

Памяти Юрия Васильевича Копаева

PACS number: 01.60.+q

24 декабря 2012 г. в автокатастрофе трагически погиб академик, руководитель Отделения физики твёрдого тела Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, профессор Юрий Васильевич Копаев.

Не стало замечательного, всеми любимого, физически и духовно красивого человека, который жил и работал ярко и с увлечением, вкладывая в любое дело свой недожинный талант и частичку души.

Путь в науку этого крупнейшего учёного в области физики конденсированного состояния нельзя назвать типичным. После окончания сельской средней школы и техникума лёгкой промышленности в 1956 г. Юрий Васильевич поступил в Московский институт лёгкой промышленности, где, во многом под влиянием замечательного педагога, участника первых работ по исследованию цепных реакций С.С. Васильева, у него проявился интерес к физике. Тяга к самостоятельной научной работе привела к переходу в 1959 г. в Московский энергетический институт. К периоду обучения в МЭИ относятся первые опыты самостоятельных теоретических исследований на кафедре полупроводниковых приборов. По рекомендации заведующей кафедрой К.В. Шалимовой руководить его дипломной работой согласился молодой научный сотрудник ФИАНа — Л.В. Келдыш. Это сыграло определяющую роль в научной судьбе Юрия Васильевича.

После окончания в 1964 г. аспирантуры МЭИ и защиты кандидатской диссертации под руководством Л.В. Келдыша последовала работа в Зеленограде в НИИ молекулярной электроники. Уже здесь молодой учёный приобрёл большой авторитет, проявив особый талант активно генерировать плодотворные научные идеи и щедро делиться ими с коллегами. В 1970 г. Юрий Васильевич перешёл в Отдел теоретической физики Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, где в 1972 г. защитил докторскую диссертацию "К теории взаимосвязи электронных и структурных превращений и сверхпроводимости". В 1992 г. Ю.В. Копаев стал руководителем лаборатории физики полупроводников Отделения физики твёрдого тела (ОФТТ) ФИАН, а в 1995 г. был избран директором ОФТТ ФИАН.

В 1964 г. была опубликована ставшая знаменитой работа по теории диэлектрических фазовых переходов: Л.В. Келдыш, Ю.В. Копаев "Возможная неустойчивость полуметаллического состояния относительно кулоновского взаимодействия", *ФТТ* 6, 2791 (1964). Модель Келдыша-Копаева, введённая и исследованная в этой работе, позволила показать, что формализм Бардина-Купера-Шриффера (БКШ), развитый в теории сверхпроводимости, может быть эффективно модифициро-



Юрий Васильевич Копаев
(21.10.1937 – 24.12.2012)

ван и использован для описания фазовых переходов металл-диэлектрик в твёрдых телах. Фазовый переход в модели Келдыша-Копаева был интерпретирован как бозе-конденсация электрон-дырочных пар (экситонов). Впоследствии диэлектрическая фаза в модели Келдыша-Копаева получила название "экситонного диэлектрика", ставшее общеупотребительным. Модель экситонного диэлектрика Келдыша-Копаева приобрела статус стандартной схемы описания межэлектронных корреляций в пределе слабого взаимодействия.

В дальнейшем в работах Ю.В. Копаева с соавторами было показано, что модель экситонного диэлектрика описывает большое многообразие экспериментально наблюдаемых состояний, в частности, состояние волны зарядовой плотности, возникающее в результате пайерлсовского перехода, состояние волны спиновой плотности, описывающей зонный антиферромагнетизм электронов, слабый ферромагнетизм коллективизированных электронов, сегнетоэлектрическое состояние в ковалент-

ных кристаллах. Были исследованы и различные экзотические состояния, вытекающие из модели экситонного диэлектрика, такие как состояния с волнами плотности тока спина и заряда в так называемых орбитальных антиферромагнетиках.

В 1982 г. за работу "Предсказание, обнаружение и исследование бесщелевых полупроводников и экситонных фаз" Ю.В. Копаеву в составе авторского коллектива присуждена Государственная премия СССР.

При определённых условиях модель Келдыша–Копаева приводит к качественно новому типу упорядоченного состояния, параметром порядка в котором служит не плотность электрического дипольного момента, как в сегнетоэлектриках, не плотность магнитного дипольного момента, как в ферромагнетиках, а плотность тороидного дипольного момента, принадлежащая к независимому, наряду с семействами электрических и магнитных мультипольных моментов, семейству тороидных электромагнитных мультиполей. Идеи о тороидном упорядочении, которое связано со спонтанными токами в кристаллах и теоретически исследовано Ю.В. Копаевым с соавторами более тридцати лет тому назад, заметно опередили своё время: лишь в последние несколько лет начались активные экспериментальные исследования систем с тороидным упорядочением и поиски областей их применения в электронике.

В 2011 г. за цикл работ "Тороидное упорядочение в кристаллах" Ю.В. Копаеву присуждена золотая медаль им. П.Н. Лебедева Российской академии наук.

В самое последнее время гипотеза о спонтанных токах, существующих в кристаллах, переживает подлинный ренессанс в связи с открытием нового класса твёрдых тел, названных топологическими изоляторами. Открытие этих особых состояний вещества, подобных состоянию квантового эффекта Холла, привело к радикальному изменению самого принципа классификации фаз вещества, дополнив определение фазы её топологическими характеристиками. В топологических изоляторах, являющихся диэлектриками в объёме, возникает система топологически защищённых, устойчивых по отношению к возмущениям, спонтанных токов электрического заряда или спина, протекающих по поверхности. С уникальными свойствами топологических изоляторов связаны вполне обоснованные надежды на их использование в электронике, в частности, для решения проблемы квантовых вычислений. Юрий Васильевич сразу же осознал значимость топологических изоляторов как для фундаментальных исследований, так и для практических приложений. С присущим ему энтузиазмом он погрузился в разработку новой проблемы, привлекая к работе над ней сотрудников, аспирантов, студентов.

Значительный цикл работ Ю.В. Копаева с соавторами посвящён исследованию неравновесных фазовых переходов в полупроводниках. Был предложен и подробно исследован электронный механизм лазерного отжига, согласно которому разрушение кристаллической структуры связано с возникновением структурной неустойчивости при возбуждении неравновесных носителей заряда (неравновесный фазовый переход), что и наблюдается в ряде полупроводников.

За цикл работ "Открытие явления импульсной ориентированной кристаллизации твёрдых тел (лазерный отжиг)" Ю.В. Копаеву в составе авторского коллектива присуждена Государственная премия СССР 1988 г.

В области физических основ нанoeлектроники Ю.В. Копаевым с соавторами разработаны новые принципы обработки и преобразования информации, основанные на управляемой перестройке когерентных состояний квантовых гетероструктур, содержащих туннельно-связанные квантовые ямы, и предложены новые типы функционально-интегрированных логических квантовых элементов.

Ю.В. Копаевым в соавторстве с В.Ф. Елесиным создана микроскопическая кинетическая теория квантового каскадного лазера и предложены варианты конструкции, обеспечивающие снижение критических токов и повышение рабочей температуры.

Многие замечательные результаты, полученные Ю.В. Копаевым в области физики сверхпроводящего состояния в Отделе теоретической физики ФИАН, куда он был приглашён В.Л. Гинзбургом в группу изучения проблемы высокотемпературной сверхпроводимости, явно опередили своё время. Задолго до открытия высокотемпературной сверхпроводимости купратов, являющихся легированными диэлектриками, Юрием Васильевичем исследована возможность конструктивной интерференции диэлектрических и сверхпроводящих корреляций. Впервые было показано, что частичная диэлектризация электронного спектра может приводить к значительному увеличению температуры сверхпроводящего перехода и изменению свойств сверхпроводящего состояния по сравнению со стандартной моделью БКШ. Большая часть этих исследований была опубликована в широко известной коллективной монографии *Проблема высокотемпературной сверхпроводимости*, изданной в 1977 г. под редакцией В.Л. Гинзбурга и Д.А. Киржница, а затем практически немедленно переведённой на английский язык и изданной в США.

В последние годы Ю.В. Копаевым с соавторами был предложен и разработан новый механизм сверхпроводимости, который учитывает особенности электронной структуры ВТСП купратов, допускающие сверхпроводящее спаривание с большим суммарным импульсом пары при экранированном кулоновском отталкивании. Исследование конкуренции и сосуществования сверхпроводящего и диэлектрических состояний в ВТСП купратах привели к выяснению нетривиальной импульсной зависимости сверхпроводящего параметра порядка, а также к качественному объяснению фазовой диаграммы и ключевых физических свойств купратов.

Много времени и сил профессор Ю.В. Копаев уделял профессиональной подготовке молодых специалистов. В течение 38 лет он преподавал в Национальном исследовательском университете "МИЭТ". Им были прочитаны оригинальные курсы, такие как "Физика твёрдого тела", "Физика полупроводников", "Физическая природа биологических полей", "Неупорядоченные полупроводники", "Кинетические процессы в полупроводниках", "Физические основы нанoeлектроники", "Топологические изоляторы". Живые, содержательные и нетривиальные лекции Ю.В. Копаева всегда были событием для многих студентов, которым они открыли дверь в науку. Под его руководством были подготовлены 15 кандидатов физико-математических наук, пятеро из которых впоследствии стали докторами наук.

По инициативе Ю.В. Копаева, предвосхитившего многие идеи Федеральной программы "Интеграция", в 1994 г. был организован Научно-образовательный центр

ФИАН и МИЭТ "Квантовые приборы и нанотехнологии", который объединил научный потенциал ОФТТ ФИАНа в области физики твёрдого тела и полупроводников и опыт учёных МИЭТа в области разработки и проектирования полупроводниковых приборов и интегральных схем.

В 2003 г. Ю.В. Копаеву была присуждена Премия Президента Российской Федерации в области образования.

За научные заслуги Ю.В. Копаев награждён Орденом Почёта.

Юрий Васильевич Копаев много времени и сил уделял организационной и научно-общественной работе в качестве заместителя главного редактора *Журнала экспериментальной и теоретической физики*, члена редколлегии журналов *Кристаллография* и *Известия Высших учебных заведений. Электроника*, члена Учёного совета Физического института им. П.Н. Лебедева РАН, члена Специализированных Учёных советов ФИАН, ИОФАН и МИЭТ, председателя секции "Теория конденсированного состояния" при Президиуме РАН, председателя экспертного Совета по физике и астрономии РФФИ и члена комиссии по нанотехнологиям при Президиуме РАН. В течение многих лет Юрий Васильевич организовывал и проводил ежемесячные заседания научных сессий Отделения физических наук РАН по фундаментальным проблемам физики и выполнял обязанности Председателя Международной конференции "Фундаментальные проблемы сверхпроводимости".

Разносторонность дарований, глубокая эрудиция и замечательные душевные качества Юрия Васильевича привлекали многих. К концу жизни только список соавторов насчитывал 96 человек. В Российской Федерации нет, наверное, такого физического центра, где бы у Ю.В. Копаева не было друзей. До самого последнего дня он работал, творил и увлекал. Всегда в курсе последних научных публикаций, всегда с новой идеей ("вот вчера придумал"), Юрий Васильевич Копаев был примером для молодёжи и опорой для старшего поколения.

После его ухода осталось обновлённое Отделение физики твёрдого тела ФИАН, оснащённое современным

экспериментальным и технологическим оборудованием. Остались полученные им замечательные научные результаты. Осталась активно развивающаяся деятельность по исследованию топологических изоляторов, ждёт своего экспериментального подтверждения идея зарядового топологического изолятора в слоистых соединениях с волной зарядовой плотности.

Остались многочисленные ученики, благодарные коллеги и друзья.

Осталась большая дружная семья, которая так много для него значила.

Осталась светлая память.

Ж.И. Алфёров, А.Ф. Андреев, А.А. Андронов, А.Л. Асеев, Ю.А. Алещенко, В.С. Багаев, С.Н. Багаев, В.И. Белявский, М.А. Васильев, С.И. Веденеев, Н.В. Волков, Б.Л. Воронов, А.В. Гапонов-Грехов, С.В. Гапонов, А.А. Гиппиус, А.А. Горбачевич, Г.Г. Громов, Ю.В. Гуляев, А.В. Гуревич, О.Д. Далькаров, А.В. Двуреченский, А.Г. Забродский, В.Е. Захаров, В.И. Егоркин, В.Ф. Елесин, И.И. Засавицкий, А.К. Звездин, К.П. Зыбин, О.М. Иваненко, А.А. Ионин, В.В. Капаев, И.П. Казаков, Н.С. Кардашов, П.К. Кашикар, В.В. Кведер, Л.В. Келдыш, Д.М. Климов, А.Ю. Колоков, З.Ф. Красильник, О.Н. Крохин, В.Д. Кулаковский, Ю.Н. Кульчин, А.В. Латышев, А.Р. Лепёшкин, А.Г. Литвак, В.Ф. Лукичев, А.В. Масалов, Г.А. Месяц, К.В. Мицен, С.Н. Молотков, А.К. Мороча, В.Н. Мурзин, В.Н. Неволин, И.Г. Неизвестный, М.С. Нунупаров, С.Г. Овчинников, А.А. Орликовский, Ю.С. Осипов, В.Н. Очкин, В.Я. Панченко, Н.Н. Плакида, Н.Г. Полухина, В.М. Пудалов, Ф.А. Пудонин, В.Д. Садовский, М.В. Садовский, Н.Н. Салащенко, К.М. Салихов, В.П. Силин, Н.Н. Сибельдин, С.М. Стишов, Р.А. Сурис, Н.Н. Сысоев, В.Ф. Тарасов, В.Б. Тимофеев, С.Г. Тиходеев, В.В. Тугушев, Ю.А. Успенский, В.В. Устинов, Д.М. Фаворский, Е.А. Федосеев, В.Е. Фортков, Д.Р. Хохлов, В.И. Цebro, А.В. Чаплик, Ю.А. Чаплыгин, И.А. Щербаков