

Jak se měří vesmír?

RNDr. Jan May, Ph.D

1. Měření vzdáleností hvězd pomocí paralaxy

První vědecký pokus „zmapovat a změřit vesmír“ proběhl již před 2150 lety. Řecký astronom Hipparchus narozený v Nicei v Bithynii u Černého moře vytvořil katalog 1080 nejzářivějších hvězd, které rozděloval na „velké a malé“.

Vzdálenosti hvězd v naší Mléčné dráze měříme trigonometricky pomocí paralaxy. Když Země obíhá kolem Slunce, mění se poloha měřené hvězdy proti vzdálenému pozadí. Vyzkoušejte si to sami: podívejte se jedním okem na zdvižený prst natažené ruky (nejedná se o vyjádření ministra Kalouska!). Pak se na něj podívejte druhým okem. Zdá se vám, že prst se pohnul proti vzdálenému pozadí. Tak je to s hvězdou. Když změříme polohu hvězdy mezi ostatními z jednoho bodu dráhy Země kolem Slunce a pak nejlépe z jiného bodu dráhy Země a známe vzdálenost měřících míst a stanovíme úhel změny polohy hvězdy, snadno spočteme vzdálenost hvězdy.

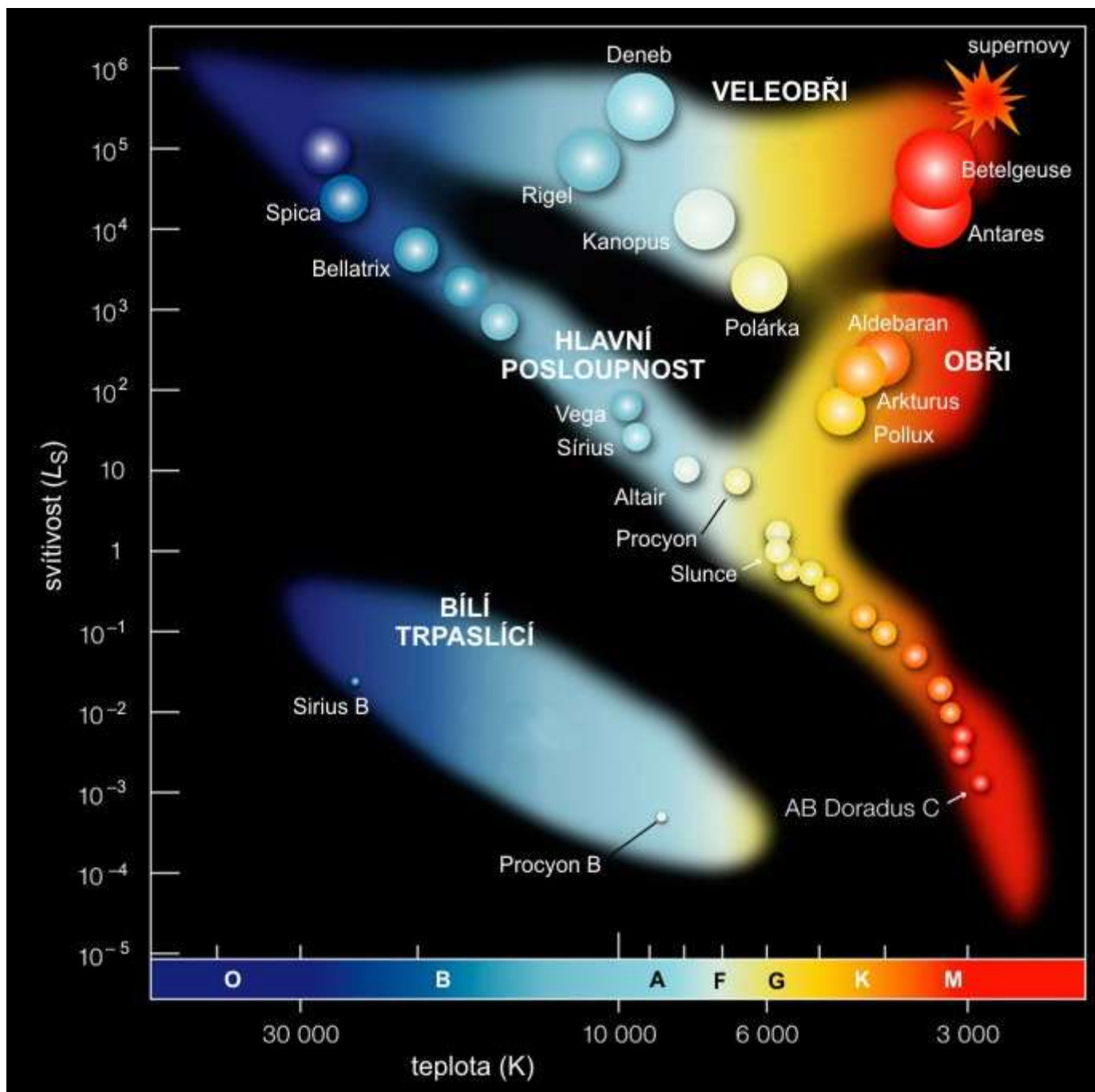
Prvé měření touto metodou bylo provedeno v roce 1838 Fridrichem Betelem hvězdy 61 Cygni, vzdálené 11,4 světelných let. Metoda měření pomocí paralaxy je použitelná asi do vzdálenosti 1000 světelných let. Při větších vzdálenostech je úhel změny polohy hvězdy tak malý, že je ho obtížné měřit. Tak ale nebylo možné změřit vzdálenosti jiných galaxií a údaje o jejich vzdálenostech byly pouze dohady.

2. Stanovení vzdáleností hvězd pomocí H-R diagramu

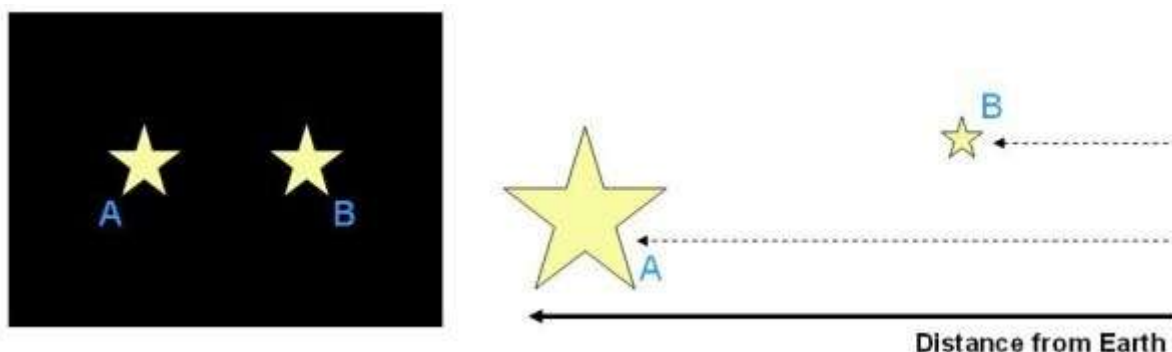
Na změření vzdálenějších hvězd už nám hvězdná paralaxa stačit nebude. S určením vzdáleností hvězd v rámci naší Galaxie, která napříč měří kolem 100 000 světelných let, nám pomůže tzv. **Hertzsprung-Russelův diagram**. Ten zachycuje závislost mezi zářivým výkonem hvězdy (svítivostí) a její povrchovou teplotou.

Barvu hvězdy zjišťujeme spektrální analýzou. Tou můžeme určit nejenom chemické složení hvězdy, ale i rychlost jejího pohybu a především její teplotu. Spektrálních tříd je vícero druhů, v následujícím textu se budeme zabývat pouze Harvardskou klasifikací. Ta dělí hvězdy podle povrchové teploty od nejžhavějších po nejchladnější dle následujícího posloupnosti: (Q – P – W) – O – B – A – F – G – K – M – (L – C – S).

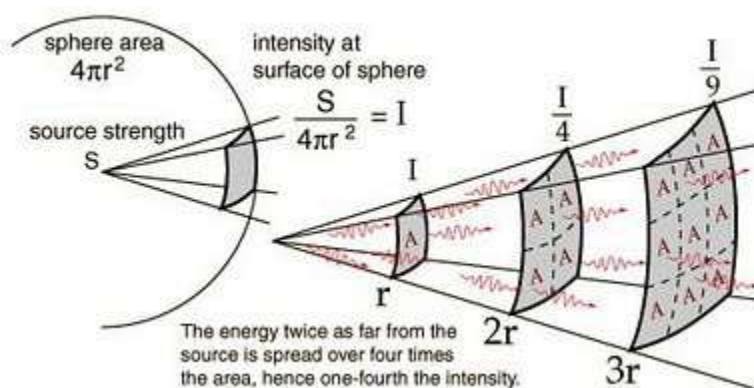
Co je hlavní posloupnost, je zřejmé z následujícího obrázku. Je to pás, který se táhne napříč celým H-R diagramem z levého horního rohu až po pravý dolní roh a vyskytuje se na něm asi 90% všech hvězd. Můžeme si všimnout, že hvězdy jsou rozloženy nerovnoměrně - mimo hlavní posloupnost se nachází tři skupiny hvězd (ve skutečnosti jich je mnohem více, ale toto jsou ty nejdůležitější). Vlevo dole jsou trpaslíci a vpravo nahoře jsou obří a veleobří. Při výpočtu svítivosti Slunce jsme zjistili, že svítivost je přímo závislá na povrchové teplotě a na poloměru hvězdy. Pokud tedy známe svítivost nějaké hvězdy, můžeme pomocí H-R diagramu spočítat i její poloměr. Hvězdy ležící nad sebou mají stejnou teplotu, ale hvězdy, které leží výš, mají větší svítivost než hvězdy na hlavní posloupnosti. Níže položené hvězdy zase mají svítivost nižší. Například Sirius A (nejjasnější hvězda noční oblohy) leží na hlavní posloupnosti a má téměř stejnou povrchovou teplotu (skoro 10 000 Kelvinů) jako Deneb, který leží mimo ni. To znamená, že Deneb musí mít mnohem větší poloměr, a tudíž i zářivost. (Sirius je 1,7x větší než Slunce a má zářivost 25 Sluncí, zatímco Deneb je asi dvěstěkrát větší než Slunce a jeho zářivost dosahuje kolem 200 000 Sluncí.)



Pro zjišťování vzdáleností pak můžeme vycházet ze známého faktu, že intenzita záření klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Pokud pozorujete dvě hvězdy, a obě se vám zdají být stejně jasné, pak to znamená, že buďto mají obě stejnou zářivost a nachází se od vás stejně daleko, anebo (a to je mnohem pravděpodobnější) se jedna z nich nachází dál, ale je více zářivá.



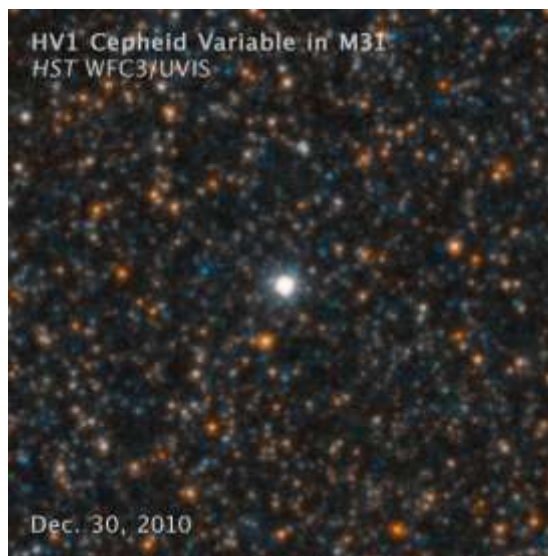
Z toho také vyplývá, že pokud najdete dvě hvězdy o stejné zářivosti, ale jedna z nich bude devětkrát jasnější než druhá, pak se ta druhá musí nacházet ve trojnásobné vzdálenosti, protože odmocnina z devíti jsou tři. První H-R diagram tedy vznikl tak, že se vzaly všechny hvězdy, u nichž byla známa jejich vzdálenost (ta se určila pomocí hvězdné paralaxy), povrchová teplota i jasnost, a tím se zjistila i zářivost. Vztah mezi barevným spektrem hvězdy a její zářivostí nevznikl náhodou, ale byl spočten na vzorku několika tisíců hvězd. K určení vzdálenosti hvězdy nám tak v podstatě stačí jen dvě věci: změřit její jasnost a zjistit vlnovou délku (barvu), kterou hvězda vyzařuje. Na základě porovnání zdánlivé a skutečné jasnosti pak můžeme zjistit vzdálenost sledované hvězdy. Vzhledem k tomu, že se stále se zvyšující vzdáleností klesá i jasnost hvězd, lze tuto metodu využít jen v rámci naší Galaxie. Na větší vzdálenosti je jas už tak slabý, že hvězdy nemůžeme přesně změřit (navíc jsou "blízko" u sebe, takže není jednoduché zaměřit jednu konkrétní hvězdu), proto je tato metoda použitelná asi do vzdálenosti čtvrt miliónu světelných let.



H-R diagram má mnohostranné využití, umí toho daleko víc, než jen zjišťovat vzdálenosti a velikosti hvězd. Můžeme z něj například vyčíst hmotnost hvězd, neboť hmotnost je přímo závislá na zářivosti. [Podle vzorce $L/L_s = (M/M_s)^n$, kde L_s je zářivý výkon Slunce a M_s hmotnost Slunce, člen n pak záleží na konkrétním typu hvězdy.] Jelikož každá hvězda během svého života prochází určitým vývojem, lze na H-R diagramu znázornit i její stav v různých časových fázích - ne nadarmo se tak o něm se říká, že je to nejznámější astronomický diagram.

3. Měření vzdáleností galaxií pomocí Cefeid

Se stále se zvyšující vzdáleností klesá i jasnost hvězd. V naší nejbližší galaxii, Andromedě, jsou hvězdy už tak málo jasné, že metodu hlavní posloupnosti už nelze využít, a je třeba zavést metodu jinou. Jednou z nich je pozorování obřích proměnných hvězd zvaných cefeidy. Pokud jste slyšeli o [Velkém třesku a vývoji hvězd](#), pak víte, že hvězdy jsou v rovnováze díky dvěma klíčovým silám: gravitaci a tlaku záření. Gravitace přitahuje veškerou hmotu směrem do středu hvězdy, zatímco termonukleární fúze uvnitř jádra hvězdy vytváří opačný tlak, jenž hvězdu naopak zvětšuje. Existují obrovské proměnné hvězdy spektrální třídy F-G (5x až 20x hmotnější než Slunce) s pravidelnou změnou jasnosti - Cefeidy. Tyto hvězdy mění svoji jasnost změnou svého průměru v intervalu 10 až 20% s periodou 2 až 40 dnů. Po rozepnutí atmosféry se hvězda ochladí, přičemž její jasnost poklesne.

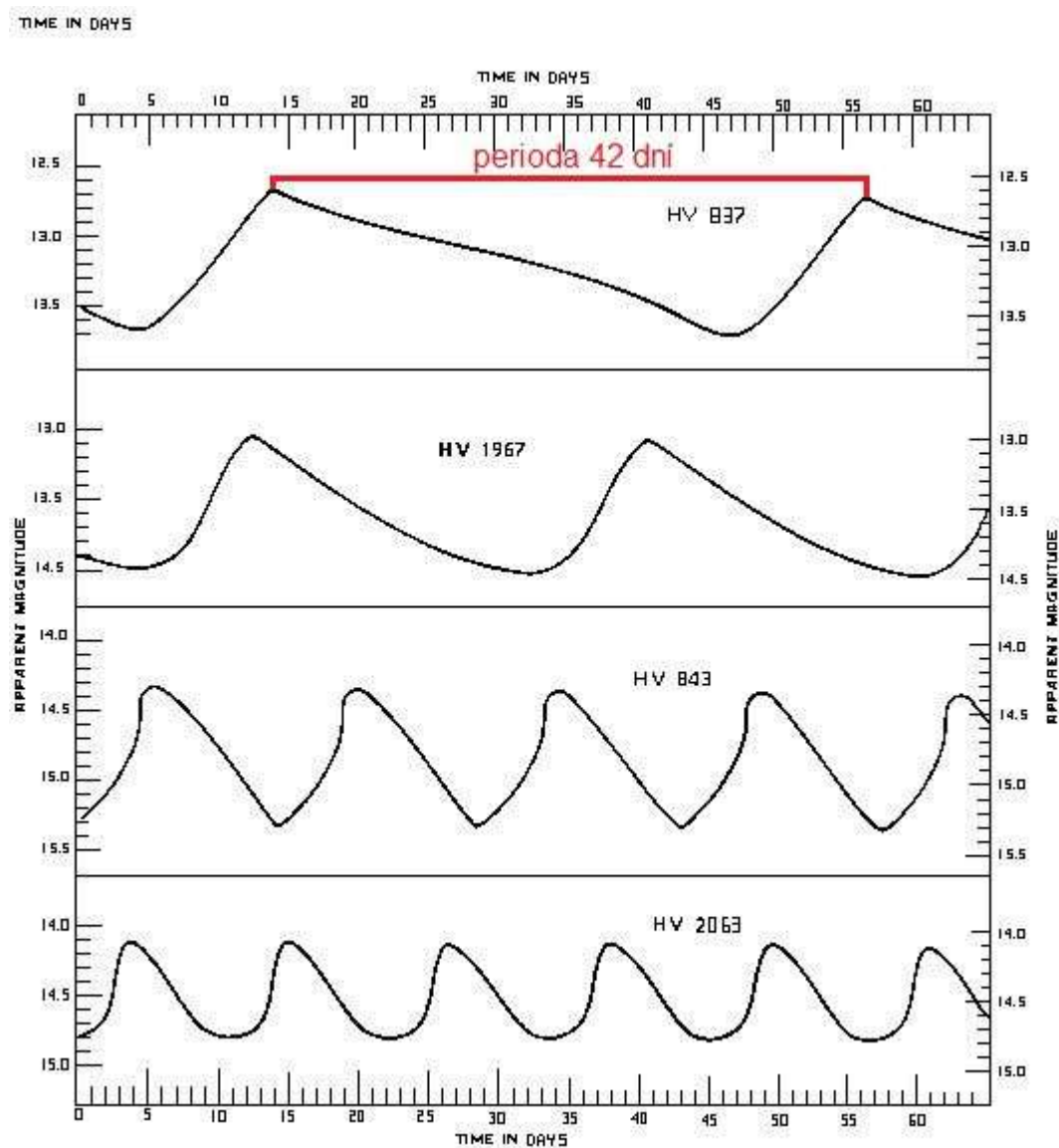


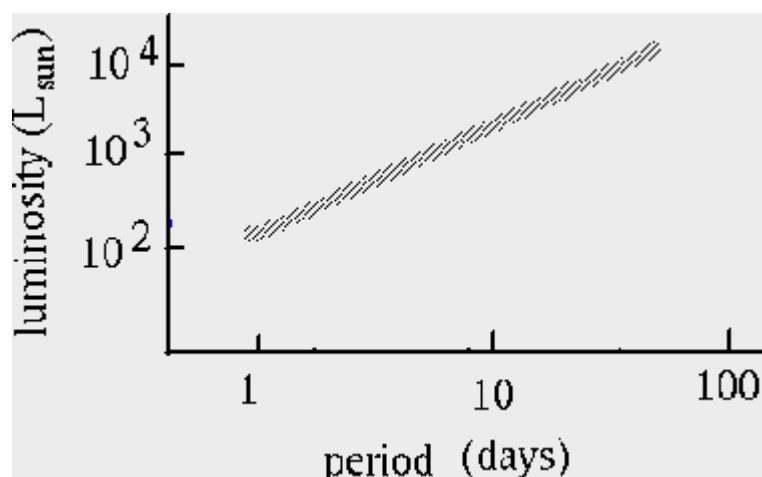
Cefeidy mají jednu zvláštní vlastnost, a to, že tyto dvě síly u nich nejsou v rovnováze - hvězda se tak střídavě smršťuje a rozpíná, čímž pravidelně mění svou jasnost. Když je gravitace silnější, hvězda se smršťuje a vydává méně světla, jakmile ale uvnitř začne narůstat tlak, hvězda se nafoukne a opět tak zvýší svou zářivost. Tato pulzace se odehrává v řádu několika dní či měsíců.

Hluchá americká astronomka Henrietta Leavittová před sto lety pozorovala cefeidy a všimla si závislosti mezi měnící se zdánlivou jasností a dobou periody. Jak taková závislost vypadá u čtyř různých cefeid, si můžete prohlédnout na následujícím obrázku. Objevila přímou úměrnost mezi periodou změn a zdánlivou jasností Cefeid. Čím je větší svítivost Cefeidy, tím je kratší perioda oscilací. Například Cefeida s periodou svítivosti 3 dny je 800x svítivější než Slunce. Oproti tomu Cefeida s periodou 30 dnů je 10 000x svítivější než Slunce. Takto jsou využívány Cefeidy jako „standardní svíčky“ ve vesmíru. Už dříve jsme si řekli, že intenzita záření klesá s druhou mocninou vzdálenosti. Ovšem, co je nám platné vědět, že jedna hvězda se nachází třeba třikrát dál než druhá, když nevíme vzdálenost ani jedné z nich? Stačí „pouze“ zjistit vzdálenost jedné blízké cefeidy jinou metodou a rázem tak můžeme měřit vzdálenosti galaxií. Pokud tedy pozorujeme dvě cefeidy a známe vzdálenost té bližší (tu zjistíme například pomocí paralaxy či jinak), pak snadno dopočítáme vzdálenost i té vzdálenější. Proto jsou cefeidy označovány jako standardní svíčky nebo jako majáky vesmíru.

Metodu měření pomocí Cefeid úspěšně využil americký astronom Edwin Hubble při měření vzdáleností nejbližších galaxií. Objevil Cefeidu v galaxii v Andromedě M31. Metoda byla pak od roku 1920 použita i na jiné galaxie naší lokální skupiny galaxií, do vzdáleností cca

50 milionů světelných let. Při měření pomocí Hubbleova teleskopu se podařilo takto měřit vzdálenosti galaxií do cca 100 milionů světelných let. U vzdálenějších galaxií není metoda použitelná, protože jednotlivé Cefeidy nejsou již v galaxiích rozlišitelné, případně galaxie Cefeidy neobsahují.





Jak daleko jsou hvězdy v naší Galaxii?

Nejbližší hvězdy	několik světelných let
Kulová hvězdokupa M13 v souhvězdí Herkula	26 světelných let
Rozměry Mléčné dráhy:	
Zploštělý disk s přibližně 150 000 milióny hvězd	Průměr: 100 000 světelných let
Galaktické halo	Průměr: 200 000 světelných let
Vzdálenost Slunce od středu galaxie	30 000 světelných let

4. Měření vzdáleností a pohybu pomocí rudého posuvu spektrálních čar.

Hubble měl však větší plán: přál si změřit rozlohu celého pozorovaného vesmíru. Společně s několika jinými astronomy měřil rudé posuvy spektrálních čar ve spektrech galaxií. Rudý posuv je vyvolán zvětšením vlnové délky světla, které vychází z objektu (galaxie), který se od nás vzdaluje. Jedná se o Dopplerův efekt, který dobře známe ze vzrůstu a poklesu tónu závodního auta, když se k nám blíží a pak od nás vzdaluje. A tak je tomu i s vlnovou délkou svítícího tělesa. Ve světle galaxií jsou totiž patrné spektrální čáry atomů, které světlo vyzařují.

Hubble naměřil rudý posuv spektrálních čar ve spektrech většiny pozorovatelných galaxií a uvědomil si, že jednotlivé galaxie se od sebe vzdalují a tudíž celý vesmír se rozpíná. Čím větší je rychlost vzdalování, tím větší rudý posuv měříme. Hubble stanovil rovnici, které se říká „Hubbleův zákon“: rychlost vzdalující galaxie je úměrná její vzdálenosti a lze vyjádřit jako

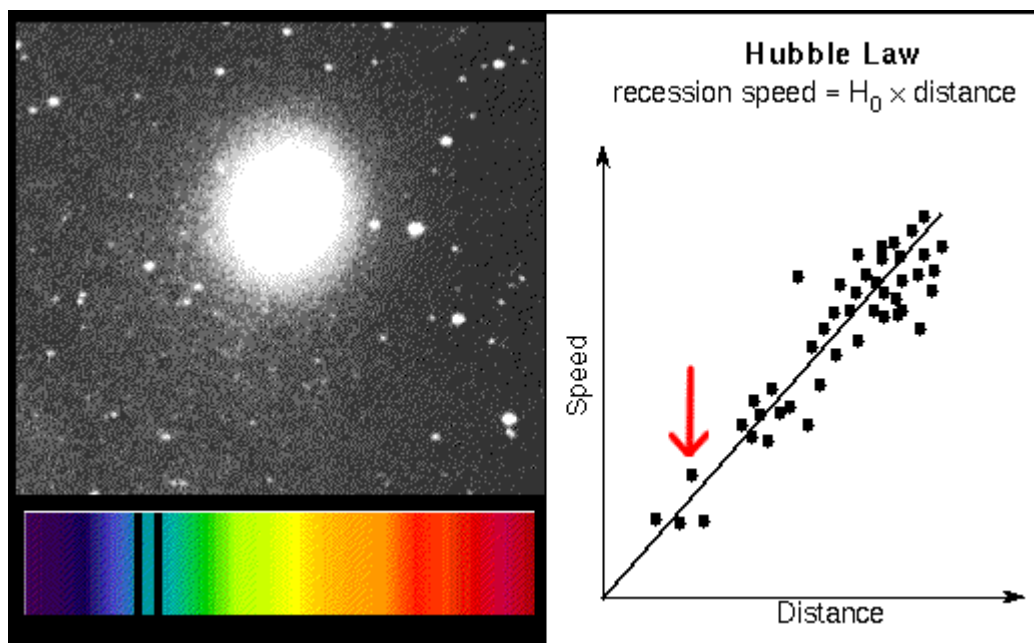
$$v = H \cdot d$$

pomocí rudého posuvu:

$$v = c \cdot z \quad \dots\dots \text{rudý posuv /nm/}$$

d vzdálenost galaxie /km/

H Hubbleova konstanta, která bývala uváděna jako 50 – 100 km/s. Mpsc, byla upřesněna na základě výsledků měření Hubbleova teleskopu na 74,2 +/- 3,6 km/s. Mpsc
Mpsc Megaparsec



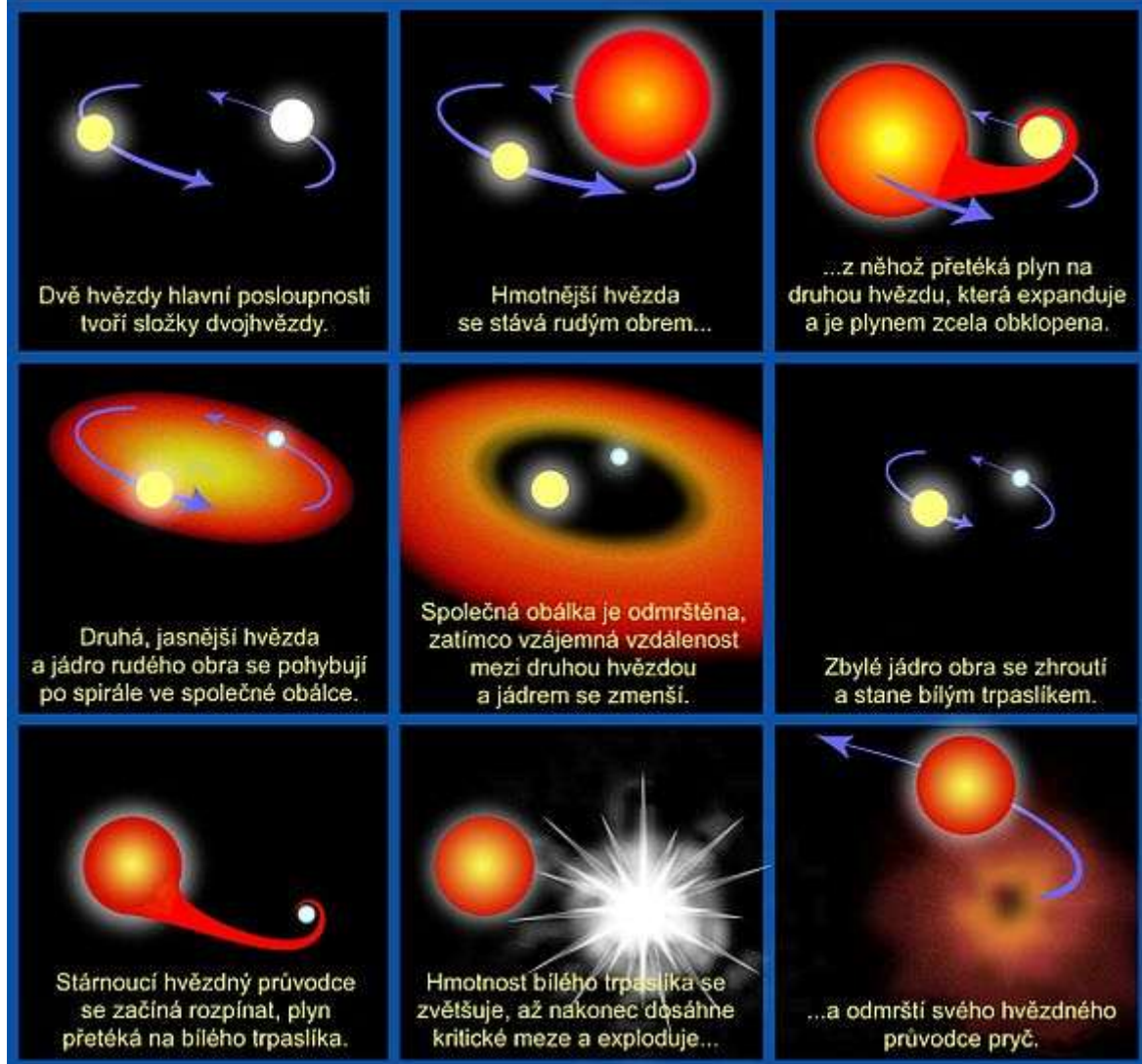
Jak daleko jsou galaxie?

Magellanovo mračno	dvě malé satelitní galaxie naší Mléčné dráhy	160 000 světelných let
Galaxie v Andromedě (M 31)	nejvzdálenější objekt pozorovatelný pouhým okem	3 milióny světelných let
Galaktická kupa Coma		325 miliónů světelných let

5. Supernovy jako standardní svíčky ve vesmíru k měření rychlosti rozpínání vesmíru

_Kromě výbuchu supernovy způsobeného kolapsem železného jádra v nitru hvězdy velké hmotnosti existuje ještě důležitý druh hvězdné exploze, k němuž dochází na povrchu. Jde o supernovy typu Ia. Mnoho hvězd se rodí jako dvojhvězdy. Protože jsou různě veliké, také se různě rychle vyvíjejí. Větší z obou hvězd se začne nadouvat v červeného obra, druhá je bílým trpaslíkem. Část rozpínajícího se obalu obra se přelévá na bílého trpaslíka. Hmota na kompaktním trpaslíkovi se hroutí, značně se ohřívá a začne zářit v rentgenovém oboru. Hmotnost bílého trpaslíka narůstá. Během času bílý trpaslík postupně získá od červeného obra velké množství vodíku z jeho vnějších vrstev. Jakmile hmotnost bílého trpaslíka dosáhne kritické Chandrasekharovy meze (1,44 hmotnosti Slunce), termonukleární syntéza hélia na jeho povrchu rozmetá celou hvězdu a její materiál vyvrhne nesmírnými rychlostmi do vesmíru.

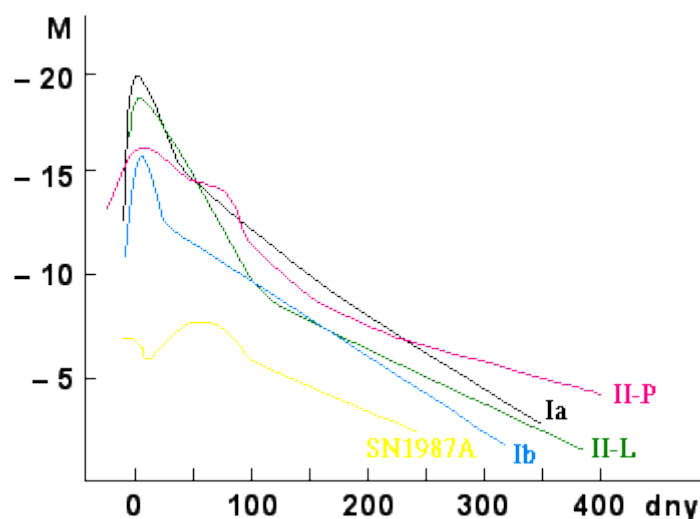
Vznik supernovy typu Ia



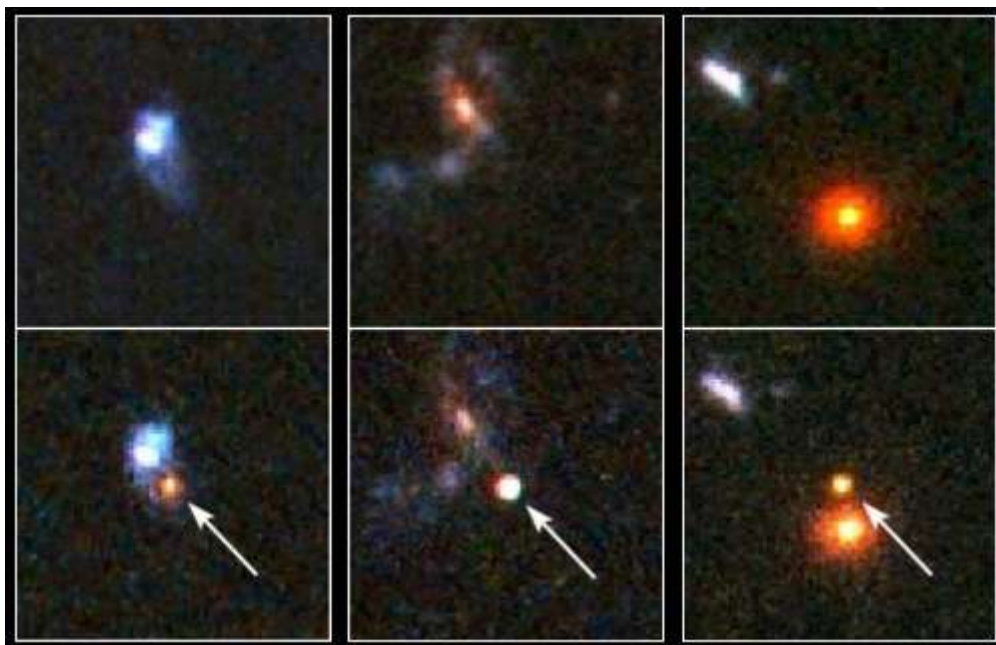
Protože Chandrasekharova mez je určována základními vlastnostmi hmoty, probíhají tyto exploze typu Ia u všech hvězd téměř identicky a produkují stejné množství energie.

Množství energie je vždy tedy zhruba stejné, takže z relativní pozorované jasnosti lze vypočítat vzdálenost příslušné supernovy. Přesnější hodnoty se pak určí z tvaru světelné křivky (z průběhu nárůstu a poklesu jasnosti). Supernovu typu Ia lze jednoznačně identifikovat podle tvaru jejího spektra. Navíc jsou tyto objekty ve vesmíru relativně časté, v průměrné galaxii dojde ke dvěma explozím za století.

Supernovy Ia lze tedy používat jako „standardní svíčky“ a pomocí nich zkoumat geometrii vesmíru. Měření velmi vzdálených explozí supernov poskytla v roce 1998 důležité informace o existenci temné energie, která urychluje expanzi vesmíru.

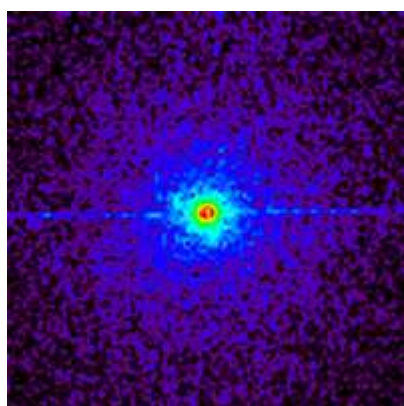


Světelné křivky (časové průběhy jasnosti) různých typů supernov



Velmi vzdálené supernovy Ia nalezené Hubbleovým dalekohledem. V horní části je mateřská galaxie před explozí, v dolní v průběhu exploze. Z jasnosti supernovy je možné odhadnout vzdálenost mateřské galaxie. Zdroj: HST/ACS/NASA/Adam Riess.

6. Nová metoda k měření kosmických vzdáleností: satelit Chandra měří rentgenové záření



Metoda je založena na měření rozptylu rtg záření mezihvězdným prachem mezi zdrojem záření a Zemí. Prach vytváří zářící halo, jako je záře semaforu v noci v mlze. Když se světlo přepíná z červené na zelenou, změna tvaru hala je poněkud zpožděna. Jestliže je semafor vzdálen 30 000 světelných let, trvá toto zpoždění cca 15 minut. Metoda může být použita i pro sousední galaxie. Astronomům bude

dále pomáhat nejen při určení rozměrů vesmíru, ale i při určení jeho stáří a dalšího vývoje.

7. Rychlý výlet vesmírem na paprsku světla

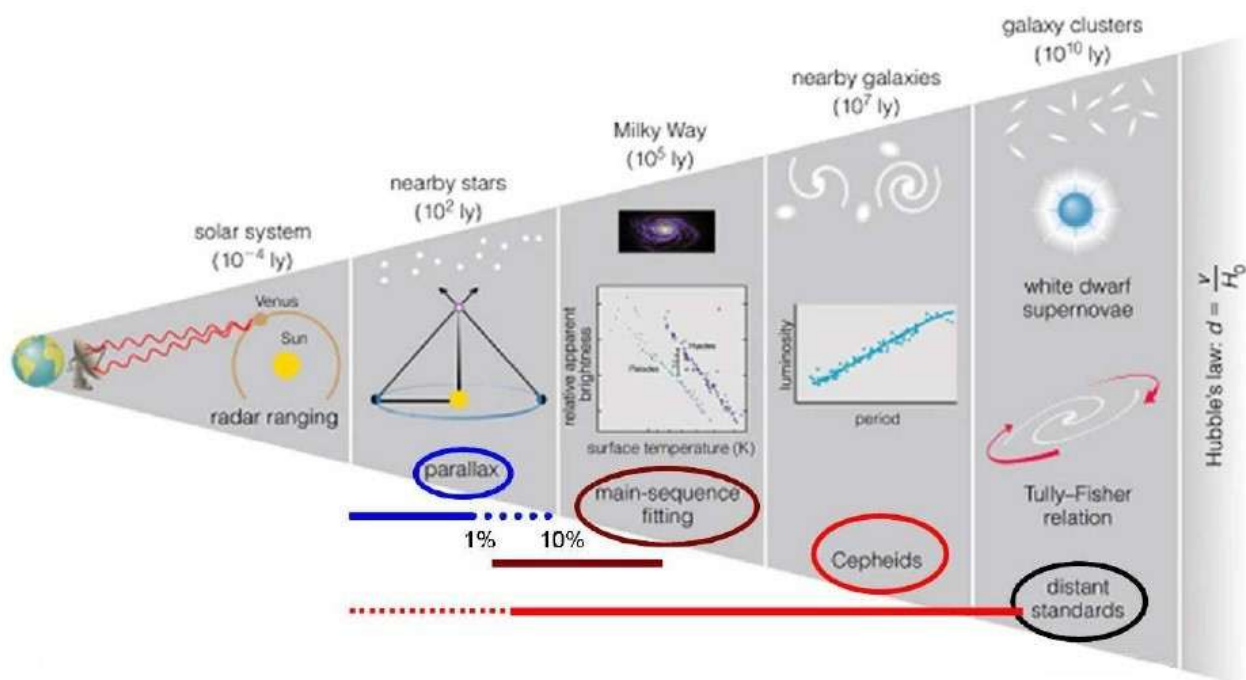
Předpokládejme, že jsme poslali paprsek světla ze Země. Jak dlouho pak bude trvat tomuto světlu – pohybující se maximální možnou rychlostí dle teorie relativity (299 792 km/s) – než doputuje k různým objektům ve Vesmíru? Uvědomujeme si dostatečně obrovské rozměry a krásu stvořeného vesmíru? Následující tabulka ukazuje některé vzdálenosti:

Měsíc	1.2 s
Slunce	8 min 20 s
Planetka Pluto	5.3 hod
Proxima Centauri – nejbližší hvězda	4.2 let
Sirius – nejjasnější hvězda na obloze	8.6 let
Polárka (Polaris)	432 let
Střed Galaxie	30 000 let
Galaxie Andromeda	3 milióny let
Galaktická kupa Virgo	60 milióny let
3C273 – kvasar	2 500 milióny let

Závěr

Od prostého pozorování oblohy, kdy jsme se změřili na nejbližší hvězdy, jsme se dostali k hvězdným paralaxám. Naměřené vzdálenosti blízkých hvězd zpočátku nebyly příliš důvěryhodné, ale až do vypuštění satelitu Hipparcos, která naměřila paralaxu 118 000 hvězd naší galaxie, se přesnost rapidně zvýšila. Poté nastalo období fotometrie a spektroskopie (porovnávání zdánlivých a absolutních jasností), kdy jsme již byli schopni odhadnout vzdálenosti nejen v naší, ale i v těch nejbližších galaxiích. Přesnost fotometrické i spektroskopické paralaxy se však nemůže rovnat trigonometrické paralaxe, proto se současně zavádí i jiné metody, které ověřují, nakolik zjištěná vzdálenost odpovídá skutečnosti. Jako kalibrace může sloužit například rozbor tempa poklesu jasnosti nov, či tzv. metoda nejjasnějších hvězd, která tvrdí, že když najdete nejjasnější hvězdokupu v některé galaxii, a porovnáte ji s nejjasnější hvězdokupou v jiné galaxii, tak obě budou mít pravděpodobně stejnou zářivost. Tento úkol je o to obtížnější, že velmi vzdálené hvězdy už vůbec nevidíme, a jediným způsob jak je pozorovat, je mimo viditelné spektrum. K tomu se navíc připojují i další limitující faktory jako například mezihvězdný plyn a prach. Na ty nejvzdálenější objekty pak využíváme supernovy (na rozdíl od klasických standardních svíček mají nevýhodu, že si je nemůžeme zaměřit, kdy chceme, ale musíme čekat, až se laskavě uráčí explodovat), měření rudého posuvu (Hubbleův zákon), anebo Tullyho-Fisherův vztah (svítivost spirálních galaxií je závislá na rychlosti jejich rotace – zde ho nepopisujeme.)

Na následujícím obrázku jsou velmi hrubě naznačeny jednotlivé metody měření se zaměřením na jejich návaznosti od několika světelných let až do vzdáleností cca 10 miliard světelných let (ozn. ly... light years)



Měření vzdáleností ve vesmíru není jednoduchá věc, protože čím dále se díváme, tím hůře vidíme a obtížněji a méně přesně měříme. S každou další pomyslnou příčkou se chyba měření zvětšuje, neboť veškeré další odhady vyplývají již z dříve zjištěných vzdáleností. Jelikož každý náš krok je závislý na tom předchozím, bývá tento princip někdy označován jako kosmologický žebřík. Zatímco jeho základy jsou poměrně přesné a pevné, horní příčky se nejistě viklají. Nám už teď nezbývá nic jiného, než je stále zpřesňovat a tedy upevňovat.