

dr hab. Krzysztof M. Graczyk
Instytut Fizyki Teoretycznej
Uniwersytet Wrocławski
pl. Maksa Borna 9, 50-343 Wrocław

Recenzja rozprawy doktorskiej pt. "The measurement and modelling of cosmic ray muons at KM3NeT Detectors" autorstwa magistra Piotra Kalaczyńskiego

Tematyka pracy

Zagadnienie promieni kosmicznych, a ściślej ich pomiar w eksperymencie KM3NeT stanowi przedmiot złożonej rozprawy doktorskiej. Promienie kosmiczne zostały odkryte w 1912 r. przez Victora Hessa, i uhonorowane nagrodą Nobla. Mimo, że od odkrycia minęło ponad sto lat, fizycy w dalszym ciągu badają własności promieni kosmicznych oraz zastanawiają się nad wyjaśnieniem pochodzenia tego rodzaju promieniowania. Jednym z celów eksperymentów takich jak Pierre Auger w Argentynie, IceCube na biegunie południowym, oraz KM3NeT w Morzu Śródziemnym jest pomiar promieni kosmicznych. Autor rozprawy bierze udział w pracach ostatniego z wymienionych projektów. Spodziewamy się, że eksperyment ten przyczyni się do zrozumienia mechanizmu powstawania promieni kosmicznych, co pozwoli zrozumieć prawa rządzące dynamiką obiektów astronomicznych we Wszechświecie.

Magister Kalaczyński jest współautorem wielu artykułów wielo-autorskich kolaboracji KM3NeT, w tym kilku-autorskich (2-3 osobowych) komunikatów, w których opublikowano część osiągnięć naukowych uzyskanych przez autora rozprawy. W rozprawie cytowanych jest sześć komunikatów kilku-autorskich, w tym dwa jedno-autorskie i jeden, w którym autor rozprawy jest pierwszym autorem. Zakres wykonanych prac dotyczy rozwoju oprogramowania wykorzystywanego przez kolaboracje w analizie danych oraz samej analizy już zebranych pomiarów.

Struktura i zawartość merytoryczna pracy

Rozprawa napisana jest w języku angielskim i składa się z ośmiu rozdziałów, sześciu dodatków, spisu literatury oraz spisu skrótów. Rozprawa została przygotowana starannie. Wyniki są omówione językiem zwięzłym.

Pierwszy rozdział omawia strukturę pracy. Autor wyszczególnia główne wyniki rozprawy. Natomiast rozdział drugi jest elementarnym wprowadzeniem do tematyki promieniowania kosmicznego. Autor, skrótowo, omawia podstawowe własności mionów, ich sposób produkcji oraz oddziaływania z ośrodkiem, w którym się poruszają. Analiza mionów będących efektem oddziaływania promieniowania kosmicznego z górnymi warstwami atmosfery ziemskiej, rejestrowanych przez eksperyment KM3NeT, stanowi główną część przedłożonej rozprawy.

Rozdział trzeci opisuje eksperyment KM3NeT. Autor szczegółowo omawia mechanizm pomiaru sygnału świetlnego w detektorach czerenkowskich. Przedstawiona została architektura dwóch detektorów ARCA oraz ORCA. Na zakończenie rozdziału wprowadzono klasyfikacje mierzonych zdarzeń.

Rozdział czwarty omawia oprogramowanie, które jest używane przez eksperyment KM3NeT do symulacji propagacji promieniowania kosmicznego. W szczególności autor rozprawy zwraca uwagę

na program Corant, do którego wniósł szereg udoskonaleń oraz zajmuje się jego utrzymaniem. Ponadto autor wymienia program gSeaGen, który generuje zdarzenia neutrinowe na bazie danych wyjściowych generatora CORSIKA. Magister Kalaczyński jest autorem szeregu wkładów do tego programu, których szczegółowe omówienie znajdujemy w dodatku A.3. Projekt ten jest publicznie dostępny, a magister Kalaczyński jest jednym z trzech jego autorów.

Rozdział piąty zawiera omówienie prac autora, dotyczących opracowania algorytmu, bazującego na jednym z modeli uczenia maszynowego, który pozwoli oszacować energie pęku mionów, całkowitej energii cząstki pierwotnej oraz krotności mionów. Rozważona jest długa lista modeli, większość z nich znajdziemy w ogólnodostępnym pakiecie scikit-learn. Aby wybrać najlepszy z nich wprowadzone są dwie metryki: Pearsona oraz R-score. Ponadto dodatkowym kryterium jest szybkość z jaką wykonana została analiza. Przy każdym z trzech wymienionych zadań wybrane są najbardziej istotne cechy, z punktu widzenia celów analizy. Najlepszy model według autora dysertacji to LightGBM – Gradient Boosted Decision Tree opracowany przez Microsoft. Jest to model zoptymalizowany pod duże zbiory danych. Ten model, według autora, wydaje się lepiej rekonstruować energie mionu niż JMuon.

Warto podkreślić, że rozdział piąty zawiera oryginalne wyniki pracy autora, jednak jest napisany mniej staranie niż reszta rozprawy. Część rysunków, jak choćby 5.2.1, 5.2.2. jest nieczytelna, co utrudnia zrozumienie z jakiego rodzaju danymi wejściowymi dla sieci mamy do czynienia. Sekcja 5.1 wprowadza do metod uczenia maszynowego. Autor omawia główne rodzaje problemów rozwiązywanych przez systemy uczące się. O ile grupowanie ze względu na rodzaj zadania ma sens to, kategoryzacja ze względu na architekturę jest nieco myląca. Generalnie głębokie uczenie nie odnosi się do ilości warstw w strukturze grafu/modułu, a do procesu samego uczenia i związane jest z abstrakcyjnym procesem budowy przez system związku pomiędzy cechami elementarnymi i abstrakcyjnymi (od szczegółu do ogółu). Jeśli taki proces ma miejsce wówczas mówimy o głębokim uczeniu. Sekcja 5.1.2 zawiera długą listę rozważanych modeli. Zaskakuje zawarcie na tej liście algorytmu SGD, który nie nazwałbym modelem, a algorytmem optymalizującym. Lista zawiera modele, które mają różną genezę i ich użycie zależy od tego jak rozumiemy rozważane dane. Część z modeli dotyczy regresji liniowej a część regresji nieliniowej. Niektóre modele, jak choćby LassoLasrcIC, bazuje na podejściu bayesowskim, a zatem zawierającym modyfikacje, które zmniejszają tendencje modelu do przeuczenia. Model sieci neuronowej, w praktyce mógłby być używany z dowolną funkcją błędu, czy nawet ze skrojonym odpowiednim modelem np. bayesowskim. Model "Ensamble methods" może być zastosowany także do sieci neuronowych i modeli liniowych. Podsumowując, omówienie modeli uczenia maszynowego jest dość powierzchowne i wymaga szerszego wyjaśnienia tj. kiedy jaki model stosujemy co jest w modelu, ile jest parametrów i hiper-parametrów etc. Pamiętajmy, że część modeli została uzyskana z bardzo konkretnego modelu statystycznego, a inne mogą być przystosowane do zadanego modelu statystycznego. Stąd porównanie ilościowe modeli wydaje się dość ryzykowne.

W rozdziale szóstym znajdujemy porównanie wyników eksperymentalnych z symulacjami Monte Carlo. Wyniki tej analizy zostały opublikowane w pracach [10-14] wymienionych w bibliografii rozprawy. W rozdziale tym znajdziemy również wyniki dyskusji błędów systematycznych oraz omówienie przyjętej strategii wyboru zdarzeń.

Rozdział siódmy zawiera główne wyniki fizyczne otrzymane przez autora rozprawy. Autor przedstawia w nim procedurę ekstrakcji pęku natychmiastowych mionów. Wreszcie przedstawione są wyniki analizy czułości detektorów KM3NeT na pomiar natychmiastowych mionów. Wyniki tej części pracy opublikowano w artykułach [11] i [12]. Rozdział ósmy podsumowuje rozprawę.

Uwagi krytyczne

- Rozdział pierwszy wprowadza elementarne pojęcia ale brakuje w nim omówienia szerszego kontekstu prowadzonych badań. Dlaczego promieniowanie kosmiczne, w tym pomiar natychmiastowych mionów, jest ważne dla fizyki?
- Dość duża część rozdziału drugiego poświęcona jest własnościom neutrin. W szczególności autor poświęca jeden z podrozdziałów na omówienie zjawiska oscylacji. Nasuwa się zatem pytanie jak zjawisko oscylacji ma się do pomiarów mionów promieniowania kosmicznego, który jest przedmiotem rozprawy?
- Z przedstawionych w rozdziale piątym analiz można wywnioskować, że model np. liniowy jest równie dobry, jak ten wskazany przez autora rozprawy. Wybór tego pierwszego sugeruje choćby jego prostota. Jakie dodatkowe kryteria sprawiły, że model ten został odrzucony?
- Jakie jest uzasadnienie do użycia współczynnika korelacji Pearson'a i współczynnika determinacji R^2 (rozdział piąty) do klasyfikacji modeli? Czy te wielkości nie są zaprojektowane do testowania hipotez, a nie porównywania modeli? Czy dla każdego rodzaju modelu możemy stosować wymienione wielkości? Wydaje się, że kiedy mamy w przypadku dwóch modeli podobne wartości dla wprowadzonych metryk to stwierdzenie, że jeden jest lepszy od drugiego jest nieuprawnione.

Nie znalazłem większych uchybień co do redakcji pracy poza wspomnianymi w rozdziale piątym. Część dodatków jest może nazbyt pedagogicznie napisana (podano kolejne kroki w wyprowadzeniach) jak na rozprawę, jednak uznaję to za walor dydaktyczny pracy, który nadaje jej dodatkowej użyteczności.

Uwagi końcowe

Podsumowując, autor rozprawy wykazał się znajomością technik eksperymentalnych fizyki wielkich energii, oraz elementów statystyki. Jednym z ciekawszych osiągnięć jest opracowanie algorytmu, opartego na metodach uczenia maszynowego, który automatycznie rekonstruuje cechy pęku mionów (rozdział 5). Autor rozprawy ma istotny wkład do rozwoju oprogramowania KM3NeT (rozdział 4) oraz wykonał ważną dla eksperymentu analizę czułości detektorów (rozdziały 6 i 7).

Stwierdzam, że złożona rozprawa doktorska spełnia ustawowe i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim. Wnoszę o dopuszczenie magistra Piotra Kalaczyńskiego do dalszych etapów przewodu doktorskiego.