

ρ_c сопротивление, пропорциональное квадрату температуры в режиме ферми-жидкости (когда электрон-фононное рассеяние несущественно), ведет себя так, как предписывает теория маргинальной ферми-жидкости [6]. Это новое состояние характеризуется законом $T \ln(T^*/T)$ в отличие от обычного линейного поведения теплоемкости при низких температурах. На языке квазичастиц, свойства "фермионов" должны иметь сильную температурную зависимость и их "массы", которые не ограничены, будут не определены на уровне Ферми при $T \rightarrow 0$. Неприменимость модели Ландау для этих случаев объясняется наличием дальнедействующей части эффективного квазичастичного взаимодействия вблизи фазового перехода при низких температурах. Аналогичное нарушение, но при температурах существенно ниже, должно наблюдаться из-за влияния дальнедействующей силы Лоренца, что было отмечено Холстейном в его теоретическом анализе явления магнитного взаимодействия Шёнберга и (косвенно) аномального скин-эффекта Пиппарда [7].

Другой проблемой, связанной с предыдущей, является переход из сверхпроводящей в нормальную фазу в зависимости от давления, состава или магнитного поля. Измерения последнего или температурной зависимости сверхпроводящего перехода показали, что поведение систем с низкой размерностью сильно отличается от предсказаний модели БКШ. Верхнее критическое поле, например в купратном сверхпроводнике $Tl_2Ba_2CuO_6$, резко растет с положительной кривизной при падении температуры без признаков насыщения при температурах порядка милликельвина [8]. Насыщение, ожидаемое в рамках стандартной модели ниже кроссовера при средних температурах (не намного ниже T_c , где длина корреляции Гинзбурга–Ландау становится меньше длины когерентности), не наблюдается. Правильная интерпретация температурной зависимости поля перехода и даже его точная связь с тем, что обычно определяется как верхнее критическое поле, остается нерешенной проблемой.

Описанные выше исследования, а также другие, связанные с ними, определяют ограничения, налагаемые на понятие элементарных возбуждений, которое являлось краеугольным камнем теории конденсированного состояния вещества в течение долгого времени. Эта концепция остается полезной даже тогда, когда квазичастицы сильно отличаются от свободных электронов. Но она может нарушаться при наличии дальнедействующих эффективных взаимодействий в вышеназванных веществах и даже в обычных металлах в основном состоянии при очень низких температурах. Описание таких систем в простых понятиях, видимо, требует введения новых теоретических подходов.

Список литературы

1. Landau L D *Collected Papers* (Gordon & Breach and Pergamon Press, 1965) Chs 90, 91
2. Shoenberg D *Magnetic Oscillations in Metals* (Cambridge: Cambridge University Press, 1984)
3. Pippard A B *Magnetoresistance in Metals* (Cambridge: Cambridge University Press, 1989)
4. Julian S R, Brown S V, Walker I R and Lonzarich G G, *to be published*
5. Julian S R, Tautz F S, McMullan G J and Lonzarich G G *Physica B* **199–200** 63 (1994); for $CeRu_2Si_2$ see also Onuki Y, Albessard A K, Aoki H, Uji S (*ibid.*)

6. Pfeleiderer C, McMullan G J, Lonzarich G G *Physica B* **199–200** 634 (1994)
7. Holstein T, Norton R E, Pincus P *Phys. Rev. B* **8** 2647 (1973)
8. Mackenzie A P, Julian S R, Lonzarich G G et al., *Phys. Rev. Lett.* **71** 1238 (1993)

Перевел А. Наргизян

Научные консультации по переводу — А.Н. Васильев

PACS numbers: 07.20.M

Капица и криогенная технология

В.Ф. Кастл

Введение

Дается обзор научных достижений Капицы в области криогенной технологии (в особенности, ожижения гелия и воздуха, турбодетандеров) и обзор ее достижений после его деятельности. Вряд ли возможно, в таком коротком обзоре воздать должное работе Капицы в этой области, однако в нем освещены важность его пионерских работ и достижений, давших другим ориентир для исследований, который и привел криогенную технологию к ее сегодняшнему состоянию.

Сжижение гелия

Главный интерес Капицы к низкотемпературной физике был вызван необходимостью получения низких температур, в частности, в связи с его исследованиями в Кембридже в области сильных магнитных полей [1, 2]. Он решил использовать более эффективный способ ожижения гелия, чем только вентильное или адиабатическое расширение: способ, основанный на процессе, происходящем под действием внешних сил. Вероятно, он предпочел бы турбодетандер, однако его оценочный размер, если исходить из потребностей Капицы в жидком гелии, не оставлял надежды на практическую реализацию конструкции, поэтому была разработана поршневая машина. При низких температурах возникают сложности с выбором смазки для цилиндра, способной сохранять свои свойства при сильном охлаждении, поэтому Капица разработал поршневую турбодетандерную установку с газовой смазкой. В этой установке была тщательно выверена соосность поршня, точность конструкции цилиндра и притирка деталей, требуемая для предотвращения значительной утечки газа [3, 4]. В ожижителе использовалось сначала предохлаждение жидким азотом, а затем сжижение в детандерной установке. Производительность системы составляла 5 литров в час. Позднее для нужд небольших лабораторий в США было пущено в производство похожее устройство, известное под названием ожижающей установки Коллинза. Дальнейшим усовершенствованием Капицы явилось создание ожижающей установки производительностью 18 л/ч, в которой использовался каскад из двух детандерных устройств и не было предохлаждения жидким азотом или воздухом [5].

Еще позже были разработаны установки для ожижения гелия, пригодные для более широкого использования. Одной из них была установка, созданная в ВОС¹ для нужд Национального Института ядерных исследований

¹ British Oxygen Company.

в Харуэлле. Ее холодопроизводительность составляла 80 Вт при 4 К. Этот рефрижератор имел две турбодетандерные ступени. Далее было проведено еще очень много исследований, и с 1980 г. существуют или находятся в стадии проектирования 9 – 10 рефрижераторов мощностью 750 – 10000 Вт. В них используются каскады из 3 – 7 детандеров, оптимальное число каскадов, по видимости, 5. Сегодня в нашем распоряжении ожижающие гелий установки с производительностью от 5 до 600 литров в час или с мощностью охлаждения 1500 Вт. Две установки по производству жидкого гелия мощностью 12 кВт были построены Зульцером (теперь Линде Криотехник) в ЦЕРНе для LEP-200. Похожие установки, производящие 2600 литров в час, были построены для ожижения гелия в большом количестве.

Турбодетандеры

Для ожижения воздуха Капица решил изменить существующую практику и использовать цикл низкого, а не высокого давления. Он показал, что для этой цели подходят турбодетандеры, и отметил, что при их использовании возможно значительное повышение эффективности. За основу им была взята конструкция с радиальным впуском, продемонстрировавшая КПД 83 %, тогда как другим удавалось достичь лишь 50 %-ного КПД [6]. Созданный в 1938 г. этот турбодетандер имел характеристики, которые другим (например, Эллиоту и Шарплесу) удалось достичь много позже. Это был прорыв вперед на несколько лет в развитии технологии высокоэффективных турбодетандеров. В 1964–1965 гг. Джекат из Уортингтона сконструировал установку с 92 %-ным КПД. Сегодня турбодетандеры имеют ту же эффективность при высокой надежности.

В современных турбодетандерах используются магнитные подушки для уменьшения потерь и, следовательно, достижения максимальной отдачи. В них используются регулируемые сопла, способные оптимизировать поток газа и обеспечить максимум эффективности. Они могут также содержать высокоэффективные компрессорные тормоза, способные непосредственно использовать регенерацию энергии в турбине, снимая ее гидравлический напор (например, в охладитель) и, таким образом, еще увеличивая эффективность. В промышленном производстве лопастей используются твердые материалы, позволяющие лопастям вращаться с высокой скоростью, не испытывая механических повреждений. Например, турбодетандеры на установках по разделению углеводородов имеют очень высокую производительность с эффективной мощностью до 5 МВт. Турбина в установке Капицы вращалась со скоростью около 40000 об./мин (при максимально достижимой скорости 60000 об./мин), как и современные турбины. Ранние исследования Сиксмита в Оксфорде и в NBS Колорадо, позднее продолженные в ВОС в 1960–1970 гг., привели к появлению турбин диаметром 9,5 мм, вращающихся со скоростью 350000 об./мин. Они были газоохлаждаемыми и имели эффективность 50%, однако могли успешно использоваться, например в упомянутом выше рефрижераторе NIRNS. С тех пор конструкция турбодетандера была усовершенствована Зульцером (Линде Криотехник).

Ожижение воздуха

Для ожижения воздуха Капица разработал турбодетандер подобного же рода, в котором использовался цикл

низкого, а не высокого давления. Устройство работало с максимальным давлением от 5 до 7 бар. Это положило начало развитию многотоннажных кислородных установок, работающих при низких давлениях. Ожижающие установки, в основном для производства жидкого азота, а не воздуха, состоят из двигателей, турбокомпрессоров и турбодетандеров. Так как объем производства сейчас весьма существен (1000 тонн в сутки, такая производительность сейчас не является необычной), подобные устройства с некоторой долей выгоды могли бы использоваться и при более высоких давлениях, чем у Капицы. Большой оборот вещества при высоких давлениях мог бы уменьшить размер охладительного оборудования при той же производительности; при этом также уменьшилась бы вероятность случайных перепадов давления. Сейчас обычно предпочитают использовать две или три турбины. При этом избегают использовать для предохлаждения фреон, так как для этого требовалось бы дополнительное дорогостоящее оборудование; открытие озоновых дыр наложило на использование фреона окончательный запрет. Установка Капицы работала с удельным расходом энергии 1,2 кВт · ч/кг. Аналогичный показатель для жидкого азота с 1975 г., когда он составлял 1,0 кВт · ч/кг, существенно улучшился: теперь он достигает 0,4 кВт · ч/кг.

Продолжив свою лабораторную работу по ожижению воздуха по возвращении в Россию в 1934 г., Капица основал завод рядом с Балашихой, который служил нуждам сталелитейной промышленности в военное время. С тех времен этот завод разросся до огромной криогенной инженерной организации. Вклад Капицы заключался также в разработке упомянутого выше цикла низкого давления для ожижения воздуха, с помощью которого в 1930-х годах можно было достичь производительности 20 кг/ч. В период с 1939 по 1942 гг. под его руководством в организации была сконструирована серия установок ТК200 производительностью 200 кг жидкого кислорода в час. В 1943–1944 гг. была создана установка ТК-2000 производительностью 2000 кг/ч. В 1945 г. в подмосковной Балашихе строится криогенный промышленный комплекс, который позже станет частью Криогенмаша. Максимальная производительность по жидкому кислороду со времен до работ Капицы, а также после его деятельности, постоянно росла: с 180 т/сутки в 1932 г. до 1000 т/сутки в 1960 г. и до 2750 т/сутки с 1975 г. К настоящему времени Криогенмаш построил более 500 больших установок для сепарации воздуха суммарной производственной мощностью $40 \cdot 10^6$ м³ кислорода в год или примерно 160000 т/сутки.

В самом Криогенмаше прямо заявляют, что “наследие П.Л.Капицы, пионера Криогенмаша, так велико, что его трудно оценить” и что “он был выдающимся ученым, прославленным основателем Криогенмаша” [7]. Достижения П.Л.Капицы в криогенной технологии имеют огромное значение. Они привели как к важнейшим достижениям в криогенной технологии, так и к созданию мощной базы криогенной инженерии в России.

Список литературы

1. Shoenberg D P.L. Kapitza 1894–1984, *Biog. Memoirs of Fellows of the Roy. Soc.* **31** 327 (1985)
2. Boag J W, Rubinin P E, Shoenberg D *Kapitza in Cambridge and Moscow* (Amsterdam: North Holland, 1990)

3. Kapitza P L The Liquefaction of Helium by an Adiabatic Method *Proc. Roy. Soc. A* **147** 189 (1934)
4. Капица П Л и Данилов И Б Детандерная установка для ожижения гелия *ЖТФ* **31** 457 (1961)
5. Капица П Л Расчет гелиевого ожижительного цикла с каскадным включением детандеров *ЖТФ* **29** 427 (1959)
6. Капица П Л Турбодетандер для получения низких температур и его применение для ожижения воздуха *ЖТФ* **9** 99 (1939)
7. Курташин В Ф *частное сообщение*

Перевел В.А. Субботин

Научная консультация по переводу — В.М. Бродянский

PACS number: 67.40.

Жидкий гелий-4

В.Ф. Вайнен

В докладе дан краткий очерк истории открытия сверхтекучести в жидком ^4He и развития наших представлений об этом явлении, рассчитанный на широкую аудиторию.

Впервые гелий был ожижен и охлажден ниже 2 К Камерлинг-Оннесом в 1908 г., но только в 1930 г. стало ясно, что у этой жидкости есть две фазы: "гелий-I" при $T \gtrsim 2$ К и "гелий-II" при более низких температурах; переход из одной фазы в другую сопровождается резким скачком теплоемкости (λ -точка). К этому времени также стало ясно, что твердой фазы не существует ни при какой температуре, пока давление не превысит 25 атм.

Первое ясное указание на то, что "гелий-II" имеет аномальные свойства было сделано В.Х. Кеезом и А.П. Кеезом в 1936 г., отметившими очень высокое значение теплопроводности. Аллен, Пайерлс и Уддин показали, что такое высокое значение аномально по своей природе, причем, поскольку эффективная теплопроводность зависит от градиента температуры ∇T и размеров канала, оно эффективно стремится к бесконечности при $\nabla T \rightarrow 0$.

Именно в связи с этим в 1938 г. Капица сделал свое первое важное открытие. Он утверждал, что наблюдаемое высокое значение теплопроводности обусловлено определенного рода конвекцией, причем этот процесс весьма эффективен благодаря очень низкой вязкости. До этого вязкость уже была получена из результатов измерений затухания колебаний диска в жидкости; ее значение оказалось действительно скорее низким, однако не в такой, аномальной, степени. Капица предположил, что этот факт не противоречит реальному очень низкому значению величины вязкости, так как при проведении эксперимента число Рейнольдса могло быть очень большим и поток был турбулентным. Поэтому Капица решил измерить вязкость, наблюдая поток через две тонкие трубки, расположенные между двумя оптическими плоскостями. Он обнаружил, что вплоть до критических скоростей в несколько десятков см/с поток двигался без всякого видимого трения. Это было первым сообщением о сверхтекучести, хотя его публикация в *Nature* и сопровождалась заметкой о том же открытии, сделанном независимо Алленом и Майзнером. Следующие два года дали ряд различных связанных с этим явлений: термомеханический (фонтанный) эффект Аллена-Джонса, перетекание по пленке Роллина-Саймона и Даунта-Мендельсона, механо-калорический

эффект Даунта-Мендельсона. Важные, подробные, оказавшие большое влияние результаты экспериментальных исследований природы процесса теплопередачи в "гелии-II", механико-теплого и термомеханического эффектов были опубликованы самим Капицей в 1941 г.

Это странное явление бросало серьезный вызов теоретикам, и интересно, что явление сверхтекучести приковало внимание некоторых наиболее известных в мире физиков-теоретиков: братьев Лондонов, Ландау, Онсагера, Фейнмана и многих других.

В основе интереса к этому явлению частично лежало то, что гелий — квантовая жидкость, а сверхтекучесть — квантовый эффект. Важность квантовых эффектов в жидком гелии, вероятно, была впервые осознана в 1934 г. Саймоном, отметившим, что невозможность выделить твердый гелий при низких давлениях — следствие ненулевой энергии основного состояния атомов.

Из третьего закона термодинамики следует, что при нулевой температуре жидкий гелий должен быть упорядочен. Поведение теплоемкости в λ -точке — типичный признак перехода порядок-беспорядок, поэтому казалось естественным предположить, что сверхтекучесть является следствием процесса упорядочения. В 1938 г. Фриц Лондон предположил, что упорядочение сопровождается бозе-конденсацией, как это происходит в теоретической модели идеального бозе-газа, и что сверхтекучесть — следствие присутствия бозе-конденсата. В конце концов, стало понятно, что эта гипотеза действительно верна, хотя и не в той непосредственной форме, которую предсказывал Лондон.

Важная идея о том, что сложное и с виду непредсказуемое поведение "гелия-II" может быть феноменологически объяснено в рамках двухжидкостной модели (смеси проникающих друг через друга нормальной и сверхтекучей компонент, которые могут иметь различные поля скоростей), впервые была развита Лондоном и Тиссой, однако их надежды на то, что сверхтекучая компонента и есть бозе-конденсат, были беспочвенны. Первый удовлетворительный фундамент для двухжидкостной модели был предложен Ландау в его замечательной статье, за которую, в конечном счете, он получил Нобелевскую премию в 1962 г. (странно, но Капица, открывший сверхтекучесть, не был лауреатом Нобелевской премии до 1978 г.). Ландау предложил свое описание жидкого гелия при низких температурах в терминах основного состояния, в котором газ слабо возбужденных состояний, удовлетворяющих определенному дисперсионному соотношению, представляет собой смесь фононов с малыми импульсами и ротонов с большими импульсами. Непосредственное экспериментальное подтверждение их спектра было получено много позже из экспериментов по неупругому рассеянию нейтронов. Ландау удалось показать, что такая картина возбуждений приводит, по крайней мере, к частичному объяснению успеха двухжидкостной модели и, что особенно важно, дает правильную температурную зависимость плотностей сверхтекучей и нормальной компонент. Вскоре, после непосредственного экспериментального измерения этих плотностей, выполненного Андроникашвили, предсказания нашли свое подтверждение. Двухжидкостная модель также позволила сделать предсказание о существовании второго звука, обнаружение и изучение которого Пешковым явилось еще одним подтверждением теории Ландау.