

Семинар имени Б. С. Ишханова «Фотоядерные исследования. Состояние и перспективы»

Посвящается Б. С. Ишханову

**Лазерно-электронный источник рентгеновского излучения
(по материалам вступительного слова на Семинаре НИИЯФ МГУ,
посвящённом 85-летию Б. С. Ишханова, 26 октября 2023 г.)**

И.А. Артюков,^{1,*} А.В. Виноградов,^{1,†} В.И. Шведунов^{1,2,‡}

¹Физический институт имени П. Н. Лебедева РАН
Россия, 111991, Москва, Ленинский проспект, д. 53

²Московский государственный университет имени М. В. Ломоносова,
НИИ ядерной физики имени Д. В. Скобельцына
Россия, 119991, Москва, Ленинские горы, д. 1, стр. 2

(Поступила в редакцию 19.12.2023; подписана в печать 28.12.2023)

Работа, как и семинар, на котором она докладывалась, посвящена памяти выдающегося физика-ядерщика, профессора МГУ Б. С. Ишханова, точнее, его вкладу в исследование и разработку ЛЭРИ — лазерно-электронных рентгеновских источников. Актуальность и перспективы этого направления связаны с «пропастью» между двумя существующими типами рентгеновских источников: с одной стороны, — рентгеновскими трубками, а с другой — электронными ускорителями, накопителями и лазерами на свободных электронах. Речь идёт о гигантском различии характеристик пучка, стоимости, масштаба, энергопотребления и пр. Кратко представлены история ЛЭРИ, современные проекты за рубежом, а также проект МГУ–Циблинский университет, выполненный под руководством Б. С. Ишханова. С точки зрения их приложений, проектируемые ЛЭРИ можно разделить на два типа и, соответственно, разных по масштабу устройства. В первом случае — это сфера применений серийных рентгеновских трубок, а во втором — это радиационная медицина, ядерные технологии и исследования по ядерной физике. Международные конференции по ЛЭРИ проводятся с 2008 г. Их перечень приведён в Приложении к статье.

PACS: 41.50.+h; 52.59.Px; 41.75.Ht УДК: 535-34: 539.1.03

Ключевые слова: обратное комптоновское рассеяние, комптоновский источник, томсоновское рассеяние, лазер-электронный рентгеновский источник (ЛЭРИ), рентгеновское излучение.

DOI: [10.55959/MSU0579-9392.79.2420205](https://doi.org/10.55959/MSU0579-9392.79.2420205)**ВВЕДЕНИЕ**

В этой статье мы коснёмся лишь одной стороны деятельности хорошо известного в МГУ и не только физика-ядерщика и педагога Бориса Саркисовича Ишханова (1938–2020)¹. В нашей стране его несомненно можно отнести к пионерам и энтузиастам развития нового типа рентгеновских приборов — источников рентгеновского излучения, возникающего при встречных столкновениях лазерного и электронного пучков (сокращенно ЛЭРИ — лазерно-электронный рентгеновский источник)². Элементарным процессом является рассеяние фотона

на релятивистском электроде в отличие от излучения релятивистского электрона в магнитных структурах на синхротронах.

Физическая эрудиция и опыт педагогической и общественной работы в МГУ позволили Б. С. Ишханову разглядеть в ЛЭРИ не только будущий инструмент научных исследований, но и потенциал практических применений в различных областях, где потребности в рентгеновских источниках в течение многих десятилетий закрывались рентгеновскими трубками, технические характеристики которых достигли к настоящему моменту пределов, определяемых фундаментальными законами физики и свойствами материалов.

* E-mail: iart@lebedev.ru† E-mail: vinograd@lebedev.ru‡ E-mail: shved@depni.sinp.msu.ru

¹ Борис Саркисович Ишханов. Серия «Выдающиеся ученые физического факультета МГУ». Выпуск XVIII. Под ред. В.И. Шведунова, И.М. Капитонова, В.В. Варламова, О.В. Чумановой. М.: Физический факультет МГУ им. М.В. Ломоносова, 2021.

² Наряду с ЛЭРИ используются сокращения: ИКИ (источник комптоновского излучения), ЛЭГ (лазерно-электрон-

ный генератор), ЛЭРГ и LEXG (лазерно-электронный рентгеновский генератор), ICS (inverse Compton source), TXS (Thomson X-ray source), CLS (compact light source), LCXS (laser-Compton X-ray source), LEGS (laser electron gamma source) и др.

1. ЛЭРИ — КОМПТОНОВСКИЙ ИЛИ РЕЛЯТИВИСТСКИЙ ТОМСОНОВСКИЙ?

Как правило, требования к лазеру и ускорителю для ЛЭРИ определяются так, чтобы оптимальным образом сформировать рентгеновский (или гамма-) пучок, необходимый для решения рассматриваемого типа задач. При выборе конкретных параметров принимаются во внимание геометрия столкновения, а также величина и структура дифференциального сечения рассеяния, зависящие, помимо геометрии, от функций распределения фотонов и электронов по импульсам.

Грубую оценку роли квантовых поправок к классической теории рассеяния электроном плоской электромагнитной волны можно получить из анализа общего соотношения энергий падающего и рассеянного фотонов [1, 2]. Она справедлива для любой пары сталкивающихся частиц, одна из которых является безмассовой.

В наиболее выгодной геометрии — рассеянии назад при лобовом столкновении — для энергии рассеянного фотона имеем

$$\hbar\omega = \frac{\gamma + \sqrt{\gamma^2 - 1}}{\gamma - \sqrt{\gamma^2 - 1} + 2\frac{\hbar\omega_L}{mc^2}} \hbar\omega_L \quad (1)$$

где γ — релятивистский фактор электрона, m — его масса, $\hbar\omega_L$ — энергия падающего фотона, который в нашем случае является лазерным, $\hbar\omega$ — энергия рассеянного фотона, который в нашем случае попадает в рентгеновский диапазон.

Для неподвижного электрона $\gamma = 1$ из (1) получается формула Комптона:

$$\hbar\omega = \frac{\hbar\omega_L}{1 + 2\frac{\hbar\omega_L}{mc^2}}, \quad \gamma = 1 \quad (2)$$

При больших γ формула (1), принимает вид

$$\hbar\omega = \frac{4\gamma^2 \hbar\omega_L}{1 + 4\frac{\gamma \hbar\omega_L}{mc^2}}, \quad \gamma \gg 1 \quad (3)$$

который при $\hbar \rightarrow 0$ сводится к классическому результату:

$$\hbar\omega = 4\gamma^2 \hbar\omega_L, \quad (4)$$

то есть имеет место томсоновское рассеяние лазерного излучения на релятивистском электроном.

Формула (3) показывает, что квантовые поправки приводят к сдвигу полосы томсоновского рассеяния в сторону низких энергий. Относительная величина сдвига в первом приближении равна:

$$\delta = \frac{4\gamma \hbar\omega_L}{mc^2}. \quad (5)$$

Соответствующую сдвигу (5) энергию фотона можно принять за условную границу E_δ , разделяющую квантовую и классическую область фотон-электронного рассеяния. Подставляя γ из (5) в (4),

получаем

$$E_\delta = \hbar\omega_\delta = \delta^2 \frac{(mc^2)^2}{4\hbar\omega_L} = \delta^2 \frac{6 \cdot 10^4}{\hbar\omega_L(\text{эВ})} \text{ МэВ}. \quad (6)$$

При этом энергия электрона, как следует из (5) и (6), равна:

$$E_e = \gamma mc^2 = \frac{E_\delta}{\delta}. \quad (7)$$

В табл. 1 в качестве примера приведены значения E_δ для $\delta = 0.1$, то есть сдвиг на 10%. Они соответствуют лазерам трёх диапазонов, которые используются в существующих и проектируемых комптоновских рентгеновских источниках. Это мощные твёрдотельные ИК-лазеры и их 4-я гармоника: $\hbar\omega_L \sim 1$ эВ и $\hbar\omega_L \sim 2.52$ эВ, а также СО₂-лазер — $\hbar\omega_L \sim 0.1$ эВ. При $E < E_\delta$ сдвиг полосы рассеяния не превышает допустимую величину 10%, квантовые поправки малы и рассеяние можно считать томсоновским.

2. ИСТОРИЯ И ЛАНДШАФТ ИСТОЧНИКОВ РЕНТГЕНОВСКОГО ИЗЛУЧЕНИЯ

Ландшафт источников рентгеновского излучения начал складываться сразу после открытия В. Рентгена и в настоящее время формируется рентгеновскими трубками — основным компонентом разнообразной рентгеновской аппаратуры, пронизывающей многие сферы деятельности человека: медицину, системы безопасности, промышленность, научные исследования и пр. На этом фоне с конца 70-х годов XX века начали появляться специализированные синхротроны с энергией до нескольких гигаэлектронвольт, оснащённые магнитными ондуляторами. Назначение их, как и появившихся в 90-х годах других типов ускорителей — лазеров на свободных электронах, генерировать рентгеновское излучение с рекордными яркостью, когерентностью и другими параметрами, в основном для научных исследований. Это уникальные установки площадью десятки гектар, располагающиеся часто в крупных научных центрах. В настоящее время их около 70 в 20 странах [3].

В 80-х годах на действующих и сооружаемых синхротронах для генерации рентгеновского и гамма-излучений при комптоновском рассеянии устанавливаются лазеры. Цель — диагностика электронного пучка ускорителя и исследования фотоядерных реакций, как было сформулировано при первом наблюдении эффекта Комптона на релятивистских электронах [4]. Первая лазерно-электронная установка для исследования фотоядерных реакций была сооружена на накопительном кольце Adone (1.5 ГэВ) и использовала аргон-ионный лазер (длина волны 514.5 нм) [5]. Гамма-пучок перестраивался в диапазоне 5–76 МэВ при изменении энергии электронов от 0.37 ГэВ до 1.5 ГэВ, поток фотонов составлял 10^4 – 10^5 фотон/с. Литература по

Таблица 1. Условная граница между теориями Томсона и Комптона фотон-электронного рассеяния, соответствующая сдвигу максимальной энергии в спектре рассеянного излучения на 10% ($\delta = 0.1$, см. (4)–(7) и пояснения к ним)

	Энергия лазерного фотона. $\hbar\omega_L$		
	0.1 эВ	1 эВ	2.5 эВ
Энергия рентгеновского фотона E_δ	6 ГэВ	600 МэВ	250 МэВ
Энергия электрона E_e	60 ГэВ	6 ГэВ	2.5 ГэВ

Таблица 2. Хронология событий, предшествовавших современным работам по ЛЭРИ (частично использованы материалы изданий [9, 10])

1896	В. Рентген	Рентгеновские лучи
1897	Д.Д. Томсон	Электрон
1905	А. Эйнштейн	Гипотеза о квантовой структуре света
1922	Р. Видероэ	Индукционный ускоритель электронов [9]
1923	А.Х. Комптон	Фотон
1944	В.И. Векслер	Открытие принципа автофазировки и начало создания на его основе новых типов ускорителей заряженных частиц: фазотрона, синхротрона, синхрофазотрона, микротрона [9]
1960	Т.Г. Мейман	Оптический квантовый генератор (лазер)
1963	Р. Мильбёрн, Ф.Р. Арутюнян, В.А. Туманян	Получение γ -квантов при лазерном рассеянии на релятивистских электронах, предложение и теория [11, 12]
1964	О.Ф. Куликов и др.	Наблюдение γ -квантов при лазерном рассеянии на релятивистских электронах [4]
1980	Л. Федерики и др.	«Ладонные пучки» — установка лазера на накопительном кольце 1.5 ГэВ для фото-ядерных экспериментов [5]
2002	Ф. Кэрол	Прототип ЛЭРИ для медицинской радиологии [13]
2015	Д. Рут, Ф. Пфайфер и др.	Разработка и установка коммерческого ЛЭРИ в Мюнхенском техническом университете [14, 15]

этому направлению, называемому также «Ladon photon beams» или «inverse Compton sources», имеется в работах [5–8]. Таким образом, установка «Ladon photon beams», созданная в конце 70-х — начале 80-х XX века во Фраскати [5], была первым практическим воплощением ЛЭРИ.

Главные события физики конца XIX–начала XXI веков, предшествовавшие лазерно-электронным источникам рентгеновского и гамма-излучения, начиная с открытия В. Рентгена, перечислены в табл. 2.

Между тем постепенно, по мере развития работ по ЛЭРИ, в научном сообществе распространяется мнение об особой роли этих устройств, когда речь идёт о диапазоне энергий рентгеновских квантов 20–150 кэВ. Именно этот диапазон прежде всего имеется в виду, когда говорят о важности рентгеновского излучения в современной жизни и деятельности человека. Этот диапазон достигается в ЛЭРИ, если взять твердотельный ИК-лазер с энергией фотона $\hbar\omega_L \sim 1$ эВ и электронный ускоритель средних энергий, 35–100 МэВ. При этом как линаки, так и накопительные кольца, занимая пло-

щадь 150–300 м², остаются достаточно компактными устройствами. Следует отметить, что технические характеристики упомянутых лазеров и ускорителей в последние два десятилетия постоянно улучшаются.

Совокупность перечисленных факторов указывает, что ЛЭРИ на энергии 20–150 кэВ со временем смогут занять нишу в наиболее важной для практики области спектра между рентгеновскими трубками и синхротронами и в ней конкурировать с обоими [16, 17]. Действительно, существенно уступая синхротронам по яркости и мощности, ЛЭРИ занимает на 1–2 порядка меньшую площадь и оказывается дешевле при сооружении и эксплуатации. В то же время ЛЭРИ, превосходя рентгеновские трубки по габаритам и стоимости, обладают перестраиваемым по энергии и более мощным пучком.

Продолжающийся прогресс твердотельных лазеров и ускорителей средних энергий открывает для ЛЭРИ возможность промышленного производства для обширного круга применений. Руководствуясь этой идеей, ещё в 1990–2002 гг. бывший медик

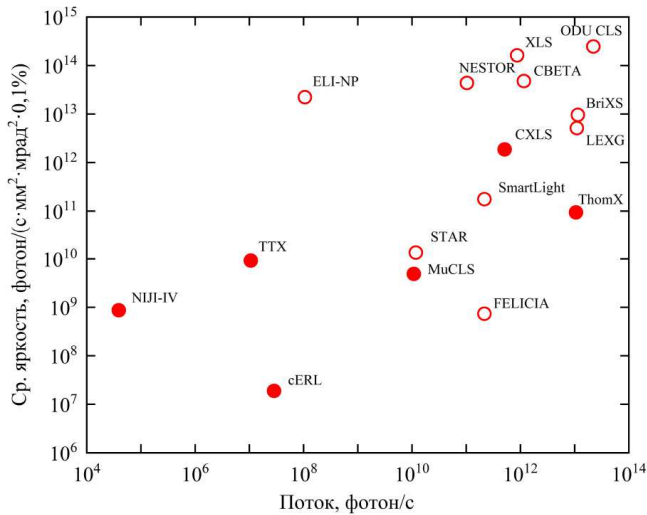


Рис. 1. Параметры ЛЭРИ, разрабатываемых (○) и уже используемых (●) в мире. Указано название проектов. По материалам статьи: *Muşat V., Latina A., D’Auria G. // Photonics MDPI. 9. 308 (2022)*

с атомной подводной лодки, профессор Ф. Кэрл в Университете Вандерильта (США) инициировал проект и построил прототип ЛЭРИ размером $4 \times 10 \text{ м}^2$ для радиологии. На нём в режиме одного выстрела (20 нс) были получены изображения фантомов кисти и других частей тела человека [13]. Современная техника позволяет вести подобные эксперименты на более компактном устройстве с частотой до 1 кГц.

В настоящее время в университетах и научных центрах нескольких стран выполняются проекты по созданию ЛЭРИ (см. рис. 1). В некоторых случаях ЛЭРИ, в отличие от источников СИ, которые являются, как правило, установками коллективного пользования, проектируются для узкого круга приложений. Подчеркнём, что важной особенностью и, очевидно, преимуществом ЛЭРИ на современном этапе является не привязка к имеющимся ускорителям и накопительным кольцам, а возможность оптимизации характеристик и конструкции как лазера, так и ускорителя, специально создаваемых для решаемой научной или практической задачи.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

Возвращаясь к посвящению статьи, к счастью для авторов у них была возможность обратиться, а затем и работать с Б. С. Ишхановым, когда в начале 2000-х они начали заниматься ЛЭРИ. Несмотря на занятость по отделу, кафедре и собственную научную деятельность, Б. С. Ишханов в 2006 г. организовал в НИИЯФ однодневный семинар, посвя-

щённый разработке и применениям ЛЭРИ. Помимо НИИЯФ, от МГУ участвовали также специалисты из Международного лазерного центра, химфака, биофака, геофака и Института механики МГУ; от Российской академии наук — ФИАН, ИНЭОС и ИПТМ (Черноголовка). Никто, кроме Б. С. Ишханова с его знанием коллектива МГУ и авторитетом среди сотрудников, не смог бы организовать подобный семинар. По результатам докладов был издан препринт [18].

Видимо, Б. С. Ишханов почувствовал зарождение нового, близкого его интересам направления. Через два года, в 2008 г. состоялась и первая международная конференция по ЛЭРИ, на которой участница того семинара Ю. Я. Маслова сделала доклад от имени коллектива, руководимого Б. С. Ишхановым (см. Приложение).

При активном участии Б. С. Ишханова завязались отношения с Цзилиньским университетом, которые через несколько лет привели к масштабному научному контракту, связанному с ЛЭРИ (см. рис. 2). Руководителями проекта являлись Б. С. Ишханов и В. И. Шведуноа. Была создана колаборация нескольких институтов: НИИЯФ МГУ (линейный ускоритель, рук. В. И. Шведун), МРТИ РАН (накопительное кольцо, рук. Г. Л. Мамаев), МЛЦ МГУ (лазерная система, рук. А. Б. Савельев-Трофимов), ФИАН (рентгеновская система, рук. И. А. Артюков). Всего в проекте участвовало около 50 человек. Отчёт содержал 638 страниц, расчёты, комплект рабочих чертежей, перечень всех систем, узлов, комплектующих и их поставщиков, а также стоимость закупаемого оборудования. Четыре сотрудника из КНР 1 год проходили соответствующую подготовку в НИИЯФ МГУ, чтобы приступить к сборке и запуску устройства в своём университете в Чаньчуне. В Москве по тематике ЛЭРИ подготовлены дипломники и 4 кандидата наук (НИИЯФ МГУ — 3, ФИАН — 1).

При подготовке контракта большое значение имела спонсорская поддержка московской компании РМExpert. Но всё же нашим партнёрам добиться решения о строительстве нового рентгеновского источника для Национальной лаборатории сверхтвёрдых материалов Цзилиньского университета в то время не удалось. Однако работы по ЛЭРИ продолжают как в КНР, так и в России. Их успех в НИИЯФ несомненно будет способствовать повышению уровня научных исследований и подготовки специалистов в области естественных и точных наук не только в МГУ, но и в других крупных университетах и ВУЗах нашей страны

Авторы выражают благодарность Ю.Я. Масловой и С.Г. Рыкованову за полезные обсуждения.

Приложение. Международные и национальные конференции и симпозиумы по ЛЭРИ после 2008 г.

- The 1st Advanced and Novel Accelerators Workshop on Compton Sources for X/Gamma Rays: Physics

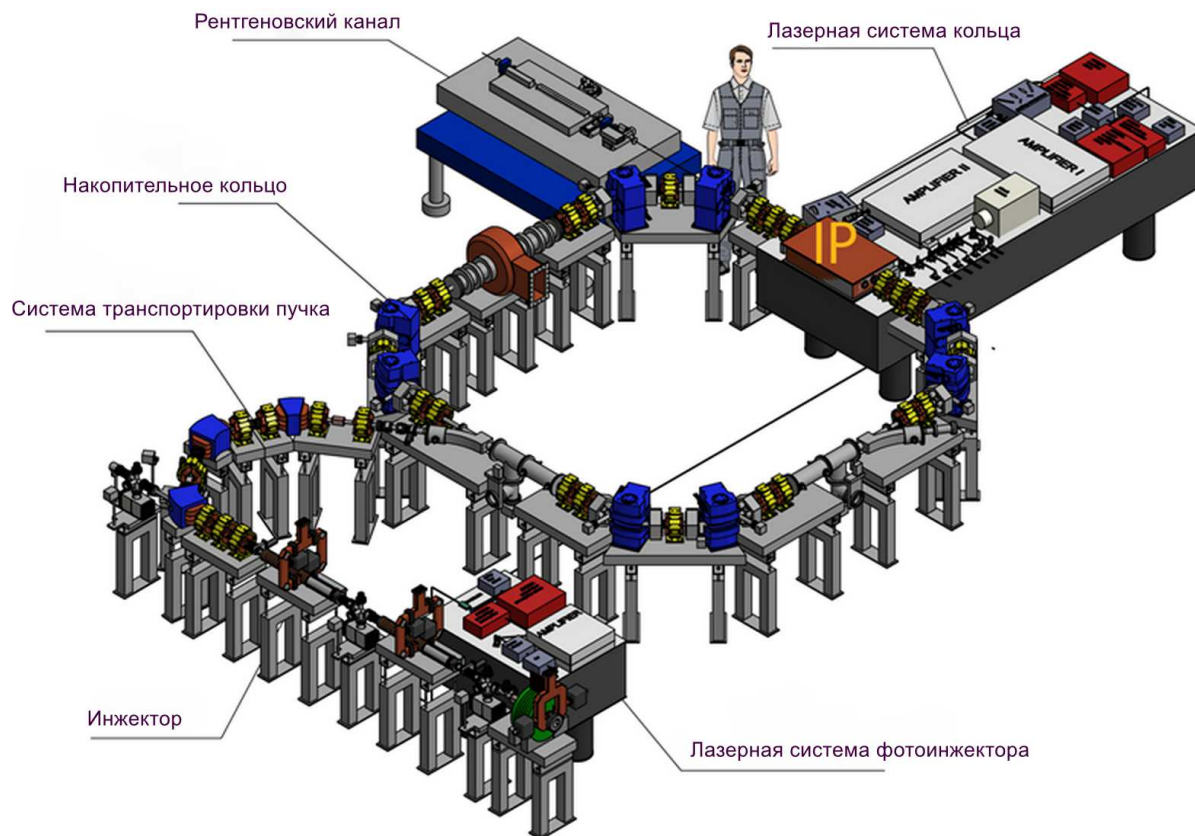


Рис. 2. Китайско–российская НИР по проектированию лазерно–электронного источника рентгеновского излучения (ЛЭРИ): «Разработка лазерно–электронного рентгеновского генератора», Контракт между Цзилиньским университетом (г.Чанчунь) и ООО «ЛЭУ МГУ», 2014–2016 гг., стоимость работ 750 тыс. евро

and Applications, г. Порто-Конте, Италия, сентябрь 2008 <https://agenda.infn.it/event/367/contributions/47877/>

- The Next Generation Gamma-Ray Source sponsored by the Office of Nuclear Physics at the Department of Energy, November 17–19, 2016, Bethesda, Maryland.
- XI International Mini-workshop AGTaX 2019 «Advance Generation of THz and X-rays using compact accelerators», Москва, МИФИ, июль 2019.
- The International Baltic Workshop 2019: Compact X-Ray Sources, technology, and application г. Калининград, БФУ им. И. Канта, ноябрь 2019.
- Advanced Medical Imaging with Synchrotron and Compton X-ray Sources, November 21–22, Bologna, 2019.
- Рабочее совещание «Комптоновские источники рентгеновского излучения, перспективы развития и применения», Калининград, БФУ им. И. Канта, июнь 2022.

[1] Ахиезер А.И., Берестецкий В.Б. Квантовая электродинамика. М.: Наука, 1969. С. 368.
 [2] Батыгин В.В., Топтыгин И.Н. Сборник задач по электродинамике. М.: НИЦ «Регулярная и хаотическая динамика», 2002, С. 510.
 [3] https://en.wikipedia.org/wiki/List_of_synchrotron_radiation_facilities
 [4] Kulikov O.F., Telnov Y.Y., Filippov E.I., Yakimenko M.N. // *Phys. Lett.* **13**. 344. (1964).

[5] Federici L., Giordano G., Matone G. et al. // *Nuov. Cim.* **В 59**. 247 (1980).
 [6] Недорезов В.Г., Туринге А.А., Шатунов А.М. // *УФН.* **174**. 353. (2004). (Nedorezov V.G., Turinge A.A., Shatunov A.M. // *Phys. Usp.* **47**. 341 (2004)).
 [7] Schaerf G., Bellini V., Bocquet J.P. et al. // *AIP Conf. Proc.* **1056**. 404 (2008).
 [8] Petrillo V., Drebot I., Ruijter M. et al. // *Appl. Sci.*

13. 752 (2023).
- [9] Храмов Ю.А. Физики. Биографический справочник, 2-е издание, М.: Наука, 1983.
- [10] Пикова К. Великая физика. От Большого взрыва до Квантового воскрешения. 250 основных вех в истории физики, 3-е издание, М.: «Лаборатория знаний», 2021.
- [11] Milburn R.H. // *Phys. Rev. Lett.* **10**. 76 (1963).
- [12] Арутюнян Ф.Р., Туманян В.А. // *ЖЭТФ*. **44**. 2100 (1963).
- [13] Carroll F.E. // *American Journal of Radiology*. **179**, 583 (2002).
- [14] Egl E., Dierolf M., Achterhold K. et al. // *Journal of Synchrotron Radiation*. **23**. 1137 (2016).
- [15] Günther B., Gradl R., Jud C. et al. // *Journal of Synchrotron Radiation*. **27**. 1395 (2020).
- [16] Artyukov I.A., Bessonov E.G., Vinogradov A.V. et al. A project of laser electron X-ray generator for scientific applications. In: Springer Proc. in Physics 115, 10th International Conference, Berlin, Germany, X-Ray Lasers. pp. 631-642, 2006.
- [17] Pogorelsky I.V., Polyanskiy M., Shaftan T. // *Phys. Rev. Accel. Beams*. **23**, 120702 (2020).
- [18] Артюков И.А., Бессонов Е.Г., Виноградов А.В. и др. Лазерно-электронный генератор рентгеновского излучения. Препринт НИИЯФ МГУ № 2006-7/806, 2006.

The laser-electron source of X-ray radiation (from the opening statement at workshop dedicated to the 85th anniversary of B.S. Ishkhanov in SINP MSU on October 26, 2023)

I.A. Artyukov^{1,a}, A.V. Vinogradov^{1,b}, V.I. Shvedunov^{1,2,c}

¹*P.N. Lebedev Physical Institute RAS, Moscow 119991, Russia*

²*Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics, Lomonosov Moscow State University, Moscow 119991, Russia*

E-mail: ^a iart@lebedev.ru, ^b vinograd@lebedev.ru, ^c shved@depni.sinp.msu.ru

The work, as well as the seminar at which it was reported, is devoted to the memory of the outstanding physicist-nuclear scientist, professor of Moscow State University B.S. Ishkhanov, namely his contribution to the research and development of LEXG — laser-electronic X-ray generators. Relevance and prospects of this direction are connected with «gap» between two existing types of X-ray sources: on the one hand — X-ray tubes, and on the other - electronic accelerators, storage rings and free electrons lasers. It's about a huge difference in their bundle characteristics, cost, scale, energy consumption, etc. The history of modern projects abroad, as well as the LEXG project of MSU–Jilin University, led by Prof. B.S. Ishkhanov, are briefly presented. From the point of view of their applications, the LEXG designs can be divided into two types with different scale of the devices. The first is the replacement of serial X-ray tubes and the second is radiation medicine, nuclear technology and nuclear physics research. International conferences on LEXG have been held since 2008. The list of these is given in the Annex to the article.

PACS: 41.50.+h; 52.59.Px; 41.75.Ht

Keywords: inverse Compton scattering, Compton source, Thomson scattering, laser-electron X-ray source, X-rays.

Received 19 December 2023.

English version: *Moscow University Physics Bulletin*. 2024. **79**, No. 2. Pp. .

Сведения об авторах

1. Артюков Игорь Анатольевич — канд. физ.-мат. наук, вед. науч. сотрудник, и. о. зав. лабораторией; тел.: (499) 132-65-22, e-mail: iart@lebedev.ru.
2. Виноградов Александр Владимирович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник; тел.: (499) 132-65-22, e-mail: vinograd@lebedev.ru.
3. Шведун Вадим Иванович — доктор физ.-мат. наук, профессор, гл. науч. сотрудник, и. о. зав. отделом, тел.: (495) 939-24-51, e-mail shved@depni.sinp.msu.ru.