



dr hab. Paweł Brückman de Renstrom, prof. IFJ PAN
Instytut Fizyki Jądrowej PAN
ul. Radzikowskiego 152
32-342 Kraków

Kraków, 27.12.2022 r.

Recenzja rozprawy doktorskiej mgr inż. Pawła Kopciewicza zatytułowanej „Design and implementation of the monitoring and analysis software platform for upgraded LHCb VELO detector and search for a new fitting method based on computational intelligence approach for $B \rightarrow Dh$ decays”

Pan mgr inż. Paweł Kopciewicz przedstawił do recenzji rozprawę doktorską zatytułowaną *Design and implementation of the monitoring and analysis software platform for upgraded LHCb VELO detector and search for a new fitting method based on computational intelligence approach for $B \rightarrow Dh$ decays*, podsumowując pracę jaką wykonał w ramach współpracy LHCb, a dotyczącą oprogramowania systemu odczytu, kalibracji oraz monitorowania zmodernizowanego krzemowego detektora wierzchołka Vertex LOcator (VELO) w eksperymencie LHCb. Główny projekt zrealizowany w ramach doktoratu polegający na stworzeniu złożonego pakietu softwarowego *Vetra* realizującego pełną komunikację z elektroniką front-end detektora VELO, dekodowanie danych i ich monitoring oraz pełny program kalibracji układu odczytowego uzupełniony został autorskimi badaniami przydatności metod uczenia maszynowego do wydajnego dopasowywania rozkładów fizycznych.

Fizyka zapachu jest jednym z podstawowych narzędzi do precyzyjnej weryfikacji i pomiaru parametrów Modelu Standardowego cząstek elementarnych (MS), zarazem umożliwiającą pośrednie poszukiwanie zjawisk wykraczających poza MS poprzez obserwację odstępstw od przewidywań tej ostatniej. Eksperyment LHCb to wysoko wyspecjalizowany jednoramienny spektrometr „do przodu” pokrywający obszar pseudopospieszności od około 2 do 5, pozwalający na ekskluzywną rekonstrukcję i precyzyjną spektroskopię ciężkich hadronów, w szczególności kaskadowych rozpadów hadronów zawierających kwark piękny b . Kwark ten podlega jedynie rozpadom słabym, co wraz ze strukturą macierzy CKM skutkuje jego obserwowalnym czasem życia umożliwiając rekonstrukcję wierzchołków pierwotnych produkcji oraz wtórnych wierzchołków rozpadu. Stąd, kluczowym elementem spektrometru LHCb jest wysokiej rozdzielczości detektor wierzchołka VELO, a jego optymalne wykorzystanie i kalibracja stanowi o sukcesie programu fizycznego eksperymentu.

Podczas drugiej długiej przerwy modernizacyjnej LHC (LS2) Spektrometr LHCb przeszedł gruntowną przebudowę. Szereg pod-detektorów zostało zastąpionych ich całkiem nową wersją. Tak miała się rzecz w przypadku VELO, będącym pierwotnie krzemowym detektorem mikro-paskowym, obecnie zastąpionym w całości nowym detektorem mozaikowym (piksele). Nowe sensory pikselowe otrzymały również zupełnie nową elektronikę odczytu front-end opartą na układach scalonych ASIC VeloPix, zdolną do odczytu detektora z pełną częstotliwością pracy zderzacza, czyli 40 MHz (w poprzedniej wersji detektora było to zaledwie 1.1 MHz). Powyższe zmiany stworzyły konieczność napisania od podstaw nowego oprogramowania odczytu, kalibracji i monitorowania detektora VELO. Z założenia, nowy software musiał stanowić integralny moduł oficjalnego pakietu oprogramowania eksperymentu LHCb t.j. szkieletu *Gaudi*. Tego złożonego zadania podjął się w ramach swojej pracy doktorskiej mgr inż. Paweł Kopciewicz.

Oprócz programowania systemów czasu rzeczywistego, Autora pasjonują współczesne metody uczenia maszynowego (machine learning – ML) i ich zastosowania do konkretnych problemów fizycznych. Stąd, druga część rozprawy poświęcona jest wnikliwej analizie możliwości użycia algorytmów uczenia maszynowego w zastosowaniu do dopasowania rozkładów wielkości fizycznych rekonstruowanych w toku analiz spektrometrycznych w eksperymencie LHCb. ML staje się coraz powszechniejsze w złożonej analizie danych, gdzie klasyfikacja lub regresja oparta jest o wielowymiarową przestrzeń, często nietrywialnie skorelowanych zmiennych. Metody uczenia maszynowego znane są ze swojej skuteczności



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

oferując bliską optymalnej wydajność. Raz nauczony algorytm, jest przy tym egzekwowany szybko co stanowi wielki atut w zastosowaniu do układów czasu rzeczywistego. Zastosowanie ML do modelowania jest stosunkowo nową i prężnie rozwijającą się dyscypliną. Rozważania przedstawione w rozprawie stanowią ciekawy pierwszy krok w kierunku nowych zastosowań.

Przedstawiona do recenzji rozprawa Pana mgr inż. Pawła Kopciwicza składa się z krótkiego wprowadzenia, pięciu głównych rozdziałów, podsumowania oraz niespotykanej bogatej bibliografii zawierającej 498 pozycji. Praca, składająca się z 139 stron, napisana jest w języku angielskim z dodatkiem streszczenia w języku polskim.

Rozdział 2 stanowi zwięzłą podróż po krainie sztucznej inteligencji. Wprowadza w świat uczenia maszynowego, opisując jego historyczny rozwój i aktualny stan badań. Autor omawia podstawowe rodzaje algorytmów uczących się, od najprostszych takich jak k-Nearest Neighbours, poprzez szeroko stosowane wzmocnione drzewa decyzyjne (BDT), skończywszy na głębokich sieciach neuronowych (DNN). Kolejno przedstawia typowe zastosowania współczesnych metod ML, a to klasyfikację, regresję, w końcu modelowanie za pomocą sieci przeciwstawnych (GAN). Widać przy tym wyraźnie szczególne zainteresowanie Autora metodami optymalizacji uczenia głębokich sieci neuronowych. W tej dziedzinie opublikował dwa artykuły naukowe, pierwszy dotyczący modyfikacji algorytmu FPA, drugi zaś optymalizacji uczenia układów sieci typu GAN.

Rozdział 3 opisuje krótko spektrometr LHCb w jego kształcie w ciągu pierwszych 10-ciu lat działania, a następnie omawia modernizację jakie przeszedł podczas LS2 (Upgrade I). Nie bez powodu szczególną uwagę Autor poświęca podsystemowi VELO, którego dotyczy główny projekt zrealizowany w ramach doktoratu. Opisuje szczegółowo funkcjonalność układu scalonego odczytu front-end *VeloPix* wraz z formatem danych przesyłanych poprzez linki optyczne oraz instrukcjami jakie przyjmują poszczególne rejestry DAC w celu precyzyjnej kalibracji charakterystyki układu odczytowego.

Rozdział 4 poświęcony jest w całości pracującemu w szkielecie *Gaudi* pakietowi softwarowemu *Vetra*, który Autor stworzył w ramach pracy doktorskiej. Wprawdzie pakiet taki istniał już wcześniej dla pierwszej wersji VELO, ale wymiana detektora z mikro-paskowego na mozaikowy wymusiła zaprojektowanie oprogramowania od nowa. Opracowane przez Autora wcielenie *Vetra* realizuje dekodowanie różnych formatów strumienia danych z nowego detektora VELO, obsługę sekwencji skanowania odczytu i jego pełną kalibrację, monitorowanie za pomocą histogramów, wszystko uzupełnione o emulację strumienia surowych danych z detektora. Pakiet realizuje więc pełną dwukierunkową komunikację z elektroniką front-end wspomaganą komercyjnym środowiskiem WinCC OA. Rozdział jest niezwykle szczegółowy i stanowi gotowy skrypt z instrukcją obsługi pakietu *Vetra*.

W rozdziale 5 Autor opisuje przykładowe analizy i kalibracje prototypowych modułów detektora VELO wykonane przy pomocy stworzonego oprogramowania. Opisane są kolejno algorytmy klastrowania sygnału oraz skany wielkości impulsów (Time-over-Threshold) i procedury kalibracji progów odcięcia od szumu, kalibracja odpowiedzi detektora na impulsy testowe i pomiar wzmocnienia wzmacniaczy ładunkowych i w końcu optymalizacja parametrów analogowych układu front-end. Autor nie stroni przy tym od tłumaczenia zasad działania elektroniki odczytu i znaczenia poszczególnych procedur kalibracyjnych.

Rozdział 6 pracy dotyczy drugiej, odrębnej tematyki pracy. Autor dyskutuje w nim użycie technik uczenia maszynowego w zastosowaniu do różnych zagadnień rekonstrukcji i analizy danych w eksperymencie LHCb. Rozdział rozpoczyna przegląd technik będących już obecnie w użyciu w eksperymencie. W kolejnym podrozdziale przedstawia propozycje zastosowania ML do dopasowania rozkładów fizycznych (histogramów). Na prostych przykładach dokonuje porównania powszechnie stosowanych technik dopasowania (fitu) modelu do danych do proponowanych przez siebie metod uczenia maszynowego. Na koniec, w podrozdziale trzecim, analizuje jakość i efektywność rekonstrukcji wielkości fizycznych w rozpadzie $B^0 \rightarrow Dh$ i porównuje ją do dopasowań za pomocą wzorcowych metod takich jak Maximum Likelihood.

Rozdział 7 zawiera podsumowanie rozprawy.

Praca jest poprawnie zredagowana, a organizacja materiału jest przejrzysta. Zaskakuje jednak trochę kolejność prezentowanego materiału. Po jednostronicowym wstępie (Rozdział 1) następuje rozdział przeglądowo opisujący stan badań w dziedzinie sztucznej inteligencji. Sam w sobie bardzo ciekawy, nie ma on związku z następującą po nim główną częścią rozprawy, która opisuje modernizację detektora VELO, oraz funkcjonalność i zastosowania pakietu *Vetra*. Z punktu widzenia czytelnika, lepiej byłoby, gdyby



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

bezpośrednio poprzedzał rozdział 6, który sam rozpoczyna się od przeglądu metod ML stosowanych obecnie w eksperymencie LHCb i nie tylko.

Nie mogę się w tym miejscu powstrzymać od stwierdzenia, że jest to jedna z bardziej intrygujących a zarazem trudnych do lektury i oceny rozpraw z jakimi się spotkałem. Dla przykładu, Rozdział 2 to niezwykle skondensowany przegląd historii rozwoju technik ML poparty imponującą liczbą ponad dwustu referencji. Świadczy o rozległej i uporządkowanej wiedzy Autora, jednak nieco odstaje od stylu oczekiwanego w pracy doktorskiej. Te ostatnie powinny mieć aspekt edukacyjny łagodnie wprowadzając nawet mniej fachowego czytelnika w arkana wiedzy, której dotyczy praca. Tutaj, ten cel został niejako zatracony na korzyść stylu pasującego bardziej do publikacji post-konferencyjnej adresowanej do ekspertów w opisywanej dziedzinie. Dość powiedzieć, że wspomniane 200 referencji przytoczone są na przestrzeni dziesięciu stron. Nie brak więc zdań w których znajdujemy tyleż słów co odniesień do bibliografii. Ponadto, przegląd wiedzy zawarty w rozdziale jest niewspółmiernie szerszy niż ten wykorzystany później w rozdziale szóstym, jednocześnie niektóre pojęcia kluczowe dla zrozumienia wkładu Autora zostały opisane bardzo lakonicznie. Dla przykładu, Algorytmy typu Differential Evolutionary (DE) skwitowane zostały w kilku wersowym akapicie na dole trony 21, podczas gdy stanowią istotny element rozdziałów 6.2 i 6.3. Z drugiej strony, Rozdział 4 jest bardzo szczegółowy i nie pozostawia cienia wątpliwości co do autorstwa pakietu *Vetra* oraz eksperckiej znajomości protokołów komunikacji pomiędzy układem odczytu front-end *VeloPix* i dalszymi elementami takimi jak karty TELL40 i w końcu farma CPU. Sam pakiet softwarowy *Vetra* pracujący w środowisku szkieletu *Gaudi* wymagał dogłębnego opanowania tajników tego ostatniego. Rozdział ten jest gotową instrukcją obsługi naszpikowaną akronimami i żargonem właściwym dla opisów systemów czasu rzeczywistego. Szczegóły takie jak n.p. rysunek 4.3 wraz z towarzyszącym mu opisem są z pewnością przydatne dla wąskiej grupy ekspertów obsługujących DAQ eksperymentu, ale nie ułatwiają odbioru pracy, o czym przestrzega sam Autor na wstępie do rozdziału. Z pewną pomocą przychodzi przydatny spis akronimów umieszczony na wstępie do rozprawy. Szkoda jednak, że zabrakło w nim np. akronimu ODIN (jest jedynie SODIN), który został wprowadzony w tekście na stronie 43 bez wyjaśnienia.

Rozdział 6 stanowi osobną całość omawiając zagadnienia uczenia maszynowego w zastosowaniu do analizy fizycznej danych. Rozpoczyna się od ciekawego przeglądu już obecnie stosowanych technik. Po nim następują propozycje nowych zastosowań do dopasowania rozkładów fizycznych. Te ciekawe rozważania zyskałyby na nieco precyzyjniejszym opisie. Czytając czasami nie jest oczywiste jaki jest cel danego porównania, a co za tym idzie, czy porównanie jest miarodajne. Dla przykładu na stronie 97 i kolejnych, podczas gdy metoda momentów jest dobrze zdefiniowana, to już metoda regresji nie definiuje jakie przyjęto założenie co do błędów zawartości binów (Rys. 6.3 sugeruje, że są nieadekwatne). Jeszcze gorzej jest w przypadku metody DE, gdzie nie wiadomo jaka funkcja straty jest w istocie minimalizowana. W przypadku zastosowania DNN do modelowania kształtu rozkładu (strona 99 i dalsze), niejasnym pozostaje czy uzyskane oszacowanie parametrów jest zadowalające, choćby dlatego że nie znamy statystyki rozkładów testowych. Nie wiadomo też które parametry μ i σ podlegają oszacowaniu, ponieważ rozkład wzorcowy zawierał dwie komponenty Gaussowskie. Bardzo ciekawym wydaje się test rozpoznawania kompozycji rozkładów podsumowany w Tabeli 6.2. Podrozdział 6.3 demonstruje wielką biegłość Autora w posługiwaniu się rozlicznymi narzędziami do optymalizacji, autorsko przystosowując je do rozważanego problemu. Nieco wątpliwości pozostawia porównanie dopasowania parametrów modelu do bezpośredniego modelowania rozkładu za pomocą głębokich sieci lub sieci przeciwstawnych (GAN). Nie wydaje się oczywistym czego Autor oczekuje od wytrenowanego układu. Zastanawiającym jest też problem praktycznego zastosowania proponowanych metod. Autor sugeruje, że metody oparte na ML mogą być odporniejsze na nie do końca znane efekty eksperymentalne. Z drugiej strony, wymagają one treningu opartego o dużą liczbę przykładów. W jaki sposób zapewnić wiarygodne modelowanie rzeczywistego układu eksperymentalnego? Wreszcie, czy taka procedura okaże się opłacalna obliczeniowo?

Miejscami praca robi wrażenie jakby Autor chciał się z nami podzielić swoją rozległą wiedzą ekspercką, ale zabrakło mu miejsca (lub cierpliwości) żeby dostatecznie wyjaśnić poruszane kwestie. I tak, na stronie 57 nie wiadomo o jaką średnią rozkładu chodzi przy wyznaczaniu piedestałów poszczególnych pikseli (nawnie spodziewałbym się, że będzie to środek narastającego zbocza rozkładu funkcji *erf*), wspomniany na stronie 63 przyrost szumu wraz z obniżeniem temperatury nie znajduje żadnego wytłumaczenia, a zdanie kończące podrozdział 4.4 dotyczące pakietu *Monet* wydaje się wyjęte z kontekstu.



INSTYTUT FIZYKI JĄDROWEJ
im. Henryka Niewodniczańskiego
POLSKIEJ AKADEMII NAUK

Podobnie, Krummenacher current (Ikrum) wprowadzony zostaje na stronie 73 bez wyjaśnienia jego fizycznego sensu, podczas gdy następnie stanowi podstawę licznych testów.

Rozprawa jest staranna edycyjnie i językowo nie pozostawia powodu do wielu uwag. Może bardziej komfortowo czytałoby się ją, gdyby często występująca fraza „in the function of” została zastąpiona poprawną w języku angielskim „as a function of”, a przymiotnik „exemplary” słowem „example”. Uśmiech na twarzy wywołuje fraza „perpendicularly to the centre” ze strony 29, a brak jakiegokolwiek wzmiankowania AGH w kontekście układu scalonego SALT (str. 33) pozostawia niedosyt.

Powyższe uwagi nie mają, jednakże, wpływu na bardzo wysoką ocenę rozprawy, dokumentującą ogromną pracę, która przyniosła bardzo konkretny owoc w postaci oprogramowania nowo zainstalowanego detektora VELO, kluczowego narzędzia dla działania eksperymentu LHCb na wiele kolejnych lat.

Podsumowując, pan mgr inż. Paweł Kopciewicz zrealizował dwa autorskie projekty polegające na stworzeniu oprogramowania komunikacji, akwizycji danych i kalibracji krzemowego detektora mozaikowego VELO drugiej generacji oraz przeprowadził nowatorskie studia przydatności metod uczenia maszynowego do pomiaru rekonstruowanych wielkości fizycznych. Projekt softwarowy *Vetra* jest już częścią oficjalnego oprogramowania eksperymentu, podczas gdy drugi projekt ma na razie charakter pionierski. Dokumentując swoją pracę doktorant wykazał się szeroką wiedzą ekspercką zarówno w dziedzinie układów odczytu front-end i wstępnej obróbki danych surowych jak i współczesnych metod uczenia maszynowego. Jego wiedzę ekspercką oraz własny wkład w rozwój powyższych dziedzin potwierdzają artykuły naukowe które opublikował w czasie przygotowania pracy doktorskiej. Nie mam żadnej wątpliwości, że przedstawiona praca spełnia wymagania stawiane pracom doktorskim i wnioskuje do Rady Dyscypliny Nauki Fizyczne AGH o dopuszczenie pana mgr inż. Pawła Kopciewicza do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

Z poważaniem
Paweł Brückman de Renstrom

*Z uwagi na wysoką wartość naukową rozprawy,
rezerwuję sobie prawo do wystąpienia z wnioskiem
o wyróżnienie po obronie pracy doktorskiej*