



Ф́ИЗИКА

Авторы: А. М. Прохоров (развитие физики до середины 20 века), В. А. Ильин, Ю. Г. Рудой

Ф́ИЗИКА (от греч. φύσις – природа), наука, изучающая простейшие и вместе с тем наиболее общие свойства и законы движения объектов материального мира. Понятия Ф. и её законы лежат в основе всего [естествознания](#).

Предмет и структура физики

Первоначально, в эпоху ранней греч. культуры, наука была единой и охватывала всё, что было известно о земных и небесных явлениях. По мере накопления фактич. материала и его науч. обобщения происходила дифференциация знаний и методов исследования, и Ф. выделилась из общей науки о природе. Однако границы, отделяющие Ф. от др. естеств. наук, в значит. мере условны и меняются с течением времени.

Законы Ф. базируются на фактах, установленных опытным путём. Эти законы представляют собой строго определённые количественные соотношения и формулируются на математич. языке. Различают эксперим. Ф. (опыты, проводимые для обнаружения новых фактов и для проверки открытых физич. законов) и теоретич. Ф., цель которой состоит в формулировке общих законов природы и в объяснении конкретных явлений на основе этих законов, а также в предсказании новых явлений. По целям исследования и возможным применениям выделяют прикладную физику.

В соответствии с многообразием исследуемых форм движения материи Ф. подразделяется на ряд дисциплин, или разделов, в той или иной мере связанных друг с другом. Деление Ф. на отд. дисциплины неоднозначно, его можно проводить руководствуясь разл. критериями. По изучаемым объектам Ф. делится на Ф. элементарных частиц, [ядерную физику](#), [атомную физику](#), [молекулярную физику](#), Ф. конденсиров. состояния вещества, Ф. плазмы. Др. критерий – изучаемые процессы или формы движения материи. Различают механич. движение, тепловые процессы, электромагнитные, гравитационные, сильные, слабые взаимодействия; соответственно в Ф. выделяют [механику](#) материальных точек и твёрдых тел, [механику сплошной среды](#) (включая [акустику](#)), [термодинамику](#), [статистическую физику](#), [электродинамику](#) (включая [оптику](#)), теорию тяготения, [квантовую механику](#) и [квантовую теорию поля](#).

Указанные разделы Ф. частично перекрываются вследствие глубокой внутр. взаимосвязи между объектами материального мира и процессами, в которых они участвуют. Так, напр., теория колебаний и волн основана на общности закономерностей колебат. процессов разл. физич. природы (механич., акустич., электрич., оптич.) и методов их исследования.

Совр. Ф. имеет дело с небольшим числом фундам. законов, или фундам. физич. теорий, охватывающих все разделы Ф. Эти теории представляют собой квинтэссенцию наших знаний о характере физич. процессов и явлений, приближённое, но наиболее полное отображение разл. форм движения материи в природе. При этом мн. процессы изучаются на разных уровнях: на макроскопич. уровне в феноменологических (описательных) теориях и на микроскопич. уровне в статистич. теориях многих частиц.

На нач. 21 в. принято также деление всей совокупности физич. знаний в соответствии с пространственными масштабами изучаемых объектов: микрофизика (размеры порядка 10^{-18} – 10^{-8} м), изучающая элементарные частицы и атомные ядра, а также атомы и молекулы; макрофизика (10^{-8} – 10^{20} м), в область изучения которой входят физич. тела, составляющие живую и неживую природу; мегафизика (10^{20} – 10^{26} м), изучающая космич. объекты от размера Солнечной системы до диаметра видимой части Вселенной (галактики и их скопления, туманности, квазары и т. п.).

При изучении объектов каждого из этих разделов Ф. оперирует специфич. законами, математич. аппаратом и методами исследования. Напр., при переходе от макро- к микрофизике полностью детерминированные законы сменяются вероятностными. При переходе от макрофизики к мегафизике подобные изменения не столь очевидны, однако уже открыты (или имеются косвенные эксперим. подтверждения) астрофизич. объекты, физич. свойства которых описывают законы, справедливые только для «мегамира».

Границы между областями физич. исследований подвижны, между разл. областями имеются многогранные связи и аналогии. Плавные переходы от одного раздела к другому, корреляция результатов в предельных случаях (*соответствия принцип*) и наличие фундам. законов (напр., *сохранения законов*) справедливы для всех частей физики.

История развития физики

Становление физики (до 17 века)

Появлению Ф. в совр. смысле слова предшествовали многочисл. попытки объяснения разл. физич. явлений. В эпоху греко-римской культуры (6 в. до н. э. – 2 в. н. э.) зародилось представление об атомном строении вещества (*Демокрит, Эпикур, Лукреций*), была создана геоцентрич. система мира (*Птолемей*), установлены простейшие законы статики (правило рычага), открыты законы прямолинейного распространения и отражения света, сформулированы начала гидростатики (закон Архимеда), наблюдались простейшие проявления электричества и магнетизма.

Общий итог приобретённых знаний был подведён *Аристотелем* (4 в. до н. э.). Физика Аристотеля включала отд. верные положения, но в то же время отвергала мн. прогрессивные идеи предшественников, в частности атомную гипотезу. Признавая значение опыта, Аристотель отдавал предпочтение умозрит. представлениям и не считал опыт гл. критерием достоверности знания. Учение Аристотеля, канонизированное Церковью, надолго затормозило развитие науки.

Естествознание возродилось лишь в 15–16 вв. в борьбе с учением Аристотеля. В сер. 16 в. Н.*Коперник* разработал гелиоцентрич. систему мира и положил начало освобождению естествознания от теологии. Потребности произ-ва, развитие ремёсел, судоходства и артиллерии стимулировали науч. исследования, опирающиеся на опыт. Однако в 15–16 вв. эксперим. исследования носили в осн. случайный характер. Лишь в 17 в. началось систематич. применение эксперим. метода в Ф.; это привело к созданию первой фундам. физич. теории – классич. механики И. *Ньютона*.

Формирование физики как науки (начало 17 – конец 18 вв.)

Развитие Ф. как науки было начато трудами Г. [Галилея](#). Галилей понял, что для открытия законов движения нужно научиться описывать движение математически. Нельзя ограничиваться простым наблюдением за движущимися телами; нужно ставить опыты, чтобы выяснить, как меняются со временем величины, характеризующие движущиеся тела. Галилей показал, что воздействие на данное тело окружающих тел определяет не скорость, как считалось в механике Аристотеля, а ускорение тела. Это утверждение представляло собой первую формулировку закона инерции. Галилей открыл принцип относительности в механике ([Галилея принцип относительности](#)), доказал независимость ускорения свободного падения тел от их плотности и массы, с помощью механики обосновал теорию Коперника. Значит. результаты были получены Галилеем и в др. областях Ф. Он впервые применил зрительную трубу для астрономич. наблюдений и сделал с её помощью ряд открытий. Количественное изучение тепловых явлений началось после изобретения Галилеем первого термометра.

В 1-й пол. 17 в. началось успешное изучение газов. Ученик Галилея Э. [Торричелли](#) открыл атмосферное давление и создал первый барометр. Р. [Бойль](#) и Э. [Мариотт](#) исследовали упругость газов и сформулировали первый газовый закон, носящий их имя. Тогда же В. [Снеллиус](#) и Р. [Декарт](#) независимо друг от друга открыли закон преломления света. К этому же времени относится создание микроскопа. Значит. шаг в изучении электромагнитных явлений был сделан в нач. 17 в. У. [Гильбертом](#), который доказал, что Земля является большим магнитом, и первым строго разграничил электрич. и магнитные явления.

Осн. достижение Ф. 17 в. – создание классич. механики. Развивая идеи Г. Галилея, Х. [Гюйгенса](#) и др., И. Ньютон сформулировал осн. законы классич. механики. При её построении впервые был воплощён идеал науч. теории, существующий и поныне: задача науки состоит в поисках наиболее общих, количественно формулируемых законов природы.

Наибольших успехов механика Ньютона достигла при объяснении движения небесных тел. Исходя из законов движения планет, установленных И. [Кеплером](#) на основе наблюдений Т. [Браге](#) и др., И. Ньютон открыл [всемирного тяготения закон](#). С помощью этого закона удалось с высокой точностью рассчитать движение Луны, планет и комет Солнечной системы, объяснить приливы и отливы в океане. Ньютон придерживался концепции дальнего действия, согласно которой взаимодействие тел (частиц) происходит мгновенно непосредственно через пустоту; силы взаимодействия должны определяться экспериментально.

В это же время Х. Гюйгенс и Г. [Лейбниц](#) сформулировали закон сохранения количества движения; Гюйгенс создал теорию физич. маятника, построил часы с маятником; Р. [Гук](#) открыл осн. закон упругости ([Гука закон](#)). Были заложены основы физич. акустики: М. [Мерсенн](#) впервые измерил скорость звука в воздухе, И. Ньютон дал теоретич. вывод формулы для скорости звука.

Во 2-й пол. 17 в. быстро развивалась геометрич. оптика применительно к конструированию телескопов и др. оптич. приборов и закладывались основы физич. оптики. Ф. [Гримальди](#) открыл дифракцию света, И. Ньютон провёл фундам. исследования дисперсии света. Эти работы Ньютона можно считать началом [оптической спектроскопии](#). В 1675 О. К. [Рёмер](#) впервые измерил скорость света. Почти одновременно возникли и начали развиваться две разл. теории о физич. природе света – корпускулярная и волновая. Согласно корпускулярной теории Ньютона, свет – это поток частиц, движущихся от источника по всем направлениям. Х. Гюйгенс заложил основы волновой теории света, согласно которой свет – это поток волн, распространяющихся в особой гипотетич.

среде – [эфире мировом](#).

В 18 в. продолжалось развитие классич. механики, в частности [небесной механики](#). По небольшой аномалии в движении планеты Уран удалось предсказать существование новой планеты – Нептуна. Уверенность в справедливости механики Ньютона стала всеобщей. На её основе была создана единая механич. картина мира, согласно которой всё качественное многообразие мира – результат различий в движении атомов, слагающих тела, которое подчиняется законам Ньютона. Эта картина мн. годы оказывала сильнейшее влияние на развитие Ф. Объяснение физич. явления считалось научным и полным, если это явление можно было свести к действию законов классич. механики.

В работах Л. [Эйлера](#) и др. была разработана динамика абсолютно твёрдого тела. Параллельно с развитием механики частиц и твёрдых тел шло развитие механики жидкостей, газов и деформируемых тел. Труды Д. [Бернулли](#), Эйлера, Ж. [Лагранжа](#) и др. в 1-й пол. 18 в. были заложены основы гидродинамики идеальной жидкости. В «Аналитической механике» Лагранжа уравнения механики представлены в столь обобщённой форме, что в дальнейшем их удалось применить и к немеханическим, в частности электромагнитным, процессам. У. Р. [Гамильтон](#) установил общий интегральный принцип наименьшего действия классич. механики, который оказался применимым во всей физике.

В др. областях Ф. происходило дальнейшее накопление опытных данных, формулировались простейшие эксперим. законы. Ш. [Дюфе](#) открыл существование двух видов электричества и определил, что одноимённо заряженные тела отталкиваются, а разноимённо заряженные – притягиваются. Б. [Франклин](#) установил закон сохранения электрич. заряда. Г. [Кавендиш](#) и Ш. [Кулон](#) независимо друг от друга открыли осн. закон электростатики, определяющий силу взаимодействия неподвижных электрич. зарядов ([Кулона закон](#)). Возникло учение об атмосферном электричестве; Франклин, М. В. [Ломоносов](#) и Г. В. [Рихман](#) доказали электрич. природу молнии. В оптике продолжалось совершенствование объектива телескопа. Труды П. [Бугера](#) и И. [Ламберта](#) начала создаваться [фотометрия](#). Были открыты инфракрасные (У. [Гершель](#), У. [Волластон](#)) и ультрафиолетовые (нем. учёный И. Риттер) лучи. Заметный прогресс наблюдался в исследовании тепловых явлений: стали различать темп-ру и количество теплоты. Это произошло после открытия Дж. [Блэком](#) скрытой теплоты плавления и эксперим. доказательства сохранения теплоты в калориметрич. опытах. Было сформулировано понятие теплоёмкости, начато исследование теплопроводности и теплового излучения. При этом одновременно утвердились неправильные взгляды на природу теплоты. Теплоту рассматривали как особого рода неуничтожимую невесомую жидкость – теплород, способную перетекать от нагретых тел к холодным. Корпускулярная теория теплоты, согласно которой теплота связана с внутр. движением частиц, потерпела временное поражение, несмотря на то, что её поддерживали и развивали такие выдающиеся учёные, как Ньютон, Гук, Бойль, Бернулли, Ломоносов и др.

Классическая физика (19 век)

В нач. 19 в. длительная конкуренция между корпускулярной и волновой теориями света завершилась окончательной, казалось бы, победой волновой теории. Это произошло после того, как Т. [Юнг](#) и одновременно О. Ж. [Френель](#) с помощью волновых представлений успешно объяснили явления интерференции и дифракции света; интерпретировать эти явления с помощью корпускулярной теории представлялось невозможным. В то же время было получено решающее доказательство поперечности световых волн (Френель, Д. Ф. [Араго](#), Юнг),

открытой ещё в 18 в. Рассматривая свет как поперечные волны в упругой среде (эфире), Френель нашёл количественный закон, определяющий интенсивность преломлённых и отражённых световых волн при переходе света из одной среды в другую (формулы Френеля), а также создал теорию двойного лучепреломления.

Большое значение для развития Ф. имели открытия Л. [Гальвани](#) и А. [Вольты](#), позволившие создать достаточно мощные источники постоянного тока – гальванич. батареи. Это дало возможность обнаружить и изучить многообразные действия электрич. тока. Прежде всего было исследовано химич. действие тока (Г. [Дэви](#), М. [Фарадей](#)), В. В. [Петров](#) получил электрич. дугу. Открытие Х. К. [Эрстедом](#) в 1820 действия электрич. тока на магнитную стрелку доказало связь между электричеством и магнетизмом. Основываясь на единстве электрич. и магнитных явлений, А. [Ампер](#) пришёл к выводу, что все магнитные явления обусловлены движущимися заряженными частицами – электрич. током. Вслед за этим Ампер экспериментально установил закон, определяющий силу взаимодействия двух электрич. токов ([Ампера закон](#)).

В 1831 М. Фарадей открыл явление электромагнитной индукции. При попытках объяснения этого явления с помощью концепции дальнего действия выявились значит. затруднения. Фарадей высказал гипотезу (ещё до открытия электромагнитной индукции), согласно которой электромагнитные взаимодействия осуществляются посредством промежуточного агента – электромагнитного поля (концепция ближнего действия). Это послужило началом формирования новой науки о свойствах и законах поведения особой формы материи – электромагнитного поля.

Важнейшее значение для Ф. и всего естествознания имело открытие закона сохранения энергии, связавшего воедино все явления природы. В сер. 19 в. опытным путём была доказана эквивалентность количества теплоты и работы и, т. о., установлено, что теплота представляет собой не какую-то гипотетическую сохраняющуюся субстанцию – теплород, а особую форму энергии. В 1840-х гг. Ю. Р. [Майер](#), Дж. [Джоуль](#) и Г. [Гельмгольц](#) независимо друг от друга открыли закон сохранения и превращения энергии. Закон сохранения энергии стал осн. законом термодинамики – теории тепловых явлений, в которой не учитывается молекулярное строение тел; этот закон получил название первого начала термодинамики.

Ещё до этого открытия Н. Л. С. [Карно](#) в 1824 получил результаты, послужившие основой для др. фундам. закона теории теплоты – второго начала термодинамики. Этот закон, сформулированный в работах Р. [Клаузиуса](#) в 1850 и У. [Томсона](#) (лорда Кельвина) в 1851, является обобщением опытных данных, указывающих на необратимость процессов в природе, и определяет направление термодинамич. процессов.

Одновременно с развитием термодинамики развивалась и молекулярно-кинетич. теория тепловых процессов. Это позволило включить тепловые процессы в рамки механич. картины мира и одновременно привело к открытию нового типа законов – статистических, в которых все связи между физич. величинами носят неоднозначный, вероятностный характер.

На первом этапе развития кинетич. теории наиболее простой среды – газа – Дж. Джоуль, Р. Клаузиус и др. вычислили ср. значения разл. физич. величин: скорости молекул, числа столкновений молекул в секунду, длины свободного пробега и др. Была получена зависимость давления газа от числа молекул в единице объёма и ср. кинетич. энергии поступат. движения молекул. Это позволило вскрыть глубокий физич. смысл темп-ры как меры ср. кинетич. энергии молекул. В основе этих представлений лежало предположение о том, что молекулы участвуют в хаотич. тепловом движении.

Второй этап развития молекулярно-кинетич. теории начат Дж. К. [Максвеллом](#). В 1859 он, введя впервые в Ф. понятие вероятности, нашёл закон распределения молекул по скоростям ([Максвелла распределение](#)). После этого возможности молекулярно-кинетич. теории необычайно расширились и привели к созданию статистич. механики. Л. [Больцман](#) построил [кинетическую теорию газов](#) и дал статистич. обоснование законов термодинамики. Осн. проблема, которую в значит. степени удалось решить Больцману, заключалась в согласовании обратимого по времени характера движения отд. молекул с очевидной необратимостью всех макроскопич. процессов. Термодинамич. равновесию системы, по Больцману, соответствует максимум вероятности данного состояния. Необратимость процессов связана со стремлением системы к наиболее вероятному состоянию. Большое значение имела доказанная Больцманом теорема о равномерном распределении ср. кинетич. энергии по степеням свободы.

Статистич. механика получила завершение в 1902 в работах Дж. У. [Гиббса](#), создавшего метод расчёта функций распределения для любых систем в состоянии термодинамич. равновесия. Всеобщее признание статистич. механика получила после создания в 1905–06 А. [Эйнштейном](#) и М. [Смолуховским](#) на основе молекулярно-кинетич. теории количественной теории броуновского движения, которая была экспериментально подтверждена в опытах Ж. Б. [Перрена](#).

Во 2-й пол. 19 в. длительный процесс изучения электромагнитных явлений был завершён Дж. К. Максвеллом, написавшим уравнения для электромагнитного поля, которые объясняли все известные в то время факты с единой точки зрения и позволяли предсказывать новые явления. Электромагнитную индукцию Максвелл интерпретировал как процесс порождения переменным магнитным полем вихревого электрич. поля. Вслед за этим он предсказал обратный эффект – порождение магнитного поля переменным электрич. полем (током смещения). Важнейшим результатом теории Максвелла был вывод о конечности скорости распространения электромагнитных взаимодействий (электромагнитных волн) и равенстве её скорости света. Эксперим. обнаружение электромагнитных волн Г. Р. [Герцем](#) (1886–89) подтвердило справедливость этого вывода. Из теории Максвелла вытекало, что свет имеет электромагнитную природу. В кон. 19 в. П. Н. [Лебедев](#) обнаружил на опыте и измерил давление света, предсказанное электромагнитной теорией Максвелла. В это же время А. С. [Попов](#) и Г. [Маркони](#) впервые использовали электромагнитные волны для беспроводной связи. В 1859 Г. Р. [Кирхгоф](#) и Р. [Бунзен](#) заложили основы спектрального анализа.

В 19 в. продолжалось также развитие механики сплошных сред. В акустике была разработана теория упругих колебаний и волн (Г. Гельмгольц, Дж. У. [Рэлей](#) и др.). Создана техника получения низких темп-р; получены в жидком состоянии все газы, кроме гелия. В нач. 20 в. Х. [Камерлинг-Оннес](#) оживил и гелий.

К кон. 19 в. Ф. считали почти завершённой. Казалось, что все физич. явления можно свести к механике молекул (или атомов) и эфира. Эфир рассматривался как механич. среда, в которой происходят электромагнитные явления. Лорд Кельвин обращал внимание лишь на два необъяснимых факта: отрицат. результат опыта А. А. [Майкельсона](#) по обнаружению движения Земли относительно эфира и непонятную с точки зрения молекулярно-кинетич. теории зависимость теплоёмкости газов от темп-ры. Однако именно эти факты явились первым указанием на необходимость пересмотра осн. представлений Ф. Для объяснения этих и множества др. фактов, открытых впоследствии, понадобилось создание теории относительности и квантовой механики.

Релятивистская и квантовая физика. Физика атомного ядра и элементарных частиц

(конец 19 – 20 вв.)

Наступление новой эпохи в Ф. было подготовлено открытием электрона Дж. Дж. [Томсоном](#) в кон. 19 в.

Выяснилось, что атомы не элементарны, а представляют собой сложные системы, в состав которых входят электроны. Важнейшую роль в этом открытии сыграло исследование электрич. разрядов в газах.

В кон. 19 – нач. 20 вв. Х. А. [Лоренц](#) заложил основы электронной теории, называемой чаще микроскопич. электродинамикой. В этой теории методы статистич. механики были распространены на электромагнитные процессы.

В нач. 20 в. выяснилось, что электродинамика требует коренного пересмотра представлений о пространстве и времени – представлений, лежащих в основе классич. механики Ньютона. Опыт показывал, что сформулированный Г. Галилеем принцип относительности, согласно которому механич. явления протекают одинаково во всех инерциальных системах отсчёта, справедлив и для электромагнитных явлений. Поэтому уравнения Максвелла не должны изменять свою форму (должны быть инвариантными) при переходе от одной инерциальной системы отсчёта к другой. Однако оказалось, что это справедливо лишь в том случае, если преобразования координат и времени при таком переходе отличны от преобразований Галилея, справедливых в механике Ньютона.

А. [Пуанкаре](#) и Х. А. Лоренц нашли эти преобразования (см. [Лоренца преобразования](#)), но не смогли дать им правильную физич. интерпретацию. Это было сделано А. Эйнштейном в 1905 в его спец. теории относительности, представлявшей собой следующий после Г. Галилея и И. Ньютона шаг в развитии представлений о пространстве и времени – релятивистскую физику. Открытие спец. теории относительности показало ограниченность механич. картины мира. Попытки свести электромагнитные процессы к механическим в гипотетич. среде – эфире – оказались несостоятельными.

В 1916 А. Эйнштейн распространил принцип относительности на неинерциальные системы отсчёта и построил общую теорию относительности – физич. теорию пространства, времени и тяготения. В том же году следствия этой теории были подтверждены астрономич. наблюдениями по смещению перигелия планеты Меркурий.

Становлению квантовой физики способствовало изучение равновесного теплового излучения, которым занимались прежде всего нем. физики во главе с В. [Винном](#) и М. [Планком](#). В кон. 19 в. выяснилось, что распределение энергии теплового излучения по спектру, выведенное из закона классич. статистич. физики о равномерном распределении энергии по степеням свободы, противоречит опыту.

Из теории следовало, что вещество должно излучать электромагнитные волны при любой темп-ре, теряя энергию и охлаждаться до абсолютного нуля, т. е. что тепловое равновесие между веществом и излучением невозможно. Однако повседневный опыт противоречил этому выводу. Выход был найден в 1900 М. Планком, показавшим, что результаты теории согласуются с опытом, если предположить, в противоречии с классич. электродинамикой, что атомы испускают и поглощают электромагнитную энергию отд. порциями – квантами. Энергия каждого такого кванта прямо пропорциональна частоте, а коэф. пропорциональности является квант действия h ; $6,6 \cdot 10^{-34}$ Дж·с, получивший впоследствии название [Планка постоянной](#).

В 1905 А. Эйнштейн расширил гипотезу Планка, предположив, что излучаемая порция электромагнитной энергии сохраняет свою индивидуальность – распространяется и поглощается только целиком, т. е. ведёт себя подобно

частице (позднее она была названа [фотоном](#)). На основе этой гипотезы Эйнштейн объяснил закономерности фотоэффекта, обнаруженные (1888–90) А. Г. [Столетовым](#), не укладывающиеся в рамки классич. электродинамики.

Т. о., на новом качественном уровне была возрождена корпускулярная теория света. Свет ведёт себя подобно потоку частиц (корпускул); однако одновременно ему присущи и волновые свойства, которые проявляются, в частности, в явлениях дифракции и интерференции. Следовательно, несовместимые с точки зрения классич. Ф. волновые и корпускулярные свойства в равной мере присущи свету (см. [Корпускулярно-волновой дуализм](#)).

Квантование излучения привело к заключению, что энергия внутриатомных движений также может меняться только скачкообразно. Такой вывод был сделан Н. [Бором](#) в 1913. К этому времени Э. [Резерфорд](#), интерпретируя результаты своих экспериментов по рассеянию α -частиц веществом, открыл (1911) атомное ядро и предложил ядерную (планетарную) модель атома. Этому предшествовали открытия [радиоактивности](#) и радиоактивных превращений тяжёлых атомов (А. [Беккерель](#), П. [Кюри](#) и М. [Склодовская-Кюри](#)), а также изотопов (Ф. [Содди](#)). Первые попытки непосредств. исследования строения атомного ядра относятся к 1919, когда Резерфорд, облучая стабильные ядра азота α -частицами, установил превращение их в ядра кислорода.

В модели атома Резерфорда движение электронов вокруг ядра подобно движению планет вокруг Солнца. Однако, согласно электродинамике Максвелла, такой атом неустойчив. Электроны, двигаясь по круговым (или эллиптич.) орбитам, испытывают ускорение, а следовательно, должны непрерывно излучать энергию и в конце концов за время порядка 10^{-8} с упасть на ядро. Чтобы объяснить устойчивость атома и его линейчатый спектр, Бор постулировал, что атомы могут находиться лишь в особых стационарных состояниях, в которых электроны не излучают, и только при переходе из одного стационарного состояния в другое атом испускает или поглощает энергию.

Дискретность энергии атома была подтверждена в 1913–14 опытами Дж. [Франка](#) и Г. [Герца](#) по изучению столкновений с атомами электронов, ускоренных электрич. полем. Для простейшего атома – атома водорода – Бор построил количественную теорию спектра, согласующуюся с опытом. Однако теория Бора была внутренне противоречива: используя для движения электронов законы механики Ньютона, она в то же время накладывала на возможные движения электронов квантовые ограничения.

Дискретность действия – фундам. факт, требующий радикальной перестройки как законов механики, так и законов электродинамики. Постоянная Планка – универсальная мировая постоянная, играющая роль масштаба явлений природы. Классич. законы справедливы лишь при рассмотрении движения объектов достаточно большой массы, когда величины размерности действия велики по сравнению с h и дискретностью действия можно пренебречь.

В 1920-х гг. была построена последовательная, логически завершённая теория движения микрочастиц – квантовая механика. В её основу легли идея квантования Планка – Бора и выдвинутая в 1923 Л. де [Бройлем](#) гипотеза, что двойственная корпускулярно-волновая природа свойственна не только электромагнитному излучению (фотонам), но и любым др. видам материи. Все микрочастицы (электроны, протоны, атомы и др.) обладают не только корпускулярными, но и волновыми свойствами: каждой из них можно поставить в соответствие волну, длина которой равна отношению постоянной Планка h к импульсу частицы, а частота –

отношению энергии к h . [Волны де Бройля](#) описывают свободные частицы. В 1927 впервые наблюдалась дифракция электронов, подтвердившая экспериментально наличие у них волновых свойств. Позднее дифракция наблюдалась и у др. микрочастиц, включая молекулы.

В 1926 Э. [Шрёдингер](#), пытаясь получить дискретные значения энергии в атоме из уравнения волнового типа, сформулировал осн. уравнение нерелятивистской квантовой механики, названное его именем. В. [Гейзенберг](#) и др. построили квантовую механику в др. математич. форме – т. н. матричную механику.

В 1925 Дж. Ю. [Уленбек](#) и С. А. [Гудсмит](#) на основе экспериментальных (спектроскопич.) данных открыли существование у электрона собств. момента количества движения – спина (а следовательно, и связанного с ним собственного, спинового, магнитного момента). В. [Паули](#) вывел уравнение движения нерелятивистского электрона во внешнем электромагнитном поле с учётом взаимодействия магнитного момента электрона с магнитным полем ([Паули уравнение](#)). В 1925 Паули сформулировал т. н. принцип запрета, согласно которому в одном квантовом состоянии не может находиться больше одного электрона ([Паули принцип](#)). Этот принцип сыграл важнейшую роль в построении квантовой теории систем мн. частиц; в частности, он позволил объяснить закономерности заполнения электронами оболочек и слоёв в многоэлектронных атомах и, т. о., дал теоретич. обоснование периодич. системы химич. элементов.

В 1928 П. А. М. [Дирак](#) получил квантовое релятивистское уравнение движения электрона ([Дирака уравнение](#)), из которого естественно вытекало наличие у электрона спина. На основании этого уравнения Дирак в 1932 предсказал существование позитрона (первой античастицы), в том же году открытого К. Д. [Андерсоном](#) в космич. лучах.

Открытие Дж. [Чедвиком](#) нейтрона (1932) привело к созданию совр. протонно-нейтронной модели ядра (В. Гейзенберг, Д. Д. Иваненко). В 1934 Ф. и И. [Жолио-Кюри](#) открыли искусств. радиоактивность. Одновременно с Ф. атомного ядра началось быстрое развитие Ф. элементарных частиц. Первые большие успехи в этой области связаны с исследованием космич. лучей, в которых были открыты новые типы элементарных частиц – мюоны, пи-мезоны, гипероны.

В 1934 П. А. [Черенков](#) под рук. С. И. [Вавилова](#) обнаружил свечение жидкостей под действием γ -излучения. Теоретич. объяснение этого явления (названного впоследствии излучением Вавилова – Черенкова) дано И. Е. [Таммом](#) и И. М. [Франком](#) в 1937.

Важнейшим результатом этого этапа Ф. стало открытие деления ядра (О. [Ган](#), Ф. [Штрассман](#), Л. [Майтнер](#), 1939) и возможности высвобождения ядерной энергии. Во время 2-й мировой войны была впервые высвобождена ядерная энергия в результате цепной реакции деления ядер урана (Э. [Ферми](#), 1942) и создана атомная бомба (США, 1945, [«Манхэттенский проект»](#); СССР, 1949, Сов. атомный проект). В 1952 осуществлена реакция термоядерного синтеза и создана водородная бомба. В 1954 в СССР построена первая атомная электростанция (г. Обнинск).

В 1960-х гг. С. [Вайнберг](#), Ш. [Глэшоу](#) и А. [Салам](#) построили перенормируемую теорию слабых взаимодействий на основе калибровочных теорий, в основе которых лежит принцип локальной калибровочной симметрии. Ранее (1956) в опытах Цзяньсунь Ву обнаружилось, что в процессах слабого взаимодействия нарушается чётность по отношению к зеркальному отражению, что было теоретически объяснено Цзундао [Ли](#) и Чжэньнином [Янгом](#). При

этом сохраняется симметрия по отношению к комбинированной инверсии. Однако в 1964 при исследованиях распада долгоживущего нейтрального K^0 -мезона было обнаружено нарушение симметрии также при комбинированной инверсии, предсказанное ранее Л. Д. [Ландау](#). Т. к. в совр. квантовой теории поля любой процесс должен быть инвариантен по отношению к одновременному проведению всех трёх перечисленных преобразований ([теорема CPT](#)), то нарушение симметрии при комбинированной инверсии в распаде K^0 -мезона означает нарушение симметрии по отношению к обращению времени. Причина этого нарушения пока не выяснена.

В 1973 М. [Кобаяши](#) и Т. [Маскава](#), а затем Й. [Намбу](#) построили теорию нарушения CP-симметрии; А. Д. [Сахаров](#) предположил, что именно оно явилось причиной барионной асимметрии Вселенной. Нарушение CP-инвариантности в процессах, идущих с участием слабого взаимодействия, впервые наблюдалось в распаде B^0 -мезона (1999, США).

Сильные взаимодействия обладают ещё рядом дополнит. внутр. симметрий, в частности [изотопической инвариантностью](#) и более широкой симметрией – т. н. SU(3)-симметрией. На основе этих симметрий М. [Гелл-Ман](#) и К. [Нишиджима](#) в 1950-х гг. создали систематику адронов, позволившую предсказать существование нескольких новых элементарных частиц, открытых позднее экспериментально, и ввести кварковую модель строения адронов.

Большим достижением стало установление кварково-лептонной симметрии, согласно которой в природе встречается 6 лептонов (частиц, не участвующих в сильных взаимодействиях), а все сильновзаимодействующие частицы состоят из 6 кварков. Эти частицы делят на 3 поколения – по паре лептонов и кварков в каждом поколении. Массы частиц возрастают от поколения к поколению. Все обычные атомы построены из частиц первого поколения: электронов, и- и d-кварков. Соответствующую модель принято называть [стандартной моделью](#) в физике элементарных частиц.

В рамках квантовой теории поля была создана объединённая модель слабых и электромагнитных взаимодействий (модель [электрослабых взаимодействий](#)), согласно которой, наряду с фотоном – переносчиком электромагнитных взаимодействий, должны существовать переносчики слабых взаимодействий – промежуточные векторные бозоны с массами в неск. десятков масс протона.

Наряду с заряженными (W^+ и W^-) бозонами должны существовать и нейтральные (Z^0). В 1973 впервые экспериментально наблюдались процессы, которые можно объяснить существованием нейтральных бозонов ([нейтральные токи](#)), а в 1983 все промежуточные бозоны были открыты экспериментально.

В 1970-х гг. построена калибровочная теория сильных взаимодействий кварков – [квантовая хромодинамика](#). Эти взаимодействия осуществляются посредством безмассовых частиц – глюонов. Глюоны взаимодействуют между собой, и поэтому поле сильных взаимодействий нелинейно. Построение квантовой хромодинамики оказалось возможным после введения нового квантового числа – цвета. Аналогично в 1970-х гг. на основе изучения потока солнечных нейтрино были открыты [нейтринные осцилляции](#), что привело к установлению ненулевых (хотя и весьма малых) масс нейтрино порядка долей эВ.

В 1950-х гг. были осуществлены генерация и усиление электромагнитных волн с помощью квантовых систем. А. М. [Прохоровым](#) и Н. Г. [Басовым](#) и независимо от них Ч. [Таунсом](#) был создан микроволновый квантовый

генератор (мазер), в котором использовалось явление вынужденного излучения, открытое ещё в 1917 А. Эйнштейном. В нач. 1960-х гг. был создан [лазер](#) – квантовый генератор электромагнитных волн видимого диапазона.

С созданием лазеров появился и начал быстро развиваться новый раздел оптики – [нелинейная оптика](#). В лазерном излучении большой мощности становятся существенными нелинейные эффекты взаимодействия электромагнитной волны со средой. Эти эффекты – перестройка частоты излучения, самофокусировка и др. – представляют большой теоретич. и практич. интерес. Почти строгая монохроматичность лазерного излучения позволила получить объёмное изображение объектов с помощью интерференции волн (см. [Голография](#)).

В дальнейшем нелинейный подход стал широко применяться практически во всех областях физики.

Развитие средств физического эксперимента

Ещё в нач. 20 в. многие фундам. открытия были сделаны с помощью сравнительно простой физич. аппаратуры. В дальнейшем эксперимент стал быстро усложняться и эксперим. установки стали сравнимы по масштабу с пром. предприятиями. Совр. эксперим. исследования в области атомного ядра и элементарных частиц, радиоастрономии, квантовой электроники и Ф. конденсиров. состояния носят масштабный характер и требуют значит. затрат средств, которые зачастую доступны лишь крупным государствам или даже группе государств с развитой экономикой.

Огромную роль в развитии ядерной Ф. и связанной с ней Ф. элементарных частиц сыграли два обстоятельства: разработка методов наблюдения и регистрации отд. актов превращений элементарных частиц, вызванных их столкновениями друг с другом и с атомными ядрами; создание ускорителей заряженных частиц, позволивших изучать разл. ядерные реакции (Э. О. [Лоуренс](#), 1931; Дж. Д. [Кокрофт](#), Э. [Уолтон](#), 1932). После войны были созданы ускорители на высокие энергии, в 1960–70-х гг. началось планомерное изучение элементарных частиц, их свойств и взаимодействий. Особую роль играют ускорители на встречных пучках, которые позволили повысить эффективную энергию столкновения частиц. Так, на ускорителе Объединённого ин-та ядерных исследований в Дубне впервые осуществлено столкновение релятивистских ядер. На ускорителе в Серпухове получены ядра антитрития и антигелия и открыт рост полного сечения взаимодействия адронов высоких энергий при их рассеянии друг на друге (Серпуховский эффект).

Открыто большое число новых элементарных частиц, в т. ч. резонансов, ср. время жизни которых составляет 10^{-20} – 10^{-24} с. Также были экспериментально наблюдаемы (по их взаимодействию) 3 типа нейтрино.

Изучая рассеяние электронов высокой энергии на протонах и нейтронах, удалось обнаружить элементы внутр. структуры нуклонов – распределение электрич. заряда и магнитного момента внутри этих частиц (формфакторы). Рассеяние электронов сверхвысоких энергий на нуклонах указывает на существование внутри нуклонов отд. образований сверхмалых размеров, названных партонами. Впоследствии эти образования были отождествлены с кварками.

Наряду с ускорителями, были созданы высокоэффективные счётчики заряженных частиц, основанные на разл. принципах: газоразрядные, сцинтилляционные, черенковские и др. С помощью пузырьковых и искровых камер можно непосредственно наблюдать треки заряженных частиц.

Развитие радиофизики получило новое направление после создания радиолокаторов во время 2-й мировой войны. Радиолокаторы нашли широкое применение в авиации, мор. транспорте, космонавтике. Была осуществлена локация небесных тел: Луны, Венеры и др. планет, а также Солнца. Совершенствование радиолокационных приборов привело к революции в астрономии. Были сооружены гигантские радиотелескопы, улавливающие излучения космич. тел со спектральной плотностью потока энергии порядка 10^{-26} эрг/(см²·с·Гц), и информация о космич. объектах неизмеримо возросла.

Открытие возможности управления электрич. проводимостью полупроводников вызвало революцию в радиофизике: электронные лампы были заменены полупроводниковыми приборами. Резко уменьшились в размерах и стали надёжнее радиотехнич. устройства и вычислит. машины. В интегральных системах вместо обычных радиодеталей и соединений используются тонкие слои молекул определённого сорта, вводимые внутрь кристалла полупроводника или напыляемые на его поверхность. Фантастич. точности достигают измерения амплитуды колебаний микроскопич. тел. С помощью радиотехнич. и оптич. датчиков можно регистрировать механич. колебания с амплитудой 10^{-17} м. Планируется создание датчиков для регистрации колебаний с амплитудой 10^{-19} – 10^{-22} м.

Всё большее значение приобретают исследования структуры твёрдых и жидких тел, полимеров, структуры их поверхности. Совершенствуются дифракционные методы изучения строения вещества – [рентгеновский структурный анализ](#), с помощью которого в нач. 20 в. была впервые доказана строгая упорядоченность расположения атомов (ионов) в кристаллах, [нейтронография](#) и [электронография](#). Выяснено влияние дислокаций и др. дефектов кристаллич. решётки на прочность и пластичность материалов. Важную роль в этих исследованиях сыграло применение [электронных микроскопов](#) большой разрешающей силы.

В 1982 созданы туннельные микроскопы, позволяющие «увидеть» отд. атомы и использующиеся для изучения структуры поверхности, происходящих на ней химич. процессов, а также для обработки поверхности (см. [Атомно-силовая микроскопия](#), [Туннельный микроскоп](#)). Для исследования структуры вещества и установления распределения электронной плотности в веществе применяются [электронный парамагнитный резонанс](#), [ядерный магнитный резонанс](#), [Мёссбауэра эффект](#) и др. резонансные методы. Совершенствуется исследование структуры атомов и молекул органич. и неорганич. веществ по их спектрам в широком диапазоне частот, в т. ч. неразрушающий анализ живых тканей в биологии и медицине.

Физика на современном этапе (конец 20 – начало 21 вв.)

Развитие микрофизики

Элементарными или фундаментальными принято называть частицы, которые на совр. уровне знаний не состоят из более простых частиц. Многочисл. эксперименты привели к обнаружению 12 элементарных фермионов (лептонов) и 4 массивных векторных бозонов, не считая соответствующих античастиц.

Элементарные фермионы – это 6 сортов, или ароматов, кварков, объединённых в 3 поколения и представляющих собой «кирпичики» мироздания. Благодаря т. н. [конфайнменту](#) кварки не существуют в виде свободных изолированных частиц, а скрепляются в адроны (нуклоны и мезоны) посредством [глюонов](#). Т. о., векторные бозоны представляют собой «клей», скрепляющий «кирпичики», т. е. бозоны переносят фундам.

взаимодействия. Существует гипотеза о наличии в природе «протокварков», или преонов, но она пока не подтверждена. Для кварков обычно принимается модель одномерной струны (см. [Струн теория](#)). При больших энергиях возникает новое состояние вещества – [кварк-глюонная плазма](#).

Одной из гл. задач микрофизики, решить которую мечтал ещё А. Эйнштейн, является создание [единой теории поля](#), объединяющей все четыре известных во Вселенной фундам. взаимодействия: гравитационное, электромагнитное, сильное и слабое. Создание такой теории означало бы фундам. прорыв во всех областях науки.

Ныне построена надёжно проверенная теория электрослабого взаимодействия, а также квантовая хромодинамика, описывающая сильное взаимодействие на основе кварк-глюонной гипотезы.

Объединение кварк-глюонной гипотезы и теории электрослабого взаимодействия принято называть [стандартной моделью](#). Необходимой составной частью этой модели является [Хиггса бозон](#) с массой ок. 125 ГэВ, предсказанный П. [Хиггсом](#) в 1964. Бозон Хиггса экспериментально обнаружен на Большом адронном коллайдере (Large Hadron Collider; ЦЕРН) в июле 2012; результат окончательно подтверждён в марте 2013. Фундам. роль этого бозона состоит в том, что механизм образования масс элементарных частиц, согласно совр. представлениям, связан со спонтанным нарушением симметрии вследствие взаимодействия с бозоном Хиггса.

Наиболее актуальная задача микрофизики – дальнейшая унификация всех фундам. взаимодействий и переход от стандартной модели к [Великому объединению](#), единым образом описывающему все существующие частицы – фермионы и бозоны. В рамках этого обобщения могут быть объяснены барионная асимметрия Вселенной, малая масса покоя нейтрино, квантование электрич. заряда, а также существование магнитного монополя, предсказанного П. Дираком в 1931. Наиболее убедительным свидетельством в пользу Великого объединения стало бы обнаружение очень редкого события – распада протона на позитрон и π^0 -мезон (время жизни протона оценивается в $1,6 \cdot 10^{33}$ лет).

В микрофизике активно разрабатываются идеи, связанные с квантованием пространства-времени, т. е. существованием фундаментальных планковской длины $\approx 1,6 \cdot 10^{-35}$ м и планковского времени $\approx 5,4 \cdot 10^{-44}$ с. По-видимому, это обобщение необходимо для того, чтобы объединить все 4 фундам. взаимодействия, т. е. включить гравитацию в рамки единой теории и построить обобщённую теорию гравитации – [супергравитацию](#) (или, как иногда её называют, «теорию всего»).

Кандидатами на «теорию всего» в качестве обобщения общей теории относительности являются «струнная» и «петлевая» версии квантованного пространства-времени, где частицы не являются точечными, но имеют размерность 10 или 11, из которых 6 или 7 являются компактифицированными. Это обобщение влечёт за собой многомерное обобщение теории гравитации, в котором суперструны присоединены к т. н. супермембранам, или N-бранам.

Ещё одно важное направление в микрофизике – суперсимметричное расширение стандартной модели, которое каждому фермиону ставит в соответствие суперсимметричный ему бозон (см. [Суперсимметрия](#)). Новые частицы должны иметь очень большие массы, что затрудняет их обнаружение, однако в дек. 2015 на Большом адронном коллайдере был зафиксирован распад новой частицы массой 700 ГэВ на 2 фотона, что может указывать на наличие суперсимметричного партнёра бозона Хиггса.

Развитие макрофизики

Наиболее интенсивное развитие ныне испытывает макрофизика ввиду наибольшего охвата физич. объектов и макс. числа возможных практич. приложений.

К макрофизике может быть отнесена физика атомного ядра, поскольку по мн. свойствам ядро, особенно у тяжёлых и сверхтяжёлых химич. элементов, аналогично капле жидкости. Искусств. синтез тяжёлых ядер – одна из задач совр. макрофизики; на 2016 синтезированы элементы с атомным номером вплоть до 118. Изучаются также экзотич. ядра с необычной (несферич.) формой, адронные атомы (напр., атом, состоящий из протона и антипротона), ядра с плотностью, превышающей обычную ядерную плотность ($\approx 3 \cdot 10^{17}$ кг/м³), и др.

Наибольший практич. интерес представляет проблема [управляемого термоядерного синтеза](#) (УТС), решение которой в принципе способно обеспечить энергетич. потребности человечества. На 2016 на [токамаке](#) (предложенном в 1950-х гг. И. Е. Таммом и А. Д. Сахаровым) достигнута темп-ра плазмы ок. $1,5 \cdot 10^7$ К и продолжаются работы в рамках проекта Междунар. эксперим. термоядерного реактора ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor, Кадараш, Франция; планируемый срок пром. пуска – 2025).

Др. достаточно традиционное направление развития макрофизики – физика низких температур. Изучены такие макроскопич. квантовые явления, как [сверхтекучесть](#) в жидком ⁴He (П. Л. [Капица](#), 1938) и [сверхпроводимость](#) в Hg (Х. Камерлинг-Оннес, 1911). В 1986 открыта высокотемпературная сверхпроводимость (Й. Г. [Беднорц](#), К. А. [Мюллер](#)) с темп-рой перехода в сверхпроводящее состояние $T_{кр}$; 100 К, т. е. выше темп-ры кипения жидкого азота при атмосферном давлении. Ныне реально стоит вопрос о сверхпроводниках с комнатной критич. темп-рой $T_{кр} \approx 300$ К; его решение может произвести переворот в энергетике (теоретич. предсказание такой возможности было дано А. А. [Абрикосовым](#) и В. Л. [Гинзбургом](#)). В 1970-х гг. был открыт сверхтекучий ³He, существующий при темп-рах ок. 300 мК и обладающий уникальным набором свойств – анизотропной магнитной сверхтекучей жидкости и жидкого кристалла. Рекордно низким диапазоном температур, достигнутым на 2016, является пикокельвин (10^{-12} К).

Большое значение как для самой науки, так и для практич. применения имеет исследование вещества в экстремальных условиях: при очень низких или очень высоких темп-рах, сверхвысоком давлении, сверхсильных магнитных полях и т. п.

Развитием квантовой электроники стал переход ко всё более коротким длинам волн генерируемого излучения – от мазеров и лазеров в сер. 20 в. до т. н. разеров (квантовых генераторов рентгеновского диапазона), а также гразеров ([гамма-лазеров](#)). В традиц. лазерах изучаются возможности резкого увеличения мощности, сокращения длительности и увеличения когерентности лазерного импульса; достигнута интенсивность излучения порядка 10^{20} – 10^{21} Вт·см⁻² с напряжённостью электр. поля порядка 10^{12} В·см⁻¹, что в 100 раз сильнее поля протона на осн. уровне атома водорода. Индукция магнитного поля при этом достигает 10^5 – 10^6 Тл. В эксперименте используют фемтосекундные импульсы (длительностью до 10^{-15} с), что открывает ряд возможностей, в частности для получения гармоник излучения рентгеновского диапазона и рентгеновских импульсов длительностью порядка 10^{-18} с. При повышении плотности мощности до 10^{26} – 10^{27} Вт·см⁻² можно будет наблюдать рождение электрон-позитронных пар из квантов лазерного излучения, что важно для эксперим.

подтверждения квантовой электродинамики.

Наиболее актуальные с научной и прикладной точек зрения совр. аспекты макрофизики весьма существенно отличаются от принятых ранее, напр. во 2-й пол. 20 в. Осн. интерес сместился от упорядоченных и неупорядоченных (как однородных, так и примесных) твёрдых тел (hard matter) к значительно более широкому (практически необозримому) разнообразию др. форм вещества (soft matter). В их число входят жидкие кристаллы, полимеры (в т. ч. биополимеры), коллоиды и др. дисперсные системы, металлич. водород, графен и графан, фуллерены, разл. гетероструктуры (Ж. И. Алфёров, Г. Крёмер; Нобелевская пр., 2000). Важная роль этих физич. объектов обусловлена возможностью их эффективного использования в системах обработки и отображения информации (дисплеи, датчики, индикаторы) и элементов интегральных электронных схем.

Металлич. водород пока не получен, хотя условия его образования достигнуты (давление ок. 2 Мбар с критич. темп-рой сверхпроводящего перехода ок. 100 К). Однако при таких давлениях начинает «течь» алмаз, из которого сделаны стенки камеры высокого давления, так что в дальнейшем планируется использовать ударные волны.

Активно изучаются новые аллотропные модификации углерода, напр. фуллерены, проявляющие полупроводниковые, а при легировании и сверхпроводящие свойства, а также нанотрубки, высокие электропроводящие и механич. свойства которых позволяют использовать их в качестве элементов нанoeлектроники.

Особый интерес представляет графен (А. Гейм, К. С. Новосёлов; Нобелевская пр., 2010) – двумерная модификация углерода, образованная слоем атомов толщиной в один атом, соединённых в гексагональную двумерную кристаллич. решётку. Графен обладает значит. механич. жёсткостью, рекордно большой теплопроводностью и максимально высокой подвижностью электронов, что позволяет рассматривать его как будущую основу нанoeлектроники.

Важное место в совр. развитии макрофизики занимает создание, удержание в магнитных ловушках (Х. Демелт, В. Пауль; Нобелевская пр., 1989) и изучение разл. физич. свойств Бозе – Эйнштейна конденсации (БЭК), полученной из атомов щелочных металлов (К. Уайман, В. Кеттерле; Нобелевская пр., 2001); в 2010 удалось получить БЭК фотонов в ограниченном оптич. резонаторе. Этим исследованиям предшествовала разработка методов охлаждения и улавливания атомов лазерным лучом (К. Козн-Таннуджи; Нобелевская пр., 1997); теоретич. основа исследований БЭК была заложена Н. Н. Боголюбовым в 1946.

Совр. период характеризуется повышенным интересом к физике поверхностей, а также к объектам пониженной размерности – напр., 0-мерные квантовые точки, 1-мерные квантовые проволоки (нити), 2-мерные квантовые «слойки» и т. п. В этих объектах, получаемых обычно методами т. н. зонной инженерии, имеет место сочетание классич. свойств в направлении «больших» размеров и квантовых размерных эффектов в направлении «малых» размеров (порядка 10^{-8} м).

Сочетание разл. физич. свойств слоёв в многослойных структурах позволяет получать новый тип электронных устройств – напр., основанный на принципах спинтроники (чередование магнитных и немагнитных слоёв), джозефсоновской электроники (чередование нормальных и сверхпроводящих слоёв, см. Джозефсона эффект), молекулярной электроники (т. н. молетроника), в т. ч. с использованием фрагментов ДНК. На основе двумерных

сеток джозефсоновских контактов может быть создан новый тип памяти (ассоциативной), особенно важный для [квантовых компьютеров](#).

Во всех устройствах наноструктурированной функциональной электроники имеет место проявление макроскопич. квантовых эффектов (см. также [Квантовая когерентность](#)). В перспективе могут быть достигнуты т. н. квантовые пределы, когда «работает» один электрон, один спин одной частицы, один квант магнитного потока, энергии и т. д. Это дало бы быстроедействие порядка 1 ТГц, плотность записи информации порядка 10^3 Тбит·см⁻², что на много порядков выше, чем достигнутая ныне, а энергопотребление – на неск. порядков ниже.

Один из наиболее употребит. терминов в совр. макрофизике – [нанотехнологии](#), под которыми понимают операции с объектами размером порядка 1 нм= 10^{-9} м. Реально диапазон подобных объектов гораздо шире – от отд. атомов (<0,1 нм) до их конгломератов (кластеров) и органич. молекул, имеющих размеры больше 1 мкм в одном или двух измерениях. Свойства наночастиц (кластеров) значительно отличаются как от свойств микрочастиц того же вещества, так и от макроскопич. образцов – напр., кластеры обладают неаддитивностью, немонотонной зависимостью свойств от размеров, допускают динамич. сосуществование разл. фаз, обнаруживают новые типы фазовых переходов и т. п.

Развитие мегафизики

Проблемы мегафизики, как это ни парадоксально на первый взгляд, теснейшим образом связаны с проблемами микрофизики, прежде всего в связи с космологич. проблемой – сценарием возникновения и эволюции Вселенной. Ныне общепринято представление о Большом взрыве с последующей инфляционной стадией (см. [Большого взрыва теория](#), [Инфляционная модель Вселенной](#)).

Нерешённой остаётся проблема самых ранних стадий эволюции (на временах менее 10^{-3} с), а также гипотетич. состояние начальной [сингулярности космологической](#) на временах меньших 10^{-35} с. Именно на этих масштабах мегафизика смыкается с микрофизикой, так что космологич. проблема может быть решена построением квантовой гравитации (см. [Квантовая теория тяготения](#)). Эксперим. проверка космологич. гипотез весьма затруднена (если вообще возможна) ввиду слишком больших масштабов необходимых энергий. Так, планковская энергия составляет порядка 10^{19} ГэВ, энергия Великого объединения 10^{16} ГэВ, тогда как даже в космич. лучах макс. энергии достигают ок. $3 \cdot 10^{11}$ ГэВ, а на самом крупном совр. ускорителе (Большомадронном коллайдере) – всего лишь ок. $1,4 \cdot 10^4$ ГэВ.

Важнейшей проблемой мегафизики является эксперим. проверка одного из осн. предсказаний общей теории относительности – существования [гравитационных волн](#). Ныне эта гипотеза получила убедительное подтверждение на запущенной в США в 2002 установке-обсерватории LIGO (Laser Interferometer Gravitational-Wave Observatory), состоящей из двух далеко разнесённых «плеч» (антенн) длиной 4 км каждое с установленными внутри зеркалами. В сент. 2015 было зафиксировано смещение зеркал на 10^{-16} см, которое произошло в результате слияния двух чёрных дыр массами ок. 30 масс Солнца на расстоянии ок. 1,3 млрд. световых лет от Земли.

В проблематику мегафизики входит также описание физич. природы мн. астрофизич. объектов – нейтронных

звёзд и пульсаров, сверхновых звёзд, чёрных дыр, квазаров и ядер галактик, а в последние годы также новых экзотич. объектов – космич. струн (топологич. дефектов, возникающих при фазовых переходах в ранней Вселенной и представляющих собой нити толщиной 10^{-29} – 10^{-30} см, протянутые между границами Вселенной).

Сравнительно недавно возникшей серьёзной проблемой как мега-, так и микрофизики является гипотеза тёмной материи и особенно (с кон. 1990-х гг.) тёмной энергии, ответственной за ускоренное расширение Вселенной. См. также Космология.

Роль физики в современном мире

Развитие физики преобразило не только естественно-науч. картину мира, но и материально-технич. обеспечение совр. цивилизации. Тесная связь Ф. с др. отраслями естествознания привела к тому, что Ф. глубочайшими корнями выросла в астрономию, геологию, химию, биологию и др. естеств. науки. Образовался ряд пограничных дисциплин: астрофизика, геофизика, химическая физика, биофизика, мед. физика, молекулярная биология и др. Физич. методы исследования приобрели решающее значение для всех естеств. наук.

Напр., возникновение молекулярной биологии и генетики было бы невозможно без Ф. Искусств. радиоактивные изотопы (меченые атомы) позволяют проследить кинетику химич. реакций и тем самым исследовать обмен веществ в живых организмах. Законы квантовой механики лежат в основе теории химич. связи. С помощью физич. методов удаётся осуществить химич. реакции, не идущие в обычных условиях. Для решения некоторых физико-химич. вопросов используют структурные аналоги атома водорода – позитроний и мюоний, а идеи ядерной Ф. становятся частью геологич. концепций, прежде всего в области геохронологии, а также в разведке полезных ископаемых.

Ф. образует фундамент осн. направлений техники. Строит. техника, гидротехника, электротехника и энергетика, радиотехника, светотехника, значит. часть воен. техники, электроника, вычислит. техника выросли на основе Ф. Благодаря сознат. использованию законов Ф. техника из области случайных находок встала на путь целенаправленного развития. В свою очередь, развитие техники оказывает существенное влияние на совершенствование эксперим. Ф. Без развития электротехники, радиотехники, технологии произ-ва очень прочных и лишённых примесей материалов было бы невозможно создание таких устройств, как ускорители элементарных частиц, полупроводниковые приборы и др.

Литература

Лит.: Кудрявцев П. С. История физики. [2-е изд.]. М., 1956–1971. Т. 1–3; Пауэ М. История физики. М., 1956; Льюэци М. История физики. М., 1970; Редже Т. Этюды о Вселенной. М., 1985; Гинзбург В. Л. Какие проблемы физики и астрофизики представляются сейчас особенно важными и интересными // Успехи физических наук. 1999. Т. 169. № 4; Федосин С. Г. Современные проблемы физики: В поисках новых принципов. М., 2002; Нобелевские премии по физике, 1901–2004. СПб., 2005. Т. 1–2; Цивинский С. В. Физика XXI века. М., 2007; Пенроуз Р. Путь к реальности, или Законы, управляющие Вселенной. М.; Ижевск, 2007; Баранников А. А., Фирсов А. В. Основные концепции современной физики. 2-е изд. М., 2008; Хокинг С. Теория всего. СПб., 2009; Мухин К. Н., Суставов А. Ф., Тихонов В. Н. Российская физика Нобелевского уровня. 2-е изд. М., 2011; Воронов В. К., Подоплелов А. В., Сагдеев Р. З. Физика на переломе тысячелетий. 2-е изд. М., 2011. [Кн. 3:] Физические основы нанотехнологий; Воронов В. К., Подоплелов А. В. Физика на переломе тысячелетий. 2-е изд. М., 2012. [Кн. 2:]

Конденсированное состояние; они же. Физика на переломе тысячелетий. [3-е изд.]. М., 2013. [Кн. 1:] Физика самоорганизующихся и упорядоченных систем. Новые объекты атомной и ядерной физики. Квантовая информация. Происхождение жизни и мышления с точки зрения современной физики; Ильин В. А., Кудрявцев В. В. История и методология физики. 2-е изд. М., 2014.