

## Работы Н.Н. Боголюбова

### "О новом методе в теории сверхпроводимости"

Микроскопическая теория сверхпроводимости была развита Бардином, Купером, Шриффером (БКШ) и Боголюбовым в 1957 году. Первоначально краткое сообщение БКШ появилось в Письмах в журнале *Physical Review* [1], а текст их полной статьи был опубликован позднее [2]. В основе их модельной теории лежит предположение о неустойчивости нормального состояния металла по отношению к образованию связанных состояний электронов с противоположными спинами и импульсами. Этот эффект был обнаружен годом ранее Купером, который рассмотрел систему из двух электронов со слабым притяжением вблизи поверхности Ферми [3]. БКШ построили свою теорию, пользуясь вариационным подходом для волновых функций, явно учитывающих наличие таких куперовских пар в сверхпроводящем состоянии. При этом расчеты были проведены для модельного гамильтониана, в котором электрон-фононное взаимодействие было заменено прямым взаимодействием электронов, приводящим к образованию куперовских пар вблизи поверхности Ферми. Для обоснования теории БКШ необходимо было построить микроскопическую теорию без привлечения вариационного подхода с заранее предполагаемым видом волновой функции и рассмотреть электрон-фононное взаимодействие в явном виде.

Такая теория была предложена Боголюбовым для электрон-фононного гамильтониана Фрелиха в работе [4] [О новом методе в теории сверхпроводимости. I, *ЖЭТФ* **34**, 58-65 (1958)], которая поступила в редакцию *ЖЭТФ* до появления полной статьи БКШ [2]. Анализируя процессы взаимодействия электронов с фононами, автор показал, что виртуальные процессы с рождением электронных пар дают расходящиеся вклады. Чтобы исключить такие "опасные" диаграммы в работе был использован метод канонического  $(u, v)$ -преобразования к квазичастицам, представляющим собой суперпозицию электронных и дырочных состояний с противоположными импульсами и спинами. Применяя метод компенсации "опасных" диаграмм, развитый ранее автором в теории сверхтекучести, Боголюбов построил модельный гамильтониан для идеального ферми-газа квазичастиц со спектром возбуждений  $E(\mathbf{k}) = \sqrt{[\varepsilon(\mathbf{k})]^2 + [C(\mathbf{k})]^2}$ , где  $\varepsilon(\mathbf{k})$  – спектр электронов в нормальной фазе и  $C(\mathbf{k})$  – щель в спектре в сверхпроводящем состоянии. Полученные при этом уравнения для щели и температуры сверхпроводящего перехода соответствовали уравнениям в модельной теории БКШ. Таким образом, введение новых

квазичастиц (иногда их называют "боголюбонами") со спектром  $E(\mathbf{k})$  позволяет дать ясную физическую картину элементарных возбуждений как суперпозиции частицы и дырки в сверхпроводящей фазе. Модельный гамильтониан для квазичастиц также значительно упрощает вычисление различных физических свойств сверхпроводников.

Во второй работе [5] [О новом методе в теории сверхпроводимости. II, ЖЭТФ **34**, 66 - 72 (1958)], используя теорию возмущения по параметру электрон-фононного взаимодействия, авторы вывели эффективный гамильтониан с прямым электрон-электронным взаимодействием такого же типа, что и модельный гамильтониан БКШ. Применяя далее метод канонического  $(u, v)$ -преобразования к квазичастицам и используя метод компенсации "опасных" диаграмм, как и в работе [4], авторы получили уравнения для сверхпроводящей щели и энергии основного состояния в сверхпроводящей фазе такие же, как в работе [4] и теории БКШ. В третьей работе цикла [6] [О новом методе в теории сверхпроводимости. III, ЖЭТФ **34**, 73-79 (1958)] была рассмотрена модель взаимодействующих пар электронов, которые описывались операторами Паули. Применяя  $(u, v)$ -преобразование и метод компенсации "опасных" диаграмм, автор получил уравнение для щели в спектре электронов в сверхпроводящем состоянии, соответствующее теории БКШ. В монографии [7], помимо изложения работ [4], [6], проведено исследование роли кулоновского взаимодействия электронов в сверхпроводящем спаривании, где показано, что учет эффектов запаздывания для электрон-фононного взаимодействия приводит к значительному ослаблению кулоновского отталкивания электронов за счет логарифмической перенормировки этого взаимодействия (логарифмический критерий "Боголюбова-Толмачева"). В заключении отметим, что в работах Боголюбова с соавторами [8] было доказано, что результаты, полученные для модельного гамильтониана БКШ с факторизующимся взаимодействием являются асимптотически точными в термодинамическом пределе  $V \rightarrow \infty$ .

Таким образом, метод введения новых квазичастиц с помощью  $(u, v)$ -преобразования оказался эффективным для построения теории сверхпроводимости как для исходного электрон-фононного гамильтониана, так и модельного гамильтониана с прямым взаимодействием электронов. В дальнейшем каноническое  $(u, v)$ -преобразование нашло широкое применение при диагонализации квадратичных форм с "аномальными" вкладами. В частности, этот метод был использован для исследования неоднородных сверхпроводников, когда  $(u, v)$  параметры пре-

образования зависят от координат (преобразование Боголюбова-Де Женна [9]), а также при определении спектра спиновых возбуждений в антиферромагнетиках, где также появляются "опасные" диаграммы.

## Список литературы

- [1] J. Bardeen, L. Cooper, and J. Schrieffer, Phys. Rev. **106**, 162 (1957).  
Microscopic theory of superconductivity.
- [2] J. Bardeen, L. Cooper, and J. Schrieffer, Phys. Rev. **108**, 1175 (1957).  
Theory of superconductivity.
- [3] L. Cooper, Phys. Rev. **104**, 1189 (1956).  
Bound electron pairs in degenerate Fermi gas.
- [4] Н. Н. Боголюбов, ЖЭТФ **34**, 58-65 (1958).  
О новом методе в теории сверхпроводимости. I.  
[N. N. Bogoliubov, Soviet Physics JETP **34**, 41 - 46 (1958). A new method in the theory of superconductivity. I.]
- [5] В. В. Толмачев, С. В. Тябликов, ЖЭТФ **34**, 66 - 72 (1958).  
О новом методе в теории сверхпроводимости. II.  
[V. V. Tolmachev, S. V. Tiablikov, Soviet Physics JETP **34**, 46 - 50 (1958). A new method in the theory of superconductivity. II.]
- [6] Н. Н. Боголюбов, ЖЭТФ **34**, 73-79 (1958).  
О новом методе в теории сверхпроводимости. III.  
[N. N. Bogoliubov, Soviet Physics JETP **34**, 51 - 55 (1958). A new method in the theory of superconductivity. III.]
- [7] Н. Н. Боголюбов, В. В. Толмачев, Д. В. Ширков, *Новый метод в теории сверхпроводимости* (Из-во АН СССР, Москва, 1958). N. N. Bogoliubov, V. V. Tolmachev, D. V. Shirkov, *New method in the theory of superconductivity*, (Consultants Bureau, New York, London, Chapman and Hall, 1959, YII).
- [8] Н. Н. Боголюбов, Д. Н. Зубарев, Ю. А. Церковников, Докл. АН СССР, **117**, 788 (1957). К теории фазового перехода; ЖЭТФ **39**, 120 - 129 (1960). Асимп-

тогически точное решение для модельного гамильтониана теории сверхпроводимости; Н. Н. Боголюбов, препринт ОИЯИ Р-511, Дубна, 1960 (ЭЧАЯ.-1971.- т.1, вып.2.- с.301-364.) К вопросу о модельном гамильтониане в теории сверхпроводимости.

[9] P. G. De Jennes, *Superconductivity of metals and alloys* (W.A. Benjamin, Inc., New York-Amsterdam, 1966).

Доктор физико-математических наук,  
профессор кафедры теоретической физики,  
главный научный сотрудник Лаборатории теоретической физики ОИЯИ  
Н. М. Плакида