

## **Отчет о проделанной работе с использованием ресурсов ИВЦ НГУ**

**Тема:** Новые методы контроля инжекции и самоорганизации пучков в плазменном кильватерном ускорителе

### **Состав коллектива:**

Лотов Константин Владимирович, г.н.с. ЛБНЗТ ФФ, зав. кафедрой теоретической физики ФФ НГУ, г.н.с. ИЯФ СО РАН, д.ф.-м.н., профессор РАН

Минаков Владимир Алексеевич, н.с. ЛБНЗТ ФФ, старший преподаватель кафедры теоретической физики ФФ НГУ, н.с. ИЯФ СО РАН, к.ф.-м.н.

Туев Петр Викторович, н.с. ЛБНЗТ ФФ, старший преподаватель кафедры высшей математики ФФ НГУ, с.н.с. ИЯФ СО РАН, к.ф.-м.н.

Шалимова Ирина Александровна, с.н.с. ЛБНЗТ ФФ, доцент кафедры вычислительной математики ММФ НГУ, с.н.с. ИВМиМГ СО РАН, к.ф.-м.н.

Спицын Роман Игоревич, м.н.с. ЛБНЗТ ФФ, старший преподаватель кафедры теоретической физики ФФ НГУ, н.с. ИЯФ СО РАН

Охотников Никита Викторович, лаборант ЛБНЗТ ФФ, старший преподаватель кафедр высшей математики и ФТИ ФФ НГУ, аспирант ИЯФ СО РАН

Ярыгова Влада Максимовна, лаборант ЛБНЗТ ФФ, ассистент кафедры высшей математики ФФ НГУ, аспирант ИЯФ СО РАН

Дорожкина Мария Сергеевна, лаборант ЛБНЗТ ФФ, аспирант НГУ.

**Финансовая поддержка:** грант РФ 23-12-00028 (руководитель Лотов К.В.), "Новые методы контроля инжекции и самоорганизации пучков в плазменном кильватерном ускорителе", 2023-2025 гг.

### **Постановка задачи:**

Проект направлен на дальнейшее развитие новых методов ускорения заряженных частиц, а именно плазменного кильватерного ускорения. Суть метода состоит в том, что короткий лазерный импульс или сгусток заряженных частиц (называемый драйвером) возбуждает в плазме ленгмюровскую волну, которая своим электрическим полем может ускорять другой сгусток заряженных частиц (называемый витнесом). Величина поля при этом может быть на несколько порядков больше, чем в традиционных ускоряющих структурах. В настоящее время плазменное кильватерное ускорение постепенно переходит из области чисто фундаментальной науки к практическим приложениям этого метода. Эти приложения – в первую очередь компактные генераторы электромагнитного излучения в диапазоне частот от ТГц до гамма-лучей и инжекторы электронов. Соответственно, современные задачи связаны с погоней за лучшими параметрами и воспроизводимостью пучков, а также эффективностью ускорения. В поисках лучших режимов анализируются новые

конфигурации пучка и плазмы, а также новые способы инъекции ускоряемых частиц в кильватерную волну. Параллельно совершенствуются численные коды с целью достичь количественного согласия моделирования и эксперимента, что даст возможность быстро проводить поиск и оптимизацию новых режимов.

### **Современное состояние проблемы:**

За последние 5 лет в плазменном кильватерном ускорении состоялось несколько эпохальных событий. В очередной раз обновлен рекорд по энергии в лазерном кильватерном ускорении, и сейчас он составляет 8 ГэВ. Достичь более высокой энергии удалось благодаря созданию канала в плазме с более резким минимумом плотности на оси. Продемонстрирована генерация излучения во внешнем ондуляторе, которая стала возможной за счет малого энергоразброса ускоренного сгустка (менее 0.5%). Продемонстрирована стабильность ускорения, когда в течение 24 часов с частотой 1 Гц получались одинаковые 400 МэВные сгустки с флуктуацией энергии и заряда на уровне нескольких процентов. В эксперименте AWAKE продемонстрирована самомодуляция протонного сгустка, инициированная электронным пучком. Это открывает возможность использовать для ускорения частиц плазменные секции со способом создания плазмы, допускающим неограниченное удлинение секции. В совокупности с решением руководства ЦЕРН предоставить для расширения эксперимента дополнительный 100-метровый туннель и теоретической демонстрацией ускорения электронов до 100 ГэВ в таком туннеле это делает возможным применение плазменного кильватерного ускорения для задач физики высоких энергий уже в обозримом будущем.

Оформились и развиваются крупные проекты, обещающие создание установок для пользователей (user facilities) на основе плазменных ускорителей. Примечательно, что во многих из них (EuPRAXIA, FlashForward, FACET-II, SPARC\_LAB) предполагается использовать стороннюю инъекцию электронов в плазменную волну. Это подтверждает тезис о крайней актуальности этой проблемы.

Контролируемая самоорганизация драйвера как метод улучшения параметров ускорителя пока что активно исследуется только применительно к протонным пучкам. И только благодаря ей этот метод имеет перспективы достижения рекордных энергий. Примечательно, что предсказания численного моделирования количественно и с хорошей точностью подтверждаются экспериментами, и это дает уверенность в том, что численные находки реализуются на практике.

### **Описание работы:**

Работа по проекту велась по трем основным направлениям.

Первое направление – это собственно инъекция частиц в кильватерную волну. Здесь основное внимание будет уделяться инъекции внешних электронов. Инъекция внешних электронов из традиционного или плазменного инжектора дает дополнительные степени свободы для оптимизации эксперимента, поскольку позволяет сделать процесс ускорения независимым от процесса генерации и начального ускорения электронов. Однако при этом возникают проблемы, связанные с неидеальностью системы. Если витнесс движется не строго по оси драйвера или

инжектируется в волну сбоку, то его качество (эмиттанс и поперечный размер) ухудшаются под действием большой поперечной силы со стороны кильватерной волны. Есть несколько идей, как уменьшить нежелательное влияние поперечной силы, используя нелинейность отклика плазмы, неоднородность плотности плазмы или искусственно созданную нестационарность фокусирующей силы, действующей на витнесс. Эти идеи возникли из численного моделирования эксперимента AWAKE в ЦЕРНе, теоретическую поддержку которого наша группа обеспечивает с момента зарождения концепции протонного кильватерного ускорения. В рамках проекта новые идеи будут проанализированы и доведены до научных публикаций. Найденные способы уменьшения роста эмиттанса будут полезны не только для кильватерного ускорения с протонным драйвером, но и для других разновидностей кильватерных ускорителей.

Второе направление - самоорганизация драйвера и плазмы. Сейчас хорошо изучено, какую волну создают в плазме драйверы заданной формы. Однако есть широкое поле возможностей, еще слабо исследованных, улучшить процесс ускорения за счет управляемого видоизменения формы пучков по мере их распространения в плазме. В рамках проекта будут исследованы различные способы контроля эволюции пучков в плазме, по сути сводящиеся к изменению продольного профиля плотности плазмы. Основное внимание будет уделяться протонным драйверам, поскольку в эксперименте AWAKE есть возможность быстрой проверки теоретических предсказаний, и улучшение параметров ускорения приблизит практические применения этой схемы ускорения.

Третье направление - совершенствование имеющихся численных инструментов для моделирования плазменного кильватерного ускорения. Здесь основное внимание будет уделяться развитию так называемой квазистатической модели, которая за счет явного использования особенностей кильватерного ускорителя (движения объектов с околосветовыми скоростями) позволяет на 2-3 порядка сократить время расчетов по сравнению с традиционными PIC (particle-in-cell) кодами.

### **Полученные результаты:**

Ресурсы ИВЦ НГУ использовались при получении двух научных результатов в рамках выполнения гранта РНФ.

Численный код Icode3d доведен до полностью функционального состояния, работает как на CPU, так и на GPU. В коде решена проблема нефизического нагрева электронов плазмы, который происходит из-за того, что шаг расчетной сетки намного превышает дебаевский радиус. Для подавления численного нагрева применена двухступенчатая схема выявления периодических мелкомасштабных смещений макрочастиц и модифицированы уравнения движения частиц. Новые возможности кода сразу позволили разобраться в нескольких проблемах, возникающих при моделировании долговременной динамики кильватерной волны квазистатическими кодами. Это проблемы ранней хаотизации кильватерного следа в трехмерной геометрии (она оказалась численным эффектом), длинноволнового хоузинга (оказалось, что в отсутствие численной неустойчивости поперечные колебания микросгустков пучка не нарастают со временем) и раннего поперечного

опрокидывания кильватерной волны в трехмерной геометрии (при подавлении численного шума двумерное и трехмерное моделирование дают близкие времена опрокидывания). По результатам работы опубликована статья в журнале *Physics of Plasmas*, включающая в себя описание трехмерного кода, описание проблемы численного нагрева и кластеризации электронов плазмы, решение этой проблемы, а также примеры задач, при моделировании которых подавление шумов существенным образом влияет на результат моделирования.

Численным моделированием продемонстрирован новый метод, позволяющий на порядок ослабить требования на допустимую степень несоосности ускоряемого пучка-витнесса и кильватерной волны в плазменном ускорителе. Суть метода состоит в том, что перед пучком-витнессом на определенном расстоянии летит электронный сгусток-демпфер с зарядом, сравнимым с зарядом витнесса. Предполагается, что демпфер и витнесс создаются одним и тем же инжектором и соосны между собой. Демпфер возмущает кильватерную волну таким образом, что поперечные колебания изначально несоосного витнесса в кильватерной волне затухают, и витнесс становится строго на ось. Установлены физические эффекты, обеспечивающие работоспособность метода, главный из которых – независимость частоты малых колебаний осциллятора от амплитуды. Найдена область в пространстве параметров, в которой метод работает. Эта область оказалась достаточно широкой, чтобы методом можно было пользоваться в реальных экспериментах. Задача возникла из эксперимента AWAKE в ЦЕРН, где кильватерная волна создается протонным пучком, и положение ее оси известно с точностью 100 мкм. Электронный сгусток-витнесс, который должен ускоряться такой волной, можно сфокусировать в любое место с точностью нескольких микрон, но куда его фокусировать – неизвестно. Если же электронный сгусток не попадает строго на ось, то его качество (эмиттанс) неприемлемо ухудшается. Предложенный метод позволит обеспечить сохранение качества электронного пучка в каждом цикле ускорения, а не один раз из ста событий. Результаты работы доложены на собрании коллаборации AWAKE. Стоит отметить, что полученные результаты актуальны и для других экспериментов по кильватерному ускорению с внешней инжекцией (EuPRAXIA, SPARC\_LAB, SINBAD). По результатам работы опубликована статья в журнале *Physics of Plasmas*. Все численные расчеты для данной задачи были выполнены трехмерной программой LCODE.

#### **Эффект от использования кластера в достижении целей работы:**

Численное моделирование проводилось на кластере НГУ с использованием GPU.

#### **Перечень публикаций:**

I.Yu. Kargapolov, N.V. Okhotnikov, I.A. Shalimova, A.P. Sosedkin, and K.V. Lotov, Declustering of macroparticles in long-term simulations of plasma wakefield acceleration. *Phys. Plasmas* 32, 023905 (2025). (IF=2.2) <https://doi.org/10.1063/5.0251688>

K.V. Lotov, I.Yu. Kargapolov, P.V. Tuev, Oscillation damper for misaligned witness in plasma wakefield accelerator. *Phys. Plasmas* 31, 123103 (2024). (IF=2.2) <https://doi.org/10.1063/5.0239380>

**Впечатления от работы вычислительной системы:** работает хорошо, когда работает.

**Аннотация:**

Численный код lcode3d доведен до полностью функционального состояния, работает как на CPU, так и на GPU. В коде решена проблема нефизического нагрева электронов плазмы, который происходит из-за того, что шаг расчетной сетки намного превышает дебаевский радиус. Для подавления численного нагрева применена двухступенчатая схема выявления периодических мелкомасштабных смещений макрочастиц и модифицированы уравнения движения частиц. Новые возможности кода сразу позволили разобраться в нескольких проблемах, возникающих при моделировании долговременной динамики кильватерной волны квазистатическими кодами. Это проблемы ранней хаотизации кильватерного следа в трехмерной геометрии (она оказалась численным эффектом), длинноволнового хоузинга (оказалось, что в отсутствие численной неустойчивости поперечные колебания микросгустков пучка не нарастают со временем) и раннего поперечного опрокидывания кильватерной волны в трехмерной геометрии (при подавлении численного шума двумерное и трехмерное моделирование дают близкие времена опрокидывания). Численным моделированием с использованием нового кода продемонстрирован новый метод инжекции, позволяющий на порядок ослабить требования на допустимую степень несоосности инжектируемого пучка-витнесса и кильватерной волны. Суть метода состоит в том, что перед пучком-витнессом на определенном расстоянии летит электронный сгусток-демпфер с зарядом, сравнимым с зарядом витнесса. Найдена область в пространстве параметров, в которой метод работает. Эта область оказалась достаточно широкой, чтобы методом можно было пользоваться в реальных экспериментах.