



Kraków, 20 marca 2024

Sztuczna inteligencja zrekonstruuje drogi cząstek prowadzące ku nowej fizyce

Gdy w akceleratorach dochodzi do zderzeń cząstek przy wielkich energiach, powstają liczne kaskady cząstek wtórnych. Elektronika przetwarzająca sygnały lawinowo napływające z detektorów musi wtedy w ułamku sekundy ocenić, czy zdarzenie jest wystarczająco interesujące, by zapisać je do późniejszych analiz. W bliskiej przyszłości to wymagające zadanie może być realizowane za pomocą algorytmów opartych na sztucznej inteligencji, w których opracowaniu uczestniczą naukowcy z Instytutu Fizyki Jądrowej PAN w Krakowie.

W fizyce jądrowej elektronika od dawna nie ma lekkiego życia. Danych napływających z LHC, najpotężniejszego akceleratora na świecie, jest tak wiele, że zapisywanie ich wszystkich nigdy nie wchodziło w grę. Układy przetwarzające falę impulsów płynących z detektorów specjalizują się więc w... zapomnianiu: w ułamku sekundy rekonstruują torę cząstek wtórnych i oceniają, czy właśnie obserwowane zderzenie można pominąć, czy też warto je zapisać do dalszych analiz. Jednak dotychczasowe sposoby rekonstrukcji torów cząstek wkrótce przestaną wystarczać.

Z badań przedstawionych na łamach czasopisma „Computer Science” przez naukowców z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie wynika, że skuteczną alternatywą dla obecnych metod szybkiej rekonstrukcji torów cząstek mogą być narzędzia zbudowane z użyciem sztucznej inteligencji. Do ich debiutu może dojść już w najbliższych dwóch-trzech latach, prawdopodobnie w eksperymencie MUonE wspomagającym poszukiwania nowej fizyki.

We współczesnych eksperymentach fizyki wysokich energii cząstki rozbiegające się z punktu zderzenia przechodzą przez kolejne warstwy detektora, w każdej deponując odrobinę energii. W praktyce oznacza to, że jeśli detektor składał się z dziesięciu warstw i cząstka wtórna przeszła przez wszystkie, to jej ruch trzeba odtworzyć na podstawie dziesięciu punktów. Zadanie tylko pozornie jest proste.

„Wewnątrz detektorów zazwyczaj znajduje się pole magnetyczne. Cząstki naładowane będą się w nim poruszały po liniach krzywych i tak też będą względem siebie rozmieszczone aktywowane przez nie elementy detektora, żargonowo nazywane hitami”, wyjaśnia prof. dr hab. inż. Marcin Kucharczyk (IFJ PAN) i zaraz dodaje: „W rzeczywistości tak zwana zajętość detektora, czyli liczba hitów przypadająca na element detekcyjny, może być bardzo duża, co przysparza wielu kłopotów przy próbach poprawnej rekonstrukcji torów cząstek. Sporym problemem jest zwłaszcza rekonstrukcja torów znajdujących się blisko siebie”.

Eksperymenty projektowane z myślą o poszukiwaniu nowej fizyki będą zderzały cząstki z większymi energiami niż dotychczas, co oznacza, że w każdym zderzeniu powstanie więcej cząstek wtórnych. Światłość wiązek także będzie musiała być większa, co z kolei zwiększy liczbę zderzeń w jednostce czasu. W takich warunkach klasyczne metody rekonstrukcji torów cząstek przestają sobie radzić. Ratunkiem może być sztuczna inteligencja, która znakomicie sprawdza się tam, gdzie trzeba szybko rozpoznawać pewne uniwersalne wzorce.

„Zaprojektowana przez nas sztuczna inteligencja jest siecią neuronową typu głębokiego. Składa się z warstwy wejściowej zbudowanej z 20 neuronów, czterech warstw ukrytych liczących po 1000 neuronów oraz warstwy wyjściowej z ośmioma neuronami. Wszystkie neurony każdej warstwy są połączone ze wszystkimi neuronami warstwy sąsiedniej. Razem sieć dysponuje dwoma milionami parametrów konfiguracyjnych, których wartości są ustalane w procesie uczenia”, opisuje dr inż. Miłosz Zdybał (IFJ PAN).

Tak przygotowaną głęboką sieć neuronową wytrenowano z użyciem 40 tysięcy symulowanych zderzeń cząstek, uzupełnionych o sztucznie wygenerowany szum. Na etapie testowania do sieci wprowadzano wyłącznie informację o hitach. Ponieważ pochodziły one z symulacji komputerowych, pierwotne torry odpowiedzialnych za nie cząstek były dokładnie znane i można je było porównać z rekonstrukcjami dostarczonymi przez sztuczną inteligencję. Na tej podstawie sztuczna inteligencja uczyła się poprawnie odtwarzać torry cząstek.

„W naszym artykule pokazujemy, że głęboka sieć neuronowa wyuczona na odpowiednio przygotowanej bazie danych jest w stanie rekonstruować torry cząstek wtórnych równie dokładnie jak klasyczne algorytmy. To wynik o dużej wadze dla rozwoju technik detekcyjnych. O ile bowiem uczenie głębokiej sieci neuronowej jest procesem długotrwałym i obliczeniowo bardzo wymagającym, o tyle wytrenowana sieć reaguje już błyskawicznie. Skoro więc robi to jeszcze z zadowalającą precyzją, możemy z optymizmem myśleć o jej użyciu w przypadku rzeczywistych zderzeń”, podkreśla prof. Kucharczyk.

Najbliższym eksperymentem, w którym sztuczna inteligencja z IFJ PAN miałaby szansę się wykazać, jest MUonE (MUon ON Electron elastic scattering). Ma on związek z interesującą rozbieżnością między zmierzonymi wartościami pewnej wielkości fizycznej dotyczącej mionów (cząstek będących ok. 200 razy bardziej masywnymi odpowiednikami elektronu), a przewidywaniami Modelu Standardowego (czyli modelu używanego do opisu świata cząstek elementarnych). Z pomiarów przeprowadzonych w amerykańskim ośrodku akceleratorowym Fermilab wynika bowiem, że tzw. anomalny moment magnetyczny mionów różni się od przewidywań Modelu Standardowego ze znaczącością sięgającą 4.2 odchyień standardowych (oznaczanych jako sigma). Tymczasem w fizyce przyjmuje się, że do ogłoszenia odkrycia zazwyczaj uprawnia wartość powyżej 5 sigma, odpowiadająca znaczącości 99.99995%.

Znaczącość rozbieżności wskazującej na nową fizykę można byłoby istotnie zwiększyć, gdyby udało się poprawić precyzję przewidywań Modelu Standardowego. Jednak aby za jego pomocą lepiej wyznaczyć anomalny moment magnetyczny mionu, należałoby znać dokładniejszą wartość parametru określanego mianem poprawki hadronowej. Niestety, matematyczne wyliczenie tego parametru nie jest możliwe. W tym momencie staje się zrozumiała rola eksperymentu MUonE. Naukowcy zamierzają zbadać w nim rozpraszanie mionów na elektronach atomów o niskiej liczbie atomowej, takich jak węgiel czy beryl. Wyniki pozwolą dokładniej określić pewne parametry fizyczne, które wprost zależą od poprawki hadronowej. Jeśli wszystko pójdzie po myśli fizyków, tak wyznaczona poprawka hadronowa zwiększy pewność pomiaru rozbieżności między teoretyczną a zmierzoną wartością anomalnego momentu magnetycznego mionu nawet do 7 sigma – i istnienie dotychczas nieznannej fizyki może zostać potwierdzone.

Eksperyment MUonE ruszy w europejskim ośrodku jądrowym CERN już w przyszłym roku, lecz faza docelowa została zaplanowana na rok 2027. Prawdopodobnie właśnie wtedy krakowscy fizycy będą mieli okazję się przekonać, czy stworzona przez nich sztuczna inteligencja spełni swoje zadanie w zakresie rekonstrukcji torów cząstek. Potwierdzenie jej skuteczności w warunkach prawdziwego eksperymentu może oznaczać początek nowej ery w technikach detekcji cząstek.

Prace zespołu fizyków z IFJ PAN zostały sfinansowane z grantu Narodowego Centrum Nauki.

Instytut Fizyki Jądrowej im. Henryka Niewodniczańskiego Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie prowadzi badania podstawowe i aplikacyjne w obszarze fizyki oraz nauk pokrewnych. Główna część działalności naukowej Instytutu koncentruje się na badaniu struktury materii, w tym własności oddziaływań fundamentalnych od skali kosmicznej po cząstki elementarne. Częścią Instytutu jest nowoczesne Centrum Cyklotronowe Bronowice, unikalny w skali europejskiej ośrodek, obok badań naukowych zajmujący się terapią protonową nowotworów. IFJ PAN prowadzi też cztery akredytowane laboratoria badawcze i pomiarowe. Wyniki badań – obejmujących fizykę i astrofizykę cząstek, fizykę jądrową i oddziaływań silnych, fizykę fazy skondensowanej materii, fizykę medyczną, inżynierię nanomateriałów, geofizykę, biologię radiacyjną i środowiskową, radiochemię, dozymetrię oraz fizykę i ochronę środowiska – są każdego roku przedstawiane w ponad 600 artykułach publikowanych w recenzowanych wysoko punktowanych czasopismach naukowych.

Corocznie Instytut jest organizatorem lub współorganizatorem wielu międzynarodowych i krajowych konferencji naukowych oraz szeregu seminariów i innych spotkań naukowych. IFJ PAN jest członkiem Krakowskiego Konsorcjum Naukowego „Materia-Energia-Przyszłość”, któremu, na lata 2012-2017, nadany został status Krajowego Naukowego Ośrodka Wiodącego (KNOW). Wiele projektów i przedsięwzięć realizowanych przez Instytut jest wpisanych na Polską Mapę Infrastruktury Badawczej (PMIB). Instytut zatrudnia ponad pół tysiąca pracowników. Komisja Europejska przyznała IFJ PAN prestiżowe wyróżnienie „HR Excellence in Research” jako instytucji stosującej zasady „Europejskiej Karty Naukowca” i „Kodeksu Postępowania przy rekrutacji pracowników naukowych”. W kategoryzacji MEIN Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w obszarze nauk fizycznych.

KONTAKT:

prof. dr hab. inż. **Marcin Kucharczyk**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
tel.: +48 12 6628050
email: marcin.kucharczyk@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Machine Learning based Event Reconstruction for the MUonE Experiment”
M. Zdybał, M. Kucharczyk, M. Wolter
Computer Science 25(1) (2024) 25-46
DOI: [10.7494/csci.2024.25.1.5690](https://doi.org/10.7494/csci.2024.25.1.5690)

POWIĄZANE STRONY WWW:

<http://www.ifj.edu.pl/>
Strona Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk.

<http://press.ifj.edu.pl/>
Serwis prasowy Instytutu Fizyki Jądrowej PAN.

MATERIAŁY GRAFICZNE:

IFJ240320b_fot01s.jpg **HR:** http://press.ifj.edu.pl/news/2024/03/20/IFJ240320b_fot01.jpg
Zasada rekonstrukcji torów cząstek wtórnych na podstawie hitów zarejestrowanych podczas zderzeń wewnątrz detektora MUonE. Kolorem złotym oznaczono kolejne tarcze, błękitnym warstwy detektorów krzemowych. (Źródło: IFJ PAN)