

Нелинейное обратное рассеяние Комптона: путь к ярким
узкополосным источникам гамма-квантов и рентгеновского
излучения

По материалам докторской диссертации

Рыкованов Сергей Георгиевич

Сколковский институт науки и технологий

10/03/2026

- Введение
- Глава 1. Линейный эффект Комптона
- Глава 2. Оценка полного выхода фотонов комптоновского источника
- Глава 3. Методы численного моделирования комптоновских источников
- Глава 4. Расчет комптоновского источника на базе лазерно-плазменного ускорителя
- Глава 5. Расчет комптоновского источника гамма-квантов ИКИ НЦФМ
- Глава 6. Нелинейный эффект Комптона
- Глава 7. Генерация гармоник на поверхности плазмы как когерентное рассеяние Томсона и аттосекундная физика
- Глава 8. Методы борьбы с пондеромоторным уширением в нелинейном рассеянии Комптона
- Заключение

- **Актуальность темы:** развитие узкополосных источников гамма-квантов и рентгеновского излучения на основе обратного рассеяния Комптона – проект ИКИ НЦФМ (г. Саров).
- **Задачи:** исследование линейного и нелинейного эффектов Комптона, разработка методов компенсации уширения спектра, исследование орбитального углового момента фотонов, исследование когерентного рассеяния Комптона при отражении от плазменного зеркала и генерации аттосекундных импульсов.
- **Практическая ценность:** применение узкополосных источников в ядерной физике, материаловедении, медицине и др. областях.

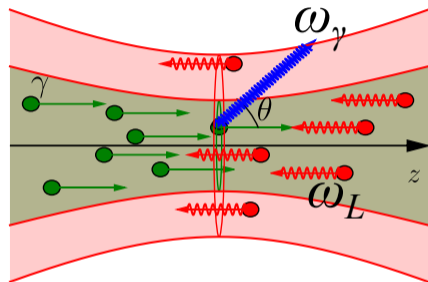
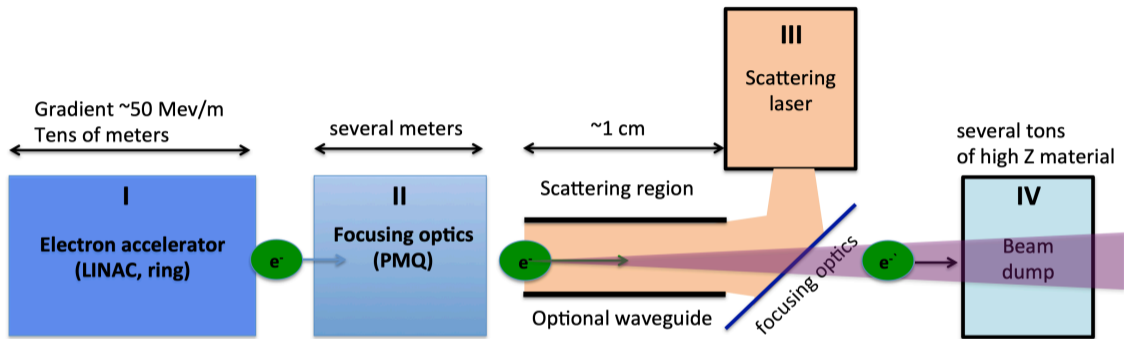


Рис.: Схема источника обратного комптоновского рассеяния. Красные круги представляют лазерные фотоны с частотой ω_L . Зелёные круги представляют электроны с энергией $mc^2\gamma$. Произвольный акт рассеяния под углом θ показан синим цветом.

Схема обратного комптоновского рассеяния (ОКР)



- Источник с настраиваемой энергией и поляризацией
- Короткие импульсы гамма излучения (зависят от длительности электронного пучка) – пикосекундные и фемтосекундные гамма всплески
- Квазимонохроматичность

Характеристики мировых источников ОКР

Таблица: Основные комптоновские источники гамма-квантов

Название установки	Энергия гамма пучка, [МэВ]	Ширина спектра, [% на полуширине]	Интенсивность, [фотоны/с]
HIGS (университет Дьюка, США), работает с 1997 года	1-100	~ 5	Полная: $\sim 1 \cdot 10^8 - 4 \cdot 10^9$ Сколлимированная: $\sim 6 \cdot 10^6 - 2.5 \cdot 10^8$
ELI-NP (Мэгуреле, Румыния), на этапе строительства	0.2-19.5	<0.5	Сколлимированная: $\sim 8 \cdot 10^8$
Проект в национальной лаборатории Лоуренса в Беркли (США), в стадии дизайна и первых экспериментов	~ 1 – 10	2-10	Полная (для частоты повторения 10 Гц): $\sim 10^9 - 10^{10}$
ИКИ НЦФМ (г. Саров), проектировка	0.02 - 250	0.5-1.5	Полная: $10^{10} - 10^{11}$

Цели диссертационной работы (1/2)

- 1 Выявить и количественно описать физические механизмы, определяющие спектральную ширину и форму линии при обратном (томсоновском / комптоновском) рассеянии в линейном и нелинейном режимах; учесть вклад угловой и энергетической расходимости пучков, а также пондеромоторного уширения.
- 2 Получить масштабные законы полного выхода фотонов и пиковой яркости для реалистичных электронно-лазерных пучков в вакууме и волноводе; найти оптимальные фокусировки и длительности импульсов для максимизации выхода при фиксированной относительной ширине спектральной полосы.
- 3 Разработать и обосновать способы компенсации пондеромоторного уширения в нелинейном рассеянии Комптона.
- 4 Исследовать влияние радиационного трения на спектр комптоновского / томсоновского излучения; указать области энергий электронов и интенсивностей поля, где его сигнатуры надёжно наблюдаемы.

Цели диссертационной работы (2/2)

- 5 Сформулировать физически обоснованные рабочие точки для источников на основе лазерно-плазменного ускорения и для проекта ИКИ НЦФМ: определить оптимальные углы, апертуры, a_0 , длительности и фокусировки, обеспечивающие узкую полосу при высокой яркости.
- 6 Исследовать перенос спинового углового момента света в орбитальный угловой момент гармоник при нелинейном когерентном рассеянии Томсона на плазменной поверхности; определить условия генерации аттосекундных импульсов с орбитальным угловым моментом и возможности формирования гамма-гребёнок методом динамической поляризации.
- 7 Продемонстрировать возможность генерации гармоник с изменяющимся во времени орбитальным угловым моментом в режиме когерентного комптоновского рассеяния от плазменной поверхности.
- 8 Верифицировать полученные выводы теорией и численным моделированием; реализовать вычислительные модели, учитывающие угловую / энергетическую расходимость, нелинейность и радиационные эффекты.

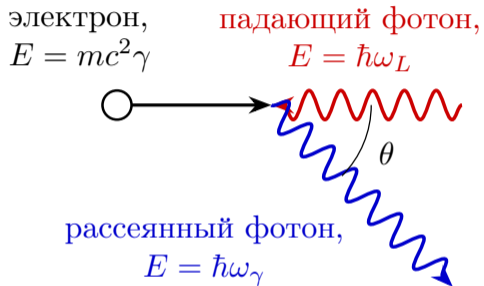
Глава 1. Линейный эффект Комптона

- Обсуждается энергетико-угловая структура рассеянных фотонов и ее зависимость от параметров электронного и лазерного пучков
- Приводятся формулы и расчёты для ширины линии рассеяния в зависимости от параметров электронного и лазерного пучков
- Обсуждается необходимость коллимации для получения желаемой относительной ширины источника κ
- Приводится оценка угла коллимации и относительного числа фотонов в узкой полосе κ

Основные результаты:

- Для заданной желаемой относительной ширины κ определяются необходимые параметры пучков, определяется угол коллимации
- В относительной ширине κ сосредоточена доля фотонов порядка κ

Обратное комптоновское рассеяние (ОКР)



Примеры:

- $\gamma = 1000$, $\hbar \omega_L = 1.55 \text{ eV}$: $E_{\text{max}} \approx 4 \text{ МэВ}$, $\chi \approx 0.5\%$.
- $\gamma = 40$, $\hbar \omega_L = 1.55 \text{ eV}$: $E_{\text{max}} \approx 10 \text{ кэВ}$, $\chi \approx 0.02\%$.

Безразмерная амплитуда поля:

$$a_0 = \frac{eA_L}{mc^2} \ll 1 \quad \text{— линейный режим}$$

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

$$E_{\text{max}} = 4\gamma^2 \hbar \omega_L, \quad \theta_{\text{max}} \sim \frac{1}{\gamma}$$

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

квантовая отдача: $\chi \approx \frac{2\gamma \hbar \omega_L}{mc^2}$

Влияние параметров пучков на ширину спектральной линии

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

$$\kappa_{\min} \approx \sqrt{\left(\frac{2\sigma_\gamma}{\gamma}\right)^2 + \left(\frac{\epsilon_n}{\sigma_{\perp,e}}\right)^2 + \left(\frac{\lambda_L}{4\pi\sigma_{l,p}}\right)^2 + a_0^4 + N_{sc}\chi}$$

σ_γ/γ – относительный энергетический разброс электронного пучка,

ϵ_n – нормализованный эмиттанс электронного пучка,

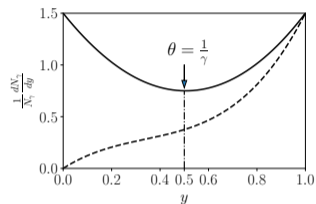
$\sigma_{\perp,e}$ – поперечный размер электронного пучка,

$\sigma_{l,p}/c$ – длительность лазерного импульса,

$\lambda_L/4\pi$ – эмиттанс лазерного пучка,

N_{sc} – среднее число актов рассеяния на электрон.

В линейном случае два последних слагаемых малы.

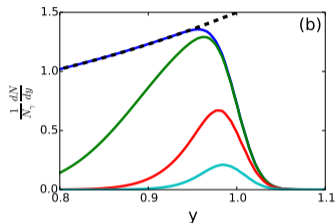
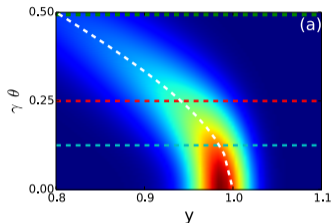


Спектр фотонов (сплошная линия) и спектр интенсивности (штриховая линия) как функции $y = \omega_\gamma / (4\gamma^2 \omega_L)$ для идеального случая.

$$\frac{1}{N_\gamma} \frac{dN_\gamma}{dy} = \frac{3}{2} (1 - 2y(1 - y))$$

Нужна коллимация: $1 - y_{col} \approx \kappa$ [желаемая отн. ширина].

Угол коллимации и число фотонов в полосе κ



[слева]: Характерный энергетический и угловой спектр ОКР как функция y и угла наблюдения $\gamma\theta$. Угловой и энергетический разброс электронного пучка учитываются.
[справа]: Спектр рассеянных фотонов полученный с помощью коллимации (интегрирования по углу от 0 (строго назад) до θ_c) для 4 разных случаев.

κ – заданная относительная ширина линии фотонов.

$$\frac{1}{1 + \gamma^2 \theta_c^2} = 1 - \kappa$$

Угол коллимации: $\gamma\theta_c \approx \sqrt{\kappa}$

Относительное число фотонов в полосе κ :

$$\frac{N_\kappa}{N_\gamma} \approx \kappa$$

S.G. Rykovanov et al., Journal of Physics B, 47, 234013 (2014)

C.G.R. Geddes, S.G. Rykovanov et al., Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B, 350,116–121 (2015)

С.Г. Рыкованов и др., Известия вузов: Радиофизика, 67, 829 (2024)

- Приведены формулы для расчета полного числа фотонов и пиковой яркости комптоновского источника
- Представлены аналитические результаты для взаимодействия гауссовских пучков
- Приведены удобные инженерные формулы для полного числа рассеянных фотонов для взаимодействия в вакууме, в волноводе и в плазменном канале.
- Оценивается влияние геометрических ошибок взаимодействия пучков на полный выход фотонов

Основные результаты:

- Для заданной энергии лазерного импульса находятся оптимальные параметры пучков, обеспечивающие максимальный выход фотонов при фиксированной относительной ширине спектральной полосы κ

Формулы для оценки полного числа фотонов и пиковой яркости

$$N_\gamma \approx 2c\sigma_T \int_{-\infty}^{+\infty} n_e(t, \mathbf{r}) n_p(t, \mathbf{r}) d^3\mathbf{r} dt$$

$$n_s = \frac{(2\pi)^{-3/2} N_s}{\sigma_{\perp,s}^2(z) \sigma_{l,s}} e^{-\left(\frac{r_{\perp}^2}{2\sigma_{\perp,s}^2(z)} - \frac{(z \pm ct - z_{0,s})^2}{2\sigma_{l,s}^2} \right)}$$

$$N_\gamma = \frac{\sigma_T N_e N_p F(x)}{\sqrt{2\pi} \sigma_l \sqrt{\sigma_{e,0}^2 + \sigma_{p,0}^2}} \frac{1}{\sqrt{\frac{\sigma_{e,0}^2}{\beta_e^{*2}} + \frac{\sigma_{p,0}^2}{\beta_p^{*2}}}}$$

$$x = \frac{\sqrt{2}}{\sigma_l} \sqrt{\frac{\frac{\sigma_{e,0}^2 + \sigma_{p,0}^2}{\sigma_{e,0}^2 + \sigma_{p,0}^2}}{\frac{\sigma_{e,0}^2}{\beta_e^{*2}} + \frac{\sigma_{p,0}^2}{\beta_p^{*2}}}} \quad F(x) = e^{x^2} [1 - \operatorname{erf}(x)]$$

Оптимум при $\sigma_l \approx 2\beta_p^*$, то есть продольный размер лазерного импульса равен двум длинам Рэлея лазерного пучка.

σ_T – сечение Томсона
(Кляйна-Нисины),

n_s , $s \in e, p$ – плотности электронов и лазерных фотонов

N_s – число частиц в пучке

$\sigma_{\perp,s}(z)$ – поперечный размер пучка в точке z

$\sigma_{l,s}/c$ – длительность пучка

$\sigma_{s,0}$ – минимальный поперечный размер пучка

β_s^* – бета-функция пучка

Можно учесть пространственные и временные сдвиги пучков, а также угол между ними.

Инженерные формулы. Идеальный точечный электронный пучок

Задана энергия лазера $E_{L,J}$ в Джоулях и интенсивность в фокусе (a_0). Продольный размер связан с остальными параметрами лазера:

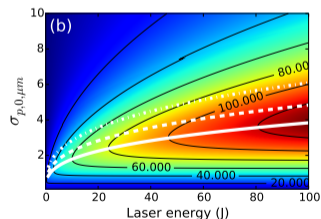
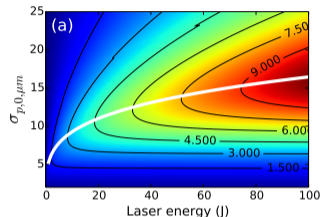
$$\sigma_l = \frac{cE_{L,J}}{(2\pi)^{3/2} I_{\max} \sigma_{p,0}^2}, \quad I_{\max} = \frac{a_{0,\max}^2 \cdot 1.37 \cdot 10^{18} [\text{Вт/см}^2]}{\lambda_{L,\mu\text{m}}^2}$$

$\lambda_{L,\mu\text{m}}$ – длина волны лазера в микронах.

$$\frac{N_\gamma}{N_e} \approx 4.7 \cdot a_{0,\max} \cdot \sqrt{\frac{E_{L,J}}{\lambda_{L,\mu\text{m}}}}$$

Оптимальный поперечный и продольный размеры пучка:

$$\sigma_{p,\mu\text{m}}^{\text{опт}} \approx \frac{2.75 \lambda_{L,\mu\text{m}}^{3/4} E_{L,J}^{1/4}}{\sqrt{a_{0,\max}}} \quad \frac{\sigma_{l,p}^{\text{опт}}}{c} [\text{пс}] \approx 0.63 \sqrt{\frac{\lambda_{L,\mu\text{m}} E_{L,J}}{a_0}}$$



Общее число фотонов, нормированное на число электронов N_γ/N_e для случая $a_{0,\max} = 0.2$, $\lambda_L = 1$ мкм. (сверху) – вакуум, (снизу) – волновод.

Промежуточные итоги по главам 1 и 2

- Результаты **первой и второй** глав могут быть использованы для первоначальной оценки при разработке узкополосного комптоновского источника.
- В **первой** главе для заданных параметров электронного и лазерного пучков оценивается относительная ширина линии κ , оценивается, что в этой линии находится κ от всех фотонов.
- Во **второй** главе приводятся расчеты и оценки для оптимального полного количества рассеянных фотонов.
- Для более точной разработки источников и для учета, например, нелинейности, необходимо проводить дополнительные аналитические и численные расчеты.

- Описаны методы численного моделирования комптоновских источников – расчет траекторий электронов в заданном электромагнитном поле и расчет излучения по траекториям (потенциалы Лиенара-Вихерта в классическом приближении и расчет матрицы рассеяния в квантовом приближении)
- Продемонстрировано совпадение численных и аналитических результатов в линейном и нелинейном режимах

Основные результаты:

- Разработаны и верифицированы численные методы расчета комптоновских источников, которые позволяют учитывать угловую и энергетическую расходимость пучков, нелинейность и радиационные эффекты

S. Rykovanov, ..., and W.P. Leemans, AIP Conf. Proc., 1507, 399 (2012)

M. Chen, ..., S. Rykovanov, and W. Leemans. Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams, 16, 030701 (2013)

T. Heinzl, ..., S. Rykovanov, C.B. Schroeder, E. Esarey, and W.P. Leemans, Phys. Rev. E, 91, 023207 (2015)

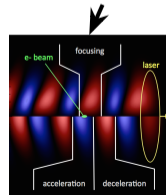
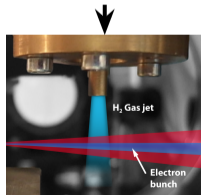
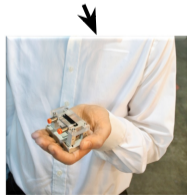
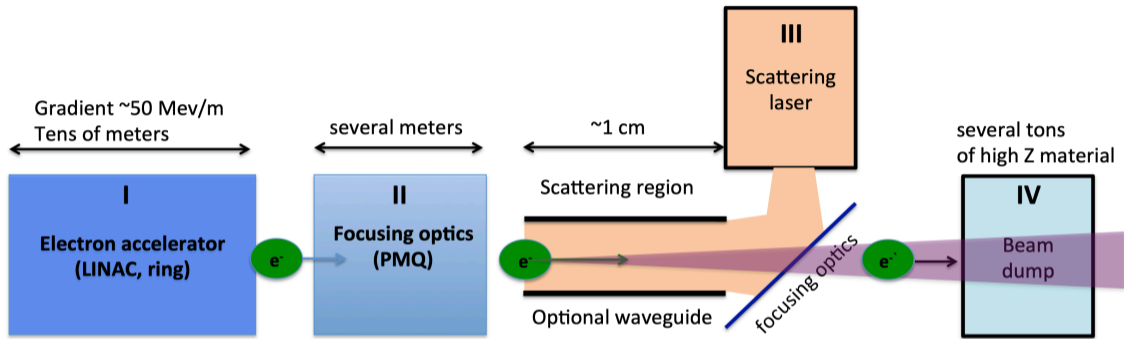
Глава 4. Расчет комптоновского источника на базе лазерно-плазменного ускорителя (ЛПУ)

- Обсуждаются особенности использования электронных пучков из лазерно-плазменного ускорителя для узкополосных комптоновских источников
- Производится проектирование комптоновских источников для ядерной резонансной флюоресценции (ЯРФ) ^{235}U и фото-деления (проект Национальной Лаборатории им. Лоуренса в Беркли)
- Приводятся расчёты и сопоставление аналитики с численным моделированием

Основные результаты:

- Численные расчеты показывают, что источники на основе ЛПУ могут конкурировать с такими крупными установками, как HIGS, при условии, что они будут работать на частотах повторения порядка кГц.

Ключевые компоненты ОКР на базе лазерно-плазменных технологий



Примерные требования к источникам для ЯРФ и фотоделения

Таблица: Примерные требования к источнику для задач ЯРФ ^{235}U и для фотоделения ядер.

	^{235}U ЯРФ	Фотоделение
E_γ [МэВ]	1.7	5–15
$\Delta E_\gamma / E_\gamma$ [FWHM]	$\sim 2\%$	$\sim 10\%$
Полный поток [фотонов/выстрел]	$\sim 10^8 - 10^9$	$\sim 10^9 - 10^{10}$
Коллимированный поток [фотонов/выстрел]	$\sim 10^7$	$\sim 10^8$

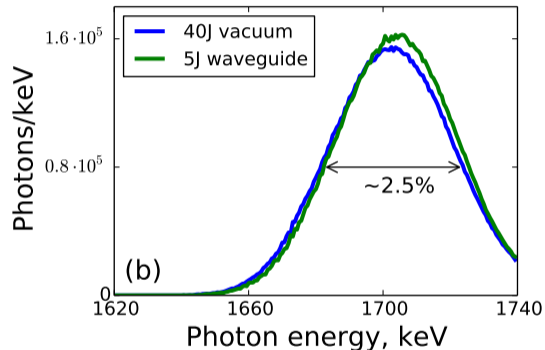
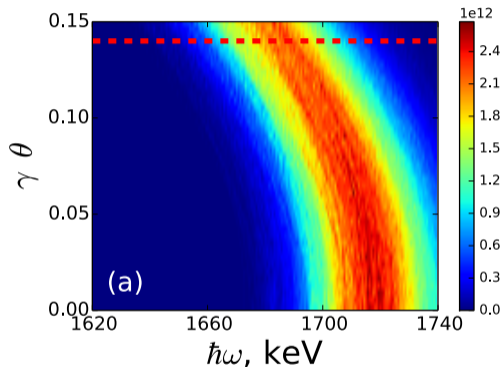
Практика проектирования:

- Несмотря на высокую энергию электронов из ЛПУ и приемлемый эмиттанс, нужно уменьшать расходимость пучка (квадруполи, плазменные линзы)
- Используя результаты из Глав 1,2 необходимо правильно подобрать параметры пучков для заданной полосы κ и максимизации выхода фотонов
- Используя оценочные параметры пучков, провести численное моделирование с учётом нелинейности

Сводка параметров пучков для моделирования источника ЯРФ ^{235}U .

Параметры электронного и лазерного пучков для полосы пропускания $\sim 2\%$		
Центральная энергия электронного пучка [МэВ]	270	
γ	~ 530	
$\sigma_{\gamma, \text{FWHM}}/\gamma$	0.9%	
$\gamma\sigma_{\theta, \text{FWHM}}$	0.05	
Нормированная амплитуда лазерного импульса, a_0	0.15	
Параметры для достижения общего выхода $5 \cdot 10^8$ фотонов/импульс		
	Вакуум	Волновод
Энергия лазерного импульса, E_L [Дж]	40	5
Длина волны лазера, λ_L [мкм]	0.8	0.8
Размер пятна лазерного импульса, $\sigma_{p,0}$ [мкм]	15	6
Продольный размер лазерного импульса, σ_l [мкм]	7040	5500
Длительность лазерного импульса [пс]	23.4	18.3
N_e	10^8	10^8
Заряд пучка, Q [пКл]	16	16
Угол коллимации, $\gamma\theta_c$	0.14	0.14

Расчет источника на основе ЛПУ для ЯРФ (^{235}U)



Слева: энергетико-угловой спектр; красная пунктирная линия обозначает угол коллимации. Справа: число фотонов на кэВ после коллимации для вакуума и волновода. В ширине $\sim 2\%$ сосредоточено $\sim 1.1 \cdot 10^7$ фотонов, что согласуется с аналитическими предсказаниями.

- Исследуются нелинейные аспекты эффекта Комптона для узкополосных гамма-источников при параметрах, релевантных для ИКИ НЦФМ
- Даются оценки выхода фотонов, относительной ширины спектра и влияния параметров электронного и лазерного пучков (слабонелинейный режим: световое давление мало, но его необходимо учесть)
- Используются аналитические расчёты и численное моделирование; рассматриваются идеальные и реалистичные пучки, различные энергетические режимы лазера

Основные результаты:

- Оптимизация параметров (в т.ч. поперечного пятна лазера $\sigma_{p,0}$) позволяет максимизировать выход; рост a_0 повышает выход, но из-за нелинейности увеличивает ширину спектра
- Численное моделирование подтверждает аналитические оценки в широком диапазоне параметров для идеальных и реалистичных пучков с параметрами, релевантными для ИКИ НЦФМ

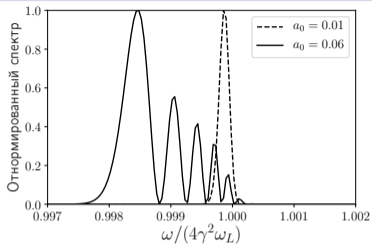
Типовые параметры электронного пучка (ИКИ НЦФМ)

Таблица: Типовые параметры электронного пучка линейного ускорителя ИКИ НЦФМ, используемые в расчётах.

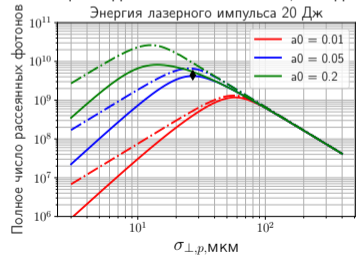
Параметр	Значение	Единица измерения
Частота следования электронных пучков	1	Гц
Относительный среднеквадратичный энергетический разброс	0.001	
Длительность электронного сгустка	7 – 10	пс
Нормализованный эмиттанс	1	мкм
Заряд электронного сгустка	1	нКл
Средняя энергия электронов	2	ГэВ

- Одним из требований к источнику является относительная ширина линии $\kappa \sim 0.3 - 0.5\%$
- Для достижения этой цели необходимо учитывать влияние нелинейности, даже при $a_0 \approx 0.05$
- Оптимизация параметров пучков позволяет максимизировать выход фотонов при заданной ширине линии

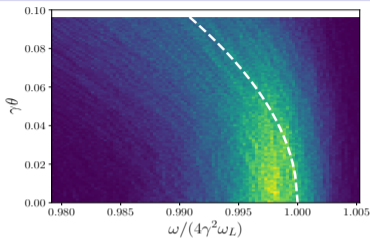
Нелинейное уширение и оптимизация выхода фотонов



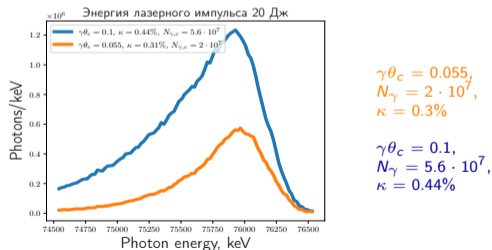
Спектр фотонов строго назад, для 1 мкм лазера с гауссовой огибающей и длительностью 3.3 пс, на одиночном электроне.



Полное число рассеянных фотонов как функция поперечного размера лазерного пучка при разных значениях a_0 .



Энергетический и угловой спектр фотонов при рассеянии лазерного импульса с $a_0 = 0.05$ на пучке электронов ИКИ НЦФМ.



Энергетические спектры фотонов при разной коллимации.

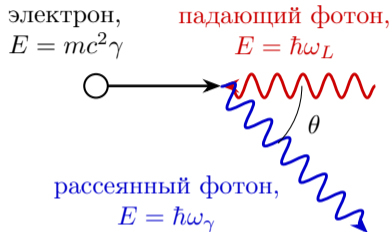
Глава 6. Нелинейный эффект Комптона

- Рассматривается нелинейное однофотонное рассеяние Комптона (нелинейное рассеяние Томсона) при $a_0 \gtrsim 1$, приводящее в том числе к генерации высоких гармоник
- Получены аналитические выражения для спектра при конечной огибающей импульса
- Исследовано влияние огибающей/СЕР и параметров пучков на уширение и структуру гармоник; обсуждается влияние радиационного трения

Основные результаты:

- Основная линия смещается в красную область с ростом a_0 ; увеличиваются выход фотонов, но и ширина спектра, что необходимо учитывать при проектировании
- Фаза несущей (СЕР) меняет спектр фотонов в малоцикловых импульсах; эффект сохраняется при реалистичных пучках, что даёт метод диагностики СЕР
- В длинных импульсах и при больших a_0 радиационное трение влияет на спектр и гармоники; показаны области параметров для наблюдения эффекта
- Демонстрируется передача спинового углового момента света (поляризация) в орбитальный угловой момент (ОУМ) гармоник

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

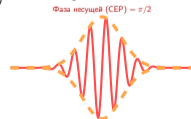
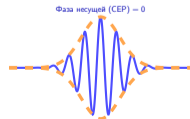
Безразмерная амплитуда поля:

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

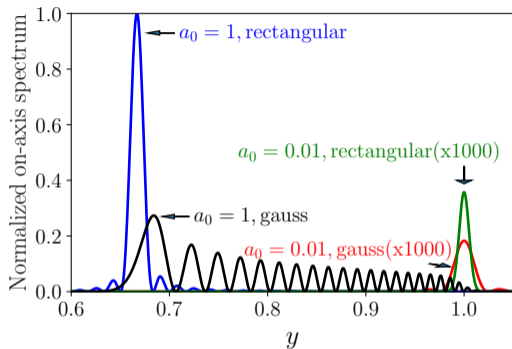
$$I \sim 10^{18} \text{ W/cm}^2 \quad \text{для } \lambda_L = 1 \mu\text{m}$$

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

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



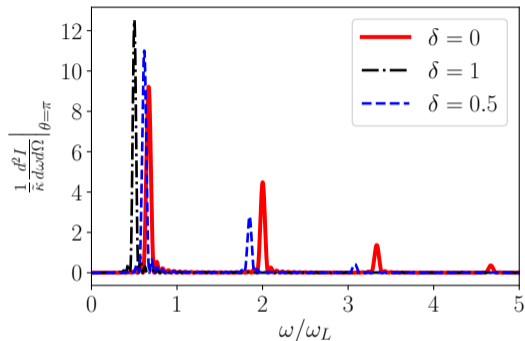
Пондеромоторное уширение линии



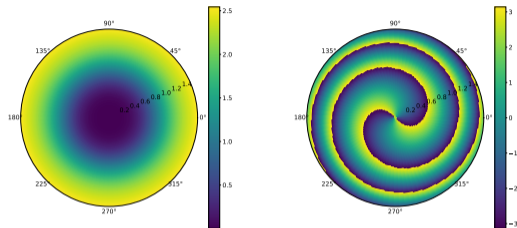
Спектры обратного рассеяния Комптона (на оси) как функции безразмерной энергии $y = \frac{\omega\gamma}{4\gamma^2\omega_0}$ для лазерных импульсов с разными огибающими. Все спектры нормированы на пиковое значение осевого спектра для прямоугольной огибающей с $a_0 = 1$.

- Пондеромоторное уширение – основной механизм уширения линии в нелинейном режиме при реалистичных огибающих
- Уширение связано с нестационарностью светового давления, приводящей к изменению энергии электрона в процессе взаимодействия
- $\frac{N_\gamma}{N_e} \approx 4.7 \cdot a_{0,\text{max}} \cdot \sqrt{\frac{E_{L,J}}{\lambda_{L,\mu m}}}$ – из Главы 2
- Количество фотонов увеличивается, но линия уширяется
- Методы компенсации уширения рассмотрены в Главе 8

Генерация гармоник при нелинейном ОКР и их угловой момент



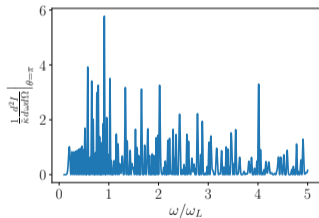
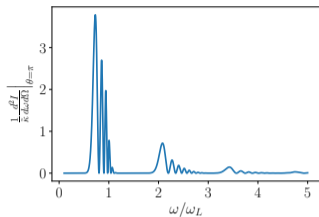
Спектр рассеяния строго назад при взаимодействии плоской волны с прямоугольной огибающей с длительностью 10 периодов, $a_0 = 1$ для разных поляризаций: $\delta = 0$ (линейная поляризация, красная линия), $\delta = 0.5$ (эллиптическая поляризация, синяя линия) и $\delta = 0$ (циркулярная поляризация, черная линия). В случае циркулярной поляризации гармоник не возникает.



Слева: интенсивность третьей гармоники при рассеянии циркулярно поляризованного импульса с $a_0 = 1$ на одном электроны. Справа: соответствующая фазовая структура, демонстрирующая наличие орбитального углового момента (ОУМ) $l = 2$.

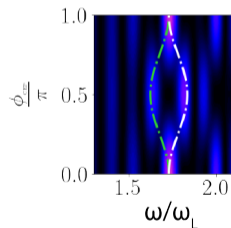
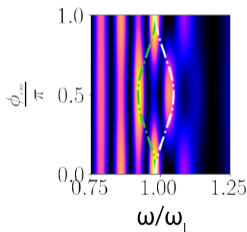
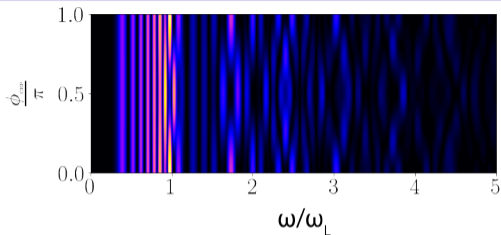
- При циркулярной поляризации гармоники несут ОУМ $n - 1$ для n -й гармоники
- Возможна генерация аттосекундных импульсов с ОУМ в режиме когерентного рассеяния (Глава 7)

Уширение гармоник и влияние фазы несущей (СЕР)



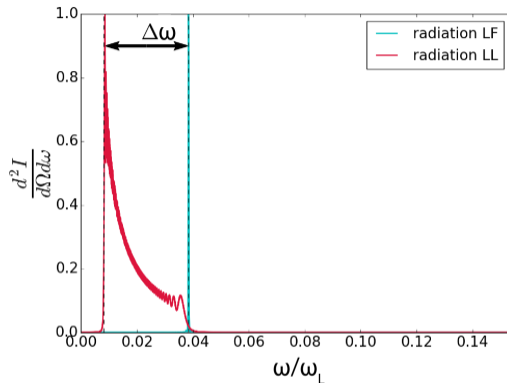
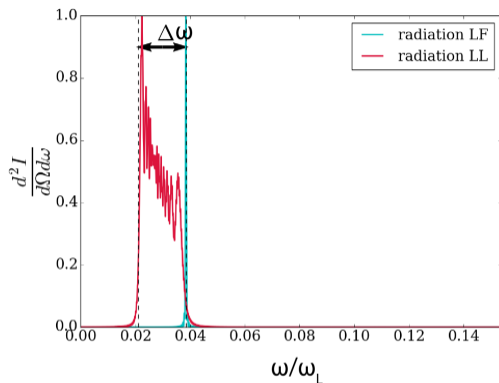
Спектр рассеяния строго назад при взаимодействии электрона с лазером с гауссовой огибающей и длительностью 5 периодов: $a_0 = 1$ (сверху), $a_0 = 3$ (снизу).

При больших a_0 гармоники перекрываются из-за уширения. Фаза несущей оказывает влияние.



Спектр рассеяния строго назад как функция $\phi_{СЕР}$ для линейно поляризованного импульса с $a_0 = 2$ и $N_0 = 5$. Нижние панели являются фрагментами верхнего графика для третьей и пятой гармоники (соответственно). **Диагностика лазера по спектру!**

Влияние радиационного трения на спектр ОКР



Нормированный излучённый строго назад спектр рассеяния для лазерного импульса с прямоугольной огибающей для случаев без учета радиационного трения (LF от Lorentz Force) и с его учетом (LL от Landau-Lifshitz force) для циркулярной поляризации. $\gamma = 1000$, $\lambda_L = 1.066$ мкм. Слева: $a_0 = 5$, $N_0 = 90$ циклов, справа: $a_0 = 5$, $N_0 = 300$ циклов.

- Уширение линии излучения можно использовать для экспериментального исследования радиационного трения.
- Результаты получены аналитически и подтверждены численным моделированием.

Глава 7. Генерация гармоник на поверхности плазмы как когерентное рассеяние Томсона и аттосекундная физика

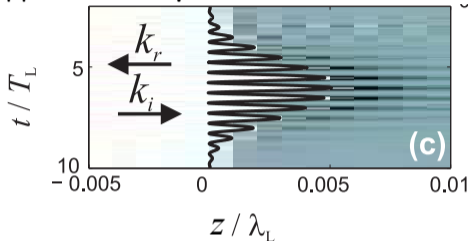
- Обсуждается механизм генерации высоких гармоник при отражении интенсивного лазерного импульса от отражающей плазменной поверхности
- Широкий спектр и синфазность гармоник позволяют формировать цуги и одиночные аттосекундные импульсы
- Влияние поляризации: подавление гармоник при эллиптичности (при нормальном падении), аналогичное ОКР
- Исследуется ОУМ гармоник и его связь с поляризацией

Основные результаты:

- Метод поляризационного окна (polarization gating) эффективен для формирования одиночных аттосекундных импульсов в отражении от плазмы
- Показана передача спинового углового момента (поляризация) света в ОУМ гармоник при отражении от плазмы
- Продемонстрировано самозакручивание (self-torque, динамический ОУМ) гармоник

Осциллирующее зеркало¹: аттосекундные импульсы и гармоники

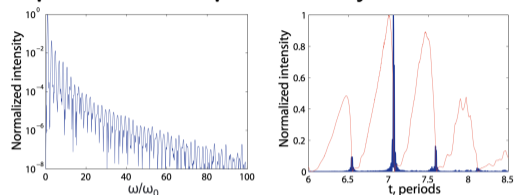
Динамика поверхности:



Движение электронного слоя для лазерного импульса с $a_0 = 10$ и продолжительностью 4 периода, при $n_e = 400n_{cr}$. Сплошная линия соответствует продольной координате z_e электрона (вертикальная ось) как функции времени (горизонтальная ось), а цветное изображение (плотность электронов) получено из 1D-PIC моделирования.

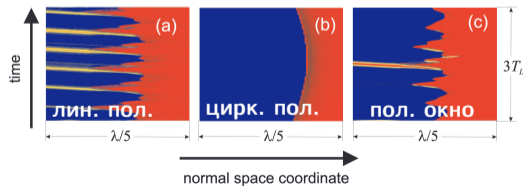
$$\begin{cases} \frac{du_z}{dt} = -\beta_x \frac{\partial a_x(t, z)}{\partial z} \Big|_{z=z_e} + n_e Z_e, \\ \frac{dz_e}{dt} = -\beta_z + \text{нач. усл.} + \text{гран. усл. для } a_x \end{cases}$$

Отраженный спектр и атто-импульсы:



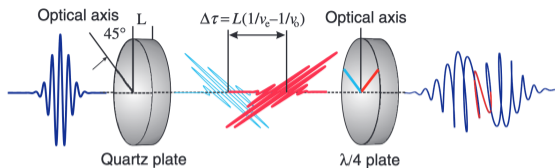
Слева: спектр отраженного импульса ($a_0 = 20$, гаусс. огибающая с длительностью 2 периода, $n_e = 81n_{cr}$). Справа: красным – норм. интенсивность отраженного импульса, синим – интенсивность атто-импульсов, при использовании фильтра от 30-й до 100-й гарм.

Зависимость динамики от поляризации:

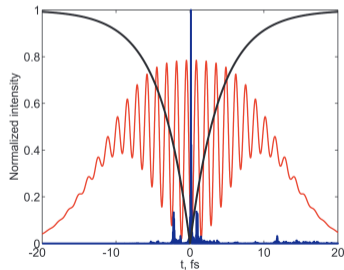


¹ Bulanov S. V., Naumova N. M., Pegoraro F. Phys. Plasmas 1, 745–757 (1994)

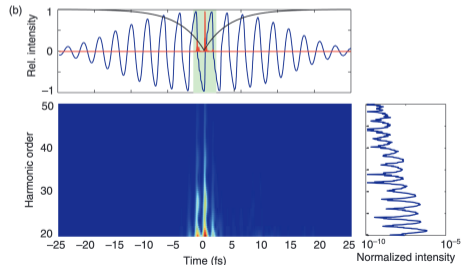
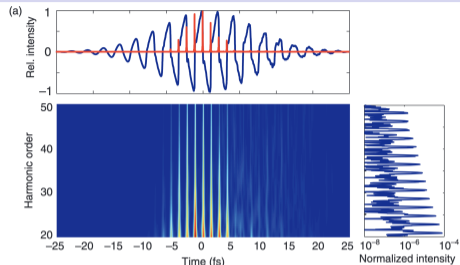
Поляризационное окно (polarization gating) – одиночные аттоимпульсы



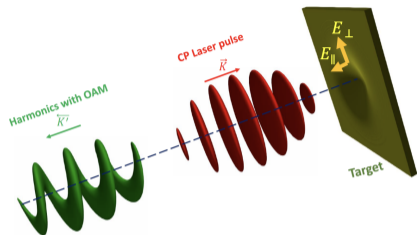
Метод получения импульса с динамической поляризацией (polarization gating): суперпозиция двух круговых поляризаций с противоположным вращением и сдвигом по времени Δt .



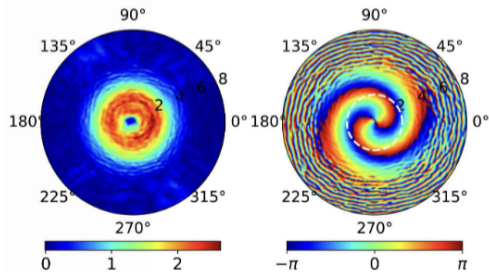
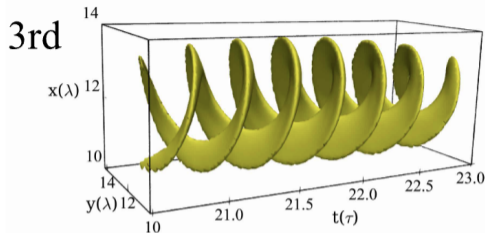
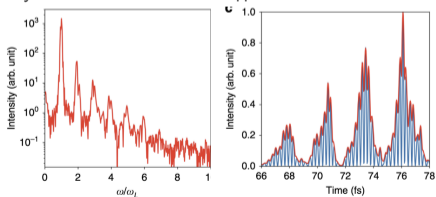
Интенсивность одиночного аттосекундного импульса (синяя линия, гармоники 20-100), а также интенсивность падающего импульса (красная линия) и эллиптичность (черная линия).



Гармоники с ОУМ



Генерация гармоник с орбитальным угловым моментом от деформированной мишени. Изначально плоская мишень деформируется в процессе взаимодействия самим лазерным импульсом за счет светового давления.



J.W. Wang, M. Zepf and S. Rykovanov, Nat. Comm., 10, 5554 (2019)

Гармоники с динамической ОУМ (self-torque)

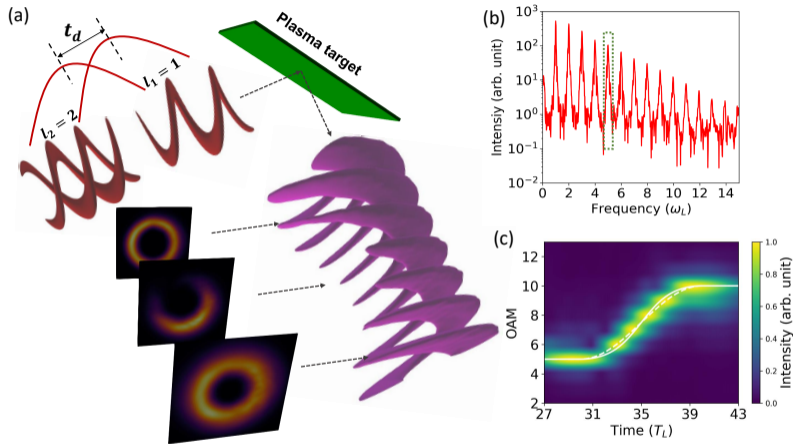


Схема генерации гармоник с динамической поляризацией от осциллирующего плазменного зеркала, возбуждаемого двумя релятивистскими лазерными импульсами с различными значениями орбитального углового момента $l_1 = 1$ и $l_2 = 2$. Также показаны три среза интенсивности для различных z и изоповерхность электрического поля. б) Спектр отраженного лазерного поля при фиксированной радиальной координате. с) Временная эволюция орбитального углового момента гармоники пятого порядка.

Глава 8. Методы борьбы с пондеромоторным уширением в нелинейном рассеянии Комптона

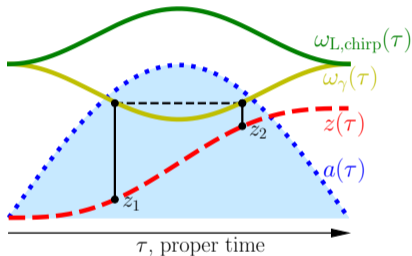
- Рассматриваются методы компенсации пондеромоторного уширения линии в нелинейном обратном рассеянии Комптона
- Предложены методы компенсации: нелинейное (*идеальное*) чирпирование; линейный противоположный чирп (дуplet); метод поляризационного окна
- Исследовано влияние радиационного трения и квантовых эффектов на компенсацию уширения

Основные результаты:

- Предложенные методы (чирпирование и метод поляризационного окна) подавляют пондеромоторное уширение; получены аналитические выражения и правила настройки, подтверждённые численным моделированием
- Метод поляризационного окна позволяет генерировать гамма-гребенку
- Сигнатуру радиационного трения можно наблюдать при компенсации уширения

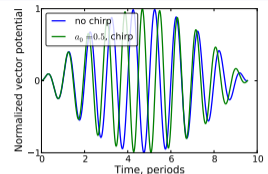
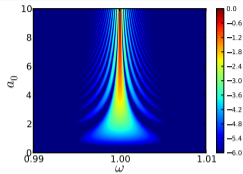
Нелинейное чирпирование для компенсации уширения

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

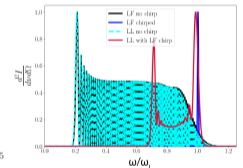
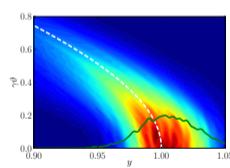


Качественная иллюстрация механизма уширения и формирования полос в нелинейном отклике электрона на сильную электромагнитную волну.

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



Слева: Спектры излучения (назад) для идеально чирпированного импульса при различных значениях a_0 (вертикальная ось). Справа: Временной профиль вект. потенциала для обычного импульса (синий цвет) и идеально чирпированного импульса с $a_0 = 0.5$.



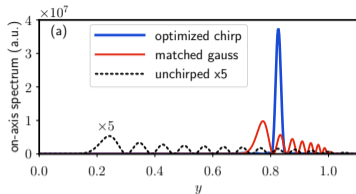
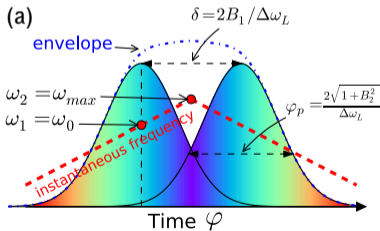
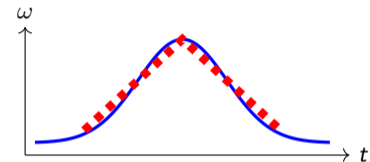
Слева: Энергетико-угловой спектр фотонов при рассеянии идеально чирпированного импульса с $a_0 = 1$ на пучке электронов. Справа: Спектры излучения (назад) для идеально чирпированного импульса с $a_0 = 2$ при учёте радиационного трения и без него, $\gamma = 1000$, $\lambda_L = 1.066$ мкм, длительность 30 циклов.

S. Rykovanov et al., Phys. Rev. Accel. Beams, 19, 030701 (2016)

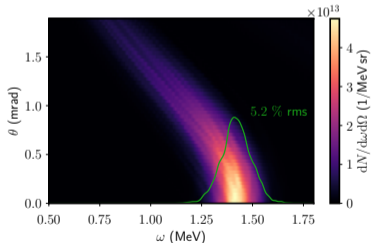
D. Seipt, S. Rykovanov, A. Surzhykov and S. Fritzsche, Phys. Rev. A, 91, 033402 (2015)

Дуплет линейно и противоположно chirпированных импульсов

Идея: два последовательных импульса с линейным chirпом и противоположными знаками компенсируют пондеромоторное уширение.



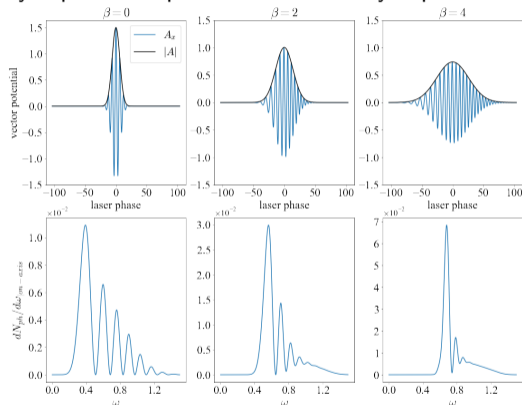
Спектр фотонов рассеянных назад для $a_0 = 2$, $\Delta\omega_L / \omega_0 = 0.1$ для chirп. дуплета (синий цвет) и неchirп. импульса (черный цвет).



Моделирование для реалистичного электронного пучка. Используется линейная оптика – планируется эксп. проверка.

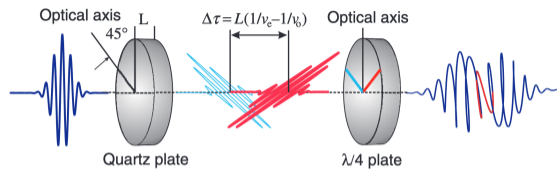
Одиночный линейно chirпированный лазерный импульс

Идея: Баланс chirпа – максимум фотонов против нелинейного уширения.

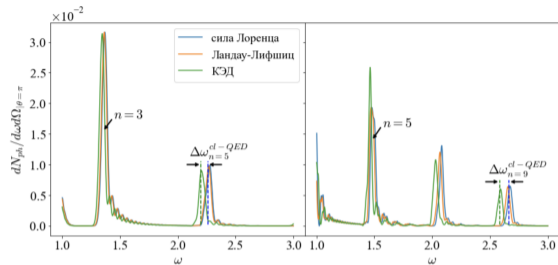
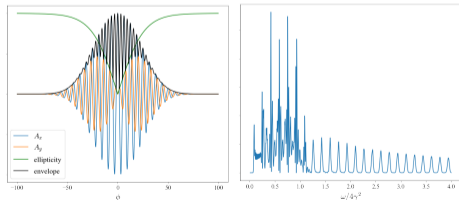


Верхний ряд: векторный потенциал линейно-chirпированного лазерного импульса ($a_0 = 1.5$, $\tau = 2\pi$) для разных параметров chirпа $\beta = 0, 2, 4$. Нижний ряд: соответствующие спектры рассеяния строго назад.

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.

Положения, выносимые на защиту (1/2)

- Установлена физическая структура спектрального уширения при обратном рассеянии Комптона: вклад от угловой и энергетической расходимости пучков складывается с вкладом от нелинейности взаимодействия; получен практический критерий коллимации, в полосе относительной ширины κ сосредоточена доля фотонов порядка κ .
- Показан доминирующий механизм пондеромоторного уширения в нелинейном режиме как следствие нестационарности светового давления при реалистичных огибающих; определены диапазоны параметров, где этот механизм задаёт предельную ширину линии.
- Показано, что для целевой относительной ширины линии $\sim 0.3\%$ влияние нелинейности существенно уже при $a_0 \approx 0.05$; сформулирован критерий необходимости учёта нелинейных поправок при проектировании узкополосных источников.
- Описан принцип компенсации пондеромоторного уширения посредством чирпирования; дуплет линейно и противоположно чирпированных импульсов обеспечивает сужение линии до уровня, задаваемого эмиттансом и апертурой, без потерь по выходу. Предложены эксперименты (в т.ч. на базе НЦФМ, включая ЛПУ-сценарии).

Положения, выносимые на защиту (2/2)

- Определены правила переноса спинового углового момента света в орбитальный угловой момент гармоник при нелинейном рассеянии циркулярно поляризованного излучения; показана спиральная фазовая структура гармоник. Показана возможность генерации аттосекундных импульсов с ОУМ в режиме когерентного рассеяния Комптона (Томсона).
- Показана возможность формирования некогерентной гамма-гребёнки с равномерным частотным шагом с использованием импульсов с динамической поляризацией (polarization gating) и генерации одиночных аттосекундных импульсов тем же методом.
- Выявлены спектральные сигнатуры классического радиационного трения в комптоновском/томсоновском излучении (асимметрия, красное смещение линии, хвосты распределений); определены области параметров для надёжного наблюдения.
- Сформулированы физические ограничения и законы масштабирования пиковой яркости комптоновских источников при фиксированной полосе: баланс коллимации, нелинейного уширения и полного числа фотонов; выделены режимы роста яркости без потери спектральной чистоты.

Список публикаций автора I

- 1 M. Chen, E. Esarey, CGR Geddes, C. Schroeder, G. Plateau, S. Bulanov, S. Rykovanov, and W. Leemans. Modeling classical and quantum radiation from laser-plasma accelerators. *Physical Review Special Topics - Accelerators and Beams*, 16(3):030701, March 2013. ISSN 1098-4402.
- 2 B. Dromey, D. Adams, R. Hörlein, Y. Nomura, S. G. Rykovanov, D. C. Carroll, P. S. Foster, S. Kar, K. Markey, P. McKenna, D. Neely, M. Geissler, G. D. Tsakiris, and M. Zepf. Diffraction-limited performance and focusing of high harmonics from relativistic plasmas. *Nature Physics*, 5(2):146–152, Feb 2009. ISSN 1745-2481.
- 3 B. Dromey, S. Rykovanov, M. Yeung, R. Hörlein, D. Jung, D. C. Gautier, T. Dzelzainis, D. Kiefer, S. Palaniyppan, R. Shah, J. Schreiber, H. Ruhl, J. C. Fernandez, C. L. S. Lewis, M. Zepf, and B. M. Hegelich. Coherent synchrotron emission from electron nanobunches formed in relativistic laser–plasma interactions. *Nature Physics*, 8(11):804–808, Nov 2012. ISSN 1745-2481.
- 4 B. Dromey, S. G. Rykovanov, C. L. S. Lewis, and M. Zepf. Isolation of Coherent Synchrotron Emission During Relativistic Laser Plasma Interactions. In Jorge Rocca, Carmen Menoni, and Mario Marconi, editors, *X-Ray Lasers 2014*, pages 121–126, Cham, 2016. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-19521-6.
- 5 C. G. R. Geddes, N. H. Matlis, S. Steinke, E. Esarey, D. E. Mittelberger, S. Rykovanov, C. B. Schroeder, Cs. Toth, J.-L. Vay, and W. P. Leemans. Laser technology for Thomson MeV photon sources based on laser-plasma accelerators. *AIP Conference Proceedings*, 1777(1):110002, 10 2016. ISSN 0094-243X.
- 6 Cameron G.R. Geddes, Sergey Rykovanov, Nicholas H. Matlis, Sven Steinke, Jean Luc Vay, Eric H. Esarey, Bernhard Ludewigt, Kei Nakamura, Brian J. Quiter, Carl B. Schroeder, Csaba Toth, and Wim P. Leemans. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res., B*, 350:116–121, 2015.

Список публикаций автора II

- 7 M Geissler, S Rykovanov, J Schreiber, J Meyer-ter Vehn, and G D Tsakiris. 3D simulations of surface harmonic generation with few-cycle laser pulses. *New Journal of Physics*, 9(7):218, jul 2007.
- 8 Thomas Heinzl, Chris Harvey, Anton Ilderton, Mattias Marklund, Stepan S. Bulanov, Sergey Rykovanov, Carl B. Schroeder, Eric Esarey, and Wim P. Leemans. Detecting radiation reaction at moderate laser intensities. *Phys. Rev. E*, 91:023207, Feb 2015.
- 9 R. Hörlein, S. G. Rykovanov, B. Dromey, Y. Nomura, D. Adams, M. Geissler, M. Zepf, F. Krausz, and G. D. Tsakiris. Controlling the divergence of high harmonics from solid targets: a route toward coherent harmonic focusing. *The European Physical Journal D*, 55(2):475–481, Nov 2009. ISSN 1434-6079.
- 10 R. Hörlein, S. Steinke, A. Henig, S.G. Rykovanov, M. Schnürer, T. Sokollik, D. Kiefer, D. Jung, X.Q. Yan, T. Tajima, and et al. Dynamics of nanometer-scale foil targets irradiated with relativistically intense laser pulses. *Laser and Particle Beams*, 29(4):383–388, 2011.

Список публикаций автора (продолжение) I

- 11 B. Lei, T. Teter, J. W. Wang, V. Yu. Kharin, C. B. Schroeder, M. Zepf, and S. G. Rykovanov. Flexible x-ray source with tunable polarization and orbital angular momentum from Hermite-Gaussian laser modes driven plasma channel wakefield. *Phys. Rev. Accel. Beams*, 22:071302, Jul 2019.
- 12 Bifeng Lei, Jingwei Wang, Vasily Kharin, Matt Zepf, and Sergey Rykovanov. Gamma-Ray Generation from Plasma Wakefield Resonant Wiggler. *Phys. Rev. Lett.*, 120:134801, Mar 2018.
- 13 Y. Nomura, R. Hörlein, P. Tzallas, B. Dromey, S. Rykovanov, Zs. Major, J. Osterhoff, S. Karsch, L. Veisz, M. Zepf, D. Charalambidis, F. Krausz, and G. D. Tsakiris. Attosecond phase locking of harmonics emitted from laser-produced plasmas. *Nature Physics*, 5(2):124–128, Feb 2009. ISSN 1745-2481.
- 14 M Ruijter, V Yu Kharin, and S G Rykovanov. Analytical solutions for nonlinear Thomson scattering including radiation reaction. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 51(22):225701, oct 2018.
- 15 Marcel Ruijter, Vittoria Petrillo, Thomas C. Teter, Maksim Valialshchikov, and Sergey Rykovanov. Signatures of the Carrier Envelope Phase in Nonlinear Thomson Scattering. *Crystals*, 11(5), 2021. ISSN 2073-4352.
- 16 S. G. Rykovanov. Gamma-ray sources based on nonlinear Compton scattering and their optimization. *Isotopes and Radiation Sources*. ZAO NTTs PLAZMAIOFAN, Russian Federation, 2018. ISBN 978-5-9903264-8-4. Plasma Physics and Fusion Technology.
- 17 S G Rykovanov, M Geissler, J Meyer ter Vehn, and G D Tsakiris. Intense single attosecond pulses from surface harmonics using the polarization gating technique. *New Journal of Physics*, 10(2):025025, feb 2008.

Список публикаций автора (продолжение) II

- 18 S G Rykovanov, H Ruhl, J Meyer-ter Vehn, R Hörlein, B Dromey, M Zepf, and G D Tsakiris. Plasma surface dynamics and smoothing in the relativistic few-cycle regime. *New Journal of Physics*, 13(2):023008, feb 2011.
- 19 S. G. Rykovanov, M. Chen, C. G. R. Geddes, C. B. Schroeder, E. Esarey, and W. P. Leemans. Virtual detector of synchrotron radiation (VDSR) - A C++ parallel code for particle tracking and radiation calculation. *AIP Conference Proceedings*, 1507(1):399–403, 12 2012. ISSN 0094-243X.
- 20 S G Rykovanov, C G R Geddes, J-L Vay, C B Schroeder, E Esarey, and W P Leemans. Quasi-monoenergetic femtosecond photon sources from Thomson Scattering using laser plasma accelerators and plasma channels. *Journal of Physics B: Atomic, Molecular and Optical Physics*, 47(23):234013, nov 2014.
- 21 S. G. Rykovanov, C. B. Schroeder, E. Esarey, C. G. R. Geddes, and W. P. Leemans. Plasma Undulator Based on Laser Excitation of Wakefields in a Plasma Channel. *Phys. Rev. Lett.*, 114:145003, Apr 2015.
- 22 S. G. Rykovanov, C. G. R. Geddes, C. B. Schroeder, E. Esarey, and W. P. Leemans. Reply to “Comment on ‘Controlling the spectral shape of nonlinear Thomson scattering with proper laser chirping’”. *Phys. Rev. Accel. Beams*, 19:098002, Sep 2016.
- 23 S. G. Rykovanov, C. G. R. Geddes, C. B. Schroeder, E. Esarey, and W. P. Leemans. Controlling the spectral shape of nonlinear Thomson scattering with proper laser chirping. *Phys. Rev. Accel. Beams*, 19(3):030701, mar 2016. ISSN 2469-9888.
- 24 S. G. Rykovanov, J. W. Wang, V. Yu. Kharin, B. Lei, C. B. Schroeder, C. G. R. Geddes, E. Esarey, and W. P. Leemans. Tunable polarization plasma channel undulator for narrow bandwidth photon emission. *Phys. Rev. Accel. Beams*, 19: 090703, Sep 2016.

Список публикаций автора (продолжение) III

- 25 S. G. Rykovanov, J. W. Wang, V. Yu. Kharin, B. Lei, C. B. Schroeder, C. G. R. Geddes, E. Esarey, and W. P. Leemans. Plasma Channel Undulator for Narrow- Bandwidth X-Ray Generation. In Tetsuya Kawachi, Sergei V. Bulanov, Hiroyuki Daido, and Yoshiaki Kato, editors, X-Ray Lasers 2016, pages 163–166, Cham, 2018. Springer International Publishing. ISBN 978-3-319-73025-7.
- 26 D. Seipt, S. G. Rykovanov, A. Surzhykov, and S. Fritzsche. Narrowband inverse Compton scattering x-ray sources at high laser intensities. *Phys. Rev. A*, 91(3): 033402, mar 2015. ISSN 1050-2947.
- 27 Daniel Seipt, Vasily Yu. Kharin, and Sergey G. Rykovanov. Optimizing Laser Pulses for Narrow-Band Inverse Compton Sources in the High-Intensity Regime. *Phys. Rev. Lett.*, 122:204802, May 2019.
- 28 M. A. Valialshchikov, V. Yu. Kharin, and S. G. Rykovanov. Narrow Bandwidth Gamma Comb from Nonlinear Compton Scattering Using the Polarization Gating Technique. *Phys. Rev. Lett.*, 126:194801, May 2021.
- 29 M. A. Valialshchikov, D. Seipt, V. Yu. Kharin, and S. G. Rykovanov. Towards high photon density for Compton scattering by spectral chirp. *Phys. Rev. A*, 106:L031501, Sep 2022.
- 30 M.A. Valialshchikov, V.Yu. Kharin, and S.G. Rykovanov. Polarisation gating technique in nonlinear Compton scattering: effect of radiation friction and electron beam nonideality. *Quantum Electronics*, 51(9):812, sep 2021.
- 31 Maksim A. Valialshchikov, Marcel Ruijter, and Sergey G. Rykovanov. On the Usage of Tapered Undulators in the Measurement of Interference in the Intensity- Dependent Electron Mass Shift. *Crystals*, 11(5), 2021. ISSN 2073-4352.

Список публикаций автора (продолжение) IV

- 32 J. W. Wang, C. B. Schroeder, R. Li, M. Zepf, and S. G. Rykovanov. Plasma channel undulator excited by high-order laser modes. *Scientific Reports*, 7(1): 16884, Dec 2017. ISSN 2045-2322.
- 33 Jingwei Wang, Matt Zepf, and Sergey Rykovanov. Intense attosecond pulses carrying orbital angular momentum using laser plasma interactions. *Nature communications*, 10:5554, 2019.
- 34 Jingwei Wang, Matt Zepf, Yuxin Leng, Ruxin Li, and Sergey G. Rykovanov. Self-torqued harmonics and attosecond pulses driven by time-delayed relativistic vortex lasers. *Phys. Rev. A*, 106:033515, Sep 2022.
- 35 M. Yeung, J. Bierbach, E. Eckner, S. Rykovanov, S. Kuschel, A. Sävert, M. Förster, C. Rödel, G. G. Paulus, S. Cousens, M. Coughlan, B. Dromey, and M. Zepf. Noncollinear Polarization Gating of Attosecond Pulse Trains in the Relativistic Regime. *Phys. Rev. Lett.*, 115:193903, Nov 2015.
- 36 Л. В. Григоренко, Н. В. Антоненко, И. А. Артюков, М. Н. Ачасов, А. Л. Барабанов, С. Л. Белостоцкий, Э. Э. Боос, И. Н. Борзов, В. В. Варламов, А. А. Васильев, et al. Проект научной программы ИНОК - комптоновского источника монохроматических гамма-квантов НЦФМ. *Физмат*, 1(3-4):123, 2023.
- 37 В. Г. Недорезов, С. Г. Рыкованов, and А. Б. Савельев. Ядерная фотоника: результаты и перспективы. *Усп. физ. наук*, 191(12):1281–1306, 2021.
- 38 С. Г. Рыкованов, А. Д. Тимошенко, Федотов А. М., Малахов М. П., and Костюков И. Ю. О роли нелинейности эффекта Комптона в проекте источника узкополосного гамма-излучения Национального центра физики и математики. *Известия Вузов. Радиофизика*, 67(10):829–846, dec 2024.

Материалы диссертации опубликованы в 38 печатных работах, из них 32 статьи в рецензируемых журналах; также 6 статей в сборниках трудов конференций, тезисах или журналах вне списка ВАК.