



Лаборатория космических лучей
пределно высоких энергий НИИЯФ МГУ



Создание телескопа ЭРА в программе EUSO-Offline

Трофимов Д.А.

18 сентября 2025

Программная среда Offline

Изначально разработана для Pierre Auger Observatory

Цель - моделирование ШАЛ и детекторов

В коллаборации - EUSO Offline

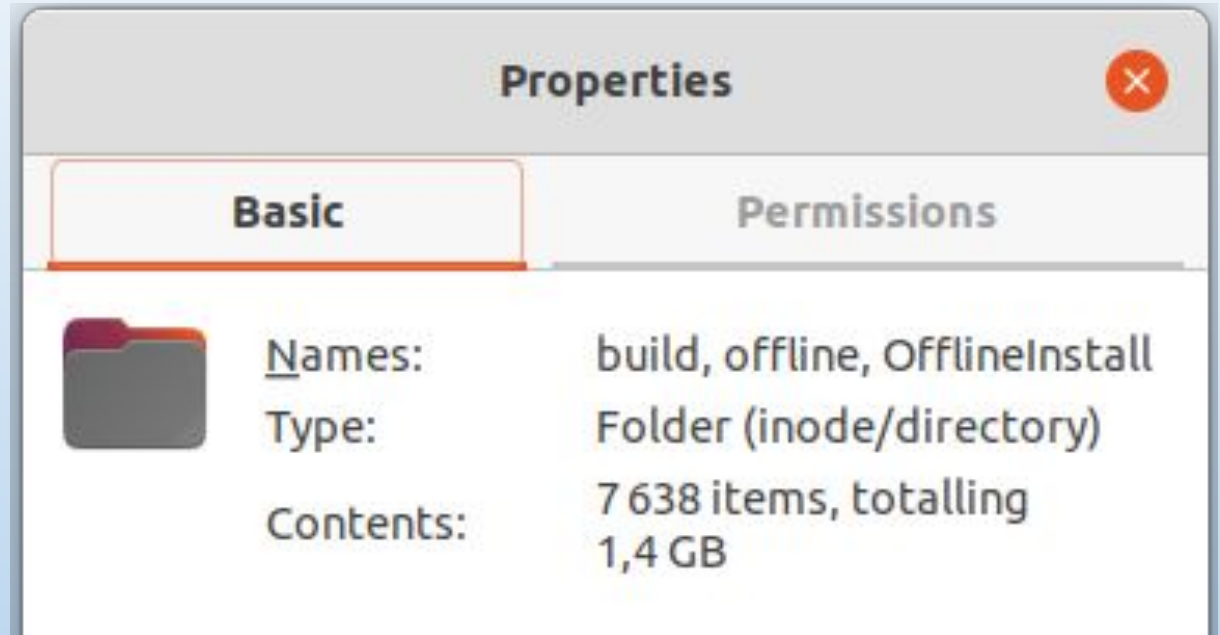
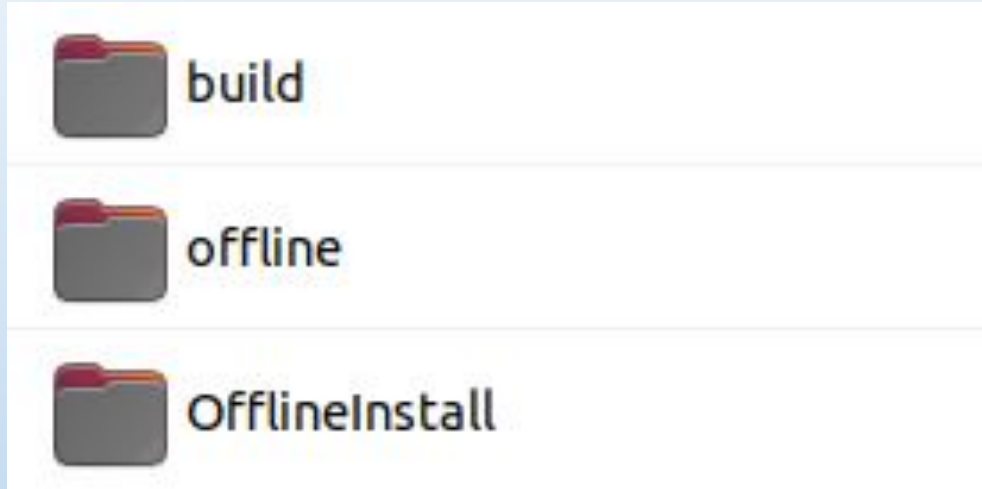
Программная среда разработана для моделирования орбитальных или стратосферных проектов.

Смоделированы:

JEM-EUSO, EUSO-Balloon, EUSO-TA, EUSO-SPB1,
Mini-EUSO, EUSO-SPB2, PBR

Язык: C++

Программная среда Offline

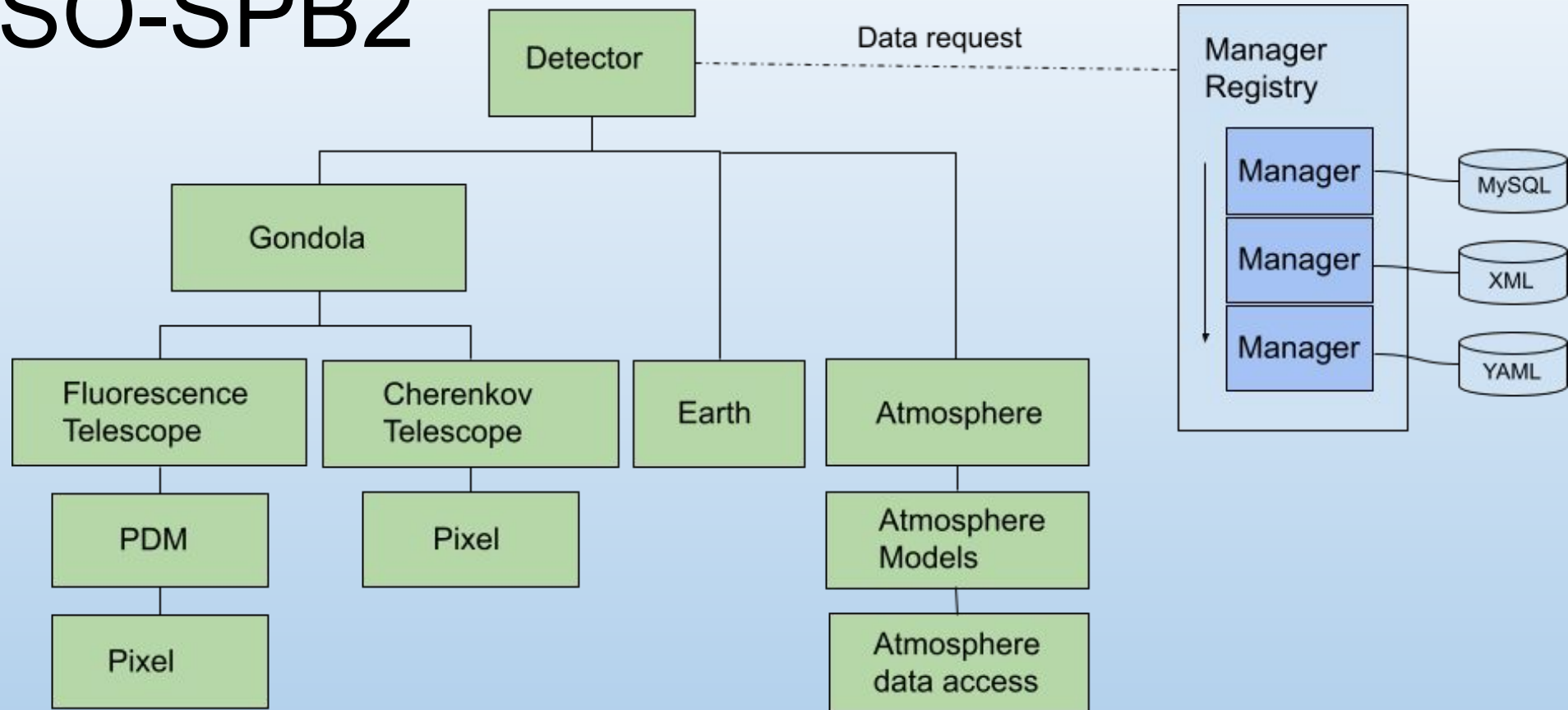


build - сборка всего проекта

offline - исходные данные

OfflineInstall - результаты моделирования

Схема моделирования для телескопа EUSO-SPB2



Моделирование детектора происходит в GEANT4

Модель ШАЛ - из CONEX

Реализация моделирования телескопа в GEANT4

Все основные характеристики записаны в файлах *.xml

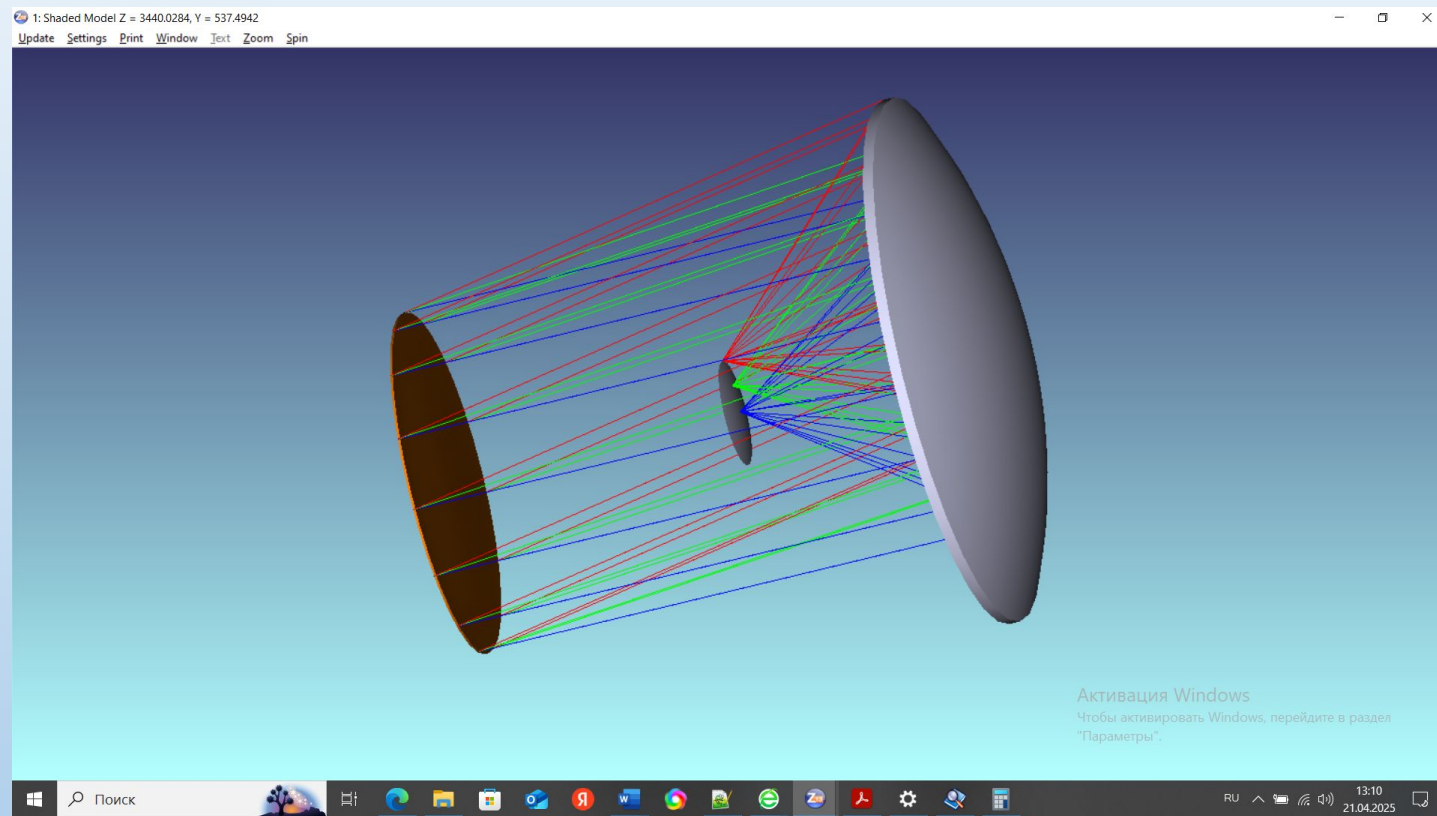
В случае выполнения сборки (команда build) используются переменные из файлов *.xml.in, они перезаписывают файлы *.xml

Также в некоторых случаях используются форматы *.dtd и *.dtd.in

В редких случаях - переменные в .hh файлах

Задача 1 - смоделировать телескоп ЭРА

- Тип зеркала: сферическое ($R_c = 2700$ мм).
- Корректирующая пластина с передней асферической поверхностью и задней плоской
- Тип ФП: выпуклая сферическая ($R_c = 1392.7$ мм).
- Габариты поперечные: диаметр зеркала $D_M = 2460$ мм, диаметр корректора $D_c = 1600$ мм, диаметр ФП ($\gamma_{\max} = 10^\circ$) $D_{FS} = 490$ мм.



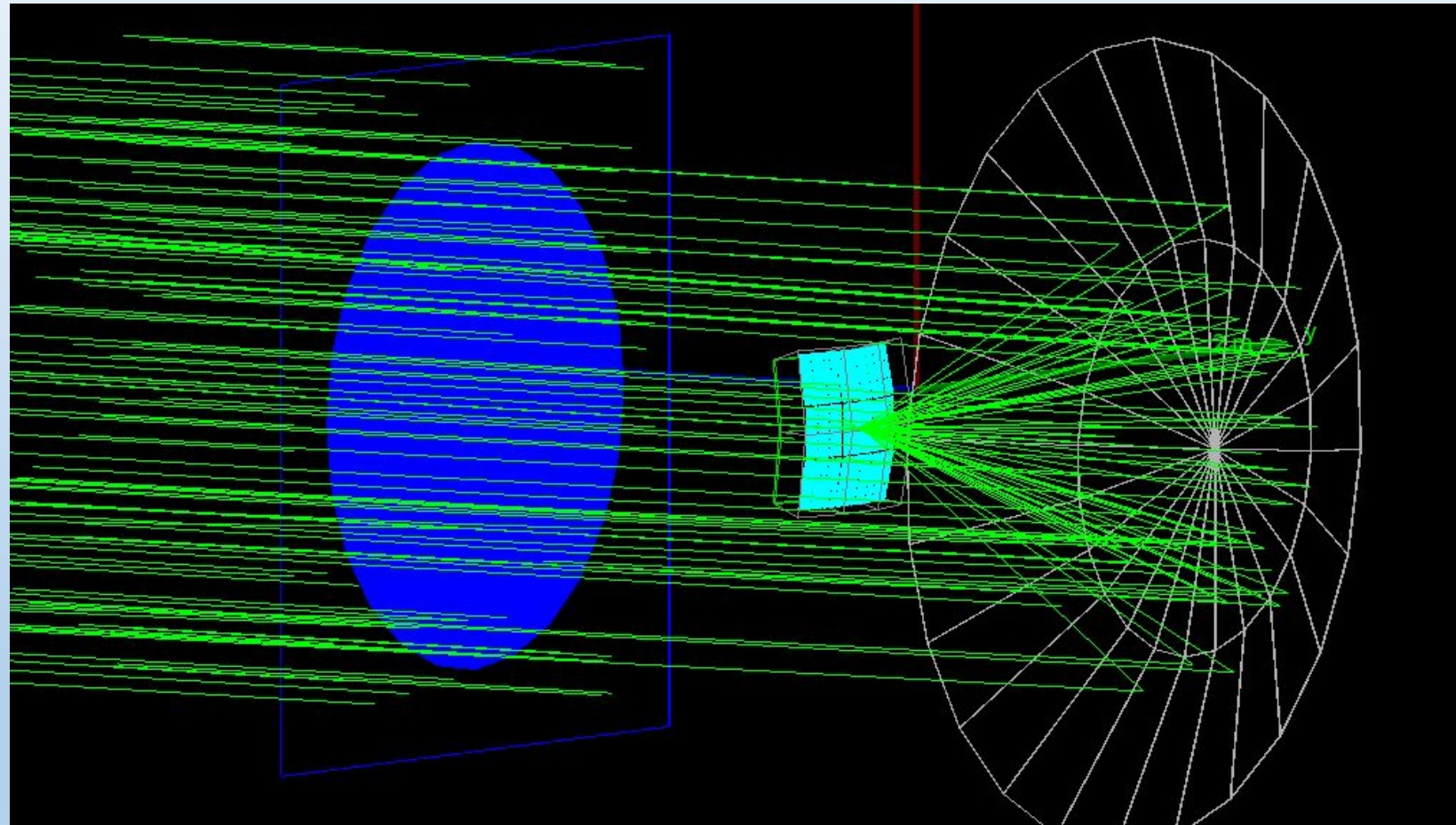
Габариты продольные: осевое расстояние от задней поверхности корректора до зеркала $L_{C2-M} = 2691.4$ мм, осевое расстояние от зеркала до ФП $L_{M-FS} = 1291.2$ мм, осевая толщина корректора $L_{C1-C2} = 20$ мм, минимальная толщина корректора $L_{C_{\min}} = 10$ мм, общая осевая длина системы $L_{OS} = 2711.4$ мм.

3D модель телескопа в GEANT4

Модель телескопа
ЭРА, сделанная на
основе EUSO-SPB2
(схема Шмидта со
сферическим
зеркалом)

Фотоприемники: 9
PDM от EUSO-SPB2
($2304 \times 9 = 20736$
пикселей)

Рендерер: OpenGL



Основные размеры телескопа

Основные размеры телескопа находятся в файле TelescopeSimulatorConstants.xml.in

Записываются в формате (для примера приведены некоторые величины):

```
<mirrorCharacteristics>
```

```
  <mirrorRadius unit="mm"> 2700.0 </mirrorRadius>
```

```
  <correctorToMirror unit="mm"> 2691.4 </correctorToMirror>
```

```
  <mirrorToFlattenerZ unit="mm"> 1251.2 </mirrorToFlattenerZ>
```

```
</mirrorCharacteristics>
```

Рендеринг телескопа

Данные параметры
находятся в файле
TelescopeSimulatorJG.xml.in

```
<visibility>
  <!-- can be DAWN, VRML, OGL -->
  <renderer> OGL </renderer>
  <!-- Mechanical Structure -->
  <world> 0 </world>
  <container> 0 </container>
  <telmother> 0 </telmother>
  <darkboxvis> 0 </darkboxvis>
  <!-- Detector -->
  <camera> 1 </camera>
  <pdm> 0 </pdm>
  <ec> 0 </ec>
  <pmt> 0 </pmt>
  <pixel> 1 </pixel>
  <photocathode> 0 </photocathode>
  <!-- Optical System -->
  <opticalsystem> 1
</opticalsystem>
  <frontlens> 1 </frontlens>
  <rearlens> 1 </rearlens>
  <tracks> 1 </tracks>
  <hits > 1 </hits>
</visibility>
```

Структура модели телескопа:

Путь к модели телескопа:

~/euso/offline/Modules/FSimulation/G4TelescopeSimulatorJG

В папке все файлы для создания модели телескопа.

Основные:

FDsimG4Detector_SPB2.cc (количество и расположение зеркал в многосекционных сборках, ConstructFMirror() , BuildMirrorSegmentERA(), BuildCorrector())

FDsimG4Camera_SPB2.cc (BuildCamera())

PDMParamSPB2.cc (ComputeTransformation(const G4int copyNo, G4VPhysicalVolume* physVol) - клонирование PDM с заданием координат)

Корректор телескопа

Задается в функции:

```
FDsimG4Detector_SPB2::BuildCorrector()
```

по формуле:

$$zz.at(i) = fBaseThick + fC2 * pow(rr.at(i), 2) + fC4 * pow(rr.at(i), 4) + fC6 * pow(rr.at(i), 6) + fC8 * pow(rr.at(i), 8);$$

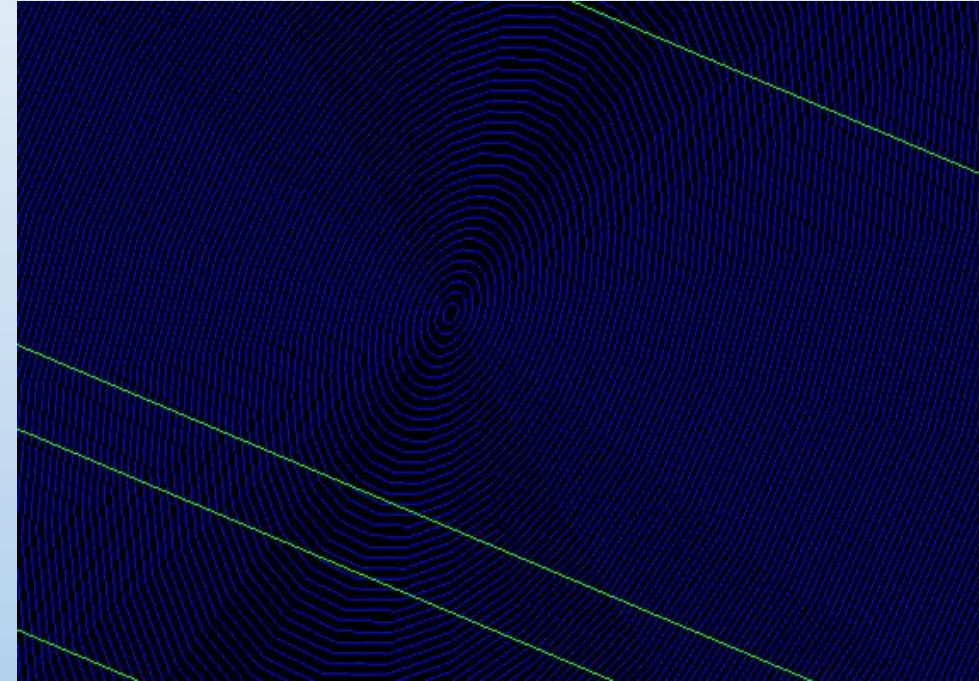
,где zz - толщина, а rr - радиус корректора

```
double fC2 = -2.9399546e-05;
```

```
double fC4 = 2.0271193e-11;
```

```
double fC6 = 3.2997552e-18;
```

```
double fC8 = 1.6296623e-24;
```



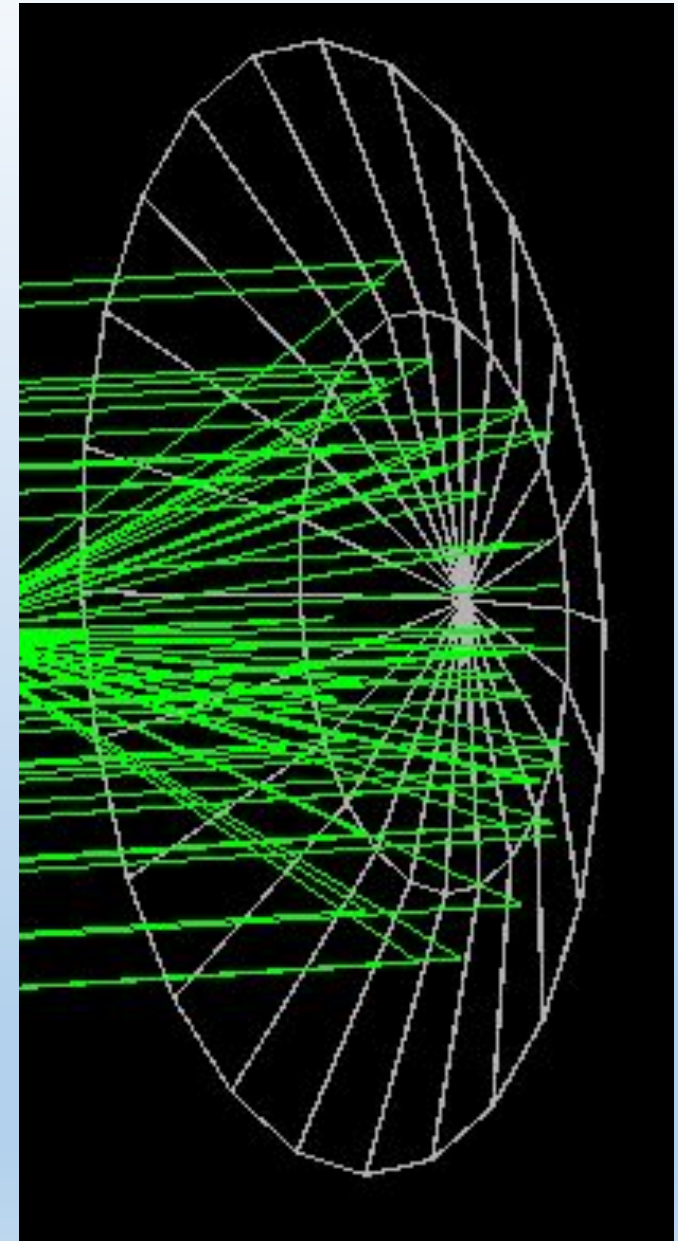
Линза телескопа

Задается в функции:

```
FDsimG4Detector_SPB2::ConstructFMirror()
```

Радиус кривизны: 2700 мм

Материал: Алюминий



Flattener

Это линза перед каждым PDM с одной сферической поверхностью:

```
<flattenerRadius unit="mm"> 324.7 </flattenerRadius>
```

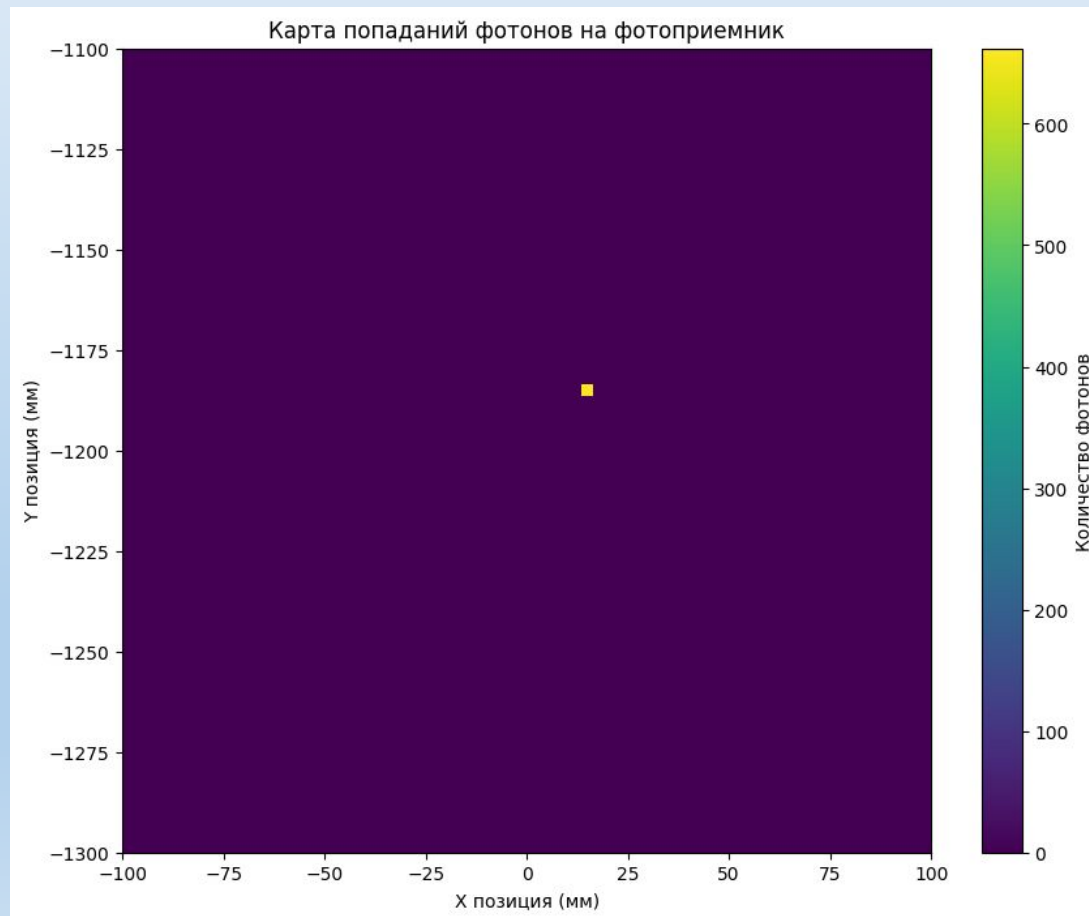
```
<flattenerSize unit="mm"> 190.0 </flattenerSize>
```

```
<centerThick unit="mm"> 35.15 </centerThick>
```

```
fFlattenerCap = new G4Box("FlattenerCap", fFlattenerBox_x, fFlattenerBox_x,  
fFlattenerBox_z);  
G4Sphere* lens = new G4Sphere("Lens", 0., fFlattener_Rc, 0, 2 * CLHEP::pi, 0, 2 *  
CLHEP::pi);  
G4ThreeVector pos(0, 0, fFlattener_Rc - fFlattenerBox_z);  
G4RotationMatrix* rot = new G4RotationMatrix();  
G4IntersectionSolid* flattener_Vol = new G4IntersectionSolid("FlattenerCap*Lens",  
fFlattenerCap, lens, rot, pos);  
//G4Material* silica = G4Material::GetMaterial("FusedSilica");  
//fFlattener_log = new G4LogicalVolume(flattener_Vol, silica, "Flattener_log", 0, 0, 0,  
true);
```

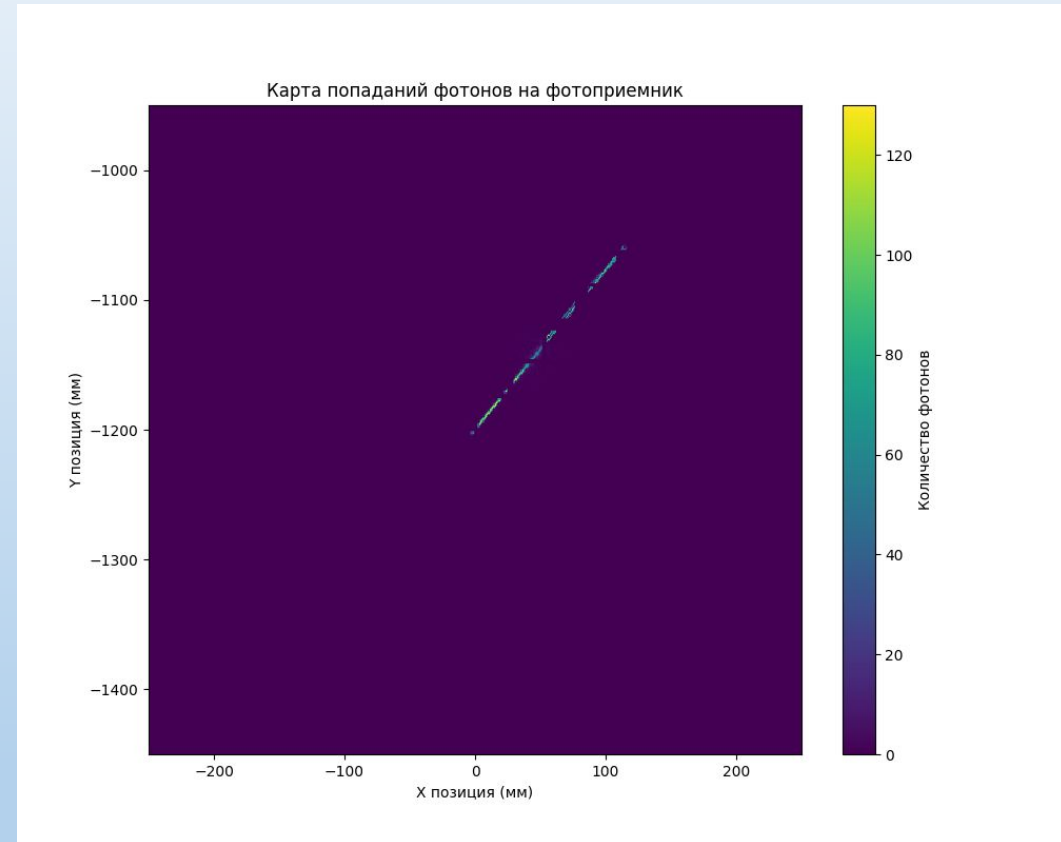
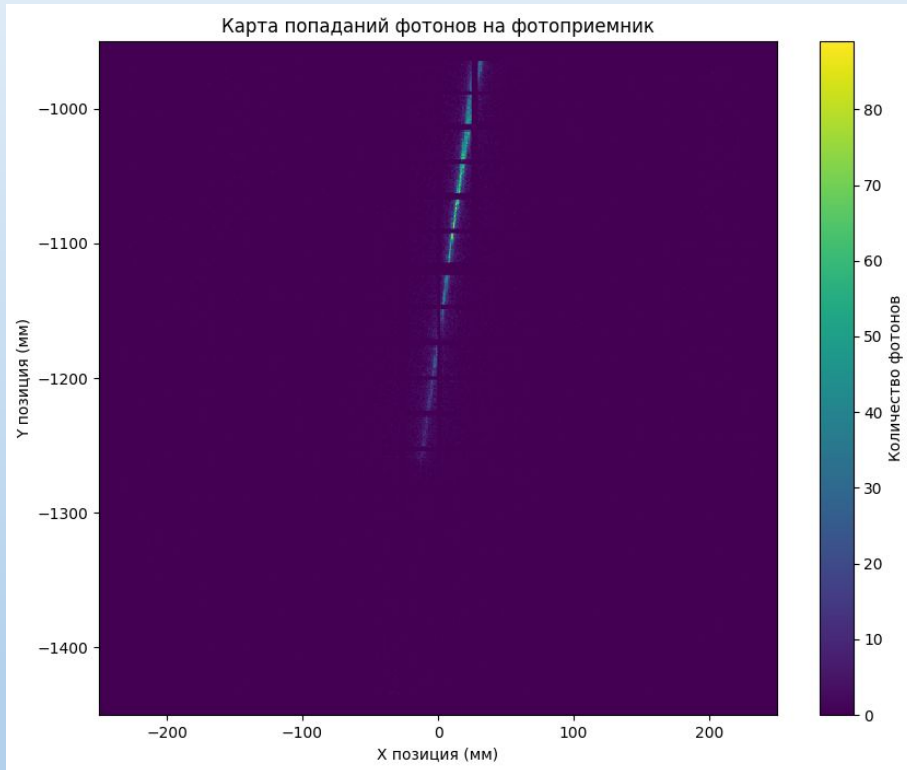
ФРТ для разных углов

Угол 0.01 рад



Моделирование ШАЛ для телескопа ЭРА

Используется ШАЛ от частицы с энергией $1e20eV$ и с зенитным углом 50 градусов

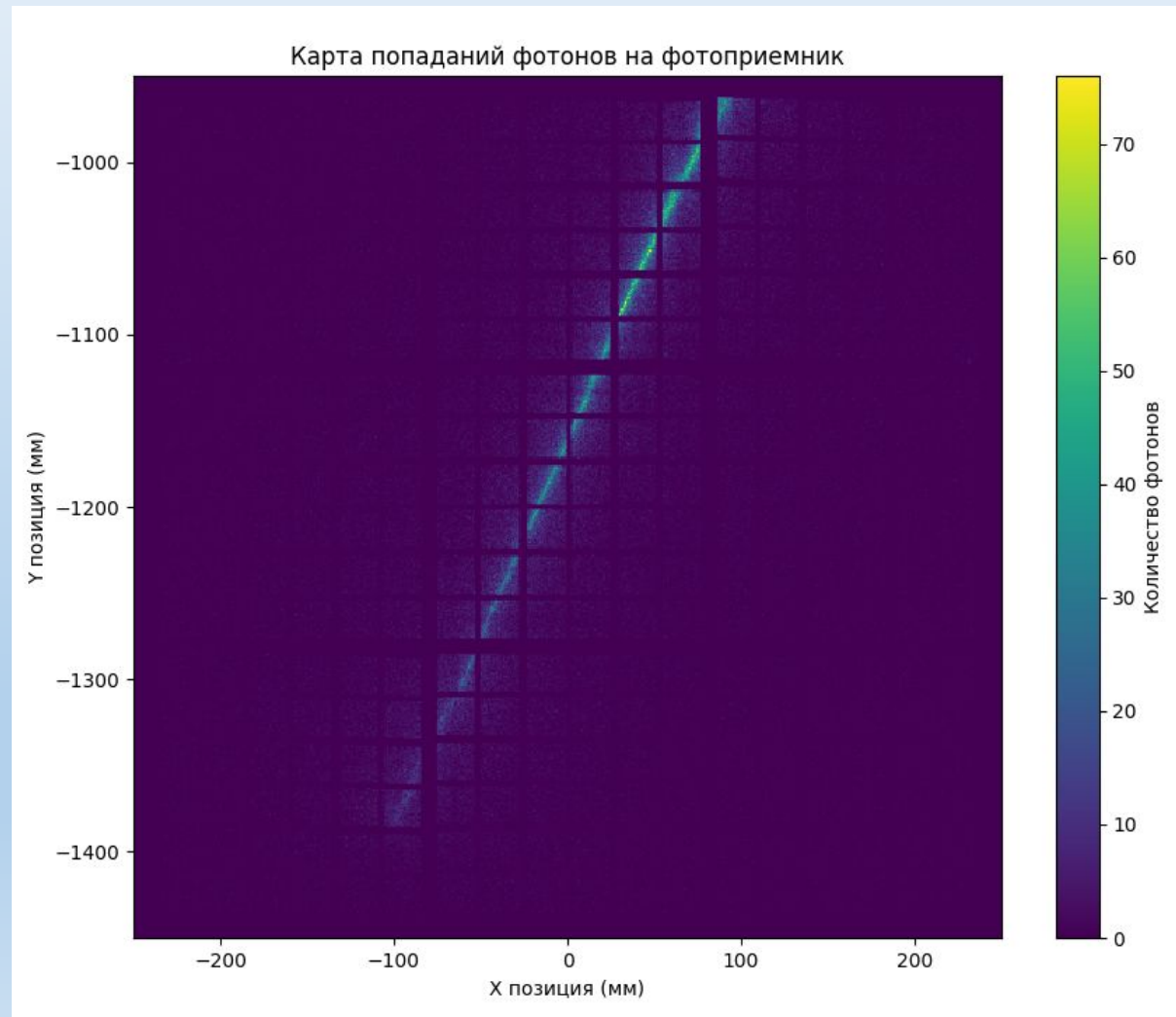


Слева: высота 33 км, справа: высота 500 км

Шкала - число фотонов (эффективность детектирования 100%)

Моделирование ШАЛ для телескопа ЭРА

Используется ШАЛ от частицы с энергией $1e20eV$ и с зенитным углом 50 градусов. В качестве примера - высота 10 км

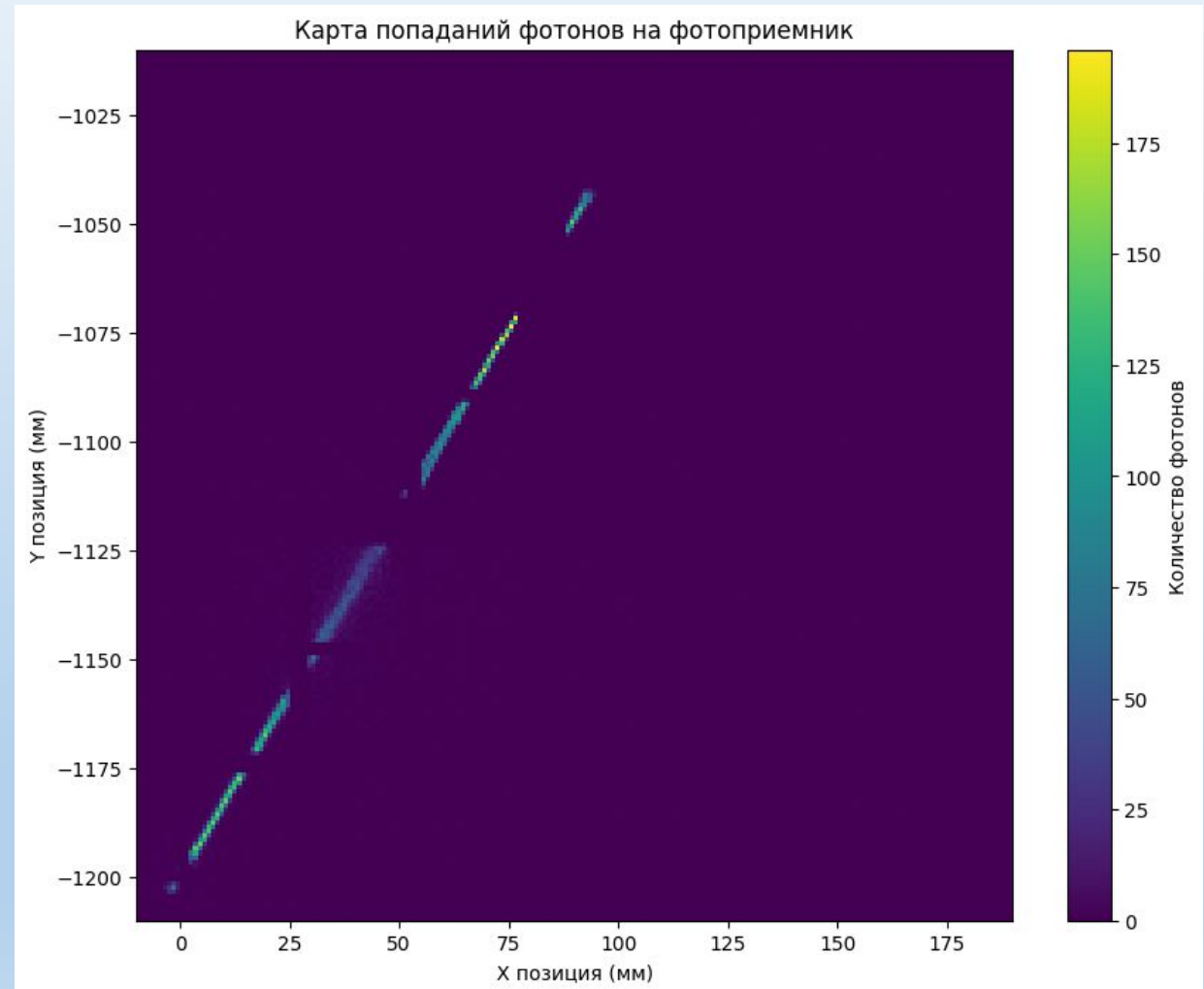


Моделирование ШАЛ для телескопа ЭРА

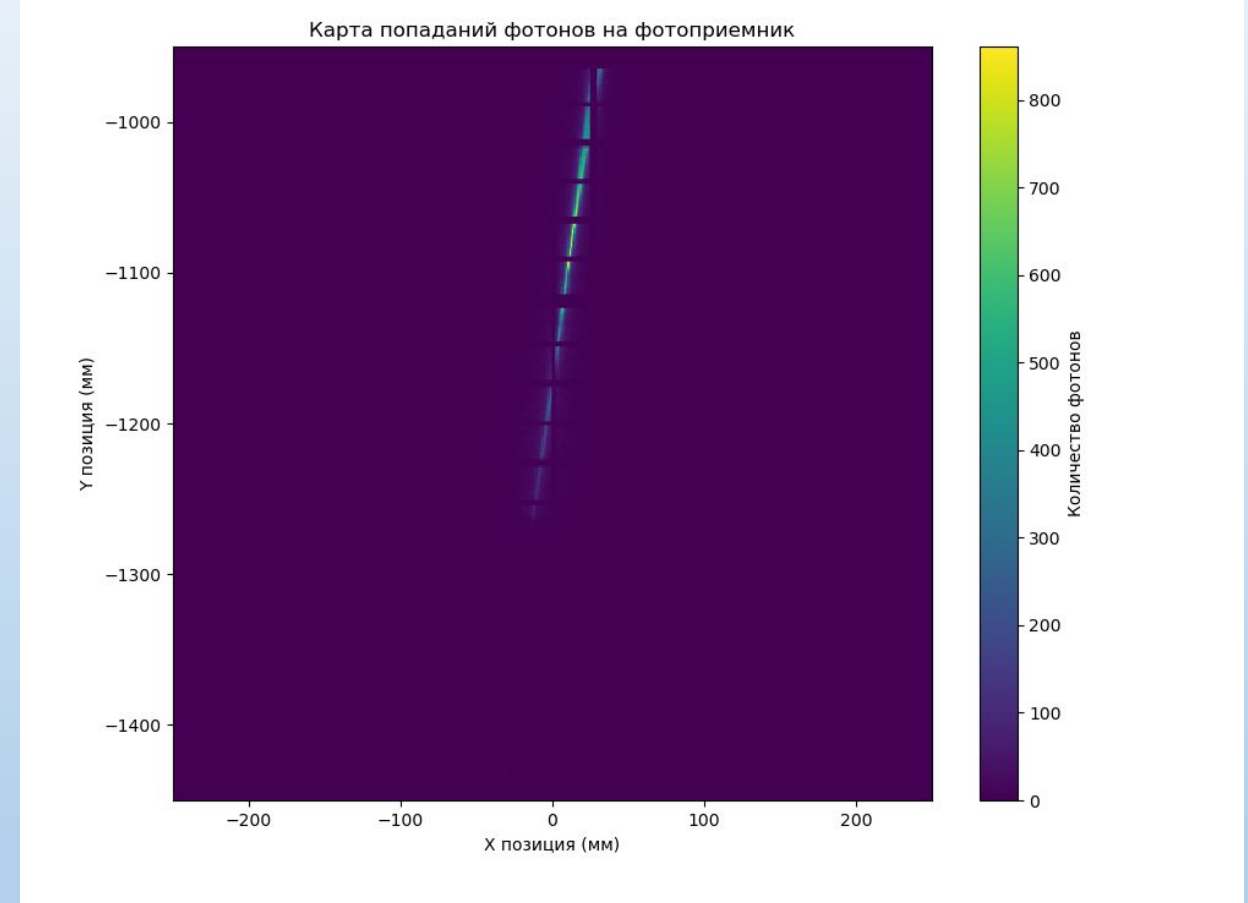
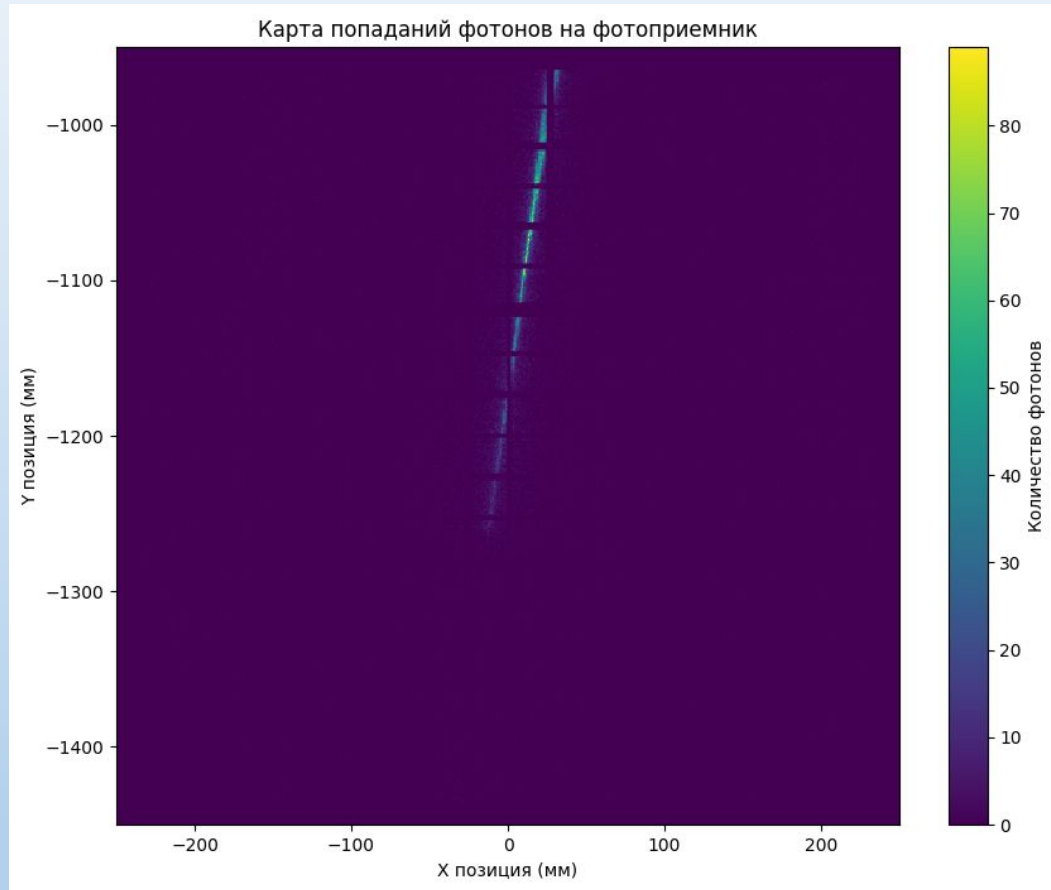
Энергия частицы $1e20eV$,
высота 500 км.

Запись временно
реализована командами в
FDSimG4PMT_SD.cc

```
FDsimG4OpticalHit* hit =  
(*fOpticalHitsCollection)[i];  
    outFile << hit->GetDetID() << " "  
    <<  
hit->GetWorldPosition().x() << " "  
    <<  
hit->GetWorldPosition().y() << " " <<  
"\n";
```



Моделирование ШАЛ для телескопа ЭРА

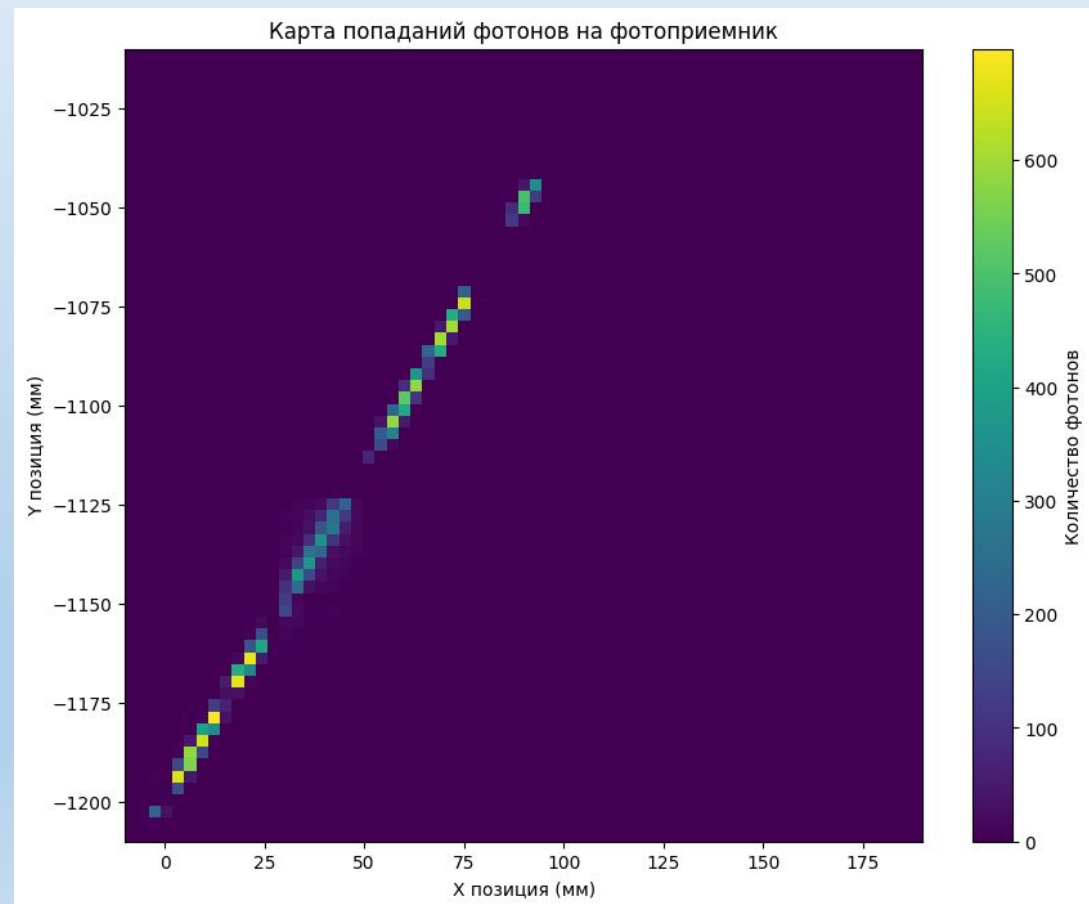
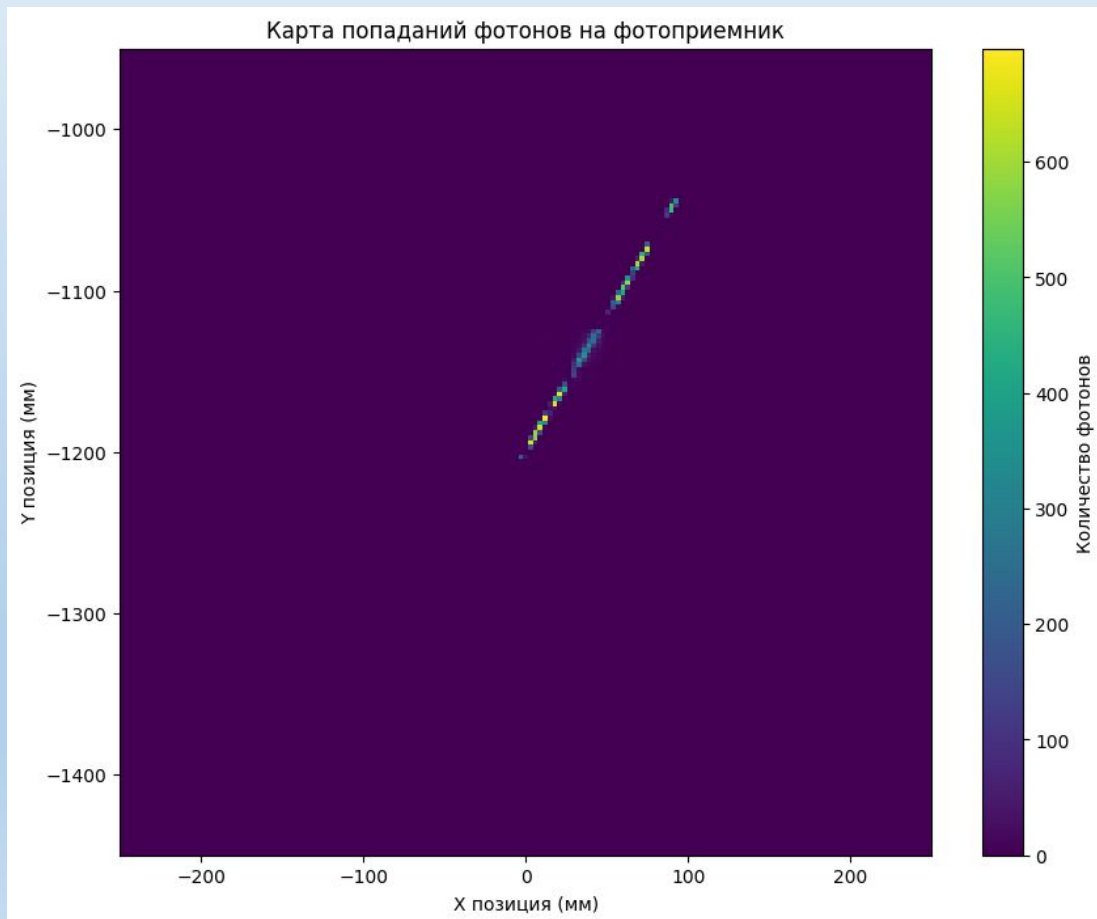


Слева: ШАЛ от частицы с энергией $1e20eV$, справа $1e21eV$, высота 33 км

Моделирование ШАЛ для телескопа ЭРА

Слева: ШАЛ от частицы с энергией $1e20eV$ на высоте 500 км

Пиксели $\sim 3 \times 3mm$



Спасибо за внимание