



Posudek oponenta diplomové práce

Student: Bc. Kateřina Hladká

Název práce: Supervizované a nesupervizované učení pro fyziku těžkých iontů
(Supervised and Unsupervised Learning for Heavy Ion Physics)

Předložená práce studentky Kateřiny Hladké se zabývá možnostmi využití strojového učení ve fyzice těžkých iontů, moderního fyzikálního oboru nacházejícího se na pomezí současné částicové a jaderné fyziky. Fyzika těžkých iontů se zabývá studiem vlastností kvarkovo-gluonového plazmatu (QGP), stavu jaderné hmoty, ve kterém se její elementární konstituenty, kvarky a gluony, nacházejí volné. QGP existovalo ve vesmíru krátce po Velkém třesku a v současnosti je možné jej studovat pouze pomocí velkých urychlovačů, které umožňují srážet ionty těžkých jader při ultra-relativistických energiích a vytvořit tak na velmi krátký okamžik tento unikátní stav jaderné hmoty. Energie potřebné ke studiu QGP jsou v současné době dosažitelné pouze na velkých urychlovačích, jakými jsou LHC v laboratoři CERN nebo RHIC v Brookhavenské národní laboratoři (BNL) v USA. Využití metod strojového učení v částicové fyzice probíhá aktivně již několik posledních let, avšak v oblasti fyziky těžkých iontů se jedná o relativně novou záležitost. Fyzika těžkých iontů se obecně zabývá hledáním často malého signálu na velkém fluktuujícím pozadí či studiem pozorovatelných závislostí na řadě dalších parametrů, a právě zde se očekává, že by strojové učení mohlo přinést vylepšení studovaného signálu a pozorovatelných oproti standardně používaným metodám. Diplomová práce je zaměřena na dvě témata, která jsou pro fyziku těžkých iontů zásadní. Jedním je detekce D mesonů obsahujících těžký kvark c , které vznikají na samotném počátku srážky a slouží jako důležitá sonda jaderné hmoty. Druhým tématem je studium povahy fázového přechodu QCD diagramu jaderné hmoty, který je velmi aktivně zkoumán na urychlovači RHIC.

Diplomová práce je rozdělena na stručný úvod, následovaný čtyřmi kapitolami a je završena shrnutím dosažených výsledků. V první kapitole je podána krátká motivace a úvod do studované problematiky. Domnívám se, že tato úvodní kapitola mohla být o něco delší a podrobnější. Kapitola obsahuje také pár nepřesností, které pravděpodobně souvisí s tím, že studentka nemá potřebné fyzikální znalosti. Jedná se o tvrzení na str. 8, že současné detektory nejsou schopné detekovat QGP, protože QGP existuje extrémně krátkou dobu. Toto tvrzení není správné, protože i sebelepší detektor by nebyl schopen přímo detekovat jednotlivé kvarky a gluony, protože to principiálně z povahy silné interakce popsané kvantovou chromodynamikou (QCD), vyznačující se tzv. uvězněním barvených nábojů, nelze. Dále je trochu neobratně popsána skutečnost a její demonstrace na Obr. 1.2, že všechny páry kaonů a pionů z rozpadu D mesonů se stejným znaménkem jsou pozadí.

V dalších dvou kapitolách studentka pěkně a relativně podrobně popisuje teoretické pozadí týkající se strojového učení se zaměřením na supervizované strojové učení (*Random Forest (RF)*, *hluboké neuronové sítě (DNN)*, *konvoluční neuronové sítě (CNN)*, *residuální neuronové sítě (RNN)*), resp. nesupervizované strojové učení. Jsou zavedeny všechny zásadní pojmy používané později v hlavní části diplomové práce, kterou tvoří Kapitola 4 a ve které studentka přehledným způsobem demonstruje a diskutuje výsledky vlastní vědecké práce. Tato práce se konkrétně týká rekonstrukce D mesonů na souboru simulovaných dat pro $d+Au$ srážky při energii 200 GeV a analýzy simulovaných dat určených pro studium QCD fázového



přechodu při energiích 27 a 200 GeV pro kinematickou oblast experimentu STAR na urychlovači RHIC. Oba typy datových souborů byly poskytnuty v rámci velmi cenné a úspěšně se rozvíjející spolupráce v této oblasti mezi Katedrou matematiky a Katedrou fyziky FJFI.

Pro studium rekonstrukce D mesonů byly nejprve provedeny testy homogenity pomocí Kolmogorov-Smirnovova testu, a to pro dvě verze pozadí signálu D mesonů a dva modely strojového učení (RF, DNN), které byly následně optimalizovány vzhledem na hodnotu AUC a jejich performance byla zvlášť vyhodnocena pro data obsahující pre-selekci D mesonů, resp. bez pre-selekce. Výsledky obou modelů jsou v práci porovnány také se standardně používanou metodou BDT (Boosted Decision Trees) implementovanou v rámci ROOT. Provedená studie ukázala, že použité modely vykazují lepší performance, když je použito pre-selekce D mesonů. Avšak v rámci daného přístupu (tj. ať už s pre-selekci nebo bez ní), jsou rozdíly mezi studovanými modely v závislosti na příčné hybnosti (p_T) D mesonů prakticky zanedbatelné, i když RF model dosáhl o něco lepší performance ve dvou nejnižších intervalech p_T . V druhé části Kapitoly 4 byla provedena studie na souboru dat z hydrodynamického modelu s fázovým přechodem prvního druhu, resp. na souboru s tzv. cross-over mezi dvěma fázemi. Bylo provedeno trénování CNN a detailně testován vliv parametrů jako centralita srážky, energie srážky či efekty hadronového přerozptýlení (rescattering). Klasifikační kvalita se ukázala být silně závislou na výběru velikosti intervalu centrality srážky. Použití konvoluční neuronové sítě proběhlo také s přidáním tzv. reziduálního bloku, což ale vedlo k nestabilitám a nižší výkonnosti modelu.

Práce je napsána srozumitelně, v anglickém jazyce s malým množstvím překlepů, i když občas se v práci objevují trochu neobratné formulace. Trochu škodou je, že při sepisování práce nebyla věnována náležitá pozornost grafické kvalitě některých obrázků. Některé obrázky jsou bohužel špatně čitelné kvůli malé velikosti fontu či dokonce dochází k překryvu dat v grafech s legendou v obrázku (např. v Obr. 4.1 až Obr. 4.6). U některých obrázků chybí číselný rozsah os a jednotky na osách. Toto opomenutí je zejména zásadní u obrázků, kde se na ose vyskytuje příčná hybnost p_T , protože není vůbec zřejmé, jaký rozsah p_T osa má (Obr. 4.15, Obr. 4.22 – 4.25). U obrázků, které mají na ose azimutální úhel ϕ , toto opomenutí sice až tak zásadní není a nebrání to čtenáři v orientaci, protože je zřejmé, že hodnoty na ose jsou v rozmezí 0 do 2π , nicméně čistě formálně i tam by měla být popiska hodnot na ose přítomna. V neposlední řadě jsou v Kapitole 4 místy citovány tabulky v jiném pořadí, než jsou očíslovány (Tab. 4.5 předchází v textu Tab. 4.1, Tab. 4.3 pak Tab. 4.2).

I přes výše uvedené připomínky, které jsou spíše formálního charakteru, jsem přesvědčena, že studentka zadané téma velmi dobře zvládla jak po teoretické, tak po praktické stránce a odvedla velký kus samostatné tvůrčí práce. Zadáání lze proto v plné míře považovat za splněné a předloženou diplomovou práci navrhuji hodnotit známkou **B** (velmi dobře).

V Praze dne 19. 5. 2021

RNDr. Jana Bielčíková, Ph.D.
Ústav jaderné fyziky AV ČR, v.v.i/
FJFI ČVUT v Praze



Otázky k obhajobě:

1. Vzhledem k relativně malému pozadí v d+Au srážkách nejsou možná pozorované výsledky, že se použité metody strojového učení pro identifikaci D mesonů (RF, DNN) moc neliší od běžnější metody BDT, až tak překvapivé. Plánujete prosím obdobné studium zopakovat na datech z Au+Au srážek, ve kterých je vliv pozadí podstatně větší a kde by zejména v centrálních srážkách s největším pozadím, mohly být vidět signifikantnější rozdíly?
2. Co se přesně myslí tvrzením v druhé části věty na str. 47 v prvním odstavci, cituji: „*In general, the higher the N value, the better was model's performance unless overtraining appeared, **although generalization techniques were introduced heavily***”. Můžete to prosím nějak blíže okomentovat?