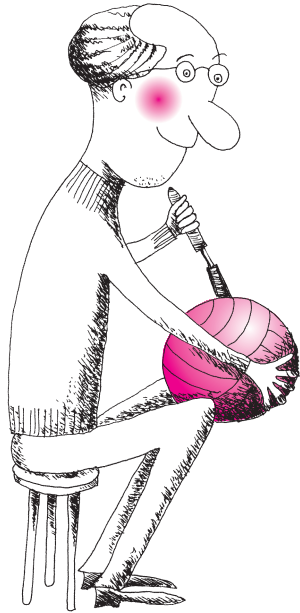


# Kosmiczna daktyloskopia, czyli o klasyfikacji widmowej gwiazd

Krzysztof ROCHOWICZ\*

Astronomowie lubią bawić się w detektywów. Od niepamiętnych czasów śledzą ruchy ciał niebieskich i próbują ustalić przyczyny zaobserwowanych zjawisk. Potrafią też na podstawie poszlak (czyli docierającego do nas promieniowania) wskazać sprawcę, a nawet szczegółowo go opisać. Światło docierające do nas od każdej gwiazdy niesie bowiem w sobie zakodowaną w formie linii widmowych informację o warunkach fizycznych i chemicznych macierzystego środowiska. Badanie widm odległych gwiazd zaczęło się na dobre w drugiej połowie XIX wieku i wtedy to pojawiła się potrzeba sklasyfikowania rosnącej liczby tego rodzaju danych.



Siedem linii w widmie Słońca jako pierwszy zaobserwował w roku 1802 angielski przyrodnik William H. Wollaston. W roku 1814 niemiecki fizyk Joseph Fraunhofer odkrył i opisał ich już ponad 600. Kilka lat później ten bawarski optyk za pomocą skonstruowanego przez siebie spektroskopu przebadał światło docierające do nas od najjaśniejszych gwiazd, zauważając podobieństwo linii występujących w widmie Polluksa (jaśniejszego z Bliźniąt) do linii widma słonecznego oraz odstępstwa w widmach Syriusza i Betelgezy. Ta różnorodność mogła początkowo niepokoić, ale dość szybko William Huggins ustalił, że linie widmowe pochodzą od tych samych pierwiastków, które występują na Ziemi. Jednak ich natężenia u różnych gwiazd odbiegały niekiedy dość znacznie od natężeń linii w widmie słonecznym. W widmie naszej Diennej Gwiazdy rzucają się w oczy przede wszystkim absorpcje sodu i zjonizowanego wapnia. Widma takich gwiazd jak Wega, Altair czy Syriusz zdominowane są przez linie absorpcyjne wodoru, a gwiazdy o czerwonej barwie – takie jak Betelgeza czy Antares – linii wodoru w ogóle nie mają, za to w ich widmach występują bardzo silne pasma tlenu tytanu. Aby odpowiedzieć na pytanie, skąd biorą się te różnice, należało przede wszystkim cały ten inwentarz uporządkować.

W roku 1863 włoski jezuita i astronom Angelo Secchi podzielił gwiazdy według ich widm i barw na pięć typów.

Secchi		Harvard	
I	Silne linie wodoru	A	Silne, szerokie linie wodoru
		B	J.w. plus tzw. „linie Oriona” (zaobserwowane u wielu gwiazd Oriona, później zidentyfikowane jako He I)
		C	Podwójne linie wodoru
		D	Obecne linie emisyjne
II	Liczne linie metali	E	Widoczne linie „H” i „K” oraz $H_{\beta}$
		F	Podobne do E, ale widoczne są wszystkie linie wodoru
		G	J.w. z dodatkowymi liniami
		H	Tak jak F, ale widoczny spadek natężenia w niebieskiej części widma
		I	J.w. z dodatkowymi liniami
		K	Pojawiają się pasma
L	Osobliwe odmiany typu K		
III	W widmie dominują pasma	M	Typ III w klasyfikacji Secchiiego
IV	Gwiazdy ciemno-czerwone	N	Typ IV w klasyfikacji Secchiiego
V	Jasne linie widmowe	O	Widma o wielu jasnych liniach (również gwiazdy WR)
		P	Mgławice planetarne
		Q	Pozostałe widma (od roku 1922 gwiazdy nowe)

Rzymskie oznaczenia od I do V określały odpowiednio: biało-niebieskie gwiazdy z liniami wodoru (Wega, Syriusz), gwiazdy z licznymi liniami metali,



### Rozwiązanie zadania F 657.

Odległość pulsara od Ziemi jest dana równaniem

$$l = D + \frac{d}{2} \sin 2\pi t/T.$$

Puls nadany w chwili  $t$  jest więc opóźniony bądź przyspieszony w stosunku do nadanego w momencie  $t = 0$  o

$$\frac{d}{2c} \sin 2\pi t/T.$$

Dwa kolejne pulsary są więc opóźnione lub przyspieszone względem siebie o

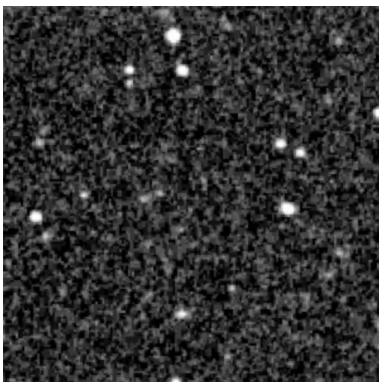
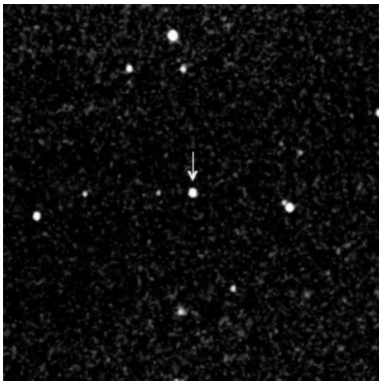
$$\frac{d}{2c} \sin 2\pi(t + 1/f)/T - \frac{d}{2c} \sin 2\pi t/T \approx \approx \frac{2\pi d}{2fcT} \cos 2\pi t/T.$$

Czas między obserwowanym na Ziemi przybyciem dwóch pulsów wynosi wobec tego

$$\Delta t = 1/f + \frac{2\pi d}{2fcT} \cos 2\pi t/T,$$

a więc częstotliwość to

$$f_1 = \frac{1}{\Delta t} \approx f - \frac{2\pi df}{2cT} \cos 2\pi t/T.$$



Fot. Porównanie obrazów tego samego fragmentu konstelacji Lwa. Obiekt oznaczony 2MASS J1146+2230 – karzeł typu widmowego L – wskazany jest strzałką na obrazie z zakresu bliskiej podczerwieni. W zakresie optycznym nie jest on widoczny.

tj. żargonowo pierwiastków cięższych od helu (Słońce, Aldebaran, Arktur), pomarańczowo-czerwone gwiazdy z pasmami (Betelgeza), gwiazdy czerwone o złożonych pasmach (19 Piscium) oraz obiekty zawierające jednocześnie emisje i absorpcje ( $\gamma$  Cassiopeiae,  $\beta$  Lyrae).

Był to, jak się okazało, trochę zbyt uproszczony podział. Astronomom przyszła z pomocą fotografia. W roku 1872 Henry Draper uzyskał pierwsze zdjęcie widma gwiazdy (Wegi). Choć ten nowojorski fizyk i astronom wkrótce zmarł, przekazane przezeń środki finansowe pozwoliły zbudować nowej klasy teleskop, przeznaczony specjalnie do fotografowania widm gwiazd (instrument ten znajduje się dziś w Piwnicach koło Torunia jako dar Stanów Zjednoczonych dla budującego się po II wojnie światowej obserwatorium). Za jego pomocą Edward C. Pickering, dyrektor obserwatorium Harvarda, wraz z Williamą Fleming przystąpili do tworzenia nowego schematu klasyfikacji widm, oznaczając poszczególne typy kolejnymi literami alfabetu łącińskiego (tabelka).

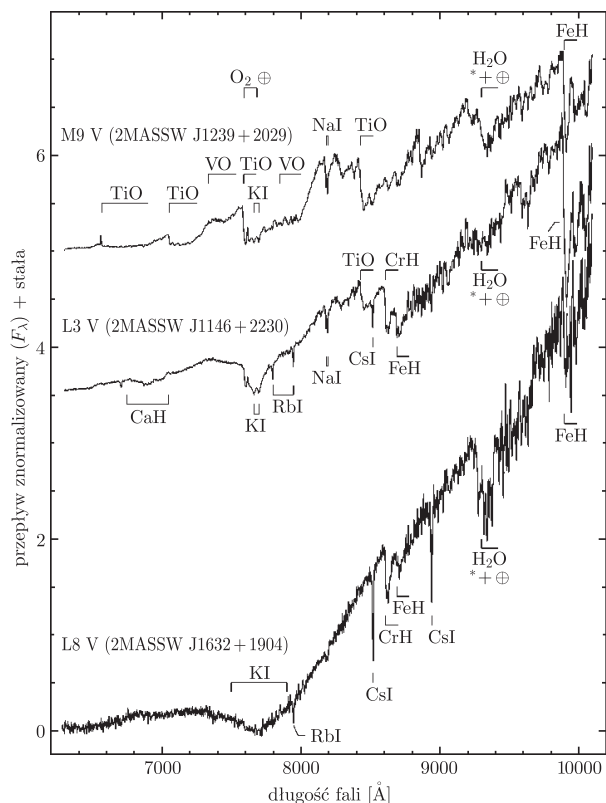
Podstawą sekwencji od A do O było malejące natężenie linii wodoru, ponadto oznaczenia P i Q zarezerwowano dla obiektów, które nie mieściły się w tym schemacie klasyfikacji. Późniejsze prace pokazały, że nie wszystkie wyróżnione typy znajdowały uzasadnienie – niektóre z nich usunięto, a część połączono w jedno. Dwie asystentki, Antonia Maury i Annie Jump Cannon, zauważyły, że – biorąc pod uwagę natężenia linii absorpcyjnych innych niż wodorowe – lepiej byłoby ustawić klasę B przed A, jeszcze wcześniej, na samym początku sekwencji, umieścić typ O. Tak oto narodził się ów klucz typów widmowych – OBAFGKM – który znamy do dziś. Annie Cannon zawdzięczamy podział poszczególnych typów na podtypy, oznaczane cyframi od 0 do 9. Przez jakiś czas na końcu sekwencji utrzymywał się jeszcze typ N, tj. gwiazd równie chłodnych i czerwonych jak obiekty typu M, z tym że w ich widmach zamiast pasm tlenku tytanu obserwowano linie węgla. Gdy znaleziono więcej gwiazd bogatych w węgiel, wykazujących jednak nieco odmienne cechy widmowe, pojawił się dodatkowo typ R (czasem R i N zastępuje się wspólnym oznaczeniem C), a gwiazdy o silnych pasmach tlenku cyrkonu oznaczono przez S. Podobnie jak N i R, uważa się je dziś raczej za osobliwe, niemieszczące się w zasadniczym ciągu klasyfikacyjnym. Wydawałoby się, że ciąg OBAFGKM trwać już będzie w niezmienionej postaci. Tymczasem w ostatnich latach astronomowie dodali na końcu owej siedmioliterowej sekwencji dwa nowe symbole: L i T. Dzięki nowej technologii i wnikliwym obserwacjom odkryte zostały obiekty o widmach wykraczających poza dotychczasowy schemat klasyfikacji.

W tym miejscu należy sobie uświadomić, że o widmie gwiazdy decyduje przede wszystkim temperatura, a w znacznie mniejszym stopniu ciśnienie i skład chemiczny jej atmosfery. To od temperatury zależy, w jakim stopniu będą zjonizowane i wzbudzone atomy poszczególnych pierwiastków (jak to pokazali fizyk austriacki L.E. Boltzmann oraz hinduski fizyk i astronom M. Saha). Skład chemiczny zaś prawie wszystkich gwiazd jest podobny, nie jest więc głównym czynnikiem różnicującym widma.

Do niedawna najchłodniejsze gwiazdy ciągu głównego określano jako M 9,5 (takie „połówki” pojawiały się już wcześniej od czasu do czasu, gdy brakowało cyfr na pomieszczenie więcej niż 10 podtypów). Problem pojawił się, kiedy zaczęto odkrywać obiekty jeszcze chłodniejsze – brązowe karły. To przewidywane już wcześniej przez teoretyków niedosłe gwiazdy, o masie poniżej 8% masy Słońca – czyli trochę za małe do zapoczątkowania klasycznych reakcji syntezy helu. Jak się jednak okazuje, nawet te niedosłe gwiazdy też świecą, a przynajmniej „żarzą się” kosztem energii grawitacyjnej kontrakcji oraz w pewnej mierze dzięki fuzji deuteru. Obiekty tego typu zaczęto odkrywać w ramach programów obserwacyjnych prowadzonych w podczerwieni, np. DENIS (*Deep Near Infrared Survey of the Southern Sky*) czy 2MASS (*Two Micron All Sky Survey* – fotografia).

Jak zatem oznaczyć owe karły, by uzupełnić dotychczasowy schemat klasyfikacji, a równocześnie nie wprowadzać symboli, które w jakiś sposób kojarzyłyby się

z używanymi już w astronomii? Zasadniczo pozostały do dyspozycji litery H, L, T oraz Y. Dość naturalną drogą wybór padł na L, choć w ten sposób znów naruszona została alfabetyczna kolejność. Typ L dobrze pasuje się w dotychczasowym schemacie klasyfikacji (rys. 1); miejsce pasm tlenków metali zajmują w widmach tego rodzaju pasma wodorków i samych metali.



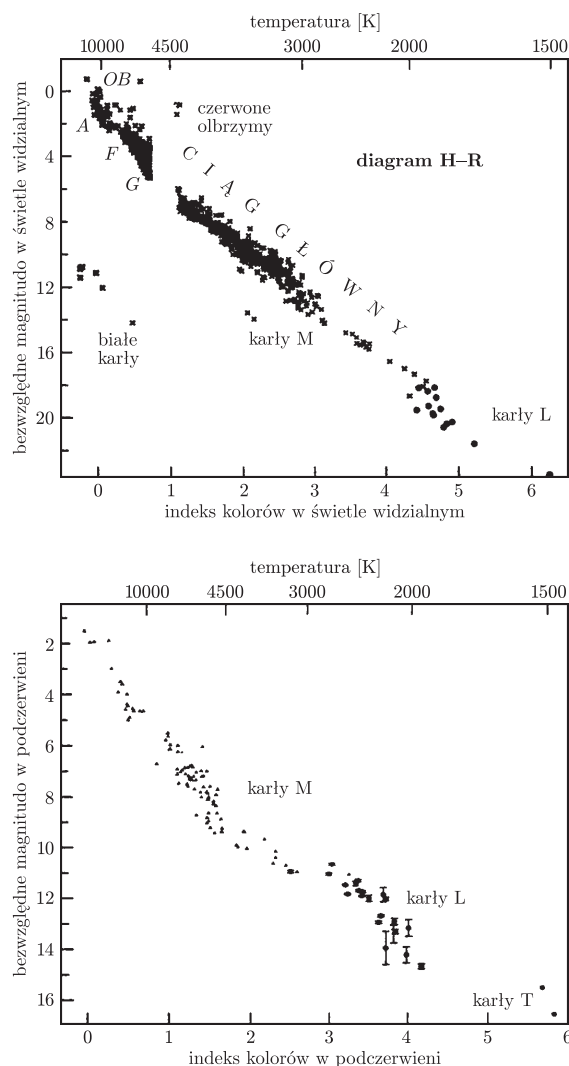
Rys. 1. Widma trzech karłów (typów M9, L3 i L8) w zakresie bliskiej podczerwieni. Najsilniejsze linie zostały zidentyfikowane, wskazano też położenie pochodzących z atmosfery Ziemi absorpcji tlenu i pary wodnej.

Już w późnych podtypach M rośnie natężenie linii tlenku wanadu, osiągając maksimum w L0; linie te znikają w podtypie L4. Z kolei w widmach typu L7 pasma tlenku tytanu stają się prawie niewidoczne. Z malejącą temperaturą rośnie natężenie absorpcji metali alkalicznych – potasu, rubidu i cezu. Absorpcja potasu staje się szczególnie silna i szeroka w podtypie L8.

Jak się ocenia, tylko około jednej trzeciej obiektów typu L to brązowe karły. Rozpoznaje się je dzięki obecności w widmie absorpcji litu. Pierwiastek ten nie ma szans na przetrwanie w materii, w której zachodzi przemiana wodoru w hel – toteż występować może jedynie w atmosferach bardzo młodych gwiazd lub właśnie brązowych karłów.

Ciągowi podtypów od L0 do L8 (L9 na razie pozostawiono w rezerwie) odpowiada ciąg malejących temperatur powierzchni od 2000 K do 1300 K (rys. 2). W tak niskich temperaturach część materii może

przyjmować postać stałą (np. tlenek wanadu czy chlorek litu; tytan wiąże się z tlenem i wapniem w związek  $\text{CaTiO}_3$ , znany w formie perowskitu). Wokół tak chłodnego obiektu może zatem powstać mglista otoczka złożona z ziaren minerałów.



Rys. 2. Położenie karłów typów widmowych L i T na diagramie HR.

To jeszcze nie koniec niezwyklej menażerii niedoszłych gwiazd. Temperaturę karła Gliese 229B wyznaczono na zaledwie 1000 K! Nietypowe wskaźniki barwy kilku podobnych obiektów i ich skomplikowane widma, bogate w linie metanu, pozwoliły na wyodrębnienie jeszcze jednego typu widmowego – T. Na razie obserwacje są zbyt skąpe, by dokonać podziału na podtypy tej ostatniej klasy karłów. Czas już jednak oswajać się z rozszerzoną sekwencją typów widmowych: OBAFGKMLT. Dotychczasowe oceny sugerują, że brązowych karłów powinno być w naszej Galaktyce nawet dwa razy więcej niż normalnych gwiazd. Oznacza to, że przypada im w udziale jakieś 15% masy zawartej w gwiazdach. Nie rozwiązuje to, co prawda, problemu brakującej ciemnej materii, ale na pewno świadczy o tym, że otaczający nas Wszechświat kryje w sobie jeszcze wiele niespodzianek.