



РОСАТОМ

ГОСУДАРСТВЕННАЯ КОРПОРАЦИЯ ПО АТОМНОЙ ЭНЕРГИИ «РОСАТОМ»

ФГУП «РФЯЦ-ВНИИЭФ»

Институт Теоретической и Математической Физики

ГЕНЕРАЦИЯ МАГНИТНОГО ПОЛЯ В ПЛАЗМЕ ЛАЗЕРНОГО ПУЧКА ВЫСОКОЙ ЭНЕРГИИ ПО РЕЗУЛЬТАТАМ 2D МОДЕЛИРОВАНИЯ

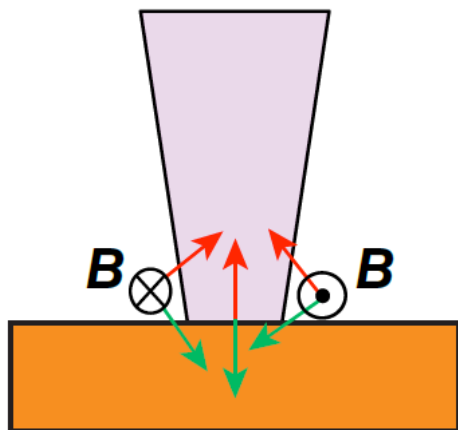
Авторы: А.С. Гнутов, С.А. Донцов, К.А. Волкова

XIII Забабахинские научные чтения

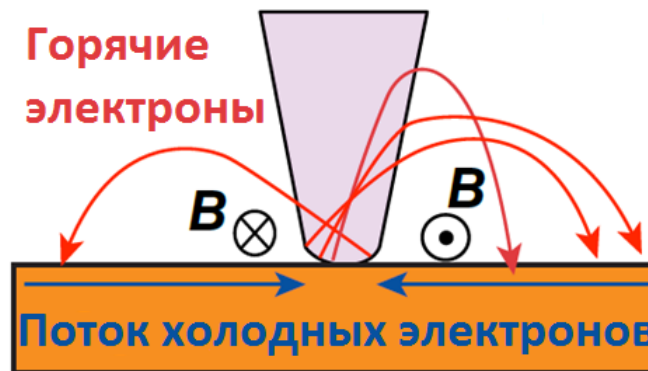
20-24.03.2017

- 1966 год - Первые измерения самогенерирующихся магнитных полей маленькими индукционными датчиками вблизи лазерной газовой мишени (В.В. Коробкин, Р.В. Серов, ЖЭТФ, 1966 г.)
- 1967 год – Измерения около твердых мишеней (Г.А. Аскарян, М.С.Рабинович и др., ЖЭТФ 1967 г.)
- 1971 год – Обнаружены относительно большие поля (кГс) (J. A. Stamper et al., Phys. Rev. Lett. 1971 г.)
- Генерация магнитного поля в лазерных экспериментах теоретически объяснена с помощью тепловых механизмов
- Стало очевидно, что очень большие (МГс) поля могут существовать в области лазерного пятна и существенно влиять на проходящие процессы
- Большие поля (МГс) измерены с помощью Фарадеевского вращения диагностического лазерного пучка (A. Davies et al., Rev. Sci. Instrum. 85, 2014 г.)
- Теоретически предсказываются магнитные поля в 10 МГс (A. Davies et al, 56th Annual Meeting of the American Physical Society, New Orleans, LA 2014) и более (X.Q. Li, S.Q. Liu, and X.Y. Tao, Plasma Phys. 48, 2008)

Механизм генерации поля



$$\partial \mathbf{B} / \partial t \sim -\nabla n \times \nabla T$$



$$\partial \mathbf{B} / \partial t \sim \nabla \times \mathbf{J}^{\text{hot}}$$

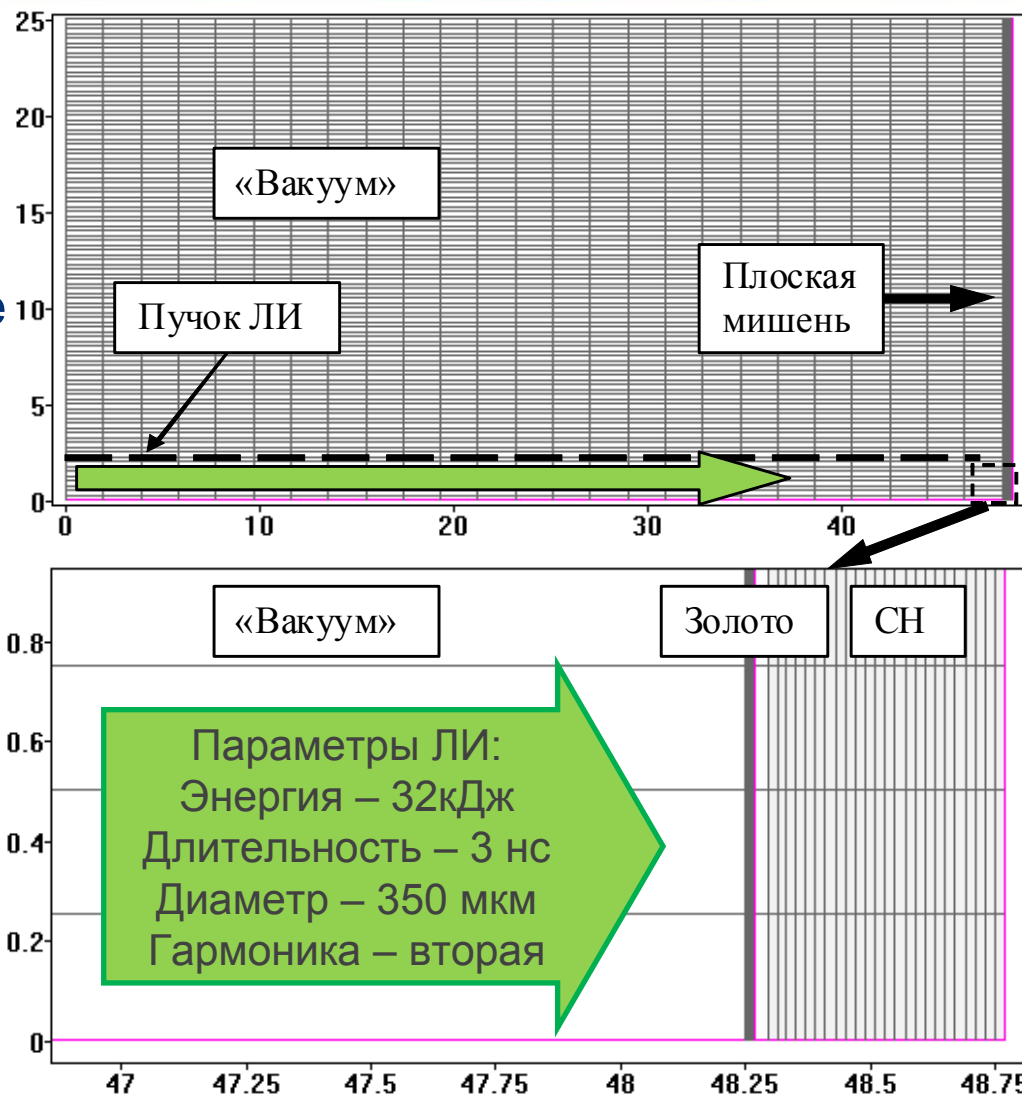
$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \frac{c^2}{4\pi\sigma} \nabla^2 \mathbf{B} - \nabla \times \left[\left(\frac{\mathbf{J}^0 + \mathbf{J}^r}{ne} \right) \times \mathbf{B} \right] + \mathbf{S}$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}^t}{\partial t} = \mathbf{S}^t = \frac{c}{ne} \nabla(kT) \times \nabla n$$

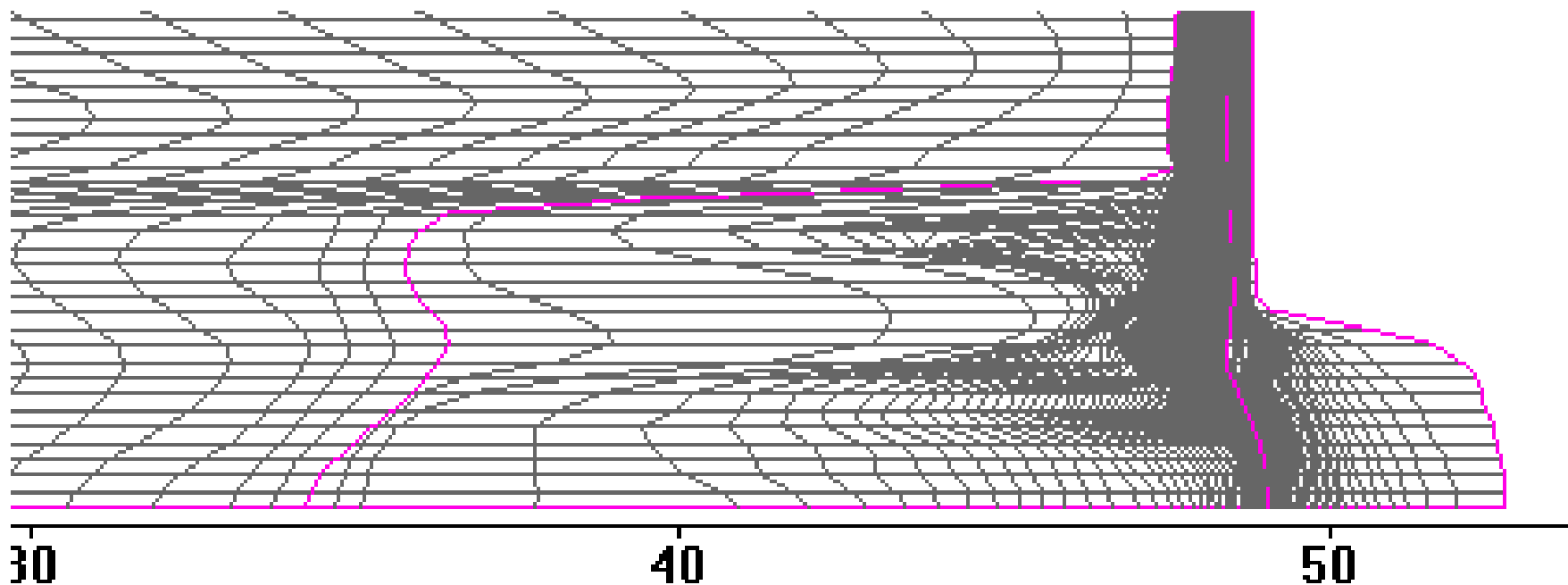
Постановка ГД-задачи

В расчетах учитывались следующие процессы:

- газодинамическое движение плазмы в 3Т приближении,
- спектральный перенос РИ,
- электронная и ионная теплопроводности и релаксация,
- ионизация вещества,
- перенос и поглощение ЛИ.



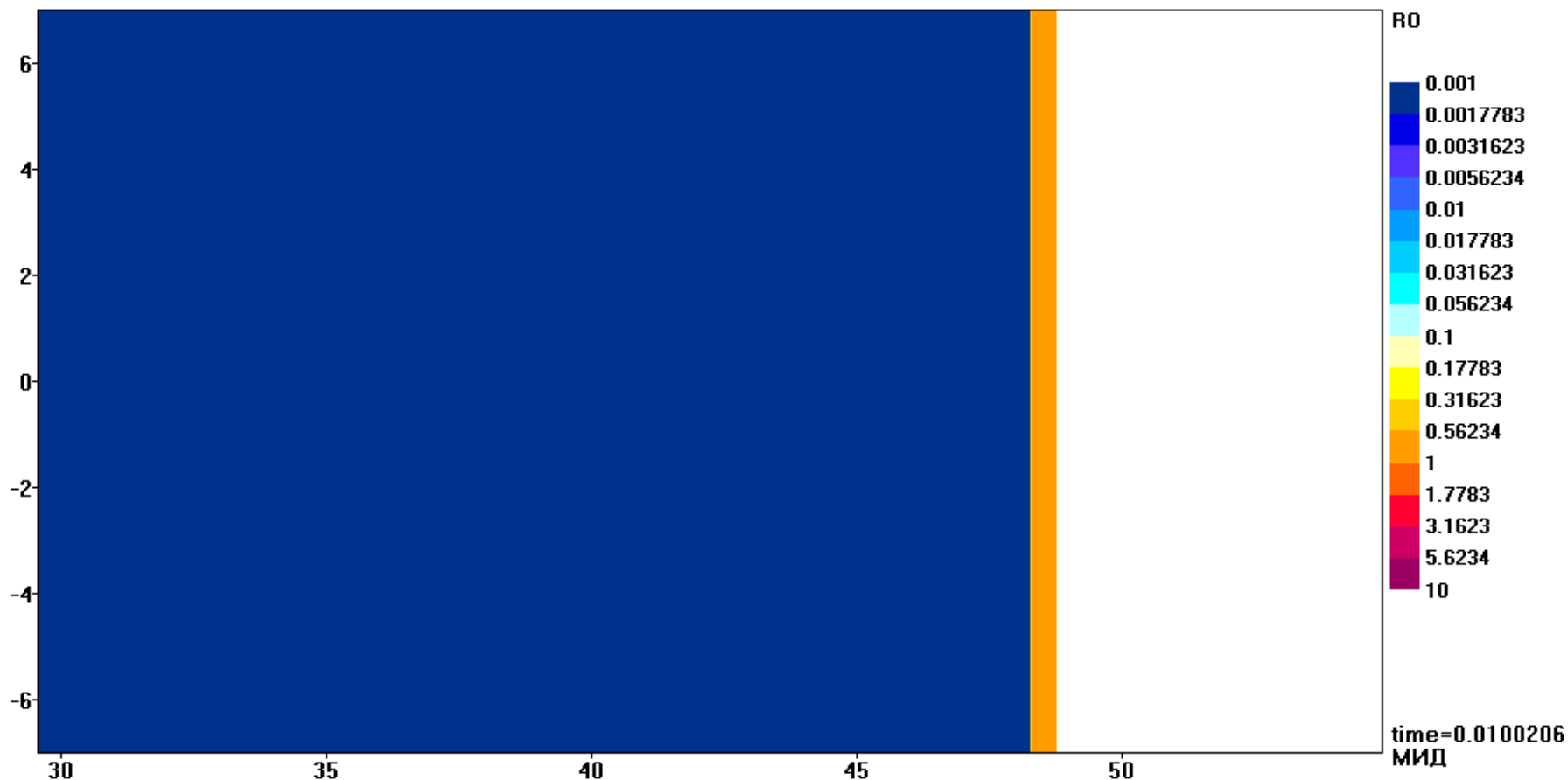
Фрагмент расчетной сетки в задаче на момент 1.5 нс
(~ середина импульса)



Результаты ГД-расчета



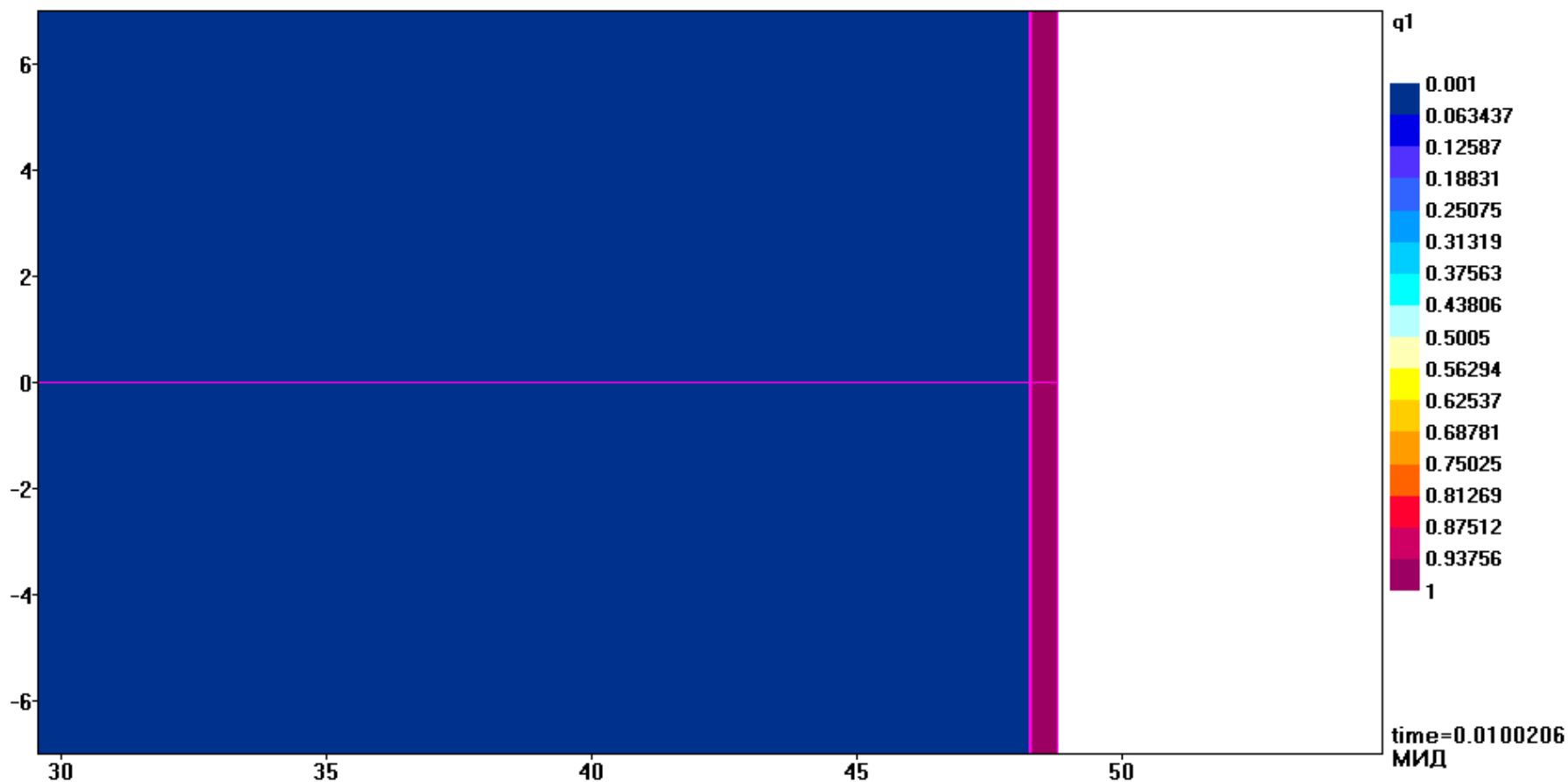
Расчетное распределение плотности вещества в задаче (логарифмическая шкала)



Результаты ГД-расчета



Расчетное распределение крит. плотности вещества
в задаче (линейная шкала)

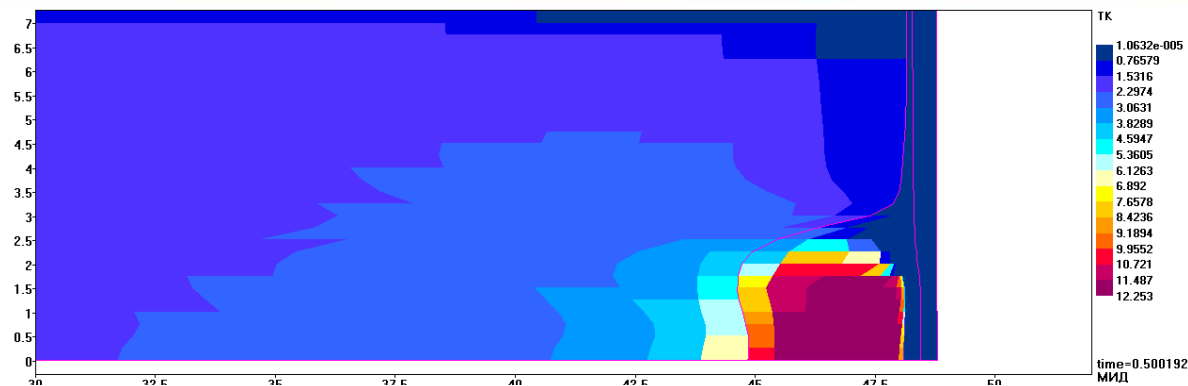


Результаты ГД-расчета

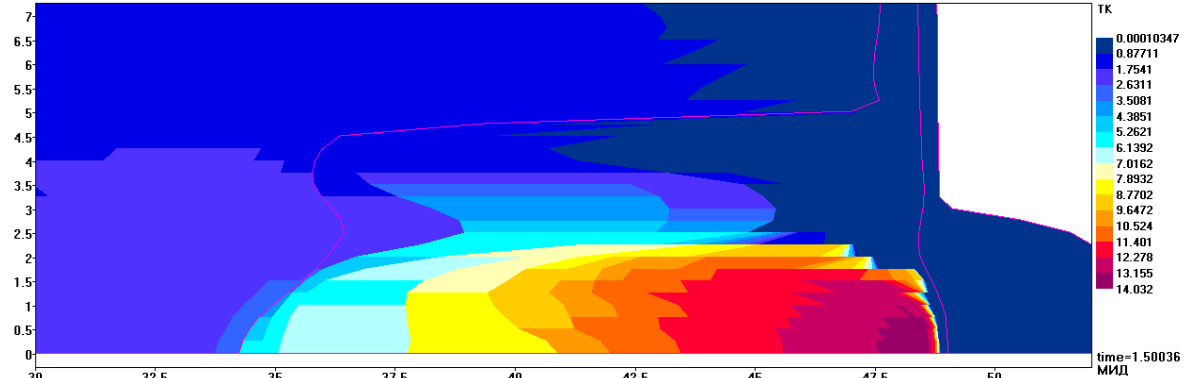


РОСАТОМ

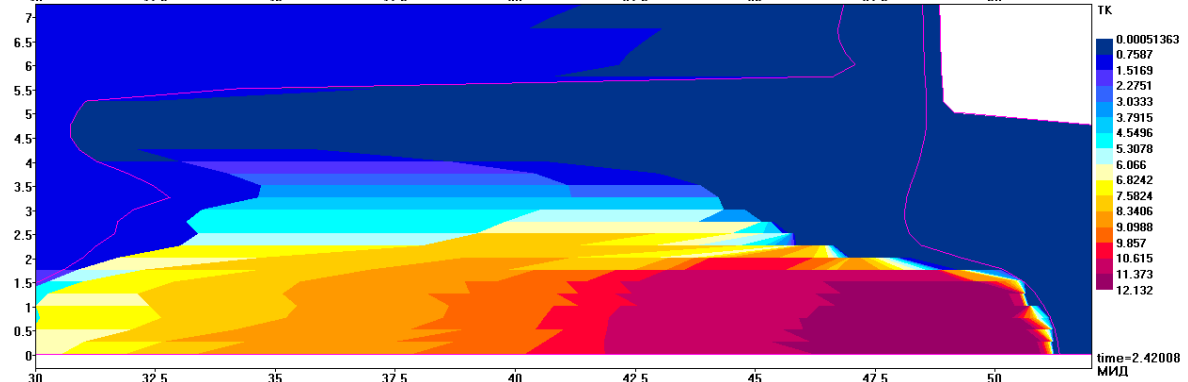
T_e 0.5 нс



T_e 1.5 нс

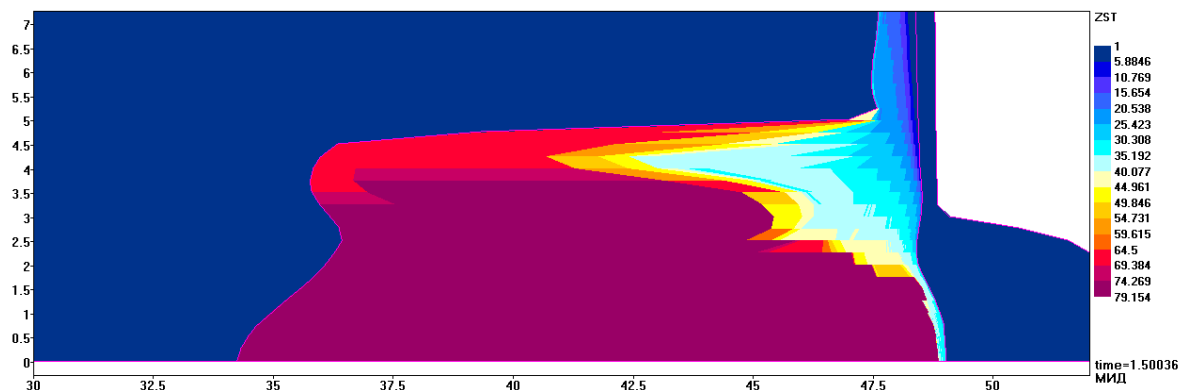


2.5 нс

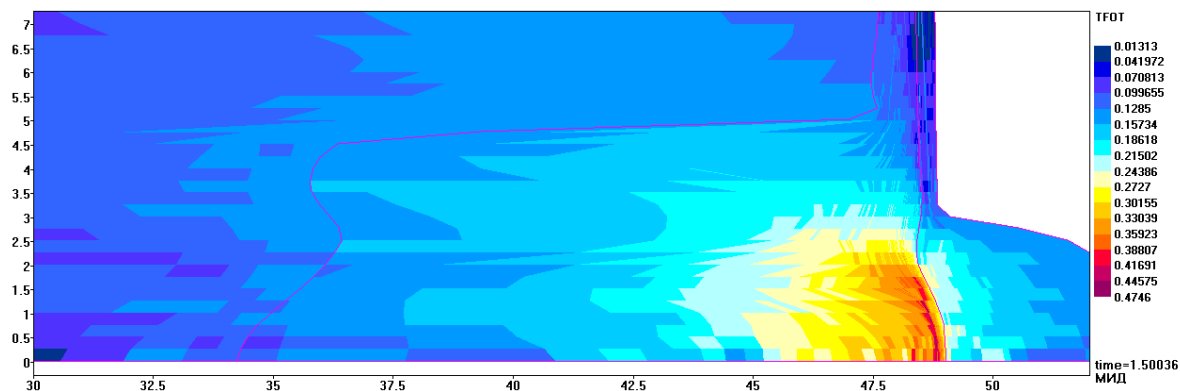


1.5 нс

Степень
ионизации
веществ



Температура
излучения

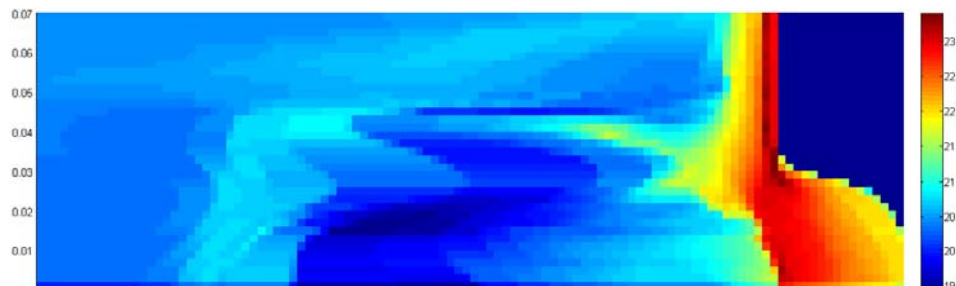


Вычисление генерирующего члена

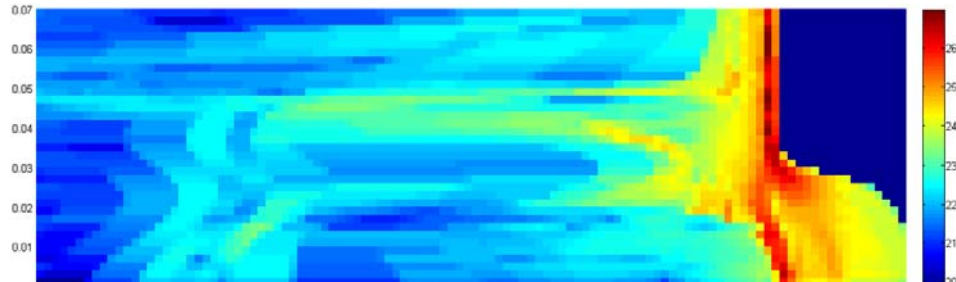
$$\frac{\partial \mathbf{B}^t}{\partial t} = \frac{c}{ne} \nabla(kT) \times \nabla n \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)_{i,j}^\tau = \frac{c}{e \cdot n_{i,j}^\tau} \nabla(kT)_{i,j}^\tau \times \nabla n_{i,j}^\tau$$

1.5 нс

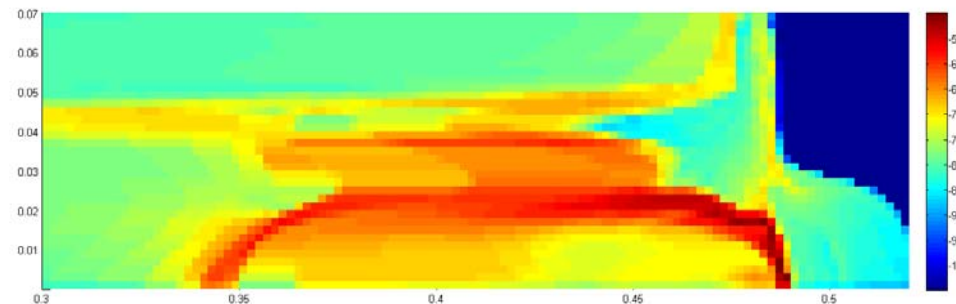
$$n_{i,j}^\tau$$



$$\nabla n_{i,j}^\tau$$



$$\nabla T_{i,j}^\tau$$

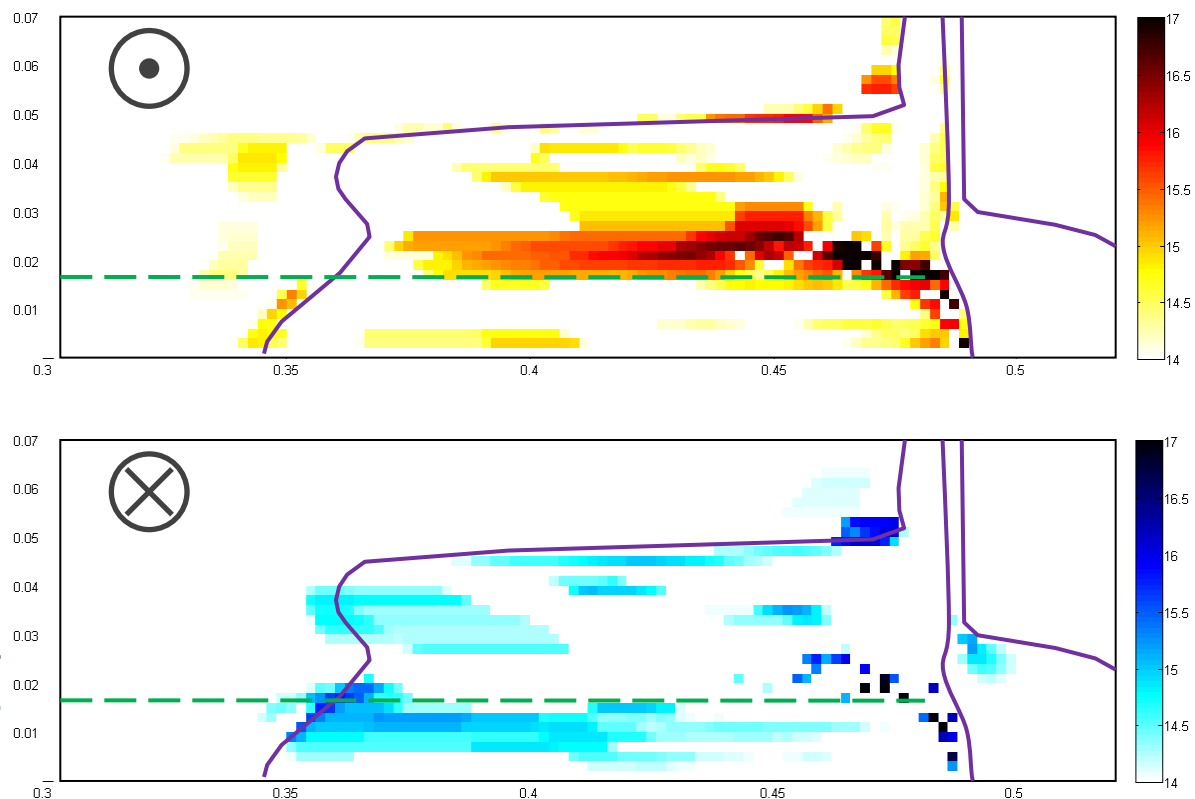


Вычисление генерирующего члена

$$\frac{\partial \mathbf{B}^t}{\partial t} = \frac{c}{ne} \nabla(kT) \times \nabla n \quad \Rightarrow \quad \left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)_{i,j}^\tau = \frac{c}{e \cdot n_{i,j}^\tau} \nabla(kT)_{i,j}^\tau \times \nabla n_{i,j}^\tau$$

Пространственное распределение генерирующего члена магнитной индукции $\delta \mathbf{B} / \delta t$ на момент времени 1.5 нс

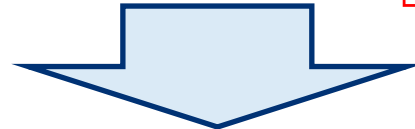
По цветовой шкале отображаются уровни от 10^{14} до 10^{17} Гс/с, то есть от 100кГс/нс до 100 МГ/нс.



Что дальше?

$$\frac{\partial \mathbf{B}^t}{\partial t} = \mathbf{S}^t = \frac{c}{ne} \nabla(kT) \times \nabla n$$

$$\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} = \nabla \times (\mathbf{V} \times \mathbf{B}) + \frac{c^2}{4\pi\sigma} \nabla^2 \mathbf{B} - \nabla \times \left[\left(\frac{\mathbf{J}^0 + \mathbf{J}^r}{ne} \right) \times \mathbf{B} \right] + \mathbf{S}$$



$$\mathbf{B} = \mathbf{B}(r, t)$$

$$\mathbf{B}^t = \int \frac{\partial \mathbf{B}^t}{\partial t} dt = \int \frac{c}{ne} \nabla(kT) \times \nabla n dt$$

Оценка магнитного поля

Распределение в пространстве магнитной индукции, обусловленной термогенерацией.

$$\left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}\right)_{i,j}^{\tau} = \frac{c}{e \cdot n_{i,j}^{\tau}} \nabla(kT)_{i,j}^{\tau} \times \nabla n_{i,j}^{\tau}$$



$$\mathbf{B}_{i,j}^{\tau} = \sum_{t=1..{\tau}} \left(\left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t}\right)_{i,j}^t \cdot \Delta \tau^t \right)$$



100кГс-1МГс
1Мгс-10МГс
более 10Мгс



100кГс-1МГс
1Мгс-10МГс
более 10Мгс

Оценка магнитного поля



РОСАТОМ

Распределение в пространстве магнитной индукции, обусловленной термогенерацией.

$$\mathbf{B}_{i,j}^{\tau} = \sum_{t=1..{\tau}} \left(\left(\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \right)_{i,j}^t \cdot \Delta \tau^t \right)$$



100кГс-1МГс

1Мгс-10МГс

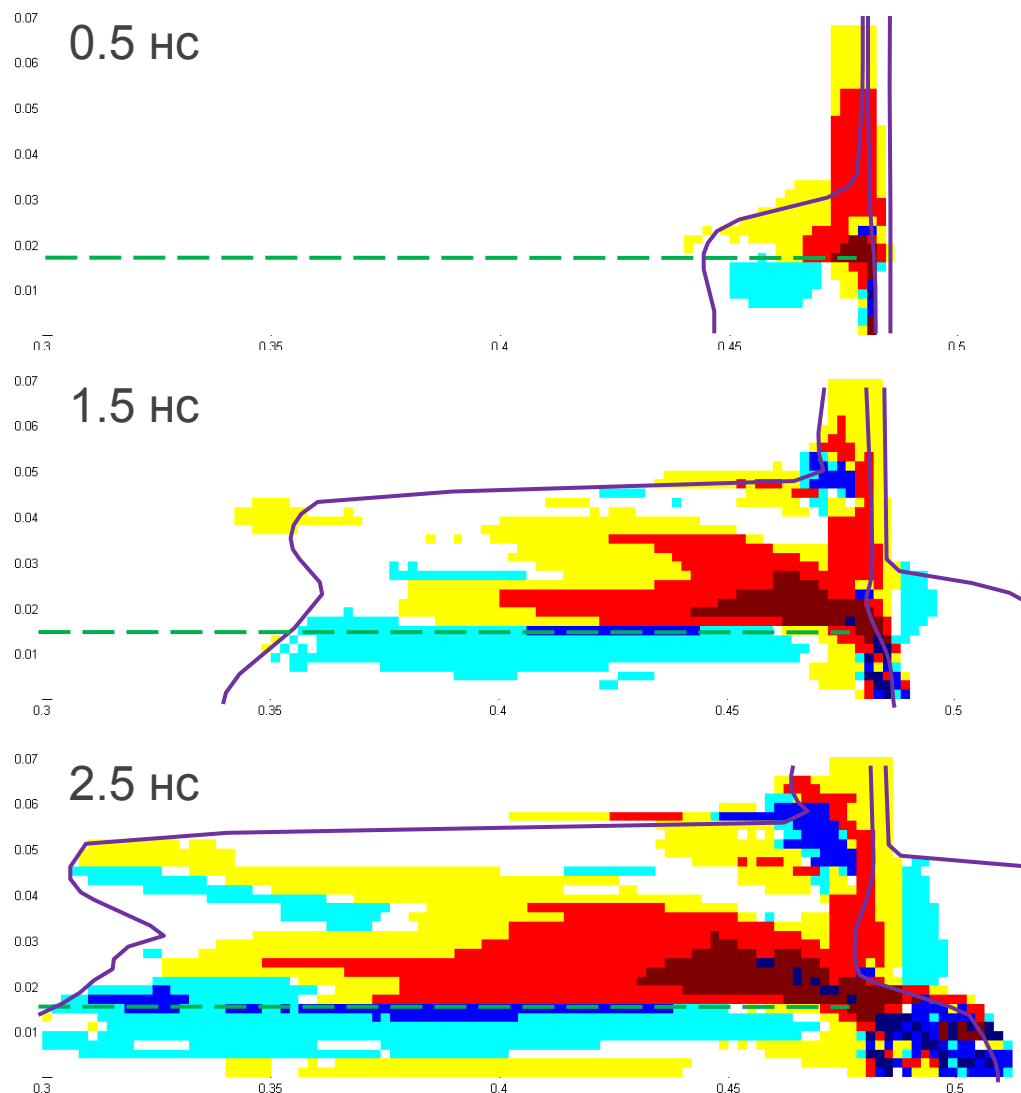
более 10Мгс



100кГс-1МГс

1Мгс-10МГс

более 10Мгс



Величина скорости образования магнитного поля достигает, в отдельных точках пространства, значений до 100 МГц/нс. Величина лазер-генерируемого магнитного поля, оцененная как соответствующий интеграл от рассчитанных скоростей образования поля в пространстве, в некоторых областях достигает значений 10-100 МГц. Область пространства, в которой реализуется генерация магнитного поля с уровнем более 1 МГц представляет собой цилиндрический слой вокруг лазерного пучка длиной около 1.5 мм и толщиной до 0.2 мм. Магнитное поле преимущественно ориентировано по правому винту относительно направления падения лазерного излучения

