



Н. А. Иногамов. Общие сведения и научная деятельность

Родился в 1951 году в семье научных работников. Отец – к.т.н., зав. лабораторией высоких напряжений, прикладная электрофизика, занимался проблемами пробоя изоляторов на высоковольтных ЛЭП (тогда до 500 кВ). Мама – историк, д.и.н. Иногамов Н.А. окончил 110-ю математическую школу г. Ташкента в 1968 г. с серебрянной медалью, окончил ФОПФ МФТИ в 1974 году.

Научная деятельность Наиля Алимовича Иногамова самым тесным образом связана с ИТФ им. Л.Д. Ландау РАН, где он работает по основному месту работы. Он пришел сюда в 1972 году студентом 3-го курса МФТИ, сдав вступительный экзамен по квантовой механике в теоргруппу академика Льва Петровича Горькова.

Иногамов прошел все этапы развития в ИТФ. Это защита диплома в 1974 г., защита кандидатской диссертации в 1977 г. (руководитель - Сергей Иванович Анисимов, член-корреспондент АН СССР с 1987 года). Эти этапы и дальнейшая работа проходили в совместных исследованиях с член-

корреспондентом РАН Анисимовым Сергеем Ивановичем. Защита докторской диссертации в ИТФ в 1990 году. Избрание в член-корреспонденты РАН по отделению физических наук в 2019 г. С 1977 г. по настоящее время Иногамов Н.А. работает в ИТФ последовательно на должностях мнс, нс, снс, внс, гнс. На общественных началах руководит сектором «плазмы и лазеров» в ИТФ им. Ландау. Эта обязанность перешла к нему после кончины основателя сектора С.И. Анисимова в 2019 году.

В настоящее время Иногамов Н.А. координирует работу сектора в ИТФ и нескольких научных групп: группа из ЦФПИ ВНИИА им. Н.Л. Духова ГК Росатом, ОИВТ РАН Лаборатория №1.2. - лазерного воздействия руководитель: Ситников Дмитрий Сергеевич и Лаборатория №1.1. - диагностики вещества в экстремальном состоянии руководитель: Макаров Сергей Stanisлавович, ИАПУ ДВО РАН Владивосток, институт физики КФУ Казань, поддерживает постоянную связь с университетом ИТМО в Санкт-Петербурге и другими коллегами. Иногамов Н.А. находится в рабочем контакте с учеными из отдела 52 астрофизики высоких энергий ИКИ РАН.

За годы своих исследований в ИТФ им. Ландау Наиль Алимович опубликовал 343 работы, это статьи, тезисы на конференциях и две монографии. Среди высокорейтинговых публикаций в рецензируемых журналах имеются:

ЖЭТФ – 18, Письма в ЖЭТФ - 26, Physical Review B - 5, Physical Review E - 1, Physical Review Applied - 2, Appl. Surf. Sci (Q1) – 9, Appl. Phys. A (Q2) – 8, Appl. Phys. B – 2, Matter Rad. Extreme (Q1) – 1, Engineering Failure Analysis (Q1) – 1, Optics Express (Q1) – 1, Phys. Fluids (Q1) – 1, Optics Laser Techn. (Q1) – 1, Nanoscale Res. Lett. (Q2) – 1, Nanoscale (Q1) – 1, Materials Research Letters (Q1) – 1, Appl. Phys. Lett. (Q1) – 2, Physical Review Letters - 1, Sci. Adv. – 1, Nature – 1.

Кроме того, были выполнены работы, опубликованные в журналах: J. Appl. Phys. (Q2) – 4, Теплофизика высоких температур – 3, Data in Brief – 1, Optical and Quantum Electronics (Q2-Q3) – 3, Доклады академии наук (ДАН) – 5 представлены академиками Я.Б. Зельдовичем, Р.З. Сагдеевым, Письма в журнал техн. физики – 5, Квантовой электроники – 3, Contributions to Plasma Physics (Q2-Q3) – 6, Physica Scripta (Q2-Q3) – 3, J. Opt. Soc. Amer. B (Q1 на год публ.) – 1, Laser Part. Beams (Q3 в период публикации) – 2, Физика плазмы – 1, Journal Physics D: Applied Physics (Q1-Q2) – 1, Phys. Lett. A – 1 и др.

Важную группу составляют публикации, связанные с астрофизикой: Письма Астрон. Журн (ПАЖ) – 7, Monthly Notices of the Royal Astronomical Society (Q1) – 1, Astronomy and Astrophysics (Q1) – 1.

Показатели (наукометрия) по самой доступной системе “google scholar Inogamov” на 14 апреля 2025 следующие

Статистика цитирования 6837 2260

h-индекс 44 24

i10-индекс 130 70

Первая колонка = за все годы, 2-я – с 2020 года

Иногамов НА получил ряд важнейших результатов в физике взаимодействия лазерного излучения с веществом, физике высокоскоростного удара и в астрофизике. Приведем здесь основные.

--1. Не одномерные гидродинамические явления и физика высоких плотностей энергии

Главная проблема лазерного термоядерного синтеза (ЛТС) связана с неустойчивостью процесса сжатия оболочки с топливом. Лазерное излучение обжимает сферическую оболочку, под действием давления во внешней плазменной короне, оболочка сокращает свой радиус, топливо внутри сжимается, нагревается и начинается термоядерная реакция. Так обстоит дело в одномерной картине. Но в реальном мире трех измерений оболочка рассыпается по пути к пиковой компрессии. Полезный выход снижается на порядки. Потребовалось более 50 лет упорнейших работ, чтобы на установке NIF недавно достичь уровня производства термоядерной энергии, превышающего вложенную в мишень энергию. Иногамов Н.А. детально исследовал ситуацию с гидродинамическими неустойчивостями, написал две монографии и десятки статей. Что в них сделано:

Н.А. Иногамовым был открыт механизм укрупнения (усиление субгармоник) доминирующих структур (обратный или инверсный каскад), возникающих в слое турбулентного перемешивания. Инверсный – означает, что постоянно происходят укрупнения текущего пространственного масштаба турбулентного слоя за счет усиления несоизмеримых субгармоник этого масштаба. Тогда как при колмогоровской турбулентности крупный вихрь делится на мелкие – это прямой каскад, каскад дробления. См. **приложенный файл «Публикации_март 2025_Иногамов.docx»**, ссылка [279] - Astrophysics and Space Physics Reviews, см. также 1-ю статью [335], посвященную открытию данного явления.

Был аналитически определен показатель автомодельности для неустойчивости Рихтмайера-Мешкова ($2/5$ в 2D и $1/3$ в 3D) — это ссылка [265] в приложенном файле с публикациями.

Была предсказано появление внутренней ударной волны при разлете продуктов детонации в газ [331]. Причем внутренняя ударная волна ограничивает развитие неустойчивости Релея-Тейлора и тормозит перемешивание [331]. Такая ситуация наблюдалась позже в экспериментах ОИВТ РАН с взрывным МГД генератором импульсного тока (для запитки специзделий). Любопытно, данный эффект не был описан в классической монографии Станюковича и др. «Физика взрыва». Оказалось, что внешняя и внутренняя ударные волны обязательно присутствуют при разлете материальной части продуктов взрыва сверхновой в межзвездный газ (один из примеров: волокна в Крабовидной туманности).

В связи с ЛТС Иногамов Н.А. занимается работами по гидродинамике: (*) решил классическую задачу о стационарной стадии Релей--Тейлоровской неустойчивости в 2D и 3D геометрии [274,279], (*) методами ТФКП (годограф) аналитически описал структуру грибовидных образований [279], (*) нашел аналитическое решение важной задачи о 2D и 3D неустойчивости Рихтмайера--Мешкова, возникающей после прохождения ударной волны через контакт между веществами [274], (*) создал теорию автомодельности с непрерывным спектром показателя (известны были тривиальные задачи, в которых показатель определялся из размерности величин, и задачи с автомодельностью 2-го рода, изученные классиками естествознания Я.Б. Зельдовичем и др.) [332,338], (*) доказал существование изоспектральной симметрии (эквивалент преобразования Беклунда) уравнения Релея, описывающего внутренние волны в слоистой жидкости в поле тяжести [310]; (*) обнаружил цилиндрический аналог классических трохеоидальных волн Герстнера (одновременно, независимо от Абрашкина А.А. из ИПФ РАН, Нижний Новгород) [322,325].

Другие работы по указанной тематике [49,60].

--2. Комета Галлея

Чрезвычайно важной задачей, стоявшей перед Советской космической наукой в 70-е и 80-е годы, было исследование такого исторического объекта (описана в хрониках древнего Китая и Вавилона), как комета Галлея – период оборота 76 лет. Готовились и пролетели близко к комете советские космические станции Вега 1 и 2, плюс станция ЕКА «Джотто» и еще несколько станций. Были получены данные о составе кометных пылинок. Считают, что органическая составляющая пылинок причастна к зарождению жизни на Земле. Впервые, реально, органическая составляющая была зафиксирована в масс-спектрах пылинок из комы кометы Галлея.

С.И. Анисимов и В.Е. Фортов работали над защитой станции от бомбардировки пылинками. Н.А. Иногамов вместе с коллегами из ИКИ РАН (Е.Н. Евланов, В.Н. Хромов, Б.В. Зубков и др.) и Германии (Йоханн Киссель «Джотто») занимался подготовкой и последующей расшифровкой масс-спектров времяпролетного пылеударного масс-спектрометра (ПУМА - пылеударный масс-анализатор с рефлектором) [329,327,325,321-314,308,307,300]. В связи с этим прикладным заданием Н.А.Иногамов внес важный вклад в развитие физики высокоскоростного удара. Скорость удара 80 км/с такова, что на аноде прибора пылинка превращается в облачко высокозарядной плазмы при относительно небольшой температуре (50-100 эВ). Пояснение: кинетическая энергия E атома железа при скорости 80 км/с около 2 кэВ; велики расходы на ионизацию, поэтому температура существенно меньше, чем E .

Наиль Алимович исследовал разлет вещества после удара, его ионный состав, сепарацию ионов по массе в самосогласованном совместном электрическом поле бесстолкновительного плазменного облака, с одной стороны, и поле прибора, с другой стороны [329,327,325,320,318-314,300]. Удар происходит в анод. Бесстолкновительное приближение работает достаточно точно, поскольку начальный размер r_0 облачка микроны, расширение облака трехмерное, а расстояние L между вытягивающей сеткой и анодом несколько сантиметров – параметр $(r_0/L)^3$ очень мал.

В отдельном случае плазменного облака в промежутке между анодом и сеткой (не в контакте с анодом), описано, как объемный заряд формирует электронную струю, выходящую в вакуум через точку перевала электростатического потенциала [325]. То есть электроны уходят на анод из опустошаемого плазменного облака в виде струи. Т.о. описан процесс разделения зарядов первоначально нейтрального плазменного облака. Плазма при значительном своем гидродинамическом расширении является «закаленной» - ионизационное равновесие нарушено - рекомбинация играет малую роль. Механически такое истечение сходно со случаем переполнения полости Роша и переходом вещества через внутреннюю точку Лагранжа. В астрофизике данное явление играет важную роль, определяя эволюцию двойной системы за счет звездного ветра и аккреции.

Исследования гидродинамики высокоскоростного удара [307,308], плазмодинамики во внешнем электрическом поле [329,327,325,320,318-314,300] и разделения ионов по отношению заряд/масса [329,327,325,320,318-314,300] потребовались для понимания физики явлений, происходящих в приборе ПУМА (пыле-ударный масс-анализатор). ПУМА -- один из основных приборов на борту международной космической станции «Вега» и

на борту станции «Джотто», обследовавших комету Галлея в 1986 г. Успех в этом проекте – суть гордость отечественной космической науки, см. победную публикацию [319] в Nature (1986), вышедшую сразу после рандеву. Иногамов Н.А. с соавторами провел плазмохимические расчеты масс-спектров кометных частиц; показано, что это вещество имеет значительную органическую составляющую.

--3. фс лазеры

Практически важным является класс проблем, связанных с фемтосекундными (фс) лазерами. Они самым широким образом применяются в технологиях обработки материалов, в фотонике, в оптоакустике, сенсорике и телекоммуникациях. Здесь Иногамовым Н.А. получены важные результаты.

Иногамов Н.А. показал, что термомеханические явления, инициируемые фс импульсом принципиально другие, отличные от того, что происходит при воздействии наносекундного (нс) лазерного импульса [277]. Благодаря этому объяснению, ему удалось понять происхождение экспериментальной картины, в которой после фс облучения в пятне облучения на наносекундном масштабе времен после фс воздействия наблюдаются интерференционные кольца Ньютона, причем число колец растет со временем: K. Sokolowski-Tinten et al., Transient States of Matter during Short Pulse Laser Ablation, PRL, v.81, 224 (1998). Абстракт этой публикации:

Short pulse laser ablation of semiconductors and metals is studied by means of ultrafast time-resolved microscopy. The characteristic stages of the conversion of solid material into hot fluid matter undergoing ablation are identified. Initially metallic material transforms during the expansion into a transparent state with a high index of refraction.

Авторы данной революционной статьи PRL-1998 (её интерпретация [277] полностью перевернула представление о фс лазерной абляции) полагали, что в пятне нагрева вещество переходит в особое нестационарное состояние (Transient States of Matter – см. заголовок и выделенное цветом в абстракте). Они полагали, что в этом состоянии показатель преломления n высок, и его значение растет со временем до больших значений $n \gg 1$. Отсюда кольца и рост их числа.

На самом деле оказалось [277], что кольца и рост их числа связаны с отделением от твердой объемной мишени тончайшей расплавленной оболочки, динамика которой в полете управляется инерцией и капиллярными силами. Кольца в изображении пятна облучения формируются из-за

интерференции лучей, отраженных от полупрозрачной оболочки и от дна кратера [277,275,273,272,270,262,254,252,251,249,243,242,239-230,216]. Число колец растет по мере раздувания/инфляции оболочки/купола, поскольку растет число полуволн зондирующего излучения, помещающихся под куполом.

Объяснения авторов статьи PRL, v.81, 224 (1998) свидетельствуют о том, насколько невообразимыми на том этапе развития науки казались представления об фс абляции, о наноотколе. Теперь, правда, такие представления считаются само собой разумеющимися.

Инерция оболочки проявляется в полете уже после отскока/отлета/отделения прогретого лазером слоя от основной массы мишени [229-227,225-218,216-213,211-209,204]. Инерция поддерживает инфляцию оболочки против торможения поверхностным натяжением. Явление отскока аналогично известному в механике отколу конденсированной фазы. Из-за чрезвычайной тонкости слоя, естественно, называть данное явление наноотколом. Часто говорят также о фс лазерной абляции или о термомеханической абляции, подразумевая под этим вылет вещества при ультракоротком воздействии [196,194,189,187,175,169,150,83].

Отделение слоя обусловлено законом сохранения импульса. Действительно, импульс, связанный с ударной волной, идущей в толщу мишени, значительный. Суммарный импульс должен быть равен нулю (импульсом фотонов пренебрегаем). Отсюда следует, что имеется сильная механическая отдача, именно она вызывает нанооткол [204]. При нс воздействии компенсирующий обратный импульс (реактивная тяга) обусловлен разлетом вещества в паровой или плазменной короне.

Толщина оболочки порядка единиц – десятка единиц нанометров. Поэтому даже в случае металлов она прозрачна для света. Соответственно, видны кольца Ньютона. До перечисленных работ Иногамова с соавторами считалось, что фс абляция схожа с нс абляцией и основывается на превращении конденсированной среды в пар или плазму. Но неожиданно оказалось, что фс удар выбивает из мишени оболочку с веществом в конденсированном состоянии и поверхностным натяжением – вовсе не пар [204,199-196,50]. Хотя, разумеется, во-первых, при повышении поглощенной мишенью энергии пар тоже присутствует и, во-вторых, при превышении определенного порога по энергии оболочка заменяется паро-плазменным факелом.

Лазерное воздействие вызывает не только фронтальный нанооткол, но и «обычный» тыльный нанооткол [91]. В наших работах с помощью

фронтального нанооткола исследовалась прочность металлов на разрыв при быстром растяжении [95] в жидком состоянии.

--3.1. Купола

Оболочка имеет вид купола. При относительно небольших энергиях расплав, составляющий оболочку, может кристаллизоваться и образовать твердый купол, см. серию работ по «куполу»

[200,199,138,128,127,124,121,113,111,108,107,105,104,102,96,94,92,90,89,76,70,68,55,54,50,37]. Основными являются публикации [138,121,104,92,90,37].

Охлаждение происходит за счет высокой теплопроводности металла с отводом тепла от макушки купола (максимум температуры) по оболочке в периметр прикрепления купола к основной части мишени. Охлаждение способно довести жидкую фазу до замерзания, во-первых, вследствие достаточно медленного полета оболочки – минимальные скорости порядка 10 м/с. И, во-вторых, благодаря ограниченному радиальному размеру оболочки порядка микрона, единиц микрон (воздействие лазерным пучком, сфокусированным на дифракционном пределе).

Разработанная Иногамовым физика формирования куполов на тонких оболочках (блистеринг, вспучивание), нанесенных на подложку, теперь общепризнана (работы вместе с В.В. Жаховским) [138,121,104,92,90].

Экспериментальная часть наших исследований выполнялась в ФИАНе (в лаб. С.И. Кудряшова) и ИАПУ ДВО РАН (лаб. А.А. Кучмижака). Купола широко используются в технологиях сегодняшнего дня с приготовлением метаповерхностей для фотоники (например, управление цветом) и сенсорики: усиление электрического поля в методиках SERS (surface enhanced Raman scattering) и в фотолюминесцентных методиках.

Применяются такие методики также биомедицинских работах для переноса биоматериалов (например, живых клеток) – LIFT, LIBT laser induced forward (backward) transfer. Когда-то (~2010 г.) эту тему начал развивать Б.Н. Чичков (Лазерный центр, Ганновер) в своих опытах. У него речь шла об изготовлении костей, кожи и даже LIFT-печати отдельных органов. При таком переносе замерзания жидкости нет, клетки переносятся капиллярной струей, в которую превращается купол выше порога отрыва от подложки [89,92]. Получается, что остросфокусированный лазерный луч (на дифракционном пределе пятно порядка микрона, диаметр струи доли мкм) применяется вместо пипетки, диаметр струи которой намного больше.

--3.2. Вспенивание расплава фс ударом

Открытие выброса/срыва слоя/оболочки от мишени было только началом (срывается слой в пятне нагрева; при конечном диаметре пятна и умеренной энергетике из этого слоя формируется оболочка. Причины формирования – убывающее распределение интенсивности с максимумом в центре пятна). Спрашивается, а что под оболочкой или под откольным слоем, между оболочкой и дном кратера? Н.А. Иногамовым было обнаружено, что пространство под куполом движущейся оболочки заполнено вспененным металлом [218-216,149,148,144,137,136,75,65,64,61,50,34]. Пена – это двухфазная смесь пар-жидкость с низким объемным содержанием жидкости.

По мере расширения эта доля снижается. Пена состоит из клеток/ячеек, наполненных паром. Ячейки разделяются мембранами. Причем из-за поверхностного натяжения мембраны являются почти плоскими. Топология пен хорошо описывается многогранниками/ячейками Вороного. При повышенных поглощенных энергиях имеется пена без ограничивающей её со стороны вакуума оболочки. За счет капиллярности пена оказывает сопротивление её инерционному растяжению.

Н.А. Иногамовым вскрыты физические причины образования случайных микро-нано-рельефов на поверхности облученной мишени. Это обусловлено кавитационной нуклеацией, вспениванием горячего расплава, расширением пены при достаточно быстром движении и отрыве оболочки. При этом пена (составляющие её мембраны) начинает разрываться, одни остатки пены улетают в виде капель, а нижняя часть пены охлаждается за счет теплопроводности в объем мишени и кристаллизуется в твердые обрывки замороженных мембран; исследования выполнены совместно с В.В. Жаховским. Такие поверхностные рельефы наблюдались, начиная с нашумевших работ Анатолия Воробьева и Гуо в начале 2000-х. Рельефы, кстати, обладают рядом замечательных свойств (черная платина, трибология, каталитические свойства, смачиваемость). Но объяснения механизма формирования пен и случайных рельефов не было.

В ситуации с меньшими вложенными в мишень энергиями доказано теоретически и экспериментально, что ультракороткий лазерный импульс вместо обширной пены создает подповерхностную пористую структуру из замороженных в твердую матрицу нано-полостей [160]. При этом поглощенной энергии недостаточно для отрыва откольного слоя. Концепция с подповерхностным пористым слоем позволяет понять аномально большое остаточное расширение/смещение облученной поверхности мишени.

Такое смещение не удавалось объяснить остаточными пластическими деформациями в результате нагрева и охлаждения – слишком оно велико – порядка толщины слоя прогрева. Пластические деформации при таком нагреве/охлаждении могут составить проценты от толщины слоя прогрева.

Можно сказать, что пористый слой – это «предвестник» появления пены при усилении энергетики воздействия. Совместно с В.В. Жаховским.

Эксперимент выполнялся С.И. Ашитковым в лаб. М.Б. Аграната в ОИВТ РАН, FIB/ТЕМ анализ (вырезание и просвечивание ламеллы), подтвердивший экспериментально существование пустот размерами десятки нм, проведен в университете Тампы, Флорида.

--4. Лазерная инициация ударных волн

Открыто неожиданное явление резкого повышения (на порядок!) предела текучести в ударных волнах, инициированных фемтосекундным лазером [195]; совместно с В.В. Жаховским. Экспериментальное подтверждение опубликовано в статье С.И. Ашитков, М.Б. Агранат, Г.И. Канель, П.С. Комаров, В.Е. Фортов, Поведение алюминия вблизи предельной теоретической прочности в экспериментах с фемтосекундным лазерным воздействием, Письма в ЖЭТФ, 92 (8), 568-573 (2010). Эти две статьи следуют друг за другом в одном выпуске журнала.

Открыт новый режим распространения упругопластических волн, при котором оба скачка движутся с единой скоростью [179,181]; совместно с В.В. Жаховским. Тогда как общепринятым классическим является механизм с раздельным по скоростям распространением упругой и пластической волн. Упругая волна бежит впереди (предвестник), затухает, имеет небольшую амплитуду, её скорость чуть превышает упругую скорость звука. При мощной упругой ударной волне прослеживается упругий участок адиабаты Гюгонио, а не только коротенькая прямая с наклоном равным упругой скорости звука; т.е. прослеживается искривление упругого участка адиабаты Гюгонио.

См. работы [16,24,28,50,54,61,93,145,147,150,161,162,164,165,170,189,196] по упругопластическим ударным волнам; как говорилось, нумерация цитирований по дополнительному файлу «Публикации_март 2025_Иногамов.docx», см. также статьи [18,24]. Распространение ударных волн в трехмерной геометрии изучено в работах [16,54,74].

В нашей группе детально экспериментально и численно исследованы сильные ударные волны, вызывающие плавление металла за фронтом волны [10,21]. Плавление связано с пересечением адиабаты Гюгонио и кривой плавления на фазовой плоскости. Интереснейшие неравновесные явления имеют место в окрестности данного пересечения как со стороны твердой фазы, так и со стороны жидкости [10,21].

--4.1. Лазерное упрочнение

Традиционной является обработка металлов для их упрочнения (ковка, дробе-ударная технология). В настоящее время их дополняет лазерная ковка наносекундными или фемтосекундными лазерными импульсами – LSP: laser shock peening. Например, проводится лазерное упрочнение самолета <https://www.naval-technology.com/news/frce-verification-milestone-peened-f-35b> По этим данным после обработки стоимостью проценты от стоимости изделия срок эксплуатации самолета удваивается. То есть имеется огромный экономический эффект.

Важно то, что LSP обработка производится на воздухе. Это намного удешевляет технологию по сравнению с ионной имплантацией при промышленном применении, для которой требуется вакуумная камера

В наших работах, связанных с LSP технологиями, проанализированы остаточные явления в металлах после распространения в них объемных и поверхностных (например, волна Релея) упругопластических ударных волн [16,18,20,21,24,28,29,42].

--4.2. Сложные мишени

В работах [26,27,77] моей группой изучена динамика разрушения сложных мишеней фс воздействием. Сложные мишени представляют собой многослойные структуры (ламинаты), типа используемых в многослойных рентгеновских зеркалах. Например, ламинаты чередующихся слоев никель-алюминий толщиной порядка 10 нм.

--5. Абляция в жидкость

Важное значение имеют технологии наработки наночастиц (НЧ) лазерным методом путем абляции в жидкость (LAL – laser ablation in liquid). По сравнению с химическими методами лазерные НЧ намного чище и более «зеленые» в смысле экологии. Кроме того, лазерный метод проще, нет сложной системы промежуточных реакций с выработкой токсичных отходов.

Н.А. Иногамовым создана теория действия лазера на конденсированное вещество через прозрачную жидкость, теория описывает гидродинамический и растворительно-диффузионно-конденсационный механизмы формирования наночастиц. Новинкой тут является гидродинамический механизм. Он ответствен за крупные (несколько десятков нм) НЧ (совместно с В.В. Жаховским) [19,36,38,40,41,42,45,47,48,53,67,68,69]. Построены представления о зависимости выхода наночастиц от длительности (от фс до

нс) и интенсивности (вплоть до оптического пробоя прозрачной жидкости) импульса.

Важным является то, что при температурах выше критической температуры золота пропадает поверхностное натяжение на границе между золотом и горячей водой. Вследствие этого испарение через поверхностный барьер на этой границе уступает место безбарьерному проникновению атомов золота в воду (растворение) и последующему диффузионному распространению проникших атомов и их конденсации в кластеры и мельчайшие наночастицы (~ 1 нм) при охлаждении. Так нарабатывается фракция мельчайших наночастиц.

Рассмотрены вопросы допробойного химического разложения жидкости в тесной окрестности нагреваемого пятна [7,25] на поглощающей металлической поверхности. То есть при достаточной интенсивности кавитационный пузырек наполняется не парами жидкости, а продуктами её термического разложения. Например, в случае воды происходит гидролиз на кислород и водород. Благодаря этому при охлаждении пузырек не схлопывается из-за конденсации пара. В случае глицерина, рассмотренного в работах [7,25], микронный размер пузырька меньше длины свободного пробега молекулы в газовой фазе пузырька. Но конденсации при остывании нет, поскольку при разложении молекул жидкости образуются газы с низкими температурами в критической точке (ниже комнатной температуры, при которой проводились опыты).

--6. Управляемое формирование поверхностных микроструктур

Н.А. Иногамовым разработана теория и на этой основе получены объяснения причин кольцеобразного структурирования на поверхности кремния с помощью пузырьков микронного размера. При этом пузырек создается в прозрачной жидкости (глицерин) в пятне на поверхности кремния, облучаемой первым ультракоротким остросфокусированным импульсом лазера. Структурирование происходит при облучении через пузырек поверхности кремния вторым импульсом [7,25]. Кольцевые поверхностные структуры формируются вследствие дифракции лазерного излучения на кавитационном пузырьке. Опыты проводились в лаборатории 1.2 (научный руководитель М.Б. Агранат) Ромашевским С.А. и Ашитковым С.И. Молекулярно-динамическое моделирование выполнено В.В. Жаховским. Электродинамические расчеты проведены А.И. Игнатовым.

Другой пример формирования поверхностных кольцевых структур с подъемом в центре описан в статье [65]. Использовался структурированный (зонная пластинка Френеля) ультракороткий пучок жесткого рентгена.

--7. Физика двухтемпературных состояний, возникающих после ультракороткого лазерного воздействия

Описано электрон-электронное взаимодействие в конденсированной среде с горячими (единицы эВ) электронами и холодной ионной подсистемой. Это продолжение знаменитой работы Сергей Ивановича Анисимова с соавторами, положившей начало лазерной двухтемпературной физике конденсированных сред: С.И. Анисимов, Б.Л. Капелиович, Т.Л. Перельман, Электронная эмиссия с поверхности металлов под действием ультракоротких лазерных импульсов, ЖЭТФ, 66 (2), 776-779 (1974).

Ссылки на эту статью 1974 появились в конце 80-х гг. после создания лазеров с фс импульсами благодаря стретчингу и компрессингу: Нобелевская премия по физике в 2018 году (Жерар Муру, Донна Стикланд и Артур Эшкин). Статья оказалась весьма востребованной – более 1000 цитирований.

Как сказано, наша группа продолжает исследования в данном весьма важном для фс лазеров направлении. Получено много существенных результатов [3,12,22,30,33,35,38,43,46,50,51,58,59,75,79]. Получены данные по электронной теплоемкости, коэффициенту электрон-ионного теплообмена (в твердом и жидком состояниях), коэффициенту электронной теплопроводности (в твердом и жидком состояниях) металлов (благородных и переходных). Вычислены частоты столкновений. Частоты электрон-электронных столкновений вычисляются с учетом зонной структуры. Это частоты s-s и s-d столкновений. Взаимодействия s-d появляются в случае металлов с s-, p- и d-зонами.

Н.А. Иногамовым с соавторами поняты эксперименты с синхронным детектированием оптических сигналов от пленок золота, находящихся в двухтемпературном состоянии с горячими электронами [3,12].

Н.А. Иногамов показал, что коэффициент температуропроводности χ резко (до ста раз!) возрастает на двухтемпературной (2Т) стадии [175]; эта стадия длится 1-10 пс после фс воздействия. Коэффициент χ определяет скорость распространения электронной тепловой волны в металле. При таких высоких значениях χ скорость распространения электронной тепловой волны (ЭТВ) превышает скорость звука. Конечно, это обусловлено тем, что фермиевская скорость электронов на два порядка превышает скорость звука. Поэтому ЭТВ обгоняет звук. В результате на 2Т стадии происходит быстрый сверхзвуковой нагрев приповерхностного слоя. Говорят о квази-гомогенном нагреве, о квази-гомогенном плавлении, об изохорическом повышении температуры. То есть повышение температуры на двухтемпературной стадии происходит на фоне отсутствия гидродинамического отклика, т.е. без движения вещества (а

значит изохорически). Волна разрежения существенно отстает от ЭТВ. См. также статью о повороте ЭТВ на 2Т стадии в тонкой пленке, толщина которой меньше толщины слоя прогрева ЭТВ на 2Т стадии [78].

--8. EUV фотолитография

EUV фотолитография работает на плазме олова. Фокусирование на фоторезист происходит с помощью многослойных зеркал. В нашей группе проведены соответствующие исследования [56,66] в связи с экспериментами в Институте спектроскопии РАН по дроблению (лазерным ударом) капли жидкого олова (40 мкм) на облако субмикронных фрагментов.

--9. Плазмоника

В физике лазерного воздействия важным является раздел, связанный с генерацией поверхностных плазмон-поляритонных мод. В работах [2,57,70,72], выполненных под руководством Иногамова Н.А., были исследованы плазмонные эффекты. Построена теория, сочетающая вместе электродинамику лазерного и плазмон-поляритонных ЭМ полей, с одной стороны, с термо-гидро-динамикой сред с фазовыми переходами с другой стороны (исследования относятся к технологиям нано-обработки, создания голограмм, метаповерхностей).

--10. Комбинирование фотоники и оптоакустики

Важнейшими разделами современной науки являются фотоника и оптоакустика. Обычно они считаются не связанными друг с другом. В работе ЖЭТФ 167, №5 (2025) Иногамовым построен гибрид этих разделов (совм. с Ромашевским, Дышлюком, Петровым и др.). Показано, что имеет место аномальное пропускание света оптически толстыми пленками никеля с вкраплениями наночастиц и являющимися (пленки) оптоакустическими трансдьюсерами. Это позволяет «видеть» Бриллюэновские осцилляции через пленку.

АСТРОФИЗИКА

-1. Н.А. Иногамовым совместно с Р.А. Сюняевым решен ряд существенных астрофизических задач. Решена важная астрофизическая задача о присоединении аккреционного диска к поверхности нейтронной звезды со слабым магнитным полем. Это широкий класс объектов среди двойных систем. В результате контакта диск-звезда от экватора к высоким широтам по поверхности звезды течет излучающий в рентгеновском диапазоне вращающийся слой растекания [193,276,280]. Интенсивность излучения близка к Эддингтоновской. Такое излучение поддерживает левитацию слоя над поверхностью звезды. Имеется тонкий баланс между мощностью диссипации на единицу площади звезды и отличием потока излучения от Эддингтоновского лимита. Чем меньше эта разница, тем толще слой, меньше его плотность на границе со звездой и тем меньше мощность диссипации. Авторами это явление названо слоем растекания (spreading layer).

В предыдущих исследованиях угловой момент аккрецирующего вещества отводился вверх по потоку по аккреционному диску. Без отвода углового момента вещество не может спускаться к нейтронной звезде. В работах [193,276,280] угловой момент вещества, подошедшего к поверхности звезды, тратится на раскрутку самой звезды. Если при аккреции по диску угловой момент отводится за счет вязкости и дифференциального вращения (чем ближе к звезде, тем быстрее вращение), то в слое растекания торможение вращения происходит за счет трения о поверхность звезды.

На соответствующую публикацию много ссылок: всего 312 цитирований по google scholar. Только за январь 2025 года 27 ссылок. В чем причина активизации цитирования? Дело в том, что впервые благодаря новому (запущен в декабре 2021 г.) рентгеновскому спутнику XPE (Imaging X-ray Polarimetry Explorer) появились возможности измерений поляризации рентгеновского излучения, связанного со слоем растекания и диском. Это безусловно поможет разобраться в радиационных потоках в диске и в слое растекания, поскольку поляризация нарабатывается в переизлучении рентгена между диском и слоем растекания. Таким образом в ближайшем будущем можно получить тонкие сведения о характеристиках нейтронной звезды.

-2. Н.А. Иногамовым вместе с Р.А. Сюняевым создана теория профиля рентгеновских линий, связанного с турбулентными течениями в горячей межгалактической плазме скоплений галактик [261].

-3. Построена теория аккреции на сверхмассивную черную дыру (СМЧД) (на примере M87), в которой аккреционный поток питает слабо вращающийся (на радиусе Бонди) газ – при этом вращение газа обусловлено внешней (по отношению к радиусу Бонди) турбулентностью [192].

--4. Описаны релятивистские радиационно-доминированные звуковые волны в ранней Вселенной [123]. Существенно для теорий барионных акустических осцилляций (акустические пики), которые играют важную роль в космологических построениях.

--5. Дальнейшие исследования:

--5.1. Осмысление данных IXPE в попытках дополнить картину взаимодействия диск-слой растекания, адаптация прибывающего вещества на поверхности звезды. Учет перехода из вещества слоя растекания в вещество звезды. Теория передачи углового момента слоя растекания внутрь звезды. Построение послойной картины потока, передающего угловой момент в сердцевину звезды – сложное внутреннее дифференциальное вращение звезды.

Еще одна проблема суть: оседание плазмы на поверхность нейтронной звезды в режиме ADAF. Определение эффективного граничного условия описание течения над поверхностью. Определение темпа аккреции. (1) В качестве столкновений учитываем только кулоновские. (2) В дополнение к кулоновским столкновениям учитываем слабое магнитное поле.

--5.2. Данные современных спутниковых спектрометрических наблюдений профилей линий сильно ионизованного железа с высоким разрешением – порядка одного эВ. Такое разрешение позволяет определять скорости турбулентных потоков в плазме скоплений галактик.

Статья [261] вышла в 2003 году – за 20 лет до запуска японского рентгеновского спектрографа The X-ray Imaging and Spectroscopy Mission (XRISM). Этот спектрометр имеет разрешение по энергии 5 эВ в диапазоне энергий рентгеновского фотона 0.4-13 кэВ. Это как раз те параметры, которые рассматриваются в работе [261]. Работа [261] имеет 120 цитирований по NASA ADS и 166 цитирований по google scholar.

--5.3. Переработка слабо турбулентного потока на СМЧД (сверхмассивная черная дыра), оседающего от радиуса Бонди, в разделяющийся поток аккреции. Часть этого потока продолжает аккрецию до гравитационного радиуса СМЧД. Другая часть разворачивается выше этого радиуса. Эта вторая часть уносит угловой момент. За счет второго потока формируется выброс от СМЧД в виде вещества в холодном газопылевом состоянии. За время жизни СМЧД это вещество накапливается и локализуется вокруг СМЧД за радиусом Бонди.

Дополнительные материалы

--1. Н.А. Иногамовым понято и объяснено явление, которое заключалось в росте шероховатости на поверхности поликристалла меди при облучении слабыми наносекундными УВ лазерными импульсами. Слабыми здесь названы интенсивности, при которых не происходит плавления поверхностного слоя. Работа выполнена с соавторами по эксперименту и по численному моделированию, см. Неласов и др. «Эволюция микроструктуры приповерхностного слоя меди при термоциклировании лазерными импульсами наносекундной длительности» ЖЭТФ том 167, номер 6.

Оказалось, дело в угловой разориентировке кристаллитов (зерен). Имеется анизотропия упругих характеристик кристаллической решетки – «слабые» и «сильные» направления. При тепловом расширении нормальная компонента деформации зависит от угловой ориентации кристаллита. То есть соседние кристаллиты деформируются по-разному. Причем амплитуды напряжений превосходят пороги пластичности. Поэтому деформации и связанные с ними шероховатости не исчезают в циклах нагревов и остывания – появляются остаточные деформации. До указанной работы рост шероховатости объясняли накоплением вакансий. Как видим, причина в другом.

--2. Н.А. Иногамовым получены представления о новом типе устройств, которые сочетают характеристики фотонных приборов (манипуляции со светом) вместе с оптоакустическими свойствами. Устройство основано на специальном образом структурированной оптически толстой пленке никеля, которая является оптоакустическим трансдьюсером и при этом пропускает свет, взаимодействуя с ним – резко меняются коэффициенты пропускания и отражения света. Фаза Бриллюэновских осцилляций (фаза акустической волны, бегущей в подложке) сложно зависит от фотонных характеристик пленки [2] и статья: «Аномальное пропускание света оптически толстыми пленками никеля, являющимися оптоакустическими трансдьюсерами», Петров Ю.В., Ромашевский С.А., Дышлюк А.В., Хохлов В.А., Еганова Е.М., Поляков М.В., Евлашин С.А., Ашитков С.И., Витрик О.Б., Иногамов Н.А. ЖЭТФ, Том 167, Вып. 5, стр. 645 (Май 2025).

--3. В России строятся весьма перспективные синхротроны СИЛА (XFEL) в Протвино и СКИФ под Новосибирском. Эти синхротроны определяют современный уровень исследований, их очень недостаёт. На сейчас наша группа готовится к работам на этих лазерах на свободных электронах, работающих в мягком (~ 100 эВ) и жестком (~ 10 кэВ) диапазонах.

В этом отношении в области экспериментальных данных по рентгену мы сотрудничаем с лабораторией 1.1 ОИВТ РАН. До сих пор создавали

теоретические описания экспериментов, выполненных на DESY и на SPring-8. Обнаружили ряд изюминок – расщепление ударной волны в алмазе [8], формирование глубочайшего кратера в металлах под действием сверхмощного мягкого рентгена (есть отчет за 2024й год, готовится публикация), «продавливание» чрезвычайно узкого (диаметр ~500 нм) канала с огромным отношением длины к диаметру (до 10 тысяч) с помощью точно сфокусированного пучка жесткого рентгена [1,5,9].

Иногамов Н.А. много занимался мягким рентгеном умеренной интенсивности [64,83,91,99,115,116,118,119,131,132,133,157,168,174,176,177,180,184,186,188,203,206,212] в связи с японскими экспериментами (KPSI - Kansai Institute for Photon Science). Делалось это совместно с Фаеновым Анатолием Яковлевичем, к глубокому сожалению, ушедшего от нас. То есть база для будущих исследований имеется.

Другое направление – это мягкий рентген в связи с EUV-фотолитографами ASML на плазме олова 13.5 нм. Здесь были выполнены исследования по рентгену и пленкам рутения [33,34,35].

--4. Exawatt Center for Extreme Light Studies (XCELS). Тут речь, как правило, идёт вокруг предела Швингера, рождении позитронов, формировании релятивистской плазмы в пустоте. Отметим, что на XFEL установках, на сверхмощных лазерах обязательно в семействе прикладных экспериментов/станций имеются станции, связанные с физикой высоких плотностей энергии. Предлагается такую станцию создать и на петаваттном лазере.

Конечно, большая часть энергии петаваттного лазера переработается в энергию релятивистских электронов. Но имеются вопросы о том, какая часть поглощенной энергии участвует в последующих процессах, в процессах, которые разворачиваются в толще достаточно массивной мишени. Безусловно будет выход за рамки, охватываемые состояниями warm dense matter =WDM (около твердотельные плотности, температуры до десятков эВ). Интерес представляет цепочка состояний с уменьшающейся плотностью энергии. Но начало этой цепочки находится высоко, намного выше, чем WDM. Наверно можно назвать эти состояния HDM или SHDM – hot или superhot dense matter. Это давления в диапазоне ТПа – ППа (до 10^{15} Па). Диапазон представляет интерес для планетологии и физики звезд.

Подчеркнем, имеется общность в способах достижений SHDM состояний. А именно, это могут быть фс оптические, мягкие рентгеновские или жесткие рентгеновские лазеры на пределе уже достигнутых на сегодня

интенсивностей. В 1970-80-е годы предлагались не оптические лазеры для создания давлений до 1 ТПа.

НАУЧНО-ОРГАНИЗАЦИОННАЯ РАБОТА

Н.А. Иногамов является рецензентом (порядка 10-15 отзывов в год) журналов ЖЭТФ, Письма в ЖЭТФ, Physical Review Letters, Optics and Laser Technology, Теплофизика высоких температур, Квантовая электроника, УФН, Powder Technology, ПАЖ, Applied Surface Science и др.

Н.А. Иногамов является членом оргкомитетов конференций FLAMN (<https://flamn.itmo.ru/>) и GDP NANO (<https://gdp-nano.com/>)

Входит в состав преподавателей с 2010 по 2023-й год включительно Н.А. Иногамов преподавал студентам 5-го курса кафедры «Фотоника» МФТИ/ФФКЭ <https://mipt.ru/dpqe/departments/kafedra-fotoniki/prepodavateli-kafedry.php> Кафедра базируется во Фрязино в ИРЭ им. Котельникова. Преподаватели кафедры поддерживаются благодаря помощи со стороны производства IPG Photonics. В конце 2023 года, видимо, из-за санкций против производства в России, Н.А. Иногамова сократили.

Под руководством Н.А. Иногамова защищены 5 кандидатских диссертаций. В 80-х годах это С.Б. Житенев и А.Б. Константинов. Поскольку тогда он не был доктором наук, их защиты были записаны на С.И. Анисимова. В новом тысячелетии это В.В. Шепелев, который формально оканчивал аспирантуру ИАП РАН с другим руководителем. Под руководством в качестве научного руководителя защитил кандидатскую диссертацию «ТЕРМОДИНАМИЧЕСКИЕ И КИНЕТИЧЕСКИЕ СВОЙСТВА МЕТАЛЛОВ С ВОЗБУЖДЁННОЙ ЭЛЕКТРОННОЙ ПОДСИСТЕМОЙ» К.П. Мигдал. Защита состоялась в 2017 г. в диссертационном совете ОИВТ РАН. Под руководством Н.А. Иногамова защитил кандидатскую диссертацию «Численное моделирование процессов деформации и разрушения при импульсных нагрузках» Д.К. Ильницкий. Защита состоялась в 2019 г. на заседании диссертационного совета МГУ.01.14.

Недавно (28 марта 2025, Диссертационный совет ИТФ им. Ландау РАН) успешно прошла докторская защита В.А. Хохлова «Двухтемпературная гидродинамика при воздействии ультракоротких лазерных импульсов на твердые мишени».

Н.А. Иногамов член Ученых советов ИТФ им. Ландау РАН, ОИВТ РАН, ИКИ РАН.

Н.А. Иногамов – состоит в составе Научного Совета РАН по горению и взрыву.

Н.А. Иногамов в 2024 году награжден государственной наградой: медалью ордена «За заслуги перед отечеством» II степени.