

Г. А. Ососков, Ю. В. Пятков, М. О. Руденко

Моделирование и анализ свойств тонких структур в массовых распределениях продуктов ядерных реакций методами глубокого обучения

Одно из информативных теоретических описаний ядерных реакций, таких как деление и квазиделение, представляет эволюцию ядерной системы в виде траекторий в многомерном пространстве деформаций. Нахождение изображений таких траекторий в пространстве экспериментально наблюдаемых переменных было предложено в работах [1,2] как новый подход к анализу данных. Траектории выглядят как «тонкие структуры» в двумерных распределениях, например в корреляционных массовых распределениях. По определению тонкая структура означает локальные области (пики) в двумерном распределении с более высоким выходом, чем на гладкой подложке, являющейся фоном для искомого эффекта. Иногда условия экспери-

мента позволяют наблюдать траекторию практически без шума (фона), когда траектория выглядит как непрерывная последовательность точек, близких, например, к прямой. В любом случае обнаружение траектории свидетельствует о сильной корреляции между параметрами продуктов реакции ядерной системы во всем доступном фазовом пространстве, что дает уникальную информацию о механизме процесса по сравнению с часто используемыми средними значениями или дисперсиями. Именно выявление тонкой структуры в корреляционных массовых распределениях осколков деления слабозбужденных ядер позволило ученым Лаборатории ядерных реакций им. Г. Н. Флерова впервые обнаружить новый тип распада, названный

G. A. Ososkov, Yu. V. Pyatkov, M. O. Rudenko

Simulation and Analysis of Fine Structure Properties in Mass Distributions of Nuclear Reaction Products by Deep Learning Methods

One of the informative theoretical descriptions of nuclear reactions, such as fission and quasi-fission, presents the evolution of a nuclear system in the form of trajectories in a multidimensional deformation space. Finding images of such trajectories in the space of experimentally observable variables was proposed in [1, 2] as a new approach to data analysis. The trajectories look like “fine structures” in two-dimensional distributions, for example, in correlation mass distributions. By definition, *fine structure* means local regions (peaks) in a two-dimensional distribution with the yield higher than on a smooth substrate, which is the background to the sought-after effect. Sometimes experimental conditions make it possible to observe a trajectory almost without noise (background). In this case, the trajectory looks as a continuous sequence of points close, for example, to a straight line. In any case the trajectory revealed gives evidence of a strong correlation between

the parameters of the reaction products. A correlation between the parameters of the nuclear system throughout the whole available phase space provides unique information about the mechanism of the process compared to mean values or variances often used.

It was the revelation of the fine structure in the correlation mass distributions of fission fragments of low excited nuclei that allowed scientists of the Flerov Laboratory of Nuclear Reactions to observe for the first time a new type of the decay called collinear cluster tri-partition (CCT) [3, 4]. This is a rather rare decay mode for the heavy actinides such as $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$, but it can be very likely for the superheavies [5]. The correlated mass distributions of fission fragments from the spontaneous fission of californium $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ are shown in figure (experimental details are given in [6]).

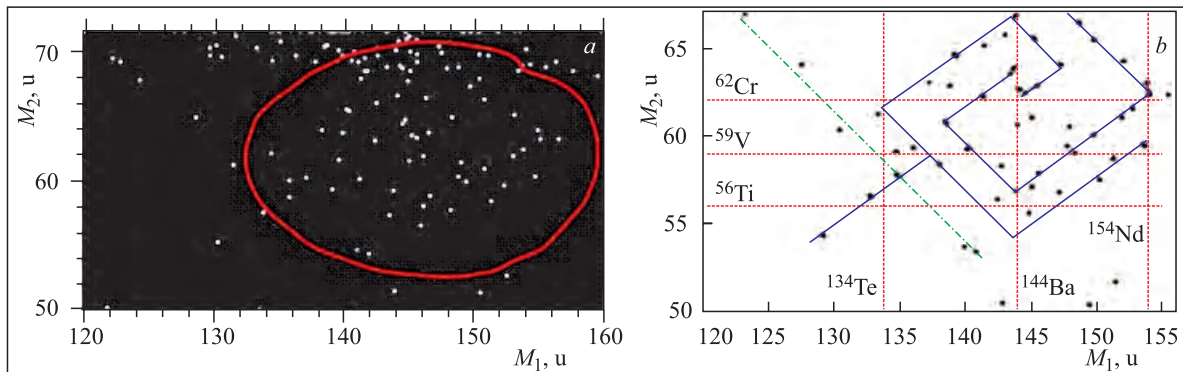
тройным коллинеарным кластерным распадом [3, 4]. Это довольно редкая мода для тяжелых актинидов, таких как $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$, но она может быть очень вероятной для сверхтяжелых [5]. Корреляционные массовые распределения осколков деления из спонтанного деления калифорния $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ представлены на рисунке (экспериментальные данные см. в работе [6]).

Перед математиками Лаборатории информационных технологий им. М. Г. Мещерякова были поставлены задачи выявления линейной структуры на имеющемся экспериментальном материале и оценки уровня ее достоверности по отношению к альтернативной гипотезе о том, что фактически наблюдается только случайная последовательность точек. Уникальность этой задачи определялась тем, что экспериментальный

материал был представлен единственным двумерным распределением, полученным в весьма затратном эксперименте [6], многократное воспроизведение которого для накопления необходимой статистики не представлялось возможным. Тем не менее сложная ромбо-спиральная форма наблюдаемой тонкой структуры, названной физиками «ядерной розой», и достаточное количество точек, ее составляющих, позволили выполнить детальный статистический анализ и установить следующие ее свойства.

- Структура имеет форму ромбического меандра, представляющего семейство из 10 прямых линий ($M_1 + M_2 \approx \text{const}$). На их пересечениях находятся точки, координаты которых близки к массам известных магических ядер [6], указанных на рисунке.

Корреляционное массовое распределение осколков деления $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$: *a*) специфическая ромбо-спиральная структура (отмечена овалом); *b*) та же структура в более крупном масштабе. Голубые линии, проведенные по экспериментальным точкам, способствуют зрительному восприятию структуры. Красными пунктирными линиями отмечены массы магических ядер [8]



Correlation mass distribution of the $^{252}\text{Cf}(\text{sf})$ fission fragments: *a*) the specific rhombo-helical structure marked with an oval; *b*) the same structure on a larger scale. The blue lines drawn across the experimental points contribute to the visual perception of the structure. The red dotted lines indicate the masses of the magic nuclei [8]

Mathematicians of the Meshcheryakov Laboratory of Information Technologies were tasked with identifying the linear structure in the available experimental material and assessing the level of its validity in relation to the alternative hypothesis that in fact only a random sequence of points is observed. The uniqueness of this problem was determined by the fact that the experimental material was represented by a single two-dimensional distribution obtained in a very costly experiment [6], which could not be reproduced repeatedly to accumulate the necessary statistics. Nevertheless, the complex rhombo-helical form of the observed thin structure, called by physicists the “nuclear rose”, and a sufficient number of points, its constituents, enabled one to carry out its detailed statistical analysis and establish its following properties.

- The structure has the form of a rhombic meander, representing a family of 10 straight lines ($M_1 + M_2 \approx \text{const}$). At their intersections there are points, the coordinates

of which are close to the masses of the known magic nuclei [6], shown in figure.

- The meander points are uniformly distributed along the segments, and their number on each of the segments has a Poisson distribution with the parameter λ . Assuming that this parameter is common to all meander segments, it was estimated by the Kolmogorov criterion as $\lambda=4.5$.

- Assuming that the scatter of points around the segments is the same for all segments and subject to the normal law with parameters $(0, \sigma)$, the parameter σ was also estimated by the χ^2 criterion as $\sigma=0.2$.

The combination of these properties made it possible to develop a numerical model of a fine structure, allowing the creation of independent images of similar structures with the same statistical properties.

To assess the reliability of the model of the fine structure with respect to the alternative hypothesis that this structure is a set of randomly scattered points, it was proposed:

- Точки меандра распределены по отрезкам равномерно, а их количество на каждом из отрезков имеет распределение Пуассона с параметром λ . В предположении, что этот параметр является общим для всех отрезков меандра, он был оценен по критерию Колмогорова как $\lambda = 4,5$.

- В предположении, что разброс точек вокруг отрезков одинаков для всех отрезков и подчинен нормальному закону с параметрами $(0, \sigma)$, параметр σ был также оценен по критерию χ^2 как $\sigma = 0,2$.

Совокупность этих свойств дала возможность разработать числовую модель тонкой структуры, позволяющую создавать независимые изображения похожих структур с теми же статистическими свойствами.

Для оценки надежности модели тонкой структуры относительно альтернативной гипотезы о том, что эта структура является набором случайно рассеянных точек, было предложено:

- создать генератор изображений и сгенерировать изображения двух различных типов: с тонкой структурой и со случайным разбросом точек по тому же полю;

- разработать нейроклассификатор на базе глубокой сверточной нейронной сети и обучить его на

- To create an image generator and generate images of two different types: images with a fine structure and images with randomly scattered points in the same field;

- To develop a neural classifier based on a deep convolutional neural network and train it on a dataset of the generated images to reliably recognize the image type.

The Python programming language with connected libraries, such as *matplotlib*, *keras*, *tensorflow*, *scikit-learn*, *numpy*, *pandas* [7], was used in the solution process. Next, a numerical experiment was carried out, and as a result, the probability of detecting a rhombic meander was obtained on an array of 10^5 statistically independent sets of random points using a deep neuroclassifier. This probability was negligibly small (0.017%), while the probability of the presence of a rhombo-spiral structure in the original image (figure) was 99.91%. We also obtained answers to two other questions of interest when planning similar experiments, namely, about an objective estimate of the range in terms of the noisiness of the distribution by background points, and about the limit of degradation of the spectrometer mass resolution, which allows us to isolate the desired structure at an acceptable level of reliability.

наборе данных из сгенерированных изображений для надежного распознавания типа изображения.

В процессе решения использовался язык программирования Python с подключенными библиотеками: *matplotlib*, *keras*, *tensorflow*, *scikit-learn*, *numpy*, *pandas* [7]. Далее был проведен численный эксперимент, в результате которого на массиве из 10^5 статистически независимых наборов случайных точек с помощью глубокого нейроклассификатора была получена вероятность обнаружения ромбического меандра, оказавшаяся пренебрежимо малой (0,017%). Вероятность наличия ромбо-спиральной структуры на оригинальном изображении (см. рисунок) составила 99,91%. Также были получены ответы на еще два вопроса, представляющих интерес при планировании аналогичных экспериментов, а именно об объективной оценке диапазона по зашумленности распределения фоновыми точками и о пределе ухудшения разрешения спектрометра по массе, что позволяет на приемлемом уровне надежности выделить искомую структуру.

Список литературы / References

1. Pyatkov Yu. V. et al. // Pattern Recogn. Image Anal. 2011. V. 21. P. 82–87.
2. Pyatkov Yu. V. et al. // Eur. Phys. J. A. 2012. V. 48. P. 94.
3. Pyatkov Yu. V. et al. // Phys. Rev. C. 2017. V. 96, No. 6. P. 064606.
4. Oertzen W. von, Nasirov A. K. // Eur. Phys. J. A. 2020. V. 56. P. 80.
5. Balasubramaniam M. et al. // Phys. Rev. C. 2016. V. 93. P. 014601.
6. Pyatkov Yu. V. et al. eLIBRARY ID: 41346520. 2018. P. 285–290; <http://isinn.jinr.ru/proceedings/isinn-22/pdf/kamanin.pdf>.
7. Топ-10 библиотек Python для Data Science. <https://datastart.ru/blog/read/top-10-bibliotek-python-dlya-data-science>.
Top 10 Python Libraries for Data Science. <https://datastart.ru/blog/read/top-10-bibliotek-python-dlya-data-science> (in Russian).
8. Ососков Г. А., Пятков Ю. В., Руденко М. О. // Письма в ЭЧАЯ. 2021. Т. 18, № 5(237). С. 430–447.
9. Ososkov G. A., Pyatkov Yu. V., Rudenko M. O. // Part. Nucl., Lett. 2021. V. 18, No. 5(237). P. 430–447 (in Russian).