

Prof. dr hab. inż. Piotr MALECKI  
emeritus  
Instytut Fizyki Jądrowej PAN  
ul Radzikowskiego 152  
31-342 – Kraków  
tel: (48 12) 662 8010



Kraków, 19 października 2022 r.

RECENZJA rozprawy doktorskiej jaką przedstawił  
mgr inż. GRZEGORZ GOŁASZEWSKI  
z Wydziału Fizyki i Informatyki Stosowanej Akademii Górniczo-Hutniczej

---

## Wykrywanie śladów cząstek długożyciowych w eksperymencie LHCb (CERN, Genewa) metodami analizy danych i inteligencji obliczeniowej

### Uwagi wstępne

---

Nierzadko recenzent rozprawy doktorskiej musi zagłębić się w lekturę przedstawionej pracy by wydobyć, a nawet i sformułować jej tezę. Mgr inż. G. Gołaszewski już w Przedmowie jasno zapowiada, że: *...praca przedstawia zestaw nowych procedur opracowanych dla potrzeb eksperymentu LHCb ...*, dalej precyzując: *... celem niniejszej dysertacji było zaprojektowanie procedury służącej do wykrywania (identyfikacji) trajektorii cząstek długożyciowych w badaniach prowadzonych w ramach eksperymentu ...*

Podstawowym wymogiem wobec doktoratu jest oryginalne rozwiązanie problemu naukowego. Oryginalność rozwiązania problemu jest zasadniczą, wymaganą przez prawo cechą rozprawy, więc jest zarazem podstawowym wymogiem dla jej recenzenta. Może warto podkreślić, że *oryginalność* jest w ustawie odniesiona do sposobu rozwiązania postawionego zadania, a nie do atrybutów i cech samego problemu naukowego, stanowiącego, w tym przypadku, przedmiot badań LHCb.

Wspomniana już 3-stronicowa Przedmowa poprzedzająca Spis Treści streszcza pokrótce siedem rozdziałów rozprawy i właściwie odkrywa strategię pracy, w której stosowana dotychczas w LHCb metoda oparta na "intuicyjnym geometrycznym spojrzeniu" - tytułowa metoda analizy danych - zostanie zastąpiona metodami inteligencji obliczeniowej.

Główną motywacją tego przedsięwzięcia jest obecna "nieakceptowalnie duża, sięgająca 55% wszystkich wyników" rekonstrukcja torów "duchów", fałszywych torów, które nie są prawdziwymi torami cząstek pochodzących ze słabych rozpadów  $\Lambda^0$  i  $K^0$ .

Doktorant opisuje też trwającą obecnie przebudowę elementów układu detekcji śladów w eksperymencie LHCb, jako inny z powodów przystąpienia do poprawy istniejącego oprogramowania rekonstrukcji przypadków.

Uprzedzając moje szczegółowe uwagi pozytywne i krytyczne, a także konkluzje, stwierdzam, że tematyka pracy jest przede wszystkim bardzo praktyczna i użyteczna, pozwalająca - w przypadku powodzenia - by współpraca LHCb mogła w znaczący sposób zwiększyć zbiory przypadków (przynajmniej tych, zawierających rozpady  $\Lambda^0$  i  $K^0$ ) bez żądania zwiększenia czasu pracy zderzacza LHC.

Lektura tej rozprawy upewnia mnie o oryginalności przyjętych w niej rozwiązań. Zarówno techniki uczenia maszynowego, jak i logika i arytmetyka zbiorów rozmytych znajdują coraz więcej zastosowań, ale tu mamy do czynienia chyba z jednym z nielicznych przypadków użycia ich w zagadnieniu kinematycznej rekonstrukcji przypadków w jednym z największych eksperymentów fizyki cząstek.

## O układzie i treści rozdziałów.

---

Wstęp jest pierwszym, 3-stronicowym rozdziałem. Po jednej stronie bardzo ogólnego opisu LHC następuje nieco myląca informacja o rejestracji w LHCb słabych rozpadów neutralnych: barionu  $\Lambda^0$  i mezonu  $K_S^0$ . Doktorant pisze, że rozpady tych cząstek: ... ***zachodzą poza obszarem czynnym detektorów...*** Gdyby tak było, to po prostu nie mielibyśmy danych dla niniejszej rozprawy.

O rozpadach barionu  $\Lambda^0$  i mezonu  $K_S^0$  najlepiej podać konkretnie:

średnia droga przed rozpadem wynosi  $\lambda = \frac{p}{m} * c * \tau$ , gdzie  $p$  i  $m$  to pęd i masa cząstki,

$c$  to prędkość światła, a  $\tau$  czas życia w układzie spoczynkowym cząstki.

Dla barionu  $\Lambda^0$   $\tau$  wynosi  $2.6 \cdot 10^{-10}$  s, a  $c \cdot \tau$  wynosi 7.9 cm

zaś dla mezonu  $K_S^0$  wartości te wynoszą odpowiednio  $0.9 \cdot 10^{-10}$  s oraz 2.7 cm.

Mówimy o nich raczej, że to rozpady o mierzalnych zasięgach niż długożyciowe.

Zachodzą one zwykle rzeczywiście poza obszarem pierwszego detektora, zwanego w LHCb detektorem wierzchołka VeLo.

Moje dalsze pretensje do Wstępu, a może po prostu do kolejności rozdziałów dotyczą całego akapitu o zupełnie tu jeszcze nieprzygotowanej dyskusji o rekonstrukcji śladów z jakichś fragmentów FT czy UT, która może być zrozumiana na końcu rozdziału drugiego, po opisie geometrii detektora LHCb.

Rozdział drugi jest kolekcją wielu (zbyt wielu?) tematów. Zaczyna się od symetrii w fizyce, oczywiście nie bez związku z tym, czym zajmuje się LHCb. Przyznam, że jeśli zamierza się poświęcić symetrii parę zdań, to wybranie ścisłego związku, a właściwie tożsamości każdej symetrii z jakąś zasadą zachowania dotyka chyba jednego z największych odkryć w fizyce.

Jest tu też krótko o CERN, i nieco więcej o LHC. Przy takich relacjach może warto zwrócić uwagę, że istotnie Polska stała się pełnoprawnym członkiem CERN w 1989 roku, ale od wczesnych lat 60-tych, jako członek-obserwator, brała czynny udział w wielu cernowskich eksperymentach. Grupy polskich fizyków z Krakowa (IFJ, AGH, UJ) i Warszawy (UW, IJB) były, jak obecnie, oficjalnymi członkami licznych współprac

międzynarodowych.

"Technicznie" najważniejszą częścią rozdziału 2 jest rozsądnie wybrany opis tych elementów systemu detekcyjnego LHCb, które są niezbędne dla zrozumienia pracy, a więc w szczególności opis krzemowego, pikselowego detektora wierzchołka VELO, oraz dwóch detektorów śladowych: 4-ro płaszczyznowego detektora UT, dostarczającego dwóch punktów przestrzennych toru cząstki naładowanej oraz, znajdującego się za magnesem 6-cio płaszczyznowego FT, dostarczającego 3 przestrzenne punktu pomiarowe toru. Ten ostatni jest obecnie w budowie, by w przygotowywanym tzw. run-3 zastąpić jego starszą wersję. Modyfikacja oprogramowania rekonstrukcji przypadków z produkcją barionów  $\Lambda^0$  i mezonów  $K_S^0$ , która jest przedmiotem tej pracy, jest przygotowywana dla tej nowej wersji trackera. Jeżeli dobrze rozumiem, testy nowego oprogramowania można jednakże przeprowadzać na danych run-2, lub na symulacjach MC nowego detektora, ponieważ zachowana została struktura danych obydwu wersji.

Ta uwaga naprowadza nas na kolejny temat rozdziału 2, który jest zwięzłym przewodnikiem po oprogramowaniu eksperymentu LHCb. Niewarto by o tym wspominać, gdyby nie było prawdą, że podjęcie się modyfikacji oprogramowania tak olbrzymiego systemu, złożonego z setek wzajemnie zależnych pakietów, tętniących życiem częstych zmian wersji, było znacznym wyzwaniem dla Doktoranta.

Rozdział trzeci jest bardzo praktyczną częścią tej rozprawy. Jest rzetelnym i kompetentnym przewodnikiem po tych tematach analizy danych, które dominują w przyjętych tu rozwiązaniach. Mamy tu wprowadzenie do jedno i wielowymiarowych statystycznych estymatorów jądrowych z szeroką dyskusją parametru (lub parametrów) wygładzania, czy ograniczenia nośnika - szczególnie aktualną, gdy modelowane są rozkłady masy.

W nowej procedurze rekonstrukcji rozpadów barionów  $\Lambda^0$  i mezonów  $K_S^0$  stworzonej przez mgr inż. G. Gołaszewskiego pojawia się też element uczenia maszynowego za sprawą wprowadzenia specjalnej sieci neuronowej zwanej enkoderem, wyostrzającej pewne cechy charakterystyczne kinematyki przypadku. Podrozdział 3.2 stanowi dobre wprowadzenie w tematykę tego typu sieci.

W końcu jest też krótkie przypomnienie o pojęciach związanych ze zbiorami rozmytymi oraz jednej z operacji na zbiorach rozmytych: przecięcia zbiorów, w tworzonej procedurze użytej do konsolidacji dwóch zbiorów rozmytych.

Rozdział 4 jest, w moim przekonaniu, kulminacją rozprawy. To tutaj realizuje się tytułowe "**metodami analizy danych i inteligencji obliczeniowej**". Postępując wg. intuicji geometrycznych ("metodami analizy danych") kojarzy się wybrany prostoliniowy segment z detektora FT z punktami z ich zbioru w UT. Następnie takich kandydatów torów łączy się w pary, które powinny zaczynać swój bieg od wspólnego punktu, znajdującego się gdzieś w przestrzeni pomiędzy detektorami VELO i UT, który jest możliwym wierzchołkiem rekonstruowanego rozpadu.

Na tym etapie rekonstrukcji wkracza właśnie **inteligencja obliczeniowa** z zadaniem skutecznego zmniejszenia liczby przypadków zbudowanych na fałszywych śladach udających ślady rozpadu. Pochodzą one głównie z błędów generowanych przez przenoszenia przybliżeń na duże odległości.

Dla poprawy tej niedoskonałej filtracji niniejsza praca G. Gołaszewskiego wprowadza procesy oparte na dwóch algorytmach, które pozwalają przypisać parze śladów rozmyty stopień przynależności do zbioru śladów prawdziwych. Te nowe procedury wykorzystują jakby niezależnie koncepcję estymatorów jądrowych odnoszących się do cech rozkładów mas oraz wykorzystują szczególną sieć neuronową typu enkoder, odpowiednio nauczoną do wyróżniania cech par trajektorii najlepiej odpowiadających produktom rzeczywistych rozpadów.

Dwie utworzone w ten sposób przynależności są następnie konsolidowane przy pomocy t-normy minimum.

Rozdziały 5 i 6 przynoszą szczegółową dyskusję otrzymanych wyników, a także szczegółowo relacjonują przygotowania niezbędnych zbiorów uczących i testowych. Przykładowo: dla wstępnej fazy przygotowania danych – budowy wzorca par trajektorii – wyznaczone są jądrowe estymatory gęstości oraz dystrybuant rozkładów mas cząstek. Zastosowano estymator jądrowy ze wspomnianą modyfikacją parametru wygładzania oraz obustronnym ograniczeniem nośnika.

Te pozornie pomocnicze prace często wymagają perfekcji w używaniu pełnej znajomości oprogramowania eksperymentu, kombinowania wyników symulacji i ich digitalizowania, kompetentnego korzystania ze zbiorów danych pochodzących z różnych okresów i t.p.

## Ocena wyników

---

Na obecnym, możliwym etapie wdrażania wyników niniejszej pracy doktorskiej można uznać, że zarówno koncepcja pracy, jak i jej realizacja zakończyła się niewątpliwym sukcesem z mierzalnym wynikiem znaczącego wyeliminowania przypadków z błędnie zrekonstruowanymi rozpadami mezonu  $K^0$  i barionu  $\Lambda^0$ .

Oddzielna ocena należy się samej rozprawie, jej treści, redakcji i edycji: moje nieliczne uwagi krytyczne, głównie dotyczące układu treści nie wpływają znacząco na ogólną ocenę. Uważam, że oryginalny i trudny temat komponujący "tradycyjną" rekonstrukcję przypadków z analizą danych opartych o uczenie maszynowe, rozkłady rozmyte został zrealizowany z sukcesem i opisany bardzo dobrze i zwięźle.

Praca zawiera obszerną bibliografię, złożoną z 66 pozycji, w pełni wykorzystaną.

## Podsumowanie

---

Przedstawioną mi do recenzji rozprawę doktorską uważam za bardzo dobrą poprzez bardzo trafny wybór tematyki oraz bardzo porządne jej zreferowanie.

Z pełnym przekonaniem stwierdzam, że przedstawiona rozprawa spełnia wszelkie wymogi stawiane pracom doktorskim i wnoszę o dopuszczenie Autora, mgr inż. Grzegorza Gołaszewskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.

