

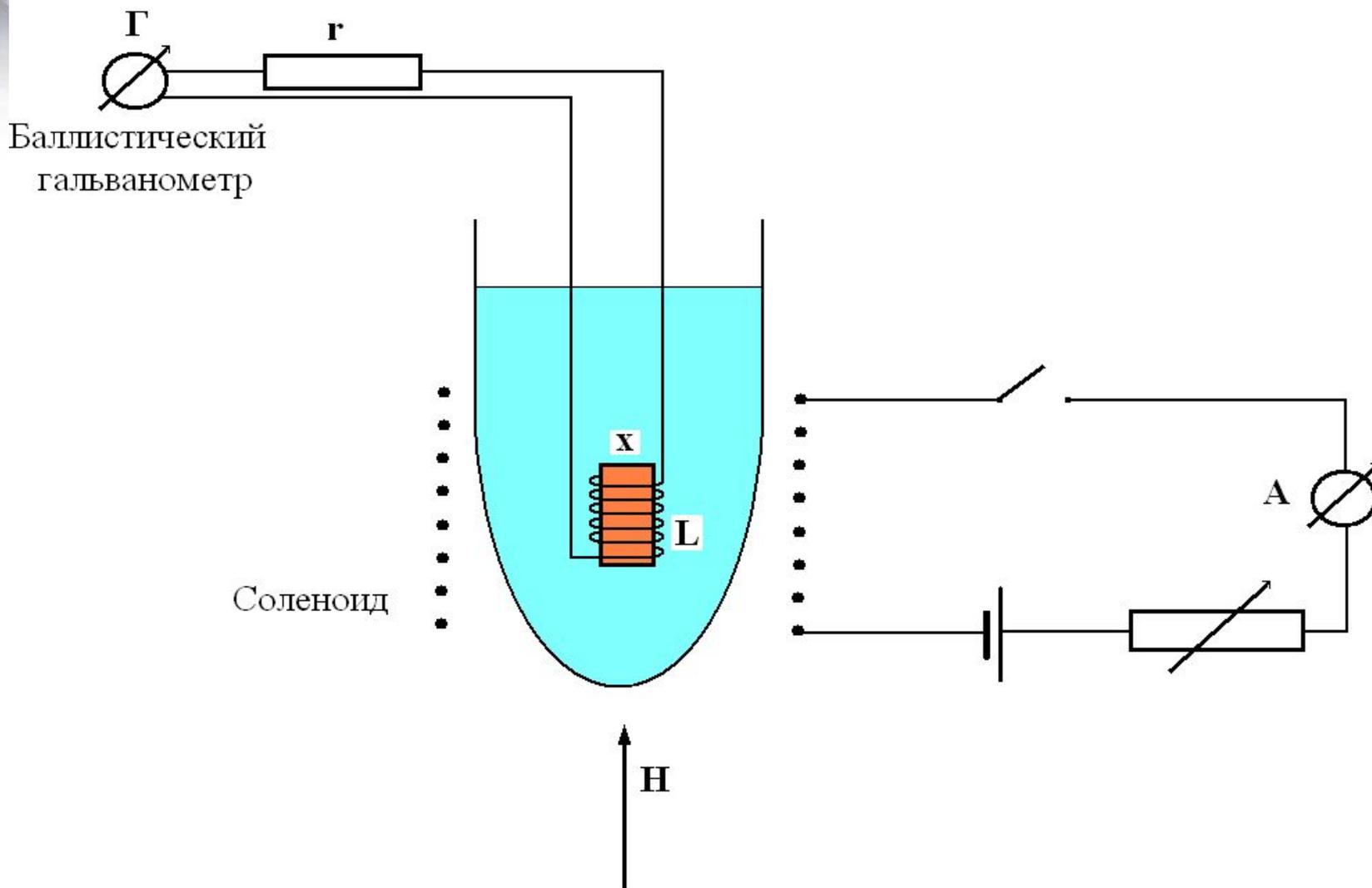
Лекция 11,12

Сверхпроводники в магнитном поле



Feuille de Brochet
au vin de Lumière
—
Mette et Ignace
de
—
de Fromages
—
Hommes et Casis

Эффект Мейснера-



Внутри массивного СП: $V=0$, $\chi=-1/4\pi$

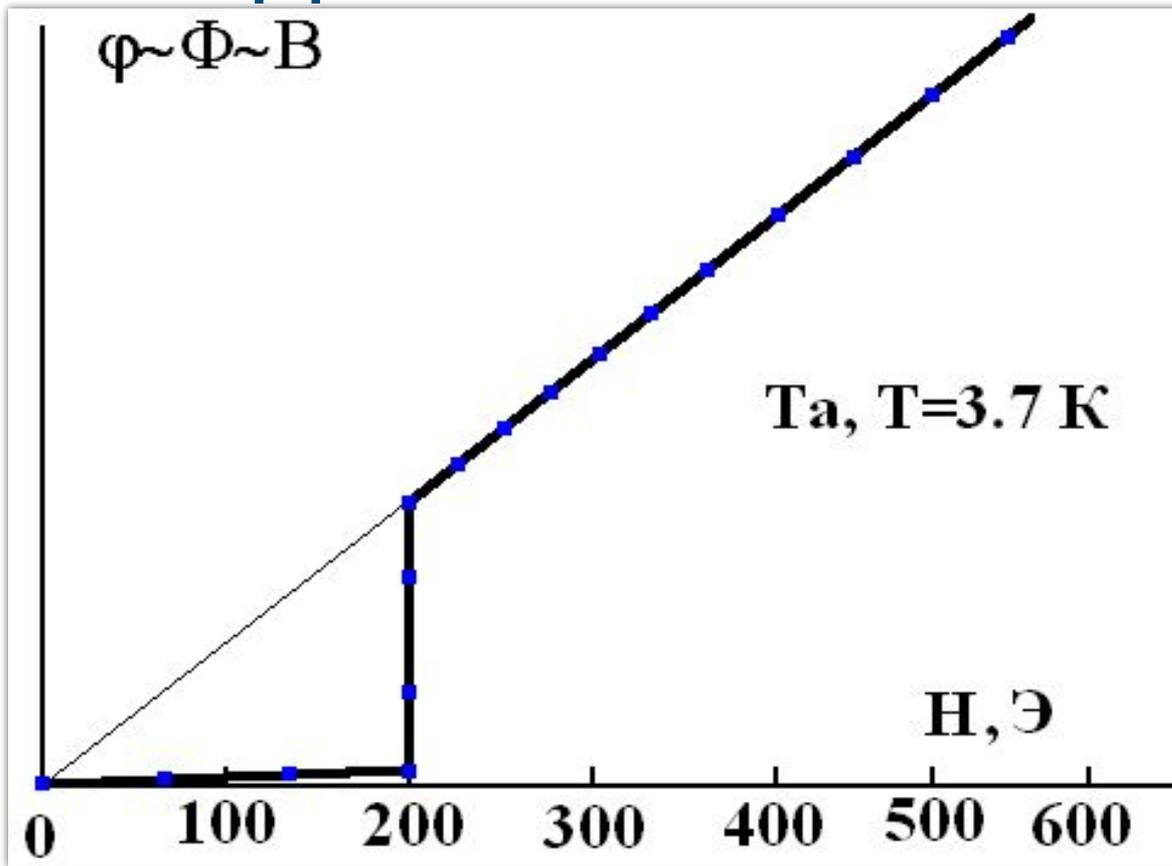
Эффект Мейснера- Оксенфельда или идеальный диамагнетизм

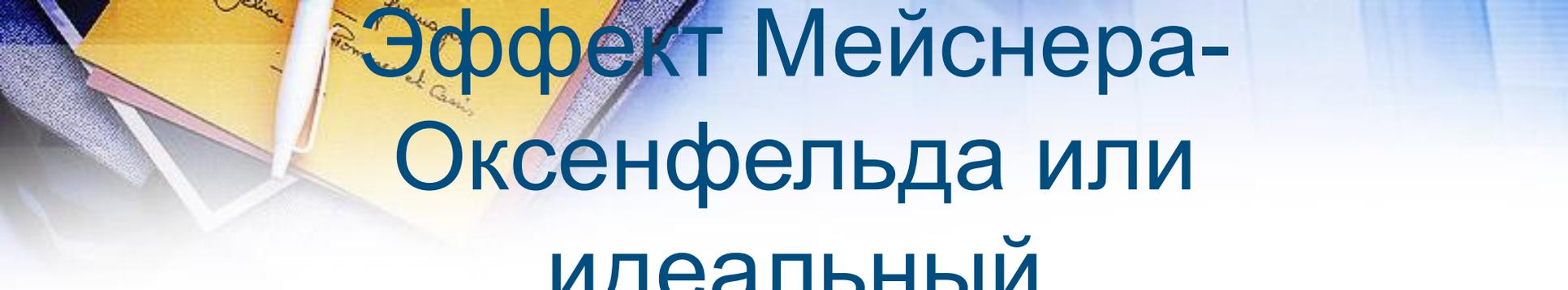
Включим **H**. Угол отклонения Γ равен:

$$\phi \sim q = \int I dt = \int \frac{\varepsilon}{r} dt = \int \frac{1}{r} \cdot \frac{1}{c} \cdot \frac{d\Phi}{dt} dt \sim \Phi = BS$$

q -заряд, протекший через гальванометр, I -ток через гальванометр, ε -ЭДС, Φ -магнитный поток через измерительную катушку L , S -площадь ($nS_{\text{средн}}$) катушки L , n -число витков катушки L

Эффект Мейснера-Оксенфельда или идеальный диамагнетизм





Эффект Мейснера- Оксенфельда или идеальный диамагнетизм

Картина распределения поля и токов.

1) В поле \mathbf{H} возникает экранирующий поверхностный ток
 $\mathbf{B}=0$.

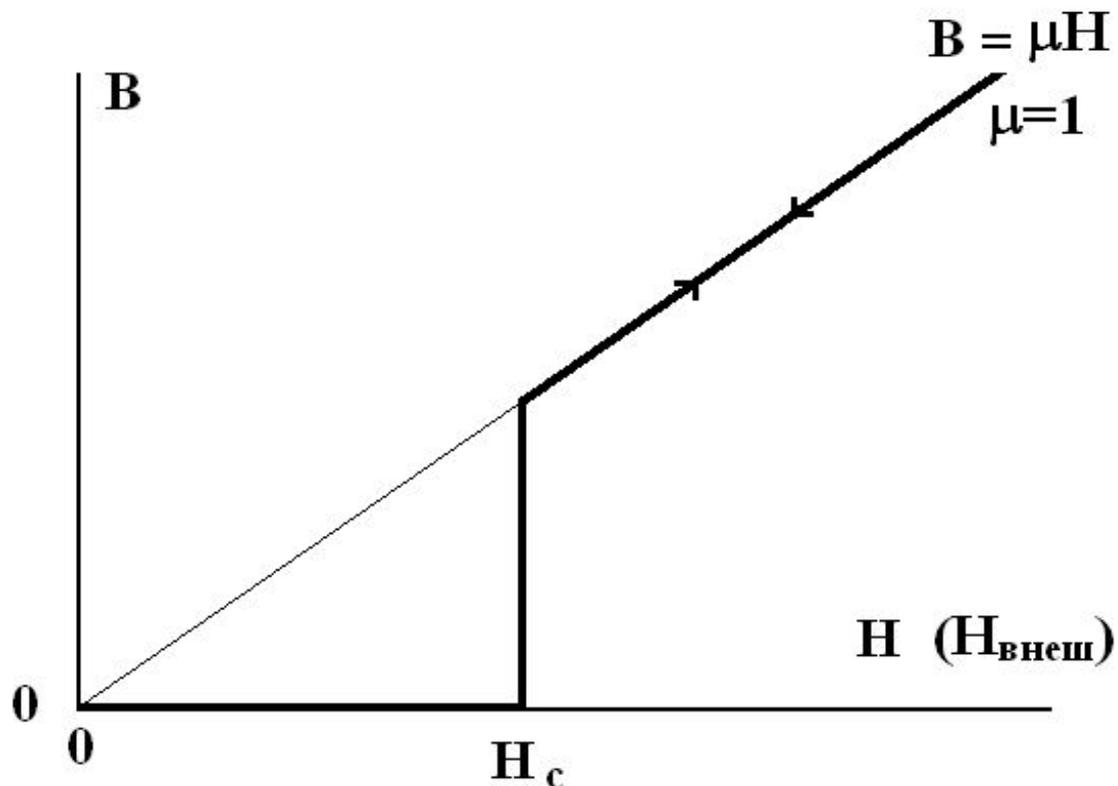
2) Вне СП $\mathbf{H}_{\text{внеш}} = \mathbf{B}_{\text{внеш}}$ (т.к. $\mu=1$) $= \mathbf{H} + \mathbf{H}_s$. Где \mathbf{H} -поле соленоида, \mathbf{H}_s -поле, создаваемое поверхностными токами (\mathbf{j}_s).

Всё это эквивалентно картине $\mathbf{B} = \mathbf{H} + 4\pi\mathbf{M}$ с $\mathbf{M} = -(1/4\pi)\mathbf{H}$.

3) Поверхностные токи!

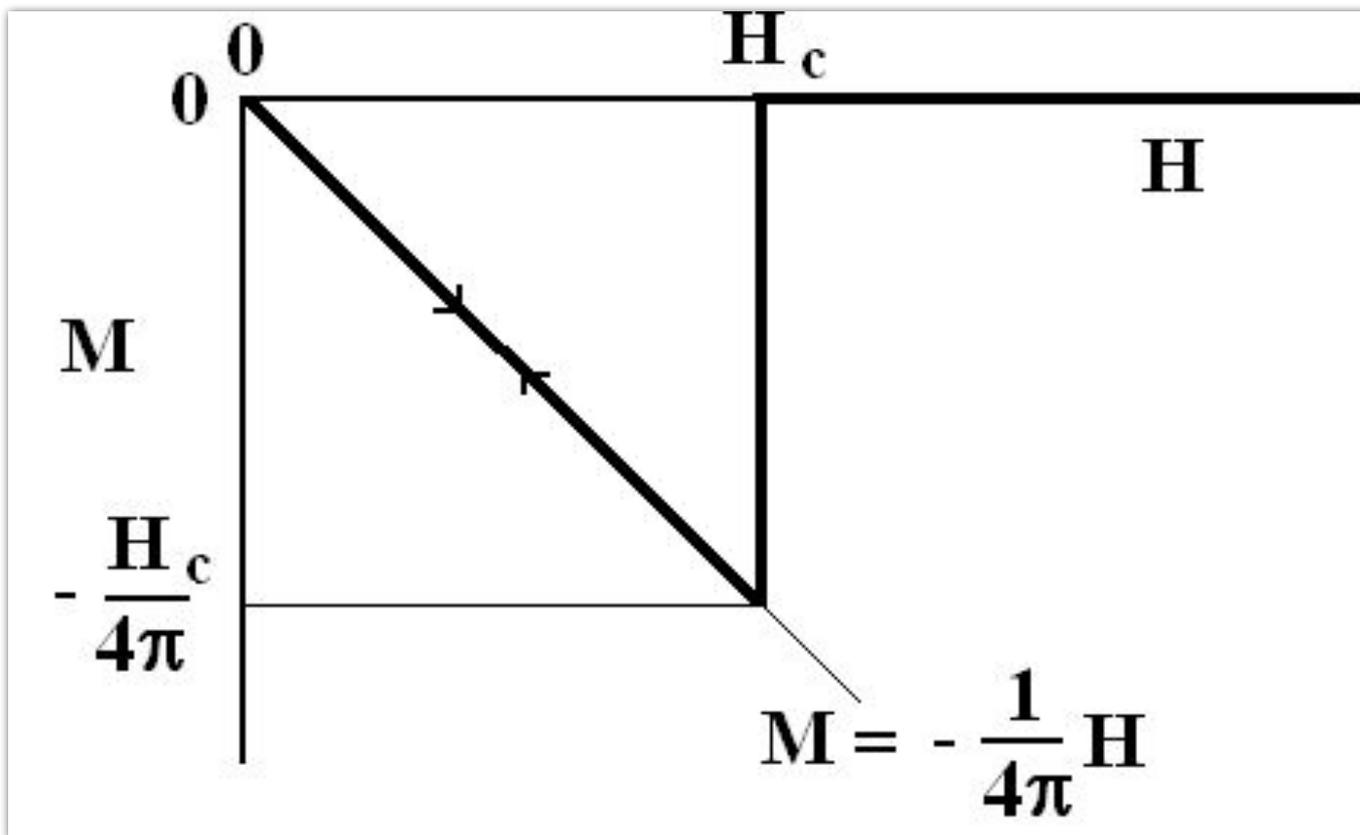
Магнитные свойства сверхпроводников

Магнитная индукция



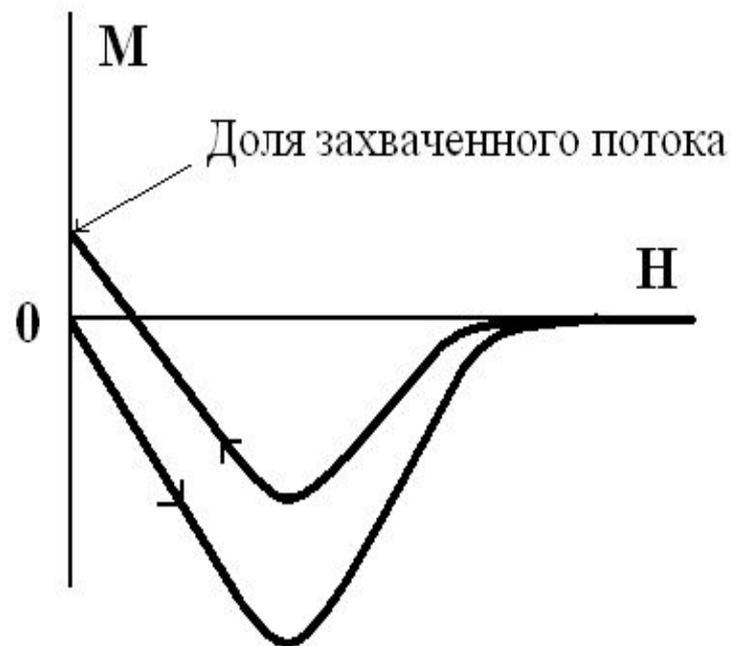
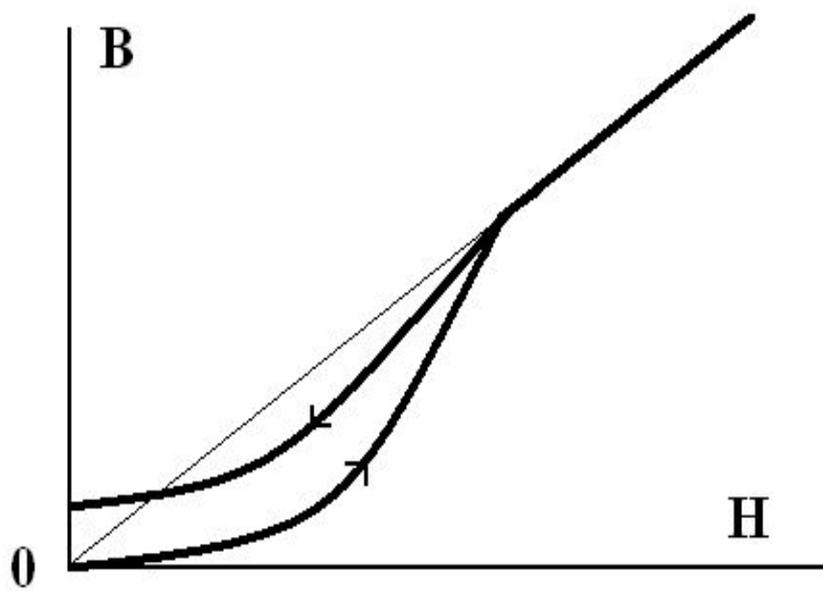
Магнитные свойства сверхпроводников

Намагниченность



Магнитные свойства сверхпроводников

Неидеальный образец. → Неоднородности, примеси, дефекты





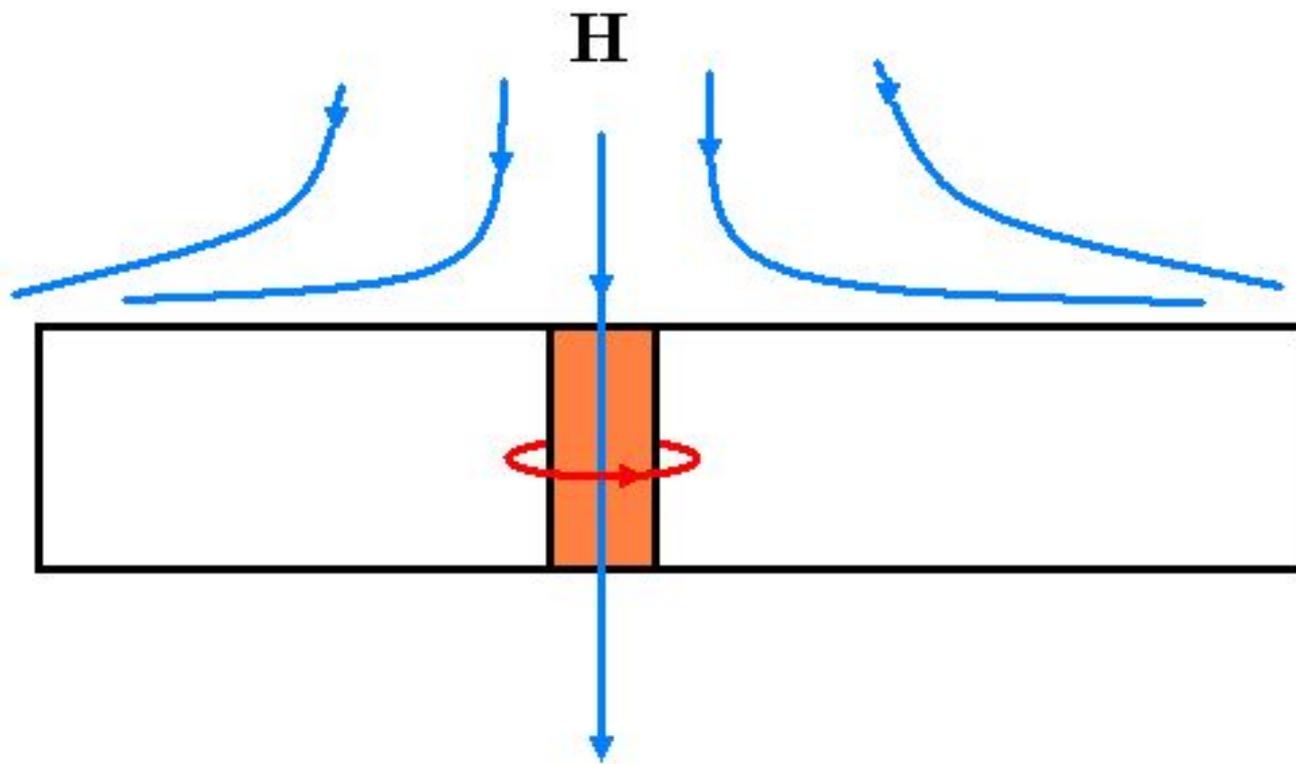
Магнитные свойства сверхпроводников

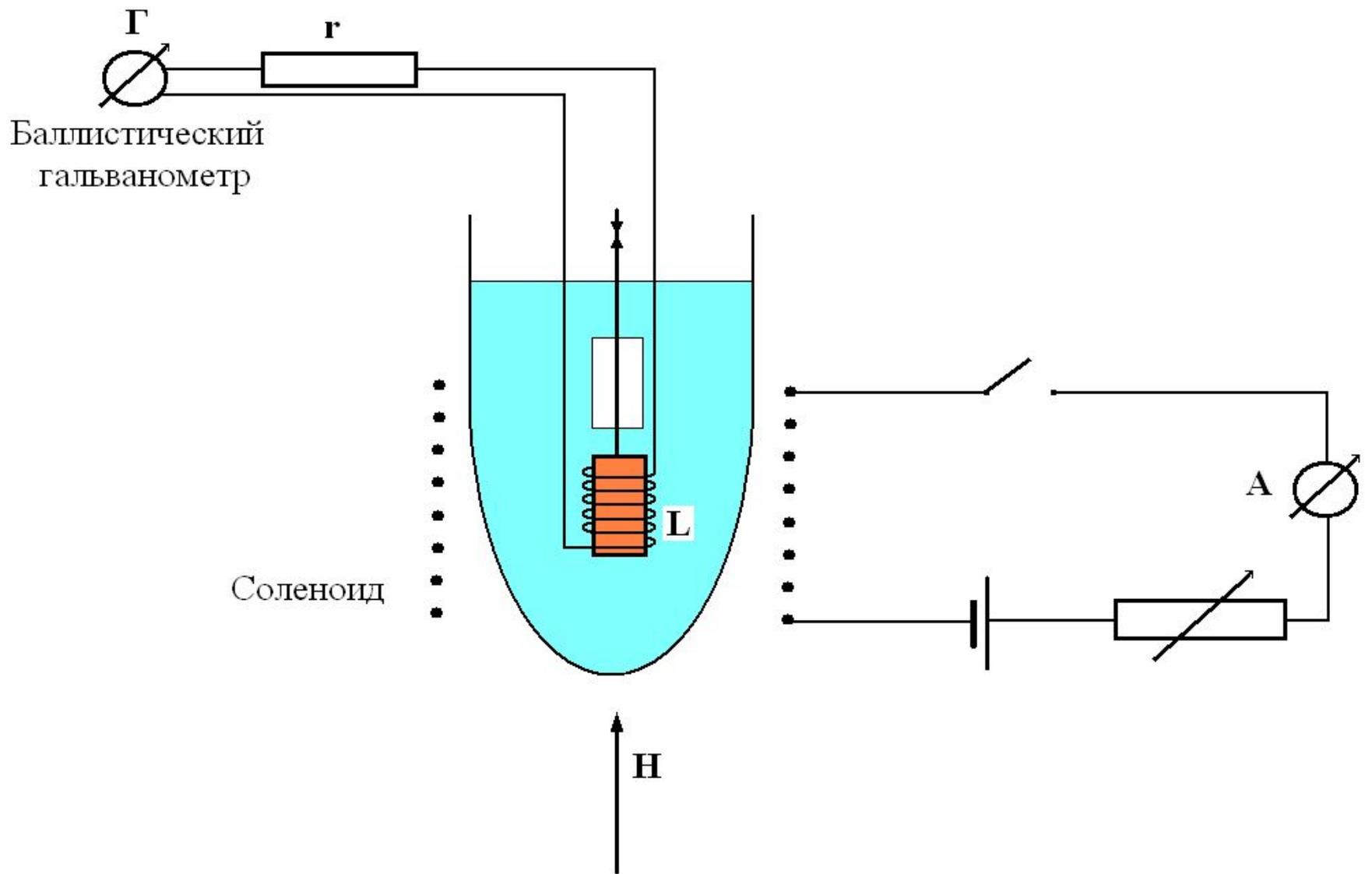
Неидеальный образец. → Неоднородности, примеси, дефекты

- 1) Нет четкого H_c («разные фазы»).
- 2) Необратимость (гистерезис).
- 3) Остаточный магнитный поток (или B) при $H=0$.
Неполный эффект Мейснера.
- 4) Остаточная намагниченность = захваченный или «замороженный» магнитный поток

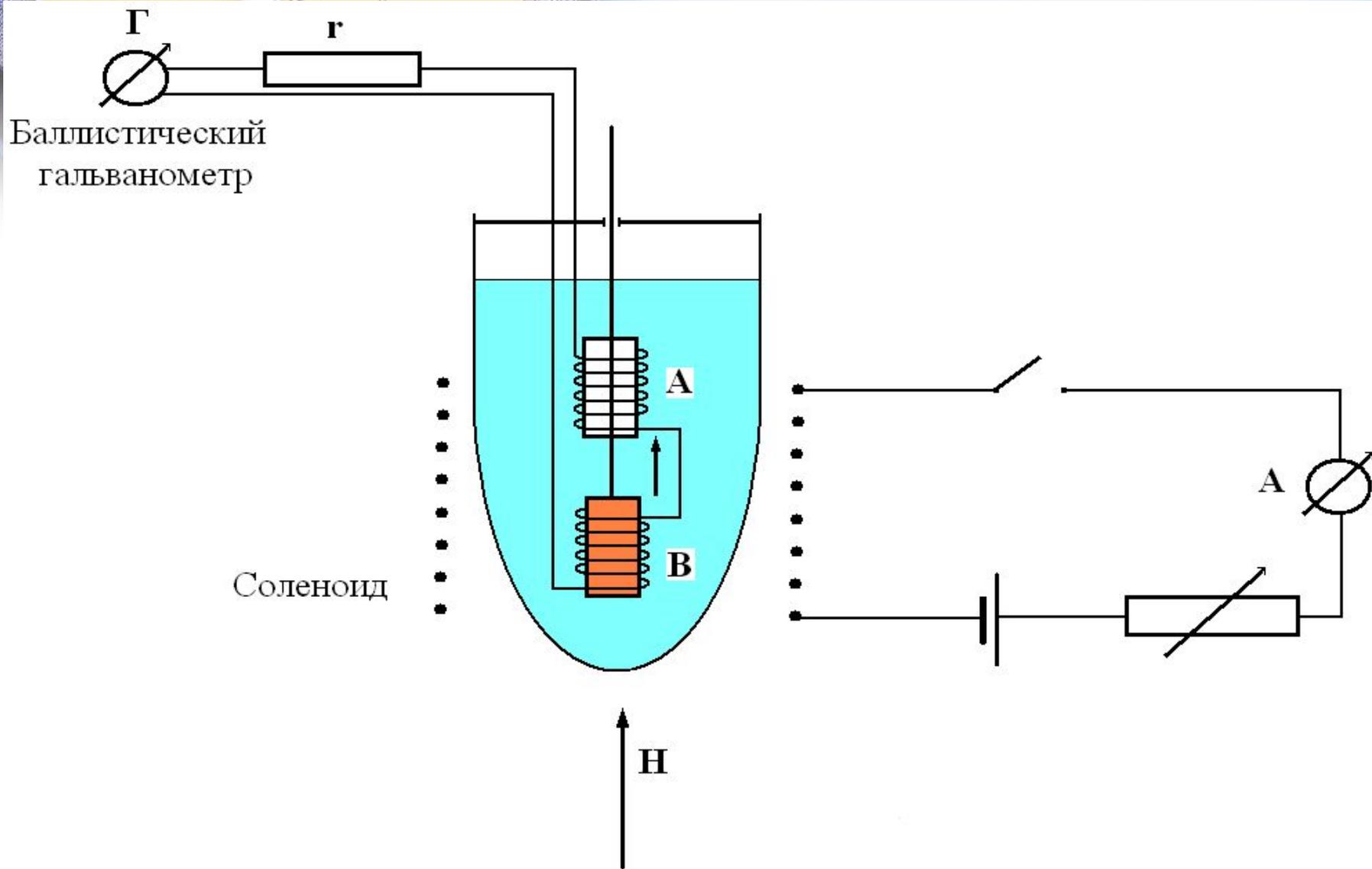
Магнитные свойства сверхпроводников

Неидеальный образец. → Неоднородности, примеси, дефекты

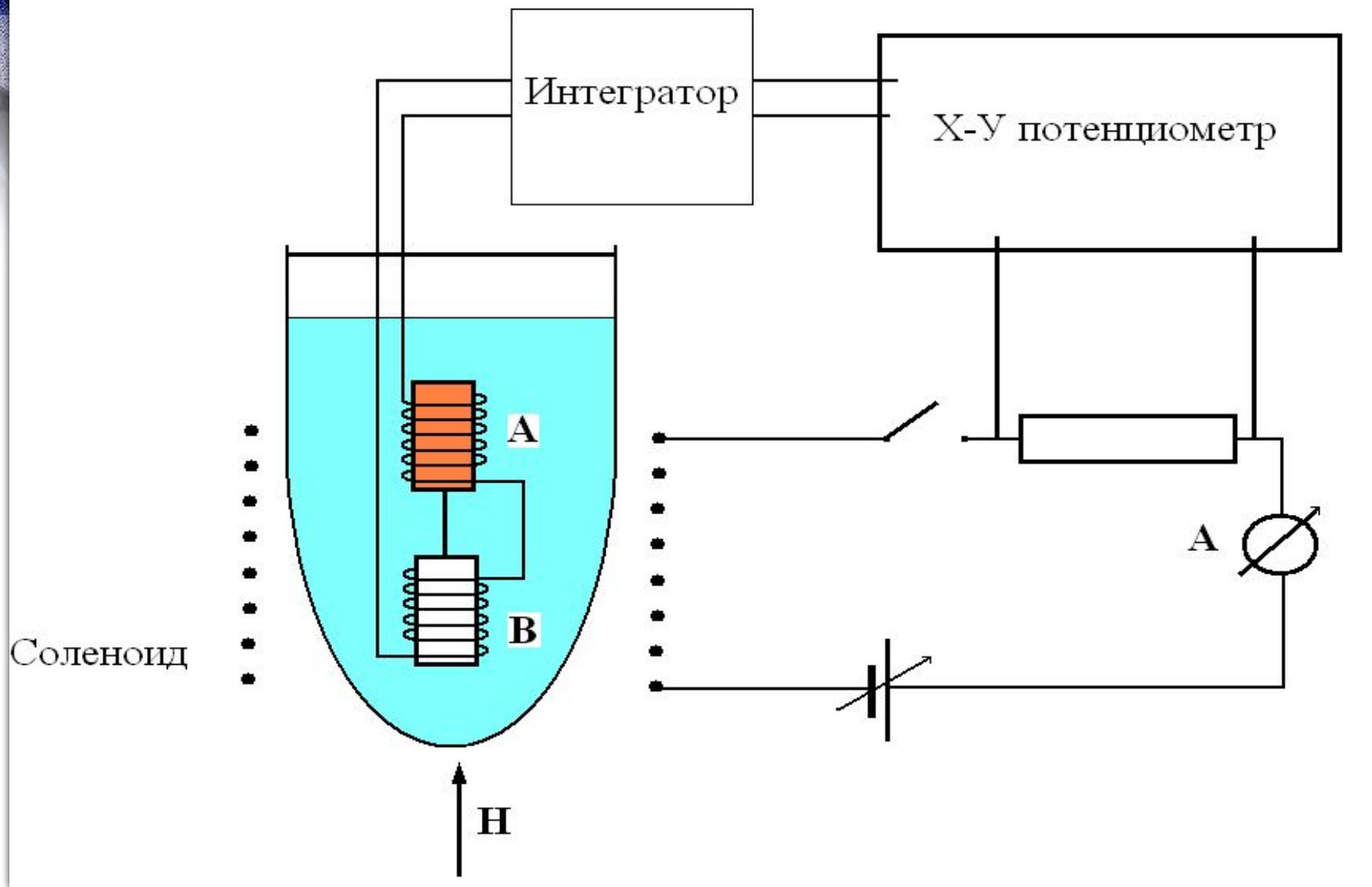




Отклонение гальванометра $\phi \sim \Delta\Phi \sim M$. Здесь $\Delta\Phi$ – изменение потока в катушке



$\Phi \sim \Delta\Phi \sim 2M$. ЭДС складываются, отброс гальванометра в 2 раза больше



Меняется внешнее поле $H(t)$. Образец неподвижен.
 Интегратор дает на выходе $V_{\text{ВЫХ}} \sim \int V_{\text{ВХ}}(t)dt$

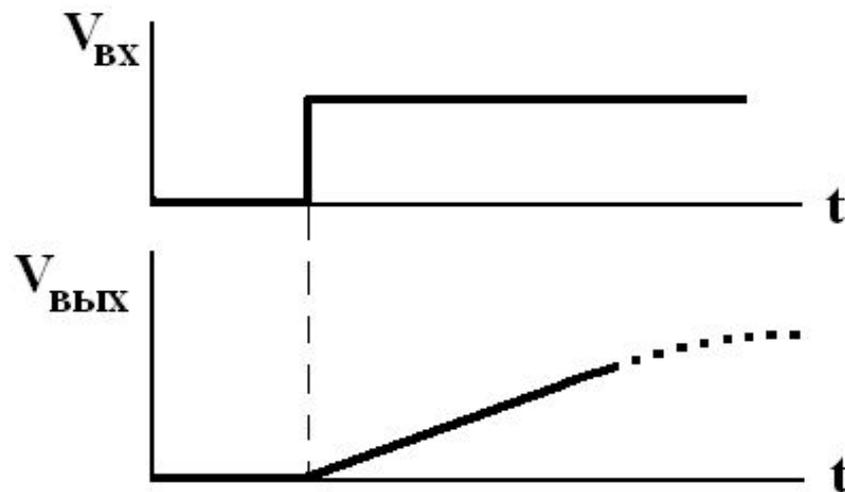
Измерения намагниченности M сверхпроводника

Интегрирующий метод

Пример простейшего
интегратора:



Напряжения (сигналы) на
входе и выходе:





Измерения намагниченности М сверхпроводника

Интегрирующий метод

ЭДС ε на входе интегратора:

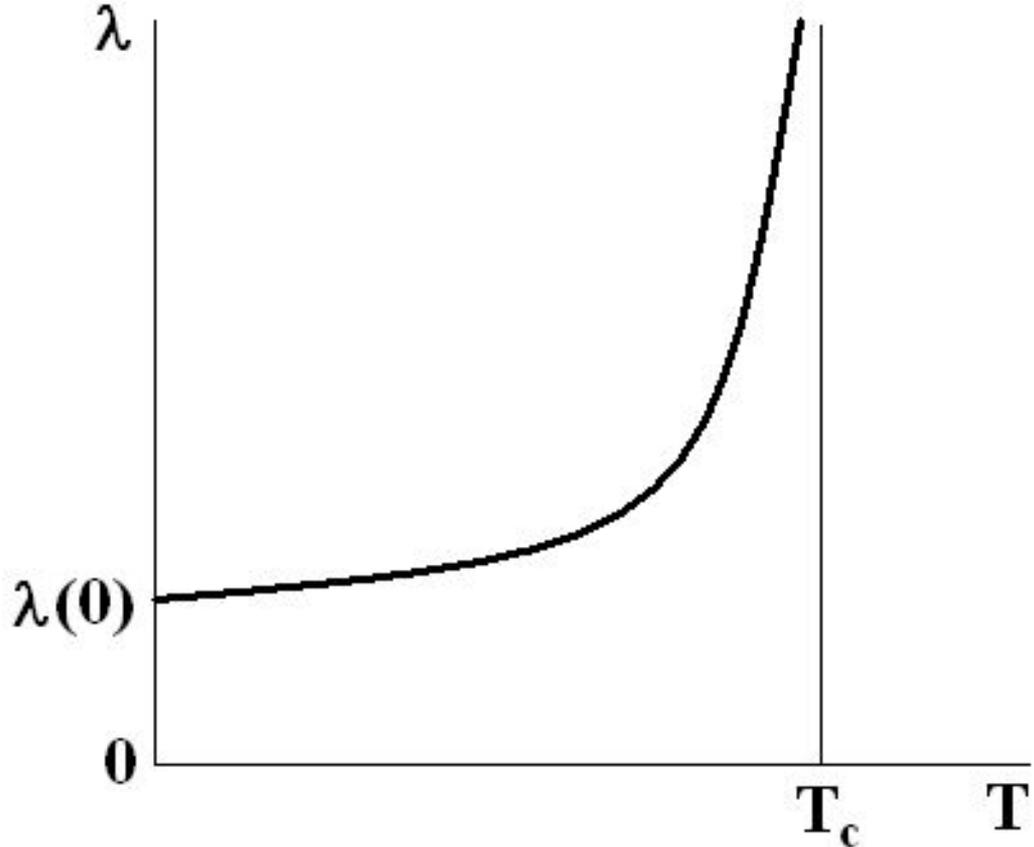
$$\varepsilon = \varepsilon_A - \varepsilon_B = -(1/c)\{d\Phi_A/dt - d\Phi_B/dt\} - (S/c)\{d(H + 4\pi M)/dt - dH/dt\} = -(4\pi S/c)dM/dt.$$

Считается $S_A = S_B = S$, $\mu = 1$ $\int \varepsilon dt$

После интегратора $V \sim \quad \sim M$

Зависимость λ от T

В теории БКШ при $T \rightarrow T_c$ концентрация электронов $n_s \sim n_s(0) (1 - T/T_c)$, т.е. $\lambda_{\text{БКШ}} = \lambda_{\text{БКШ}}(T) \cdot (1 - T/T_c)^{-1/2}$



На эксперименте λ_{exp} :

$$\lambda_{\text{exp}} = \lambda(0) \cdot [1 - (T/T_c)^4]^{-1/4}.$$

При $T \rightarrow T_c$

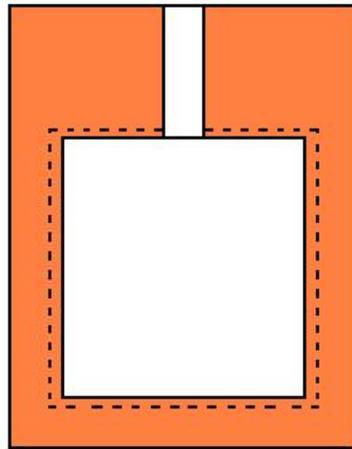
$$\lambda_{\text{exp}} \sim (1 - T/T_c)^{-1/2},$$

т.е. согласуется с БКШ

Зависимость λ от T

Методы измерения λ

- 1) Наблюдение прямого проникновения поля через тонкую пленку с $d \leq \lambda$.
- 2) Измерение резонансной частоты объемного резонатора из сверхпроводника



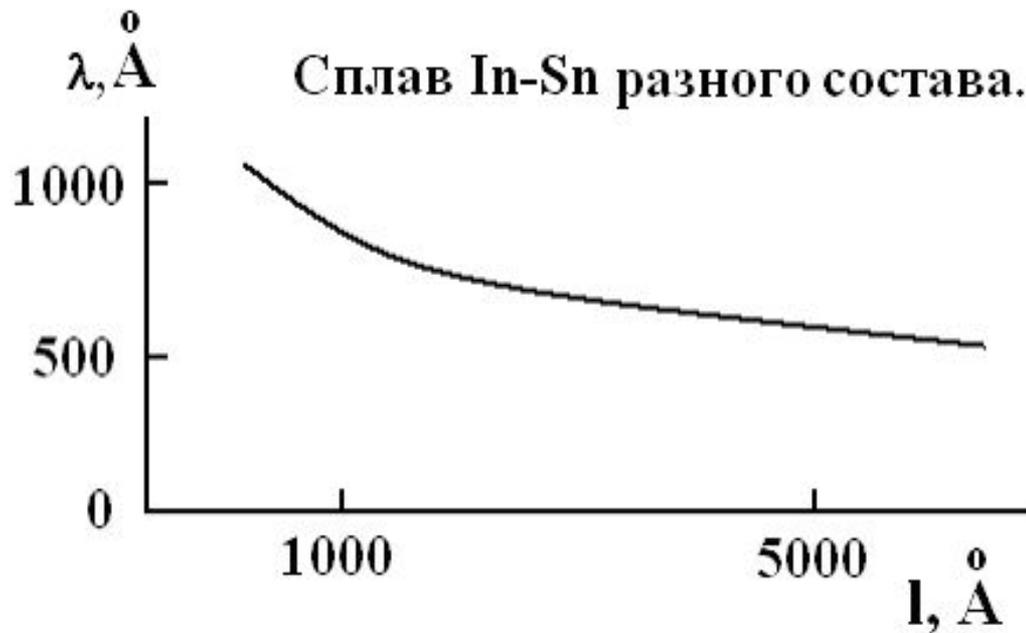
С T меняется глубина проникновения поля, т.е. эффективный размер полости резонатора, т.е. его частота

- 3) Измерение частоты LC-генератора, в котором в качестве индуктивности L используется катушка со СП сердечником

A decorative background in the top-left corner shows a stack of yellow and pink sticky notes, a white pen, and a blue folder. The sticky notes have some handwritten text in French, including "Fournitures et Co.", "Paris", and "Fournitures".

Зависимость глубины
проникновения λ в СП
от длины свободного
пробега носителей
заряда l (т.е. от чистоты
материала)

Зависимость λ от l



длина когерентности ξ («размер пары») зависит от чистоты материала

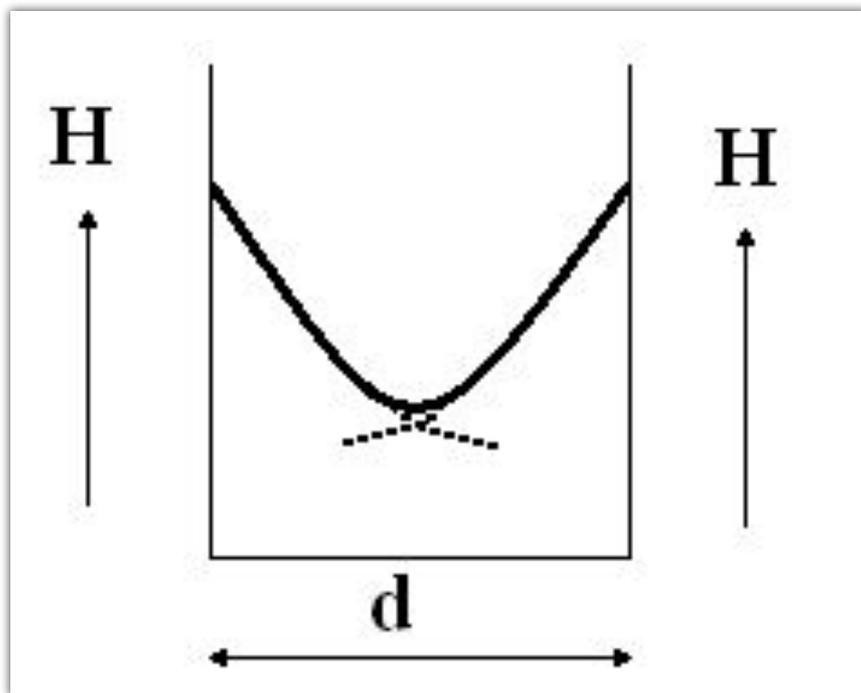
$$\xi(l) \sim \begin{cases} \xi_0 & \text{при } l \rightarrow \infty \\ \sqrt{\xi_0 l} & \text{при } l \rightarrow 0 \end{cases}$$

А глубина проникновения магнитного поля в сверхпроводник:

$$\lambda(l) = \lambda_\infty \cdot \sqrt{\xi_0 / \xi(l)}$$

Здесь $\lambda_\infty = \lambda(l = \infty)$. Хорошее согласие с экспериментом

Глубина проникновения поля в СП для тонких пленок



Здесь $H=H_{\parallel}$, $d \sim \lambda$. При уменьшении d поле все больше проникает в пленку

Эксперимент:

$$H_{c \text{ пленки}} > H_{c \text{ массив}} \text{ при } d < \lambda$$

Глубина проникновения поля в СП для тонких пленок

$$G_s(H) = \int_0^H \mathbf{M} dH \quad (1)$$

Если $\mathbf{M} = -(1/4\pi)\mathbf{H} \rightarrow$ массивный СП, то из (1) получим

$$G_s(H) = G_s(0) + H^2/8\pi \quad (2)$$

Здесь член $H^2/8\pi$ - энергия экранирующих токов и вытесненного поля.

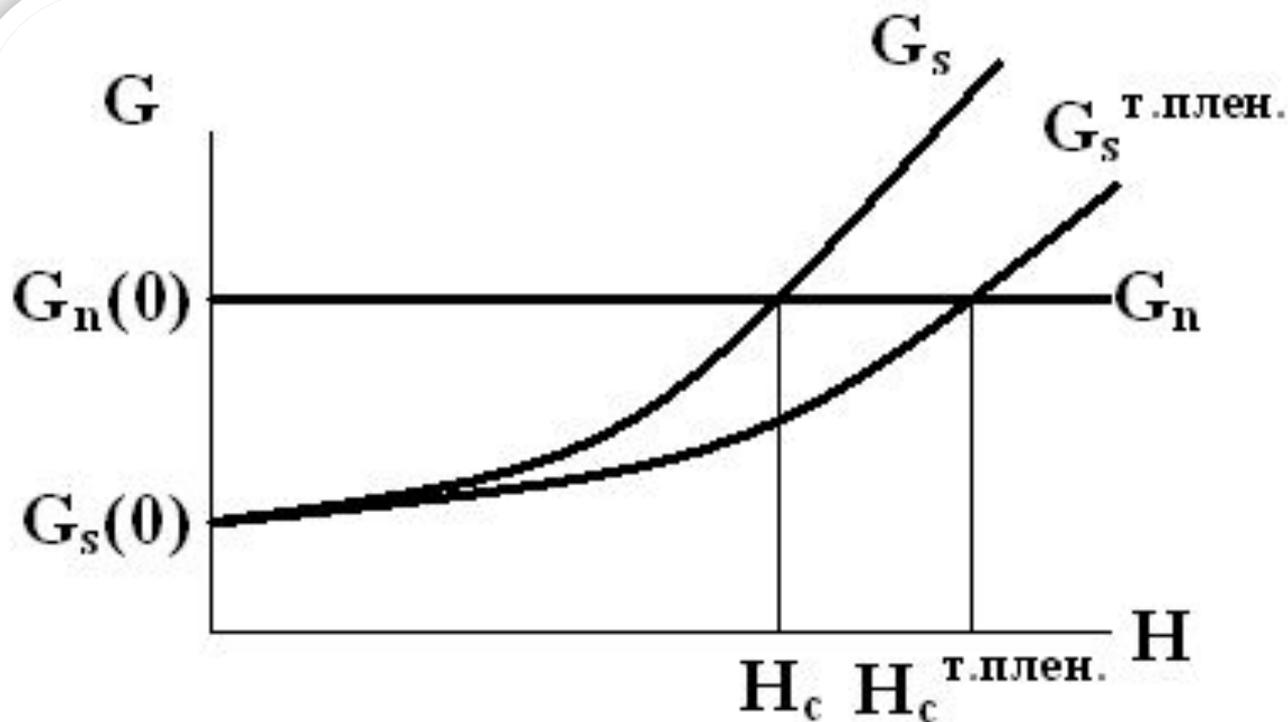
Вспомним, что $G_n(H) = G_n(0) = G_s(0) + H_c^2/8\pi$

G_n не зависит от H при отсутствии парамагнетизма.

Это основное уравнение термодинамики сверхпроводников.

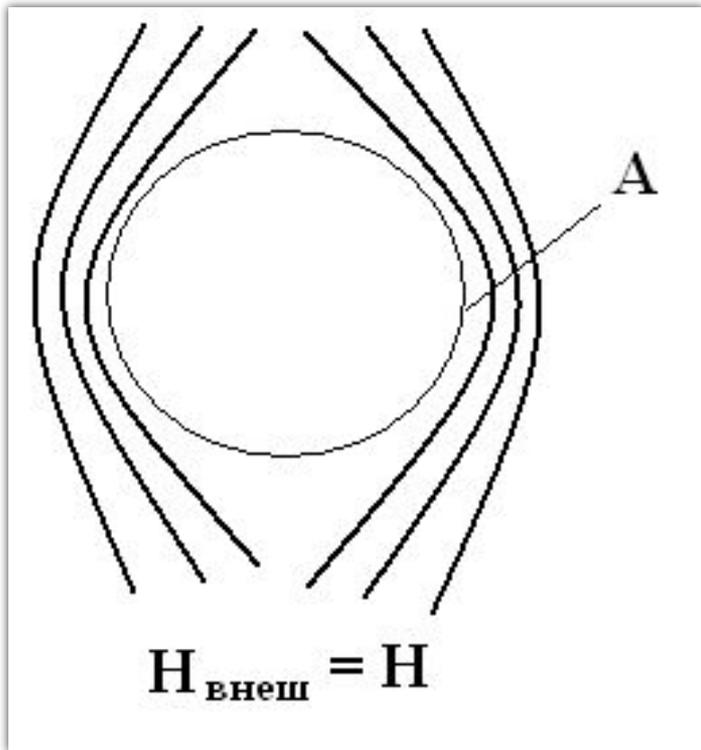
Таким образом, при $H = H_c$ величина G_s достигает G_n

Глубина проникновения поля в СП для тонких пленок



Промежуточное состояние

Коэффициент размагничивания



СП шар в поле $H < H_c$

В точке А плотность силовых линий увеличена, т.е.

$$H_{\text{эф}} \equiv H_a > H$$

(из-за добавочных токов)

Записывают $H_{\text{эф}} = H - 4\pi n_M M$ это эквивалентно $B = H + 4\pi M$.

Здесь n_M – коэффициент размагничивания (размагничивающий фактор).

$M = -(1/4\pi) H_{\text{эф}}$, т.е. $H_{\text{эф}} = H / (1 - n_M)$.

В т.А $n_M = 1/3$ сфера
 $1/2$ провод \perp полю
 0 провод \parallel полю



Промежуточное состояние

1) При $H_c < H_{эф} < H_c/(1-n_M)$ или $(1-n_M)H_c < H < H_c$

возникает особое – **промежуточное** – состояние.

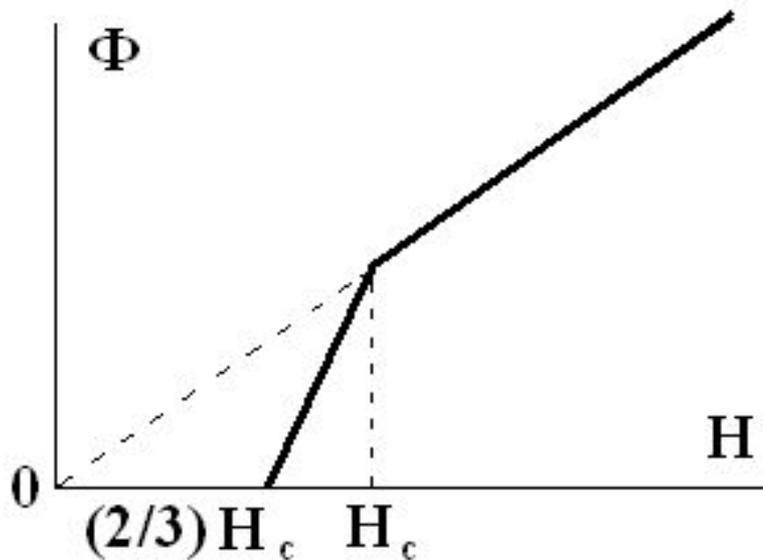
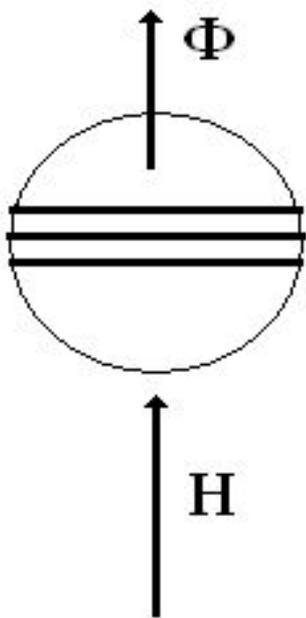
2) В т.А должно быть N-состояние (поле $>H_c$).

Но весь шар не может перейти в N-состояние, мало среднее поле. Ведь если шар перейдет весь в N-состояние, то поле внутрь и $H < H_c$. Что невозможно.

3) Произойдет расслоение на N и S области – домены

Промежуточное состояние

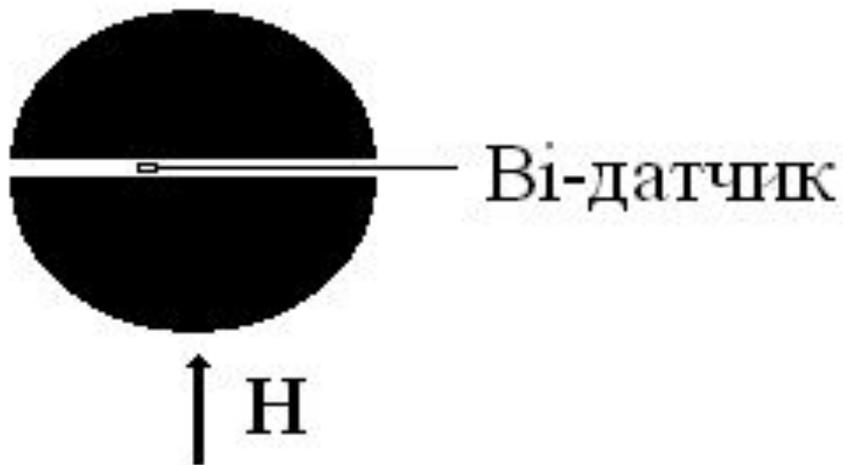
Магнитный поток, проникающий в катушку:



Пунктир – ситуация для цилиндра \parallel полю, когда $n_M = 0$

Прямое наблюдение доменной структуры

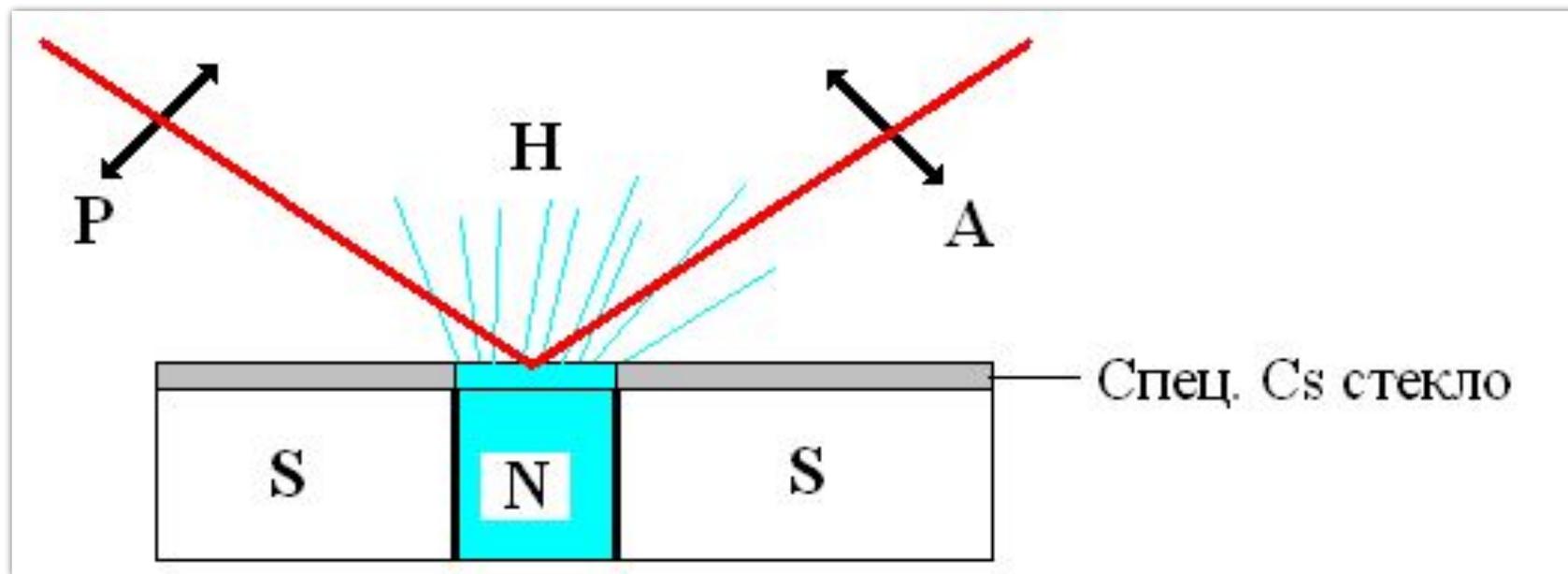
Опыт Шальникова и Мешковского



У V_i очень сильная зависимость $R(H)$.
Проволочка диаметром 30-50 мкм.
В СП области $H=0$, в N-области $H=H_c$

Прямое наблюдение доменной структуры

Эффект Фарадея



Цезиевое стекло вращает плоскость поляризации света в магнитном поле.

P – поляризатор (свет после него линейно поляризован, колебания в одной плоскости), $A \equiv P$ – анализатор