинетической энергии частиц в состоянии теплового равновесия.

На пороге технологического прогресса стоит пуск ускорителя FCC в 2025 г., обещающего достигнуть энергий в 100 ТэВ, что приблизит нас к пониманию поведения материи при таких экстремальных условиях. Однако важно осознавать, что данные, получаемые в результате столкновений отдельных частиц в ускорителях, не дают полного представления о свойствах плазмы Вселенной в ее ранних периодах, ведь плазма была значительно более плотной, чем условия, воссоздаваемые в лабораториях.

При энергиях в 10^{19} ГэВ мы сталкиваемся с огромным пробелом в знаниях, так как на данном этапе отсутствует теория квантовой гравитации, которая могла бы объяснить физические процессы,

происходящие при подобных космических масштабах энергии. Понимание физических явлений начинает оформляться на уровне температур в 146 ГэВ, соответствующих массе топ-кварка – самой массивной частицы в рамках Стандартной модели физики частиц. Среди других «тяжеловесов» выделяются хиггсовский бозон (с массой 125 ГэВ) и векторные бозоны (80 и 90 ГэВ). Таким образом, в области сотен ГэВ можно предположить, что плазма будет состоять из элементарных частиц Стандартной модели. Впрочем, создать плазму с температурой 146 ГэВ в лабораторных условиях нам вряд ли под силу, поскольку давление в ней при заметной плотности окажется запредельным. Тем не менее, на сегодняшний день в Дубне возводится ускоритель для столкновений тяжелых ионов, включая ядра гольмия и других элементов. В ходе центральных столкновений таких частиц ожидается формирование кварк-глюонной плазмы.

В масштабах Вселенной плазма подобного рода остается скрытой от наблюдений, так как не пропускает фотоны. С падением температуры начинается процесс смещения равновесия в направлении формирования стабильных частиц, что приводит к космологическому нуклеосинтезу. В его результате возникают протоны, дейтерий, гелий и ряд легких элементов. Их конкретное количественное распределение зависит от законов расширения Вселенной и отношения количества барионов к фотонам. До недавнего времени предполагалось, что стандартная

космологическая модель, известная как Λ CDM, адекватно описывает этот процесс расширения. Однако свежие данные, полученные космическим телескопом «Джеймс Уэбб», свидетельствуют о существовании полностью сформированных галактик уже на стадии $z=7$, что ставит под сомнение предпосылки модели Λ CDM о временных рамках формирования галактик.

В *таблице* представлены итоги процесса нуклеосинтеза, основанные на параметрах стандартной космологической модели, а также на одной из альтернативных теорий – модели с замедленным расширением Вселенной, известной как теория доминирования вакуумных флуктуаций (VFD). В рамках последней давление и плотность вакуума квантовых полей играют ключевую роль в определении закона, по которому это происходит.

Было тщательно подобрано количество барионной материи – 0,05 (в единицах критической плотности Вселенной) для модели и 0,87 для VFD, чтобы точно воссоздать наблюдаемое соотношение между гелием и водородом. В рамках стандартной космологической модели сценарии количества дейтерия согласуется с имеющимися данными, однако наблюдается трехкратное избыточное производство лития-7. Модель VFD, в свою очередь, не способна синтезировать дейтерий, однако предсказывает слегка завышенное количество лития, что вплотную приближается к приемлемым значениям.

Телескоп «Джеймс Уэбб», хотя иногда поражает воображение и созданием великолепных снимков, является в первую очередь спектрометром, предназначенным для исследования космоса. Открытие им объектов с повышенным содержанием дейтерия могло бы указать на существование не учтенных космологическими моделями механизмов синтеза данного элемента. Одним из впечатляющих достижений телескопа стало обнаружение воды в газовом облаке Хамелеон I, фотография которого приводится на *рис. 2*. Это облако находится на ранних стадиях звездообразования, ввиду чего предполагается, что кислород, обнаруженный в его составе, имеет космологическое происхождение. Из анализа данных, представленных в *таблице*, становится очевидно, что количество элементов CNO, сформированных на космическом уровне в рамках модели VFD, заметно превышает аналогичные показатели модели Λ CDM. Помимо этого, в других газовых облаках, которые еще не подверглись процессу звездообразования, были обнаружены органические молекулы, что подтвердило предположение о возможности синтеза элементов CNO космологически.

	Λ CDM	VFD
H	0,75	0,75
$Y_p=4Y_{He}$	0,25	0,25
$D/H \times 10^5$	2,6	$<10^{-25}$
${}^3\text{He}/H \times 10^5$	1,1	$<10^{-8}$
$T/H \times 10^8$	7,9	$<10^{-32}$
$({}^7\text{Li} + {}^7\text{Be})/H \times 10^{10}$	5,7	2,1
${}^6\text{Li}/H \times 10^{14}$	1,2	$<10^{-25}$
${}^9\text{Be}/H \times 10^{19}$	9,2	$<10^{-34}$
${}^{10}\text{B}/H \times 10^{21}$	2,9	$<10^{-8}$
${}^{11}\text{B}/H \times 10^{16}$	3,3	$<10^{-10}$
$\text{CNO}/H \times 10^{16}$	8,0	$5,6 \times 10^7$

Таблица. Результаты моделирования распространенности элементов, синтезированных в результате космологического нуклеосинтеза, для Λ CDM модели при количестве барионной материи $\Omega_b=0,05$ и VFD модели при $\Omega_b=0,87$. Величина Ω_b представляет собой отношение плотности барионной материи к критической плотности материи во Вселенной. Распространенности всех элементов, кроме водорода и гелия даны по отношению к водороду.

Рис. 1. Поздняя стадия электрического взрыва двух медных проволочек



Рис. 2. Молекулярное облако Хамелеон I, в котором телескоп «Джеймс Уэбб», обнаружил молекулы воды. Фото: собственность НАСА



Рис. 3. Медная копия самой ранней скульптуры лошади. Оригинал, сделанный около 30 тыс. лет назад из кости мамонта, был найден в Баден-Вюртемберге, Германия



Величественная глава космической истории открывается перед нами через изучение микроволнового реликтового излучения – света из самой далекой точки, доступной нашему взору, от поверхности последнего рассеяния. Он начал свой путь к нам в момент, когда, охладившись до примерно 3000 К, в сочетании с рекомбинацией водорода, Вселенная стала прозрачной, позволяя фотонам свободно путешествовать сквозь пространство и время. Измерение расстояния до поверхности последнего рассеяния предпочтительно выражать через красное смещение z – загадочный показатель, который рассказывает нам о древности областей пространства-времени, через которые прошел свет: чем выше красное смещение, тем старше исследуемая область. Анализ флуктуаций анизотропии микроволнового излучения раскрывает картину акустических пиков, архитектурных величин космоса, угловой размер которых оценивается примерно в полградуса. Эти пики – свидетельства колебаний плотности в ранней Вселенной, создавшие структуру космоса, в котором мы существуем.

В зарисовке космической Одиссеи, с одной стороны, есть возможность измерить угол и раскрыть тайну величины характерной неоднородности в тот момент времени, когда Вселенная переживала эпоху рекомбинации; с другой – открывается перспектива исследовать масштабы мироздания, анализируя массивы распределения космических тел одного рода, таких как каталоги галактик, и из этих глубин выта-

щить ключ к пониманию масштабов характерной неоднородности. Принято верить, что они должны гармонизировать друг с другом. И в реалиях стандартной космологической модели они действительно находят свое взаимное отражение.

Однако в теории медленного расширения Вселенной горизонт на заре рекомбинации предстает чрезвычайно обширным и не может служить мериллом для измерений. В то же время толщина поверхности последнего рассеяния, характеризующая время рекомбинации, оказывается ключом к пониманию углового масштаба флуктуаций реликтового микроволнового излучения, предоставляя необходимую меру для их оценки. И здесь вступает в игру дуализм масштабов, ведь в эпоху рекомбинации существует двойственность скоростей распространения волн в космической плазме. Одна, более быстрая, скользит по плазме, в то время как вторая, медленная, проходя по нейтральному водороду, раскрывает перед нами еще один уровень понимания структуры макрокосмоса.

В наш век, наполненный многочисленными открытиями, Вселенная предстает загадочной книгой, полной тайн. Это напоминает образ летящей лошади с ее изяществом, лаконичностью и внушительной древностью в 40 тыс. лет – великолепная метафора для понимания мироздания. С одной стороны, это воплощение материального мира, основанного на заметных и знакомых нам образах, с другой – оно переносит нас за пределы обыденного, напоминая, что даже отсутствие видимых средств для полета, таких как крылья, не является препятствием для стремления вперед через время и пространство. Так и Вселенная, переполненная необъясненными явлениями, продолжает вдохновлять нас на поиск ответов, открывая новые горизонты для размышлений и исследований. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Лосев А.Ф. Античный космос и современная наука / А.Ф. Лосев. – Москва, 2023.
2. A.E. Barysevich, S.L. Cherkas. Testing the equation of state and electrical conductivity of copper by the electrical wire explosion in air: experiment and magnetohydrodynamic simulation // *Physics of Plasmas*. 2011. Vol. 18, №5, P. 052703.
3. B.S. Haridasu, S.L. Cherkas, V.L. Kalashnikov. Reference level of the vacuum energy density of the Universe and astrophysical data // *Fortschritte der Physik*. 2020. Vol. 68, №7, P. 2000047.
4. S.L. Cherkas, V.L. Kalashnikov. AEther as an Inevitable Consequence of Quantum Gravity // *Universe*. 2022. №8(12). P. 626.

Кривизна пространства-времени: о чем говорят изображения черных дыр



Станислав Комаров,
доцент кафедры
теоретической физики
и астрофизики БГУ,
кандидат физико-
математических наук

В физике выделяют четыре принципиально различных фундаментальных взаимодействия: электромагнитное, сильное, слабое и гравитационное. С первым все мы знакомы по его проявлению при применении постоянных магнитов, а также при касании наэлектризованных тканей. Оно лежит в основе принципа действия всех электрических приборов, современных компьютеров, смартфонов и т.д. и наиболее изучено как с теоретической, так и с практической точек зрения. Сильное взаимодействие играет основную роль в ядерных реакциях, сильное и слабое – определяют различные явления в мире элементарных частиц, хотя пока не нашли широкого применения. Тем не менее ученые установили, что эти три вида взаимодействий – электромагнитное, сильное и слабое – имеют очень сходные теоретические описания, кроме того, открыты их элементарные частицы-переносчики.

Иначе обстоит дело с гравитацией: как оказалось, для ее изучения необходимы несколько иные подходы. Если с явлениями, вызванными электромагнитным взаимодействием, мы сталкиваемся в основном при использовании техники, то с гравитацией, без преувеличения можно сказать – непрерывно. Не удивительно, что исторически первой была попытка разработки теории именно гравитационного взаимодействия (И. Ньютон, 1687 г.), а только затем электромагнитного (Дж. Кл. Максвелл, 1864 г.), слабого и сильного (вторая половина XX в). С развитием всех четырех теорий стало ясно, что наше понимание гравитационного взаимодействия не вписывается в общую схему. Переломным моментом в его понимании послужило появление общей теории относительности (А. Эйнштейн, 1915 г.), которая до настоящего времени остается общепризнанной среди ученых всего мира.

При ее создании ученый исходил из принципиально иных соображений в отношении природы гравитационного взаимодействия,

нежели тех, которые привели к созданию теории электромагнетизма. Как известно из курса физики, все тела падают в гравитационном поле Земли с одинаковым ускорением, а следовательно, при равных начальных условиях описывают и одинаковые траектории. Здесь, правда, нужно еще предположить отсутствие сопротивления воздуха, поэтому на практике универсальность ускорений хорошо выполняется, например, для планет и звезд в космическом пространстве. Из указанного свойства гравитации также вытекает, что гравитационное поле можно исключить, по крайней мере локально, с помощью ускоренной системы отсчета. Последним обстоятельством пользуются, например, при проведении так называемых параболических полетов. Самолет в этом случае направляется по определенным способом рассчитанной траектории (параболе) таким образом, что люди на борту находятся в состоянии невесомости.

Данный принцип (эквивалентности эффекта ускорения системы отсчета, с одной стороны, и действия на тела гравитационного поля – с другой) А. Эйнштейн и взял в качестве отправного пункта своей теории [1]. Рассмотрим гравитационное поле, создаваемое планетой или звездой. Хорошо известно, что его действие уменьшается по мере удаления от источника. Таким образом, А. Эйнштейн пришел к выводу, что как величина масштабов всех расстояний, так и скорость хода часов будут зависеть от рассматриваемой точки пространства [1]. Этот постулат приводит к необходимости описывать данное явление при помощи неевклидовой геометрии. Остановимся на этом подробнее.

Евклидова геометрия, сформулированная в III в. до н.э., на протяжении более 2 тыс. лет считалась незыблемой математической теорией. Но все поменялось, когда в 1826 г. российский математик Н.И. Лобачевский представил в Казанском университете доклад о неевклидовой геометрии и показал ограниченность построений Евклида [2]. Следует сказать, что параллельно с Лобачевским сходной темой занимался и великий немецкий математик К.Ф. Гаусс, а также венгерский математик Я. Больяй. Они пришли приблизительно к тем же результатам, что и Лобачевский, однако К.Ф. Гаусс не решился опубликовать их при жизни, не сделал этого и Больяй [2]. Основная идея неевклидовых геометрий состоит в обобщении исходных аксиом, принятых Евклидом. Для иллюстрации их свойств на плоскости обычно переходят от плоскости к некоторой искривленной поверхности, которая допускает альтернативные определения прямых, параллельных прямых и т.д. Для наших целей будет удобнее воспользоваться мысленным примером, который придумал А. Пуанкаре и изложил в книге «Наука и гипотеза» [3].

Он предложил рассмотреть изолированную планету, у которой имеется очень горячее ядро с температурой T , при движении к поверхности планеты эта температура убывает до значения t (рис. 1).

Необходимо предположить, что в недрах этой планеты обитают некоторые разумные существа, а у всех веществ, имеющих на ней, один и тот же коэффициент теплового расширения. Как известно, при повышении температуры все тела увеличиваются в размерах, а коэффициент теплового расширения показывает количествен-

ную меру этого увеличения. Таким образом, наделив точки пространства планеты различной температурой, можно как бы моделировать изменение масштаба расстояний от точки к точке, о котором писал А. Эйнштейн. Заметим сразу, что если эти существа не будут передвигаться на большие расстояния внутри планеты, а будут жить, например, в одном «городе», то они могут и не заметить эффекта изменения температуры вовсе, если поселение достаточно мало. Ведь линейки, которыми они будут измерять тела в лабораториях и на производстве, тоже будут изменять свою длину в таком же отношении, как и измеряемые тела (здесь мы сознательно пока не говорим о возможных оптических методах измерения длин). При этом они могут создать довольно развитую науку, хотя и не будут иметь представления о температуре (от нее ничего не зависит). В этом аналогия с гравитацией, которую локально (например, в кабине самолета, совершающего «параболический полет») можно исключить из рассмотрения.

Однако если существа, проживающие в недрах планеты, будут достаточно любопытны, то отправят научную экспедицию к ее поверхности и по пути могут измерить ее радиус, начав движение непосредственно от ядра



Рис. 1. Мир Пуанкаре

(пренебрежем его размером). Для этого им нужно будет последовательно прикладывать линейку единичной длины (рис. 1). Выйдя на поверхность, они аналогичным образом измерят длину большой окружности планеты и определят величину одной из важнейших констант математики – числа π . Как известно, для этого необходимо длину измеренной окружности l разделить на удвоенный радиус r : $\pi=l/2r$. Однако после проведения вычислений они убедятся, что его величина не совпадает с известным значением 3,14.

Почему так произошло? Так как длина единичной линейки не фиксировалась специальным образом, то для простоты следует положить ее равной такой величине, чтобы на поверхности планеты она была равна 1 м. Следовательно, измеренная на поверхности окружность планеты будет совпадать с ее истинной длиной, выраженной в метрах. Однако вблизи центра длина линейки увеличится вследствие большей температуры. Поэтому измеренный радиус (количество приложенных подряд линеек) окажется меньше, нежели его истинное значение в метрах, а $\pi > 3,14$. И этот ответ будет противоречить результату «городских» математиков, так как локально геометрия описанных существ будет совпадать с нашей.

Таким образом, можно сделать вывод о том, что в неевклидовой геометрии в общем случае не бывает подобных фигур. Именно это имел в виду К.Ф. Гаусс, когда пытался обнаружить неевклидовость нашего трехмерного мира, проводя измерения углов треугольника, образованного тремя альпийскими вершинами – Брокен, Хорхе Хаген и Инзельберг. Как известно, даже на указанных масштабах его эксперимент не дал положительного результата [2].

Вернемся снова к гравитационному полю. Понятно, что приведенный выше пример иллюстрирует лишь некоторые его эффекты, а еще одним отличием, согласно теории А. Эйнштейна, значится то, что неевклидовым здесь является не только пространство, а пространство-время, образующее 4-мерный континуум. Тем не менее можно понять, что локально в гравитационном поле на тела не действуют никакие силы, связанные с этим полем. Например, локально все планеты Солнечной системы движутся по прямой, хотя на больших масштабах пространства и времени мы видим, что они описывают практически замкнутые траектории. Для более полного сходства с гравитацией можно рассмотреть и электромагнитные явления в рамках модели А. Пуанкаре. При этом нужно допустить, что все материалы на планете таковы, что скорость света в них уменьшается определенным образом с понижением температуры. Это необходимо для того, чтобы результаты измерений расстояний между двумя точками с помощью линеек, длины которых зависят от температуры, совпадали с данными оптических дальномеров, принцип действия которых основан на регистрации времени распространения света между этими точками. Физически это может быть выполнено с помощью установления показателя преломления вещества, зависящего от температуры. Но в среде с неоднородным показателем преломления лучи света имеют искривленную форму. Следовательно, рассмотренная планета будет искривлять лучи света, которые проходят сквозь нее. Например, подобное явление ответственно за появление миражей в пустыне, где лучи света пре-

ломляются в неоднородно нагретом воздухе, имеющем вследствие этого неоднородное распределение показателей преломления. Аналогичным образом проявляет себя и гравитационное поле: траектория распространения света, проходящая вблизи массивного объекта, испытывает отклонение от прямолинейного распространения. Этот эффект впервые был измерен экспедициями Лондонского королевского общества и Королевского астрономического общества под руководством астрономов Эддингтона и Кромелина. Они наблюдали изменение видимого положения звезд при прохождении рядом с ними солнечного диска в момент солнечного затмения 29 мая 1919 г. Измерения полностью подтвердили выводы общей теории относительности [1, 4].

Изображения черных дыр

Рассмотренная аналогия между свойствами неевклидовых геометрий и гравитационным полем и была использована А. Эйнштейном при создании общей теории относительности. Как уже отмечалось, он пошел еще дальше – с помощью неевклидовой геометрии описывал не только пространство, но пространственно-временной континуум в совокупности. Таким образом он пришел к довольно элегантной теории гравитации, предсказывающей в то же время и удивительные свойства пространства-времени на большом масштабе. Однако, как и любая другая физическая теория, она требует подтверждения. Одно из них связано с наблюдением отклонения лучей света в гравитационном поле массивного объекта. Для дальнейших доказательств необходимо было искать

новые эффекты. Следующий шаг в этом направлении был сделан К. Шварцшильдом, уже известным в то время астрономом, интересующимся работами Эйнштейна, в 1916 г. (всего через год после формулировки общей теории относительности). Изучая уравнения Эйнштейна, ученый получил новое их решение. Сначала Шварцшильд считал, что применимость его решения ограничивается гравитационным полем сферически-симметричных тел, таких как звезды и планеты. Однако затем стало ясно, что оно имеет более широкое применение – описывает особые объекты, гравитация которых столь велика, что даже излучаемый в непосредственной близости от них свет не может покинуть их поверхности. Считается, что термин «черная дыра», обозначающий такие объекты, впервые был публично употреблен физиком-теоретиком Дж.А. Уилером в 1967 г.

Наблюдательные подтверждения существования черных дыр стали появляться в 60-х гг. прошлого века, когда астрофизики начали исследовать рентгеновское и оптическое излучение от источников [5]. Пионерами в этой области были белорусский физик Я.Б. Зельдович [6] и американский астрофизик Э.Э. Солпитер (работавшие параллельно).

Описанные открытия лишь косвенно подтверждали следствия из теории Эйнштейна. Они потребовали долгой цепочки рассуждений и математических расчетов, прежде чем удалось понять, что излучающим объектом действительно является черная дыра, а не какой-то иной вид небесных тел, таких как звезды или галактики. Поэтому важно было получить прямое доказательство существования черной дыры, увидев ее непосредственно. Такую воз-

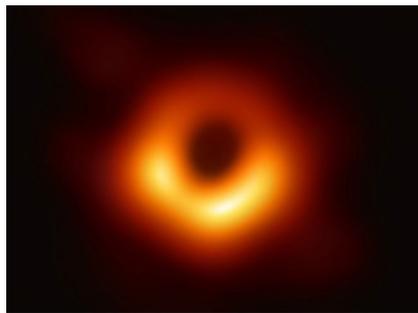


Рис. 2. Изображение сверхмассивной черной дыры в галактике M87, полученное с помощью EHT

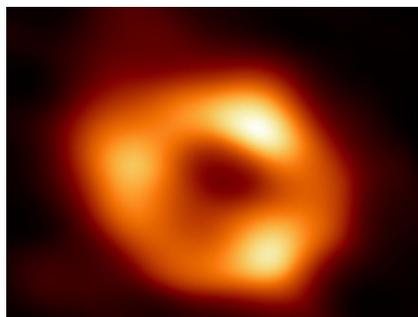


Рис. 3. Изображение сверхмассивной черной дыры Sagittarius A* (Sgr A*), находящейся в центре нашей галактики, полученное с помощью EHT

можность предоставили астрофизики из коллаборации Event Horizon Telescope (EHT), в 2019 г. С помощью специальной сети телескопов – интерферометра проводились наблюдения за сверхмассивной черной дырой, расположенной в галактике M87 [7, 8], находящейся на расстоянии около 50 млн световых лет от Земли. Такое большое расстояние до объекта наблюдения не позволило ученым сразу сформировать изображение черной дыры. Для этого понадобилось аккумулировать данные наблюдений в течение нескольких лет (2017–2019 гг.). Полученное таким образом изображение представлено на рис. 2.

Важную роль в подобных астрофизических наблюдениях играет выбор области спектра электромагнитного излу-

чения, в которой производится наблюдение.

Как правило, рабочий диапазон спектров телескопов ограничен многими факторами. Например, электромагнитное излучение на длинных волнах сильно искажается плазмой и межзвездной средой. Невозможность использования слишком коротких волн в режиме интерферометра вызвана техническими сложностями. Event Horizon Telescope представляет собой интерферометр со сверхдлинной базой – сложную систему из телескопов, находящихся в различных точках земного шара (в Чили, на Гавайях (США), в Мексике, Испании, Аризоне и Калифорнии (США), Гренландии, Франции и в Антарктиде) [8]. Расстояние между наиболее удаленными телескопами такой системы и называют базой интерферометра, а ее разрешающая способность (минимальное угловое расстояние, на котором два источника света видны как отдельные) равна разрешающей способности одного телескопа, диаметр объектива которого совпадает с размером базы (то есть в нашем случае – диаметром Земли). Однако такая техника требует поддержания небольшого уровня шумов, который возрастает с уменьшением длины волны используемой части спектра [7]. Анализ всех указанных причин привел инженеров коллаборации EHT к решению использовать для наблюдений длину волны 1,3 мм, что, конечно же, не входит в диапазон оптического излучения. Поэтому результирующую картинку пришлось окрасить уже в произвольные цвета, придающие ей максимальный эффект.

Изображение сверхмассивной черной дыры в центре нашей галактики было получено той же коллаборацией в 2022 г. [9] (рис. 3).

Следует отметить, что альтернативный подход к построению интерферометра со сверхдлинной базой реализован в рамках международного проекта «Радио Астрон» Российской академией наук (АКЦ ФИАН) [10–12] по принципу «космос – Земля»: один из радиотелескопов находится на искусственном спутнике «Спектр-Р», на высокой орбите (апогей – около 300 тыс. км), а другие – на Земле. Таким образом, длина базы становится на порядок больше. Однако, в отличие от проекта Event Horizon Telescope, на «РадиоАстроне» используются длины волн сантиметрового и дециметрового диапазонов. Оказывается, разрешающие способности телескопов обоих проектов примерно сопоставимы. Но волны сантиметрового диапазона уже испытывают гораздо большие искажения при проникновении сквозь плазму, окружающую компактные астрофизические объекты. В этом причина того, что черную дыру удалось увидеть лишь коллаборации ЕНТ. «РадиоАстрон» же выполнял задачи изучения пульсаров, крупных образований вблизи сверхмассивных черных дыр и др. [10]. В ближайшее время планируется начало его нового проекта «Миллиметр», где тоже предполагается использование интерферометра космос – Земля, однако уже в миллиметровом и субмиллиметровом диапазонах [10, 12]. В случае успеха миссии можно будет увидеть много новых изображений черных дыр, более содержательных и важных с научной точки зрения.

Наиболее важным элементом на подобных изображениях является так называемая тень черной дыры. Именно эта область на фоне светящейся плазмы, обычно окружающей черные дыры, и

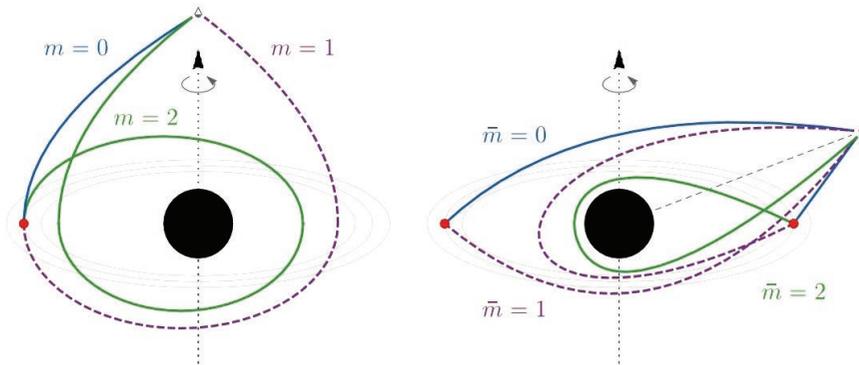


Рис. 4. Схематическое изображение различных типов траекторий луча света в окрестности черной дыры [13]

говорит нам о ее существовании в центре. Форма тени формируется вследствие характерного искривления траекторий лучей света в сильном гравитационном поле (рис. 4). Эта особенность и позволяет проводить проверку теорий гравитации по наблюдательным данным.

Так как общая теория относительности связывает гравитацию с геометрией пространства-времени, то массу черной дыры можно определить двумя способами. Один заключается в ее определении по размеру тени (геометрия), а другой – по динамике плазмы, движущейся в окрестности черной дыры (поле гравитации) [7]. Соответствующие расчеты показали согласованность наблюдаемых данных с общей теорией относительности.

Кроме того, анализ тени позволил сделать и другие важные выводы.

Например, черная дыра является не единственной гипотезой относительно компактного объекта в M87. Существует еще несколько других, маловероятных, но возможных гипотез. Так, наблюдения тени M87 позволили исключить из числа потенциальных кандидатов такие экзотические объекты, как «голые сингулярности» и кротовые норы [7].

Более того, теоретиками всего мира разрабатываются гипотезы, обобщающие теорию гравитации Эйнштейна и в основном соответствующие ее представлениям. Однако технически они могут формулироваться с помощью несколько иных математических конструкций (как правило, более сложных). Так как при использовании той или иной теории гравитации форма тени может несколько отличаться, то по ее изображению можно сделать вывод о том, какие из теорий ошибочны. На данном этапе решающая способность интерферометров недостаточно велика для того, чтобы делать выводы о форме тени. Однако с появлением новых приборов, таких как «Миллиметр», эта задача станет вполне реальной [14].

Таким образом, на примере одного из астрофизических открытий последнего времени видно, как получение и исследование изображения черной дыры привело к решению сразу нескольких физических и технических задач. К ним можно отнести разработку и создание принципиально новых измерительных приборов (интерферометров со сверхдлинной базой, работающих в диапазоне коротких волн), исследование космических объ-

ектов как в нашей галактике, так и за ее пределами, подтверждение идей Эйнштейна о связи геометрии и гравитации. Не следует сомневаться, что в будущем это приведет к лучшему пониманию нашего мира и созданию новых, еще более впечатляющих технологий. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Эйнштейн А. Теория относительности. Избранные работы. – Ижевск, 2000.
2. Чистяков В.Д. Беседы о геометрии Лобачевского. – Минск, 1973.
3. Пуанкаре А. О науке: Пер. с французского / под ред. Л.С. Понтрягина. – 2-е изд. стер. – М., 1990.
4. Мизнер Ч., Торн К., Уилер Дж. Гравитация: в 3-х т., пер. с англ. М.М. Баско / под ред. В.Б. Брагинского и И.Д. Новикова. – М., 1977.
5. Зельдович Я.Б., Новиков И.Д. «Черные дыры» во Вселенной // Природа. 1972. №4. С. 28–32.
6. Зельдович Я.Б. Судьба звезды и выделение гравитационной энергии при аккреции. Докл. АН СССР. – 1964. Т. 155, №1. С. 67–69.
7. Akiyama [et. al.]. (The Event Horizon Telescope Collaboration). First M87 Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole // The Astrophysical Journal Letters. 2019. Vol. 875:L1. 17.
8. Akiyama [et. al.]. (The Event Horizon Telescope Collaboration). First M87 Event Horizon Telescope Results. II. Array and Instrumentation // The Astrophysical Journal Letters. 2019. Vol. 875:L2. P. 28.
9. Akiyama [et. al.]. (The Event Horizon Telescope Collaboration). First Sagittarius A* Event Horizon Telescope Results. I. The Shadow of the Supermassive Black Hole in the Center of the Milky Way // The Astrophysical Journal Letters. 2022. Vol. 930:L12. P. 21.
10. Кардашев Н.С. «Радиоастрон» – радиотелескоп, много больший Земли. Научная программа // Успехи физических наук. 2009. Т. 179, №11. С. 1191–1202.
11. Кардашев Н.С. [и др.]. Технические решения и практика эксплуатации приборного комплекса космического телескопа наземно-космического радиоинтерферометра «РадиоАстрон» // Труды института прикладной астрономии РАН. 2018. Вып. 47. С. 31–37.
12. Астрокосмический центр ФИАН // <https://millimetron.ru>.
13. Gralla S., Lupsasca A. Lensing by Kerr black holes // Phys. Rev. D. // 2020. Vol. 101. 044031.
14. Зенин О.И., Алексеев С.О., Прокопов В.А. Тени черных дыр как источник проверки расширенных теорий гравитации // Пространство, время и фундаментальные взаимодействия. 2023. Вып. 1. С. 65–70.

Гамма-всплески — ярчайшие вспышки во Вселенной



Евгений Деришев,
старший научный
сотрудник Института
прикладной физики
им. А.В. Гапонова-Грехова РАН,
кандидат физико-
математических наук

Детективная история. Открытие гамма-всплесков

Истории астрономических открытий складывались по-разному. Некоторые из них, надев изрядно шуму, впоследствии были опровергнуты. Так случилось с «открытием» каналов на Марсе итальянским астрономом Джованни Скиапарелли. Увы, длинные и почти прямые протоки на поверхности Красной планеты оказались вовсе не свидетельством трудолюбия марсиан, а всего лишь результатом несовершенства телескопов того времени.

Другие открытия, казавшиеся поначалу совершенно невероятными, быстро получали объяснение в рамках уже известного. Так произошло с пульсарами. Импульсы их радиоизлучения повторяются с совершенно одинаковыми интервалами по времени (выражение «как по часам» здесь будет преуменьшением – пульсары «тикают»

гораздо точнее обычных хронометров). Строго периодическое их мигание сначала приняли за сбой в работе записывающей аппаратуры, а затем и вовсе сочли сигналами от далеких инопланетных цивилизаций. Однако вскоре появилось прозаичное объяснение загадки. Пульсары оказались нейтронными звездами, которые испускают мощное радиоизлучение со своих магнитных полюсов. Почти идеальная периодичность сигналов связана с вращением нейтронной звезды, чьи размеры настолько малы, что позволяют ей совершать десятки оборотов в секунду.

Случались и заранее предсказанные открытия. Хрестоматийным примером служит история Нептуна. Изучая движение Урана, самой далекой из известных на тот момент планет, сотрудники Парижской (Урбен Леверье) и Кембриджской (Джон Адамс) обсерваторий независимо друг от друга обнаружили отклонения его фактической орбиты от расчетной, объяснив их притяжением еще более далекой и пока не обнаруженной планеты. Также независимо они вычислили ее приблизительное положение на небе, где Нептун вскоре и был найден.

В редких случаях бывает так, что открытие, будучи многократно подтвержденным, ждет своего объяснения долгие десятилетия. Именно такая судьба ждала гамма-всплески. История их открытия могла бы послужить сюжетом для детективного рассказа. Она началась с запуска серии американских спутников военного назначения Vela, которые должны были выявлять проводимые в СССР ядерные испытания и изучать их последствия по сопутству-

ющему ядерным взрывам гамма-излучению атмосферы. Начиная с 1967 г., спутники фиксировали вспышки предположительно происходящего от земной атмосферы гамма-излучения длительностью от единиц до десятков секунд. Однако они не были похожи на ожидаемые последствия ядерных взрывов и не сопровождалась сейсмическими сигналами, к тому же не было полной уверенности, что это не ложные срабатывания детекторов. Так что обратили на них внимание только в 1969 г. Поскольку основная задача спутников была другой, изучение загадочных вспышек продолжалось неспешно. Выяснилось, что они вовсе не земного происхождения, а космического, но их источники не связаны и с Солнцем. Первое сообщение о космических гамма-всплесках (так было названо обнаруженное явление) в научном журнале появилось лишь спустя несколько лет после их открытия, в 1973 г. К тому времени уже существовали независимые наблюдения гамма-всплесков другими спутниками, но открытие оставалось неполноценным. Требовалось связать явление с какими-нибудь известными, желательно видимыми в обычный телескоп объектами. Дело с таким отождествлением не заладилось. Во-первых, точность определения направления на источник для детекторов гамма-излучения невелика – даже сейчас она составляет доли градуса, а в то время речь шла о нескольких градусах. В области неба такого размера телескоп различает миллионы объектов, причем очевидных кандидатов на роль источников гамма-всплесков не было. Во-вторых, гамма-вспле-

ски не повторяются. Уточнить положение источников с помощью многочисленных наблюдений не представлялось возможным, поскольку каждый раз всплеск приходит с иного направления. Ясно было только то, что источники не слишком велики по космическим меркам, не больше нескольких миллионов километров. Если бы они были большего размера, то не смогли бы включиться и погаснуть за нужное время, даже если бы все изменения в них происходили со скоростью света.

В 70-е гг. прошлого века детекторы гамма-излучения начали устанавливать на межпланетные космические аппараты. Так появилась возможность измерять задержку прихода короткого сигнала на удаленные друг от друга спутники, чтобы с помощью триангуляции определить угол между соединяющей их линией и направлением на источник. Наблюдение на двух спутниках дает узкий круг на небесной сфере, на трех – пересечение таких кругов, образующее небольшую область, гораздо меньшую по размерам, чем погрешность каждого прибора по отдельности. Несколько раз складывались удачные обстоятельства, когда наблюдения велись сразу тремя или даже четырьмя спутниками, но к разгадке происхождения гамма-всплесков это не привело. В выделенном сегменте на небе ярких в оптическом диапазоне объектов не было вообще, а тусклых – слишком много. Интерес к неподатливой загадке рос, и в 1991 г. на орбиту вывели первый специализированный прибор BATSE для поиска гамма-всплесков. Их зарегистрировали сотни за годы его работы. Большая статистика принесла с собой

новые сюрпризы. Выяснилось, что есть два типа гамма-всплесков – длинные, продолжительностью десятки секунд (их большинство), и короткие, длящиеся доли секунды. Вопреки ожиданиям, даже самые слабые, а значит наиболее удаленные всплески были распределены на небесной сфере изотропно, то есть в любом направлении их число одинаково. Звезды распределены иначе. Самые тусклые из них образуют на небе полосу – Млечный Путь. Это следствие дискообразной формы нашей галактики – при взгляде вдоль диска видно больше звезд (правда, почти все они далекие).

То обстоятельство, что источники гамма-всплесков не концентрируются к плоскости галактики, сразу выдвинуло на первый план гипотезы об их внегалактической природе, которые до того момента считались экзотической гимнастикой для ума. И в самом деле, модели, помещавшие источники в далекие галактики, должны были как-то обеспечить яркость, по меньшей мере, в миллионы раз больше, чем у любой сверхновой звезды. Напомним, что размер источника при этом не превосходит размеров обычной звезды. С другой стороны, никакая звезда не могла бы пережить взрыва подобной силы, а это естественным образом объясняло отсутствие повторяющихся всплесков. Предположение о том, что источники коротких и длинных всплесков могут быть разными, давало дополнительную работу теоретикам.

В 1996 г. начал работу спутник ВерроSAX. Помимо широкоугольного детектора, удобного для обнаружения непредсказуемых гамма-всплесков, он имел на борту и рентгеновский теле-

скоп с малым полем зрения, но хорошим (по сравнению с широкоугольными гамма-детекторами) угловым разрешением. На следующий год произошел гамма-всплеск GRB 970228, который по счастливому стечению обстоятельств попал не только в поле зрения широкоугольного детектора, но и «зоркого» телескопа. Наконец-то положение источника удалось определить с точностью лишь немногим хуже остроты человеческого зрения. Подключившиеся к наблюдениям наземные оптические телескопы обнаружили рядом с указанным местом затухающий точечный источник. Поблизости не было ничего другого, что можно было бы связать с гамма-всплеском. Некоторое время спустя на месте потерявшего яркость источника стала видна далекая галактика, находящаяся на расстоянии 8 млрд световых лет. Таким образом, положение источников гамма-всплесков было установлено, и их открытие получило завершенность спустя 30 лет после первого наблюдения. Оставалось только определить, что именно и каким образом порождает это явление.

Что такое гамма-всплески

Гамма-всплески – не просто ярчайшие события во Вселенной. В видимой ее части самые мощные из них на пике своей яркости затмевают все остальное, вместе взятое. Совсем не просто уместить такую прорву энергии всего лишь в объеме средних размеров звезды. Теоретически это возможно, но плотность фотонов окажется настолько велика, что они будут сталкиваться друг с другом, мешая излучению выхо-

дить из источника. Часто сталкивающиеся фотоны обязательно термализуются, то есть спектр излучения станет похож на таковой у нагретого черного тела, который описывается формулой Планка и вовсе не похож на спектр гамма-всплесков. У проблемы компактности нет иного решения, кроме как уменьшить плотность излучения в источнике (одновременно увеличивая его размер), чтобы фотоны выходили свободно.

Увеличенный размер источника как будто находится в противоречии с ограничениями, полученными из быстрой переменности. Спасают релятивистские (то есть связанные с теорией относительности) эффекты. При движении в сторону наблюдателя со скоростью, близкой к скорости света, источник будет казаться более кратковременным и менее вытянутым, чем он есть на самом деле. Сила релятивистских эффектов тем больше, чем ближе скорость движения к скорости света. Чтобы наиболее высокоэнергичные из наблюдаемых гамма-квантов имели возможность свободно выходить из источника, его направленная скорость должна отличаться от скорости света на величину меньше одной тысячной доли процента. Источники гамма-всплесков оказались держателями рекорда скорости. Более быстрого движения во Вселенной не найти, если не брать в расчет микроскопические частицы субатомного размера.

Если бы источники гамма-всплесков светили одинаково во все стороны, то для создания самых сильных из них потребовалось бы полностью превратить в энергию излучения звезду с массой почти 10 масс Солнца (вспомним знаменитую формулу

Эйнштейна об эквивалентности массы и энергии). Самый эффективный из известных способов преобразования массы в энергию – это высвобождение гравитационной энергии при падении вещества на черную дыру. Эффективность при этом может достигать 10%. Термоядерные реакции (из тех, что могут протекать достаточно быстро) едва дотягивают до эффективности в 0,1%. Получается, что даже самой массивной звезды может не хватить для обеспечения нужной энергии. А ведь ее еще нужно преобразовать именно в гамма-излучение с неизвестной, но скорее всего не слишком высокой эффективностью. Единственный возможный вывод: источники гамма-всплесков представляют собой очень узкие струи быстро движущегося вещества (джеты), которые светят только в направлении своего движения. По крайней мере, некоторые гамма-всплески формируются джетами с углом раскрытия в доли градуса (об их ширине в ряде случаев можно судить по особенностям кривой блеска). Судя по всему, источники гамма-всплесков можно назвать самыми узкими струями естественного происхождения. Луч прожектора расходится сильнее, чем их джеты.

Если гамма-всплески светят в узком луче, то они происходят гораздо чаще, чем можно судить по наблюдениям. Большинство из них направлены в сторону от нас, потому такие явления невидимы, и в этом случае не так уж и редки. Частота наблюдаемых событий оценивается в 2–3 в день во всей наблюдаемой Вселенной, то есть примерно раз в 10 млн лет в одной галактике. Частота невидимых может оказаться в 10–100 тыс. раз больше,

и тогда она сравнима с частотой появления сверхновых звезд.

Чрезвычайно быстрое выделение энергии в источнике гамма-всплеска, по сути, является взрывом, который запускает очень сильную ударную волну в окружающий межзвездный газ. Вещество на фронте такой ударной волны разогревается до огромных температур, а часть электронов приобретает энергию намного больше средней. Они эффективно излучают за счет синхротронного и обратного комптоновского механизма, порождая радио-, оптическое, рентгеновское и гамма-излучение. Затухающее свечение постепенно тормозящейся ударной волны продолжается еще долгое время (недели и даже месяцы) после окончания гамма-всплеска. Оно получило название послесвечения. Это самое широкополосное явление во Вселенной, наблюдаемое в диапазоне частот, который тянется, по меньшей мере, на 18 порядков по частоте, от радиодиапазона до крайне жесткого гамма-излучения с энергией фотонов в десятки ТэВ. Сколько-нибудь серьезную конкуренцию ему могут составить разве что активные ядра галактик.

Гамма-всплески – весьма необычное явление, которое раз за разом преподносило сюрпризы наблюдателям и загадки теоретикам. Тем не менее все справились со своей работой, и сейчас существуют общепринятые теоретические модели. Источниками длинных всплесков выступают довольно редкие сверхновые типа Ibc – взрывы массивных звезд Вольфа – Райе, которые к концу своей жизни полностью потеряли водородную оболочку и даже наружный гелиевый слой ядра. Остав-

шееся углеродно-кислородное ядро может иметь быстрое вращение. Когда начинается взрыв сверхновой звезды, то есть коллапс центральной области в черную дыру, быстро вращающееся вещество задерживается на близкой к черной дыре орбите. Там его энергия посредством очень сильного магнитного поля передается в два ускоряющихся вдоль оси черной дыры джета. Они постепенно отодвигают вещество звезды со своего пути и спустя некоторое время достигают поверхности, после чего можно увидеть вызванный излучением джетов гамма-всплеск. Пока в этом сценарии понятны не все детали, но в целом он подтверждается наблюдениями. В частности, в оптическом послесвечении длинных гамма-всплесков обнаруживается подъем яркости, который по форме и спектру похож на сверхновую.

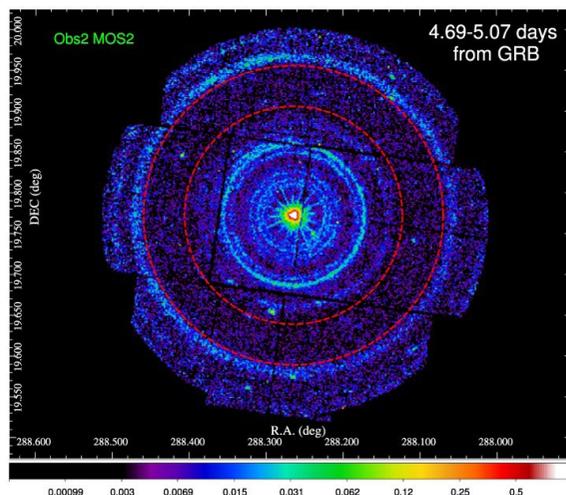
Короткие гамма-всплески возникают при слиянии двойных нейтронных звезд. Представление об этом как о новом классе взрывающихся объектов обрело популярность после открытия в 1974 г. пульсара в системе из двух нейтронных звезд. Уже упоминавшаяся фантастическая точность хода «пульсарных часов» позволила не только верно определить элементы орбиты, но и заметить их медленное изменение со временем. Пульсар постепенно сближается со своим компаньоном, теряя энергию орбитального вращения на излучение гравитационных волн в точном соответствии с предсказаниями общей теории относительности. За косвенное обнаружение гравитационного излучения первооткрыватели пульсара получили в 1993 г. Нобелевскую премию по физике. Через 300 млн лет

нейтронные звезды сблизятся настолько, что произойдет их слияние с образованием черной дыры и короткоживущего аккреционного тора вокруг нее. За счет того же механизма, что и для длинных гамма-всплесков, происходит передача энергии от вращающегося и падающего на черную дыру вещества к двум джетам, разгоняющимся вдоль оси вращения. Они и являются источником гамма-всплеска. В 2017 г. сразу три детектора гравитационных волн наблюдали сигнал от слияния компактных объектов, связанный с коротким гамма-всплеском. Так было получено окончательное подтверждение теории их происхождения. Интересно, что в том же году за прямое наблюдение гравитационных волн была присуждена еще одна Нобелевская премия, а среди немногих известных на тот момент событий был и упомянутый источник короткого гамма-всплеска.

Фотовспышка для Вселенной

Порой гамма-всплески бывают настолько яркими, что чувствительные детекторы космических аппаратов оказываются засвеченными. Это не вызывает необратимых последствий для приборов, но теряется важная информация (а ведь редкие яркие события – самые интересные). Часть утраченного можно возместить, работая с гораздо более слабым отраженным сигналом. Чаще всего наблюдают отражение от частей конструкции спутника, атмосферы Земли или даже от Луны. Но самым впечатляющим примером можно назвать отражение от межзвездных облаков космической пыли. На *рисунке* пока-

Рисунок. Фотография рентгеновского излучения от гамма-всплеска GRB 221009A, отражающегося от облаков космической пыли в нашей галактике. Изображение получено спутником XMM-Newton и опубликовано в журнале «The Astrophysical Journal Letters» <https://iopscience.iop.org/article/10.3847/2041-8213/ac1dc>



зано отраженное от межзвездной пыли рентгеновское излучение самого яркого из всех известных на сегодня гамма-всплесков GRB 221009A. Это изображение (и ему подобные) можно с натяжкой назвать единственной доступной фотографией гамма-всплесков. Изображение самого источника, полученное на любом телескопе в различных диапазонах электромагнитного спектра, выглядит как точка.

В каждый момент времени точки отражения располагаются на поверхности эллипсоида вращения, в одном из фокусов которого находится измерительный прибор, а в другом – источник. Чем дальше от направления на него отстоит точка отражения и чем ближе она к наблюдателю, тем больше будет задержка. То есть находящиеся ближе к Земле пылевые облака в отраженном свете космической рентгеновской вспышки окажутся на небе на самом большом угловом удалении от источника. По направлению на отраженный сигнал и его задержке можно вычислить расстояние до пылевого облака и его размер. А сравни-

вая спектр отраженного рентгеновского излучения со спектром исходного, можно определить химический состав пыли и даже размер пылинок (это, по сути, рентгенофлуоресцентный анализ, широко применяющийся в лабораториях). Трудно представить себе более удобный способ исследования космических пылевых облаков, но, к сожалению, мощные гамма-всплески – большая редкость.

Каждый делавший рентгеновский снимок в поликлинике знает, как много на нем можно увидеть. И дело тут не только в прозрачности человеческого тела для рентгеновских лучей, а еще и в том, что оно просвечивается насквозь. Отраженные от разных внутренних органов, рентгеновские лучи смешались бы друг с другом и даже близко не дали бы четкой картины. Исследовать «на просвет» Вселенную крайне сложно – не считая малую долю объема, занятую галактиками, она практически пустая и, соответственно, почти абсолютно прозрачная. Оказавшись внутри одной из межгалактических пустот, человек увидел бы совершенно черное небо. И все же темнота эта далеко не абсолютная. Ее пронизывает свет миллиардов

недоступных человеческому глазу галактик. Будь у воображаемого космонавта хороший телескоп, он смог бы измерить спектр Вселенной в целом, что дало бы информацию о численности звезд разных типов и об истории звездообразования от момента зарождения галактик до наших дней. Сделать подобное, находясь на Земле, очень сложно: мешают многочисленные звезды нашей галактики, заполняющая межзвездное пространство космическая пыль и прочие помехи. Было бы здорово иметь посланника с нужной информацией из межгалактического пространства. И здесь снова приходят на помощь гамма-всплески. Рождающиеся в послесвечении сверхэнергичные ТэВ-ные фотоны на своем пути к Земле через межгалактическое пространство могут сталкиваться с фотонами звездного света (менее энергичные из них не могут участвовать в таких взаимодействиях). По тому, сколько пропало ТэВ-ных фотонов, можно судить о частоте столкновений, а значит, напрямую измерить количество (и даже спектр) звездного излучения между галактиками. Пока регистрация сверхэнергичного гамма-излучения остается сложной в техническом отношении задачей, а наблюдавшиеся в ТэВ-ном диапазоне всплески можно пересчитать по пальцам. Однако теория утверждает, что каждый такой всплеск является мощным источником ТэВ-ных фотонов, и по мере совершенствования приборов количество и качество измерений многократно вырастет. Когда Вселенную «просветят» много раз с разных направлений, станет возможным создание «томограммы» звездного света, которая расскажет много нового об истории Вселенной.

Близкий контакт. Гамма-всплески в нашей галактике

К настоящему времени наблюдались тысячи гамма-всплесков, и все они, включая ближайшие из известных, возникали далеко даже по меркам межгалактических расстояний. Конечно, любопытство подталкивает астрофизиков (и не только) к попыткам выяснить, как мог бы выглядеть подобный феномен, случившийся сравнительно близко. Для одной отдельно взятой галактики это редчайшее событие, которое случается примерно раз в 10 млн лет. Но за время своего существования наша планета могла быть свидетелем сотен очень близких гамма-всплесков. Выдвигались гипотезы, что самые мощные из них могли быть причиной катастроф, вплоть до великих вымираний в далекие геологические эпохи. Настоящие последствия все же не настолько драматические.

Перенесись мы ко времени последнего очень близкого гамма-всплеска, условно – во времена динозавров, и представшее нашим глазам зрелище было бы грандиозным. Хотя глаза лучше было бы защитить – с началом явления небо становится ослепительно ярким. Свет похож на исходящий от неоновой лампы, но при этом ярче солнечного в сотни раз. Это воздух поглощает опасное рентгеновское и гамма-излучение, перерабатывая его в относительно безвредное видимое и ультрафиолетовое излучение. Не будь атмосферы Земли, защищающей нас, и доза радиации уже в первые секунды стала бы смертельной для любого сложного живого

организма. Во время всплеска воздух у поверхности нашей планеты немного разогреется, что вызовет ощутимый ветерок, а вот на большой высоте, в стратосфере, нагрев гораздо больше. Там будет бушевать настоящий ураган, гул от которого слышен и у Земли. Из-за ионизирующего действия поглощенной радиации в атмосфере образуется много окислов азота, и в последующие дни пройдут очень сильные кислотные дожди, отчего пострадает растительность. По-видимому, это и будет самым страшным и самым долгоиграющим последствием гамма-всплеска для жизни на Земле. Примерно неделю после него на закате и перед восходом можно будет наблюдать огромный ореол вокруг Солнца, ярко светящийся в зеленых, бирюзовых и голубых тонах. Это ТэВ-ные фотоны от послесвечения, сталкиваясь с фотонами солнечного света, образуют энергичные электроны и позитроны, которые излучают в магнитном поле солнечного ветра.

Сожалеть о том, что нам никогда не доведется увидеть такое зрелище, наверное, не стоит. Ведь вызванная гамма-всплеском сильнейшая магнитная буря, на которую динозавры не обратили бы внимания, легко может оставить без Интернета и электричества половину населения нашей планеты. Лучше уж изучать гамма-всплески в далеких галактиках, они и так очень интересны. ■

Как извлекать энергию из вращающейся черной дыры



Николай Прокопеня, старший научный сотрудник Центра квантовой оптики и квантовой информатики Института физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси, кандидат физико-математических наук, доцент

Открытие квазаров в 1963 г., а затем обнаружение радиопульсаров, рентгеновских и гамма-источников излучения стало началом развития новой области науки – релятивистской астрофизики. В результате появилась идея о том, что в центре каждой галактики находится сверхмассивная черная дыра.

В марте 1963 г. в журнале «Nature» вышла статья трех астрономов (С. Hazard, M.B. Mackey, A.J. Shimmins), где было показано, что радиоисточник 3C 273 (обнаруженный в 1959 г. в ходе третьего кембриджского обзора небосвода) имеет две компоненты, которые отделены примерно на 20 угловых секунд. При этом одна из них имела очень необычный спектр излучения и получила название квазар, или квази-звездный источник (похожий на звезду). Дальнейшие наблюдения показали, что второй уникальный компонент представляет собой

струи вещества, вылетающую с огромной скоростью из центрального компактного источника. Такие мощные выбросы называются релятивистскими струями. Сам центральный компактный источник отождествили с ядром галактики. На сегодня самым лучшим примером можно считать гигантскую эллиптическую галактику M87 (обнаружена в 1781 г. французским астрономом Шарлем Мессье как туманный объект, а в 1918 г. американский астроном Гебер Кертис заметил наличие прямого луча, связанного с ядром тонкой линией материи), которая является одной из самых массивных, с ярчайшим источником радио-

излучения (рис. 1). Из ядра этой галактики вырывается огромная релятивистская струя, а в 2019 г. у было получено детальное изображение самого центра (ядра) галактики. Это самое первое в истории человечества изображение сверхмассивной черной дыры, которая находится в ядре галактики M87. На снимке, полученном коллаборацией «Телескоп горизонта событий» (Event Horizon Telescope), хорошо виден светящийся аккреционный диск вокруг центральной черной дыры (рис. 2). Но к идее о том, что она находится в центре активного ядра галактики, ученые пришли задолго до начала работы «Телескопа горизонта событий».

Сам термин «черная дыра» был популяризован и введен в научный обиход известным американским физиком-теоретиком

Дж.А. Уилером в его популярной лекции «Наша Вселенная: известное и неизвестное» в 1967 г., когда ученые серьезно дискутировали о самой возможности реального их существования и возможных механизмах рождения. В те годы было принято говорить о звездах, поэтому в 1963 г. вышла работа американских астрофизиков Ф. Хойла и У. Фаулера, где они обсуждали идею существования сверхмассивной звезды массой порядка миллиарда солнечных масс, способной быть источником гравитационной и термоядерной энергии, ускорять частицы до релятивистских скоростей и создавать потоки вещества, выбрасываемые со скоростью в несколько тысяч километров в секунду. Ученые предположили, что магнитное поле может наматываться между центральной звездой и окружающим ее аккреционным диском, хранить большое количество энергии, что приводит к мощным взрывам и струям, подобным M87. Причем только за счет сжатия огромной массы сверхзвезды можно получить самые мощные источники космического излучения. Вскоре после этого в 1964 г. американский астрофизик Э. Солпитер и советский ученый Я. Зельдович выдвинули идею производства энергии за счет аккреции (падения) вещества на сверхмассивную звезду. Важно отметить, что гипотеза о ее существовании не имела серьезных теоретических оснований, поскольку



Рис. 1. Галактика M87. Из центра галактики вырывается релятивистская струя
Источник: NASA and The Hubble Heritage Team

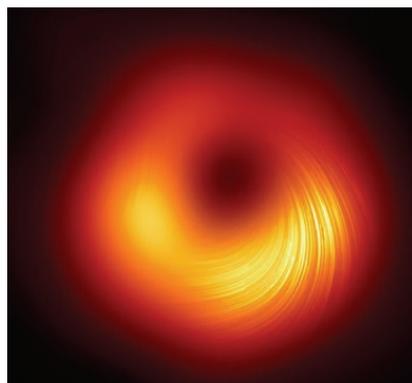


Рис. 2. Сверхмассивная черная дыра в центре галактики M87. Это самое первое в истории человечества качественное изображение тени черной дыры
Источник: Event Horizon Telescope, <https://www.eso.org>.

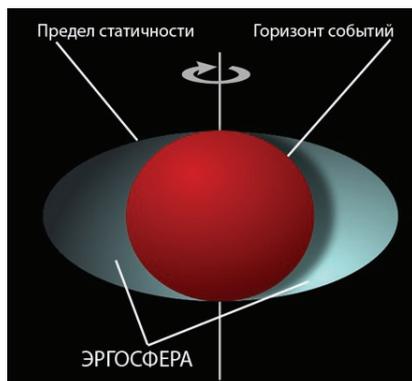


Рис. 3. Структура вращающейся черной дыры
Источник: <https://ru.wikipedia.org/wiki/Эргосфера>

такие огромные звезды будут очень неустойчивыми. В итоге от идеи отказались.

Наконец, в 1969 г. английский астрофизик Д. Линден-Белл заявил, что мертвые квазары в форме «коллапсировавших тел» (то есть черных дыр) должны быть обычным явлением в ядрах галактик, учитывая энерговыделение первых за время жизни и их распространенность в более ранние периоды истории Вселенной. Линден-Белл исследовал тепловое излучение и выброс быстрых частиц из аккреционного диска, вращающегося вокруг черной дыры, что связано с диссипацией энергии из-за магнитных и турбулентных процессов. Для мощности излучения типичных квазаров аккреционный диск должен иметь максимальную эффективную температуру порядка 100 тыс. градусов Цельсия, что может приводить к фотоионизации и излучению в широких линиях. Исследователь отметил, что при различных значениях массы черной дыры и темпа аккреции эти диски способны дать объяснение значительной части явлений астрофизики высоких энергий, включая ядра галактик, сейфертовские галактики, квазары и космические лучи. Здесь стоит отметить, что Линден-Белл рассматривал невращающуюся, статическую черную дыру, или черную дыру Шварцшильда.

В этом же году вышла работа британского физика и математика Р. Пенроуза (лауреат Нобелевской премии по физике 2020 г. за открытие постулата о том, что образование черных дыр неизбежно следует из общей теории относительности), где были исследованы

свойства вращающейся черной дыры Керра. Ученый описал ее новое необычное свойство, а именно наличие отрицательных энергетических состояний у частиц, движущихся против направления вращения самой черной дыры, и предложил процесс, с помощью которого можно извлечь энергию из вращающейся черной дыры, (рис. 3), что стало революционной идеей. Собственно черная дыра обычно отождествляется с горизонтом событий (поверхность, через которую можно беспрепятственно войти внутрь, но выйти уже невозможно), окруженной еще одной поверхностью, называемой пределом статичности (куда всегда можно войти и выйти обратно). Область между ними – эргосфера, особенность которой состоит в том, что внутри нее пространство как бы закручивается и находится в постоянном вращении. Это означает, что любая материя, попадающая в эргосферу, автоматически начнет вращаться. При этом участок вне поверхности предела статичности не вращается. Пенроуз сделал наглядную иллюстрацию (рис. 4), на которой показано, что люди построили некую станцию вокруг вращающейся черной дыры и на веревках спускают вещество прямо в эргосферу, чтобы получить энергию. Ученый подчеркивал, что при этом будет уменьшаться скорость вращения черной дыры, а значит, извлекаться энергия. Кроме этой ироничной картинке никаких расчетов в статье не приводилось. Конкретное числовое выражение было представлено годом позже, и оно показывало, что одна частица падает в эргосферу и там распадается на две другие (рис. 5), при этом вторая

должна лететь прямо в черную дыру против направления ее вращения, вследствие чего будет иметь отрицательную энергию. Третья частица улетает из эргосферы с положительной энергией, которая больше энергии исходной частицы. Оказалось, что в этом примере эффективность процесса извлечения энергии очень низкая. Затем следовало утверждение о

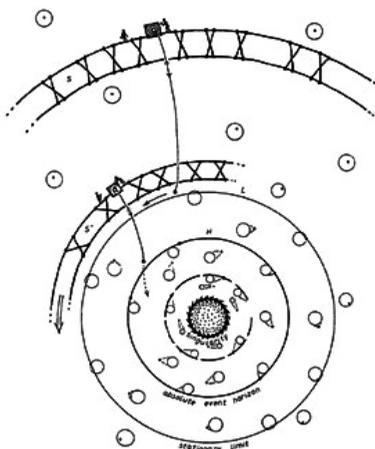


Рис. 4. Иллюстрация извлечения энергии из черной дыры, сделанная Роджером Пенроузом

Источник: Rivista del Nuovo Cimento, Numero Speciale I, 257 (1969)

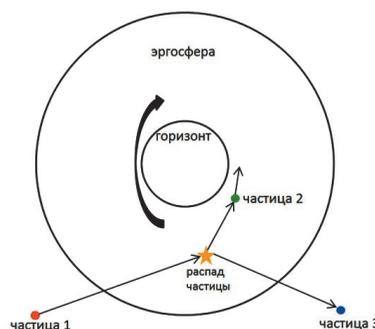


Рис. 5. Схема процесса Пенроуза. Частица 1 летит в эргосферу и там распадается на две другие частицы. Частица 2 попадает под горизонт черной дыры, а частица 3 улетает обратно. Энергия частицы 2 отрицательна, поэтому энергии частицы 3 больше, чем энергии частицы 1

Источник: автор статьи

том, что КПД для такого механического процесса не превышает 20%, а сами частицы, которые уносят энергию из черной дыры, не могут быть ускорены до релятивистских скоростей. Таким образом, в первой половине 1970-х гг. сформировалось мнение, что механический процесс Пенроуза хоть и возможен в принципе, но для описания энерговыделения в реальных астрофизических объектах не годится.

Прорыв произошел в 1977 г., когда британский астрофизик Р. Блэндфорд вместе со своим аспирантом Р. Знайеком опубликовали статью об электромагнитном механизме извлечения энергии из вращающейся черной дыры, который получил их имена – Блэндфорда – Знайека. Известный американский астрофизик и нобелевский лауреат по физике К. Торн писал об этом так: «...этот механизм является одним из лучших объяснений источника энергии, который питает квазары». Блэндфорд и Знайек использовали аналогию с радиопульсаром, моделью которого считалась вращающаяся замагниченная нейтронная звезда (рис. 6). Ее вращение служит источником энергии радиопульсара. Механизм процесса связан с работой униполярного индуктора, который можно пояснить на следующем примере. Если к вращающемуся замагниченному шару присоединить два скользящих контакта, соединенных неподвижным проводом, то по нему потечет ток, который будет отводить энергию от источника (то есть вращающегося шара) к внешней нагрузке, где и будет выделяться энергия. Замедление вращения шара связано

с поверхностными токами, которые должны появиться для замыкания всей цепи. В отличие от нейтронной звезды черная дыра не имеет своего собственного магнитного поля. Тем не менее можно говорить о ее магнитосфере, поскольку большая часть материи, находящейся в аккреционном диске черной дыры, будет иметь проходящие через нее линии магнитного поля (рис. 7). При попадании вещества в черную дыру магнитные линии увлекаются вместе с ним, становясь все более и более плотно упакованными по мере приближения к ней. Во вращающейся черной дыре само пространство движется, как вода в водовороте,

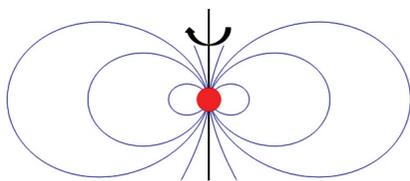


Рис. 6. Схема магнитосферы нейтронной звезды. Магнитные линии показаны синим цветом. Они выходят из одного полюса и замыкаются на противоположном; (звезда обозначена красным цветом)
Источник: автор статьи

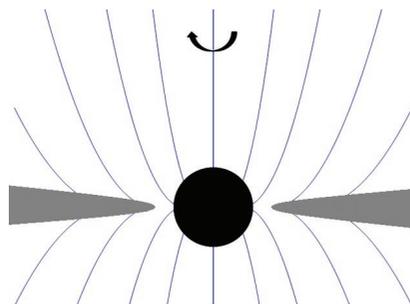


Рис. 7. Схема магнитосферы черной дыры. Магнитные линии (показаны синим цветом) пронизывают черную дыру в центре, а также примыкающий к ней аккреционный диск (показан серым цветом)
Источник: автор статьи

и магнитные силовые линии тоже будут тянуться, скручиваясь и скручиваясь, как веревка. Систему, состоящую из них и горячей плазмы из падающего вещества, можно рассматривать как электрическую цепь. Токи текут вдоль силовых линий к полюсам черной дыры, по «поверхности» горизонта событий и за его пределы вблизи экватора. На некотором расстоянии от черной дыры этот ток сбрасывает свою энергию в плазму, которая выдувается в виде огромных струй из полюсов черной дыры. Это делает ее генератором напряжения, магнитное поле – линиями проводов, а плазма есть нагрузка в цепи. Конечно, электрические заряды на самом деле не могут течь через горизонт событий, это описание полезно только для того, чтобы понять, как магнетизм, электричество и плазма ведут себя за пределами черной дыры. Механизм замедления ее вращения связан не с поверхностными токами, как в случае с нейтронной звездой, а с «движением пространства» в эргосфере черной дыры. Как в механическом процессе Пенроуза необходимо наличие частиц с отрицательной энергией, так и в процессе Блэнфорд-Знайека энергия электромагнитного поля, пересекающего горизонт событий, является отрицательной.

Остается обсудить вопрос о запасе энергии черной дыры. Согласно знаменитой формуле Эйнштейна $E = mc^2$, энергия есть масса, умноженная на

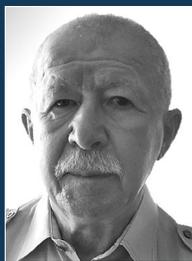
квадрат скорости света. Получается, что энергия сверхмассивной черной дыры практически бесконечна. Но какая ее часть относится к вращательной? Ответ на этот вопрос был получен в 1970 г. в работе греческого астрофизика Д. Крестодулу (в те годы был аспирантом Д. Уиллера), выведшего формулу, из которой следовало, что полная энергия черной дыры состоит из вращательной энергии и так называемой неприводимой (которую нельзя уменьшить). То есть в процессе извлечения вращательной энергии из черной дыры будет уменьшаться ее полная энергия вместе с вращательной, но неприводимая при этом будет возрастать либо может остаться без изменений. Предположим идеальный вариант, при котором процесс извлечения энергии происходит без увеличения неприводимой ее части. Вначале черная дыра имеет максимальную скорость вращения, определяемую ее начальной массой. Добывать энергию можно до тех пор, пока черная дыра полностью не остановится, то есть не станет статической. Тогда из формулы Крестодулу следует, что величина максимально возможной полученной энергии будет составлять 29% от начальной энергии черной дыры, то есть треть.

Если взять квазар с мощностью излучения в миллиард мощностей Солнца, который питает сверхмассивная черная дыра с массой в миллиард солнечных масс, то светить он будет еще тысячи миллиардов лет. ■

АНОНС

Обзор «Первичные черные дыры» Александра Долгова, доктора физико-математических наук, профессора Новосибирского университета и заведующего лабораторией теоретической физики им. Н. Н. Боголюбова Объединенного института ядерных исследований будет опубликован в № 5 журнала «Наука и инновации».

Осцилляции солнечных нейтрино



Олег Бояркин,
профессор кафедры
общей и медицинской
физики Международного
государственного
экологического института
им. А.Д. Сахарова БГУ,
доктор физико-
математических наук,
профессор



Виктор Махнач,
доцент кафедры
физико-математических
дисциплин Института
информационных
технологий БГУИР,
кандидат физико-
математических наук,
доцент

Поскольку Солнце – обычная звезда нашей Галактики, то такие проблемы, как, например, источники энергии, строение и образование спектра, являются общими для физики Солнца и звезд. Следовательно, все многообразие уже установленных солнечных явлений: зернистая структура поверхности, сложные изменения яркости и движений в ее отдельных активных центрах, процессы в самых внешних, разреженных слоях атмосферы, в частности солнечные вспышки, образование протуберанцев, солнечного ветра, – свойственно не только Солнцу, но и другим звездам. Поэтому физика солнечных явлений имеет огромное значение для развития астрофизики в целом.

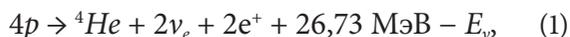
До

недавнего времени основным источником информации о Солнце были наблюдения на гамма-телескопах. Однако Солнце – не только источник электромагнитного излучения, оно также излучает огромное количество левосторонних электронных нейтрино ν_{eL} . Поскольку нейтрино на своем пути от Солнца до земного наблюдателя, в отличие от фотонов, практически не взаимодействуют с частицами космической среды, то они несут практически стопроцентную информацию о прародительском объекте.

Свойства нейтрино не совсем обычны, и надежное их установление – необходимое условие успешной работы нейтринных телескопов. В минимально расширенной Стандартной модели массовая матрица нейтрино в базисе $\nu_{eL}, \nu_{\mu L}, \nu_{\tau L}$ (флэйворный базис) недиагональна. Следовательно, $\nu_{eL}, \nu_{\mu L}$ и $\nu_{\tau L}$ уже не физические частицы с определенным значением массы, являются таковыми только их комбинации ν_1, ν_2 и ν_3 (массовый базис). В вакууме переход от флэйворного базиса к массовому осуществляется матрицей M_0 , которая представляет собой функцию от трех постоянных углов смешивания θ_0^{ik} ($i, k=1, 2, 3$). Значение их таково, что, например, массовое состояние ν_2 определяется примерно равным количеством $\nu_{eL}, \nu_{\mu L}$ и $\nu_{\tau L}$. В свою очередь, в ν_3 флэйворные комбинации $\nu_{\mu L}$ и $\nu_{\tau L}$ находятся приблизительно в одинаковом соотношении с очень небольшой долей ν_{eL} . Следовательно, ν_3 будет проявляться с вероятностью $\sim 0,48$ как $\nu_{\mu L}$, $\sim 0,5$ – как $\nu_{\tau L}$ и $\sim 0,02$ – как ν_{eL} . С другой стороны, флэйворные состояния оказываются смешанными с массовыми: так, ν_{eL} состоит примерно из $2/3 \nu_1, 1/6 \nu_2$ и $1/6 \nu_3$. В веществе матрица перехода к физическому базису M_m имеет тот же вид, что и M_0 , но с заменами вакуумных углов смешивания на углы смешивания в веществе $\theta_0^{ik} \rightarrow \theta_m^{ik}$. При этом θ_m^{ik} не являются постоянными числами, а определяются характером взаимодействия нейтрино с веществом.

Что касается электромагнитных характеристик, то нейтрино, несмотря на свою нейтральность, обладает отличным от нуля магнитным моментом. При этом не исключена возможность наличия и других мультипольных моментов (анепольного момента, зарядового радиуса и т.д.).

Основным источником солнечных электронных нейтрино является совокупность реакций термоядерного синтеза в центральной части Солнца, приводящая к превращению водорода в гелий без участия катализаторов (протон-протонная цепочка). Ее можно представить в виде многоступенчатого процесса:



где E_ν – энергия, уносимая электронным нейтрино со средним значением $\sim 0,6$ МэВ; pp -цепочка заканчивается образованием ядра гелия ${}^3\text{He}$, двух позитронов и двух электронных нейтрино.

Имеется еще один цикл термоядерных реакций, ответственный за появление нейтрино. Эта последовательность реакций, приводящая к образованию гелия из водорода с участием углерода, азота, кислорода и фтора в качестве катализаторов, получила название «углеродно-азотный цикл» (CNO-цикл). Для солнечных температур его вклад довольно слаб, поэтому за его счет рождается только 1,5% нейтрино от полного потока.

Из уравнения (1) можно сделать грубые оценки полного нейтринного потока Φ_ν , который падает на земную поверхность. Поскольку в каждой реакции рождается два нейтрино и излучается энергия $E_\gamma \approx 27$ МэВ, то Φ_ν определится соотношением:

$$\Phi_\nu \approx \frac{L_\odot}{4\pi D^2 \frac{1}{2} E_\gamma}, \quad (2)$$

где D – расстояние от солнечного ядра до Земли. Подстановка численных значений приводит к результату $\Phi_\nu \approx 6 \times 10^{10} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$.

Уже первые измерения потоков солнечных нейтрино показали разногласие с предсказаниями Стандартной солнечной модели (ССМ) [1]. Так, например, на 1981 г. измеренное значение полной скорости захвата ν_{eL} -нейтрино определялось величиной:

$$\Phi_{exp} = (1,8 \pm 0,3) \text{ СНЕ}, \quad (3)$$

в то время как вычисления с использованием ССМ давали

$$\Phi_{theor} = (7,6 \pm 3,3) \text{ СНЕ}. \quad (4)$$

СНЕ – солнечная нейтринная единица; $1 \text{ СНЕ} = -10^{-36}$ захват/(атом мишени-с).

Следует помнить, что измеряемой в единицах СНЕ величиной является не просто поток, а его произведение на сечение, проинтегрированное по энергиям детектируемых нейтрино. Расхождение между теоретическим показателем и измеренным получило название проблемы солнечных нейтрино. Она оставалась нерешенной с 1967 по 2001 г. На протяжении этого времени значения обеих величин менялись весьма значительно. Напомним, что только SNO (Sudbury Neutrino Observatory) чувствителен ко всем сортам нейтрино. Результаты всех экспериментов, за исключением SNO, показывали значительное ослабление потока левосторонних электронных нейтрино по сравнению с предсказаниями ССМ. Эти частицы рождаются в ядре Солнца, после чего пролетают 700 тыс. км вдоль его радиуса в среде с переменной плотностью и достаточно интенсивным магнитным полем. В этих условиях за счет взаимодействия становятся возможными резонансные переходы (осцилляции) левосторонних электронных нейтрино в другие флэйворные состояния. После выхода с солнечной поверхности, прежде чем достичь земного детектора, пучок нейтрино пролетает в вакууме $1,5 \times 10^8$ км и подвержен конверсии, но уже за счет вакуумных осцилляций.

Теория нейтринных осцилляций впервые подтверждается экспериментом в 1998 г., когда группа Super-Kamiokande сообщает об обнаружении осцилляций атмосферных нейтрино, рождающихся в широких атмосферных ливнях [2]. В 2002 г. группа ученых из обсерватории Sudbury получает непосредственные подтверждения переходов ν_e в ν_μ и ν_τ [3]. Этот результат окончательно доказывает гипотезу нейтринных осцилляций, которая использовалась для объяснения дефицита солнечных нейтрино при измерениях на нейтринных телескопах Homestake, SAGE, GALLEX, GNO и Super-Kamiokande. Таким образом, проблема солнечных нейтрино, которая была движущей силой в физике нейтрино на протяжении 35 лет, была решена. В том же году результаты SNO нашли свое подтверждение в экспериментах на нейтринном телескопе KamLAND [4], использовавших хорошо контролируемый пучок реакторных антинейтрино. Все это позволило сделать окончательный вывод о наличии у нейтрино массы и о смешивании в секторе нейтральных лептонов. По всеобщему признанию, 2002 г. стал «*annus mirabilis*» в физике солнечных нейтрино.

Обсудим подробнее источники нейтринных осцилляций. Начнем с вакуумных. После прохождения в вакууме некоторого расстояния волновая функция нейтрино, рожденного в состоянии с флэйвором $l=e, \mu, \tau$, представляет собой уже суперпозицию состояний со всеми возможными значениями флэйвора. Это означает, что имеется отличная от нуля вероятность обнаружить в нейтринном пучке, первоначально состоящим из ν_l -частиц, $\nu_l \neq l$ -компоненты, или, другими словами, что нейтрино может испытывать осцилляционные переходы. Явление нейтринных осцилляций напоминает дифракцию микрочастиц на нескольких щелях (в нашем случае их число равно числу нейтринных поколений), которая, согласно принципу Гюйгенса – Френеля, объясняется возникновением вторичных волн де Бройля с их последующей интерференцией. Можно показать, что при движении нейтрино в вакууме возникновение переходов между различными сортами нейтрино возможно только при выполнении условий:

- (i) нейтрино должны иметь массы;
- (ii) некоторые или все вакуумные углы смешивания должны быть отличны от нуля;
- (iii) для возникновения осцилляций нейтринному пучку необходимо пройти расстояние, соизмеримое с длиной осцилляций.

При рассмотрении движения нейтринного пучка в Солнце обычно считают, что совокупность взаимодействий нейтрино с частицами солнечной материи сводится к движению нейтрино в поле с потенциальной энергией. Если ограничиться двухфлэйворным приближением ($e\mu$ -смешивание), то связь между массовыми и флэйворными состояниями имеет простой вид:

$$\begin{aligned} \nu_1 &= \nu_{eL} \cos \theta_m + \nu_{\mu L} \sin \theta_m, \\ \nu_2 &= -\nu_{eL} \sin \theta_m + \nu_{\mu L} \cos \theta_m, \end{aligned}$$

где θ_m – угол смешивания между электронным и мюонным поколениями в веществе. Поскольку вероятность $\nu_{eL} \rightarrow \nu_{\mu L}$ -перехода $P_{\nu_{eL} \rightarrow \nu_{\mu L}}$ есть по существу величина, пропорциональная дифференциальному сечению реакции $\nu_{eL} e^- \rightarrow \nu_{\mu L} e^-$, то на резонансе ее поведение описывается формулой Брейта – Вигнера:

$$P_{\nu_{eL} \rightarrow \nu_{\mu L}} = \frac{\text{const}}{(N_e(z) - N_R)^2 + \Gamma^2}, \quad (5)$$

где N_R – плотность электронов солнечного вещества в точке резонанса и $\Gamma = \delta N_e$ – ширина резонанса, в нашем случае равная $N_R \tan 2\theta_0$ (θ_0 – угол $e\mu$ -смешивания в вакууме). Из (5) следует, что при движении

нейтринного потока в среде с переменной плотностью при $N_e(z)=N_R$ происходит резкое увеличение вероятности перехода нейтрино из одного флэйворного состояния в другое. Эффект резонансного усиления осцилляций в веществе был предсказан Л. Вольфенштайном [5], П. Михеевым и Ю. Смирновым [6] и получил название эффекта Михеева – Смирнова – Вольфенштайна (МСВ).

В работе [7] был выполнен анализ движения нейтринного пучка в магнитном поле Солнца. Предполагая, что нейтрино обладает только магнитным моментом, было показано, что и в магнитном поле нейтрино может испытывать резонансные конверсии. Причем возможны осцилляции как между левыми и правыми компонентами одного флэйвора, так и перевороты спина, сопровождаемые переходами между состояниями с различным флэйвором.

Таким образом оказывается, что, исследуя нейтринные потоки, можно предсказывать поведение магнитных полей на Солнце. Этот факт позволяет надеяться на возможность прогнозирования катастрофических для Земли солнечных явлений, к примеру высокоэнергетических солнечных вспышек (СВ). Следует отметить, что вспышки происходят и на других звездах первого поколения, поэтому их изучение позволяет глубже понять строение и эволюцию Вселенной. Высокоэнергетические СВ особенно разрушительны, если они направлены в сторону Земли. Они вызывают проблемы с электростанциями, отключениями радиосвязи, мутациями в ДНК, разрушение экосистем, выход из строя различных устройств на спутниках и т.д. Наиболее сильная СВ имела место в 1859 г. (событие Кэррингтона). Солнечная вспышка и сопровождающее ее извержение корональной плазмы, проходившее с середины октября до начала ноября 2003 г., вывели из строя японский спутник Мидори II и привели к потере связи с космическим кораблем Mais Odyssey. Поэтому для нашего все более технологически зависимого общества большое практическое значение имеет предсказание того, когда, где и как велики ожидаются СВ.

Поскольку магнитное поле является основным источником энергии СВ, то необходимо знать, как меняется магнитное поле в области вспышки в предвспышечный период. В годы активного Солнца на дне конвективной зоны в области порядка 10^3 км поле имеет значение 10^5 Гс. С увеличением r поле уменьшается, и его значение на поверхности целиком зависит от существования на ней так называемой активной области (область магнитного поля, увеличивающегося со значений 1 Гс). Ее характерные размеры по поверхности R_\odot в диаметре, а по высоте

она простирается до короны. В тех местах активной области, где значение поля достигает 500 Гс, начинается процесс образования солнечных пятен. Предполагается [8], что в течение одного активного цикла $\sim 10^{24}$ Гс·см² магнитного потока выходит из недр Солнца и накапливается на солнечных пятнах. Созданное при этом магнитное поле неоднородно, носит вихревой характер:

$$(\text{rot } \mathbf{B})_z = 4\pi j_z \quad (6)$$

и обладает скручиванием $\Phi(z)$, где

$$B_x \pm iB_y = B_{\perp} e^{\pm i\Phi(z)}. \quad (7)$$

Заметим, что как для Солнца, так и для звезд первого поколения причиной скручивания является различная скорость вращения их компонент и глобальная конвекция плазменной жидкости. В соответствии с общепринятой моделью магнитного пересоединения [9], дальнейший процесс эволюции солнечных пятен выглядит следующим образом. Некоторые большие пятна противоположной полярности начинают объединяться в пары (спаренные пятна). Затем изменение конфигурации магнитного поля может привести к появлению предельной силовой линии (ПСЛ), являющейся общей для спаренных пятен. На протяжении всей ПСЛ, поднимающейся от фотосферы к короне, начинается перераспределение магнитных потоков, поступающих из недр Солнца на поверхность. С момента появления ПСЛ электрическое поле, индуцированное изменениями магнитного поля, вызывает ток вдоль этой линии, принимающей форму токового слоя (ТС). В общем случае этот пересоединяющий ТС представляет собой магнито-плазменную структуру. Поскольку ТС препятствует перераспределению магнитных потоков, то начинается процесс накопления магнитной энергии ТС. При этом чем более мощным будет СВ, тем большим будет напряженность магнитного поля. Продолжительность периода формирования ТС (то есть начальная фаза СВ) варьируется от нескольких часов до десятков. На начальной фазе солнечной вспышки величина магнитного поля для спаренных солнечных пятен B_c может достигать значений $\sim 10^5$ – 10^6 Гс. Более того, в случае супер-СВ значения B_c могут быть много больше. Вторая стадия СВ (взрывная фаза) длится всего лишь 1–3 минуты. Она начинается с появления области с высоким сопротивлением в некоторой части ТС, что приводит к диссипации тока. Тогда, благодаря проникновению магнитного поля через ТС, появляется сильное магнитное поле,

перпендикулярное к ТС. Возникающая магнитная сила разрывает ТС и на огромной скорости выбрасывает плазму. Магнитная энергия солнечных пятен превращается в кинетическую энергию излучения вещества (на скорости порядка 10^6 м/с), энергию жесткого электромагнитного излучения и потоки солнечных космических лучей, которые состоят из протонов, ядер с зарядами $2 \leq Z \leq 28$ и электронов. Рожденные фотоны достигают Земли примерно через 8,5 мин после взрывной фазы. Далее через несколько десятков минут мощный поток заряженных частиц касается земной поверхности. Что до плазменных облаков, то они приближаются к нашей планете только в течение 2–3 дней. Самый мощный поток, падающий на поверхность Земли, может достигать $\sim 4500\%$ по сравнению с фоновым потоком космических частиц. Заключительная стадия СВ (горячая фаза) может продолжаться до нескольких часов. Во время ее существования формируется высокотемпературная корональная область, которая состоит из плотного горячего плазменного облака.

Исследования по прогнозированию СВ проводятся с помощью γ -телескопов, которые накапливают данные, связанные с образованием солнечных вспышек. Для обработки огромного количества информации был создан так называемый метод машинного обучения, использующий различные эмпирические модели [10]. Однако пока не установлено, какая из моделей является наилучшей.

Следует также отметить физически обоснованный метод прогнозирования высокоэнергетических СВ на основе критического условия магнитогиродинамической неустойчивости [11].

На корреляцию нейтринного потока с СВ было впервые указано в [12]. Было показано, что наличие у нейтрино анапольного момента может приводить к дополнительному резонансному переходу $\nu_{eL} \rightarrow \nu_{\mu R}$. Более общий анализ поведения пучка левосторонних электронных нейтрино при прохождении магнитного поля спаренных солнечных пятен был выполнен в [13, 14]. Здесь уже список мультипольных моментов включал зарядовый радиус, магнитный дипольный и анапольный моменты, а магнитное поле носило вихревой характер, было неоднородным и обладало скручиванием. Были найдены резонансно-подобные формулы для вероятностей переходов:

$$\nu_{eL} \rightarrow \nu_{eR}, \nu_{eL} \rightarrow \nu_{\mu R}, \nu_{eL} \rightarrow \nu_{\tau R} \quad (8)$$

которые могут приводить к ослаблению пучка левосторонних электронных нейтрино. Число убывших из пучка ν_{eL} -нейтрино определяется временем

нахождения нейтрино в резонансном слое. Для всех трех резонансов эта ширина имеет один и тот же порядок, а именно $\mu_{II} B_{\perp}$. Учитывая это обстоятельство, можно оценить степень ослабления ν_{eL} -пучка после прохождения каждого из вышеперечисленных резонансов. Если ввести обозначение:

$$\eta = \frac{N_i - N_f}{N_i},$$

где N_i и N_f – число ν_{eL} -нейтрино до и после прохождения резонанса соответственно. Тогда для $\mu_{II} = 6,8 \times 10^{-10} \mu_B$ (что не противоречит эксперименту) и $B_{\perp} = 10^8$ Гс (что возможно для высокоэнергетических СВ) $\eta = 1,2$. Очевидно, что столь значительное ослабление нейтринного пучка может быть зарегистрировано с помощью детекторов второго поколения, работа которых основана на реакции когерентного упругого нейтрино-ядерного рассеяния (CE ν NS). Этот тип низкоэнергетического (анти)нейтринного взаимодействия был предсказан в 1974 г. и недавно наблюдался коллаборацией COHERENT [15]. Было показано, что нейтрино и антинейтрино всех типов могут взаимодействовать не только с отдельным нуклоном, но и с атомным ядром целиком, то есть когерентно. Это происходит при энергиях нейтрино менее 50 МэВ, когда длина волны де Бройля возрастает до величины порядка зарядового радиуса ядра $R = 1,12 \times (A)^{1/3} 10^{-13}$ см (A – количество нуклонов). Поперечное сечение CE ν NS описывается формулой:

$$\sigma \simeq \text{few} \times 10^{-45} N^2 (E_{\nu})^2 \text{ см}^2,$$

где N – количество нейтронов, E_{ν} – энергия нейтрино, выраженная в МэВ.

Благодаря фактору N^2 сечение этого процесса велико, оно более чем на 2 порядка превышает сечения других известных процессов, описывающих взаимодействия низкоэнергетических нейтрино. Чтобы удовлетворить требованию когерентности, нейтрино должны иметь энергии в МэВ-области.

Детекторы на основе CE ν NS уже используются для мониторинга работы ядерного реактора в онлайн режиме. В качестве примера можно представить РЕД-100, работающий на Калининской АЭС [16]. Установленный на расстоянии 19 метров от ядерного реактора, где поток реакторных антинейтрино достигает значений $1,35 \times 10^{13} \text{ см}^{-2} \text{ с}^{-1}$, РЕД-100 должен регистрировать 3300 антинейтринных событий в день. Более того, в будущем планируются масштабировать детектор в 10 раз по массе чувствительного объема порядка 1 т (РЕД-1000). Это позволит наблюдать уже 33 тыс. событий в день. Следовательно, когда

РЕД-1000 будет использоваться для наблюдения солнечных pp -нейтрино, то он сможет зарегистрировать около 2 тыс. нейтринных событий в день.

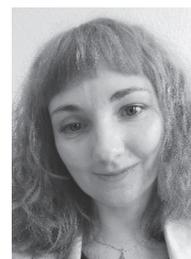
Итак, с уверенностью можно утверждать, что физика нейтрино находится на переднем крае физики элементарных частиц. Поиски ответов на такие фундаментальные вопросы, как, например, природа нейтрино (дираковская или майорановская), существуют ли стерильные нейтрино, могут изменить содержание стандартной теории электрослабых взаимодействий. Физика нейтрино уже нашла свое место в решении прикладных задач (антинейтринные детекторы на АЭС, нейтринная томография Земли) и делает первые шаги по созданию нейтринных коммуникационных сетей. Сегодня трудно предугадать, в какой еще сфере человеческой деятельности она найдет свое дальнейшее применение. Но несомненно одно: как источник новых технологий она не исчерпала своих возможностей. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. J.N. Bahcall, S. Basu and M.N. Pinsonneault. How Uncertain Are Solar Neutrino Predictions // *Physics Letters B*. 1998. Vol. 1. P. 443.
2. Y. Fukuda [et al.]. Evidence for Oscillation of Atmospheric Neutrinos Super-Kamiokande Collaboration // *Physical Review Letters*/ 1998. Vol. 81. P. 1562.
3. Q.R. Ahmad [et al.]. SNO Collaboration, Direct Evidence for Neutrino Flavor Transformation from Neutral-Current Interactions in the Sudbury Neutrino Observatory // *Physical Review Letters*. 2002. Vol. 89. P. 011301.
4. K. Eguchi [et al.]. (KamLAND Collaboration), First Results from KamLAND: Evidence for Reactor Antineutrino Disappearance // *Physical Review Letters*. 2003. Vol. 90. P. 021802.
5. L. Wolfenstein. Neutrino Oscillations in Matter // *Physical Review D*. 1978. Vol. 17. P. 2369.
6. S.P. Mikheev, A.Yu. Smirnov. Resonance Amplification of Oscillations in Matter and Spectroscopy of Solar Neutrinos // *Yadernaya Fizika*. 1985. Vol. 42. P. 1441.
7. M. Voloshin, M. Vysotskii, L.B. Okun. Electrodynamics of the neutrino and possible effects of solar neutrinos // *The Journal of Experimental and Theoretical Physics*. 1986. Vol. 91. P. 754.
8. D.J. Galloway, N.O. Weiss. Convection and magnetic fields in stars // *The Astrophysical Journal*. 1981. Vol. 243. P. 945.
9. K. Shibata, T. Magara. Solar Flares: Magnetohydrodynamic Processes // *Living Reviews in Solar Physics*. 2011. Vol. 8. P. 6.
10. T. Hastie, R. Tibshirani, J. Friedman. The elements of statistical learning: data mining, inference and prediction. – New York. 2009. 2nd edn.
11. Kanya Kusano [et al.]. A physics-based method that can predict imminent large solar flares // *Science*. 2020. P. 369–587.
12. O.M. Boyarkin, D. Rein. Neutrino mass and oscillation angle phenomena within the asymmetric left-right models // *Physical Review D*. 1996. Vol. 53. P. 361.
13. O.M. Boyarkin, G.G. Boyarkina. Influence of solar flares on behavior of solar neutrino flux // *Astroparticle Physics*. 2016. Vol. 85. P. 39.
14. O.M. Boyarkin, I.O. Boyarkina. Solar neutrinos as indicators of the Sun's activity // *International Journal of Modern Physics A*. 2019. Vol. 3. P. 1950448.
15. D. Akimov [et al.]. Observation of coherent elastic neutrino-nucleus scattering // *Science*. 2017. Vol. 357. P. 1123.

Направления регионализации высокотехнологичной сферы Республики Беларусь

УДК 338.4:339.138



Валентина Щетко,
ведущий специалист
РУП «Центр цифрового
развития»
valasche@gmail.com

Геополитическая трансформация мира требует пересмотра внешней и внутренней политики государств. Взаимодействие стран основывается на международном разделении труда и создании объединений, которые изначально базировались на географической и экономической близости участников, но претерпели изменения под влиянием глобализации и интернационализации мирового хозяйства. ИО представляют собой форму международного экономического сотрудничества, направленного на создание и укрепление трансграничных связей в различных областях. В данной статье понятия «интеграционные объединения» и «региональные объединения» применяются как синонимичные термины, хотя при углубленном изучении в рамках экономической географии или мировой экономики они имеют ряд различий (например, по количеству и географическому расположению их членов, степени экономической интеграции и т.д.).

Аннотация. В статье раскрывается значение интеграционных объединений (ИО) в сфере высоких технологий и их преимущества для развития производства и экономики в целом. Проведен анализ наиболее перспективных для углубления сотрудничества Республики Беларусь государств и региональных объединений, на основе которого может быть построена стратегия участия нашей страны в ИО.

Ключевые слова:
высокотехнологичная сфера, товары, мировой рынок, интеграционные объединения.

Для цитирования: Щетко В. Направления регионализации высокотехнологичной сферы Республики Беларусь // Наука и инновации. 2024. №4. С. 50–55. <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-04-50-55>

Использование возможностей ИО для развития высокотехнологичной сферы дает участникам ряд преимуществ, связанных с укреплением региональных экономических связей и расширением рынка сбыта, взаимодействием с потребителями продукции на более выгодных условиях, чем в случае экспортно-импортных операций в рамках общих процессов международной торговли, и при этом без дополнительных затрат на экспорт и маркетинг. Также компании получают возможность ускоренного роста своих производственных мощностей, в том числе за счет распределения затрат и совместной разработки новых технологий и продуктов. Благодаря профессиональной и технологической интеграции региональных производственных и сбытовых связей возрастает качество и конкурентоспособность продукции на мировом рынке товаров и услуг, снижаются затраты через оптимизацию логистики, стандартизации и координации между странами-участниками. Это дает компаниям шанс закупать более качественные и доступные комплектующие и сырье, использовать совместные производства, что способствует снижению себестоимости продукции.

Дополнительное преимущество ИО состоит в том, что они обеспечивают создание однородного рынка и применение единых принципов регулирования. Общие технические нормы и стандарты, согласование правил торговли и инвестиций, совместные инфраструктурные проекты помогают снизить затраты на доставку товаров и производство, уменьшают издержки на управление, повышают его эффективность.

Участники ИО могут обмениваться технологиями, перенимать опыт друг друга и совместно решать научно-технические задачи. Например, в рамках создания Таможенного союза и общего рынка МЕРКОСУР отдельно подписаны соглашения о защите интеллектуальной собственности. Зона свободной торговли АСЕАН также их затрагивает, как и перемещение технологий. Это способствует развитию новых промышленных секторов, повышению экспортных возможностей участников и стимулирует инновации, что, в конечном счете, приводит к укреплению национальных экономик и международных связей в области науки и технологий.

Цели и задачи данной статьи – определить наиболее перспективные страны и региональные объединения для углубления сотрудничества Республики Беларусь в высокотехнологичной сфере с учетом происходящих изменений на мировом рынке.

Материалы и методы

Динамика развития технологий и трансформации мирового высокотехнологичного рынка в последние десятилетия предполагает, что лидерство на нем достигается не только значительным объемом экспорта, но и высоким уровнем квалификации кадров, а также накопленным научным потенциалом для появления новых товаров в будущем. Определение перспективных партнеров для Республики Беларусь базируется на ранее проведенном исследовании [1], позволившем провести группировку стран, представленных на глобальном рынке высокотехнологичной продукции, сотрудничество с которыми в рамках ИО может привести к ускоренному развитию отечественной высокотехнологичной сферы.

Необходимость сотрудничества

В исследованиях Европейской экономической комиссии ООН под руководством Р. Пребиша [2] изучался феномен «отсталости». Утверждалось, что существующий мировой экономический порядок обусловлен дихотомией «центр – периферия», когда страны периферии главным образом выступают в роли экспортеров ресурсов (в широком понимании) в развитые страны «центра». При этом условия сотрудничества таковы, что экономическое положение государств-экспортеров в долгосрочной перспективе ухудшается. Это обусловлено двумя взаимосвязанными факторами. Во-первых, по мнению Р. Пребиша, существует так называемый порочный круг, не позволяющий представителям периферии преодолеть отставание в уровне производительности и норме накопления. Во-вторых, существующие структурные условия в этих странах не позволяют воспользоваться выгодами от возможного роста производительности в результате взаимодействия с более передовыми партнерами. Объяснением возникновения данных факторов выступила теория, что «силы мирового рынка» поддерживают существующий выгодный для развитых государств порядок. По аргументации Р. Пребиша, изменение структуры международной торговли определяется, в преобладающей степени, политическими решениями, в том числе и самих периферийных стран.

Подтверждением данной теории явились труды А. Гальченко, А. Тегина и В. Тегина, проанализировавших конкурентные преимущества и

ценообразование на высокотехнологичную продукцию стран «центра и полупериферии» (в терминологии авторов). В соответствии с их исследованиями, «искусственно завышенные цены на продукцию стран мирового экономического «центра» создают избыток финансовых средств, обеспечивающих им сравнительно высокий уровень жизни... и опережающее развитие науки и технологий» [3].

По их мнению, конкурентные (стоимостные) характеристики промышленной продукции, производимой в странах «центра», существенно завышены, и такие страны «значительно уступают в конкурентоспособности производящим странам «полупериферии» по ряду основных видов промышленных товаров». При этом «чем продукция более технологична, тем более неконкурентоспособной для стран «центра» она является в открытом рыночном соревновании». Разработанная авторами модель показывает, что «страны «полупериферии», создавая любую промышленную продукцию, заведомо обладают конкурентными преимуществами, и чем выше научно-технологический уровень отрасли, в которой проходит заочное соревнование, тем выше уровень преимуществ» [3]. Данные результаты получены на основе исследований наиболее высокотехнологичных отраслей промышленности, таких как выпуск гражданских и военных самолетов, космическая техника и аппаратостроение, конструкции ядерных технологий и др. [3–5]. Например, анализ выпуска гражданских самолетов показал, что высокие объемы продаж стран «центра» обеспечиваются путем использования инерции ценовых преимуществ от эффекта массового производства и монополизации эксплуатационного обеспечения. При этом внедрение последних результатов НИОКР (создание более легких конструкций планера и экономичных двигателей) в меньшей степени влияет на продажи. Данные условия не позволяют авиационной промышленности стран «полупериферии» выйти одновременно на большие объемы выпуска из-за сравнительной дороговизны малосерийной продукции. Только увеличение объема производства до тысячных серий позволило бы ей конкурировать по ценам на внутренних и внешних рынках, и такая ситуация наблюдается во многих областях по выпуску средних и высокотехнологичных товаров.

Для небольших государств, таких как Беларусь, данный вопрос не может быть решен без участия партнеров из крупных стран «полупериферии». В результате возникает необходимость определения наиболее перспективных стран, сотрудничество с которыми принесет наибольшую выгоду.

Выбор стран-партнеров

В соответствии с последними изменениями [6] на мировом рынке высокотехнологичных товаров происходит постепенное замедление его роста. Это связано в первую очередь с сокращением сегмента производства и поставок компьютеров и комплектующих к ним. После значительного подъема во время пандемии, обусловленного удаленным характером работы, когда конечные потребители и организации приобретали новые устройства, в 2022 г. отмечено падение глобальных поставок на 16%. Это можно объяснить и общим замедлением мировой экономики, и тенденцией удлинения циклов обновления уже используемого оборудования. Несмотря на экономический кризис и политическую неопределенность, расходы на компьютерное оборудование по итогам 2023 г. возросли на 3,2% и составили 4,7 трлн долл. [6]. В результате рейтинговой оценки [1] страны, представленные на мировом рынке высокотехнологичных товаров, разделены на 4 категории: лидеры; потенциальные лидеры; последователи; находящиеся на периферии рынка.

Лидеры, в числе которых Япония, Республика Корея, Сингапур, Германия, США, Нидерланды, Великобритания, Франция, Швейцария, Швеция, Канада, Бельгия, Дания, Израиль, Ирландия, Финляндия, Австрия, Норвегия, Австралия и Китай, самостоятельно создают и распространяют технологии, имеют значительный потенциал для проведения исследований, занимают лидирующие позиции по экспорту наукоемкой продукции. Для большинства из них сотрудничество с Республикой Беларусь в существующих условиях ограничено санкционными или политическими мерами. Проводимые ранее проекты или поставки товаров значительно сократились и носят точечный характер. Для частичного сохранения потенциала сотрудничества организации-партнеры находят пути взаимодействия через государства-посредники, например Грузию, Узбекистан, Молдову, Китай, Малайзию и др.

Наиболее перспективным партнером из группы стран-лидеров для Беларуси выступает Китай, который близок к тому, чтобы обогнать США в качестве крупнейшего импортера в мире по общему товаропотоку, что существенно влияет на расстановку сил в высокотехнологичной сфере. В 2001 г., когда Китай присоединился к ВТО, он уже был четвертым импортером в мире после США, Японии и Франции. Прогнозировалось, что он быстро переместится на первое место, но США продолжают оставаться круп-

нейшим мировым покупателем и сохранять рычаги влияния в торговых переговорах. Однако введение ограничительных мер со стороны США может привести к тому, что в ближайшие годы лидерство перейдет к КНР [7]. Для Беларуси Китай выступает стратегическим партнером во многих сферах экономики. Общий экспорт товаров из нашей республики в эту страну за 2011–2021 гг. вырос более чем на 36% и равнялся 867,4 млн долл. [8]. В 2022 г. объем валовых инвестиций увеличился на 80% и составил порядка 200 млн долл. В том же году было выполнено более 40 совместных проектов в высокотехнологичной сфере на территории республики. Для дальнейшего углубления сотрудничества подписана Комплексная стратегия совместного промышленного развития, а также дорожная карта по ее реализации. В них содержатся конкретные проекты по созданию совместных производств как на территории Беларуси, так и Китая, привлечению китайских технологий для модернизации существующих белорусских предприятий. Планируются общие инициативы по выпуску медицинского и технологического оборудования, транспорта, электроники [9].

К группе потенциальных лидеров отнесены Италия, Испания, Чехия, Россия, Малайзия, Люксембург, Польша, Венгрия, Португалия, Таиланд, Словения, Бразилия, Новая Зеландия, Гонконг, Мексика, Исландия, Словакия, Аргентина, Мальта, Греция. Здесь для Беларуси интересна в первую очередь РФ как давний стратегический партнер, а также страны Юго-Восточной Азии.

Двустороннее сотрудничество с Россией активно дополняется развитием кооперационных связей в рамках ЕАЭС. Это позволяет углублять взаимодействие также со странами-последователями: они активны в использовании новых технологий, но научный и/или производственный уровень не позволяет выпускать высокотехнологичную продукцию в большом количестве. Как правило, это небольшая группа конкурентоспособных товаров, спрос на которые часто ограничен узким сегментом мирового рынка. В одних государствах, таких как Румыния, Литва, Украина, Болгария, Эстония, Хорватия, Сербия, Латвия, Казахстан, Македония, наука и экономика формировались во время существования СССР (сюда относится и Беларусь). В других – Индия, ЮАР, Тунис, Чили, Филиппины, Индонезия, Турция, Колумбия, Марокко – кооперационные связи и перенос производств из стран экономического авангарда позволил выпускать высокотехнологичные товары, жизненный цикл которых подходит к концу.

Государства Юго-Восточной Азии соперничают с КНР в качестве производственной базы. Торговая напряженность между Китаем и США и опасения по поводу ненадежных цепочек поставок подтолкнули компании к строительству промышленных площадок во Вьетнаме, Таиланде и Сингапуре, которые входят в альянс 10 стран АСЕАН и выпускают аналоги товаров, производимых в Китае. Карантинные меры в КНР в начале 2020 г. привели к частичной или полной остановке китайских заводов, работавших на крупнейшие технологические корпорации мира. В результате произошло перераспределение товарных потоков, и возрос вклад в экспорт высокотехнологичной продукции других азиатских стран: Малайзии, Таиланда, Сингапура и Республики Корея.

Расширение сотрудничества с государствами Латинской Америки объясняется активным увеличением спроса на аккумуляторные батареи для мобильных гаджетов и электромобилей. В рамках мировой экономики это привело к росту торговли материалами, связанными с изготовлением батарей, поставщиком сырья для которых и являются страны Латинской Америки. Согласно анализу Trade Data Monitor, Чили и Аргентина – крупнейшие в мире экспортеры карбоната лития.

В настоящее время получателем этого материала становится Китай вместо Японии, Южной Кореи и США, поскольку КНР развивает собственную цепочку поставок аккумуляторов [10]. Несмотря на то, что в Беларуси создан прототип аккумулятора на основе натрия (альтернатива дорогим литиевым), до производства его в промышленных масштабах целесообразно прорабатывать свои пути закупок карбоната лития.

Невысокий уровень распространения передовых технологий и профессиональной подготовки рабочей силы, отсутствие современных производств в странах, находящихся на периферии высокотехнологичного сегмента мирового рынка, не позволяют им выпускать и, следовательно, экспортировать высокотехнологичные товары. Наибольшее количество государств (72%) относится именно к таковым, например Кения, Пакистан, Босния и Герцеговина, Катар, Египет, Боливия, Гватемала, Сальвадор и др. Сотрудничество с ними может базироваться на проводимой правительством политике налаживания связей со странами «дальней дуги». В этом случае они будут рассматриваться в основном как потребители белорусской высоко- и среднетехнологичной продукции. Для этого следует более активно проводить ознакомительные и рекламные кампании производимых в республике товаров.

Возможности интеграционных объединений

Термин «интеграция» впервые упоминается в работах немецких ученых Х. Кельзена, Д. Шиндлера и Р. Шмеда, которые трактовали его как «объединение людей (особенно государств) в некую социально-политическую общность» [11]. В научной литературе экономическая интеграция определяется как процесс объединения и взаимодействия отдельных экономических субъектов на различных уровнях: международном, региональном и отдельных предприятий (микроуровень). Международная экономическая интеграция – наивысшая ступень интернационализации, при которой происходит сращивание национальных хозяйств на основе глубоких устойчивых взаимосвязей и разделения труда и формируется общее пространство с единой валютно-финансовой, правовой системой и координацией экономической политики государств.

Важным вкладом в развитие ее теории стало выявление следующей закономерности: «Региональная экономическая интеграция становится возможной только после того, как в соответствующем регионе складывается, по меньшей мере, IV технологический уклад, а глобализация – только тогда, когда во всех авангардных регионах мира начинает доминировать V уклад» [12]. Исходя из данного постулата, интеграционные процессы более характерны для развитых стран, чем развивающихся. Объясняется это прежде всего структурными особенностями экономик развивающихся стран, вынужденных конкурировать на относительно однородных рынках (сельское хозяйство, добыча полезных ископаемых и др.).

Функционирование Евразийского экономического союза показывает его эффективность, поэтому целесообразно дальнейшее расширение направлений интеграции без изменения базовых договоренностей. Рассматривается возможность установления льготного налогового режима для совместных предприятий в таких приоритетных высокотехнологических отраслях, как электроника, авиастроение, «большая» химия, фармакология. Также изучается вопрос перераспределения потоков инвестиций в основной капитал в объекты обрабатывающей промышленности, которые непосредственно влияют на конкурентоспособность экономики и получение высокой добавленной стоимости. Прорабатывается тема создания автономной цифровой валютной среды, выгодной государствам – членам ЕАЭС и другим дружественным странам, а также внедрения независимой расчетной системы, аналогичной SWIFT. Расширение объемов сотрудничества членов

ЕАЭС со странами – участниками ШОС и БРИКС (рост торговли в 2022 г. на 35%) диктует необходимость интеграции платежных систем между ИО [13].

Введение санкционных и ограничительных мер ухудшает условия для функционирования глобальных цепочек приращения стоимости. На смену процессам глобализации приходит мегарегионализация. Возникают торговые соглашения нового типа – мегарегиональные (МРТС). Предметом международных договоренностей становятся не только торговые аспекты взаимодействия между странами, но и вопросы промышленной, инвестиционной, научно-технической, экологической и социальной политики.

В настоящее время МРТС выделяются как основной вектор региональной экономической интеграции. В начале XXI в. направления их развития определялись позицией США, которые рассматривали их как способ укрепления своего влияния в противовес Китаю, а также как инструмент стимулирования своего экспорта, объединения рынков и активизации транснационального бизнеса. США сыграли ключевую роль в подготовке и подписании крупнейшего договора Тихоокеанского партнерства (ТТП), а также вели интенсивные переговоры с Европейским союзом по созданию Трансатлантического торгового и инвестиционного партнерства (ТТИП).

Азиатско-тихоокеанский регион (АТР) и Северная Атлантика в настоящее время выступают двумя основными мировыми центрами, заинтересованными в выработке организационно-правовых решений, обеспечивающих развитие международного производства. Участие в МРТС позволяет продвигать новые правила международной торговли, что облегчает их распространение по всему миру, в том числе в будущих аналогичных соглашениях. Но в 2017 г. администрацией США было принято решение о выходе из уже подписанного соглашения ТТП и приостановлении переговоров о создании ТТИП, что оказалось выгодным для Китая, который возглавляет аналогичный проект – Всеобъемлющее региональное экономическое партнерство (ВРЭП), в который входят 7 из 12 стран – участниц ТТП. Несмотря на то, что государства при создании ВРЭП в ноябре 2020 г. ставили менее глобальные цели, чем при ТТП, подписанное соглашение охватывает не только сферу торговли, но и предусматривает содействие росту взаимных инвестиционных потоков. При этом оба проекта сопоставимы по объему ВВП стран-участниц и обороту международной торговли.

Кроме данной группировки в АТР существует еще одно крупное региональное объединение – Всеобъемлющее и прогрессивное тихоокеанское

партнерство (соглашение подписано в марте 2018 г.). В него вошли страны, не подписавшие соглашение ВРЭП: Австралия, Бруней, Вьетнам, Канада, Малайзия, Мексика, Новая Зеландия, Перу, Сингапур, Чили и Япония. По сравнению с ТТП в данном объединении существенно смягчены положения о защите интеллектуальной собственности, на которых настаивали США. Но суммарный выигрыш стран от участия в партнерстве составит 147 млрд долл. В случае присоединения еще 5 членов (Индонезии, Республики Корея, Филиппин, Тайваня и Таиланда) суммарный выигрыш 16 участников может существенно превысить таковой в ТТП [14].

Для Беларуси вхождение в данные мегарегиональные объединения даже не в качестве полноправного члена, а, например, наблюдателя или партнера в определенных областях, принесет значительное расширение рынков сбыта и рост возможностей технологической, производственной и научно-технической кооперации.

Результаты и выводы

Межрегиональная экономическая интеграция – один из инструментов обеспечения стабильного и устойчивого роста региональных экономик. Участие страны в ИО позволяет высокотехнологичным предприятиям входить в глобальные производственные цепочки, эффективно привлекать и применять новые технологии, наращивать свою конкурентоспособность на мировом рынке. Это особенно актуально для Республики Беларусь в силу реализации Программы социально-экономического развития на 2021–2025 гг., где поставлены цели по увеличению экспорта товаров и услуг более чем на 50 млрд долл. в 2025 г., а также диверсификации его структуры; повышению конкурентоспособности производственного сектора экономики, в том числе путем создания новых высокотехнологичных производств [15]. Кроме того, Государственной программой инновационного развития на 2021–2025 гг. планируется создание около 100 высокодоходных экспортно ориентированных производств, увеличение удельного веса инновационно активных организаций обрабатывающей промышленности до 30,5%, объема экспорта наукоемкой и высокотехнологичной продукции до 18,3 млрд долл. [16].

Но взаимодействие страны в рамках любого интеграционного объединения должно основываться в первую очередь на соблюдении собственных экономических и политических интересов и защите внутренних ресурсов, что требует учета новых реалий

для участия Беларуси в ИО. В качестве действенного механизма может рассматриваться возможность разносторонней и разноуровневой интеграции как в рамках существующих ИО, так и при присоединении к новым. ■

■ **Summary.** The article defines the importance of integration associations in the field of high technologies and their advantages for the development of production and the economy as a whole. The most promising countries and regional associations for deepening cooperation between Belarus are analyzed. The results of the study will help identify the most promising partner countries for Belarus in the field of high technologies and develop a strategy for participation in integration associations.

■ **Keywords:** high-tech sphere, goods, world market, integration associations.

■ <https://doi.org/10.29235/1818-9857-2024-04-50-55>

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

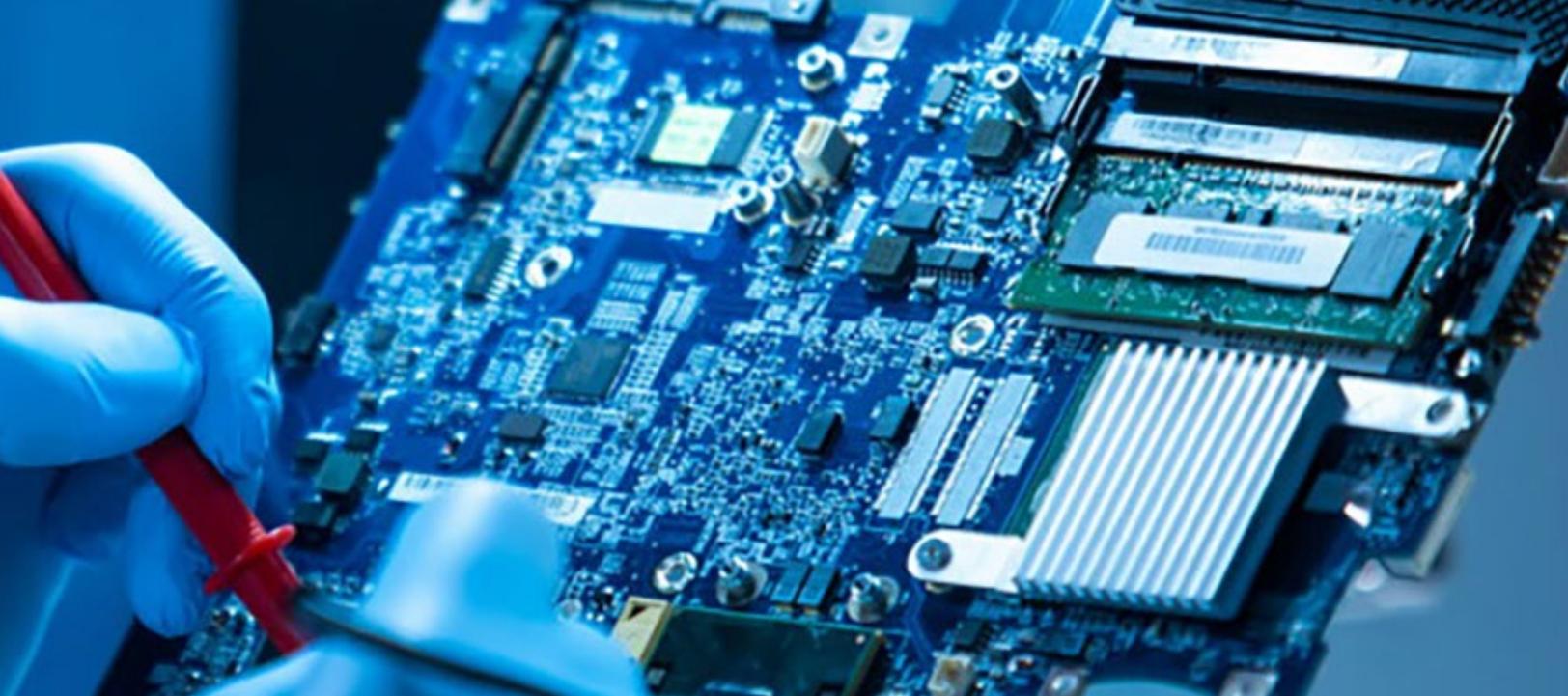
1. В.А. Щетко. Беларусь в рейтинге стран, представленных на мировом рынке высокотехнологичных товаров // Наука и инновации. 2017. №11. С. 34–38.
2. Prebish R. The Economic Development of Latin America and Its Principal Problems. – New York, 1950.
3. А. Гальченко [и др]. Признаки системной неконкурентоспособности экономики альянса стран мирового экономического центра // Общество и экономика. 2022. №6. С. 57–71.
4. Е. Балабан [и др]. Динамическое равновесие цен на материальную высокотехнологичную продукцию в рамках ценометрической парадигмы // Общество и экономика. 2018. №7. С. 65–90.
5. А. Гальченко [и др]. О корректности определения ВВП стран мирового экономического центра // Общество и экономика. 2021. №4. С. 41–58.
6. Tech trends 2023 – statistics & facts // <https://www.statista.com/statistics/268938/global-it-spending-by-segment/>.
7. TDM Insight: Top Ten Trade Trends of 2021–2022 // <https://www.tradedatamonitor.com/datanews/tdm-insight-top-ten-trade-trends-of-2021-2022/>.
8. Внешняя торговля товарами // <https://www.belstat.gov.by/ofitsialnaya-statistika/realny-ekonomiki/vneshnyaya-torgovlya/vneshnyaya-torgovlya-tovarami/>.
9. Инвестиции в приоритете // Экономика Беларуси. 2023. №2. С. 24–31.
10. Trade Data Monitor. 2022 // <https://tradedatamonitor.com/index.php/in-the-news>.
11. Н.М. Игнатьев. О понятии экономической интеграции хозяйствующих субъектов // Экономический журнал. 2012. Т. 27. №3. С. 98–104.
12. Ю.В. Шишков. Регионализация и глобализация мировой экономики: альтернатива или взаимодополнение // Мировая экономика и международные отношения. 2008. №1. С. 8–13.
13. М. Мясникович. Приоритеты Евразийского экономического союза 2030+. Научно-практический подход // Наука и инновации. 2023. №6. С. 7–10.
14. В.С. Загашвили. Экономическая глобализация и региональная интеграция в постковидную эпоху // Мировая экономика и международные отношения. 2022. Т. 66, №4. С. 5–13.
15. Программа социально-экономического развития Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утв. Указом Президента Республики Беларусь от 29.07.2021 г. №292 // <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P32100292>.
16. Государственная программа инновационного развития Республики Беларусь на 2021–2025 гг., утв. Указом Президента Республики Беларусь от 15.09.2021 г. №348 // <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=P32100348>.

Статья поступила в редакцию 06.06.2023 г.



Инновационно-промышленный кластер «Микро-, опто- и СВЧ-электроника» – добровольная координирующая структура, осуществляющая свою деятельность в сфере научных исследований, опытно-конструкторских разработок и выпуска передовых изделий микроэлектроники, был создан в нашей стране в феврале 2017 г. В его состав вошли известные профильные предприятия – ОАО «Интеграл», «Планар», Минский НИИ радиоматериалов, научные организации НАН Беларуси и ведущие национальные университеты. Одним из инициаторов объединения лучших сил страны, специализирующихся на электронной компонентной базе, в единый научно-промышленный конгломерат был академик Николай КАЗАК. Мы расспросили у него, каких успехов удалось добиться в этом стратегически важном направлении и какой вклад в его развитие вносят белорусские ученые.

Вендор белорусской электроники



– Николай Станиславович, предположу, что для выработки стратегии деятельности кластера были предприняты серьезные организационные и правовые усилия. Какие наиболее важные из них стоит отметить?

– В первую очередь следовало определить новую перспективную тематику фундаментальных и прикладных работ. Для этого были образованы рабочие группы по заданной тематике, налажено тесное взаимодействие специалистов заинтересованных предприятий, обладающих соответствующим опытом и компетенциями, утвержден Перспективный план сотрудничества Национальной академии наук Беларуси, вузов, ОАО «Интеграл» и ОАО «Планар» на 2017–2020 гг., а затем и на 2021–2025 гг., предусматривающий реализацию нескольких десятков мероприятий. Огромный, не побоюсь этого слова, вклад в формирование перспективных точек роста внесла разработанная с участием кластера Концепция развития в Республике Беларусь исследований и разработок для создания электронной компонентной базы на 2021–2025 гг. В документе содержится обзор мировых тенденций в отрасли, а также поставлены конкретные задачи по диверсификации номенклатуры выпускаемых в нашей стране изделий микро-, опто- и СВЧ-электроники, МЭМС-датчиков и сенсоров. Концепция получила одобрение Министерства промышленности, Государственного комитета по науке и технологиям, Министерства образования и Министерства экономики.

В 2022–2023 гг. по данному вопросу было организовано несколько совещаний у Главы государства, на которых дан ряд серьезных поручений. Во исполнение одного из них Министерством промышленности совместно с Национальной академией наук разработана и утверждена Правительством Программа развития микроэлектронной промышленности Республики Беларусь на период до 2030 г. Она содержит 146 заданий по совершенствованию и модернизации действующих в Республике Беларусь микроэлектронных производств и предусматривает использование новых материалов, технологий, конструктивных и технологических решений, новейших достижений науки, а также реализацию важнейших инновационных проектов. Для решения поставленных задач созданы отраслевые лаборатории для быстрого освоения в производстве опытных образцов и небольших партий новых изделий микроэлектроники. На сегодняшний день функционирует уже 10 таких структур.

– Основным звеном кластера являются три промышленных предприятия – ОАО «Интеграл», «Планар» и Минский НИИ радиоматериалов. Какова номенклатура электронных компонентов, выпускаемых ими?

– Безусловно, это наши «киты», на которых держится отрасль и которые демонстрируют весьма высокие результаты. Так, «Интеграл» – ведущий белорусский микроэлектронный холдинг,

обеспечивающий полный цикл изготовления продукции – от этапа проектирования до серийного выпуска, с 2013 по 2022 г. реализовал 4 инвестиционных проекта. Они касались развития производства эпитаксиальных структур, создания прецизионной сборки, разработки перспективных технологий корпусирования микросхем и внедрения процессов усовершенствованной биполярной и БиКДМОП-технологии на пластинах диаметром 150 мм. В результате возможности предприятия существенно расширились, и номенклатура изделий стала насчитывать более 3500 типов микросхем и полупроводниковых приборов, сборочные мощности по корпусированию дискретных приборов – 30 млн штук в год, микросхем – 60 млн. В обозримой перспективе здесь планируется освоение новых технологических процессов с проектными нормами до 250 нм. По прогнозам, объем выручки от реализации продукции к 2030 г. вырастет почти вдвое по сравнению с прошлым годом. Здесь создана и успешно функционирует современная отраслевая лаборатория новых технологий и материалов (ОЛНТМ).

Минский НИИ радиоматериалов специализируется на проектировании и изготовлении СВЧ монолитных интегральных схем и микроэлектромеханических чувствительных элементов. Освоенные проектные нормы 100–200 нм в полной мере соответствуют мировому уровню для такого рода продукции. Ее перечень увеличился за последние годы в десятки раз и включает более 120 позиций СВЧ-компонентов, МЭМС-датчиков, электронных модулей, систем и другой техники. Созданы оригинальные и импортозамещающие СВЧ монолитные интегральные схемы сантиметрового и миллиметрового диапазонов длин волн, всего 58 наименований, производственные мощности – до 300 тыс. в год. СВЧ-компоненты поставляются для белорусских и российских предприятий: ОАО «Алевкурп», ОКБ ТСП, АО «НПП «Исток» им. Шокина», АО «ИЭМЗ «Купол», ООО «КОМЕТА», ООО «ВебСейлЭлектроникс», АО «НИИ «Полус» им. М.Ф. Стельмаха», АО «ЭРКОН», ФГУП РНИИРС, ООО «НПК Позитрон» и др.

МНИИРМ обладает технологиями изготовления микроэлектромеханических систем, в частности чувствительных элементов датчиков – акселерометров, инклинометров, гироскопов. В интересах отечественных предприятий разработан и выпускается широкий спектр импортозамещающих изделий: датчиков и блоков контроля, бесконтактных индуктивных выключателей и т.д., для ПАО «КАМАЗ» – образец системы контроля перегруза автомобиля.

В институте организованы 2 отраслевые лаборатории: по проектированию и изготовлению фотошаблонов для выпуска микро-, опто- и СВЧ-электроники и МЭМС-технологий, а также по созданию критических технологий МЭМС и СВЧ электронных компонентов. В ближайшие годы в модернизацию предприятия планируется вложить около 14 млн долл. Все эти шаги позволяют МНИИРМ уверенно наращивать производство продукции, работ, услуг. Так, рост их объема за 1-й квартал 2023 г. по отношению к аналогичному периоду 2022 г. составил 181,6%, экспорта – 334,6%.

Научно-производственный холдинг «Планар» известен сложнейшим оптико-механическим, технологическим, сборочным и контрольно-измерительным оборудованием для микроэлектроники. Их перечень обширен и требует отдельной публикации. Поэтому остановлюсь только на том, что согласно Программе «Развитие микроэлектронной промышленности Республики Беларусь на период до 2030 г.» предприятию предстоит освоить производство изделий с проектными нормами 90–65 нм, а по отдельным видам машин – 45–28 нм.

– Микроэлектроника, являясь элементом V технологического уклада, служит основой для большинства современных технологий следующего, VI уклада: искусственного интеллекта, современных систем связи, космических технологий, электротранспорта, беспилотных комплексов, авиационного, навигации, банковской системы, систем управления и др. Что было принято для диверсификации выпускаемых белорусскими предприятиями изделий микро-, опто- и СВЧ-электроники?

– Осознавая необходимость выработки инновационных подходов для производства изделий микроэлектроники на передовом, соответствующем мировому уровню, участниками кластера коллективно были определены основные направления исследований и разработок на текущую пятилетку с использованием новейших достижений в области материаловедения, микро- и наноструктур, микро-, нано-, лазерной, волоконной и квантовой оптики. К примеру, в ОАО «Интеграл» и ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» была выполнена опытно-конструкторская работа и начат выпуск лавинных кремниевых фотодиодов, характеристики которых не уступают аналогичным фотоприемникам мирового лидера – японской фирмы «Hamamatsu», а по некоторым параметрами превышают их. Изделия уже поставляются организациям

Республики Беларусь и Российской Федерации, имеются запросы из Китая и Индии. Новым витком развития стал малогабаритный кремниевый многопиксельный фотоумножитель, разработаны его опытные образцы, ведется подготовка к серийному выпуску. В рамках выполнения задания Союзной НТП «Компонент-Ф» планируется расширить номенклатуру фотоприемников. Они будут обладать высокими показателями: диапазоном спектральной чувствительности 0,35–1,06 мкм, коэффициентом усиления 105–106, пробивным напряжением 27–60 В, возможностью работы как в пропорциональном, так и в гейгеровском режиме.

Проводится НИОКР по расширению семейства датчиков на основе кремниевых лавинных диодов и фотоумножителей: гамма- и бета-излучения, регистрации ультрафиолетового излучения малой интенсивности. Не могу не упомянуть и о достижениях в области тепловизионных технологий. ОАО «Интеграл», ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» и БГУ трудятся над их созданием. В частности, разрабатываются микроболлометрические фоточувствительные матрицы с использованием диоксида ванадия и комплементарные структуры на кремнии, охлаждаемые фоточувствительные матрицы и тепловизионные системы на основе неохлаждаемых микрорезонаторов Фабри – Перо. Кроме того, отрабатываются технологии гибридизации мультиплексоров с неохлаждаемыми и охлаждаемыми фотоприемными матрицами, изготовлен тепловизор с охлаждением с чувствительностью 0,04 оК.

В соответствии с мировыми трендами по постепенной замене кремниевых транзисторов на нитрид галлиевые в Институте физики им. Б.И. Степанова НАН Беларуси активно ведутся изыскания в области создания нового поколения СВЧ-электроники на базе этого соединения, позволяющего без существенных изменений производственных цепочек и технологических норм осуществить технологический скачок в быстродействии – до 100 раз, мощности – до 4 раз, температурной – до 400–600 °С и радиационной стойкости – в 10–100 раз. Эти прорывные показатели способны дать новую жизнь зарядным устройствам, системам питания и управления электромобилями, космической электронике и электронике специального назначения и т.д. В Институте получены гетероструктуры AlGaIn/GaN с характеристиками двумерного электронного газа на уровне лучших мировых результатов. На их основе разработаны тестовые СВЧ-транзисторы с частотой отсечки 16 ГГц, крутизной 160 мСм/мм и максимальным током стока более 1,1 А/мм, что является

отличным результатом для ширины затвора 1 мм. Большие подвижки есть в проектировании дизайна гетероструктур, топологии СВЧ- и силовых транзисторов. Последние имеют на два порядка большую частоту работы – до 10 МГц, высокий КПД, в 4 раза сниженные тепловые потери и значительно меньшие массогабаритные параметры. Такие транзисторы найдут применение в активных фазированных антенных решетках радаров, системах телекоммуникации мобильного и авиакосмического базирования, а также 5G и 6G сотовой связи.

– Во многих государствах мира микросхемотехника и технологии защиты изделий электроники входят в Перечень критических разработок. Какое значение придается этому направлению в нашей стране?

– В Беларуси принято решение о более интенсивном его развитии. К тому же для этого не требуются дорогостоящие технологии глубокого субмикрона. Например, в арсенале Минского НИИ радиоматериалов – широкий спектр различных датчиков, которые поставляются белорусским и российским организациям. Это датчики деформации, конечного положения, угла наклона, теплового потока (0,1–14 мкм), системы мониторинга угарного, углекислого газа и метана в критических точках автомобиля, дифференциальный зонд для контроля дефектности круглого стального проката, кремниевые сопла и др. Для расширения работ в этой области в МНИИРМ созданы, как я уже упоминал, две новые отраслевые лаборатории. К этой тематике активно подключается и ОАО «Интеграл». Фундаментальные и прикладные исследования обеспечиваются НАН Беларуси, БГУИР, БНТУ и БГУ. В перспективе основные усилия будут сосредоточены на разработке технологий для сборки 2D и 3D для многофункциональных микроэлектромеханических систем; изготовлении чувствительных элементов; оптических и магнитоэлектрических сенсоров постоянного и переменного магнитного и электрических полей на основе пленочных гетероструктур мультиферроиков; пленочных газовых сенсоров высокого быстродействия на графеновых структурах и оксидных материалах и др.

В НПЦ НАН Беларуси по материаловедению разработаны технологии формирования многослойных пленочных экранов (МПЭ) симметричного и градиентного типов, составных и широкополосных электромагнитных экранов для защиты от воздействия постоянного магнитного и электромагнитного поля низкой частоты. Высокие результаты получены на МПЭ симметричного типа. Совместно с российским

предприятием «ТЕМП-АВИА» были изготовлены и проведены испытания чувствительных сенсоров навигационной аппаратуры ракетной техники на устойчивость к случайной вибрации, которая в присутствии излучения приводит к появлению электрического потенциала на электронных компонентах. Экранирование существенно улучшило характеристики датчиков угловых скоростей в режимах старта, взлета и ускорения летательных аппаратов. МПЭ градиентного типа тоже зарекомендовали себя мощными средствами защиты. Если эффективность в отношении импульсного электромагнитного поля напряженностью $1,25 \div 3,5$ кА/м для микросекундного диапазона, обеспечиваемая конструкциями бортовых кабельных сетей из алюминия, составила минус 29 дБ (29 раз), то с применением МПЭ – минус $60 \div 51$ дБ ($1000 \div 360$ раз).

В ВЧ- и СВЧ-диапазонах электромагнитного воздействия используются материалы, поглощающие и отражающие его, а также сильные поглотители. Образцы последних на основе полимерных матриц с добавлением многослойных углеродных нанотрубок созданы в НИИ ПФП БГУ. Благодаря им в диапазоне частот 14–60 ГГц излучение ослабевает до минус 40 – минус 45 дБ.

В ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» НАН Беларуси и БГУИР разрабатывают тонкопленочные, фольговые и композиционные составы на основе оксидов алюминия и переходных металлов, наночастиц углерода и других углеродных наноматериалов. В НПЦ НАН Беларуси по материаловедению совместно с АО «ТЕСТ-ПРИБОР», г. Москва, и ОАО «Интеграл» ведутся работы в области локальной радиационной защиты на основе композиционных и многослойных материалов, созданию на их базе специализированных корпусов и модулей. Как показывает практика, они способны ослабить поток электронов с энергией 1,8 MeV с почти в 100 раз.

– Известно, что законы развития микроэлектроники – Мура, Деннарда, Амдала – демонстрируют симптомы насыщения. Каким видится выход из данной ситуации?

– В вышедшей в 2022 г. в России книге наших белорусских ученых А.И. Белоуса и В.А. Солодухи «Материалы и устройства наноэлектроники. Электроника после Мура» сделана успешная попытка дать развернутый ответ на этот вопрос. На основании системного анализа мировых тенденций здесь показано, что наиболее перспективными направлениями дальнейшего развития микроэлектроники

является квантовая микроэлектроника, спинтроника, магнетроника, стрейтроника, квантовые точки, нейроморфные наноматериалы и новые вычислительные системы на их основе. Одним из вариантов может стать объединение электроники с такой совместимой технологией, как фотоника. Оптическая передача информации обеспечивает не только гальваническую развязку, но и высокую скорость передачи данных до 50–100 Гбит/с, в то время как предел используемой в настоящее время медной металлизации оценивается в ~ 20 Гбит/с. Однако здесь есть ряд серийных проблем, связанных с применением оптических межсоединений. Одна из них – разработка технологий и конструкций оптических компонентов минимального размера – не более 45 нм. Они, кроме больших размеров, характеризуются низкой температурной стойкостью. Фундаментальной проблемой для фотонных интегральных схем является создание проводников и волноводов с низкими потерями. При этом наиболее предпочтительна кремниевая фотоника. Она идеальна благодаря высокой развитости и экономичности КМОП-технологии производства кремниевых интегральных схем, с которой она совместима. Кремний обладает важными оптическими свойствами в ближней инфракрасной области. Он работает на длине волны 1,55 мкм, поэтому модуляторы, волноводы и фотоприемники также могут быть созданы на базе этого элемента.

В БГУИР, БГУ, Институте физики, ГНПО «Оптика, оптоэлектроника и лазерная техника» ведутся исследования в области интегральной радио- и кремниевой фотоники. Это источники света – III-V/BiCMOS-лазеры, полупроводниковые лазеры с вертикальным и кольцевым резонатором; электрооптические модуляторы; волноводы, прежде всего планарные; фотоприемники УФ, видимого и ближнего ИК (до 5 мкм) диапазонов длин волн на базе гипердопированных атомами теллура слоев кремния на кремнии p-типа; фотонные компоненты на основе поверхностных плазмонов, в том числе с использованием графена; технологии 2,5D и 3D интеграции кремниевых электронных и фотонных интегральных схем, в том числе кремниевых интерпозеров.

– Что, по вашему мнению, следует предпринять для эффективного функционирования отрасли?

– В Программе «Развитие микроэлектронной промышленности Республики Беларусь на период до 2030 г.» определены мировые тренды микроэлектроники на 2026–2030 гг. Среди них названы

уже упомянутые мной молекулярная и квантовая микроэлектроника, спинтроника, магноника и магнанные вычисления, стрейтроника, нейронные сети и нейроморфные вычисления, полупроводниковые квантовые точки. Объединение и взаимное проникновение этих направлений привело к появлению нано-био-информационно-когнитивных НБИК-технологий, и все это основано на использовании совершенно новых для полупроводниковой индустрии наноразмерных материалов, в том числе нуль-, одно- и двумерных с необходимыми свойствами. По оценке большинства независимых зарубежных экспертов, уже сегодня в этом сегменте занято столько же ученых и специалистов, сколько и в традиционной кремниевой полупроводниковой промышленности. Логично, что и количество исследований по данной тематике в ближайшие 10 лет будет только увеличиваться, как и финансирование в них. Поэтому наиболее верным путем дальнейшего развития микроэлектроники и электронной продукции является поиск эффективных материалов и композитов, новых областей применения, создания комплексных микроэлектронных изделий на новых принципах и технологиях. В этой связи целесообразно, на мой взгляд, начать работу по формированию Государственной программы научных исследований с условным названием «Микро- и наноэлектроника нового поколения» на 2026–2030 гг. с двумя разделами – фундаментальных и прикладных исследований. Тематика первого должна соответствовать новым альтернативным научным направлениям, второго – включать планирование конкретных технологий и устройств, которые могут быть доведены «до ума» в рамках государственных и государственных научно-технических программ. Хочу отметить, что для проведения экспериментальных исследований в области наноэлектроники необходимо сложное и весьма дорогое технологическое, сборочное и контрольно-измерительное оборудование. Частично оно имеется в Академии наук и в вузах, новое закупается ОАО «Интеграл» для отраслевой лаборатории новых технологий и материалов. Однако имеющейся базы явно не достаточно – нужно сосредоточить ресурсы и создать в различных организациях Республики Беларусь центры коллективного пользования, где новейшая техника будет предоставляться исследователям и разработчикам с оплатой только расходных материалов, а

ГКНТ станет ежегодно выделять средства на ремонт и частичное обслуживание такого оборудования.

Следует также организационно оформить межотраслевую руководящую структуру, управляющую этими работами, возможно, на основе кластера, придав ему более сильные права и обязанности.

По моему мнению, очень важно для обеспечения устойчивого функционирования и целевого роста имеющейся базы микроэлектроники, а также формирования ее экосистемы объединить усилия белорусских и российских коллективов, работающих в этих направлениях. В нашей стране это специалисты инновационно-промышленного кластера «Микро-, опто- и СВЧ-электроника», в РФ – консорциумов «Перспективные материалы и элементная база информационных и вычислительных систем» и «Консорциум дизайн-центров и предприятий радиоэлектронной промышленности РФ». На их партнерство и взаимодействие нацелено подписанное в сентябре 2022 г. межправительственное соглашение в области развития технологий, проектирования и производства электронной компонентной базы и электронного машиностроения. Необходима сильная интеграционная структура (совет, группа или т.п.) для координации исследований и разработок, объединения компетенций, обмена информацией, выработки стратегии и тактики общих усилий белорусских и российских ученых и производственников, для чего следует, на мой взгляд, подготовить совместное предложение по формированию научно-технической программы Союзного государства в данной сфере. Также предстоит оперативно создать центр обучения и стажировки специалистов, разработчиков и высококлассных технологов в данной предметной области.

Такие действия позволят создать опережающий научный задел и условия для нового витка микроэлектроники – важного элемента национальной безопасности и технологической независимости страны, устойчивости и конкурентоспособности отечественной промышленности. ■

Ирина ЕМЕЛЬЯНОВИЧ



РЕСПУБЛИКАНСКИЙ НАУЧНЫЙ ЦЕНТР УГЛЕВОДОРОДНОГО И АЛЬТЕРНАТИВНОГО СЫРЬЯ: МАКСИМУМ ЭФФЕКТИВНОСТИ ПРИ ИСПОЛЬЗОВАНИИ РЕСУРСОВ



Разработка новых лесохимических технологий на основе возобновляемых растительных ресурсов страны и научные изыскания, нацеленные на повышение эффективности нефтепереработки, – вот главные цели, которые преследовались при создании в Институте химии новых материалов НАН Беларуси ряда специализированных научных центров. Первым – в 2005 г. – по инициативе директора Института, заслуженного деятеля науки, академика Владимира Агабекова был образован Центр нефте- и лесохимических технологий – совместно с Институтом катализа им. Г.К. Борескова СО РАН. Его деятельность стала своеобразным фундаментом для организации в 2015 г. в Институте Республиканского научного центра углеводородного и альтернативного сырья. О сути его работы и полученных результатах мы расспросили ученого секретаря подпрограммы «Лесохимия 2» ГПНИ «Химические процессы, реагенты и технологии, биорегуляторы и биооргхимия», ведущего научного сотрудника Института химии новых материалов, кандидата химических наук Максима Бея.

– Чем была вызвана необходимость создания специализированного центра по лесохимии и нефтехимии на базе Института? Какие задачи были перед ним поставлены?

– В первую очередь надо подчеркнуть, что развитие этой тематики – заслуга академика Владимира Еноковича Агабекова, руководившего нашим Институтом более 20 лет и продолжающего трудиться в нем по сей день. В первой половине 2000-х гг., с учетом колебаний цен на нефть, крайне актуальной и для белорусских, и для российских ученых была задача разработки технологий более эффективной ее переработки. Владимир Енокович совместно с академиком РАН Валентином Пармоном, который возглавлял Институт катализа РАН, для продвижения этой тематики решили объединить усилия и основали Центр нефте- и лесохимических технологий. Ведь катализ – это область, близкая к нефтехимии, смежная с ней, одним из основных его направлений как раз и являются нефтехимические процессы. Надо сказать, что при создании центра сыграли свою роль и личные контакты ученых. Академика Пармона многое связывает с Беларусью: он закончил школу в Минске, а потом поступил в Московский физико-технический институт. Но связи с нашей страной остались. Также было налажено сотрудничество и с Институтом нефтехимического синтеза им. А.В. Топчиева РАН, одним из ведущих российских центров нефтепереработки, директором которого в то время был академик Саламбек Хаджиев. А уже в 2015 г. Центр нефте- и лесохимических технологий был трансформирован в Республиканский научный центр углеводородного и альтернативного сырья.

– Что представляет собой повестка углеводородного и альтернативного сырья сейчас?

– В нефтехимии она всегда примерно одинаковая: увеличение глубины переработки нефти. Задача очень сложная, поскольку – будем объективно говорить – речь идет об огромных объемах исходного сырья, требующих больших вложений. Идея, которую продвигал и сейчас продвигает академик Владимир Агабеков, – это совместная переработка тяжелых нефтяных остатков (гудронов, битумов, асфальтенов и т.д.) и растительного сырья (например, опилок). Есть разработки, показывающие, что, если вести этот процесс в присутствии определенных каталитических добавок, то эти два вида сырья взаимно дополняют друг друга, и глубина переработки нефти, выход так называемых светлых нефтепродуктов – бензинов, дизельных топлив, керосинов – увеличивается. Если говорить о цифровом выражении, то основная цель – увеличить глубину переработки нефти до 92–95%, уменьшить расход сырой нефти на 20–30% за счет ее замещения на растительное сырье и дополнительно получить 10–15% светлых углеводородных фракций. В данном случае добавляемое альтернативное сырье – это солома, опилки и пр. Исследования в этой области планомерно ведутся, начались они с разработки экспериментальной стационарной установки, которая уже введена в эксплуатацию на базе Института в прошлом году и отработки технологии. На текущую пятилетку запланировано выполнение задания, которым руководит академик Агабеков, – создание непрерывной технологии совместной переработки возобновляемого и углеводородного сырья.

Но поскольку в названии нашего центра фигурирует не только углеводородное, но и альтернативное, растительное сырье, на котором определен акцент в Институте делался всегда, то такое направление, как лесохимия, для нас ничуть не менее важно. Особенно актуально оно сейчас, в связи с концепциями устойчивого развития, зеленой энергетики, химии, технологии. Повестка альтернативного сырья всегда принималась во внимание и развивалась.

– Каким научным заделом вы располагали на старте?

– Работы по возобновляемому сырью, лесохимии достаточно традиционны для нашей республики, они активно ведутся и в НАН, и в БГТУ. Ведь в Беларуси одним из действительно доступных видов сырья является сосновая живица. Успешно работает с этим сырьем завод «Лесохимик» в Борисове, который занимается переработкой и получает основную живичную канифоль и скипидар – исходные продукты для лесохимии. Кроме того, в процессе деятельности Светлогорского целлюлозно-картонного комбината образуется так называемое талловое масло. Оно представляет собой смесь смоляных кислот канифоли и жирных кислот. Если бы мы смогли его переработать, то получили бы еще до 8 тыс. т канифоли.

Фактически это означало бы, что мы располагаем базой порядка 10 тыс. т своего, отечественного сырья. Это немало, учитывая, что общемировое производство канифоли – около 1 млн т в год.

В Беларуси развитием данного направления занимались академик Владимир Шкателов – один из основоположников отечественной лесохимии, член-

корреспондент НАН Беларуси Иван Бардышев, который заведовал крупной лабораторией химии терпеноидов и смоляных кислот в Институте физико-органической химии. Исследования велись на очень высоком уровне, была заложена мощная научная база. Значительный вклад в эту тематику вносит кафедра химической переработки древесины БГТУ. В 1980–1990-е гг. в ИФОХ работа в этой области существенно сократилась. В то время был образован химико-технологический центр НАН, ставший в 1998 г. Институтом химии новых материалов, и часть сотрудников Института физико-органической химии перешла туда. Благодаря им и была создана лаборатория лесохимических композиционных материалов, проработавшая около 20 лет, а сейчас – лаборатория лесохимических продуктов и технологий, которую возглавляет кандидат химических наук Александр Сидоренко. Такое направление, как переработка возобновляемых ресурсов, занимает в работе Центра углеводородного и альтернативного сырья существенную роль.

– Какие научные результаты уже достигнуты в этой области? Какие технологии оказались наиболее востребованными?

– По сути, мы занимаемся двумя направлениями: химией канифоли и химией скипидара. Например, моя работа связана с новыми методами получения индивидуальных соединений на основе смоляных кислот канифоли, которые могут быть использованы в качестве модифицирующих добавок в полимеры, улучшающих их физико-химические свойства, и оптически активных добавок в ЖК-материалы. Нам, например, впервые удалось раз-



работать метод получения широкого ряда индивидуальных соединений из канифоли с высокими выходами.

Второе направление – химия монотерпенов, его ведет заведующий лабораторией Александр Сидоренко. Суть – в получении катализаторов для превращения монотерпенов в ценный биологически активный продукт.

Например, уже созданы каталитические системы для эффективного синтеза соединений с высокой аналгетической и противовирусной активностью. Это особым образом модифицированные галлуазитовые либо алюмосиликатные нанотрубки. Для них были подобраны такие условия модификации, которые позволяют сформировать на их поверхности каталитически активные участки, направляющие ход реакции в нужную сторону, с образованием соединений, проявляющих высокую биологическую активность.

Эта работа ведется совместно с коллегами из Новосибирского института органической химии РАН, где данные соединения были впервые синтезированы, но с невысоким выходом. Их аналгетическая и противовирусная активность была под-

тверждена на животных моделях. Перед белорусскими учеными была поставлена задача разработать эффективные катализаторы для высокоселективного синтеза этих полезных соединений. По некоторым из них нашими российскими коллегами проводятся дальнейшие биологические исследования с последующим выходом на клинические испытания. Можно надеяться, что они станут основой для появления нового типа противовирусных и аналгетических препаратов – на основе терпеноидов, то есть соединений, выделяемых из растительного сырья: древесины, растений.

Заслуживают внимания и полученные нами результаты по совместной переработке возобновляемого и нефтехимического сырья – тяжелых нефтяных остатков.

Можно отметить работы, которые проводятся совместно с предприятием «Светлогорск-Химволокно», производящим полимерные нити. В лаборатории органических композиционных материалов в свое время была создана методика изготовления модифицированного волокна Арселон, с высоким кислородным индексом, что позволило практи-

чески обеспечить его негорючесть. Сейчас ведутся дополнительные исследования по получению антипиренов – добавок, которые препятствуют возгоранию, тушат открытое пламя.

– Какие из патентов оказались наиболее востребованными и экономически успешными?

– На базе лесохимического сырья – канифоли – разработан, запатентован и производится в Институте концентрат смазочно-охлаждающей жидкости (СОЖ). Для ее производства даже открыт отдельный цех. Ежегодный выпуск продукта составляет от 10 до 20 т, а экономический эффект – более 20 тыс. руб. в год. Потребители СОЖ – белорусские металлообрабатывающие предприятия: ЗАО «Атлант», ОАО «Торгмаш» (г. Барановичи), ОАО «Управляющая компания холдинга «Белкоммунмаш», Ивацевичский филиал ОАО «Экран», Минский моторный завод.

Еще один наш продукт – динатриевая соль 4,4'-азобензолдикарбоновой кислоты для ОАО «СветлогорскХимволокно» в качестве УФ-стабилизатора для волокон. Нами разработана технология, на основе которой на предприя-

тии создана установка, где и производится добавка. Она позволяет улучшать потребительские качества продукции и, соответственно, повышать ее стоимость и рентабельность.

– С какими направлениями деятельности Центра вы связываете его перспективы?

– У нас активно ведутся работы в области лесохимии, а именно химии скипидара, с Российской Федерацией. Надо сказать, что там произошла определенная реорганизация: Российский фонд фундаментальных исследований слился с Российским научным фондом, что повлекло за собой изменения в порядке предоставления грантов. Если раньше финансировалось множество небольших проектов, то теперь предпочтение отдается крупным, под которые, естественно, выделяются значительные средства.

В частности, в одном из таких проектов, выполняемых с Институтом органической химии им. Воронцова Сибирского отделения РАН, заняты сотрудники нашей лаборатории. Цель этого начинания – разработка эффективных методов получе-

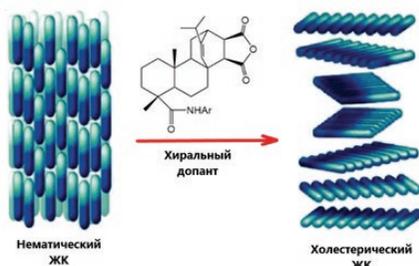
ния новых соединений из скипидара. И для Беларуси, и для России это традиционное возобновляемое лесохимическое сырье. Правда, в РФ, несмотря на огромные площади хвойных лесов, которые могут быть источником скипидаров и канифолей в большом количестве, многие канифольные заводы закрылись, стали нерентабельными. Особенность канифольного производства – заготовка сырья, или, как ее называют, подсочка – сбор смолы в лесу. Это ручной, тяжелый труд, которым могут заниматься только хорошо обученные люди – «вздымщики». Технически это выглядит так: на дерево наносятся специальные насечки – «карры», и через некоторое время начинается сбор смолы. Чтобы продукция из нее была конкурентоспособна и окупалась, а труд сборщиков оплачивался достойно, сырье необходимо перерабатывать в продукт с высокой добавленной стоимостью. Собственно, на это и нацелен проект.

Перспективное направление, которое мы начали осваивать в сотрудничестве с компанией «Планар», – создание материалов для микро-электроники.

Безусловно, продолжатся разработки новых физиологически активных веществ и функциональных добавок, материалов на основе растительного лесохимического сырья. И, конечно, будем заниматься увеличением глубины переработки нефти и в целом эффективностью нефтепереработки. Ведь нефть – то исходное сырье, которое служит основой для получения новых соединений и веществ, в том числе и лекарств. Нефтехимия, по большому счету, – это и есть практически вся современная химия.



ДОПАНТЫ ЖИДКИХ КРИСТАЛЛОВ



Описание. Импортозамещающие хиральные допанты жидких кристаллов (ЖК) на основе продуктов химической модификации отечественного лесохимического сырья.

Область применения. Производство ЖК-материалов и ЖК-индикаторов различного функционального назначения.

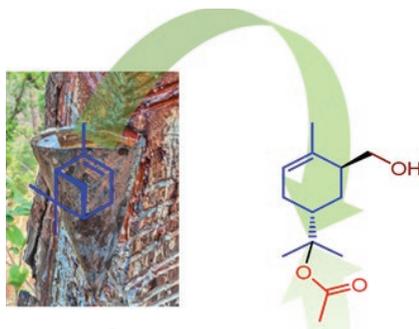
Технические преимущества. Синтез допантов осуществляется на основе исходных хиральных природных соединений (смоляных кислот канифоли), что позволяет избежать применения дорогостоящих методов асимметрического синтеза и разделения. Получаемые допанты характеризуются высокой закручивающей способностью, совместимостью с нематическими ЖК-матрицами, свето- и термостабильностью.

ЖИДКОСТИ СМАЗОЧНО-ОХЛАЖДАЮЩИЕ

Описание. Водорастворимые концентраты полусинтетических композиций на основе лесохимического и растительного сырья, в состав которых включены поверхностно-активные вещества и ингибирующие добавки.

Область применения. При производстве изделий из металлических сплавов, включая сплавы с пониженными антикоррозионными характеристиками.

Технические преимущества. Обеспечивают смазку, эффективное охлаждение зоны резания и надежную консервацию обрабатываемой поверхности как во время резания, так и при хранении между операциями.



НОВЫЕ СОЕДИНЕНИЯ НА ОСНОВЕ ТЕРПЕНОВ

Описание. Каталитические системы для селективного синтеза новых хиральных биологически активных гетероциклических соединений на основе монотерпенов.

Область применения. Синтез веществ, парфюмерия и фармацевтика. **Технические преимущества и новизна.** Найден новый подход к каталитическому использованию альфа-пинена и 3-карена – основных компонентов белорусского и российского скипидаров. Применение альфа-пинена основано на его каталитической реакции с формальдегидом с образованием ацетата гидроксиметиллимонена. Данное соединение рассматривается как новая хиральная платформа для дальнейшего синтеза функциональных молекул, в том числе биологически активных. Изучена реакция с формальдегидом 3-карена, в результате которой образуется гидроксиметил-2-карена – вальтерол, являющийся платформой для синтеза биоактивных соединений.

На этой основе планируется получение широкого набора гетероциклических соединений с противоопухолевыми, анальгетическими, противовирусными и иными свойствами. ■

Юлия ВАСИЛИШИНА

ТРЕНДЫ РАЗВИТИЯ



Валерий Гончаров,
директор Центра системного анализа и стратегических исследований НАН Беларуси, кандидат экономических наук



Наталья Янкевич,
заведующий отделом Центра системного анализа и стратегических исследований НАН Беларуси, кандидат физико-технических наук



Продолжение. Начало в №3

Технологические аспекты электромобильности ч.2

Развитие зарядной инфраструктуры

Эксперты агентства DigiTimes Research полагают, что продажи электромобилей с 2021 по 2025 г. будут расти в среднем на 45% в год. Поэтому ожидается, что к 2026 г. доля продаваемых в мире электрических автомобилей приблизится к 30% общего объема продаж. Этот прогноз подтверждается экспертами Международного энергетического агентства, которые констатируют, что в 2021 г. в мире было продано 6,75 млн электромобилей, а это на 120% больше, чем в 2020 г. Основываясь на указанной тенденции, агентство прогнозировало, что уже по итогам 2023 г. объемы их продаж вырастут на 49% (до 14 млн

штук), причем более 60% (или 9 млн) будут реализованы в Китае. Следует отметить, что данный прогноз был сделан в 2020 г. и не учитывал особенностей текущего момента, последствий для производств пандемии COVID-19 и др. Вместе с тем в 2022 г. более 60% мирового рынка электромобилей уже принадлежало КНР, в то время как Европе – 24% и 9% – США (всего за 2022 г. было продано 9,78 млн электромобилей).

В связи с этим возникает вопрос: хватит ли вырабатываемого электричества для эксплуатации автопарка? Установлено, что для зарядки всех

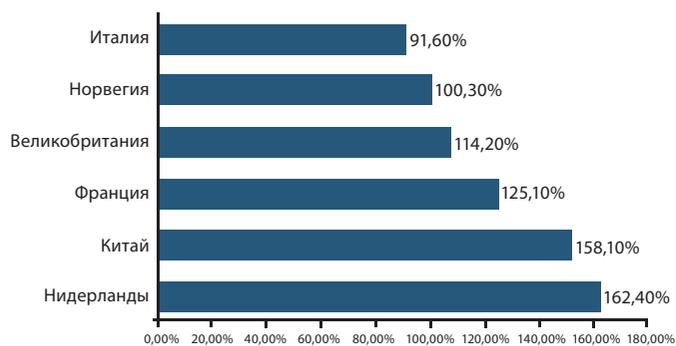


Рис. 1. Темпы роста инфраструктуры зарядных станций в 2017–2020 гг. Источник: IEA, Bloomberg [11]

электрокаров в зависимости от используемого зарядного устройства потребуется от 24 до 170 ГВт мощности сети. Однако, по оценке CIA World Factbook, установленная мощность мировой генерации электроэнергии составляет более 6300 ГВт. Учитывая тот факт, что одновременно заряжаться будет лишь малая доля парка электромобилей, говорить о нехватке генерирующих мощностей сегодня не представляется обоснованным.

Для полного перевода транспорта на электричество понадобится увеличить выработку электроэнергии на 60% за 30 лет, то есть на 2% в год. В рамках мировой энергетики эта задача может быть решена путем включения в сети дополнительного количества солнечных станций и ветряков. Если эти условия будут соблюдены, то преимущества электромобильности реализуются в полной мере. Считается, что к 2027 г. мировой рынок зарядных станций достигнет 93 млрд долл. (в 2019 г. он оценивался в 23 млрд). Таким образом, в период 2021–2027 гг. выручка этого сектора будет расти примерно на 20% ежегодно. При этом количество зарядных станций в мире будет увеличиваться в среднем на 17,5% в год и к 2027 г. достигнет около 2,8 млн (в 2019 г. – 819 тыс.) [1, 2].

Как констатировал официальный представитель Государственного управления по делам энергетики КНР Лян Чансинь, количество объектов зарядной инфраструктуры в Китае в 2022 г. выросло почти в 2 раза (до 5,2 млн единиц) благодаря усилиям государства по развитию индустрии транспортных средств на новых источниках энергии. Согласно данным правительства страны, за 2022 г. были введены в эксплуатацию 650 тыс. общественных точек зарядки электромобилей, в результате чего их суммарное число составило 1,8 млн; кроме того, было установлено в общей сложности 1,9 млн част-

ных зарядных станций, а общее количество таких устройств достигло 3,4 млн единиц [3].

К тому же в Китае производится свыше 50% всех материалов и компонентов, необходимых для электрического транспорта, тяговых батарей и зарядных станций. По версии DigiTimes Research, компании CATL и BYD попали в десятку крупнейших поставщиков в Азии. CATL при этом является мировым лидером по выпуску тяговых батарей, а BYD занимает первое место на китайском рынке по выпуску электромобилей. Под контролем КНР находится 80% рынка услуг по переработке материалов для производства аккумуляторов. Стоимость батареи может достигать 30–35% от цены электромобиля, поэтому большая концентрация узкопрофильных предприятий в КНР делает китайские автомобили весьма конкурентоспособными на мировом рынке [2, 3].

Но для массового внедрения электротранспорта необходимо еще больше: к 2040 г. рост электромобильного парка потребует не менее 12 млн зарядных устройств общего пользования (около 400 млрд долл. инвестиций, причем в статистике не учтены комплексы личного пользования) [4].

По прогнозу BNEF, даже страны – нынешние лидеры по продвижению электрокаров, такие как Китай, США, а также часть Европы (рис. 1), в начале 2030-х гг. могут столкнуться с недостатком инфраструктуры для зарядных станций, из-за чего рост продаж электромобилей может значительно замедлиться [5].

Расширение парка таких машин должно сопровождаться глобальными инфраструктурными изменениями, поскольку сегодня одной из главных причин отказа от их покупки является слишком низкий во многих странах уровень развития сети зарядных станций. Кроме того, водителей настораживает продолжительность самого процесса зарядки (например, от обычной электрической розетки в домашних условиях – 7–10 часов). В связи с этим производство так называемых быстрых зарядных станций, позволяющих за несколько минут пополнить аккумуляторы автомобиля количеством энергии, достаточным для преодоления длительных расстояний, является одной из самых перспективных отраслей в экономике. Аналитики McKinsey&Co считают, что до 2030 г. в разработку и производство таких станций будет вложено около 50 млрд долл. Так, концерн Volkswagen заявил, что планирует разместить вдоль основных дорог Европы сеть зарядных станций такого типа, позволяющих быстро заряжать несколько машин одновременно. Предпола-

гаются, что они будут располагаться как минимум через каждые 120 км, а всего на реализацию программы концерн планировал к 2023 г. потратить 30 млрд евро.

В этом направлении работают также Ford, Tesla и многочисленные стартапы (в первую очередь – в Китае и США). Вместе с тем в научных центрах и университетах всего мира идет работа над созданием и принципиально новых зарядных станций. Однако если самые медленные из них за 1 час заряжают аккумуляторы примерно на 30 км, то быстрые способны всего за полчаса обеспечить водителю электромобиля возможность преодолеть 120 км пути. В то же время, например, компания Ionity (в число акционеров входят Volkswagen и Ford) начала производство зарядных станций, которые за 10 мин обеспечивают пробег 340 км (рис. 2).

На сегодняшний момент самая большая сеть электрических зарядных станций (ЭЗС) для электромобилей у Tesla: в США, Европе и Азии у нее есть более 12 тыс. точек Supercharger. При этом компания заявила о создании новой версии своих станций, которые получили название Supercharger V3 (пиковая отдача – 250 кВт), благодаря чему можно заряжать машины практически вдвое быстрее, причем несколько одновременно.

В Европейском союзе принят закон, согласно которому в каждом новом доме Европы, построенном после 2019 г., обязательно должна быть размещена зарядка для электромобилей. Следует отметить, что более 90% немецких автомашин заряжаются в домашнем или офисном гараже, где, как правило, используется обычная электросеть с отдельным счетчиком. Согласно отчету Norwegian Electric Vehicle Association, практически все (96%) владельцы электромобилей в Норвегии имеют персональные зарядные станции, а в Японии и Дании их количество уже превысило число автозаправок.

Оригинальный подход при решении проблемы с подзарядкой аккумуляторов предложила компания Highways England. В Великобритании, где насчитывается около 50 тыс. электромобилей, планируется построить экспериментальную трассу, которая будет подзаряжать электромобили с поддержкой беспроводной зарядки прямо на ходу от оборудования, установленного под поверхностью дорожного полотна. В ближайшие 5 лет правительство планирует инвестировать 500 млн фунтов стерлингов в освоение этой технологии [6].

Таким образом, большинство развитых стран вовлечено в процесс расширения электромобиль-

ности. Республика Беларусь, обладая значительным научным, производственным и энергетическим потенциалом, также активно включилась в этот процесс. Именно поэтому внимательное изучение, знание и анализ накопленного мирового опыта очень важны, поскольку могут содействовать повышению уровня конкурентоспособности отечественной науки и технологий, сохранению и развитию кадрового потенциала, обеспечению полноправного участия белорусского научного сообщества в глобальных интеграционных процессах в области научных исследований и наукоемкого производства.

Электромобильность в Республике Беларусь

Во многих отношениях сегодня электромобильность является двигателем научно-технического прогресса, поэтому можно констатировать, что будущее неразрывно связано с электричеством. Применение электротехнологий позволяет автоматизировать технологические процессы, внедрять системы управления, снижать потери. Во всем мире просматривается четкая зависимость: чем больше страна потребляет электрической энергии, тем выше у нее ВВП на душу населения (это относится, прежде всего, к Норвегии, Финляндии, Швеции, Швейцарии).

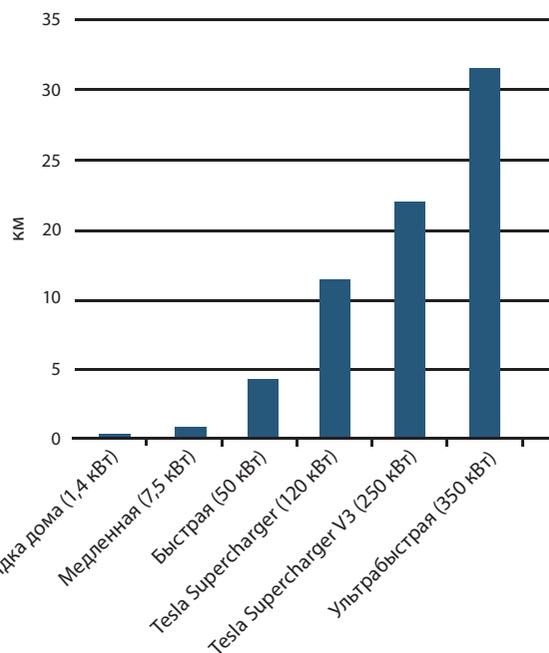


Рис. 2. Расстояние (км), которое можно проехать после 1 мин подзарядки (данные Forbes)

Легковых автомобилей в собственности у белорусов становится все больше (в 2022 г. на 1 тыс. чел. приходилось 323 авто), но первый электромобиль был зарегистрирован еще в 2013 г. Если в конце 2015 г. насчитывалось лишь 27 электромобилей, то в декабре 2020 г. – 1,6 тыс., в 2022 г. – 3420, а в 2023 – около 6500 единиц.

При этом электромобили в Беларуси захватывают рынок намного активнее, чем в Российской Федерации. Так, согласно данным агентства «АВТОСТАТ», на 01.01.2023 г. на территории Российской Федерации было зарегистрировано 20,7 тыс. электромобилей, что составляет всего лишь 0,0004% от общего количества легковых машин в стране (рис. 3) [7, 8]. Для Республики Беларусь аналогичный показатель составляет 0,01%.

Общественный транспорт также соответствует этому тренду: в декабре 2020 г. в Республике Беларусь находились в эксплуатации 7147 единиц городского транспорта (из них 1492 – электрические). При этом большая часть общественного наземного электротранспорта (более 1300 единиц) приходилась на обычные контактные троллейбусы, их вариантов с возможностью автономного хода насчитывалось около 100, электробусов – 82. В 2021 г. число электробусов составило 107 единиц, в том числе в Минске – 93, в других городах страны – 14. Таким образом, уже к 2020 г. более 20% от всего наземного городского транспорта Беларуси было электрифицировано. Правительством поставлена задача достижения к 2025 г. средневропейского уровня (30% соотношения электротранспорта к общему транспортному парку страны, осуществляющему пассажирские перевозки).

Согласно Комплексной программе развития электрического транспорта на 2021–2025 гг. [9], суммарная потребность для коммунальных нужд за этот период составит 2549 единиц: 1190 электробусов, 1263 троллейбуса с автономным ходом и 96 в обычном исполнении.

Для сравнения: в октябре 2020 г. основной перевозчик в сфере общественного транспорта Берлина (компания BVG) сообщил, что в немецкой столице эксплуатируются около 100 электробусов, причем этого результата удалось достичь всего за полтора года. В пересчете на душу населения на 1 электробус в Берлине приходится 36 450 горожан. В Минске, по аналогичным подсчетам, по состоянию на конец 2021 г. на 1 электробус приходилось около 21 тыс. жителей. Однако при этом следует отметить, что в Европе

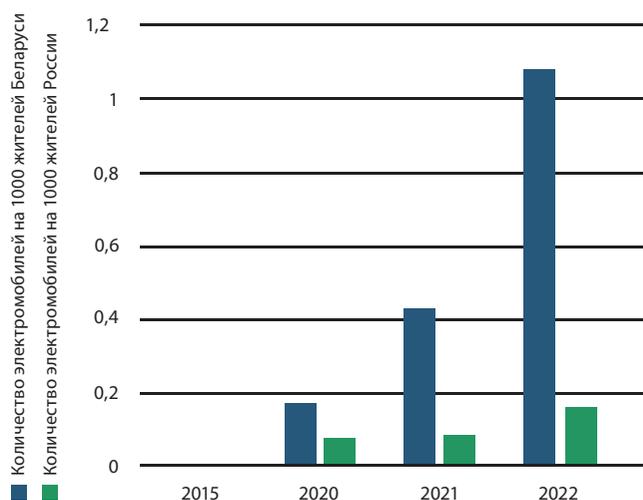


Рис. 3. Рост количества электромобилей на 1 тыс. жителей в Республике Беларусь и Российской Федерации

приоритет отдается развитию именно рельсового общественного электротранспорта: он, по сравнению с колесным, безопаснее и обладает более высокой пассажироместимостью. По данным Росстата, в Российской Федерации доля электробусов составляет 0,6% от общего числа городских автобусов. В Беларуси этот показатель в 3 раза выше – 1,85%. Доля же всего электрического транспорта (трамвай, троллейбусы, электробусы, вагоны метрополитена) в наземном и подземном пассажирском транспорте России в 2020 г. находилась на уровне 13,65%. В нашей стране этот показатель превышает 20%. Таким образом, доля электрического транспорта в Республике Беларусь является довольно высокой.

Отечественные производители внимательно изучают растущий спрос на электромобили. Правительством определены ориентиры развития электромобильности в стране. Комплексной программой развития электрического транспорта на 2021–2025 гг. заложены два сценария:

- оптимистичный, который подразумевает отставание от глобальных темпов роста доли электротранспорта в среднем на 4–5 лет. Одновременно большая часть продукции будет представлена легковыми автомобилями премиального сегмента, что обосновано отсутствием на рынке бюджетных моделей вследствие все еще высокой стоимости батарейных блоков;
- пессимистичный, который предполагает отставание от глобальных трендов в сред-

нем на 6–7 лет, что может быть обусловлено задержкой в развитии зарядной инфраструктуры, а также ограничениями технического регламента, препятствующими широкому импорту моделей среднего и бюджетного сегмента, и низкую долю продаж – 3–4%.

Существуют планы по выпуску первой тысячи белорусских электромобилей с целью изучения рынка, что позволит продемонстрировать модели и привить культуру покупки таких машин с помощью программ кредитования и лизинга. При этом планируется, что СЗАО «БЕЛДЖИ» будет заниматься их производством непосредственно на территории Беларуси.

Правительством определены барьеры для интенсивного внедрения электромобильности в транспортную отрасль. Признано необходимым системное развитие предприятий данной отрасли, организаций, разработчиков и поставщиков компонентов, а также поставлена задача укрепления взаимодействия между научными, инженерными, производственными организациями, повышения роли инновационного менеджмента и научного и инженерно-технического потенциала.

Стоит отметить, что тяговый электропривод хорошо известен белорусским машиностроителям и уже длительное время применяется на автомобилях БЕЛАЗ, трамваях, троллейбусах, электробусах, выпускаемых компанией ВКМ HOLDING (ранее известной как «Белкоммунмаш»), продукции ОАО «Минский автомобильный завод» и др.

Однако что касается развития легкового автомобилестроения, то основной задачей в этой области является определение партнеров для серийного выпуска легковых электромобилей с поэтапной локализацией его базовых компонентов. Как дополнительный вариант может быть рассмотрена разработка и организация мелкосерийного производства бюджетных электрических машин, эксплуатируемых на закрытых территориях (например, в аэропортах, на складах и т.д.). Это даст возможность проверить те или иные технические решения, что позволит в дальнейшем использовать их при разработке серийных электромобилей и их компонентов. Белорусские автопроизводители активно работают над созданием электромобилей – ОАО «Минский автомобильный завод» развернул ОКР по разработке гибридной силовой установки и, в частности, создал экспериментальный образец грузовика с электроприводом (пробег до 200 км).

Потенциальная потребность белорусского внутреннего рынка в электрических и гибридных силовых установках для перспективных моделей новой техники составляет около 4 тыс. единиц, однако с учетом экспортных возможностей может превысить 10 тыс. Очевидно, что при таких потребностях организация собственного производства электрических и гибридных силовых установок для транспортных средств становится актуальной.

В связи с этим Министерство промышленности Республики Беларусь определило головные организации, ответственные за создание и выпуск электротранспорта по узким направлениям:

- *грузового и пассажирского коммерческого транспорта – ОАО «БЕЛАЗ» и ОАО «МОАЗ» с управляющей компанией холдинга «БЕЛАВТОМАЗ»;*
- *тяговых электродвигателей переменного тока различных типов для использования в электромобилях – Могилевский завод лифтового машиностроения и Могилевский завод электродвигателей;*
- *систем управления базовыми элементами электромобилей – ОАО «Горизонт» и ОАО «Измеритель»;*
- *стационарных станций зарядки – ОАО «Витязь»;*
- *накопителей нового типа – НППЦ НАН Беларуси по материаловедению.*

Развитие электрических средств передвижения требует привлечения малого и среднего бизнеса, поскольку, как и любой вид транспорта, электромобили нуждаются в обслуживании и ремонте. По мере увеличения их количества будет возрастать спрос на данные услуги. Следовательно, уже сейчас необходимо создавать сервисные центры и готовить материально-техническую базу, что может представлять интерес в том числе и для частного капитала.

Набирает популярность и двухколесный электрический транспорт, включая все возможные варианты – мотоциклы, велосипеды, самокаты.

Следуя актуальным тенденциям рынка, Национальная академия наук Беларуси разработала широкую линейку электромобильного транспорта и его компонентов: электромобили (Объединенный институт машиностроения НАН Беларуси), накопители (Научно-производственный центр НАН Беларуси по материаловедению), персональный легкий электрический транспорт (ОАО «Приборостроительный завод Оптрон») и др.

Растущий спрос на электромобили в республике обусловлен значительными преференциями при их покупке и быстрым развитием сети зарядных станций.

В связи с вступлением в силу постановления Правительства от 30.12.2022 г. №952 «Об изменении постановления Совета Министров Республики Беларусь от 30.12.2013 г. №1166 «Об установлении для населения цен на газ, тарифов на электрическую и тепловую энергию, утверждении затрат на единицу оказываемых населению коммунальных услуг газо- и энергоснабжающими организациями Министерства энергетики», с 1 января 2023 г. дей-

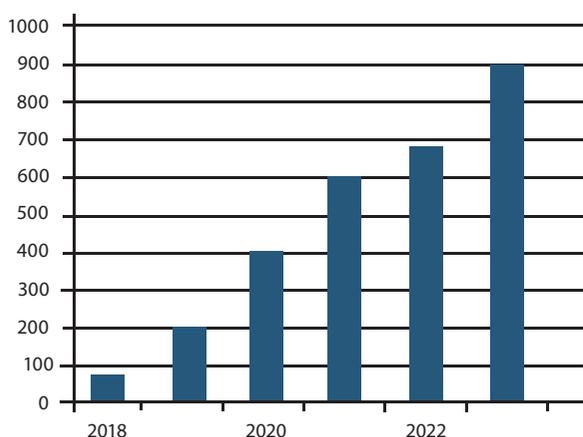


Рис. 4. Количество зарядных станций в Республике Беларусь

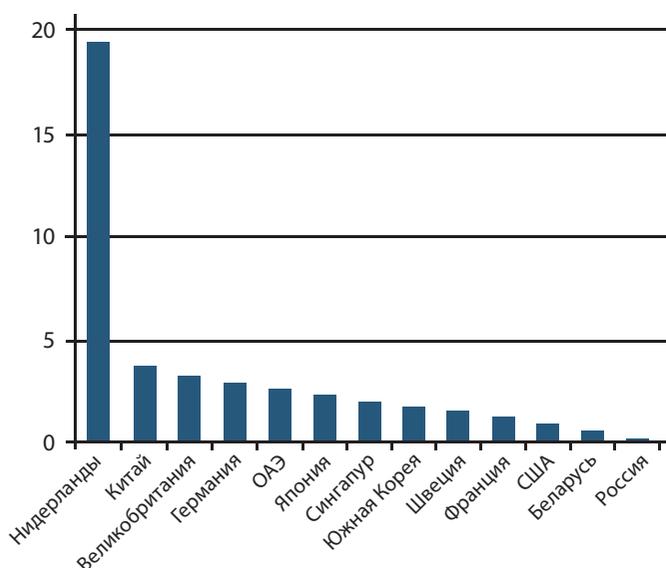


Рис. 5. Количество зарядных станций на 100 км в 2020 г., единиц

ствуют новые тарифы на электрическую и тепловую энергию для населения.

В 2023 г. частные потребители в Беларуси оплачивают потребленную электроэнергию по тарифу около 8 евроцентов за киловатт-час, а предприятия – порядка 13,15 евроцента. Поэтому можно утверждать, что в нашей стране сегодня одна из самых низких цен на электроэнергию для населения. Например, в Германии за 1 кВт платят в среднем около 53, а в Бельгии – 54,7 евроцента.

С 2018 г. Беларусь в основном отказалась от экспорта электроэнергии, однако уже с 2019 г. начала снова ее экспортировать. Этому способствовала реализация в республике двух масштабных отраслевых программ. Одна из них связана с развитием альтернативной энергетики (хотя пока маленькие квоты не позволяют создавать крупные объекты в этой отрасли и привлечь серьезные инвестиции), вторая – с введением в эксплуатацию первой отечественной атомной станции в г. Островце.

Перевод экономики с газового режима на электрический – один из способов полного использования энергии, вырабатываемой Белорусской АЭС. Очевидно, что в круг ее потребителей могут быть включены и электромобили.

Государство продает электроэнергию для зарядных станций (ЭЗС) по тарифу, определенному Министерством антимонопольного регулирования и торговли Республики Беларусь. Однако попытка зарядиться по такой цене обречена на неудачу, так как это тариф не для владельцев электромобилей, а для юридических лиц, которые оказывают услуги по их зарядке (иными словами, речь идет о стоимости закупки электроэнергии у государства).

ПО «Белоруснефть» (главный оператор зарядных станций «Malanka») предоставляло услугу по зарядке электромобильного транспорта с 2014 г. на безвозмездной основе, однако с 2019 г. она стала платной. Ее ориентировочная стоимость с 1 октября 2022 г. составляет:

- медленная зарядка – 0,40 руб./кВт·ч.;
- быстрая – 0,49 руб./кВт·ч.

Белорусские электросети активно формировались еще во времена Советского Союза, но определенный запас по мощности есть – пока не используемые в полную силу, они способны подзарядить больше 30 тыс. электромобилей. Сейчас отечественная система электрических коммуникаций работает со значительной нагрузкой днем и минимальной – ночью. Такой режим невыгоден энергосистеме. Развитие электротранспорта и зарядной инфраструк-

туры как раз может сгладить эти пики энергопотребления, причем наиболее выгоден вариант, когда владельцы электромобилей будут заряжать их в ночное время.

Сеть зарядных станций в Беларуси стремительно развивается (рис. 4, 5). В 2021 г. в республике их было установлено 540, 350 из которых – в Минске. В 2022 г. количество таких объектов возросло до 680. В июле 2023 г. в нашей стране насчитывалось около 900 публичных пунктов для зарядки электротранспорта: порядка 430 – типа DC мощностью от 50 до 172 кВт и 470 – типа AC (22–44 кВт).

Комплексной программой развития электрического транспорта на 2021–2025 гг. предусмотрено поэтапное строительство ЭЗС: первый этап (до конца 2021 г. включительно) предполагал введение в эксплуатацию 472 таких станции, второй (2022–2025 гг.) – еще 466 и третий (2026–2030 гг.) – 407 ЭЗС. К 2023 г. в Республике Беларусь были введены в эксплуатацию 900 зарядных станций (более 700 – Malanka) [11]. Показатели развития государственной зарядной сети могут быть скорректированы с учетом темпов роста парка электромобильного транспорта в Республике Беларусь и общемировых тенденций на рынке зарядной инфраструктуры.

Кроме того, с 2022 г. в стране реализуется программа создания супербыстрых электроразрядных комплексов. К 2025 г. количество таких объектов, которые будут включать от 6 станций мощностью 350 кВт каждая, должно приблизиться к 50. Предусматривается строительство не менее 25 мест зарядки на каждые 50 тыс. человек в городах с населением свыше 100 тыс. В Беларуси зарядная инфраструктура, учитывая покупательскую способность жителей, в первую очередь нацелена на массовый сегмент и универсальность, то есть позволяет заряжать любой электромобиль. Выбор мест установки заряд-

ных станций обусловлен в первую очередь ожидаемым спросом со стороны владельцев электрических авто. Так, например, станции медленной зарядки Mode 3 располагаются там, где водитель может оставить свою машину на 4–8 часов без ущерба для комфорта: на стоянках крупных бизнес-центров, гостиниц, мест общественного назначения.

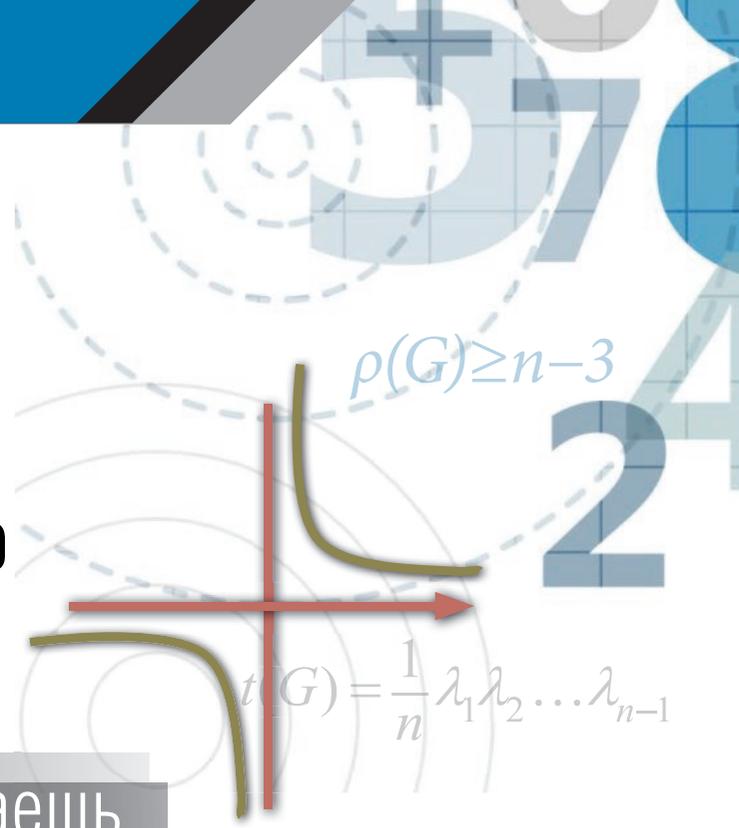
Анализ мирового производства и рынка электромобилей приводит к следующим выводам. Широкое распространение электрического и автономного транспорта выступает сегодня в качестве одного из возможных подходов к снижению уровня загрязнения атмосферы планеты выбросами парниковых газов. Однако нужно иметь в виду, что решение этой задачи требует не только выработки согласованной политики разных стран, но и значительных субсидий для ее реализации. Для широкого внедрения электротранспорта также нужны финансовые преференции. Как правило, такой транспорт развивается в тех государствах, где есть мощная финансовая поддержка: субсидии или освобождение от налогов, бесплатные парковки и проезд по платным дорогам и т.д. Исследования и разработки, совершенствование массового производства приводят к снижению затрат на аккумуляторы, и продолжение этой тенденции должно сократить разрыв в конкурентоспособности между электромобилями и авто с двигателями внутреннего сгорания. Вместе с тем ряд вопросов, которые пока остаются нерешенными, могут существенно затормозить развитие электромобильности, и для их решения необходима разработка консолидированной стратегии. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

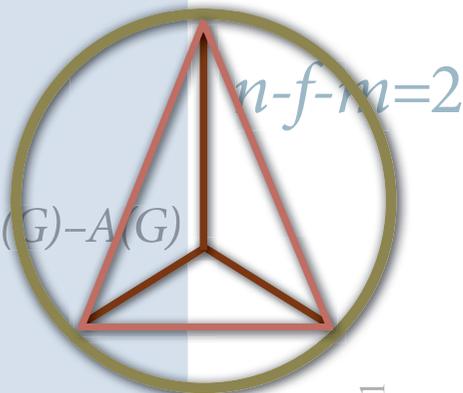
1. Количество продаж электромобилей в 2023 году вырастет до 14 млн штук // <https://electricauto.by/eksperty-prognozirujut-rost-prodazh-elektromobilej-do-14-mln-shtuk>.
2. Исследование: мировой рынок зарядок для электромобилей достигнет \$93 млрд к 2027 году // <https://tass.ru/ekonomika/12159859>.
3. В 2022 году количество объектов зарядной инфраструктуры для электромобилей в Китае выросло почти в два раза // <http://russian.people.com.cn/n3/2023/0214/c31516-10207138.html>.
4. Сколько в мире зарядных станций для электромобилей? // <https://el-book.ru/2020/09/05/skolko-v-mire-zaryadnykh-stantsiy-elektromobilej/>.
5. Количество зарядных станций для электромобилей в мире перевалило за миллион // <https://news.drom.ru/79861.html>.
6. Ольховская У. Глобальная электромобилизация // <https://archive.atomicexpert.com/page1930439.html>.
7. Угадаете, сколько электромобилей зарегистрировано в Беларуси? Подсказка: почти в 40 раз больше, чем два года назад // <https://auto.onliner.by/2022/11/23/skolko-elektromobilej-zaregistrovano-v-belarusi-podskazka>.
8. Лобода В. Число зарегистрированных электромобилей в России превысило 20 тысяч // <https://www.autostat.ru/news/54027/>.
9. Постановление Совета Министров Республики Беларусь от 09.04.2021 г. №213 «О Комплексной программе развития электротранспорта на 2021–2025 гг.» // <https://pravo.by/document/?guid=3871&p0=C22100213>.
10. В Беларуси в 2022 г. появятся первые супербыстрые зарядные станции для электромобилей // <https://minsknews.by/v-belarusi-v-2022-g-rojavuyatsya-pervye-superbystrye-zaryadnye-kompleksy-dlya-elektromobilej/>.
11. Что нужно сделать, чтобы в Беларуси было 100 тыс. электричек? Идеи людей из автобизнеса // <https://autogrodno.by/news/30249-plan-y-elektro-baa.html>.

Как из 100 000 000 000 вариантов выбрать нужный,

если перебрать успеваешь
только 100 из них?



Продолжение. Начало в №3



В рамках совместного проекта журнала «Наука и инновации» и Института математики НАН Беларуси представляем продолжение публикации об истории математических открытий и их роли в современных технологиях.

$$t(G) = \frac{1}{n} \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}$$



Владимир Сарванов,
ведущий научный сотрудник отдела теории чисел и дискретной математики Института математики, кандидат физико-математических наук



Евгений Макаров,
зав. отделом дифференциальных уравнений Института математики, доктор физико-математических наук, профессор;
jcm@im.bas-net.by

$Ax = \lambda x$

Высаживаем леса, выращиваем деревья и сколачиваем клики

Что эйлеров и гамильтонов циклы, что запрещенные конфигурации планарных и тороидальных графов – все это специфические подграфы исходного графа. Задачи их отыскания – одни из основных в алгоритмической теории графов. Есть и много других, в которых требуется найти имеющий нужные свойства подграф заданного графа или, по крайней мере, доказать его существование. В рамках этих поисков популярно построение остовных деревьев, паросочетаний и клик, часто с какими-либо условиями минимальности или максимальности.

Паросочетание – это множество попарно несмежных, то есть не имеющих общих вершин ребер. Его можно представлять себе как содержащийся в исходном графе лес, состоящий из «иголок» – деревьев на двух вершинах с одним ребром. Паросочетание называется максимальным, если к нему нельзя добавить ни одной дополнительной «иголки», и совершенным, если в него входят все вершины графа. *Клика* – подграф, являющийся полным графом, то есть набор вершин исходного графа, каждая из которых связана ребрами со всеми другими из этого же набора. Остовное дерево может быть только в связном графе. В него по определению должны входить все вершины исходного графа.

Алгоритмы, разработанные математиками для решения такого рода задач, широко используются в самых разнообразных информационных технологиях, от проектирования компьютерных сетей до анализа данных в медицине и биологии. Некоторые из них возникли еще на заре теории графов в первой половине XX в., и с их появлением иногда связаны очень поучительные истории, позволяющие проникнуться атмосферой той, уже почти легендарной эпохи.

Задача построения остовного дерева во взвешенном графе естественным образом возникает при проектировании практически любой сети. Весом ребра в таких случаях, как правило, будет стоимость включения этого ребра в сеть, для линий электропередачи в основном определяемая его физической протяженностью и характером местности. Цель при этом – создание наиболее дешевого скелета сети, который впоследствии можно будет дополнить резервными и дублирующими линиями, прокладка которых, очевидно, приведет к образованию циклов в изображающей сеть графе.

Именно такая задача встала перед компанией «Западно-Моравские электростанции» вскоре после ее образования в 1921 г., когда она приступила к электрификации сельских населенных пунктов Западной и Южной Моравии. Речь шла о том, куда и как вести линии электропередачи, которые должны были соединить несколько десятков деревень в окрестностях Брно, чтобы они имели наименьшую длину и, следовательно, были наиболее экономичными при прокладке. Но найти оптимальный путь с помощью инженерных методик не удавалось, а адекватного математического способа решения таких проблем еще не существовало: до создания полноценной теории графов оставалось около 10 лет, хотя еще в середине XIX в. на начальной стадии развития этой теории была установлена формула для числа всех n -вершинных деревьев, которое равно $n^{(n-2)}$. Ровно столько же имеется и различных остовных деревьев в полном графе на n вершинах, что при количестве узлов электросети в несколько десятков полностью исключало возможность решения задачи, вставшей перед энергетиками, путем

Формула для числа остовных деревьев полного графа на n вершинах была установлена Г. Кирхгофом в 1847 г. при исследовании электрических цепей и А. Кэли в 1889 г. в связи с перечислением деревьев, описывающих строение разветвленных углеводов, а также Дж. Сильвестром в 1857 г. и К. Борхардом в 1860 г.

Кирхгофом на самом деле была решена более общая задача – он нашел формулу для числа остовных деревьев $t(G)$ любого графа G на n вершинах:

$$t(G) = \frac{1}{n} \lambda_1 \lambda_2 \dots \lambda_{n-1}$$

Здесь $\lambda_1, \lambda_2, \dots, \lambda_{n-1}$ – ненулевые собственные значения матрицы Кирхгофа $K(G)$, которая связана с матрицей смежности $A(G)$ графа G равенством $K(G) = D(G) - A(G)$, где $D(G)$ – диагональная матрица степеней вершин графа. Каждый ее элемент, стоящий на пересечении i -го столбца и i -й строки, равен степени вершины с номером i . По определению это число совпадает с суммой элементов матрицы смежности, стоящих в этой же строке. Все остальные элементы нулевые.

Задачи, в которых требуется определить количество графов, обладающих тем или иным свойством, называются перечислительными. Существует целый раздел

теории графов – пересчитываемая теория графов. Ее развитию в Институте математики уделялось немалое внимание. Сотрудниками института получены эффективные пересчитываемые формулы для нескольких классов неизоморфных плоских графов (карт) с n ребрами, в том числе эйлеровых, полуэйлеровых и двудольных; установлены пересчитываемые формулы для плоских графов с выделенным остовом, имеющих заданное число ребер и вершин; найдены замкнутые пересчитываемые формулы для регулярных плоских карт нечетной степени с заданным числом вершин.

Отметим, что теория задач пересчитывания карт на поверхностях восходит к классическим результатам У. Татта 1960-х гг. по пересчитыванию так называемых корневых плоских карт. Несколько позже и независимо этой задачей заинтересовались физики, начиная с нобелевского лауреата Г. Хоофта, в связи с некоторыми моделями статистической физики и квантовой гравитации. К настоящему времени пересчитываемая теория карт насчитывает сотни публикаций в престижных международных математических журналах.

простого перебора вариантов, поскольку уже при $n=10$ их число равно 10^8 – 100 миллионов.

В конце 1925 г. сотрудник «Западно-Моравских электростанций» Йиндржих Саксел после длительных и неудачных попыток продвинуться в решении порученной ему задачи обратился за помощью к Отакару Боровке, в будущем – академику и патриарху чехословацкой математики (в послевоенное время он занимался теорией дифференциальных уравнений и на этой почве поддерживал контакты с Институтом математики АН БССР и его директором Н.П. Еругиным), который на тот момент был ассистентом профессора, изучал новую для него область проективной дифференциальной геометрии и никакого опыта в области дискретной математики не имел. И тем не менее не только решил задачу, стоявшую перед Й. Сакселем, но дал ей строгую математическую формулировку:

на плоскости (в пространстве) даны n точек, расстояния между которыми попарно различны. Необходимо их соединить сетью так, чтобы: 1) каждые две точки соединялись либо напрямую, либо через другие; 2) общая длина сети была как можно меньшей, –

и создал общий метод решения в виде очень простого алгоритма. Результаты были тут же опубликованы: сначала в специальном техническом журнале для энергетиков [8], а затем и в местном научном издании «Труды Моравского общества естествознания» [9].

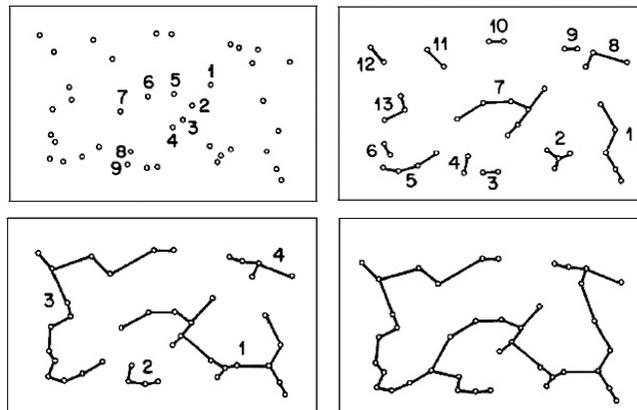


Рис. 1. Возникновение кратчайшего остовного дерева из россыпи точек на карте под действием алгоритма Боровки [8, 10]

Чешские математики тщательно выяснили и заботливо сохранили все обстоятельства этих и последующих событий, закрепивших за Чехией приоритет в решении одной из первых задач теории графов и комбинаторной оптимизации. Как сами работы О. Боровки, так и многочисленные публикации, им посвященные ([10] и др.), оцифрованы и выложены на портале *The Czech Digital Mathematics Library*, <https://dml.cz>, созданном «для того, чтобы сохранить в цифровом виде содержание основной части математической литературы, которая когда-либо публиковалась на чешских землях, и обеспечить свободный доступ к цифровому контенту и библиографическим данным».

В алгоритме Боровки предполагается, что веса ребер в исходном графе различны или как-то дополнительно упорядочены так, чтобы всегда можно было найти единственное ребро с минимальным весом. Сам автор алгоритма всегда отмечал, что это условие гарантирует единственность решения задачи, но абсолютно несущественно на практике, поскольку два отрезка длиной в несколько десятков километров обязательно отличаются хотя бы на один сантиметр [12].

Работа алгоритма состоит из (1) высаживания леса и (2) выращивания деревьев.

Высаживание леса производится перед началом работы алгоритма. Для этого необходимо удалить в исходном графе все ребра, превратив его в лес из одновершинных деревьев.

Затем на каждом последующем шаге для всякого дерева в имеющемся лесу находим самое короткое ребро, связывающее его с некоторым другим, и соединяем их этим ребром. При этом деревья растут, а их количество уменьшается. Все как в настоящем лесу.

То, что случилось дальше, определялось двумя факторами: особенностями опубликованных работ и тем, что происходило в большом мире, далеком от интересов европейского, но вполне провинциального Брно.

Статья, вышедшая в техническом журнале, представляла собой короткий рассказ и образцовый показ работы нового алгоритма: занимающие половину журнальной страницы несколько строк текста и 4 рисунка (рис. 1), на которых из россыпи 40 точек, изображающих узлы сети, за 4 хода как по волшебству возникает вождеденная оптимальная сеть. Нет никаких сомнений, что это должно было произвести впечатление на «технарей». И тому есть свидетельство. 17 ноября 1939 г. нацисты закрыли все чешские университеты. И «Западно-Моравские электростанции» немедленно обратились к О. Борувке с предложением поступить к ним на работу на очень выгодных условиях. Он подумал... и отказался. (Такие были времена!) На этом его роман с энергетикой и завершился. Вскоре все закончилось и для его контрагента: инженер Йиндржих Саксел был расстрелян гестапо 5 июня 1942 г.

Совсем по-другому развивались события вокруг математической статьи. Как и статья для энергетиков, она вышла на чешском языке (с резюме на немецком, благодаря чему и стала со временем известной). Это, а также ее объем – 22 страницы – и искусственная усложненность изложения, которую признавал и сам автор, казалось бы, обрекали ее на вечное забвение. На удивление, получилось иначе.

Выдающийся американский математик Джо-зеф Краскал в статье [13], посвященной памяти академика Борувки, рассказывает, что где-то во второй половине 1954 г. ему в руки попали скрепленные вместе две обтрепанные странички бумаги неизвест-

ного происхождения с текстом на немецком языке, отпечатанным на машинке через копирку. До него они длительное время циркулировали по математическому факультету Принстона, не находя себе должного применения. Как выяснилось чуть позже, это была перепечатка немецкого резюме статьи [9].

1954 г. – самый разгар холодной войны. «Горячая» Вторая мировая разогрела интерес к новой математике как средству совершенствования невиданного ранее оружия. Холодная война подняла этот интерес на небывалую высоту. В те годы усилия многих западных математиков были направлены на решение задач наподобие Soviet Railway System Problem, состоявшей в поиске оптимального способа бомбить советские железные дороги, позволяющего полностью блокировать их деятельность при наименьшей затрате ресурсов [14]. Именно эту проблему решает вошедшая во все учебники знаменитая теорема Форда – Фалкерсона и одноименный алгоритм, при изучении которых в практике преподавания западных университетов Soviet Railway System Problem до сих пор используется как важный пример. Над чем тогда работали советские специалисты, до сих пор остается во многом неизвестным.

К этому времени уже несколько математиков вновь открыли или модифицировали алгоритм построения кратчайшего остовного дерева. В 1930 г. профессор Карлова университета в Праге В. Ярник, ознакомившись с работами Борувки, предложил свой способ, переоткрытый в 1957 г. американцем Р. Примом, имя которого он теперь и носит. В 1938 г. Г. Шоке в «Докладах Французской академии наук» опубликовал алгоритм, идентичный варианту Борувки. Еще одно независимое изобретение того же построения было сделано в 1951 г. в Польше группой математиков [15]. Никто из них, по-видимому, не знал о работах предшественников.

«При первом чтении я мало что понял, только общую идею», – пишет Дж. Краскал. Она показалась ему элегантною, но чересчур сложно воплощенной. Следуя своим природным склонностям просто излагать сложные вещи, он «постарался упростить конструкцию до ее сути», надеясь, однако, на то, что идея метода все еще присутствует в новой версии. На самом деле был создан совершенно новый алгоритм.

Дж. Краскал долго сомневался, достоин ли полученный результат публикации, и очень благодарен тому человеку, чье имя он тем не менее прочно забыл, который убедил его отдать работу [16] в печать: «Прошло немало лет, прежде чем другие мои публикации стали столь же известны как эта, казавшаяся слишком простой».

Три классических алгоритма построения минимального остовного дерева во взвешенном графе сейчас носят имена Борувки, Прима и Краскала. Все три начинают свою работу одинаково, с высаживания леса, но каждый из них выращивает деревья по-своему.

Под действием алгоритма Прима растет только одно дерево, к которому на каждом шаге присоединяется самое короткое ребро из всех тех, которые прилегают к его вершинам.

Алгоритм Краскала требует предварительного упорядочения всех ребер по возрастанию длины. Затем в порядке этой очередности каждое ребро рассматривается и либо добавляется в растущий лес, если оно соединяет два разных дерева, либо отбрасывается, если соединяет вершины одного и того же дерева, замыкая в нем цикл.

Следует отметить, что во всех случаях присоединяемое ребро должно быть самым коротким среди некоторого доступного набора ребер исходного графа. Это позволяет отнести все три алгоритма к категории «жадных». Алгоритм считается таковым, если при его работе на каждом этапе выбираются варианты, наилучшие «здесь и сейчас», в надежде, что в конце концов это приведет к нужному решению, наилучшему среди всех. Такая надежда далеко не всегда оправдывается, но для некоторых задач применение жадных алгоритмов вполне оправданно.

После 1956 г. процесс переоткрытия все тех же трех алгоритмов продолжился. Г. Лоберман и А. Вейнберг в 1957 г. в статье [19] описали методы, аналогичные методам Ярника – Прима и Краскала, но их статья вышла слишком поздно, когда работа [16] уже была напечатана, о чем они и пишут в замечании, добавленном при корректуре. Е. Дейкстра в работе 1959 г. [20] подверг критике их, а также и Дж. Краскала, и предложил в качестве нового алгоритма, идентичный алгоритму Ярника – Прима, усовершенствовав при этом способ хранения промежуточных данных, но не заметив, что в [19] он, по сути дела, также описан.

Статья [20] была сдана в журнал «Numerische Mathematik» в 1956 г., но вышла лишь через 3 года при определенном сопротивлении редакции. В это время университетская Европа, в отличие от США, продолжала жить прежними понятиями: «В математической культуре тех дней Вы должны были иметь дело с бесконечностью, чтобы сделать вашу тему с

научной точки зрения респектабельной», – жаловался Е. Дейкстра в своем интервью [21].

В этой же статье он опубликовал свой алгоритм отыскания кратчайшего пути в графе, связывающего две заданные вершины. По его всегдашним утверждениям, он придумал его за 20 минут без карандаша и бумаги за столиком кафе. И, как некоторые авторы пионерных результатов алгоритмической теории графов той поры, сомневался в ценности того, что получилось, из-за очевидной простоты. «В конце концов этот алгоритм стал, к моему большому удивлению, одним из краеугольных камней моей славы», – отмечал он спустя почти 50 лет [21].

Наконец, в 1961 г. Г. Соллин подготовил доклад на семинаре К. Бержа в Париже, в котором он еще раз открыл алгоритм Борувки – и на несколько десятилетий алгоритм Борувки стал алгоритмом Соллина.

К середине 1960-х, когда исследования по теории графов и комбинаторной оптимизации начались в Институте математики АН БССР, эпоха уже сменилась. С тех пор уже никому не удавалось за 20 минут «сварганить на коленке» результат мирового уровня, да еще такой, что его можно за те же 20 минут объяснить любому «чайнику».

В самом деле, совершенно непонятно, как это сделать в отношении вот такой последовательности слов: «построено рекурсивное множество формул экзистенциональной логики второго порядка, которое в точности определяет класс сложности $NP_{co}NP$ комбинаторных проблем на произвольных структурах».

А ведь этот результат, недавно полученный в Институте математики, до самого последнего времени характеризовался известными специалистами как абсолютно недостижимый. Сама возможность существования таких формул подвергалась сомнению. Более того, вполне вероятной считалась справедливость гипотезы о невозможности рекурсивного представления всех проблем из этого класса, играющего исключительную роль в криптографии с открытым ключом, поскольку существует прямая зависимость криптографической стойкости такого шифрования от их вычислительной сложности. Теперь эта гипотеза опровергнута, но значение этого события очень трудно донести даже до математиков других специальностей, не говоря уже о «людях с улицы».

Новая эпоха принесла с собой невиданный рост интереса к графовым задачам, в том числе и отысканию специальных подграфов. Остовы сетей и маршруты в них превратились в предмет пристального внимания провайдеров услуг связи, а изучение

структуры связей пользователей между собой, в том числе и выявление плотно сколоченных клик, стало чрезвычайно занимать маркетологов и спецслужбы. И это не говоря уже о внимании к теме со стороны военных и военно-промышленного комплекса.

Лица из треугольников, дома из спичек

В наступившую новую эпоху одним из наиболее востребованных разделов дискретной математики стала комбинаторная вычислительная геометрия. Как научное направление она начала активно развиваться со второй половины 70-х гг. Ее возникновение в наибольшей степени стимулировалось потребностями компьютерной графики и автоматизированного проектирования микросхем. Предметом исследований в ней являются геометрические объекты, имеющие конечное (дискретное) описание. Таковы, например, конечные наборы точек и отрезков, многоугольники на плоскости и многогранники в пространстве. Разработка и исследование алгоритмов и структур данных для эффективного оперирования такого рода объектами является центральной задачей комбинаторной вычислительной геометрии. Чтобы дать представление об этих задачах, приведем 4 из них, имеющие совершенно прозрачные постановки:

- даны n точек на плоскости, найти две из них, расстояние между которыми минимально;
- для заданного множества из n точек на плоскости построить его выпуклую оболочку, то есть минимальный выпуклый многоугольник, содержащий все эти точки;
- для заданного множества из n отрезков на плоскости найти все пары пересекающихся отрезков;
- построить разбиение на треугольники заданного на плоскости многоугольника с n вершинами.

Предполагается, что в условиях сформулированных задач каждая точка задается своими координатами, отрезок – парой конечных точек, а многоугольник – координатами своих вершин.

Скептически настроенному читателю подобные задачи могут показаться слишком простыми. Впечатление о простоте и даже тривиальности может сложиться из-за того, что при небольшом числе точек (отрезков) их можно изобразить на плоскости и решить соответствующую задачу «визуально». Неприемлемость подобного «решения» связана в первую очередь с тем, что число n точек (отрезков) в

реальных задачах чрезвычайно велико. В частности, при проектировании элементной базы современных компьютеров приходится иметь дело с миллионами точек, отрезков и других элементарных геометрических объектов. Такая же особенность характерна и для других прикладных областей. В этой ситуации непригодными оказываются и алгоритмы, основанные на бесхитром переборе возможных вариантов. Например, для решения первой из указанных задач можно было бы вычислить расстояния между каждой из $n(n-1)/2$ пар точек и выбрать пару с наименьшим расстоянием. Время работы (сложность, трудоемкость) такого алгоритма будет расти пропорционально квадрату числа точек. Заметим, что наилучший на сегодняшний день алгоритм решения рассматриваемой задачи имеет сложность порядка $n \log \log n$, где символ \log обозначает логарифм по основанию 2. Разница между n^2 и $n \log \log n$ становится огромной при достаточно большом n . Если, условно говоря, задачу со сравнительно небольшим числом точек $n = 10\,000$ алгоритм трудоемкости, пропорциональной $n \log \log n$, решает за 1 минуту, то для пропорциональной n^2 понадобится около 2 суток. Предполагается, конечно, что в обоих случаях использован один и тот же язык программирования и компьютеры одинакового быстродействия.

Сформулированные выше задачи, вместе с рядом похожих, решались на первой стадии развития комбинаторной вычислительной геометрии. Они были на тот момент базовыми, поскольку необходимость ускорения процесса возникла при разработке алгоритмов решения многих других, более сложных задач.

В приведенных четырех примерах все фигурирующие там объекты рассматриваются на плоскости, то есть соответствующие задачи являются «двумерными». Нетрудно сформулировать их трехмерные аналоги, заменив плоскость пространством, а плоские многоугольники – трехмерными многогранниками. Переход к пространственной постановке, как правило, значительно усложняет задачу. С переходом в пространство более высокой размерности они становятся еще более трудными. На современном этапе развития комбинаторной вычислительной геометрии исследование «двумерных» задач по-прежнему остается актуальным – при том, что доля связанных с многомерными объектами постоянно возрастает.

В Институте математики первые годы развития этого направления были связаны с разработкой алгоритмов решения комбинаторно-геометрических задач именно на плоскости.

Сотрудниками института были предложены методы построения выпуклых оболочек различных объектов (многоугольных фигур, конечных множеств точек и др.) на плоскости, отыскания диаметра и ширины таких объектов, а также вычисления расстояний между ними. Разработанные на этой основе алгоритмы асимптотически оптимальны по времени выполнения и используют минимальный объем компьютерной памяти. Кроме того, получено решение ряда задач оптимального разбиения плоских многоугольных областей на элементарные фигуры, разработаны эффективные алгоритмы распознавания связности таких областей и проверки подобия многоугольников.

Прикладные аспекты результатов этих исследований в первую очередь связаны с проектированием интегральных схем. Еще одну область их практического применения составляют разнообразные задачи раскроя, когда требуется из большого листа вырезать детали (фигуры) заданного вида так, чтобы минимизировать отходы, то есть неиспользованную часть материала, иными словами, разместить на нем как можно больше упомянутых фигур. Кроме того, сама техника «эффективного манипулирования» плоскими многоугольными фигурами широко используется в компьютерной графике (рис. 2).

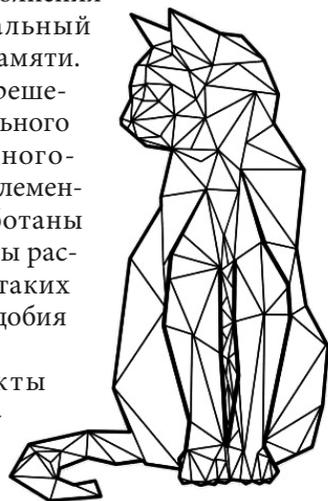


Рис. 2. Кошка из треугольников

Основной объект исследований в трехмерном пространстве – составленные из треугольников многогранные поверхности, которые по-научному называются «двумерные симплициальные комплексы», или «полиэдры». В институте разработан не улучшаемый по трудоемкости алгоритм построения триангулированной (разбитой на треугольники) границы наименьшего тела, составленного из треугольников заданного симплициального комплекса, а также разработан эффективный алгоритм построения всех наименьших тел и удаления всех треугольников, не принадлежащих границам никаких тел в полиэдре.

Описание трехмерного объекта посредством задания триангуляции его поверхности (треугольной сетки – полиэдра) – распространенная форма представления моделей в компьютерной графике. Процесс получения описания некоторого изделия состоит в

выполнении ряда операций над полиэдрами (например, операции объединения), задающими его составные части. В результате этого могут появляться «лишние» треугольники (не принадлежащие границам никаких тел в полиэдре). Отсюда возникает задача быстрого обнаружения и удаления таких треугольников. Кроме того, в современных САПР наряду с визуализацией геометрические модели активно используются для различного рода физического моделирования (оптическая трассировка – просчет поведения луча света при преломлении и отражении от моделируемого объекта, тепловое и конвекционное моделирование и т.д.). Для корректного физического моделирования необходима реконструкция топологии геометрической модели, то есть выделение в ней гел и установление связей между ними.

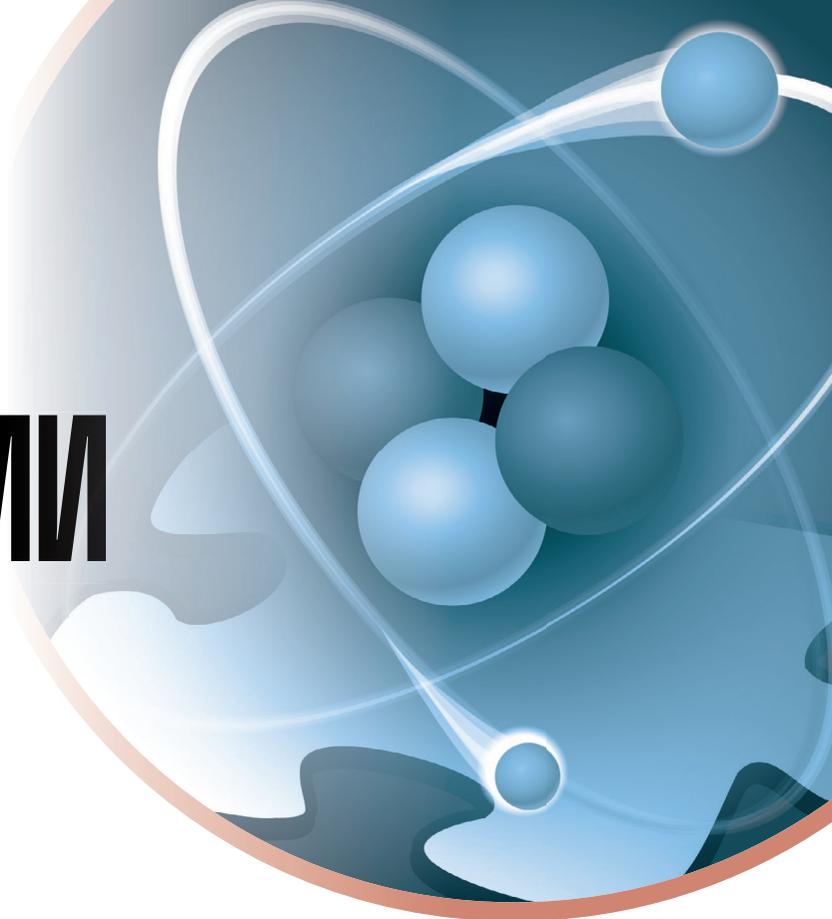
Исследование комбинаторно-геометрических задач в пространствах большей размерности ($n > 3$) было в основном направлено на развитие теории частичной (или обобщенной) выпуклости. Но это настолько обширная и своеобразная тема, что на нее здесь просто не хватит места. ■

Продолжение следует.

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

- Borůvka O. Příspěvek k řešení otázky ekonomické stavby elektrovedných sítí // Elektrotechnický obzor. Roč 15. 1926. №10. S. 153–154.
- Borůvka O. O jistém problému minimálním // Práce Moravské Přírodovědecké Společnosti v Brně. Sv. 3. 1926. №3. S. 37–58.
- Milková E. Moderní pohled na «jistý problém minimální» Pokroky matematiky, fyziky a astronomie // Vol. 45. 2000. №4. S. 265–273.
- Třešňák Z., Šarmanová P., Půža B. Otakar Borůvka. – Brno, 1996.
- Nešetřil J., Nešetřilová H. The Origins of Minimal Spanning Tree Algorithms – Borůvka and Jarník // Documenta Mathematica. Extra Volume ISMP (2012). S. 127–141.
- Kruskal J.B. A reminiscence about shortest spanning subtrees // Archivum Mathematicum. Brno, 1997. Vol. 33. №1–2. P. 13–14.
- T.E. Harris, F.S. Ross. Fundamentals of a Method for Evaluating Rail Net Capacities, Research Memorandum RM-1573. The RAND Corporation, Santa Monica, California, [October 24,] 1955.
- Graham R. L., Hell P. On the History of the Minimum Spanning Tree Problem // Annals of the History of Computing. 1985. Vol. 7. №1. P. 43–57.
- Kruskal J.B. On the shortest spanning tree of a graph and the travelling salesman problem // Proceedings of the American Mathematical Society. 1956. Vol. 7. P. 48–50.
- Prim R.C. The shortest connecting network and some generalization // The Bell System Technical Journal. 1957. J. 36. №6. P. 1389–1401.
- Jarník V. O jistém problému minimálním // Práce Moravské Přírodovědecké Společnosti v Brně. 1930. Sv. 6. Spis 4. S. 57–63.
- Loberman H., Weinberger A. Formal Procedures for Connecting Terminals with a Minimum Total Wire Length // Journal of the ACM. 1957. №4. P. 428–437.
- Dijkstra E.W. A Note on Two Problems in Connexion with Graphs // Numerische Mathematik. 1959. Vol. I. P. 269–271.
- Prana P.L., Misa T.J. An interview with Edsger W. Dijkstra // Communications of the ACM. 2010. Vol. 53. №8. P. 41–47.

ГЕНЕЗИС ИНФОРМАЦИИ



На протяжении всей истории развития человечества люди постоянно имеют дело с информацией. Известно множество определений этого термина, используемых в различных предметных областях, однако строгой научной дефиниции этого понятия пока не выработано. Но поскольку значение данного феномена в жизни общества стремительно растет, меняются методы работы с информацией, расширяются сферы ее применения, автором предпринята попытка представить толкование термина с точки зрения ее потребителя, моделирующего текущую ситуацию для выработки варианта своего поведения в следующий момент времени.



Виктор Шарак,
главный
конструктор проекта
Объединенного
института проблем
информатики
Национальной
академии наук
Беларуси

Определения слова «информация» и близких ему по значению синонимов, которые даются в словарях, весьма схожи. Например, в Толковом словаре Ожегова они представлены следующим образом:

- *информация* – сведения об окружающем мире и протекающих в нем процессах;
- *сведение* – известие, сообщение;
- *известие* – сообщение о чем-нибудь;
- *сообщение* – известие, информация.

Существует достаточно много определений понятия «информация». Часто они сложны и противоречивы [1]:

- *информация* есть знания, переданные кем-то другим или приобретенные путем собственного исследования или изучения;

- информация – это сведения, содержащиеся в данном сообщении и рассматриваемые как объект передачи, хранения и обработки;
- информация в обыденном смысле – это сведения, известные в научно-технических приложениях – то, что имеет на себе сигнал;
- информация есть план строения клетки и, следовательно, всего организма;
- информация есть запомненный выбор одного варианта из нескольких возможных и равноправных [2].

Как видим, содержание дефиниции «информация» в предметных сферах существенным образом отличается. Так, например, в физике она часто определяется через другое понятие – энтропию, которая в той же физике рассматривается по-разному. Ряд исследователей советует трактовать информацию через неопределенность, что еще больше запутывает, поскольку последняя сама по себе в научных работах строго не регламентирована.

Будем определять информацию в системе как запомненное и ограничимся живыми системами, а точнее – обладающими естественным интеллектом. Запомненным будем называть содержание памяти [3].

Очевидно, что единое определение понятия «информация» отсутствует, а существующие толкования достаточно расплывчаты. Цель работы – дать единое точное толкование термина, применимое во всех областях деятельности.

Интуитивно предполагается, что информация является сведениями, содержащимися в книгах, публикациях, передаваемыми по каналам связи, и

имеет отношение только к человеку. В то же время практически мало обращается внимание на жизненную необходимость информации для существования ее потребителя. Автор позволил себе смелость заполнить этот пробел и представить взгляд на информацию с точки зрения ее потребителя.

Уточним область интересов для дальнейших рассуждений.

Представление, в смысле «образ предмета, явления или какого-нибудь понятия, имеющее атрибуты», для краткости назовем уява. Представление «ничто», по мнению автора, атрибутов не имеет и поэтому не является уявой.

Создание, в смысле «живое существо, способное моделировать текущую ситуацию для прогнозирования вариантов своего поведения и выбрать его вариант в следующий момент времени», для краткости назовем ствар. Если альтернативы выбору никогда нет, то это не ствар, а автомат, даже если выбор производится с использованием датчика случайных чисел. Термин «ствар» относится только к понятию «живое существо», так как устройства, наделенные искусственным интеллектом, пока не достигли его уровня.

В мозг поступают сигналы от сенсоров ствара. Из них выделяются атрибуты конкретной уявы и их значения с доступной точностью. Только после этого значения атрибутов можно назвать информацией, и она вовлекается в моделирование ситуации. Информация сохраняется в памяти ствара некоторый промежуток времени, в течение которого она достоверна для дальнейшего использования. Следовательно, информа-

ция – это значение атрибута в конкретный момент времени.

Способы и формы ее хранения в памяти ствара и алгоритмы функционирования мозга неизвестны.

Сохраненная информация также называется знаниями. К ним относят и найденные ранее или предполагаемые зависимости между атрибутами, выражаемые в теориях, законах, гипотезах, утверждениях и опыте, и их можно записать на внешних носителях информации.

Процесс накопления знаний, начиная с чистой памяти ствара, и нахождение зависимостей между атрибутами в статье не рассматриваются.

Для успешного обеспечения своих потребностей ствару необходимо прогнозировать развитие текущей ситуации в будущем, что достигается с помощью ее моделирования с применением при этом информации о состоянии как внешнего, так и своего внутреннего мира, поступившей в последний момент перед началом моделирования и знаний. Для успешного моделирования ситуации необходимо знать значение атрибутов всех используемых уяв с возможной степенью точности на данный промежуток времени и правильно установить зависимости между ними.

Точность атрибута выражается числом его возможных состояний. Если на данный момент оно конкретно не известно, а представлен диапазон значений, в котором оно находится, то можно говорить о полноте информации атрибута. Для ее оценки введем одноименный коэффициент:

$$k_i = \frac{N_i - n_i}{N_i},$$

где k_i – значение коэффициента полноты информации i -го атрибута; n_i – количество значений диапазона, в которых не может находиться значение i -го атрибута на данный момент времени; N_i – общее количество значений i -го атрибута.

Если в некоторый момент времени известно точное значение атрибута ($n_i = 0$), следовательно, о нем имеется полная информация для нужд моделирования.

Коэффициентом нескольких атрибутов будет сумма $(N_i - n_i)$, деленная на сумму N_i :

$$k = \frac{\sum_{i=1}^m (N_i - n_i)}{\sum_{i=1}^m N_i},$$

где k – коэффициент полноты информации; m – количество атрибутов.

В таком случае $\log_2 N_i$, округленный в большую сторону и трактуемый как количество информации, определяет количество разрядов атрибута в двоичной системе счисления для записи в память технического устройства. Тогда $\log_2 N_i$ можно назвать информационной емкостью атрибута.

Предложенное определение: «Информация – это знание атрибута в конкретный момент времени» – устраняет размытость предыдущих трактовок, применимо во всех сферах деятельности, будет способ-

ствовать лучшему взаимопониманию специалистов разных областей знаний и, по мнению автора, внесет свою лепту в изучение законов функционирования мозга и развития искусственного интеллекта. ■

СПИСОК ИСПОЛЬЗОВАННЫХ ИСТОЧНИКОВ

1. Шавенько Н.К. Основы теории информации. Учебное пособие. – М., 2019.
2. Чернавский Д.С. Проблема происхождения жизни и мышления с точки зрения современной физики // Успехи физических наук. 2000. Т. 170, №2. С. 157–183.
3. Бондаренко И.А., Гидлевский А.В. Философское содержание понятия информации: критический анализ // <https://science-education.ru/ru/article/view?id=15733>.

Дорогие наши читатели, коллеги, друзья!
Научно-практический журнал «Наука и инновации» приглашает вас к сотрудничеству! Журнал зарегистрирован в научной электронной библиотеке eLibrary. Научным публикациям присваиваются номера DOI. Высшей аттестационной комиссией Республики Беларусь журнал «Наука и инновации» включен в перечень научных изданий для опубликования результатов диссертационных исследований по биологическим, медицинским, а также экономическим наукам (вопросы инновационного развития).

Чтобы опубликовать статью, необходимо направить ее на электронный адрес редакции: nii2003@mail.ru. Правила публикации – на нашем сайте <https://innosfera.belnauka.by>, в разделе «0 журнале» – «Прием статей».

**Наука
и инновации**

Alexey Litvin

Code «Bagration» (Part 1) 4

The third material of the journal «Science and Innovation» and the Institute of History of the National Academy of Sciences of Belarus joint project «Liberation. Chronicle of Events», deals with the 80th anniversary of the liberation of Belarus from the Nazi invaders, depicts the events of April 1944: the heroic partisans resistance to enemy punitive operations and preparation for the upcoming offensive of the Red Army.

Grigory Vereshchagin

Astronomy: history and prospects 10

The author considered the importance of astronomy for modern civilization and underlined the high capability of Belarusian scientists to contribute to scientific progress.

Gennady Bisnovaty-Kogan

Dark matter and dark energy: the early and late Universe, the Hubble parameter problem 14

The author presented the cosmological solutions to models of the Universe, and considered the potential of the density fluctuations studying.

Yuri Vybyly

Cosmology: past and future 19

A brief review of the cosmology current state is given. The author considered the basic ideas about the Universe expanding, dark energy and dark matter and the connection between cosmology, astrophysics and the theory of gravity.

Ivan Rybak

On the issue of high-energy physics on gravitational waves. Accurate cosmology and observational data 22

The author considers the evolution of the Universe and the role of scientific observations and ideas in the exploration of the earliest cosmos period, right up to the moment of its "birth".

Sergey Cherkas, Vladimir Kalashnikov

Archeology of the Universe: from the plasma era to microwave radiation 27

The article considers the problems of cosmological nucleosynthesis and prospects for slow expansion cosmologies.

Stanislav Komarov

Space-time curvature: what images of black holes say 30

On the example of a significant recent astrophysical discovery, the first direct observation of a black hole, the author shows its impact on both physics in general (theoretical and experimental) and on the theory of gravitational interaction in particular.

Evgeniy Derishev

Gamma-ray bursts are the brightest flashes in the Universe 35

The gamma-ray bursts have been analyzed as a very unusual process that has given many surprises to observers and theorists, and the common theoretical models of this phenomenon were presented.

Nikolai Prokopenya

How to extract energy from a spinning black hole .. 41

The article considers the history of the extracting energy from a black hole idea, and presents the elementary concepts of black holes and their relationship to observable astrophysical phenomena.

Oleg Boyarkin, Victor Makhnach

Solar neutrino oscillations 45

The author considers the behavior of an electron neutrino beam in solar matter and presents a method for predicting high-energy solar flares, based on the attenuation of an electron neutrino beam when passing through the magnetic field of paired sunspots.

Valentina Shchetko

Directions of the high-tech sector regionalization in the Republic of Belarus 50

The article considers the importance of integration associations in the field of high technologies and their advantages for the production and the economic development. The most promising states for deepening cooperation with the Republic of Belarus in the specified area are analyzed.

Iryna Yemelyanovich

Belarusian electronics vendor 56

It is an interview with academician Nikolai Kazak about the activities of the innovation-industrial cluster "Micro-, opto- and microwave electronics" being the flagship of domestic microelectronics.

Yulia Vasilishina

Republican Scientific Center for Hydrocarbon and Alternative Raw Materials: maximum efficiency in the use of resources 62

The author presents the works in the field of new forest chemical technologies and higher efficiency of oil refining, carried out at the Republican Scientific Center for Hydrocarbons and Alternative Raw Materials, Institute of Chemistry of New Materials of the National Academy of Sciences of Belarus.

Valery Goncharov, Natalia Yankevich

Technological aspects of electromobility (Part 2) 67

It's a further review of the global electric car industry trends development, in which the authors clarify the point if the generated electricity and charging infrastructure are sufficient to transfer the global and domestic vehicle fleet from gasoline and gas fuels to electric ones.

Vladimir Sarvanov, Evgeny Makarov

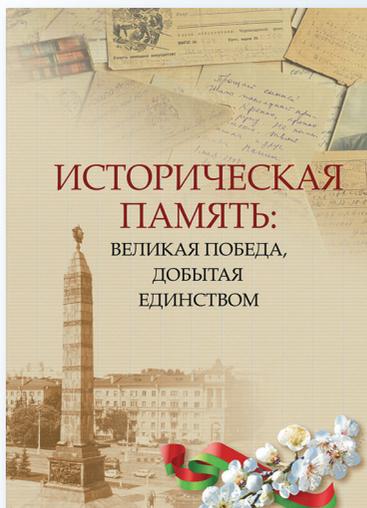
How can you choose the right one from 100,000,000 options if you only have time to sort through 100 of them? 74

In the second part of the article, the authors continue the story about the graph theory development and options for its practical application.

Victor Sharak

Genesis of information 81

The author gives an interpretation of the notion "information" from the user's point of view. He underlines the significance of information as an attribute of the simulated situation at a specific point in time.

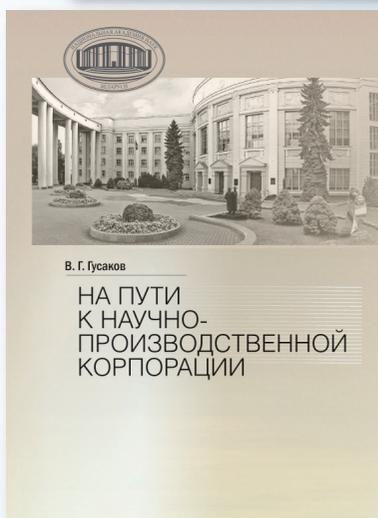


Историческая память: Великая Победа, добытая единством : материалы Междунар. парламент. конф., Минск, 14–15 июня 2022 г. / сост.: В. Л. Лакиза, А. М. Литвин ; редкол.: В. П. Андрейченко (пред.) [и др.] ; Нац. акад. наук Беларуси, Институт истории. – Минск : Беларуская навука, 2024. – 311 с.

ISBN 978-985-08-3116-3.

Сборник включает материалы, посвященные вопросам сохранения исторической памяти о Победе в Великой Отечественной войне в контексте укрепления национальной и международной безопасности, представленные на Международной парламентской конференции «Историческая память: Великая Победа, добытая единством», состоявшейся в июне 2022 г. Приводятся сведения о геноциде белорусского народа во время Великой Отечественной войны и в послевоенный период, показан белорусский опыт сохранения исторической памяти и недопущения реабилитации нацизма.

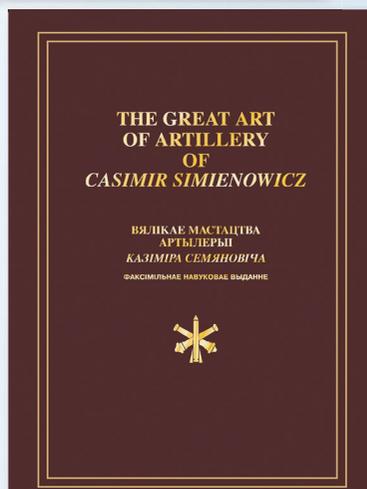
Сборник предназначен для работников государственных органов, руководителей и специалистов организаций, научных сотрудников и студентов, широкого круга читателей, интересующихся вопросами сохранения исторической памяти.



На пути к научно-производственной корпорации : сб. докл., выступлений, ст., публикаций в СМИ, приветств. и вступ. слов Пред. Президиума НАН Беларуси акад. В. Г. Гусакова / В. Г. Гусаков. – Минск : Беларуская навука, 2024. – 337 с. : ил.

ISBN 978-985-08-3124-8.

Настоящий сборник отражает очередной этап жизни и деятельности Председателя Президиума НАН Беларуси В. Г. Гусакова. Знакомство с книгой, куда вошли научные статьи академика, приветственные слова на общественных мероприятиях, выступления в СМИ, дает возможность объективно представить разностороннюю жизнь Академии наук за конец 2022-го и истекший, 2023 год. *Для широкого круга ученых и специалистов.*



The Great Art of Artillery of Casimir Simienowicz = Вялікае мастацтва артылерыі Казіміра Семяновіча / уступ. арт., навук.-давед. апарат, уклад.: П. Д. Падбярэзкі, В. В. Урублеўскі ; рэдкал.: У. Р. Гусакоў (гал. рэд.) [і інш.] ; Нац. акад. навук Беларусі, Цэнтр. навук. б-ка імя Я. Коласа. – Факс. навук. выд. на аснове лондан. экз. 1729 г. – Мінск : Беларуская навука, 2024. – 575 с. : іл.

ISBN 978-985-08-3110-1.

Кніга змяшчае факсімільнае выданне лонданскага экзэмпляра «Вялікага мастацтва артылерыі» – самага вядомага падручніка па артылерыйскай справе эпохі мадэрну, напісанага Казімірам Семяновічам – навукоўцам, выхадцам з беларускіх зямель Вялікага Княства Літоўскага. Даступнасць і навуковасць тэксту, сістэматычны разгляд і эмацыянальная насычанасць, тэхніка, эстэтыка і візуалізацыя аб'екта даследавання рабілі і робяць чытанне «Вялікага мастацтва артылерыі» займальным не толькі для «вузкіх» спецыялістаў, але і для самага шырокага кола чытачоў усіх эпох. У выданні таксама прадстаўлены даследаванні генеалогіі і навуковага стылю Казіміра Семяновіча, аналітычны разбор літаратуры па праблеме, навукова-даведачны апарат.

Для гісторыкаў, філолагаў, мовазнаўцаў і ўсіх, хто цікавіцца навуковай і культурнай спадчынай Беларусі.

РУП «ИЗДАТЕЛЬСКИЙ ДОМ «БЕЛОРУССКАЯ НАУКА»

предлагает литературу

- по медицине
- искусствоведению
- литературоведению
- языкознанию
- этнографии
- фольклору
- естественным наукам

принимает заказы на печать

- бланки формата А₅, А₄, А₃
 - грамоты ● дипломы
 - канцелярские книги
 - блокноты ● блоки для записей
 - календари ● буклеты
 - проспекты (с разработкой дизайна)
- тираж от 1 экземпляра*

Получить информацию об изданиях и оформить заказ можно по телефонам:

*+375 (17) 396-83-27,
370-64-17, 320-33-74.*

*Адрес: ул. Ф. Скорины, 40,
220084, г. Минск,
Республика Беларусь;
e-mail: belnauka@mail.ru;
сайт: www.belnauka.by*

16-я Международная конференция «НОВЫЕ МАТЕРИАЛЫ И ТЕХНОЛОГИИ: ПОРОШКОВАЯ МЕТАЛЛУРГИЯ, КОМПОЗИЦИОННЫЕ МАТЕРИАЛЫ, ЗАЩИТНЫЕ ПОКРЫТИЯ, СВАРКА»

22–24 мая 2024 г.

Тематика конференции:

Секция 1

«Порошковые материалы на металлической основе. Композиционные порошковые материалы: триботехнические, электротехнические, пористые и специальные. Технологии и моделирование процессов их получения и применения»;

Секция 2

«Наноматериалы и нанотехнологии. Сверхтвердые и керамические материалы»;

Секция 3

«Инженерия поверхности. Защитные покрытия: материалы, технология и оборудование для нанесения»;

Секция 4

«Новые технологии и оборудование сварочного производства. Соединение и деструкция материалов. Нетрадиционные металлургические технологии».

Подробности на сайте:

<https://pminstitute.by/>

e-mail: info50@pminstitute.by

Место проведения:

Институт порошковой металлургии им. академика О.В. Романа (г. Минск, ул. Платонова, 41, 2-й этаж, зал заседаний).

По вопросам участия в мероприятии обращаться в оргкомитет по тел.:

8(017) 290-95-64

ОРГАНИЗАТОРЫ:



Отделение физико-технических наук НАН Беларуси, пр. Независимости, 66, Минск



Государственное научное учреждение «Институт порошковой металлургии имени академика О. В. Романа»