

AUTOREFERAT

MACIEJ KOPROWSKI

1. Dane podstawowe

Dr Maciej Koprowski

Adres : Instytut Astronomii, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Gagarina 11, 87-100 Toruń

Email : mkoprowski@umk.pl

ORCID : [0000-0001-5785-1154](https://orcid.org/0000-0001-5785-1154)

2. Edukacja

2011-2015 **Studia doktoranckie, Astronomia**, Obserwatorium Astronomiczne w Edynburgu, WB. Praca doktorska pt.: ‘(Sub)millimetre-Selected Galaxies and the Cosmic Star-Formation History’, promotor: Prof. James Dunlop.

2006-2011 **Magister fizyki z wyróżnieniem w astrofizyce**, Uniwersytet w Edynburgu, WB

3. Zatrudnienie

2024- **SONATA Bis, kierownik projektu**, Tytuł: ‘Teleskop Jamesa Webba – Ewolucja galaktyk gwiazdotwórczych z czasem do $z \sim 12$.’, Instytut Astronomii, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, Polska.

2021-2024 **SONATA, kierownik projektu**, Tytuł: ‘Ewolucja gęstości tempa formowania się gwiazd z czasem we wczesnym Wszechświecie.’, Instytut Astronomii, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, Polska.

2021- **Adiunkt**, Instytut Astronomii, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, Polska (pełen etat na umowie o pracę na czas nieokreślony).

2019-2021 **Asystent**, Instytut Astronomii, Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej, Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, Polska.

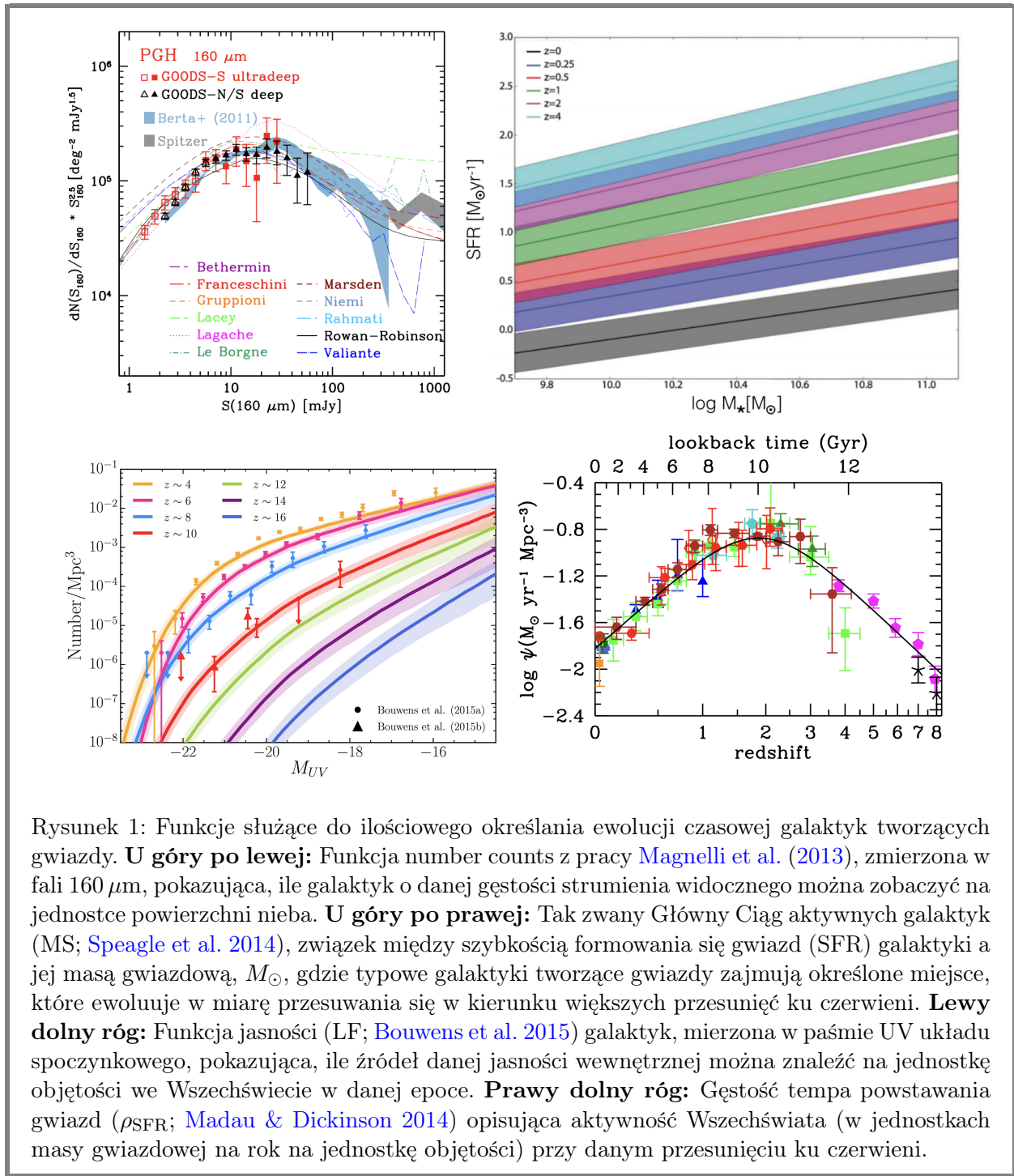
2015-2019 **Asystent**, Centrum Badań Astrofizycznych, Szkoła Fizyki, Inżynierii i Informatyki, Wydział Fizyki, Astronomii i Matematyki, Uniwersytet Hertfordshire, Hatfield, Wielka Brytania.

EWOLUCJA GALAKTYK GWIAZDOTWÓRCZYCH O DUŻYM PRZESUNIĘCIU KU CZERWIENI

- (Hab1) **Koprowski, M.P.**; Coppin, K.E.K.; Geach, J.E.; McLure, R.J.; Almaini, O.; Blain, A.W.; Bremer, M.; Bourne, N.; Chapman, S.C.; Conselice, C.J.; Dunlop, J.S.; Farrah, D.; Hartley, W.; Karim, A.; Knudsen, K.K.; Michałowski, M.J.; Scott, D.; Simpson, C.; Smith, D.J.B.; van der Werf, P.P.; Title: ‘*A direct calibration of the $IRX-\beta$ relation in Lyman-break Galaxies at $z = 3 - 5$.*’, 2016, MNRAS, 458, 4321, DOI: [10.1093/mnras/sty1527](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1527)
- (Hab2) **Koprowski, M.P.**; Coppin, K.E.K.; Geach, J.E.; Hine, N.K.; Bremer, M.; Chapman, S.; Davies, L.J.M.; Hayashino, T.; Knudsen, K.K.; Kubo, M.; Lehmer, B.D.; Matsuda, Y.; Smith, D.J.B.; van der Werf, P.P.; Violino, G.; Yamada, T.; Title: ‘*A Resolved Map of the Infrared Excess in a Lyman Break Galaxy at $z = 3$.*’, 2016, ApJL, 828, L21, DOI: [10.3847/2041-8205/828/2/L21](https://doi.org/10.3847/2041-8205/828/2/L21)
- (Hab3) **Koprowski, M.P.**; Coppin, K.E.K.; Geach, J.E.; Dudzeviciute, U.; Smail, I.; Almaini, O.; An, Fangxia; Blain, A.W.; Chapman, S.C.; Chen, Chian-Chou; Conselice, C.J.; Dunlop, J.S.; Farrah, D.; Gullberg, B.; Hartley, W.; Ivison, R.J.; Karska, A.; Maltby, D.; Malek, K.; Michałowski, M.J.; Pope, A.; Salim, S.; Scott, D.; Simpson, C.J.; Simpson, J.M.; Swinbank, A.M.; Thomson, A.P.; Wardlow, J.L.; van der Werf, P.P.; Whitaker, K.E.; Title: ‘*An ALMA survey of the SCUBA-2 cosmology legacy survey UKIDSS/UDS field: Dust attenuation in high-redshift Lyman-break galaxies.*’, 2020, MNRAS, 492, 4927, DOI: [10.1093/mnras/staa160](https://doi.org/10.1093/mnras/staa160)
- (Hab4) **Koprowski, M.P.**; Dunlop, J.S.; Michałowski, M.J.; Coppin, K.E.K.; Geach, J.E.; McLure, R.J.; Scott, D.; van der Werf, P.P.; Title: ‘*The evolving far-IR galaxy luminosity function and dust-obscured star formation rate density out to $z \simeq 5$.*’, 2018, MNRAS, 479, 4355, DOI: [10.1093/mnras/stx1843](https://doi.org/10.1093/mnras/stx1843)
- (Hab5) **Koprowski, M.P.**; Wijesekera, J.V.; Dunlop, J.S.; McLeod, D.J.; Michałowski, M.J.; Lisiecki, K.; McLure, R.J.; Title: ‘*Charting the main sequence of star-forming galaxies out to redshifts $z < 5.7$.*’, 2024, A&A, 691, A164, DOI: [10.1051/0004-6361/202449948](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202449948)

I. Wstęp

Rosnąca ilość danych pozyskiwanych z obserwacji nieba, ułatwia coraz bardziej zniuansowaną analizę rozległych próbek galaktyk. Ten postęp pozwala na kompleksową charakterystykę populacji galaktyk w odniesieniu do różnych funkcji i ich ewolucji przesunięcia ku czerwieni. Na przykład gęstość powierzchniowa galaktyk obserwowana przy określonej gęstości strumienia (mierzona przy wyznaczonych długościach fal w jednostkach liczby źródeł na stopień kwadratowy nieba) może być kwantyfikowana poprzez funkcję ‘number counts’ (NC; górny lewy panel [Rysunek 1](#); np. [Lagache et al. 2004](#); [Béthermin et al. 2012](#); [Magnelli et al. 2013](#)). Ponadto związek między aktywnością galaktyk, mierzoną za pomocą tempa powstawania gwiazd (ang. Star Formation Rate, SFR) w jednostkach masy gwiazdowej, $M_{\odot}$, na rok, a jego zmiennością wraz z przesunięciem ku czerwieni i $M_{\odot}$ w różnych populacjach galaktyk jest reprezentowany przez Ciąg Główny (ang. Main Sequence, MS; prawy górny panel [Rysunek 1](#); np. [Speagle et al. 2014](#); [Tomczak et al. 2016](#); [Koprowski et al. 2016b, 2024](#)). Ponadto funkcja jasności (ang. Luminosity Function, LF; dolny lewy panel [Rysunek 1](#); np. [Gruppioni et al. 2013](#); [Bouwens et al. 2015](#); [Koprowski et al. 2017](#)) opisuje ilość galaktyk danej jasności na jednostkę objętości. Na koniec, ewolucja gęstości SFR Wszechświata w czasie jest zilustrowana przez gęstość tempa formowania się gwiazd (ρ_{SFR} ; dolny prawy panel [Rysunek 1](#); np. [Gruppioni et al. 2013](#); [Koprowski et al. 2017](#); [Gruppioni et al. 2020](#); [Magnelli et al. 2024](#)).

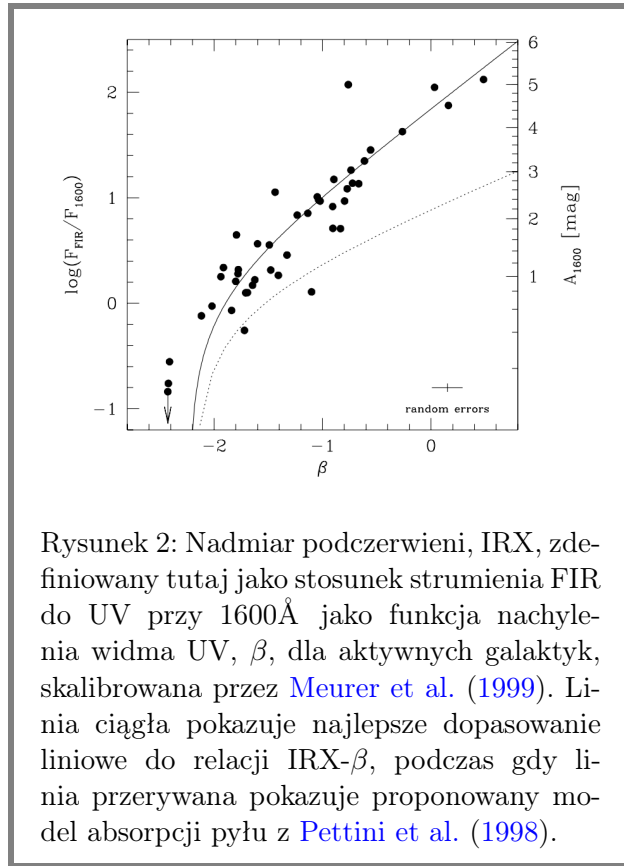


Rysunek 1: Funkcje służące do ilościowego określania ewolucji czasowej galaktyk tworzących gwiazdy. **U góry po lewej:** Funkcja number counts z pracy [Magnelli et al. \(2013\)](#), zmierzona w fali 160 μm , pokazująca, ile galaktyk o danej gęstości strumienia widocznego można zobaczyć na jednostce powierzchni nieba. **U góry po prawej:** Tak zwany Główny Ciąg aktywnych galaktyk (MS; [Speagle et al. 2014](#)), związek między szybkością formowania się gwiazd (SFR) galaktyki a jej masą gwiazdową, $M_{\odot}$, gdzie typowe galaktyki tworzące gwiazdy zajmują określone miejsce, które ewoluje w miarę przesuwania się w kierunku większych przesunięć ku czerwieni. **Lewy dolny róg:** Funkcja jasności (LF; [Bouwens et al. 2015](#)) galaktyk, mierzona w paśmie UV układu spoczynkowego, pokazująca, ile źródeł danej jasności wewnętrznej można znaleźć na jednostkę objętości we Wszechświecie w danej epoce. **Prawy dolny róg:** Gęstość tempa powstawania gwiazd (ρ_{SFR} ; [Madau & Dickinson 2014](#)) opisująca aktywność Wszechświata (w jednostkach masy gwiazdowej na rok na jednostkę objętości) przy danym przesunięciu ku czerwieni.

Określanie tempa formowania się gwiazd

Aby opisać ewolucję galaktyk w kategoriach wyżej wymienionych funkcji, najpierw niezbędne jest dokładne oszacowanie tempa formowania się gwiazd, przy czym ultrafioletowe (UV) światło służy jako najbardziej bezpośredni wskaźnik, na który wpływają przede wszystkim emisje masywnych, krótko żyjących gwiazd ([Kennicutt & Evans, 2012](#)). W związku z tym jasność UV, w połączeniu z domniemaną początkową funkcją masy gwiazd (IMF), jest dominującą wielkością obserwowalną wykorzystywaną do szacowania tempa formowania się gwiazd (SFR), zwłaszcza przy podwyższonych przesunięciach ku czerwieni (np. [Bouwens et al. 2011](#); [Dunlop et al. 2012](#); [Ellis et al. 2013](#); [McLeod et al. 2015, 2016](#)). Niemniej jednak zastosowanie jasności UV do oszacowania SFR jest skomplikowane ze względu na absorpcję światła UV przez pył w ośrodku międzygwiazdowym (ISM). Energia pochłonięta przez ten pył jest następnie ponownie emitowana w podczerwieni (IR), co wymaga dodatkowych obserwacji w celu kompleksowego zrozumienia procesu powstawania gwiazd. Niestety, ograniczona czułość pojedynczych anten dalekiej podczerwieni, FIR, i sub-/milimetrowych, wraz ze

stosunkowo małymi polami widzenia interferometrów, powoduje, że znaczna liczba galaktyk nie ma detekcji w dalekiej podczerwieni. W rezultacie konieczne jest zastosowanie alternatywnych metod w celu uwzględnienia światła UV pochłanianego przez pył (np. [Chapman et al. 2000, 2002](#); [Webb et al. 2003](#); [Coppin et al. 2015](#); [Koprowski et al. 2016b,a, 2020](#)).



Rysunek 2: Nadmiar podczerwieni, IRX, zdefiniowany tutaj jako stosunek strumienia FIR do UV przy $1600\text{\AA}$ jako funkcja nachylenia widma UV, β , dla aktywnych galaktyk, skalibrowana przez [Meurer et al. \(1999\)](#). Linia ciągła pokazuje najlepsze dopasowanie liniowe do relacji IRX- β , podczas gdy linia przerywana pokazuje proponowany model absorpcji pyłu z [Pettini et al. \(1998\)](#).

Dominująca metoda szacowania jasności dalekiej podczerwieni galaktyk wybranych w ultrafiolecie polega na wykorzystaniu ustalonej korelacji między nadmiarem podczerwieni, zdefiniowanym jako $\text{IRX} \equiv L_{\text{IR}}/L_{\text{UV}}$, a obserwowanym nachyleniem UV, oznaczonym jako β (np. [Meurer et al. 1999](#); [Overzier et al. 2011](#); [Takeuchi et al. 2012](#), patrz [Rysunek 2](#)). W miarę przesuwania się w kierunku długości fal bliskiej podczerwieni, wpływ przesłonięcia pyłem znacząco maleje (przy czym wygaszenie pyłu jest około dziesięć razy mniejsze przy $2,2\text{ }\mu\text{m}$ w porównaniu do $0,55\text{ }\mu\text{m}$; [Calzetti 1997](#)). W związku z tym nachylenie widma emisji gwiazdowej UV w układzie spoczynkowym, β , służy jako przybliżenie do oceny stopnia absorpcji pyłu (gdzie $F_{\lambda} \propto \lambda^{\beta}$). Ważne jest, aby zauważyć, że oszacowanie to dotyczy wyłącznie obserwowalnej emisji kontinuum UV; jeśli absorpcja pyłu jest zbyt duża, emisja UV może być całkowicie niewykrywalna, faworyzując w ten sposób najmniej zasłonięte obszary galaktyki. Badania wykazały silną korelację między IRX a obserwowanym nachyleniem UV w lokalnych galaktykach gwiazdotwórczych wyselekcjonowanych w zakresie UV (np. [Calzetti 1997](#); [Meurer et al. 1999](#)), a także w podobnie jasnych w zakresie UV galaktykach o dużym przesunięciu ku czer-

wieni (np. [Seibert et al. 2002](#); [Reddy et al. 2008, 2012](#); [Pannella et al. 2009](#); [Heinis et al. 2013](#); [Bourne et al. 2017](#); [McLure et al. 2018](#)). Dlatego lokalna zależność IRX- β jest często wykorzystywana do korygowania absorpcji pyłu w galaktykach o dużym przesunięciu ku czerwieni ($z > 2$), gdy nie są dostępne dane w podczerwieni (np. [Treyer et al. 2007](#); [González et al. 2010, 2014](#); [Bothwell et al. 2011](#); [Finkelstein et al. 2012](#); [Smit et al. 2012, 2016](#)).

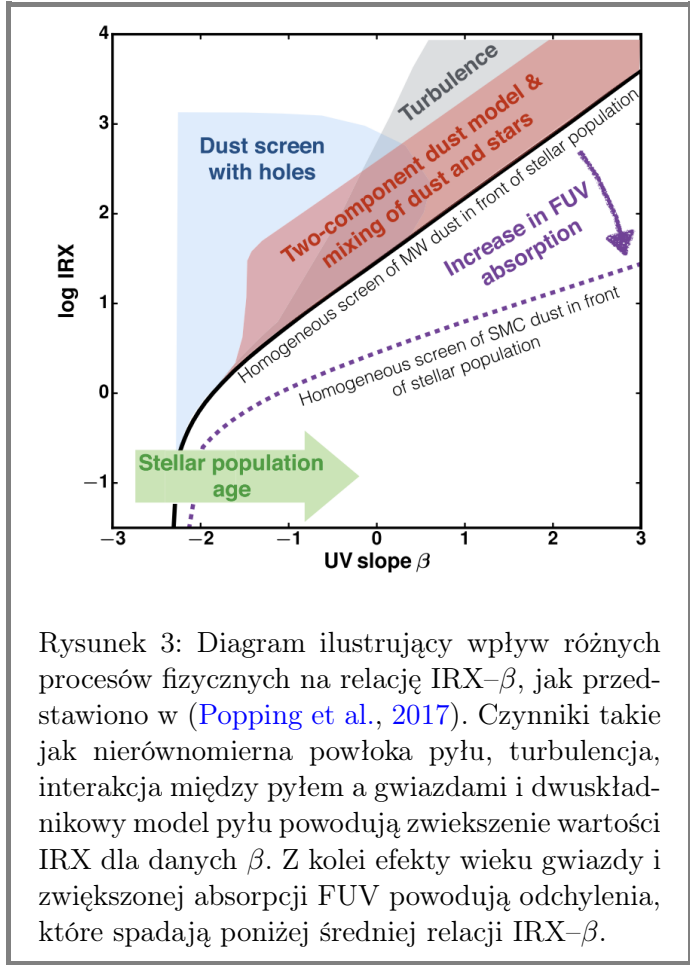
Ostatnie badania wskazują, że lokalna relacja IRX- β nie jest tak silna, jak wcześniej twierdzono, wykazując znaczną zmienność między poszczególnymi galaktykami (np. [Kong et al. 2004](#)). Zauważono, że te rozbieżności można wyjaśnić, wprowadzając tzw. ‘trzeci parametr’. Przykłady takich parametrów obejmują różny wiek bazowych populacji gwiazdowych (np. [Kong et al. 2004](#); [Burgarella et al. 2005](#); [Boquien et al. 2009](#); [Grasha et al. 2013](#)), różnice w kształtach wewnętrznych nachyleń UV (tj. tych bez tłumienia pyłu) (np. [Boquien et al. 2012](#)) i zmiany w składzie pyłu (np. [Thilker et al. 2007](#)). Co więcej, obserwacje najbardziej odstające od tej normy mogą po prostu wskazywać na fundamentalną rozbieżność między obszarami emisji reprezentowanymi przez mniej przesłonięte promieniowanie UV i bardziej przesłonięte promieniowanie FIR ([Goldader et al., 2002](#)). Niedawno wykazano, że zmienność w relacji IRX- β może być uwarunkowana różnicami w krzywych absorpcji pyłu ([Salmon et al., 2015](#); [Salim & Boquien, 2019](#)).

Przy zwiększonych przesunięciach ku czerwieni obserwacje z *Herschel* i ALMA wskazują, że najjaśniejsze galaktyki w dalekiej podczerwieni, zidentyfikowane w ultrafiolecie w układzie spoczynkowym, na ogół wykazują bardziej niebieskie nachylenia UV przy stałym nadmiarze podczerwieni (np. [Reddy et al. 2010](#); [Penner et al. 2012](#); [Oteo et al. 2013](#); [Casey et al. 2014](#); [Watson et al. 2015](#)). [Casey et al. \(2014\)](#) wiąże zaobserwowane przesunięcie w stronę bardziej niebieskich długości fal z jasnością w podczerwieni, ujawniając, że jaśniejsze galaktyki mają tendencję do wykazywania bardziej niebieskich kolorów UV. Jednocześnie zauważono, że niektóre źródła o dużym przesunięciu

ku czerwieni znajdują się poniżej ustalonej lokalnej zależności (np. Reddy et al. 2010; Whitaker et al. 2012; Capak et al. 2015; Bouwens et al. 2016a; Pope et al. 2017; Koprowski et al. 2016a), co sugeruje, że na światło gwiazd w tych galaktykach może wpływać alternatywne prawo absorpcji pyłu, potencjalnie bardziej charakterystyczne dla Małego Obłoku Magellana (ang. Small Magellanic Cloud, SMC).

Liczne badania teoretyczne miały na celu wyjaśnienie zaobserwowanych rozbieżności od lokalnej relacji IRX- β (np. Ferrara et al. 2016; Popping et al. 2017; Narayanan et al. 2018; patrz Rysunek 3). Zaproponowano, że głównym czynnikiem przyczyniającym się do pozycjonowania niebieskich, zapyłonych galaktyk gwiazdotwórczych powyżej lokalnej relacji jest nierównomierne rozmieszczenie pyłu i gwiazd. W tym scenariuszu regiony o minimalnym tłumieniu pyłu wykazują niebieskie kolory ultrafioletowe, podczas gdy obszary o wyższych stężeniach pyłu skutkują podwyższonymi wartościami IRX. Z drugiej strony galaktyki wykazujące bardziej czerwone kolory UV mogą wskazywać na starsze populacje gwiazd lub być pod wpływem zmieniających się praw ekstynkcji pyłu. Alternatywne wyjaśnienie zakłada, że temperatura pyłu tych galaktyk może być niedoszacowana, co prowadzi do błędnego obliczenia ich jasności w podczerwieni i w konsekwencji wartości IRX.

Biorąc pod uwagę znaczenie dokładnego określenia jasności galaktyk w dalekiej podczerwieni dla wiarygodnych badań ich ewolucji, poświęciłem już aż trzy projekty badaniu charakterystyk funkcji IRX- β (Koprowski et al., 2016b,a, 2020).



Rysunek 3: Diagram ilustrujący wpływ różnych procesów fizycznych na relację IRX- β , jak przedstawiono w (Popping et al., 2017). Czynniki takie jak nierównomierna powłoka pyłu, turbulencja, interakcja między pyłem a gwiazdami i dwuskładnikowy model pyłu powodują zwiększenie wartości IRX dla danych β . Z kolei efekty wieku gwiazdy i zwiększonej absorpcji FUV powodują odchylenia, które spadają poniżej średniej relacji IRX- β .

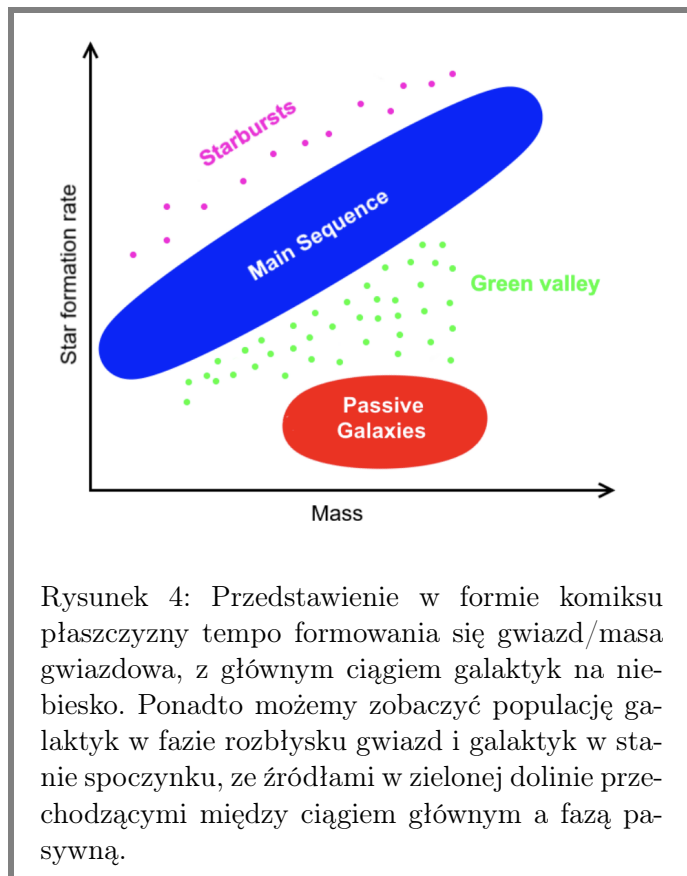
Rozbieżności w obserwowanym kształcie Głównego Ciągu galaktyk gwiazdotwórczych

Znaczny postęp w ocenie kluczowych cech fizycznych galaktyk, takich jak fotometryczne przesunięcia ku czerwieni, masy gwiazdowe i krzywe absorpcji pyłu, ułatwił klasyfikację dwóch odrębnych populacji galaktyk: galaktyk gwiazdotwórczych (ang. star-forming galaxies, SFG) i galaktyk spokojnych (ang. quiescent galaxies, QG) (np. Labbé et al. 2005; Wuyts et al. 2007; Ilbert et al. 2010, patrz Rysunek 4). Podstawowa różnica między tymi populacjami leży w ich aktywnościach związanych z formowaniem gwiazd. Badania wykazały silną korelację między szybkością formowania się gwiazd a masą gwiazdową SFG, rozciągającą się na najwyższe zbadane przesunięcia ku czerwieni, które są określane jako Ciąg Główny (ang. Main Sequence, MS; np. Speagle et al. 2014; Tomczak et al. 2016; Daddi et al. 2022; Popesso et al. 2023; Koprowski et al. 2024). Zazwyczaj związek między SFR a $M_{\odot}$ można wyrazić za pomocą prostej funkcji potęgowej:

$$\log(\text{SFR}/M_{\odot} \text{ yr}^{-1}) = \alpha \times \log(M_{*}/M_{\odot}) + \beta, \quad (1)$$

gdzie α i β oznaczają odpowiednio nachylenie i normalizację MS. Dowody sugerują, że podczas gdy normalizacja wzrasta wraz z przesunięciem ku czerwieni — co wskazuje, że galaktyki wykazują podwyższone współczynniki SFR we wcześniejszych epokach kosmicznych — nachylenie MS pozostaje w przybliżeniu stałe, z wartościami w zakresie od około 0,8 do 1,3, w dużej mierze niezależnie od przesunięcia ku czerwieni (np. Lee et al. 2015; Tomczak et al. 2016; Popesso et al. 2023). Ostatnie badania wskazały, że MS wykazuje tendencję do spłaszczania przy wyższych masach gwiazdowych

(np. Lee et al. 2015; Schreiber et al. 2015; Leslie et al. 2020; Leja et al. 2022; Popesso et al. 2023), ostatecznie zbliżając się do asymptotycznej wartości SFR.



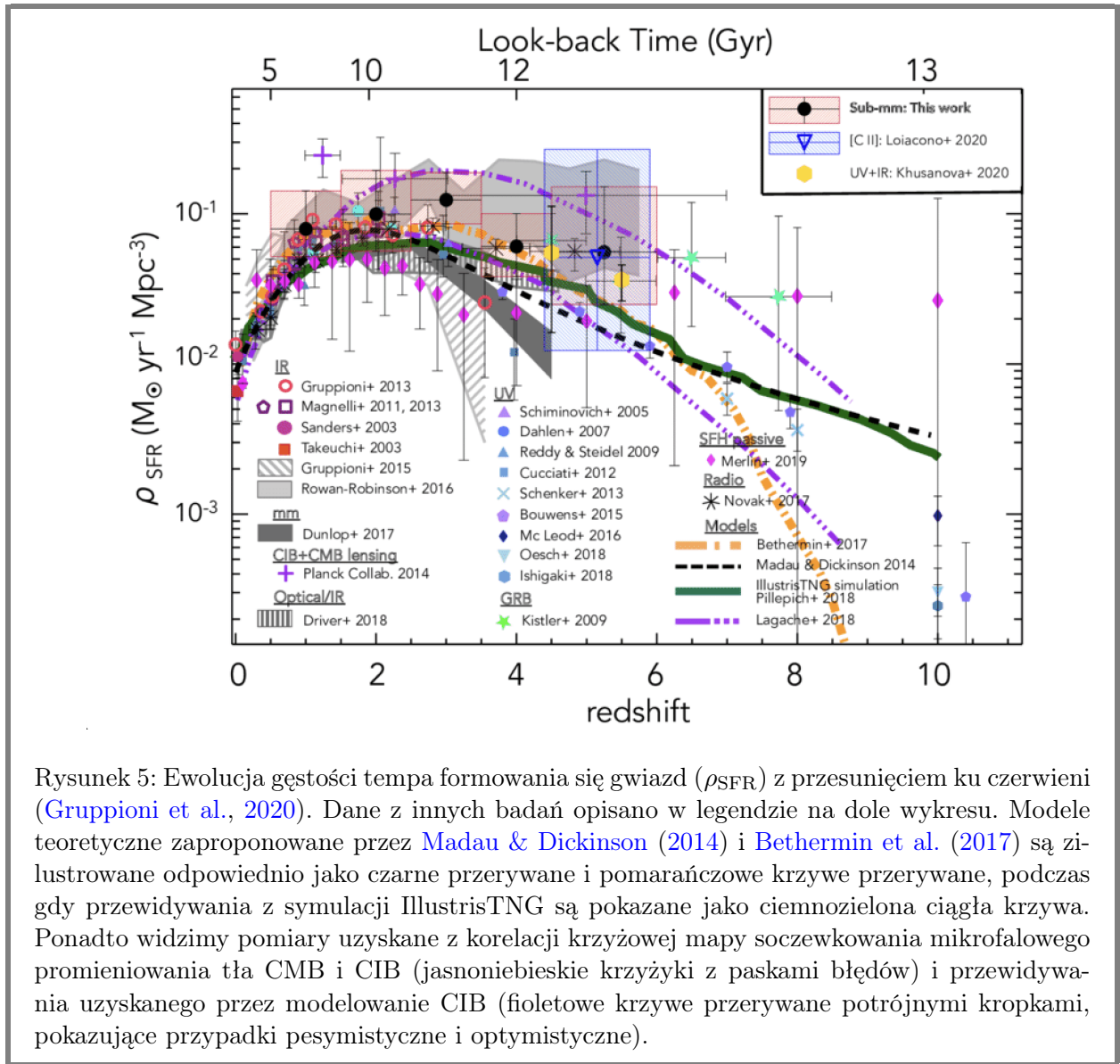
(UV+IR) współczynników SFR. Jednak stosunkowo niska rozdzielczość danych *Herschel* w falach FIR pozwala na wykrywanie tylko najjaśniejszych źródeł przy wysokich przesunięciach ku czerwieni, co skutkuje potencjalnie niekompletnymi próbkami galaktyk, zakłamując średnie wartości SFR. Speagle et al. (2014) i, ostatnio, Popesso et al. (2023) zsyntetyzowali różne badania w celu standaryzacji kalibracji absolutnych w celu rozwiązania niektórych z tych wyzwań. Choć skrupulatnie rozwiązują nieścisłości wynikające z różnych założeń modelowania, niepewności związane z wskaźnikami SFR i kompletnością skompilowanych próbek nadal stanowią istotne problemy. W Koprowski et al. (2024) zastosowałem zatem alternatywną metodologię, wykorzystując próbkę galaktyk wyselekcjonowanych w ultrafiolecie (UV) do zmapowania ewolucji MS aż do przesunięć ku czerwieni sięgających 5,7.

Trudności w opisie historii ρ_{SFR} Wszechświata w długościach fal FIR

Określenie gęstości tempa formowania się gwiazd (ρ_{SFR} ; patrz Rysunek 5) jest niezbędne do zrozumienia ewolucji galaktyk, co ponownie wymaga pomiarów zarówno w zakresie ultrafioletowym, jak i dalekiej podczerwieni. W widmie UV poczyniono znaczny postęp w tej dziedzinie, głównie dzięki obserwacjom przeprowadzonym za pomocą Kosmicznego Teleskopu Hubble’a (HST) i rozległym obrazom naziemnym z takich obiektów, jak Subaru, CFHT, VLT i VISTA (np. Cucciati et al. 2012; McLure et al. 2013; Bowler et al. 2014, 2015; Bouwens et al. 2015, 2016a; Finkelstein et al. 2015; Parsa et al. 2016). Obecnie znaczne rozbieżności dotyczące gęstości jasności promieniowania ultrafioletowego (ρ_{UV}) są obserwowane przede wszystkim przy ekstremalnych przesunięciach ku czerwieni, konkretnie $z > 8$ (np. Ellis et al. 2013; Oesch et al. 2014; McLeod et al. 2015). Jednak większość zgłoszonych rozbieżności można pogodzić, stosując spójne ograniczenia do całkowania funkcji jasności (LF) (McLeod et al., 2016; Ishigaki et al., 2017).

Jednak pomimo znaczenia promieniowania w dalekiej podczerwieni (Dole et al., 2006), postęp w zrozumieniu funkcji jasności napotkał wyzwania ze względu na trudności związane z obserwa-

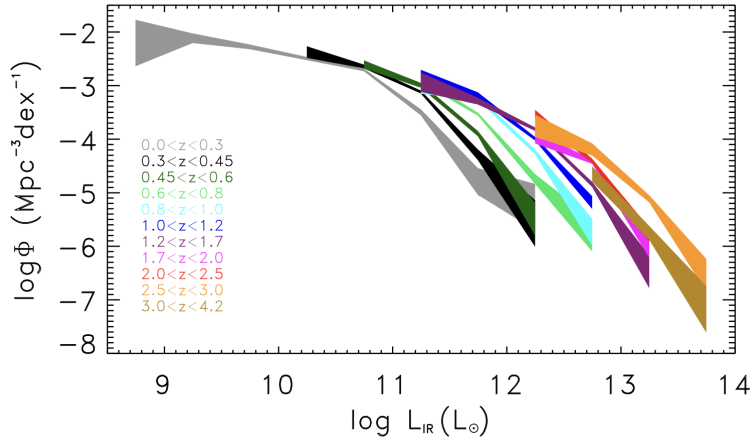
Dokładny kształt i ewolucja ciągu głównego nadal są tematem znacznej debaty w literaturze akademickiej, a liczne badania oferują różne punkty widzenia. Źródła tych rozbieżności są wieloaspektowe, obejmując takie czynniki, jak zakładana początkowa funkcja masy, modelowanie syntezy populacji gwiazd, historie formowania się gwiazd (ang. star formation history, SFH) i krzywe absorpcji pyłu. Krytycznym aspektem jest to, że metodologie stosowane do szacowania całkowitych szybkości formowania się gwiazd mogą znacząco wpływać na wyniki. Biorąc pod uwagę, że część emisji ultrafioletowej z młodych gwiazd jest pochłaniana przez pył międzygwiazdowy, dokładne określenie tego efektu jest niezbędne. Poleganie wyłącznie na danych UV/optycznych w celu pomiaru absorpcji pyłu daje wysoce niepewne wyniki ze względu na degenerację między wiekiem (różne SFH) a zaczerwienieniem (różne metaliczności i krzywe absorpcji). Uruchomienie teleskopu *Herschel* (Pilbratt et al., 2010) pozwoliło na bezpośrednią obserwację energii reemitowanej przez pył w dalekiej podczerwieni, umożliwiając dokładniejszą ocenę całkowitych



Rysunek 5: Ewolucja gęstości tempa formowania się gwiazd (ρ_{SFR}) z przesunięciem ku czerwieni (Gruppioni et al., 2020). Dane z innych badań opisano w legendzie na dole wykresu. Modele teoretyczne zaproponowane przez Madau & Dickinson (2014) i Bethertin et al. (2017) są zilustrowane odpowiednio jako czarne przerywane i pomarańczowe krzywe przerywane, podczas gdy przewidywania z symulacji IllustrisTNG są pokazane jako ciemnozielona ciągła krzywa. Ponadto widzimy pomiary uzyskane z korelacji krzyżowej mapy soczewkowania mikrofalowego promieniowania tła CMB i CIB (jasnoniebieskie krzyżyki z paskami błędów) i przewidywania uzyskanego przez modelowanie CIB (fioletowe krzywe przerywane potrójnymi kropkami, pokazujące przypadki pesymistyczne i optymistyczne).

cjami, które obejmują wysoki szum tła i ograniczoną rozdzielczość kątową. Spowodowało to ograniczony zakres uzyskanych próbek i znaczne niepewności dotyczące wyznaczenia ich przesunięcia ku czerwieni. Niemniej jednak osiągnięto znaczący postęp, początkowo poprzez obserwacje w średniej podczerwieni za pomocą Kosmicznego Teleskopu *Spitzer*, a ostatnio poprzez obrazowanie w dalekiej podczerwieni przeprowadzone przez Kosmiczne Obserwatorium *Herschel*. Łącznie te instrumenty umożliwiły udane śledzenie funkcji jasności w dalekiej podczerwieni i jej ewolucji aż do przesunięcia ku czerwieni $z \simeq 2$, przy czym dane przy większych przesunięciach ku czerwieni są obciążone bardzo znacznymi niepewnościami, co można zauważyć na Rysunku 5.

Początkowo obrazowanie *Spitzer* MIPS 24- μm zostało wykorzystane do zbadania funkcji jasności w falach NIR aż do przesunięcia ku czerwieni $z \simeq 2$ (Le Floch et al., 2005; Caputi et al., 2007; Rodighiero et al., 2010). Jednak proces ekstrapolacji z 24 μm do jasności w dalekiej podczerwieni staje się coraz bardziej problematyczny wraz ze wzrostem długości fali. Niedawno badania przeprowadzone za pomocą *Herschel* PACS i SPIRE ułatwiły postęp w tych badaniach, umożliwiając wybór obiektów przy bardziej odpowiednich długościach fal dalekiej podczerwieni, które są bliższe maksimum emisji pyłu. Dołączenie danych w falach 250, 350 i 500 μm umożliwiło Gruppioni et al. (2013) ustalenie jasności w dalekiej podczerwieni bez polegania w dużym stopniu na ekstrapolacjach; niemniej jednak, wybór obiektów był nadal wykonywany przy krótszych długościach fal PACS. W konsekwencji, to badanie obejmuje głównie bliższe i cieplejsze źródła, ograniczając próbki na $z > 2$ głównie do ekstremalnych źródeł (patrz Rysunek 6). Rowan-Robinson et al. (2016) starał się rozwijać pracę Gruppioni et al. (2013) poprzez rozszerzenie analizy na jeszcze wyższe przesunięcia ku



Rysunek 6: Funkcja jasności IR oszacowana z danych *Herschel* dla próbek na różnych przedziałach przesunięcia ku czerwieni, od $z \sim 0$ do $z \sim 4$ (Grupponi et al., 2013). Obszary wypełnione kolorem reprezentują niepewności $\pm 1\sigma$ (Poissona). Można zauważyć, że używając *Herschel* do selekcji galaktyk, wykrywamy tylko najbardziej ekstremalne obiekty przy $z \gtrsim 2$.

czerwieni ($z \simeq 6$) poprzez selekcję obiektów na długości fali $500 \mu\text{m}$, najdłuższym paśmie długości fal obrazowania *Herschel* SPIRE. Badania te przyniosły nieoczekiwanie wysokie szacunki gęstości jasności przy wysokich przesunięciach ku czerwieni; jednak wykorzystanie danych o najdłuższej długości fali z *Herschel* stwarza znaczne wyzwania ze względu na duży rozmiar wiązki (około 36 sekund łuku) i powiązane komplikacje, takie jak zlewanie się źródeł na niebie, błędna identyfikacja, potencjalne zanieczyszczenie przez aktywne jądra galaktyczne (ang. active galactic nuclei, AGN) i soczewkowanie grawitacyjne. Na przykład w tym badaniu odnotowano tempo formowania się gwiazd sięgające $20\,000 M_{\odot}/\text{yr}$.

Pomimo znacznych postępów w tej dziedzinie, wiarygodne mierzenie funkcji jasności galaktyk w dalekiej podczerwieni i powiązanej gęstości tempa formowania się gwiazd (ρ_{SFR}) poprzez wybór obiektów przez *Spitzer* lub *Herschel* staje się coraz trudniejsze przy przesunięciach ku czerwieni większych niż $z \simeq 2$. Aby sprostać tym wyzwaniom, selekcji galaktyk należy dokonywać w falach submilimetrowych/milimetrowych (sub-mm/mm). Podejście to wykorzystuje połączenie szeroko zakrojonych badań przeprowadzonych przy użyciu kamery SCUBA-2 na Teleskopie Jamesa Clerka Maxwella (JCMT; np. Geach et al. 2013, 2017; Roseboom et al. 2013; Chen et al. 2016; Michałowski et al. 2017; Cowie et al. 2017), wraz z mapowaniem o wyższej rozdzielczości, które można uzyskać dzięki Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array (ALMA), jak podkreślono w pracach Hatsukade et al. (2015, 2016); Umehata et al. (2015); Walter et al. (2016) i Dunlop et al. (2017). Chociaż podejmowano już wcześniejsze wysiłki mające na celu zbadanie ewolucji odległych populacji galaktyk w falach FIR przy użyciu naziemnych danych submilimetrowych (np. Wall et al. 2008), jakość dostępnych badań nie była wystarczająca.

Zalety przejścia na obserwacje submilimetrowe (tj. 450 i $850 \mu\text{m}$) i milimetrowe (tj. $1,1$ – $1,3 \text{ mm}$) z poziomu ziemi stają się coraz bardziej widoczne przy wyższych przesunięciach ku czerwieni. Po pierwsze, zmniejszone rozmiary wiązki przy tych długościach fal, zapewniane przez duże naziemne teleskopy z pojedynczą anteną, takie jak JCMT, oraz układy interferometryczne, takie jak ALMA, znacznie łagodzą ograniczenia związane ze słabą rozdzielczością obrazowania w dłuższych falach *Herschel* SPIRE. Ta redukcja minimalizuje problemy związane ze zlewaniem się źródeł i błędną identyfikacją optycznych odpowiedników badanych galaktyk, zwiększając tym samym dokładność określania przesunięć ku czerwieni. Po drugie, szczególnie przy przesunięciach ku czerwieni większych niż 3, wybór obiektów o długościach fal sub-mm/mm jest znacznie mniej dotknięty zanieczyszczeniem z aktywnych jąder galaktycznych w porównaniu do selekcji przy użyciu *Spitzer* lub *Herschel* PACS. To przesunięcie upraszcza również ekstrapolację potrzebną do oszacowania całkowitej jasności w dalekiej podczerwieni.

Liczne publikacje sugerują, że podwyższone wartości ρ_{FIR} , znane z prac bazujących na danych *Herschel* dla $z \simeq 2, 5$, mogą być niedokładne. Wstępne oceny tempa formowania się gwiazd w falach

FIR dla galaktyk o dużym przesunięciu ku czerwieni – czy to pochodzących z analiz nachylenia UV (np. [Dunlop et al. 2013](#)), czy z obserwacji ALMA (zarówno pojedynczych, jak i łączonych; np. [Capak et al. 2015](#); [Bouwens et al. 2016b](#)) – wskazują, że wkład aktywności gwiazdotwórczej przesłoniętej pyłem do ρ_{SFR} przy najwyższych przesunięciach ku czerwieni jest stosunkowo niewielki. Jednakże można zasadnie twierdzić, że galaktyki najbardziej zasłonięte pyłem prawdopodobnie nie występują w próbkach wybranych na podstawie emisji UV. Co ważniejsze, wyniki rozległych obrazowań ALMA pola Hubble’a Ultra Deep Field (HUDF; [Dunlop et al. 2017](#)) i analiza najgłębszych map SCUBA-2 Cosmology Legacy Survey (S2CLS) ([Bourne et al., 2017](#)) ujawniają znacznie niższe wartości przesłoniętego pyłem ρ_{SFR} w porównaniu do tych zgłoszonych przez [Gruppioni et al. \(2013\)](#) i [Rowan-Robinson et al. \(2016\)](#), szczególnie przy $z > 3$. Niemniej jednak pozostaje kwestią sporną, czy te badania, chociaż kompleksowe dla galaktyk o stosunkowo niskich wartościach SFR (około $10M_{\odot} \text{ yr}^{-1}$), obejmują wystarczająco duże obszary, aby uchwycić wkład pochodzący od najbardziej ekstremalnych obiektów gwiazdotwórczych.

W [Koprowski et al. \(2017\)](#) moim celem było wyjaśnienie tego scenariusza, a ponadto dokładne ustalenie kształtu i ewolucji funkcji jasności galaktyki w dalekiej podczerwieni i gęstości tempa formowania się gwiazd. Udało się to osiągnąć dzięki kompleksowej analizie danych z HUDF ALMA 1,3 mm i głębokiego obrazowania S2CLS 850 μm , w połączeniu z danymi z szerszych map 850 μm wytworzonych w ramach projektu S2CLS ([Geach et al., 2017](#); [Michałowski et al., 2017](#)). Łącznie te zestawy danych umożliwiają badanie o strukturze ‘tortu weselnego’, oferując wystarczająco szeroki zakres jasności i przesunięcia ku czerwieni, ułatwiając badanie kształtu i ewolucji w czasie funkcji jasności w falach FIR.

II. Opis publikacji złożonych jako osiągnięcie habilitacyjne

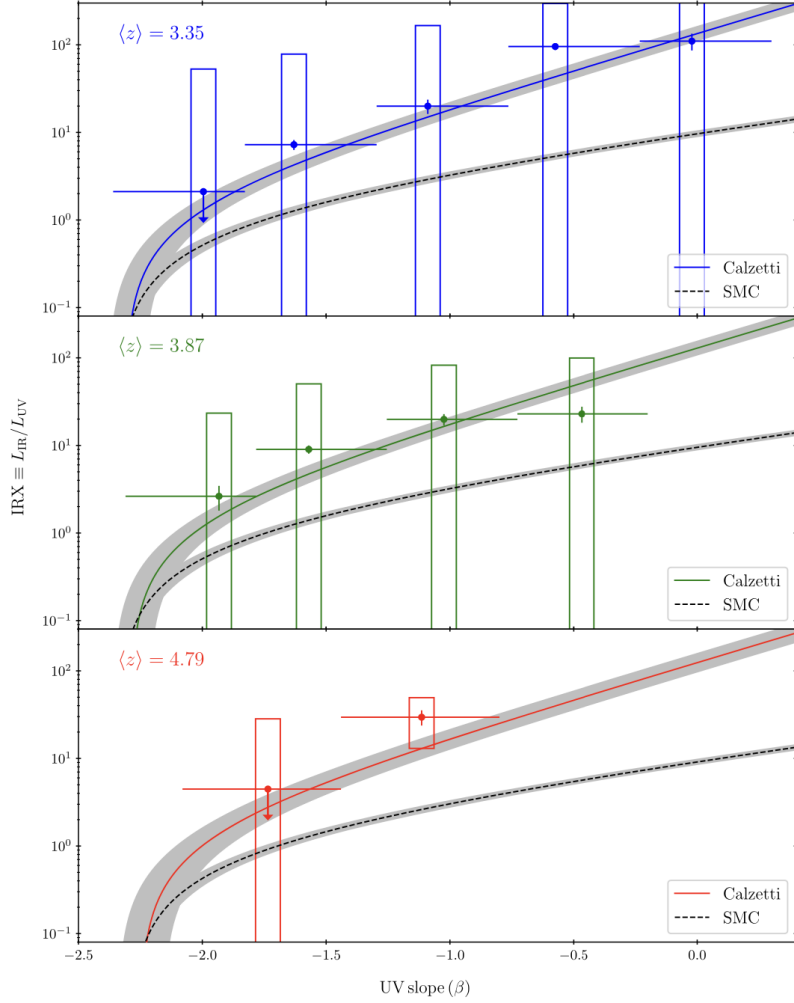
(Hab1) [Koprowski, M.P.](#); Coppin, K.E.K.; Geach, J.E.; McLure, R.J.; Almaini, O.; Blain, A.W.; Bremer, M.; Bourne, N.; Chapman, S.C.; Conselice, C.J.; Dunlop, J.S.; Farrah, D.; Hartley, W.; Karim, A.; Knudsen, K.K.; Michałowski, M.J.; Scott, D.; Simpson, C.; Smith, D.J.B.; van der Werf, P.P.; Title: ‘*A direct calibration of the IRX- β relation in Lyman-break Galaxies at $z = 3 - 5$.*’, 2016, MNRAS, 458, 4321, DOI: [10.1093/mnras/sty1527](https://doi.org/10.1093/mnras/sty1527)

Zarys

Użyłem 4209 galaktyk Lyman-break (ang. Lyman-Break Galaxies, LBG) przy przesunięciach ku czerwieni wynoszących około 3, 4 i 5, aby zbadać korelację między obserwowanym nachyleniem emisji kontinuum gwiazdowego w ultrafiolecie, oznaczonym jako β , a termiczną emisją pyłu, która jest reprezentowana przez nadmiar podczerwieni ($\text{IRX} \equiv L_{\text{IR}}/L_{\text{UV}}$). Wyprowadziłem funkcje ciągłe dla relacji $\text{IRX}-\beta$ do $z \sim 5$, ujawniając brak znaczącej ewolucji wraz z przesunięciem ku czerwieni i wykazując, że średnia krzywa $\text{IRX}-\beta$ jest zgodna z prawem absorpcji pyłu charakterystycznym dla [Calzetti et al. \(2000\)](#). Uśredniłem również wartości IRX dla pojedynczych źródeł (poprzez technikę ‘stacking’) w przedziałach masy gwiazdowej, co doprowadziło mnie do wniosku, że niemal liniowa zależność $\text{IRX}-M_*$ służy jako skuteczniejszy sposób dostosowania obserwowanych jasności w ultrafiolecie do wartości całkowitych (połączonych z jasnością zablokowaną przez pył).

Jako część cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych

Niniejsze badanie koncentruje się na podstawowej funkcji charakteryzującej ewolucję galaktyk o dużym przesunięciu ku czerwieni, w szczególności na relacji $\text{IRX}-\beta$. W przypadkach, gdy dane dalekiej podczerwieni są niedostępne, relacja ta służy jako narzędzie do oszacowania zakresu światła gwiazdowego przesłoniętego przez pył. Biorąc pod uwagę, że relacja ta została początkowo skalibrowana z lokalnymi galaktykami, istotne było ocenienie jej ważności przy wyższych przesunięciach ku czerwieni i ustalenie, czy istnieje jakakolwiek ewolucja czasowa. Ponadto, ze względu na inherentną niedokładność parametru β , zbadałem korelację między IRX a masą gwiazdową. To badanie umożliwiło opis średniej absorpcji światła gwiazdowego w galaktykach o określonych masach w poszczególnych epokach.



Rysunek 7: Zależność $\text{IRX}-\beta$ dla każdego przedziału przesunięcia ku czerwieni badanego w [Koprowski et al. \(2018\)](#). Błędy na β wskazują zakres każdego konkretnego przedziału, podczas gdy wartości IRX są uśrednionymi wartościami. Kolorowe prostokąty ilustrują variację 1σ w poszczególnych wartościach IRX w każdym przedziale β . Krzywe przedstawiają modele absorpcji pyłu charakterystyczne dla [Calzetti et al. \(2000\)](#) i SMC. Ta ilustracja wyraźnie pokazuje, że nasze ustalenia są zgodne z krzywą tłumienia [Calzetti et al. \(2000\)](#), a także sugeruje, że zależność $\text{IRX}-\beta$ nie ewoluuje w czasie.

Moja rola w projekcie

Jako główny koordynator tego projektu, podjąłem się większości prac niezależnie. Współautorzy przyczynili się do rozwiązywania pewnych problemów analitycznych, które pojawiły się w trakcie trwania projektu i udzielili cennych wskazówek podczas pisania. Ponadto pomagali w procedurze uśredniania. Byłem odpowiedzialny za przeprowadzenie wszystkich analiz, wygenerowanie wszystkich wykresów wizualnych, interpretację wyników i skomponowanie ostatecznego manuskryptu.

Najważniejsze wyniki

Odkryłem, że funkcja absorpcji pyłu w galaktykach gwiazdotwórczych pomiędzy $3 < z < 5$ jest zgodna z kalibracją [Calzetti et al. \(2000\)](#), gdzie pył i gwiazdy są ‘dobrze wymieszane’ ze sobą. Ponadto nie znalazłem żadnej ewolucji przesunięcia ku czerwieni dla $\text{IRX}-\beta$ pomiędzy $z = 3 - 5$ (patrz [Rysunek 7](#)). Zależność ta jest typowa dla galaktyk o podobnym wieku, charakteryzujących się podobnymi wewnętrznymi nachyleniami emisji ciągłej UV ($\beta_{\text{intr}} \sim -2.3$). W konsekwencji za zmiany w obserwowanej wartości β odpowiada głównie ilość pyłu. Porównując wyniki z wynikami [Heinis et al. \(2013\)](#); [Álvarez-Márquez et al. \(2016\)](#); [Reddy et al. \(2018\)](#) i [McLure et al. \(2018\)](#), stało

się oczywiście, że niektóre badania podają niższe wartości IRX odpowiadające określonemu β , co sugeruje zależność bardziej charakterystyczną dla Małego Obłoku Magellana (SMC). Uśrednianie IRX w przedziałach masy gwiazdowej, zamiast jako funkcji β , dało znacznie bardziej spójny obraz. Znalazłem ścisłą relację IRX- M_* , w której przetworzona przez pył emisja gwiazdowa skaluje się niemal liniowo z masą gwiazdową.

(Hab2) Koprowski, M.P.; Coppin, K.E.K.; Geach, J.E.; Hine, N.K.; Bremer, M.; Chapman, S.; Davies, L.J.M.; Hayashino, T.; Knudsen, K.K.; Kubo, M.; Lehmer, B.D.; Matsuda, Y.; Smith, D.J.B.; van der Werf, P.P.; Violino, G.; Yamada, T.; Title: ‘*A Resolved Map of the Infrared Excess in a Lyman Break Galaxy at $z = 3$.*’, 2016, ApJL, 828, L21, DOI: [10.3847/2041-8205/828/2/L21](https://doi.org/10.3847/2041-8205/828/2/L21)

Zarys

Zaobserwowałem kontinuum emisji pyłu 10 galaktyk na $z = 3.1$ za pomocą Atacama Large Millimeter/submillimeter Array (ALMA). Wykryłem i rozdzieliłem emisję $870\ \mu\text{m}$ w jednym ze źródeł i znalazłem całkowitą jasność w podczerwieni $L_{\text{IR}} = (8.4 \pm 2.3) \times 10^{10} L_{\odot}$. Za pomocą kamery Hubble Space Telescope Advanced Camera for Surveys zmapowałem emisję UV w układzie spoczynkowym w tej samej skali co pył, skutecznie rozdzielając IRX w normalnej galaktyce przy $z = 3$. Odkryłem, że źródło leży znacznie poniżej lokalnej relacji IRX- β . Doszedłem do wniosku, że złożona względna morfologia pyłu w odniesieniu do emisji UV jest w dużym stopniu odpowiedzialna za rozrzut w relacji IRX- β przy wysokich wartościach z .

Jako część cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych

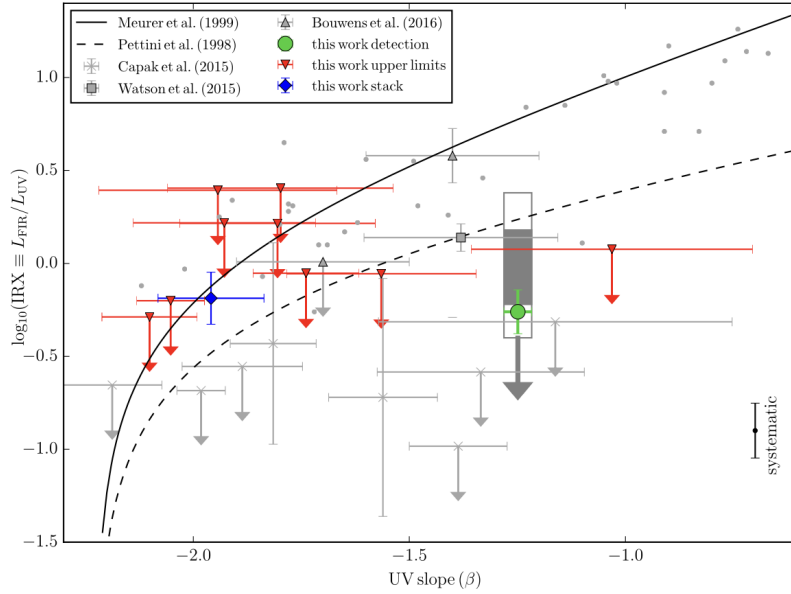
W tym badaniu wykorzystałem jedno z najwcześniejszych bezpośrednich dalekich wykryć w falach FIR kilku galaktyk o dużym przesunięciu ku czerwieni, wykorzystując nasze zastrzeżone dane ALMA. Chociaż średnia korelacja nadmiaru podczerwieni (IRX)- β wydaje się być stosunkowo spójna, poszczególne źródła wykazują znaczne wahania wokół tego trendu. Moje odkrycia wskazują, że niektóre źródła są umieszczone znacznie poniżej relacji Calzetti et al. (2000), co prowadzi do wniosku, że przestrzenny rozkład gwiazd i pyłu jest czynnikiem przyczyniającym się w tych przypadkach. Niniejsze badanie pokazuje, że podczas gdy relacja IRX- β służy jako użyteczna rama do charakteryzowania galaktyk gwiazdotwórczych jako populacji, nie zawsze sprawdza się dla pojedynczych detekcji.

Moja rola w projekcie

W tym badaniu niezależnie analizowałem dane ALMA przy wsparciu personelu ALMA Regional Centre w Manchesterze w Wielkiej Brytanii. Udało mi się zidentyfikować pojedyncze wykrycie galaktyki gwiazdotwórczej przy przesunięciu ku czerwieni $z = 3$. Przeprowadziłem całą analizę i jestem autorem większości manuskryptu. Jeden ze współautorów dostarczył surowe dane ALMA, podczas gdy inni przyczynili się do rozwiązywania pewnych problemów analitycznych i pomocy w procesie pisania.

Najważniejsze wyniki

Zaobserwowałem, że morfologia emisji ultrafioletowego światła i światła dalekiej podczerwieni wykazuje znaczące różnice, co sugeruje, że ta galaktyka może przechodzić fazę dwóch mniejszych źródeł. Podczas gdy galaktyka wykazuje mniej więcej równy poziom przesłoniętego i nieprzesłoniętego przez pył tempa formowania się gwiazd, moja szczegółowa analiza nadmiaru podczerwieni ujawnia odrębne obszary: niektóre są silnie przesłonięte ($z\ \text{IRX} \simeq 1,5$), podczas gdy inne są stosunkowo nieprzesłonięte ($z\ \text{IRX} \lesssim 0,5$; patrz [Rysunek 8](#)). Ta zmienność w obrębie pojedynczego układu wskazuje na znaczny rozrzut wartości IRX dla typowych galaktyk wokół średniej zależności IRX- β . Praca ta pokazuje, że konwencjonalna korelacja IRX- β (Meurer et al., 1999) ma tendencję



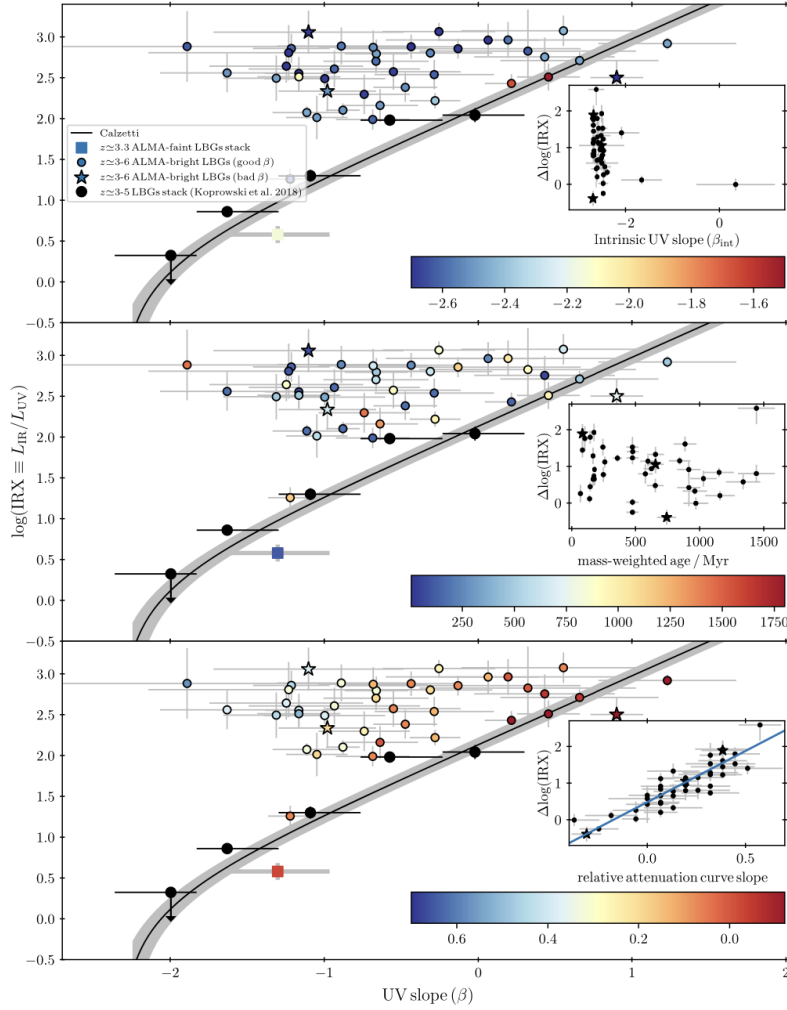
Rysunek 8: Związek między IRX a nachyleniem UV. Moje ustalenia są porównywane z ustaleniami Capak et al. (2015); Watson et al. (2015); Bouwens et al. (2016a) i oryginalną lokalną próbką z Meurer et al. (1999), która obejmuje górne limity 3σ . Dane wykazują znaczną zmienność i często pokrywają się z bardzo niskimi wartościami IRX. Szczegółowa mapa, którą skonstruowałem, wskazuje, że IRX może fluktuować co najmniej o czynnik trzech w obrębie jednego źródła, co sugeruje, że znaczna część obserwowanej zmienności w korelacji IRX- β może wynikać ze skomplikowanych i niejednorodnych rozkładów pyłu i gwiazd w galaktykach gwiazdotwórczych.

do przeceniania wartości tempa formowania gwiazd (SFR) galaktyk dla określonego β , co jest kluczowym czynnikiem, który należy wziąć pod uwagę przy ocenie uśrednionych objętościowo wartości SFR uzyskanych wyłącznie z funkcji jasności w ultrafiolecie.

(Hab3) Koprowski, M.P.; Coppin, K.E.K.; Geach, J.E.; Dudzeviciute, U.; Smail, I.; Almaini, O.; An, Fangxia; Blain, A.W.; Chapman, S.C.; Chen, Chian-Chou; Conzelmann, C.J.; Dunlop, J.S.; Farrah, D.; Gullberg, B.; Hartley, W.; Ivison, R.J.; Karska, A.; Maltby, D.; Malek, K.; Michałowski, M.J.; Pope, A.; Salim, S.; Scott, D.; Simpson, C.J.; Simpson, J.M.; Swinbank, A.M.; Thomson, A.P.; Wardlow, J.L.; van der Werf, P.P.; Whitaker, K.E.; Title: ‘*An ALMA survey of the SCUBA-2 cosmology legacy survey UKIDSS/UDS field: Dust attenuation in high-redshift Lyman-break galaxies.*’, 2020, MNRAS, 492, 4927, DOI: [10.1093/mnras/staa160](https://doi.org/10.1093/mnras/staa160)

Zarys

W tym badaniu przeanalizowałem obserwacje kontinuum emisji pyłu z Atacama Large Millimeter Array (ALMA) dla 41 galaktyk, a także 209 źródeł, które nie zostały wykryte przez ALMA, jako kontynuację mapowania SCUBA-2 pola UKIDSS Ultra Deep Survey (UDS). Analiza wykazała, że jasne galaktyki ALMA znacząco odbiegają od lokalnej relacji IRX- β , wykazując stosunkowo bardziej niebieskie nachylenia UV pomimo ich wysokich wartości nadmiaru podczerwieni w porównaniu ze średnią lokalną relacją IRX- β . Obserwację tę można częściowo przypisać młodemu wiekowi populacji gwiazd; jednak głównym czynnikiem przyczyniającym się do niezwykle niebieskich nachyleń UV jest ‘płytsza’, niż w przypadku średniej zależności, krzywa absorpcji pyłu. Ponadto wykazuję, że podczas określania mas gwiazdowych poprzez dopasowanie rozkładu energii widmowej (SED) istotne jest dopuszczenie zmienności krzywych absorpcji, a nie przestrzeganie stałego prawa (Calzetti et al.,



Rysunek 9: Nadmiar podczerwieni analizowany jest w odniesieniu do nachylenia ultrafioletowego, oznaczonego jako β . Jasne galaktyki FIR są reprezentowane przez małe kółka dla tych z wiarygodnymi dopasowaniami β i małe gwiazdy dla tych z mniej wiarygodnymi dopasowaniami, podczas gdy uśredniona wartość FIR (metoda ‘stacking’) jest oznaczony dużym kwadratem. Te reprezentacje są kodowane kolorami zgodnie z wewnętrznym nachyleniem UV (przed tłumieniem pyłu), wiekiem i nachyleniem krzywej absorpcji pyłu, jak pokazano odpowiednio na górnym, środkowym i dolnym panelu. Wstawiony wykres na dolnym panelu ujawnia, że pionowa odległość określonego źródła od średniej relacji, IRX, wykazuje istotną korelację z nachyleniem krzywej absorpcji pyłu. W związku z tym można wnioskować, że zmienność obserwowana w płaszczyźnie IRX- β dla źródeł badanych w tej pracy jest przede wszystkim uwarunkowana różnicami w krzywych absorpcji.

2000). Moje odkrycia wskazują, że stosowanie niewłaściwych krzywych absorpcji może prowadzić do niedoszacowania mas gwiazdowych średnio o współczynnik 2–3.

Jako część cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych

Niniejsze badanie stanowi dodatkowy wysiłek w celu ilościowego określenia i zrozumienia zachowania i stosowalności lokalnej relacji IRX- β . Konkretnie skupiam się na jasnych źródłach FIR, bezpośrednio wykrywanych, które leżą wyraźnie powyżej średniej krzywej. Moje ustalenia wskazują, że lokalna krzywa nie ma zastosowania do tych źródeł, ponieważ ich tłumienie pyłu nie jest zgodne z krzywą typu Calzetti et al. (2000), która jest typowa dla lokalnej relacji Meurer et al. (1999).

Moja rola w projekcie

Dane ALMA wykorzystane w tym projekcie zostały dostarczone przez mojego współpracownika. Przejąłem inicjatywę w projekcie, przeprowadziłem wszystkie analizy, wygenerowałem wszystkie wykresy i napisałem większość tekstu. Kilku współautorów przyczyniło się do napisania Wprowadzenia i pomogło w interpretacji niektórych wyników.

Najważniejsze wyniki

Analiza wykazała, że jasne w zakresie FIR galaktyki posiadają średnio znacznie większą masę w porównaniu do ich ciemniejszych odpowiedników, co wzmacnia proponowany związek między masą gwiazdową a szybkością formowania się gwiazd (SFR) (Koprowski et al., 2024). Podczas przeprowadzania dopasowań rozkładu energii widmowej UV-FIR do dostępnej fotometrii szerokopasmowej stało się oczywiste, że zmienność krzywych absorpcji jest niezbędna do uzyskania dokładnych dopasowań. Wykorzystując indywidualne wartości IRX i β wyprowadzone z widm dla każdej galaktyki w naszej próbce, zaobserwowano, że jasne w zakresie FIR galaktyki są umieszczone znacznie powyżej typowej korelacji IRX- β typu Calzetti et al. (2000) (patrz Rysunek 9), co bierze się najprawdopodobniej z nieregularnego rozkładu gwiazd względem pyłu. Podczas szacowania mas gwiazdowych na podstawie dopasowań SED kluczowe jest zachowanie ostrożności w odniesieniu do zakładanych form bazowych krzywych absorpcji.

(Hab4) Koprowski, M.P.; Dunlop, J.S.; Michałowski, M.J.; Coppin, K.E.K.; Geach, J.E.; McLure, R.J.; Scott, D.; van der Werf, P.P; Title: *‘The evolving far-IR galaxy luminosity function and dust-obscured star formation rate density out to $z \simeq 5$.’*, 2018, MNRAS, 479, 4355, DOI: [10.1093/mnras/stx1843](https://doi.org/10.1093/mnras/stx1843)

Zarys

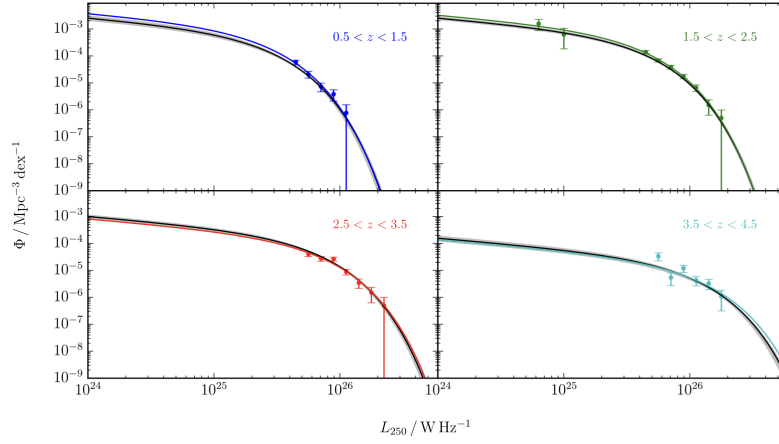
Niniejsze badanie wprowadza nowy pomiar ewoluującej funkcji jasności dalekiej podczerwieni (LF) galaktyk, rozciągającej się na przesunięcia ku czerwieni około $z \simeq 5$. Odkrycia mają istotne implikacje dla zrozumienia gęstości formowania się gwiazd zasłoniętych pyłem we wczesnym Wszechświecie. Aby to osiągnąć, wykorzystałem dane FIR zebrane przez SCUBA-2 na Teleskopie Jamesa Clerka Maxwella i Atacama Large Millimeter/Submillimeter Array. Instrumenty te zapewniają obrazowanie o wysokiej rozdzielczości z odpowiednim zakresem dynamiki, umożliwiając kompleksowe pokrycie płaszczyzny jasności-przesunięcia ku czerwieni do $z > 4$. Wyniki potwierdzają wcześniejsze sugestie, że nachylenie części LF na małych jasnościach jest na tyle płaskie, że główny wpływ na wynikającą z niej gęstość jasności mają obiekty najjaśniejsze. Jednak moja analiza ujawnia, że gęstość liczbowa i jasność tych źródeł przy dużych przesunięciach ku czerwieni zostały znacząco przeszacowane w poprzednich badaniach, bazujących na danych małej rozdzielczości z *Herschel* SPIRE poza $z \simeq 2$.

Jako część cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych

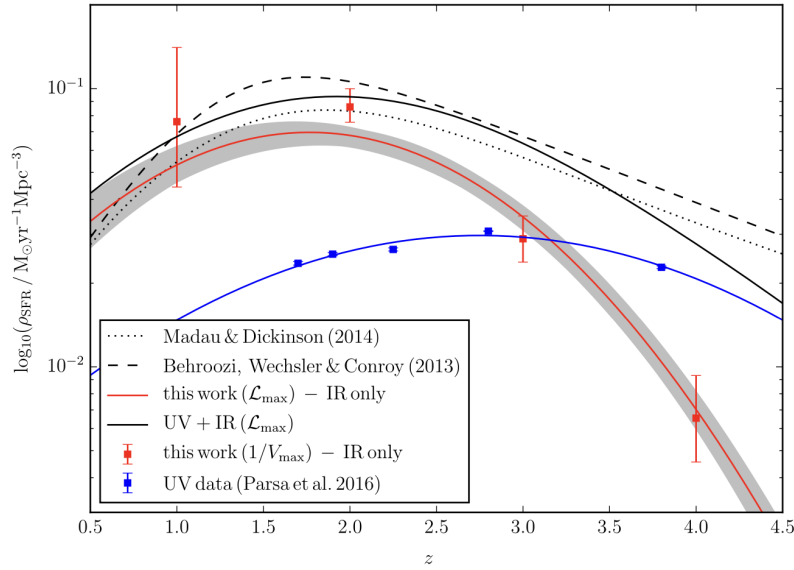
W pracy tej zbadałem fundamentalny aspekt astrofizyki, skupiając się na ewolucji galaktyk w okresie wczesnego Wszechświata poprzez analizę funkcji jasności (LF) i powiązanej gęstości tempa formowania się gwiazd (ρ_{SFR}). LF jest wykorzystywana do ilościowego określenia liczby galaktyk wykazujących określoną jasność na jednostkę objętości w określonej epoce. Poprzez integrację LF oceniłem ogólną „aktywność” Wszechświata w kategoriach ρ_{SFR} . Funkcje te zostały bezpośrednio zmierzone w dalekiej podczerwieni (FIR) do przesunięcia ku czerwieni $z \simeq 5$ i zostały następnie zintegrowane z pomiarami opartymi na ultrafiolecie UV, aby zapewnić kompleksowy opis całkowitej, niezakłóconej ewolucji formowania się gwiazd we Wszechświecie.

Moja rola w projekcie

Koordynowałem wszystkie prace nad tym projektem, przeprowadziłem wszystkie analizy i ukończyłem większość pisanego. Moi współautorzy przyczynili się, pomagając w pisaniu sekcji Wprowadzenie i Dyskusja, a także zapewniając wsparcie w rozwiązywaniu pewnych wyzwań analitycznych.



Rysunek 10: Funkcje jasności galaktyk w dalekiej podczerwieni (LF) dla czterech przedziałów przesunięcia ku czerwieni badanych w tej pracy. W zakresie przesunięcia ku czerwieni $1,5 < z < 2,5$ dwa najslabsze punkty danych reprezentują wartości LF uzyskane z obserwacji ALMA. Ta analiza umożliwiła określenie nachylenia ciemnego końca LF, $\alpha = -0,4$, które następnie zastosowano do innych przedziałów przesunięcia ku czerwieni. Ciągłe linie w kolorze ilustrują najlepiej dopasowane funkcje ciągłe.



Rysunek 11: Gęstość tempa formowania się gwiazd, oznaczona jako ρ_{SFR} , jest zilustrowana jako funkcja przesunięcia ku czerwieni. Ostatnie modele parametryczne ewolucji przesunięcia ku czerwieni ρ_{SFR} są przedstawione za pomocą czarnych linii kropkowanych i przerywanych, jak opisano odpowiednio w [Madau & Dickinson \(2014\)](#) i [Behroozi et al. \(2013\)](#). Moje oszacowania dla IR ρ_{SFR} , określone przez zintegrowanie odpowiadających im LF z [Rysunku 10](#), są przedstawione za pomocą wypełnionych na czerwono kwadratów. Natomiast niebieskie kwadraty wskazują oszacowania ultrafioletowego ρ_{SFR} uzyskane z badań przeprowadzonych przez [Parsa et al. \(2016\)](#). Niebieska linia ciągła przedstawia funkcję ciągłą dopasowaną do danych UV. Ponadto czarna linia ciągła zapewnia kompleksową reprezentację funkcjonalną całkowitego ρ_{SFR} , który pochodzi z integracji wyników UV i IR.

Najważniejsze wyniki

Przeprowadziłem analizę pokrycia w obrębie płaszczyzny jasności dalekiej podczerwieni – przesunięcia ku czerwieni, aby uzyskać nowy pomiar ewoluującej funkcji jasności dalekiej podczerwieni (LF) galaktyk, rozciągającej się do przesunięcia ku czerwieni w przybliżeniu $z \simeq 5$ (patrz [Rysunek 10](#)). Kształt i ewolucja LF zostały modelowane przez funkcję Schechtera o nachyleniu $\alpha = -0,4$, wyprowadzonym z danych ALMA przy $z \simeq 2$. Wykorzystując pomiary LF, obliczyłem gęstość jasności w podczerwieni, co z kolei pozwala na oszacowanie gęstości przesłoniętego tempa formowania się gwiazd (patrz [Rysunek 11](#)). Następnie zintegrowałem to z aktywnością formowania się gwiazd w falach UV z [Parsa et al. \(2016\)](#), aby ocenić ewolucję całkowitego ρ_{SFR} . Moje odkrycia wskazują, że ewolucja podczerwonego LF z przesunięciem ku czerwieni prowadzi do spadku wypadkowej ρ_{SFR} poza redshiftem około $z \simeq 2 - 2,5$, jednocześnie sugerując, że najjaśniejsze źródła submilimetrowe będą obecne na bardzo wysokich przesunięciach ku czerwieni, około $z \simeq 5 - 6$.

(Hab5) Koprowski, M.P.; Wijesekera, J.V.; Dunlop, J.S.; McLeod, D.J.; Michałowski, M.J.; Lisiecki, K.; McLure, R.J.; Title: ‘Charting the main sequence of star-forming galaxies out to redshifts $z < 5.7$.’, 2024, A&A, 691, A164, DOI: [10.1051/0004-6361/202449948](https://doi.org/10.1051/0004-6361/202449948)

Zarys

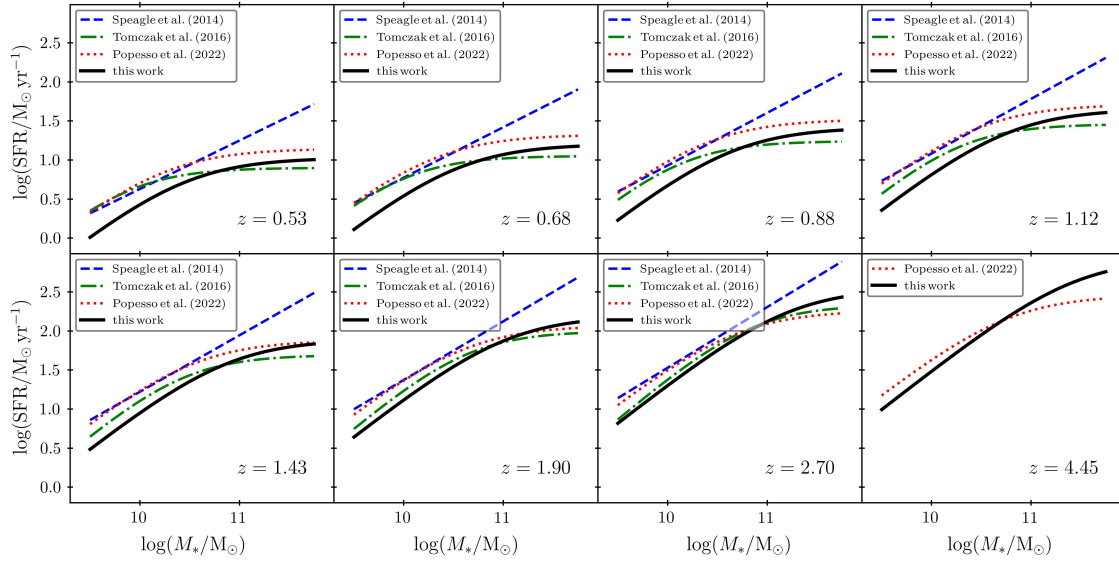
W tym badaniu przedstawiłem nowe oszacowanie głównego ciągu galaktyk gwiazdotwórczych (ang. Main Sequence, MS), uzyskaną poprzez uśrednienie sygnału około 100 000 źródeł w falach dalekiej podczerwieni, używając map *Herschel* i *James Clerk Maxwell Telescope* (JCMT). Analiza ujawniła funkcjonalne cechy MS, charakteryzujące się liniową zależnością między szybkością formowania się gwiazd (SFR) a masą gwiazdową (M_*), która wykazuje tendencję do spłaszczenia przy podwyższonych masach gwiazdowych, wraz z wykładniczym wzrostem normalizacji wraz z przesunięciem ku czerwieni. W porównaniu z istniejącą literaturą moje ustalenia wskazują, że MS wykazuje nieco niższą normalizację przy przesunięciach ku czerwieni mniejszych niż 2 i tendencję do spłaszczenia przy nieco wyższych masach gwiazdowych przy większych przesunięciach ku czerwieni. Ta rozbieżność jest prawdopodobnie spowodowana różnymi założeniami dotyczącymi temperatury pyłu stosowanymi w obliczeniach SFR przy braku danych FIR. Dodatkowo zbadałem poprawność wyznaczonej MS poprzez symulację ewolucji obserwowanej funkcji masy gwiazdowej galaktyk (GSMF) w czasie.

Jako część cyklu powiązanych tematycznie artykułów naukowych

W tym badaniu analizuję fundamentalną zależność dotyczącą typowych galaktyk gwiazdotwórczych, w szczególności ciągu głównego. Wyjaśniam korelację między „aktywnością” galaktyk, mierzoną na podstawie tempa formowania się gwiazd, a masami gwiazdowymi w fazie ewolucji charakteryzującej się spójnym i niezaburzonym formowaniem się gwiazd. Ta zależność dostarcza istotnych spostrzeżeń na temat cyklu życia galaktyk o dużym przesunięciu ku czerwieni i została tutaj zbadana przy użyciu kompletnej próbki sięgającej przesunięcia ku czerwieni 5,7.

Moja rola w projekcie

Procedura uśredniania sygnału opiera się na katalogach optycznych dostarczonych przez moich współpracowników. Przejąłem inicjatywę w projekcie, przeprowadziłem wszystkie analizy i wygenerowałem wykresy, z pewną pomocą mojego doktoranta. Ponadto byłem odpowiedzialny za napisanie manuskryptu. Jeden z moich współautorów przyczynił się do sekcji szczegółowo opisującej katalogi zawarte w publikacji.



Rysunek 12: Główny ciąg galaktyk gwiazdotwórczych (MS), reprezentowany przez ciągłą czarną linię, wyznaczony dla każdego przedziału przesunięcia ku czerwieni analizowanego w tym badaniu. W celach porównawczych relacje ustalone przez [Speagle et al. \(2014\)](#), [Tomczak et al. \(2016\)](#) i [Popesso et al. \(2022\)](#) są zilustrowane odpowiednio przerywanymi liniami niebieskimi, zielonymi i czerwonymi. Chociaż istnieje ogólna zgodność między funkcjami, widoczne są lekkie rozbieżności.

Najważniejsze wyniki

Szybkość formowania się gwiazd (SFR) dla galaktyk gwiazdotwórczych (ang. star-forming galaxies, SFG) znajdujących się na ciągu głównym (MS) wykazuje niemal liniową zależność z masą gwiazdową w różnych przesunięciach ku czerwieni, ostatecznie wyrównując się do asymptotycznej SFR przy podwyższonych poziomach masy (patrz [Rysunek 12](#)). Przy ustalonej masie gwiazdowej SFR wykazuje wzrost wraz z przesunięciem ku czerwieni, odzwierciedlając ewolucję przesunięcia ku czerwieni normalizacji MS. Zgodnie z wynikami [Daddi et al. \(2022\)](#) wydaje się, że obserwowane spłaszczenie MS można przypisać przede wszystkim spadkowi procesów akrecji zimnego gazu do wnętrza galaktyki. Moja analiza zależności między szczytową temperaturą pyłu, a przesunięciem ku czerwieni wykazała dodatnią korelację, przy czym temperatura pyłu (T_d) wzrasta kwadratowo wraz z przesunięciem ku czerwieni. Potwierdza to hipotezę, że wyższe wartości T_d w SFG są konsekwencją rosnących specyficznych szybkości formowania się gwiazd (ang. specific star formation rate, sSFR = SFR/ $M_\odot$), jak zauważono w [Liang et al. 2019](#). Stosując różne formy funkcjonalne dla relacji SFR- $M_\odot$, modelowałem również ewolucję czasową obserwowanej funkcji masy gwiazdowej galaktyk gwiazdotwórczych (ang. galaxy stellar mass function, GSMF) z prac [Davidzon et al. \(2017\)](#) i [McLeod et al. \(2021\)](#). Wyniki wskazały, że symulowana część GSMF na małych masach wykazuje większe gęstości liczbowe przy wyższych przesunięciach ku czerwieni, co sugeruje, że nachylenie MS prawdopodobnie ewoluje w kierunku bardziej stromych wartości wraz ze wzrostem przesunięcia ku czerwieni.

III. Wnioski i perspektywy na przyszłość

Podczas moich badań podoktoranckich skupiłem się na analizie cech galaktyk i ich ewolucji czasowej we wczesnej historii Wszechświata, co szczegółowo opisałem w artykułach zawartych w tym dokumencie (Hab 1-5). Analiza właściwości formowania się gwiazd w galaktykach wymaga ich wykrycia w dalekiej podczerwieni (FIR), co jest zadaniem skomplikowanym ze względu na ograniczenia naszych narzędzi obserwacyjnych, w tym niską rozdzielczość teleskopów i ograniczone pole widzenia interferometrów FIR. Aby zidentyfikować źródła poniżej szumu w wystarczających ilościach, zastosowałem przede wszystkim technikę uśredniania sygnału (ang. stacking). To podejście pozwoliło mi

dosięgnąć przesunięcia ku czerwieni ~ 6 , co odpowiada okresowi, w którym Wszechświat miał zaledwie około miliarda lat. Dokonałem ilościowej oceny kilku funkcji ewolucji galaktyk, takich jak IRX- β (Koprowski et al., 2016a, 2018, 2020), funkcja jasności w podczerwieni, gęstość tempa powstawania gwiazd (Koprowski et al., 2017) i ciąg główny galaktyk gwiazdotwórczych (Koprowski et al., 2014, 2024), a następnie scharakteryzowałem ich ewolucję czasową, wykorzystując najpełniejsze dostępne katalogi optyczne.

Obecnie zajmuję się ilościowym określaniem dodatkowych zależności, w szczególności korelacją między nadmiarem podczerwieni (IRX) a masą gwiazdową, M_* , co jest często bardziej praktyczne niż wykorzystanie funkcji IRX- β . Ponadto dokonuję aktualizacji mojej poprzedniej pracy nad wyznaczaniem funkcji jasności w podczerwieni i odpowiadającej jej gęstości tempa formowania się gwiazd (Koprowski et al., 2017). Obecnie skupiam się na zwiększeniu dokładności pomiarów jasności w podczerwieni w przypadku bezpośrednich detekcji poprzez włączenie dodatkowych danych fotometrycznych i umożliwienie użycia temperatury pyłu jako zmiennej. Ponadto bezpośrednio wyznaczam nachylenie funkcji jasności na małych wartościach poprzez technikę uśredniania sygnału. To podejście pozwoli mi jako pierwszemu ustalić ewolucję tego nachylenia w czasie we wczesnym Wszechświecie.

W niedalekiej przyszłości planuję rozszerzyć moje obecne badania, aby objąć najwyższe przesunięcia ku czerwieni zbadane do tej pory (około $z \sim 11$). To przedsięwzięcie wykorzysta nadchodzące katalogi optyczne i bliskiej podczerwieni z Kosmicznego Teleskopu Jamesa Webba, które są obecnie kompletowane przez moich kolegów z Uniwersytetu w Edynburgu, WB. Praca ta będzie prowadzona pod auspicjami mojego obecnego grantu SONATA Bis i umożliwi mi analizę ewolucji najbardziej odległych galaktyk w epoce rejonizacji, okresie, gdy Wszechświat miał zaledwie około 300 milionów lat.

5. Prezentacja znaczącej działalności naukowej prowadzonej w więcej niż jednej uczelni

Po ukończeniu doktoratu na Uniwersytecie Edynburskim w Wielkiej Brytanii, uzyskałem stanowisko podoktorskie na Uniwersytecie Hertfordshire w Wielkiej Brytanii, gdzie poświęciłem cztery lata na badania i opublikowałem kilka prac, w tym Koprowski et al. (2016b,a, 2017, 2018). W 2019 roku przeszedłem na Uniwersytet Toruński (UMK), aby kontynuować badania podoktoranckie. W 2021 roku objąłem stanowisko głównego badacza w grantie SONATA, a od listopada 2024 roku kieruję grantem SONATA Bis. Ponadto w 2021 roku zostałem mianowany pełnoetatowym adiunktem na UMK.

6. Prezentacja osiągnięć dydaktycznych i mentorskich

Prowadziłem zajęcia instruktażowe na różnych kursach na Uniwersytecie w Edynburgu i Hertfordshire w Wielkiej Brytanii. Kursy, które prowadziłem, to m.in. „Termodynamika”, „Mechanika statystyczna”, „Fizyka 1B: Materiał wszechświata” i „Matematyka inżynierska”. Ponadto prowadziłem kurs „Astronomiczne podstawy geografii” na Uniwersytecie Mikołaja Kopernika w Toruniu. Podczas mojego stażu podoktorskiego byłem mentorem projektu licencjackiego Krzysztofa Lisieckiego na UMK i współnadzorowałem kilku doktorantów, takich jak Tracy Garratt na Uniwersytecie w Hertfordshire oraz Alya Amirah Azman, Le Ngan i Mateusz Ogrodnik na UMK. W latach 2020 i 2021 byłem również opiekunem naukowym dwóch studentów zagranicznych w ramach programu ‘Toruń Astrophysics/Physics Summer’ (TAPS). Obecnie pełnię również funkcję współopiekuna doktoranta Jude Vijayanga Wijesekera.

7. Prezentacja osiągnięć organizacyjnych

- 2024-teraz; **Kierownik grantu**; Kierownik grantu SONATA Bis; Tytuł: ‘Teleskop Jamesa Webba - Ewolucja galaktyk gwiazdotwórczych do $z \sim 12$.’; Instytut Astronomii – Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki – Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Polska.

- 2021-2024; **Kierownik grantu**; Kierownik grantu SONATA; Tytuł: ‘Ewolucja czasowa gęstości tempa powstawania gwiazd we wczesnym Wszechświecie.’; Instytut Astronomii – Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej – Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Polska.
- 2024; **Organizator seminariów Instytutu Astronomii**; Instytut Astronomii – Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki – Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Polska.
- 2023; **Organizator zjazdu Polskiego Towarzystwa Astronomicznego**; Członek LOC; Data spotkania: 11-15/09; [Strona internetowa i program](#).
- 2020; **Organizator seminarium nt. powstawania gwiazd i astrochemii**; Instytut Astronomii – Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki – Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu, Polska.

8. Inne informacje: stypendia, nagrody, wyróżnienia i nagrody —

- 2024; **Grant badawczy SONATA Bis**; Kierownik; Tytuł: ‘Teleskop Jamesa Webba - Ewolucja galaktyk gwiazdotwórczych do $z \sim 12$.’; Instytut Astronomii – Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki Stosowanej – Uniwersytet Mikołaja Kopernika w Toruniu; Kwota: 2.120.850 zł.
- 2021; **Grant badawczy SONATA**; Kierownik; Tytuł: ‘Ewolucja czasowa gęstości tempa powstawania gwiazd we wczesnym Wszechświecie.’; Instytut Astronomii – Wydział Fizyki, Astronomii i Informatyki – Uniwersytet Mikołaja Kopernika, Toruń, Polska. Kwota: 816.600 zł.
- 2011-2015; **Stypendium doktorskie**; Oferowane przez Science & Technology Facilities Council na Uniwersytecie w Edynburgu, Edynburg, Wielka Brytania. Kwota: 48.000 GBP.
- 2015; **Nagroda STEP**; przyznawana przez Science & Technology Facilities Council na Uniwersytecie w Edynburgu, UK, na przedłużenie doktoratu na okres pół roku. Kwota: 7.000 GBP.
- 2009; **Nagroda im. Emersona**; przyznawana dla najlepszego studenta studiów magisterskich w dziedzinie astrofizyki, Uniwersytet Edynburski, Wielka Brytania.

Literatura

- Álvarez-Márquez J., et al., 2016, [A&A](#), **587**, A122
- Behroozi P. S., Wechsler R. H., Conroy C., 2013, [ApJ](#), **770**, 57
- Béthermin M., et al., 2012, [A&A](#), **542**, A58
- Bethermin M., et al., 2017, preprint, ([arXiv:1703.08795](#))
- Boquien M., et al., 2009, [ApJ](#), **706**, 553
- Boquien M., et al., 2012, [A&A](#), **539**, A145
- Bothwell M. S., et al., 2011, [MNRAS](#), **415**, 1815
- Bourne N., et al., 2017, [MNRAS](#), **467**, 1360
- Bouwens R. J., et al., 2011, [ApJ](#), **737**, 90
- Bouwens R. J., et al., 2015, [ApJ](#), **803**, 34
- Bouwens R. J., et al., 2016a, [ApJ](#), **830**, 67
- Bouwens R. J., et al., 2016b, [ApJ](#), **833**, 72
- Bowler R. A. A., et al., 2014, [MNRAS](#), **440**, 2810
- Bowler R. A. A., et al., 2015, [MNRAS](#), **452**, 1817
- Burgarella D., Buat V., Iglesias-Páramo J., 2005, [MNRAS](#), **360**, 1413
- Calzetti D., 1997, [AJ](#), **113**, 162
- Calzetti D., Armus L., Bohlin R. C., Kinney A. L., Koornneef J., Storchi-Bergmann T., 2000, [ApJ](#), **533**, 682

Capak P. L., et al., 2015, *Nature*, 522, 455

Caputi K. I., et al., 2007, *ApJ*, 660, 97

Casey C. M., et al., 2014, *ApJ*, 796, 95

Chapman S. C., et al., 2000, *MNRAS*, 319, 318

Chapman S. C., Lewis G. F., Scott D., Borys C., Richards E., 2002, *ApJ*, 570, 557

Chen C.-C., et al., 2016, preprint, ([arXiv:1601.02630](#))

Coppin K. E. K., et al., 2015, *MNRAS*, 446, 1293

Cowie L. L., Barger A. J., Hsu L.-Y., Chen C.-C., Owen F. N., Wang W.-H., 2017, *ApJ*, 837, 139

Cucciati O., et al., 2012, *A&A*, 539, A31

Daddi E., et al., 2022, *A&A*, 661, L7

Davidzon I., et al., 2017, *A&A*, 605, A70

Dole H., et al., 2006, *A&A*, 451, 417

Dunlop J. S., McLure R. J., Robertson B. E., Ellis R. S., Stark D. P., Cirasuolo M., de Ravel L., 2012, *MNRAS*, 420, 901

Dunlop J. S., et al., 2013, *MNRAS*, 432, 3520

Dunlop J. S., et al., 2017, *MNRAS*, 466, 861

Ellis R. S., et al., 2013, *ApJL*, 763, L7

Ferrara A., Hirashita H., Ouchi M., Fujimoto S., 2016, preprint, ([arXiv:1607.01824](#))

Finkelstein S. L., et al., 2012, *ApJ*, 756, 164

Finkelstein S. L., et al., 2015, *ApJ*, 810, 71

Geach J. E., et al., 2013, *MNRAS*, 432, 53

Geach J. E., et al., 2017, *MNRAS*, 465, 1789

Goldader J. D., Meurer G., Heckman T. M., Seibert M., Sanders D. B., Calzetti D., Steidel C. C., 2002, *ApJ*, 568, 651

González V., Labbé I., Bouwens R. J., Illingworth G., Franx M., Kriek M., Brammer G. B., 2010, *ApJ*, 713, 115

González V., Bouwens R., Illingworth G., Labbé I., Oesch P., Franx M., Magee D., 2014, *ApJ*, 781, 34

Grasha K., Calzetti D., Andrews J. E., Lee J. C., Dale D. A., 2013, *ApJ*, 773, 174

Gruppioni C., et al., 2013, *MNRAS*, 432, 23

Gruppioni C., et al., 2020, *A&A*, 643, A8

Hatsukade B., Ohta K., Yabe K., Seko A., Makiya R., Akiyama M., 2015, *ApJ*, 810, 91

Hatsukade B., et al., 2016, *PASJ*, 68, 36

Heinis S., et al., 2013, *MNRAS*, 429, 1113

Ilbert O., et al., 2010, *ApJ*, 709, 644

Ishigaki M., Kawamata R., Ouchi M., Oguri M., Shimasaku K., 2017, preprint, ([arXiv:1702.04867](#))

Kennicutt R. C., Evans N. J., 2012, *ARA&A*, 50, 531

Kong X., Charlot S., Brinchmann J., Fall S. M., 2004, *MNRAS*, 349, 769

Koprowski M. P., Dunlop J. S., Michałowski M. J., Cirasuolo M., Bowler R. A. A., 2014, *MNRAS*, 444, 117

Koprowski M. P., et al., 2016a, *MNRAS*, 458, 4321

Koprowski M. P., et al., 2016b, *ApJL*, 828, L21

Koprowski M. P., Dunlop J. S., Michałowski M. J., Coppin K. E. K., Geach J. E., McLure R. J., Scott D., van der Werf P. P., 2017, *MNRAS*, 471, 4155

Koprowski M. P., et al., 2018, *MNRAS*, 479, 4355

Koprowski M. P., et al., 2020, *MNRAS*, 492, 4927

Koprowski M. P., Wijesekera J. V., Dunlop J. S., McLeod D. J., Michałowski M. J., Lisiecki K., McLure R. J., 2024, *arXiv e-prints*, p. [arXiv:2403.06575](#)

Labbé I., et al., 2005, *ApJL*, 624, L81

Lagache G., et al., 2004, *ApJS*, 154, 112

Le Floc'h E., et al., 2005, *ApJ*, 632, 169

Lee N., et al., 2015, *ApJ*, 801, 80

Leja J., et al., 2022, *ApJ*, 936, 165

Leslie S. K., et al., 2020, *ApJ*, 899, 58

Liang L., et al., 2019, *MNRAS*, 489, 1397

Madau P., Dickinson M., 2014, [ARA&A](#), **52**, 415
Magnelli B., et al., 2013, [A&A](#), **553**, A132
Magnelli B., et al., 2024, [A&A](#), **688**, A55
McLeod D. J., McLure R. J., Dunlop J. S., Robertson B. E., Ellis R. S., Targett T. A., 2015, [MNRAS](#), **450**, 3032
McLeod D. J., McLure R. J., Dunlop J. S., 2016, [MNRAS](#), **459**, 3812
McLeod D. J., McLure R. J., Dunlop J. S., Cullen F., Carnall A. C., Duncan K., 2021, [MNRAS](#), **503**, 4413
McLure R. J., et al., 2013, [MNRAS](#), **428**, 1088
McLure R. J., et al., 2018, [MNRAS](#), **476**, 3991
Meurer G. R., Heckman T. M., Calzetti D., 1999, [ApJ](#), **521**, 64
Michałowski M. J., et al., 2017, [MNRAS](#), **469**, 492
Narayanan D., Davé R., Johnson B. D., Thompson R., Conroy C., Geach J., 2018, [MNRAS](#), **474**, 1718
Oesch P. A., et al., 2014, [ApJ](#), **786**, 108
Oteo I., et al., 2013, [A&A](#), **554**, L3
Overzier R. A., et al., 2011, [ApJL](#), **726**, L7
Pannella M., et al., 2009, [ApJL](#), **698**, L116
Parsa S., Dunlop J. S., McLure R. J., Mortlock A., 2016, [MNRAS](#), **456**, 3194
Penner K., et al., 2012, [ApJ](#), **759**, 28
Pettini M., Kellogg M., Steidel C. C., Dickinson M., Adelberger K. L., Giavalisco M., 1998, [ApJ](#), **508**, 539
Pilbratt G. L., et al., 2010, [A&A](#), **518**, L1
Pope A., et al., 2017, [ApJ](#), **838**, 137
Popesso P., et al., 2023, [MNRAS](#), **519**, 1526
Popping G., Puglisi A., Norman C. A., 2017, [MNRAS](#), **472**, 2315
Reddy N. A., Steidel C. C., Pettini M., Adelberger K. L., Shapley A. E., Erb D. K., Dickinson M., 2008, [ApJS](#), **175**, 48
Reddy N. A., Erb D. K., Pettini M., Steidel C. C., Shapley A. E., 2010, [ApJ](#), **712**, 1070
Reddy N. A., Pettini M., Steidel C. C., Shapley A. E., Erb D. K., Law D. R., 2012, [ApJ](#), **754**, 25
Reddy N. A., et al., 2018, [ApJ](#), **853**, 56
Rodighiero G., et al., 2010, [A&A](#), **515**, A8
Roseboom I. G., et al., 2013, [MNRAS](#), **436**, 430
Rowan-Robinson M., et al., 2016, [MNRAS](#), **461**, 1100
Salim S., Boquien M., 2019, [ApJ](#), **872**, 23
Salmon B., et al., 2015, [ApJ](#), **799**, 183
Schreiber C., et al., 2015, [A&A](#), **575**, A74
Seibert M., Heckman T. M., Meurer G. R., 2002, [AJ](#), **124**, 46
Smit R., Bouwens R. J., Franx M., Illingworth G. D., Labbé I., Oesch P. A., van Dokkum P. G., 2012, [ApJ](#), **756**, 14
Smit R., Bouwens R. J., Labbé I., Franx M., Wilkins S. M., Oesch P. A., 2016, [ApJ](#), **833**, 254
Speagle J. S., Steinhardt C. L., Capak P. L., Silverman J. D., 2014, [ApJS](#), **214**, 15
Takeuchi T. T., Yuan F.-T., Ikeyama A., Murata K. L., Inoue A. K., 2012, [ApJ](#), **755**, 144
Thilker D. A., et al., 2007, [ApJS](#), **173**, 572
Tomczak A. R., et al., 2016, [ApJ](#), **817**, 118
Treyer M., et al., 2007, [ApJS](#), **173**, 256
Umehata H., et al., 2015, [ApJL](#), **815**, L8
Wall J. V., Pope A., Scott D., 2008, [MNRAS](#), **383**, 435
Walter F., et al., 2016, [ApJ](#), **833**, 67
Watson D., Christensen L., Knudsen K. K., Richard J., Gallazzi A., Michałowski M. J., 2015, [Nature](#), **519**, 327
Webb T. M., et al., 2003, [ApJ](#), **582**, 6
Whitaker K. E., van Dokkum P. G., Brammer G., Franx M., 2012, [ApJL](#), **754**, L29
Wuyts S., et al., 2007, [ApJ](#), **655**, 51