

## 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 недожизненный 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. Форт, Д.Р. Хохлов, В.И. Цebro, А.В. Чаплик, Ю.А. Чаплыгин, И.А. Щербаков*