

Вячеслав Ключин (НИИЯФ МГУ)

Применение метода двойных интегралов магнитного поля в эксперименте CMS

Конференция НИИЯФ МГУ, Москва

4 февраля 2022

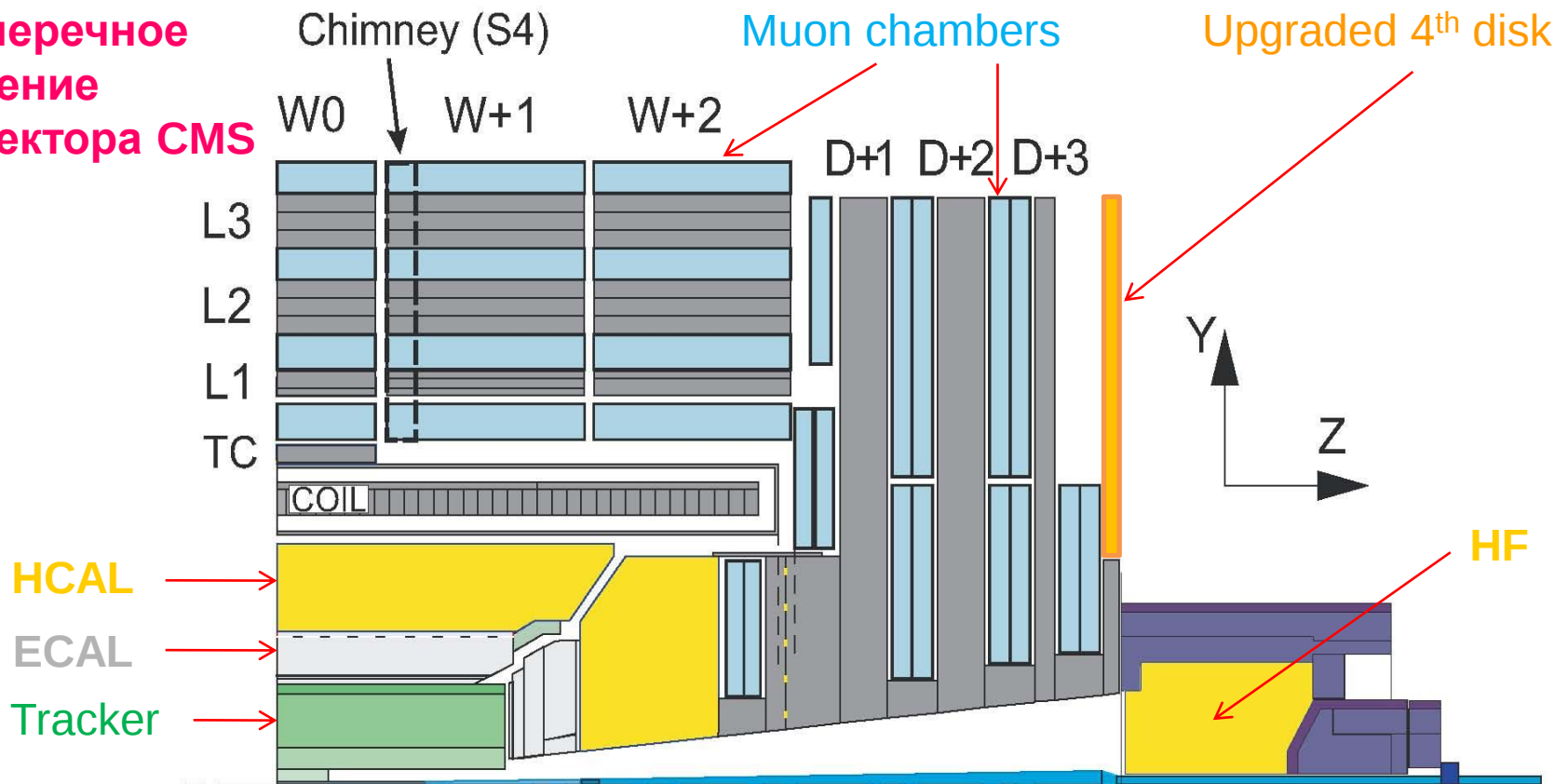
План доклада

- Краткое описание детектора CMS.
- Описание модели магнитной системы детектора CMS.
- Определение двойных интегралов магнитного поля.
- Описание модели пластин поглотителя HGCal.
- Предел на величину относительной магнитной проницаемости нержавеющей стали, предполагаемой для изготовления пластин поглотителя HGCal.
- Поведение величины полной плотности магнитного потока и угла между вектором магнитной индукции и вектором начального импульса частицы в зависимости от длины траектории частицы и псевдобыстроты.
- Сравнение поведения двойных интегралов магнитного поля вдоль траектории частицы в зависимости от псевдобыстроты.
- Заключение.

Цель исследования

- После окончания **сеанса III** на **Большом адронном коллайдере**, **торцевой адронный калориметр** детектора **CMS**, размещённый внутри **сверхпроводящего соленоида CMS** будет заменён новым **высокогранулярным калориметром HGCal**, состоящим из кремниевых детекторов и пластин поглотителя, выполненных из **нержавеющей стали**, **относительная магнитная проницаемость** которой должна быть меньшей величины **1,05**.
- В данном исследовании изучено влияние материала пластин поглотителя **HGCal** на **однородность** магнитного поля в объёме **трекового детектора CMS**.
- Метод исследования основан на использовании **двойных интегралов магнитного поля**, которыми определяется разрешение по **импульсу** заряженных частиц.

**Поперечное
сечение
детектора CMS**



Superconducting coils inside the cryostats – in dark grey;

Inner tracker – in green;

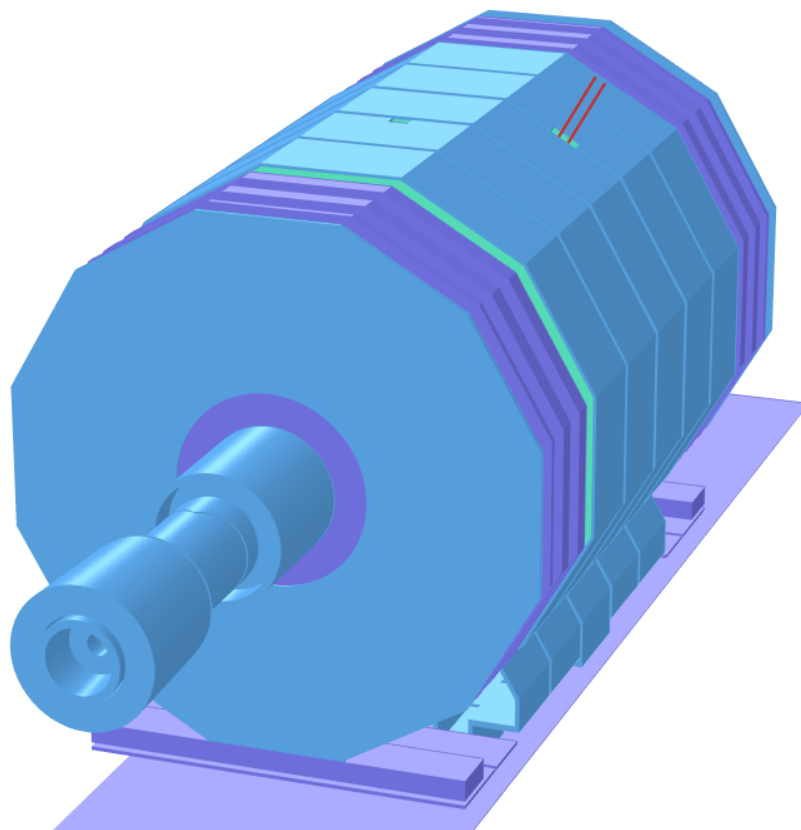
Electromagnetic calorimeter – in light grey;

Hadronic calorimeter – in yellow;

Muon chambers – in light blue;

Magnet yoke – in dark grey;

Radiation protection shield – in violet.



Трехмерная модель детектора **CMS** включает в себя **сверхпроводящий соленоид** с магнитной индукцией **3,8 Тл** диаметром **6 м** и длиной **12,5 м** и стальное **ядро магнита** весом **10000 т** с внешним диаметром **15 м**. Полный ток в **соленоиде** составляет **39,6 МА-витков**. **Энергия, запасенная** в магнитной системе при поле **3,8 Тл** составляет **2,28 ГДж**. Вклад центральной части **ядра магнита** в величину центральной **плотности магнитного потока** составляет **7,97%**. Вклад передних стальных элементов и пола экспериментального зала составляет **0,03%**.

Определение двойных интегралов магнитного поля

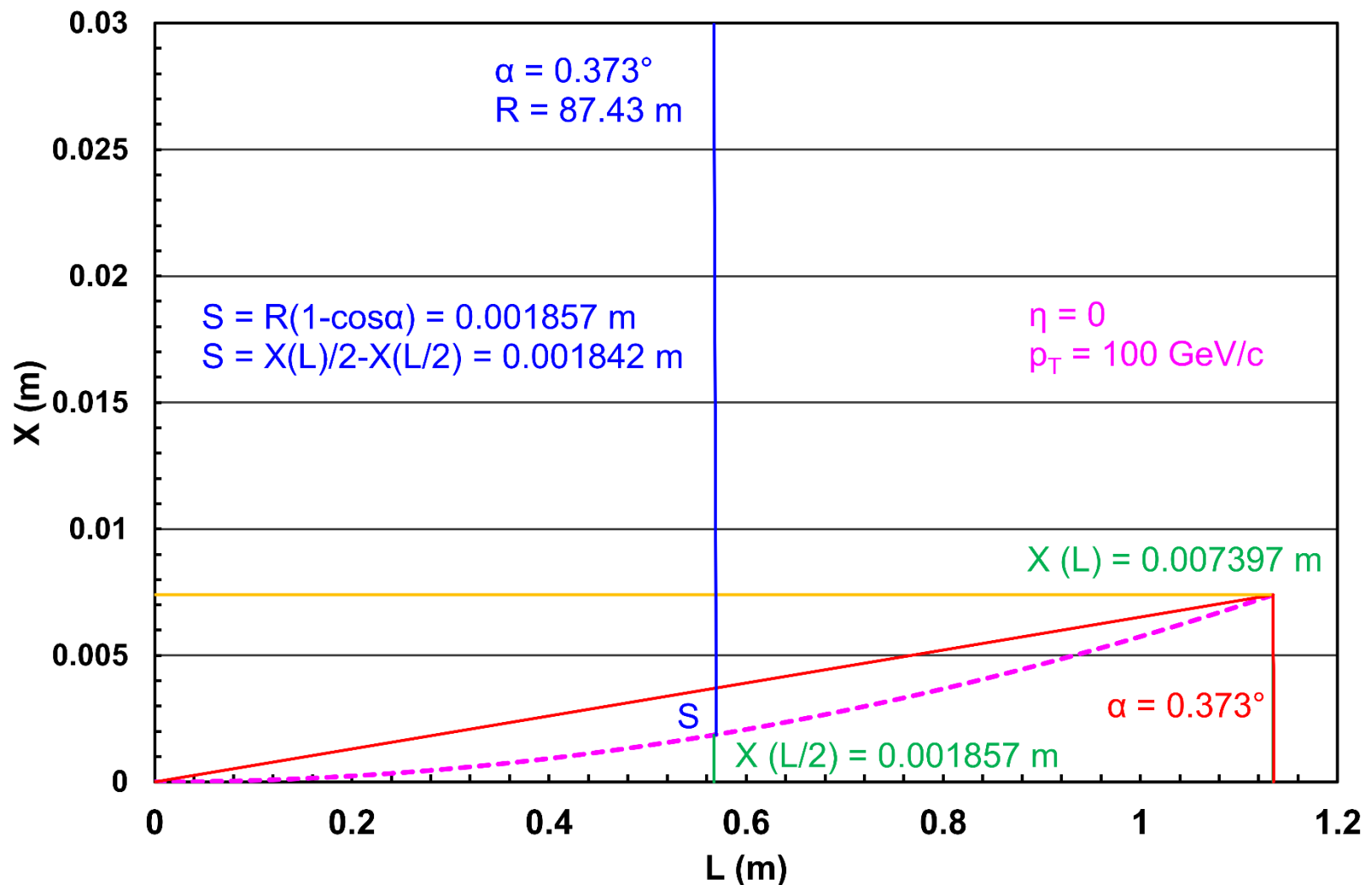
Рассмотрим траекторию заряженной частицы, испущенной под углом θ к оси пучка частиц из номинальной точки столкновения частиц пучка. Для малого шага dl вдоль траектории движения частицы в идеальном соленоиде с однородным магнитным полем изменение $d\alpha$ угла поворота частицы лежит в плоскости, поперечной пучку частиц, и определяется выражением

$$d\alpha = \frac{0.3}{p_T} B dl \sin\theta,$$

где длина траектории l измеряется в метрах, **поперечный импульс** частицы p_T измеряется в ГэВ/с, а величина вектора **плотности магнитного потока** B измеряется в Тл. В случае неоднородного магнитного поля траектория частицы заворачивается в направлении, определяемом векторным произведением $dl \times B$. На длине l угол поворота частицы α по отношению к RZ -плоскости, определяемой вектором начального **импульса** частицы и осью пучка частиц, составляет

$$\alpha(l) = \frac{0.3}{p_T} \int_0^l B \sin\theta_{(dl, B)} dl,$$

где **полярный угол** θ является углом между вектором начального **импульса** частицы и вектором **плотности магнитного потока** B . Тогда **поперечное отклонение** траектории частицы x определяется интегрированием этого выражения по $dr = dl \sin\theta$, где r — радиус в поперечной плоскости.



Траектория заряженной частицы с **поперечным импульсом 100 ГэВ/с** в плоскости, поперечной оси пучка взаимодействующих частиц при значении **псевдобыстроты** частицы $\eta = 0$. Здесь **R** — радиус траектории, **S** — расстояние от центра дуги до центра ее основания (**сагитта**).

Определение поперечного отклонения траектории

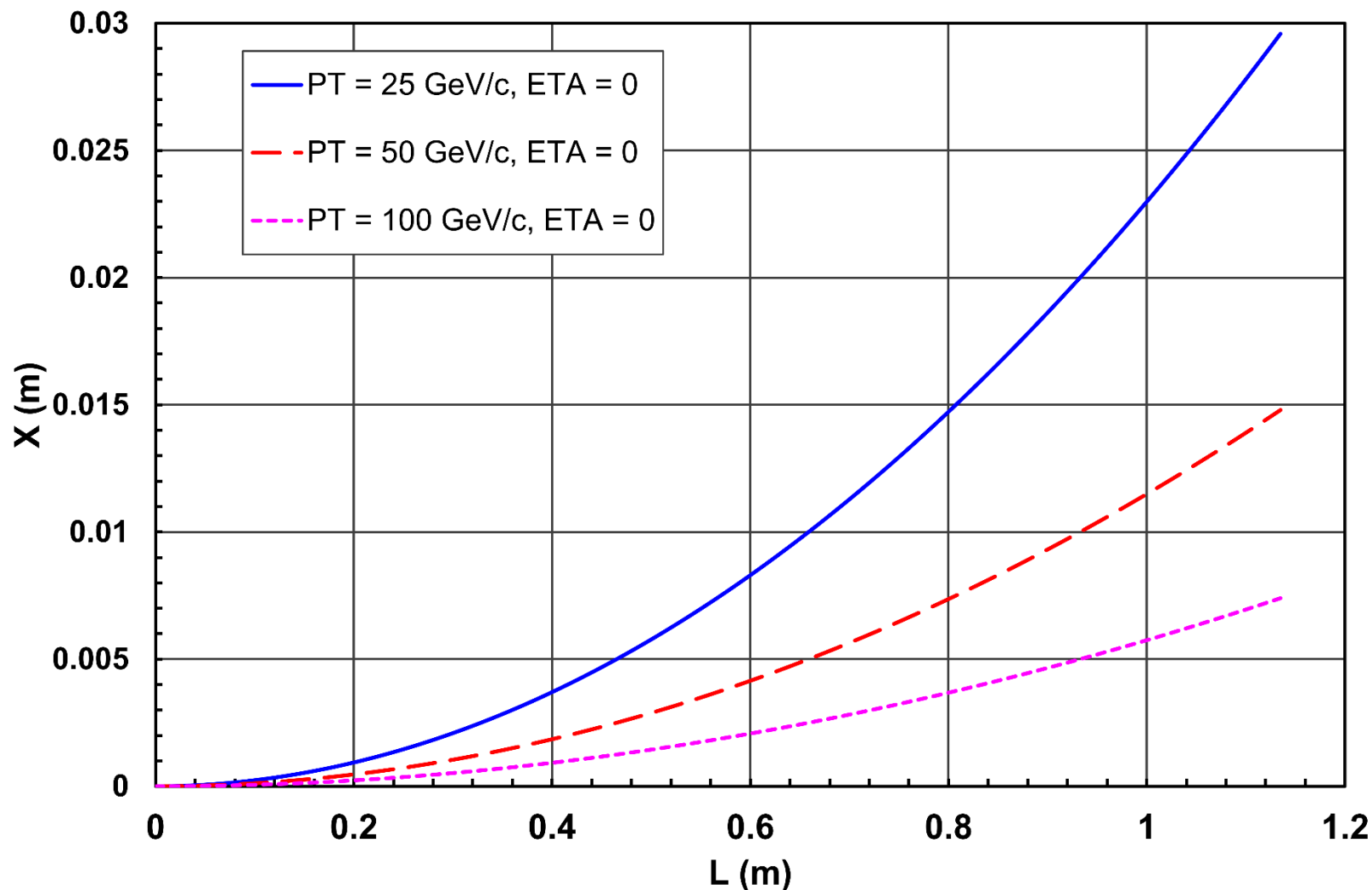
Следовательно,

$$x(l) = \frac{0.3}{p_T} \int_0^l \int_0^{r/\sin\theta} B \sin\theta_{(dl,B)} dl dr.$$

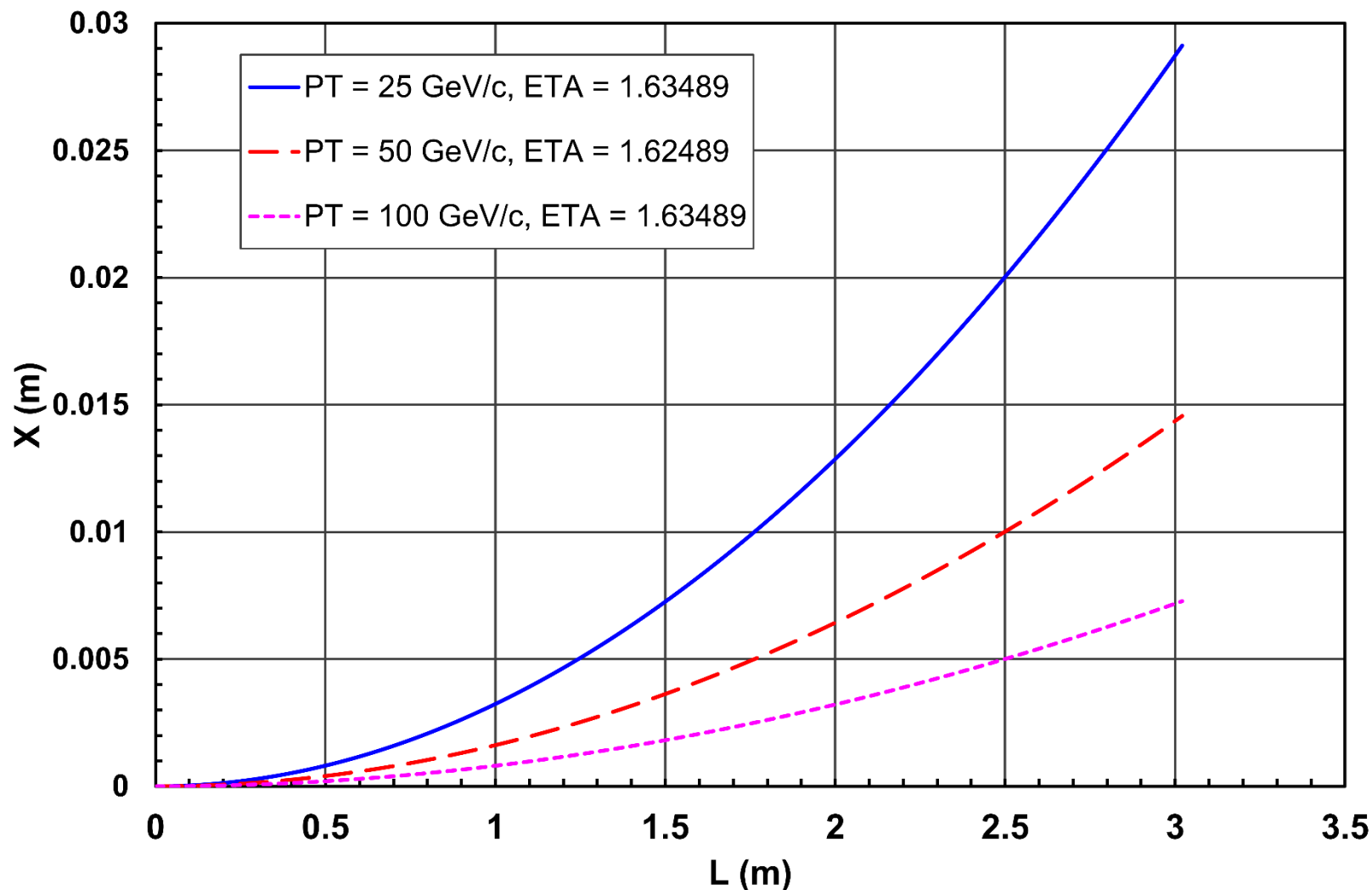
Для идеального соленоида поперечное отклонение частицы $x(l)$ пропорционально l^2 . Разрешение по импульсу частицы $\Delta p/p$ пропорционально величине деградации $1 - R$, где R представляет собой отношение величины $x(L)$ в поле реального соленоида к той же величине в идеальном соленоиде, а L является проекцией полной длины траектории частицы в объёме трековой системы на RZ -плоскость, что оправдано при больших поперечных импульсах.

В детекторе CMS этот объём представляет собой цилиндр длиной 5.6 м и диаметром 2,27 м. Двойные интегралы магнитного поля вычислены в области псевдобыстроты η от 0 до 3, где $\eta = -\ln[\tan(\theta/2)]$, а θ — полярный угол в системе координат детектора CMS. Значение $\eta = 1,63489$ соответствует углу квадранта RZ -плоскости в трековом объёме.

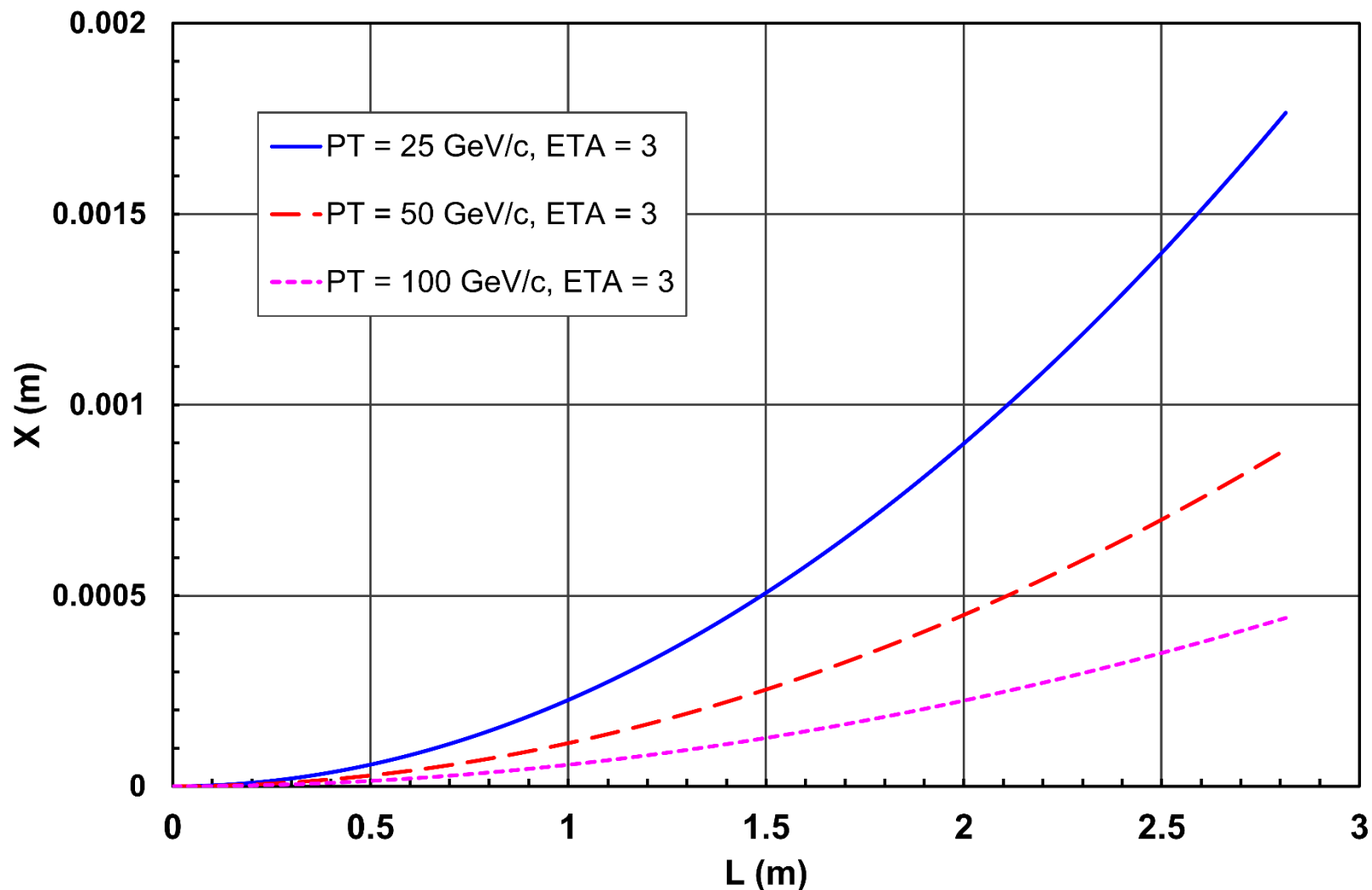
Деградация величины $1 - R$ в зависимости от η отражает зависимость деградации разрешения по импульсу частицы от псевдобыстроты.



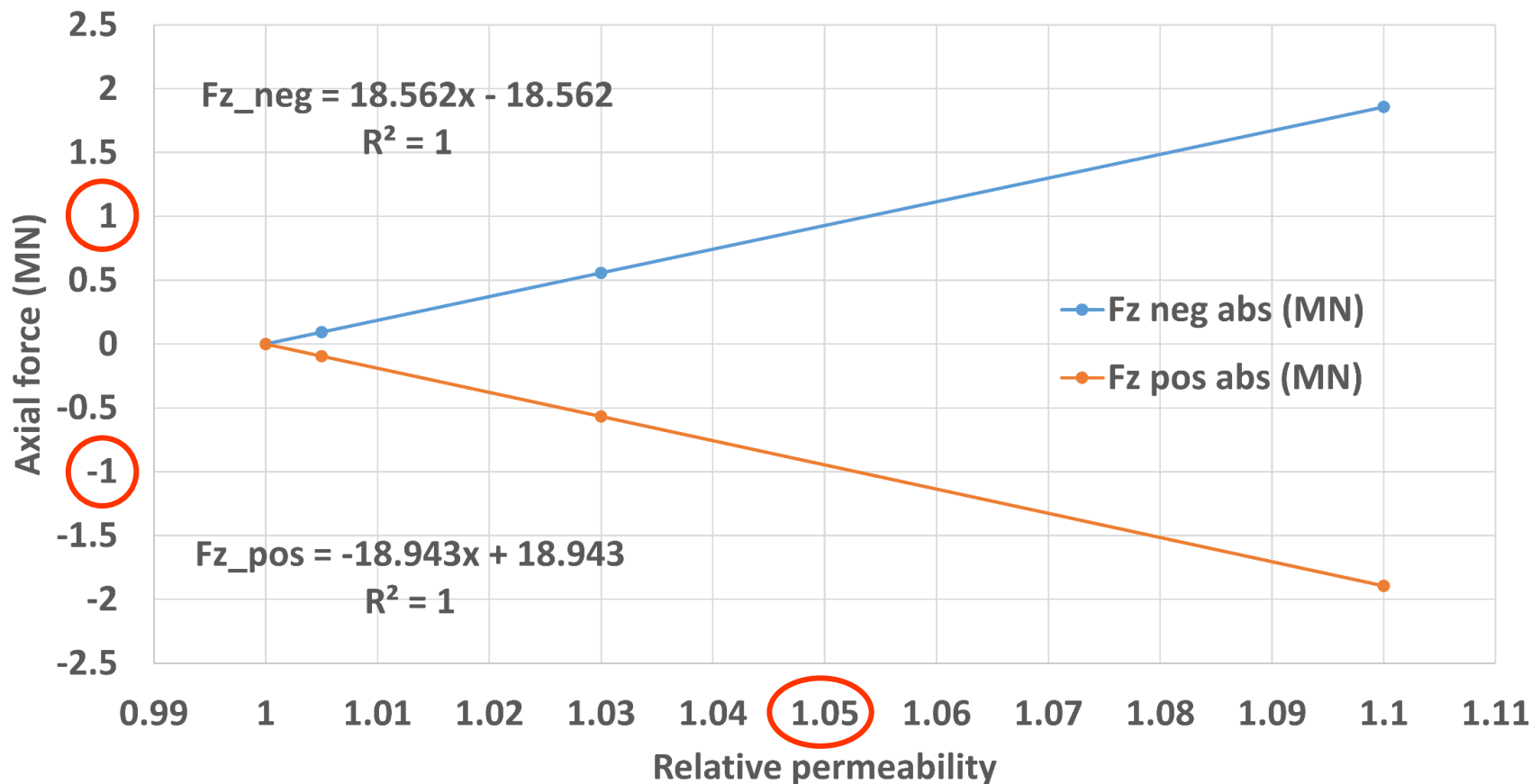
Траектории заряженных частиц с **поперечными импульсами 25, 50 и 100 ГэВ/с** в плоскости, поперечной оси пучка взаимодействующих частиц при значении **псевдобыстроты** частиц $\eta = 0$.



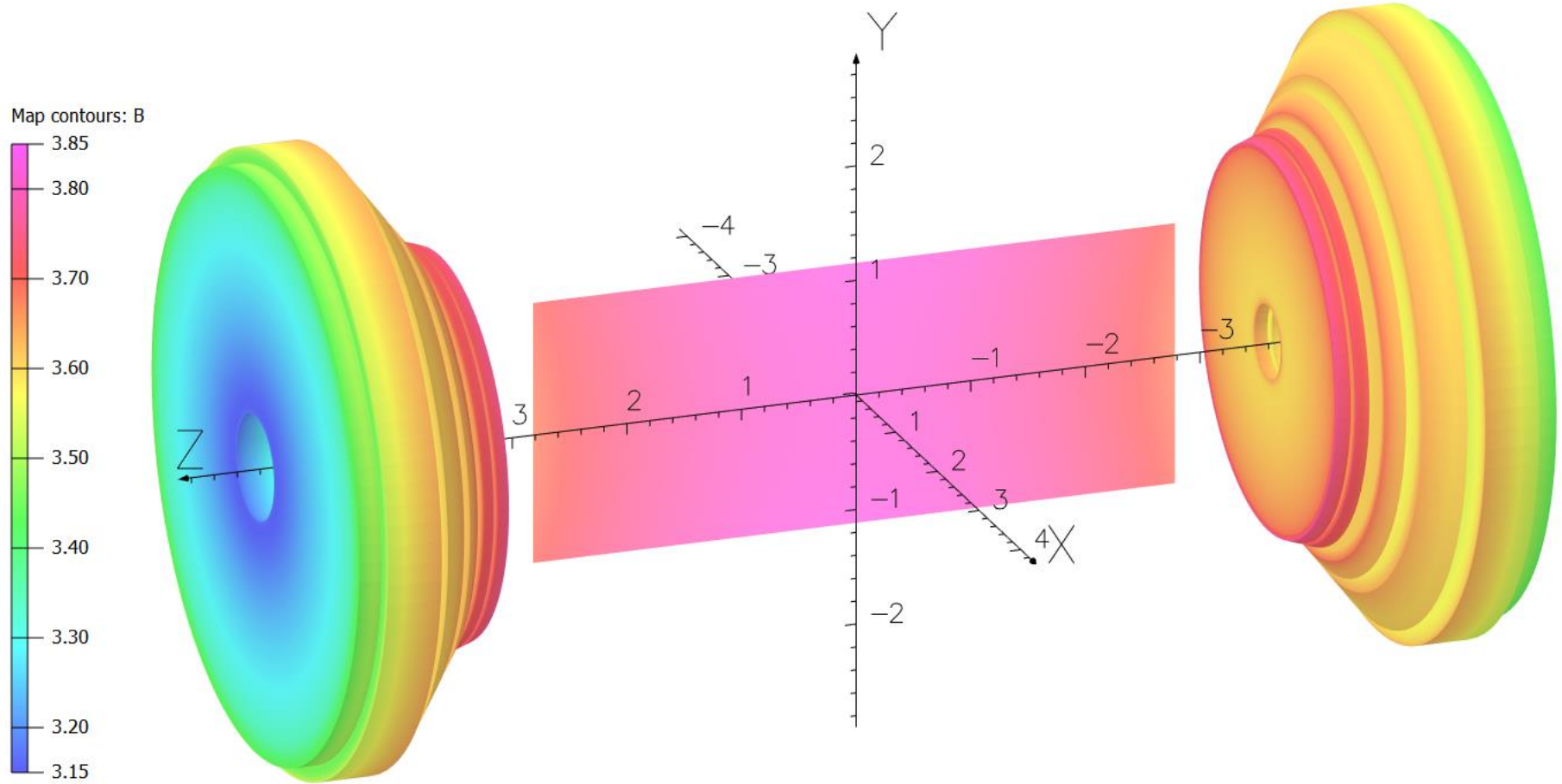
Проекции траекторий заряженных частиц с **поперечными импульсами 25, 50 и 100 ГэВ/с** при значении **псевдобыстроты** частиц $\eta = 1,63489$ на плоскость, поперечную оси пучка взаимодействующих частиц.



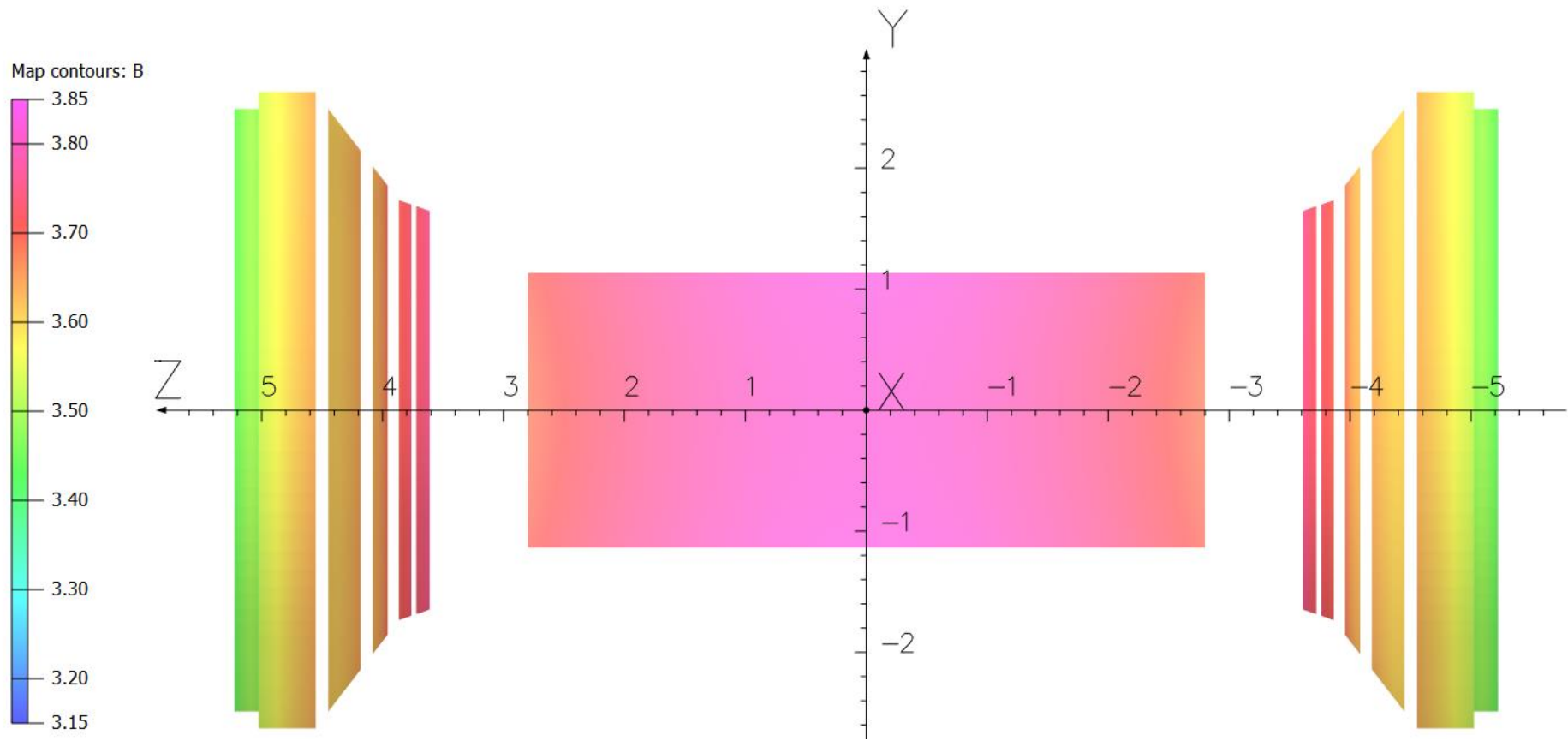
Проекции траекторий заряженных частиц с **поперечными импульсами 25, 50 и 100 ГэВ/с** при значении **псевдобыстроты** частиц $\eta = 3$ на плоскость, поперечную оси пучка взаимодействующих частиц.



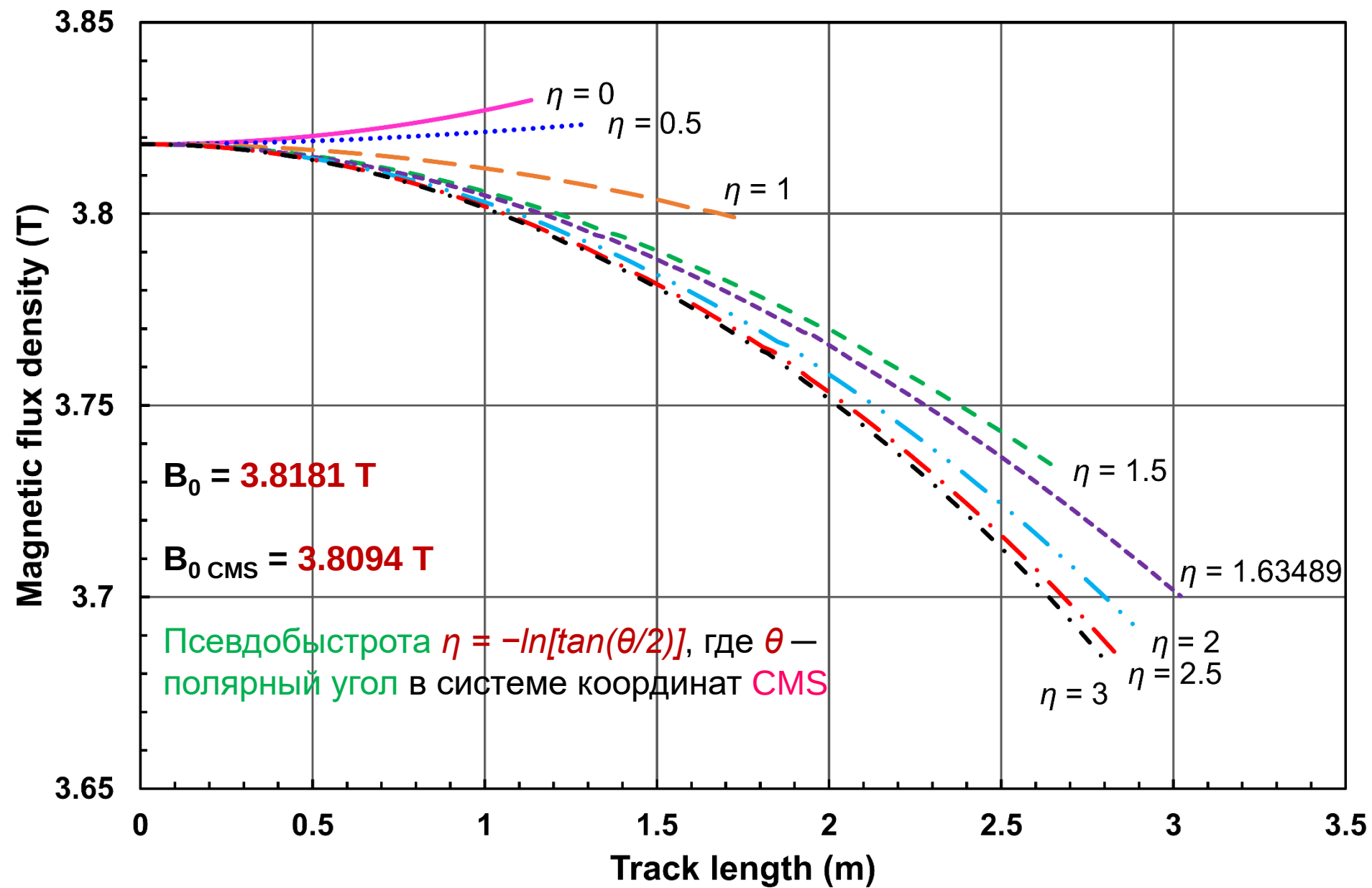
Продольная составляющая **магнитной силы**, действующей на пластины поглотителя адронного высокогранулярного торцевого калориметра **HGCal**, в зависимости от величины **относительной магнитной проницаемости нержавеющей стали**. Предел механической прочности конструкции на уровне **1 МН** ограничивает значение **относительной магнитной проницаемости** сверху величиной **1,05**.

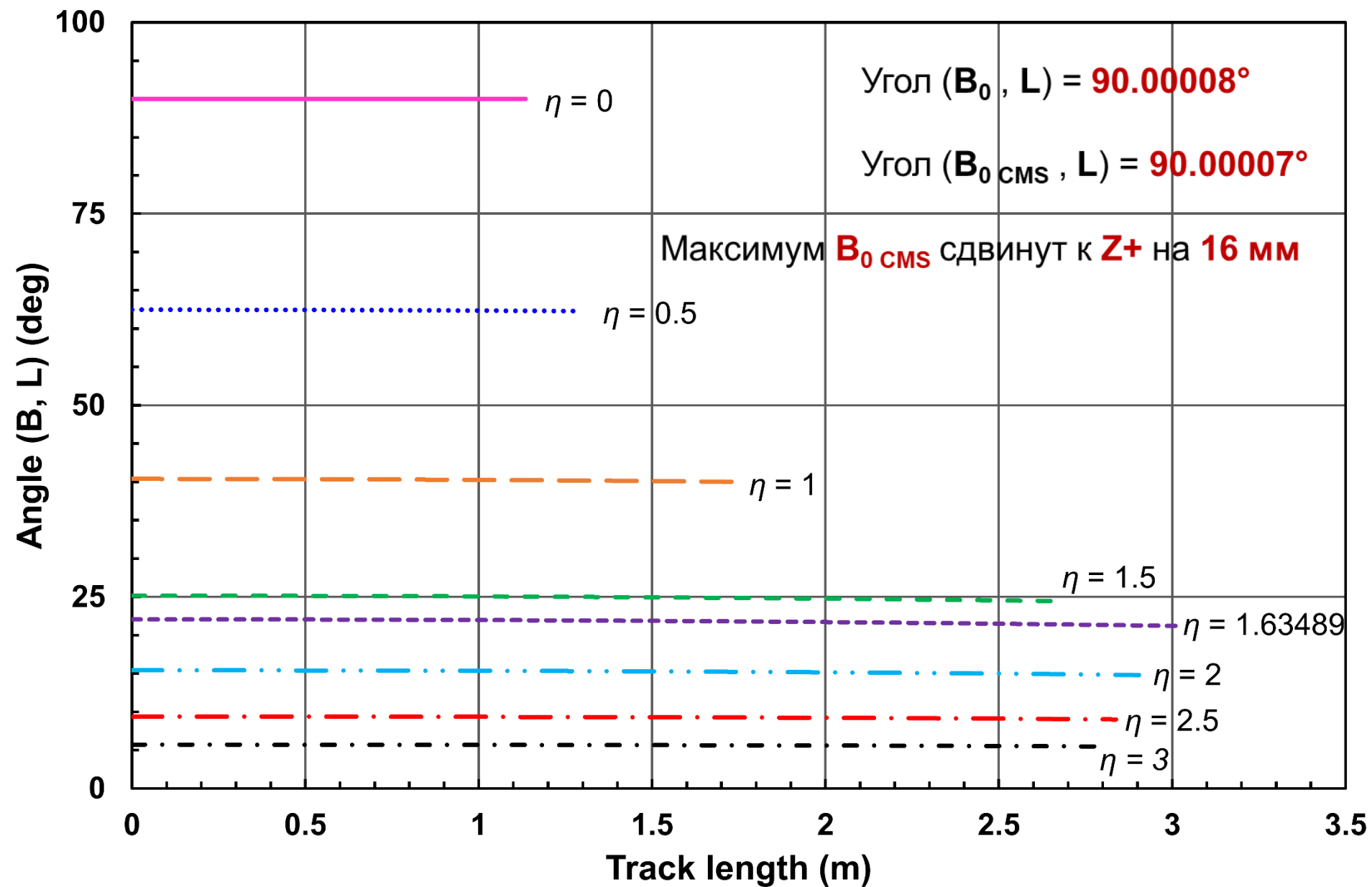


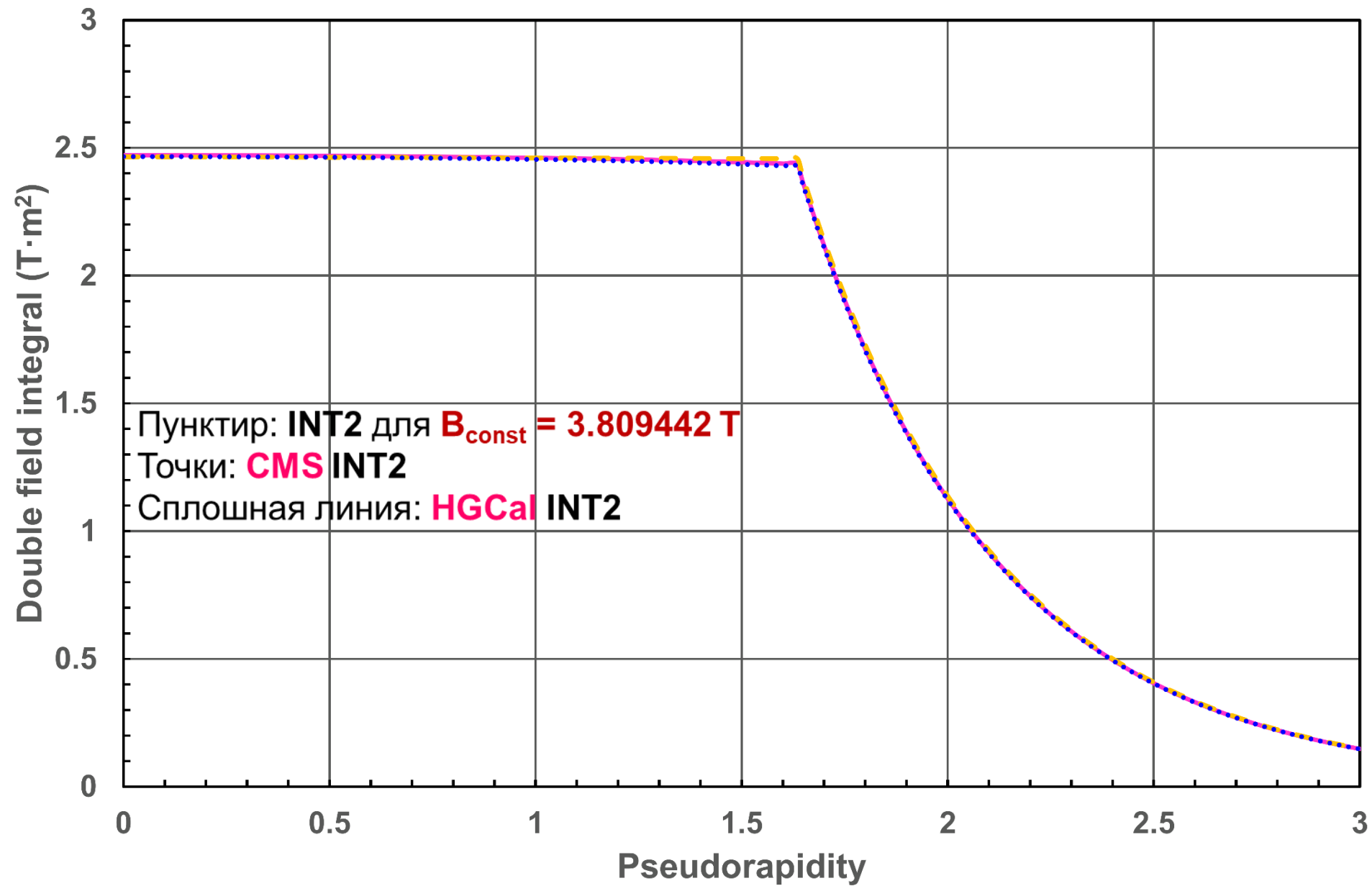
Трехмерная модель пластин поглотителя **HGCal** с величиной **относительной магнитной проницаемости 1,05**. **Плотность магнитного потока** на поверхности пластин падает с **3,75 до 3,15 Тл (−15,8 %)**. В центре, на вертикальной **RZ-плоскости трекового детектора**, показано распределение величины **магнитной индукции**, падающей с **3,83 до 3,68 Тл (−3,97 %)**. Деление цветовой шкалы составляет **0,1 Тл**.

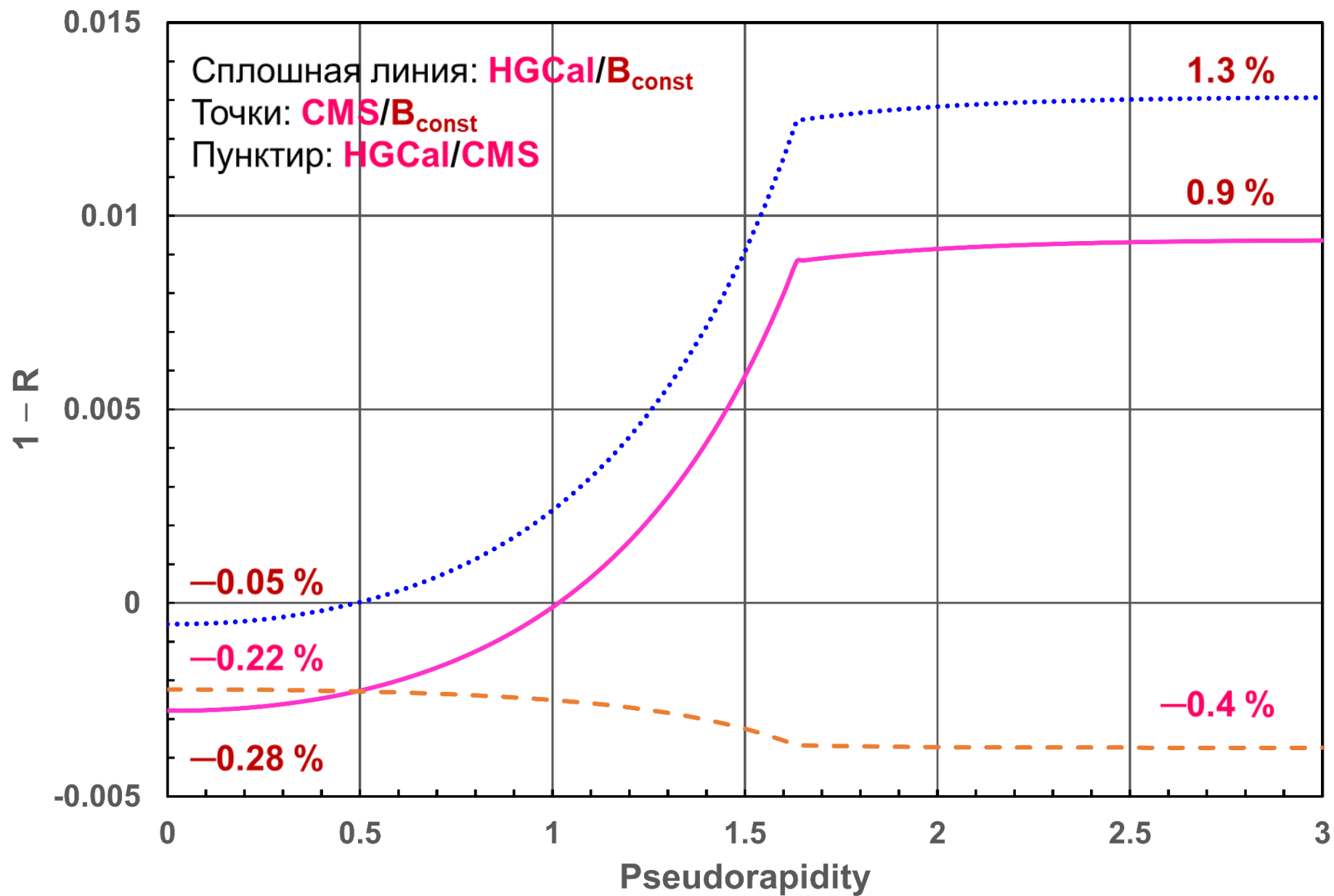


Вид внутреннего объёма **трекового детектора** длиной **5,6 м** и диаметром **2,27 м**, а также пластин поглотителя **HGCal**, в продольном сечении внутри соленоида детектора **CMS**. Величина центральной **плотности магнитного потока** на **0.247 %** выше ее значения в настоящей конфигурации детектора **CMS**. Деление цветовой шкалы составляет **0,1 Тл**.









Заключение

- Описан метод двойных интегралов магнитного поля, применённый к исследованию влияния материала пластин поглотителя адронного высокогранулярного торцевого калориметра на однородность магнитного поля в объёме **трекового детектора**.
- При объёме **нержавеющей стали** с **относительной магнитной проницаемостью 1,05**, равном у каждого торца **21,4 м³**, центральная **магнитная индукция** возрастает на **0.247 %**, а максимальная деградация **двойного интеграла магнитного поля** в **трековом объёме** улучшается с **1.3 %** до **0.9 %**.
- **Плотность магнитного потока** в объёме **трекового детектора** в обеих конфигурациях детектора **CMS** распределена **однородно**, что позволяет проводить измерения импульсов заряженных частиц с высокой точностью.

Спасибо за внимание!