

даже эффективно превышать кулоновское отталкивание между электронами, однако не следовало забывать об огромных кинетических энергиях электронов, казалось бы, разрывающих найденную слабую связь. Составные бозоны снова не получились.

В том же 1950 году на основе накопленного экспериментального материала и развития теоретических представлений о физике твердого тела, жидущихся на применении квантовой механики и статистической физики, В.Л.Гинзбург и Л.Д.Ландау создают новую феноменологическую теорию сверхпроводимости – так называемую теорию Гинзбурга – Ландау. Эта теория оказалась настолько провидческой и успешной, что и сегодня является мощным инструментом исследования сверхпроводимости, несмотря на прошедшие 50 лет и последующее создание микроскопической теории сверхпроводимости.

В 1957 году американскими учеными Дж.Бардином, Л.Купером и Дж.Шриффером собираются воедино упомянутые выше намеки и идеи и формулируется последовательная микроскопическая теория сверхпроводимости. Явление сверхпроводимости действительно оказалось связанным с возникновением в металлах притяжения между электронами. Природа этого притяжения носит сугубо квантовый характер. Большие кинетические энергии электронов, обусловленные особенностями основного состояния квантовой системы фермионов, не помеха: спаривание возникает не между самими электронами, а между низкоэнергетическими возбуждениями в этой системе – квазичастицами. Они имеют тот же заряд, что и электрон, и некоторую эффективную массу, однако в металлической фазе их энергии могут быть сколь угодно малыми. Притяжение приводит к перестройке и этого спектра и к «открытию» в нем так необходимой для выполнения критерия сверхтекучести Ландау щели. В качестве нестройной аналогии можно привести пример двух шариков, лежащих на резиновом коврике. Если эти шарики далеки друг от друга, то каждый из них деформирует коврик, образуя вокруг себя лунку. Если же положить сначала один шарик, а затем недалеко от

него другой, то их лунки сольются в одну и шарики скатятся вместе на дно общей лунки. Часть квазичастиц (обычно, после введения в теорию, их снова называют электронами) при достаточно низких температурах как бы объединяются в связанные (так называемые куперовские – по имени их первооткрывателя) пары, которые, пребывая в особом, квантовом состоянии, переносят электрический ток без потерь энергии. Размеры таких пар в атомном масштабе весьма велики – они могут достигать сотен и тысяч межатомных расстояний. Поэтому следует представлять их не как два электрона, связанных друг с другом наподобие двойной звезды, а, скорее, как двух партнеров, пришедших вместе в дискотеку, но танцующих, может быть, в разных концах зала, когда их разделяют десятки других танцоров.<sup>2</sup> Таким образом, сверхпроводимость – не что иное, как макроскопическое квантовое явление.

Итак, потребовалось почти полвека с момента открытия сверхпроводимости, прежде чем был достигнут качественный прогресс в понимании природы этого удивительного явления и создана его последовательная теория. Этот период можно считать первым этапом в изучении сверхпроводимости.

### В поисках высоких критических параметров

Создание теории сверхпроводимости послужило мощным импульсом ее целенаправленного исследования. Без преувеличения огромный прогресс был достигнут в получении новых сверхпроводящих материалов. Важную роль сыграло тут открытие А.А.Абрикосовым нового класса сверхпроводников (так называемых сверхпроводников второго рода), качественно отличавшихся от уже известных своим весьма необычным поведением в магнитном поле. Если ранее считалось, что магнитное поле не может проникнуть в сверхпроводящую фазу, не разрушив ее (и это действительно верно почти для всех чистых

металлов)<sup>3</sup>, то Абрикосов теоретически показал, что существует и другая возможность – магнитное поле может проникать при определенных условиях в сверхпроводник в виде вихрей тока (вихрей Абрикосова), сердцевина которых переходит в нормальную фазу, периферия же остается сверхпроводящей! В соответствии с поведением сверхпроводников в магнитном поле их стали делить на сверхпроводники первого рода (старые) и второго (открытые Абрикосовым). Важно, что сверхпроводник можно перевести из первого рода во второй, «испортив» его примесями или другими дефектами.

Среди сверхпроводников второго рода удалось найти соединения, способные нести токи большой плотности и выдерживать гигантские магнитные поля. И хотя для их практического использования пришлось решить ряд непростых технологических проблем (эти вещества были хрупкими, большие токи оказывались неустойчивыми и т.п.), факт оставался фактом – одно из двух основных препятствий на пути широкого использования сверхпроводников в технике было преодолено.

Хуже обстояло дело с повышением критической температуры. Если критические магнитные поля к шестидесятым годам удалось увеличить по сравнению с первыми опытами Камерлинг-Оннеса в тысячи раз, то рост критической температуры не вселял особого оптимизма – она достигала лишь 20 кельвинов. Таким образом, для нормальной работы сверхпроводящих устройств все так же требовался дорогой жидкий гелий. И это было особенно обидно, поскольку как раз в это время обнаружили принципиально новый квантовый эффект – эффект Джозефсона, открывший сверхпроводникам обширное поле применения в микроэлектронике, медицине, измерительной и компьютерной тех-

<sup>3</sup> Следует оговориться, что подобное утверждение, строго говоря, справедливо лишь для образцов цилиндрической формы при приложении поля вдоль оси цилиндра. В случае более сложной формы образца или другой ориентации не слишком слабого магнитного поля возможна реализация так называемого промежуточного состояния, при котором макроскопические слои сверхпроводящей фазы чередуются в объеме образца с нормальными слоями.

<sup>2</sup> Это образное сравнение принадлежит одному из создателей теории сверхпроводимости Дж.Шрифферу.