

*Я. Б. Файнберг*

## В. И. ВЕКСЛЕР И НОВЫЕ МЕТОДЫ УСКОРЕНИЯ\*

Большое, если не определяющее значение для становления и развития новой, важной области современной физики — физики ускорителей релятивистских частиц, составляющих экспериментальную основу физики высоких энергий и элементарных частиц, имело то, что у истоков этого раздела физики был В. И. Векслер, заложивший основы, и то, что масштабы деятельности и талант Владимира Иосифовича полностью соответствовали масштабности и значению этого раздела физики. Те, кому выпало большое счастье быть сотрудником или взаимодействовать с В. И., конечно, с большой благодарностью и признательностью расскажут о нем. Я же коснусь только работы В. И. Векслера в одном из наиболее важных и очень любимых им направлений его многогранной деятельности в физике ускорителей — открытия и осуществления новых методов ускорения. Хотя, по существу, вся его работа по физике ускорителей сводилась к поискам и созданию новых методов ускорения, начиная с открытия им (и независимо немного позже Макмилланом) принципа автофазировки. До сих пор все резонансные ускорители заряженных частиц, энергия которых достигла многих гигаэлектронвольт, основываются на этом принципе. Не надо быть провидцем, чтобы с полным основанием утверждать, что еще долгие годы автофазировка сохранит свое значение.

Владимир Иосифович, благодаря своим работам по ускорителям релятивистских заряженных частиц ставший признанным лидером этой области и завоевавший в ней огромный международный авторитет, нашел в себе силы и мужество начинать новую, неизведанную и как всегда в начале зыбкую область — новых методов, и уже одно это решение вызывает огромное уважение. Если к этому добавить целый ряд пионерских, глубочайших и неожиданных, очень плодотворных идей в этой области, часть из которых уже близка к осуществлению либо будет реализована в близком будущем, удивительную свежесть восприятия, благодаря которой он всегда оставался в науке моложе некоторых молодых, но слишком трезво мыслящих, чрезмерно рассудочных, но не всегда дальновидных оппонентов, его надежную поддержку всему но-

---

\*Доклад на семинаре, посвященном 95-летию со дня рождения В. И. Векслера (Дубна, 4–6 марта 2002 г.).

вому и прогрессивному в науке, его доброжелательность, сочетающуюся с глубокой критичностью, то становится ясно, что значение Владимира Иосифовича для становления и развития новых методов ускорения трудно переоценить.

Работы по новым методам ускорения, доложенные на первой международной конференции в Женеве (ЦЕРН) в 1956 г. В. И. Векслером (когерентные методы ускорения), А. М. Будкером (по фокусировке ускоряемых частиц с помощью автостабилизированного релятивистского электронного пучка с учетом сильного влияния процессов излучения) и автора этого доклада (об ускорении с помощью волн плотности заряда, возбуждаемых в плазме или нескомпенсированных пучках заряженных частиц), вызвали большой интерес и серьезную дискуссию.

В 1957 г. В. И. Векслером был предложен метод ускорения тяжелых ионов кольцами релятивистских электронов, усовершенствованный и осуществленный В. П. Саранцевым и сотрудниками. Для развития новых методов ускорения важное значение имели предшествующие работы Альфвена по ускорению сменным фокусом электронного потока (1950 г.) и Беннета по самофокусировке релятивистских пучков электронов (без учета влияния процессов излучения) (1934 г.).

Напомним, что особенность коллективных методов заключается в том, что ускоряющие и фокусирующие поля не создаются сторонними источниками (например, СВЧ-генераторами), а образуются зарядами и токами среды, в которой происходит ускорение (например, в плазме или сильноточных релятивистских пучках электронов — СРЭП). Таким образом, необычность коллективных методов заключается в том, что в них определяющую роль играют коллективные процессы, происходящие в системах, содержащих большое число кулоновски взаимодействующих частиц, отличающихся большей сложностью, чем традиционные ускорители, и поэтому требующих значительно большее время для проверки и осуществления. В таких системах особую роль приобретают вопросы управления дисперсионными свойствами и многочисленными неустойчивостями.

Отличительной особенностью когерентных методов ускорения (ускорение движущейся средой, ударное ускорение, ускорение квазинейтральных сгустков) является то, что ускоряющие силы зависят от числа ускоряемых частиц  $N$ , возрастая пропорционально  $N$ .

Я уже упоминал о первой международной конференции по ускорителям (Женева, ЦЕРН, 1956 г.), но, наверное, она заслуживает, чтобы более подробно рассказать о ней. Во-первых, она сыграла очень важную роль в развитии физики и техники ускорителей, особенно новых

методов ускорения. Во-вторых, все меньше остается участников этой конференции, которые могли бы рассказать о ней.

В 1956 г. в Женеве состоялась первая международная конференция (симпозиум) по ускорителям высоких энергий, наверное, потому, что это был вообще первый в этой области международный симпозиум, и потому, что встреча проходила после окончания Великой Отечественной (и второй мировой) войны, когда научные контакты были прерваны, а в настоятельной необходимости их возобновления были уверены почти все физики-ускорительщики и, конечно, потому, что в физике ускорителей накопились новые интересные идеи и были достигнуты большие успехи в развитии ускорителей релятивистских частиц. По всем этим причинам симпозиум превратился в могучий поток новых идей, новых поразительных результатов в создании резонансных ускорителей электронов и протонов, основанных на принципе автофазировки, открытом Владимиром Иосифовичем Векслером (1944 г.) и несколько позже (1945 г.), но независимо, Эдвином Макмилланом.

Уже начали свое успешное шествие ускорители с сильной фокусировкой Кристофолоса, Куранта, Снайдера и Левингстона. Напомним, что на симпозиуме впервые было высказано утверждение, что осуществление идеи встречных пучков становится реальным. Об этом говорилось в докладе Керста, посвященном ускорителям на встречных пучках протонов, а также в докладе О'Нила по встречным электронным пучкам.

На симпозиуме были изложены основные идеи коллективных методов ускорения и фокусировки, которые образовали совершенно новое направление развития ускорителей.

Помимо В. И. Векслера и Э. Макмиллана в симпозиуме участвовали: один из создателей первого ускорителя — Кокрофт, циклотрона — Лоуренс, бетатрона — Керст, принципа сильной фокусировки — Кристофолос; Снайдер, Курант, Левингстон; очень много сделавшие для развития ускорителей Видероз и Альварец; Адамс, Блекетт, Уилкиншоу, Маллет, Фрай, Лоусон и другие; наши — Владимирский, Синельников, Желепов, Вальтер, Коломенский, Комар, Балдин, Наумов, Беляев и др. С большим успехом были доложены работы, выполненные под руководством Минца, Рабиновича и других, и работа, выполненная К. Саймоном и А. Сесслером.

Владимир Иосифович, прибывший в Женеву раньше, на заседании оргкомитета предупредил нас, что доклады В. И. Векслера, А. М. Будкера и наш вызывают очень большой интерес и предстоит серьезное обсуждение, но действительность превзошла все ожидания. Большое удовлетворение вызвала длительная и горячая дискуссия.

В ней перемешались глубокие, серьезные и трудные вопросы с вопросами, в которых чувствовалось, что их задают очень хорошие физики, но для которых обсуждаемая область физики была малоизвестной, а идеи — совершенно неожиданными. Через пять-десять лет идеи коллективных методов ускорения и фокусировки стали привычными, а многие из тех, кто задавали вопросы, сами стали авторами интересных исследований в этой области.

Много сделали для развития коллективных методов ускорения лаборатории, руководимые учениками и сотрудниками Владимира Иосифовича В. П. Саранцевым (а затем И. Н. Ивановым и сотрудниками) в ОИЯИ, М. С. Рабиновичем и А. А. Коломенским (а затем А. Н. Лебедевым) в ФИАНе и, конечно, огромное значение имели работы, проведенные А. М. Будкером и сотрудниками (а затем А. Н. Скринским и сотрудниками) в Институте ядерной физики СО АН СССР, особенно в области эксперимента. В настоящее время определяющее значение имеют работы физиков США, Японии, Франции.

Попытаемся сделать короткий обзор некоторых работ по коллективным методам ускорения. В одном докладе это сделать практически невозможно. Поэтому мы рассмотрим только одну из разновидностей коллективных методов — метод ускорения волнами плотности зарядов в плазме и пучках заряженных частиц. Этапы развития этих методов непосредственно связаны с этапами развития способов и источников возбуждения плазменных волн или волн в нескомпенсированных пучках.

На первом этапе эти волны возбуждались с помощью излучения, создававшегося СВЧ-генераторами. На втором этапе — с помощью сильноточных релятивистских электронных пучков. На третьем — с помощью интенсивного короткоимпульсного лазерного излучения LWFA или коротких электронных или позитронных сгустков ( $n_b > n_p$ ).

Основной задачей первого этапа была проверка самой возможности возбуждения в плазме волн плотности заряда и топографии полей и фазовой скорости, необходимых для ускорения с напряженностью полей порядка существующих в традиционных ускорителях. В результате исследований было показано, что волны пространственного заряда, необходимые для ускорения заряженных частиц в плазме, существуют, а напряженности этих полей достигают 35–50 кВ/см. Впоследствии был предложен, теоретически и экспериментально исследован способ возбуждения плазменных волн с помощью первоначально немодулированного пучка электронов, используя предсказание Ахиезером и нами, и Бомом и Гроссом, и экспериментально подтвержденной пучковой неустойчивости (1949 г.).

Второй этап развития коллективных методов ускорения непосредственно связан с серьезными достижениями в области создания сильноточных релятивистских электронных пучков в конце 60-х годов. В 70-х годах был предложен целый ряд способов ускорения протонов и тяжелых ионов с помощью волн плотности заряда, распространяющихся в нескомпенсированных СРЭП. Основная трудность, которую необходимо было преодолеть, заключалась в том, что для соблюдения синхронизма между ускоряющей волной  $V_z$  и ускоряемой частицей необходимо было понизить фазовую скорость волн, распространяющихся в СРЭП, движущихся со скоростью порядка  $c$ , до скорости ускоряемых протонов и тяжелых ионов, скорость которых много меньше  $c$ . Для этого использовались волны, обусловленные аномальным эффектом Доплера, для которых  $\omega - k_z V_{ez} = -\omega_{rez}$ .

В методе Слоуна–Драммонда ускорение осуществляется медленной циклотронной волной  $\omega_{rez} = \omega_{He}$ . Близким к этому методу является способ ускорения медленной ленгмюровской волной, возбуждаемой в сходящемся гладком волноводе (P. Sprangle et al., 1976 г.)

$\omega_{rez} = \frac{\omega_b(z) k_z}{\gamma_b k}$ . Наибольшее влияние на изменение  $V_{ph}(z)$  оказывает

изменение  $\gamma_b(z)$ . Значительный интерес представляет предложенный в 1973 г. (Н. А. Хижняк, А. Г. Лымарь и др.) способ ускорения модулированных СРЭП, движущихся в гофрированном волноводе  $\omega_{rez} = \frac{2\pi V_{ez}}{L}$ ,

где  $L$  — период волноводной структуры. Интересной и важной особенностью медленных циклотронных и ленгмюровских волн, распространяющихся в СРЭП, является то, что это волны с отрицательной энергией, и поэтому ускорение ионов, которое приводит к диссипации энергии сопровождается ростом амплитуды волны в отличие от традиционных систем. Заметим, что волны с отрицательной энергией были известны и ранее, новым является то, что диссипативным элементом являются не волны замедляющей структуры с положительной энергией, взаимодействие которых с волнами с отрицательной энергией пучка приводит к возбуждению и усилению волны в системе «пучок–замедляющая структура», а ускоряемые ионы, которые движутся в СРЭП, являются диссипативным элементом.

В методе Слоуна–Драммонда синхронизм ускоряемой частицы и ускоряющей ее волны поддерживается путем изменения напряженности постоянного магнитного поля. В экспериментах было достигнуто очень большое замедление, минимальная энергия инжектируемых ионов может быть сделана очень малой  $\sim 0,06c$ , высокая напряженность

ускоряющего электрического поля волны в экспериментах составляла около 100–200 кВ/см, т.к.  $E_z \sim V_{ph}^{-1} \sim H_0$ , то с ростом энергии напряженность ускоряющего поля падает, ток ускоряемых частиц  $I \sim E_z / \lambda$  для коротких волн велик. Нелинейная теория этого метода ускорения была развита в работе В. Д. Шапира, В. И. Шевченко и др.

Экспериментальное подтверждение возможности возбуждения медленных циклотронных волн, основанных на использовании аномального эффекта Доплера, дано в работах Б. И. Иванова, полномасштабный эксперимент по проверке метода Слоуна–Драммонда осуществлен Е. Cornet, М. Sloan и др., затем Р. А. Мещеровым (МРТИ АН СССР) и основные выводы теории были подтверждены.

Недостаток метода ускорения протонов или тяжелых ионов с помощью медленных ленгмюровских волн, возбуждаемых в сходящемся волноводе, заключается в том, что минимальная фазовая скорость велика, это требует сильного увеличения энергии инжектируемого пучка протонов или тяжелых ионов до 20 МэВ. Правда, существует возможность понижения фазовой скорости ускоряемой волны использованием нелинейного явления: уменьшение фазовой скорости волны с ростом ее амплитуды.

Подводя итоги второго этапа развития метода ускорения с помощью волн плотности заряда, возбуждаемых в СРЭП или в плазме, следует подчеркнуть, что в результате успешно показана высокая эффективность этих вариантов коллективного ускорения с помощью волн плотности заряда, распространяющихся в СРЭП, и достигнуты напряженности ускоряющих полей до 200 кВ/см. Поэтому мне трудно объяснить внезапное прекращение этих исследований.

Третий этап развития метода ускорения заряженных частиц с помощью волн, распространяющихся в плазме или сильнооточных пучках электронов, тесно связан с созданием короткоимпульсных ( $\tau$  порядка десятков или сотен фемтосекунд) лазеров большой мощности  $T^3$  (терраватт, и даже петаватт) и теоретическими исследованиями, в первую очередь с замечательной работой Т. Tajima J. Dawson (1979 г.), и независимо выполненными работами Л. М. Горбунова и др., Р. Sprangle et al. и ряда других работ «чистых» (неприкладных) теоретиков, например, работы Розенблюта и Лью по возбуждению плазменных волн лазерным излучением, работы Р. В. Половина по нелинейным возмущениям в плазме и А. И. Ахиезера и Р. В. Половина по нелинейным релятивистским волнам в плазме (1956 г.).

Мне представляется уместным подчеркнуть значение работ J. Dawson в развитии теории плазмы, в частности методов численного

моделирования процессов, происходящих в плазме и других средах с большим числом кулоновски взаимодействующих частиц, и в разработке плазменно-лазерных методов ускорения заряженных частиц (LBWA, LWFA), а также в разработке метода PWFA.

В методе LBWA плазменные (ленгмюровские) волны возбуждаются в результате биений двух коллинеарных электромагнитных волн, создаваемых лазером так, что  $\omega_1 - \omega_2 = \omega_p$ ,  $k_1 - k_2 = \omega_p / V_{ph}$ ,  $V_{ph} \ll c$ ,  $V_{ph}^{\text{Langm}} = V_g^{\text{laser}} = c \left(1 - \omega_p^2 / \omega^2\right)^{1/2}$ . Возбуждение волн обусловлено пондеромоторной силой, действующей на электроны плазмы в направлении распространения электромагнитной волны  $\frac{e}{c} \left[ \tilde{V}_1 \tilde{H}_2 \right]$ ,  $\frac{e}{c} \left[ \tilde{V}_2 \tilde{H}_1 \right]$ , где  $\tilde{H}_1$  и  $\tilde{H}_2$  — напряженности электромагнитных полей,  $\tilde{V}_1$  и  $\tilde{V}_2$  — скорости электронов плазмы. Напряженность электрического поля плазменной волны равна  $E_z^{\text{max}} = (4\pi m c^2 n_p \gamma_p)^{1/2}$ , максимальная энергия ускоряемых электронов, определяемая расстройкой скорости волны и ускоряемой частицы, равна  $\epsilon_{\text{max}} = 2\gamma_p^2 m c^2 = 2m c^2 (\omega^2 / \omega_p^2)^{1/2}$ .

К третьему этапу развития метода ускорения с помощью плазменных волн относится также предложенный в 1985 г. в работе P. Chen, J. Dawson, R. Huff, T. Katsouleas метод ускорения, тоже основанный на использовании для ускорения плазменных волн, но возбуждаемых не лазерным излучением, а сгустками электронов или их периодической последовательностью. Такие вопросы теоретически и экспериментально исследовались и ранее, новым и важным было то, что ускорение предлагалось осуществить с помощью кильватерных волн, следующих за сгустком. Таким образом, ускоряемый сгусток частиц и возбуждающий волну были пространственно разнесены. Поэтому ускоряющее поле  $E_-$  и поле, тормозящее электронные сгустки, возбуждающие волну,  $E_+$  могли значительно отличаться друг от друга. Это же утверждение справедливо для различных частей одного и того же сгустка. Частицы передней части сгустка возбуждают кильватерную плазменную волну, которая ускоряет электроны хвоста сгустка. Таким образом, для рассматриваемого способа ускорения определяющим является так называемый коэффициент трансформации  $R = E_+ / E_-$ . Так как возбуждаемый сгусток состоит из большого числа электронов, то здесь на

<sup>1</sup>Подробнее см. статью: Я. Б. Файнберг // Физика плазмы. 1987. Т. 13, вып. 5. С. 607–625.



первый план выходят вопросы фокусировки и устойчивости сгустков, возбуждающих волну.

Основным результатом работ третьего этапа было подтверждение правильности идей способов ускорения BWA, PWA, LWA и SmLWA (последний метод — это плазменно-лазерный метод, основанный на открытом в работах по плазменно-лазерному методу ускорения интересном явлении самомодуляции лазерного импульса, распространяющегося в плазме (Андреев, Antonsen, Sprangle)). Отметим, что это явление самомодуляции подобно автомодуляции пучка электронов, движущегося в плазме при плазменно-пучковой неустойчивости.

Вторым важным результатом третьего этапа является доказательство в работах по плазменно-лазерным методам ускорения того, что можно на малых длинах (порядка 1 см) получить очень большие напряженности электрических полей:  $\sim 3 \cdot 10^8$  В/см в методе LWA и 50 кВ/см на длине 4 см в методе PWA. Сравнительно малые напряженности в методе PWA связаны с относительно малым числом электронов сгустка  $\sim 4$  нКл и небольшим коэффициентом трансформации.

К четвертому этапу нам представляется возможным отнести совместную работу группы лабораторий и институтов SLAC, LBNL, UCLA, USC (проект E-157). Целью эксперимента E-157 является ускорение электронов на больших длинах (порядка 1,4 м) в условиях, когда ускоряющие поля плазменных волн на один-два порядка превосходят максимальные напряженности, достигнутые в традиционных ускорителях электронов ( $\sim 10^6$  В/см). Только в этом случае плазменный ускоритель имеет реальные преимущества перед существующими ускорителями. В проекте ставилась задача увеличить первоначальную энергию электронов, инжектируемых из линейного ускорителя SLAC  $\sim 28,5$  ГэВ на длине порядка метра на 1 ГэВ.

В этой работе предложено для осуществления PWFA использовать возбуждение релятивистских двумерных в режиме «blow-out», когда  $n_b \gg n_p$ , и пучок «сдувает» все электроны плазмы и, таким образом, остается только ионный остов, объемный положительный заряд которого фокусирует пучок (сгусток) электронов. При этом суммарное действие радиальных сил на электроны пучка, создаваемых волной, ввиду  $V_z \approx c$ , равно нулю. В этой работе утверждается необходимость использования именно этого режима для ускорения и фокусировки в методе PWFA. Приведены соображения, по которым использование несимметричных профилированных сгустков, в которых плотность нарастает на сравнительно большой длине (несколько  $c/\omega_p$ ), а затем быстро спадает на расстоянии  $< c/\omega_p$ , предложенных на раннем этапе развития метода, непригодно, так как в этом случае ради-



альные фокусирующие силы сильно зависят от радиуса и продольной координаты электронов в сгустке. Можно было бы вместо только профилированного сгустка использовать нелинейные одномерные волны, так как в них отклики (response) сильно отличаются для ускоряющих и замедляющих полей ( $E_-$  и  $E_+$ ). Это позволяет получить больший коэффициент трансформации, но, к сожалению, как отмечают авторы, нелинейные кильватерные волны в лабораторной плазме не могут рассматриваться как одномерные ( $a_r \gg c/\omega_p$ ). Эти соображения не применимы к космической плазме.

В методе PWFA возбуждение кильватерных плазменных волн осуществляется электронами сгустка, а в методе LWFA — пондеромоторными силами лазерного импульса. Поэтому процессы ускорения и соответствующая теория этих методов, по существу, очень схожи. Это в первую очередь относится к разнообразным неустойчивостям: модуляционной, шланговой и др.

Несомненно, основными на четвертом этапе развития плазменных методов ускорения являются теоретические и экспериментальные работы по проекту E-157<sup>2</sup>. В этих работах авторы поставили перед собой цель создания модели ускорителя, использующего возбуждение плазменных волн, возбуждаемых компактным плотным интенсивным высокоэнергетичным сгустком электронов (PWFA). Естественно, что при взаимодействии сгустка электронов с плазмой могут возникнуть неустойчивости, характерные для пучков и плазмы, например, модуляционная неустойчивость и модифицированная шланговая неустойчивость. Как можно судить из кратких статей о проекте E-157, именно модифицированная шланговая неустойчивость и помешала полностью выполнить программу проекта E-157. В ходе выполнения проекта были теоретически и экспериментально решены некоторые важные задачи, связанные с осуществлением одного из вариантов плазменных методов ускорения — PWFA, была создана достаточно однородная (степень однородности 15 %, плотность  $10^{14}$ ) на длине 1,4 метра, на которой электроны хвоста сгустка должны были приобрести энергию 1 ГэВ. Остроумно была решена задача создания сгустков электронов. Авторы использовали не два сгустка, как обычно, из которых один возбуждает кильватерные волны в плазме, а электроны другого ускоряются этими

---

<sup>2</sup>Я с большим удовольствием ознакомился с опубликованными статьями, связанными с проектом E-157. Однако ввиду их краткости мне не удалось получить ответа на возникшие у меня вопросы. Поэтому, излагая результаты и дальнейшие проекты, связанные с E-157, я строго придерживался точки зрения авторов, излагая ее почти дословно.

волнами, а один сгусток электронов, ускоренных линейным ускорителем SLAC, передняя часть сгустка возбуждала кильватерные волны в плазме, а электроны хвостовой части сгустка ускорялись этими волнами. Очень продуктивной была идея использования сгустка электронов, создаваемого в линейном ускорителе SLAC. Параметры сгустка (длина  $\sim 0,6$  мм, радиальные размеры  $75 \times 75$  нм, число электронов сгустка  $2 \cdot 10^{10}$ , энергия электронов 28,5 ГэВ, ток в импульсе 100 А) почти соответствуют требованиям проекта E-157. Такая большая энергия электрона в большей степени соответствовала предположениям, сделанным при выборе для ускорения режима («blow-out»,  $\gamma \gg 1$ ,  $V_b \approx c$ ) возбуждения двумерных нелинейных релятивистских плазменных волн. Кроме того, при больших  $\gamma$  необходимые для компенсации сил рассталкивания электрические поля значительно уменьшаются.

Для исследования процессов, происходящих в сгустках ускоряемых электронов, и для измерения их параметров применяются методы диагностики, основанные на эффектах Черенкова и переходного излучения.

Целью полномасштабных экспериментов по проекту E-157 и являются исследования метода PWFA в условиях, близких к условиям реального ускорителя. Поэтому работы по проекту, как нам представляется, являются последним этапом исследований метода PWFA перед созданием действующего ускорителя, основанного на использовании кильватерных плазменных волн, возбуждаемых плотным сгустком электронов в условиях, когда  $n_b > n_p$  и имеет место режим «blow-out».

Следует отметить большой интерес, проявленный в последнее время к созданию коротких плотных сгустков электронов для плазменных методов ускорения, когерентного  $\gamma$ -излучения и инерционного термоядерного синтеза. Осуществление перехода к коротким плотным сгусткам, исследование вопросов их удержания и устойчивости, по нашему мнению, могут оказаться существенным для возрождения и развития когерентных методов ускорения В. И. Векслера.

Помимо решения основных вопросов создания ускорителей на основе PWFA, в работах по проекту E-157 были выполнены заслуживающие внимания две работы, результаты которых представляют значительный интерес. В одной из них экспериментально обнаружено, на первый взгляд, неожиданное явление: заметное отклонение 30-ГэВ электронного пучка (на 1 мрад) при прохождении через границу раздела довольно редкой плазмы ( $n \sim 10^{14} \text{ см}^{-3}$ ) газа — и дано, как нам представляется, правильное объяснение этого явления. В дальнейшем авторы предполагают увеличить плотность газа с  $10^{14}$  до  $10^{16}$ , а длину

сгустка сократить до 100 микрон. В другой работе проведено численное моделирование возбуждения кильватерных волн с помощью сгустка позитронов.

В этой краткой статье я пытался показать, что новые методы ускорения, начатые пионерскими работами В. И. Векслера, успешно развиваются. Они полностью или частично необратимым образом вошли в физику ускорителей заряженных частиц. Время их полного осуществления было бы сильно сокращено, если бы с нами был Владимир Иосифович, которого нам очень не хватает.