

## UCIECZKA OD POCZĄTKU ŚWIATA

Dr Bronisław KUCHOWICZ

Już chwila namysłu, po rzuceniu oka na gwiaździste niebo prowadzi nas do zdumiewającego paradoksu, o którym wspomnieliśmy w poprzednim artykule. Paradoks ten wynika z ekstrapolacji naiwnych wyobrażeń opartych o koncepcję statycznego, nieskończonego, jednorodnego Wszechświata. Czyżby te wyobrażenia miały być niesłuszne? Spojrzenie na niebo przy użyciu teleskopu i spektrometru podważa jeszcze bardziej te wyobrażenia. Odpowiednie fakty udało się ustalić dopiero w początkach bieżącego stulecia, kiedy metody spektroskopowe na dobre zadomowiły się w astronomii, a nowo zbudowane, potężne teleskopy pozwoliły sięgnąć daleko poza naszą Galaktykę.

Auguste Comte (1798–1857), twórca systemu „filozofii pozytywnej” głosił, iż jest rzeczą bezsensowną mówić o składzie chemicznym odległych gwiazd, ponieważ człowiek nigdy nie będzie w stanie ich zbadać. Oto jego kategoryczne stwierdzenie: „Dziedzina filozofii pozytywnej mieści się całkowicie w granicach Układu Słonecznego, Wszechświat jest bowiem niedostępny badaniom w jakimkolwiek pozytywnym sensie” (według „Cours de philosophie positive”, t. 1–6, 1830–42). Jeszcze za życia Comte’a Bunsen z Kirchhoffem rozpoczęli badania w dziedzinie optyki, uwierczone skonstruowaniem spektroskopu i opracowaniem analizy widmowej, która legła u podstaw wyznaczania składu chemicznego atmosfer gwiazdnych. Już w dniu 18 sierpnia 1868 roku, podczas całkowitego zaćmienia Słońca, francuski astronom J. Janssen zaobserwował w widmie protuberancji słonecznych jasną linię żółtopomarańczową, niepodobną do żadnej linii znanej podówczas z obserwacji laboratoryjnych. Linię tę zauważył także angielski astronom N. Lockyer, który stwierdził, że musi ona pochodzić od nieznanego jeszcze pierwiastka chemicznego; na cześć greckiego boga Słońca, Heliosa, zaproponował on dla tego pierwiastka nazwę helu. Pierwiastek ten dopiero po dwudziestu paru latach wykryto w laboratorium ziemskim. Rozwój analizy widmowej sprawił, że dysponujemy dziś dokładniejszymi danymi o składzie chemicznym atmosfer ciał niebieskich odległych o miliony lat świetlnych, niż o składzie chemicznym wnętrza Ziemi. Przy wszystkich indywidualnych różnicach między poszczególnymi obiektami, czy nawet całymi ich grupami udało się ustalić pewne zasadnicze prawidłowości (o których w tym miejscu wspominać nie będziemy). Najważniejszym okazało się stwierdzenie jednolitego w zasadzie składu chemicznego materii w jej różnorodnych formach. Nie ma się co spodziewać, że odkryjemy gdzieś obecność takich pierwiastków chemicznych, których albo nie ma na Ziemi, albo też (jeśli mowa o nietrwałych pierwiastkach promieniotwórczych) nie umielibyśmy w sposób sztuczny wytworzyć.

Od badania widm gwiazd w naszej Galaktyce astrofizycy stopniowo przechodzili do analizowania widm odległych galaktyk. Gdy na początku naszego stulecia dokonywano zestawienia widm galaktyk z widmami wzorcowymi z laboratoriów, okazało się, że w przeciwieństwie do widm gwiazd, trudno uzyskać dobre dopasowanie linii. Linie w widmach galaktyk przypadają nie tam, gdzie powinny, lecz były z reguły przesunięte w stronę fal dłuższych, tj. ku czerwieni (jeśli chodzi o zakres optyczny). Zjawisko to nazwano poczerwienieniem galaktyk; nazwę tę stosujemy do dziś, rozszerzwszy ją na całe widmo elektromagnetyczne (choć np. dla światła czerwonego mamy przesunięcie w kierunku podczerwieni, a więc w zasadzie jest to już „odczerwienienie”). Obok samego faktu przesunięcia linii widmowych zauważono też pewną korelację, która początkowo wydawała się nieistotna: przesunięcie linii w widmie wzrastało ze spadkiem jasności obserwowanej galaktyki.



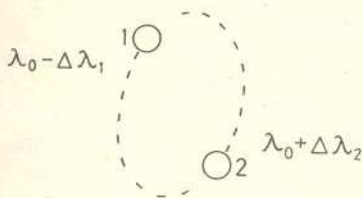
Edwin Powell Hubble (1889–1953), absolwent studiów prawniczych, po uprawianiu przez rok swego zawodu w Louisville (stan Kentucky) poczuł taką do niego niechęć i wewnętrzną konieczność zajmowania się astronomią, że wstąpił ponownie na studia i w ciągu trzech lat uzyskał doktorat na podstawie rozprawy pt. „Badania fotograficzne słabych mgławic”. W 1917 roku, kiedy przedstawił swoją pracę, brak było jeszcze zdecydowanego potwierdzenia obserwacyjnego, że niektóre z tzw. mgławic leżą poza Galaktyką. Pracując przy wielkich teleskopach na Mount Wilson (60- i 100-calowy), Hubble przedstawił niezbita dowody pozagalaktycznego charakteru różnych mgławic (zwanymi dziś galaktykami), wykazując, że są one systemami gwiazdowymi, równorzędnymi naszej Galaktyce. Podał klasyfikację galaktyk. Zasadnicze jego odkrycie ustalające proporcjonalność pomiędzy odległością od jakiejś galaktyki a przesunięciem jej linii widmowych ku czerwieni, datuje się z 1929 roku.

**Galaktyki** (dawniej zwane mgławicami pozagalaktycznymi) — układy gwiazd, gazu i pyłu, podobne do naszej Galaktyki. Przeciętne ich masy wynoszą pomiędzy  $10^{42}$  a  $10^{45}$  g. Największe galaktyki liczą do 500 miliardów gwiazd. Najbliższymi galaktykami są Obłoki Magellana, odległe od Galaktyki o 50–60 kiloparseków. Zwięzła informacja dotycząca galaktyk znajduje się w I tomie „Encyklopedii Fizyki” (PWN 1972).

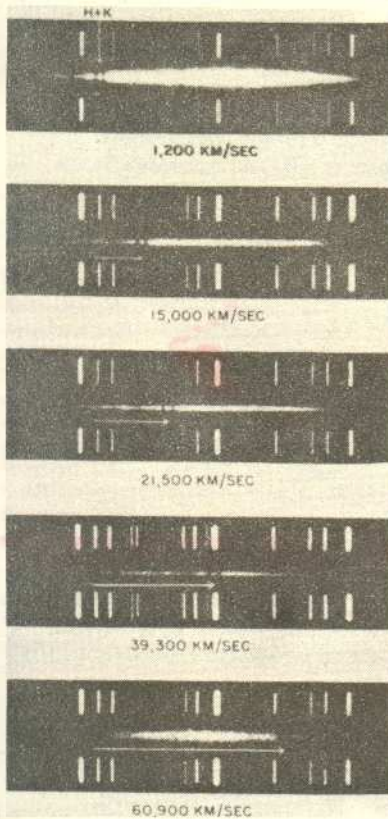
**Zjawisko Dopplera w optyce.** Jeśli  $v_0$  jest częstotliwością drgań źródła, które porusza się względem obserwatora z prędkością  $v$ , to częstota obserwowana  $\nu$  wynosi:

$$\nu = \nu_0 \frac{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}{1 - \frac{v}{c} \cos \varphi}$$

gdzie  $c$  jest prędkością światła w próżni,  $\varphi$  — kątem między kierunkiem prędkości a kierunkiem obserwacji. Wzór powyższy odnosi się do przypadku, gdy fale rozchodzą się w próżni. W przypadku nierelatywistycznym ( $v/c \ll 1$ ) otrzymujemy znany wzór (patrz „Delta” 3/1976).



Przesunięcie długości fali  $\lambda_0$  emitowanej przez dwie składowe układu podwójnego.



Widma 5 galaktyk, wskazujące na prędkości ucieczki galaktyk od 1200 do 60900 km/s.

**Parsek (ps)** — jednostka odległości w astronomii:  
 $1 \text{ ps} = 3,26 \text{ roku świetlnego} = 3,08 \cdot 10^{16} \text{ m}$ .  
 Jednostki większe: kiloparsek, megaparsek.

Wyjaśnienie przesunięcia linii widmowych przez zjawisko Dopplera nie było obce astronomom, znającym tzw. gwiazdy podwójne spektralnie, układy złożone z dwóch gwiazd położonych tak blisko siebie, że w lunetach nie można ich dostrzec oddzielnie. Gwiazdy te obiegają wspólny środek ciężkości, a więc to jedna, to znów druga zbliża się do nas. Nawet gdyby obie gwiazdy miały identyczny skład chemiczny atmosfer i temperatury powierzchni, obserwowane linie widmowe absorpcyjne ulegną rozszczepieniu na dwie składowe, związane z tymi gwiazdami. W sytuacji przedstawionej obok na rysunku zamiast laboratoryjnej długości fali  $\lambda$  obserwujemy dwie linie o nieznacznie różniących się długościach:  
 $\lambda_1 = \lambda_0 + \Delta\lambda_1$  (przesunięcie długości ku czerwieni)  
 $\lambda_2 = \lambda_0 - \Delta\lambda_2$  (przesunięcie długości ku fioletowi).  
 Długość fali  $\lambda_1$  pochodzi od składowej 1 oddalającej się od nas, długość fali  $\lambda_2$  — od składowej 2 przybliżającej się ku nam. Gdy w jakiejś następnej chwili gwiazdy 1 i 2 zamienią się miejscami, przesuniętą ku czerwieni okaże się linia pochodząca ze składowej 2. Orbitalny ruch obu składowych układu podwójnego wykrywa się poprzez badanie okresowych przesunięć linii w obie strony. Metodę powyższą stosuje się równie dobrze do wyznaczenia prędkości radialnej jakiegokolwiek źródła światła względem obserwatora. Jeśli prędkość radialna (tj. w kierunku radialnym od obserwatora do źródła światła) jest  $v$ , wtedy przesunięcie długości fali jest w przybliżeniu, gdy  $v/c \ll 1$ ,  $\Delta\lambda = \frac{v}{c} \lambda_0$ , gdzie  $c$  oznacza prędkość światła w próżni.

Już choćby z tego przybliżonego wzoru widać, że z wyznaczenia przesunięcia jakiejś linii można wyprowadzić prędkość radialną (przybliżania bądź oddalania) źródła światła względem nas. Interpretując przesunięcia linii widmowych dla galaktyk jako przesunięcia dopplerowskie V. M. Slipher zajmował się od 1912 roku wyznaczaniem prędkości radialnych galaktyk. Pierwszym stwierdzeniem było, że Wielka Mgławica w Andromedzie przybliży się ku nam z prędkością ok. 200 km/s. Zbadanie widm dalszych trzynastu galaktyk obserwowanych przez Sliphera do 1915 roku pozwoliło mu wykryć, że aż jedenaście spośród nich oddala się od nas.

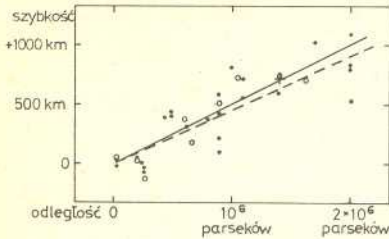
Początkowo nie dostrzegano w tym nic szczególnego. Ot, chaotyczny ruch galaktyk w przestrzeni (na wzór ruchów Browna, tyle że raczej bez zderzeń). Przypadkowo trafiono na te galaktyki, które się oddalają, ale gdyby wziąć większą próbkę losową galaktyk, wtedy na pewno okaże się, że tyle ich mniej więcej oddala się od nas co i przybliża. Warto więc zwiększać statystykę danych, obserwując przesunięcia linii w coraz to innych galaktykach, ale żadna sensacja nas tu nie oczekuje. Tak sądzono jeszcze przez kilkanaście lat od pierwszych obserwacji Sliphera, który przez dziesięć lat był jedynym astronomem, wyznaczającym radialne prędkości galaktyk. Gdy wyznaczył on już te prędkości dla 41 galaktyk, zawierały się one między wartością 1800 km/s dla największej szybkości oddalania i 300 km/s dla największej szybkości przybliżania. Zwróćmy uwagę na tę asymetrię przedziału prędkości.

Stopniowo dołączali inni astronomowie, możliwe stało się wyznaczanie odległości do odległych galaktyk oparte na występowaniu szczególnego typu gwiazd zmiennych — cefeid. Młody podówczas astrofizyk E. P. Hubble, który całe życie poświęcił obserwacjom galaktyk, zwrócił wtedy uwagę na pewną obserwacyjną osobliwość, jawnie niezgodną z przewidywanym chaotycznym ruchem galaktyk w przestrzeni: na prawie wszystkich spektrogramach galaktyk (z wyjątkiem kilku z najbliższego sąsiedztwa naszej Galaktyki przez duże G) linie były przesunięte w kierunku czerwieni. Czyżby więc wszystkie one się od nas oddalały? Mierząc przy użyciu metody cefeid odległość do owych galaktyk, Hubble doszedł do sformułowania ilościowej zależności pomiędzy prędkością oddalania się od nas ( $v$ ) jakiejś galaktyki, a jej odległością ( $r$ ). Oto prawo Hubble'a:

$$v = H \cdot r.$$

Symbolem  $H$  oznaczamy tu tzw. stałą Hubble'a, o wymiarze odwrotności czasu, nad której dokładnym wyznaczeniem astronomowie męczą się do dziś, a której poprawna wartość mieści się między 50 a 100  $\text{km s}^{-1} \text{ Mps}^{-1}$  (Korzystając z podanej obok wartości liczbowej megaparseka możemy też napisać:  $0,5 \cdot 10^{-10} \text{ lat}^{-1} \leq H \leq 10^{-10} \text{ lat}^{-1}$ ).

Odkrycie Hubble'a świadczy o ucieczce galaktyk, o „rozbieganiu się” na wszystkie strony materii we Wszechświecie. Wszelkie próby wytłumaczenia przesunięcia linii widmowych w inny sposób niż przez efekt Dopplera poniosły fiasko (a prób takich było sporo). A więc Wszechświat rozszerza się. Jeśli przyjąć dla uproszczenia, że prędkości ucieczki galaktyk były zawsze takie same, wtedy można łatwo obliczyć, przed ilu laty ucieczka ta zaczęła się, czyli ile lat trwa owa kosmiczna ekspansja. Czas ten, który można by nazwać wiekiem Wszechświata, równy jest odwrotności stałej Hubble'a, wartość jego mieści się więc pomiędzy 10 a 20 miliardami lat. Przed tym więc laty cała materia Wszechświata (niezależnie od tego, czy uważamy go za skończony czy też nieskończony) ściśnięta była maksymalnie, galaktyki (czy też jakieś znacznie bardziej gęste twory, które przed nimi istniały) nie dawały się od siebie oddzielić, odróżnić. W jednym z dalszych artykułów przekonamy się, że za wcześniej było wtedy nie tylko na istnienie galaktyk, ale nawet na istnienie materii w jej normalnych, chemicznych stanach skupienia, znanych nam z codziennego doświadczenia. Cokolwiek jednak wtedy było, było to tak zasadniczo odmienne od znanego nam dziś Wszechświata, że śmiało można mówić o ewolucji Wszechświata. Wszechświat jako twór niestatyczny, zmienny w czasie!



Zależność szybkości ucieczki galaktyki od jej odległości wg Hubble'a.



Gromada galaktyk w Warkoczcu Bereniki.

Możliwości takiej nie rozważali wcześniej obserwatorzy. Wskazał jednak na nią już na parę lat przed odkryciem Hubble'a, na drodze czysto teoretycznej dedukcji z równań teorii Einsteina, rosyjski matematyk A. A. Friedmann. Prace jego tak wydawały się wtedy odległe od rozpowszechnionych wyobrażeń o budowie Wszechświata, że mało kto zwrócił na nie uwagę. Wydawały się jedynie matematyczną ciekawostką, a tymczasem one to tłumaczyły hubble'owską ucieczkę galaktyk od początku świata. Modele te były zbudowane w ramach ogólnej teorii względności, stworzonej przez Einsteina w latach pierwszej wojny światowej. A tymczasem sam Einstein wprowadził do swej teorii pewną dodatkową stałą (tzw. stałą kosmologiczną) po to tylko, by otrzymać model niezmiennego w czasie statycznego Wszechświata. Już fakt ten najbardziej świadczy, jak dalece wszyscy przywiązani byli do modelu statycznego Wszechświata, nie dostrzegając innych możliwości.

Odkrycie Hubble'a doprowadziło do racjonalnego wytłumaczenia paradoksu Olbersa, bez odwoływania się do hierarchicznego modelu Wszechświata, na rzecz którego i w czasach Charliera, i dziś jeszcze brak argumentów obserwacyjnych. Poczzerwienie galaktyk prowadzi do zmniejszania energii każdego pochodzącego z nich fotonu. Galaktyki te uciekają od nas (właściwie to nie tylko od nas, ile każda od każdej, bo z każdej obserwowalibyśmy ten sam obraz ucieczki), a więc każdy kolejny foton wysłany w kierunku Ziemi z odległej galaktyki ma do przebycia drogę dłuższą niż poprzedni. Fotony z tej galaktyki będą więc trafiać na Ziemię coraz rzadziej, a zarazem każdy z nich będzie niósł coraz mniej energii. Rozszerzanie się Wszechświata wraz z nieustannym zwiększaniem długości fali promieniowania stale osłabia docierające do nas promieniowanie odległych galaktyk, tym silniej im bardziej są one oddalone. Powróćmy do rysunku z poprzedniego artykułu. W myśl wyводу Olbersa kolejne warstwy kuliste dawały jednakowe ilości światła. Było tak we Wszechświecie statycznym. Ale we Wszechświecie rozszerzającym się wkłady kolejnych warstw będą coraz mniejsze, sumując je będziemy dodawali przyczynki malejące tak szybko, że ciąg sum częściowych będzie zbieżny do niewielkiej wartości skończonej. I oto dlaczego niebo pozostaje ciemne.

Przez długie lata odkrycie Hubble'a stanowiło zasadniczy fakt obserwacyjny tkwiący u podstaw modeli rozszerzającego się Wszechświata. Na następne odkrycie o równie podstawowym znaczeniu trzeba było czekać kilkadziesiąt lat — do 1965 roku. O odkryciu tym mowa będzie w dziesiątym numerze „Delt”.



$\frac{1}{18}$	$2\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{18}$	0	$2 \cdot \frac{1}{18}$	$4\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{18}$
				$4\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{18}$
				$3\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{18}$
				$1\frac{1}{6} \cdot \frac{1}{18}$

Jeśli pion znalazł się w obszarze zakresowanym z jednakowym prawdopodobieństwem na każdym z trzech pól, to gra zakończy się w co najwyżej dwu ruchach. Prawdopodobieństwa zakończenia gry na poszczególnych polach brzegowych wpisane są w te pola. Jak w takiej sytuacji należałoby je obstawić? Pamiętajmy, że I ma do wyboru ruch losowy lub ruch po przekątnej.



## ROZSTRZYGNĘCIE KONKURSU „JAK WYGRYWAĆ”

W świątecznym numerze „Delt” (grudzień 1975) ogłosiliśmy konkurs na zaproponowanie możliwie najlepszych strategii w opisaną tam grze dwuosobowej. (Ze względu na szczupłość miejsca nie przytaczamy tu opisu gry odsyłając zainteresowanych Czytelników do numeru 12/75.) Oto rozstrzygnięcie:

- namiot — otrzymuje L. Newelski z Wrocławia;
- dwie rakietki tenisowe — P. Biller również z Wrocławia;
- piłka siatkowa — St. Zoła z Woli Dąbrowieckiej.

Podanie pełnej analizy strategicznej tej gry jest zadaniem bardzo trudnym, tym bardziej, że występuje w niej element losowy (rzut kostką). Niewątpliwie najwięcej w tym kierunku osiągnął L. Newelski, który podał oryginalny ogólny schemat takiej analizy i szczegółowo zbadał niektóre ważne właściwości tej gry. Udało mu się przy tym połączyć dwa spojrzenia: strategiczne (w którym szacuje prawdopodobieństwa różnych przebiegów i wyników gry) i taktyczne (w którym analizuje pewne sekwencje ruchów). P. Biller nadesłał 6-stronicowe opracowanie (przy ocenie mogliśmy wziąć pod uwagę, zgodnie z warunkami konkursu, tylko 4 pierwsze strony), w którym podobnie jak i St. Zoła opisał poprawne ogólne zasady strategiczne dla gracza II, oraz przeprowadził analizy różnych możliwych partii. Zastanawiające, że nikt nie badał dokładniej strategii gracza I i nie przeprowadzał analizy „końcówek” tej gry. Analiza taka (sama w sobie interesująca, zob. np. sytuację opisaną obok) ułatwiła by również zbadanie możliwości strategicznych gracza I. Pierwsi dwaj laureaci zwrócili również uwagę na możliwość dowolnie długich partii (partia nieskończenie długa jest do wyobrażenia, ale jej prawdopodobieństwo jest równe zeru).

P. Biller zaproponował pewne modyfikacje tej gry (dokładniej: kostki), dzięki którym jego zdaniem — i naszym też — gra mogła by się stać bardziej zabawna przy praktycznym jej rozgrywaniu.