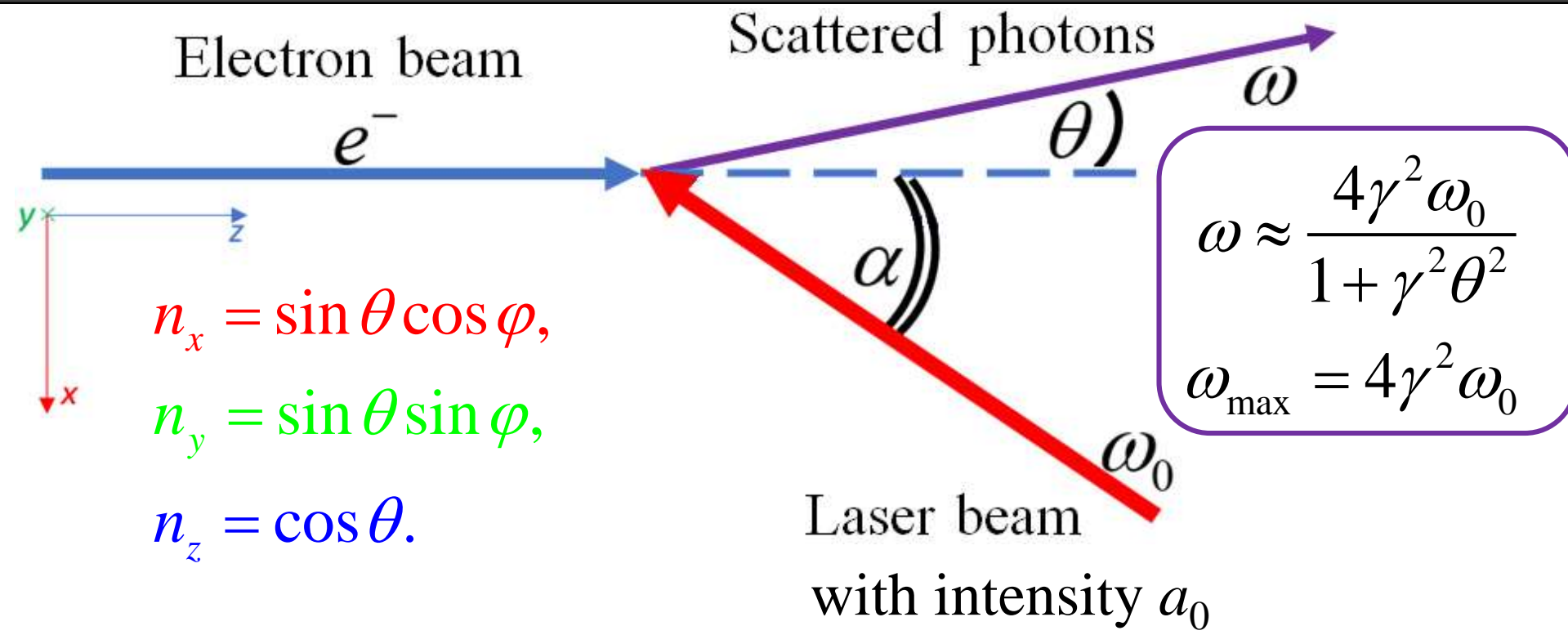


ВВЕДЕНИЕ

Обратное томсоновское рассеяние является перспективным механизмом для создания яркого и компактного источника излучения в рентгеновском диапазоне /1,2/, в связи с чем активно исследуется в последние годы. При наличии развитого физико-математического аппарата, на первые роли выходит компьютерное моделирование явления. В области физики излучения наиболее проработанным и подходящим является программный пакет Geant4 /3/. В настоящем докладе мы описываем общее состояние дел в данной области, включая перспективные направления развития. и представляем результаты разработки нового модуля дискретного физического процесса в Geant4 для моделирования обратного томсоновского рассеяния. Созданный модуль позволяет просчитать взаимодействие электронного пучка с лазерным импульсом, описываемым фиксированной световой мишенью, с рождением фотонов в рентгеновском диапазоне. При этом, в зависимости от задаваемых пользователем параметров электронного пучка, фотоны могут генерироваться как в когерентном, так и некогерентном режимах.

ОБРАТНОЕ ТОМСОНОВСКОЕ РАССЕЯНИЕ: ОДНОЧАСТИЧНАЯ ЗАДАЧА



$$\frac{d^2 N(\mathbf{n}, \omega)}{d(\hbar\omega)d\theta} = \frac{\omega \sin(\theta) d\phi}{4\hbar\pi^2 c^2 137} \sum_{s=1}^{\omega/\omega_0} \frac{\sin((A - s\eta)NT/2)}{(A - s\eta)/2} (-1)^s J_s(B) \left\{ \mathbf{H} - s \frac{\mathbf{K}}{B} \right\}^2$$

$$N \sim \frac{1}{137}$$

$$B = \frac{\omega}{c} \left[n_x \frac{a_0 c}{\omega_0 \gamma (1 + \beta_{0z})} + n_z \left(\frac{a_0 v_{0x}}{\omega_0 \gamma (1 - \beta_{0z}^2)} \right) \right], T_{int} = NT = N \frac{2\pi}{\omega_0 (1 + \beta_{0z})}$$

$$\mathbf{H} = (\mathbf{e}_x n_y - \mathbf{e}_y n_x) \left(v_{0z} + \frac{a_0 v_{0x}}{\gamma (1 - \beta_{0z}^2)} \right) + (\mathbf{e}_y n_z - \mathbf{e}_z n_y) \left(v_{0x} + \frac{a_0 c}{\gamma} \right) + (\mathbf{e}_z n_x - \mathbf{e}_x n_z) v_{0y}$$

$$\mathbf{K} = (\mathbf{e}_x n_y - \mathbf{e}_y n_x) \left(-\frac{a_0 v_{0x}}{\gamma (1 - \beta_{0z}^2)} \right) + (\mathbf{e}_y n_z - \mathbf{e}_z n_y) \left(-\frac{a_0 c}{\gamma} \right), \eta = \omega_0 + \frac{k_{0z} z}{t} \approx \omega_0 (1 + \beta_{0z})$$

ЧИСЛО ФОТОНОВ И РОЛЬ КОГЕРЕНТНОСТИ

| Design | E_x (keV) | Ph/s | Brightness, Ph/s $mm^{-2} mrad^{-2} 0,1\% BW$ | σ_y (μm) |
|---------|-------------|-----------|---|------------------------|
| MuCLS | 15 - 35 | 10^{10} | 10^9 | 42 |
| Lyncean | 10 - 20 | 10^{11} | 10^{11} | 45 |
| TTX | 20 - 80 | 10^{12} | 10^{10} | 50 |
| ThomX | 20 - 90 | 10^{13} | 10^{11} | 70 |
| KEK | 35 | 10^{13} | 10^{11} | 10 |

Как увеличить число фотонов?

- Увеличить число электронов;
- Использовать мощный лазер;
- Уменьшить поперечный размер пучка;
- Увеличить время взаимодействия;
- **Когерентность.**

Наномодулированные электронные пучки

$$N \sim N_e^2$$

$$\frac{d^2 N_N(\mathbf{n}, \omega)}{d(\hbar\omega)d\theta} = \frac{d^2 N_1(\mathbf{n}, \omega)}{d(\hbar\omega)d\theta} \{ N_e F_{incoh} + N_e (N_e - 1) F_{coh} \}$$

Некогерентный фактор Когерентный фактор

$$F_{coh} = F_t F_{tr}, F_t = \exp \left[-\frac{\sigma_z^2 \left(\frac{\omega}{v} \cos \alpha - k_x \sin \alpha \right)^2}{2} \right], F_{tr} = \exp \left[-\frac{\sigma_y^2 k_y^2}{2} - \frac{\sigma_x^2 \left(\frac{\omega}{v} \cos \alpha + k_x \sin \alpha \right)^2}{2} \right]$$

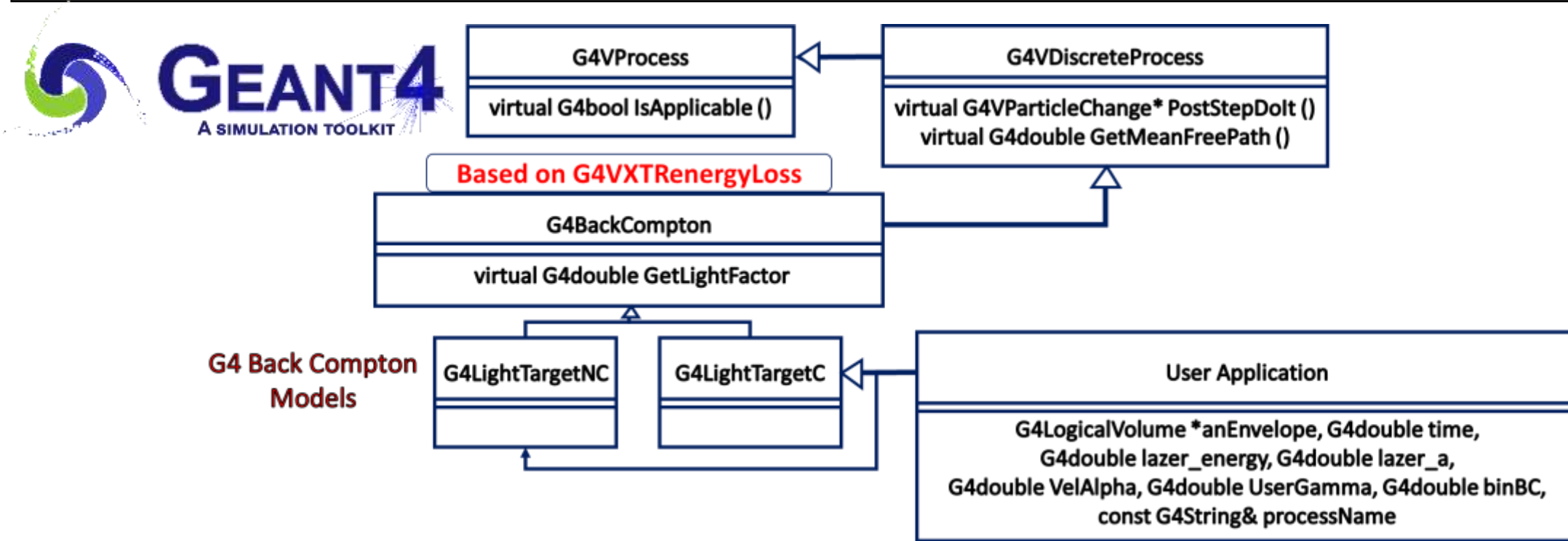
K. E. Deitrick et al., PR AB 21, 080703 (2018)

Теоретически предсказанный средний поток $\sim 10^{14}$ ph/s

W.S. Graves et al., NIM A 608, 103 (2009)

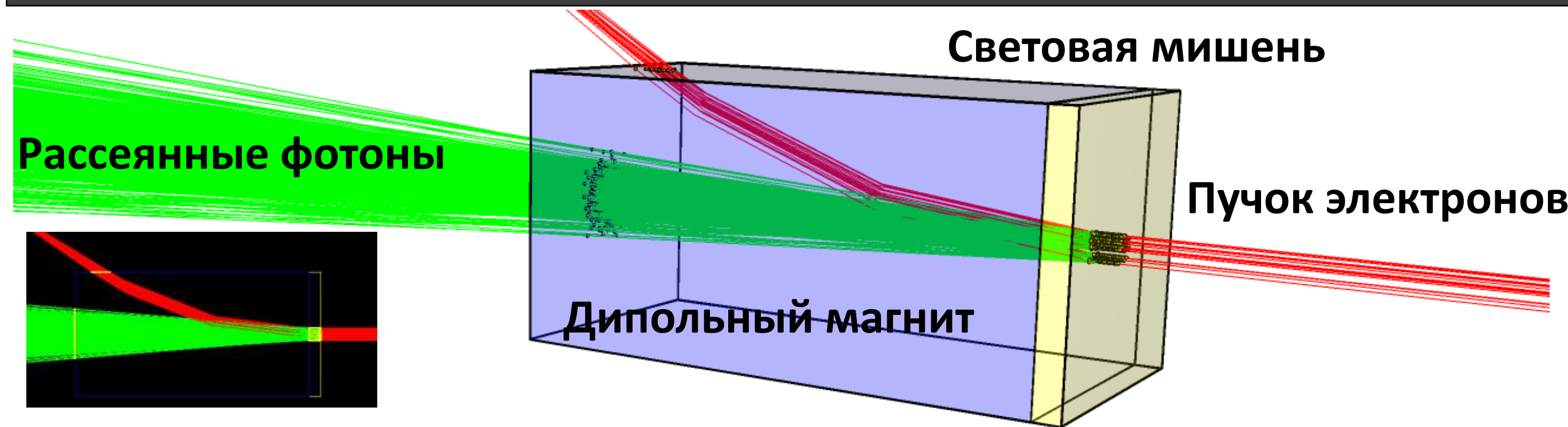
$\sigma_z, \sigma_x, \sigma_y$ - продольное и поперечные сечения пучка электронов, l_0 - период модуляции, N_b - число нанобанчей.
 $\max F_i$ if $\lambda = (\beta^{-1} \cos \alpha - n_x \sin \alpha) l_0 / s, s = \dots, -2, -1, 1, 2, \dots$ $N_e = 10^9 \div 10^{11}$ - когерентность играет ключевую роль!

РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА В GEANT4

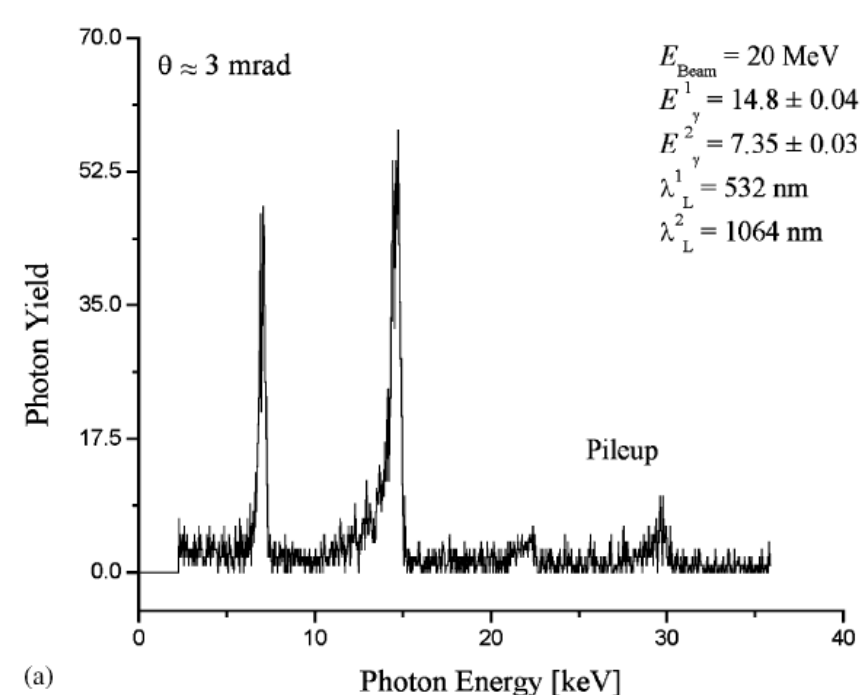
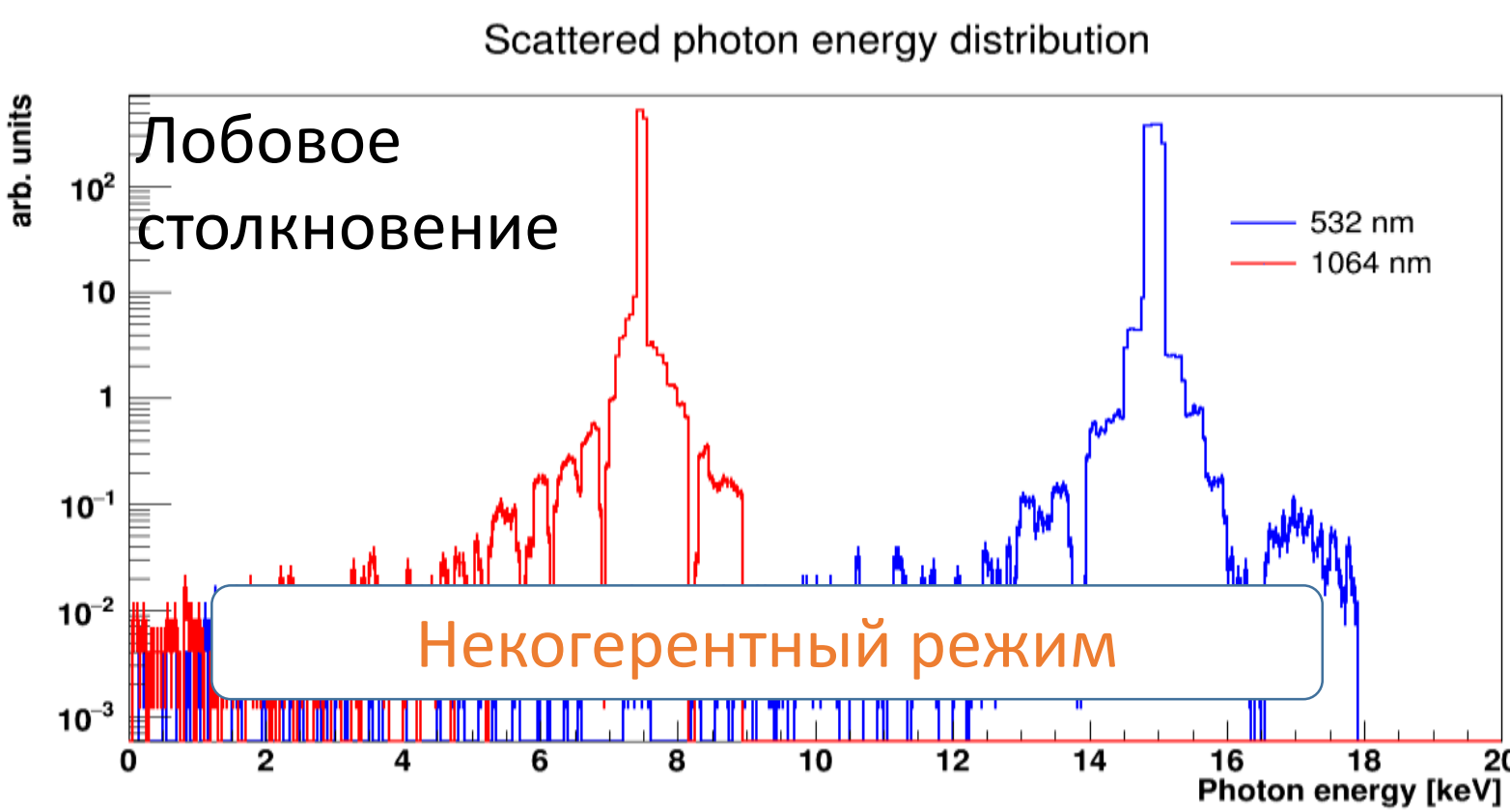
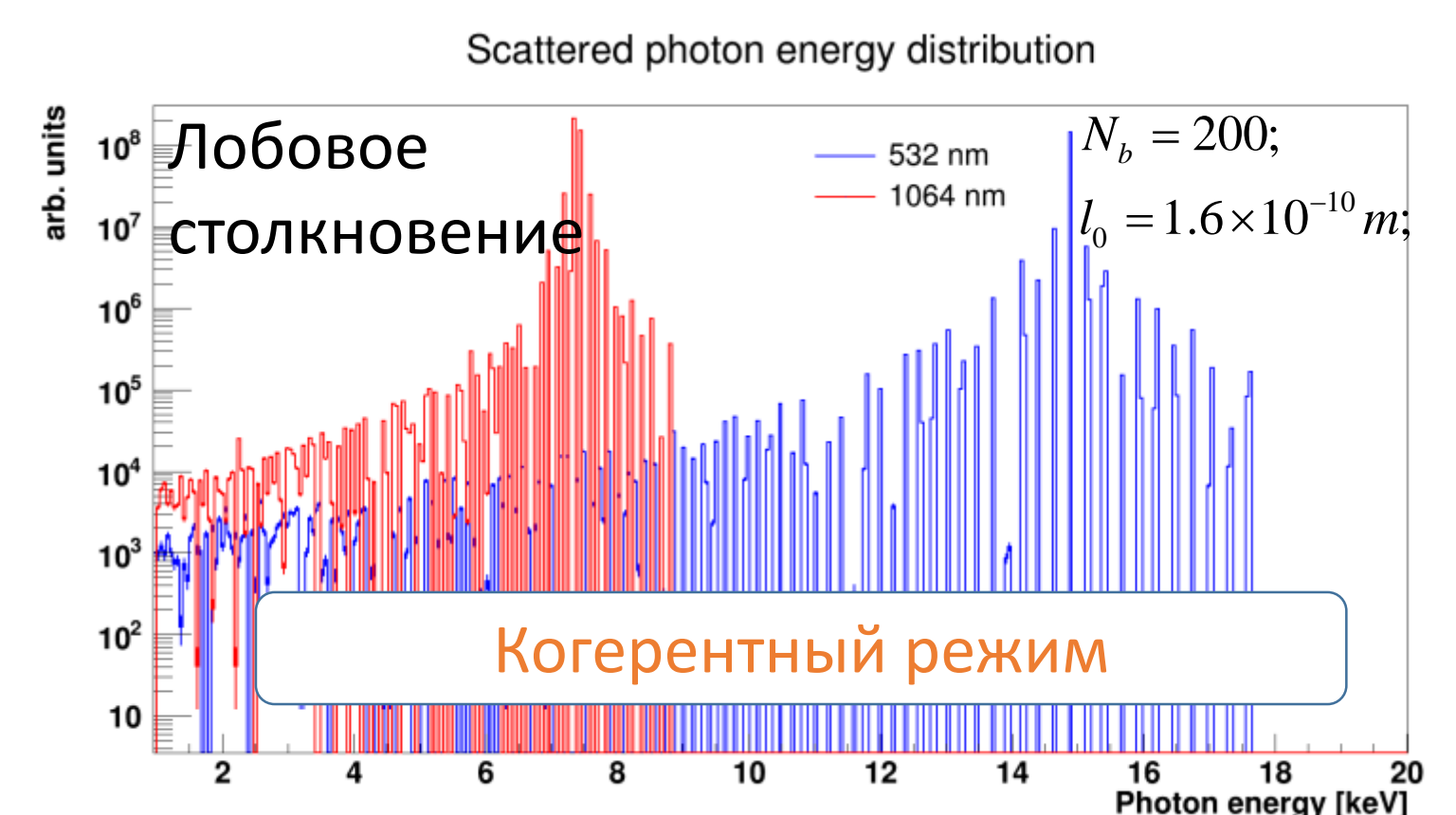


- Лазерный луч заменяется на «Световую мишень»;
- G4BackCompton — дискретный физический процесс;
- G4BackCompton включает выражения, которые могут быть активированы моделью G4LightTarget;
- G4LightTargetC — класс для когерентного процесса;
- G4LightTargetCNL — класс для некогерентного процесса;
- Пользовательское приложение включает геометрию и другие параметры, а также модуль анализа для извлечения информации.

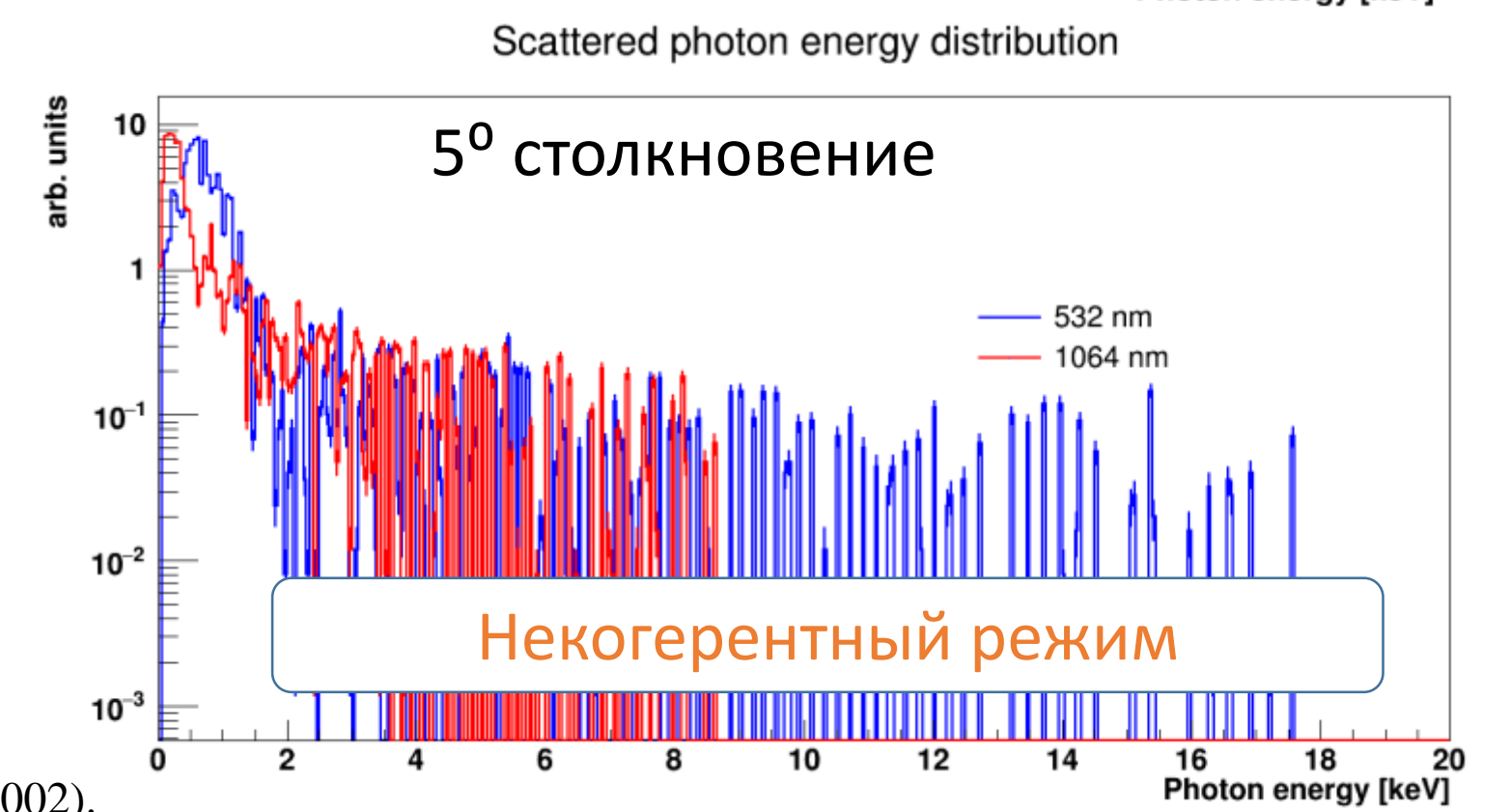
РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ НОВОГО МОДУЛЯ



Электронный пучок 20 МэВ
Лазер: $a_0 = 0.03$, 7 нс, 532 нм и 1064 нм



K. Chouffani et al., Nucl. Inst. and Meth. A 495, 95 (2002).



СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. K. T. Phuoc et al., // Nat. Photonics, 2012, 6, 308.
2. G. Sarri et al., // Phys. Rev. Lett., 2014, 113, 224801.
3. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako et al., // Nucl. Instrum. Meth. A, 2003, 506, 250.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Мы создали основу для нового дискретного физического процесса в Geant4, используя принципы G4FastSimulation.
- В модуле были реализованы два режима работы: когерентный и некогерентный;
- Показано, что созданный физический модуль дает предсказуемые и надежные результаты как в некогерентном, так и в когерентном режимах;
- На следующем шаге будет добавлена возможность моделировать пучки с наклонными фронтами;
- Финальной стадией станет официальная подача заявки на слияние кода модуля с Geant4.