

КОЛЛЕКТИВНЫЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ И КВАЗИЧАСТИЦЫ

П.И. Белобров

Сибирский федеральный университет, МОЛПИТ, Институт биофизики СО РАН,
660036 Красноярск. E-mail: peter.belobrov@gmail.com

Представлен обзор современного состояния и направлений исследования коллективных возбуждений и квазичастиц конденсированного состояния вещества. Среди элементарных возбуждений выделены те, которые уже применяются в сложных жидкостях (мягкой материи). Рассмотрены недавно открытые квазичастицы, которые могут найти применение в биологии. Можно разделить липидные плоты на кластеры дифференцировки и распространяющуюся через мембрану квазичастицу рафтон.

Collective excitations and quasiparticles. P.I. Belobrov. The paper is review a current status of research and development of collective excitations and quasiparticles in condensed matter. We made focus on recently developed elementary excitations, which already being applied in complex fluids or soft matter. The recently discovered quasiparticles, which can be found biological applications, are considered. We resolve lipid rafts separating itself from a cluster differentiation and propagating through the membrane as quasiparticle rafton.

1. ВВЕДЕНИЕ

Коллективные возбуждения в биологии и в физике являются основным типом динамических состояний. В физике теория конденсированного состояния, где квазичастицы играют основную роль, достаточно развита. Биология же, где все процессы происходят в конденсированной фазе, до сих пор не имеет собственных элементарных возбуждений и квазичастиц.

Обзор по биологическим квазичастицам требует рассмотрения проблемы в целом, так как за последние годы было открыто несколько новых квазичастиц в физике, которые вскоре безусловно найдут интересные биологические приложения.

Первую работу, где были введены кванты звука, и которая начала «цепную реакцию» создания квазичастиц, написал Тамм [1]. История развития методов исследования коллективных возбуждений достаточно сложная и запутанная, так как рождение и созревание почти каждой квазичастицы происходило в течение многих лет.

В разделе 1.1 мы рассмотрим логику развития методов описания элементарных возбуждений и квазичастиц на физических примерах. Затем опишем важнейшие биологические примеры, где возможно введение квазичастиц.

1.1 ФИЗИКА КВАЗИЧАСТИЦ

После основополагающих работ [2-14] общая теория коллективных возбуждений конденсированного состояния казалась сформированной, однако недавнее открытие безмассовых фермионов Дирака в графене [15] вследствие разделения заряда и спина коллективных электронов инициировало открытие ряда совершенно новых квазичастиц и пересмотр старых коллективных возбужде-

ний [16-28]. Учебный материал изложен в работах [29-39].

1.2 БИОЛОГИЧЕСКИЕ ВОЗБУЖДЕНИЯ

По нашему мнению, все возбуждения в биологических системах являются коллективными. Однако проблема выделения элементарных возбуждений пока не решена. Тем не менее есть целый ряд процессов, где введение биологических квазичастиц практически подготовлено всей предысторией так, что приближение газовой фазы и «почти частиц» уже не представляется фантастикой. 60 лет развивается модель Ходжкина-Хаксли [40] и 40 лет исполняется конформону в полимерах [41-43] и солитону Давыдова в α -спиралях белков [44, 45]. Эти модели существенно продвинуты для физического рассмотрения квазичастиц в цепочках [46] и в компьютерной логике [47], хотя с точки зрения глубины понимания сравнение работ [48-51] и [52-55] позволяет сделать вывод о незначительном продвижении к элементарным коллективным возбуждениям при решении проблем биологии.

Понятно, что биофизика нервного импульса должна быть понята не только на языке электрических схем, но и на всех уровнях организации мембран, нервных волокон, каналов в мембранах и клеток в тканях. Поэтому исследования проблем биологии возбуждений постоянно углубляются в различных направлениях, в основном, экспериментально [56-64]. Открываются новые факты в межклеточных взаимодействиях [65-69] вместе с развитием теории плазмонных мод в клеточных мембранах [70-73].

Массивные параллельные измерения на основе микрофлюидной и микроэмульсионной платформ сильно развиваются. Этот прогресс обязан

новым методам и приборам массивного параллельного секвенирования. Поэтому недавно появилось много новых работ по коллективным возбуждениям в микрофлюидных системах с наблюдением аномальных продольных и поперечных фононных мод [74-79]. Микрофлюидный захват клеток, выделяющих антитела [80], позволяет создавать динамические паттерны [81] в микрофлюидных устройствах с мицеллами [82]. В настоящее время достигнут значительный прогресс в понимании структуры и динамики клеточных мембран.

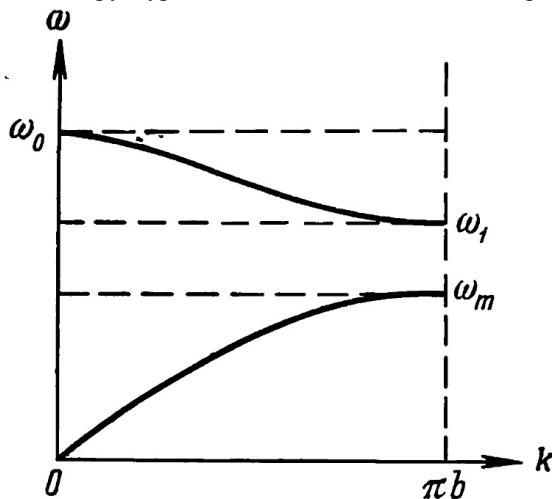


Рис. 1. Типичный закон дисперсии для сложной кристаллической решетки. Заимствован из [36].

2. КВАЗИЧАСТИЦЫ В ФИЗИКЕ

Представление коллективных возбуждений в физике как частиц и античастиц достаточно естественно. В [31] Абрикосов писал: «При каждом последовательном перемещении частиц изнутри ферми-сферы наружу создается частица снаружи ферми-сферы и свободное место или «античастица» внутри. Эти частицы и античастицы представляют в данном случае квазичастицы возбужденного состояния. «Античастицы» представляют собой полную аналогию античастицам в теории элементарных частиц (например, позитрон). Часто употребляемое название «дырки» для этих квазичастиц является, с нашей точки зрения, неудачным, так как обычно этот термин служит для обозначения другого объекта - свободных мест в незаполненной зоне (см. § 2.3 в [31])». Путаница «квази-античастиц» с «дырками» встречается, к сожалению, достаточно часто.

2.1 КВАНТ ЗВУКА - ФОНОН

И.Е. Тамм ввел в физику кванты звуковых волн [1], которые Я.И. Френкель назвал фононами. Эти элементарные возбуждения рассмотрены

подробно во многих учебниках и обзорах. Для понимания элементарных возбуждений рассмотрим фонон [30]. Световые волны можно рассматривать как квантованные осцилляторы излучения или считать, что они состоят из частиц («квантов»), называемых фотонами, каждый из которых имеет энергию $\hbar\omega$. Тамм звуковые волны рассмотрел аналогичным образом [1].

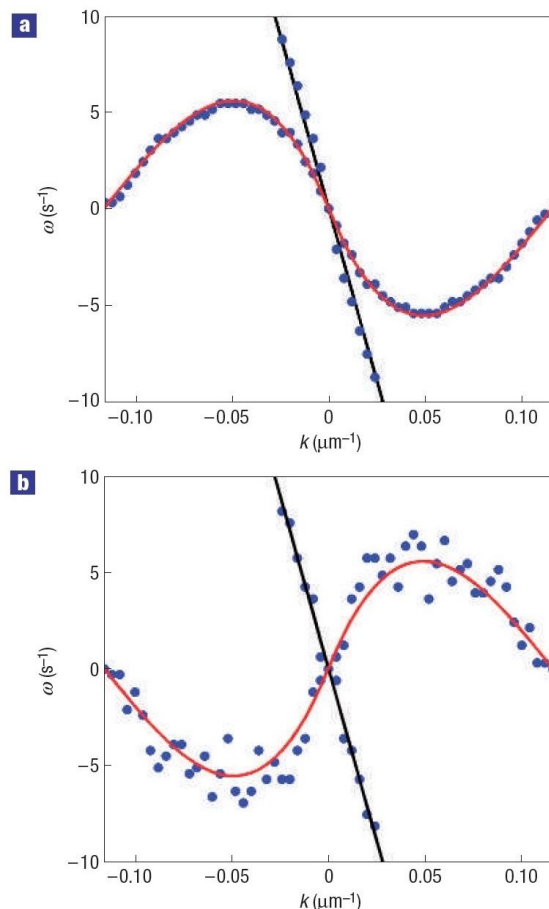


Рис.2 Дисперсионные соотношения $\omega(\mathbf{k})$ фононов в 1D кристалле из капель для продольных (a) и поперечных (b) волн, пики спектра мощности для двух ветвей. (1) искаженная \sin -подобная кривая из-за гидродинамического взаимодействия между каплями. Линия - теоретический результат без параметров. (2) прямая линия $\omega(\mathbf{k}) = -u_d k$ соответствует отклонениям капли вследствие относительного движения дефектов [77].

Фонон правильнее называть квантом или частицей звука. Величина $\hbar\omega_q$ представляет собой наименьшую порцию энергии возбуждения над основным уровнем, энергия которого есть $\hbar\omega_q/2$. Так как один фонон несет эту наименьшую энергию, его и рассматривают как элементарное возбуждение. Тогда „сложное возбуждение“ есть возбуждение, содержащее много фононов [30].

Для большинства систем многих тел возможно перейти от системы сильно взаимодействующих частиц к совокупности почти независимых элементарных возбуждений над основным состоянием следующим образом:

$$H = \sum_i H(\mathbf{p}_i, \mathbf{r}_i) + 1/2 \sum_{i,j} V(\mathbf{r}_i, \mathbf{r}_j; \mathbf{p}_i, \mathbf{p}_j) \rightarrow \\ \rightarrow H' = E_0 + \sum_q \varepsilon'_q A^*_q A_q + f(\dots A_q \dots A^*_q \dots), \quad (1)$$

где E_0 - энергия основного состояния системы взаимодействующих частиц, ε'_q - энергия элементарного возбуждения, A^*_q , A_q и $A^*_q A_q$ - операторы рождения, уничтожения и числа элементарных возбуждений. Зависимость ε'_q от волнового вектора q часто называют „законом дисперсии“ или „спектром возбуждения“. Малый по величине член $f(\dots)$ в (1) описывает взаимодействие между элементарными возбуждениями. С ним связаны уширения $\Delta\varepsilon'_q$ уровней энергии ε'_q [30].

На рис.1 приведен лишь типичный закон дисперсии для оптических и акустических мод, чтобы в дальнейшем сравнивать с ним другие законы дисперсии (рис.2), которые возникают, например, для аномальных продольных и поперечных фононных мод. При произвольных волновых числах \mathbf{k} вид закона дисперсии весьма сильно зависит от свойств силовых матриц [36]. В простейших моделях обычно оказывается, что $\omega_1(\mathbf{k}) < \omega_2(\mathbf{k})$. Тогда график зависимостей $\omega = \omega_q(\mathbf{k})$ вдоль некоторого «хорошего» направления в обратной решетке схематически может быть представлен рис. 1, на котором \mathbf{b} - это период обратной решетки в выбранном направлении. Низкочастотная ветвь закона дисперсии ($\omega < \omega_m$) описывает так называемые *акустические* колебания, а высокочастотная ($\omega_1 < \omega < \omega_0$) - *оптические* колебания кристалла. Итак, сложная кристаллическая решетка, помимо акустических фононов, обладает также оптическими фононами [36].

На рис. 2 показаны дисперсионные соотношения фононов в 1D кристалле из капель [77]. Кристалл был создан микрофлюидным устройством для генерации 1D кристалла из движущихся капель воды в масле. Равномерные капли образуются на Т-образном перекрестии между каналами воды и масла (+ПАВ). Высота канала составляла 10 мкм. Ширина 35 мкм на Т-образном перекрестии и 250 мкм вдоль выходного канала. Отрицательные значения ω показаны, чтобы отразить нарушение симметрии. В кристалле период $a = 27$ мкм, радиус капли $R = 10$ мкм, скорость капли $u_d = 360$ мкм*с⁻¹ и скорость масла $u_{oil} = 1730$ мкм*с⁻¹ [77]. Цикл работ [74-79] позволяет понять захват клеток, выделяющих антитела по микрокапиллярному механизму [80], который позволяет создавать динамические паттерны [81] в микрофлюидных устройствах с мицеллами [82].

2.2 ВОЗБУЖДЕНИЯ~КВАЗИЧАСТИЦЫ

Элементарные возбуждения часто разбивают [91] на две основные категории — коллективные возбуждения и квазичастицы, хотя эта классификация далеко не универсальна. Тер-Хаар [92], называет все элементарные возбуждения квазичастицами. Коллективные возбуждения представляют собой кванты, связанные с коллективными движениями макроскопических групп частиц в системе, т. е. с движениями системы как целого.

Примеры коллективных возбуждений [91]:

1. *Фононы*. В периодических атомных структурах, таких, как кристалл, коллективные движения представляют собой звуковые волны. Соответствующие возбуждения, как уже обсуждалось выше, суть кванты звука или фононы.

2. *Плазмоны*. В электронном газе в металле возникают флуктуации электронной плотности, подобные звуковым волнам. Они образуют почти независимые фиктивные тела, известные как „плазменные колебания“. Кванты этих колебаний представляют собой коллективные возбуждения; их называют плазмонами.

3. *Магноны*. В ферромагнетиках существуют регулярные флуктуации плотности спинового момента, называемые „спиновыми волнами“. Коллективные возбуждения в этом случае суть кванты спиновых волн, известные как магноны.

Коллективные возбуждения похожи на реальные частицы не более, чем волны на воде похожи на молекулы воды. Напротив, квазичастицы очень напоминают реальные частицы. Дело здесь, грубо говоря, в следующем: если одна частица движется через систему, она притягивает или расталкивает частицы вокруг себя и оказывается окруженной «облаком» взбаламученных частиц, подобным облаку пыли от копыт скачущей лошади. Реальная частица плюс связанное с ней облако и образуют квазичастицу. Как облако пыли скрывает лошадь, так и облако из частиц „экранирует“ реальную частицу, значительно ослабляя действие ее силового поля. Поэтому квазичастица только слабо взаимодействует с другими квазичастицами и может рассматриваться как почти независимая от них. Присутствие облака приводит также к различию свойств квазичастицы и реальной частицы, например, квазичастица может иметь свою эффективную массу [30].

Вот некоторые примеры квазичастиц:

1. *Квазиэлектрон*. Электрон в электронном газе с однородным фоном положительного заряда отталкивает от себя другие электроны и таким образом оказывается окруженным положительным экранирующим облаком. Электрон плюс экранирующее облако и образуют квазиэлектрон. Эффективное взаимодействие между двумя квазиэлектронами - экранированное взаимодействие -

более слабое (более короткодействующее), нежели первоначальное кулоновское взаимодействие.

2. *Полярон*. Электрон, двигаясь в непроводящем полярном кристалле, взаимодействует с ионами кристаллической решетки, смещая их из равновесных положений и приводя таким образом к локальному возбуждению звуковых волн, т. е. фононов. Полярон представляет собой электрон плюс облако фононов.

3. *Электрон проводимости*. Электрон, взаимодействующий с периодическим полем фиксированных ионов решетки, не окружен облаком в том смысле, как об этом говорилось выше. Тем не менее влияние периодического поля может быть описано с помощью понятия эффективной массы, поэтому электроны проводимости можно рассматривать как некоторый простейший вид квазичастицы.

Имеется также небольшое число элементарных возбуждений, которые не очень легко укладываются в рамки нашей классификации, хотя их часто относят то к одной, то к другой категории. Один из примеров — это *экситон*, который представляет собой пару „связанный электрон + дырка“ и движется сквозь кристалл как водородоподобный „атом“. Его часто называют коллективным возбуждением. Другой пример — *боголон*, или „квазичастица Боголюбова“, представляющая собой линейную комбинацию электрона в состоянии $(+k, \uparrow)$ и „дырки“ в состоянии $(-k, \downarrow)$. Боголон — это элементарное возбуждение в сверхпроводнике. Возбуждения типа боголонов существуют также в некоторых ядрах, которые во многих отношениях напоминают сверхпроводники.

Важно отметить, что в физической системе может существовать более одного вида элементарных возбуждений. Например, в электронном газе в металлах имеются как квазиэлектроны, так и плазмоны,

2.3 ПОЛЯРОН

Теория полярона началась с идеи Ландау, который, используя результат Пайерла о стационарных состояниях [2], рассмотрел автолокализацию электронов в решетке за счет поляризации [3]. Затем теорию полярона развивали Пекар [5, 7], Фрелих [8] и Фейнман [10].

Физическая картина поляронов малого и большого радиуса такова [85]. Локальные изменения электронного состояния в кристалле приводят к соответствующим локальным изменениям во взаимодействии между индивидуальными атомами в кристалле и отсюда к возбуждению атомных колебаний, т. е. к возбуждению фононов. И, соответственно, наоборот — любое локальное изменение состояния ионов решетки изменяет локальное электронное состояние. Общепринято в такой си-

туации говорить об «электрон — фононном взаимодействии». Это взаимодействие проявляет себя также при нулевой температуре и является следствием ряда макроскопических и микроскопических явлений. Когда электрон движется через кристалл, он переносит вместе с собой область искажения решетки.

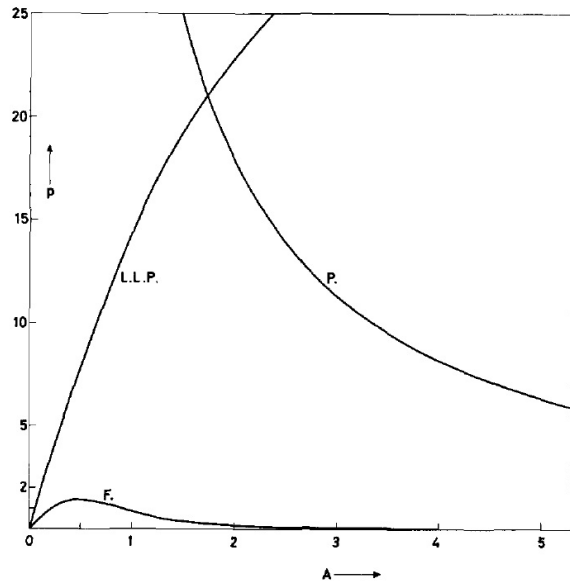


Рис.3 Относительная погрешность (в процентах) собственной энергии симметричной модели полярона, соответствующие трем "классическим" теориям — L. L. P.: приближение Ли, Лоу и Пайнса [84], P: приближение Ландау-Пекара [5] и F: приближение Фейнмана [10]. Заимствовано из [83].

Электрон вместе с сопровождающим его самосогласованным полем поляризации можно рассматривать как квазичастицу, называемую поляроном. Её эффективная масса больше, чем эффективная масса блоховского электрона. Образование полярона — это следствие динамического электрон-решёточного взаимодействия, которое ответственно также за рассеяние заряженных носителей тока, перенормировку фононных частот и экранировку взаимодействия между носителями тока.

Полярон большого радиуса ввел Пекар [5], который рассмотрел предельный адиабатический случай, когда электрон-решёточное взаимодействие столь сильно, что позволяет описать все наиболее существенные свойства стационарного полярона в созданном им поляризационном поле.

Несмотря на кажущуюся простоту модельной задачи о поляроне, она до сих пор не решена и продолжает привлекать внимание. Ей принадлежит важная роль в статистической механике и квантовой теории поля, поскольку она может рассматриваться как простейший пример задачи нерелятивистской квантовой частицы, взаимодействующей с квантовым полем [85].

Для сравнения точности различных теорий в работе [83] рассмотрено точное решение симметричной модели для типичного значения волнового вектора фонона ($\kappa = \hbar k^2/m\omega = \sqrt{2}$, m - масса электрона) и в зависимости от некоторых "эквивалентного" параметра связи $A = \frac{1}{4} \gamma^2$ ($\gamma = 2iV_k/\hbar\omega$, где V_k - энергия электрон-фононного взаимодействия и ω - угловая частота осцилляторов). Очевидно, что параметр κ не существует в полной теории полярона. Что касается параметра связи A , можно показать, что среднее число виртуальных фононов монотонная функция A . Это оправдывает использование A в качестве параметра связи. Собственной энергии в симметричной модели (E_0^S) была аппроксимирована, следуя методам Ли и др. [84], Ландау-Пекара [5] и Фейнмана [10]. Относительная погрешность этих методов в E_0^S приведено на рис. 3 [83]. Основная решенная проблема в этой работе - применение метода Фейнмана для симметричной модели. Модель полярона Фейнмана основана на его нерелятивистской квантовой механике с методом "интегралов по траекториям". Этот метод также известен как пространственно-временной подход к квантовой механике [86].

2.4 РОТОН

Эти квазичастицы были созданы при развитии теории сверхтекучести гелия [4, 6]. Ландау отметил, что «элементарные возбуждения» вихревого спектра могут быть названы «ротонами». Это название предложил Тамм [4].

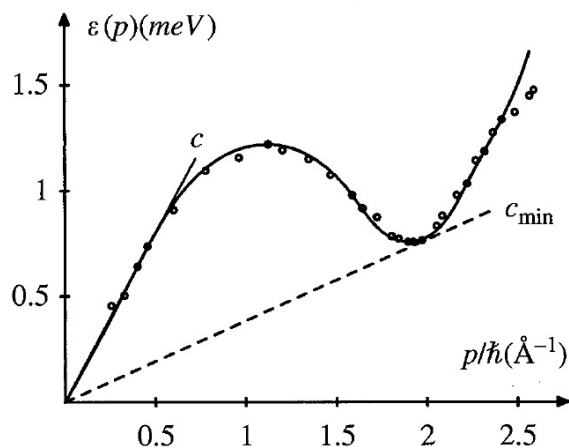


Рис.4 Энергия квазичастиц в сверхтекучем гелии
Займствовано из [87].

Аргументы Ландау показывают, что квазичастичные возбуждения ротонны для сверхтекучих жидкостей, движутся с меньшей, чем минимальный наклон c_{\min} скоростью, и не дают вклада в диссипацию. На практике критическая скорость сверхтекучего потока значительно меньше, чем этот предел. Поэтому могут быть получены дру-

гие возбуждения, в частности, вихри, что и приводит к диссипации и вязкости [4, 87].

Самое удивительное в спектре на рис.4 - наличие минимума. Эта часть называется ротонной частью спектра

$$\varepsilon(p) = \Delta + (p-p_0)^2/2\mu. \quad (2)$$

Физическая интерпретация движений в фоновой и ротонной областях приведены на рис.5.

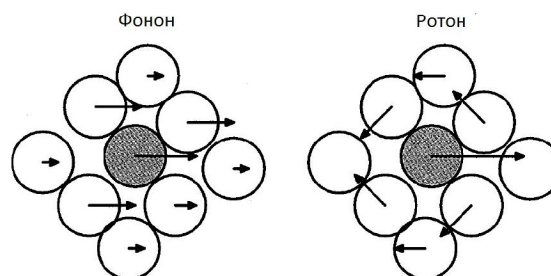


Рис.5 Физические интерпретации фоновой и ротонной частей спектра квазичастиц [87].

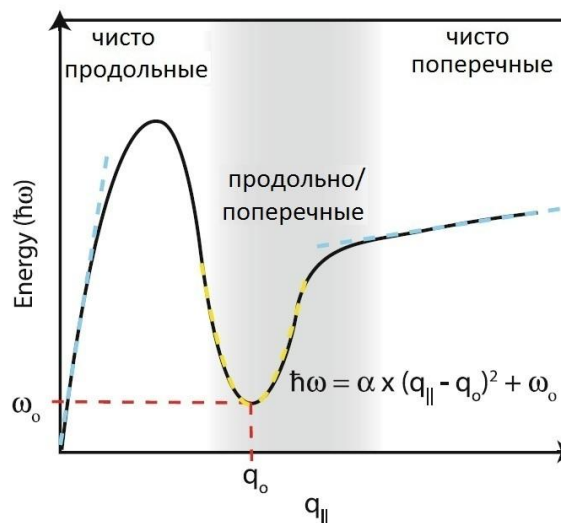


Рис.6 Типичный закон дисперсии в липидных системах. Займствовано из [88].

Движение фононов соответствует длине волны де Бройля $p = h/\lambda$, которая больше, чем размер одного атома. Это приводит к сочетанию движения групп атомов, движущихся вместе как фонон в твердом теле. Ротон соответствует длине волны де Бройля порядка межчастичного разделения. Это соответствует центральной части частицы, движущейся вперед, а плотноупакованные соседи должны двигаться в сторону круговыми движениями. Фейнман отмечает, что это сочетание линейного и кругового движения имеет схожесть с движущимися кольцами дыма. Физическая интерпретация фоновой и ротонной частей спектра квазичастиц показана на рис.5.

На рис.6 диапазон $q_{||}$ вокруг минимума хорошо описывается параболической формой. Дисперсия линейна при малых $q_{||}$ из-за высокой частоты распространения звука с продольной поляризацией. При больших $q_{||}$ дисперсия также является линейной. Поперечная поляризации наблюдалась ранее [88]. Из сравнения формулы на рис.6 с выражением (2) следует достаточно интересный вывод о наличии квазичастиц типа ротонов в липидных системах. Этот тип элементарных возбуждений может быть полезен, например, для понимания липидной «акробатики» в биологических мембранах [93].

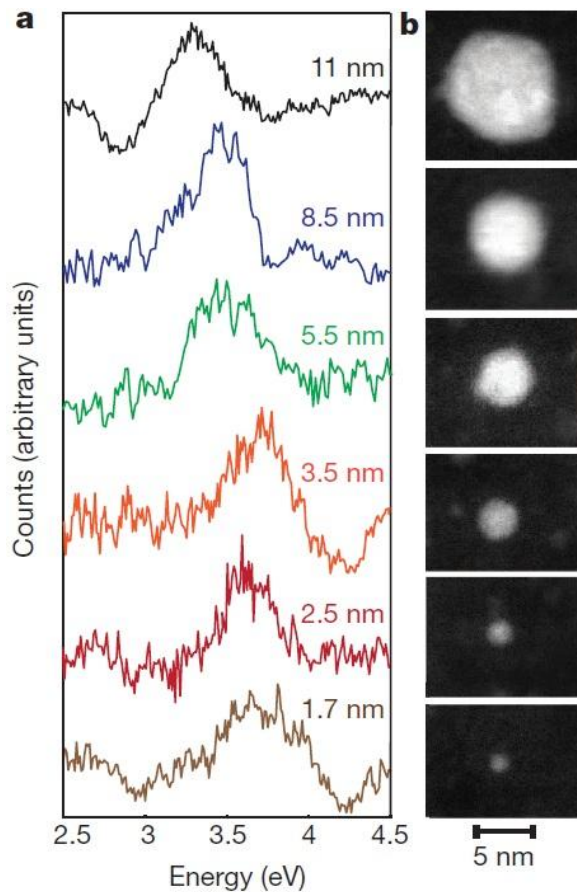


Рис.7. Корреляция геометрии наночастиц серебра с данными плазмонных EELS потерь [94].

2.5 КВАНТОВЫЙ ПЛАЗМОН

В работе [94] исследованы плазмонные резонансы отдельных наночастиц серебра без использования стабилизирующих лигандов методами просвечивающей электронной микроскопии с коррекцией аберрации (ПЭМ) и монохроматического сканирования ПЭМ энергетических потерь электронов спектроскопии (EELS). Эта техника позволила найти прямую связь между геометрией частицы и ее плазменного резонанса [94].

Таблица 1. Список квазичастиц [95].

| Квазичастица | Точный смысл |
|---------------------------|---|
| Биполярон | Связанная пара двух поляронов |
| Chargon | Квазичастицы, образующиеся при разделении спина и заряда электрона |
| Холон | |
| Орбитон | |
| Спинон | |
| Конфигурон | Элементарное конфигурационное возбуждение в аморфном материале, которое включает в себя разрыв химической связи |
| Квазиэлектрон | Электрон плюс экранирующее облако, зависит от других сил и взаимодействий в твердом теле |
| Магنون | Когерентное возбуждение электронных спинов в материале |
| Плазмарон | Квазичастицы от связи между плазмоном и дыркой |
| Плазмон | Когерентного возбуждения плазмы |
| Полярон | Движущая заряженная квазичастица, которая окружена ионами в материале |
| Поляритон | Смесь фотонов с другими квазичастицами |
| Ротон | Элементарные возбуждения в сверхтекучем гелии-4 |
| Солитон | Самоусиливающая уединенная волна возбуждения |
| Трион | Когерентного возбуждения трех квазичастиц (две дырки и один электрон или двух электронов и одной дырки) |
| Фермион Майорана | Квазичастица, равная своей античастице, находится в запрещенной зоне некоторых сверхпроводников |
| Фазон | Колебательные моды в квазикристалле, связанные с атомными перестройками |
| Фонон | Колебательные моды в кристаллической решетке, связанные со сдвигами атомов |
| Фрактон | Коллективные квантованные колебания на подложке с фрактальной структурой |
| Экситон | Связанное состояние электрона и дырки |
| Электронная дырка (дырка) | Отсутствие электрона в валентной зоне |

Когда наночастицы диаметром от 20 нм уменьшаются до 2 нм, плазмонный резонанс смещается в сторону более высоких энергий на 0,5 эВ, что значительно отклоняется от классических

предсказаний. Представлена аналитическая квантово-механической модель, которая описывает этот сдвиг, связывая его с изменением диэлектрической проницаемости частицы. Эти результаты свидетельствуют о квантовых плазмонных свойствах малых металлических наночастиц, что полезно для понимания применений каталитически и биологически активных наночастиц серебра.

На рис.7 приведены данные EELS потерь при плазмонном резонансе частиц серебра диаметром от 11 нм до 1,7 нм (рис.7а) и соответствующий образ STEM каждого образца (рис.7б). Электронный пучок был направлен на край частиц, так что на рисунке показан только поверхностный плазмонный резонанс.

3. НОВЫЕ КВАЗИЧАСТИЦЫ

Насколько известно, полного списка квазичастиц и элементарных возбуждений не существует. Да и вряд ли он возможен. Достаточно полный список на английском, арабском, итальянском и китайском языках есть в Википедии [95]. Он приведен в табл.1 на русском.

3.1 ОРБИТОН

Когда электрон рассматривается как элементарная частица, он имеет спин и заряд. При связывании с ядром в атоме он приобретает квантовое число момента импульса, соответствующего квантованию атомных орбиталей. Даже если электроны в полоске твердого тела делокализованы, то изоляторы Мотта сохраняют три основных квантовых числа: спиновое, зарядовое и орбитальное. Было показано, что в твердом теле не только заряд и спин электронов может приводить к магнетизму, но и орбитальные степени свободы электронов [96]. Хотя «настоящий» физический электрон имеет спин, заряд и орбитальный момент, теоретически электрон можно рассматривать как связанное состояние трех независимых, фундаментальных квазичастиц: спинон (спин электрона), холон или *chagon* (заряд электрона), и орбитон (перенос орбитальной степени свободы) [17].

Отличительной чертой одномерной физики состоит в разложении элементарных электронов на отдельные степени свободы, т.е. разделение электронов на самостоятельные квазичастицы, которые несут или спин (спиноны) или заряд (холон). Замечательным и фундаментальным свойством одномерных (1D) систем является то, что электронные возбуждения распадаются на спиноны и холоны. Это было предсказано 15 лет назад (см. [97] и ссылки в ней) и было подтверждено экспериментально фотоэмиссией с угловым разрешением, которую впервые наблюдали в работах [98, 99].

Авторы работы [17] сообщили о наблюдении орбитальной степени свободы (орбитона), используя резонансное неупругое рассеяние рентгеновских лучей на одномерной изоляторе Мотта Sr_2CuO_3 . Показано, что орбитон отдельно от спина распространяется через решетку в качестве самостоятельной квазичастицы с существенной дисперсией $\epsilon(\mathbf{p})$ порядка 0,2 эВ почти в одной зоне Бриллюэна.

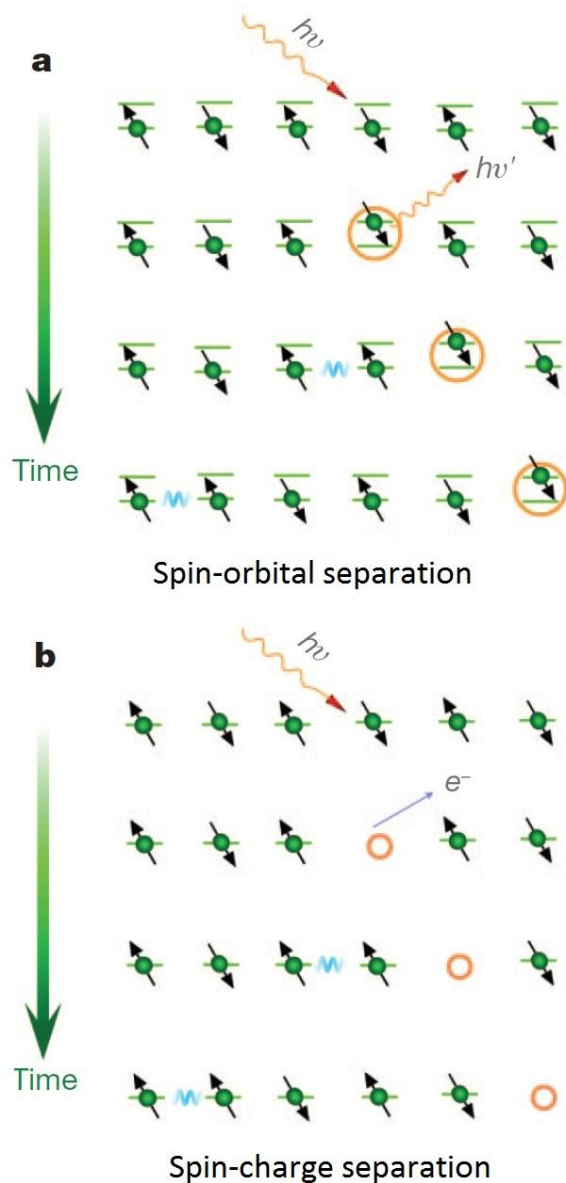


Рис.8. Спин-орбитальное разделение в антиферромагнитной цепочке спинов, возникающее после возбуждения орбитали: спин-орбитальное (а) и спин-зарядовое (б) разделения [17].

Спин-зарядовое разделение (рис.8) - пример дробления частиц, т.е. явление, в котором квантовые числа квазичастиц не кратны элементарным частицам и их долям. Эффект является одним из

самых необычных проявлений квантовой физики коллективного взаимодействия частиц. Это концепция уже нашла свое отражение в ряде теорий, например, при описании высокотемпературной сверхпроводимости [17]. Мы полагаем, что подобные эффекты имеют место при движении липидных плотов (rafts) в биологических мембранах.

В целом «не так уж ты элементарен, мой дорогой электрон. Фундаментальная частица распадается на квазичастицы, в том числе на новый орбитон», как было сказано в [18] при комментировании работы [17].

3.2 КОНФИГУРОН

Конфигурон открыт в работах [19-24], хотя чаще всего цитируется статья [27], написанная на основе работ [19-26]. Точное определение его дано в таблице 1.

3.3 ФЛУКТУОН, ФЛЕКСУРОН ...

Флуктуонные состояния электронов (флуктуоны), которые ввёл в физику Кривоглаз [29], и флексурон Кацнельсона [16] продолжают «цепную реакцию» введения квазичастиц, которую начал Тамм [1]. Что будет дальше? Многообразие в заголовке раздела говорит о том, что «песня ещё не спета».

4. «КВАЗИЧАСТИЦЫ» В БИОЛОГИИ

Заключение в кавычки слова квазичастицы имеет простой смысл. В этой главе мы рассмотрим те коллективные возбуждения в биологии, для которых возможное квантование так и не было сделано, хотя оно в принципе было возможно.

Идея коллективных возбуждений в биологии имеет длительную историю, однако квазичастиц как квантов элементарных возбуждений нет до сих пор. Примеры плазмонов [70-72] и конформонов [41, 43] недостаточно убедительны. Конформон не получил применения в понятном аппарате биологии. Плазмоны применяются для анализа поверхностных состояний в системах биологического происхождения, отнесение их к биологическим квазичастицам спорно. Понятие плазмон в генетике для комплекса цитоплазматических генов (геномы митохондрий и пластидов) [64] имеет лишь лингвистическое отношение к квазичастицам, как протоплазма клеток к физической плазме. Здесь категоричность неуместна, так как плазмоны в мембранах могут неожиданно быть связаны с липидными плотами (rafts).

Идею квазичастичного описания электронно-конформационных возбуждений уже 40 лет. В 1972 году конформон предложили независимо Волькенштейн [41] и Грин [43].

4.1 СПАЙКИ В НЕЙРОНАХ

Модель Ходжкина-Хаксли развивается в течение 60 лет [40, 48-53]. Биофизика нервного импульса не может быть понята только на языке электрических схем. Развитие модели Ходжкина-Хаксли для импульсов в нейронах (спайки) вполне подготовило введение соответствующих квазичастиц - солитонов.

Реальное же понимание связи механики, проводимости и строения ионных каналов и на всех уровнях организации мембран, нервных волокон, каналов в мембранах и клеток в тканях возможно, с нашей точки зрения только после введения коллективных возбуждений и «настоящих» биологических квазичастиц.

4.2 ЛИПИДНЫЕ ПЛОТЫ (RAFTS)

В работе [100] впервые предложена концепция, согласно которой сфинголипид-холестериновые плоты, как правило, используется в качестве платформы для связанных с мембраной функций. Предложено формирование плотов или рафтов и способы проявления липидами своих функций со специфическими белками, которые являются плот-связанными. Изоляция рафтов и их движение в мембране является элементарным коллективным возбуждением, квантом которого мы предполагаем квазичастицу «рафтон». Теория рафтона рассмотрена в отдельной статье.

Наконец-то одна из тайн, спрятанных в клеточной мембране, представлена обоснованной гипотезой формирования бляшек. Одной из причин их возникновения может быть нарушение нормальной работы липидных рафтов [100]. Теория липидных рафтов сразу же стала сенсацией. Так статья [100], опубликованная 5 лет назад, была процитирована более 6 тысяч раз.

Липидные плоты суть кластеры дифференцировки [60]. Поэтому можно ввести квазичастицу мембраны - рафтон. Её существование в подвижной мембране можно связать с сохранением индивидуальности кластеров для точного узнавания клетками друг друга при взаимодействии.

5. ОБСУЖДЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

Полное обсуждение рафтона как биологической квазичастицы достаточно сложно. При подготовке этого обзора собрано более двухсот работ, в которых обсуждаются квазичастицы и коллективные возбуждения на физических, химических и биологических примерах. Но неразумно увеличивать список литературы до двух сотен.

Библиография отражает рассмотренную проблему, которая становится основной в биофизике.

5.1 ЧТО НАДО СДЕЛАТЬ НЕМЕДЛЕННО

Разработать теорию рафтона примерно так, как был введен и рассмотрен флексурон [16]. Необходимые для этого предпосылки рассмотрены выше в тексте и в цитированной литературе.

5.2 БИОМАРКЕРЫ КАК КВАЗИЧАСТИЦЫ

Идеальным идентификатором (ID) маркера мог бы являться штрихкод, включающий в себя геном, условия экспрессии, протеом, историю маркера в клетке, в органе и в ткани от эмбриона до апоптоза, ассоциации маркера с болезнями и характеристики в биологических жидкостях, иммунный статус в шкале «свой – чужой», способность вызывать инфекции. Желательно было бы включать в штрихкод пространственную структуру и функции маркера, статический и динамический потенциал трансформации маркера в другие типы биомолекул под влиянием различных ферментов. Это в целом и есть тот самый биологический ID, который желателен для каждой молекулы, надмолекулярной и субклеточной структуры, клетки, органа, ткани и биологической жидкости каждого живого организма. Однако уровень наших знаний не позволяет пока определить этот ID. Поэтому легко идентифицировать как биомаркеры лишь те молекулы, которые можно «штриховать» генетически: ДНК, РНК, пептиды и белки. А вот уже плоты (rafts), состоящие из белково-липидных комплексов, практически очень сложно связать с геномом, т.е. с полинуклеотидом. Эта проблема будет обсуждаться подробно в другой статье.

Можно предположить, что идентификатором ID могут являться биологические квазичастицы и соответствующие элементарные возбуждения. Собственно, все квазичастицы в физике являются штрихкодом соответствующих коллективных возбуждений. Поэтому дальнейшее понимание конденсированного состояния в биологии без квазичастиц невозможно.

ВЫВОДЫ И ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Сделан анализ коллективных возбуждений и квазичастиц на физических примерах, и представлен обзор современного состояния и направлений исследования коллективных возбуждений и квазичастиц конденсированного состояния вещества. Среди элементарных возбуждений были выделены те, которые уже применяются в сложных жидкостях (мягкой материи). Рассмотрены недавно открытые квазичастицы, которые могут найти биологические применения. Например, липидные плоты можно разделить на рафтон и распространяющиеся через мембрану новую квазичастицу.

ЛИТЕРАТУРА

1. Ig. Tamm. Uber die Quantentheorie der molekularen Lichtzerstreuung in festen Korpern // *Z. Phys.* **60** (5-6), 345-363 (1930). Тамм И. Е. О квантовой теории молекулярного рассеяния света в твердых телах // Тамм И.Е. Собрание научных трудов в двух томах. М. Наука. 1975. т.1, с.168-185.
2. R. Peierls. Uber die Existenz stationarer Zustände // *Zs. Phys.*, **58** (1-2), 59-62 (1929).
3. L Landau. On the motion of electrons in a crystal lattice // *Phys. Z. Sowjetunion* **3**, 884 (1933). Л.Д. Ландау. Собрание трудов. М. Наука, 1969. Том 1, стр. 90-91.
4. Ландау Л.Д. Теория сверхтекучести гелия II // *ЖЭТФ*, **11** (6), 592 (1941).
5. С.И. Пекар. Теория полярона // *ЖЭТФ*, **16**, 341 (1946).
6. Н.Н. Боголюбов. К теории сверхтекучести // *Изв. АН СССР, сер. физ.* **11**, 77-90 (1947).
7. ЛД Ландау, С.И. Пекар. Эффективная масса полярона // *ЖЭТФ*, **18** (5), 419-423 (1948).
8. H. Fröhlich, H. Pelzer & S. Zienau. XX. Properties of slow electrons in polar materials // *Phil. Mag. Series 7*, **41** (314), 221-242 1950.
9. Тябликов С. В. К теории взаимодействия частицы с квантовым полем // *ЖЭТФ*, **21**, 16 1951.
10. R. P. Feynman. Slow Electrons in a Polar Crystal // *Phys. Rev.* **97**, 660-665 (1955).
11. В.Л. Бонч-Бруевич. Физические идеи метода элементарных возбуждений // *УФН* **56** (5), 55-76 (1955).
12. ЛД Ландау. Теория ферми-жидкости // *ЖЭТФ*, **30**, 1058 (1956).
13. ЛД Ландау. Колебания ферми-жидкости // *ЖЭТФ*, **32**, 59 (1957).
14. ЛД Ландау. К теории ферми-жидкости // *ЖЭТФ*, **34**, 262 (1958).
15. K. S. Novoselov, A. K. Geim *et al.* Two-dimensional gas of massless Dirac fermions in graphene // *Nature* **438**, 197-200 (2005).
16. M. I. Katsnelson. Flexuron, a self-trapped state of electron in crystalline membranes // *Phys. Rev. B* **82**, 205433 (2010).
17. J. Schlappa, K. Wohlfeld *et al.* Spin-orbital separation in the quasi-one-dimensional Mott insulator Sr₂CuO₃ // *Nature* **485**, 82-85 (2012).
18. Z. Merali. Not-quite-so elementary, my dear electron. Fundamental particle 'splits' into quasiparticles, including the new 'orbiton'. // *Nature News* (18 April 2012).
19. C. A. Angell. Oxide Glasses in Light of the "Ideal Glass" Concept: I, Ideal and Nonideal Transitions, and Departures from Ideality // *J. Am. Ceramic Soc.* **51** (3), 117-124 (1968).
20. C. A. Angell. The old problems of glass and the glass transition, and the many new twists // *PNAS USA*, **92**, 6675-6682 (1995).

21. C. A. Angell. Formation of Glasses from Liquids and Biopolymers // *Science* **267**, 1924 (1995).
22. C.A. Angell. Landscapes with megabasins: Polyamorphism in liquids and biopolymers and the role of nucleation in folding and folding diseases // *Physica D* **107**, 122–142 (1997).
23. C A Angell. Ten questions on glassformers, and a real space 'excitations' model with some answers on fragility and phase transitions // *J. Phys.: Condens. Matter* **12**, 6463 (2000).
24. C. A. Angell. Calorimetric Studies of the Energy Landscapes of Glassformers by Hyperquenching Methods // *J. Thermal Analysis and Calorimetry*, **69** (2002) 785–794.
25. Ожован М.И. Динамические однородные фракталы в эмульсиях // *ЖЭТФ*, **104**, 4021 (1993).
26. Ожован М.И. Топологические характеристики связей в окисных системах SiO₂ и GeO₂ при переходе стекло-жидкость // *ЖЭТФ*, **130**, 944 (2006).
27. M.I. Ojovan. Configurons: Thermodynamic Parameters and Symmetry Changes at Glass Transition // *Entropy*, **10**, 334–364 (2008).
28. Jun Suzuki. Model for Motions of Impurities in Bose-Einstein Condensates // (2005) ArXiv:cond-mat/0407714v2 [cond-mat.stat-mech].
29. Кривоглаз М. А. Флуктуонные состояния электронов // *УФН* **111** 617–654 (1973).
30. Маттук Р. Фейнмановские диаграммы в проблеме многих тел. М.: Мир, 1969. - 365 с.
31. Абрикосов А.А. Основы теории металлов: Учеб. руководство. М.: Наука. 1987. 520 с.
32. Каганов М. И., Ляфшиц И. М. Квазичастицы: Идеи и принципы квантовой физики твердого тела. М.: Наука. 1989. - 96 с.
33. Днепровский В.С. Экситоны перестают быть экзотическими квазичастицами // *Соросовский образовательный журнал*, 2000, №8, с. 88-92.
34. Жуков А.В. Квазичастичное описание конденсированных сред: Учебное пособие. Белгород: Изд-во БелГУ, 2001. - 36 с.
35. Брандт Н. Б., Кульбачинский В. А. Квазичастицы в физике конденсированного состояния. 2005. 634 pp.
36. Косевич А.М. Основы механики кристаллической решетки. Наука, 1972. – 282 с.
37. Косевич А.М., Ковалев А.С. Введение в нелинейную физическую механику, 1989. – 304 с.
38. Тулуб А.В. Квазичастицы в современной физике. 1972. 39 с.
39. Ашкрофт Н., Мермин Д. Физика твердого тела. М.: Мир, 1981, в 2-х томах, 684 с.
40. Hodgkin, A., and Huxley, A. A quantitative description of membrane current and its application to conduction and excitation in nerve // *J. Physiol.* **117**: 500–544. (1952)
41. M.V. Volkenstein. The conformon // *J Theor Biol.* **34** (1), 193–195 (1972).
42. Волькенштейн М В Физика мышечного сокращения // *УФН* **100** 681–717 (1970)
43. D.E. Green, and S. C. Ji. The electromechanochemical model of mitochondrial structure and function // *PNAS USA*, **69** (3), 726–729 (1972).
44. A.S. Davydov. The theory of contraction of proteins under their excitation // *J Theor Biol*, **38**, (3), 559–569 (1973).
45. Давыдов А.С. Солитоны в квазиодномерных молекулярных структурах // *УФН* **138** 603–643 (1982).
46. Браун О.М., Кившарь Ю.С. Модель Френкеля-Конторовой. Концепции, методы, приложения 2008.
47. Cris Calude, Gheorghe Paun. Computing with Cells and Atoms: An Introduction to Quantum, DNA and Membrane Computing 2000. 316 p.
48. Hodgkin, A., Huxley, A., and Katz B. Measurement of Current-Voltage Relations in the Membrane of the Giant Axon of *LOLIGO* // *J. Physiol.* (1952) **116**, 424-448.
49. Hodgkin, A., and Huxley, A. Currents Carried by Sodium and Potassium Ions Through the Membrane of the Giant Axon of *LOLIGO* // *J. Physiol.* (1952) **116**, 449-472.
50. Hodgkin, A., and Huxley, A. The Components of Membrane Conductance in the Giant Axon of *LOLIGO* // *J. Physiol.* (1952) **116**, 473-496.
51. Hodgkin, A., and Huxley, A. The Dual Effect of Membrane Potential on Sodium Conductance in the Giant Axon of *LOLIGO* // *J. Physiol.* (1952) **116**, 497-506.
52. Nelson, M.E. Hodgkin-Huxley Models. Electrophysiological Models. In: Databasing the Brain: From Data to Knowledge. S. Koslow and S. Subramaniam, eds. Wiley, New York. 2004.
53. Катц Б. Нерв, мышца и синапс 1968.
54. Кольс О.Р., Максимов Г.В., Раденович Ч.Н. Биофизика ритмического возбуждения. - М.: Изд-во МГУ, 1993. -208 с.
55. Leslie M. Loew. Biophysical Journal 60 Years after Hodgkin-Huxley // *Biophys J*, **103** (1), E1-E2 (2012).
56. Ченцов Ю.С. Введение в клеточную биологию: Учебник для вузов. 4-е изд., перераб. и доп. М.: ИКЦ «Академкнига», 2004. 495 с.
57. В.В. Исаева, Ю.А. Каретин, А.В. Чернышев, Д.Ю. Шкуратов. Фракталы и хаос в биологическом морфогенезе Владивосток, Ин-т биологии моря ДВО РАН, 2004. - 128 с.
58. Белобров П.И. Физические модели надмолекулярной самоорганизации. Дисс. на соиск. уч. ст. д.ф.-м.н., Красноярск 1996. 298 с.
59. А. Г. Камкин, И. С. Киселева. Физиология и молекулярная биология мембран клеток. М.: Изд. центр "Академия". 2008. 592 с.
60. H. Lodish, A. Berk *et al.* Molecular Cell Biology. 7th Edition, 2012, 973 p.

61. Уолтер Г. Живой мозг. М. Мир. 1966, 302 с.
62. Любищев А.А., Гурвич А.Г. Диалог о биополе. Оргкомитет Любимцевских чтений, Ульяновск, УГПУ, 1998. - 208 с.
63. Belousov LV, Opitz JM, Gilbert SF. Life of Alexander G. Gurwitsch and his relevant contribution to the theory of morphogenetic fields // *Int J Dev Biol.* **41** (6):771-779 (1997).
64. Джинкс Д., Нехромосомная наследственность, пер. с англ., М., 1966. {Плазмон (генетика)}
65. S.V. Stovbun, A.I. Mikhailov et al. On the Supramolecular Mechanism of Cell-Cell Commutation // *Rus. J. Phys. Chem. B*, **6** (1), 60-64 (2012).
66. Стовбун С.В., Михайлов А.И. и др. Хиральность при самоорганизации струн в жидкой фазе и принципы экономии в природе // *Вестник МГОУ. Серия «Естественные науки».* № 3, 92-97 (2011).
67. Dill KA, Ghosh K, Schmit JD. Physical limits of cells and proteomes // *PNAS USA* **108** (44), 17876-17882 (2011).
68. Vazquez A. Optimal macromolecular density in the cell // *PNAS USA*, **109** (9), E533 (2012).
69. K.A. Dilla, K. Ghosh et al. Optimal density is robust to variations in calculation // *PNAS USA*, **109** (9), E534 (2012).
70. E Manousakis. Collective charge excitations along cell membranes // *Phys. Lett. A* **342**, 443 (2005).
71. W Zheng, HC Chiamori et al. Nanofabricated plasmonic nano-bio hybrid structures in biomedical detection // *Nanotech Rev*, **1**, 213-233 (2012).
72. T. T. Nhan, N. T. Nhan et al. Theory on Plasmon Modes of the Cell Membranes // arXiv:0706.1685v1 [physics.bio-ph] (2007).
73. M. Pierno. Structural and dynamical properties of advanced polymeric sols and films: a light scattering investigation // Ph.D. Thesis. Politecnico Di Milano. 2004. 120 p.
74. T. Beatus, R.H. Bar-Ziv, T. Tlusty. The physics of 2D microfluidic droplet ensembles // *Phys Rep*, **516** (3), 103-145 (2012).
75. B. Liu, J. Goree, Y. Feng. Waves and instability in a one-dimensional microfluidic array // arXiv:1206.3507v2 [physics.flu-dyn] (2012).
76. J.-C. Baret. Surfactants in droplet-based microfluidics // *Lab Chip* **12**, 422-433 (2012).
77. T. Beatus, T. Tlusty and R. Bar-Ziv. Phonons in a one-dimensional microfluidic crystal // *Nature Physics* **2**, 743 - 748 (2006).
78. P. Garstecki. Microfluidic crystals: Impossible order // *Nature Physics* **2**, 733 - 734 (2006).
79. T Beatus, R Bar-Ziv, T Tlusty. Anomalous Microfluidic Phonons Induced by the Interplay of Hydrodynamic Screening and Incompressibility // *Phys. Rev. Lett.* **99**, 124502 (2007).
80. S. F. Romanuik, S. M. Grist et al. Microfluidic Trapping of Antibody-secreting Cells // *J Med Bio Engineering*, **31** (2): 121-127 (2011).
81. T. Thorsen, R. W. Roberts et al. Dynamic Pattern Formation in a Vesicle-Generating Microfluidic Device // *Phys. Rev. Lett.* **86**, 4163-4166 (2001).
82. R. Seemann, M. Brinkmann et al. Droplet based microfluidics // *Rep Prog Phys* **75**, 016601 (2012).
83. J. Devreese, R. Evrard. On the Feynman polaron // *Phys Lett*, **23** (3), 196-198 (1966).
84. T. D. Lee, F. E. Low, and D. Pines. The Motion of Slow Electrons in a Polar Crystal // *Phys. Rev.* **90**, 297-302 (1953).
85. Боголюбов Н. Н., Боголюбов Н. Н. (мл.) Аспекты теории полярона. - М. 2004. - 176 с.
86. R. P. Feynman. Space-Time Approach to Quantum Electrodynamics // *Phys. Rev.* **76**, 769-789 (1949).
87. Annett J.F. Superconductivity, superfluids and condensates. Oxford University Press, 2004.
88. C. L. Armstrong, M. A. Barrett et al. Effect of cholesterol on the lateral nanoscale dynamics of fluid membranes // *Eur Biophys J*, 2012,
89. Paciaroni A, Orecchini A. et al. Fingerprints of amorphous ice-like behavior in the vibrational density of states of protein hydration water // *Phys Rev Lett* **101**:148104 (2008).
90. A. Paciaroni, A. Orecchini et al. Vibrational Collective Dynamics of Dry Proteins in the Terahertz Region // *J Phys Chem B*, **116**, 3861-3865 (2012).
91. Пайнс Д., Проблема многих тел, ИЛ, 1963.
92. Тер Хаар Д. Введение в физику систем многих частиц. 1958.
93. A.J. Markvoort, S.J. Marrink. Lipid Acrobatics in the Membrane Fusion Arena // *Current Topics in Membranes*. **68**, 259-294 (2011).
94. J.A. Scholl, A.L. Koh & J.A. Dionne. Quantum plasmon resonances of individual metallic nanoparticles // *Nature* **483**, 421-427 (2012).
95. http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_quasiparticles Список квазичастиц.
96. Кугель К И, Хомский Д И. Эффект Яна - Теллера и магнетизм: соединения переходных металлов // *УФН* **136**, 621-664 (1982).
97. Giamarchi T. Quantum Physics in One Dimension. Clarendon Press, 2004.
98. C. Kim, A. Y. Matsuura et al. Observation of Spin-Charge Separation in One-Dimensional SrCuO₂ // *Phys. Rev. Lett.* **77**, 4054-4057 (1996).
99. C. Kim, Z.-X. Shen et al. Separation of spin and charge excitations in one-dimensional SrCuO₂ // *Phys. Rev. B* **56**, 15589-15595 (1997).
100. K. Simons, E. Ikonen. Functional rafts in cell membranes // *Nature* **387**, 569-572 (1997).

14/7/12 13:32K