

Oponentský posudek disertační práce „Measurement of the energy spectrum of cosmic rays using Cherenkov-dominated data at the Pierre Auger Observatory“, autor Vladimír Novotný.

Dizertační práce Vladimíra Novotného se zabývá měřením energetického spektra kosmického záření pomocí detektorů Observatoře Pierra Augera. Konkrétně se autor soustředí na měření událostí, které obsahují dominantní Čerenkovský signál měřený fluorescenčními detektory, s cílem proměřit spektrum kosmického záření v rozsahu zhruba $10^{15} - 10^{18}$ eV. Tento energetický rozsah nebyl dříve na observatoři měřen. Autor práce je hlavním autorem tohoto měření a v předložené dizertační práci dokumentuje, jak hardwarové pozadí, tak většinu kroků, které bylo při analýze dat nutné udělat. Konkrétně zejména použití nové rekonstrukční metody („profile constrained geometry fits“), výpočet veličiny osvit („exposure“), použití unfoldingu, odvození velikosti neměřené energie („invisible energy“) a výpočet systematických chyb spojených s měřením.

Dizertační práce diskutuje aktuální problematiku. Otázky po původu vysokoenergetického kosmického záření a po mechanismech urychlování nabitých částic v mezihvězdém či mezigalaktickém prostoru nejsou zdaleka zodpovězeny. Výsledky práce představují hodnotný původní příspěvek k prohloubení znalostí v dané oblasti fyziky.

Formální úroveň práce je velmi dobrá. Práce obsahuje pouze malé množství překlepů, chyb, či jiných formálních nedostatků (např. místo výrazu „Picture“ by bylo vhodné používat výraz „Figure“, i když se jedná o převzatý obrázek; zkratka CDAS není definována). Velmi pozitivně hodnotím členění práce – důležité technické detaily jsou odděleny do dodatků a neruší hlavní tok textu. Naopak v práci trochu postrádám rozvedení motivace a širší úvod do problematiky astročásticové fyziky.

Předložená dizertační práce dokazuje, že autor přispěl k řešení celé řady dílčích problémů v rámci výzkumu prováděném na Observatoři Pierra Augera, což je dokumentováno nejen touto prací, ale i vysokým počtem oficiálních technických zpráv uvnitř kolaborace, které autor práce spolu s kolegy sepsal a které jsou uvedeny v seznamu literatury.

K dizertační práci bych měl následující dotazy, které bych rád, aby autor zodpověděl:

- 1) V rovnici (2.19) figurují dva „atenuační faktory“ tau a T. Jak se tyto faktory určí? Jsou faktory T_i skutečně stejné pro (2.16) a (2.17), tedy nezávislé na vlnové délce? Pokud ano, proč je tau jiné než T? Na čem tyto faktory závi (úhel vletu, teplota a kvalita atmosféry (?)). Jak je tato korekce velká?
- 2) Jak vypadá profil (tj. rozdělení středních hodnot pro každý bin) obrázku 2.18, prosím? Lineární čára patrně znázorňuje fit. Je kalibrace skutečně lineární? Například pro N_{19} 2D rozdělení na menších energiích jako lineární nevypadá. Je případná odchylka od linearit zahrnuta v systematických neurčitostech? Myslím, že lepší by bylo snažit se parametrizovat profil.
- 3) Kdybychom rebinovali Pierre-Auger data na obr. 3.2 budou možná i tři sigma v nesouladu s extrakcí IceTop (očekáváním s X_{max} i s GSF modelem) i s daty z experimentu Yakutsk. Data vykazují systematicky vyšší "invisible energy" než MC (Obr. 3.1, 3.2, 3.3). Je toto diskutováno v kolaboraci a je snaha toto nějak vysvětlit?
- 4) Vztah (3.12), obrázky 3.9, 3.10. Osvit („exposure“) je charakterizován maticí A. Pokud je A diagonální, jak se tvrdí v textu, proč je na obrázku 3.10 pro R více mimo-diagonálních elementů, než na obrázku 3.9 pro M? Možná se jedná o problém volby škály na ose z. Pokud procesu dobře rozumím, exposure je vyhodnocena pomocí MC simulací (vztah (3.7)) jako funkce simulované energie. Rozdíl mezi rekonstruovanou energií a simulovanou energií se pro exposure zanedbává, neboť migrace je zde minimální (exposure se s energií nemění

- nijak prudce (obr. 3.6)) a A je pak diagonální. Je to tak?
- 5) Metoda forward folding je citlivá na rozdíl mezi tvarem generovaných spekter v MC a tvarem unfoldovaných reálných spekter. Zde je response hodně blízká diagonální, takže unfolding není složitý. Nicméně, proč Pierre-Auger nevyužívá např. iterativní Bayesovský unfolding implementovaný v softwaru RooUnfold, který ve vyšších iteracích koriguje na rozdíly mezi unfoldovaným a generovaným rozdělením? Tento přístup zároveň umožňuje udělat řadu ověření, že unfolding funguje dobře. Korekci na exposure by mělo být možné v tomto případě implementovat jako korekci na konečnou efektivitu. Dovolil bych si tvrdit, že většina experimentálních publikací v HEP fyzice používá unfolding (Bayesovský, nebo SVD, popřípadě i novější metody) a nikoliv forward folding.
 - 6) Nejdůležitější systematickou neurčitostí je "energy scale", která je zhruba 15% pro "Čerenkov-dominated" měření (Tab 3.3). Pro kombinované měření je pak tato neurčitost více než 30%. Nelze tuto limitující neurčitost zredukovat, např. identifikováním dalších korelovaných komponent? Proč vykazují všechny ostatní experimenty (Obr. 3.27) téměř řádově menší neurčitosti?
 - 7) Bude nízkoenergetické spektrum naměřené v této práci publikováno v odborném časopise? Jaký je plán?

Závěrem je nutné zdůraznit, že autor zjevně přispěl do rozvoje poznání v oblasti astročásticové fyziky, výsledky prezentoval na konferencích, některé ze svých výsledků publikoval v odborném časopise a dokázal, že je schopen samostatné vědecké práce. Předloženou práci celkově hodnotím jako velice kvalitní a doporučuji ji k přijetí.

doc. Mgr. Martin Spousta, Ph.D.
ÚCJF, MFF UK