

## Использование Python для диагностики и настройки разрезного микротрона

М. А. Борисов<sup>1,2\*</sup>

<sup>1</sup>Московский государственный университет имени М.В. Ломоносова,  
Научно-исследовательский институт ядерной физики имени Д.В. Скобельцына (НИИЯФ МГУ)

<sup>2</sup>ООО "Лаборатория электронных ускорителей МГУ" (ООО "ЛЭУ МГУ")

Россия, 119991, Москва, Ленинские горы

(Статья поступила 25.02.2020; подписана в печать 16.03.2020)

Для диагностики и настройки разрезного микротрона было предложено использовать фотографии пучков электронов, полученных посредством синхротронного излучения последних. Зная геометрию ускорителя, была написана программа на языке программирования Python, которая оценивает как отклонения по энергии и координате частиц от своих равновесных значений, так и отклонения по координате поворотных магнитов путем анализа полученных фотографий.

PACS: 29.20.-c

УДК: 539.1

Ключевые слова: микротрон, моделирование, синхротронное излучение.

### ВВЕДЕНИЕ

Из классической электродинамики известно, что любая заряженная частица, двигаясь с ускорением, излучает электромагнитную энергию. В магнитном поле поворотного магнита разрезного микротрона частица движется по окружности, испытывает центростремительное ускорение и излучает. При определенных параметрах такой системы излучение попадает в видимый диапазон и может быть зафиксировано обычной фотокамерой. Такие наблюдения, например, производились на каскаде разрезных микротронов в Майнце (МАМИ) [1] и на разрезном микротроне RTM-55 НИИЯФ МГУ [2]. Однако полученные фотографии не давали численной информации о системе ускоритель — пучок. Однако очевидно, что такие изображения представляют собой ценный источник информации. По положению изображения пучка на фотографии или по расстоянию между изображениями, снятых от нескольких орбит, можно получить информацию о некоторых параметрах системы (энергии пучка, положении основных элементах ускорителя).

В настоящей работе была разработана программа, моделирующая движение заряженной частицы в полях разрезного микротрона RTM-55 НИИЯФ МГУ. На ее основе строится изображение на фотокамере, которое должно получаться посредством синхротронного излучения. Далее производится анализ параметров разрезного микротрона, которые можно оценить, используя данный подход.

### 1. ПОСТРОЕНИЕ МОДЕЛИ

Оценить энергию синхротронного излучения можно по формуле для критической энергии [3]:

$$E_c = \hbar\omega_c = \frac{3}{2}\hbar c \frac{\gamma^3}{\rho}, \quad (1)$$

где  $\rho$  — радиус кривизны траектории,  $\gamma$  — Лоренц-фактор. Для энергии 20 МэВ и величине магнитного поля 1 Тс, критическая энергия составляет 1.24 эВ (видимый диапазон составляет 1.59 — 3.26 эВ). Однако, учитывая форму спектра синхротронного излучения (рис. 1), оно попадает в видимый диапазон. На разрезном микротроне RTM-55 НИИЯФ МГУ были получены изображения пучков частиц, начиная с 4-й орбиты, что соответствует энергии 20 МэВ. Используя данную формулу можно оценить, начиная с какой энергии можно наблюдать синхротронное излучение в видимом диапазоне.

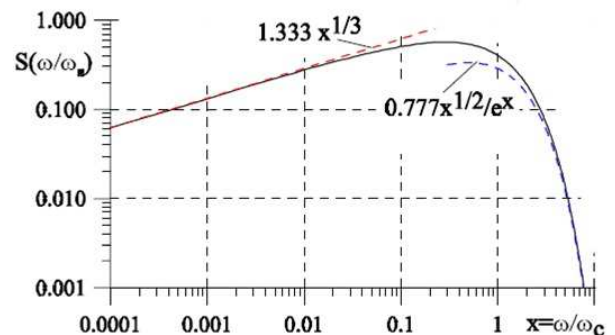


Рис. 1: Спектр синхротронного излучения

Для того, чтобы смоделировать изображение получаемое на фотокамере, необходимо знать динамику пучка в ускорителе. Однако такие программы по расчету движению заряженных частиц в электромагнитных полях как CST [4] и ASTRA [5] имеют закрытый программный код, что не позволяет решить поставленную задачу. Поэтому была написана программа на языке Python, рассчитывающая движение частиц в электромагнитных полях. Python — высокоуровневый язык программирования общего назначения, ориентированный на повышение производительности разработчика и читаемости кода, который смог удачно аккумулировать в себе «находки» из других языков программиро-

\*E-mail: [muchmaxx@gmail.com](mailto:muchmaxx@gmail.com)

вания [6]. Это привело к появлению языка программирования, который за более чем 25 лет своего существования успел понравиться, обрасти массой накопленного кода — и в результате стать одним из самых распространённых языков программирования. В этом и состоит основная причина, по которой для написания программы был выбран именно Python — наличие большого количества библиотек позволяет с легкостью обрабатывать и выводить данные. В программу заносятся ранее рассчитанные для RTM-55 НИИЯФ МГУ поля поворотных магнитов и ускоряющей структуры. Далее производится интегрирование методом Рунге-Кутты четвертого порядка следующего дифференциального уравнения:

$$\begin{cases} \frac{d\mathbf{x}}{dt} = \mathbf{V} \\ \frac{d\mathbf{p}}{dt} = e\{\mathbf{E} + [\mathbf{V} \times \mathbf{B}]\}, \end{cases} \quad (2)$$

где  $\mathbf{V}$  — скорость,  $\mathbf{p}$  — импульс,  $\mathbf{E}$  и  $\mathbf{B}$  — вектора электрических и магнитных полей. По отчетам была воспроизведена геометрия разрезного микротрона RTM-55 НИИЯФ МГУ. Так на рис. 2 представлена зависимость числа частиц в сгустке от энергии, рассчитанной по полученной программе и по RTMTrace — программе, использовавшейся при разработке разрезного микротрона [7]. Видно, что геометрия воспроизведена достаточно хорошо.

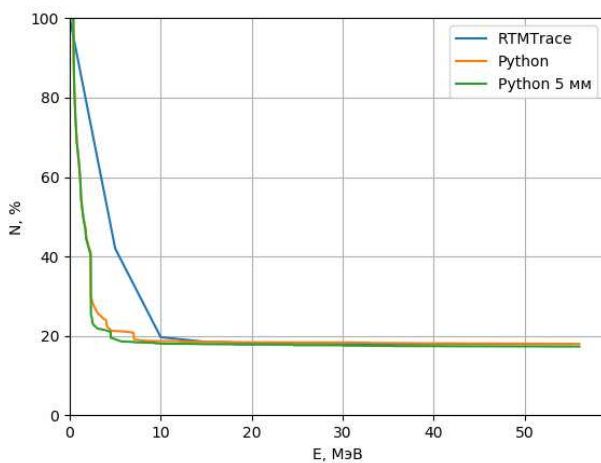


Рис. 2: Зависимость числа частиц в сгустке от энергии

Анализируя рис. 2 можно понять необходимость разработки систем диагностики разрезного микротрона. При энергии инжекции 400 мА (ток инжекции RTM-55 НИИЯФ МГУ), ожидаемый ток на выходе составляет около 70 мА. Однако на практике он редко доходит до значения порядка 8 мА [2]. При такой величине тока на выходе еще рано говорить об неустойчивостях и потерях пучка, связанных с пространственным зарядом, которые начинают проявляться от 15 — 20 мА. Поэтому потери происходят из-за недостаточно точной

настройки разрезного микротрона (амплитуды ускоряющего поля, положения поворотных магнитов).

Для моделирования изображения на фотокамере примем следующие упрощения:

- Синхротронное излучение направлено по касательной к траектории, которая вычисляется путем дифференцирования.
- Угловое распределение не учитывается. Положим, что излучение сосредоточено в бесконечно малом угле раствора конуса.
- Полученное излучение, независимо от энергии, фиксируется камерой. Поэтому положение камеры настраивается на получение изображения пучка, имеющего энергию 20 и более МэВ.
- В данном случае ограничимся рассмотрением изображения равновесной частицы.

Используя данные упрощения и зная геометрию вакуумной камеры поворотного магнита, можно найти оптимальное положение фотокамеры и смоделировать изображение на ней. Параметры фотокамеры соответствуют одной из фотокамер, использующихся в лаборатории. На рис. 3 представлена траектория равновесной частицы, вакуумная камера поворотного магнита с окном, через которое возможно наблюдение синхротронного излучения (на рисунке красная линия), и фотокамера, состоящая из матрицы и тонкой линзы.

## 2. АНАЛИЗ МОДЕЛИ

Оценим разрешающую способность фотокамеры. Для этого воспользуемся формулой для радиуса кривизны траектории заряженной частицы в магнитном поле [8] и формулой увеличения изображения в тонкой линзе:

$$\Delta R = \frac{\Delta E}{Bc} = h \frac{u}{\nu}, \quad (3)$$

где  $u$  — расстояние от объекта до линзы,  $\nu$  — расстояние от линзы до матрицы,  $h$  — расстояние от центра матрицы до изображения,  $\Delta E$  — разность по энергии. Дальнейшие расчеты были сделаны для фотокамеры со следующими параметрами: матрица с разрешением  $782 \times 582$  и размеров  $6.5 \times 4.83$  мм, объектив с фокусным расстоянием 50 мм, камера находится на расстоянии 600 мм от объекта (что примерно соответствует расстоянию до первой видимой орбиты). При такой конфигурации разрешающая способность фотокамеры составляет 0.03 МэВ по энергии. На рис. 4 представлена зависимость центра изображения от равновесной частицы на матрице камеры от ее смещения по энергии. Видно, что без учета конечных размеров пикселей матрицы, зависимость между энергией и положением линейна, что следует из 3-й формулы (синяя линия). При учете пикселей картина становится дискретной,

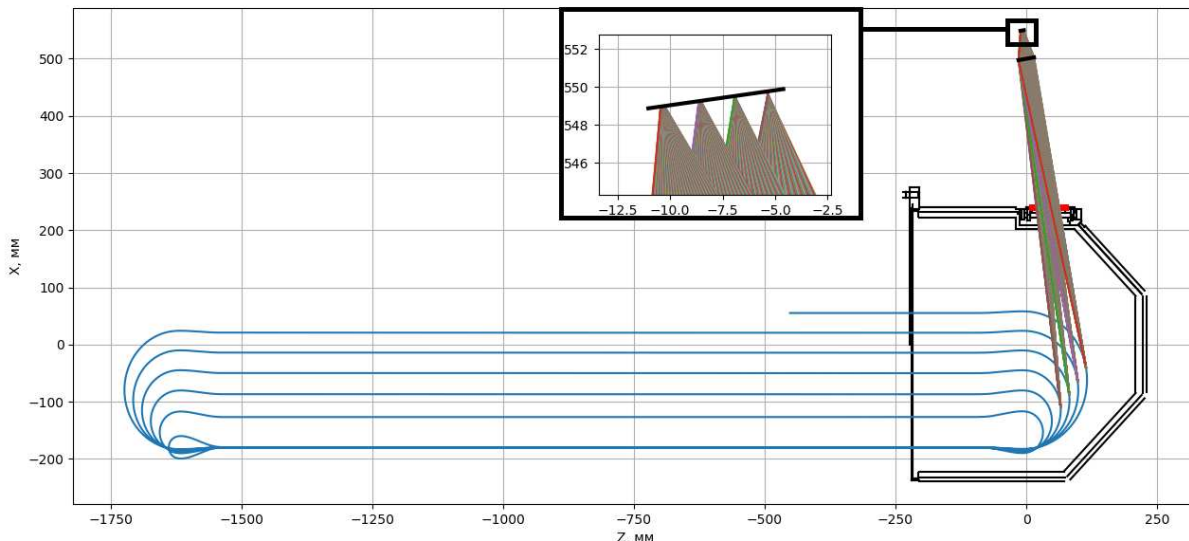


Рис. 3: Траектория движения равновесной частицы и формирование изображения от нее

с шагом примерно равным разрешающей способности. Аналогичные расчеты можно проделать для сдвига частицы по оси  $X$  и  $Y$ . Таким образом по изображению можно оценить возможное смещение частицы относительно своего оптимального значения по энергии и координате.

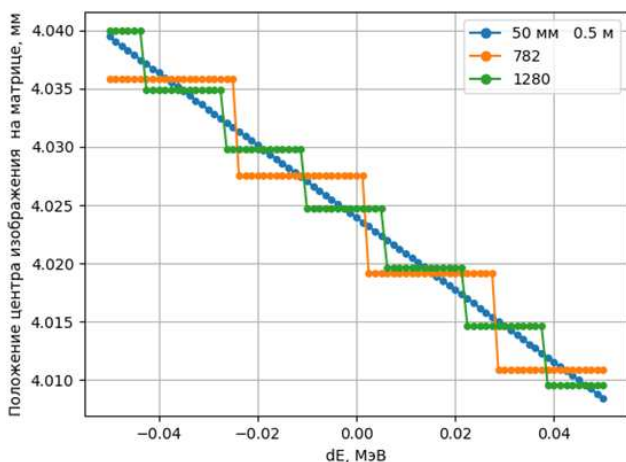


Рис. 4: Зависимость центра изображения от смещения равновесной частицы по энергии

Перейдем к анализу изображения сразу от 4-х траекторий. При изменении положения магнитов в продольном направлении относительно их оптимальных значений наблюдаются фазовые колебания, которые могут быть зафиксированы (рис. 5) и использованы для оценки величины отклонения того или иного параметра. Аналогичные расчеты справедливы для поперечной плоскости. Для оценки смещения поворотных магнитов и отклонения амплитуды ускоряющей структу-

Таблица 1: Среднее отклонение восстановленных параметров от их истинных значений

	X	Y
Смещение $M2$ , мм	0.22	0.16
Смещение $M1$ , мм	0.26	0.08
Отношение амплитуды УС, %	0.3	-
Смещение УС, мм %	-	0.12

ры, набиралась статистика возможных изображений, по которой восстанавливались значения отклонения. Для теста полученной программы выбирались случайные значения смещений магнитов и амплитуды ускоряющей структуры. В таблице 1 приведены значения среднего абсолютного отклонения восстановленных параметров от истинных с учетом конечных размеров пикселей. Данная точность может быть повышена путем увеличения статистики или улучшения параметров фотокамеры.

### ЗАКЛЮЧЕНИЕ

В данной работе была построена геометрия, близкая к геометрии разрезного микротрона RTM-55 НИИЯФ МГУ. Было смоделировано получение изображения частиц по синхротронному излучению. Для оценки параметров частиц был выбран метод сравнения их изображения с изображением равновесной частицы. Были построены модели, предсказывающие параметры частицы (ее координату  $X$  и  $Y$ , а также энергию  $E$  относительно равновесной частицы) и параметры системы в целом (смещения поворотных магнитов и отклонение амплитуды ускоряющего поля).

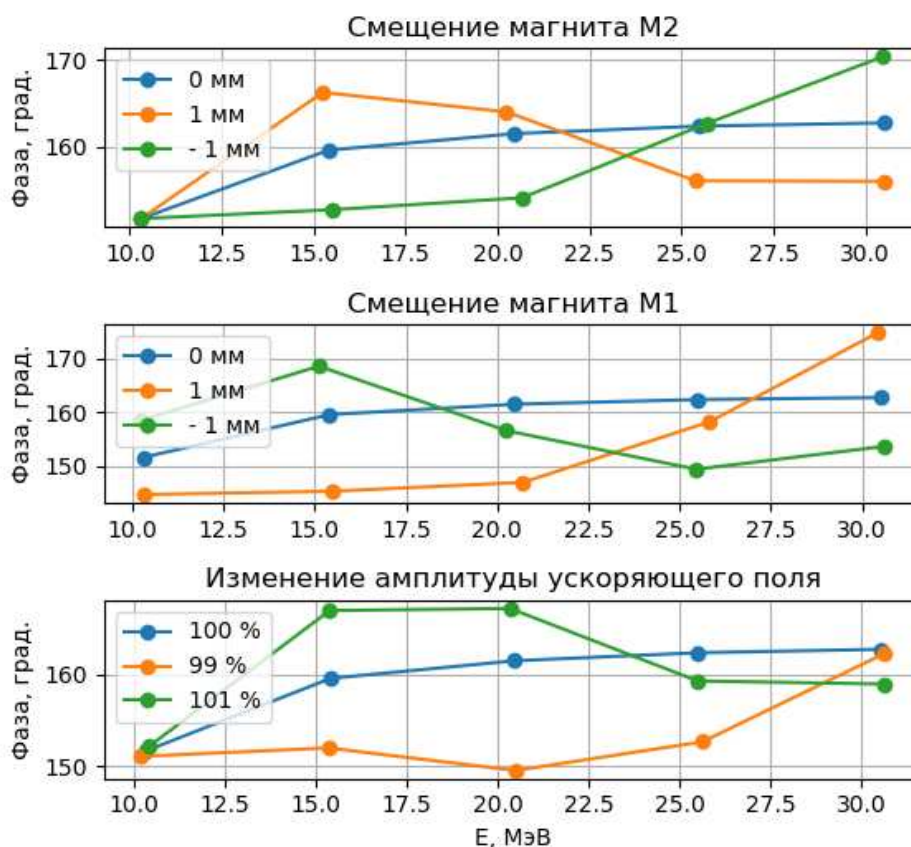


Рис. 5: Фазовые траектории равновесной частицы при различных отклонениях параметров ускорителя

Выражаю особую благодарность своему научному руководителю Шведуну Василию Ивановичу за ценные советы и рекомендации при создании данной ра-

боты. Также я крайне признателен Ханкину Вадиму Валерьевичу за помощь в некоторых практических аспектах.

[1] *Herminghaus H.* et al. // IEEE Transactions on Nuclear Science. 1983. **30**, N 4. P. 3274.  
[2] *Ermakov A. N.* et al. // Instruments and Experimental Techniques. 2018. **61**. N 2. P. 173.  
[3] *Wiedemann H.* Particle accelerator physics. Springer, 2015.  
[4] [3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/](https://3ds.com/products-services/simulia/products/cst-studio-suite/)  
[5] [desy.de/mpyilo/](https://desy.de/mpyilo/)

[6] *Антонюк В.А.* GPU+Python. Параллельные вычисления в рамках языка Python. Физический факультет МГУ им. М. В. Ломоносова, 2018. С. 48.  
[7] *Shvedunov V.I.* et al. RTMTRACE. 1989.  
[8] *Ципенюк Ю.* Фундаментальные и прикладные исследования на микротроне. Litres, 2017.

## Using Python to diagnose and adjust the racetrack microtron

**М. А. Борисов**<sup>1,2</sup>

<sup>1</sup>*Lomonosov Moscow State University, Skobeltsyn Institute of Nuclear Physics (SINP MSU)*

<sup>2</sup>*«Laboratory of electron accelerators MSU Ltd» («LEA MSU Ltd»)*

*Moscow 119991, Russia*

*E-mail: muchmaxx@gmail.com*

To diagnose and adjust the racetrack microtron, it was suggested to use photos of electron beams obtained by synchrotron radiation. Knowing the geometry of the accelerator and using the photo, a program was written in Python, which evaluates the

deviations in energy and coordinate of particles from their equilibrium values, and the deviations in the coordinate of bending magnets.

PACS: 29.20.

*Keywords:* microtron, modeling, synchrotron radiation.

*Received 25 February 2020.*

#### **Сведения об авторах**

1. Борисов Максим Антонович — студент; e-mail: [michmaxx@gmail.com](mailto:michmaxx@gmail.com).
-