



ul. Bartycka 18, 00-716 Warszawa
tel: (22) 841 00 41, (22) 3296 100
fax: (22) 841 00 46
email: camk@camk.edu.pl
<http://www.camk.edu.pl>

CENTRUM ASTRONOMICZNE IM. MIKOŁAJA KOPERNIKA PAN

Warszawa, 30 sierpnia, 2021

Wydział Fizyki
Uniwersytetu w Białymstoku,
ul. Ciołkowskiego 1L
15-245, Białystok

Recenzja rozprawy doktorskiej pod tytułem:

"Global Parameters of Quasars with anomalous electromagnetic spectrum"

autorstwa mgr. Marcina Marculewicza, napisana pod opieką

dr hab. Marka Nikołajuka

Rozprawa doktorska napisana przez pana Marcina Marculewicza prezentuje badania nad kwazarami należącymi do nielicznej klasy obiektów o słabych liniach emisyjnych (z ang. WLQ, Weak Emission-line Quasars). Na dzień dzisiejszy znamy około dwustu obiektów typu WLQ. P. Marculewicz zajął się analizą widmową tych kwazarów, a w szczególności wyznaczaniem ich globalnych parametrów z dopasowania modeli teoretycznych do obserwacji. Praca napisana jest w języku angielskim i zawiera analizę widm szerokopasmowych dziesięciu obiektów o podobnej naturze, oraz jednego szczególnego kwazara, który wykazuje znaczącą absorpcję – prawdopodobnie związaną ze źródłem, a na pewno nie związaną z absorpcją w naszej Galaktyce. Wyniki zawarte w rozprawie zostały opublikowane w dwóch artykułach, przy czym pierwszy w wysoko punktowanym czasopiśmie recenzowalnym – *The Astrophysical Journal*, a drugi jako doniesienie konferencyjne Polskiego Towarzystwa Astronomicznego, które też było ocenione przez niezależnego recenzenta. W obydwu publikacjach p. Marculewicz jest pierwszym autorem. Ponadto pan Marculewicz aktywnie uczestniczy w pracach konsorcjum CTA (Cherenkov Telescope Array), i jest współautorem czterech publikacji dotyczących tego przyszłego instrumentu, który będzie służył do obserwacji wysoko energetycznych cząstek i fotonów z kosmosu. Ciekawostką jest ostatnia praca prezentowana przez autora rozprawy, opublikowana w *Organic Letters*, dotycząca witaminy B12, co oznacza, że przeszedł on ze świata mikro do makro, prawdopodobnie przy zachowaniu tych samych narzędzi analizy.

Rozprawa doktorska pana Marculewicza składa się z siedmiu rozdziałów, przy czym pierwszy stanowi szerokie wprowadzenie do morfologii aktywnych jąder galaktyk, w tym kwazarów o wąskich liniach emisyjnych, następne dwa prezentują wyniki dopasowania widm próbki dziesięciu WLQs, a czwarty rozdział zawiera dyskusję tych wyników. Rozdział piąty przedstawia analizę wyjątkowego źródła, którego widmo odznacza się silną absorpcją. Autor podaje możliwe scenariusze powstawania tak silnej absorpcji w widmie ciągłym, zarówno przez masywny wiatr z dysku, jak i obecność galaktyk karłowatych na drodze do obserwatora. Przedstawione wyniki dyskutowane są w rozdziale szóstym, i w przyszłości mają ukazać się w formie publikacji naukowej. Końcowy rozdział siódmy zawiera ostateczne wnioski oraz przedstawia perspektywy i możliwe ścieżki badawcze dotyczące kwazarów typu WLQ.

Na wstępie recenzji pragnę zaznaczyć, że aktywne jądra galaktyk mają niesłychanie złożoną morfologię i do dziś dnia nie potrafimy wytłumaczyć fizycznego pochodzenia wielu obszarów emisji tych skomplikowanych źródeł. Wystarczy spojrzeć na rysunki: 1.1, 1.2, 1.6 i 1.7 rozprawy, aby zrozumieć od jak wielu czynników fizycznych gazu zależy ostateczny kształt widma, który trafia do obserwatora na Ziemi. Ponadto, strumień energii emitowanej przez różne obszary jest wielokrotnie absorbowany lub rozpraszany na materii, przy czym absorpcja w naszej Galaktyce skutecznie wycina najciekawszy obszar widma (optyka/UV) i dlatego od lat badania szerokopasmowego rozkładu widmowego (SED) kwazarów, są skrupulatnie prowadzone przez liczne grupy badawcze, zarówno w pozyskiwaniu danych, jak i w ich interpretacji. Dlatego wyzwanie podjęte przez p. Marculewicza, polegające na gromadzeniu danych specyficznej grupy obiektów jakimi są WLQs, oraz próba ich interpretacji stanowi dobrze postawiony problem badawczy, zasługujący na wyróżnienie tytułem doktora. Należy zaznaczyć, że autor rozprawy samodzielnie wykonał kilka ważnych kroków procedury analizy widmowej kwazarów, a mianowicie: 1) samodzielnie zgromadził obserwacje z różnych przeglądów nieba, 2) napisał program numeryczny modelujący widmo ciągle kwazara uwzględniając emisję z dysku akrecyjnego, z pyłowego torusa oraz światło z formujących się gwiazd, 3) policzył siatkę modeli dla szerokich przedziałów parametrów globalnych charakteryzujących typową aktywną galaktykę takich jak: masa czarnej dziury, tempo akrecji, spin czarnej dziury oraz nachylenie obiektu do płaszczyzny nieba, 4) i ostatecznie dokonał dopasowania modeli do obserwacji, co pozwoliło oszacować masę super-masywnych czarnych dziur w tych obiektach. Oszacowanie takiej masy czarnej dziury znajdującej się w aktywnej galaktyce jest niesłychanie pożądanym wynikiem, który pozwala zrozumieć ewolucję galaktyk w kontekście kosmologicznym. Niezwykle wartościowe jest, że autor przeszedł te punkty samodzielnie, co pozwoliło mu pozyskać umiejętności zarówno w pracy obserwacyjnej jak i teoretycznej. Ponadto stworzył nowe narzędzie obliczeniowe, z którego zapewne w przyszłości skorzystają inne grupy badawcze.

W pierwszej części rozprawy pan Marculewicz zbadał 10 obiektów typu WLQ. Zgromadził ich widma z różnych instrumentów od podczerwieni do dalekiego ultrafioletu. W tym celu musiał skorzystać z wielu katalogów publikowanych przez różne instrumenty. Program numeryczny napisał z uwzględnieniem emisji z dysku akrecyjnego wokół super-masywnej czarnej dziury. Taka emisja dobrze jest opisywana lokalnie przez widmo Plancka, przy czym całkowite widmo uzyskuje się po zsumowaniu natężenia promieniowania z różnych promieni pod różnym kątem patrzenia. Pan Marculewicz od razu założył, że czarna dziura rotuje, czyli przyjął rozkład temperatur z promieniem według modelu Novikov, Thorne (73). Te wzory są doskonale znane naukowcom badającym dyski akrecyjne, więc pod tym względem programowanie było dość oczywiste. Za nowatorskie uważam uwzględnienie w

programie dodatkowo emisji z wewnętrznego i zewnętrznego torusa, emisji z jasnych gwiazd oraz absorpcji fotoelektrycznej przez obszary międzygalaktyczne. To wszystko pozwoliło stworzyć model porównywalny z obserwacjami. Za nowatorskie uważam zastosowanie analizy bayesowskiej do zbadania przestrzeni parametrów, które najlepiej pasują do danych.

Ostateczne rezultaty dopasowania modelu do danych dziesięciu obiektów typu WLQ pozwoliły wyznaczyć masy czarnych dziur znajdujących się w centrach rozważanych kwazarów i pokazać jak korelują się one z masami wyznaczonymi metodą wyznaczania szerokości połówkowych (FWHM) linii emisyjnych (tak zwana metoda wirialna, równanie 1.1). Autor rozprawy skrupulatnie sprawdził, że jeśli kwazary mają silne linie emisyjne to obydwie metody: ta przez dopasowanie szerokopasmowych modeli emisji z dysku i ta wirialna, to jest przez pomiar szerokości połówkowych linii emisyjnych, dają dobrą zgodność, co ilustruje rysunek 3.2. Jednak jeśli mamy do czynienia z kwazarami o słabych liniach emisyjnych, to metoda wirialna wyznacza masy za małe, czyli ich nie doszacowuje. To niesłychanie ważny wniosek, który pokazuje, że w przypadku WLQ, linie są za słabe, aby przy ich użyciu wyznaczać masę centralnej czarnej dziury napędzającej te kwazary. W rezultacie pan Marculewicz podał jak musi zmienić się wzór 1.1 (wirialny), aby miał on zastosowanie dla WLQ.

Następnie pan Marculewicz podjął się analizy jak otrzymany wynik zależy od kąta nachylenia tych skomplikowanych obiektów. Niestety, ja od lat badam atmosfery dysków akrecyjnych i w jednej z moich prac pokazałam, że zależność kątowa stosowana przez pana Marculewicza jest prawidłowa tylko wtedy jeśli mamy sam dysk akrecyjny. Wówczas wystarczy zastosować pomnożenie strumienia przez $\cos(i)$ (lub \sin w zależności od tego czy kąt polarny, czy 90-polarny). W przypadku dodatkowego obszaru emisji cała procedura całkowania po powierzchni widzianej pod danym kątem nie sprowadza się tylko do pomnożenia przez $\cos(i)$, ale powinno się uczciwie zsumować emisję po powierzchni. Natomiast, wiem, że dla wygody, nie stosuje się takiego sumowania i dlatego można prosto określić kąt patrzenia. Ja natomiast nie zgadzam się z taką procedurą dlatego nie skomentuję tych wyników. Niemniej ostatecznie, pan Marculewicz dochodzi do wniosku, że rozmiar obszaru formowania się szerokich linii emisyjnych (BLR) ma większe znaczenie niż nachylenie całego źródła, zwłaszcza w przypadku WLQs, więc sprawa nachylenia nadal pozostaje nie rozstrzygnięta.

W drugiej części pracy, pan Marculewicz zajął się ciekawym obiektem znajdującym się w konstelacji Ursa Majoris i wykazującym w swoim widmie wyjątkowo głęboką absorpcję. Jest to kwazar na średnim przesunięciu ku czerwieni, $z=1.9$ i o znanej ekstynkcji w jego kierunku. Autor skoncentrował się na poprzednim wyznaczeniu masy tego obiektu, która okazała się nadzwyczaj duża $\log(M_{\text{BH}})= 11.2$ w jednostkach mas Słońca. Przedstawił kilka propozycji jak można wymodelować tę znaczącą absorpcję, a w szczególności zbadał model dysku akrecyjnego podzielonego na wewnętrzny gorący przepływ zwany koroną, i zewnętrzny chłodny przepływ będący tradycyjnym dyskiem akrecyjnym lub przykrytym ciepłą skórą. Całą analizę pan Marculewicz przeprowadził przy użyciu programu XSPEC, który przeważnie używany jest do analizy danych rentgenowskich. Ale wnioskuję z tego, że modele użyte do analizy z gorącą koroną i ciepłą skórą są dostępne tylko w XSPECu i dlatego pan Marculewicz zdecydował się nauczyć tego programu. Obydwa sposoby wyznaczenia masy, to jest przy użyciu modelu QSOSED oraz AGNSED (przy czym ten drugi ma więcej parametrów swobodnych, w tym rozmiary korony i skóry), dały o dwa rzędy wielkości masę mniejszą od tej wyznaczonej wcześniej przez inną grupę badawczą. Różnica

jest olbrzymia i zaskakująca, bo daje do myślenia czy dobrze rozumiemy ten obiekt. Niemniej pragnę nadmienić, że użyte przez pana Marculewicza modele AGNSED nie tłumaczą natury korony i gorącej skórki. One tylko pokazują, że dopuszczają istnienie takich obszarów emisyjnych, co jest niesłychanie użyteczne w przypadku obiektów wykazujących emisję rentgenowską. W obecnej pracy pan Marculewicz nie korzysta z danych rentgenowskich, wobec tego niewiele może o tych obszarach powiedzieć. Mam uwagę edytorską do rysunków 5.6 i 5.7. Oś pozioma powinna być w jednostkach długości fali, tak jak wszystkie pozostałe rysunki przedstawiające widma w rozprawie. To jest tylko jedna komenda w XSPECu, a znacznie ułatwiłaby porównanie zakresów widm między sobą na różnych rysunkach.

W rozdziale szóstym pan Marculewicz przedstawia różne scenariusze absorpcji, która mogą zachodzić na drodze do obserwatora, ale jego wnioski nie są jednoznaczne. Pasuje zarówno scenariusz chmurki emitujących słabe linie magnezu i węgla jak i karłowate galaktyki ustawione kolejno między chmurkami. Autor szeroko analizuje również scenariusze opracowane przez inne grupy badawcze i uczciwie przyznaje, że trudno wyciągnąć obiecujące wnioski na podstawie jednego obiektu. Na koniec rozdziału obiecuje, że znajdzie więcej podobnych obiektów i podda ich podobnej analizie. Wnioski oparte na większej próbie na pewno będą bardziej wiarygodne. Do tego rozdziału mam tylko uwagę, że relacja pomiędzy EW (szerokością równoważną) a N_j (gęstością kolumnową jonu) jest znana z teorii atmosfer i nazywa się krzywą wzrostu. W reżimie ośrodka optycznie cienkiego ma ona liniowy charakter, ale gdy tylko przechodzimy do ośrodka grubego optycznie, krzywa wzrostu zakrzywia się i następuje saturacja. Wówczas szerokości równoważne robią się takie same lub bardzo podobne dla szerokiego zakresu gęstości kolumnowej absorbującego jonu. Ponadto należy pamiętać, że w analizie przedstawionej przez pana Marculewicza, można tylko wyznaczyć gęstości kolumnowe poszczególnych jonów, a nie całego ośrodka. Żeby wyznaczyć całkowitą gęstość kolumnową absorbującej materii, musimy znać parametr jonizacyjny i metaliczność charakterystyczną dla wszystkich pierwiastków zawartych w gazie, a nie tylko dla konkretnego jonu. Dlatego tytuł „The column density of J1105” jest zbyt daleko idący, bo autor takiej gęstości kolumnowej całego ośrodka nie wyznaczył.

Podsumowując, rozprawa doktorska p. Marculewicza przedstawia interesujące wyniki oparte na analizie widmowej kwazarów o słabych liniach emisyjnych. Autor oszacował masy wszystkich analizowanych obiektów i porównał je do wcześniejszych wyznaczeń otrzymanych przez inne grupy badawcze. Pokazał, że w przypadku WLQs metoda wiralna zaniża masę czarnej dziury o czynnik 4-5. Zaproponował korektę formuły wiralnej użyteczną w przypadku kwazarów o słabych liniach emisyjnych. Przeprowadzona analiza pozwoliła mu wnioskować, że linie są słabe ponieważ emitowany gaz jest przesłonięty przez dodatkowy materiał znajdujący się na linii widzenia, tak zwany „shielding gas”. Czyli widmo ciągłe pozbawione jest znacznej ilości fotonów, które potem nie są w stanie wzbudzić linii emisyjnych w BLR. Pan Marculewicz pokazał, że metoda znajdowania masy czarnej dziury z dopasowania widma ciągłego daje poprawne rezultaty w przypadku WLQs, a sama metoda pozwala ocenić parametry globalne tych obiektów. Wszystkie te rezultaty dają interesujący wkład w wiedzę o kwazarach, a plany na przyszłość przedstawione przez autora w rozdziale siódmym są bardzo ambitne.

Moja największa uwaga krytyczna tej rozprawy dotyczy strony edytorskiej. Pan Marculewicz ma bardzo specyficzny sposób pisania, który odznacza się bardzo niską precyzją. Ja rozumiem, że temat jest trudny i złożony, ale autor wielokrotnie dotyka bardzo

poważnych i trudnych tematów nie pisząc o nich do końca. Często musiałam zgadywać „co autor miał na myśli”. Na początku bardzo mnie to raziło, ale po jakimś czasie zrozumiałam, że pan Marculewicz inaczej nie umie i pewnie umiał nie będzie. Prawdopodobnie on sam nie odczuwa potrzeby bycia bardziej precyzyjnym i ja osobiście nie podejmuję się mu tłumaczyć jakie to jest ważne. Poniżej przedstawiam tylko nieliczne usterki edytorskie, które spowodowały, że poważnie zastanawiałam się, czy autor rozumie o czym pisze. Ale po przeczytaniu całej pracy jestem przekonana, że pan Marculewicz wszystko doskonale rozumie tylko opowiadanie o tym precyzyjnie i to w języku angielskim sprawia mu wyraźnie trudność. Oto niektóre rażące niedopatrzenia:

- Nieustannie brak referencji do ważnych odkryć na przykład „Unified Model”, kto go zaproponował?
- Sporządził Pan listę akronimów, która jest niepełna. I to nie, żeby brakowało jednego, ale brakuje wielu akronimów użytych w pracy np.: LBQS, SDSS, BB, ISM, GALEX, ICO, PG i innych.
- W kluczowych momentach warto konkretnie wyrażać się ilościowo, jeśli słabe linie i definiujemy taką klasę obiektów to jak słabe są te linie i których linii to dotyczy.
- Nie używa się „spectrum index” tylko „spectral index”.
- Najpierw zależność potęgowa jest przedstawiona w długościach fali, a za chwilę w częstotliwościach. Trzeba się chwilę namęczyć, żeby sobie to policzyć.
- Podpis pod rysunkiem 1.5 bardzo dziwny, ja rozumiem, że source dotyczy źródła tego rysunku, ale dlaczego są dwa?
- Brak wytłumaczenia co oznacza parametr R_{sey}
- Często czasowniki mają formę simple present, a powinny mieć simple past, bo autor pisze o dokonaniach innych grup badawczych.
- Czy weak line oznacza, że szerokość linii < 10 Angstromów?
- „lower than in normal AGNs” co dla autora oznacza normal AGNs?
- Index AlphaOX jest indexem, a nie nachyleniem widma potęgowego, ale ja wiem, że autor to rozumie tylko jest niefortunnie zapisane.
- Przeważnie zakłada się, że prędkość BLR jest Keplerska, a autor o tym wcale nie pisze.
- „perfect blackbody approximation” to jest założenie autora tej rozprawy, w rzeczywistości powinien być policzony transfer promieniowania przez atmosferę dysku.
- Konfuzja oznaczeń, dwa razy użyty parametr x_0 w dwóch różnych znaczeniach, strona 21 i 31.
- Dwa razy zdefiniowana funkcja Plancka, strona 22 i 32, przy czym dopiero za drugim razem są podane znaczenia wszystkich parametrów.

- Definicja kąta nachylenia dysku powinna wskazywać w którą stronę mierzymy ten kąt: czy od osi obrotu w stronę płaszczyzny równikowej czy odwrotnie.
- Powinno być wytłumaczenie co oznacza „single-epoch method”.
- Tabela 2.2 jest cytowana najpierw, a potem tabela 2.1, a powinno być na odwrót według numeracji.
- Co oznacza „emission redshift of the source” - powinno być wytłumaczone.
- Na stronie 30 autor posługuje się natężeniem promieniowania, a potem strumieniem. Nie jest jasne co jest w jego programie.
- Brak opisu programu, który autor napisał sam.
- Szara linia oznacza widmo na rysunkach w rozdziale drugim, ale co oznaczają szare punkty?
- Brak wytłumaczenia jak autor robi dopasowanie poza programem XSPEC?
- Gdy liczona jest emisja z AD, to jaki zakres promieni jest rozważany – nigdzie nie ma tej informacji.
- Rysunki nie pokazują jak pracuje metoda dopasowania, rysunki pokazują finalne rezultaty.
- Bardzo martwi mnie wysokie χ^2 około 5 i takie też jest akceptowane przez autora.
- Co oznacza ndf w podpisie pod rysunkiem 5.6.
- Nie ma wytłumaczonego pomiaru rewerberacji dla kwazarów. Na czym on polega i dlaczego jest istotny.
- Rozumiem, że wszystkie ćwiczenia na wprowadzenie „shielding gas” były robione przez inne grupy badawcze, bo nie zauważyłam, żeby autor rozprawy gdzieś to ilościowo sprawdził. Czy gdzieś był dopasowany „covering factor”?
- W podpisach pod rysunkami nie ma napisane skąd pochodzą dane np.: rys. 5.1
- Na stronie 68 autor pisze, że przebudował program, ale nie pisze który program.
- Na stronie 73 autor nagle pisze o „color temperature correction” nie tłumacząc co to znaczy.
- Co znaczy zdanie na stronie 77 „reprocess is ON”
- Dlaczego są inne jednostki parametrów Gaussa w układzie obserwatora i w źródle (strona 80)?

Reasumując, kwazary mają duże znaczenie pod względem kosmologicznym. Ich badania pomagają nam zrozumieć ewolucję galaktyk, a w szczególności badania wypływów zjonizowanego gazu z ich środka dostarczają nam istotnych informacji o procesie wymiany materii pomiędzy galaktykami a obszarami międzygalaktycznymi (tak zwane z ang. galaxy

feedback). Dlatego wyniki przedstawione w tej rozprawie uważam za cenne, zwłaszcza, że dotyczą szczególnej klasy obiektów jakimi są WLQs. Podsumowując, pomimo licznych usterek edytorskich uważam, że rozprawa doktorska mgr Marcina Marculewicza spełnia formalne i zwyczajowe wymogi stawiane rozprawom doktorskim i na tej podstawie wnioskuję do Rady Wydziału Fizyki Uniwersytetu Białostockiego o dopuszczenie jej do dalszych kroków niezbędnych do nadania panu Marculewiczowi tytułu doktora.

Z poważaniem

Prof. dr hab. Agata Różańska