

## Александр Викторович Гуревич

(к 90-летию со дня рождения)

PACS number: 01.60. + q

19 сентября 2020 г. исполняется девяносто лет замечательному физико-теоретику, академику Российской академии наук (РАН) Александру Викторовичу Гуревичу.

Научная деятельность А.В. Гуревича началась в 1954 г. в Институте земного магнетизма, ионосферы и распространения радиоволн Академии наук (ИЗМИ-РАНе), где он работал в лаборатории Я.Л. Альперта. По приглашению В.Л. Гинзбурга в 1957 г. он поступил на работу в Отдел теоретической физики Физического института им. П.Н. Лебедева Академии наук (ФИАН), с которым связана вся его дальнейшая научная жизнь и где им выполнены выдающиеся работы по радиофизике, астрофизике, кинетической теории плазмы и математической физике.

Уже первые работы А.В. Гуревича по теории убегания электронов приобрели мировую известность. В экспериментах 1950-х годов по удержанию плазмы наблюдался значительный избыток электронов с большими энергиями по сравнению с тем количеством, которое должно было бы наблюдаться при их равновесном распределении по скоростям. Эти электроны, унося значительную долю энергии, препятствовали эффективному нагреву плазмы. Явление требовало теоретического истолкования. А.В. Гуревич рассмотрел задачу о формировании функции распределения быстрых электронов под действием постоянного электрического поля с учётом их столкновений с тепловыми электронами и ионами плазмы. Особенностью этих столкновений является падение сечений рассеяния, а следовательно, и силы торможения, с ростом энергии частиц. А.В. Гуревич построил последовательную кинетическую теорию эффекта, количественно описав поток быстрых частиц из области тепловых энергий в область высоких энергий. Теория дала экспоненциально сильное отличие от простых аналитических оценок. Неожиданным оказалось то, что даже в очень слабом электрическом поле в плазме возникает неравновесное состояние с немаксвелловской функцией распределения. Именно этим плазма принципиально отличается от газа. Ранее кинетическая теория рассматривалась в основном как вспомогательный способ получения коэффициентов переноса в рамках гидродинамического подхода (С. Чепмен и Д. Энског). Построение же теории убегających электронов явилось важным этапом развития кинетики плазмы. При этом кинетическая теория выступает не вспомогательным инструментом гидродинамики, а непосредственным инструментом описания сущности физического явления. В частности, кинети-



Александр Викторович Гуревич

ческий подход лежит в основе пионерской работы А.В. Гуревича по теории обтекания тел, движущихся в ионосферной плазме, выполненной в 1957 году к запуску первого спутника. Эта теория, развитая в совместных работах с Я.Л. Альпертом и Л.П. Питаевским, получила в дальнейшем широкое применение.

В 1992 году А.В. Гуревич, основываясь на представлении об убегających электронах, предложил новый механизм пробоя газов. Идея состояла в том, что в электрическом поле затравочный "убегающий" электрон ионизует нейтральный газ за счёт соударений, рождая при этом, наряду с большим количеством электронов малых энергий, некоторое количество электронов с энергией, достаточной для преодоления ионизационных потерь. Эти вновь рождённые быстрые электроны в свою очередь будут ускоряться электрическим полем и ионизовать газ. Тем самым будет нарастать лавина быстрых элект-

ронов. Кинетическая теория этого явления, построенная совместно с К.П. Зыбиным, Г.М. Милихом и Р. Расселом-Дюпре, показала, что для этого явления пороговое электрическое поле в десять раз меньше, чем при обычном пробое, зато пространственный масштаб нарастания лавины при атмосферном давлении составляет около сотни метров. Эти работы стали широко популярны у специалистов по атмосферному электричеству. На сегодняшний день это единственная теория, позволяющая объяснить такие явления, как наблюдаемые всплески интенсивного рентгеновского излучения во время гроз, а также приходящие со стороны Земли мощные вспышки гамма-излучения, регистрируемые на искусственных спутниках (ТGF). Важно также, что измерения электрических полей в грозных облаках всегда давали значения полей, недостаточные для пробоя с точки зрения традиционного механизма. А.В. Гуревичем было высказано предположение, что затравочными частицами для пробоя на убегающих электронах могли бы быть электроны вторичных космических лучей; разработана обширная программа одновременных наблюдений прохождения широких атмосферных ливней космических лучей и характерных для грозных разрядов всплесков гамма-излучения, радиоизлучения и потоков быстрых электронов. Исследования, проводимые по инициативе А.В. Гуревича на Тянь-Шаньской высокогорной научной станции (ТШВНС) ФИАНа, выявили корреляцию между этими явлениями, предсказанную теорией пробоя на убегающих электронах.

Особое место в творчестве А.В. Гуревича занимают проблемы радиофизики и физики нелинейных явлений. Ещё в 1960 году он совместно с В.Л. Гинзбургом написал обзор "Нелинейные явления в плазме (ионосфере)" для журнала "Успехи физических наук" (УФН), ставший широко известным, он цитируется и по сей день. Для А.В. Гуревича исследования ионосферной и космической плазмы важны не только потому, что плазма — основное состояние вещества вне атмосферы Земли, но и потому, что именно там, по его мнению, плазма проявляет свои свойства в более чистом виде, что открывает путь к развитию ясных теоретических представлений (в отличие от лабораторных установок, где границы существенно влияют на физику процесса). В обширном цикле работ была построена теория нелинейной модификации ионосферы при воздействии на неё мощных радиоволн. Было предсказано, что такие волны должны вызывать в ионосферной плазме резонансную неустойчивость, приводящую к нелинейному поглощению радиоволны, к нагреву электронов и к искусственному свечению ионосферы. Нелинейность приводит к разбиению области нагрева на узкие вытянутые неоднородности с пониженной плотностью плазмы. Возникает нелинейная самофокусировка падающей волны на генерируемых ею мелкомасштабных неоднородностях. В возмущённой радиоволновой зоне генерируются разнообразные плазменные волны, что приводит к развитию нелинейной плазменной турбулентности. Она проявляется в ускорении электронов, в возникновении искусственного радиоизлучения и устойчивых плазменных структур.

Важность теоретических работ А.В. Гуревича по взаимодействию плазмы с мощным микроволновым излучением стимулировали в СССР, США и на севере

Европы создание специальных радиостендов для воздействия на ионосферу и комплексы разнообразной аппаратуры для её диагностики. Работы по нелинейным явлениям в ионосфере принесли А.В. Гуревичу международную известность. В 1990 г. он был удостоен премии им. Эплтона Королевского общества и Международного научного радиосоюза.

В 1970-е годы А.В. Гуревич и Л.П. Питаевский поставили и решили задачу о структуре бездиссипативной ударной волны в диспергирующей среде (задача Гуревича–Питаевского). Их работа была отмечена премией им. Л.Д. Ландау АН СССР за 1980 г. Как известно, возмущение бездиссипативной среды в отсутствие дисперсии через конечное время становится сингулярным. Было показано, что при наличии дисперсии вместо этого возникает расширяющаяся область осцилляций, эти осцилляции уносят энергию, появляется дополнительное торможение. Решение строилось путём усреднения уравнения Кортевега–Де Вриза методом Уизема. Авторы продемонстрировали преимущество этого метода для построения многосолитонных решений по сравнению с методом обратной задачи рассеяния. Это обстоятельство привлекло внимание математиков и стало началом целого направления в исследовании точно интегрируемых уравнений.

В 1990-е годы А.В. Гуревичем с соавторами была поставлена и решена задача описания турбулентности в бездиссипативной среде с дисперсией. Было показано, что широкий класс детерминировано заданных начальных возмущений в точно интегрируемых уравнениях будет динамически эволюционировать к хаотическому состоянию, статистические характеристики которого вычисляются из начального возмущения. Этот новый вид возникновения хаоса из динамики является результатом многократного опрокидывания максимумов начальной волны, распространяющейся в бесконечной нелинейной диспергирующей среде. Интерес А.В. Гуревича к проблеме турбулентности не ограничивается бездиссипативным случаем. В 2000-е годы им были инициированы работы по теории классической гидродинамической турбулентности, в которых совместно с К.П. Зыбиным, В.А. Сиротой и А.С. Ильиным удалось существенно продвинуться в понимании структуры развитой турбулентности.

В 1980-е годы А.В. Гуревичем, В.С. Бескиным и Я.Н. Истоминым была построена теория магнитосферы пульсаров и их радиоизлучения, которая и сейчас, спустя многие годы, остаётся актуальной в понимании процессов, проходящих в окрестности нейтронных звёзд. Предложенная последовательная теория физических процессов, протекающих в окрестности вращающихся нейтронных звёзд, выявила пространственную структуру токов, текущих в магнитосфере и замыкающихся по поверхности звезды. Пондеромоторное действие этих токов приводит к наблюдаемому замедлению вращения пульсара. Это утверждение сейчас кажется тривиальным, однако 30–40 лет назад принималось астрофизиками чуть ли не в штыки. В то время считалось, что электромагнитные потери вызваны простым магнитно-дипольным излучением намагниченного тела в вакууме. В частности, теория предсказала, что угол между осью вращения звезды и магнитной осью эволюционирует в направлении эква-

тора. К сожалению, справедливость этого предсказания до сих пор невозможно проверить непосредственно, однако в настоящее время появляются всё новые и новые наблюдательные указания на правильность этого предсказания.

Далее, была разработана теория генерации когерентного радиоизлучения пульсаров. Согласно этой теории при движении плазмы в искривлённом магнитном поле звезды развивается неустойчивость, на нелинейной стадии которой генерируется радиоизлучение; фактически, до сих пор эта теория остаётся единственной теорией радиоизлучения, в которой была подробно исследована нелинейная стадия. Также, задолго до современных работ по численному моделированию, была построена кинетическая теория рождения релятивистской электрон-позитронной плазмы вблизи магнитных полюсов нейтронной звезды. Таким образом, впервые удалось связать воедино процессы в магнитосфере нейтронной звезды, рождение частиц и генерацию радиоизлучения, а авторский коллектив в 1994 г. был удостоен премии им. Л.И. Мандельштама РАН.

Наконец, отметим серию работ А.В. Гуревича и К.П. Зыбина о нелинейной стадии гравитационной (джинсовской) неустойчивости бездиссипативного самогравитирующего холодного вещества и пространственной структуре его распределения. Указанными свойствами обладает тёмное вещество, которое, по современным представлениям, определяет наблюдаемую структуру галактик и их скоплений. Я.Б. Зельдович указал, что в рассматриваемой среде через конечное время возникает особенность плотности ("блин Зельдовича"). Однако использованный им гидродинамический подход не позволяет получить решение за особенностью, и, следовательно, найти установившееся распределение вещества. А.В. Гуревич и К.П. Зыбин в 1988 г. разработали кинетическую теорию, показавшую, что процесс установления равновесия идёт через развитие за особенностью многопоточкового течения, причём число потоков, как и число особенностей, со временем нарастает. Кроме того, оказалось, что в нелинейную стадию неустойчивости первыми входят окрестности тех точек, где возмущения в максимумах плотности достигают критического значения. Универсальный характер любой дифференцируемой функции вблизи локального максимума и диктует универсальный характер возникающего в асимптотике размешанного кинетического состояния. Полученное аналитически равновесное распределение является сингулярным и хорошо описывается радиальной степенной функцией с показателем степени, близким к наблюдаемому в галактиках и их скоплениях. Таким образом, на конечной стадии развития неустойчивости образуется протяжённый самогравитирующий объект. Позднее, с развитием численных методов и повышением мощности компьютеров, подобное сингулярное распределение начали получать и в численных экспериментах. Эта серия работ была отмечена премией им. А.А. Фридмана РАН за 2005 г.

Сингулярный характер потенциала в центре гало тёмной материи является естественной причиной зарождения и дальнейшего роста чёрной дыры, для возникновения которой, однако, необходимо поглощение также и барионной материи. А.В. Гуревичем и его группой был предложен механизм роста центральной сверхмассивной

чёрной дыры за счёт поглощения ею тёмной материи и звёзд. Вычисленный темп роста гигантских чёрных дыр согласуется с наблюдениями.

А.В. Гуревича особенно интересует связь теоретических представлений с реальными природными явлениями. Поэтому он всегда стремился заниматься теоретическими проблемами, потенциально связанными с наблюдениями и экспериментами, а не изучал, по его выражению, "нечто за пределами чего-то". Так, помимо уже упомянутых ионосферных исследований А.В. Гуревич принимал участие в планировании натуральных исследований атмосферных разрядов на ТШВНС ФИАН и в интерпретации полученных данных. Кроме того, он сотрудничал с Институтом электрофизики (ИЭФ) Уральского отделения РАН, где проводились лабораторные исследования роли убегающих электронов в ионизационной волне, а также осуществлял научное руководство проектом микроспутника "Чибис" (Института космических исследований (ИКИ) РАН, НИИ ядерной физики Московского государственного университета (МГУ), ФИАН) для исследований высотных атмосферных разрядов.

Мы желаем Александру Викторовичу здоровья и бодрости духа!

*В.С. Бескин, М.А. Васильев, А.В. Гапонов-Грехов,  
Л.М. Зелёный, К.П. Зыбин, Я.Н. Истомина,  
Н.Н. Колачевский, Г.А. Месяц, Л.П. Пятаевский,  
М.О. Птицын, В.И. Ритус*