

MERANIE VZDIALENOSTÍ VO VESMÍRE

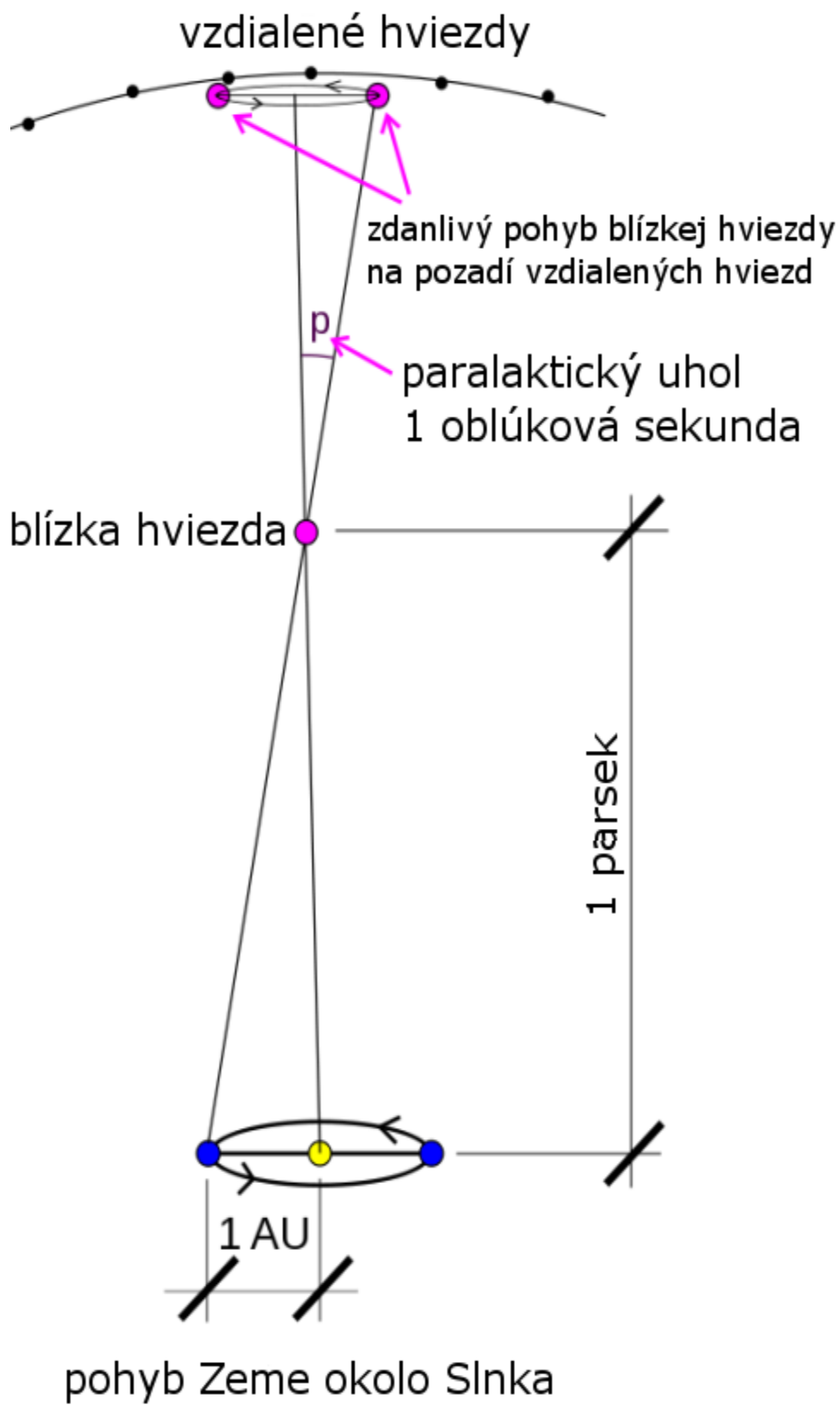
1. Astronomické jednotky na meranie vzdialeností vo vesmíre:

V každodennom živote na Zemi meriame vzdialenosti najčastejšie pomocou centimetrov, metrov alebo kilometrov. Vesmír je však obrovský, taký obrovský, že si to sotva dokážeme priamo a názorne predstaviť. Preto pri meraní vzdialeností vo vesmíre musíme používať iné merné jednotky, také, ktoré nám tieto obrovské vzdialenosti umožnia zachytiť a vyjadriť. Sú to:

a) astronomická jednotka (značka AU, z angl. *astronomical unit*) sa rovná strednej alebo priemernej vzdialenosti Zeme od Slnka, t. j. približne **150 miliónov kilometrov**

b) svetelný rok (značka ly, z angl. *light year*) je definovaný ako vzdialenosť, ktorú prejde svetlo vo vákuu za jeden juliánsky rok. Približne je to **10 biliónov kilometrov**. To znamená, že ak je nejaká hviezda vzdialená od Zeme 5 svetelných rokov, jej svetlo dorazí na Zem za päť rokov. Alebo ešte inak – danú hviezdu vidíme takú, aká bola pred piatimi rokmi a nie takú, aká je práve v tejto chvíli, keď si myslíme, že ju *priamo* pozorujeme. Rovnako zaujímavé je to, že v danom prípade už danú vzdialenosť nemeríme len ako (okamžitú) priestorovú jednotku, ktorú vieme „uchopiť“ jedným pohľadom, ale aj ako časovú, či ešte presnejšie, časopriestorovú jednotku, pri ktorej musíme počítať s plynutím času a „expandovaním“ priestoru.

c) parsek (značka pc, z angl. *parallax of one arcsecond*) je definovaný ako vzdialenosť, z ktorej sa javí veľká poloos zemskej dráhy (1 AU) pod uhlom 1" (jedna oblúčková sekunda). V literatúre sa stretávame často aj s jeho násobkami – tisícnásobkom (kiloparsek, kpc) alebo miliónnásobkom (megaparsek, Mpc). Pre nás je ale rovnako dôležité vedieť, že jeden parsek rovná sa 202 265 AU, čo je približne **3,26 ly**, čiže svetelného roka.



2. Príklady vesmírnych vzdialeností: už pri prvom priblížení, v rámci Slnčnej sústavy, vidíme, že aj v nej sú vzdialenosti medzi jednotlivými telesami v porovnaní s pozemskými vzdialenosťami **skutočne obrovské:**

planéta	vzdialenosť v AU
Merkúr	0,387
Venuša	0,723
Zem	1,000
Mars	1,524
Jupiter	5,203
Saturn	9,537
Urán	19,191
Neptún	30,069

Aby sme ešte lepšie priblížili vesmírne diaľavy našim pozemským predstavám, zostavme si akúsi postupnosť narastajúcich jednotiek. Pri každej z nich súčasne vyjadríme čas, za ktorý ju prejde svetlo. Nech priemer Zeme, ktorý meria 12 756 km, je našou prvou jednotkou dĺžky. Aby sme dostali druhú jednotku dĺžky – vzdialenosť zo Zeme k Mesiacu 384 400 km – musíme vedľa seba položiť 30 Zemí. Do vzdialenosti 1 AU sa nám zmestí 389 jednotiek dĺžky Zem – Mesiac.

Polomer planetárnej sústavy, t. j. vzdialenosť od Slnka k Plutu je 5 878 200 000 km, čo je zhruba 39 AU. Na dĺžku 1 svetelného roka by sme museli vedľa seba položiť 1610 polomerov slnečnej planetárnej sústavy. K najbližšej hviezde, Proxime Centauri, cestuje svetlo 4,28 roka, k najbližšej galaxii, Veľkému Magellanovmu mraku 163 000 rokov. Najvzdialenejší objekt, ktorý ešte vidíme na oblohe voľným okom, Veľkú hmlovinu v súhvezdí Androméda, je od nás vzdialený 2,9 milióna svetelných rokov. Hranice nášho pozorovateľného vesmíru siahajú až do vzdialeností 20 miliárd svetelných rokov, čo je skoro 9000 ráz ďalej ako Veľká hmlovina v Androméde. Ak by sme túto vzdialenosť určili v kilometroch, bolo by to 189 220 000 000 000 000 000 kilometrov.

Veľmi jasne to ukazuje nasledujúca tabuľka, v rámci ktorej platia aj takéto prevodové vzťahy:

$$1 \text{ ly} = 9,461 \times 10^{15} \text{ m} = 63\,241 \text{ AU} = 0,306\,8 \text{ pc}$$

$$1 \text{ pc} = 3,086 \times 10^{16} \text{ m} = 206\,265 \text{ AU} = 3,261\,633 \text{ ly}$$

príklad	vzdialenosť	čas letu svetla
zemský priemer	$12,756 \times 10^6$ m	0,04 s
Zem – Mesiac	$384,400 \times 10^6$ m	1,28 s
Zem – Slnko	$149,600 \times 10^9$ m	8,32 min
Slnko – Pluto	$5\,878,200 \times 10^9$ m	5,45 h
svetelný rok	$9,461 \times 10^{15}$ m	1 rok
k Proxime Centauri	$4,049 \times 10^{16}$ m	4,28 roka
k Veľkému Magellanovmu mraku	$1,542 \times 10^{21}$ m	163 000 rokov
k Hmlovine v Androméde	$2,744 \times 10^{22}$ m	2 900 000 rokov
k hraniciam pozorovaného vesmíru	$1,892 \times 10^{26}$ m	20 000 000 000 rokov

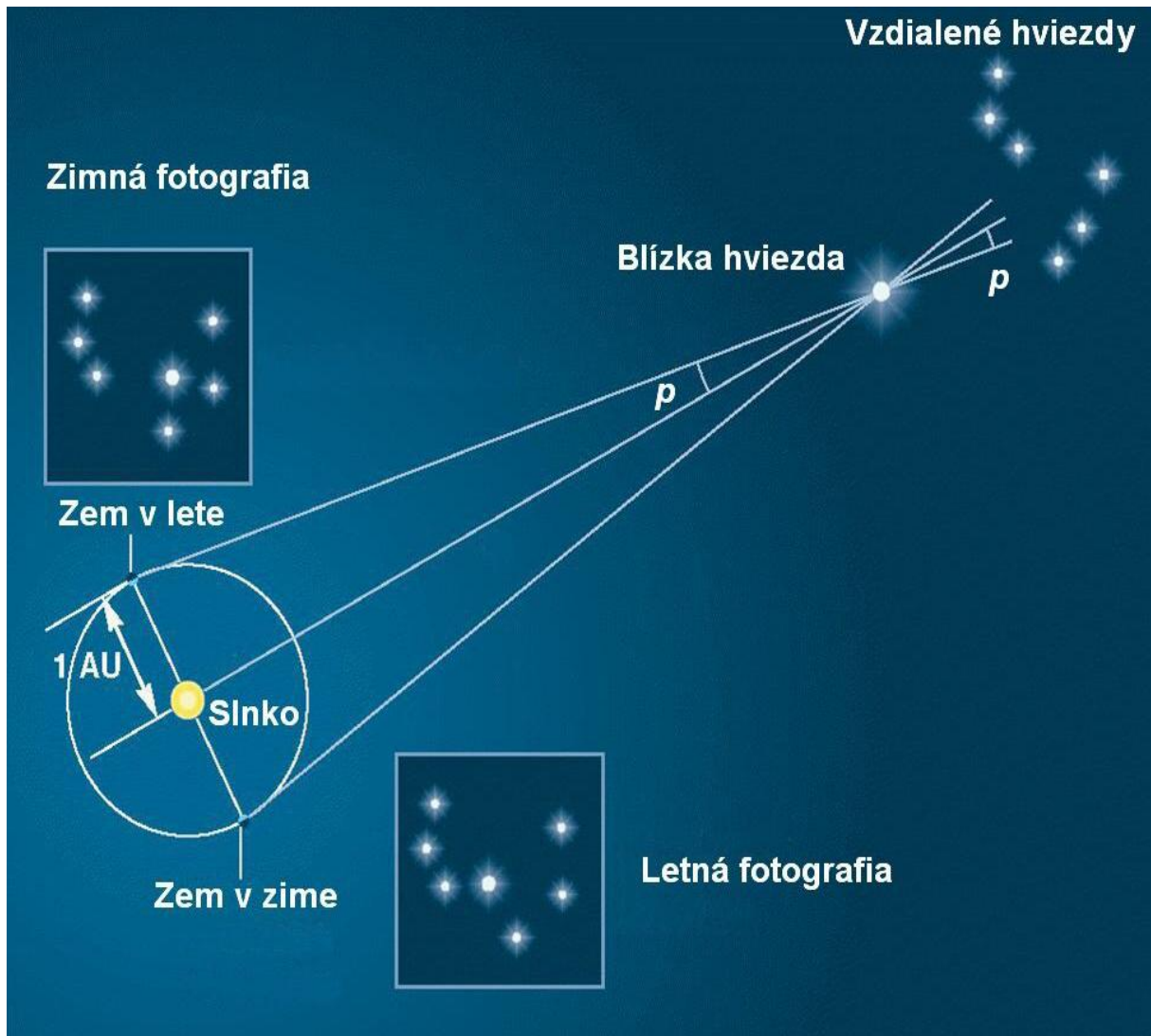
3. Meranie vzdialeností v rámci Slnčnej sústavy: Na predošlom stretnutí sme sa oboznámili s tým, ako Eratosténes vypočítal obvod Zeme pomocou jednej tyče, niekoľkých priateľov a matematického úsudku. Presné vypočítanie väčších, t. j. vesmírnych vzdialeností však už bolo nad sily starovekých Grékov. Aristarchos zo Sámu sa napríklad pokúsil určiť vzdialenosť Slnka od Zeme, keď najprv určil pomer vzdialeností Slnka a Mesiaca od Zeme tak, že zmeral veľkosť uhlu, pod ktorým tieto dve telesá vidíme zo Zeme v čase prvej štvrté Mesiaca. Z jeho meraní vyšiel uhol 87° , zatiaľ čo správna hodnota je $89^\circ 52'$. Táto nevelká chyba merania viedla však ku značnej chybe v určení pomeru vzdialeností, a tak Aristarchovi vyšlo, že Slnko je od Zeme len 19-krát ďalej ako Mesiac, zatiaľ čo v skutočnosti je pomer týchto vzdialeností rovný 390.

Aj vzdialenosť Zeme od Slnka (t. j. astronomická jednotka) bola ešte v Kopernikovej dobe odhadovaná na asi 7 miliónov kilometrov, čo je viac ako 20-krát menej než jej skutočná hodnota. O to zaujímavejšie boli a sú Eratosténove výpočty tejto vzdialenosti na základe zatmení Mesiaca, po ktorých Eratosténes dospel k výsledku 804 000 000 štadiónov. Vtedajší štadión mal pritom dĺžku 185 metrov, a tak sa dá povedať, že týmto svojim výsledkom, ktorý bol po prepočítaní 148 740 000 000 metrov sa tento skvelý astronóm veľmi priblížil v súčasnosti nameranej hodnote AU, ktorá je presne $149\,597\,870\,691 \pm 30$ m. K presnosti Eratosténových výpočtov sa

astronómovia začali približovať až v 18. storočí, keď v roku 1672 hodnotu AU prvýkrát odhadli Jean Richer a Giovanni Domenico Cassini meraním paralaxy planéty Mars z dvoch rôznych miest na Zemi a dospeli k číslu okolo 140 miliónov kilometrov.

V dnešnej dobe však používame oveľa presnejšie i spoľahlivejšie metódy merania vzdialeností v Slnčnej sústave, najmä meranie **radarom**, resp. **laserovým lúčom**. Metóda je založená na meraní časového oneskorenia medzi vyslaním signálu a zachytením jeho odrazu. Takto bola veľmi presne zmeraná vzdialenosť Venuše, ktorá je dobrým odrážačom rádiových vln. Vďaka programom Apollo a Lunochod, počas ktorých umiestnili na povrchu Mesiaca niekoľko kútových odrážačov laserových lúčov, môžeme dokonca merať polohu nášho súputníka **s centimetrovou presnosťou**. Táto metóda sa však dá použiť iba v prípade blízkych objektov v Slnčnej sústave. Za zmienku však určite stojí aj to, že hmotnosť Slnka sa pri jeho „horení“ veľmi pozvoľna znižuje, a preto obežná doba telesa v danej vzdialenosti zase zväčšuje, **v dôsledku čoho sa AU predlžuje asi o 1 centimeter ročne**.

- 4. Meranie vzdialeností ku hviezdám:** Ako už vieme, hviezdy sa nachádzajú v obrovských vzdialenostiach od Zeme. Merať ich vzdialenosti jednotkami vzdialeností, ktoré používame v Slnčnej sústave (výnimočne kilometre, častejšie astronomické jednotky) by bolo veľmi nepraktické. Slnku najbližšia hviezda Proxima Centauri je vzdialená asi 276 395-krát ďalej ako Zem od Slnka, teda 276 395 AU (astronomických jednotiek) a najvzdialenejšie hviezdy v našej galaxii sú od nás vzdialené približne 6×10^9 AU! Astronómovia preto používajú jednotku vzdialenosti parsek (pc). Najčastejšie používanou metódou merania vzdialeností hviezd v Galaxii je metóda trigonometrickej paralaxy. Táto dáva dosť presné výsledky **do vzdialenosti asi 50 pc**. Umelá družica Hipparcos už rozšírila interval presných hodnôt vzdialeností hviezd **na 150 pc** a zmerala vzdialenosti asi **120 000 hviezd**. V súčasnosti pripravovaná družica Gaia bude po roku 2012 schopná zmerať vzdialenosti **asi 100 miliónov hviezd** vzdialených asi **10 kpc**, teda **ďalej, ako leží stred našej galaxie**. Pre lepšie porozumenie problematike si však ešte raz uvedieme spôsob, akým sa meria vzdialenosť ku hviezdám, t. j. meranie vzdialenosti pomocou trigonometrickej paralaxy:



Obr. 1: Trigonometrická paralaxa p sa zistí po vyfotografovaní hviezdneho poľa s polročným odstupom. Vzdialené hviezdy nemenia svoju zdanlivú polohu na oblohe, zato blízka hviezda plynule mení svoju polohu počas obehu Zeme okolo Slnka.

Ako je teda zrejmé, najväčšia aktuálne dostupná základňa pre pozorovanie je obežná dráha Zeme okolo Slnka. Preto, aby sme zmerali ročnú paralaxu, musíme danú hviezdu pozorovať v dvoch obdobiach, keď sa Zem nachádza v opačných bodoch svojej dráhy, teda po šiestich mesiacoch. Takto sme schopní dosiahnuť zo Zeme rozlíšenie až stotiny uhlovej sekundy (0,01"). **Družica Hipparcos** určená na meranie polôh hviezd dosiahla rozlíšenie až 0,002", okrem iného aj preto, že nebola zaťažená nepokojom atmosféry.

6. Meranie vzdialeností ku galaxiám: Ako som uviedol vyššie, priame meranie paralaxy (t. j. zdanlivého posunu) hviezd je veľmi presná metóda, ale obmedzuje nás na relatívne malé vzdialenosti do desiatok parsekov. No na začiatku XX. storočia zistila americká astronómka Henrietta Swan Leavittová (1868 - 1921) pri štúdiu premenných hviezd v Malom Magellanovom mračne (LMC), že jeden typ pulzujúcich premenných hviezd vykazuje **vzťah medzi periódou pulzov a maximálnou dosahovanou jasnosťou**. Potom ak zmeriame periódu pulzov vzdialenej cefeidy a jej zdanlivú jasnosť, **môžeme určiť jej absolútnu jasnosť a z toho jej vzdialenosť**, pretože platí, že **čím dlhšia jeperióda, tým jasnejšia je daná premenná hviezda a naopak!**

Spôľahlivosť tejto metódy je už menšia, chyba dosahuje asi 10 až 25%. Neskôr sa tiež ukázalo, že je viac druhov pulzujúcich premenných hviezd, ktoré majú rôzne závislosti perióda-svietivosť a pre niektoré typy hviezd tento vzťah neplatí vôbec. Vďaka družici *Hipparcos* boli premerané vzdialenosti väčšieho množstva **blízkyh cefeíd** metódou **merania ich paraláx**, takže bola spresnená aj metóda cefeíd. Dosah metódy je do 20 Mpc. Edwin Hubble to aj využil pri meraní vzdialeností galaxií, v ktorých boli pozorované cefeidy.

7. Meranie vzdialeností k najvzdialenejším galaxiám pomocou tzv. červeného posunu: Pri určovaní vzdialenosti veľmi vzdialených galaxií je účinná najmä metóda červeného posunu. Rozborom spektra svetla svietiaceho telesa možno zistiť, či sa od nás objekt pozorovania vzdáľuje alebo či sa k nám približuje. Keď sa teleso približuje, javia sa vlnové dĺžky jeho žiarenia skrátané, takže objekt vyzerá o čosi *modrejší*. Naopak pri vzdáľovaní sa zdroja vlnové dĺžky sa predlžujú a objekt sa javí *červenší*. Tento jav - posun vo vlnových dĺžkach, resp. frekvenciách, v závislosti od pohybu zdroja je známy i pri šírení zvuku. Zvuk sirény je vyšší keď sa k vám sanitka približuje a hlbší, keď okolo vás prejde a vzdáľuje sa preč. Rozborom posunu vlnových dĺžok sa zaoberal po prvýkrát v roku 1842 Rakúšan Christian Ludwig Doppler (1803 - 1853) a vysvetlenie predniesol prvýkrát v Prahe.

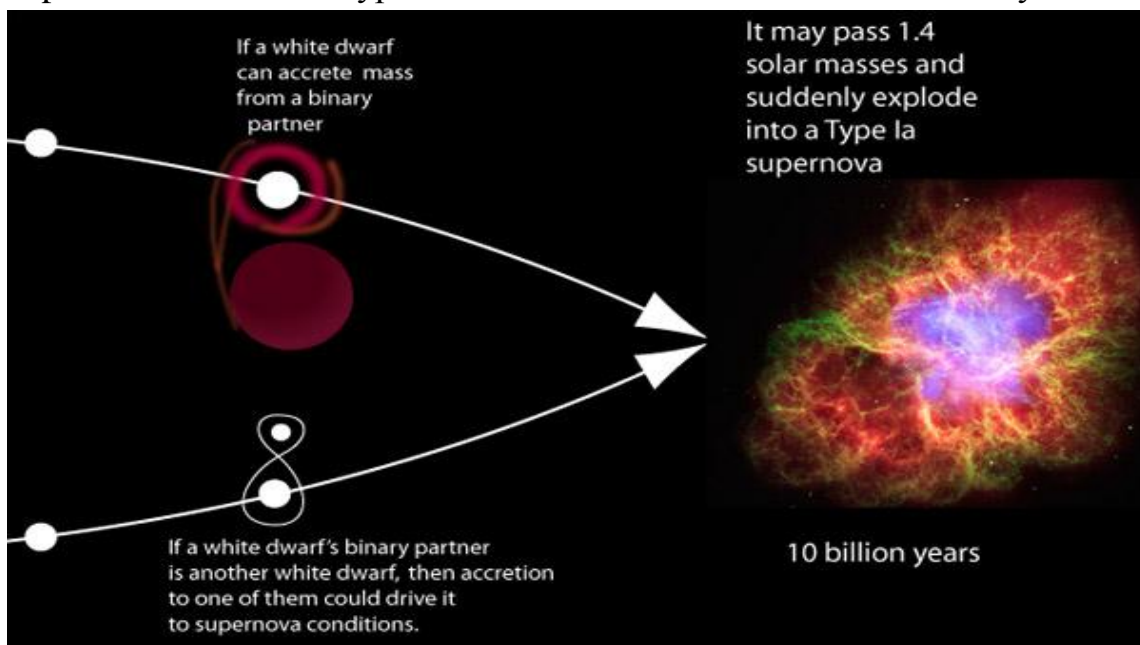
Metóda merania posuvu spektrálnych čiar vychádza z pozorovaní Edwina Hubbla, ktorý odvodil závislosť medzi vzdialenosťou blízkyh galaxií a Dopplerovým posuvom spektrálnych čiar k červenému koncu spektra. Platí vzťah:

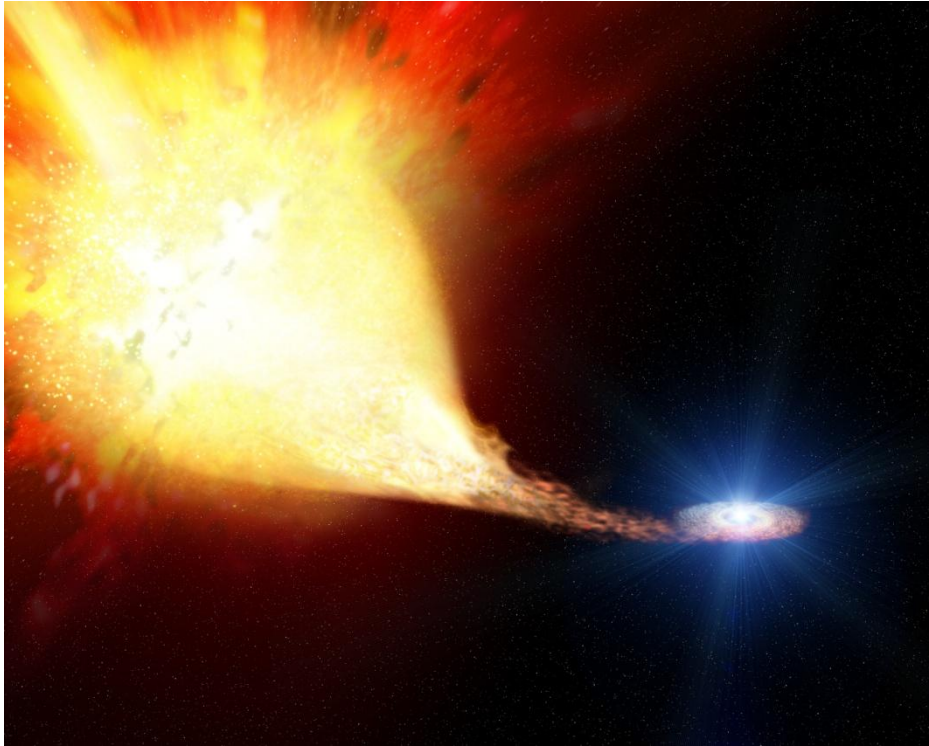
$$R = c.z/H$$

Kde R je vzdialenosť objektu vyjadrená v Mpc, c je rýchlosť svetla v km/s, z je zmeraný posuv spektrálnych čiar a H je Hubblova konštanta vyjadrujúca rozpínanie vesmíru. Problém je v tom, že v súčasnosti ešte nie je dostatočne presne zistená hodnota Hubblovej konštanty, niektoré pozorovania nasvedčujú hodnote okolo $50 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, zatiaľ čo iné výsledky hovoria o hodnote asi $80 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$. Súčasná najpresnejšia hodnota je odhadovaná na $H_0 = 65 (\pm 8) \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$.

8. Meranie vzdialeností k najvzdialenejším galaxiám pomocou tzv.

supernov: Poznáme niekoľko druhov supernov, ale pre astronómov sú z hľadiska meranie vzdialeností vo vesmíre najzaujímavejšie supernovy typu Ia. Ide o tzv. bielych trpaslíkov, ktorí po určitý čas priberajú hmotu zo svojho hviezdneho suseda (t. j. inej hviezdy) až do okamžiku, kým táto hmotnosť neprekročí určitú kritickú hranicu a biely trpaslík neexploduje a nezmení sa nakoniec na maličkú železnú hviezdičku. Počas svojej explózie však dokáže celé týždne **žiarit' rovnako jasne ako 4 miliardy slnk.** Preto je ho vidieť aj na obrovské vesmírne vzdialenosti a ako štandardná vesmírna sviečka alebo maják vystupuje aj preto, že všetci bieli trpaslíci vyžarujú úplne rovnaké množstvo svetla a aj vyhasínajú úplne rovnakým spôsobom. Supernova typu Ia uvoľňuje najväčšie množstvo energie medzi všetkými ostatnými známymi triedami supernov. Najvzdialenejší jednoduchý objekt, aký bol kedy vo vesmíre pozorovaný (galaxie a guľové hviezdokopy sa nepočítajú), bola práve supernova SN 1997ff typu Ia vzdialená viac ako 11 miliárd svetelných rokov.

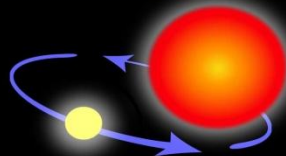




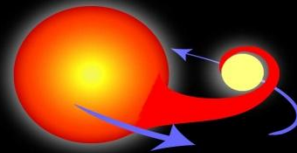
The progenitor of a Type Ia supernova



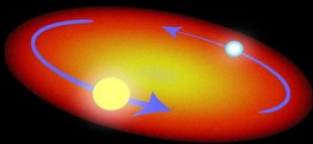
Two normal stars are in a binary pair.



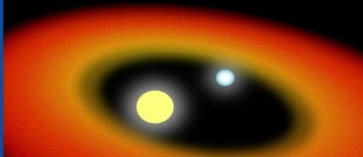
The more massive star becomes a giant...



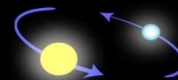
...which spills gas onto the secondary star, causing it to expand and become engulfed.



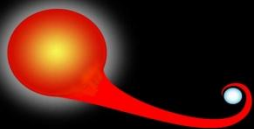
The secondary, lighter star and the core of the giant star spiral inward within a common envelope.



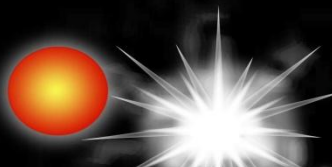
The common envelope is ejected, while the separation between the core and the secondary star decreases.



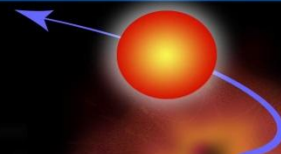
The remaining core of the giant collapses and becomes a white dwarf.



The aging companion star starts swelling, spilling gas onto the white dwarf.



The white dwarf's mass increases until it reaches a critical mass and explodes...



...causing the companion star to be ejected away.

Kontrolné otázky:

1. Koľkým miliónom kilometrov sa rovná 1 astronomická jednotka?
2. Na základe čoho bol definovaný jeden svetelný rok a koľko miliárd kilometrov má táto astronomická jednotka?
3. Koľko svetelných rokov má 1 parsek?
4. Koľko astronomických jednotiek je od Zeme vzdialený Jupiter?
5. A koľko Neptún?
6. Ako ďaleko je od nás najbližšia hviezda?
7. A ako sa nazýva? Putuje vesmírom sama, alebo má súputníkov?
8. Ako sa nazýva najvzdialenejší objekt, ktorý na oblohe vidíme voľným okom? A ako je ďaleko?
9. Ako dlho letí svetlo k Mesiacu a ako dlho k Slnku?
10. Pomocou akých prístrojov meriame dnes vzdialenosti k najbližším vesmírnym telesám (Venuši, Mesiacu a pod.)?
11. O koľko centimetrov ročne sa predlžuje 1 astronomická jednotka?
12. A prečo?
13. Ako sa nazýva družica, ktorá nám nedávno pomohla veľmi presne zmerať vzdialenosti až 120 000 hviezd?
14. Čo sú to cefeidy?
15. Aký je vzťah medzi periódou a absolútnou jasnosťou cefeíd?
16. Aké vlnové dĺžky (či farbu) má objekt, ktorý sa ku nám približuje, a aké objekt, ktorý sa od nás vzdďaluje?
17. Čo vyjadruje Hubblova konštanta?
18. Ako jasne dokáže žiariť biely trpaslík, resp. supernova typu Ia počas svojej explózie?
19. Čo z neho zostane po jeho explózii?
20. Ako ďaleko od nás bol objavený najvzdialenejší explodujúci biely trpaslík, čiže supernova typu Ia?