

Projekt Brána do vesmíru

Hvězdárna Valašské Meziříčí, p. o.
Krajská hvezdáreň v Žiline



PROGRAM
CEZHRANIČNEJ
SPOLUPRÁCE
SLOVENSKÁ REPUBLIKA
ČESKÁ REPUBLIKA



EURÓPSKA ÚNIA
EURÓPSKY FOND
REGIONÁLNEHO ROZVOJA
SPOLOČNE BEZ HRANÍČ



KRAJSKÁ
HVEZDÁREŇ

Vztah fyziky a astronomie ve školní výuce

Vladimír Štefl

Ústav teoretické fyziky a astrofyziky

PřF MU Brno

Osnova

1. Současný stav, výuka x popularizace
2. Vztah fyzika - astronomie ve výuce
3. Mechanika: Země - Měsíc, pulsary - ZZMH
4. Termodynamika: vlastnosti hvězd - V.V.
5. Atomová fyzika: zdroje energie hvězd
6. Úlohy výpočetní
7. Úlohy - PC
8. Závěr

1. Současný stav výuky astronomie na školách

- změna postavení přírodovědných předmětů na základních i středních školách + zvýšení požadavků na rozvoj osobnosti studenta → **paradoxní situace**
- **restrinkce počtu vyučovacích hodin** → vyřazení tematických celků, nemožnost náročnějších metod
- **necitlivé vypuštění závěrečného astrofyzikálního tematického celku na gymnáziích** ↔ při zájmu žáků o problematiku, nových informacích - hromadné sdělovací prostředky, denní tisk, časopisy, **žáci mají vnitřní potřebu k jejich ujasnění**, neboť jsou často rozporuplné, se zmatenou či nesprávnou interpretací
- **učitel** → **odstraňování nevěrohodných informací, korekce, věcně správný výklad** včetně širších souvislostí

Začleňování astronomie do výuky metodou „rozptylové loučky“ †

Rozptýlení astronomie do předmětů:

biologie, chemie, fyziky, geografie, geologie, meteorologie,
filozofie, etiky, dějepisu, cizích jazyků

Kolik je učitelů s aprobací **F - B, F - Ch, F - Z, F - D?**

Kdo bude spojovat jednotlivé astropoznatky do nezbytných
souvislostí, systémů?

Kdo bude ověřovat znalosti žáků získané v různých
předmětech?

Nebo prověřování není potřebné jako u popularizace?

**Vhodnost metody pro I. stupeň základních škol,
nevhodné pro gymnaziální závěrečný celek .**

Výuka x popularizace

nedostatečné rozlišování popularizace x výuka

sbližování, ztotožňování, popularizační texty → posun k bezobsažným vyjádřením, bez větší informační hodnoty, často věcně nepřesné či zcela špatné

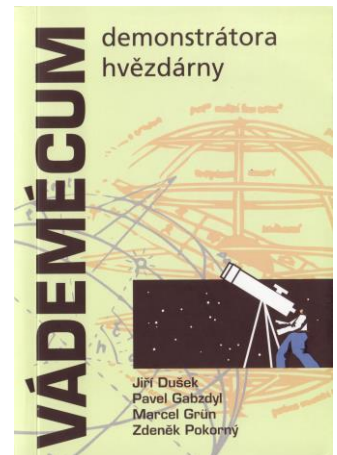
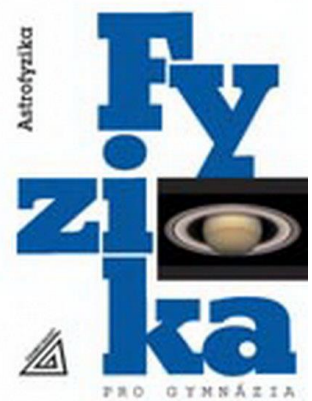
neurčitá číslovka *několik* - 8, 60, 230

terminologie: používání nevhodných termínů:
„souhvězdí Velkého vozu“, *„poměry na Venuši jsou ještě pekelnější“*

hvězdy = stálice... *„blízká stálice je vždy trochu na jiném místě“*

- pohyb prostorem → změna polohy na obloze, vývoj chemické složení, změna povrchové teploty, spektra, zářivého výkonu:

hvězdy nejsou neměnné, proč stálice?



Výuka x popularizace

výuka a popularizace astronomie se liší metodami, úplností a cíli výkladu

jde o **rozdílné formy vzdělávání**, cílem popularizace jsou ...,
pozitivní motivace, přesvědčení posluchače o tom, že astronomie je zajímavá, perspektivní a pro lidstvo důležitá.
Popularizace **nemusí striktně dbát na úplnost informací, na logickou návaznost výkladu“...**, navíc neprovádí ověřování znalostí“....

„výuka na rozdíl od popularizace však musí být systematická, musí ověřovat vědomosti, dovednosti, dbát při zavádění nových pojmů na jejich přesné definici.“

neexistuje **komplexní objektivní práce** analýzy problematiky popularizace astronomie → ☼MFF.

2. Vztah fyzika - astronomie ve výuce

Společné pojmy obou disciplín, **zákony**, **badatelské metody**, jejich využití při interpretaci astronomických jevů - témata:

Mechanika - vývoj soustavy Z - M, rotace pulsarů - ZZMH

Termodynamika - termodynamické vlastnosti hvězd - V.V.

Atomová fyzika - termionukleární reakce

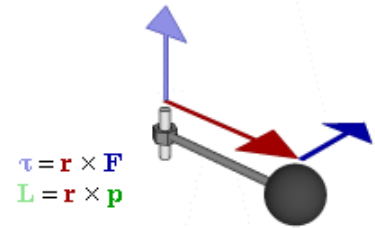
Úlohy - Saturn, Io, HST

Práce s PC - Krabí mlhovina, Hubbleův zákon

Štefl, V.: Proč vyučovat astrofyziku na gymnáziích. MFI **16** (2007), č. 9, s. 538 - 546.

3. Mechanika - zákon zachování momentu hybnosti

- podstata různých jevů ve vesmíru: fyzikální interpretace zákonitostí spojených s ZZMH



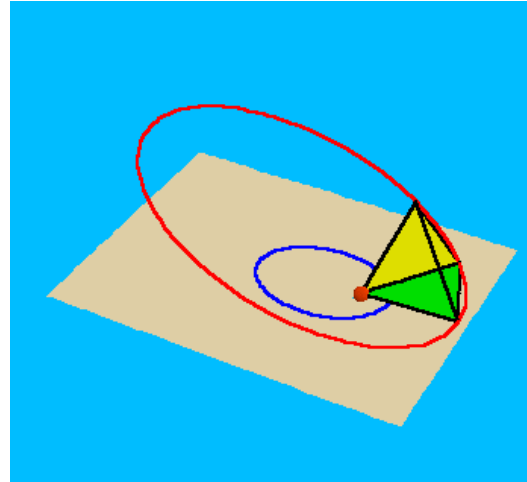
- $\vec{L} = \vec{r} \times \vec{p} = \vec{r} \times m\vec{v} = \text{konst.}$ $L = mvr = m\omega r^2 = \text{konst.}$
- platí v případech, kdy na kosmické těleso či soustavu těles nepůsobí vnější síly nebo je-li výslednice otáčivých momentů vnějších sil rovna nule, při velkých vzdálenostech mezi kosmickými tělesy je splňováno relativně dobře
- aplikace na **proces expanze či smršťování při vývoji galaxií, hvězd, sluneční soustavy, planet, měsíců**
- odpověď na otázky: **proč se Měsíc vzdaluje od Země, proč mají pulsary tak extrémní vlastnosti?**

3. Mechanika - zákon zachování momentu hybnosti

II. Keplerův zákon - plošná rychlost konstantní

$$r^2 \frac{d\varphi}{dt} = \text{konst.}_1$$

$$L = mr^2 \frac{d\varphi}{dt} = \text{konst.}_2$$



Procvičení pojmů: *dráha planet, plošná rychlost, Keplerovy zákony*

Mechanika: Procvičení pojmů: *tuhé těleso, rotační perioda, úhlová rychlost, zrychlení, moment setrvačnosti, kinetická energie rotujícího tělesa, zákon zachování momentu hybnosti, zákon zachování energie*

Fizyka w Szkole **60**, (2014), č. 3, s. 25.

3.1. Vzdalování Měsíce od Země

Měsíc se vzdaluje **37 mm.rok⁻¹**

rychlost - $1 \cdot 10^{-9}$ m.s⁻¹

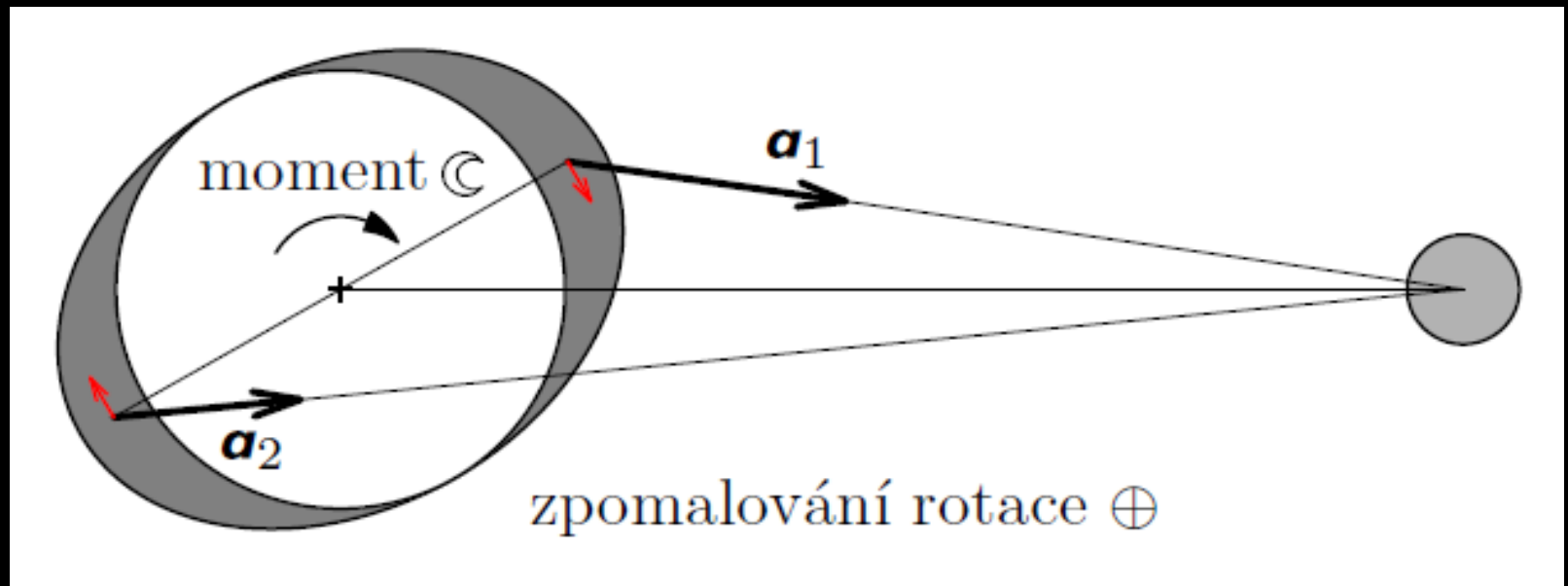
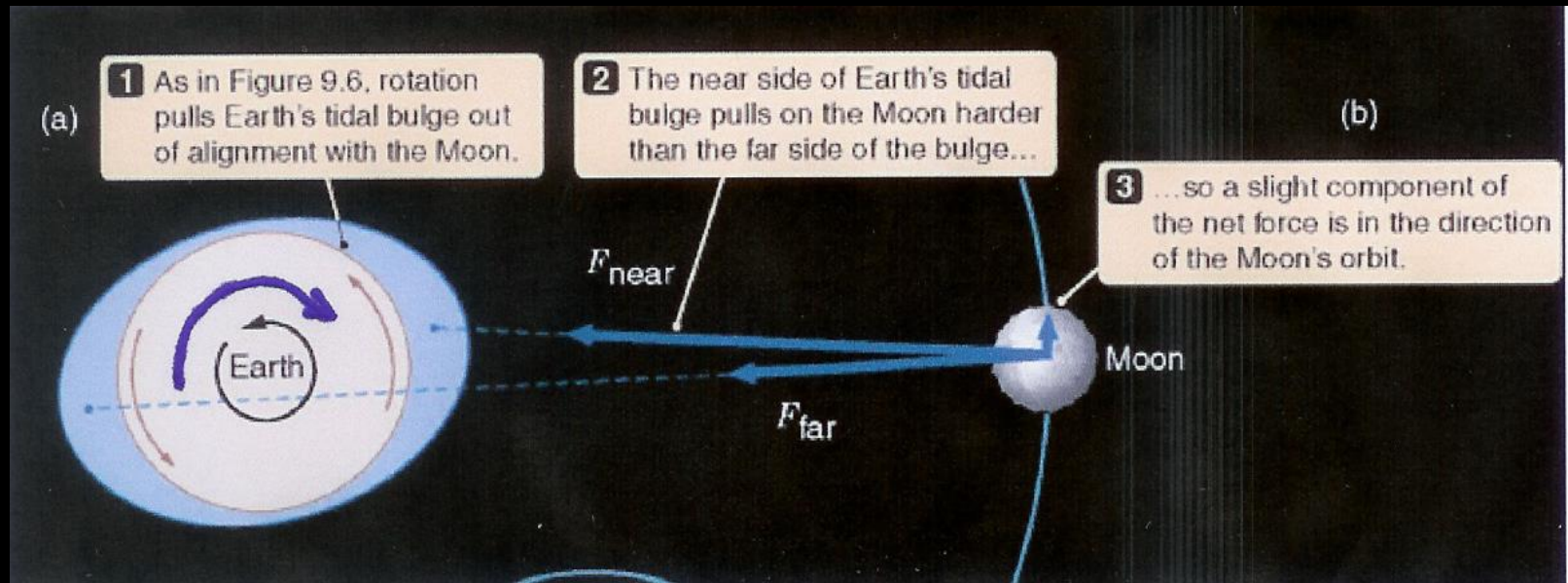
**zpomalování doby rotace Země
za jednu otočku $4,4 \cdot 10^{-8}$ s**



Apollo 14



Zpomalování rotace Země



Zpomalování rotace Země

„Urychlení“ pohybu Měsíce vede k jeho zpomalení, poklesu kinetické a nárůstu gravitační potenciální energie -V.V. analogie: cvrknutí kuličky do kopce.



Přiložíme ruku na otáčející se glóbus. Cítíme, jak nás tření mezi rukou a glóblem urychluje a současně zpomaluje rotaci glóbusu.

Proč se Měsíc vzdaluje od Země

ZZMH_{celk} dvě složky
MH_{rot} každého z obou těles
MH_{dráh} pohyb kolem
barycentra

$$L_c = L_{Zrot} + L_{Mrot} + L_{Mdráh} + L_{Zdráh}$$
Měsíc, Země jsou částečně deformovatelná tělesa → vzájemné slapové účinky přenášení momentu hybnosti Země → Měsíc

NAUCZANIE ASTRONOMII

JULIUSZ DOMAŃSKI

Toruń

VLADIMIR STEFL

Brno

Dlaczego Księżyc oddala się od Ziemi?

Stopniowe oddalanie się Księżyca od Ziemi jest faktem potwierdzonym obserwacyjnie. Spróbujmy odpowiedzieć na pytanie: Czy można wyjaśnić to zjawisko za pomocą praw fizyki?

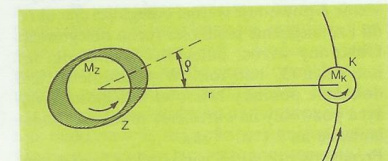
W pierwszym przybliżeniu, ze względu na duże odległości od innych ciał niebieskich, układ Ziemia–Księżyc możemy potraktować jako odosobniony. W takim układzie zarówno dynamiczne własności układu, jak i tworzących go ciał mogą zmieniać się w czasie. Istotnym ograniczeniem wymienionych zmian jest zasada zachowania całkowitego momentu pędu, na który w tym przypadku składają się momenty pędu ruchu obrotowego obu ciał wokół ich osi i moment pędu ruchu obiegowego tych ciał wokół wspólnego środka masy – barycentrum. Tabela I.

Zauważmy, gdyby Ziemia i Księżyc były ciałami doskonale sztywnymi, nie podlegającymi żadnym odkształceniom lub przeciwnie – ciałami doskonale elastycznymi, dającymi się de-

formować bez wykonywania pracy, ich rotacyjne momenty pędu byłyby niezależne od obiegowego momentu pędu. Obowiązywałyby wówczas dwie niezależne zasady zachowania.

Tymczasem Ziemia i Księżyc są ciałami podlegającymi deformacji (ale nie są doskonale elastycznymi), która jest następstwem zjawisk zwanych pływami. Zjawisko pływów oceanicznych jest dość powszechnie znane. Mniej wiemy o pływach atmosfery i litosfery. Siły pływowe mogą na Księżycu wywoływać (przynajmniej obecnie), ze względu na brak wód i atmosfery, jedynie pływy litosferyczne. Jest rzeczą oczywistą, że dzięki oporom ruchu (tarcie wewnętrzne) przemieszczenia mas (wód, atmosfery, litosfery) związane są z wykonywaniem pracy na koszt energii mechanicznej układu.

Stracona w ten sposób przez układ energia mechaniczna ulega dyssypacji (zamienia się na energię wewnętrzną). Możemy też powiedzieć inaczej. Dzięki oporom ruchu zjawiska pływowe opóźniają się względem zmian pola grawitacyjnego o pewien kąt δ (ryc. 1), powodując powstanie momentu pary sił dążącego do wyhamowania ruchu obrotowego.



Ryc. 1

Tabela I
Parametry układu Słońce-Ziemia-Księżyc

	Ziemia	Księżyc
masa [kg]	$5,977 \cdot 10^{24}$	$7,35 \cdot 10^{22}$
promień [m]	$6,378 \cdot 10^6$	$1,738 \cdot 10^6$
prędkość katowa wa obrótu [rad/s]	$7,292 \cdot 10^{-5}$	$2,67 \cdot 10^{-6}$
wielka półoś orbity [m]	$1,4959 \cdot 10^{11}$	$3,844 \cdot 10^8$
mimośrodek średnia	0,0167	0,0549
prędkość katowa na orbicie [rad/s]	$1,966 \cdot 10^{-7}$	$2,67 \cdot 10^{-6}$

Vzdalování Měsíce od Země

stejná délka roku
růst korálů, střední devon o
35 vrstev korálů více, tedy
rok o 35 dnů delší
→ den kratší

W świetle powyższych rozważań dochodzimy do wniosku, że w układzie Ziemia–Księżyc mamy następującą sytuację. Siły pływowe na tyle spowolniły rotację Księżyca, że stała się ona synchroniczna z ruchem obiegowym wokół Ziemi (dzięki temu Księżyc jest zwrócony do Ziemi stale tą samą stroną). Taka sytuacja (zrównanie okresów obrotów obu globów z okresem obiegu) jest obserwowana także w układzie Pluton–Charon.

W takim układzie wymiana między rotacyjnym a obiegowym momentem pędu Księżyca jest minimalna, spowodowana tylko ekscentrycznością jego orbity. Natomiast okres obrotu Ziemi wokół osi jest ok. 27 razy krótszy niż okres obiegu wokół barycentrum. Siły pływowe nadal powodują zmniejszanie okresu obrotu Ziemi (skracanie doby). Współcześnie zmniejsza się ona $4,4 \cdot 10^{-8}$ s na obrót. Moment pędu ruchu obrotowego Ziemi zmniejsza się; jego część zostaje przeniesiona do momentu pędu ruchu obiegowego układu. Stosując przybliżenie orbit kołowych moment pędu układu

$$L = \mu \cdot v \cdot r,$$

gdzie L – moment pędu układu, v – prędkość obiegu, r – odległość środków mas części układu, a

$$\frac{1}{\mu} = \frac{1}{M_Z} + \frac{1}{M_K}.$$

Z równania

$$G \frac{M_Z M_K}{r^2} = \mu \frac{v^2}{r},$$

po prostych przekształceniach

$$r = \frac{L^2}{G M_Z M_K \mu}$$

oraz

$$v = \frac{G M_Z M_K}{L}.$$

Z otrzymanych związków wynika, że zwiększenie L powoduje wzrost odległości ciał układu i zmniejszenie prędkości ruchu obiegowego. Obliczony wzrost odległości wynosi ok. 0,1 mm/dzień (37 mm/rok). Współczesne bardzo dokładne pomiary laserowe odległości Księżyca pozwoliły na określenie prędkości oddalania się na $1,1 \cdot 10^{-9}$ m s⁻¹.

Przedstawione wyżej wielkości są bardzo małe. Popatrzmy jednak na problem z perspektywy dłuższych okresów czasu. A mamy na ten

temat dość wiarygodne dane. Dostarcza ich m.in. paleontologia. Badając rafy koralowe potrafimy wyróżnić zarówno przyrosty roczne jak i dobowe. Współcześnie wyróżnia się 365 linii w roku, a u zachowanych egzemplarzy z okresu dewońskiego (z przed 380 mln lat) 400 linii w roku. A więc rok w okresie dewońskim miał o 35 dni więcej (inaczej: doba była odpowiednio krótsza). Tabela II.

Tabela II

Epoka geologiczna	Wiek mln lat	Dni w roku	Godzin w dniu	Wzgl. dł. doby
Współczesność	–	365,24	24	1,00
Kreda	70	370,3	23,7	0,98
Perm	270	364,1	22,8	0,95
Karbon	300	387,5	22,6	0,94
Dewon	380	398,7	22,0	0,91
Sylur	440	407,1	21,5	0,89

Jeśli wspomniana wartość kąta δ nie ulegnie zmianie, to odległość Ziemia–Księżyc za ok. 5,5 mld lat wzrośnie do 73 promieni ziemskich (dziś ok. 60), a długość doby osiągnie 1000 godzin! Ziemia i Księżyc będą do siebie zwrócone stale tymi samymi półkulami. Dalsza ewolucja układu będzie zachodziła dzięki występowaniu pływów słonecznych (spowodują one ponowne zbliżanie się Księżyca do Ziemi).

Zadanie. Jak wspomnieliśmy, dzięki zjawisku pływów okres obrotu Ziemi maleje o $4,4 \cdot 10^{-8}$ s na obrót (0,0016 s na stulecie). Oblicz, jaką moc wydzieliła się dzięki pływom. Średni światowy pobór mocy z elektrowni wynosi $1,5 \cdot 10^{12}$ W. Energia obrotowa bryły sztywnej

$$E = \frac{I \omega^2}{2} = \frac{1}{5} \frac{4 \pi^2 M R^2}{T^2}.$$

A ponieważ

$$p = \left| \frac{dE}{dt} \right|,$$

zatem

$$P = \frac{1}{5} \frac{4 \pi^2 M R^2}{T^3} 2 \frac{dT}{dt}.$$

Kładąc $\frac{dT}{dt} = 0,0016$ otrzymujemy

$$P = 3,0 \cdot 10^{12} \text{ W}.$$

Zpomalování zemské rotace - historická zatmění

babylónská kronika: úplné zatmění Slunce 15. dubna 136 př.
n. l. v 8 hod. 45 min - **Babylon**

vypočtený pás totality, za předpokladu současné úhlové
rychlosti rotace Země, měl ležet nad **Mallorkou** rozdíl
zeměpisné délky $3 \frac{1}{4}$ hod.

**důvod - původně větší úhlová rychlost rotace Země -
postupně se zpomalovala, průměrně se den prodlužuje o
0,0016 s za stol.**

Podrobnější rozbor:

F.

R. Stephenson.: *Historical Eclipses and Earth's Rotation*.
Cambridge University Press, Cambridge 1997.

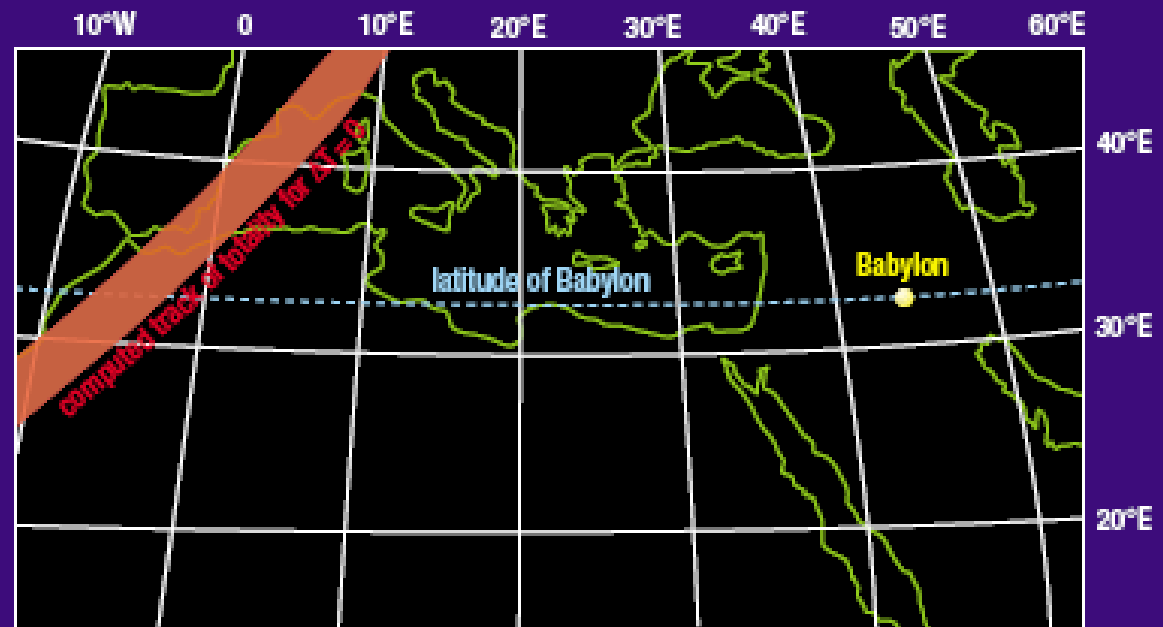
Zpomalování zemské rotace – historická zatmění



3: Late Babylonian astronomical tablet containing a record of the total solar eclipse of 15 April in 136 BC. See text for translation. (Courtesy: British Museum)

za 100 roků by se hodiny jdoucí
rovnoměrně předběhly oproti
zemské rotaci o $\Delta t \times 36525 = 29 \text{ s}$

za 2000 roků rozdíl $3^{\text{h}} 15^{\text{m}} \dots 40^{\circ}$



4: Computed track of totality for the eclipse of 15 April in 136 BC, assuming a fixed length of day ($\Delta T = 0$). This track lies more than 50° to the west of Babylon, where totality was actually observed.

zatmění Slunce
15. dubna 136 př.n.l.

Vzdalování Měsíce od Země

soustava Země - Měsíc, platí ZZMH_{celk}

$$\mathbf{L_{Zrot} + L_{Mdrahpoč} = L_{Mdrahkon}} \quad L_{Zrot} - 17 \%, L_{Mdrah} - 82 \%$$

počáteční stav:

$$L_{Zrotpoč} = 6 \cdot 10^{33} \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-1}$$

$$L_{Mdrahpoč} = 2,9 \cdot 10^{34} \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-1}$$

$$\text{při } \omega_{poč} = 2,7 \cdot 10^{-6} \text{ rad.s}^{-1}$$

$$\text{celkový počáteční moment hybnosti } L_{cpoč} = 3,5 \cdot 10^{34} \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-1}$$

$$L_{Mdrahkon} = 3,5 \cdot 10^{34} \text{ kg.m}^2.\text{s}^{-1}$$

$$\text{III. Keplerův zákon } a_{poč}^3 \omega_{poč}^2 = a_{kon}^3 \omega_{kon}^2$$

konečný stav:

$$a_{kon} = 5,6 \cdot 10^8 \text{ m}, \omega_{kon} = 1,5 \cdot 10^{-6} \text{ rad.s}^{-1}$$

$$\text{doba oběhu } T_{kon} = 48 \text{ dnů}$$

3.2. Pulsar v Krabí mlhovině



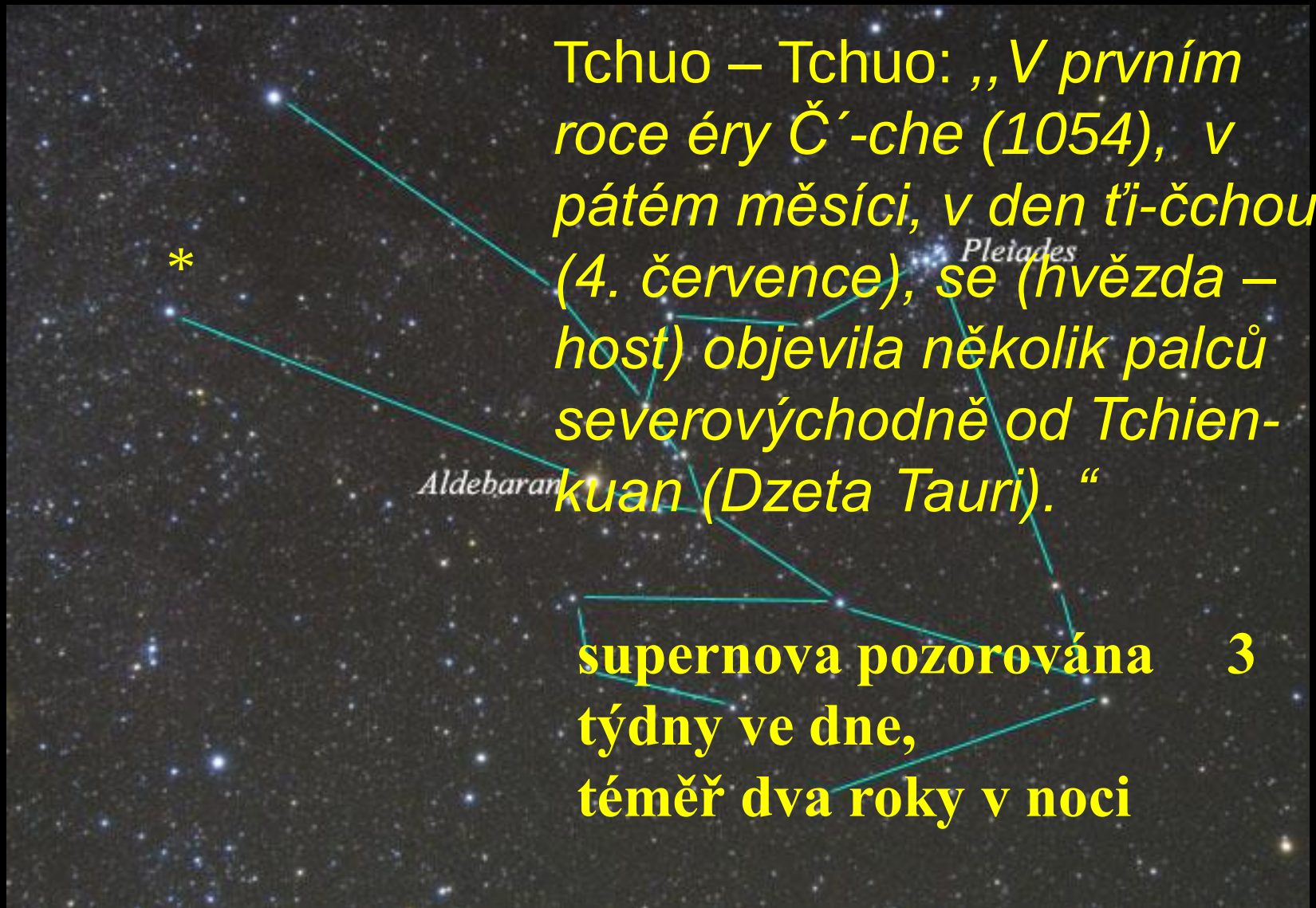
Jak vznikl pulsar a Krabí mlhovina, jaká je její strukturu?

Lze transformovat astronomickou podstatu vzniku krásy do výuky fyziky na gymnáziu?

Vznik Krabí mlhoviny



Vznik Krabí mlhoviny - exploze supernovy



Tchuo – Tchuo: „V prvním roce éry Č'-che (1054), v pátém měsíci, v den t'i-čchou (4. července), se (hvězda – host) objevila několik palců severovýchodně od Tchien-kuan (Dzeta Tauri).“

**supernova pozorována 3
týdny ve dne,
téměř dva roky v noci**

Iba Yasuaki

漢泉院奉書二年正月十四日校母時客日書

凡十一日沒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沒明道元年六月乙巳出東北方近濁有芒彗至丁巳凡十三日沒至和元年五月己丑出天關東南可數寸歲餘稍沒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

Neutronové hvězdy

při $\rho > 10^{12} \text{ kg.m}^{-3}$ nastává neutronová degenerace

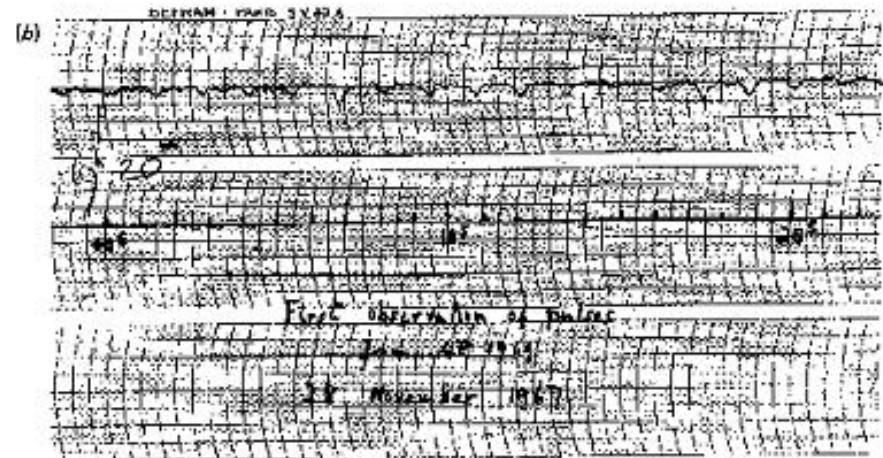
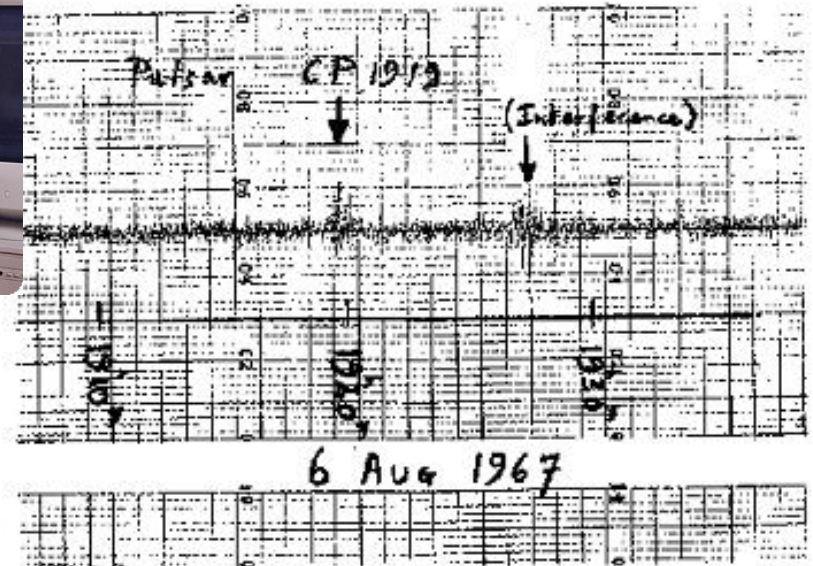
neutronizace $e^- + p \rightarrow n + \nu_e$



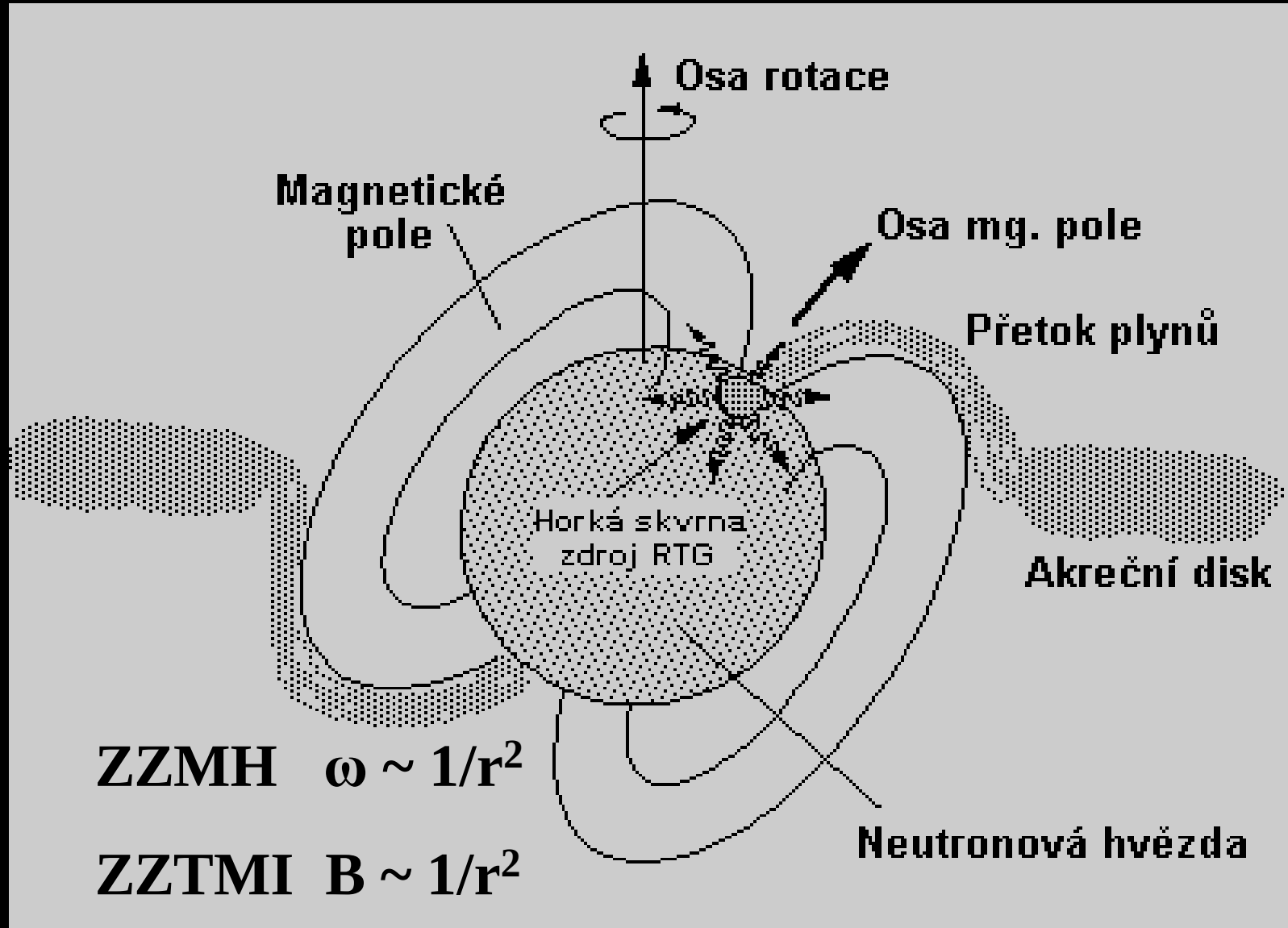
výrazné gravitační a magnetické pole neutronových hvězd

Objev pulsarů - neutronových hvězd

- Don't look in the optical
 - 2 radio astronomers
Cambridge (Jocelyn Bell
and Tony Hewish)
recording intensity of radio
waves from several stars
- Nobelova cena za fyziku A. Hewish 1974**
- CP 1919 (now known as
PSR B1919+21) seen to
have a period of 1.337 s.



Majákový model pulsaru - vlastnosti



Pulsar v Krabí mlhovině

Proč má **takové** extrémní vlastnosti ?

jeho vznik - zákon zachování momentu hybnosti $L = mrv$

při $M = 1,4 M_{\odot}$, $R = 10 \text{ km}$, $P = 0,033 \text{ s}$, $dP/dt = 4 \cdot 10^{-13}$

moment setrvačnosti tuhého tělesa - koule $J = \frac{2}{5} MR^2$

rotační kinetická energie $E_{rot} = \frac{1}{2} J \omega^2$

úhlová rychlost $\omega = \frac{2\pi}{P}$

změna rotační energie

$$\frac{dE_{rot}}{dt} = -\frac{8}{5} \pi^2 MR^2 P^{-3} \frac{dP}{dt}$$



Pulsar v Krabí mlhovině

úbytek kinetické rotační energie = vyzářená energie

$$\frac{dE_{rot}}{dt} = \frac{dE_{zar}}{dt}$$

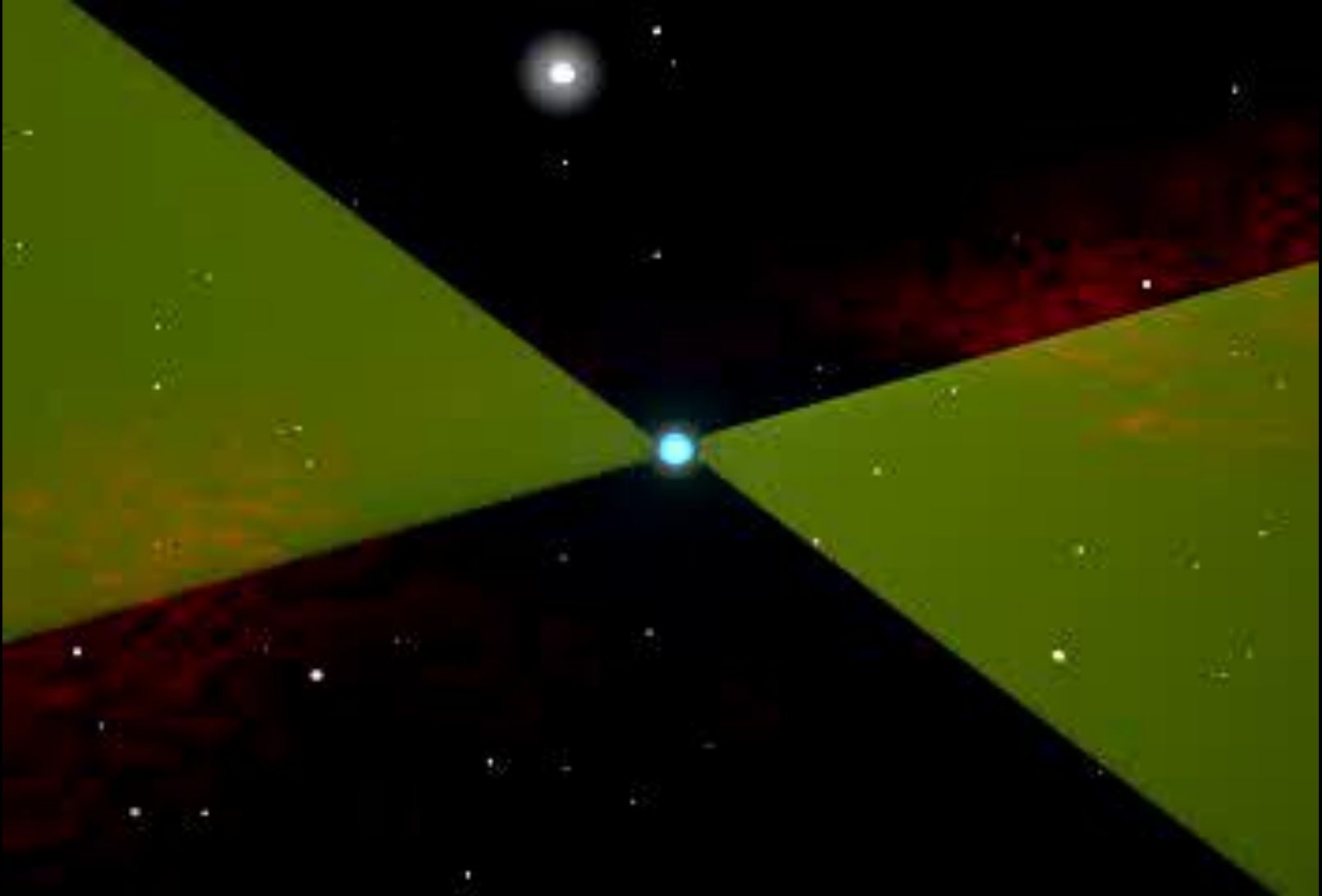
zářivý výkon Krabí mlhoviny $\frac{dE_{rot}}{dt} = -5.10^{31}W$

- odpovídá změně rotační energie za sekundu

rotující magnetický dipól, ve vnitřní části mlhoviny

produkce vysoce energetických elektronů

Majákový model pulsaru v Krabí mlhovině





Neutronové hvězdy

srovnání neutronových hvězd a obrů básníkem

Jan Neruda
Písně kosmické

*Tot' prostě tím: ty maličké
z jaderného jsou fládru,
ale ty velké a poslušné
jen z plynových jsou hadrů.*



4. Termodynamika gravitační

Hvězdy - soubory částic držených pohromadě gravitací

- Jak hvězdy pracují a jaká je jejich termodynamika?
- Lze ochlazovat hvězdy hlavní posloupnosti?
- Proč termojaderné hoření v nitru hvězd nepřechází do explozivního?
- Jak rozumět tvrzení o záporné měrné tepelné kapacitě hvězd?
- Platí toto vyjádření pro všechna stadia vývoje hvězd?
- Je teorie vývoje hvězd v souladu s termodynamikou?

Vývojové etapy hvězd - vznik, HP, závěrečná stadia

Termodynamika:

Procvičení pojmů: *měrná tepelná kapacita, tepelný tok, termodynamický děj, termodynamická soustava, kinetická energie, gravitační potenciální energie, zákon zachování energie, viriálová věta*

Vznik hvězd v Orlí mlhovině M 16

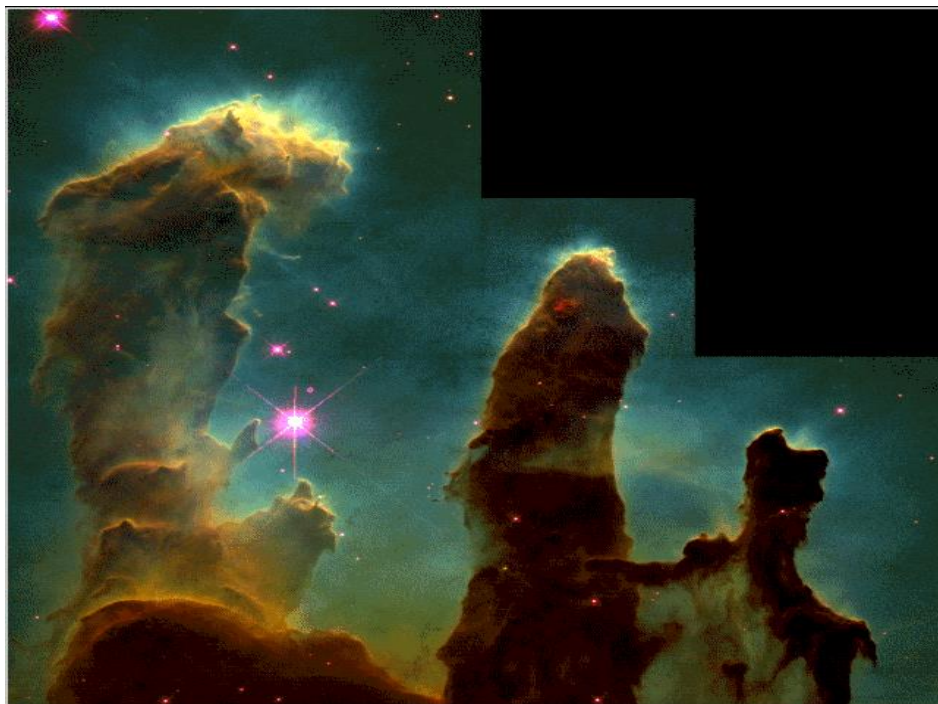


$$n = 5 \cdot 10^4 \text{ m}^{-3}$$

$$T \sim 50 \text{ K}$$

$$r = 2 \text{ kpc}$$

Vznik hvězd



$$|W_p| \succ |W_k|$$

gravitační smršťování -
nárůst W_k , T_c

přeměna protohvězda →
hvězda

kvazistacionární průběh

Viriálová věta

R. Clausius r. 1870:

$$\frac{1}{2} \left\langle \frac{d^2 I}{dt^2} \right\rangle = 2 \langle W_k \rangle + \langle W_p \rangle$$

omezený prostor, periodický
pohyb, změna momentu
hybnosti $\rightarrow 0$.

$$\frac{1}{2} \left\langle \frac{d^2 I}{dt^2} \right\rangle = 0$$

tzv. jednoduchý tvar, střední
časové hodnoty, částice hvězd,
hvězdy v hvězdokupách, galaxie
v kupách galaxií

$$\langle W_k \rangle = -\frac{1}{2} \langle W_p \rangle$$

střední hodnota celkové
energie =

$$\langle W \rangle = \langle W_k \rangle + \langle W_p \rangle = \frac{1}{2} \langle W_p \rangle = -\langle W_k \rangle$$

centrální teplota

$$\left\langle \frac{3}{2} N k T_{sc} \right\rangle = \left\langle \frac{1}{2} \frac{3}{5} \frac{G M_s^2}{R_s} \right\rangle$$

Gravitační termodynamika hvězd

termonukleární reakce vodík $\rightarrow$ helium

rovnovážný stav: hydrostatická a tepelná rovnováha, ustálené hodnoty kinetické a potenciální energie

termonukleární reakce $\rightarrow$ nárůst kinetické energie hvězd

termodynamická soustava hvězdy - dva stupně volnosti: teplota, **objem**:
dodání tepla - objem narůstá, energie koná práci proti gravitačním silám
 $\rightarrow$ transformuje se do energie gravitačního pole

podle V.V. - dvojnásobek původně dodané –
kinetická energie klesá, hvězda se ochlazuje

$$\langle W \rangle = \frac{1}{2} \langle W_p \rangle = -\langle W_k \rangle$$

Hvězdy - přírodní termostat

Hlavní posloupnost – stav tepelné rovnováhy, zářivý výkon konstantní, energie produkovaná v nitrech = vyzařovaná z povrchu $L_{tjad} = L$.

Porušení tepelné rovnováhy - změna celkové energie $\frac{dW}{dt} = L_{tjad} - L$.

Zvýšení energie termonukleárními reakcemi $L_{tjad} > L \rightarrow \frac{dW}{dt} > 0$,

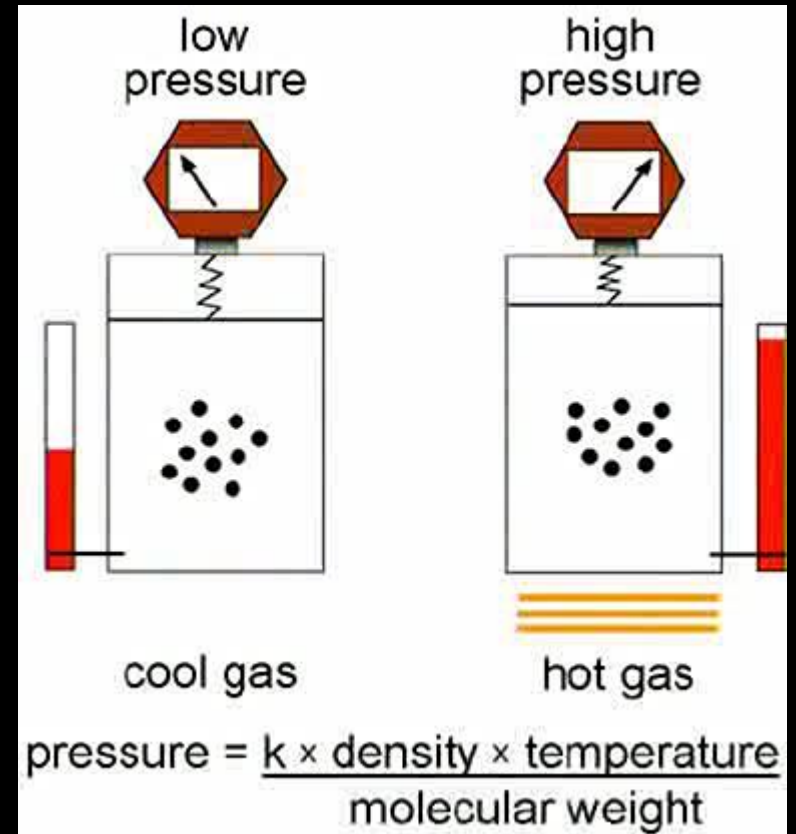
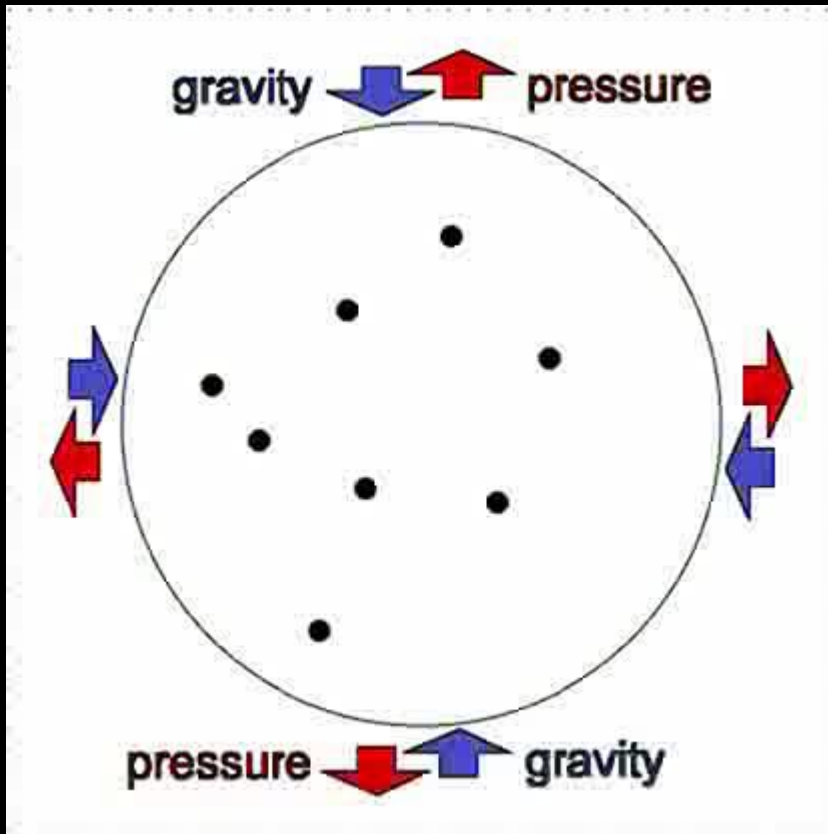
hvězdy zvětšují objem, kinetická energie částic se snižuje jakož i teplota. Následně poklesne tempo termonukleárních reakcí, silně závislé na teplotě - hvězdy se vrátí do rovnovážného stavu.

Naopak, při snížení produkce energie $L_{tjad} < L \rightarrow \frac{dW}{dt} < 0$.

Kinetická energie částic narůstá, objem hvězd zmenšuje, budou se smršťovat. Teplota nitra se zvýší, tempo termojaderných reakcí také.

Hvězdy pracují jako přírodní termostat.

Fyzikální podmínky v nitru hvězd



Gravitační termodynamika hvězd

- **záporná měrná tepelná kapacita hvězdy jako celku, při dodání tepla se ochlazuje**
- stabilita vůči tepelným poruchám → stabilita termonukleárních reakcí, hoření nevede k explozi, zářivý výkon hvězd konstantní
- myšlenkové úvahy o energii - V. V. → termodynamické vlastnosti hvězd
- na středoškolské úrovni kvalitativní předvídání fyzikálního chování hvězd → porozumění problematice

Domański, J.: Twierdzenie o wiriale w nauczaniu astronomii. Fizyka w Szkole **24** (1978), č. 3, s. 127 - 131.

Štefl, V.: Viriálová věta ve vyučování astrofyzice na gymnáziu. PMFA **25** (1980), č. 6, s. 348 - 352.

Šolc, M., Švestka, J., Vanýsek, V.: Fyzika hvězd a vesmíru. SPN, Praha 1983.

Ivanov, A. I., Kazanceva, L. P.: Těorema viriala v prepodavanii fiziki i astronomii.

http://vestnik.yspu.org/releases/uchenu_e_praktikam/12_2/

5. Atomová fyzika: zdroje energie hvězd

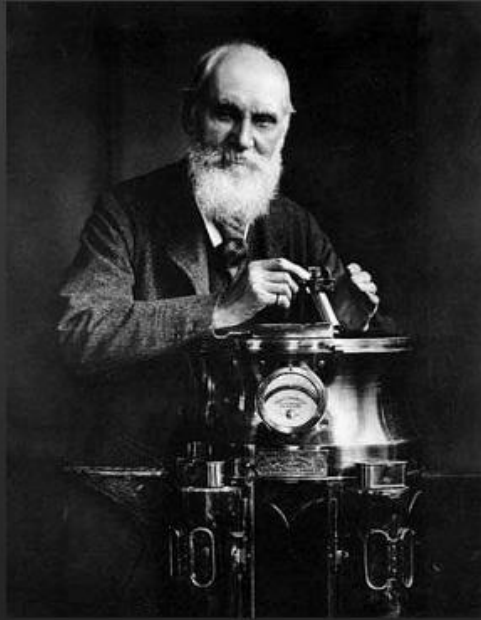


Co skrývá nitro?
Kde se bere energie?

Atomová fyzika:
Procvičení pojmů: *proton, elektron, neutrino, termionukleární reakce, hmotnostní úbytek, zářivý výkon, zákon zachování energie*

Zdroj energie Slunce - gravitační energie

Powering the Sun: Gravitational Energy???



Lord Kelvin (1824-1907)



Hermann von Helmholtz
(1821-94)

vyzářená energie Sluncem, při $L_S = 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$

za dobu jeho existence $W_C = L_S \cdot t = 5 \cdot 10^{43} \text{ J}$, $W_p = -10^{41} \text{ J}$



Hledání možných zdrojů energie

H. N. Russell (1877 - 1957) formuloval požadavky na zdroje energie hvězd:

1. Uplatňují se při vysokých teplotách a hustotách, tedy v nitrech hvězd, nikoliv planet
2. Zvýšení uvolňování energie nesmí vést k explozivním procesům
3. Velikost uvolňované energie je regulována, platí zářivá rovnováha

Vlastnosti nitra hvězd

fyzikální představy o nitru
Slunce, hvězd, výpočty

hydrostatická rovnováha

$$T_c \approx 1,5 \cdot 10^7 \text{ K}$$

$$P_c \approx 10^{16} \text{ Pa}$$



Arthur Stanley Eddington

1882 - 1944



Energie hvězd, jejich vývoj

F. Hoyle

1915 - 2001



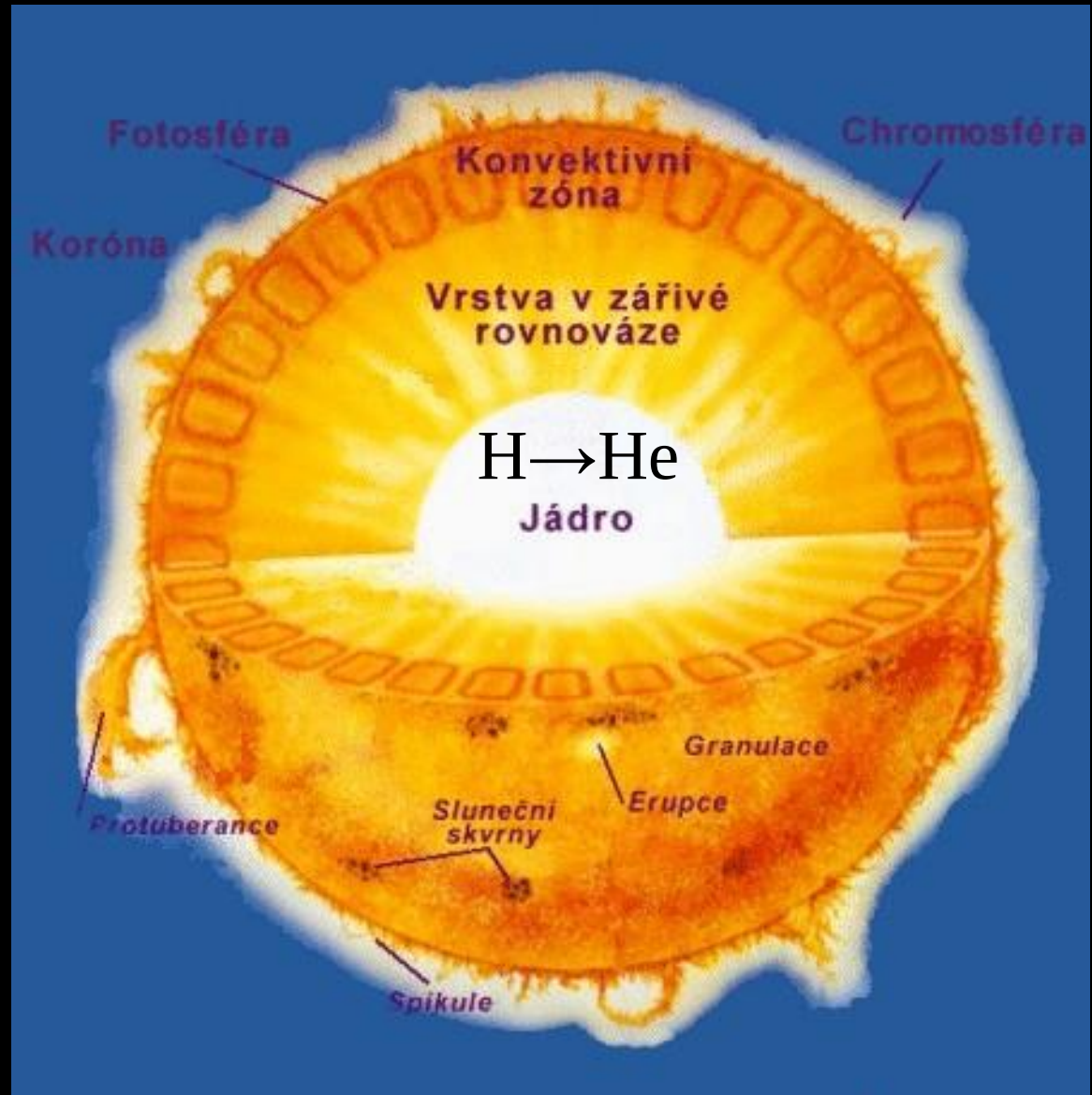
*„V první čtvrtině 20. století museli astronomové čelit záplavě poznatků o hvězdách a jejich vývoji. Dnes víme, že výklad těchto údajů mohla podat jediné jaderná fyzika...**Eddington** a **Russell**, kteří se nechali vést pozorováním, tak předjali řadu výsledků, které se později objevily v jaderné fyzice. Tehdejší fyzikové se jim za to posmívali...Velký byl **rozsah posměchu**, jemuž byl vystaven **Eddington** v Cavendishově laboratoři za domněnku, že energie ve hvězdách se získává přeměnou vodíku na hélium.“*

Tajemství stavby Slunce

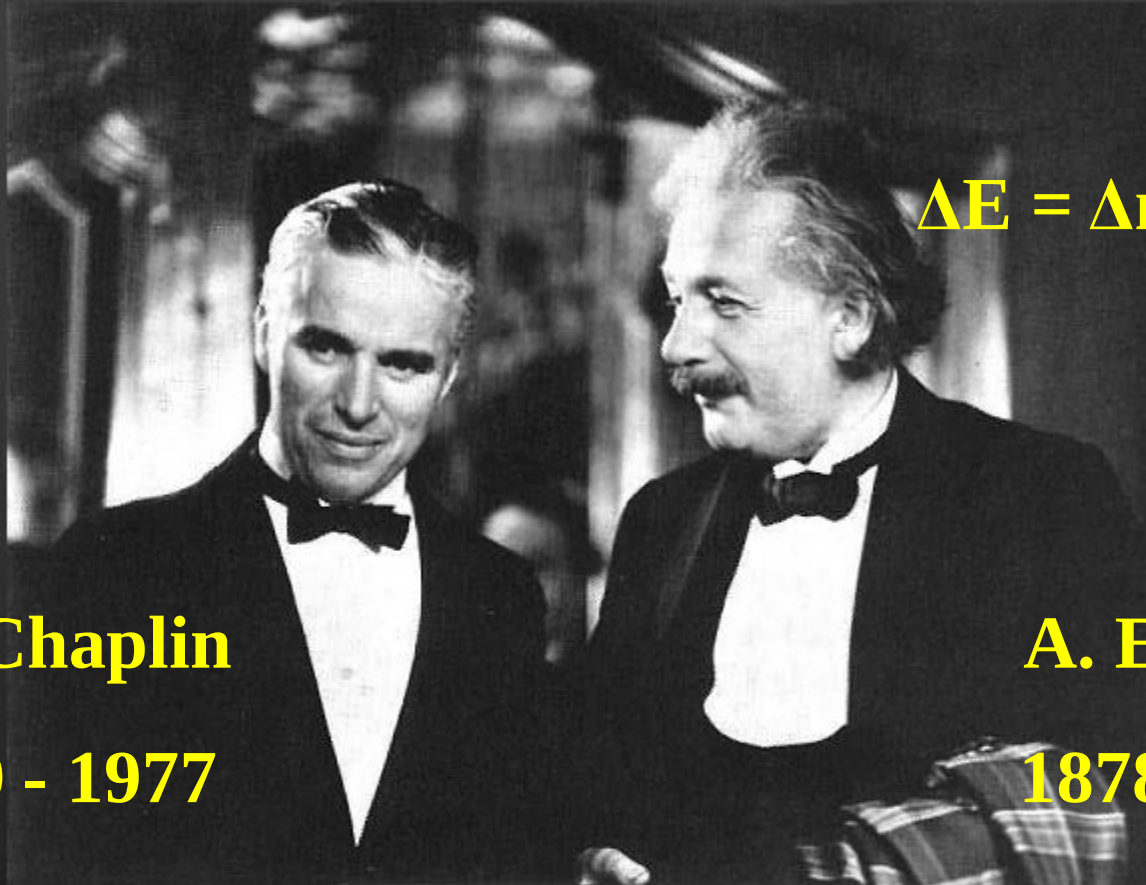
A. S. Eddington

A. Unsöld

1905 - 1995



Kde se bere energie hvězd?



$$\Delta E = \Delta m c^2$$

Ch. Chaplin

1889 - 1977

A. Einstein

1878 - 1953

- Chaplin to Einstein: "People love me, because they understand *everything* I say, and they love you, because they understand *nothing* of what you say..."

Zdroj energie Slunce, hvězd

Bethe a.j.

vojenské = hvězdné
tajemství

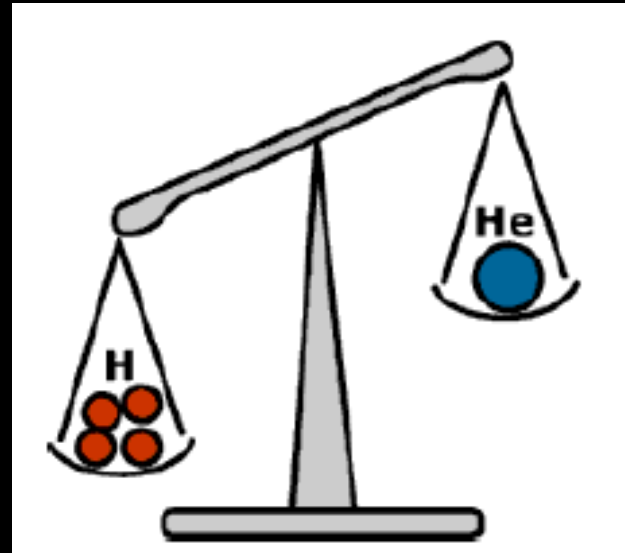
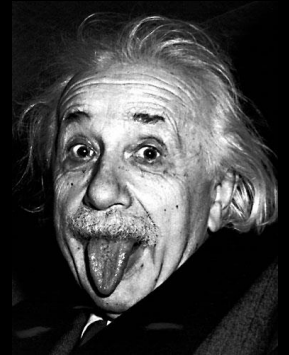
přeměna hmoty $\rightarrow$ energie

$\Delta E = \Delta m c^2$ - vazebná energie

$4m_p - m_{\text{He}} = 5 \cdot 10^{-27} \text{ kg}$

pro celé Slunce

$\Delta m = 4 \cdot 10^9 \text{ kg.s}^{-1}$

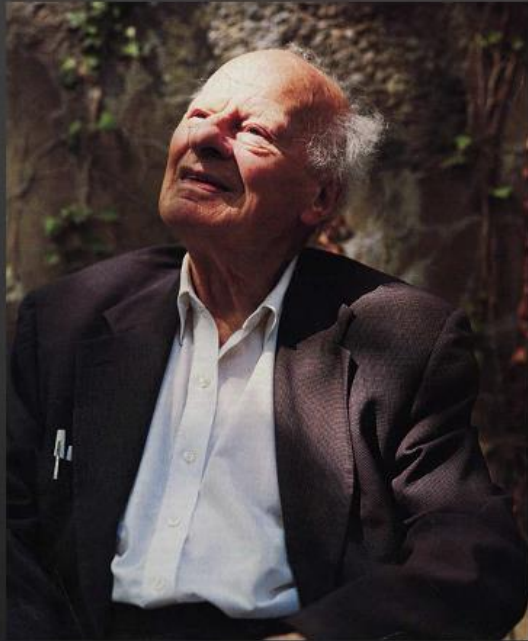


Konkrétní typy termionukleárních reakcí

H. Bethe - Nobelova cena za fyziku r. 1967

teorie nukleárních reakcí - CNO

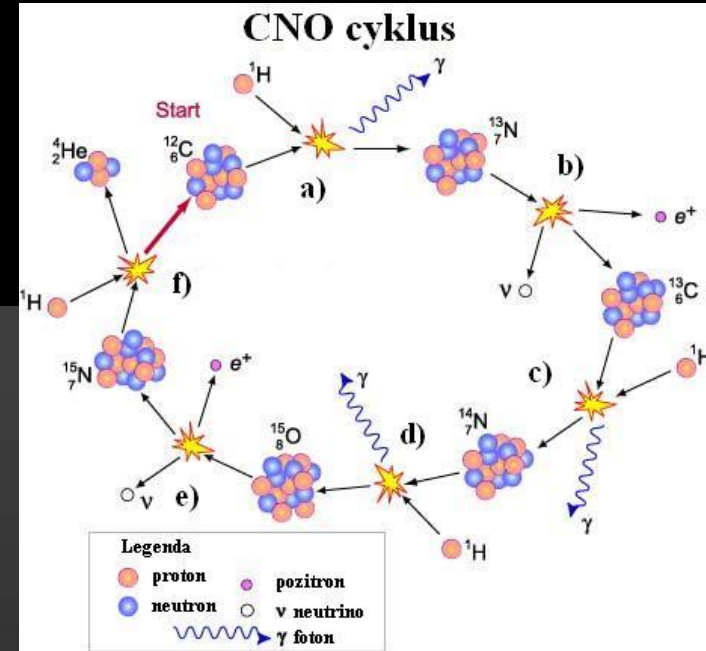
speciálně objev energie hvězd



Hans Bethe (1906-2005)



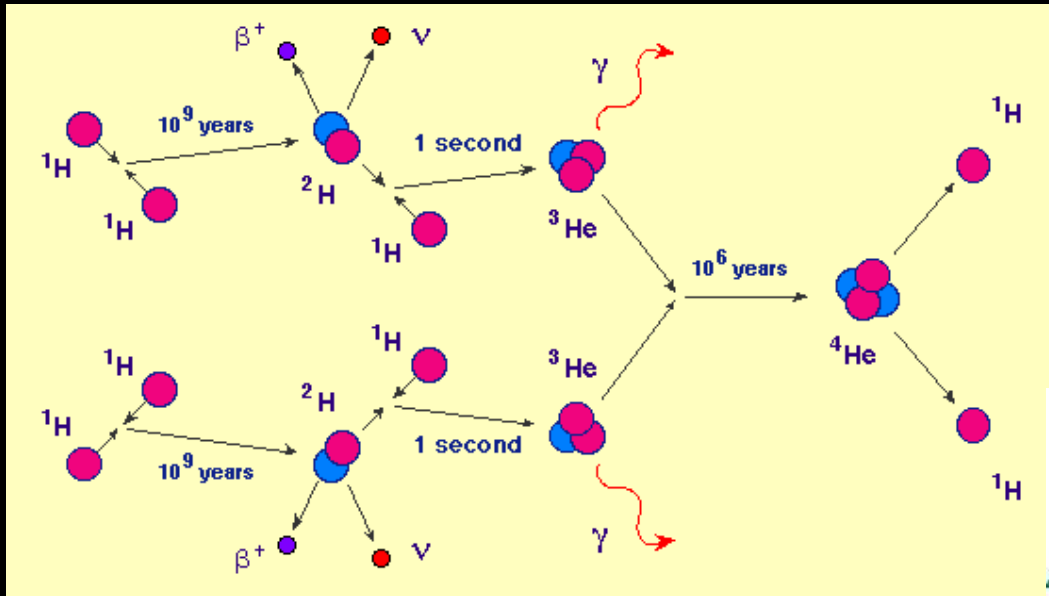
Carl Friedrich von Weizsäcker (1912 - 2007)



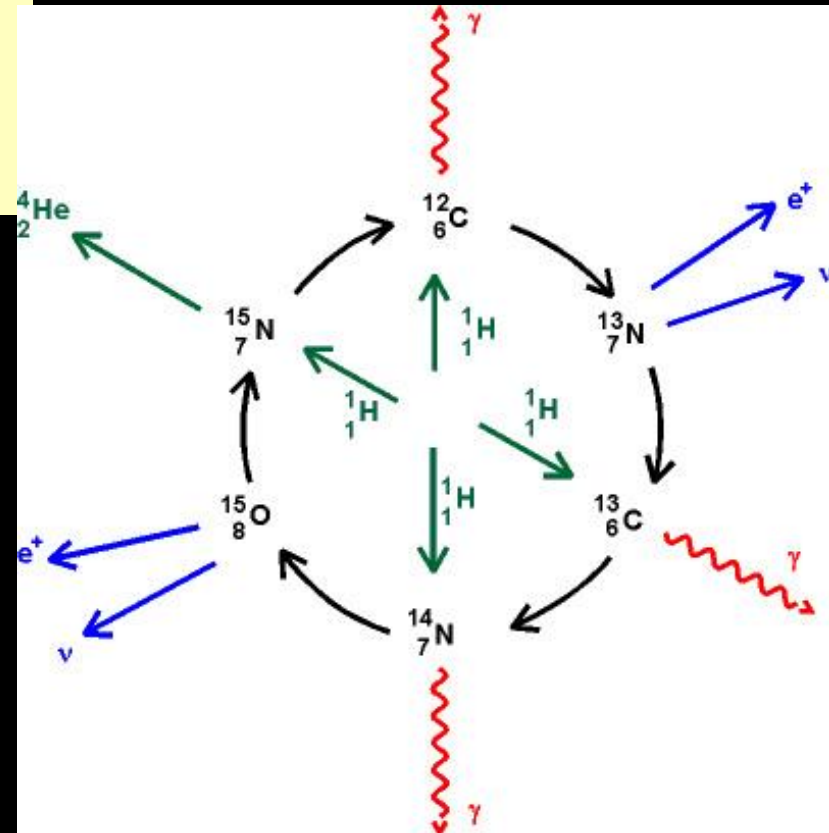
termionukleární reakce -
dlouhodobý zdroj energie

zaručuje $5 \cdot 10^{45} \text{ J}$

Termonukleární řetězce a cykly v nitru hvězd



CNO cyklus



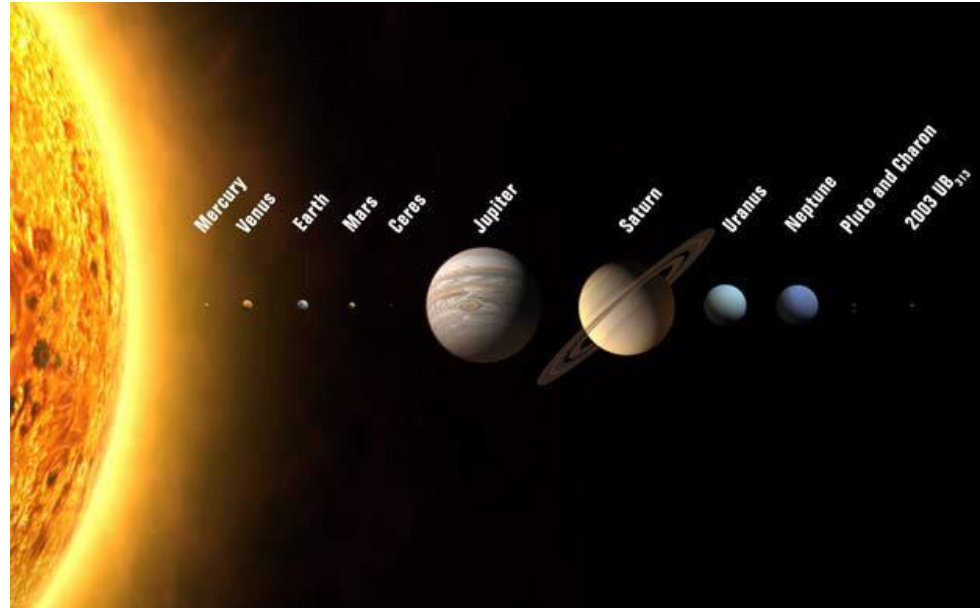
p-p řetězec

I. Epstein (1919 - 1995)

J. B. Oke (1928 - 2004)

6. Úlohy výpočetní

Dráhový moment hybnosti - sluneční soustava



Úloha 3.24 V kterých tělesech sluneční soustavy je uložen největší moment hybnosti? Určete dráhový moment hybnosti Země, Jupitera, Saturnu a Uranu, porovnejte s momentem hybnosti Slunce. Nezbytné údaje naleznete v <http://ads.harvard.edu/books/hsaa/>.

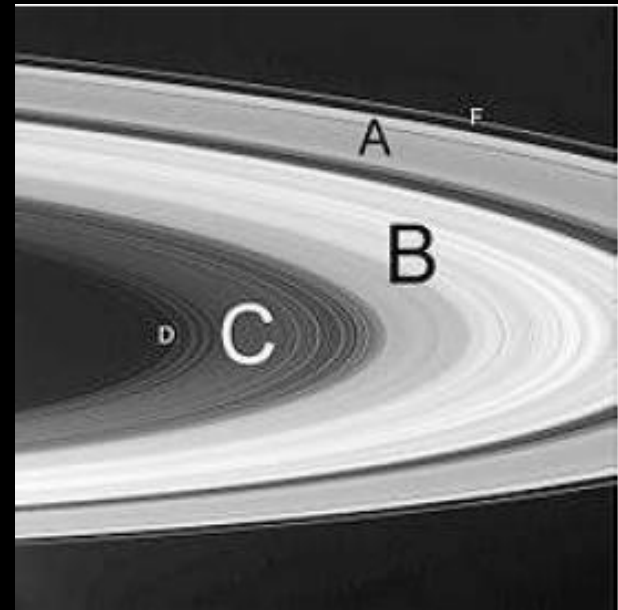
Řešení: Za předpokladu kruhových drah planet můžeme jejich dráhový moment hybnosti zachytit vztahem $L = mvr = m \frac{2\pi r}{T} r$. Při znalosti hmotností, poloměrů drah a oběžných dob planet můžeme vypočítat dráhové momenty hybnosti vybraných planet $L_Z = 2,7 \cdot 10^{40} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $L_J = 1,9 \cdot 10^{43} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $L_S = 7,8 \cdot 10^{42} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, $L_U = 1,7 \cdot 10^{42} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$. U Slunce je rotační moment hybnosti $L_{\odot} = 1,1 \cdot 10^{42} \text{ kg} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$, činící méně než zhruba 3 % celkového momentu hybnosti všech planet, přestože jeho hmotnost je 99,9 % celkové hmotnosti sluneční soustavy.

Podstata prstenců Saturnu

Jak bylo dokázáno v [1] *Jamesem Clarkem Maxwellem* (1831–1879) na základě analýzy dynamické stability, je-li hmotnost Saturnu dostatečně velká, potom prstence diskrétních vzájemně interagujících částecek na oběžné dráze kolem planety udržují stabilní tvar a nejsou tvořeny tuhými tělesy, nýbrž systémy drobných částecek. Později např. *James Edward Keller* (1857–1900) v [2] a *William Wallace Campbell* (1862–1938) proměřovali spektroskopicky relativní rychlosti vnitřních a vnějších částí prstenců k vyjasnění, který jejich okraj se pohybuje rychleji. Závislost rychlosti částic tuhého tělesa na vzdálenosti je $v \sim r$ zatímco u oběžné rychlosti pohybujícího se tělesa na kruhové dráze je dána závislostí $v \sim \sqrt{1/r}$. Bylo zjištěno, že ledové částčky tvořící převážně systém prstenců (obr. 2), se pohybují ve vnitřní oblasti rychleji než ve vnější, což je v souladu s pohybem volného tělesa a jde o tzv. keplerovskou rotaci. Modelové přiblížení problematiky lze demonstrovat následovně.

Štefl, V.: Nejkrásnější planeta sluneční soustavy Saturn v úlohách. MFI 23 (2014), č. 1, s. 27 - 40.

Prstence Saturnu



Úloha 1. Určete oběžnou rychlost vnitřní části prstence D o vzdálenosti 67 000 km od Saturnu s oběžnou dobou 0,20 dne, vnitřní části prstence A o vzdálenosti 122 000 km s oběžnou dobou 0,50 dne, vnitřní části prstence E o vzdálenosti 181 000 km s oběžnou dobou 0,91 dne. Ověřte platnost závislosti $v \sim \sqrt{1/r}$.

Řešení. Dosazením do vztahu $v = \frac{2\pi r}{T}$ postupně získáme $v = 24,3 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, $17,7 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ a $14,4 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$, tedy s rostoucí vzdáleností od planety klesá oběžná rychlost v souladu se závislostí $v \sim \sqrt{1/r}$.

Saturn v úlohách

Úloha 6. Nalezněte hmotnost Saturnu, jestliže z pozorování bylo zjištěno, že měsíc Titan (obr. 6), obíhá ve vzdálenosti $a = 1\,221,8 \cdot 10^3$ km s oběžnou dobou $T = 15,945$ dne.



Obr. 6

Řešení. Úpravou III. Keplerova zákona obdržíme

$$M_S = \frac{G}{4\pi^2} \frac{a^3}{T^2} = 5,7 \cdot 10^{26} \text{ kg.}$$

Slapy na Titanu

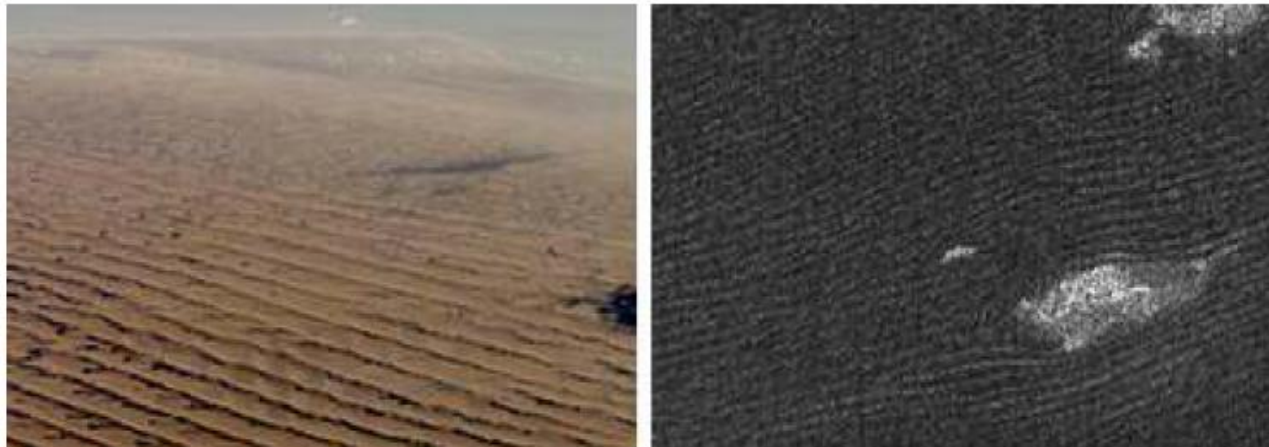
Úloha 11. Stanovte velikost slapové síly Saturnu působící na jeho měsíc Titan. Hmotnost Saturnu je $M_S = 5,7 \cdot 10^{26}$ kg, měsíc Titan má hmotnost $M_T = 1,35 \cdot 10^{23}$ kg, průměr $D_T = 5\,150$ km a Saturn obíhá ve vzdálenosti $r = 1,22 \cdot 10^6$ km.

Řešení. Působící slapová síla je dána vztahem

$$F = 2G \frac{M_S m_m}{r^3} D_m.$$

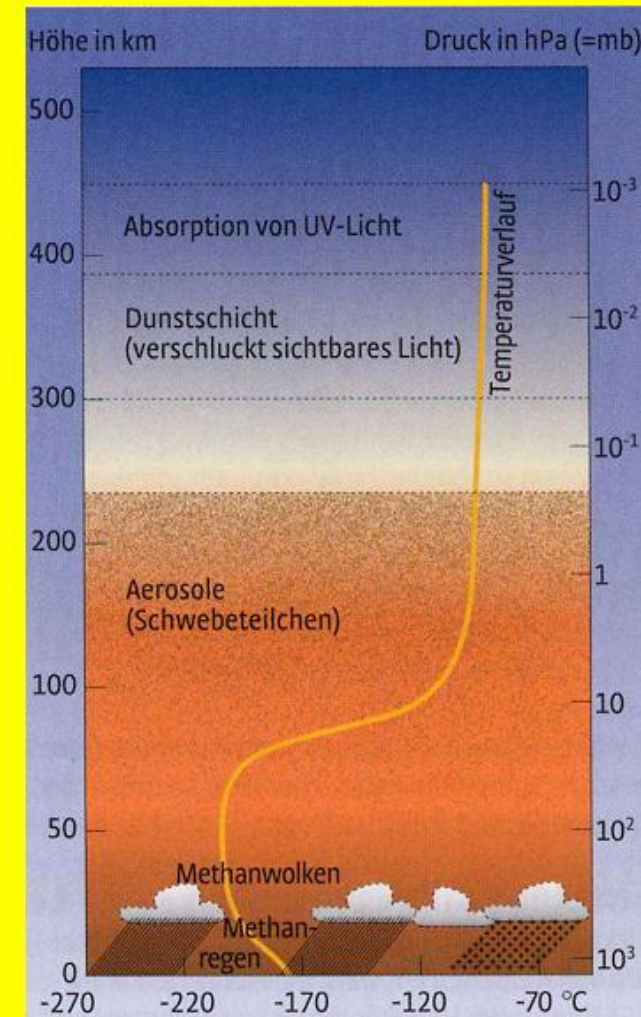
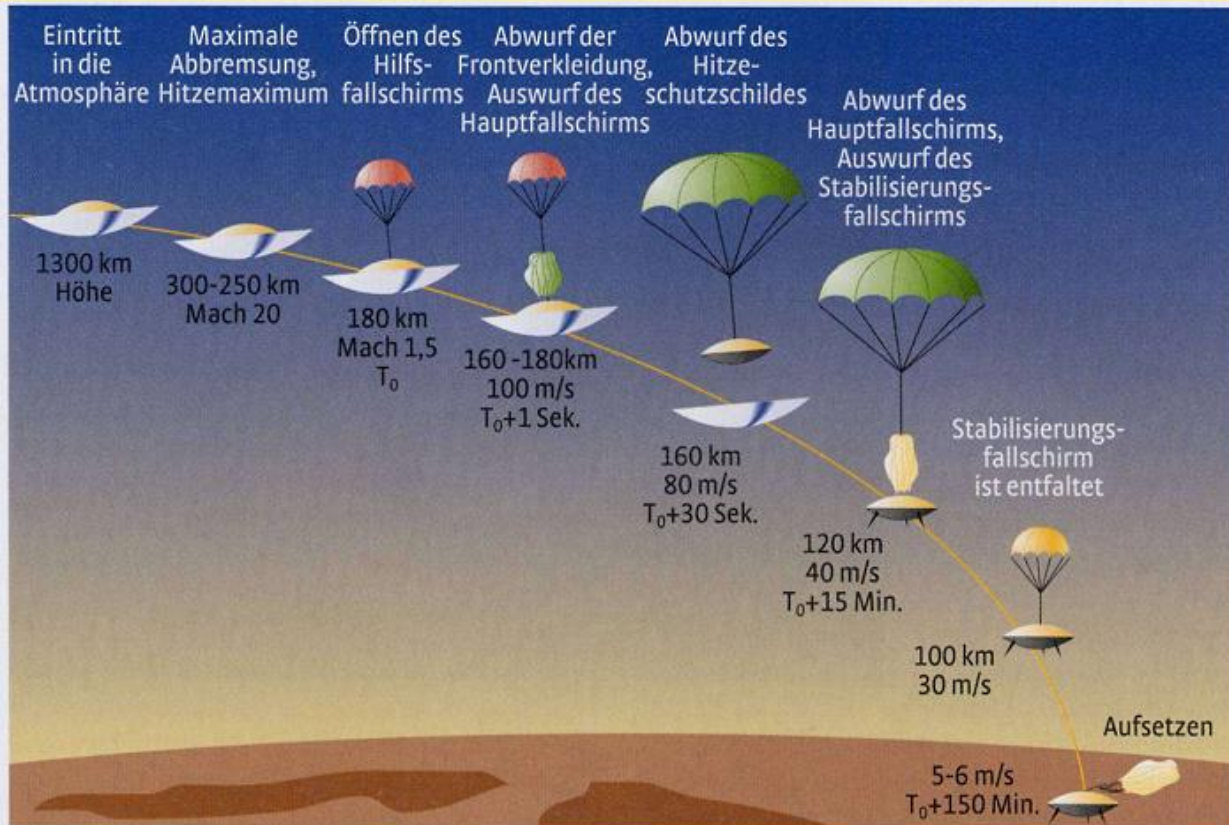
Dosadíme do vztahu parametry soustavy Saturn–Titan, $F_T = 2,9 \cdot 10^{19}$ N.

Relativně velká slapová síla Saturnu, výraznější než slapová síla Měsíce působící na Zemi, vyvolává v dusíkové a metanové atmosféře Titanu značný pozorovaný vítr, který způsobuje přesuny písku na povrchu ([9], obr. 10).



Modul Huygens na Titanu r. 2005

Huygens auf Titan



Přistání modulu Huygens



Obr. 7

Úloha 7. Při sestupu modulu Huygens o hmotnosti $m = 320 \text{ kg}$ na padáku na měsíc Titan rychlostí $v = 6 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, došlo při dopadu modulu k jeho zaboření do hloubky $s = 12 \text{ cm}$. Stanovte střední sílu F odporu materiálu hornin na Titanu. Jaké decelerační zrychlení a při tom působilo na modul?

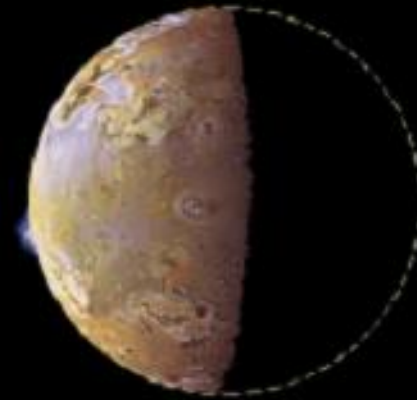
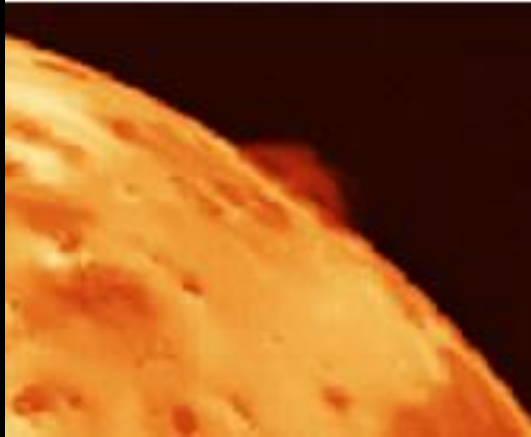
Řešení. Kinetická energie modulu je rovna vykonané práci vynaložené při vnikání do povrchových hornin měsíce. Platí

$$Fs = \frac{1}{2}mv^2,$$

odkud po numerickém dosazení obdržíme $F = 57\,600 \text{ N}$. Dále ze vztahu $mv = Ft$ stanovíme $t = 0,033 \text{ s}$. Odtud

$$a = \frac{2s}{t^2} = 218 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}.$$

Úloha - sopka na měsíci Io



g m.s⁻²

Io	1.81
Earth	9.81

Ze zjištěné výšky výstupu **h** žáci určí
rychlost v vyvrhování materiálu sopky,
poloměr měsíce Io je $R = 1\,821$ km, levý dolní
roh odpovídá středu měsíce, typické hodnoty
 $h \approx 300$ km: $v \approx 1$ km.s⁻¹

$$mgh = \frac{1}{2}mv^2$$

$$gh = \frac{1}{2}v^2$$

$$h = \frac{1}{2}gv^2$$

$$v = \sqrt{2gh}$$

Hubbleův kosmický dalekohled

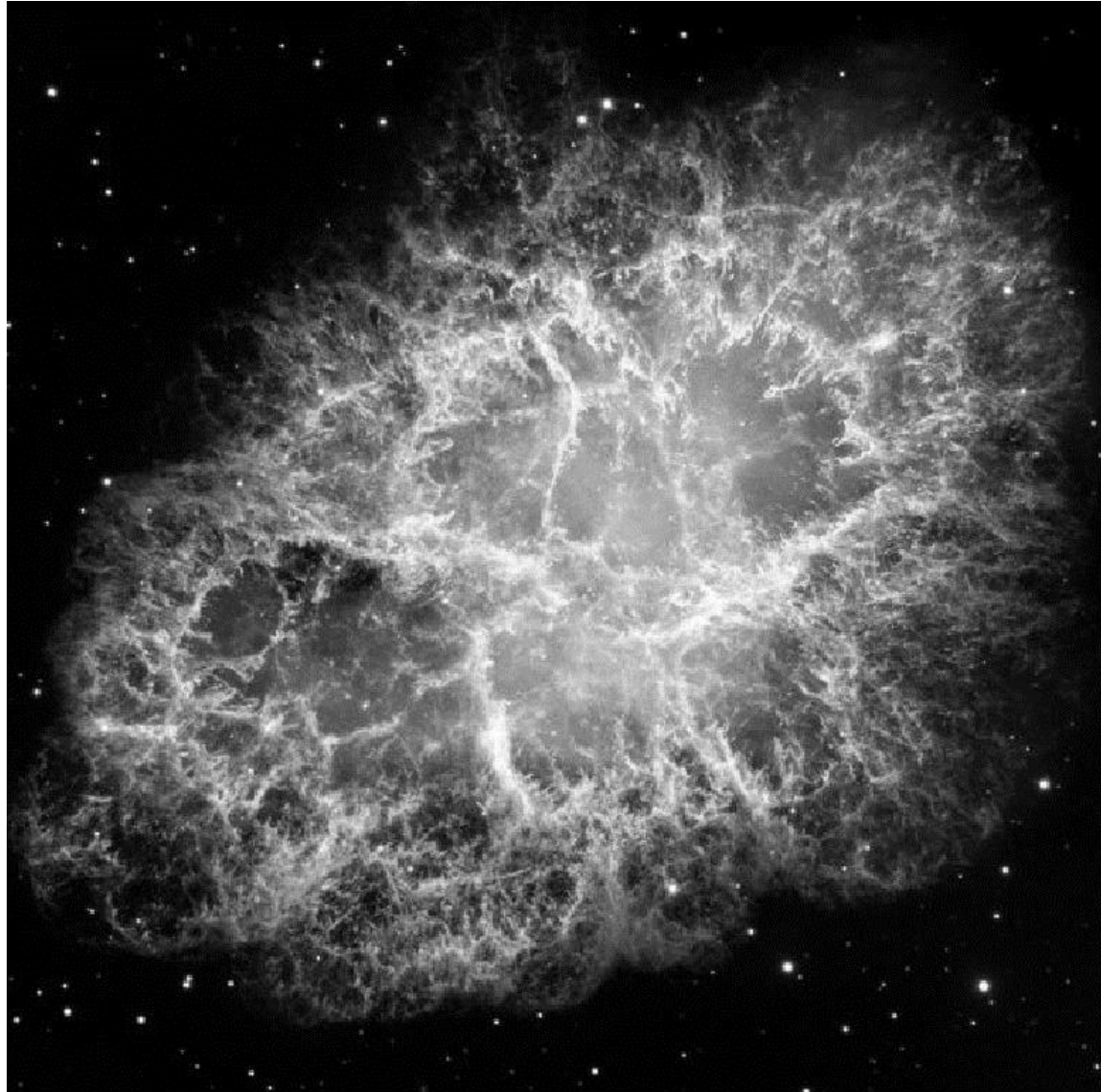
Určete práci pro převedení HST
z kruhové oběžné dráhy $h_1 = 550$ km
na $h_2 = 600$ km.



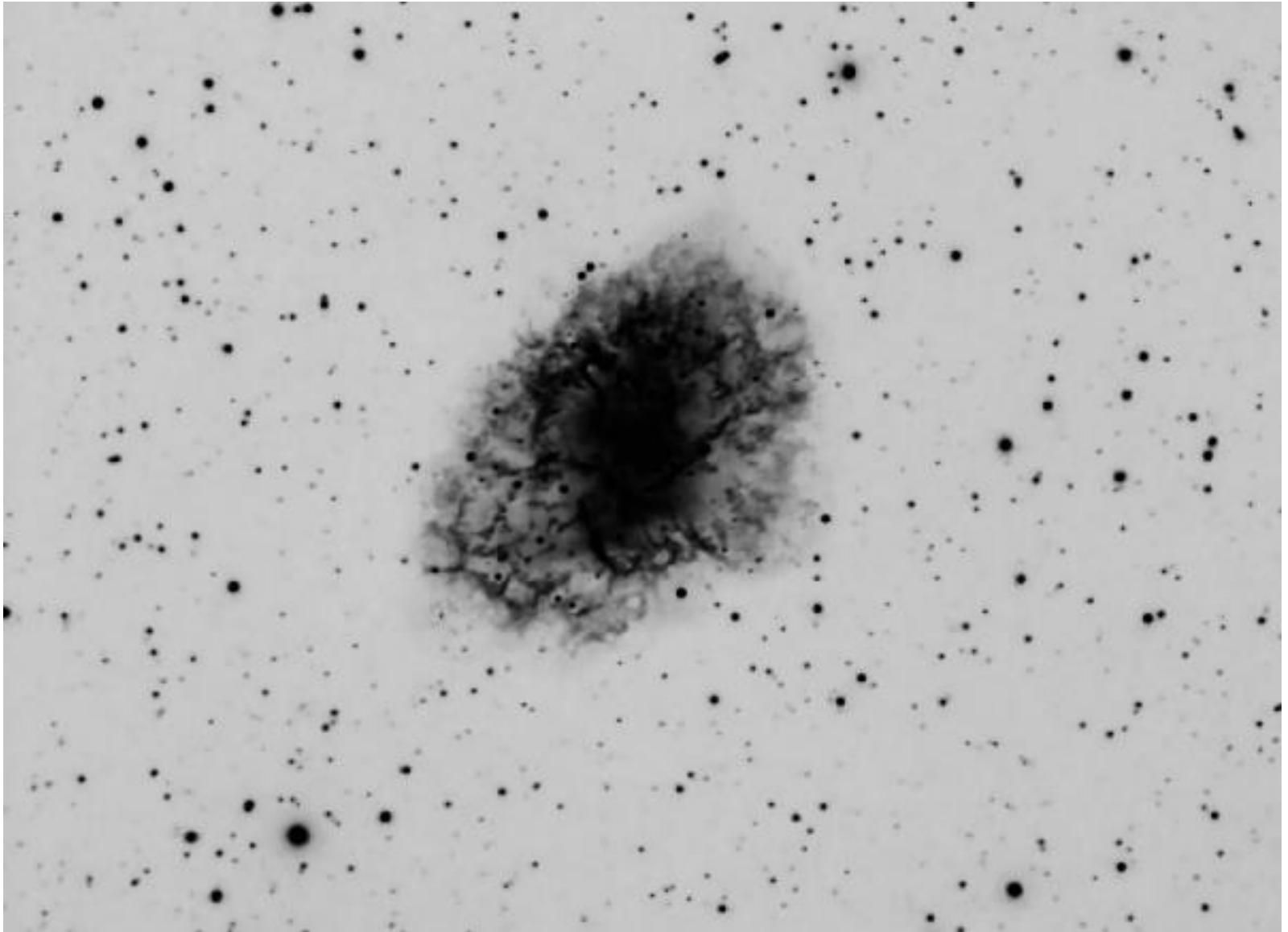
$$\left(\frac{1}{2} m_H v_1^2 - G \frac{m_H M_Z}{R_Z + h_1} \right) - \left(\frac{1}{2} m_H v_2^2 - G \frac{m_H M_Z}{R_Z + h_2} \right) =$$
$$G \frac{m_H M_Z}{2} \left(\frac{1}{R_Z + h_2} - \frac{1}{R_Z + h_1} \right) = -2,2 \cdot 10^9 \text{ J}$$

Štefl, V.: Hubbleův kosmický dalekohled ve výuce fyziky
na středních školách. MFI **21** (2012), č.5, s. 274 - 286.

7. Úlohy - PC: Expanze Krabí mlhoviny



Expanze Krabí mlhoviny 1951 - 2007



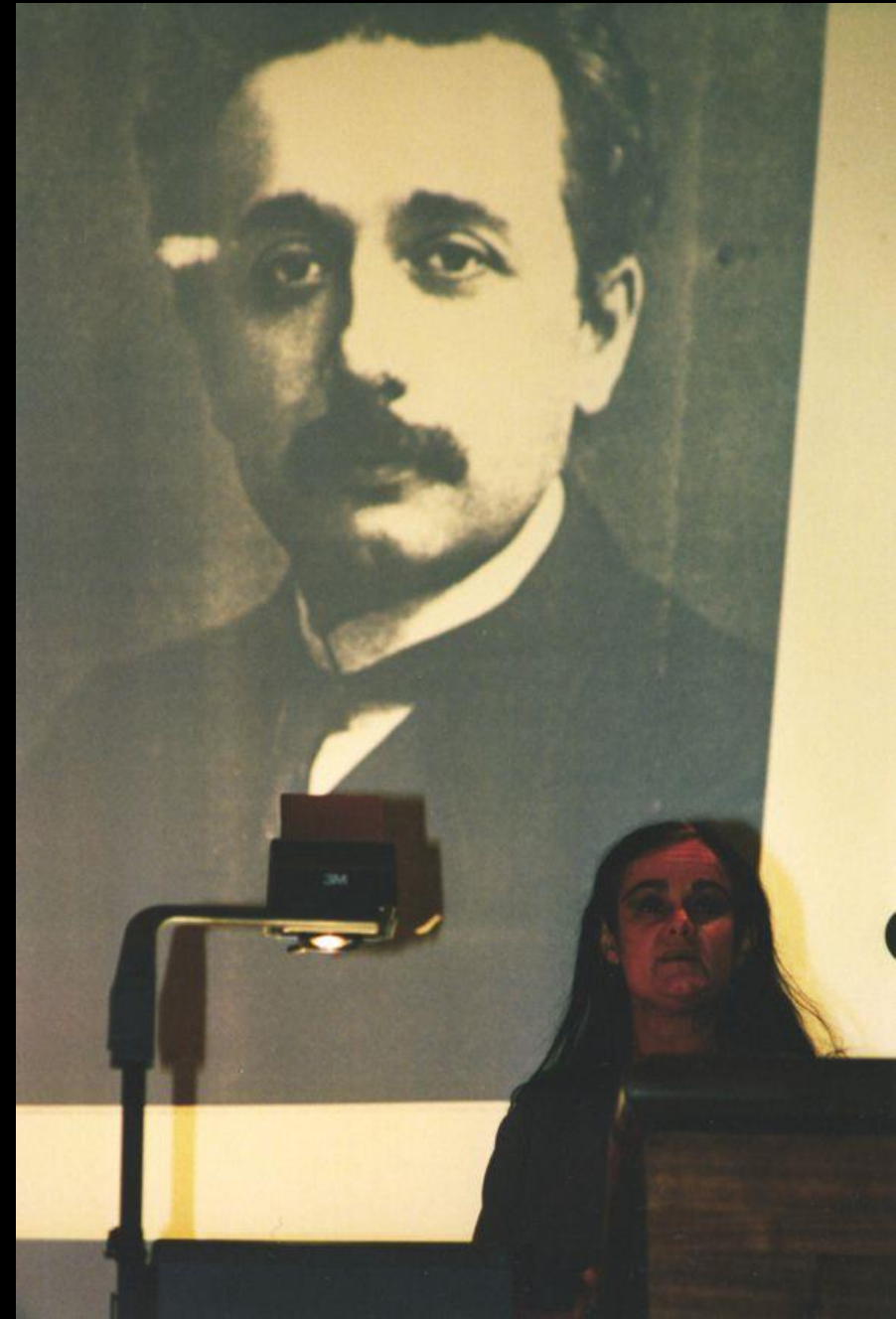
Jak Krabí mlhovina expanduje?

Virginia Louise Trimble

r. 1968 Ph.D.

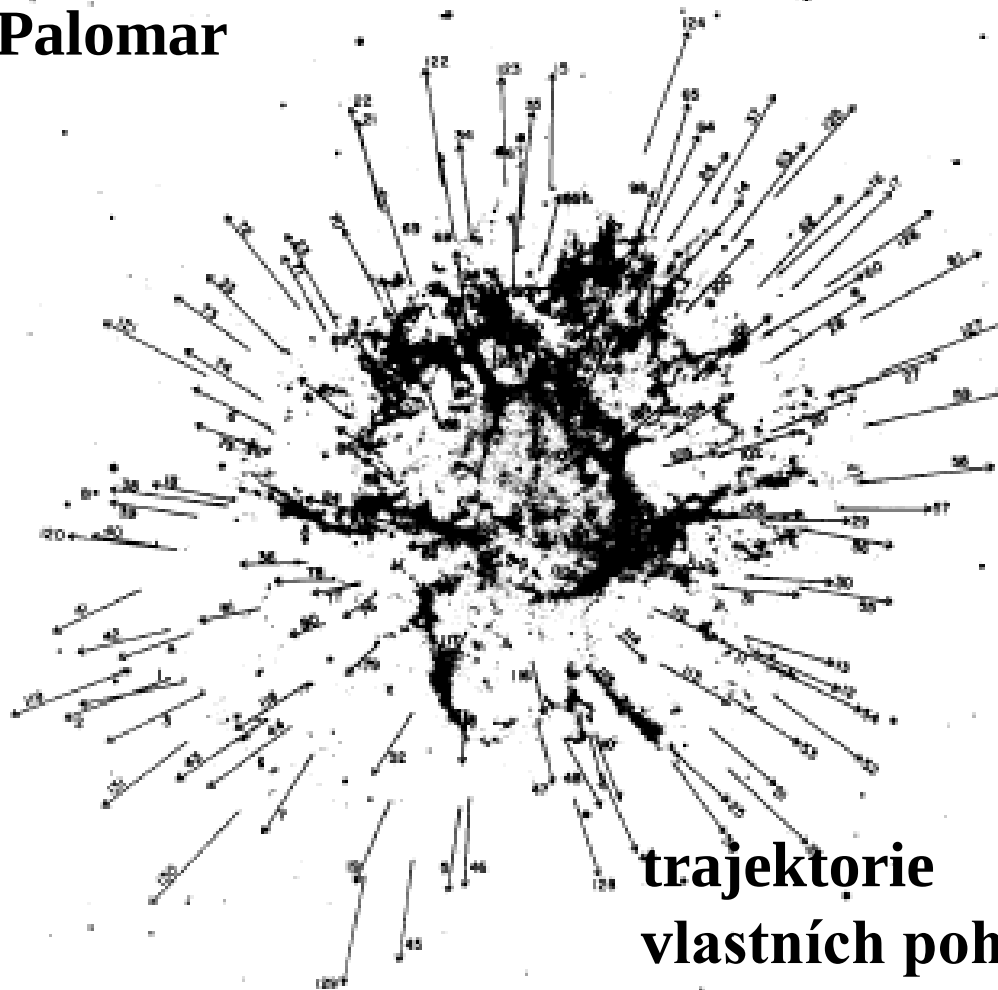
*Motion and Structure
of the Filamentary Envelope
of the Crab Nebula*

**první komplexní studium
expanze Krabí mlhoviny**



Expanze Krabí mlhoviny

snímek v čáře H_α
Mount Palomar



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

Krabí mlhovina

předpoklad – zachyceny dráhy filamentů v následujících 270 rocích při konstantní rychlosti

nesymetrie exploze, rychlost pulsaru $\approx 150 \text{ km.s}^{-1}$

obálka expandující mlhoviny - opticky jasné zářící filamenty, analýza jejich pohybu, srovnání poloh po přibližně dvaceti rocích - 1939, 1960, 1976, 1992, na fotografiích s vysokým rozlišením → **výpočet střední rychlosti expanze,**

konvergence drah filamentů pro rok 1054 n.l.

pozorování filamentů → pohyb je akcelеровán $dv/dt > 0$

Krabí mlhovina

pohyb rovnoměrně zrychlený

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

současná velikost velké poloosy mlhoviny $R = 6'$,
při vzdálenosti $r = 1,8$ kpc - $s \approx 10^{16}$ m

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

v_0 je počáteční rychlost expanze mlhoviny

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

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

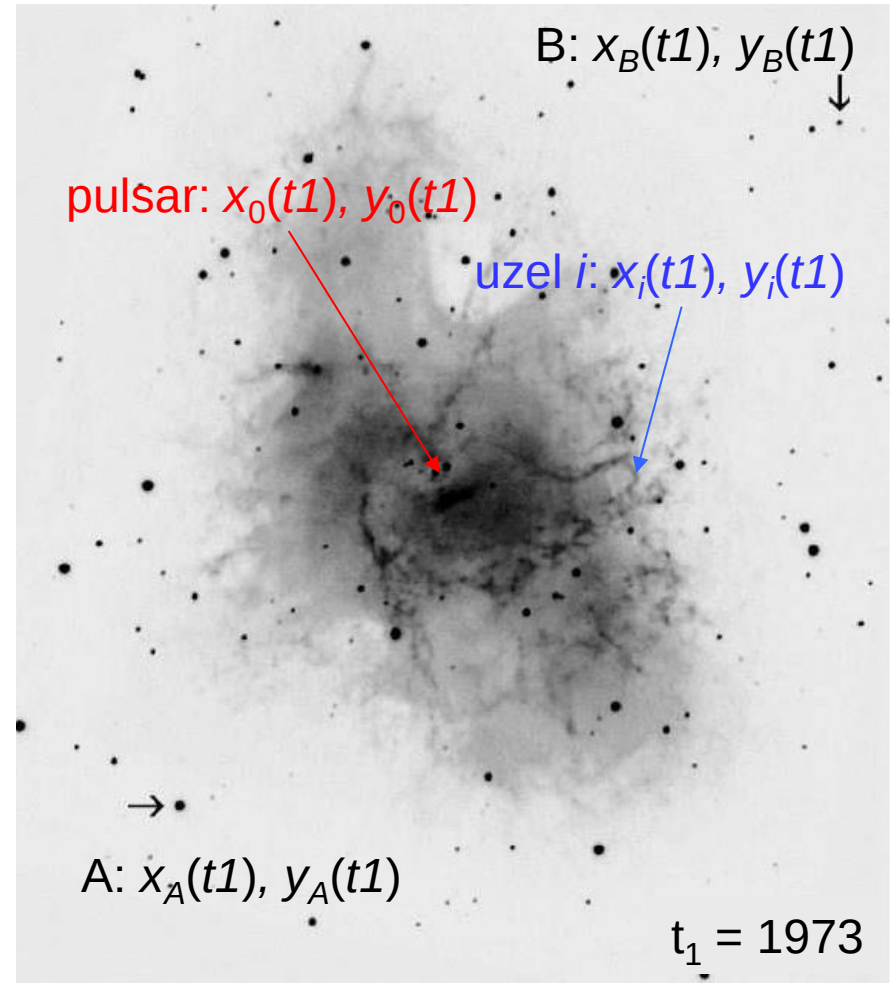
Výpočet parametrů expanze Krabí mlhoviny

- prostorovou, nesymetrickou a s rychlostí v čase slabě proměnnou expanzi zjednodušíme na expanzi plošnou, symetrickou a s konstantní rychlostí
- měřítko fotografií se stanoví ze známé úhlové vzdálenosti φ dvou hvězd A a B rovněž zachycených na fotografii:

$$s(t) = \frac{\varphi}{\sqrt{[x_B(t) - x_A(t)]^2 + [y_B(t) - y_A(t)]^2}}$$

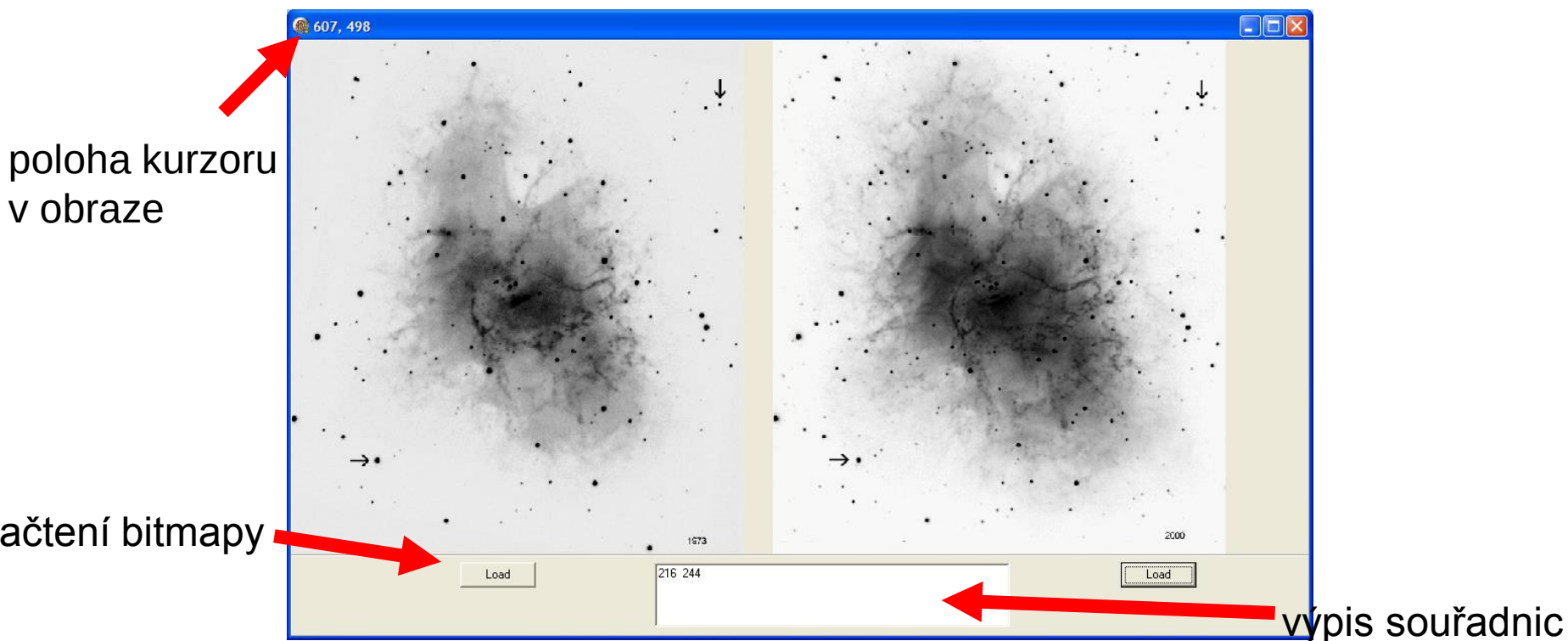
- určení úhlové rychlosti expanze z analýzy dvou fotografií, pořízených v čase t_1, t_2

$$v_i = \frac{s(t_2)\sqrt{[x_i(t_2) - x_0(t_2)]^2 + [y_i(t_2) - y_0(t_2)]^2} - s(t_1)\sqrt{[x_i(t_1) - x_0(t_1)]^2 + [y_i(t_1) - y_0(t_1)]^2}}{t_2 - t_1}$$



Krabí mlhovina - odečet poloh hvězd, uzlů

- polohy lze odečítat přímo z digitálních fotografií v pixelech
- je zapotřebí vidět současně obě fotografie
- jednoduchý program je k úloze k dispozici



Krabí mlhovina - rychlost rozpínání, stáří

1. Určení měřítka fotografie

1973

Hvězda →		Hvězda ↓	
x	110 px	x	551 px
y	539 px	y	81 px

Vzdálenost hvězd		Měřítko	
$\Delta = 635.8 \text{ px}$		0.6055 "/px	
385 "			

2000

Hvězda →		Hvězda ↓	
x	111 px	x	552 px
y	537 px	y	82 px

Vzdálenost hvězd		Měřítko	
$\Delta = 633.65 \text{ px}$		0.6076 "/px	
385 "			

$$s(t) = \frac{\varphi}{\sqrt{[x_B(t) - x_A(t)]^2 + [y_B(t) - y_A(t)]^2}}$$

$$\varphi = 385''$$

2. Souřadnice pulzaru

1973

x	280 px
y	316 px

2000

x	295 px
y	316 px

3. Určení vzdálenosti uzlů, rychlosti rozpínání a stáří mlhoviny

1973

Uzel	x (px)	y (px)	r (px)	r (")
1	414	316	134	81
2	412	270	140	85
3	370	487	193	117
4	225	74	248	150
5	133	383	162	98

2000

x (px)	y (px)	r (px)	r (")
435	319	140	85
431	270	144	87
387	494	200	122
239	65	257	156
142	385	168	102

$\Delta r / \Delta t$ (" /rok)	t (rok)
0.15	583
0.10	910
0.18	695
0.22	706
0.15	663

0.16	711.24
0.0234	61.97

v (m/rok)	4.3E+13
v (km/s)	1.4E+03

$$\begin{aligned}\Delta r / \Delta t &= (0.16 \pm 0.02) \text{ "/rok} \\ r &= 1.8 \text{ kpc} = 5.6 \text{E}+19 \text{ m} \\ \Delta r / \Delta t &= (1350 \pm 200) \text{ km/s}\end{aligned}$$

$$t = (700 \pm 60) \text{ roků}$$

stáří mlhoviny

$$t_2 = \frac{s(t_2) \sqrt{[x_i(t_2) - x_0(t_2)]^2 + [y_i(t_2) - y_0(t_2)]^2}}{v_i}$$

Krabí mlhovina - komentář

- Motivačním faktorem - krása vláknité struktury Krabí mlhoviny → zájem učitele a žáků
- Problém začleňování poznatků z moderní astrofyziky do výuky fyziky
- Žáci dostávají odpovědi na otázky vzniku, expanze Krabí mlhoviny
- Dovednosti práce s PC - bude se jim v bankách hodit....

Štefl, V., Navrátil, Z.: Krabí mlhovina ve fyzikální výuce na gymnáziu. MFI **19** (2009), č. 1, s. 32 - 39.

Charakteristiky expanze Krabí mlhoviny

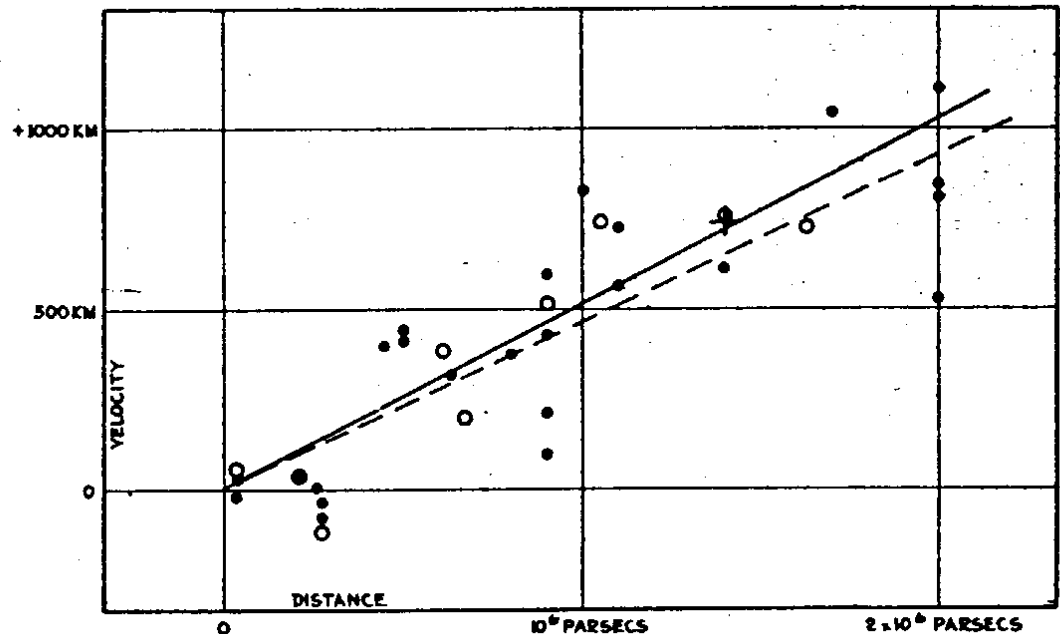
- Eliptický tvar – rotační elipsoid, $b/a = 0,67$
- úhlová velikost os $4'$ a $6'$, skutečná 2 pc a 3 pc při vzdálenosti mlhoviny 1,8 kpc
- ve směru hlavní osy expanze $v \approx 1\,700 \text{ km.s}^{-1}$ u vedlejší osy $v \approx 1\,100 \text{ km.s}^{-1}$
- vnitřní část expanduje $v \approx 700 \text{ km.s}^{-1}$
- vnější část $v \approx 1\,500 \text{ km.s}^{-1}$

7. Úlohy - PC: Určování vzdáleností galaxií

Hubbleův zákon - jeden
z nejdůležitějších objevů,
součást středoškolského
vzdělání

Edwin Powell Hubble
1889 - 1953

$$v = H \cdot r$$



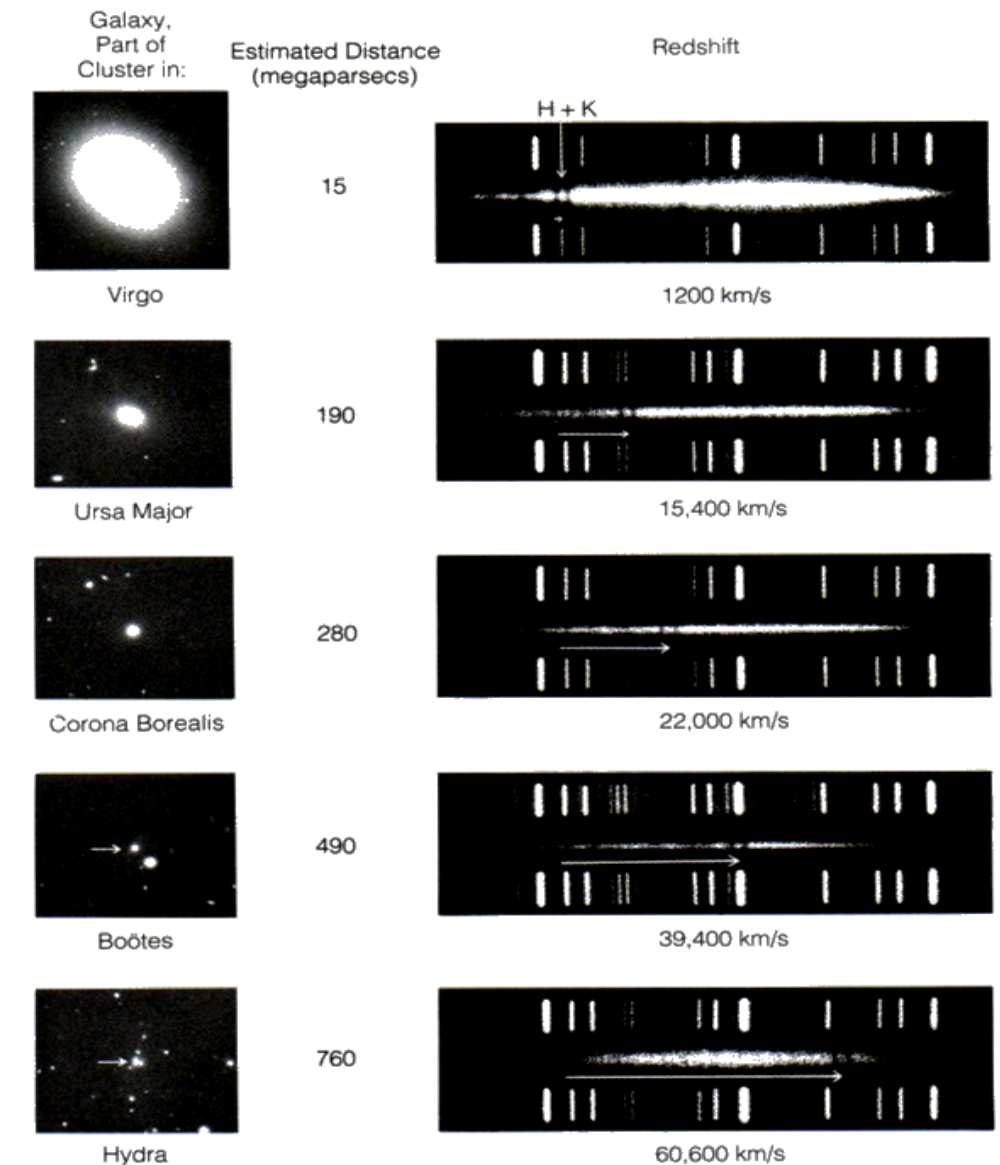
Hubbleův zákon

$$r = \frac{v}{H}$$

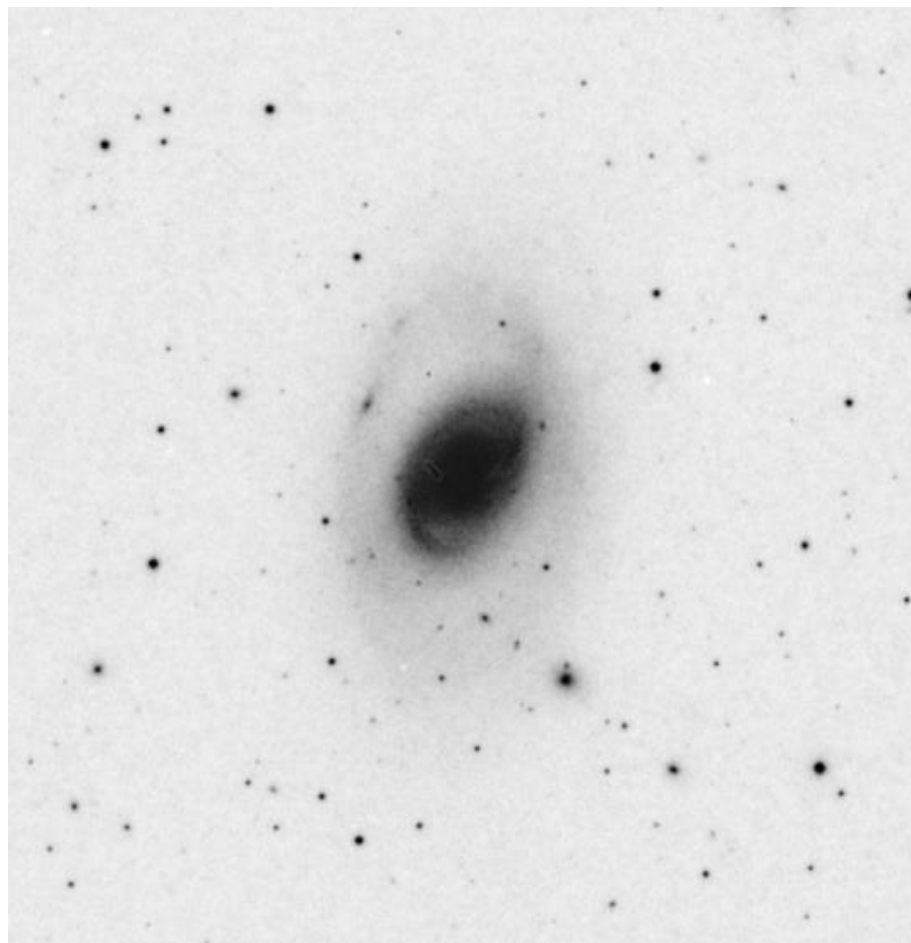
$$v = c \cdot z = c \frac{\Delta\lambda}{\lambda_1}$$

pro $z > 0,1$

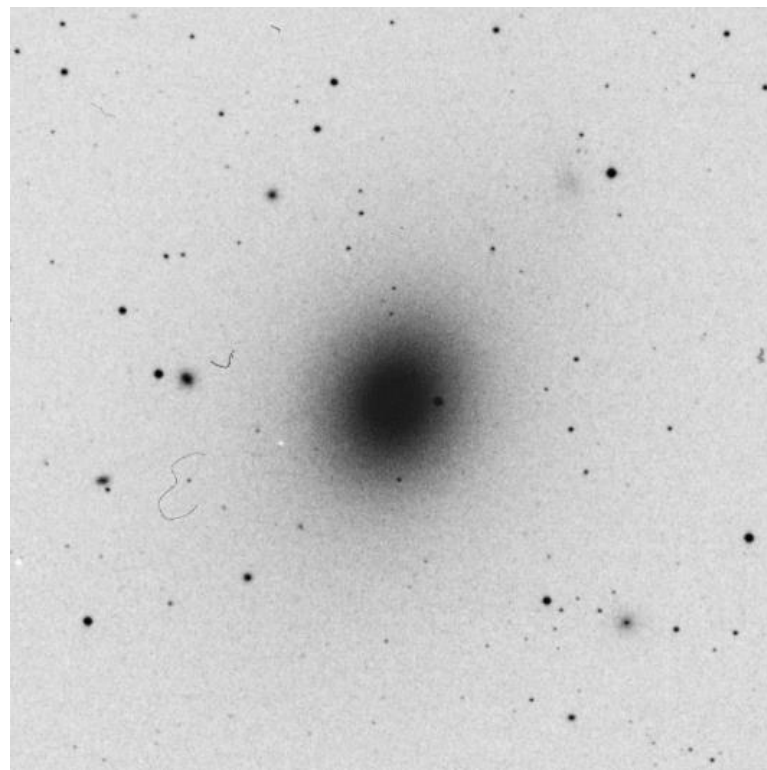
$$v = c \frac{(1+z)^2 - 1}{(1+z)^2 + 1}$$



galaxie NGC 3368 Sab
v souhvězdí Lva, $r = 12$ Mpc



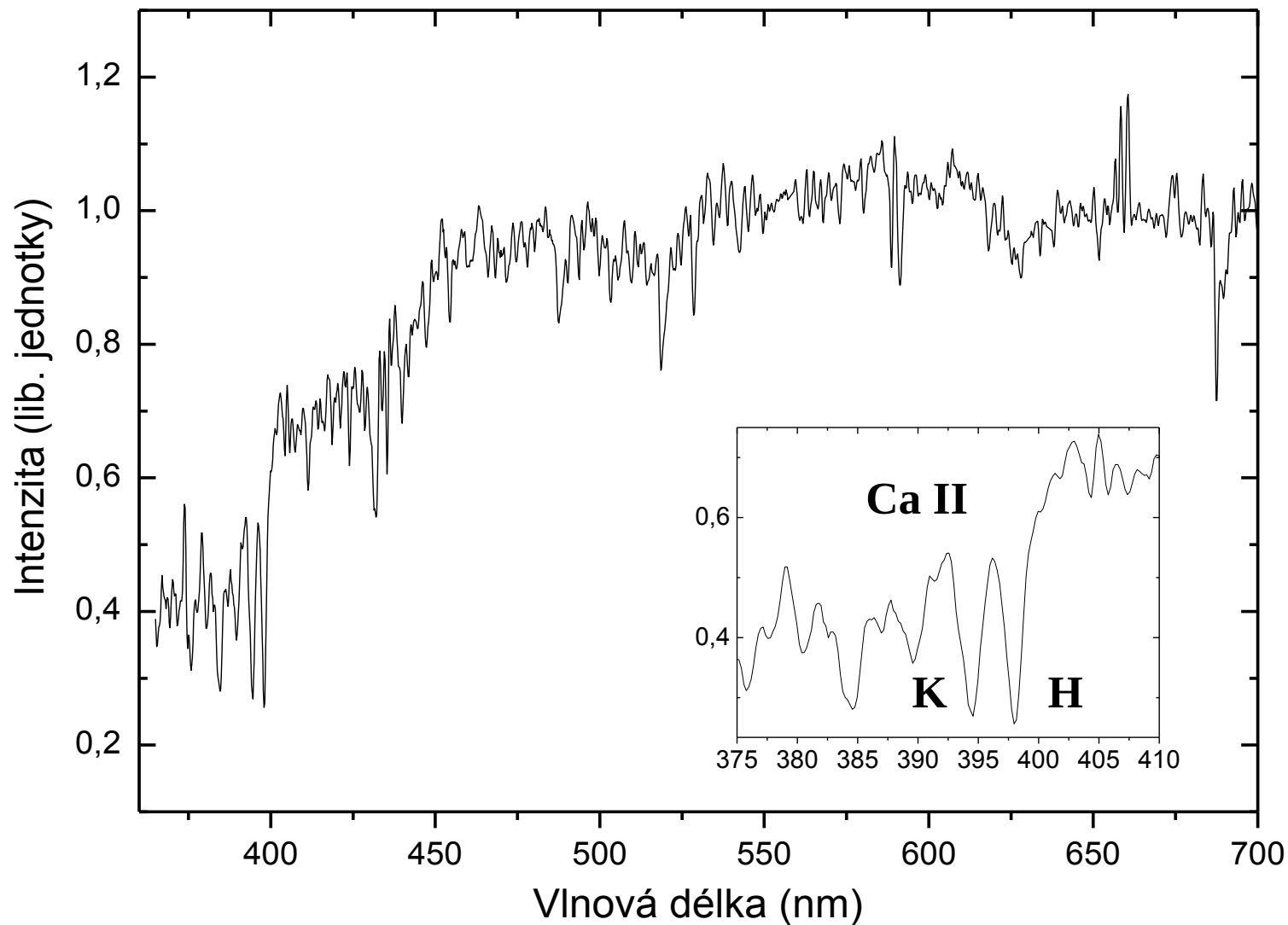
galaxie NGC 4472 E1
v souhvězdí Panny, $r = 18$ Mpc



Určování vzdáleností galaxií

- identifikace charakteristických absorpčních respektive emisních čar ve spektrech galaxií
- proměřování kosmologického rudého posuvu $\Delta\lambda$
- výpočet $\Delta\lambda = \lambda_p - \lambda_l$, $z = \Delta\lambda / \lambda_l$
- stanovení vzdálenosti $r = c.z / H$ při $H = 73 \text{ km/s/Mpc}$
- zpracováno s využitím
- www.astro.washington.edu/labs/hubblelaw/galaxies.html
- Kennicutt, R. C. Jr.: A Spectrophotometric Atlas of Galaxies. *The Astrophysical Journal Supplement Series*, **79**, (1992), p. 255 - 284.
- Štefl, V., Navrátil, Z.: Rozvíjení schopností žáků v astrofyzikální výuce na gymnáziích. Sborník DIDFYZ 2006, s. 42.

Spektrum NGC 3368

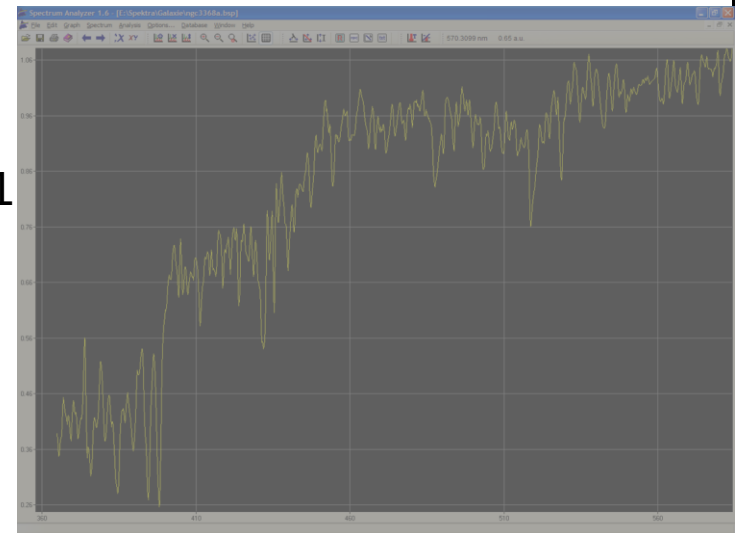


Postup práce

- spektra galaxií jsou uložena v souborech jako závislost $I = I(\lambda)$,
- zobrazení spektra, nalezení spektrálních čar ve spektru, odečtení vlnové délky studenti provádějí pomocí programu *Spectrum Analyzer* *
- ze znalosti měřené vlnové délky studenti v procesoru Excel stanovují vzdálenost galaxie.

Navrátil, Z. *et al* (2006): *Czech. J. Phys.* **56** B944–B951

* <http://www.physics.muni.cz/~zdenek/span/>



Určování vzdáleností galaxií

laboratorní vlnové délky

Galaxie (NGC)	r (Mpc)	Ca II K λ_0 393.37 nm				Ca II H λ_0 396.85 nm				r (Mpc)
		$\lambda_{\text{měř}}$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)			$\lambda_{\text{měř}}$ (nm)	$\Delta\lambda$ (nm)			
3368	12	394.52	1.15	880	12	398.03	1.18	890	12	12
3623	11	394.27	0.90	690	9	397.85	1.00	760	10	10
3941	12	394.56	1.19	910	12	397.99	1.14	860	11	12
4472	18	394.90	1.53	1170	16	397.83	0.98	740	10	16
3303	84	401.30	7.93	6050	81	405.45	8.60	6500	87	84
4889	86	401.88	8.51	6490	87	405.67	8.82	6670	89	88

katalogová vzdálenost

výsledná určená hodnota

Hubbleův zákon – význam úlohy

- pojem galaxie
- „užitečnost“ fyzikálních jevů
- složitost spekter, orientace v optické oblasti spekter hvězd a galaxií,
- rozvíjení pojmu spektra $I = I(\lambda)$

rozvíjení schopností

- samostatná práce žáků
- hledání literatury na Internetu
- práce s PC, zpracování dat - vhodné pro bankovní úředníky

8. Závěr

- **Žáci trvale projevují zájem o astronomickou problematiku,** jejich zájmu je třeba využít.
- Pokračující vzdělávací reformy nezlepšily postavení astronomie, především na gymnáziích.
- Jednou z možností zlepšení stavu je využití vazby astronomie a fyziky. **Vztah astronomie $\leftrightarrow$ fyzika umožňuje zefektivnit výuku obou disciplín.** Důležitou roli bude mít **učitel fyziky, jeho vědomosti a znalosti z astronomie.** Je nezbytná jeho příprava již na vysoké škole a průběžné vzdělávání.
- **Výuka astronomie by měla zůstat v obsahu výuky na základních a středních školách v 21. století zachována.** Jedna z možností její realizace (zejména pro seminární výuku) byla v příspěvku nastíněna.
- **Astronomické poznatky vždy patřily a budou patřit do trvalé pokladnice lidské vzdělanosti, jak bylo na ukázkách vztahu fyzika $\leftrightarrow$ astronomie demonstrováno.**

**Za pozornost děkuje
a na další setkání se těší...**



Gravitační termodynamika hvězd

Smršťováním uvolňovaná gravitační potenciální energie $\rightarrow$
transformace na zvětšení kinetické energie tepelného pohybu částic +
energii vyzařování $\langle W_k \rangle + \langle W_p \rangle + \langle W_z \rangle = 0$

Při platnosti V.V. platí $\langle W_k \rangle = -\frac{1}{2} \langle W_p \rangle = \langle W_z \rangle$

Polovina gravitační potenciální energie uvolňované při smršťování
jde na záření hvězd, druhá polovina na zvýšení kinetické energie
tepelného pohybu částic hvězdy.

Důsledkem **gravitačního smršťování** v některých etapách vývoje
může být **změna stavební struktury hvězd**.

Popularizace x výuka

Důraz na **vazbu s fyzikou je i při popularizaci nezbytný**.
Popularizátor – uvádí zajímavosti z výpravy na pozorování slunečního zatmění a komentující snímky Slunce získané v různých filtrech by příkladně měl umět odpovědět na otázku, na jakém fyzikálním principu jím používané optické filtry pracují...

