

dr Katarzyna Małek (z domu Krupska)

Autoreferat

Publikacje wchodzące w skład osiągnięcia naukowego:

Tabela 1: Lista publikacji wchodzących w skład osiągnięcia naukowego. Cytowania podane na dzień 02.04.2019 za:

* Web of Science

** SAO NASA Astrophysics Data System (ADS)

id	publikacja	cytowania (12.02.2019)	
		WoS*	ADS**
H1	Małek, K. ; Pollo, A.; Takeuchi, T. T.; Giovannoli, E.; Buat, V.; Burgarella, D.; Malkan, M.; Kurek, A, "Dusty Universe viewed by AKARI far infrared detector", Earth, Planets and Space, Volume 65, Issue 10, p. 1101-1108 (2013) <i>Jest to pierwsza praca z serii prac przedstawiających wyniki modelowania własności galaktyk podczerwonych stanowiących powstawanie przedstawionego we wniosku cyklu habilitacyjnego. Mój wkład w postawienie tej pracy polegał na identyfikacji galaktyk obserwowanych w głębokim polu South Field-South japońskiego satelity AKARI i wykorzystaniu własnych programów do modelowania pełnego widma spektroskopowego galaktyk obserwowanych w tym polu. Równocześnie w pracy tej przedstawiam podstawowe informacje dotyczące morfologii analizowanych przeze mnie galaktyk, a także ich identyfikację. Wykonałam wszystkie ilustracje, napisałam manuskrypt. Swój wkład oceniam na 75%.</i>	4	2

H2	Małek, K.; Pollo, A.; Takeuchi, T. T.; Buat, V.; Burgarella, D.; Malkan, M.; Giovannoli, E.; Kurek, A.; Matsuura, S., "Properties of star forming galaxies in AKARI Deep Field-South", Astronomy & Astrophysics, Volume 562, id.A15, 15 pp. (2014) <i>W tej pracy badałam właściwości fizyczne galaktyk obserwowanych w dalekiej podczerwieni w polu AKARI Deep Field-South (ADF-S). Zaczynając od katalogu 1000 najjaśniejszych obiektów w polu, obserwowanych w paśmie 90 μm, zbudowałam katalog 500 obiektów pokrywający widmo energetyczne od ultrafioletu przez optykę i bliską podczerwień po podczerwone detekcje AKARI. Używając programów Photometric Analysis for Redshift Estimate oraz Code Investigating GALaxy Emission wyznaczyłam przesunięcia ku czerwieni dla obiektów, dla których ta informacja nie była dostępna w publicznych bazach danych i wyznaczyłam podstawowe parametry fizyczne. Poprawne modelowanie (ze względu na jakość dopasowania) było możliwe dla 184 galaktyk. Wykonałam pełną analizę otrzymanych parametrów fizycznych i spisałam manuskrypt. Opublikowałam katalog zawierający dane fotometryczne i przesunięcie ku czerwieni oraz podstawowe parametry fizyczne analizowanych galaktyk. Swój udział procentowy szacuję na 75%.</i>	8	8
H3	Małek, K.; Bankowicz, M.; Pollo, A.; Buat, V.; Takeuchi, T. T.; Burgarella, D.; Goto, T.; Malkan, M.; Matsuhara, H., "[Ultra] luminous infrared galaxies selected at 90μm in the AKARI deep field: a study of AGN types contributing to their infrared emission", Astronomy & Astrophysics, Volume 598, id.A1, 23 pp. (2017) <i>Jest to praca dotycząca modelowania szczególnych galaktyk podczerwonych - bardzo jasnych w podczerwonych długościach fal. W pracy tej zajmowałam się modelowaniem zarówno pełnego widma galaktyk, jak i wyznaczeniem w bardzo dokładny sposób typów aktywnych jąder galaktyk w tych obiektach - ich geometrię. Swój wkład oceniam na 75%.</i>	2	4
H4	Buat, V.; Oi, N.; Heinis, S.; Ciesla, L.; Burgarella, D.; Matsuhara, H.; Małek, K.; Goto, T.; Malkan, M.; Marchetti, L.; Ohya, Y.; Pearson, C.; Serjeant, S.; Miyaji, T.; Krumpe, M.; Brunner, H., "Dust attenuation up to z~2 in the AKARI North Ecliptic Pole Deep Field", Astronomy & Astrophysics, Volume 577, id.A141, 14 pp. (2015) <i>W tej pracy byłam odpowiedzialna za wyselekcjonowanie próbki ~3 000 galaktyk obserwowanych w paśmie 8μm w polu AKARI North Ecliptic Pole. Wraz z głównym autorem pracowałam nad modelowaniem widm energetycznych galaktyk obserwowanych w podczerwieni. Byłam odpowiedzialna za określenie parametrów opisujących jakość dopasowania. Brałam udział w pisaniu manuskryptu, odpowiadaniu na pytania recenzenta, a także we wszystkich dyskusjach dotyczących strategii analizy danych. Swój wkład oceniam na 35%.</i>	13	16

H5	Małek, K.; Buat, V.; Roehlly, Y.; Burgarella, D.; Hurley, P. D.; Shirley, R.; Duncan, K.; Efstathiou, A.; Papadopoulos, A.; Vaccari, M.; Farrah, D.; Marchetti, L.; Oliver, S., "HELP: modelling the spectral energy distributions of Herschel detected galaxies in the ELAIS N1 field", <i>Astronomy & Astrophysics</i>, Volume 620, id.A50, 17 pp. (2018) <i>W pracy tej analizowałam unikalny katalog ~50 000 galaktyk znajdujących się na polu ELAIS N1 - pilotazowym polu projektu HELP. W ykonałam modelowanie widm wszystkich galaktyk, opracowałam nowy sposób selekcji obiektów specyficznych (takich jak galaktyki soczewkowane, HotDOG-i itp) na podstawie jakości dopasowania modeli w różnych długościach fal. Co najważniejsze wykazałam, że modele atenuacji pyłu stosowane powszechnie w literaturze mają istotny wpływ na oszacowanie masy gwiazdowej galaktyk - najbardziej podstawowego fizycznego parametru opisującego galaktykę. Dowiodłam, że różnice szacowanych mas gwiazdowych przy użyciu różnych modeli atenuacji różnią się znacząco (kilkukrotnie w skali logarytmicznej). Swój wkład określałam na 80%.</i>	2	2
H6	Buat, V.; Boquien, M.; Małek, K.; Corre, D.; Salas, H.; Roehlly, Y.; Shirley, R.; Efstathiou, A., "Dust attenuation and Hα emission in a sample of galaxies observed with Herschel at $0.6 < z < 1.6$", <i>Astronomy & Astrophysics</i>, Volume 619, id.A135, 12 pp. (2018) <i>Mój udział w tej pracy polegał na wymodelowaniu własności ~15 000 galaktyk z pola COSMOS w celu znalezienia ich parametrów fizycznych a następnie wyselekcjonowaniu kandydatów mających pomiary spektroskopowe (detekcje linii Hα). Brałam czynny udział w analizowaniu wyników oraz spisywaniu manuskryptu i pisaniu odpowiedzi na komentarze recenzenta. Swój wkład określałam na 40%.</i>	2	2
H7	Małek, K.; Solarz, A.; Pollo, A.; Fritz, A.; Garilli, B.; Scodreggio, M.; Iovino, A.; Granett, B. R.; Abbas, U.; Adami, C.; Arnouts, S.; Bel, J.; Bolzonella, M.; Bottini, D.; Branchini, E.; Cappi, A.; Coupon, J.; Cucciati, O.; Davidzon, I.; De Lucia, G.; de la Torre, S.; Franzetti, P.; Fumana, M.; Guzzo, L.; Ilbert, O.; Krywult, J.; Le Brun, V.; Le Fevre, O.; Maccagni, D.; Marulli, F.; McCracken, H. J.; Paoro, L.; Polletta, M.; Schlagenhauser, H.; Tasca, L. A. M.; Tojeiro, R.; Vergani, D.; Zanichelli, A.; Burden, A.; Di Porto, C.; Marchetti, A.; Marinoni, C.; Mellier, Y.; Moscardini, L.; Nichol, R. C.; Peacock, J. A.; Percival, W. J.; Phleps, S.; Wolk, M.; Zamorani, G., "The VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey (VIPERS). A support vector machine classification of galaxies, stars, and AGNs", <i>Astronomy & Astrophysics</i>, Volume 557, id.A16, 16 pp. (2013) <i>Jest to praca, w której pierwszy raz wykorzystaliśmy nadzorowane algorytmy uczące w celu klasyfikacji obiektów pochodzących z przeglądu VIPERS. Jako główny autor i pomysłodawca tej pracy oceniam swój wkład na 75 %</i>	23	28

H8	Krakowski, T.; Małek, K.; Bilicki, M.; Pollo, A.; Kurcz, A.; Krupa, M. "Machine-learning identification of galaxies in the WISE x SuperCOSMOS all-sky catalogue", <i>Astronomy & Astrophysics</i>, Volume 596, id.A39, 11 pp. (2016) <i>Jest to pierwsza praca naukowa napisana przez doktoranta, nad którym sprawuję opiekę merytoryczną. W pracy tej użyliśmy danych otrzymanych poprzez zespolenie dwóch największych obecnie przeglądów całego nieba, WISE i SuperCOSMOS, dla których udało się oszacować przesunięcia ku czerwieni. Głównym celem tej pracy była identyfikacja galaktyk znajdujących się w tym katalogu poprzez użycie algorytmów uczenia maszynowego i opublikowanie wyników. Ze swojej strony sprawowałam opiekę merytoryczną nad powstawaniem tej pracy, pomagałam wykonać analizę oraz zastosować nadzorowaną metodę samouczącą SVM, aktywnie pomagałam wygenerować ilustracje oraz redagowałam tekst. Swoją wkład oceniam na 25%.</i>	8	13
H9	Siudek, M.; Małek, K.; Pollo, A.; Krakowski, T.; Iovino, A.; Scodreggio, M.; Moutard, T.; Zamorani, G.; Guzzo, L.; Garilli, B.; Granett, B. R.; Bolzonella, M.; de la Torre, S.; Abbas, U.; Adami, C.; Bottini, D.; Cappi, A.; Cucciati, O.; Davidzon, I.; Franzetti, P.; Fritz, A.; Krywult, J.; Le Brun, V.; Le Fèvre, O.; Maccagni, D.; Marulli, F.; Polletta, M.; Tasca, L. A. M.; Tojeiro, R.; Vergani, D.; Zanichelli, A.; Arnouts, S.; Bel, J.; Branchini, E.; Coupon, J.; De Lucia, G.; Ilbert, O.; Haines, C. P.; Moscardini, L.; Takeuchi, T. T., "The VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey (VIPERS). The complexity of galaxy populations at $0.4 < z < 1.3$ revealed with unsupervised machine-learning algorithms", <i>Astronomy & Astrophysics</i>, Volume 617, id.A70, 25 pp. (2018) <i>Byłam opiekunem naukowym tej pracy. Powstała ona w ramach pracy doktorskiej mgr Siudek. Byłam odpowiedzialna za pomysł naukowy oraz nadzór nad wykonaniem pracy. Swoją wkład oceniam na 50%.</i>	2	5

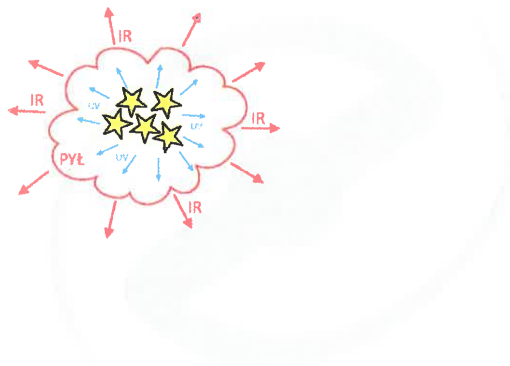


Fig. 1: Schematyczne przedstawienie masywnych, młodych gwiazd emitujących silnie w zakresie UV, otoczonych przez chmury pyłu. Pył ten pochłania część promieniowania UV i reemituje je w podczerwieni.

Autoreferat - język polski

Ze względu na trudności w dokładnym przetłumaczeniu wyrażeni angielskich na język polski czasami posilkuję się angielskimi skrótami. Wszystkie są wymienione i opisane w tekście autoreferatu, jednak zdecydowałam się dodać niewielki słowniczek pozwalający na szybsze odszukanie odpowiedniego skrótu.

FIR – far infrared, daleka podczerwień,

IR – infrared, podczerwień,

LIRG – Luminous Infrared Galaxy, Jasna Galaktyka Podczerwona ,

MIR – mid infrared, średnia podczerwień,

NIR – near infrared, bliska podczerwień,

RTM – radiative transfer model, równanie transferu promieniowania,

SED – spectral energy distribution, widmo energetyczne,

SF – star formation, aktywność tworzenia gwiazd,

ULIRG – Ultra Luminous Infrared Galaxy, Ultrajasna Galaktyka Podczerwona,

UV – ultraviolet, ultrafiolet z – redshift, przesunięcie ku czerwieni,

z_{phot} – photometric redshift, przesunięcie ku czerwieni wyznaczone z danych fotometrycznych

1 Wstęp

Źródłem promieniowania podczerwonego (ang. *infrared*, IR) jest ciepło bądź też promieniowanie ciepłe (pochodzące z ruchów atomów i molekuł). Ponieważ praktycznie każde ciało emituje promieniowanie termiczne, obserwacje astronomiczne w zakresie podczerwonym dotyczą obserwacji "prawie wszystkiego" we Wszechświecie. Dodatkowo, biorąc pod uwagę fakt, iż promieniowanie w zakresie ultrafioletowym (UV) i optycznym, emitowane przez galaktyki o wysokim przesunięciu ku czerwieni, jest przesunięte w stronę wyższych długości fal, analiza "podczerwonego" Wszechświata jest niezwykle wszechstronna.

Ze względu na własności używanych detektorów promieniowanie podczerwone w astronomii dzielimy na trzy zakresy:

1. bliską podczerwień (ang. *near infrared*, NIR), o długościach fal z zakresu $1 - 5 \mu\text{m}$; w tym zakresie obserwowany w kosmosie pył jest przezroczysty; niebieskie, gorące gwiazdy widoczne najwyraźniej w zakresie optycznym błędną, natomiast wyłaniają się zimniejsze, czerwone

gwiazdy,

2. średnią (ang. *mid infrared*, *MIR*), o długościach fal z zakresu $5 - 30 \mu m$, w tym zakresie pył nadal jest przezroczysty, zimne gwiazdy błędną, a wylaniają się jeszcze chłodniejsze obiekty, takie jak planety, komety, planetoidy,
3. daleką (ang. *far infrared*, *FIR*), o długościach fal z zakresu $30 - 500 \mu m$, w których możliwa jest obserwacja bardzo zimnego pyłu, centralnych obszarów galaktyk itp.

Oczywiście podział ten jest tylko umowny i, w zależności od opracowania, granice te mogą ulec niewielkim zmianom.

Fale IR, poza kilkoma wąskimi "oknami" obserwacyjnymi, które występują głównie poniżej $4 \mu m$ (bliska podczerwień), są praktycznie całkowicie absorbowane przez atmosferę ziemską. Pomimo tych trudności możliwe jest obserwowanie Wszechświata w promieniowaniu podczerwonym z wykorzystaniem teleskopów umieszczonych w wysokich górach o suchym klimacie (w trzech wąskich oknach bliskiej podczerwieni) lub dzięki obserwacjom ponadatmosferycznym, do których wykorzystywane są samoloty lub balony, które niestety nie pozwalają na przegląd całego dostępnego nieba. Najskuteczniejsze są obserwacje satelitarne, które umożliwiają obserwację pełnego widma podczerwieni oraz przeglądy całego nieba w różnych długościach fal.

Ostatnie osiągnięcia w obserwacjach satelitarnych poszerzyły naszą wiedzę na temat galaktyk oraz ich ewolucji poprzez pomiar ich promieniowania w długich zakresach fal elektromagnetycznych. W szczególności zakres FIR jest silnie powiązany z aktywnością gwiazdotwórczą w galaktykach na przestrzeni istnienia Wszechświata (da Cunha et al., 2010). Ponieważ obszary, w których tworzą się nowe gwiazdy, są gęsto umieszczone w zwartych rdzeniach chmur molekularnych, najwcześniejsze etapy ich powstawania można zaobserwować w długościach fal wynoszących milimetry. Wiemy jednak, że cząsteczki pyłu w galaktykach mają tendencję do pochłaniania promieniowania UV emitowanego przez młode, masywne gwiazdy. Ogrzane w ten sposób obszary chmur otaczających nowoutworzone gwiazdy emitują promieniowanie w FIR. W związku z tym, emisja pyłu jest silnym wskaźnikiem tempa powstawania gwiazd. Schemat tego procesu jest pokazany na Rys. 1. Z tego też powodu procesy powstawania gwiazd w galaktykach są zawsze stowarzyszone z wytworzeniem pyłu (Schulz, 2005; Stahler & Palla, 2005), aczkolwiek same mechanizmy zasilania tych obszarów w pył nie są jeszcze dobrze poznane (Takeuchi et al., 2005b).

1.1 Satelitarne przeglądy w podczerwonych długościach fal

Pierwszy katalog IR całego nieba powstał dzięki obserwacjom satelity Infra-Red Astronomy Satellite (IRAS; Neugebauer et al., 1984; Beichman, 1987). Pod wieloma względami IRAS stworzył podwaliny całej astronomii w dalekiej podczerwieni. Kluczowym produktem obserwacji satelity IRAS był katalog źródeł obserwowanych w czterech długościach fal: 12, 25, 60 i $100 \mu m$. Mimo, że dane pochodzące z satelity IRAS mają już ponad 35 lat (satelita rozpoczął obserwacje w 1983 roku), katalog ten nadal jest używany przez astronomów zajmujących się astronomią podczerwoną.

Następne satelitarne obserwatorium promieniowania podczerwonego to Kosmiczny Teleskop Hubble'a (HST), który został wystrzelony na niską orbitę Ziemi w 1990 r. i nadal zbiera dane. HST ma na pokładzie dwa detektory promieniowania podczerwonego: kamerę czułą na detekcje w bliskiej podczerwieni, Near Infrared Camer, i spektrometr Multi-Object Spectrometer (NICMOS, działający od 1997 do 1999 r., a następnie po rewitalizacji od 2002 do 2008 roku) oraz kamerę Wide Field 3 (WFC3, zainstalowaną w 2009 r.). Kolejne misje satelitarne przystosowane do obserwacji w podczerwieni, Infrared Space Observatory (ISO Kessler et al., 1996) i *Spitzer* Space Telescope (Werner et al., 2004), choć mają lepsze możliwości niż IRAS, nie zostały zaprojektowane do

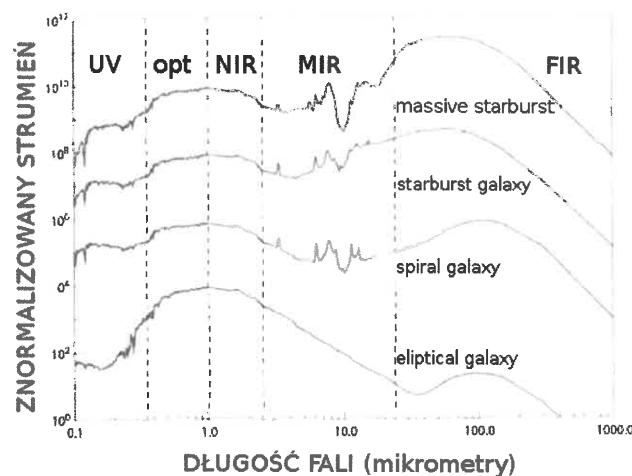


Fig. 2: Modele widm energetycznych czterech typów galaktyk. Rysunek ten obrazuje różnice w zakresie widma podczerwonego i jednocześnie podobne kształty w zakresie fal UV do optycznych. Strumienie widm energetycznych czterech różnych typów galaktyk zostały przeskalowane w taki sposób, aby umożliwić ich porównanie. Ilustracja pochodzi z pracy Clements (2015).

obserwacji całego dostępnego nieba, a jedynie jego fragmentów.

Kosmiczny Teleskop Spitzera (*Spitzer Space Telescope*) to należący do NASA teleskop, przeznaczony do obserwacji kosmosu w zakresie promieniowania NIR i MIR. Jest nieco mniej znany niż Kosmiczny Teleskop Hubble’a, jest jednak bardzo użyteczny w badaniach odległych galaktyk ze względu na rozkład pasm fotometrycznych wycelowanych na długościach fal 3,6, 4,5, 5,8, 8, 24, 70 i 160 μm , pozwalających śledzić wielopierścieniowe węglowodory aromatyczne w galaktykach, będące wskaźnikami aktywności gwiazdotwórczej.

Swoją pracę nad obserwacjami galaktyk w zakresie promieniowania podczerwonego rozpoczęłam od danych pochodzących z japońskiego satelity AKARI (Murakami et al., 2007). AKARI został wysłany przez rakietę JAXA MV8 w 2006 roku i działał do roku 2011, a jego głównym zadaniem była obserwacja całego nieba w podczerwieni. W tym celu wykorzystano dedykowaną kamerę FIS (Kawada et al., 2007). Obejmowała ona zakres długości fal od 50 do 180 μm poprzez ekspozycję w czterech filtrach dalekiej podczerwieni: N60 wyśrodkowanym na długości fali 65 μm , WIDE-S wyśrodkowanym na 90 μm , WIDE-L – 140 μm oraz N160 – 160 μm . Katalogi, które dostarczył AKARI, były znacznie dokładniejsze niż wcześniejsze obserwacje IRAS-a ze względu na czulsze detektory oraz znacznie lepszą rozdzielczość kątową i szerszy zasięg widmowy. W celu dokładniejszej analizy promieniowania podczerwonego we Wszechświecie misja AKARI obejmowała również dwa głębokie pola wokół biegunów ekliptyki północnej i południowej (Wada et al., 2008; Takagi et al., 2012; Matsuura et al., 2011). Własności galaktyk z obu tych pól były tematem mojej analizy.

Wide-field Infrared Space Explorer (WISE Wright et al., 2010), to obserwujący w zakresie podczerwonym satelita NASA, który został wyniesiony na orbitę okołoziemską w 2009 roku. Na jego pokładzie znajdują się detektory IR obserwujące w czterech pasmach wycelowanych na długościach fal 3,4, 4,6, 12 i 22 μm . Katalog źródeł obserwowanych przez WISE zawiera prawie 750 obiektów o stosunku sygnału do szumu (S/N) ≥ 5 w przynajmniej jednym z pasm. Pomiarów wykonane przez WISE dają niezbędny wkład do modelowania widm galaktyk, a jednocześnie do zrozumienia natury obserwowanych źródeł. Z drugiej strony ogromna liczba pomiarów zmusiła astronomów do wykorzystania technik uczenia maszynowego w celu odróżnienia rzeczywistych

pomiarów od szumu, a także klasyfikacji źródeł podczerwonych (np. Krakowski et al., 2016; Solarz et al., 2017).

Kosmiczne Obserwatorium Herschela (*Herschel* Space Observatory) zostało zbudowane przez Europejską Agencję Kosmiczną (ESA). Satelita działał od 2009 do 2013 roku i był największym, jak do tej pory, teleskopem przeznaczonym do obserwacji w zakresie dalekiej podczerwieni i fal submilimetrycznych. Na jego pokładzie znajdował się teleskop z 3.5-metrowym lustrem. Dzięki obserwacjom pasm w dalekiej podczerwieni *Herschel* był w stanie badać procesy powstawania galaktyk we wczesnym Wszechświecie, a także ich ewolucji.

Kosmiczny Teleskop Podczerwony dla Kosmologii i Astrofizyki (SPICA) to nowej generacji satelita IR, który zostanie wyniesiony w przestrzeń kosmiczną w 2032 roku. Jego czułość będzie dwa rzędy wielkości większa niż teleskopów *Spitzer* i *Herschel* i obejmie długości fali MIR (20–40 μm) oraz FIR (34–210 μm i 350 μm).

Połączenie wszystkich dostępnych pomiarów otrzymanych z satelitów podczerwonych umożliwia odtworzenie pełnego widma podczerwonego galaktyk od NIR poprzez MIR do FIR, a co za tym idzie zrozumienie procesów tworzenia gwiazd w galaktykach. Jest to niezwykle istotne, ponieważ stare gwiazdy można zobaczyć głównie w zakresie spektralnym NIR. Z kolei pył, składający się z mieszaniny ziaren węglowych i krzemianów amorficznych (Draine, 2003) reemituje promieniowanie pochodzących z młodych, masywnych gwiazd w zakresie MIR i FIR.

Rys. 2 pokazuje, jak istotne dla poprawnej klasyfikacji typów obiektów astrofizycznych są informacje pochodzące z części podczerwonej widm galaktyk – wszystkie prezentowane widma energetyczne mają podobne kształty w zakresie widzialnym, ale w części podczerwonej znacznie się różnią. Oznacza to, że wykorzystanie informacji z części IR widm jest wręcz niezbędne w procesie identyfikacji typów galaktyk. Biorąc pod uwagę wszystkie możliwe dane z różnych długości fal, a także informacje dotyczące morfologii galaktyk - klasyfikacja różnych typów i podtypów galaktyk staje się coraz bardziej skomplikowana (ale równocześnie bardziej precyzyjna). Tutaj z pomocą przychodzą algorytmy uczenia maszynowego gdyż równoczesna praca z milionami galaktyk, z których każda opisywana jest przez kilka parametrów, powoli wychodzi poza możliwości standardowej analizy. Dodatkowo algorytmy uczenia maszynowego mogą pomóc w uzyskaniu dokładniejszej fotometrii obiektów obserwowanych w podczerwieni, pomagając zredukować efekt przenikania się strumieni pochodzących z wielu źródeł astronomicznych. Obecnie najbardziej zaawansowanym narzędziem pomagającym wyodrębnić strumienie podczerwone pochodzące od pojedynczych galaktyk jest program XID+ (Hurley et al., 2017), który wykorzystuje metody probabilistyczne, ale w niedalekiej przyszłości zastosowanie technik uczenia maszynowego może znacząco usprawnić ten proces.

Jako, że oba tematy są ze sobą ściśle związane, moja praca obejmuje zarówno pełną analizę spektrum galaktyk - od UV do FIR, jak i na zastosowaniu algorytmów uczenia maszynowego do wielkich przeglądów galaktyk. Analiza własności fizycznych obiektów astrofizycznych jest najskuteczniejsza, jeżeli dane obiekty mają pomiary w różnych długościach fal i są poprawnie sklasyfikowane, ponieważ dopiero pełna analiza spektralna pozwala opisać całą złożoność procesów fizycznych zachodzących w galaktykach.

2 Najważniejsze problemy astronomii podczerwonej związane przez mnie w ostatnich latach - krótkie podsumowanie

Dzięki obserwacjom satelitarnym w dalekiej podczerwieni oraz ich korelacji z danymi w zakresach długości fal od UV do promieniowania widzialnego, rozpoczęliśmy nową erę astronomii IR. Jak w każdej nowej dziedzinie nauki, wciąż mamy do czynienia z wieloma problemami, opierającymi się głównie na pytaniach, jak wykorzystać dane w rzeczywistych analizach i jak interpretować uzyskane wyniki.

Większość istotnych szczegółów dotyczących prac z zakresu **H1–H9** omówię w dalszych, dedykowanych im rozdziałach. W tym miejscu chciałabym sporządzić listę kluczowych kwestii, którymi zajmowałam się w ciągu okresu, jaki minął od nadania mi stopnia doktora:

- właściwości źródeł podczerwonych – obserwacje wykonane w zakresie FIR mają znacznie niższe rozdzielczości niż podobne pomiary otrzymane przy użyciu krótszych długości fal; Strumienie pochodzące z różnych galaktyk mieszają się ze sobą, dlatego też identyfikacja pojedynczych źródeł jest bardzo trudna. Zwykle do wyekstrahowania strumienia dla pojedynczej galaktyki należy użyć zestawu założeń dotyczących jej położenia oraz jej bardzo podstawowych własności. W moich pracach **H1** i **H2** sprawdziłam identyfikację 1000 najjaśniejszych źródeł AKARI w polu ADF–S obserwowanych w paśmie 90 μm poprzez modelowanie ich widm energetycznych (ang. *spectral energy distribution*, SED). Wykazałam, że galaktyki obserwowane przez AKARI w głębokim polu podczerwonym ADF–S to głównie bliskie galaktyki o silnej aktywności gwiazdotwórczej (ang. *star formation*, SF); stwierdziłam również, że większość analizowanych obiektów jest silnie zasłonięta przez pył; ponadto obecnie pracuję nad użyciem algorytmów uczenia maszynowego, które pozwolą na użycie bardziej elastycznych założeń wykorzystywanych później do ekstrakcji strumienia w obserwacjach podczerwonych (**H7–H9**),
- identyfikacja Jasnych Galaktyk Podczerwonych (LIRGs) oraz Ultrajasnych Galaktyk podczerwonych (ULIRGs) (wyjaśnienie w rozdziale Sec. 3)– selekcja LIRG-ów i ULIRG-ów również nie jest trywialna; 90% energii w tych galaktykach emitowane jest w zakresie podczerwonym, a ich widmo od UV do światła widzialnego nie ma żadnych unikalnych właściwości; do selekcji tych ekstremalnych obiektów potrzebna jest szacunkowa ocena całkowitej wartości jasności pyłu (L_{dust}); technika modelowania SED jest tu niezwykle użyteczna. Z pola ADF–S wybrałam LIRG-i i ULIRG-i na podstawie oszacowanej z modelowania jasności pyłu i wyznaczyłam dla nich średnie widma unormowane dla długości fali 90 μm (**H1**); ponadto przeprowadziłam dodatkową analizę wpływu tłumienia pyłu na ich własności, a także wkładu aktywnych jąder galaktyk (AGN) w jasności tych obiektów w zakresie długości fal NIR–MIR (**H3**). Sprawdziłam również, które typy AGN częściej występują w tych ekstremalnych galaktykach i wykazałam, że LIRG-i zawierają zarówno Typ 1 i Typ 2 AGN-ów, jak i typy pośrednie. Zdecydowana większość ULIRG-ów zawiera AGN-y Typu 2. Ponadto w pracy **H5** sprawdziłam możliwość oszacowania L_{dust} jedynie na podstawie emisji pochodzącej z gwiazd i dowiodłam, że dzięki modelowaniu galaktyk z zachowaniem bilansu energetycznego możemy przewidzieć wartość L_{dust} bazując tylko na danych UV–NIR. Jest to możliwe nie tylko dla standardowych galaktyk IR, ale nawet LIRGów i ULIRGów, które zachowują budżet energetyczny.
- atenuacja pyłu – odgrywa istotną rolę w galaktykach IR. Podstawą metodą modelowania SED jest rekonstrukcja emisji promieniowania pochodzącego z gwiazd z wykorzystaniem modeli syntetycznych populacji gwiazdowych oraz historią powstawania gwiazd. Dlatego

też podczas modelowania widm energetycznych galaktyk należy wziąć pod uwagę relacje między pyłem, gwiazdami i gazem w galaktyce. Pył odgrywa tutaj kluczową rolę, gdyż silnie oddziałując przekształca SED: pochłania i rozprasza fotony pochodzące z młodych gwiazd, a następnie reemituje pochłoniętą energię w IR. W rezultacie, wszelkie modelowanie SED, szczególnie dla galaktyk o znacznej emisji w podczerwieni, musi uwzględniać tłumienie pyłu. Najlepszą metodą wyznaczenia atenuacji pyłu w galaktyce jest rozwiązanie równań transportu promieniowania, ale obliczenia są bardzo skomplikowane i silnie zależą od geometrii galaktyki. Dlatego też najprostszym sposobem opisu atenuacji pyłu jest wprowadzenie jednej krzywej tłumienia, uwzględniającej właściwości cząsteczek i rozmieszczenie zarówno gwiazd jak i chmur pyłu w galaktyce.

W pracach **H4**, **H5** i **H6** przeprowadziłam analizę wpływu trzech najbardziej znanych praw atenuacji pyłu na podstawowe własności galaktyk obserwowanych w pełnym zakresie widma. Skupiłam się na takich wielkościach jak: masa gwiazdowa, tempo tworzenia nowych gwiazd i jasność pyłu.

W pracy **H4** wnioskujemy, że atenuacja pyłu, oszacowana dla grup galaktyk wyselekcjonowanych na podstawie jasności w IR, jest znacznie większa (~ 2 mag) od tej samej wartości uzyskanej dla galaktyk wyselekcjonowanych w zakresie UV, czy emiterów H_α . Atenuacja pyłu w galaktykach podczerwonych jest również większa niż globalne tłumienie promieniowania we Wszechświecie mierzone w oparciu o rozkład strumieni jasności zarówno UV, jak i IR. Zbadaliśmy też globalną ewolucję tłumienia w funkcji przesunięcia ku czerwieni (ang. *redshift*, oznaczanego symbolem z) – atenuacja pyłu w galaktykach podczerwonych rośnie w przedziale $0 < z < 1$ i pozostaje niemal stała dla przesunięć ku czerwieni pomiędzy 1 a 1,5. Przy selekcji galaktyk o stałej jasności IR ich atenuacja nieznacznie maleje wraz z przesunięciem ku czerwieni, ale otrzymane wyniki mają znacznie większy rozrzut.

W pracy **H5** wykazałam, że masa gwiazdowa jest niezwykle wrażliwa na różnice w zastosowanych prawach tłumienia pyłu, które prowadzą do istotnych różnic w oszacowaniach mas gwiazdowych, nawet o czynnik dwa w skali logarytmicznej, czyli 100 razy. W oparciu o wyjątkowo dużą próbkę galaktyk, liczącą powyżej 40 tysięcy, opublikowaliśmy funkcję przeskalowującą otrzymane masy gwiazdowe pomiędzy trzema użytymi modelami atenuacji pyłu.

W **H6** wykazaliśmy, iż prawa tłumienia o elastycznych parametrach znacznie lepiej naśladują prawdziwe krzywe tłumienia niż te używane standardowo w literaturze. Otrzymane przez nas wyniki są bardzo zbliżone do tych uzyskanych na podstawie modeli równań transportu pyłu w galaktykach.

Analiza atenuacji pyłu w galaktykach podczerwonych jest obecnie kontynuowana w ramach projektu SONATA BIS *AstroDust*, którego jestem kierownikiem.

- Klasyfikacja galaktyk: identyfikacja różnych klas źródeł promieniowania podczerwonego, ale nie tylko, jest wstępnym krokiem poprzedzającym rozpoczęcie analizy fizycznej. Typowe dwuwymiarowe diagramy kolor-kolor lub kolor-kolor-strumień nie są zwykle wystarczające, aby móc wyselekcjonować konkretne klasy obiektów. Nawet prosta klasyfikacja gwiazda–galaktyka–AGN w przestrzeni dwu, lub trójwymiarowej jest bardzo trudna, ponieważ różne typy obiektów nachodzą na siebie na takich wykresach. Wynikowe "zabrudzenie" próbki ma wpływ na interpretację statystyczną wyników i może powodować błędy w analizie oraz fałszować wyprowadzone wnioski. Jedyną możliwością wyboru właściwej próbki różnych typów obiektów jest wykorzystanie całej możliwej wiedzy do procesu selekcji. Dla galaktyk ten wektor danych może łączyć strumienie, jasności, kolory, przesunięcia ku czerwieni, morfologię, właściwości fizyczne, linie spektralne itp. Możliwym sposobem radzenia sobie z wielowymiarową klasyfikacją jest zastosowanie algorytmów uczenia maszynowego. Swoją pierwszą próbę klasyfikacji w przestrzeni wielowymiarowej podjęłam posługując się nadzorowanym algorytmem uczenia maszynowego SVM (**H7**). Proces ten nazywany jest

uczeniem nadzorowanym, gdyż tryb uczenia się algorytmu z zestawu danych treningowych (wzorcowych) może być traktowany jako nauczyciel nadzorujący proces uczenia się. Dzięki próbce treningowej znane są prawidłowe odpowiedzi i algorytm iteracyjnie uczy się przewidywać, z pewnym prawdopodobieństwem, odpowiedź, a w razie błędnej odpowiedzi jest on korygowany. Po kilku "lekcjach" algorytm jest tak dobrze wyszkolony (zakończył konstrukcję płaszczyzny decyzyjnej), że może pracować bez "nauczyciela". W celu "nauczenia algorytmu" właściwego schematu klasyfikacji stworzyłam próbkę szkoleniową na podstawie danych fotometrycznych i wyznaczonego spektroskopowo przesunięcia ku czerwieni gwiazd, galaktyk i AGN-ów pochodzących z zestawu danych VIPERS. Próbkę treningową składała się z obiektów sklasyfikowanych za pomocą widm spektroskopowych. Po starannym treningu algorytm SVM, którego używałam, wybrał galaktyki, gwiazdy i AGN z nieużywanego do treningu zestawu obiektów VIPERS (zbioru testowego) z dokładnością powyżej 90% oraz z niekompletnością i zanieczyszczeniem na poziomie 2%. W tej pracy wykazałam, że dodanie informacji pochodzącej z zakresu promieniowania podczerwonego znacznie poprawia wyniki klasyfikacji w szczególności AGN-ów i zmniejsza zanieczyszczenie katalogów sklasyfikowanych obiektów.

Razem z doktorantem Tomaszem Krakowskim wykonaliśmy podobną klasyfikację (**H8**) w oparciu o dwa przeglądy nieba typu all-sky: SuperCOSMOS (katalog źródeł optycznych) i WISE (NIR–MIR). Ten zestaw danych nie zawiera informacji o przesunięciu ku czerwieni. Ponownie wykorzystaliśmy próbkę szkoleniową gwiazd, galaktyk i AGN-ów, bazując na korelacji z katalogiem Sloan Digital Sky Survey (SDSS). Dzięki nadzorowanemu algorytmowi SVM sklasyfikowaliśmy i upubliczniliśmy katalog 15 milionów galaktyk wraz z prawdopodobieństwem przynależności danego obiektu do klasy galaktyk.

Ostatnia praca dotycząca automatycznej klasyfikacji zawarta w moim podsumowaniu osiągnięć zawodowych, **H9**, jest to praca wykonana razem z moją ówczesną doktorantką Małgorzatą Siudek i dotyczy klasyfikacji bez nadzoru (użyłam algorytmu Fisher EM). Nienadzorowane uczenie ma zastosowanie tam, gdzie próbka szkoleniowa nie jest znana, a celem algorytmu jest modelowanie podstawowej struktury lub rozkładu danych. Nienadzorowane algorytmy uczące mogą być wykorzystywane do rozwiązywania problemów związanych z grupowaniem się obiektów, aby odkryć charakterystyczne właściwości zawarte w danych. Automatyczne, nienadzorowane klasyfikacje stają się nieocenionym narzędziem w dobie eksponencjonalnego przyrostu ilości danych astronomicznych. W lokalnym Wszechświecie galaktyki można sklasyfikować np. wg krejsz z wersji diagramu kamertonowego Hubble'a. Dla wyższych przesunięć ku czerwieni często ograniczamy się do trzech klasycznych grup galaktyk: czerwonych—pasywnych, niebieskich—aktywnych i pośrednich mającymi swoje miejsce w zielonej dolinie. Istnieje więcej podklas tych galaktyk, ale nie jesteśmy w stanie zbudować próbki treningowej w celu użycia algorytmów nadzorowanych, gdyż nie znamy dokładnych właściwości tych podklas.

W artykule **H9** zaproponowaliśmy nowe podejście do klasyfikacji galaktyk, oparte na trzynastowymiarowej przestrzeni parametrów zbudowanej z 12 jasności bezwzględnych i spektroskopowego przesunięcia ku czerwieni. Za pomocą algorytmów nienadzorowanych znaleźliśmy 12 klas (11 klas rzeczywistych i jedna klasa obiektów odstających), które są uporządkowane według ściśle określonej sekwencji od najwcześniejszych do najpóźniejszych typów, dzieląc galaktyki na trzy główne grupy: czerwoną, zieloną i niebieską. Grupy te zostały następnie automatycznie podzielone na podklasy: trzy czerwone, trzy zielone i pięć niebieskich. Granice, które znaleźliśmy pomiędzy klasami, nie są ostre (takie podejście jest bardziej realistyczne, ponieważ przejście między klasami powinno być ciągłe); prawdopodobieństwo przynależności do danej klasy jest przypisane do każdej galaktyki, podobnie jak w artykule **H8**. Wszystkie galaktyki należące do końcowych 11 grup mają wspólne właściwości fizyczne i widmowe, także poza cechami wykorzystywanymi do celów klasyfikacji. Oznacza to, że nasze nowe podejście do klasyfikacji pozwala nam na śledzenie ścieżek ewolucji galaktyk i

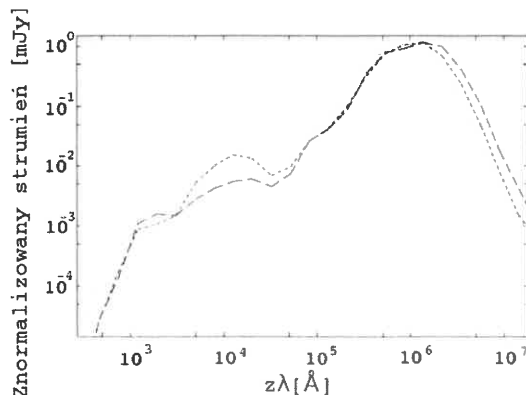


Fig. 3: Średnie znormalizowane widma energetyczne dla długości fali $90\ \mu\text{m}$; ULIRG (linia przerywana), LIRG (linia kropkowana) i pozostałe galaktyki (linia ciągła). Otrzymane średnie widma energetyczne zostały przedstawione w układzie spoczynkowym (ich przesunięcie ku czerwieni wynosi 0). Rysunek pochodzi z pracy Małek et al. (2013a).

wybieranie z dużych przeglądów np. czystej klasy galaktyk przysłoniętej pyłem, tworzących gwiazdy bardzo efektywnie (np. klasa 6 z pracy H9). Dodanie do schematu klasyfikacyjnego danych FIR pomoże w selekcjonowaniu bardziej szczególnych galaktyk ze względu na zmianę tłumienia pyłu – na podstawie zdefiniowanych klas, można prześledzić różne właściwości tłumienia pyłu oraz jego pełną ewolucję bez zniekształceń powodowanych selekcją (bardziej szczegółowo proces ten został opisany w pracy H4 oraz przedstawiony na Rys. 4).

Poniżej przedstawiam kolejno wszystkie artykuły naukowe, które wchodzi w skład mojego osiągnięcia naukowego, omawiając je bardziej szczegółowo.

3 Właściwości galaktyk obserwowanych w głębokich przeglądach FIR

Małek et al. (2013a) [H1], and Małek et al. (2014) [H2]

Rozpoczęłam badania nad galaktykami obserwowanymi w podczerwieni używając do tego celu przeglądu AKARI Deep Field-South (ADF-S). ADF-S jest dużym (~ 12 stopni²) pozagalaktycznym przeglądem nieba, który obserwowany był przez wiele instrumentów, rejestrujących fale optyczne, IR i radiowe. Lokalizacja tego pola (RA=4:44:00, Dec=-53:20:00) jest bardzo perspektywiczna, ponieważ leży on blisko południowego bieguna ekliptycznego i w przyszłości będzie także objęty obserwacjami takich misji kosmicznych jak Euklid czy SPICA (Nakagawa et al., 2015).

Wspólnie ze współpracownikami wykorzystaliśmy wieloczęstotliwościowy katalog ADF-S (Małek et al., 2010), który był pierwszym takim katalogiem (wieloczęstotliwościowy to moje tłumaczenie angielskiego odpowiednika multiwavelength, czyli zawierający pomiary pochodzące z różnych instrumentów, zebrane w różnych długościach fal) pola ADF-S, zawierającym 1000 najjaśniejszych źródeł wykrytych w paśmie $90\ \mu\text{m}$. W roku 2010, czyli w czasie kiedy ten katalog powstawał, jedynie 545 galaktyk posiadało optyczne odpowiedniki w innych katalogach, a co więcej, jedynie dla niecałych 25% z nich posiadaliśmy informacje o przesunięciu ku czerwieni. Aby zbadać naturę i właściwości źródeł ADF-S w pracy H1 obliczyłam fotometryczne przesunięcia ku czerwieni dla wszystkich z nich.

W Małek et al. (2010) wykazaliśmy, że obserwowane w ADF–S jasne źródła punktowe FIR mają bardzo podobne właściwości jak lokalna populacja galaktyk jasnych optycznie, z wyjątkiem niezwykle wysokiego odsetka obiektów szczególnych lub oddziałujących oraz mniejszego udziału galaktyk eliptycznych. Odsetek galaktyk soczewkowatych okazał się taki sam jak w populacji jasnej optycznie, co sugeruje, że galaktyki tego typu mogą często zawierać znaczną ilość chłodnego pyłu. 343 z 1000 najjaśniejszych galaktyk obserwowanych w polu ADF–S nie było wcześniej znanych jako źródła IR. W pracy Małek et al. (2010) na podstawie rozkładu spektroskopowego przesunięcia ku czerwieni pokazaliśmy, że galaktyki obserwowane w polu ADF–S to głównie bliskie galaktyki, ale bez informacji o przesunięciu ku czerwieni dla całej próbki, nie mogliśmy wyciągnąć jednoznacznych wniosków. W moim pierwszym artykule włączonym do dorobku habilitacyjnego, Małek et al. 2013a, **H1**, oszacowałam fotometryczne przesunięcia ku czerwieni (z_{phot}) dla dodatkowych 113 galaktyk posługując się techniką modelowania widm energetycznych galaktyk (ang. *spectral energy distribution*, SED) z wykorzystaniem kodu Code Investigating GALaxy Emission (CIGALE Noll et al., 2009; Boquien et al., 2019). Podstawowym założeniem metody modelowania SED jest rekonstrukcja emisji gwiazd znajdujących się w galaktyce z modelami syntezy populacji i historią powstawania gwiazd o różnej złożoności przy użyciu wolnych parametrów (np. Walcher et al., 2011; Conroy, 2013).

Program wykorzystywany do modelowania widm galaktyk, CIGALE, został w pracy **H1** po raz pierwszy zastosowany w celu oszacowania z_{phot} . W tym czasie kod CIGALE nie był zaprojektowany jako narzędzie do szacowania z_{phot} , ale odkryliśmy, że w przypadku galaktyk IR bardziej efektywne było użycie narzędzia do modelowania SED wykorzystującego bilans energetyczny pomiędzy UV i FIR, niż użycie standardowych kodów do szacowania z_{phot} , które koncentrują się głównie na UV-optycznym zakresie widm.

Wykorzystanie użyteczności kodu CIGALE do estymacji z_{phot} i zaproponowanie procedury postępowania było ubocznym, ale istotnym dla całej społeczności astronomicznej wykorzystującej podczerwone narzędzia do modelowania SED. W rezultacie, nowa wersja kodu CIGALE (Boquien et al., 2019) ma już zaimplementowaną tę funkcjonalność. W **H1** doszliśmy do wniosku, że najjaśniejsza próbka obiektów IR ADF–S składa się głównie z pobliskich, masywnych galaktyk. Galaktyki te są również bardzo aktywne, jeżeli chodzi o procesy SF, co jest ściśle skorelowane z przesunięciem ku czerwieni (dalsze galaktyki są bardziej aktywne - co może być częściowo spowodowane selekcją). Ustaliliśmy, że 25% próbki stanowią ULIRG-i. Podobnie jak w Sanders & Mirabel (1996a) definiuję ULIRG-i jako galaktyki o całkowitej jasności w podczerwieni (L_{dust}) większej niż $10^{12}[L_{\odot}]$ (podobnie definiuję LIRG-i, jako te, dla których $10^{11}[L_{\odot}] < L_{dust} < 10^{12}[L_{\odot}]$).

Dzięki wysokiej statystyce ULIRG-ów i LIRG-ów, w pracy Małek et al. (2013a) zsumowaliśmy i opublikowaliśmy średnie modele SED dla ULIRG-ów, LIRG-ów i pozostałych galaktyk podczerwonych znalezionych w polu ADF–S, znormalizowanych na poziomie $90 \mu m$ (Rys. 3).

Poprzednie badania wskazują, że w lokalnym Wszechświecie (przesunięcie ku czerwieni poniżej 0,2) ULIRG-i są rzadko obserwowanymi obiektami (Kim & Sanders, 1998), ale przy wyższym przesunięciu ku czerwieni stają się one bardziej powszechne (Takeuchi et al., 2005a; Symeonidis et al., 2013). Ponieważ w polu ADF–S, które zawiera niedalekie obiekty, znalazłam grupę LIRG-ów i ULIRG-ów, zdecydowałam się na przeprowadzenie bardziej analizy tych źródeł. W pracy Małek et al. (2014), **H2**, wykazałam, że ULIRG-i oraz LIRG-i zawierają chłodniejszy pył niż reszta próbki ADF–S. Widoczne jest wyraźne przesunięcie maksimum emisji pyłu w kierunku dłuższych fal (Rys. 3) niż dla pozostałych galaktyk. Ponadto średnie modele widm energetycznych wykazują rosnący stosunek jasności bolometrycznej i podczerwonej do jasności pyłu. Wartość ta jest ściśle skorelowana z atenuacją pyłu w paśmie V ($\sim 0.55 \mu m$) dla populacji gwiazdowej. Ogólnie rzecz biorąc, natura LIRG-ów i ULIRG-ów nie jest trywialna. Wygląda na to, że większość lokalnych ULIRG-ów to systemy powstałe w wyniku zderzeń bogatych w gaz galaktyk dyskowych (Murphy et al., 1996; Clements et al., 1996; Veilleux et al., 2002), podczas gdy lokalne LIRG-i

mają bardziej zróżnicowane morfologie (Hung et al., 2014); emitują one większość swojej energii (ponad 90%) w zakresie IR, co oznacza, iż w dużym stopniu zasłonięte są pyłem (Sanders & Mirabel, 1996b). Pomimo bardzo jasnego składnika pyłowego LIRG-i i ULIRG-i charakteryzują się umiarkowanym natężeniem światła w pasmach optycznych. Z tego powodu, aby wyjaśnić ich bardzo wysokie natężenie promieniowania podczerwonego, obiekty te muszą posiadać wciąż trwające, gwałtowne procesy gwiazdotwórcze, tworząc nowe gwiazdy w tempie 100 mas słońca w ciągu roku ($100 M_{\odot} \text{yr}^{-1}$, na podstawie wzorów zawartych w Kennicutt, 1998 i wyników opublikowanych w da Cunha et al., 2015; Howell et al., 2010; Podigachoski et al., 2015 i innych). Ta bardzo intensywna formacja nowych gwiazd jest niemal niewykrywalna w długościach fal innych niż IR (Pérez-González et al., 2005). Wyniki te skłoniły mnie do bardziej szczegółowej analizy właściwości tłumienia pyłu w różnego rodzaju populacjach galaktyk IR, ale najpierw chciałam odpowiedzieć na pytanie, czy, a jeśli tak, to w jaki sposób aktywne jądra galaktyk (ang. Active Galactic Nucleus, AGN) mogą mieć wpływ na jasność ULIRG-ów i LIR-Gów.

3.1 Wpływ różnych typów AGN-ów na widmo energetyczne LIRG-ów i ULIRG-ów

Małek et al. (2017) [H3]

Z wcześniejszych badań wynika, że ponad 25% (Veilleux et al., 1997), 30% (Clements et al., 1996; U et al., 2012), 40% (Farrah et al., 2007; Veilleux et al., 2009), 50% (Alonso-Herrero et al., 2012; Carpineti et al., 2015) a nawet 70% (Nardini et al., 2010) ULIRG-ów i LIRG-ów w naszym lokalnym Wszechświecie zawiera AGN-y. Tak duża rozbieżność wyników badań sugeruje, że odsetek LIRG-ów i ULIRG-ów, w których znajdują się AGN-y, ściśle zależy od selekcji próbki i metody diagnostycznej umożliwiającej identyfikację AGN-ów. Najbardziej prawdopodobnym dominującym czynnikiem wpływającym na całkowitą emisję IR w większości ULIRG-ów jest aktywność gwiazdotwórcza, która może być związana z obecnością AGN-ów. W artykule Veilleux et al. (2009), na podstawie próbki *Spitzer* 1 Jy, stwierdzono, że udział AGN-ów w lokalnych ULIRG-ach może wahać się od 30% do nawet 50%, a ich zawartość jest silnie uzależniona od samej jasności pyłu. Veilleux et al. (2009) i Lee et al. (2011) pokazali, że ULIRGi częściej zawierają Typ 2 AGN-ów, czyli przysłoniętych torusem pyłowym, niż Typ 1 (centralny obszar aktywnego jądra znajduje się na linii widzenia obserwatora), a odsetek ULIRG-ów połączonych z Typem 2 AGN wzrasta wraz ze wzrostem jasności IR. Podobną konkluzję można znaleźć w pracy Kim (1995). Ponieważ wszystkie wymienione artykuły oparte były na bardzo podobnej selekcji obiektów (przeglądy IRAS 1 Jy i *Spitzer* 1 Jy), bardzo interesującym wydaje się sprawdzanie, czy ULIRGi wyselekcjonowane w inny sposób mają podobne właściwości.

Do analizy wykorzystałam ten sam wieloczęstotliwościowy katalog Małek et al. (2010) jak w moich poprzednich pracach, ale tym razem dodałam nowe pomiary fotometryczne, głównie z teleskopów GALEX, *Spitzer* (Rieke et al., 2004), WISE i przeglądu ATCA-ADFS (White et al., 2012), a także nowe dane spektroskopowe, nie zawarte w moich poprzednich badaniach (głównie Sedgwick et al., 2011), w celu stworzenia rozszerzonej wersji katalogu. Aby uniknąć możliwych nieprawidłowości związanych z wyznaczeniem z_{phot} , wybrałam tylko galaktyki z przesunięciem ku czerwieni >0.05 , charakteryzujące się z dobrym pokryciem spektralnym całych widm: od UV do FIR. W sumie wyselekcjonowałam 69 galaktyk.

Razem ze współpracownikami, użyliśmy narzędzia CIGALE do obliczenia podstawowych właściwości fizycznych jasnych galaktyk podczerwonych ADF–S. Uwzględniliśmy moduł Fritz et al. (2006), który odzwierciedla geometryczną strukturę torusa pyłowego oraz emisję pochodzącą z AGN-ów i przeprowadziliśmy analizę obu typów (Typ 1 i Typ 2). Dodatkowo, w celu uzyskania niezależnych wyników pomiarów L_{dust} i temperatury pyłu, wykorzystaliśmy narzędzie do modelowania CMCIRSED SED (Casey, 2012) dopasowujące do części podczerwonej widma funkcję

zmodyfikowanego ciała doskonale czarnego (tzw. gray body) oraz funkcję potęgową. Część pracy związanej z modelowaniem widm podczerwonych galaktyk programem CMCIRSED SED wykonała doktorantka, Małgorzata Bankowicz, w której przewodzie jestem promotorem pomocniczym.

Wykazaliśmy, że 25% obiektów z pola ADF–S można sklasyfikować jako ULIRG-i, natomiast 32% jako LIRG-i. Większość LIRG-ów to galaktyki pobliskie, z przesunięciem ku czerwieni poniżej 0,4. Jednocześnie rozkład przesunięcia ku czerwieni ULIRG-ów jest znacznie szersza i obejmuje zakres od 0.1 do 1,4. Na podstawie metody dopasowania SED-ów w pełnym przedziale widma, od UV do FIR, doszliśmy do wniosku, że dla większości ULIRG-ów w polu ADF–S wkład AGN-ów w całkowitą jasność pyłu L_{dust} jest wyższy niż $19\pm 8\%$. Wkład AGN-ów do jasności LIRG-ów jest nieco niższy i wynosi $13\pm 3\%$. Wykazaliśmy, że w próbce LIRG-ów z pola ADF–S znajdują się AGN-y zarówno Typu 1, Typu 2, jak i typów pośrednich. Przeważająca część ULIRG-ów zawiera AGN-y Typu 2.

Dla ponad 64% ULIRG-ów i LIRG-ów z pola ADF–S, wkład AGN-ów w całkowitą jasność jest wyższy niż 10%. Stwierdziliśmy, że ULIRG-i charakteryzują się wyższą zawartością AGN-ów niż LIRG-i, a ponadto wkład AGN-ów zwiększa się wraz z jasnością pyłu. Większość ULIRG-ów wykazuje udział AGN na poziomie wyższym niż 20%. Jak wynika z pracy Ciesla et al. (2015), wkład emisji AGN-ów w całkowitą jasność L_{dust} wyznaczony przez CIGALE jest praktycznie zawsze przeszacowywany dla wkładu AGN-ów poniżej 10%. Równocześnie jest on niedoszacowany dla wyznaczonego wkładu AGN-ów powyżej 20%. Ponieważ większość LIRG-ów i ULIRG-ów w polu ADF–S charakteryzuje się wkładem AGN-ów na poziomie powyżej 10%, rzeczywisty wkład może być niedoszacowany, a zatem uzyskane przez nas wartości należy traktować jako limity dolne.

Pojawia się pytanie, dlaczego chłodne ULIRG-i mają większe szanse na to, że zawierają AGN-y, których jądro znajduje się na linii widzenia obserwatora? Jeżeli przyjmiemy, że emisja pyłu w ULIRG-ach jest izotropowa, takie odkrycie mogłoby podważyć teorię unifikacji AGN-ów, według której galaktyki Seyferta Typu 1 i Typu 2 są tego samego rodzaju obiektami, otoczonymi optycznie grubym torusem pyłu, ale widzianymi pod różnymi kątami (Antonucci, 1993). Istotnie, takie wyjaśnienie zaobserwowanej tendencji różnych rodzajów ULIRG-ów do posiadania różnych typów AGN-ów sugerowały na przykład prace Veilleux et al. (1997) i Lee et al. (2011).

Aby rozwiązać tę zagadkę bardziej szczegółowo, potrzebujemy lepszych zestawów danych, z bardziej precyzyjnymi pomiarami IR obejmującymi pełne spektrum galaktyk od NIR do FIR, aby znacznie dokładniej odwzorować kształt emisji samego AGN-a, bądź też użyć bardziej zaawansowanych modeli do opisu torusa pyłowego niż Fritz et al. (2006). Jest to temat mojej obecnej pracy. Jak już wcześniej sprawdziliśmy, (H1 i H2, kolejno Małek et al., 2013a, 2014), tłumienie pyłu odgrywa również bardzo ważną rolę w opisie właściwości galaktyk, zwłaszcza galaktyk z dużą ilością pyłu, postrzeganych jako ekstremalne obiekty podczerwone, jak LIRG-i, ULIRG-i czy nawet Hyper LIRG-i (jasność L_{dust} powyżej $10^{13}[L_{\odot}]$).

4 Atenuacja pyłu

Gwiazdy i pył w galaktykach wspólnie ewoluują i ich własności wzajemnie od siebie zależą. Ponieważ obserwowane promieniowanie zależy zarówno od własności pyłu, jak i od własności gwiazd, jednoczesne modelowanie ich własności nie jest sprawą łatwą. Tę złożoną zależność odzwierciedla prawo atenuacji pyłu, czyli wygaszania intensywności promieniowania galaktyki w danym paśmie. Nieznajomość dokładnego kształtu krzywej tłumienia ogranicza interpretację podstawowych własności galaktyk, takich jak wiek, masa i tempo powstawania gwiazd.

Wraz z pojawieniem się teleskopów rejestrujących emisję w zakresie fal podczerwonych i sub-

milimetrowych, zawartość pyłu (masa pyłu i emisja pyłu) jest mierzona rutynowo dla niskich i wysokich przesunień ku czerwieni (Cortese et al., 2012; Dunne et al., 2011; Santini et al., 2014). Obecność pyłu w galaktyce powoduje poczerwienienie, będące konsekwencją tłumienia najsilniejszego w zakresie promieniowania UV i zmniejszającego się w kierunku fal dłuższych. Poczerwienienie to jest zależne zarówno od właściwości pyłu, jak i od rozmieszczenia go w strukturze galaktyki. Proces interakcji pomiędzy gwiazdami i pyłem charakteryzuje się głównie krzywą wygaszenia mierzoną wzdłuż linii widzenia pojedynczych gwiazd, co daje bezpośredni wgląd we właściwości pyłu. Jednak jeśli weźmie się pod uwagę duże regiony galaktyk lub galaktyki jako całość, wpływ pyłu na populację gwiazd zależy nie tylko od ilości i właściwości pyłu, ale także od jego rozmieszczenia w stosunku do obszarów gwiazdotwórczych. Ta złożona interakcja prowadzi do pojawienia się prawa atenuacji, którego zależność od długości fali jest generalnie bardzo różna od krzywej wygaszenia (np. Witt & Gordon, 2000). W zależności od o kształtu krzywej atenuacji, efekty te ograniczają możliwość oszacowania i interpretacji podstawowych własności galaktyk, takich jak wiek populacji gwiazdowych, masa gwiazdowa oraz tempo powstawania gwiazd (dokładny opis wpływu na pomiary mas gwiazdowych galaktyk można znaleźć w artykułach Mitchell et al., 2013; Lo Faro et al., 2017; Małek et al., 2018; Buat et al., 2018).

4.1 Ewolucja krzywej atenuacji

Buat et al., 2015, [H4]

Wspólnie ze współpracownikami dokonaliśmy dokładnego oszacowania atenuacji pyłu dla galaktyk IR obserwowanych na Północnym Polu Bieguna Ekliptyki AKARI (AKARI NEP). Pole to jest znacznie mniejsze niż pole obserwowane w ramach przeglądu ADF–S, ponieważ obejmuje obszar $0,4 \text{ stopni}^2$ (Matsuhara et al., 2006). Dane uzyskano za pomocą przyrządu Infra-red Camera (IRC, Onaka et al., 2007), który zbierał dane w filtrach NIR i MIR, wyśrodkowanych na długościach fal 2 (N2), 3 (N3), 4 (N4), 7 (S 7), 9 (S 9), 11 (S 11), 15 (L15), 18 (L18) i 24 (L24) μm . Długie czasy ekspozycji umożliwiły stworzenie bardzo głębokiego katalogu – 26,86 magnitudy w paśmie N2. Do danych optycznych i danych NIR dodaliśmy również pomiary z pasm UV i FIR (*Herschel* 100 i 160 μm). Do ostatecznej analizy wykorzystaliśmy 4077 galaktyk wyselekcjonowanych w paśmie 8 μm . Ze względu na dużą próbkę galaktyk, podzieliliśmy obiekty na cztery grupy ze względu na przesunięcie ku czerwieni na 0.3, 1.0, 1.5 i 2.0. Wyznaczyliśmy atenuację pyłu za pomocą pełnego modelowania widm galaktyk w przedziale UV – FIR wraz z komponentem AGN (Fritz et al., 2006 model). Zastosowaliśmy różne prawa tłumienia znane w literaturze:

1. Calzetti et al. (2000) o elastycznym nachyleniu, z dodatkową wypukłością (tzw. *bumpem*) na długości fali 2175 Å:

$$A_\lambda = E(B - V)(k'(\lambda) + D_{\lambda_0, \gamma, E_b}(\lambda))\left(\frac{\lambda}{\lambda_V}\right)^\delta, \quad (1)$$

gdzie $A_\lambda = A_V(\lambda/\lambda_V)^\delta$, λ_V jest długością fali 550 μm , A_V jest atenuacją mierzoną w paśmie V, k' zdefiniowane jest jako

$$k'(\lambda) = \begin{cases} 2.659(-1.857 + 1.040/\lambda)R'_V, & (0.63 \leq \lambda \leq 2.20[\mu\text{m}]), \\ 2.659(-2.156 + 1.509/\lambda - 0.198/\lambda^2 + 0.011/\lambda^3) + R'_V & (0.12 \leq \lambda < 0.63[\mu\text{m}]), \end{cases} \quad (2)$$

a R'_V jest stałą. Część równania $D_{\lambda_0, \gamma, E_b}(\lambda)$ opisuje wybrzuszenie krzywej atenuacji dla $\lambda=2175 \text{ Å}$ (dokładny opis tej modyfikacji znajduje się w pracy Noll et al., 2009),

2. *LMC2-like* – otrzymana bezpośrednio z pomiarów krzywa atenuacji dla galaktyk o wysokim przesunięciu ku czerwieni opublikowana przez Buat et al. (2012) i odpowiadająca $E_b = 1.6$ i $\delta = -0.27$ w równaniu 1, bardzo podobna do krzywej atenuacji Wielkiego Obłoku Magellana z dodatkowym wybrzuszeniem dla długości fali $\lambda=2175 \text{ Å}$,

3. *SMC-like* – krzywa atenuacji zbliżona do wyznaczonego prawa tłumienia dla Małego Obłoku Magellana, gdzie $\delta = -0.5$ i $E_b = 0$.

Zastosowaliśmy oddzielne prawa tłumienia dla młodych i starych gwiazd (współczynnik 2 zmniejsza nadmiar koloru otrzymanego dla gwiazd starszych niż 10^7 lat, podobnie jak w Calzetti (1997), lub Charlot & Fall (2000)). Wykazaliśmy, że przyjmując jako wartość referencyjną wyniki otrzymane z Buat et al. (2012), tłumienie pyłu w paśmie UV (dla długości fali równej $150 \mu\text{m}$) jest wyższe dla *SMC-like* i niższe dla Calzetti et al. (2000). Równocześnie znaleźliśmy odwrotną zależność dla atenuacji pyłu w paśmie V (odpowiadającemu starszej populacji gwiazdowej).

Wkład jasności pochodzącej od AGN-ów do całkowitej emisji w podczerwieni jest znikomy i wynosi średnio 10%, z pewnymi przesłankami wskazującymi na jego wzrost z przesunięciem ku czerwieni. Zauważyliśmy, że przyjęte scenariusze dla dwóch różnych typów AGN-ów (AGN Typu 1 i Typu 2) wpływają na oszacowanie wartości atenuacji pyłu. Zastosowanie AGN Typu 1 powoduje nieznacznie wyższe tłumienie w pasmach UV (odpowiadających młodej populacji gwiazdowej).

Główne wyniki naszych badań pokazane są na Rys. 4. Wykres ten pokazuje porównanie ewolucji atenuacji pyłu w zakresie przesunięć ku czerwieni pomiędzy lokalnym Wszechświatem, aż do przesunięcia ku czerwieni rzędu 2 (czyli do momentu gdy Wszechświat miał zaledwie 3,2 miliona lat), uzyskanej za pomocą odmiennych metod i w próbkach wyselekcjonowanych na podstawie różnych kryteriów.

Uwzględniliśmy ogólne pomiary atenuacji pyłu na podstawie gęstości natężenia promieniowania (Burgarella et al., 2013) oraz pomiary przeprowadzone w dużych przeglądach aktywnych gwiazdotwórczo galaktyk wyselekcjonowanych w pasmach UV lub jako emitery H_α . Wykazaliśmy, że atenuacja pyłu oszacowana na podstawie galaktyk wyselekcjonowanych w pasmach podczerwonych jest znacznie większa (około 2 mag) niż ta sama wartość uzyskana na podstawie danych pozyskanych w wyniku selekcji UV lub H_α . Jest ona również większa niż ogólna atenuacja pyłu we Wszechświecie mierzona równocześnie przy pomocy natężenia światła podczerwonego i UV. Nasze wyniki mogą być zaskakujące, ale biorąc pod uwagę ścisłą korelację pomiędzy metodą selekcji a masami gwiazdowymi wybranych galaktyk, mogą być uzasadnione następująco: selekcja UV dokonuje wyboru szerokiego spektrum mas gwiazdowych, podczas gdy selekcja w podczerwieni preferuje galaktyki o dużej masie gwiazdowej. Wiele wcześniejszych badań wykazało, że atenuacja pyłu wzrasta wraz z masą gwiazdową w galaktykach (np., Hopkins et al., 2001; Martin et al., 2005; Buat et al., 2007) lub tempem powstawania gwiazd (np., Brinchmann et al., 2004; Pannella et al., 2009; Buat et al., 2012) i jest ściśle związana z jasnością pyłową galaktyk (Kennicutt, 1998). Oznacza to, że selekcja zastosowana w H4 preferuje masywne galaktyki, dla których tłumienie pyłu jest bardziej istotne niż w przypadku innych, mniej masywnych galaktyk. Wykazaliśmy, że model fenomenologiczny zaproponowany przez Bernhard et al. (2014), opisujący ewolucję funkcji jasności UV i IR w funkcji przesunięcia ku czerwieni może bardzo dokładnie odwzorować wysoką atenuację pyłu otrzymaną dla galaktyk podczerwonych (wyniki otrzymane na podstawie tego modelu zaznaczone są na Rys. 4 jako zielone puste kwadraty). Wyniki tej pracy stanowią kolejną przesłankę dowodzącą konieczności rozwiązania problemu klasyfikacji i selekcji galaktyk.

4.2 Wpływ atenuacji pyłu na podstawowe parametry fizyczne galaktyk

The *Herschel* Extragalactic Legacy Project (HELP) został ufundowany przez Komisję Europejską w ramach 7go Programu Ramowego SPACE. Jego głównym celem było opracowanie narzędzi i przygotowanie zestawu danych umożliwiających astronomom w Europie i na świecie korzystanie z badań odległego Wszechświata prowadzonych przez misję ESA *Herschel*. HELP skupia się na danych pochodzących z tej misji pokrywającej obszar ponad 1300 stopni kwadratowych na nie-

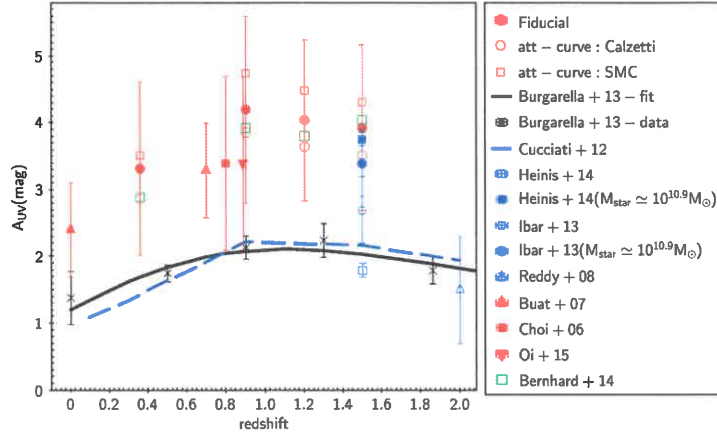


Fig. 4: Średnie wartości współczynnika tłumienia, $A_{UV}(mag)$, w funkcji przesunięcia ku czerwieni (redshift). Czerwone symbole odpowiadają próbkom galaktyk wybranym w podczerwieni. Uzyskane wyniki analizy otrzymane z pracy **H4**, (Buat et al., 2015), są oznaczone jako: czerwone pełne koła – wyniki otrzymane przy użyciu modelu *LCM2-like*, puste czerwone koła – dla rezultatów uzyskanych na podstawie modelu atenuacji Calzetti et al. (2000), puste czerwone kwadraty – z wykorzystaniem prawa atenuacji *SMC-like*. Niebieskie symbole i linie odwołują się do selekcji bazującej na promieniowaniu w zakresie UV bądź też na podstawie linii H_{α} . Czarna linia i krzyże odpowiadają ogólnym szacunkom pochodzącym z Burgarella et al. (2013) opartym na funkcjach jasności. Ich rozwiązanie analityczne jest oznaczone jako linia ciągła, a krzyże odpowiadają ich pomiarom w różnych przesunięciach ku czerwieni. Zielone puste kwadraty są średnimi wartościami atenuacji pyłu wyznaczonymi przy pomocy modelu Bernhard et al. (2014). Rysunek pochodzi z pracy Buat et al. (2015)

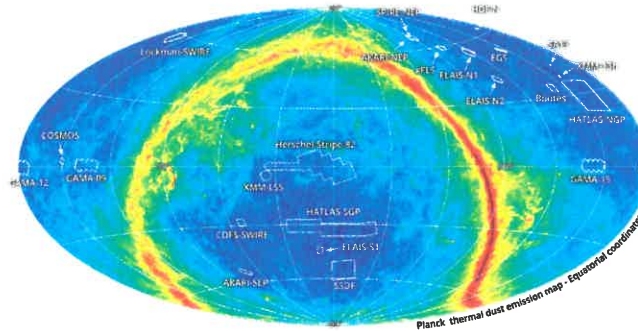


Fig. 5: Mapa obszarów nieba analizowanych w projekcie HELP. Każdy biały region jest indywidualnym polem, które zawiera dane pochodzące z Kosmicznego Obserwatorium Herschela oraz obserwacje pochodzące z innych przeglądów nieba. Kolorowa mapa tła pokazuje gęstość zapylenia Drogi Mlecznej.

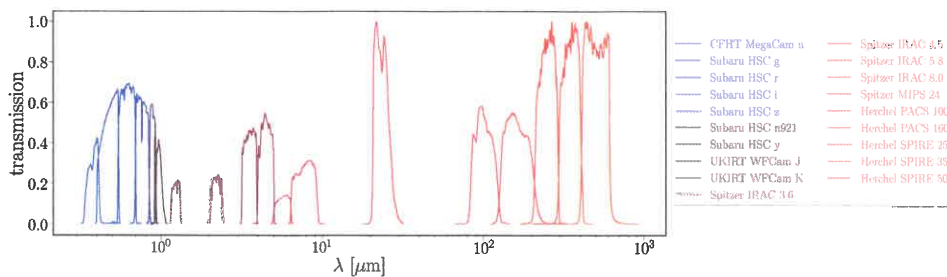


Fig. 6: Krzywe transmisji i przykładowe pokrycie głównych pasm fotometrycznych używanych do modelowania SED w polu ELAIS N1. W przypadku, gdy wiele filtrów obejmuje ten sam region, dla jasności pokazałam jeden filtr. Rysunek pochodzi z pracy Małek et al. (2018).

bie i jest w fazie przygotowań do publikacji katalogu wielu setek milionów obiektów mających obserwacje w wielu długościach fal. Mapa obszarów, które zostały uwzględnione w projekcie jest przedstawiona na Rys. 5. HELP ma na celu zestawienie i ujednolicenie obserwacji pochodzących z różnych instrumentów astronomicznych (w zakresie od UV do fal radiowych), a ponadto oszacowanie kluczowych parametrów fizycznych obserwowanych galaktyk. Kompletna baza danych HELP zawiera 170 milionów galaktyk. Każde pole analizowane w ramach projektu zawiera co najmniej 15 pasm fotometrycznych, a każda galaktyka posiada spektroskopowe lub fotometryczne przesunięcie czerwieni. W projekcie uczestniczę od roku 2017, przez 2 lata jako koordynator pakietu WP9 - modelowanie właściwości fizycznych galaktyk. W roku 2019 zostałam powołana na stanowisko Project Scientist w tym projekcie i jestem odpowiedzialna za fizyczne modelowanie galaktyk.

Moim głównym celem było znalezienie najlepszej metody jednoczesnego dopasowania widm energetycznych milionów galaktyk w szerokim zakresie przesunięć ku czerwieni, w celu uzyskania jednorodnych oszacowań głównych parametrów fizycznych galaktyk obserwowanych w podczerwieni. Moje zadanie polegało na wykonaniu dopasowania SED dla galaktyk znajdujących się we wszystkich 21 polach wchodzących w skład projektu HELP, ale dla potrzeb szczegółowej analizy fizycznej skupiłam się głównie na polach ELAIS N1 i COSMOS. Pole ELAIS N1 wybrałam ze względu na jego reprezentatywność wśród umiarkowanie głębokich pól należących do HELP, natomiast COSMOS – dlatego, że jest to najbardziej znane i najczęściej analizowane pole w środowisku astrofizycznym zajmującym się analizą galaktyk, co bardzo ułatwia porównywanie z wcześniejszymi pracami.

4.2.1 Nowa metoda kontroli jakości modelowania SED i wpływ atenuacji pyłu na masę gwiazdową galaktyk

Małek et al., 2018, [H5]

W pracy Małek et al. (2018), **H5**, przedstawiłam modelowanie widm energetycznych 42 047 galaktyk z pilotażowego pola HELP: European Large Area ISO Survey North 1 (ELAIS N1). Pole to ma powierzchnię 9 stopni² wyśrodkowaną w RA=16:10:01 DEC=+54:30:36 (Oliver et al., 2000; Rowan-Robinson et al., 2004). Dane pochodzące z teleskopu *Herschel* dla tego pola uzyskano w ramach projektu HerMES (Oliver et al., 2012). ELAIS N1 jest przedstawicielem umiarkowanie głębokich pól dla wszystkich katalogów HELP. Dane składają się z 19 głównych pasm fotometrycznych przedstawionych na Rys. 6, co pozwala na bardzo dokładne oszacowanie właściwości fizycznych galaktyk znajdujących się na tym polu.

Aby przeprowadzić modelowanie SED, wykorzystałam najnowszą wersję narzędzia CIGALE. Umożliwia ono oszacowanie parametrów fizycznych galaktyk za pomocą funkcji rozkładu prawdopodobieństwa.

bieństw pochodzących z najbliższych obserwacjom modeli energetycznych galaktyk. Do swojej pracy wyznaczyłam podstawowe parametry fizyczne takie jak masa gwiazdowa, SFR, i L_{dust} . Równocześnie przygotowałam specjalną wersję tego narzędzia o nazwie CIGALON (dostępna na stronach projektu HELP), która ułatwia odtworzenie otrzymanych przeze mnie wyników poprzez automatyczne zaimplementowanie modeli i parametrów użytych podczas mojej analizy. Podczas modelowania wszystkich galaktyk używałam modułu implementującego AGN-y, aby przygotować próbkę do przyszłej analizy ULIRG/LIRG.

Jednoczesne modelowanie SED-ów dla milionów galaktyk wymagało bardzo wydajnych, automatycznych metod sprawdzania jakości uzyskanych dopasowań i wiarygodności oszacowanych właściwości fizycznych. W Małek et al. (2018), **H5**, wprowadziliśmy zupełnie nową metodę kontroli jakości dopasowania modeli odchodząc od stosowanej powszechnie klasycznej analizy zredukowanych wartości χ^2 . Wykorzystaliśmy właściwości fizyczne galaktyk oraz zachowanie budżetu energetycznego pomiędzy nowo utworzonymi gwiazdami a emitującym pyłem. Pozwoliło to na wyselekcjonowanie zarówno prawidłowych dopasowań modeli jak i galaktyk specyficznych, które nie zachowują standardowego bilansu energetycznego (jak np. dusty star forming galaxies – czyli galaktyki silnie aktywne gwiazdotwórczo bardzo ściśle zasłonięte chmurami pyłu, lub galaktyki soczewkowate), czy błędne dopasowania pomiędzy danymi optycznymi i danymi pochodzącymi z podczerwieni. Do skonstruowania kryteriów oceny wykorzystaliśmy wyznaczone masy gwiazdowe galaktyk uzyskane z modelowania części UV–optycznej widma SED, oraz L_{dust} oszacowane wyłącznie na podstawie danych podczerwonych, a następnie te same wartości z pełnego dopasowania widma UV–FIR.

W publikacji Małek et al. (2018) przetestowaliśmy procedurę modelowania SED, użyte modele, parametry, kontrolę jakości procedury oraz wpływ różnych praw atenuacji na końcowe oszacowania podstawowych parametrów fizycznych galaktyk. Wykonaliśmy trzy serie modelowania widm energetycznych galaktyk z zastosowaniem trzech praw atenuacji pyłu, co pozwoliło na sprawdzenie, który model atenuacji pozwala na najwierniejsze odwzorowanie danych obserwacyjnych. Jako model referencyjny wybrałam model atenuacji pyłu opisany przez Charlot & Fall (2000). Następnie wykonałam pełną procedurę modelowania z użyciem prawa atenuacji opisanego przez Calzetti et al. (2000) jako najczęściej używanej procedury w literaturze. Jako ostatnie wykorzystałam prawo atenuacji pyłu ULIRG-ów wyprowadzone przez Lo Faro et al. (2017) w ramach projektu HELP.

W pracy Charlot & Fall (2000) założono, że gwiazdy powstają w międzygwiazdnych chmurach narodzin (ang. *birth clouds*, BCs), a następnie, po upływie okresu około 10 milionów lat, gwiazdy migrują ze swojego miejsca urodzenia do ośrodka międzygwiazdowego (ang. *Interstellar medium*, ISM), który otacza BC. Prawo atenuacji Charlot & Fall (2000) można zapisać jako:

$$A(\lambda) = \begin{cases} A_\lambda(BC) + A_\lambda(ISM), & \text{dla młodych gwiazd, (wiek} < 10^7 \text{ lat),} \\ A_\lambda(ISM), & \text{dla dojrzałych gwiazd (wiek} > 10^7 \text{ lat).} \end{cases} \quad (3)$$

gdzie $A_\lambda = A_V(\lambda/\lambda_V)^\delta$, λ_V to $550 \mu\text{m}$, A_V jest tłumieniem pyłu w filtrze V, a δ jest równa -0.7 . Wkład całkowitej efektywnej głębokości optycznej do rozproszonego ośrodka międzygwiazdowego jest zdefiniowany jako $\mu = f_{att}/(1 + f_{att})$, gdzie $f_{att} = A_V^{ISM}/A_V^{BC}$.

W ramach projektu HELP Lo Faro et al. (2017) porównała krzywe atenuacji pyłu z wynikami obliczeń równań transportu pyłu w dwudziestu ULIRG-ach obserwowanych przez satelitę *Herschel*. Wyznaczyła ona prawo atenuacji pyłu podobne do Charlot & Fall (2000), ale znacznie bardziej spłaszczone, składające się z dwóch krzywych potęgowych o wykładnikach dla BC i ISM równych -0.48 (zamiast oryginalnych -0.7). Zmiana obu wykładników skutkuje znacznie bardziej płaską krzywą atenuacji w zakresie promieniowania UV. Prawo atenuacji pyłu wyznaczone przez Lo Faro et al. (2017) jest analogiczne do równania (3) z δ równą -0.48 .

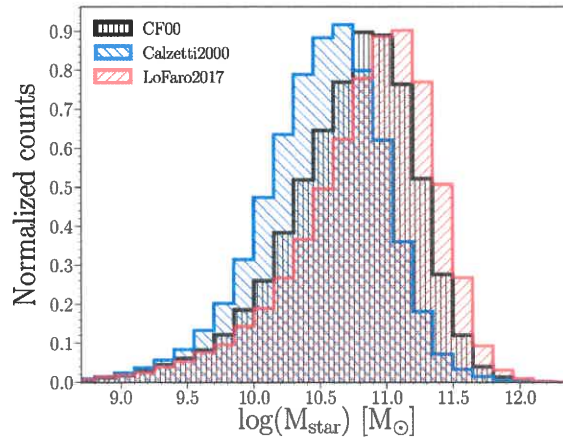


Fig. 7: Porównanie rozkładów mas gwiazdowych otrzymanych przy założeniu trzech różnych praw atenuacji pyłu: Charlot & Fall (2000) – czarny prążkowany histogram, Calzetti et al. (2000) – niebieski prawostronnie prążkowany histogram i Lo Faro et al. (2017) – czerwony lewostronnie prążkowany histogram. Wykres pochodzi z pracy Małek et al. (2018)

Model atenuacji pyłu według Calzetti et al. (2000) został opisany w równaniu (1). W naszej analizie wykluczaliśmy możliwość istnienia dodatkowego wybrzuszenia (ang. *bump*) na krzywej atenuacji ze względu na niewystarczającą gęstość pasm fotometrycznych w tym obszarze uniemożliwiającą jego precyzyjny pomiar.

Różnica w kształcie krzywych tłumienia zdefiniowanych przez Calzetti et al. (2000) i Charlot & Fall (2000) występuje dla długości fal dłuższych niż $5000 \text{ \AA}$ ($0.05 \text{ \mu m}$), gdzie krzywa atenuacji pyłu podana przez Charlot & Fall (2000) jest znacznie bardziej płaska niż ta opracowana przez Calzetti et al. (2000). Szczegółowy opis różnic pomiędzy tymi dwoma prawami tłumienia można znaleźć w Lo Faro et al. (2017).

Porównaliśmy wyniki estymacji parametrów fizycznych otrzymanych z wykorzystaniem trzech różnych krzywych atenuacji i stwierdziliśmy, że ich wpływ użytych funkcji opisujących atenuację pyłu na SFR i L_{dust} jest znikomy. Niemniej jednak wybór prawa atenuacji ma istotny wpływ na wyznaczenie masy gwiazdowej galaktyki. Rysunek 7 przedstawia rozkład mas gwiazdowych uzyskanych dla tej samej próbki galaktyk oszacowanych za pomocą trzech różnych praw atenuacji pyłu. Znaleźliśmy funkcje przeskalowujące masy uzyskane za pomocą różnych praw tłumienia - było to możliwe tylko dlatego, że używamy ogromnej liczby galaktyk, która umożliwia nam precyzyjny opis tych zależności. Wykazaliśmy, że całkowita wartość tłumienia promieniowania pochodzącego od młodych populacji gwiazdowych (w zakresie UV) jest zwykle dobrze określona przez różne prawa atenuacji pyłu. Jednocześnie sprawdziliśmy, że tłumienie w zakresie NIR nie jest zachowane pomiędzy różnymi prawami tłumienia i jest większe dla Lo Faro et al. (2017) i Charlot & Fall (2000) od atenuacji wyznaczonej na podstawie Calzetti et al. (2000). Relacja ta jest bezpośrednim wynikiem kształtu krzywych atenuacji.

Zmiana masy gwiazdowej ma wpływ na specyficzny SFR (czyli SFR na jednostkę masy gwiazdowej galaktyki) i może również skutkować pojawieniem się bardziej płaskiego kształtu dla galaktyk o wysokiej masie w tzw. galaktykach głównego ciągu (ang. *main-sequence*, czyli zależność masy gwiazdowa – SFR), gdyż w przedziale najwyższych mas mamy więcej masywniejszych galaktyk dla Charlot & Fall (2000) i Lo Faro et al. (2017), niż dla Calzetti et al. (2000) przy jednoczesnym zachowaniu tych samych wartości SFR. Głównym wynikiem pracy **H5** jest określenie kształtu praw atenuacji pyłu w paśmie NIR, które są odpowiedzialne za istotną niespójność w wyznaczonej

masie gwiazdowej, głównym parametrem fizycznym opisującym galaktyki.

Co więcej, w omawianym artykule sprawdziliśmy dokładność oszacowania jasności części pyłowej widma galaktyki wyłącznie na podstawie emisji pochodzącej z gwiazd. Wykazaliśmy, że dzięki uwzględnionemu w CIGALE problemowi zachowania budżetu energetycznego jesteśmy w stanie przewidzieć wartość L_{dust} dla standardowych galaktyk obserwowanych w podczerwieni, wyłącznie w oparciu o dane UV–NIR. Znaleźliśmy bardzo zgodne oszacowania wartości L_{dust} na podstawie UV–NIR i pełnego zakresu UV–FIR. Nasze przewidywania mogą być wykorzystywane do projektowania nowych przeglądów i jako podstawowe założenia w celu ekstrakcji strumieni z map podczerwonych. Nie jesteśmy w stanie oszacować monochromatycznych strumieni w poszczególnych długościach fal podczerwonych, a jedynie całkowitą wartość L_{dust} .

4.2.2 Zmodyfikowane prawa tłumienia i porównanie z wynikami otrzymanymi na podstawie równań transportu energetycznego w galaktykach (*radiative transfer models*)

Buat et al., 2018, [H6]

Zagłębiliśmy się w problematykę modeli atenuacji pyłu aby sprawdzić, jak skuteczne są one w porównaniu z modelami równań transportu (ang. *radiative transfer models*, RTM). Ponownie wykorzystaliśmy bazę danych HELP, ale tym razem posłużyliśmy się bardzo dobrze zbadanym polem COSMOS. Połączyliśmy galaktyki o wysokim stosunku sygnału do szumu ($S/N > 5$) pochodzące z obserwacji satelity *Herschel* pola COSMOS, z katalogiem 3D-HST w celu uzyskania linii H_α . Finałna próbka galaktyk jest bardzo mała, 34 galaktyki znajdujące się na przesunięciu ku czerwieni pomiędzy 0,6 a 1,6, małą ale kompletną próbką emiterów H_α . Rys. 8 przedstawia krzywe transmisji dla filtrów używanych do modelowania widm energetycznych galaktyk z pola COSMOS. Ponownie użyliśmy kodu CIGALE, aby dopasować emisję kontinuum widma i natężenie linii H_α dla 34 wybranych galaktyk.

Dopasowując widma UV–NIR i strumienie H_α porównaliśmy równocześnie kilka metod atenuacji pyłu: klasyczne metody Calzetti et al. (2000) równanie 4 i Charlot & Fall (2000), równanie 6, oraz elastyczne formuły modyfikujące nachylenie krzywej atenuacji. Różnica w atenuacji pomiędzy emisją gwiazd i emisją pochodzącą z mgławic, a także z młodych i starych populacji gwiazdowych, została przyjęta jako wolny parametr dla każdej z metod.

Wykazaliśmy, że elastyczne metody przy znacznym zróżnicowaniu nachylenia krzywej tłumienia dają najlepsze wyniki, potwierdzając nieuniwersalność wszelkich modeli atenuacji pyłu. Ustaliliśmy, że model Charlot & Fall (2000) w swojej oryginalnej formie, bez zmiany nachylenia funkcji, zapewnia najbardziej zadowalające wyniki. Aby otrzymać podobne wyniki przy pomocy modelu Calzetti et al. (2000), oryginalne nachylenie musi zostać istotnie zmodyfikowane. Obserwowane strumienie H_α zostały bardzo dobrze odwzorowane w otrzymanych widmach energetycznych, a średnia wartość atenuacji pyłu mierzona dla H_α wynosi 2 magnitudo.

Efektywne krzywe tłumienia uzyskane dzięki elastycznym prawom tłumienia (z nachyleniem przyjętym jako wolny parametr podczas modelowania) są na ogół bardziej strome niż oryginalne. Wykazaliśmy, że elastyczna formuła oparta na recepturze Charlot & Fall (2000) pozostaje w zgodzie z wynikami otrzymanymi na podstawie modeli RTM. W tym samym czasie zmiany w nachyleniu krzywej atenuacji przedstawionej przez Calzetti et al. (2000) nie spłaszczają wystarczająco nachylenia w bliskiej podczerwieni i otrzymane rezultaty są dalekie od zgodności, nawet w granicach błędów. Wynik ten jest przedstawiony na Rys. 9.

Zestawienie artykułów **H1–H6** pokazuje, że pył pełni kluczową rolę, silnie oddziałując i przekształcając widma energetyczne galaktyk: pochłania i rozprasza fotony pochodzące z młodych

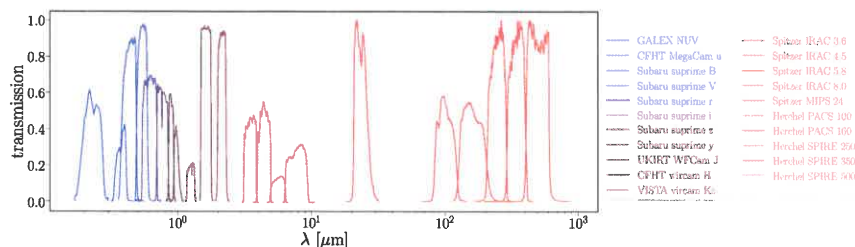


Fig. 8: Krzywe transmisji i przykładowe pokrycie głównych pasm fotometrycznych używanych do modelowania SED w polu COSMOS. Wykres pochodzi z pracy Buat et al. (2018)

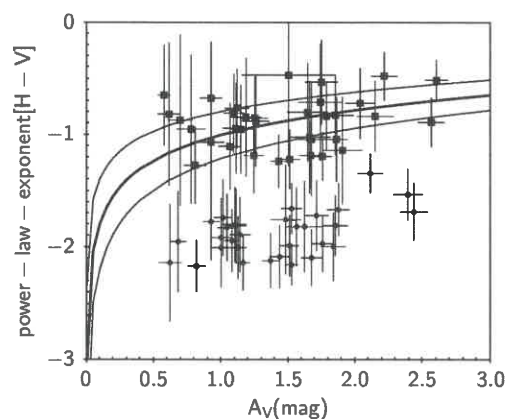


Fig. 9: Wykładniki krzywych potęgowej efektywnej atenuacji pyłu mierzone w bliskiej podczerwieni w funkcji wartości tłumienia w paśmie V. Wartości otrzymane z równań transportu energetycznego opublikowane w pracy Chevallard et al. (2013) zostały zaznaczone grubą linią. Cienkie linie odpowiadają niepewności 1σ . Wartości atenuacji i wykładników uzyskane przy użyciu zmodyfikowanych modeli Charlot & Fall i Calzetti są zaznaczone odpowiednio pełnymi kwadratami i kropkami. Wykres pochodzi z pracy Buat et al. (2018)

gwiazd oraz emituje ich energię w IR. Co więcej, analiza galaktyk podczerwonych pozwala na odkrycie nowych typów galaktyk i galaktyk bardzo odległych, w celu próbkowania różnych skal we Wszechświecie i odkrywaniu tajemnicy ewolucji galaktyk. Oznacza to również, że pracując z galaktykami podczerwonymi pochodzącymi z różnych katalogów mamy do czynienia z milionami obiektów o różnych właściwościach i różnej strukturze pyłu. Moim głównym celem naukowym jest pokazanie, jak korzystać z tych wszystkich danych równocześnie, traktując pomiary w sposób jednorodny, a także nauczyć się, jak uwzględniać nowe obserwacje z przyszłych teleskopów takich jak LSST czy SPICA, które dostarczą nam petabajty nowych danych. Analiza, którą przeprowadziłam w artykułach **H1–H6**, skłoniła mnie do połączenia problematyki modelowania różnych typów galaktyk i ich jednoczesnej klasyfikacji.

5 Klasyfikacja obiektów astrofizycznych

Klasyfikacja różnych typów obiektów jest pierwszym krokiem w rozwoju większości nauk i ma zastosowanie do badań galaktyk nie mniej niż do jakiegokolwiek innej dziedziny wiedzy. Dopiero gdy wyodrębnimy wspólne cechy badanych obiektów (takie jak pomiary jasności w podczerwieni, tłumienie obszarów nowopowstałych gwiazd, masy gwiazdowej galaktyk itp.) i wykorzystamy je do segregowania galaktyk na dodatkowe podgrupy, otrzymujemy punkt wyjściowy dla dalszych analiz. Ponieważ udowodniłam już, jak ważna jest część pyłowa widm galaktyk i jak istotne jest tłumienie pyłu, wykorzystałam swoją wiedzę do dokonania klasyfikacji na podstawie algorytmów uczenia maszynowego (najpierw nadzorowanych, w następnym kroku także tych bez nadzoru), aby dobrze zdefiniować próbki galaktyk o podobnych właściwościach, które w następnym kroku będę mogła wykorzystać do bardziej szczegółowych analiz.

Klasyfikacją obiektów zajmuję się równocześnie z modelowaniem widm energetycznych galaktyki w moim przekonaniu stanowi to nierozdzielalną całość mojego dorobku naukowego.

5.1 Gwiazdy, galaktyki, AGN-y - klasyfikacja prosta, ale nie oczywista

Małek et al., 2013b, [H7]

Pierwszą klasyfikację opartą na uczeniu maszynowym przeprowadziłam na danych pochodzących z VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey (VIPERS) - dużego programu ESO, którego celem była obserwacja 10^5 galaktyk o przesunięciu czerwieni z przedziału $0,5 < z < 1,2$. Program VIPERS miał na celu dokładny pomiar własności grupowania galaktyk, wzrostu struktury wielkoskalowej Wszechświata oraz właściwości galaktyk w epoce, gdy Wszechświat był w przybliżeniu o połowę młodszy w stosunku do swojego obecnego wieku. Postanowiliśmy opracować trzyklasowy algorytm klasyfikacji, który będzie w stanie grupować galaktyki/AGN/gwiazdy na podstawie danych fotometrycznych pochodzących z The Canada France Hawaii Telescope Legacy Survey (CFHTLS), który był podstawą fotometryczną przeglądu VIPERS. Jako zestaw treningowy wykorzystaliśmy pomiary jasności obiektów o najlepszej jakości widm spektroskopowych z danych VIPERS i VIMOS VLT Deep Survey (VVDS) Deep (pole F02) oraz Wide (pole F22). Użyliśmy metody wektorów nośnych Support Vector Machine (SVM) - klasy nadzorowanych algorytmów uczenia maszynowego.

Dzięki użyciu nieliniowych funkcji jądra, algorytmy SVM pozwalają na wyznaczenie hiperpłaszczyzn oddzielających różne grupy obiektów. Początkowo algorytmy te obejmowały nadzorowane uczenie maszynowe, w szczególności klasyfikację i regresję w medycynie i biologii, ale ostatnio znajdują wiele nowych zastosowań, także w astronomii, ze względu na zwiększającą się liczbę obserwacji astronomicznych uniemożliwiających manualną analizę pojedynczych obiektów. SVM

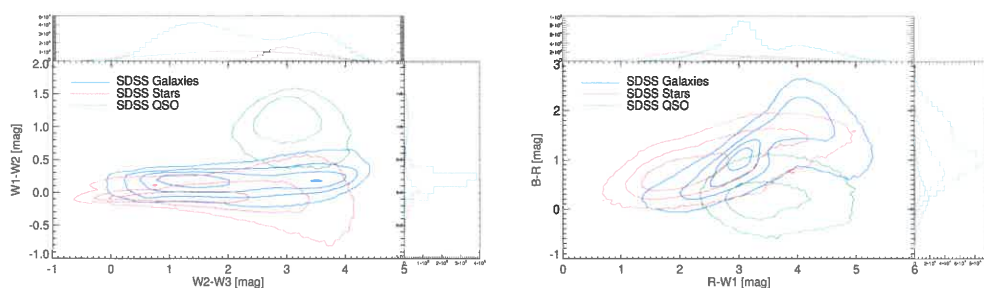


Fig. 10: Diagramy kolor-kolor (*lewy panel:* kolory pochodzące jedynie z obserwacji WISE, *prawy panel:* kolory pochodzące z obserwacji WISE i SuperCOSMOS) dla galaktyk, gwiazd i AGNów z katalogu WISExSuperCOSMOS połączonego z danymi spektroskopowymi pochodzącymi z przeglądu SDSS. Niebieskie kontury odpowiadają grupie galaktyk, czerwone – gwiazdom, a zielone – próbce AGNów. Rysunek pochodzi z pracy Krakowski et al. (2016)

stanowi rozszerzenie nieliniowych modeli rozpoznawania obrazów opracowanych przez Vladimira Vapnika (Vapnik, 1995). Algorytmy te opierają się na koncepcji płaszczyzn decyzyjnych. Bardzo ważnym elementem jest wybranie próbki trenującej reprezentującej wzorcowe grupy obiektów, względem których przebiega trenowanie klasyfikatora. Użyte w algorytmach jądro przekształca wejściowe parametry wzorców w nową n -wymiarową przestrzeń parametrów, na której podstawie wyznaczana jest hiperprzestrzeń oddzielająca poszczególne klasy. Zasadniczo w kolejnych krokach algorytm SVM poszukuje optymalnej hiperpłaszczyzny separacyjnej pomiędzy klasami poprzez maksymalizację marginesu pomiędzy najbliższymi punktami klas.

W pracy Małek et al. (2013b) **H7**, wykazaliśmy, że zastosowanie algorytmu SVM może dostarczyć doskonałej (z dokładnością do testu wykonanego na próbce kontrolnej galaktyk) klasyfikacji źródeł na poziomie efektywności wyższym niż 98% dla galaktyk, 94% dla AGNów i 93% dla gwiazd. Oczywiście tak dokładna klasyfikacja może zostać wykonana po starannym doborze próbki treningowej. Do naszej analizy skonstruowaliśmy dwa klasyfikatory, jeden wykorzystujący pomiary w bliskiej podczerwieni (niestety dane w średniej i dalekiej podczerwieni nie są dostępne dla całego pola VIPERS), a drugi bez użycia danych podczerwonych. Wykazaliśmy znaczną poprawę w klasyfikacji SVM poprzez wykorzystanie informacji pochodzącej z podczerwieni (efektywność klasyfikacji z wykorzystaniem obserwacji podczerwonych jest średnio 8% wyższa niż dla klasyfikatora czysto optycznego). Sugeruje to, że klasyfikacja obiektów z użyciem znacznie szerszego zakresu w podczerwieni może skutkować lepszymi parametrami klasyfikacyjnymi i pozwolić na znalezienie precyzyjniej zdefiniowanych typów obiektów do dalszej analizy. To ma bardziej istotne konsekwencje: niemożliwość lepszej niż $\sim 90\%$ selekcji AGN-ów bez bliskiej podczerwieni w przyszłych wielkich przeglądach jak LSST i inne przeglądy w zakresie optycznym.

5.2 Klasyfikacja galaktyk na podstawie bliskiej i średniej podczerwieni dla przeglądów całego nieba

Krakowski et al., 2016, [H8]

Klasyfikacja galaktyk z wykorzystaniem danych podczerwonych była naturalnym kolejnym krokiem w mojej analizie. Jako następną próbkę klasyfikacyjną wybraliśmy, wraz z doktorantem, magistrem Tomaszem Krakowskim, katalog WISExSuperCOSMOS all-sky. Zarówno WISE jak i SuperCOSMOS są obecnie największymi fotometrycznymi katalogami danych o przesunięciu ku czerwieni około 0,2, czyli obejmującymi nasz lokalny Wszechświat.

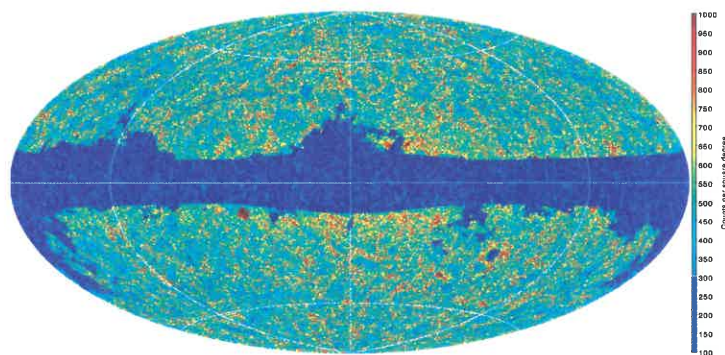


Fig. 11: Projektcja Aitoff (zmodyfikowana projekcja map azymutalnych) wszystkich kandydatów na galaktyki pochodzących z katalogu WISExSuperCOSMOS. Powyższy rysunek zawiera 15 milionów źródeł naniesionych we współrzędnych galaktycznych. Rysunek pochodzi z pracy Krakowski et al. (2016).

Satelita WISE (Wright et al., 2010) obserwował całe niebo w czterech pasmach podczerwieni: 3,4, 4,6, 12 i 23 μm (odpowiednio W1–W4). W naszej pracy zastosowaliśmy drugą pełną wersję katalogu, który składa się z prawie 750 milionów źródeł ze stosunkiem S/N w co najmniej jednym z pasm większym/równym 5. Średnia 95% kompletność katalogu WISE w obszarach wolnych od zakłóceń wynosi $W1 < 17,1$, $W2 < 15,7$, $W3 < 11,5$ i $W4 < 7,7$ mag (w systemie VEGA).

SuperCOSMOS Sky Survey (Hambly et al., 2001c,b,a) składa się z cyfrowych fotografii w trzech pasmach: B , R , I , uzyskanych poprzez zautomatyzowane skanowanie płyt źródłowych z United Kingdom Schmidt Telescope (UKST) na południowej półkuli i Palomar Observatory Sky Survey-II (POSS-II) na półkuli północnej. Dane są publicznie dostępne poprzez Archiwum Naukowe SuperCOSMOS, w którym znajdują się dane fotometryczne, morfologiczne i jakościowe dla 1,9 miliarda źródeł.

Jak pokazuje Rys. 10, dokładna klasyfikacja na trzy główne grupy obiektów: gwiazdy, galaktyki i AGN-y na podstawie diagramów kolor-kolor jest w zasadzie niemożliwa. Wszystkie obiekty mieszają się ze sobą i jest prawie niemożliwe znalezienie takich dwuwymiarowych cięć, aby rozseparować je przy zachowaniu wysokiej czystości grup. Dokładne klasy obiektów zostały otrzymane z obserwacji spektroskopowych wykonanych w przeglądzie spektroskopowym SDSS. Oczywiście obserwacje spektroskopowe mają znacznie większe możliwości klasyfikacji galaktyk, jednak są one znacznie droższe i czasochłonne. Dlatego też poszukiwanie możliwości klasyfikacji źródeł tylko i wyłącznie za pomocą jasności w szerokich pasmach optycznych ma silnie uzasadnienie.

W celu wyselekcjonowania galaktyk, gwiazd i AGN-ów z katalogu WISExSuperCOSMOS ponownie użyliśmy algorytmu SVM. Jako próbki treningowej użyliśmy części katalogu WISExSuperCOSMOS połączonego ze spektroskopowym katalogiem SDSS. Rezultatem naszej pracy jest około 15 milionów kandydatów na galaktyki znajdujących się na obszarze zajmującym 70% nieba (Rys. 11). Każda z galaktyk jest wyposażona w prawdopodobieństwo przynależności do danej grupy obiektów. Katalog został opublikowany wraz z oszacowanymi przesunięciami ku czerwieni (<http://ssa.roe.ac.uk/WISExSCOS.html>). Dokładny opis metody klasyfikacji został opublikowany w Krakowski et al. (2016), **H8**. Zdecydowaliśmy się opublikować jedynie katalog galaktyk z tego względu iż, korzystaliśmy tylko z rozciągniętych (ekstensywnych) źródeł pochodzących z katalogu SuperCOSMOS. Skuteczna identyfikacja galaktyk za pomocą algorytmów uczenia maszynowego pokazuje, że podobne podejście będzie wartościowym rozwiązaniem dla innych przeglądów fotometrycznych, takich jak LSST czy Euclid.

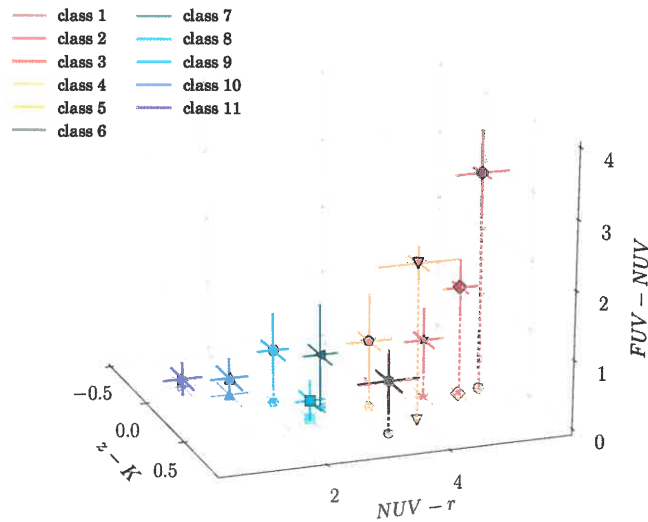


Fig. 12: Trójwymiarowy diagram kolor-kolor dla 11 typów galaktyk pochodzących z przeglądu VIPERS. Niepewności wyznaczone są jako pierwsze i trzecie kwartyle rozkładu koloru. Linie kropkowane wskazują na projekcje klas otrzymanych za pomocą algorytmu FEM na dwuwymiarową płaszczyznę kolor-kolor $z - K$ vs. $NUV - r$. Rysunek pochodzi z pracy Siudek et al. (2018).

5.3 Wyodrębnienie 11 typów galaktyk, w tym aktywnych galaktyk gwiazdotwórczych silnie zakrytych pyłem

Siudek et al., 2018, [H9]

Ostatnią z prac którą chciałabym omówić w ramach mojego dorobku naukowego, jest praca Siudek et al. (2018), **H9**, która również bazowała na danych VIPERS, podobnie jak praca **H7**. Tym razem zastosowaliśmy klasyfikację bez nadzoru, co oznacza, że nie stworzyliśmy próbki szkoleniowej - pozwoliliśmy klasyfikatorowi pogrupować dane za pomocą własnego schematu. Celem pracy było wyodrębnienie pomniejszych zbiorów galaktyk poza trzema klasycznymi grupami. Magister, obecnie doktor, Małgorzata Siudek była moją doktorantką i wykonawczynią projektu NCN SONATA "Klasyfikacja galaktyk o przesunięciu ku czerwieni ~ 1 ", którego byłam kierownikiem.

Do klasyfikacji galaktyk w wielowymiarowej przestrzeni jasności bezwzględnych i przesunięć ku czerwieni zastosowaliśmy algorytm uczenia maszynowego bez nadzoru Fisher Expectation Minimization (FEM, Bouveyron & Brunet, 2012). Jak pokazano na Rys. 12, takie podejście pozwala nie tylko na oddzielenie trzech dobrze znanych typów galaktyk (w wielkim uproszczeniu: niebieską aktywną gwiazdotwórczo, czerwoną pasywną i zieloną pośrednią), ale także znaleźć fizycznie podklasy tych grup. Wśród znalezionych podklas znajdują się bardzo interesujące pod względem zawartości pyłu i atenuacji, klasy pośrednie (jedna z klas okazała się być zdominowana przez AGNy o wąskich liniach emisyjnych).

Klasy FEM odzwierciedlają schemat klasyfikacji galaktyk zaczynając od najwcześniejszych, czerwonych wymarłych galaktyk, w których nie występują młode gwiazdy, do najmłodszych ewolucyjnie, niebieskich galaktyk, w których tempo powstawania nowych gwiazd jest bardzo intensywne. Klasy dają się post factum ulokować na diagramach kolor-kolor, jak i znajdują one odzwierciedlenie we właściwościach morfologicznych, parametrach fizycznych i spektroskopowych (co ważne, nie używanych w procesie klasyfikacji).

W pracy Siudek et al. (2018) znaleźliśmy trzy czerwone, trzy zielone i pięć niebieskich podty-

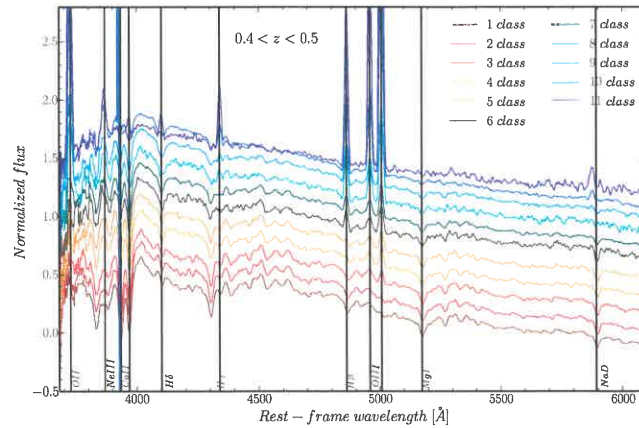


Fig. 13: Zsumowane widma dla 11 klas galaktyk w wąskim zakresie przesunięć ku czerwieni ($0.4 < z < 0.5$). Klasa pierwsza jest najbardziej pasywna (nie występują w niej aktywne obszary gwiazdotwórcze), natomiast klasa 11 jest reprezentatką galaktyk o ekstremalnej aktywności tworzenia nowych gwiazd.

pów galaktyk rozmieszczonych wzdłuż ściśle określonej ścieżki w wielowymiarowej przestrzeni parametrów. Granice między klasami nie są ostre; prawdopodobieństwo przynależności do danej klasy jest związane z każdą galaktyką, podobnie jak w pracy **H8**. Klasy są dobrze oddzielone w przestrzeni parametrów i dlatego dokładniej odzwierciedlają pełną złożoność populacji galaktyk na zadanych przesunięciach ku czerwieni. W oparciu o naszą klasyfikację pokazaliśmy wyraźną ewolucję 11 klas w zakresie $0.4 < z < 1.0$. Wykazaliśmy również, że istnieją istotne różnice we właściwościach fizycznych i spektroskopowych pomiędzy galaktykami sklasyfikowanymi jako czerwone/zielone/niebieskie klasy FEM a ich podklasami.

Pokazaliśmy, że przedstawiciele każdej klasy mają podobne właściwości fizyczne i spektroskopowe. Rys. 13 pokazuje, że nieużyte w klasyfikacji widma spektroskopowe obiektów zmieniają się pomiędzy klasami, co jest dodatkowym dowodem na to, że klasyfikacja oddaje rzeczywiste właściwości galaktyk.

W badaniach wyodrębniono następujące klasy FEM:

- w klasach 1-3 znajdują się czerwone galaktyki sferoidalne, nie wykazujące oznak tworzenia się gwiazd, zdominowane przez stare populacje gwiazd (o czym świadczy ich silna absorbcja w obszarze $4000\text{\AA}$),
- w klasach 4-6 znajdują się galaktyki pośrednie, których właściwości fizyczne, takie jak kolory, sSFR, masy gwiazdowe i kształty, są pośrednie w stosunku do galaktyk czerwonych, pasywnych i niebieskich, aktywnych. Te pośrednie typy galaktyk mają bardziej skoncentrowane profile jasności i niższą zawartość gazu niż galaktyki aktywne gwiazdotwórczo (na to wskazuje wyznaczony dla wszystkich galaktyk indeks Sérsica, opisujący profil jasności powierzchniowej galaktyk, a także szerokość linii *OII*). Tendencja ta jest również obserwowana w przypadku galaktyk pośrednich obserwowanych w lokalnym Wszechświecie,
- klasy 7-11 zawierają galaktyki tworzące gwiazdy. Niebieska chmura dyskowych galaktyk aktywnie tworzących nowe gwiazdy, zdominowana przez młode populacje gwiazdowe (co znajduje swoje potwierdzenie w bardzo słabej linii absorbcyjnej w obszarze $4000\text{\AA}$). Dodatkowo wydaje się, że klasa 11 składa się z galaktyk o niskiej metaliczności lub istnieje w niej silny wkład od AGN-ów na co wykazuje ich lokalizacja na tzw. diagramach "BPT" (dia-

gram Baldwina, Phillipsa & Terlevicha bazujący na stosunku linii emisyjnych pochodzących z zakresu niebieskiego i czerwonego: Baldwin et al., 1981; Lamareille, 2010).

W ten sposób w pracy **H9** zademonstrowaliśmy potencjał nienadzorowanego uczenia maszynowego w celu klasyfikacji galaktyk. W rezultacie otrzymaliśmy złożony schemat klasyfikacji składający się z 11 różnych typów obiektów na przesunięciu ku czerwieni rzędu 0,7–1,0. Takie zadanie jest niemożliwe do wykonania przy użyciu metod konwencjonalnych (wykresy kolor-kolor, kolor-strumień, kolor-kolor-przesunięcie ku czerwieni itp). Podsumowując, klasyfikacja z wykorzystaniem uczenia maszynowego okazała się niezwykle skutecznym narzędziem do identyfikacji różnych wcześniej nieznanych typów galaktyk. Klasyfikacja ta może posłużyć do zbudowania bardziej realistycznej ścieżki ewolucji galaktyk i lepszego oszacowania ich właściwości fizycznych w oparciu o dopasowanie SED dla poszczególnych typów obiektów i, na przykład, analizie atenuacji zawartego w nich pyłu.

Moim zdaniem zarówno właściwa, szczegółowa klasyfikacja obiektów wykonana za pomocą algorytmów samouczących, jak i wnikliwa analiza wpływu tłumienia pyłu na główne parametry fizyczne galaktyk jest przyszłością nowych, wielkich podczerwonych przeglądów nieba, takich jak planowana SPICA.

6 Podsumowanie

Podsumowując, uważam, że moje prace wniosły znaczący wkład w rozwój zarówno dziedziny modelowania widm energetycznych galaktyk, jak i wykorzystania algorytmów uczenia maszynowego do analizy danych w wielkich przeglądach nieba. Do swoich najważniejszych osiągnięć zaliczam:

1. Identyfikację znaczącej populacji LIRG-ów i ULIRG-ów w polu ADF-S oraz zbadanie ich własności, w szczególności odkrycie, że wypełnione są zimnym pyłem (w przeciwieństwie do ULIRG-ów identyfikowanych w katalogach opartych na krótszych długościach fal), znaczący wkład w ich jasność mają AGN-y, oraz to, że w ULIRG-ach najczęściej występują AGN-y Typu 2. Badania te mają znaczenie zarówno dla przyszłej klasyfikacji ULIRG-ów i zrozumienia mechanizmów ich ekstremalnej aktywności, jak i - być może - dla zrozumienia natury aktywnych jąder galaktyk (prace **H1**, **H2**, **H3**).
2. Istotnym technicznym aspektem mojej analizy rozwijanej w ramach prac **H1**, **H2**, **H3** było wykazanie użyteczności kodów dopasowujących modele promieniowania w podczerwieni do estymacji fotometrycznych przesunięć ku czerwieni (co wcześniej uważano za trudne bądź niemożliwe). Efektem jest wprowadzenie przy moim współudziale nowej funkcjonalności estymacji fotometrycznych przesunięć ku czerwieni do popularnego kodu CIGALE.
3. Badania atenuacji pyłu i w szczególności wykazanie, że ewolucja atenuacji badana w zakresie UV i IR różni się znacząco (nawet o dwa rzędy wielkości). Oznacza to, że przyszłe badania atenuacji muszą brać pod uwagę cały zakres promieniowania od UV do IR, a w szczególności IR jest niezbędne do właściwego szacowania atenuacji (praca **H4**). Przy wykorzystaniu danych HELP przetestowaliśmy następnie szereg stosowanych w literaturze praw atenuacji i wskazaliśmy najlepsze, które powinny być stosowane w przyszłych analizach (prace **H5** i **H6**).
4. W roku 2017 jako specjalistka od modelowania własności galaktyk podczerwonych zostałam zaproszona do projektu HELP, co umożliwiło mi rozszerzenie mojej analizy na bezprecedensowo duże próbki i głębokie przeglądy danych; wykorzystanie statystycznych możliwości, jakie otworzył dostęp do danych HELP doprowadziło do szeregu kolejnych odkryć:

- Wprowadziłam nową metodę określania jakości dopasowania SED, uwzględniającą budżet energetyczny widma, która poza zapewnieniem lepszej jakości fitowania pozwala na identyfikację obiektów nietypowych, np. soczewkowanych (artykuł **H5**).
 - Wykazałam, że różne prawa atenuacji standardowo stosowane w literaturze prowadzą do znaczących (rzędu dwóch rzędów wielkości) różnic w szacowaniu mas gwiazdowych masywnych galaktyk, a najczęściej stosowane w literaturze prawo Calzetti et al. (2000) daje niedoszacowane wyniki (praca **H5** oraz **H6**). Zważywszy, że masy gwiazdowe są jednym z podstawowych otrzymywanych w procesie dopasowania widm parametrów i uchodzą za jeden z "najbezpieczniejszych" i najbardziej fizycznych parametrów, na których opiera się wiele dalszych analiz, odkrycie to może mieć dalekosiężne skutki dla wszelkich przyszłych analiz wielkich katalogów galaktyk, zarówno fotometrycznych, jak i spektroskopowych, wpłynie m.in. na interpretację kształtu tzw. głównego ciągu galaktyk (relacji między tempem formowania gwiazd a masą gwiazdową).
5. Przeprowadzenie automatycznej nadzorowanej klasyfikacji obiektów w katalogu VIPERS, która wykazała, że metody automatycznej klasyfikacji mogą znacznie zwiększyć efektywność selekcji celów dla przyszłych katalogów spektroskopowych. Wykazaliśmy także, że dla poprawnej selekcji aktywnych jąder galaktyk i odróżnienia ich od gwiazd istotne jest uwzględnienie pasm podczerwonych - ma to implikacje dla selekcji źródeł we wszystkich przyszłych wielkich fotometrycznych przeglądach nieba, w szczególności LSST (praca **H7**).
 6. Zastosowanie nienadzorowanych automatycznych metod grupowania pozwoliło na zaproponowanie (we współpracy z moją ówczesną doktorantką Małgorzatą Siudek) nowatorskiej klasyfikacji galaktyk zidentyfikowanych w katalogu VIPERS i identyfikację nietypowych i trudnych do znalezienia w oparciu o inne metody populacji galaktyk, np. zapyłone galaktyki aktywne gwiazdotwórczo czy populacja zdominowana przez słabe galaktyki z aktywnymi jądrami o wąskich liniach emisyjnych (praca **H9**).
 7. W oparciu o doświadczenia z pracy H6 opracowaliśmy i opublikowaliśmy wraz z moim doktorantem Tomaszem Krakowskim z NCBJ katalog galaktyk z całego nieba na podstawie połączonych danych fotometrycznego przeglądu SuperCOSMOS i przeglądu podczerwonego WISE (praca **H8**).

Wyniki prac były szczegółowo omawiane na konferencjach międzynarodowych, a także w formie wystąpień jak i seminariów zarówno w Polsce jak i w ośrodkach zagranicznych. Obecnie kontynuuję zarysowane wyżej badania m.in. jako Project Scientist projektu HELP, a także w ramach niedawno otrzymanego grantu NCN Sonata Bis.

Literatura

- Alonso-Herrero, A., Pereira-Santaella, M., Rieke, G. H., & Rigopoulou, D. 2012, ApJ, 744, 2
- Antonucci, R. 1993, ARA&A, 31, 473
- Baldwin, J. A., Phillips, M. M., & Terlevich, R. 1981, PASP, 93, 5
- Beichman, C. A. 1987, ARA&A, 25, 521
- Bernhard, E., Béthermin, M., Sargent, M., et al. 2014, MNRAS, 442, 509
- Boquien, M., Burgarella, D., Roehlly, Y., et al. 2019, A&A, 622, A103
- Bouveyron, C. & Brunet, C. 2012, arXiv e-prints [[arXiv]1204.2067]

Brinchmann, J., Charlot, S., White, S. D. M., et al. 2004, MNRAS, 351, 1151

Buat, V., Boquien, M., Małek, K., et al. 2018, A&A, 619, A135

Buat, V., Noll, S., Burgarella, D., et al. 2012, A&A, 545, A141

Buat, V., Oi, N., Heinis, S., et al. 2015, A&A, 577, A141

Buat, V. et al. 2007, Astrophysical Journal Supplement Series, 173, 404

Burgarella, D., Buat, V., Gruppioni, C., et al. 2013, A&A, 554, A70

Calzetti, D. 1997, AJ, 113, 162

Calzetti, D., Armus, L., Bohlin, R. C., et al. 2000, ApJ, 533, 682

Carpinetti, A., Kaviraj, S., Hyde, A. K., et al. 2015, A&A, 577, A119

Casey, C. M. 2012, MNRAS, 425, 3094

Charlot, S. & Fall, S. M. 2000, ApJ, 539, 718

Chevallard, J., Charlot, S., Wandelt, B., & Wild, V. 2013, MNRAS, 432, 2061

Ciesla, L., Charmandaris, V., Georgakakis, A., et al. 2015, A&A, 576, A10

Clements, D. L. 2015, Infrared Astronomy – Seeing the Heat (CRC Press)

Clements, D. L., Sutherland, W. J., Saunders, W., et al. 1996, MNRAS, 279, 459

Conroy, C. 2013, ARA&A, 51, 393

Cortese, L., Ciesla, L., Boselli, A., et al. 2012, A&A, 540, A52

da Cunha, E., Charmandaris, V., Díaz-Santos, T., et al. 2010, A&A, 523, A78

da Cunha, E., Walter, F., Smail, I. R., et al. 2015, ApJ, 806, 110

Draine, B. T. 2003, ARA&A, 41, 241

Dunne, L., Gomez, H. L., da Cunha, E., et al. 2011, MNRAS, 417, 1510

Egami, E., Gallerani, S., Schneider, R., et al. 2018, PASA, 35

Farrah, D., Bernard-Salas, J., Spoon, H. W. W., et al. 2007, ApJ, 667, 149

Fritz, J., Franceschini, A., & Hatziminaoglou, E. 2006, MNRAS, 366, 767

Hambly, N. C., Davenhall, A. C., Irwin, M. J., & MacGillivray, H. T. 2001a, MNRAS, 326, 1315

Hambly, N. C., Irwin, M. J., & MacGillivray, H. T. 2001b, MNRAS, 326, 1295

Hambly, N. C., MacGillivray, H. T., Read, M. A., et al. 2001c, MNRAS, 326, 1279

Hopkins, A. M., Connolly, A. J., Haarsma, D. B., & Cram, L. E. 2001, AJ, 122, 288

Howell, J. H., Armus, L., Mazzarella, J. M., et al. 2010, ApJ, 715, 572

Hung, C.-L., Sanders, D. B., Casey, C. M., et al. 2014, ApJ, 791, 63

Hurley, P. D., Oliver, S., Betancourt, M., et al. 2017, MNRAS, 464, 885

Kawada, M., Baba, H., Barthel, P. D., et al. 2007, PASJ, 59, S389

Kennicutt, Jr., R. C. 1998, ARA&A, 36, 189

- Kessler, M. F., Steinz, J. A., Anderegg, M. E., et al. 1996, *A&A*, 315, L27
- Kim, D.-C. 1995, PhD thesis, University of Hawaii
- Kim, D.-C. & Sanders, D. B. 1998, *ApJS*, 119, 41
- Krakowski, T., Małek, K., Bilicki, M., et al. 2016, *A&A*, 596, A39
- Lamareille, F. 2010, *A&A*, 509, A53
- Lee, J. C., Hwang, H. S., Lee, M. G., Kim, M., & Kim, S. C. 2011, *MNRAS*, 414, 702
- Lo Faro, B., Buat, V., Roehlly, Y., et al. 2017, *MNRAS*, 472, 1372
- Małek, K., Bankowicz, M., Pollo, A., et al. 2017, *A&A*, 598, A1
- Małek, K., Buat, V., Roehlly, Y., et al. 2018, *A&A*, 620, A50
- Małek, K., Pollo, A., Takeuchi, T. T., et al. 2010, *A&A*, 514, A11
- Małek, K., Pollo, A., Takeuchi, T. T., et al. 2014, *A&A*, 562, A15
- Małek, K., Pollo, A., Takeuchi, T. T., et al. 2013a, *Earth, Planets, and Space*, 65, 1101
- Małek, K., Solarz, A., Pollo, A., et al. 2013b, *A&A*, 557, A16
- Martin, D. C., Seibert, M., Buat, V., et al. 2005, *ApJ*, 619, L59
- Matsuhara, H., Wada, T., Matsuura, S., et al. 2006, *PASJ*, 58, 673
- Matsuura, S., Shirahata, M., Kawada, M., et al. 2011, *ApJ*, 737, 2
- Mitchell, P. D., Lacey, C. G., Baugh, C. M., & Cole, S. 2013, *MNRAS*, 435, 87
- Murakami, H., Baba, H., Barthel, P., et al. 2007, *PASJ*, 59, S369
- Murphy, Jr., T. W., Armus, L., Matthews, K., et al. 1996, *AJ*, 111, 1025
- Nakagawa, T., Shibai, H., Onaka, T., et al. 2015, *Publication of Korean Astronomical Society*, 30, 621
- Nardini, E., Risaliti, G., Watabe, Y., Salvati, M., & Sani, E. 2010, *MNRAS*, 405, 2505
- Neugebauer, G., Beichman, C. A., Soifer, B. T., et al. 1984, *Science*, 224, 14
- Noll, S., Burgarella, D., Giovannoli, E., et al. 2009, *A&A*, 507, 1793
- Oliver, S., Rowan-Robinson, M., Alexander, D. M., et al. 2000, *MNRAS*, 316, 749
- Oliver, S. J., Bock, J., Altieri, B., et al. 2012, *MNRAS*, 424, 1614
- Onaka, T., Matsuhara, H., Wada, T., et al. 2007, *PASJ*, 59, S401
- Pannella, M., Carilli, C. L., Daddi, E., et al. 2009, *ApJ*, 698, L116
- Pérez-González, P. G., Rieke, G. H., Egami, E., et al. 2005, *ApJ*, 630, 82
- Podigachoski, P., Barthel, P. D., Haas, M., et al. 2015, *A&A*, 575, A80
- Rieke, G. H., Young, E. T., Engelbracht, C. W., et al. 2004, *ApJS*, 154, 25
- Rowan-Robinson, M., Lari, C., Perez-Fournon, I., et al. 2004, *MNRAS*, 351, 1290
- Sanders, D. B. & Mirabel, I. F. 1996a, *ARA&A*, 34, 749

- Sanders, D. B. & Mirabel, I. F. 1996b, ARA&A, 34, 749
- Santini, P., Maiolino, R., Magnelli, B., et al. 2014, A&A, 562, A30
- Schulz, N. S. 2005, From Dust to Stars (Springer Praxis Books)
- Sedgwick, C., Serjeant, S., Pearson, C., et al. 2011, MNRAS, 416, 1862
- Siudek, M., Małek, K., Pollo, A., et al. 2018, A&A, 617, A70
- Solarz, A., Bilicki, M., Gromadzki, M., et al. 2017, A&A, 606, A39
- Stahler, S. W. & Palla, F. 2005, The Formation of Stars, Physics Textbook (Wiley-VCH)
- Symeonidis, M., Vaccari, M., Berta, S., et al. 2013, MNRAS, 431, 2317
- Takagi, T., Matsuhara, H., Goto, T., et al. 2012, A&A, 537, A24
- Takeuchi, T. T., Buat, V., & Burgarella, D. 2005a, A&A, 440, L17
- Takeuchi, T. T., Takako, I. T., Takaya, N., et al. 2005b, MNRAS, 592
- U, V., Sanders, D. B., Mazzarella, J. M., et al. 2012, ApJS, 203, 9
- Vapnik, V. N. 1995, The Nature of Statistical Learning Theory (Springer)
- Veilleux, S., Kim, D.-C., & Sanders, D. B. 2002, ApJS, 143, 315
- Veilleux, S., Rupke, D. S. N., Kim, D.-C., et al. 2009, ApJS, 182, 628
- Veilleux, S., Sanders, D. B., & Kim, D.-C. 1997, ApJ, 484, 92
- Wada, T., Matsuhara, H., Oyabu, S., et al. 2008, PASJ, 60, S517
- Walcher, J., Groves, B., Budavári, T., & Dale, D. 2011, Ap&SS, 331, 1
- Werner, M. W., Roellig, T. L., Low, F. J., et al. 2004, ApJS, 154, 1
- White, G. J., Hatsukade, B., Pearson, C., et al. 2012, MNRAS, 427, 1830
- Witt, A. N. & Gordon, K. D. 2000, ApJ, 528, 799
- Wright, E. L., Eisenhardt, P. R. M., Mainzer, A. K., et al. 2010, AJ, 140, 1868

Katya Miel

