
Особенности переноса энергии быстрыми электронами в сферической мишени лазерного термоядерного синтеза прямого облучения

С.Ю. Гуськов², Н.В. Змитренко¹, [П.А. Кучугов](#)^{1,2}, Р.А. Яхин²

¹Институт прикладной математики им. М.В. Келдыша РАН

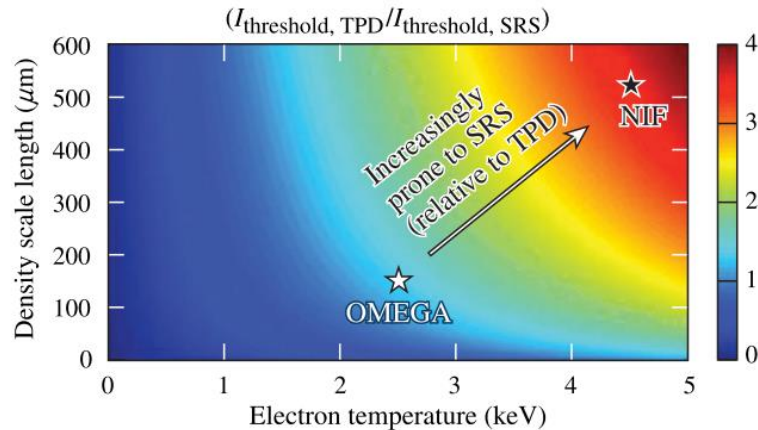
²Физический институт им. П.Н. Лебедева РАН

XIV Забабахинские научные чтения

г. Снежинск, Челябинская обл., РФ, 18-22 марта 2019



Fast electron generation in laser-driven fusion problems and recent experimental results on NIF for direct-drive



Генерация быстрых электронов
возможна в основном в
результате:

- двухплазмонного распада (TPD)
- вынужденного рамановского рассеяния (SRS)

Распределение отношения однопучковых пороговых интенсивностей для двухплазмонного распада и вынужденного рамановского рассеяния от масштаба неоднородности плазмы и значения электронной температуры.

Nd : Glass 3ω

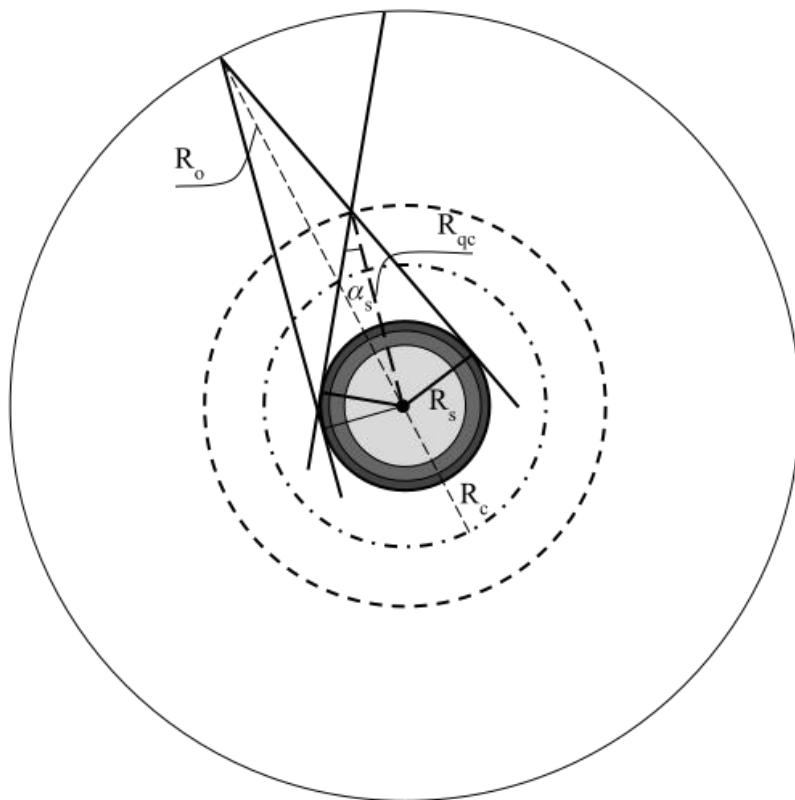
$$\eta \approx 0.5 - 1 \%, \quad T_h \approx 50 \text{ keV}$$

Рассматриваемые в работе диапазоны параметров б. электронов

$$0.1\% < \eta < 1.5 \%, \quad 30 \text{ keV} < T_h < 70 \text{ keV}$$

Rosenberg M.J., Solodov A.A., Myatt J.F. et al., Origins and Scaling of Hot-Electron Preheat in Ignition-Scale Direct-Drive Inertial Confinement Fusion Experiments, PRL, 120, 5, 055001, 2018, [doi: 10.1103/PhysRevLett.120.055001](https://doi.org/10.1103/PhysRevLett.120.055001).

Effect of wandering



Мощность источника
«прогревающих»
быстрых электронов:

$$q_h = \delta_h q_0$$

$$\delta_h = \frac{2\Omega_s}{4\pi} = 1 - \cos \alpha_s$$

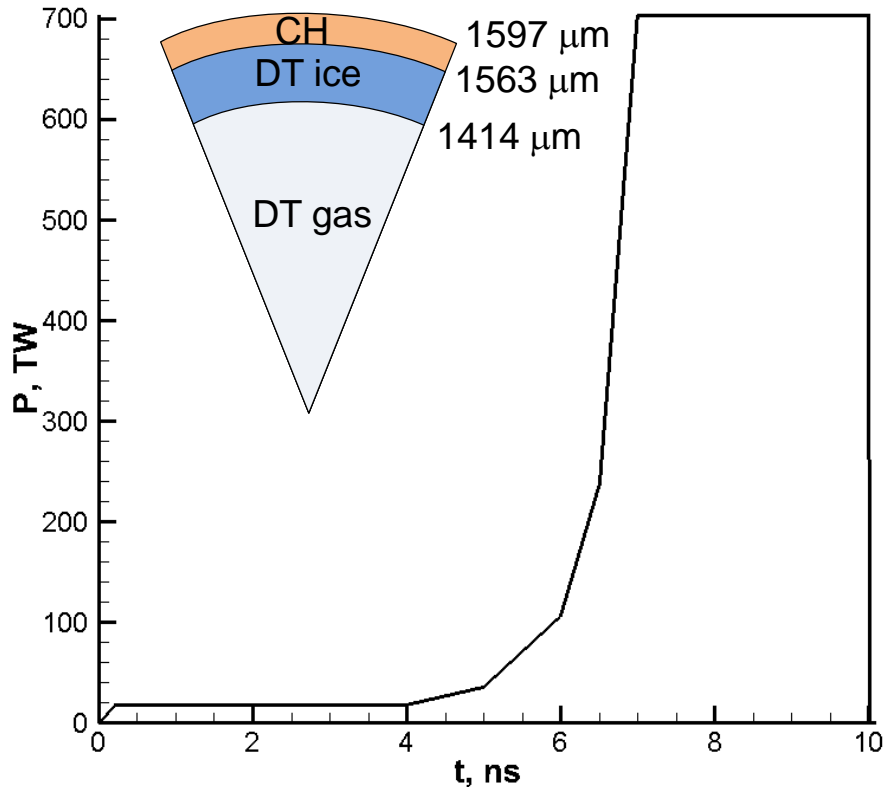
$$\cos \alpha_s = \sqrt{1 - \left(R_s / R_{qc}\right)^2}$$

R_s - радиус поверхности абляции,
 R_{qc} - радиус четвертькритической
поверхности

Предполагается изотропное угловое распределение б. электронов

Gus'kov S.Yu., Kuchugov P.A., Yakhin R.A., Zmitrenko N.V., Effect of 'wandering' and other features of energy transfer by fast electrons in a direct-drive inertial confinement fusion target, PPCF, accepted for publication, 2019, [doi: 10.1088/1361-6587/ab0641](https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab0641).

Baseline target for Russian laser project



Nd : Glass 2ω $E_L = 2.6$ MJ

$$A_{DT} \approx 10.4 \quad A_a \approx 47$$

$$\mu = m_a / m_i \approx 1.05$$

1D calculations

$$\eta = 6.61\% \quad V_{imp} = 4.1 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$$

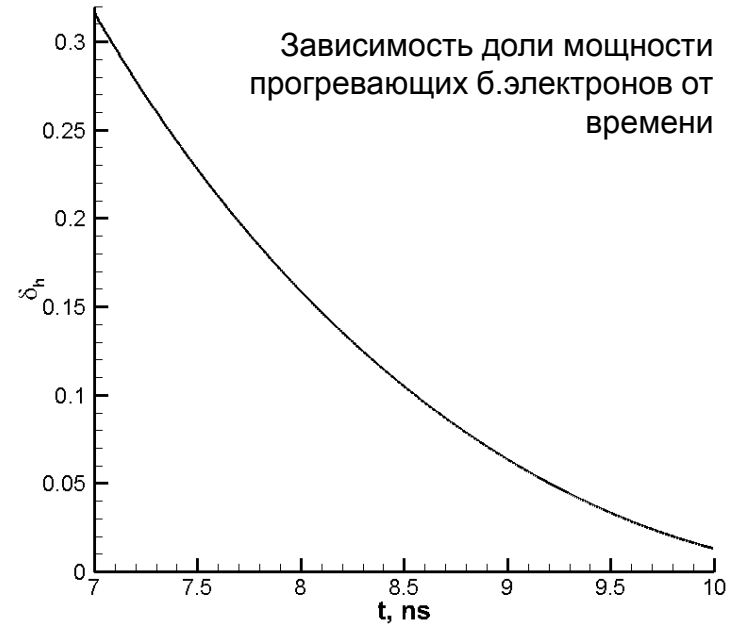
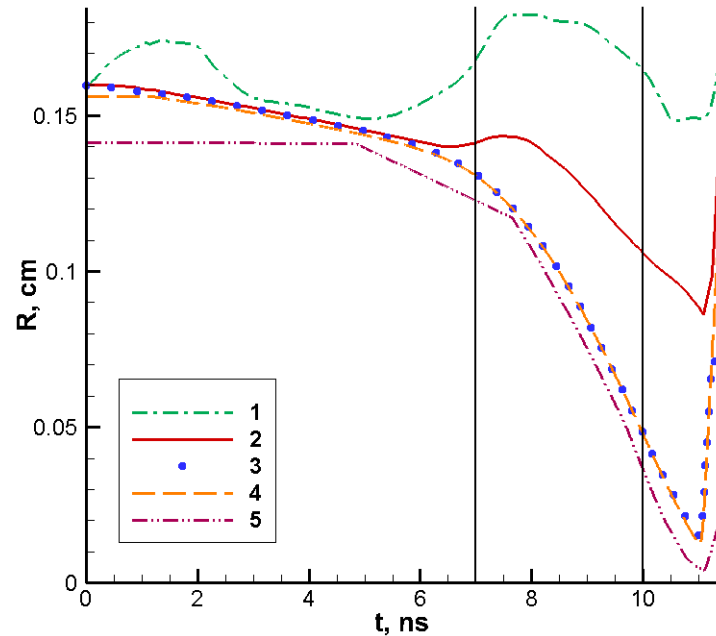
$$(\rho r)_{DT}^{\max} = 0.92 \text{ g/cm}^2$$

$$m_{ev} = 1035 \mu\text{g} = 0.93 m_a$$

$$G = 20.9$$

Bel'kov S.A., Bondarenko S.V., Vergunova G.A. et al., Thermonuclear Targets for Direct-Drive Ignition by a Megajoule Laser Pulse, JETP, 121, 4, 686-698, 2015, [doi: 10.1134/S1063776115100167](https://doi.org/10.1134/S1063776115100167).

Fraction of heating fast electrons

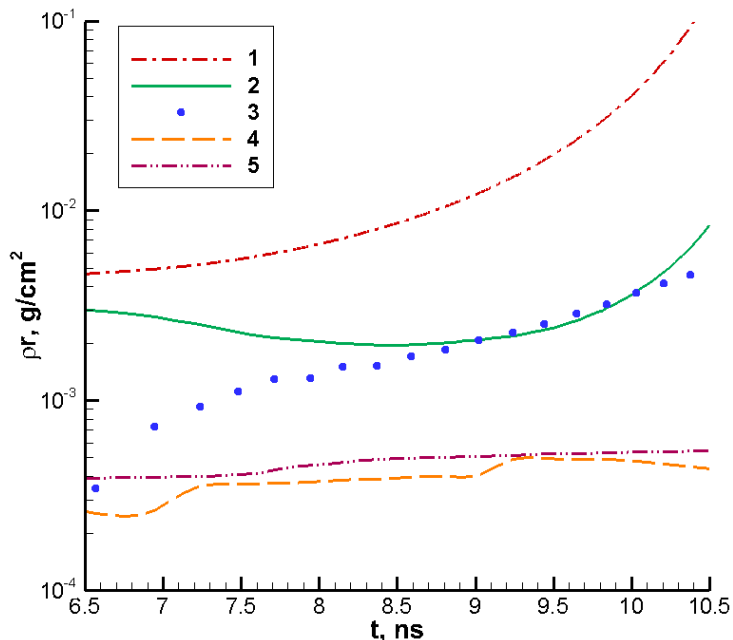


$$R_{qc} = 0.185 \text{ cm}, R_s = R_{s0} - V_i(t - t_0), R_{s0} = 0.135 \text{ cm}, V_i = 350 \text{ km s}^{-1}$$

Число прогревающих б. электронов составляет 12% от общего числа; доля их мощности снижается с 31% до 1.5%

Gus'kov S.Yu., Kuchugov P.A., Yakhin R.A., Zmitrenko N.V., Effect of 'wandering' and other features of energy transfer by fast electrons in a direct-drive inertial confinement fusion target, PPCF, accepted for publication, 2019, [doi: 10.1088/1361-6587/ab0641](https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab0641).

Estimation of energy transmission from fast electrons



Зависимости поверхностных плотностей различных областей базовой мишени от времени: 1 – DT, 2 – сжатый аблятор, 3 – от поверхности испарения до критической поверхности, 4 – от критической поверхности до четвертькритической, 5 – от четвертькритической поверхности до края плазмы.

▪ Угол α_s мал, поэтому будем считать, что поверхностная плотность внутри Ω_s даётся выражением $\int \rho(r) dr$

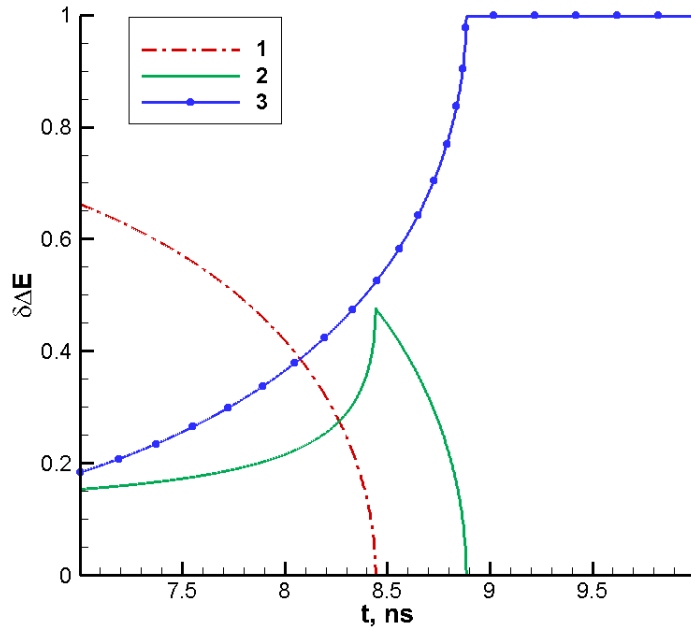
▪ Для рассматриваемого диапазона энергии б. электронов от 30 кэВ до 70 кэВ передача энергии плазме мишени происходит за один пролёт

▪ Потерями энергии в области между критической и четвертькритической поверхностями можно пренебречь в силу малости соответствующей поверхностной плотности. Тогда можно считать, что все прогревающие б. электроны передают свою энергию в области с плотностью больше критической

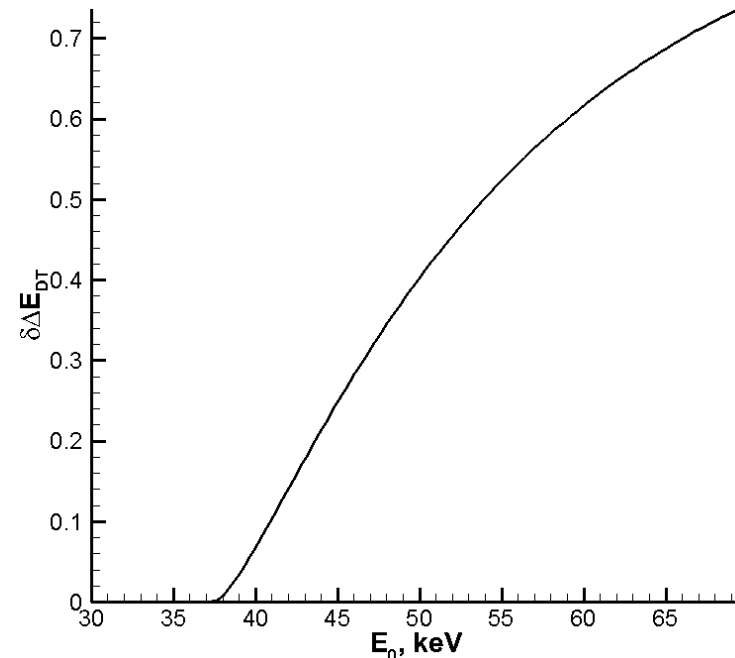
▪ Моноэнергетический спектр б.э.

Gus'kov S.Yu., Kuchugov P.A., Yakhin R.A., Zmitrenko N.V., Effect of 'wandering' and other features of energy transfer by fast electrons in a direct-drive inertial confinement fusion target, PPCF, accepted for publication, 2019, [doi: 10.1088/1361-6587/ab0641](https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab0641).

Estimation of energy transmission from fast electrons



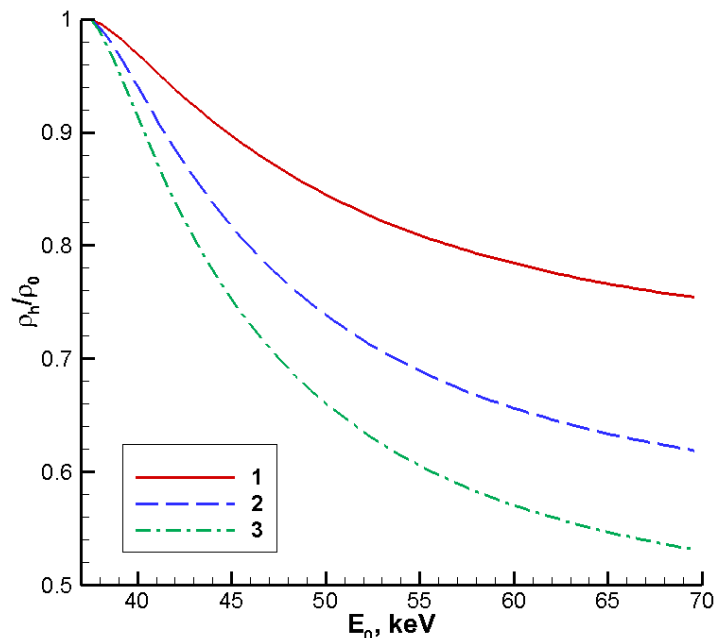
Зависимости от времени долей энергии, передаваемой различным областям мишени б. электронами с начальной энергией 50 кэВ. 1 – DT, 2 – сжатый аблятор, 3 – от поверхности испарения до критической поверхности.



Зависимости доли энергии, передаваемой DT, от начальной энергии б. электронов.

Gus'kov S.Yu., Kuchugov P.A., Yakhin R.A., Zmitrenko N.V., Effect of 'wandering' and other features of energy transfer by fast electrons in a direct-drive inertial confinement fusion target, PPCF, accepted for publication, 2019, [doi: 10.1088/1361-6587/ab0641](https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab0641).

Estimation of corresponding compression degradation



Зависимости снижения плотности DT-оболочки от начальной энергии б. электронов для различных значений доли лазерной энергии, перешедшей в б. электроны: 1 – 0.5%, 2 – 1%, 3 – 1.5%.

В предположении адиабатичности сжатия:

$$\frac{\rho_h}{\rho_0} = \left(\frac{T_0}{T_0 + \Delta T_h} \right)^{\gamma-1}$$

$$\Delta T_h = \frac{\Delta E_1}{C_v M_s}$$

$$T_h = 50 \text{ keV}$$

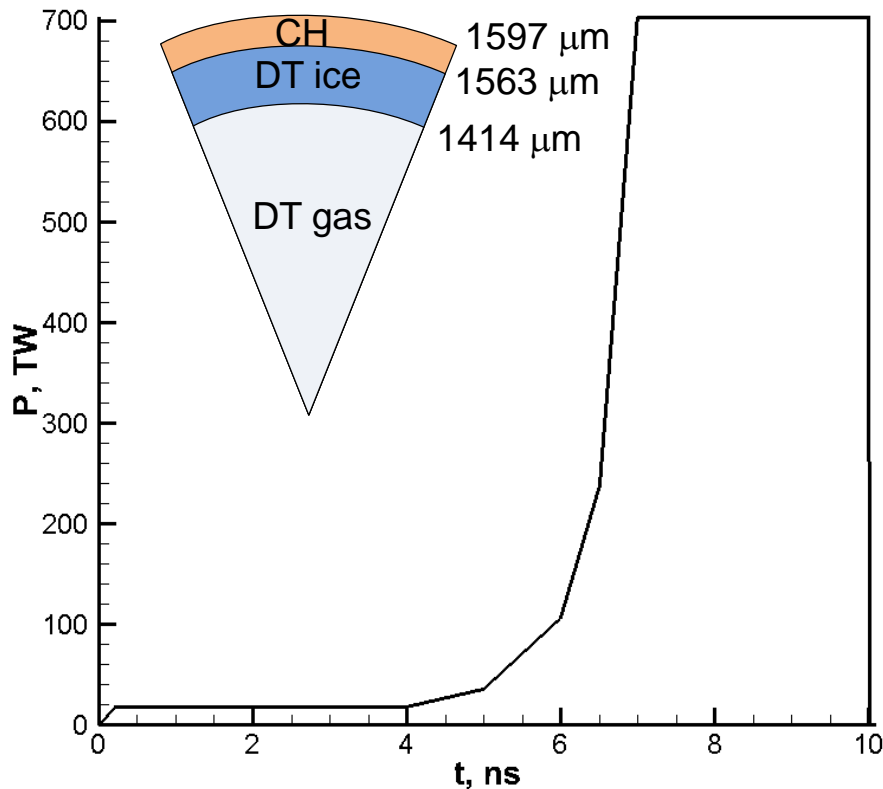
$$\eta = 0.5\%, \rho_h/\rho_0 \approx 0.83 \text{ (0.58)}$$

$$\eta = 1\%, \rho_h/\rho_0 \approx 0.77 \text{ (0.42)}$$

$$\eta = 1.5\%, \rho_h/\rho_0 \approx 0.67 \text{ (0.32)}$$

Gus'kov S.Yu., Kuchugov P.A., Yakhin R.A., Zmitrenko N.V., Effect of 'wandering' and other features of energy transfer by fast electrons in a direct-drive inertial confinement fusion target, PPCF, accepted for publication, 2019, [doi: 10.1088/1361-6587/ab0641](https://doi.org/10.1088/1361-6587/ab0641).

Baseline target for Russian laser project



Nd : Glass 2ω $E_L = 2.6$ MJ

$$A_{DT} \approx 10.4 \quad A_a \approx 47$$

$$\mu = m_a / m_i \approx 1.05$$

1D calculations

$$\eta = 6.61\% \quad V_{imp} = 4.1 \cdot 10^7 \text{ cm/s}$$

$$(\rho r)_{DT}^{\max} = 0.92 \text{ g/cm}^2$$

$$m_{ev} = 1035 \mu\text{g} = 0.93 m_a$$

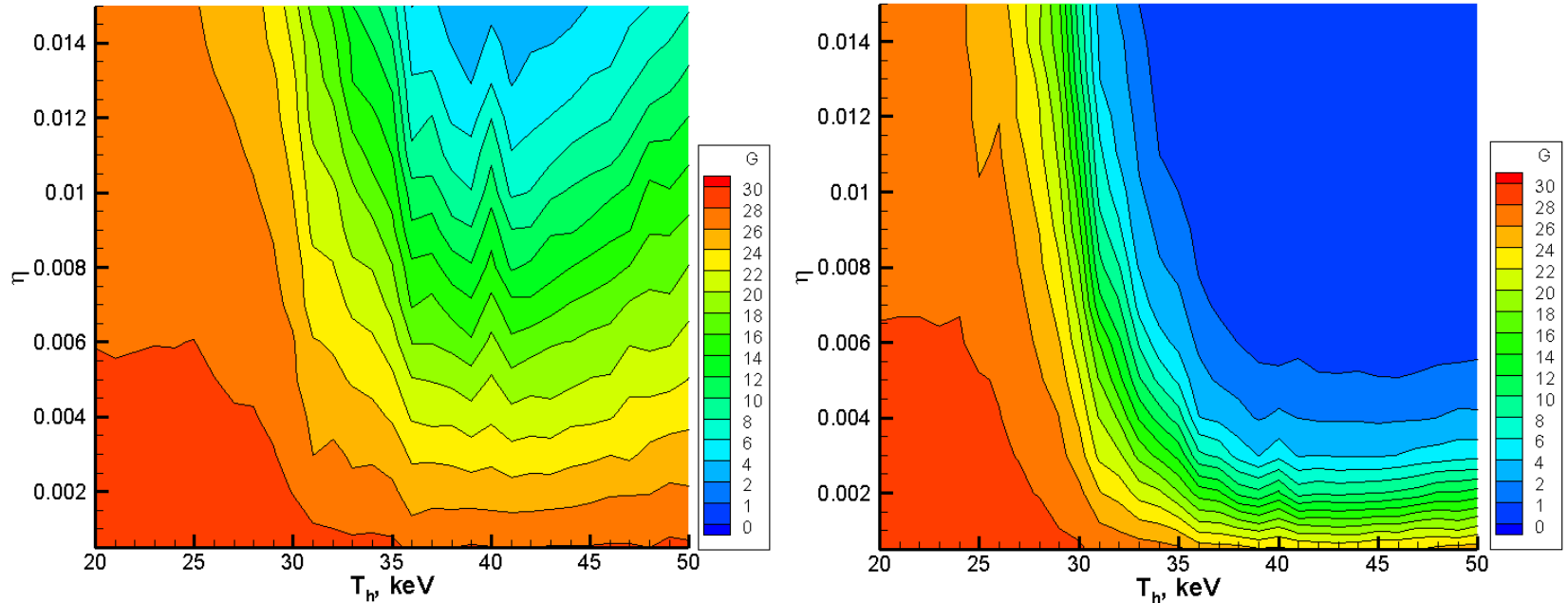
$$G = 20.9$$

Bel'kov S.A., Bondarenko S.V., Vergunova G.A. et al., Thermonuclear Targets for Direct-Drive Ignition by a Megajoule Laser Pulse, JETP, 121, 4, 686-698, 2015, [doi: 10.1134/S1063776115100167](https://doi.org/10.1134/S1063776115100167).

Approach to modeling energy transfer by fast electrons

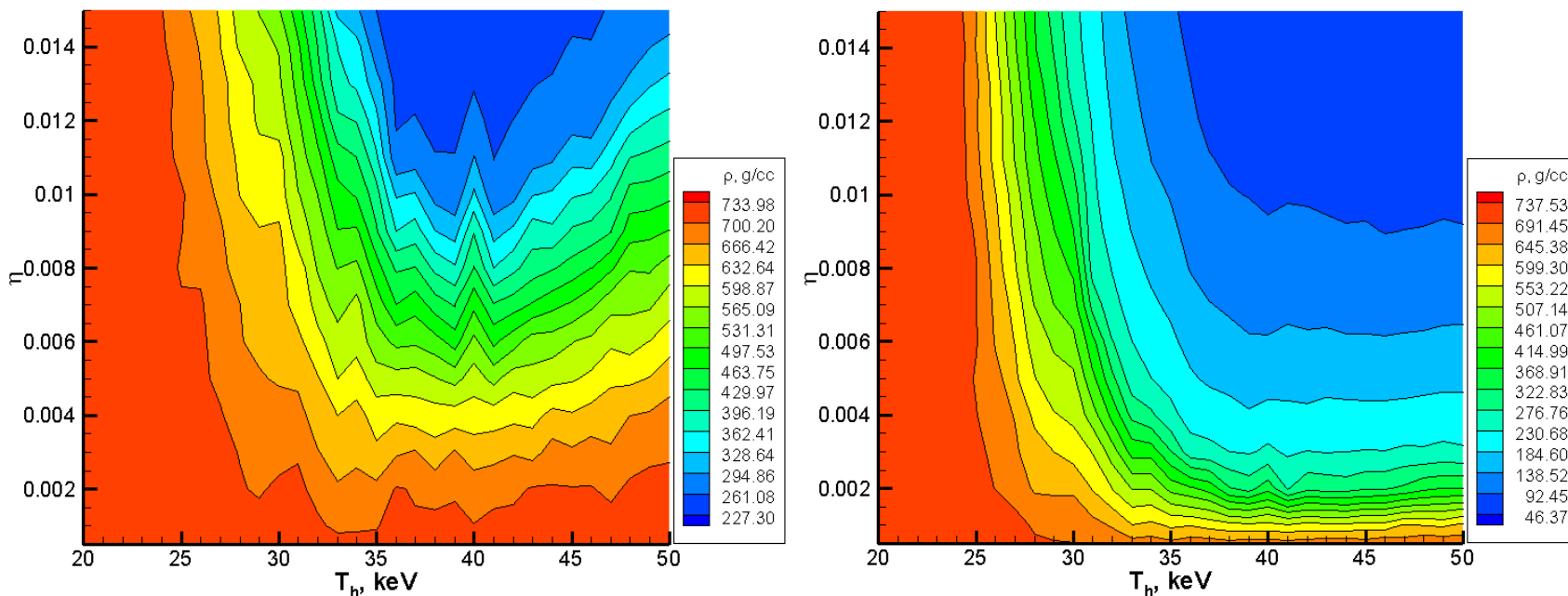
- Скорость передачи энергии б. электроном плазме даётся классическим выражением в нерелятивистском пределе с учётом рассеяния.
- Учитывается энергетический спектр б. электронов, в нашем случае максвелловский, посредством усреднения энергии с соответствующей функцией распределения.
- Учитывается уменьшение мощности «прогревающих» б. электронов.
- Рассматриваются две группы «прогревающих» б. электронов – начинающие своё движение к центру и в противоположном направлении.
- Энергия от «блуждающих» б. электронов распределяется равномерно по массе в области испарённого аблятора мишени.

Influence of fast electron energy transfer on target compression and thermonuclear gain



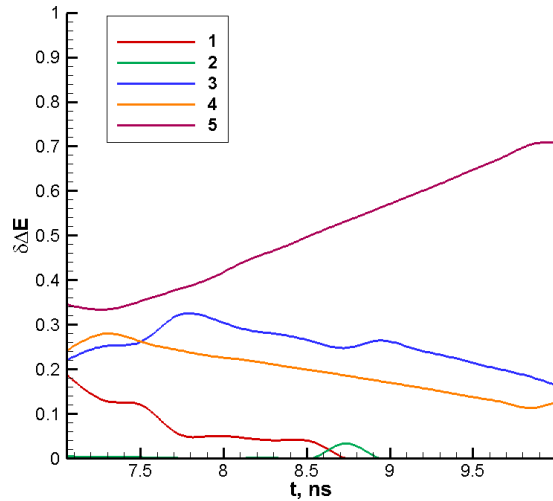
Распределения коэффициента усиления от температуры быстрых электронов и доли лазерной энергии, перешедшей в быстрые электроны: а) с учётом эффекта «блуждания», б) без учёта.

Influence of fast electron energy transfer on target compression and thermonuclear gain

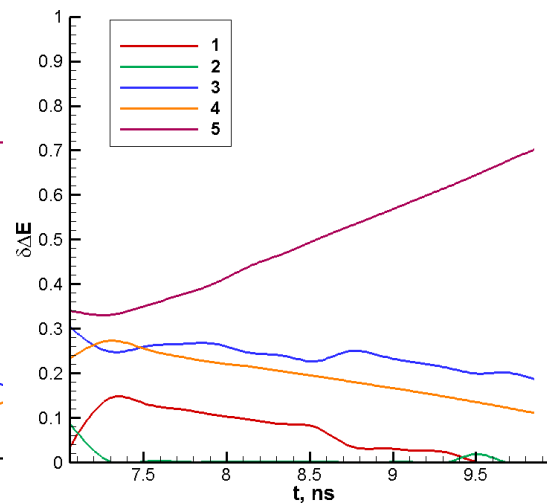


Распределения максимальной плотности DT-оболочки от температуры быстрых электронов и доли лазерной энергии, перешедшей в быстрые электроны: а) с учётом эффекта «блуждания», б) без учёта.

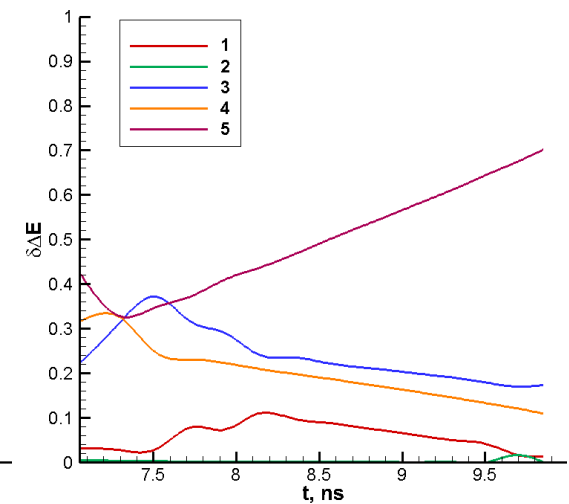
Dynamics of energy deposition from fast electrons in different areas of the target taking into account effect of 'wandering'



$T_h \approx 35$ keV
 $G = 15.3$



$T_h \approx 41$ keV
 $G = 7.7$



$T_h \approx 50$ keV
 $G = 15.1$

Основные различия – в динамике передачи энергии от б. электронов DT-топливу, а также в абсолютном значении соответствующей энергии.

Main results & Conclusions

- Значительная часть б. электронов, родившихся в малоплотной короне не попадает в сжатую часть мишени. Для базовой мишени прямого облучения, рассчитанной на 1.5 МДж поглощённой лазерной энергии, доля «прогревающих» б. электронов составляет 12% от их общего числа. В результате значительно снижается их негативное влияние на коэффициент термоядерного усиления.

- Учёт эффекта «блуждания» - эффекта малой доли «прогревающих» быстрых электронов - приводит к значительному снижению требований к критическим параметрам генерации быстрых электронов, срывающих зажигание мишени, по сравнению с предельным случаем, когда все родившиеся быстрые электроны передают свою энергию сжимаемой части мишени.

Так, например, при доле лазерной энергии, перешедшей в б. электроны, равной 1% и температуре 40 кэВ мишень не зажигается ($G = 0.34$) в случае без учёта эффекта «блуждания» и $G = 11.2$ при учёте эффекта «блуждания». При $\eta = 0.5\%$ и той же температуре в первом случае $G = 1.1$ и $G = 20$ во втором случае. Напомним, что без учёта генерации быстрых электронов коэффициент усиления составляет 21.

Acknowledgements

Thank you
for your attention