

Úloha: Měření vzdálenosti supernovy SN 1987A

Jméno: Artem Goshkov

Datum odevzdání: 4.04.23

- Nejprve spočítáme úhlový průměr vnitřního prstence, tedy takový, jak jej pozorujeme ze Země. Využijeme k tomu hvězdy 1, 2, 3 v obrázku 7. V tabulce 7 jsou udány jejich vzdálenosti v úhlových vteřinách. Změřte vzdálenost hvězd na snímku. Zapište do tabulky a spočítejte odpovídající měřítko snímku.

Tabulka 7: Měřítko snímku na obrázku 7.

| | Vzdálenost [mm] | Vzdálenost ["] | Měřítko ["/mm] |
|----------------------|-----------------|----------------|----------------|
| Hvězdy 2 ke hvězdě 1 | 94,3 | 3.0 | 0,03181 |
| Hvězdy 3 ke hvězdě 1 | 52,7 | 1.4 | 0,02657 |
| Hvězdy 3 ke hvězdě 2 | 145,1 | 4.3 | 0,02963 |

$$(0,029 \pm 0,03) \frac{''}{\text{mm}}$$

- Úhel mezi rovinou prstence a rovinou kolmou na zorný paprsek ze Země se nazývá inklinace nebo inklinanční úhel i . Pokud by inklinace byla nulová nebo rovna 180° , pak bychom viděli prstenec kruhový. Kdyby byla rovna 90° , pozorovali bychom místo prstence jen úsečku. Pro všechny ostatní hodnoty z intervalu $(0^\circ, 180^\circ)$ má pro nás prstenec tvar elipsy. Změření velké a malé osy vnitřního prstence nám pomůže určit nejen průměr prstence, ale také velikost inklinace v případě prstence u SN 1987A.

Na obrázku 7 změřte velikost malé a velké osy vnitřního jasného prstence. Měření vztáhněte ke středu jasného pásu vnitřního prstence, vypočtete průměry a příslušné chyby. Vše zapište do tabulky 8.

Tabulka 8: Velikost prstence.

| Měření | Velká osa [mm] | Malá osa [mm] |
|--------|----------------|---------------|
| 1 | 26,8 | 21,8 |
| 2 | 26,8 | 20,1 |
| 3 | 26,6 | 20,4 |
| 4 | 27,0 | 19,7 |
| 5 | 26,3 | 20,1 |
| průměr | 26,7 | 20,4 |
| chyba | 0,1 | 0,4 |

$$\begin{aligned}
 0^\circ &\rightarrow a - b = 0 \\
 90^\circ &\rightarrow a - b = a \\
 a - b &\approx (26,7 - 20,4) \text{ mm} = 6,3 \text{ mm} \\
 \frac{a}{90^\circ} &= \frac{26,7 \text{ mm}}{90^\circ} = 0,2967 \frac{\text{mm}}{^\circ} \\
 i &= 2 \cdot \frac{6,3 \text{ mm} \cdot 1^\circ}{0,2967 \text{ mm}} = 42,46^\circ \\
 u(i) &\approx 2,10^\circ
 \end{aligned}$$

S pomocí obrázku 8 spočtete inklinaci včetně její chyby. Inklinace prstence SN 1987A je $(42,4 \pm 3)^\circ$.

- Abychom určili vzdálenost supernovy SN 1987A potřebujeme znát skutečný průměr d prstence v rovině kolmé na zorný paprsek. Výbuch supernovy vyvolá silný záblesk, který se do okolí šíří rychlostí světla. V určitém čase t sekund po výbuchu supernovy, záblesk osvětlí prstenec. Když předpokládáme, že je prstenec přesně kruhový

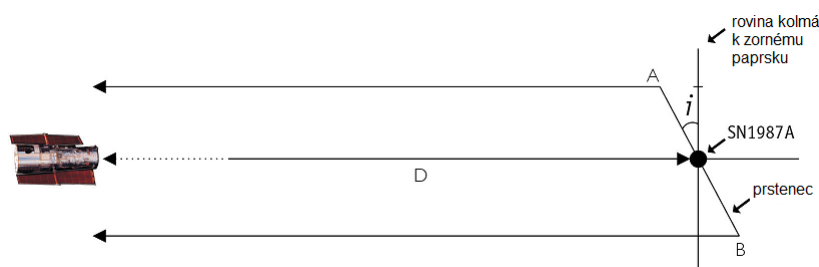
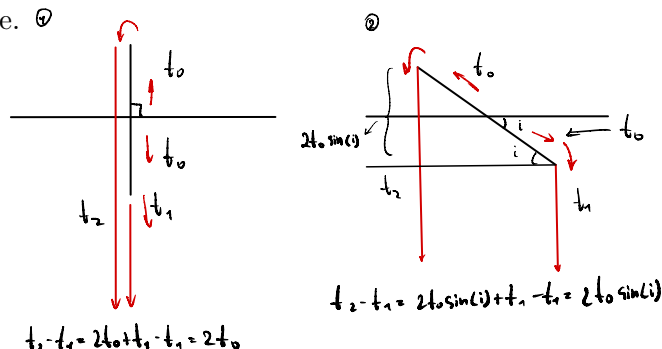


Obr. 8: Určení inklinčního úhlu. Představte si, že se na soustavu díváme ze strany, takže vidíme prstenec pod inklinčním úhlem i vzhledem k rovině kolmé na zorný paprsek. Inklinční úhel můžeme určit z jednoduchého vztahu mezi velkou a malou osou pozorované elipsy. Vyznačeny jsou nejbližší část prstence A a nejvzdálenější část B.

a jeho střed souhlasí se středem supernovy, pak by měly být všechny části prstence při pohledu ze supernovy osvětleny současně. Jenže, při pohledu ze Země, při inklinaci $i \neq 0^\circ$, resp 180° se nejdříve zjasní k Zemi nejbližší část prstence, protože trajektorie světla z této části prstence je k Zemi nejkratší. Ale teprve až je vidět ze Země celý prstenec osvětlený, dosáhne světelná křivka prstence svého maxima. Rozdíl mezi nejbližšími a nejvzdálenějšími body prstence může být určen z prodlevy mezi těmito jevy na světelné křivce. Určete z obrázku 11 dobu mezi prvním záznamem osvětlení prstence a okamžikem maxima světelné křivky, kdy záblesk ze supernovy pro pozorovatele na Zemi dospěl k nejvzdálenějším částem prstence.

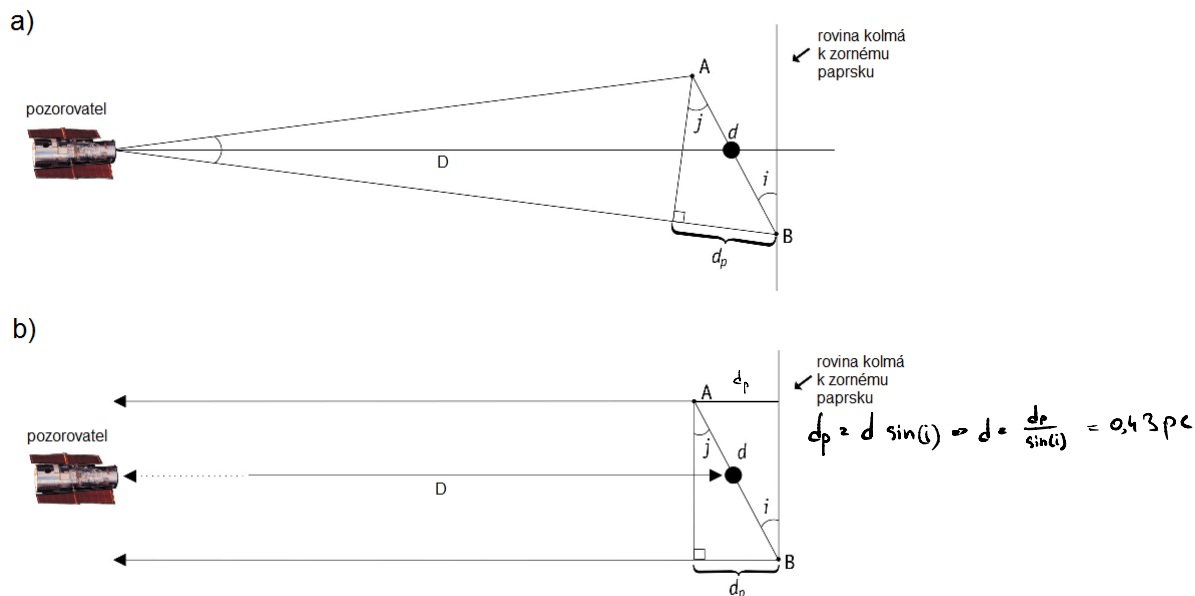
Zjištěná doba $t = (356,2 \pm 1) \text{ dn}$ a jí odpovídající vzdálenost $d_p = (9,29 \pm 56,6) \text{ pc}$. Kdybychom měli inklinaci 90° , bylo by určení skutečného průměru prstence vzhledem ke zjištěné době t snadné. Proč? Vysvětlete. ①

Pokud by úhel inklinace byl 90° , nebylo by nutné provádět žádné korekce pro výpočet průměru prstence. To by usnadnilo výpočty a snížilo chybu.



Obr. 9: Záblesk ze supernovy SN 1987A zasáhne celý prstenec ve stejnou dobu. Také nejbližší část A a nejvzdálenější B byly ozářeny ve stejnou dobu a simultánně vyslaly záření dále k Zemi. Světlo vyzářené částí B má ale kvůli sklonu prstence delší trajektorii k Zemi.

- Bohužel v našem případě je inklinace $i \neq 90^\circ$, takže situace není tak jednoduchá. Musíme provést jisté zjednodušení, jak je naznačeno na obrázcích 10. Rozměry prstence jsou vzhledem k uvažované vzdálenosti malé, a proto můžeme zanedbat úhel mezi zornými paprsky k bodu A a bodu B a považovat je za rovnoběžné. Úhly i a j jsou pak shodné a výpočet hodnoty skutečného průměru prstence je už triviální záležitostí.



Obr. 10: S pomocí obrázku a dříve zjištěných hodnot je možné určit skutečný rozměr prstence d . Obrázek a) ukazuje skutečnou situaci, ale vzhledem k velké vzdálenosti LMC od Země lze provést zjednodušující předpoklad, že paprsky mířící k Zemi k části prstence A i B jsou rovnoběžné, jak je zobrazeno na spodním obrázku b).

Určete skutečný průměr prstence v radiánech včetně chyby určení. Vnitřní prstenec má průměr $(7,6 \pm 0,3) \text{ rad.} = 9$

Skutečný průměr prstence $d = 0,43 \dots \pm 0,3 \dots \text{ pc.}$

5. Diskutujte, jak se nepřesnost v určení časového zpoždění projeví na přesnosti určení skutečného průměru prstence.

Pokud neprovedete korekci úhlu inklinaci, mohou být výsledky výrazně zkrácené, protože d_p bude mít hodnotu několik desetín menší než skutečná (v našem případě).

6. Nyní už známe, jak pozorovaný úhlový průměr prstence, tak jeho skutečný rozměr, takže určení vzdálenosti je opravdu snadnou úlohou.

$$\vartheta = \frac{d}{D} \rightarrow D = \frac{d}{\vartheta} = 56,58 \text{ kpc}$$

$$u(\vartheta) = 3,41 \text{ kpc}$$

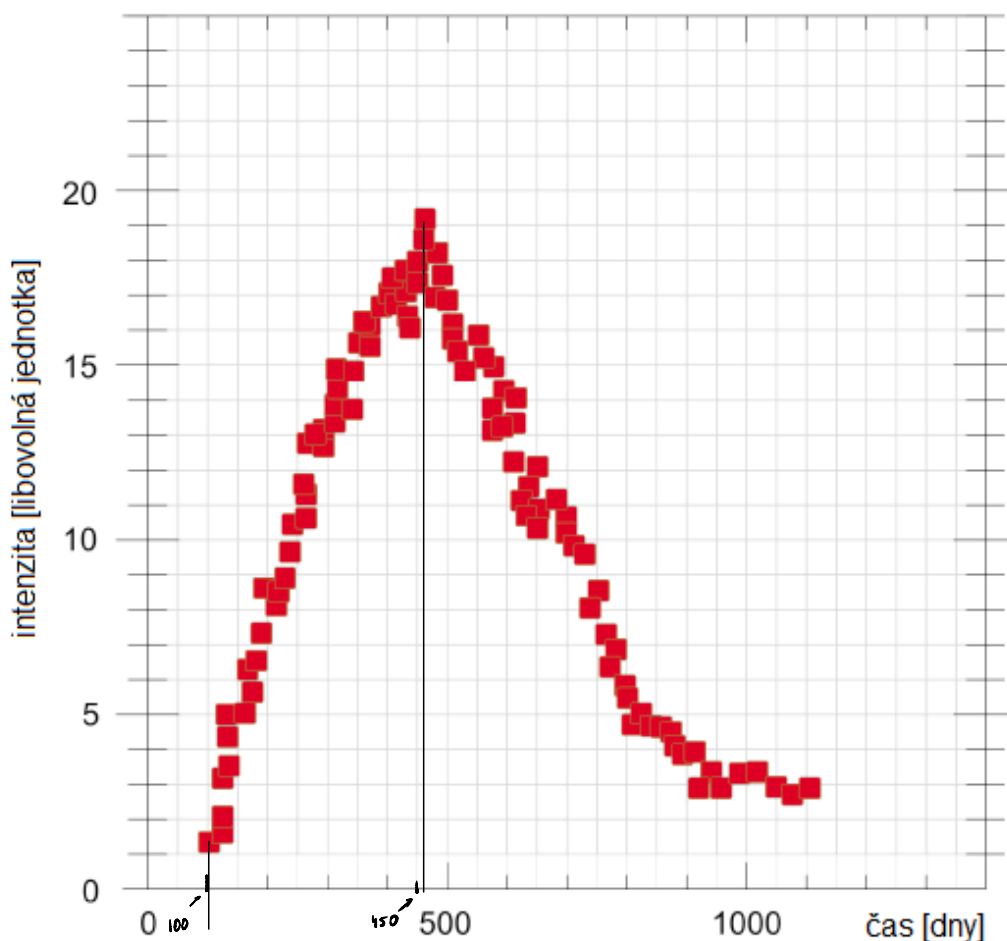
Vzdálenost supernovy SN 1987A $r = (57 \pm 3) \text{ kpc.}$

7. V předchozím úkolu jste diskutovali vliv přesnosti určení času t na hodnotu skutečného průměru prstence. Doplňte nyní diskusi úvahou, v jakém rozmezí jste stanovili vzdálenost supernovy (v závislosti na chybách veličin potřebných pro její určení).

Pravděpodobně největší chyba při měření byla v určení úhlové velikosti prstence. Protože chyba měření byla zpočátku vysoká (tabulka 7), měla nakonec vliv na chybu při určování vzdálenosti.

8. Na serveru <https://ui.adsabs.harvard.edu/> jsou k dispozici astronomické články publikované v odborných časopisech. Pokuste se nalézt originální práci, v níž Panagia a kol. (1991) publikovali mimo jiné vzdálenost supernovy SN 1987A. Srovnajte jejich výsledek s vaším a diskutujte možné příčiny případných odchylek. V žádném případě vámi určené hodnoty neupravujte! Pro uklidnění, pokud se vaše výsledky neliší od publikovaných více než o součet nejistoty ze zdroje a vašeho postupu, pracovali jste dobře.

Nejvýznamnější rozdíl byl v určení úhlové velikosti prstence.
Nakonec rozdíl v hodnotách $\theta \approx 0,1$ rad, vedl k získání hodnoty od skutečné.



Obr. 11: Světelná křivka prstence ukazuje měření celkové jasnosti prstence měsíce po explozi supernovy. Jasnost začala růst, když světlo ze supernovy dosáhlo k prstenci. Maximum křivky odpovídá situaci, kdy je při pohledu Země „rozsvícený“ celý prstenec. Měření pocházejí z družice International Ultraviolet Explorer (IUE). Nejistotu měření odhadněte jako polovinu nejmenšího dílku v grafu.