

Podsumowanie pracy dyplomowej

Panchromatyczne modelowanie rozkładu energii widmowej jasnych galaktyk podczerwonych

napisanej przez

Subhrata Dey

Dziedzina formowania i ewolucji galaktyk przeszła rewolucyjną transformację w ciągu ostatnich dwóch dekad, ułatwioną przez obfitość danych zebranych z wielofalowych pomiarów fotometrycznych i spektroskopowych. Te obserwacje odgrywają kluczową rolę w zrozumieniu historii formowania gwiazd we Wszechświecie, określaniu przesunięcia ku czerwieni pierwszych proto-galaktyk oraz śledzeniu procesów ewolucyjnych małych składników w masywne galaktyki obserwowane dzisiaj.

Te procesy ewolucyjne pozostawiają ślad na globalnym i szczegółowym kształcie widma, każdy dominujący w różnych długościach fali. Emisja z galaktyk od γ -promieni do długości fal radiowych jest wynikiem złożonego fizycznego oddziaływania między ich głównymi składnikami barionowymi: gwiazdami wszystkich wieków i ich resztkami; gazem molekularnym, atomowym i jonizowanym; pyłem; oraz supermasywnymi czarnymi dziurami. Całościowe podejście do dystrybucji energetycznej widma (SED) we wszystkich zakresach długości fali, a więc modelowanie, jest niezbędnym narzędziem do poszerzenia naszego zrozumienia ewolucji galaktyk.

W tej pracy skoncentrowaliśmy się na zapełnieniu luki między modelowaniem SED od ultrafioletu (UV) do podczerwieni (IR) a modelem SED od długości fal radiowych, które tradycyjnie były prowadzone niezależnie. Poprzez jednoczesne uwzględnienie tych dwóch reżimów, uchwyciliśmy wzajemne powiązania zachodzących procesów fizycznych i zyskaliśmy bardziej holistyczne zrozumienie ewolucji galaktyk. Dodatkowo, przeprowadziliśmy modelowanie SED tylko dla fal radiowych, korzystając z gęsto próbkowanych widm radiowych, co tradycyjnie było wykonywane albo uwzględniając częstotliwości powyżej 1,4 GHz, pomijając niższe częstotliwości, albo korzystając z prostych modeli fizycznych z niewielką liczbą swobodnych parametrów.

Aby się temu przeciwstawić, wprowadziliśmy do naszego modelowania SED podejście fizycznie uzasadnione, które uwzględnia procesy absorpcji przy niskich częstotliwościach wraz z złożoną naturą ciągłego widma radiowego, rozważając scenariusze, w których emisja pochodzi z jednego lub dwóch odrębnych obszarów, charakteryzowanych przez populacje elektronów promieniowania kosmicznego (CRe) i zmienny stopień optyczny.

Do badania wybraliśmy klasę galaktyk znanych jako jasne galaktyki podczerwone. Jasne i ultrajadne galaktyki podczerwone (U/LIRGs) są najbardziej ekstremalnymi galaktykami o dużej intensywności

formowania gwiazd, i są one głównie wywoływane przez oddziaływania i łączenie się gazowo-bogatych galaktyk. Odgrywają one kluczową rolę, zwłaszcza w wyższych przesunięciach ku czerwieni. U/LIRGs są głównymi contributorami do gęstości szybkości formowania gwiazd w Wszechświecie przy $z > 1$, co czyni je niezwykle ważnymi źródłami do badania formowania i ewolucji galaktyk.

Dalej, główna emisja podczerwona w tych galaktykach wynika z ciepłego pyłu podgrzanego przez aktywne jądra galaktyk, wybuchy gwiazdowe z powodu głównych połączeń, lub oba, korelując dobrze z powszechnie akceptowanym obrazem ewolucji, który umieszcza U/LIRGs na ustalonym etapie w sekwencji ewolucyjnej między transformacją galaktyk bogatych w gaz a czerwonymi martwymi eliptycznymi. Dlatego stanowią one doskonałe lokalne laboratoria do szczegółowego badania procesów fizycznych związanych z hierarchiczną transformacją galaktyk formujących gwiazdy w galaktyki eliptyczne.

Szczegółowe modelowanie SED lokalnych U/LIRGs jest więc niezbędne do lepszego zrozumienia procesów barionowych oraz opracowania i testowania modeli mogących wyjaśnić badania statystyczne oparte na dużych populacjach takich galaktyk w wysokim przesunięciu ku czerwieni.

Praca przedstawia szczegółową analizę próbki 11 lokalnych LIRGs i 14 lokalnych ULIRGs. Analiza spektralna obejmuje szeroki zakres długości fal, od UV przez IR do częstotliwości radiowych. Do modelowania SED od UV-IR-do radiowych użyto danych w 20-30 pasmach z różnych obserwatoriów naziemnych i kosmicznych dostępnych w archiwach publicznych. Ponadto, do modelowania SED tylko dla fal radiowych, zgromadzono dane z archiwów, w tym nasze dedykowane obserwacje GMRT oraz ponowną analizę danych archiwalnych VLA dla kilku galaktyk. W szczególności, do modelowania SED tylko dla fal radiowych, użyto najnowoc

ześniejszego pakietu *UltraNest*, wykorzystując jego algorytm próbkowania zagnieżdżonego.

Dla 11 lokalnych LIRGs, widma radiowe obejmują nasze dedykowane obserwacje z GMRT przy 325 i 610 MHz oraz publicznie dostępne dane. Kluczowe wyniki obejmują to, że indeksy spektralne synchrotronu pokazują zakres między -0,5 a -1,7 z identyfikacją przełamań w widmach radiowych. Przełamania te są przypisywane absorpcji swobodnej-swobodnej, wykluczając samoabsorpcję synchrotronową (SSA) lub efekt Cytkowicza-Razina, ponieważ szacowane częstotliwości odcięcia dla tych procesów są znacznie niższe niż obserwowane dla typowych jasności powierzchni, sił pól magnetycznych i gęstości elektronów obserwowanych w naszych galaktykach.

Wyniki z analizy CIGALE ujawniają właściwości zgodne z galaktykami podobnych klas, takie jak luminosność podczerwona, masa pyłu i szybkości formowania gwiazd, masa gwiazd, masa pyłu i temperatura pyłu. Nasze modelowanie SED tylko dla fal radiowych pozwoliło nam rozłożyć całkowitą emisję radiową na składowe termalne i niewtórne radiowe. W oparciu o relację kalibracji szybkości formowania gwiazd przedstawioną przez Murphy et al. (2011), obliczyliśmy całkowitą, niewtórna i termalną szybkość formowania gwiazd przy 1,4 GHz i porównaliśmy je z SFR_{IR} uzyskanym z modelowania SED za pomocą CIGALE uśrednionego na 10 i 100 Myrs.

Obserwuje się dodatnią korelację między SFR_{IR} uśrednioną na 10 Myrs (w porównaniu do 100 Myrs temu) a radiem 1,4 GHz (całkowitym i niewtórnym).

Jest to spowodowane oczekiwanymi podobnymi czasami życia synchrotronu dla typowych sił pól magnetycznych obserwowanych w tych galaktykach ($\sim 50 \mu\text{G}$).

Po studium LIRG, rozszerzyliśmy próbkę na 14 lokalnych U/LIRGs, aby zbadać, jak zmieniają się fizyczne właściwości wraz ze zwiększaniem się szybkości SFR. Kluczowe wyniki obejmują to, że indeks spektralny synchrotronu waha się między $\sim -0,6$ a $\sim -2,0$ z identyfikacją przełamań w widmach radiowych. Zauważamy, że pięć ULIRGs w naszej próbce jest znanych z hostowania AGN typu GPS i wykazuje zgięte widma. Jednak szacowana jasność powierzchniowa dla tych galaktyk mieści się w zakresie $\approx 0,001\text{--}500$, co odpowiada częstotliwościom odcięcia w zakresie od 0,11 MHz do 60 MHz, aby przełamania mogły być przypisane do SSA. Efekt Cytkowicza-Razina również został wykluczony, ponieważ obliczona częstotliwość odcięcia nie pasowała do obserwowanej dla typowej gęstości elektronów plazmy.

Ponadto, omówiono globalne właściwości astrofizyczne dla próbki 25 galaktyk gwiazdotwórczych ($z < 0,5$), łącząc wyniki modeli Theses_summary_english SED 11 LIRGs i 14 ULIRGs. Kluczowe wyniki to: 1) widma radiowe są często charakteryzowane przełamaniami i przełomami, bez wskazań, że ULIRGs wykazują bardziej skomplikowane SED niż LIRGs, pomimo wykazywania większej liczby oznak interakcji; 2) uwzględnienie pomiarów radiowych w modelowaniu SED od UV do radiowych za pomocą CIGALE ograniczyło luminancję pyłu i szacunki SFR o więcej niż jeden rząd wielkości lepiej niż wcześniej zgłaszano dla galaktyk gwiazdotwórczych; 3) pokazujemy, że całkowita i niewtórna luminancja radiowa przy częstotliwościach 1,4 i 4,8 GHz mogą być dobrymi estymatorami niedawnej SFR dla wszystkich LIRGs i tych ULIRGs z niewielkim wpływem AGN; 4) obserwuje się słabszą, ale nadal istotną korelację między radiową SFR przy 1,4 GHz a starą (uśrednioną na 100 Myr) SFR opartą na modelowaniu SED, co wskazuje na wielokrotne epizody aktywności gwiazdotwórczej w trakcie ich życia; 5) termalna luminancja radiowa przy 4,8 GHz jest lepszym wskaźnikiem niedawnej formacji gwiazd niż przy 1,4 GHz; 6) widzimy, że frakcja AGN bolometrycznych nie zależy od optycznej klasy morfologicznej, zgodnie z tymi znalezionymi w literaturze; 7) zbadaliśmy korelację między modelowanymi niewtórnymi indeksami spektralnymi radiowymi a właściwościami galaktyk takimi jak przesunięcie ku czerwieni, masa gwiazd, SFR, specyficzna SFR i masa pyłu. Stwierdziliśmy,

że nie są one istotnie statystycznie skorelowane.

Wnioski przedstawione w pracy są wyjątkowe w sensie, że żadne inne badanie nie przeprowadziło modelowania SED w tak szerokim zakresie częstotliwości obejmującym UV, IR i radio. Podkreśla to zaletę rozszerzania technik dopasowywania SED od UV-IR do częstotliwości radiowych, zwłaszcza gdy przechodzimy w erę, w której badania FIR pozostają ograniczone, a dane radiowe stają się coraz bardziej obfite, czego przykładem są inicjatywy takie jak Square Kilometer Array (SKA) i jego prekursorzy.