**Применение нейронных сетей для вычисления функциональных интегралов в квантовой теории поля**

***Васильев А.В. Иванов А.С. Сальников Д.В. Чистяков В.В.1***

Студент1

Московский Государственный университет имени М.В. Ломоносова,

Физический факультет, Москва, Россия

*E–mail:* [*vsevolod.chistyakov@gmail.com*](mailto:vsevolod.chistyakov@gmail.com)

Проблема вычисления наблюдаемых величин в квантовой механике (КМ) и квантовой теории поля (КТП) является актуальной задачей современной теоретической физики. Существует несколько подходов для описания моделей КМ и КТП. Одним из таких подходов является формализм функциональных интегралов [1], [2]. С помощью функциональных интегралов удается формально записать аналитические выражения для наблюдаемых величин, однако выполнить аналитические вычисления удается только в исключительных случаях. В общем случае используются пертурбативные и численные непертурбативные приближенные методы. Одним из непертурбативных методов вычисления функциональных интегралов является метод Монте-Карло для функциональных интегралов (МКФИ) [3]. В методе МКФИ исходный функциональный интеграл аппроксимируется конечномерным кратным интегралом в Евклидовом пространстве-времени.

Для вычисления среднего значения оператора методом МКФИ производится аппроксимация кратным интегралом

где — набор траекторий (выборка размера M), имеющих распределение с плотностью вероятности

где S(x) - некоторый функционал на , определяемый гамильтонианом модели.

Ошибка вычисления является стохастической и может регулироваться увеличением числа траекторий - числа M. Генерирование выборки может быть выполнено с помощью алгоритма Метрополиса [3].

В данной работе производится вычисление двухточечной корреляционной функции в моделях релятивистской квантовой механики.

Для генерации выборки можно использовать также алгоритмы машинного обучения, схожие с теми, что применяются для генерации изображений [5]. А именно, используется алгоритм нормализующего потока (normalizing flow) [6]. В рамках этого алгоритма строится отображение (n — число узлов решётки )

такое, что если , то

Для построения отображения g(z) используются нейронные сети. В простейшем случае g можно представить в виде композиции аффинных преобразований, коэффициенты которых аппроксимируются с помощью нейронных сетей. Преобразование g зависит от некоторого числа параметров (весов).

Пусть -плотность распределния вероятности на образе отображения g. Для нахождения параметров w требуется, чтобы распределение как можно меньше отличалось от целевого распределения P. Мы ставим задачу минимизации следующей функции

где — дивергенция Кульбака-Лейблера [5].

Оптимизация L[w] производится с помощью встроенного алгоритма Adam библиотеки pytorch. Результаты вычислений двухточечной функции Грина, проведённых с помощью метода МКФИ и описанной выше генеративной модели искусственного интеллекта согласуются между собой в ряде рассмотренных моделей.

[1] Фейнман Р., Хибс А. Квантовая механика и интегралы по траекториям. Пер. с англ. Под ред. В. С. Барашенкова. // Мир, 1968.

[2] Smolyanov O.G., Shavgulidze E.T. Path integrals. // Moscow State Universuty, 1990.

[3] Creutz M., Freedman B.A. A statistical approach to quantum mechanics // Ann. Phys. 1981. 132. 427.

[4] Ivanov A. S., Novoselov A. A., Pavlovsky O. V. Relativistic path integral monte carlo: Relativistic oscillator problem // IJMP C. 2016. 27, 11. 1650133–1–1650133–14.

[5] Albergo M. S., Kanwar G., Shanahan P. E. Flow-based generative models for Markov chain Monte Carlo in lattice field theory // Phys. Rev. D. 2019. 100, 034515

[6] Papamakarios G. , Nalisnick E., Rezende D. J., Mohamed S., Lakshminarayanan B. Normalizing Flows for Probabilistic Modeling and Inference // Journal of Machine Learning Research, 22(57):1-64, 2021