

Два новых способа ускорения заряженных частиц в линейном ускорителе

Аннотация: В статье предлагается рассмотреть два принципиально новых способа ускорения заряженных частиц: ускорение протонов на обратной волне (Ускоритель профессора Богомолова) и кильватерное ускорение электронов с помощью протонного драйвера в Большом адронном коллайдере (проект AWAKE).

Ключевые слова: линейный ускоритель, обратная волна, протон, электрон, векторное поле, скалярное поле, продольная сила, кильватерное поле.

1. Вступление

Европейская стратегическая группа (ESG) рассматривает для исследования принципиально новые проекты по созданию более эффективных и менее дорогих ускорителей и коллайдеров. В статье предлагается два проекта ускорения частиц, в основе которых лежат совершенно новые физические принципы: кильватерное ускорение электронов с помощью протонного драйвера в Большом адронном коллайдере (проект AWAKE) и ускорение протонов на обратной волне (Ускоритель профессора Богомолова)

Фактически во всех проектах последних 30 лет разработчики линейных ускорителей ориентировались на возможности сверхпроводящих (СП/SC) ускорительных комплексов. Особенно:

- в США (2006 г.) создан самый мощный в мире протонный лазер - источник нейтронов - СНС (энергия протонов 1 ГэВ, мощность 1,56 МВт, длина 258 м);

- в США (2008-2018 гг.) создается многофункциональная ионная ДЛ с энергией 8 ГэВ ($L=692$ м);

- Европейское Сообщество (2010-2018 гг.) осуществляет проектирование нейтронного комплекса ESS на пучке Н-линейного ускорителя протонов с энергией 1,33 ГэВ и мощностью пучка 5 МВт;

- Китай, Индия, Япония, Южная Корея реализуют программы, основанные на создании ЛУП для фундаментальных и прикладных исследований, определяющих будущее АЭ.

В этих программах ускорители «однотехнологичные» — все на сверхпроводимости. Создание этих ускорителей потребляет миллиарды долларов ресурсов. Конструкции «теплых» ЛУ (для АДС), отличные от традиционных схем, нигде не обсуждаются. По сведениям автора, последнее известное серьезное обсуждение проблемы было на ЭПАК-96 [1]. В современной литературе содержится «руководящее и направляющее» утверждение, широко распространенное во всем мировом сообществе разработчиков ускорительной техники и «кочующее» из одной публикации в другую: «в “теплых” вариантах ЛУ КПД мал, и малая апертура (диаметр канала ускорителя) представляет проблему с точки зрения потерь пучка, которые к тому же не являются локализованными». Именно такого рода утверждение «развернуло» основную массу создателей ЛУ на разработки сверхпроводящих (СП/SC) ускорительных комплексов. Как следствие, с начала 1990-х годов практически исчезли серьезный анализ и публикации по разработке сверхмощных ЛУ, которые могли бы быть выполнены на линейных ускоряющих структурах комнатной (~300К) температуры. Это ошибочное мнение полностью опровергают теоретические работы профессора Алексея Богомолова и успешная эксплуатация, созданных им ускорителей протонов на обратной волне [2].

2. Ускоритель протонов на обратной волне Алексея Богомолова

Сегодня, как никогда актуальна задача жизнеобеспечения человечества дешевыми и надежными источниками энергии (электроэнергии и тепла) и избавления от накопленного количества радиоактивных отходов и страхов, связанных с использованием атомной энергии. Ядерная энергетика в реакторах с самоподдерживающейся реакцией вызывает настороженное

отношение к ней как населения, так и специалистов. Контроль, обеспечение работоспособности и безопасности, управление всеми процессами в подкритических реакторах осуществляются пучками протонов высоких энергий. Это принципиально отличает подкритические реакторы от современных реакторов и полностью исключает радиационное заражение при авариях чернобыльского типа. Вместо поддержания цепной реакции подкритический реактор использует дополнительные нейтроны от внешнего источника. Существует два основных класса таких устройств. Один использует нейтроны, испускаемые машиной ядерного синтеза, концепция, известная как гибрид синтеза и деления. В другом устройстве используются нейтроны, образующиеся в результате деления тяжелых ядер заряженными частицами, такими как протоны, ускоренные ускорителем частиц, концепция, известная как система, управляемая ускорителем (ADS), или подкритический реактор, управляемый ускорителем. В статье «Ускорители на обратной волне, как альтернатива классическим сверхпроводящим ускорителям» профессор Алексей Богомолов представляет материалы своих пятидесятилетних исследований, направленных на создание АДС - ускорительной ядерной установки промышленного назначения, по теме BWLAP (обратноволновой линейный ускоритель частиц), в отношении к проблеме создания компактного ускорителя протонов на мощных линейных ускорителях. структуры «комнатной температуры» с ярко выраженной обратной пространственной гармоникой высокочастотного электромагнитного поля, распространяющегося навстречу потоку ускоренных частиц [2]. Это доказывает преимущество BWLAP (с водоохлаждаемыми ускорительными конструкциями) перед сверхпроводящими ускорителями по общему КПД (P_{beam}/P_{AC}) при аналогичной энергии протонов. Применение BWLAP целесообразно в комплексах с подкритическими ядерными реакторами для трансмутации радиоактивных отходов (РАО) и выдувания младших актинидов, а также для получения ядерной энергии. Модульный трехмерный ускоритель с обратной волной, производящий огромный поток протонов, может стать грозным оружием. BWLAP может обеспечить режим с малой скважностью и непрерывной работой. Группа исследователей под руководством Богомолова Алексея Сергеевича разработала технологию ускорения положительно заряженных частиц (протонов, дейтронов) на обратной волне - БУЛАП (рис. 1). Суть этой технологии заключается в ускорении элементарных частиц электрической составляющей электромагнитной волны, движущейся в том же направлении и с той же возрастающей скоростью, что и ускоряемые ионы. В этом случае источник электромагнитных волн устанавливается в конце ускорителя, противоположном инъекционному, и волна бежит навстречу потоку энергии - тем самым волна (пространственная гармоника) направлена противоположно направлению потока энергии.



Рисунок 1. Мобильный модульный 3D-ускоритель обратной волны Алексея Богомолова.

Метод ускорения на обратной пространственной гармонике позволяет:

1. Решить задачу о продольной и поперечной устойчивости ускоренных протонов;
2. Осуществить 95%-ный захват инжектированного в ускоритель пучка протонов в режим стабильного ускорения;
3. Увеличить в 10 раз частоту ВЧ поля, ускоряющего протоны, и осуществить ускорение в дециметровом диапазоне длин волн;
4. Уменьшить более чем на порядок продольные и поперечные размеры разгонных конструкций;

В то же время ускорители на основе предложенного принципа ускорения имеют ряд преимуществ по сравнению с традиционными линейными ускорителями:

1. Отсутствие в конструкции сверхпроводящих структур и использование традиционного водяного охлаждения;
2. Значительно меньшие габариты ускорителя при сопоставимой мощности;
3. Высокая энергия ускоренного пучка - более 1 ГэВ;
4. Более высокий КПД установки - 34% вместо 16% у традиционных ускорителей.

Возможные области применения ускорителей на основе предлагаемого принципа ускорения:

1. Трансмутация, захоронение радиоактивных отходов;
2. Атомная энергетика: 1) создание подкритических ядерных реакторов с внешним источником нейтронного излучения;
3. Медицина: 1) протонно-лучевая терапия онкологических, параспинальных и нейрохирургических заболеваний; 2) производство радиофармпрепаратов, в т.ч. для ранней диагностики заболеваний;
4. Материаловедение: 1) производство изотопов для промышленных нужд; 2) производство высокочистых химических соединений для микроэлектроники и электрооптики; 3) дефектоскопия; 4) обработка материалов, изменение их физико-химических свойств
5. Обнаружение взрывчатых, наркотических и делящихся материалов.

То есть мы имеем дело с изобретением Века. Ускоритель Богомолова на обратной волне позволяет за счет взаимодействия протонного пучка с толстой мишенью (реакция расщепления) получить поток нейтронов высокой плотности, способный разделить U-238. При использовании в энергетике мы можем получить что-то похожее на реактор на быстрых нейтронах, но вырабатывающее тепло без цепной реакции и наличия критической массы. Реактор становится маленьким, бесполезным для террористов и прочих негодяев, т.к. критической массы нет. Нет опасности неконтролируемого разгона реактора, как это было в Чернобыле, потому что нет цепной реакции. Реактор можно просто выключить в любой момент, даже не заботясь об отводе остаточного тепла от дочерних изотопов, так как последних мало по сравнению с обычным реактором. Их сжигают непосредственно в процессе работы. И, наконец, заводы по обогащению урана нам больше не нужны, т.к. вся эта красота работает на природной смеси изотопов.

Внимание, вопрос - почему такая великая вещь существует только в виде отдельных лабораторных установок и не используется в промышленности? И дело не только в технических проблемах. С такими бонусами можно преодолеть любые технические проблемы. Так что есть что-то еще. И это что-то — существующие реакторы. Точнее, их безопасность. Ведь современный реактор — это урановые стержни, которые на 95% состоят из оксида урана-238. Тот, который идеально делится быстрыми нейтронами. А что, спрашивается, будет, если такой реактор попадет в пучок быстрых нейтронов? В нем начнется реакция деления, что приведет к разогреву активной зоны. Остановить реакцию с помощью самого реакторного блока невозможно. Вам остается только отводить вырабатываемое тепло и надеяться, что мощности насосов для этого хватит. Но, это если вы готовы и понимаете, что происходит! Если воздействие быстрых нейтронов извне окажется неожиданностью, то так оно и будет, ведь никто не ходит по стране с генераторами быстрых нейтронов и не облучает ими реакторные блоки! Так, в случае неожиданного облучения увеличится тепловыделение реактора, завоюют детекторы нейтронов, а автоматика сбросит

защитные стержни. Но, это ничего не изменит, т.к. источник нейтронов находится вне реактора. Нагрев будет продолжаться, ядро расплавится и произойдет тепловой взрыв. Реактор перестанет существовать. Казалось бы, фантастическая перспектива, ведь реактор имеет толстый внешний корпус, который должен останавливать поток нейтронов. Ведь именно он останавливает те нейтроны, которые образуются внутри реакторов, и защищает людей от радиационного поражения? Но, к сожалению, речь идет о нейтронах с относительно низкими энергиями. Самые быстрые из них в 100 раз медленнее тех нейтронов, которые можно получить с помощью ускорителя обратной волны. Естественно, защита реактора не рассчитана на такие энергии. Оказавшись в руках террористов ускоритель Богомолова может оказаться очень опасным оружием, но принятый на вооружение нашей армии он может уничтожить весь атомный флот США в считанные дни.

3. Проект AWAKE в ЦЕРН в свете реальной электродинамики Максвелла

В ЦЕРН впервые в мире экспериментально доказали: ускорение пучка электронов в плазме с помощью протонного драйвера возможно. В интервью руководителя проекта AWAKE Эдды Гшвентер ««Это фантастика»: новый метод ускорения частиц работает», (сентябрь 2018) дается объяснение сути поставленного эксперимента: «При классической схеме пучок электронов в коллайдере ускоряется под воздействием электромагнитного поля. В нашем эксперименте в плазме летит пучок протонов, он создает волну и тем самым обеспечивает ускорение летящего следом пучка электронов, это называется кильватерным ускорением. Пучок электронов с энергией 19 МэВ пролетел в плазме десять метров и увеличил энергию до 2 ГэВ, то есть более чем в 100 раз. Это значит, что был достигнут средний темп ускорения — 200 МэВ/м.» [3]. Эксперимент проводила коллаборация AWAKE, от России в нем принимал участие Институт ядерной физики им. Г. И. Будкера СО РАН (ИЯФ СО РАН). Традиционные ускорители используют так называемые радиочастотные (RF) резонаторы, чтобы разгонять пучки частиц до более высоких энергий. Это включает в себя чередование электрической полярности положительно и отрицательно заряженных зон внутри РЧ-резонатора с комбинацией притяжения и отталкивания, ускоряющей частицы внутри полости. Напротив, в ускорителях Уэйкфилда частицы ускоряются за счет «серфинга» над плазменной волной (или Уэйкфилдом), которая содержит аналогичные зоны положительных и отрицательных зарядов. Аллен Колдуэлл, представитель коллаборации AWAKE, сказал: «У ускорителей Уэйкфилда есть два разных луча: пучок частиц, который является целью для ускорения, известен как «луч-свидетель», а луч, который сам генерирует Уэйкфилд, известен как "ведущая балка". AWAKE — это первый эксперимент по использованию протонов в качестве движущего луча, и ЦЕРН предоставляет прекрасную возможность опробовать эту концепцию. Двигательные пучки протонов проникают глубже в плазму, чем ведущие пучки электронов и лазеров. Следовательно, ускорители Уэйкфилда, использующие протоны в качестве движущих лучей, могут ускорять свои наблюдающие лучи на большее расстояние, что позволяет им достичь более высоких энергий». В будущем ученые надеются, что новый метод позволит существенно уменьшить размеры коллайдеров, ведь сейчас по этому параметру ускорители достигли своего предела. Протонные пучки, генерируемые Большим Адронным Коллайдером (БАК), будут использоваться в первых новых мини-ускорителях частиц. Эдда Гшвентер указывает на то, что энергия пучка протонов очень большая — она составляет килоджоуль, — поэтому очень выгодно использовать его в качестве драйвера. В других экспериментах, например BELLA, в качестве драйвера используют лазер, его энергия намного меньше, всего несколько джоулей. Однако, использование заряженных протонов в качестве драйвера для ускорения электронов, по сравнению с фотонами имеет и еще одно преимущество. Оно заключается в появлении электродинамической продольной силы, позволяющей эффективно ускорить поток электронов при движении пучка протонов. Эта продольная сила не может быть описано поперечными силами Лоренца и не связана с кильватерным ускорением в плазме. Именно она внесла весомый вклад в фантастическое ускорение электронов в сто раз на дистанции в десять метров. Это силовое электромагнитное взаимодействие можно охарактеризовать величиной изменения потенциала \bar{A} и волновой функцией частицы. Взаимодействие было обнаружено в 1959 году в экспериментах

Ааронова-Бома [4]. Когда электрон движется вблизи длинного соленоида с током, траектория электрона изменяется, хотя магнитное поле вне соленоида равно нулю ($H = 0$), когда нет тока в соленоиде, траектория электрона остается неизменной. Профессор Р. Фейнман объясняет этот эффект взаимодействием частицы с векторным потенциалом \vec{A} [5]. Экспериментально обнаруженное явление силового взаимодействия движущихся электронов с полем векторного потенциала \vec{A} в экспериментах Ааронова-Бома подтвердилось и в более поздних экспериментах японских ученых в 1986 г. [6]. В ходе экспериментов было обнаружено изменение фазы волновой функции движущегося заряда при отсутствии и наличии в исследуемом пространстве поля векторного потенциала \vec{A} , при полном отсутствии магнитного поля H в это пространство. Положительные экспериментальные результаты соответствовали только однозначному значению векторного потенциала тока. Изменение фазы волновой функции векторным потенциалом определяется выражением:

$$\Delta\phi = q / \hbar \int \vec{A} ds, \quad (1)$$

где интеграл берется по траектории частицы.

Эксперимент Ааронова-Бома заставляет пересмотреть устоявшиеся представления о одних поперечных магнитных силах Лоренца и признать наличие продольных сил магнитного взаимодействия. Существование электродинамической продольной силы подтверждается не только эффектом Ааронова-Бома, но и кильватерным ускорением потока электронов в коллайдере пучком релятивистских протонов. Механизм этого кильватерного ускорения пучком заряженных протонов отличается от кильватерного ускорения электронов лазерным излучением. Чтобы объяснить природу электродинамической продольной силы, необходимо пересмотреть уравнения электродинамики Максвелла. Максвелл ошибочно применил теорему Остроградского-Гаусса не только для покоящихся зарядов, но и для движущихся (теорема Гаусса - одно из уравнений Максвелла). В результате этого произвольного предположения динамическое состояние движущихся электрических зарядов просто заменяется их статическим состоянием. Закон Кулона справедлив только для стационарных зарядов [7]. Закон Кулона справедлив только для стационарных зарядов [7]. Сам Максвелл указывал на трудности с его уравнениями при незамкнутых электрических токах и отдельных элементах тока. Эти трудности заключаются в том, что для одних только открытых токов ненулевая пространственная производная $\text{rot}\vec{A} = H$ векторного потенциала \vec{A} не может его полностью определить. Это выявило существование еще одной ненулевой пространственной производной $\text{div}\vec{A} \neq 0$ векторного потенциала \vec{A} . В общем случае векторный потенциал \vec{A} можно представить в виде суммы потенциальной и вихревой составляющих $\vec{A} = \vec{A}_g + \vec{A}_r$. Оказывается, прямолинейный бесконечный ток не создает скалярного магнитного поля, а элемент тока конечной длины создает как векторное магнитное поле $H_r = \text{rot} A_g$, так и скалярное магнитное поле $H_p = -\text{div} A_r$ [8]. Выражение для плотности потока электромагнитной энергии (вектор Пойнтинга) имеет вид:

$$S = (E \times H_r) + (E \times H_p) \quad (2)$$

Изменение скалярного магнитного поля эквивалентно образованию электрических зарядов, изменение которых, в свою очередь, порождает электрическое потенциальное поле. По результатам экспериментов предлагается отказаться от лоренцевской калибровки, а вместо нее взять выражение для плотности электромагнитной энергии в виде [9]:

$$S = -\text{div} A - \lambda \epsilon_0 \mu_0 d\phi/dt \quad (3)$$

Очевидно, введенные таким образом потенциалы допускают значительную гибкость в использовании уравнений Максвелла. В классическом случае полагается $S = 0$. При использовании калибровки (3) при $\lambda=0$ получается кулоновская калибровка, а при $\lambda=1$ имеем калибровку Лоренца. Если не предполагать равенства нулю выражения для S , то при $\lambda=0$ скалярное поле приобретает смысл нового продольного магнитного поля. Корректировка уравнений электродинамики Максвелла основана на признании дополнительного скалярного магнитного поля, действующего вдоль направления тока и создающего продольную силу в дополнение к поперечной силе Лоренца [10].

4. Вывод

Предлагаемые в статье на рассмотрение читателей новые физические методы ускорения частиц позволяют значительно повысить эффективность ускорителей заряженных частиц, при этом значительно удешевив их изготовление и эксплуатацию.

БЛАГОДАРНОСТЬ

Автор благодарен профессора Алексею Сергеевичу Богомолу за его помощь и скорбит о его скоропостижной кончине

ЛИТЕРАТУРА

R.A. Jameson.// Proc. EPAC-96. P. 210

А. С. Богомол, Т. С. Бакиров, П.К. Богданов, «Ускорители на обратной волне, как альтернатива классическим сверхпроводящим ускорителям» - Вестник научно-технического развития (Национальная Технологическая Группа), № 4 (44), 2011 г.

Edda Gshwendtner, “This is the fantastic: the new method of particle acceleration works” - Naked Science N9, September (2018)

Aharonov, Y; Bohm, D (1959). “Significance of electromagnetic potentials in quantum theory - Physical Review. 115 (3): 485–491.

Richard P. Feynman, Robert B. Leighton, Mark F Sands . “The Feynman Lectures on Physics” - January 1965 Physics Today 17(8), DOI: 10.1063/1.3051743, Publisher: Addison-Wesley

Osakabe, N; et al. (1986). “Experimental confirmation of Aharonov–Bohm effect using a toroidal magnetic field confined by a superconductor”- Physical Review A. 34 (2): 815-822. Bibcode:1986PhRvA..34..815O. doi:10.1103/PhysRevA.34.815. PMID 9897338.

Sapogin, L.G., Dzhanibekov, V.A., Mokulsky, M.A., Ryabov, Yu.A., Savin, Yu.P. and Utchastkin, V.I., “About the Conflicts between the Unitary Quantum Theory and the Special and General Relativity Theories” - Journal of Modern Physics, 6, pp. 780-785, (2015).

Konstantinov S.I.; “Tokomak, Accelerators, Colliders, and Maxwell’s Electrodynamics”- Global Journals Inc. (US) GJSFR-A, (2017), 16(6), 85-97

K.J. von Vlaenderen and A.Waser , Generalization of classical electrodynamics to admit a scalar field and longitudinal waves , -Hadronic journal, 24, 609-628, (2001)

Агеев И.М., Шишкин Г.Г., “Продольные волны”, - Москва: МАИ, (2014)