

Разработка рентгенооптических трактов экспериментальных станций первой очереди проекта ЦКП «СКИФ»

Докладчик: Требушинин А.Е.

Руководитель: к.ф.-м.н. Ракшун Я.В.

ИЯФ СО РАН

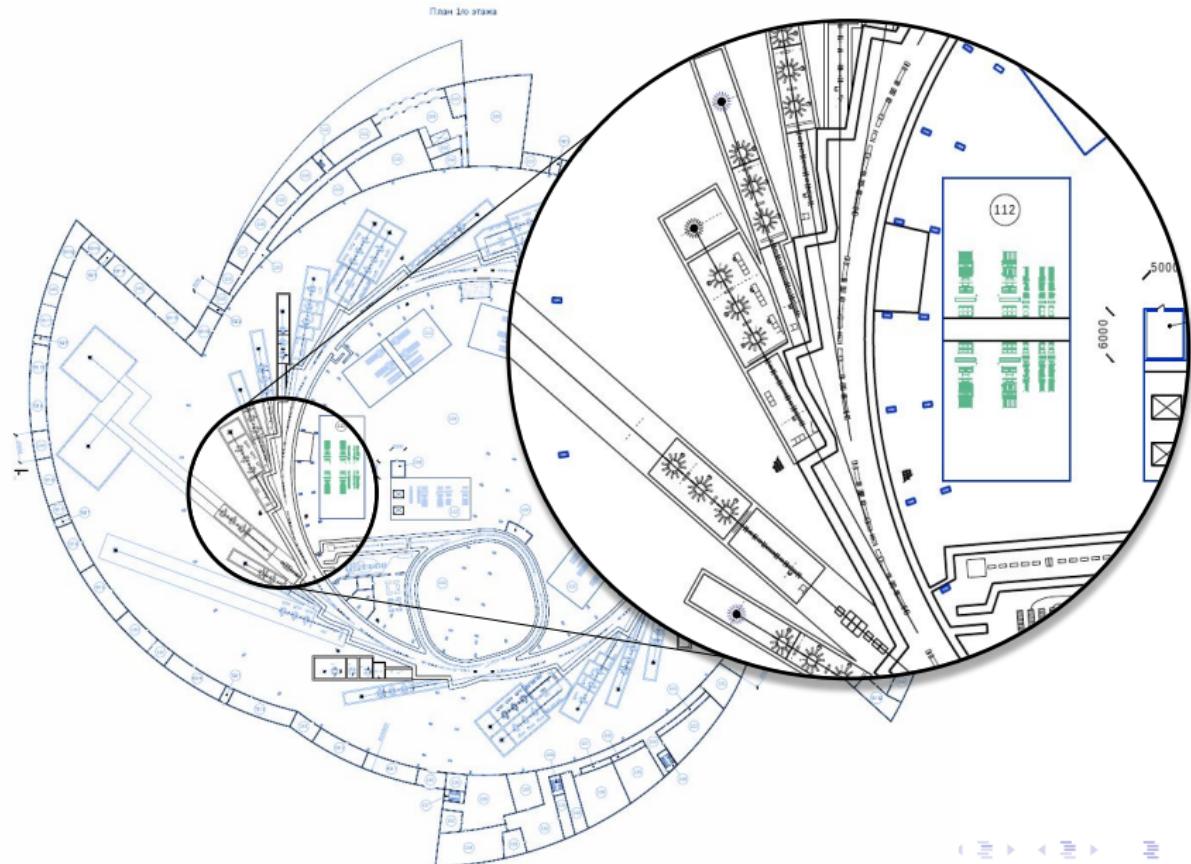


Новосибирск, 2019

Цель

Расчёт оптической части экспериментальных станций Центр коллективного пользования «Сибирский кольцевой источник фотонов» (ЦКП «СКИФ»)

Схема ЦКП «СКИФ»



Задачи

Расчёт ондуляторных станций 1-1, 1-2 и 1-4.

- Расчёт ондуляторного излучения с помощью численного моделирования.
- Аналитическое описание и численный расчёт специального ондулятора с уширенными гармониками.
- Проектирование оптических трактов:
 - расчёт тепловых нагрузок на оптические элементы;
 - расчёт сечений пучка после оптических элементов;
- Разработка программного кода.

SRW — Среда моделирования

SRW — Synchrotron Radiation Workshop. Код для моделирования излучения релятивистского электронного пучка и прохождения излучения через рентгеновскую оптическую систему.

- Расчёт электрического поля:

$$\vec{\tilde{E}}_{\perp}(\vec{r}_o, \omega) = \frac{i\omega e}{c} \int_{-\infty}^{\infty} dt' \left[\frac{\vec{\beta} - \vec{n}}{|\vec{r}_o - \vec{r}'_o(t')|} - \frac{ic}{\omega} \frac{\vec{n}}{|\vec{r}_o - \vec{r}'_o(t')|^2} \right] \times \\ \exp \left[i\omega \left(t' + \frac{|\vec{r}_o - \vec{r}'_o(t')|}{c} \right) \right]$$

- Фурье оптика:

$$g_2(x, y) = \int_{-\infty}^{\infty} \int_{-\infty}^{\infty} g_1(\eta, \xi) h(x - \eta, y - \xi) d\eta d\xi$$

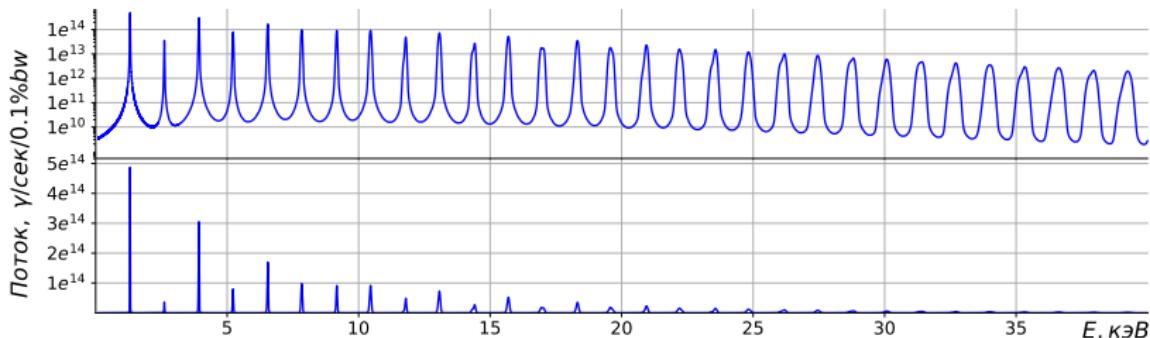
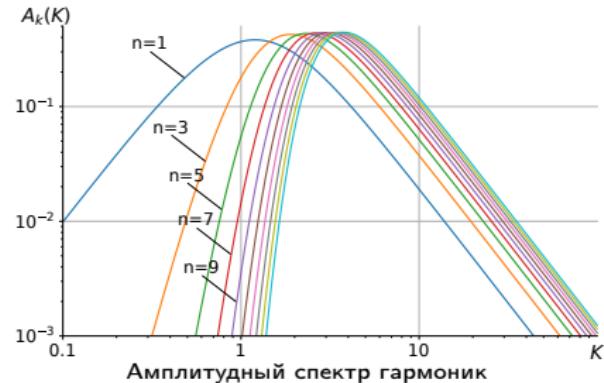
↔

$$G_2(f_x, f_y) = G_1(f_x, f_y) H(f_x, f_y)$$

Расчёт станции 1-1

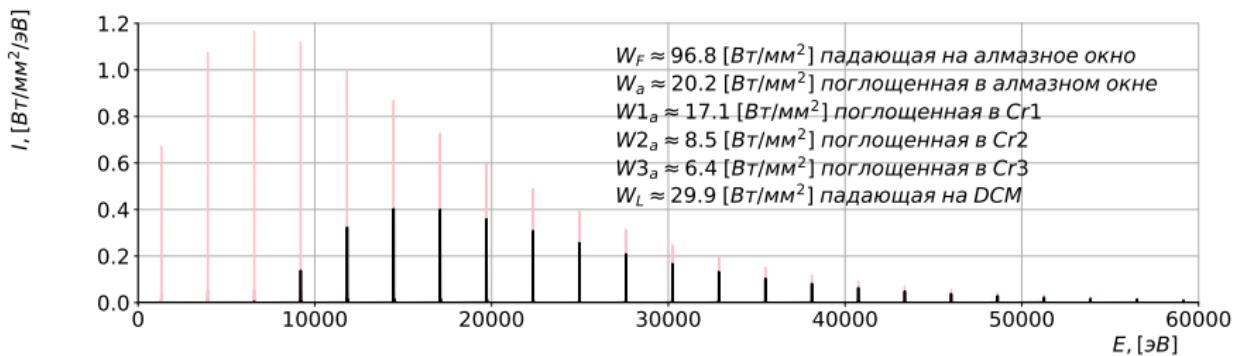
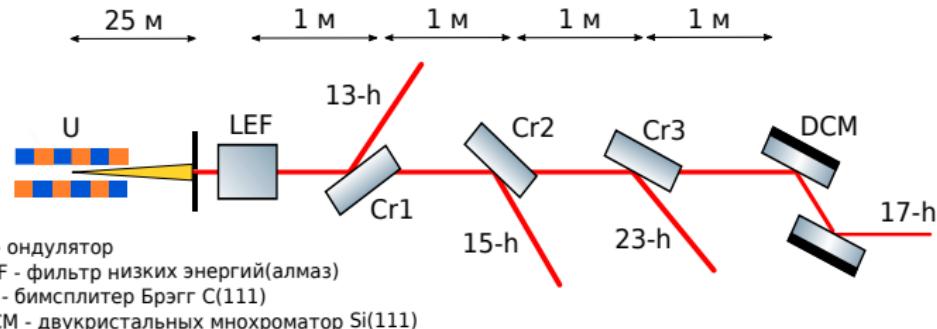
B, [Тл]	1.36
d, [мм]	18
K	2.29
L, [м]	2.3
Гармоники	11, 13, 17, 23

Сверхпроводящий ондулятор

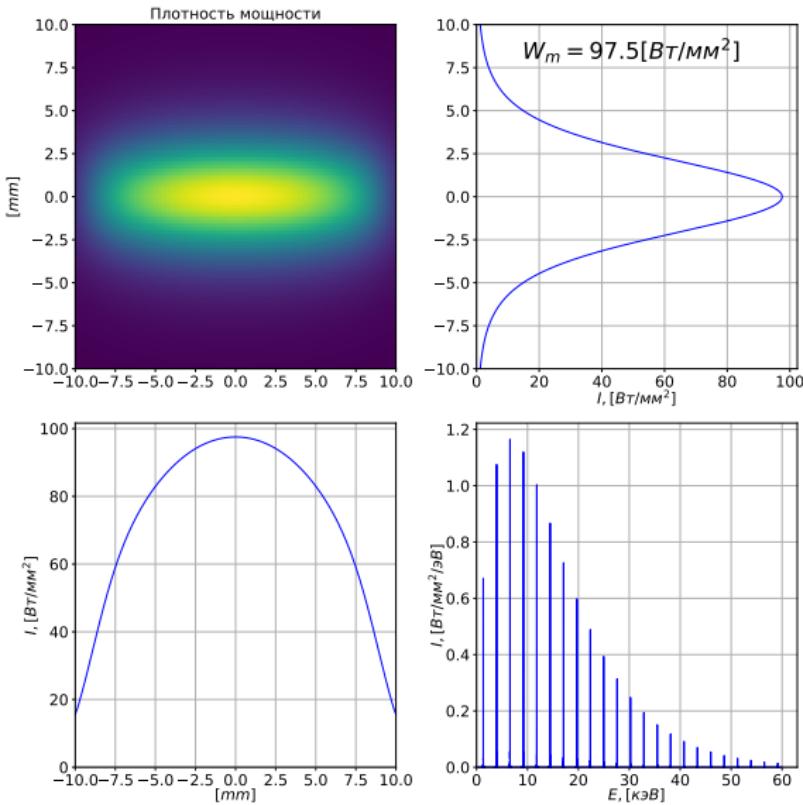


Спектр проинтегрированный по апертуре 0.4 мм на расстоянии 25 м

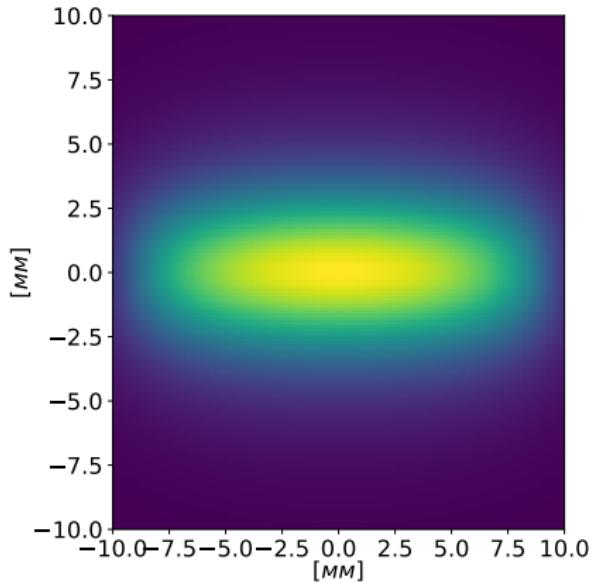
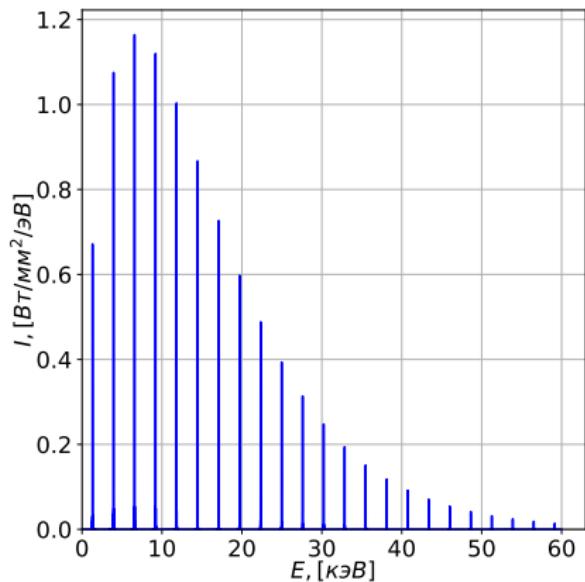
Оптическая схема станции 1-1. Тепловые нагрузки



Второй метод расчёта в коде SRW



Сравнение методов

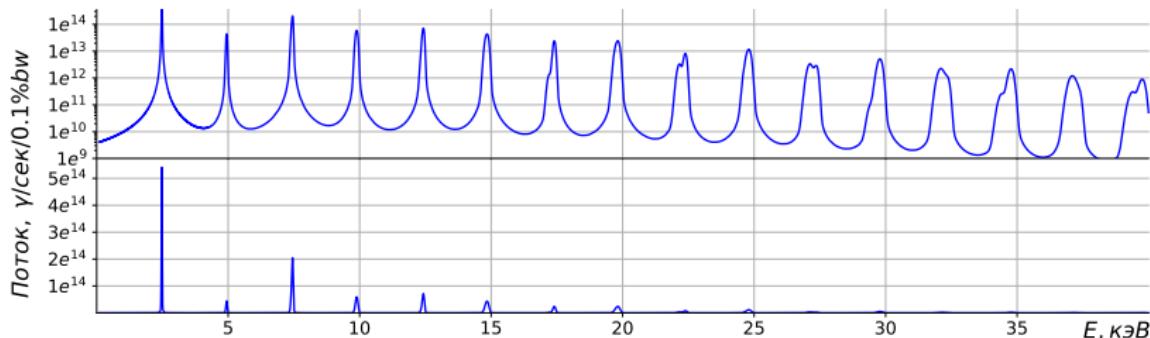
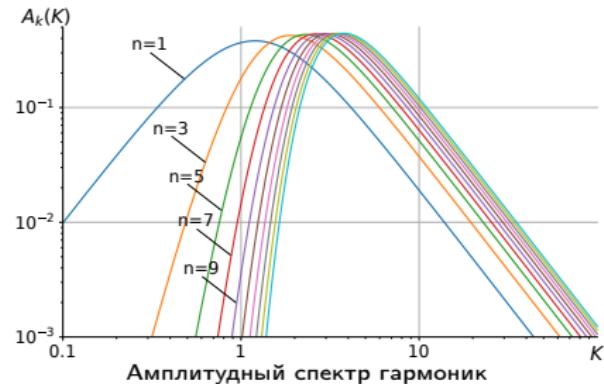


$$W = \sum_{E_i=0 \text{ кэВ}}^{60 \text{ кэВ}} I(E_i) \Delta E_i = 96,8 \text{ Bт/mm}^2 \quad W_{\max} = 97,5 \text{ Bт/mm}^2$$

Расчёт станции 1-2

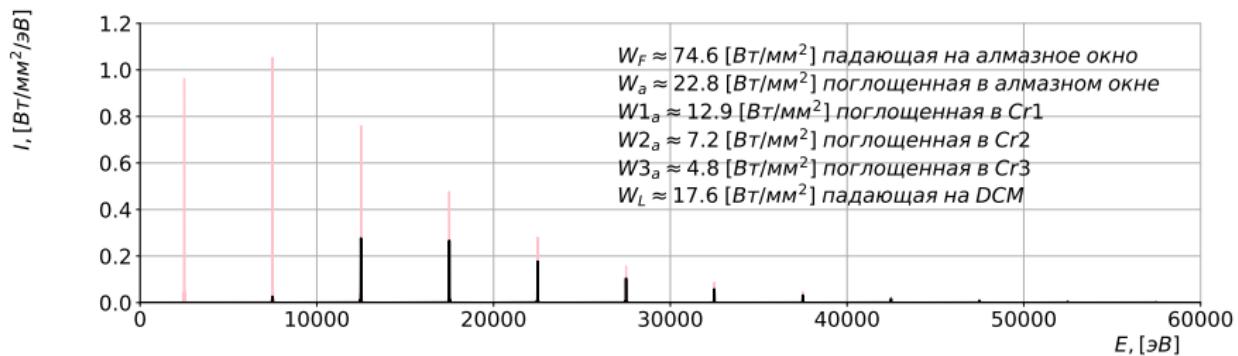
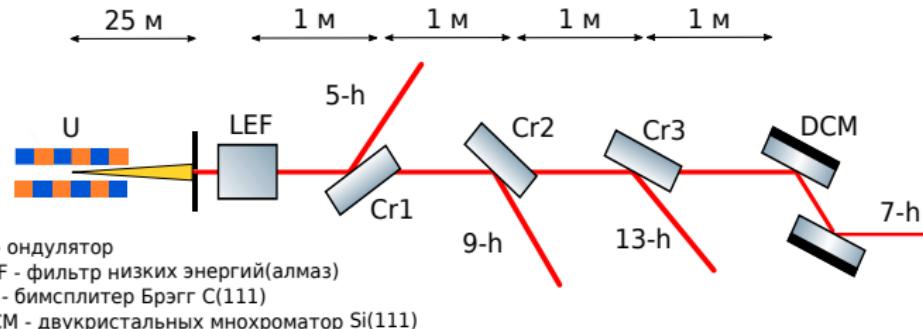
B, [Тл]	1.06
d, [мм]	15.6
K	1.53
L, [м]	2
Гармоники	5, 7, 9, 13

Сверхпроводящий ондулятор



Спектр проинтегрированный по апертуре 0.4 мм на расстоянии 25 м

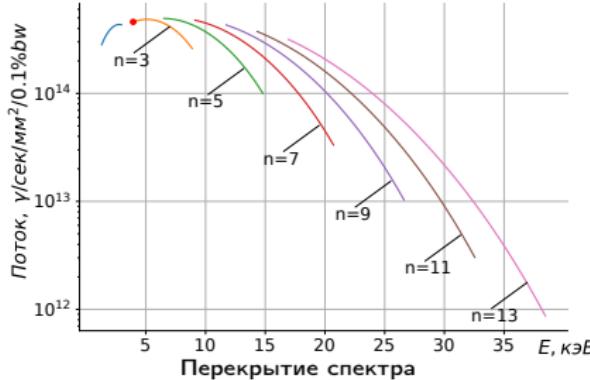
Оптическая схема станции 1-2. Тепловые нагрузки



Результаты расчёта тепловых нагрузок

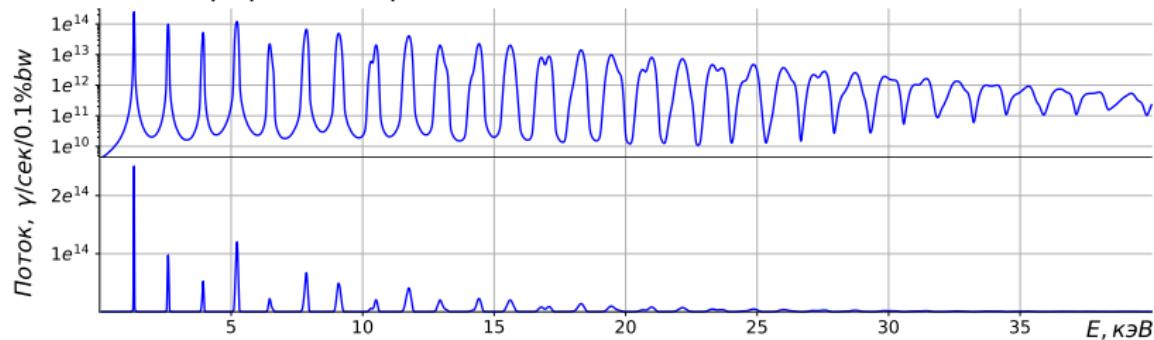
- Рассчитаны удельные тепловые нагрузки на каждый оптических элемент.
- Приведено двумерное распределение плотности мощности на первый оптических элемент.
- Есть возможность оценивать интегральный поток (Вт) на оптический элемент.

Расчёт оптики станции 1-4. ХАС-спектроскопия



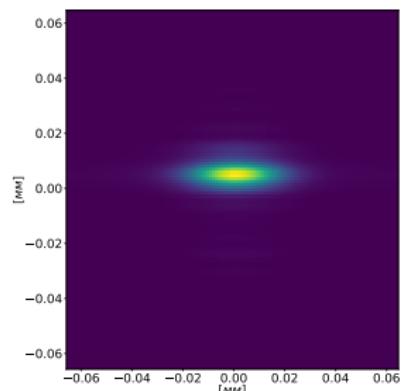
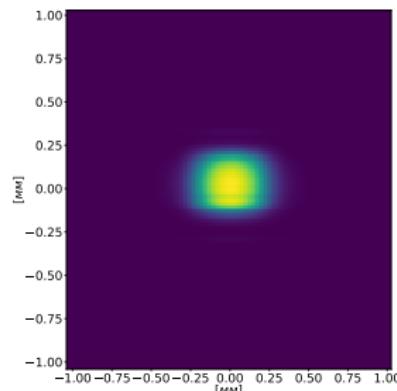
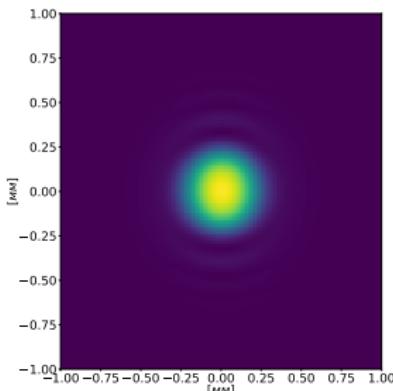
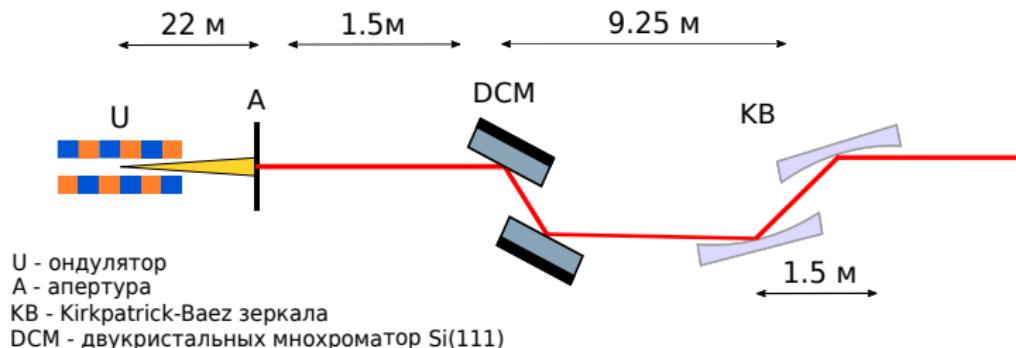
$B(K)$, [Тл]	0.65 - 1.35
d , [мм]	18
K	1.1 - 2.3
L , [м]	2.3
Гармоники	3 - 13

Сверхпроводящий ондюлятор



Спектр проинтегрированный по апертуре 1 мм на расстоянии 22 м

Оптическая схема станции 1-4



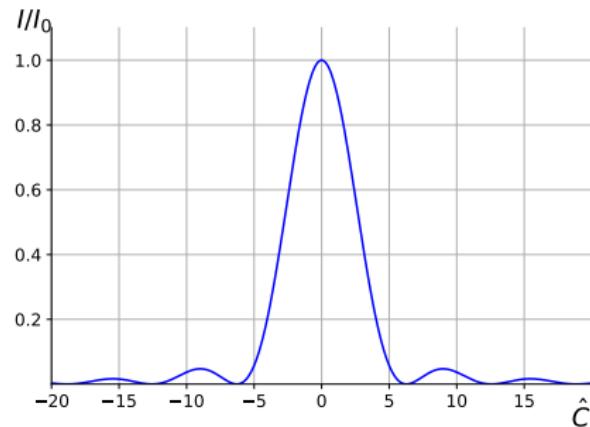
Ондулятор станции 1-4 (Quick-XAFS)

- Необходим спектр

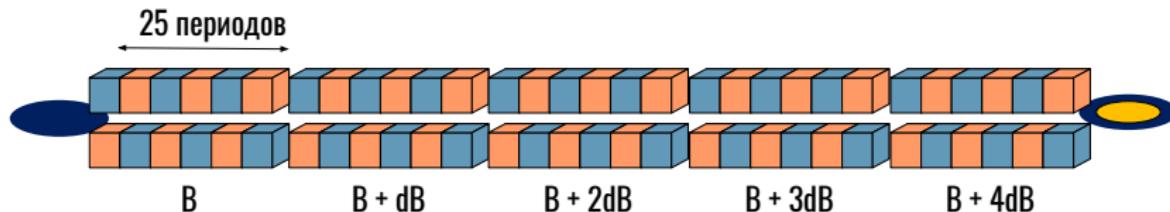
$$\frac{\Delta E}{E_{ph}} \sim 10^{-1}$$

- Ондуляторный спектр

$$\frac{\Delta E}{E_{ph}} \sim \frac{1}{nN_u} \sim 10^{-2}$$

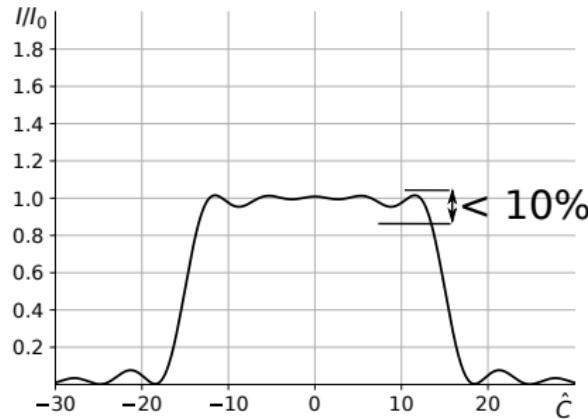


$$\hat{C} = CL_u = 2\pi N_u \frac{\Delta\omega}{\omega_r}, \quad N_u \text{ --- количество периодов}$$



Оценки спектра

Первое предположение

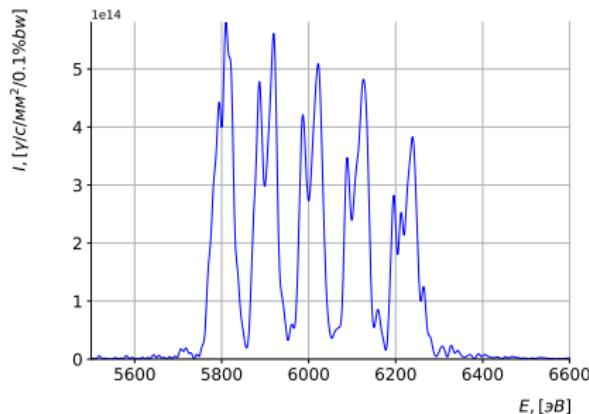


$$\tilde{I} = \left(\frac{\omega e A_{JJ} L_u}{2c^2 \gamma z_0} \right)^2 \left[\sum_{n=-2}^2 (K_0 + n\Delta K)^2 \operatorname{sinc}^2(\hat{C} + n\Delta \hat{C}) \right]$$

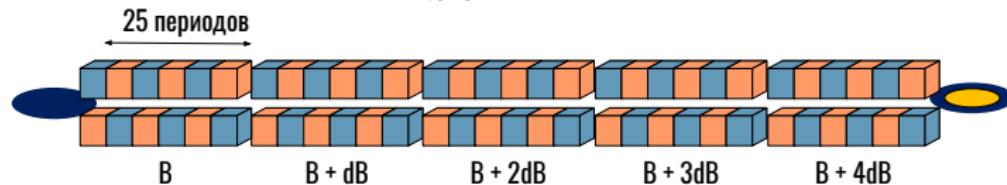
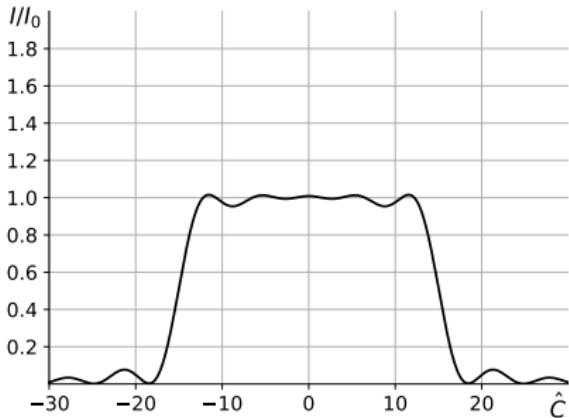
$$\hat{C} = 2\pi N_u \frac{\Delta\omega}{\omega_r} \quad \Delta\hat{C} = 2\pi N_u \frac{\Delta\omega}{\omega_r} \cdot \frac{\Delta K}{K}$$

Моделирование в *SRW*

Симуляция *SRW**



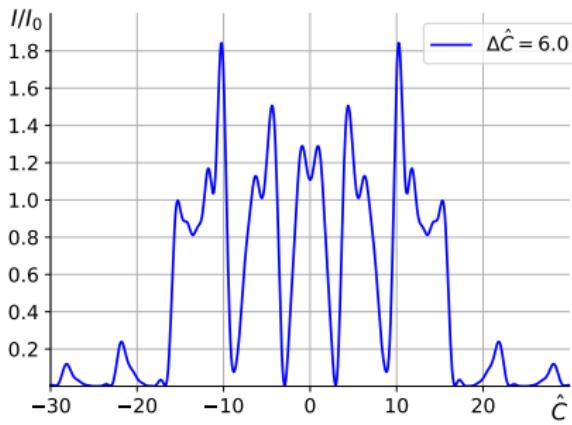
Оценка



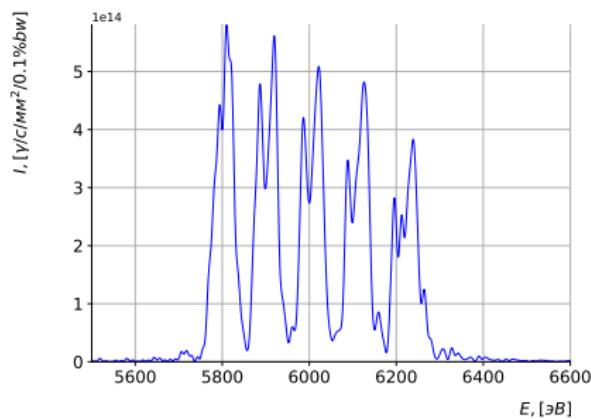
* Спектр излучения для электронного пучка с бесконечно малым эмиттансом

Интерференция в спектре

Аналитический результат



Симуляция SRW

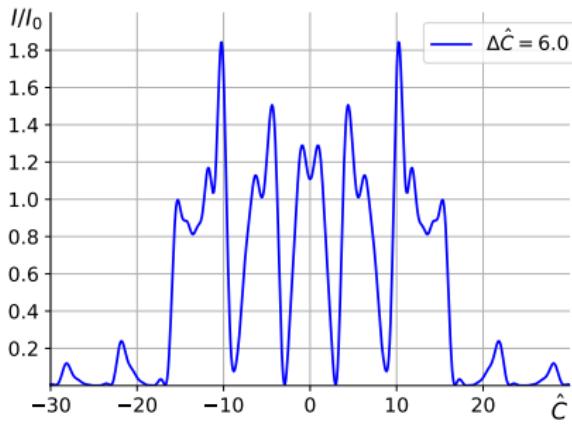


$$\vec{\tilde{E}}_{\perp}(\vec{r}_0, \omega) = \frac{\omega e A_{JJ} L_s}{2c^2 \gamma} \frac{1}{z_0} \times$$

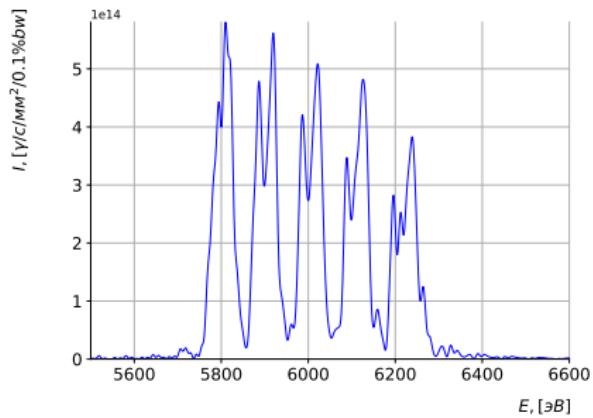
$$\sum_{n=-2}^2 (K_0 + n\Delta K) \operatorname{sinc}((\hat{C} + n\Delta\hat{C})/2) e^{in(C+n\Delta C)L_s} \vec{e}_x$$

Интерференция в спектре

Аналитический результат

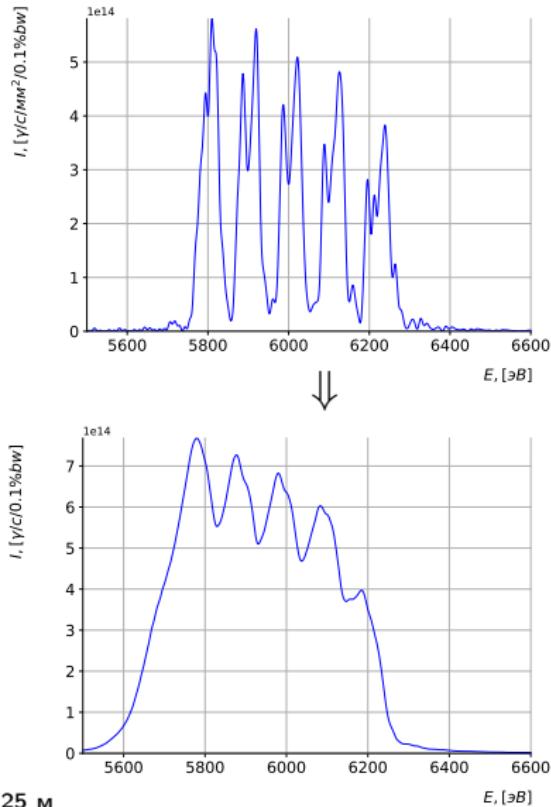


Симуляция SRW



$$\begin{aligned}\tilde{I} &= \left(\frac{\omega e A_{JJ} L_u}{2c^2 \gamma z_0} \right)^2 \left[\sum_{n=-2}^2 (K_0 + n\Delta K)^2 \operatorname{sinc}^2(\hat{C} + n\Delta\hat{C}) + \right. \\ &\quad \left. \sum_{\substack{n,m=-2 \\ n \neq m}}^2 K_0^2 \left(1 + n \frac{\Delta K}{K_0} + m \frac{\Delta K}{K_0} \right) \operatorname{sinc}^2(\hat{C} + n\Delta\hat{C}) e^{i[(n-m)\hat{C} + (n^2 - m^2)\Delta\hat{C}]} \right]\end{aligned}$$

Спектр проинтерированный по апертуре



Апертура 1 мм на расстоянии 25 м

Результаты

- Для станции 1-4 описан **способ уширения ондуляторного спектра**.
- Для станций 1-1 и 1-2 посчитаны удельные **тепловые нагрузки** на оптические элементы.
- Получены **сечения пучка излучения** на выходе оптических элементов для станций 1-4.
- Разработана надёжная **программная база** для дальнейших расчётов.

За расчётами по проекту ЦКП «СКИФ» можно следить на:

https://github.com/TrebAndrew/thesis_andrei/tree/dev

Почта: trebandrej@gmail.com

Разработка рентгенооптических трактов экспериментальных станций первой очереди проекта ЦКП «СКИФ»

Докладчик: Требушинин А.Е.

Руководитель: к.ф.-м.н. Ракшун Я.В.

ИЯФ СО РАН



Новосибирск, 2019

Дополнительные слайды

Карта ускорительных центров

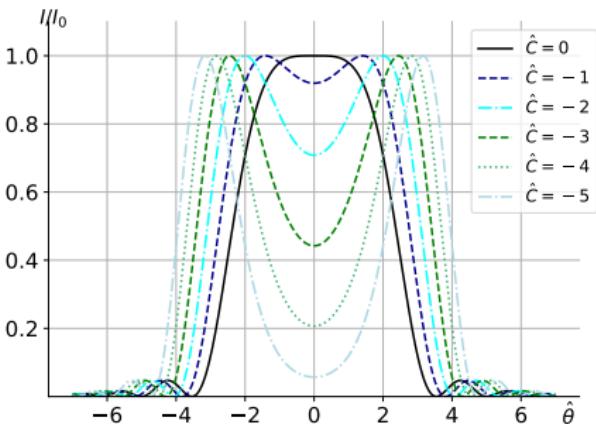


Жёлтым цветом обозначены центры синхротронного излучения

Параметры электронного пучка в пустом промежутке

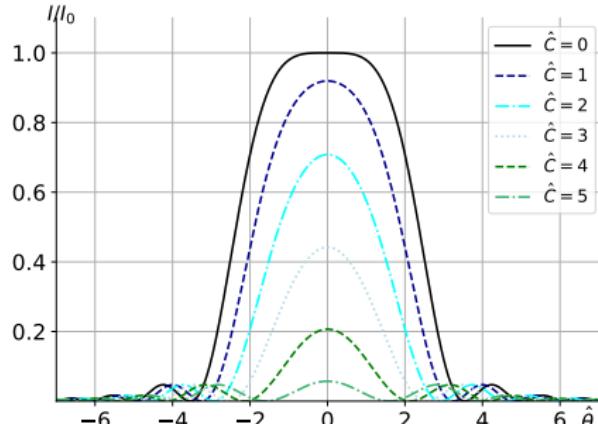
$E, [GeV]$	$I, [mA]$	$\beta_x, [m]$	$\beta_y, [m]$	
3	400	12.48	1.99	
$\sigma_x, [m]$	$\sigma_{x'}, [rad]$	$\sigma_y, [m]$	$\sigma_{y'}, [rad]$	$\Delta E/E$
33.0×10^{-6}	2.65×10^{-6}	8.6×10^{-7}	5.0×10^{-7}	8.6×10^{-4}

Угловое распределение ондуляторного излучения



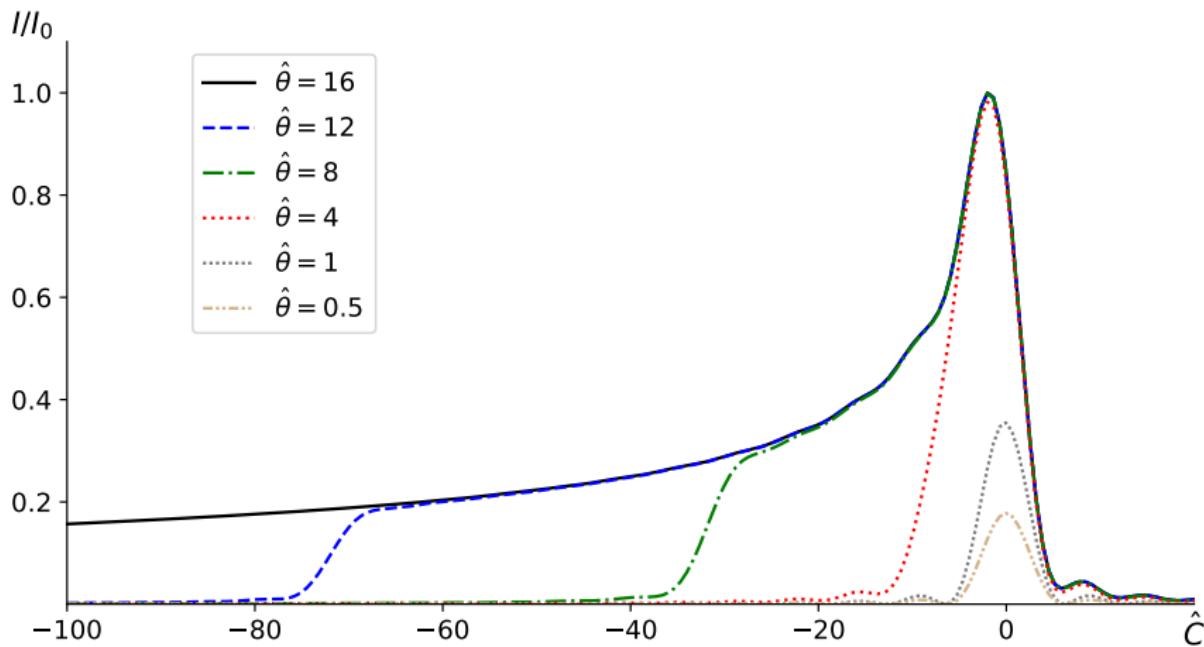
Отрицательная сдвигка от ω_r

$$\hat{\theta} = \theta \sqrt{\frac{\omega_L}{c}}, \hat{C} = CL_u = 2\pi N_u \frac{\Delta\omega}{\omega_r}$$



Положительная сдвигка от ω_r

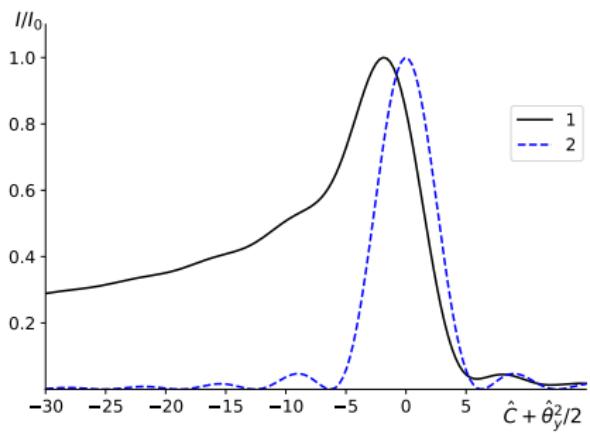
Спектр через конечную апертуру



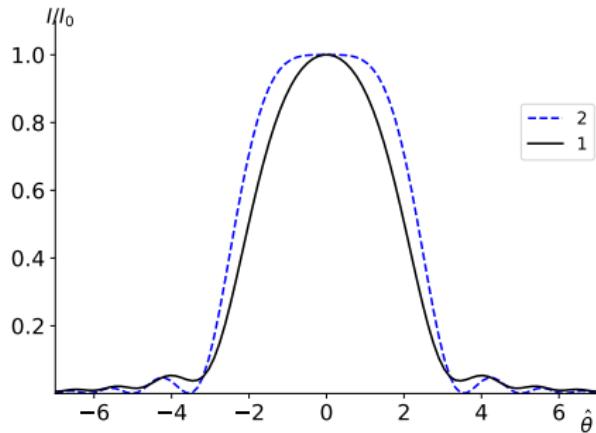
$$\hat{\theta} = \theta \sqrt{\frac{\omega L}{c}}, \quad \hat{C} = CL_u = 2\pi N_u \frac{\Delta\omega}{\omega_r}$$

Влияние эмиттанса электронного пучка

Спектр



Угловое распределение

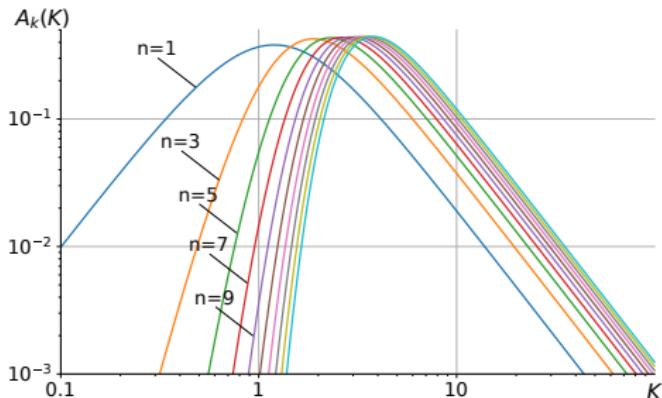
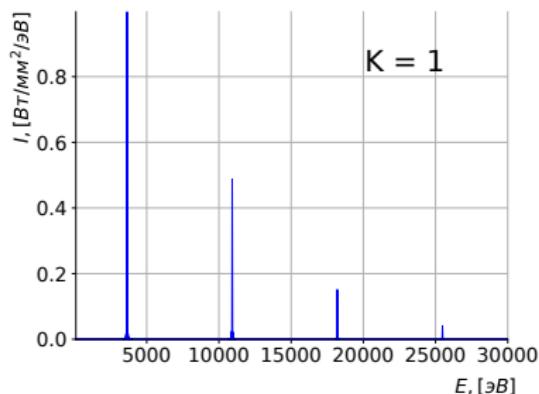
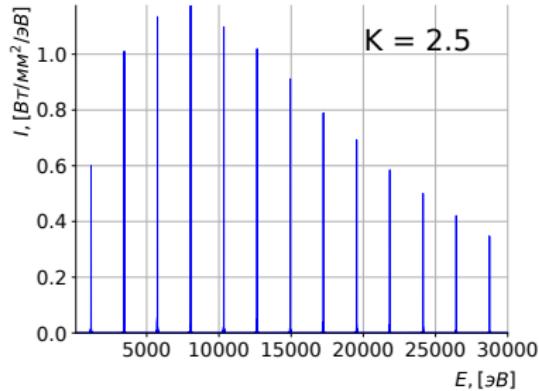


1 - электронный пучок $\hat{\epsilon}_x \rightarrow \infty \hat{\epsilon}_y \rightarrow 0$

2 - уединённый электрон

$$\hat{\theta} = \theta \sqrt{\frac{\omega L}{c}}, \hat{C} = CL_u = 2\pi N_u \frac{\Delta\omega}{\omega_r}$$

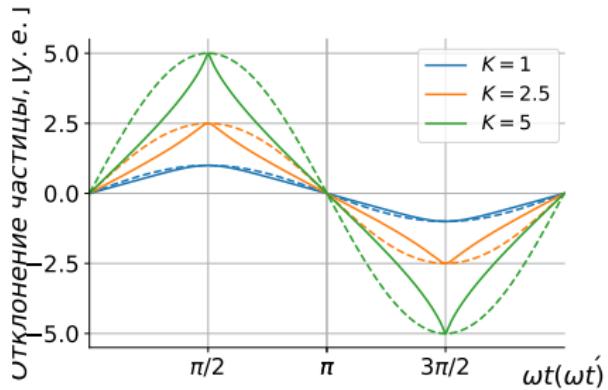
Состав спектра планарного ондулятора



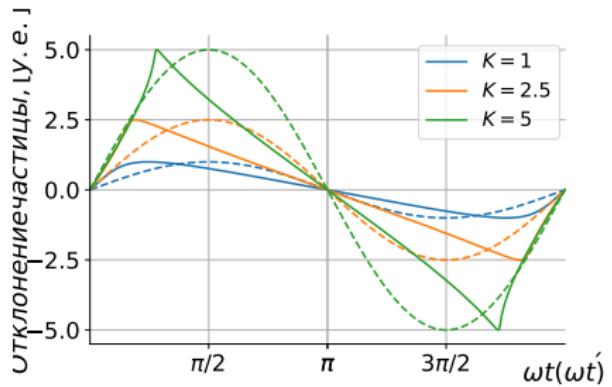
Амплитудный спектр гармоник

Состав спектра планарного ондулятора

Отклонение при $\theta = 0$



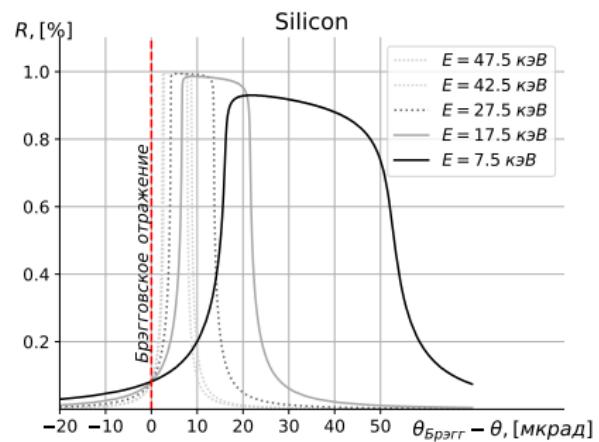
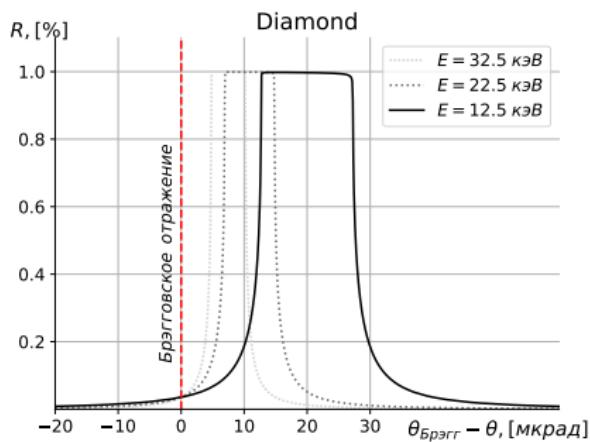
Отклонение при $\theta = 1/\gamma$



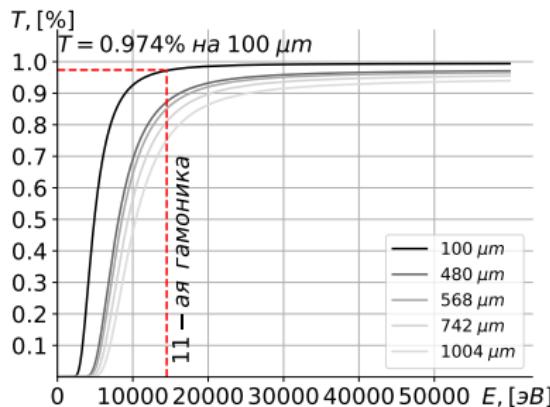
$$t = t' + \frac{1}{c} |R - r(t')|$$

$$\frac{dt}{dt'} = 1 - \vec{n} \cdot \vec{\beta}$$

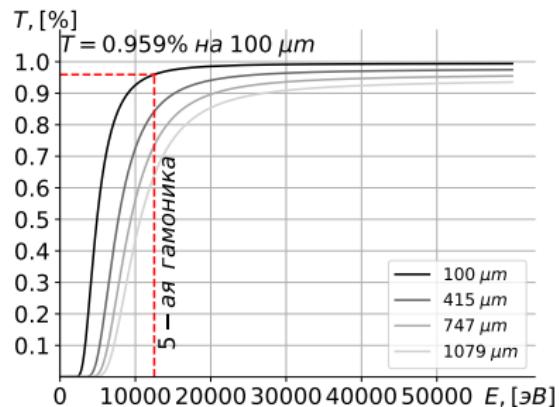
Кривые Дарвина



Кривые поглощения для алмаза



Станция 1-1



Станция 1-2