

Самокомпрессия лазерных импульсов при рамановском усилении шумов плазмы

А.А. Балакин, С.А. Скобелев

Институт прикладной физики РАН

Сессия по нелинейной динамике, 2020

Схемы рамановской компрессии в плазме

Рамановская компрессия –
трехволновый процесс

$$\partial_t a + \partial_z a - \frac{i}{2} \nabla_{\perp}^2 a = -b f,$$

$$\partial_t b - \partial_z b - \frac{i}{2} \nabla_{\perp}^2 b = a f^* + i\beta |b|^2 b,$$

$$\partial_t f + i\delta\omega(z)f + \nu_f f = a b^* + iB |f|^2 f.$$

Начальный уровень шума:

$$f_{\text{noise}} = \sqrt{2\sqrt{2}\pi \frac{a_0 T_e}{mc^2} \sqrt{\frac{\omega_p}{\omega_a} \frac{t_c \omega_a}{\Delta_r^2 \Delta_z}}} \sim 10^{-5}.$$

Стандартная схема:

$$i, a \longrightarrow f_{\text{noise}} \uparrow \longleftarrow b$$

Плазменное зеркало:

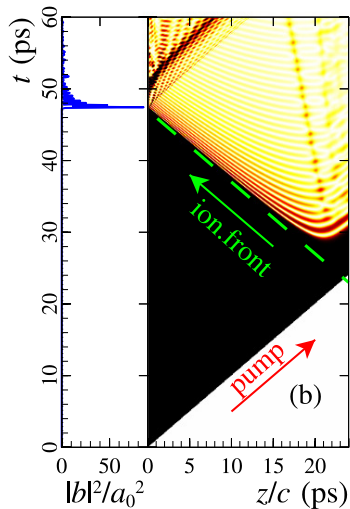
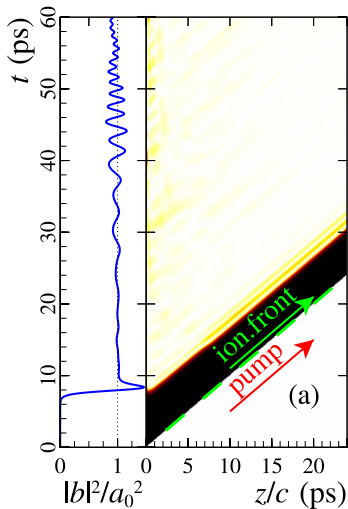
$$i, a \longrightarrow f_{\text{noise}} \uparrow$$

Мы предлагаем:

$$a \longrightarrow f_{\text{noise}} \uparrow \longleftarrow i$$

Самокомпрессия при рамановском усилении шумов

Истощения
накачки нет до
фронта ионизации.
Шумы за фронтом
играют роль очень
слабой затравки.
Получаем
идеальный
импульс, но тратим
несколько (5 ... 10)
обратных
инкрементов на
раскачку.



Инкремент для пространственно ограниченных импульсов

Из линеаризованных уравнений

$$\partial_t = 0, \quad \partial_t b = f^* - i\nabla_{\perp}^2 b, \quad \partial_t f = b^*.$$

Для возмущений $\propto e^{\lambda t - i\mathbf{k}_{\perp} \cdot \mathbf{r}}$ получаем дисперсионное соотношение

$$\det \begin{vmatrix} \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & \lambda & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & \lambda - ik_{\perp}^2 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & \lambda & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & \lambda + ik_{\perp}^2 & 1 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & \lambda \end{vmatrix} = \lambda^2 [(\lambda^2 - 1)^2 + \lambda^2 k_{\perp}^4] = 0.$$

Откуда, находим эффективный инкремент

$$\operatorname{Re} \lambda = \sqrt{1 - k_{\perp}^2/4} \leq 1.$$

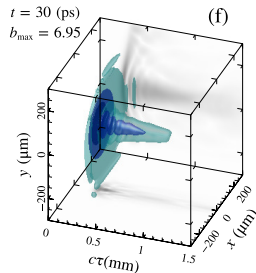
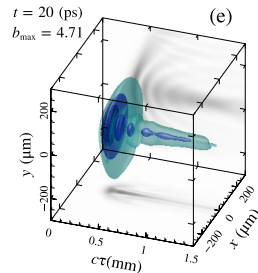
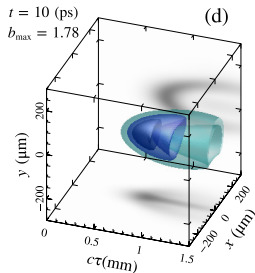
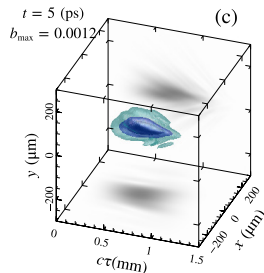
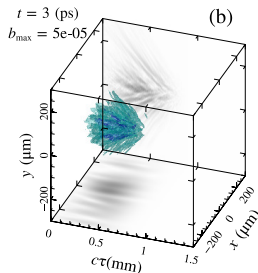
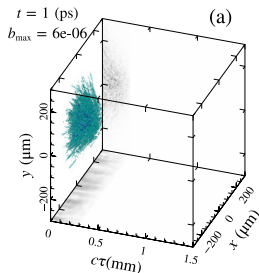
Трёхмерное моделирование

Инкремент
 $\gamma \propto 1 - k_{\perp}^2$.

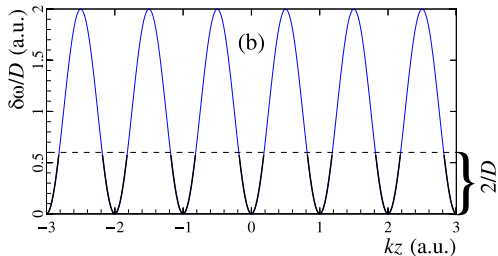
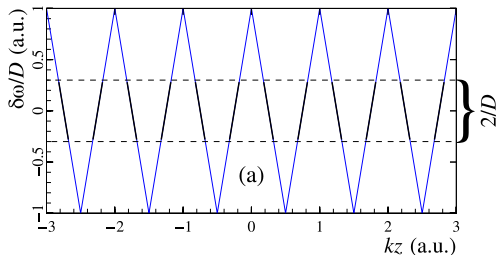
Значит быстрее
усиливаются
плавные

распределения
с $k_{\perp} \approx 0$.

Расчеты дают
эффективность
28% по энергии.



Влияние неоднородностей плазмы



Для малых возмущений $D \ll 1$:

$$\lambda_{\text{eff}} \simeq \int \sqrt{1 - D^2 \sin^2(kz)} \frac{dz}{2\pi/k} \approx 1 - \frac{D^2}{4}.$$

Для резких изломов $D \gtrsim 1$

$$\lambda_{\text{eff}} \simeq 2 \int \sqrt{1 - (kz)^2} \frac{dz}{\pi/k} \approx \frac{2}{D}$$

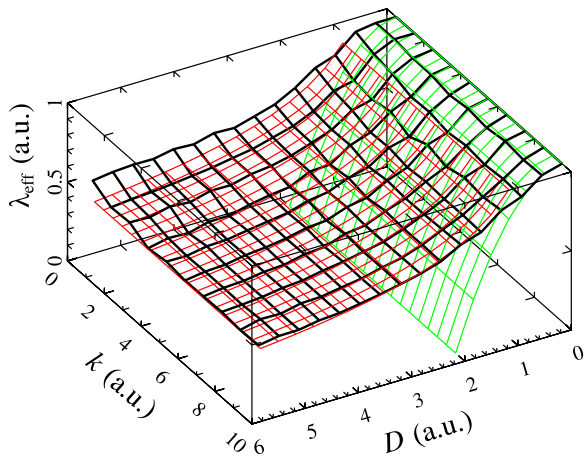
Вблизи «макушек» $D \gtrsim 1$

$$\lambda_{\text{eff}} \simeq \int \sqrt{1 - \frac{D^2(kz)^4}{32}} \frac{dz}{2\pi/k} \approx \frac{0.935}{\sqrt{D}}.$$

Эффективный инкремент усиления

Неоднородность плазмы лишь затягивает темп усиления на линейной стадии. При этом эффект слабо зависит от размеров флуктуаций.

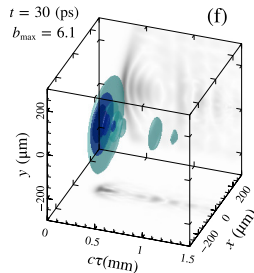
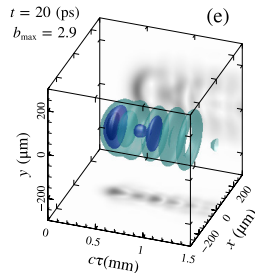
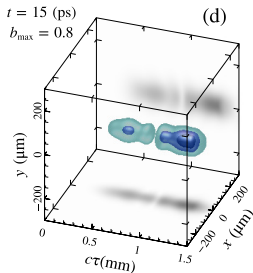
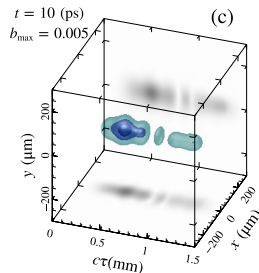
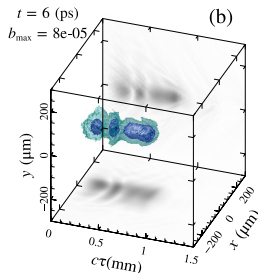
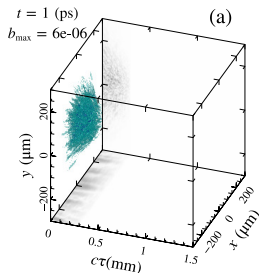
Аналитические оценки хорошо совпадают с результатами расчетов.



Трёхмерное моделирование при $\delta n = 8\%$ ($D = 6$)

При таких
флуктуациях
плотности
стандартная
схема
компрессии не
работает.

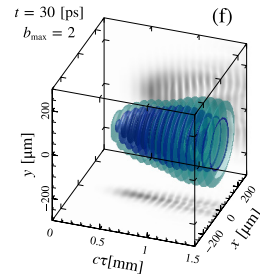
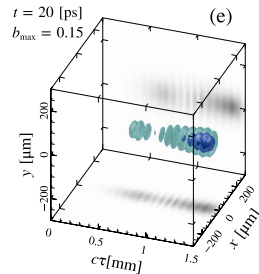
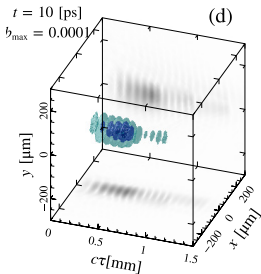
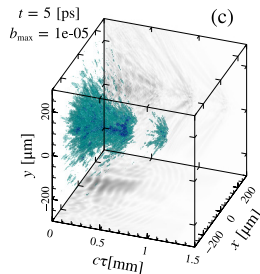
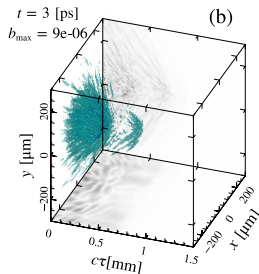
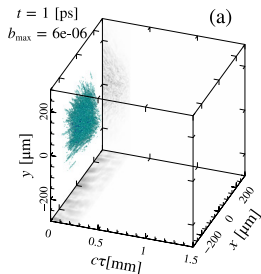
Самокомпрессия
при усилении
шумов лишь
затягивает
линейную
стадию.



Трехмерное моделирование при $\delta n = 13\%$ ($D = 10$)

Процесс само-компрессии идет даже при столь больших флуктуациях.

Однако, появляются продольные искажения на начальной стадии.

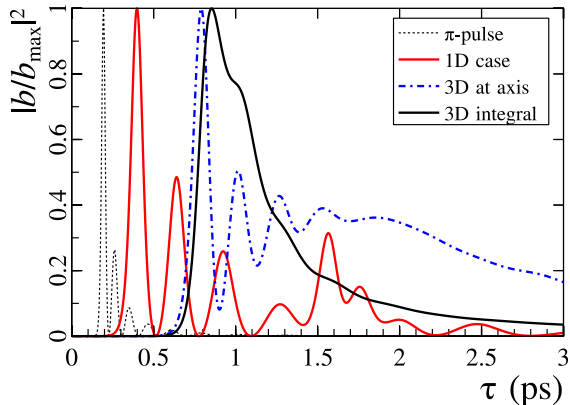


Продольный профиль импульса

Временной профиль интенсивности на выходе из струи плазмы длиной 9 мм с плотностью 10^{19} см^{-3} .

Параметры накачки: 10^{14} Вт/см^2 , 60 пс.

Первый импульс имеет длительность 125 фс, в фокальной зоне — 370 фс.



Выводы

Предложен и обоснован метод самокомпрессии лазерного импульса в процессе рамановского рассеяния излучения на шумах плазмы, создаваемой встречным ионизирующим импульсом. Резкость фронта ионизации обеспечивает формирование выходного импульса, близкого к π -импульсному решению, с резким передним фронтом. Зависимость инкремента усиления от поперечного волнового числа приводит к формированию плавного фазового фронта выходного импульса. Энергия в сжатом импульсе достигает 28% от общей энергии накачки. Исследование влияния квазистатических неоднородностей плотности плазмы показало лишь небольшое замедление процесса компрессии даже при амплитудах возмущений до 10%, когда обычный процесс рамановской компрессии невозможен. Результат подтвержден трехмерным численным моделированием.

Публикации: [PRA 102](#), 013516 (2020); [Phys.Plasmas 27](#), 053106 (2020).