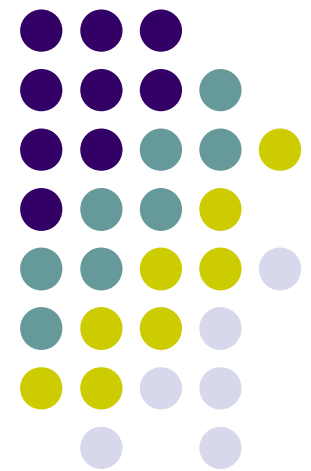


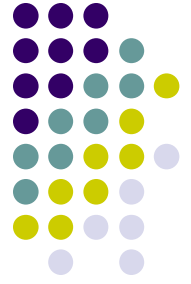
Джозефсоновские среды – terra incognita

(лекция-путешествие)

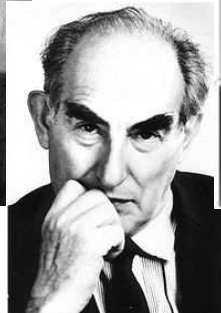
*100-летию открытия
сверхпроводимости и 50-летию
открытия эффекта Джозефсона
посвящается...*



СВЕРХПРОВОДИМОСТЬ (ОТКРЫТИЯ И ВЕХИ)



- 8 апреля 1911 год. Х.Камерлинг-Оннес, К.Дорсман, Г.Хольст обнаружили падение сопротивления ртути до нуля при температуре 3К
- 1933 год. Обнаружение эффекта Мейснера
- 1934 год. Теория Гротера-Казимира (электроны двух типов)
- 1935 год. Братья Лондоны дают первое теоретическое объяснение явлению сверхпроводимости
- 1950 год. Теория Гинзбурга-Ландау
- 1957 год. Микроскопическая теория Бардина-Купера-Шриффера (БКШ)
- 50-е годы. Сверхпроводники I и II рода (1957 год теория А.Абрикосова)
- 60-е годы. Сверхпроводники, способные выдерживать сильные магнитные поля и нести токи большой плотности.
- 1962 год. Эффект Джозефсона
- 1986 год. К. Мюллер, Г.Беднорц открытие высокотемпературной сверхпроводимости
- все в наших руках...





СВЕРХПРОВОДНИКИ I и II РОДА

ЭФФЕКТ МЕЙСНЕРА

вытеснение магнитного поля из объёма проводника при переходе в сверхпроводящее состояние. Впервые явление наблюдалось в 1933 году немецкими физиками Мейснером и Оксенфельдом.

ПОЛНЫЙ
↓

частичный

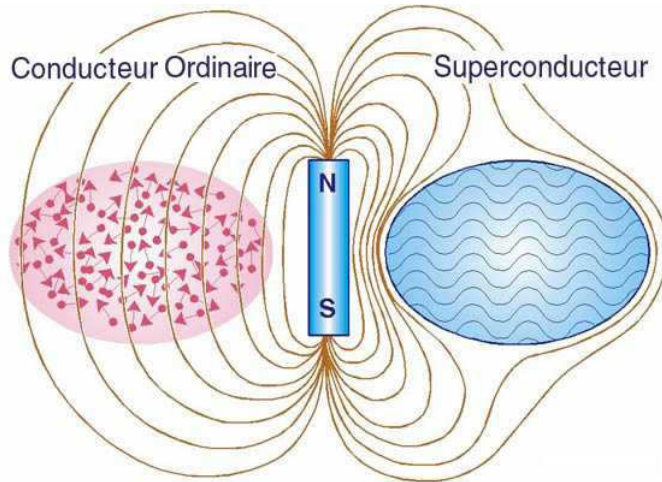
сверхпроводники II рода

сверхпроводники I рода

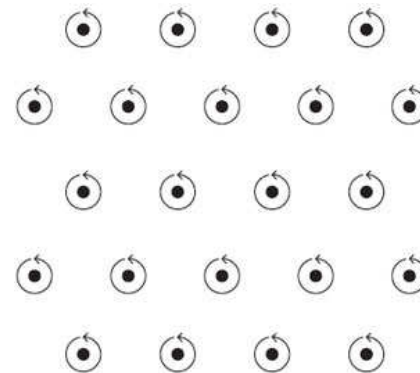
$$H < H_C$$

Имеются два критических значения магнитного поля.

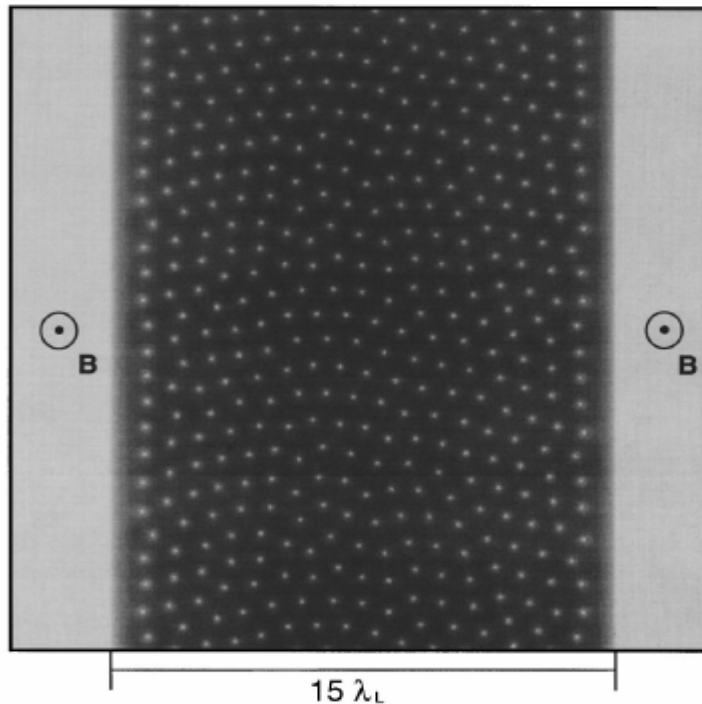
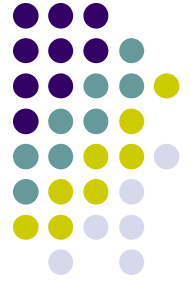
$$H_{C1} < H < H_{C2}$$



Магнитное поле входит в образец в виде вихрей.



ЖЕСТКИЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ II РОДА

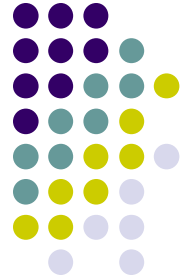


Сверхпроводники второго рода с искусственными или естественными дефектами – жесткие сверхпроводники второго рода

Поле также проникает в систему в виде вихрей, но вихри могут «зацепляться» за центры пиннинга

FIG. 1. A typical Abrikosov lattice seen in the simulations in the absence of pinning centers. The magnitude of the external field is $0.5H_{c1}$, directed out of the pages as indicated. The greyscale indicates magnetic-field intensity (lighter areas correspond to stronger fields). The light uniform regions on the sides indicate the applied external field. We have taken the magnus coefficient, defined in Eq. (1), to be $a=0.1$ in all simulations.

Критическое состояние сверхпроводников II рода.



На вихрь в образце действуют силы магнитного давления и сила пиннинга, когда они уравновешивают друг друга, возникает распределение поля, называемое **критическим состоянием**.

Благодаря существованию критического состояния жесткий сверхпроводник II рода может нести высокий сверхпроводящий ток (практическое применение!!!)

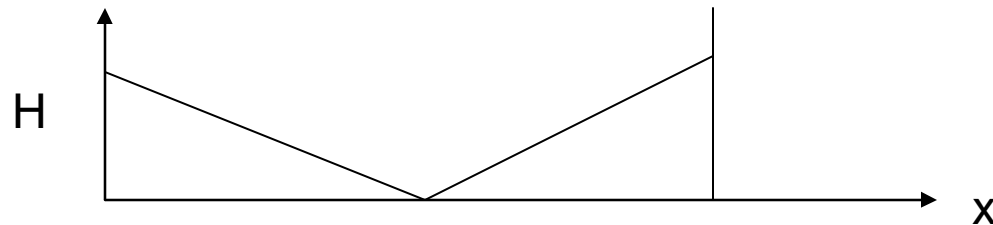


Схема распределения поля в образце согласно модели Ч.Бина PRL, 8,250 (1964)

ДИСКРЕТНЫЕ СВЕРХПРОВОДНИКИ (ДЖОЗЕФСОНОВСКИЕ СРЕДЫ)

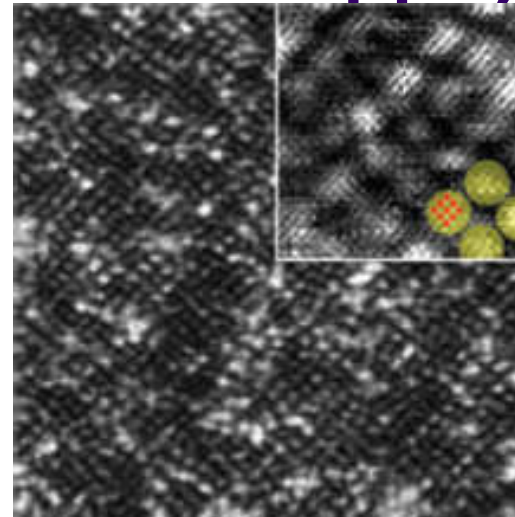
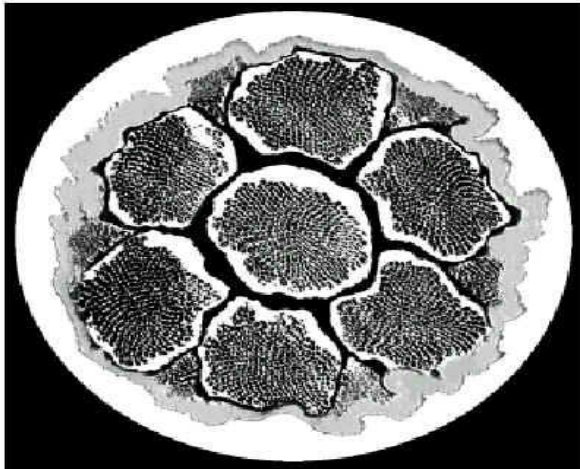
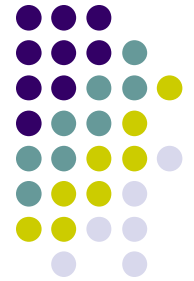


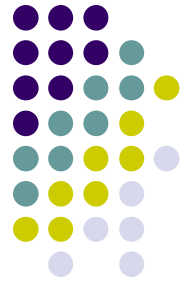
Рис. 4а

Универсальность критического поведения дискретных сверхпроводников и жестких сверхпроводников второго рода (S.L.Ginzburg et al, Physica C, 174, 109(1991), D-X Chen et al, PRB, 53, 6579(1996)).

Керамические сверхпроводники весьма перспективны в плане крупномасштабных применений, главным образом по той причине, что их можно изучать и использовать при охлаждении сравнительно недорогим жидким азотом.

Стоимость литра жидкого гелия составляет около \$5, в то время как литр азота обходится всего в \$0,2.

Джозефсон, Брайан Дэвид



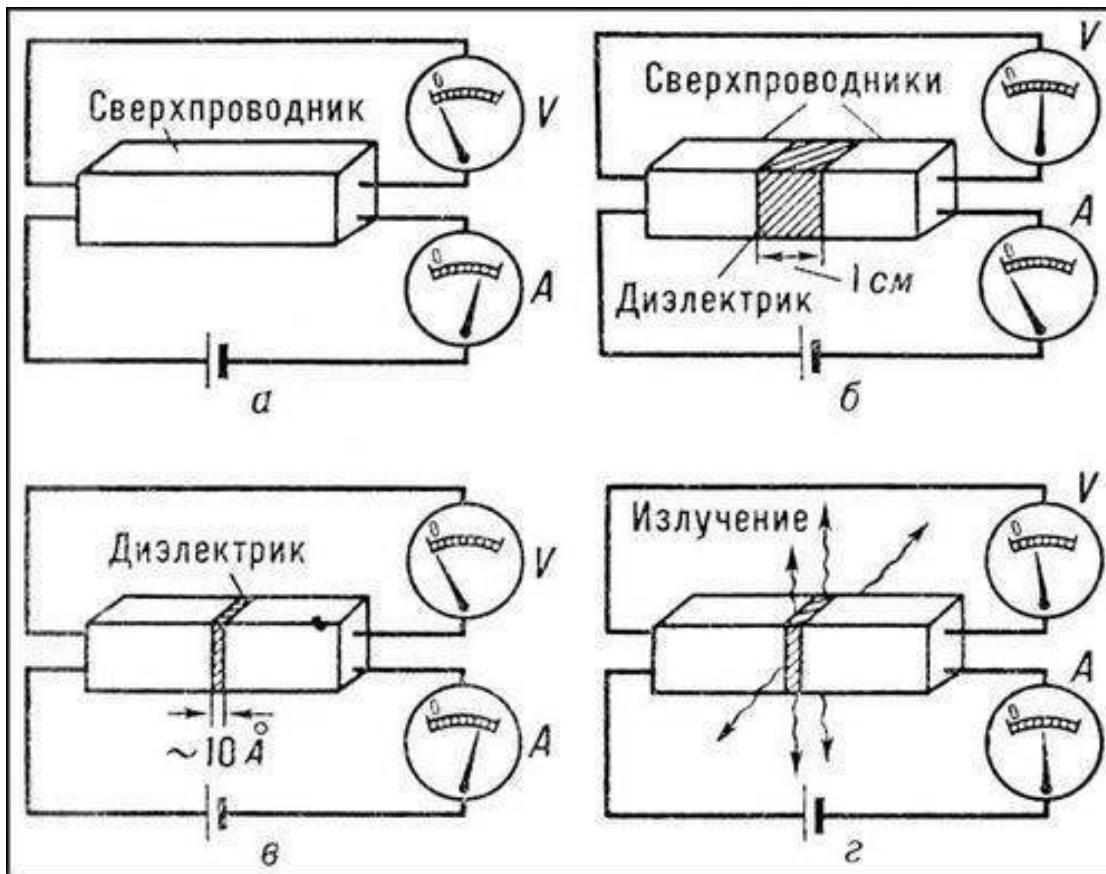
С 1962 года Джозефсон изучает свойства сверхпроводимости. Будучи аспирантом, в двадцать два года, теоретически предсказал явление прохождения электронов через тонкий слой диэлектрика, помещённый между двумя сверхпроводящими металлами ([стационарный эффект Джозефсона](#)). Он предположил также, что если к контакту приложить разность потенциалов, то через него пойдет осциллирующий ток с частотой, зависящей только от величины приложенного напряжения ([нестационарный эффект Джозефсона](#)).

В настоящее время заведует «Проектом соединения разума и материи» (Mind-Matter Unification Project) в Кавендишской лаборатории Оксфордского университета.
Научный девиз: «Никому не верь на слово!»



Брайан Дэвид Джозефсон (род. [4 января 1940](#), [Кардифф, Уэльс, Великобритания](#)) — [английский физик](#), лауреат [Нобелевской премии по физике 1973 года](#).

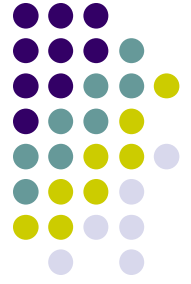
ЭФФЕКТЫ ДЖОЗЕФСОНА



протекание сверхпроводящего тока через тонкий слой диэлектрика, разделяющий два сверхпроводника (т. н. контакт Джозефсона)

Если ток через контакт Джозефсона не превышает определённого значения, называемого критическим током контакта, то падение напряжения на контакте отсутствует (так называемый **стационарный Д. э.**, см. **рис.**, в). Если же через контакт пропускать ток, больший критического, то на контакте возникает падение напряжения V , и контакт излучает электромагнитные волны (**нестационарный Д. э.**, **рис.**, г).

СТАЦИОНАРНЫЙ ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА



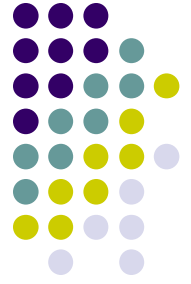
- Стационарный эффект Джозефсона состоит в том, что достаточно слабый ток (меньший критического тока слабой связи) протекает без сопротивления, то есть на ней не происходит падения напряжения. Джозефсон получил следующее выражение для тока:

$$I = I_c \sin \varphi$$

где φ - разность фаз волновых функций по разные стороны слабой связи.

В своей работе Джозефсон предсказал, что в области диэлектрической прослойки будут интерферировать когерентные токи, исходящие из обоих сверхпроводников, так же как световые волны от двух когерентных источников. Поэтому результирующий ток оказывается пропорциональным синусу разности фаз.

НЕСТАЦИОНАРНЫЙ ЭФФЕКТ ДЖОЗЕФСОНА



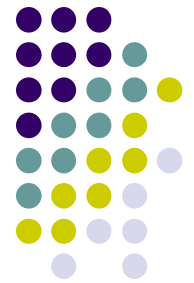
- Приложение постоянного напряжения V к джозефсоновскому контакту приводит к тому, что тот начинает самопроизвольно генерировать переменный ток, частота которого задается фундаментальным соотношением Джозефсона:

$$2eV = (h / 2\pi)\omega$$

- Эта формула имеет совершенно ясную интерпретацию. Действительно, если на переходе падает напряжение V , то электроны в одной из сверхпроводящих обкладок будут обладать потенциальной энергией, большей на $2eV$, чем электроны в другой. В результате туннелирования сквозь диэлектрик электрон попадает в другую обкладку и должен каким-то образом уменьшить свою энергию, чтобы перейти в равновесное состояние, в котором находятся остальные электроны.

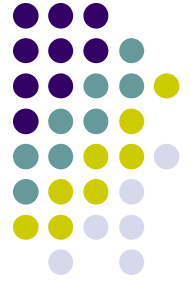
В обычном металле это произойдет вследствие возбуждения тепловых колебаний в кристаллической решетке. Путем таких столкновений избыточная энергия перейдет в тепло. Подобные столкновения приводят в металлах к электрическому сопротивлению, в сверхпроводнике же оно отсутствует. В нем куперовская пара не может отдать избыточную энергию решетке, пока эта энергия меньше $2D$ - энергии связи пары. Единственный выход - отдать избыточную энергию $2eV$ в виде кванта электромагнитного излучения.

ЭКСПЕРИМЕНТЫ по обнаружению эффектов Джозефсона

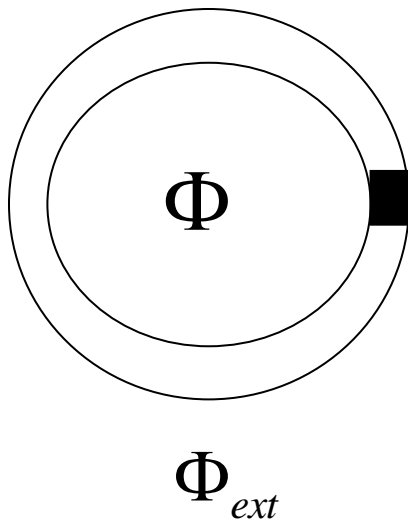


- Экспериментально стационарный эффект был обнаружен американскими физиками П. Андерсоном и Дж. Роуэллом в [1963 году](#).
- Экспериментальное обнаружение излучения Джозефсона было непростой задачей. Тем не менее спустя всего лишь два года после опубликования статьи Джозефсона оно было обнаружено в Харьковском физико-техническом институте низких температур учеными И.М. Дмитренко, В.М. Свистуновым и И.К. Янсоном.

Сверхпроводящий квантовый интерферометр (СКВИД)



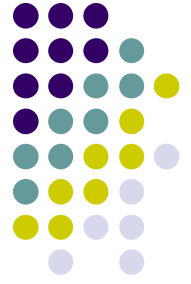
- Принцип работы



$$I_c \sin \varphi + \frac{\Phi_0}{2\pi\rho} \frac{d\varphi}{dt} = \frac{\Phi_{ext} - \Phi}{L}$$

$$V = \frac{2\pi L}{\Phi_0} I_c; \quad \varphi = 2\pi \frac{\Phi}{\Phi_0}$$

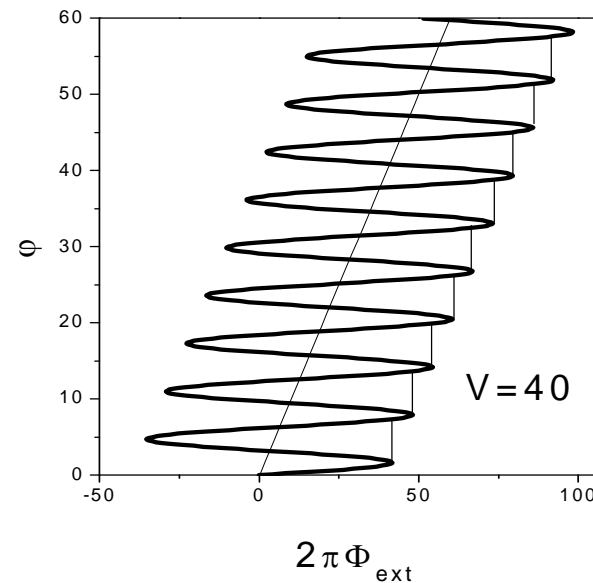
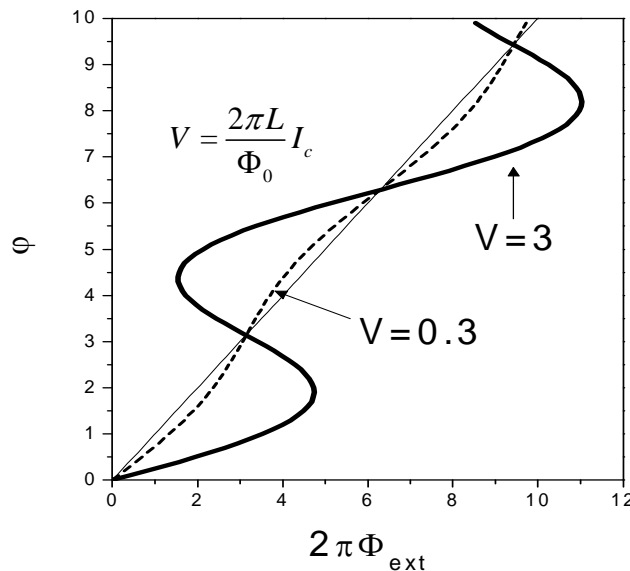
$$V = \frac{2\pi}{\Phi_0} (\Phi_{ext} - \Phi)$$



Параметр V

$$V = \frac{2\pi L}{\Phi_0} I_c$$

При $V < 1$ средний сверхпроводящий ток в системе равен нулю, при $V > 1$ он положительный, СКВИД становится **центром пиннинга**. При $V \gg 1$ в нем реализуется **квантование потока** внутри кольца.



$$\Phi \approx n\Phi_0$$

Изготовление решеток джозефсоновских контактов

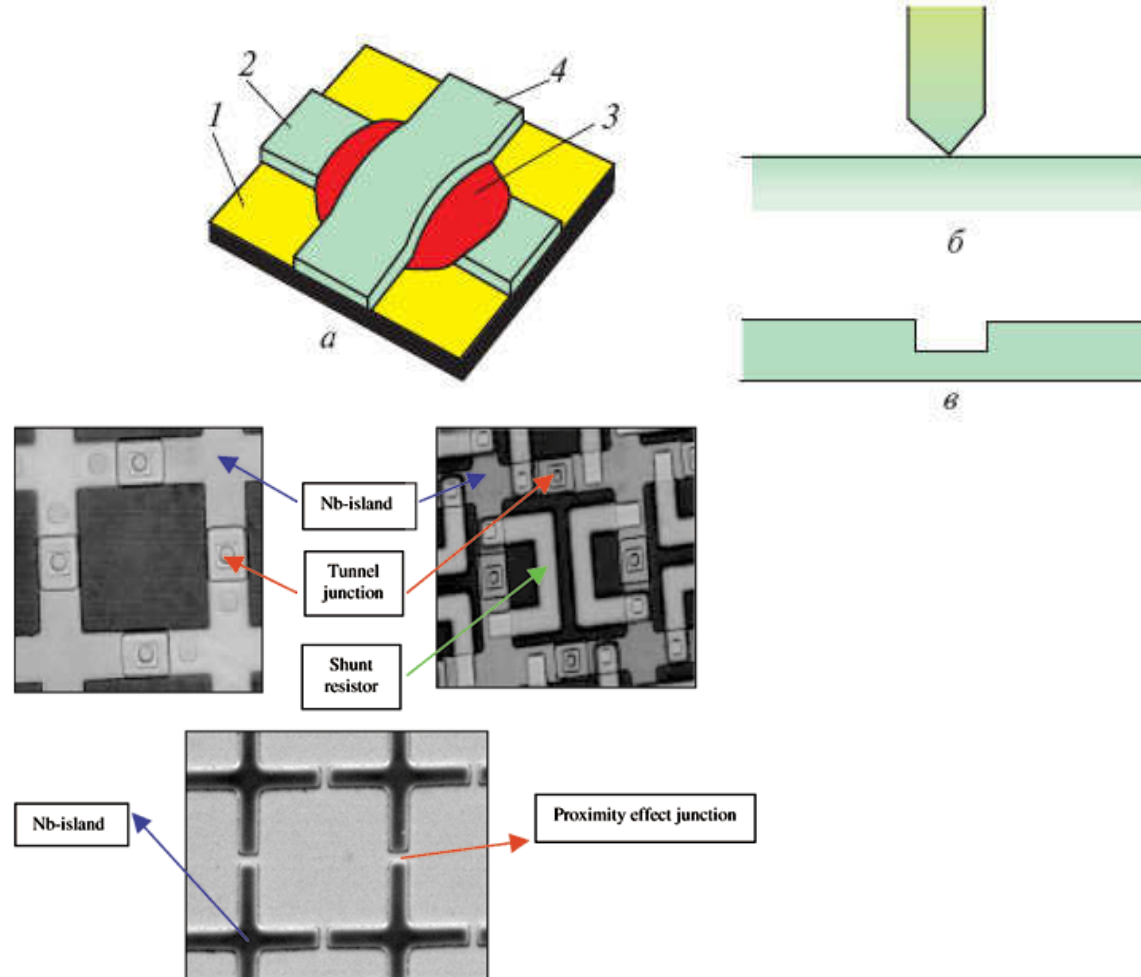
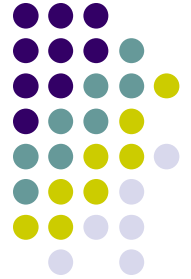
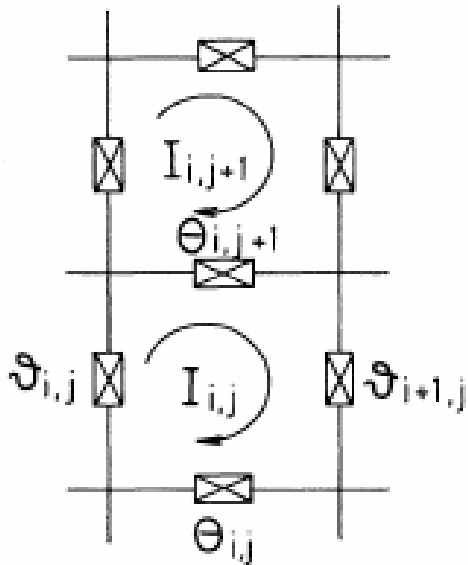
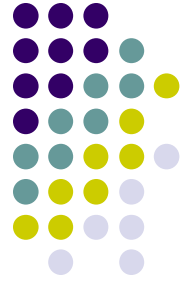


Figure 1. Photographs of Josephson junction arrays of different types: (I) SIS/unshunted, (II) SIS/shunted, and (III) SNS.

Дискретный сверхпроводник (джозефсоновская среда)



$$4\pi j_{ij}^{(i)} = \frac{H_{ij} - H_{ij-1}}{l},$$

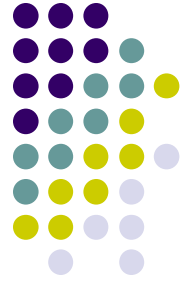
$$4\pi j_{ij}^{(j)} = \frac{H_{i-1j} - H_{ij}}{l},$$

$$j_{ij}^{(i)} = j_c \sin \theta_{ij} + \frac{\Phi_0}{2\pi\rho} \frac{d\theta_{ij}}{dt},$$

$$\frac{2\pi}{\Phi_0} \Phi_{ij} = 2\pi \oint \vec{A} d\vec{l} =$$

$$= \varphi_{ij} + \theta_{ij+1} - \varphi_{i+1j} - \theta_{ij},$$

Дискретный сверхпроводник (джозефсоновская среда)



$$V \sin \theta_{ij} + \tau \frac{d\theta_{ij}}{dt} = s_{ij} (\varphi_{ij} + \theta_{ij+1} - \varphi_{i+1j} - \theta_{ij}) - \\ - s_{ij-1} (\varphi_{ij-1} + \theta_{ij} - \varphi_{i+1j+1} - \theta_{ij-1});$$

$$V \sin \varphi_{ij} + \tau \frac{d\varphi_{ij}}{dt} = s_{i-1j} (\varphi_{i-1j} + \theta_{i-1j+1} - \varphi_{ij} - \theta_{i-1j}) - \\ - s_{ij} (\varphi_{ij} + \theta_{ij+1} - \varphi_{i+1j} - \theta_{ij});$$

$$V = \frac{8\pi^2 a^2 l}{\Phi_0} j_c; \tau = \frac{4\pi a^2 l}{\rho};$$

$$h_{ext} = H_{ext} \frac{a^2}{\Phi_0}; s_{ij} = \frac{a^2}{S_{ij}}; a^2 = \langle S_{ij} \rangle$$

Критическое состояние в дискретном сверхпроводнике при различных V



Имеются два масштаба:
характерный размер ячейки и
характерный «размер» вихря.
Можно сказать: $V \sim a^2 / \lambda_j^2$

$V < 1$

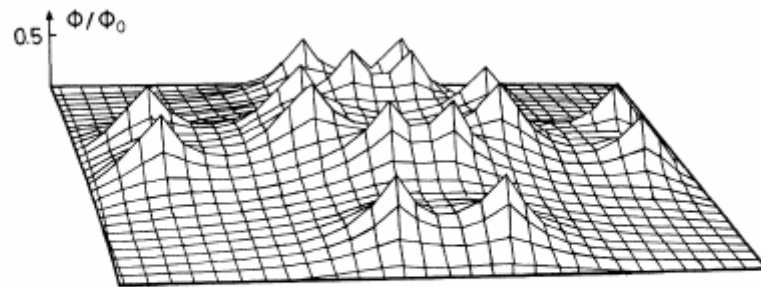


FIG. 2. Remanent magnetic flux distribution in a system of 30×30 weak links with $\beta=0.1$ and initial external flux $\phi_{\text{ext}} = \phi_0 = h/4\pi e$.

$V > 1$

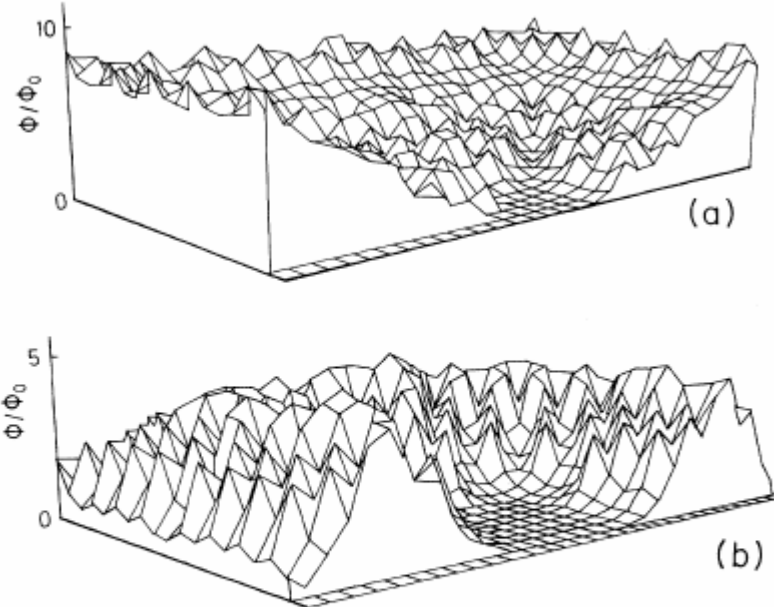
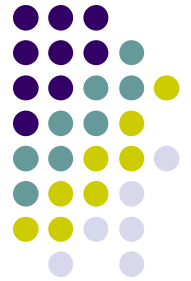


FIG. 3. (a) Magnetic flux distribution in a section of our network with $\beta=2$ after applying an external field $\phi_{\text{ext}} = 10 \phi_0$. (b) Remanent flux for an initial distribution shown in (a) after switching off the external field.

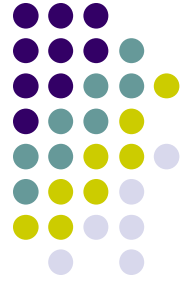
ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ эффекта Джозефсона



- Сверхпроводниковый квантовый интерферометр (СКВИД) — самый точный на сегодняшний день прибор для измерения магнитных полей, и при этом весьма компактный. Он находит самое широкое практическое применение в самых разных областях, начиная с предсказания землетрясений и заканчивая медицинской диагностикой



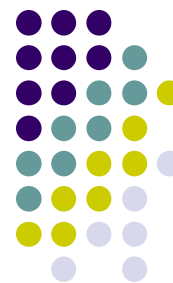
ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ эффекта Джозефсона



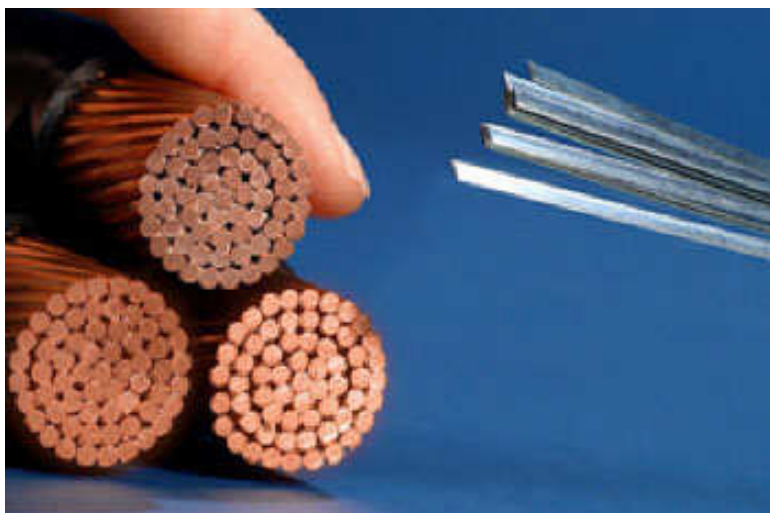
- Эксперименты, основанные на нестационарном эффекте Джозефсона, позволили с невероятной точностью измерить мировые константы (отношение e / h) и создать стандарты единиц измерения (вольт)



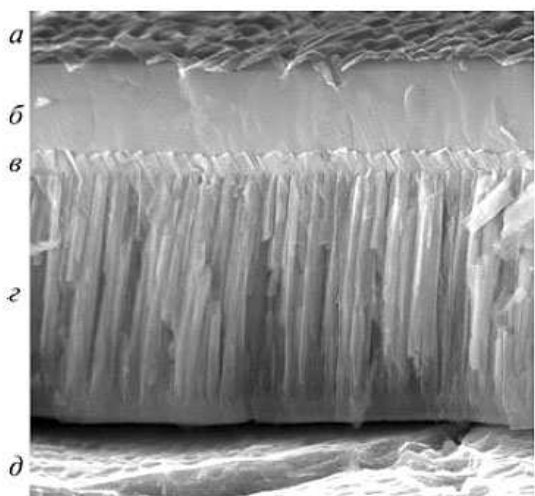
Установка на основе матрицы джозефсоновских переходов для воспроизведения единицы напряжения



ПРАКТИЧЕСКОЕ ПРИМЕНЕНИЕ дискретных сверхпроводников



«Ленточные» сверхпроводящие провода второго поколения представляют собой осаждение гранулированного YBCO на подложку из никелевого сплава (ширина 4мм при длине 100м). Могут переносить ток в 150 раз больший, чем медные провода (слева). Возможен промышленный выпуск. Провод длиной 10 метров может нести ток плотностью 400 А/см



- а) защитный слой меди
- б) керамика (толщина менее 2мкм)
- в) ориентированный слой оксида марганца
- г) неориентированный слой оксида марганца
- д) лента из нержавеющей стали(50-120 мкм)

УСПЕХИ В СОЗДАНИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПРОВОДОВ



«Наша работа демонстрирует, что действительно возможно изготовить сверхпроводящие провода с параметрами, необходимыми для целого ряда крупномасштабных приложений. Мы объединили нанотехнологию и сверхпроводимость, - говорит д-р Гойял. - Если такой подход позволит изготовить провода большой длины, где будут введены нанодефекты в объемную структуру, то можно будет надеяться на революционные преобразования в электроэнергетике».

Амит Гойял – руководитель исследовательской группы в Окриджской Национальной Лаборатории





УСПЕХИ В СОЗДАНИИ СВЕРХПРОВОДЯЩИХ ПРОВОДОВ

Проблемы в создании сверхпроводящих проводов:

- зависимость сверхпроводимости от магнитного поля: достаточно сильное магнитное поле выведет сверхпроводящую линию электропередачи из строя.
- ломкость имеющихся сверхпроводников, так что из них трудно сделать достаточно длинные кабели.

Проблема хрупкости была решена тем, что сверхпроводник - иттрий-барий-медный оксид - тонким слоем покрывает проволоку из обычного гибкого металла. Это, кроме того, существенно удешевило кабель.

Влияние же магнитного поля было нейтрализовано добавлением нанокристаллов цирконата бария, которыми сверхпроводник нашпигован словно тесто изюмом и которые проводят силовые линии внешнего магнитного поля, защищая от него сам сверхпроводник.

Для изготовления провода порошковую смесь цирконата бария и иттрий-барий-медного оксида взрывали при помощи лазерного луча. Полученный пар осаждался тонким слоем на металлической полоске.



Джозефсоновские среды – terra cognita





Для любителей цифр

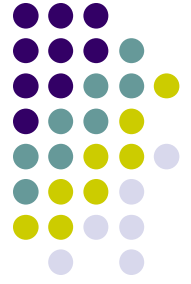
Сверхпроводник	T_c, K	$H_c, Э$
Ртуть	4,15	410
Свинец	7,2	803
Ниобий	9,2	1970
Алюминий	1,18	100
Ванадий	5,3	1370

Олово $\lambda_L = 510 \text{ \AA}$ Ртуть $\lambda_L = 410 \text{ \AA}$
 Алюминий $\lambda_L = 500 \text{ \AA}$ Ниобий $\lambda_L = 470 \text{ \AA}$
 Свинец $\lambda_L = 390 \text{ \AA}$ Таллий $\lambda_L = 920 \text{ \AA}$

Вещество	$\lambda_L, \text{ \AA}$	$\xi, \text{ \AA}$
Алюминий	500	15000
Олово	510	2500
Таллий	920	2700
Ниобий	470	600
Сплав ниобия и тантала	900	300

Вещество	T_c, K	$H_{c2}, Э, \text{ при } 4,2 K$
$Nb_xTi_{1-x} (x \approx 0,5)$	8–10	90 000 – 130 000
V_3Ga	14,5	220 000
Nb_3Sn	18	230 000
V_3Si	17	230 000
Nb_3Ga	20,3	340 000
$Nb_3Al_{0,7}Ge_{0,3}$	20,7	370 000
Nb_3Ge	24	400 000

Рекомендуемые путеводители



Сверхпроводимость металлов и сплавов / Де Жен П. - М.: Мир, 1968. - 279 с.

К. К Лихарев, Введение в динамику джозефсоновских переходов, М.: Наука, 1985.

И.О.Кулик, И.К.Янсон "Эффект Джозефсона в сверхпроводящих туннельных структурах" ("Наука", Москва, 1970);

А.Бароне, Дж.Патерно "Эффект Джозефсона" ("Мир", Москва, 1984).

<http://www.superconductors.org/>

<http://perst.issph.kiae.ru/supercond/bulletein.php>