

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, м.н.с. ИЯФ СО РАН

Охотников Никита Викторович, лаборант ЛБНЗТ ФФ, ассистент кафедры ФТИ ФФ НГУ, магистрант ФФ НГУ, старший лаборант ИЯФ СО РАН

Ярыгова Влада Максимовна, лаборант ЛБНЗТ ФФ, магистрант ФФ НГУ, старший лаборант ИЯФ СО РАН

Дорожкина Мария Сергеевна, лаборант ЛБНЗТ ФФ, магистрант ФФ НГУ, старший лаборант ИЯФ СО РАН

Финансовая поддержка: грант РНФ 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 витнессом). 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 инжекции 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 инжекцию 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 ведется по трем основным направлениям.

Первое направление – это собственно инжекция частиц в кильватерную волну. Здесь основное внимание будет уделяться инжекции внешних электронов. Инжекция 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 только одного из шести научных результатов, полученных в рамках выполнения гранта РФФИ.

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 подготовлена большая статья, 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.

Эффект от использования кластера в достижении целей работы:

Исследования, связанные с проблемой численного нагрева и кластеризации электронов плазмы, проводились на кластере НГУ (с использованием GPU).

Перечень публикаций:

I.Yu. Kargapolov, N.V. Okhotnikov, I.A. Shalimova, A.P. Sosedkin, and K.V. Lotov, LCODE: Quasistatic code for simulating long-term evolution of three-dimensional plasma wakefields. arXiv:2401.11924 [physics.acc-ph]. (в настоящее время статья находится на рецензировании). [<https://doi.org/10.48550/arXiv.2401.11924>]

Впечатления от работы вычислительной системы: работает хорошо, когда работает (есть с чем сравнивать). Спасибо за помощь в работе.

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). По результатам работы подготовлена большая статья, 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.