



Исследования перспективных схем генерации для ИКИ НЦФМ

А.А. Тищенко

Д.В. Гавриленко, Д.Ю. Сергеева, А.П. Потылицын, А.А. Савченко

Исследовательская лаборатория № 423

“Излучение заряженных частиц”

Национальный исследовательский ядерный университет «МИФИ»

Как увеличить число фотонов?

- Увеличить число электронов N в сгустке

Да, но: эффект пространственного заряда

- Использовать более интенсивный лазер

Да, но: красное смещение максимума энергии, генерация гармоник, пондеромоторное уширение, ... - энергия лазера расплзается по гармоникам

$$N_{ph} \propto \frac{\sigma_{Thomson}}{\sigma_{laser}^2 + \sigma_e^2} T_{int} a_0^2 N_e$$

- Уменьшить размер е-сгустка

Да, но: технические проблемы с синхронизацией + увеличение эмиттанса → уменьшение яркости.

- Синхронизировать фронты лазера и е-сгустка - так чтобы время взаимодействия возросло. - **об этом позже**

A. Debus *et al.*, Appl. Phys. B (2010).

K. Steiniger, A. Debus *et al.*, Building an Optical Free-Electron Laser in the Traveling-Wave Thomson-Scattering Geometry, Front. Phys. **6**, 155 (2019)

А еще?

Общие свойства излучения

поле


$$\mathbf{E}(\mathbf{r}, \omega) = \mathbf{E}_1(\mathbf{r}, \omega) \sum_{n=1}^N \exp(i\psi_n)$$

$\psi_n = \mathbf{k}\mathbf{r}_n$
фаза

$$I_N(\mathbf{n}, \omega) = I_1(\mathbf{n}, \omega) \left\langle \sum_{n=1}^N |\exp(i\psi_n)|^2 + \sum_{n=1}^N \sum_{\substack{m=1, \\ m \neq n}}^{N-1} \exp(i\psi_n) \exp(-i\psi_m^*) \right\rangle$$

интенсивность

$$I_N = I_1 \left(N + N^2 G_{coh} \right)$$



не когерентное когерентное

$$N = 10^9 \div 10^{11} !$$

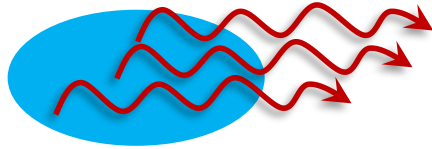
$$G_{coh} = \left| \int d^3r \exp(-i\mathbf{k}\mathbf{r}) f(\mathbf{r}) \right|^2$$

если G_{coh} не слишком мал

когерентный форм-фактор
– фурье-образ функции распределения (?!?)

Общие свойства излучения

Пучок из N электронов



$$\lambda \ll l$$

$$\lambda \leq l$$

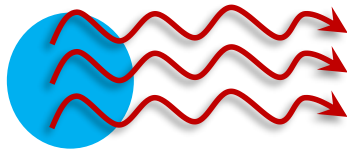


**Некогерентное
излучение**



$$I(\mathbf{n}, \omega) \propto N$$

Пучок из N электронов



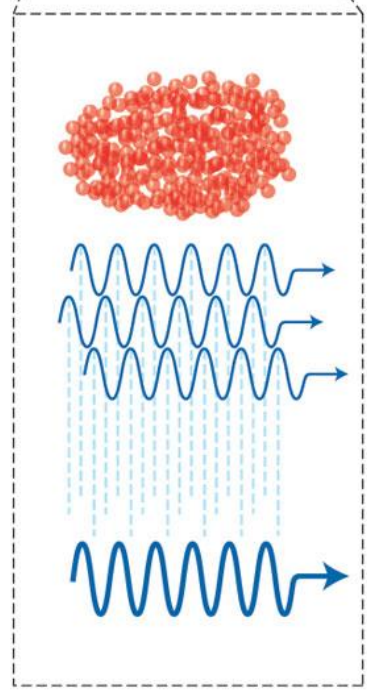
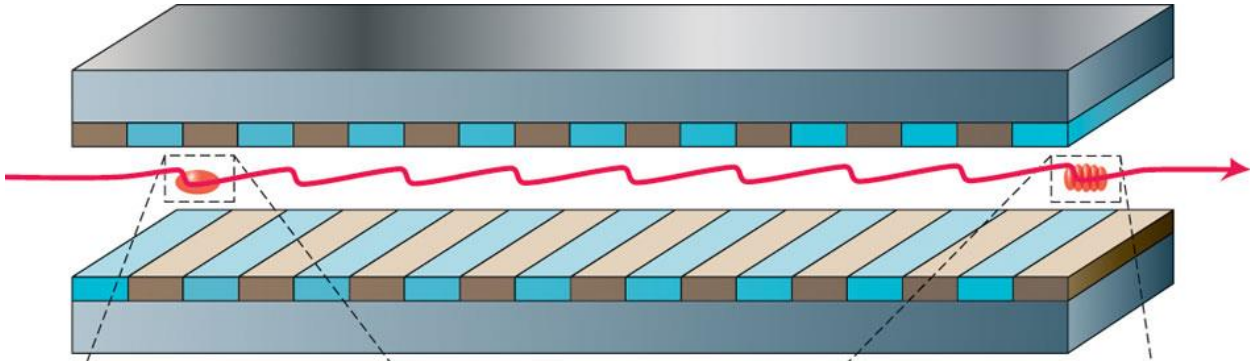
$$\lambda \gg l$$



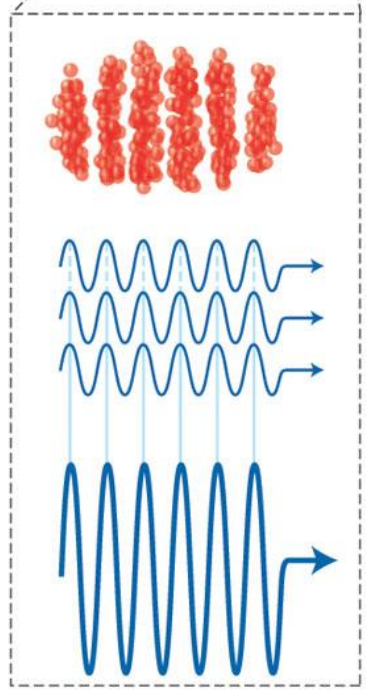
**Когерентное
излучение**



$$I(\mathbf{n}, \omega) \propto N^2$$



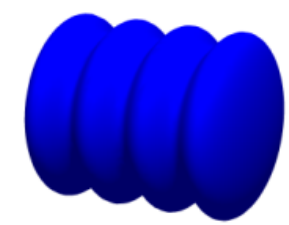
Incoherent emission:
electrons randomly phased



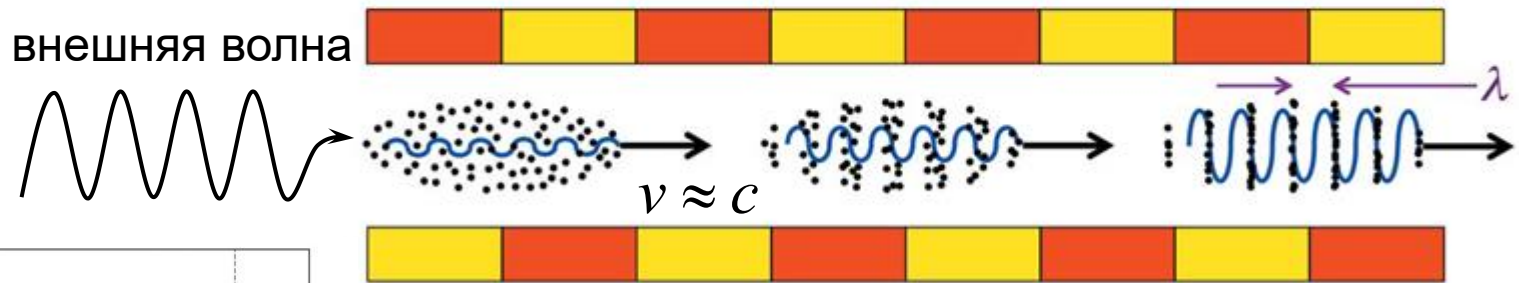
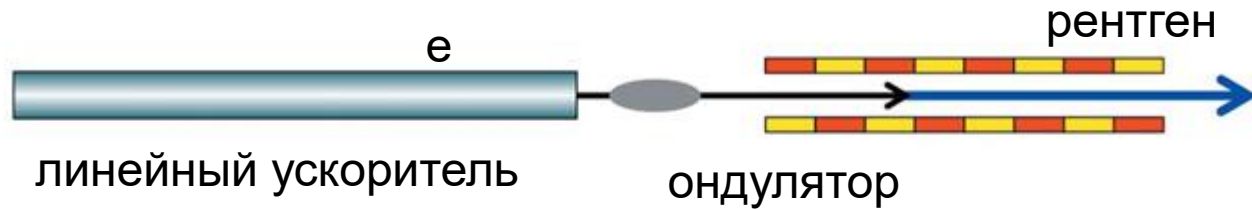
Coherent emission:
electrons bunched at
radiation wavelength

Ключевое для ЛСЭ

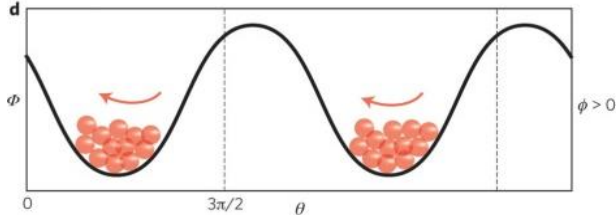
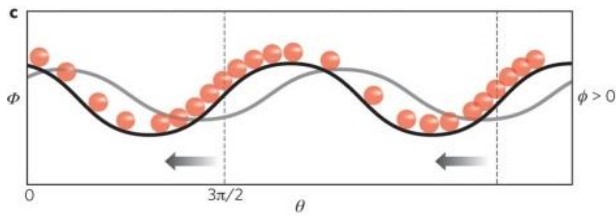
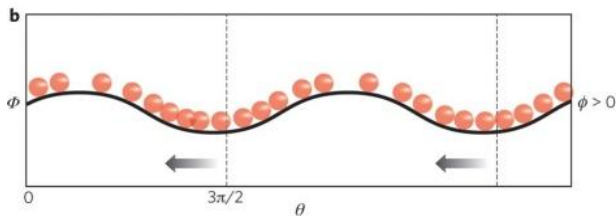
*Нужны
очень короткие пучки
или очень
малый период модуляции*



Лазеры на свободных электронах



ондулятор, необязательно длинный

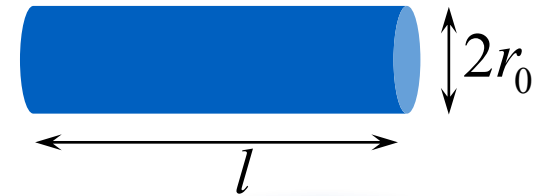


Y. Hwua, G. Margaritondo,
J. Synchrotron Rad. (2021).

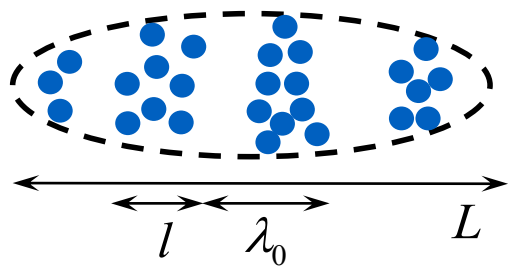
**А как рассчитать
модулированный сгусток?**

Общее о пучках заряженных частиц

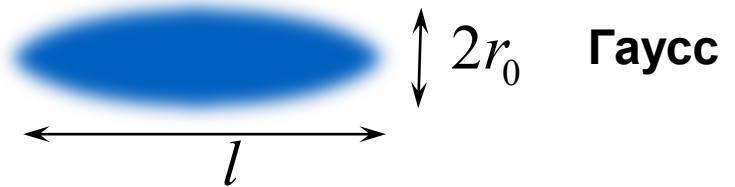
- функции распределения частиц в пучке



модулированные

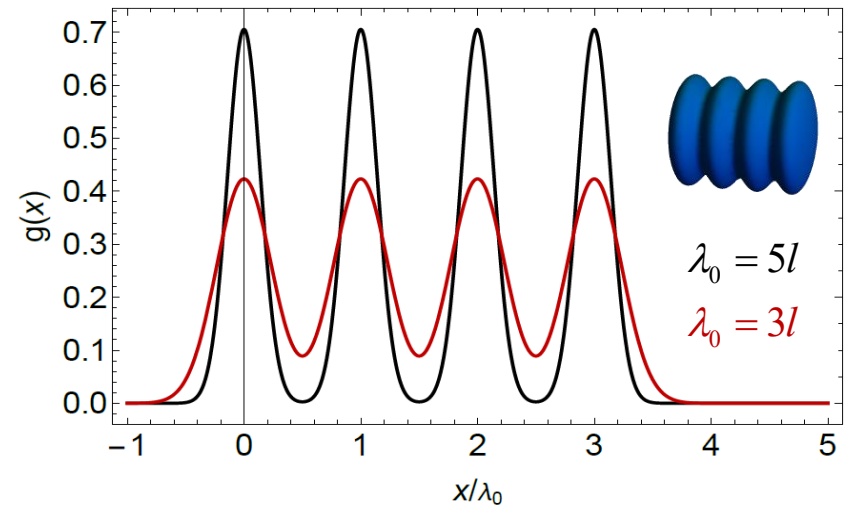
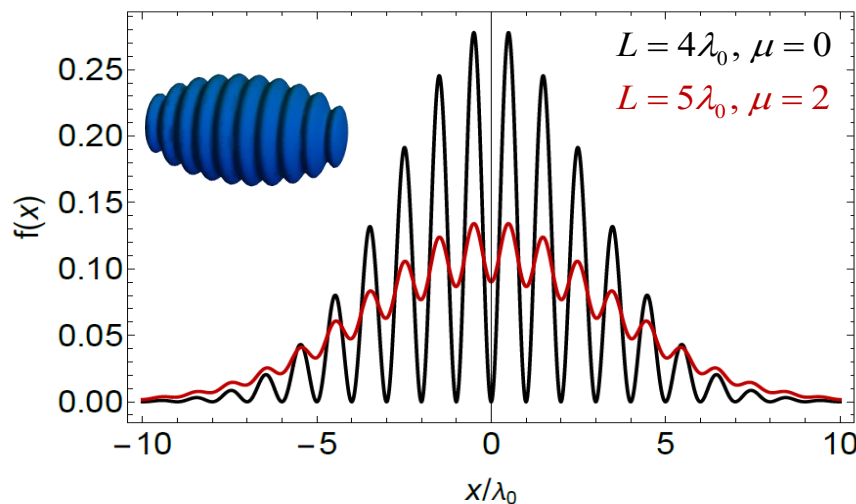


λ_0 – период модуляции
 μ – глубина модуляции
 (полная модуляция при $\mu=0$)



$$f(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}L} e^{-\frac{x^2}{L^2}} \frac{\mu + \sin^2(\pi x/\lambda_0)}{1 + 2\mu - e^{-\pi^2 L^2/\lambda_0^2}}$$

$$g(x) = \frac{1}{N_b \sqrt{\pi}l} \sum_{s=0}^{N_b-1} e^{-\frac{(x-s\lambda_0)^2}{l^2}}$$



Комптовский источник на модулированном пучке

$$\frac{dW^{bunch}(\mathbf{n}, \omega)}{d\omega d\Omega} = \frac{dW^{el}(\mathbf{n}, \omega)}{d\omega d\Omega} F^{bunch}$$

один электрон
форм-фактор сгустка

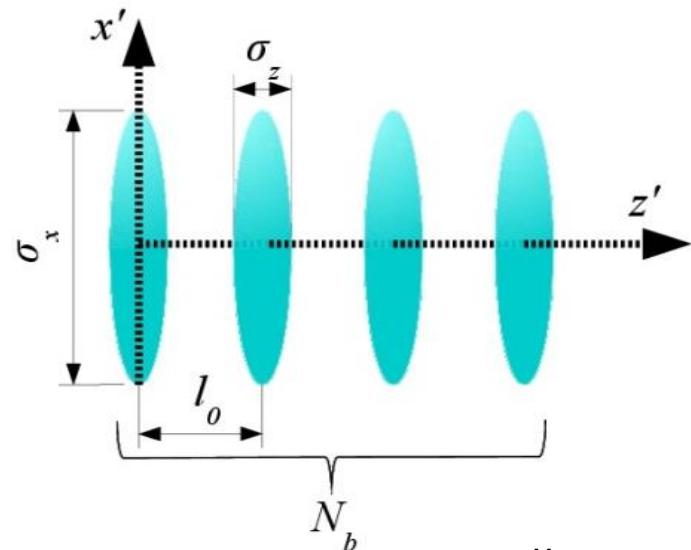
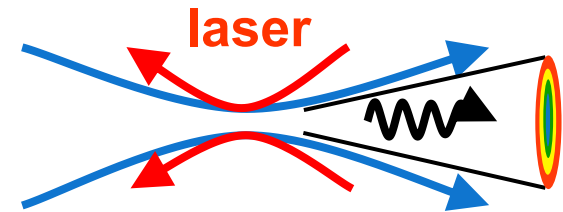
$$\frac{d^2W^{el}(\mathbf{n}, \omega)}{d\omega d\Omega} = \frac{\omega^2}{4\pi^2 c^3} \left| \int_0^T dt e(t) [\mathbf{n}\mathbf{v}(t)] \times \exp\{i\omega t - i\mathbf{k}\mathbf{R}(t)\} \right|^2$$

$$p_\mu = p_{0\mu} - \frac{e}{c} A_\mu + \frac{k_\mu}{kp_0} \left(\frac{e}{c} p_0 A - \frac{e^2}{2c^2} A^2 \right)$$

Волковские решения,
 А.И. Никишов, В.И. Ритус,
 ЖЭТФ **46**, 776 (1964)

$$F^{bunch} = N + N^2 G_{coh}$$

$$G_{coh} = \left| \int_V d\mathbf{r} e^{-i\mathbf{k}(\mathbf{r}-\mathbf{r}_0)} P(\mathbf{r}) \right|^2$$



модулированный пучок

Продольный**Когерентный форм-фактор**

$$G_{coh} = G^l G^{tr}$$

$$G^l = \exp \left[-\frac{\sigma_z^2 (k_z \cos \alpha - k_x \sin \alpha)^2}{2} \right] \frac{1}{N_b^2} \frac{\sin^2 (N_b l_0 (k_z \cos \alpha - k_x \sin \alpha)/2)}{\sin^2 (l_0 (k_z \cos \alpha - k_x \sin \alpha)/2)}$$

$$G^{tr} = \exp \left[-\frac{\sigma_y^2 k_y^2}{2} - \frac{\sigma_x^2}{2} (k_x \cos \alpha + k_z \sin \alpha)^2 \right]$$

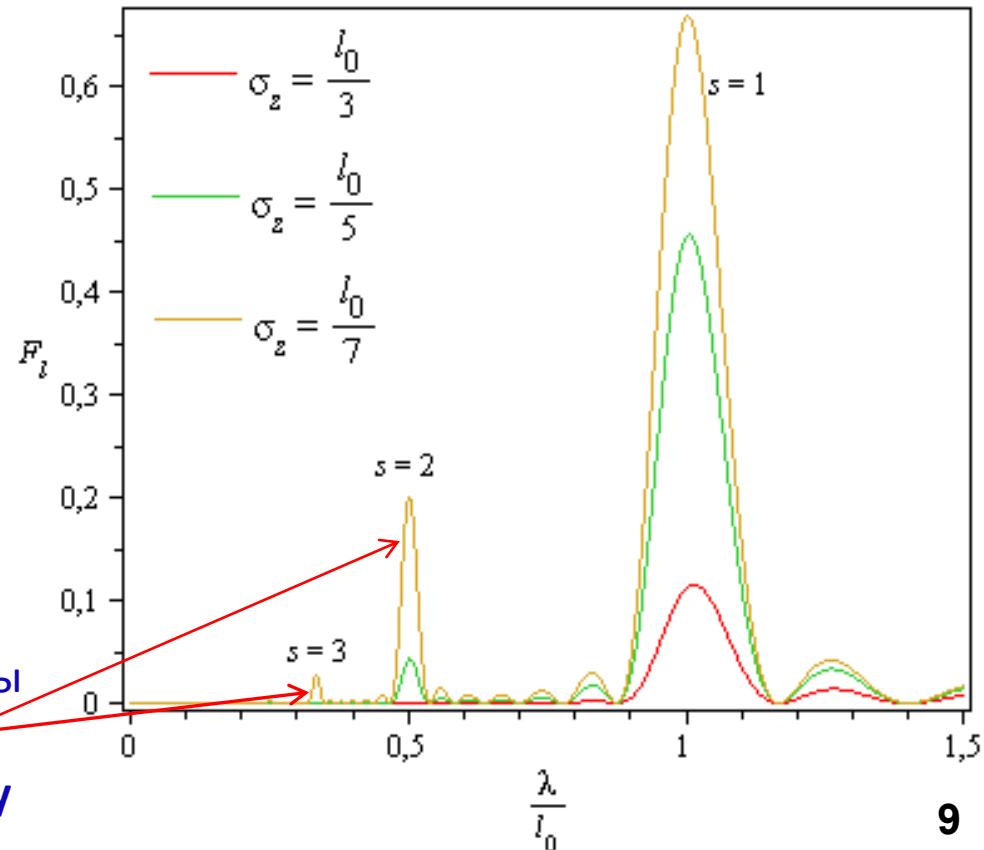
Продольный форм-фактор, $\alpha = 0$ **Поперечный****Резонансные соотношения**

$$\lambda = \frac{l_0}{s} (n_z \cos \alpha - n_x \sin \alpha)$$

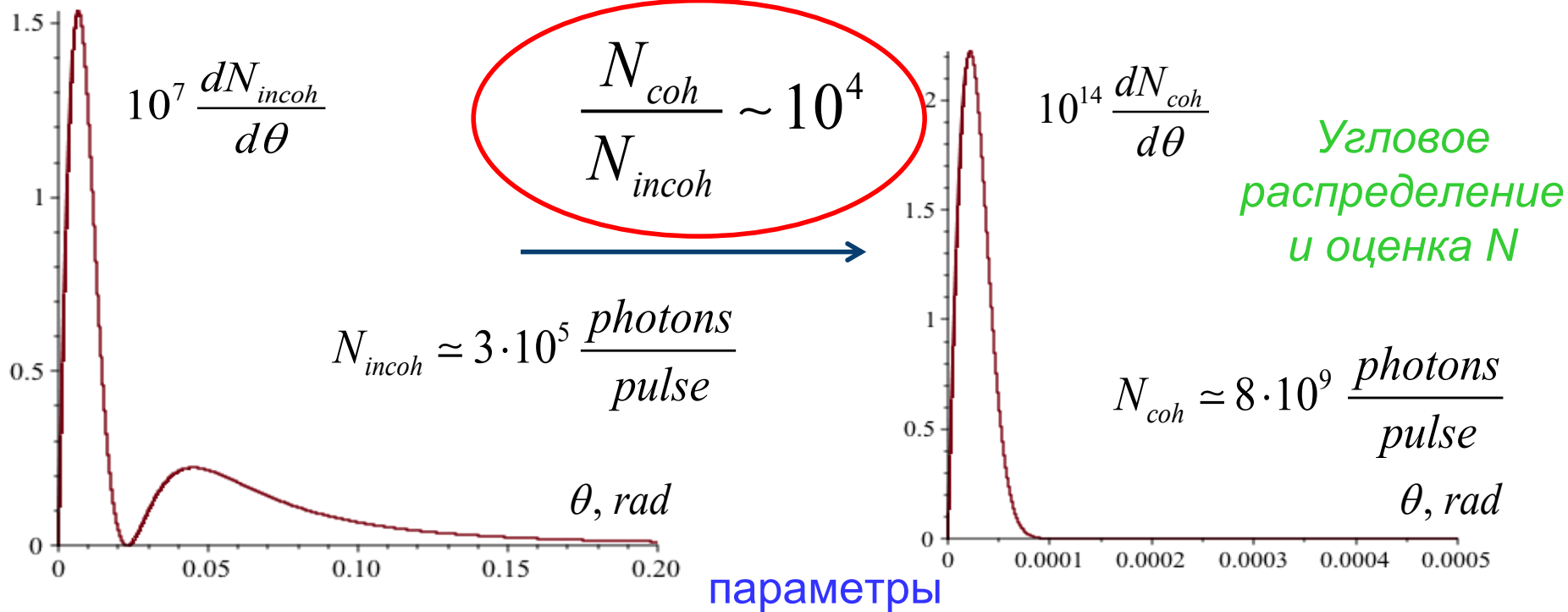
$$s = \dots, -2, -1, 1, 2, \dots$$

$$\mathbf{n} = (\sin \theta \cos \varphi, \sin \theta \sin \varphi, \cos \theta)$$

Даже если период недостаточно мал, мы можем работать на гармониках – они эффективно увеличивают частоту



Комптоновский источник на модулированном пучке



Nanni, Graves, et al., PRAB 2018

Tishchenko, Sergeeva, Proc. of High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress 2020.

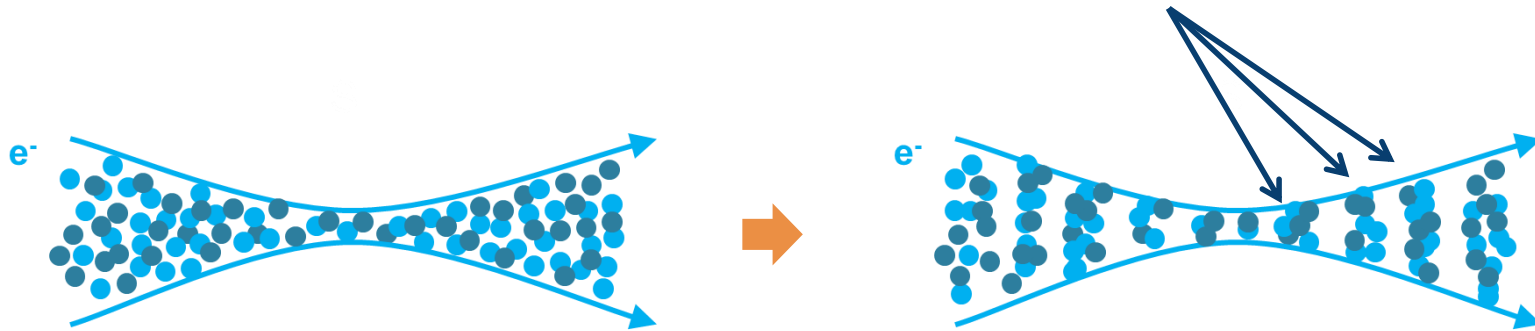
Schaap et al., NewJ.Phys.2022

Electron beam				Laser	
Energy	22.5 MeV	Length	$l_0/5$	Wavelength	10 μm
				Transverse size	30 μm
Lorentz factor	45	Transverse size	10 μm	Strength parameter a_0	0.03
Modulation period l_0	1.24 nm	Number of bunches	2000	Interaction time	80 fs

$a_0 \leq 0,2$
линейный режим

$$\frac{N_{coh}}{N_{incoh}} \sim 10^4 !$$

**Прекрасно – но нам нужны
аттосекундные длительности!
а лучше модуляция**



атто секунды - нано метры

атто сгустки - атто длительность лазерного импульса

**оптика на масштабах “атто” сегодня только возникает
(хотя, Нобелевские премии 2018, 2024)**

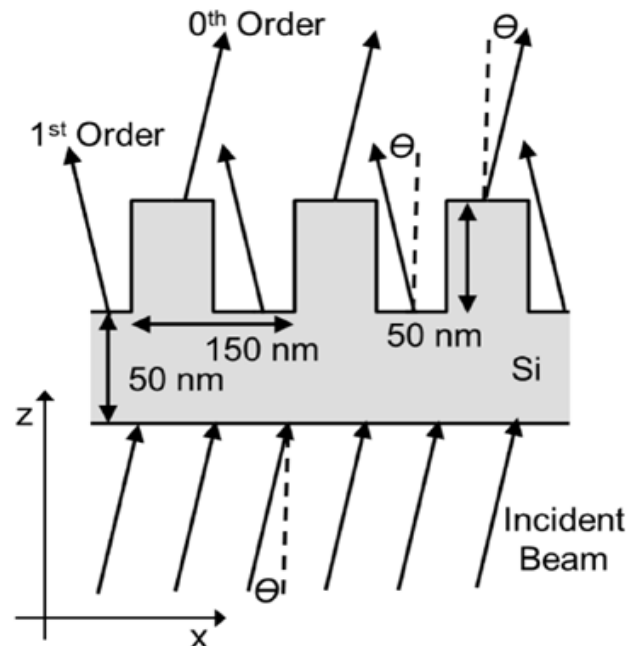
Физика близкого будущего - а насколько близкого?

Очевидный способ получить нано-модулированные пучки
– это XFEL, отработанный пучок.

Но в России нет рентгеновского ЛСЭ.

Более того, стандартный XFEL – энергии электронов в десятки ГэВ, и наномодуляция не поможет в условиях когда ОКР улетит в МэВ.
(если только брать мазер? Но и, если есть рентгеновский ЛСЭ, зачем ОКР в рентгене?) **А еще?**

E.A. Nanni, W.S. Graves, D.E. Moncton, [Nanomodulated electron beams via electron diffraction](#) and emittance exchange for coherent x-ray generation, Phys. Rev. AB (2018)



ASU (MIT)
1.24 nm

Государственный университет Аризоны

CXLS

Compact X-Ray Light Source

- **вводится в эксплуатацию (на 2025 г.)**
- 6–20 кэВ
- электроны 30 МэВ, 500 фс, 200 пКл
- лазер 1030 нм, 200 мДж, 1 пс, 1 кГц (PHAROS)
- 10^9 ф/с
- 18 м, хотят уменьшить

<https://biodesign.asu.edu/cxfel/about/>

T. Brown, et al., Upgrades to the photoinjector and ICS interaction point chamber of the CXLSNST Open Research (2025)

S. Tilton, Laser systems and diagnostics for the ASU compact X-ray source, Proc. of High-brightness Sources and Light-driven Interactions Congress, Austria (2024)

CXFEL

Compact X-Ray Free Electron Laser

- **строится (конец 2026)**
- 0,25–1 кэВ
- электроны 14–30 МэВ, 300 фс, 1 пКл
- лазер 1030 нм, 500 мДж, 800 пс, 1 кГц
(могут достичь 40 фс, 20 фс)
- 10^{11} ф/с
- 10-20 м
- **нано-банчирование за счет дифракции на кремниевой нанорешетке (250 эВ - 2,5 кэВ) < 1 нм!**

In laboratory: a soft X-ray source

Итак, получить усиление интенсивности ОКР на несколько порядков с помощью атто/нано модулированных е-пучков – реалистично. Но это в рентгене.

А что в гамма-диапазоне?

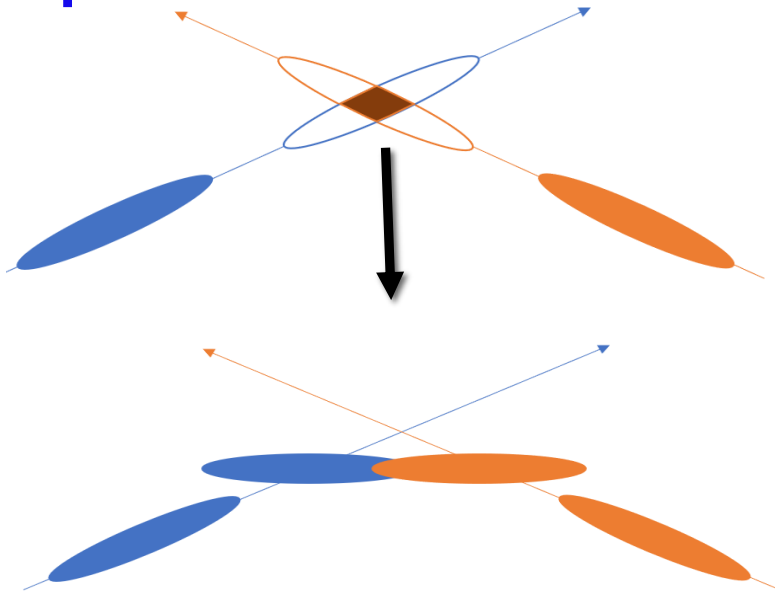
Нужны зепто-модулированные пучки (1 зепто = 10^{-3} атто)

- ✓ теория: неупругое рассеяние электронов в лазерном луче с большим градиентом поля поляризованного вдоль скорости
A. E. Kaplan, A. L. Pokrovsky, Laser gate: multi-MeV electron acceleration and **zeptosecond e-bunching**, Optics Express (2009).
- ✓ теория: неупругое рассеяние электронов в лазерном луче в газовой среде
H.K. Avetissian, G.F. Mkrtchian, **Zeptosecond Electron Pulse Train** and Ultrafast Coherent Control of Quantum States via Multiphoton Inelastic Cherenkov Diffraction, arXiv (2025)
- ✓ теория: сжатие е-сгустков до зептосекунд путем изменения их волновых функций с помощью специально подобранных широкополосных волновых полей
X. Jin, C.I. Velasko, F.J. Garcia de Abajo, **Zeptosecond free-electron compression** through temporal lensing, arXiv (2025).

Итак, зепто пока нет, даже в оптике.

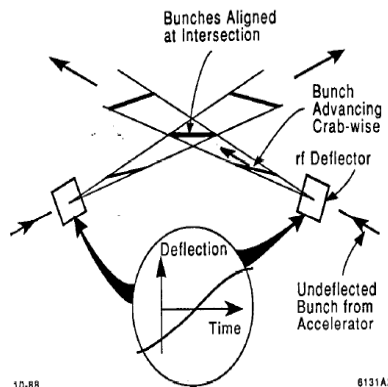
А тогда как усилить ОКР в гамма-диапазоне?

Краб-схема



Линейный e – p коллайдер:

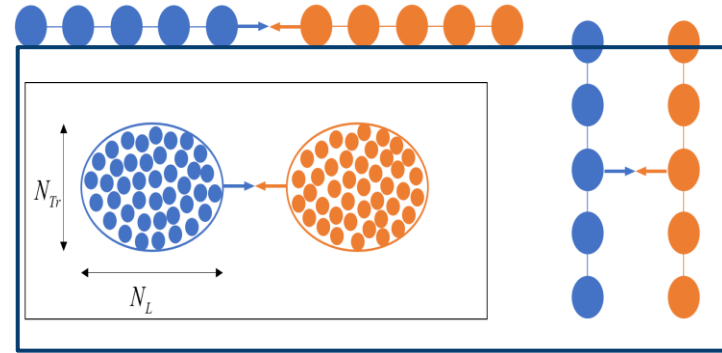
R.B. Palmer, Energy Scaling, Crab Crossing and the Pair Problem, Invited talk at the DPF Summer Study Snowmass 88, SLAC-PUB-4, 1988.



Рекорд светимости в физике коллайдеров!

$$N_{ph} = N_L N_e \sigma L,$$

$$L = c(1 + \beta \cos \varphi) \int d^4x F_L(x) F_e(x)$$



Предельные случаи:

каждая с каждой каждая с одной

Выгодно, чтобы импульсы проходили друг через друга **вдоль направления их "вытянутости"!**

Краб-схема в ОКР даст выигрыш в светимости: много раз или порядков! В зависимости от формы импульсов

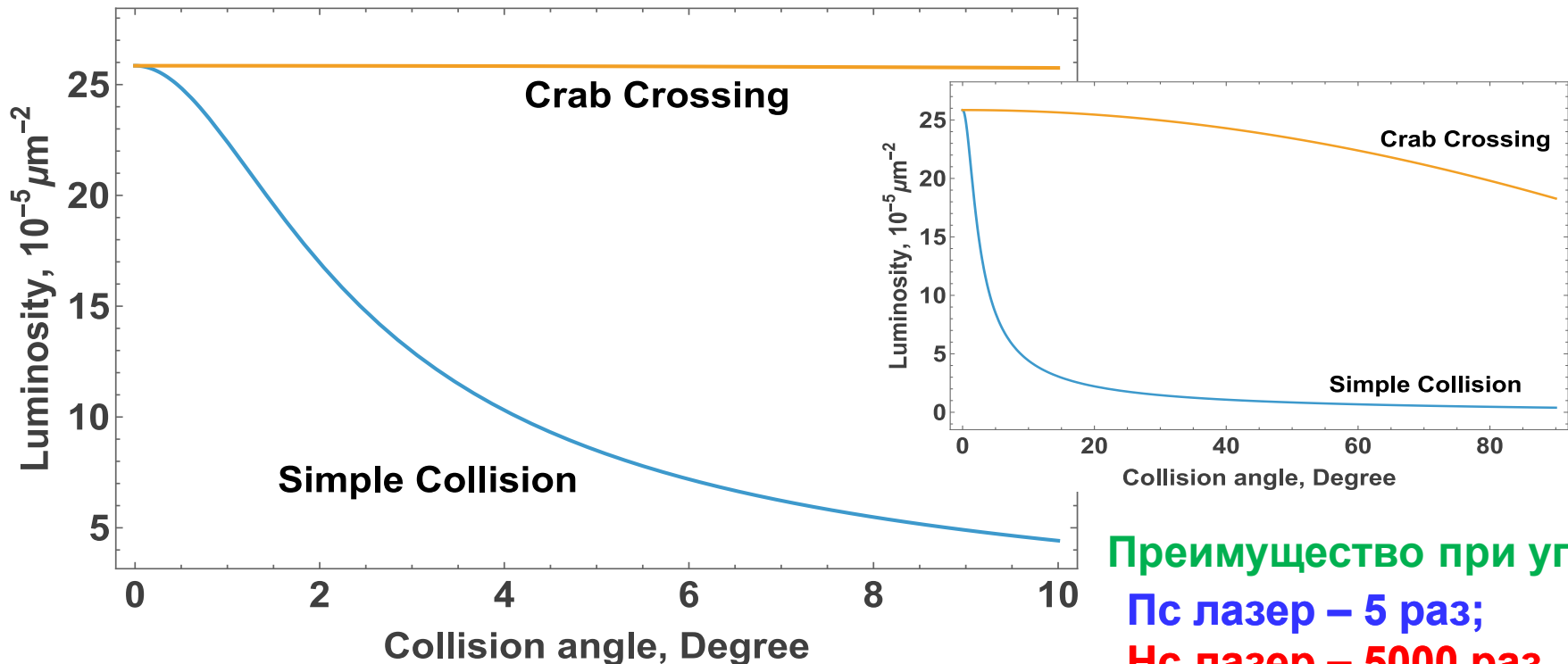
A.P. Potylitsyn, D.V. Gavrilenko, M.N. Strikhanov, A.A. Tishchenko, *Crab crossing in inverse Compton scattering*, Phys. Rev. AB (2023).

Преимущество краб-схемы: “мягкая” точка встречи

Радиус электронного пучка	30 мкм
Длительность электронного пучка	10 пс = 3мм
Длительность лазерного пучка	8 нс = 2.4м, 8пс = 2.4мм
Диаметр перетяжки	30 мкм

35-120
МэВ

Данные
из докл.
Андрея
Шемухина
РАН, 2025



Преимущество при угле 7°

Пс лазер – 5 раз;

Нс лазер – 5000 раз

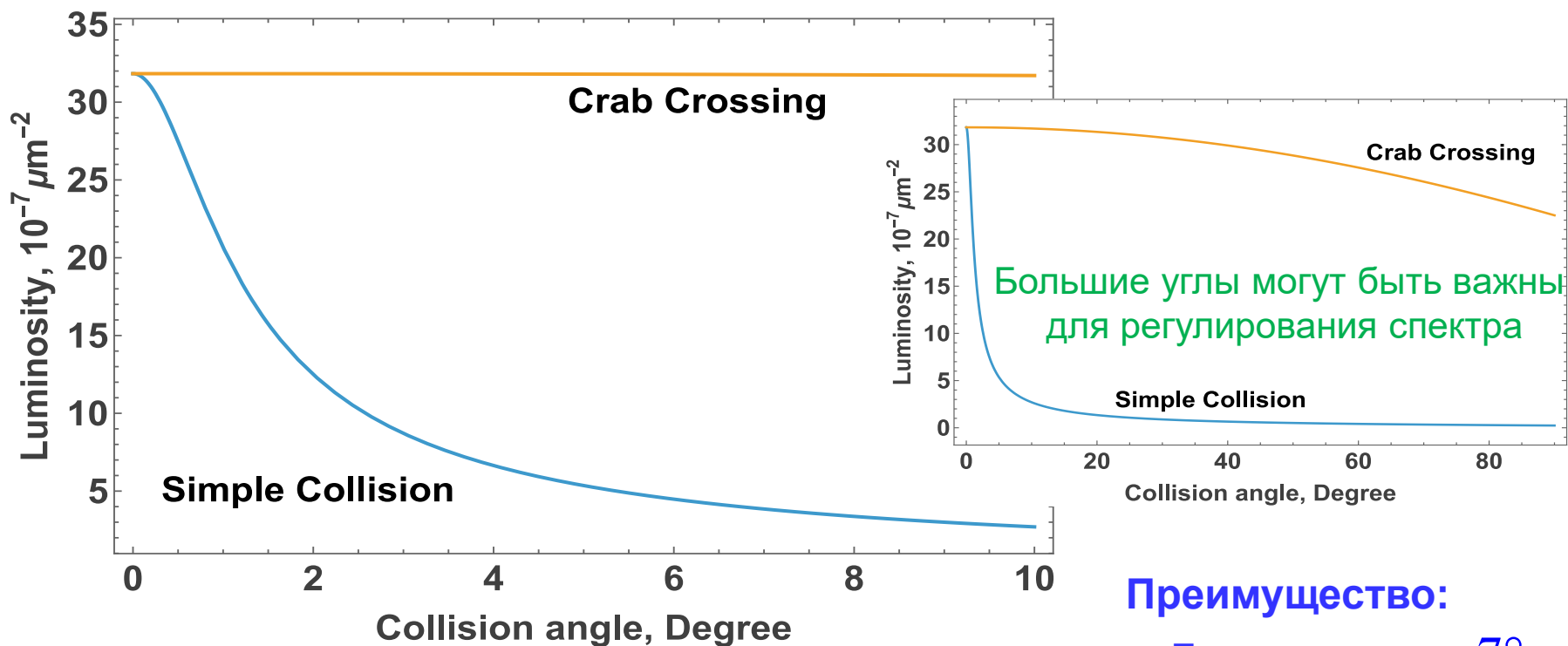
Чем длиннее лазерный импульс, тем больше цена промаха!

Преимущество краб-схемы: “жесткая” точка встречи

Радиус электронного пучка	0,1 мм
Длиительность электронного пучка	1 мм
Длиительность лазерного пучка	100 пс = 3 см
Диаметр перетяжки	0,2 мм

2 ГэВ

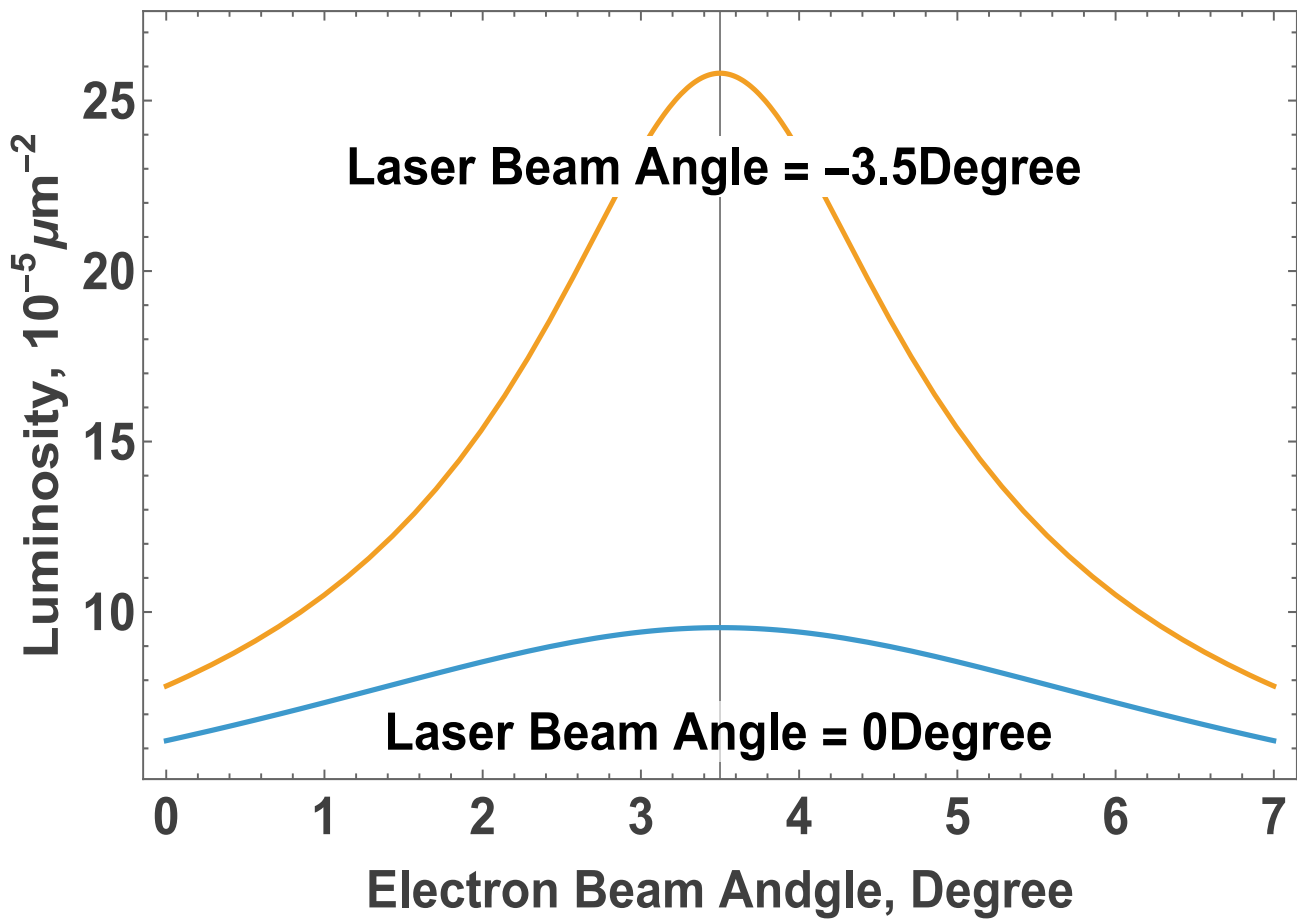
Данные
из докл.
Ярослава
Гетманова
РАН, 2025

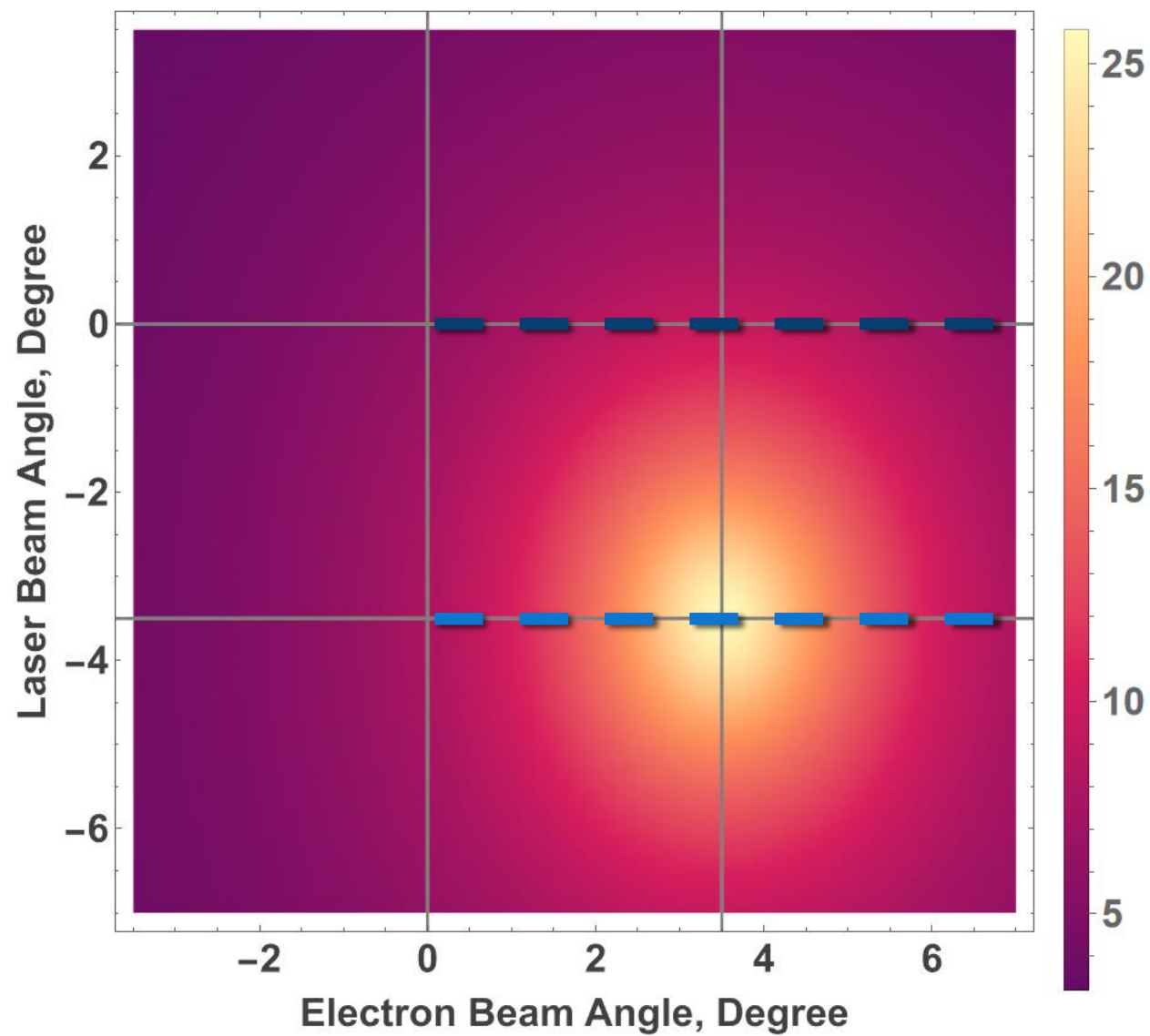


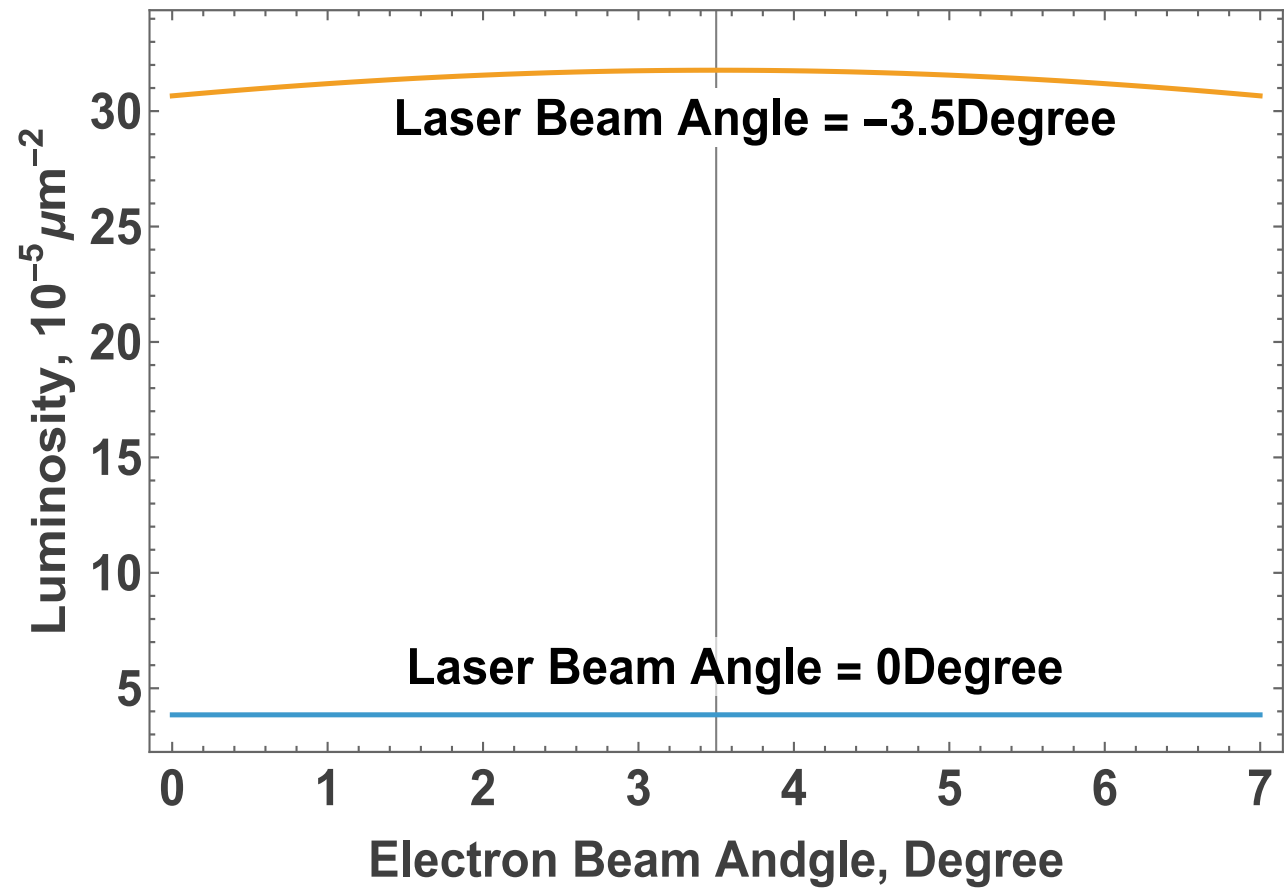
Преимущество:

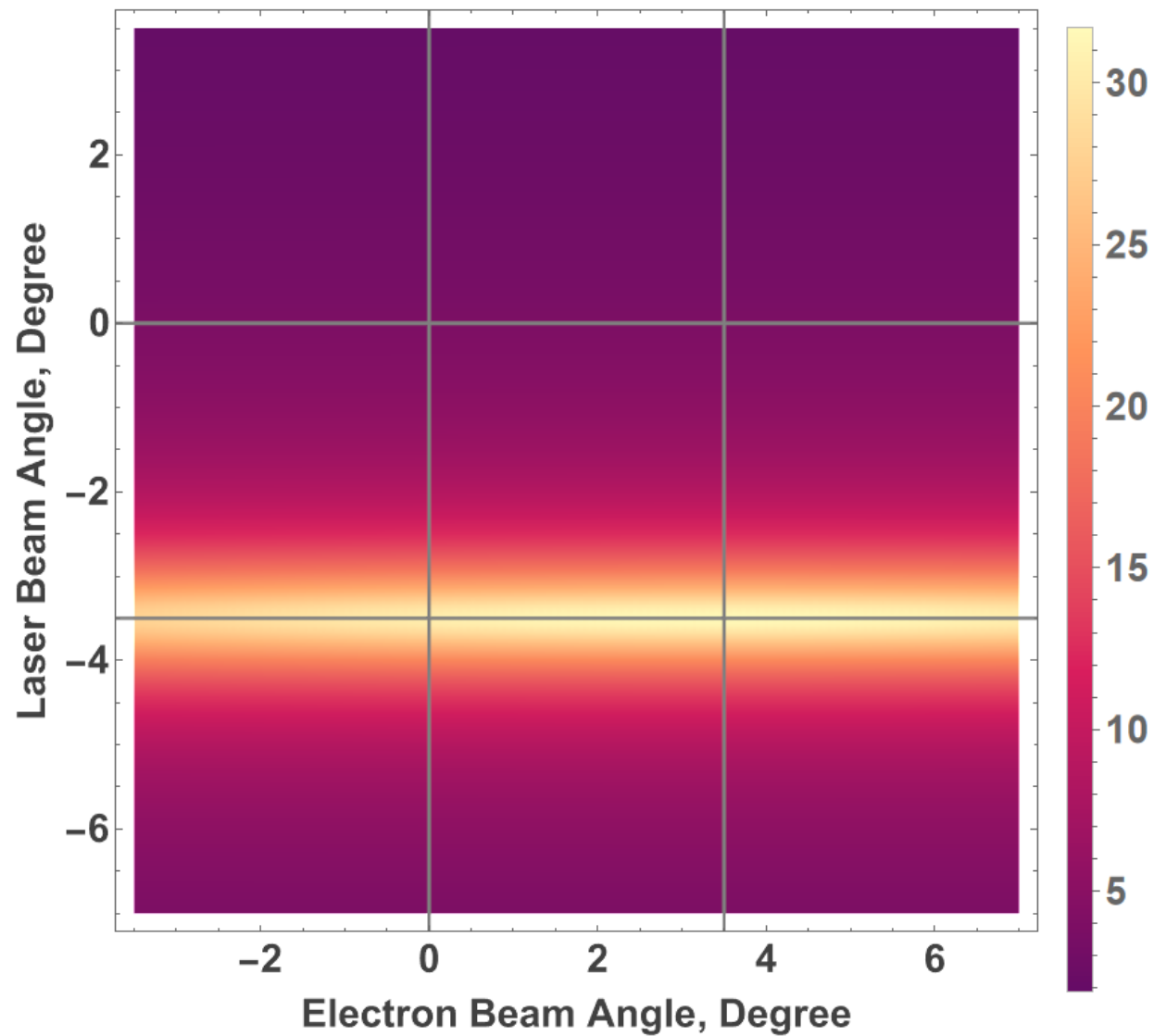
7 раз при угле 7°
 ~ 100 раз при угле 90°

Спасибо за внимание!





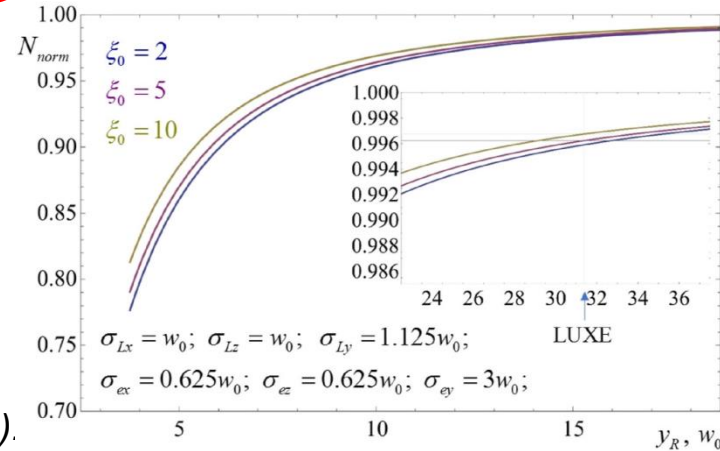
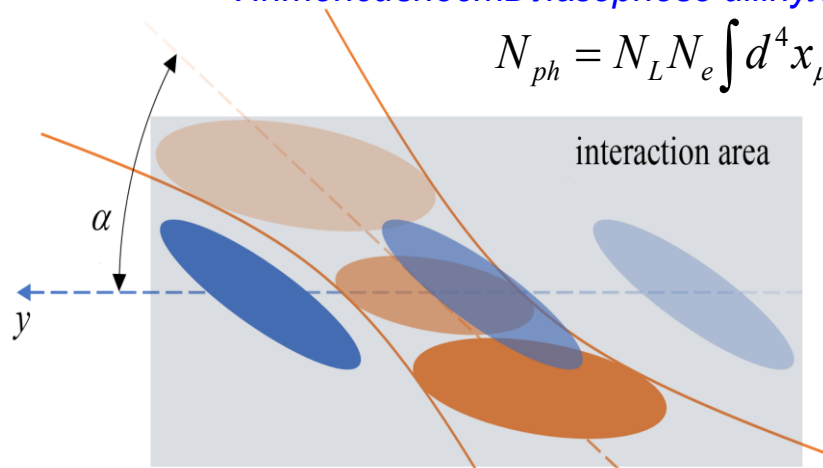




Краб-схема – эффект конечности рэлеевской длины

Интенсивность лазерного импульса меняется вдоль траектории!

$$N_{ph} = N_L N_e \int d^4 x_\mu \sigma(y) F_L(x_\mu) F_e(x_\mu)$$



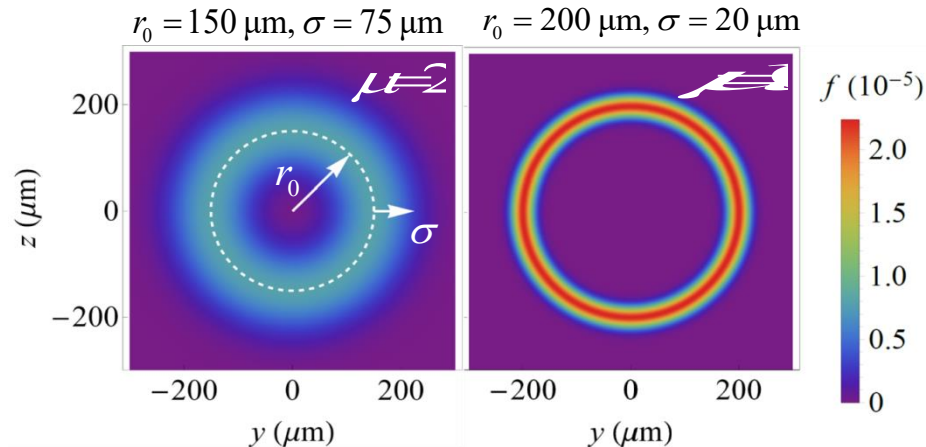
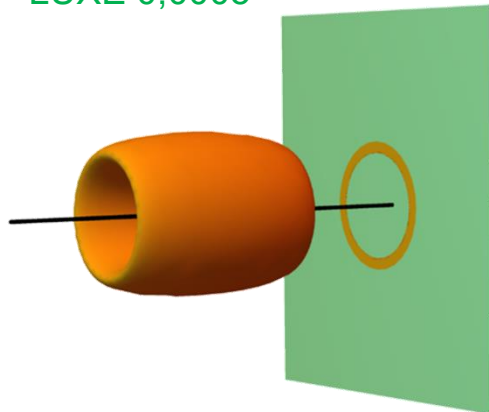
D. Gavrilenko,
A. Potylitsyn,
A. Tishchenko,
*Finite Rayleigh
length in
Compton
backscattering*
Nucl.Instr.and
Meth.A (2025).

G. Toraldo di
Francia.
M. Berry,
N. Zheludev

Е-сгусток (синим) и лазерный импульс (оранжевым).

Для Гаусс-Лагерровых пучков вследствие эффекта супер-осцилляций Рэлеевская длина может быть очень мала, и мы предсказываем, что ее влияние на ОКР будет порядка 20% и более.

LUXE 0,0005



полюс
пучки

D. Yu. Sergeeva,
D.V. Karlovets, A.A.
Tishchenko *Optics
Letters* (2025);

Сергеева, Тищенко
Письма в ЖЭТФ
(2025).

Общее о пучках заряженных частиц

- энергия, ток, размер, форма пучков

размер

$$1 \text{ нс} \leftrightarrow 30 \text{ см}$$

$$1 \text{ пс} \leftrightarrow 0,3 \text{ мм (ТГц)}$$

$$1 \text{ фс} \leftrightarrow 0,3 \text{ мкм (видимый)}$$

$$1 \text{ ас} \leftrightarrow 0,3 \text{ нм}$$

заряд

$$e = 1,6 \times 10^{-19} \text{ Кл}$$

$$N_e = 10^9 \div 10^{11};$$

$$Q_{\text{bunch}} = 10 \text{ пКл} \div \text{нКл}$$

$$\text{нано} - 10^{-9}, \text{ пико} - 10^{-12}$$

$$\text{фемто} - 10^{-15}, \text{ атто} - 10^{-18}$$

ТОК

$$10^{-6} \div 10^4 \text{ А} // \text{ мкА} - \text{кА}$$

исслед. ускоритель – милли А

ЛНС – 0,58 А (ток в розетке 16 А)

$$2808 \text{ сгустков} \leftrightarrow 10^{11} \frac{\text{протонов}}{\text{в сгустке}}$$



размер

обычно длина пучков 10 нс ÷ 100 фс;

(атто / нано – длительности

– передний край исследований);

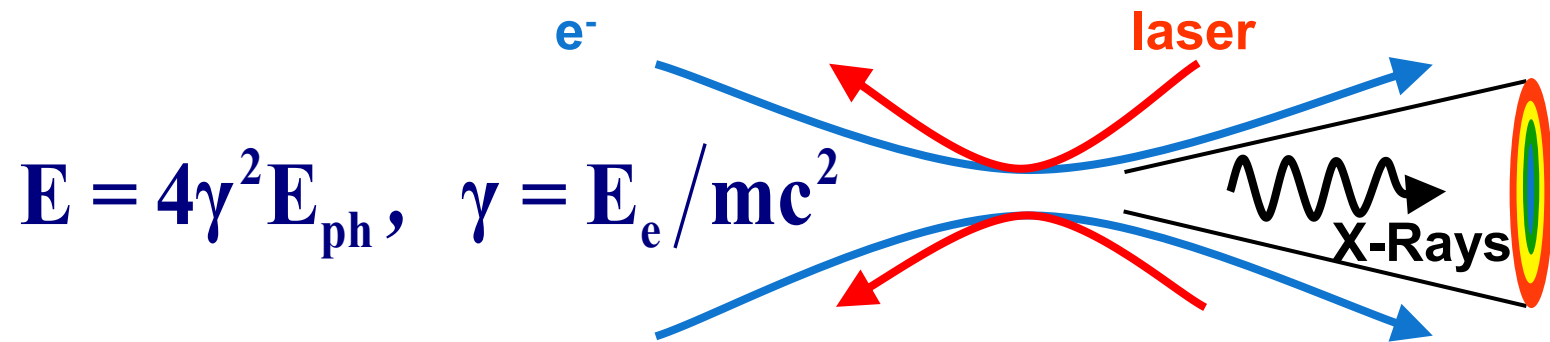
поперечный размер

1 нм ÷ 100 мкм – слаботочные ускорители

~ (1 ÷ 10) мм – сильноточные ускорители

In laboratory: a soft X-ray source

Thomson/Compton backscattering



X-ray tubes

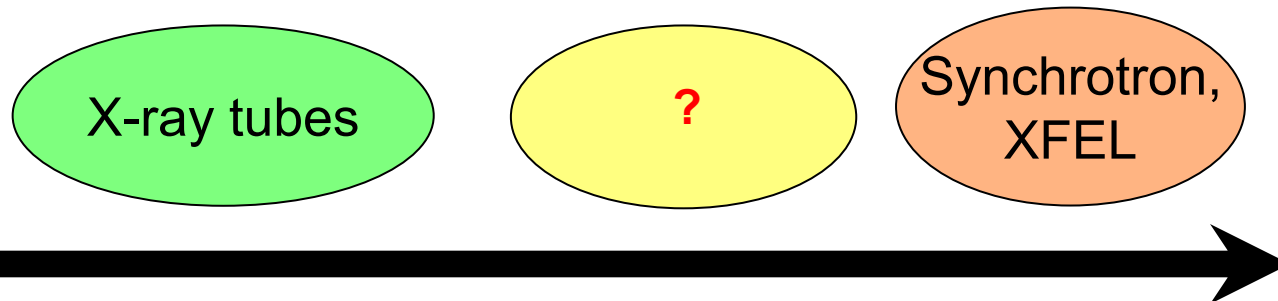
Compton
source!

Synchrotron,
XFEL



In laboratory: a soft X-ray source

	X-ray tube	Synchrotron
Average spectral brightness $s^{-1}mm^{-2}mrad^{-2}0,1\%$	$<10^8$	$10^{16}-10^{21}$
Divergence, mrad	4π	<0.1
Size, m	0,1–1	20–1000
Price, $10^6\$$	$10^{-4}-10^{-1}$	100–1000



In laboratory: a soft X-ray source

Design	Status	Type	E_x (keV)	Ph/s	Brightness, Ph/s $\text{mm}^{-2}\text{mrad}^{-2}$ 0,1% BW	σ_y (μm)
MuCLS	e	SR	15 - 35	10^{10}	10^9	42
Lyncean	e	SR	10 - 20	10^{11}	10^{11}	45
TTX	e	SR	20 - 80	10^{12}	10^{10}	50
BriXS	f	Linac (SC)	83 - 88	10^{13}	10^{13}	14
ThomX	e	SR	20 - 90	10^{13}	10^{11}	70
KEK	e	Linac (SC)	35	10^{13}	10^{11}	10
ASU (MIT)	f	Linac	12	10^{13}	10^{12}	2
ODU CLS	f	Linac (SC)	1.2 - 12	10^{13}	10^{14}	3

Lumitron Technologies; LEXG

e - existing design

f - funded design

K. Deitrick et al., PR AB (2018)

Theoretically predicted average flux \sim 10^{14} ph/s

W.S. Graves et al., Nucl. Instr. And Meth. A (2009)

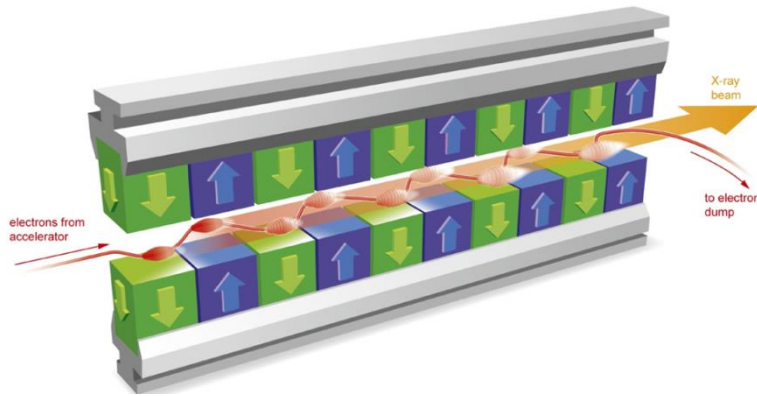
angiography - 10^{12} ph/ms \rightarrow 10^{15} ph/s – more 10 needed!

In laboratory: a soft X-ray source

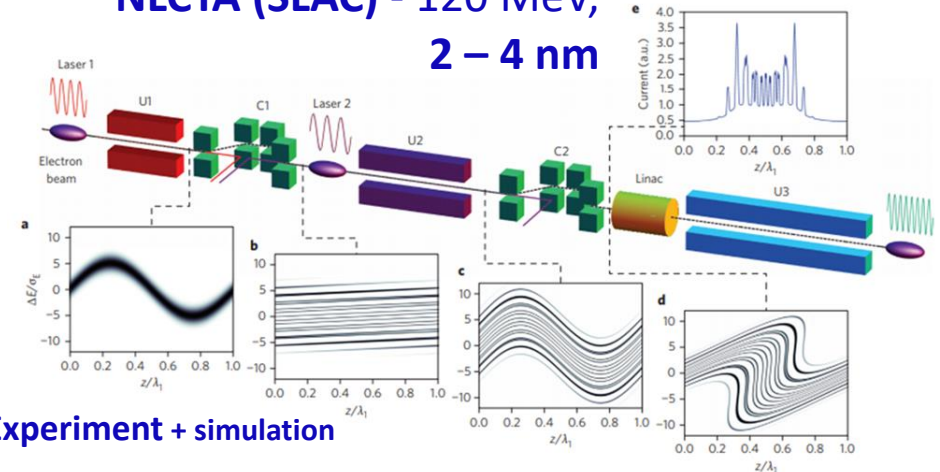
**Are atto-second/nanomodulated
bunches feasible?**

Atto-second/nanomodulated e-bunches

European XFEL - 17.5 GeV, 0.1 nm



NLCTA (SLAC) - 120 MeV,
2 – 4 nm



Experiment + simulation

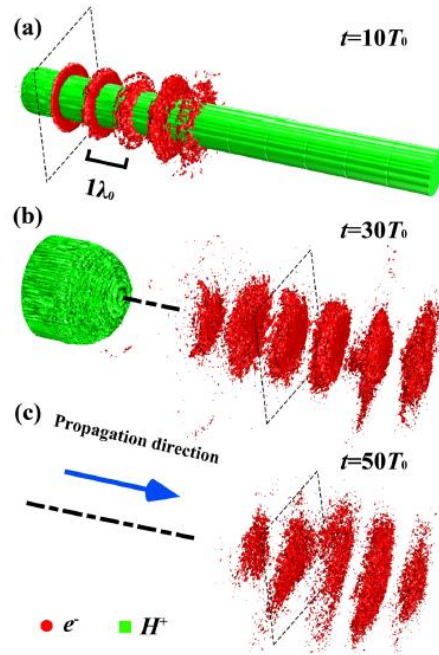
E. Hemsing, et al., Echo-enabled harmonics up to the 75th order from precisely tailored electron beams, *Nature Photonics* **10**, 512 (2016).

China, UK
470 MeV

200 nm (up to 60 nm)
(1 μ m spacing)

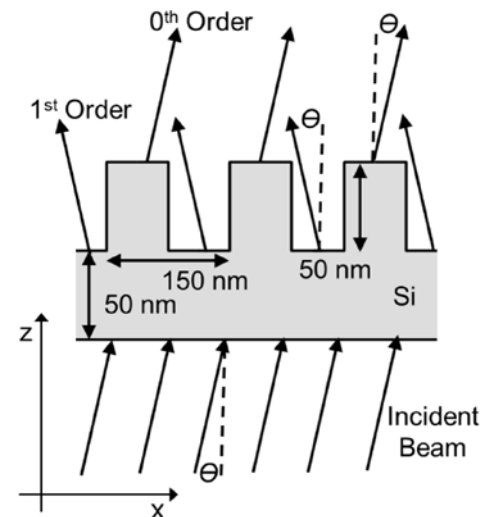
simulation

L.-X. Hu, et al., Attosecond electron bunches from a nanofiber driven by Laguerre-Gaussian laser pulses, *Scientific Reports* **8**, 7282, (2018)



ASU (MIT)
22.5 MeV,
1.24 nm

E.A. Nanni, W.S. Graves, D.E. Moncton, Nanomodulated electron beams via electron diffraction and emittance exchange for coherent x-ray generation, *Phys. Rev. AB* **21**, 014401 (2018)



OAM = twisted light

Atto-second/nanomodulated e-bunches

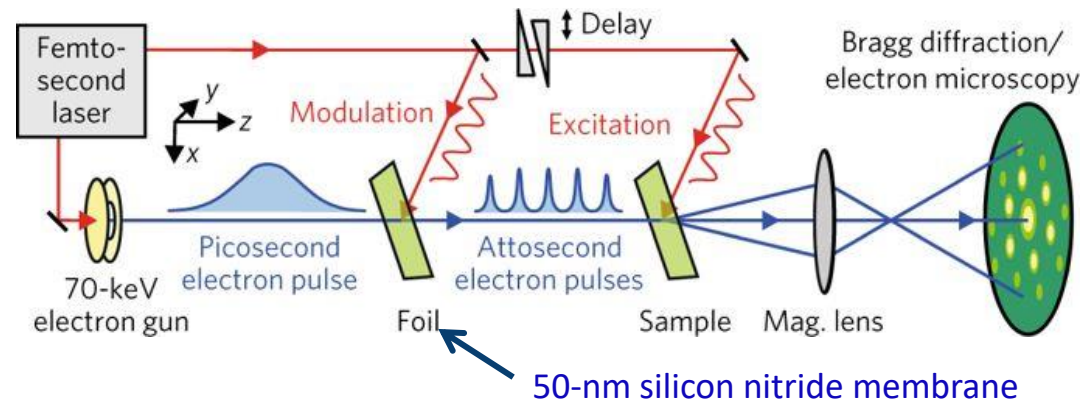
Germany

70 keV

250 nm

Experiment + simulation

Y. Morimoto, P. Baum, Diffraction and microscopy with attosecond electron pulse trains, Nature Phys **14**, 252 (2018).



Phase shift of the drive field because of dielectric membrane

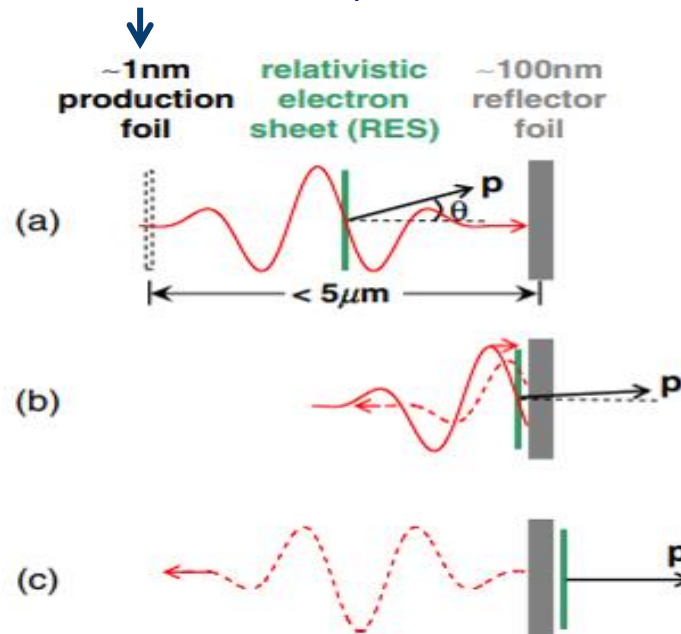
USA

35 MeV

Electron sheet 0,5 nm

H.-C. Wu, et al., Nonlinear coherent Thomson scattering from relativistic electron sheets as a means to produce isolated ultrabright attosecond x-ray pulses, Phys. Rev. ST-AB **14**, 070702 (2011)

thinner than the skin layer



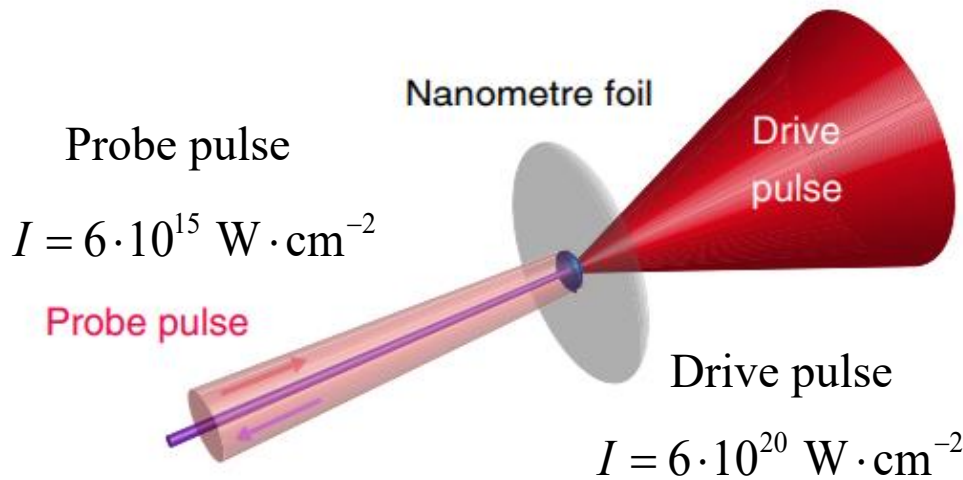
Single-cycle sine wave

- Ionization
- Quazi-monochromatic electron energy spectrum ($\gamma=70$). Electron sheet after the reflector has expanded from 0.5 nm to a FWHM of 0.565 nm
- Electrons interact with both the drive and the reflected drive pulse and their transverse momentum is completely canceled, while their longitudinal momentum is almost unchanged.
- The cancellation of transverse momentum occurs when passing the reflector.

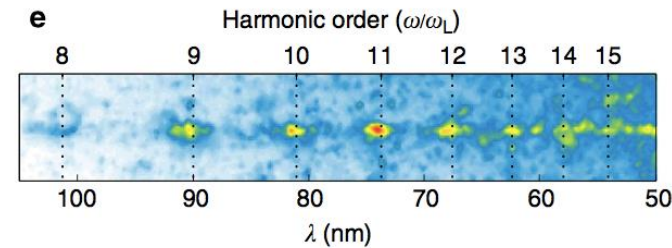
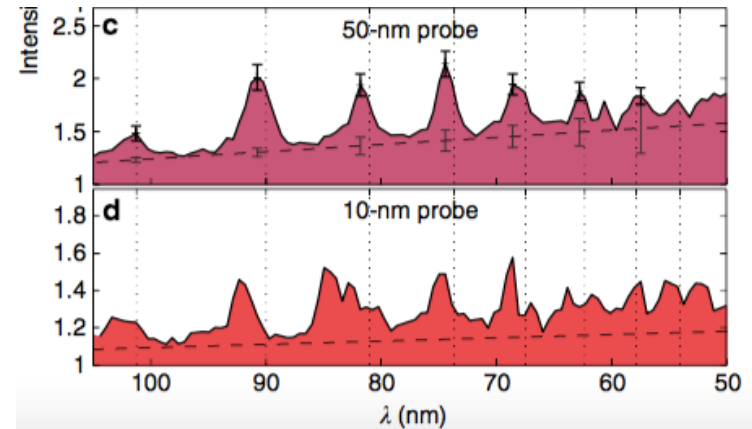
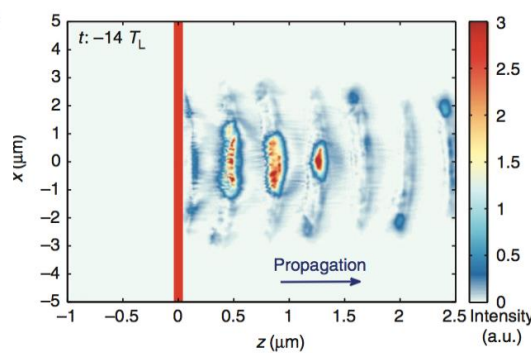
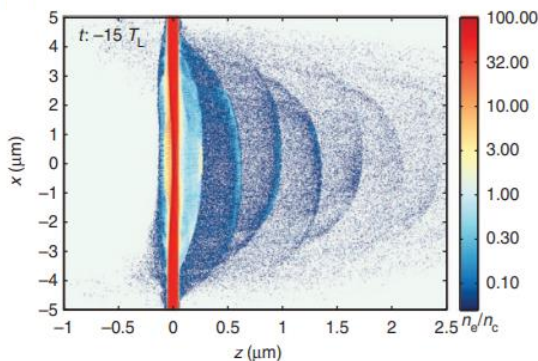
Theory+ simulation

Atto-second/nanomodulated e-bunches

Coherent Thomson EUV by relativistic electron mirrors from nanoscale foils



XUV spectrometer



Experiment + simulation

800 nm → 60 nm

Bandwidth = 20%

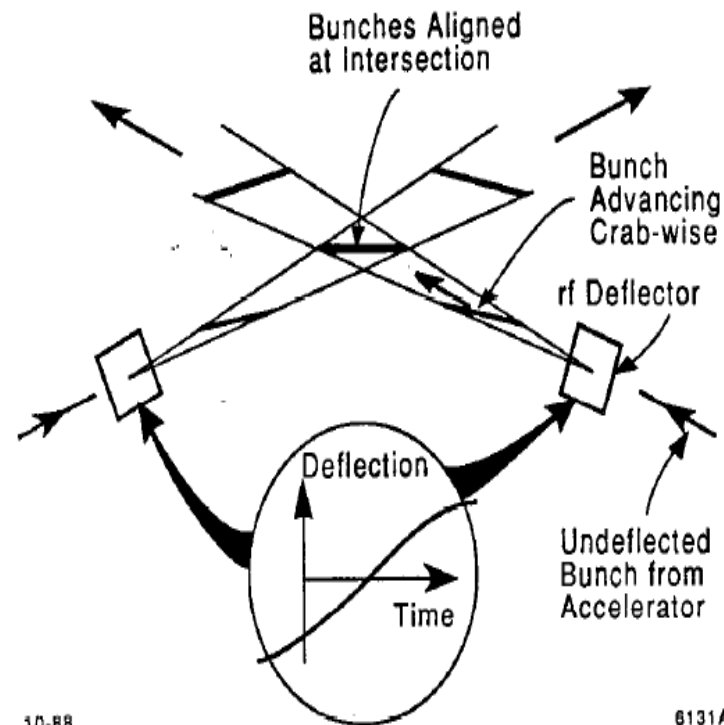
$N_{ph} \sim 8 \cdot 10^6$ photons per shot

D. Kiefer et al., Relativistic electron mirrors from nanoscale foils for coherent frequency upshift to the extreme ultraviolet, Nature Communications 4, 1763 (2013)

Crab-scheme // crab crossing, crab waist scheme

Linear e – p colliders:

R. B. Palmer, Energy Scaling, Crab Crossing and the Pair Problem, Invited talk at the DPF Summer Study Snowmass 88, SLAC-PUB-4, 1988.



Circular storage rings:

K. Oide, K. Yokoya, Beam-beam collision scheme for storage-ring colliders, PRA (1989).

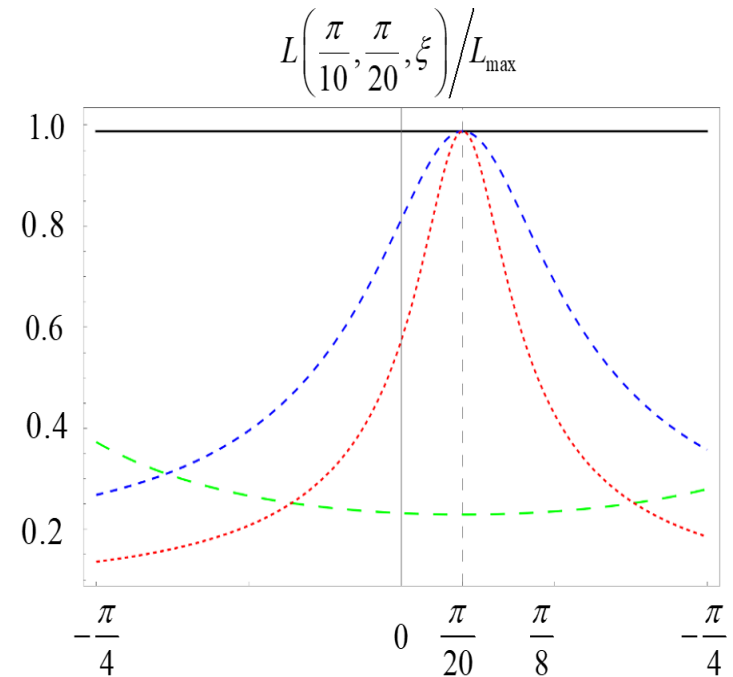
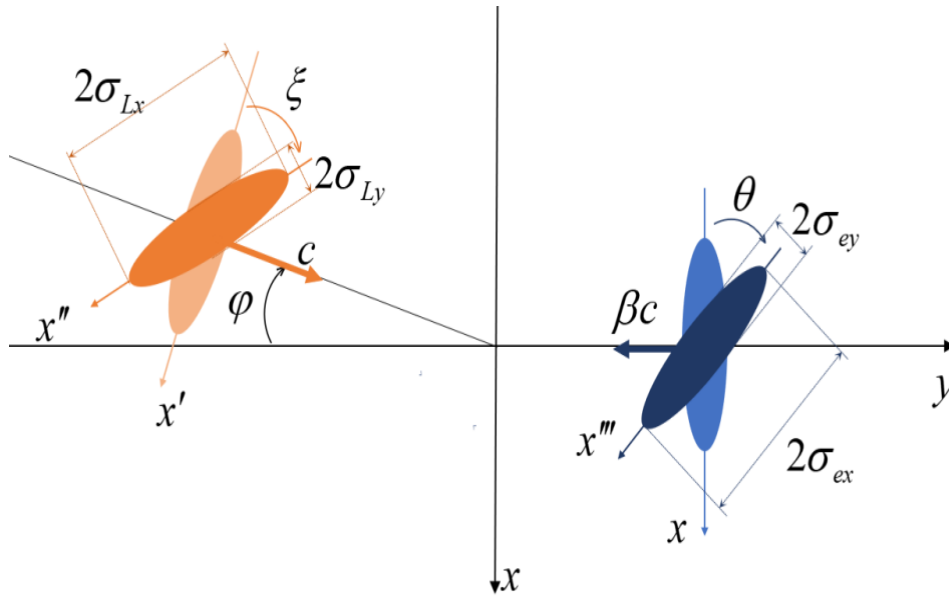
Then **KEK** and **Cornell** staff developed designs, prototypes, and in 2007 installed the device on KEKB; now it is on **SuperKEKB**. Also, designs have been developed for LHC, ILC, CLIC, eRHIC.

**The world
record of
luminosity!**

Q. Wu, Crab cavities: Past, present, and future of a challenging device, USA, IPAC 2015.

Crab-scheme - but what about the physics of electromagnetic radiation?

Making the story short ...



Crab-scheme in Compton/Thomson backscattering may give a gain of several orders of magnitude in luminosity!

depending on the pulses form