

ЭЛЕКТРОСТАТИЧЕСКИЕ УСКОРИТЕЛИ ВАН ДЕ ГРААФА

С. Н. АБРАМОВИЧ, В. И. СЕРОВ

Перед изложением истории появления и развития ускорителей Ван де Граафа во ВНИИЭФ хотелось бы напомнить хорошо известный принцип Ю. Б. Харитона, который он привез из Кавендишской лаборатории (Кембридж, Англия), где стажировался с 1926 по 1928 гг. у Э. Резерфорда: «О явлении нужно знать в десять раз больше, чем это непосредственно необходимо для использования в сиюминутных практических целях». И еще одна околонаучная притча. Утверждают, что Т. Эдисон (известнейший изобретатель и предприниматель США, 1841–1931), принимая на работу специалиста, давал ему задание на год. Если через год тот приходил с вопросом, что делать дальше, то Эдисон его увольнял вне зависимости от полученных результатов. Объяснение этой позиции очень простое: всерьез занимаясь проблемой, набираешься опыта и неизбежно выходишь на «белые» пятна и новые задачи, решение которых должно увлечь специалиста на многие годы вперед. Вся история становления ускорителей Ван де Граафа во ВНИИЭФ (и, вероятно, многих других установок) может служить яркой иллюстрацией принципа Резерфорда–Харитона и правила Эдисона.

Для разработки во ВНИИЭФ ядерных и термоядерных зарядов необходимы были сведения о многих ядерно-физических константах (ЯФК), характеризующих взаимодействие излучений с конструкционными и активными материалами. Прежде всего необходимо было знать с достаточной точностью ЯФК основных веществ, входящих в состав зарядов. На начальном этапе работ информация о ЯФК была крайне ограничена. Данные из научной литературы часто носили противоречивый характер, имели низкую точность, были ненадежны. Создание в институте инструментария для проведения ядерно-физических экспериментов и получения необходимой информации стало насущной потребностью и одним из важнейших направлений работ над атомным проектом.

Изобретенные Ван де Граафом в 1931 г. ускорители, названные затем электростатическими, сразу получили широкое признание в мире как наиболее подходящие для ядерно-физических исследований в области малых и средних энергий (до 5 МэВ). Их отличительной особенностью являлись высокая стабильность энергии и потому монохроматичность ускоренных частиц, составляющая обычно 0,05–0,1 %.

Путем принятия специальных мер ее можно повысить до 0,015 %. Никакие другие ускорители в этом диапазоне не обеспечивают подобных параметров.

На рис. 1 приведена упрощенная схема такого ускорителя. Основной его частью является транспортер (переносчик) зарядов 1, обычно представляющий бесконечный (замкнутый) резиновый ремень на текстильной основе, надетый на два металлических шкива. Расстояние между шкивами составляет несколько метров. Лента движется со скоростью 20–40 м/с. На поверхность ленты в районе нижнего, вращаемого электромотором шкива наносится заряд специальным зарядным устройством 2. Около верхнего шкива заряд снимается с ленты щетками и переносится на металлический кондуктор 3. Накапливаемый заряд обеспечивает высокий потенциал кондуктора относительно «земли»; величина потенциала ограничивается только электрической прочностью окружающей среды. К кондуктору присоединяется источник ионов 4 (чаще всего протонов), размещаемый на верху вакуумной секционированной ускорительной трубы 5. Кондуктор устанавливается на изолирующих колоннах 6. Пучок ускоряемых в 5 ионов проходит через магнитный анализатор 7 и отклоняется им на мишень 8, в которой ионы взаимодействуют с атомами вещества в зависимости от проводимых экспериментов. Величина тока пучка контролируется за магнитом по измерительным приборам.

В связи с изложенным были спроектированы и изготовлены по специальному заданию Совмина СССР в Харьковском физико-техническом институте два электростатических ускорителя Ван де Граафа на 1 и 4 МВ проектного ускоряющего напряжения.

Первый из них был поставлен во ВНИИЭФ осенью 1952 г. со множеством недоделок и низкими эксплуатационными параметрами. Для «доводки» ускорителя и ядерно-физических экспериментов, проводимых параллельно с работами по совершенствованию ускорителя, был специально создан отдел электростатических ускорителей под руководством А. В. Алмазова. В результате интенсивной работы коллектива отдела на ускорителе (условное название ЭГ-2) было получено напряжение 1,5 МВ и ток пучка ускоренных ионов до 20 мкА.

В 1956 г. из Харькова был доставлен второй ускоритель (ЭГ-5) на напряжение 4 МВ. Большое коли-

чество вопросов пришлось решать отделу электростатических ускорителей, чтобы увеличить ускоряющее напряжение до 5,5 МВ и поставить ЭГ-5 в ряд лучших в мире ускорителей своего класса по эксплуатационным характеристикам. Были предложены и реализованы неординарные технические решения по технологии изготовления ускорительных трубок с высокой электрической прочностью, новым источникам ионов, замене традиционного транспортера зарядов с диэлектрической лентой цепным транспортером с индукционным зарядным устройством.

Сразу же после того, как В. Х. Беннет запатентовал принцип использования перезарядки отрицательных ионов для повышения энергии ускоряемых частиц, а Л. Альварес попытался его применить, в отделе А. В. Алмазова начались работы по проектированию ускорителя с перезарядкой на энергию ускоренных ядер изотопов водорода 10 МэВ. Сначала изготовили первый источник отрицательных ионов водорода и собрали простейшую модель ускорителя с перезарядкой, обеспечившего энергию ускоренных ионов около 300 кэВ. Так был экспериментально проверен принцип перезарядки. Более мощная модель, рассчитанная на ускоряющее напряжение более 2 МэВ, была создана для отработки основных идей построения полномасштабного ускорителя ЭГП-10. Проектирование ЭГП-10 велось совместно с НИИ электрофизической аппаратуры им. Д. В. Ефремова (Ленинград). Изготовление основных узлов ускорителя осуществлялось на Ленинградском заводе «Электросила», а сборка, настройка и доведение до проектных параметров проведены во ВНИИЭФ.

К 7 ноября 1962 г. осуществлен физпуск ЭГП-10. Впервые на таком принципе был получен пучок ускоренных ионов водорода. И уже вскоре, благодаря напряженной работе всего коллектива, достигли проектных параметров ускорителя — энергия ускоренных ионов изотопов водорода составила 10 МэВ при токе пучка на мишени до 2 мкА.

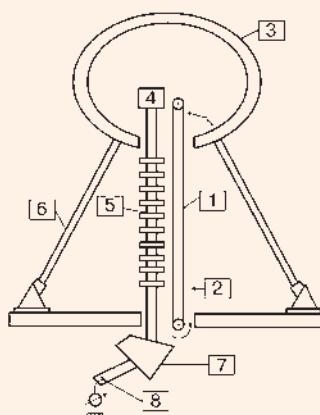


Рис. 1. Упрощенная схема ускорителя Ван де Граафа.

1 — транспортер зарядов, 2 — источник высокого напряжения зарядного устройства, 3 — кондуктор, 4 — источник ионов, 5 — секционированная ускорительная трубка, 6 — изолирующие колонны, 7 — магнитный анализатор, 8 — мишень

Дальнейшие усовершенствования ускорителя позволили улучшить его эксплуатационные характеристики, в том числе получить максимальную энергию ионов водорода до 14 МэВ и довести ЭГП-10 до мирового уровня среди ускорителей своего класса.

На сегодняшний день действующим остался только ускоритель ЭГП-10. На фотографии показан внешний вид и приведены основные эксплуатационные характеристики. Ускоритель ЭГ-2 был передан в НИИ атомных реакторов (г. Димитровград), где несколько лет использовался в качестве генератора нейтронов при исследовании делящихся материалов, затем демонтирован. Ускоритель ЭГ-5 также был демонтирован, поскольку ЭГП-10 перекрывает почти все его возможности.

В настоящее время на базе ЭГП-10 создается исследовательский многоцелевой комплекс «ядерный микрозонд». Основой его является пучок ускоренных ионов, имеющий микронные размеры. Это мощное аналитическое средство, которое может найти применение для микроструктурного анализа материалов в интересах многочисленных отраслей науки, техники, медицины.

Стремительно растущие вычислительные мощности делают возможным проводить более точные и надежные расчеты, позволяющие сократить, а в некоторых случаях и полностью отказаться от проведения дорогостоящих испытаний и экспериментов. Но для этого необходимо поднять точность ядерно-физическими данных, используемых в этих расчетах. В связи с этим предполагается ввести на ЭГП-10 импульсный режим, который позволит получить данные нового поколения повышенной точности и подробности.

Говоря о результатах экспериментов и научных исследованиях, выполненных на ускорителях Ван де Граафа, надо отметить характерное для ВНИИЭФ органическое соединение прикладных и фундаментальных исследований. В связи с этим приведем высказывание Ю. Б. Харитона в Вестнике АН СССР (1983, № 5. С. 58–62): «Никакие технические успехи были бы невозможны без проводимых одновременно интенсивных исследований в области фундаментальных наук, без тесного контакта с академическими институтами. Именно фундаментальные исследования лежат в основе каждого серьезного шага в развитии техники».

Вся работа на ускорителях подтверждает и известный тезис, что научные знания, накапливаясь, образуют «критическую массу», которая приводит к «взрывной» ситуации в развитии как идейных, так и чисто технологических сторон изучаемых проблем. При этом увлеченность работой, поддержка творчества и энтузиазма создают в научных коллективах благоприятный климат и обеспечивают высокий уровень исследований и технических решений.

Отметим некоторые из полученных результатов. Прежде всего при определении ЯФК материалов, необходимых для конструирования и анализа испытаний ядерных зарядов, попутно получено большое ко-



Электростатический перезарядный генератор (тандем) ЭГП-10 является прецизионным ускорителем заряженных частиц, который обеспечивает возможность ускорения частиц любой массы и заряда и позволяет измерять и поддерживать энергию этих частиц с очень высокой точностью.

Ускоряющая система состоит из верхней и нижней ускорительных трубок, перезарядной мишени, кондуктора, индукционного зарядного устройства и анализирующего (раздаточного) магнита.

Габаритные размеры котла:

диаметр — 3 м,
высота — 11,5 м,
диаметр кондуктора — 1,3 м.

В настоящее время ведутся работы по модернизации ЭГП-10 для создания системы формирования пучка ускоренных заряженных частиц микронных размеров.

ОСНОВНЫЕ ПАРАМЕТРЫ

Тип источника отрицательных ионов: дуплазмotron;
Рабочий диапазон энергий ускоренных протонов, МэВ: 0,8–14;
Максимальный ток ускоренных протонов на мишени, мкА: 1;
Монохроматичность ускоренных протонов при энергии 9,345 МэВ, кэВ: 1;
Типы ускоренных частиц: ионы протия, дейтерия, трития, кислорода, углерода.

личество сведений спектроскопического характера, необходимых для фундаментальной науки об атомном ядре. Так, экспериментальные исследования по трансурановой проблеме внесли заметный вклад не только в решение прикладных оружейных проблем, но и в фундаментальную ядерную физику.

С помощью диэлектрических трековых детекторов на электростатическом ускорителе ЭГ-5 были измерены сечения деления быстрыми нейтронами и угловые распределения осколков для ^{238}Pu , ^{242}Pu , ^{241}Am , ^{242}Am , ^{243}Am , ^{249}Bk , ^{249}Cf .

В некоторых случаях, когда исследование деления ядер с помощью нейтронов связано с экспериментальными трудностями, необходимые данные получены с

использованием в качестве бомбардирующих частиц дейтонов или тритонов. Большой цикл исследований реакций (d, pf) и (t, pf) проведен на ядрах $^{233,236,238}\text{U}$, ^{238}Pu и др. В качестве источника протонов, дейтонов и тритонов использовался ускоритель ЭГП-10. По результатам исследований реакций $^{233}\text{U}(t, pf)$, $^{236}\text{U}(t, pf)$, $^{238}\text{U}(t, pf)$, $^{237}\text{Np}(t, pf)$ и $^{243}\text{Am}(t, pf)$ определены сечения деления ядер ^{237}U , ^{234}U , ^{239}U , ^{238}Np и ^{244}Am нейtronами с энергиями 0,3–1,5 МэВ.

При исследовании реакции $^{239}\text{Pu}(d, pf)$ замечены пороговые аномалии в зависимости вероятности деления от энергии возбуждения и перераспределении осколков по массам для некоторых углов измерений и энергий делящегося ядра. Измерения выходов нейтронов и γ -квантов деления в реакциях $^{233}\text{U}(d, pf)$, $^{235}\text{U}(d, pf)$ и $^{239}\text{Pu}(d, pf)$ позволили понять, что нерегулярности в зависимостях $\nu(E_n)$ являются следствием перераспределения осколков деления по массам. Такие перераспределения проявляются не одинаково в разных реакциях.

Определенный вклад в проблему трансмутации радиоактивных отходов ядерной энергетики внесли измерения сечений деления нечетно-нечетных актинидов, выполненные на ЭГП-10.

Реакции на легких ядрах тщательно изучались с точки зрения использования их как источников термоядерной энергии. Последовательные измерения сечений термоядерных реакций, проводимые во ВНИИЭФ на ускорителях ЭГ-2, ЭГ-3, ЭГП-10, и анализ литературных данных позволили накопить материал для константного обеспечения проблем управляемого термоядерного синтеза. Завершилась эта огромная работа изданием справочника «Ядерно-физические константы термоядерного синтеза». Несколько позднее была создана компьютерная библиотека оцененных данных SABA. Здесь, как отмечалось выше, явно прикладная нацеленность исследований получила выход в фундаментальную науку.

Когда возник интерес к изучению поведения функции возбуждения полного сечения реакции $^3\text{H}(t, 2n)^4\text{He}$ вблизи нуля кинетической энергии ставившихся частиц, анализ существующих экспериментальных данных показал значительные отклонения при минимальных энергиях от так называемого «гамовского» графика в сторону больших сечений. Это могло объясняться как экспериментальными погрешностями, так и наличием возбужденного состояния в ^6He вблизи порога канала $^3\text{H} + ^3\text{H}$. До известной степени интерес подогревался еще попытками объяснить дефицит солнечных нейтрино в опытах Р. Дэвиса наличием узкого мощного резонанса вблизи порога зеркальной реакции $^3\text{He}(^3\text{He}, 2p)^4\text{He}$. Возникла необходимость в экспериментальном исследовании сечения реакции $^3\text{H}(t, 2n)^4\text{He}$ в области малых энергий. На ЭГ-2 были проведены такие чрезвычайно трудные исследования. В экспериментах использовалась специально разработанная газовая мишень с очень тонким входным окном, а также специально изготовленные тонкие твердые тритиевые мишени на

основе тритида скандия. В результате этих исследований показано, что данные (вплоть до энергии 30 кэВ налетающих тритонов) хорошо согласуются с гамовским графиком. Это означает отсутствие гипотетических состояний ${}^6\text{He}$ в этой области энергий возбуждения. Публикация этих данных побудила физиков Лос-Аламоса (США) провести тщательную проверку сечений всех основных термоядерных реакций. Программа измерений заняла у них около 15 лет и подтвердила данные, полученные во ВНИИЭФ.

И еще примеры направленности исследований на фундаментальные науки. В процессе поиска изобар-аналоговых резонансов в малонуклонных системах (с использованием тритиевого пучка ускорителя ЭГП-10) в реакции ${}^7\text{Li}(t, p){}^9\text{Li}$ было обнаружено аномальное поведение функции возбуждения вблизи сильного нейтронного порога в канале ${}^7\text{Li}(t, n){}^9\text{Be}^*(T = 3/2)$. Дальнейший анализ и тщательные экспериментальные исследования позволили объяснить это явление как пороговую аномалию. Существование таких аномалий было предсказано Е. Вигнером и А. И. Базем, последовательная же теория этих явлений была создана во ВНИИЭФ доктором физ.-мат. наук Л. М. Лазаревым. Изучение аномальных явлений в реакции ${}^7\text{Li}(t, p){}^9\text{Li}$ позволило получить оценку массы нейтронно-неустойчивого ядра ${}^{10}\text{Li}$ и установить квантовые характеристики его основного и первого возбужденного состояний.

Следует отметить, что далеко не всегда исследования заканчивались удачей. Однако в науке отрицательный результат является тоже результатом, и польза от него может быть ощутимой. Примером тому могут служить поиски таких экзотических систем, как бинейtron и связанный четвертый изотоп водорода ${}^4\text{H}$. После неудачных многократных попыток обнаружить бинейtron из реакций ${}^3\text{H}(t, \alpha)n^2$ и ${}^7\text{Li}(t, 2\alpha)n^2$ активационным методом был поставлен сложный корреляционный эксперимент на ускорителе ЭГ-5, в котором, изучая спектр совпадений первичной α -частицы из реакции ${}^7\text{Li}(t, \alpha){}^6\text{He}^*$ с α -частицей из распада ${}^6\text{He}^*$, надеялись если и не обнаружить пик, соответствующий связанному состоянию бинейtrона, то, по крайней мере, оценить знак и длину рассеяния нейтрона на нейтроне. Измерения были выполнены с использованием магнитного спектрометра, из-за малой светосилы которого время измерений было очень большим. В итоге результат имел очень низкую статистическую точность. Публикация этого материала натолкнула французскую группу исследователей на мысль реализовать эту идею в условиях использования появившихся в то время полупроводниковых детекторов с большой площадью чувствительной области. Таким образом удалось более чем на порядок улучшить статистику. В результате была получена одна из наиболее точных в то время экспериментальных оценок длины рассеяния нейтрона на нейтроне.

Сильные резонансные состояния в средних ядрах, плохо укладывающиеся в предсказания статистических моделей даже с учетом флуктуационных осо-

бенностей, неожиданно нашли свое естественное объяснение в рамках обнаруженных в это время изобар-аналоговых резонансов (ИАР) в составном ядре. Один из конкретных вопросов этой проблемы — природа ИАР. Суть в том, что проявление ИАР в (p, n) -реакции происходит вопреки запрету, обусловленному законом сохранения изоспина. Наличие кулоновского поля протонов в ядре приводит к нарушению этого закона за счет смешивания компаунд-ядерных состояний с ИАР. При этом происходит селективное возбуждение компаунд-ядерных состояний, имеющих такую же конфигурацию (спин и четность), что и ИАР. Это и обеспечивает проявление ИАР в (p, n) -реакции, несмотря на запрет по изоспину. Указанное смешивание конфигураций может иметь два механизма: «внутреннее» смешивание и «внешнее» смешивание. Выражение для сечения ИАР в (p, n) -канале, полученное Робсоном, основывалось на предположении о доминирующей роли внешнего смешивания. Необоснованность утверждения о доминировании внешнего смешивания и некоторая несогласованность результатов обработки имеющихся экспериментальных данных вызывали сомнения в справедливости этой гипотезы. Выполненный во ВНИИЭФ анализ всех имеющихся экспериментальных данных показывал необходимость проведения систематических исследований по этому направлению. В результате серии экспериментальных и теоретических работ было доказано, что механизм внутреннего смешивания играет существенную роль в формировании аналогового резонанса, а в ряде случаев является доминирующим.

Еще одним важным вкладом в физику ИАР со стороны ВНИИЭФ явилось обнаружение прямого нейтронного распада ИАР в резонансной (p, n) -реакции. Ясное понимание механизмов происходящих процессов позволило сотрудникам ВНИИЭФ сформулировать теоретические подходы к обработке имеющихся экспериментальных данных и осуществить постановку новых экспериментов, позволивших впервые обнаружить прямой нейтронный распад ИАР и закрепить приоритет ВНИИЭФ в этой области ядерной спектроскопии. Широкая дискуссия на международных конференциях на эту тему закончилась полным признанием данных результатов.

Развитие исследований изобарических коллективных состояний привело к обнаружению гамов-теллеровских резонансов (ГТР), близких по своей структуре к ИАР. Поиск ГТР проводится в спектрах состояний конечных ядер, образующихся в прямых реакциях перезарядки (p, n) при энергиях протонов 25–200 МэВ. Возможности изучения ГТР при таком подходе существенно ограничены из-за сложности измерения парциальных ширин и плохого энергетического разрешения ($\Delta E \approx 1,3$ МэВ при энергии 200 МэВ), которое затрудняет получение информации, заключенной в форме резонансной кривой. Б. Я. Гужовским (канд. физ.-мат. наук) был предложен другой способ изучения ГТР, основанный на наблюдении его в функции

возбуждения (p, n)-реакции. В этом подходе измерение функции возбуждения на тандемном ускорителе ЭГП-10 с разрешением $\Delta E < 10$ кэВ позволило изучить структуру ГТР, выделить вклады узких ИАР, найти не только полные, но и парциальные ширины нейтронного и протонного распадов ГТР. Получить эти сведения другим способом крайне затруднительно. Первая же работа, посвященная этой теме (наблюдение ГТР в составном ядре ^{118}Sb), преподнесла и неожиданности. В функции возбуждения реакции $^{117}\text{Sn}(p, n)^{117}\text{Sb}$ вместо одного резонанса обнаружено два, причем с ширинами, существенно меньшими ($\approx 3,5$ раза), чем ширины ГТР в ядрах $^{116,120}\text{Sb}$, полученные в реакциях прямой перезарядки при разрешении $\approx 0,6$ МэВ.

Приведенный материал не исчерпывает все осуществленные на электростатических ускорителях ВНИИЭФ исследования прикладного и фундаментального характера. За 50 лет использования этих ускорителей на них были выполнены исследования, результаты которых опубликованы в более чем 250 статьях в научных журналах, материалах отечественных и зарубежных международных конференций. Эти публикации обеспечили признание, известность и авторитет в мировом научном сообществе коллектику исследователей, работавших и продолжающих работать на электростатических ускорителях ВНИИЭФ. Свидетельством тому являются три международных конференции по ядерной спектроскопии и структуре атомного ядра, проведенные во ВНИИЭФ в 1996, 2001 и 2006 гг.

Целесообразно отметить большую роль электростатических ускорителей ВНИИЭФ в учебно-педагогической работе и подготовке кадров высшей квалификации. По работам, выполненным на ускорителях, были защищены 4 докторских и 10 кандидатских диссертаций. Ряд аспирантов и соискателей проводят исследования в рамках готовящихся диссертаций. Немало выпускников вузов, часть которых работает в различных подразделениях ВНИИЭФ и других на-

учных центрах России, выполняли свои дипломные работы на ускорителях Ван де Граафа ВНИИЭФ. В настоящее время ускоритель ЭГП-10 используется при проведении лабораторных работ по курсу физики атомного ядра для студентов СарФТИ (Саров).

В заключение несколько слов о людях, работавших над созданием, модернизацией и эксплуатацией ускорителей, а также проводивших на них эксперименты и исследования.

Ключевыми фигурами коллектива, обеспечившего создание, эксплуатацию и модернизацию ускорителей ЭГ-2, ЭГ-5 и ЭГП-10, были Ю. М. Хирный (канд. физ.-мат. наук), Л. Н. Кочемасова, Ю. М. Большаков (ионные источники), Ф. Ф. Мынцов и В. М. Деваев (механика и технология изготовления ускорительных трубок), Ю. А. Серов (автоматизированная система управления), В. В. Опасин, Г. Н. Слепцов, Л. А. Моркин (эксплуатация). Руководил этими работами А. В. Алмазов.

Самые первые исследования на ЭГ-2, опубликованные в открытой печати, были выполнены В. И. Серовым (канд. физ.-мат. наук) и Б. Я. Гужовским. В дальнейших исследованиях на ускорителях активное участие принимали кандидаты физ.-мат. наук Ю. В. Стрельников, М. Ф. Андреев, А. Г. Звенигородский, Э. Ф. Фомушкин, Л. Н. Генералов, С. В. Трусилло, В. В. Чулков, Г. Ф. Новоселов и С. А. Дунаева, доктора физ.-мат. наук С. Н. Абрамович и Ю. И. Виноградов, а также В. С. Руднев, В. А. Перешиков, Л. А. Моркин, В. Н. Протопопов, В. А. Завгородний, В. В. Гаврилов и многие другие.

АБРАМОВИЧ Сергей Николаевич — главный научный сотрудник ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, доктор физ.-мат. наук, профессор

СЕРОВ Виктор Иванович — начальник лаборатории ИЯРФ РФЯЦ-ВНИИЭФ, кандидат физ.-мат. наук

ТЕНЕВОЕ ФОТОГРАФИРОВАНИЕ В ФИЗИЧЕСКОМ ЭКСПЕРИМЕНТЕ

С. И. ГЕРАСИМОВ, В. А. ВИКТОРОВ

Уникальной возможностью обладают схемы теневого метода, которые позволяют одновременно визуализировать как оптические неоднородности по ненулевой второй производной показателя преломления (ударные волны, зоны отрыва, пограничные слои, турбулентные следы и т. д.), так и проекции непрозрачных тел,

исследуемых в опыте (метаемый объект, кумулятивная струя, нагружаемая поверхность) и/или сопровождающих изучаемый процесс (частицы среды, частицы объекта изучения, уносимые в результате абляции, разрушения, неустойчивости).

Рассмотрим характерные примеры использования таких схем в

различных экспериментах. Фотографии получены при применении разработанных во ВНИИЭФ взрывных источников света на базе газодинамического компрессора с рекордной яркостью и малым временем свечения (Герасимов С. И., Файков Ю. И., Холин С. А. Кумулятивные источники света. — Саров: РФЯЦ-ВНИИЭФ, 2002).