

## Hubbleov zakon i širenje svemira

Krešimir Pavlovski,<sup>1</sup> Zagreb

Galaksije su velike nakupine zvijezda, javljaju se u velikom rasponu veličina i oblika, od malih patuljastih sferoida sa stotinjak milijuna zvijezda, do superdivovskih eliptičnih galaksija, koje pokrivaju prostor cijele jedne lokalne grupe galaksija kakva je i naša, a koja sadrži tridesetak galaksija. Naša je galaksija, Mliječni Put, spiralna galaksija, nalik disku s ispučenim središtem na koji se nadovezuje nekoliko spiralnih krakova.

Još u vrijeme kada se tek prava priroda spiralnih maglica tek naslućivala, godine 1912. američki je astronom *Vesto M. Slipher* otkrio da su linije u njihovim spektrima u pravilu pomaknute prema crvenom dijelu spektra. Kako Dopplerov efekt vrijedi za sve vrste valova, a svjetlost je elektromagnetski val, to znači da se galaksije, u pravilu, od nas udaljuju. Uzmimo neku galaksiju koja se nalazi na udaljenosti  $d$  od naše galaksije. Crveni pomak  $z$  definiran je kao omjer promjene valne duljine spektralne linije  $\Delta\lambda$  prema valnoj duljini linije u mirovanju  $\lambda_0$ :

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0}. \quad (1)$$

Prema Dopplerovom tumačenju, ako se izvor valova udaljuje od promatrača brzinom  $v$ , valna duljina valova će se povećati. Može se pokazati da vrijedi izraz:

$$v = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_0} = cz, \quad (2)$$

gdje je  $c$  brzina svjetlosti. Izraz (2) vrijedi za brzine  $v \ll c$ . U protivnom, potrebno je koristiti relativistički izraz.

Godine 1929. *Edwin Hubble*, također američki astronom, otkrio je da postoji veza između udaljenosti galaksija i njihovih brzine udaljavanja. Što bi galaksija bila udaljenija, to bi i njezin crveni pomak linija u spektru bio veći. Napisano matematički, Hubbleovo je otkriće glasilo:

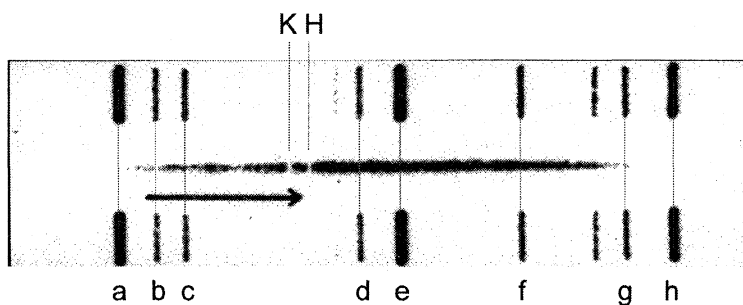
$$v = H_0 d, \quad (3)$$

gdje je  $H_0$  konstanta proporcionalnosti između brzine i udaljenosti galaksija. Za konstantu je Hubble tada odredio iznos od  $550 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ . Zašto je ovaj jednostavan matematički iskaz sadržan u jednadžbi (3) tako značajan da su ga astronomi nazvali *Hubbleov zakon*, a  $H_0$  Hubbleovom konstantom? Također bismo se mogli zapitati, zašto galaksije 'bježe' od Mliječnog Puta, i to, što su udaljenije, to brže? Odgovor je, koliko jednostavan, toliko i značajan: galaksije se međusobno udaljuju jer se svemir širi. Hubbleovo je otkriće imalo ogromnu važnost u razumijevanju nastanka i razvoja svemira. U vrlo jednostavnom modelu, prema kojem bi se širenje svemira odvijalo jednolikom brzinom, dakle, bez usporevanja ili ubrzavanja, recipročna vrijednost Hubbleove konstante  $H_0$  dala bi starost svemira (provjerite odgovara li dimenzija veličine  $1/H$  dimenziji vremena). Međutim, širenje svemira kroz njegovu dugu povijest nije se moralo odvijati jednoliko. Zbog toga smo u jedn. (3) za Hubbleov zakon uz konstantu  $H$  dodali indeks koji označuje da se Hubbleova konstanta odnosi na sadašnju epohu, a ne, recimo, na vrijeme od prije nekoliko milijardi, ili pak 10 milijardi godina.

<sup>1</sup> Autor je redoviti profesor astronomije i astrofizike na Prirodoslovno-matematičkom fakultetu Sveučilišta u Zagrebu, e-mail: kresimir@phy.hr, http://www.phy.hr/~kresimir

Za određivanje Hubbleove konstante, koja je jedna od temeljnih kozmoloških veličina, potrebno je pored crvenog pomaka  $z$  poznavati i udaljenost galaksije  $d$ . I dok se crveni pomak  $z$  ili brzina udaljavanja  $v$  može izmjeriti relativno lako iz spektra galaksije, s određivanjem udaljenosti galaksija već je daleko teže. Zbog toga, niti nakon sedam desetljeća istraživanja, nije određena prava vrijednost Hubbleove konstante. Dakako, Hubbleova prvotna vrijednost u proteklo je vrijeme više puta značajno ispravljana. Danas prevladava uvjerenje da se vrijednost kreće oko  $65 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ , s granicama od  $50 - 75 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ .

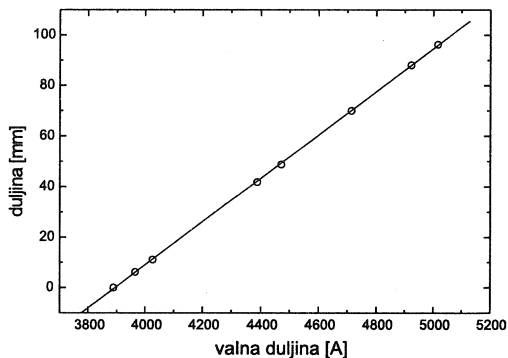
Odredit ćemo u ovoj vježbi Hubbleovu konstantu, mjereći crveni pomak jakih linija kalcijevog iona, tzv. H i K linija. Linije su dobile naziv po Fraunhoferovim oznakama, redosljedom kojim je on popisao jake linije u Sunčevom spektru, i nemaju značenje simbola kemijskih elemenata vodika i kalija! Sl. 1 prikazuje postupak mjerenja crvenog pomaka, na primjeru jednog od spektra koji su nam na raspolaganju za mjerenje. Prije svega, uočimo spektar galaksije koji se kao traka pruža sredinom slike, između dvaju, gotovo identičnih, poredbenih spektara. Poredbeni spektri imaju vrlo karakterističan raspored jakih, emisijskih linija (sl. 1 prikazana je kao negativ!).



*Slika 1. Spektar galaksije i poredbenog spektra. Mjerenjem razmaka među linijama poredbenog spektra koje su označene slovima a do h baždarićemo skalu valnih duljina na spektrogramu. Mjerenjem položaja H i K linije u spektru galaksije, pomoću Dopplerove formule, odredit ćemo brzinu udaljavanja galaksije.*

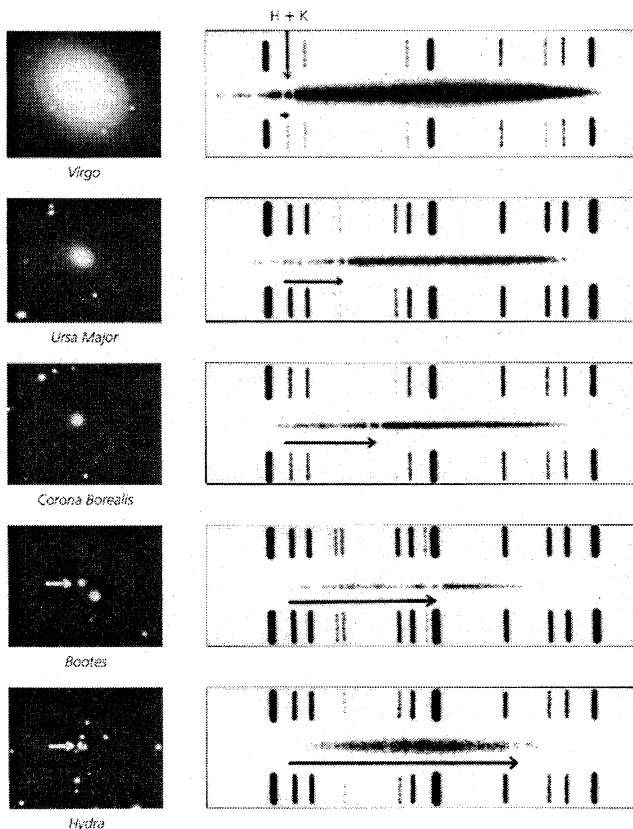
Nasuprot, u spektru galaksije uočavamo pak tamne apsorpcijske linije, među kojima se H i K linije, najbolje razaznaju. Poredbeni su nam spektri potrebni za baždarenje skale valnih duljina. U poredbenom spektru odabrali smo nekoliko spektralnih linija, označene su slovima od a do h, a njihove valne duljine dane su u tablici 1. Prvo ćemo tankom linijom povezati linije poredbenog spektra tako da one presijecaju spektar galaksije. Zatim ćemo ravnalom, mjereći uzduž spektra galaksije, odrediti položaj označenih linija. Najjednostavnije je uzeti liniju a kao ishodišnu, od koje ćemo mjeriti razmaka do svih drugih linija. Podatke ćemo unijeti u tablicu, te nacrtati graf (sl. 2). Na osi apscisa nanesimo valne duljine, a na osi ordinata razmak među linijama. Između ucrtanih vrijednosti mjerenja povucimo pravac. Tako smo baždarićemo skalu valnih duljina na spektru galaksije. Ako smo baždarenje napravili na jednom od spektara sa sl. 3 onda će nam baždarni graf vrijediti za sve ostale spektre jer su slike spektara galaksija reproducirane u istoj skali.

linija	valna duljina [Å]
a	3888
b	3965
c	4026
d	4387
e	4471
f	4713
g	4922
h	5015
Ca <sup>+</sup> K	3933.7
Ca <sup>+</sup> H	3968.5



Tablica 1. Podaci za baždarnu krivulju.

Slika 2. Baždarni graf koji određuje skalu valnih duljina na spektrogramima galaksija sa sl. 1. i 3.

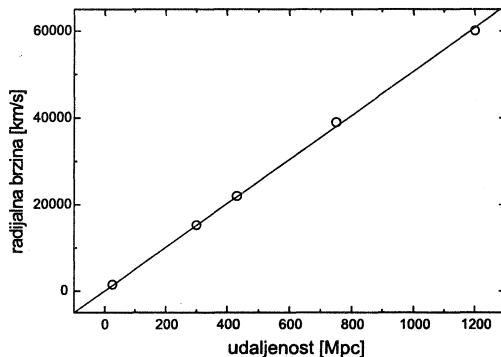


Slika 3. Spektri galaksija. Postupkom koji je opisan u tekstu i prikazan na sl. 1 izmjerite položaj H i K linija u spektrima galaksija, te izražunajte njihov crveni pomak  $z$  i njihovu brzinu  $v$ .

Slijedi mjerenje crvenog pomaka galaksije. Strelica na spektru pomoć je za prepoznavanje H i K linija. Izmjerimo razmak H i K linija od linije a u poredbenom spektru. Unesimo vrijednosti na baždarni graf i očitajmo valne duljine na osi apscisa. Valne duljine H i K linija u laboratoriju su također dane u tablici 1. Pomoću jednadžbe (1) izračunajmo prvo crveni pomak  $z$ , te pomoću jednadžbe (2), množenjem s brzinom svjetlosti  $c = 300\,000 \text{ km s}^{-1}$ , izračunajmo brzinu galaksije  $v$  (radi se o radijalnoj ili uzdužnoj brzini).

galaksija	udaljenost [Mpc]
Virgo	19
Ursa Major	300
Corona Borealis	430
Bootes	770
Hydra	1200

Tablica 2. Podaci za galaksije.



Slika 4. Hubbleov zakon prema mjerenjima brzina galaksija sa slike 3 i udaljenostima galaksija iz tablice 2. Nagib pravca koji prolazi izhodištem jednak je Hubbleovoj konstanti  $H_0$ .

U tablici 2 dane su udaljenosti pojedinih galaksija označenih imenima jata kojima pripadaju. Kada izmjerimo brzine svih pet galaksija nacrtajmo graf koji će povezati brzine galaksija s njihovim udaljenostima. Za os apscisa ćemo uzeti udaljenost galaksija, izraženu u Mpc (megaparsek,  $1 \text{ Mpc} = 10^6 \text{ pc}$ ). Opet ćemo između ucrtanih točaka provući pravac. Nagib pravca upravo je veličina koju tražimo – Hubbleova konstanta  $H_0$ . Koju ste vrijednost dobili? Izračunajte starost svemira za model širenja u kojem na galaksije ne djeluje nikakva sila. Usporedite starost svemira sa starošću Sunca koje iznosi 4.6 milijardi godina.

\*\*\*

Uglavnom je zasluga Wierstrassove znanstvene djelatnosti što danas u analizi postoji potpuna usaglašenost i sigurnost u odnosu na one vrste rasuđivanja koje se zasnivaju na pojmu iracionalnog broja i granica uopće. Njemu dugujemo za jedinstveni tretman svih rezultata, čak i onih koji se odnose na najsloženija pitanja, a dotiču područje teorije diferencijalnih i integralnih jednadžbi, bez obzira na vrlo smione i raznovrsne kombinacije primjene superpozicija, kombinacija i transpozicija granice.

David Hilbert (1862. – 1943.),  
njemački matematičar

Priredila: Marina Kreković