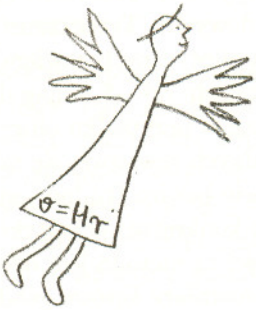
Stała Hubble'a – jak dokładnie ją znamy?

Andrzej MARECKI

O tym, jak fundamentalną rolę w astronomii pełni stała Hubble'a, nie trzeba nikogo przekonywać. Z jej znaczeniem zupełnie jednak „nie licuje" dokładność, z jaką ją znamy. Nic dziwnego zatem, że szukanie sposobów na znalezienie poprawnej wartości tej stałej absorbowało i nadal absorbuje astronomów i w rezultacie ich poszukiwań metod tych znamy dziś wiele. Amerykański kosmolog, Edward L. Wright, w swoim bardzo przystępnym wykładzie z kosmologii (www.astro.ucla.edu/˜wright/cosmolog.htm) wymienia ich aż 26.



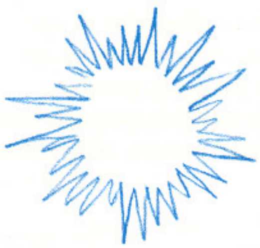
Dlaczego jest ich tyle i żadna z nich nie jest doskonała? Otóż, zasadnicza trudność z wyznaczeniem stałej Hubble'a wynika z prostej, lecz niebanalnej okoliczności: z ogromu Wszechświata. Pół biedy, gdy chcemy wyznaczyć odległość Księżyca. Przewyższa ona – powiedzmy – wzrost człowieka 200 mln razy. Sporo, jeśli zauważyć, że tyle wynosi stosunek rozmiarów największych do najmniejszych organizmów żywych (odpowiednio: drzewa i wirusy). Ale ta odległość jest wprost śmieszna na tle ogromu Kosmosu. Aby uzmysłowić sobie rozmiary Układu Słonecznego, trzeba dopisać do owych 200 milionów jeszcze cztery zera, odległości najbliższych gwiazd – kolejne cztery, a następne cztery (to już będzie razem dwanaście dodatkowych zer!) dadzą nam stosunek odległości między Słońcem a centrum Galaktyki do wzrostu człowieka. A przecież Galaktyka to tylko mała wysepka świecącej materii oddalona od innych podobnych wysepek tak bardzo, że światło na przemierzenie tych przestrzeni zużywa w skrajnych przypadkach znaczny odsetek – nawet do 90% – całego wieku Wszechświata. Co to oznacza dla „mierniczych" Wszechświata? Otóż to, że nie ma uniwersalnej metody, która by była odpowiednia do pomiarów wszelkich odległości we Wszechświecie. Zupełnie inaczej wyznaczamy odległość do Księżyca, planet, gwiazd w naszej Galaktyce, czy wreszcie do innych galaktyk. I właśnie umiejętność wyznaczania tych ostatnich była niezbędna Edwinowi Hubble'owi do tego, by odkryć słynne prawo proporcjonalności prędkości ucieczki galaktyk v do ich odległości r, nazwane jego imieniem: $v = Hr$. Współczynnik proporcjonalności H, czyli stała Hubble'a, miała według niego (1929 r.) wynosić ponad 500 km/(s·Mpc). Dziś wiemy, że wartość ta jest zupełnie nie do przyjęcia, bo oznaczałaby wiek Wszechświata na poziomie 2 mld lat, a więc mniej nawet niż wiek Ziemi liczony od momentu zestalenia się skorupy ziemskiej: 3,8 mld lat, co w sposób pewny wyznacza się metodami izotopowymi, niemającymi związku z astronomią. Ale nie miejmy za złe Hubble'owi jego pomyłki. Błędy systematyczne wyznaczania stałej Hubble'a są poniekąd wbudowane w sam ów proces wyznaczania i są popełniane aż po dzień dzisiejszy, czego najlepszym przykładem jest najnowsza korekta jej wyznaczenia, która miała miejsce... w grudniu 2000 r. Przyczyną tych błędów jest wielostopniowość procesu wyznaczania odległości galaktyk i akumulowania się zbieranych „po drodze" błędów cząstkowych. Ogrom tych odległości sprawia bowiem, iż kalibrowanie kosmicznych „taśm mierniczych" odbywa się na podstawie innych uprzednio skalibrowanych wzorców, te zaś określa się w jeszcze innych procesach pomiarowych itd. Hierarchiczną strukturę pomiarów, zwaną – bardzo trafnie, choć nieco żargonowo – „drabiną odległości", cechuje zatem kumulowanie się i zgoła lawinowe narastanie błędów na coraz wyższych jej szczeblach.

Konstrukcja owych szczebli drabiny odległości opiera się na oczywistym rozumowaniu. Wyobraźmy sobie, że mamy źródła światła o znanej identycznej mocy, czyli tzw. świece standardowe. Jeśli jeden z takich obiektów jest np. cztery razy słabszy od drugiego, to oznacza, że leży on po prostu dwa razy dalej (jasność widoma zmienia się bowiem odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości). Świecami standardowymi będą dla astronomów niewątpliwie jakieś gwiazdy. Ba, ale skąd pewność, że dana gwiazda ma z góry znaną, „standardową" moc? – wtedy bowiem jej widoma jasność będzie miarą tylko jej odległości. I czy w ogóle jesteśmy w stanie dostrzec i wyróżnić jakąś konkretną gwiazdę w odległej galaktyce, a potem zmierzyć jej jasność, skoro galaktyki mają setki miliardów gwiazd i ich światło zlewa się w jedną plamę?

Otóż takimi świecami standardowymi są np. cefeidy, olbrzymie i bardzo jasne pulsujące gwiazdy zmienne, w dodatku których jasność absolutną, czyli moc

Rozwiązanie zadania F 557.
Masa metra sześciennego wody wynosi 10^3 kg, a kilomol wody (czyli 18 kg) zawiera $N = 6 \cdot 10^{26}$ cząsteczek wody. Zatem metr sześcienny wody zawiera $N = 6 \cdot 10^{26} \cdot 10^3/18 = 3{,}3 \cdot 10^{28}$ cząsteczek. Średnia odległość między cząsteczkami wynosi więc $d = 1/\sqrt[3]{N} \approx 3,1 \cdot 10^{-10}$ m. Średnia siła wzajemnego oddziaływania ma wartość

$$F \approx \frac{6p_e^2}{4\pi\epsilon_0 d^3} = 6{,}7 \cdot 10^{-20}\ \text{N}.$$



promieniowania, można z niezłą dokładnością ocenić, obserwując ich okres zmian blasku (patrz strona 6). Mimo że są one jakieś 10 tysięcy razy jaśniejsze od Słońca, są wciąż na tyle słabe, iż nawet największymi teleskopami udaje się je dostrzec i pomierzyć ich parametry tylko w kilku najbliższych galaktykach. Mając już odległości tych galaktyk, należy poszukać w nich innych wzorcowych cech czy obiektów i teraz na podstawie nich określać odległości galaktyk jeszcze dalszych, czyli przejść na następny szczebel „drabiny odległości". Oznacza to niechybnie przede wszystkim jedno: kolejne niedokładności. Nic więc dziwnego, że jeszcze dziesięć lat temu technika określania odległości we Wszechświecie była na tyle niepewna, iż w zależności od tego, jak dana grupa badaczy konstruowała sobie swoją drabinę, takie otrzymywała wyniki. Zasadniczy spór w tej materii wiodły dwie grupy: de Vaucouleursa i Sandage'a. Stała Hubble'a podana przez pierwszą z nich miała 100 km/(s·Mpc), a przez drugą – tylko 50 km/(s·Mpc), zatem rozbieżność była ni mniej ni więcej tylko dwukrotna. Cóż za frustrująca sytuacja!

Wyjście z tego impasu umożliwił Kosmiczny Teleskop Hubble'a (*Hubble Space Telescope* – HST). Dzięki temu, że znajduje się on na orbicie i nie przeszkadza mu atmosfera Ziemi, a do tego jest po prostu wielkim i doskonałym teleskopem, może on zobaczyć znacznie słabsze obiekty niż dotychczas obserwowane. Nie pozostawało zatem nic prostszego, jak zacząć szukać cefeid przy użyciu HST w znacznie dalszych galaktykach, niż to było dotychczas możliwe w obserwatoriach naziemnych, a przez to uniknąć konstrukcji dodatkowego szczebla drabiny odległości i nowych związanych z tym błędów. Projekt takich poszukiwań stał się priorytetowym programem HST – został nazwany Projektem Kluczowym (HST-KP) i niedawno został oficjalnie zakończony. W jego ramach dokonano obserwacji 800 cefeid w 18 galaktykach znajdujących się w odległościach do 20 Mpc. Rezultat ogłoszony w 1999 r. brzmiał: stała Hubble'a wynosi 70 km/(s·Mpc) z błędem na poziomie 10%.

Mimo zakończenia HST-KP poszukiwania „prawdziwej" wartości stałej Hubble'a wciąż trwają, zwłaszcza że cytowany wyżej błąd jest nadal spory. Opracowywane są nowe metody jej wyznaczania. Astronomowie zdają sobie sprawę z tego, że drabina odległości to podstawowe źródło wszelkich błędów tych wyznaczeń, więc szans upatrują w tzw. metodach bezpośrednich. Są one bardzo wyrafinowane i możliwe tylko dzięki najnowszej technologii zaprzęgniętej do prowadzenia obserwacji. Pomiar odległości jedną z takich metod stał się źródłem nie lada sensacji latem 1999 r. i spowodował ogromną konfuzję: już, już wydawało się, że wszystko będzie dobrze i problem określania odległości we Wszechświecie można będzie uznać za rozwiązany, a tu nagle...

Jedną z ważnych własności galaktyk – *nota bene* z uniwersalności której zdajemy sobie sprawę dopiero od niedawna – jest to, że w ich centrach znajdują się supermasywne czarne dziury. Słowo „supermasywne" oznacza tu, że ich masy to co najmniej miliony mas Słońca. Czarna dziura to obiekt z definicji niewidoczny, ale zdradzający swą obecność dzięki monstrualnemu polu grawitacyjnemu, jakie wytwarza. Inne ciało znalazłszy się w takim polu ma „do wyboru" albo wpaść do dziury i przepaść na zawsze w jej wnętrzu, albo bardzo szybko obiegać ją po jakiejś orbicie. Ziemi np. wystarczy biec z prędkością 30 km/s po swojej orbicie, żeby nie spaść na Słońce. Ze względu na zawrotne natężenie pola wokół galaktycznej czarnej dziury obiekt obiegający ją po orbicie o promieniu nawet dziesiątki tysięcy razy większym niż promień orbity ziemskiej musi pędzić z prędkością rzędu 1000 km/s.

Okazuje się, że takie obiekty istnieją. Co o nich wiemy? Otóż, wiemy przynajmniej tyle, iż są dość małych rozmiarów – mniejszych niż Układ Słoneczny – i że emitują fale radiowe. Źródłem tej emisji jest woda – poznajemy to po widmie owego promieniowania, a obiekty te nazywamy maserami wodnymi. Metoda pomiaru odległości wykorzystuje to, że po pierwsze mierzymy prędkości maserów na podstawie efektu Dopplera, a po drugie śledzimy ich ruchy. W niezwykle wyrafinowanych obserwacjach radiowych mamy bowiem możliwość mierzenia nieprawdopodobnie wręcz małych przesunięć kątowych,

Rozwiązanie zadania F 558.

W nieruchomym ośrodku prędkość światła wynosi $u = c/n$. Jeśli ośrodek zbliża się z prędkością v do źródła światła, prędkość światła w ośrodku wynosi wtedy

$$u' = \frac{u+v}{1+uv/c^2} = \frac{c/n+v}{1+v/(cn)},$$

a jeśli się oddala:

$$u'' = \frac{c/n-v}{1-v/(cn)}\ .$$

Czas rozprzestrzeniania się światła zgodnie ze strumieniem cieczy wynosi

$$t_1 = \frac{2l}{u''} = \frac{2l(1-v/(cn))}{c/n-v}\ ,$$

a dla światła biegnącego „pod prąd" mamy

$$t_2 = \frac{2l}{u'} = \frac{2l(1+v/(cn))}{c/n+v}\ .$$

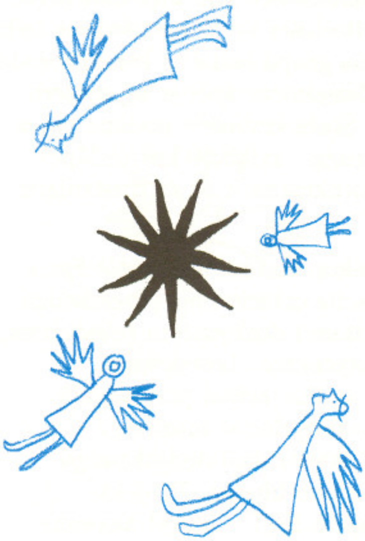
Różnica czasów wynosi

$$\tau = t_1 - t_2 = \frac{4lv(1-1/n^2)}{c^2/n^2-v^2}\ .$$

Uwzględniając, że $c \gg v$, otrzymujemy

$$\tau = \frac{4lv}{c^2}(n^2-1)\ .$$

rzędu zaledwie dziesięciotysięcznej sekundy łuku. Pod takim kątem widać (jeśli w ogóle można by coś takiego zobaczyć) jeden milimetr z odległości ponad 2000 km. Albo inaczej: tak subtelna metoda pozwalałaby zmierzyć grubość włosa z odległości Warszawa-Kraków. Dysponując taką precyzją pomiaru możemy nawet w obiektach oddalonych o miliony lat świetlnych po paru latach obserwacji dostrzec, że chmura poruszająca się z prędkością rzędu 1000 km/s nieco się przemieściła.



Metodę tę udało się zastosować do galaktyki NGC 4258 (znanej także jako M 106). W jej centrum rezyduje czarna dziura o masie 39 mln mas Słońca, a wokół niej na orbitach o promieniach od 33 tys. do 58 tys. j.a. poruszają się chmury zawierające masery wodne. Od 1994 r. przez kilka lat śledzono ruchy takich chmur w NGC 4258 i 5 sierpnia 1999 r. opublikowano w *Nature* wyniki tych badań. Okazało się, iż odległość NGC 4258 wynosi 7,2 Mpc z błędem zaledwie 4%, co jest najdokładniejszym dotąd wyznaczeniem tak wielkiej odległości. Oczywiście łatwo się domyślić, co zrobiono natychmiast po uzyskaniu tego wyniku: skonfrontowano go z pomiarem metodą cefeid dokonanym za pomocą HST i okazało się, iż wynosi ona dla NGC 4258... 8,6 Mpc. Różnica jest znaczna, gdzie zatem tkwi błąd?

Podejrzenie padło na metodę cefeid i oparty o nią HST-KP. Zespół naukowców pracujący nad tym projektem natychmiast zabrał się za szukanie błędu w swoich obliczeniach. Po ponad roku pracy ogłoszono kolejną korektę w wyznaczeniu stałej Hubble'a – aktualna wartość to 72 km/(s·Mpc), a więc nieco więcej niż poprzednio uznana przez tę samą grupę. To sprawiło, że wyznaczenia odległości dla NGC 4258 obiema metodami zbliżyły się na tyle, iż (z biedą, ale jednak) lokują się w granicach swoich błędów losowych. W taki oto sposób metoda bezpośrednia wykazała swoją zdecydowaną wyższość – właśnie to wyznaczenie okazało się od początku poprawne!

Zakończenie HST-KP zamyka pewien rozdział w poszukiwaniach metod pomiaru odległości we Wszechświecie i wyznaczania stałej Hubble'a. Nadzieję na poprawienie dokładności, przy jednoczesnym zachowaniu lub nawet powiększeniu zasięgu, pokładać więc należy w metodach bezpośrednich. Obecnie znane są tylko nieliczne takie metody, jak choćby ta z maserami wodnymi. Czyżby więc nadal trzeba było poszukiwać nowych metod? Wygląda na to, że tak, zatem trwający już ponad 70 lat permanentny konkurs na pomysły, jak wyznaczyć stałą Hubble'a, pozostaje nadal otwarty.

Zadania

Redaguje Łukasz WIECHECKI

Wydawałoby się, że wyobraźnia matematyka nie zna granic. A jednak...

M 967. Ciąg (a_n) spełnia warunki: $a_1 = 2$ oraz $a_{n+1} = 4 - \frac{3}{a_n}$ dla $n \geq 1$. Udowodnić, że ciąg (a_n) jest zbieżny i obliczyć jego granicę.
Rozwiązanie na str. 1

M 968. Dany jest ciąg liczb dodatnich (a_n), który spełnia dla każdego $n \geq 1$ równanie rekurencyjne $a_{n+1} = \left(1 - \frac{1}{m}\right)a_n + \frac{a}{m a_n^{m-1}}$, gdzie m jest liczbą całkowitą dodatnią, $a > 0$. Wykazać, że ciąg ten jest zbieżny i znaleźć jego granicę.
Rozwiązanie na str. 1

M 969. Ciąg (a_n) określony jest następująco: $a_1 = 1$, $a_{n+1} = a_n + \frac{1}{a_n}$ dla wszystkich $n \geq 1$. Znaleźć taką najmniejszą liczbę dodatnią k, że ciąg $\left(\frac{a_n}{n^k}\right)$ jest zbieżny. Dla znalezionego k obliczyć $\lim_{n\to\infty} \frac{a_n}{n^k}$.
Rozwiązanie na str. 2

Redaguje Ewa CZUCHRY

F 557. Cząsteczka wody może być w pierwszym przybliżeniu traktowana jako dipol o momencie elektrycznym $p_e = 6{,}1 \cdot 10^{-30}\,\mathrm{C \cdot m}$. Oszacować siłę przyciągania się dwóch cząsteczek wody.
Rozwiązanie na str. 10

F 558. W doświadczeniu Fizeau użyte zostały dwie wiązki świetlne: jedna w kierunku zgodnym z kierunkiem płynącej cieczy, a druga w kierunku przeciwnym (rysunek). Wiedząc, że długość każdej rurki jest l, prędkość cieczy v i współczynnik załamania n, znaleźć różnicę w czasie propagacji obu wiązek świetlnych.
Rozwiązanie na str. 11