

53(048)

**НАУЧНАЯ СЕССИЯ ОТДЕЛЕНИЯ ОБЩЕЙ ФИЗИКИ  
И АСТРОНОМИИ АКАДЕМИИ НАУК СССР  
(23 — 24 января 1974 г.)**

23 и 24 января 1974 г. в конференц-зале Физического института им. П. Н. Лебедева АН СССР состоялась научная сессия Отделение общей физики и астрономии АН СССР. На сессии были заслушаны доклады:

1. О. Ф. Прилуцкий, И. Л. Розенталь, В. В. Усов. О природе всплесков космического  $\gamma$ -излучения.
2. В. С. Троицкий, Л. Н. Бондарь, А. М. Стародубцев. Поиск спорадического радиоизлучения из космоса.
3. Ф. Ю. Алиев, Э. Г. Касумова. Аномалии теплового расширения и электропроводности в охлажденных пленках  $\text{CuFeS}_2$ .
4. И. М. Дмитренко, И. С. Щеткин, Т. В. Сильвестрова, Е. А. Осика. Об аномальной электропроводности металлоаммиачных растворов.
5. Н. Е. Алексеевский, А. А. Слуцкий. Магнитный прибор в металлах.

Ниже публикуется краткое содержание четырех докладов.

523.165(048)

**О. Ф. Прилуцкий, И. Л. Розенталь, В. В. Усов.** О природе всплесков космического  $\gamma$ -излучения. Около полугода назад при обработке результатов наблюдений на спутниках системы «Веда» были обнаружены мощные всплески  $\gamma$ -излучения в диапазоне энергий 0,2—1,5 Мэв. Продолжительность всплесков составляла 0,1—30 сек, плотность потока излучения достигала  $4 \cdot 10^{-4}$  эрг/см<sup>2</sup>сек, а полный поток энергии за импульс был равен  $10^{-5}$  —  $2 \cdot 10^{-4}$  эрг/см<sup>2</sup> (нижняя граница интервала определяется чувствительностью детектора). Временной профиль  $\gamma$ -всплеска носит, как правило, следующий характер: резкое увеличение плотности потока излучения с последующим его более медленным уменьшением. Уменьшение плотности

потока излучения в ряде случаев было немонотонным, а наблюдались внутри импульса максимумы и минимумы интенсивности длительностью до 0,1 сек. С помощью детекторов, установленных на спутниках OSO-7 и IMP-6, были измерены спектры  $\gamma$ -всплесков. Наблюдаемые спектры показывают как экспоненциальное обрезание на энергии  $\epsilon_\gamma \sim 150$  кэв, так и степенной спад в диапазоне 11—100 кэв, причем жесткость спектра возрастает с увеличением плотности потока.

Измерение разности времен регистрации фронта  $\gamma$ -всплесков на нескольких спутниках позволило оценить направление на их источники. Оказалось, что объекты Солнечной системы не могут генерировать наблюдаемые  $\gamma$ -всплески. Однако имеющаяся в настоящее время информация недостаточна для того, чтобы сделать выбор между галактической и метagalacticкой природой  $\gamma$ -всплесков.

Для объяснения природы наблюдаемых  $\gamma$ -всплесков было выдвинуто несколько гипотез. Так, например, авторы открытия отмечают возможность связи  $\gamma$ -всплесков со вспышками сверхновых. Однако исходная гипотеза С. Колгейта, рассмотревшего генерацию  $\gamma$ -излучения при вспышках сверхновых, приводит к другим характерным временам ( $\tau \sim 10^{-5}$  сек) и энергиям ( $\epsilon_\gamma \sim 1$  Гэв)  $\gamma$ -всплесков. Увеличение радиуса предсверхновой до  $\sim 10^{12}$  см, предложенное в недавней работе С. Колгейта, может приблизить времена и энергии  $\gamma$ -всплесков к наблюдаемым значениям, но при этом возникает проблема обеспечения энергетического выхода. А именно, как показано Д. К. Надеждиным и Д. А. Франк-Каменецким, релятивистская ударная волна в звездах с малыми параболическими скоростями (большими радиусами) слаба и, следовательно, энергия, излучаемая в  $\gamma$ -диапазоне, невелика.<sup>1</sup>

Недавно Ф. Штеккер и К. Фрост предположили, что источниками  $\gamma$ -всплесков являются всыхивающие звезды, причем механизм этих вспышек подобен солнечному. Аргументом в пользу данной гипотезы является сходство длительностей и спектров  $\gamma$ -излучения всплесков и жесткого рентгеновского излучения солнечных вспышек. Однако в данной модели  $\gamma$ -всплеск должен сопровождаться исключительно мощным мягким рентгеновским излучением (с потоком  $\gtrsim 1$  эрг/см<sup>2</sup>сек). Это излучение, несомненно, было бы обнаружено по ионосферным возмущениям.

Другим возможным механизмом образования  $\gamma$ -всплесков является нестационарная аккреция на компактные объекты — белые карлики, нейтронные звезды и «черные дыры». В работах М. Харвита и др. были предложены две конкретные модели генерации  $\gamma$ -всплесков при аккреции.

В первой модели  $\gamma$ -всплески связываются с аккрецией комет на одиночные нейтронные звезды, а во второй — с аккрецией газа, выброшенного из нормального компонента тесной двойной системы, на компактный объект. Эти модели позволяют объяснить энергетические и временные характеристики  $\gamma$ -всплесков. Наиболее сложным вопросом в этих моделях является возможность объяснения наблюдаемой частоты всплесков. Так, например, сохранение плотного кометного облака при вспышке сверхновой маловероятно.

Возможно также, что  $\gamma$ -всплески генерируются при коллапсе магнитных вращающихся звезд с массой  $\sim 10^6 M_\odot$ , находящихся на космологических расстояниях. С присутствием именно таких сверхмассивных звезд в настоящее время все чаще и чаще связывают активность ядер галактик. Потоки энергии, длительность, спектр и ожидаемое число  $\gamma$ -всплесков, вычисляемые в рамках данной гипотезы, находятся в согласии с наблюдаемыми значениями.

Решающим тестом для проверки различных гипотез о природе  $\gamma$ -всплесков является статистический тест — определение числа всплесков  $N(S)$  с потоком больше  $S$ . Важную роль в исследовании  $\gamma$ -всплесков должны сыграть и коррелированные наблюдения этого явления в различных диапазонах — радио, оптическом, рентгеновском и  $\gamma$ -диапазоне.

#### ЛИТЕРАТУРА

- S. J. A. Colgate, Canad. J. Phys. 46, 1847 (1968); R. W. Klebesadel, J. B. Strong, R. A. Olsen, Astrophys. J. 182, L85 (1973); T. L. Clune, U. D. Desai, R. W. Klebesadel, J. B. Strong, ibid. 185, L1 (1973); F. W. Stecker, K. J. Frost, Nature (Phys. Sci.) 245, 71 (1973).

523.164.4(048)

**В. С. Троицкий, Л. Н. Бондарь, А. М. Стародубцев.** Поиск спорадического радиоизлучения из космоса. За последнее время стали усиленно проводиться поиски нерегулярного импульсного радиоизлучения из космоса, связанного с различными взрывными процессами в космосе, или сопутствующие, обнаруженные Вебером гравитационные волны, идущие из центра Галактики или, наконец, обусловленные деятельностью внеземной цивилизации, возможно, находящейся в окрестности Солнечной системы. Волны Вебера у Земли имеют большую энергию,

и для их объяснения требуется источник в центре Галактики с мощностью порядка  $10^{51}$  эрг/сек.гу. При таких мощных процессах, которые связываются с коллапсом массивных объектов, кажется неизбежным существование хотя бы ничтожной части энергии в виде электромагнитных волн.

К настоящему времени образовалось несколько групп исследователей, занимающихся поиском нерегулярного импульсного радиоизлучения из космоса, — в Англии (Кембриджская группа), США (группы Принстонская и «Белл телефон»), Канаде и СССР (НИРФИ, ИКИ АН СССР). В таблице приведены основные характеристики

Место	Время наблюдения	$\lambda$ , см	Число одновременно работающих станций	Объект	Чувствительность, ед. потока	Антенна: Дф, град	Авторы	
Англия (Кембридж)	V—VIII 1970 г.	200	5	Центр Галактики	$5 \cdot 10^3$	15	У. Чармен и др.	
США (Принстон)	V—VIII 1970 г.	1,5	1	То же	$10^6$	12	Р. Портридж	
США («Белл телефон»)	I—III 1971 г.	2	2	» »	$10^2$	0,2	То же Дж. Риксон	
		1,5	2	Крбовидная туманность	$10^6$	1,2		
Канада	VI—XII 1971 г.	35	1	Центр Галактики	$10^2$	1,4	У. Хьюз, Д. Реталлэк	
СССР (НИРФИ)	1970—1973 гг.	50	4	Все небо	$10^4$	Диполь	В. С. Троицкий и др.	
		35	2	» »	$10^4$	»	То же	
		21	2	» »	$10^4$	»	» »	
		15	2	» »	$10^4$	»	» »	
		8	2	» »	$10^4$	»	» »	
СССР (ИКИ АН СССР)	1972 г.	70—50	3	2	» »	$10^4$	»	Н. С. Кардашев и др.
			2	2	» »	$10^4$	»	
			2	2	» »	$10^4$	»	

условий наблюдений. Целью работы<sup>1</sup> был поиск импульсного нерегулярного радиоизлучения из области центра Галактики, возможно, сопровождающего гравитационные волны Вебера. Исключение местных помех достигалось одновременным наблюдением в пяти пунктах: Кембридж, Дублин, Харуэлл, Глазго и остров Мальта. При этом предусматривалось исключение местных помех также путем измерения дисперсии скорости волны по разности времени прихода импульсов со слегка разной частотой. За 1114 часов наблюдений, проводимых на частоте 151 Мгц в ночное время с мая по август 1970 г., отмечены 242 двойных совпадения. За 586 часов было обнаружено 6 тройных совпадений. Во время наблюдений не отмечено случаев совпадения в четырех и пяти пунктах. Ожидаемое число чисто случайных совпадений дает те же цифры. Авторы делают вывод, что не наблюдалось ни одного события импульсного радиоизлучения космического происхождения за 368 часов наблюдений.

В работе<sup>2</sup> исследовались импульсы радиоизлучения на волне  $\lambda = 2$  см в моменты, отмеченные Вебером как прием гравитационных волн из центра Галактики. В результате наблюдений с января по март 1971 г. найдено, что в интервалы  $\pm 2$  минуты от моментов времени импульсов Вебера попало 6 импульсов радиоизлучения. Расчет показал, что это количество близко к числу случайных совпадений. Авторы делают вывод, что с точностью до  $5 \cdot 10^6$  ед. потока не обнаружено радиосопровождения волн Вебера. Этот факт ими объясняется несколькими причинами. Дисперсионная задержка радиоволн может быть в  $10^4$ — $10^6$  раз больше ожидаемой, что приводит к потере корреляции; импульс радиоизлучения имеет большую длительность, чем гравитационный; аппаратура не регистрировала надежно изменения интенсивности за время порядка 50 сек и более. Далее, источники веберовских волн дают исключительно малую долю излучения в радиоволнах. Кроме этого, выдвигаются предположения, затрагивающие фундаментальные выводы общей теории относительности; например, если скорость

гравитационных волн отличается от скорости света всего на  $10^{-10}$  часть, то соответствие с радиосопровождением будет потеряно.

В работе <sup>3</sup> исследователи ставили такую же цель, что и в предыдущей работе. С целью выделения помех работали одновременно две станции, расположенные друг от друга на расстоянии 10 км. Наблюдения проводились на волне 1,5 см в двух пунктах — Хаверхолд-колледж и «Белл лабораториз», причем более чувствительная аппаратура была во втором пункте. За время наблюдений с мая по август 1970 г. было только одно совпадающее событие, которое по расчету является случайным. В этой же работе проводились наблюдения Крабовидной туманности, при этом не получено ни одного совпадающего всплеска. В работе <sup>4</sup> проводились наблюдения центра Галактики с июня по декабрь 1971 г. на волне 35 см. За 270 часов наблюдений зафиксировано 97 событий. Средняя плотность событий — 1 событие за 3 часа. Ни одного всплеска не попало в интервал  $\pm 5$  минут от момента веберовских всплесков. Оказалось, что радиопульсы идут из района центра Галактики, преимущественно из района направления с координатами

$$\alpha = 17^{\text{h}}48,2^{\text{m}} \pm 1,3^{\text{m}}, \quad \delta = 28^{\circ} 58' \pm 52' \quad (1950 \text{ г.}).$$

Длительность зафиксированных импульсов меньше 1 сек, поток порядка  $4 \cdot 10^{-24}$   $\text{вт}/\text{м}^2\text{гц}$ , плотность 10  $\text{имп}/\text{сутки}$ . Предполагается, что это гигантские и потому редкие импульсы от пульсара PSR 1749-28, положение которого попадает в квадрат области, излучающей импульсы. Авторами обсуждаются также возможности излучения при падении вещества в «черную дыру».

В результате всех работ оценена верхняя граница интенсивности радиоволн, возможно, сопровождающих гравитационные волны. Эта интенсивность меньше чем одна на  $10^{27}$  частей от интенсивности гравитационных волн. Если гравитационные волны Вебера из космоса — реальность, то факт отсутствия заметного электромагнитного сопровождения ставит много серьезных вопросов не только модельного, но и общезначимого характера. За последнее время В. Б. Брагинским экспериментально показано, что выводы Вебера о гравитационных волнах из космоса скорее всего ошибочны (см. <sup>5</sup>).

В цитируемых зарубежных работах отмечается, что не было обнаружено какой-либо связи индивидуальных событий с различными индивидуальными явлениями солнечной активности или ионосферными процессами. Следует заметить, что в это же время проводились поиски всплесков оптического и рентгеновского излучения с той же целью обнаружения корреляции с всплесками гравитационных волн. В оптике, по-видимому, обнаружены очень короткие вспышки от 1 до 50  $\text{мксек}$  в ночном небе, не коррелирующие, однако, с веберовскими. При баллонных измерениях рентгеновского излучения, по утверждению их авторов — Бэйрда и Номерантца <sup>6</sup>, обнаружены всплески рентгена, совпадающие с веберовскими не случайно. Оценена верхняя граница энергии импульса рентгена, оказавшаяся на девять порядков меньше энергии импульса гравитационных волн Вебера.

Наши работы начаты одновременно с зарубежными. Их основной целью был поиск случайных спорадических излучений из космоса, связанных с деятельностью внеземной цивилизации и другими причинами. В этих измерениях фиксировались события, длительность которых более одной секунды. В измерениях ИКИ, так же как и в зарубежных, медленные всплески с временем в несколько секунд подавлялись. В. Л. Гинзбург обратил внимание на то, что сейчас поиски нерегулярного импульсного излучения из космоса приобретают новый аспект в связи с обнаружением всплесков  $\gamma$ -излучения космического происхождения. Представляют большой интерес для раскрытия природы  $\gamma$ -всплесков поиски их радиосопровождения. Вообще, по-видимому, возникает некоторое новое самостоятельное направление в радиоастрономии — поиск и исследование нерегулярных эпизодических излучений из космоса.

Наблюдения спорадического радиоизлучения фона в НИРФИ (Горький) проводились с сентября по ноябрь 1970 г. одновременно в четырех пунктах территории СССР (Мурманская обл., Горьковская обл., Крым и Уссурийск) на волне  $\lambda = 50$  см, в июне и октябре 1971 г. на волнах от 3 до 50 см в двух пунктах (Горьковская обл. и Крым). В июле и августе 1972 г. синхронные наблюдения проводили в трех пунктах: Горьковская обл., Крым и корабль «Академик Курчатов», совершивший рейс в Атлантическом океане в районе экватора. Исследования показали <sup>7</sup>, что в сантиметровом и дециметровом диапазоне волн существуют всплески спорадического радиоизлучения и шумовые бури различной продолжительности и интенсивности. Встречаются всплески и шумовые бури, несущие глобальный характер. За время с сентября 1970 г. по ноябрь 1972 г. (150 суток наблюдений) было зарегистрировано 5800 всплесков на волне  $\lambda = 50$  см и 1900 всплесков на других волнах. Шумовых бурь на волне 50 см длительностью более одного часа было 25, более 10 минут — 650. Среди всех всплесков на волне 50 см было около 400 двойных и 130 тройных совпадающих всплесков. Все наблюдавшиеся всплески не похожи по форме друг на друга. Это означает, что они происходят из околоземного пространства, а не из дальнего космоса. Явление генерации возникает или на больших высотах порядка нескольких тысяч километров (высота одновре-

менной видимости Крыма и Уссурийска), или на высотах сотен километров, когда область генерации захватывает большие пространства. На рис. 1 приведена зависимость суточного хода экспериментального и вероятного чисел плотности совпадающих всплесков  $\bar{n}_2$  (час<sup>-1</sup>). На рисунке виден утренний и вечерний максимум плотности суточного хода совпадающих всплесков в разных пунктах, аналогичный максимумам

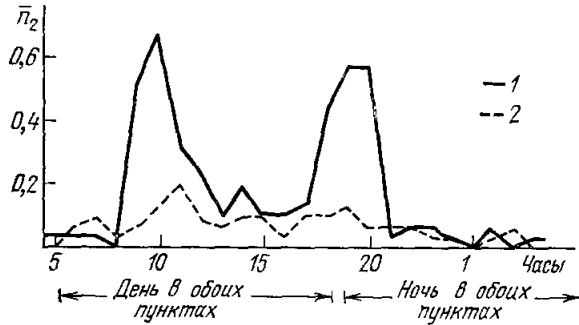


Рис. 1. Суточный ход фактической и вероятной плотности двойных совпадений Горький — Крым, усредненный за период 1. IX—2. XI 1970 г. ( $\lambda = 50$  см). 1 — фактическое число совпадений, 2 — случайное число совпадений.

и тройных совпадающих всплесков  $\bar{n}_2$  и  $\bar{n}_3$  зависят от эпохи наблюдений, в то время как у средней интенсивности всплесков этой зависимости не обнаружено. Среднемесячная плотность всплесков увеличивается пропорционально длине волны во всем интервале длин волн от 3 до 50 см. Излучение всплесков частично поляризовано, а ширина их спектра составляет 0,02—1 Гц. Средняя интенсивность всплесков по яркостной температуре небесной полусферы составляет 40—50 °К, что дает

в суточном ходе магнитных возмущений. Совпадающие всплески в трех пунктах одновременно возникают только днем. Наиболее вероятной причиной спорадического радиоизлучения может быть генерация в ионосфере Земли, вызываемая различными корцускулярными потоками, идущими от Солнца и из поясов радиации.

Изучены статистические характеристики всплесков (распределение по длительности, интенсивности, суточный ход и т. д.). Показано, что средняя длительность всплесков варьирует от 0,5 до 4,5 мин, зависит от эпохи наблюдений и не зависит от длины волны и места наблюдения. Среднемесячные плотности одиночных всплесков  $\bar{n}_1$ , а также двойных

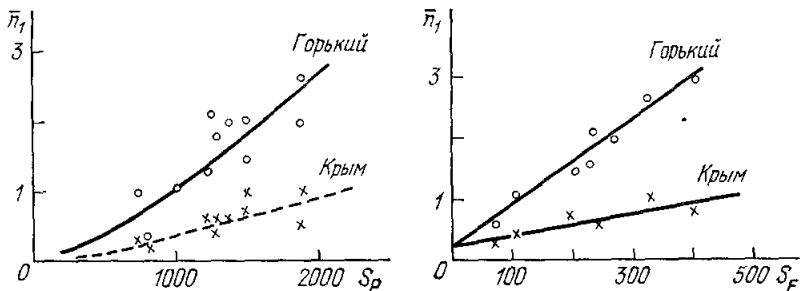


Рис. 2. Зависимость среднемесячной плотности одиночных всплесков  $\bar{n}_1$  от площади пятен и площади хромосферных вспышек за 1970—1972 гг. для Крыма и Горького ( $\lambda = 50$  см).

поток излучения  $(3-5) \cdot 10^{-21}$  вт/м<sup>2</sup>гц. Проведенный в работе<sup>8</sup> анализ показал, что коэффициент корреляции среднемесячной плотности одиночных и совпадающих всплесков и шумовых бурь со среднемесячной площадью пятен и хромосферных вспышек одинаков и находится в пределах 0,75—0,85. Таким образом, вся совокупность свойств всплесков и шумовых бурь спорадического радиоизлучения фона указывает на статистическую связь с индексами солнечной активности. Для наглядности на рис. 2 приведены полученные на основе временных зависимостей  $\bar{n}_1(t)$ ,  $\bar{n}_2(t)$  и  $\bar{S}_P(t)$ ,  $\bar{S}_F(t)$  графики среднемесячной плотности одиночных всплесков  $\bar{n}_1$  от среднемесячной площади пятен и хромосферных вспышек для всего периода наблюдений, охватывающего заметную часть одиннадцатилетнего цикла солнечной активности; рассмотрены различные механизмы спорадического радиоизлучения.

Проведено сопоставление всплесков радиоизлучения фона с датами 16 всплесков  $\gamma$ -излучения за 1970—1972 гг. Одновременные наблюдения, оказалось, имели место

только за один день 30 июня 1971 г. В этот день проводились синхронные наблюдения радиоизлучения в Горьком и в Крыму на волнах 20, 35 и 50 см. Кажется не случайным что именно для этого дня на волне  $\lambda = 50$  см в Крыму имел место радиовсплеск в  $20^{\text{h}} 29^{\text{m}} 30^{\text{s}}$  московского времени, на 30 сек предвещающий всплеск  $\gamma$ -излучения. Эффективная температура всплеска равна  $8^\circ\text{K}$ , что соответствует потоку  $5 \cdot 10^{-22}$  *вт/м<sup>2</sup>*; длительность всплеска — 20 сек, форма колоколообразная. На других волнах, в том числе и на 50 см, в Горьком и в Крыму близких по времени всплесков не наблюдалось. Для наблюдения в Крыму центр Галактики был на местном горизонте, а в Горьком — под горизонтом.

Наблюдаемые нами всплески спорадического радиоизлучения околоземного пространства могут сильно маскировать импульсы из космоса, затрудняя их обнаружение. С этой точки зрения наиболее подходящим диапазоном для наблюдений импульсов радиоизлучения является сантиметровый диапазон.

## ЛИТЕРАТУРА

1. W. N. Charman, J. H. Fruin, J. V. Jelleu, *Nature* 232 (5307) (1971).
2. R. V. Partridge, G. T. Wrixon, *Astrophys. J.* 173 (2, pt. 1) (1972).
3. R. V. Partridge, *Phys. Rev. Lett.* 26 (15) (1971).
4. V. A. Hughes, D. S. Retallack, *Nature* 242 (5393) (1973).
5. В. Б. Брагинский, А. Б. Манукян, Е. И. Попов, В. Н. Руденко, А. А. Хорев, *УФН* 108, 595 (1972).
6. G. A. Baird, M. A. Romerantz, *Phys. Rev. Lett.* 28, 1337 (1972).
7. В. С. Троицкий, Л. Н. Бондарь, А. М. Стародубцев и др., *Изв. вузов (Радиофизика)* 16 (3) (1973).
8. В. С. Троицкий, Л. Н. Бондарь, А. М. Стародубцев и др., *ДАН СССР* 212 (3) (1973).

[536.764 + 537.311.33](048)

Ф. Ю. Алиев, Э. Г. Касумова. Аномалии теплового расширения электропроводности охлажденных пленках  $\text{CuFeS}_2$ . В течение ряда лет проводятся исследования теплового расширения и электропроводности пленок полупроводников сложного состава с целью изучения влияния квантования уровней энергии носителей заряда<sup>1</sup> и выявления некоторых особенностей такого состояния вещества. Ранние исследования пленок  $\text{CuS}$  при низких температурах позволили обнаружить новую особенность — температурную осцилляцию электропроводности и коэффициента теплового расширения (КТР). Этот эффект обусловлен перемещением квантованных уровней (подзон) относительно уровня химического потенциала, который назван впервые квантовым температурно-размерным эффектом (КТРЭ)<sup>2</sup> и соответствует теории<sup>3</sup>.

Было также определено, что в пленке  $\text{CuS}$  температура сверхпроводящего перехода повышается (для массивного образца  $T_{\text{к}} = 1,65^\circ\text{K}$ , а для пленки  $\sim 3^\circ\text{K}$ )<sup>4</sup>. Эти исследования и теоретические предположения<sup>5</sup> позволили заключить о возможности явления сверхпроводимости в квантовых пленках полупроводников с относительно высокой температурой перехода. С этой целью исследовались тепловое расширение и электропроводность пленок антиферромагнитного полупроводника  $\text{CuFeS}_2$  от 2 до  $300^\circ\text{K}$ .

В процессе получения пленок было замечено, что в зависимости от способа их конденсации в свойствах появляются существенные отличия. Пленки получались термическим испарением соединения  $\text{CuFeS}_2$  в вакууме  $\sim 5 \cdot 10^{-5}$  мм рт. ст. при параллельном и перпендикулярном расположении поверхности подложки относительно оси конусообразного вольфрамового испарителя. Измерения теплового расширения от  $4,2$  до  $300^\circ\text{K}$  производилось применением метода биспиралей<sup>6</sup>.

На рис. 1 показана зависимость разности относительно изменения длины образца и стекла в единицах чувствительности прибора  $S_T = 8,3 \cdot 10^{-7}$  для пленки толщиной  $\sim 200 \text{ \AA}$ . Как видно, наблюдается аномалия, т. е. с увеличением температуры линейное тепловое расширение уменьшается и проявляется его осцилляция.

На рис. 2 приводится зависимость КТР от температуры, полученная дифференцированием указанной кривой пленки  $\text{CuFeS}_2$  толщиной  $\sim 200 \text{ \AA}$  с учетом расширения стекла. Как видно, в области  $4,2 - 89^\circ\text{K}$  КТР в некоторых интервалах температур принимает отрицательные значения и наблюдается КТРЭ, амплитуда которой экспоненциально растет с температурой<sup>3</sup>.

При температуре  $89^\circ\text{K}$  КТР терпит скачок аналогично фазовым переходам II рода. В области  $240 - 280^\circ\text{K}$  снова происходит скачок, связанный, по-видимому, с антиферромагнитным превращением.

Аналогичная картина получается и для пленки толщиной  $\sim 400 \text{ \AA}$ , где переход осуществляется около  $79^\circ\text{K}$ . Для выяснения характера перехода при  $90^\circ\text{K}$  измерялась

также электропроводность пленок  $\text{CuFeS}_2$  до 2 °К. На рис. 3 приводится зависимость удельного сопротивления  $\rho$  от температуры пленки толщиной  $\sim 200 \text{ \AA}$ , полученной на стеклянной плоской подложке параллельным перемещением ее вокруг испарителя. Как видно, и в данном случае температурная осцилляция  $\rho$  ясно проявляется до 88 °К,

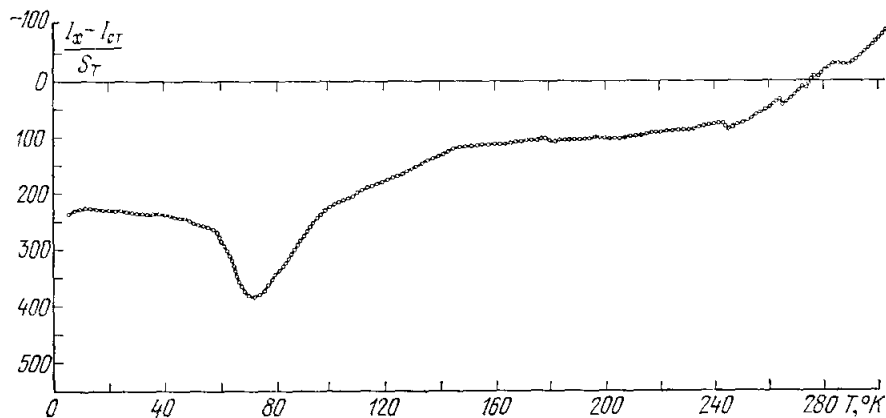


Рис. 1. Зависимость разности относительного изменения длины образца и стекла от температуры в единицах чувствительности прибора  $S_T = 8,3 \cdot 10^{-7}$  для пленки  $\text{CuFeS}_2$  толщиной  $\sim 200 \text{ \AA}$ .

где обнаруживается «исчезновение» сопротивления в узкой области температур шириной  $\sim 2^\circ$ . Величина сопротивления при этом уменьшается от 483 до 12 ом, т. е. приблизительно в 40 раз; в верхней границе провала удельное сопротивление  $\sim 2,42 \cdot 10^{-3} \text{ ом} \cdot \text{см}$ ,

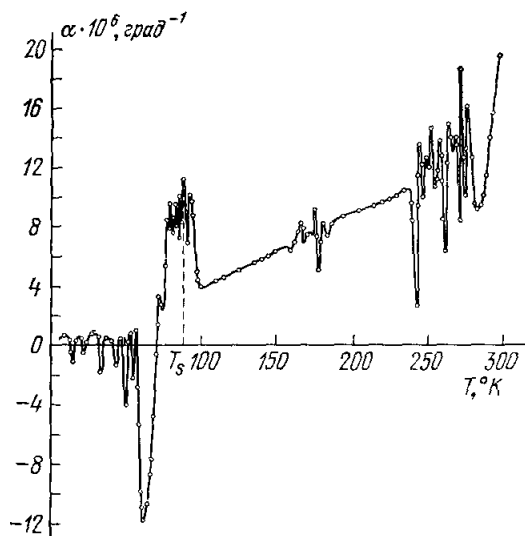


Рис. 2. Зависимость коэффициента теплового расширения от температуры для пленки  $\text{CuFeS}_2$  толщиной  $\sim 200 \text{ \AA}$ .

а в нижней  $\sim 6 \cdot 10^{-5} \text{ ом} \cdot \text{см}$ . Выше 90 °К сопротивление скачком восстанавливается и сохраняется прежний ход зависимости  $\rho$  от  $T$ .

Аналогичная картина получается для пленок толщиной  $\sim 500 \text{ \AA}$  с тем отличием, что температура перехода уменьшается до 70,2 °К, а ширина сужается до  $\sim 0,7^\circ$ .

В случае перпендикулярной конденсации удельное сопротивление имеет полупроводниковый ход, без каких-либо особенностей, как у массивного образца. Интересно отметить, что вышеуказанное явление, скачок сопротивления, и КТР наблюдаются

в пленках, в которых имеет место КТРЭ. Выбор такого вещества был обусловлен тем, что  $\text{CuFeS}_2$  является смесью двух ионных состояний  $\text{Cu}^1+\text{Fe}^3+\text{S}_2^{2-}$ ,  $\text{Cu}^2+\text{Fe}^2+\text{S}_2^{2-}$  с ионной и ковалентной связями, которые приводят к участию различных групп электронов в кинетических и термодинамических свойствах. Обнаружение в пленках «исчезновения» сопротивления при  $89^\circ\text{K}$  и фазового перехода II рода, определенного скачком КТР, позволяет сказать, что этот переход является сверхпроводящим переходом, обусловленным кулоновским взаимодействием электронов различных групп в соответствии с теорией <sup>5</sup>.

Согласно этой теории переход осуществляется в ограниченной области температур, выше и ниже которой сверхпроводник остается в нормальном состоянии. Наблюдаемое явление по своему характеру является весьма сложным, так как здесь, кроме

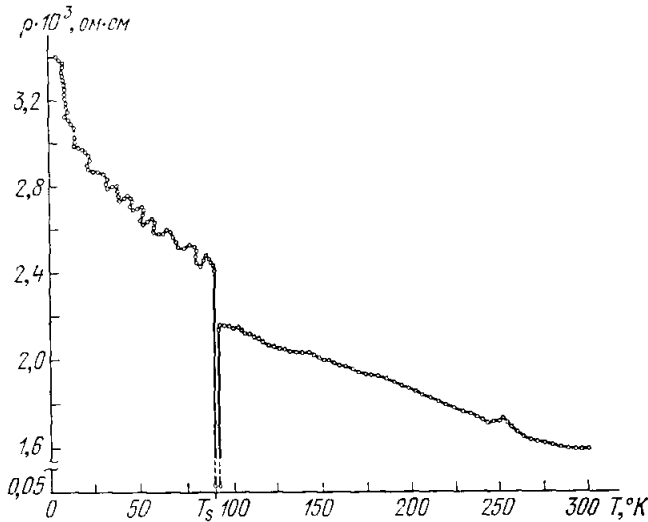


Рис. 3. Зависимость удельного сопротивления от температуры для пленки  $\text{CuFeS}_2$  толщиной  $\sim 200$  Å.

указанного механизма, существенную роль, по-видимому, играет магнитная анизотропия свойств в зависимости от условия конденсации пленок, и увеличение температуры перехода частично обусловлено обменным взаимодействием электронов различных групп, на которое ранее было обращено внимание в работах <sup>7</sup>.

Возникновение остаточного сопротивления и осцилляция КТР в окрестности точки перехода, по-видимому, связаны корреляцией флуктуаций плотностей состояний различных электронных групп.

Материал доклада опубликован в «Письмах в редакцию ЖЭТФ»—18, 3 (1973).

ЛИТЕРАТУРА

1. Б. А. Тавгер, В. Я. Демиховский, УФН 96, 61 (1968).
2. Ф. Ю. Алиев, Ф. Р. Годжаев, И. Г. Керимов, Е. С. Крупников, Письма ЖЭТФ 13, 679 (1971); 15, 24 (1972).
3. С. С. Недорезов, ЖЭТФ 59, 1353 (1970).
4. Ф. Ю. Алиев, И. Г. Керимов, Ф. Р. Годжаев, Е. И. Калинина, Е. С. Крупников, ДАН Азерб. ССР 27 (9), 18 (1971).
5. В. З. Кресин, Б. А. Тавгер, ФТТ 8, 1008 (1966).
6. Б. Г. Лазарев, А. И. Судовцов, ДАН СССР 69, 345 (1949).
7. В. Л. Гинзбург, ЖЭТФ 31, 202 (1956); С. В. Вонсовский, М. С. Свирицкий, ДАН СССР 122, 204 (1958); ЖЭТФ 39, 384 (1960).

537.311.31(048)

Н. Е. Алексеевский, А. А. Слуцкий. Магнитный пробой в металлах. Напряженности магнитных полей, используемых в современном эксперименте для изучения низкотемпературных свойств металлов, обычно хорошо удовлетворяют условию квазиклассичности  $\kappa = \hbar\omega_c/\epsilon_F \ll 1$  ( $\omega_c$  — характерная циклотронная частота,  $\epsilon_F$  — энергия Ферми). Это неравенство, как известно, позволило объяснить



большое число экспериментальных данных в терминах классического движения электрона проводимости по орбитам в импульсном пространстве.

В последнее время, однако, выяснилось, что целый ряд экспериментальных фактов не укладывается в рамки классической схемы. Для их объяснения оказывается необходимым учитывать квантовый характер динамики электронов проводимости уже в нулевом приближении по параметру квазиклассичности  $\kappa$ . Эти аномалии обусловлены магнитным пробоем (МП) <sup>1</sup> — межзонными туннельными переходами электронов проводимости, возникающими при достаточно сильных магнитных полях в узких областях импульсного пространства с малыми межзонными энергетическими щелями.

Основной динамической характеристикой магнитного пробоя является вероятность межзонного туннелирования  $W = \exp(-H_0/H)$ , где константа  $H_0 = (m_0 c / e \hbar) \times \Delta^2 / \epsilon_F$  ( $m_0$  — масса свободного электрона,  $c$  — скорость света,  $\Delta$  — межзонная энергетическая щель в области магнитного пробоя,  $e$  — заряд электрона). В пределе  $W \rightarrow 1$ ,  $H \gg H_0$  магнитный пробой вызывает только топологическую перестройку классических орбит, т. е. эту предельную ситуацию (так же, как и случай слабого пробоя  $W \rightarrow 0$ ,  $H_0 \gg H$ ) можно рассматривать классически. Как было показано в работе <sup>2</sup>, принципиально иная предельно квантовая картина возникает в промежуточной области  $H \sim H_0$ ,  $W(1-W) \sim 1$ . При этих значениях  $H$  кинетические явления в металлах обнаруживают своеобразную двойственность, отражающую корпускулярно-волновой дуализм магнитопробойной динамики электронов проводимости. Оказывается <sup>2</sup>, что при интерпретации экспериментальных данных по магнитному пробое возможны два качественно различных подхода. В одном из них (стохастическом) электроны рассматриваются как классические частицы, совершающие в областях магнитного пробоя, с вероятностью, равной  $W$ , случайные «перескоки» между орбитами. При другом подходе электроны рассматриваются как волна, для которой область магнитного пробоя представляет собой полупрозрачный туннельный контакт. Волна проходит через этот контакт с амплитудой, равной  $\sqrt{W}$ . Так как различные отраженные и прошедшие волны когерентно интерферируют друг с другом, магнитопробойные кинетические коэффициенты оказываются весьма чувствительными к фазе волновой функции электрона.

Согласно <sup>2</sup> реализация этих дополнительных друг к другу случаев определяется наличием в металле крупномасштабных слабых деформационных полей, созданных протяженными дефектами типа дислокаций. Если концентрация этих дефектов достаточно велика, то квантовая когерентность разрушается и происходит переход к стохастическому случаю \*).

Подобную же стохастизацию может вызывать и неоднородность внешнего магнитного поля. Следует подчеркнуть, что описанный дуализм имеет место только в условиях магнитного пробоя.

Отмеченные выше аспекты особенно ярко проявляются в поведении тензора магнитосопротивления  $\rho_{ih}(H)$ . Нами были проведены экспериментальные исследования магнитосопротивления Nb и Вe. Измерения проводились либо в сверхпроводящем, либо в водоохлаждаемом соленоиде, создававшем поле 150 кэ. Применение магнитных концентраторов давало возможность проводить измерения в полях до 180 кэ, при этом однородность поля была достаточно высокой.

1. Магнитный пробой в Nb <sup>3</sup>. Для измерений использовались очень совершенные образцы Nb с  $\rho(300^\circ\text{K})/\rho(4,2^\circ\text{K})_{H=0} = 10^5$  и плотностью дислокаций  $\approx 10^4 \text{ см}^{-2}$ . Характерная зависимость  $\rho_{xx}(H)$  представлена на рис. 1. Из рисунка видно, что  $\rho_{xx}(H)$  выходит на насыщение. Для Nb — металла с открытой поверхностью в 3-й зоне и  $n_1 \neq n_2$  — это однозначно свидетельствует о появлении магнитного пробоя. Анализ полученных данных показал хорошее согласие эксперимента с «когерентной» теорией. Этого и следовало ожидать, учитывая совершенство образцов Nb. Сравнение теории с экспериментом показало, что поле пробоя  $H_0 = 280 \pm 20 \text{ кэ}$  и межзонная щель  $\Delta \approx 0,09 \text{ эв}$  (0,068 ридберга). Полученное значение  $\Delta$  согласуется с теоретическими представлениями <sup>4</sup> об электронном спектре Nb.

\*) При этом характеристики возмущающего поля выпадают из окончательных выражений, играя, таким образом, роль своеобразных «скрытых» параметров.

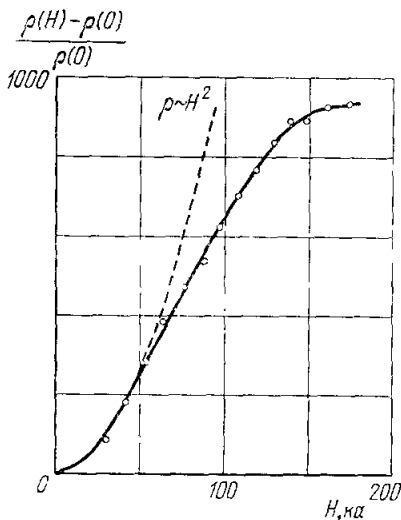


Рис. 1.

2. Магнитный пробой в Ве был обнаружен в работе<sup>5</sup> по излому на кривой  $\rho(H)$ . В дальнейшем было показано<sup>6</sup>, что в Ве при магнитном пробое между малой орбитой «сигары» и большой орбитой «короны» возникают гигантские осцилляции  $\rho(H)$  (рис. 2), периодичные по  $1/H$  с периодом  $eh^2/eS$ , где  $S$  — площадь малой орбиты. Относительная величина амплитуды осцилляций  $A$  оказалась  $\sim 1$ , что указывало на их «когерентное» происхождение и принципиальное отличие от всех ранее известных осцилляционных эффектов. Столь большое значение  $A$  было объяснено<sup>2, 6</sup> тем, что когерентный магнитный пробой в Ве формирует узкий слой токовых состояний, вклад которых в поперечную проводимость оказывается определяющим. Электроны в этих

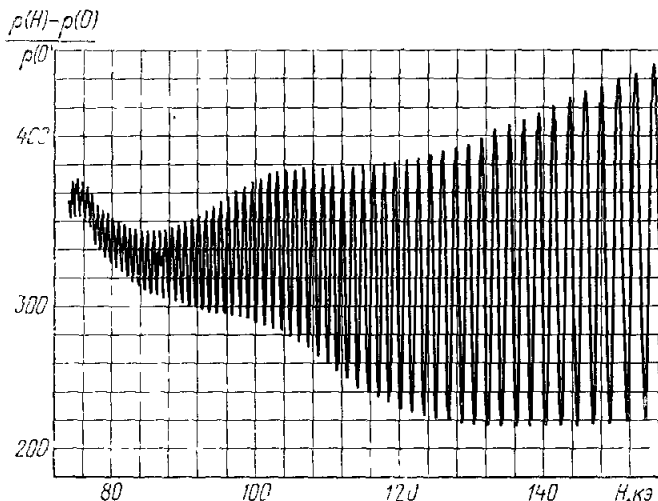


Рис. 2.

состояниях двигаются наподобие волны в периодическом волноводе, пропускная способность которого определяется приращением фазы квазиклассической волновой функции при обходе вокруг малой орбиты. Изменение этой фазы периодически модулирует весь поперечный ток, вызывая тем самым гигантские осцилляции  $\rho(H)$ . Расчет, основанный на изложенной идее, дал вполне удовлетворительное согласие с опытом<sup>7</sup>.

Особенно четко когерентность магнитного пробоя в Ве проявилась при исследовании разности фаз в осциллирующей зависимости  $\rho_{xx}$  и  $\rho_{yy}$ , проведенном недавно в работе<sup>8</sup>. Для одновременного измерения этих компонент использовался S-образный образец. Напряжение, снимаемое в образце, подавалось на двухкоординатный самописец. Разность фаз  $\theta$  определялась из формы эллипсов, получавшихся при изменении  $H$  на 2—3 кэ. Весьма существенно, что зависимость  $\theta$  от угла  $\alpha$  между  $H$  и осью [0001] оказалась очень резкой:  $\theta(0^\circ) = 0$ ,  $\theta(3^\circ) \sim \pi/2$ . Такое поведение  $\theta(\alpha)$  можно объяснить только в рамках «когерентной» теории, согласно которой уже малые отклонения  $H$  от оси [0001] приводят к резкой фазовой аperiodичности волновой функции в  $p$ -пространстве вдоль оси  $y$  (вдоль оси  $x$ , перпендикулярной к  $H$  и оси [0001], периодичность сохраняется) и, как следствие этого, — к расфазировке осцилляций  $\rho_{xx}$  и  $\rho_{yy}$  на величину  $\theta \sim b\alpha^2/\kappa$  ( $\kappa$  — параметр квазиклассичности, константа  $b \sim 1$ ). Эта формула хорошо согласуется с экспериментом.

В неоднородном поле величина  $A$  существенно уменьшалась, принимая значения, типичные для осцилляций, возникающих в стохастических условиях. Одновременно с этим оказалось, что  $\theta(\alpha) \equiv 0$ . Таким образом, вид функций  $\theta(\alpha)$  является хорошим индикатором когерентности или стохастичности магнитного пробоя.

Из сказанного следует, что макроскопически магнитный пробой проявляется как гигантская квантовая аномалия в нормальных металлах, весьма чувствительная к фазе волновой функции электрона. Это позволяет использовать магнитный пробой для создания квантовых интерферометров, работающих в больших магнитных полях. На основе эффекта гигантских осцилляций  $\rho(H)$  в Ве был создан прибор, позволяющий определить величину и градиент магнитного поля, а также магнитометр, позволяющий измерять восприимчивость. Точность этих приборов более чем  $10^{-5}$  и может быть существенно повышена.

Разумеется, Nb и Be не исчерпывают всех магнитопробойных металлов, которых сейчас известно уже более 10: Al, Zn, Mg и т. д. Дальнейшее увеличение магнитных полей, несомненно, существенно расширит этот список и приведет к обнаружению принципиально новых эффектов, имеющих значительный идейный и практический интерес.

## ЛИТЕРАТУРА

1. R. W. Stark, L. M. Falicov, Prog. Low Temp. Phys. 5, 235 (1967).
2. А. А. Слутский, ЖЭТФ 58, 1098 (1970); 65, 2114 (1973).
3. Н. Е. Алексеевский, К.-Х. Бертель, В. И. Нижанковский, Письма ЖЭТФ 19, 117 (1974).
4. L. M. Falicov, Phys. Rev. B1, 373 (1970).
5. Н. Е. Алексеевский, В. С. Егоров, ЖЭТФ 45, 388 (1963).
6. Н. Е. Алексеевский, В. С. Егоров, А. В. Дубровин. Письма ЖЭТФ 6, 793 (1967).
7. N. E. Alekseyevskii, A. A. Slutskii, V. S. Yegorov, J. Low Temp. Phys. 6, 69 (1972).
8. Н. Е. Алексеевский, В. И. Нижанковский, ФММ 38 (1974).