

Нелинейная эволюция пучков заряженных частиц в плазме и эксперимент AWAKE в ЦЕРНе

Константин Лотов



Институт ядерной физики СО РАН



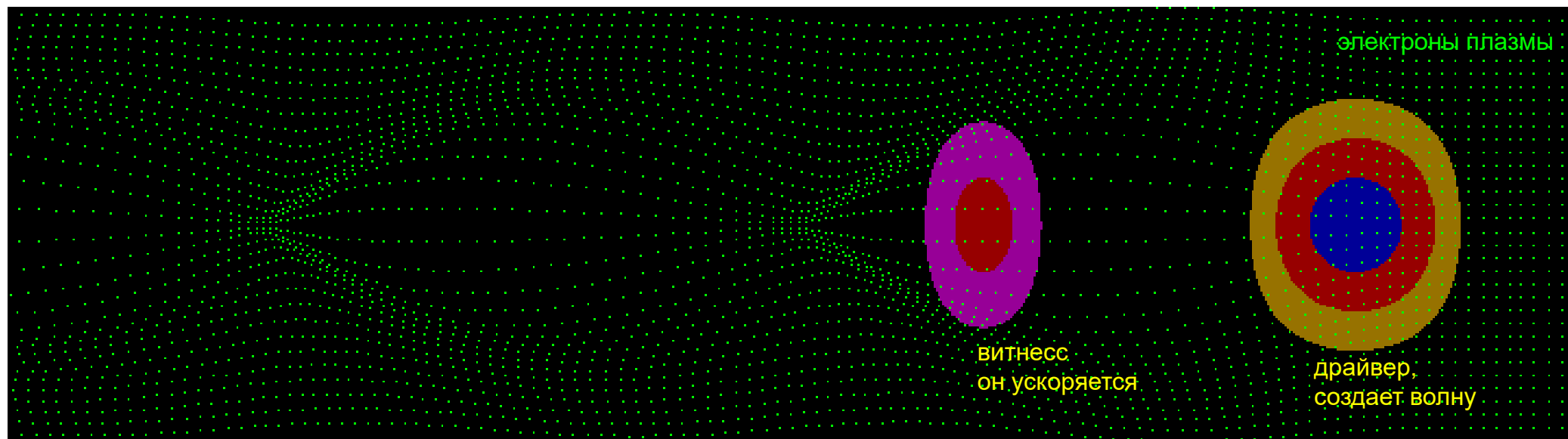
Новосибирский государственный университет



Коллаборация AWAKE

О чем вообще речь? Кильватерное ускорение частиц в плазме ...

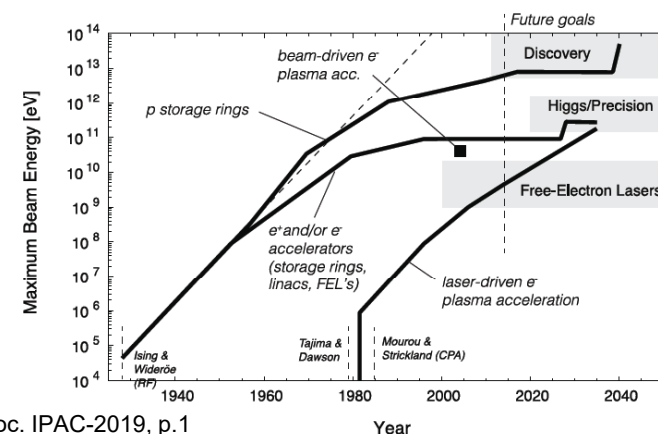
(это – пример почти линейной волны, создаваемой электронным сгустком)



Характерные масштабы:

плотность плазмы $n_0 \sim 10^{15} \text{ см}^{-3}$
 времена $\sim \omega_p^{-1} = \left(\sqrt{4\pi n_0 e^2 / m} \right)^{-1} = 0.5 \text{ псек}$
 размеры сгустков $\sim c / \omega_p \sim 0.2 \text{ мм}$ причина
 поля $\sim E_0 = \sqrt{4\pi n_0 m c^2} \sim 3 \text{ ГВ/м}$ интереса

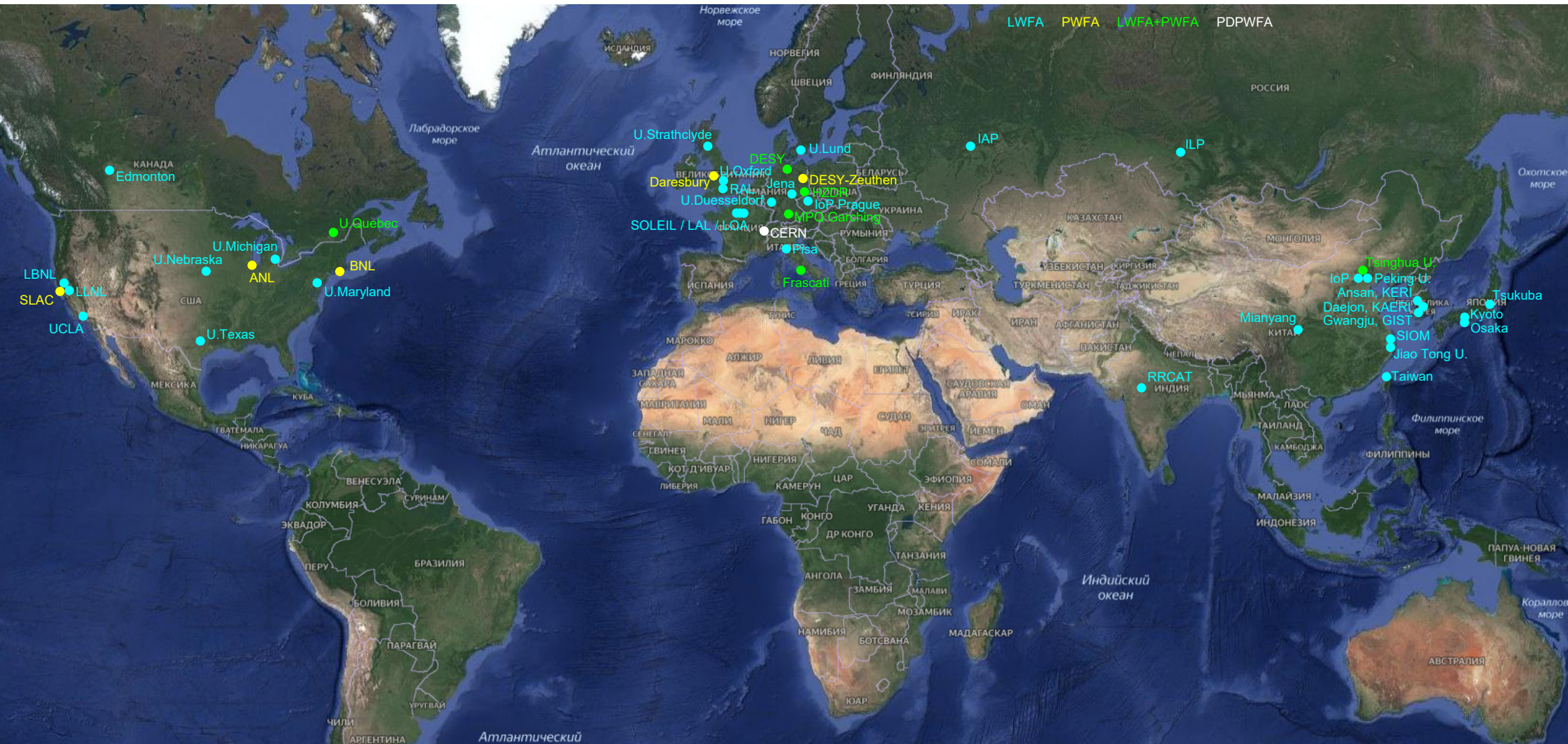
История развития:
 скепсис ускорительщиков,
 быстрое улучшение
 параметров,
 рост интереса в мире



M.Ferrario, R.Assmann, Proc. IPAC-2019, p.1



Плазменное кильватерное ускорение в мире сейчас широко распространено



О чем вообще речь? Кильватерное ускорение частиц в плазме с протонным драйвером

Электронный драйвер (PWFA)

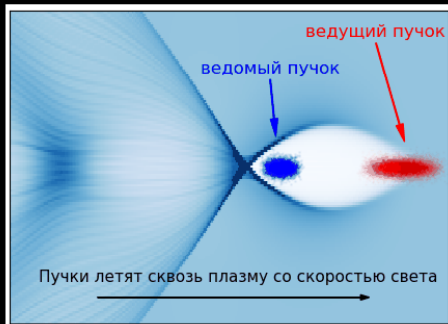
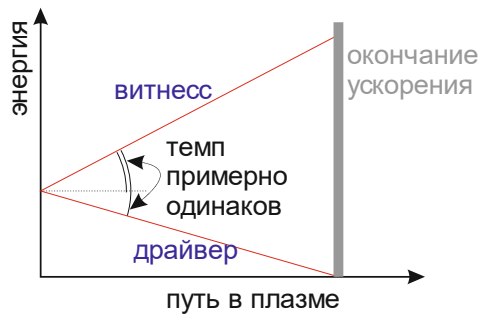


Illustration from [LCODE](#) website



Ускоряет примерно на энергию частиц драйвера, нужно много стадий для достижения больших (ТэВных) энергий

Лазерный драйвер (LWFA) (laser wakefield acceleration)

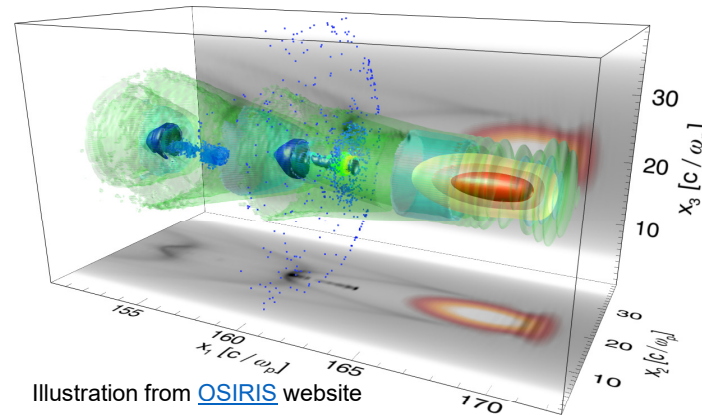


Illustration from [OSIRIS](#) website

Может создавать электронный пучок из плазмы,
 пока что < 10 ГэВ/стадию,
 хорош для приложений (компактные источники излучения, электронные инжекторы),
 нужно много стадий для достижения больших (ТэВных) энергий.

Протонный драйвер (PDPWFA) (proton driven plasma wakefield acceleration)

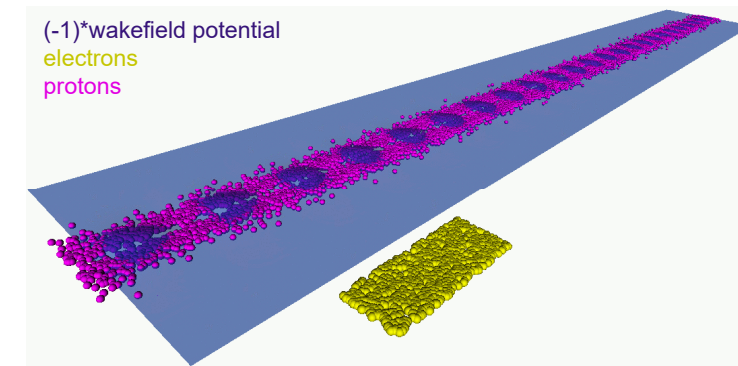


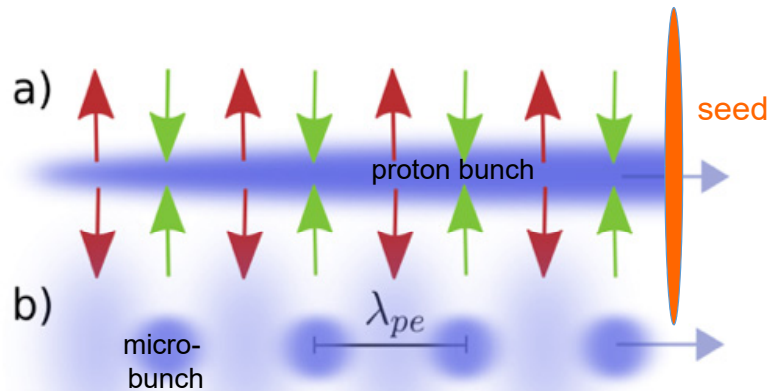
Illustration from [LCODE](#) website

До 2009 не рассматривались вообще,
 но есть драйверы с 20 кДж и 450 ГэВ (SPS), >150 кДж и 6.5 ТэВ (LHC),
 энергии достаточно для ускорения электронов до ТэВ и более в одной плазменной секции,
 и именно в контексте сверхвысоких энергий они изучаются.

«Запрячь» протоны удалось благодаря контролируемой самомодуляции

Проблема: имеющиеся в синхротронах протонные пучки длинные, они не возбуждают в плазме волну.

Нужно их разбить на короткие сгустки, чтобы резонансно раскачивали волну! Как?



Контролируемая самомодуляция:

Запускаем в плазму затравочное возмущение

Пучок где-то немножко фокусируется, где-то дефокусируется

Модуляция радиуса пучка модулирует (де)фокусирующую силу, которая усиливает модуляцию радиуса и т.д.

Итог – длинный пучок разбился на микросгустки

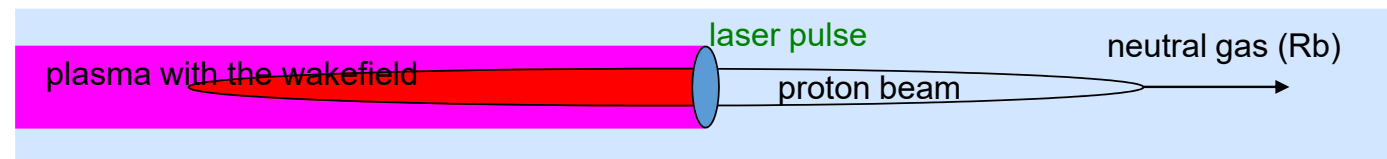
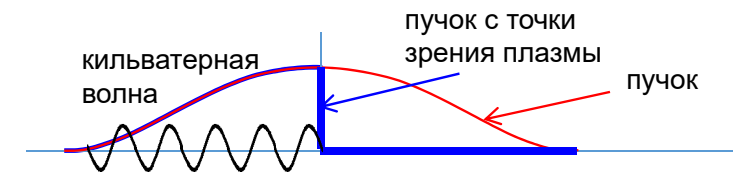
[K. Lotov, Instability of long driving beams in plasma wakefield accelerators, Proc. EPAC-1998, p.806-808.](#)

Первые эксперименты AWAKE: самомодуляция инициируется ионизационным фронтом

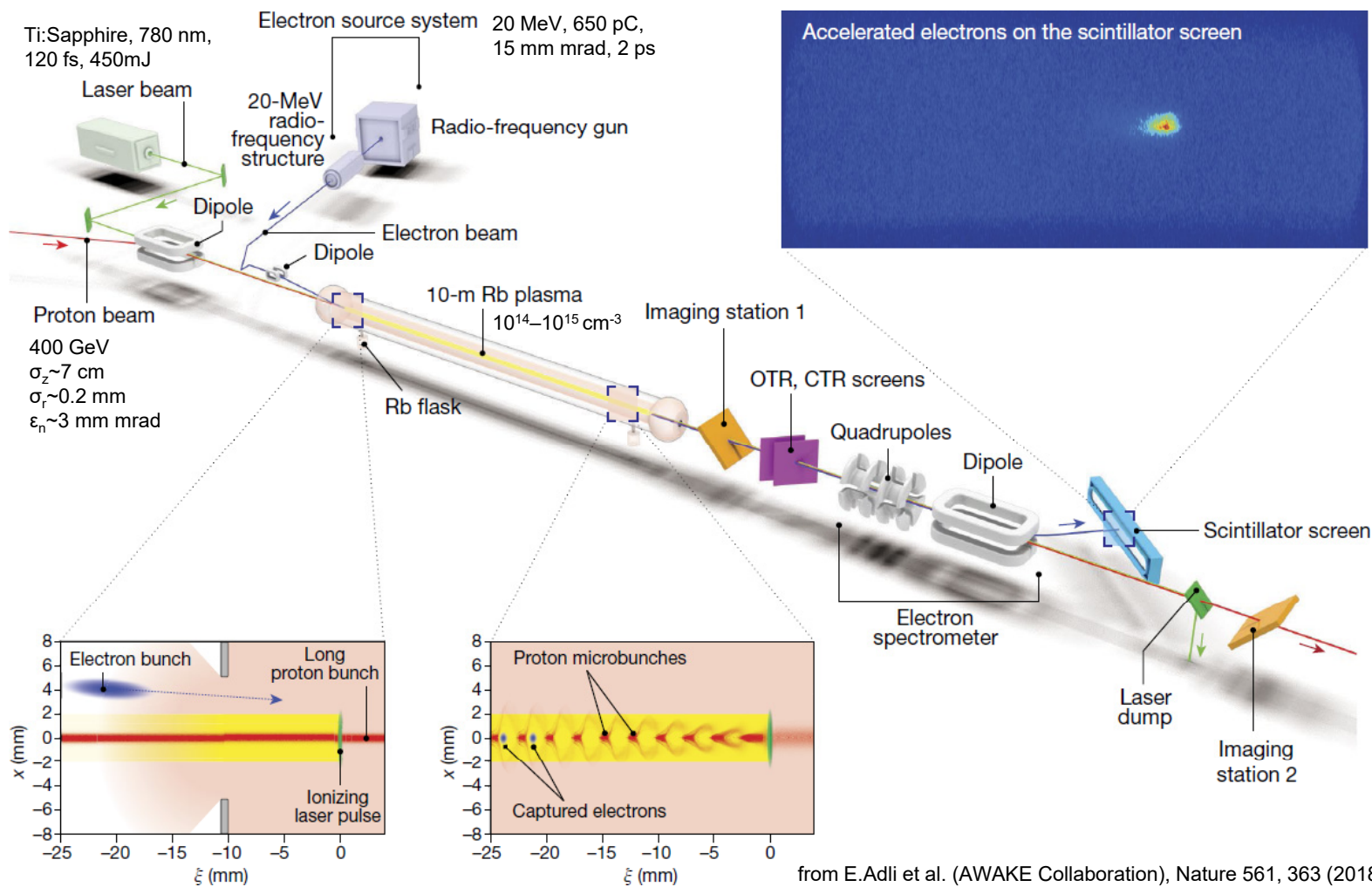
Короткий лазерный импульс движется вместе с протонным пучком и быстро ионизует газ

С точки зрения плазмы у протонного пучка – резкий передний фронт

Резкий фронт создает затравочную волну



AWAKE – первый эксперимент по плазменному кильватерному ускорению с протонным драйвером



from E.Adli et al. (AWAKE Collaboration), Nature 561, 363 (2018)

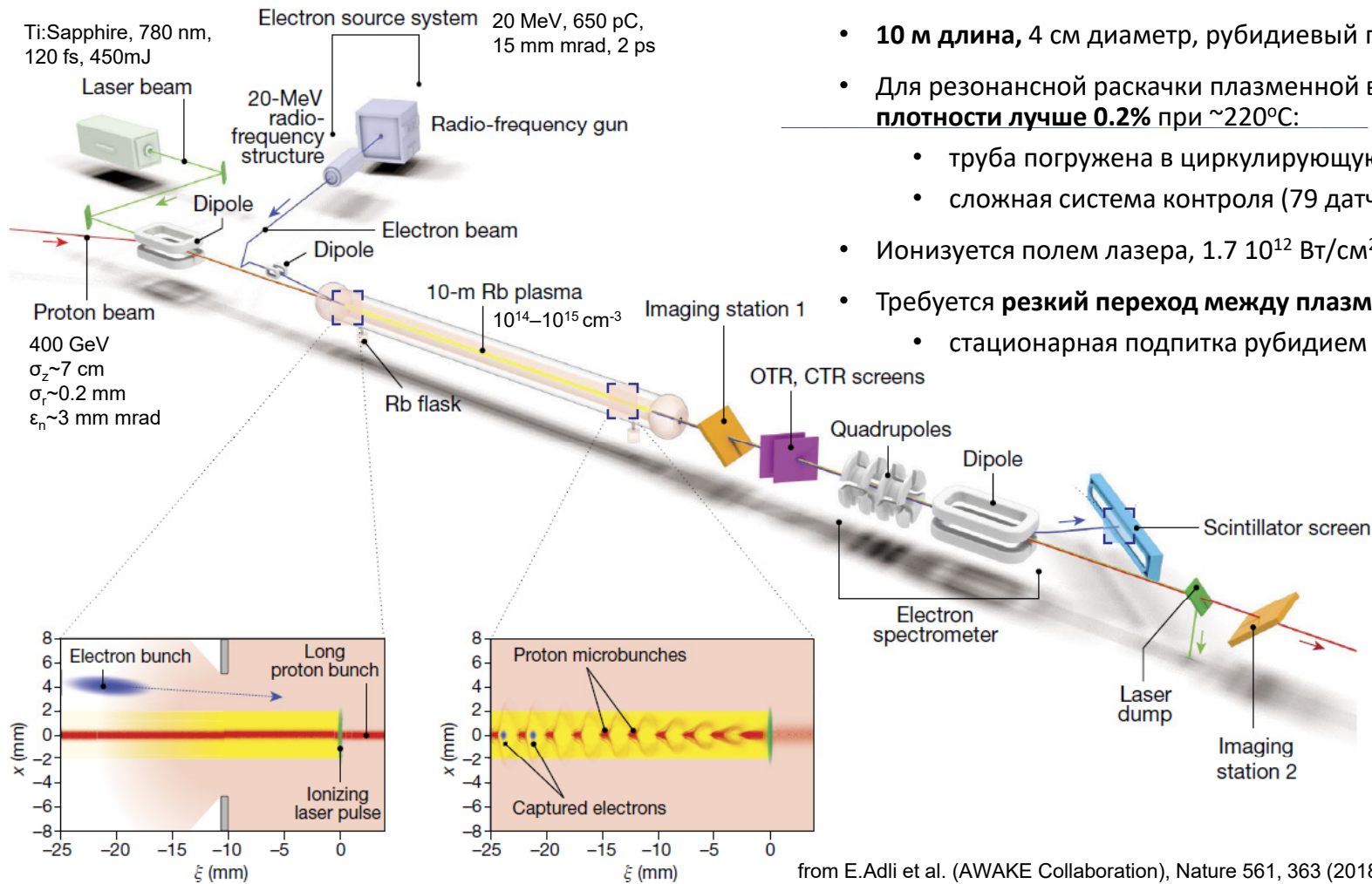
Проводится в ЦЕРНе, использует 400 ГэВ пучок синхротрона SPS

Цель первых экспериментов – продемонстрировать самомодуляцию протонного пучка и ускорение электронов в его кильватерной волне.

Цель направления – при помощи плазмы поднять энергию лептонных пучков до уровня, достигнутого в протонных синхротронах.

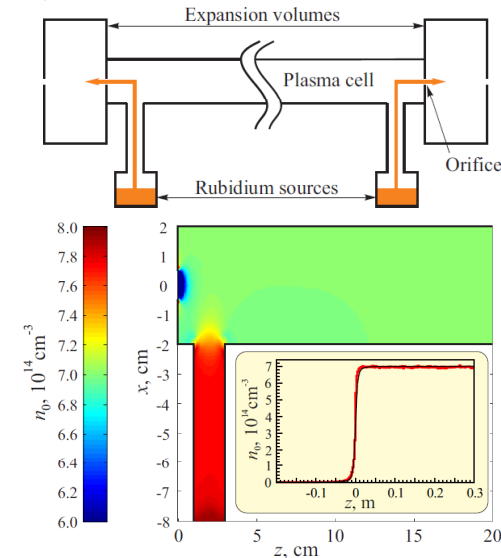


AWAKE – первый эксперимент по плазменному кильватерному ускорению с протонным драйвером



Плазменная секция:

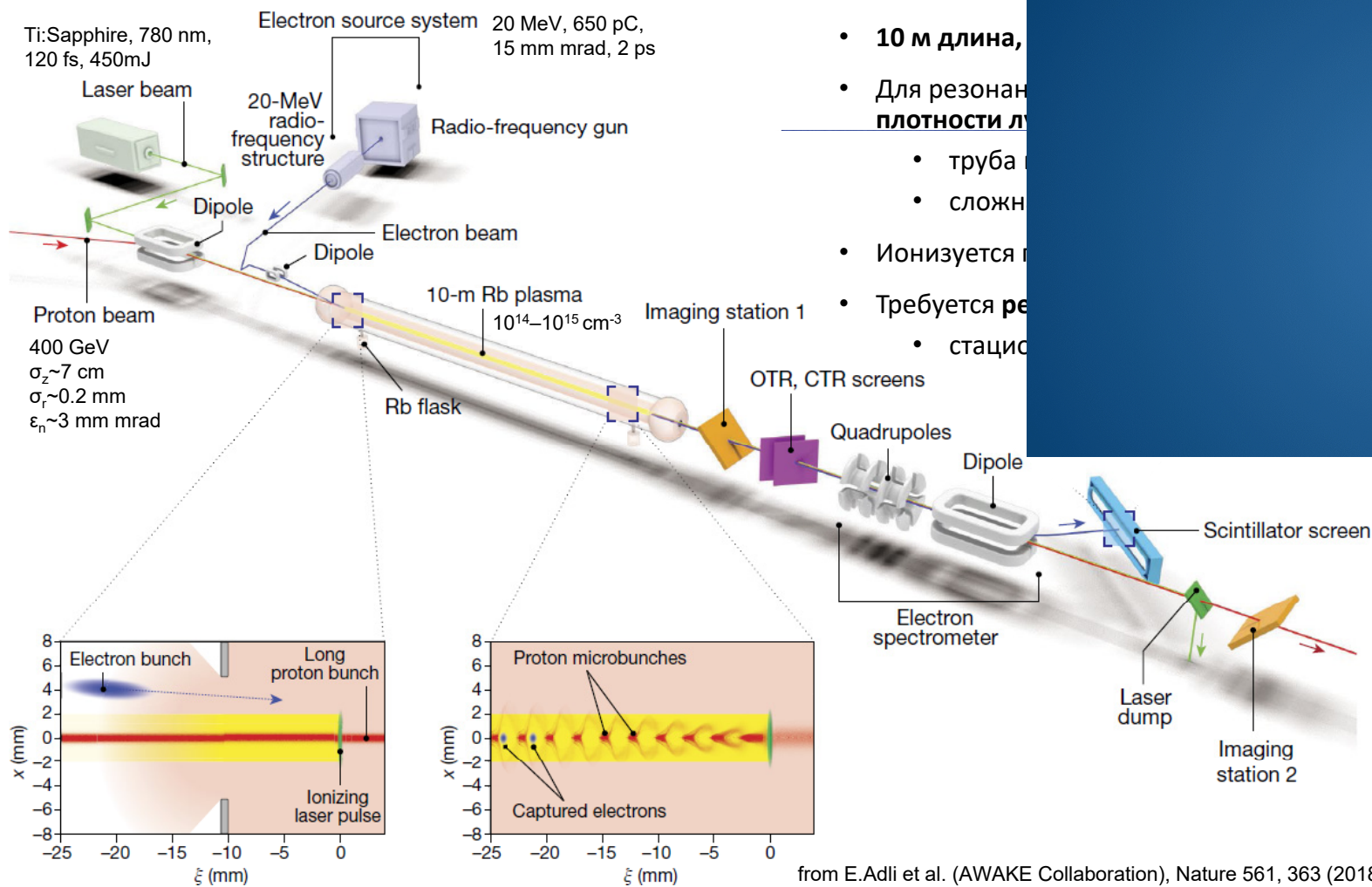
- **10 м длина**, 4 см диаметр, рубидиевый пар, $10^{14} - 10^{15} \text{ cm}^{-3}$
- Для резонансной раскочки плазменной волны требуется **однородность плотности лучше 0.2%** при $\sim 220^\circ\text{C}$:
 - труба погружена в циркулирующую жидкость (Galden)
 - сложная система контроля (79 датчиков температуры)
- Ионизируется полем лазера, $1.7 \cdot 10^{12} \text{ Вт/см}^2 < I < 1.2 \cdot 10^{14} \text{ Вт/см}^2$, $\varnothing 3$ мм плазма
- Требуется **резкий переход между плазмой и вакуумом**:
 - стационарная подпитка рубидием на концах



from E.Adli et al. (AWAKE Collaboration), Nature 561, 363 (2018)

from A.Caldwell et al (AWAKE Collaboration), Nuclear Instr. Methods A 829, 3 (2016).

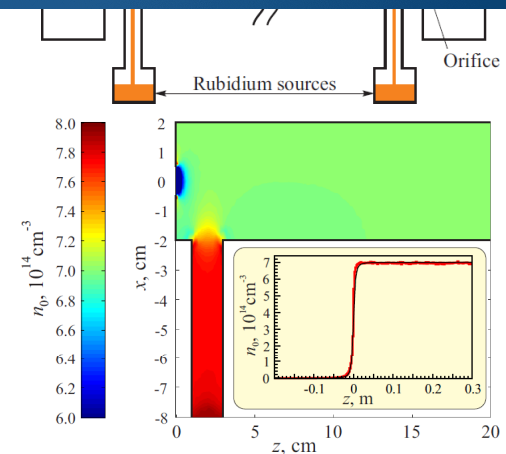
AWAKE – первый эксперимент по плазменному кильватерному ускорению с протонным драйвером



from E.Adli et al. (AWAKE Collaboration), Nature 561, 363 (2018)

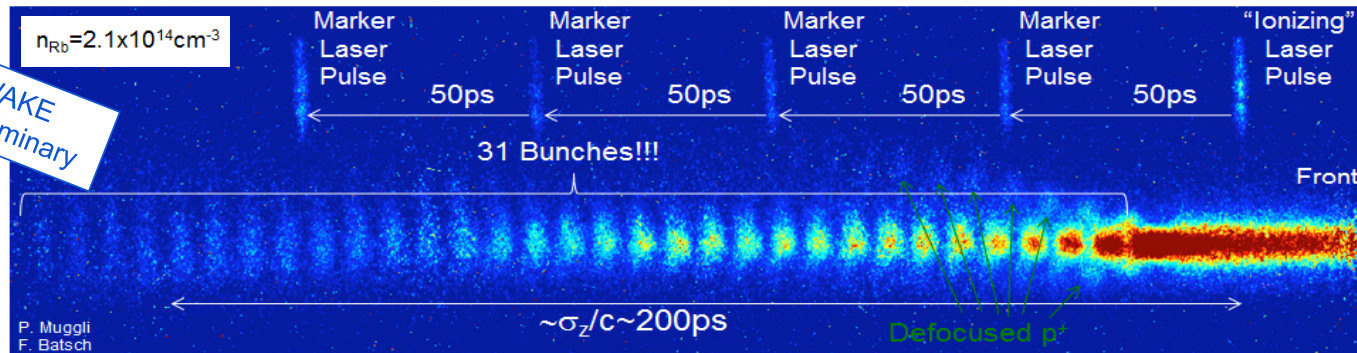
Плазменная секция

- 10 м длина,
- Для резонансного ускорения требуется высокая плотность плазмы
- труба
- сложная конструкция
- Ионизируется протонным пучком
- Требуется резонансное ускорение
- стационарный режим

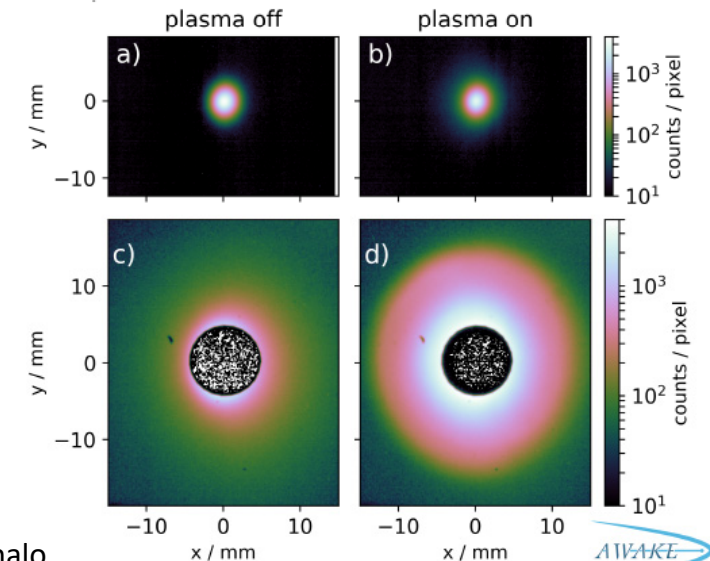


from A.Caldwell et al (AWAKE Collaboration), Nuclear Instr. Methods A 829, 3 (2016).

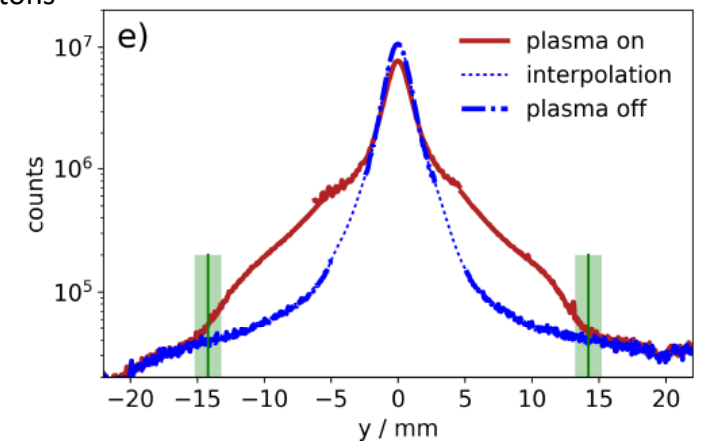
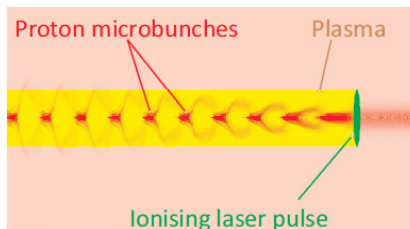
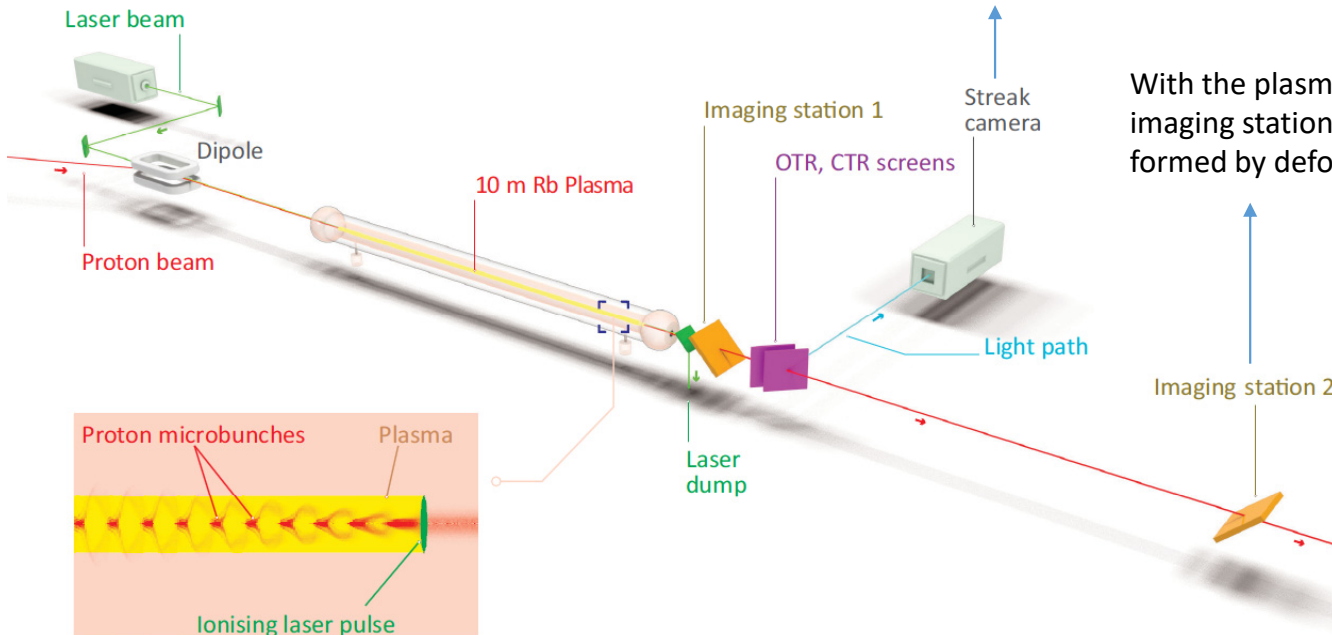
Первые результаты: продемонстрирована самомодуляция



Micro-bunches are seen on the streak camera images, their positions (wrt laser pulse) are reproducible

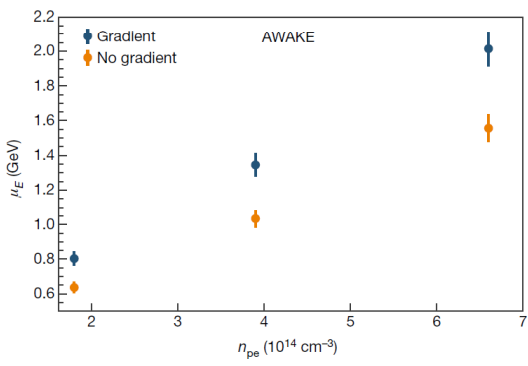
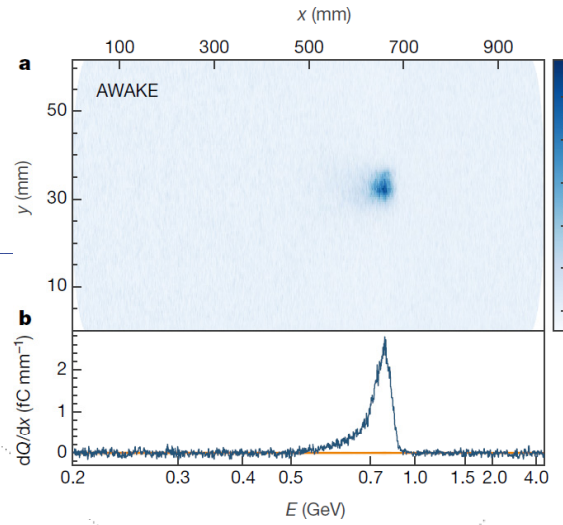
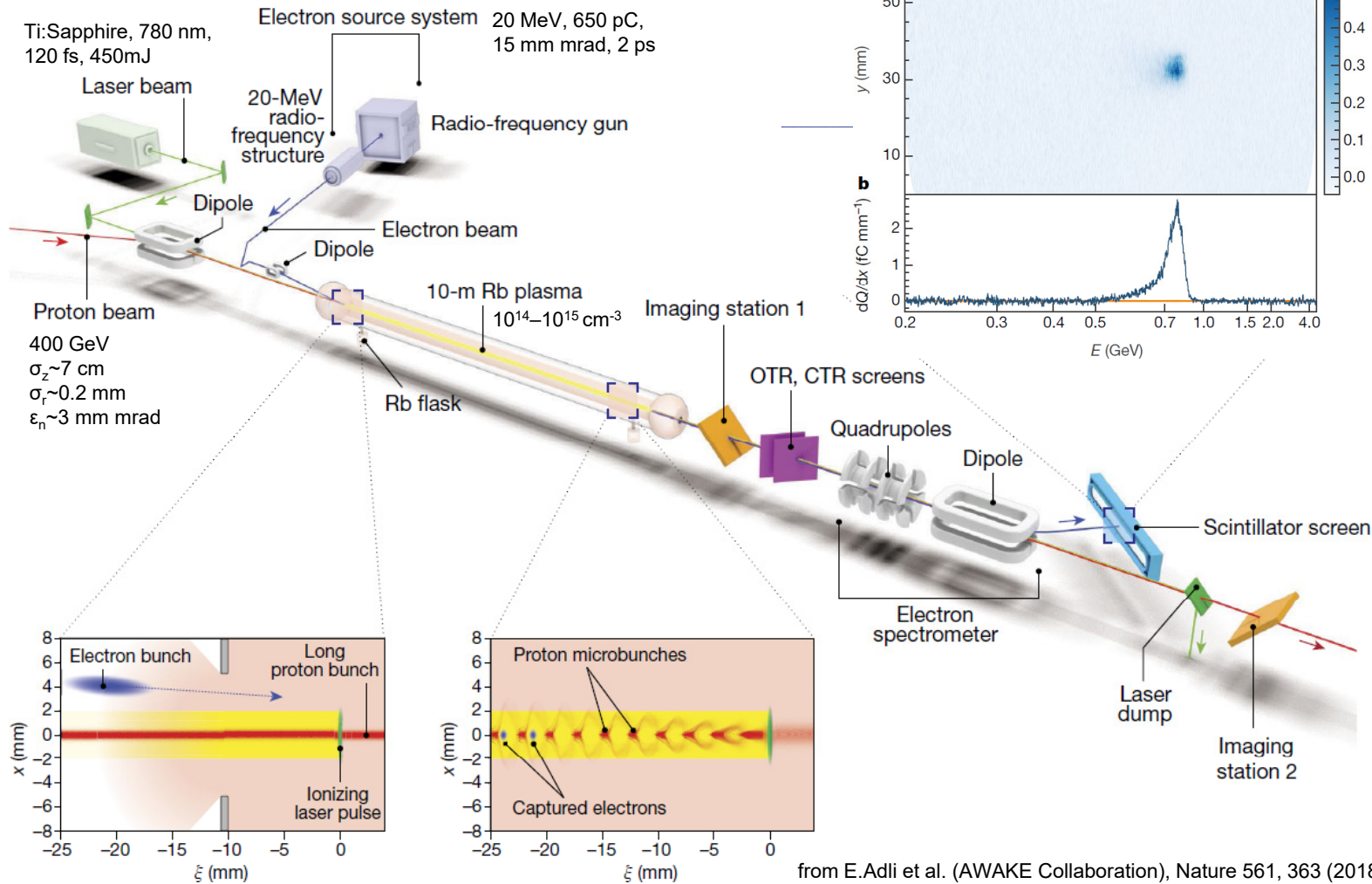


With the plasma on, the imaging stations show a halo formed by defocused protons

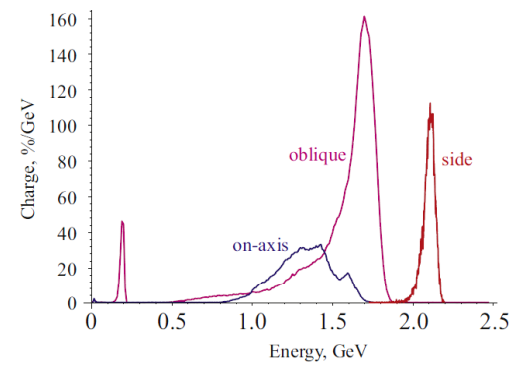


from M. Turner et al. (AWAKE Collaboration), PRL 122, 054801 (2019).

Первые результаты: ускорение



Форма спектра и набор энергии (2 ГэВ) согласуются с ожиданиями, количество ускоренных электронов меньше (захват хуже расчетного).



from E.Adli et al. (AWAKE Collaboration), Nature 561, 363 (2018)

from A.Caldwell et al (AWAKE Collaboration), Nuclear Instr. Methods A 829, 3 (2016).

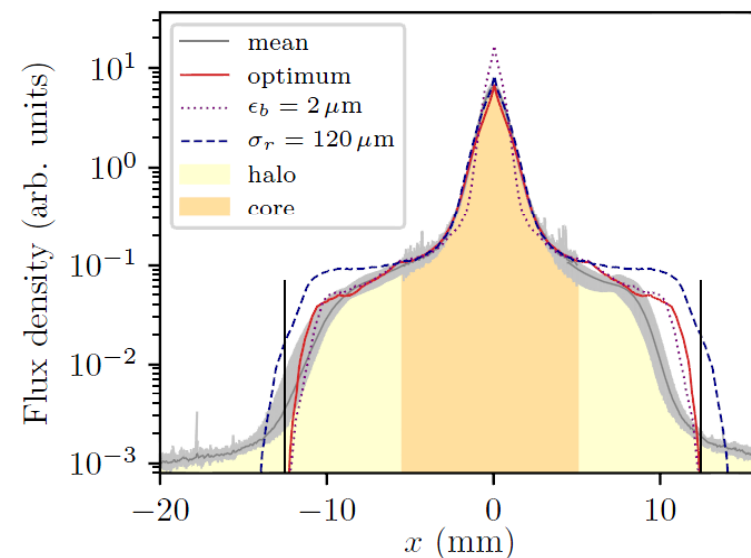
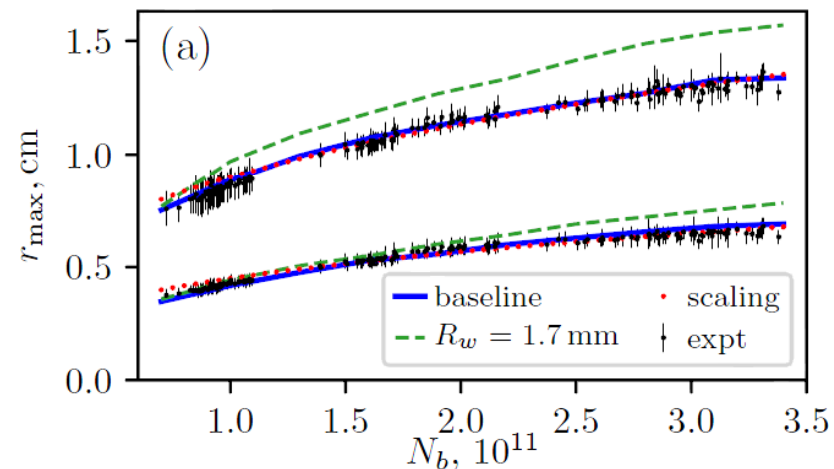
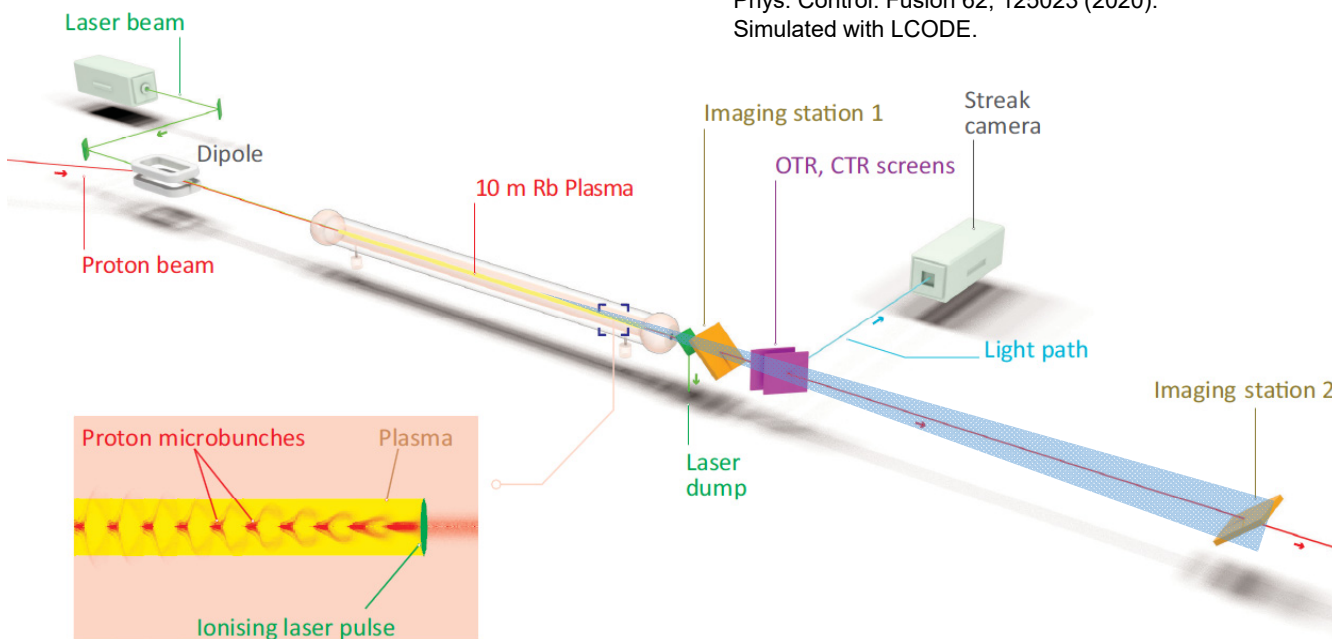
Первые результаты: согласие с моделированием

Пример: максимальный радиус отклонения протонов – интегральная количественная характеристика самомодуляции, удобная для сравнения с моделированием.

Совпадает с точностью **лучше 5% без подгонки параметров** (входные данные моделирования взяты из эксперимента)

Показывает, что процесс контролируемой самомодуляции хорошо понят, т.е. моделирование учитывает все существенные эффекты, имеет предсказательную силу и может использоваться для разбирательства с деталями явления.

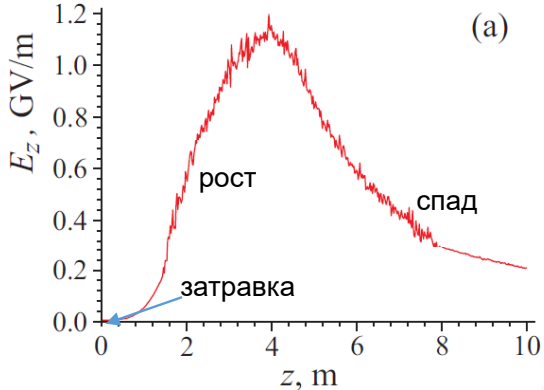
A.A.Gorn et al. (AWAKE Collaboration), Plasma Phys. Control. Fusion 62, 125023 (2020).
Simulated with LCODE.



Самомодуляция протонного пучка в AWAKE

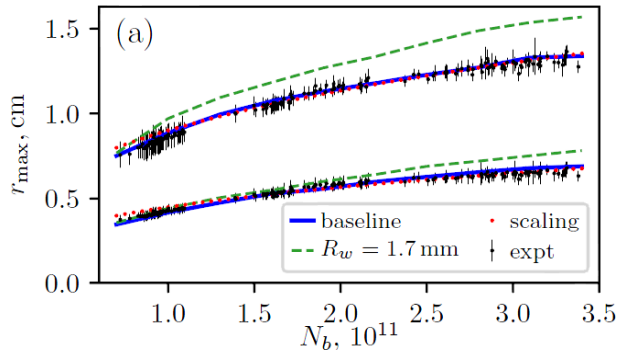
Предсказывается моделированием ...

A.Caldwell et al. (AWAKE Collaboration), NIMA 829, 3 (2016)..



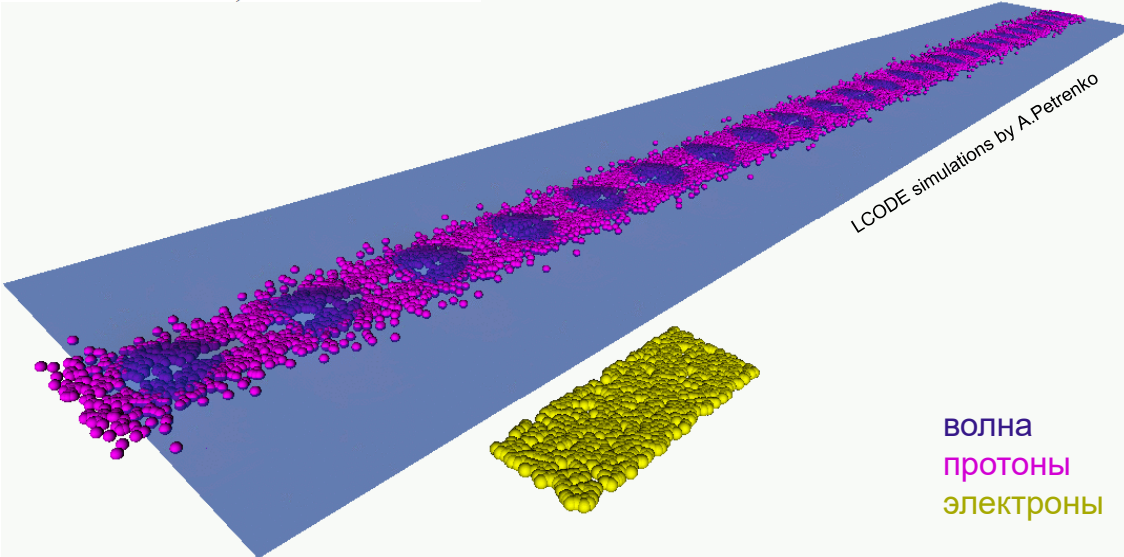
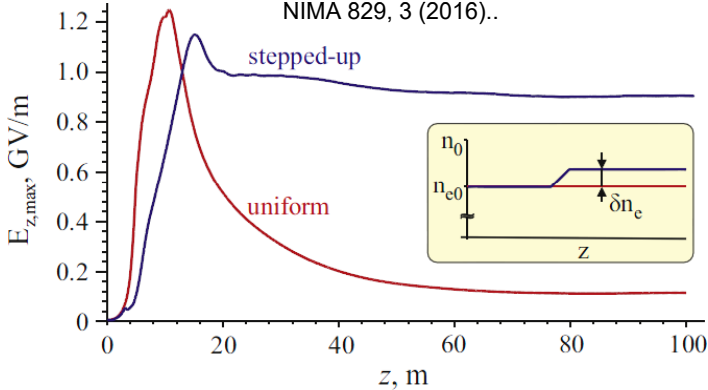
... и совпадает с измерениями

A.A.Gorn et al. (AWAKE Collaboration), PPCF 62, 125023 (2020).



Но также предсказывается и быстрое разрушение пучка в однородной плазме, которое устраняется скачком плотности:

A.Caldwell et al. (AWAKE Collaboration), NIMA 829, 3 (2016)..



волна
протоны
электроны

Нужно разобраться, как происходит самомодуляция и как работает скачок плотности

В AWAKE самомодуляция смешана со многими другими эффектами, поэтому исследуем упрощенную модель

AWAKE:

Плазма ограничена по радиусу

Движение ионов успеваает проявиться

Полу-гауссовский пучок (по z)

Рост волны ограничен нелинейностью плазмы

Радиус пучка ($\sigma_r=1$) ни мал, ни велик

Длинный пучок (~150 периодов волны), трудно моделировать и рассматривать на экране

$p+$, $\Gamma=400$ (долго моделировать)

Начальный эмиттанс играет роль

Единицы: скорость света c (скорости), масса электрона m (массы), начальная плотность плазмы n_0 (плотности), обратная плазменная частота ω_p^{-1} (времена), глубина скин-слоя $k_p^{-1} = c/\omega_p$ (расстояния), поле опрокидывания волны $E_0 = mc\omega_p/e$ (поля); а также $\xi = z - ct$.

Исследуемая модель:

Бесконечная и однородная по радиусу плазма

Неподвижные ионы

Постоянный ток пучка,
$$n_b = \begin{cases} n_{b0} e^{-r^2/(2\sigma_r^2)}, & \xi < 0, \\ 0, & \xi \geq 0, \end{cases}$$

Линейный отклик плазмы, $n_{b0} = 4 \times 10^{-3}$

“Узкий” пучок, $\sigma_r = 0.5$ (есть аналитические формулы)

Смотрим на первые 25 периодов волны ($L=160$)

$e+$, $\gamma=1000$

(быстрое моделирование, пучок не отстает от света)

Начальный угловой разброс мал: $\delta\alpha = 2 \times 10^{-4}$

Важно качественное поведение, а не числа

Как характеризуем рост волны и вклад отдельных сгустков

Безразмерный кильватерный потенциал:

$$\Phi(r, \xi) = \int_{\xi}^{\infty} E_z(r, \xi') d\xi'$$

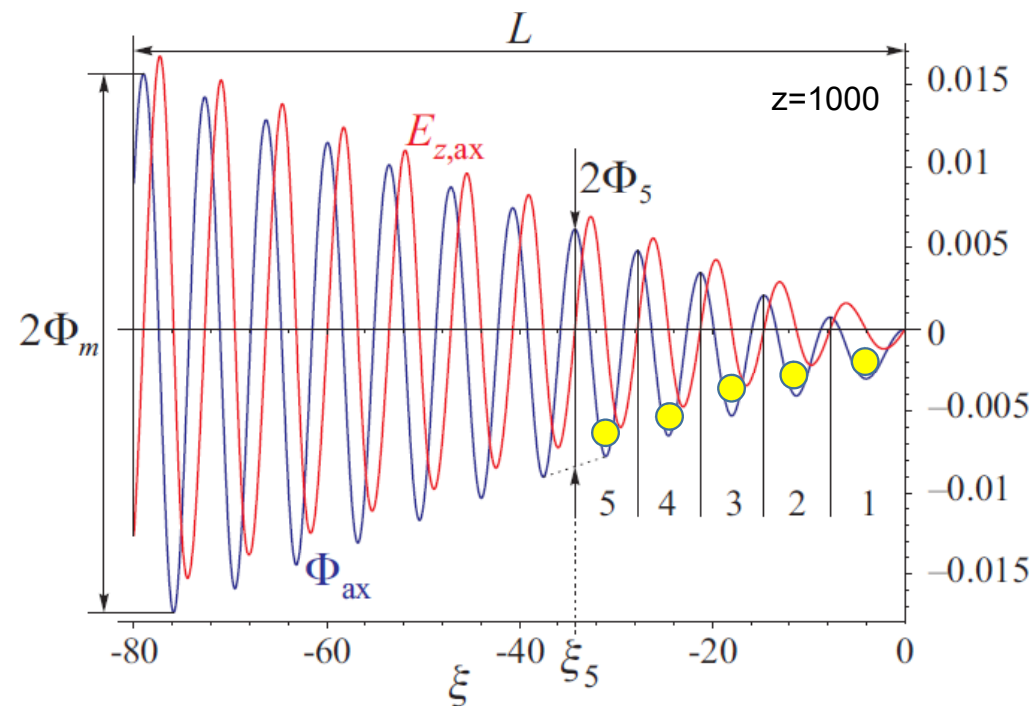
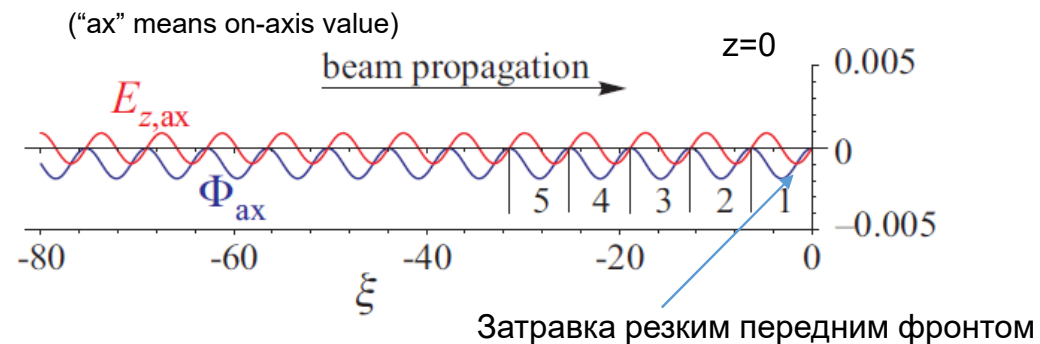
$$\mathbf{F} = e(\mathbf{E} + [\mathbf{e}_z, \mathbf{B}]) = -\nabla\Phi$$

Потенциальная яма = сгусток
(даже если он еще не сформировался)

Положение ямы ξ_j
(координата локального максимума),

амплитуда волны Φ_j после j -ого сгустка

- это функции пройденной в плазме
длины z



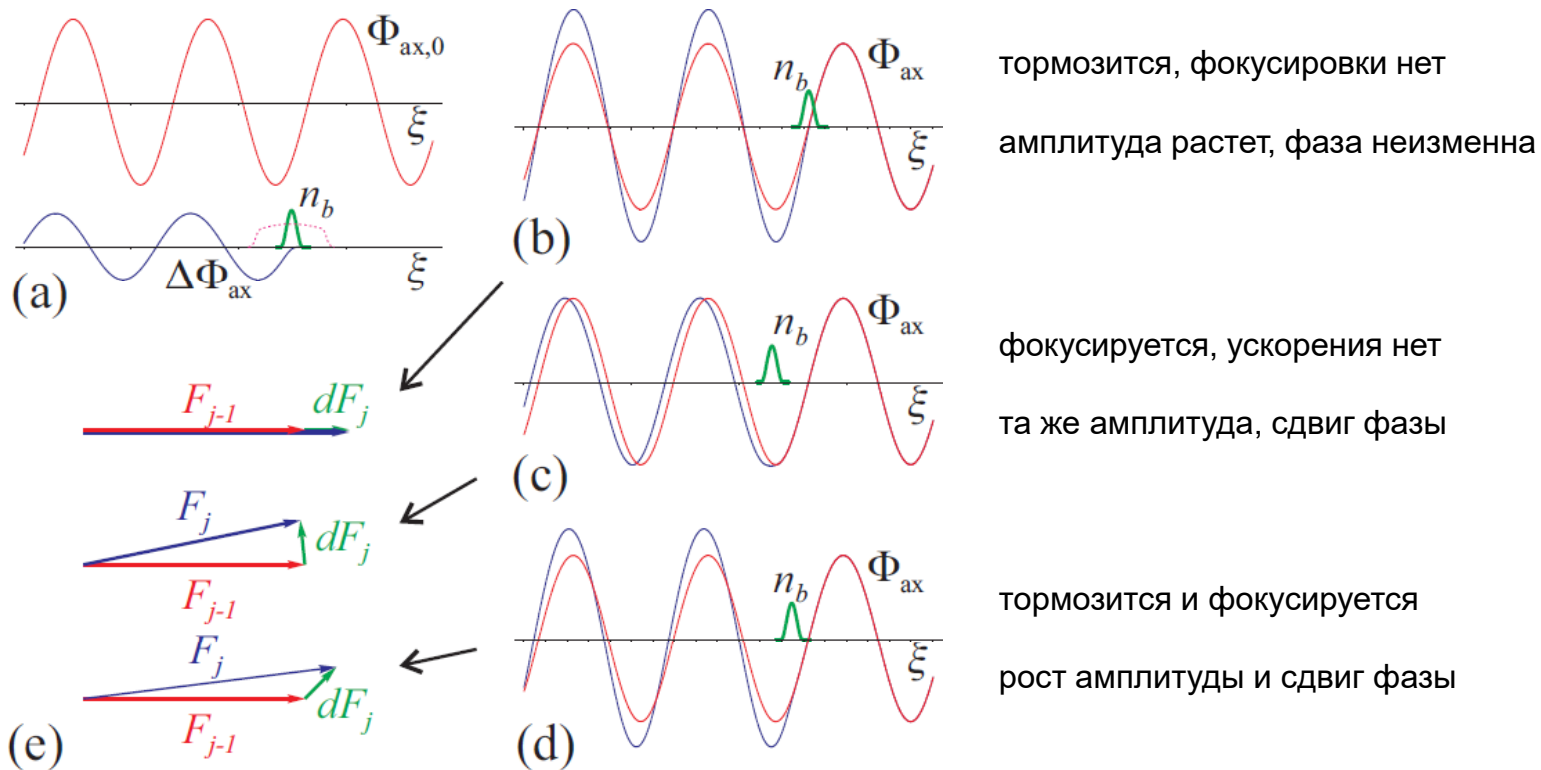
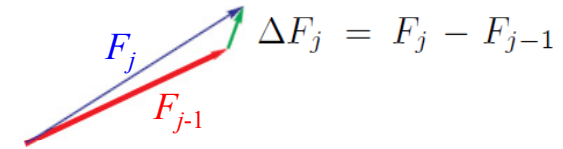
Возбуждение волны (линейная теория)

Удобно ввести комплексную амплитуду $F_j = \Phi_j \exp(-i\xi_j \sqrt{n})$,

плотность плазмы
(нужна после скачка)

Вклад сгустка по отношению к существовавшей волне $dF_j = \Delta F_j \exp(i\xi_{j-1} \sqrt{n})$

Вклад сгустка зависит от положения сгустка в волне:



Типичное поведение максимальной амплитуды

Однородная плазма: 5 стадий

1 стадия: структура кильватерной волны перестраивается от затравочной к той, которая соответствует скорейшему нарастанию неустойчивости.

2 стадия: почти экспоненциальный рост [описывается аналитически:
A. Pukhov, et al., PRL 107, 145003 (2011),
C.B.Schroeder, et al., PRL 107, 145002 (2011)]

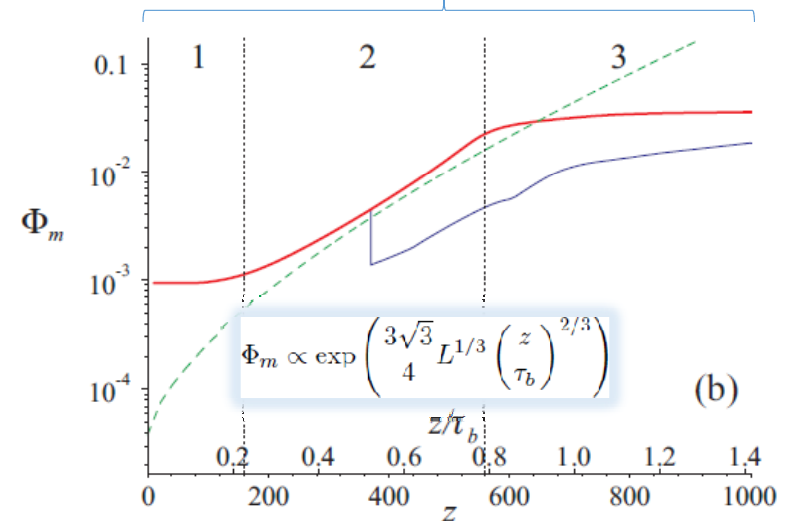
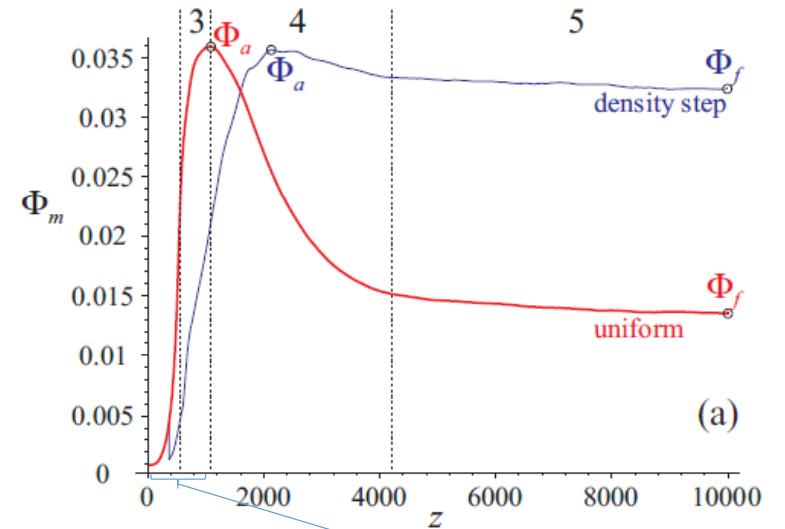
3 стадия: неэкспоненциальный рост

4 стадия: быстрое спадание поля (чем длиннее последовательность, тем больше относительный спад)

5 стадия: почти постоянное поле

Плазма со скачком плотности: сохранение поля на высоком уровне

Здесь оптимальный скачок = резкий рост плотности плазмы на 8.5% при $z = 360$.



Как увидеть движение частиц пучка в привязке к волне?

Важны: r, ξ, p_r

Несущественны: ϕ, p_ϕ, p_z



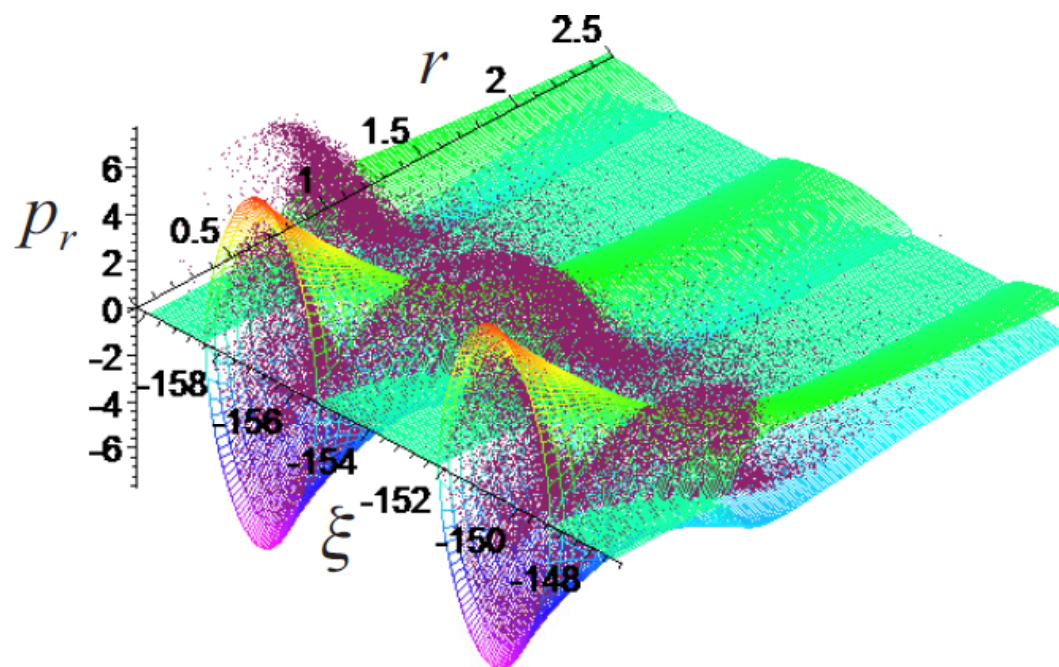
Отследим движение частиц пучка в пространстве (r, ξ, p_r)

Как связать с положением потенциальной ямы?

Сепаратриса ($p_r^2/2\gamma_b + \Phi = 0$):

$$p_r = \pm \sqrt{-2\gamma_b \Phi(r, \xi)} \quad \text{at} \quad \Phi(r, \xi) \leq 0$$

Смотрим на $-160 < \xi < -147.8$
(23, 24 сгустки)



Движение частиц пучка в однородной плазме

Потенциальные ямы **движутся назад** относительно пучка (известный факт, $v_{ph} < c$)

Почему (зачем)?

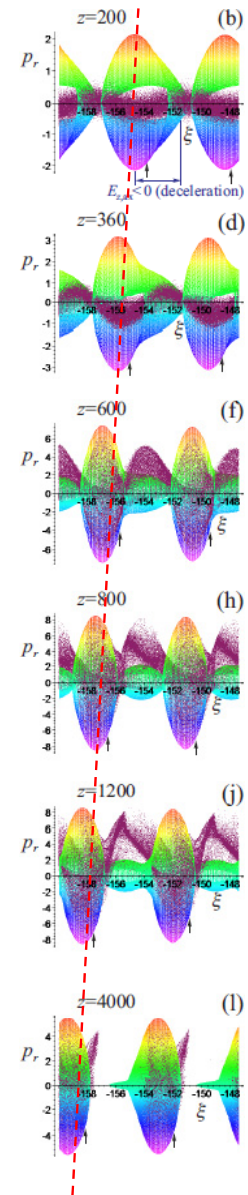
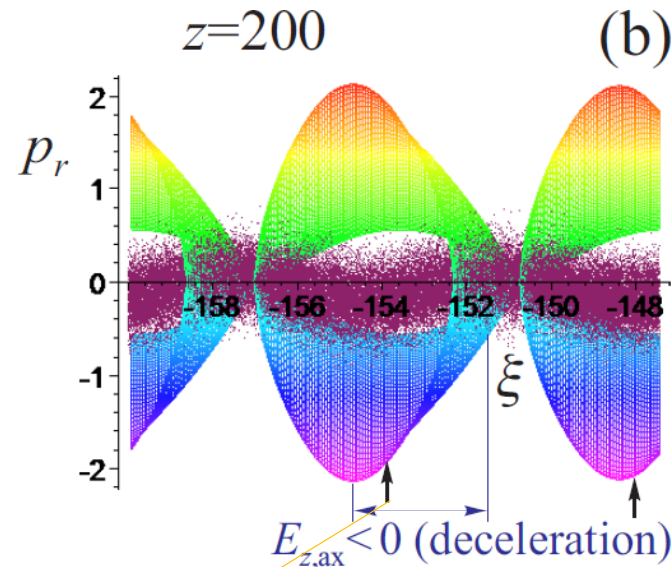
Волна может раскачиваться, если в потенциальных ямах (сгустках) тормозящихся частиц больше, чем ускоряющихся.

Но потенциальные ямы симметричны по ξ и притягивают частицы одинаково в фазы ускорения и торможения.

Если $v_{ph} = c$, то сгусток формируется на дне ямы и не раскачивает волну

Если яма соберет частицы и сдвинется назад, то **максимум плотности** будет в тормозящей фазе.

Это самый эффективный способ возбуждения волны, поэтому он «побеждает» другие возможные возмущения



Движение частиц пучка в однородной плазме

По мере развития само модуляции **потенциальные ямы должны двигаться** относительно пучка, «поглощать» его частицы с одной стороны и «выпускать» с другой.

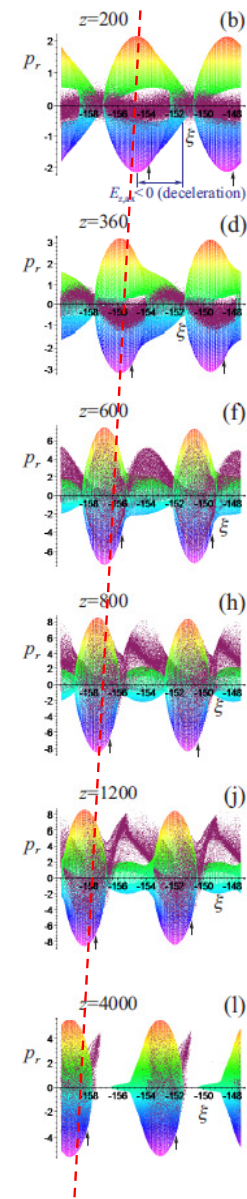
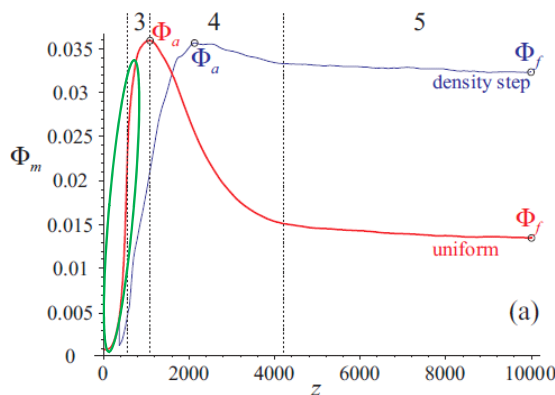
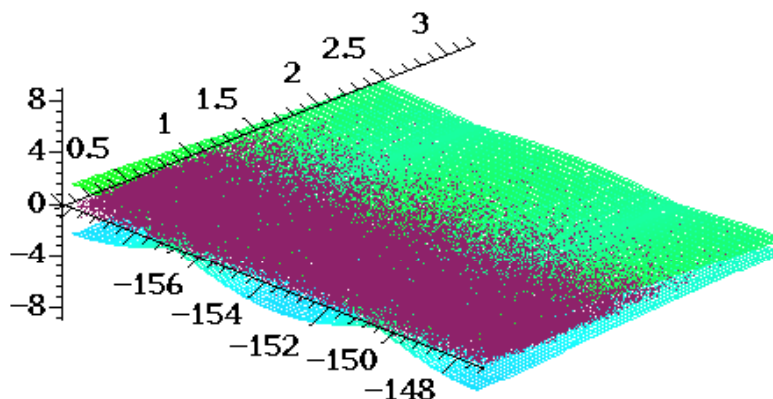
Растущие сгустки обеспечивают все больший сдвиг фазы, т.е. движение ямы.

Это – экспоненциальная (линейная) стадия неустойчивости. Она заканчивается, когда возмущение перестает быть малым.

Что потом?

Яме нечего больше «поглощать». Но волна продолжает расти (3 стадия), так как отсутствие поглощаемых (в ускоряющую фазу) частиц способствует росту волны.

$z=0..1000$



Движение частиц пучка в однородной плазме

Максимум поля = пустая область дошла до тормозящей фазы (точнее, яма залезла в пустую область наполовину)...

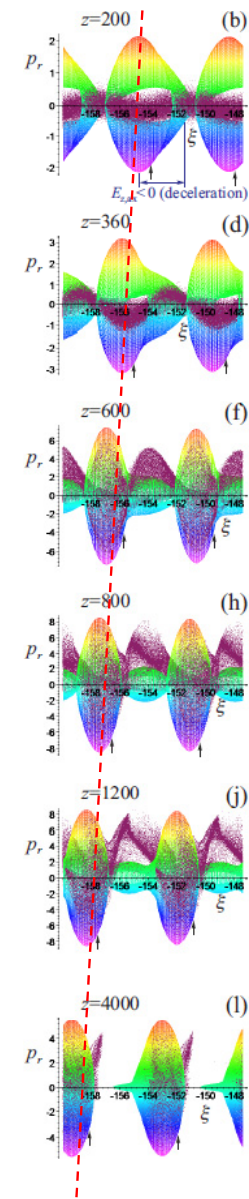
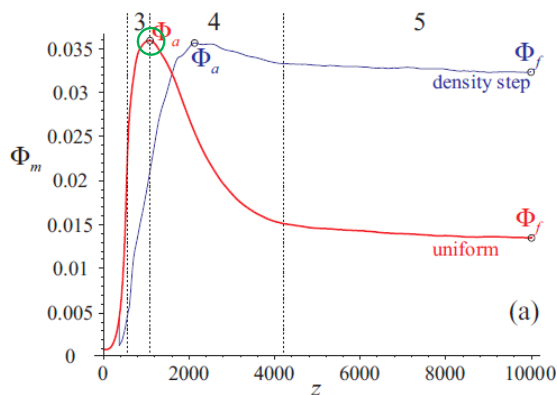
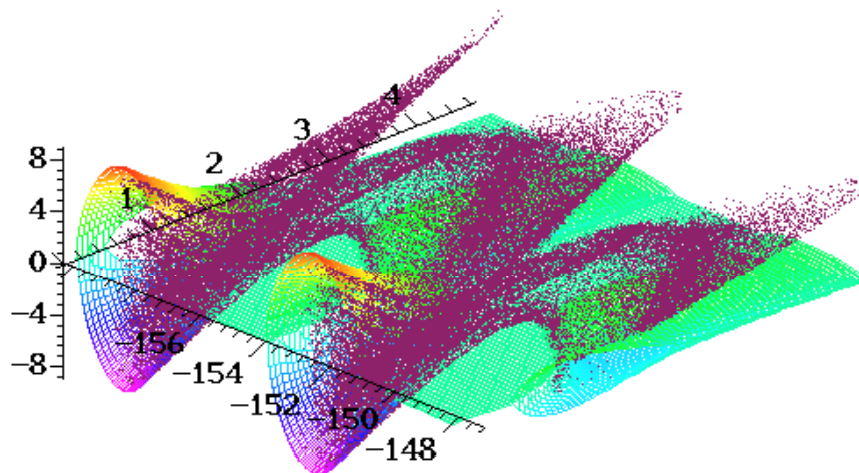
$z=1200$

... но яма продолжает движение, так как предыдущие сгустки эволюционируют медленнее,

... и теряет, теряет частицы.

Как итог, в установившемся состоянии частиц в яме мало.

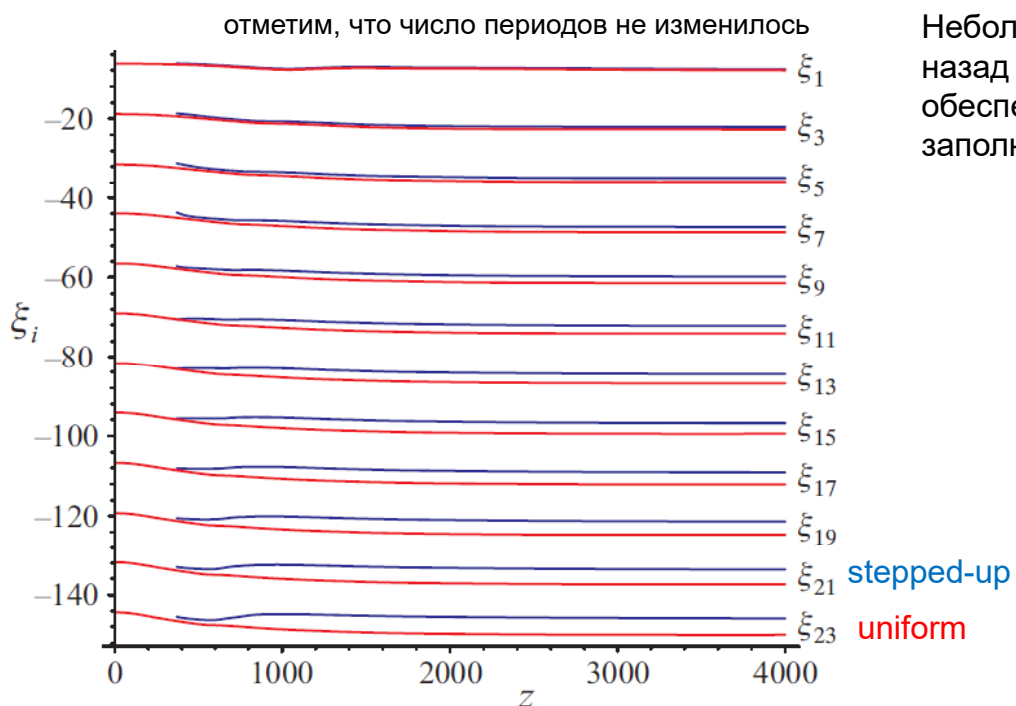
(Потенциальная яма «уползла» в пустую область).



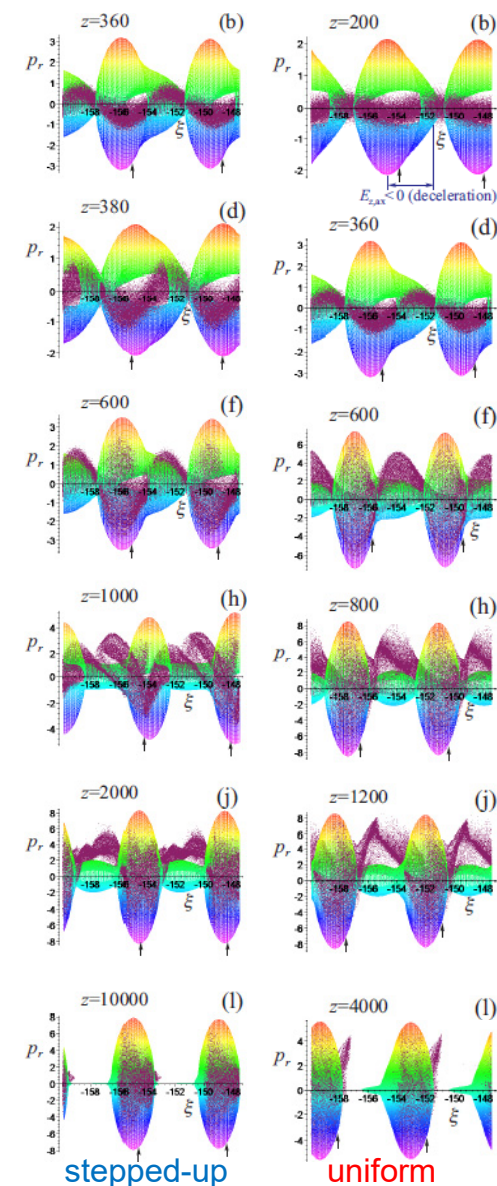
Движение частиц пучка при скачке плотности

Плазма плотнее, длина волны короче,
= «сила», препятствующая удлинению периода волны

Сила определенной величина останавливает движение ямы
(останавливает постепенно, так как сгустки, начавшие формироваться в меньшей плотности, не сразу и не полностью адаптируются к большей)



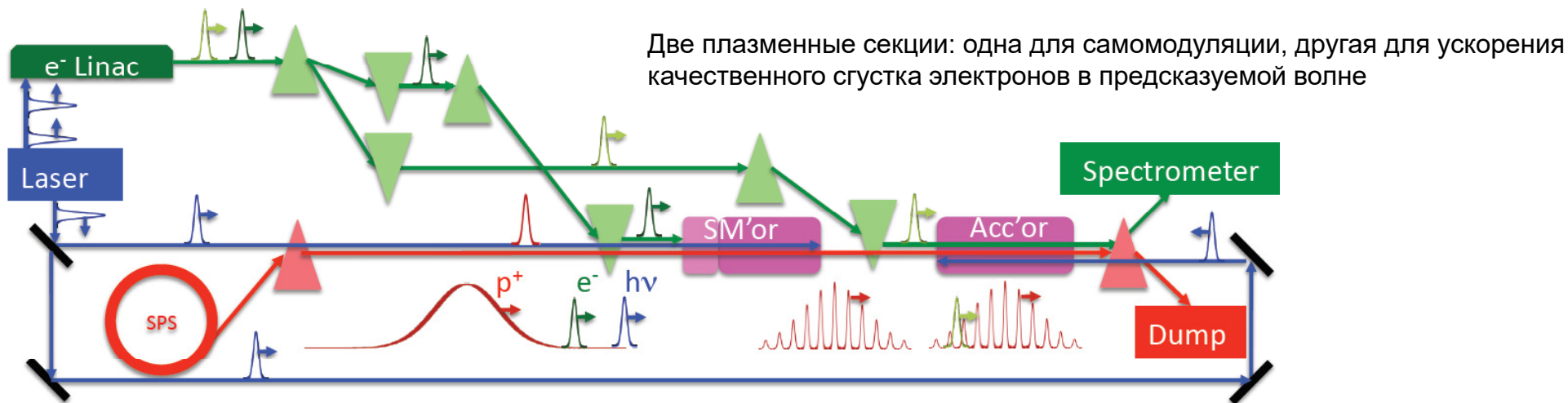
Небольшие подвижки ямы вперед-назад тоже важны, так как ими обеспечивается несимметричное заполнение потенциальных ям.



Как проверить? AWAKE Run 2

2.1. Run 2 experimental layout

P.Muggli for the AWAKE Collaboration, Physics to plan AWAKE Run 2.
Journal of Physics: Conference Series 1596, 012008 (2020).

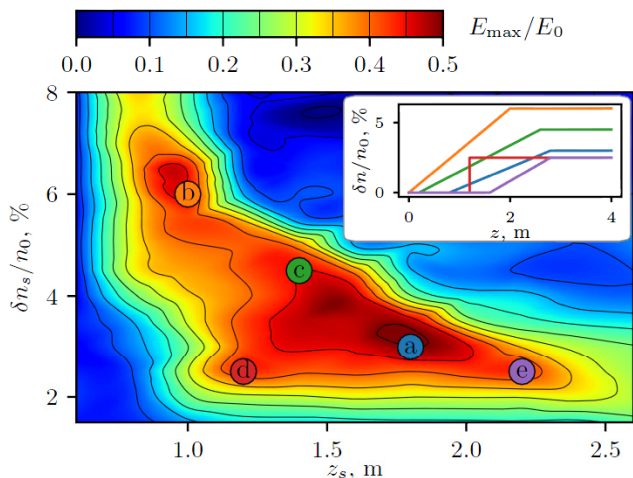


Скачок плотности интересен не сам по себе, а как способ создать долгоживущий драйвер, но долгоживущему драйверу нужна длинная плазма, созданная другим способом (не сопутствующим лазерным импульсом, т.к. его энергии недостаточно).

В предионизованной плазме голова пучка самомодулируется непредсказуемым образом и испортит хорошую волну от «правильно» модулированного хвоста.

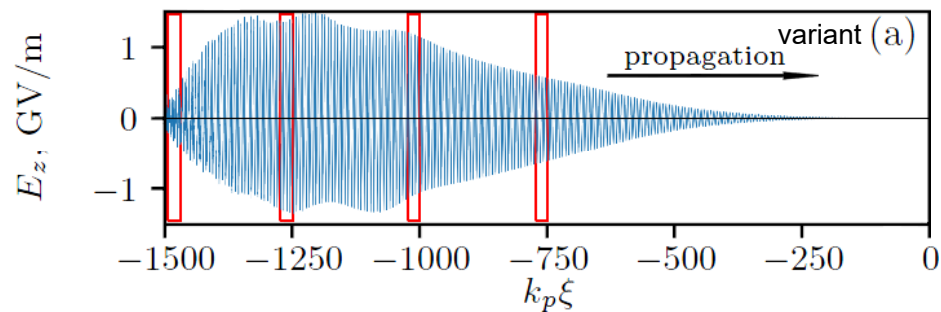
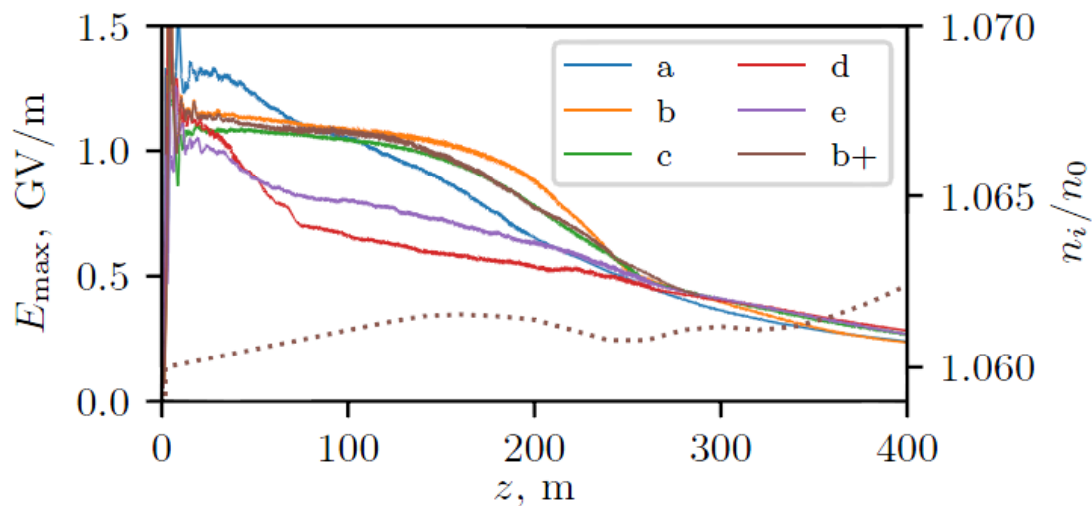
Поэтому в первой секции нужно промодулировать весь протонный пучок, и инициировать такую самомодуляцию можно коротким электронным сгустком. – Уже продемонстрировано в однородной плазме [PRL 129, 024802 (2022)]

Что дальше? Моделирование обещает много интересного

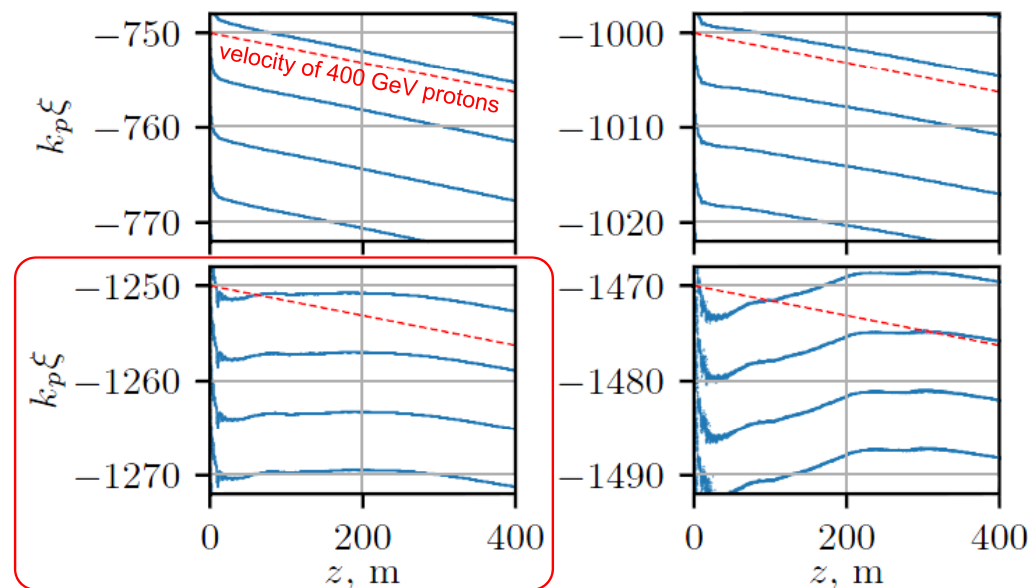


Варьируя параметры профиля плотности плазмы на стадии самомодуляции можно получать пучки с разным поведением на большой длине распространения.

Некоторые могут создавать волну с фазовой скоростью, большей скорости драйвера

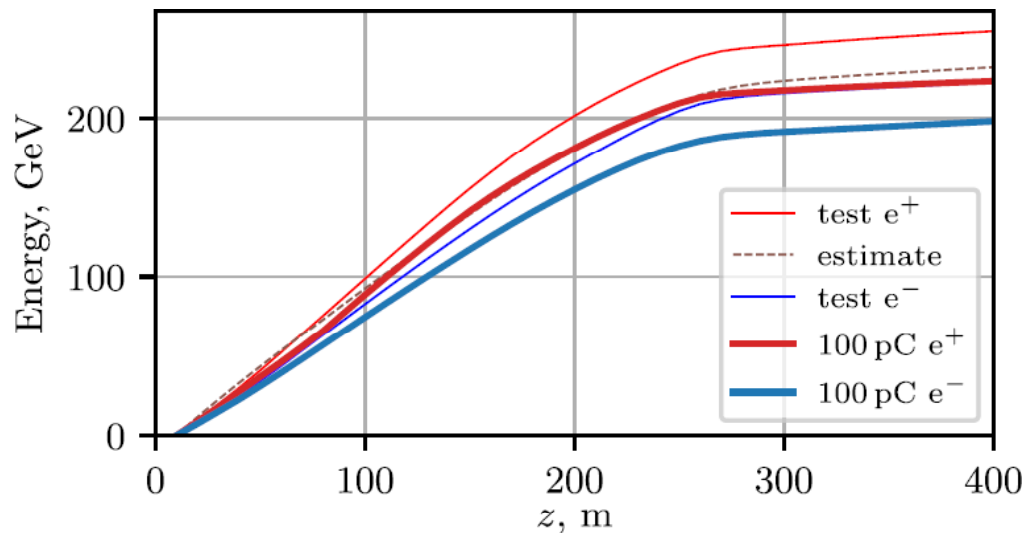


Location of wakefield maxima (shows phase velocity):

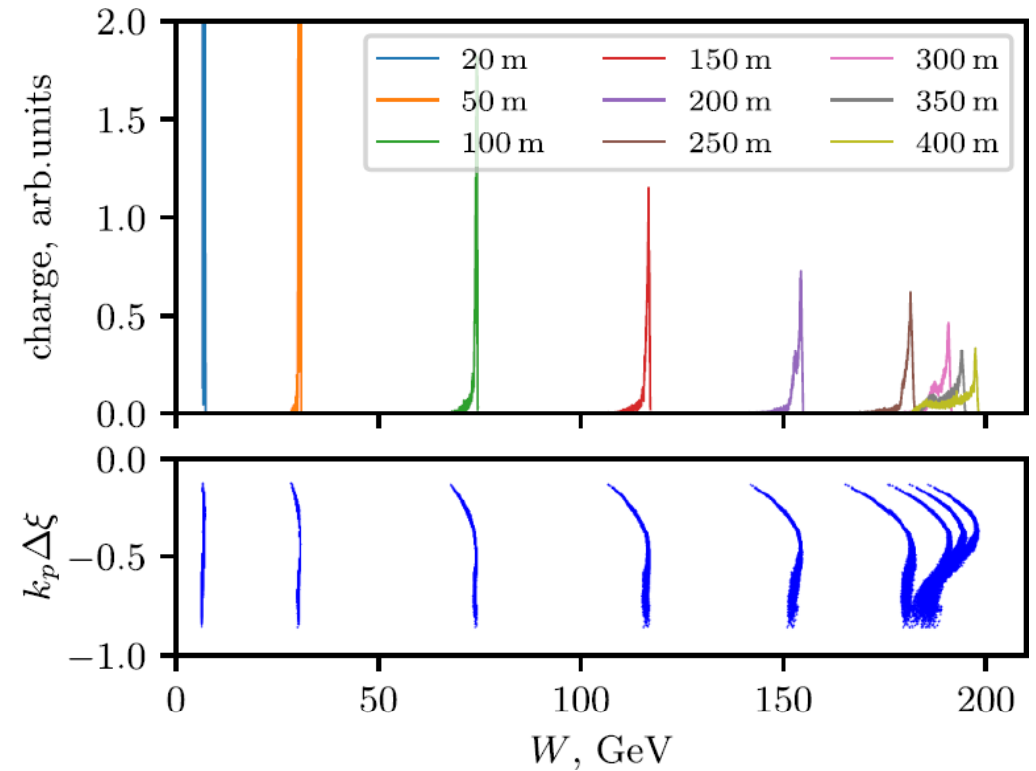


Что дальше? Моделирование обещает 200 ГэВ электроны с 400 ГэВ драйвером

- 400 ГэВ пучок есть
- плазменный столб (наверно) можно сделать
- туннель для размещения эксперимента имеется (~100 м)
- = рекордное ускорение электронов в обозримом будущем



K.V. Lotov and P.V. Tuev, Plasma Phys. Control. Fusion 63, 125027 (2021).





Итак

Контролируемая само модуляция релятивистского пучка заряженных частиц позволяет организовать процесс кильватерного ускорения «с заданными свойствами».

Она сделала возможным эксперимент AWAKE и развитие кильватерного ускорения с протонными драйверами.

Моделирование количественно согласуется с экспериментами, возможен численный поиск.

Бесконечное количество степеней свободы (подбирается функция, $n_p(z)$).

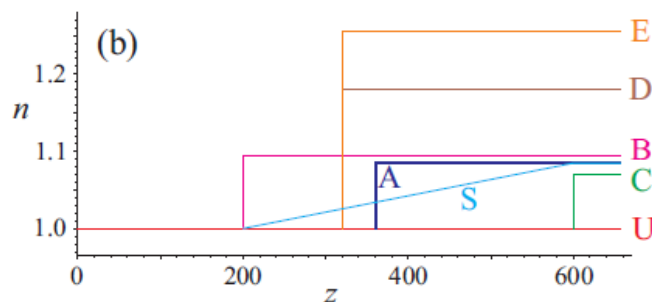
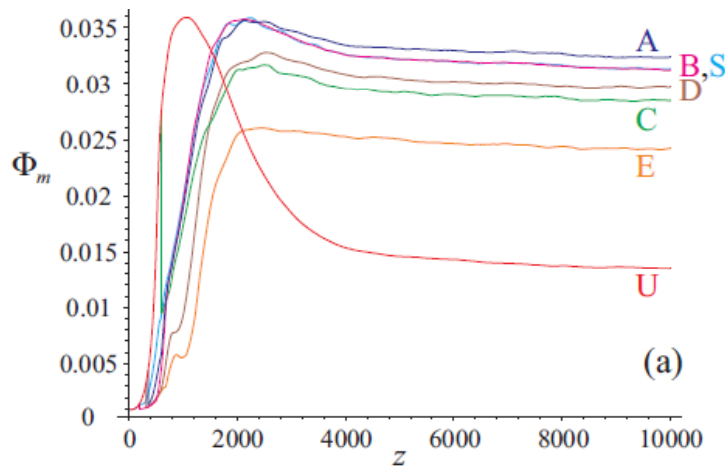
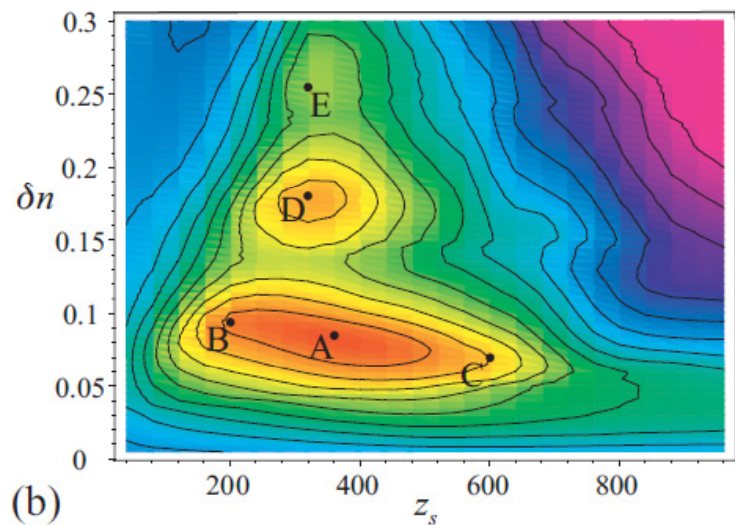
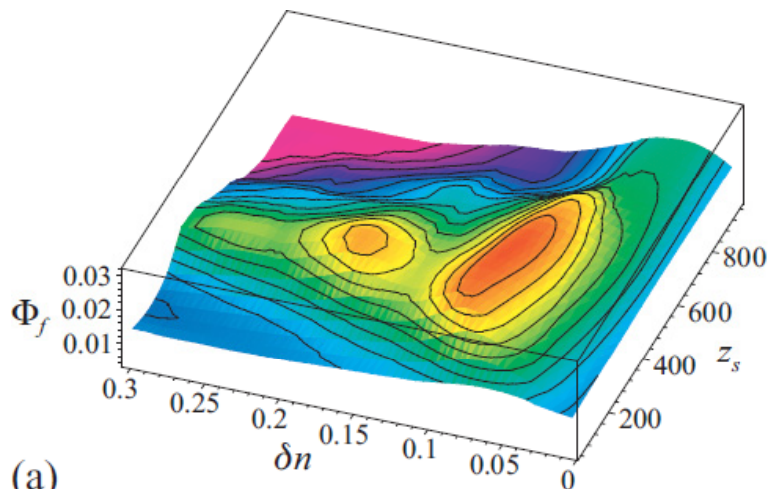
Разные профили плотности на стадии само модуляции дают разное поведение пучка на больших расстояниях.

Впереди – интересная физика и новые возможности.

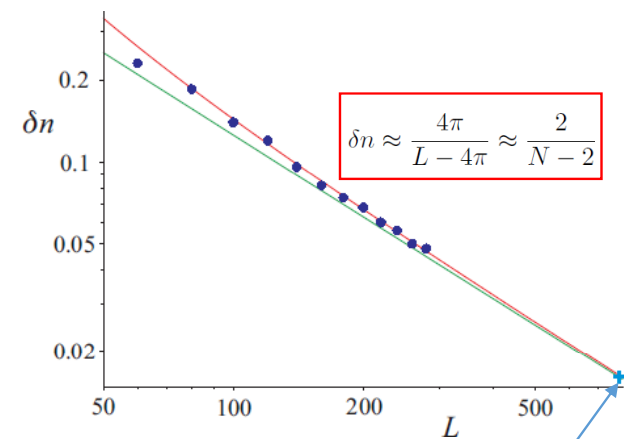
Спасибо за внимание



Карта скачков плотности



оптимальный скачок «втискивает» ровно один дополнительный период волны в длину пучка, два первых сгустка играют особую роль



simulations of LHC beam
(Phys. Plasmas 18, 103101)

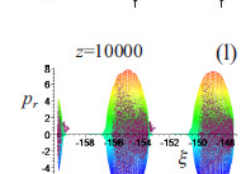
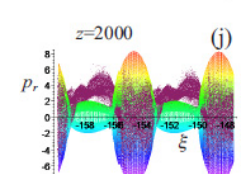
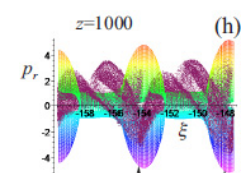
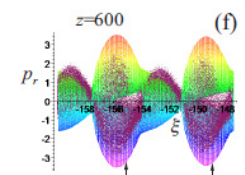
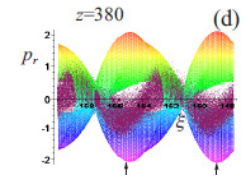
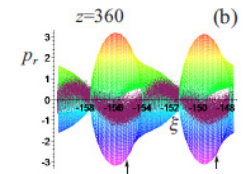
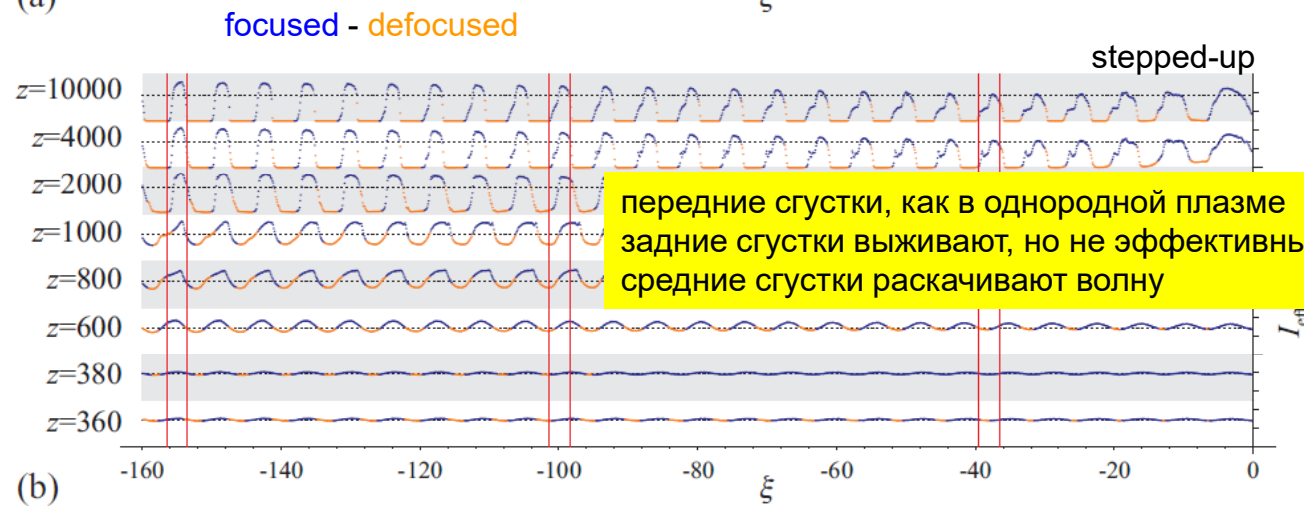
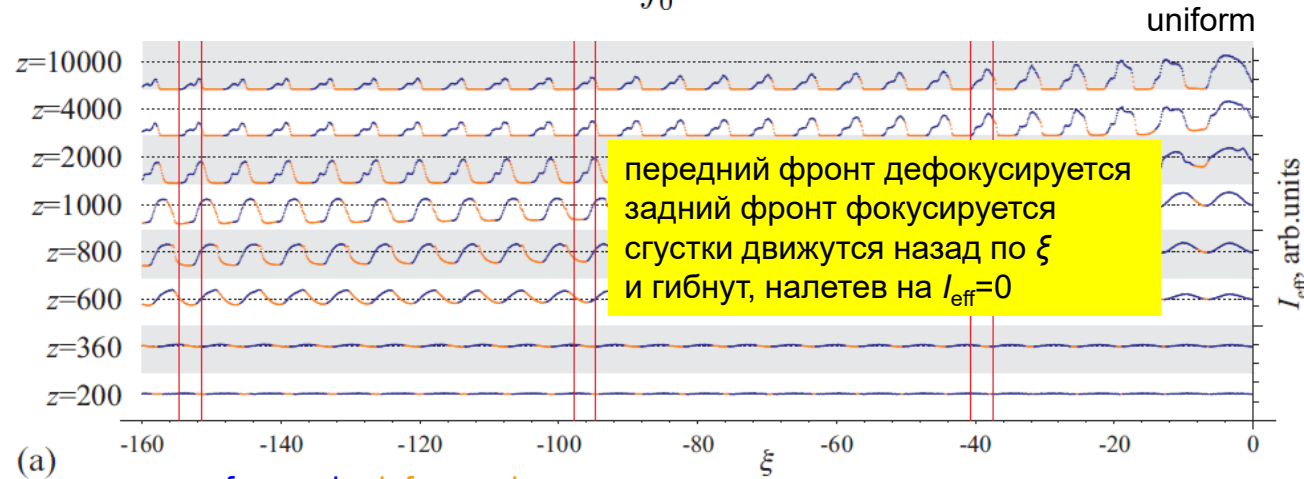
Скачок плотности должен быть **на экспоненциальной стадии** развития неустойчивости (а не в момент полной бунчировки)

Плавное нарастание плотности работает так же
-> **длина переходной области не важна**

Есть локальные максимумы при амплитуде скачка, кратной оптимальной δn

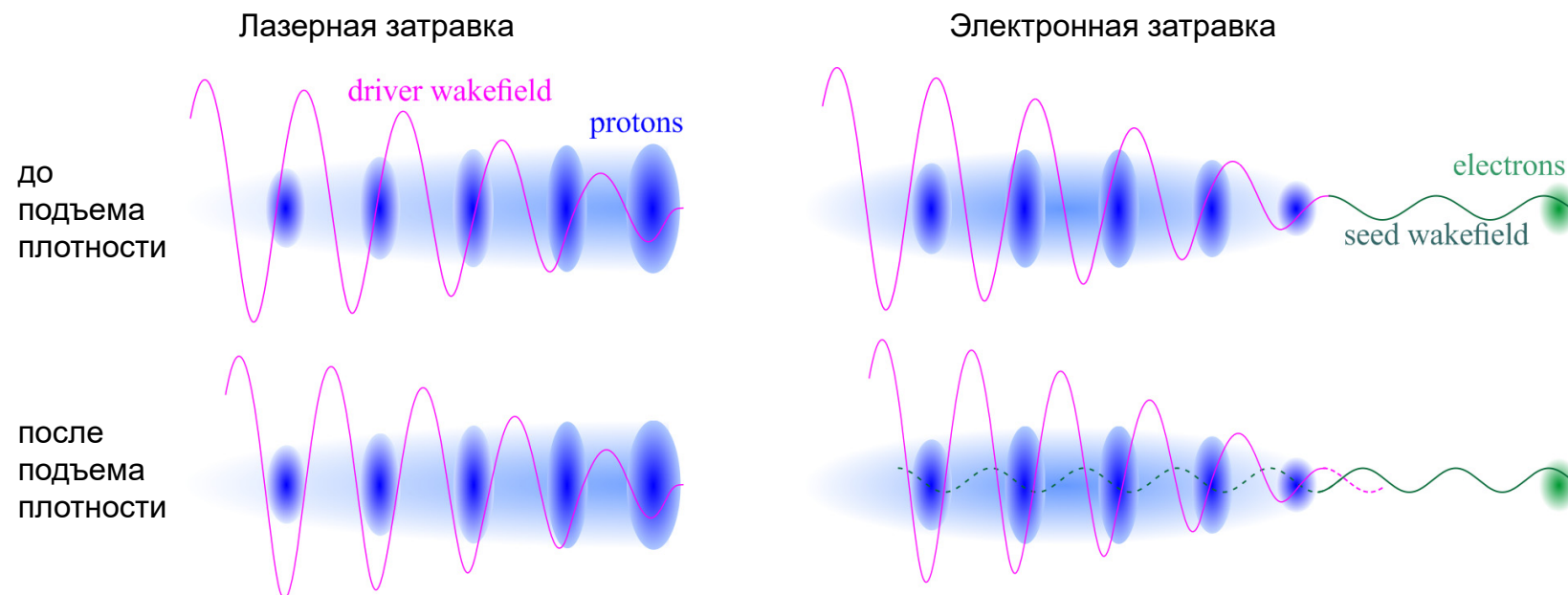
Движение частиц пучка при скачке плотности

Как же асимметрия населенности ямы?
$$I_{\text{eff}}(\xi) = \int_0^\infty n_b(r, \xi) e^{-r} 2\pi r dr$$



stepped-up

Почему высокоэнергичный качественный электронный сгусток оказался худшей затравкой?

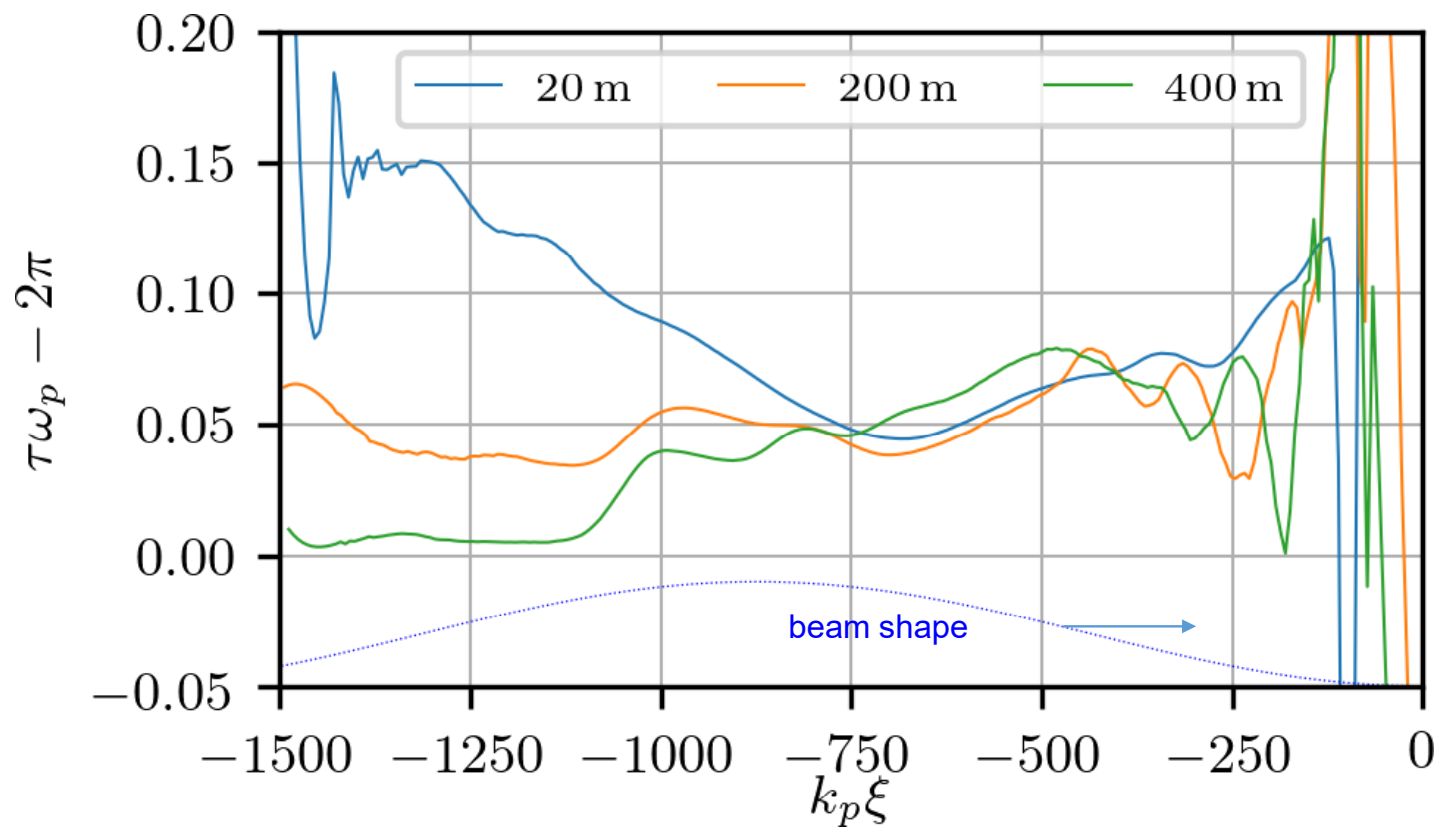


До подъема плотности поле драйвера идеально согласовано с затравочным полем, при этом собственное поле драйвера «привязано» к первому «большому» микросгустку.

После подъема плотности поле драйвера оказывается рассогласованным с полем электронной затравки, так как между пучками – большое расстояние. С лазерной затравкой проблем нет.

Как итог, затравочное поле начинает разрушать микросгустки вместо того, чтобы помогать им расти.

Why the phase velocity is higher? Because the wavelength shortens.



← This part of figure appears because of redundancy →

At the leading half of the beam, the period is longer than 2π , because oscillations are forced. Each bunch shifts the wave a little backward.

At the trailing half of the beam, the period is even longer, because the wave is slightly nonlinear there (because of a high amplitude). The bunch train matches the wave, and bunch-to-bunch distance is also longer.

As the driver depletes, the wave amplitude goes down, the nonlinearity switches off, the period shortens, points of constant phase moves forward with respect to the beam.

At certain $\xi=z-ct$, this effect compensates slowness of the driver.

