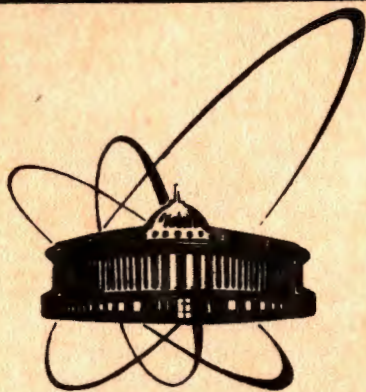


92-296



ОБЪЕДИНЕННЫЙ  
ИНСТИТУТ  
ЯДЕРНЫХ  
ИССЛЕДОВАНИЙ  
ДУБНА

P9-92-296

А. Г. Бонч-Осмоловский

ВОЗНИКНОВЕНИЕ И РАЗВИТИЕ  
НОВОЙ УСКОРИТЕЛЬНОЙ ФИЗИКИ

Направлено в журнал "Атомная энергия"

1992



## 1. ВВЕДЕНИЕ

Одной из характерных черт развития физики элементарных частиц, вообще физики микромира, возникшей в XX веке, является стремление к достижению все больших энергий заряженных частиц, которые служат "снарядами" - основным средством исследования свойств объектов микромира. Столкновение этих снарядов с атомами, ядрами, другими микрочастицами, исследования процессов, происходящих при этом, позволяют изучать природу микрообъектов, законы, действующие в микромире, недоступные для "грубых" приемов лабораторных исследований. Чем больше энергия частиц-снарядов, тем более глубокие пласты микромира вскрываются, тем меньшие достигаются расстояния, на которых разыгрываются явления микромира, тем более фундаментальные закономерности открываются.

Следует, правда, отметить, что при малых и средних энергиях возможна постановка тонких, изощренных экспериментов, результатом которых подчас являются не менее глубокие, фундаментальные выводы: например, известные исследования несохранения четности в слабых взаимодействиях, обнаружение и измерение ненулевой массы покоя нейтрино, синтез и исследование свойств трансурановых элементов и др.

Тем не менее господствующая тенденция сохраняется, происходит погоня за все более высокими энергиями, ставятся все новые и новые задачи, решения которых связываются не только с изучением свойств микромира, но и с глобальными проблемами материи и картиной Мироздания.

Наибольшие доступные в природе энергии частиц зарегистрированы в космических лучах, они достигают величины порядка  $10^{19}$  эВ и даже больше. Эксперименты с частицами таких энергий, значительно превышающих мыслимые в обозримом будущем энергии в ускорительных установках, интенсивно проводятся, хотя они чрезвычайно сложны и трудоемки из-за малого количества частиц-снарядов такой энергии.

Поэтому расширение возможностей ускорительной физики и техники в область все больших энергий остается главной задачей.

За несколько десятков лет развития УФТ (ускорительной физики и техники) энергия ускоряемых частиц выросла от величины порядка МэВ ( $10^6$  эВ) - это равно энергии, набираемой частицей с зарядом электрона при прохождении разности потенциа-

лов в один миллион вольт - до энергии порядка ТэВ ( $10^{12}$  эВ) в лабораторной системе координат.

Соответственно, от исследований свойств молекул и атомов (длины порядка  $10^{-7}$ - $10^{-8}$  см) произошел переход к длинам масштаба  $10^{-16}$ - $10^{-17}$  см, где могут изучаться области внутри ядер и самих "элементарных" частиц, фундаментальные вопросы, связанные с построением единой картины микровзаимодействий.

Для развития УФТ характерно не только повышение энергии частиц, но и стремление к неуклонному увеличению интенсивности, т.е. количества ускоряемых частиц в единицу времени, поскольку большой поток частиц-снарядов позволяет упрощать постановку физических экспериментов и ставить опыты со все более редкими событиями. Необходимость получения интенсивных ускоренных пучков связана также с развитием важного направления УФТ - метода встречных пучков. Именно этот метод дает наибольшие в настоящее время энергии (в центре масс сталкивающихся частиц), но его значение определяется светимостью установок на встречных пучках, т.е., в первую очередь, интенсивностью сталкивающихся пучков (плотностью частиц в них).

К середине XX столетия энергия ускоряемых частиц достигла в классических ускорительных установках (протонные синхротроны, электронный линейный ускоритель в Стенфорде) величины порядка 10 ГэВ ( $10^{10}$  эВ), при этом размеры и техническая сложность ускорителей возросли до такой степени, что на повестку дня встала необходимость разработки принципиально новых подходов к их конструированию и дальнейшему совершенствованию. Такая насущная потребность, как всегда, вызвала к жизни новые идеи: почти одновременно возникли метод встречных пучков (Видерое, 1943 г., Керст, 1956 г.) идея жесткой магнитной фокусировки и предложение об использовании сверхпроводимости в магнитных системах ускорителей.

В 1956 г. на Международной конференции по ускорителям высоких энергий в Женеве были доложены разработки советских физиков Г.И.Будкера, В.И.Векслера и Я.Б.Файнберга о новых принципах ускорения заряженных частиц, основанных не на ускорении и удержании частиц во внешних электрических и магнитных полях, а в полях, возникающих при определенных условиях в плотных ансамблях заряженных частиц того же или иного сорта, нежели ускоряемые частицы. В этих работах, о которых подробнее расскажем далее, были заложены основы когерентных и коллективных методов ускорения, физика которых тесно связана с большим пространственным зарядом и большой плотностью частиц в ансамблях заряженных частиц (плазма, пучки, отдельные сгустки частиц различной конфигурации). Эти идеи оказались непосредственно взаимосвязаны со второй главной проблемой УФТ - увеличением



интенсивности ускоряемых частиц, а также с возникшей параллельно и практически одновременно грандиозной задачей овладения управляемым термоядерным синтезом при использовании магнитного удержания сверхплотной горячей плазмы, так называемой проблемой УТС.

Так возникла новая область физики - физика плотных ансамблей заряженных частиц и коллективных эффектов, характерных для этих объектов. Особенности этой области физики являются релятивистский характер движения заряженных частиц, огромные стационарные и квазистационарные электромагнитные поля, связанные с большой плотностью частиц, на фоне которых разыгрываются динамические процессы: сложные коллективные движения, неустойчивости, излучение и т.д.

Это еще один замечательный пример в истории науки и техники, когда человеческая любознательность и практические потребности вызывают развитие новых областей знания и почти одновременно с разных сторон начинается штурм новых высот познания окружающего мира и технических достижений.

Примерно 35 лет продолжаются непрерывные исследования проблем УТС и УФТ. За это время в этих сложнейших областях науки и техники достигнут весьма высокий уровень понимания свойств ансамблей заряженных частиц, сущности коллективных эффектов в них, практические же результаты пока значительно скромнее, хотя неуклонное продвижение вперед существует, несомненно, и здесь.

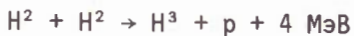
Перейдем к краткой характеристике проблем и основных этапов развития УТС и УФТ.

## 2. ИССЛЕДОВАНИЯ ПЛОТНОЙ ПЛАЗМЫ И ПРОБЛЕМЫ УТС

Возникновение и развитие ядерной физики, в частности, открытие реакций деления ядер с выделением большой энергии, привело к возникновению концепции управляемого термоядерного синтеза, основанного на реакции слияния ядер дейтерия (или ядер дейтерия и трития), которые сначала образуют плазму, т.е. ионизованное вещество, состоящее из электронов и ядер водорода, дейтерия и трития, нагретое до температуры порядка сотни миллионов градусов, когда реакции синтеза ядер идут эффективно. Для эффективности хода реакций вида



или



необходима высокая температура  $T$ , плотность плазмы  $n$  и достаточное время удержания плазмы (без контакта со стенками) согласно так называемому критерию Лоусона (1957 г.):



Здесь  $n$  - плотность плазмы,  $\tau$  - время удержания.

При практическом осуществлении этой концепции сразу возникает проблема удержания плотной и горячей плазмы в замкнутом объеме так, чтобы она не контактировала со стенками технического устройства (реактора).

Сахаров и Тамм (1950 г.) предложили принцип магнитного удержания плазмы, т.е. наложение на плазму достаточно сильного магнитного поля определенной конфигурации, "привязывающего" заряженные частицы к силовым линиям магнитного поля. Выбирая соответствующие геометрию и напряженность магнитного поля, можно, в принципе, практически полностью исключить попадание горячих частиц (с большой энергией) на стенки реактора.

С 1950-х гг. начались интенсивные исследования горячей замкнутой плазмы, и очень скоро выяснилось, что физически прозрачные идеи, лежащие в основе концепции управляемого термоядерного синтеза, при проведении в практику создания реально действующей энергетической установки наталкиваются на серьезные трудности, связанные с новым, необычным для исследователей поведением плазмы в экспериментальных условиях. Образно говоря, плазма оказалась весьма "капризной", плохо управляемой субстанцией, обладающей рядом аномальных, неожиданных свойств. При большой плотности в ней разыгрываются многообразные динамические коллективные процессы - неустойчивости, некоторые из которых обладают очень большим инкрементом - скоростью роста возмущений.

Потребовались десятилетия напряженных экспериментальных и теоретических исследований, прежде чем появилось относительно ясное понимание этих сложных физических процессов и были придуманы способы борьбы с ними, компенсации их влияния. В конечном счете эти усилия привели к концепции токамаков - сложных технических устройств с "хитрой" конфигурацией магнитных полей, в которых достигнуты обнадеживающие результаты по нагреву и удержанию плотной плазмы. Температура, плотность и время удержания достигли таких величин, что стала возможной демонстрация "зажигания" термоядерных реакций, хотя энергетический выход еще очень мал, так что не компенсируются затраты энергии на работу установки. Но важен принцип: следует ожидать, что в ближайшее время и эта задача будет решена и появится демонстрационный термоядерный реактор.



Для нас сейчас важно подчеркнуть, что гигантские усилия физиков в этой области привели к разработке общих вопросов теории коллективных процессов в плазме - характерном и типичном примере плотного ансамбля заряженных частиц. Получены фундаментальные экспериментальные результаты по методам управления движением заряженных частиц, параметрами плазмы, которые имеют важное значение не только для физики горячей плазмы, но и для других областей физики и техники, бурно развивающихся в наше время и успешно использующих при своем параллельном развитии выводы и достижения в разработке проблемы УТС. Естественно, существует и обратное влияние, несмотря на специфические отличия таких областей, как УФТ, радиофизика и радиотехника больших мощностей, сильноточные электрон-ионные пучки и пр.

Для всех этих областей многие понятия, физические идеи и представления являются общими.

### 3. УВЕЛИЧЕНИЕ ИНТЕНСИВНОСТИ УСКОРИТЕЛЕЙ И СВЕТИМОСТИ НАКОПИТЕЛЬНЫХ УСТАНОВОК: БОРЬБА С ЭФФЕКТАМИ БОЛЬШОГО ПРОСТРАНСТВЕННОГО ЗАРЯДА В УФТ

В 1950-1960 гг. интенсивность существующих ускорителей на самые большие энергии ( $\sim 10$  ГэВ) достигала  $10^{11}$ - $10^{12}$  р/с, что в основном удовлетворяло потребности тогдашнего этапа развития ядерной физики и физики элементарных частиц. Однако очень скоро в связи с увеличившейся сложностью физических экспериментов и относительной редкостью изучаемых событий возникла потребность в увеличении интенсивности пучков ускоряемых частиц.

При попытках увеличить интенсивность на порядок и более быстро выяснилось, что собственные электромагнитные поля пучков заряженных частиц существенно влияют на процесс ускорения. Многочисленные эффекты большого пространственного заряда выступают как помехи, ограничивающие увеличение тока и качество ускоряемых пучков. Эти явления лимитировали и светимость установок на встречных пучках (коллайдеров, которые начали интенсивно создавать в этот период), поскольку плотность сталкивающихся пучков непосредственно определяет количество изучаемых событий в физическом эксперименте.

С этого времени начинаются широкомасштабные исследования эффектов большого пространственного заряда, коллективных эффектов в ансамблях заряженных частиц применительно к специфике проблем УФТ. Работа, как всегда, шла как по линии теоретического осмысления этих эффектов, так и экспериментально, путем компенсации их влияния на работу ускорительных установок. Успех этих исследований обусловлен тесной связью теории и

эксперимента: были поняты основные физические принципы, развита приближенная математическая теория коллективных эффектов, разработаны тонкие и эффективные методы контроля их влияния. Соответственно начала расти интенсивность ускорителей. В циклических ускорителях типа протонных синхротронов, обеспечивающих до настоящего времени наибольшую энергию в лабораторной системе отсчета, она достигла  $10^{12}$ - $10^{13}$  р/с (Брукхейвен, Дубна, ЦЕРН, Батавия, Серпухов). Возросла и светимость коллайдеров.

Следует отметить, что многие задачи увеличения тока ускоренных частиц оказались родственными тем, что параллельно вскрывались и изучались в проблеме УТС; объединяют их общие свойства и черты поведения плотных ансамблей заряженных частиц, специфика же задач УФТ заключается в релятивистской энергии направленного движения основной массы частиц ансамблей и подчас в отличии от нуля полного заряда ансамблей.

Период интенсивных исследований коллективных эффектов в плазме и в ускорителях ознаменовался выдвижением ряда красивых и важных физических идей, направленных на развитие ускорительной техники. К ним относятся идея о возможности электронного охлаждения пучков ускоряемых ионов (Будкер, 1966г.) и предложение Ван-дер-Меера (1972г.) о стохастическом охлаждении пучка в синхротронах. Важно подчеркнуть, что обе эти идеи были довольно быстро реализованы на практике, что привело к существенному прогрессу в работе установок со встречными пучками вследствие повышения плотности частиц в пучках и, соответственно, увеличению светимости коллайдеров.

Увеличение интенсивности классических ускорителей и успехи физики горячей плазмы подготовили почву для возникновения принципиально новой концепции ускорения, основанной на использовании сильных полей, которые могут при определенных условиях возникать в плотных ансамблях заряженных частиц, для ускорения какой-либо группы частиц ансамбля.

Рассмотрим кратко первоначальный этап развития этого круга идей, связанный с именами Г.И.Будкера, В.И.Векслера и Я.Б.Файнберга.

### 4. КОНЦЕПЦИЯ КОГЕРЕНТНЫХ И КОЛЛЕКТИВНЫХ МЕТОДОВ УСКОРЕНИЯ. РАБОТЫ Г.И.БУДКЕРА, В.И.ВЕКСЛЕРА, Я.Б.ФАЙНБЕРГА

Все три работы советских физиков, объединенные идеей использования для целей ускорения полей пространственного заряда, созданного в том или ином ансамбле заряженных частиц (сгусток, пучок, неоднородная плазма), появились удивительным образом одновременно и независимо на I Конференции по ускорителям высоких энергий в Женеве в 1956 году.



Как это часто бывает в науке, ряд сходных или близких по идее предложений высказывался и раньше. В качестве примера упомянем идеи Х.Альфвена и П.Вернхольма<sup>11</sup> и Э.Ферми<sup>12</sup>. В первой работе фактически предвосхищена идея коллективного ускорения с помощью компактного сгустка заряженных частиц, в то время как попытка Ферми объяснить высокую энергию частиц космических лучей адиабатическим отражением их от магнитных полей движущихся в пространстве облаков межзвездной материи инициировала в дальнейшем многие интересные предложения по удержанию и ускорению заряженных релятивистских частиц. Поскольку развитие науки и техники в то время не подготовило почву для принятия и даже понимания идей такого типа, эти работы Альфвена и Ферми были не оценены должным образом сразу после опубликования.

Краткий анализ предложений трех основоположников новой идеологии начнем с работы Будкера о стабилизированном релятивистском электронном пучке; в ней, по существу, идея коллективного ускорения предстает в несколько специфическом виде<sup>13</sup>.

Будкер предложил использовать собственные поля кругового сильноточного электронного пучка для захвата положительно заряженных частиц и их последующего удержания в этих полях на круговой орбите, задаваемой электронным пучком, для последующего ускорения до высоких энергий. Таким образом, вместо огромного магнитного поля, необходимого для создания круговой орбиты высокоэнергетических частиц, протонов или ионов, предлагалось использовать потенциальную яму пространственного заряда сильноточного электронного пучка. При этом требуется внешнее магнитное поле для сворачивания этого пучка в кольцо, во много раз меньшее магнитного поля, необходимого для создания круговой орбиты релятивистских протонов того же радиуса. Очевидно, для осуществления этой идеи необходима большая глубина потенциальной ямы пространственного заряда электронного пучка, т.е. большой ток пучка или малый размер поперечного сечения пучка.

Суть идеи Будкера состоит в том, что им был предложен и рассмотрен теоретически коллективный процесс демпфирования поперечных колебаний электронов и, соответственно, стягивания поперечного сечения пучка за счет специфического излучения релятивистских электронов в пучке с малой примесью ионов. Такой процесс возможен при выполнении условия равновесия

$$\frac{1}{\gamma_0^2} \leq \frac{v_e}{v_i} \leq 1,$$

где безразмерные плотности электронов и ионов

$$v_{e,i} = 2\pi r_0 \int_0^r n_{e,i} r dr, \quad r_0 = \frac{e^2}{mc^2} = 2,8 \cdot 10^{-13} \text{ см},$$

$n_{e,i}$  - плотности электронов и ионов в пучке,  $\gamma_0$  - равновесный релятивистский фактор продольного движения электронов.

Для компенсации потери продольного импульса электронов при столкновениях с ионами к пучку прикладывается продольное электрическое поле  $E$ . В результате набираемая из поля энергия электронов уносится излучением и пучок переходит в равновесное самофокусирующееся состояние с параметрами, скажем, при  $v_e = v_i$ :

$$\gamma_0 \cong \frac{1,7}{v_e}, \quad r^* \cong \frac{3,6 \cdot 10^{-3} \text{ (см)}}{E^{1/2} \text{ (В/см)}}, \quad i_e \cong \frac{2,9 \cdot 10^4}{\gamma_0} \text{ (А)}.$$

При токе 1000 А собственное магнитное поле на поверхности пучка может достигать 50000 Э, в то время как внешнее магнитное поле, обеспечивающее круговую орбиту электронов радиусом 1 м, составляет только 1350 Э. Эта красивая идея была практически сразу же поставлена на экспериментальную проверку и изучение. Серия экспериментов показала, что идеализированная модель самофокусировки пучка и коллективных процессов, происходящих в нем, весьма далека от реальной картины поведения такого плотного ансамбля электронов и ионов. Были обнаружены неустойчивости сильноточного пучка с ионами, в том числе двухпучковая, когда нарастают относительные поперечные колебания и изгибания двух пучков, электронного и ионного. Эти неустойчивости и другие коллективные процессы маскировали и "размазывали" искомый регулярный процесс взаимодействия релятивистских электронов с ионами и электромагнитными полями.

Фактически не удалось получить и идентифицировать устойчивое состояние стабилизированного электронного пучка на круговой орбите с малыми поперечными размерами.

Однако круг этих идей и представлений, а также развитые мощные аналитические методы расчетов и экспериментальные подходы оказали большое влияние на последующее развитие физики и техники плотных ансамблей заряженных частиц и коллективных процессов. В частности, отсюда родилась плодотворная идея электронного охлаждения ионных пучков, вскоре блестяще подтвержденная экспериментально и принятая ныне как один из эффективных методов повышения светимости коллайдеров.

Пучок Будкера, параметр Будкера, процесс Будкера - эти и другие понятия прочно закрепились в лексиконе современной физики новых методов ускорения и коллективных процессов.

Нельзя исключить возможность экспериментального подтверждения коллективного процесса становления самофокусирующегося состояния кругового сильноточного электрон-ионного пучка, указанного Будкером, при дальнейшем развитии новой ускорительной техники и техники сильноточных пучков и совершенствовании ме-



тодов экспериментального исследования коллективных эффектов и компенсации вредного влияния ряда из них.

Наибольшее значение для формирования идеологии коллективно-го ускорения, вообще концепции новых методов ускорения, имели идеи, высказанные В.И.Векслером в его знаменитых теперь работах<sup>4,5,7</sup>. В них принципы, составляющие сущность нового направления развития УФТ, предстают в максимально ясной и прозрачной форме.

Первым по времени был предложен принцип когерентного ускорения, сущность которого в сжатой форме такова: представим себе сгусток зарядов ограниченных размеров, число заряженных частиц в котором равно  $N$ ; движение сгустка происходит в среде, где возможно электромагнитное излучение зарядов (например, в замагниченной плазме, в которой, как было показано И.Е.Таммом, возможно излучение Черенкова и обратный эффект - увеличение заряда движущейся средой). Тогда, если размеры сгустка меньше длины волны излучения, возникает когерентное излучение, т.е. синфазность излучения отдельных зарядов, при которой мощность излучения пропорциональна не числу зарядов  $N$ , а  $N^2$ . Векслер обратил внимание на возможность ускорения сгустка зарядов движущейся средой (замагниченной плазмой), причем увлекающая сгусток сила при условии когерентности будет пропорциональна также  $N^2$  и, следовательно, ускоряющая сила на одну частицу будет пропорциональна  $N$  - числу зарядов в сгустке. Ясно, что при большом количестве зарядов, точнее, при большой плотности частиц в сгустке, ускоряющая сила может стать весьма большой, больше обычной для классических ускорителей. Такой тип механизма ускорения, когда ускоряющая сила (температура ускорения) пропорциональна числу самих ускоряемых частиц, и был назван Векслером принципом когерентного ускорения. Им же был придуман так же интересный и важный вариант ударного ускорения, по заложенным в него идеям предназначенный для достижения высоких и сверхвысоких энергий. Эксперименты, поставленные в Физическом институте им. П.Н.Лебедева, показали, что осуществление первоначального варианта когерентного метода ускорения сталкивается с трудностями из-за сложного поведения плазмы и проблем создания компактных сгустков с большой плотностью частиц.

Несколько позднее, развивая круг этих идей, Векслер обратился к идее коллективного ускорения и разработал метод создания сгустка с большим числом заряженных частиц, размеры которого, в принципе, могли поддерживаться внешними электромагнитными полями, методами, известными в классической ускорительной технике.

Так возникла идея тонкого заряженного кольца с релятивистским движением электронов во внешнем магнитном поле, в котором кулоновские силы расталкивания электронов из-за магнитного стягивания параллельных токов ослаблены в  $\gamma_{\perp}^2$  раз ( $\gamma_{\perp}$  - релятивистский фактор вращения электронов). Захваченные в потенциальную яму пространственного заряда кольца ионы, с одной стороны, добавочно компенсируют действие пространственного заряда на сгусток как целое, а с другой - при ускорении кольца во внешнем электрическом поле получают энергию в  $M/m\gamma_{\perp}$  раз большую, чем электроны кольца (при условии неотрыва ионов при ускорении кольца).

Это и есть коллективный принцип ускорения, в котором, в отличие от когерентного принципа, ускоряющее ионы поле определяется не числом самих ускоряемых частиц (в данном случае ионов), а числом заряженных частиц другого сорта, т.е. электронов: ясно, что поле, увлекающее ионы при ускорении кольца, пропорционально числу электронов в кольце.

Экспериментальное осуществление этого метода - разновидности общего принципа коллективного ускорения, названного коллективным линейным ускорением ионов электронными кольцами, началось в Дубне в 1962 г.

После опубликования идеи и первых результатов по формированию электронного кольца в докладе на Международной ускорительной конференции в Кембридже (США) в 1967 г., уже после смерти Векслера, во всем мире был проявлен огромный интерес к кольцевому коллективному методу, и были начаты интенсивные теоретические и экспериментальные исследования электронных колец с большим током: в США (Беркли, Мериленд), ФРГ (Гаршинг), позже в Японии (Нагоя)<sup>6-8</sup>.

Результаты, полученные в процессе этих исследований, имели и имеют большое познавательное и прикладное значение, вызвали многочисленные новые, альтернативные предложения по развитию коллективного принципа ускорения и заложили основу этой новой области ускорительной физики и техники.

В этом, прежде всего, состоит фундаментальное значение идей Векслера, несмотря на то, что прикладные результаты пока еще далеки от ожидаемых. Работоспособность и плодотворность этих идей можно считать доказанными, хотя трудности технических решений еще во многом не преодолены.

Наконец, остановимся кратко на третьем направлении новой идеологии УФТ, развитие которого было начато в работах Я.Б.Файнберга. Как выяснилось впоследствии, предложения Файнберга стали одной из важнейших линий развития новых методов ускорения. Речь идет о возможности генерации очень сильных электрических полей в плотной плазме (плазменных волноводах)



и сильноточных электрон-ионных пучках при возбуждении в них медленных ( $v_e < c$ ) волн большой амплитуды. Заметим, что к моменту опубликования работы<sup>9/</sup> техника получения РЭП (релятивистских электронных пучков) еще не была разработана, это произошло на десять лет позднее. В этом смысле идеи Файнберга опередили развитие техники.

Если в плазме или электрон-ионном пучке с плотностью электронов  $n_e$  возбуждена волна с напряженностью поля  $E \sim E_M \exp i k_z z$  (для простоты берем одномерный случай), то легко получить оценку для величины  $E_M$ , например, следующим образом:

$$\frac{dE}{dz} \cong 4\pi e n_e \quad \text{или} \quad k_z E_M \cong 4\pi e n_e, \quad \text{т.е.} \quad E_M \cong 4\pi e n_e \frac{c}{\omega},$$

и, полагая по порядку величины  $\omega \sim \omega_{\text{пл}} = \sqrt{\frac{4\pi e^2 n_e}{m}}$  (ленгмюровской частоте колебаний электронов ансамбля), получаем

$$E_M \sim \sqrt{4\pi m c^2 n_e}.$$

Отсюда следует, что при значительной плотности  $n_e$  поле может достигать очень больших значений. Например, для плазмы при  $n_e \cong 10^{18} \text{ см}^{-3}$   $E_M \sim 10^9 \text{ В/см}$ . Для сильноточных пучков с характерной плотностью  $n_e \cong 10^{13} \text{ см}^{-3}$ ,  $E_M \sim 3 \cdot 10^6 \text{ В/см}$ .

Интенсивная разработка и развитие концепции возбуждения волн пространственного заряда в плазме и сильноточных пучках продолжают до настоящего времени как в работах харьковской школы Файнберга, так и в других научных центрах по всему миру. Сразу же были отмечены перспективные и практически важные стороны этой пучково-волновой концепции: образование сгущений плотности заряда пролетными электронами (если фазовая скорость волны не равна направленной скорости электронов в плазме или пучке), что ликвидирует проблему фокусировки сгустков, в особенности, продольной. Далее, возможность управления процессом возбуждения и самим спектром волн, а также их фазовой скоростью. Наконец, концентрация ускоряющего поля в той области пространства, где движутся ускоряемые частицы.

Многочисленные эксперименты по возбуждению волн в плазме и пучках в харьковском УФИ и других исследовательских центрах дали новый большой научный материал, в значительной степени прояснили картину генерации волн в плотных ансамблях заряженных частиц - в плазменных волноводах и нескомпенсированных (по заряду) электрон-ионных пучках. Были экспериментально открыты и изучены неустойчивости ансамблей с волнами значительной амплитуды, эффекты регуляризации спектра волн

в процессе их возбуждения, нелинейные явления при больших полях и т.д. (см. многочисленные публикации и обзоры<sup>10,11/</sup>).

Была показана перспективность этого направления развития УФТ в области малых и средних энергий ускоряемых частиц. Однако, как подчеркнул Файнберг в одном из последних обзоров<sup>11/</sup>, существующие разработки и достижения, в том числе и в области пучково-волновых методов ускорения, еще не решают проблему создания ускорителей на сверхвысокие энергии (свыше 100 ГэВ).

Заканчивая этот краткий обзор зарождения и развития новых методов ускорения, подчеркнем, что высказанные идеи, теоретические и экспериментальные методы исследования процессов в плотных ансамблях заряженных частиц имеют значительно большее научное и прикладное значение, нежели чисто ускорительные задачи. Помимо проблемы УТС, связь с которой уже отмечалась, можно выделить общие вопросы физики плазмы, космофизики, радиофизики, в частности, методы генерации сверхмощного ВЧ- и СВЧ-излучения, рентгеновского излучения и многое другое.

Задачи в этой области физики необычайно трудны, связаны со сложными математическими методами описания и не менее сложными и тонкими методами экспериментальных исследований. Успех достигается трудно и весьма медленно, как это показывает тридцатилетняя история развития новой области УФТ и физики коллективных процессов в плотных ансамблях заряженных частиц.

Показательны в связи с этим быстрое разочарование и прагматический подход части зарубежных исследователей: после быстрого реагирования на предложения, родившиеся в Дубне, Москве и Харькове, встретившиеся трудности привели к разочарованию и остановке исследований в ряде научных центров за рубежом, несмотря на большое количество полученных интересных научных и методических (но промежуточных!) результатов. Опыт исследований коллективных процессов в плотных ансамблях заряженных частиц говорит о том, что успех может прийти, в том числе и в получении прикладных результатов, в конце длинного пути усилий, особенно экспериментальных, подкрепленных глубокими теоретическими изысканиями и поиском новых путей и возможностей. Первые успехи в решении проблемы УТС, а также неоднократная демонстрация возможностей коллективного ускорения<sup>12,13/</sup> убеждают в правильности оценки большой перспективности новой области физики, в том числе физики ускорителей.

Преимуществом идей и разработок, подготовка специалистов в новой области представляется первостепенной задачей - требуется еще масштабная и целенаправленная работа квалифицированных научно-исследовательских и инженерных коллективов. Терять наработанные заделы и научно-технический потенциал ни в коем случае нельзя, иначе приоритет нашей науки в этой области может быть потерян.



Подчеркнем в заключение, что одной из главных целей нового направления УФТ может стать не только и не столько достижение сверхвысоких энергий, о чем говорилось в начале этой статьи, но и создание компактных и, возможно, технически не очень сложных и достаточно дешевых ускорителей на малые и средние энергии, особенно ускорителей многозарядных ионов. Характерной особенностью этого нового поколения ускорителей может стать значительная величина тока ускоренных частиц, которая будет лимитироваться, главным образом, возможностями источников тяжелых заряженных частиц.

Решение этой задачи может иметь фундаментальное значение как для ядерной физики и физики элементарных частиц (альтернатива и конкуренция с проектами мезонных фабрик), так и для решения важнейших прикладных задач: электробридинг, наработка изотопов для медицинских целей, облучение онкологических больных, исследования в области физики твердого тела и многое другое.

#### ЛИТЕРАТУРА

1. Alfven H., Vernholm P. - Report at the Opening of CERN, 1952. - Proc. CERN Symp., 1956, v.1, p.99
2. Fermi E. - Astrophys. Journ., 1954, v.19, p.1.
3. Budker G.I. - Proc. CERN Symp., 1956, v.1, p.80; Будкер Г.И. - Атомная энергия, 1956, т.1, с.9.
4. Veksler V.I. - Proc. CERN Symp., 1956, v.1, p.68; Векслер В.И. - Атомная энергия, 1957, т.2, с.427.
5. Veksler V.I. et al. - Proc. VI Conf. High En. Accel. Cambridge, 1967, p.289; Атомная энергия, 1968, т.24, с.317.
6. Keefe D. et al. - Phys. Rev. Lett., 1969, v.22, p.558.
7. Reiser M. - IEEE Trans. Nucl. Sci., 1973, NS-20, p.310.
8. Destler W. et al. - Proc. of Nucl. Sci., 1975, NS-22, p.995.
9. Andefinger C. et al. - IPP 0/8 Max-Planck Inst. für Plasma-phys., Garching, 1971.
10. Fainberg Ya.B. - Proc. CERN Symp., 1956, v.1, p.84; Файнберг Я.Б. - Атомная энергия, 1959, т.6, с.431.
11. Файнберг Я.Б. - Физика плазмы, 1977, т.3, с.442.
12. Файнберг Я.Б. - Физика плазмы, 1985, т.11, с.1398.
13. Саранцев В.П. - Труды VIII Всесоюз. совещания по ускорителям заряж. частиц. Дубна, 1983, т.11, с.387.
14. Olson C. - Труды II Симп. по коллект. методам ускорен., Дубна, 1976, с.101.

Рукопись поступила в издательский отдел  
9 июля 1992 года.

Бонч-Осмоловский А.Г.  
Возникновение и развитие новой  
ускорительной физики

P9-92-296

Рассмотрены причины возникновения и этапы развития новой области физики - физики плотных ансамблей заряженных частиц и связанных с ней новых принципов ускорения. Дано сжатое объяснение сущности физики новых методов ускорения, описаны их состояние и перспективы развития.

Работа выполнена в Лаборатории высоких энергий  
ОИЯИ.

Препринт Объединенного института ядерных исследований. Дубна 1992

Перевод автора

Bonch-Osmolovsky A.G.  
The Creation and Development  
of New Physics of Acceleration

P9-92-296

The creation and stages of development of the new field of physics - the physics of the dense charge-particle ensembles and connected with it new principles of acceleration are considered. In brief form the explanation of the essence of the physics of new acceleration methods was given, their state and perspectives of their development were pictured.

The investigation has been performed at the Laboratory of High Energies, JINR.

Preprint of the Joint Institute for Nuclear Research. Dubna 1992