

КУРАКИН В.Г.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

(ЭЛЕМЕНТАРНОЕ ВВЕДЕНИЕ)

IV ЧЕРЕНКОВСКИЕ ЧТЕНИЯ
Москва, ФИАН 12 апреля 2011

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

100 лет открытия сверхпроводимости

1908 г. – получение жидкого гелия

1911 г. – исследование зависимости сопротивления металлов от температуры. 8 апреля при экспериментах со ртутью было замечено, что сопротивление практически исчезло при 3К. Несколько позже, 11 мая была измерена температура перехода – 4,2 К



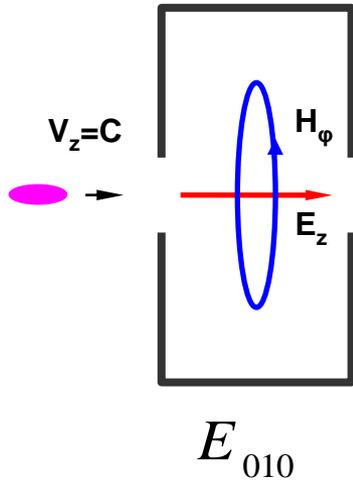
Камерлинг-Оннес

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

Имеется обширная литература по всем аспектам исследования и применения сверхпроводников и приборов на основе сверхпроводников, в том числе и на русском языке. Тем не менее, существует пробел в публикациях на русском языке такой важной области практического использования сверхпроводимости, как сверхпроводящие высокочастотные резонаторы для ускорителей заряженных частиц. Последнее тем более досадно, что на основе таких резонаторов в настоящее время создаются проекты, имеющие часто ключевое значение для соответствующих направлений - линейные электрон-позитронные коллайдеры, нейтронные генераторы, рентгеновские лазеры на свободных электронах (ЛСЭ). Понятна и причина данного положения дел – исследования в России по данному направлению практически заглохли, не выйдя даже отдаленно на существующий в мире уровень.

Цель сообщения – дать краткое описание состояние данной области исследований и разработок, что в какой то мере поможет пробудить интерес к данному вопросу начинающих исследователей.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ



$$E_z = EJ_0 \left(\frac{v_{01}}{a} r \right) \exp(i\omega t), \quad H_\varphi = i \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} EJ_1 \left(\frac{v_{01}}{a} r \right) \exp(i\omega t)$$

$$Q = \omega \frac{W}{P}, \quad R = \frac{U^2}{P} \quad Q = \frac{La}{\delta(L+a)} \quad \delta = \sqrt{\frac{2}{\omega \mu_0 \sigma}}$$

$$U(t_0) = \int_0^L E \cos\left(\omega t_0 + \omega \frac{z}{v}\right) dz = \frac{\lambda v}{\pi c} E \sin\left(\frac{\pi Lc}{\lambda v}\right) \cos\left(\omega t_0 + \frac{\pi Lc}{\lambda v}\right)$$

$$U = \frac{\lambda v}{\pi c} E \sin\left(\frac{\pi Lc}{\lambda v}\right)$$

$$\frac{R}{Q} = \frac{U^2}{\omega W} = \frac{2\lambda^2 v^2}{\varepsilon_0 \omega \pi^3 c^2 a^2 L J_1^2(v_{01})} \sin^2\left(\frac{\pi Lc}{\lambda v}\right)$$

Для релятивистских частиц при длине резонатора, равной половине длины волны

$$\frac{R}{Q} = \frac{8}{\pi^2 \varepsilon_0 c v_{01}^2 J_1^2(v_{01})} \approx 210 \text{ (Ом)} \quad \text{При } \lambda=10 \text{ см} \quad Q \approx 1,8 \times 10^4$$

$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{(3 \times 10^5)^2}{200 \times 1,8 \times 10^4} \approx 25 \text{ кВт}$$

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

$$P_s = \frac{1}{2} R_s H_s^2 \quad Q = G / R_s \quad G = \omega \mu_0 \frac{\int_V H^2 dV}{\int_S H^2 dS}$$

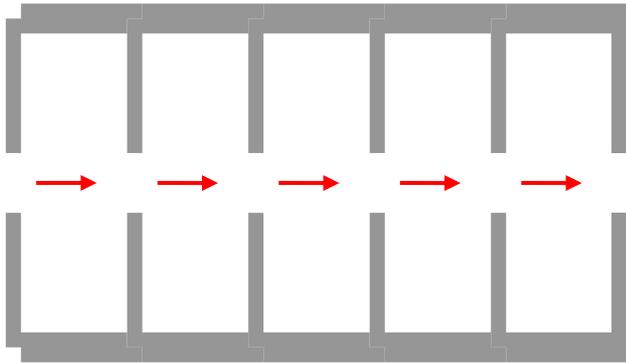
P_s - удельная мощность вч потерь, G – геометрическая константа. G не зависит от частоты

Для медного 10-сантиметрового цилиндрического резонатора

$$G = \frac{\omega \mu_0 2\pi L \int_0^a J_1^2\left(\frac{\nu_{01}}{a} r\right) r dr}{2\pi a L J_1^2(\nu_{01}) + 2\pi \int_0^a J_1^2\left(\frac{\nu_{01}}{a} r\right) r dr} = \sqrt{\frac{\mu_0}{\varepsilon_0} \frac{0,5 \nu_{01} L}{\frac{\lambda \nu_{01}}{2\pi} + L}} \approx 256 \text{ Ом}$$

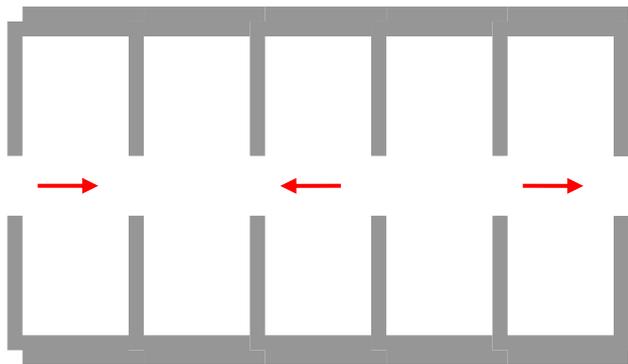
$$R_s = \frac{1}{\sigma \delta} = \frac{1}{5,8 \times 10^7} \times \frac{10^6}{1,2} = 14,4 \text{ мОм}$$

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

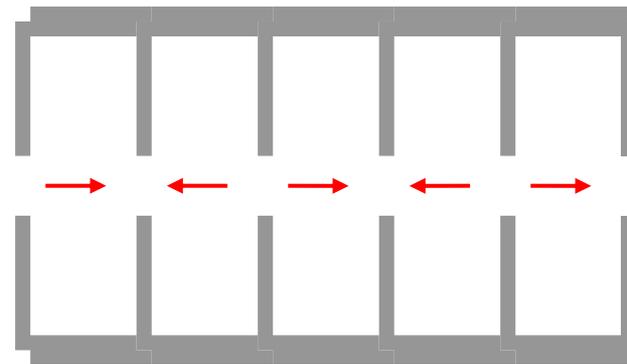


Вид колебаний
0

Направление вектора электрического поля в ячейках резонатора при различных видах колебаний (модах)



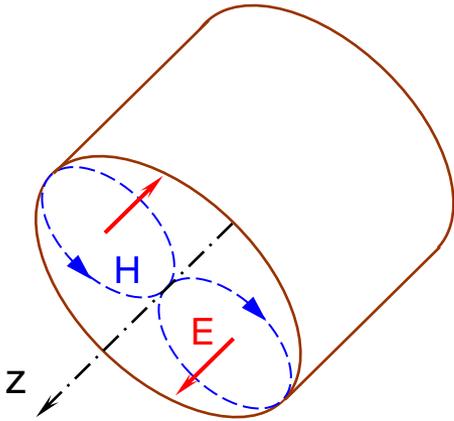
Вид колебаний
 $\pi/2$



Вид колебаний π

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

Колебания высших типов в резонаторах ускорителей. TM₁₁₀



$$E_z = EJ_1\left(\frac{v_{11}}{a}r\right) \cos \varphi, \quad H_r = -i \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} \frac{a}{v_{11}} J_1\left(\frac{v_{11}}{a}r\right) \sin \varphi,$$

$$H_\varphi = -iE \sqrt{\frac{\epsilon_0}{\mu_0}} J_1'\left(\frac{v_{11}}{a}r\right) \cos \varphi$$

В приосевой области

$$E_z = Ekx \cos(\omega t + \psi), \quad B_y = \frac{E}{c} \sin(\omega t + \psi)$$

$$J_{\text{нор}} = \frac{\pi \epsilon_0 m \gamma \omega^3 L}{2Qe \left(\frac{kL}{2} \sin kL + \cos kL - 1\right)} \int_0^a J_1^2\left(r \frac{v_{11}}{a}\right) r dr$$

Неустойчивость при $kL > 2\pi$

Регенеративная, рециркуляторная и кумулятивная неустойчивости

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

Согласно теоретическим представлениям удельное сопротивление металла зависит от температуры по закону (Формула Блоха-Грюнайзена)

$$\rho_{ud} = \frac{kT}{M\theta^6} \int_0^{\theta/T} \frac{\xi^5 d\xi}{(e^\xi - 1)(1 - e^{-\xi})}$$

θ – температура Дебая (347 для меди, 276 для ниобия). Согласно этой формуле, можно ожидать увеличение проводимости чистой меди при гелиевой температуре в $6 \cdot 10^6$ раз, а на высоких частотах – в $2,5 \cdot 10^3$ раз (скин-эффект). Реальное увеличение проводимости – в 6 раз (аномальный скин-эффект)

Простое охлаждение металла даёт незначительный выигрыш в потерях !

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

Сверхпроводящий резонатор. Для частот, меньших 10 ГГц имеет место эмпирическая формула

$$R_s = A \frac{\omega^2}{T} \exp\left(-\alpha \frac{T_c}{T}\right) + R_{осм}$$

Реперная точка: при частоте 3 ГГц и 4,2 К для ниобия

$$R_s \approx 2,5 \times 10^{-6} \text{ Ом}$$

Для 10-см цилиндрического резонатора при 4,2 К

$$Q = G / R_s = 256 / 2,5 \times 10^{-6} \approx 10^8 \quad P = \frac{(3 \times 10^5)^2}{200 \times 10^8} \approx 4.5 \text{ Вт}$$

При 2 К

$$R_s(2\text{К}) = \frac{4,2}{2} \exp\left[-\alpha T_c \left(\frac{1}{2} - \frac{1}{4,2}\right)\right] R_s(4,2\text{К}) \approx 6 \times 10^{-8} \text{ Ом}$$

$$Q = 256 / 6 \times 10^{-8} \approx 4,3 \times 10^9 \quad P \approx 0,1 \text{ Вт}$$

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

Ограничения, налагаемые на величину ускоряющего градиента свойствами сверхпроводника

$$H_c(T) = H_c(0) \left[1 - (T / T_c)^2 \right]$$

Для свинца

$$H_c = 80 \text{ мТ} , H_{sh}(0) = 105 \text{ мТ}$$

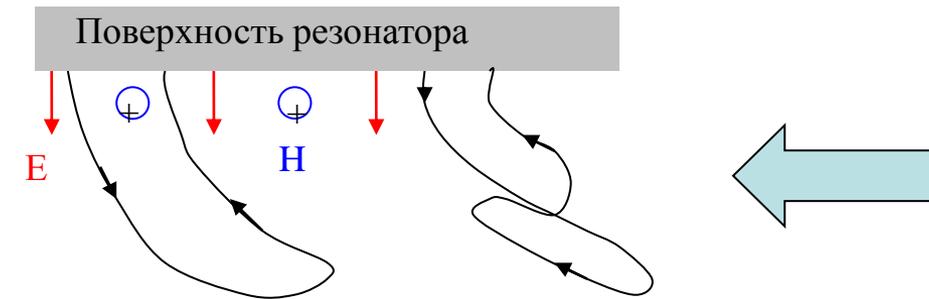
Для ниобия

$$H_c = 200 \text{ мТ} , H_{sh}(0) = 240 \text{ мТ}$$

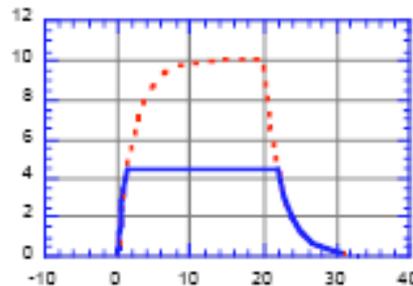
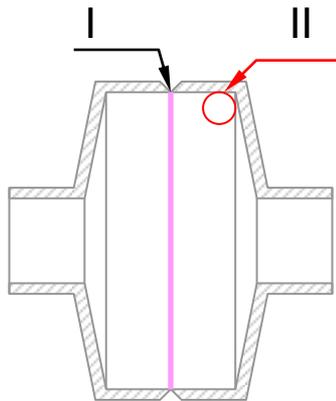
$$\frac{H_{\max}}{E_{\max}} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} J_{1\max} \approx \frac{0,58}{120 \pi} (T / B / м)$$

$$\frac{H_{\max}}{E_a} = \sqrt{\frac{\varepsilon_0}{\mu_0}} \frac{\pi}{2} J_{1\max} \approx \frac{0,58}{240} \approx 2,4 (\text{мТ} / \text{МВ} / \text{м})$$

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ



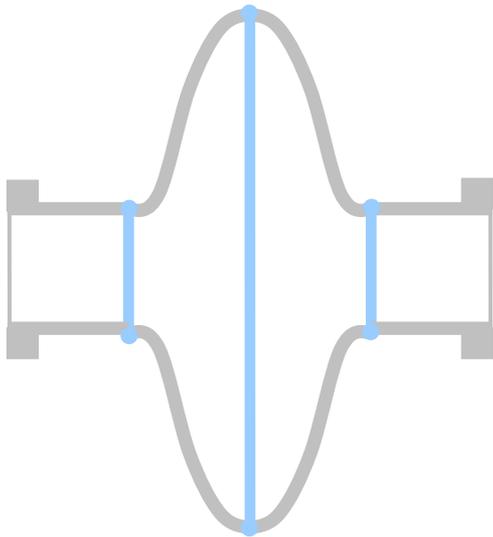
Траектории электронов в резонаторе при мультипактинге



- Резонансное размножение электронов в высокочастотном поле
- I – электронно-лучевая сварка
- II - локализация мультипактинга в резонаторе

Осциллограмма нарастания поля в резонаторе при мультипактинге

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ



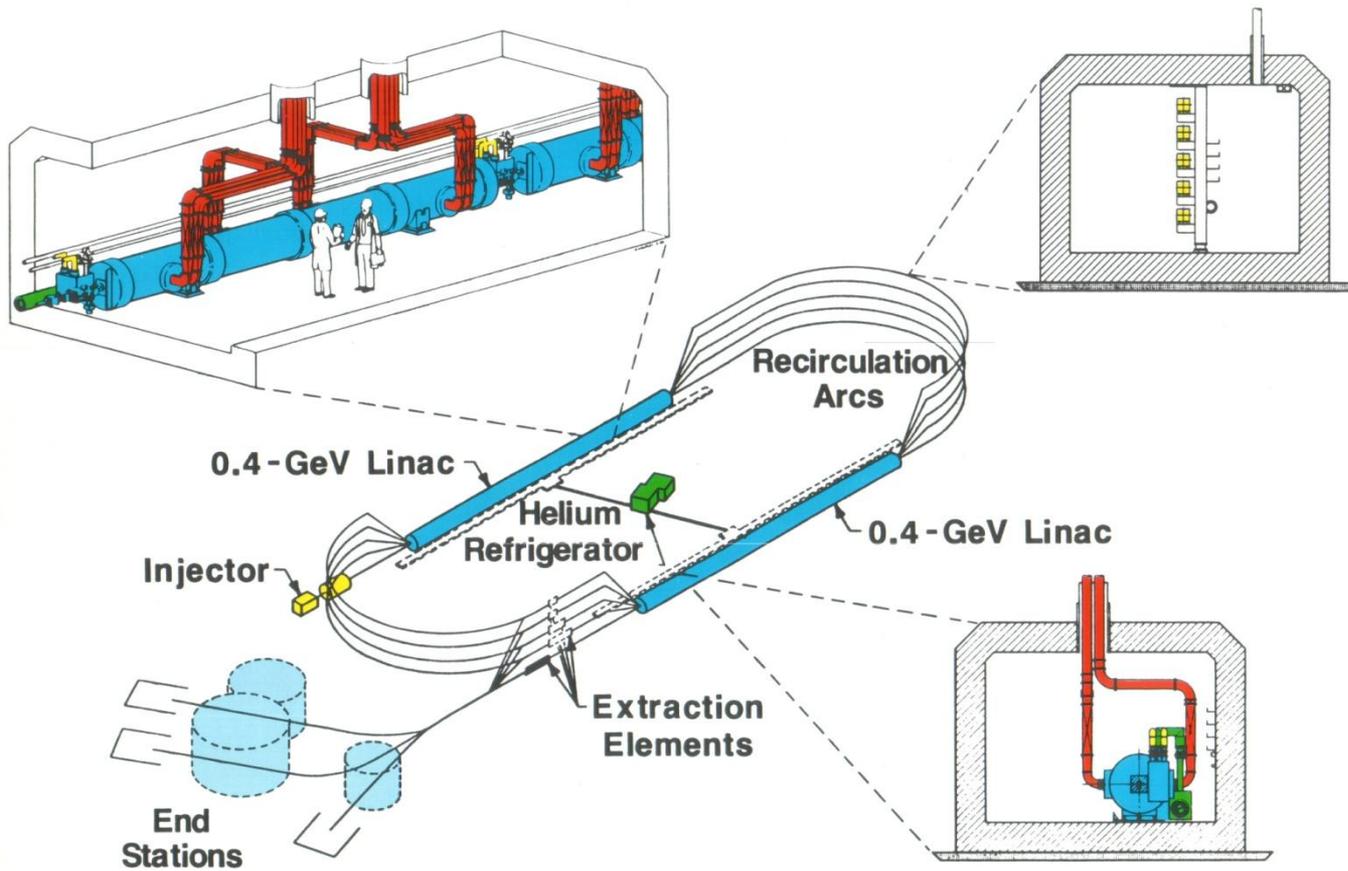
В резонаторах округлой или эллиптической формы мультипактор не возникает! Точнее, траектории вторичных электронов сносятся к экваториальной области, где отсутствует нормальная составляющая электрического поля, и процесс размножения вторичных электронов затухает.

С обнаружением данного эффекта (конец 70-х, Генуя, Вупперталь) началась гонка за получением предельных полей, стали возникать новые проекты сверхпроводящих ускорителей – наиболее крупный проект – электронный рециркулятор CEBAF

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

MACHINE CONFIGURATION

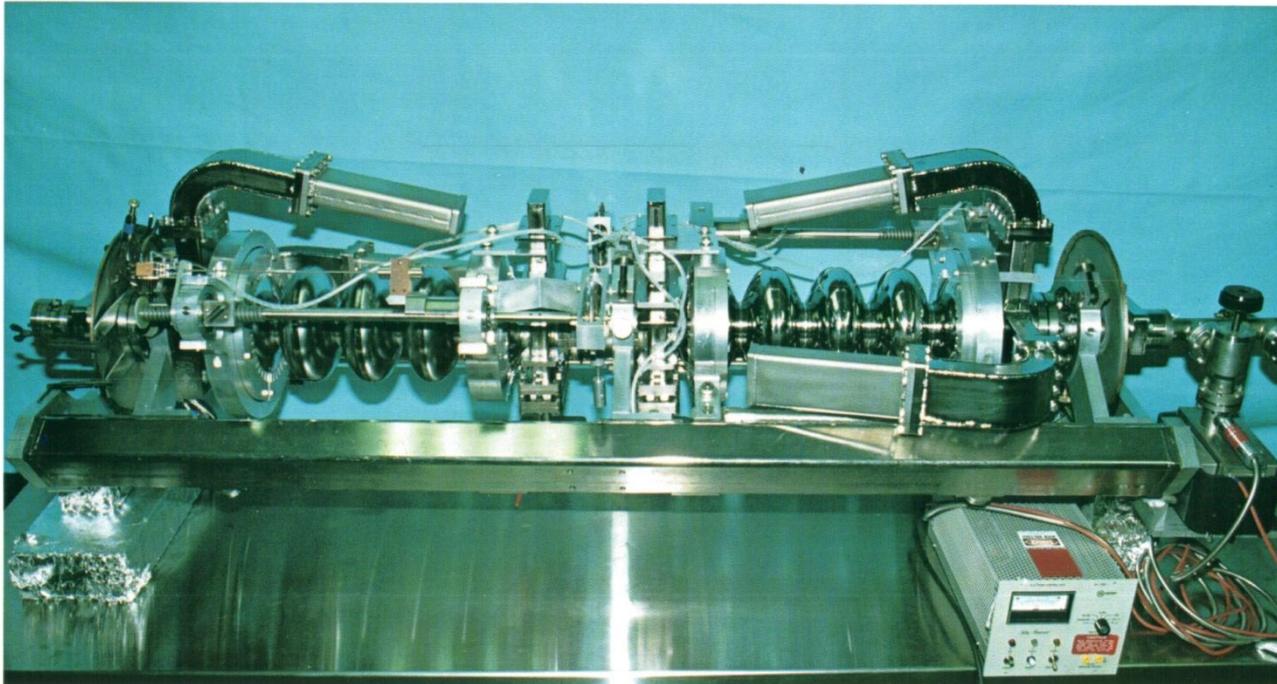
CEBAF



СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

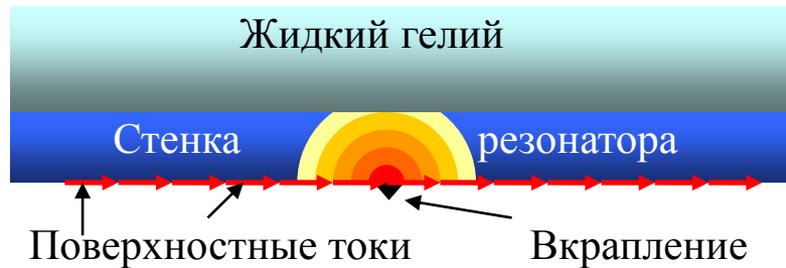
CEBAF

The Continuous Electron Beam Accelerator Facility



SUPERCONDUCTING CAVITY PAIR

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ



$$H_{\max} = \sqrt{4(T_c - T_{\text{LHe}}) \lambda / (R_s^n r_d)}$$

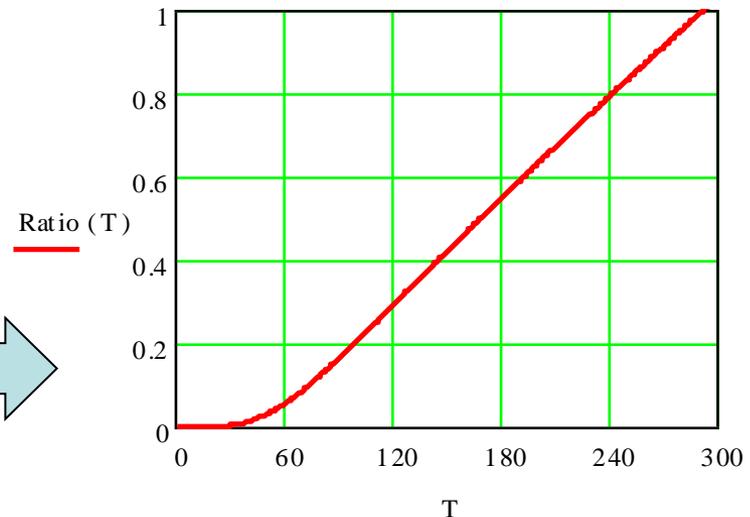
- Развитие тепловой неустойчивости в сверхпроводящем резонаторе- тепловой пробой инициирует микро вкрапление.
- Абсолютная тепловая неустойчивость сверхпроводящего резонатора (Куракин В.Г., 1992 г.)

КОНЦЕПЦИЯ УСКОРИТЕЛЬНОГО КОМПЛЕКСА ФИАН НА ОСНОВЕ СВЕРХПРОВОДЯЩЕГО ЭЛЕКТРОННОГО РЕЦИРКУЛЯТОРА

- Увеличение теплопроводности материала резонатора – способ подавления тепловой неустойчивости. В первых резонаторах использовался ниобий с RRR (Residual Resistance Ratio)=40, в современных резонаторах используется, как правило материал с RRR=300.
- Для меди RRRидеал = $6 \cdot 10^6$
- Для ниобия = $2,5 \cdot 10^6$

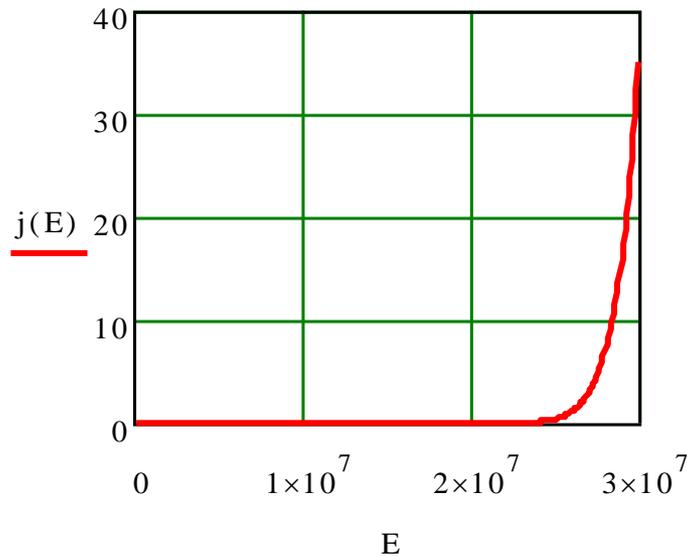
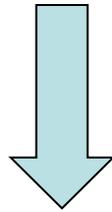
$$RRR = \frac{\sigma_{LHe}}{\sigma_{RoomT}}$$

$$\rho_{ид} = \frac{kT^5}{M\theta^6} \int_0^{\theta/T} \frac{\xi^5 d\xi}{(e^\xi - 1)(1 - e^{-\xi})}$$



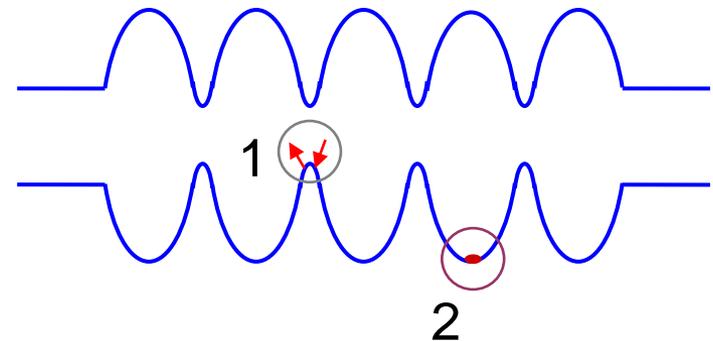
СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

$$j \approx 1,4 \cdot 10^{-6} \frac{E^2}{\varphi} \exp\left(10,11 \varphi^{-0,5} - 6,49 \cdot 10^7 \frac{\varphi^{1,5}}{E}\right)$$

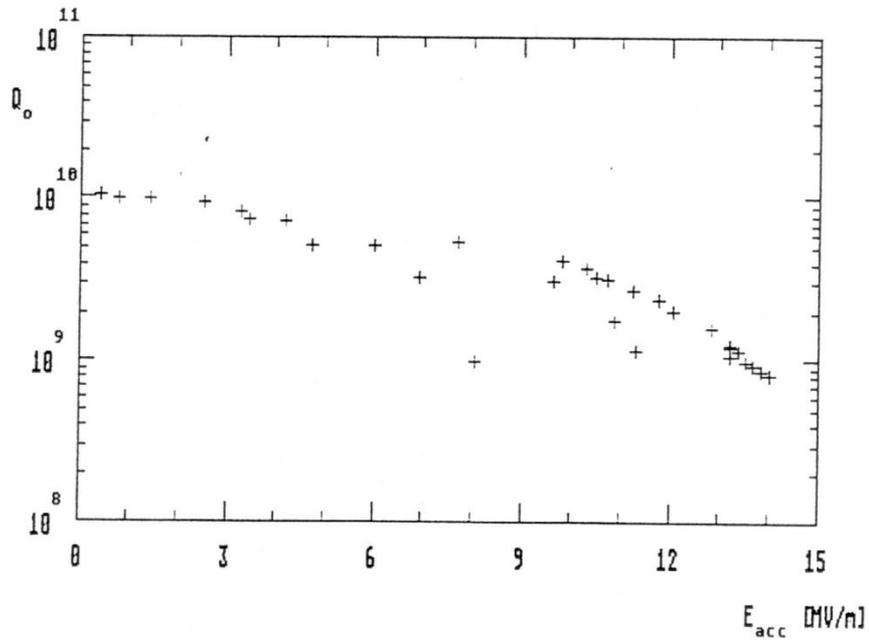


Автоэлектронная (полевая) эмиссия. Формула Фаулера – Нордхейма для тока автоэмиссии
(j, E, φ в А/см², В/см и В).
φ=4,5

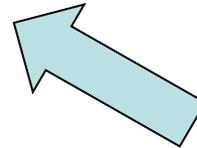
Локализация эмиттеров (1) и мест теплового пробоя (2) в резонаторе



СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ



- Измерения сверхпроводящих резонаторов



Тест резонатора 10-см диапазона из ниобия высокой частоты RRR=300 (Вупперталь, 1990 год)

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

На пути к предельным ускоряющим градиентам

Проект TESLA (TeV Energy Superconducting Linear Accelerator)
– 1989 год

Данный проект возник как альтернатива линейному электрон-позитронному коллайдеру на медных ускоряющих структурах. Задача создания вч генератора больше 100 МВт импульсной мощности на длине волны 3 см, необходимого для возбуждения тёплой структуры, оказалась сложной. В сверхпроводящих структурах эта проблема отсутствует, однако достигнутые средние градиенты (10 МВ/м) в многоячеистых резонаторах представлялись недостаточны. Предполагалось, что будет разработан сверхпроводящий резонатор с градиентом поля 40 МВ/м! В ходе дальнейшей проработки проекта договорились, что и при более умеренном градиенте 25 МВ/м проект имеет смысл.

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

Задача создания сверхпроводящего резонатора с градиентом поля 25 МВ/м была успешно решена в результате реализации проекта TTF (TESLA Test Facility) в DESY (Гамбург, ФРГ)

Основные параметры сверхпроводящего резонатора TESLA

Резонансная частота -1300 МГц ($\lambda=23$ см)

Число ячеек $n=9$

$R/Q = 1036$ Ом

E_a (ускоряющий градиент) > 25 МВ/м

Q (собственная добротность) $> 5 \cdot 10^9$

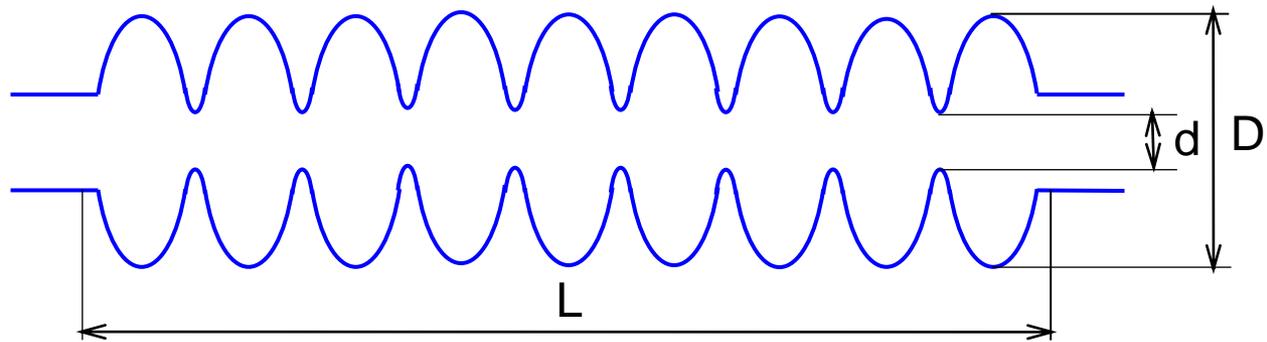
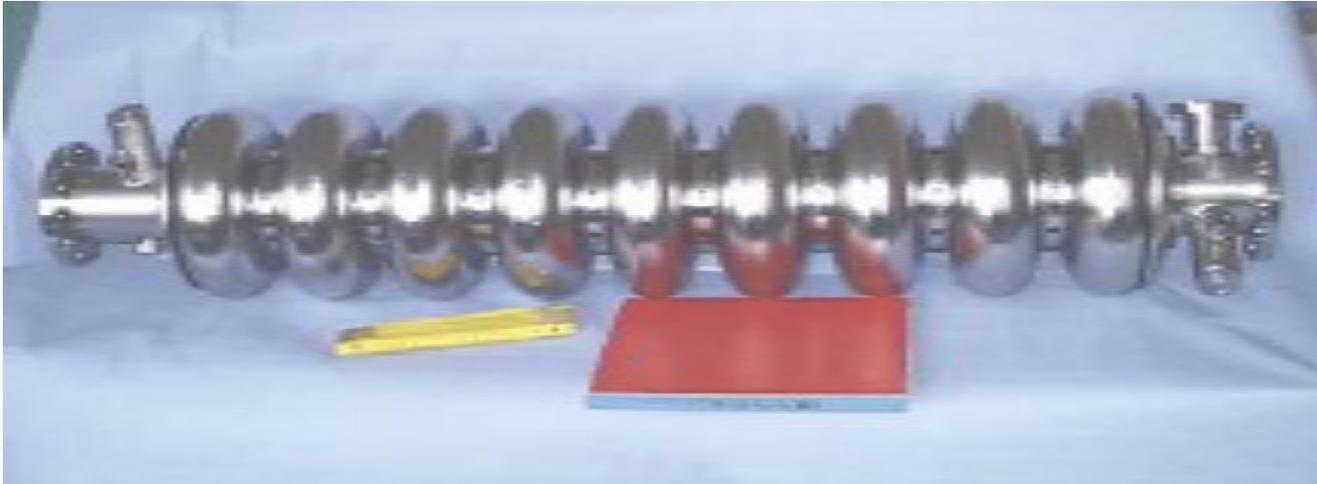
Рабочая температура $T=2.0$ К

Внутренний диаметр $d = 70$ мм

Наружный диаметр $D= 206.6$ мм

Активная длина - 1038 мм ($L= \lambda n/2$)

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ



Фотография и схематический рисунок резонатора TESLA

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

Ускорители для
ядерной физики

Электрон-позитронные
коллайдеры

Нейтронные
генераторы (SNS)



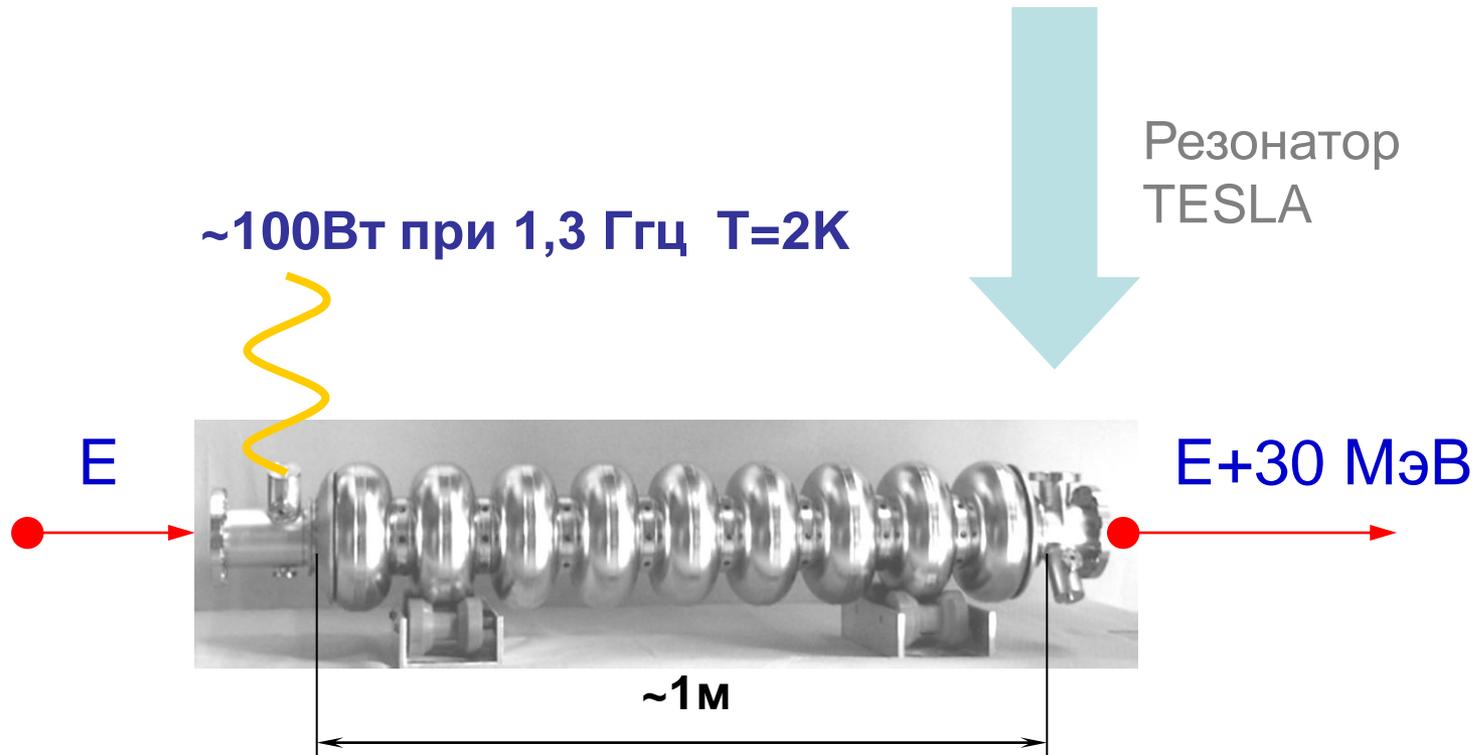
Подкритические
ядерные реакторы
(ADS)

Лазеры на свободных
электронах (FEL, XFEL)

Источники света
высокой яркости
(ERL)

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

Что объединяет элементы вышеприведенного списка?
Во всех перечисленных установках используются сверхпроводящие резонаторы из ниобия с высоким градиентом ускоряющего поля (выше 30 МВ/м).



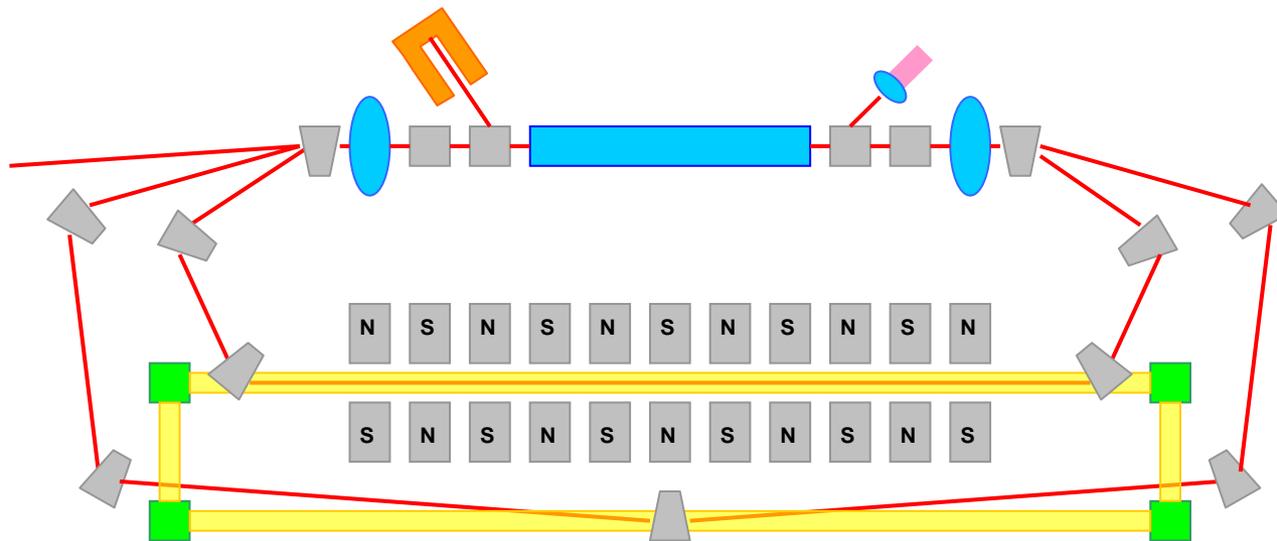
МНОГОЦЕЛЕВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС



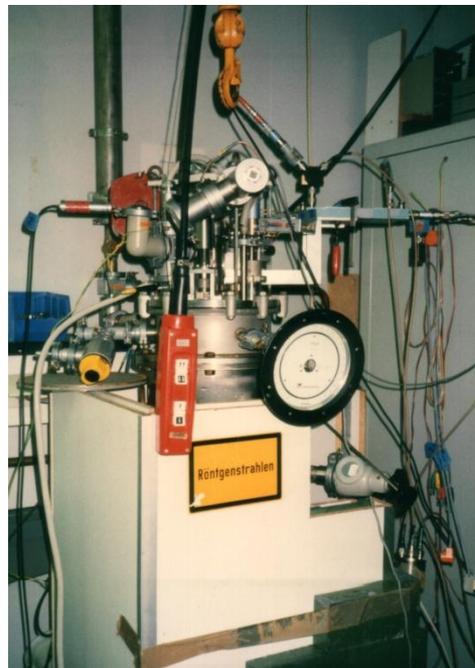
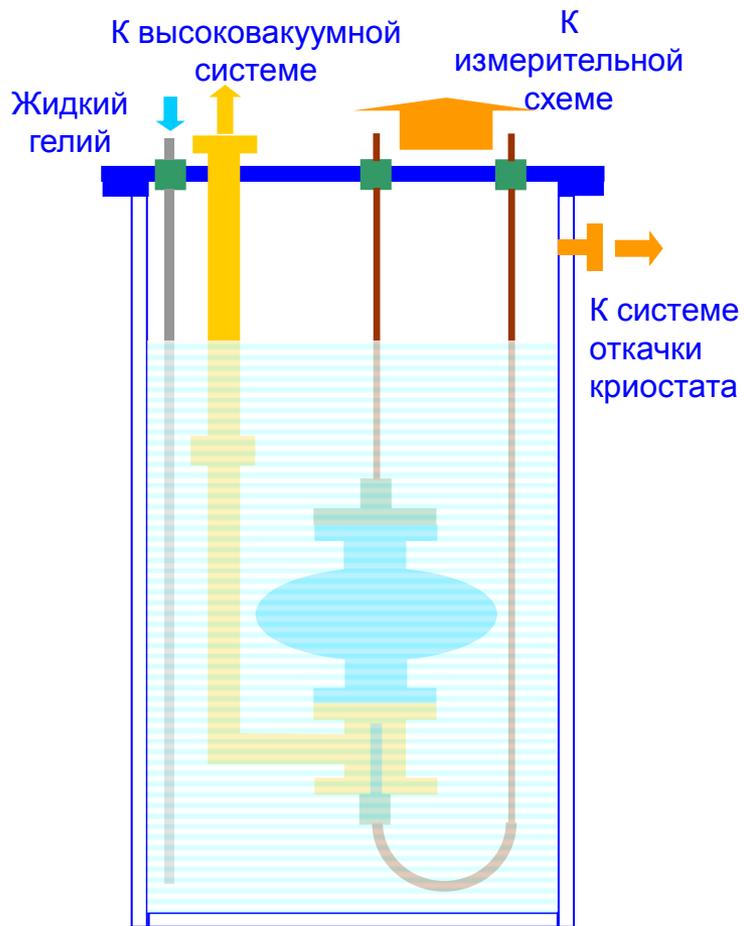
Экспериментальный комплекс ФИАН

1 – дипольный магнит, 2 – инжектор, 3 – сверхпроводящий ЛУ, 4 – орбиты ускорителя, 5 – магнитные линзы, 6 – мишень, 7 – магниты ахроматической системы, 8 – секция коррекции энергии и спектра пучка, 9 – поглотитель, 10 – квадрант накопителя, 11 – вигглер, 12 - кикер

МНОГОЦЕЛЕВОЙ ИЗЛУЧАТЕЛЬНЫЙ КОМПЛЕКС

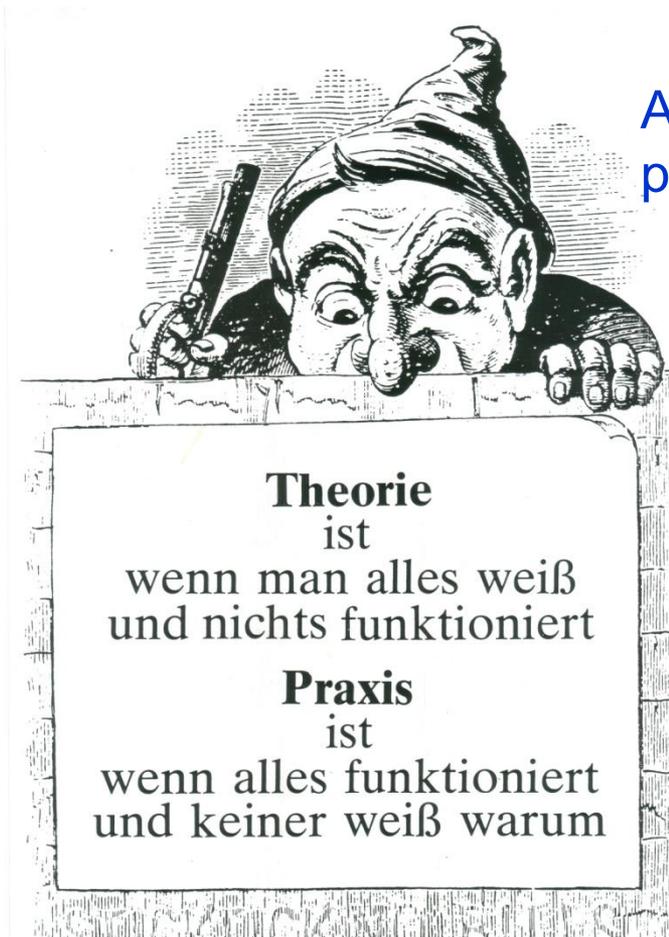


СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ

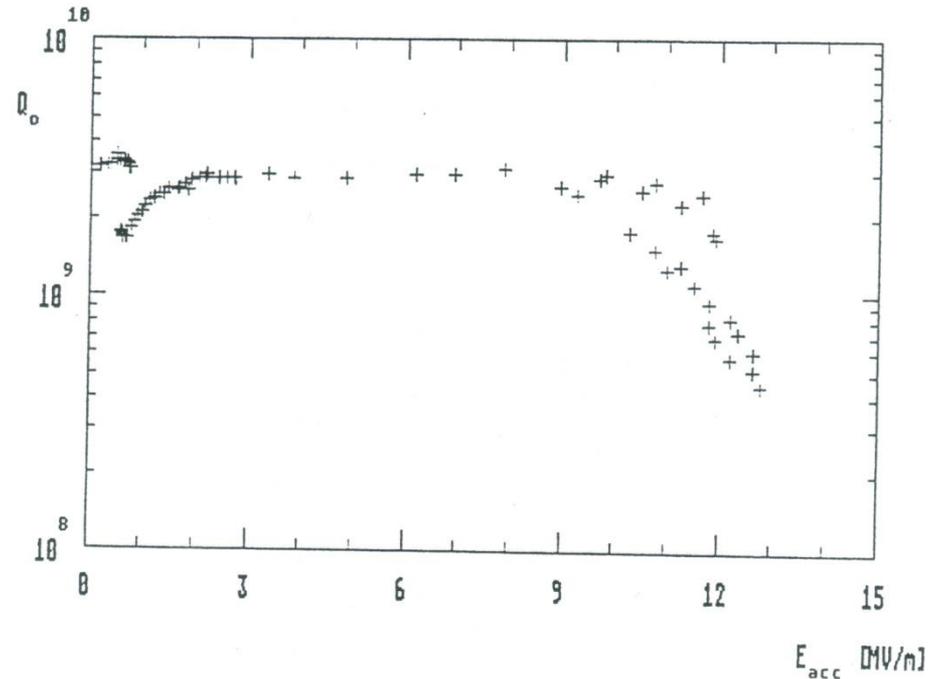


Криогенный измерительный стенд и его комплектация

СВЕРХПРОВОДЯЩИЕ УСКОРЯЮЩИЕ СТРУКТУРЫ



Аномальное поведение сверхпроводящего резонатора при малых полях



ДОКЛАДЧИК ВЫРАЖАЕТ ПРИЗНАТЕЛЬНОСТЬ
ОРГАНИЗАТОРАМ ЧТЕНИЙ ЗА ПРИГЛАШЕНИЕ
ВЫСТУПИТЬ С ДАННЫМ СООБЩЕНИЕМ

СПАСИБО ЗА ВНИМАНИЕ!