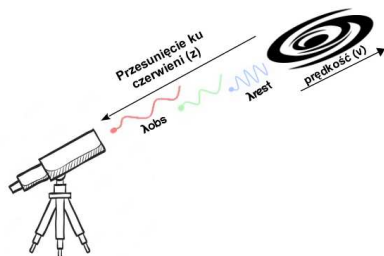


# ALPINE: holistyczne spojrzenie na młode galaktyki we wczesnym Wszechświecie

\* Narodowe Centrum Badań Jądrowych, członek projektu ALPINE

ALMA (Atacama Large Millimeter/submillimeter Array, o którym pisaliśmy też w  $\Delta_{21}$  w artykule Aleksandry Hamanowicz *Astronomia milimetrowa – obserwatorium ALMA*) jest teleskopem radiowym zbudowanym z 66 anten rejestrujących promieniowanie pochodzące ze źródeł astrofizycznych w zakresie od 0,3 do 3,6 mm. Obserwatorium ALMA jest usytuowane na płaskowyżu Chajnantor na pustyni Atacama w Chile, na wysokości powyżej 5000 m ponad poziomem morza.



Rys. 1. Schematyczne przedstawienie pojęcia przesunięcia ku czerwieni. Ponieważ Wszechświat się rozszerza, galaktyki oddalają się od nas z coraz większą prędkością. W konsekwencji światło emitowane przez odległą galaktykę ( $\lambda_{rest}$ ) przed dotarciem do Ziemi ( $\lambda_{obs}$ ) zostanie rozciągnięte i przesunięte w kierunku czerwonej części widma elektromagnetycznego. To przesunięcie ku czerwieni  $z$  jest proporcjonalne do prędkości galaktyki, która z kolei jest związana z jej odległością poprzez prawo Hubble'a, jak poniżej:

$$z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{rest}}{\lambda_{rest}} = \frac{v}{c} = \frac{Hd}{c},$$

gdzie  $c$  to prędkość światła,  $H$  to stała Hubble'a, a  $d$  to odległość od galaktyki. Jak pokazano powyżej, im wyższe przesunięcie ku czerwieni, tym dalsza galaktyka. O relacji między przesunięciem ku czerwieni a odległością można przeczytać w artykule Szymona Charzyńskiego z  $\Delta_{23}$ .

Ze względu na przesunięcie ku czerwieni promieniowanie w zakresie UV dla odległych galaktyk na Ziemi obserwowane jest w zakresie optycznym.

Michael ROMANO\*

Wszechświat jest zamieszkały przez wiele galaktyk o różnych kształtach, kolorach i właściwościach. Jednak te źródła nie zawsze były takie, jakimi wydają się być dzisiaj. Spoglądając w przeszłość, kiedy Wszechświat miał zaledwie miliard lat, astronomowie są w stanie zobaczyć początkowe fazy formowania się galaktyk. Na ich podstawie próbują zrozumieć, jak pierwsze skupiska gwiazd, gazu i pyłu (główne składniki galaktyk) ewoluowały w kosmiczne struktury obserwowane obecnie.

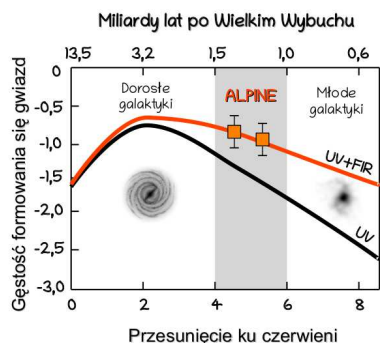
To właśnie był główny cel projektu o nazwie *ALMA Large Program to INvestigate C<sup>+</sup> at Early times* (czyli w skrócie, ALPINE, o którym pisaliśmy już w  $\Delta_{20}$ , K. Małek, *Prosto z nieba*). Jak sugeruje sama nazwa programu, projekt ten używa w swoich obserwacjach teleskopu ALMA, aby scharakteryzować promieniowanie podczerwone emitowane przez młode galaktyki. Obserwacje zostały przeprowadzone dla 118 pierwotnych galaktyk, które docierające teraz do teleskopu światło wysłały, gdy Wszechświat miał zaledwie od 1 do 1,5 miliarda lat. W żargonie astronomicznym mówimy, że galaktyki znajdują się na przesunięciu ku czerwieni między 4 a 6 (zobacz rys. 1). Ten przedział czasowy stanowi kluczową fazę ewolucji galaktyk, łącząc niedojrzałe jeszcze, nastoletnie w skali czasowej Wszechświata, galaktyki znajdujące się na wysokim przesunięciu ku czerwieni z ich bardziej dojrzałymi odpowiednikami w najbliższym otoczeniu Ziemi. Otóż w ciągu tych zaledwie 500 milionów lat, który to przedział czasu pokrywa swoimi obserwacjami ALPINE, galaktyki doświadczają gwałtownego wzrostu swojej masy gwiazdowej poprzez przekształcanie zawartego w nich gazu w gwiazdy, a także poprzez łączenie się z innymi galaktykami (tzw. zderzające się galaktyki,  $\Delta_{22}$ , William Pearson, *Poszukiwanie zderzających się galaktyk*). W międzyczasie te młode galaktyki znajdują się pod wpływem obecnych w ich centrach supermasywnych czarnych dziur oraz wybuchów starych gwiazd w ośrodku międzygwiazdowym. Oba te czynniki są w stanie tłumić powstawanie gwiazd poprzez podgrzewanie gazu i wyrzucanie go na zewnątrz galaktyki.

Przed 2013 rokiem, czyli przed pojawieniem się teleskopu ALMA, jedynym sposobem na określenie formowania się i ewolucji odległych źródeł było spojrzenie na ich promieniowanie w zakresie ultrafioletowym (UV). Wadą obserwacji w zakresie promieniowania UV jest jego absorbowanie przez obłoki pyłowe znajdujące się w bliskim otoczeniu młodych gwiazd. Obłoki te rozgrzewają się pod wpływem absorbowanego promieniowania UV i ponownie emitują promieniowanie o większej długości fali, a mianowicie w podczerwieni, głównie tej dalekiej (FIR, *far infra-red*). Innymi słowy, przesłonięte pyłem regiony formowania się gwiazd wewnątrz tych galaktyk były niewidoczne dla teleskopów optycznych, przez co astronomowie stracili znaczną część informacji ukrytych w zakresie FIR. Aby uzupełnić brakującą wiedzę astrofizyczną dotyczącą tempa tworzenia się gwiazd w młodym Wszechświecie, zespół naukowców z projektu ALPINE rozpoczął w 2018 roku dużą kampanię obserwacyjną. Kampania ta miała na celu zmierzenie zawartości gazu i pyłu w młodościanych galaktykach poprzez przyjrzenie się ich właściwościom w podczerwieni. Ze względu na przesunięcie ku czerwieni promieniowanie FIR dla tych obiektów przesunięte jest w obszar submilimetrycznych długości fal i dzięki temu dostępne dla detektorów ALMA. W szczególności, naukowcy pracujący w przeglądzie ALPINE ustawili anteny radiowe teleskopu tak, aby wykryć emisję na długości fali 158  $\mu\text{m}$  pochodzącą od jonu C<sup>+</sup>, dodatkowo naładowanego atomu węgla, produkowanego głównie przez promieniowanie UV nowo narodzonych gwiazd wewnątrz ich macierzystych galaktyk.

Węgiel jest jednym z najbardziej powszechnych pierwiastków występujących we Wszechświecie i stanowi potężne narzędzie do badania struktury i składu galaktyk. Analizując linie emisyjne wytwarzane przez atomy węgla oraz

Tłumaczenie:

Katarzyna MAŁEK



Rys. 2. Szkic pokazujący historię formowania się gwiazd we Wszechświecie przed (czarna linia) i po (czerwona linia) uwzględnieniu nowych danych pochodzących z przeglądu ALPINE (pomarańczowe kwadraty). Gęstość formowania się gwiazd jest pokazana jako funkcja przesunięcia ku czerwieni (oś dolna) lub miliarda lat, które upłynęły od Wielkiego Wybuchu (oś górna). ALPINE zebrał pomiary gazu i pyłu w galaktykach o przesunięciu ku czerwieni rzędu 5, czyli w epoce przejściowej między pierwotną a dojrzałą ewolucją galaktyk. Na podstawie rys. 1 z pracy Faist A. i inni (2022), "ALPINE: A Large Survey to Understand Teenage Galaxies", Universe, vol. 8, issue 6, s. 314

ich rozkład przestrzenny, można uzyskać informacje o rotacji galaktyk, ich morfologii oraz o tym, jak wiele gwiazd się w nich tworzy. Ponadto częstotliwości bliskie linii emisyjnej  $C^+$  są bezpośrednio związane z liczbą fotonów produkowanych przez ziarna pyłu wokół młodych gwiazd. Zgrubne zliczenie tych fotonów pozwala astronomom wnioskować o zawartości pyłu w pierwotnych galaktykach i wkładzie ukrytego pod warstwą tempa tworzenia się gwiazd. Zespół ALPINE połączył dane z ALMA z danymi otrzymanymi na innych długościach fal, uzyskanymi wcześniej przez inne teleskopy kosmiczne i naziemne rozsiane po całym świecie. Dzięki temu możliwe było globalne zbadanie charakterystyki tych interesujących, odległych od nas źródeł. Na przykład wykorzystano optyczne obserwacje pochodzące z Kosmicznego Teleskopu Hubble'a (dalej nazywać go będziemy HST), aby oszacować tempo powstawania gwiazd w aktywnie gwiazdotwórczych, jednak wolnych od pyłu, regionach wyselekcjonowanych wcześniej 118 galaktyk. Badacze użyli też danych pochodzących z kosmicznego teleskopu Spitzer'a do wykrycia emisji pochodzących ze starych gwiazd, które dostarczają informacji o całkowitej masie gwiazdowej galaktyki. Dzięki temu wielowątkowemu podejściu naukowcy z ALPINE uzyskali ważne informacje na temat struktury odległych galaktyk zamieszkujących młody Wszechświat.

Jednym z najważniejszych rezultatów tego projektu było odkrycie silnie zapyłonych galaktyk tak odległych, że obserwujemy ich światło wyemitowane zaledwie 1,2 miliarda lat po Wielkim Wybuchu (przesunięcie ku czerwieni 5). Część z nich zawierała tak dużo pyłu, że była całkowicie niewidoczna nawet dla czujnego oka HST (stąd nazwa „HST-dark”). Te źródła zostały po raz pierwszy zaobserwowane za pomocą zespołu teleskopów ALMA. Było to naprawdę zaskakujące odkrycie. Przed odkryciem ALPINE astronomowie uważali, że galaktyki w bardzo młodym Wszechświecie nie miały czasu, aby uformować wystarczającą liczbę gwiazd czy też wyprodukować duże ilości pyłu i ciężkich pierwiastków w swoim ośrodku międzygwiazdowym. Dodatkowo, podczas analizy morfologii i kinematyki emisji  $C^+$  okazało się, że znaczny procent tych młodych galaktyk oddziaływał ze sobą! Jednak najbardziej zadziwił wynik dotyczący kinematyki tych obiektów – zaobserwowano, że wiele z „nastoletnich” galaktyk wykazywało już pierwsze oznaki uporządkowanej rotacji. Ta uporządkowana rotacja może być odpowiedzialna za powstanie obecnych galaktyk o strukturze spiralnej, jak nasza Droga Mleczna. Wszystkie te wyniki wskazują, że pierwotne galaktyki były o wiele bardziej dojrzałe, niż się spodziewano, podważając nasze obecne modele formowania i ewolucji galaktyk.

Przykład wpływu wyników ALPINE na dotychczasową wiedzę o odległych galaktykach widać na rysunku 2. Tutaj naszkicowana jest historia powstawania gwiazd we Wszechświecie, w przedziale czasu od 0,6 miliarda lat po Wielkim Wybuchu do dnia dzisiejszego. Wcześniejsze badania UV/optyczne (nieuwzględniające wkładu od obiektów pyłowych) szacowały szczyt tempa formowania się nowych gwiazd na okres około 10 miliardów lat temu. Szczyt ten poprzedzony był mozolnym wzrostem tempa powstawania gwiazd od czasu Wielkiego Wybuchu (czarna linia na rys. 2). Najnowsze wyniki ALPINE (czerwona linia) pokazują, że po uwzględnieniu obserwowanej w ich programie emisji FIR z tych galaktyk tempo formowania się gwiazd w pierwotnym Wszechświecie było znacznie bardziej dynamiczne i 0,6 miliarda lat po Wielkim Wybuchu plasowało się na podobnym poziomie, jaki obserwujemy obecnie. Równocześnie badania te po raz kolejny pokazały, że informacje o tempie formowania gwiazd ukryte w promieniowaniu podczerwonym mają kluczowe znaczenie dla badania historii formowania się gwiazd we Wszechświecie.

Przyszłe obserwacje pozwolą astronomom uzyskać jeszcze bardziej solidne wnioski na temat składu, struktury i formowania się młodocianych galaktyk. W szczególności pomogą w tym obserwacje pochodzące z Kosmicznego Teleskopu Jamesa Webba. Ten operujący w zakresie podczerwonym teleskop satelitalny NASA charakteryzuje się głęboką czułością i wysoką rozdzielczością. Pozwoli on na otwarcie na oścież okna umożliwiającego badanie odległego Wszechświata. Będzie on dostarczał ważne informacje na temat procesów fizycznych, które sprawiają, że pierwotne galaktyki dorastają tak zaskakująco szybko.



#### Rozwiązanie zadania M 1755.

Wystarczy udowodnić tezę dla dowolnej liczby całkowitej dodatniej  $n$ . Przeprowadźmy rozumowanie indukcyjne. Oczywiście  $n = 1 = \frac{2!}{2!}$ , dalej założymy, że dowolna liczba całkowita dodatnia mniejsza od  $n$  posiada żądane przedstawienie. Możemy zapisać:

$$n = p_1 \cdot p_2 \cdot \dots \cdot p_k = \frac{p_1!}{(p_1 - 1)!} \cdot \frac{p_2!}{(p_2 - 1)!} \cdot \dots \cdot \frac{p_k!}{(p_k - 1)!},$$

dla pewnych liczb pierwszych  $p_1 \leq p_2 \leq \dots \leq p_k \leq n$ . Jednakże każdą z liczb  $1, 2, \dots, p_k - 1$  zapiszemy w żądany sposób, więc mianowniki  $(p_i - 1)!$  dla  $(1 \leq i \leq k)$  również, a więc  $n$  także.