Astronomia milimetrowa – obserwatorium ALMA

*Aleksandra HAMANOWICZ**

*Space Telescope Science Institute, Baltimore, USA

Astronomia milimetrowa to dział radioastronomii zajmujący się badaniem molekularnego i atomowego gazu oraz kosmicznego pyłu o temperaturach nieprzekraczających 100 stopni Kelwina. Są to typowe warunki występujące w obłokach przestrzeni międzygwiazdowej, w której możliwe jest powstawanie nowych gwiazd. Ze względu na bardzo niskie temperatury obszary te są niewidoczne w zakresie światła widzialnego, ale świecą jasno w milimetrowej i submilimetrowej części widma. Obserwacje w zakresie milimetrowych długości fal umożliwiają astronomom śledzenie procesów gwiazdotwórczych o różnych rozmiarach: począwszy od badań dysków protoplanetarnych istniejących wokół młodych gwiazd po obłoki molekularne, z których powstają gwiazdy. Anteny działające w pasmach submilimetrowych rejestrują słabe sygnały z regionów gwiazdotwórczych pochodzących nawet z najodleglejszych, a co za tym idzie najstarszych galaktyk (z okresu gdy Wszechświat miał mniej niż $0{,}7\times10^9$ lat, o przesunięciu ku czerwieni $z\sim8$).

Astronomia milimetrowa wykorzystuje obserwacje w zakresie fal radiowych wysokiej częstotliwości (100–1000 GHz), wykonywane za pomocą technik obserwacyjnych radioastronomii. Obserwacje fal o tak wysokiej częstotliwości są niezwykle trudne ze względu na fakt, iż znajdują się one na granicy przepuszczalności ziemskiej atmosfery. Jakość obserwacji zmienia się bardzo w zależności od warunków atmosferycznych, zależy zwłaszcza od wilgotności powietrza. Najtrudniejsze są obserwacje w zakresie najwyższych częstotliwości, gdzie przepuszczalność atmosfery dla takiego promieniowania spada niemal do zera i jest osiągalna tylko w wyjątkowo suchych warunkach atmosferycznych. Para wodna jest największym problemem obserwacji milimetrowych, gdyż molekuły wody w atmosferze znacznie zmniejszają rejestrowany sygnał, chętnie absorbując promieniowania milimetrowe, i dodatkowo przez swoją emisję termiczną zwiększają szum zaburzający obserwacje. Ze względu na te specyficzne wymagania obserwatoria milimetrowe budowane są na wysoko położonych, suchych płaskowyżach, takich jak Plateau de Bure w Alpach Francuskich czy płaskowyż Chajnantor w Andach Chilijskich.

ALMA (*Atacama Large Millimeter Array*), największy i najbardziej czuły teleskop milimetrowy na świecie, powstał dzięki współpracy między Ameryką Północną, Europą oraz Azją Wschodnią. Zarządzany jest bezpośrednio przez Join ALMA Observatory. Polska, dzięki partnerstwu z ESO (*European Southern Observatory*), jest częścią tego międzynarodowego projektu (`www.eso.org/public/poland/teles-instr/alma/`). Jest to obecnie najnowocześniejszy teleskop służący do badania najzimniejszych obiektów we Wszechświecie. Interferometr ALMA jest umieszczony w wysoko położonym obserwatorium (5000 m n.p.m.) w pustynnych Chilijskich Andach, około 50 km na wschód od San Pedro de Atacama w północnym Chile, jednym z najsuchszych, a tym samym najlepszych miejsc do obserwacji astronomicznych na świecie.

Wyjątkowa lokalizacja radioteleskopu ALMA realizuje dwa wymagania obserwatorium milimetrowego – wysokość nad poziomem morza oraz suchość powietrza.

ALMA to największy na świecie teleskop naziemny, obejmujący łączny obszar o średnicy 16 kilometrów, na którym umieszczonych jest 66 anten. Pięćdziesiąt głównych 12-metrowych anten może zmieniać swoją pozycję na płaskowyżu, regulując osiąganą przez obserwatorium rozdzielczość (im anteny są rozstawione dalej od siebie, tym większa wypadkowa wielkość wirtualnego teleskopu i lepsza rozdzielczość). Cztery dodatkowe, również 12-metrowe, anteny wykonują pomiar całkowitej jasności obiektu, pozwalając skalibrować obserwacje wysokiej rozdzielczości. Kolejnych dwanaście 7-metrowych anten może zostać dołączonych do obserwacji (jeszcze bardziej wzmacniając czułość instrumentu) lub mogą być one używane osobno. Pole widzenia ALMA zależy od częstotliwości, na których prowadzone są obserwacje: od 1 minuty kątowej dla najniższych częstotliwości (84–116 GHZ, tzw. Band 3) do 10 sekund kątowych dla najwyższych częstotliwości (602–720 GHZ, Band 9). Z tego powodu ALMA ani żaden inny interferometr radiowy czy milimetrowy nie nadają się do dużych przeglądów nieba i są używane głównie do dokładnych obserwacji pojedynczych obiektów.

Dzięki transformacie Fouriera sygnał (obraz) z wielu teleskopów składany jest do pojedynczego sygnału będącego obrazem obserwowanego obiektu. *Dla Czytelnika Zainteresowanego, wzór na transformatę Fouriera:* `en.wikipedia.org/wiki/Fourier transform` *pierwszy wzór pod „definition”*

Technika interferometrii radiowej, będąca podstawą działania obserwatorium ALMA, pozwala osiągnąć wysoką rozdzielczość i czułość dzięki połączeniu obserwacji z wielu małych teleskopów – bez konieczności budowy potężnego, jednolitego teleskopu. Grupa połączonych razem małych teleskopów obserwuje jednocześnie ten sam obiekt. Zarejestrowany sygnał jest przekazywany do kolimatora, w którym przy znajomości dokładnej odległości między antenami sygnał może być sprowadzony do jednej fazy. Połączenie tych sygnałów wzmacnia mierzone natężenie, a informacja o różnicy faz między kolejnymi parami anten pozwala na stworzenie dwuwymiarowego wzoru interferencyjnego.

Rozwiązanie zadania M 1680.
Układ równań możemy równoważnie zapisać jako

$$\begin{cases} y = \frac{3x-x^3}{1-3x^2} \\ z = \frac{3y-y^3}{1-3y^2} \\ x = \frac{3z-z^3}{1-3z^2} \end{cases}$$

Ponieważ

$$\operatorname{tg}(3\alpha) = \frac{3\operatorname{tg}(\alpha) - \operatorname{tg}(\alpha)^3}{1 - 3\operatorname{tg}(\alpha)^2},$$

więc podstawiając $x = \operatorname{tg}(\alpha)$, dla pewnego $-\frac{\pi}{2} < \alpha < \frac{\pi}{2}$, widzimy, że pierwsze równanie przedstawia się jako $y = \operatorname{tg}(3\alpha)$, drugie jako $z = \operatorname{tg}(9\alpha)$, a trzecie jako $x = \operatorname{tg}(27\alpha)$. Wobec tego $\operatorname{tg}(\alpha) = \operatorname{tg}(27\alpha)$, więc

$$(x, y, z) = \left(\operatorname{tg}\frac{k\pi}{26}, \operatorname{tg}\frac{3k\pi}{26}, \operatorname{tg}\frac{9k\pi}{26}\right)$$
$$\text{dla } k \in \{\pm1, \pm2, \ldots, \pm12\}.$$

Tak połączone w sieć anteny działają jak elementy jednego dużego teleskopu, o wielkości równej odległości między parą najdalej położonych od siebie anten. W ten sposób ALMA uzyskuje rozdzielczość nawet dziesięciokrotnie wyższą niż Kosmiczny Teleskop Hubble'a.

Poprzez transformację Fouriera interferometryczny wzór może zostać następnie przekształcony w matematyczną reprezentację oryginalnego sygnału – obraz obserwowanego obiektu. Analizując obserwacje interferometryczne, należy więc pamiętać, że nie patrzymy na rzeczywisty obraz nieba, jak to ma miejsce w przypadku detektorów optycznych, ale jego matematyczną reprezentację, odtworzoną ze wzoru interferometrycznego. Analiza takich danych jest bardziej skomplikowana, gdyż niektóre struktury mogą być nieistniejącymi w rzeczywistości artefaktami transformacji Fouriera, niebędącymi reprezentacją rzeczywistych właściwości obserwowanego obiektu.

Teleskopy milimetrowe i interferometria radiowa dostarczyły najciekawsze odkrycia i obrazy obiektów autonomicznych ostatnich lat, takie jak szczegółowe mapy dysków protoplanetarnych czy obraz czarnej dziury w sercu galaktyki M87. Dzięki rozwojowi tej dziedziny w ciągu ostatniej dekady odkrywamy ciemny i zimny kosmos, który wcześniej był przed nami ukryty.

Jak nie wierzyć w liczby rzeczywiste?

*Aleksy SCHUBERT**

* Wydział Matematyki, Informatyki i Mechaniki, Uniwersytet Warszawski

Dyskusje na temat wiary matematycy zwykle uważają za coś wykraczającego poza zakres ich aktywności. Nie zmienia to jednak faktu, że czasem na ten temat się wypowiadają. Na przykład Leonhard Euler w swoim dziele *Vollständige Anleitung zur Algebra* z 1770 roku pisał tak:

> *Ponieważ wszystkie liczby, jakie można sobie wyobrazić, są albo większe od 0, albo mniejsze od 0, albo równe 0, to jasne jest, że pierwiastki kwadratowe liczb ujemnych nie mogą być uważane za możliwe liczby [liczby rzeczywiste]. W związku z tym musimy przyjąć, że takie liczby są niemożliwe. To zaś prowadzi nas do pojęcia liczb, które ze swej istoty są niemożliwe, a zwykle nazywane liczbami urojonymi albo fantastycznymi, gdyż istnieją one tylko w wyobraźni.*

Tak oto sławny matematyk poddał w wątpliwość istnienie liczb urojonych, czy szerzej – zespolonych, które dziś stanowią jeden z centralnych obiektów badawczych matematyki.

Dlaczego jednak w ogóle można poddawać w wątpliwość istnienie czegoś, co zostało nazwane *rzeczywistym*? Cóż, sięgnijmy po wypowiedź innego sławnego matematyka, Leopolda Kroneckera. Przypisuje mu się taką wypowiedź:

> *Liczby naturalne stworzył dobry Bóg. Reszta jest dziełem człowieka.*

Według tego zdania ewidentnie liczby rzeczywiste mają gorszy status niż naturalne. Możemy zatem uciec się do naszej dociekliwości i zacząć zgłębiać różnice między liczbami naturalnymi a rzeczywistymi, zwłaszcza te dotyczące intuicji leżących u podstaw ich istnienia.

Liczby naturalne mają to do siebie, że łatwo jest nam znaleźć w naszym otoczeniu ich *reprezentacje* fizyczne. Na przykład reprezentacją fizyczną liczby 5 jest pięć palców mojej prawej ręki, a reprezentacją fizyczną liczby 2 jest dwoje moich uszu. Natychmiast ktoś może powiedzieć, że reprezentacją fizyczną liczby rzeczywistej jest punkt na prostej. Zaraz, zaraz, ale czy punkt jest czymś, co istnieje w świecie fizycznym? Przecież gdy narysujemy punkt na prostej, to on ma jakąś długość. Wtedy jednak trudno jest nam powiedzieć, jaką faktycznie liczbę reprezentuje. Może reprezentuje tylko liczbę wymierną? – takich jest przecież mnóstwo w zakresie, na jakim jest rozpięty.

Jednak żeby zacząć mówić bardziej precyzyjnie o powyższych rozróżnieniach, dobrze jest dokładniej wiedzieć, czym jest liczba rzeczywista. Otóż potrzebę

Rozwiązanie zadania F 1028.
Po wejściu w obszar działania pola magnetycznego naładowana cząstka porusza się po skomplikowanym torze (po krzywej śrubowej wokół linii sił pola) i opuszcza ten obszar z prędkością o zmienionym kierunku oraz niezmienionej wartości w stosunku do prędkości, z jaką w ten obszar weszła. Jeśli względem obserwatora cząstka porusza się z prędkością $\vec{v}$ i zderza się z obszarem występowania pola (obłok zjonizowanego gazu) poruszającego się względem obserwatora z prędkością $\vec{u}$, to względem pola prędkość cząstki wynosi $\vec{V} = \vec{v} - \vec{u}$ przed zderzeniem i $\vec{V}'$ po zderzeniu, przy czym $|\vec{V}'| = |\vec{V}|$. Po zderzeniu obserwator zarejestruje cząstkę o prędkości $\vec{w} = \vec{u} + \vec{V}'$. Największy wzrost energii kinetycznej cząstki obserwator zarejestruje, gdy zwroty $\vec{v}$ i $\vec{u}$ są przeciwne, a w wyniku zderzenia kierunek prędkości cząstki względem pola zmieni się na przeciwny. Zmiana energii kinetycznej cząstki o masie m wyniesie wówczas (obliczenie dla prędkości znacznie mniejszych od prędkości światła):

$$\Delta E_k = \tfrac{1}{2}m(v+2u)^2 - \tfrac{1}{2}mv^2 = \\ = 2mu(v+u).$$

Udowodniliśmy, że zaproponowany mechanizm może prowadzić do przyspieszania cząstek.
W pracach dotyczących omawianego efektu Fermi przeprowadził obliczenia w ramach szczególnej teorii względności – obliczenia i wynik są nieco bardziej skomplikowane, ale wniosek pozostaje niezmieniony.

E. Fermi, Physical Review **75**, 1169 (1949);
E. Fermi, The Astrophysical Journal **119**, 1 (1954).