

УДК 577.338, 538.945, 577.336

ГИПОТЕЗА О ФИЗИЧЕСКОЙ ПРИРОДЕ ФЕНОМЕНА ЖИЗНИ (к дискуссии по статье Г.Р. Иваницкого «XXI век: что такое жизнь с точки зрения физики»)

© 2021 г. А.М. Смолович

Институт радиотехники и электроники им. В.А. Котельникова РАН, 125009, Москва, Моховая ул., 11/7

E-mail: asmolovich@petersmol.ru

Поступила в редакцию 15.03.2021 г.

После доработки 15.03.2021 г.

Принята к публикации 24.03.2021 г.

Предложена гипотеза о том, что в основе феномена жизни лежит макроскопическое квантовое состояние органических структур, входящих в состав клетки, которое характеризуется наличием энергетической щели в электронном спектре. Оценивается порядок ширины щели. Обсуждается возможность обнаружить эту энергетическую щель в экспериментальном исследовании.

Ключевые слова: феномен жизни, куперовские пары, энергетическая щель, оптическая спектроскопия.

DOI: 10.31857/S0006302921050227

В статье Г.Р. Иваницкого «XXI век: что такое жизнь с точки зрения физики» [1] значительное место уделяется проблеме определения понятия жизни, которое по наличию или отсутствию какого-то признака или набора признаков могло бы дифференцировать живую и неживую материю, что оказывается весьма непростой задачей. Кроме того, в статье обсуждаются гипотезы возникновения жизни. Эти проблемы вызвали большой интерес и породили последующую дискуссию. Однако возможен другой подход к вопросу, вынесенному в заголовок работы [1]. В настоящее время, когда структура ряда простейших живых организмов изучена практически до атомного уровня, как отмечено в работе [2], «все большее число ученых начинает осознавать, что мы не знаем чего-то самого главного». Чего же мы можем не знать, детально зная структуру? Ответом может быть то, что мы не знаем состояние этой структуры. Если рассматривать жизнь как особое состояние органических структур, входящих в состав клетки, физическая природа которого в настоящее время еще не известна, то слова «что такое жизнь с точки зрения физики» можно понимать, как вопрос о том, какова эта природа, т.е. какой физический механизм лежит в ее основе. В этом случае кажется естественным попробовать искать какие-то аналоги среди явлений, изученных в физике конденсированного состояния. Подобный подход уже предлагался ранее рядом известных физиков.

В предисловии к своей монографии [3] Ф. Лондон предположил возможность некоторого квантового поведения, которое могло бы играть роль в биологических процессах, сходного с тем, что присутствует при сверхпроводимости и сверхтекучести. Он писал, что определенные взаимодействия между макромолекулами в биохимии можно понять не иначе, как порождение некоего квантового механизма, присущего системе в целом. Это обеспечивает системе характерную стабильность квантовых состояний с возможностью изменений без участия процессов диссипации. В работах [4, 5] У.А. Литтл обратил внимание на это замечание Ф. Лондона и отметил, что это совершенно новое и важное соображение для понимания живых систем. Затем У.А. Литтл предположил, что сверхпроводимость при близкой к комнатной температуре может быть достигнута в органическом полимере, структура которого подобна структуре ДНК.

Позднее вопросы локальной сверхпроводимости рассматривались на молекулярном уровне. Сложные молекулы с сопряженными связями содержат как электроны на внутренних орбитах (σ -электроны), так и внешние электроны (π -электроны) [6]. При этом π -электроны способны перемещаться вдоль всего молекулярного σ -остова (ядра атомов молекулы с σ -электронами), т.е. являются коллективными или делокализованными. Другими словами, π -электроны подобны свободным электронам в проводнике. Используя подход, использованный в работе [7], В.З. Кресин

показал, что в π -электронной системе возможна парная корреляция, подобная образованию куперовских пар в сверхпроводнике [8]. При этом связь между электронами в парах обусловлена их взаимодействием с σ -остовом, который играет здесь роль, подобную роли кристаллической решетки в сверхпроводниках. Сложные молекулы с сопряженными связями входят в состав биологически активных веществ. В работах [8, 9] В.З. Кресин ссылается на книгу А. и Б. Пюльманов [10], которая завершается главой «Делокализация электронов и жизненные процессы». Там делается вывод, что присутствие электронного облака в сопряженных молекулах можно рассматривать, как главную основу жизни. В.З. Кресин делает предположение, что «парная корреляция коллективизированных электронов, приводящая к возникновению щели в спектре, обеспечивает стабильность, аналогичную той, которая наблюдается в сверхпроводящих металлах, а дальний порядок, обусловленный межэлектронной корреляцией, существенен для понимания механизма связи, передачи возбуждений в биологически активных веществах» (см. раздел «Сверхпроводимость и физика сложных молекул» в работе [8]).

Поясним, что сверхпроводящее состояние в сложных молекулах не означает возможность протекания электрического тока с нулевым сопротивлением. Это лишь одно из характерных (но не в данном случае) свойств сверхпроводящего состояния, наряду рядом других. Одно из них — наличие энергетической щели в плотности электронных состояний вблизи уровня Ферми, внутри которой нет разрешенных уровней энергии. Ширина щели 2Δ соответствует энергии, связи куперовской пары электронов. Эта щель придает стабильность сверхпроводящему состоянию, ведь для разрушения состояния необходимо затратить энергию порядка ширины щели. Теория Бардина—Купера—Шриффера предсказывает ширину щели для обычных сверхпроводников при $T = 0$: $2\Delta = 3.52k_B T_c$, где T_c — температура сверхпроводящего перехода, а k_B — постоянная Больцмана (выражение (45.18) в работе [11]). Величины энергетической щели для высокотемпературных сверхпроводников [12] и для волны зарядовой плотности [13] отличаются от приведенного выражения, но также имеют порядок $2k_B T_a$, где T_a — температура сверхпроводящего или пайерлсовского перехода соответственно.

Наша гипотеза состоит в том, что в основе феномена жизни лежит макроскопическое квантовое состояние органических структур, входящих в состав клетки. Полагаем, что это не сверхпроводимость, но что стабильность этого состояния тоже обеспечивается наличием энергетической щели в электронном спектре. Предполагаем, что ширина этой энергетической щели тоже имеет

порядок $2k_B T_V$, где T_V — некоторая температура, типичная для живых организмов, например, 300 К. Это дает оценку ширины энергетической щели порядка 5×10^{-2} эВ. Можно попытаться обнаружить эту энергетическую щель в экспериментальном исследовании.

Укажем экспериментальные методы идентификации энергетической щели. Для измерения плотности состояний, включая идентификацию сверхпроводящей энергетической щели и энергетической щели волны зарядовой плотности, широко используется туннельная спектроскопия [14]. Метод использовался и для биологических объектов. В частности, одиночные молекулы ДНК исследовали методом сканирующей туннельной спектроскопии [15–17]. Однако в этих работах представлен довольно большой разброс результатов измерений. Для идентификации энергетической щели также используется традиционная оптическая спектроскопия в различных диапазонах длин волн электромагнитного спектра (см. работы [18, 19] и ссылки в них). Этот метод привлекателен для исследования живых объектов, поскольку является бесконтактным. Большинство исследований биологических объектов было проведено в спектральном диапазоне в промежутке между 600 и 2000 см^{-1} . При исследовании бактерий и фагов были использованы следующие виды оптической спектроскопии: спектроскопия комбинационного рассеяния и поверхностно-усиленная спектроскопия комбинационного рассеяния [20–24], когерентная антистоксовая спектроскопия комбинационного рассеяния [25], инфракрасная Фурье-спектроскопия [26], инфракрасная спектроскопия с временным разрешением [27, 28]. В работе [24] проведены спектроскопические исследования единичной бактерии, которую фиксировали в поле зрения конфокального микроскопа с помощью так называемого «рамановского оптического пинцета». По-видимому, этот метод следует считать предпочтительным для идентификации энергетической щели в живых структурах.

Вопрос о том, где и как следует искать энергетическую щель, является дискуссионным. Очевидно, для этого исследования следует выбрать некоторые простые организмы. Ведь даже простые биологические объекты, такие как прокариоты или вирусы, значительно сложнее, чем большинство объектов физических исследований. Их спектры тоже достаточно сложны, что затрудняет процесс идентификации энергетической щели. В случае использования в этих исследованиях бактерий может помочь сравнение их спектров в нормальном и инактивированном состоянии, что означает использование этих состояний в качестве маркеров живого (V, *vita*) и мертвого (M, *mort*) (обозначения из работы [1]). Это будет

аналогом сравнения спектров сверхпроводника при температурах выше и ниже точки сверхпроводящего перехода (см. рис. 2 в работе [18] или рис. 1 в работе [19]). Однако идентификация энергетической щели в спектре бактерии будет осложнена тем, что в живой клетке протекают известные процессы, связанные с ее жизнедеятельностью. Эти процессы также вносят вклад в разницу спектров живых и мертвых клеток [23]. Возможно, для поиска энергетической щели следует использовать спектры отдельных органелл клетки или отдельных биологических молекул, содержащихся в клетке, например, молекул белков.

Другим вариантом является использование для поиска энергетической щели спектров вирусов. Относительно того, являются ли вирусы формой жизни или органическими структурами, которые взаимодействуют с живыми организмами, мнения расходятся. В работе [1] вирусы названы «организмами на краю жизни». Когда вирусы находятся вне клетки-хозяина, они не проявляют жизненных характеристик в виде метаболизма, репликации и т.д. Можно предложить использовать в качестве маркеров V и M вирусов, находящихся внутри и вне клетки-хозяина. Для этих исследований подойдет процесс инфицирования бактерий фагами. В этом случае следует сравнивать спектры ДНК фагов до попадания в клетку бактерии и во время нахождения ДНК фага внутри клетки. Здесь учитывается, что при инфицировании внутрь бактерии попадает только ДНК фага, а его белковая оболочка (капсид) остается снаружи мембраны. Кроме того, при попадании ДНК фага в клетку происходят изменения процессов жизнедеятельности бактерии, связанные с ее инфицированием. В ряде процессов ДНК фага принимает непосредственное участие, что приведет к изменениям в ее спектре и осложнит идентификацию энергетической щели. Отдельной задачей является разделение спектров фагов, бактерий и раствора, в котором они находятся. Для этого существуют специальные методы (см. работу [29]), которые успешно применяются в том числе при спектроскопии фагов и бактерий. В частности, эти методы позволяют отличать спектр бактерии от спектра фага, а также спектры разных видов фагов друг от друга [20].

Таким образом, обсуждена гипотеза о феномене жизни как макроскопического квантового состояния органических структур, входящих в состав клетки, которое характеризуется наличием энергетической щели в электронном спектре. Обсуждена также возможность экспериментальной идентификации этой щели.

БЛАГОДАРНОСТИ

Благодарю Е.Р. Лозовскую, А.А. Синченко, С.В. Чекалина, А.В. Калинина и Д.В. Клинова за полезные консультации и обсуждения.

ФИНАНСИРОВАНИЕ РАБОТЫ

Работа выполнена в рамках государственного задания ИРЭ им. В.А. Котельникова РАН.

КОНФЛИКТ ИНТЕРЕСОВ

Автор заявляет об отсутствии конфликта интересов.

СОБЛЮДЕНИЕ ЭТИЧЕСКИХ СТАНДАРТОВ

Настоящая работа не содержит описания исследований с использованием людей и животных в качестве объектов.

СПИСОК ЛИТЕРАТУРЫ

1. Г. Р. Иваницкий, Успехи физ. наук **180** (4), 337 (2010).
2. В. П. Реутов и А. Н. Шехтер, Успехи физ. наук **180** (4), 393 (2010).
3. F. London, *Superfluids*, Vol. 1 (John Wiley & Sons, Inc., N. Y., 1950).
4. W. A. Little, Phys. Rev. **134** (6), A1416 (1964).
5. У. Литтл, Успехи физ. наук **86** (2), 315 (1965).
6. V. Z. Kresin and Y. N. Ovchinnikov, Annals Phys. **417**, 168141 (2020).
7. А. И. Ларкин и А. Б. Мигдал, Журн. эксперим. и теорет. физики **44** (5), 1703 (1963).
8. В. З. Кресин, Журн. структурной химии **12** (4), 745 (1971).
9. В. З. Кресин, *Сверхпроводимость и сверхтекучесть* (Наука, М., 1978).
10. Б. Пюльман и А. Пюльман, *Квантовая биохимия* (Мир, М., 1965).
11. В. В. Шмидт, *Введение в физику сверхпроводников* (МЦНМО, М., 2000).
12. T. Timusk and B. Statt, Reports Progr. Phys. **62** (1), 61 (1999).
13. P. Monceau, Advances Phys. **61** (4), 325 (2012).
14. Y. I. Latyshev, in *Electron Transport in Nanosystems*, Ed. by J Bonča and S Kruchinin (Springer, Dordrecht, 2008), p. 155.
15. M. S. Xu, S. Tsukamoto, S. Ishida, et al., Appl. Phys. Lett. **87** (8), 083902 (2005).
16. E. Shapir, H. Cohen, A. Calzolari, et al. Nature Mater. **7** (1), 68 (2008).
17. N. Fardian-Melamed, G. Eidelstein, D. Rotem, et al., Adv. Mater. **31** (35), 1902816 (2019).
18. T. Timusk, Physics in Canada **67** (2), 99 (2011).
19. О. В. Мисочко, Физика твердого тела **40** (6), 998 (1998).

20. L. J. Goeller and M. R. Riley, *Appl. Spectroscopy* **61** (7), 679 (2007).
21. K. Hamasha, Q. I. Mohaidat, R. A. Putnam, et al., *Biomed. Optics Express* **4** (4), 481 (2013).
22. S. Vishnupriya, K. Chaudhari, R. Jagannathan, et al., *Particle & Particle Systems Characterization* **30** (12), 1056 (2013).
23. R. Li, D. Dhankhar, J. Chen, et al., *IEEE Access* **7**, 23549 (2019).
24. Z. Pilat, A. Jonas, J. Pilatova, et al., *Anal. Chem.* **92** (18), 12304 (2020).
25. A. Downes, R. Mouras, and A. Elfick, *J. Biomed. Biotechnol.* **2010**, 101864 (2010).
26. C. A. Vargas, A. A. Wilhelm, J. Williams, et al., *Appl. Environ. Microbiol.* **75** (20), 6431 (2009).
27. J. Chen, Y. Zhang, and B. Kohler, in *Photoinduced phenomena in nucleic acids*, Ed. by M. Barbatti, A.C. Borin, and S. Ullrich (Springer, Switzerland, 2014), vol. 2, p. 39.
28. K. de La Harpe, F. R. Kohl, Y. Zhang, et al., *J. Phys. Chem. A* **122** (9), 2437 (2018).
29. Y. H. Ong, M. Lim, and Q. Liu, *Optics Express* **20** (20), 22158 (2012).

**A Hypothesis about the Physical Phenomenon of Life
(Contribution to the Discussion of the Paper by G.R. Ivanitskii
“21st Century: what Is Life from the Perspective of Physics”)**

A.M. Smolovich

*Kotel'nikov Institute of Radioengineering and Electronics, Russian Academy of Sciences,
ul. Mokhovaya 11/7, Moscow, 125009 Russia*

It is hypothesized that macroscopic quantum state, characterized by the presence of an energy gap in the electronic spectrum, of the organic structures that are the constituents of the cell, undergoes reactions leading to the first life forms. The width (energy) of the band gap is estimated. The possibility of detecting this energy gap in an experimental study is discussed.

Keywords: phenomenon of life, Cooper pairs, energy gap, optical spectroscopy