

Арепьев Ю. Д.

СКОРОСТЬ СВЕТА: ОТ НУЛЯ ДО БЕСКОНЕЧНОСТИ

Институт физики полупроводников НАНУ, проспект Науки 45, Киев, 03028, Украина;

e-mail: yuri@arepjev.relc.com

<http://www.chronos.msu.ru/lab-kaf/Oleynik/eoleynik.html>

Бурное развитие систем коммуникации, обеспечивающее получение и обработку информации, с необходимостью ставит вопрос об увеличении скорости передачи информации, верхняя граница которой, исходя из установленных на сегодняшний день знаний, не может превышать скорости света в вакууме. Поэтому в последнее время предпринимаются настойчивые попытки исследователей многих стран выйти (если такое возможно) за эту границу. Цель предлагаемого обзора – ознакомить специалистов, работающих в области средств коммуникации, с современной проблематикой управления скоростью света, и отобразить состояние дел со “сверхсветовыми” исследованиями на данный момент.

Ключевые слова: информация, скорость света, сверхсветовая коммуникация.

Введение

Настоящий обзор является попыткой ознакомить специалистов, занимающихся проблемами средств коммуникации, с интенсивными исследованиями последнего десятилетия, касающимися возможности управления скоростью распространения электромагнитного сигнала (в основном, на примере световых фотонов) в обоих направлениях от хорошо известной точки отсчёта — скорости распространения света в вакууме — c . Важно отметить, что если первая часть проблемы (так называемая «остановка» света) не вызвала принципиальных возражений физиков и была только вопросом времени, необходимого для создания новых экспериментальных возможностей, вторая часть (продвижение за границу скорости света в вакууме) — есть предмет не только бурных дискуссий и интенсивных исследований (берущих своё начало в 60-е годы¹), но и активного неприятия трактовки результатов эксперимента теми же физиками, твёрдо знающими *истину*², что передача сигнала со скоростью, превышающей скорость света в вакууме, строго запрещена специальной теорией относительности. Естественно, что скоропалительное желание объявить первым о достигнутом успехе в решении проблемы не должно защищать авторов сенсационных публикаций от критики, тем более если появление публикации сопровождается комментариями СМИ о том, что «рухнула теория относительности». Но всё увеличивающийся фронт исследований данной проблемы даёт лишний раз основание утверждать, как и героям известной пьесы Шекспира, что *не всё спокойно в датском королевстве и есть много чего такого, друг Горацио, что и не снилось нашим мудрецам*.

Наука не стоит на месте и критика методами стандартной теории бурно развивающейся области исследования не является окончательным приговором. Обзор не носит характер критического разбора рассматриваемых экспериментальных и теоретических работ: заинтересованный читатель всегда может обратиться к указанным в списке литературы работам, чтобы самому разобраться в интересующем его вопросе и конкретных деталях эксперимента или теоретической модели из «первых рук». Автор хотел показать читателю значимость исследуемой проблемы для создания совершенно новых технологий, в частности, современных средств коммуникации, которые, при успешном решении рассматриваемой проблемы, предоставят уникальные возможности для развития человеческого общества. В

¹ Сверхсветовой физический объект — лазерный импульс в усиливающей среде — был впервые обнаружен в 1965 году, а возможность сверхсветового движения обсуждалась до начала 70-х годов.

² «Всякий, кто попытается выступить в качестве авторитета в области Истины и Познания, потерпит жалкое фиаско под хохот богов» — А.Эйнштейн.

заклучении будет изложено понимание ситуации автором обзора и его подход к возможному решению данной проблемы.³

По дороге к нулю⁴

Успехи последних десятилетий по созданию электромагнитных ловушек, удерживающих атомы при сверхнизких температурах (порядка десятков μK), привели логичным образом к увеличению числа удерживаемых атомов до нескольких сот тысяч, а также к созданию бозе-конденсата из газа этих атомов. Эти успехи, а также использование уникальных свойств сверхохлаждённого газа атомов позволили физикам приступить к осуществлению экспериментов по так называемой «остановке» света. (Каждый физик знает, что скорость света в вакууме около 300 000 000 м/сек. Хотя через вещество свет распространяется медленнее, всё же его скорость остаётся порядка тысячи метров в секунду).

Первый шаг осуществила группа из Гарвардского института Роуанда (Harvard/Rowland Institute of Science) под руководством Lene Vestergaard Hau. Используя эффект фотоиндуцированной прозрачности (ФИП)⁵ в сверххолодном газе атомов натрия они смогли уменьшить скорость света до 17 м/сек. [1]

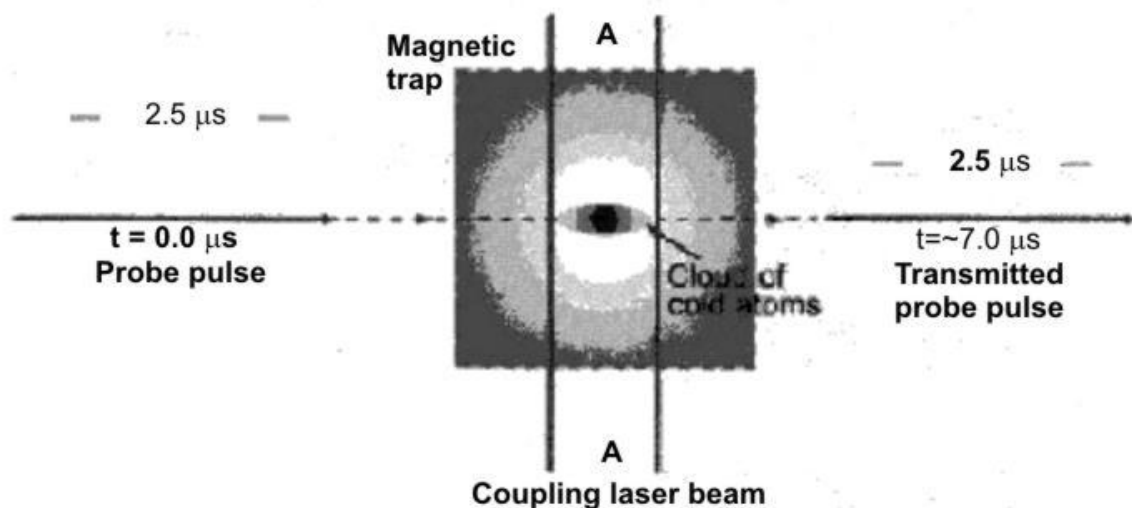


Рис. 1. Экспериментальная установка Хау и сотр. Циркулярно поляризованный сигнальный импульс длительностью 7 мсек пересекает 0,2-мм облако охлаждённых атомов — это составляет одну десятимиллионную часть скорости света в вакууме.

В рассматриваемом эксперименте атомы натрия были захвачены и охлаждены в магнитно-оптических ловушках. Атомы охлаждались до тех пор, пока они не образовали бозе-конденсат — особое состояние вещества, в котором все атомы находятся в одном и том же квантовом состоянии и описываются единой волновой функцией. Затем Хау и сотрудники настроили «управляющий» лазер на переход между двумя сверхтонкими состояниями в атомах. При специально подобранных условиях они обнаружили, что это приводит к замедлению «сигнального» луча лазера, проходящего под прямым углом к «управляющему» лазеру. Исследуемый образец обнаружил также чрезвычайно большую оптическую нелинейность, которую можно было бы использовать для создания оптических переключателей. На основании прове-

³ Несмотря на то, что автор обзора по профессии физик-теоретик, он намеренно оставил за рамками обзора большинство теоретических работ по данной проблематике не только с целью ограничить объём и сделать его доступнее. По мнению автора обзора, теоретические работы, основанные на общепринятых подходах, не только не предлагают **реального физического механизма** «сверхсветовой» передачи информации, но и не способны его предложить, оставаясь в рамках стандартной теории (например, линейных уравнений Максвелла).

⁴ При написании этого обзора автор использовал информацию, размещённую на сайтах <http://www.scientific.ru> и <http://phys.web.ru> (Е. Онищенко, А. Иванов, А. П. Крашенинников, А. В. Селиверстов).

⁵ Эффект ФИП основывается на интерференции между различными электронными переходами в атоме и используется, чтобы изначально непрозрачные среды сделать прозрачными для определённых длин волн.

дённых исследований группа сделала заключение, что ничто не препятствует замедлению света до скоростей, измеряемых в см/сек.

Следующий шаг удалось сделать группе из Гарвардского астрофизического центра (Harvard-Smithsonian Center for Astrophysics) под руководством Рона Уолсворта (Ron Walsworth) и Михаила Лукина. Уолсворт, Лукин и их коллеги прошли остаток пути до полной остановки света, используя новую методику, предложенную теоретически [2,3]. При решении этой задачи исследователи научились преобразовывать информацию, которую несет свет, в когерентную атомную форму (и наоборот). Обычно при поглощении атомами фотонов переносимая светом информация полностью теряется, однако этот новый метод позволяет, в принципе, ее сохранить. Посылая лазерный импульс в специальном образом подготовленный газ атомов рубидия, удалось, во-первых, уменьшить групповую скорость импульса до нуля и, во-вторых, записать переносимую им информацию в форме атомной спиновой волны (коллективного возбуждения атомов рубидия)⁶. Такая волна когерентна и существует длительное время, что позволяет сохранять длительное время заключенную в импульсе света информацию и, когда необходимо, выпускать её в виде такого же импульса. Это достижение увеличивает надежду на создание квантовых систем связи, которые когда-нибудь смогут объединить в глобальную сеть сверхбыстрые квантовые компьютеры.

Эксперименты по «хранению света» начались в Гарварде с облучения «управляющим» лазерным пучком стеклянной кюветы, заполненной парами рубидия при температуре около 70-90°C. Излучение переводило атомы в ФИП-состояние, в котором они (в обычном смысле) не могут поглощать свет. Затем кювета освещалась «сигнальным» световым импульсом, содержащим сохраняемую информацию. В парах рубидия скорость этого импульса падала примерно до 900 м/с. После попадания переднего фронта импульса в кювету (и, соответственно, его замедления) происходит весьма впечатляющее пространственное сжатие: с нескольких километров в вакууме до сантиметров в парах рубидия. Взаимодействуя с атомами, свет когерентно изменяет ориентацию их магнитных моментов и создает связанную систему из атома и фотонов (поляритон).

Взаимодействие «свет-атом» приводит к тому, что поляритон движется как частица, имеющая собственную массу (эффективную массу). Одно из объяснений уменьшения скорости света заключается в том, что не имеющие массы фотоны «довешиваются» массивными атомами (образуя поляритоны) и поэтому теряют скорость.

Далее, исследователи остановили сигнальный импульс, постепенно выключая управляющий пучок. При этом все больше атомов «смешивается» со все меньшим количеством фотонов, увеличивая массу поляритонов и уменьшая их скорость. Когда управляющий пучок выключается полностью, поляритоны становятся чисто атомными, лазерный импульс — остановленным. За время хранения эта среда не излучает.

Итак, в кювете не остается фотонов. Энергия света не идет, как это обычно бывает, на «подогрев» атомов. Вместо этого фотоны «тратятся» на формирование атомной спиновой волны, сохраняя в ней всю информацию из сигнального импульса и «ожидая» ее освобождения (т. е. излучения импульса, идентичного начальному).

Другой способ описания замедления света основан на представлении об импульсе как волновом пакете — волне, составленной из многих компонентов с различными частотами (гармоник). Атомы рубидия по-разному преломляют эти компоненты в зависимости от их частоты (явление дисперсии). Зависимость показателя преломления содержимого кюветы от частоты приводит к тому, что групповая скорость (т. е. скорость распространения импульса как целого) существенно падает. Ослабление управляющего пучка приводит к усилению этой зависимости и дальнейшему уменьшению групповой скорости. Оно приводит к уменьшению полосы прозрачности паров рубидия, однако световая волна (а более точно, ее суперпозиция с атомной спиновой волной) продолжает замедляться, сохраняя форму, но уменьшая свою спектральную

⁶ Следует отметить также, что в статье [4], обсуждается новая методика, позволяющая не только остановить импульс, но и изменить потом направление его распространения на противоположное. Это явление может быть использовано в прикладной нелинейной оптике.

ширину (количество компонентов) так, чтобы не происходило поглощения. После довольно длительной задержки можно включить управляющий пучок, заставив атомы преобразовать поляритон обратно в свет и излучить точно такой же импульс, что когда-то попал в эту кювету.

Итак, краткое резюме:

1. длину светового импульса можно уменьшить с километров до сантиметров в соответствующим образом подготовленных парах рубидия;
2. переносимая светом информация оказывается запечатленной в ансамбле атомов как долгоживущие спиновые волны;
3. при необходимости световой импульс может быть извлечен из такой ячейки памяти.

Этот метод хранения света удобен, поскольку информация хранится в коллективных атомных спиновых состояниях, которые гораздо более устойчивы по отношению к диссипации и эффектам потери когерентности (вызывающим сбои в квантовых компьютерах), чем возбужденные электронные состояния атомов. Гарвардский эксперимент продемонстрировал важный результат для исследователей, занимающихся квантовой передачей информации и проблемами ее сохранности. В будущем, возможно, именно этот способ откроет двери перед хранением и передачей информации в квантовых вычислениях и средствах связи [5]. Уолсворт и Лукин также сообщили, что похожие результаты были недавно получены и группой Хай (Lene Hau) в Гарвардском институте Роуленда (Harvard/Rowland Institute of Science) в сверххолодном атомном газе [6].

После полной остановки и сохранения световой волны в газе подобный результат был получен и в твердотельном образце в эксперименте, проведенном в Массачусетском технологическом институте (MIT) совместно с Научно-исследовательской лабораторией ВВС США в Хэнскоме (Hanscom, Massachusetts). Это можно считать весьма солидным достижением, поскольку в настоящее время применение в области обработки и хранения информации в основном находят разработки именно из области физики твердого тела. В качестве среды был использован распространенный в средствах оптической записи кристалл иттриевого силиката с примесью редкоземельного элемента празеодима.

Группа ученых из США и Южной Кореи [7] смогла уменьшить скорость распространения импульса до 45 м/с, а также осуществить «захват» и «высвобождение» импульса в кристаллах диэлектрика Y_2SiO_5 , содержащего 0.05 атомных процента празеодима, но в идейном плане эксперимент близок эксперименту в атомном газе⁷. В подобных экспериментах в обычных условиях оптическая среда полностью непрозрачна для света с определенной длиной волны из-за резонансного поглощения (это очень важный момент — эффект резонансный), однако при определенных условиях среда становится прозрачной под действием электромагнитного излучения (эффект фотоиндуцированной прозрачности). Более мощное «управляющее поле» (грубо говоря, подсветка) делает возможным распространение в среде на порядок более слабого «сигнального (пробного) поля» (импульса, с которым производятся манипуляции). Управляющее и сигнальное поля связывают уровни, отличающиеся магнитными квантовыми числами и, таким образом, электромагнитное поле оказывается «завязанным» со спиновой подсистемой атомов (и в парах рубидия, и в системе Pr: Y_2SiO_5). Образуется смешанное состояние фотонов и возбуждений среды (поляритон), причем скорость распространения поляритона в среде (которая гораздо меньше скорости света), а также «относительная доля» электромагнитного поля и спиновой компоненты в таком «составном» возбуждении, зависит от величины управляющего поля. Адиабатически медленно выключив управляющее поле, можно остановить поляритон, при этом поляритонное состояние не разрушается, а полностью переходит в спиновые возбуждения. Надо подчеркнуть, что в это время в среде не существует никаких фотонов, поэтому термины «остановка света» и «хранение света» не следует понимать буквально. Адиабатически медленным включением управляющего поля можно «возродить свет к жизни»; время «хранения света» лимитируется характерным временем спиновой релаксации в системе (и в парах ру-

⁷ Заметим, что на самом деле демонстрация «хранения света» в твердотельной матрице с редкоземельными ионами не есть еще один шаг вперед в поступательном развитии науки - на самом деле статья Турухина и др. [7] поступила в редакцию *Physical Review Letters* даже раньше, чем статья Филлипса с соавторами [5].

бидия, и в системе Pr: Y₂SiO₅ это примерно 0.5 мс).

В первую очередь такие «игры со светом» представляют интерес с точки зрения хранения и обработки квантовой информации — для работы квантовых компьютеров требуется сохранение когерентности квантовых состояний. В силу удобства интеграции с твердотельными электронными устройствами выгодно использовать твердотельную среду для манипуляций с импульсом света, но эффект резонансный и требуются малые спектральные ширины линий, а в твердых телах спектральные ширины линий на порядки превышают ширины линий в атомных спектрах. Однако и в твердом теле можно работать с достаточно узкими линиями, если кристаллическая матрица содержит редкоземельные элементы. Это связано с уникальными свойствами редкоземельных элементов, которые определяются их сложной электронной структурой — у них происходит заполнение электронами специфической *4f*-облочки. *4f* электроны иона редкоземельного элемента в кристаллической матрице фактически экранированы от внешних воздействий и поэтому слабо реагируют на окружение; соответственно, спектральные ширины линий лишь в малой степени неоднородно уширены вследствие локальных вариаций внутрикристаллических полей. Конечно, твердотельная специфика проявляется. Методика манипулирования импульсом несколько иная, например, присутствует третье «поле» (свет с частотой, отличающейся от частоты управляющего и сигнального полей) — «вспомогательное поле», оно определяет оптическую плотность среды (степень прозрачности) для сигнального импульса.

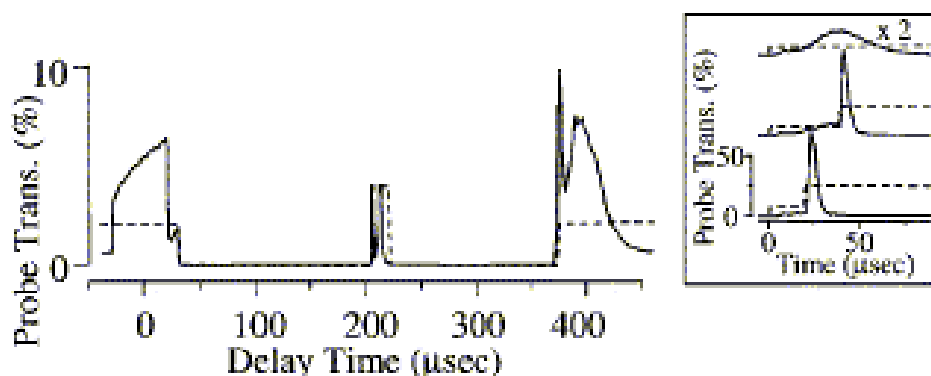


Рис. 2. Остановка, хранение и высвобождение светового импульса. Сплошной линией показан обусловленный пробным импульсом сигнал на выходе из кристалла, пунктиром — изменение управляющего поля. На вставке справа видно, что при увеличении управляющего поля групповая скорость растет, в результате пробный сигнал доходит до места регистрации быстрее. Слева демонстрируется возможность захвата и хранения светового импульса при выключении управляющего поля. Короткий управляющий импульс «в центре» связан с тем, что необходимо «обратить» связанную с неоднородным уширением спиновую дефазировку (спиновое эхо).

В экспериментах группы американских и корейских ученых использовался лазер на красителях, генерирующий излучение с длиной волны 606 нм; для выделения трех частот использовались акустооптические преобразователи частоты. Сигнальный импульс длительностью несколько десятков микросекунд попадал в кристалл Y₂SiO₅, легированный празеодимом. Путем изменения управляющего поля (интенсивности подсветки с соответствующей частотой) ученые управляли скоростью распространения импульса света; оказывалось возможным уменьшить групповую скорость до 45 м/с (это почти в десять миллионов раз меньше скорости света в вакууме). Также, посредством выключения и включения управляющего поля оказывалось возможным останавливать импульс и хранить его в течение определенного времени, а потом высвобождать. Таким образом, была продемонстрирована возможность когерентного управления прохождением импульса через резонансно поглощающую *твердотельную* среду в режиме фотоиндуцированной прозрачности.

Исследователи предполагают, что замедление и остановка света в твердом теле найдет свою «экологическую нишу» в таких областях, как квантовые вычисления, сверхчувствительная магнитометрия и акустооптика (при замедлении света до дозвуковых скоростей становится возможной сильная связь оптических и звуковых волн).

По дороге к бесконечности

Как видно из предыдущего раздела, исследователи в поисках возможности изменения скорости света c в ту или иную сторону в первую очередь обращаются к средам с аномальной дисперсией, поскольку в них групповая скорость оптического импульса может быть как существенно меньше, так и существенно больше скорости света в вакууме. Одним из важных направлений по изучению распространения электромагнитных сверхсветовых сигналов в последнее время стали

Эксперименты с туннелированием.

Эксперименты, проведённые группой под руководством Raymond Y. Chiao (Department of Physics, University of California, Berkeley), показали [8], что отдельные фотоны проходят сквозь оптический туннельный барьер с эффективной групповой скоростью, значительно превышающей скорость света в вакууме.

Эксперименты проводились с двухфотонным источником света, создающего коррелированные фотонные пары посредством спонтанной параметрической конверсии с понижением частоты. Оба фотона данной пары испускались в слегка различающихся направлениях таким образом, чтобы один фотон проходил сквозь туннельный барьер, в то время как другой фотон проходил свой путь в вакууме. Для туннелирующего фотона время задержки относительно его вакуумного двойника измерялось достижением детектирования совпадений с помощью регулировки разности длины пути между этими двумя фотонами в Hong-Ou-Mandel интерферометре.

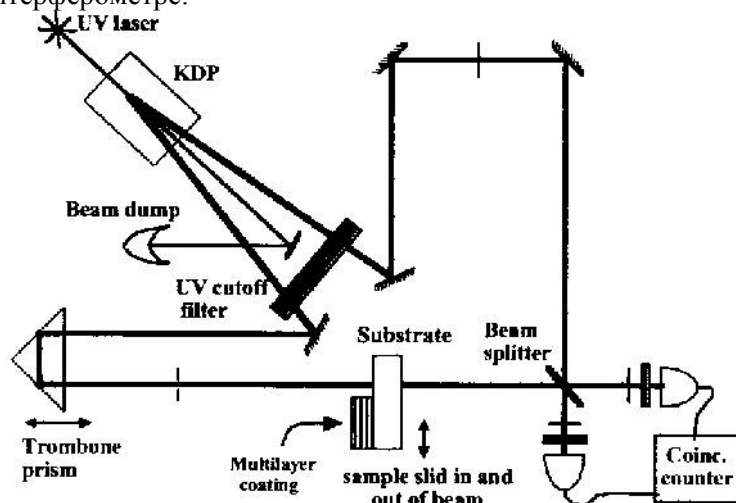


Рис. 3. Схема эксперимента в Беркли по измерению времени туннелирования.

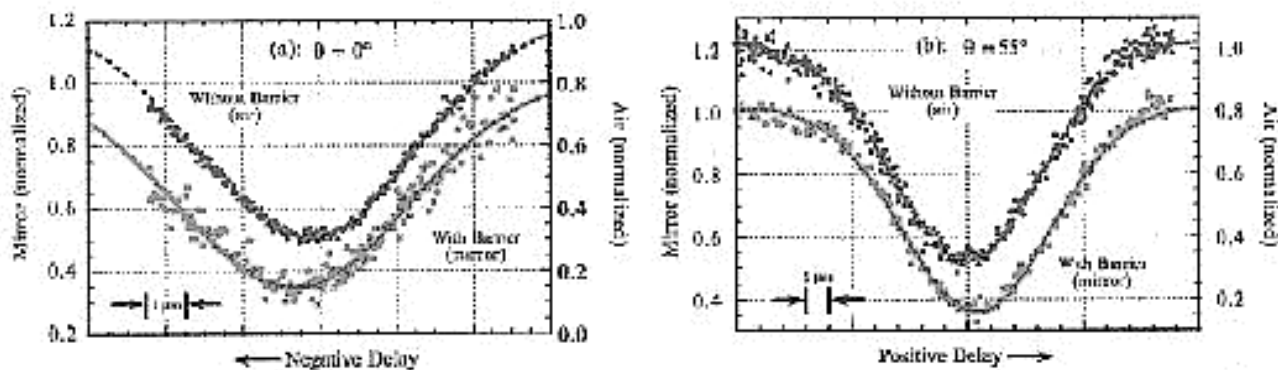


Рис. 4. (а) Зависимость скорости совпадения от времени задержки, т. е. положения согласующей trombone призмы на предыдущем рисунке при наличии и отсутствии туннельного барьера (зеркала) при нормальном пути падения пучка. (б) То же при изменении наклона зеркала на угол Брюстера.

Было обнаружено, что время прохождения фотона сквозь барьер меньше времени прохождения его вакуумного двойника на такой же дистанции, что указывало на то, что квантовомеханический процесс туннелирования является сверхсветовым.

Поскольку время туннелирования является основным фактором при трактовке результатов эксперимента, то ещё одной сильной мотивацией проведения экспериментов по измерению времени туннелирования был факт существования различных конкурирующих теорий для определения этого времени, среди которых основными соперничающими претендентами можно считать следующие три:

1. Вигнеровское время (определяемое по теории Вигнера, т. е., «фазовое время» или «групповое запаздывание»).
2. Бёттикер-Ландауеровское время (т. е., «полуклассическое время»).
3. Ларморовское время (в модификации Бёттикера).

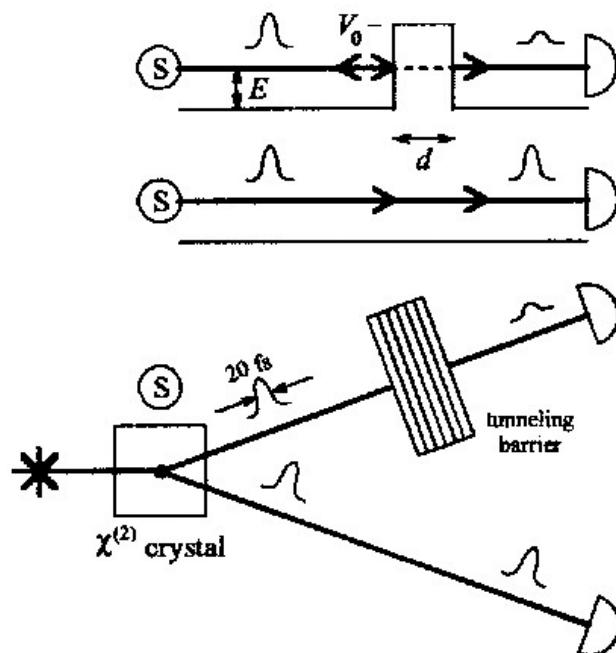


Рис. 5. (Вверху): Мысленный эксперимент по измерению времени туннелирования с помощью двух частиц, одновременно испускаемых источником S и измеряемых двумя равноотстоящими детекторами. **(Внизу):** Реализация этой ситуации посредством источника S спонтанной параметрической конверсии с понижением частоты, в котором родительский фотон распадается на два дочерних фотона.

Вигнеровское время вычисляется как промежуток времени, необходимый для прохождения пика волнового пакета между моментом падения пакета на входную поверхность барьера и моментом его появления на выходе. Так как пик волнового пакета в борновском приближении соответствует наибольшей вероятности события (см. мысленный эксперимент на Рис.5), естественно ожидать, что это определение времени будет наиболее уместно использовать для экспериментов. Этот расчёт основан на асимптотической трактовке туннелирования, как задачи рассеяния, и использует метод стационарной фазы для вычисления положения пика волнового пакета. Результат очевиден: это время туннелирования — просто производная фазы амплитуды туннелирования по энергии частицы.

Время туннелирования Бёттикер-Ландауера определяется из мысленного эксперимента, отличного от предыдущего. Предположим, что изменение высоты туннельного барьера синусоидально по времени. Если частота возмущения мала, туннелирующая частица будет «видеть» мгновенную высоту барьера, и вероятность прохождения будет адиабатически следовать за возмущением. Однако при увеличении частоты возмущения, при некоторой характеристической частоте, вероятность туннелирования больше не будет адиабатически следовать за быстро изменяющимся возмущением. Естественно определить время

туннелирования как величину, обратную этой характеристической частоте. Результат вновь очевиден: для непрозрачных барьеров время туннелирования — это просто расстояние, пересекаемое частицей, (т. е. ширина барьера) делённое на абсолютное значение скорости частицы. (В классически запрещенной подбарьерной области эта скорость является мнимой, но её характерная величина даётся абсолютным значением).

Ларморовское время основано на ещё одном, отличающемся от предыдущих, мысленном эксперименте. Предположим, что туннелирующая частица имеет спин (например, электрон). Предположим далее, что магнитное поле было приложено к области барьера, но только к этой области. Тогда угол прецессии спина туннелирующей частицы — естественная мера времени туннелирования. Однако, как заметил Бёттикер, в дополнение к этому эффекту ларморовской прецессии, для спина существует значительная тенденция выстраивания себя по или против направления магнитного поля за время туннелирования, так как энергия для этих двух ориентаций спина различна. Полное угловое изменение спина туннелирующей частицы, делённое на частоту ларморовской прецессии и есть Ларморовское время по Бёттикеру.

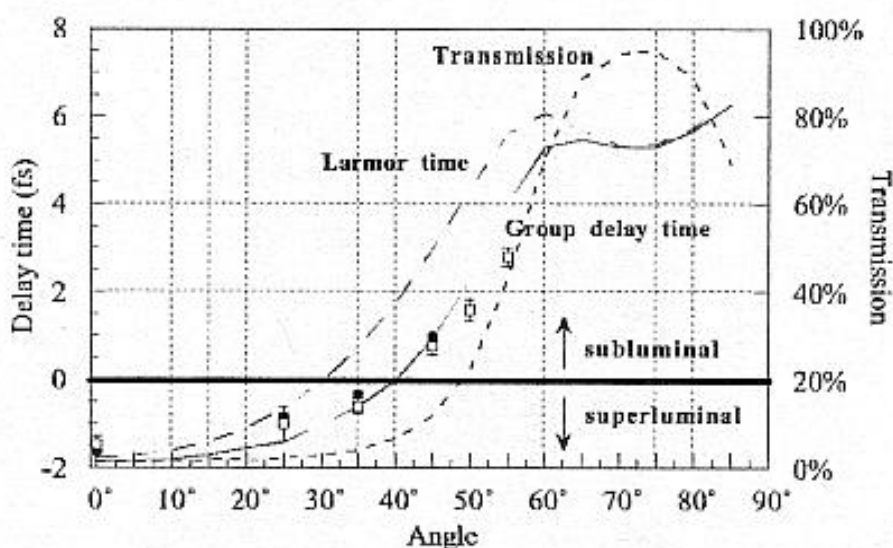


Рис. 6. На рисунке показаны временные сдвиги минимума на основе данных Рис.4, как функции угла падения, в сравнении с предсказаниями теории на основе времени туннелирования по Вигнеру (сплошная кривая) и ларморовскому времени по Бёттикеру (кривая с длинным пунктиром). Зависимость прохождения от угла падения изображена линией с коротким пунктиром. Все кривые относятся к случаю р-поляризации. Сплошными кружочками и квадратиками обозначены данные для двух образцов с различными туннельными барьерами.

Одним из следствий Вигнеровского времени является результат Хартмана (Hartman): для непрозрачных барьеров время туннелирование выходит на насыщение и для больших d (d — ширина барьера) предельное значение находится из соотношения неопределенности и составляет $\hbar/\sqrt{V_0 - E}$. Сверхсветовое свойство туннелирования с очевидностью является следствием этого результата, так как с увеличением d найдётся такая ширина барьера d_0 , что время обхода по вакуумному пути d_0/c превысит величину насыщения времени туннелирования, и тогда окажется, что фотон туннелирует быстрее, чем распространяется в вакууме.

В противоположность этому, теория Бёттикера-Ландауера предсказывает линейный рост времени туннелирования по мере увеличения d для непрозрачных барьеров, как это и следовало бы ожидать из классики. Для прямоугольного барьера с высотой $V_0 \ll mc^2$ эффективная скорость $|v|$ всегда меньше чем c . Однако, для периодической структуры, которую мы использовали в нашем эксперименте, эффективная скорость $|v|$ в середине щели

бесконечна, т. е. ведёт себя ещё более сверхсветовым образом, чем этого следовало бы ожидать из определения времени по Вигнеру. Этот факт облегчает экспериментальную задачу установить различие между этими двумя теориями времени туннелирования. Однако, следует оговориться, что время по Бёттикеру-Ландауеру не применимо к нашей экспериментальной ситуации, поскольку мысленный эксперимент, на котором основано его определение, совершенно отличен от условий нашего эксперимента.

Ларморовское время по Бёттикеру даёт время туннелирования, которое для тонких барьеров не зависит от d , но асимптотически приближается к линейной зависимости от d в предельном случае непрозрачного барьера, где оно совпадает с Бёттикер-Ландауеровским временем. В первом эксперименте группы из Беркли было невозможно провести экспериментальное различие между этим временем и Вигнеровским временем. Только во втором эксперименте стало возможным провести чёткое различие между этими двумя теориями (см. Рис.6)

Группа из Ренна, используя методику расстройки полного внутреннего отражения (*frustrated total internal reflection* — FTIR⁸), наблюдала туннелирование фотонов сквозь воздушную щель между двумя стеклянными призмами, когда угол падения пучка света на эту щель превышает критический [13]. Эксперимент с помощью FTIR выявил как боковое смещение туннелирующего пучка, так и угловое отклонение этого пучка. Эти два эффекта можно интерпретировать как доказательство существования двух различных времён туннелирования, которые одновременно сосуществуют при прохождении одного и того же туннельного барьера. Боковое смещение можно приписать Вигнеровскому времени, а угловое отклонение — времени по Бёттикеру-Ландауеру. В доказательство этого они приводят факт насыщения смещения пучка (эффект Хартмана) и линейное увеличение отклонения пучка с увеличением щели.

Таким образом, эксперименты группы из Беркли и других групп указывают на сверхсветовой характер туннелирования. И хотя противоречия между различными теориями не полностью преодолены на эксперименте, сделаны важные шаги для этого преодоления. В частности стало ясно, что нельзя исключать вигнеровское время просто на том основании, что оно приводит к сверхсветовому времени туннелирования. Оказывается также, что время туннелирования не определяется однозначно.

К вышеперечисленным исследованиям следует присоединить теоретические и экспериментальные исследования группы Erasmo Recami в Италии [14], касающиеся сверхсветового туннелирования. В них, в частности, было уделено внимание не только резонансному, но и нерезонансному туннелированию. На примере модельной задачи с двумя последовательными прямоугольными барьерами (решалось стационарное уравнение Шредингера) они подтвердили наличие эффекта Хартмана. Более того, их расчёты показали, что полное фазовое время туннелирования не зависит не только от ширины барьера, но и от расстояния между ними. Эффект Хартмана они объясняют перестройкой формы волны внутри барьера, а независимость этого времени от расстояния между барьерами — интерференцией волны, выходящей из первого барьера с частью волны, отражённой от второго барьера, имеющей место между барьерами. Наличие второго результата они связывают с нелокальностью квантовой механики. Проведённые их группой эксперименты подтверждают сделанные расчёты. Следует отметить, что авторы упомянутых работ, исходя из аналогии со

⁸ Нарушенное полное внутреннее отражение (FTIR) — если исчезающая волна (образованная в результате полного внутреннего отражения) распространяется поперек раздела среды в область с более высоким показателем преломления, энергия может течь поперек границы. Это явление известно как нарушенное полное внутреннее отражение и подобно квантово-механическому туннелированию или барьерному проникновению. Когда передача энергии поперек границы происходит таким способом, «полное внутреннее отражение» больше не является полным, т. к. проходящая волна расходится на внутренне отражённую волну Исчезающая (evanescent) — электромагнитная волна, наблюдаемая при полном внутреннем отражении, в волноводах с сужениями (являющимися аналогом потенциальных барьеров), и в периодических диэлектрических гетероструктурах. В то время как волновые решения имеют действительные волновые числа k , для исчезающей моды k — комплексное число. Исчезающие моды характеризуются экспоненциальным затуханием и отсутствием смещения фазы.

стационарным уравнением Шредингера, описывающим процесс туннелирования электронов сквозь последовательные прямоугольные барьеры, распространяют полученные результаты на процесс туннелирования фотонов сквозь диэлектрические барьеры и на распространение микроволнового излучения в волноводах с сужениями, описываемое уравнением Гельмгольца. Тем самым они утверждают, что результаты их модели, в силу их общности, применимы для описания всех вышеперечисленных экспериментов, осуществлённых другими исследовательскими группами, хотя вопрос о правомочности *стационарного* подхода остаётся открытым.

Среды с аномальной дисперсией

В 2000 году появилось сообщение о новом эксперименте, в котором проявились эффекты сверхсветового распространения. Его осуществил Lijun Wang с сотрудниками в исследовательском институте в Принстоне (США) [15]. Его результат состоит в том, что световой импульс, входящий в камеру, наполненную парами цезия, увеличивает свою скорость в 300 раз. Получается, что главная часть импульса выходит из дальней стенки камеры даже раньше, чем импульс входит в камеру через переднюю стенку (схема экспериментальной установки Lijun Wang приведена на рис.7).

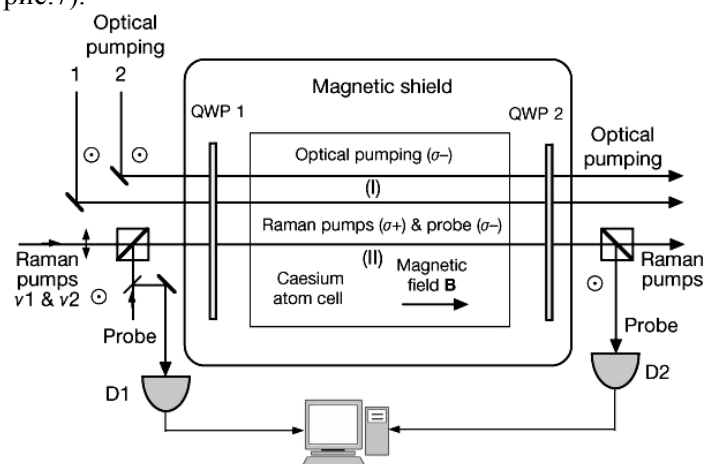


Рис. 7. Схематическое изображение экспериментальной установки. Два оптических пучка накачки, настроенные на D1 и D2 переходы атома цезия переводят атомы на сверхтонкий подуровень основного состояния $|F=4, m=-4\rangle$. Два рамановских пучка накачки и рамановский зондирующий пучок, полученные из общего диодного лазера с узкой шириной линии, распространяются коллинеарно параллельно слабому магнитному полю B сквозь ячейку с атомами цезия. Для того, чтобы приготовить эти три световых луча в соответствующих циркулярно-поляризованных состояниях и затем разделить их для анализа, используются две четвертьволновые пластины (QWP1&2).

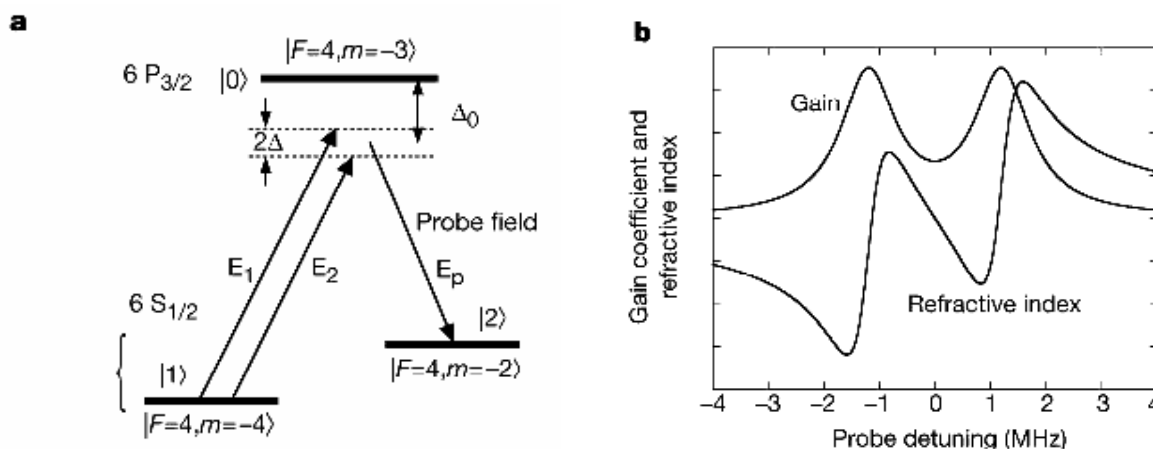


Рис. 8. Усиление, обеспечиваемое аномальной дисперсией. **a.** Схематическая диаграмма атомных уровней. **b.** Теоретически рассчитанные частотные зависимости коэффициента усиления и показателя преломления для пробного пучка света, распространяющегося сквозь атомную среду со структурой уровней, показанных на а.

В эксперименте Lijun Wang световой импульс, входящий в камеру с парами цезия, имел длительность около 3 мкс. Атомы цезия могут находиться в шестнадцати возможных квантово-механических состояниях, называемых «сверхтонкими магнитными подуровнями основного состояния». При помощи оптической лазерной накачки почти все атомы приводились только в одно из этих шестнадцати состояний, соответствующее почти абсолютному нулю температуры по шкале Кельвина ($-273,15^{\circ}\text{C}$). Длина цезиевой камеры составляла 6 сантиметров. В вакууме свет проходит 6 сантиметров за 0,2 нс. Через камеру же с цезием, как показали выполненные измерения, световой импульс проходил за время на 62 нс меньшее, чем в вакууме. Другими словами, время прохождения импульса через цезиевую среду имеет знак «минус»! Эта «отрицательная задержка» в среде равна времени, в течение которого импульс совершил бы 310 проходов через камеру в вакууме. Следствием этого явилось то, что выходящий из камеры импульс успел удалиться от нее на 19 метров, прежде чем приходящий импульс достиг ближней стенки камеры. Как же можно объяснить такую невероятную ситуацию?

Здесь хочется провести параллель между экспериментами со сверхсветовым туннелированием и сверхсветовым прохождением света сквозь пары цезия (среда с аномальной дисперсией). При аномальной дисперсии картина распространения света в веществе меняется радикальным образом. Групповая скорость $V_{\text{гр}}$ становится больше фазовой скорости волн и может превысить скорость света в вакууме (а также стать отрицательной). Следует, однако, заметить, что условие $V_{\text{гр}} > c$ является чисто формальным, так как понятие групповой скорости введено для случая малой (нормальной) дисперсии, для прозрачных сред, когда группа волн при распространении почти не меняет своей формы. В областях же аномальной дисперсии световой импульс быстро деформируется и понятие групповой скорости теряет смысл; в этом случае вводятся понятия скорости сигнала и скорости распространения энергии, которые в прозрачных средах совпадают с групповой скоростью, а в средах с поглощением остаются меньше скорости света в вакууме. Но если в эксперименте световой импульс, пройдя через среду с аномальной дисперсией, не деформируется, а сохраняет свою форму, то это соответствует допущению о распространении импульса с групповой скоростью и получается, что в среде отсутствует поглощение, хотя аномальная дисперсия среды обусловлена именно поглощением.

Одно из возможных объяснений этого эксперимента может быть таким:

Световой импульс состоит из множества составляющих с различными длинами волн. В некоторой точке все составляющие волны находятся в фазе (их максимумы совпадают); здесь они, складываясь, усиливают друг друга и образуют импульс. По мере дальнейшего распространения в пространстве фазировка волн всё более нарушается и волны всё более «гасят» друг друга. В области аномальной дисперсии (внутри цезиевой ячейки) волна, которая была короче, становится длиннее. И наоборот, волна, бывшая самой длинной из нескольких, становится самой короткой. Следовательно, соответственно меняются и фазы волн. Когда волны прошли через цезиевую ячейку, их волновые фронты восстанавливаются. Претерпев необычную фазовую модуляцию в веществе с аномальной дисперсией, рассматриваемые волны вновь оказываются в фазе в некоторой точке. Здесь они снова складываются и образуют импульс точно такой же формы, как и входящий в цезиевую среду.

Обычно в любой прозрачной среде с нормальной дисперсией световой импульс не может точно сохранять свою форму при распространении на удаленное расстояние, то есть все его составляющие не могут быть сфазированы в какой-либо удаленной точке вдоль пути распространения. И в обычных условиях световой импульс в такой удаленной точке появляется спустя некоторое время. Однако вследствие аномальных свойств использованной в эксперименте среды импульс в удаленной точке оказывается сфазирован так же, как и при входе в эту среду. Таким образом, световой импульс ведет себя так, как если бы он имел отрицательную временную задержку на пути до удаленной точки, то есть пришел бы в нее не позже, а раньше, чем прошел среду.

На фоне вышеизложенного результат группы E. Recami, касающийся фазировки волны при сверхсветовом туннелировании, неожиданно обнаруживает параллель при рассмотрении процесса прохождения сверхсветового импульса в средах с аномальной дисперсией и, вполне вероятно, отражает существенный момент в понимании динамики образования сверхсветовых

импульсов.

Все эти интересные резонансные эффекты наблюдались в газовых средах, где в исследуемой области содержится от миллионов до многих триллионов атомов. Однако недавно [16] ученые из Токийского университета и американского Национального института стандартов и технологий реализовали ситуацию, когда подобный эффект наблюдается в случае «среды», состоящей из нескольких атомов, и даже отдельного атома. Присутствие нескольких атомов вызывает очень слабое изменение «показателя преломления» (эти слова приведены в кавычках, так как показатель преломления среды — макроскопическая величина) и поэтому очень трудно оценить их влияние на скорость светового импульса при обычных условиях. Для постановки эксперимента необходимы специальные условия — атомы должны находиться в резонаторе, что позволяет существенно модифицировать их взаимодействие с электромагнитным полем.

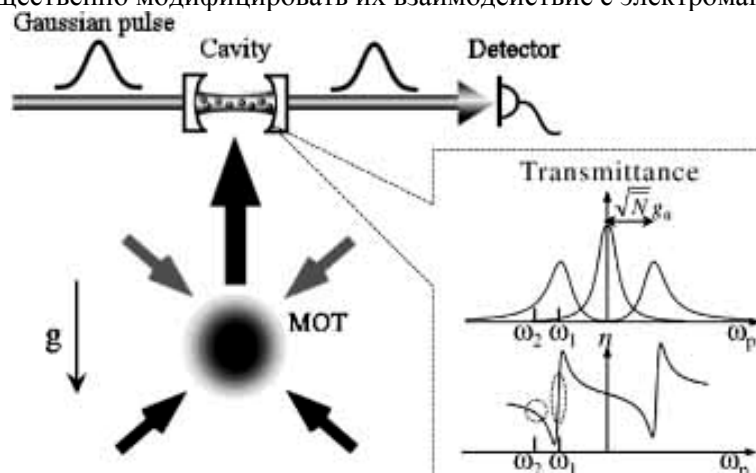


Рис. 9. Схема экспериментальной установки; на графике частота ω_1 соответствует режиму малых групповых скоростей, частота ω_2 — режиму сверхсветовых скоростей

Схема экспериментальной установки показана на рис.9. Охлажденные атомы ^{85}Rb находятся в магнито-оптической ловушке, над которой расположен оптический микрорезонатор (два вогнутых зеркала, расположенных на расстоянии 70 мкм одно от другого). После выключения части лазеров, излучение которых формирует магнито-оптическую ловушку, атомы могли подниматься вверх и попадать в резонатор. Поскольку атомы в ловушке имеют малые скорости, а резонатор расположен выше ловушки, только очень малое число атомов в состоянии подняться в резонатор. Попадание атомов в резонатор фиксировалось по изменению коэффициента пропускания резонатора, причём среднее число атомов в резонаторе в описываемых экспериментах не превышало десяти штук.

После того, как атомы занимали свои места, через резонатор пропускался тестовый импульс, частота излучения которого была немного отстроена от резонансной частоты; выходящий импульс регистрировался с помощью высокочувствительного детектора. Было показано, что в зависимости от частоты тестового импульса, наблюдается либо задержка (на 440 нс в данных экспериментах), либо опережение (на 170 нс в данных экспериментах) времени прихода импульса по сравнению с тем, что следовало бы ожидать для импульса, распространяющегося со скоростью света. Таким образом, впервые было продемонстрировано изменение скорости распространения светового импульса при помощи всего нескольких атомов.

Здесь пришло время объяснить, почему мы объединили в обзоре, казалось бы, два противоположных явления — замедление и ускорение светового импульса. На самом деле в одном и другом случаях речь идет об эффектах, связанных с распространением света в среде с аномальной дисперсией. Вблизи резонанса между энергией фотона и энергией перехода между, например, двумя энергетическими уровнями атома, групповая скорость оптического импульса

$V_{\text{гр}}$ резко меняется с частотой: $V_{\text{гр}} = \frac{c}{n(\omega) + \omega \frac{dn(\omega)}{d\omega}}$ Как можно видеть (см. также график на

рис. 9), с одной стороны от резонанса она резко падает, а с другой стороны от резонанса может быть очень большой ($V_{гр} > c$ — в этом случае и говорят о «сверхсветовых» скоростях) и даже отрицательной (это означает, что световой импульс покидает среду раньше, чем в нее входит).

Поэтому другое возможное объяснение эксперимента Lijun Wang часть физиков склонна связывать с возникновением низкоинтенсивного предвестника в диспергирующей среде камеры. Дело в том, что при спектральном разложении импульса в спектре присутствуют составляющие сколь угодно высоких частот с ничтожно малой амплитудой, так называемый предвестник, идущий впереди «главной части» импульса. Характер установления и форма предвестника зависят от закона дисперсии в среде. Имея это в виду, последовательность событий в эксперименте Вонга предлагается интерпретировать следующим образом. Приходящая волна, с предвестником впереди себя, приближается к камере. Прежде чем пик приходящей волны попадет на ближнюю стенку камеры, предвестник инициирует возникновение импульса в камере, который доходит до дальней стенки и отражается от нее, образуя «обратную волну». Эта волна, распространяясь в 300 раз быстрее c , достигает ближней стенки и встречается с приходящей волной. Пики одной волны встречаются со впадинами другой, так что они уничтожают друг друга и в результате ничего не остается. Получается, что приходящая волна «возвращает долг» атомам цезия, которые «одалживали» ей энергию на другом конце камеры. Тот, кто наблюдал бы только начало и конец эксперимента, увидел бы лишь импульс света, который «прыгнул» вперед во времени, двигаясь быстрее c .

Эксперименты с бесселевыми пучками

Однако для получения сверхсветовых скоростей нет необходимости работать только со средами с аномальной дисперсией, есть и другой путь. Речь идет о так называемых «бездифракционных (бездисперсионных) пучках», специальным образом сформированных волновых пакетах. Подобные оптические импульсы могут распространяться без изменения формы. Эксперименты с бездисперсионными (их еще называют бесселевыми, так как радиальное распределение напряженности поля для такого оптического импульса описывается функцией Бесселя первого рода нулевого порядка) пучками начались в конце 80-х годов прошлого века. Однако на то, что групповая скорость бездисперсионного импульса может превышать скорость света в вакууме, обратили внимание не сразу, хотя такие специальным образом сформированные оптические импульсы активно использовались в различных приложениях (получение изображений, нелинейная оптика, генерация «плазменных волноводов» для прохождения интенсивных импульсов и т. д.). Возможно, тут сыграла роль некоторая «аллергия» научного сообщества на сверхсветовые скорости.

Впервые экспериментально исследовали эффект сверхсветового распространения бездисперсионных импульсов два года назад итальянские ученые [17]. Однако они работали в микроволновом диапазоне и в их измерениях было зафиксировано распространение электромагнитного импульса со сверхсветовой скоростью на расстояния порядка нескольких десятков длин волн. Подобная локальность эффекта (и ряд других деталей) позволили поставить результаты экспериментов под сомнение. Недавняя работа американских ученых [18], похоже, ставит точку в развернувшейся дискуссии. Исследователи из Мэрилендского университета работали с оптическими импульсами и провели измерение скорости распространения импульса *тремя независимыми методами* (упрощенная схема экспериментальной установки показана на рис. 10.).

Необходимо особо подчеркнуть, что никаких резонансных эффектов в этих экспериментах не было, т. е. ситуация принципиально отличается от случая упомянутых ранее опытов со сверхсветовыми скоростями в средах с аномальной дисперсией.

Исследовалось распространение специальным образом сформированных бездисперсионных фемтосекундных (длительность импульса — 70 фс) оптических импульсов (с длиной волны около 800 нм) в аргоне, находящемся при атмосферном давлении. Интенсивности фемтосекундного импульса (плотность мощности более 10^{14} Вт/см²) было достаточно, чтобы вызвать ионизацию нейтрального аргона. Таким образом, при прохождении оптического импульса через среду он оставлял за собой след — «шнур» плазмы (который сохранялся в течение доста-

точно долгого времени после прохождения импульса — вставка b на рис.11).

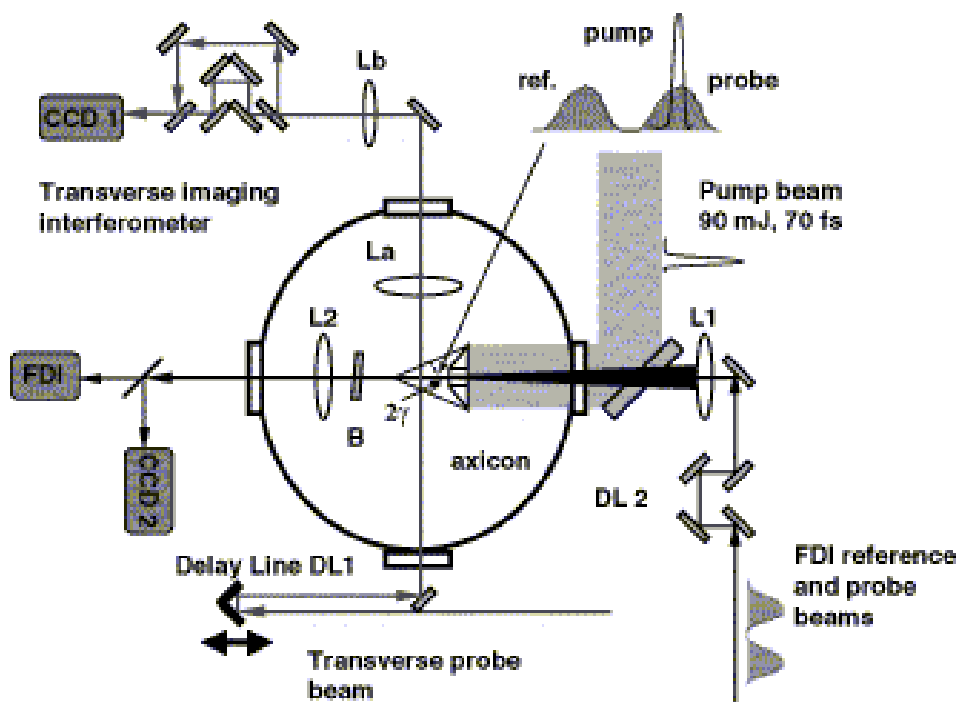


Рис. 10. Упрощенная схема экспериментальной установки

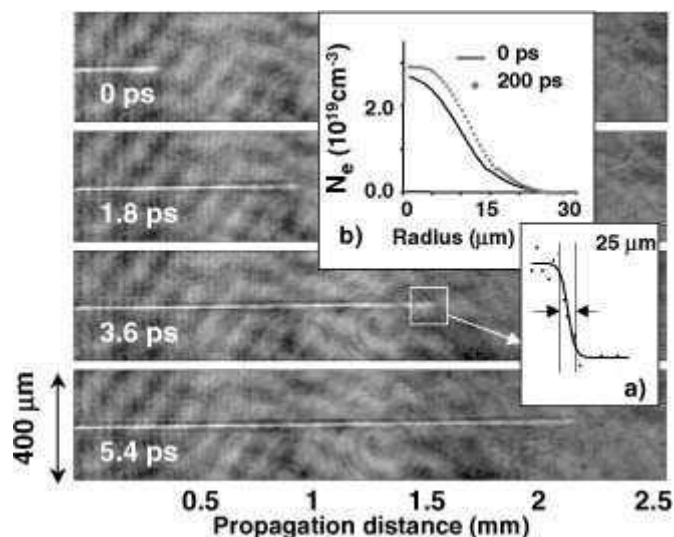


Рис. 11. Серия «моментальных фотографий», сделанных через 1.8 пс. Хорошо виден плазменный след, оставляемый оптическим импульсом. На вставке а показана форма фронта ионизации, которая остается неизменной на протяжении всего пути импульса через газовую среду. На вставке b показан профиль плотности электронов, образовавшихся при ионизации аргона бездисперсионным импульсом, видно, что радиус плазменного шнура практически не изменился за 200 пс.

Если при прохождении бездисперсионного импульса через газовую среду пропускать в перпендикулярном направлении гораздо менее интенсивный «тестовый» фемтосекундный импульс, то можно получить серию «моментальных фотографий», по которым можно точно определить (по движению фронта ионизации) пройденный оптическим импульсом за определенный период путь (рис.11). Эти измерения показывают, что групповая скорость примерно равнялась 3.3×10^5 км/с, т. е. на 10 % превышала скорость света в вакууме. Здесь важно отметить, что для бездисперсионного импульса групповая скорость и скорость движения переднего фронта им-

пульса совпадают, так как не должно происходить изменения формы волнового пакета. Серия фотографий с более высоким пространственным разрешением показывает, что при прохождении импульса через аргон действительно не происходило изменения формы фронта ионизации (вставка а на рис.11). Измерения, проведенные двумя другими методами, также дали значение групповой скорости оптического импульса порядка $1.1c$ (в пределах погрешности эксперимента три полученных различными способами значения совпадают).

Отрицательное время задержки

Недавние исследования проявления сверхсветовых эффектов подтверждают прогнозы, что групповая скорость в прозрачных оптических средах может превышать c без нарушения специальной теории относительности. Более того, в электронной области, принцип причинной связи не запрещает отрицательного времени задержки аналитических сигналов в электронных цепях, в которых пик выходного импульса появляется на выходе цепи прежде, чем пик входного импульса входит в начало цепи. (Кроме того, смещение импульса для этих «сверхсветовых» аналитических сигналов может быть незначительным как в оптической, так и в электронной области). Поэтому Chiao *et al.* в работе [19] предлагают распространить эти идеи на микроэлектронную область. основополагающим принципом является тот факт, что для создания отрицательного времени задержки можно воспользоваться отрицательной обратной связью. Такие отрицательные времена задержки могут быть использованы для взаимной компенсации положительного времени задержки, которое является следствием «транзисторной латентности» (например, из-за конечного RC-времени нарастания для МОП-транзисторов, вызванного их встроенной ёмкостью), также как и времени задержки распространения коммутирующих сигналов между транзисторами чипа (нижняя граница которого определяется самым длинным путём между транзисторами). Используя этот принцип, можно существенно увеличить быстродействие компьютерных систем.

К этой работе тесно примыкает статья [20], где показано, что в случае сверхсветовой групповой скорости волнового пакета в диспергирующей среде волновой пакет с гладкой (аналитической) огибающей действительно распространяется со сверхсветовой скоростью, а в случае отрицательной групповой скорости максимум сигнала действительно появляется в точке приема раньше, чем в точке передачи. Это обстоятельство не входит в противоречие с фактом предельности скорости света в вакууме для передачи информации (в случае сверхсветовой скорости распространения) или принципом причинности (в случае отрицательного времени задержки). *Эффект отрицательного времени задержки в принципе может быть использован для прогнозирования наблюдаемого процесса.*

Распространение волнового пакета с достаточно плавно изменяющейся огибающей (т. е. с достаточно узким частотным спектром) в среде с временной дисперсией происходит с так называемой групповой скоростью, которая в общем случае может быть как меньше скорости света в вакууме, так и больше нее (или даже стать отрицательной). И хотя иногда сверхсветовая или отрицательная групповая скорость сигнала рассматривается как формальный результат, тем не менее в нелинейно усиливающей среде эффект перемещения максимума волнового пакета со сверхсветовой скоростью был теоретически и экспериментально исследован ещё в работах 60-х годов [21—22] (из последних обзоров по данному вопросу можно указать [23]). При этом сверхсветовая скорость перемещения максимума волнового пакета наблюдалась в нелинейной среде с насыщением усиления как результат преимущественного усиления передней части сигнала по сравнению с его задней частью.

Выводы работы [20] могут быть представлены следующими пунктами:

а) Эффект перемещения сигнала со скоростью, большей скорости света возможен для слабых сигналов и возникает в линейном приближении как неизбежное следствие сверхсветовой групповой скорости волны при определенной частоте несущей. *Данный эффект не является особенностью именно электромагнитных волн в пространстве, а может возникать при прохождении сигнала любой природы через любой линейный фильтр при достаточно узком спектре сигнала и подходящей частоте его несущей.*

б) Эффект возникает как в линейной усиливающей среде (на крыле спектральной линии

усиления), так и в линейной поглощающей среде (вблизи центра спектральной линии поглощения).

в) При достаточно сильной дисперсии время задержки сигнала при распространении может стать не только меньше времени распространения света в вакууме от точки передачи до точки приема, но и меньше нуля, что означает прием сигнала раньше его передачи. Отмеченное обстоятельство позволяет сделать вывод о *принципиальной возможности опережающего отражения* в неживой природе.

(В последний момент автору стала известна работа M. Kitano, T. Nakanishi, and K. Sugiyama, *Negative Group Delay and Superluminal Propagation: An Electronic Circuit Approach*, quant-ph/0302166 существенно развивающая и дополняющая материалы данного раздела).

Глава заключительная, или какой видится ситуация автору обзора?

Итак, как видно из предыдущего, на экспериментальном фронте исследований заметны впечатляющие успехи. В то же время, в рамках стандартной теории, достигнуть полной ясности в вопросе о сверхсветовой передаче информации вроде бы не удаётся до конца. Фотон как подчинялся постулатам теории относительности, так и продолжают подчиняться и принцип причинности остаётся неизблемым.

Приведём цитату из статьи д. т. н. А. Голубева, «Возможна ли сверхсветовая скорость?» помещённой на сайте <http://enlt.narod.ru/swet.htm>:

«Работы последних лет показывают, что при определенных условиях сверхсветовая скорость действительно может иметь место. Но что именно движется со сверхсветовой скоростью? Теория относительности, как уже упоминалось, запрещает такую скорость для материальных тел и для сигналов, несущих информацию. Тем не менее, некоторые исследователи весьма настойчиво пытаются продемонстрировать преодоление светового барьера именно для сигналов. Причина этого кроется в том, что в специальной теории относительности нет строгого математического обоснования (базирующегося, скажем, на уравнениях Максвелла для электромагнитного поля) невозможности передачи сигналов со скоростью, большей c . Такая невозможность в СТО устанавливается, можно сказать, чисто арифметически, исходя из эйнштейновской формулы сложения скоростей, но фундаментальным образом это подтверждается принципом причинности. Сам Эйнштейн, рассматривая вопрос о сверхсветовой передаче сигналов, писал, что в этом случае «... мы вынуждены считать возможным механизм передачи сигнала, при использовании которого достигаемое действие предшествует причине. Но, хотя этот результат с чисто логической точки зрения и не содержит в себе, по-моему, никаких противоречий, он все же настолько противоречит характеру всего нашего опыта, что невозможность предположения $V > c$ представляется в достаточной степени доказанной». Принцип причинности — вот тот краеугольный камень, который лежит в основе невозможности сверхсветовой передачи сигналов. И об этот камень, по-видимому, будут спотыкаться все без исключения поиски сверхсветовых сигналов, как бы экспериментаторам не хотелось такие сигналы обнаружить, ибо такова природа нашего мира.»

Ещё в 1992 году в докладе Анисовича К. В. [24] была показана возможность существования сверхсветового сигнала в рамках теории относительности. Автор сконструировал лагранжиан релятивистского сверхсветового сигнала и показал, что стандартные доводы в пользу запрета на него безосновательны. Анисович на примере двух систем K и K' (в первой два наблюдателя движутся, во второй — покоятся) и области гипотетической среды S^2 (гипержидкость) показывает, что в системах K и K' — разные начальные условия и поэтому сигнал, существующий в системе K , может не иметь аналога в системе K' и приходит логично к выводу, что принцип относительности, утверждающий идентичность уравнений для различных наблюдателей в одной и той же 4-области, не может утверждать идентичность процессов для различных наблюдателей в одной и той же области S^2 . Но поскольку автор, несмотря на исчерпывающий анализ несостоятельности запрета на передачу сверхсветового сигнала информации, воспользовался несуществующей гипотетической средой, то приверженцы стандартной аргументации просто проигнорировали эту работу.

Одну из интересных попыток найти гипотетическую среду предпринял Д. Дойч

(D. Deutsch) в книге [25]. Автор, разбирая явление интерференции фотона, приходит к выводу, что для понимания существа происходящего в этом процессе с фотоном, его (фотон) должны сопровождать движущиеся со скоростью света теньевые фотоны. Но, разделяя, как и Д. Дойч, принцип бритвы Оккама (не множить сущности без необходимости), автор обзора не видит необходимости ради объяснения явления интерференции создавать гипотетическую среду обитания фотона, навешивая на один фотон 10^{12} теньевых фотонов.

Со времени опубликования работы [26] и до выхода в свет монографии [27], подводятся итог первому этапу создания квантовой механики и электродинамики самодействующего электрона, описываемого нелинейными и нелокальными аналогами уравнений Шредингера и Дирака, автор обзора вместе с профессором В. П. Олейником пришёл к выводу, что роль т. н. гипотетической среды, в которой возможно распространение сверхсветового сигнала информации, может взять на себя потенциальная часть собственного поля электрона. Что это такое и о чём идёт речь? Постараемся вкратце изложить сущность подхода.

В основе всей современной физики лежит модель изолированной системы, использование которой отражает глубоко укоренившееся в умах физиков представление о том, что физическая система может существовать сама по себе, в отрыве от окружающего мира (какой бы ни была физическая система, если ее изолировать от окружающей среды, она не утратит своей индивидуальности). Однако природа устроена, по-видимому, так, что элементарные кирпичики мироздания (например, электроны), из которых образуются материальные тела, являются принципиально неизолированными системами. Физическая сущность открытой системы состоит в том, что она неразрывно связана с окружающим миром и своим поведением и физическими свойствами обязана взаимодействию с ним.

Электрон как **открытая самоорганизующаяся система** представляет собой квант (элементарное возбуждение) поля самодействующей электрически заряженной материи. Порождая собственное поле в окружающем пространстве, электрон тем самым наделяет пространство (и время! — в силу неразрывной связи между пространством и временем) физическими свойствами.

В работах [28-32] из принципа действия выведено основное уравнение динамики, учитывающее принцип относительности и описывающее самодействующий электрон как открытую самоорганизующуюся систему. По внешнему виду это уравнение совпадает с обычным уравнением Дирака для заряженной частицы во внешнем поле, описываемом 4-потенциалом. Однако в действительности оно существенно отличается от уравнения Дирака. Различие состоит в том, что предложенное уравнение является нелинейным и нелокальным, причем нелокальность имеет как пространственный, так и временной характер. Потенциальная и вихревая компоненты 4-потенциала, входящего в уравнение, отличаются друг от друга по своей физической природе: первая описывает собственное поле и выражается квадратично через компоненты волновой функции электрона, а вторая описывает поперечные электромагнитные волны и однозначно выражается через электромагнитные поля. Эти две существенно различные по своей природе величины объединяются в нашей теории в единый 4-вектор.

Анализ решений основного уравнения динамики показывает, что они описывают локализованные в пространстве сгустки самодействующей электрически заряженной материи, т. е. частица является **солитоном**. Спектр внутренней энергии электрона дискретный с бесконечно большим числом уровней, причем каждому значению энергии отвечают определенные размеры пространственного распределения заряда частицы и определенная геометрическая форма.

Распределение электрического заряда электрона в основном состоянии состоит из области основной локализации с линейными размерами порядка боровского радиуса и хвоста, простирающегося до бесконечности. Существенно, что из-за нелинейности динамического уравнения электрона волновая функция не подчиняется принципу суперпозиции. В силу этого электрон приобретает свойства абсолютно твердого тела: возмущение, испытываемое электроном в момент времени t в области основной локализации, в следующий момент $t + \varepsilon$ ($\varepsilon \rightarrow +0$) становится известным на любом расстоянии от нее.

Попытка отыскать в электродинамике физический механизм сверхсветовой передачи

информации предпринята в работе [33]. Здесь отмечается, что физическим носителем сверхсветовых сигналов является собственное поле электрически заряженной частицы. Это поле имеет двойственный характер: с одной стороны, собственное поле подчиняется уравнениям Максвелла и поэтому является электромагнитным полем, а с другой — оно порождается заряженной частицей и не может существовать в ее отсутствие, т. е. представляет собой в некотором смысле составную часть частицы. Последнее приводит к тому, что по своим физическим свойствам собственное поле частицы существенно отличается от поля электромагнитных волн: оно является полем стоячих волн материи, имеет чисто классический характер и не может быть сведено к совокупности фотонов. По-видимому, собственное поле электрона ответственно за появление у частицы волновых свойств, которые и проявляются в опытах по дифракции электрона. Собственное поле заряженной частицы играет в природе особую роль, состоящую в том, что оно превращает окружающее пространство в физическую среду (физический вакуум), обладающую свойствами абсолютно твердого тела. Одно из физических свойств этой среды состоит в том, что она способна мгновенно передать сигнал (информацию) о возмущении, происходящем в некоторой точке пространства, на сколь угодно большое расстояние.

Согласно результатам работ [33–34], поперечное вихревое электромагнитное поле состоит из двух компонент — электромагнитных волн и собственного поля заряженных частиц, существенно отличающихся друг от друга по своим физическим характеристикам. Двум компонентам электромагнитного поля отвечают два механизма передачи сигнала (информации): (1) передача сигнала через посредство собственного поля заряженных частиц, представляющего собой стоячие волны материи, жестко связанные с частицами и идущие от них на бесконечность или к другим частицам; собственное поле может передавать возмущения как со скоростью света, так и мгновенно; (2) передача сигнала со скоростью света с помощью электромагнитных волн, излучаемых частицами при их ускоренном движении и отрывающихся от частиц. Оба эти механизма действуют одновременно, как бы дублируя друг друга.

Своим происхождением сверхсветовые сигналы обязаны самодействию — обратному влиянию на заряженную частицу его собственного поля, в результате чего частица становится пространственно протяженной системой. Сверхсветовые сигналы неразрывно связаны, таким образом, с процессами самоорганизации, приводящими к формированию внутренней структуры заряженных частиц.

Сделанный вывод о возможности сверхсветовой передачи сигнала с помощью собственного поля заряженных частиц находится в явном противоречии с общепринятой точкой зрения, которая была впервые сформулирована А. Эйнштейном как следствие специальной теории относительности [35]. Детальный анализ проблемы показывает, однако, что вывод о невозможности мгновенных сигналов не вытекает из СТО и является дополнительной гипотезой, противоречащей уравнениям Максвелла, как это следует из рассмотрения переноса сверхсветового возбуждения собственным полем частицы [33–34].

Ошибка в общепринятом доказательстве невозможности существования сверхсветовых сигналов состоит в следующем. Проблема причинно-следственной связи между двумя событиями — это проблема динамики, ибо речь идет о передаче взаимодействия от одного события к другому. Следовательно, она может быть решена только путем анализа решений уравнений движения, подчиняющихся надлежащим граничным условиям. Оставаясь в рамках кинематики, решить проблему причинно-следственной связи принципиально невозможно. В общепринятых рассуждениях, касающихся сверхсветовых сигналов, динамика не рассматривается вовсе и поэтому вывод о невозможности сверхсветовых сигналов не является обоснованным.

Результаты работы [36] свидетельствуют о том, что при описании взаимодействия электромагнитного поля с заряженными частицами на основе уравнений Максвелла с необходимостью появляются сверхсветовые сигналы. В квантовой механике взаимодействие электромагнитного поля с заряженными частицами описывается не на языке полей E и B , а на языке скалярного и векторного потенциалов и это взаимодействие приводит к смещению фаз волновых функций частиц, которое вызывает изменение интерференционной картины, возникающей при наложении волновых функций. В смещениях фаз волновых функций содержится вся физическая информация о взаимодействующих системах, которую можно передать на любое рас-

стояние без переноса энергии и импульса. Сверхсветовая передача информации происходит, таким образом, вследствие нелокальной связи потенциалов с напряжённостями. (Автор обзора убеждён, что ответы на вопросы Д. Дойча, касающиеся процесса интерференции фотонов, также как и объяснение эффекта ЭПР (Эйнштейна-Подольского-Розена), заключены в структуре эфира, образуемого собственным полем. На этом же пути возможно продвинуться в понимании процесса образования сверхпроводящих пар). Решение динамических уравнений, учитывающих должным образом собственные поля, позволит установить физические механизмы, управляющие квантовыми процессами с учетом сверхсветовых сигналов, предсказать новые физические эффекты, связанные с этими механизмами, и тем самым указать конкретные пути развития технологий сверхсветовой передачи информации.

Благодарности. Идея написания обзора принадлежит В. П. Олейнику, которому автор выражает искреннюю благодарность за постоянную помощь в процессе работы. Автор благодарен также В. Г. Ляпину и В. С. Ольховскому за консультации по разъяснению и уточнению некоторых терминов.

Л и т е р а т у р а :

1. *Lene Vestergaard Hau, S. E. Harris, Zachary Dutton, Cyrus H. Behroozi* Light speed reduction to 17 metres per second in an ultracold atomic gas, *Nature* 397, 594-598, (18 February 1999).
2. *M. D. Lukin, S. F. Yelin, M. Fleischhauer* Entanglement of Atomic Ensembles by Trapping Correlated Photon States, *Phys. Rev. Lett.*, v. 84, 18, pp. 4232-4235, (1 May 2000).
3. *M. Fleischhauer, M. D. Lukin* Dark-State Polaritons in Electromagnetically Induced Transparency, *Phys. Rev. Lett.*, v. 84, 22, pp. 5094-5097, (29 May 2000).
4. *Olga Kocharovskaya, Yuri Rostovtsev, Marlan O. Scully* Stopping Light via Hot Atoms, *Phys. Rev. Lett.*, v. 86, 4, pp. 628-631, (22 January 2001).
5. *D. F. Phillips, A. Fleischhauer, A. Mair, R. L. Walsworth, M. D. Lukin, Storage of Light in Atomic Vapor.*, *Phys. Rev. Lett.*, v. 86, 5, pp. 783-786, (29 January, 2001).
6. *Chien Liu, Zachary Dutton, Cyrus H. Behroozi, Lene Vestergaard Hau* Observation of coherent optical information storage in an atomic medium using halted light pulses, *Nature* 409, 490-493, (25 January 2001).
7. *A. V. Turukhin, V. S. Sudarshanam, M. S. Shahriar, J. A. Musser, B. S. Ham, P. R. Hemmer* Observation of Ultraslow and Stored Light Pulses in a Solid, *Phys. Rev. Lett.*, v. 88, 2, 023602, (14 January 2002), Published 20 December 2001.
8. *Raymond Y. Chiao* Tunneling Times and Superluminality: a Tutorial, quant-ph/9811019.
9. *G. Nimtz, A. Haibel* «Basics of superluminal signals», physics/0104063.
10. *A. Ranfagni, P. Fabeni, G. P. Pazzi, D. Mugnai* Anomalous pulse delay in microwave propagation: A plausible connection to the tunneling time, *Phys. Rev. E*, v. 48, 2, pp. 1453-1460, (August 1993).
11. *Ch. Spielmann, R. Szipöcs, A. Stingl, F. Krausz* Tunneling of Optical Pulses through Photonic Band Gaps, *Phys. Rev. Lett.*, v. 73, 17, pp. 2308-2311, (24 October 1994).
12. *W. Heitmman, G. Nimtz* *Phys. Lett. A* 196 (1994) 154.
13. *Ph. Balcou, L. Dutriaux* Dual Optical Tunneling Times in Frustrated Total Internal Reflection, *Phys. Rev. Lett.*, v. 78, 5, pp. 851-854, (3 February 1997).
14. *Vladislav S. Olkhovskiy, Erasmo Recami, Giovanni Salesi*, Superluminal effects for quantum tunneling through two successive barriers, quant-ph/0002022; *Vladislav S. Olkhovskiy, Erasmo Recami, Jacek Jakiel* Unified Time Analysis of Photon and (Nonrelativistic) Particle Tunnelling, and the Superluminal group-velocity problem, quant-ph/0102007; *S. Longhi, P. Laporta, M. Belmonte, E. Recami* Measurement of Superluminal optical tunneling times in double-barrier photonic bandgaps, quant-ph/0201013; *J. Jakiel, V. S. Olkhovskiy, E. Recami* On Superluminal motions in photon and particle tunnelling, quant-ph/9810053.
15. *L. J. Wang, A. Kuzmich, A. Dogariu* Gain-assisted superluminal light propagation *Nature*, 406, 277-279, (2000).
16. *Yukiko Shimizu, Noritsugu Shiokawa, Noriak Yamamoto* Control of Light Pulse Propagation with Only a Few Cold Atoms in a High-Finesse Microcavity, *Phys. Rev. Lett.*, v. 89, 233001, (2002).
17. *D. Mugnai, A. Ranfagni, R. Ruggeri*, Observation of Superluminal Behaviors in Wave Propagation, *Phys. Rev. Lett.*, v. 84, 21, pp. 4830-4833, (22 May 2000).
18. *I. Alexeev, K. Y. Kim, H. M. Milchberg* Measurement of the Superluminal Group Velocity of an Ultrashort Bessel Beam Pulse, *Phys. Rev. Lett.*, v. 88, 7, 073901, (18 February, 2002).
19. *Raymond Y. Chiao, Jandir M. Hickman, Daniel Solli* Faster-than-light effects and negative group delays in optics and electronics, and their applications, quant-ph/0103014.
20. *Н. С. Бухман* О реальности сверхсветовой групповой скорости и отрицательного времени задержки волнового пакета в диспергирующей среде, *ЖТФ*, том 72, вып. 1, с. 136-138, 2002.
21. *Басов Н. Г., Амбарцумян Р. В. и др.* // *ДАН СССР*. 1965. т. 165. № 1. С. 58-60.

22. Крюков П. Г., Летохов В. С. Распространение импульса света в резонансно усиливающей (поглощающей) среде, УФН, т. 99. № 2, с. 169-227, 1969.
23. А. Н. Ораевский Сверхсветовые волны в усиливающих средах, УФН, № 12, 1998.
24. Anisovich K. V. The Relativistic Superlight Signal Carrying Information, "Problems of high energy physics and field theory (Proceeding of the XIV workshop)", Moscow, "Nauka", 1992, p. 57-64.
25. David Deutsch The Fabric of Reality, Penguin Press, 1997.
26. Арепьев Ю. Д., Буц А. Ю., Олейник В. П. К проблеме внутренней структуры электрически заряженных частиц. Спектры внутренней энергии и распределение заряда свободного электрона и атома водорода. — Киев: ИП АН УССР, Препринт № 8 — 91, 1991. — 36 с.
27. Oleinik V. P. The Problem of Electron and Superluminal Signals. (Contemporary Fundamental Physics) (Nova Science Publishers, Inc., Huntington, New York, 2001).
28. Олейник В. П. Квантовая электродинамика, описывающая внутреннюю структуру электрона// Квантовая электроника. — 1993. — Вып. 44. — С. 51-59.
29. Олейник В. П. К теории внутренней структуры электрона. Вторичное квантование и энергетические соотношения// Квантовая электроника. — 1993. — Вып. 45. — С. 57-79.
30. Oleinik V. P. Quantum Theory of Self-Organizing Electrically Charged Particles. Soliton Model of Electron, Proceedings of the NATO-ASI "Electron theory and quantum electrodynamics. 100 years later." (Plenum Press, N. — Y., London, Washington, D. C., Boston, 1997), p. 261-278.
31. Oleinik V. P. Nonlinear Quantum Dynamical Equation for the Self-Acting Electron, J. Nonlinear Math. Phys. — 1997. — v. 4, № 1-2, — p. 180-189.
32. Oleinik V. P. Quantum Equation for the Self-Organizing Electron, Photon and Poincare group (Nova Science Publishers, New York, Inc., 1999), p. 188-200.
33. Oleinik V. P. Superluminal Transfer of Information in Electrodynamics, SPIE Material Science and Material Properties for Infrared Optoelectronics, **3890**, p.321-328, (1998) (<http://www.spie.org/>).
34. Oleinik V. P. Faster-than-Light Transfer of a Signal in Electrodynamics, Instantaneous action-at-a-distance in modern physics (Nova Science Publishers, Inc., New York, 1999), p. 261-281.
35. Эйнштейн А. Принцип относительности и его следствия в современной физике // Собрание научных трудов, т. 1. — М.: Наука, 1965. — С. 138-164.
36. Олейник В. П. Проблема сверхсветовой коммуникации: сверхсветовые сигналы в электромагнитном поле и их физический носитель. // Физика сознания и жизни, космология и астрофизика. — 2003. — № 1. — С. 28-54.

Статья поступила в редакцию 12.03.2003 г.

Arepjev Yu.D.

The Velocity of Light: from Zero to Infinity

The advancement of communication systems, ensuring data obtaining and processing, raises necessarily the question of increasing the information rate, the upper limit of which, from the few point of the present-day knowledge, cannot exceed the velocity of light in vacuum. Recently, researches from many countries undertake persistent attempts to overcome (if it is possible) this limit. The purpose of this review is acquainting the specialists, working in the sphere of communication facilities, with the modern problematics of speed light control, and representing the state of affairs as regards "superluminal" investigation at the present moment.

Key words: information, velocity of light, superluminal communication.

Об авторе:

АРЕПЬЕВ Юрий Дмитриевич, научный сотрудник Института физики полупроводников НАН Украины. Публикации в отечественных и зарубежных изданиях. С электронными публикациями можно ознакомиться на сайтах: **Ошибка! Недопустимый объект гиперссылки.** и <http://www.chronos.msu.ru/lab-kaf/Oleynik/eoleynik.html>. Область интересов в теорфизике: туннельные переходы во внешних полях из связанного состояния в континуум; нелокальная и нелинейная квантовая механика и электродинамика с учётом самодействия, приводящая к понятию собственного поля частицы, обладающего нефотонной природой; изменение темпа времени частицы при её движении по траектории во внешних полях (возможность управления временными процессами); сверхсветовая коммуникация, основанная на передаче информации волнами нефотонной природы; «холодный» синтез (cold fusion); квантовый компьютер.