



Prof. dr hab. Piotr Salabura

Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego

ul. Prof. Łojasiewicza 11

Uniwersytet Jagielloński

30-348 Kraków

29.03. 2021

Kraków

Recenzja pracy doktorskiej mgr inż. Adama Dendka ” Machine learning based long-lived particle reconstruction algorithm for Run 2 and upgrade LHCb trigger and a flexible software platform for the UT detector read-out chip emulation”

Praca doktorska pana mgr inż. Adama Dendka „Machine learning based long-lived particle reconstruction algorithm for Run 2 and upgrade LHCb trigger and a flexible software platform for the UT detector read-out chip emulation ” została wykonana w ramach dużej międzynarodowej współpracy LHCb wykonującej pomiary na Large Hadron Collider (LHC) w CERN. Autor w ramach przedstawionej pracy wykonał dwa dobrze określone zadania polegające na ; (a) opracowaniu algorytmu wyboru śladów cząstek rozpadających poza wierzchołkiem zderzenia (tkz. downstream tracks) (b) wykonaniu oprogramowania do monitorowania pracy detektora śladów Upper Tracker (UT) oraz testów prototypów.

Opracowanie algorytmu wyboru kandydatów śladów (pattern recognition), tzw. Long-Lived Tracking, oraz selekcji najlepszego śladu wykonano przez zastosowanie metod uczenia maszynowego, których architektury oraz efektywność została szczegółowo przebadana przy pomocy symulacji Monte Carlo rozpadów mezonów B ( $B \rightarrow J/\Psi K_s$ ) i D ( $D^* \rightarrow D\pi$ ).

Porównano wyniki uzyskane przy pomocy drzew decyzyjnych XGBoost (Extreme Gradient Boosted) oraz głębokich sieci neuronowych (deep neural networks). Opracowane rozwiązanie zostało pozytywnie zweryfikowane przez dane eksperymentalne uzyskane przez LHCb z wyselekcjonowanymi rozpadami  $\Lambda$  i  $K_s$ . Autor pracy wykazał wzrost efektywności

rekonstrukcji w porównaniu z algorytmem używanym poprzednio (PatDownstream) przez współpracę LHCb. Algorytm oparty na drzewach decyzyjnych, w nieco uproszczonej wersji stosującej tablicę przeglądową (look-up table), został włączony do oficjalnego systemu rekonstrukcji danych w czasie rzeczywistym eksperymentu LHCb. Rozwinięte przez autora pracy algorytmy pozwoliły na redukcję czasu obliczeń o ponad 40% w stosunku do poprzednio używanych. Te wyniki należy zaliczyć do największych osiągnięć pracy. Silną stroną tej części pracy jest także dogłębna analiza algorytmów, w szczególności w aspekcie wielowymiarowości problemu, głębokości struktur, ich optymalizacja i badania efektywności. Przedstawiona dyskusja oraz wyniki wskazują na głęboką wiedzę autora w niezwykle dynamicznie rozwijającym się obszarze metod uczenia maszynowego.

W drugiej, krótszej, części pracy autor przedstawił rozwinięty system do monitorowania pracy paskowego detektora krzemowego UT, jego emulację oraz uzyskane wyniki z testów prototypów na wiązce protonów. Przedstawiono standardowe kroki analizy oparte na ustalaniu wielkości piedestałów, rozkładów szumów, ich usuwania oraz metod klasteryzacji i wyznaczania rozkładów deponowanego ładunku. Opracowany system posłużył do analizy danych uzyskanych przy pomocy prototypowego detektora paskowego na wiązce protonów w CERN (SPS). Istotnym wynikiem uzyskanym w teście było wyznaczenie przesłuchu pomiędzy kanałami (cross-talk) oraz opracowanie metody jego kompensacji.

Wyniki prac mgr. Dendka zostały opublikowane w 3 artykułach, 2 komunikatach współpracy LHCb i wygłoszone na 11 międzynarodowych konferencjach (spis na stronie 9/10).

Opis pracy:

Praca jest napisana w języku angielskim, składa się 6 głównych rozdziałów i podsumowania. Jest napisana czytelnie, choć zdarzają się drobne literówki nieprzeszkadzające w zrozumieniu. Praca jest bogato ilustrowana rysunkami dobrze prezentującymi wyniki, choć w paru przypadkach opis rysunków jest zbyt mały (np. 4.7.1, 4.7.2, 4.7.3, 4.12.1). Rozdział pierwszy zawiera skondensowany opis detektora LHCb, ze szczególnym uwzględnieniem detektorów wierzchołka VELO oraz stacji śledzących umieszczonych po obu stronach magnesu dipolowego (tkz, stacji TT oraz T), które odgrywały zasadniczą rolę w algorytmach opracowanych przez autora. Opisano także ambitny plan rozbudowy detektora LHCb do zbliżających się pomiarów w czasie Run3/4. Oczekuje się znacznego zwiększenia zintegrowanej świetlności poprzez modernizację detektorów krzemowych i ich systemów odczytu (w tym zastosowanie układu SALT wykonanego przez grupę Prof. M. Idzika z AGH) oraz systemu procesowania danych w czasie rzeczywistym który pozwoli na odczytu detektora z częstotliwością 40 MHz. Modyfikacji detektorów wierzchołka pozwoli uzyskanie doskonałej zdolności rozdzielczej 15-

30  $\mu\text{m}$ , kluczowych dla rozpadów mezonów B/D, oraz dużej wydajności dla niskich pędów – rysunek 1.4.4 (tutaj brakuje mi opisu punktów oznaczonych kolorem czarnym)

W rozdziale drugim znajdujemy podstawy modelu Standardowego oraz łamania symetrii CP, której badanie w rozpadach mezonów B są jednym z głównych celów eksperymentu LHCb. Rozdział trzeci zawiera obszerny przegląd metod uczenia maszynowego i metod ich optymalizacji, ze szczególnym uwzględnieniem użytych w algorytmach opracowanych przez autora. Autor podjął się trudnego zadania dokonania przeglądu bardzo dynamicznie rozwijającej się dziedziny z licznymi odnośnikami do literatury. Takie opracowanie może być bardzo pomocne dla zainteresowanych, choć może nie łatwe do zrozumienia bez materiału ilustrującego praktyczne użycie. Taką ilustrację znajdujemy w rozdziale 4 dla zastosowań użytych przez autora : drzew decyzyjnych oraz głębokich sieci neuronowych . W uwag edytorskich w równaniu 3.3 jest chyba pomyłka, w pierwszym wyrazie jest  $\log P(x)$  a powinno być chyba  $\log(1/P(x))$ , opis rys. 3.3.1 jest dość skąpy i trudno się zorientować jakie jest znaczenie różnych kolorów, rys. 3.3.11 nie zawiera lewej i prawej części ale górna i dolną, na rys. 3.3.14 opisy osi x i y są zamienione.

Rozdział 4 zawiera centralna część pracy z opisami algorytmów oraz wyników badań. W pierwszej części przedstawiono model śladu w polu magnetycznym dipola LHCb . Model pozwala na rekonstrukcję śladu w płaszczyznach ugięcia (x-z) i płaszczyźnie (z-y), gdzie ślad w przybliżeniu jest linią prostą. Celem algorytmu było: (a) przyporządkowanie do części śladu zrekonstruowanego w detektorach T, umieszczonych za magnesem, zrekonstruowanych trafień w detektorze TT (b) rozróżnienie śladów pochodzących od prawdziwych trajektorii od tych fałszywie zrekonstruowanych , tzn. składających się w większości z trafień pochodzących od różnych cząstek (>30%) oraz (c) wyselekcjonowania najlepszego toru. Model trajektorii oraz zebranie zbioru śladów (tkz. T-Seed) jest dobrze opisany w rozdziale 4.4, choć nie do końca zrozumiałem jak jest estymowana początkowa wartość pędu dla równania 4.3 bez wiedzy na temat kierunku śladu w detektorach TT, który chyba na tym poziomie nie jest jeszcze znany (poza tym pod równaniem 4.12 jest chyba niepoprawny odnośnik do równania 4.11, które nie jest równaniem na  $t_{y,TT}$  ). Do rozwiązania problemu (b) autor pracy użył drzewa decyzyjnego (BDT) oraz alternatywnie głębokiej sieci neuronowej . Obie architektury pozwalają na bardzo dobra klasyfikacje z wydajnością ponad 90%, określoną przy pomocy Monte Carlo dla cząstek z rozpadu  $B \rightarrow J/\Psi K_s$  ta symulacja była także użyta do optymalizacji algorytmów). Jako cechy rozróżniające ślady prawdziwe od fałszywych użyto 10 obserwabli, zdefiniowanych w rozdziale 4.7, których rozkłady nie różnią się trywialnie dla obu przypadków, co w sposób jednoznaczny wskazuje na siłę wybranych metod uczenia maszynowego. Jakość rozróżnienia ilustrują bardzo dobrze rozkłady klasyfikatorów oraz krzywych operacyjnych ROC (rys. 4.10.2,4.10.3 dla BDT oraz 4.11.3

dla sieci neuronowej). Interesujące są także przedstawione wyniki badań optymalizacji – rysunki 4.9.1 (choć tutaj nie do końca jest dla mnie jasne co przedstawiono na osi y w rysunku po lewej i dlaczego wartość całki pod krzywą ROC po prawej jest ujemna), wyniki zbieżności dla BDT części trenującej i testującej – rys. 4.9.2 (tutaj opis osi X nie jest do końca spójny pomiędzy rysunkiem a tekstem na str. 116), badania wpływu różnych obserwacji na wynik klasyfikacji oparte na rozkładach wartości SHAP (rys. 4.12.2, 4.12.3). Problem rekonstrukcji najlepszego śladu (c) został rozwiązany przez zastosowanie głębokiej sieci neuronowej zoptymalizowanej na podstawie danych z symulacji  $D^* \rightarrow D\pi$  i użycie 9 obserwacji przedstawionych na stronie 129. Wydajność oraz czystość rekonstrukcji została szczegółowo przebadana w funkcji pędu, pędu transwersalnego i pseudopospieszności, zarówno dla rozpadów mezonu D jak i B, dla wszystkich zrekonstruowanych śladów jak i tych które zostały zrekonstruowane przez Filtr Kalmana cięcia usuwające fałszywe ślady (rysunki 4.14.1-8). W tym drugim przypadku generalnie obserwuję się spadki wydajności czystości, co mimo wytłumaczenia autora iż oba w.w algorytmy nie są zoptymalizowane do detekcji rozpadów poza wierzchołkiem pierwotnym, jest trochę niepokojące ponieważ rodzi się pytanie czy zysk wypracowany przez autora nie zostaje zniwelowany w innym stopniu analizy (mam nadzieję że nie..). Porównanie wydajności algorytmów opracowanych przez autora z poprzednio stosowanymi wypada zdecydowanie na korzyść rozwiązania przedstawionego w pracy (rys. 4.14.9-12). Także zastosowanie algorytmów do analizy sygnału  $\Lambda$  oraz  $K_s$  z danych rzeczywistych wybadania bardzo obiecująco, choć brakuje mi tutaj jakiejś referencji do oczekiwań z symulacji Monte Carlo w postaci oczekiwanej wydajności. Nie jest dla mnie oczywiste jak metody rozwinięte rozpadów krótko-życiowych mezonów B i D sprawdzają się dla rozpadów długożyciowych  $\Lambda$ ,  $K_s$ . Autor pracy demonstruje zysk, rzędu paru procent –choć trzeba zauważyć iż zysk dla sygnału jest w granicach błędu (tabela 1.14.7 – n.b błędy powinny być także propagowane dla podanych wielkości S/B oraz wzrostu sygnału).

W rozdziale 5 i 6 przedstawiono opracowanie i emulację oprogramowania monitorującego pracę detektora paskowego UT oraz wyniki uzyskane w pomiarach testowych. Jak wspomniałem już we wstępie do recenzji, najbardziej cenne są wyniki uzyskane w eksperymencie testującym w którym jako detektora referencyjnego użyto precyzyjnego teleskopu Timepix3. W testach nie był dostępny układ SALT, ale uzyskane wyniki są cenne ze względu na testy sensora. W mojej ocenie najważniejsze są wyniki dotyczące przesłuchów między kanałami oraz procedury ich korekty (rys. 6.3.2-6.3.5).

Podsumowując, stwierdzam iż przedstawiona do recenzji praca mgr. Adam Dendka w pełni spełnia warunki ustawy o stopniach naukowych i tytule naukowym doktora dlatego też wnoszę do Rady Dyscypliny Nauk Fizycznych AGH o dopuszczenie mgr. Adama Dendka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Prof. dr hab.

Piotr Salabura

A handwritten signature in blue ink that reads "Piotr Salabura". The signature is written in a cursive, flowing style.