

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

536.48

СОВЕЩАНИЯ И КОНФЕРЕНЦИИ**X МЕЖДУНАРОДНАЯ КОНФЕРЕНЦИЯ ПО ФИЗИКЕ
НИЗКИХ ТЕМПЕРАТУР****✠ (Москва, 31 августа—6 сентября 1966 г.)**

X Международная конференция по физике низких температур проходила в Москве с 31 августа по 6 сентября 1966 г. В работе Конференции приняли участие около 1000 ученых из 27 стран, в том числе из СССР более 500 человек, США — 167, Англии — 94, Франции — 39, из Японии — 18, из ГДР — 17, из ФРГ — 17, из Италии — 16, из Нидерландов — 15, из Венгрии — 6.

Конференцию открыл академик П. Л. Капица (СССР). Он отметил продолжающееся расширение исследований в области физики низких температур; об этом свидетельствует, например, рост числа участников низкотемпературных конференций. П. Л. Капица сказал также, что физика низких температур вступила в период зрелости, она уже работает не только на себя, но и дает выход в технику. После вступительной речи состоялась церемония вручения премии имени Ф. Лондона известному голландскому ученому, директору Лейденской лаборатории К. Дж. Гортеру за пионерские работы в области парамагнитной релаксации в твердых телах при низких температурах.

На конференции было представлено около 450 докладов, одно их перечисление заняло бы больше места, чем отведено для данного отчета, поэтому мы остановимся лишь на некоторых из них. В основном работа конференции проходила в секциях. Всего было четыре секции: Свойства гелия, Сверхпроводимость, Электронные свойства металлов, Антиферромагнетизм. В изложении мы будем придерживаться этого деления.

За последние несколько лет достигнут большой прогресс в понимании явлений, которые сопровождают перенос зарядов в сверхтекучем гелии. Обзор работ по этому вопросу был сделан Ф. Рейфом (США). В настоящее время картина движения зарядов в гелии представляется такой. Положительные ионы притягивают к себе окружающие их атомы гелия и образуют твердое ядрышко радиусом около $6,5 \text{ \AA}$. Электроны, наоборот, расталкивают нейтральные атомы гелия и образуют вокруг себя полость радиусом примерно в 12 \AA . Эти образования могут двигаться под действием внешнего электрического поля. При достижении некоторой критической скорости пузырек или ядрышко рождает в гелии квантованный вихрь и связывается с ним. На то, что движущиеся заряды связаны с вихрями, указывает полученная экспериментально зависимость энергии заряда E от его скорости v : $E \sim \frac{1}{v}$. Такая зависимость характерна для вихревых колец в сверхтекучем гелии. Докладчик указал также на ряд относящихся сюда вопросов, которые остаются невыясненными. Это, прежде всего, вопрос о структуре ствола вихря. Отсутствуют также аккуратные вычисления критических скоростей и сечений рассеяния элементарных возбуждений в гелии вихрями. Некоторые из этих проблем обсуждались на конференции.

Представляет интерес также изучение движения зарядов в твердом гелии. В работе Э. Иффта (США), Л. П. Межова-Деглина и А. И. Шальникова (СССР) была определена зависимость величины тока через твердый гелий-3 и -4 от температуры при различных давлениях. Заряды в гелии создавались β -источником, помещенным на одном конце образца. Полученные кривые в некоторой области температур обнаруживают экспоненциальную зависимость тока от обратной температуры. Вблизи точки затвердевания наблюдается отклонение от этой зависимости. В настоящее время нет ясного понимания механизма движения зарядов в твердом гелии.

Явления, связанные с распространением звука в жидком гелии по-прежнему привлекают внимание исследователей. В докладе И. М. Халатникова и Д. М. Черниковой (СССР) «Релаксационные явления и дисперсия звука

в сверхтекучем гелии» был рассмотрен вопрос о распространении звука произвольной частоты в жидком гелии. Когда частота звука настолько мала, что в газе возбуждений успевает устанавливаться равновесие, скорость и затухание звука можно вычислить с помощью уравнений гидродинамики. Более интересна та область частот, где период колебаний в звуковой волне сравнивается с временами, характеризующими установление равновесия. В этом случае для вычисления скорости и затухания звука нужно решать кинетическое уравнение. Благоприятная ситуация с установлением равновесия по энергиям в газе возбуждений позволила решить задачу по существу точно. Вычисленные дисперсионные кривые для первого и второго звука хорошо согласуются с имеющимися экспериментальными данными. Две экспериментальные работы по определению скорости и затухания звука в гелии были доложены на конференции. В. М. Уитли и К. Е. Чейз (США) провели измерения этих величин при частотах 1,00, 3,94 и 11,9 *Мгц* в температурной области от 0,15 до 1,8 °К. Был обнаружен максимум величины скорости вблизи 0,7 °К и максимум на кривой поглощения около 0,9 °К. В. М. Абрагам, Я. Экштейн, Дж. Б. Кеттерсон и Дж. Вигнос (США) измерили затухание звука при температурах от 0,125 до 2,00 градусов в диапазоне частот от 12 до 150 *Мгц*. Полученные в обеих работах кривые хорошо согласуются с вычислениями И. М. Халатникова и Д. М. Черниковой.

Большой интерес вызвал доклад В. Р. Абеля, А. К. Андерсона и Дж. К. Уитли (США) о распространении нулевого звука в жидком He^3 . Эта группа измерила скорость и затухание звука в He^3 при температурах вплоть до двух миллиградусов. При этом наблюдался переход от обычного звука к нулевому. (Подробнее об этом см. в настоящем номере журнала, стр. 311.)

Группа американских ученых К. К. Акерман, Б. Бертман, Г. А. Фейербенк и Р. А. Гайер) сообщила о наблюдении второго звука в твердом гелии-4. До сих пор второй звук наблюдали лишь в жидком гелии, хотя на возможность его распространения в твердых диэлектриках Уорд и Уилкс указывали в 1951 г. Чтобы второй звук мог распространяться, его частота ω должна удовлетворять условиям $\tau_U^{-1} < \omega < \tau_N^{-1}$, где τ_U — время между соударениями фононов, сопровождающимися потерей импульса, а τ_N — соответствующее время для соударений без потери импульса. Эти условия, как следует из измерений Л. П. Межова-Деглина, могут быть выполнены в твердом гелии. Для наблюдения второго звука через кристалл твердого гелия-4 пропускался тепловой импульс и измерялась скорость его прохождения. Было замечено отражение импульса от границ образца, что указывает на его звуковой характер. Измеренная скорость второго звука (~ 160 м/сек) согласуется по порядку величины с теоретическими оценками.

Недавно Д. О. Эдвардс (США) обнаружил, что раствор He^3 в He^4 с концентрацией меньше 6% может существовать не расслаиваясь, вплоть до абсолютного нуля температур. Такой раствор является очень интересным объектом исследования. Растворенный He^3 представляет собой почти идеальный ферми-газ, причем величину фермиевской энергии этого газа можно легко менять, изменяя концентрацию раствора. Дж. К. Уитли рассказал о работе, выполненной им совместно с А. Андерсоном В. Р. Роучем, Р. Е. Сарвинским и Д. О. Эдвардсом (все США), в которой были измерены теплоемкость, магнитная восприимчивость и коэффициент самодиффузии растворов He^3 в He^4 с концентрацией 1,3% и 5% вплоть до температур в несколько миллиградусов. Полученные кривые хорошо следуют зависимостям, которые теория предсказывает для слабонеидеального ферми-газа. Из этих измерений можно оценить степень неидеальности такого газа. Это было сделано Дж. Бардином, Г. Беймом и Д. Пайнсом (США). Для описания взаимодействия между атомами He^3 в растворе они ввели некий модельный потенциал с двумя произвольными постоянными. Эти постоянные были определены из измеренных значений коэффициента самодиффузии при двух концентрациях (1,3 и 5%). С полученным таким образом потенциалом взаимодействия были вычислены величины эффективных масс He^3 в растворах тех же концентраций. Они с хорошей точностью совпали с экспериментально найденными значениями. Взаимодействие, описываемое предложенным потенциалом, является слабым притяжением, поэтому при достаточно низких температурах ($\sim 10^{-6}$ °К) в растворенном He^3 должно произойти куперовское спаривание.

Растворы He^3 в He^4 представляют интерес и с точки зрения их технического использования. В докладе Н. С. Борисова, Н. И. Квиткова, М. Ю. Либурга и Б. С. Неганова (СССР) было сообщено о работе установки для получения сверхнизких температур, использующей эффект поглощения тепла при растворении He^3 в He^4 . Установка работает в стационарном режиме и может поддерживать температуру 0,1 °К при теплоотводе 1300 *эрг/сек*. Наиболее низкая температура, полученная на этой установке равна 0,025 °К. В. П. Пешков (СССР) произвел термодинамический анализ работы холодильной машины, действующей по такому принципу, и показал, что на ней можно достигать температур порядка тысячных долей градуса при теплоотводе 5 *эрг/мин*.

Новым явлениям во вращающемся гелии был посвящен доклад Э. Л. Андро-никаши (СССР). Автор остановился подробно на результатах работ, выпол-

ненных им совместно с Д. Цакадзе и Л. Замтарадзе. В этих работах было обнаружено уплотнение вращающегося гелия при переходе в сверхтекучее состояние. Для объяснения этого явления авторы высказали предположение о том, что в λ -точке во вращающемся гелии фазовому переходу II рода сопутствует и фазовый переход I рода, связанный с образованием или исчезновением вихрей.

Секция «Сверхпроводимость» по числу докладов была самой большой на конференции. В последние годы значительное внимание уделялось изучению сверхпроводников II рода. Характерной их особенностью является наличие двух критических значений магнитного поля H_{c1} и H_{c2} . При поле H_{c2} происходит полное разрушение сверхпроводимости. Поле H_{c2} для некоторых сверхпроводников II рода достигает сотен килоэрстед, что позволяет делать из них сверхпроводящие магниты. Поле H_{c1} обычно гораздо меньше (~ 1000 э); при этом поле начинается проникновение магнитного поля в сверхпроводник в виде нитей квантованного магнитного потока — флюксонов. Об изучении движения этих нитей под влиянием электрического поля было сделано два обзорных доклада. Дж. Бардин (США) рассказал о состоянии теории явления. Он остановился подробно на теории движения нитей, предложенной им совместно с М. Дж. Стефеном (США). Теория основана на локальной модели; она объясняет некоторые экспериментальные результаты, но не является вполне удовлетворительной. И. Б. Ким (США) говорил в основном о результатах экспериментов по изучению процессов диссипации энергии при движении флюксонов и об интерпретации этих результатов.

И. Гизвер (США) сообщил об экспериментах, в которых непосредственно показано, что движение флюксонов в сверхпроводнике II рода приводит к возникновению в нем разности потенциалов. Сделано это было следующим образом. Был приготовлен «сэндвич» из двух оловянных пленок (толщиной $500 \div 1000$ Å), разделенных изолирующей прослойкой (толщиной $100 \div 200$ Å). Этот сэндвич охлаждался настолько, чтобы олово стало сверхпроводящим, и помещался в магнитное поле, перпендикулярное к границам раздела. По одной из пленок пропускали ток, при этом на другой пленке возникала разность потенциалов. Объясняется это тем, что флюксоны в обеих пленках составляют продолжение друг друга. Электрический ток заставляет двигаться флюксоны в одной из пленок, одновременно приходят в движение связанные с ними флюксоны в другой пленке, а это приводит к появлению на ней разности потенциалов. Такая система работает как трансформатор постоянного тока.

Для исследования движения флюксонов и для решения некоторых других динамических задач сверхпроводимости полезно иметь уравнения, аналогичные уравнениям Гинзбурга — Ландау, но описывающие зависимость параметра упорядочения от времени. В работе М. П. Кемоклидзе и Л. П. Пятаевского (СССР) такие уравнения получены как для нулевой температуры, так и для отличных от нуля температур. Они проводили рассмотрение, предполагая, что $qv_F \ll \Delta(T)$; здесь q — волновой вектор поля, v_F — фермиевская скорость электронов, а $\Delta(T)$ — величина щели. Е. Абрахамс и Т. Иунето (США) получили аналогичные уравнения для случая, когда выполнено противоположное неравенство.

Очень интересный обзорный доклад о новых сверхпроводящих материалах был сделан Б. Т. Маттисом (США). Он рассказал о таких материалах, открытие которых внесло нечто новое в понимание явления сверхпроводимости. Интересным было, в частности, исследование сверхпроводящих свойств соединений углерода со щелочными металлами (общая формула C_8M , $C_{16}M$ или $C_{24}M$, где M — K, Rb, Cs¹). В таких соединениях слои металла разделены слоями графита. Оказалось, что соединения, в которых на один атом металла приходится более восьми атомов углерода, не становятся сверхпроводящими. Ранее было показано, что при таком содержании углерода исчезают корреляции между металлическими слоями, т. е. система перестает быть трехмерной. Сопоставление этих фактов наводит на мысль, что сверхпроводимость возможна лишь в трехмерных системах. Н. Е. Алексеевский (СССР) рассказал об изучении изотопического эффекта на свежеосажденных пленках изотопов олова 112 и 124. Из результатов, полученных докладчиком, следует, что для таких пленок показатель степени α при массе ($T_c M^\alpha = \text{const}$) имеет то же значение, что и для массивного металла, и не зависит от толщины пленки.

Исследование туннельного эффекта Джозефсона является сейчас важным направлением в физике сверхпроводников. Обзор экспериментальных работ по этому вопросу был сделан Б. И. Гейлором (США). И. М. Дмитрички и И. К. Янсон (СССР) рассказали о работе, в которой они исследовали характеристики спектра джозефсоновского электромагнитного излучения. Оказалось, что они зависят от многих факторов, в частности, от положения рабочей точки на ступеньке вольт-амперной характеристики, от постоянного магнитного поля, от температуры, от величин сопротивлений в измерительных цепях и от качества туннельного перехода. В большинстве случаев наблюдаемое излучение было нестабильно по частоте.

Одно из заседаний на секции сверхпроводимости было посвящено обсуждению свойств промежуточного состояния сверхпроводников I рода. Такие сверхпроводники

в некотором интервале значений приложенного магнитного поля расслаиваются на области нормальной и сверхпроводящей фазы. Это состояние и называется промежуточным.

Ю. В. Шарвину (СССР) удалось наблюдать движение слоев нормальной фазы под действием электрического тока, предсказанное К. Гортером в 1957 г. Сделано это было с помощью микроконтактов, подведенных к поверхности оловянного образца. Сопротивление микроконтакта изменялось при переходе материала образца в районе контакта из сверхпроводящего в нормальное состояние. Движение слоев проявлялось в том, что сопротивление контакта осциллировало в зависимости от времени.

Ф. Хесслер и Л. Риндере показали кинофильм, в котором заснят процесс установления промежуточного состояния в индии и олове. Чтобы сделать видимыми сверхпроводящие и нормальные области, была использована порошковая методика. Магнитное поле проникает в образцы в виде макроскопических трубок магнитного потока. Эти трубки возникают на границах образца и движутся к центру. Траектории движения трубок зависят от скорости изменения поля и чистоты образца.

А. Ф. Андреев (СССР) вывел уравнения электродинамики промежуточного состояния. Он произвел усреднение уравнений Максвелла по областям, большим по сравнению с размерами областей различных фаз. С помощью этих уравнений докладчик нашел связь тока с электрическим полем в плоскопараллельной пластинке, находящейся во внешнем поле, перпендикулярном к ее поверхности. Следствием полученных уравнений является возможность распространения в достаточно чистом сверхпроводнике, находящемся в промежуточном состоянии, слабо затухающих электромагнитных волн. Эти волны аналогичны геликонам нормального металла.

Обсуждение вопросов, связанных с одномерной сверхпроводимостью, было одним из центральных на секции сверхпроводимости. На возможность существования сверхпроводимости в длинных полимерных молекулах, которые можно рассматривать как одномерные системы, указал около двух лет назад американский ученый В. А. Литтл.

Л. П. Горьков в рассказе о работе, выполненной им совместно с Ю. А. Бычковым и И. Е. Дзялошинским (СССР), в которой показано, что сверхпроводимость в одномерных системах возможна, однако характер возникающего при переходе состояния сложнее, чем в обычных сверхпроводниках. Если в обычных сверхпроводниках элементарными образованиями являются пары электронов, то в одномерных системах это четверки — два электрона и две дырки. В. А. Литтл рассмотрел в своем докладе влияние флуктуаций на сверхпроводящий ток в одномерной системе. Он показал, что хотя сопротивление одномерного сверхпроводника из-за флуктуаций не может стать точно нулем, его величина очень быстро убывает, когда температура системы становится ниже критической, т. е. такая система будет практически сверхпроводящей. Доклад Р. А. Феррелла (США) содержал возражения против возможности существования одномерной сверхпроводимости. Их суть сводилась к тому, что в одномерном случае законы сохранения энергии и импульса допускают распад фермиевского возбуждения на частицу и пару. Это должно привести к размытию границы Ферми и к невозможности куперовского спаривания.

К. Г. Купер (Израиль) тоже считает, что одномерная сверхпроводимость не должна существовать. В своем докладе он показал, что в одномерной системе не происходит существенного экранирования кулоновского отталкивания электронов, а силы притяжения, предложенные В. А. Литтлом, недостаточно велики, чтобы скомпенсировать неэкранированное отталкивание.

Развернувшаяся дискуссия между сторонниками и противниками одномерной сверхпроводимости не привела к установлению единого мнения.

Большой интерес вызвал доклад Н. Ф. Берка и Дж. Р. Шриффера (США) о влиянии ферромагнитного обменного взаимодействия на сверхпроводимость. Было замечено, что в конце рядов переходных металлов, образующих группы палладия и платины, наблюдается резкое понижение температуры перехода в сверхпроводящее состояние по мере роста плотности валентных электронов. Одновременно растет отношение статической магнитной восприимчивости к коэффициенту в линейном законе теплоемкости. Авторы доклада показали, что такие зависимости можно объяснить влиянием ферромагнитного обменного взаимодействия. Это взаимодействие способствует параллельной ориентации спинов, что, с одной стороны увеличивает магнитную восприимчивость металла, а с другой, — затрудняет образование куперовских пар. В палладии, например, это взаимодействие настолько сильно, что сверхпроводимость полностью подавляется.

На секции «Электронные свойства металлов» было представлено около 90 докладов. По-прежнему довольно большое внимание уделялось одному из самых старых методов изучения электронного спектра — исследованию гальваномагнитных свойств металлов. Ему было посвящено свыше 10% докладов. Сравнительно новым эффектом в этой области является влияние магнитного пробоя на свойства металлов в сильных магнитных полях, в последнее время привлекающее внимание как теоретиков, так и экспериментаторов. В связи с этим значительный интерес вызвала работа Фалд-

кова, Нипарда и Сиверта (США), посвященная теоретическому расчету гальваномагнитных свойств Mg и Zn — металлов, в которых может возникнуть магнитный пробой. Как известно, поперечное магнетосопротивление ρ_{\perp} монокристаллов в сильных полях либо насыщается, стремясь к постоянной величине ($\rho_{\perp} \rightarrow \text{const}$), либо квадратично возрастает с увеличением поля ($\rho_{\perp} \sim H^2$). Эти особенности поведения ρ_{\perp} определяются топологическими свойствами изоэнергетических поверхностей. Поперечное сопротивление стремится к насыщению в случае замкнутых орбит и растет $\sim H^2$ для открытых орбит, т. е. электронных орбит, простирающихся через всю решетку. Если учесть квантование площади орбит в магнитном поле (уровни Ландау), то появляются дополнительные слабые осцилляции сопротивления (эффект Шубникова — де-Гааза), периодические в обратном поле $1/H$. Поведение сопротивления двухвалентных гексагональных металлов Mg и Zn отличается рядом особенностей. По мере увеличения магнитного поля, параллельного гексагональной оси, сопротивление сначала квадратично возрастает, достигает максимума, а затем уменьшается и стремится к постоянному значению в сильных полях. На это плавное изменение сопротивления наложены очень сильные осцилляции, периодические в обратном поле. В работе Фаликова и др. построена теория, количественно описывающая эти экспериментальные факты. В основу теории положено явление магнитного пробоия, при котором электрон вместо движения по орбите, определяемой брэгговскими отражениями, может двигаться по орбите свободного электрона в магнитном поле, т. е. в сильном магнитном поле вероятность перехода между различными частями ферми-поверхности отлична от нуля. Кроме того, эта вероятность перехода между большим куском ферми-поверхности (так называемым «уродцем» в Mg и Zn) и малой частью («сигары» в Mg и «иглы» в Zn) может быть промодулирована квантованием Ландау для малой части изоэнергетической поверхности. Эти идеи объясняют как изменение плавного хода сопротивления переходом от открытых орбит к замкнутым, так и большую амплитуду квантовых осцилляций, влияющих на вероятность магнитного пробоия. За исключением второстепенных деталей, между развитой теорией и экспериментом было достигнуто хорошее согласие.

Оживленную дискуссию вызвала методически интересная работа А. Г. Незеркота и Р. Дж. Гутфелда (США) «Тепловые импульсы в металлических кристаллах при низких температурах». Авторы применили ранее развитую методику тепловых импульсов в диэлектриках к исследованию скоростей и длин свободного пробега носителей тепла в металлах. Измерения проводились на монокристаллах очень чистого галлия при гелиевых температурах ($1,8 \div 4^{\circ} \text{K}$), когда электроны имели пробег 1 см. В качестве источника тепла использовался гигантский импульс рубинового лазера, поглощаемый поверхностью металла. Детектором служил сверхпроводящий болометр. В условиях большой длины свободного пробега носителей тепла верхний предел их скоростей может быть определен из измерений промежутка времени, через который тепловой импульс достигает детектора. Хотя в галлии не удалось пока получить столь большой длины свободного пробега, чтобы непосредственно измерить фермиевскую скорость электронов, однако, исходя из формы принимаемого импульса, были получены интересные сведения о коэффициенте теплопроводности и тепловой длине свободного пробега электронов.

Значительное внимание на конференции уделялось высокочастотным методам изучения энергетического спектра металлов. Ряд докладов был посвящен циклотронному резонансу Азбея — Капера.

Лангенберг и С. Ии (США) рассказали о результатах экспериментов по изучению циклотронного резонанса в мышьяке, В. П. Набережных и В. Л. Мельник (СССР) — в кадмии. Проведенное Р. Т. Мина (СССР) исследование циклотронного резонанса и эффекта его отсекания в монокристаллах индия позволило автору найти фермиевские скорости носителей тока и оценить величину фурье-компонент эффективного потенциала решетки индия. Если в первых работах Азбея и Капера одним из условий наблюдения циклотронного резонанса в металлах была строгая параллельность постоянного магнитного поля поверхности металла, для того чтобы электроны смогли большое число раз вернуться в скин-слой, то теперь усилия теоретиков были направлены на рассмотрение эффектов, возникающих при наклоне магнитного поля. Этому были посвящены доклад М. Я. Азбея, Л. Б. Давыдовой и В. Г. Пещанского (СССР), работа Блумфильда (США) «Теория радиочастотного размерного эффекта и циклотронного резонанса в наклонном магнитном поле», а также сообщение Э. А. Капера и А. Я. Бланка (СССР). Экспериментально наблюдаемое в некоторых случаях расщепление линий циклотронного резонанса по мере наклона магнитного поля, а затем удвоение числа резонансов и их инверсия находят свое объяснение в возникновении листов тока в глубине металла и их взаимодействии с дрейфующими электронами. Можно заключить, что аномальное проницание электромагнитных волн в металлы приводит к тому, что циклотронный резонанс должен иметь место не только в параллельном поле, а при любых углах наклона относительно поверхности образца.

Сравнительно новым методом изучения поверхностей Ферми в металлах является радиочастотный размерный эффект (Р.Р.Э.). На конференции было представлено пять докладов, посвященных теоретическому и экспериментальному исследованию этого эффекта. Размерный эффект, дающий возможность по особенностям поверхностного импеданса регистрировать величину магнитного поля, когда размер орбиты электрона равен толщине образца, предъявляет высокие требования к качеству используемых монокристаллов. Однако простота интерпретации данных, из которых непосредственно получаются геометрические характеристики — экстремальные размеры — поверхности Ферми, делает этот эффект весьма удобным инструментом при исследовании энергетического спектра электронов в металле. В настоящее время методом Р. Р. Э. исследован уже целый ряд металлов (Sn, In, Ga, Bi). В докладе В. П. Набережных и А. А. Марьяхина (СССР) было сообщено об экспериментах на Cd, а в докладе Дж. Ф. Коха и Т. К. Вагнера (США) — об исследовании Р. Р. Э. в К. Для интерпретации данных по Р. Р. Э. очень важен вопрос о форме линии и о выборе величины поля отсчета в пределах ширины линии. Как было показано в докладе В. Ф. Гантмахера и И. П. Крылова (СССР), в теоретическом расчете формы линии размерного эффекта Э. А. Канера и В. Л. Фалько (СССР), а также в уже упомянутом докладе Коха и Вагнера форма и ширина линии непосредственно связаны со структурой распределения электромагнитного поля в металле и глубиной скин-слоя. Началу линии в слабых полях соответствует момент, когда экстремальная траектория электрона точно касается обеих поверхностей пластины. Выяснение этого обстоятельства, помимо возможности получения сведений о структуре поля в скин-слое при аномальном скин-эффекте, позволяет увеличить точность измерений экстремальных размеров ферми-поверхности.

В интересном докладе М. С. Хайкина (СССР) «Осцилляторная зависимость поверхностного сопротивления металла от слабого магнитного поля» рассмотрены физические причины немонотонного поведения импеданса на СВЧ в очень слабом поле. Это явление, обнаруженное Хайкиным несколько лет назад, до сей поры не имело удовлетворительного объяснения. В своей работе М. С. Хайкин предлагает объяснение осцилляций на основе учета вклада в СВЧ-ток электронов, движущихся по дугам, центры которых лежат вне металла над его поверхностью. Отбор среди множества подобных орбит определяется условием Ландау наиболее эффективного ускорения электронов, т. е. равенством скоростей СВЧ-волны и электронов в направлении нормали к поверхности. Возникающая при определенных значениях поля кратность времени движения электрона по дуге периоду внешнего СВЧ-поля приводит к осцилляциям импеданса, периодичным в обратном поле. В работе Хайкина были экспериментально исследованы осцилляции поверхностного сопротивления монокристаллов Bi на частотах 9,4 и 18,7 Гц в магнитном поле $\sim 0,05$ э. Результаты опытов, за исключением частотной зависимости, хорошо согласуются с предложенным механизмом возникновения осцилляций. Более четверти всех работ на секции было связано с изучением квантовых осцилляций (эффекты де-Гааза — ван Альвена, Шубникова — де-Гааза и др.). Эффект де-Гааза — ван Альвена и родственные эффекты являются, по-видимому, самым мощным методом изучения электронного спектра металлов (во всяком случае, самым распространенным). Исследованию электронной структуры элементов и сплавов были посвящены доклады Пристли, Виндмиллера, Кеттерсона и Экштейна (мышьяк, эффект де-Гааза — ван Альвена), Грасси и Бейкера (Англия) (мышьяк, эффект Шубникова — де-Гааза), Майера и Ливера (Англия) (молибден), Ли (Англия) (натрий), Яна, Пирсона и Сайфорта (Канада) (упорядоченные сплавы типа β -латуни), Эдвардса и Спрингфорта (Англия) (интерметаллическое соединение Au — Sn). Несколько работ было посвящено влиянию давления на осцилляционные эффекты в металлах и сплавах. Темплтон (Канада), Е. С. Ицкевич, А. Н. Вороновский и Л. М. Фишер (СССР), Н. Б. Брандт, Л. Г. Любутина, Я. Г. Пономарев (СССР). Целый ряд докладов касался квантовых осцилляций различных свойств: тока холодной эмиссии (Блатт (США), А. Громан и Л. Войда (Польша)), магнитоотрицки (Чандрасекер, Фосетт, Спарлин (США)), Уайт (Австралия)), сдвига Найта (Рейнольдс, Гудрих, Канн (США)), контактной разности потенциалов (Пичини и Уайтес (Бразилия)). Пожалуй, наибольший интерес вызвал доклад Шенберга и Вуллемина (Англия) «Магнитное взаимодействие электронов в эффекте де-Гааза — ван Альвена». Как было указано уже несколько лет назад, при достаточно сильном эффекте де-Гааза — ван Альвена синусоидальная форма осцилляций может сильно измениться благодаря тому, что электрон «чувствует» индукцию B , а не внешнее поле H . Шенберг назвал это эффектом магнитного взаимодействия. В пределе очень больших амплитуд кривые намагниченности приобретают пилообразную форму. При наличии осцилляций двух периодов можно наблюдать самые разнообразные эффекты амплитудной и частотной модуляции, комбинационные частоты и т. п. Подобные явления наблюдались Шенбергом в благородных металлах — серебре и золоте — и Кондоном — в бериллии.

Магнитные взаимодействия в образцах с отличным от нуля размагничивающим фактором приводят к интересному эффекту — образованию доменов, причиной возникновения которых является не ферромагнитное упорядочение спинов, а квантование циклотронных орбит. В докладе К о н д о н а (США) «Магнитные домены в материале с сильным эффектом де-Гааза — ван Альвена» было указано, что в любом веществе с дифференциальной магнитной восприимчивостью, большей $1/4\pi$, следует ожидать возникновения магнитных доменов с противоположными направлениями намагниченности. Было найдено, что в бериллии и благородных металлах колебательная восприимчивость имеет пукжную величину. Таким образом, при достаточно сильном эффекте де-Гааза — ван Альвена энергетически выгодным оказывается не состояние с однородной намагниченностью образца, а доменная структура. Энергия стенки доменов Кондона положительна, как и в случае ферромагнетика. Из соображений минимума общей энергии Кондон оценил размеры доменов, оказавшихся $\sim 0,03$ мкм (в диске из бериллия толщиной 1 мкм при $1,2^\circ\text{K}$ и 30 кэ).

Мы закончим обзор работ секции «Электронные свойства металлов» кратким замечанием о тематике остальных докладов. Значительное количество докладов было посвящено магнитоакустическим эффектам. Обсуждались также термомагнитные и фотомагнитные эффекты, магнитоплазменные волны и различные вопросы электропроводности при низких температурах. На магнитной секции обсуждались различные низкотемпературные свойства ферро- и антиферромагнетиков. Большой интерес вызвал доклад И. Е. Д з я л о ш и н с к о г о «Магнитные структуры антиферромагнитных веществ». Докладчиком была построена общая теория магнитных структур, основывающаяся на малости энергии образования магнитной структуры по сравнению с энергией связи атомов в кристалле. Эта теория позволила объяснить существование магнитных структур с большим периодом. Из анализа, проведенного Е. М. Лифшицем в 1941 г., следует, что устойчивыми могут быть лишь такие магнитные структуры, период которых равен 1, 2, 3 или 4 периодам атомной решетки; это так называемые «классические» структуры. В действительности же у некоторых веществ период магнитной структуры намного превышает период атомной решетки и не находится с ним ни в каком простом соотношении. Как показал докладчик, этот факт можно объяснить тем, что на «классическую» структуру накладываются «биеция», возникающие благодаря спин-орбитальному взаимодействию или же резкой анизотропии обменных сил. В металлах из-за дальнедействующего характера обменных взаимодействий и изменения топологии поверхности Ферми при магнитных переходах могут существовать структуры с периодами, близкими к обратной величине каких-либо экстремальных диаметров ферми-поверхности. Наконец, в принципе возможны «случайные» структуры с совершенно произвольными периодами. Структуры всех этих типов различаются между собой по зависимости их периода от температуры.

А. Я. Б л а н к и М. И. К а г а н о в (СССР) исследовали теоретически распространение спин-спиральных волн в ферромагнетиках. Эти волны возникают из-за наличия в этих веществах сильной связи между спиральной и спиновой ветвями колебательного спектра. В упруго деформированном ферромагнитном проводнике, находящемся в сильном магнитном поле, наряду со спиновой и спиральной волнами существует и третий тип колебаний — звуковые волны. Благодаря магнитострикции и индукционному механизму взаимодействия, все три типа волн оказываются связанными между собой. Подбирая соответствующим образом величину магнитного поля, можно осуществить тройной резонанс, т. е. одновременное совпадение частот и волновых векторов всех трех типов колебаний. По оценкам докладчиков для обычных значений параметров металла это поле имеет порядок $10^3 \div 10^4$ э.

Дж. А. М а р к у с, А. Дж. А р к о, Дж. Е. Г е й н е р и Р. А. М о н т е л л о (США) доложили об изучении эффекта де-Гааза — ван Альвена и гальваномагнитных эффектов в антиферромагнитном хrome. Из детальных измерений поперечного четного эффекта Холла и магнитосопротивления они определили топологические особенности поверхности Ферми, возникающие при переходе в антиферромагнитное состояние. В докладе А. Дж. Х и г е р а, А. П. К л е й н а и П. Т у (США) говорилось об изучении влияния немагнитных примесей на осцилляции спиновой плотности в металле. Как следует из работ М. А. Р у д е р м а н а и К. К и т т л е я, Т. К а с у й я и К. И о с и д ы, вблизи магнитной примеси в металле спиновая плотность должна осциллировать по закону $\sigma(r) \sim \frac{\cos 2k_F r}{r^3}$, где k_F — фермиевский импульс электронов, а r — расстояние от примеси. Если в такой сплав добавить еще и немагнитные примеси, то из-за рассеяния на них эти осцилляции будут подавляться. В результате закон изменения спиновой плотности изменится на множитель $e^{-r/\lambda}$, где λ — длина свободного пробега для рассеяния на немагнитных примесях. Докладчики выбрали для исследования сплавы меди с небольшими количествами марганца ($< 0,05\%$) и алюминия (от 0% до 10%). Атомы марганца служили магнитными, а алюминия — немагнитными примесями. С помощью методики ядерного магнитного резонанса они

показали, что подавление осцилляций из-за рассеяния на немагнитных примесях действительно происходит.

Большая группа докладов была посвящена изучению полей на ядрах. И. М. Петров и Г. А. Смоленский (СССР) провели очень чистые измерения локальных магнитных полей на различных ядрах в кристаллах $TlMnF_3$, $RbMnF_3$, $RbCoF_3$, $NaNiF_3$ (общая формула ABF_3) в парамагнитной области. Полученные результаты интерпретировались на основе метода молекулярных орбит. Было показано, что спиновая плотность на ядрах ионов А обусловлена взаимодействием электронных S -орбит ионов А с t_{2g} орбитами магнитных ионов. Установлено, что теория сверхобмена Андерсона позволяет качественно объяснить разницу в температурах Нееля для $NaNiF_3$ и $RNiF_3$. Следует отметить также работу В. В. Скляревского, Н. И. Лукашевича, К. П. Алешина и Н. И. Филиппова (СССР), в которой методом эффекта Мёсбауэра была подробно исследована температурная зависимость (в области 5—300° К) поля на примесных ядрах Dy^{161} в поликристаллическом гадолинии.

А. С. Боровик-Романов и Л. А. Прозорова (СССР) исследовали антиферромагнитный резонанс в $MnCO_3$ в сильных магнитных полях. В этом веществе имеются две ветви антиферромагнитного резонанса, причем у одной из них есть щель. Интересным результатом этой работы является найденная температурная зависимость щели $H_{AE}^2 \sim \sigma^2(T)/\chi_{\perp}(T)$, где $\sigma(T)$ и $\chi_{\perp}(T)$ — соответственно значения спонтанного ферромагнитного момента и восприимчивости в базисной плоскости по данным статических измерений. Такая зависимость является несколько неожиданной потому, что она может быть получена на основе сильно упрощенной теории молекулярного поля. В работе исследован также вопрос о взаимодействии обеих ветвей резонанса в $MnCO_3$; для этого была подробно изучена окрестность точки пересечения двух ветвей. Оказалось, что если внешнее поле направлено строго перпендикулярно к главной оси кристалла, то никакого взаимодействия между ветвями не наблюдается. Если вывести поле из базисной плоскости даже на небольшой угол, возникает взаимодействие между двумя типами колебаний, которое имеет неожиданно большую величину.

Я. Кадер (ЧССР) сделал интересный обзорный доклад о вызванных магнитным полем фазовых переходах в антиферромагнетиках. Он подробно остановился на переходах между антиферромагнитным состоянием и состоянием со слабым ферромагнетизмом.

А. И. Беляева и В. В. Еременко (СССР) сообщили о наблюдении в спектрах поглощения света антиферромагнитными кристаллами фторида никеля полос, обусловленных не чисто электронными, а комбинационными электрон-фононными и электрон-магнонными переходами. Эти полосы обладают рядом особенностей. Их форма асимметрична — резкий коротковолновый край и плавный длинноволновый спад. Спектральное положение электрон-магнонных полос сильнее зависит от температуры, чем у обычных электронных полос поглощения.

После окончания конференции состоялся двухдневный теоретический симпозиум. На нем были более подробно обсуждены некоторые из вопросов, затронутых на конференции.

XI конференцию по физике низких температур намечено провести в Сент-Эндрюсе (Шотландия) в 1968 г.

И. П. Крылов, И. А. Фомин