



Kraków, 5 marca 2026

Lepiej znane nieznane prowadzi ku dokładniejszym symulacjom zderzeń

Szacowanie rzeczy istniejących na ogół przychodzi nam bez trudu, gorzej bywa z tymi nieistniejącymi. Doskonale wiedzą o tym fizycy z Polski i Wielkiej Brytanii. Aby poprawić obecne symulacje zderzeń cząstek o wysokich energiach, opracowali oni dokładniejszą metodę szacowania wpływu obliczeń, których... się nie wykonuje.

Przewidywanie bywa trudne, zwłaszcza gdy chodzi o przyszłość – miał kiedyś powiedzieć Niels Bohr, jeden z ojców mechaniki kwantowej. Podstawowy problem z przewidywaniem przyszłości tkwi w banalnym fakcie, że jej po prostu nie znamy. Nieco podobne wyzwanie pojawia się w obliczeniach używanych przy modelowaniu zderzeń cząstek o wysokich energiach: aby były użyteczne, trzeba umieć oszacować wpływ obliczeń, których... się nie wykonuje. Fizycy Matthew A. Lim z University of Sussex w Brighton i dr Rene Poncelet z Instytutu Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk (IFJ PAN) w Krakowie na łamach czasopisma „Physical Review D” przedstawili nowe podejście do tego zagadnienia.

„Dane ze zderzeń cząstek, gromadzone przez takie akceleratory jak LHC, zawsze wymagają uważnej interpretacji. Aby zrozumieć, co zostało zarejestrowane, musimy porównać pomiary z przewidywaniami jakiegoś modelu teoretycznego. Jednak z uwagi na złożoność obliczeń w fizyce wysokich energii, wyniki symulacji nigdy nie są w pełni dokładne. My zaproponowaliśmy pewien wariant obliczeń perturbacyjnych, pozwalający zmniejszyć niepewności występujące w dotychczasowych symulacjach”, mówi dr Poncelet, który na realizację nowej, wysoce precyzyjnej symulacji komputerowej zderzeń cząstek wysokoenergetycznych zdobył w 2025 roku prestiżowy europejski grant ERC Starting Grants.

Obrazowego wyjaśnienia istoty podejścia perturbacyjnego dostarcza astronomia. Orbitę Ziemi wokół Słońca można wyliczyć dokładnie tylko wtedy, gdy się przyjmie, że wpływ innych ciał Układu Słonecznego jest pomijalny. Lecz gdybyśmy chcieli uwzględnić, jak na tę orbitę wpływa na przykład Jowisz, równania grawitacyjnego nie da się już rozwiązać wprost – to słynny problem „trzech ciał”. Właśnie wtedy stosuje się podejście perturbacyjne: wpływ kolejnej planety nie jest ujmowany w głównym równaniu, lecz wprowadzany jako niewielki czynnik zaburzający rozwiązanie równania prostszego.

„W teorii perturbacji zamiast wyliczać skomplikowane funkcje bezpośrednio, przybliżamy je za pomocą rozwinięć w szereg. Pojawiające się tu wyrazy pierwszorzędowe można sobie wyobrażać jako kontynenty na mapie. Poprawki drugorzędowe odpowiadałyby w tej analogii zatokom czy wyspom leżącym u wybrzeży, podczas gdy wyrazy jeszcze wyższych rzędów odwzorowywałyby położenie na przykład poszczególnych skał czy kamieni”, wyjaśnia dr Poncelet.

Podejście perturbacyjne sprawdza się znakomicie w wielu zastosowaniach, od obliczeń torów ruchu rakiet i sond międzyplanetarnych po analizy wytrzymałościowe konstrukcji nośnych. Jednak gdy chcemy je wykorzystać do symulowania zderzeń cząstek przy najwyższych energiach, zwłaszcza tam, gdzie w grę wchodzi poszukiwanie nowej fizyki, natychmiast pojawiają się niebanalne problemy. W rozwinięciach w szereg poprawki każdego kolejnego rzędu wymagają coraz większej ilości obliczeń, co w przypadku tak nietrywialnej teorii jak używana wówczas chromodynamika kwantowa oznacza coraz większą liczbę skomplikowanych całkowań. Złożoność obliczeń rośnie lawinowo, a tym samym dramatycznie wydłuża się czas ich wykonywania.

Z uwagi na ograniczenia obliczeniowe, w symulacjach zderzeń cząstek o wysokich energiach proces rozwijania w szereg jest więc dość szybko przerywany. W konsekwencji wyliczane wartości nieco się różnią od wartości parametrów mierzonych w eksperymentach w akceleratorach. Kluczowe pytanie brzmi: o ile? Różnicę można byłoby dość łatwo wyliczyć, gdyby szeregi używane w symulacjach zderzeń były zbieżne; kłopot w tym, że na ogół nie są. Jak więc oszacować poprawki, o których jedyne co wiemy to to, że nic o nich nie wiemy? A zignorować ich nie można, bo przecież to właśnie tam może się kryć nowa fizyka!

Podstawowym sposobem na oszacowanie niewyliczonych poprawek jest metoda wariacji skali. Poprawki wszystkich rzędów zależą od parametru nazywanego skalą renormalizacji, arbitralnie wybranego adekwatnie do energii modelowanych zderzeń. Po zakończeniu głównych obliczeń, uwzględniających założoną liczbę poprawek, parametr ten modyfikuje się w również arbitralnie dobranym zakresie by sprawdzić, jak zmiany wpływają na obliczenia i ich zgodność z danymi. To właśnie na tej podstawie można następnie oszacować wpływ poprawek pominiętych w obliczeniach z użyciem pierwotnie założonej skali renormalizacji.

W ostatnich latach na popularności zyskuje podejście alternatywne, polegające na modyfikowaniu parametrów określanych mianem uprzykrzających. Analogiczne jak przy wariacji skali, bada się tu wpływ zmian wybranych parametrów na wielkość liczonych poprawek. Zmianom poddaje się jednak nie jeden parametr matematyczny (skalę renormalizacji), lecz parametry znacznie lepiej interpretowane fizyczne. W przypadku symulacji zderzeń cząstek o wysokich energiach mogą być nimi na przykład masy cząstek, stałe sprzężenia, parametry funkcji rozkładu prawdopodobieństwa itp. Podstawowa przewaga kryje się tu w fakcie, że zmiany wartości odpowiednio dobranych parametrów uprzykrzających muszą zachowywać ich fizyczny sens i pozostawać w zgodzie z wcześniejszymi pomiarami. W tym podejściu szacowanie nieznanego wymaga co prawda wiedzy eksperckiej, ale dzięki temu jest obciążone znacznie mniejszą arbitralnością.

W opublikowanym artykule zaproponowano nową metodologię oszacowań z użyciem parametrów uprzykrzających i wykazano, że pozostaje ona w znakomitej zgodności z danymi zebranymi w Wielkim Zderzaczu Hadronów dla dziesięciu rodzajów zderzeń wysokoenergetycznych protonów. Analiza obejmowała takie przypadki jak produkcja bozonu Higgsa, par bozonów W bądź Z , par kwarków prawdziwych z ich antykwarkami czy procesy skutkujące powstawaniem kwantów γ i strug hadronów. Tam, gdzie standardowe podejście z użyciem wariacji skali sprawdziło się dobrze, nowe podejście prowadziło do zbliżonych wyników, natomiast w przypadkach dotychczas problematycznych najnowsze oszacowania okazały się bardziej realistyczne.

„Zaproponowaliśmy gotową do użycia metodę estymacji nieznanymi poprawkami wyższych rzędów w obliczeniach perturbacyjnych dotyczących zderzeń protonów o wysokich energiach, fizycznie lepiej ugruntowaną od dotychczasowej. Poprawa wiarygodności oszacowań niepewności teoretycznych pozwoli na dokładniejsze interpretacje zjawisk zachodzących podczas zderzeń cząstek zarówno w Wielkim Zderzaczu Hadronów, jak i w akceleratorach przyszłości”, podsumowuje dr Poncellet.

Omówione badania wchodzą w zakres prac objętych grantem ERC Starting Grant.

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 klasyfikacji MEiN Instytut został zaliczony do najwyższej kategorii naukowej A+ w obszarze nauk fizycznych.

KONTAKT:

dr **Rene Poncelet**
Instytut Fizyki Jądrowej Polskiej Akademii Nauk
email: rene.poncelet@ifj.edu.pl

PUBLIKACJE NAUKOWE:

„Robust estimates of theoretical uncertainties at fixed-order in perturbation theory”
M. A. Lim, R. Poncelet
Physical Review D 112, L111901, 2025
DOI: [10.1103/7g5k-4y3v](https://doi.org/10.1103/7g5k-4y3v)

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:

IFJ260305b_fot01s.jpg HR: http://press.ifj.edu.pl/news/2026/03/05/IFJ260305b_fot01.jpg
Poprawa dokładności interpretacji zderzeń cząstek może pomóc w znalezieniu zjawisk nowej fizyki. (Źródło: ATLAS Collaboration)