

Wielka struktura w wielkich przeglądach

Agnieszka POLLO*

Większość obiektów, które widzimy na niebie gołym okiem albo za pomocą niewielkich amatorskich teleskopów, należy do naszej Galaktyki – Drogi Mlecznej. Jasny pas, widoczny na niebie w ciemną noc, to jej dysk – zalicza się ona bowiem do kategorii galaktyk dyskowych, a ściślej – spiralnych, najprawdopodobniej z poprzeczką.

Gigantyczna gąbka. Wszechświat pełen jest galaktyk mniej lub bardziej do naszej podobnych. Najbliższą naszą dużą sąsiadką jest galaktyka w Andromedzie – spiralna, podobna do Drogi Mlecznej, chociaż trochę od niej większa. Wraz z kilkudziesięcioma galaktykami karłowatymi te dwa duże układy tworzą tzw. Grupę Lokalną. Obłoki Magellana, które przez lata uchodziły za satelitki Drogi Mlecznej, to najbardziej znane spośród małych galaktyk. Są one widoczne gołym okiem – chociaż, niestety, tylko z półkuli południowej. Ostatnie pomiary ich prędkości własnych wydają się jednak wskazywać, że nie okrążają one naszej Galaktyki, lecz mijają ją w drodze przez wszechświat.

Grupa Lokalna jest bardzo skromnym zgrupowaniem galaktyk. Bogate gromady, jakich wiele we wszechświecie, liczą sobie wiele tysięcy jasnych i słabych galaktyk. Wiemy dziś jednak, że struktura wielkoskalowa wszechświata jest znacznie bardziej skomplikowana i znacznie bogatsza: gromady galaktyk siedzą w węzłach kosmicznej sieci, składającej się też z olbrzymich pustek, otaczających je ścian i filamentów, którymi galaktyki spływają w kierunku gromad. Tę olbrzymią trójwymiarową sieć czasem przyrównuje się do gigantycznej gąbki.

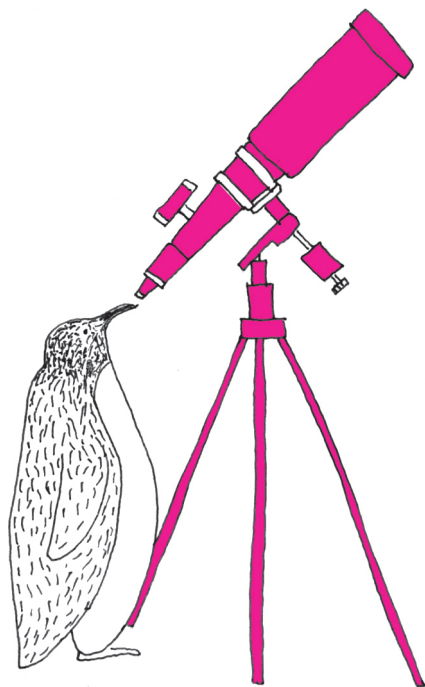
Ciemne i jasne. W tym szaleństwie struktur jest jednakże metoda. Symulacje komputerowe i rachunki teoretyczne pokazują, że dzisiejszą strukturę wielkoskalową wszechświata możemy wywieść w prostej linii od niewielkich zaburzeń gęstości materii, która niemal jednorodnie wypełniała wszechświat 400 000 lat po jego powstaniu. Wystarczy tylko jeden mechanizm, żeby te niewielkie zagęszczenia rozrosły się i rozbudowały do dzisiejszej struktury wielkoskalowej. Tym mechanizmem jest grawitacja, a ściślej – tzw. niestabilność grawitacyjna.

Zidentyfikowanie grawitacji jako siły sprawczej rozwoju struktur we wszechświecie nie zapewnia nam jeszcze dokładnej rekonstrukcji struktury wielkoskalowej i wszystkich czynników, jakie ją kształtują. Przede wszystkim – materii, której jest o wiele za mało, żeby ukształtować strukturę obecnie obserwowaną. Dopiero uwzględnienie obecności większych ilości dodatkowej, tzw. ciemnej materii zapewnia dostatecznie silne pole grawitacyjne. I to zresztą nie wystarczy, żeby wyjaśnić, dlaczego, jak pokazują bardzo głębokie przeglądy, struktura wielkoskalowa pojawiła się we wszechświecie we wczesnych etapach jego istnienia. Ten problem z kolei daje się rozwikłać, gdy przyjmujemy do wiadomości istnienie ciemnej energii. . .

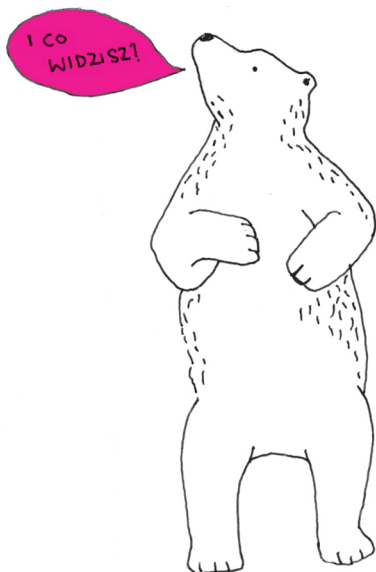
Mimo że zwykła świecąca materia i zbudowane z niej galaktyki zawierają zaledwie niewielki ułamek kosmicznego bilansu energii i materii, to jednak możemy za ich pomocą badać struktury utworzone i uformowane głównie przez „ciemne składowe” wszechświata. Ale nawet odtworzenie rozkładu galaktyk w różnych kosmicznych epokach to wielkie – logistyczne i naukowe – wyzwanie.

Niebo, czyli dwa wymiary. Z praktycznego punktu widzenia przeglądy nieba najprościej podzielić na dwie kategorie: dwu- i trójwymiarowe. Przeglądy dwuwymiarowe to po prostu katalogi położenia na niebie, zawierające też zazwyczaj informację o jasnościach: wiemy, gdzie takiego źródła szukać na niebie, ale nie jesteśmy w stanie nic powiedzieć o jego odległości od nas, a w każdym razie nie od razu. Takie przeglądy tworzy się względnie tanio i prosto (stopień względności jest tu, naturalnie, bardzo duży) – wystarczy obserwować dany fragment nieba odpowiednio długo w odpowiednich długościach fal. . . W praktyce nie jest to, oczywiście, takie łatwe – obserwacje w wielu zakresach fal, jak średnia czy daleka podczerwień, mikrofałe, promienie rentgenowskie czy ultrafiolet, wymagają wysłania satelitów w przestrzeń wokółziemską. Nawet w zakresie optycznym poświęcenie długiego czasu pracy teleskopu na obserwacje jednego fragmentu nieba jest uznawane za zbyt kosztowne.

Struktura w 3D. Jeśli chcemy do położenia na niebie dołożyć odległość, sprawa robi się jeszcze trudniejsza: musimy przeprowadzić pomiary spektroskopowe. Za pomocą spektroskopu dla każdego obiektu musimy otrzymać pasek widma, który pozwoli nam na zidentyfikowanie linii widmowych.



Zaburzenia gęstości materii możemy zaobserwować w postaci niewielkich różnic temperatury nieba, obserwowanego w mikrofalach – tzw. mikrofalowego promieniowania tła; jego najnowszych pomiarów dostarczył nam w 2015 roku satelita Planck.



*Obserwatorium Astronomiczne Uniwersytetu Jagiellońskiego w Krakowie i Narodowe Centrum Badań Jądrowych w Warszawie



Rozwiązanie zadania F 900.

Niech odległość między szczelinami wynosi d . Wówczas kolejne prążki interferencyjne pojawiają się pod kątami α_n spełniającymi warunek $n\lambda = d \sin \alpha_n$, gdzie n jest rzędem prążka, $\lambda = h/p$ długością fali de Broglie'a, h jest stałą Plancka, a $p = mv$ pędem molekuly o masie m . Rozrzut prędkości prowadzi do poszerzenia prążków. Obserwacja prążków rzędu n wymaga, by prążki „nie zachodziły na siebie”, czyli (dla niewielkich kątów sinus jest funkcją rosnącą): $(n+1)\lambda_- > n\lambda_+$, gdzie $\lambda_- = h/(p - \Delta p)$ i $\lambda_+ = h/(p + \Delta p)$ oznaczają górną i dolną granicę przedziału długości fal de Broglie'a wiązki. Ostatecznie otrzymujemy

$$\frac{\Delta p}{p} = \frac{\Delta v}{v} < \frac{1}{2n+1}.$$

Za przesunięcie widma ku czerwieni może też odpowiadać po prostu ruch galaktyki w przestrzeni, który powoduje „zwykły” efekt Dopplera; w przypadku odległych galaktyk jego wpływ na widmo jest znacznie mniejszy.



Rozwiązanie zadania M 1488. Tak!

Warunek dany w zadaniu możemy przedstawić w postaci

$$n_1^2 - n_1(n_2n_3 + n_2n_4 + n_3n_4) + n_2^2 + n_3^2 + n_4^2 - n_2n_3n_4 = 0.$$

Jeśli pewna czwórka liczb (n_1, n_2, n_3, n_4) spełnia to równanie, to na mocy wzorów Viète'a spełnia je również czwórka (N_1, n_2, n_3, n_4) , gdzie

$$n_1 + N_1 = n_2n_3 + n_2n_4 + n_3n_4.$$

W takim razie z dowolnego rozwiązania (n_1, n_2, n_3, n_4) możemy uzyskać inne rozwiązanie (N_1, n_2, n_3, n_4) , gdzie $N_1 = n_2n_3 + n_2n_4 + n_3n_4 - n_1$. Jeśli założymy, że $n_1 \leq n_2 \leq n_3 \leq n_4$, to otrzymamy $N_1 > n_4$. Otrzymaliśmy więc nową czwórkę liczb spełniającą równanie, przy czym minimalny element czwórki został zmieniony na element największy.

Zaczynając od czwórki $(1, 1, 1, 1)$ i wykonując wielokrotnie analogiczną operację, uzyskamy szukane rozwiązanie.

Różne typy galaktyk mają swoje charakterystyczne linie widmowe. Galaktyki eliptyczne składają się głównie ze starych gwiazd – nie ma w nich pyłu ani gazu, z którego mogłyby powstawać nowe gwiazdy. Dlatego widma galaktyk eliptycznych, podobnie jak widma gwiazd, charakteryzują się obecnością linii absorpcyjnych – są bowiem po prostu złożeniem wielu widm gwiazdowych, w których dominują właśnie linie absorpcyjne. Linie te powstają, kiedy promieniowanie wyprodukowane we wnętrzu gwiazdy przechodzi przez jej atmosferę i jest przez nią pochłaniane. Galaktyki spiralne z kolei zawierają nie tylko różne pokolenia zarówno starych, jak i młodych gwiazd, ale też duże zasoby gazu i pyłu. Dlatego poza liniami absorpcyjnymi w ich widmach znajdujemy linie emisyjne – rezultat wzbudzenia atomów gazu międzygwiazdowego przez promieniowanie młodych gwiazd.

Widma różnych typów galaktyk odznaczają się zatem obecnością różnych linii – wodoru, tlenu, ale też sodu, krzemu, węgla, a nawet neonu. Mają charakterystyczne kształty i charakterystyczne zestawy linii, po których doświadczony obserwator może je rozpoznać. Te serie linii w przypadku każdej galaktyki obserwujemy jednak w trochę innych długościach fal. Za ten efekt odpowiada kosmologiczne przesunięcie ku czerwieni – wraz z rozszerzaniem się wszechświata rosną odległości między nami a każdą z obserwowanych galaktyk i długość wysłanych przez nie kiedyś fal elektromagnetycznych ulega wydłużeniu. Przesunięcie widma ku czerwieni pozwala nam określić, jak daleko od nas znajduje się obserwowany obiekt i jak dawno temu jego światło zostało wysłane. Oznacza to, że badając odległe galaktyki, patrzymy jednocześnie w głąb kosmosu i w przeszłość.

Mając odległość – trzeci wymiar – możemy już rekonstruować kosmiczną sieć z dużą dokładnością. Pomiar spektroskopowy wymaga jednak więcej czasu niż dwuwymiarowe, fotometryczne – musimy rozłożyć światło na składowe, co oznacza, że potrzebujemy więcej fotonów, a więc i dłuższych czasów obserwacji. W dodatku nie możemy obserwować wszystkich obiektów w polu widzenia. Nawet największe multispektroskopy, zdolne do zmierzenia kilkuset widm jednocześnie, muszą „zarezerwować” dla każdego z badanych obiektów miejsce na CCD na jego pasek widma. W rezultacie tworzenie katalogów trójwymiarowych to żmudna i długotrwała praca.

Są metody na obejście problemu – w katalogach dwuwymiarowych wyznacza się tzw. fotometryczne przesunięcia ku czerwieni, na podstawie przybliżonego kształtu, jaki wyłania się z pomiarów jasności w wielu zakresach długości fal. Ta metoda jest jednak znacznie mniej dokładna od spektroskopowej.

12 mld lat wielkich struktur. Największym istniejącym przeglądem współczesnego wszechświata jest Sloan Digital Sky Survey – SDSS. Pokrywa jedną trzecią nieba i zawiera pomiary dla ponad trzech milionów obiektów. Wyłania się z niego wyraźna trójwymiarowa struktura wszechświata wokół nas – w promieniu co najmniej trzech miliardów lat świetlnych.

Jednak według kosmologicznych standardów trzy miliardy lat świetlnych to właściwie nasze kosmiczne podwórko – a trzy miliardy lat temu to niemal jak wczoraj. Tymczasem zrozumienie, jak wielkoskalowa struktura się rozwijała, wymaga sięgnięcia znacznie dalej w przeszłość.

Największym istniejącym przeglądem galaktyk sprzed 8 mld lat jest przegląd VIMOS Public Extragalactic Redshift Survey (VIPERS), w którym bierze udział także zespół polskich astronomów. Obejmuje pomiary blisko 100 000 widm galaktyk, które układają się w wyraźną trójwymiarową sieć, już wtedy zadziwiająco podobną do tej, którą znamy z lokalnych przeglądów.

A jeszcze dalej? Im dalej, tym trudniej – galaktyki są słabsze, pomiary widm znacznie trudniejsze. VIMOS Ultra Deep Survey, największy obecnie przegląd spektroskopowy wszechświata sprzed 12 mld lat, liczy sobie zaledwie (albo aż) około 10 000 galaktyk. Ale i tam, mniej niż dwa miliardy lat po narodzinach wszechświata, galaktyki wydają się układać już w skomplikowane struktury.

Z każdym pomiarem przekonujemy się, że scenariusz, w którym kluczową rolę w rozwoju struktury wielkoskalowej odgrywa grawitacja, wydaje się sprawdzać. Ale żeby dobrze zrozumieć szczegóły tego procesu – będziemy potrzebować kolejnych, jeszcze większych i bogatszych przeglądów.