

Сверхпроводящая система со слабой связью и током в основном состоянии.
Л.Н. Булаевский

Institute of Theoretical Physics, ETH, Zurich, Switzerland
Theoretical Division, Los Alamos National Laboratory, Los Alamos, New
Mexico 87545, USA

О статье SUPERCONDUCTING SYSTEM WITH WEAK COUPLING TO CURRENT
GROUND-STATE

BULAEVSKII L.N., KUZII V.V., SOBYANIN A.A. (1977)

В статье Письма в ЖЭТФ, **25**, 314, 1977 Булаевский, Собянин и Кузий (БСК) рассмотрели джозефсоновский СИС переход с изолятором (И) между двумя обычными синглетными s-волновыми сверхпроводниками (С) в ситуации когда изолятор И содержит магнитные примеси с большой концентрацией. Ранее Кулик (ЖЭТФ, **49**, 1211, 1965) показал, что магнитные примеси в изоляторе И уменьшают сверхпроводящий критический ток из-за того, что туннелирование куперовской пары с противоположными спинами электронов через магнитные примеси даёт отрицательный вклад в критический ток и энергию переходов, в то время как туннелирование через немагнитные атомы даёт положительный вклад. БСК показали, что если туннелирование через магнитные примеси доминирует, то критический ток оказывается отрицательным, и разность фаз в основном состоянии перехода равна π , а не 0 как в обычных джозефсоновских переходах. Они назвали такой переход пи-переходом. Как в случае пи-перехода, так и обычного 0-перехода ток в основном состоянии отсутствует. Однако, если закортить пи-переход обычным сверхпроводником и если индуктивность кольца будет достаточно велика, основное состояние системы будет состоянием со спонтанным током текущим через переход, причем направление тока оказывается случайным. Этот ток приводит к появлению измеримого магнитного поля и, соответственно, потока в кольце. Магнитный поток при этом может принимать значения между 0 и половиной кванта потока в зависимости от индуктивности кольца.

Через четыре года Булаевский, Буздин и Панюков (Письма в ЖЭТФ, **35**, 147, 1981) показали что пи-переход можно реализовать в СФС системе с ферромагнетиком (Ф) в качестве слабой связи, потому что обменное поле в Ф приводит к осцилляции разности фаз на переходе в зависимости от толщины ферромагнитного слоя. Эта толщина может быть выбрана так, что разность фаз на противоположных краях Ф-слоя будет равна π , что приводит к отрицательному критическому току. Экспериментально такой пи-переход был реализован 20 лет позднее Рязановым с сотрудниками (Phys. Rev. Lett., **86**, 2427, 2001).

В 1987 г. Гешкенбейн, Ларкин и Бароне (Phys. Rev. B, **36**, 235, 1987) показали что система СС'С с тяжёлофермионным р-волновым сверхпроводником (С') ведёт себя аналогично пи-переходу, поскольку сверхпроводящий параметр порядка в р-волновом сверхпроводнике меняет знак на краях кристалла с перпендикулярной кристаллографической ориентацией. Это наблюдение оказалось очень полезным для доказательства того, что высокотемпературные сверхпроводники на основе меди имеют d-волновое куперовское спаривание, при котором знак параметра порядка меняется при изменении ориентации на 90 градусов. Действительно, Тсуи и Киртлей (Tsuei, Kirtley, Rev. Mod. Phys. **72**, 969, 2000) изготовили первый пи-переход, используя разные грани на угловом краю кристалла YBCO и доказали однозначно, что этот сверхпроводник имеет d-волновое спаривание.

Позднее было экспериментально доказано также что СИС система с большой концентрацией магнитных примесей обладает сверхпроводящим током в основном состоянии, так как области с пи- и 0-переходами появляются внутри перехода из-за вариации концентрации примесей (O. Vavra *et al.*, Phys. Rev. B, **74**, 020502, 2006).

В настоящее время известно много методов получения фазового π -сдвига внутри джозефсоновских переходов (см. Schulz *et al.* Appl. Phys. Lett., **76**, 912, 2000; J.J.A. Bazelmans, *et al.*, Nature, **397**, 43, 1999; J-P. Cleuziou, *et al.*, Nature Nanotechnology, **1**, 53, 2006).

Пи-переходы находят применение, например, в качестве фазосдвигающих элементов в структуре кубитов для уменьшения шумов в этих квантовых системах.