

Плазменное кильватерное ускорение с протонным драйвером: первые результаты эксперимента AWAKE

Константин Лотов



Институт ядерной физики СО РАН



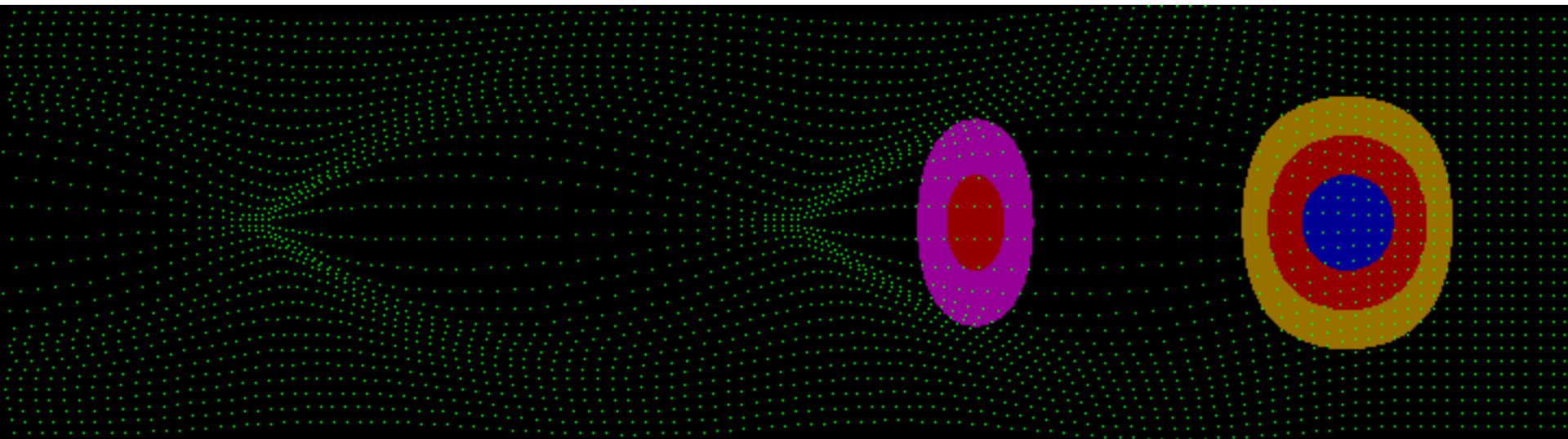
Новосибирский государственный университет



Коллаборация AWAKE



Плазменное кильватерное ускорение



Витнесс
(ускоряемые
электроны)

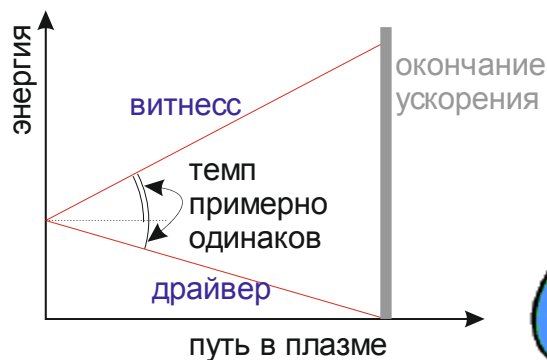
Драйвер (лазерный
импульс или сгусток
заряженных частиц)



Три направления плазменного кильватерного ускорения

Электронные драйверы (1985):
< 120 Дж, 50 ГэВ (SLC)

Трансформатор энергии пучков

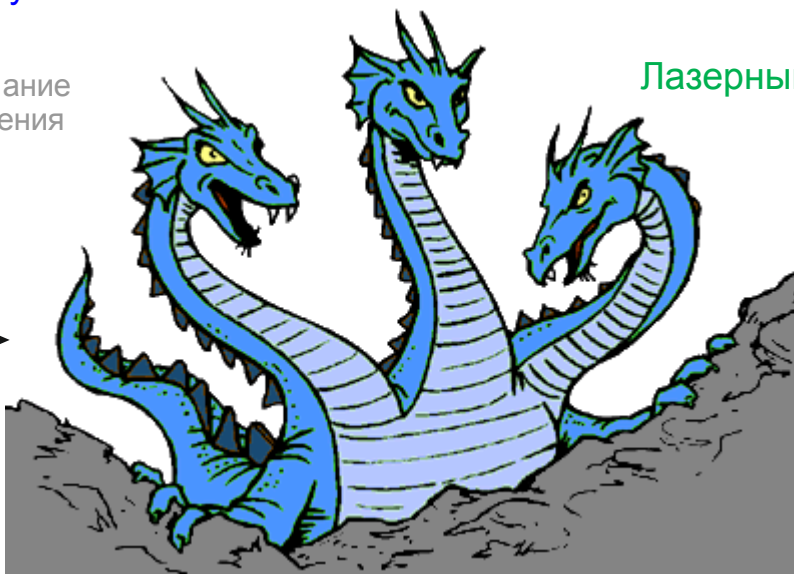


либо «доускоритель»
(добавка к обычному
линаку для удвоения
энергии),
либо многостадийное ускорение
(много драйверов, один витнесс,
сложно)

Для сравнения,
International Linear Collider:
250 ГэВ, 1 кДж в сгустке

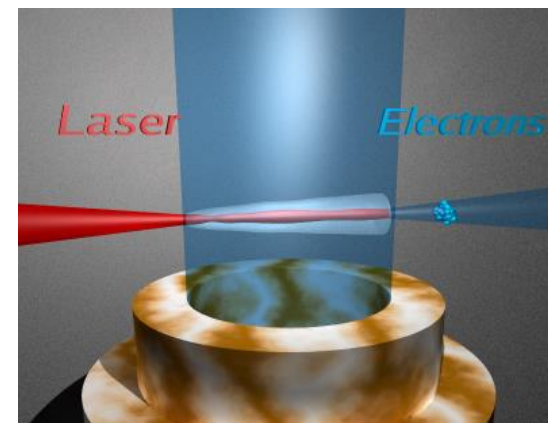
Протонные драйверы (2009):

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 и изучаются



Лазерный драйвер (1979):

Генератор пучков частиц



< 50 Дж в импульсе, < 10 ГэВ за секцию,
для ТэВ-ных энергий нужно много секций.

Изучается, в основном, как компактный
источник коротких электронных сгустков
или излучения на их основе



Протонные драйверы

На пути к использованию протонов стояло столько проблем, что до 2009 г. никто их не рассматривал в качестве возможных драйверов. Протонные сгустки:

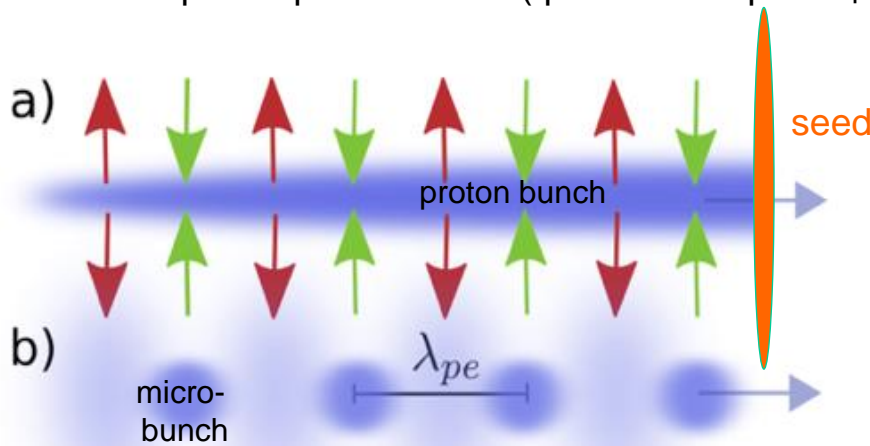
Длинные (не возбуждают плазменную волну)

Медленные (фазовая скорость волны меньше скорости света)

Протонные драйверы

Оказалось, протонные пучки:

Можно разбить на короткие сгустки (резонансно возбуждают плазменную волну)
 При энергии >1 ТэВ (фазовая скорость достаточно близка к скорости света)



Контролируемая самомодуляция:

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

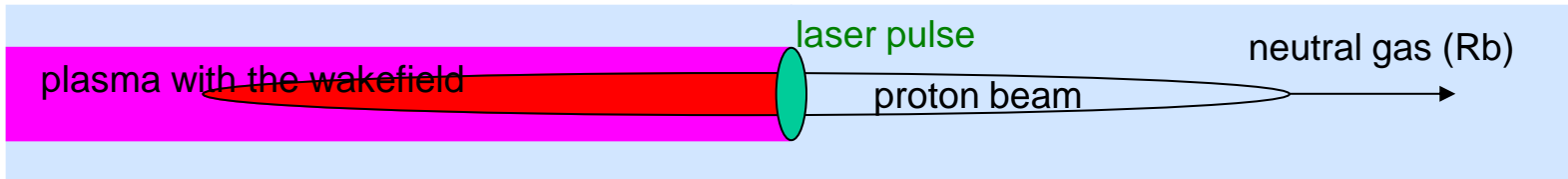
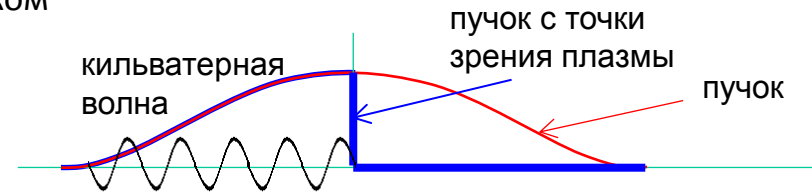
K. Lotov, Instability of long driving beams in plasma wakefield accelerators, Proc. EPAC-1998, p.806-808.

В AWAKE самомодуляция инициируется ионизационным фронтом:

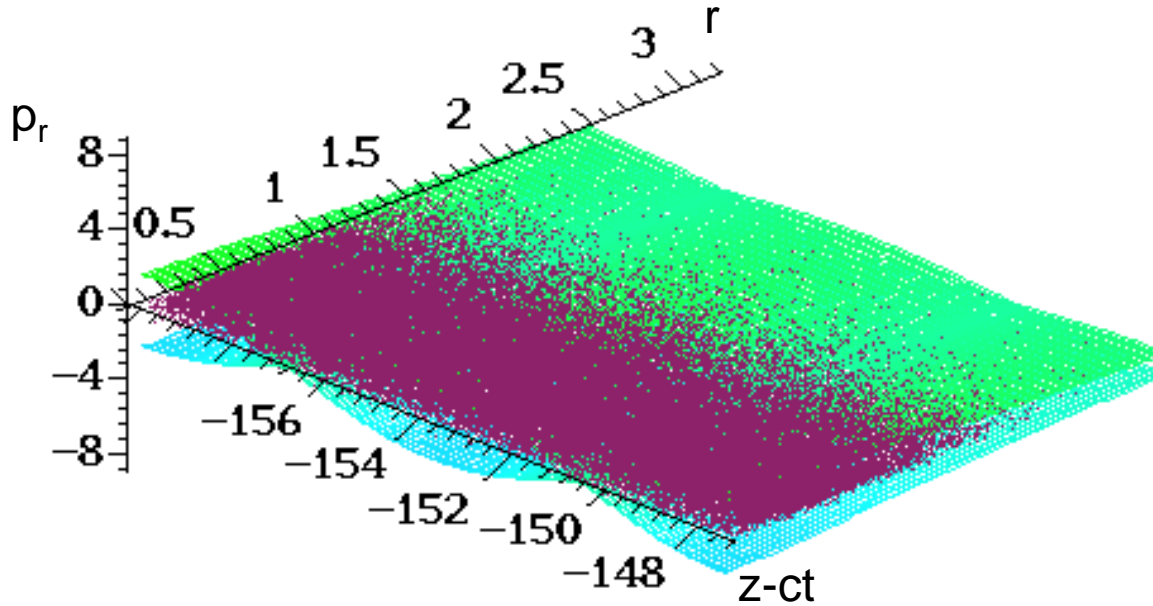
Короткий лазерный импульс движется вместе с протонным пучком и быстро ионизует газ

С точки зрения плазмы у протонного пучка – резкий передний фронт

Резкий фронт создает затравочную волну



Самомодуляция чуть подробнее



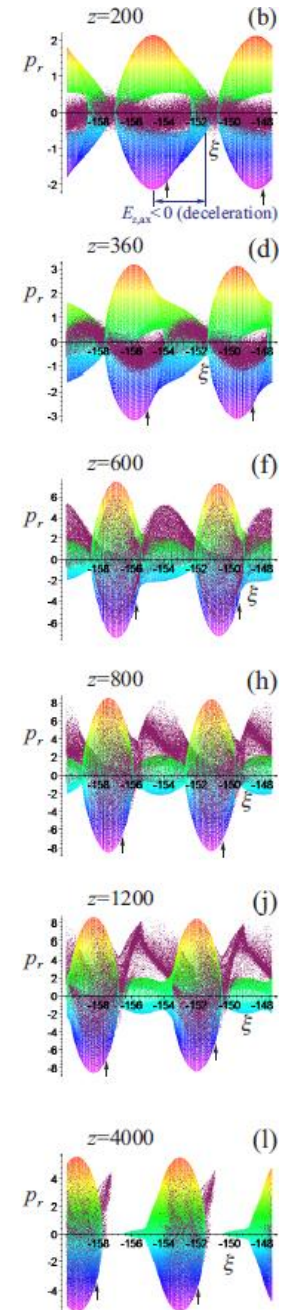
Также показана сепаратриса ($p_r^2/2\gamma_b + \Phi = 0$):

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

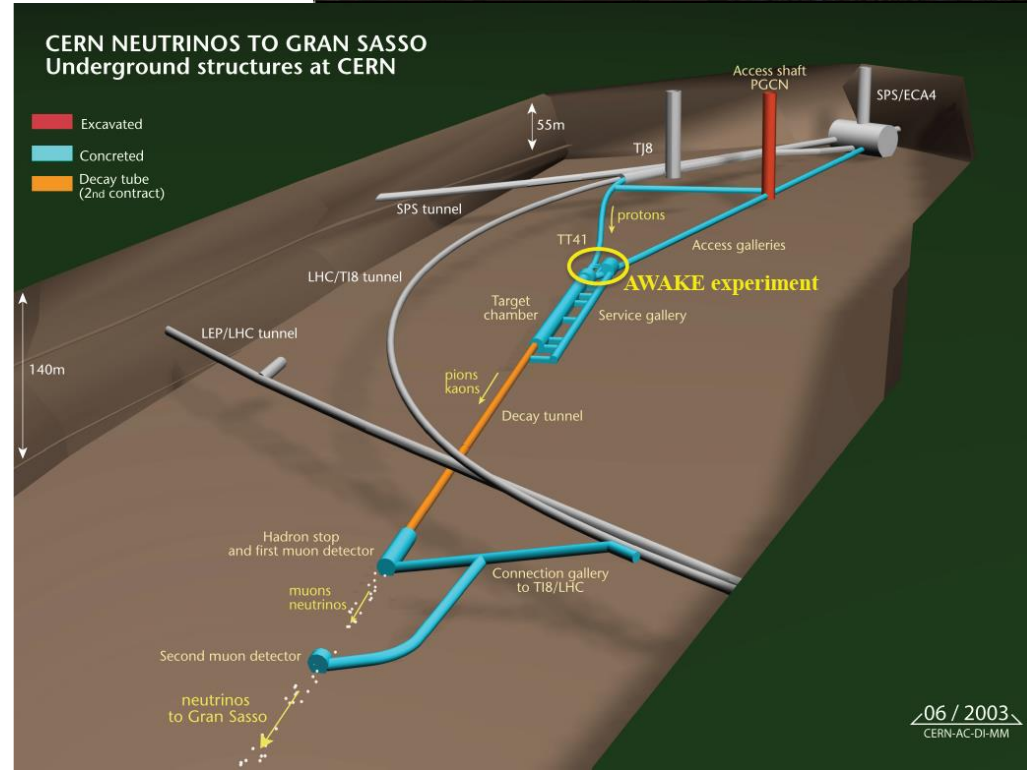
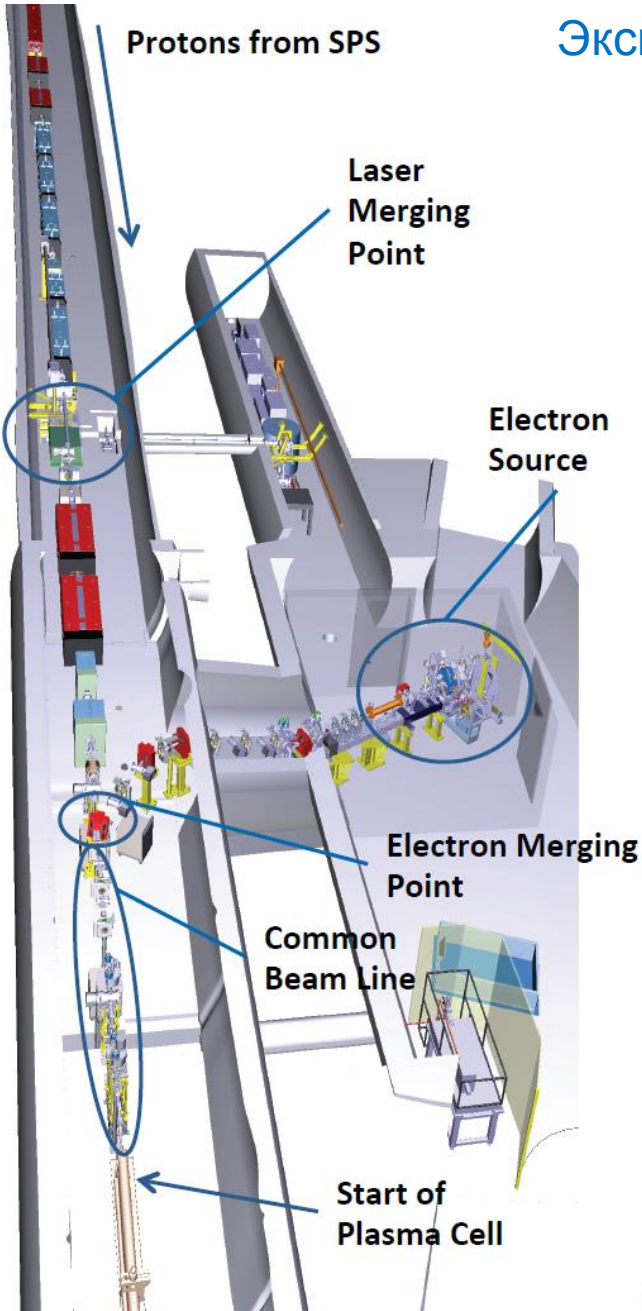
По мере развития самомодуляции потенциальные ямы движутся относительно пучка.

Пучок увеличивает угловой разброс (эммитанс).

Дефокусируемые частицы приобретают большой радиальный импульс.



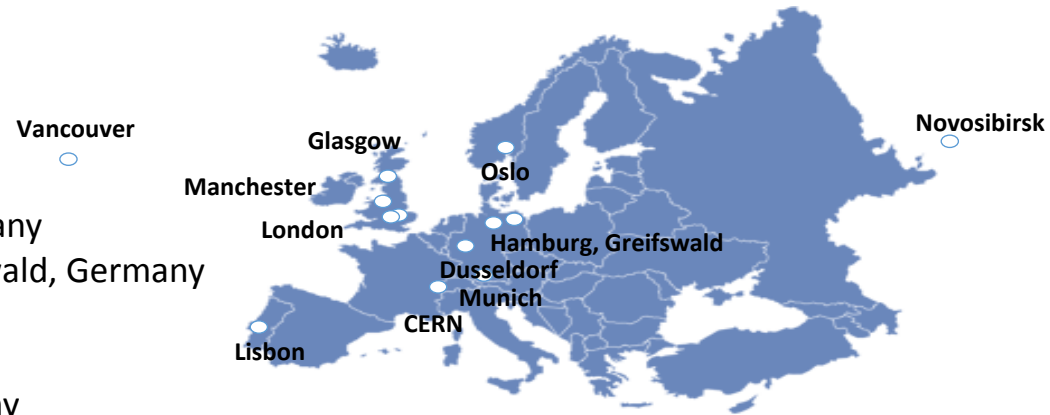
Эксперимент AWAKE



AWAKE Collaboration: 18+3 Institutes world-wide

Collaboration members:

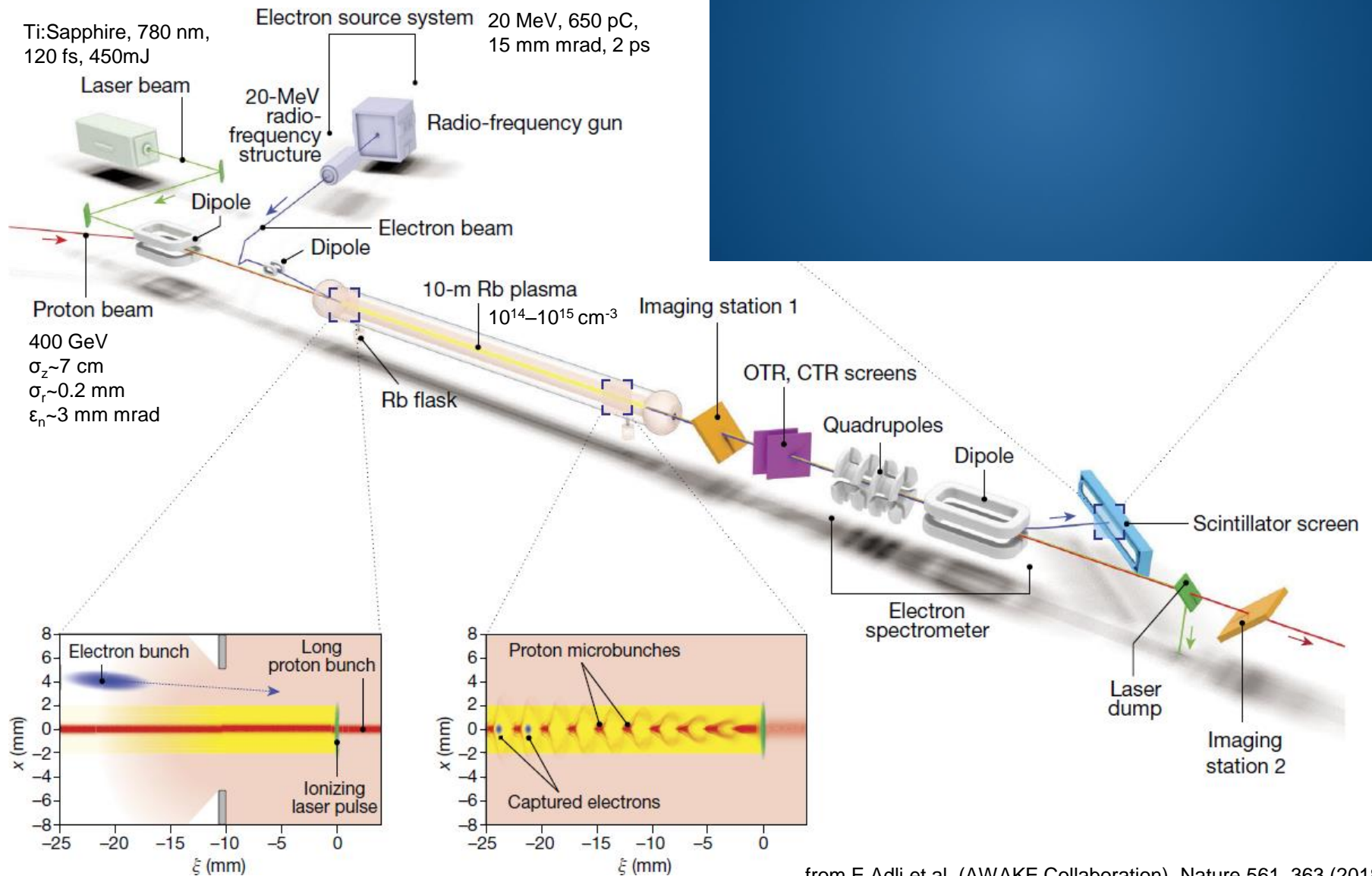
- University of Oslo, Oslo, Norway
- CERN, Geneva, Switzerland
- University of Manchester, Manchester, UK
- Cockcroft Institute, Daresbury, UK
- Lancaster University, Lancaster, UK
- Max Planck Institute for Physics, Munich, Germany
- Max Planck Institute for Plasma Physics, Greifswald, Germany
- UCL, London, UK
- UNIST, Ulsan, Republic of Korea
- Philipps-Universität Marburg, Marburg, Germany
- Heinrich-Heine-University of Düsseldorf, Düsseldorf, Germany
- University of Liverpool, Liverpool, UK
- ISCTE - Instituto Universitário de Lisboa, Portugal
- Budker Institute of Nuclear Physics SB RAS, Novosibirsk, Russia
- Novosibirsk State University, Novosibirsk, Russia
- GoLP/Instituto de Plasmas e Fusão Nuclear, Instituto Superior Técnico, Universidade de Lisboa, Lisbon, Portugal
- TRIUMF, Vancouver, Canada
- Ludwig-Maximilians-Universität, Munich, Germany



Associated members:

- University of Wisconsin, Madison, US
- Wigner Institute, Budapest
- Swiss Plasma Center group of EPFL

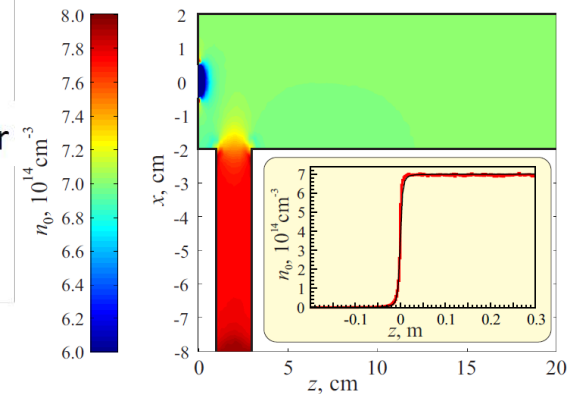
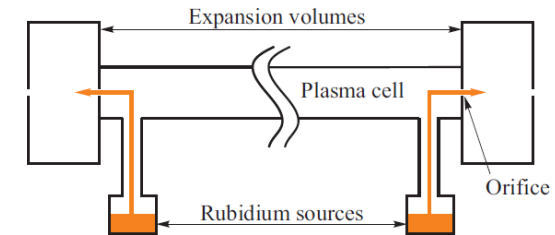
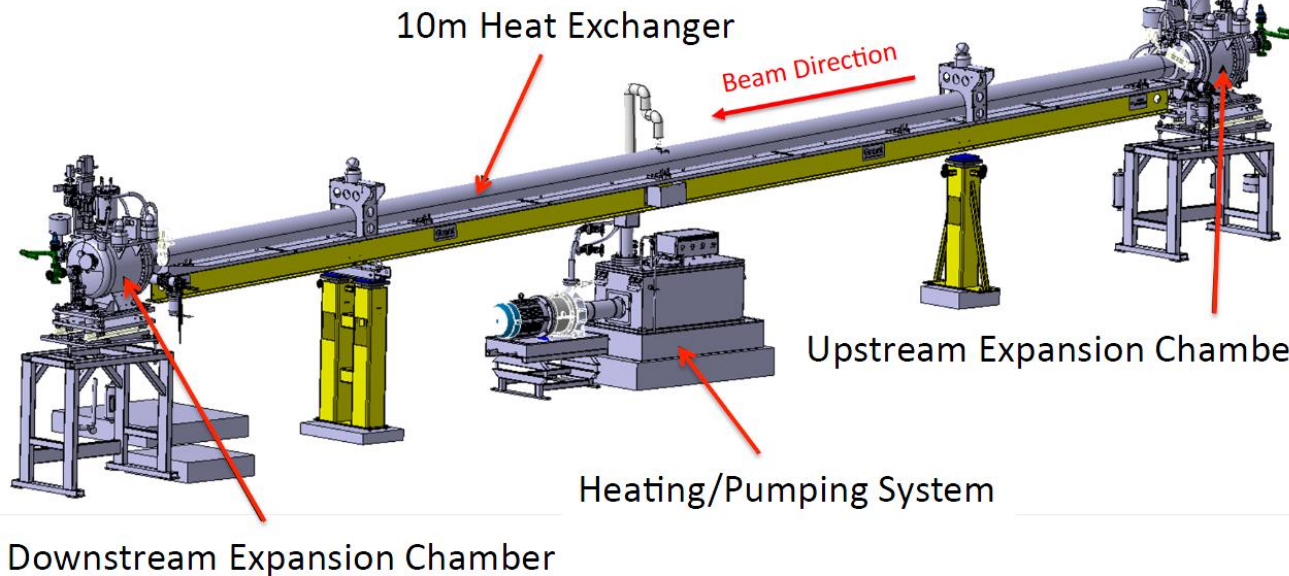
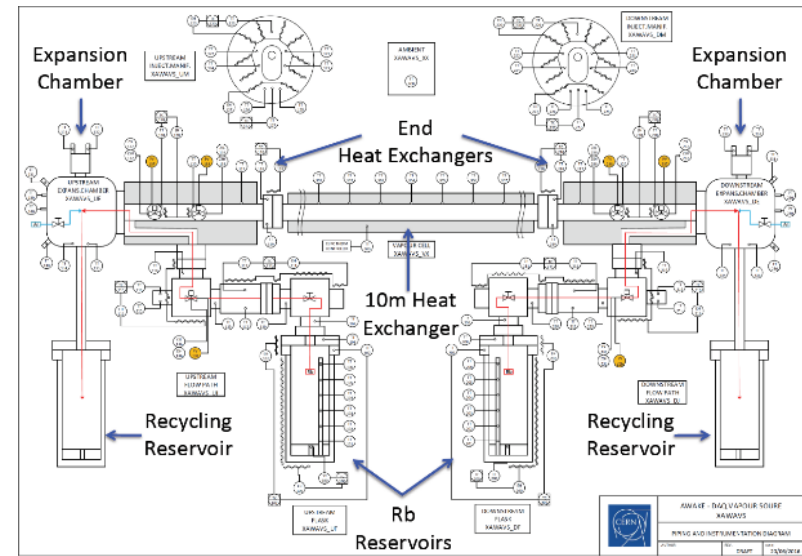
Layout of the AWAKE experiment



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

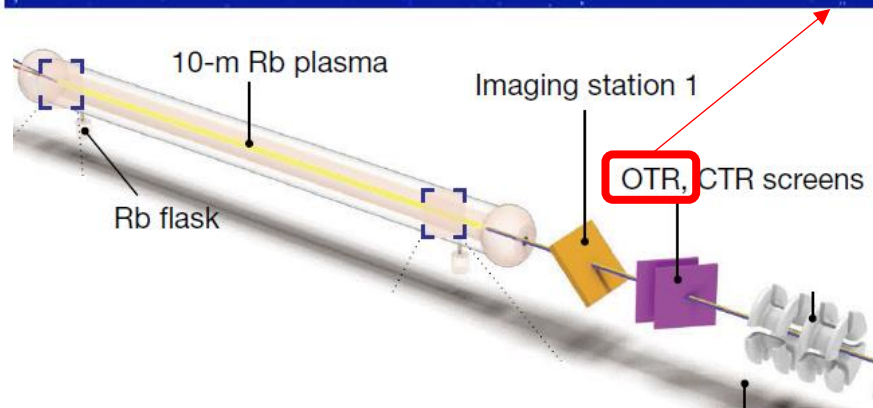
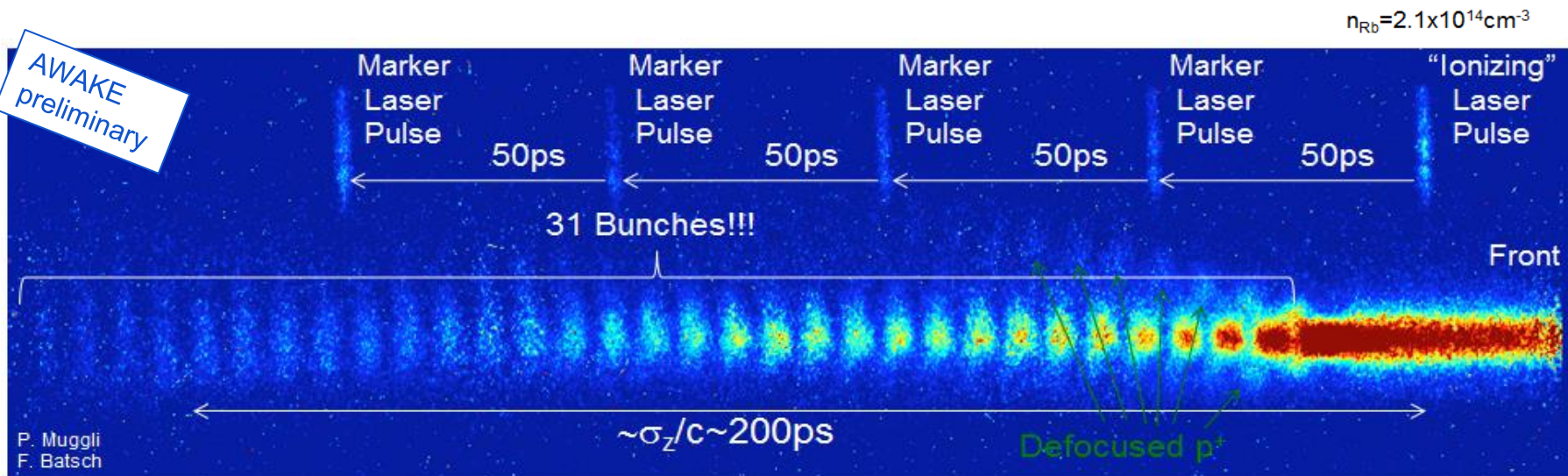
Плазменная секция AWAKE

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





Результаты: прямое наблюдение самомодуляции протонного сгустка

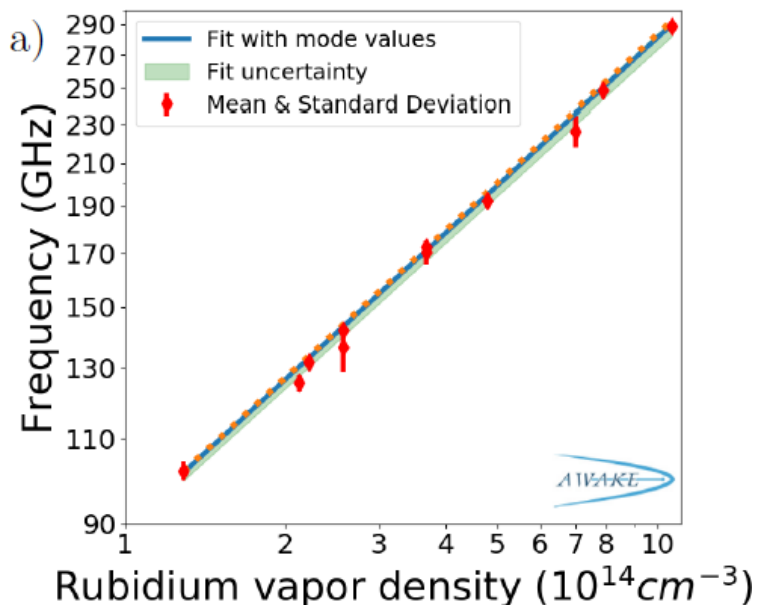
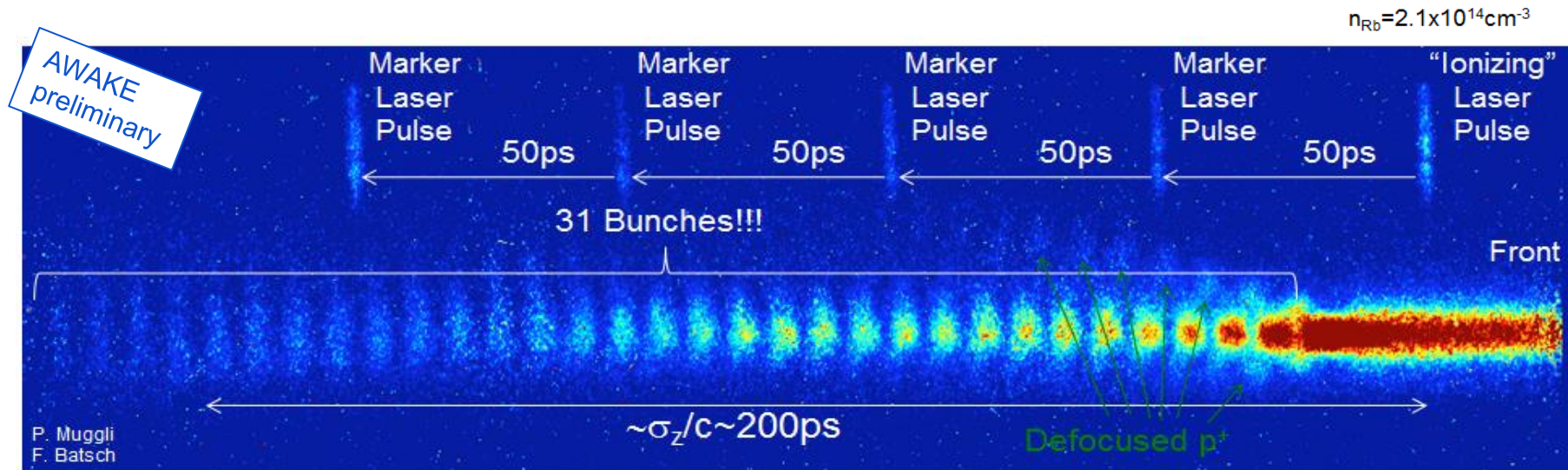


Продольная структура протонного сгустка:
Оптическое переходное излучение → стрик-камера

- Видна модуляция плотности пучка
- Модуляция начинается за лазерным импульсом → инициирована затравочным возмущением
- Много микросгустков → плазма достаточно однородна, нет «сюрпризов»
- Положение сгустков воспроизводится от выстрела к выстрелу (важно для последующего ускорения электронов)

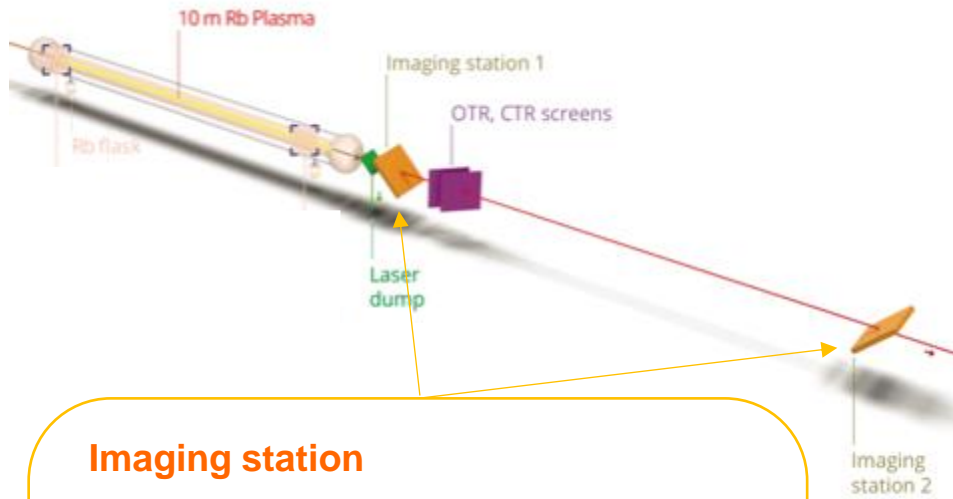


Результаты: прямое наблюдение самомодуляции протонного сгустка

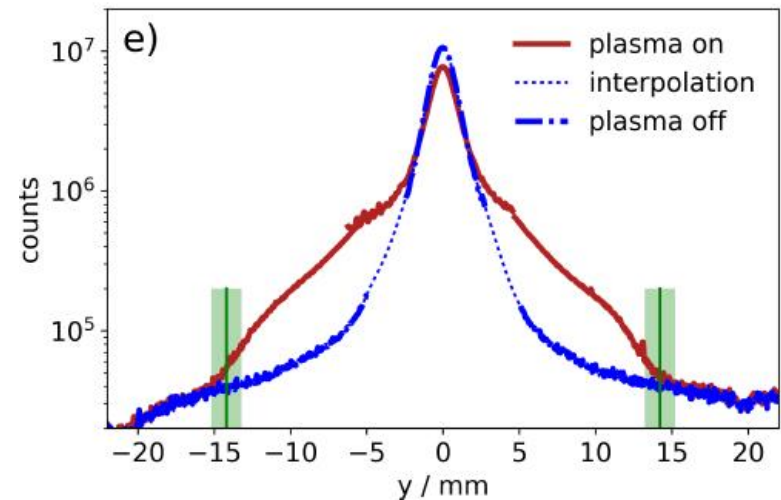
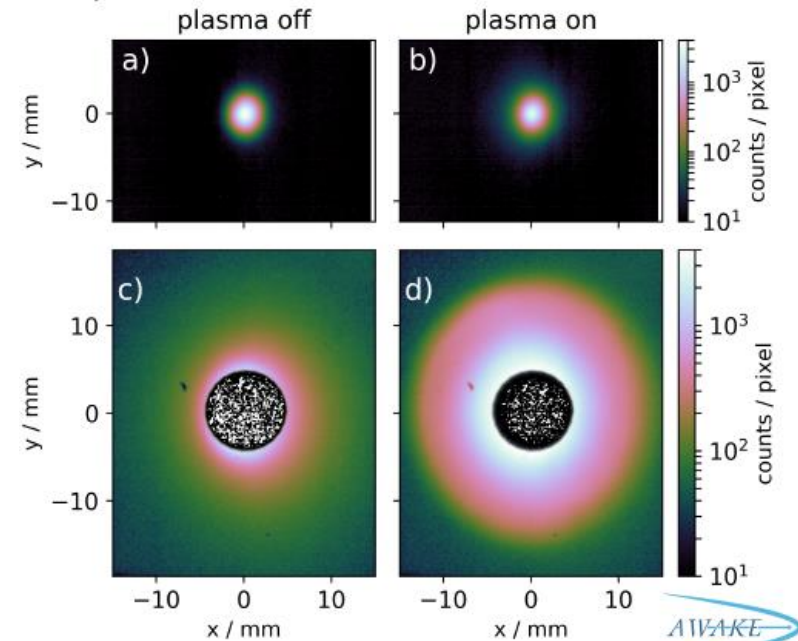
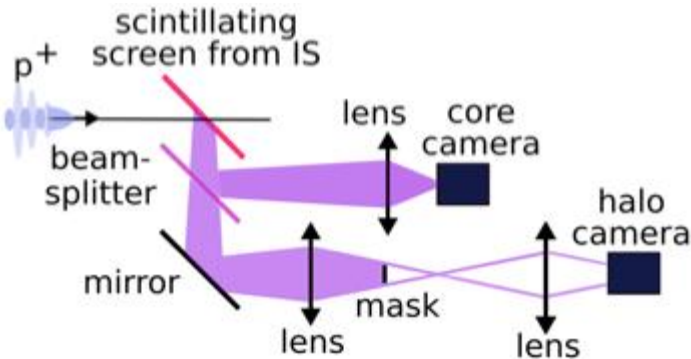


• Частота следования микросгустков соответствует плазменной частоте 100% однократно ионизованного рубидия

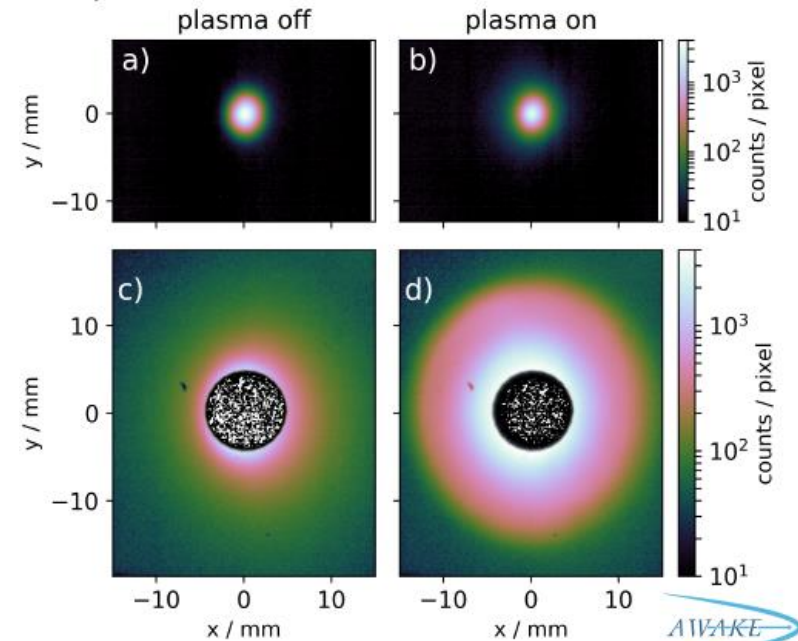
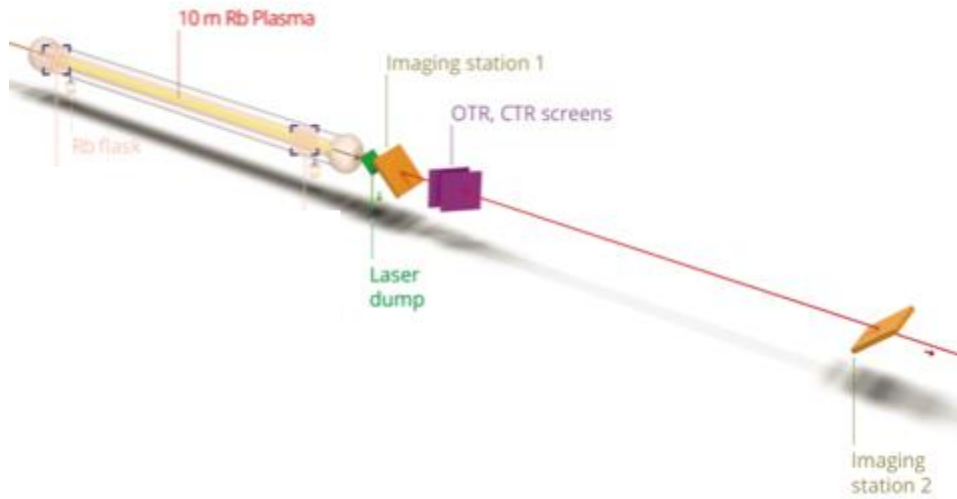
Результаты: наблюдение отклоненных протонов (следствие самомодуляции)



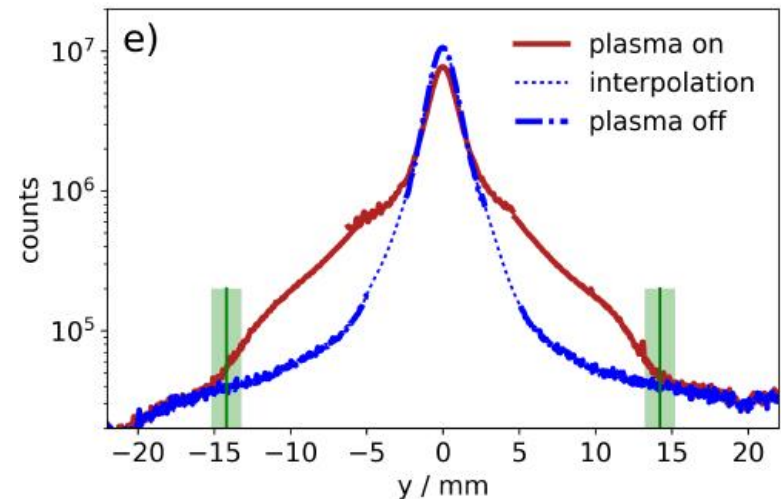
Imaging station



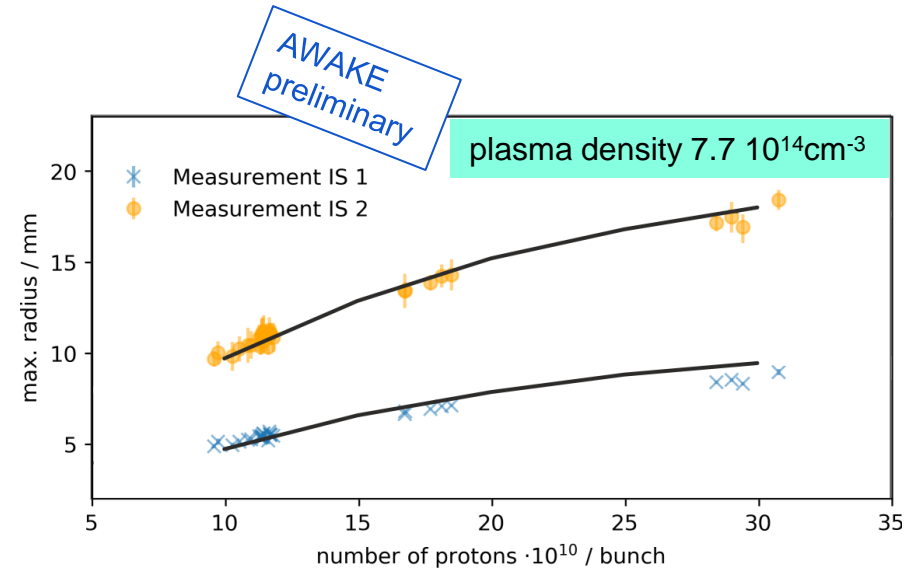
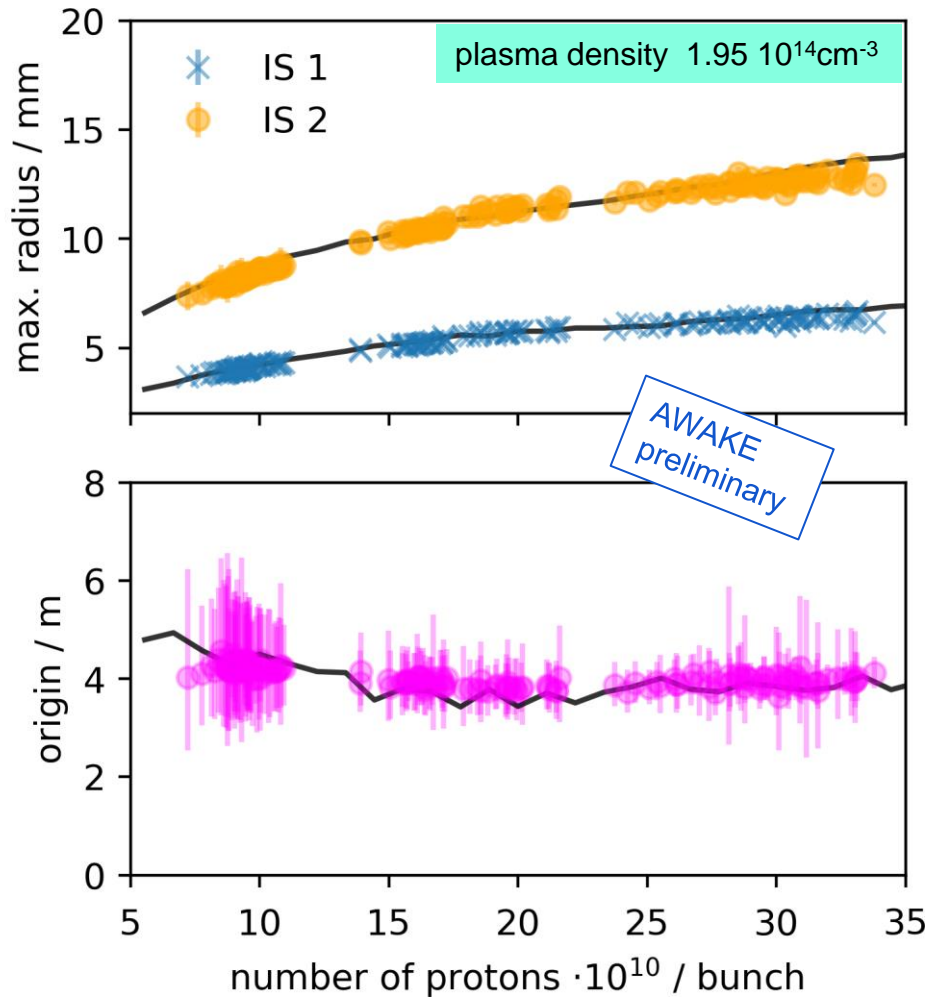
Результаты: наблюдение отклоненных протонов (следствие самомодуляции)



- Протоны, дефокусированные кильватерной волной в процессе самомодуляции, образуют гало
- Уменьшение количества протонов в центре соответствует их количеству в гало
- Гало симметричное \Rightarrow нет шланговой неустойчивости
- Наибольший радиус отклонения – количественная характеристика процесса, удобная для сравнения с моделированием



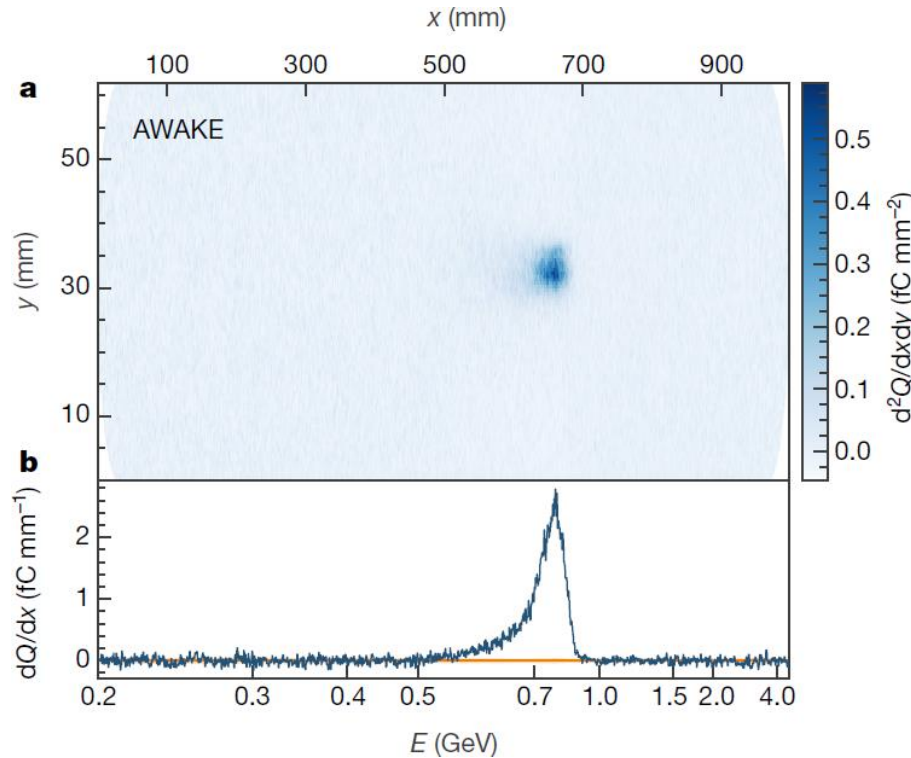
Результаты: сравнение с моделированием



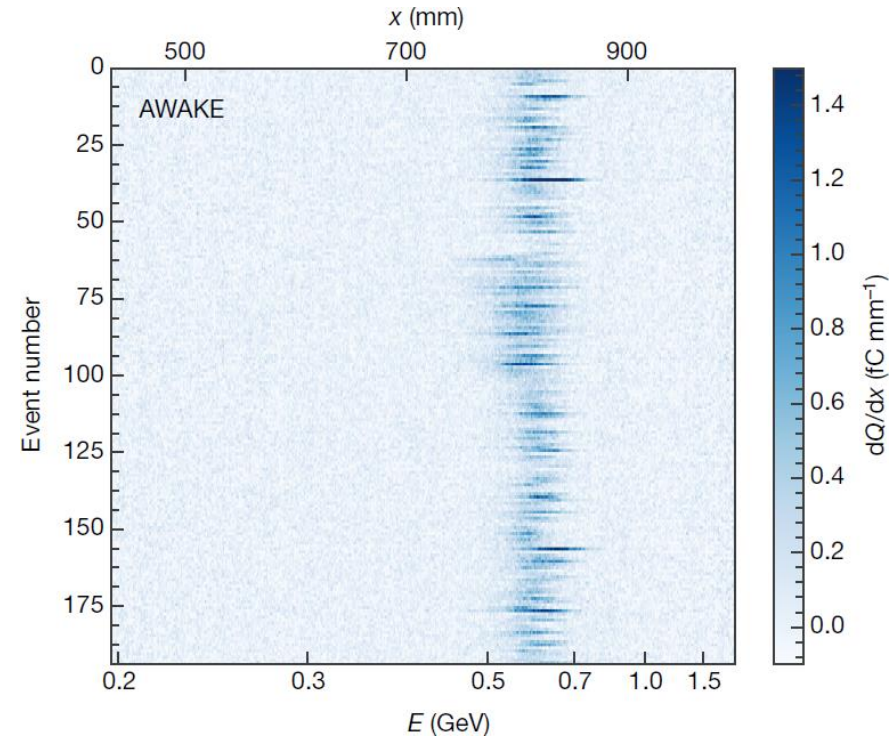
- Измеренное максимальное отклонение протонов совпадает с результатами моделирования LCODE в широком интервале параметров
- Протоны с наибольшим поперечным импульсом появляются при $z \approx 4\text{m}$



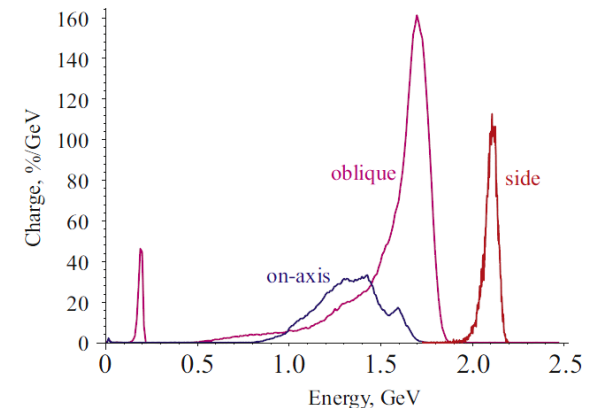
Результаты: ускорение электронов



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



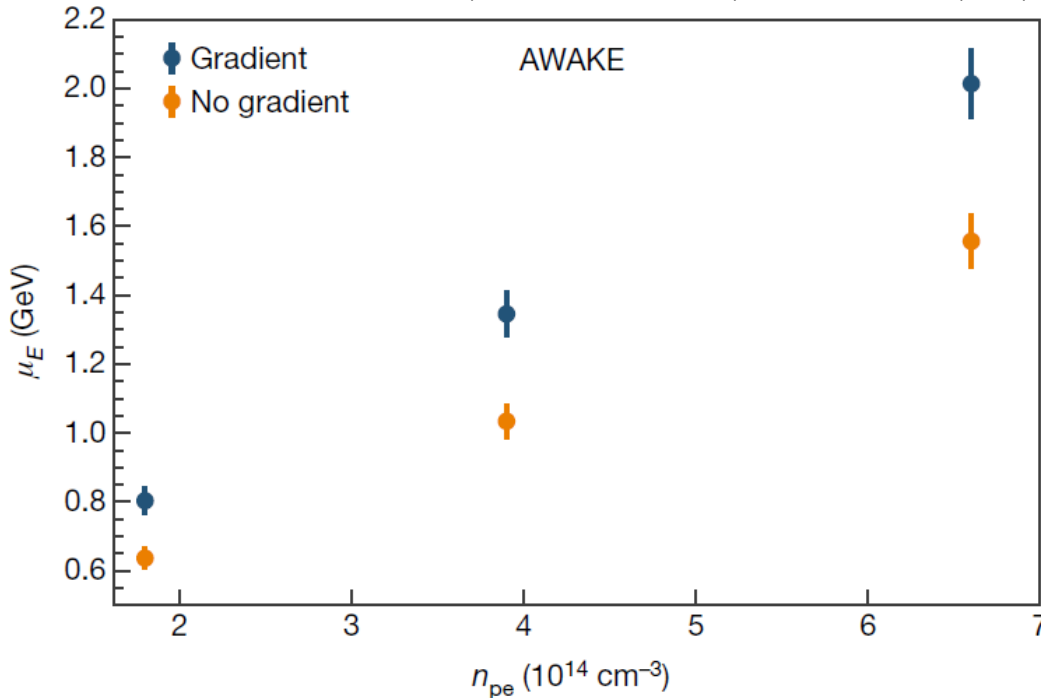
- Зарегистрированы ускоренные электроны (лучше всего видны при низкой плотности плазмы, $1.8 \cdot 10^{14} \text{ см}^{-3}$)
- Узкий энергетический спектр (FWHM $\approx 17\%$), хотя инжектированный электронный сгусток имеет длину несколько периодов волны
- Форма спектра близка к теоретическим предсказаниям
- Процесс ускорения хорошо воспроизводим



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

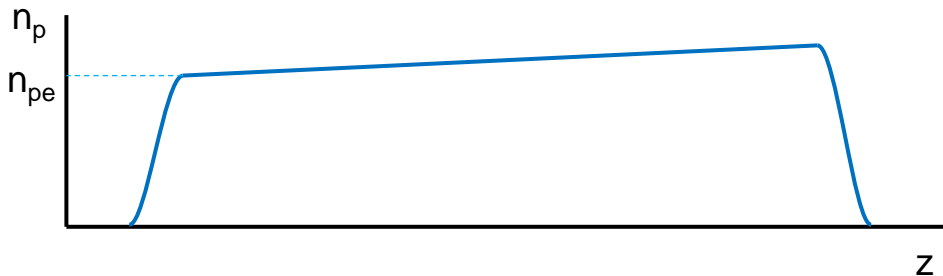
Результаты: ускорение электронов

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



- Энергия ускоренных электронов линейно растет с плотностью плазмы и достигает 2 ГэВ при $6.6 \cdot 10^{14} \text{ cm}^{-3}$
- Положительный градиент плотности плазмы благоприятно влияет на ускорение

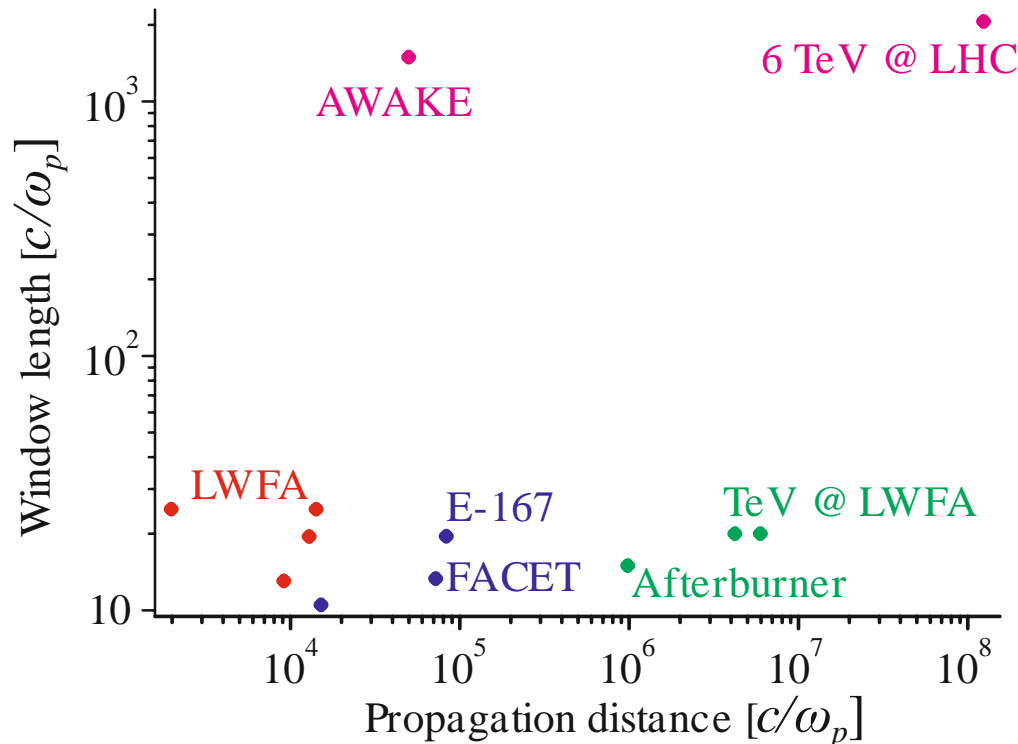
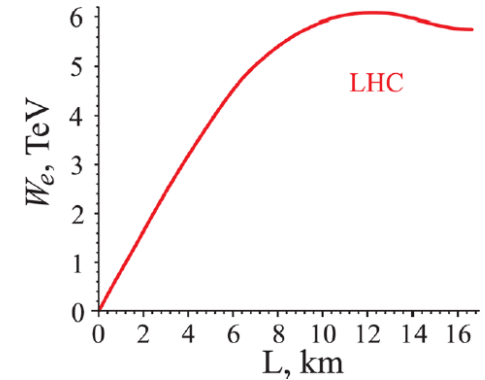
Профиль плотности плазмы при наличии градиента (не в масштабе, величина $\sim 2\%$):



Градиент плотности влияет на процесс самомодуляции и (при оптимальном значении) увеличивает долю пучка, оставшуюся в микросгустках

Почему эксперимент AWAKE так важен?

- Первый эксперимент по кильватерному ускорению с протонным драйвером. Да, но не только.
- Первый эксперимент по контролируемой самомодуляции длинного пучка. Он открывает путь к достижению огромных энергий электронов при помощи относительно недорогих добавок к существующим установкам.
- Ставятся экспериментальные точки в ранее неисследованной области параметров. Это позволит проверить численные коды, используемые для дальнейшего поиска перспективных методов ускорения.



Итак,

Достижения AWAKE:

- Продемонстрирована стабильная, хорошо воспроизводимая самомодуляция протонного пучка (2017)
- Достигнуто согласие теории самомодуляции и экспериментов
- Продемонстрировано ускорение электронов (2018)

Планы:

- Большая энергия ускоренных электронов
- Сохранение качества электронного сгустка
- Возможность неограниченного удлинения плазменной секции
- Теоретический поиск новых режимов

Спасибо за внимание