1966 г. Ноябрь *Том 90, вып. 3*

УСПЕХИ ФИЗИЧЕСКИХ НАУК

546.79

ПЛУТОНИЙ И МЕТАЛЛЫ-АКТИНИДЫ *)

Курт Мендельсон

При температурах, близких к абсолютному нулю, у металлов-актинидов можно наблюдать ряд совершенно новых физических свойств, одно из которых — увеличение сопротивления металлов со временем.

Металлы-актиниды насчитывают в своем составе 15 радиоактивных элементов, включая уран. Последние 11 элементов, называемые трансурановыми, были получены искусственным путем, и в природе их не существует. В течение многих лет, однако, данные о свойствах трансурановых элементов из-за производства ядерного оружия были строго засекречены. Около 10 лет назад, когда ограничения были отменены, были опубликованы данные о том, что металлы-актиниды обладают весьма необычными свойствами. Описанию некоторых из этих необычных свойств посвящается данная статья. Программа исследований этих элементов и, в частности, плутония, у которого был обнаружен ряд совершенно новых свойств при очень низких температурах, была выполнена совместно Кларендонской лабораторией в Оксфорде и исследовательским учреждением атомного центра в Харуэлле.

История трансурановых элементов началась с 1932 г., когда Джеймс Чадвик в Кембридже выяснил природу странной проникающей радиации, которую наблюдали ранее во многих лабораториях. Это излучение возникало при бомбардировке легких элементов, таких, как бериллий и бор, быстро движущимися α-частицами — ядрами гелия.

Чэдвик показал, что эти лучи, не являющиеся γ-излучением, состоят из потока частиц с массой, практически равной массе протона, но, в отличие от последнего, электрически нейтральных. Так был открыт нейтрон. Основное внимание было обращено на свойства новой частицы, и скоро определились ее возможности как мощного инструмента в ядерных исследованиях. Облучение положительно заряженных ядер медленными протонами и α-частицами не особенно эффективно из-за взаимодействия между зарядом ядра и положительным зарядом бомбардирующих частиц. С другой стороны, нейтрон может беспрепятственно двигаться в веществе до столкновения с ядром. Из-за отсутствия заряда он легко проникает в ядро.

В 1934 г. в Риме Энрико Ферми и его сотрудники приступили к систематическому изучению действия нейтронного облучения на ядра; особенно их интересовали опыты с самыми тяжелыми ядрами. До того времени подвергались облучению только самые легкие элементы, потому что более тяжелые ядра обладают большим положительным зарядом, а это создавало для заряженных бомбардирующих частиц непреодолимую преграду. Применение нейтронов позволило не только преодолеть

*) K. Mendelssohn, Plutonium and the actinide metals, Science Journal 1, 73 (1965). Перевод Е. Г. Максимова и Е. Д. Михальчи.

эту трудность и значительно расширить число исследуемых ядер, но и получить, по-видимому, уникальные результаты. Ферми полагал, что при облучении самого тяжелого элемента, урана, нейтронами может случиться так, что нейтрон удержится в ядре, а образовавшееся вследствие этого ядро будет тяжелее любого другого из известных в природе. Кроме того, недавнее открытие явления искусственной радиоактивности указывало на возможность испускания вновь созданным ядром электронов, что привело бы к образованию элементов с большим атомным номером — трансурановых элементов. Нейтронное облучение самых тяжелых атомов открывало волнующие перспективы получения новых, созданных человеком элементов, которых нет в природе.

Действительно, эксперименты Ферми тотчас же дали новые результаты, и только одно обстоятельство вызывало беспокойство: эти результаты были слишком удачны. Вместо нескольких, как того ожидали, новых типов атомов, их оказалось такое множество, что это могло поставить втупик. Естественно, что вновь создаваемые атомы удавалось получить в незначительном количестве, и их идентификация оказалась трудным делом. Были применены обычные химические методы выделения незначительного количества вновь полученных атомов путем осаждения их вместе с известными элементами. Измерение радиоактивности продуктов реакции с помощью счетчиков Гейгера давало возможность установить присутствие новых элементов в осадке. Ввиду того, что элементы одного столбца периодической таблицы обладают сходными химическими свойствами, можно было бы определить основные свойства новых трансурановых элементов, но тут-то и начинаются трудности. Как только что я упоминал, новых ядер было больше, чем нужно. Они обнаруживали удивительное сходство со многими из известных элементов. Интерес к вопросу усилился после того, как в Берлине в 1938 г. О. Ган и Ф. Штрасман как будто обнаружили в осадке атомы радия.

Чтобы объяснить появление радия как результат бомбардировки урана нейтронами, надо было допустить, что первоначально созданное ядро должно очень быстро испустить подряд не менее четырех α-частиц, а это кажется совсем невероятным. В осадке был обнаружен также барий, элемент подобный радию, и для подтверждения этого странного результата Ган и Штрасман приступили к чрезвычайно трудоемкой задаче отделения радия от бария. На этой стадии работы их ожидала неожиданность: радиоактивным оказался барий.

Выбора не было и пришлось признать, что новым атомом был не радий, а барий. Об остальной части истории говорилось так часто, что ее можно было выучить наизусть. Отто Фриш и Лизи Мейтнер предположили, что на самом деле ядро урана при облучении расщепляется на две приблизительно равные части. Это предположение о расщеплении ядра было скоро подтверждено множеством прямых экспериментов. Атомы радиоактивного бария, найденные Ганом и Штрасманом, являлись осколками деления ядра урана, среди которых было много других ядер, найденных Ферми и его школой. Это было на заре трансурановых элементов, и Ферми часто в шутку вспоминал о том уникальном случае, как ему присудили Нобелевскую премию за неверный эксперимент.

Возбуждение, вызванное открытием деления урана и планами использования ядерной энергии, отодвинуло, однако, не на очень длительное время, исследование трансурановых элементов на второй план. Дальнейшие опыты показали, что обладающие различными скоростями нейтроны, сталкиваясь с ядром наиболее распространенного изотопа урана с массой 238, попадают в ядро и удерживаются там, в соответствии с предсказанием Ферми. Новое ядро U^{239} оказывается радиоактивным и рас-

падается с периодом полураспада 23 минуты, испуская электрон. Оставшееся после вылета электрона ядро имеет больший положительный заряд, и ему соответствует атомный номер 93 и место в периодической таблице за ураном. В свое время это ядро назвали нептунием, а новое ядро Np^{239} оказалось также радиоактивным. Спустя немногим более двух с половиной дней оно испускает электрон, в результате чего образуется новый элемент — плутоний.

Исходя из всего этого, Нильс Бор и Дж. А. Уилер предположили, что ядро плутония Pu^{239} распадается при облучении нейтронами точно так же, как и изотоп U^{235}, который являлся материалом для урановых бомб. В связи с перспективами создания нового ядерного взрывчатого вещества для военных целей был принят план развития в широком масштабе производства плутония. В то время этот проект и все полученные результаты были засекречены. Только в середине 50-х годов эти результаты стали появляться в научных журналах сначала в Соединенных Штатах и Великобритании и несколько позже в советских изданиях. Но даже в наше время основные работы по выделению урана проводятся в исследовательских учреждениях различных атомных центров. Это связано не столько с требованиями секретности, сколько с огромными экспериментальными трудностями, встречающимися при этой работе, которая невозможна без применения чрезвычайно дорогого и специализированного оборудования. Вследствие высокого уровня радиоактивности, плутоний и остальные новые металлы очень опасны, и были тщательно разработаны меры предосторожности при работе с ними. Хотя критическая масса плутония относительно мала и составляет только несколько фунтов, опасность ядерного взрыва невелика, так как масса исследуемых образцов обычно еще меньше. Тем не менее определенная осторожность при хранении металла необходима. Настоящая опасность заключается в сильной α-радиоактивности, которая и делает это вещество чрезвычайно вредным. К счастью, энергия α-частиц невелика, поэтому для защиты достаточно тонкого пластмассового мешка. Равным образом α-частицы, испущенные Pu^{239}, не могут проникнуть под кожу человека на опасную глубину. С другой стороны, плутоний очень быстро окисляется и после появления первого тонкого и плотно прилегающего слоя окиси следующий слой окиси образуется в виде мелкой пыли, которая стремится подняться в воздух. Частицы пыли попадают в тело при дыхании, поэтому плутоний необходимо осаждать очень медленно. Плутоний, попадая внутрь, нарушает кровообращение. Вообще с плутонием надо обращаться как с веществом в миллион раз более ядовитым, чем цианиды. Следовательно, обычные лабораторные методы по подготовке и работе с образцами для исследований совершенно неприемлемы. Все работы должны выполняться в герметически закрытом пространстве, наполненном инертным газом, обычно аргоном или гелием, давление которого несколько меньше атмосферного. Это обеспечивает проникновение окружающего воздуха в контейнер, если в нем появилось маленькое отверстие; таким образом можно избежать опасности распространения газа из активной зоны в лабораторию. Методы обращения с радиоактивными препаратами до некоторой степени различны в разных лабораториях, оснащенных для такой работы, но главные характерные черты в основном одни и те же. Ограждение состоит из металлической рамы, одна или несколько стенок которой сделаны из стекла или крепких пластиковых листов, через которые можно наблюдать за проводимыми работами. Эти операции выполняются вручную при помощи длинных резиновых перчаток, вставленных в прозрачную стенку, поэтому все устройство называется защитной камерой с перчатками (з.к.п.).

В з.к.п. находятся измерительные приборы такие, как чувствительные весы, дилатометр или манометр в зависимости от вида исследований, проводимых в данной камере. Все принадлежности, необходимые для работы,— пинцеты, плоскогубцы, напильники, пилы, паяльник — должны быть внутри ящика. Почти неизбежно, что при введении или перемещении в ящике новых образцов и инструментов контейнер может открыться, и появится активность. Поэтому в ящике делают специальные отверстия, закрытые длинными пластиковыми рукавами. Чтобы положить внутрь, скажем, гаечный ключ, его кладут в конец рукава и заворачивают. Конец рукава потом раскрывается при нагревании пластика. Следующая операция состоит в том, что давлением рукав направляется внутрь ящика. После этого, наконец, гаечный ключ находится в з.к.п. в маленьком ящике, прикрепленном к концу рукава. Все, что осталось после этого сделать,— это разрезать мешок ножницами, которые уже находятся внутри и передвигаются к гаечному ключу. Подобная техника используется и для извлечения объектов из ящика, при этом в пластиковом мешке находится радиоактивный предмет. Должна быть ясна последовательность действий; радиоактивная зона ограничивается или ящиком или запечатанным мешком; внутренняя сторона мешка станет внешней, после того как он будет вынут из ящика, так же, как и поверхность рукава.

Когда изменения в з.к.п. становятся необходимы, одна из сторон ящика присоединяется к тщательно закупоренному помещению в пределах лаборатории, где открыто хранятся радиоактивные вещества. Поскольку целая комната становится радиоактивной, входить и выходить из нее надо через ряд остроумно сконструированных переходов, в которых находится обеззараживающее оборудование. Любой работник, находясь в этой комнате, должен носить защитную одежду, покрывающую все тело целиком. Этот пневмокостюм соединен с основной лабораторией шлангом. В костюмах поддерживается избыточное давление для того, чтобы при любом случайном проколе воздух всегда выходил из костюма в загрязненную комнату, но никогда не шел в противоположном направлении.

Кроме плутония, из других металлов-актинидов представляет интерес нептуний. Из сказанного ранее ясно, что изотоп Np^{239}, полученный при облучении нейтронами U^{238}, мало подходит для исследований металлических свойств из-за своего малого периода полураспада, составляющего немногим больше двух дней. Однако существует изотоп Np^{237}, испускающий α-частицы с периодом полураспада в 2 миллиона лет. Он далеко не так доступен, как плутоний, так как при получении небольших металлических образцов образуются тонны радиоактивных отходов. Хотя активность Np^{237} в сотни раз меньше активности плутония, он все же является слишком опасным для применения обычной лабораторной техники, и с ним надо обращаться так же, как с плутонием.

Пока имеется только весьма ограниченное количество америция, элемента с атомным номером 95, невозможно провести исследование его металлических свойств. Что касается следующего элемента, кюрия, атомный номер которого 96, вычисления указывают, что вследствие очень высокого уровня активности любой металлический образец будет или постоянно раскаленным или даже начнет плавиться под действием своего собственного тепла.

Когда в середине 50-х годов появились первые данные о плутонии, стало ясно, что новый искусственный элемент является самым необыкновенным металлом. Измерения коэффициента расширения плутония пока-

зали, что его кристаллическая структура претерпевает не менее шести изменений при изменении температуры от комнатной до точки плавления при 640° С (рис. 1). α-фаза, являющаяся устойчивой формой металла при комнатной и более низких температурах, является моноклинной конфигурацией. В отличие от других металлов, электрическое сопротивление плутония падает с повышением температуры. Наблюдения, выполненные при температурах ниже температуры жидкого воздуха, привели к неожиданному результату: сопротивление оказалось максимальным при 100° К (—173° С), при более низких температурах сопротивление снова постепенно падает.

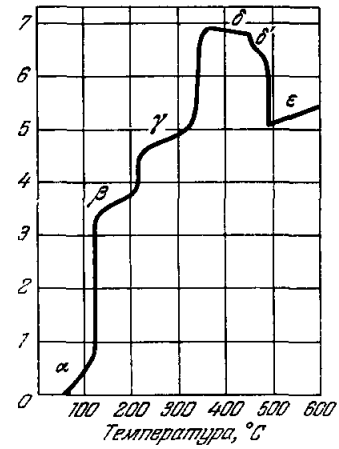

Рис. 1. Изменение коэффициента расширения плутония при увеличении температуры от комнатной до точки плавления — 640° С.

Видно, что плутоний при этом проходит через шесть различных кристаллических модификаций. *α-фаза, являющаяся устойчивой* при комнатных и более низких температурах, обладает рядом аномальных свойств, в частности, ее сопротивление падает с повышением температуры. С понижением температуры до температуры жидкого воздуха у сопротивления обнаруживается максимум при 100° К, а затем снова наблюдается постепенное уменьшение сопротивления при более низких температурах. Эти явления еще более заметны у *β-фазы*, и *могут наблюдаться* и в δ-фазе металла.

Все эти открытия ясно указывали на интригующие и совсем необычные особенности, и, по-видимому, особый интерес будет представлять поведение электрического сопротивления при еще более низких температурах. Наша исследовательская группа Кларендонской лаборатории в Оксфорде в течение многих лет занималась исследованием свойств металлов при низких температурах, и мы, естественно, с большим интересом стали заниматься изучением свойств плутония. В исследовательских учреждениях атомного центра в Харуэлле изучением металлического плутония занималась руководимая Н. Б. Уолдроном физико-металлургическая группа, в которую входили, в частности, А. Ли и его коллеги. Они были превосходными экспериментаторами, что обеспечило успешное развитие этих работ. Объединение усилий и сочетание уникальных возможностей и значительного опыта Харуэлла по работе с самыми активными металлами с навыками исследований при низких температурах Кларендонской лаборатории должны были принести пользу. Совместная работа была начата зимой 1957—1958 гг., и результаты, полученные семь лет спустя, полностью подтвердили правильность этого решения.

Не считая сложностей, связанных с высокой токсичностью плутония, работа с этим элементом при низких температурах имеет ряд дополнительных трудностей. Большое количество тепла, выделяющееся вместе с *продуктами распада в бруске металлического плутония весом в 1 кг*, достаточно для того, чтобы пластиковый мешок, в котором находится металл, расплавился. Действительно, температура в центре бруска, весящего 1 *кг*, на 60° С выше окружающей комнатной температуры. Поэтому образцы, которые охлаждаются почти до абсолютного нуля, должны быть не только малы и не очень массивны, но должны находиться в хорошем тепловом контакте с жидким гелием, в котором они охлаждаются. Для того чтобы удовлетворить всем этим условиям, была создана специальная защитная камера с перчатками, которая раскрывалась в тонкую длинную трубку, направленную вниз. Эта трубка окружается охлаждающим устройством. Газообразный гелий конденсируется на дне трубки. Изучаемый образец плутония помещается затем в эту трубку.

Перед началом нашей совместной работы было решено не ограничиваться изучением только плутония, а расширить его на всю серию актинидов, начиная с тория. Раньше в периодической таблице элементов эти металлы помещались в ряд, начинавшийся с тория. Торий находится в IV группе под гафнием, а уран — под вольфрамом. Этот порядок означал бы, что нептуний и плутоний обладают свойствами, сходными с рением и осмием соответственно. Но, с другой стороны, в верхнем ряду гафний следовал не непосредственно за лантаном, а за целой группой из 14 редкоземельных металлов, которые очень близки по своим свойствам. Причина

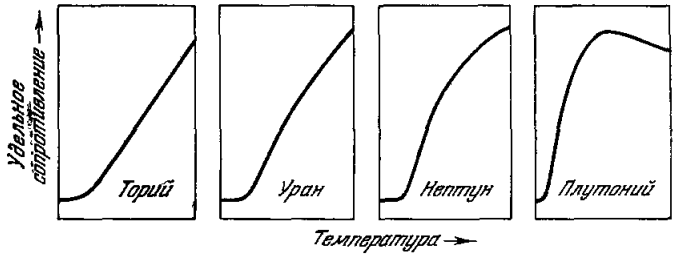

Рис. 2. Удельное сопротивление тория, урана, нептуния и плутония, измеренное как функция температуры в области абсолютного нуля.

такого необычного расположения стала ясна, после того как Бор показал, что электроны в атомах заполняют орбитальные оболочки так, что при каждом увеличении атомного номера следующий электрон добавляется в верхнюю незаполненную оболочку. Это положение как раз и определяет химические свойства элемента. Стало ясно также, что за лантаном следующие 14 электронов добавляются в нижние незаполненные оболочки, оставляя верхние оболочки, а следовательно, и химические свойства элементов почти неизменными. Это и объясняет большое сходство между редкоземельными металлами. С увеличением интереса к наиболее тяжелым элементам, в частности, к искусственным, также возник вопрос, является ли старая классификация корректной, или за актинием следует новая редкоземельная группа, начинающаяся с тория. Все имеющиеся данные действительно указывают на справедливость этого предположения.

Нашей первой задачей поэтому было измерение удельного сопротивления всех этих металлов и сравнение полученных результатов. Как можно видеть из рис. 2, существует постепенное изменение в последовательных кривых, начиная от совершенно обычной для тория до очень необычной кривой для плутония. Из кривой для тория следует, что его сопротивление не зависит от температуры вблизи абсолютного нуля и затем постепенно возрастает, становясь в конечном счете пропорциональным температуре. Подобное поведение является характерным для большинства металлов. У урана за первым постепенным ростом следует небольшой изгиб в противоположном направлении; эта особенность усиливается у нептуния. У плутония этот изгиб развивается до такой степени, что приводит к упомянутому ранее максимуму. Кроме того, сопротивление плутония резко падает при низких температурах.

Это необычное поведение проявляется не только в моноклинной α-фазе металла. Используя очень остроумную технику, ученые из Харуэлла смогли охладить в жидком азоте β-фазу, обычно устойчивую лишь между 112 и 184° С, и измерить ее удельное сопротивление при низких температурах. Здесь особенности, отмеченные для α-плутония, еще более усилились — максимум стал острее, а быстрое падение сопротивления

при низких температурах даже более резко выраженным. Действительно, сопротивление β-плутония даже при 1° К меняется заметно сильнее, чем у большинства других известных металлов. Наконец, у δ-фазы плутония, которая в обычных условиях устойчива лишь между 320 и 450° С, но может находиться в устойчивом состоянии в виде сплава с алюминием, также было отмечено наличие максимума на кривой сопротивления при низких температурах.

Причина подобного аномального поведения удельного сопротивления плутония до сих пор не известна, но уже сам факт, что три фазы с различной кристаллической структурой (β-плутоний имеет моноклинную объемноцентрированную решетку, а δ-фаза — кубическую гранецентрированную) ведут себя так схоже, дает указание на возможную причину. Можно, кажется, предположить, что эти аномалии создаются не за счет внешних электронов, а, по-видимому, из-за магнитных эффектов, связанных с частично незаполненными нижними оболочками. Таким образом, плутоний обнаруживает дополнительное сходство с «редкоземельными» металлами, которые, как известно, обладают аномальными магнитными свойствами. Однако в некоторых металлах, таких как хром и марганец, эти аномальные эффекты едва выделяются на общем фоне магнитных свойств образца, а плутоний, к сожалению, по-видимому, принадлежит к тому же классу, и только дополнительные тщательные магнитные измерения могут решить этот вопрос.

Однако плутоний проявляет и другие необычные свойства, которые совершенно неожиданно проливают дополнительный свет на эту проблему. Когда сопротивление плутония было измерено при температуре жидкого гелия (несколько градусов выше абсолютного нуля), то оказалось, что оно очень медленно растет с течением времени. За восемь часов, в течение которых образец находился при температуре жидкого гелия, его удельное сопротивление увеличилось на один процент. Это слишком мало, чтобы решить, имеет ли место действительно рост сопротивления, или эти изменения вызваны неустойчивостью в регистрирующих приборах. Потребовались изменения в аппаратуре, которые позволили бы проводить эксперименты в течение более длительного периода времени. По этой причине мы поместили наши образцы плутония в герметическую капсулу, которая опускалась в большой сосуд, наполненный жидким гелием. После двух дней уже не оставалось сомнений, что сопротивление действительно растет со временем, а когда образец был выдержан в жидком гелии непрерывно в течение 500 часов, выяснилась четкая структура нового эффекта. Не только возрастание сопротивления было измерено с хорошей точностью, но и было показано, что скорость этого возрастания замедляется с течением времени. Примерно в то же самое время, когда мы заметили это увеличение сопротивления, наши коллеги из Лос-Аламоса также открыли этот эффект. Обнаруженный ими начальный рост сопротивления хорошо согласуется с нашим наблюдением, но, к сожалению, они прекратили свои эксперименты после 164 часов, что, конечно, является слишком коротким промежутком времени, чтобы заметить постепенное изменение этого роста.

Нетрудно найти объяснение этому новому эффекту. Альфа-частицы, испущенные ядрами плутония, вызывают разрушение структуры металла, что и приводит к увеличению электрического сопротивления. Так как при высоких температурах эти разрушения немедленно снимаются тепловым движением атомов, ясно, что остаются они при очень низких температурах. Следовательно, длительное наблюдение при температурах, близких к абсолютному нулю, представило бы удобную возможность изучить это явление детально. В частности, мы хотели знать, приведет ли

изменение удельного сопротивления при непрерывном разрушении к некоторой новой постоянной величине сопротивления, и если так, то когда это будет достигнуто.

С этой целью ряд образцов плутония содержался в жидком гелии непрерывно в течение примерно 10 000 часов. Примерно после 6000 часов, действительно, было замечено выравнивание сопротивления, но во время этой работы вскрылись и другие любопытные особенности. У образца, находившегося при несколько более высокой температуре (температуре жидкого водорода 20° К), также наблюдалось наличие подобного эффекта, но возрастание сопротивления в этом случае было значительно меньшим. Однако после охлаждения этого образца жидким гелием его сопротивление возросло до такой величины, как если бы он все время находился при температуре жидкого гелия. Это показывает, что дополнительное удельное сопротивление, обусловленное накоплением разрушений, зависит от температуры, и это опять-таки отличается от обычного поведения металлов.

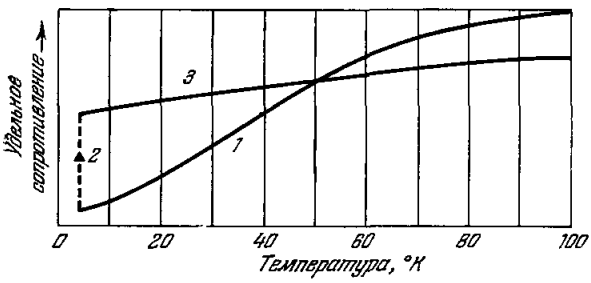

Рис. 3. Кривая удельного сопротивления неразрушенного образца.

Виден обычный максимум при 100° К (кривая *1*). Альфа-частицы, испущенные ядром, приводят к разрушению структуры металла, что отражается в постепенном увеличении его сопротивления — отрезок *2* изображает его возрастание в три раза по сравнению с первоначальной величиной при 5° К за 8000 часов пребывания в жидком гелии. На кривой *3* изображено сопротивление сильно разрушенного образца при его нагревании. Примерно при 50° К кривые *1* и *3* пересекаются; выше 50° К сопротивление разрушенного образца меньше, чем сопротивление неразрушенного образца.

Обычно можно различить две причины, обусловливающие электрическое сопротивление. Сопротивление, как известно, возникает из-за рассеяния электронов, несущих ток. Первой причиной такого рассеяния являются тепловые колебания атомов решетки; уменьшение этих колебаний с падением температуры приводит к хорошо известному явлению уменьшения сопротивления при охлаждении металла. Другой причиной является рассеяние электронов на дефектах металлической структуры, таких, как примеси или нарушения в расположении атомов в решетке. Так как эти дефекты не меняются при изменении температуры, то дополнительное сопротивление, обусловленное ими, не должно зависеть от температуры. Это в действительности обычно и наблюдается, но результаты, полученные на плутонии, безусловно, находятся в противоречии с этим правилом.

Убедительным подтверждением этого является измерение зависимости удельного сопротивления от температуры одного из таких сильно разрушенных образцов плутония (он содержался в жидком гелии около 8000 часов) при постепенном нагревании его до 100° К. На графике (рис. 3) кривая сопротивления этого сильно разрушенного образца сравнивается с кривой в неразрушенном состоянии. На последнем графике (кривая *1*) видны как максимум при 100° К, так и крутое падение сопротивления при низких температурах. Отрезок *2* показывает увеличение сопротивления в три раза, накопленное за 8000 часов пребывания в жидком гелии. Наконец, кривая *3* изображает сопротивление сильно разрушенного образца при его нагревании. Эта новая кривая не только совершенно отлична от первоначальной по форме (сопротивление едва меняется с температурой), но и содержит дальнейшие неожиданности. При температуре около

50 К обе кривые пересекаются; выше этой температуры сопротивление сильно разрушенного образца меньше, чем сопротивление неразрушенного образца.

Из того, что было сказано выше о действии кристаллических дефектов на удельное сопротивление металлов, этот последний результат должен казаться совершенно непонятным. Единственным возможным объяснением этого является предположение, что в плутонии существует третий механизм рассеяния электронов. Такой механизм, действительно, мог бы существовать за счет магнитных эффектов, связанных с нижними незаполненными электронными оболочками, о возможном существовании которых в плутонии мы уже упоминали ранее. Таким образом, это необычное явление, вызванное саморазрушением плутония при низких температурах, предоставило нам совершенно неожиданные аргументы в пользу существования таких незаполненных нижних оболочек. Дальнейшие подтверждения этого мы находим в аналогичных опытах с α-фазой и δ-фазой плутония, в которых обнаруживаются очень многие схожие черты. Мы проделали также эксперименты с нептунием и изотопом урана U^{233}, отличающимся высоким уровнем радиоактивности. Удельное сопротивление обоих металлов растет со временем, если они находятся при гелиевых температурах. Но так как они значительно менее активны, чем плутоний, эти эффекты слишком малы, чтобы был заметен детальный характер их поведения. Потребовались бы десятки лет непрерывных наблюдений за поведением этих металлов при гелиевых температурах, чтобы достигнуть результата, подобного полученному на плутонии.

Если рассмотреть все данные, которые мы смогли собрать к настоящему времени, то, по-видимому, можно сказать, что когда мы движемся к более высокому атомному номеру в новом ряду металлов-актинидов, возникает постепенное возрастание роли магнитных эффектов, связанных с нижней незаполненной оболочкой. Хотя данные по урану и нептунию неизбежно являются отрывочными, они согласуются с большинством важных выводов: некоторые слабые эффекты, наблюдаемые в других актинидах, не заметны в них только из-за очень низкого уровня их радиоактивности. Принимая во внимание этот факт, становится ясным, что увеличение удельного сопротивления на единицу разрушения у нептуния меньше, чем у плутония, а у урана меньше, чем у нептуния. Это связано с постепенным увеличением магнитных эффектов при возрастании атомного номера в ряду актинидов.

Хотя низкотемпературные исследования металлов-актинидов уже привели к открытию множества новых и удивительных явлений, несомненно, что мы находимся лишь у начала этой многообещающей области исследований. Даже если мы не можем ждать десятилетия, чтобы увидеть все подробности поведения урана и нептуния при низких температурах, существуют другие возможности получения необходимых данных. Если наши предположения правильны, то протактиний, обладая почти такой же радиоактивностью, как и плутоний, но имея атомный номер на три единицы меньше, должен проявлять достаточно отличные от плутония свойства. К сожалению, в нашем распоряжении находятся очень малые количества этого металла и не известны достаточно хорошо его химические свойства, чтобы получать его в массивной металлической форме. Однако эти трудности со временем будут преодолены. С другой стороны, очень мало известно о магнитных свойствах плутония, которые, по-видимому, не обнаруживают столь поразительных эффектов, но могут принести дополнительную информацию при более тщательном исследовании. Из-за большого самонагревания трудно измерить теплоемкость этих металлов при низких температурах, и такие данные, полученные в различных

лабораториях, не находятся в хорошем согласии. Большое количество трудностей все еще ощущается из-за неполноты наших знаний о влиянии, которое могут оказывать примеси и общее состояние металла на эти результаты. Необходимо помнить также, что, поскольку актиниды являются радиоактивными, чистота образцов ухудшается со временем.

Возможно, что работы по актинидам приведут также к результатам более общего характера. Так как магнитное состояние плутония, как оказывается, является очень чувствительным к действию ядерного излучения, приводя к большим изменениям в сопротивлении, облучение других металлов, по-видимому, также может вскрыть неизвестные магнитные состояния.

Здесь, в самом деле, перед нами имеется широкое и волнующее поле исследований, но продвижение вперед является относительно медленным из-за экспериментальных трудностей и недостатка подходящего оборудования. Работы до сих пор ограничивались очень немногими лабораториями, да и то в большинстве из них объем исследований был относительно мал. Некоторые эксперименты были проведены в учреждении по исследованию атомного оружия в Олдермастоне, в двух лабораториях во Франции и в Аргонской лаборатории в Чикаго. Заметные усилия в этом направлении, кроме Харуэл-Оксфордской группы, были предприняты нашими коллегами из Лос-Аламоса, с которыми мы поддерживаем состояние дружбы и очень полезной конкуренции. Если, по случайности, мы и оказались в состоянии их несколько опередить, я хочу думать, что это имело место благодаря тесной кооперации между правительственными исследовательскими учреждениями и университетом.