

---

## Streszczenie

*(Abstract in Polish)*

Aktywne jądra galaktyk (ang. Active Galactic Nuclei - AGN) są jednymi z najjaśniejszych źródeł obserwowanych we Wszechświecie - potrafią być o 12 - 15 rzędów wielkości jaśniejsze niż Słońce. W swoich jądrach kryją supermasywne czarne dziury o masach szacowanych na milion do dziesięciu miliardów mas Słońca. Głęboka jama potencjału grawitacyjnego w pobliżu czarnych dziur sprawia, że płynąca w stronę czarnej dziury materia nagrzewa się i świeci niezwykle jasno. To zjawisko pozwala na obserwować aktywne jądra galaktyk i ich najbliższe otoczenie. Kwazary - klasa najjaśniejszych AGN - mogą być obserwowane z ogromnych, kosmologicznych odległości, i mogą służyć jako doskonałe, jeszcze nie w pełni doceniane, znaczniki tempa ekspansji Wszechświata. Analiza kilku wzajemnie powiązanych zagadnień dotyczących kwazarów, przedstawiona w niniejszej rozprawie, ułatwi później wykorzystanie kwazarów w kosmologii i lepsze zrozumienie ich związku z ewolucją galaktyk.

Materia opadająca pod wpływem grawitacji w stronę supermasywnej czarnej dziury stopniowo traci posiadany moment pędu. To prowadzi do formowania dysku akrecyjnego wokół czarnej dziury, co sprawia, że obiekty te są dalekie od sferycznej symetrii. Akreująca materia dysku nagrzewa się i świeci. Energia powstałych fotonów rozciąga się od bliskiej podczerwieni do nadfioletu i zakresu rentgenowskiego, a promieniowanie to oświetla materię otaczającą dysk akrecyjny. To zjawisko prowadzi do powstawania silnych i szerokich linii emisyjnych. Rozmiar tego obszaru, zwanego obszarem szerokich linii emisyjnych (ang. Broad Line Region - BLR), waha się od kilkudziesięciu do kilku tysięcy promieni grawitacyjnych.

Te szerokie linie emisyjne pozwalają na pomiar masy centralnej supermasywnej czarnej dziury i leżą u podstaw wykorzystania kwazarów do zastosowań kosmologicznych. Pełnią też kluczową rolę w szacowaniu parametrów silnika centralnego i w badaniach statystycznych, które pomagają rozwiązać problem obserwowanej różnorodności w AGN. Część z tych linii powstaje w materii wypływającej z dysku akrecyjnego, o wysokim stopniu jonizacji, linie te określane są jako linie o wysokim potencjale jonizacyjnym (ang. High Ionization Lines - LIL, potencjał jonizacyjny  $IP > 50$  eV). Z drugiej strony, obserwuje się też bardzo silne linie emisyjne z pierwiastków o niskim poziomie jonizacji ( $IP < 50$  eV), powstające w mniej zjonizowanym ośrodku. Te określamy jako linie o niskim potencjale jonizacyjnym (ang. Low Ionization Lines - LIL). W przedstawionej dysertacji skupiam się na liniach o niskim potencjale jonizacyjnym, które prowadzą do bardziej wiarygodnych pomiarów mas czarnych dziur.

Kształty linii emisyjnych, ich względne intensywności i szerokopasmowe wskaźniki widmowe obiektów prowadzą do złożonej klasyfikacji kwazarów. Analiza głównych składowych (ang. Principal Component Analysis - PCA) - technika redukcji wymiarowości, pozwoliła na wydobycie znaczących informacji z dużych zbiorów danych zawierających różne populacje kwazarów. Wyraźny efekt pojawia się przy analizie tak zwanej płaszczyzny optycznej, tworzonej przez parametr względnej intensywności  $Fe\ \Pi\lambda 4570$  (znanego również jako  $R_{FeII}$ ) i pełną szerokość połówkową linii  $H\beta$  (ang. Full Width Half Maximum - FWHM). Punkty obserwacyjne umieszczone na tej płaszczyźnie wykazują silną antykorrelację, a efekt jest znany jako ciąg główny kwazarów. Ten ciąg główny kwazarów jest pewną analogią diagramu Hertzsprunga-Rusella. Gwiazdny ciąg główny na diagramie Hertzsprunga-Rusella jest łatwy

---

do zrozumienia, ponieważ gwiazdy charakteryzują się przede wszystkim masą, gdy pominiemy ich stadium ewolucyjne. W przeciwieństwie do gwiazd, kwazary są znacznie bardziej złożone. Ich wygląd jest określony przez masę czarnej dziury, szybkość akrecji, spin i ich kąt nachylenia do obserwatora.

Pierwsza kwestia to próba głębszego zrozumienia, dlaczego tak złożone obiekty tworzą niemal jednoparametrową rodzinę w płaszczyźnie optycznej. Dlatego przedstawiam model motywowany fizycznie, który może wyjaśnić własności tych linii emisji. Model ten uwzględnia podstawową geometrię aktywnego jądra, w tym masę czarnej dziury, promieniowanie z dysku akrecyjnego otaczającego czarną dziurę z uwzględnieniem gorącej korony oraz obłoku gazu reprezentującego BLR w odpowiedniej odległości od środka układu. Ta zjonizowana chmura gazu BLR pochłania promieniowanie i ponownie emituje w postaci linii emisyjnych które są następnie obserwowane w widmie. Transfer promieniowania w ośrodku rozwiązuje się w celu uzyskania współczynników emisji i szerokości kinematycznej linii odzwierciedlającej ruch chmury emitującej linię. Wyniki otrzymane z modelu są następnie porównywane z dostępnymi pomiarami linii emisyjnych w  $\sim 1$  milionie kwazarów z publicznie dostępnych katalogów kwazarów. Model pomyślnie odtwarza istnienie ciągu głównego kwazarów. Zadanie nie było jednak całkiem proste. W szczególności, obliczenia emisji jonów żelaza w zakresie optycznym wymagają wzięcia pod uwagę modelu atomu zawierającego 371 poziomów energetycznych i 68 535 przejść atomowych. Obliczenia pokazują, że model dobrze odtwarza obserwowane własności kwazarów, jeśli weźmie się również pod uwagę złożoną zależność między składem chemicznym a gęstością chmur BLR z tempem akrecji materii. Im wyższe tempo akrecji, tym więcej pierwiastków, takich jak żelazo, musi charakteryzować dany obiekt. Ten efekt jest po raz pierwszy pokazany w pracy Panda et al. (2018) poprzez systematyczne modelowanie teoretyczne widm galaktyk aktywnych.

Wyniki opublikowane w pierwszej pracy wymagały jednak dalszych badań. W kolejnej pracy dołączam również do modelu dodatkowy składnik widmowy - ciepłą koronę - wewnętrzny ciepły obszar komptonizujący, odpowiedzialny za powstawanie obserwowanej nadwyżki miękkiego promieniowania rentgenowskiego (Panda et al., 2019a), a następnie uwzględniam rolę kąta, pod jakim obserwujemy AGN (Panda et al., 2020a; Panda et al., 2019c). Analizując konsystentnie kąt widzenia i odpowiadające mu rozmieszczenie chmur BLR, potwierdzam zależność ciągu głównego kwazarów od stosunku jasności do jasności Eddingtona i pozostałych trendów obserwacyjnych powiązanych z kształtem kontinuum jonizującego, gęstością chmur i ich składem chemicznym. To pozwala mi stwierdzić, że kwazary o różnych właściwościach występują w różnych częściach ciągu głównego kwazarów. W szczególności, kwazary o bardzo silnej emisji w pasmie żelaza akreują w tempie bliskim granicy Eddingtona, i widziane są pod stosunkowo małymi kątami. Źródła te mogą służyć jako „normalizowalne” świece standardowe do badania rozszerzania się Wszechświata.

Emisja Fe II jest obserwowana od ultrafioletu do bliskiej podczerwieni i działa jako jeden z głównych mechanizmów chłodzenia BLR. Jednak złożona struktura elektronowa Fe II ze względu na zróżnicowane mechanizmy wzbudzenia utrudnia modelowanie atomu. W końcowych rozdziałach pracy badam właściwości i lokalizację obszaru LIL z wykorzystaniem emisji trypletowej NIR Ca II zamiast emisji Fe II. W pierwszej części tej serii (Panda et al., 2020b) potwierdzam obserwowaną korelację między intensywnością Fe II i Ca II i testuję różne parametry fotojonizacji z uwzględnieniem (a) parametru jonizacji, (b) gęstości chmury, (c) metaliczności, oraz (d) gęstości kolumny. W badaniach modelowych odtwarzam obserwowaną liniową, prawie jeden do jednego zależność między emisją tych jonów. W

---

drugiej części (Panda, 2020) otrzymuję syntetyczne wartości szerokości równoważnych (ang. equivalent width - EW) dla obu jonów z uwzględnieniem oczekiwanych frakcji pokrywających charakterystycznych dla obszaru BLR i odtwarzam pokrywanie się ich obszarów emisji. Ta praca podkreśla również rolę metaliczności i rozmiarów chmur w modelowaniu akreujących kwazarów, a dodatkowo uwzględnienie mikroturbulencji pozwala ograniczyć wymagana zawartości metali w BLR przy odtwarzaniu odpowiedniego poziomu emisji Fe II.

Zbiór prac zawartych w tej rozprawie wykazał, że (i) obszary szerokich linii emisyjnych galaktyk aktywnych mają prawie uniwersalną gęstość lokalną, (ii) istnieje sprzężenie między stosunkiem Edingtona a zawartością metali w tych zjonizowanych mediach, która potwierdza koewolucję galaktyki macierzystej i aktywnego jądra oraz (iii) kwazary mogą służyć jako godne zaufania mierniki kosmologiczne do badania ekspansji naszego Wszechświata.