

---

**К 100-ЛЕТИЮ  
М.С. РАБИНОВИЧА**

---

УДК 533.9

## М.С. РАБИНОВИЧ И ТЕРНИСТЫЕ ТРОПЫ ФИЗИКИ ПЛАЗМЫ

© 2019 г. Г. М. Батанов\*

*Институт общей физики им. А.М. Прохорова РАН, Москва, Россия*

\*e-mail: batanov@fpl.gpi.ru

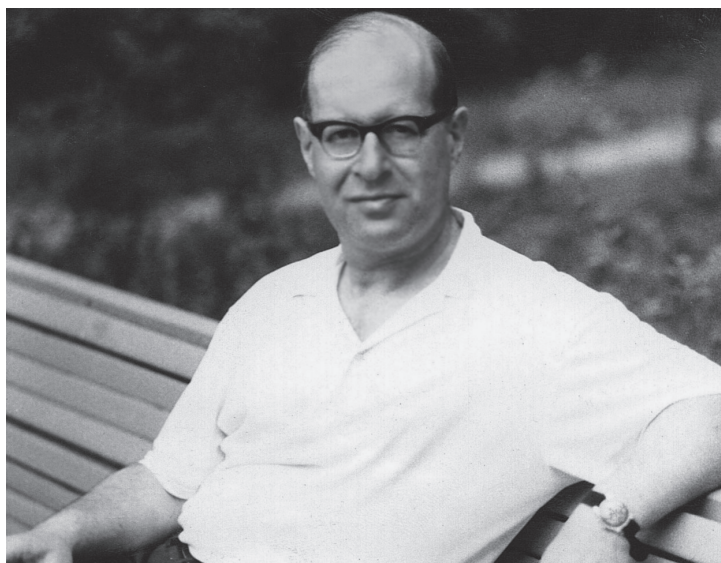
Поступила в редакцию 16.05.2019 г.

После доработки 25.05.2019 г.

Принята к публикации 25.05.2019 г.

В день рождения М.С. Рабиновича вспоминаются его живой и энергичный характер и то огромное влияние, которое он оказал на постановку и развитие исследований актуальных проблем физики плазмы, а также обстоятельства и трудности исследований, проводившихся в руководимой им лаборатории ФИАН. Столкнувшись в середине 60-х годов с трудностями финансирования в реализации волновавших его идей при постановке экспериментальных работ, Матвей Самсонович предпринял беспримерные усилия по выполнению исследований по заказам промышленности. Результатом явились пионерские работы по стеллараторам с постройкой крупнейшего в Европе в те годы стелларатора Ливень-2, созданием гиротронного комплекса по электронно-циклотронному нагреву бестоковой плазмы. Уникальными были также результаты по исследованию параметрических неустойчивостей и ускорению электронов в сильных микроволновых полях, по самопрокидыванию ленгмюровских волн и ускорению электронов в плазменном резонансе, по открытию новой формы подпорогового микроволнового разряда в газах. Мировую известность получили исследования по генерации гигантских микроволновых импульсов в замедляющих структурах и в плазме сильноточными пучками электронов релятивистских скоростей. До сих пор уникальной является постановка экспериментов по лабораторному моделированию процессов солнечных вспышек по идеям С.И. Сыроватского. Бесценной была поддержка Матвеем Самсоновичем Г.А. Аскарьяна в реализации его идей по взаимодействию лазерного излучения с веществом: ориольному рассеянию, банановой самофокусировке, светореактивному ускорению и генерации звука, по генерации магнитных полей в лазерной искре, по “лазерному дракону” и др. Широкую известность получили также пионерские работы по многофотонной ионизации газов и силовому воздействию лазерных пусков на атомы, поддержанные М.С. Рабиновичем, поставленные и выполненные в руководимом им коллективе.

**DOI:** 10.1134/S0367292119110027



На площадке лестницы между первым и вторым этажами второго корпуса Ленинградского политехнического института, ныне имени Петра Великого, в мое время висел плакат с цитатой из Карла Маркса: “В науке нет широкой столбовой дороги, и только тот достигает ее сияющих вершин, кто не боясь усталости карабкается по ее каменным тропам”. Вспоминая Матвея Самсоновича, нашего Мусю, со всеми его особенностями и, как нам казалось, странностями, хочется сказать ему великое спасибо за ту постоянную и непреклонную энергию, с которой он пробивал нам, его сотрудникам, путь по ухабам и оврагам советской действительности. Масштаб деятельности М.С. Рабиновича мне вряд ли удалось бы охватить. Я не могу и не буду останавливаться в своей статье на его широкой научно-общественной деятельности по организации многих международных конференций, по сотрудничеству с зарубежными лабораториями, по организации Научного совета при Президиуме АН СССР по физике плазмы и журнала “Физика плазмы”. Она была чрезвычайно успешной и плодотворной и принесла ему широкую известность в научных кругах разных стран.

Выбор направления исследований — одна из труднейших задач в физике. Очень часто мы бросаемся следовать за модой, либо остаемся в рамках традиционных задач, формулируемых как приоритетные, прорывные и т.п. направления, вычисляем теперь индекс Хирша и рейтинг журнала. Для М.С. Рабиновича были характерны широкая образованность и интерес ко всем разделам физики. Он глубоко чувствовал и осознавал широкий круг новых, только что проклюнувшихся идей и всячески старался способствовать их развитию. Матвей Самсонович ощущал ту неуловимую прелесть чуть мелькнувших идей и явлений, которые открывают новые горизонты познания природы. А его деятельный и живой характер требовал незамедлительной реализации открывающихся перспектив.

Начало 60-х годов. Неудача попыток получить высокотемпературную плазму на крупных тороидальных установках с током. Крах спитцеровских стеллараторов с прямолинейными участками магнитного поля. Нет еще докладов М.С. Иоффе о стабилизации конвективной неустойчивости его знаменитыми палками и доклада К.А. Разумовой о первых успехах на токамаках по подавлению крупномасштабных МГД-колебаний и достижению температуры электронов в 200 эВ. Но А.И. Морозов и Л.М. Коврижных показывают принципиальную возможность существования замкнутых магнитных поверхностей в системах с винтовыми полями, и Матвей Самсонович с жаром поддерживает идеи Л.М. Коврижных о создании чисто тороидального стелларатора без прямолинейных участков. При этом формулируется

идея внешней инъекции плазмы во избежание неустойчивостей, вызываемых тороидальным током. Программа создания и экспериментов на “Малом Ливне”, так называлась эта установка, была реализована несмотря на более чем скептическое к ней отношение Л.А. Арцимовича и равнодушные В.И. Векслера. И среди участников работ по подготовке экспериментов велись жаркие споры по методам инъекции плазмы. До сих пор помню дискуссию на Ученом совете лаборатории по поводу той схемы инъекции, на которой настаивал Матвей Самсонович, по инъекции плазмы из четырех искровых пушек поперек магнитного поля.

Рисунок 1 демонстрирует первую страницу из публикации первых экспериментов. Работа была представлена академиком Л.А. Арцимовичем, что свидетельствует о той творческой обстановке, которая царил в те годы в АН СССР и Министерстве среднего машиностроения. По сути дела, это был первый результат о преодолении ограничения Бома.

На протяжении всех лет М.С. Рабинович придавал первостепенное значение работам в области высокотемпературной плазмы, как исследованию наиболее важных явлений в физике ионизированных газов. В нынешнее время достигнуты блестящие результаты на стеллараторах LHD в Японии и Wendelstein-7X в Германии. Что касается нашей программы, то следующий решительный шаг был сделан строительством и запуском в 1975 г. стелларатора Ливень-2 (Л-2), а затем созданием гиротронного комплекса для электронно-циклотронного нагрева плазмы МИГ-1. При своем запуске Ливень-2 являлся самой крупной машиной в Европе. Параллельно с созданием Л-2 шло возрождение и развитие стеллараторной программы в Германии и Японии. Результатом стеллараторных исследований явилось установление общности явлений удержания плазмы в токамаках и стеллараторах и решающей роли микротурбулентности плазмы в процессах аномального переноса. При этом на Л-2 впервые было показано, что дрейфовая турбулентность столь высока, что представляет собой дрейфовые вихри (Физика плазмы, 1993).

Гиротронный комплекс МИГ-1 сменили затем комплексы МИГ-2 и МИГ-3. Последний позволил в настоящее время вести изучение явлений в высокотемпературной плазме при рекордных удельных энергозатратах. Это открывает новые возможности по изучению роли коротковолновой микротурбулентности в аномальном переносе.

Все семидесятые годы были чрезвычайно напряженными в жизни Матвея Самсоновича. Создание в эти годы стелларатора Л-2 и системы электронно-циклотронного нагрева в условиях

Доклады Академии наук СССР  
1965. Том 160, № 6

ФИЗИКА

Г. М. БАТАНОВ, М. С. БЕРЕЖЕЦКИЙ, С. Е. ГРЕБЕНЩИКОВ,  
Н. М. ЗВЕРЕВ, А. П. ПОПРЯДУХИН, М. С. РАБИНОВИЧ,  
И. С. СВИТНИКОВА, И. С. ШНИГЕЛЬ

**МАГНИТНЫЕ ПОВЕРХНОСТИ И УДЕРЖАНИЕ ПЛАЗМЫ  
ВИНТОВЫМИ ПОЛЯМИ В СТЕЛЛАРАТОРЕ  
С ВНЕШНЕЙ ИНЖЕКЦИЕЙ**

(Представлено академиком Л. А. Арцимовичем 23 IX 1964)

1. Исследование поведения плазмы в винтовых магнитных полях в установках, получивших название стелларатор, ведутся уже более 10 лет (см., например, (1-3)). Основное внимание в этих работах было сосредоточено на омическом нагреве плазмы, создаваемой током. Однако до сих пор не было исследовано стабилизирующее действие винтовых обмоток на бестоковую плазму, не проведены экспериментальные исследования существования замкнутых магнитных поверхностей, не осуществлялась внешняя инжекция плазмы. Все эти вопросы были исследованы нами на замкнутой тороидальной установке с двухзаходным винтовым полем. Было показано существование магнитных поверхностей при отсутствии сильных резонансных возмущений, проведено исследование влияния резонансных возмущений, осуществлена инжекция плазмы в ловушку и показано стабилизирующее действие винтовых обмоток на бестоковую плазму.

2. Вакуумная камера установки (большой диаметр 1200 мм, малый 100 мм) выполнена из нержавеющей немагнитной стали толщиной 2 мм. Вокруг камеры по всей ее длине размещена обмотка продольного поля и обмотка, создающая двухзаходное винтовое поле. Магнитные поля — переменные во времени. Время подъема полей до максимального значения 2,7 мсек, постоянная времени спада 7 мсек. Максимальное значение продольного поля 10 000 эрст. Параметр  $\epsilon$ , равный отношению величины основной гармоники винтового поля к величине продольного, может быть плавно изменен в пределах  $0,71 \div 0,33$ . Угол наклона винтовой обмотки  $\sim 45^\circ$ . Обмотки питаются от конденсаторной батареи (запасаемая энергия равна 450 кдж). Камера снабжена рядом патрубков, используемых для откачки, инжекции плазмы и диагностики.

3. Как известно, в стеллараторных полях при отсутствии сильных возмущений должны существовать замкнутые магнитные поверхности, образуемые силовой линией за счет преобразования поворота при многократном прохождении ее вокруг тора. При определенном значении угла прокручивания силовые линии данной поверхности замыкаются сами на себя через некоторое число оборотов. В этих условиях наличие возмущающих полей может приводить к резонансному (пространственная структура возмущения совпадает со структурой невозмущенной поверхности) искажению поверхностей, в частности, к их расщеплению, образованию розеток, а в случае очень сильных возмущений и к полному разрушению. Для проверки факта существования поверхностей, их формы и исследования резонансов были предприняты подробные измерения. Измерения производились с помощью импульсной (длительность импульса  $\sim 3$  мсек) электронной пушки и маленького зонда размером  $3 \times 3$  мм<sup>2</sup>\*, который перехватывал электронный пучок на каком-либо

\* Можно было считать, что при таких размерах зонда можно пренебречь размером ларморовского радиуса электронов, который составлял  $6 \cdot 10^{-2}$  мм, и считать, что электроны движутся точно по силовым линиям магнитного поля.

1293

Рис. 1.

плановой экономики было возможно только исключительно благодаря замечательным свойствам его личности: широте натуры и силе интеллекта. Так, плита из нержавеющей стали для установки магнитных катушек могла быть выточена только на самом крупном в стране карусельном станке. Для этого недостаточно было решения комиссии Правительства: завод был загружен военными заказами. Надо было найти убедительные слова при личном контакте с главным инженером и директором. Аналогичная ситуация возникла и при создании модулятора комплекса МИГ-1.

Развитие работ по физике плазмы в ФИАН во многом обязано Владимиру Иосифовичу Векслеру, сформулировавшему блестящую идею когерентного ускорения сгустков плазмы давлением сверхвысокочастотных волн дм или см диапазона. При размере сгустков плазмы меньше длины волны рассеяние отдельных электронов когерентно и поэтому сечение рассеяния сгустка пропорционально квадрату числа электронов. При сантиметровых размерах сгустков с концентрацией  $\sim 10^{12} \text{ см}^{-3}$  сечение рассеяния сгустка порядка его размеров и электроны получают импульс порядка импульса волны. Попытка осуществить эту блестящую идею привела к созданию в стенах лаборатории мощных импульсных генераторов дм диапазона на основе РЛС-техники, но окончилась глубоким разочарованием. Рабиновичу предстояла трудная задача реорганизовать исследования в условиях такой неудовлетворенности результатами экспериментов. И Матвей Самсонович поддержал идею проверить простые закономерности течения импульсных струй разряженной плазмы в неоднородных сильных микроволновых полях: свободный пролет через квазипотенциальную яму в магнитном поле при гирочастоте электронов выше круговой частоты поля и эффект торможения на квазипотенциальном барьере при движении поперек волновода. А далее планировалось изучить фокусировку струи разряженной плазмы в поле  $TE_{01}$  волны и удержание в резонаторе в трехмерной микроволновой ловушке. Природа, как всегда, оказалась сложнее наших моделей и фантазий. Можно было бы долго рассказывать о порой трагикомических эпизодах наших экспериментов. Но в итоге пришли к экспериментальному открытию параметрического возбуждения ленгмюровских волн и ускорению в них электронов. Этому способствовали работы В.П. Сирина по параметрическим неустойчивостям ленгмюровских волн в сильных высокочастотных однородных полях, хотя они не предсказывали возникновения “аномального” нагрева и ускорения электронов. До сахаровского коллапса ленгмюровских волн (1972) было еще далеко. Успех экспериментальных исследований параметрических неустойчивостей и ускорения электронов был обеспечен той базой мощных дм

генераторов, которые были созданы для изучения радиационного ускорения плазмы. Такой базы не было в зарубежных лабораториях за исключением группы Консоли во Франции. Здесь нельзя не упомянуть о нескольких обнаруженных экспериментально новых эффектах. Это, в частности, обнаружение генерации групп быстрых электронов в замагниченной плазме при резонансе частоты волны накачки с субгармониками потенциальных волн, открытие нелинейной прозрачности плазмы с концентрацией выше критической, эффект ускорения электронов в плазме с докритической плотностью в результате кинетической неустойчивости ленгмюровских волн. Одним из замечательных результатов в этой серии исследований можно назвать наблюдение в экспериментах группы К.Ф. Сергейчева генерации быстрых электронов в результате коллапса ленгмюровских волн (ЖЭТФ, 1989).

На рис. 2 представлена первая страница доклада, прочитанного Матвеем Самсоновичем в 1974 г. в Токио на международной конференции по физике плазмы и термоядерному синтезу.

Как ни удивительно, проблема нелинейного возбуждения волн в горячей плазме токамаков и стеллараторов при электронно-циклотронном нагреве плазмы вновь встала в последние годы (Е.З. Гусаков, А.Ю. Попов. Письма в ЖЭТФ, 2010).

Преждевременная кончина в 1966 г. В.И. Векслера серьезно сказалась на жизни лаборатории. Середина и конец 60-х годов характеризовались острым дефицитом финансирования и получения фондов на новое оборудование. В этих условиях М.С. Рабинович воспользовался первой же возможностью получить заказ на исследования от промышленности. И такие работы сотрудниками лаборатории стали интенсивно вестись с начала 70-х годов при активной поддержке академика А.М. Прохорова. Это позволило Матвею Самсоновичу обеспечить финансию и, что особенно важно, фондами на оборудование все направления исследований, как уже ведущихся, так и вновь инициированных. Поддержка А.М. Прохорова в эти годы играла решающую роль во всей деятельности Матвея Самсоновича. В те годы ярко проявлялось влияние и активность партийной организации ФИАН в организации деятельности научных коллективов. Матвей Самсонович безусловно был ярким представителем отечественной интеллигенции в КПСС. Он не только вел интереснейший семинар по темам экономики и политики. Его перу принадлежал новый устав ФИАН, который широко дискутировался во всех подразделениях. В это время М.С. Рабинович выяснил, что дополнительное финансирование, которое институт получает за работы, выполняемые для промышленности, используются только ла-

## ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ И "АНОМАЛЬНОГО НАГРЕВА" ПЛАЗМЫ

Г.М. БАТАНОВ, М.С. РАБИНОВИЧ  
Физический институт им. П.Н. Лебедева  
Академии наук СССР,  
Москва,  
Союз Советских Социалистических Республик

### Abstract-Аннотация

#### EXPERIMENTAL STUDY OF PARAMETRIC INSTABILITIES AND ANOMALOUS HEATING IN PLASMA.

Over the last few years the study of the dissipation of electromagnetic wave energy in a hot plasma has become perhaps one of the main problems of hot plasma physics and controlled thermonuclear fusion. The focus of attention is on the processes by which electromagnetic energy is transformed into potential plasma waves and the processes involving relaxation of the latter. In this paper the authors summarize the experimental research into these processes conducted at the Lebedev Physics Institute over the 10 cm wave band. In the case of an isotropic plasma the authors recorded non-linear generation of Langmuir noise, the energy density of which was found to be comparable, in order of magnitude, with that of a pump wave. They detected the generation of fast electron streams, the non-stationary character of the latter with respect to time, and non-linear transillumination of the plasma layer. In the case of a magnetoactive plasma they studied the parametric excitation of oscillations at the upper hybrid frequency during its resonance with the first overtone of the pump wave. At the same time as excitation of the plasma noises they detected generation of fast electron streams, in the energy spectrum of which they recorded separate groups. It was also found that the effective collision frequency increases by 1-3 orders, compared to the pair collision frequency. In the region of magnetic waves close to the electron cyclotron resonance the authors observed forced Mandelstam-Brillouin scattering and kinetic instability of the plasma. It was found that the excitation of Langmuir ion noises preceded "anomalous absorption" of waves and "anomalous heating" of electrons. The authors further consider the possibility of an experimental study of anomalous heating in plasma in the region of the lower hybrid frequencies, using the Institute's L-2 stellarator.

#### ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНОЕ ИССЛЕДОВАНИЕ ПАРАМЕТРИЧЕСКИХ НЕУСТОЙЧИВОСТЕЙ И "АНОМАЛЬНОГО НАГРЕВА" ПЛАЗМЫ.

Изучение диссипации энергии электромагнитных волн в горячей плазме за последние годы становится едва ли не одной из центральных проблем физики горячей плазмы и проблемы управляемого термоядерного синтеза. Большое внимание здесь привлекают процессы трансформации энергии электромагнитного излучения в потенциальные плазменные волны и процессы релаксации последних. В докладе подводится итог экспериментальных исследований этих процессов, выполненных в ФИАН в 10 см диапазоне длин волн. В случае изотропной плазмы была зарегистрирована нелинейная генерация ленгмюровских шумов, плотность энергии которых по порядку величины оказалась сравнимой с плотностью энергии в волне накачки. При этом были обнаружены явления генерации потоков быстрых электронов, его нестационарности во времени и явление нелинейного просветления плазменного слоя. В случае магнитоактивной плазмы изучено параметрическое возбуждение колебаний на верхней гибридной частоте при резонансе ее с первым обертоном волны накачки. Одновременно с возбуждением плазменных шумов была обнаружена генерация потоков быстрых электронов, в энергетическом спектре которых зарегистрированы отдельные группы. Было установлено также, что эффективная частота столкновений возрастает на  $1 \div 3$  порядка по сравнению с частотой парных столкновений. В области магнитных полей, близких к электронному циклотронному резонансу, наблюдалось вынужденное рассеяние Мандельштама-Бриллюэна и кинетическая неустойчивость плазмы. При этом оказалось, что возбуждение ленгмюровских ионных шумов предшествует "аномальному поглощению" волн и "аномальному нагреву" электронов. В работе рассматривается также вопрос о возможности экспериментального изучения процессов "аномального нагрева" плазмы в области нижних гибридных частот на стеллараторе ФИАН "Л-2".

625

Рис. 2.

бораториями квантовой радиофизики и колебаний, хотя эти дополнительные ресурсы могут распределяться дирекцией на все подразделения ФИАН. Рабиновичу удалось добиться именно такого передела финансов. Легко вообразить в связи с этим реакцию фиановцев в различных подразделениях и то уважение и восхищение, которое высказывалось в его адрес.

Исследования аномального нагрева электронов бесстолкновительной плазмы и параметрической неустойчивости вылились позднее, в связи с работами по заказам промышленности, в изучение генерации плазменного факела на поверхности твердых тел и генерации быстрых электронов в области плазменного резонанса, а также в изучение физики микроволновых разрядов в газах в волновых пучках. Результатом этих исследований было обнаружение высоких коэффициентов преобразования микроволн в энергию пучка быстрых электронов (эффект, вызванный самопрокидыванием ленгмюровских колебаний в области резонанса), обнаружение новой формы ионизационной волны в газах, возникающей как результат ионизационно-перегревной неустойчивости несамостоятельного разряда в микроволновом пучке, получение рекордных концентраций F-центров в кристаллах LiF в поверхностных слоях нанометровой толщины. На рис. 3 представлена первая страница из одной публикации с участием Матвея Самсоновича. Созданная в те годы техника мощных генераторов микроволн позволила в последующие годы выполнить исследования по плазмохимии в микроволновых пучках (Труды ИОФАН. Т. 47. М: Наука, 1994). В частности, была показана экологическая опасность микроволновых разрядов в стратосфере.

Матвей Самсонович был неистощим в постановке новых экспериментов. Но она не проходила безболезненно, порой возникали критические ситуации. Подход В.П. Силина к нелинейному взаимодействию волн в сильном поле не был единственным среди теоретиков лаборатории. Другой подход развивали В.Н. Цытович, Л.М. Коврижных, И.С. Данилкин. Еще до перестройки экспериментов по радиационному ускорению сгустков плазмы были инициированы эксперименты по рассеянию интенсивного лазерного пучка в плазме. Это было характерно для Рабиновича. Он осознавал новые возможности новых когерентных источников света и горел нетерпением использовать их в экспериментах. Согласно одномерной теории Цытовича ожидался сильный эффект рассеяния. Эксперимент, на который было затрачено группой М.Д. Райзера много усилий и ресурсов, не подтверждал предсказания одномерной модели. Работа топталась на месте, и было неясно, что делать дальше. Значительно позже Л.М. Коврижных показал, что в трехмерном случае эффект ниже на три порядка.

Матвей Самсонович требовал прекращения эксперимента, что экспериментаторам (П.С. Стрелкову и А.Г. Франк), потратившим массу усилий и времени, казалось еще рано. Тем не менее им пришлось смириться и заняться другими исследованиями.

Безусловной заслугой М.С. Рабиновича является постановка и развитие работ по релятивистской СВЧ-электронике. Идеи использования релятивистских пучков электронов для генерации электромагнитных волн были близки его сердцу. Нельзя забывать, что он выступал оппонентом у А.М. Прохорова при защите Александром Михайловичем докторской диссертации. Плазма как среда, которая может быть использована для генерации мощного излучения, была ему также понятна и близка. Еще в 1960 г. Л.М. Коврижных и А.А. Рухадзе независимо от Бунемана до опубликования его работы в Phys. Rev. послали в ЖЭТФ свою статью о неустойчивости плазмы с током. А уже в 1961 г. А.А. Рухадзе показал, что при взаимодействии релятивистского пучка с плазмой инкремент черенковской неустойчивости обратно пропорционален гамма-фактору, что должно вести к сужению спектра возбуждаемой пучком волны и росту эффективности преобразования энергии пучка в энергию волн. Энтузиазму Матвея Самсоновича не было предела, когда он познакомился с источниками релятивистских пучков не длительности, использующих взрывную эмиссию холодных катодов, позволяющих получать кА токи пучков в сотни кВ. Эти работы в США только что были рассекречены. Идея использования таких пучков в вакуумной СВЧ-электронике, в вакуумных замедляющих структурах (карсинотронах, они же ЛБВ) стала приоритетной при создании группой М.Д. Райзера первого ускорителя сверхточного релятивистского пучка (М.С. Рабинович, А.А. Рухадзе, Г.П. Мхеидзе, М.Д. Райзер). Тесные дружеские связи Матвея Самсоновича с горьковскими физиками привели к успешному запуску группой М.Д. Райзера совместно с горьковчанами карсинотрона с рекордной мощностью 350 МВт и рекордным КПД 12% (Письма в ЖЭТФ, 1973). Этот успех дал сильный толчок разработкам у нас в стране и за рубежом. Исследования развернулись в Горьком и в Томске, а затем в Екатеринбурге, в США и Франции. Гигантские не импульсы см излучения были использованы в радиолокации. В стенах плазменного корпуса методом народной стройки создали новые помещения с рентгеновской защитой для генераторов сверхточных пучков в группах Г.П. Мхеидзе, П.С. Стрелкова, М.Д. Райзера, возглавляемых А.А. Рухадзе.

Для использования гигантских импульсов см диапазона длин волн в экспериментах с плазмой были реализованы крупнейшие в те годы проекты по созданию стендов с генераторами на пучках

Письма в ЖТФ, том 5, вып. 7

12 апреля 1979 г.

РЕАКТИВНАЯ ТЯГА СВЧ-РАЗРЯДА  
В НЕОДНОРОДНОМ ГАЗОВОМ ПОТОКЕГ.М. Б а т а н о в, И.А. К о с с ы й,  
М.С. Р а б и н о в и ч

Преимущества ракетного двигателя, использующего энергию внешнего электромагнитного излучения, в частности, волны дециметрового диапазона, были рассмотрены К.Э. Циолковским еще в 1924 г. [1]. Различные способы создания реактивной тяги при взаимодействии излучения с веществом и другие аспекты настоящей проблемы рассматривались в работах [2-7]. В частности, в [3] был проведен анализ проблемы генерации мощного СВЧ излучения, распространения его в атмосфере, формирования СВЧ луча. Однако до сих пор остается открытым вопрос о достаточно экономичном двигателе, использующем энергию микроволн. Основная трудность здесь заключается в том, что при высокой интенсивности излучения разряд, как правило, имеет высокую концентрацию и температуру заряженных частиц, что ведет к сильному отражению волн и, следовательно, низкому КПД использования энергии излучения. В этой связи представляется перспективным использование таких плазменных конфигураций, в которых концентрация заряженных частиц плавно нарастала бы от низких значений до величин выше критической  $n_c = \pi m c^2 / e^2 \lambda^2$  ( $e$ ,  $m$ ,  $c$ ,  $\lambda$  - заряд и масса электрона, скорость света, длина волны). Как известно [8], в этом случае в области плазменного резонанса при косом падении волны в случае  $p$ -поляризации может иметь место почти полное поглощение энергии волн. Реализация такого разряда не представляет труда. Действительно, если газовое сопло помещено в вакууме в потоке электромагнитного излучения, то расширение газа и образующейся при его ионизации плазмы приводит к плавному в масштабе деблевского радиуса  $r_{De} = v_{Te} / \omega$  профилю концентрации заряженных частиц, необходимого для высоких значений коэффициента поглощения.

432

Рис. 3.

релятивистских электронов в МРТИ в Москве и ИПФ АН в Горьком. И у истоков этого развития стоял М.С. Рабинович.

Идея кумуляции и разрывов токовых слоев, моделирующих процессы солнечных вспышек,

теория которых развивалась С.И. Сыроватским в теоретическом отделе ФИАН, была воспринята Матвеем Самсоновичем с энтузиазмом. Но постановка экспериментов, как всегда в те годы, требовала обоснования и утверждения на Ученом

## Воздействие света на вещество

- **Воздействие света на вещество и пучки частиц в магнитной ловушке**  
ЖЭТФ. 1964. Т. 47(2). С. 782
- **Лавинная ионизация сред под действием вспышки интенсивного света**  
ЖЭТФ. 1965. Т. 48(3). С. 290
- **Световая искра в магнитном поле**  
Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 1(1). С. 9
- **Обнаружение быстрого ореола фотоионизации и облака концентрированной долгоживущей ионизации от ударной волны луча лазера**  
Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 1(6). С. 18
- **Поляризация ореола ионизации световой искры в постоянном электрическом поле**  
Письма в ЖЭТФ. 1965. Т. 2(11). С. 503

Рис. 4.

совете лаборатории, которая тогда (1964 г.) называлась “Физика плазмы и плазменные ускорители”. И целый ряд почтенных членов совета не видели, какое непосредственное отношение токовые слои могут иметь к ускорению. Вопрос ставился прямо: можно ли так сформулировать эксперимент, что удастся наблюдать хотя бы ускоренные электроны. На это не было еще и теоретического предсказания, но зато было хорошо известно о возбуждении турбулентности и о торможении пучка в экспериментах А.М. Стефановского по плазменному бетатрону. Матвей Самсонович добился постановки экспериментов. Как все теоретики, он был нетерпелив и желал сразу же получить положительный результат. И первые экспериментальные трудности, вызванные возникновением турбулентного сопротивления (вспомним Бунемана, Коврижных и Рухадзе), и постоянное давление со стороны критиков программы чуть было не привели к прекращению начатых исследований. Автору этих строк стоили тяжелого и резкого разговора с Матвеем Самсоновичем попытки свернуть эксперименты. С другой стороны, постановку этих экспериментов поддерживал не только С.И. Сыроватский, но и глава теоретдела В.Л. Гинзбург. В полной мере проявился яркий талант Анны Глебовны Франк, которая предложила поднять проводимость плазмы за счет увеличения самой турбулентной проводимости, повышая концентрацию плазмы.

Авторы экспериментов вместе с создателем теории С.И. Сыроватским были удостоены Государственной премии. А схема постановки наших экспериментов до сих пор остается классической и еще никем не повторена.

Матвей Самсонович легко распознавал и ценил в человеке таланты физика и всегда с радостью и увлечением поддерживал такого человека. Его любимым и высоко ценимым сотрудником безусловно был Г.А. Аскарьян, которому он прощал все его шутки и нелестные высказывания в свой адрес. Хорошо известна история с кирпичом, положенным Гургеном Аскарьяном в портфель Матвея Самсоновича на спор с В.Н. Цытовичем, что Муся не обратит внимания на вложение, т.к. не открывает портфель, а носит его по привычке. Идеи Гургена Ашотовича о постановке экспериментов по изучению процессов в лазерных искрах, по самофокусировке и по распространению света были не только поддержаны и одобрены, но была создана группа экспериментаторов во главе с ним. Работы этой группы привели к открытию ряда новых явлений: нелинейной рефракции в оптике и акустике, ореольного рассеяния света, светореактивного давления и абляционного излучения мощного звука, спонтанных магнитных полей и ореола ионизации в лазерных искрах, дипольного электрического момента у световой искры (названия ряда публикаций приведены на рис. 4).



Одним из направлений исследований взаимодействия мощного лазерного излучения с веществом, инициированных М.С. Рабиновичем, стало изучение процессов силового воздействия лазерного излучения на атомы и молекулы, в том числе процессов многофотонной ионизации. Идея силового воздействия света на атомы и молекулы, в том числе резонансного воздействия, родственна идеям когерентного ускорения сгустков плазмы и их фокусировки в пучках микроволн. И, естественно, развивавшиеся Гургеном Ашотовичем идеи о воздействии градиентов сильной волны на атомы и молекулы и о возбуждении и диссоциации молекул в интенсивном световом поле были близки Матвею Самсоновичу. Достаточно упомянуть стоящую на рис. 4 первой публикацию Г.А. Аскарьяна, Н.Б. Делоне и М.С. Рабиновича в ЖЭТФ. Но нет сомнения, что решающее воздействие на Матвея Самсоновича оказала работа Л.В. Келдыша по ионизации атомов сильным лазерным полем (ЖЭТФ, 1964), и в 1965 г. он поддержал программу экспериментальных исследований группы Н.Б. Делоне. Пионерские работы этой группы вызвали живейший отклик в различных лабораториях у нас и за рубежом и оказали влияние на весь ход дальнейших исследований в области многофотонной физики и физики взаимодействия атомов и молекул с сильным лазерным полем. Как всегда, Рабинович поддерживал сотрудничество лаборатории с зарубежными группами в США, Канаде, Франции, Венгрии и содействовал организации международных конференций по взаимодействию атомов с сильным полем, которые проходили в Москве, Ташкенте и Будапеште. В 1980 г. под редакцией

М.С. Рабиновича в свет вышла книга “Многофотонная ионизация атомов”. В 1978 г. работы научной группы, занимавшейся экспериментальным изучением процессов многофотонной ионизации, получили новое направление — изучение воздействия вынужденного светового давления на атомы в поле стоячей световой волны. Группу возглавила Г.А. Рябенко. В 1981 г. впервые было зарегистрировано отклонение атомов натрия из пучка за счет вынужденного светового давления (В.А. Гринчук, А.П. Казанцев, Е.Д. Кузин, М.Л. Нагаева, Г.А. Рябенко, Г.И. Сурдучович, В.Р. Яковлев. Письма в ЖЭТФ, 1981).

В настоящее время проблема силового воздействия света на атомы вылилась в широкие исследования разнообразных явлений торможения и ускорения частиц, селективного отклонения и рассеяния атомных пучков, охлаждения атомов и ионов до сверхнизких температур. Развитие этих работ принесло славу теперь широко известным зарубежным группам и ученым. Но мы не должны забывать, что источник этих широких исследований был открыт и взлелеян М.С. Рабиновичем.

Матвей Самсонович ушел из жизни на пике развития лаборатории, когда в ее составе было 130 человек, конструкторская группа и мастерская. Он мужественно сражался с поразившим его тяжелейшим недугом. Девяностые и двухтысячные годы вдвое сократили наш коллектив. Но ряд тех направлений исследований, которые были инициированы неумной энергией Матвея Самсоновича, нам удастся сохранить до сих пор, и по сей день, они остаются актуальными в физике плазмы.