



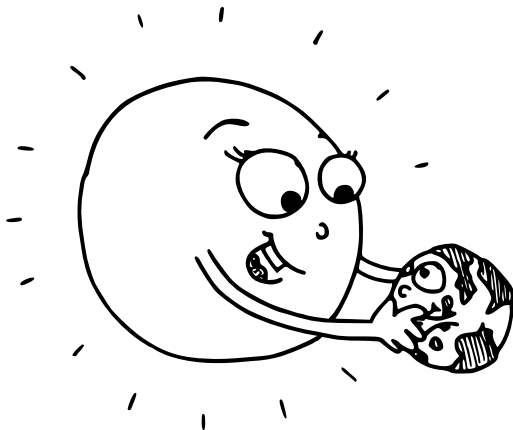
Výfučení: Vzdálenosti ve vesmíru

Není jednotka jako jednotka

Na měření rozměrů nebo vzdáleností různých objektů je nutné zavést nějakou *jednotku* vzdálenosti. Jednou ze základních jednotek soustavy SI je metr. Metr spolu s jeho odvozenými jednotkami (milimetr, kilometr, atd.) používáme na běžná měření různých věcí na Zemi. Navíc jsou s jeho pomocí vyjádřeny i další důležité odvozené jednotky SI (například jednotka rychlosti kilometr za hodinu).

Bohužel Země samotná je vůči velikostem a vzdálenostem objektů, které pozorujeme ve vesmíru, strašně malá. Jenom Slunce má poloměr přibližně stokrát větší než Země; Zemi samotnou bychom mohli mezi ní a Slunce naskládat asi dvanáct tisíc krát. K měření těchto a daleko větších vzdáleností je použití metrů velmi nepraktické. Nejen kvůli jednoduché představitelnosti, ale i z důvodu zpřehlednění matematických operací zavádíme nové jednotky vzdálenosti.

Tento díl Výfučení bude vyprávět právě o těchto nových jednotkách. A nejen to – povíme si i o tom, jakými metodami lze obrovské vzdálenosti ve vesmíru měřit.



Astronomická jednotka

Ukazuje se, že pro měření vzdáleností v naší Sluneční soustavě je vhodné používat jako základní jednotku vzdálenost Slunce od Země. Mnozí víte, že taková vzdálenost se ale v průběhu roku mění. Proto se pro definici tzv. astronomické jednotky (značka AU nebo také au z angl. astronomical unit) používá *střední* vzdálenost Země od Slunce. Platí tedy

$$1 \text{ au} = 149\,597\,870\,700 \text{ m}.$$

V praxi se používá zaokrouhlená, lehce zapamatovatelná hodnota $1 \text{ au} = 150 \cdot 10^6 \text{ km}$.

Jak již bylo zmíněno, astronomická jednotka je užitečná například k měření vzdáleností planet od Slunce. Třeba Jupiter je od Slunce vzdálen 5,2 au, nejvzdálenější planeta Neptun 30 au. Na druhou stranu, poloměr Slunce je méně než 0,005 au, k jeho vyjádření proto stále používáme kilometry.

Světelný rok

Pro vyjadřování vzdálenějších objektů, například okolních hvězd, je přirozenou jednotkou světelný rok (značka ly z angl. light year). Jeden světelný rok je vzdálenost, kterou urazí světlo ve vakuu za jeden juliánský rok, tedy přesně 365,25 dn. V přepočtu platí

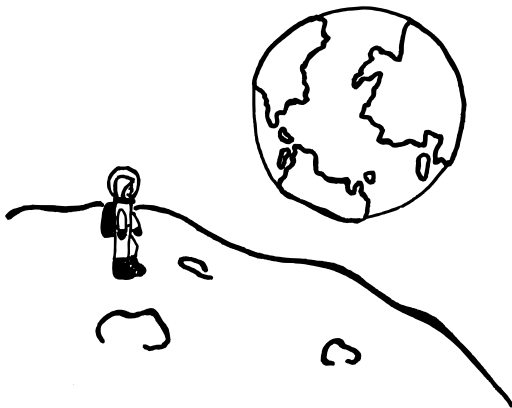
$$1 \text{ ly} \doteq 9,46 \cdot 10^{12} \text{ km} \doteq 63\,200 \text{ au}.$$

Ku příkladu jedna z možných „hranic“ naší Sluneční soustavy, Oortův oblak, je vzdálen přibližně 1,6 ly a naše nejbližší hvězda po Slunci, Proxima Centauri, se nachází ve vzdálenosti přibližně 4,2 ly. Většina objektů, které můžete vidět na noční obloze, je vzdálených o mnoho více. Střed naší galaxie je vzdálen 26 000 ly a nám nejbližší galaxie (galaxie M31 v Andromedě) je vzdálena až $2,5 \cdot 10^6$ ly.

Vzdálenost měřená ve světelných rocích zároveň vypovídá i o době, po kterou k nám světlo, které pozorujeme, putovalo. Ve skutečnosti sledujeme vzdálené objekty mladší, než ve skutečnosti jsou. Extrémním příkladem je supernova ASASSN-15lh v souhvězdí Indiána, která je vzdálená $3,8 \cdot 10^9$ ly. To znamená, že hvězda, která předtím zabírala její místo, ukončila svůj život přibližně v době, kdy naše Země vznikala, přesto však tuto událost pozorujeme až teď.

Paralaxa a parsec

Pod pojmem *paralaxa* rozumíme rozdíl úhlů, pod kterým pozorujeme nějaký objekt vůči posuvu pozorovatele. Na základě známého posunutí a změřeného úhlu pak můžeme určit vzdálenost pozorovaného objektu.

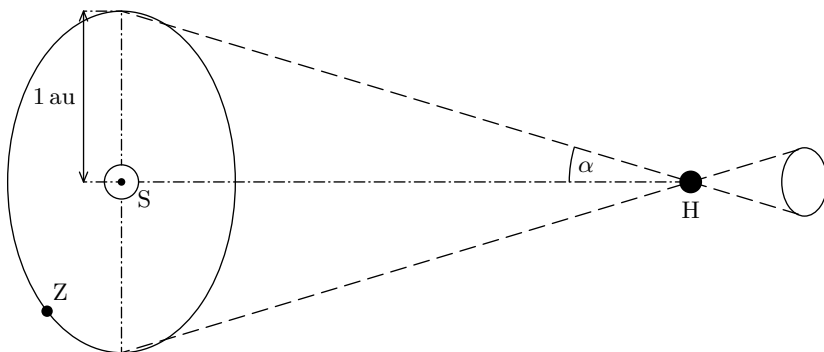


Měření pomocí paralaxy si ukážeme na jednoduchém příkladu. Představme si, že na louce pozorujeme vzdálený strom. Pak si vezmeme kompas a zapíšeme si úhlovou polohu stromu vůči severu. Pak se projdeme ve směru kolmém na naši spojnici se stromem a následně strom opět zaměříme kompasem. Rozdíl změřených úhlů je paralaxa stromu. Řekněme, že změřená paralaxa byla $\alpha = 2^\circ$ a ušlá vzdálenost $x = 3$ m. S pomocí trigonometrické funkce tangens pak lze vyjádřit vzdálenost stromu d jako

$$d = \frac{x}{\text{tg } \alpha} = \frac{3 \text{ m}}{\text{tg}(2^\circ)} \doteq 86 \text{ m}.$$

Paralaxy, které měří astronomové, jsou často mnohem menší, než 1° . Pro tak malé úhly platí s dostatečnou přesností i vztah $d = x/\alpha$, přičemž ale úhel α musí být vyjádřen v radiánech.¹

Jak tedy takové měření hvězdných paralax probíhá? Abychom dosáhli měřitelné paralaxy, změna polohy pozorovatele musí být o mnoho větší, než pouhá procházka po poli. Největší pohyb, který Země periodicky vykonává vůči hvězdám, je obíhání okolo Slunce. Této metodě se říká *roční paralaxa* a uvažuje se paralaxa odpovídající posunutí o 1 au. Jinak řečeno, roční paralaxa je též úhel, pod kterým vidíme z pozorované hvězdy vzdálenost 1 au.



Obr. 1: Schéma roční paralaxy. Písmeny S, Z a H je (v tomto pořadí) označeno Slunce, Země a (v nesprávném měřítku) hvězda. Zdánlivý pohyb hvězdy po elipse pozorujeme vzhledem k ještě vzdálenějším objektům, jejichž roční paralaxa je zanedbatelně malá.

Právě z měření paralaxy se zavedla i nová jednotka vzdálenosti – parsec (značka pc). Jeden parsec je vzdálenost bodu od Slunce, který při kolmém posuvu na tuto vzdálenost o 1 au pozorujeme s paralaxou $1''$ (jedné úhlové vteřiny, tzn. $1/3\,600$ stupně). Lze vypočíst, že platí

$$1 \text{ pc} \doteq 3,08 \cdot 10^{13} \text{ km} \doteq 206\,265 \text{ au} \doteq 3,26 \text{ ly}.$$

V parsecích se měří vzdálenosti blízkých hvězd. Už zmiňovaná Proxima Centauri je vzdálena asi 1,3 pc a Polárka je vzdálena přibližně 99 pc. V astronomii se ale také používají i násobné jednotky, například kiloparsec ($1 \text{ kpc} = 10 \cdot 10^3 \text{ pc}$) a megaparsec $1 \text{ Mpc} = 10 \cdot 10^6 \text{ pc}$). V takových jednotkách se už měří vážně velké vzdálenosti. Taková galaxie v Andromedě je vzdálena asi 0,78 Mpc.

Měření velkých vzdáleností

Problém měření paralaxy popsané výše spočívá v tom, že běžné roční paralaxy hvězd jsou menší, než $1''$. Jenom paralaxa Proximy Centauri je pouze $0,77''$, s rostoucí vzdáleností hvězd paralaxa dále klesá. Z důvodu konečného rozlišení dalekohledů jsme omezeni na měření paralax hvězd, které jsou vzdáleny maximálně asi 1 600 ly.

Astronomové proto vymysleli i jiné metody, jak zjistit vzdálenosti k mnohem vzdálenějším objektům, ať už k hvězdám v naší Galaxii nebo k okolním mlhovinám, hvězdokupám atd.

¹Radián je, podobně jako stupeň, jednotkou úhlové velikosti. Mezi radiány a stupni platí převodní vztah $1 \text{ rad} = 57^\circ$. Více se o radiánech dočtete v dalším díle Výfučení.

Hvězdná velikost

Hvězdná velikost nebo hvězdná magnituda m je veličina popisující pozorovanou *jasnost* hvězd. Hvězdné velikosti pozorované ze Země říkáme *zdánlivá* hvězdná velikost. Historicky je tato veličina zavedena tak, že jasné hvězdě Vega v souhvězdí Lyry byla přiřazena velikost 0. Objekty, které se ze Země jeví jasnější než Vega, mají pak hvězdnou velikost zápornou, a objekty, které jsou méně jasné, mají hvězdnou velikost kladnou. Kupříkladu Slunce má zdánlivou hvězdnou velikost asi $-26,7$, zatímco hvězdy na hranici rozlišitelnosti lidským okem nabývají hvězdné velikosti 6.

Kromě zdánlivé velikosti zavádíme i *absolutní* hvězdnou velikost M . Ta je definována jako zdánlivá velikost hvězdy, kterou pozorujeme ze vzdálenosti 10 pc. Absolutní hvězdná velikost Slunce je pouze 4,8.

Fakt, že s rostoucí vzdáleností pozorovatele od hvězdy klesá její zdánlivá hvězdná velikost, popisuje tzv. Pogsonova rovnice

$$m - M = 5 \log \left(\frac{d}{10 \text{ pc}} \right),$$

kde d je vzdálenost hvězdy (typicky udávaná v parsecích), funkci \log říkáme logaritmus² Rovnici lze upravit a vyjádřit z ní vzdálenost

$$d = 10 \text{ pc} \cdot 10^{\frac{m-M}{5}}.$$

Základem pro měření vzdáleností pomocí hvězdných velikostí je poznatek, že pro různé typy hvězd lze *odhadnout* jejich absolutní hvězdnou velikost na základě jejich teploty, vyzařovaného spektra, věku a podobně. Pozorujeme-li ze Země blízkou hvězdu, jejíž vzdálenost určíme například pomocí paralaxy, z Pogsonovy rovnice lze určit její absolutní hvězdnou velikost, a tudíž i vzdálenosti podobných, ale vzdálenějších hvězd. Těto metodě říkáme *spektroskopická paralaxa* a je použitelná do vzdálenosti asi 10 000 pc.

Cefeidy

Cefeidy jsou speciálním typem hvězd, jejichž hvězdná velikost se mění v pravidelných intervalech. Periody těchto změn se pohybují v jednotkách nebo desítkách dnů. Na začátku 20. století Henrietta Leavittová zjistila, že mezi střední hodnotou hvězdné velikosti cefeid M_C a jejich periodou P vyjádřené ve dnech platí vztah

$$M_C = -2,78 \log(P) - 1,35.$$

Z měření period a jasností cefeid pak lze nejen určit jejich vzdálenost, ale vzhledem k jejich výrazné jasnosti i vzdálenost objektů v jejich okolí. Typicky se pomocí jasných cefeid měří vzdálenosti blízkých galaxií.

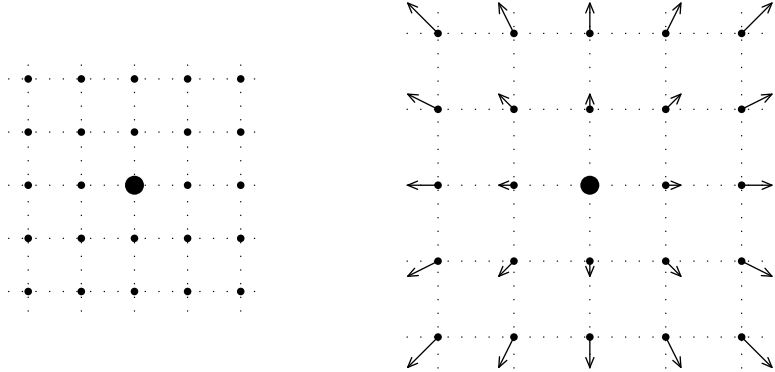
²Více se o logaritmu můžete dozvědět ve Výfučení 5. série 3. ročníku: <http://vyfuk.mff.cuni.cz/ulohy/vyfučení>.

Rozpínání vesmíru a červený posuv

Ve dvacátých letech 20. století se (teoreticky i experimentálně) zjistilo rozpínání vesmíru, které má za následek vzájemné vzdalování většiny galaxií. Platí přitom, že rychlost vzdalování v je úměrná vzdálenosti d , tzv. Hubbleův zákon

$$v = H_0 d,$$

Kde $H_0 \approx 68 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}\cdot\text{Mpc}^{-1}$ je Hubbleova konstanta. Právě Edwin Hubble ji poprvé experimentálně změřil. Její obskurní jednotku chápeme tak, že galaxie, která se nachází ve vzdálenosti 1 Mpc, se od nás vzdaluje rychlostí $68 \text{ km}\cdot\text{s}^{-1}$.



Obr. 2: Rozpínání vesmíru si lze představit pomocí natahování dvourozměrné mřížky. Všimněte si, že při jejím natahování se vzdálenější body pohybují rychleji než ty blízké, což je také podstata Hubbleova zákona.

Vidíme tedy, že ze známé hodnoty rychlosti vzdalování jsme schopni vypočítat odpovídající vzdálenost. Tuto rychlost musíme měřit, a to nejčastěji tzv. *červeným posuvem*. Červený posuv je důsledek Dopplerova jevu, který říká, že vlnová délka světla, jehož zdroj se od pozorovatele vzdaluje rychlostí v , se zvětší. Zvětšení vlnové délky světla například znamená, že původně žlutá hvězda začne svítit více do oranžova.

Matematicky červený posuv značíme z a platí pro něj

$$z = \frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \sqrt{\frac{1 + \frac{v}{c}}{1 - \frac{v}{c}}},$$

kde λ je pozorovaná vlnová délka záření (pozorujeme například vyzařování charakteristických prvků: vodíku, helia, atd.), λ_0 je odpovídající vlnová délka stojícího zdroje (kterou změříme na stejných prvcích v laboratoři) a $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ je rychlost světla.

Měření červeného posuvu umožňuje astronomům měřit i ty největší vzdálenosti ve vesmíru a dokonce, díky měření červeného posuvu zbytkového záření po Velkém třesku, i jeho věk.

Korespondenční seminář Výfuk je organizován studenty a přáteli MFF UK. Je zastřešen Oddělením pro vnější vztahy a propagaci MFF UK a podporován Katedrou didaktiky fyziky MFF UK, jejími zaměstnanci a Jednotou českých matematiků a fyziků.

Toto dílo je šířeno pod licencí Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported.
Pro zobrazení kopie této licence, navštivte <http://creativecommons.org/licenses/by-sa/3.0/>.