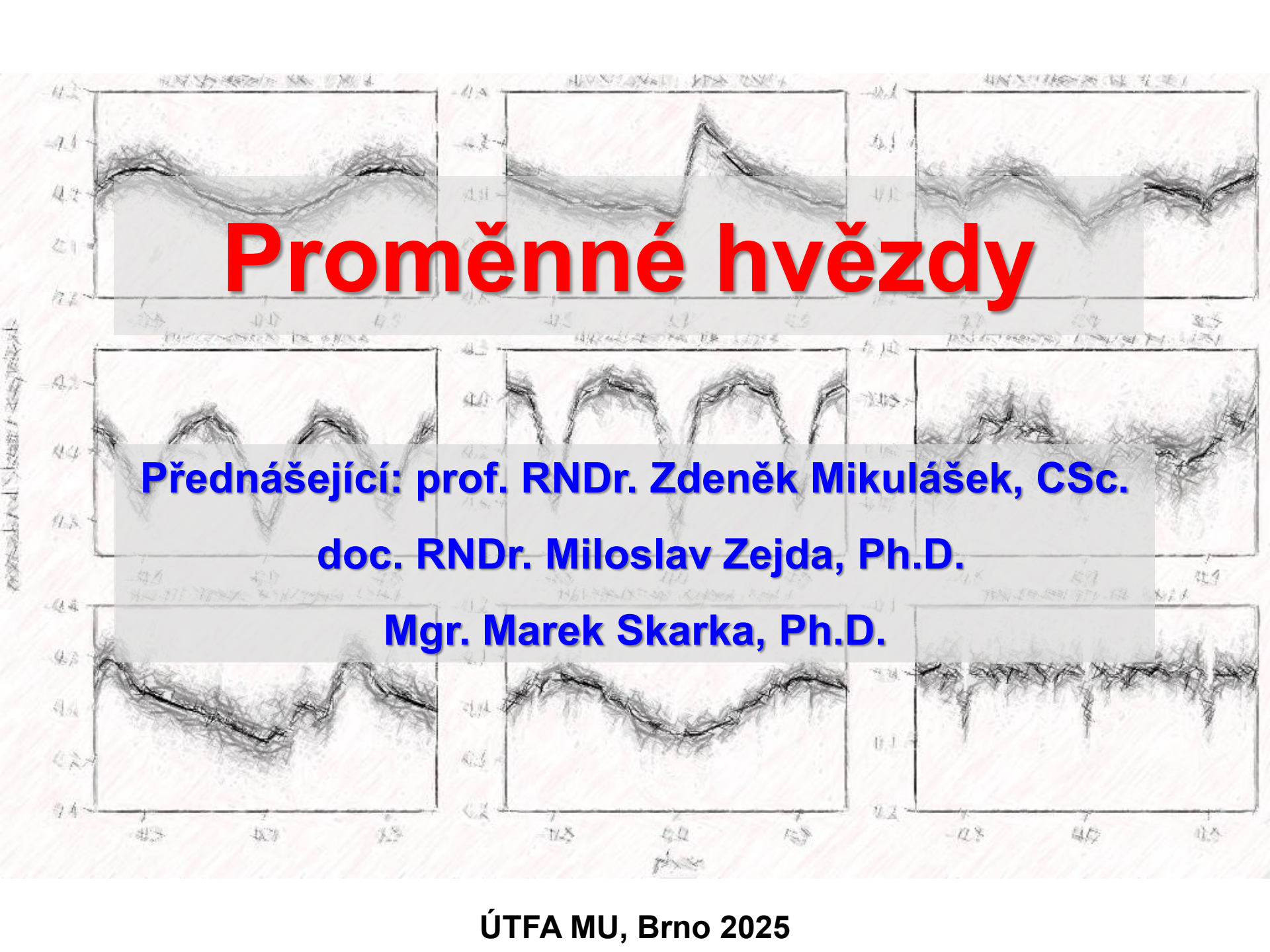




Proměnné hvězdy

Přednášející: prof. RNDr. Zdeněk Mikulášek, CSc.

doc. RNDr. Miloslav Zejda, Ph.D.

Mgr. Marek Skarka, Ph.D.

Která hvězda je proměnná?

každá!

záleží jen na časové škále citlivosti detekce změn

pro nás - hvězdy se změnou alespoň 0.001 mag

na časové škále od ms po desítky let až stovky let => některé jen jedna změna, ale výrazná (supernovy), některé se mění častěji a (ne)pravidelně

Význam výzkumu proměnných hvězd

- Snazší získávání informací ze světa hvězd
- Parametry hvězd – ověřování modelů hvězdné stavby a hvězdného vývoje, parametry mateřských hvězd planetárních soustav
- Vzdálenosti ve vesmíru - kosmologie

Nejstarší pozorování proměnných hvězd

- ❖ nesystematická, vzácná
- ❖ změna hvězd v rozporu s učením Aristotela => zařazeno - meteorologické jevy
- ❖ změna tak veliká, že nešla přehlédnout => výbuchy (super)nov

Rok	Typ	Souřadnice α [h m] δ [°]		Dnešní označení	Maximální hv.vel. [mag]	Doba pozorování pouhýma očima	Pozorovatel(é)
-134	?	5 54	-13		?	?	Hiparchos, Čínané
185	SN	14 12	-60		-8	7.12.185-červenec 186	
369	?	0±	+60±		?	6 měsíců	
386	SN	18 30	-25		+1	3 měsíce	
393	SN	16 48	-38		-1	8 měsíců	
1006	SN	15 13	-45	CM Tau	-8 až -10	28.4.1006 -13.8.1006	arab., jap., čín., jihoevr.poz. Jang Wej-Te aj.
1054	SN	5 30	+22		-4 až -5	4.7.1054 -17.4.1056	
1181	SN	2 05	+64.8		-1	červenec 1181 -?	
1203	N	16 48	-38		-2		S. Fujivara aj.
1230	N	16 20	+20			říjen 1230 - březen 1231	
1430	N	7 24	+7			1 měsíc	
1572	SN	0 19	+64	B Cas	-4	6.11.1572-únor 1574	Schüller, Brahe, Hájek aj.
1600	N?	20 12	+38	P Cyg	+3	8.8.1600-1626?	Blaeu, Kepler(?)
1604	SN	17 25	-21	V843 Oph	-2,5	9.10.1604-podzim 1605	Kepler, Fabricius, Brunowski
1667	N	6	+20	V529 Ori			
1670	N	19 42	+28		+2,7	20.6.1670-?	Anthelme, Picard

- ❖ 1. vědecké pozorování – Brahe, Hájek SN1572 – 1. světelná křivka a určení vzdálenosti => popření Aristotela!

Periodická prvotina

srpen 1596 – **David Fabricius** – objev proměnnosti omikron Ceti,
nové pozorování 1609



1638 – 1. případ systematického sledování hvězdy; **Jan Fokkens**
(**Johann Phocylides**) **Holwarda** studoval Miru systematicky po celý rok, odhadl periodu na 11 měsíců



1639 a 1642 – **J. Hevelius** pozorování, označení Mira = podivuhodná

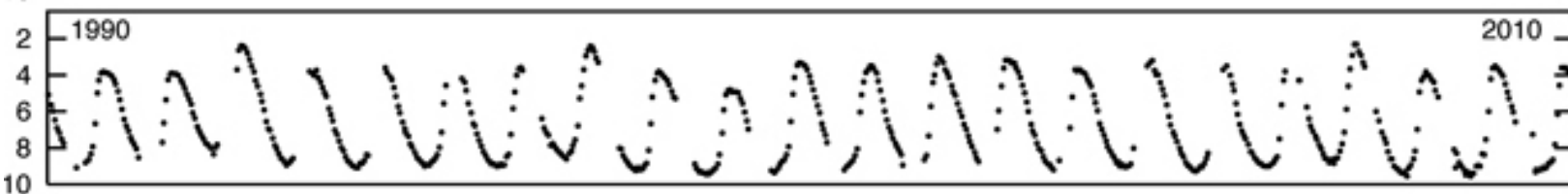


1667 – **I. Boulliau** - první určení periody světelných změn Miry 333 d
(dnes 332 d)

1667-9? – **G. Montanari** - objev proměnnosti Algolu
(Algol už v egyptském Káhirském kalendáři 1244 – 1163 př.n.l.)



1715 - **E. Halley** - SN 1572, SN 1604, o Ceti, P Cyg (N1600), Nova 1670 Vul,
χ Cyg – jen nejnápadnější prom. hvězdy, nikoli všechny tehdy známé



Začátky systematického studia proměnných hvězd

do konce 18. st. další objevené proměnné hvězdy

o Ceti	1596	Mira	372	M5e-M9e	Fabrizius
β Persei	1667	EA	2.87	B8V	Montanari
χ Cygni	1686	M	408	S6.2e-S10.4e	Kirch
R Hydrae	1704	M	384	M6e-M9e	Maraldi
R Leonis	1782	M	310	M6e-M9.5IIIe	Koch
β Lyrae	1784	EB	12.9	B8II-IIIep	Goodricke
η Aquilae	1784	δ Cep	7.18	F6Ib	Pigott
δ Cephei	1784	δ Cep	5.37	F5-G1Ib	Goodricke
R CrB	1795	RCB	—	G0Iep	Pigott
α Herculis	1795	SRc	—	M5Ib-II	W. Herschel
R Scuti	1795	RVa	147	G0Iae-K2pIbe	Pigott

až E. Pigott, J. Goodricke systematické pozorování (80. léta 18. st.)

- 1782-3 Goodricke znovuobjevil proměnnost Algolu
a správně ji interpretoval jako důsledek
zakrývání dvojice hvězd
- 1786 Pigott – 1. katalog prom. hvězd
(tucet kousků)





1844 **F. Argelander** – výzva k pozorování proměnných hvězd

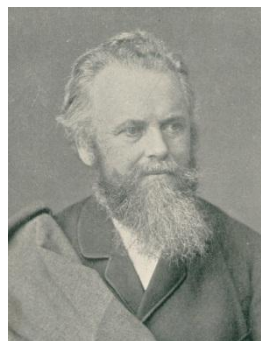
- jednoduchá metoda pro vizuální pozorování
- katalog proměnných hvězd (44 položek)
- označování proměnných hvězd

1880 - **E. Pickering** – zhruba 100 proměnných hvězd => pokus o základní klasifikaci

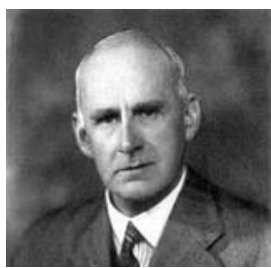
- z modelu dvojhvězdy a zákrytů vypočtena světelná křivka
=> teorie dvojhvězdné povahy Algolu



1890 **H. Vogel** – měření radiálních rychlostí Algolu, potvrzení dvojhvězdy;
- spolu s Scheinerem první určení hmotnosti a rozměru hvězdy (mimo Slunce)



1914 – **H. Shapley** – vysvětlení proměnnosti cefeid pulsacemi



1917, 1918 - **A. Eddington** – teorie hvězdných pulsací

Metody výzkumu proměnných hvězd

➤ Fotometrie

- ❑ Vizuální fotometrie
- ❑ Nevizuální fotometrie
 - fotografická,
 - fotoelektrická,
 - „křemíková“



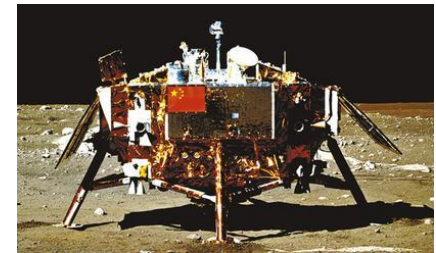
➤ Spektroskopie

➤ Interferometrie

➤ Detekce gravitačních vln

Observatoře

- ✓ pozemské - profesionální & amatérské
- ✓ atmosférické – balóny, letadla
- ✓ družicové
- ✓ měsíční



Vizuální fotometrie



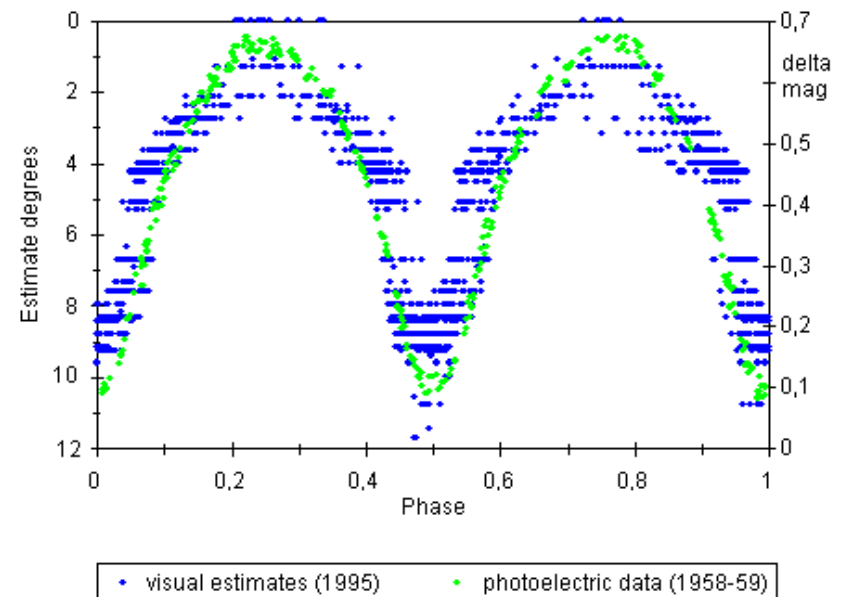
fotometrie prováděná prostým okem

oko – limit – 6-7 mag,

přesnost zpravidla 0.1 mag; výjimečně až 0.02 mag (Otero, Hornoch, Dubovský)

Metody:

- Argelanderova metoda (1844)
- Nijlandova – Blažkova
- Pogsonova
- Pickeringova



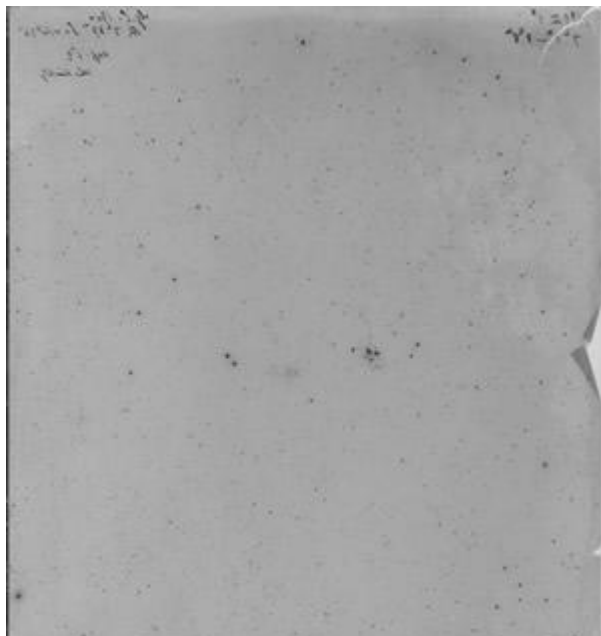
V839 Oph (Molík)

Fotografická fotometrie

1881 Draper – 14.7 mag – poprvé lepší dosah se stejným dalekohledem než při vizuálním pozorování

výhody:

- objektivní metoda studia proměnných hvězd
- možnost přehlídek => rozsáhlé skleněné archívy
- možnost opakovaně proměřit hvězdy na snímku



Fotoelektrická fotometrie

1892 – W. Monck - 1. elektrická detekce světla hvězdy
(fotonka zkonstruovaná G. Minchinem)

1907 – J. Stebbins - seleniový odporový fotočlánek

průkopníci fotoelektrické fotometrie:

P. Guthnick a R. Prager (Berlín) a J. Stebbins a jeho kolegové (USA)

30. léta 20.st. – objev fotonásobiče - V. K. Zworykin x L. A. Kubetsky

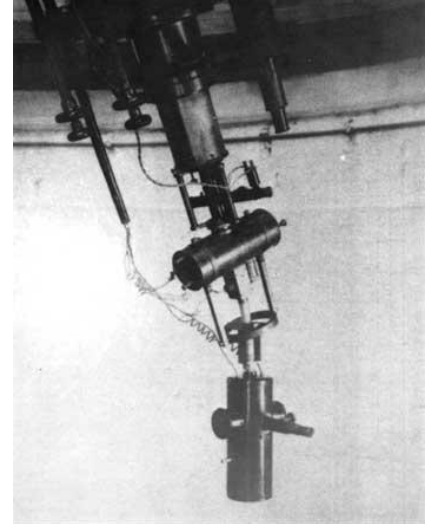
1946 Kron, počátek 50. let 20. st. - Johnson & Morgan *UBV*

Výhody:

- fotonásobiče nejcitlivějším přístrojem na detekci světla
- detekce jednotlivých fotonů
- velký dynamický rozsah
- linearita
- rychlost

Nevýhody - neopakovatelnost měření, náročnější zpracování

Současnost - jen na několika observatořích na světě



„Křemíková“ fotometrie – CCD, CMOS

1969 – 1. prvek CCD (Charged Coupled Device) W. Boyle a G. E. Smith

1970 – 1. CCD kamera

1974 – 1. komerční CCD zobrazovací prvky Fairchild Electronics (100x100 px)

(schopnost přenosu náboje tehdy $<0,5\%$ => o trochu méně než dobrá fotografická deska)

1979 – 1. použití v profesionální astronomii a počátek nového věku v pozorovací technice (Kitt Peak National Observatory, čip RCA 320x512)



Výhody:

- vysoká kvantová účinnost (dnes i 90 %) => pozorování slabších objektů
- lepší linearita oproti fotografii
- možnost počítačového zpracování, zpracování všech hvězd na snímku současně, opakované zpracování
- dostupnost i pro amatéry, využití moderních fotoaparátů

Nevýhody:

- potíže s pozorováním jasných hvězd, srovnávací a kontrolní hvězdy
- běžně přesnost 0.01 mag, ale lze až 0.001 mag
- časové rozlišení řádově 0.01 s (levné komerční kamery)
- malý dynamický rozsah



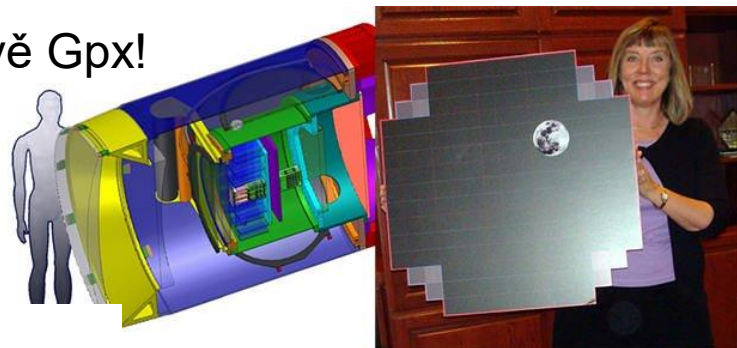
Současnost daná CCD&CMOS

CCD kamery - masově rozšířeny i mezi amatéry => vzrostl počet fotometrických dalekohledů => nárůst objemu dat pro individuální objekty, nárůst počtu proměnných hvězd

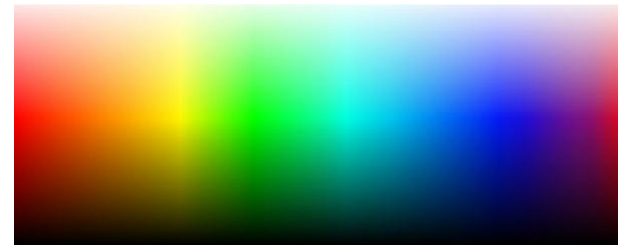
DSLR (Digital Single Lens Reflex) kamery – digitální zrcadlovky i kamery mobilních telefonů umožňují fotometrii

přehlídkové projekty - ASAS, OGLE, MACHO, ROTSE, NSVS, SuperWASP, APASS, SDSS, Catalina, 2MASS, LINEAR, TASS, Stardial, HAT, TESS...

nové – Vera Rubin, Pan-STARRS – čipy přes řádově Gpx!



Spektroskopie



1802 W. H. Wollaston - temné čáry ve slunečním spektru

1818 J. Fraunhofer - 576 temných čar ve slunečním spektru, nejvýraznější A až K.

1832 D. Brewster - chladný plyn vytváří temné čáry ve spojitém spektru

1847 J. W. Draper - horká pevná látka emituje spojitě spektrum zatímco horký plyn čárové spektrum

1859 G. R. Kirchhoff a R. Bunsen - každý chemický prvek nebo sloučenina má charakteristické spektrum čar, které mají stejnou vlnovou délku v emisním i absorpčním spektru. => možnost studovat složení alespoň povrchových vrstev hvězd na dálku rozbořením jejich světla.

1872 H. Draper - 1. fotografický záznam spektra, tzv. spektrogram hvězdy (Vegy)

* * *

1842 Ch. Doppler – prezentace D. jevu (1868 W. Huggins – pozorovací důkaz)

1888-90 H. C. Vogel – 1. měření a sestavení křivky rad. rychlostí pro dvojhvězdu

* * *

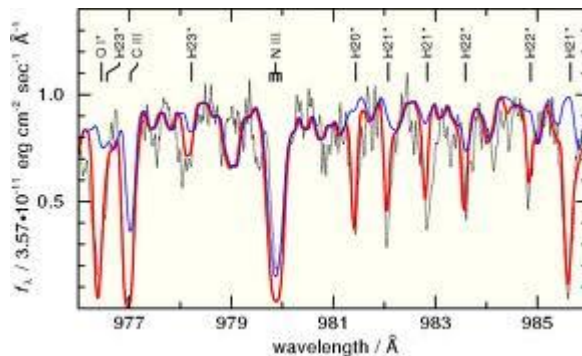
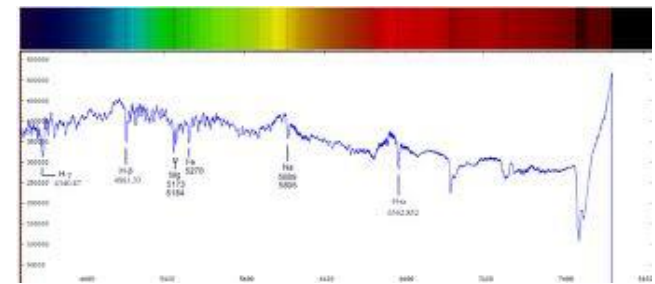
1867 – A. Secchi – 1. klasifikace spekter 316 hvězd,

přelom 19. a 20. st. – E. Pickering a zejména A Cannonová klasifikace hvězdných spekter; HD katalog (téměř 230 tisíc hvězd)

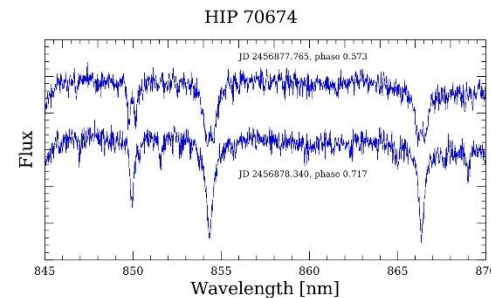
Využití spektroskopie

studium změn ve spektrech hvězd:

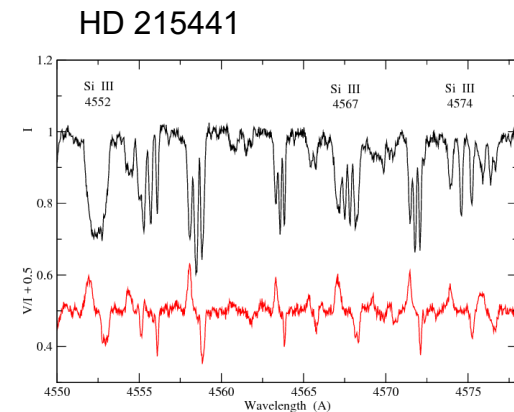
- složení atmosfér
- radiálních rychlosti, detekce složek vícenásobných soustav
- změny v profilech některých spektrálních čar (nejčastěji $H\alpha$)
- změny ekvivalentní šířky čar některých prvků (u magnetických chemicky pekuliárních hvězd)
- změna rozšíření způsobené magnetickým polem



pozorované a syntetické spektrum



spektra SB2 v různých fázích a křivka RV



Zeemanův rozštěp čar

kruhová polarizace

Interferometrie

1946 - představena astronomická interferometrie

Astronomické interferometry – optické, IR, submm, radiové

rádiové = soustavy klasických parabolických antén, jednorozměrných antén nesměrových dipólů (Tony Hewish's Pulsar Array).

antény jsou spojeny, signály se skládají, interferují tak, že vlny o stejné fázi se posilují a vlny o fázi opačné se ruší => cílem zvýšit úhlové rozlišení, rozlišovací schopnost jako u jediné antény s průměrem shodným se vzdáleností dílčích antén.

od 70. let – propojeny radioteleskopy na Zemi i ve vesmíru Very Large Array (Nové Mexiko, USA), Very Long Base Interferometry - VLBI).

Square Kilometre Array (SKA) - JAR, Austrálie

Event Horizon Telescope (EHT)

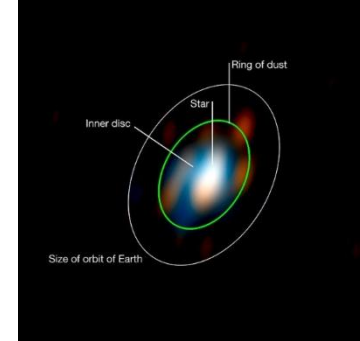
optické

VLTI (ESO, Chile) – 4x 8.2m a 4x1.8m dalekohledy,

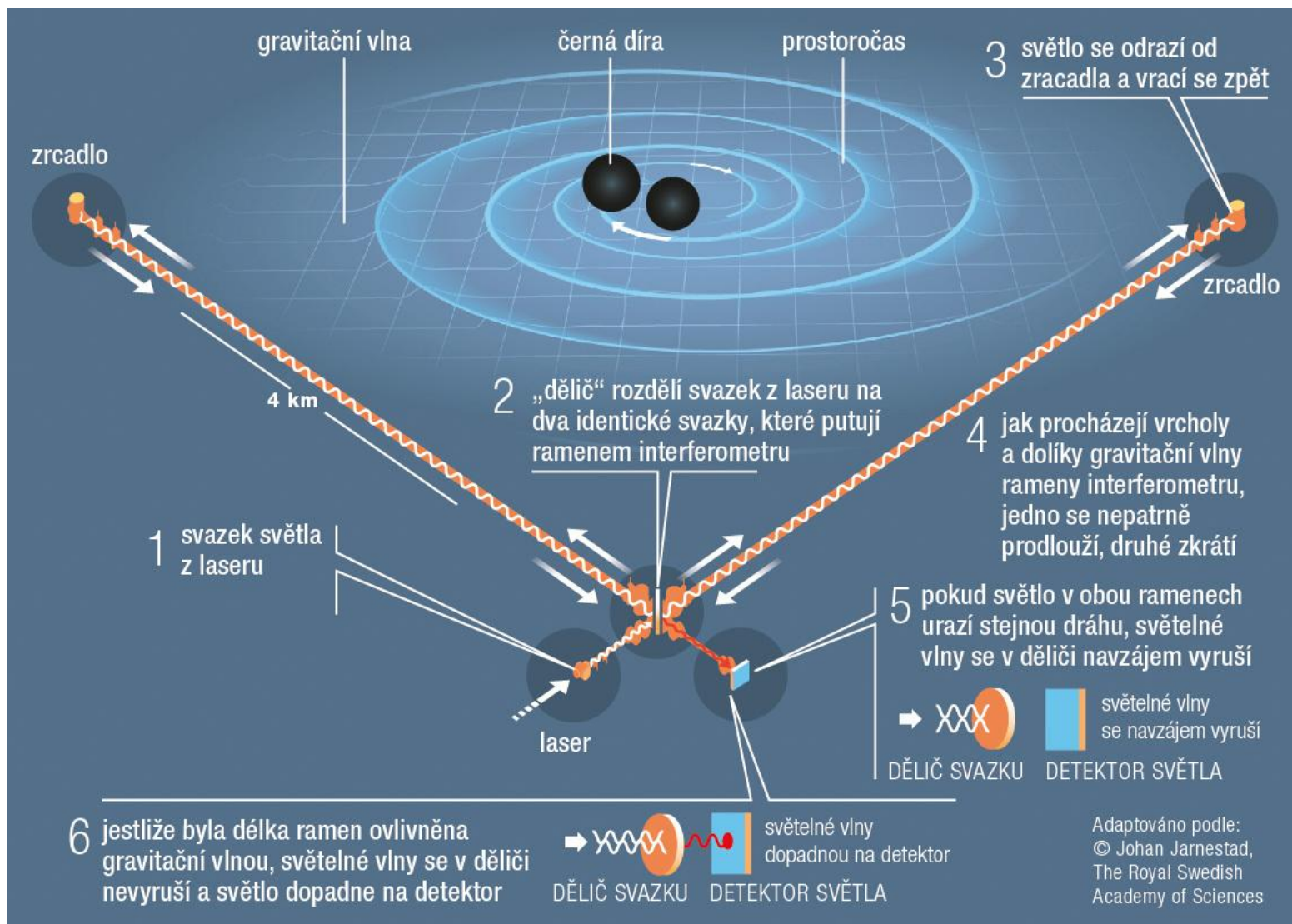
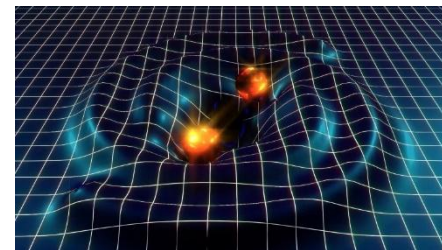
NPOI (Navy Precision Optical Interferometer, USA) – nejdelší základna na světě (větve tvaru Y o délce 250 m)

CHARA – 6x1m, vzdálenost až 330 m, Mt. Wilson, USA

submilimetrové – ALMA (Atacama Large Millimeter/sub-millimeter Array, Chile) - 66x 12m a 7m radioteleskopů; účast i České republiky



Gravitační vlny



Proměnné hvězdy v 21.století

Základní katalog proměnných hvězd (**GCVS** - General Catalogue of Variable Stars)

původně Německo, od r. 1948 v Moskvě – ved. N. Samus

poslední 5. vydání katalogu 58 035 objektů (stav k r. 2022) – nyní přidávány jen individuálně objevené proměnné hvězdy

2 katalogy hvězd podezřelých z proměnnosti – NSV (New catalogue of suspected variable stars) + suppl. - celkem 26 017 objektů (2011,2022)

VSX (Variable Star Index) – server Americké asociace pozorovatelů proměnných hvězd AAVSO (<http://www.aavso.org/vsx>)

k 19. 9. 2017 465 093 prom. hvězd,

k 24. 9. 2019 1 390 742

k 26. 9. 2021 2 115 130

k 19. 9. 2023 2 227 834

k 10. 9. 2025 **10 297 038** proměnných hvězd,

ale GAIA DR3 (2022) 2 184 477 zákrytových proměnných, celkem 12.5 mil. proměnných hvězd!!!

Další v DR4, Vera Rubin Observatory ...

Klasifikace proměnných hvězd, příčiny a mechanismy proměnnosti

Klasifikace – zejména podle světelné křivky

Označení typu - podle charakteristického znaku nebo typického představitele

Dělení proměnných hvězd podle mechanismu proměnnosti:

- ❖ **geometrické** (anglicky *extrinsic*) - světelný tok z hvězdy nebo hvězdné soustavy se nemění, mění se však její svítivost nejčastěji v důsledku rotace hvězdy se skvrnami na povrchu nebo oběhu složek dvojhvězdy kolem společného těžiště.
- ❖ **fyzické** (anglicky *intrinsic*) - skutečné proměnné hvězdy; reálně se mění jejich zářivý výkon v daném spektrálním oboru.

lokalizace zdroje změn:

- v okolí hvězdy,
- v povrchových vrstvách hvězdy (nejčastěji - různé projevy hvězdné aktivity),
- v podpovrchových vrstvách (pulzace všeho druhu)
- v jádru hvězdy - ohnisko vzplanutí supernov

Pár poznámek o Brnu a proměnných hvězdách

univerzitní centrum: Josef Mikuláš Mohr, Luboš Perek

60cm dalekohled 1954

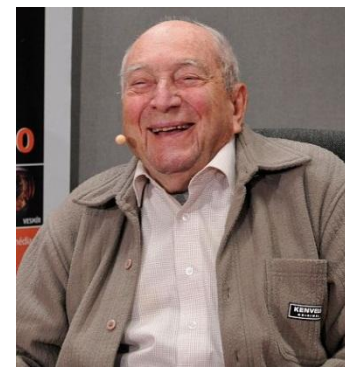
Vladimír Vanýsek, Jiří Grygar, Zdeněk Kvíz nebo Luboš Kohoutek.

současnost – ÚTFA PřF MU (ZM, MZ, JJ, MS, PK, JK, EP ...)

oblasti – CP hvězdy, zákrytové dvoj- a vícehvězdy, rtg. dvojhvězdy,
supernovy, pulsující, proměnné hvězdy v otevřených
hvězdokupách

konference, možnosti, spolupráce

hvězdárna: Oto Obůrka – HaP MK, Sekce ČAS (Jindřich Šilhán, Zdeněk Pokorný,
Zdeněk Mikulášek, Miloslav Zejda)



Co můžete využívat při studiu

Dalekohledy

- ASA AZ800
 lokalita – hvězdárna Ždánice
 vybavení – CCD kamera C5A-150M
 - spektrograf – LISA
- Newton 600/2780 + G4-16000 – lokalita Kraví hora, Brno
 po dohodě s HaP
- Celestron CGE 1400 XLT (průměr 350 mm) – Boyden, JAR
- ROSAMUND – 0.5m reflektor, Deep Sky Chile
- Skywatcher Newton 8" 203/1000 EQ-6 PRO – mobilní
- MUMO – Maksutow-Newt. 190/1000 + fotoaparát Canon
- PLATOSpec – 1.52m dal.+spektrograf, La Silla
- Perkův 2m dalekohled v Ondřejově
 projekty, Bc, Mgr...

Satelity – GRBA Alpha, Beta, VZLUSAT-2, QUVIK

Počítačová učebna

Stáže – ERASMUS, ESO ...

