

Применение MSE диагностики для измерения магнитного поля в плазме

План



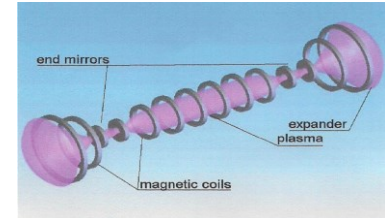
- ❖ Физические задачи, требующие измерения локального магнитного поля
 - в установках со «слабым» магнитным полем (открытые ловушки, RPF)
 - В установках с «сильным» полем (токамаки, стеллараторы)
- ❖ Основные принципы MSE
- ❖ Поляриметрическая MSE диагностика (MSE-LP)
- ❖ Спектральная MSE диагностика (MSE-LS)
- ❖ Imaging MSE
- ❖ Модели для обработки данных измерений

Для чего нужно измерять \vec{B} ?

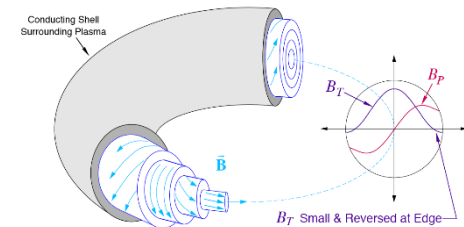


$$\beta = \frac{8\pi\langle p \rangle}{B^2}$$

Открытые ловушки: достижимо высокое бета, порог устойчивости при $\beta \approx 1$ (экспериментально достигнуто $\beta \approx 0.6$ в ГДЛ).



Пинчи с обращённым полем (RFP): достижимо высокое бета, порог устойчивости при $\beta = ?$ (экспериментально достигнуто $\beta_t \approx 0.8, \beta_{total} \approx 0.27$ в MST)



Токамаки:

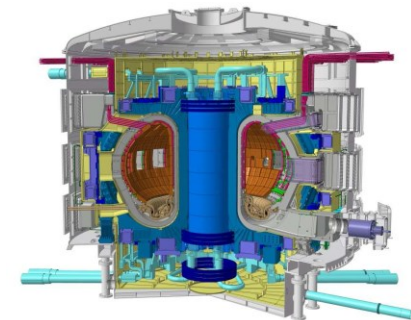
$$\beta_t = \frac{8\pi\langle p \rangle}{B_t^2}, \beta_p = \frac{8\pi\langle p \rangle}{B_p^2}, \frac{1}{\beta} = \frac{1}{\beta_t} + \frac{1}{\beta_p}$$

$$\text{Нормализованное бета: } \beta_N = 10^8 \frac{\langle p \rangle}{I_p/a} \approx 10^8 \frac{a B_t}{I_p} \beta_t,$$

где a – малый радиус [м], B_t - тороидальное поле [Т], I_p - плазменный ток [МА].

Порог МГД (срыв) для токамаков с большим отношением R/a: $\beta_N^{max} \approx 3.5$;

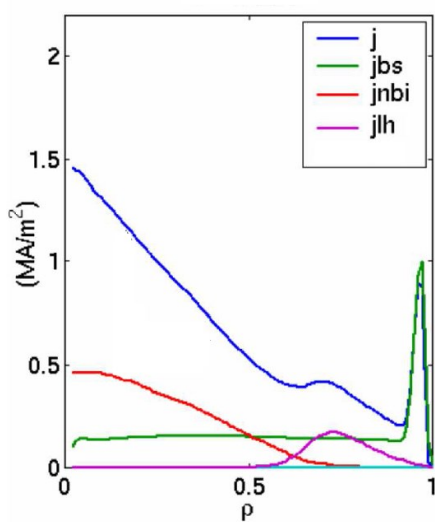
Для сферических токамаков с малым отношением R/a достигнуто $\beta_N = 7.2$ (NSTX).



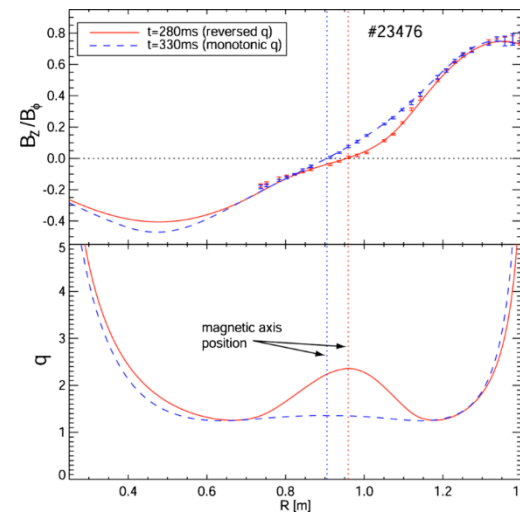
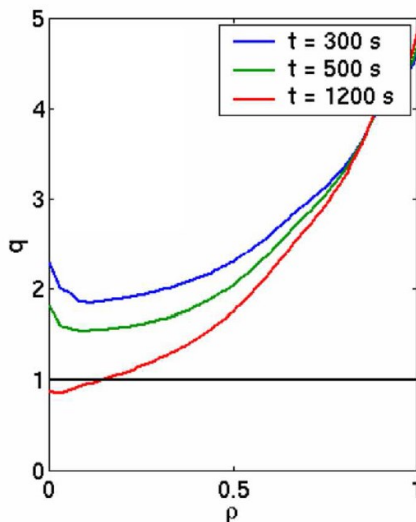
Измерение $j(r)$ и $q(r)$ в токамаках



Радиальный профиль запаса устойчивости $q \approx \frac{a B_t}{R B_p} \propto \frac{a^2 B_t}{R I_p}$ определяется распределением плазменного тока $j(r)$ по сечению шнура.



Моделирование режима $Q=10$ в ITER

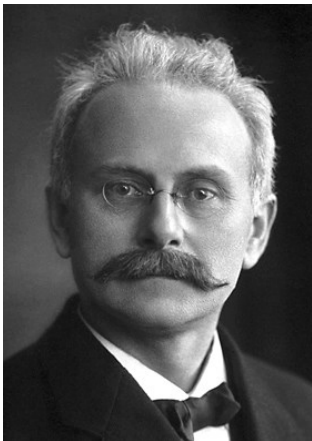


Вычисление $q(r)$ на основании измерений питч-угла магнитного поля в сферическом токамаке MAST

«Честное» бета $\ll 1$, однако *равновесие плазмы* (устойчивость времени удержания, поперечный транспорт, ...) в значительной степени определяется $j(r)$.

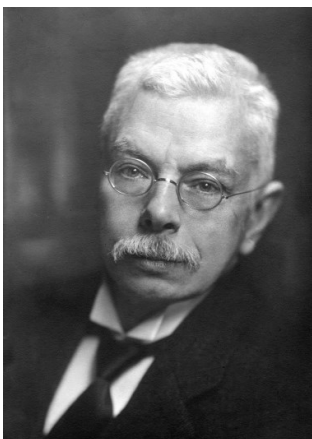
$j(r)$ может быть вычислен по измерениям питч-угла магнитного поля B_z/B_ϕ

Эффекты Штарка и Зеемана



Johannes Stark

1913: исследование расщепления спектральных линий в электрическом поле;
1919: Нобелевская премия по физике за труд “Discovery of the Doppler effect in canal rays and the splitting of spectral lines in electric fields”



Pieter Zeeman

1902: Нобелевская премия по физике (вместе с Н.А. Lorentz) “in recognition of the extraordinary service they rendered by their researches into the influence of magnetism upon radiation phenomena”

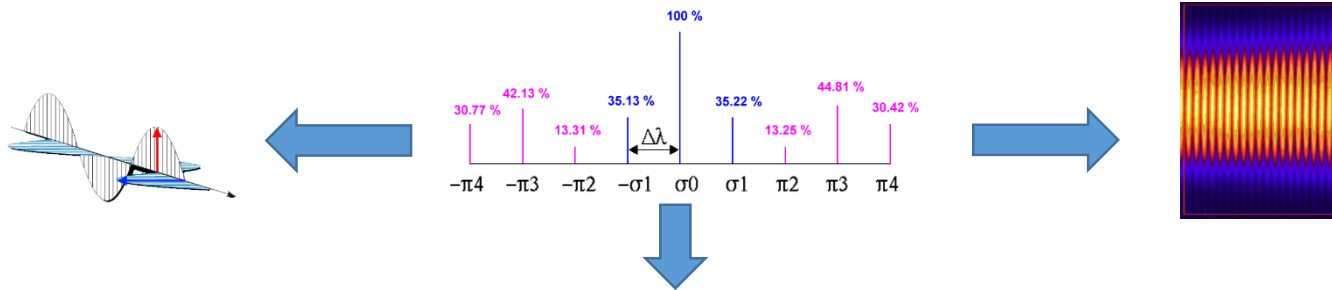
Эффекты Штарка и Зеемана



Эффекты Штарка и Зеемана: модификация уровней энергии электрона в атоме (водорода) при взаимодействии его дипольного момента и магнитного момента с внешними электрическим и магнитным полями

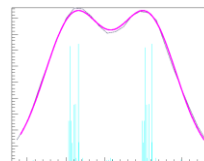
Динамический эффект Штарка (Motional Stark Effect, MSE): взаимодействие с лоренцевским электрическим полем $E_L = v \times B$, возникающего в сопутствующей СО атома, движущегося в магнитном поле (это релятивистский эффект)

π - polarisation: $\parallel E$ (Lorenz electric field)
 σ - polarisation: $\perp E$



Поляриметрия MSE (токамаки)

- Измерения питч-угла поля



Imaging MSE (линейные и тороидальные системы)

- Измерения питч-угла и абсолютной величины **B**

Спектральная MSE (линейные и тороидальные системы)

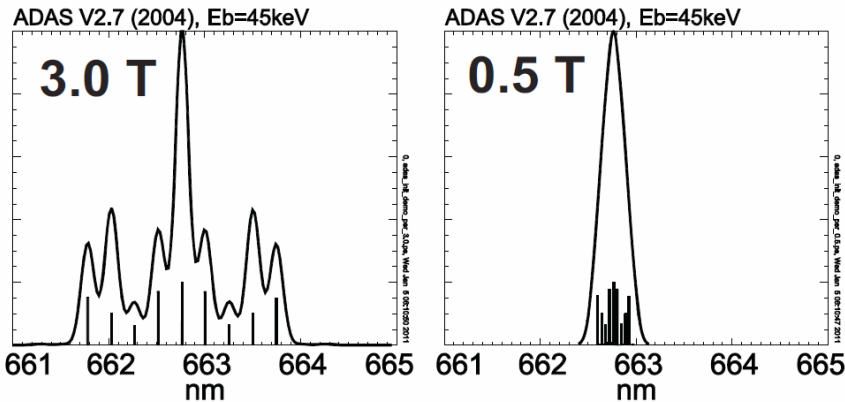
- Измерения абсолютной величины **B**

Динамический эффект Штарка



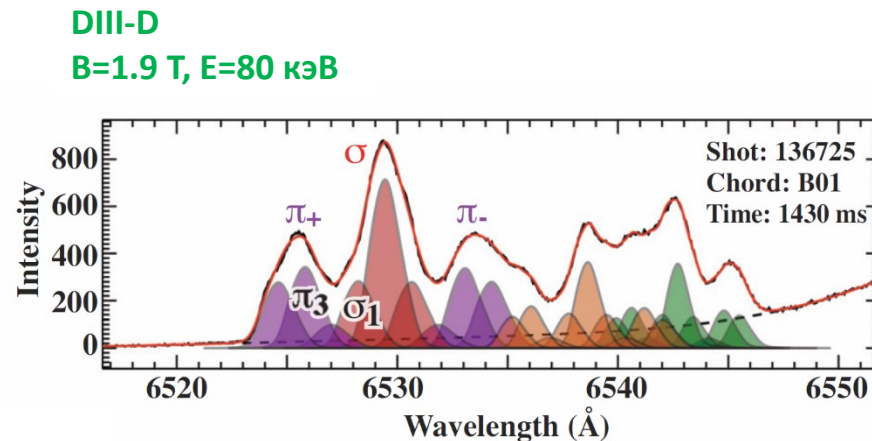
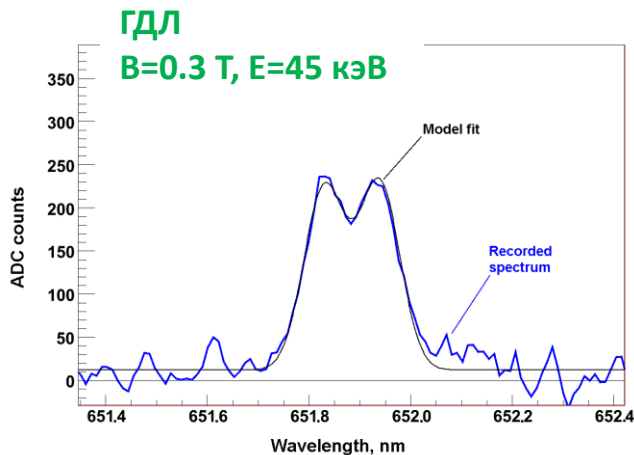
Если магнитное поле $B \geq 0.5 \text{ T}$, а энергия пучка атомов водорода $E \geq 35 \text{ кэВ}$: можно пренебречь эффектом Зеемана в расщеплении линии $H_\alpha, \lambda_0 = 656.3 \text{ нм}$.

$$\Delta\lambda_{Stark} = \frac{3ea_0}{2hc} \lambda_0^2 \nu B_\perp$$



Моделирование спектров MSE при помощи ADAS

Экспериментальные спектры MSE

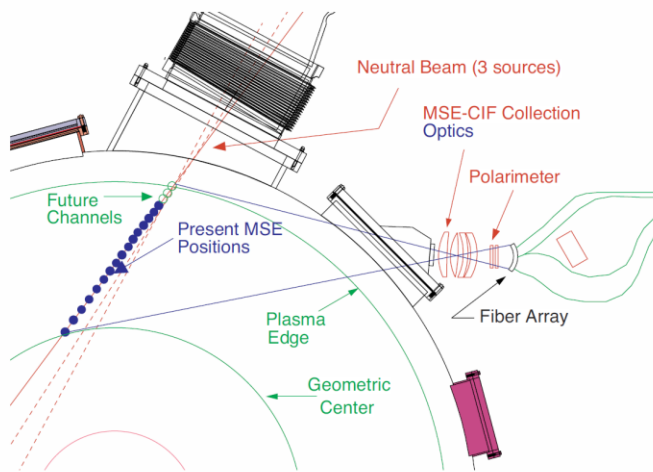


MSE-LP: измерение поляризации



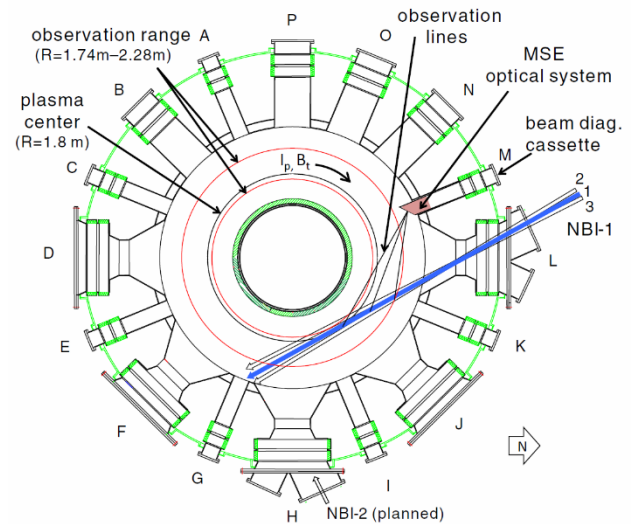
MSE Line Polarization (MSE-LP) применяется на токамаках и стеллараторах для измерения питч-угла магнитного поля

Первая реализация: TFTR -- F. M. Levinton, R. J. Fonck, et. al., *Phys. Rev. Lett.* **63**, 2060 (1989)



Геометрия измерений MSE-LP на NSTX (2008)

- Нагревной пучок (D) направлен \approx радиально
- Линии наблюдения MSE \approx тангенциальные
 - 16 линий наблюдения, $R=0.2\div 1.5$ м
 - Пространственное разрешение ≈ 2 см



Геометрия измерений MSE-LP на KSTAR (2017)

- Нагревной пучок (D) направлен \approx тангенциально
- Линии наблюдения MSE \approx тангенциальные
 - 29 линий наблюдения, $R=1.75\div 2.3$ м
 - Пространственное разрешение ≈ 5 см

MSE-LP: измерение поляризации

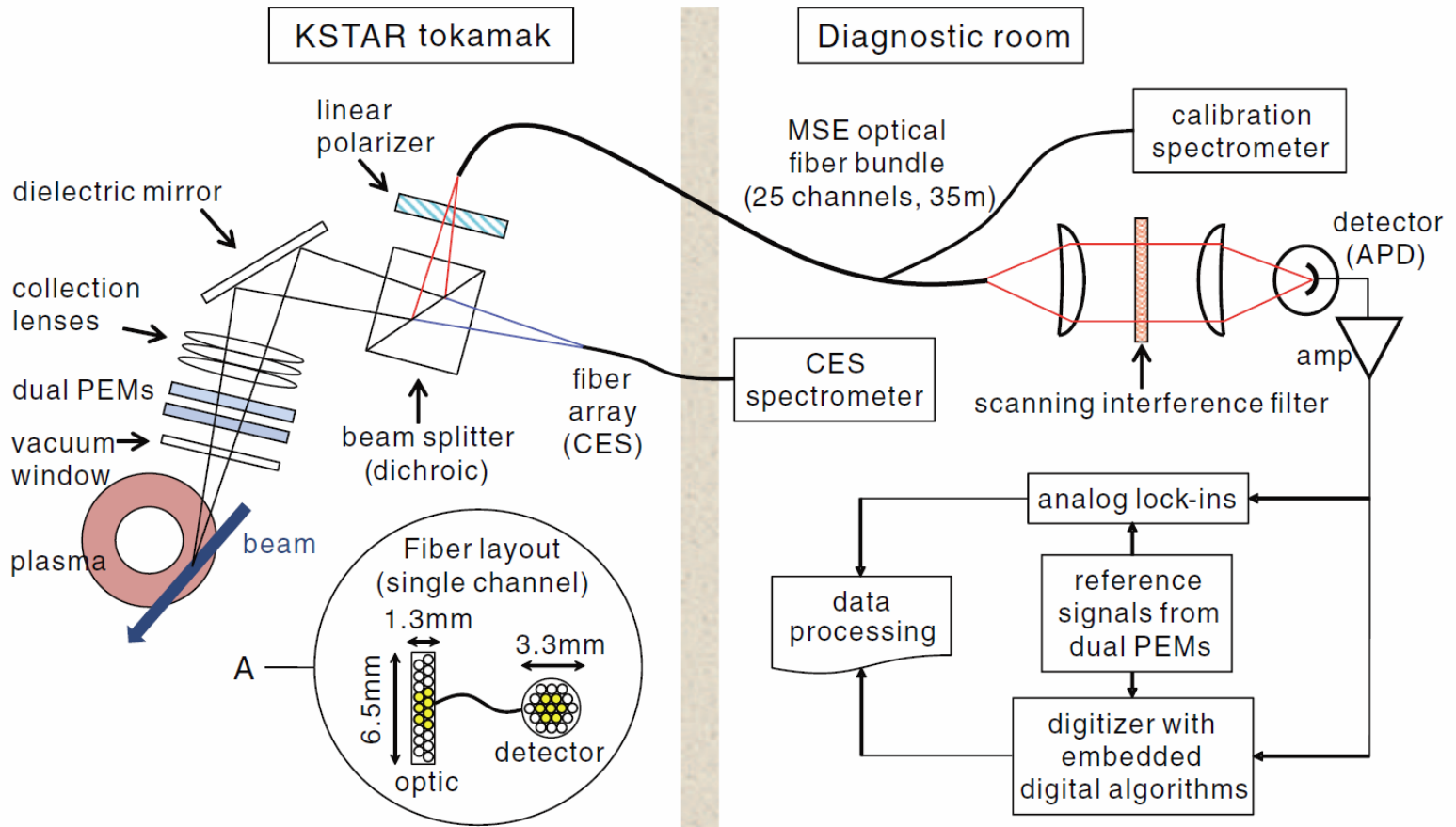
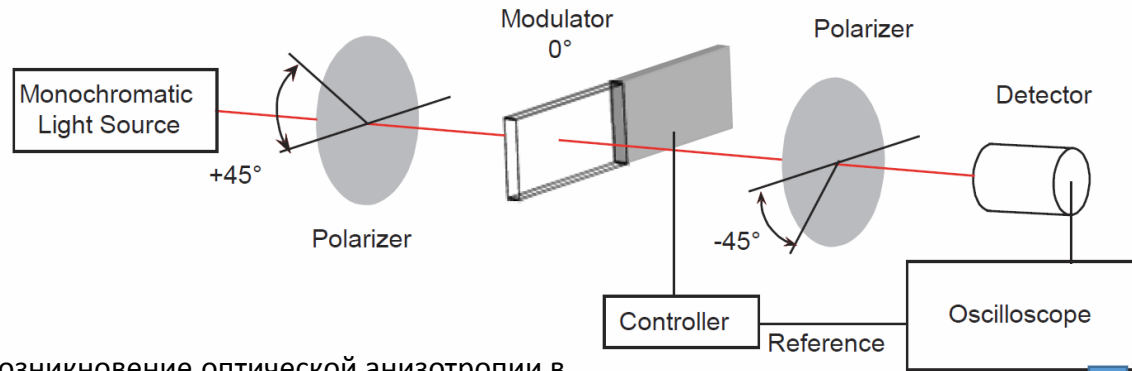


Схема диагностики MSE-LP на KSTAR (2017)

MSE-LP: измерение поляризации



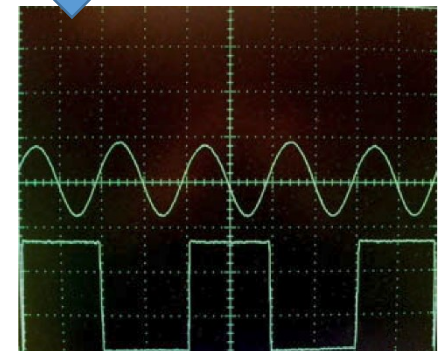
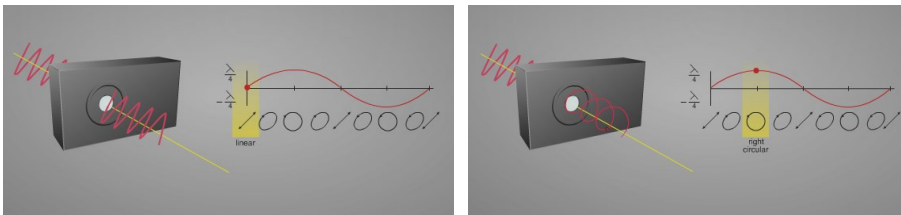
Принцип определения направления поляризации



Фотоупругость – возникновение оптической анизотропии в первоначально изотропных твёрдых телах (например, плавленный кварц) под действием механических напряжений.

Принцип работы PEM – сдвиг фазы между ортогональными линейными поляризациями, модулированный с частотой f (50 кГц).

PEM: Photoelastic modulator



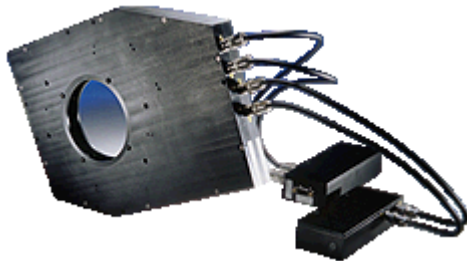
При амплитуде задержки в $\lambda/4$, на выходе в течение периода модуляции, поляризация меняется от линейной до круговой

MSE-LP: измерение поляризации



Принцип измерения питч-угла магнитного поля $\gamma = \text{tg}^{-1} \left(\frac{B_p}{B_t} \right)$

- Выделение компоненты MSE-спектра с определённой поляризацией (узкополосный интерф. фильтр)
- Преобразование компоненты с определённой поляризацией в сигнал с модуляцией амплитуды по времени при помощи фотоупругого модулятора (PEM) – первая проекция вектора поляризации
- Повторение предыдущего шага с PEM, повернутым на 45° для определения второй проекции вектора поляризации
 - Для преобразования модуляции поляризации в амплитуду используется линейный поляризатор



Dual-PEM производства HINDS Instruments используется как Стокс-поляриметр.

Два модулятора с осями под 45° друг к другу

- Модуляция на различных частотах, например $f_1=50$ кГц и $f_2=55$ кГц
- Опорные частоты $f_1, 2*f_1, f_2, 2*f_2$ подаются в систему регистрации данных
- Отношение сигналов детектора на $2*f_1$ и $2*f_2$ даёт фазовый сдвиг, т.е. исходное направление поляризации

С применением синхронного детектирования разрешающая способность $1: 10^6$

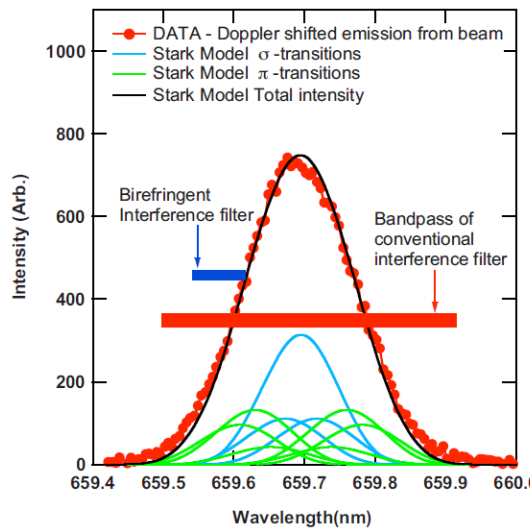
- Использование синхронных усилителей в схеме аналоговой обработки сигналов позволяет вычислять результат в реальном времени. Длительность окна интегрирования определяется амплитудой полезного сигнала и отношением S/N и обычно составляет ≈ 1 мс
- Применение современных сигнальных процессоров на базе FPGA также позволяет вычислять результат в реальном времени на основе потоковой обработки оцифрованных сигналов
- Данные диагностик MSE-LP в реальном времени используются для управления разрядом в токамаке (например, сигналы обратной связи для систем безиндуктивного разгона плазменного тока)

MSE-LP: измерение поляризации

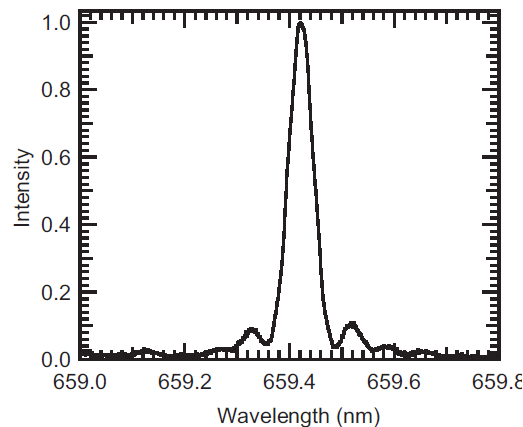


Частично поляризованное излучение

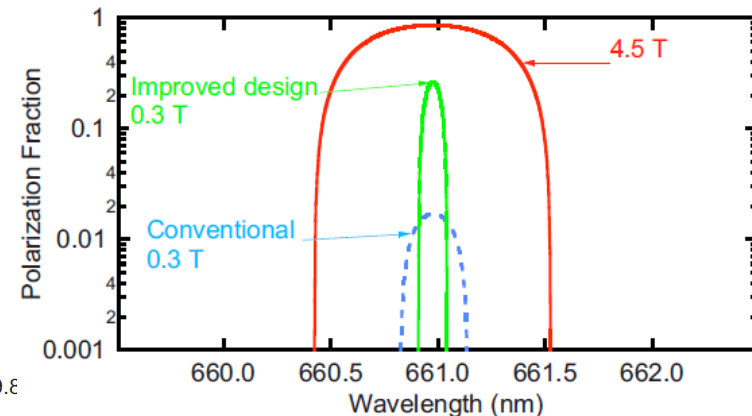
- Для работы метода нужно выделить π или σ компоненту MSE-спектра (группу линий)
- Степень поляризации $P_f = \frac{(I_{\parallel} - I_{\perp})}{(I_{\parallel} + I_{\perp})}$ определяется соотношением полосы пропускания интерференционного фильтра, штарковского расщепления и уширения спектральной линии. Этот параметр определяет соотношение сигнал/шум: $P_f \approx S/N \propto \sqrt{I}$. **Требуется $P_f \geq 0.1$!**
- Технологический предел производства многослойных интерференционных фильтров: $\text{FWHM} \leq 0.1 \text{ nm}$
- **Решение:** двулучепреломляющий фильтр Лيو с большой угловой апертурой



Полосы пропускания фильтров в сравнении с уширением линии MSE-спектра атомарного пучка (NSTX)



Измеренная полоса (FWHM) фильтра Лيو для диагностики MSE-LP на NSTX



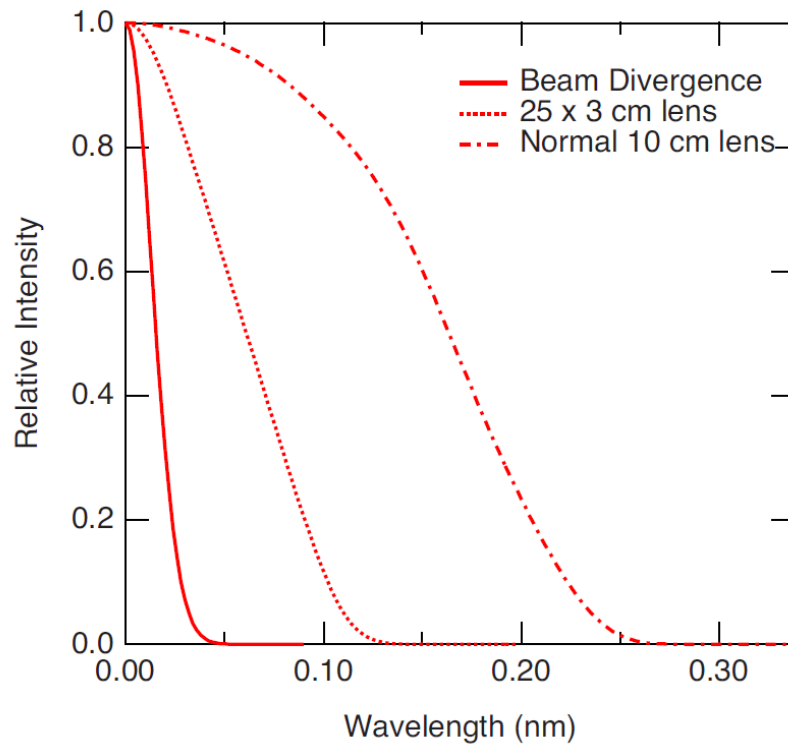
Степень поляризации с использованием многослойного интерференционного фильтра и фильтра Лيو (NSTX)

MSE-LP: измерение поляризации



Уширение спектральных линий атомарного пучка

- Апертурный угол оптической системы регистрации
- Угловой разброс в пучке (порядка 1° или 17 мрад)
- Разброс по энергиям вносит пренебрежимо малый вклад
- Решение: ограничение апертуры оптики в плоскости пучка и линии наблюдения (прямоугольная апертура)



Уширение линии MSE-спектра атомарного пучка на установке NSTX:

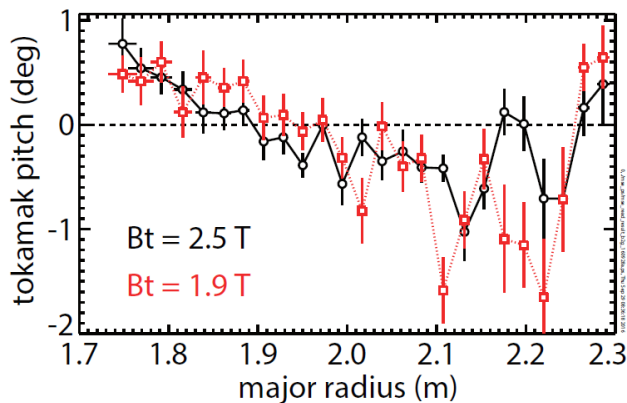
- Вклад углового разброса пучка
- Оптика с круглой апертурой диаметром 10 см
- Оптика с прямоугольной апертурой 25x3 см

MSE-LP: измерение поляризации

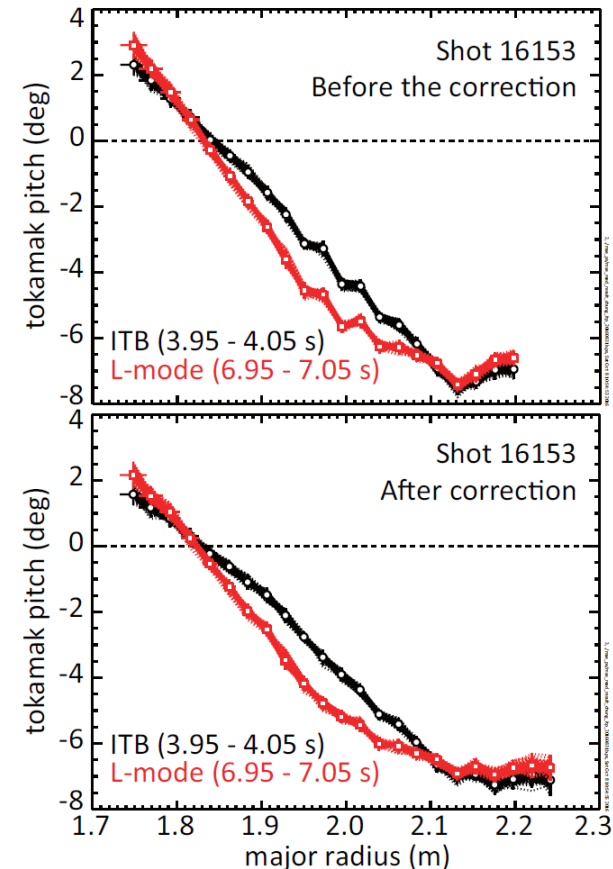


Калибровка аппаратной функции

- Эффект Фарадея в материале вакуумного окна и оптики (кварц, стекло STH-6)
 - «Паразитный» фотоупругий эффект в материале окна вследствие механических напряжений при вакуумной откачке
 - Нелинейная зависимость пропускания фильтра Лио от угла падения (для различных линий наблюдения)
 - ...
- Решение: эксперимент с инжекцией атомарного пучка в газовую мишень с рабочим значением магнитного поля, измерение профиля питч-угла поля



Калибровка смещения нулевой линии питч-угла магнитного поля по измерениям с инжекцией пучка в газовую мишень (KSTAR, 2017)

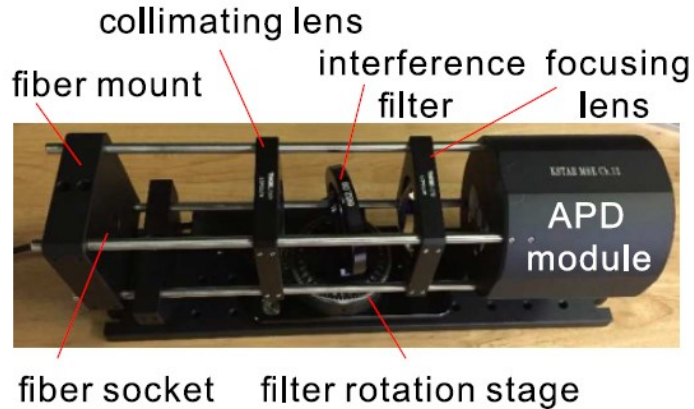


Радиальные профили питч-угла магнитного поля до и после учёта калибровки (KSTAR, 2017)

MSE-LP: измерение поляризации



Система регистрации сигналов диагностики MSE-LP



(a)



(b)

Измерительный модуль с узкополосным интерференционным фильтром и ЛФД (одна линия наблюдения)

- Температурная стабилизация $0.1 \text{ } ^\circ \text{C}$
- Юстировка фильтра в реальном времени по сигналу обратной связи от системы питания атомарного пучка (компенсация нестабильности энергии инжекции)

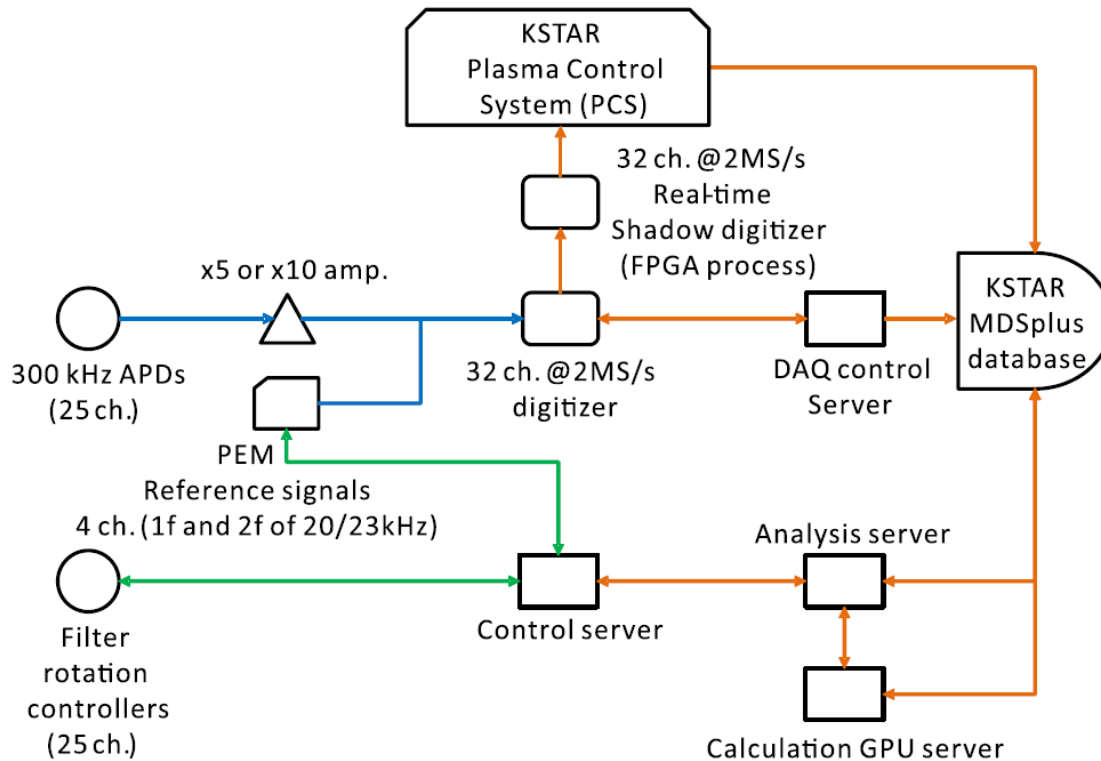
Система регистрации MSE-LP на KSTAR

- Отдельное помещение «аппаратной»
- 25 измерительных модулей

MSE-LP: измерение поляризации



Система управления и сбора данных диагностики MSE-LP

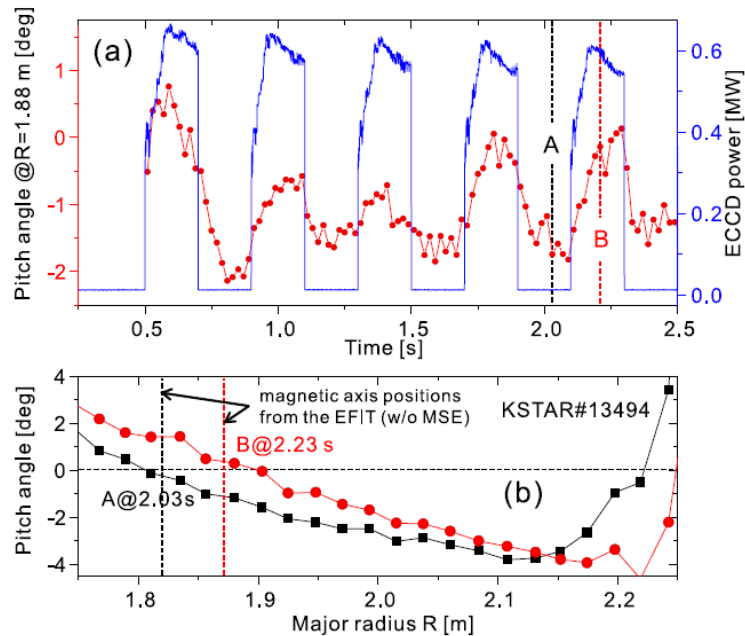


- Разрешение по времени в режиме “real-time analog lock-in” **10 мс** для формирования сигналов управления установкой
- Оцифровка сигналов с разрешением 16 бит и потоковая обработка в реальном времени при помощи кластера GPU (пока нет опубликованных данных)

MSE-LP: измерение поляризации



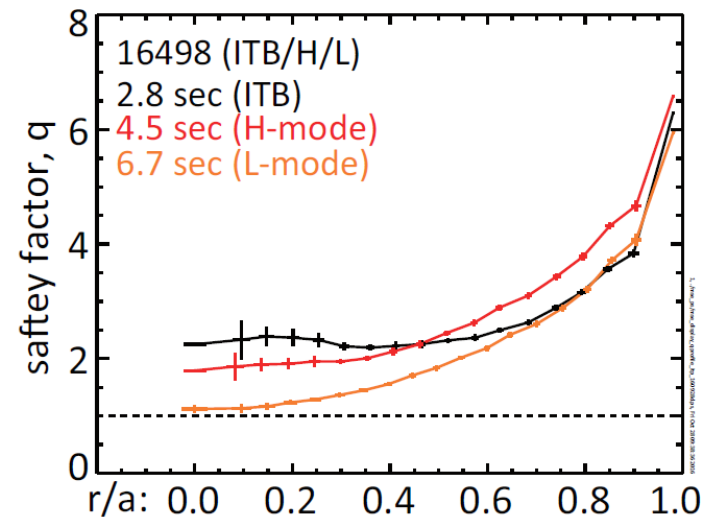
Результаты измерений



Динамика изменения пич-угла магнитного поля в KSTAR на радиусе 1.88 м в режиме с инжекцией СВЧ-мощности для поддержания плазменного тока (ECCD)

Изменение радиального профиля пич-угла магнитного поля в KSTAR в режиме с инжекцией СВЧ-мощности для поддержания плазменного тока (ECCD)

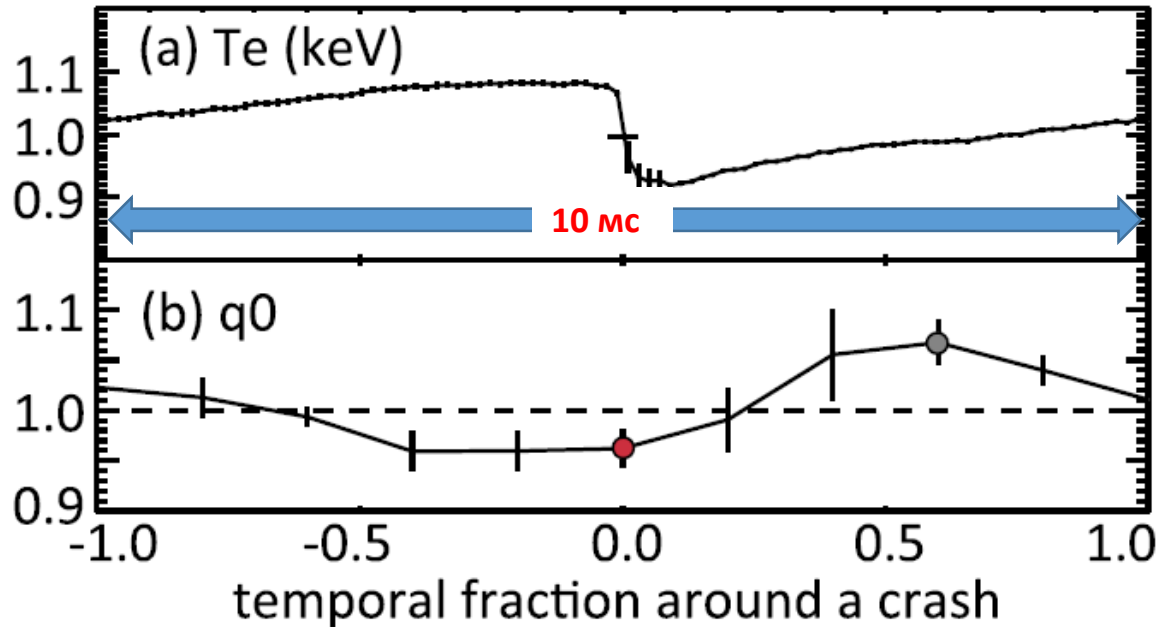
Радиальные профили запаса устойчивости (q) в KSTAR в различных режимах



MSE-LP: измерение поляризации

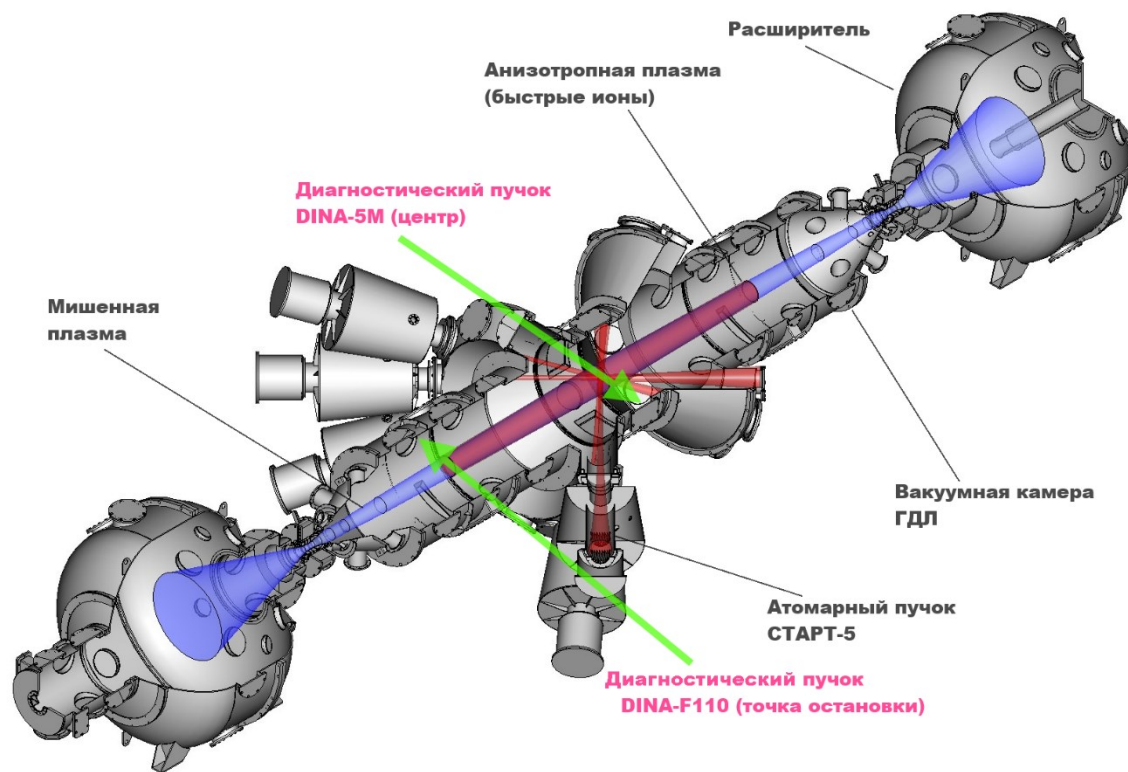


Результаты измерений



Динамика $q(0)$ во время модификации магнитных поверхностей при пилообразных колебаниях (sawtooth) в токамаке KSTAR

MSE-LS: измерение абсолютной величины магнитного поля



Принцип измерения:

Спектральный анализ излучения диагностического пучка

- Нет интерференционного фильтра – возможность измерять поля до ≈ 0.2 Т (по сравнению с ограничением ≈ 0.8 Т для MSE-LP)
- Нижний предел по полю определяется уширением спектральных линий MSE-спектра пучка (угловой разброс)

Спектральная MSE диагностика на ГДЛ: две независимые системы с использованием фокусированных диагностических пучков атомов дейтерия с энергией 45 кэВ (центр) и 50 кэВ (точка остановки быстрых ионов)

MSE-LS: измерение абсолютной величины магнитного поля

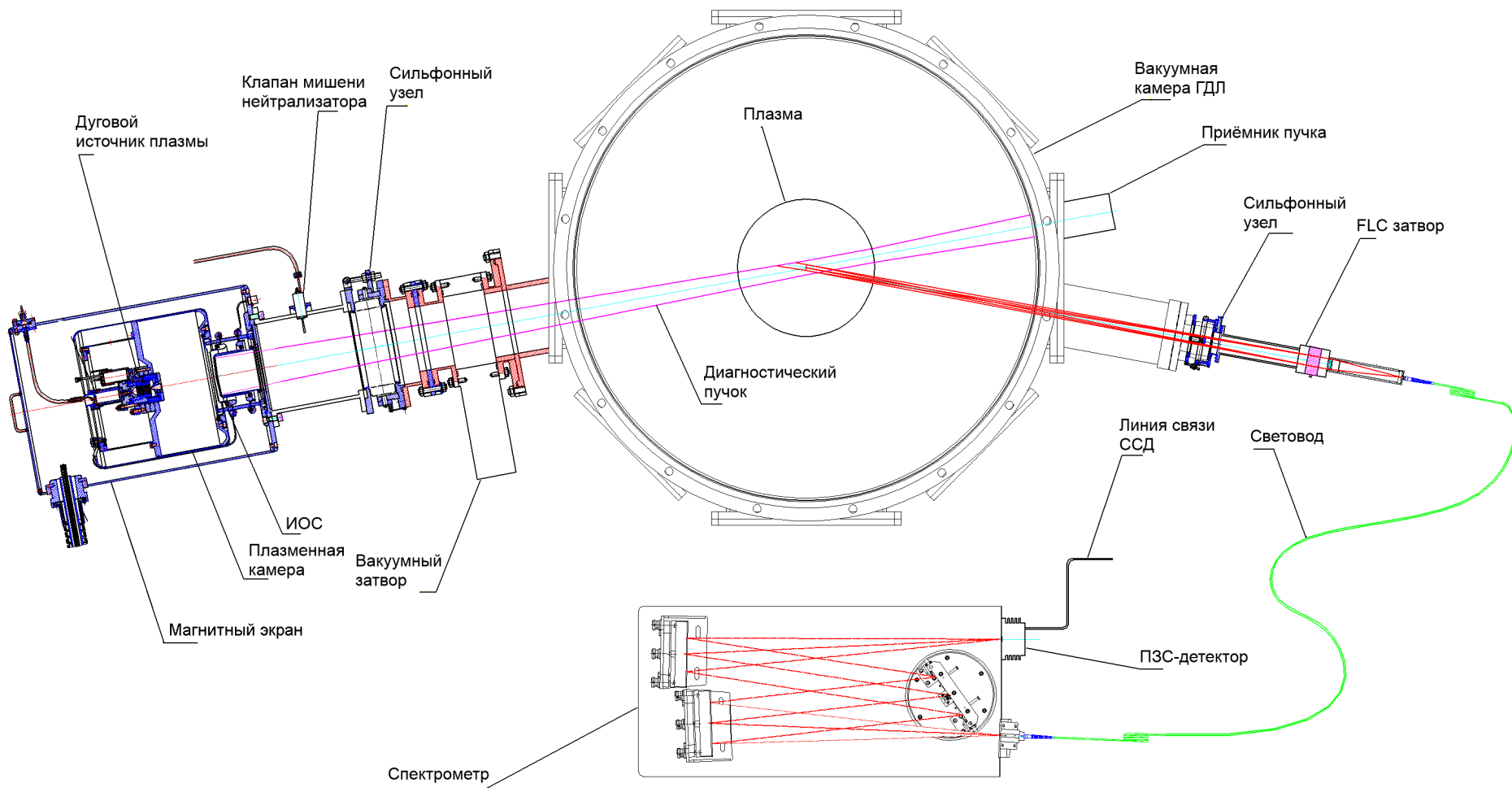
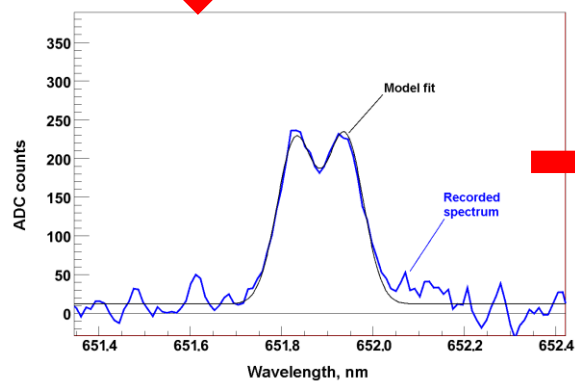
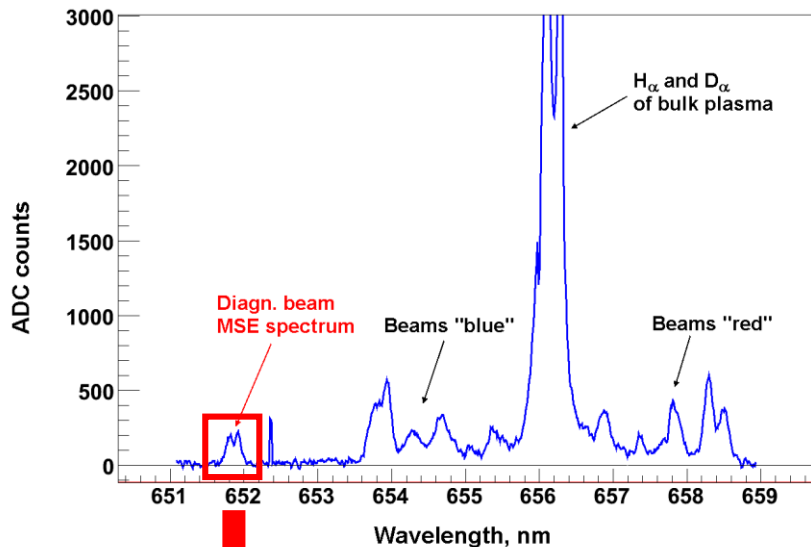


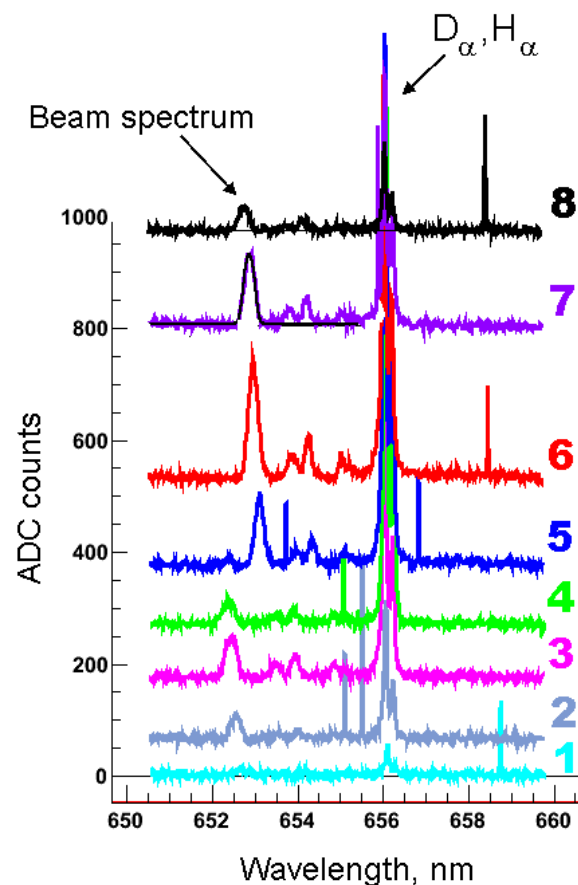
Схема спектральной MSE диагностика на ГДЛ (центр)

MSE-LS: измерение абсолютной величины магнитного поля



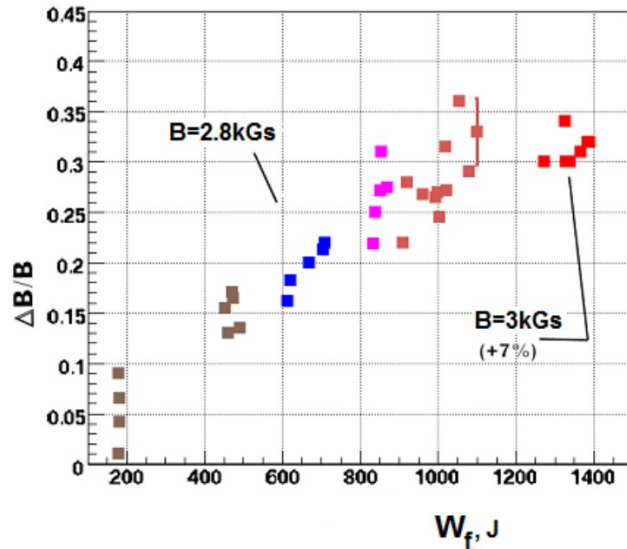
$|B| = 0.29 \pm 0.007 \text{ T}$
 $\tau_{int} = 200 \mu\text{s}$

Типичные спектры MSE, измеренные в центральной плоскости ГДЛ

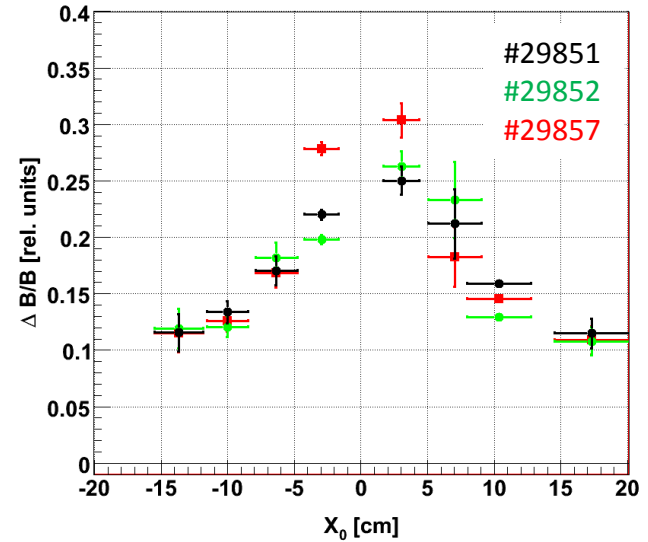


Типичные спектры MSE, измеренные в точке остановки быстрых ионов в ГДЛ (8 линий наблюдения)

MSE-LS: измерение абсолютной величины магнитного поля



Максимальная величина диамагнитного уменьшения поля в плазме как функция полной запасённой энергии в плазме ГДЛ
Предел по β ?



Поперечные профили диамагнитного уменьшения поля в плазме

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{B_{vac} - B_{pl}}{B_{vac}}$$

измеренные в области максимальной плотности анизотропной плазмы

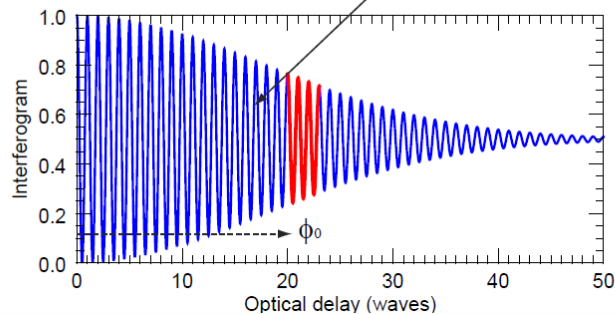
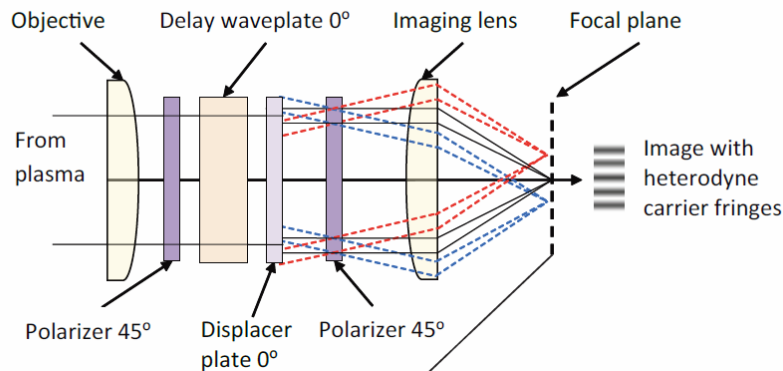
⇒ $\beta \cong 0.6$ на оси

⇒ Эффект пинчевания быстрых ионов

Imaging MSE: комбинация интерферометра и поляриметра

Основные принципы:

- Регистрация двумерных распределений интенсивности излучения
- Селекция частично-когерентного и частично-поляризованного излучения
- «Пространственное гетеродинирование»: кодирование характеристик частотной когерентности света и свойств поляризации в структуре интерференционных полос в изображении



$$S = I[1 + \xi_I \xi \cos(\phi_I + \phi)],$$

ξ_I, ϕ_I - параметры аппаратной функции,

ξ, ϕ - наблюдаемые изменения

контрастности и фазы интерференционных полос, определяемые свойствами излучения (например, поляризация линий штарковского спектра)

Анализ интерферограмм производится при сравнении с «фоновым» изображением, содержащим структуру интерференционных полос при освещении монохроматическим источником с длиной волны, близкой к рабочей спектральной области. Это и есть аппаратная функция.

Анализ интерферограмм:

Фаза аппаратной функции $\phi_I = \phi_0 + k_0 x + \phi_S$:

$\phi_0 = 2\pi L (n_e(\lambda) - n_o(\lambda)) / \lambda_0$ - выбранное смещение фазовой пластины (в соответствии с длиной когерентности исследуемого излучения),

$k_0 = 2\pi d / f \lambda_0$ - волновой вектор, определяемый разделением лучей d и фокусным расстоянием f ,

ϕ_S - дополнительный систематический фазовый сдвиг, являющийся свойством неидеальности системы

На вход интерферометра-поляриметра поступает **неполяризованное излучение** (например, все компоненты штарковского спектра, выделенные интерференционным фильтром с FWHM ≈ 1 нм). Разрешение (дискриминация) обеспечивается за счёт придания компонентам с различной поляризацией специально подобранной задержки при помощи фазовой пластины.

Декодирование фотографий-интерферограмм производится одним из существующих развитых методов, например, методом демодуляции Гилберта.

Imaging MSE

Применение изображающего интерферометра-поляриметра с пространственным гетеродинированием в MSE диагностике

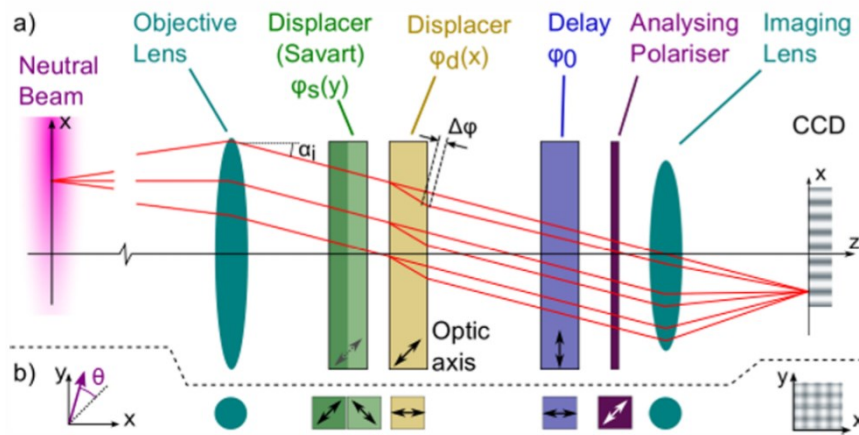
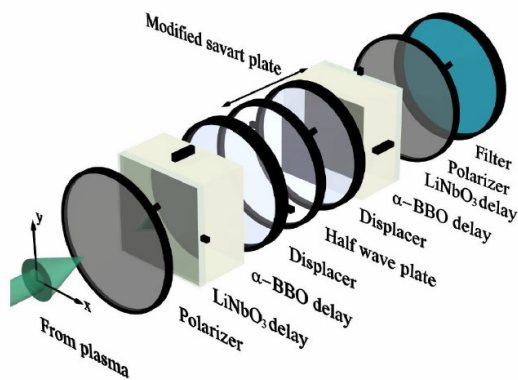
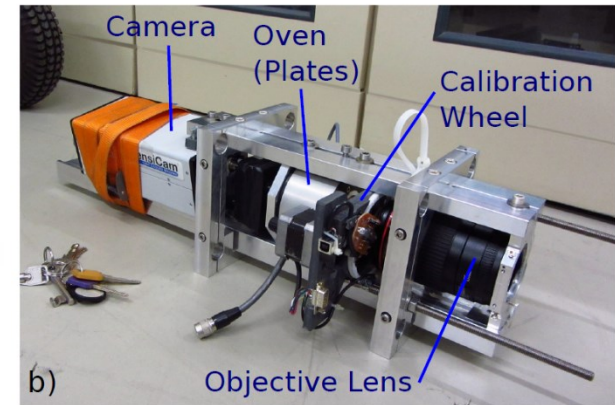


Схема оптической системы регистрации Imaging MSE с двумерной пространственной несущей и ориентация осей двулучепреломляющих элементов

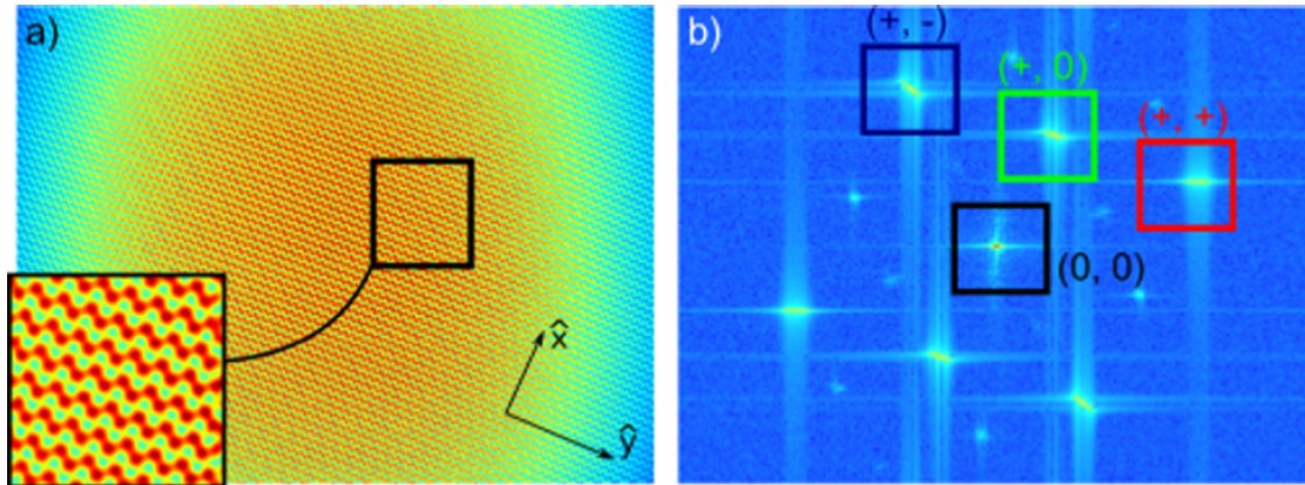


Компоненты оптической системы регистрации Imaging MSE

Imaging MSE



Регистрация и демодуляция двумерных интерферограмм Imaging MSE (на примере диагностики AUG)



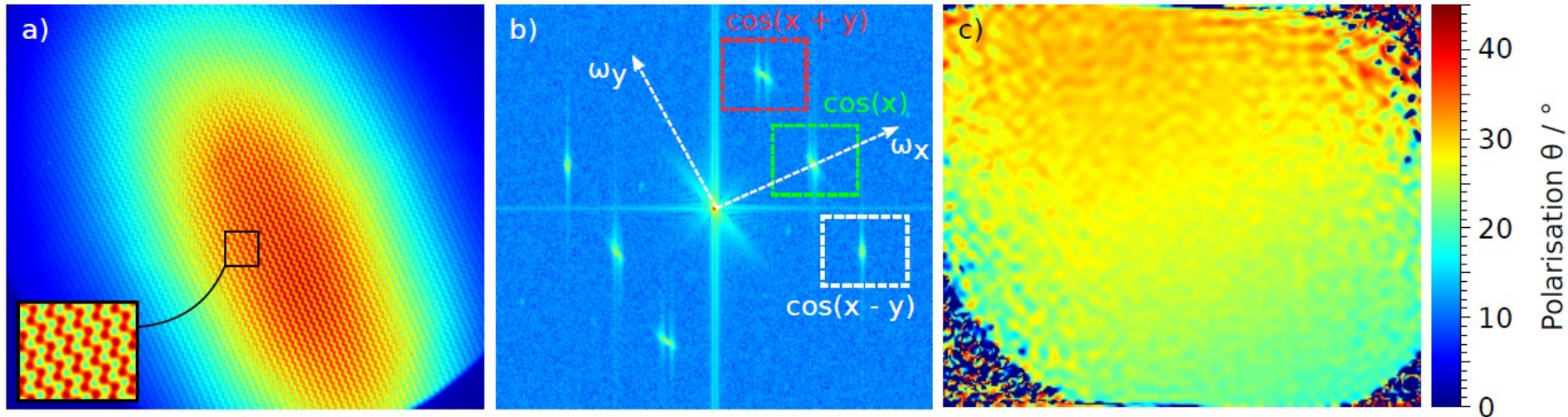
Пример тестового изображения Imaging MSE на установке AUG (использовалась «лампа Зеемана» – квазимонохроматичный источник света с магнитным полем). Показано окно для пространственного преобразования Фурье (справа).

- Спектральный диапазон: 651÷655 нм (MSE-спектр нагревного дейтериевого пучка, смещённый в коротковолновую область).
- В зависимости от выбора толщины фазовой пластины α – BBO, изображение содержит от 75 до 700 интерференционных полос.

Imaging MSE



Регистрация и демодуляция двумерных интерферограмм Imaging MSE (на примере диагностики AUG)



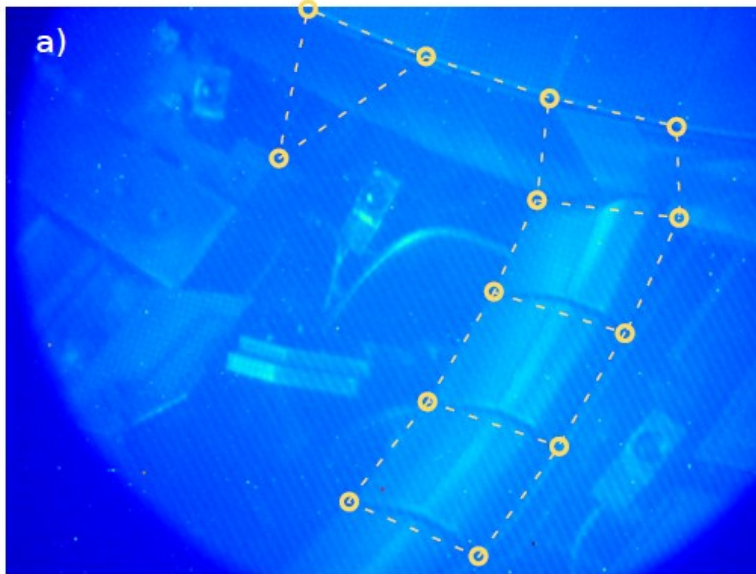
Пример изображения Imaging MSE в эксперименте с атомарным пучком на установке AUG. Показано окно для пространственного преобразования Фурье (справа).

Результат демодуляции – распределение угла поляризации (питч-угол).

Imaging MSE

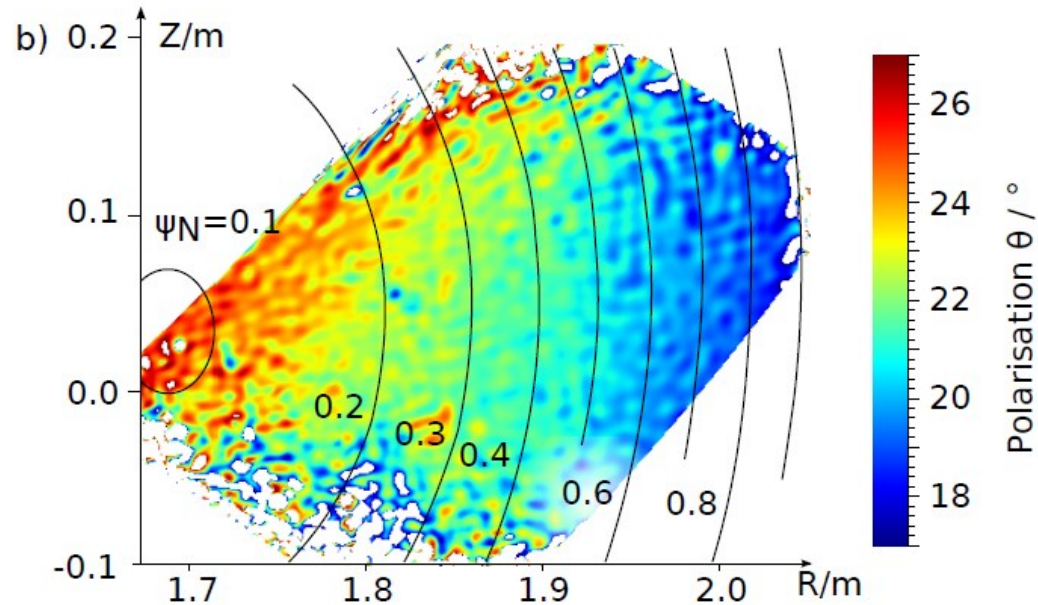


Регистрация и демодуляция двумерных интерферограмм Imaging MSE (на примере диагностики AUG)



Калибровочное изображение Imaging MSE (без атомарного пучка) на установке AUG.

Отмеченные точки имеют точно измеренные координаты в вакуумной камере установки и использовались для преобразования изображений.

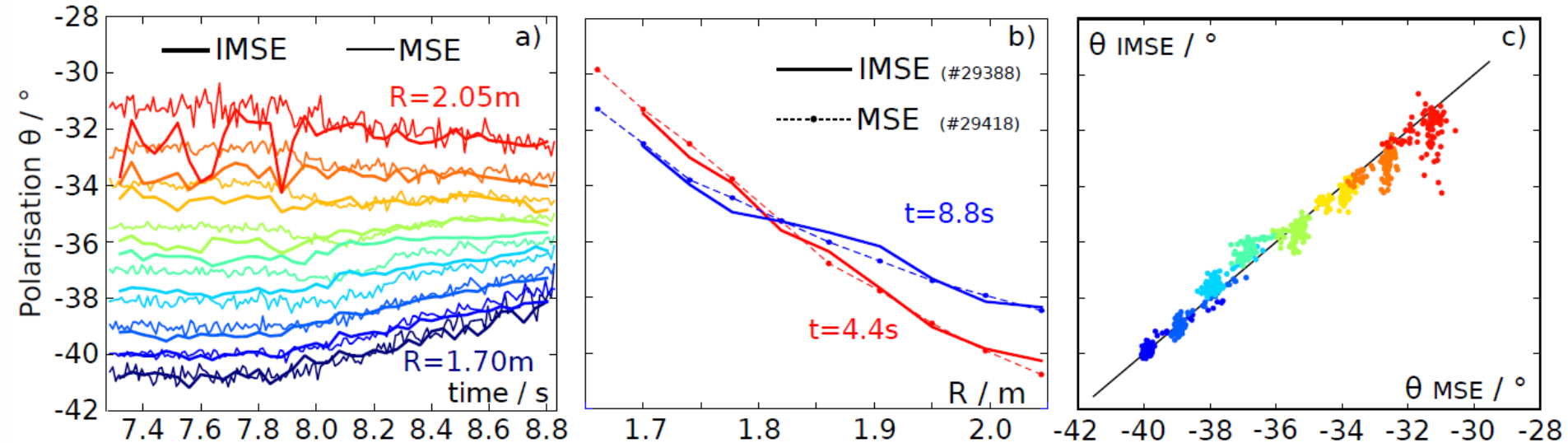


Распределение питч-угла, пересчитанное в торoidalные координаты токамака.

Imaging MSE



Сравнение результатов Imaging MSE и MSE-LP (на примере диагностики AUG)



Динамика изменения питч-угла на различных радиусах, сравнение данных «традиционной» диагностики MSE-LP и Imaging MSE.

Радиальные профили питч-угла, сравнение данных «традиционной» диагностики MSE-LP и Imaging MSE.

Корреляция результатов «традиционной» диагностики MSE-LP и Imaging MSE в течение одного разряда.

Модели для обработки данных MSE диагностики



I. Точные значения энергии уровней в атоме водорода в произвольном электрическом и магнитном полях

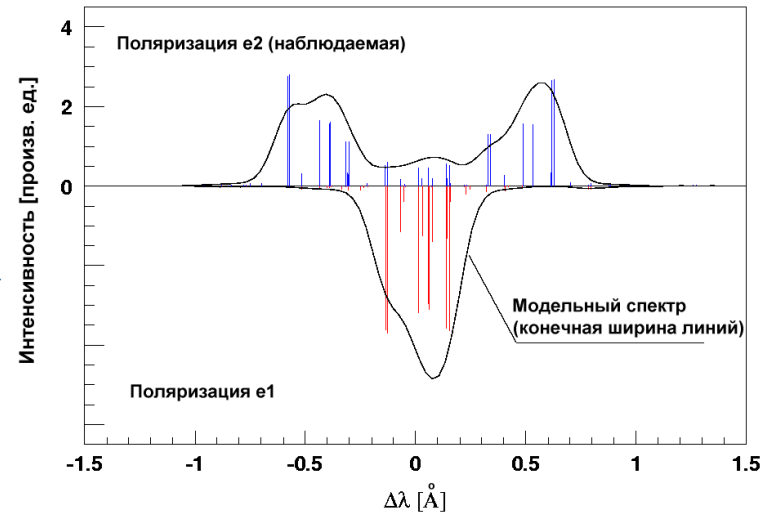
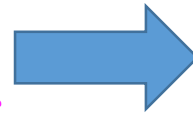
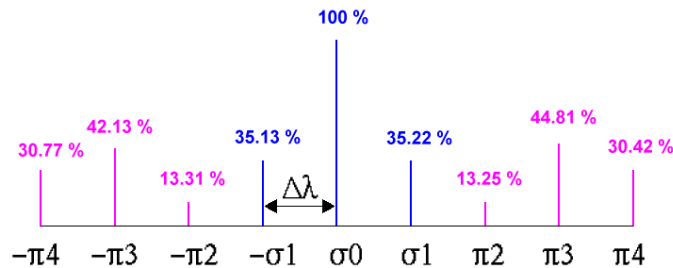
Гамильтониан электрона в атоме водорода: $\hat{H}_{total} = \hat{H}_{rel} + \hat{H}_{Stark} + \hat{H}_{Zeeman}$

$$\hat{V} = -\frac{\hat{p}^4}{8m^3c^2} + \frac{1}{2} \left(\frac{e\hbar}{mc} \right)^2 \frac{1}{r^3} \hat{l}\hat{s} + \frac{\pi e^2}{2\hbar c^3 m^2} \delta(\mathbf{r}) \quad \hat{H}_{Stark} = \frac{evB}{c} \cdot \hat{x}. \quad \hat{H}_{Zeeman} = (g_l \hat{L}_z + g_s \hat{S}_z) \mu_B B_z.$$

Собственные числа оператора взаимодействия – энергии уровней

π - polarisation: $\parallel E$ (Lorenz electric field)

σ - polarisation: $\perp E$



Модели для обработки данных MSE диагностики



II. Относительные интенсивности линий в спектре (форма спектра)

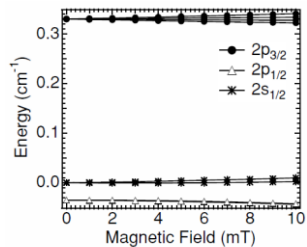
Требуется модель для расчета относительных интенсивностей оптических переходов 3→2 атома водорода с учётом столкновений с частицами плазмы и возбуждения лазерным излучением.

Решается система из 144 уравнений (по числу уровней с n=2, 3):

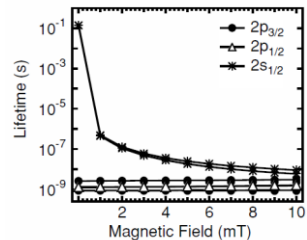
$$v \frac{dn_i}{dx} = - \left[I_i + \sum_{j>i} E_{ij} + \sum_{j<i} D_{ij} + \sum_{j<i} A_{ij} + W_{ij} \right] n_i + \left[\sum_{j<i} E_{ji} + \sum_{j>i} D_{ji} + \sum_{j>i} A_{ji} + W_{ji} \right] n_j + R_i n_{ion}$$

n_i - плотность популяции на уровне i , I_i - скорость ионизации с уровня i , E_{ij} - скорость возбуждения $i \rightarrow j$, D_{ij} - скорость де-возбуждения $i \rightarrow j$, A_{ij} - скорость радиационного перехода $i \rightarrow j$, W_{ij} - скорость лазерной накачки $i \rightarrow j$, R_i - скорость рекомбинации на уровень i , n_{ion} - плотность ионов в плазме.

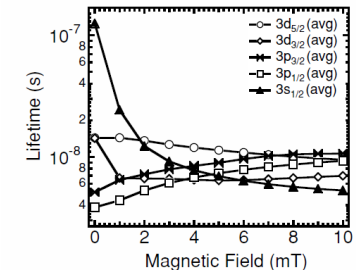
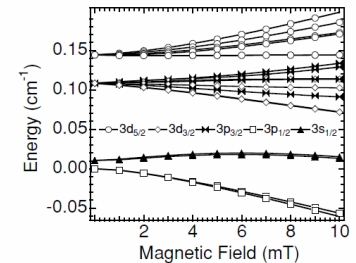
Пример решения упрощённой задачи: модель CRISP (E. Foley, F. Levinton)



Энергия и время некоторых уровней n=2 как функция магнитного поля



Энергия и время некоторых уровней n=3 как функция магнитного поля

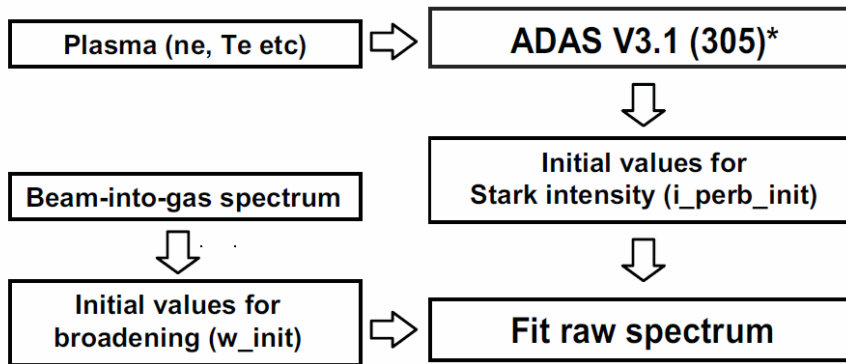


Модели для обработки данных MSE диагностики



II. Относительные интенсивности линий в спектре (форма спектра)

Применение ADAS (Atomic Data Analysis Structure)



Блок-схема обработки данных с использованием ADAS (MST)

Мотивация: наблюдаемая асимметрия σ -пиков в спектре MSE, не объясняемая моделью статистического распределения заселённости уровней энергии

Fitting was typically performed for individual peaks.

