

## Streszczenie

polish Zgodnie ze standardowym modelem  $\Lambda$ CDM, Wszechświat składa się z ciemnej energii, promieniowania, ciemnej materii oraz materii barionowej. Rozkład gęstości materii (ciemnej materii i barionowej) można śledzić poprzez analizę grupowania się struktur wielkoskalowych (LSS), takich jak galaktyki i kwazary. Badania tych struktur przeprowadza się przy użyciu zarówno technik fotometrycznych, jak i spektroskopowych. Przeglądy spektroskopowe dostarczają precyzyjnych pomiarów przesunięć ku czerwieni (spec- $z$ ) na podstawie widm i umożliwiają trójwymiarowe mapowanie wielkoskalowych struktur kosmicznych. Są one jednak kosztowne pod względem obserwacyjnym i czasochłonne. Z drugiej strony, badania fotometryczne pozwalają obserwować duże obszary nieba, wykrywając miliony obiektów na dużych głębokościach w stosunkowo krótkim czasie. Ich głównym ograniczeniem jest to, że nie zapewniają one bezpośrednich pomiarów przesunięcia ku czerwieni. Uzyskanie wartości spec- $z$  dla wszystkich obiektów w badaniach fotometrycznych jest niepraktyczne ze względu na wymagane długie czasy naświetlania, co stanowi poważne wyzwanie dla wykorzystania danych fotometrycznych w analizach kosmologicznych, w których przesunięcie ku czerwieni jest kluczową wielkością.

W niniejszej pracy podjęto to wyzwanie poprzez oszacowanie przesunięć ku czerwieni na podstawie danych fotometrycznych przy użyciu zaawansowanych algorytmów uczenia maszynowego. Szacunki te, znane jako fotometryczne przesunięcia ku czerwieni (photo- $z$ ), są jednak mniej precyzyjne niż spec- $z$ . Chociaż wartości photo- $z$  nie są dość precyzyjne w przypadku pełnego trójwymiarowego grupowania się galaktyk ze względu na związane z nimi niepewności, można je skutecznie wykorzystać do pomiarów grupowania się kąтового (dwuwymiarowego). Chociaż informacje o przesunięciu ku czerwieni nie są potrzebne do pomiaru grupowania kąтового w obserwowanych danych, rozkład przesunięć ku czerwieni jest niezbędny do modelowania tej wielkości obserwowalnej. Rozkład ten jest wyznaczany na podstawie wartości photo- $z$ . Ponieważ galaktyki są obciążonymi wskaźnikami całkowitego rozkładu materii, podczas gdy sama ciemna materia nie jest bezpośrednio obserwowalna, modelowanie to pozwala nam oszacować tzw. *bias* ("parametr obciążenia") i lepiej zrozumieć związek między widocznymi strukturami a rozkładem gęstości materii we Wszechświecie.

Głównym osiągnięciem niniejszej pracy jest opracowanie platformy uczenia głębokiego Hybrid- $z$  służącej do szacowania przesunięcia ku czerwieni na podstawie danych optycznych. Model ten łączy dane obrazowe z czterech pasm optycznych z dziewięciopasmowymi wielkościami fotometrycznymi za pomocą hybrydowej architektury opartej na konwolucyjnych sieciach neuronowych i sztucznych sieciach neuronowych. Zastosowany do katalogu jasnych galaktyk Kilo-Degree Survey Data Release 4 (KiDS-DR4), Hybrid- $z$

znacznie poprawia oszacowania foto- $z$ . Osiąga on około 20% redukcję rozrzutu w porównaniu z poprzednią metodą, która opierała się wyłącznie na wielkościach fotometrycznych, a nie na danych z obrazów. Model został udostępniony publicznie jako narzędzie open-source, a wynikowy katalog foto- $z$  dla próbki jasnych galaktyk KiDS-DR4 jest dostępny dla społeczności.

Metodę Hybrid- $z$  zastosowano również do kwazarów z katalogu KiDS-DR4 w celu sporządzenia rozkładów przesunięć ku czerwieni oraz analizy ich grupowania przy użyciu kątowej funkcji korelacji dwupunktowej. Najlepiej dopasowany, niezależny od skali  $bias$  kwazarów wzrasta z  $b \approx 1,6$  dla  $z \approx 0,6$  do  $b \approx 4,0$  dla  $z \approx 2,2$ , wykazując kwadratową zależność od przesunięcia ku czerwieni. Wyniki analizy grupowania sugerują, że kwazary znajdują się w halach ciemnej materii o masach  $\log_{10}(M_{\text{eff}}/h^{-1}M_{\odot}) \sim 12,7\text{--}12,9$  i wysokościach pików  $\nu_{\text{eff}}$  rosnących od  $\sim 1,5$  do  $2,9$  w rozpatrywanym zakresie przesunięcia ku czerwieni. Zbadano również efekty systematyczne w obliczeniach  $bias$ . Wynika z nich, że zanieczyszczenie gwiazdami ma znikomy wpływ, podczas gdy rozkład przesunięcia ku czerwieni znacząco wpływa na wyznaczony  $bias$ , co podkreśla potrzebę dokładnej kalibracji przesunięcia ku czerwieni.

W niniejszej pracy, wykraczając poza statystykę dwupunktową, zbadano niegaussowskie cechy rozkładu materii przy użyciu statystyk wyższego rzędu uzyskanych metodą zliczeń w komórkach. Pomiaru uśrednionej funkcji korelacji oraz zredukowanych kumulantów w przedziałach fotometrycznych  $z$  jasnej próbki KiDS-DR4 ujawniają znaczącą niegaussowskość oraz jej ewolucję wraz z przesunięciem ku czerwieni. Sygnał grupowania jest najsilniejszy w małych skalach kątowych i słabnie wraz ze wzrostem skali, co wskazuje na systematykę obserwacyjną w dużych skalach. Na koniec zbadano zależność grupowania od właściwości galaktyk. Galaktyki o większej masie gwiazdowej i bardziej czerwonych barwach wykazują silniejsze grupowanie, co wskazuje, że preferują one gęstsze środowiska.

Wyniki te dostarczają wglądu w związek między obiektemi pozagalaktycznymi w KiDS-DR4 a leżącym u ich podstaw rozkładem materii oraz pokazują potencjał wykorzystania uczenia maszynowego do szacowania foto- $z$  w połączeniu z analizą grupowania w badaniach LSS nowej generacji.