
Úvod do studia planety Země

STÁTNÍ
PEDAGOGICKÉ
NAKLADATELSTVÍ
PRAHA

1. vnější svět existuje mimo nás, nezávisle na našem vědomí a nezávisle na našem vnímání;
2. o tomto světě můžeme získat objektivní poznatky a není principiálních hranic poznání.

Z uvedených tezí vychází i **princip nevyčerpatelnosti hmoty**, který lze popsat dvěma aspekty:

a) **aspekt gnozeologický (poznávací)** – v žádné konečné etapě poznání není možno získat úplný a vyčerpávající obraz vesmíru;

b) **aspekt ontologický** – rozeznáváme nevyčerpatelnost do hloubky (neexistují objekty bez struktury) a nevyčerpatelnost do šířky [existuje nekonečné množství projevů hmoty (druhů), forem pohybu atd.].

Prostor a čas jsou jen určitými formami existence hmoty. Pojem **prostoru** charakterizuje rozložení materiálních objektů ve vzájemném poměru, vyjadřuje jejich rozprostraněnost. Kde není hmota, není ani prostor. Čas označuje změnu stavu pořadí následování jedné jevy za jinými a délku probíhání procesů. Je fyzikální veličinou, pro kterou nemáme přesnou definici. Jsme pouze schopni na základě projevů hmoty jej měřit (podle otáčení Země, kmitů molekul aj.). Ze zkušenosti víme, že čas plyne od minulosti přes přítomnost do budoucnosti.

Prostorové a časové charakteristiky objektů jsou navzájem nerozlučně spjaty. Velmi dobře se to projevuje při pohybu věcí. V Newtonově pojetí byl prostor a čas chápán jako samostatné veličiny, kterými lze popsat určitý objekt. V relativistické fyzice splývají tyto veličiny do **časoprostorových souřadnic událostí** (x, y, z, t). Vzdálenost dvou událostí v tomto prostoru odpovídá intervalu, který je nutný k proběhnutí světelného paprsku od jedné události ke druhé.

2.1.2 FYZIKÁLNÍ PROJEVY HMOTY

Otázka poznání hmoty však není předmětem jen filozofie, ale i dalších vědních disciplín, mezi nimiž zaujímá fyzika výsadní postavení. Studuje vlastnosti a vzájemné silové působení (interakci) hmoty v jednotlivých formách. Astrofyzika je potom aplikace fyzikálních poznatků na jednotlivá tělesa ve vesmíru.

Vzájemné silové působení hmoty

Tabulka 2.1

Typ interakce	Relativní velikost síly	Dosah působení [m]	Příklad stabilního systému
silná	1	10^{-15}	atomové jádro
elektromagnetická	10^{-3}	∞	atom, molekula, krystal
slabá	10^{-15}	$< 10^{-16}$?
gravitační	10^{-40}	∞	sluneční soustava

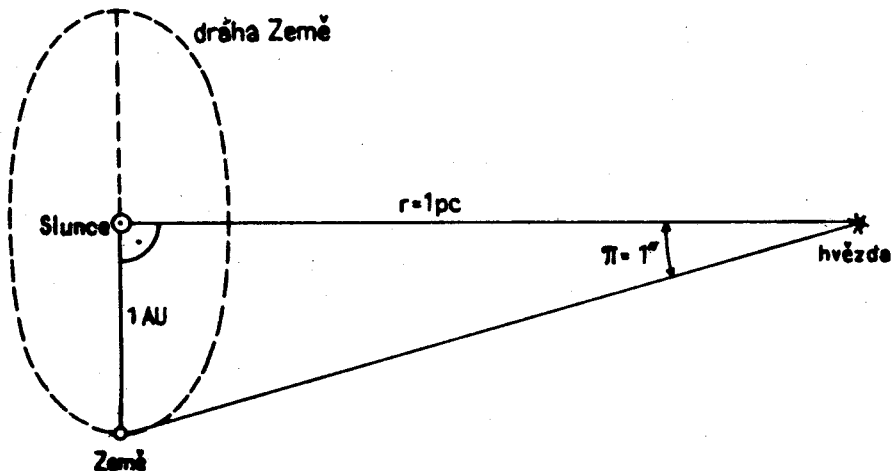
Fyzika studuje dvě formy hmoty – látku a pole. **Látkové prostředí** tvoří molekuly, které se skládají z atomů; atomy z **jader a elektronových obalů** a jádra atomů tvoří **nukleony**. Předpokládá se, že i elementární částice mají vnitřní strukturu. Pole zprostředkovává **silové působení** mezi látkovými částicemi. Toto vzájemné silové působení může být rozděleno na typy uvedené v tab. 2.1.

Podle velikosti stavových veličin (hustota, teplota) může látka zaujímat různá **skupenství (fáze)**. I ve vesmíru se látka vyskytuje v různých skupenstvích. Nejznámější jsou **skupenství pevné, kapalné a plynné**, ke kterým se řadí čtvrté skupenství hmoty – **plazma**. A právě plazma, složené z ionizovaných částic, tvoří více než 99 % hmoty ve vesmíru, přestože v našem bezprostředním okolí pozorujeme právě tělesa z pevných látek, kapaliny a plyny.

Vlastnosti všech forem hmoty ve vesmíru jsou předmětem podrobného astrofyzikálního studia vesmíru.

Z praktických důvodů byly v astronomii zavedeny speciální jednotky vzdáleností – astronomická jednotka (používá se zkratka AU z anglického astronomical unit nebo UA podle francouzského unité astronomique), světelný rok (zkratka ly z anglického light year) a parsek (pc):

- 1 astronomická jednotka je rovna střední vzdálenosti Země–Slunce a její hodnota je:
1 AU = 1,495 978 70 · 10¹¹ m;
- světelný rok je vzdálenost, kterou urazí elektromagnetické vlnění ve vakuu za 1 rok;
- 1 parsek je vzdálenost, ze které vidíme jednu astronomickou jednotku pod úhlem 1 vteřiny



2.1 Definice parseku

(obr. 2.1). Definice parseku souvisí s určením tzv. **roční paralaxy tělesa**. Je to malý úhel π v trojúhelníku Slunce, Země, hvězda, v němž platí:

$$\pi = \frac{1}{r}, \quad r = \frac{1}{\pi}, \quad (2.1)$$

kde π je roční paralaxa hvězdy ve vteřinách a r je vzdálenost hvězdy v parsecích. Z tohoto odvození plyne i obsah slova parsek, které vzniklo spojením prvních slabik slov paralaxa a sekunda.

Vzájemné převody jednotlivých astronomických délkových jednotek jsou uvedeny v tab. 2.2.

Převody astronomických délkových jednotek

Tabulka 2.2

	m	AU	ly	pc
m	1	6,684 587 2 · 10 ⁻¹²	1,057 026 · 10 ⁻¹⁶	3,240 75 · 10 ⁻¹⁷
AU	1,495 978 7 · 10 ¹¹	1	1,581 29 · 10 ⁻⁵	4,848 102 · 10 ⁻⁶
ly	9,4605 · 10 ¹⁵	6,323 95 · 10 ⁴	1	3,065 917 · 10 ⁻¹
pc	3,0857 · 10 ¹⁶	2,062 663 · 10 ⁵	3,261 66	1

materiálu nižší, sluneční látka je pro záření neprůhledná, a proto se zde začíná uplatňovat jiný způsob přenosu energie ve Slunci – **konvekce (promíchávání)**. Části teplejších spodních vrstev stoupají k povrchu, kde se ochladí a poté klesají dolů. **Konvektivní vrstva** zasahuje téměř až k povrchu Slunce a je pravděpodobně zodpovědná za většinu projevů sluneční aktivity, pozorovaných na povrchu Slunce a v jeho atmosféře (viz část 3.3.1.2).

2.3 Hvězdy

2.3.1 HVĚZDNÉ VELIKOSTI (MAGNITUDY)

Již při běžném pozorování hvězdného nebe jsme schopni jednotlivé hvězdy rozdělit do skupin podle jejich jasností. Pro jednotku, udávající **jasnost hvězd i dalších nebeských objektů**, se užívá název **hvězdná velikost** neboli **magnituda** m (M). Z hlediska fyzikálního označuje magnituda osvětlení způsobené měřenou hvězdou (či jiným objektem). Magnituda je jednou z mála dostupných a přímo měřitelných charakteristik hvězd.

Vztah mezi **osvětlením** a **zdánlivou hvězdnou velikostí** má tvar:

$$m_2 - m_1 = 2,5 \log \frac{E_1}{E_2}, \quad (2.9)$$

kde m_1, m_2 jsou zdánlivé hvězdné velikosti (magnitudy) hvězd a E_1, E_2 jejich osvětlení. Tento vztah se nazývá **Pogsonova rovnice**.

Dnešní astrofyzika pracuje s objekty o maximálním rozdílu asi 50 magnitud, který odpovídá poměru osvětlení 10^{20} . Takto zjištěné osvětlení od daných hvězd nám však neurčuje skutečný zářivý výkon (tj. množství vyzařené energie z hvězdy do prostoru za 1 s). Důvodem je to, že jednotlivé hvězdy jsou různě vzdáleny od Země. Pro objektivnější posouzení světelného výkonu hvězdy zavádíme pojem **absolutní magnituda**. Je definována jako magnituda hvězdy, kterou pozorujeme ve vzdálenosti 10 pc (což odpovídá paralaxe $0,1''$). Pro absolutní magnitudu M platí:

$$M = m + 5 - 5 \log r, \quad (2.10)$$

kde r je vzdálenost hvězdy v parsecích.

Vzhledem k tomu, že se povrchové teploty hvězd vzájemně liší, liší se i vlnová délka maxima vyzařování hvězdy. Tím se ovšem liší také hodnoty magnitud podle spektrální citlivosti detektoru záření. Magnitudy měřené ve vizuální oblasti (s maximem v žlutozelené barvě) označujeme m_V , magnitudy měřené v oblasti modré m_B , magnitudy měřené v oblasti ultrafialové m_U apod. (v odborné literatuře se uvádí i označení V, B, U). Důležitá je i **magnituda bolometrická**, odvozená z celkového toku záření hvězdy ve všech vlnových délkách. Lze ji měřit přímo jen mimo zemskou atmosféru a označujeme ji m_{bol} .

2.3.2 CHARAKTERISTIKY HVĚZD

Kulová gravitačně vázaná tělesa, složená z plazmatu, nazýváme **hvězdami**. Jejich charakteristickým projevem je, že jsou zdrojem elektromagnetického záření i toku částic (korpuskulí). Jejich hmotnosti jsou v mezích $0,01 - 60 M_{\odot}$.

Hvězdy jsou **základními stavebními prvky vesmíru**. Ukazuje se, že více než 90 % viditelné hmoty vesmíru je soustředěno v nich. Mezní hodnoty nejdůležitějších fyzikálních charakteristik hvězd jsou uvedeny v tab. 2.4.

Veličina	Interval velikostí (v jednotkách Slunce)	
hmotnost	$10^{-2} - 5 \cdot 10^1$	M_{\odot}
poloměr	$10^{-4} - 10^3$	r_{\odot}
střední hustota	$10^{-7} - 10^{10}$	ρ_{\odot}
efektivní teplota	$3 \cdot 10^{-1} - 2 \cdot 10^1$	T_{ef}
celkový zářivý výkon	$10^{-4} - 10^6$	L_{\odot}

Stavba hvězd se řídí mechanismy, které byly naznačeny v části 2.2.2 na příkladu „typické“ hvězdy – Slunce.

Důležitou, ve výzkumu hvězd nezastupitelnou charakteristikou, je jejich **spektrum**. Rozborem spektra získáváme mnohé parametry hvězd, které nám dovolují určit stav povrchové vrstvy hvězd – atmosféry. Záření vychází do prostoru výhradně z vnějších oblastí hvězdy – tzn. z té části atmosféry, kterou nazýváme **fotosféra hvězdy**.

Spektrum hvězd se skládá ze spojitého spektra (kontinua) a z řady spektrálních čar (především absorpčních). Spojité spektrum vzniká ve spodnějších (teplejších) částech fotosféry, zatímco tmavé absorpční čáry vznikají až při průchodu světla vyššími vrstvami fotosféry.

Spektra jednotlivých hvězd se od sebe navzájem liší. Hlavně to způsobuje různá teplota fotosféry a částečně další vlastnosti hvězdy – gravitační pole, magnetické a elektrické pole, rotace hvězdy aj. Uspořádat jednotlivá spektra hvězd podle určitých společných znaků se snažili astronomové již počátkem 19. století. Začátkem 20. století byla zavedena tzv. **Harvardská klasifikace**, která se po opravách a doplňcích užívá dosud. Tato klasifikace třídí hvězdy podle přítomnosti či nepřítomnosti určitých (většinou absorpčních) čar a jejich intenzity do následujících **spektrálních tříd**:

(*Q; P; W*); *O; B; A; F; G; K; M; (S; R; N)*,

kde *O* – *M* jsou hlavní **spektrální třídy**. Sleduje se tak i teplotní škála: nejžhavější jsou hvězdy třídy *O* a nejchladnější třídy *M*. Hvězdy spektrálních tříd *R* a *N* (tj. hvězdy se zvýšeným obsahem uhlíku) se v poslední době označují společným znakem *C*. Charakteristické znaky jednotlivých spekter uvádí např. V. VANÝSEK (1980).

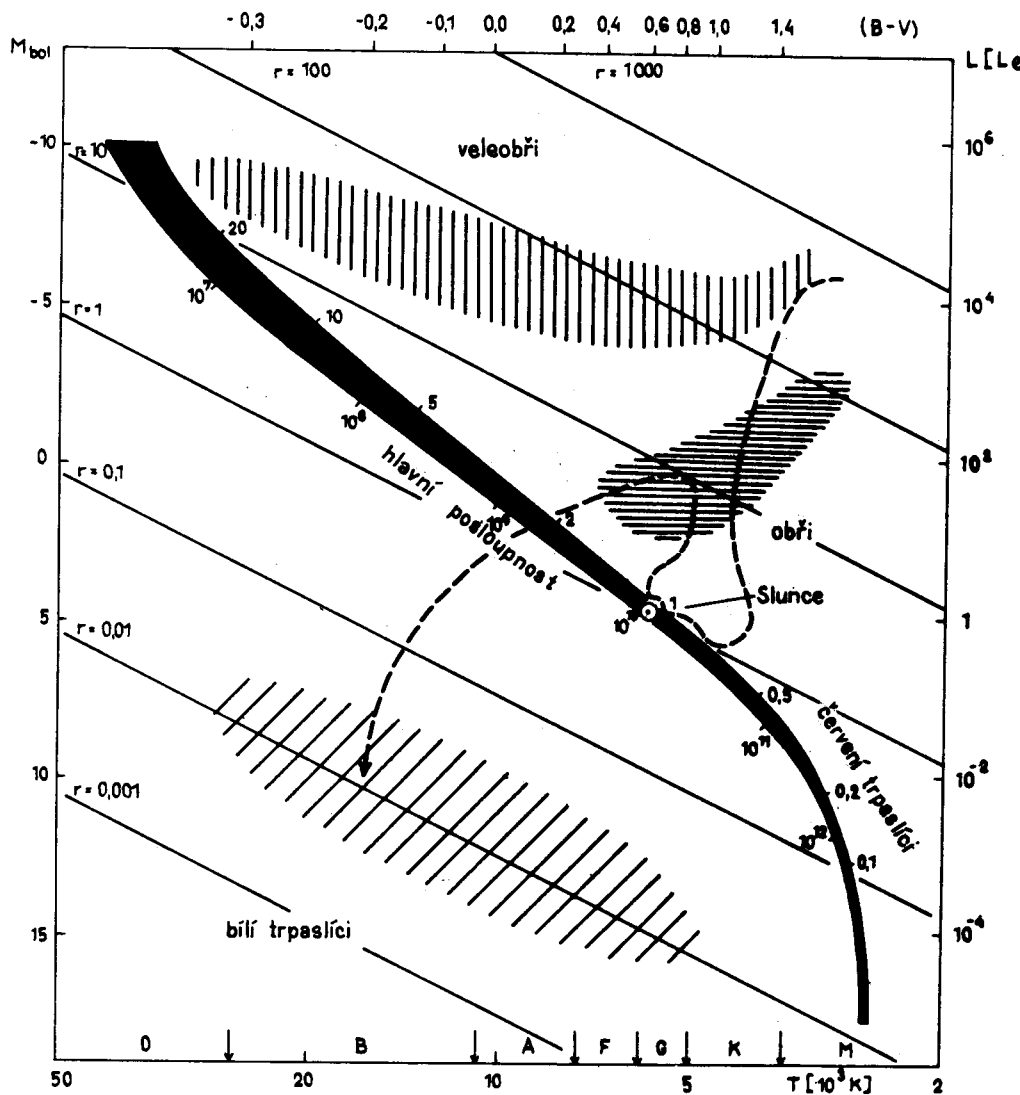
2.3.3 HERTZSPRUNGŮV-RUSSELŮV DIAGRAM

Mezi charakteristikami hvězd existují vztahy, které lze vyjádřit různými závislostmi. Jistě nejznámějším vztahem je **závislost mezi výkonem hvězdy a povrchovou teplotou**, zvaná též podle svých autorů jako **Hertzsprungův-Russelův diagram**, zkráceně nazývaná **HR diagram**.

Hvězdy se v HR diagramu seskupují do několika oblastí, které jsou dány zákonitostmi vývoje a stavby hvězd. Určitým spektrálním třídám odpovídají totiž zcela určité (nebo několik určitých) svítivosti.

HR diagram lze sestavit různým způsobem podle toho, jaké veličiny na jednotlivé osy nanášíme. Na obr. 2.3 jsou na vodorovné osy vyneseny spektrální třídy, teploty (*T*), popř. barevný index (*B-V* – což je rozdíl modré a vizuální magnitudy hvězdy) a na svislé osy absolutní bolometrické magnitudy M_{bol} nebo svítivosti *L* v jednotkách svítivosti Slunce.

V diagramu se převážná většina hvězd seskupuje v oblasti táhnoucí se z levého horního rohu do pravého dolního rohu. Tato oblast HR diagramu se nazývá **hlavní posloupnost**. Dalšími skupinami jsou **obří**, **veleobří** a **bílí trpasličí**. Poloha Slunce je vyznačena na hlavní posloupnosti symbolem \odot . Nad hlavní posloupností jsou uvedeny hmotnosti hvězd v jednotkách hmotnosti Slunce a pod hlavní posloupností životní doby hvězd v rocích. Z HR diagramu můžeme též určit přibližné poloměry hvězd *r*, udané v poloměrech Slunce.



2.3 Hertzsprungův-Russellův diagram (vysvětlivky v textu)

Na základě zkušeností s Hertzsprungovým-Russellovým diagramem byly u spektrálních klasifikací hvězd doplněny třídy svítivosti. Značíme je za spektrální třídou pomocí římských číslic takto:

- | | |
|------------------|---|
| I – veleobři, | V – hvězdy hlavní posloupnosti (trpaslíci), |
| II – jasní obři, | VI – podtrpaslíci, |
| III – obři, | VII – bílí trpaslíci. |
| IV – podobři, | |

Slunce například je ve spektrální klasifikaci označeno $G2 V$, což znamená, že Slunce je hvězda spektrální třídy $G2$, ležící na hlavní posloupnosti (trpaslík).

HR diagram vyjadřuje tedy závislost, která nám pomáhá ze známých dvou parametrů hvězdy určit často i zbývající neznámé veličiny. Kromě toho, jak bude uvedeno dále, pomáhá nám pochopit vývoj hvězd.

2.3.4 VÝVOJ HVĚZD

Na první pohled se zdá, že hvězdy jsou skutečnými „stálicemi“ – neměnnými útvary ve vesmíru. Dnes je však známo, že hvězdy se pohybují prostorem, mění se jejich uspořádání na obloze a jejich stavba.

Hvězdy vznikají, vyvíjejí se a zanikají. Hlavním parametrem, určujícím charakter i rychlost vývoje hvězdy, je její hmotnost. Rychlost vývoje je tím větší, čím větší je hmotnost hvězdy.

Vývoj hvězd lze vysvětlit na příkladu vývoje Slunce, které vznikalo kontrakcí (smršťováním) části oblaku mezihvězdné látky asi před $4,6 \cdot 10^9$ léty. Impuls, který „odstartoval“ smršťování protoslunce do dnešní podoby, není dosud znám. Soudí se však, že jím mohl být výbuch blízké supernovy. Gravitační smršťování, formující protohvězdu, probíhá z počátku rychle; jakmile se však ve hvězdě ustaví hydrostatická rovnováha, tento proces se zpomaluje. V té době Slunce září na úkor energie uvolněné gravitačním smršťováním. Slunce prochází údobím aktivity hvězdy typu **Tauri** (tj. hvězdy s mohutným hvězdným větrem). Obrovský hvězdný vítr, vanoucí z povrchu Slunce, formuje rodící se sluneční soustavu. Fáze gravitační kontrakce končí v okamžiku, kdy teplota v nitru dosáhne hodnoty potřebné pro zapálení jaderných reakcí ($1,35 \cdot 10^7$ K).

Převážnou část svého aktivního života (asi 85 %) stráví Slunce na **hlavní posloupnosti**. Přibližně $9 \cdot 10^9$ let se spaluje v jeho nitru vodík na hélium a jen velmi pozvolna se mění. Na konci vývoje Slunce na hlavní posloupnosti bude jeho výkon dvojnásobný a poloměr bude o 40 % větší než na počátku této etapy. Jakmile se všechen vodík v jádře vyčerpá, začne spalování vodíku v okolí jádra. Jádro z vyhořelého hélia se zmenší a zvětší se jeho hustota. Obal hvězdy se bude rozpínat a chladnout – Slunce se v HR diagramu přesune do oblasti **červených obrů**. Vývoj se pak dále zrychlí a Slunce se ocitne na vrcholu větve červených obrů. Jeho výkon bude $350 L_{\odot}$, poloměr $50r_{\odot}$ a teplota 3500 K.

V tomto okamžiku se velmi rychle vznítí jaderné reakce, které spalují hélium na uhlík, popř. na kyslík. Héliové reakce probíhají poměrně rychle a situace se opakuje. Uhlíko-kyslíkové jádro se smršťuje a obal hvězdy se rozpíná. Před **rozpadem Slunce** bude jeho teplota 3000 K a výkon dosáhne $3000 L_{\odot}$. Povrch Slunce bude sahat ke dráze Země. Uprostřed rozpínajícího se obalu zůstane uhlíko-kyslíkový zbytek o hmotnosti asi $0,6 M_{\odot}$ velikosti Země, obalený vrstvičkami hořícího hélia a vodíku.

V dalším stadiu dojde k osamostatnění plynného obalu, který se rozpíná do prostoru, zatímco hvězda se přesunuje na HR diagramu do oblasti jader planetárních mlhovin. Horký ultrafialový trpaslík postupně chladne a mění se v bílého trpaslíka, později v **chladného černého trpaslíka**, bez zdrojů energie. Vývoj Slunce je schematicky znázorněn čárkovanou čarou na obr. 2.3.

Vývoj hvězd jiných hmotností má až na nepodstatné odchylky podobný průběh. Podstatněji se však liší závěrečná stadia vývoje hvězd. Hvězdy do hmotnosti asi $8 M_{\odot}$ se vyvíjejí obdobně jako Slunce – končí jako **bílí trpaslíci**. U hvězd o hmotnosti větší než $8 M_{\odot}$ je vývoj dramatictější – vybuchují jako **supernovy**. Pozůstatkem jejich vývoje jsou tzv. pulsary (viz část 2.3.5). U hvězd o hmotnostech ještě vyšších může vyčerpáním zásob jaderné energie dojít ke gravitačnímu kolapsu a zhroutil se v **černou díru**.

2.3.5 FYZICKÉ PROMĚNNÉ HVĚZDY, NESTACIONÁRNÍ HVĚZDY

Velmi početnou skupinou hvězd jsou **proměnné hvězdy**. Jsou to hvězdy, u nichž se v průběhu času

Tělesa, která se pohybují v gravitačním poli Slunce po kuželosečkách a vykonávají alespoň jeden úplný oběh kolem Slunce, patří do **sluneční soustavy**. Kromě centrální hvězdy **Slunce** se sem řadí **planety, měsíce planet, planetky, komety, meteoroidy, meziplanetární plyn a prach**. Nepatří sem tělesa prolétávající sluneční soustavou po hyperbolických dráhách z mezihvězdného prostoru.

Jestliže chápeme hmotnost celé sluneční soustavy jako 100 %, pak přibližné **hmotnostní podíly** jednotlivých typů objektů jsou:

Slunce	99,866 %
planety	0,134 %
komety	0,000 3 %
mésíce planet	0,000 04 %
planetky	0,000 000 2 %
meteoroidy, prach a plyn	0,000 000 000 01 %.

3.2 Nebeská mechanika

Studiem pohybů nebeských těles, která na sebe silově působí v souladu s Newtonovým gravitačním zákonem, se zabývá **nebeská mechanika**. Patří mezi nejstarší astronomické obory. Vycházela vždy z přijímaných modelů sluneční soustavy (oběhů planet).

Velkým úspěchem nebeské mechaniky bylo empirické odvození zákonů pohybů planet a určení všeobecného gravitačního zákona.

3.2.1 KEPLEROVY ZÁKONY

J. KEPLER odvodil tyto **zákony pohybů planet**:

1. **Planety se pohybují po elipsách málo odlišných od kružnic, v jejichž společném ohnisku je Slunce.**

2. **Plochy opsané průvodičem planety za stejné doby jsou stejné.**

3. **Druhé mocniny oběžných dob planet jsou ve stejném poměru jako třetí mocniny jejich velkých poloos.**

Z **prvního Keplerova zákona** plyne, že vzdálenost planety od Slunce se mění. V určitém místě své dráhy je planeta Slunci nejbliže – tento bod se nazývá **přisluní (perihel) II**, v jiném nejdále – ten bod se nazývá **odsluní (afel) A** (obr. 3.2). Spojnice perihelu a afelu je **přímka apsid**.

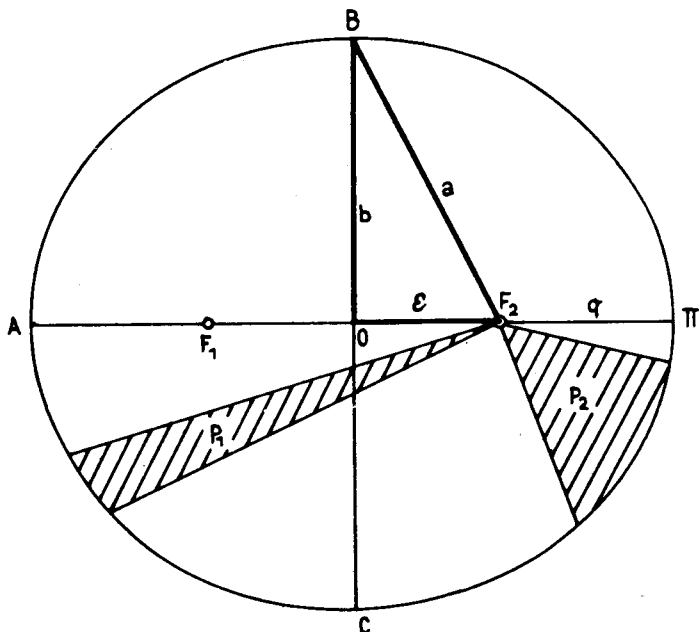
Tvar eliptické dráhy určíme pomocí **výstřednosti (excentricity)**. Vzdálenost středu elipsy O od jejího ohniska F nazýváme **délkovou (lineární) výstředností ϵ** . V astronomii se užívá poměr délkové výstřednosti ϵ ku délce hlavní poloosy a :

$$e = \epsilon / a = (a^2 - b^2)^{\frac{1}{2}} / a, \quad (3.1)$$

který nazýváme **číslnou (numerickou) výstředností** (b je vedlejší poloosa). Ze vztahu 3.1 je zřejmé, že pro elipsu nabývá číselná výstřednost hodnot mezi 0 a 1 ($e = 0$ odpovídá kružnici, $e = 1$ odpovídá parabole).

Je nutno připomenout, že znění prvního zákona není úplné, neboť tělesa se mohou ve sluneční soustavě pohybovat po jakékoli kuželosečce.

Ve **druhém Keplerově zákonu** (zákonu ploch) se průvodičem planety rozumí spojnice planety se Sluncem. Plocha opsaná průvodičem za jednotku času je **plošná rychlost** a lze tedy tento zákon vyjádřit následovně: **Plošná rychlost planety je konstantní**. Tedy v obr. 3.2 pro plochy P_1 a P_2



3.2 Oběh tělesa po eliptické dráze – parametry dráhy tělesa sluneční soustavy a vyjádření zákona ploch

platí $P_1 = P_2$. (Čas uplynulý při oběhu planety mezi body 1 a 2 je stejný jako mezi body 3 a 4.) Znamená to, že planeta se pohybuje kolem Slunce různou rychlostí, takže např. dráhu CIB proběhne za kratší dobu než dráhu BAC .

Druhý Keplerův zákon je důsledkem zákona zachování momentu hybnosti tělesa podle vztahu (2.11). Pro těleso o hmotnosti m platí:

$$\mathbf{r}_1 \times m\mathbf{v}_1 = \mathbf{r}_2 \times m\mathbf{v}_2, \quad (3.2)$$

$$\text{odkud} \quad \mathbf{r}_1 : \mathbf{r}_2 = \mathbf{v}_2 : \mathbf{v}_1, \quad (3.3)$$

kde $\mathbf{r}_1, \mathbf{r}_2$ jsou průvodiče a $\mathbf{v}_1, \mathbf{v}_2$ odpovídající rychlosti uváděného tělesa.

Třetí Keplerův zákon vyjadřuje vztah mezi oběžnou dobou planety a její velkou poloosou. Jsou-li P_1, P_2 oběžné doby planet a a_1, a_2 jejich střední vzdálenosti od Slunce, lze třetí Keplerův zákon vyjádřit ve tvaru:

$$\frac{P_1^2}{P_2^2} = \frac{a_1^3}{a_2^3}. \quad (3.4)$$

Tento vztah platí za předpokladu, že hmotnost planety je podstatně menší než hmotnost Slunce. Teprve po objevení gravitačního zákona I. NEWTONEM bylo nalezeno i přesné znění třetího Keplerova zákona ve tvaru:

$$\frac{a_1^3}{a_2^3} = \frac{P_1^2}{P_2^2} \cdot \frac{M_\odot + m_1}{M_\odot + m_2}, \quad (3.5)$$

kde M_\odot je hmotnost Slunce a m_1, m_2 jsou hmotnosti jednotlivých planet.

PŘÍKLAD 3.1: Oběžná doba Země kolem Slunce je 1 rok, oběžná doba Neptuna 165 let.

Vypočítejte, kolikrát dále je Neptun od Slunce než Země.

Řešení: Je-li vzdálenost Země od Slunce 1 AU, pak dosazením do (3.4) dostaneme:

$$\frac{1^3}{165^2} = \frac{1^3}{r^3}, \text{ odkud } r \doteq 30 \text{ AU.}$$

Velká poloosa dráhy Neptuna je 30krát větší než velká poloosa dráhy Země.

3.2.2 NEWTONŮV GRAVITAČNÍ ZÁKON

Již J. KEPLER byl přesvědčen, že jeho tři zákony mají také charakter dynamický a že zdrojem síly je Slunce, podmiňující pohyby těles ve sluneční soustavě. V jeho době však nebylo možno tuto sílu přesně určit. Teprve sjednocením Galileovy nauky o setrvačnosti a pohybu těles na Zemi a Keplerových zákonů pohybů planet se I. NEWTONOVI podařilo vytvořit obecně platnou **teorii gravitace**. Základními zákony jsou v ní tři Newtonovy zákony a gravitační zákon.

Pro odvození gravitačního zákona jsou potřebné Keplerovy zákony, Newtonovy zákony a pojem centrální síly. **Newtonovy zákony** jsou následující:

1. **Zákon setrvačnosti:** každé těleso (o hmotnosti m) setrvává v klidu nebo v přímočarém rovnoměrném pohybu (rychlostí \mathbf{v}), pokud není tento stav přinuceno změnit působením okolních těles. Je-li hybnost tělesa $\mathbf{p} = m\mathbf{v}$, pak platí:

$$\frac{d\mathbf{p}}{dt} = 0 \quad (3.6)$$

2. **Zákon síly:** časová změna hybnosti tělesa je úměrná síle působící na těleso, tedy platí:

$$\mathbf{F} = \frac{d\mathbf{p}}{dt}, \quad (3.7)$$

a též

$$\mathbf{F} = m\mathbf{a}, \quad (3.8)$$

kde \mathbf{a} je zrychlení tělesa.

3. **Zákon akce a reakce:** v uzavřeném systému těles každá akce vyvolává stejnou reakci opačného směru, tedy

$$-\mathbf{F}_1 = \mathbf{F}_2 \quad (3.9)$$

V uzavřeném systému těles s hybnostmi \mathbf{p}_1 a \mathbf{p}_2 pro celkovou hybnost platí:

$$\mathbf{p} = \mathbf{p}_1 + \mathbf{p}_2 = \text{konst.} \quad (3.10)$$

Z druhého Keplerova zákona plyne, že síla působící na planetu o hmotnosti m míří do centra oběžného pohybu (do Slunce). Její velikost je:

$$F = ma \quad (3.11)$$

Pro zrychlení u centrálního pohybu platí:

$$a = \frac{v^2}{r}, \quad (3.12)$$

a odtud:

$$F = \frac{mv^2}{r}, \quad (3.13)$$

kde r je poloměr dráhy, v rychlost na kruhové dráze. Je-li oběžná doba P a dráha $2\pi r$, je rychlost planety na dráze rovna:

$$v = \frac{2\pi r}{P} \quad (3.14)$$

Po dosazení (3.14) do (3.13) dostaneme pro přitažlivou sílu F :

$$F = \frac{4\pi^2 rm}{P^2} . \quad (3.15)$$

Pro více planet podle (3.4) platí

$$\frac{P_1^2}{a_1^3} = \frac{P_2^2}{a_2^3} = \dots = k , \quad (3.16)$$

kde k je konstanta úměrnosti závislá na volbě jednotek. Třetí Keplerův zákon lze tedy psát ve tvaru

$$P^2 = kr^3 , \quad (3.17)$$

a po dosazení do (3.15) dostaneme:

$$F = \frac{4\pi^2}{k} \cdot \frac{m}{r^2} . \quad (3.18)$$

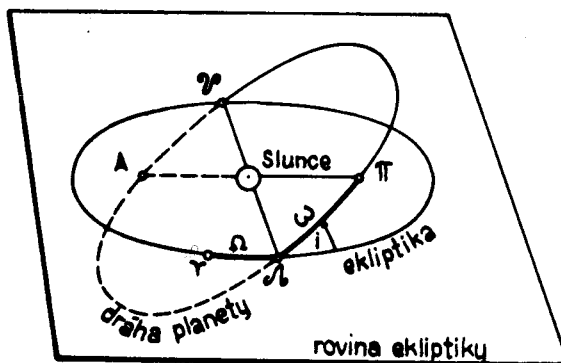
Protože zrychlení způsobené centrální silou (3.13) je úměrné hmotnosti centrálního tělesa m_c , lze

položít $G = \frac{4\pi^2}{km_c}$ a dosazením za k do (3.18) dostaneme matematické vyjádření **všeobecného gravitačního zákona**:

$$F = G \frac{m_c m}{r^2} . \quad (3.19)$$

3.2.3 DRÁHOVÉ ELEMENTY TĚLES SLUNEČNÍ SOUSTAVY

Pro jednoznačný popis dráhy planety nebo jiného tělesa v prostoru je nutná znalost jejich dráhových elementů, které určují tvar, velikost a orientaci dráhy v prostoru vzhledem ke zvolené rovině. Ve sluneční soustavě je touto rovinou rovina ekliptiky, což je rovina oběhu Země kolem Slunce. Mezi **dráhové elementy** (obr. 3.3) patří:



3.3 Elementy drah těles ve sluneční soustavě (A – odsluní, Π – přisluní; další popis v textu)

1. Elementy určující polohu roviny v prostoru

a) **Sklon roviny dráhy k ekliptice i [°]**. Udává odchylku roviny dráhy tělesa od roviny ekliptiky. Pokud se pohyb tělesa promítnutý do roviny ekliptiky děje ve stejném směru jako se pohybuje Země kolem Slunce, hovoříme o **pohybu přímém (direktním)** a $i < 90^\circ$. V opačném případě, kdy $i > 90^\circ$, hovoříme o **pohybu zpětném (retrográdním)**. U planet (tab. 3.1) je sklon dráhy k ekliptice poměrně malý (největší sklon má planeta Pluto – $17^\circ 9'$). U komet a planetek nabývají sklony drah všech hodnot od 0° do 180° .

b) **Délka výstupného uzlu Ω [°]**. Je to úhlová vzdálenost výstupného uzlu Ω od jarního bodu Υ měřená v rovině ekliptiky ve směru oběhu Země kolem Slunce. (**Výstupný uzel Ω** je místo na dráze, kde se těleso dostává na sever „nad“ rovinu dráhy Země. Protilehlým bodem je **sestupný uzel** a spojnice těchto dvou bodů se nazývá **uzlová přímka $\Omega \ \varpi$** .) Jarní bod je místo na ekliptice, kde se Slunce nachází o jarní rovnodennosti (bližší viz 4.2.2.2). Pro **délku sestupného uzlu** platí $\varpi = \Omega + 180^\circ$.

c) **Argument šířky perihelu ω [°]**. Je to úhlová vzdálenost mezi uzlovou přímkou a přímkou apsid, měřená ve směru pohybu tělesa od výstupného uzlu k přísluní. Někdy se udává místo argumentu šířky perihelu, **délka perihelu Π** , pro niž platí $\Pi = \omega + \Omega$.

2. Elementy určující tvar dráhy

a) **Délka velké poloosy a [AU]**. Někdy se místo velké poloosy udává **perihelová vzdálenost $q = a(1-e)$** (viz obr. 3.2).

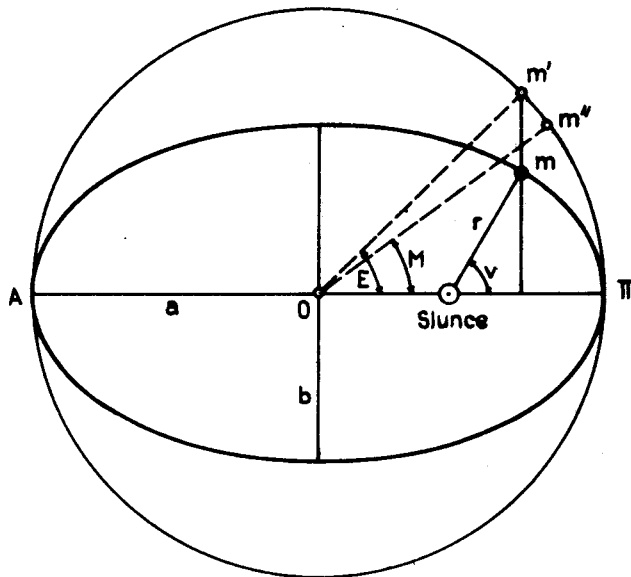
b) **Číselná výstřednost e** .

3. Elementy určující polohu tělesa na dráze

a) **Okamžik průchodu tělesa přísluním T** .

Poloha planety (tělesa) v prostoru v daném okamžiku t je jednoznačně určena velikostí, tvarem a orientací dráhy v prostoru a místem, kde se planeta na dráze nachází. Vzhledem k tomu, že se planety nepohybují po kružnicích, ale po elipsách, nestačí k jednoznačnému určení místa na dráze znalost doby oběhu P a okamžik průchodu přísluním T . Pro přesné zjištění polohy tělesa m na eliptické dráze zavádíme tzv. **anomálie** (obr. 3.4). Rozeznáváme **anomálii pravou v** , což je úhel Π, m , **excentrickou E** , což je úhel $\Pi, 0, m'$ a **anomálii střední M** , což je úhel $\Pi, 0, m''$.

Pro potřebné výpočty jsou zavedena pomocná tělesa m', m'' tak, že těleso m'' charakterizuje



3.4 Anomálie (Π – přísluní, A – odsluní, (další popis v textu)

polohy tělesa pohybujícího se po kruhové dráze se stejnou oběžnou dobou jako má skutečné těleso m . Pomocné těleso m' je pak průmět skutečných poloh tělesa m pohybujícího se po eliptické dráze na kružnici. Cílem je zjistit skutečnou polohu tělesa m na dráze ze znalosti oběžné doby P . Vztahy pro výpočet anomálií uvádí např. B. HÁCAR (1963).

Obdobným způsobem, jako jsou v této kapitole určeny vztahy a pojmy z nebeské mechaniky, lze je použít i pro zcela obecný případ dvou těles ve vesmíru.

3.3 Sluneční soustava

3.3.1 SLUNCE

Slunce je pro obyvatele Země jistě nejdůležitějším vesmírným tělesem, neboť žádné jiné těleso neovlivňuje procesy a jevy na Zemi tak výrazně jako Slunce (výjimkou je snad jen slapové působení Měsíce – viz část 14). Jeho relativní blízkost nám dovoluje je velmi dobře pozorovat a studovat.

Slunce jako hvězda, jeho stavba, uvolňování energie a vývoj byly již popsány v části 2.2. Zde budeme hovořit o atmosféře Slunce a projevech jeho činnosti.

3.3.1.1 Atmosféra Slunce

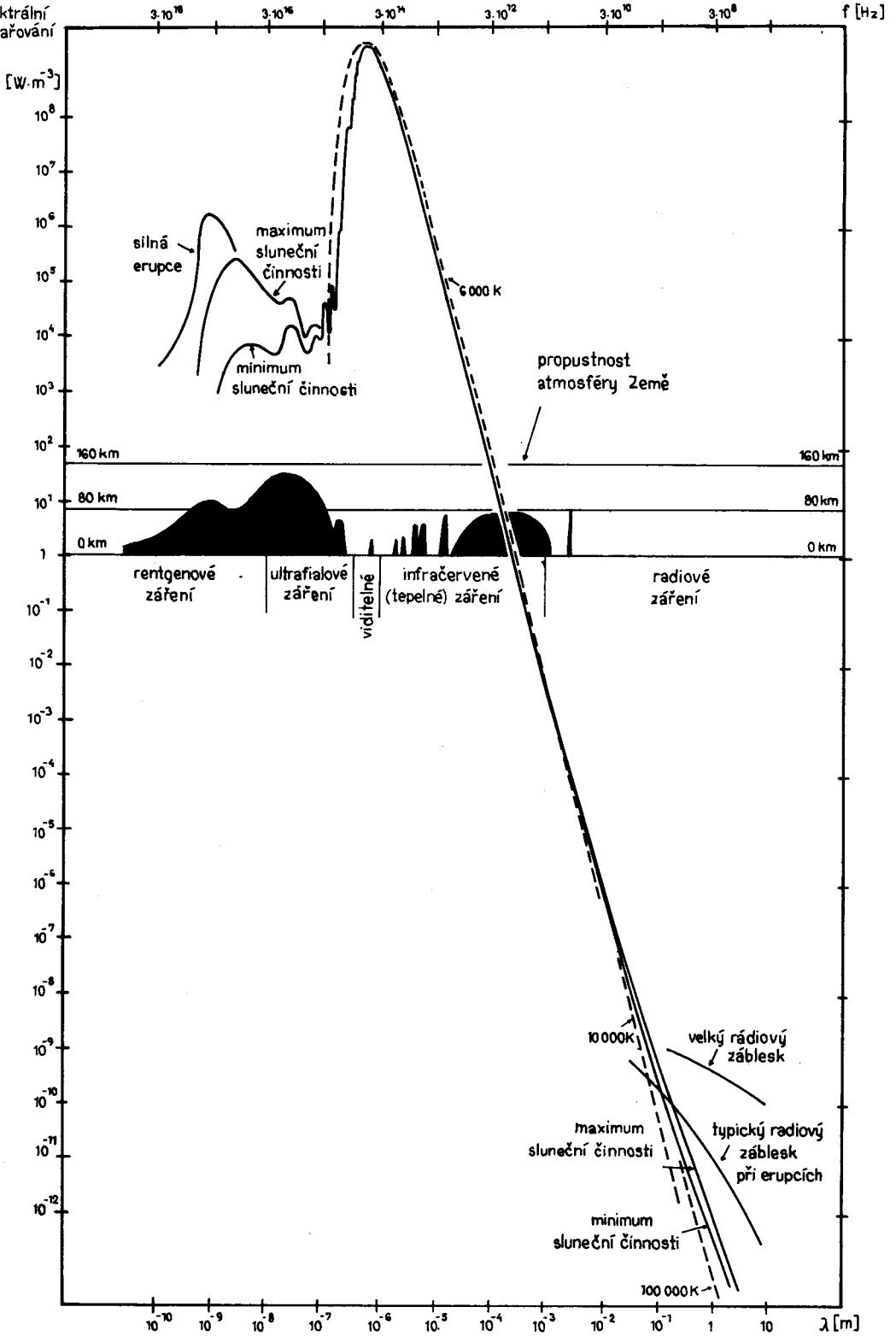
Pod pojmem **atmosféra Slunce** zahrnujeme ty jeho části, z nichž k nám přichází sluneční záření. **Povrchem Slunce** pak rozumíme tenkou (tloušťka 200–300 km) neprůhlednou vrstvu, kterou pozorujeme optickými dalekohledy – tzv. **fotosféru**. Nad ní se rozprostírá **chromosféra**, dosahující tloušťky několik tisíc kilometrů; která pozvolna přechází do nejsvrchnější vrstvy atmosféry Slunce – **koróny**. Koróna plynele přechází do meziplanetárního prostoru a její tvar a velikost velmi kolísá.

a) Fotosféra

Fotosféra je vrstva, ze které k nám přichází 99,9 % záření Slunce. Teplota ve fotosféře s rostoucí výškou klesá a tento stav je mimo jiné pozorovatelný jako okrajové ztemnění slunečního kotouče. Spojité záření, které zde vzniká, odpovídá záření absolutně černého tělesa s teplotou asi 5800 K. Průběh vyzařování Slunce je znázorněn na obr. 3.5 plnou čarou, čárkovane jsou pak vyznačeny Planckovy křivky vyzařování absolutně černého tělesa pro udané teploty. Viditelný povrch se neustále mění a je možné zde pozorovat různé projevy sluneční činnosti, především sluneční skvrny (viz část 3.3.1.2) a granule. **Granule** je projev vzestupného proudění hmoty v konvektivní vrstvě. Při podrobném pozorování jeví buněčnou strukturu. Jednotlivé granule dosahují velikosti 700–1000 km. Uprostřed je granule světlejší (zde vystupují na povrch zahřáté hmoty) a okolní oblast (**intergranulární prostor**) je tmavší (ochlazené plyny zde klesají zpět). Rozdíl v teplotách granulí a intergranulárního prostoru je až několik set kelvinů.

3.5 Elektromagnetické záření Slunce v jednotlivých oborech spektra (podle S. B. PIKELNERA, 1976). Označení: λ – vlnová délka, f – frekvence. Ve střední části obrázku je znázorněno spektrum pohlcování slunečního záření s ohledem na různé výšky v zemské atmosféře. Je zřejmé, že až k zemskému povrchu se dostává jen úzká část slunečního elektromagnetického záření

spektrální
vyzařování



b) Chromosféra

Chromosféra přispívá k celkovému záření Slunce jen asi 0,1 %. Je složená z řidších a teplejších plynů než fotosféra a dochází v ní k prudkému vzrůstu teploty směrem ke koróně. Přímé pozorování chromosféry je možné jen při úplných slunečních zatměních, kdy je pozorovatelná jako narůžovělý kroužek kolem černého kotoučku Měsíce zakrývajícího fotosféru. Mimo zatmění lze chromosféru pozorovat např. koronografem (dalekohled napodobující úplné zatmění Slunce) v H_{α} filtru. Chromosféra září nejvýrazněji v červené spektrální čáře H_{α} . Zřetelně zde můžeme rozlišit tzv. **spikule** – zakončení granulí v podobě sloupce horkých plynů vystupující chromosférou rychlostí kolem $20 \text{ km} \cdot \text{s}^{-1}$ až do výšek $2 \cdot 10^4 \text{ km}$. V chromosféře lze také pozorovat protuberance a chromosférické erupce (viz část 3.3.1.2).

c) Koróna

Koróna je nejsvrchnější částí sluneční atmosféry. Má velmi malý jas (asi 10^{-6} jasu fotosféry), a proto je pozorovatelná jen při úplných slunečních zatměních. Částečně jsme schopni ji pozorovat i koronografem. Její tvar je velmi rozmanitý a mění se v závislosti na sluneční aktivitě. V minimu sluneční aktivity je tvar koróny protáhlý v rovníkové oblasti a kolem pólů téměř chybí, zatímco v maximu je symetricky rozložená kolem slunečního disku. Ze spektra koróny byla určena i její teplota až na 10^6 K . Tato teplota však určuje míru tepelných pohybů atomů (nebo elektronů) v nesmírně řídkém prostředí. Pohyb částic je dán **rázovými (zvukovými) vlnami**, které do koróny přenášejí energii z konvektivní vrstvy. Zvukové vlny, které tak vznikají při proudění plynů, prakticky bez ztrát energie, procházejí fotosférou a chromosférou a předávají svoji energii částicím v koróně. Koróna je takto značně nestabilní a částice z vnějších vrstev koróny opouštějí Slunce rychlostí asi $3-12 \cdot 10^5 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$ ve formě **slunečního větru**.

3.3.1.2 Sluneční činnost

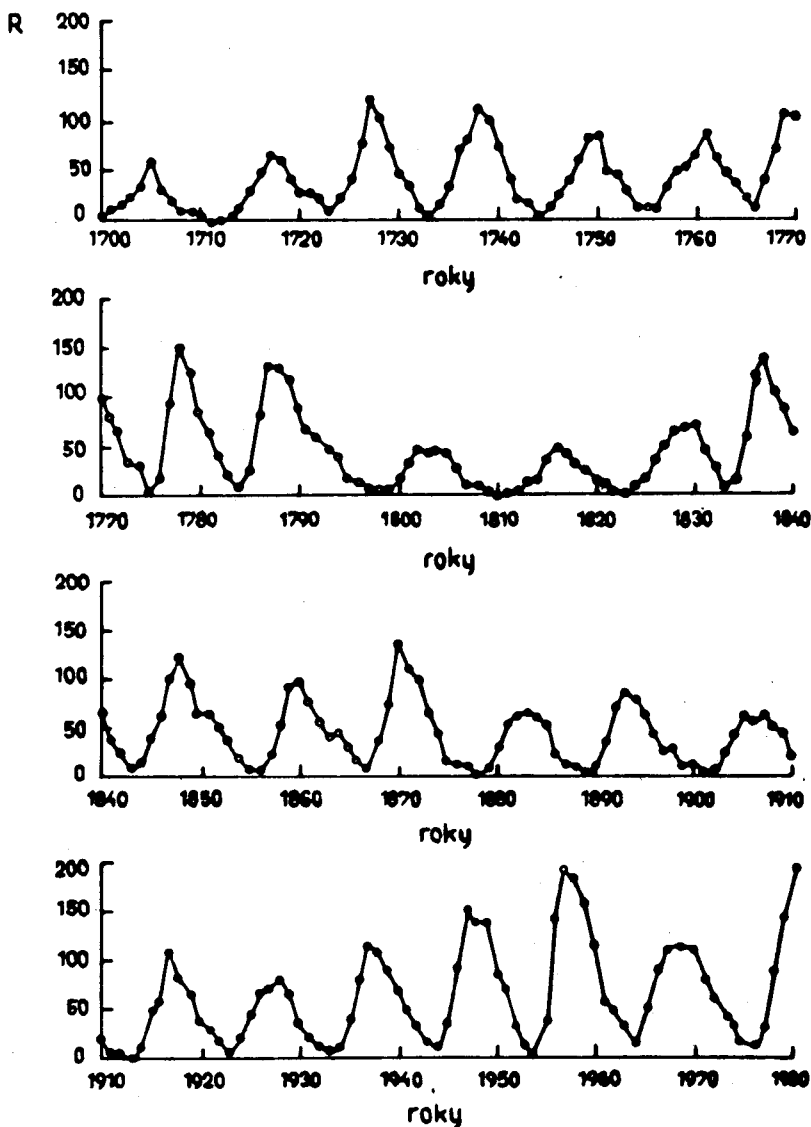
Sluneční činností se rozumí řada různých jevů vyskytujících se v některých obdobích a oblastech na Slunci. V každém místě Slunce probíhají neustále určité jevy, které v souboru tvoří celkovou aktivitu Slunce. Do sluneční aktivity řadíme pozorovatelné jevy, které jsou zdrojem záření a částic o vysokých energiích. Za index velikosti aktivity Slunce lze vzít množství některých aktivních procesů na Slunci v určitém časovém intervalu. Mezi takovoto charakteristické jevy patří např. množství a velikost slunečních skvrn, množství a velikost chromosférických erupcí, erupce v rentgenové a rádiové oblasti, množství protuberancí aj. Aktivitu Slunce lze také vyjádřit velikostí vyzařované energie v některých oborech. Na obr. 3.5 jsou v rádiové a rentgenové oblasti udány toky energie v maximu a minimu sluneční činnosti.

Nejvýraznějším a také nejnámějším projevem aktivity Slunce jsou **sluneční skvrny**. Jsou to chladnější místa ve sluneční fotosféře o teplotě kolem 4500 K , vznikající v oblastech zesíleného magnetického pole. **Skvrna** je místo, kde vlivem nehomogenity magnetického pole dochází ke zpomalení konvekce a tím i k ochlazení. Velikosti skvrn jsou velmi rozdílné od zcela nepatrných až do 10^4 km (výjimečně 10^5 km). U středních a velkých skvrn je patrná i vnitřní struktura (tmavé jádro nazýváme **umbra** a světlejší okolí **penumbra**). Množství skvrn kolísá v čase a jejich počet převedený do tzv. Wolfova relativního čísla už skoro 300 let slouží jako ukazatel sluneční aktivity.

Wolfovo relativní číslo R je dáno vztahem:

$$R = K(10g + f), \quad (3.20)$$

kde K je konstanta závislá na použitém dalekohledu (zvětšení), g je počet jednotlivých skupin skvrn a f je počet skvrn na viditelné polokouli Slunce. Pro dalekohled o průměru 8 cm se zvětšením 64krát je $K = 1$. Hodnoty ročních Wolfových relativních čísel od roku 1700 jsou na obr. 3.6. Z obrázku je zřejmé, že počet skvrn kolísá s periodou 11 roků a že existuje i perioda délky asi 80–90 let. Z rozboru pozorování slunečních skvrn hluboko do minulosti byla zjištěna i podstatně delší perioda kolem 600 let, kterou jsou modulovány 11 leté a 80–90 leté cykly. S periodou 11, popř. 22 let kolísá i výskyt skvrn na slunečním disku v závislosti na heliografické šířce (blíže viz V. VANÝSEK, 1980).



3.6 Roční hodnoty Wolfových relativních čísel (R) (J. C. BRANDT, P. W. HODGE, 1964; dále doplněno Z. OKÁCEM)

S výskytem skvrn těsně souvisí i výskyt tzv. **flokulí (flokulových polí)**, které jsou viditelné na monochromatických snímcích sluneční fotosféry a chromosféry. V bílém světle jim odpovídají tzv. **fakule**. Jsou to oblasti, vázané podobně jako skvrny, na lokální magnetická pole.

Významným indikátorem sluneční činnosti jsou náhlé několik minut trvající **chromosférické erupce** související s fakulovými oblastmi a slunečními skvrnami. Během chromosférické erupce se prudce zvýší intenzita v celém rozsahu spektra (také v oblasti rádiového, rentgenového a gama záření). Chromosférická erupce je také zdrojem korpuskulárního záření a je doprovázená