6. kapitola o měření vzdáleností

- definice metru v SI, nepraktické přikládání měřítka;
- **zatmění a zákryty nebeských těles:**

  ≈ 5. st. př. n. l. — Pýthagorás ze Samu (≈ 582–≈ 507 př. n. l.) z tvaru stínu při částečném zatmění ☾ usoudil na kulatý tvar ⊕ a určil, že ☾ je 2,5 krát menší než *kuželový stín* ⊕ ve vzdálenosti ☾ ⇒ ☾ je 3,5 krát menší než ⊕,

  úhlová velikost ☾ $30'$ ⇒ vzdálenost 30 průměrů ⊕

  OBR kuželového stínu ⊕ a úhlového průměru ☾

  ≈ 290 př. n. l. — Aristarchus ze Samu (≈ 310–≈ 230 př. n. l.) ve spisu „O velikostech a vzdálenostech Slunce a Měsíce“ užil geometrickou metodu pro výpočet vzdálenosti ⊙ a ☾ od ⊕.

  Pohledem na kotouček ☾ zjistil okamžik 1. čtvrti ⇒ úhel ⊕☾⊙ = 90°, změřil úhel ☾⊕⊙ = 87° ⇒ poměr vzdáleností ⊕–☾/⊕–⊙ = 1/20. Úhlová velikost ⊙ $30'$ ⇒ 5 krát větší než ⊕ (*ale* správná hodnota úhlu je 89° $51'$ a poměr 1/400).

  Vendelinus (1630) touž metodou, ale s pomocí dalekohledu, získal paralaxu ⊙ $15''$ (dvakrát menší než ve skutečnosti)
- **obvod ⊕ z délky vrženého stínu:**

  ≈ 235 př. n. l. — Eratosthenes z Kýrény (276–194 př. n. l.) ve spisu „O měření Země“ odvodil obvod ⊕ s dobrou přesností z vrženého stínu. Měření úhlu prováděl pomocí *skafé* při slunovratu v Alexandrii (a zjistil odchylku poledního stínu od svislice 7,2°), přičemž věděl, že v Syéné (dnešním Asuánu) bývá Slunce v nadhlavníku.

  ⇒ absolutní vzdálenosti a velikosti ☾ a ⊙.

  OBR skafé
- **3. Keplerův zákon** (Kepler 1619) ⇒ poměry *všech* vzdáleností ve sluneční soustavě; synodické → siderické periody:

$$\frac{360^\circ}{1\,\mathrm{yr}} - \frac{360^\circ}{P_\mathrm{sid}} = \frac{360^\circ}{P_\mathrm{syn}}$$

- **trigonometrická paralaxa** (denní, roční):

  ≈ 340 př. n. l. — Aristotelés ze Stageiry (384–322 př. n. l.) nepozoroval žádnou paralaxu ∗ ⇒ a) ∗ jsou příliš daleko, b) ⊕ je nehybná; tvrdí, že b) je pravděpodobnější.

  meteory (lze si snadno očima vyzkoušet, že jsou ve výškách ≈ 100 km nad zemí)

  komety (lze se přesvědčit, že jsou mimo atmosféru)

  začátek 17. st. — Johannes Kepler (1571–1630) použil Tychonova vizuální pozorování Marsu k odhadu jeho paralaxy, což se mu nepodařilo. Protože ale znal přesnost pozorování, usoudil, že Slunce musí být nejméně 3 krát dál než tvrdil Aristarchus.

  roční paralaxa ∗ 61 Cygni $0{,}3''$ (Bessel 1838), Vega (Struve 1838), α Centauri (Henderson 1839)

  temný průvodce Síria (Bessel 1844)

  denní paralaxa Marsu na základně Cayenne, Francouzská Gyana – Paříž (Richer & Cassini 1672) ⇒ paralaxa Slunce $\pi_\odot = 9{,}5''$ s chybou 30 %, první dobré měření

  přechody Merkuru a Venuše přes disk ⊙ (měření *rozdílů* dob trvání přechodů z různých observatoří): observační kampaň na dva přechody Venuše 1761 a 1769, které se opakují až po 120 letech ⇒ $\pi_\odot = 8{,}55''$ až $8{,}88''$; přepočet Enckeho (1835) $8{,}57'' \pm 0{,}04''$

  Galle (1872) navrhnul pozorovat asteroidy kvůli jejich bodovým obrazům, měření Iris, Victoria a Sappho v letech 1888 a 1889 poskytlo hodnotu $\pi_\odot = 8{,}802''$.

  paralaxy blízkozemních asteroidů: (433) Eros byl objeven v roce 1898 a měřen při opozicích v letech 1900 a pak 1930–31, kdy se pozorovací kampaně účastnilo 40 observatoří ⇒ $\pi_\odot = 8{,}790'' \pm 0{,}001''$ (Spencer Jones 1942)

  astrometrické družice Hipparcos (10^{-3} arcsec, 1 000 pc) a GAIA (10^{-6} arcsec);

  OBR přechodů Venuše, Hipparcos, GAIA, přesnost astrometrie
- **dynamické poruchy** pohybu ☾ kolem ⊕ vlivem ⊙ (Hanson 1857, 1863) ⇒ $\pi_\odot = 8{,}92''$

  poruchy Marsu a Venuše ⊕ působené ⊕ (Leverrier, ≈ 1860) ⇒ $8{,}95''$ (tj. hodnota odlišná od paralaktických metod)

  poruchy Erosu ⇒ $M_\oplus$ ⇒ $\pi_\odot = 8{,}799''$ (Noteboom 1921); s využitím perturbací od všech planet $8{,}79402'' \pm 0{,}00012''$ (Lieske 1966)
- **aberace světla:**

  Foucault a Fizeau (1850) měřil rychlost světla laboratorně a aberaci ∗ v dalekohledu ⇒ oběžná rychlost ⊕ ⇒ $\pi_\odot = 8{,}8''$

  Michelson & Newcomb (≈ 1890) obdrželi $8{,}80'' \pm 0{,}01''$
- **„rychlost krát čas“:** vysoká relativní přesnost měření času $\sim 10^{-13}$

  laser a koutový odražeč (tři zrcadla/stěny hranolu v základních rovinách)

  laserová skvrna na ☾ o průměru 7 km

OBR koutového odražeče na Měsíci a pozemských stanic McDonald (USA), Calern (OCA, Francie)

radar, radarová rce ($\propto r^{-4}$):

$$P_r = \frac{P_t G_t A_r \sigma F^4}{(4\pi)^2 r_t^2 r_r^2} \to \frac{P_t G_t A_r \sigma}{(4\pi)^2} r^4 \,,$$

kde P_r je přijímaný výkon, P_t vysílací výkon, G_t zisk antény, A_r efektivní plocha cíle, F faktor šíření, r_t vzdálenost vysílače od cíle, r_r vzdálenost přijímače od cíle.

odrazy od Venuše (Victor & Stevens 1961, Campbell et al. 2001), Merkuru, planetek

– **pohybové $*$kupy** (Hyády), vertex (Boss 1908, Perryman et al. 1998);

$$\alpha_C = 96{,}6^\circ,\ \delta_C = +5{,}8^\circ$$

$$[\mu]_{''/\mathrm{yr}} = \frac{[v_t]_{\mathrm{km/s}}}{4.74047[d]_{\mathrm{pc}}} = \sqrt{(\mu_\alpha \cos\delta)^2 + \mu_\delta^2}$$

$$v_t = v_r \operatorname{tg}\theta$$

tangenciální rychlost v_t nemohu měřit přímo v km/s, ale vypočítám jí z radiální v_r (u které to lze ze spektra), protože znám úhel θ mezi hvězdokupou a úběžníkem!

$$\cos\theta = \sin\delta \sin\delta_C + \cos\delta \cos\delta_C \cos(\alpha - \alpha_C)$$

(kosínová věta ve sférickém trojúhelníku)

OBR Hyád a vertexu na obloze

– **dynamická paralaxa dvoj$*$:**

$$\frac{a^3}{P^2} = \frac{G}{4\pi^2}(M_1 + M_2)$$

hmotnosti M odhadnu ze spekter

$$\pi'' = \alpha''(M_1 + M_2)^{-\frac{1}{3}} P^{-\frac{2}{3}}$$

slabá závislost na M

– **luminozitní vzdálenost** $F = \frac{L}{4\pi r^2}$

např. hvězdy stejného spektrálního typu mají stejné M a L (s rozlišením obrů a trpaslíků podle tlakového rozšíření spektrálních čar), maximální jasnost nov v galaxii nebo charakteristický průběh světelné křivky

např. novy v M 31 mají $m_{\max} = 16$ až 17 mag, podle měření v MW je $M = -6$ až -7 mag $\Rightarrow$ *modul vzdálenosti* $m - M = 24$ mag

Pogsonova rovnice

$$m_2 - m_1 = -2{,}5 \log \frac{E_2}{E_1}$$

$$m - M = -2{,}5 \log \frac{L/r^2}{L/(10\,\mathrm{pc})^2} = -5 \log \frac{10\,\mathrm{pc}}{r} = -5(1 - \log[r]_{\mathrm{pc}})$$

$\Rightarrow \log[r]_{\mathrm{pc}} = 0{,}2(m - M) + 1 = 5{,}8$; $r = 600$ kpc

Je zdroj *izotropní*? Zdroje záblesků gama (GRB) zřejmě ne!

OBR HR diagram, spektrální typy, animace GRB

– **cefeidy, vztah perioda–svítivost:**

$M_V = a + b \log[P]_{\mathrm{dny}}$, $a = -1{,}7$ mag, $b = -2{,}54$ mag pro typ I (klasické cefeidy)

periodické změny opacity nitra $*$ kvůli přechodům mezi jednou a dvakrát ionizovaným héliem:

HeII	$\leftrightarrow$	HeIII
velká opacita,		malá opacita,
absorpce záření,		záření uniká,
ionizace HeII $\to$ HeIII,		rekombinace HeIII $\to$ HeII,
cefeida svítí málo,		cefeida svítí hodně,
roste T a p		klesá T a p

Vrstva, kde probíhají přechody hélia, je *pod povrchem*, po ionizaci a poklesu opacity tlak *procházejícího* záření rozepne vrstvy *nahoře*.

změna poloměru cefeid o $\sim 10\,\%$ (typ I) nebo $\sim 50\,\%$ (typ II)

Leavittová (1912) — vztah P–L pro cefeidy v Magellanově oblaku (všechny jsou stejně daleko), ale nebyly tehdy ještě známy podobné $*$ RR Lyr, W Vir

OBR světelné křivky cefeid

– **supernovy typu Ia:**

akrece na bílého trpaslíka (WD), překročení Chandrasekharovy meze $1{,}44\,M_\odot$, „standardní svíčky“;

SN Ia nemají ve spektru čáry vodíku ani hélia

$M_V = -19{,}30 + 5\log(H_0/60)$

disperze jen 0,3 mag, $B - V \doteq 0\,\mathrm{mag}$

OBR spektrum SN Ia a II

- **Tullyho–Fisherův vztah** (Tully & Fisher 1977):

  šířka čáry Δf na 21 cm $\Rightarrow$ rotační rychlost ΔV – svítivost pro spirální galaxie

  $\mu_0 = 3{,}5\,\mathrm{mag} + 6{,}25\log\Delta V + m_{\mathrm{pg}} \pm 0{,}3\,mag$

- **rozdělení poloh objektů na obloze** a jejich korelace se známými strukturami

  OBR rovina ekliptiky, galaxie, záblesky γ v izotropním vesmíru

- **Hubbleův zákon** $v = Hd$ (Slipher 1918, Hubble 1925, 1928),

  Hubbleova konstanta $H \doteq 70\,\mathrm{km\cdot s^{-1}\cdot Mpc^{-1}} \doteq 2{,}5\,\mathrm{cm/rok/vzdálenost\ Měsíce}$,

  rudý posuv $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \doteq \frac{v}{c}$ pro $v \ll c$, relativisticky $(z+1)^2 = \frac{c+v}{c-v}$;

  OBR schéma rozpínání (kdybychom byli jinde, je rozpínání stejné), Mt Wilson