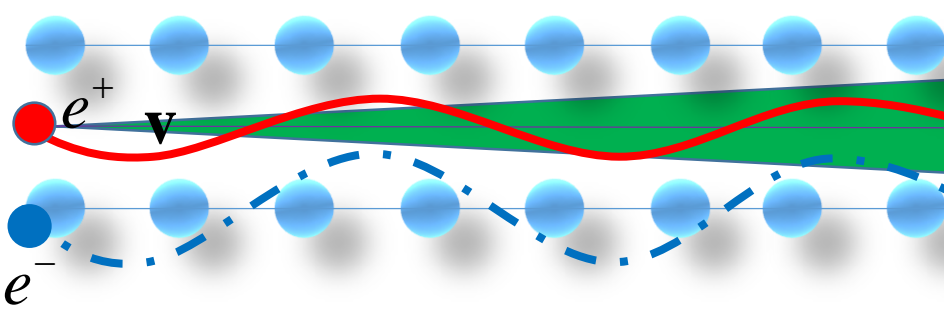


## ВВЕДЕНИЕ

В данном докладе обсуждается создание и интеграция в программный комплекс Geant4 /1/ нового C++ модуля для расчета излучения инициированного ультррелятивистской заряженной частицей, движущейся в монокристалле вдоль кристаллографических осей – когерентное тормозное излучение /2/, или, при условии захвата частицы осевым потенциалом, излучение при осевом каналировании /3/. Создаваемый нами модуль встраивается в Geant4 как дискретный набор физических процессов. Подобная форма интеграции даст возможность комбинировать новые физические процессы в монокристаллах с уже встроенными в Geant4 (обычное тормозное излучение, разные виды рассеяния как фотонов, так и первичных частиц и т. п.), что существенно увеличит качество моделирования. Непосредственное же вычисление излучения в Geant4 не только ускорит расчет, но и позволит описывать более сложные устройства.

## ИЗЛУЧЕНИЕ ПРИ КАНАЛИРОВАНИИ

### Плоскостное каналирование



$$\hbar\omega_{ph} \ll E_e,$$

$$\gamma \ll \sqrt{\frac{2U_0}{E_e}}; \gamma \gg 1; \frac{1}{137} \frac{2c\gamma^2 Z\beta}{\omega a} \gg 1$$

### Осевое каналирование



### Расчет потенциала

$$U(x, y) = \sum_{\mathbf{g}_m} v_{\mathbf{g}_m} e^{i\mathbf{g}_m \cdot \mathbf{r}_\perp}$$

$$v_{\mathbf{g}_m} = -\frac{2\pi}{V_c} a_0 e^2 \sum_i \alpha_i e^{-\frac{1}{4} \left( \frac{\beta_i}{4\pi^2} + 2\rho^2 \right) |\mathbf{g}_m|^2}$$

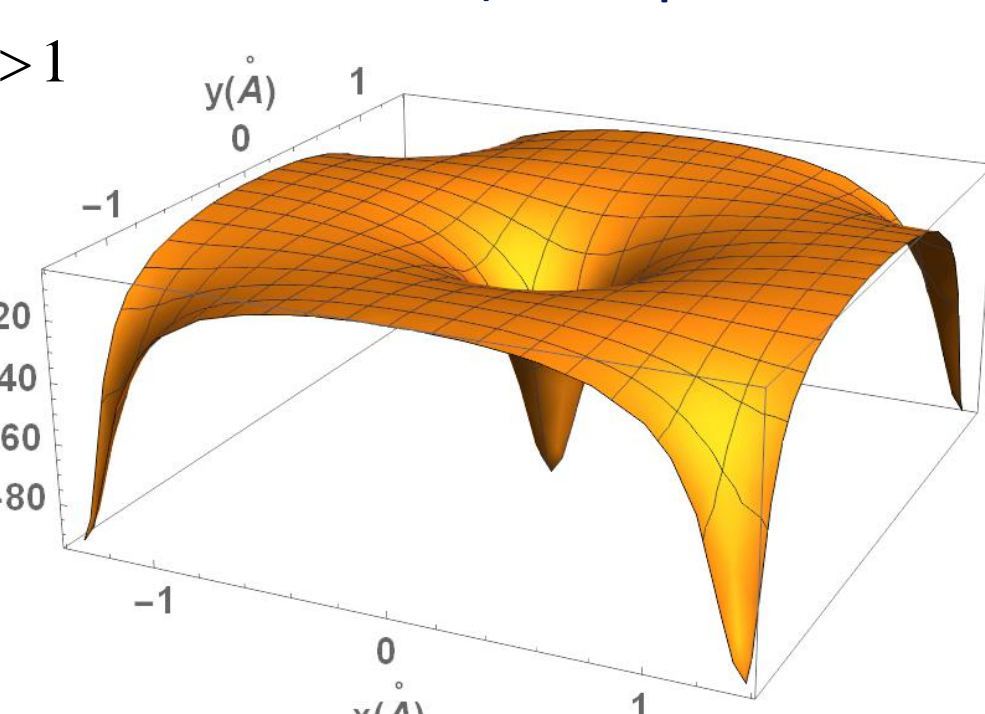
$a_0$  – радиус Бора;  $e$  – заряд электрона;  $\alpha_i$  и  $\beta_i$  – табличные коэф.;

$\mathbf{g}_m$  – вектор обратной решетки;  $V_c$  – объем ячейки;  $\rho$  – амплитуда тепловых колебаний атомов.

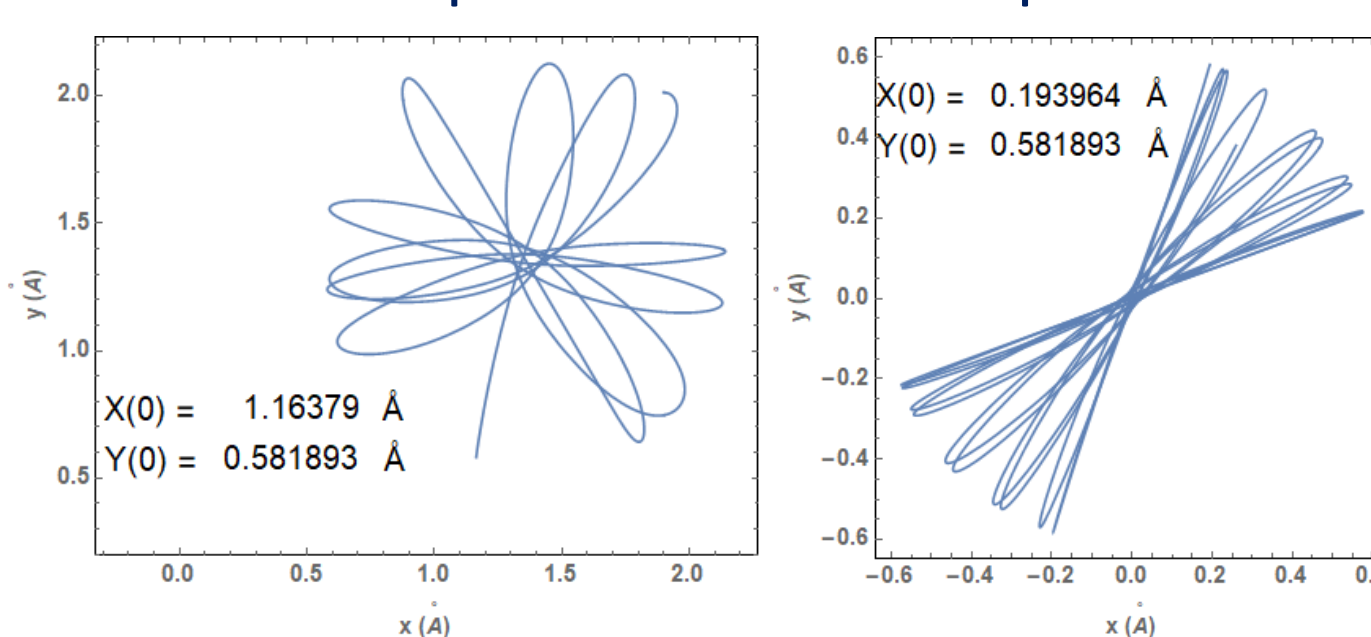
### Расчет траекторий из уравнений движения в потенциале

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = \frac{d}{dt} \left( \frac{m\mathbf{v}}{\sqrt{1 - \frac{v_x^2 + v_y^2 + v_z^2}{c^2}}} \right) = \mathbf{F}$$

### Осевой потенциал кремния <100>



### Типичные траектории электрона 800 МэВ при осевом каналировании



### Спектрально-угловое распределение

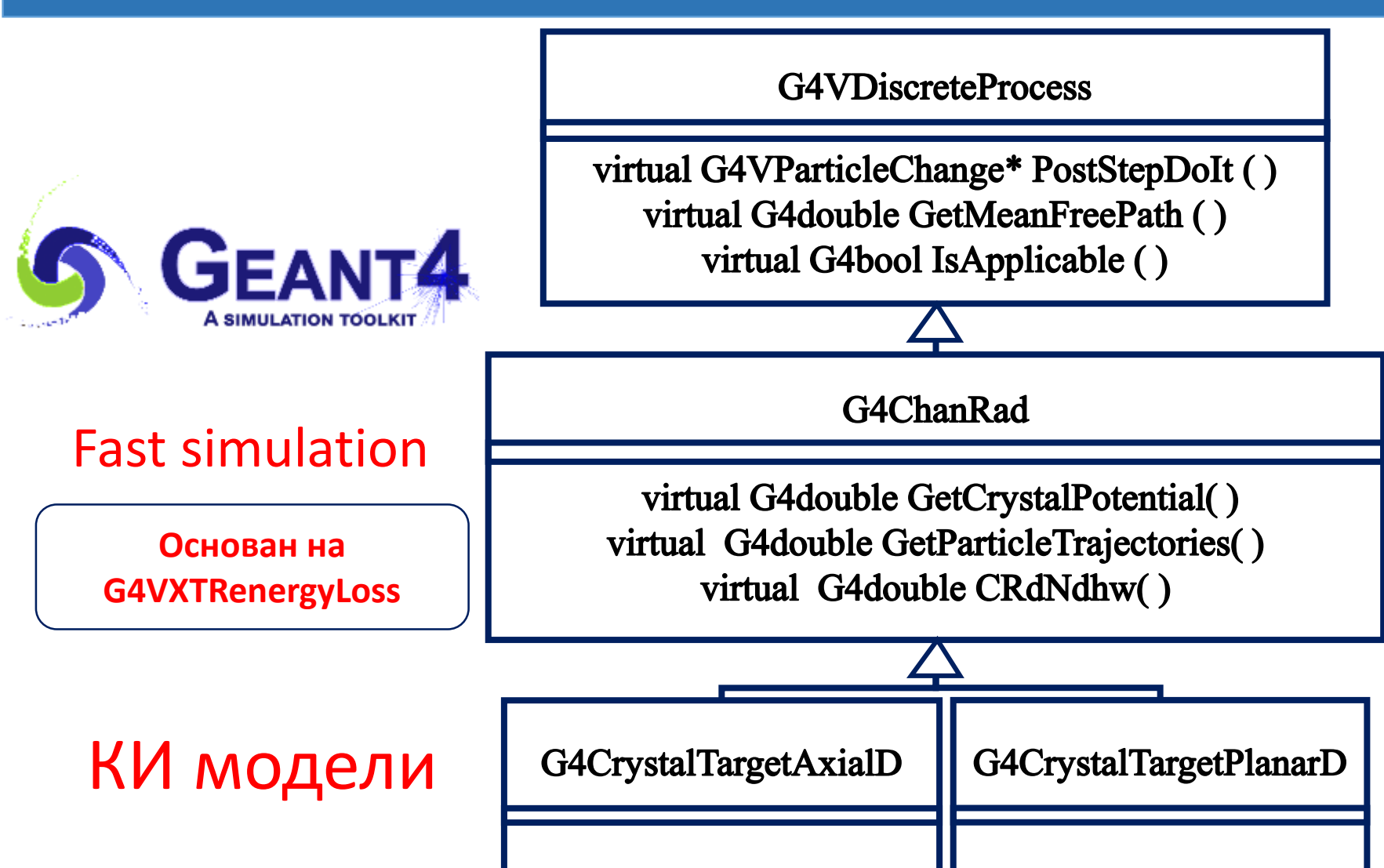
$$\frac{d^2 N}{d\hbar\omega d\Omega} = \frac{1}{4\pi^2 \omega} \left| \int_0^\tau e^{i(\omega t - \mathbf{k} \cdot \mathbf{r})} \frac{\mathbf{n} \times ((\mathbf{n} - \boldsymbol{\beta}) \times \boldsymbol{\beta})}{(1 - \boldsymbol{\beta} \cdot \mathbf{n})^2} dt \right|^2$$

$$d\Omega = \sin\theta d\theta d\varphi$$

$$\mathbf{r}(t) = \mathbf{r}_\perp(t) + \mathbf{v}_z t; \quad c\boldsymbol{\beta} = \dot{\mathbf{r}}; \quad \mathbf{k} = \omega\mathbf{n}/c$$

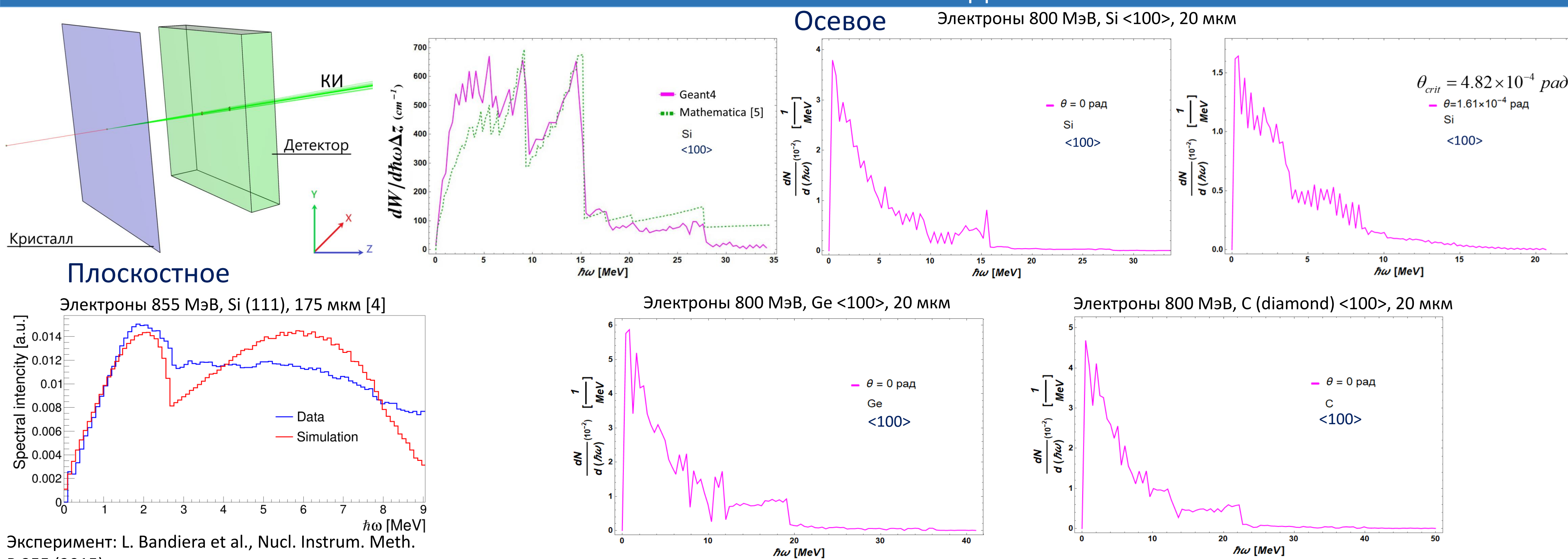
$$\mathbf{r}_\perp(t) = x(t)\mathbf{e}_x + y(t)\mathbf{e}_y$$

## РЕАЛИЗАЦИЯ ПРОЦЕССА В GEANT4



- Кристалл заменен на виртуальную мишень “Crystal target”;
- G4ChanRad – основной класс дискретного физического процесса, реализующий генерацию фотонов излучения при каналировании за счет функции PostStepDoIt;
- Классы G4CrystalTarget отвечают за расчет потенциала кристалла, траекторий заряженных частиц и спектрально-углового распределения излучения для случаев плоскостного или осевого каналирования, рассмотренных в дипольном приближении, а затем данные передаются в основной класс;
- Пользовательское приложение включает описание геометрии, сторонних физических процессов, а также часть кода для анализа получаемых данных.

## РЕЗУЛЬТАТЫ РАБОТЫ НОВОГО МОДУЛЯ



## СПИСОК ИСТОЧНИКОВ

1. S. Agostinelli, J. Allison, K. Amako et al., // Nucl. Instrum. Meth. A, 2003, 506, 250.
2. M.L. Ter-Mikaelian, High Energy Electromagnetic Processes in Condensed Media, New York, Wiley, 1972.
3. M. A. Kumakhov, // Phys. Lett., 1976, 57A, 17.
4. A.A. Savchenko and W. Wagner, // JINST, 2021, 16, P12042
5. B. Azadegan et al., // Nucl. Instrum. Methods B, 2011, 269, 2098.

## ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Мы создали новый модуль дискретного физического процесса в Geant4 для моделирования излучения при каналировании, используя принципы G4FastSimulation. В модуле были реализованы два варианта генерации излучения: при плоскостном и осевом каналировании (классическое описание, дипольное приближение);
- Показано, что созданный физический модуль дает предсказуемые и надежные результаты, которые согласуются как с экспериментальными данными, так и с моделированием в сторонних программах;
- Непосредственное моделирование излучения при каналировании в Geant4 будет полезно, например, для проектирования гибридных источников позитронов, которые могут быть использованы в будущих инжектирующих установках электрон-позитронных коллайдеров.