

ZÁKLADY ASTRONOMIE 2

Praktikum 3

MĚŘENÍ VZDÁLENOSTI SUPERNOVY SN 1987A

1 Úvod

Supernova představuje výbušný konec životní dráhy určitých hvězd. Obecně rozlišujeme dva typy supernov – jedny jsou výsledkem vývoje ve dvojhvězdě a druhé znamenají konec života velmi hmotných osamocenených hvězd. V této laboratorní úloze se budeme věnovat druhému případu. Zatímco komety dostávaly i ve dvacátém století jméno podle svého objevitele, u supernov už to neplatí. A tak nejvýznamnější supernova minulého století, objevená jako první v roce 1987, má prosté označení SN 1987A. Objevili ji ve Velkém Magellanově mračnu (LMC) Ian Shelton a Oscar Duhalde na observatoři Las Campanas v Chile 24. února a nezávisle na nich také amatérský pozorovatel Albert Jones na Novém Zélandu. Jednalo se o první pouhým okem viditelnou supernovu po čtyřech stoletích.



Obr. 1: Velké Magellanovo mračno je malá nepravidelná galaxie v blízkosti naší Galaxie. Je vyplněna hvězdami, prachem a plynem a probíhá v ní zrod nových hvězd. Snímek byl pořízen Schmidtovým dalekohledem na Evropské jižní observatoři (ESO) na La Silla.

Supernovy typu II jsou výsledkem poměrně rychlého vývoje masivních hvězd (o hmotnosti alespoň 5 hmot slunečních). Při této explozi se uchová z původní hvězdy jen malé jádro,

z něhož posléze vznikne neutronová hvězda. Většina materiálu hvězdy je odhozena do okolního prostoru rychlostí až 10^7 m/s (3% rychlosti světla). Expandující obálka zůstává pozorovatelná po tisíce let. Nejprve vytvoří mlhovinu (například Krabí mlhovina), která se dále rozplývá do okolního prostoru. Řídké pozůstatky supernovy jsou pak pozorovatelné například jako tzv. Řasy v souhvězdí Labutě.

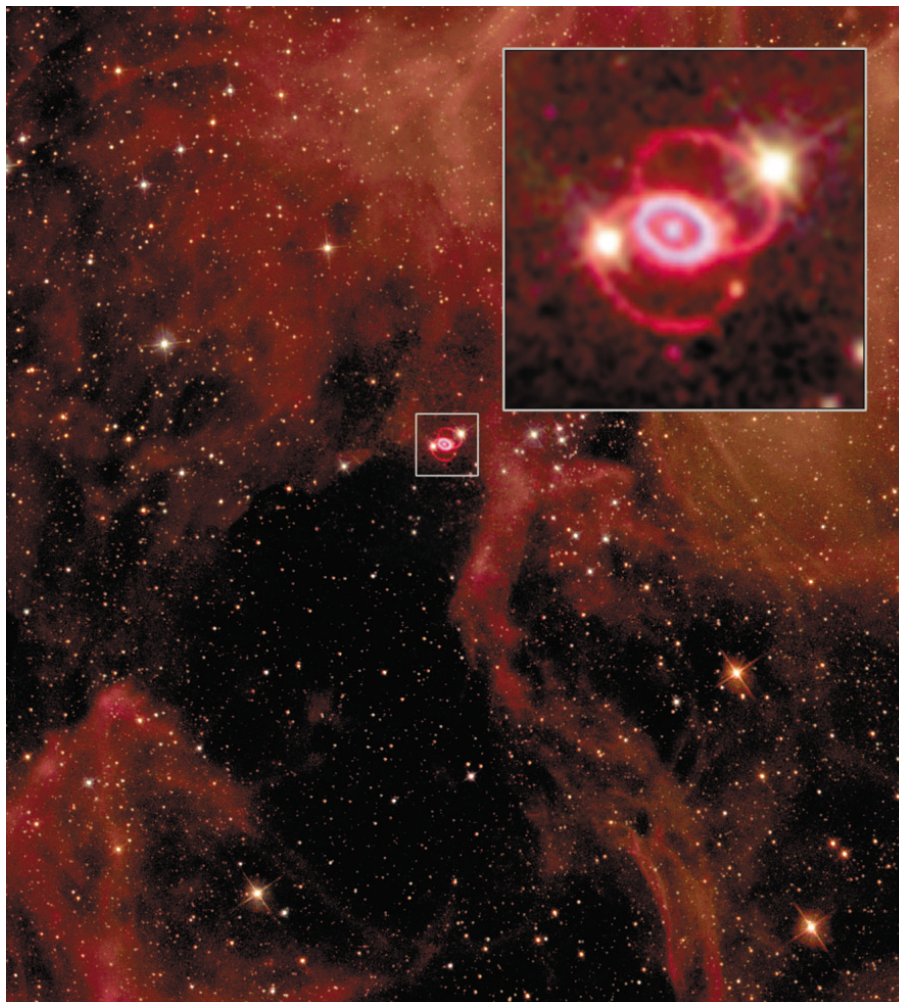
Všechny supernovy jsou velmi jasné. Patří mezi vůbec nejzářivější objekty ve vesmíru. Jejich zářivý výkon odpovídá zářivému výkonu několika miliard Sluncí a to znamená, že jsou vidět na velkou vzdálenost.



Obr. 2: Mlhovina Tarantule v LMC. Vlevo po výbuchu supernovy SN 1987A 23. února 1987, vpravo před výbuchem.

Určování vzdáleností ve vesmíru je jednou z nejdůležitějších úloh v astronomii. Supernova SN 1987A nevybuchla v naší Galaxii, ale našťastí hned v sousední galaxii Velké Magellanovo mračno. Pokud se nám podaří určit vzdálenost supernovy, určíme tím i vzdálenost LMC. Vzhledem k rozměrům LMC můžeme považovat vzdálenost k nám pro všechny hvězdy v této galaxii za stejnou. Existují samozřejmě i další metody určování vzdáleností, lze využít například pulzující proměnné hvězdy, cefeidy. Protože takové objekty pozorujeme i v dalších vzdálenějších galaxiích, můžeme pomocí našeho určení vzdálenosti pomocí supernovy korigovat jiné metody určování vzdáleností v tzv. žebříčku vzdáleností a použít je pro jiné, vzdálenější galaxie než LMC.

Hubbleův kosmický dalekohled byl vynesena na oběžnou dráhu až v dubnu 1990 a tak první snímek SN 1987A s vysokým rozlišením byl pořízen až 1278 dní po zjasnění. Na snímku (viz obr. 3) jsou patrné kruhové útvary kolem supernovy – vnitřní prsteneček a dva vnější prstence. V této praktické úloze využijeme jen vnitřní prsteneček. Nachází se příliš daleko od supernovy, aby se mohlo jednat o materiál vyvržený supernovou při explozi. Musel být utvořen dříve, pravděpodobně hvězdným větrem v posledních několika tisíciletích před výbuchem. Zatím však není přesně znám mechanismus, jak byl materiál z hvězdy zformován do takového tenkého, dobře definovaného kruhu. Je však zřejmé, že jakmile k materiálu disku doputovalo infračervené záření ze supernovy, začal silně zářit. Předpokládáme, že prsteneček je perfektně kruhový, ale je natočen vůči zornému paprsku od Země, takže jej vidíme jako elipsu. Kdyby byla rovina prstence vůči směru k Zemi kolmá, viděli bychom jej jako kruhový a všechny části prstence by se zjasnily najednou. Záblesk ze supernovy doputoval k celému prstenci současně. Natočení prstence ale způsobilo, že k Zemi nejbližší část prstence se zjasnila nejdříve, zatímco nejvzdálenější nejpozději (viz obr. 4). Poté, co prstencem záblesk prošel, plyn v prstenci dál zářil a jen zvolna „blednul“. Celkové světlo vyzářené prstencem dosáhlo maxima přibližně v době, kdy byl osvětlen celý obvod prstence. A právě toho využijeme při řešení naší úlohy.



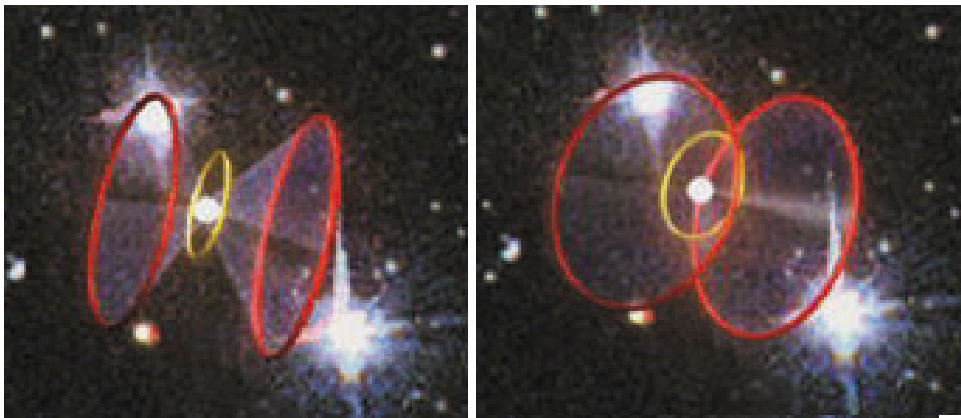
Obr. 3: Supernova 1987A uprostřed snímku (výřez vpravo nahoře) zanechává po sobě zbytky v podobě tří prstenců svítícího plynu. V tomto cvičení poslouží malý centrální prsteneček na změření vzdálenosti k supernově a tedy i LMC. Kolem supernovy je na snímku vidět nejen mnoho mladých (12 milionů let starých) modrých hvězd, ale také prach a plyn temně červené barvy. To ukazuje, že oblast kolem supernovy poskytuje stále vhodné podmínky pro vznik nových hvězd. Snímek byl pořízen pomocí HST.

Použité zdroje a další materiály ke studiu

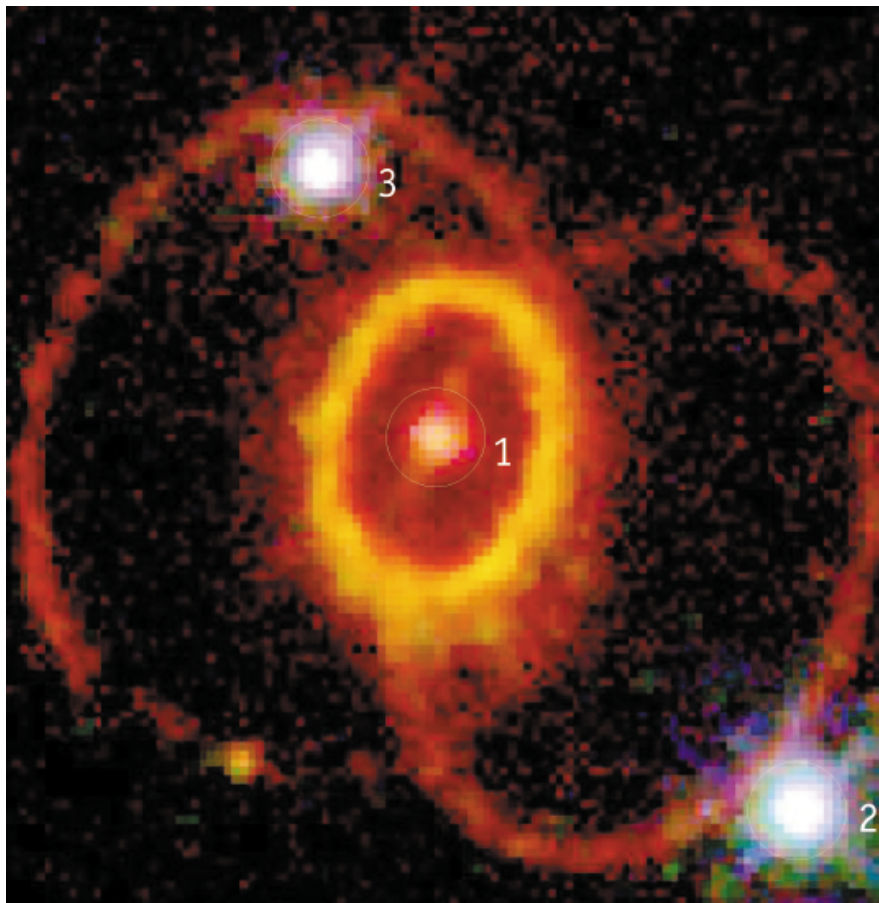
- Fransson, C., Cassatella, A., Gilmozzi et al. 1989, Ap.J., 336, 429-441: Narrow ultraviolet emission lines from SN 1987A Evidence for CNO processing in the progenitor.
- Gould, A., 1994, Ap.J., 425, 51-56: The ring around supernova 1987A revisited. 1: Ellipticity of the ring.
- Panagia, N., Gilmozzi, R., Macchetto et al., 1991, Ap.J., 380, L23-L26: Properties of the SN 1987A circumstellar ring and the distance to the Large Magellanic Cloud
- Jakobsen, P., Albrecht, R., Barbieri, C. et al. 1991, ApJ, 369, L63-L66: First results from the Faint Object Camera – SN 1987A. Viz také <http://www.astroex.org/>



Obr. 4: Zjasnění prstence. Animace ukazuje, jak světlo ze supernovy SN 1987A doputuje k prstenci materiálu a ten následně začne zářit. Prstenec se rozzářil nejvíce 400 dní po vzplanutí. Pro pozorovatele na Zemi se ale v důsledku konečné rychlosti světla nejdříve zjasňují ty části prstence, které jsou k nám nejbližší. Měřením tohoto časového zpoždění je možné určit vzdálenost SN 1987A. Obrázky jsou převzaty z STScI/NASA.



Obr. 5: Kdybychom se dívali na prstence SN 1987A z vhodného úhlu, viděli bychom tři kruhové prstence se supernovou SN 1987A ve středu nejmenšího z nich a dva větší prstence v rovnoběžných rovinách. Na snímku HST se nám ale promítají všechny tři do jediné roviny. Převzato z STScI/NASA.



Obr. 6: Hvězdy kolem supernovy SN 1987A byly zachyceny na snímku pořízeném v únoru 1994 s Wide Field and Planetary Camera 2 (WFPC2) na palubě HST. Byl použitý filtr $H\alpha$, který propouští červené světlo vycházející ze zářícího vodíkového plynu.

1. Nejprve spočítáme úhlový průměr vnitřního prstence, tedy takový, jak jej pozorujeme ze Země. Využijeme k tomu hvězdy 1, 2, 3 v obrázku 6. V tabulce jsou udány jejich vzdálenosti v úhlových vteřinách. Změřte vzdálenost hvězd na snímku. Zapište do tabulky a spočítejte odpovídající měřítko snímku.

Tabulka 1: Měřítko snímku na obrázku 6.

	Vzdálenost [mm]	Vzdálenost ["]	Měřítko ["/mm]
Hvězdy 2 ke hvězdě 1		3.0	
Hvězdy 3 ke hvězdě 1		1.4	
Hvězdy 3 ke hvězdě 2		4.3	

2. 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 6 změřte velikost malé a velké osy vnitřního jasného prstence. Měření vztáhněte ke středu jasného pásu vnitřního prstence, vypočítejte průměry a příslušné chyby. Vše zapište do tabulky 2.

Tabulka 2: Velikost prstence.

Měření	Velká osa [mm]	Malá osa [mm]
1		
2		
3		
4		
5		
průměr		
chyba		

Určete střední průměr prstence v radiánech včetně chyby určení. Vnitřní prstenec má průměr $\dots \pm \dots$ rad.

S pomocí obrázku 7 spočítejte inklinaci včetně její chyby. Inklinace prstence SN 1987A je $\dots \pm \dots$.

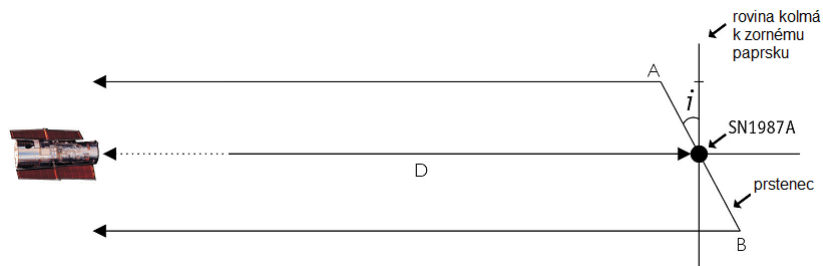


Obr. 7: Určení inklinálního úhlu. Představte si, že se na soustavu díváme ze strany, takže vidíme prstenec pod inklinálním úhlem i vzhledem k rovině kolmé na zorný paprsek. Inklinální úhel můžeme určit z jednoduchého vztahu mezi velkou a malou osou pozorované elipsy. Vyznačeny jsou nejbližší část prstence A a nejdálčenější část B.

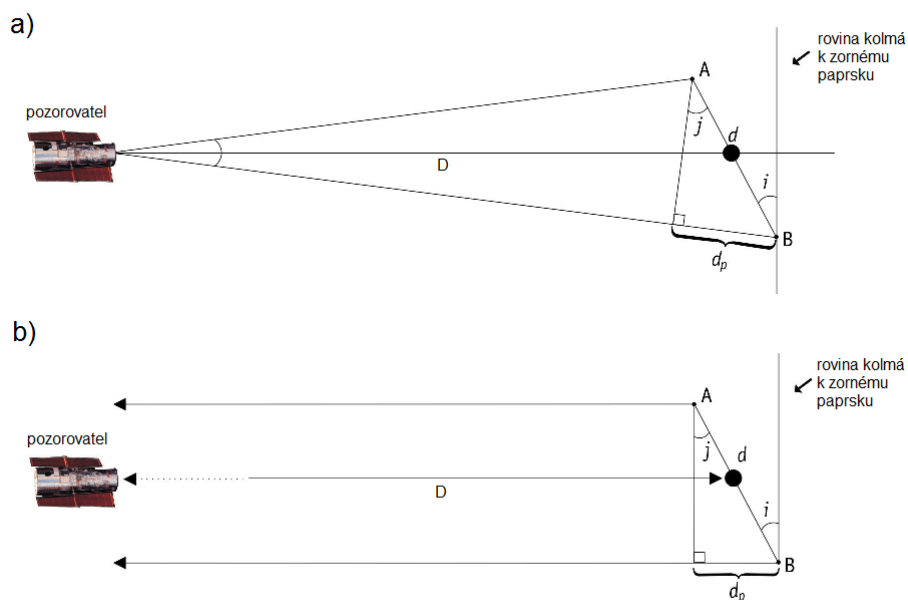
3. Abychom určili vzdálenost supernovy SN 1987A potřebujeme znát skutečný průměr d prstence v rovině kolmé na zorný paprsek. Výbuch supernovy vyvolá silný záblesk, který se do okolí šíří rychlostí světla. V určitém čase t sekund po výbuchu supernovy, záblesk osvětlí prstenec. Když předpokládáme, že je prstenec přesně kruhový 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 nejdálčenějšími body prstence může být určen z prodlevy mezi těmito jevy na světelné křivce. Určete z obrázku 10 dobu mezi prvním záznamem osvětlení prstence a okamžikem maxima světelné křivky, kdy záblesk ze supernovy dospěl k nejdálčenějším částem

prstence.

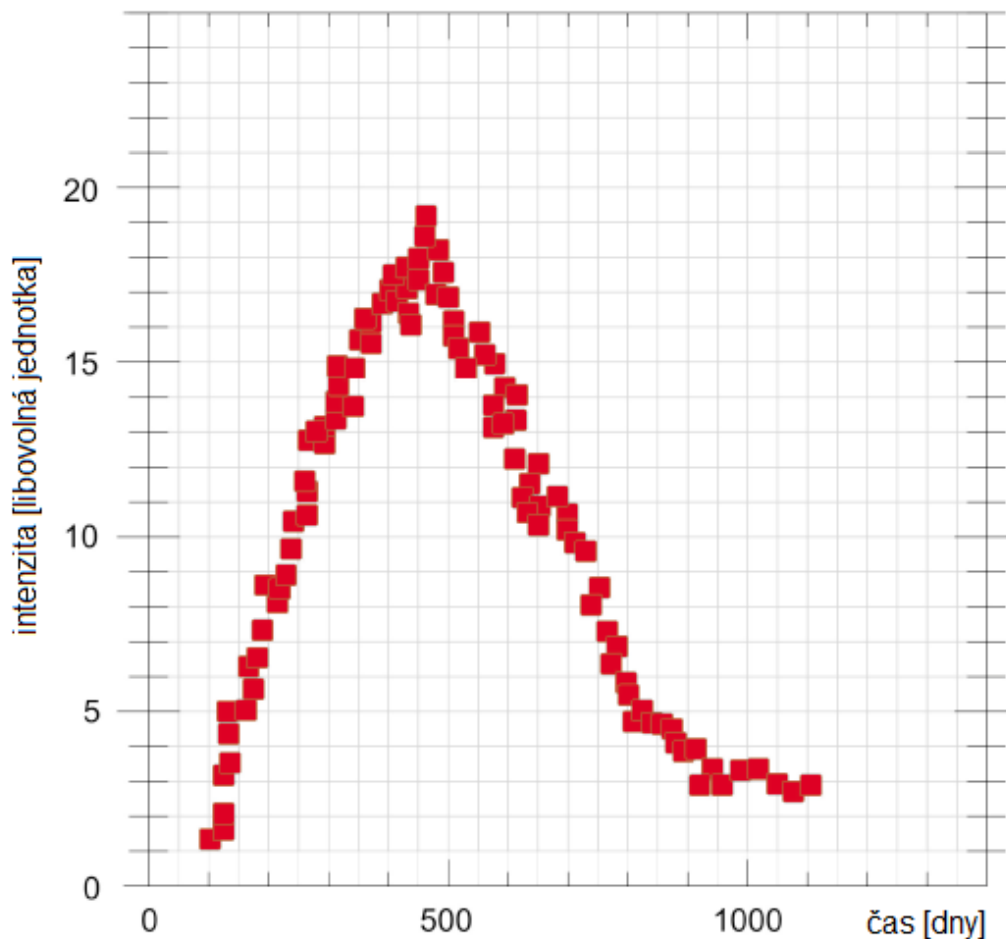
Zjištěná doba $t = \dots\dots\dots$ a jí odpovídající vzdálenost $d_p = \dots\dots\dots$. Kdybychom měli inklinaci 90° , bylo by určení skutečného průměru prstence vzhledem ke zjištěné době t snadné. Proč? Vysvětlete.



Obr. 8: Záblesk ze supernovy SN 1987A zasáhne celý prstence ve stejnou dobu. Také nejbližší část A a nejdálší 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.



Obr. 9: 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).



Obr. 10: 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).

4. Bohužel v našem případě je inklinace $i \neq 90^\circ$, takže situace není tak jednoduchá. Musíme provést jisté zjednodušení, jak je naznačeno na obrázcích 9. 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.

Skutečný průměr prstence $d = \dots\dots\dots$

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

6. Nyní už známe, jak pozorovaný úhlový průměr prstence, tak jeho skutečný rozměr, takže

určení vzdálenosti je opravdu snadnou úlohou.

Vzdálenost supernovy SN 1987A km = ly = pc.

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).

Na serveru http://adsabs.harvard.edu/abstract_service.html 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 jak o 20 % pracovali jste dobře.