

Магнитные системы плазменных установок

Полосаткин Сергей Викторович, тел.47-73

пятница, 14.10 – 15.45

<http://www.inp.nsk.su/students/plasma/sk/tpe.ru.shtml>

Магнитные системы плазменных установок

Магнитное поле используется для управления движением заряженных частиц

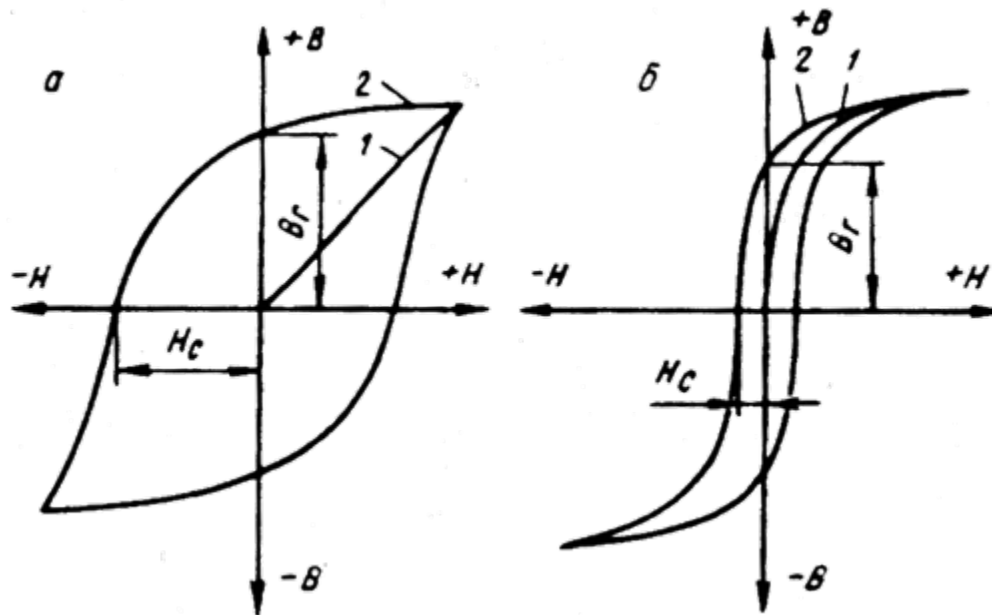
- Удержание плазмы
- Транспортировка пучков

магнитные поля $10^{-5} - 10^3$ Тл

Поле земли	$0,6 \cdot 10^{-4}$ Тл
Постоянные магниты	1,2 Тл
Электромагниты (железо)	2 Тл
Сверхпроводящие магниты	14 Тл
Теплые магниты	30 Тл
Импульсное сжатие	1000 Тл

Электромагниты

Электротехнические стали
 $\mu=3000-8000$, $B_{\text{макс}}=2$ Тл



Электромагниты

Электротехнические стали

$\mu=3000-8000$, $B_{\text{макс}}=2$ Тл

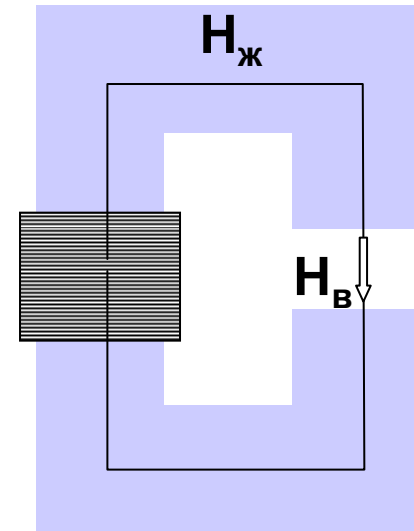
$$N \cdot I = \int H_{\text{жс}} dl + \int H_{\text{в}} dl \quad \text{- Магнитодвижущая сила}$$

$$\oint B dS = 0$$

$$\Phi = B_{\text{жс}} S_{\text{жс}} = B_{\text{в}} S_{\text{в}} \quad \text{- Магнитный поток}$$

$$N \cdot I = \Phi \cdot \left(\frac{l_{\text{жс}}}{\mu_0 \mu \cdot S_{\text{жс}}} + \frac{l_{\text{в}}}{\mu_0 S_{\text{в}}} \right)$$

Магнитное сопротивление



Электромагниты

Электротехнические стали

$\mu=3000-8000$, $B_{\text{макс}}=2$ Тл

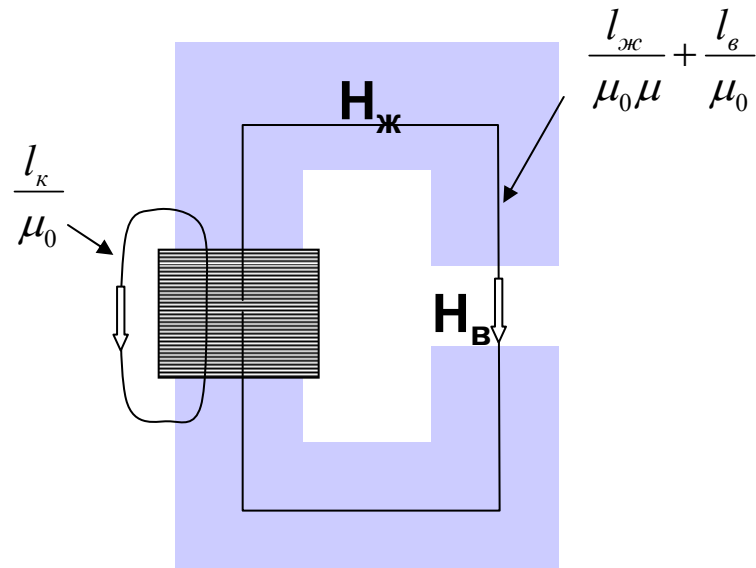
$$N \cdot I = \int H_{\text{жс}} dl + \int H_{\text{в}} dl \quad \text{- Магнитодвижущая сила}$$

$$\oint B dS = 0$$

$$\Phi = B_{\text{жс}} S_{\text{жс}} = B_{\text{в}} S_{\text{в}} \quad \text{- Магнитный поток}$$

$$N \cdot I = \Phi \cdot \left(\frac{l_{\text{жс}}}{\mu_0 \mu \cdot S_{\text{жс}}} + \frac{l_{\text{в}}}{\mu_0 S_{\text{в}}} \right)$$

Магнитное сопротивление



Электромагниты

Электротехнические стали

$\mu=3000-8000$, $B_{\text{макс}}=2$ Тл

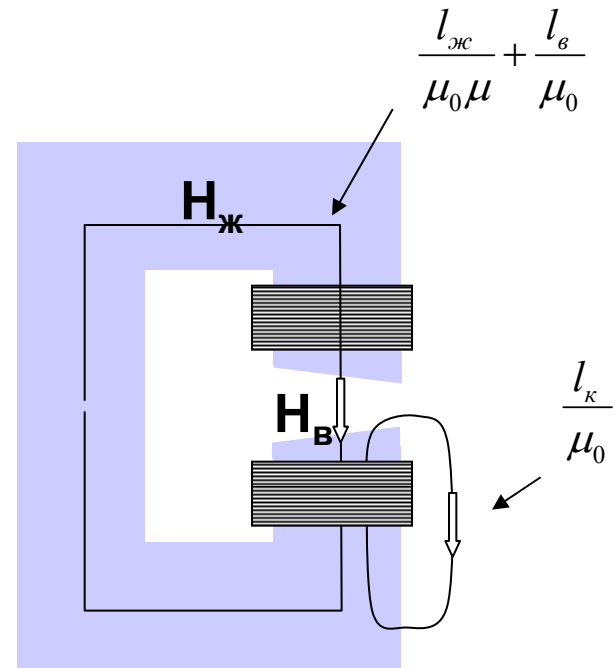
$$N \cdot I = \int H_{\text{жс}} dl + \int H_{\text{в}} dl \quad \text{- Магнитодвижущая сила}$$

$$\oint B dS = 0$$

$$\Phi = B_{\text{жс}} S_{\text{жс}} = B_{\text{в}} S_{\text{в}} \quad \text{- Магнитный поток}$$

$$N \cdot I = \Phi \cdot \left(\frac{l_{\text{жс}}}{\mu_0 \mu \cdot S_{\text{жс}}} + \frac{l_{\text{в}}}{\mu_0 S_{\text{в}}} \right)$$

Магнитное сопротивление

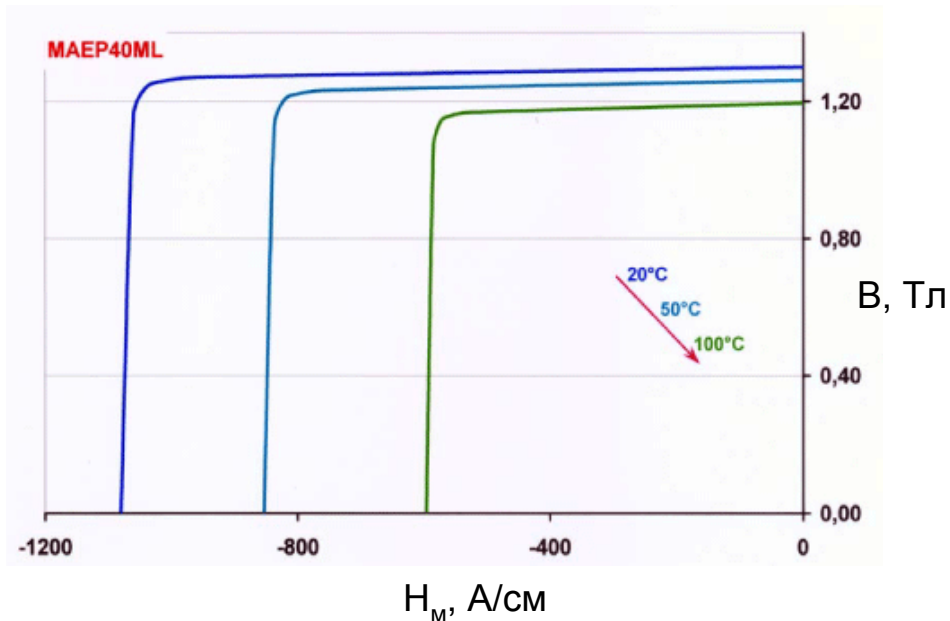


Постоянные магниты

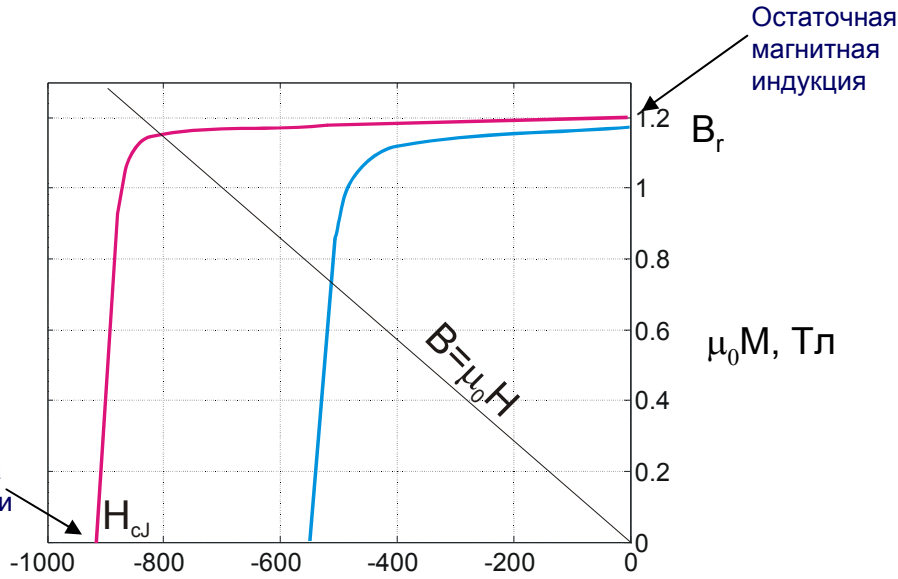
NdFeB – $B_r=1,4$ Тл, $B \cdot H \sim 300$ кДж/м³, $t_{\text{макс}}=120^\circ\text{C}$, $t_{\text{Кюри}}=340^\circ\text{C}$

SmCo – $B_r=1$ Тл, $B \cdot H \sim 300$ кДж/м³, $t_{\text{макс}}=200^\circ\text{C}$, $t_{\text{Кюри}}=800^\circ\text{C}$,
коррозионная стойкость

AlNiCo (ЮНДК35Т5БА) – $B_{\text{макс}}=1$ Тл, $B \cdot H \sim 36$ кДж/м³, $t_{\text{макс}}=250^\circ\text{C}$



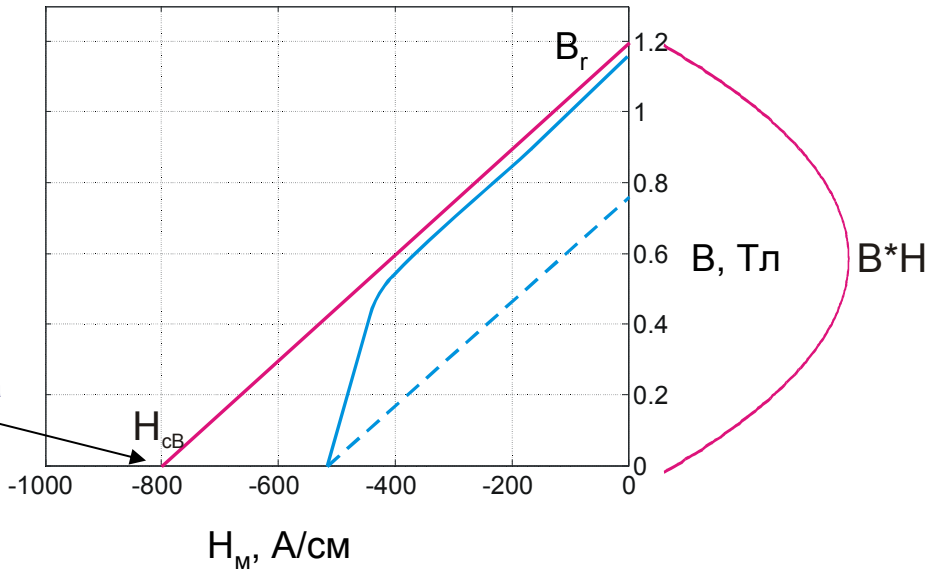
Постоянные магниты



$$B = \mu_0 H + \mu_0 M = \mu_0 (1 + \chi) H$$

Намагниченность

Магнитная восприимчивость



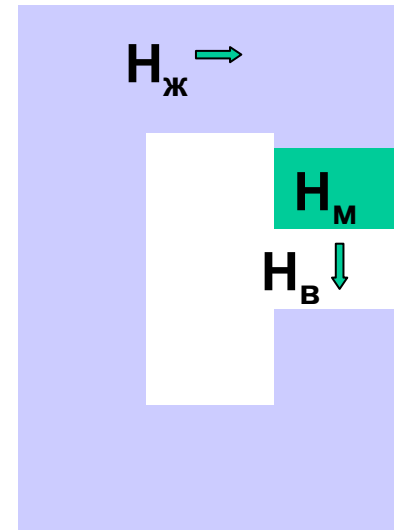
Постоянные магниты

$$-\int H_M dl_M = \int H_{жс} dl_{жс} + \int H_{\epsilon} dl_{\epsilon}$$

$$\oint B dS = 0$$

$$\Phi = B_M S_M = B_{жс} S_{жс} = B_{вак} S_{вак}$$

$$\mu_0 M_r + \frac{B_r}{H_{сВ}} H_M = \mu_0 \mu_{жс} H_{жс} = \mu_0 H_{вак}$$



Классификация NdFeB магнитов



Сверхпроводящие магниты

Nb Ti

$$T_{\text{кр}} = 9.2 \text{ K}$$
$$B_{\text{макс}} = 7.5 \text{ Тл}$$

$$B_{C0}(Tл) = 14.6 \cdot \left[1 - \left(\frac{T}{9.2K} \right)^{1.7} \right]$$

Nb₃Sn

$$T_{\text{кр}} = 18.3 \text{ K}$$
$$B_{\text{макс}} = 13.5 \text{ Тл (1.8 K)}$$

Хрупкий – деформация меньше 0.5%

Необходим отжиг 300 часов в инертных газах при T=700 C

MgB₂ (открыт в 2001 году)

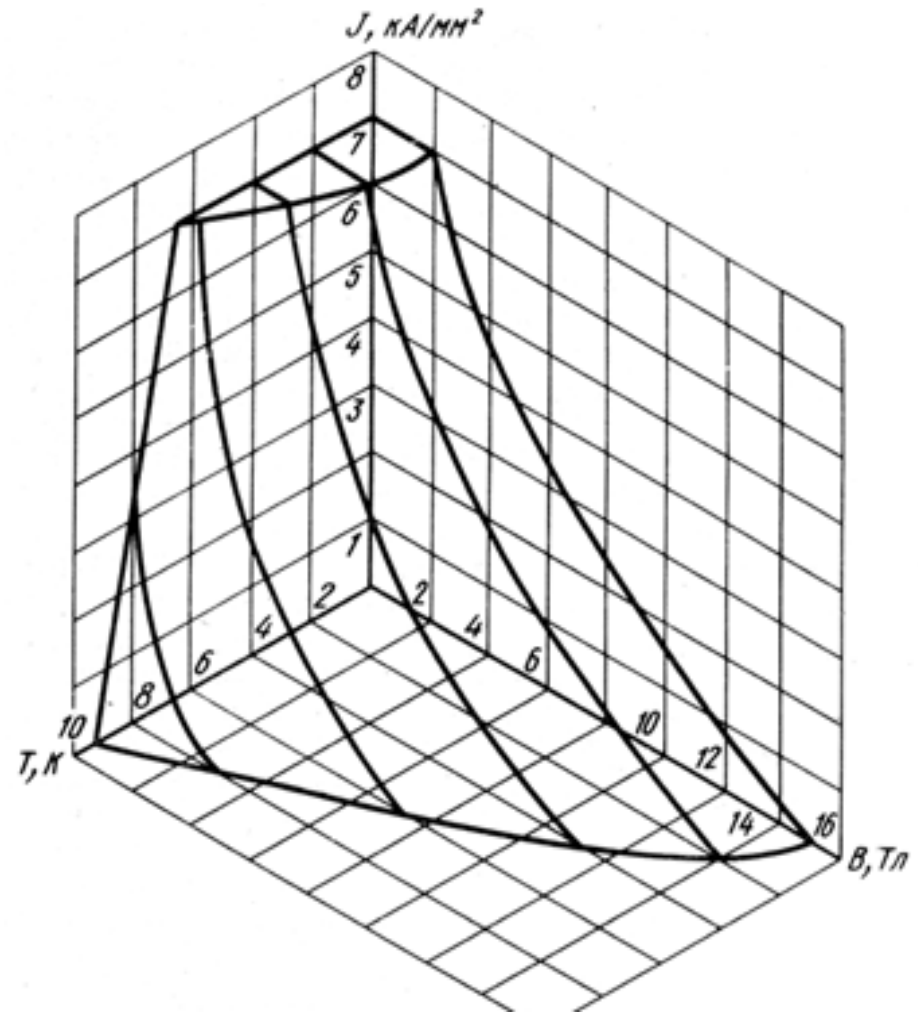
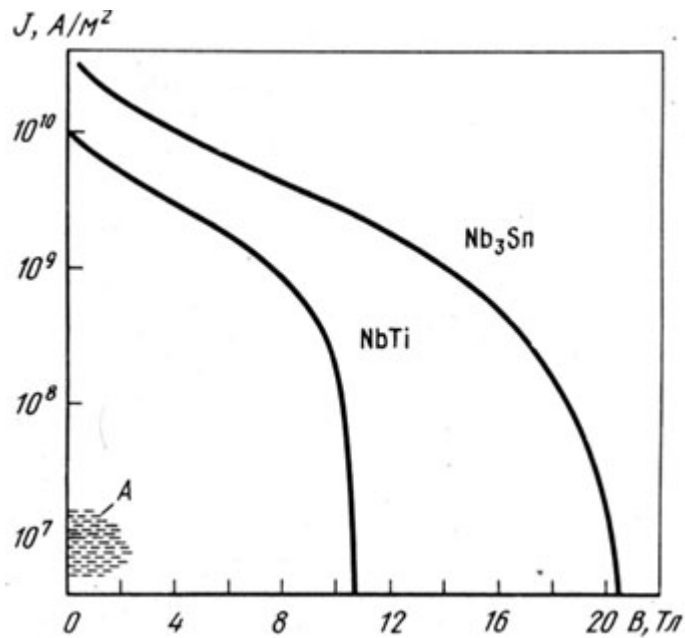
$$T_{\text{кр}} = 40 \text{ K}$$
$$B = 2 \text{ Тл (20 K)}$$

Сверхпроводящие магниты

Ограничения – плотность тока, максимальное поле

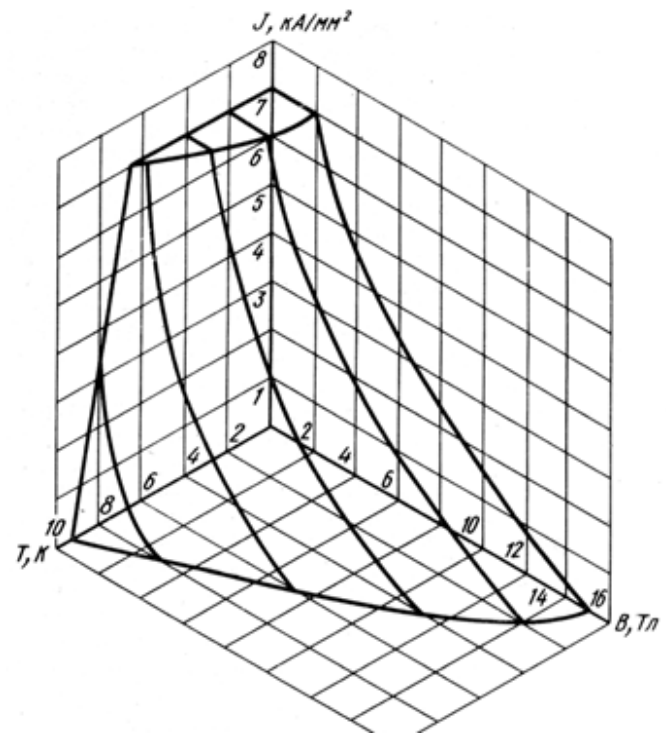
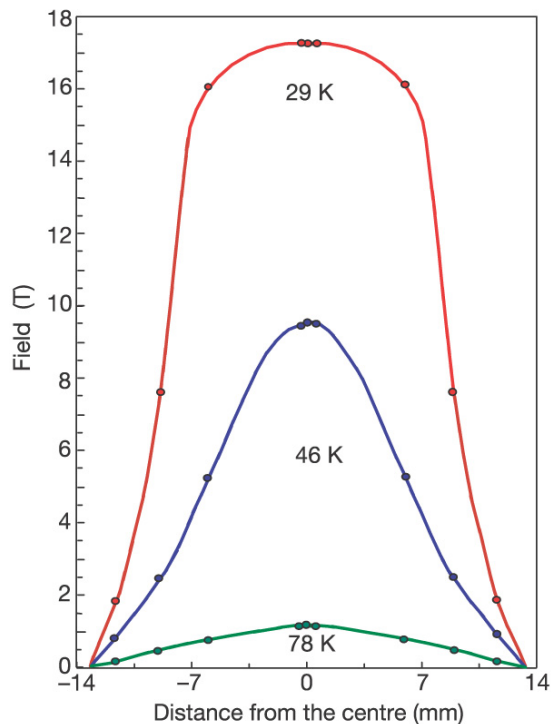
Макс. поле – определяется хим.структурой

Плотность тока – зависит от технологии производства



Постоянные сверхпроводящие магниты

YBCO (Yt-Ba-Cu-O) – керамика
“Захваченное” поле до 17 Тл при 29 К



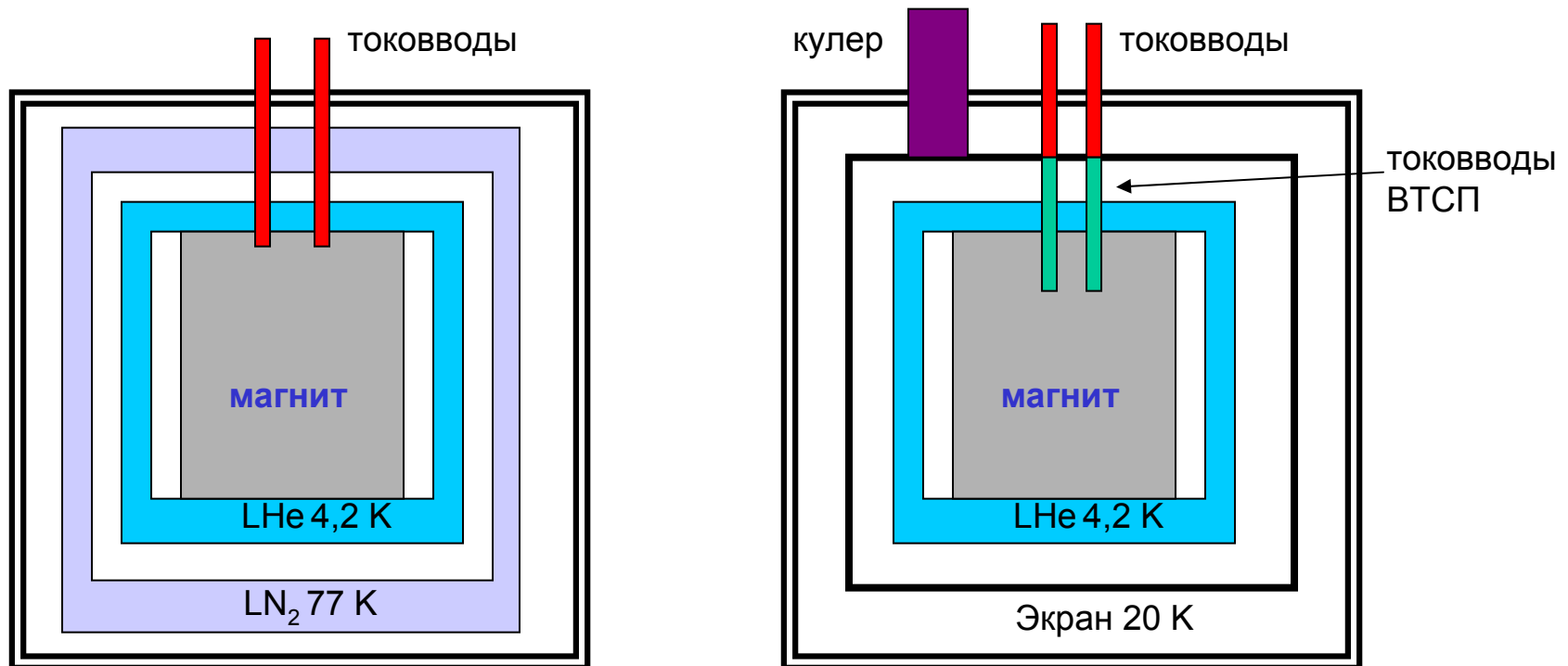
Masaru Tomita and Masato Murakami

High-temperature superconductor bulk magnets that can trap magnetic fields of over 17 tesla at 29 K
Nature 421, 517-520(30 January 2003)

Сверхпроводящие магниты

Уменьшение потока тепла в криостат (1 Вт – 1,4 литра гелия / час)

- Тепловые экраны (тепловой поток $\sim \sigma T^4$)
- Высокотемпературные сверхпроводящие вводы
- Охлаждение внутри криостата



Теплые магниты

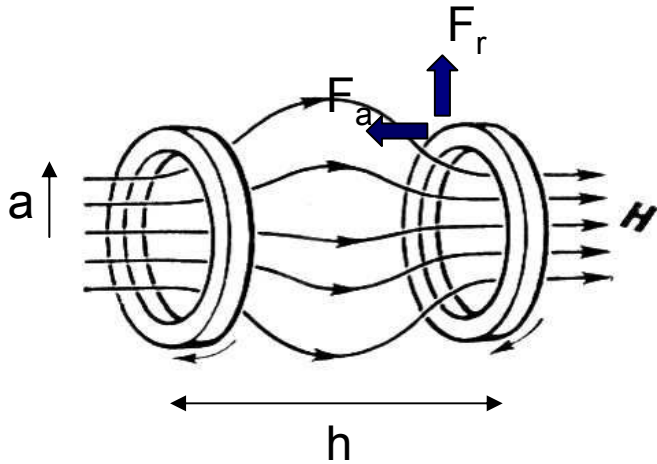
Для получения полей выше 15 Тл нужно использовать теплые или комбинированные магниты

Основная проблема – механическая прочность

$$P = \frac{B^2}{2\mu_0}$$

Медь $\sigma_{\text{тек}} = 30 \text{ кг/мм}^2$ – $B_{\text{мах}} = 30 \text{ Тл}$

Механическая прочность



$$F_a = P_m S k (h/2a) \quad S = \pi a^2$$

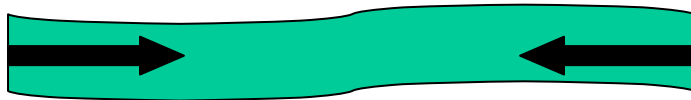
для $h/2a = 1-100$ $k = 0.5-1.5$

ГОЛ-3 $a = 8\text{ см}$ $H = 10\text{ Тл}$ $P_m = 400\text{ кг/см}^2$

$$S = 200\text{ см}^2$$

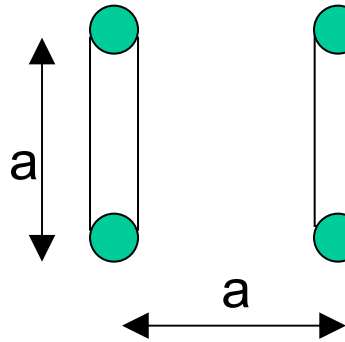
$$F = 80\text{ Тонн (!)}$$

Проблема механической устойчивости



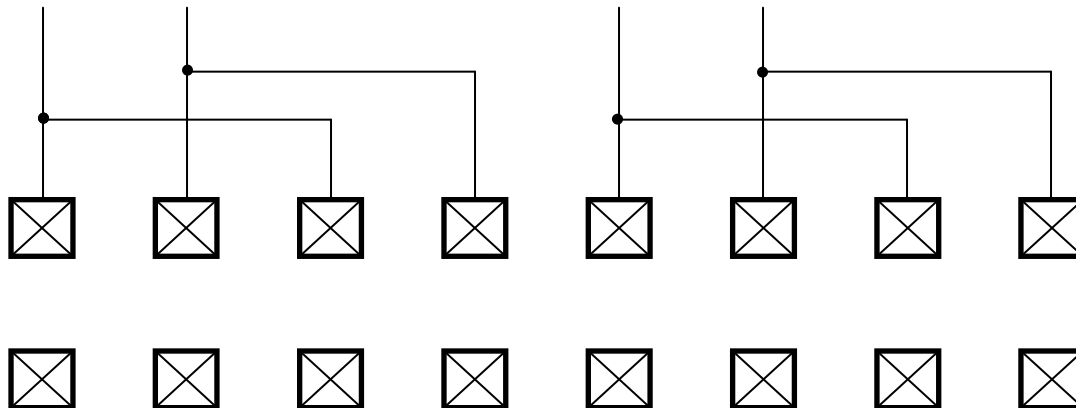
Секционированный соленоид

Катушки Гельмгольца



Однородность при $r < a/2$ 2-5%

$$H_z(0) = 0.7 I/a$$

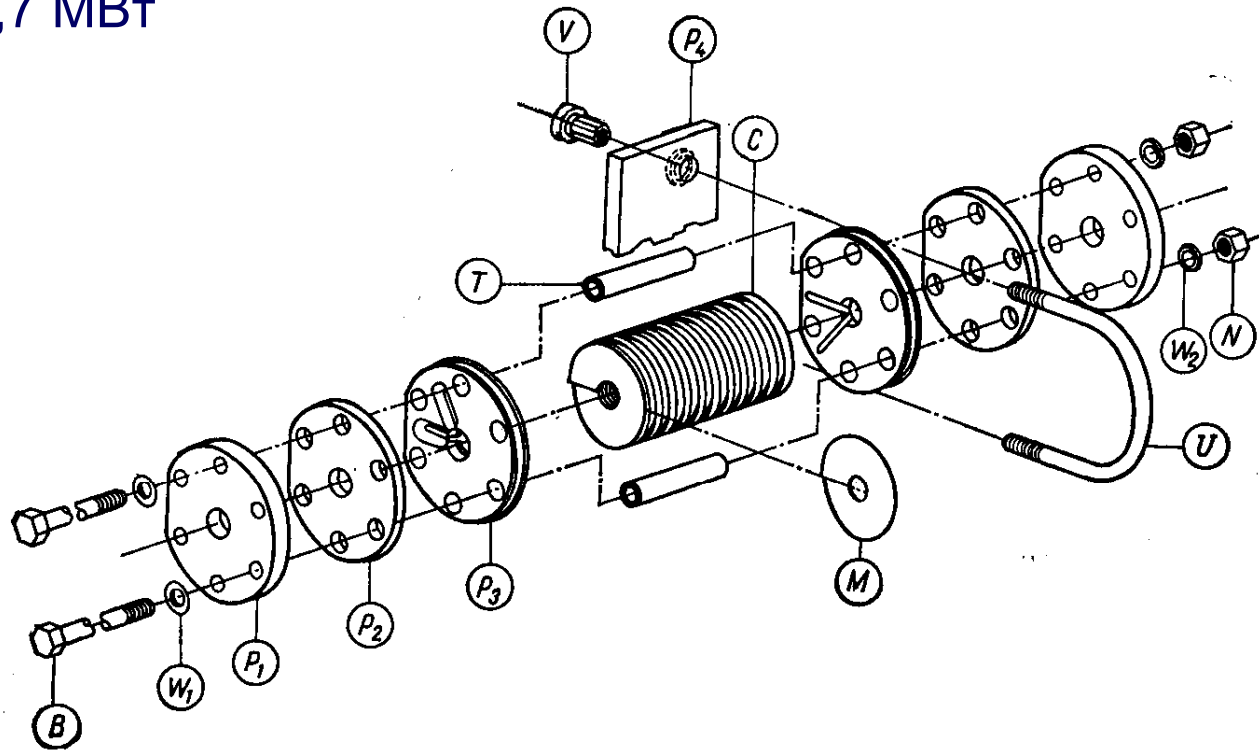


Диски Биттера

Вложенные спирали – до 100 Тл

Постоянный режим – 35 Тл

10 Тл – 1,7 МВт



Ф и г. 7.4. Спиральный соленоид типа Фонера в разобранном виде [7.9].

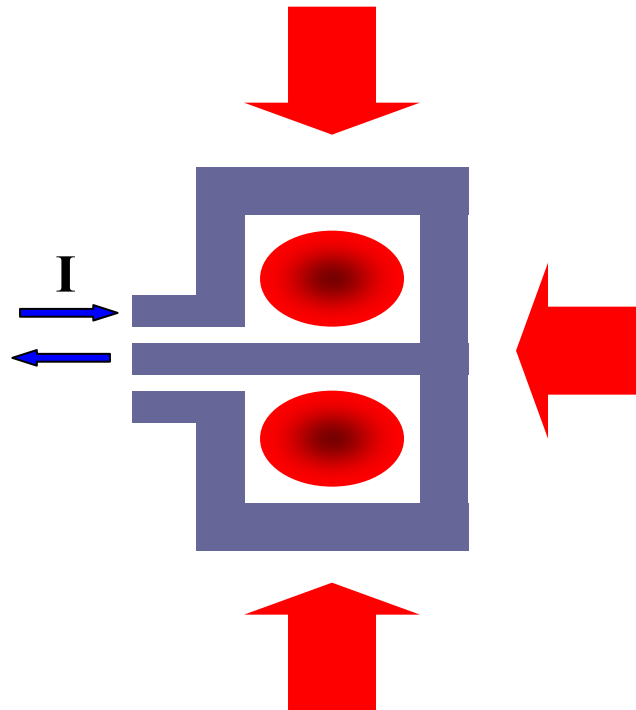
Каждый из концов спирали C припаивается к электродной пластине P_3 , которая прижимается U -образным болтом к шине P_4 для обеспечения электрического контакта; механическая жесткость системы также обеспечивается изоляционными пластинами P_2 и торцевыми пластинами из нержавеющей стали P_1 .

Импульсное сжатие

Сжатие взрывом – до 2800 Тл

Проект МАГО (Арзамас-16)

10^{18}см^{-3} , 300 эВ, 10 Тл - 10^{20}см^{-3} , 10 кэВ, 100 Тл



Расчеты магнитных полей

Закон Био-Савара

$$dB = \frac{\mu_0}{4\pi} \frac{[I \cdot dl]}{r^2}$$

2 D – SAM, Mermaid – ИЯФ СО РАН

POISSON, FEMLAB

Бесконечно много доступных программ

.....

3D – FEMLAB, TOSKA, ANSYS, MASTAK

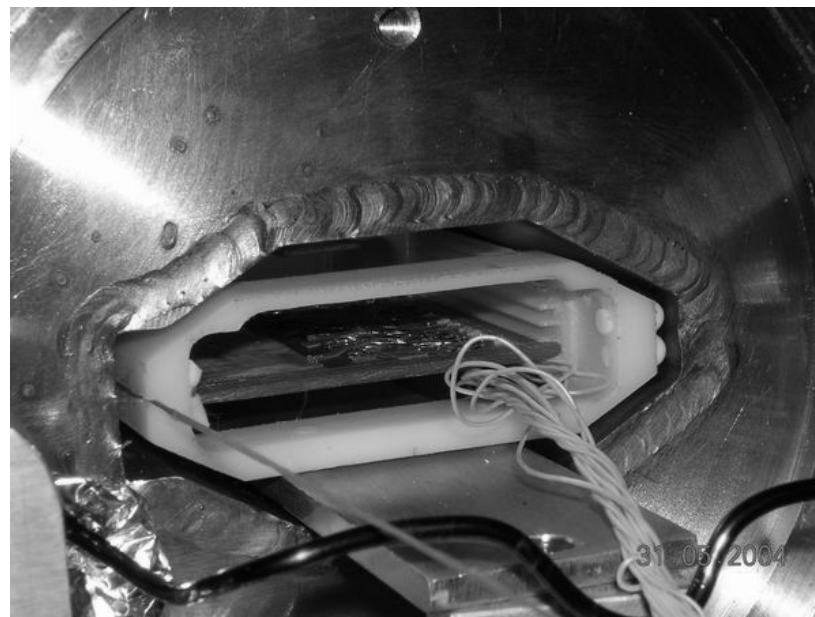
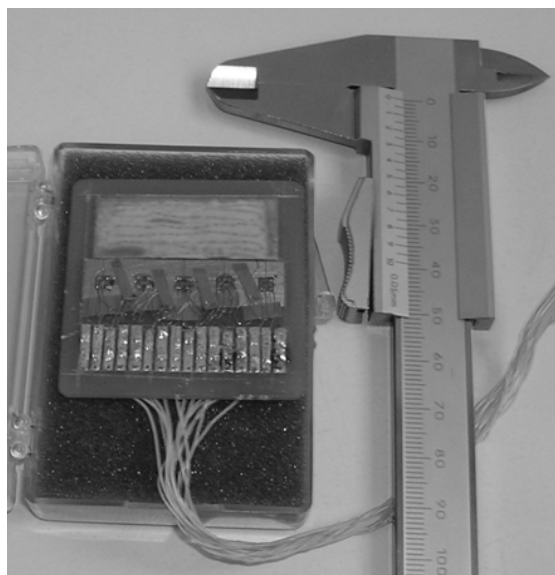
Измерение магнитных полей

Индукционная катушка – импульсные поля

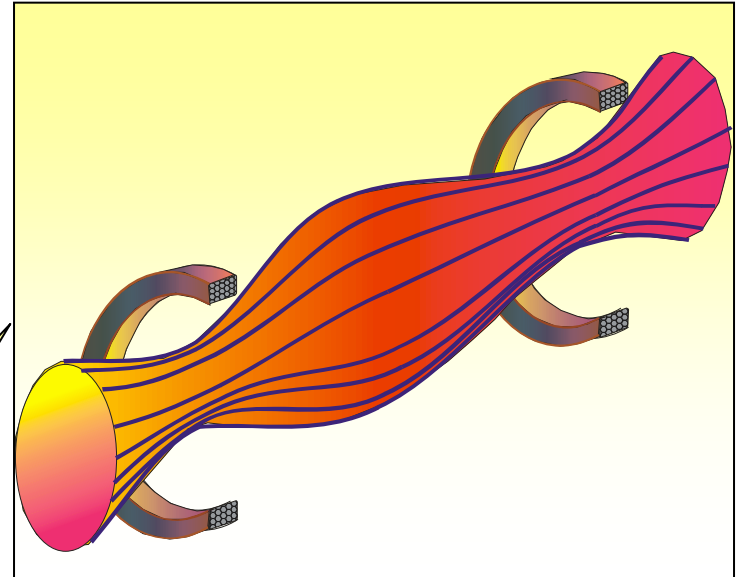
Вращающаяся рамка

Датчики Холла

Ядерный магнитный резонанс

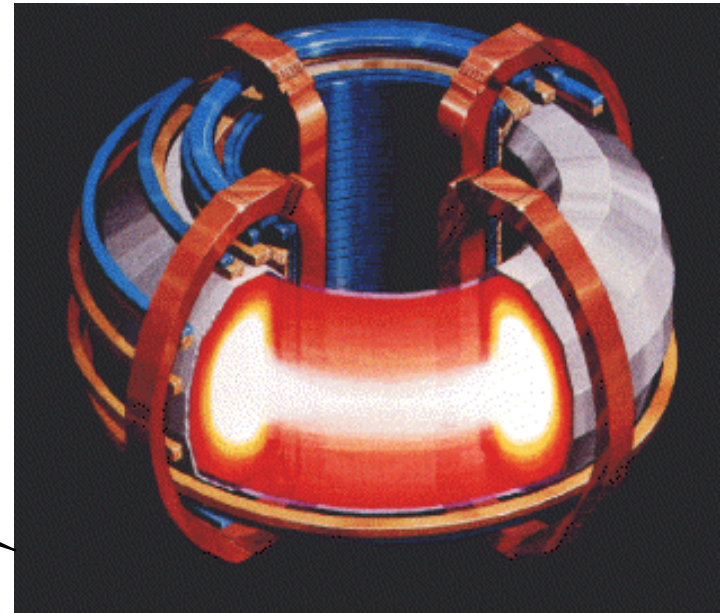


Магнитные системы термоядерных установок



Открытые ловушки

Замкнутые ловушки



Свойства плазмы в магнитном поле

Плазма - диамагнетик

$$-\Delta B = \mu_0 \frac{nT}{B}$$

$$\frac{B_{нар}^2}{2\mu_0} = nT + \frac{B_{вн}^2}{2\mu_0}$$

Магнитные системы термоядерных установок

Открытые ловушки

Пробкотрон

Будкер, Пост, 1953г.



Плазма, как диамагнетик,
выталкивается из сильного поля.

Или:

частицы плазмы отражаются от
магнитных пробок.

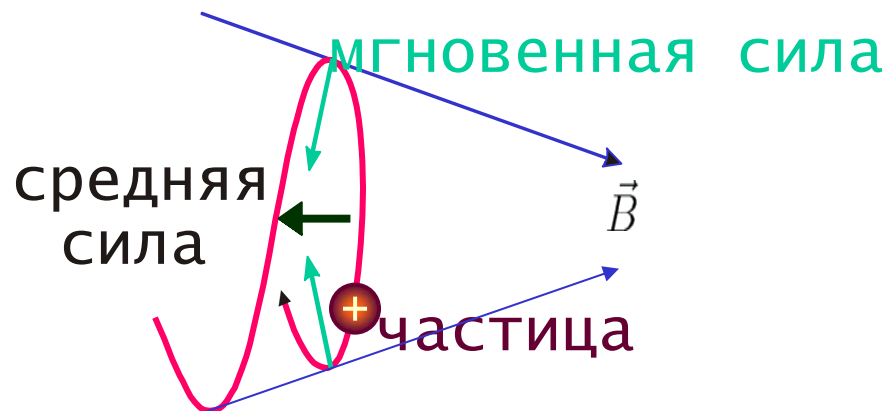
В результате в пробкотроне удерживаются частицы (плазма).

Но:

существует поток незапертых (пролетных) частиц сквозь пробку

Условие удержания:

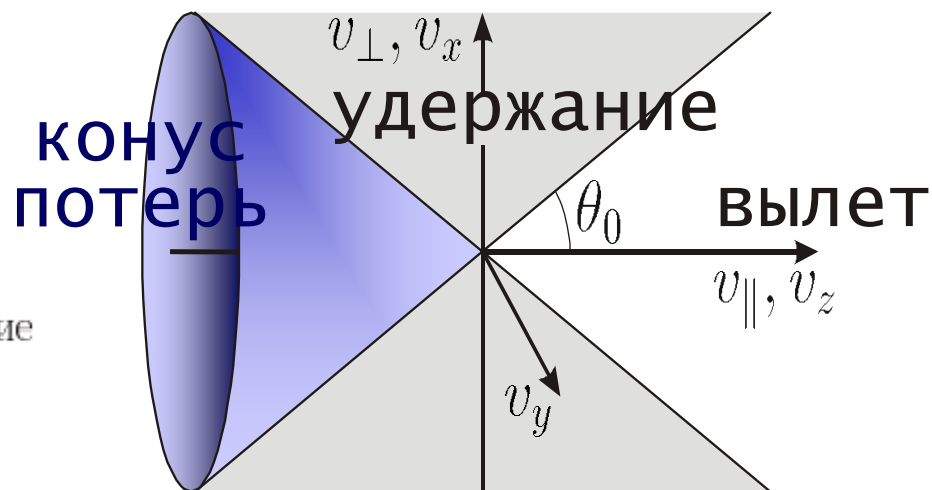
$$\frac{v_{\perp}^2}{v^2} > \frac{B}{B_{max}}$$



В точке минимума поля:

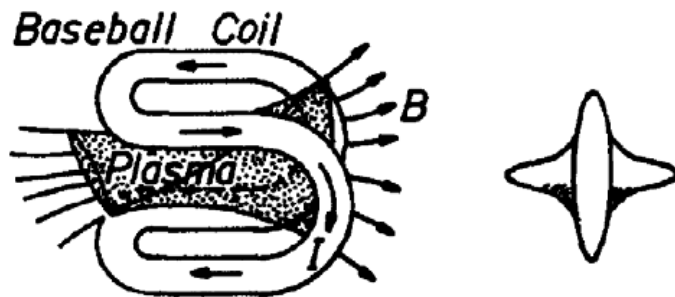
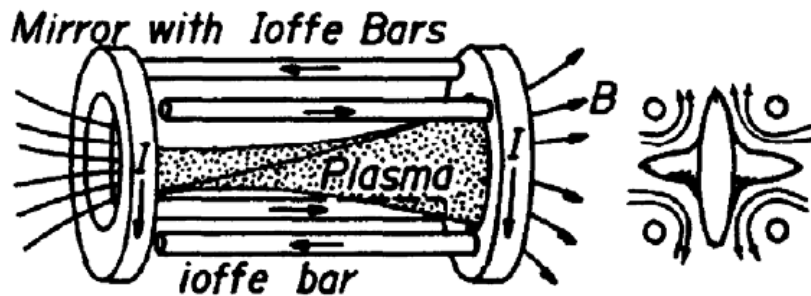
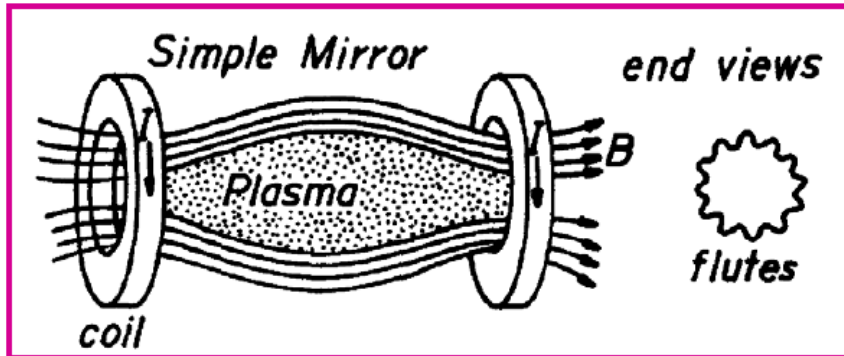
$$\sin \theta_0 = \frac{v_{\perp}}{v} = \sqrt{\frac{B_{min}}{B_{max}}}$$

$$R \stackrel{\text{def}}{=} B_{max}/B_{min} \quad \text{— пробочное отношение}$$



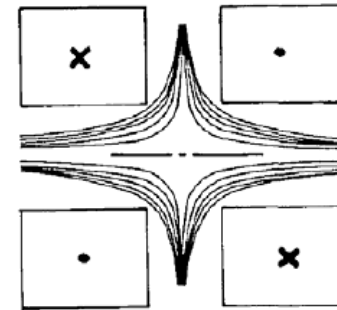
Простейшие конфигурации с $\min B$

пробкотрон (неустойчив)



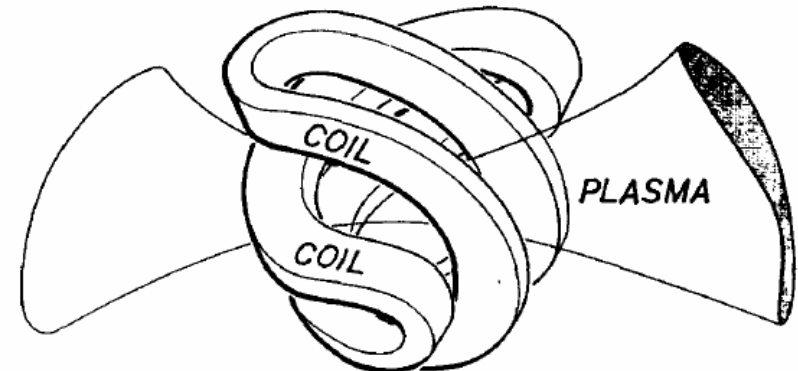
«палки Иоффе» и ловушка-бейсбол

касп (антипробкотрон)



в такой системе нет сохранения
адиабатического инварианта –
магнитного момента

КАТУШКИ ИНЬ-ЯНЬ

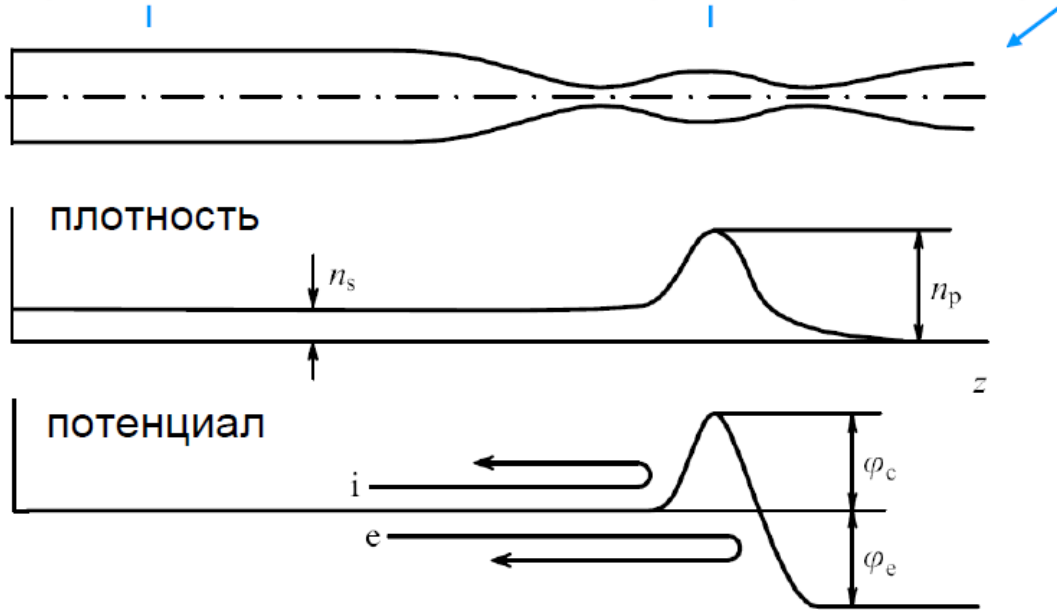


Амбиполярная ловушка

Г.И.Димов, 1975

исходная идея

центральный соленоид концевой пробкотрон расширитель



$$e\varphi_c = kT_e \ln \frac{n_p}{n_s}$$

$$e\varphi_c \gg kT_e$$

время продольного удержания плазмы
в центральном соленоиде

$$\tau_{||} \sim \tau_i \frac{e\varphi_c}{kT_i} \exp \frac{e\varphi_c}{kT_i}$$

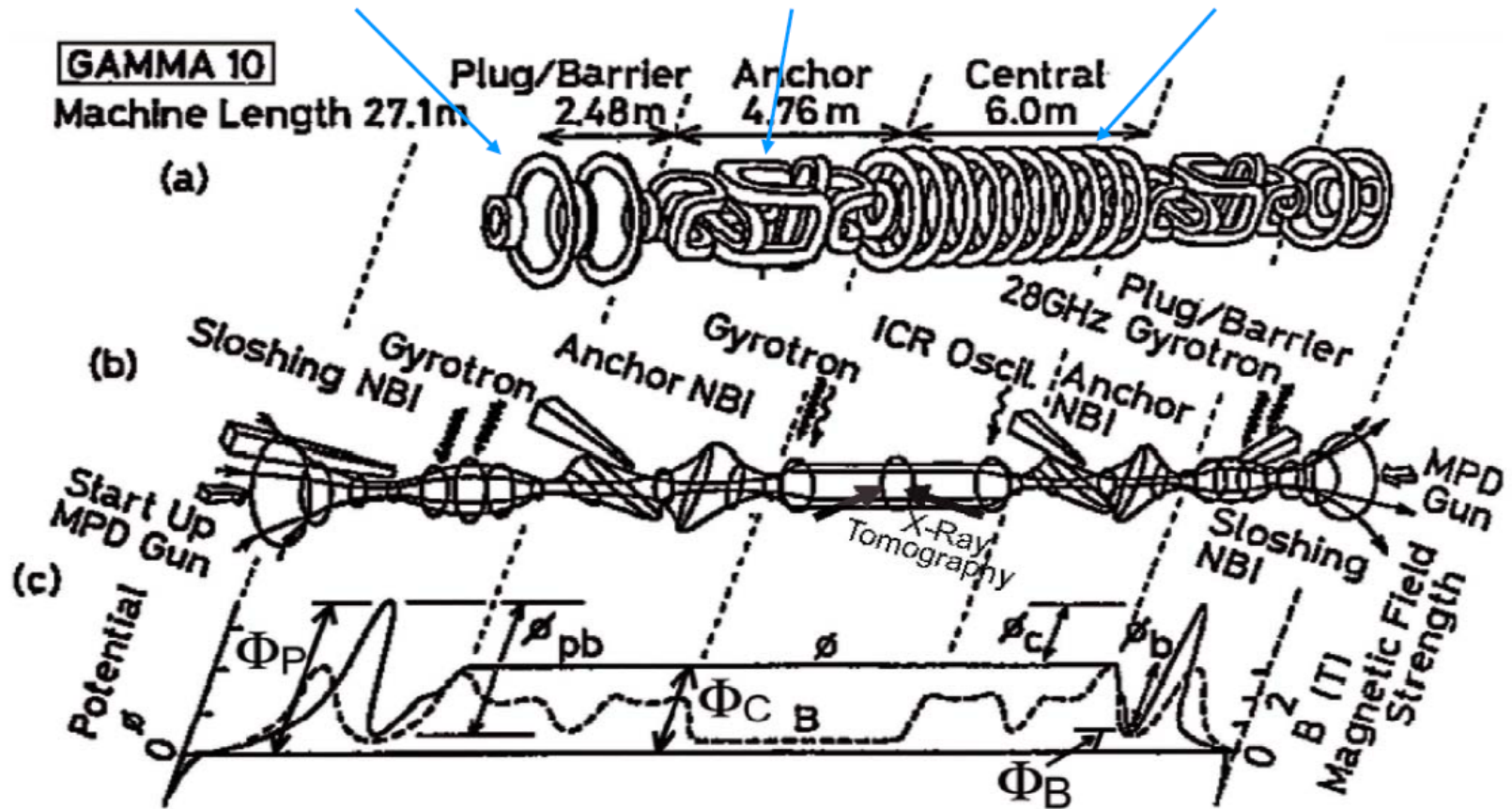
требуются дополнительные меры МГД-стабилизации

Установка ГАММА-10 (Цукуба, Япония)

концевой пробкотрон

МГД-стабилизаторы

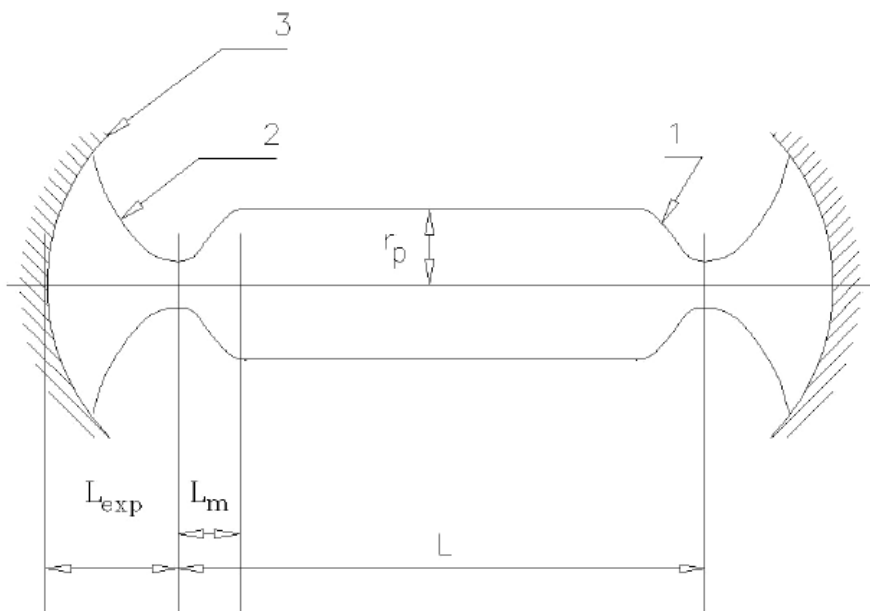
центральный соленоид



крупнейшая действующая амбиполярная ловушка
дополнительные системы для стабилизации плазмы
недостаток: нет аксиальной симметрии магнитного поля
(большие неокласические потери)

Газодинамическая ловушка

Д.Д.Рютов, В.В.Мирнов, 1979

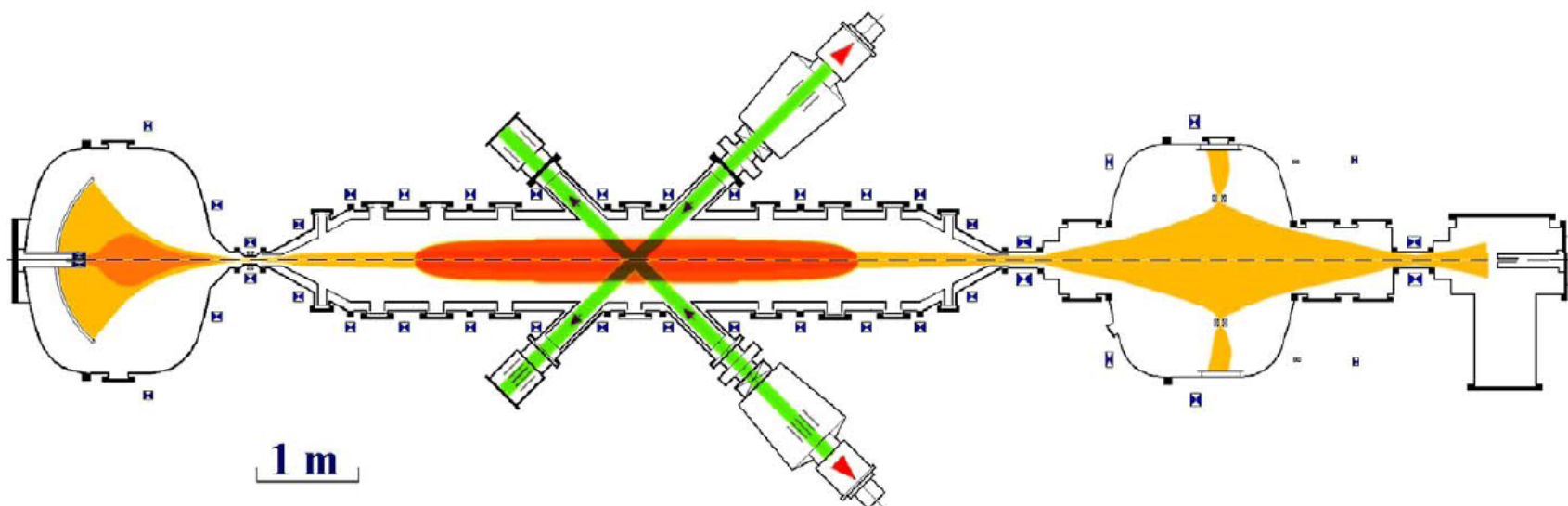


1 – силовые линии магнитного поля,
2 – расширитель,
3 – торцевая стенка (поглотитель плазмы).

$$L \gg \lambda_{ij} \ln(R)/R, \quad R \gg l$$

Пробочное отношение предполагается большим, а плазма в соленоиде достаточно плотной, так что длина свободного пробега иона по отношению к рассеянию в конус потерь меньше длины ловушки. Плазма, удерживаемая в центральном соленоиде газодинамической ловушки, столкновительная и имеет максвелловское изотропное распределение частиц по скоростям везде, кроме небольшой области в непосредственной близости от пробок. Это обстоятельство делает невозможным развитие кинетических неустойчивостей, характерных для классических пробкотронов. МГД-стабилизация происходит за счёт специального профиля магнитного поля в расширителе.

Установка ГДЛ (ИЯФ, Новосибирск)



Газодинамическая ловушка: $L \gg \lambda_i/R$

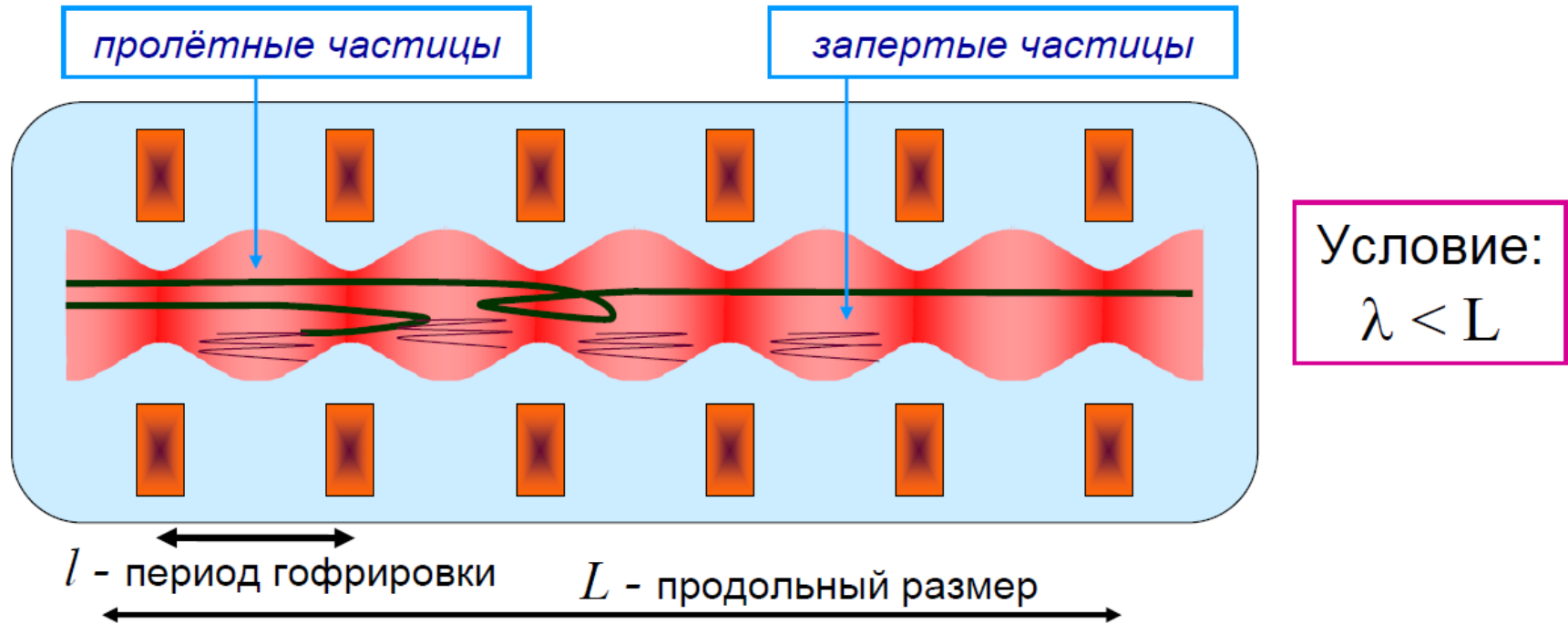
(длина установки много больше длины рассеяния на угол θ_0):

$$\tau \sim RL/2V_s.$$

Многопробочная ловушка

Г.И.Будкер, В.В.Мирнов, Д.Д.Рютов, 1971

Принцип действия

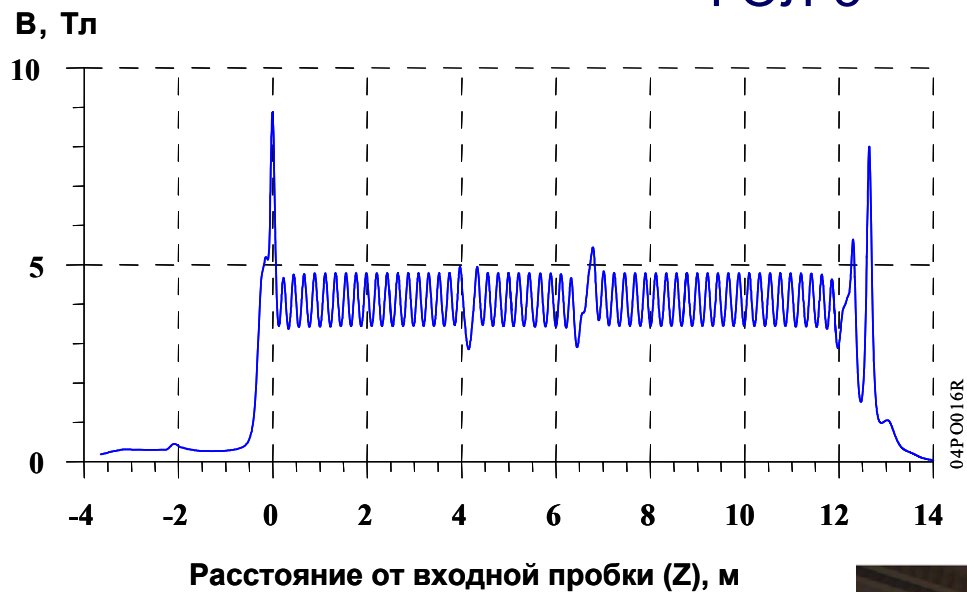


Без гофрировки скорость расширения плазмы - V
В гофрированном поле появляется сила трения между
пролетными и запертыми частицами.
Свободный разлет плазмы сменяется диффузией:

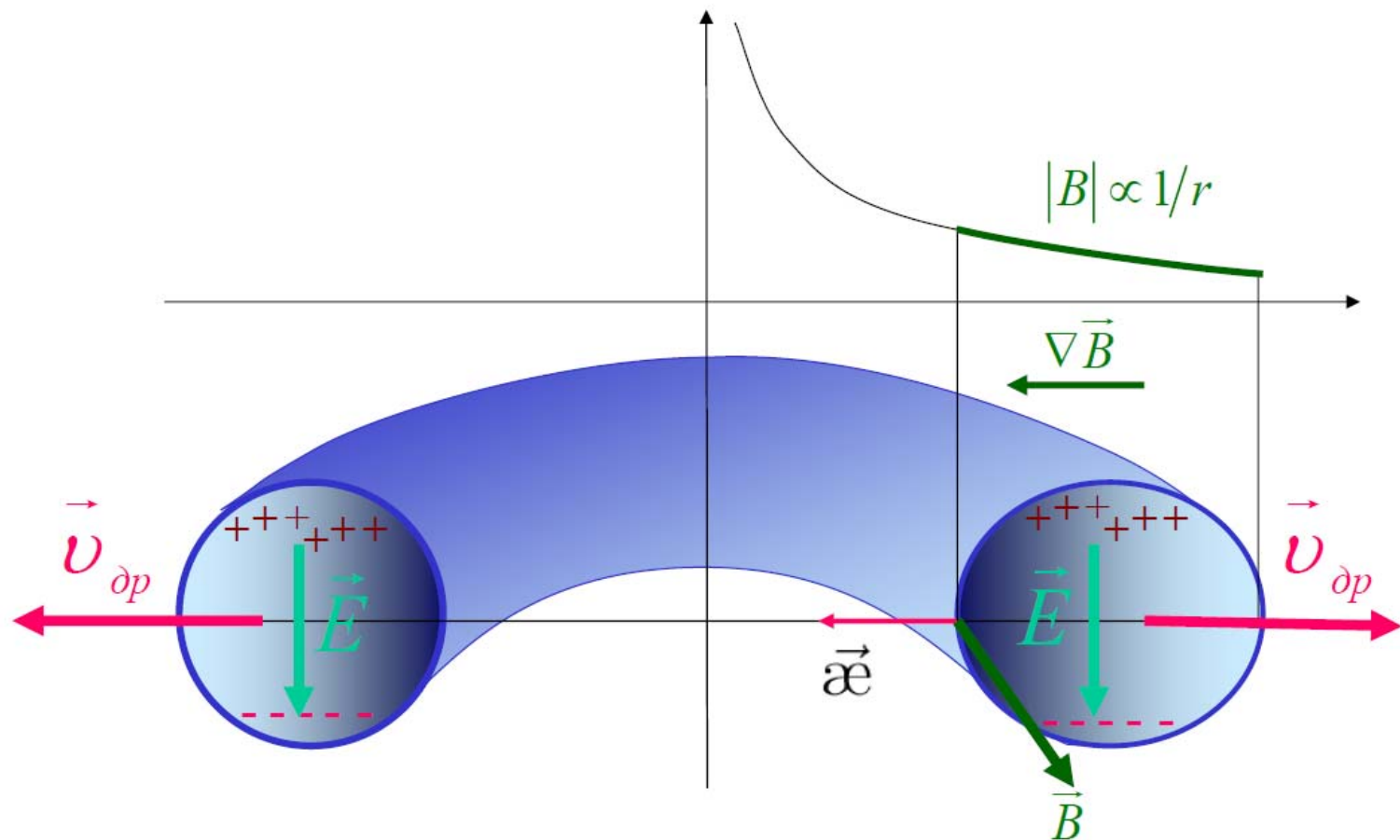
$$V_{пл} \sim V \cdot (l/L) \ll V$$

Магнитные системы термоядерных установок

ГОЛ-3



Тороидальные магнитные системы



Электроны и ионы дрейфуют в разные стороны

⇒ поляризация плазмы ⇒ дрейф в скрещенных полях наружу

⇒ в простом тороидальном поле плазму удержать нельзя !

Борьба с дрейфом плазмы наружу

Способ борьбы:

введение полоидального магнитного поля, при этом силовая линия “наматывается” на тороидальную поверхность и дрейфовые движения в целом компенсируются

Два подхода к получению полоидального поля:

- создается током, текущим по плазме (**токамак**)
- создается внешними обмотками (**стелларатор**)

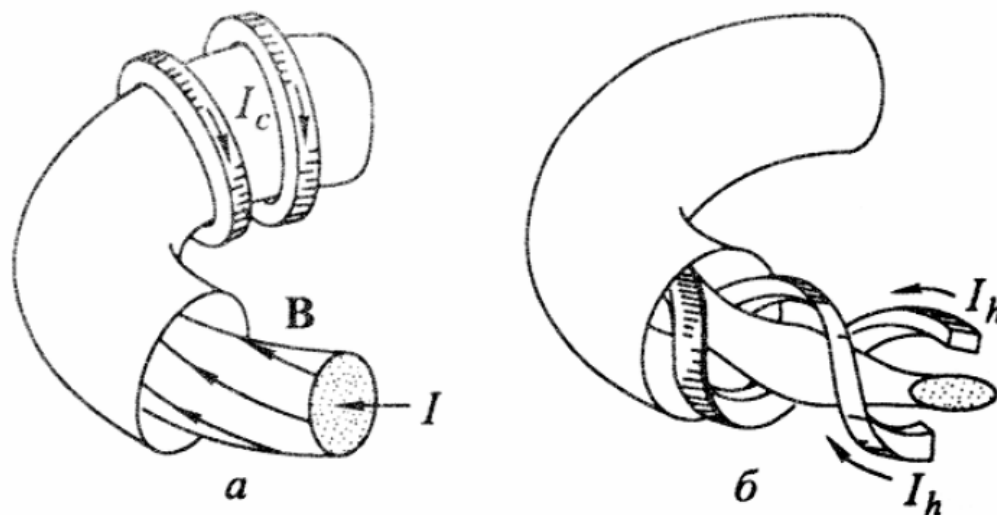
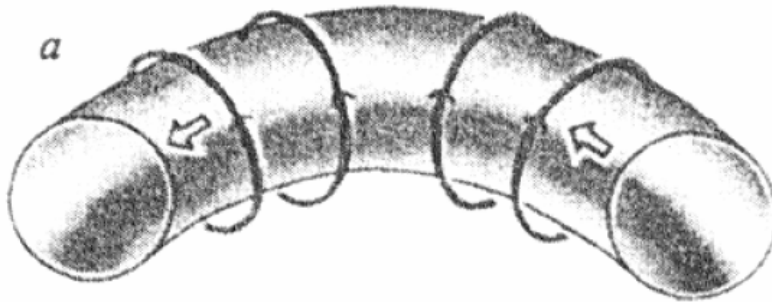
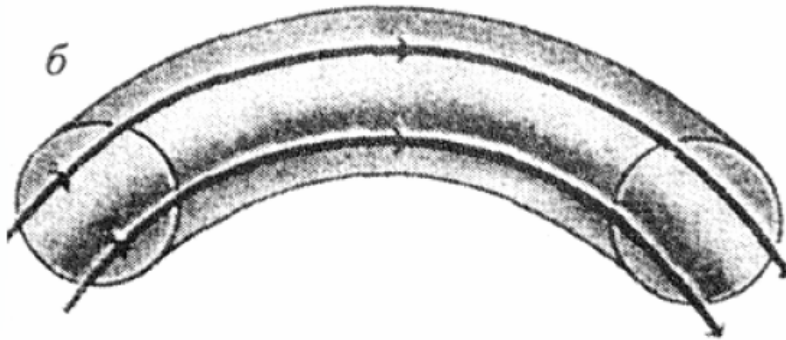


Рис. 1. Замкнутые магнитные ловушки: *a* — токамак; *б* — стелларатор-торсатрон. Короткие стрелки показывают направление токов: I_c — в витках тороидального поля; I_h — в винтовых витках; I — в плазме токамака

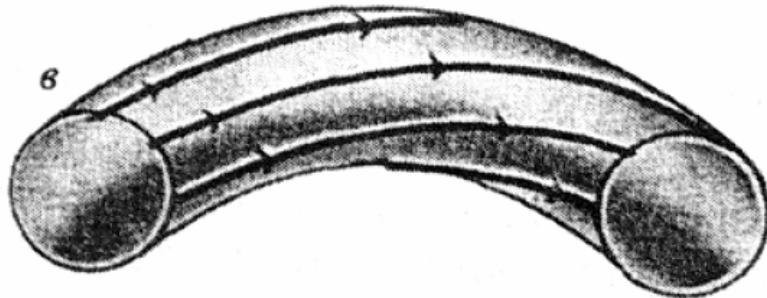
Магнитное поле токамака



Поле плазменного тока
(полоидальное)



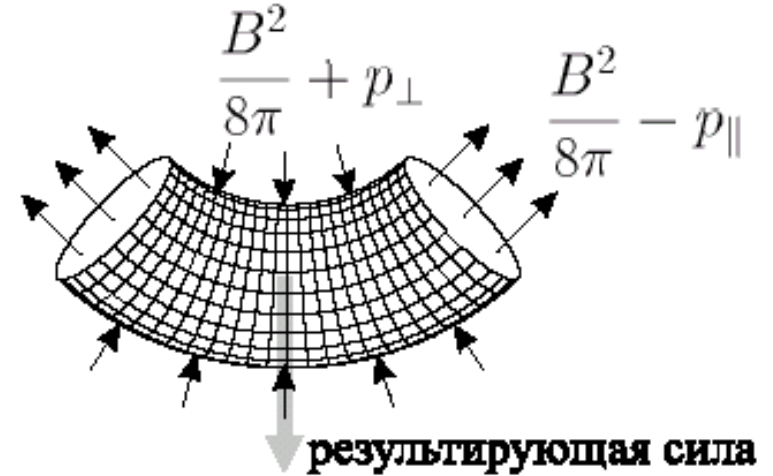
Поле соленоида
(тороидальное)



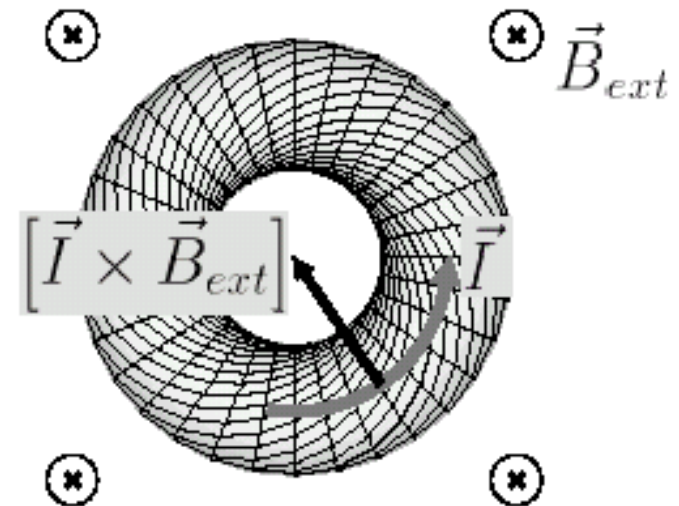
Суммарное поле

Магнитное поле токамака

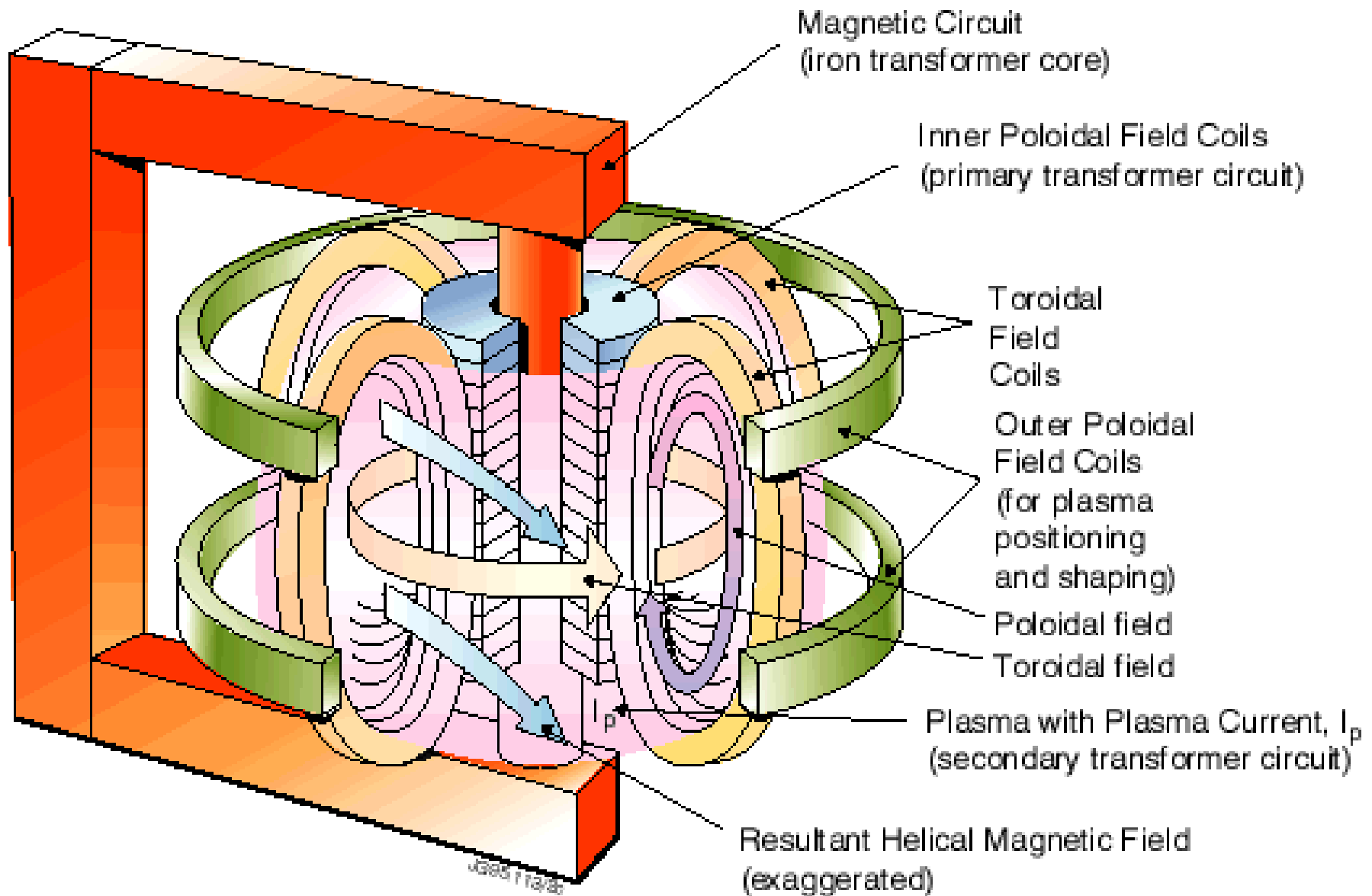
Ток сам по себе не обеспечивает равновесия плазмы:



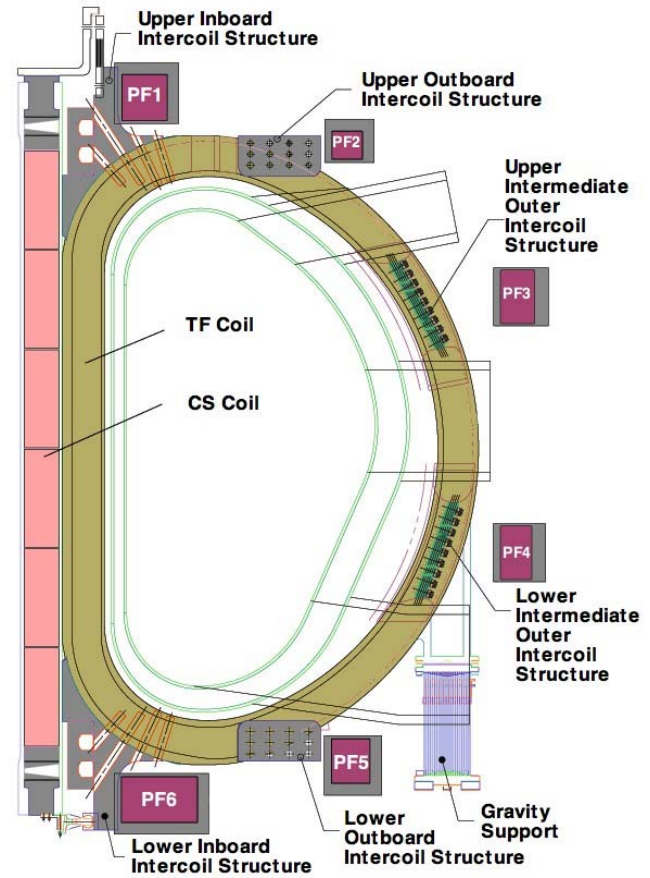
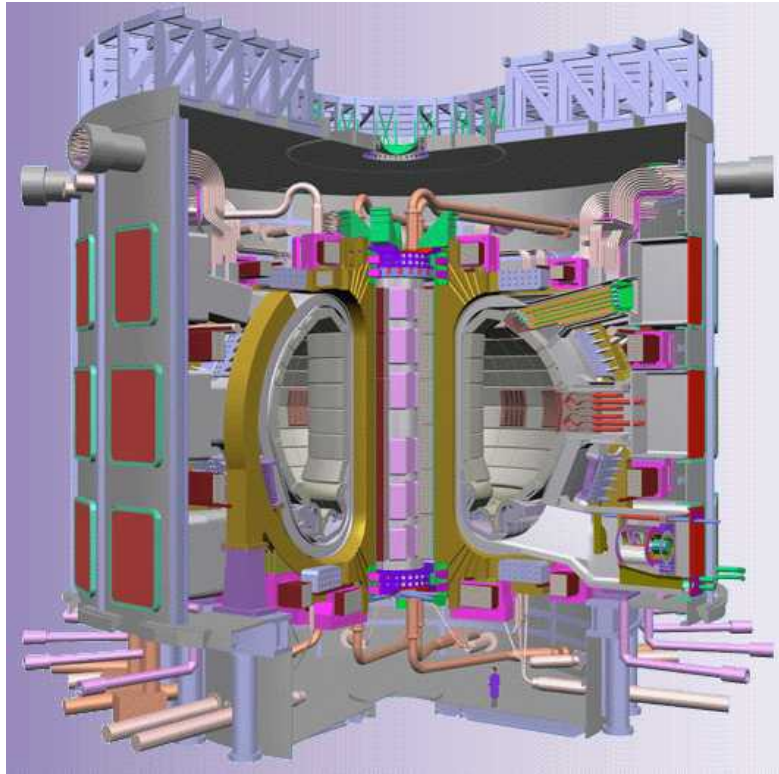
Нужно дополнительное магнитное поле:



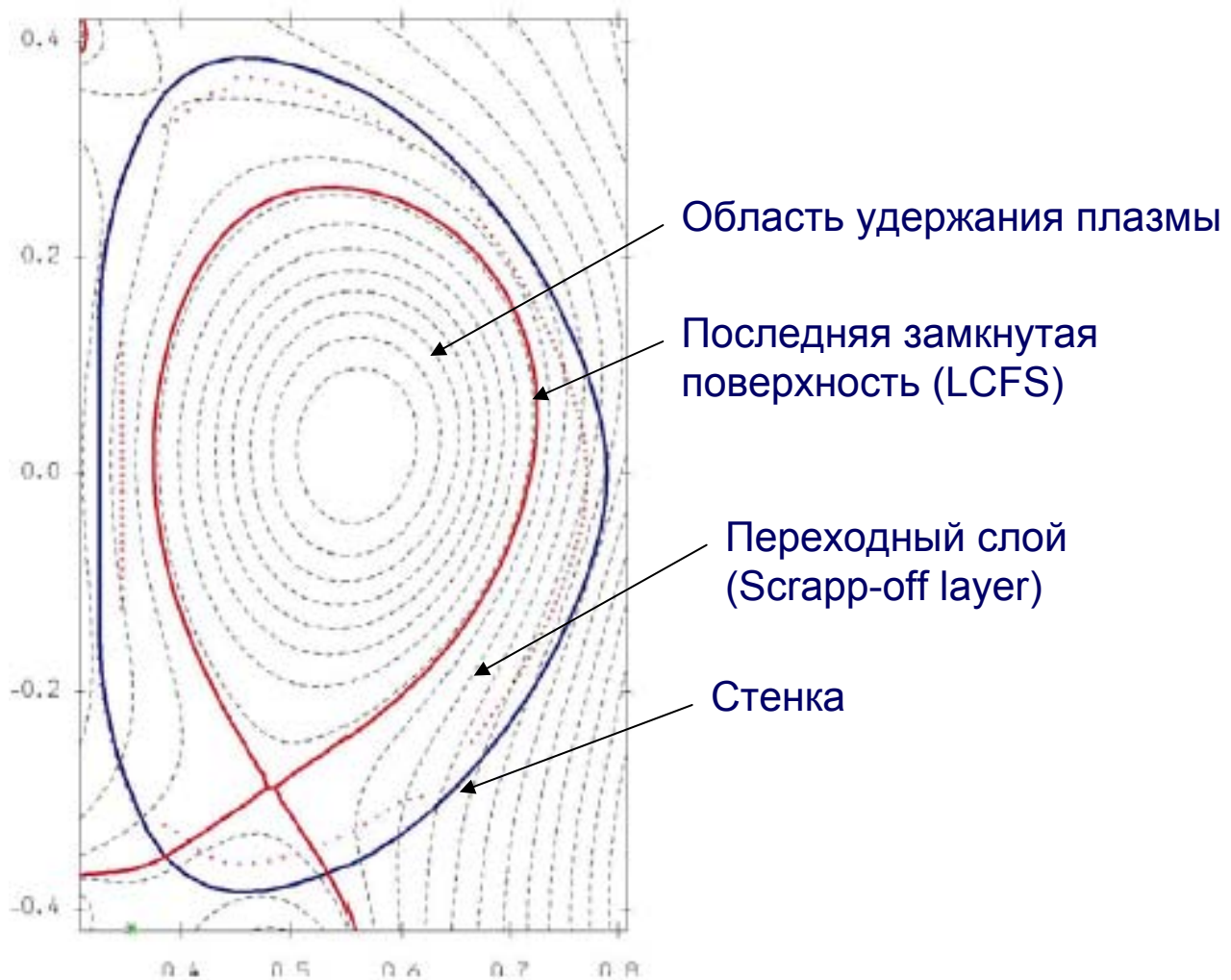
Магнитное поле токамака



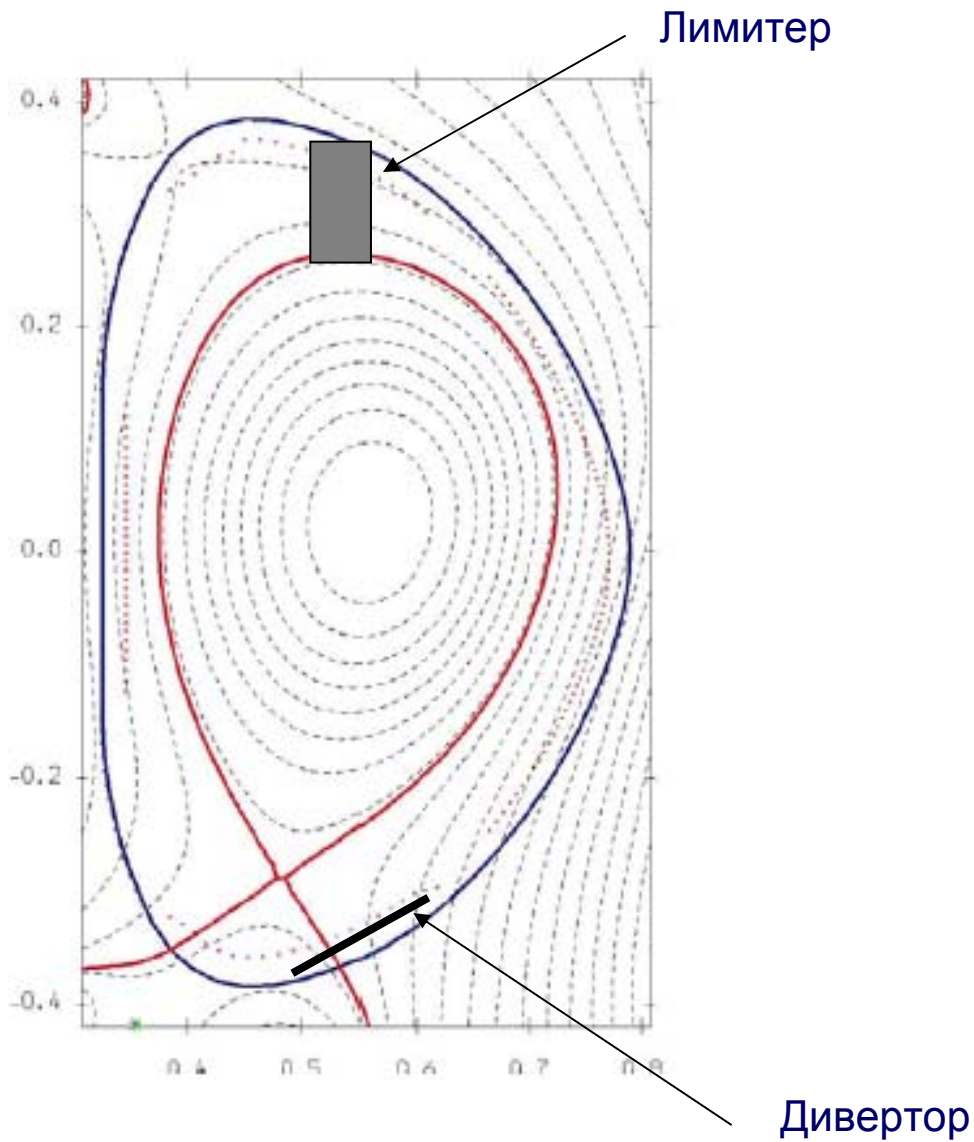
Токамак ИТЕР



Вложенные магнитные поверхности



Вложенные магнитные поверхности



Стеллараторы

Спитцер, 1951 г.

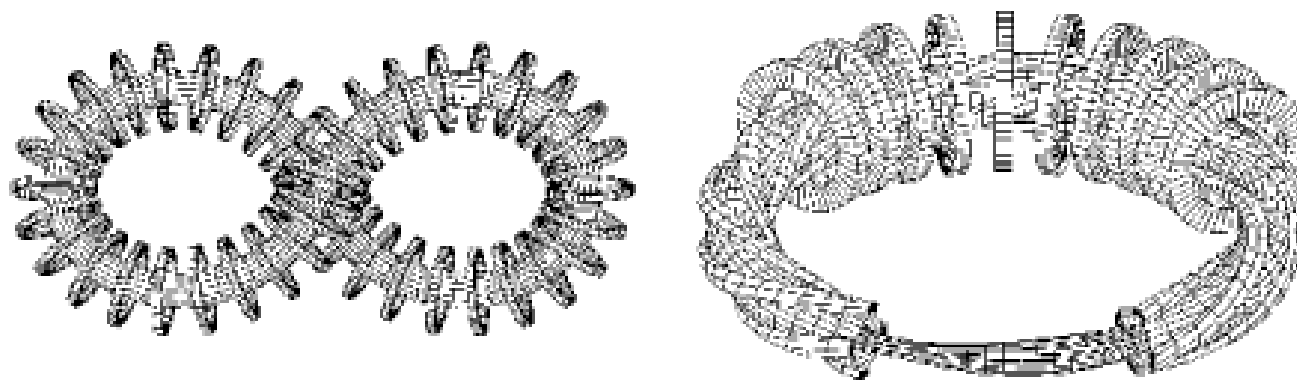
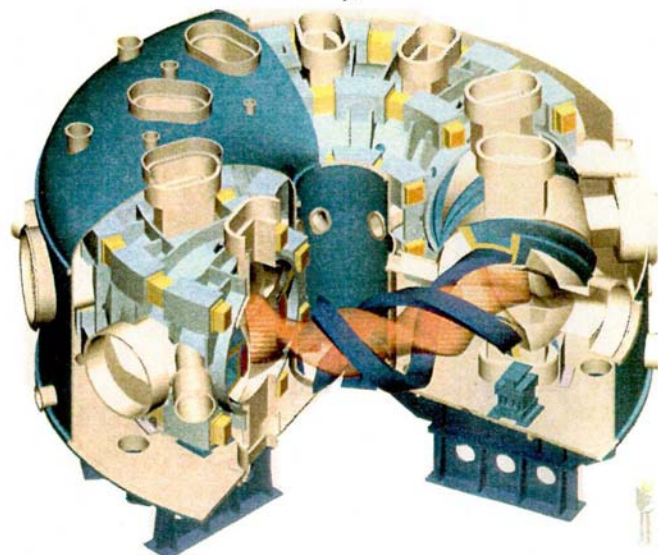


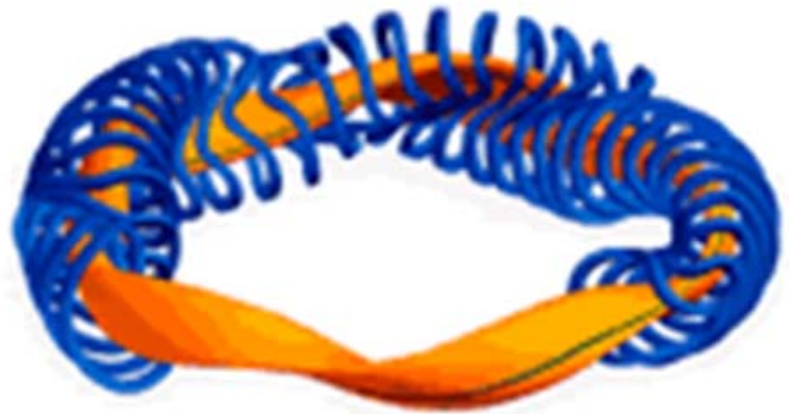
Figure 2.8. Left: figure-eight stellarator—rotational transform is obtained by twisting the torus. Right: classical stellarator—rotational transform is produced by helical windings. The figures display coils and magnetic surfaces. (See also Figure 5.9.)

Стелларатор

Гелиотрон (LHD, Япония)

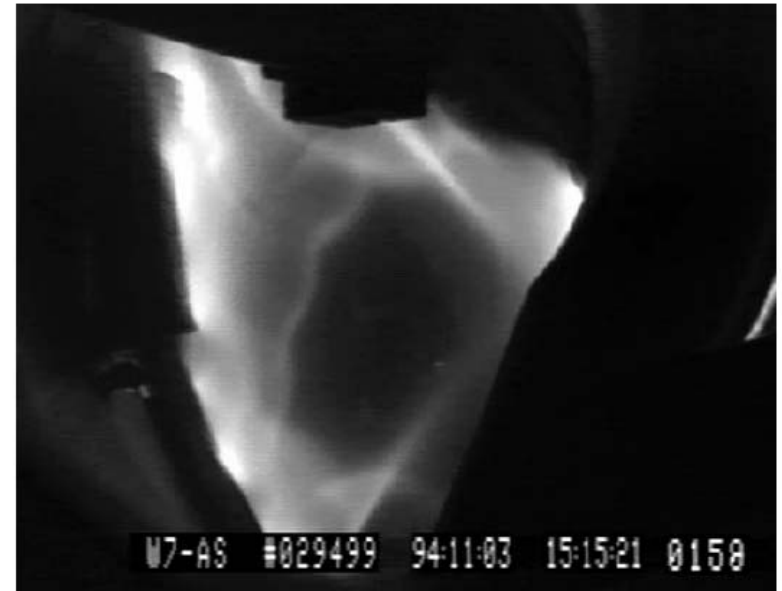
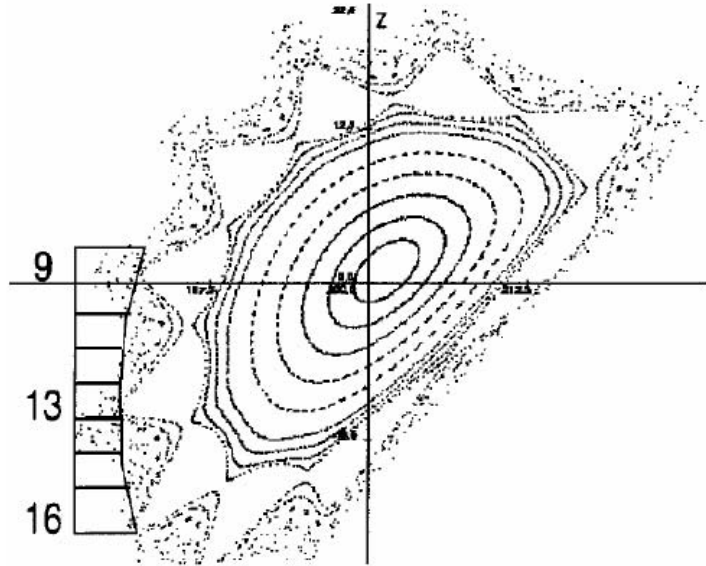


Гелиас (**HEL**ical **AD**vanced **Stellatator**)
W-7X, Германия



Стелларатор

Неточности изготовления магнитной системы приводят к появлению участков хаотического поля на периферии

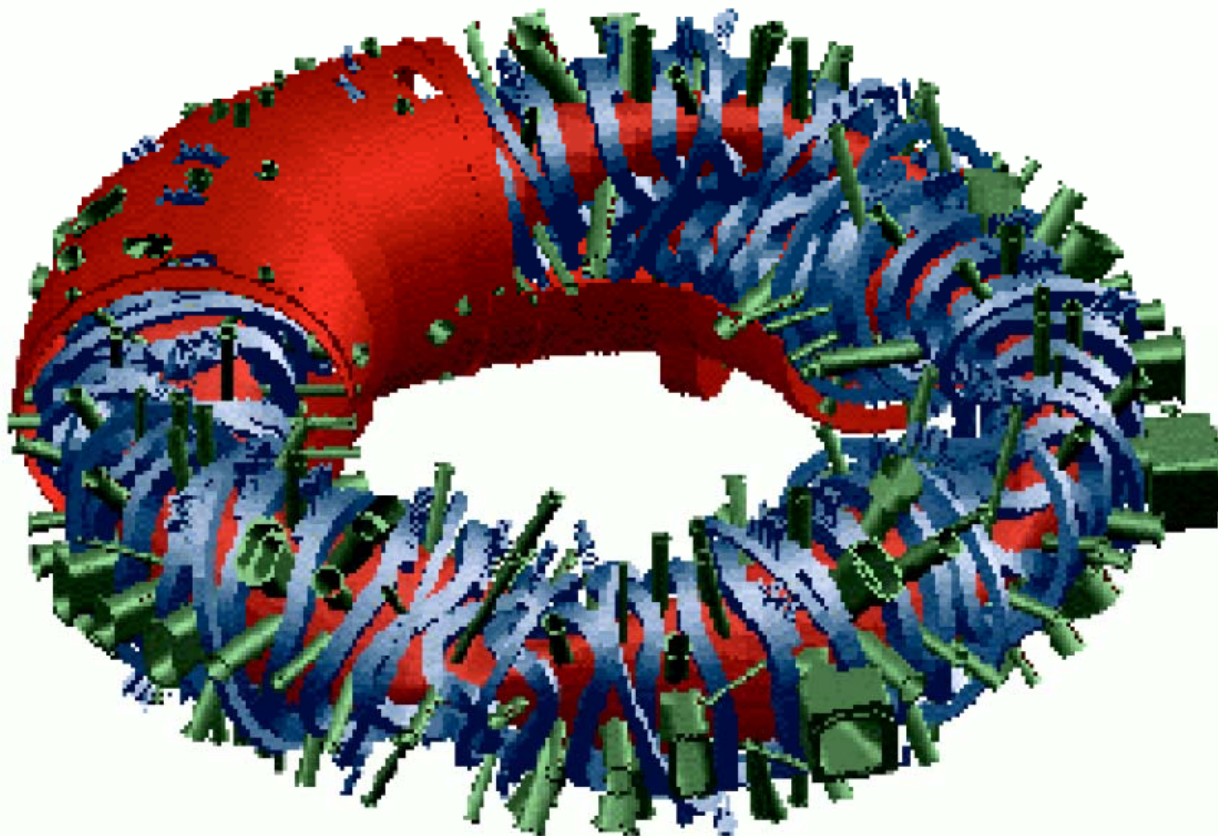


Расчетные магнитные поверхности (слева) и снимок плазмы (справа) W-7AS

Проект W-7X (Германия, запуск в 2012 г.)

1980 г. - начало разговоров, август 1990 - начало проектирования

Топология магнитной системы и
последняя замкнутая магнитная поверхность



$$\begin{aligned}R &= 5.5 \text{ м} \\a &= 0.5 \text{ м} \\V_{\text{pl}} &= 27 \text{ м}^3 \\B &= 2.5 \text{ Тл}\end{aligned}$$

Ожидается:

T - от 2 до 5 кэВ

$n \sim 2 \cdot 10^{20} \text{ м}^{-3}$

β - до 9%

50 сверхпроводящих катушек поля, стационарный режим

Работы по проекту W-7X

прототип секции камеры W-7X



отработка технологии монтажа катушек



Энергия магнитного поля

$$W = \frac{B^2}{2\mu_0} V$$

ГОЛ-3: 5 Тл, 200 см² 12 м – 2,5 МДж

ИТЕР: 6 Тл, 1000 м³ – 15 ГДж !!!!!!!