

## КОНФЕРЕНЦИИ И СИМПОЗИУМЫ

## Научный симпозиум, посвященный 100-летию со дня рождения П.Л. Капицы

(Кембридж, 8 июля 1994 г.)

В рамках празднования 100-летия со дня рождения П.Л. Капицы в Кавендишской лаборатории (Кембридж) 8 июля 1994 г. состоялся научный симпозиум, посвященный вкладу Петра Леонидовича Капицы в физику и технику низких температур с акцентом на те направления, которые выросли из его пионерских работ. На симпозиуме были заслушаны следующие доклады:

1. Д. Шёнберг (Кавендишская лаборатория, Кембридж, Великобритания). *Капица в Кембридже и в Москве.*

2. А.Б. Пиппард (Кавендишская лаборатория, Кембридж, Великобритания). *Магниторезистивный эффект — наследие Капицы.*

3. Г.Г. Лонзарич (Кавендишская лаборатория, Кембридж, Великобритания). *Эксперименты в сильных магнитных полях и при высоких давлениях.*

4. В.Ф. Кастл (Британская кислородная компания, Великобритания). *Капица и криогенная технология.*

5. В.Ф. Вайнен (Бирмингемский университет, Великобритания). *Жидкий гелий-4.*

6. Г.Е. Холл (Манчестерский университет, Великобритания). *Поток и текстуры в сверхтекучем  $^3\text{He-A}$*

7. А.М. Генно (Ланкастерский университет, Великобритания). *Капица и Ланкастер.*

Краткое содержание этих докладов приводится ниже.

PACS numbers: 01.60.+q

### Капица в Кембридже и в Москве

#### Д. Шёнберг

##### 1. Кембридж<sup>1</sup>

Связь Капицы с Кембриджем возникла довольно случайно. Он пережил страшную трагедию, потеряв почти всех своих близких в эпидемию, бушевавшую в Петрограде во время гражданской войны. Он сам с трудом выкарабкался из тяжелого нефрита и был совершенно убит потерей отца, жены и детей. Долгое время он не мог

работать, но, на его счастье, произошло нечто, совершенно изменившее его жизнь. Была образована комиссия под председательством Абрама Иоффе, в чью задачу входило восстановление прерванных научных связей с Западом. Когда эта комиссия в 1921 году отправилась в длительную поездку на Запад, Иоффе сумел включить Капицу в ее состав. Иоффе хотел, чтобы Капица провел некоторое время в знаменитой Лейденской лаборатории, но голландцы, опасаясь возможной коммунистической заразы, этому воспротивились.

К счастью, Англия оказалась более гостеприимной, и в мае 1921 года Капица приехал в Кембридж. Иоффе представил его Резерфорду, который заведовал Кавендишской лабораторией Кембриджского университета, бывшей в то время своего рода Меккой для физиков со всего света. Капица спросил Резерфорда, сможет ли тот принять его в качестве аспиранта. Резерфорд довольно недружелюбно ответил, что в его лаборатории и так уже много народа. Тогда Капица задал ему несколько неожиданный вопрос: какой точности добивается Резерфорд в своих экспериментах? Резерфорд удивился, но ответил, что ошибка в три процента считается допустимой. "Ага, — сказал Капица, — у Вас примерно 30 человек, так что если Вы меня возьмете, то Вы этого даже не заметите, так как я укладываюсь в ошибку эксперимента". На Резерфорда подобные находчивость и нахальство произвели впечатление, и Капица был принят.

Хотя сначала Капица боялся Резерфорда (он даже прозвал его Крокодилом), он сумел установить с ним очень хорошие отношения. Резерфорду нравились не только оригинальность и техническое мастерство Капицы, но и то, что тот бесстрашно разговаривает с ним на равных, чего никто другой из его учеников себе не позволял. По-видимому, ему также нравилось, что Капица им открыто восхищается. Первой работой Капицы было исследование того, как энергия  $\alpha$ -частиц уменьшается к моменту их остановки, и он не только придумал оригинальный способ измерения этой энергии, но и сумел в рекордно короткий срок выполнить исследования и опубликовать результаты. Когда статья была напечатана, Капица решил слегка подшутить над Резерфордом. Дело в том, что, когда Капица начал работать в Кавендише, его разозлило предупреждение Резерфорда о том, что тот не потерпит никакой коммунистической пропаганды. Поэтому Капица написал на обложке оттиска на своем своеобразном английском: "Вручая с

<sup>1</sup> Первая часть доклада была произнесена в Колонном зале 21 июня 1994 года на торжественном собрании ученых и общественности, посвященном юбилею академика П.Л. Капицы. (Впервые на русском языке была опубликована в газете "Эврика" № 10, 1994 г. — научно-популярном приложении к "Новой ежедневной газете".)

наилучшими пожеланиями эту работу, автор надеется убедить профессора Резерфорда в следующем: что, во-первых, к моменту своей остановки  $\alpha$ -частица не обладает никакой энергией и, во-вторых, что автор приехал в Кавендишскую лабораторию для научной работы, а не для коммунистической пропаганды". Резерфорду эта дерзкая надпись не понравилась, и, рассерженный, он швырнул оттиск назад Капице. Но тот хорошо подготовился к этой встрече: он вручил тогда Резерфорду другой оттиск с уже общепринятой надписью, так что мир был скоро восстановлен.

После этого Капица придумал новый способ создания сильных магнитных полей, которыми можно было бы отклонять  $\alpha$ -частицы. Новизна метода заключалась в том, что для уменьшения джоулевых потерь в магнитной катушке поле включалось всего на долю секунды и одновременно производилось фотографирование треков в камере Вильсона. Поля в 10 Тл достигались с помощью специально сконструированной свинцовой батареи, которая разряжалась через магнитную катушку. Измерения кривизны траекторий частиц убедительно подтвердили и обобщили результаты предыдущих экспериментов. В ходе этой работы Капица осознал, что мощные импульсные магнитные поля можно было бы использовать для открытия совершенно новых областей исследования. Первым делом он занялся эффектом Зеемана. Его исследования подтвердили целесообразность использования импульсных полей, но, хотя его поля были в несколько раз сильнее использованных прежде, результаты не отличались от тех, которые можно было получить экстраполяцией из области низких полей.

Тогда Капица создал совершенно новую установку для получения еще более сильных импульсных полей. Он использовал кинетическую энергию большого генератора, часть которой разряжалась через магнитную катушку. В сотрудничестве с промышленностью Капица сконструировал генератор, специальную систему включения и особо прочную магнитную катушку. Благодаря его энтузиазму установка была создана примерно за два года и были получены поля в 35 Тл. В течение следующих лет им был выполнен ряд работ, в основном, по росту сопротивления металлов в сильных магнитных полях, а также по магнитострикции и магнитной восприимчивости. Исследование эффекта Зеемана было отложено и возобновлено уже в Москве только через 10 лет. Скоро стало ясно, что результаты становятся интереснее, если понижать температуру. Поскольку в то время в Кембридже могли охлаждать только до температуры жидкого азота, Капица занялся ожижением водорода и гелия.

В начале 30-х годов Резерфорд, на которого оригинальный стиль работы Капицы продолжал производить большое впечатление и который в ту пору был одной из самых влиятельных фигур в английской науке, убедил Королевское Общество использовать часть денег, завещанных промышленником Людвигом Мондом, для строительства специальной лаборатории для Капицы, где тот мог бы продолжать свои магнитные исследования при более низких температурах. Мондовская лаборатория, как ее называли, была с большим шумом открыта в 1933 году Стэнли Болдуином, бывшим премьер-министром и тогдашним канцлером университета. Ключ от лаборатории был сделан в форме золотого

крокодила, а вход в нее украшал барельеф крокодила, выполненный известным скульптором Эриком Гиллом. Чтобы не оставалось сомнений в том, кто крокодил, внутри здания Гилл поместил другой барельеф, уже Резерфорда.

Тут я позволю себе сделать некоторое отступление.

Когда Капицу спрашивали о смысле этого прозвища, он обычно дурачил людей. Вот что он сказал одному английскому журналисту: "В России крокодил — символ отца семейства. Кроме того, он вызывает удивление и восхищение тем, что не может оборачиваться назад. Он просто движется вперед с разинутыми челюстями, как наука, как Резерфорд". Другое, совершенно апокрифическое объяснение, популярное в Кавендише, такое: прозвище связано с крокодилом из "Питера Пэна", который проглотил будильник, чтобы предупреждать о своем приближении. Как и Резерфорда (у которого были громкий голос и тяжелая поступь), его можно было сначала услышать, а потом увидеть. Еще одно объяснение основано на популярном детском стихотворении Корнея Чуковского о крокодиле, разгуливающем по улицам Петрограда. Анна Алексеевна, однако, считает все эти объяснения надуманными: просто Капица вначале здорово боялся Резерфорда, и крокодил был самый страшный зверь, которого он мог придумать. За чаем в честь открытия лаборатории произошел забавный инцидент. Капица сидел рядом с Болдуином и что-то ему рассказывал. Когда Болдуин воскликнул что-то вроде: "Это же невероятно!" — Капица улыбнулся и ответил: "Можете мне поверить, ведь я не политик!"

Еще до открытия Мондовской лаборатории Капица вместе с Кокрофтом построил новый ожижитель водорода оригинальной конструкции. Поэтому в новой лаборатории он сосредоточил свои усилия на завершении работ по ожижению гелия. Как всегда, избегая проторенных дорог, он разработал совершенно оригинальный метод охлаждения газа с помощью адиабатического расширения, используя газ как смазку между поршнем и цилиндром. Он надеялся первым в Англии получить жидкий гелий, но его опередил Линдемманн в Оксфорде, который в 1933 году привез из Германии Мендельсона вместе с одним из миниатюрных ожижителей Саймона и триумфально объявил о первом ожижении в то самое время, когда была открыта Мондовская лаборатория. Однако машина Капицы обладала тем большим преимуществом, что жидкий гелий мог быть перелит в дьюар, так что, когда она с успехом заработала в апреле 1934 года, он мог заявить, что первым в Англии получил жидкий гелий, который можно было увидеть. (Оксфордский гелий находился же в металлическом сосуде.) Его ожижитель сделал Кембридж одним из мировых криогенных центров и, что более важно, был первым предшественником промышленной установки, сделанной Коллинзом в США. Создание промышленной установки революционизировало физику низких температур, сделав жидкий гелий легко доступным повсюду.

Новая лаборатория стала еще одной Меккой для физиков, посещающих Кембридж, и Капица демонстрировал ее особенности в присутствии ему стили. Так, рассказывая о короткоживущих сильных магнитных полях, он говорил: "Одна сотая секунды кажется очень малым отрезком времени, но оно достаточно велико, если знаешь, что с ним делать". Он также любил шутить

по поводу того, что он самый высокооплачиваемый физик в мире, так как получает профессорское жалование всего за несколько секунд работы в год. Каждый раз, когда генератор закорачивался соленоидом, около 20 процентов энергии ротора терялось, что приводило к землетрясению в миниатюре. Чтобы не мешать работе тонких регистрирующих приборов, соленоид и приборы были установлены на расстоянии 20 метров от генератора, так что сейсмическая волна достигала их, когда эксперимент уже был закончен. Капица любил объяснять, как это обстоятельство повлияло на элегантную архитектуру новой лаборатории с 20-метровым магнитным залом в центре, куда выходили комнаты исследователей. Даже когда генератор был увезен, магнитный зал продолжал осуществлять важную социологическую функцию, являясь местом неформальных встреч и уменьшая изоляцию исследователей. Другой особенностью, которую Капица любил демонстрировать (особенно нервным посетителям), была комната с оживителем с очень легкой крышей специально на случай взрыва водорода. К счастью, этого ни разу не произошло!

Казалось, все складывалось удачно, и комбинация высоких полей и низких температур в новой лаборатории, несомненно, привела бы к получению новых волнующих результатов, но пребывание Капицы в Кембридже подошло в 1934 году к внезапному концу. Совершенно неожиданно, когда он в очередной раз приехал в Россию, ему не разрешили вернуться в Англию. В конце концов ему построили в Москве Институт физических проблем, и большая часть оборудования Мондовской лаборатории была туда перевезена. История всего этого — сложная и выходит за рамки моего доклада так же, как и дальнейшая карьера Капицы в Москве. Достаточно сказать, что некоторые исследования, начатые в Мондовской лаборатории, были успешно продолжены в Москве молодыми коллегами Капицы, но сам он обратился к другим проблемам. Наиболее впечатляющими были его работы по жидкому гелию, который, как он показал, становится сверхтекучим ниже  $\lambda$ -точки. За эти работы он через много лет получил Нобелевскую премию. Его также продолжало интересовать оживление газов, и он разработал для промышленности турбинный метод оживления воздуха. Во время войны этим методом получали дешевый кислород для сталелитейной промышленности.

За 13 лет, проведенных в Кембридже, Капица благодаря своим достижениям и эксцентричности стал своего рода легендой. Его продвижение по академической лестнице было очень быстрым. В 1925 году он был избран членом Тринити-колледжа, а в 1929-м — членом Королевского Общества. Редкое достижение для иностранца, особенно для такого, который в том же году стал членом-корреспондентом советской Академии наук. В 1930 году он стал профессором Королевского Общества. Во многих отношениях Капица являл собой классический тип рассеянного профессора, который не помнит, что ему надо надеть и что вечером к обеду будут гости. Когда он был поглощен работой, от него трудно было добиться ответа на задаваемый вопрос. Он обычно отвечал: "What you say?" И если вы повторяли вопрос, он повторял свое: "What you say?" — пока вы не сдавались или пока он сам не уходил от вас. Но когда он был в настроении, он мог быть замечательным собеседником, никогда не лезшим за словом в карман,

остроумным и теплым. Он любил спорить и был прекрасным рассказчиком с огромным репертуаром историй и анекдотов. Вот что он рассказывал о теоретиках: "Два теоретика пьют, помешивая, чай, и один говорит другому: "Интересно, почему чай сладкий? Из-за сахара или из-за того, что чай помешивают?" Они долго спорят, но не находят убедительного ответа и решают обратиться к Ландау. Ландау думает и отвечает, что, пожалуй, знает ответ, но просит прийти на следующий день, так как ему кое-что надо додумать. Когда они приходят к нему на следующий день, он говорит: "Теперь все ясно. Чай сладкий из-за того, что его помешивают. Что меня сначала останавливало, так это то, что я не понимал, зачем нужно в чай класть сахар, но теперь я понял, что, если вы не положите сахар, чай не надо будет помешивать". Иногда юмор истории терялся, если вы не были знакомы с русской традицией или из-за своеобразного капицинского английского, но он сам так заразительно смеялся своим шуткам, что окружающие невольно смеялись вместе с ним, даже если они шутку не совсем поняли.

Он также был известен своей любовью к автомобилям и лихачеством. Если нервничающий пассажир обращал его внимание на высокие показания спидометра, которые, конечно, были в милях в час, Капица убеждал его, что это специальный спидометр, показывающий километры в час. Однажды он повез своего друга священника Симпсона (историка в Тринити-колледже). Когда они доехали до опасного поворота, Капица повернулся к сидящему сзади Симпсону и сказал: "Молитесь Богу, Симпсон, молитесь Богу!" Молитва, очевидно, была услышана! Вообще Капице нравилось дразнить священников. Как-то один священник, бывший гостем на обеде в Тринити-колледже, поинтересовался, что за человек с выдающейся внешностью сидит недалеко от него. Это был знаменитый астроном Эддингтон, и Капица объяснил: "Он знает о небесах гораздо больше, чем Вы".

В Кембридже Капица оставил не один след. Он был из первых, кто способствовал тому, что Кавендиш перешел из века сургуча и веревки в машинный век. Благодаря ему в Кембридже возникли физика твердого тела и физика низких температур, и значение, которое он придавал сверхчистым образцам и монокристаллам, явилось важным наследием для тех, кто пошел по его следам. И наконец, он положил начало живому неформальному семинару, Клубу Капицы, как его называли, который внес русский темперамент в более флегматичные английские научные обсуждения. В Кембридже его работы были продолжены многими поколениями исследователей в области физики твердого тела и низких температур, сначала в Мондовской лаборатории, а после 1972 года, когда Кавендишская лаборатория переехала из центра Кембриджа, в группе физики низких температур в Кавендише.

## II. Московский период

Кембриджский период жизни Капицы закончился летом 1934 г. во время его визита в Советский Союз с целью провести мать и принять участие в научной конференции, когда ему неожиданно запретили ехать обратно в Кембридж. Причины задержания, как и его переговоры с советским руководством были весьма сложны. Одной из них, возможно, было то, что иногда он говорил о своих

успехах в Англии слишком горячо, и казалось, что его работа могла бы привести к большому техническому прогрессу, получи он нужную финансовую поддержку. Власти, возможно сам Сталин, поймали его на слове и заставили в дальнейшем работать на них, хотя фактически ничто из того, что он сделал, не было засекречено: все было доступно любому. Некоторое время он был вне себя, заявляя, что оставит физику и займется биологией, если ему не дадут уехать. Однако в те времена было опасно противиться решениям сверху, и в конце концов Капица согласился стать директором нового престижного Института физических проблем, в который переправили большую часть его кембриджского оборудования.

Институт был готов к работе к концу 1936 г. Хотя он и был весьма невелик по сравнению с типичными громадными советскими институтами, под эффективным научным руководством Капицы вскоре приобрел международную репутацию. У института имелись привлекательные жилые помещения для сотрудников. Весьма фешенебельный особняк директора института в обиходе, как ни странно, назывался коттеджем — слово, которое русские считают приемлемым переводом на английский того, что англичане просто называют удаленным домом. Директору удалось сэкономить немало красной ткани для лозунгов и избежать кропотливых процедур планирования, обычных для любого советского института; он гордился своей фразой о том, что общепринятое детальное планирование схоже с выписыванием рецепта больному от той болезни, которой он заболел через несколько лет.

Институт быстро доказал свою полезность, и уже через год или около этого Капице, благодаря открытию сверхтекучести в жидком гелии, удалось поставить исследования в институте на новую базу. За это открытие, как и за другой вклад в низкотемпературную физику, в конце концов, 40 лет спустя он был удостоен Нобелевской премии. Сам он не продолжил свои кембриджские исследования по магнетизму и металлам, но его младшие сотрудники в Москве взялись за них с рвением, и их работа также привела к росту репутации института. Другим направлением, которым Капица сам очень успешно занимался и которое имело более техническое содержание, была разработка нового, более эффективного метода охлаждения воздуха для производства дешевого кислорода, необходимого промышленности, в частности сталелитейной.

Во время войны производство кислорода стало его главным полем деятельности. Эта работа была отмечена многими орденами и грамотами в середине 40-х годов. Но беда была не за горами! В то время за сложные технические разработки, в том числе и за работу Капицы над производством кислорода и спешную разработку атомной бомбы, отвечал Берия, глава КГБ. Капица был членом специальной комиссии по атомной бомбе и считал, что стиль руководства Берии этим проектом в крайней степени безобразен и неприемлем. В конце концов он пожаловался Сталину, что "...Берия ведет себя как дирижер, у которого в руках палочка, но который не понимает партитуры", и подал в отставку из комитета. Берия был в ярости и стал мстить Капице, тормозя работу с кислородом. Без сомнения, внедряя свои новые методы, Капица успел насолить многим, и для Берии не представило труда собрать ту роковую

комиссию из оппонентов Капицы, которая постановила, что вся его работа бесполезна.

Удивительно, что Берии не удалось просто уничтожить Капицу. Очевидно, Сталин, обожавший играть в кошки-мышки, сказал Берии, что он может снять Капицу с работы, но не может "трогать". Еще с времен, когда Капице был запрещен выезд, он писал многочисленные письма Сталину, в которых резко критиковал то, как ведется надзор над делами науки и образования, и еще более резко выступал в защиту незаконно репрессированных ученых во времена чисток. Наиболее известно его вмешательство в судьбу Ландау, "домашнего" теоретика Капицы, которого он ухитрился вырвать из когтей Берии после того, как Ландау провел год в тюрьме. Вероятно, Сталину, равно как и Резерфорду, нравилась дерзость и смелость Капицы, и он держал его в качестве "королевского шута". Из всего множества писем Капицы Сталин ответил только на два, но есть свидетельство, что ему нравилось получать эти письма и, вероятно, он развлекался, используя критику Капицы, чтобы дразнить Берию.

Летом 1946 г. разразилась буря. Капица был снят не только с работы по производству кислорода, но и с поста директора института. Как академик, он продолжал получать жалование, и ему позволили спокойно жить на своей даче на Николиной Горе. Сперва он был полностью выбит из колеи этой новой катастрофой, но вскоре пришел в себя. Однажды, еще будучи в опале, он написал Сталину, перефразируя цитату Толстого, что "не тот ученый, который занимается наукой, а тот, который не может не заниматься ею". С помощью своих сыновей-подростков (которые теперь сами выдающиеся ученые, и мы рады их видеть сегодня здесь) он построил небольшую мастерскую и лабораторию на задворках дачи. Не было никакой неожиданности в том, что вскоре ее стали называть "Избой физических проблем". И здесь ему удалось добиться успеха в новом направлении деятельности — в разработке новых методов получения микроволн высокой мощности. Новая установка была названа "ниготроном" (от названия Николина Гора). Ему удалось убедить правительство, что эта работа имеет огромное военное значение — представить что-то вроде сценария звездных войн, и постепенно он стал получать все большую техническую поддержку.

После смерти Сталина, падения и казни Берии Капица был восстановлен в штате старого института и быстро расширил его, чтобы использовать свой "ниготрон" в новом качестве. У него была идея применять микроволны высокой мощности для нагрева плазмы до температур, при которых возможен ядерный синтез. Работой над этим проектом он занимался до конца своей долгой жизни. Хотя он продолжал верить, что должен существовать экономичный метод достижения управляемого ядерного синтеза — дешевого источника энергии будущего, ему не по силам было сражаться с теми, кто разрабатывал и разрабатывает до сих пор менее смелые схемы, в которых задействованы гигантские машины и батальон ученых. Работа Капицы явилась большим вкладом в физику плазмы, но, по мнению специалистов, Чашей Грааля, дающей дешевый источник энергии, вряд ли станет ядерный синтез. Однако и батальону ученых еще не досталась эта Чаша, хотя, возможно, они и близки к тому, чтобы ее отыскать.

По случаю столетия со дня рождения Капицы мы с благодарностью чествуем его память.

Перевод части II доклада — *А.В. Субботин*  
Консультирование по переводу — *П.Е. Рубинин*

PACS numbers: 72.15.G

## Магниторезистивный эффект — наследие Капицы

А.Б. Пиппард

Исследования Капицы магниторезистивного эффекта в металлах опубликованы в двух больших статьях, вышедших по завершению его работы с сильными магнитными полями. В них была поставлена задача, почти не исследованная ранее в силу того, что ни у кого не было условий, обеспечивающих и генерацию сильных магнитных полей, и поддержание низких температур. На самом деле и работа Капицы была серьезно осложнена тем, что у него не было возможности охладить образцы ниже температуры жидкого воздуха, так что из всех имеющихся металлов лишь у висмута наблюдался большой эффект — увеличение сопротивления примерно в 50 раз при 300 кГц (30 Тл). Это было в 1928 г., за два года до открытия осцилляций Шубникова–де Гааза, которые Капица вряд ли мог наблюдать в силу их слабости при температурах порядка температуры жидкого воздуха.

Наблюдаемое изменение сопротивления в висмуте, по мнению Капицы, вначале вело себя как  $H^2$ , а затем, с увеличением поля  $H$ , переходило в линейный рост. Все последующие интерпретации этого эффекта на других металлах были инициированы этим открытием, так что линейную форму зависимости стали называть законом Капицы. Он не выдержал испытания временем, но есть много примеров линейного магниторезистивного эффекта, которые дают основание сделать его центральным предметом настоящего обсуждения.

Сначала мы спросим себя, не обманывался ли Капица относительно поведения висмута. Очевидно, что опубликованные им кривые вполне убедительны, и для окончательной проверки достаточно лишь нескольких измерений. Теоретически, скорее всего следовало бы ожидать квадратичного роста сопротивления с ростом поля  $H$ , однако эта догадка не подтверждается. При температурах порядка температуры жидкого водорода Герритсен и др. обнаружили нелинейное поведение, определенно менее сильное, чем квадратичное, хотя один из образцов при 14 К хорошо соответствовал закону Капицы. Позднее, работая с температурами порядка температуры жидкого гелия, Алерс и Уэббер наблюдали наложение осцилляций Шубникова–де Гааза на близкое к линейному изменение сопротивления. Поэтому, хотя и не существует адекватного объяснения такого поведения, нет поводов усомниться в результатах Капицы.

Говоря о других материалах, мы видим, что Капица измерял магниторезистивный эффект в поперечном поле на поликристаллических проволоках всех металлов, которые он смог найти и достать. При температурах жидкого воздуха эффект был слаб, например 45 %-ный рост сопротивления при 300 кГц для меди в жидком азоте.

Нужно помнить, что в силу наличия в модели свободных электронов металл не должен изменять сопротивление в магнитном поле, и что эффект в меди есть следствие контактов поверхности Ферми с зонной границей (эта мысль не могла быть принята во внимание Капицей, работавшим во времена, когда квантовая теория Блоха об электронах в металлах была еще молода и оценена очень немногими). Интересно, что квадратичная зависимость в меди уступает место линейной, когда  $\omega_c\tau$  все еще лишь около  $1/3$ , и поле порядка 100 кГц способно продвинуть электроны между столкновениями примерно на  $1/20$  расстояния по поверхности Ферми. Для объяснения достаточно предположить, что по крайней мере в некоторых областях поверхности Ферми существуют довольно резкие изменения направления; действительно, электроны, проходящие через шейку поверхности Ферми, резко изменяют направления, что и может рассматриваться как выражение магниторезистивного эффекта. Поверхности Ферми очень многих металлов имеют достаточно острые участки, так что неудивительно, что в слабых полях квадратичное поведение теряется, а значение  $\omega_c\tau$  все еще мало.

Можно лишь удивляться, сколь точно Капице удалось подогнать эксперимент под свою (квадратичный + линейный закон) модель. В какой-то степени это можно объяснить весьма ограниченным диапазоном изменения сопротивления — и можно лишь благодарить Капицу за то, что ему удалось получить надежные результаты, используя импульсное поле, способное легко исказить картину, индуцируя перепады напряжений на контактах. Однако более поздние исследования, при работе с более низкими температурами, и, следовательно, с гораздо большими  $\omega_c\tau$ , обычно не подтверждали его интерпретации. Поведение в сильных полях прекрасно согласуется с теорией Лифшица и др.: удельное сопротивление либо должно расти квадратично, либо выходить на насыщение. Условия каждого варианта поведения, вообще говоря, достаточно сложны, и мы не будем их рассматривать. Нам сейчас интересен тот факт, что в этой теории нет места линейному изменению удельного сопротивления, которое обычно наблюдается. Отметим несколько случаев:

1) **А л ю м и н и й**. Удельное сопротивление проявляет явно выраженную тенденцию к переходу в насыщение, однако при сильных полях остается небольшой дрейф вверх, более заметный при 20 К, чем при 4 К.

2) **М е д ь** (и, возможно, золото). В поликристаллических проволоках после области квадратичной зависимости устанавливается режим, в котором удельное сопротивление почти пропорционально напряженности поля.

3) **К а л и й**. На первый взгляд, в этом почти идеальном металле, имеющем почти сферическую поверхность Ферми, не должен проявляться магниторезистивный эффект. На самом деле, в нем наблюдается линейный рост, невозпроизводимый при переходе от одного образца к другому. Последние измерения с помощью более изощренных методов окончательно запутали дело.

Обсудим вкратце эти три случая (в [1] можно найти более детальное обсуждение). С самого начала стоит отметить главное: электрический ток более эффективно отклоняется газовыми включениями и другими объемными дефектами в сильных полях, что может приводить к линейному росту сопротивления, однако маловероятно, что в большинстве образцов количество полос-