



Искусст- венный физик

Системы машинного обучения продемонстрировали ошеломляющий прогресс в пограничных областях экспериментальной квантовой физики

Анил Анантхасвами

Ф

изик, специалист в области квантовой физики Марио Кренн (Mario Krenn) вспоминает, как в начале 2016 г. он сидел в кафе в Вене, просматривая компьютерные распечатки, пытаясь осмыслить то, что обнаружил *MELVIN*. *MELVIN* — это созданный Кренном самообучающийся машинный алгоритм, что-то вроде искусственного интеллекта. Его назначение — перемешивать и сопрягать строительные блоки стандартных экспериментов квантовой физики и находить решения новых проблем. Он действительно помог найти много интересных задач. Но было одно решение, которое не имела смысла. «Первое, что я подумал: "В программе ошибка, потому что такое решение не может существовать"», — вспоминает Кренн.

ОБ АВТОРЕ

Анил Анантхасвами (Anil Ananthaswamy) — автор книг «Границы физики» (*The Edge of Physics*), «Человек, который там не был» (*The Man Who Wasn't There*) и «Через две двери разом: изящный эксперимент, раскрывающий тайну нашей квантовой действительности» (*Through Two Doors at Once: The Elegant Experiment That Captures the Enigma of Our Quantum Reality*).



MELVIN, казалось бы, решил проблему создания очень сложных квантовых перепутанных многофотонных состояний (квантовые перепутанные состояния — это те состояния, которые когда-то заставили Альберта Эйнштейна вызвать фантом «призрачного дальнего действия»). Кренн, Антон Цайлингер (Anton Zeilinger) из Венского университета и их коллеги не задали алгоритму правила генерирования таких сложных состояний явным образом, но он сам отыскал способ. В конце концов Кренн понял, что *MELVIN* заново открыл тип экспериментальной схемы, которая была придумана еще в начале 1990-х гг. Однако те эксперименты были намного проще. *MELVIN* решил гораздо более сложную проблему. «Когда мы поняли, что происходит, мы сразу же сумели обобщить [решение]», — говорит Кренн, который в настоящее время работает в Университете Торонто.

С тех пор и другие научные группы начали проводить эксперименты, придуманные системой *MELVIN*, что позволило им по-новому проверить концептуальные принципы квантовой механики. Тем временем Кренн, работая с коллегами в Торонто, усовершенствовал свои алгоритмы машинного обучения. Их последняя разработка, программа искусственного интеллекта под названием *THESEUS* («Тесей» — в честь героя греческой мифологии, одолевшего Минотавра. — Примеч. пер.), повысила ставки: она на несколько порядков быстрее, чем *MELVIN*, и человеку легче интерпретировать ее выходные данные. Если Кренну и его коллегам требовались дни или даже недели, чтобы разобраться в загогулинах результатов алгоритма *MELVIN*, то понять, что говорит им *THESEUS*, они могут почти сразу же. «Это потрясающая работа», — говорит физик-теоретик, специалист по квантовой физике Ренато Реннер (Renato Renner) из Института теоретической физики Швейцарской высшей технической школы Цюриха, который провел критический разбор изучения системы *THESEUS* 2020 г., но сам непосредственного участия в этом не принимал.

Кренн наткнулся на эту исследовательскую программу почти случайно, когда с коллегами

пытался выяснить, как экспериментально создать перепутанные особым образом квантовые состояния фотонов. Когда два фотона взаимодействуют, они становятся квантово перепутанными и оба могут быть математически описаны с помощью одного общего квантового состояния. Если вы измеряете состояние одного фотона, это измерение мгновенно фиксирует состояние другого, даже если они находятся на расстоянии многих километров друг от друга (отсюда иронические комментарии Эйнштейна о «призрачной» природе перепутанности).

В 1989 г. три физика — Дэниел Гринбергер (Daniel Greenberger), покойный Майкл Хорн (Michael Horne) и Антон Цайлингер — описали квантовое перепутанное состояние, которое получило название ГХЦ (по их инициалам). В нем участвуют четыре фотона, каждый из которых может находиться в квантовой суперпозиции, скажем, двух состояний, 0 и 1 (квантовое состояние, называемое кубитом). В их статье состояние ГХЦ представляло собой квантовое перепутывание четырех кубитов, так что вся система находилась в двумерной квантовой суперпозиции состояний 0000 и 1111. Если вы измерили один из фотонов и обнаружили его в состоянии 0, суперпозиция схлопнулась и другие фотоны также окажутся в состоянии 0. То же самое происходило и с состоянием 1. В конце 1990-х гг. Цайлингер и его коллеги впервые экспериментально наблюдали ГХЦ-состояния, используя три кубита.

Кренн с коллегами намеревался получить ГХЦ-состояния более высокой размерности. Они хотели работать с тремя фотонами, где каждый имеет размерность 3, то есть может находиться в суперпозиции трех состояний: 0, 1 и 2. Такое квантовое состояние называется «кутрит». Состояние квантовой перепутанности, которое стремилась получить научная группа, представляет собой трехмерное ГХЦ-состояние — суперпозицию состояний 000, 111 и 222. Такие состояния — важный компонент безопасной квантовой связи и более быстрых квантовых вычислений. В конце 2013 г. ученые этой группы потратили

недели, прорисовывая на классных досках схемы экспериментов и выполняя гору вычислений, чтобы посмотреть, сможет ли такая установка генерировать необходимые квантовые состояния. Но каждый раз они терпели неудачу. «Я подумал: это какой-то бред сумасшедшего. Почему мы не в состоянии придумать схему эксперимента?» — вспоминает Кренн.

Чтобы ускорить процесс, сначала Кренн написал компьютерную программу, которая рассчитывала результат для той или иной схемы экспериментальной установки. Затем он усовершенствовал программу, предоставив ей возможность включать в свои вычисления те же строительные блоки — компоненты оборудования, — которые экспериментаторы используют для того, чтобы получать фотоны и манипулировать ими на оптической скамье: лазеры, нелинейные кристаллы, светоделители, фазовращатели, голограммы и т.п. Программа просматривала большое пространство конфигураций путем случайного перемешивания и сопряжения строительных блоков, выполняла вычисления и выдавала результат. Так родился *MELVIN*. «За несколько часов программа нашла решение, до которого мы, ученые, три экспериментатора и один теоретик, не смогли додуматься за несколько месяцев», — рассказывает Кренн. — Это был безумный день. Я не мог поверить в случившееся». После этого он расширил интеллектуальные способности системы *MELVIN*. Каждый раз когда он находил схему установки, которая выполняла какую-нибудь полезную функцию, *MELVIN* добавлял ее в свой арсенал инструментов. «Алгоритм запоминает ее и пытается применить для более сложных решений», — объясняет Кренн.

Именно этот усовершенствованный *MELVIN* заставил Кренна надолго призадуматься в одном из венских кафе. Он запустил программу, загрузив набор инструментов эксперимента, включавший в себя два кристалла, каждый из которых мог генерировать пару квантово перепутанных в трех измерениях фотонов. Кренн наивно ожидал, что *MELVIN* найдет конфигурации, которые объединят эти пары фотонов, чтобы создать перепутанные состояния максимум в девяти измерениях. Но «фактически было найдено решение, невероятно редкий случай, в котором перепутанность намного выше, чем в остальных состояниях», — вспоминает Кренн.

В конце концов он выяснил, что *MELVIN* использовал методику, разработанную несколькими научными группами почти три десятилетия назад. В 1991 г. Синь Юй Цзоу (Xin Yu Zou), Ли Цзюнь Ван (Li Jun Wang) и Леонард Мандель (Leonard Mandel), в то время из Рочестерского

университета, разработали один метод. А в 1994 г. Цайлингеру, работавшему тогда в Инсбрукском университете в Австрии, и его коллегам пришла в голову еще одна идея. Концептуально эти эксперименты были попыткой достичь примерно одинакового результата, но конфигурация, придуманная Цайлингером и его коллегами, более проста для понимания. Эксперимент начинается с того, что в одном кристалле образуется пара фотонов (*A* и *B*). Пути этих фотонов проходят через другой кристалл, в котором также могут образоваться два фотона (*C* и *D*). Пути фотона *A* (из первого кристалла) и фотона *C* (из второго) строго совпадают и ведут к одному и тому же детектору. Когда детектор щелкает, невозможно определить, каким, первым или вторым, кристаллом испущен фотон. То же самое справедливо и для фотонов *B* и *D*.

Фазовращатель — это устройство, которое по сути дела увеличивает путь фотона на величину, составляющую некоторую долю длины его волны. Если на одном из двух путей между кристаллами установить фазовращатель и изменить величину фазового сдвига, в силу интерференции на детекторе можно наблюдать усиление или ослабление сигнала. Пусть, например, каждый кристалл генерирует 1 тыс. пар фотонов в секунду. На интерференционном максимуме (на пике) детекторы будут регистрировать 4 тыс. пар фотонов в секунду. А на интерференционном минимуме (в узле) они не обнаружат ни одного: система в целом не будет создавать никаких фотонов, даже если каждый из кристаллов будет генерировать 1 тыс. фотонов в секунду. «Если вдуматься, это на самом деле выглядит довольно бредовой идеей», — говорит Кренн.

Нетривиальное решение программы *MELVIN* включало такие совпадающие пути. Но смутило Кренна то, что в наборе инструментов алгоритма было всего два кристалла. И вместо того чтобы разместить эти кристаллы в начале экспериментальной установки, алгоритм засунул их внутрь интерферометра (устройства, которое расщепляет путь, по которому летит, скажем, фотон, на два, а затем снова их объединяет). После серьезных усилий Кренн понял, что найденная системой *MELVIN* схема эквивалентна схеме, включающей более двух кристаллов, каждый из которых генерирует пары фотонов, так что их пути к детекторам объединяются в один. Такую конфигурацию можно использовать для получения квантовых перепутанных состояний большой размерности.

Физик Нора Тишлер (Nora Tischler), специалист в области квантовой физики, которая в то время, когда *MELVIN* проходил испытания, была аспиранткой Цайлингера и работала над не связанной с этим темой, обратила внимание на эти

разработки. «С самого начала было ясно, что [такой] эксперимент не был бы проведен, если бы он не был предложен программой», — говорит она.

Помимо формирования сложных квантовых перепутанных состояний, установку с объединяющимися оптическими путями, в которой более двух кристаллов, можно использовать для проведения экспериментов, обобщающих эксперимент Цайлингера 1994 г. по квантовой интерференции с двумя кристаллами. Физик-экспериментатор Эфраим Стейнберг (Aephraim Steinberg), коллега Кренна из Торонто, хотя и не работал над этими проектами, впечатлен тем, что обнаружил искусственный интеллект. «Это обобщение, до которого (насколько мне известно) ни один человек не смог додуматься за прошедшие десятилетия, а возможно, не додумался бы и никогда, — говорит он. — Это первый великолепный пример нового типа исследований, которые мыслящие машины могут взять от нас на себя».

В одной такой обобщенной конфигурации с четырьмя кристаллами, каждый из которых генерирует пару фотонов, у которых часть пути совпадает, и ведет к четырем детекторам, квантовая интерференция может создавать ситуации, когда щелкают либо все четыре детектора (пик интерференционной картины), либо ни один из них (узел интерференционной картины). До недавнего времени проведение такого эксперимента оставалось далекой мечтой. И вот в мартовском препринте группа под руководством Лань-Тянь Фэна (Lan-Tian Feng) из Научно-технического университета Китая в сотрудничестве с Кренном сообщила, что они изготовили всю установку на одной оптической интегральной схеме (ИС) и провели эксперимент. Ученые собирали данные более 16 часов: такое достижение стало возможным благодаря невероятной стабильности оптической ИС, какой было бы невозможно достичь в более масштабном настольном эксперименте. Хотя бы потому, что, по словам Стейнберга, для подобной установки потребовалось бы множество оптических элементов общей площадью около 1 м^2 , с высокой точностью отъюстированных на оптической скамье. Кроме того, «дрожания или смещения на тысячную долю толщины человеческого волоса одного из оптических элементов в течение этих 16 часов могло быть достаточным, чтобы разрушить эффект», — объясняет он.

Во время своих первых попыток упростить и обобщить то, что обнаружил MELVIN, Кренн и его коллеги поняли, что решение напоминает абстрактные математические формы, называемые графами, которые содержат вершины и ребра и используются для отображения парных отношений между объектами. В случае этих квантовых экспериментов каждый путь, по которому проходит фотон, представлен одной

из вершин графа. А, например, кристалл представляет собой ребро, соединяющее две вершины. Сначала MELVIN построил такой граф, а затем выполнил над ним математическую операцию. Операция, называемая идеальным соответствием, представляет собой построение эквивалентного графа, в котором каждая вершина соединена только с одним ребром. Этот процесс значительно упрощает вычисление конечного квантового состояния, хотя людям понять его все еще трудно.

Ситуация изменилась с появлением преемника алгоритма MELVIN — программы THESEUS, которая генерирует гораздо более простые графы, отбрасывая все лишнее в первом сложном графе, отображающем найденное программой решение, сводя таким образом его к графу с минимальным количеством ребер и вершин (так что любое дальнейшее удаление разрушает способность установки генерировать желаемые квантовые состояния). Такие графы проще, чем графы идеального соответствия алгоритма MELVIN, поэтому теперь даже легче разобраться в любом решении, найденном с помощью искусственного интеллекта. Особенно впечатлен Реннер выходными данными алгоритма THESEUS, которые легко интерпретировать человеку. «Решение выдается в таком виде, чтобы количество соединений в графе было минимальным, — говорит он. — И, естественно, такое решение легче понять, чем если бы у нас был очень сложный граф».

Эрик Кавальканти (Eric Cavalcanti) из Университета им. Гриффита в Австралии, с одной стороны, впечатлен этой работой, с другой — относится к ней с осторожностью. «Эти методы машинного обучения представляют собой интересное направление исследований. Для ученого-человека, рассматривающего данные и интерпретирующего их, некоторые решения, возможно, покажутся новыми прорывными путями. Но на данном этапе эти алгоритмы все еще далеки от уровня, когда можно было бы сказать, что они порождают действительно новые идеи или предлагают новые концепции, — считает он. — С другой стороны, я действительно полагаю, что однажды мы придем к этому. Пока это младенческие шажки, но нужно с чего-то начинать». Стейнберг согласен: «На сегодня это одни из лучших инструментов. Эти программы позволяют нам делать то, что, скорее всего, без них вряд ли бы получилось».

Перевод: А.П. Кузнецов

ИЗ НАШИХ АРХИВОВ

■ Фолджер Т. Пересекая квантовый барьер // ВМН, № 8–9, 2018.