

Исследование микронеустойчивостей в плазмоеде анизотропных ионов

А.В.Аникеев и группа ГДЛ

Компактный пробкотрон установки ГДЛ

Камера КП:

$L=30$ см, $d=70$ см.

Магнитная система:

$B_0=2.4$ Тл, $B_m=5.2$ Тл

Мишенная плазма:

водород, $n_0 \approx 10^{13}$ см⁻³,

$T_e \approx 90$ эВ, $a=9$ см.

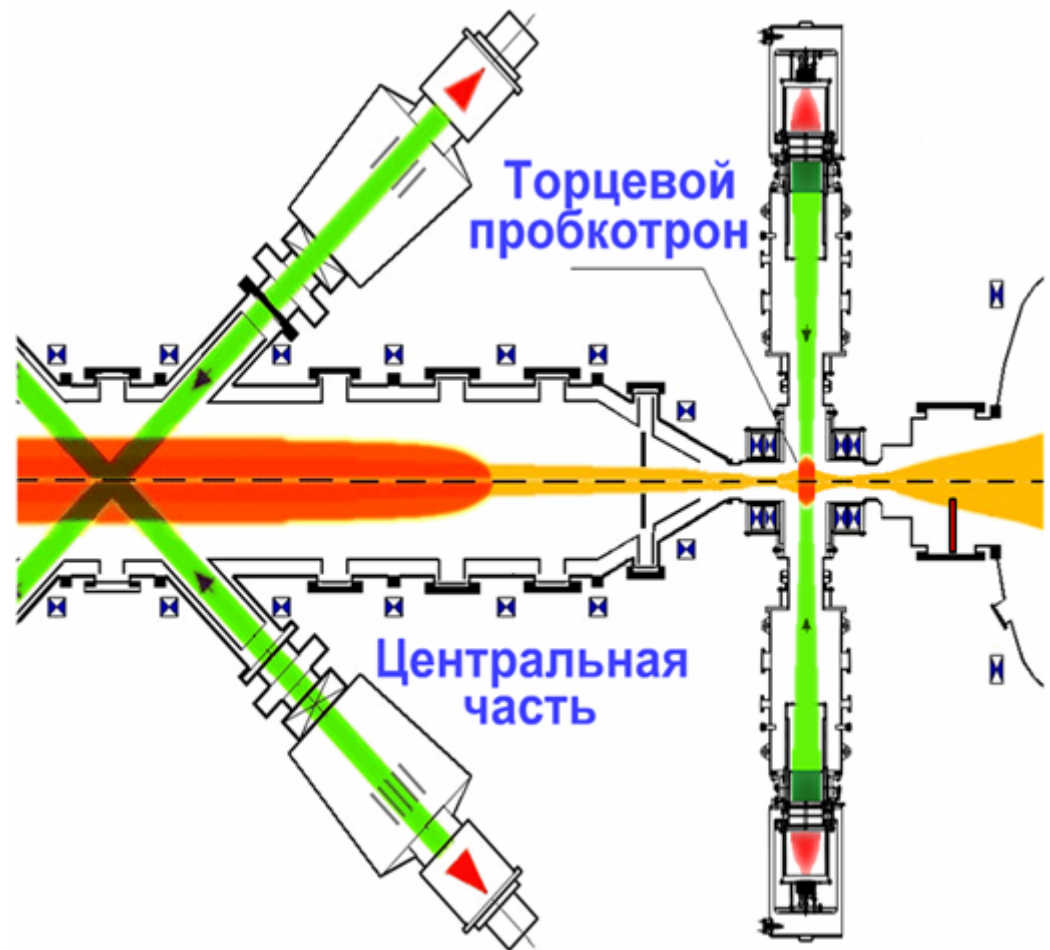
Инжекционная система:

водород или дейтерий

$E_0=20$ кэВ, $\theta=90^\circ$,

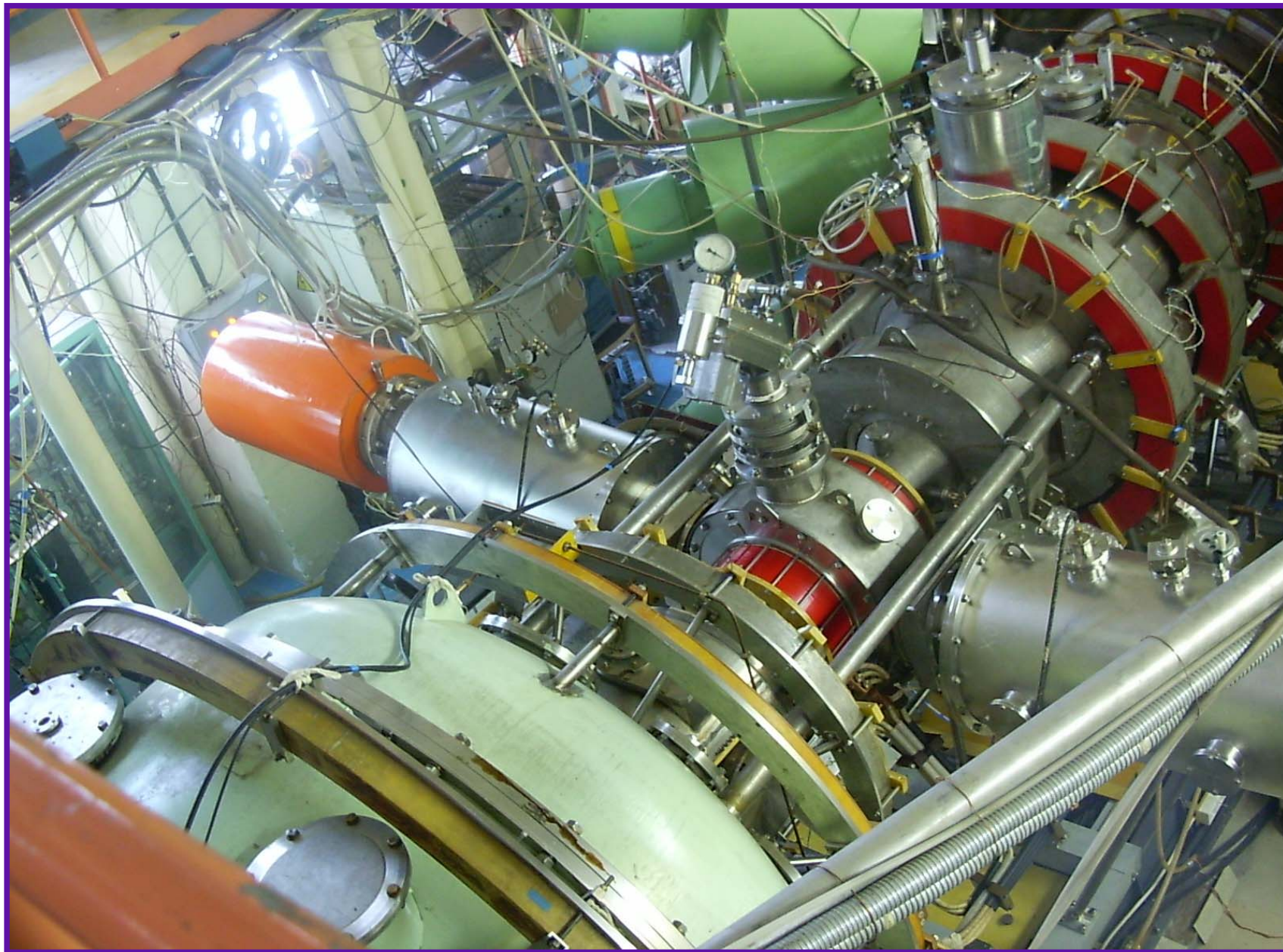
$P_{inj} \approx 1$ МВт,

$\tau_{inj}=4$ мс



Экспериментально наблюдались колебания потенциала плазмы на частоте вблизи ионно-циклотронной частоты в области плазмоида.

Компактный пробкотрон на ГДЛ



Микронеустойчивости анизотропной плазмы

DCLC

(the drift-cyclotron losscone instability)

Дрейфово-
конусная
неустойчивость

$$k_{\parallel} \ll k_{\perp}$$

$$k_{\parallel} = 0$$

$$\omega \approx \omega_{ci}$$

AIC

(the Alfvén ion-cyclotron instability)

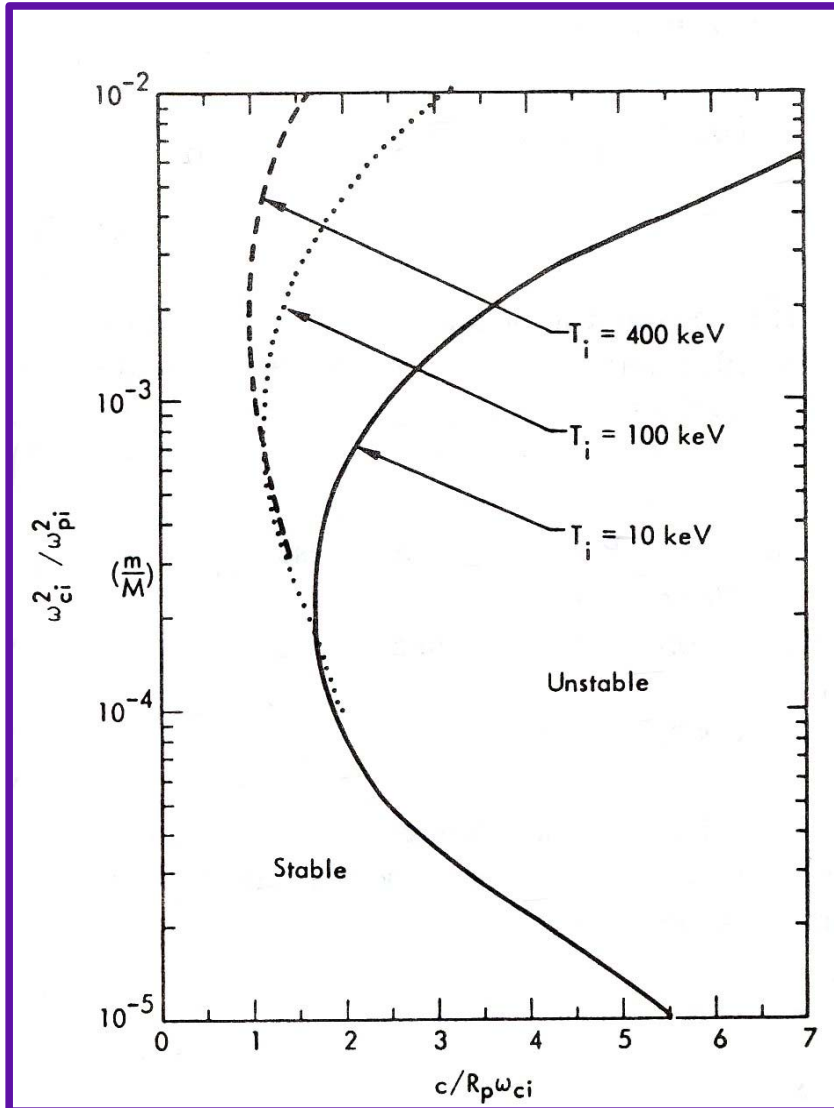
Альфеновская
ионно-циклотронная
неустойчивость

$$k_{\parallel} \gg k_{\perp}$$

$$k_{\perp} = 0$$

$$\omega < \omega_{ci}$$

Оценки для DCLS мод в КП ГДЛ



Параметры ГДЛ:

$$c / R_p \omega_{ci} \approx 18 ;$$

$$\omega_{ci}^2 / \omega_{pi}^2 \approx 6.4 \cdot 10^{-4}$$

Стабилизация теплыми
ионами:

$$n_w / n_f > 0.06$$

$$\text{ГДЛ: } n_w / n_f \approx 0.1$$

R.F.Post, Nuclear fusion, Vol.27, 1987

M.J.Gerver, The Phys. of Fluids, Vol.19,1976

Оценки для АІС мод в КП

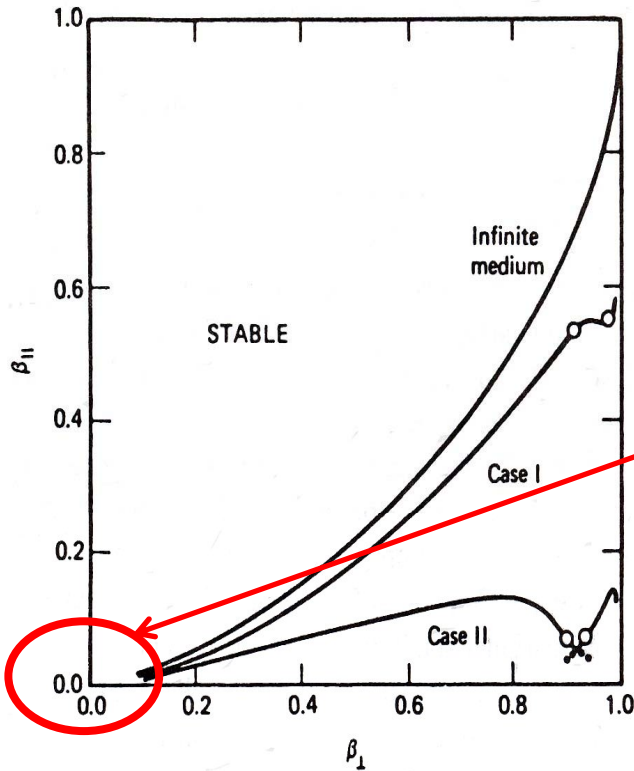


FIG. 65. Stability boundaries for the AIC mode in β - B space for a bi-Maxwellian ion distribution function in a mirror machine with vacuum mirror ratio $R_m = 2.0$.
 Case I: $R_p = 15 a_i$, $L = 50 a_i$. Case II: $R_p = 2.7 a_i$, $L = 15 a_i$ (appropriate to the Livermore 2XIIIB experiment).

Критерий развития неустойчивости:

Параметры

ГДЛ:

$$\beta_{\parallel} < \beta_{\perp} \sim 0.02$$

При $\beta_{\parallel} \sim \beta_{\perp} \ll 1$

$$\beta_{\parallel} < \text{const} * \beta_{\perp}^2$$

или

$$(\beta_{\parallel}, \beta_{\perp}) \rightarrow (A, \beta_{\perp}) :$$

$$\beta_{\perp} A > \text{const}$$

$$\text{ГДЛ: } A \equiv \langle W_{\perp} \rangle / \langle W_{\parallel} \rangle = 50, \\ \beta = 0.02$$

$$\beta A \approx 1$$

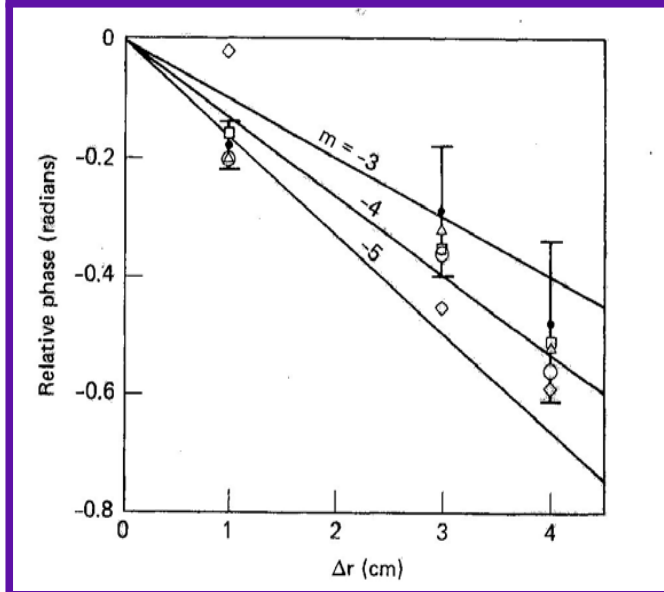
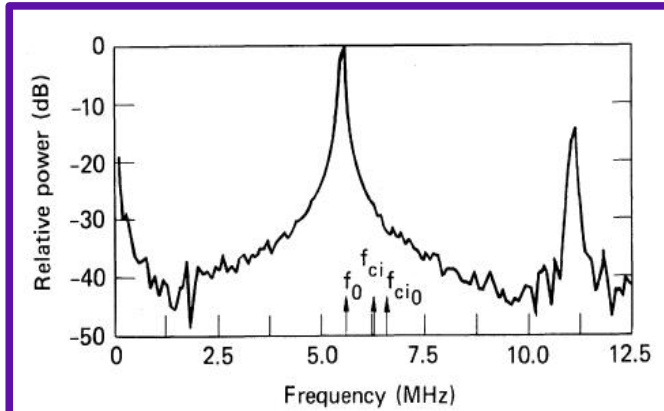
T.A.Casper, G.R.Smith,
 Phys.Rev.Letters, Vol.45, 1982

?

$$\beta A^2 > 8 \quad \text{TMX}$$

DCLC и AIC на установках 2XIIB и TMX

2XIIB : основная неустойчивость – DCLC,
 TMX: основная неустойчивость – AIC,



Параметр	2XIIB	TMX	ГДЛ
a_i/R_p	0.37	0.13	0.23
β	0.33	0.07	0.02
$A=W_{\perp} / W_{\parallel}$	5	14	35-50
βA^2	8	14	25-50
βA	1.65	0.98	0.7-1
E_i , кэВ	13	8	20
f_{ci} , МГц	4.9	7.6	40

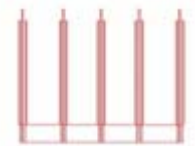
Регистрация AIC на TMX

Электрические зонды: 5 вч-зондов отстоящих друг от друга на Δx , по азимуту, на радиусах r (20-30см)

$$P_{12}(f) = |P_{12}(f)| * \exp(i\theta_{12}(f))$$

$$f_0 = 5.6 \text{ MHz}, f_{ci} = 6.3 \text{ MHz}, f_{ci0} = 6.6 \text{ MHz}$$

$$|m| \approx 4, f_0 < f_{ci} \rightarrow \text{AIC}$$

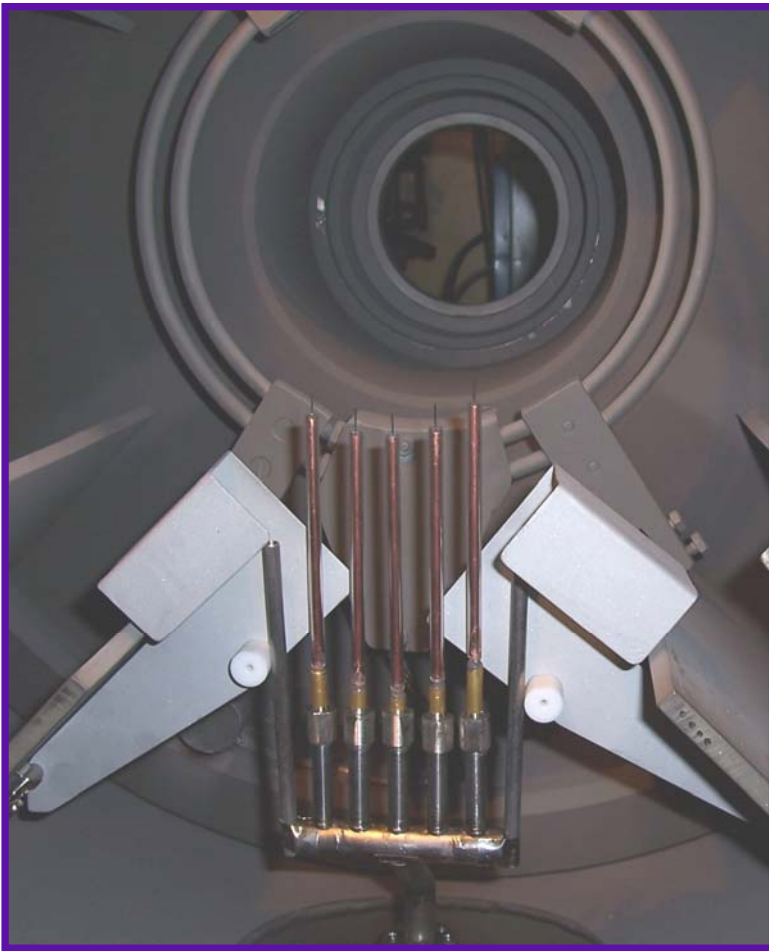


$$\Delta x = 1 \text{ cm}, r \geq 2R_p$$

Магнитные зонды: три ортогональных петли, позволили определить поляризацию (левая)

T.A.Casper, G.R.Smith, Phys.Rev.Letters, Vol.45, 1982

Исследования микро-неустойчивостей в плазме проводились при помощи специальных высокочастотных (ВЧ) электрических и магнитных зондов:

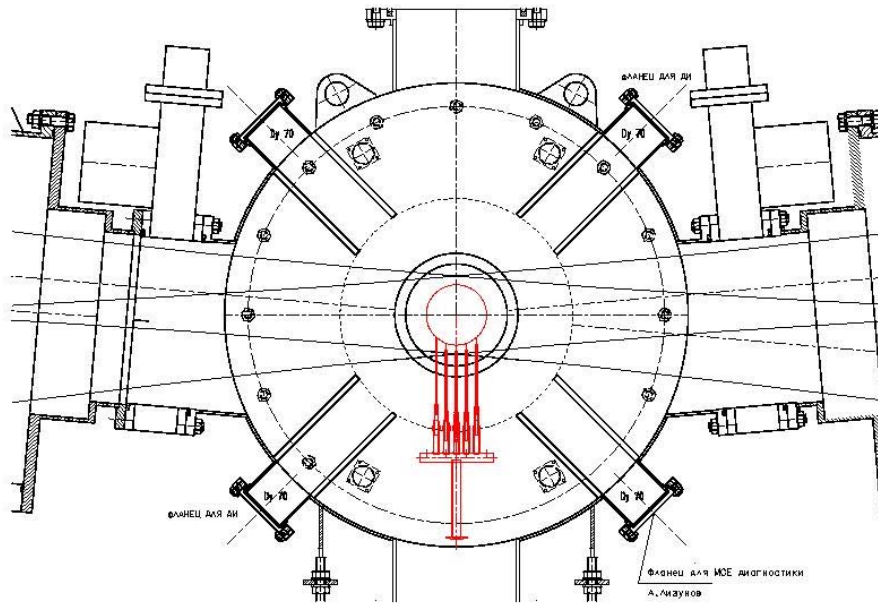


Набор электрических ВЧ зондов для определения пространственного характера колебаний плазмы.



Три петли магнитного ВЧ зонда для исследования поляризации волн.

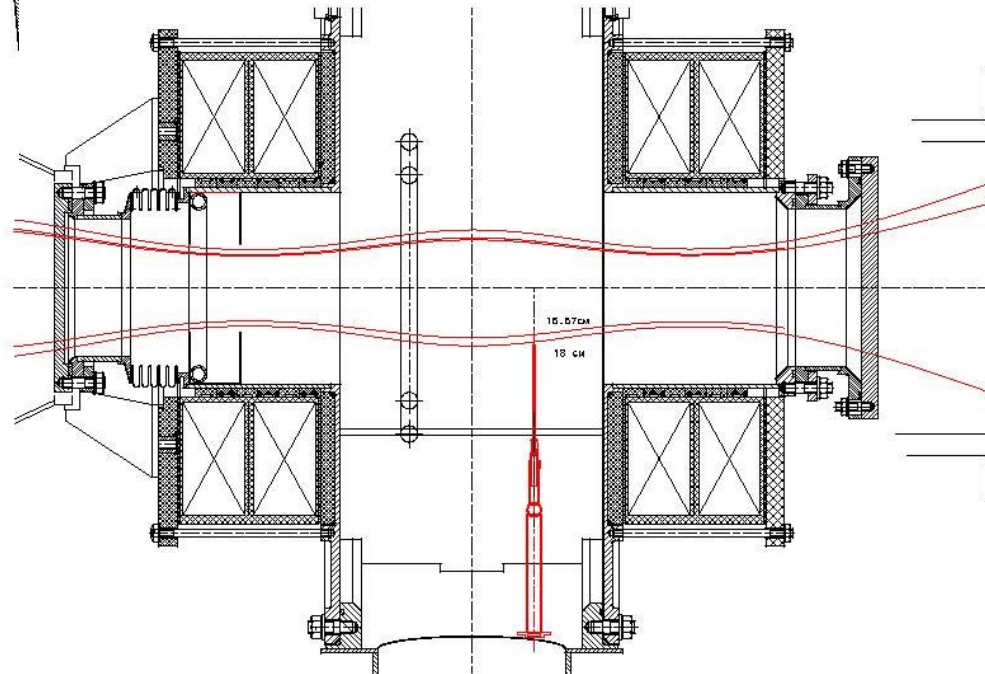
Система электрических ВЧ-зондов для регистрации АИС на ГДЛ



Оценка частоты: $f_0 < f_{ci}(1-1/A)$
 $f_{ci} = 42 \text{ MHz}$
 $f_0 \approx 40 \text{ MHz}$

Моды: $k = m/r_p$
 $r_p = 4.5 \text{ cm}$, $\varphi \approx 0.4 \text{ рад}$
 $m \approx 1-15$

DCLC: function $P_{12}(f)$ между средним зондом и зондом в расширителе, силовая линия 15.5 см



Оциллограмма характерных колебаний в КП

Частота колебаний:

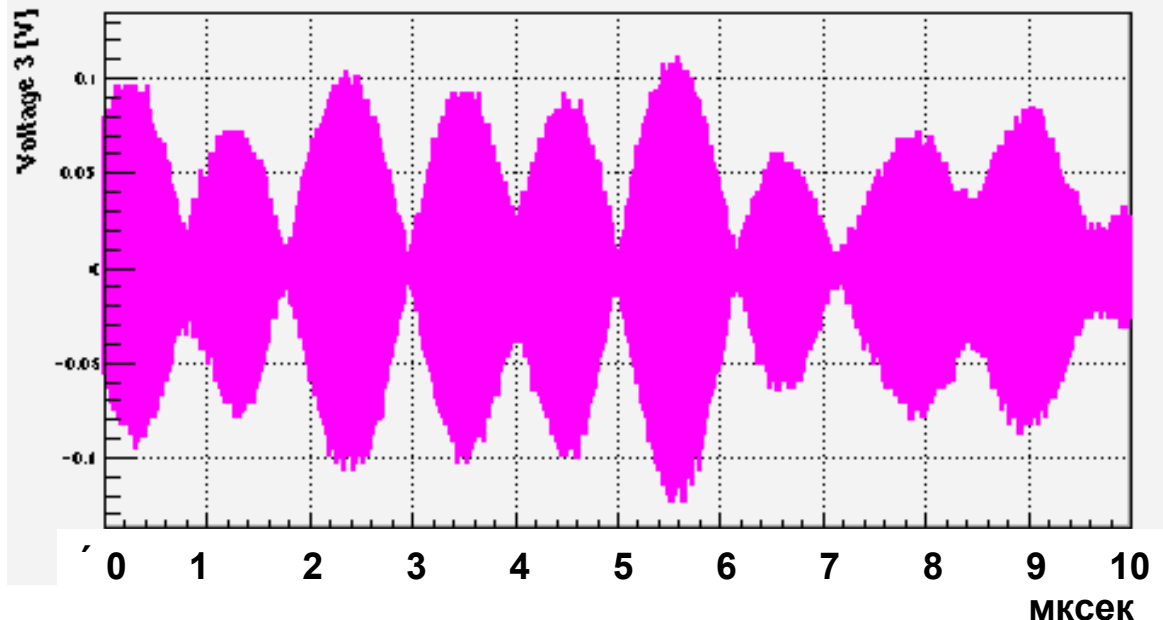
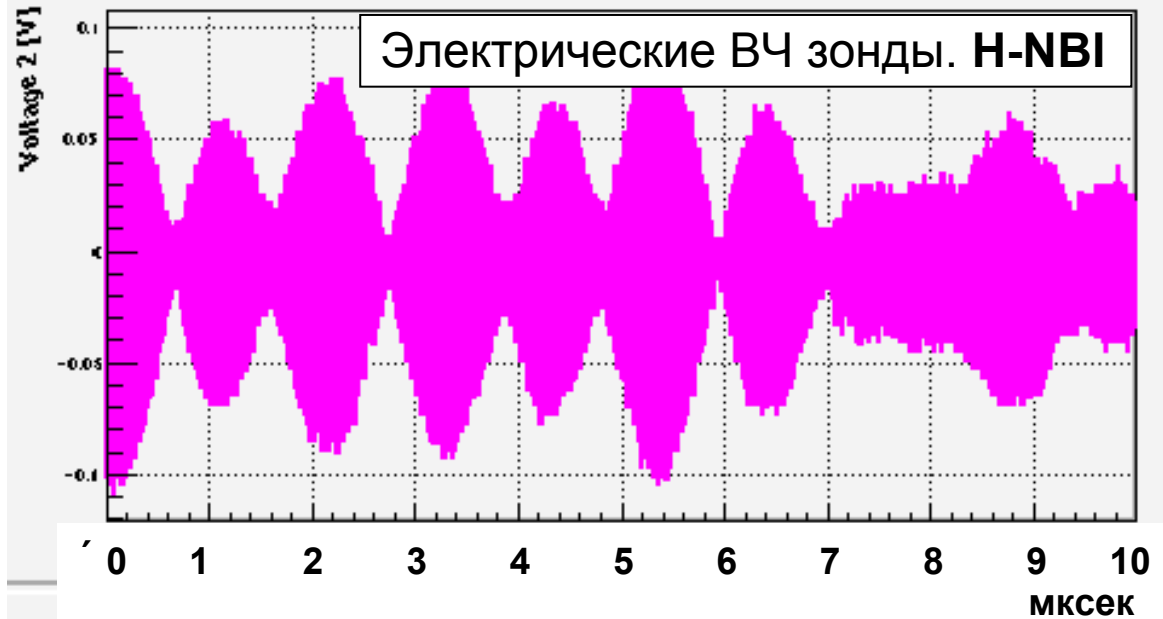
$$f_0 = 39.7 \pm 0.2 \text{ МГц}$$

Амплитуда колебаний
магнитного поля
волны $\sim 100 \text{ мГс}$

$$B_{\text{MSE}} = 27.6 \pm 0.3 \text{ кГс}$$

$$f_{ic} = 42 \pm 0.5 \text{ МГц}$$

$$f_0 < f_{ci} (1 - \langle W_{\parallel} \rangle / \langle W_{\perp} \rangle)$$



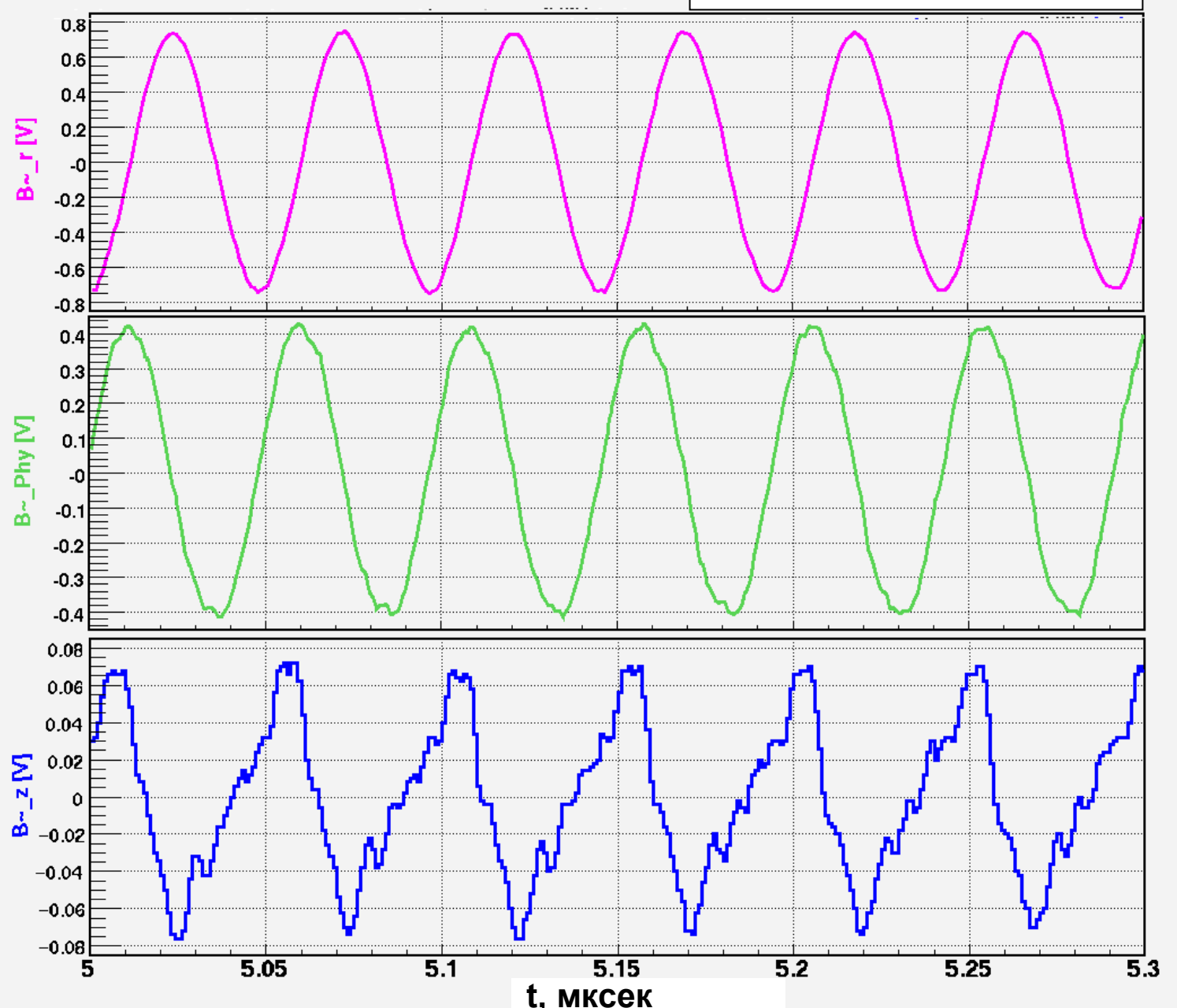
Оциллограмма характерных колебаний в КП

Магнитный зонд. H-NBI

D-NBI

Частота колебаний:
 $f_0 \sim 20$ МГц

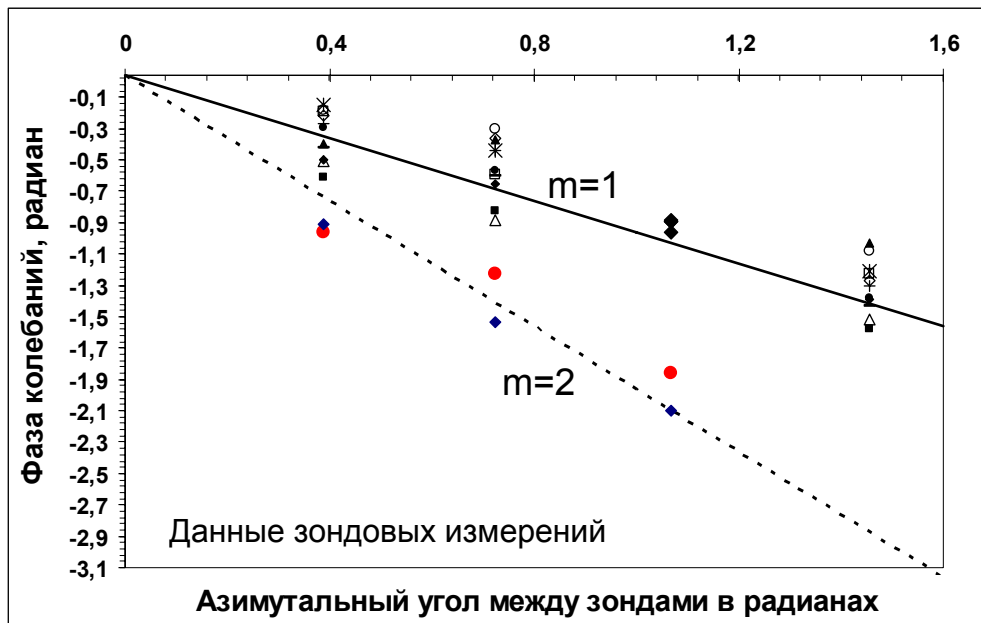
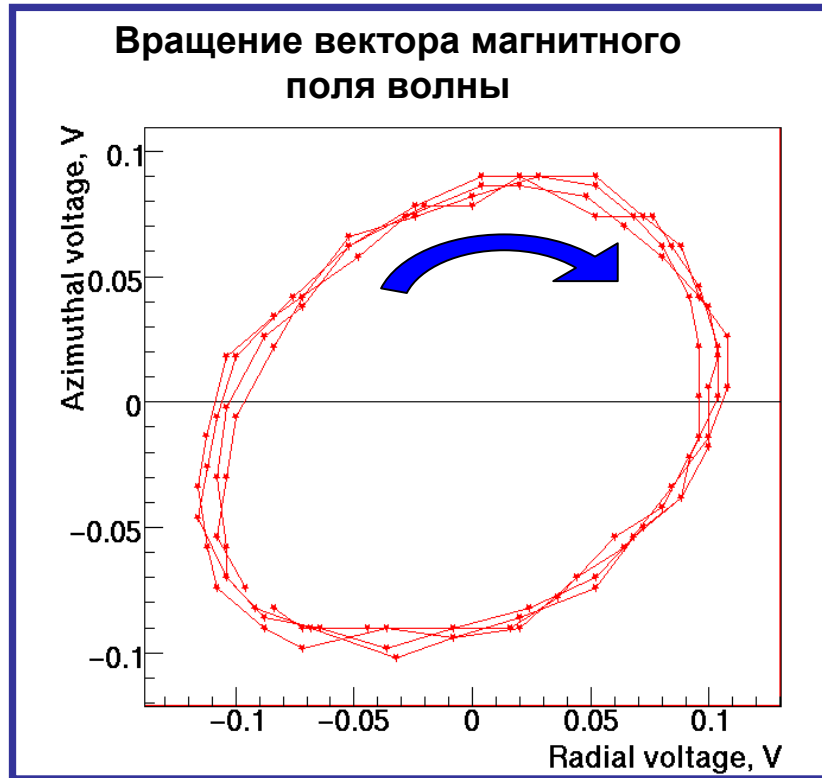
Амплитуда колебаний магнитного поля волны
 $\sim 1 - 10$ Гс



Регистрация АИС в КП ГДЛ

Электрические зонды: частота и модовый состав

Магнитные зонды: частота, поляризация, порог



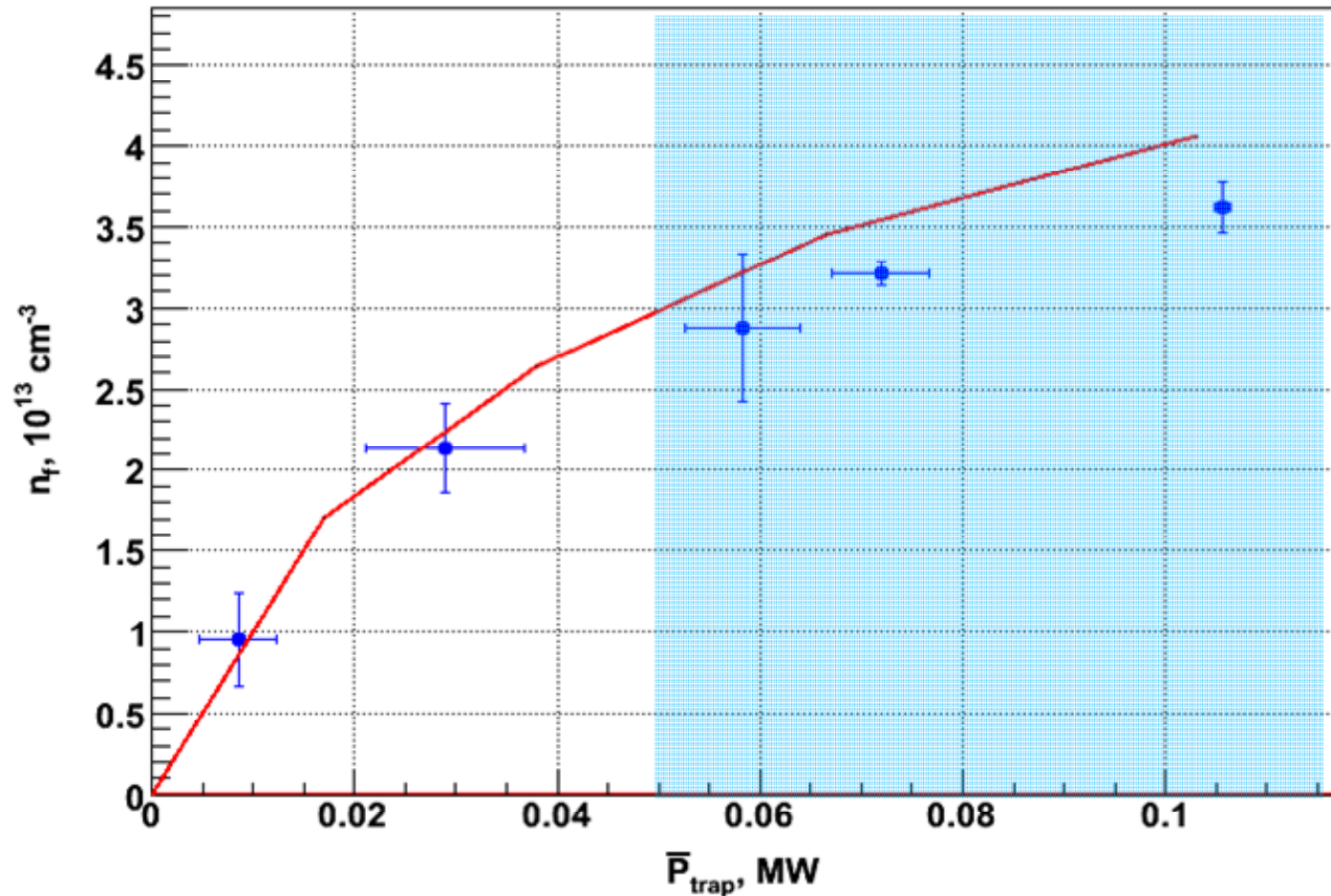
Азимутальная $m \sim 1-2$

Частота $f_0 < f_{ci}$

Вращение поляризации
волны в направлении
ларморовского движения
ионов

AIC

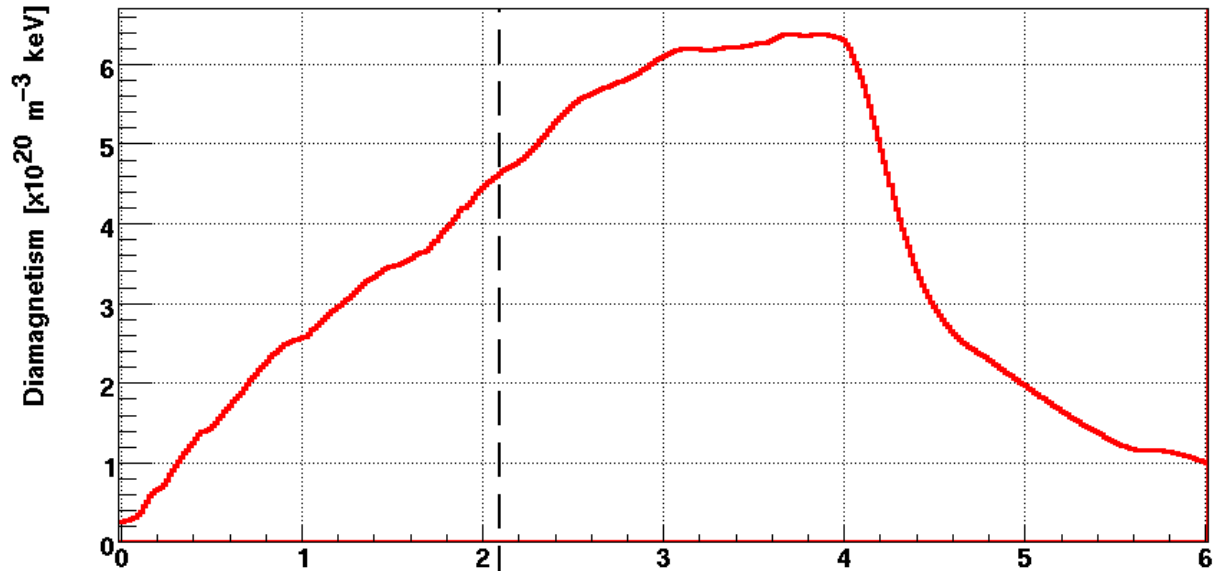
Пороговый характер колебаний



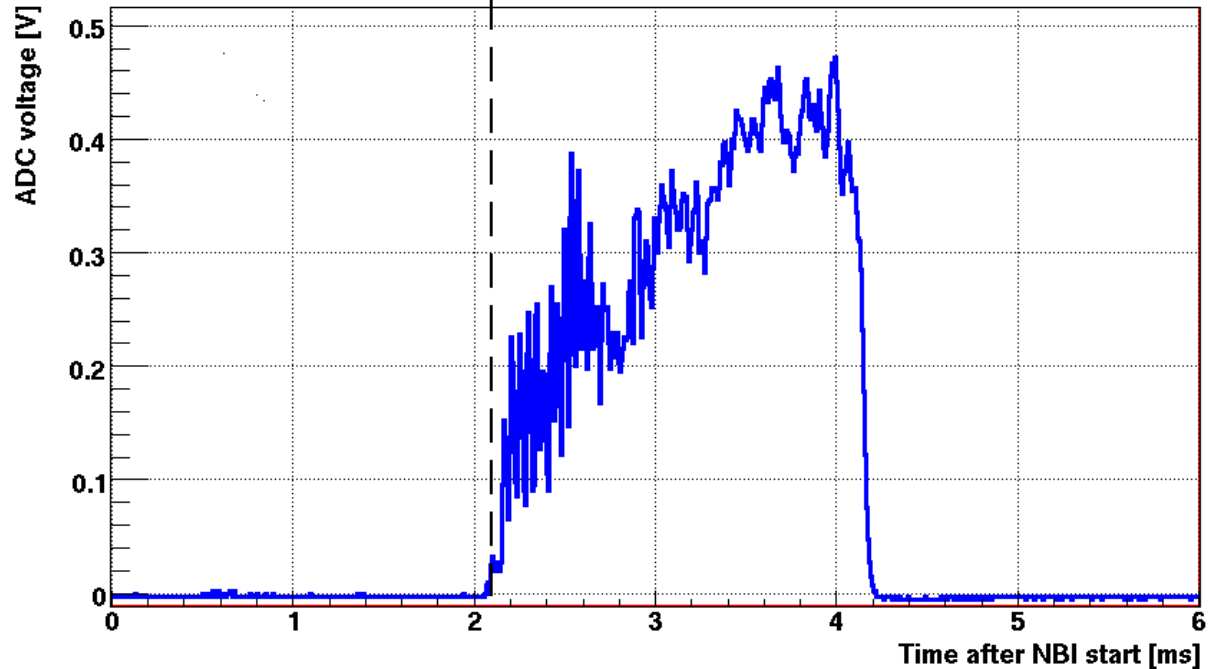
Плотность быстрых ионов в компактном пробкотроне в зависимости от мощности захвата. Точки – экспериментальные данные, сплошная линия – расчет с помощью ITCS.

Пороговый характер колебаний

Диамagnetизм
(энергосодержание)
быстрых ионов в КП



Амплитуда ВЧ-колебаний
на магнитном зонде.



$$n > 2.5 \times 10^{13} \text{ cm}^{-3}$$

$$A \approx 35$$

$$\rho_{ci}/a_p \approx 0.23$$

Влияние микронеустойчивости на потери быстрых ионов из КП

$$\frac{\tilde{B}}{B_0} \gg \left(\frac{c}{k\omega} \right)^{4/3} \frac{p_{\parallel}^{4/3}}{p_{\perp} (mc)^{1/3}} \equiv \left(\frac{\rho_{ci}}{kA} \right)^{1/3} \frac{c}{k\omega A}$$

А.И.Нейштадт, А.В.Тимофеев ЖЭТФ, т.98, вып 5(11) 1987

Для параметров эксперимента с КП ГДЛ:

$$A \approx 40$$

$$\omega \approx 2\pi \cdot 4 \times 10^7 \text{ рад/с}$$

$$k \approx 20 \text{ см}$$

$$\rho \approx 1 \text{ см}$$

$$B_0 = 24 \text{ кГс}$$

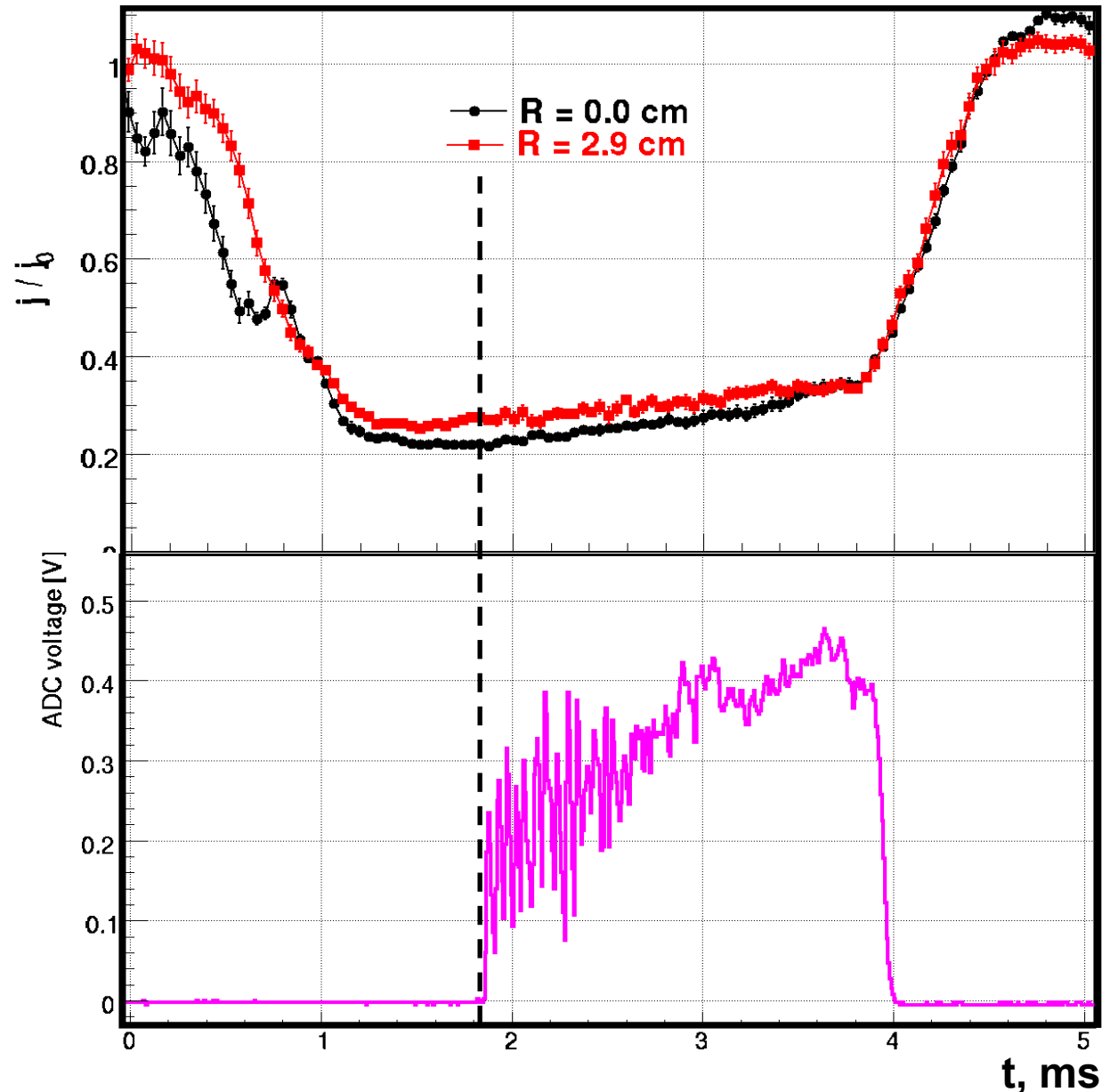
$$\frac{\tilde{B}_*}{B_0} \sim 0.01$$
$$\tilde{B}_* \sim 250 \text{ Гс}$$

Из эксперимента:

$$\tilde{B} \sim 1 \div 10 \text{ Гс}$$

Влияние микронеустойчивости на эффект амбиполярного запираения

Подавление потока ионов из центральной части ГДЛ



Амплитуда ВЧ колебаний

Важные выводы:

- Микронеустойчивость, развивающаяся в компактном пробкотроне (КП) при 90° инжекции мощных фокусированных атомарных пучков является альфвеновской ионно-циклотронной (AIC), о чем свидетельствуют малые азимутальные волновые числа $m = 1-2$, частота колебаний ниже ионно-циклотронной частоты и вращение вектора магнитного поля волны в направлении ларморовского движения ионов.
- В экспериментах был определен порог начала развития микронеустойчивости относительно важнейших параметров плазмы: плотности быстрых ионов, β , степени анизотропии и отношения ларморовского радиуса к радиусу плазмоида. Неустойчивость развивалась при достижении плотности быстрых ионов $n > 2.5 \times 10^{13} \text{ см}^{-3}$, степени анизотропии $A \approx 35$, $\rho_{ci}/a_p \approx 0.23$.
- Экспериментально обоснованный критерий, который определяет границу устойчивости: $\beta A \geq 1$
- Развивающаяся в КП ГДЛ альфвеновская ионно-циклотронная неустойчивость не приводит к заметным потерям частиц и ограничению важнейших параметров эксперимента с КП.