

### 1. Электрический дипольный момент электрона

Стандартная модель элементарных частиц предсказывает существование у электрона электрического дипольного момента величиной  $d_e \sim 10^{-40} e$  см, но эффекты за пределами Стандартной модели могли бы на много порядков его усилить. В экспериментах коллаборации АСМЕ по спектроскопическому исследованию пучков нейтральных молекул ранее было получено ограничение  $d_e < 9,4 \times 10^{-29} e$  см. Исследователи из Национального института стандартов и технологий и Колорадского университета в Боулдере (США) выполнили новый эксперимент по измерению  $d_e$  с использованием молекулярных ионов  $^{180}\text{Nf}^{19}\text{F}^+$  в ловушке с вращающимся электрическим полем. В течение  $\approx 700$  мс, пока ионы находились в ловушке, спины внешних электронов в молекулах прецессировали, и в угле прецессии мог содержаться вклад от взаимодействия  $d_e$  с внутренним электрическим полем молекулы. Угол прецессии измерялся путём диссоциации молекул и регистрации ионов. На достигнутом уровне точности ненулевой  $d_e$  выявлен не был, и получено ограничение  $d_e < 1,3 \times 10^{-28} e$  см. Хотя это ограничение не сильнее полученного ранее АСМЕ, важность работы заключается в том, что результат АСМЕ подтверждён с помощью новой экспериментальной методики и другой физической системы. Наличие дипольного момента электрона могло бы быть связано с асимметрией относительно обращения времени и генерацией барионной асимметрии в ранней Вселенной.

Источник: *Phys. Rev. Lett.* **119** 153001 (2017)

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.153001>

### 2. Управление шириной запрещённой зоны в экситонном изоляторе

Как показали теоретически Л.В. Келдыш и Ю.В. Копаев в 1964 г., в полупроводниках с малой шириной запрещённой зоны может происходить бозе-эйнштейновская конденсация экситонов (связанных состояний электронов и дырок), приводящая к формированию стабильной фазы "экситонного изолятора". Позже эта фаза действительно была обнаружена в некоторых соединениях, в том числе в слоистом полупроводнике  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$ . В новом эксперименте S. Mог (Институт им. Фрица Хабера Общества М. Планка, Германия) и др. исследовали сверхбыструю неравновесную динамику электронной структуры  $\text{Ta}_2\text{NiSe}_5$  под влиянием лазерных импульсов ближнего ИК-диапазона методом фотоэлектронной спектроскопии с временным и угловым разрешением. Было установлено, что при уменьшении поверхностной плотности излучения  $F_c$  ниже величины  $0,2$  мДж см $^{-2}$  запрещённая зона резко сужается, а при увеличении  $F_c$  она расширяется. Это поведение противоположно тому, что имеет место в обычных полупроводниках. Для прояснения механизма данного явления были выполнены теоретические расчёты методом Хартри–Фока, которые показали, что ключевую роль здесь играет возрастание параметра порядка (плотности) экситонного конденсата. О когерентных состояниях экситонов см. в статье Л.В. Келдыша в этом номере *УФН* (с. 1273).

Источник: *Phys. Rev. Lett.* **119** 086401 (2017)

<https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.119.086401>

### 3. Ионизация фазово-синхронизированными импульсами

D.V. Foote (Мэрилендский университет, США) и др. исследовали многофотонную ионизацию атомов Хе двойными лазерными импульсами, синхронизированными по фазе. Двойные импульсы получались из одиночных с помощью жидкокристаллического модулятора или путём разделения импульсов в интерферометре. Измерение числа образующихся под влиянием двойных импульсов ионов Хе $^+$  позволило выявить зависимость эффективности ионизации от формы и взаимного расположения импульсов. В частности, оказалось, что даже небольшое (на уровне  $\sim 10\%$ ) перекрытие двух импульсов по времени приводит к существенным изменениям выхода ионов из-за оптической интерференции, которая изменяет интенсивность составного импульса. Также присутствует незначительный вклад от квантовой интерференции волновых функций возбуждённых электронов. Ионизация в поле сильной электромагнитной волны была рассмотрена в теоретической работе Л.В. Келдыша в *ЖЭТФ* **47** 1945 (1964).

Источник: *Phys. Rev. A* **96** 023425 (2017)

<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.023425>

### 4. Квантово-электродинамические каскады с ионизацией атомов

В ближайшие годы ожидается появление лазеров с мощностью до 10 ПВт, в поле излучения которых возможно развитие квантово-электродинамических каскадов (см. *УФН* **185** 103 (2015)). В таких каскадах происходит лавинообразное цепное рождение фотонов и электрон-позитронных пар. Для рождения  $e^+e^-$  в вакууме требуются лазерные поля большой интенсивности. Но каскад может развиваться и в более слабых полях в том случае, когда источниками начальных электронов являются атомы при их ионизации. Исследователи из Института прикладной физики РАН (г. Нижний Новгород) И.И. Артеменко и И.Ю. Костюков выполнили теоретическое исследование квантово-электродинамических каскадов с ионизацией тяжёлых атомов в поле двух встречных лазерных импульсов. По сравнению с предшествующими упрощёнными моделями, была учтена ионизация не только с внешних, но и с внутренних электронных уровней, а для темпа ионизации получена удобная формула, описывающая как режим слабой интенсивности, так и режим экстремально сильной интенсивности лазерного излучения. Характер ионизации атомов при различных значениях ионизационного потенциала, частоты и интенсивности излучения определяется параметром Келдыша  $\gamma_K$ . Моделирование методом Монте-Карло позволило рассчитать распределение и спектр каскадных электронов и фотонов. Важным фактором в развитии каскада является вытравливание большинства электронов пондеромоторными силами из области наиболее сильного лазерного излучения, но малое число остающихся электронов продолжает поддерживать каскад. Изучение квантово-электродинамических каскадов важно для ряда перспективных лазерных технологий, в числе которых фотоядерные реакции и лазерно-плазменное ускорение частиц.

Источник: *Phys. Rev. A* **96** 032106 (2017)

<https://doi.org/10.1103/PhysRevA.96.032106>

### 5. Бесфазовое распространение в волноводе

Если показатель преломления вещества  $n \rightarrow 0$ , то длина электромагнитной волны в образце  $\lambda \rightarrow \infty$ , и её фаза на всём протяжении образца одинакова. Бесфазовое распространение волн уже было продемонстрировано в ряде систем. Е. Mazur (Гарвардский университет, США) и его коллеги развили данную технологию, создав кремниевый волновод на основе метаматериала, который поддерживает бесфазовое распространение, причём новая технология совместима с обычными телекоммуникационными устройствами. Волновод представляет собой пластину с полукруглыми вырезами на подложке, заполненной массивом отверстий. Переход  $n$  через ноль при  $\lambda = 1625$  нм происходит благодаря наличию одновременно электрического и магнитного дипольных резонансов. При приближении  $n$  к нулю у волны сохраняется конечная групповая скорость, и волна может переносить энергию. Из-за большой частоты волны наблюдать напрямую её бесфазовое распространение затруднительно, поэтому с помощью инфракрасной камеры наблюдались биения при интерференции двух встречных волн, происходящие когерентно по всей длине волновода.

Источник: *ACS Photonics* 4 2385 (2017)  
<https://doi.org/10.1021/acsphotonics.7b00760>

### 6. Генерация терагерцового излучения в жидкой воде

Электромагнитное излучение терагерцового (ТГц) диапазона привлекает большое внимание благодаря возможности неструктивно просвечивать многие материалы. Одним из перспективным методов генерации терагерцового излучения является оптико-терагерцовое преобразование, происходящее при воздействии лазерного света на вещество. Q. Jin (Рочестерский университет (США) и Хуачжунский университет науки и технологии (КНР)) и др. впервые экспериментально продемонстрировали генерацию широкополосных терагерцовых сигналов в жидкой воде под действием фемтосекундных лазерных импульсов с частотой повторения 1 кГц, которые фокусировались параболическим зеркалом внутри плёнки воды толщиной  $\approx 180$  мкм. Плёнка двигалась со скоростью  $1,3$  м с<sup>-1</sup> и стационарно поддерживалась между двумя алюминиевыми проволоками благодаря поверхности натяжению воды. Использование тонкой плёнки позволяет излучению выходить наружу, не поглощаясь. Обнаружена сильная зависимость генерируемого излучения от направления поляризации лазерного излучения по отношению к плоскости плёнки и от длительности лазерных импульсов. Вероятным механизмом генерации является мультифотонная и каскадная ионизация молекул и плазменные колебания. О других источниках терагерцового излучения см. в *УФН* 181 867 (2011) и *УФН* 186 667 (2016). О высокочувствительных приёмниках терагерцового излучения см. в *УФН* 176 983 (2006) и *УФН* 184 1033 (2014).

Источник: *Appl. Phys. Lett.* 111 071103 (2017)  
<https://doi.org/10.1063/1.4990824>

### 7. Движение воды под действием лазерного излучения

Поскольку фотоны переносят импульс, воздействие света на газы и жидкости может вызывать гидродинамические потоки, что уже было ранее продемонстрировано в экспериментах. В частности, поток наблюдался вблизи поверхности воды из-за её деформации. Y. Wang (Университет электронных наук и технологий Китая и Хьюстонский университет (США)) и др. обнаружили новый эффект, при котором пульсирующее лазерное излучение создаёт устойчивые потоки в объёме чистой воды. Сначала ёмкость была заполнена водной взвесью золотых наночастиц, и через несколько минут возникал гидродинамический поток в направлении луча. Поток наблюдался по отражению света другого лазера от полимерных микросфер в воде, служивших маркерами. Исследование с помощью гидрофона показало, что поток возникал под влиянием ультразвуковых волн, которые генерировались при резком тепловом расширении золотых наночастиц, нагревае-

мых лазерными импульсами. Важно, что наночастицы в объёме воды были нужны только для возникновения течения, и поток сохранялся после замещения взвеси чистой водой. Оказалось, что за поток чистой воды ответственны наночастицы, внедрившиеся в стекло. Созданные ими микроворонки на внутренней поверхности сосуда обнаружены и исследованы с помощью сканирующего электронного микроскопа. Поток чистой воды поддерживался в течение примерно часа, пока происходило вымывание наночастиц из воронок.

Источник: *Science Advances* 3 e1700555 (2017)  
<https://doi.org/10.1126/sciadv.1700555>

### 8. Новые результаты LIGO/Virgo

С помощью гравитационно-волновых интерферометров LIGO/Virgo впервые выполнена регистрация гравитационного всплеска GW170814 сразу тремя детекторами, а также впервые зарегистрирован всплеск GW170817, который связан с гамма-всплеском GRB 170817A. С 1 августа 2017 г. к наблюдениям гравитационных волн, выполняемым на двух детекторах LIGO, которые находятся в США, присоединился детектор Virgo, расположенный в Италии. 14 августа 2017 г. тремя детекторами зарегистрирован всплеск гравитационных волн GW170814. Его характеристики соответствуют слиянию двух чёрных дыр с массами  $30,5M_{\odot}$  и  $25,3M_{\odot}$ . По данным трёх детекторов направление на источник определяется на порядок лучше, чем в случае двух детекторов. Также впервые определена поляризация гравитационной волны и подтверждено предсказание Общей теории относительности о тензорном характере поляризации, а чисто скалярный и чисто векторный варианты исключены. 17 августа 2017 г. LIGO/Virgo зарегистрировали всплеск GW170817, из области локализации которого спустя  $1,74 \pm 0,05$  с телескопом Fermi-GBM был зарегистрирован короткий гамма-всплеск GRB 170817A. Массы сливающихся объектов заключены в интервалах от  $1,17M_{\odot}$  до  $1,60M_{\odot}$ , что соответствует массам нейтронных звёзд. Таким образом, впервые посредством гравитационных волн наблюдалось слияние нейтронных звёзд в двойной системе и доказано, что короткие гамма-всплески могут генерироваться при таких слияниях. Скорость распространения гравитационных волн с относительной точностью  $\sim 10^{-15}$  совпала со скоростью света, что также подтверждает Общую теорию относительности и ограничивает параметры ряда моделей космологической тёмной энергии. Из того же направления спустя несколько часов после сигнала GW170817 с помощью нескольких телескопов было зарегистрировано оптическое излучение. В том числе оптический сигнал наблюдался российской глобальной роботизированной сетью телескопов МАСТЕР, созданной под руководством В.М. Липунова (ГАИШ МГУ) (см. *УФН* 186 1011 (2016)). Источник оптического излучения находится в галактике NGC 4993 на расстоянии 2 кпк от её центра. Также излучение было зарегистрировано в рентгеновском, УФ-, ИК- и радиодиапазонах. Свойства сигналов хорошо соответствуют предсказаниям модели "килоновой". Оптическое излучение в этой модели генерируется при радиоактивных распадах тяжёлых ядер, образующихся в процессе нуклеосинтеза при слиянии нейтронных звёзд. О расчётах темпа генерации гравитационных сигналов от слияний нейтронных звёзд см. в *УФН* 171 3 (2001), об истории разработки детекторов гравитационных волн см. в *УФН* 186 968 (2016) и о значимости их регистрации см. в *УФН* 184 367 (2014), *УФН* 186 1001 (2016), *УФН* 186 1011 (2016), *УФН* 187 884 (2017).

Источники: *Phys. Rev. Lett.* 119 141101, 161101 (2017)  
*Astrophys. J. Lett.* 848 L12 (2017)  
<https://arxiv.org/abs/1709.09660>  
<https://arxiv.org/abs/1710.05832>  
<https://arxiv.org/abs/1709.05833>  
<https://arxiv.org/abs/1710.05461>

Подготовил Ю.Н. Ерошенко  
 (e-mail: erosh@ufn.ru)