

УДК 546 291

УДИВИТЕЛЬНЫЙ ГЕЛИЙ: ИСТОРИЯ ОТКРЫТИЯ В ЛИЦАХ

И.А. ГОЛУБЕВА, Р.Р. НИГААРД, Н.И. КАЗАЧЕНКО

РГУ нефти и газа им. И.М. Губкина

Распространено мнение, что наука — это довольно беспристрастное занятие. В то время как другие области человеческой деятельности подвержены влиянию моды, меняющихся взглядов и личности творца, науку считают полностью находящейся во власти строгой логики эксперимента. Имеют значение лишь результаты проведённого исследования, но не люди, которые их получают. И это, конечно же, заблуждение. Наука, как и любая сфера людских интересов, зависит от общепризнанных точек зрения и личных взглядов учёного. Поэтому в этой статье будет много рассказано об учёных, внесших вклад в наши представления об удивительных свойствах гелия.

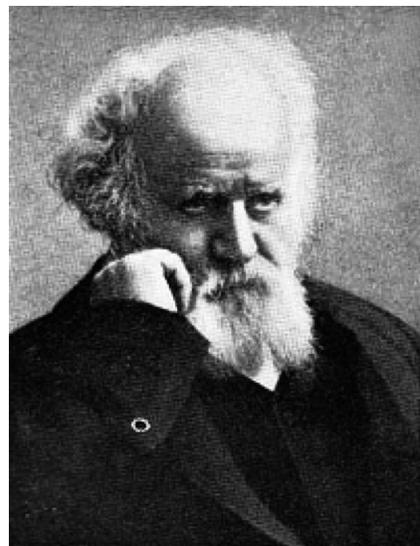
Но вначале о самом предмете обсуждения. Гелий — газ, который не имеет ни цвета, ни запаха, второй элемент периодической системы, по распространённости гелий — второй после водорода элемент во Вселенной, но на Земле его относительно мало. Основной источник гелия сегодня — природные газы.

Гелий является самым лёгким после водорода газом. Он обладает низкой критической температурой ($T_{кр} = -267,97^\circ\text{C}$), плохо растворяется в воде и жидких углеводородах, химически инертен, устойчив к ионизационным излучениям. Благодаря своим уникальным свойствам, гелий широко применяется в различных областях науки и техники для создания сверхчистых сред, сверхпроводимых материалов, сверхмощных магнитных полей и сверхнизких температур.

Гелий имеет самую маленькую инертную молекулу во Вселенной. Известны некоторые химические соединения гелия, например фторид и гидрид, однако условий для их образования в природе практически нет, и их синтез возможен лишь в лаборатории. Возможность объяснения инертности гелия появилась благодаря прорыву, совершённом в первые десятилетия прошлого столетия — созданию квантовой механики. Этот прорыв совершили великие учёные: *Нильс Бор, Поль Дирак, Макс Борн, Энрико Ферми* и др. Они стали «отцами-основателями» области знания, которая изменила понимание окружающего мира, заложенного *Исааком Ньютоном* и господствовавшего в физике на протяжении трёх с половиной столетий.

Началось всё 18 августа 1868 г., в этот день французский астроном *Пьер Жюль Сезар Жансен*, находясь в индийском городе Гунтур, изучал хромосферу Солнца. Во время солнечного затмения, при исследовании излучаемого Солнцем света методом спектроскопии (при этом излучаемый свет расщеп-

лялся стеклянной призмой на линии различной окраски), он обнаружил новую, ярко-жёлтую, ранее неизвестную линию, которую нельзя было приписать ни одному из уже существующих элементов. Ярко-жёлтая линия принадлежала гелию, элементу, с которым наука того времени ещё не сталкивалась. Однако *Пьер Жансен* не сразу осознал, что открыл новый элемент.



Пьер Жюль Сезар Жансен (1824-1907)
Страна: Франция

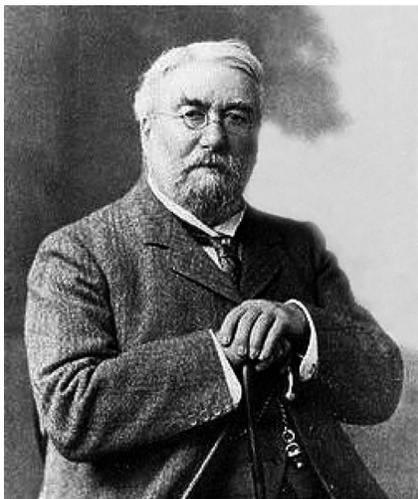
- 1860 г. — получил докторское звание за диссертацию о поглощении тепловых лучей глазом
- 1866 г. — воспроизвёл многие атмосферические линии солнечного спектра
- 1868 г. — обнаружил спектральную линию гелия в солнечном излучении
- 1875 г. — избран членом Лондонского Королевского общества
- 1877 г. — награждён большой медалью Румфорда
- 1885 г. — доказал, что кислорода нет в солнечной атмосфере
- 1897 г. — учреждена Премия Жюля Жансена

Это интересно

Родители Жансена готовили его к карьере художника. Начиная с 1868 г., Жансен не пропустил ни одного солнечного затмения (за исключением 1887 г. в России). Желая участвовать в наблюдении солнечного затмения в Алжире в 1870 г. улетел из Парижа на воздушном шаре в то время, как город осаждали германские войска

Спустя два месяца (20 октября 1868 г.) английский астроном *Джозеф Норман Локьер*, работавший независимо от своего французского коллеги, провёл аналогичные исследования. Учёный также обнаружил ярко-жёлтую линию, чья длина волны была близко расположена к Фраунгоферовым линиям натрия D_1 и D_2 . Именно *Джозеф Локьер* доказал, что эта линия не принадлежит ни одному известному на тот момент веществу и дал ей обозначение

D_3 . В 1870 г. он совместно с английским химиком *Эдуардом Франклендом* назвал элемент «гелий», от древнегреческого слова «Солнце».



Джозеф Норман Локьер (1836-1920)
Страна: Англия

1868 г. — обнаружил спектральную линию гелия в солнечном излучении

1871 г. — объяснил происхождение неизвестной линии в излучении Солнца наличием в его атмосфере доселе неизвестного химического элемента и предложил назвать его «гелием»

1897-1903 гг. — изучил астрономическую ориентацию монументальных сооружений в Египте, Греции, Британии, а также на Ближнем Востоке

Это интересно

В 1869 г. основал журнал «Nature» и оставался его редактором до 1919 г.

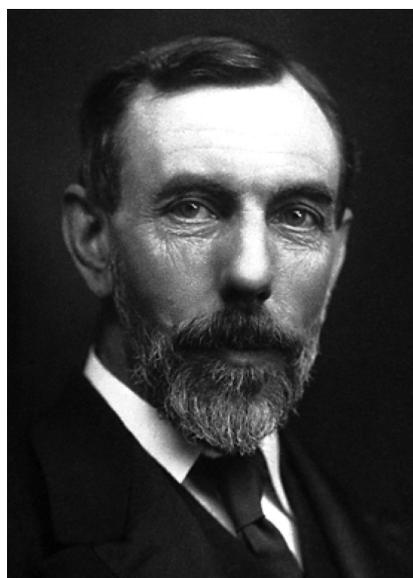
С 1869 г. являлся членом Лондонского королевского общества

В 1904 г. избран иностранным членом Петербургской Академии наук
Результаты его экспериментов навели Эрнеста Резерфорда на мысль о нестабильности тяжёлых ядер, и, в конце концов, помогли ему создать теорию радиоактивного распада

Присутствие гелия на Земле впервые удалось обнаружить другому представителю британской научной школы, *Уильяму Рамзаю*. Исследуя спектр поглощения газа, выделившегося в результате разложения клевета (минерала, содержащего торий и уран), учёный обнаружил ту самую D_3 -линию. Это открытие позволило ему сделать предположение, что гелий может выделяться из минералов с богатым содержанием тория и урана. Чуть позже *Рамзаю* удалось выделить гелий.

В 1911 г. *Резерфорд*, анализируя результаты своего знаменитого опыта, проведённого совместно с *Хансом Гейгером* и *Эрнстом Марсденом*, предложил планетарную модель атома, основной идеей которой было наличие в атоме ядра, в котором сосредоточена большая часть его массы. Работы этого выдающегося учёного носили фундаментальный характер и послужили основой для дальнейшего развития теории строения атома.

Говоря о строении атома гелия, следует сказать о том, что на данный момент известно о существовании восьми его изотопов, однако лишь два из них стабильны и встречаются в природе: гелий-3 и гелий-4. Разница у них всего лишь в один нейтрон, и,



Уильям Рамзай (1852-1916)
Страна: Англия

1884 г. — установил атомный вес цинка

1893 г. — предложил метод определения молекулярного веса жидкости по величине её поверхностного натяжения

1894 г. — открыл аргон (совместно с Джоном Стреттом)

1895 г. — выделил газообразный гелий

1898 г. — открыл криптон, ксенон и неон (совместно с Морисом Таверсом)

1904 г. — получил Нобелевскую премию по химии «в знак признания открытия им в атмосфере различных инертных газов и определения их места в периодической системе»

1910 г. — изобрел микровесы, позволяющие определять вес тел объёмом до $0,1 \text{ мм}^3$ и с точностью до 10^{-9} г

Это интересно

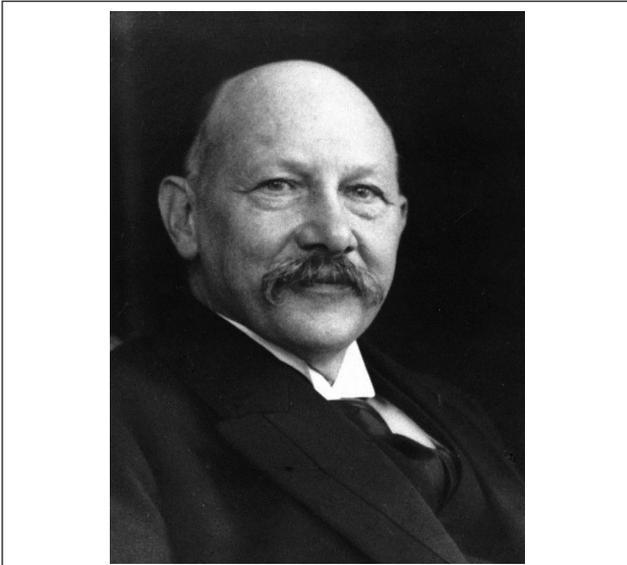
В 1884 г. лорд Рэлей указал на несоответствие плотности синтезированного аммиака и аммиака, выделенного удалением из него посторонних компонентов. Это привело к открытию Рамзаем аргона

В 1901 г. Уильям Рамзай стал членом-корреспондентом Петербургской Академии наук, а в 1913 г. был избран её почётным членом

тем не менее, она закладывает коренные различия между ними, которые начинаются с соотношения их количества в природе. Поскольку альфа-распад является наиболее энергетически выгодным на Земле преобразованием нестабильных ядер, а гелий-4 — продукт данной ядерной реакции, то его примерно в десять тысяч раз больше в природе, чем гелия-3, который образуется при бета-распаде космического трития.

Разговор о жидком гелии, увлечёт нас ещё глубже в прошлое, в конец первой половины девятнадцатого века, когда *Уильям Томсон* (он же лорд *Кельвин*), ввёл понятие абсолютной температуры и абсолютного нуля. С тех самых пор физиков не оставляло стремление приблизиться к заветной нулевой отметке, где должно прекратиться тепловое движение частиц. Интуиция подсказывала учёным, что здесь можно ожидать новых явлений и необычного поведения вещества. И вот, наконец, через полвека после публикации работ *Томсона*, в 1908 г., голландскому физическому *Хейке Камерлинг-Оннесу* удалось после долгих усилий достичь температуры, всего на $0,9 \text{ К}$ отличающейся от абсолютного нуля, и попутно получить жидкий гелий. Чуть позже, в 1911 г., при

температуре 4,2 К *Камерлинг-Оннес* обнаружил совершенно новое физическое явление, возникающее при низких температурах, — сверхпроводимость ртути. Результат на самом деле был поразительным: в сверхпроводящем состоянии электрическое сопротивление не просто уменьшается, а становится точно равным нулю, и ток в сверхпроводящем кольце может беспрепятственно течь сколь угодно долго, если его не тревожить.



Хейке Камерлинг-Оннес (1853-1926)
Страна: Голландия

1894 г. — основал криогенную лабораторию в Лейденском университете. Разработал экспериментальную установку по сжижению газов
1906 г. — получил жидкий водород
1908 г. — достиг рекордно низкой отметки 0,9 К и получил жидкий гелий
1911 г. — обнаружил резкое падение электрического сопротивления ртути ниже температуры 4,1 К
1912 г. — впервые обнаружил явление сверхтекучести жидкого гелия
1913 г. — обнаружил разрушение сверхпроводимости сильными магнитными полями. Получил Нобелевскую премию по физике «за исследования свойств вещества при низких температурах, которые привели к производству жидкого гелия»

Это интересно

За свои исследования в области низких температур Камерлинг-Оннес получил среди коллег почётное прозвище «Господин Абсолютного Нуля»

После этого открытия стало ясно, что овчинка стоит выделки. Низкие температуры оказались окном в квантовый мир, а гелий стал первой квантовой жидкостью, полученной за всю историю человечества. Что же такое квантовая жидкость и чем она отличается от обычной? В 1922 г. французский физик *Луи де Бройль* высказал революционную идею, что любая движущаяся частица характеризуется некоторым периодическим процессом, а говоря проще — может характеризоваться волновыми параметрами, одним из которых является длина волны. Она, как известно, обратно пропорциональна энергии частицы. При температурах, близких к абсолютному нулю, энергия теплового движения становится настолько низкой, что длина волны вполне соизмерима со средним расстоянием между части-

цами. Вот тогда-то уже нельзя игнорировать волновые свойства вещества при его описании, и обычная жидкость превращается в квантовую.

Дальнейшее изучение и классификация элементарных частиц привели к выделению двух классов квантовых жидкостей: бозе-жидкостей (жидкостей, состоящих из бозонов — частиц, обладающих целым спином в единицах постоянной Планка) и ферми-жидкостей (жидкостей, состоящих из фермионов — частиц, обладающих полуцелым спином).

Как это ни парадоксально, основы теории бозе-жидкостей были заложены человеком, который так никогда и не согласился с принципами квантовой механики. В 1925 г. *Альберт Эйнштейн*, вдохновлённый идеей индийского физика *Шатьендраната Бозе*, выдвинул смелую гипотезу о поведении вещества при низких температурах и предсказал новое явление, которое позже получило название конденсации Бозе-Эйнштейна, а вещество в таком состоянии стали называть конденсатом.

$$\langle n \rangle_{\text{Б-Э}} = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - \mu}{kT}\right) - 1} \quad \text{— распределение Бозе-Эйнштейна,}$$

где $\langle n \rangle_{\text{Б-Э}}$ — наиболее вероятное число частиц с энергией E и химическим потенциалом μ ; T — температура.

Частицы бозе-эйнштейновского конденсата стремятся прийти в одно наиболее энергетически выгодное состояние, в котором у всех будет одинаковая нулевая скорость, одинаковая масса, заряд и все



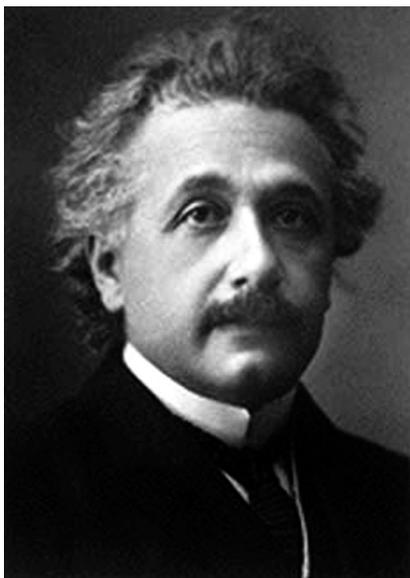
Шатьендранат Бозе (1894-1974)
Страна: Индия

1924 г. — вывел формулу Планка для распределения энергии, излучаемой абсолютно чёрным телом, базируясь на статистике Больцмана. Сделал фундаментальное предположение, что свет можно рассматривать как фотонный газ
1925 г. — приехал в Париж, где встретился с Эйнштейном, который, развивая идеи Бозе, положил начало статистике Бозе-Эйнштейна

Это интересно

Вывод Бозе не удовлетворил Макса Планка, чем Эйнштейн был сильно опечален. Поль Дирак назвал частицы, подчиняющиеся распределению Бозе-Эйнштейна, бозонами

прочие параметры, а когда это происходит, начинают вести себя как одна большая макроскопическая квантовая частица, т.е., как говорят физики, когерентно. Таким образом, бозе-эйнштейновский конденсат — это не просто замершие в неподвижности атомы. Он отличается от обычного охлаждённого газа так же, как луч лазера от света обычной лампы накаливания.



Альберт Эйнштейн (1853-1926)
Страна: Германия/США

1905 г. — разработал специальную теорию относительности (СТО). Объяснил фотоэффект с помощью квантовой механики. Создал молекулярно-кинетическую теорию для количественного описания броуновского движения, заложив основы теории флуктуаций
1907 г. — разработал квантовую теорию теплоёмкости, пытаясь объяснить экспериментально наблюдаемую зависимость теплоёмкости от температуры
1915 г. — разработал общую теорию относительности (ОТО) — современную теорию тяготения
1917 год — предположил существование нового излучения, происходящего под действием внешнего электромагнитного излучения
1922 г. — получил Нобелевскую премию по физике «за заслуги перед теоретической физикой и особенно за объяснение закона фотоэлектрического эффекта»
1925 г. — обобщил модель Бозе, применив её к любым системам тождественных частиц с целым спином

Это интересно

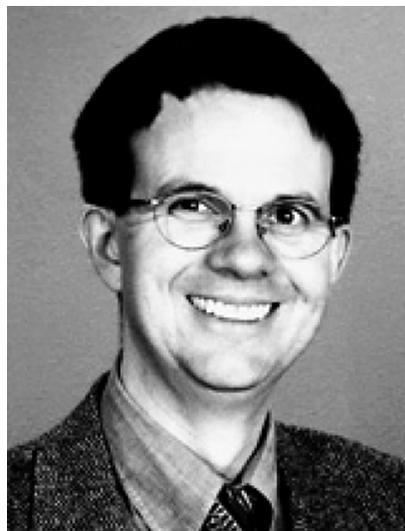
«С тех пор, как за теорию относительности взялись математики, я её не понимаю» — Альберт Эйнштейн, автор специальной и общей теории относительности.

«Теория — это когда всё известно, но ничего не работает. Практика — это когда всё работает, но никто не знает почему. Мы же объединяем теорию и практику: ничего не работает, и никто не знает почему!», — Альберт Эйнштейн.

Кандидатура Эйнштейна на присуждение Нобелевской премии выдвигалась ежегодно с 1910 по 1922 гг. (кроме 1911-го и 1915-го)

Семьдесят лет спустя после того, как *Эйнштейн* выдвинул свою гипотезу, в 1995 г., *Эриком Корнеллом*, *Карлом Виманом* почти одновременно с *Вольфгангом Кеттерле* были получены первые бозе-эйнштейновские конденсаты. За эту работу в 2001 г. они были удостоены Нобелевской премии по физике.

С ферми-жидкостями всё обстоит сложнее. Фермионы — индивидуалисты, каждый из них обладает своей собственной волновой функцией. В 1925 г.

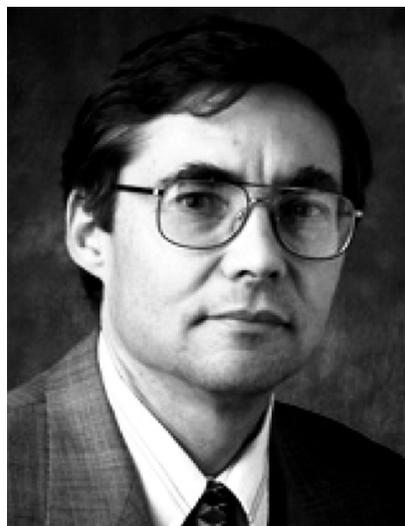


Эрик Аллин Корнелл (1961)
Страна: США

1995 г. — получил первый бозе-эйнштейновский конденсат из газа атомов рубидия (совместно с Карлом Виманом)
2001 г. — получил Нобелевскую премию по физике «за достижения в изучении процессов конденсации Бозе-Эйнштейна в среде разреженных газов и за начальные фундаментальные исследования характеристик конденсатов» (совместно с Карлом Виманом и Вольфгангом Кеттерле)

Это интересно

После ухода Корнелла из МТИ в группу Притчарда пришёл Вольфганг Кеттерле, с которым он позже разделит Нобелевскую премию



Карл Виман (1951)
Страна: США

1984 г. — занимался лазерными охлаждением и лазерными ловушками, показав, что таким образом можно исследовать поведение атомов при очень низких температурах

1985 г. — успешно измерил нарушения чётности в атомах, предсказанного теорией электрослабого взаимодействия, используя для этой цели цезий.

1995 г. — получил первый бозе-эйнштейновский конденсат из газа атомов рубидия (совместно с Эриком Корнеллом)

2001 г. — получил Нобелевскую премию «за достижения в изучении процессов конденсации Бозе-Эйнштейна в среде разреженных газов и за начальные фундаментальные исследования характеристик конденсатов» (совместно с Эриком Корнеллом и Вольфгангом Кеттерле)

Это интересно

В Стэнфордском университете научным руководителем Вимана был Тореадор Вольфганг Хенш, лауреат Нобелевской премии по физике 2005 г. «за вклад в развитие основанной на лазерах точной спектроскопии»



Вольфганг Кеттерле (1957)
Страна: Германия

1986 г. — доказал существование гидрида гелия, впервые получил спектры этой молекулы и полностью объяснил их
1995 г. — получил бозе-эйнштейновский конденсат из атомов натрия с использованием принципа удержания атомов в магнитной ловушке
1997 г. — продемонстрировал первый атомный лазер
2001 г. — получил Нобелевскую премию «за достижения в изучении процессов конденсации Бозе-Эйнштейна в среде разреженных газов и за начальные фундаментальные исследования характеристик конденсатов» (совместно с Эриком Корнеллом и Карлом Виманом)
2005 г. — экспериментально доказал высокотемпературную сверхтекучесть в фермионном конденсате

Это интересно

Немецкий физик Герберт Вальтер так отзывался о работе Кеттерле о гидриде гелия: «Он создал новую область физики и сам же её убил»

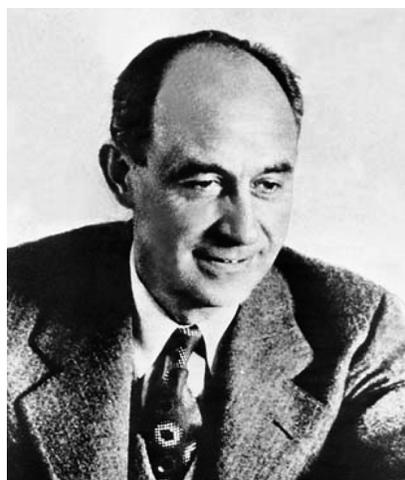
итальянский физик *Энрико Ферми* разработал статистику распределения частиц, подчиняющихся запрету Паули, которые позже были названы фермионами. Год спустя другой выдающийся физик *Поль Андриен Морис Дирак*, ассиметризовав волновую Ψ -функцию Гейтлера-Лондона, получил тот же результат. Поэтому данное распределение связывают с именами обоих учёных.

$$\langle n \rangle_{\text{Ф-Д}} = \frac{1}{\exp\left(\frac{E - \mu}{kT}\right) + 1} \quad \text{— распределение Ферми-Дирака,}$$

где $\langle n \rangle_{\text{Ф-Д}}$ — наиболее вероятное число частиц с энергией E и химическим потенциалом μ ; T — температура.

После этого очередной прорыв в этой области случился лишь в 1957 г., когда советский физик-теоретик *Лев Давидович Ландау* создал феноменологическую теорию ферми-жидкости, и сразу после этого группой американских учёных — *Джоном Бардиным, Леоном Купером и Джоном Шриффером* была создана теория БКШ.

Следует отметить, что атом гелия-3, благодаря нечётному количеству фермионов в ядре (один нейтрон), сам является фермионом, в отличие от гелия-4, у которого в ядре два нейтрона — следовательно, он является бозоном. Поскольку гелий-4 яв-



Энрико Ферми (1901-1954)
Страна: Италия

1925 г. — разработал статистику для частиц, подчиняющихся принципу Паули, которые позже были названы фермионами
1928 г. — развил метод определения основных состояний многоэлектронных атомов
1929-1930 гг. — разработал канонические правила квантования электромагнитного поля, внёс значительный вклад в создание квантовой электродинамики
1934 год — создал теорию бета-распада, предложил для получения новых радиоактивных элементов бомбардировать ядра нейтронами
1938 г. — получил Нобелевскую премию по физике «за доказательство существования новых радиоактивных элементов, полученных при облучении нейтронами, и связанное с этим открытие ядерных реакций, вызываемых медленными нейтронами»
1939-1942 гг. — вёл активное исследование цепных ядерных реакций
1944 г. — стал одним из руководителей ядерной программы США
1949 г. — создал теорию происхождения космических лучей и раскрыл механизм ускорения частиц в них
1950 г. — разработал статистическую теорию множественного рождения мезонов
1952 г. — открыл изотопический квадруплет — первый адронный резонанс

Это интересно

С самого детства Ферми посвящал много времени чтению книг по физике и математике.

Ферми известен как один из немногих физиков, преуспевших как в теоретической, так и в экспериментальной физике.

Шестеро из учеников Ферми стали нобелевскими лауреатами.

В честь Энрико Ферми назван сотый элемент в периодической системе — фермий

ляется наиболее распространённым изотопом и был изучен первым, о нём — в первую очередь.

Итак, в конце 1930-х годов *Виллем Хендрик Кеезом*, унаследовавший после *Камерлинг-Оннеса* криогенную лабораторию Лейденского университета, наблюдал удивительное явление: как только жидкий гелий охлаждался до температуры 2,17 К, кипение внезапно прекращалось. Изучив его свойства, учёный обнаружил, что полученная жидкость становится необычайно хорошим проводником тепла, её теплоёмкость в этой точке проходит через острый пик (λ -точка), что свидетельствует о наличии термодинамического фазового перехода. Он не сопровождался выделением или поглощением энергии в виде тепла, и *Кеезом* справедливо отнёс это явление к фазовому переходу второго рода. Жидкий гелий выше температуры 2,17 К он назвал гелием I, жидкий гелий ниже 2,17 К — гелием II.



Поль Андриен Морис Дирак (1902-1984)
Страна: Англия

1926 г. — защитил докторскую диссертацию, названную им «Квантовая механика», в которой были рассмотрены приложения матричной теории Гейзенберга к решению задачи об атоме водорода, а также попытки распространить ее на многоэлектронные системы.

Опубликовал статью «К теории квантовой механики», в которой вывел статистику, описывающую распределение частиц, подчиняющихся принципу Паули (ранее уже полученную Энрико Ферми из иных соображений).

Развил теорию возмущений и применил её для описания атома, находящегося в поле излучения.

Ввёл дельта-функцию, ныне носящую его имя.

Развил общую теорию преобразований.

Разработал метод вторичного квантования, а так же ввёл многовременной формализм.

Вывел релятивистское уравнение электрона, включающее в себя его спин и магнитный момент.

1933 г. — получил Нобелевскую премию по физике «открытие новых продуктивных форм атомной теории» (совместно с Эрвином Шредингером)

Это интересно

На ранних этапах своей научной деятельности Дирак с презрением относился к «грубым и уродливым» приближённым методам физики, предпочитая им стройность и логику математического анализа.

Часто говорил о своей научной деятельности как об игре математических соотношений. Главным для него был поиск красивых уравнений, которые впоследствии могли получить физическую интерпретацию

Последующие эксперименты показали, что у гелия I присутствуют все свойства типичной жидкости. Всё не так, когда речь заходит о гелии II. Исследованием этой очень холодной и удивительной жидкости физики-экспериментаторы занимаются и по сей день, но началось всё в 1938 г. с экспериментов, поставленных *Петром Леонидовичем Капицей*. Учёный обнаружил поразительное свойство гелия II, которое потрясло научный мир сороковых годов прошлого столетия. Этим свойством была сверхтекучесть — способность, или точнее неспособность жидкости испытывать трение при течении. Почти одновременно с *Капицей* то же явление наблюдал британский физик *Джон Фрэнк Аллен*.

Чуть позже *Аллен* впервые наблюдал возникновение разности давлений в сверхтекучей жидкости при наличии разности температур. Это явление получило название термомеханического эффекта.



Виллем Хендрик Кеезом (1876-1956)
Страна: Голландия

1926 г. — перевёл гелий в твёрдое состояние

1932 г. — обнаружил и исследовал фазовый переход второго рода в жидком гелии при температуре 2,17 К

1935 г. — обнаружил скачок теплопроводности жидкого гелия при температуре 2,17 К при нормально давлении

1949 г. — написал монографию о свойствах гелия (в том числе жидкого и твёрдого)

Это интересно

Во время обучения в Амстердамском университете одним из его ставников был Ян Дидерик Ван-дер-Ваальс — лауреат Нобелевской премии по физике 1910 г.

Во время работы в лейденском университете Кеезом был ближайшим помощником Камерлинг-Оннеса и вместе с ним получил жидкий гелий

Несколько лет спустя оно было теоретически исследовано *Хайнцем Лондоном*, который предложил его термодинамическое описание и получил уравнение, впоследствии названное его именем:

$$dp/dT = \rho \cdot S \text{ — уравнение Лондона,}$$

где dp — разность давлений; dT — разность температур; ρ — плотность; S — энтропия жидкого гелия.

В 1939 г., британские физики *Джон Гильберт Даунт* и *Курт Мендельсон* обнаружили механокалорический эффект, — явление, обратное термомеханическому эффекту, заключающееся в том, что сверхтекучий гелий охлаждается в том сосуде, в который он перетекает. Ими же была измерена толщина поверхностной плёнки жидкого гелия и измерена её теплопроводность.

Излишне говорить, что на момент этих открытий не имелось никаких теорий, позволявших их объяснить. Тем не менее, ошеломляющий успех экспериментаторов подстегнул неторопливых теоретиков, и гениальные идеи начали появляться одна за другой.

Первой такой идеей, высказанной уже в 1938 г., стало фундаментальное предположение *Фрица Лондона* о том, что сверхтекучесть гелия является следствием явления бозе-эйнштейновской конденсации. Позже оно было подтверждено в теоретических работах норвежского физика и химика *Ларса Онзагера*.

Второй идеей стала предложенная венгерским физиком *Ласло Тиссой* двухжидкостная модель сверхтекучего гелия. Ознакомившись с феноменологической теорией сверхпроводимости братьев *Лондонов*, *Тисса* сумел приложить её постулаты к



Петр Леонидович Капица (1894-1984)
Страна: Российская Империя/СССР

1918 г. — проводил работу, посвящённую измерению магнитного момента атома в неоднородном магнитном поле (совместно с Николаем Семеновым)

1923 г. — наблюдал искривление траекторий альфа-частиц, поместив камеру Вильсона в сильное магнитное поле

1924 г. — получил магнитное поле 34 тесла в объёме 2 см³

1928 г. — сформулировал закон линейного возрастания электрического сопротивления ряда металлов в зависимости от напряжённости магнитного поля (закон Капицы)

1934 г. — создал принципиально новую высокопроизводительную установку по сжижению газов

1938 г. — исследовал явление сверхтекучести и свойства сверхтекучего гелия

1978 г. — получил Нобелевскую премию по физике «за фундаментальные эксперименты в области сверхтекучего гелия»

Развил общую теорию электронных приборов магнетронного типа и создал магнетронные генераторы непрерывного типа.

Экспериментально обнаружил образование высокотемпературной плазмы в высокочастотном разряде.

Занимался исследованием в области термоядерного синтеза

Это интересно

Когда Капица приехал в Кембридж работать в лаборатории Резерфорда, тот сказал, что штат уже укомплектован, но Капица убедил Резерфорда взять его как «допустимую погрешность».

Выдвинул гипотезу о природе шаровой молнии.

Именно Капица разработал турбодетандер.

Когда Ландау арестовали за антисталинскую пропаганду, Капица добился его освобождения

гидродинамике сверхтекучего гелия и пришёл в выводу, что в гелии ниже температуры 2,17 К образуется вторая компонента, которая и несёт ответственность за его удивительные свойства.

В 1941 г., базируясь на идее Тиссы, Лев Ландау совместно с Исааком Халатниковым разработал полуженуменологическую теорию сверхтекучести, позже известную как теория Ландау-Халатникова. В рамках этой теории был введён критерий сверхтекучести; объяснялось явление сверхтекучести, аномальная теплопроводность сверхтекучего гелия, механокалорический и термомеханический эффекты. Однако помимо этого данная концепция позволила предсказать наличие новых, тогда необнаруженных явлений, которые позже были открыты экспериментально.

Одним из явлений, предсказанных теорией Ландау-Халатникова, был так называемый «второй звук». Наличие сверхтекучей компоненты, не способной переносить энергию в виде тепла, обусловило совершенно иной характер теплового движения. Распространение температурных флуктуаций ниже температуры 2,17 К переставало быть диффузионным,



Джон Фрэнк Аллен (1908-2001)
Страна: Канада/Великобритания

1938 г. — измерил поверхностное натяжение, теплопроводность и вязкость жидкого гелия

Подтвердил результат Кеезума, зафиксировав аномально большое значение теплопроводности гелия II.

Для объяснения аномальной теплопроводности гелия ввёл понятие «пристенного слоя» (совместно с Майзнером).

Впервые наблюдал термомеханический эффект

Это интересно

Говорят, что Аллен обнаружил эффект фонтанирования гелия (термомеханический эффект) с помощью карманного фонарика.

За десять лет Аллен снял целый фильм, записав на плёнку все удивительные эксперименты с жидким гелием.

В 1949 г. Джон Фрэнк Аллен был избран членом Лондонского королевского общества



Хайнц Лондон (1907-1970)
Страна: Германия/США

1935 г. — вывел уравнение, связывающее ток и магнитное поле в сверхпроводниках. Теоретически установил глубину проникновения магнитного поля в сверхпроводник и первым поставил эксперимент, доказавший этот эффект (совместно с Фрицем Лондоном).

Установил связь между размерами сверхпроводника и критическим магнитным полем (магнитным полем, при котором исчезают сверхпроводящие свойства).

Экспериментально исследовал вопрос наличия электрического поля в сверхпроводниках.

Предложил термодинамическое описание термомеханического эффекта гелия II.

Разработал новый метод разделения изотопов ¹³O и ¹⁸O.

Разработал рефрижиратор растворения, принцип работы которого основан на смешении гелия-3 и гелия-4. Это единственный метод непрерывного охлаждения, позволяющий достичь температуру 0,3 К

Это интересно

В 1961 г. за свои выдающиеся заслуги Хайнц Лондон был принят в Лондонское королевское общество



Джон Гильберт Даунт (1913-1987)
Страна: Великобритания

1938 г. — измерил толщину поверхностной плёнки жидкого гелия (50-100 атомов) (совместно с Мендельсоном)

Открыл явление переноса жидкого гелия от более холодного места к более тёплому внутри плёнки (эффект переноса плёнки)

1939 г. — открыл механокалорический эффект (совместно с Мендельсоном)

Обнаружил отфильтровывание изотопа ^3He при пропускании гелия II через тонкую щель

1948 г. — нашёл выражение для температурной зависимости глубины лондоновского проникновения

Это интересно

В 1958 г. Даунт был награждён медалью имени Фрица Лондона



Курт Альфред Георг Мендельсон (1906-1980)
Страна: Великобритания

1939 г. — открыл механокалорический эффект (совместно с Даунтом)
1950-е годы — показал, что энтропия сверхтекучей компоненты гелиевой плёнки равна нулю.

Разработал эффективный метод определения дефектов решётки в твёрдых телах.

Выдвинул постулат о существовании энергетической щели для возбуждённых состояний, вносящих вклад в электронную теплоёмкость

Это интересно

В книге «Физика низких температур» Мендельсон выступает с критикой работы Льва Ландау.

В 1967 г. Мендельсону была вручена медаль Хьюза

вместо этого становясь волновым. Эти уникальные тепловые волны Ландау и назвал «вторым звуком».

$$u_2 = \frac{\rho_s \cdot T \cdot S^2}{C \cdot \rho_n} \quad \text{— выражение скорости второго звука,}$$

где ρ_s — плотность сверхтекучей компоненты; ρ_n — плотность нормальной компоненты; C — теп-



Фриц Вольфганг Лондон (1900-1954)
Страна: Германия/США

1927 г. — первая в мире статья по квантовой химии, в которой правильно объяснялась природа гомоядерной связи в молекуле водорода (совместно с Вальтером Гайтлером)

1930 г. — ввёл понятие «дисперсионного эффекта» для притяжения между атомами двух разрежённых газов на больших расстояниях друг от друга — лондоновские силы. Предположил, что сверхтекучесть жидкого гелия является следствием конденсации Бозе-Эйнштейна

1935 г. — предсказал квантование магнитного потока в сверхпроводниках

1937 г. — предложил описание электродинамики сверхпроводников, введя дополнительное уравнение, получившее название уравнение Лондонов (совместно со своим братом Хайнцем)

Это интересно

Несмотря на свой выдающийся вклад в теоретическую физику Лондон так и не был удостоен Нобелевской премии.

Фриц Лондон был среди первых физиков, которые приняли новое учение о микрочастицах и стали применять его для описания физических явлений

лоёмкость гелия; T — абсолютная температура; S — энтропия жидкого гелия.

Из приведённого уравнения видно, что скорость «второго звука» прямо пропорциональна плотности сверхтекучей компоненты. При разогреве гелия до температуры 2,17 К она становится равной нулю, и второй звук исчезает. Вычислив скорость распространения тепловых волн по данному выражению, Ландау получил значение 25 м/с. Экспериментально второй звук был обнаружен в 1944 г. В.П. Пешковым, который сумел измерить его скорость: она оказалась равной 19,6 м/с.

Другим предсказанным явлением была критическая скорость течения — скорость, при которой жидкость теряет свойство сверхтекучести. Согласно Ландау при увеличении скорости потока сверхтекучей жидкости возрастал энергетический вклад фонон-ротонных взаимодействий квазичастиц, пока, наконец, энергия системы не становилась настолько большой, что частицы в ней снова могли поглощать энергию молекулярного трения. Как только это происходило, жидкость теряла свойство сверхтекучести.

$$v \geq \min(E/p),$$

где v — скорость течения гелия; E — энергия элементарного возбуждения; p — истинный импульс квазичастиц.



Ларс Онзагер (1903-1976)
Страна: Норвегия/США

1925 г. — внёс некоторые изменения в теорию растворов Дебая-Хюккеля, уточнив броуновское движение ионов в растворе
1942 г. — решил двумерную модель Изинга
1926 г. — вывел уравнение электропроводности Онзагера
1931 г. — открыл принцип симметрии кинетических коэффициентов, который послужил основой феноменологической термодинамики неравновесных процессов
1949 г. — предложил теорию квантовых вихрей в сверхтекучем гелии
1968 г. — получил Нобелевскую премию «за открытие соотношений взаимности в необратимых процессах, названных его именем, которые имеют принципиально важное значение для термодинамики необратимых процессов»

Это интересно

Научным руководителем Онзагера был Петер Йозеф Вильгельм Дебай — лауреат Нобелевской премии по химии 1936 г.
На протяжении всей своей жизни Онзагер испытывал большие сложности в общении с людьми, «менее умными» в обсуждаемой области, чем он



Лев Давидович Ландау (1908-1974)
Страна: Российская Империя/СССР

1927 г. — в работе «Проблема торможения излучением» для описания состояния систем ввёл в квантовую механику новое понятие — матрицу плотности
1937 г. — развил теорию фазовых переходов второго рода, а также разработал теорию промежуточного состояния сверхпроводников
1941 г. — разработал теорию сверхтекучести в рамках созданной им теории квантовых жидкостей (совместно с Исааком Халатниковым)
1946 г. — создал теорию колебаний электронной плазмы
1950 год — создал полуфеноменологическую теорию сверхпроводимости (совместно с Виталием Лазаревичем Гинзбургом)
1958 г. — разработал теорию ферми-жидкостей
1962 г. — получил Нобелевскую премию по физике «за свои пионерские теории конденсированных сред и особенно жидкого гелия»

Это интересно

В Бакинском университете Ландау обучался сразу на двух факультетах: физико-математическом и химическом.
В 1934 г. разработал теорминимум — специальную программу для обучения молодых физиков-теоретиков.
Ландау классифицировал физиков по их достижениям, оценивая их по логарифмической десятибалльной шкале. Из физиков XX века высшую оценку получил только Альберт Эйнштейн



Ласло Тиса (1907-2009)
Страна: Венгрия/США

1938 г. — высказал фундаментальное предположение о двухжидкостной модели гелия ниже 2,17 К и предсказал наличие в нём «тепловых волн»

Это интересно

Близким другом Ласло Тиссы был венгр Эдвард Теллер — один из авторов атомной бомбы.
Одно из первых мест в ряду научных интересов Тиссы всегда занимала термодинамика, с которой он познакомился на лекциях Макса Борна



Исаак Маркович Халатников (1919)
Страна: СССР/Россия

1941 г. — разработал теорию сверхтекучести (совместно со Львом Ландау)
Автор фундаментальных исследований по квантовой электродинамике (совместно со Львом Ландау и Алексеем Абрикосовым)
Работал в области общей теории относительности и космологии (известность получила сингулярность Белинского-Халатникова-Лифшица)

Это интересно

Научным руководителем Халатникова был Лев Давидович Ландау.
В 1994 г. Исаак Маркович Халатников был избран иностранным членом Лондонского королевского общества

Однако здесь теория расходилась с опытом. Экспериментально определённая критическая скорость течения была на два-три порядка ниже значения,



Ричард Филлипс Фейнман (1918-1988)
Страна: США

1943-1945 гг. — один из авторов атомной бомбы
1948 г. — разработал метод интегрирования по траекториям в квантовой механике
1949 г. — разработал метод диаграмм Фейнмана, позволяющий объяснить превращения элементарных частиц
1954-1955 гг. — написал ряд работ, в которых обосновывал непосредственную связь между сверхтекучестью гелия и конденсацией Бозе-Эйнштейна. Предложил теорию квантовых вихрей
1965 г. — получил Нобелевскую премию по физике «за фундаментальную работу в квантовой электродинамике с далеко идущими последствиями для физики элементарных частиц»
1969 г. — предложил партонную модель нуклона

Это интересно

Физика не была единственной сферой интересов Фейнмана: он интересовался также биологией, химией, геологией и даже психологией. В своей школе учёных Ландау поставил Фейнмана выше себя самого. Разработал новый курс физики для студентов. В 1986 г. наглядно доказал причину падения шаттла «Челленджер»

предсказанного Ландау (60 м/с). Это наводило на мысль о том, что в теории сверхтекучести Ландау-Халатникова остались неучтёнными какие-то факторы.

Исследование вращающегося гелия помогло пролить свет на эту загадку. Сверхтекучая компонента, согласно модели Тиссы, не должна была принимать участия во вращательном движении, но эксперименты показали, что при достаточно больших угловых скоростях она также начинает увлекаться стенками вращающегося сосуда.

Чтобы объяснить это явление, в 1949 г. Ларс Онзагер предположил, что вращение гелия II, ввиду его квантовой природы, тоже должно быть квантованным. В 1955 г. эта гипотеза была развита Ричардом Филлипсом Фейнманом, а в 1961 г. британский физик Джо Вайнен дал первое экспериментальное доказательство существования так называемых квантовых вихрей — потоков жидкости, вращающихся вокруг квантовой нити (рис. 1).

$m_{\text{He}} r v_s = n \hbar$ — квантовый момент количества движения атома гелия,

где v_s — скорость сверхтекучего движения; r — радиус окружности вращения; n — целое число.

В ходе обширной серии экспериментов было обнаружено и ещё одно удивительное свойство сверхтекучего гелия: он, находясь в покое, самопроизвольно поднимался по вертикальным стенкам сосуда и, таким образом, вытекал из него (рис. 2).

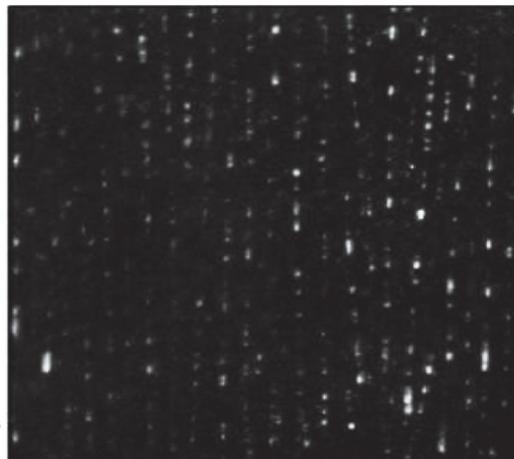


Рис. 1 Квантовые вихри в сверхтекучем гелии



Виталий Лазаревич Гинзбург (1916-2009)
Страна: СССР/Россия

1940 г. — разработал квантовую теорию эффекта Вавилова-Черенкова и теорию черенковского излучения в кристаллах
1946 г. — разработал теорию переходного излучения, возникающего при пересечении частицы границы двух сред
1951 г. — разработал полуфеноменологическую теорию сверхпроводимости (совместно со Львом Ландау)
1958 г. — развил полуфеноменологическую теорию сверхтекучести гелия (совместно со Львом Питаевским)
Разработал теорию магнитного космического радиоизлучения и радиоастрономическую теорию происхождения космических лучей
2003 г. — получил Нобелевскую премию по физике «за пионерский вклад в теорию сверхпроводимости и сверхтекучести» (совместно с Алексеем Абрикосовым и Энтони Леггетом)

Это интересно

Сам Гинзбург говорил, что его любовь к низким температурам удивительна после пережитой им суровой военной зимы в Казани в 1942 г. Гинзбург был одним из самых известных в Советском Союзе и России публичных атеистов. Научным руководителем Гинзбурга был Игорь Евгеньевич Тамм, лауреат Нобелевской премии по физике 1958 г. «за открытие и истолкование эффекта Черенкова»

Разгадкой этого явления занялся выдающийся советский и российский физик, Виталий Лазаревич Гинзбург. Объединив усилия со Львом Петровичем Питаевским, в 1958 г., он распространил феноменологическую теорию сверхпроводимости на случай сверхтекучести (следует отметить, что эту теорию сверхпроводимости создал он же вместе с Ландау в 1951 г.). В основу этой теории легло предположение



Лев Петрович Питаевский (1933)
Страна: СССР/Россия

1958 г. — разработал полуфеноменологическую теорию сверхтекучести гелия (совместно с Виталием Гинзбургом)
1959 г. — теоретически доказал возможность перехода гелия-3 в переходное состояние

Это интересно

Научным руководителем Питаевского был Лев Давидович Ландау. Под редакцией Питаевского были изданы десять томов курса теоретической физики, созданного Ландау совместно с Лифшицем. В данный момент Лев Петрович Питаевский преподаёт в Московском физико-техническом институте

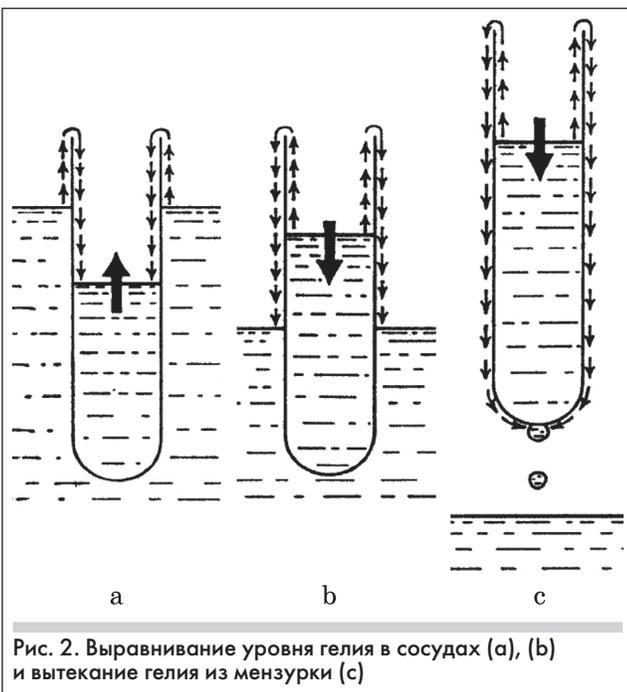


Рис. 2. Выравнивание уровня гелия в сосудах (а), (b) и вытекание гелия из мензурки (с)

Гинзбурга о том, что плотность сверхтекучей компоненты у стенок сосуда равна нулю.

К сожалению, проверка экспериментом показала, что эта новая феноменологическая теория сверхтекучести (позже известная как теория Гинзбурга-Питаевского) не может быть количественно применена к гелию II. Тем не менее, она была вполне способна дать качественное объяснение поведения сверхтекучего гелия около стенок сосуда.

$$\rho_s = m|\Psi|^2,$$

где ρ_s — плотность сверхтекучей компоненты (при $\Psi(0) = 0$ у стенки сосуда $\rho_s = 0$);

$$T_\lambda(d) = T_\lambda - 2,53 \cdot 10^{-11} \left(\frac{3+M}{M} \right) d^{\frac{3}{2}},$$

где T_λ — температура λ -перехода в массивном гелии (2,17 К); d — толщина плёнки; M — параметр теории.

Итак, загадки гелия-4 удалось «раскусить» почти за двадцать лет. С гелием-3 все оказалось еще сложнее. Количество, достаточное для перевода его в жидкое состояние, было получено лишь в 1948 г., после того, как мировые сверхдержавы начали активно разворачивать ядерные программы. С тех пор, несмотря на то, что практически каждая лаборатория мира, располагающая оборудованием, способным достичь температуры ниже 3 К, занималась изучением свойств жидкого гелия-3, теория всегда опережала эксперимент.

Так эффект отрицательной теплоты кристаллизации, предсказанный советским физиком *Исааком Яковлевичем Померанчуком* в 1950 г., экспериментально был доказан лишь в 1957 г. американскими физиками *Уильямом Фейрбенком* и *Гаем Уолтерсом*. Причина такого аномального поведения заключается в том, что при температуре ниже 0,3 К энтропия твёрдого гелия-3 больше энтропии жидкого, следовательно, и для перехода системы в твёрдое состояние она должна не выделить определённое количество энергии в виде тепла, а поглотить его. Эффект Померанчука лёг в основу одного из первых

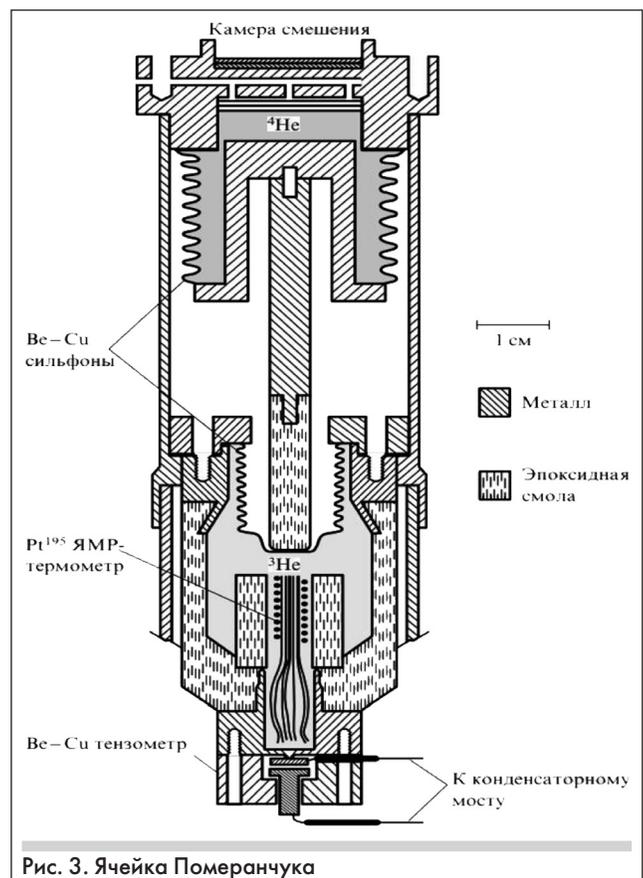


Рис. 3. Ячейка Померанчука



Исаак Яковлевич Померанчук (1913-1966)
Страна: Российская Империя/СССР

1937 г. — разработал первую количественную теорию рассеяния фотонов полем ядра частицы (совместно с Александром Ахиезером) и теорию электропроводности в металлах при низкой температуре (совместно со Львом Ландау).

1944 г. — предсказал наличие синхротронного излучения (совместно с Дмитрием Иваненко).

1950 г. — предсказал эффект отрицательной теплоты кристаллизации гелия-3 (эффект Померанчука).

1940-1950 гг. — развил теорию дифракционного рождения частиц (совместно с Александром Ахиезером и Евгением Фейрбенгом) и внёс огромный вклад в развитие теории дифракционного рассеяния частиц на ядрах. Возглавлял научную группу, занимавшуюся расчётом материального баланса водородной бомбы.

1958 г. — создал новое научное направление в физике элементарных частиц: физику асимптотически высоких энергий

Это интересно

Научным руководителем Померанчука был Лев Давидович Ландау.

В 1937 г. был исключен из комсомола «за связь с Ландау».

В 1955 г. с Ландау и Гинзбургом подписал «Письмо трёхсот».

Исаак Яковлевич Померанчук создал новую школу физиков-теоретиков

методов охлаждения, позволяющих достичь температур ниже 2 мК (рис. 3).

В 1957 г., как уже упоминалось, Ландау разработал феноменологическую теорию ферми-жидкости, в которой предсказал одно интереснейшее явление: наличие коротковолновых затухающих колебаний функции распределения квазичастиц в ферми-жидкости. Согласно Ландау оно становится заметным лишь при температурах, очень близких к абсолютному нулю, и поэтому он назвал это явление «нулевым звуком». Более детальная теория распространения и затухания «нулевого звука», основанная на идее Ландау, была разработана независимо друг от друга двумя исследовательскими группами: его учениками Халатниковым и Абрикосовым, и американскими учеными Абелем, Андерсоном и Уитли. Первое же экспериментальное доказательство существования «нулевого звука» было дано лишь в 1963 г. британскими физиками Кином, Мэтьюзом и Уилксом.

$$c_0 = \frac{1 + \frac{1}{3} F_1}{F_0 \left(1 + \frac{1}{3} F_1\right) + \left(\frac{c_0}{v_F}\right)^2 F_1} \quad \text{— выражение скорости нулевого звука,}$$



Алексей Алексеевич Абрикосов (1928)
Страна: СССР/Россия/США

1955 г. — в возрасте 27 лет защитил докторскую диссертацию по квантовой электродинамике высоких энергий.

Открыл существование сверхпроводников второго рода (совместно с Николаем Заварицким) и объяснил их свойства: ввёл понятие регулярной вихревой решетки.

Объяснил сдвиг Найта при низких температурах.

Распространил теорию ферми-жидкости Ландау на несверхтекучий гелий-3.

Проводил обширные теоретические и практические исследования в области физики твёрдого тела и квантовой электродинамики.

Открыл явление фазовых переходов вещества в магнитном поле.

2003 г. — получил Нобелевскую премию по физике «за основополагающие работы по теории сверхпроводников и сверхтекучести жидкостей» (совместно с Виталием Гинзбургом и Энтони Леггетом)

Это интересно

Научным руководителем Абрикосова был Лев Давидович Ландау.

Родители Абрикосова, видные патологоанатомы, были отстранены от работы в ходе кампании против врачей-вредителей.

В 1999 г. принял американское гражданство. Является членом Национальной академии наук США, Российской академии наук, Лондонского королевского общества, Американской академии наук и искусств

где c_0 — скорость нулевого звука, c_0 — средняя скорость нулевого звука (194,4 м/с при 0,32 атм), v_F — фермиевская скорость (53,8 м/с при 0,28 атм), $F_0 = 10,77$, $F_1 = 6,25$.

Ну и наконец, сверхтекучесть гелия-3. Это явление больше других будоражило сердца и умы учёных. Светлейшие умы планеты работали над этой проблемой: теоретики пытались объяснить, создавая новые теории, а экспериментаторы — получить экспериментальные данные, которые окончательно свидетельствовали бы о наличии сверхтекучего перехода.

Напомним, что ядра гелия-4 (бозоны) и гелия-3 (фермионы) являются совершенно разными по свойствам частицами, и поэтому теория бозе-эйнштейновской конденсации, удовлетворительно объяснявшая поведение более тяжёлого изотопа, казалось была совершенно неприменима к его лёгкому собрату. Таким образом, до 1957 г. люди совершенно не представляли, как объяснить поведение фермионов при сверхнизких температурах, пока Бардин, Купер и Шриффер не разработали свою знаменитую так называемую микротерию сверхпроводимости.



Дэвид Моррис Ли (1931)
Страна: США

1972 г. — обнаружил переход гелия-3 в сверхтекучее состояние
Работал над обнаружением волн ядерного спина в спиново-поляризованном газе атомарного водорода
1996 г. — получил Нобелевскую премию по физике «за открытие сверхтекучести гелия-3»

Это интересно

1976 г. — получил премию имени сэра Фрэнкса Симона
1981 г. — получил премию Оливера Бакли



Дуглас Дин Ошеров (1945)
Страна: США

1972 г. — обнаружил переход гелия-3 в сверхтекучее состояние
1996 г. — получил Нобелевскую премию по физике «за открытие сверхтекучести гелия-3»

Это интересно

Отец Ошерова был еврейским иммигрантом из России.
Участь в калифорнийском технологическом институте, посещал лекции Фейнмана.
Был одним из членов комиссии, созданной для расследования трагедии шаттла «Колумбия»



Роберт Колман Ричардсон (1937-2013)
Страна: США

1972 г. — обнаружил переход гелия-3 в сверхтекучее состояние
1996 г. — получил Нобелевскую премию по физике «за открытие сверхтекучести гелия-3»
Автор множества работ в области ЯМР, физики низких температур: и физики конденсированного состояния вещества

В рамках этой теории *Купером* было сделано предположение, что электроны в сверхпроводнике при очень низких температурах связываются в пары. Таким образом, две частицы, объединяясь с полужелтым спином, образуют квазичастицу с целым спином, а как было установлено ранее, система, состоящая из бозонов, способна переходить в сверхтекучее состояние.

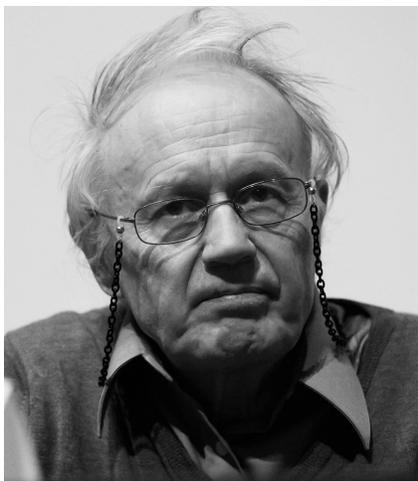
Несмотря на то, что теория БКШ относится к сверхпроводникам, она послужила прочным базисом для создания теории сверхтекучести гелия-3. Основываясь на идее *Купера*, *Лев Питаевский* в 1958 г. высказал идею о спиновом механизме спаривания частиц. В 1972 г. группе учёных — *Дэвиду Ли*, *Дугласу Ошерову* и *Роберту Ричардсону* удалось зафиксировать переход гелия-3 в сверхтекучее состояние при температуре 2,6 мК (35 атм). Такой низкой температуры удалось достигнуть, используя эффект Померанчука.

Этой же группой были зафиксированы ещё два фазовых перехода: один наблюдался при охлаждении жидкости до 0,9 мК, а второй — при наложении магнитного поля. Таким образом, было установлено факт существования трёх различных фаз сверхтекучего гелия:

- А-фаза, описываемая двухжидкостной моделью Ландау с учётом спиновой анизотропии (анизотропная);
- В-фаза, полностью описываемая двухжидкостной моделью Ландау, лишь с той разницей, что при наложении магнитного поля она приобретает свойство анизотропии;
- А¹-фаза, существование которой обусловлено не только жидкокристаллическими, но и магнитными свойствами вещества.

В том же 1972 г. *Энтони Леггет*, развивая идею *Питаевского* и полагаясь на экспериментальные данные, полученные от группы *Дугласа Ошерова* и *Ричардсона*, создал теорию сверхтекучести гелия-3.

Помимо чистых квантовых жидкостей научный и практический интерес представляют и их растворы друг в друге. Подробным изучением свойств



Энтони Джеймс Леггетт (1936)
Страна: США

Проводил исследования фоновых возмущений высокого порядка. Занимался изучением растворов гелия-3 в гелии-4
1972 г. — создал теорию сверхтекучести гелия-3
2003 г. — получил Нобелевскую премию по физике «за пионерский вклад в теорию сверхпроводников и сверхтекучих жидкостей»

Это интересно

Среди научных интересов Леггетта числятся квантовая механика, физика низких температур и конденсированного состояния вещества, топологическое квантовое моделирование

системы $^3\text{He} - ^4\text{He}$ занимались научная группа *Абеля, Андерсона и Уитли*, а также группа *Генри Фейрбенка*, в состав которой входил *Дэвид Моррис Ли*, ещё будучи постдоком.

На практике смесь $^3\text{He} - ^4\text{He}$ применяется в так называемом рефрижераторе растворения, разработанном *Хайнцем Лондоном*. Принцип его действия основан на том факте, что энтальпия системы раствора, рассчитанная на моль ^3He в растворе, увеличивается при уменьшении концентрации ^3He . Таким образом, если разбавление проводить адиабатически, то температура будет понижаться.

Не стоит забывать и о применении чистого гелия (как жидкого, так и газообразного), который благодаря своим удивительным свойствам находит широкое применение в индустриально развитом обществе.

Химическая инертность гелия обусловила его широкое применение для создания инертной среды и предотвращения окисления металлических сплавов во время их термообработки, а также в качестве газа-носителя в хроматографическом анализе. Благодаря всё той же химической инертности гелием наполняют дирижабли. Несмотря на то, что его грузоподъемность меньше грузоподъёмности водорода, после трагедии с дирижаблем «Гинденбург» человечество поступает этим недостатком в пользу безопасности.

Газообразный гелий благодаря своей малой растворимости в человеческой крови используется как компонент дыхательных смесей в водолазных баллонах, а также смесей для снятия приступов астмы и при других заболеваниях дыхательных путей. Кроме того, он является прекрасным проводником тепла и чрезвычайно устойчив к действию ионизи-

рующих излучений, поэтому его используют в качестве охлаждающего агента оболочки ядерных реакторов. Гелий находит применение и в более обычных областях человеческой жизни, например, в качестве газовой смазки подшипников и в наружной неоновой рекламе в смеси с другими благородными газами.

Жидкий гелий — незаменимый источник низких температур. Его используют для охлаждения сверхпроводящих магнитов в различных научных, технических и медицинских устройствах, таких как ускорители заряженных частиц, детекторы инфракрасного высокочастотного излучения, сканирующие туннельные микроскопы и криогенные электрические машины.

Таким образом, потребление гелия является косвенным индикатором уровня индустриального и научного развития страны, Гелий, обладающий уникальными свойствами, играет огромную роль в развитии научно-технического прогресса, он определяет развитие важнейших отраслей хозяйства; существуют теории, утверждающие о возможности использования гелия-3 в качестве топлива для термоядерного синтеза — источника энергии будущего.

В связи со столь широким спектром применения гелия мировая потребность в нём неуклонно растёт; к 2030 г. ожидается удвоение потребления гелия по сравнению с текущим моментом, будет реализовано порядка 10 новых гелиевых проектов. Центры производства гелия смещаются из США в другие страны.

Россия, располагая огромными запасами природных газов в Восточной Сибири и Якутии с высоким содержанием гелия, производит менее 3%, а потребляет менее 1% гелия от общемирового, что свидетельствует о низком уровне развития в нашей стране высоких технологий. Гелий сегодня востребован мировым рынком; с развитием новых российских месторождений Россия может стать глобальным игроком на рынке гелия с долей 40-50%.

Но, решая вопросы стратегии разработки этих месторождений, нельзя забывать о том, что гелий — практически невозобновляемый ресурс, он крайне рассеян в атмосфере, не встречается в свободном виде в недрах, промышленным источником его получения является природный газ. Поэтому необходим разумный подход к разработке сибирских месторождений, оценив его востребованность мировым рынком на долгосрочную перспективу и найдя экономически целесообразные пути избежания потерь этого ценнейшего ресурса. В США, Канаде, Алжире месторождения природных газов с высоким содержанием гелия разрабатываются, это определяется возможностями его реализации, ресурсы гелия при этом уменьшаются. В перспективе его может не хватиться в достаточном количестве для возрастающего потребления. В то же время получение высококонцентрированного товарного жидкого гелия при отсутствии на сегодня достаточного рынка сбыта и хранение его на будущее требует огромных затрат.

В связи с этим, с точки зрения авторов, есть два пути сохранения этого уникального ресурса, не торжествуя удовлетворение в его потребности на текущий момент. Первый путь — это выделение и хранение не товарного гелия, а более дешёвого гелия-сырца (азото-гелиевого концентрата), когда объём его извлечения превышает спрос на него. Второй путь — это не одновременное, а последовательное введение мощностей добычи природного газа, учитывающее спрос на гелий.

Таким образом, освоение новых сибирских гелиевых проектов должно предусматривать создание крупных подземных хранилищ гелия-сырца. Это позволит предотвратить потери гелия и создаст механизм регулирования его баланса производства и потребления в мировом масштабе. Такой способ был реализован в США при разработке месторождений природных газов с высоким содержанием гелия, потом этот запас гелия был распродан. К сожалению, в России нет законодательных актов, предусматривающих сохранность запасов гелия от потерь, поэтому есть опасность его безвозвратных потерь в атмосферу при освоении газовых месторождений Восточной Сибири.

Тем не менее, новые российские гелиевые проекты могут и должны быть реализованы российским научно-промышленным комплексом. Основной рынок сбыта сибирского гелия — страны АТР, в меньшей степени — Европа и США. Наличие масштабных долговременных источников российского гелия создаёт хорошие предпосылки развитию новых высокотехнологичных проектов в области нанотехнологий, энергетики, медицины на территории Российской Федерации с участием российских и иностранных партнеров. Но реализация этих проектов должна предусматривать экономное извлечение гелия, чтобы девиз «Сохраним гелий для потомков!» был выполнен, несмотря на разрывы во времени объёмов потребности в гелии и его добычи с газом.

ИСПОЛЬЗОВАННАЯ ЛИТЕРАТУРА

Молчанов С.А. Особенности выделения гелия из природного газа. — М.: ООО «Издательский дом Недра», 2011. — 285 с.

Лифшиц Е.М., Ландау Л.Д. Теоретическая физика. Т. 3. Квантовая механика. Ч. 2. — М.: Физматлит, 2004. — 750 с.

Лифшиц Е.М., Питаевский Л.П. Теоретическая физика. Т. 9. Статистическая физика: Ч. 2. — М.: Физматлит, 2004. — 493 с.

Абрикосов А.А. Сверхпроводники второго рода. Нобелевские лекции по физике — 2003 // Успехи физических наук. — 2004. — Т. 174, № 11. — С. 1234-1239.

Леггет Э.Дж. Сверхтекучий ^3He : ранняя история глазами теоретика. Нобелевские лекции по физике — 2003 // Успехи физических наук. — 2004. — Т. 174, № 11. — С. 1256-1268.

Ли Д.М. Необычные фазы жидкого ^3He . Нобелевские лекции по физике — 1996 // Успехи физических наук. — 1997. — Т. 167, № 12. — С. 1307-1326.

Ошеров Д.Д. Сверхтекучесть ^3He : открытие и понимание. Нобелевские лекции по физике — 1996 // Успехи физических наук. — 1997. — Т. 167, № 12. — С. 1327-1339.

Ричардсон Р.К. Эффект Померанчука. Нобелевские лекции по физике — 1996 // Успехи физических наук. — 1997. — Т. 167, № 12. — С. 1340-1347.

Дмитриев В.В. Объединённая научная сессия Отделения физических наук Российской академии наук и Объединённого физического общества Российской Федерации (к 110-летию П.Л. Капицы и 70-летию Института физических проблем им. П.Л. Капицы РАН) // Успехи физических наук. — 2005. — Т. 175, № 1. — С. 85-92.

Питаевский Л.П. Нулевой звук в жидком He^3 // Успехи физических наук. — 1967. — Т. 91, № 2. — С. 309-310.

Абель В.Р., Андерсон А.К., Уитли Дж.К. Распространение нулевого звука в жидком He^3 при низких температурах // Успехи физических наук. — 1967. — Т. 91, № 2. — С. 311-316.

Абрикосов А.А., Халатников И.М. Теория ферми-жидкости // Успехи физических наук. — 1958. — Т. 66, № 2. — С. 177-212.

Гинзбург В.Л. Сверхпроводимость и сверхтекучесть (что удалось и чего не удалось сделать), а также о «физическом минимуме» в XXI веке // Успехи физических наук. — 2004. — Т. 174. — С. 1240-1255.

Якуцени В.П. Традиционные и перспективные области применения гелия. — Санкт-Петербург: Нефтегазовая геология. Теория и практика, 2009. — 13 с.

Фастовский В.Г., Ровинский А.Е., Петровский Ю.В. Инертные газы — М.: Атомиздат, 1972. — 352 с.

Каменский И.Л., Акуцени В.П., Мамирин Б.А. Изотопы гелия в природе // Геохимия. — 1971. — № 8. — С. 915-930.

Уважаемые читатели!

В № 9 за 2014 г. журнала «Нефтепереработка и нефтехимия» в статье «Цетаноповышающие присадки и их хранение» авторов Т.Н. Митусовой, М.В. Калининой, Е.В. Полиной, О.Б. Довлатбеговой в начале правой колонки на стр. 44 следует читать: «Максимальная рекомендуемая температура хранения — 60°C, так как при более высоких температурах существует риск ускоренного экзотермического разложения алкилнитратных присадок с ростом температуры и давления, что создаёт опасность взрыва и возгорания».

Редакция журнала приносит свои извинения авторам статьи за допущенную техническую ошибку.