



Astrofyzika V. cvičení

Závěrečná stadia vývoje hvězd

Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

Gravitační rudý posuv - odvození

Úloha 11.1 Odvoďte vztah pro gravitační rudý posuv u bílého trpaslíka o hmotnosti M a poloměru R .

Řešení: V přiblížení klasické fyziky platí vztahy: $E = mc^2$, $E = h\nu \Rightarrow m = \frac{h\nu}{c^2}$. Gravitační potenciální energie na povrchu hvězdy je $E_p = -G\frac{Mh\nu}{Rc^2}$. Celková energie je $E_c = h\nu\left(1 - \frac{GM}{c^2R}\right)$. Energie detekovaného fotonu na Zemi je $h\nu' = h\nu\left(1 - \frac{GM}{c^2R}\right)$, $\Delta\nu = \nu - \nu'$. Úpravou pro hmotnost hvězdy obdržíme $M = \frac{\Delta\nu}{\nu} \frac{c^2R}{G}$, nebo při využití vlnových délek $M = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} \frac{c^2R}{G}$, kde jsme volili $\left|\frac{\Delta\nu}{\nu}\right| = \left|\frac{\Delta\lambda}{\lambda}\right|$. V rámci OTR lze změnu vlnové délky záření vyjádřit přibližně $\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left(1 - \frac{2GM}{c^2R}\right)^{-1/2} - 1 \cong \frac{GM}{c^2R}$.

$$|\Delta\nu| = \left| \frac{c\Delta\lambda}{\lambda^2} \right|$$

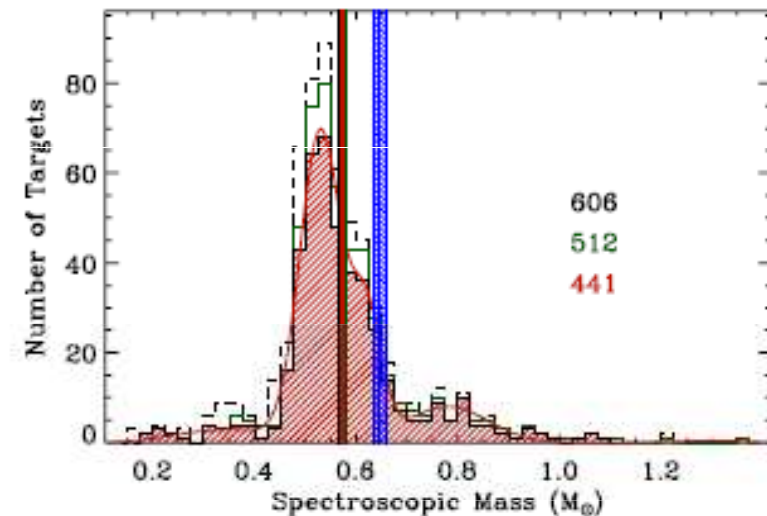
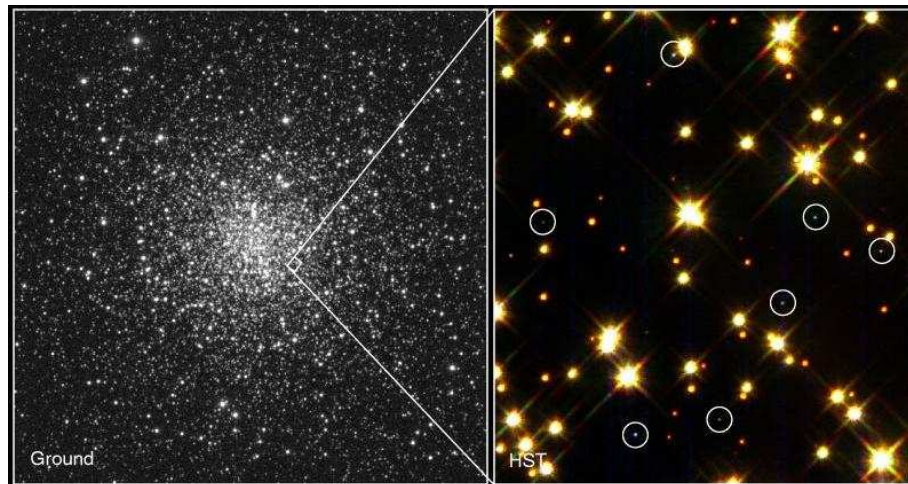
úloha řešena v newtonovském přiblížení, v OTR jde o rozdíl relativistických potenciálů ve dvou bodech

$$\frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \left(1 - \frac{2GM}{c^2R}\right)^{-\frac{1}{2}} - 1 = \frac{GM}{c^2R}$$

Důsledky gravitačního rudého posuvu

Úloha 11.5 Radiální rychlosti hvězd, jak známo, určujeme pomocí Dopplerova jevu. Skupinové určování radiálních rychlostí bílých trpaslíků ukázalo na jejich systematické vzdalování střední rychlostí $38 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$. Co můžeme konstatovat o průměrné hmotnosti bílých trpaslíků, jestliže přijmeme jejich průměrný poloměr 7700 km ?

Řešení: Z uvedených údajů lze odhadovat střední hmotnost bílých trpaslíků za předpokladu platnosti vztahu pro gravitační rudý posuv na $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{GM}{c^2 R}$, $M = 1,3 \cdot 10^{30} \text{ kg} = 0,65 M_{\odot}$.



Lze rozlišit posuv čar vyvolaný vzdalováním bílého trpaslíka od posuvu vyvolaného gravitací ?

Důsledky gravitačního rudého posuvu

A GRAVITATIONAL REDSHIFT DETERMINATION OF THE MEAN MASS OF WHITE DWARFS. DA STARS

ROSS E. FALCON, D. E. WINGET, M. H. MONTGOMERY, AND KURTIS A. WILLIAMS

Department of Astronomy and McDonald Observatory, University of Texas, Austin, TX 78712, USA; cylver@astro.as.utexas.edu, dew@astro.as.utexas.edu,
mikemon@astro.as.utexas.edu, kurtis@astro.as.utexas.edu

Received 2009 December 2; accepted 2010 February 2; published 2010 March 4

ABSTRACT

We measure apparent velocities (v_{app}) of the H α and H β Balmer line cores for 449 non-binary thin disk normal DA white dwarfs (WDs) using optical spectra taken for the European Southern Observatory SN Ia progenitor survey (SPY). Assuming these WDs are nearby and comoving, we correct our velocities to the local standard of rest so that the remaining stellar motions are random. By averaging over the sample, we are left with the mean gravitational redshift, $\langle v_g \rangle$: we find $\langle v_g \rangle = \langle v_{\text{app}} \rangle = 32.57 \pm 1.17 \text{ km s}^{-1}$. Using the mass–radius relation from evolutionary models, this translates to a mean mass of $0.647^{+0.013}_{-0.014} M_{\odot}$. We interpret this as the mean mass for all DAs. Our results are in agreement with previous gravitational redshift studies but are significantly higher than all previous spectroscopic determinations *except* the recent findings of Tremblay & Bergeron. Since the gravitational redshift method is independent of surface gravity from atmosphere models, we investigate the mean mass of DAs with spectroscopic T_{eff} both above and below 12,000 K; fits to line profiles give a rapid increase in the mean mass with decreasing T_{eff} . Our results are consistent with *no* significant change in mean mass: $\langle M \rangle^{\text{hot}} = 0.640 \pm 0.014 M_{\odot}$ and $\langle M \rangle^{\text{cool}} = 0.686^{+0.035}_{-0.039} M_{\odot}$.

Key words: stars: kinematics and dynamics – techniques: radial velocities – techniques: spectroscopic – white dwarfs

Online-only material: color figures, machine-readable table

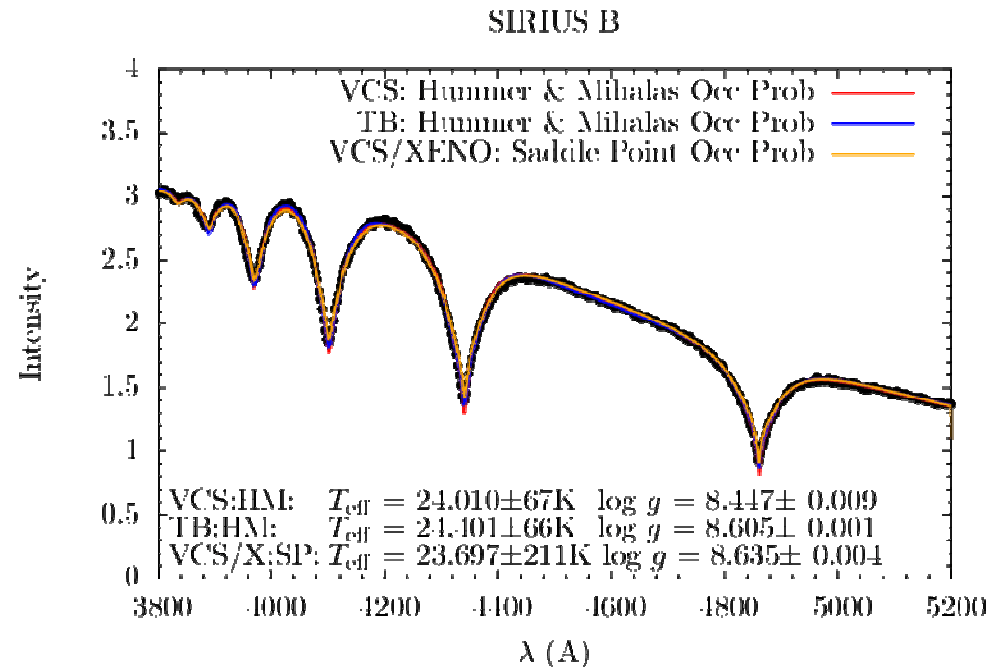
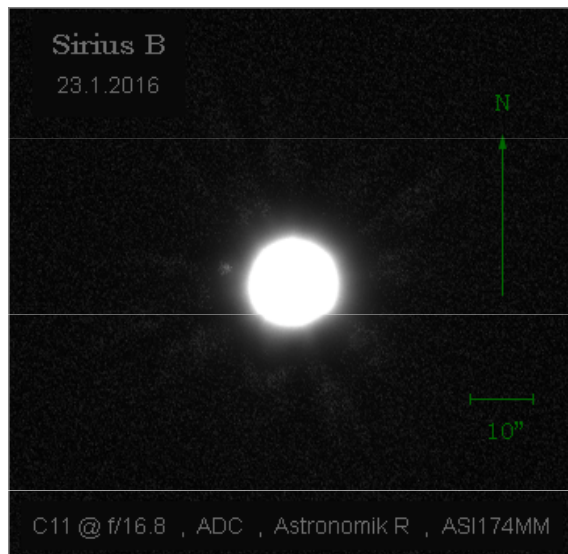
Charakteristiky bílých trpaslíků

| Study | Number of WDs | $\langle M \rangle$ (M_{\odot}) | δ (M) (M_{\odot}) | σ_M (M_{\odot}) | Method | Assumed H-layer ^a | Notes |
|---------------------------------------------|------------------|----------------------------------------|-------------------------------------|-------------------------------|---------|---------------------------------|----------------------------------------------------------------------|
| Koester et al. (1979) | 122 | 0.58 | 0.10 | 0.12 ^b | Photo | Thin/No | |
| Koester (1987) | 9 | 0.58 | ... | 0.11 | GRS | Thin/No | CPM WDs |
| McMahan (1989) | 50 | 0.523 | 0.014 | ... | Spectro | Thin/No | |
| Wegner & Reid (1991) | 35 | 0.63 | 0.03 | ... | GRS | Thin/No | CPM WDs |
| Bergeron et al. (1992) | 129 | 0.562 | ... | 0.137 | Spectro | Thin/No | $T_{\text{eff}} \gtrsim 14,000$ K |
| Bragaglia et al. (1995) | 42 | 0.609 | ... | 0.157 | Spectro | Thin/No | $T_{\text{eff}} > 12,000$ K |
| Bergeron et al. (1995b) | 129 | 0.590 | ... | 0.134 | Spectro | Thick | Revised Bergeron et al. (1992) w/thick H-layers |
| Reid (1996) | 34 | 0.583 | 0.078 | ... | GRS | Thick | CPM WDs |
| Vennes et al. (1997) | 110 | 0.56* | ... | ... | Spectro | Thin/No | $15,000$ K $\gtrsim T_{\text{eff}} \gtrsim 25,000$ K |
| Finley et al. (1997) | 174 | 0.570* | ... | 0.060* | Spectro | Thick | $T_{\text{eff}} \gtrsim 25,000$ K some w/ cool companions |
| Silvestri et al. (2001) | 41 | 0.68 | 0.04 | ... | GRS | Thick | CPM WDs |
| Madej et al. (2004) | 1175 | 0.562* | ... | ... | Spectro | Thick | $T_{\text{eff}} \geq 12,000$ K |
| Liebert et al. (2005) | 298 | 0.603 | ... | 0.134 | Spectro | Thick | $T_{\text{eff}} > 13,000$ K |
| | | 0.572* | ... | 0.188 | | | |
| Kepler et al. (2007) | 1859 | 0.593 | 0.016 | ... | Spectro | Thick | $T_{\text{eff}} > 12,000$ K |
| Tremblay & Bergeron (2009) | ~250 | 0.649 | ... | ... | Spectro | Thick | $40,000$ K $> T_{\text{eff}} > 12,000$ K overlap w/Liebert et al. |
| Koester et al. (2009b) ^c | 606 ^d | 0.567 ^e | 0.002 ^e | 0.142 ^e | Spectro | Thick | SPY |
| Koester et al. (2009b) ^c | 512 ^d | 0.580 ^e | 0.002 ^e | 0.136 ^e | | | SPY non-binary thin disk WDs |
| Koester et al. (2009b) overlap ^c | 441 | 0.575 ^e | 0.002 ^e | 0.128 ^e | | | |
| This work | 449 | 0.647 | $^{+0.013}$ $^{-0.014}$ | ... | GRS | Thick | SPY non-binary thin disk WDs |

Bílý trpaslík – Sírius B

Úloha 11.8 Zářivý výkon Siria B je $0,022 L_{\odot}$, efektivní povrchová teplota dosahuje 24 800 K, naměřená hodnota gravitačního rudého posuvu je $z = 3 \cdot 10^{-4}$. Určete hmotnost Siria B a jeho průměrnou hustotu. Stanovte teplotu nitra a dokažte, že elektrony se nacházejí ve stavu degenerace.

Řešení: $R_B = \left(\frac{L}{4\pi\sigma T_{\text{eff}}^4} \right)^{1/2} = 5,6 \cdot 10^6 \text{m}$ tudíž $0,008 R_{\odot}$. Úpravou vztahu pro gravitační rudý posuv dostaneme $M_B = \frac{c^2 R_B \Delta\lambda}{\lambda} = 2,1 \cdot 10^{30} \text{kg}$, tedy $1,03 M_{\odot}$. Průměrná hustota $\rho = 2,86 \cdot 10^9 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$. Teplotu nitra stanovíme ze vztahu $T_i \cong 7 \cdot 10^7 \left(\frac{L_B M_{\odot}}{L_{\odot} M_B} \right)^{2/7} = 2,3 \cdot 10^7 \text{K}$. Podmínka degenerace stanovuje $K_1 \rho^{5/3} \geq \frac{\mathcal{R} \rho T}{\mu}$, odkud po částečném dosazení obdržíme $\rho \geq \left(\frac{T}{7,5 \cdot 10^4} \right)^{3/2} 10^3$. Nerovnice dává pro $\rho \geq 5,4 \cdot 10^6 \text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$, tudíž podmínka degenerace elektronů je splněna.



Bílý trpaslík – 40 Eri B

Úloha 11.9 Zářivý výkon hvězdy 40 Eri B je $0,017 L_{\odot}$, efektivní teplota 17 000 K. Naměřená hodnota gravitačního rudého posuvu $z = 6 \cdot 10^{-5}$. Určete hmotnost tohoto bílého trpaslíka.

Řešení: Poloměr určíme $R_B = \left(\frac{L}{4\pi\sigma T_{\text{ef}}^4} \right)^{1/2} = 10^7 \text{ m}$ tedy $0,015 R_{\odot}$. Hmotnost $M_B = \frac{c^2}{G} R_B \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = 8 \cdot 10^{29} \text{ kg}$, přibližně $0,43 M_{\odot}$.

Úloha 11.11 Jeden z prvních objevených bílých trpaslíků 40 Eri B má efektivní povrchovou teplotu 17 000 K a absolutní bolometrickou hvězdnou velikost 9,2 mag. Nalezněte jeho poloměr.

Řešení: Zářivý výkon stanovíme ze vztahu $L = 10^{0,4(4,75 - M_{\text{bol}})} \cong 0,017 L_{\odot}$. Poloměr určíme ze vztahu $R = \left(\frac{L}{4\pi\sigma T_{\text{ef}}^4} \right)^{1/2} \cong 10^7 \text{ m} \cong 0,015 R_{\odot}$.



M: 4.5, 9.7, 11.5
AB 82.4" BC 9.0"
Dist: 16.2 LY
A: K1V 0.84 Mo
B: DA4 White Dwarf 0.5 Mo
C: M4.5 Red Dwarf 0.2 Mo

40 Eridani STF518

S. Smith 17 FEB 17

Neutronové hvězdy

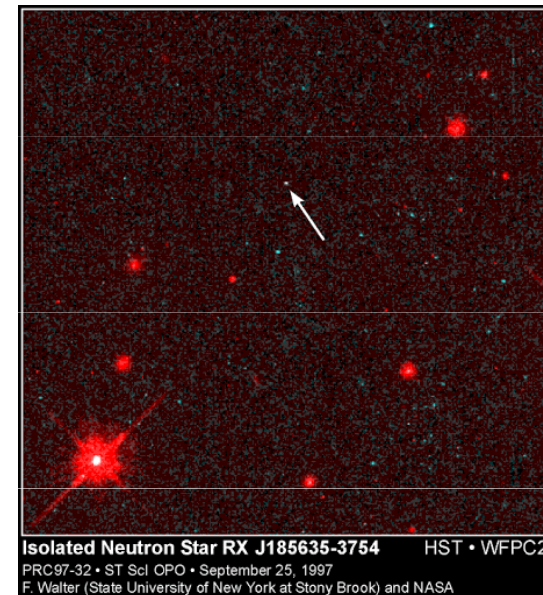
Úloha 11.12 Neutronová hvězda vzniklá po výbuchu supernovy má v průběhu prvních 100 roků po vzniku povrchovou teplotu T větší než $2 \cdot 10^6$ K. Na jaké vlnové délce leží maximum intenzity vyzařování předpokládáme-li, že vyzařuje jako černé těleso s výše uvedenou teplotou. Určete zářivý výkon, jestliže poloměr neutronové hvězdy je 10 km.

Řešení: Z Wienova posunovacího zákona určíme $\lambda_{\max} = \frac{b}{T} = 1,44$ nm, zářivý výkon stanovíme ze Stefanova-Boltzmannova zákona $L = 4\pi R^2 \sigma T_{\text{sf}}^4 = 1,14 \cdot 10^{27}$ W.

Úloha 11.13 S využitím vztahu $z = \frac{\Delta\lambda}{\lambda} = \frac{GM}{c^2 R}$ dokažte, že maximální hodnota rudého posuvu z pro záření z povrchu neutronové hvězdy je 0,14.

Řešení: Dosadíme charakteristiky typických neutronových hvězd $M = 2,8 \cdot 10^{30}$ kg = $1,4 M_{\odot}$, $R = 1,5 \cdot 10^4$ m = 15 km.

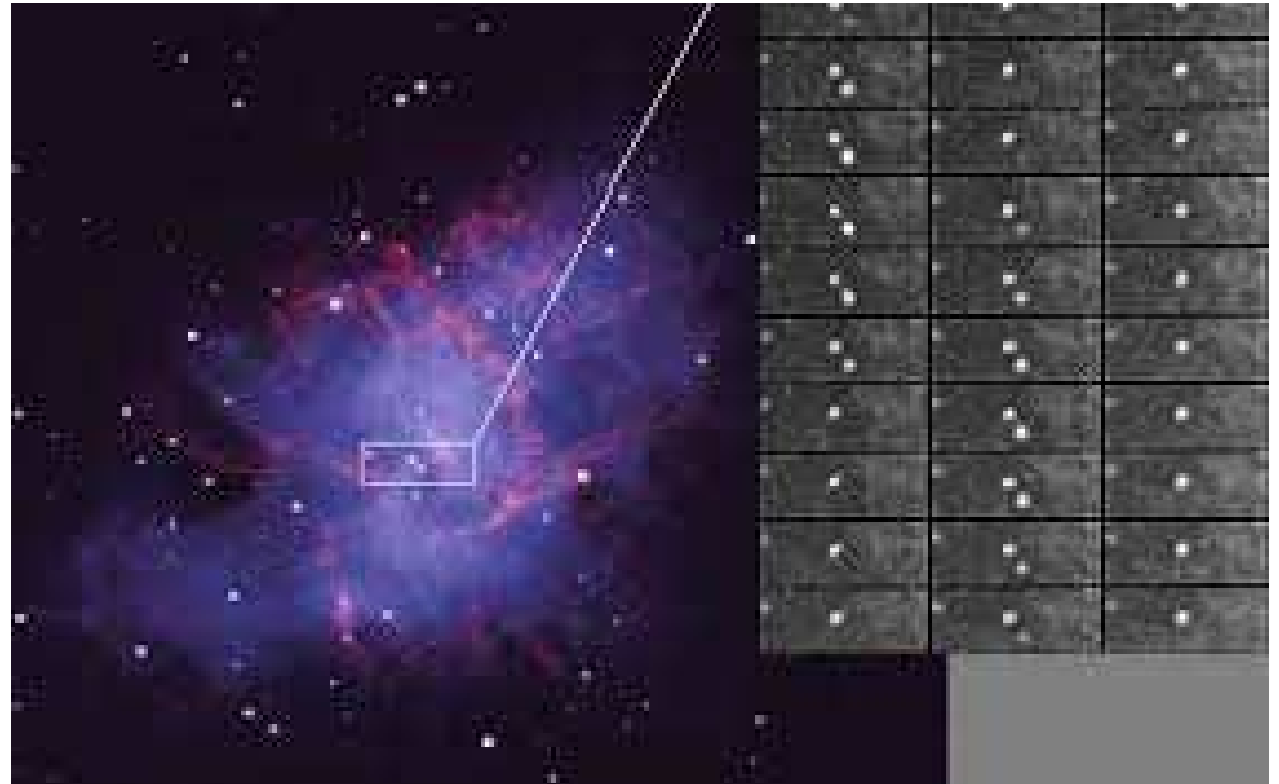
vlastnosti neutronových hvězd ...



Neutronové hvězdy

Úloha 11.16 Určete energii, kterou ztrácí pulsar – neutronová hvězda o hmotnosti $1,4 M_{\odot}$ a poloměru $R = 10 \text{ km}$ v Krabí mlhovině každou sekundu při zmenšování úhlové rychlosti rotace prostřednictvím změny rotační energie. Je zadáno $P = 0,033 \text{ s}$ a $\frac{dP}{dt} = 4 \cdot 10^{-13}$.

Řešení: $\frac{dE_{\text{rot}}}{dt} = -\frac{8}{5}\pi^2 MR^2 P^{-3} \frac{dP}{dt} = 5 \cdot 10^{31} \text{ W}$ což odpovídá zářivému výkonu Krabí mlhoviny. Lze také vyjádřit změnu rotační kinetické energie za sekundu, tedy $\Delta E_{\text{rot}} = \frac{4\pi^2 MR^2}{5P^2} - \frac{4\pi^2 MR^2}{5(P+\Delta P)^2} = \frac{4}{5}\pi^2 MR^2 \left[\left(\frac{1}{P^2}\right) - \left(\frac{1}{P^2} - \frac{2\Delta P}{P^3}\right) \right] = 10^{32} \text{ J}$. Samotná Krabí mlhovina má zářivý výkon asi $5 \cdot 10^{31} \text{ W}$.



přednáška

Vznik Krabí mlhoviny



Historické záznamy pozorování exploze supernovy r.1054

凡十一日没三年三月乙巳出東南方大中祥符四
 年正月丁丑見南斗魁前天禧五年四月丙辰出軒轅
 前星西北大如桃速行經軒轅太星入太微垣掩右執
 法犯次將歷屏星西北凡七十五日入濁没明道元
 年六月乙巳出東北方近濁有芒彗至丁巳凡十三
 日没至和元年五月己丑出天關東南可數寸歲餘
 稍没熙寧二年六月丙辰出箕度中至七月丁卯犯
 箕乃散三年十一月丁未出天囷元祐六年十一月
 辛亥出參度中犯掩側星壬子犯九游星十二月癸
 酉入奎至七年三月辛亥乃散紹興八年五月守婁

漢書卷之九十四
 卷之九十四
 漢書卷之九十四
 漢書卷之九十四

٢٤٣
 انشاء المصريين وجرى بين ابن بطران وابن رشوان وفائع كثيرة في ذلك الوقت وتوارد
 نظر بين تلامذتهم فائدة وقد تضمن كثيرا من هذه الاشياء كتاب الله ابن بطران بعد
 خروجهم من دار مصر واجتماعه ابن رشوان ولابن رشوان كتاب في الرد عليه وكان ابن
 بطران أعذب الفاظا وأكثر نظرا وأميز في الادب وما يتبعه وما يدل على ذلك ما ذكره
 في رسالته التي وجهها بدعوة الاطباء وكان ابن رشوان ألب وأعلم بالعلوم الحكيم وما
 يتلحق بها وكان ابن رشوان أسود اللون ولم يكن بالجليل الصورة ولهما مثالة في ذلك يرونها
 على من عبره ببيع الخلفة وقد بين فيهم ابراهيم أن الطبيب الفاضل لا يجب أن يكون وجهه
 جليلا وكان ابن بطران أكثر ما يقع في علي بن رشوان من هذا القبيل واشباهه ولذلك يقول
 في رسالته التي وجهها بدعوة الاطباء (الطويل)
 فلما تبدي للثواب وجهه * تكمن على أعقابهم من الندم
 وقتلوا وخفن الكلام تسترا * الا ليتنا كنا نركاه في الرحم
 وكان يلقبه بتمساح الجبل وسافر ابن بطران من دار مصر الى القسطنطينية وأقام بها سنة
 وعشرت في زمنه أو بآء كثيرة (وقالت) من خطبه فيما ذكره من ذلك ما هذا مثاله قال
 ومن مشاهد الاوباء في زماننا الذي عرض عند طلوع الكوكب الاثاري في الجزء من
 سنة ست وأربعين وأربعمائة فان في تلك السنة دفن في كنيسة لوقا بعد أن امتلأ جميع
 الدافن التي في القسطنطينية أربعة عشر ألف نسمة في الخريف فلما توسط الصيف
 في سنة سبع وأربعين لوقا النبل فحلت في القسطنطينية والشام أكثر أهلها وجميع القرى
 الامن شاء الله وانتقل الوباء الى العراق فأتى على أكثر أهلها واستولى عليه الخراب
 بطرق المسالك المتعددة واتصل ذلك بها الى سنة أربع وخمسين وأربعمائة وعرض
 للناس في أكثر البلاد فروع سوداوية وأورام الطحال وتفسير ترتيب نواب الحصان
 واضطرب نظام البصارين باختلاف علم القضاء في تقدمه المعرفة وقال أيضا بعد ذلك
 ولان هذا الكوكب الاثاري طلع في برج الجوزاء وهو مطلع مصر وأتم الوباء في القسطنطينية
 بتحصان النبل في وقت ظهوره في سنة خمس وأربعين وأربعمائة وسع لذار بطليموس
 الفاضل الذي لاهل مصر اذا طلع أحد ذوات الذواتب وانضم في الجوزاء وانزل
 زحل برج السرطان تكامل خراب العراق والموسل والجزيرة واختلت ديار بكر وروسة
 ومصر وقارص وكردان وبلاد القرب واليمن والقسطنطينية والشام واضطربت أحوال
 ملوك الارض وكثرت الحروب والقلا والوباء وسع حكم بطليموس في قوله ان زحل
 والمرجى في اقتران السرطان زلزال العالم (وقالت) أيضا من خط ابن بطران فيما ذكره
 من الاوباء العظيمة العارضة للعالم بتقدم العلماء في زمانه قال ما عرض في مدة بضع عشرة
 سنة ببقاة الاجل المرتضى والشجى الى الحسن البصرى واقعية الى الحسن القدوري
 وأفضى القضاة الساوري وابن الطبيب الطبري على جماعتهم رشوان الله ومن اصحاب
 علوم الله سماه أبو علي بن الهيثم وأبو سعيد البعالي وأبو علي بن السمع وساعد الطبيب

Iba Yasuaki

Historický záznam pozorování supernovy r. 1054

Tchuo – Tchuo: „*V prvním roce éry Č'-che (1054), v pátém měsíci, v den ti-čchou (4. července), se (hvězda – host) objevila několik palců jihovýchodně od Tchien-kuan (Dzeta Tauri).*“

Biot Édouarde 1843
des Temps

Connaissance

Historický rozbor textu Duyvendak,
J. J. L r. 1942, PASP, 54, 91.

凡十一日没三年三月乙巳出東南方大中祥符四年正月丁丑見南斗魁前天禧五年四月丙辰出軒轅前星西北大如桃速行經軒轅太星入太微垣掩右執法犯次將歷屏星西北凡七十五日入濁没明道元年六月乙巳出東北方近濁有芒彗至丁巳凡十三日没至和元年五月己丑出天關東南可數寸歲餘稍没熙寧二年六月丙辰出箕度中至七月丁卯犯箕乃散三年十一月丁未出天囷元祐六年十一月辛亥出參度中犯掩側星壬子犯九游星十二月癸酉入奎至七年三月辛亥乃散紹興八年五月守婁

Pozorování supernovy r. 1054

pozorována 3 týdny ve dne
téměř dva roky v noci

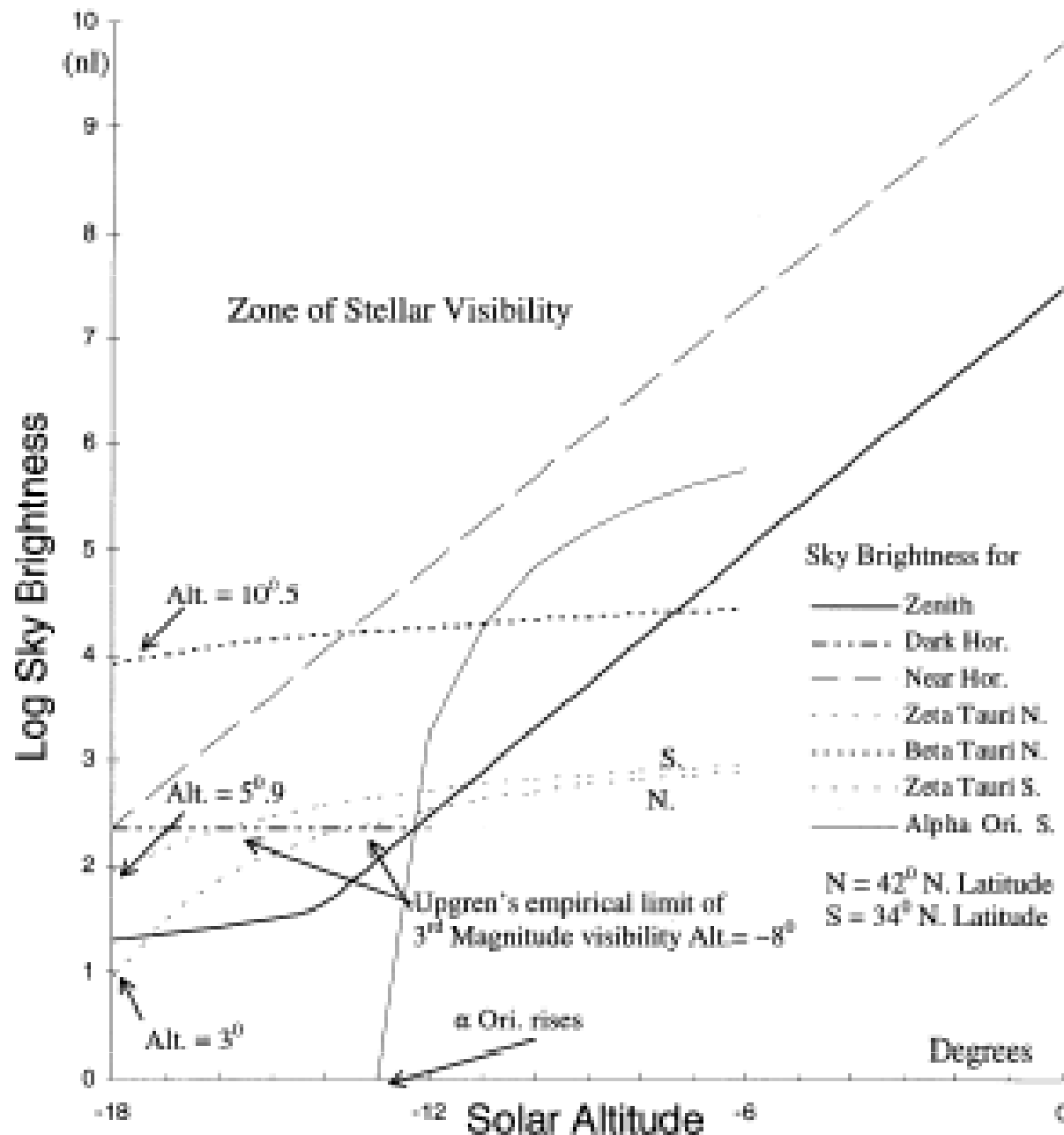
Aldebaran

Pleiades

rekonstrukce světelné křivky supernovy
odhadované údaje: 27. července $m_v - 3.5$ mag
615 dnů $m_v (6.0 \pm 0.5)$ mag atypická
supernova

Identifikace hvězdy ζ Tauri

Stellar Visibility



hledání správné hvězdy

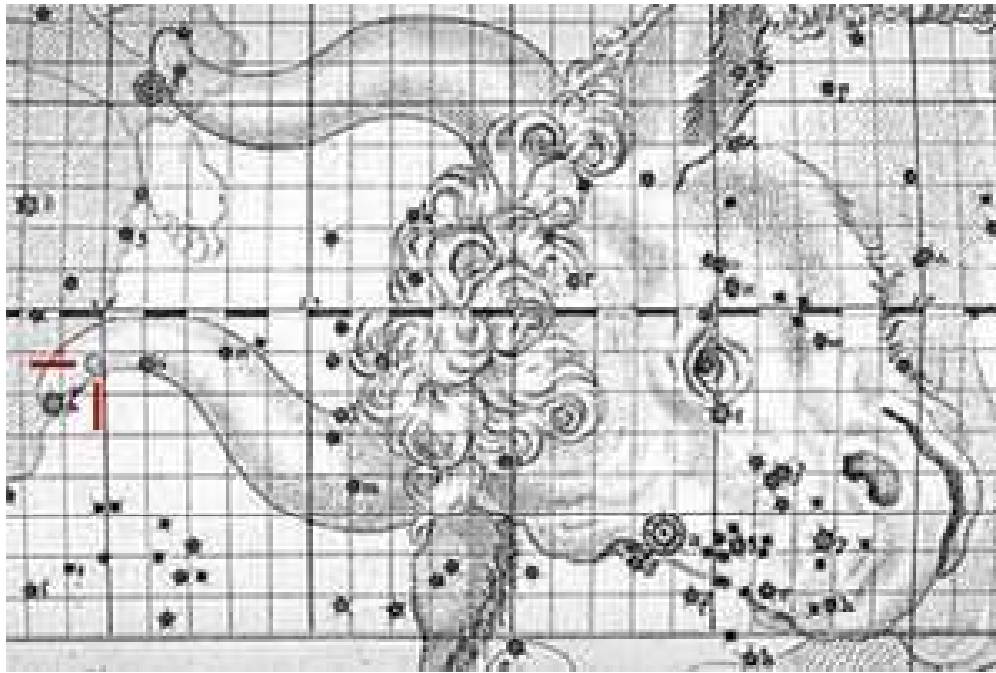
ranní soumrak - úsvit

minimální výška 6⁰

**pozorovatelnost v
severní a centrální Číně
- dynastie Sung**

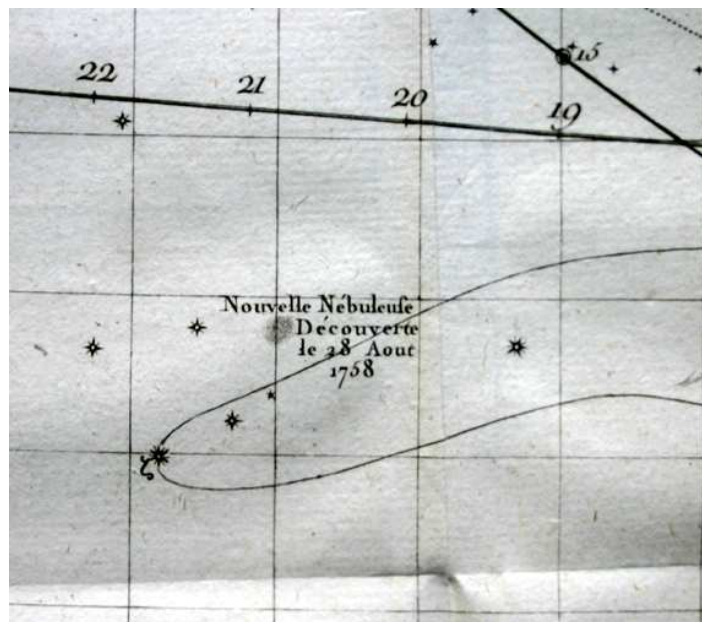
**pozice M 1 nyní 1⁰
severozápadně**

Objevení Krabí mlhoviny v novověku



John Bevis
r. 1731

Charles Messier
r. 1758



Nébuleuses. 238

| DATE des OBSERVATIONS. | Nombres des Nébuleuses. | ASCENSION DROITE. | | DÉCLINAISON. | Hauteur en degrés & min. |
|------------------------|-------------------------|-------------------|-------------|--------------|--------------------------|
| | | En Temps. | En Degrés. | | |
| | | H. M. S. | D. M. S. | D. M. S. | |
| 1738. Sept. 12 | 1. | 5. 20. 2 | 80. 0. 33 | 21. 45. 27 B | |
| 1760. Sept. 11 | 2. | 21. 21. 8 | 320. 17. 0 | 1. 47. 0 A | 0. 4 |
| 1764. Mai. 3 | 3. | 13. 31. 25 | 202. 51. 19 | 29. 32. 57 B | 0. 3 |
| | 8. | 16. 9. 8 | 242. 16. 56 | 25. 55. 40 A | 0. 2 |
| | 23 | 5. 15. 6. 36 | 226. 39. 4 | 2. 57. 16 B | 0. 3 |

239 1787.

N.° des Nébuleuses.

Détails des Nébuleuses & des amas d'Étoiles.
Les positions sont rapportées ci-contre.

- Nébuleuse au-dessus de la croupe méridionale du Taureau, ne contient aucune étoile; c'est une lumière blanche, allongée en forme de la lumière d'une bougie, découverte en observant la Comète de 1738. Voyez la Carte de cette Comète. *Mém. Acad. année 1759, page 188*; observée par le Docteur Bévis vers 1731. Elle est rapportée sur l'*Atlas céleste* anglais.
- Nébuleuse sans étoile dans la tête du Verseau, le centre en est brillant, & la lumière qui l'environne est ronde; elle ressemble à la belle Nébuleuse qui se trouve entre la tête & l'arc du Sagittaire, elle se voit très-bien avec une lunette de deux pieds, placée sur le parallèle de α du Verseau. M. Messier a rapporté cette nébuleuse sur la Carte de la route de la Comète observée en 1759. *Mém. Acad. année 1760, page 464*. M. Maraldi avoit vu cette nébuleuse en 1746, en observant la Comète qui parut cette année.
- Nébuleuse découverte entre le Bouvier & un des Chiens de Chasse d'Hévélius; elle ne contient aucune étoile, le centre en est brillant & sa lumière se perd insensiblement, elle est ronde; par un beau ciel on peut la voir avec une lunette d'un pied; elle est rapportée sur la Carte de la Comète observée en 1779. *Mémoires de l'Académie de la même année. Revue le 29 Mars 1781*, toujours très-belle.
- Amas d'étoiles très-petites; avec une faible lunette on le voit sous la forme d'une nébuleuse; cet amas d'étoiles est placé près d'Antaris & sur son parallèle. Observé par M. de la Caille, & rapporté dans son Catalogue. Revu le 30 Janvier & le 22 Mars 1781.
- Belle Nébuleuse découverte entre la Balance & le Serpent, près de l'étoile du Serpent, de sixième grandeur, la cinquième suivant le Catalogue de Flamsteed; elle ne contient aucune étoile; elle est ronde, & on la voit

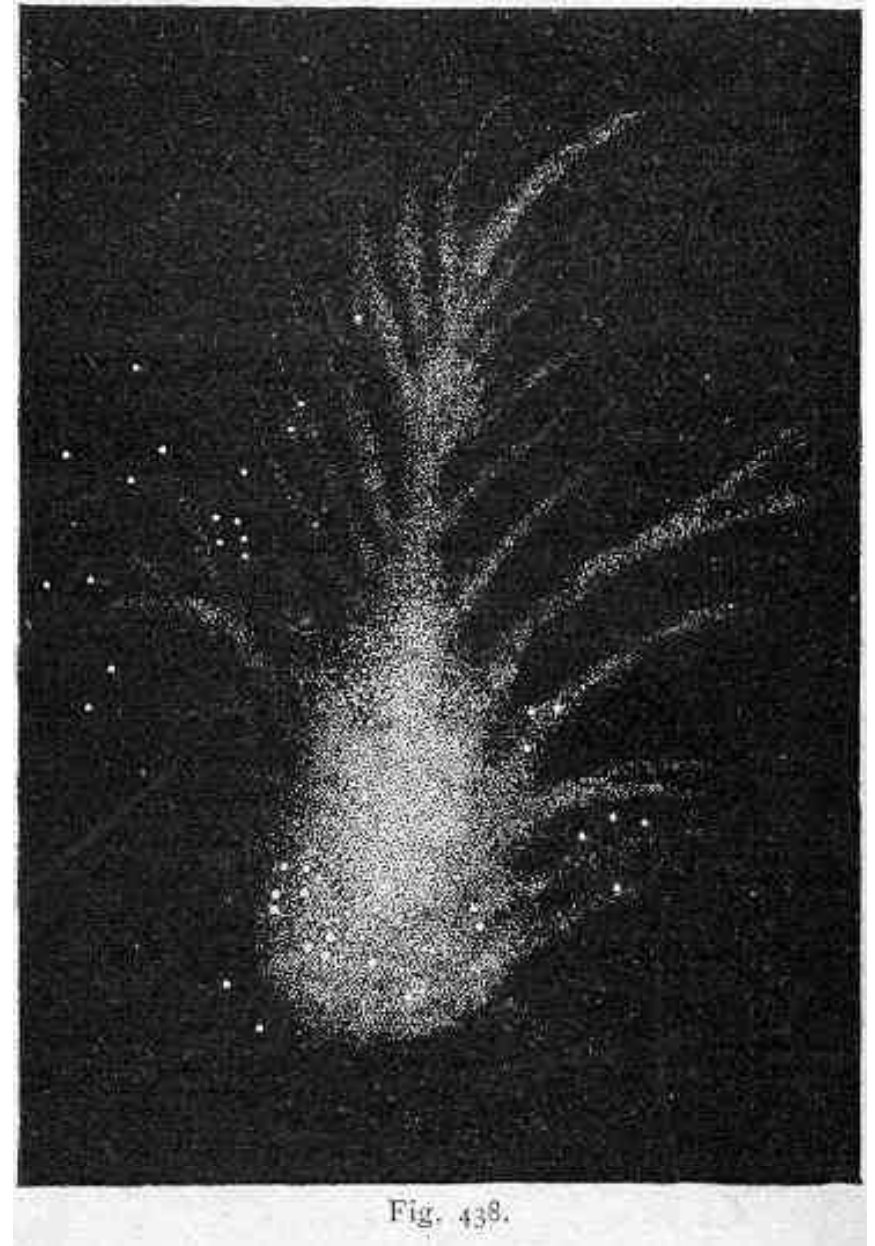
Mlhovina nebo hvězdokupa?

pozorování dalekohledem

William Herschel r. 1784
mlhovina bez hvězd

**William Parsons -
lord Rosse** r. 1844
popis mlhoviny, její název

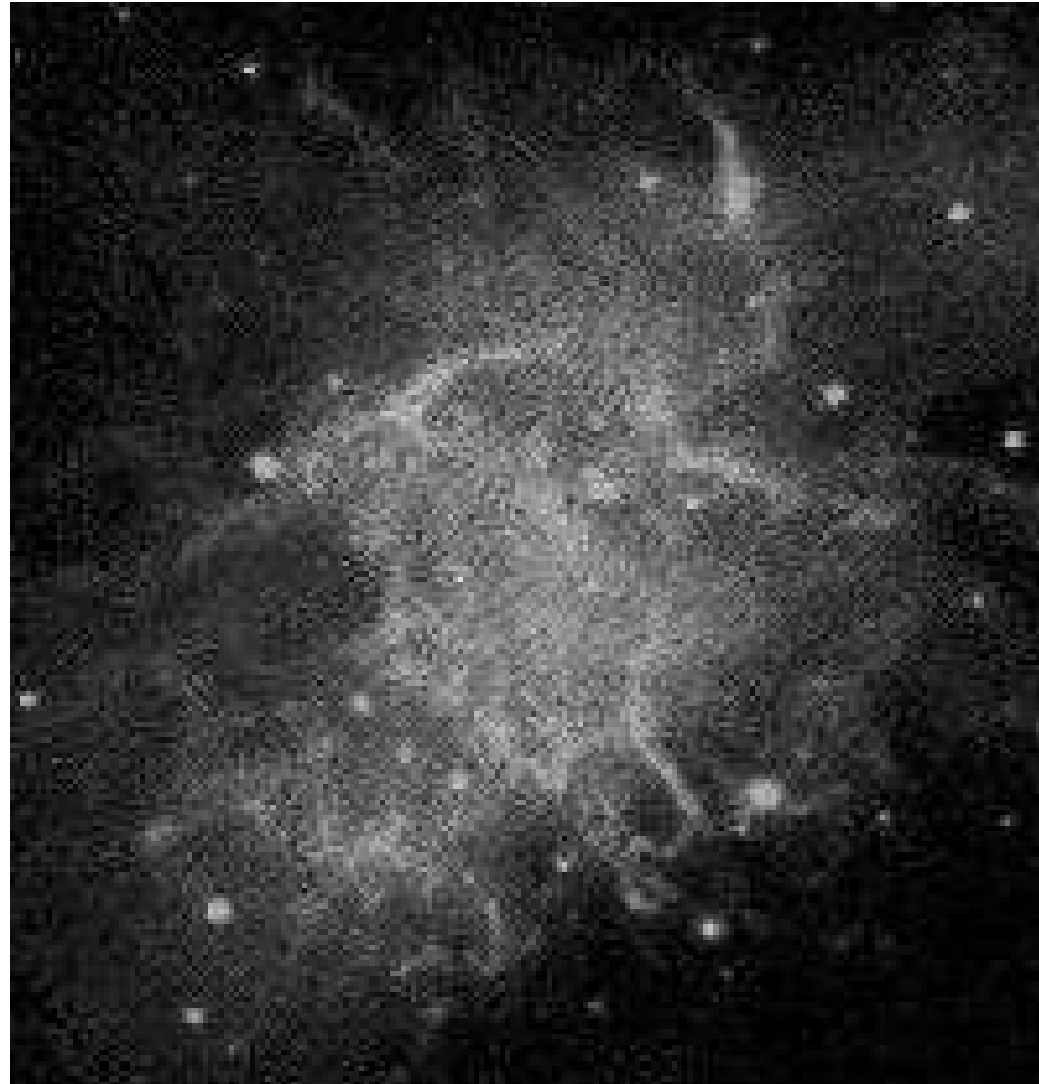
William Lassell r. 1852
velmi jasná mlhovina
s dvěma resp. třemi hvězdami



Mlhovina nebo hvězdokupa?

Isaac Roberts: fotografie Krabí mlhoviny r. 1892

→ jemná filamentová struktura



Čárové a spojité spektrum

Roscoe Frank Sanford r. 1919

v čárovém spektru identifikace šesti emisních čar H, He

zdrojem čárového spektra je vláknitá struktura, obálka
vnějších částí mlhoviny, teplota (15 000 – 20 000) K, vysoká
teplota - uvolňování tepla při srážkách, 10^9 částic v m^{-3}

druhá složka záření vytváří spojité spektrum, zdrojem amorfní
látka - původ synchrotronové záření

Josip Samuilovič Šklovskij DAN 90, 1953 - hypotéza

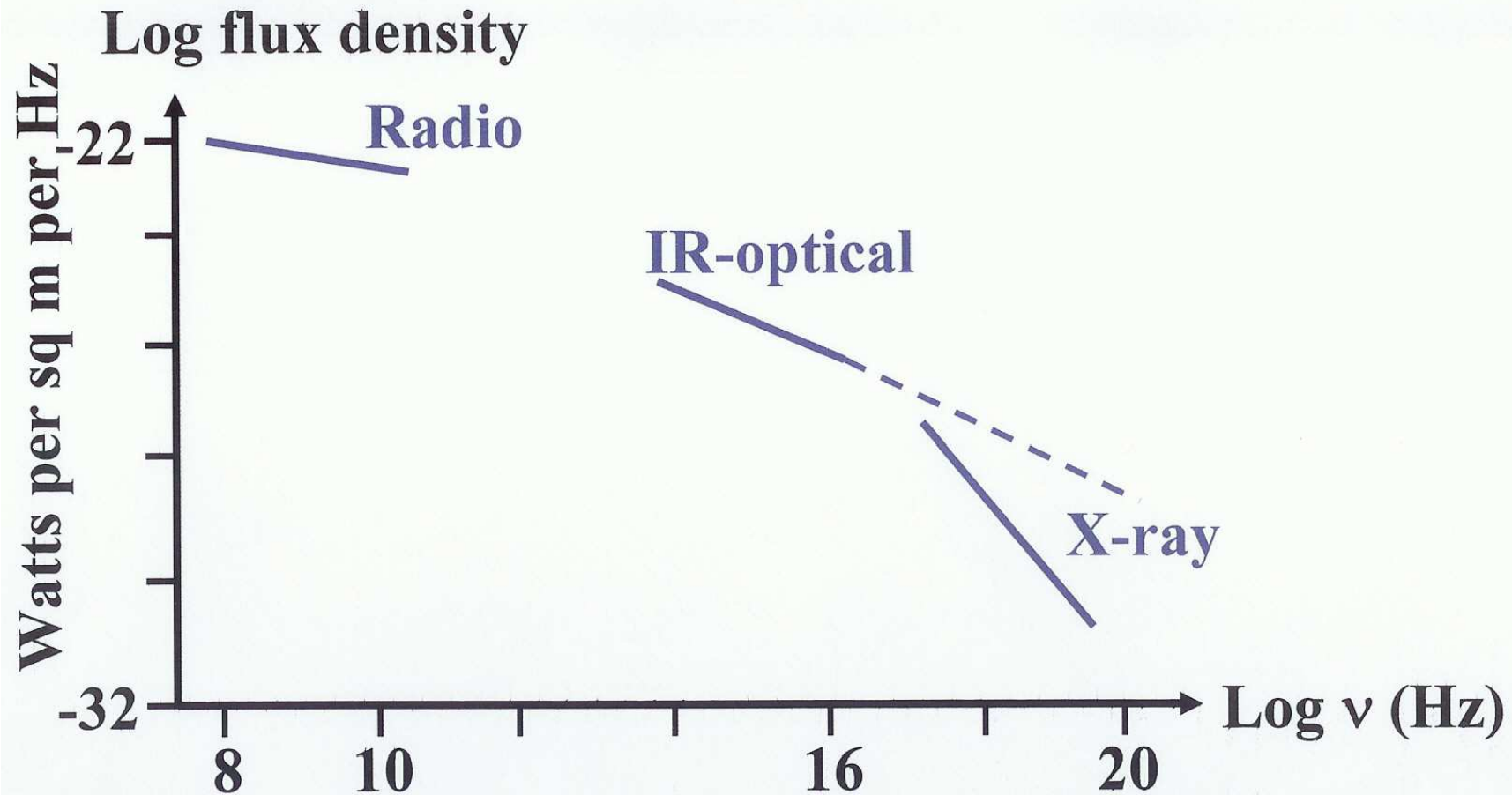
původu spojitého spektra - synchrotronové záření, potvrzeno

V. A. Dombrovski, M. A. Vašakidze 1953 - lineární polarizace

záření v optické oblasti $\approx 7\%$

Spektrum Krabí mlhoviny

Spectrum of the Crab Nebula



also γ -rays detected up to 2.5×10^{11} eV

Expanze Krabí mlhoviny

John Duncan r. 1921, PNAS, vol. 7, 179

Changes observed in the Crab Nebula Taurus

snímky 60ti palcovým dalekohled Mount Wilson

říjen

1909 → duben 1921 = 11,5 roku

stereokomparátor a mikrometr

srovnávací

hvězdy, šipky – trajektorie vláken a hvězd na 500 roků

dopředu při konstantním vlastním pohybu

závěr

práce:

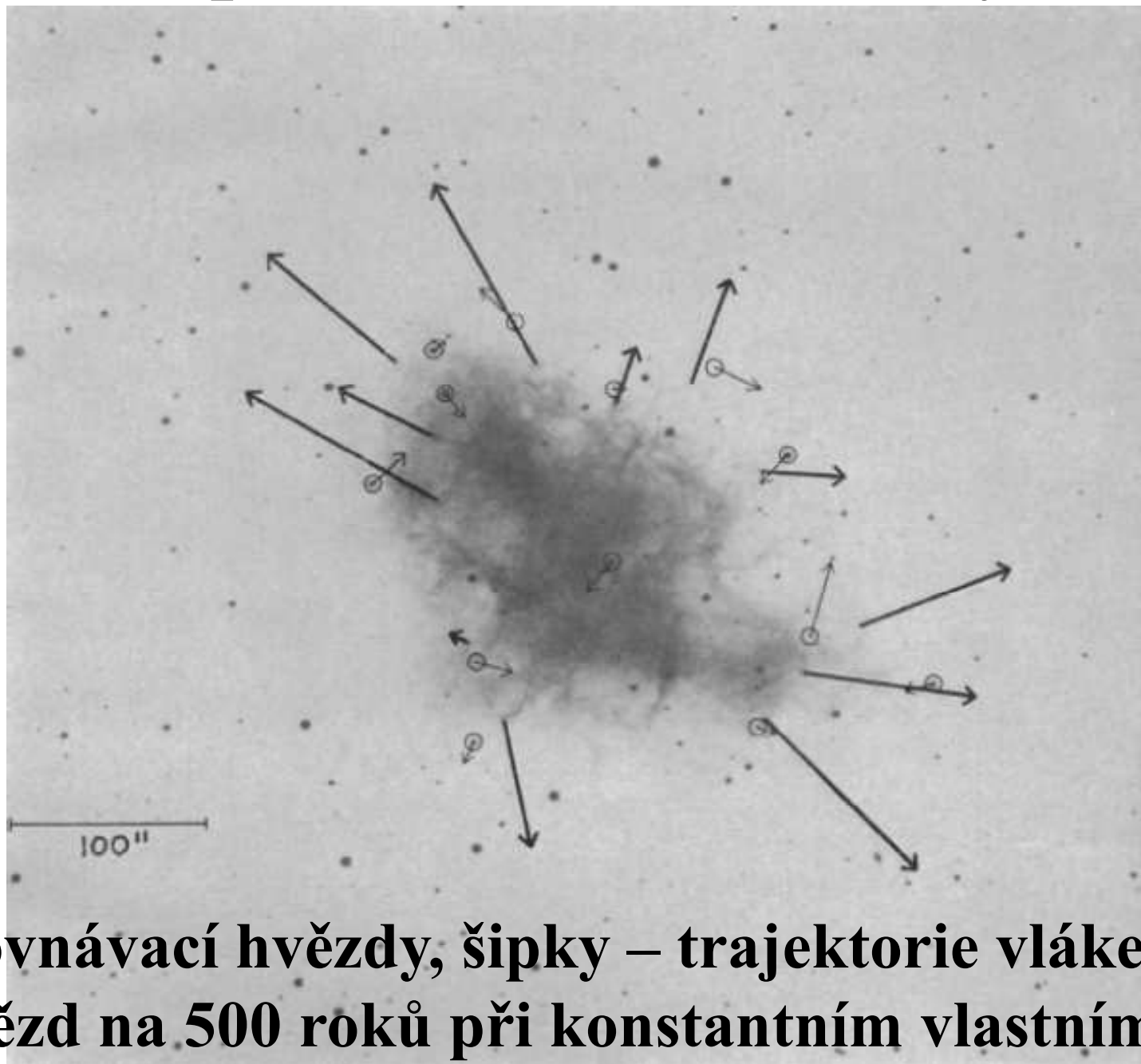
zřetelný

systematický pohyb vláken mlhoviny, náhodný pohyb hvězd

celkem 12 bodů (vláken, uzlů) mlhoviny zachycujících její

expanzi - **mlhovina expanduje!**

Expanze Krabí mlhoviny



srovnávací hvězdy, šipky – trajektorie vláken a hvězd na 500 roků při konstantním vlastním pohybu

Expanze Krabí mlhoviny

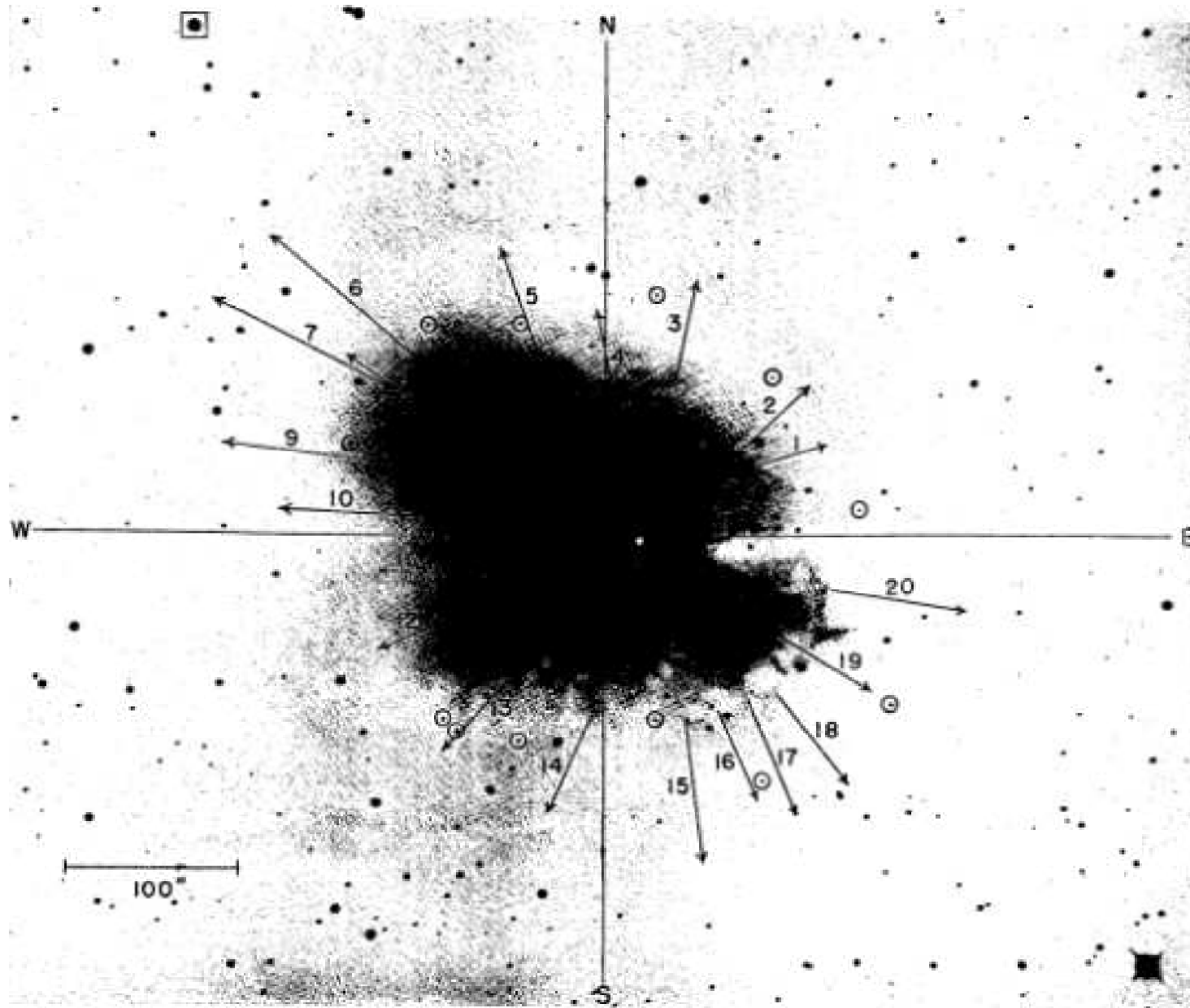
John Duncan r. 1939, ApJ **89**, 482

Second Report on the Expansion of the Crab Nebula

stejný dalekohled na Mount Wilson, interval 29 roků,
měřeny polohy 20 bodů mlhoviny, šipky zachycují
trajektorie na 500 roků při konstantní rychlosti,
počátek expanze v bílé skvrně, v blízkosti centrální
dvojhvězdy jižní složka dvojhvězdy $0,019''$ / rok
vlastní mlhovina $0,037''$ / rok, při $r = 1,3$ kpc, 230 km.s^{-1}

Duncan – hypotéza o zrychlování expanze

Expanze Krabí mlhoviny



EXPANSION OF THE CRAB NEBULA

The vectors indicate the motion of twenty nebulous points in 500 years. Projected backward they suggest an outburst occurring about 800 years ago at the point marked by the white spot. Comparison stars are encircled.

Která hvězda je centrální?

Walter Baade r. 1942, ApJ 96, 188

The Crab Nebula

rozdělení mlhoviny – vnější vláknité obálka,
vnitřní amorfní struktura,

úhlová rychlost expanze mlhoviny 0,2"/rok,

**zrychlování expanze objevené Duncanem označil
za sporné**

$r = 1,2$ kpc,

centrální hvězda, supernova I typu, její pohyb,
studium spekter dvou hvězd, úhlová rychlost
expanze mlhoviny

Která hvězda je centrální?

Rudolph Minkowski r. 1942, ApJ, 96, 199

The Crab Nebula

první **astrofyzikální pohled** na mlhovinu a centrální hvězdu,

určení teploty a zářivého výkonu mlhoviny, chemické složení H, He, O, S

jižní hvězda je centrální hvězdou,

odhadnuty její charakteristiky

30 000 L_{\odot} , 500 000 K, 0,02 R_{\odot} $1,8 \cdot 10^5 \rho_{\odot}$ hypotéza

– bílý trpaslík **pokračující ve svém vývoji**, 70 %

degenerace

Význam Krabí mlhoviny pro astrofyziku

J. S. Šklovskij:

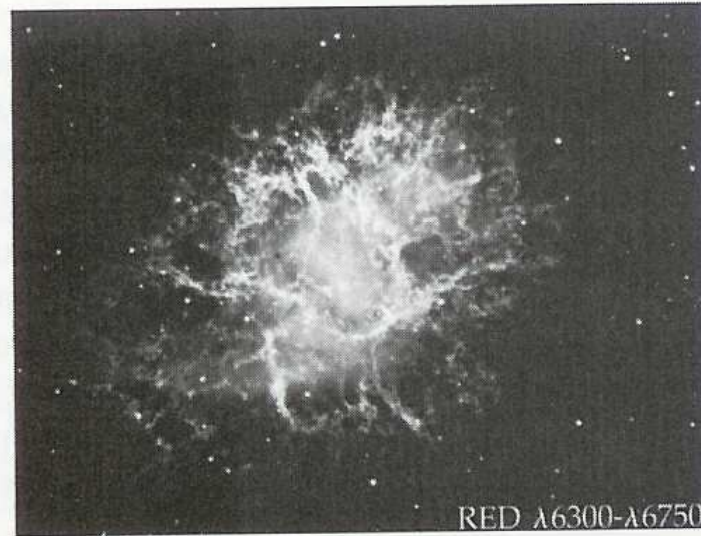
*„Astrofyziku rozdělujeme na **astrofyziku Krabí mlhoviny** a zbytek.“*



Změna vzhledu Krabí mlhoviny – různé vlnové délky, polarizace světla



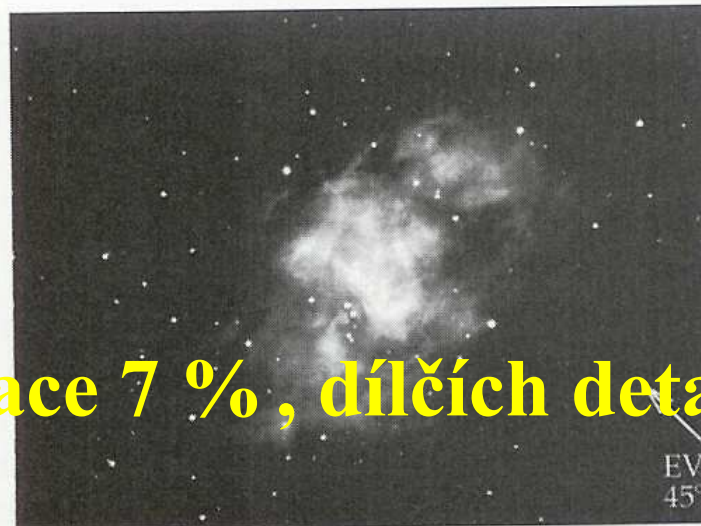
(A)



(B)



(C)



(D)

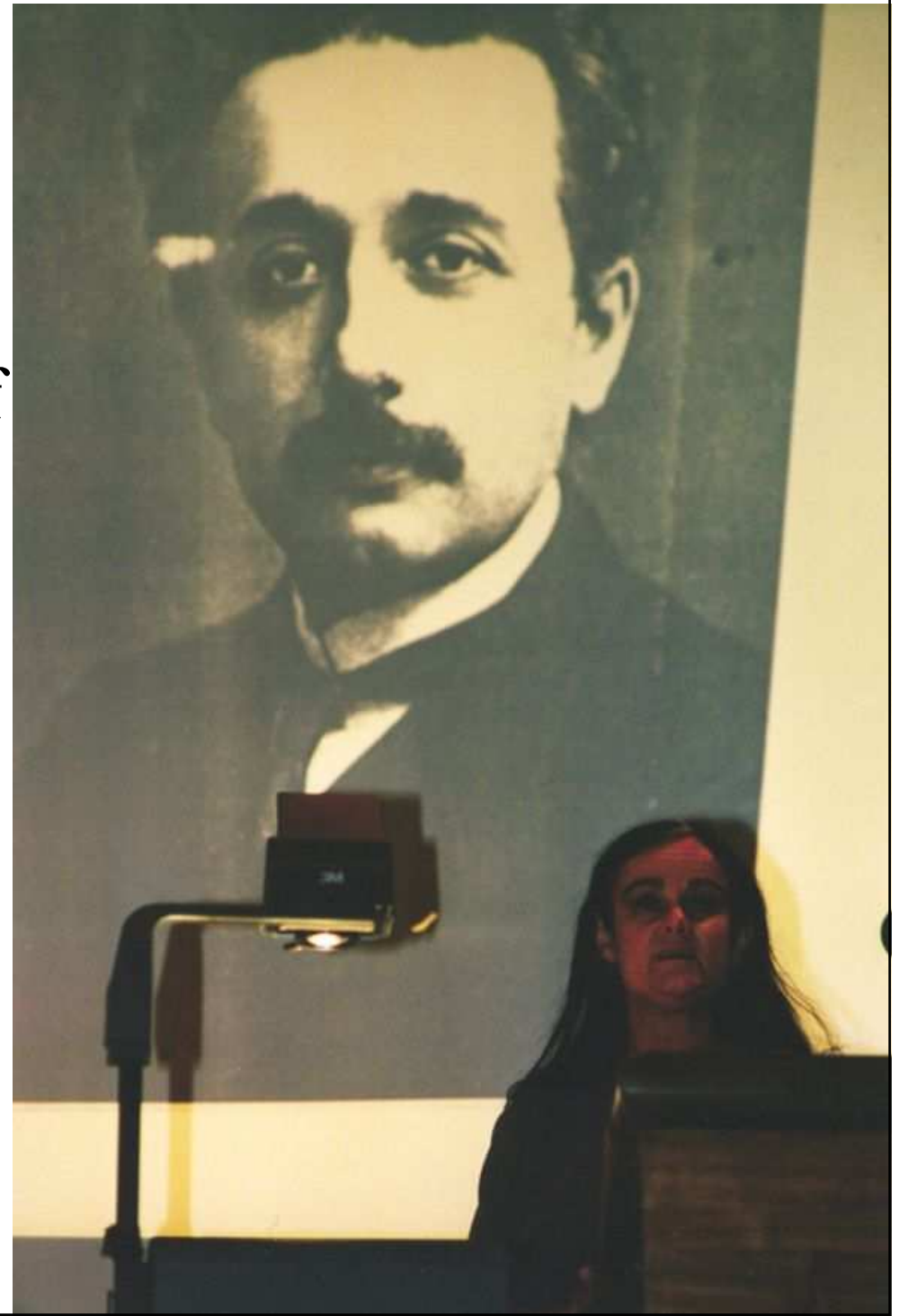
Jak mlhovina expanduje?

Virginia Louise Trimble
r. 1968 Ph.D.

Motion and Structure
of the Filamentary Envelope of
the Crab Nebula

předmluva, připomínky

**první komplexní studium
expanze Krabí mlhoviny**



Závěry práce V. Trimbleové

proměřeny polohy,

vlastní pohyby a radiální rychlosti 126 uzlů

střed expanze nalezený zpětnou extrapolací leží

jihovýchodně od dvojhvězdy v blízkosti středu mlhoviny

počátek expanze odhadnut na r. 1 140

vzdálenost Krabí mlhovina je zvýšena $\approx 1,8$ kpc

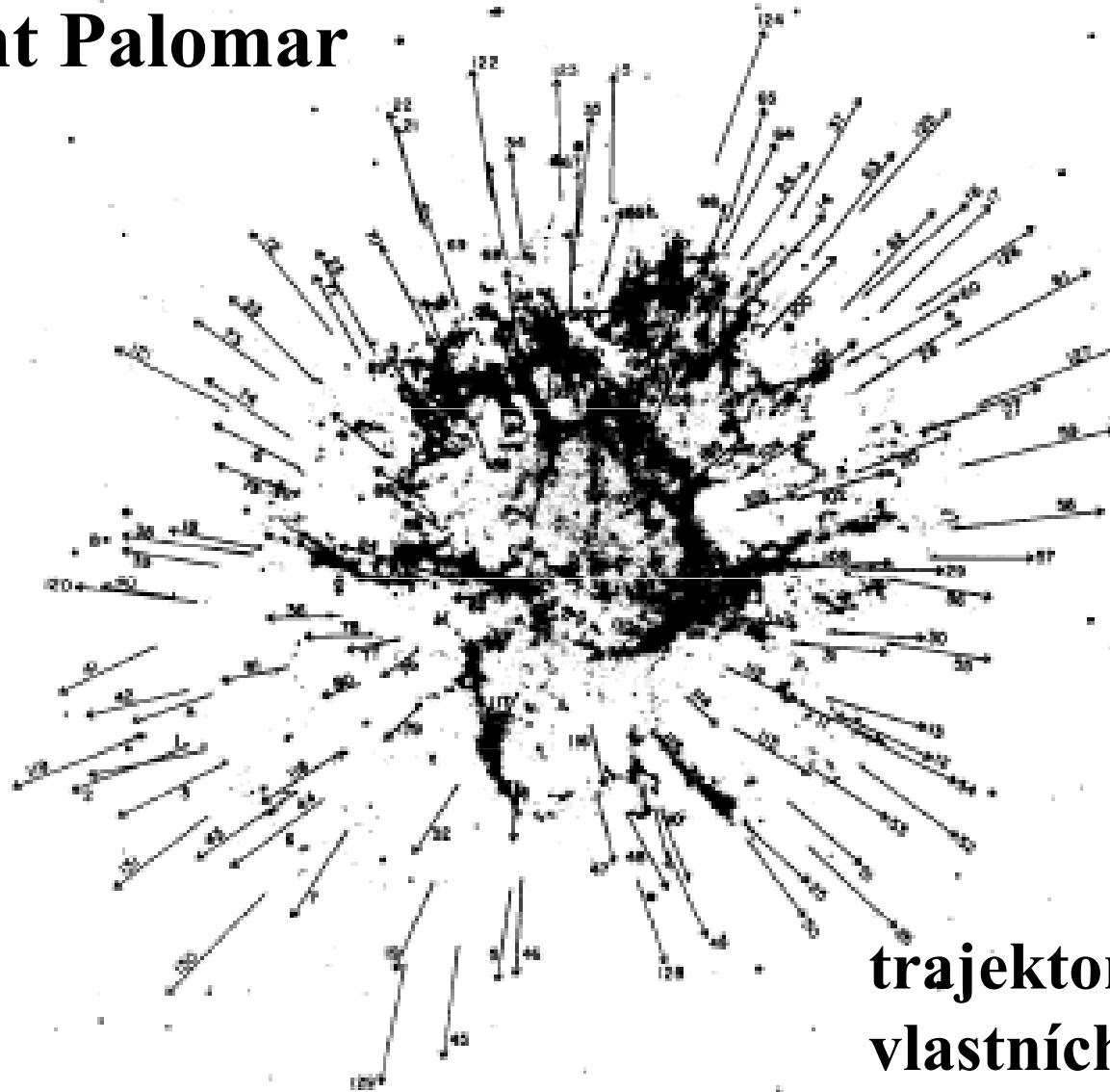
Virginia Trimble r. 1970, PASP 82, 375

Optical studies of the Crab Nebula-Line emission

component - kinematická analýza expanze mlhoviny

Expanze Krabí mlhoviny

snímek v čáře H_{α}
Mount Palomar



trajektorie
vlastních pohybů **132 uzlů**
v následujících 270 rocích při
současné rychlosti

Expanze Krabí mlhoviny

$$v = v_0 + at \quad (1) \quad s = v_0 t + \frac{1}{2} at^2 \quad (2)$$

při současné velikosti velké poloosy mlhoviny $R = 6'$, což při vzdálenosti $r = 1,8$ kpc dává $s \approx 10^{16}$ m

v je průměrná současná rychlost expanze stanovená z rozpínání mlhoviny $0,2'' \text{rok}^{-1}$, $v \approx 1,6 \cdot 10^6 \text{ m.s}^{-1}$

v_0 je počáteční rychlost expanze mlhoviny

t je čas $(1950 - 1054) = 896$ roků $\times 3,156 \cdot 10^7$ s

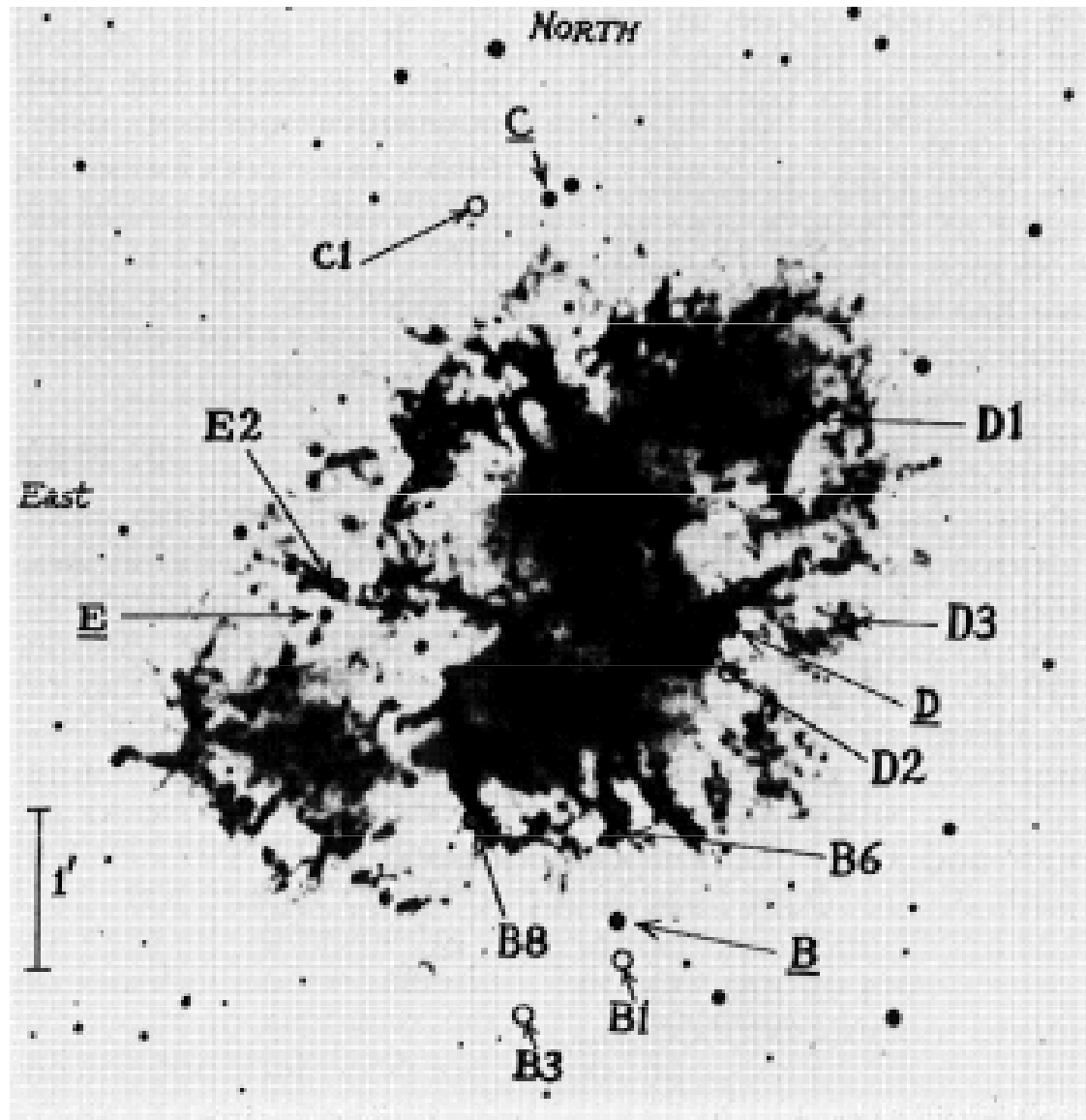
při současném zrychlení $a = 8,2 \cdot 10^{-6} \text{ m.s}^{-2}$

dává $v_0 = 1,37 \cdot 10^6 \text{ m.s}^{-1}$

ze vztahu (2) určená hodnota $s \approx 10^{16}$ m

Chemické složení

Kris Davidson, r. 1978, chemické složení 9 malých oblastí,
- He, H, N, O, Ne, S



B, C, D, E
referenční hvězdy

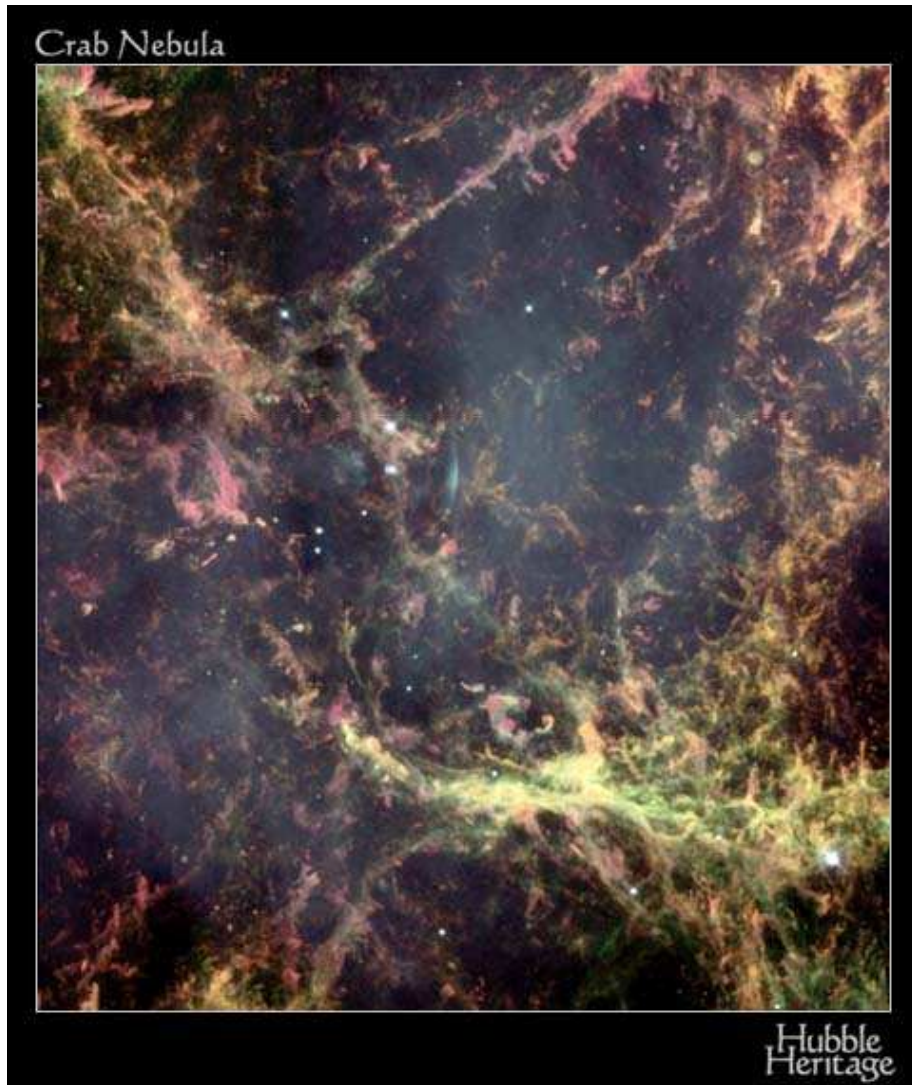
severní oblasti

obsahují méně kovů
než jižní oblasti,
obsah je podstatně
menší než u Slunce,

(50 – 75) %

**obsahu podle
hmotnosti tvoří
helium**

Chemické složení



vodík – oranžová H_{α} 656,3 nm

dusík – červená N II 658,3 nm

síra – růžová S II 673,1 nm

kyslík – zelená O III 500,7 nm

Chemické složení

Kris Davidson, Robert Kirschner, Theodore Gull,
Robert Fesen r. 1980:

chemické složení - He, H, N, O, Ne, S,
v jednotlivých oblastech a vláknech s narůstající
vzdáleností od ionizujícího zdroje
↑ He/H od 0,15 → 1,2, obsah helia je asi 5krát větší
než u typických emisních mlhovin

Gordon MacAlpine r.1989, v některých vláknech
obsah helia až 95 %

Jaký typ supernovy produkuje zjištěné chemické
složení mlhoviny?

supernova II typu

Jaká je hmotnost mlhoviny?

Čím více se mlhovina zkoumá, tím má větší hmotnost!

1957 ~ 0,2 M_{\odot} , 1968 ~ 1 M_{\odot} , 1978 ~ 2 M_{\odot} ,

1997 - celková vláknité struktury odhadována

$\approx 3 M_{\odot} + 1,4 M_{\odot}$ pulsar - $(4,4 \pm 1,8) M_{\odot}$

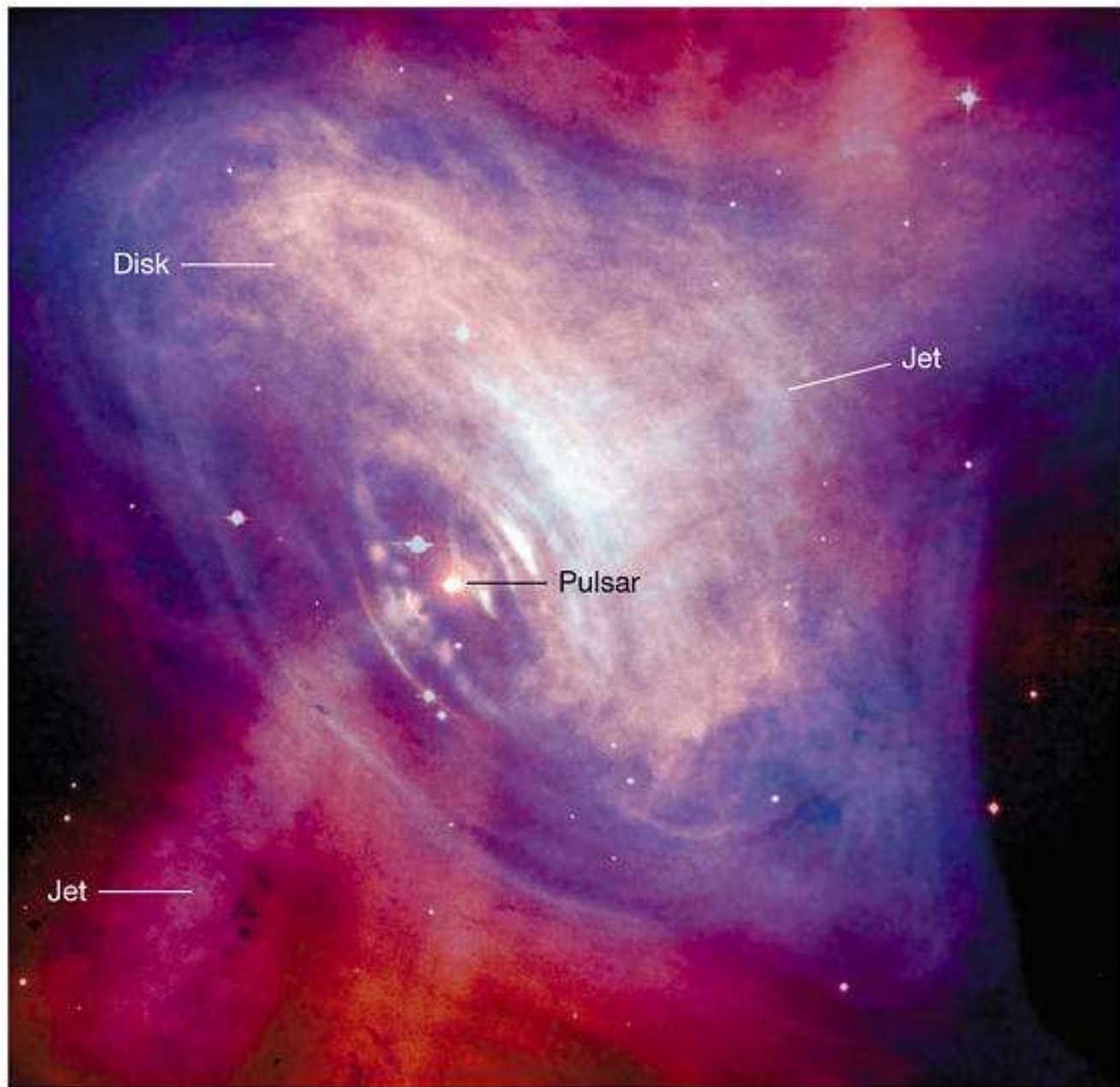
vzhledem k chemickému složení, progenitor 10 M_{\odot} ,

obsah kyslíku není výrazně vyšší,

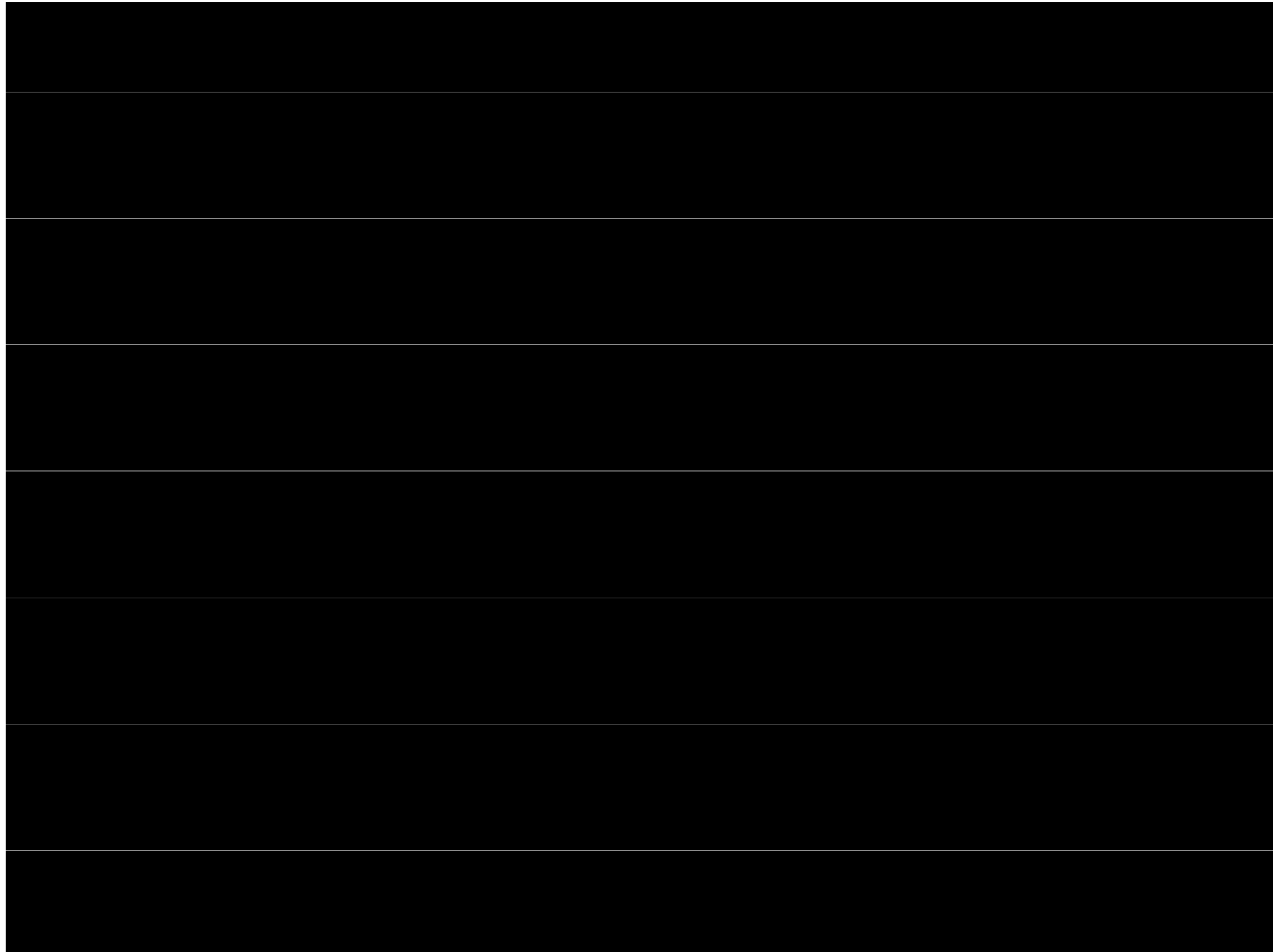
hmotnost progenitoru $< (12 - 13) M_{\odot}$

Kde je zbývající hmotnost?

Krabí mlhoviny v rtg. oboru



Krabí mlhovina v různých oborech



Pulsar

Úloha 11.14 Zjištěný časový rozdíl příchodu signálů z pulsaru v Krabí mlhovině PSR 0531+21 na frekvencích $f_2 = 430$ MHz a $f_1 = 196$ MHz má hodnotu 4,796 s. Určete vzdálenost pulsaru, jestliže hustota elektronů v mezihvězdném prostoru ve směru Krabí mlhoviny je $n_e = 2,8 \cdot 10^4 \text{ m}^{-3}$.

Řešení: Pulsar je zdrojem elektromagnetického záření v širokém intervalu frekvencí. Na Zemi je nejprve přijímáno záření o vyšších kmitočtech, následně teprve záření o nižších kmitočtech. Velikost tohoto časového posunu, tzv. disperzní míra, závisí na koncentraci volných elektronů v mezihvězdném prostředí ve směru pulsaru a na vzdálenosti pulsaru. Při řešení využijeme již upravený vzorec, ve kterém je časový rozdíl vyjádřen v sekundách, hustota elektronů n_e je dána jejich počtem v cm^3 , vzdálenost d je v pc a frekvence f_1 a f_2 jsou v MHz. Platí vztah $\Delta t = 4,15 \cdot 10^{-3} n_e d \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)$, odkud pro vzdálenost dostaneme $d = 2000$ pc. Tzv. disperzní míra $DM = \int_0^d n_e dl = 5,6 \cdot 10^7 \text{ pc} \cdot \text{m}^{-3}$.

Úloha 11.15 Určete hustotu elektronů v mezihvězdném prostoru ve směru pulsaru PSR 0901 – 63, jestliže na frekvencích $f_2 = 405$ MHz a $f_1 = 234$ MHz byl zjištěn časový rozdíl příchodu signálů 3,797 s. Vzdálenost pulsaru $d = 3000$ pc.

Řešení: Ze vztahu $\Delta t = 4,15 \cdot 10^{-3} n_e d \left(\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2} \right)$ určíme $n_e = 2,5 \cdot 10^4 \text{ m}^{-3}$.

disperze způsobuje, že na vyšších frekvencích signál pozorujeme dříve

Bílí trpaslíci – procvičování

Stanovte hmotnost bílého trpaslíka Procyon B, jehož efektivní teplota činí 7 750 K, zářivý výkon $0,0005 L_s$ a gravitační rudý posuv $z = 10^{-4}$.

Určete poměr gravitačních rudých posuvů bílých trpaslíků 40 Eri B a 40 Eri C. Hvězdy se vyznačují následujícími charakteristikami.

40 Eri B: efektivní teplota 17 000 K, zářivý výkon $0,017 L_s$, hmotnost $0,4 M_s$

40 Eri C: efektivní teplota 3 100 K, zářivý výkon $0,008 L_s$, hmotnost $0,2 M_s$

Úlohy příští týden

vlastní pohyb hvězd, radiální a tangenciální rychlost, spektroskopické dvojhvězdy, rozlišovací schopnost dalekohledu

1. Určete teoretickou mez úhlové vzdálenosti mezi dvěma hvězdami, rozlišitelnými dalekohledem na Mount Palomar - $D = 510$ cm. Předpokládejme, že hvězdy vyzařují světlo se střední $\lambda = 550$ nm.
2. Úhel mezi dvěma hvězdami je 10^{-6} rad. Můžeme je rozlišit pomocí dalekohledu na Mount Wilson - $D = 254$ cm při $\lambda = 510$ nm? Předpokládejme, že hvězdy vyzařují rádiové vlny na frekvenci 400 MHz. Můžeme je rozlišit pomocí rádiového teleskopu na Arecibu o $D = 305$ m?
3. Barnardova hvězda má největší vlastní pohyb $\mu = 10,36''$ za rok. Její vzdálenost od Slunce je 1,83 pc. Stanovte její tangenciální rychlost.
4. Ve spektru Kapteynovy hvězdy je čára vápníku $\lambda = 422,674$ nm posunuta o 0,341 nm k červenému konci spektra. Vlastní pohyb $\mu = 8,671''$ za rok, paralaxa $\pi = 0,254''$. Určete celkovou rychlost hvězdy.

Úlohy – za 14 dnů

13.3, 13.4. 13.5, 13. 9, 13.11, 13.15, 13.17, 13.19