

Моделирование переходного излучения от радиаторов сложного типа и оптимизация их параметров

Жутиков Иван

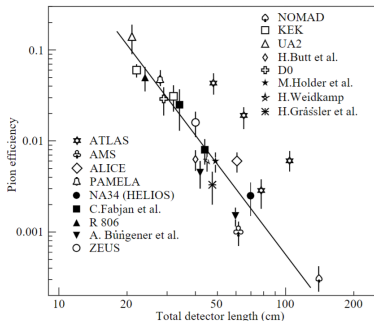


18 июня 2024

Научный руководитель:
к.ф.-м.н., профессор Романюк А. С.

Мотивация

Детекторы переходного излучения (TRD) широко используются для идентификации частиц высоких энергий в экспериментах с космическими лучами и на ускорителях. Однако переходное излучение обладает рядом особенностей усложняющих их использование такие как низкая интенсивность ($\sim \alpha$) и малый угол между фотонами и частицей ($\sim \text{mrad}$).



Цели работы

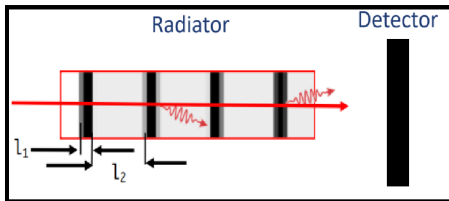
В соответствии с этим общей целью данной работы является решение данных проблем через оптимизацию геометрии радиатора, для чего необходимо:

- Разработать программу способную рассчитывать переходное излучение от сложных типов радиаторов
- Произвести оптимизацию параметров радиаторов для максимизации количества излучаемых фотонов

Разработка программы для
моделирования сложных типов
радиаторов

Детектор переходного излучения

TRD (Transition Radiation Detector)



$$\frac{d^2 N_{\text{gen}}}{d\theta d\omega} = 4 \frac{d^2 N_0}{d\theta d\omega} \sin^2 \left(\frac{l_1}{Z(\omega_1)} \right) \frac{\sin^2 \left(N \left(\frac{l_1}{Z(\omega_1)} + \frac{l_2}{Z(\omega_2)} \right) \right)}{\sin^2 \left(\frac{l_1}{Z(\omega_1)} + \frac{l_2}{Z(\omega_2)} \right)}$$

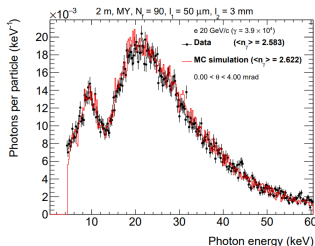
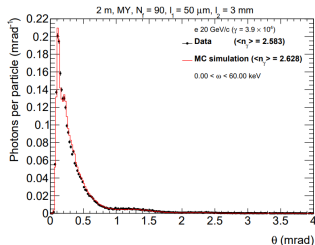
$$\frac{d^2 N_0}{d\theta d\omega} = \frac{1}{c} \left(\frac{qe}{4\pi c} \right)^2 \theta^3 \omega (Z(\omega_1) - Z(\omega_2))^2 \quad Z(\omega_i) = Z(\theta, \omega, \omega_i) = \frac{4c}{\omega \left(\gamma^{-2} + \left(\frac{\omega}{\omega} \right)^2 + \theta^2 \right)}$$

$$\omega_{\text{max}} \approx 0.65 \cdot l_1 \omega_1^2$$

$$\gamma_{\text{thr}} \approx 3 \cdot 10^3 \cdot l_1 \omega_1$$

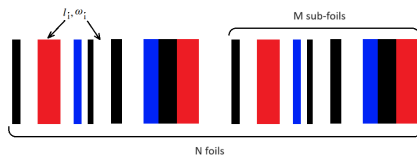
$$\gamma_{\text{sat}} \approx 3 \cdot 10^3 \cdot \omega_1 \sqrt{l_1 l_2}$$

$$\theta \approx 1.2 / \omega_1 \sqrt{l_1 l_2} \approx 3.6 \cdot 10^3 / \gamma_{\text{sat}}$$



Расчёт переходного излучения от произвольного радиатора

$$\frac{d^2 N_{\text{gen}}}{d\theta d\omega} = \frac{c}{4\pi} E H^* R^2 \quad 1$$



$$E = \left[\sum_{i=0}^{i=M-2} \frac{A_{i,i+1}}{R} e^{-2i \sum_{j=i+1}^{j=M-1} \frac{l_j}{Z_j}} + \frac{A_{M-1,0}}{R} \right] \frac{\sin N \Delta\phi/2}{\sin \Delta\phi/2} \quad \Delta\phi = 2 \left(\sum_{i=0}^{i=M-1} \frac{l_i}{Z_i} \right)$$

$$A_{i,j}^2 = \frac{1}{c} \left(\frac{qe}{4\pi c} \right)^2 \theta^3 \omega (Z_i - Z_j)^2 \quad Z_i = \frac{4c}{\omega \left(\gamma^2 + \left(\frac{\omega_i}{\omega} \right)^2 + \theta^2 \right)}$$

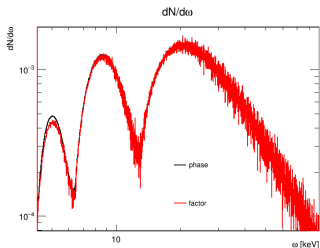
¹Cherry M. L. Extending the Lorentz factor range and sensitivity of transition radiation with compound radiators // arXiv: <https://arxiv.org/abs/2201.07901> 5/17

Результаты расчёта

One regular



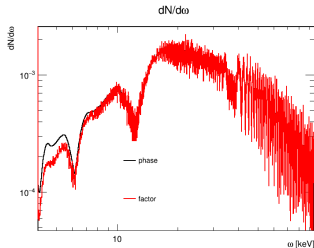
MY 50 μm AIR 3 mm N = 90
Total length 271.5 mm



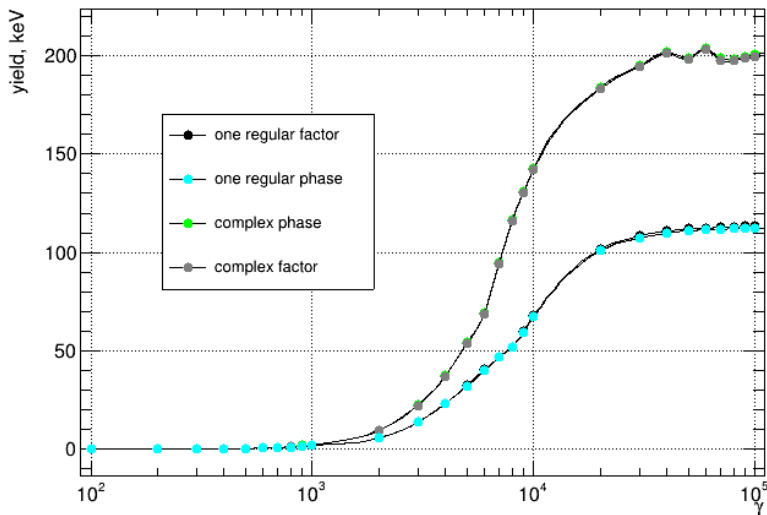
Complex



Thick foil MY 100 μm N = 126
Thin foil MY 50 μm N = 126
AIR gap 1 mm
Total length 269.9 mm



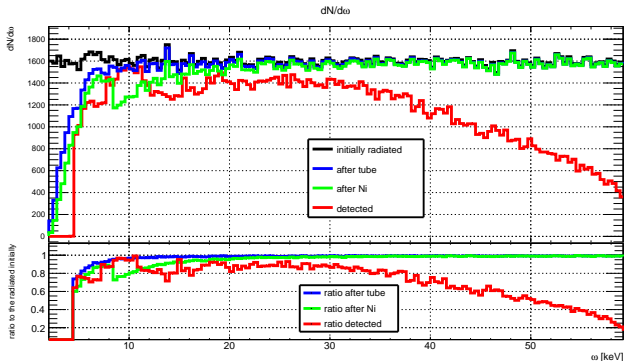
Зависимость световыхода от гамма фактора



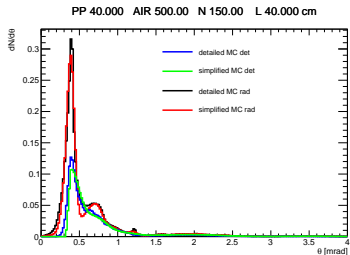
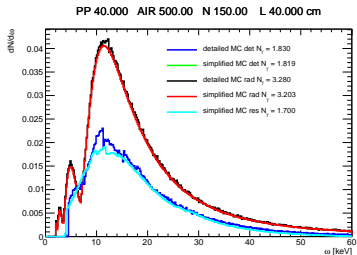
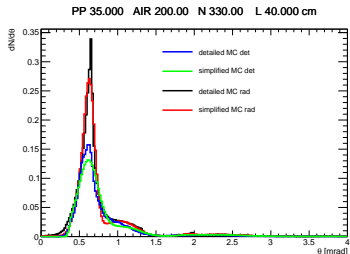
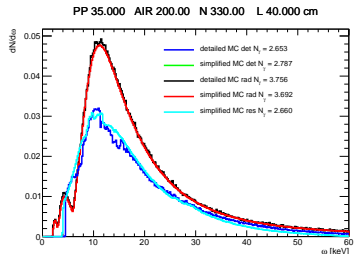
Оптимизация параметров радиатора

Упрощенная МК программа

Для оптимизации параметров радиатора была разработана упрощённая версия МК программы, которая использует упрощённую эффективность регистрации TR фотонов. Данная программа позволяет производить расчёты в $10^2 - 10^3$ раз быстрее чем детальная МК программа.



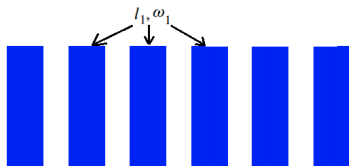
Сравнение детальной и упрощённой МК программ



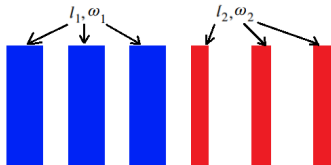
Рассмотренные конфигурации

Для оптимизации были выбраны два наиболее простых типа радиаторов, которые планируется применить на следующем тестовом пучке.

Обыкновенный радиатор

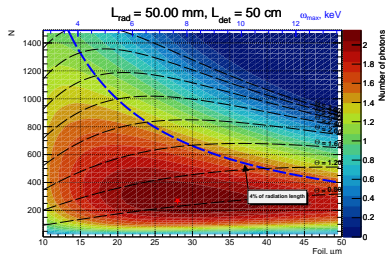
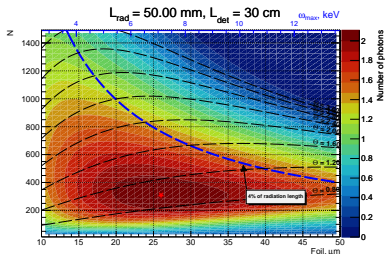
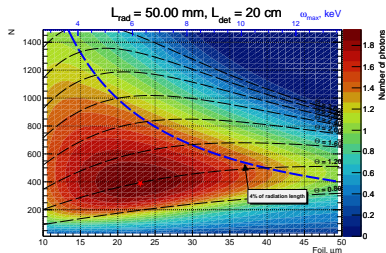
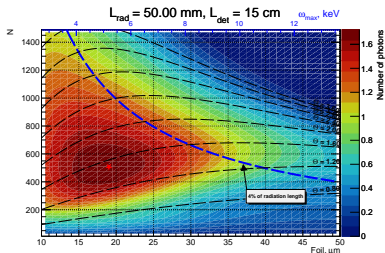


Последовательный радиатор



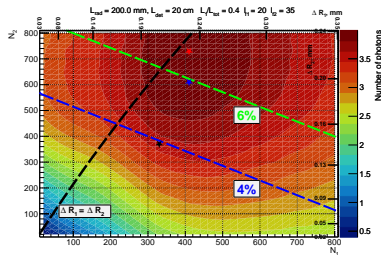
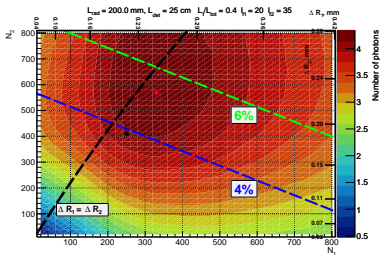
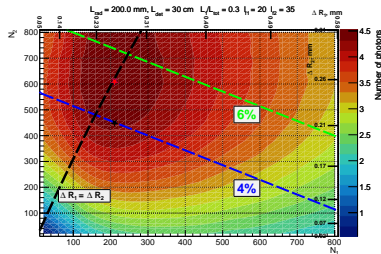
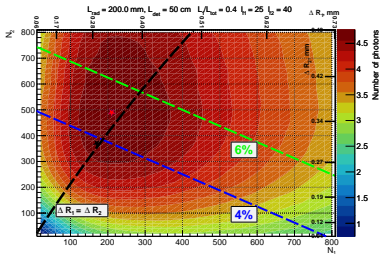
Результаты для обычного радиатора

Каждый график содержит результаты 10^4 симуляций!



Результаты для последовательного радиатора

Каждый график содержит результаты 10^5 симуляций!



Сравнение обыкновенного и последовательного радиатора

$L_{\text{rad}}, \text{mm}$	$l_{\text{det}}, \text{cm}$	$l_f, \mu\text{m}$	$l_g, \mu\text{m}$	N	N_{photons}
200	50	25/40	356/205	210/490	4.77
		30	273	660	4.41
200	30	20/35	222/176	210/610	4.53
		25	219	820	4.14
250	50	25/45	375/238	250/530	5.3
		30	275	820	4.84
250	30	20/35	337/205	210/730	4.99
		25	211	1060	4.51

Выбранные радиаторы и их комбинации

По итогу оптимизации были выбраны следующие радиаторы для будущего тестового пучка

Radiators to produce:

Type 1: 25 μm - 240 μm - 377 - 1 Block

Type 2: 30 μm - 240 μm - 555 - 1 Block

Type 3: 25 μm - 200 μm - 450 - 1 Block

Type 4: 30 μm - 200 μm - 450 - 1 Block

Type 5: 35 μm - 500 μm - 300 - 1 block
(exists)

Type 6: 25 μm -Radiator with mesh (Gap 220-240 μm ?) - set 460 and set 377 foils
(depending on the effective thickness)

Radiator combination:

Thin foil radiator is closest to the detector

Radiator 1: Type1 & Type2

Radiator 2: Type3 & Type4

Radiator 3: Type1 & Type5

Radiator 4: Type3 & Type4

Radiator 5: Type6 (377) comparison with Type1

Radiator 6: Type6 (460+377)

Заключение

В ходе данной работы:

- Была разработана программа для моделирования радиатора произвольной конфигурации.
- Было изучено как усложнение геометрии радиатора влияет на параметры переходного излучения.
- Была произведена оптимизация параметров обыкновенных и составных радиаторов для будущего тестового пучка.
- Было показано, что при одинаковых начальных условиях последовательный радиатор даёт на $\approx 10\%$ большее число фотонов.

THANKS!