

# ASTRONOMICKÉ SÚRADNICOVÉ SYSTÉMY, ATLASY, KATALÓGY A MERANIE VZDIALENOSTÍ VO VESMÍRE

Jozef Žižňovský, RNDr., CSc.

ziga@astro.sk

Astronomický ústav Slovenskej akadémie vied, Tatranská Lomnica

## Úvod

Pri orientácii na nočnej oblohe si ľudstvo v minulosti pomáhalo väčšinou spájaním jasnejších hviezd do rôznych zoskupení, ktoré im pripomínali nejaké zvieratá, mytologické postavy a podobne. Prvé súhvezdia začali pozorovatelia nočnej oblohy "vytvárať" niekedy pred 15 000 rokmi v oblasti Stredozemného mora, obývanej prvými kmeňovými kultúrami kočovných národov. Motiváciou bola najmä potreba určovania správnych smerov pri nočnom presune, teda orientácia v teréne a určovanie času. Neskôr nastala potreba určovať začiatky sezónnych poľnohospodárskych prác, ktoré pomáhali načasovať východy, prípadne západy výrazných nebeských objektov alebo súhvezdí.

Postupne si pozorovatelia nočnej, ale aj dennej oblohy začali uvedomovať periodicitu pozorovaných javov a vznikala potreba spresňovať znalosť polôh nebeských objektov, lebo práve pomocou nich sa hodnoty potrebných períód určovali a spresňovali. A na presné určenie polôh nielen na oblohe, ale aj na Zemi potrebujeme zaviesť súradnicové systémy s dobre určenými základnými rovinami, stredmi a dôležitými smermi. Keďže pri pohľade na oblohu má pozorovateľ dojem, že má nad sebou oblohu v tvare gule (sféry), dostala skupina astronomických súradnicových systémov prívlastok *sférické*. V astronómii sa používajú nasledujúce sférické súradnicové systémy:

- obzorníkový (horizontálny),
- ekvatoriálny (rovníkový) [<http://www.astro.sk/~zkanuch/apvv/wwwheslar/heslo.php?id=76>]
- ekliptikálny [<http://www.astro.sk/~zkanuch/apvv/wwwheslar/heslo.php?id=69>],
- galaktický [<http://www.astro.sk/~zkanuch/apvv/wwwheslar/heslo.php?id=74>].

Ich názvy viac-menej naznačujú, v akej oblasti astronómie a na ktoré objekty sa jednotlivé systémy používajú. Veľmi podrobné a kvalitné informácie o rovníkovom, ekliptikálnom a galaktickom systéme súradníc nájde pozorný čitateľ na internetových adresách, ktoré sú uvedené v hranatých zátvorkách za každým systémom. Je ešte nutné poznamenať, že všetky súradnice v astronomických sférických systémoch sú vyjadrené v oblúkových stupňoch. V niektorých prípadoch sa z praktických dôvodov používajú vo výpočtoch namiesto oblúkových stupňov radiány.

Obzorníkový súradnicový systém, ktorý sa v profesionálnej astronómii používa len zriedkavo, si stručne popíšeme v nasledujúcich riadkoch.

### 1. Obzorníkový súradnicový systém

Základnou rovinou tohto systému je dotyčnicová rovina, prechádzajúca tým bodom na Zemi, na ktorom stojí pozorovateľ. Základným smerom je smer k juhu. Súradnicami telesa na oblohe je výška telesa nad obzorom  $h$  a azimut  $a$ .

Výška  $h$  objektu sa meria od obzoru smerom k zenitu (nadhlavníku) od nuly po 90 oblúkových stupňov. Azimut  $a$  sa v astronómii meria v rovnakých jednotkách od juhu cez západ, sever a východ. Takisto v oblúkových stupňoch od nuly po 360. Azimut je teda uhlová vzdialenosť priesečníka hlavnej kružnice prechádzajúcej zenitom a pozorovaným objektom s

rovinou horizontu od južného smeru. Je to pomerne jednoduchý a ľahko pochopiteľný systém. Jeho nevýhodou je, že pozorované objekty v ňom sústavne menia svoje súradnice. Navyše, so zmenou polohy pozorovateľa sa mení stred súradnicového systému. Platí teda len pre dané pozorovacie miesto. Pre sledovanie nebeských javov voľným okom, alebo prenosnými ďalekohľadmi, je to však veľmi výhodný systém.

## 2. Astronomické katalógy a atlasy

Prvé zoznamy hviezd a vyobrazenia oblohy sa nezachovali. V súčasnosti je známe, že nákresy hviezd, prípadne objektov na oblohe vznikali už v neolite. V staroveku, ale aj stredoveku sa široko používaným katalógom stal katalóg gréckeho matematika a astronóma Hipparcha, ktorý ho zostavil v druhom storočí pr. n. l. na základe starších zoznamov hviezd. Hipparchov katalóg obsahoval okrem polôh aj jasnosti hviezd. Na základe neho zostavil Ptolemaios v roku 150 n. l. katalóg hviezd (ktorý bol súčasťou jeho diela *Almagest*) s polohami 1025 hviezd. Po zavedení ďalekohľadu do astronomickej praxe publikoval J. Flamsteed v roku 1690 prvý hviezdny katalóg zostavený na základe jeho meraní polôh hviezd ďalekohľadom. Neskôr vznikali stovky rôznych katalógov s čoraz presnejšími údajmi.

Spravidla každý katalóg obsahuje okrem mena, príp. čísla hviezdy jej polohu na oblohe. Dost' dlho to bola jediná možnosť ako identifikovať jednotlivé hviezdy v rôznych katalógoch, pretože jedna a tá istá hviezda mala v každom katalógu iné meno (číslo). Presnosť polôh hviezd uvádzaná v katalógoch závisela od použitej metódy merania jej polohy. Spočiatku to boli len odhady voľným okom, neskôr vďaka vynálezu uhloerných prístrojov presnosť vzrástla a donedávna najpresnejšou bola tá, ktorá začala využívať ďalekohľady a fotografické platne v ich ohniskách. Od polovice XIX. storočia po päťdesiate roky XX. storočia vzniklo na základe fotografických pozorovaní viacero hviezdnych katalógov v USA aj v Európe. Najznámejšími sa stali *Henry Draper Catalogue*, ktorý vznikol v USA na Harvardskom univerzitnom observatóriu, ďalej *Bonner Durchmusterung* vypracovaný na observatóriu v nemeckom Bonne a *Cordoba Durchmusterung* pre južnú oblohu zostavený na základe fotografických pozorovaní na argentínskom observatóriu v Córdobe. Tieto prvé moderné katalógy umožnili prudký rozvoj astronómie, pretože okrem presných polôh na oblohe obsahovali údaje o jasnosti, farbách a spektrálnych typoch hviezd, čo sú ich dôležité fyzikálne charakteristiky. Okrem týchto základných prehľadových katalógov vznikali neskôr špecializované katalógy. Pre veľmi presné určovanie polôh objektov na oblohe sa používali takzvané fundamentálne katalógy. Najpresnejší z nich, *Vierter Fundamentalkatalog (FK 4)* bol vydaný v Heidelbergu v roku 1963 a obsahoval polohy 1535 hviezd z celej oblohy s presnosťou 0,05" (oblúkovej sekundy). Slúžil tak ako základný katalóg pre meranie presných polôh ďalších hviezd, planétiiek, komét a pod. Bol prekonaný až v roku 1997, keď boli publikované *The Hipparcos and Tycho Catalogues*, zostavený na základe presných meraní polôh hviezd z pozorovaní rovnomennou družicou HIPPARCOS vyslanou Európskou vesmírnou agentúrou ESA. V rokoch 1989 až 1993 určila presné polohy približne 120 000 hviezd do 12. magnitúdy s presnosťou 10 – 100-násobne vyššou, ako boli existujúce fotografické katalógy. Priemerná presnosť meraní polôh hviezd jasnejších ako 9. magnitúda bola 0,6 – 1 tisícina oblúkovej sekundy. Pre ďalších približne milión hviezd boli určene polohy s presnosťou 2 – 3 stotín oblúkovej sekundy. Tieto presné polohy boli využité aj na meranie vzdialeností hviezd metódou trigonometrickej paralaxy. Na ilustráciu uvedme, že táto družica bola schopná zmerať priemer ľudského vlasu vo vzdialenosti 20 km.

S ešte vyššou presnosťou bude pozorovať ďalšia družica agentúry ESA, Gaia, s plánovaným štartom v roku 2013 (obr. 3). Bude umiestnená v Lagrangeovom libračnom bode L2 vo vzdialenosti 1,5 milióna km za obežnou dráhou Zeme. Tá má merať presné polohy zhruba jednej miliardy hviezd, získať asi 10 000-krát viac údajov ako HIPPARCOS. Okrem

merania polôh hviezd sa zameria aj na presné merania polôh tisícov asteroidov v našej Slnecnej sústave. Priemer ľudského vlasu by Gaia dokázala odmerať zo vzdialenosti 1000 km!

Okrem hviezdnych katalógov vznikali aj zoznamy, katalógy obsahujúce iné zaujímavé objekty. Známym a pozorovateľmi nočnej oblohy obľúbeným je napríklad Messierov katalóg hmlovín. Špecializované katalógy vznikali aj v Čechách a na Slovensku. Antonín Bečvář publikoval katalóg hviezd *Atlas Coeli II*, v ktorom boli okrem polôh hviezd na oblohe uvedené aj ich spektrálne typy, vlastné pohyby, paralaxy a radiálne rýchlosti. V Prahe vznikol veľmi praktický kartičkový *Katalóg otvorených a guľových hviezdokôp* (autor Jiří Ruprecht) s množstvom užitočných údajov a súpisom literatúry o každej katalogizovanej hviezdokope. Zaujímavý *Katalóg planetárnych hmlovín* doplnený aj ich fotografiami publikoval český astronóm Luboš Kohoutek. Raritou je aj *Katalóg H II oblastí* (sú to veľké oblaky medzhviezdnej hmoty obsahujúce ionizovaný vodík) zostavený Pavlou Polechovou z Prahy. Anna Antalová pripravila na Skalnatom plese a vydala rozsiahly *Katalóg slnečných erupcií* a Astronomický ústav SAV spravuje z poverenia Medzinárodnej astronomickej únie rozsiahly *Katalóg dráh meteorov* (pod vedením Vladimíra Porubčana). Eduard Pittich a Jana Pittichová spolu s kolegami z Ruskej akadémie vied z Petrohradu vypracovali a na Astronomickom ústave SAV spravujú *Katalóg krátkoperiodických komét*. Juraj Zverko a Jozef Žižňovský z Astronomického ústavu SAV v spolupráci s kolegami z Masarykovej univerzity v Brne zostavili *On-line databázu fotometrických pozorovaní magnetických chemicky pekuliárnych hviezd*. Posledné tri katalógy sú už publikované on-line na internete v digitálnej podobe, čo umožňuje rýchly prístup odbornej astronomickej verejnosti k publikovaným dátam. V podstate už ide o vyššiu formu katalógu, sú to databázy, obsahujúce aj návody na prácu s dátami, prípadne jednoduché programy na ďalšiu prácu s dátami.

Hviezdne atlasy sú tvorené súbormi máp hviezdnej oblohy. Najstaršie dochované vyobrazenia hviezdnej oblohy pochádzajú z oblasti Egypta a Mezopotámie a vznikli približne 1500 – 1200 rokov pred n. l. Prvé obrazce súhvezdí, čo boli predchodcami moderných atlasov (ale aj tabuliek hviezd, ktoré tvorili súhvezdia), vznikli v starogréckom kultúrnom prostredí. Z Číny pochádza najstarší známy atlas hviezdnej oblohy z rokov 649 – 684. Na obrázku č. 4 je reprodukcia jednej z jeho 13 máp, ktorá pokrýva okolie severného pólu. V dolnej časti mapky je dobre viditeľné súhvezdie Veľkej medvedice (Veľký voz), na ľavom okraji časť súhvezdia Herkules. Aj prvý hviezdny atlas, ktorý vznikol tlačiarenskou technikou, pochádza z Číny z roku 1092.

Autormi prvých vedecky (ale aj v bežnej námornej a cestovateľskej praxi) využiteľných (na vtedajšiu dobu) podkladov pre tvorbu hviezdnych atlasov boli tzv. tabuľky súhvezdí, ktoré zostavili starogrécki učenci Hipparchos a Ptolemaios. Či existovali aj v obrazovej forme, a teda vo forme hviezdnych atlasov, prípadne voľných mapových listov, nie je známe. Zachovalo sa ale kartografické dielo autora Hyginusa *Poeticon Astronomicon*, (obr. 5) vydané v roku 1482 v Benátkach, obsahujúce zaujímavé drevorezby súhvezdí. Usporiadanie súhvezdí je v ňom presne také, ako sú uvedené súradnice (a teda polohy hviezd na oblohe) v Ptolemaiovom *Almageste*. Vidíme teda, že ešte 10 rokov pred objavením Ameriky Krištofom Kolumbom sa používali v Európe mapy nočnej oblohy, nakreslené na základe "katalógov" hviezd, starých približne 1500 rokov.

Postupne začali vznikať väčšie a obsiahlejšie tabuľky obsahujúce polohy hviezd na oblohe a boli využité na kreslenie máp hviezdnej oblohy. Presnosť polôh hviezd sa postupne zvyšovala vďaka dômyselným uhlomerným prístrojom. Najväčšiu zásluhu na zostavovaní tabuliek hviezd s presnými polohami v období pred vynájdením ďalekohľadu Galileom mal dánsky astronóm Tycho Brahe (1546–1601), ktorý precíznymi pozorovaniami dokázal zmerať polohy stovák hviezd s presnosťou 1 oblúkovej minúty. Katalóg obsahujúci výsledky jeho pozorovaní a výpočtov polôh 777 hviezd vydal v roku 1602. Tieto jeho pozorovania

využili viacerí jeho nasledovníci (napríklad Johannes Kepler pri výpočte eliptickej dráhy planéty Merkúr) a poslúžili viacerým autorom na nakreslenie relatívne veľmi presných máp hviezdnej oblohy, z ktorých tak postupne vznikali rôzne hviezdne atlasy. Mnohé s umelecky poňatými kresbami súhvezdí.

V ére krátko po objave ďalekohľadu vzniklo niekoľko pozoruhodných hviezdnych atlasov. Autormi boli Johannus Hevelius (*Firmamentum Sobiescianum sive Uranographia*, 1690), John Flamsteed (*Atlas coelestis*, 1729) a ďalší. Na obrázku 6 sú súhvezdia Orióna a Býka z atlasu J. Flamsteeda.

Z hľadiska modernej astronómie sú najdôležitejšie hviezdne atlasy, ktoré vznikli na základe fotografických pozorovaní od začiatku XIX. do zhruba polovice XX. storočia. Patrí medzi ne Harvardský atlas, ktorý vznikol vďaka katalógom, ktoré zostavili hlavne asistentky profesora Pickeringa na Harvardskom observatóriu. Moderný vzhľad mal už napríklad Argelanderov (známy pozorovateľ a objaviteľ premenných hviezd) atlas, od vzhľadu ktorého sa začali odvíjať ďalšie moderné diela hviezdnej kartografie. Asi najkrajším a zrejme ťažko prekonateľným sa stalo dielo Dr. Antonína Bečvářa, ktorý na Skalnatom plese vypracoval a postupne vydal sériu 4 hviezdnych atlasov: *Atlas Coeli Skalnaté Pleso* (1948) s katalógom (1951), *Atlas Eclipticalis* (1958), *Atlas Borealis* (1962) a *Atlas Australis* (1964). Podrobnosti o ich vzniku sú na nasledujúcej adrese:

[http://www.astro.sk/public\\_relation/becvar/atlas\\_y\\_sk.html](http://www.astro.sk/public_relation/becvar/atlas_y_sk.html)

Zvláštnym prípadom hviezdneho atlasu je *Palomar Sky Atlas*. Je výsledkom dlhodobého fotografického mapovania hviezdnej oblohy veľmi kvalitným ďalekohľadom, takzvanou Schmidtovou komorou o priemere korekčnej dosky 1,20 m. Ten fotografoval oblohu z observatória Mt. Palomar na západnom pobreží USA. Bolo naexponovaných 935 snímok oblohy v modrej aj v červenej oblasti spektra, spolu 1870 fotografií na sklenených fotografických platniach rozmeru 36 x 36 cm, z ktorých boli vyhotovené kontaktné kópie na fotografickom papieri a k nim boli vyhotovené tzv. *identifikačné* fólie s názvami objektov pre príslušnú fotografiu hviezdneho poľa na oblohe. Keďže z observatória Mt. Palomar na severnej pologuli sa nedajú získať pozorovania z južnej hviezdnej oblohy, spoločným úsilím Austrálie a Veľkej Británie bola postavená podobná Schmidtova komora v Austrálii na observatóriu Siding Spring a tá sa zaslúžila o dokončenie kompletného zmapovania hviezdnej oblohy. Časť pozorovaní bola ale vykonaná aj na južnom observatóriu ESO v Chile.

V súčasnosti hviezdna kartografia využíva intenzívne výpočtovú techniku a atlasy sa často publikujú už len v elektronickej forme.

### 3. Meranie vzdialeností vo Vesmíre

Jednotky vzdialenosti používané v astronómii sú astronomická jednotka (AU), svetelný rok (ly) a parsek (pc). Približné vzťahy medzi jednotkami vzdialenosti sú:

$$1 \text{ AU} = (149\,597\,870\,691 \pm 30) \text{ m}$$

$$1 \text{ ly} = 63\,271 \text{ AU}$$

$$1 \text{ pc} = 3,26 \text{ ly} = 206\,265 \text{ AU}$$

Podrobnejšie viď heslá projektu APVV LPP-0146 na URL:

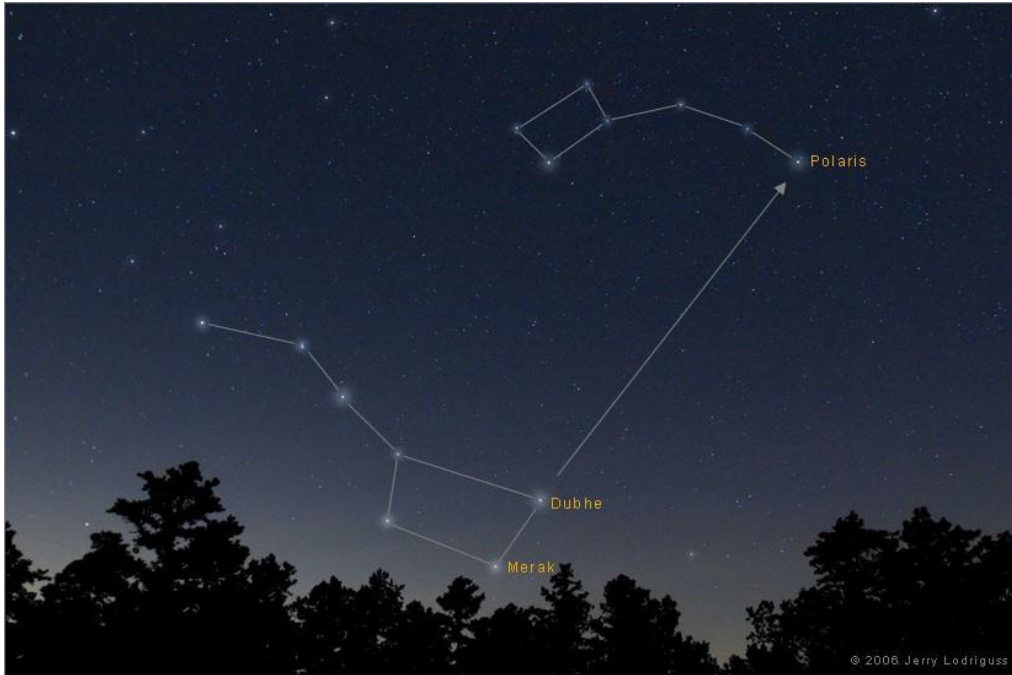
<http://www.astro.sk/~zkanuch/apvv/wwwheslar/heslo.php?id=47>

a ďalšie na:

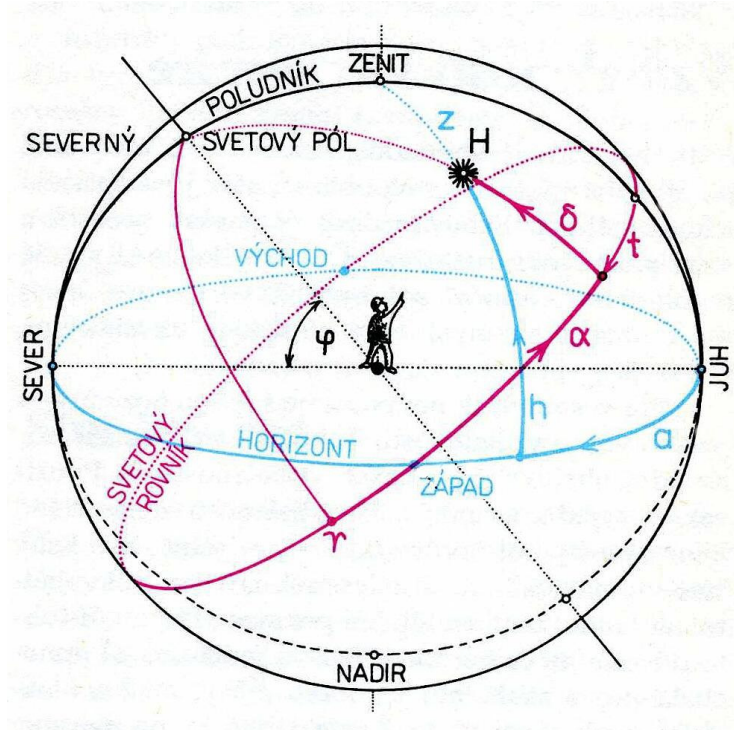
<http://www.astro.sk/~zkanuch/apvv/wwwheslar/>

a referát z podobného seminára pre učiteľov z roku 2009 *Základné fyzikálne parametre hviezd*. Na URL:

[http://www.astro.sk/~choc/open/09\\_casu/str/zbornik.html](http://www.astro.sk/~choc/open/09_casu/str/zbornik.html)

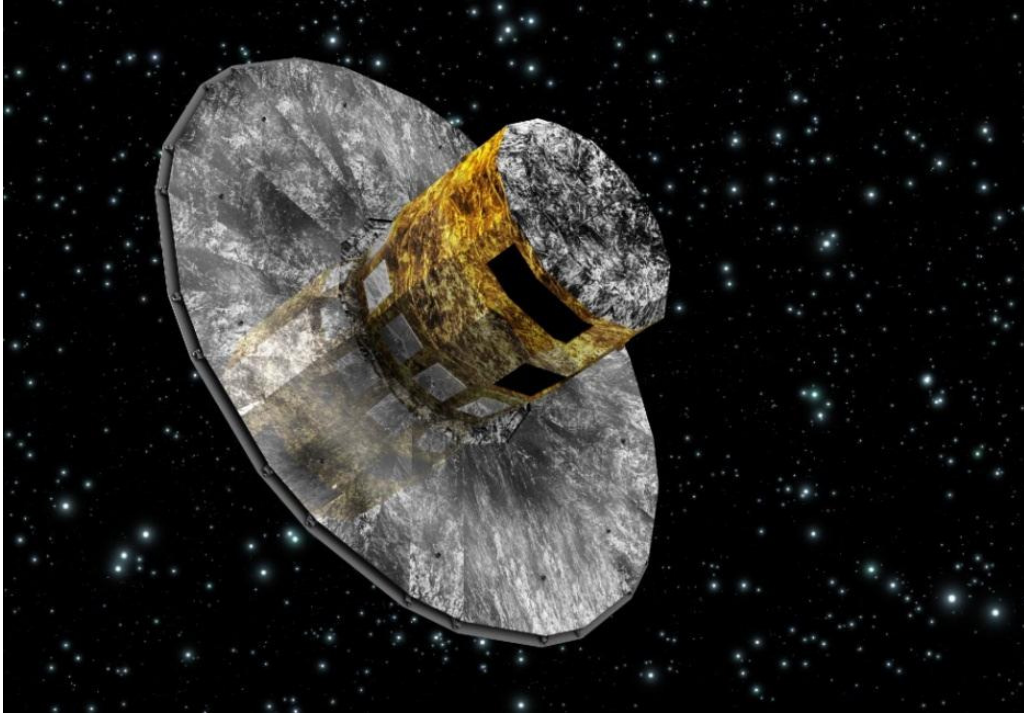


Obr. 1: Súhvezdia *Velkej a Malej medvedice (Velký a Malý voz)*. Spojnica hviezd *Merak* a *Dubhe* smeruje na hviezdu  $\alpha$  v súhvezdí *Malej medvedice (Polárku)*, často využívanú pri orientácii pri pohybe v noci, ale aj na oblohe a pri určovaní času pomocou polohy ich spojnice. <http://antwrp.gsfc.nasa.gov/apod/ap030207.html>



Obr. 2: Schématické znázornenie horizontálnych a ekvatoriálnych súradníc.  
Zdroj: E. Pittich, D. Kalmančok: *Obloha na dlani*. Obzor, 1981





Obr. 3: Kresba družice Gaia na obežnej dráhe okolo Slnka.

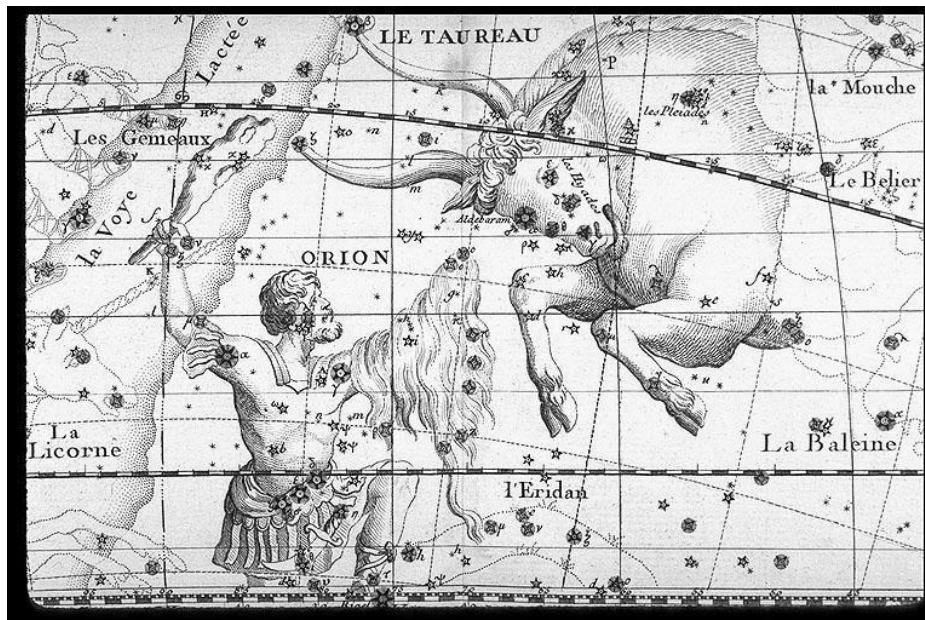


Obr. 4: Ukážka z čínskeho hviezdneho atlasu zo VII. storočia.

Zdroj: <http://apod.nasa.gov/apod/ap090619.html>

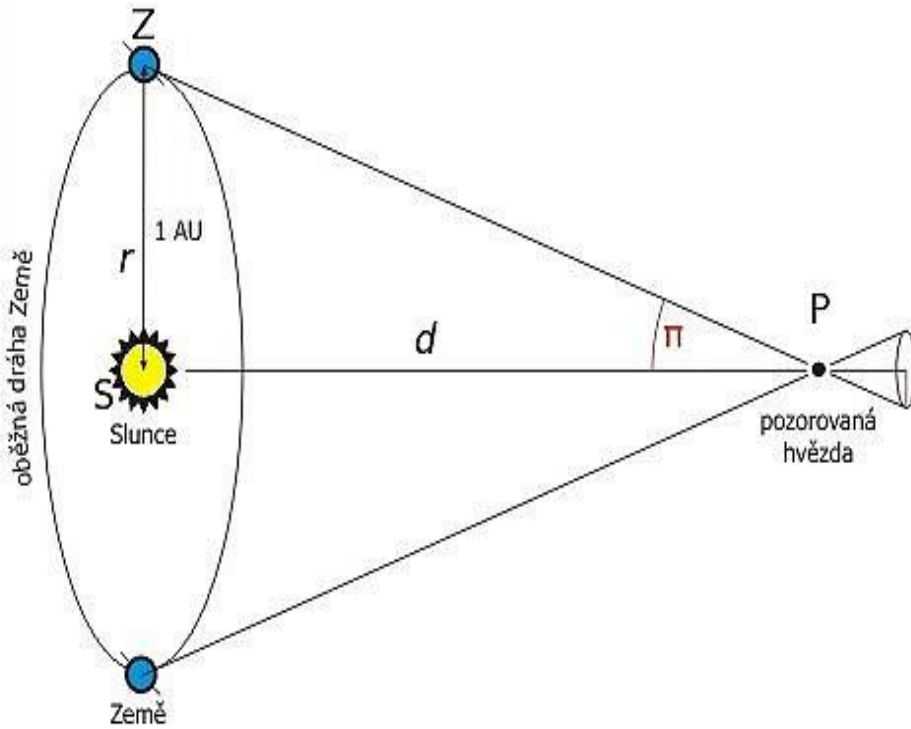


Obr. 5: Súhvezdie Orión z diela *Poeticon Astronomicum*.

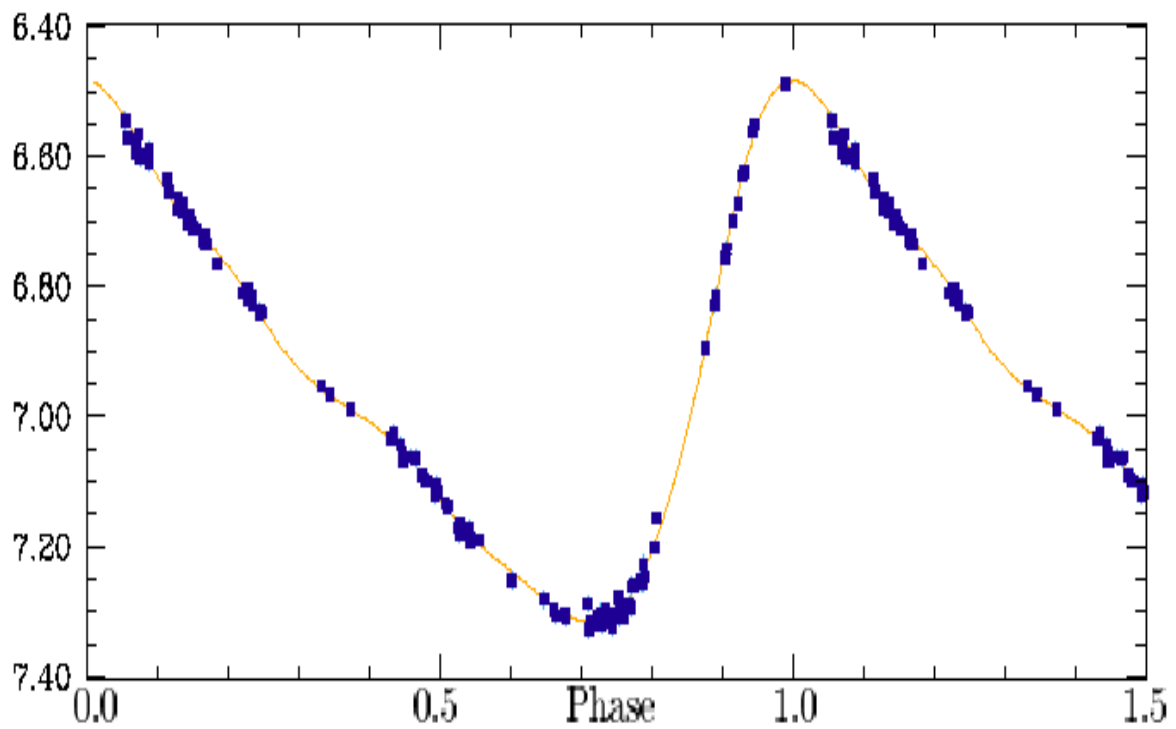


Obr. 6: Oblasť oblohy so súhvezdiami Orióna a Býka z atlasu J. Flamsteeda, v Parížskom vydaní z roku 1763, po úpravách J. Fortina

[http://www.lindahall.org/events\\_exhib/exhibit/exhibits/stars/hev.htm](http://www.lindahall.org/events_exhib/exhibit/exhibits/stars/hev.htm)



Obr. 7: Schématický nákres pre výpočet paralaxy hviezdy  $\pi$  riešením pravouhlého trojuholníka ZSP. ([commons.wikimedia.org](https://commons.wikimedia.org))



Obr. 8: Svetelná krivka pulzujúcej premennej hviezdy typu  $\delta$  Cep.



Vzhľadom na obrovské vzdialenosti vo Vesmíre, nie je možné merať vzdialenosti vesmírnych objektov priamo. Prvou známou metódou, ktorá sa využíva dodnes, je metóda *paralaktická*. Je používaná aj pri geodetických meraniach na povrchu Zeme. Je to klasická trigonometrická metóda, využívajúca presné merania uhlov pri pozorovaní vzdialeného objektu z dvoch dostatočne vzdialených bodov, ktoré tvoria základňu trojuholníka. Prvýkrát v histórii ju použil (a zdokumentoval) Eratostenes Alexandrijský na prelome III. a II. storočia pred n.l. Meral pomocou nej polomer Zeme a vzdialenosť Mesiaca od Zeme.

Poznajúc vzdialenosť Slnko-Zem, získame pre paralaktickú metódu veľmi dlhú základňu – takú, že pomocou nej dokážeme merať vzdialenosti blízkych hviezd.

Označme polomer dráhy Zeme  $r$  a vzdialenosť hviezdy od Slnka  $d$  (obr. 7). Trojuholník ZSP je pravouhlý, pre hodnotu paralaxy  $\pi$  preto môžeme písať:

$$\tan \pi = r/d.$$

Koncom 70. rokov minulého storočia už boli vďaka fotografickým pozorovaniam známe paralaxy viac ako 5800 hviezd a maximálna hodnoverná vzdialenosť bola 40 – 50 pc. Výrazný obrat nastal až po spracovaní meraní družice HIPPARCOS (štart v r. 1989, pracovala do r. 1993), ktorá zmerala polohy necelých 120 000 hviezd do vzdialenosti 150 pc (s presnosťou 0,0008–0,002 oblúkovej sekundy). Toto je vysoká presnosť, ale stále ešte postačuje len na prácu v rámci našej Galaxie.

Pre vzdialenejšie objekty za hranicami našej Galaxie sa používa dodnes metóda, ktorú vypracovala Henrietta Leawittová z Harvardovho observatória v USA začiatkom XX. storočia. Zistila, že pulzujúce premenné hviezdy cefeidy majú tým dlhšiu periódu pulzácií, čím sú ich jasnosti vyššie. Táto zákonitosť je zatiaľ najpresnejšie vyjadrená na základe meraní trigonometrických paralax družice HIPPARCOS takto (pre cefeidy typu I):

$$M_v = -2,81 \times \log_{10} P - 1,43 ,$$

kde  $M_v$  je absolútna magnitúda cefeidy a  $P$  je perióda jej svetelných zmien vyjadrená v dňoch. Využívajúc tzv. modul vzdialenosti  $m - M_v$ , pre ktorý platí:

$$m - M_v = 5 \log_{10} d - 5,$$

dostaneme :

$$\log_{10} d = 0,2 (m - M_v + 5) \text{ a } d = 10^{0,2(m - M_v + 5)}, \text{ (} d \text{ v jednotkách pc).}$$

Obrovskou výhodou cefeíd je, že sú to mimoriadne svietivé hviezdy 100 až 10 000-krát svietivejšie ako Slnko. Pozorujeme ich aj v nie veľmi vzdialených galaxiách. Pokiaľ vzdialenosti hviezd sme dokázali v dobe objavu vzťahu *Perióda – svietivosť* merať len do vzdialenosti 20 pc a o niečo neskôr do 40 pc, stačilo zmerať trigonometrické paralaxy všetkých dostupných cefeíd v našej Galaxii a mohli sme všetky vzdialené, aj v iných galaxiách využívať ako *štandardné sviečky* až do vzdialenosti 50 Mpc (megaparsec = milión parsekov). Objav H. Leawittovej zrazu zväčšil objem „merateľného“ vesmíru miliárdkrát!

Podobnou metódou je výpočet vzdialeností tých galaxií, v ktorých pozorujeme výbuchy supernov typu Ia. U tých je známe, že vo vrchole jasnosti dosahujú absolútnu magnitúdu  $M = -19,3 \pm 0,03$ . Pomocou modulu vzdialenosti potom dokážeme vypočítať ich vzdialenosť až do 1000 Mpc.

Spektroskopickým výskumom týchto galaxií sa ukázalo, že spektrálne čiary drvicej väčšiny z nich sú posunuté smerom k dlhovlnnej (červenej) oblasti spektra (takzvaný červený posun galaxií). Išlo o prejav Dopplerovho efektu (posunu vlnovej dĺžky spektrálnej čiary vzdalujúceho sa telesa). Americký astronóm Edwin Hubble v 30. rokoch XX. storočia

objavil závislosť „veľkosti“ červeného posunu v spektrách galaxií na ich vzdialenosti (určenej z pozorovaní periód cefeíd). Na základe merania polôh spektrálnych čiar v spektrách galaxií zistil, že s výnimkou niekoľkých galaxií z miestnej skupiny galaxií sa všetky galaxie od nás vzdiaľujú, a teda, že Vesmír sa rozpína. Navyše zistil, že rýchlosť vzdľaľovania galaxií je tým vyššia, čím väčšia je ich vzdialenosť. Toto bol prevratný objav vedúci k poznávaniu stavby a štruktúry Vesmíru v globálnom meradle.

Veľkosť červeného posunu  $z$  sa určuje zo vzťahu:

$$z = \Delta\lambda/\lambda,$$

kde  $\lambda$  je laboratórna vlnová dĺžka spektrálnej čiary a  $\Delta\lambda$  je rozdiel jej pozorovanej a laboratórnej vlnovej dĺžky ( $z$  je teda bezrozmerná veličina). Ak uvažujeme len dopplerovský červený posun, pre radiálnu rýchlosť  $v$  galaxie (v km/s) s červeným posunom  $z$  platí:

$$v = c \cdot z,$$

kde  $c$  je rýchlosť svetla (tiež v km/s). Hubble po výpočte vzdialeností tých galaxií, v ktorých sa nachádzali dobre pozorovateľné cefeidy, sformuloval vzťah, pomocou ktorého sa dajú počítať vzdialenosti  $R$  aj takých galaxií, v ktorých cefeidy nepozorujeme:

$$R = v/H,$$

kde  $v$  je pozorovaná rýchlosť galaxie v km/s a  $H$  je takzvaná Hubblova konštanta vyjadrená v (km/s)/Mpc (vyjadruje rýchlosť galaxie vzdialenej 1 Mpc =  $3,09 \times 10^{19}$  km). Vypočítame tak vzdialenosť pozorovanej galaxie v jednotkách Megaparsec (milión parsekov). Hodnota Hubblovej konštanty podľa najnovších pozorovaní Hubblovým kozmickým ďalekohľadom (HST) je  $H = 73,8 \pm 2,4$  (km/s)/Mpc, resp.  $H = 67,0 \pm 3,2$  (km/s)/Mpc, podľa toho, akú skupinu vesmírnych objektov na jej určenie použijeme.