

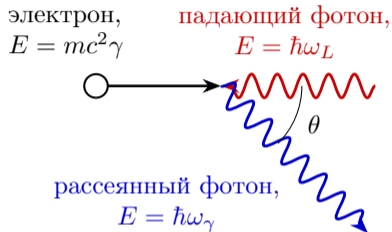
Возможности исследования нелинейного эффекта Комптона на станции 3 ИКИ НЦФМ

Рыкованов Сергей Георгиевич, Александр Федотов, Игорь Костюков

Сколковский институт науки и технологий, МИФИ, ИПФ РАН

10/03/2026

Нелинейное обратное комптоновское рассеяние (ОКР)



$$\hbar k^\mu + u^\mu = \hbar k_\gamma^\mu + u_e^\mu \quad [\text{linear Compton}]$$

$$n \hbar k^\mu + \tilde{u}^\mu = \hbar k_\gamma^\mu + \tilde{u}_e^\mu \quad [\text{nonlin. Compton}]$$

- Генерация гармоник (вигглер)
- Гармоники могут нести орбитальный угловой момент
- Красное смещение и нелинейное уширение линии

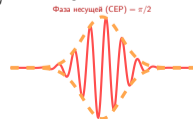
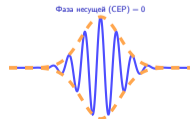
Безразмерная амплитуда поля:

$$a_0 = \frac{eA_L}{mc^2} \sim 1 \quad - \text{нелинейный режим}$$

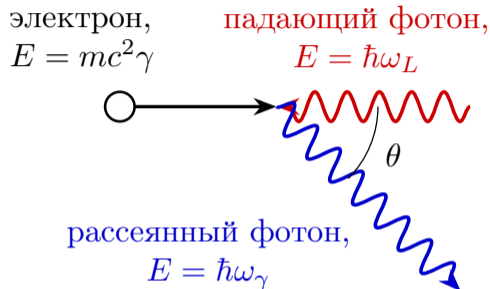
$$I \sim 10^{18} \text{ W/cm}^2 \quad \text{для } \lambda_L = 1 \mu\text{m}$$

$$\omega_{n,\gamma} \approx \frac{4\gamma^2 n\omega_L}{1 + \theta^2 \gamma^2 + a_0^2(t) + n\eta}$$

- Лазерные пучки обладают (неравномерной) огибающей – $a_0(t, \mathbf{r})$
- Спектр фотонов уширяется из-за зависимости $\omega_{n,\gamma}$ от a_0



Линейный и нелинейный режимы обратного комптоновского рассеяния



Линейный режим: $a_0 \ll 1$

Рассеяние одного лазерного фотона на электроне.

Нелинейный режим: $a_0 \sim 1$

Существен вклад интенсивного поля лазера, возможны многофотонные эффекты и сильная зависимость спектра от амплитуды поля.

Энергия рассеянного фотона в направлении назад оценивается как

$$\omega_{n,\gamma} \approx \frac{4\gamma^2 n\omega_L}{1 + \gamma^2\theta^2 + a_0^2 + n\eta},$$

где

$$a_0 = \frac{eA_L}{mc^2}, \quad \eta \approx \frac{2\gamma\hbar\omega_L}{mc^2}.$$

При переходе к нелинейному режиму:

- растёт полный выход фотонов ($\propto a_0$);
- линия смещается в красную область;
- возникает нелинейное уширение спектра;
- при достаточно больших a_0 и γ становятся заметны радиационные эффекты.

Станция 3 на карте параметров нелинейной КЭД

Ключевые параметры режима взаимодействия

$$\eta \equiv \frac{2\gamma\hbar\omega_L}{mc^2}; \quad \chi \approx a_0\eta = \frac{2\gamma a_0\hbar\omega_L}{mc^2}$$

- η – параметр **квантовой отдачи**, характеризует роль отдачи в одном акте рассеяния.
- χ – параметр **квантовой нелинейности**, определяет, насколько существенно квантовое описание излучения в сильном поле.
- $\eta \ll 1$ – малая отдача в одном акте излучения;
- $\chi \ll 1$ – в основном классический режим;
- $\chi \sim 0.1$ – переходная область, где квантовые поправки уже могут быть существенны;
- $\chi \gtrsim 1$ – область сильнополевой КЭД.

Параметры станции 3

- Энергия электронов: **0.2 – 2 ГэВ**
- $\gamma \sim 400\text{--}4000$
- Хороший эмиттанс и энергетический разброс
- $\chi \sim 0.01\text{--}0.1$ при $a_0 \sim 1$

Вывод

Станция 3 важна для исследования нелинейного увеличения яркости и **переходного режима** нелинейного Комптона, где квантовые поправки уже непренебрежимы, хотя область $\chi \gtrsim 1$ ещё не достигается.

Нелинейный эффект Комптона на станциях ИКИ НЦФМ

Прикладные исследования

- увеличение яркости источника;
- контроль спектра гамма-квантов (чирп, прямоугольные импульсы и т.д.);
- компенсация нелинейного уширения;

Стенд МГУ и станции 1,3 ИКИ НЦФМ.

Фундаментальные исследования

- неклассического радиационного трения;
- проверка моделей излучения;
- определение области применимости классического и квантового описания;
- использование результатов при расчётах
 - ▶ взаимодействия мощных лазеров с плазмой,
 - ▶ астрофизических процессов.

Станция 3 ИКИ НЦФМ + апгрейд лазерной системы.

Этапы экспериментальной программы: управление нелинейностью

Этап	Ключевая задача	Наблюдаемые величины	Инструменты / результат
1. Контролируем нелинейность	<ul style="list-style-type: none">- показать, что нелинейный режим не только наблюдается;- добиться воспроизводимого управления спектральным откликом.	<ul style="list-style-type: none">- красное смещение основной линии;- нелинейное уширение;- форма спектра;- полный выход фотонов.	<ul style="list-style-type: none">- сканирование a_0;- длительность импульса;- фокусировка; <p>Результат: переход к режиму управляемого нелинейного источника.</p>
2. Спектральная инженерия	<ul style="list-style-type: none">- научиться целенаправленно управлять спектром;- использовать нелинейность как ресурс, а не только как ограничение.	<ul style="list-style-type: none">- положение и ширина основной линии;- спектральная плотность;- высокие гармоники;- гармоническая структура спектра.	<ul style="list-style-type: none">- чирп; - форма огибающей;- последовательность импульсов;- квазипрямоугольные импульсы. <p>Результат: компенсация пондеромоторного уширения, рост яркости в полосе, гармоники как диагностический инструмент.</p>

Базовый этап — простое наблюдение самой нелинейности — здесь не выделяется отдельно.

Этапы экспериментальной программы: фундаментальные исследования

Этап	Ключевая задача	Наблюдаемые величины	Инструменты / результат
3. Фундаментальные исследования	<ul style="list-style-type: none">- проверить модели излучения и радиационных потерь;- исследовать переходную область между классическим и квантовым описанием;- определить, какие модели адекватны параметрам эксперимента.	<ul style="list-style-type: none">- потери энергии электронов;- форма электронного спектра после взаимодействия;- γ-спектр;- высокие гармоники как чувствительный индикатор режима.	<ul style="list-style-type: none">- сравнение различных режимов взаимодействия;- управляемые лазерные профили;- сопоставление классических и квантовых моделей. <p>Результат: тестирование моделей радиационного трения и излучения.</p>

Главная идея

Нелинейный Комптон на станции 3 интересен не только как механизм генерации фотонов, но и как **контролируемая экспериментальная платформа** для проверки моделей излучения в сильном поле.

Какие физические эффекты доступны на станциях 1,3 и на стенде МГУ

Наиболее надёжные наблюдаемые эффекты

- **Красное смещение основной линии**
- **Нелинейное уширение спектра**
вследствие зависимости частоты излучения от амплитуды лазерного поля.
- **Рост полного выхода фотонов**
при увеличении a_0 .
- **Изменение формы спектра**
при сканировании параметров лазерного импульса и коллимации.

Более тонкие и физически богатые эффекты

- **Управление спектром**
с помощью чирпа, формы огибающей и последовательности импульсов.
- **Потери энергии электронов**
после взаимодействия с интенсивным лазерным импульсом.
- **Спектральные сигнатуры радиационного трения**
в γ - и электронных спектрах.
- **Чувствительность гармоник**
к режиму излучения и к модели радиационных потерь.

Международный контекст: похожие программы уже развиваются

LUXE (DESY / XFEL)

- сильнополевая КЭД на пересечении высокоэнергетического электронного пучка и мощного лазера;
- нелинейный Комптон и Брейт–Вилер.

переход от “наблюдения эффекта” к **точному сопоставлению** с моделями.

E-320 (FACET-II, SLAC)

- программа сильнополевой КЭД на базе FACET-II;
- не как ближайший экспериментальный режим;
- далее — выход к фоторождению пар и более сильным полям.

даже на раннем этапе уже ценны **Compton edge shift**, форма спектра и электронные потери энергии.

SHINE (Shanghai)

- высокоэнергетический электронный пучок и сверхмощный лазер;
- нелинейный Комптон — первый процесс для исследований;
- количественная проверка моделей излучения.

нелинейный Комптон как **международная экспериментальная платформа**, а не как частная идея одной установки.

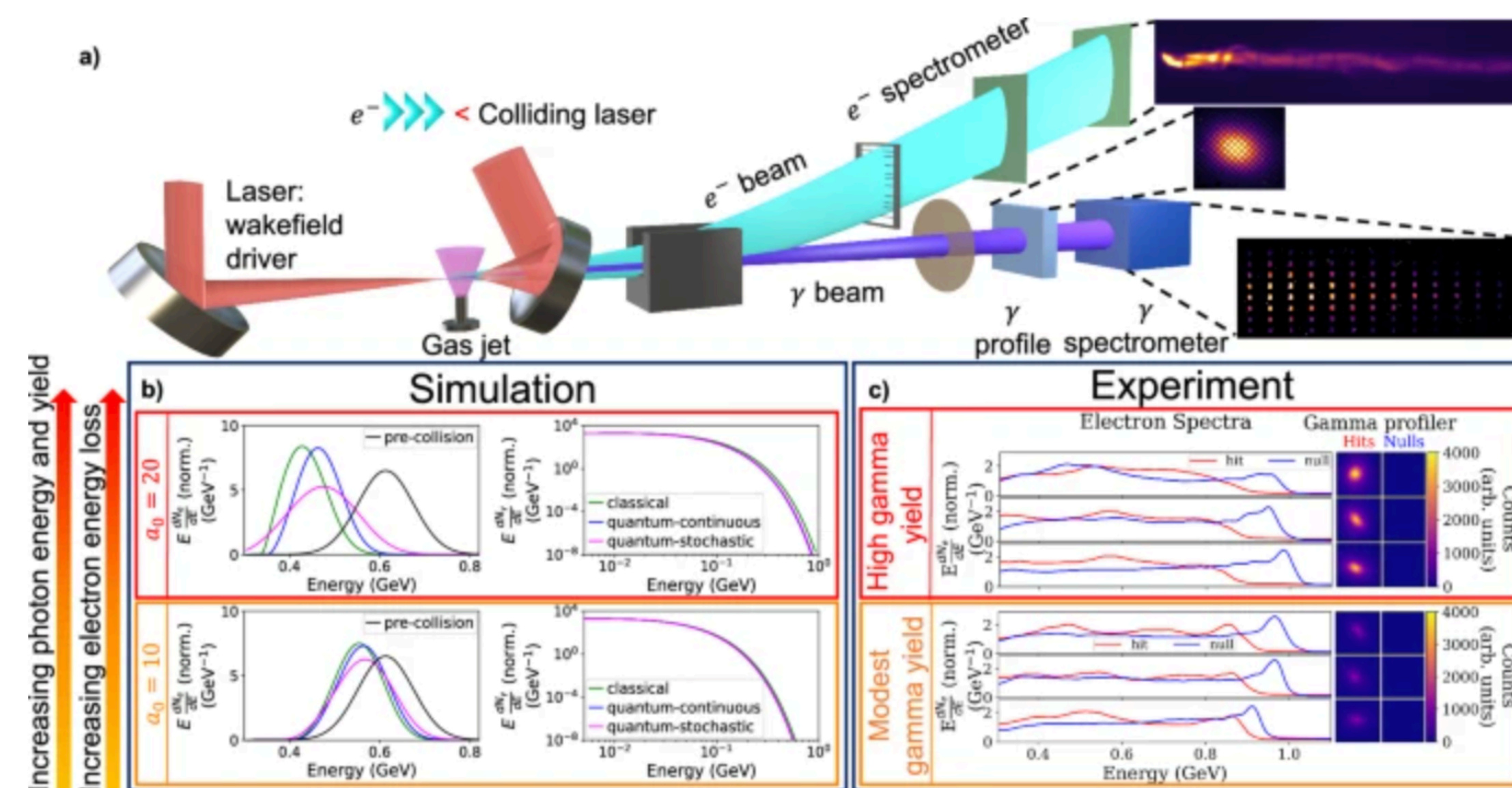
Article | [Open access](#) | Published: 13 January 2026

Observation of quantum effects on radiation reaction in strong fields

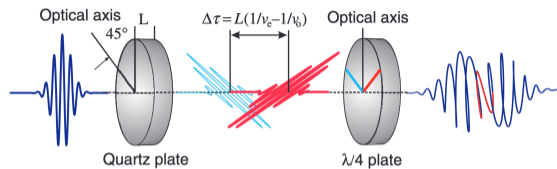
[Eva E. Los](#) , [Elias Gerstmayr](#), [Christopher Arran](#), [Matthew J. V. Streeter](#), [Cary Colgan](#), [Claudia C. Cobo](#), [Brendan Kettle](#), [Thomas G. Blackburn](#), [Nicolas Bourgeois](#), [Luke Calvin](#), [Jason Cardarelli](#), [Niall Cavanagh](#), [Stephen J. D. Dann](#), [Antonino Di Piazza](#), [Rebecca Fitzgarrald](#), [Anton Ilderton](#), [Christoph H. Keitel](#), [Mattias Marklund](#), [Paul McKenna](#), [Christopher D. Murphy](#), [Zulfikar Najmudin](#), [Peter Parsons](#), [Paramel Pattathil Rajeev](#), [Daniel R. Symes](#), ... [Stuart P. D. Mangles](#) [+ Show authors](#)

[Nature Communications](#) **17**, Article number: 1157 (2026) | [Cite this article](#)

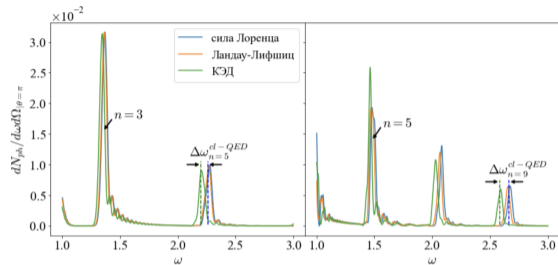
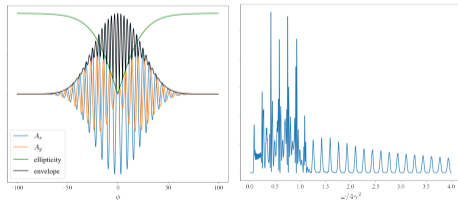
Fig. 1: Experimental set-up, qualitative comparisons of measured hits and nulls and simulated radiation reaction models.



Поляризационное окно (polarization gating) – генерация гамма гребенки



Идея: Цирк. поляризация (по краям) – нет гармоник, лин. поляризация (в центре) – есть гармоника. Генерация гармоник только в окрестности пика интенсивности.



- Сравнение различных моделей (классическая электродинамика, радиационное трение, нелинейная КЭД) может быть проведено экспериментально.
- Гармоники комптоновского излучения – мощный инструмент для исследования радиационного трения и нелинейной КЭД.

Заключение

- Станция 1,3 ИКИ НЦФМ, а также стенд МГУ представляют интерес не только для линейного обратного комптоновского рассеяния, но и для исследований **нелинейного режима**.
- При параметрах электронного пучка **200 МэВ – 2 ГэВ** и современных параметрах лазера доступны такие наблюдаемые, как
 - ▶ красное смещение, нелинейное уширение основной линии,
 - ▶ потери энергии электронов,
 - ▶ в дальнейшем — гармоническая структура излучения.
- Наиболее разумные первые эксперименты связаны с **измерением и контролем** спектральных проявлений нелинейности.
- Следующий физически важный шаг — использование нелинейного Комптона как **инструмента тестирования моделей излучения и радиационных потерь** в сильном поле.
- Таким образом, станция 3 может стать платформой как для **спектральной инженерии комптоновского источника**, так и для **фундаментальных исследований** переходного режима между классическим и квантовым описанием излучения.