

Prof. Michał Praszałowicz
Uniwersytet Jagielloński
Instytut Fizyki im. M. Smoluchowskiego
Zakład Teorii Cząstek

Kraków, dn. 1 maja 2018

Recenzja rozprawy doktorskiej
pana magistra Pawła Szczerbiaka
pt.:

*Własności ciemnej materii i ich związek z sektorem Higgsa
w wybranych uogólnieniach Modelu Standardowego*

Przedstawiona mi do oceny praca doktorska pana magistra Pawła Szczerbiaka z Instytutu Fizyki Teoretycznej Uniwersytetu Warszawskiego powstała pod kierunkiem profesora Marka Olechowskiego a dotyczy ważnego problemu współczesnej fizyki oddziaływań fundamentalnych, ale także i kosmologii, a mianowicie problemu ciemnej materii (ang. *dark matter*). Ciemna materia daje się zaobserwować jedynie poprzez efekty grawitacyjne wywierane na zgromadzoną w galaktykach materię obserwowalną bezpośrednio. Dane kosmologiczne wskazują, że ciemnej materii jest we Wszechświecie sześć razy więcej niż materii bezpośrednio obserwowalnej. Z punktu widzenia fizyki mikroskopowej ciemna materia powinna być składnikiem rozszerzonego Modelu Standardowego (MS) o bardzo ograniczonych oddziaływaniach ze zwykłymi cząstkami będącymi jego składnikami. Wynika to z ograniczeń doświadczalnych na przekroje czynne oddziaływania ciemnej materii z materią zwykłą w różnych rozszerzeniach MS. Autor w swojej rozprawie doktorskiej bada supersymetryczne rozszerzenia MS: tzw. minimalny model supersymetryczny (MSSM) i model NMSSM (ang.: *next to MSSM*) zawierający dodatkowe pole skalarne. Praca liczy 105 stron, podzielona jest na 7 rozdziałów, trzy dodatki oraz spis literatury zawierający 76 pozycji. Rozprawa napisana jest w języku polskim, ale oparta jest o trzy oryginalne angielskojęzyczne prace naukowe powstałe we współpracy z promotorem oraz dr. Marcinem Badziakiem, opublikowane we wiodących czasopismach fizycznych: *Journal of High Energy Physics* (2016 i 2017) oraz *Physics Letters B* (2017), a także o jedno doniesienie konferencyjne przedstawione przez pana Szczerbiaka na *18th International Conference From the Planck Scale to the Electroweak Scale*, Ioannina, Grecja z roku 2015. Zapowiadana we wstępie rozprawy praca oparta na wynikach rozdziału 6. dotyczącego gorącej ciemnej materii, wg mojego rozeznania jeszcze się nie ukazała. Wyżej wymienione prace są dobrze cytowane w literaturze, co świadczy o ich merytorycznym poziomie i wadze dyskutowanych problemów.

Dwa pierwsze rozdziały pracy: *Wstęp* oraz *Podstawy teoretyczne modeli MSSM i NMSSM* wprowadzają czytelnika w problematykę rozprawy. We *Wstępie* autor omawia pokrótce argumenty przemawiające za istnieniem ciemnej materii, supersymetryczne rozszerzenia MS, oddziaływanie ciemnej materii z sektorem Higgsa, a także przedstawia strukturę rozprawy i jej powiązanie ze wspomnianymi wyżej publikacjami. Szkoda, że nie pojawiły się już w tej części główne wyniki pracy i konkluzje, których niecierpliwy czytelnik musi szukać w rozdziale 7. czyli *Podsumowaniu pracy*, aby na tej podstawie podjąć decyzję, czy warto zająć się lekturą (uwaga ta oczywiście nie dotyczy recenzenta). Rozdział drugi zawiera podstawowe informacje dotyczące sformułowania modeli supersymetrycznych, definicje parametrów, transformacji pól, a także dyskusję wzorów na przekroje czynne oddziaływania ciemnej materii z nukleonami. Przekroje te wyrażają się przez różnicę zdefiniowanych wcześniej parametrów mieszania higgsin. W paragrafie po równaniu (2.38) doktorant – za autorami referencji [11] omawiającej kod numeryczny micrOMEGAs_3 – cytuje wartości parametrów przyjętych do obliczania w/w przekrojów czynnych. Trudno jednak ocenić skąd wzięły się te wartości, a nawet jaki mają wymiar (wymagałoby to podania normalizacji stanów $|N\rangle$).

Przedmiotem badań autora jest w gruncie rzeczy sprawdzenie, czy dany model ciemnej materii spełnia istniejące obecnie ograniczenia doświadczalne na gęstość reliktową i na przekroje czynne na oddziaływanie z materią zwykłą. Wymaga to określenia modelu (podanie składu, stałych sprzężenia, mas, etc.), znalezienia spektrum, czyli mas i parametrów mieszania w określonym reżimie kinematycznym poprzez rozwiązanie równań grupy renormalizacji, zastosowanie reguł Feynmana do obliczenia przekrojów czynnych i wreszcie rozwiązania równania Boltzmanna w celu obliczenia gęstości reliktovej. W praktyce przeprowadzenie tej procedury odbywa się przy pomocy rozwiniętych w literaturze kodów numerycznych. Do obliczenia spektrum autor używa kodu SuSpect z roku 2002 z późniejszymi poprawkami, który jest narzędziem powszechnie używanym (oryginalna praca z roku 2007 [18] pt.: *SuSpect: A Fortran code for the supersymmetric and Higgs particle spectrum in the MSSM* jest obecnie cytowana prawie tysiąc razy). W literaturze dostępne są inne kody tego typu: Isajest, SoftSusy, SPheno, SUPERHD, czy FlexibleSUSY. Ponieważ różne kody mogą dawać różne wyniki na spektra supercząstek warto byłoby zapoznać się z uzasadnieniem wyboru programu SuSpect. Z kolei do obliczenia gęstości reliktovej autor używa kodu MicroOMEGAs (opisanego w pracy [19] *micrOMEGAs_3: A program for calculating dark matter observables* z roku 2013, która cytowana jest prawie 500 razy). Tu wg mojej wiedzy istnieją także inne kody numeryczne jak DarkSUSY, IsaTools, MadDM czy SuperIso oraz SuperIso Relic. Podobnie jak w poprzednim przypadku nie znajdujemy uzasadnienia wyboru programu MicroOMEGAs, a także podobnego uzasadnienia użycia programu NMSSMTools, którym autor posługuje się w kilku miejscach rozprawy.

W rozdziale 3. *Dobrze dostrojone bino-higgsino w modelu MSSM* pan mgr Szczerbiak zajmuje się modelem, w którym supersymetryczni partnerzy bozonów W , tzw. wina są odsprężnione. Autor bada charakter najlżejszych cząstek supersymetrycznych (ang. *lightest*

supersymmetric particle: LSP), które są neutralne, sprawdzając jak dokładnie trzeba w takim modelu dostroić wolne parametry, aby uzyskać gęstość reliktową zgodną z doświadczeniem oraz aby przekroje czynne na oddziaływanie z nukleonami mieściły się w ograniczeniach eksperymentalnych. Doktorant konkluduje, że wybór bina (supersymetryczny partner bozonu B z grupy $U(1)$ niezłamanego MS) na LSP daje za dużą gęstość reliktową, zaś wybór higgsin za małą. Zatem LSP jest pewną mieszaniną bina i higgsina, a typ tego mieszania ilustruje rysunek 3.1. Maksymalna masa takiego LSP jest rzędu 1.1 TeV. Dalej autor dyskutuje przypadek ciężkiego (podrozdział 3.2) i lekkiego (podrozdział 3.3) skalaru H w kontekście wartości przekrojów czynnych na nukleonie. W tym pierwszym przypadku autor napotyka na ograniczenia stosowalności kodu SuSpect, z którymi sobie radzi przyjmując arbitralnie masy wszystkich skwarków jako 6 TeV. To ograniczenie, a także fakt, że w przypadku dużych mas stopów autor woli używać raczej kodu SUSYHD niż SuSpect, ponawia pytanie o uzasadnienie wyboru kodów numerycznych użytych w parcy. Fakt, iż w parametry spełniające ograniczenia doświadczalne w przypadku odsprzęgniętego H generują stopy o masach rzędu 25 TeV skłania autora do przebadania przypadku lekkiego H (niestety autor nie podaje, co to ilościowo znaczy; o ile dobrze zrozumiałem lekki skalar H odpowiada sytuacji, w której $m_H \approx m_A$, czyli kilkaset GeV). Tu analiza jest bardziej skomplikowana, gdyż trzeba brać pod uwagę szereg więzów dotyczących fizyki bozonu Higgsa. Niestety i w tym przypadku uzyskanie lekkich cząstek stop nie jest możliwe dla $m_A > 320\text{--}375$ GeV. Autor konkluduje ten rozdział podsumowaniem zawartym w podrozdziale 3.4, z którego wynika, że nawet po uwzględnieniu niepewności teoretycznych scenariusz dobrze dostrojonego *bina* i *higgsina* nie przechodzi testów doświadczalnych (poza bardzo wąskimi przedziałami parametrów, które jeszcze są dozwolone). To skłania go do rozważenia w następnym rozdziale modelu NMSSM, który dopuszcza małą wartość tangensa parametru β (stosunek wartości próżniowych dwóch pól Higgsa, które są konieczne w modelach SUSY), które w przypadku MSSM są wykluczone.

Najobszerniejszy, bo liczący 27 stron rozdział 4. *Analiza tzw. ślepych punktów w modelu NMSSM*, poświęcony jest „skanowaniu” przestrzeni parametrów różnych wersji modelu z dodatkowym superpolem skalarnym S w poszukiwaniu obszarów, gdzie niezależny od spinu przekrój czynny na rozpraszanie LSP na nukleonie zeruje się. Takie zbiory parametrów to właśnie *ślepe punkty*. Na niezależny od spinu przekrój czynny σ_{SI} oraz na zależny od spinu przekrój czynny σ_{SD} istnieją bardzo silne ograniczenia doświadczalne pochodzące głównie z podziemnego eksperymentu LUX (ang.: *Large Underground Xenon dark matter experiment*) umieszczonego w Południowej Dakocie, który pierwsze dane opublikował w roku 2017. Autor swoje wyniki porównuje także z przewidywaną czułością eksperymentu XENON1T umieszczonego w tunelu Gran Sasso we Włoszech oraz planowanego eksperymentu LZ w Południowej Dakocie. Ograniczenia te sięgają wartości 10^{-45} cm² dla σ_{SI} oraz 10^{-40} cm² dla σ_{SD} . Warto może dla ustalenia skali przypomnieć przykładowo, że całkowity przekrój czynny na produkcję cząstki Higgsa w LHC przy energii 7 TeV to około 10 pB czyli 10^{-35} cm².

Zidentyfikowanie *ślepych punktów* jest ważne, gdyż ze względu na w/w ograniczenia obszary dozwolonych parametrów układają się w ich sąsiedztwie.

W przypadku modelu NMSSM kandydatami na LSP są supersymetryczny fermionowy partner pola skalarnego S , tzw. *singlino* oraz *higgsino* lub ich mieszanka. W podrozdziale 4.1 autor prezentuje potrzebne mu do analizy formuły, definiuje użyteczne parametry oraz dyskutuje ich uproszczone formy w interesujących przypadkach granicznych. W podrozdziale 4.2 dyskutowane są ogólne warunki na *ślepe punkty*. Następne podrozdziały poświęcone są badaniu przestrzeni parametrów pod kątem różnych wersji modelu: bez efektów interferencyjnych w sytuacji braku mieszania między skalarami i z uwzględnieniem mieszania, gdzie autor wyróżnia przypadek czystych stanów LSP oraz mieszanek *singlino-higgsino*, z efektami wymiany cząstek h (bozon Higgsa) i H (supersymetryczny skalar) w przypadku bez mieszania z singletem oraz z uwzględnieniem mieszania, z efektami wymiany cząstek h i s dla różnych wartości tangensu β oraz w pewnym szczególnym uproszczonym przypadku dla macierzy mas neutralin. Jak z tego wyliczenia widać, wykonana przez doktoranta analiza jest bardzo szczegółowa i wymagała bardzo skrupulatnego przebadania przestrzeni parametrów ze zwróceniem uwagi na istniejące więzy (nie tylko na wspomnianą gęstość reliktową, której poświęcony jest następny rozdział, ale na przekroje czynne σ_{SI} i σ_{SD} oraz ze względu na więzy wynikające z fizyki cząstki Higgsa, czy warunku perturbacyjności modelu). Warto zauważyć, że przeprowadzona przez pana Szczerbiaka analiza oparta jest o wkłady drzewowe do przekrojów czynnych. Wiąże się to z tym, że poprawki pętlowe są znane tylko w prostych przypadkach, wówczas konkluzje dotyczące występowania *ślepych punktów* się nie zmieniają.

Z lektury rozdziału 4. widać wyraźnie, że autor opanował dostępne mu narzędzia numeryczne i umiejętnie zastosował je do analizy, która oparta jest na dużym wyczuciu skomplikowanego układu o wielu stopniach swobody, jakim jest konstrukcja wiarygodnego modelu ciemnej materii w modelu NMSSM. W ostatnim podrozdziale 4.6 pan Szczerbiak podsumowuje zwięźle wyniki analizy modelu NMSSM z punktu widzenia istnienia *ślepych punktów*. Być może najważniejszą konkluzją jest stwierdzenie, że w przyszłości badania oddziaływań zależnych od spinu będą odgrywały istotną rolę w ograniczaniu przestrzeni parametrów modelu.

Rozdział 5. *Ślepe punkty a gęstość relikтовая LSP typu singlino-higgsino w modelu NMSSM* stanowi kontynuację poprzedniego rozdziału, w którym szukano *ślepych punktów* bez narzucenia warunku na gęstość reliktową ciemnej materii. Poszczególne przypadki (a w każdym razie te najistotniejsze) z rozdziału 4 są przebadane pod tym kątem. Ogólna konkluzja, zawarta w podsumowaniu (podrozdział 5.4), sprowadza się do stwierdzenia, zresztą dość oczywistego, że narzucenie warunku na gęstość reliktową ogranicza przestrzeń dozwolonych parametrów modelu. Szczęśliwie, pozostaje jednak całkiem duży obszar, na razie dozwolony, „którego zbadanie wymaga większej czułości eksperymentów” (cytat z

rozprawy ze strony 73.). Zastanawia dość defensywne podejście autora do przyszłych wyników doświadczalnych. Zamiast wyrazić nadzieję, że przyszłe eksperymenty zobaczą ciemną materię, wydaje się być on przekonany, że wykluczą kolejny, znaczny obszar dozwolonych parametrów. Świadczy o tym choćby cytat ze strony 70.: „Proces ten pozwala uniknąć ograniczeń z LUX (...), ale nie jest wystarczająco silny, aby przesunąć σ_{SD} poniżej czułości XENONIT (...)”.

Rozważania przedstawione w rozdziale 5. potwierdzają bardzo dobrą orientację autora w skomplikowanym układzie zależności różnych obserwabli od doboru parametrów modelu. Bardzo podobało mi się porównanie wyników z symulacji numerycznych z wyrażeniami analitycznymi wyprowadzonymi przy założeniu pewnych uproszczeń. Tego typu analiza wskazuje, że autor rozumie skąd biorą się uzyskane numerycznie zależności. Pozwala to także na dość jasne rozważania jakościowe w różnych przypadkach, jak na przykład dyskusja wpływu lekkiego pseudoskalara na gęstość reliktową ciemnej materii na str. 63, czy dyskusja poniżej wzoru (5.16).

Zupełnie inny charakter ma rozdział 6 pt. *Gorąca materia w modelu S. Weinberga*, gdzie autor bada rozwiązanie równania Boltzmanna dla materii relatywistycznej stosując różnego rodzaju przybliżenia i testując ich wpływ na otrzymane wyniki. Główną motywacją jest tutaj nie tyle wkład gorącej ciemnej materii do gęstości reliktovej (który jest znikomy), tylko jej wkład do „ilości” promieniowania w okresie nukleosyntezy. Stąd taką ciemną materię nazywa się często ciemnym promieniowaniem. Jak autor argumentuje w podrozdziale 6.1, istnieją pewne przesłanki doświadczalne wskazujące na istnienie takiego promieniowania. Ilościową miarą jest tutaj przeliczenie wpływu ciemnego promieniowania na efektywną liczbę rodzajów neutrin N_{eff} , którą można oszacować analizując anizotropię promieniowania tła. Niestety wyniki doświadczalne obarczone są dużymi błędami systematycznymi. Jak podaje autor w podrozdziale 6.1 oszacowania na N_{eff} wahają się między 2.99 a 3.84 z błędami rzędu 10%. W tym kontekście pan mgr Szczerbiak przytacza model Weinberga, oparty na złamanej symetrii globalnej $U(1)$, w którym dodatkowy wkład do N_{eff} pochodzi od bozonu Goldstone’a i szacowany jest w literaturze na $\Delta N_{eff} \approx 0.39$. Celem rozdziału 6. jest „zweryfikowanie spotykanych w literaturze przybliżeń liczenia ewolucji termicznej bozonu Goldstone’a” (cytat ze strony 75).

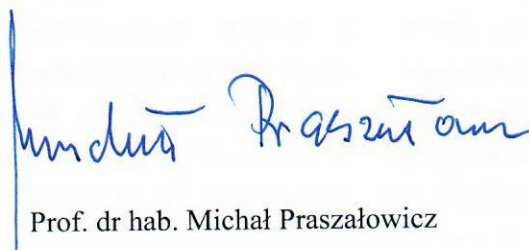
Po omówieniu w podrozdziale 6.2 równania Boltzmanna (rB) i wprowadzeniu istotnych zmiennych i oznaczeń oraz przedyskutowaniu sformułowania rB w przypadku statystyki Bosego-Einsteina, Fermiego-Diraca, czy uproszczonego modelu Maxwella-Boltzmanna, autor w podrozdziale 6.3.1 definiuje model Weinberga, dyskutuje przybliżenie natychmiastowego wymrażania (podrozdział 6.3.2) i wreszcie w podrozdziale 6.3.3 przedstawia rozwiązania rB. W konkluzjach tego rozdziału, przedstawionych w podrozdziale 6.4, autor zwraca uwagę, że przybliżenie natychmiastowego wymrażania na ogół przeszacowuje wartość ΔN_{eff} , zwraca uwagę na konieczność uwzględnienia w stanach końcowych anihilacji bozonów Goldstone’a

zarówno mionów jak i pionów oraz podkreśla zauważalne efekty pochodzące od uwzględnienia różnych statystyk. Uważam, że jest to bardzo ciekawa i kompletna analiza ukazująca nowe, w stosunku do poprzednich rozdziałów, umiejętności doktoranta.

Praca doktorska pana magistra Pawła Szczerbiaka jest zredagowana nadzwyczaj starannie. Znalazłem tylko dwie tzw. „literówki”. Bardzo użyteczne są podsumowania zawarte na końcu głównych rozdziałów rozprawy. Przygotowując rozprawę doktorską autor wykonał bardzo żmudne obliczenia numeryczne, porównał je z przybliżonymi obliczeniami analitycznymi, które pozwoliły mu na obszerną dyskusję jakościową otrzymanych wyników. W kilku miejscach pan Szczerbiak pisze *explicite*, że jakiś przypadek został sprawdzony czy przeliczony, choć szczegółowych wyników nie przytacza. Świadczy to o tym, że miał więcej materiału niż zamieścił w rozprawie. W rezultacie powstała bardzo solidna analiza pewnych szczególnych modeli ciemnej materii, która niewątpliwie będzie przedmiotem zainteresowania badaczy zajmujących się tą dziedziną.

W zasadzie, poza drobnymi uwagami zawartymi w tekście recenzji, nie mam jakichś zasadniczych uwag krytycznych. Oczywiście jest pytanie, na ile można poprzestać na przybliżeniu drzewowym stosowanym w pracy przy znajdowaniu *ślepych punktów*. Ale zdaję sobie sprawę, że wyjście poza to przybliżenie jest niezwykle trudne.

W konkluzji stwierdzam, że przedstawiona przez pana magistra Pawła Szczerbiaka rozprawa doktorska p.t. *Własności ciemnej materii i ich związek z sektorem Higgsa w wybranych uogólnieniach Modelu Standardowego* spełnia wszystkie wymagania stawiane pracom doktorskim i wnioskuję o dopuszczenie pana magistra Pawła Szczerbiaka do dalszych etapów przewodu doktorskiego.



Prof. dr hab. Michał Prasałowicz