

České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky

Obor: Fyzika a technika termojaderné fúze



**Od vzniku prvků k výzkumu chemického  
složení meziplanetární hmoty**

**From the Elements' Genesis  
to the Chemical Composition of  
Interplanetary Matter**

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Vypracovala: Anna Křivková  
Vedoucí práce: RNDr. Martin Ferus, Ph.D.  
Rok: 2018

—Zadání práce—

## **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem svou bakalářskou práci vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti použití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne .....

.....

Anna Křivková

## Poděkování

Děkuji vedoucímu své bakalářské práce RNDr. Martinu Fergusovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky, vstřícnost a trpělivost při konzultacích. Ráda bych také poděkovala prof. Eliasu Chatzitheodoridisovi z Technické univerzity v Athénách za poskytnutí experimentální aparatury a vzorků minerálů pro měření prezentovaná v této práci. Děkuji také Ing. Liboru Lenžovi, Ing. Jakubu Koukalovi a všem kolegům z Hvězdárny Valašské Meziříčí, p.o., za poskytnutí spekter sporadických meteorů zaznamenaných spektrografy provozovanými touto institucí. Práce byla vypracována na Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského Akademie věd České republiky. Výzkumný záměr byl podpořen Grantovou agenturou ČR v rámci projektu reg. č. 18-27653S a programem Regionální spolupráce AV ČR s kraji, projekty reg. č. R200401801, R200401521 a R200401721.

Díky patří také mému partnerovi a všem členům rodiny za jejich velkou podporu během studia.

Anna Křivková

*Název práce:*

## **Od vzniku prvků k výzkumu chemického složení meziplanetární hmoty**

*Autor:* Anna Křivková

*Obor:* Fyzika a technika termojaderné fúze

*Druh práce:* Bakalářská práce

*Vedoucí práce:* RNDr. Martin Ferus, Ph.D.

Ústav fyzikální chemie J. Heyrovského, v. v. i.

*Abstrakt:* První část této bakalářské práce je věnována vzniku prvků od nukleogeneze velkého třesku přes termojadernou fúzi ve hvězdách až k výbuchu supernovy. Dále jsou vysvětleny základní principy formování prvních minerálů v okolí hvězd a během planetární akrece. Po objasnění pojmů meteoroid, meteor a meteorit následuje stručný popis metody spektroskopie laserem indukovaného průrazu (LIBS) a jejího využití pro vesmírné účely. V rámci studia chemického složení a mineralogie meziplanetární hmoty bylo naměřeno 80 LIBS spekter minerálů relevantních pro spektra meteorů z hlediska jejich složení, které byly následně manuálně zpracovávány a popisovány. Tato spektra poté posloužila k sestavení kvalitativního atlasu, jenž má být pomůckou pro prvotní popis a porozumění spektrům meteorů. S jeho pomocí pak byla na závěr popsána spektra sporadických meteorů.

*Klíčová slova:* nukleogeneze, LIBS, meteor, meteorit, meziplanetární hmota

*Title:*

## **From the Elements' Genesis to the Chemical Composition of Interplanetary Matter**

*Author:* Anna Křivková

*Abstract:* The first part of this bachelor thesis focuses on the genesis of elements since the Big Bang nucleosynthesis through thermonuclear fusion within stars up to the supernova's explosion. In the following section, basic principles of shaping of first minerals in the surroundings of stars and during planetary accretion are explained. The next chapter clarifies terms meteoroid, meteor and meteorite and is followed by a brief description of a laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) method and its use for space purposes. Eighty LIBS spectra of minerals, relevant for spectra of meteorites in terms of their composition, were recorded within the study of chemical composition and mineralogy of interplanetary matter. These results were then manually processed and described. The spectra were afterwards used to compile a qualitative atlas, which should serve as a helpful tool for a primal description and understanding of meteorites spectra. Finally, spectra of sporadic meteors were described with the use of the atlas.

*Key words:* nucleogenesis, LIBS, meteor, meteorite, interplanetary matter

# Obsah

Úvod	8
<b>I Vznik chemických prvků a formování základních minerálů</b>	<b>10</b>
1 Nukleosyntéza velkého třesku	11
2 Termojaderná fúze ve hvězdách	14
2.1 Vodíkové hoření . . . . .	14
2.1.1 Proton-protonový cyklus . . . . .	15
2.1.2 CNO cyklus . . . . .	16
2.2 Heliové hoření . . . . .	16
2.3 Uhlíkové hoření . . . . .	17
2.4 Neonové hoření . . . . .	18
2.5 Kyslíkové hoření . . . . .	18
2.6 Křemíkové hoření . . . . .	19
3 Prvky těžší než železo	21
3.1 S-proces . . . . .	21
3.2 R-proces a výbuch supernovy . . . . .	22
4 Anomální trojice - Li, Be, B	23
5 Formování základních minerálů	24
5.1 Ur-minerály . . . . .	24
5.2 Éra planetární akrece . . . . .	25
<b>II Složení a mineralogie meziplanetární hmoty</b>	<b>27</b>
6 Meteoroid, meteorit a meteor	28
7 LIBS metoda a její využití v kosmonautice	30
7.1 Princip LIBS metody . . . . .	30
7.2 Využití LIBS v kosmonautice . . . . .	32
8 Zhodnocení spekter minerálů	34
8.1 Proces vyhodnocování . . . . .	35

8.2 Spektra sporadických meteorů . . . . .	38
<b>Závěr</b>	<b>41</b>
<b>Literatura</b>	<b>42</b>
<b>Přílohy</b>	<b>45</b>
<b>A Obsah přiloženého CD</b>	<b>45</b>

# Úvod

Odkud přicházíme. Kdo jsme. Kam jdeme. Název postimpresionistického díla Paula Gauguina a zároveň odvěká otázka, která možná zní jako klišé. Ve skutečnosti se jedná o motor řady vědeckých výzkumů, které se za pomoci nejmodernějších experimentálních technik a teoretických modelů snaží nalézt vysvětlení vzniku života, chemické evoluce prostředí naší planety, sluneční soustavy a nově také extrasolárních planetárních systémů. Pokud bychom však chtěli být opravdu důslední, museli bychom pátrat ne jako paleontologové pouhé stovky milionů let v minulosti, ale museli bychom se přenést miliardy let zpět v čase, jelikož my všichni jsme potomky dávno vyhaslých hvězd. Náš hmotný svět se totiž sestává z prvků, jež jsou v podstatě pouze nahromaděným popelem, který hvězda na sklonku svého života odmrštila do svého okolí.

První část této bakalářské práce je věnována hlavně otázkám kdy, kde a jak tyto prvky vznikaly. Nejdříve je vysvětlena nukleogeneze velkého třesku a následně je sledován průběh života našich pradávných hvězdných předků, který má u těch velmi hmotných dramatické zakončení - výbuch supernovy.

Ten rozptýlí materiál zanikající hvězdy nabohacený o těžké prvky do okolního prostoru. Bez této dramatické události by byla valná část těžkých prvků ve vesmíru koncentrována do vyhaslých hvězd a nebyla by tak přístupná pro další procesy zahrnující: vznik kondenzátů hvězdného prachu, formování molekulárních oblaků, chemické reakce vedoucí ke vzniku minerálních i organických látek, vznik hvězd dalších generací opětovnou akrecí a pro akreci planetárních systémů, v nichž na vhodných tělesech může dojít ke vzniku životních forem a snad i civilizací, jako je ta naše. S jakou pravděpodobností se toto ve vesmíru může stát, je dosud nerozřešenou otázkou.

Vesmír je pro člověka i přes veškeré dosavadní znalosti stále velkou záhadou. Informace o dalekých končinách kosmu jsou získávány právě i díky studiu meziplanetární hmoty. Hlavním cílem této práce je sestavení kvalitativního atlasu spekter minerálů. Ten bude sloužit při výzkumu distribuce prvkového složení a chemismu meziplanetární hmoty, a sice pro kvalitativní popis spekter meteorů, jenž je pilotní informací pro chemické složení těles meteoroidů. Ta se ve většině případů zcela vypaří při průchodu atmosférou a spektroskopický záznam, pakliže je pořízen, je jediným dokladem složení tělesa. Přitom znalost chemického složení meziplanetární hmoty vstupující každý den do atmosféry Země nám zdarma poskytuje informace o historii i současnosti sluneční soustavy. Dosud byla spektra interpretována pouze teoreticky. Předložená bakalářská práce je jednou ze sérií pilotních studií zaměřených na získání experimentálních dat umožňujících interpretaci spekter meteorů rychle,



přesně a opakovatelně.

V experimentální části práce jsou představeny základní principy metody spektroskopie laserem indukovaného průrazu (LIBS), která byla při vytváření tohoto atlasu použita, a využití této metody ve vesmíru.

Na závěr je nastíněn proces vyhodnocování naměřených minerálních spekter, která jsou součástí sestaveného katalogu a s jejichž pomocí jsou popsána spektra sporadických meteorů změřena na Hvězdárně ve Valašském Meziříčí.

# Část I

## Vznik chemických prvků a formování základních minerálů

# Kapitola 1

## Nukleosyntéza velkého třesku

V roce 1929 podal americký astronom Edwin Hubble první přímý důkaz o expanzi vesmíru. Toto zjištění vedlo k předpokladu, že vesmír musel mít dříve větší hustotu, menší objem a vyšší teplotu. Ve 40. letech 20. století vědci G. Gamow, R. Alpher a R. Herman formulovali základy teorie, která je v současné době nazývána „teorií velkého třesku“. Hypotéza Gamowa a jeho kolegů zahrnovala rovněž model popisující vznik prvků přímou syntézou během raného stádia vesmíru. Přestože dnes je již známo, že většina prvků vzniká až následkem procesů jaderné fúze v nitru hvězd, jejich myšlenka se ukázala být správnou pro lehké prvky - např. vodík či helium [1, 2].

Dříve, než se mohly utvořit první atomy, muselo dojít ke vzniku atomových jader, protonů a neutronů a částic atomárních obalů, elektronů. Podle současných teorií se tak stalo přímou interakcí gama fotonů a neutrin s dostatečnou energií procesem tzv. materializace. První protony existovaly již několik  $\mu\text{s}$  po velkém třesku, kdy teplota klesla pod  $10^{13}$  K. Elektrony se začaly objevovat až 10 s od vzniku vesmíru, tedy poté, co došlo k ochlazení na teplotu přibližně  $4 \cdot 10^9$  K. Také neutrony vznikaly velmi brzy po velkém třesku interakcí protonů a elektronů za vzniku neutrina  $\nu$ :



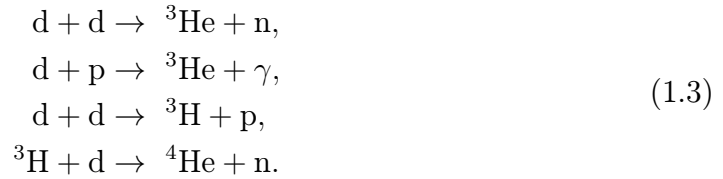
Volné neutrony jsou však nestabilní a rychle dochází k jejich rozpadu.

Tyto první zformované částice byly velmi rychle rozmetány do velkého prostoru. Se snižující se teplotou však začne hrát roli gravitační síla. Díky ní se mohly nově vzniklé částice přiblížit na dostatečnou vzdálenost, až došlo k jejich vazbě. První takováto reakce proběhla pravděpodobně mezi protonem a neutronem

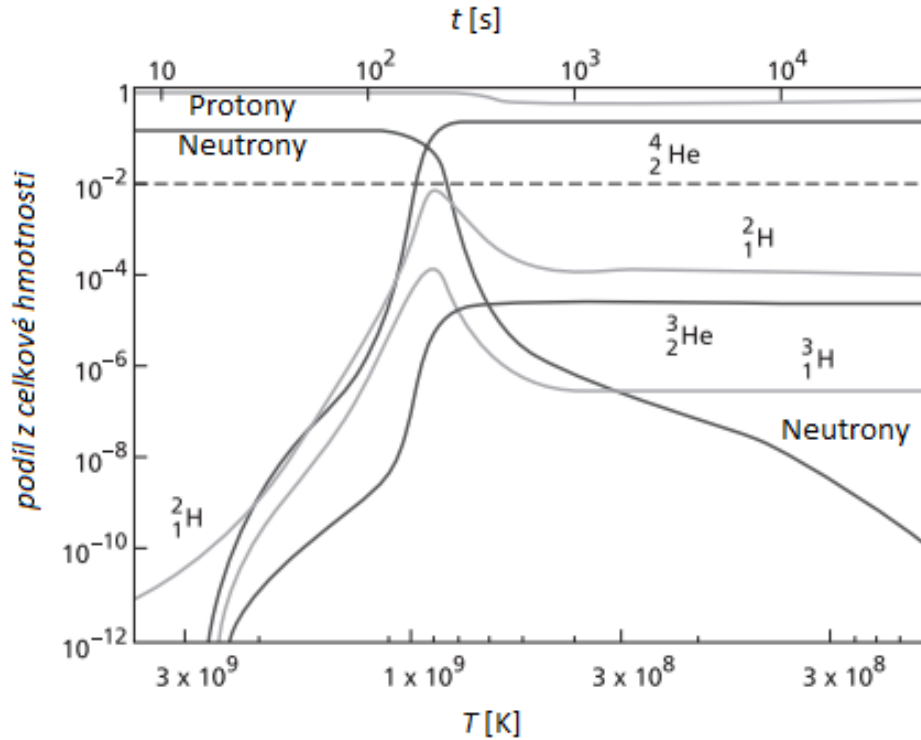


Jejím produktem je jádro izotopu vodíku - deuteron (d) a foton  $\gamma$ . Během prvních okamžiků po velkém třesku však deuterony přicházely do kontaktu s vysokoenergetickým gama zářením, což zapříčinilo jejich opětovný rozpad na jednotlivé složky. Teprve asi po 100 s byla teplota nižší než  $10^9$  K a toto záření, schopné rozbít deuterony, nebylo tak časté, což vedlo k jejich akumulaci v prostoru [3]. V tuto chvíli se začaly objevovat další jaderné reakce, jež daly vzniknout novým částicím, jako jsou

např. jádro hélia-4 ( ${}^4\text{He}$ ), hélia-3 ( ${}^3\text{He}$ ) a tritia ( ${}^3\text{H}$ ) [2]:

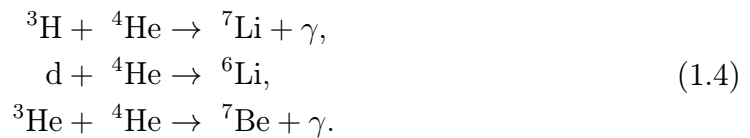


S postupným ochlazováním vesmíru docházelo k dramatickým změnám v koncentraci těchto vzniklých částic. Pouze u protonů zůstala koncentrace relativně neměnná, jak lze vyčíst z Obr. 1.1. Po prvních 100 vteřinách vývoje vesmíru se s velkou pravdě-



Obr. 1.1: Koncentrace různých částic v raném vesmíru [3].

podobností začaly formovat i další izotopy, a sice: lithium-6, lithium-7 a beryllium-7. Jedny z možných reakcí vedoucích k jejich vzniku jsou [4]:



Koncentrace těchto izotopů, obzvláště pak  ${}^6\text{Li}$  a  ${}^7\text{Be}$ , byla v dané době však téměř zanedbatelná.

Přestože byl po několika minutách od velkého třesku vesmírný prostor plný částic (protonů, neutronů, elektronů, deutronů aj.) potřebných k vytvoření atomů, k jejich vzniku nedošlo ještě po dalších 400 000 let. Příčinou byla příliš vysoká kinetická energie těchto částic, díky níž nebyla elektrostatická síla schopna zadržet elektrony

na orbitalech protonů. Rekombinační procesy začaly probíhat řádově od desítek tisíc K a teprve až s teplotou nižší než 4000 K došlo k vytvoření zcela neutrálního atomárního plynu. Při dalším ochlazení pak vznikala i horký molekulární plyn, jakým je například plamen ohně [5].

Je třeba poznamenat, že se velmi záhy po velkém třesku, když teplota klesla pod  $10^7$  K, syntéza nových prvků zastavila, jelikož k vytvoření dalších těžších jader je zapotřebí reakce stejně nabitých částic, jako jsou protony nebo jádra helia. Jejich kinetická energie však nebyla v té době již dostatečná na to, aby došlo k překonání odpudivé Coulombovy síly a jejich následnému sloučení. K další tvorbě prvků byl tedy nutný nový zdroj energie, kterým se stalo teplo uvolněné gravitačním stlačením hroutícího se plynu formujícího vnitřní části hvězd.

# Kapitola 2

## Termojaderná fúze ve hvězdách

Ke zrození hvězd zásadně přispěl a stále přispívá fakt, že vesmír nebyl nikdy zcela homogenní. V některých částech prostoru je tak hustota hmoty mírně větší, než jak je tomu v jiných oblastech. Gravitačním působením dochází k další akumulaci a stlačování prachoplynného oblaku, složeného převážně z molekul vodíku, který se do sebe začne hroutit v případě, že gravitační síla převáží nad vnitřní energii mezihvězdného oblaku. V jeho středu postupně narůstá teplota, dokud protony nezískají dostatečnou kinetickou energii na překonání Coulombovy bariéry, čímž dojde k zapálení fúze a ke zformování mladé hvězdy.

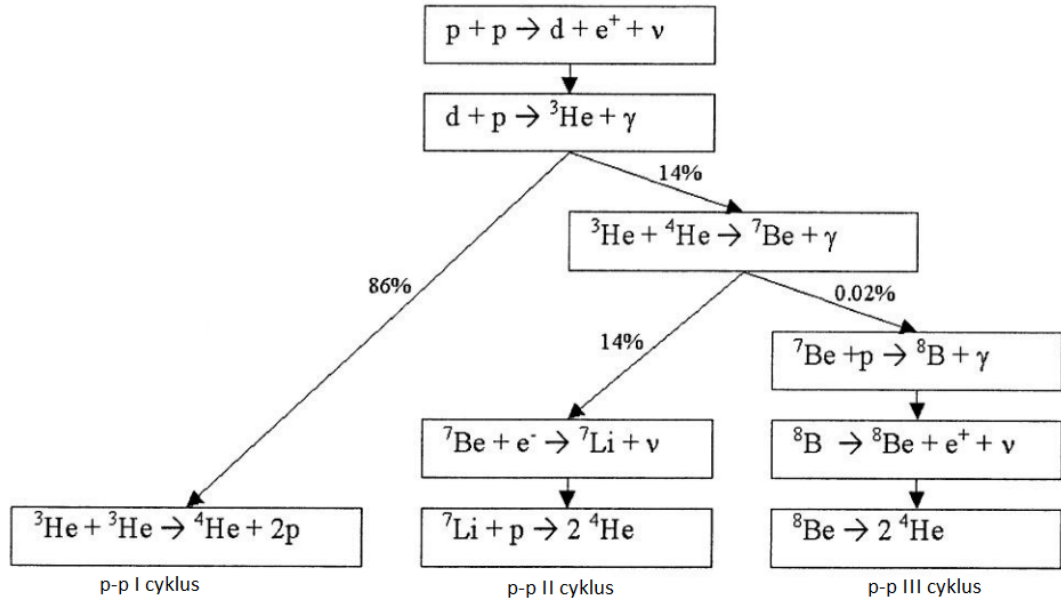
Než však došlo k zažehnutí prvních hvězd, byl vesmír starý téměř půl miliardy let. Tyto hvězdy byly obřích rozměrů i hmotností a produkcí nových těžších prvků zásadně změnila další evoluci vesmíru [6].

### 2.1 Vodíkové hoření

Počáteční fází v evoluci hvězd je prachoplynný oblak s vysokou koncentrací vodíku. Při formování první generace hvězd nebyl vesmír ještě kontaminován těžšími prvky a tento oblak byl tedy tvořen pouze vodíkem a heliem. Pokud je teplota částic dostatečně nízká (10-20 K), gravitační interakce mezi jednotlivými molekulami může být nakonec natolik silná, až započne gravitační kolaps, jehož důsledkem je nárůst teploty. Je předpokládáno, že iniciátorem může být například nestabilita způsobená kolizí rázové vlny z výbuchu blízké supernovy s molekulárním oblakem vedoucí k jeho místnímu zhuštění, při němž gravitační síla převáží. Poté, co se jádro ohřeje na více než  $10^7$  K, protony (jádra vodíku) se začnou slučovat a formovat tak jádra helia. Tento proces, znám také jako *vodíkové hoření*, je tedy prvním stupněm hvězdné nukleogeneze. Tlak záření uvolněného během této fáze působí proti gravitačnímu tlaku a smršťování hvězdy se tak na nějaký čas pozastaví [3].

## 2.1.1 Proton-protonový cyklus

Jednou z možností, jak je vodík přeměňován na helium v jádru hvězd, je *proton-protonový cyklus* (p-p cyklus), viz Obr.2.1. První z reakcí v tomto řetězu je fúze



Obr. 2.1: Proton-protonový cyklus vodíkového hoření [7].

dvou protonů do deuteronu:



Aby tato reakce mohla proběhnout, musí se proton  $p$  přeměnit na neutron  $n$ , přičemž dojde k uvolnění pozitronu  $e^+$  a neutrina  $\nu$ .

Jakmile je utvořen deuteron, dochází velmi rychle k reakci s dalším protonem



V dalším kroku mohou následovat dvě různé reakce, čímž získáme rozdělení na p-p I a p-p II cyklus [2].

V případě p-p I cyklu, který se objevuje v 86 % případech, dochází ke sloučení dvou  ${}^3\text{He}$  za uvolnění dvou protonů do konečného heliového jádra  ${}^4\text{He}$ :



Pro p-p II cyklus je potřeba, aby došlo k fúzi  ${}^3\text{He}$  s  ${}^4\text{He}$ , během níž se uvolní jeden foton  $\gamma$ :

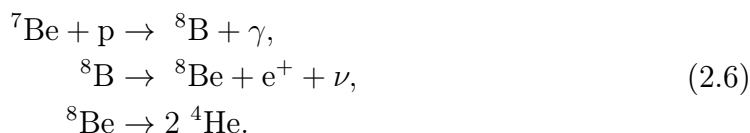


Téměř ve všech případech následuje zachycení elektronu a emise neutrina  $\nu$  za přeměny  ${}^7\text{Be}$  na  ${}^7\text{Li}$ . Poté se lithium-7 spojí s dalším protonem a dojde k vytvoření

dvou jader  ${}^4\text{He}$ :



Další větev p-p II cyklu se objevuje pouze v 0,02 % případech. V tomto případě je reakce (2.4) následována sekvencí tří dalších, a to:

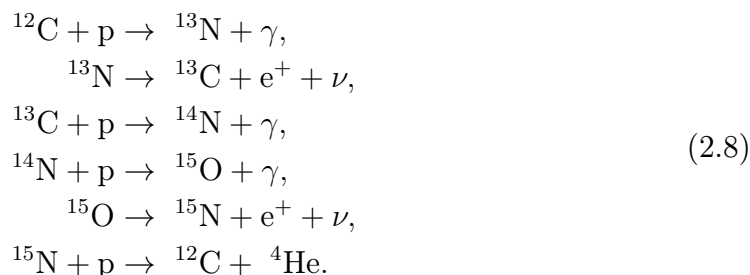


Celkově lze zapsat všechny tři p-p cykly jako



### 2.1.2 CNO cyklus

Ve hvězdách dalších generací, které už obsahují alespoň malé množství těžších prvků z dříve zaniklých hvězd, může docházet ke spalování vodíku také během tzv. *CNO cyklu*:



V tomto řetězci fungují prvky C, N a O pouze jako „katalyzátory“ a reakci lze opět souhrnně zapsat jako (2.7).

Ve hvězdách, které jsou lehčí než  $2M_{\odot}$ , kde  $M_{\odot}$  představuje hmotnost Slunce, dominuje p-p cyklus. Naopak u hvězd s větší hmotností než  $2M_{\odot}$  převládá CNO cyklus [7].

Hvězda dál spaluje své zásoby vodíku, než však začne další fáze hvězdné nukleogeneze, může uběhnout až několik desítek miliard let. V případě Slunce, které žhne již po více než 4,5 miliardy let, bude trvat ještě dalších asi 5 miliard, než přejde do následující etapy spalování [8].

## 2.2 Heliové hoření

Když dojde k vyčerpání téměř veškerého vodíku ve hvězdném jádru, fúzní reakce zde ustanou, tlak záření již nestačí vyrovnávat tlak gravitační a hvězda se začne



opět smršťovat. S gravitačním kolapsem roste i teplota v jádru, dokud nedojde opět k zažehnutí fúze. Tentokrát však dochází ke slučování helia.

Ve vnějších a chladnějších částech ale stále probíhá fúze vodíku. Hvězda se tak v této fázi vývoje v podstatě skládá z jádra, kde probíhá heliové hoření, a vnější chladnější slupky, kde dochází ke slučování vodíku.

Aby mohlo nastat *heliové hoření*, musí se teplota v jádru pohybovat kolem 200 milionů K [3]. Jeho hlavním produktem je  $^{12}\text{C}$ , s jehož pomocí může docházet k tvorbě  $^{16}\text{O}$ .

Přestože se mezi jádry helia a uhlíku nachází v periodické tabulce ještě tři další prvky ( $^7\text{Li}$ ,  $^9\text{Be}$ ,  $^{10}\text{B}$ ), k jejich vzniku ve hvězdách nedochází. Pokud byly přítomny v původním prachoplýnném oblaku, rozpadly se ještě před započítím vodíkového hoření [9]. Jejich původ bude vysvětlen později v kapitole 4.

Aby mohlo dojít během heliového hoření k přeskočení této mezery, musely by se přesně ve stejný okamžik setkat tři  $\alpha$  částice ( $^4\text{He}$ ). Takováto reakce je však velmi nepravděpodobná a v přirozeném prostředí probíhá v podstatě ve dvou krocích.

V prvním kroku nejdříve dojde ke sloučení dvou  $\alpha$  částic za vzniku velmi nestabilního jádra  $^8\text{Be}$ :



Poločas rozpadu  $^8\text{Be}$  je  $10^{-16}$  a během této doby dojde k záchytu dalšího  $^4\text{He}$ , čímž se vytvoří ještě nestálější excitovaný  $^{12}\text{C}^*$ . Ten se však téměř okamžitě stabilizuje vyzářením  $\gamma$  fotonu:



Reakce (2.9) a (2.10) jsou souhrnně nazývány jako *3 $\alpha$ -proces* [2].

Během heliového hoření je část nově vzniklých jader  $^{12}\text{C}$  použita k vytvoření dalšího nového prvku  $^{16}\text{O}$ :

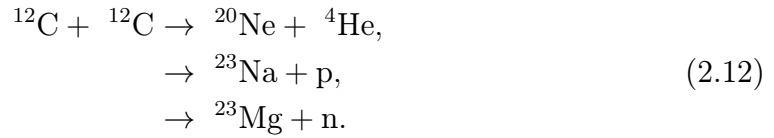


Další reakce mezi  $^4\text{He}$  a  $^{16}\text{O}$  se vyskytují v mnohem menším rozsahu, a proto heliové hoření končí po několika desítkách milionů let vytvořením  $^{12}\text{C}$  a  $^{16}\text{O}$ .

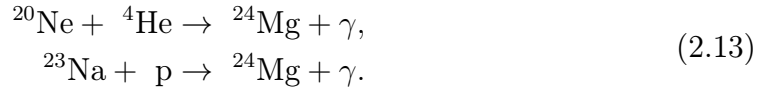
## 2.3 Uhlíkové hoření

Nové těžší prvky vzniklé během spalování helia se přesouvají do jádra hvězdy, kde však v dané chvíli žádné fúzní reakce neprobíhají. Jádro se opět vlivem gravitace začíná smršťovat a teplota uvnitř roste. Pokud je hvězda dostatečně hmotná ( $m > 8M_{\odot}$ ) dojde k zahřátí až na teplotu  $T \approx 5 \cdot 10^8$  K, při které dochází k novému procesu tzv. *uhlíkovému hoření*. Hvězda se v této době skládá již ze dvou slupek („vodíkové“ a „heliové“) a „uhlíkového“ jádra [7].

Primární reakce této fáze jsou:



Uvolněné  $\alpha$  částice, protony a neutrony mohou interagovat s dalšími již dříve vzniklými jádry a vytvořit tak celou řadu nových jader, jako jsou  ${}^{20,21,22}\text{Ne}$ ,  ${}^{23}\text{Na}$ ,  ${}^{24,25,26}\text{Mg}$ ,  ${}^{26,27}\text{Al}$ ,  ${}^{28,29,30}\text{Si}$  a  ${}^{31}\text{P}$ . Hlavními produkty jsou ale  ${}^{20}\text{Ne}$  a  ${}^{24}\text{Mg}$ , který pochází z následujících reakcí [10]:

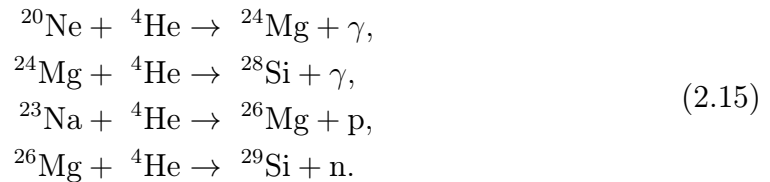


## 2.4 Neonové hoření

Fáze uhlíkového hoření trvá kolem jednoho tisíce let a na jejím konci se v jádru hvězdy nachází převážně  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{20}\text{Ne}$ ,  ${}^{23}\text{Na}$  a  ${}^{24}\text{Mg}$ . Po obvyklém poklesu tlaku záření s koncem uhlíkového hoření nastává komprese jádra a nárůst teploty. Dříve než však začne reagovat kyslík s kyslíkem, vzroste teplota natolik ( $T > 10^9$  K), že začne docházet k fotodisintegraci neonu. Poté, co  ${}^{20}\text{Ne}$  absorbuje gama záření, dojde k jeho rozpadu na  $\alpha$  částici a kyslík:



Uvolněné  $\alpha$  částice mohou dále reagovat s ostatními jádry v následujících procesech:

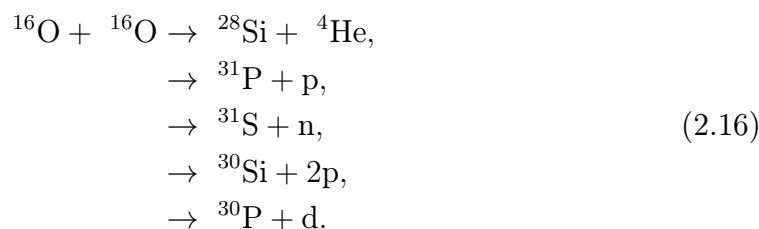


Aby se hvězda vůbec dostala do fáze neonového hoření, její počáteční hmotnost musí být větší než  $25M_{\odot}$  [2].

## 2.5 Kyslíkové hoření

V řádu několika let je neonové palivo spotřebováno a hvězdné jádro se skládá především z  ${}^{16}\text{O}$ ,  ${}^{24}\text{Mg}$  a  ${}^{28}\text{Si}$ . Po obvyklém sledu událostí (komprese a zahřátí) započne při teplotě  $T \approx 2 \cdot 10^9$  K hoření nového paliva  ${}^{16}\text{O}$ .

Hlavní reakce v této fázi jsou:



Uvolněné  $\alpha$  částice, protony a neutrony dále reagují s přítomnými jádry a dochází k tvorbě dalších nuklidů včetně  ${}^{28}\text{Si}$ ,  ${}^{32,33,34}\text{S}$ ,  ${}^{35,37}\text{Cl}$ ,  ${}^{36,38}\text{Ar}$ ,  ${}^{39,41}\text{K}$ ,  ${}^{40,42}\text{Ca}$ ,  ${}^{46}\text{Ti}$  a  ${}^{30}\text{Cr}$ . Z nich mají největší zastoupení  ${}^{28}\text{Si}$  a  ${}^{32}\text{S}$  [10].

## 2.6 Křemíkové hoření

Po několika měsících kyslíkové hoření v jádru s vysokou koncentrací  ${}^{28}\text{Si}$  a  ${}^{32}\text{S}$  pomalu ustává. Další etapou při  $T \geq 2,8 \cdot 10^9$  K je *křemíkové hoření*. Fúzní reakce jako např.  ${}^{28}\text{Si} + {}^{28}\text{Si}$  nebo  ${}^{28}\text{Si} + {}^{32}\text{S}$  jsou ale velmi nepravděpodobné kvůli poměrně velké výšce Coulombovy potenciálové bariéry. Místo toho dochází k nukleogenzi pomocí fotodisintegrace méně pevně svázaných jader a následnému zachycení osvozených lehčích částic (protonů, neutronů a  $\alpha$  částic) za vzniku postupně těžších jader.

Nejdříve dochází k rozpadu méně stabilního jádra  ${}^{32}\text{S}$  vlivem interakce s gama fotonem:

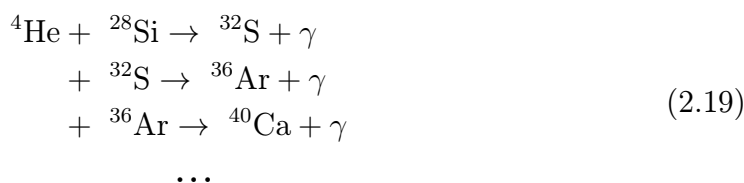


Jádro  ${}^{31}\text{P}$  podstoupí rychle sekvenci reakcí, jejichž konečným produktem je  ${}^{28}\text{Si}$ . V první části křemíkového hoření dochází tedy k přeměně  ${}^{32}\text{S}$  na  ${}^{28}\text{Si}$ .

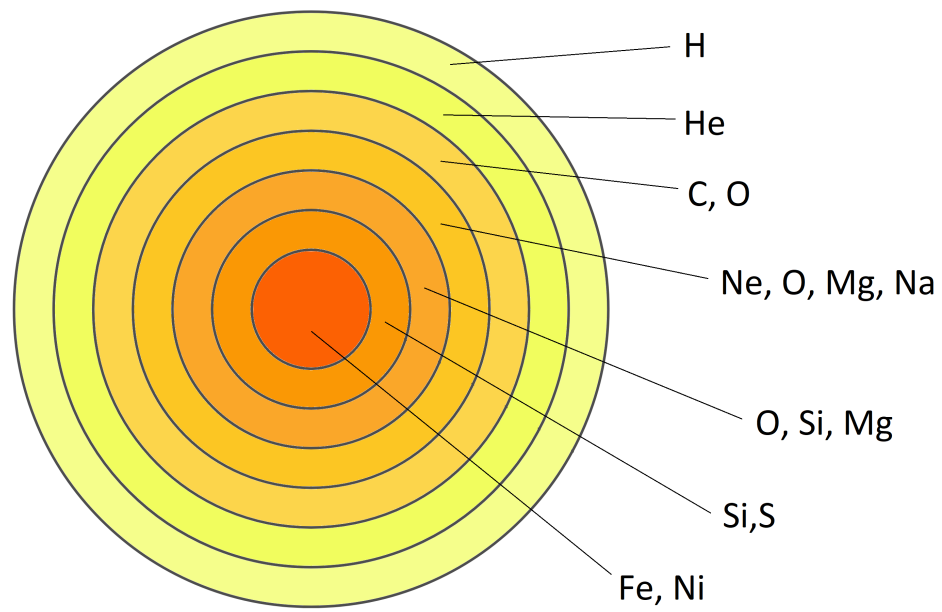
S rostoucí teplotou v jádře začíná nabývat na významu také fotodisintegrace  ${}^{28}\text{Si}$ :



Uvolněné  $\alpha$  částice pak umožní vytvoření těžších prvků, dokud většinu jádra netvoří  ${}^{54}\text{Fe}$ ,  ${}^{56}\text{Ni}$  a  ${}^{56}\text{Fe}$ , které je zároveň jedním z nejpevněji vázaných nuklidů [7].



Ke konci křemíkového hoření, které trvá pouze několik dní, má plně vyvinutá hvězda vrstevnatou strukturu, jež je schématicky znázorněna na Obr. 2.2.



Obr. 2.2: Schématická struktura jednotlivých vrstev plně vyvinuté hvězdy, spolu s jejich hlavními složkami.

# Kapitola 3

## Prvky těžší než železo

Fúzní reakce, které byly doposud popsány, jsou zodpovědné pouze za prvky s protonovým číslem menším než 26 (železo). K vytvoření těžších prvků je tedy zapotřebí jiných mechanismů.

Nejčastějším procesem pro vznik prvků nacházejících se v periodické tabulce až po železe je *záchyt neutronů*. Během této reakce zasáhne neutron cílové jádro a dojde k vytvoření izotopu s nukleonovým číslem vyšším o 1, než mělo původní jádro.

### 3.1 S-proces

Ve většině případů dokáže stabilní jádro jako např.  $^{56}\text{Fe}$  absorbovat 1, 2 nebo i více dalších neutronů a stále zůstat stabilní. V případě  $^{56}\text{Fe}$  dojde po záchytu neutronu k přeměně na  $^{57}\text{Fe}$ , které je stabilní:



Stejným procesem železo-57 absorbuje postupně ještě další dva neutrony, až se vytvoří jádro  $^{59}\text{Fe}$ , které už však stabilní není. Následně se pak  $\beta^-$  rozpadem přemění na nový prvek  $^{59}\text{Co}$ :

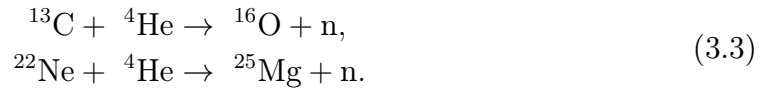


který by jinak výše zmíněnými fúzními reakcemi nevznikl. Kobalt se poté může stát novým cílem pro další neutron.

Avšak tento proces nemůže pokračovat do nekonečna. Hlavním omezením je vztah mezi dobou potřebnou pro záchyt neutronu a poločasem rozpadu vzniklých izotopů. Výše popsané reakce, jež mění železo v kobalt a nikl, probíhají velmi pomalu a jsou proto označovány jako *s-proces* (slow neutron capture = pomalý záchyt neutronu). Jako „pomalé“ jsou označovány z toho důvodu, že můžou v průměr uběhnout stovky tisíc let, než nějaké jádro neutron absorbuje [3].

S-procesy jsou časté ve starých a hmotných hvězdách, ve kterých probíhá uhlíkové, neonové a kyslíkové hoření. Hlavním mechanismem produkce neutronů pro s-proces

jsou totiž reakce [7]:



## 3.2 R-proces a výbuch supernovy

Pro vytvoření prvků s velmi vysokým protonovým číslem, jako je například olovo ( $Z = 82$ ) nebo bismut ( $Z = 83$ ), jsou tyto pomalé procesy neefektivní. Izotopy vznikající záchytem neutronů, které jsou potřebné k vývoji těchto nových prvků, mají totiž příliš krátké poločasy rozpadu.

K jejich vzniku je potřeba naopak rychlého záchytu neutronů nebo-li *r-procesu* (rapid neutron capture). K tomuto procesu dochází na samotném konci života hvězdy, kdy je v jejím jádře nahromaděno velké množství stabilního nuklidu  ${}^{56}\text{Fe}$ . V tomto okamžiku totiž končí exotermní fúzní reakce a tlak záření, který byl po celou dobu života hvězdy v rovnováze s gravitačním tlakem, celkem náhle pomine. Vnitřní části hvězdy se v podstatě volným pádem zřítí do jejího centra, kde prudce narůstá teplota ( $T \approx 10^{11}\text{K}$ ) a tlak. Jádra železa, která byla syntetizována během křemíkového hoření těsně před, jsou znovu roztrhána na protony a neutrony. V nejvnitřnějších částech hvězdy je tak velký tlak a hustota, že se elektrony začnou spojovat s protony a produkují tak neutrony a neutrina.

V těsném okolí kolabujícího jádra vytvoří tok neutronů jakýsi náraz „neutronového větru“ s délkou trvání  $t \approx 10$  s. Ten je velmi bohatý na neutrony, ale zároveň s sebou nese i mnohem menší množství protonů, které vznikly opětovnou reakcí volných neutronů s neutrinami z jádra. Protony a neutrony se následně spojují a vytváří jádra helia nebo-li  $\alpha$  částice. Nad hvězdným jádrem je tedy v daný moment vrstva složená z neutronů a  $\alpha$  částic. Dojde k opětovnému poklesu teploty a jádra helia se tak mohou začít slučovat do jader prvků skupiny železa.

Složení zmíněné vrstvy se tedy změní na volné neutrony a těžké prvky. Poté, co znovu poklesne teplota pod  $10^9$  K, dojde k nastartování r-procesu. Volné neutrony se začnou zachytávat na přítomných jádrech a vytvářet tak i velmi těžké prvky, jako jsou například již zmiňované olovo nebo bismut. Na konci svého života hvězda tedy vlastně zopakuje celý proces vzniku prvků během deseti sekund a protáhne ho až do pozdních fází nukleosyntézy [11].

S pokračujícím gravitačním kolapsem dosáhne toto neutronové jádro maximálního stupně hustoty, kdy se již dál nemůže smršťovat. Vnější vrstvy na něj dopadnou a odrazí se zpět. Tím vznikne mohutná rázová vlna, o které se dříve myslelo, že je příčinou „výbuchu“ supernovy, tj. rozmetání prakticky veškerého hvězdného materiálu nad hranicí neutronového jádra, vzniklého během předchozích etap, do prostoru. Výzkumy posledních 30 let však prokázaly, že tato vlna sama o sobě nemá dostatečnou energii k explozi vnějších vrstev. Pouze díky dodatečné energii unikajících neutrin dojde k této dramatické události, která významně poznamenává své okolí až do vzdálenosti mnoha stovek světelných let [7].

# Kapitola 4

## Anomální trojice - Li, Be, B

Vznik lithia, beryllia a boru (LiBeB) není možné vysvětlit mechanismy popsány v předešlých kapitolách. Je předpokládáno, že až na nepatrné množství nuklidů  ${}^7\text{Li}$ ,  ${}^6\text{Li}$  a  ${}^7\text{Be}$  vytvořených během nukleosyntézy velkého třesku nevznikla tato lehká a křehká jádra s počátkem vesmíru ani během hvězdné nukleogeneze.

Mechanismus jejich vzniku byl pro vědce takovou záhadou, že až do 70. let minulého století nesl název *x-proces* (*x* místo nejasného). V roce 1971 dospěl Hubert Reeves spolu se svými studenty k závěru, že LiBeB-jádra vděčí za svůj vznik spalačným (tříštvířným) procesům probíhajícím v mezihvězdném prostoru [12].

Vysokoenergetické kosmické záření, mající původ s největší pravděpodobností v supernovách, se skládá převážně z rychle se pohybujících jader helia a vodíku a menšího množství jader uhlíku, dusíku a kyslíku (CNO). Vysoce urychlená jádra vodíku a helia následně tříští CNO jádra vyskytující se v mezihvězdné hmotě.

Avšak tento proces sám o sobě není schopen vytvořit dostatečné množství LiBeB. Na jejich vzniku se tedy podílí ještě další proces, kdy dochází naopak ke kolizi prolétávajících CO jader s jádry vodíku a helia, které se nachází v mezihvězdném oblaku. K těmto reakcím dochází převážně v okolí velmi hmotných hvězd, které jsou schopny dodávat nově syntetizovaná CO jádra a urychlit je pomocí rázových vln.

Část nuklidů  ${}^7\text{Li}$  a  ${}^{11}\text{B}$  pochází ze spalačných reakcí vyvolaných neutrinami při výbuchu supernovy [7, 12].

# Kapitola 5

## Formování základních minerálů

### 5.1 Ur-minerály

Začátek vývoje minerálů je datován asi před 13 miliardami let v souvislosti s výbuchem prvních supernov. Teprve tehdy mohlo docházet v expandujících a ochlazujících se plynných hvězdných obalech k formování prvních pevných kousků minerálů [13].

Prvním minerálem byl s největší pravděpodobností diamant (možná ještě společně s lonsdaleitem, jinak také nazývaným „hexagonální diamant“), který zkondenzoval v zónách bohatých na uhlík při teplotě kolem 3700 °C. Dále následoval grafit za lehce nižší teploty 3200 °C.

Diamant a grafit byly prvními „ur-minerály“, což je skupina přibližně ještě dalších 10 minerálů, které se utvořily před vznikem hvězdných mlhovin, planet a měsíců. Všechny členy této skupiny lze nalézt v Tab. 5.1.

Název	Vzorec
Diamant/lonsdaleit	C
Grafit	C
Moissanit	SiC
Nano-částice TiC,ZrC,MoC,FeC a Fe-Ni kov v grafitu	
Osbornit	TiN
Nierit	Si <sub>3</sub> N <sub>4</sub>
Rutil	TiO <sub>2</sub>
Korund	Al <sub>2</sub> O <sub>3</sub>
Spinel	MgAl <sub>2</sub> O <sub>4</sub>
Hibonit	CaAl <sub>12</sub> O <sub>19</sub>
Forsterit	Mg <sub>2</sub> SiO <sub>4</sub>
Perovskitová struktura	MgSiO <sub>3</sub>
GEMS (silikátové sklo se zapuštěným kovem a sulfidy)	

Tab. 5.1: Skupina prvních minerálů tzv. „ur-minerálů“ [15].



Ur-minerály jsou koncentrovány v hustých molekulárních oblacích, což jsou obrovské studené části galaxie, kde vodík, helium a minerální prach dosahují hustot  $10^2$ - $10^4$  částic na  $\text{cm}^3$ . Tyto minerály obsažené v prachových zrnech mají velikost v řádu mikro- až nanometrů [14].

Důkaz pro existenci ur-minerálů poskytují tzv. *chondrity*, což jsou kamenné meteority vzniklé akrecí částic prachu v primární Sluneční soustavě. Stáří chondritů se tedy pohybuje kolem 4,5 miliardy let [13].

## 5.2 Éra planetární akrece

K dalšímu rozšíření řad minerálů došlo až o desítky milionů let později, když se začaly tvořit první planety, protože právě během jejich vývoje docházelo k nejmasivnějšímu vzniku minerálů.

Planety se formují ve hvězdných mlhovinách, které svou hmotu získaly ze supernov. Velká část mlhoviny se nejdříve zhroutí dovnitř, čímž se zrodí centrální hvězda. Zbylý materiál vytvoří kolem hvězdy rozsáhlý rotující disk a postupně se začíná spojovat do větších těles tvořených prvotním prachem, který obsahuje pouze výše zmíněné ur-minerály a další atomy a molekuly.

K markantním změnám dochází až v momentě zažehnutí centrální hvězdy, která začne vysílat do okolí pulsy tepla. V naší Sluneční soustavě došlo k zažehnutí Slunce asi před 4,6 miliardami let [13].

Éra planetární akrece je rozdělována na 2 etapy:

1. Formování primárních chondritických minerálů
2. Transformace v planetesimálech

Během první fáze, začínající zrodem hvězdy, jsou díky tepelným pulsům nové minerály formovány kondenzací, tuhnutím taveniny nebo rekrystalizací okolních prvků a ur-minerálů. Během tohoto procesu vznikne přibližně na 60 nových minerálů. Mezi ně patří například první Fe-Ni slitiny, sulfidy, fosfidy a množství oxidů a silikátů. Mnoho z těchto minerálů je nacházeno v nejprimitivnějších meteoritech, které obsahují částice kulovitého tvaru, tzv. *chondrule*, jež se utvořily rychlým ochlazením roztavené horniny [16].

Další vývoj je následek gravitační akumulace chondritů do rostoucích planetesimál (stavební kameny budoucích planet). Některé byly dostatečně velké na to, aby mohlo docházet k jejich částečnému tavení, diferenciaci a různým termálním a vodním pozměňovacím procesům. Časté kolize s okolními tělesy také hrály velkou roli při formování nových minerálů, jelikož byly dodatečným zdrojem tepla a tlaku. Během této etapy se počet druhů minerálů navýšil asi na 250. Tyto minerály představují základní materiál pro tvorbu každé terestrické planety a všechny jsou dodnes nacházeny v řadách meteoritů spadlých na Zem. Jejich zástupci jsou například olivín, plagioklas, titanit a zirkon.

Dnes je známo přes více než 4400 druhů. Kromě těchto 250 však všechny ostatní minerály vznikaly během pokročilejších stádií vývoje planety Země a jejich formováním se v této práci nebudeme dále zabývat [13, 15].

## Část II

# Složení a mineralogie meziplanetární hmoty

# Kapitola 6

## Meteoroid, meteorit a meteor

Slova *meteoroid*, *meteorit* a *meteor* nejsou navzdory všeobecnému přesvědčení zaměnitelné výrazy a často dochází k jejich nesprávnému používání.

### Meteoroid

K vymezení pojmu *meteoroid* lze použít jeho rozměry. Tímto termínem je označováno pevné těleso pohybující se meziplanetárním prostorem, jehož velikost je v rozmezí od  $10\ \mu\text{m}$  do 1 m. Tělesa o větších velikostech, která lze ze Země teleskopicky pozorovat, jsou označována jako *asteroidy*. Naopak částice menší než  $10\ \mu\text{m}$  nesou název *meziplanetární prach* [26]. Tyto velikostní hranice však nemají absolutní platnost a obzvlášť u objektů, jejichž rozměry se blíží okraji tohoto vymezeného intervalu, je velmi těžké rozhodnout, do jaké kategorie spadají.

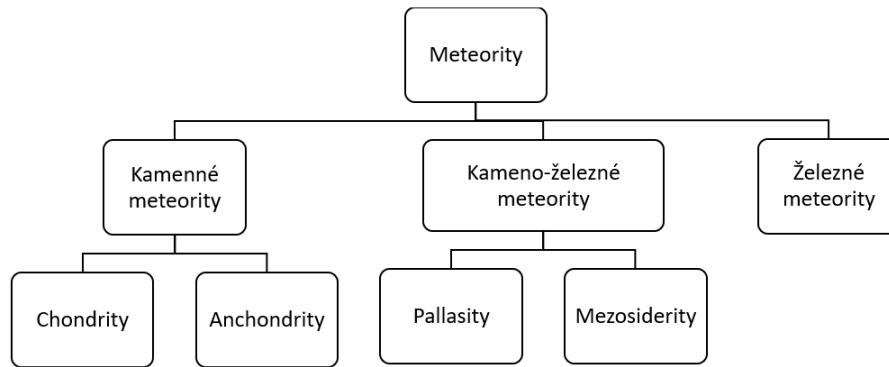
### Meteor

Slovo *meteor* označuje světelný jev, který nastává při vstupu meteoroidu do atmosféry. Ten se díky tření o molekuly vzduchu ohřívá, což vede až k ablacii (vypařování hmoty meteoroidu) a následné excitaci a ionizaci okolních molekul. Při zpětné rekombinaci atomů pak dochází k tvorbě světelné stopy [27]. Velmi jasný meteor, který se svou září vyrovná i nejjasnějším hvězdám či dokonce měsíci, se nazývá *bolid* [28].

### Meteorit

Pokud byl meteoroid dostatečně velký na to, aby dokázal projít celou atmosférou bez toho, aniž by se celý vypařil, potom zbylé těleso, které dopadne na zemský povrch, nazýváme *meteorit* [27].

Meteority jsou podle tradiční klasifikace (Obr. 6.1) rozdělovány do 3 základních kategorií podle toho, zda jsou složeny převážně z hornin (*kamenné meteority*), kovů (*železné meteority*), či jsou kombinací těchto materiálů (*kameno-železné meteority*).



Obr. 6.1: Tradiční klasifikace meteoritů.

Skupina kamenných meteoritů je dále dělena na *chondrity* (viz kapitola 5) a *anchondrity* - magmatická hornina pocházející z asteroidu či planetárního tělesa (Mars, Měsíc), která prošla tavením, částečným tavením a/nebo rekrystalizací).

Kameno-železné meteority se rozdělují na *pallasity*, které jsou tvořeny hlavně krystaly olivínu v železo-niklové matrici, a na *mezsiderity*, jež jsou přibližně z poloviny tvořeny křemičitany a z poloviny Fe,Ni-kovy.

Železné meteority jsou také ještě členěny do 13 dalších skupin, avšak již podle novější chemické klasifikace [29].

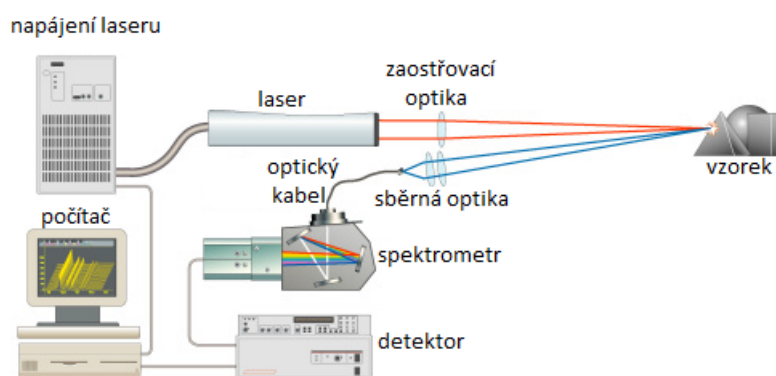
# Kapitola 7

## LIBS metoda a její využití v kosmonautice

Spektroskopie laserem indukovaného průrazu, zkráceně LIBS (z anglického Laser-induced breakdown spectroscopy), je technika pro určování prvkového složení v reálném čase. Její velká výhoda tkví v možnosti analyzovat a identifikovat chemické a biologické materiály v pevné, kapalné či plynné formě bez žádné nebo minimální přípravy vzorku a je tedy ideální pro *in situ* analýzu. Díky této vlastnosti je LIBS stále více a více používanou metodou [17].

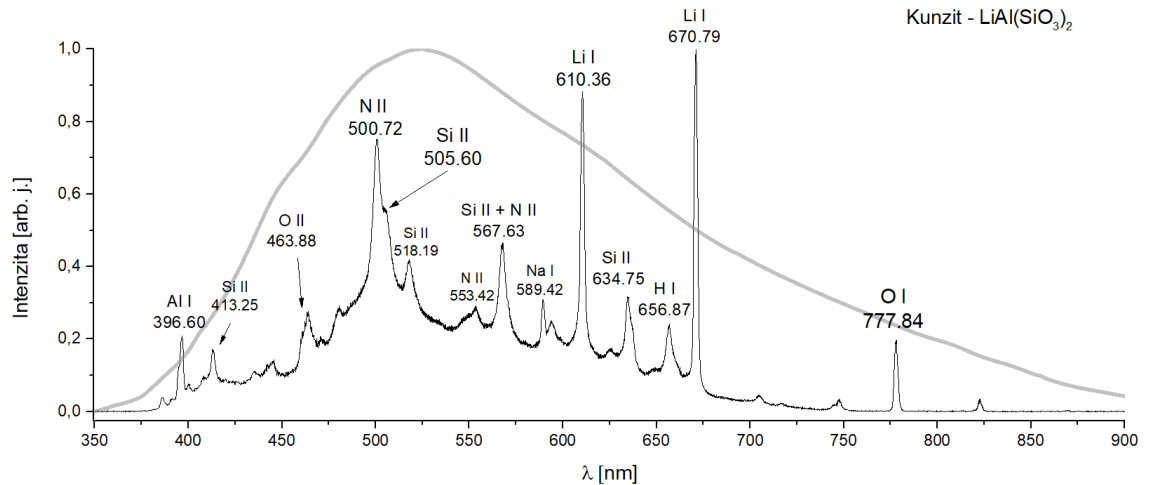
### 7.1 Princip LIBS metody

LIBS je jakožto metoda atomové emisní spektroskopie (AES) založena na snímání plazmatu generovaného laserovým paprskem. Schéma základní aparatury pro spektroskopii laserem indukovaného průrazu je znázorněno na Obr. 7.1.



Obr. 7.1: Typické uspořádání aparatury pro LIBS metodu [19].

Ať už se jedná o kvalitativní nebo kvantitativní analýzu, základní součástí veškerých LIBS měření je emisní spektrum zaznamenané pro každé plazma. Při laserovém výstřelu dochází k ablaci části vzorku v místě, kam byl paprsek fokusován, tedy nastává odpařování, atomizace a excitace vzorku, vytváří se plazma. Emitované světlo je poté sbíráno a optickým vláknem přenášeno do spektrometru. Výstupem LIBS měření je spektrum znázorňující závislost intenzity záření na vlnové délce [18]. Příklad jednoho spektra získaného pomocí LIBS metody lze vidět na Obr. 7.2.



Obr. 7.2: Ukázka LIBS spektra kunzitu.

Pro ablaci vzorků lze využít různých typů laserů. Důležitými parametry LIBS laserů jsou:

1. energie pulzu
2. frekvence opakování pulzů
3. kvalita laserového svazku
4. velikost/hmotnost
5. chladicí a energetická náročnost

Mírou kvality laserového svazku je jeho schopnost být fokusován. Vlnová délka laserového paprsku není ve většině případů důležitým faktorem [17].

Nejčastěji používaným laserem pro LIBS měření je nanosekundový Nd:YAG o vlnové délce 1064 nm, který má aktivní prostředí ve formě krystalu yttrito-hlinitého granátu dopovaného neodimovými ionty ( $\text{Nd}^{3+}$ ).

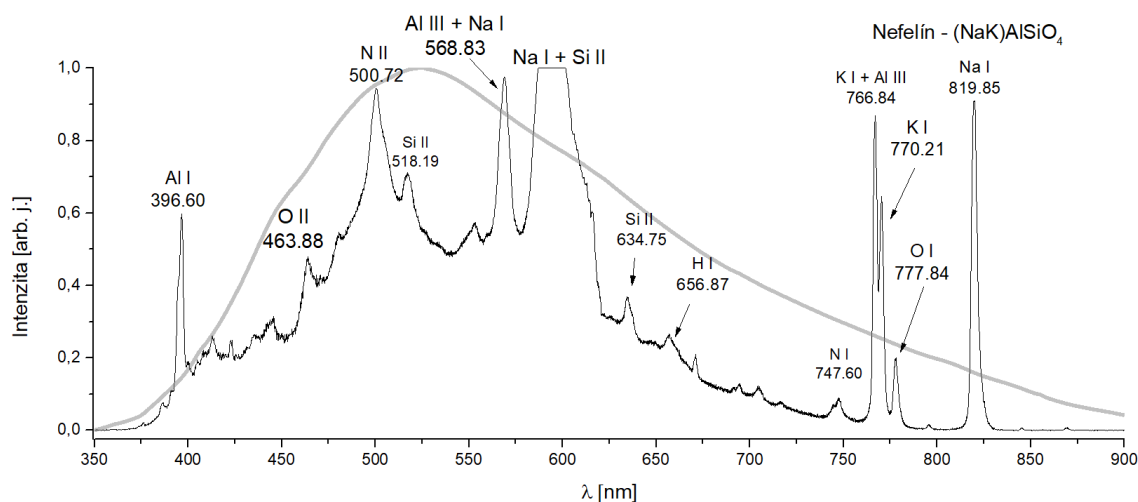
Dále jsou také využívány  $\text{CO}_2$  lasery s vlnovou délkou 10,6  $\mu\text{m}$  nebo excimerové lasery s typickými délkami 193, 248 a 308 nm [18].

Ve většině LIBS systémů je laserový paprsek fokusován pomocí jediné čočky nebo zakřivených zrcadel. Systém více čoček je využíván v případě, že je potřeba zaostřit

paprsek na délce několika metrů a přitom dosáhnout co největší hustoty výkonu v co nejmenším bodě na vzorku.

V závislosti na aparátu jsou čočky a zrcadla používány také ke sběru záření plazmatu, které dále co nejefektivněji přivádí na štěrbinu spektrometru. Jeho úkolem je rozdělit přivedené polychromatické světlo podle vlnových délek. Důležitými vlastnostmi spektrometrů je rozlišení (minimální vlnová vzdálenost, při které lze dva sousední spektrální znaky pozorovat jako dvě samostatné čáry) a šířka spektra, jež lze pozorovat. Výsledné spektrum je následně zaznamenáváno detektorem [17].

LIBS metoda má i své nevýhody. Jednou z nich je například saturace signálu pro vysoce koncentrované prvky v důsledku samoabsorpčních jevů nebo matriční efekty v případě, že se analyzuje velmi různorodý nebo nehomogenní prvek [20]. Na Obr. 7.3 lze najít příklad saturovaného spektra nefelínu.



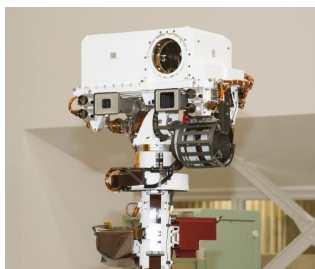
Obr. 7.3: Ukázka saturovaného spektra pro minerál nefelín.

## 7.2 Využití LIBS v kosmonautice

Díky svým vlastnostem je LIBS velmi vhodnou metodou pro vesmírné výzkumy a s její pomocí lze získat důležité informace o geochemickém vývoji povrchu ostatních planet.

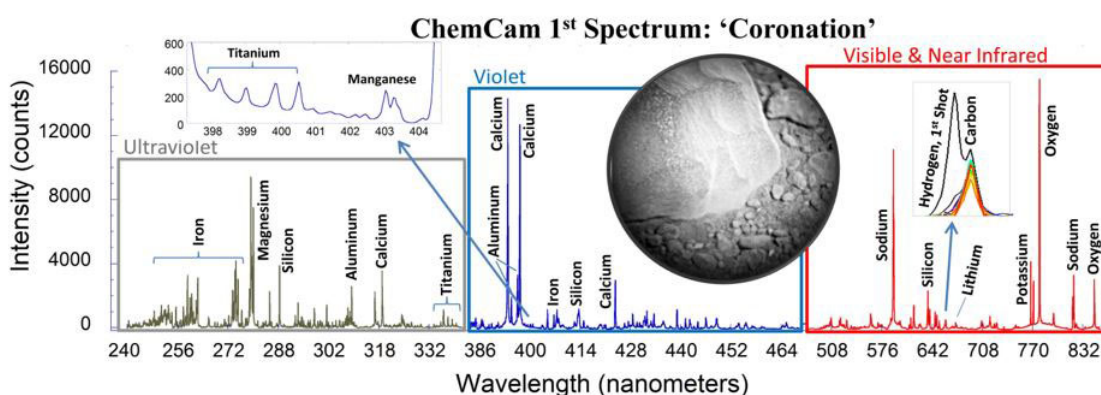
V srpnu roku 2012 na Marsu úspěšně přistál rover *Curiosity* nesoucí také mimo jiné zařízení *ChemCam* (Obr. 7.4), jehož součástí je technologie LIBS. ChemCam je navržen tak, aby prováděl rychlou elementární analýzu hornin a půd do vzdálenosti 7 metrů od roveru. Denně může odebírat tisíce spekter a provádět tak analýzu povrchu Marsu nevídanou rychlostí. Díky jednoduchosti dálkového ovládní se stal ChemCam nejčastěji používaným analytickým přístrojem roveru.





Obr. 7.4: Zařízení ChemCam, které je součástí roveru Curiosity [21].

První vzorek, jež LIBS spektrum (Obr. 7.5) Curiosity odeslal zpět vědcům do NASA, byl kámen o velikosti pěsti a byl později pojmenován jako „Coronation“ (v překladu „Korunovace“). Od té doby bylo naměřeno více než 200 000 dalších spekter z asi 1500 individuálních cílových míst [21].



Obr. 7.5: První spektrum naměřené na Marsu roverem Curiosity [22].

LIBS technologie se vzhledem ke svým schopnostem rychle a vzdáleně analyzovat cíle i v extrémně nehostinných prostředí pravděpodobně stane zásadním nástrojem také při plánovaných misích na Venuši. Úkolem LIBS má být například určit typy povrchových hornin, jejich mineralogii a strukturu nebo měřit izotopy a sloučeniny síry. Tato data by měla poskytnout odpovědi na otázky, proč je Venuše tolik odlišná od Země a zda byla Venuše někdy jako Země. V současnosti je vědci z NASA rozvíjen plán na misi VITAL (Venus Intrepid Tessera Lander) [23].

V budoucnosti možná bude LIBS efektivní metodou pro prospekci rud a vzácných kovů na asteroidech. Automatizovaná flotila malých satelitů by například mohla ostřelovat povrch asteroidů pomocí laserů a dálkově zaznamenávat spektra, která by sloužila k mapování nerostného v bohatství pásu planetek. Tento koncept byl uplatněn například při návrhu sovětské sondy Dva orla pro průzkum Měsíce [24].

Pomocí spektroskopie laserem indukovaného průrazu lze také monitorovat zdraví raketových motorů. Detekce a charakterizace kovových prvků ve výfukových plynech může naznačovat opotřebení nebo korozi kovu v uhlovodíkem poháněných motorech. Tato informace obdržená za chodu motoru je velmi užitečná a může díky ní dojít k vypnutí mototru ještě před katastrofickým selháním [25].

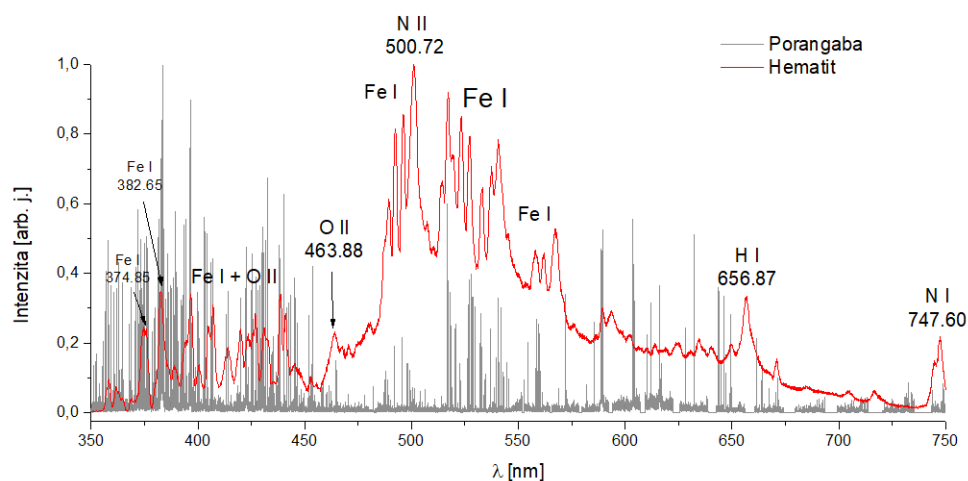
# Kapitola 8

## Zhodnocení spekter minerálů

Pro účely této bakalářské práce bylo na vzduchu naměřeno 80 ablačních spekter minerálů relevantních pro spektra meteorů z hlediska jejich chemického složení. Ta následně posloužila k sestavení kvalitativního atlasu spekter minerálů (viz CD příloha), který má být pomůckou při porozumění a popisování spekter meteorů. Některé minerály jsou však unikátní pro meteority. Jelikož tvoří pouze mikroinkluzy, nedají se najít jejich makroskopické vzorky.

Změřena byla nízce rozlišená LIBS spektra přístrojem podobných parametrů, jako jsou kamery pro zaznamenávání spekter meteorů. V návaznosti na tento pilotní výzkum budou vzorky minerálů v budoucnu podrobeny vysoce rozlišené LIBS analýze, což umožní přesnější popis meteorů.

K dispozici jsou také vysoce rozlišená LIBS spektra meteoritů. I k jejich primárnímu popisu a porozumění bude moci sloužit tento kvalitativní atlas. Pokud například srovnáme vysoce rozlišené spektrum meteoritu Porangaba bez jakékoliv znalosti jeho chemického složení se spektrem hematitu  $\text{Fe}_2\text{O}_3$ , lze podle Obr. 8.1 vidět (obzvláště v oblasti 350–450 nm), že železo je jedním z hlavních prvků meteoritu.



Obr. 8.1: Nízce rozlišené spektrum hematitu spolu s vysoce rozlišeným spektrem meteoritu Porangaba.

## 8.1 Proces vyhodnocování

Abecední seznam všech minerálů, jejichž vzorky byly použity k sestavení kvalitativního katalogu spekter, jsou uvedeny v Tab. 8.1.

Albit	Chalcedon	Mastek	Serpentin
Ametyst	Chromdiopsid	Měď	Sfalerit
Anhydrit	Chromit v olivínu	Monazit	Siderit
Anortit	Chromit v serpetinu	Muskovit	Síra
Apatit	Ilmenit	Nefelín	Slitina chromu a vanadu
Basalt	Jantar	Obsidián	Smithsonit
Beryl	Jaspis	Oligoklas	Titanit
Biotit	Kaolinit	Olivín (dunit)	Uvarovit
Bismut	Karbid křemíku	Opál	Vanadit
Braunit	Kobaltin	Ortoklas	Vápenec
Bytownit	Korund	Ortoklas 277	Vermikulit
Celestin	Křemen	Pemza	Wollastonit
Cinabarit	Kunzit	Perla	Zirkon
Cinvaldit	Labradorit	Prehnit	Železný meteorit
Diopsid	Laterit nikl	Pyrhotin	
Dolomit	Limonit	Pyrit	
Egirin	Magnetit	Rodochrozit	
Fayalit	Malachit	Sádrovec	
Halit	Mangan	Sanidin	
Hematit	Manganová ruda	Saponit	

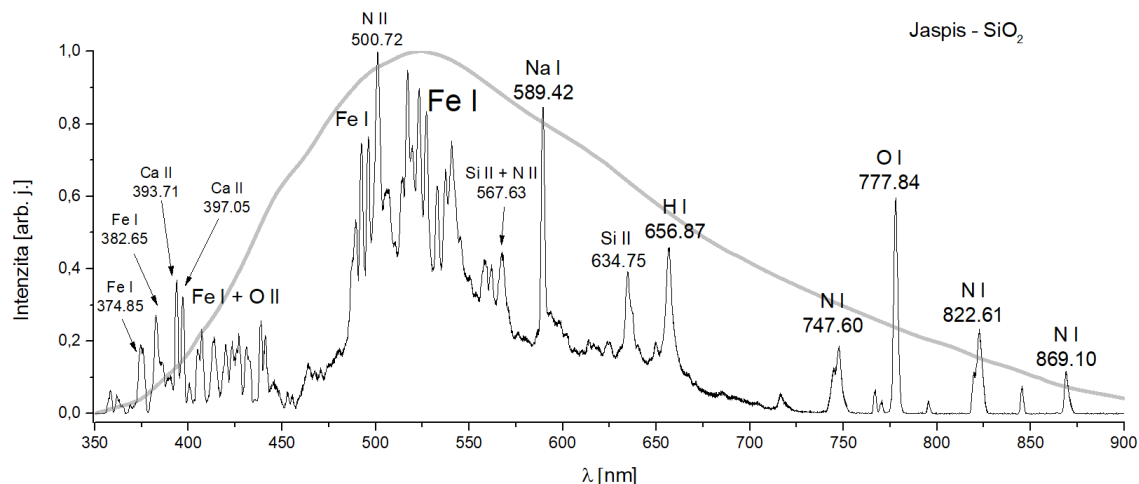
Tab. 8.1: Seznam minerálů, u jejichž vzorků byla provedena LIBS analýza.

Před samotným vyhodnocováním jednotlivých spekter bylo nejdříve zapotřebí sestavit seznam chemických vzorců jednotlivých minerálů. Tím byl získán prvotní odhad prvků, které by se měly ve spektrech ablovaných vzorků vyskytovat.

Pro každý vzorek se provedlo několik desítek měření a spektra nehodící se k dalšímu zpracování (např. příliš velká saturace signálu) byla následně vyřazena. Zbylé výsledky se poté zprůměrovaly a nanormovaly. Vyhodnocování a popis spekter byl prováděn manuálně za pomoci programového softwaru *ESAWIN*. Ke každému spektru je také šedou barvou přidána kalibrační křivka spektrometru použitého při LIBS měřeních (viz např. Obr. 8.2).

Při průletu meteoroidů naší atmosférou dochází v podstatě k jejich ablaci „na vzduchu“. Díky tomu se v zaznamenaných spektrech meteorů nachází typické emisní linie prvků, jako je například dusík, kyslík nebo vodík, které jsou běžnou složkou vzduchu. Z tohoto důvodu byla také všechna naše měření prováděna na vzduchu a tyto charakteristické linie jsou přítomny téměř ve všech spektrech minerálů. S pomocí sestaveného katalogu bude tedy možné určit i tyto atmosferické prvky, které třeba jinak nejsou součástí chemického složení prolétávajících meteoroidů, avšak ve spektrech meteorů přítomny jsou.

Pro nalezení těchto emisních čar bylo zapotřebí srovnání všech spekter minerálů a nalezení píků vyskytujících se ve většině případů. Typické linie atmosferických prvků jsou dobře vidět například na naměřeném spektru vzorku jaspisu (Obr. 8.2).

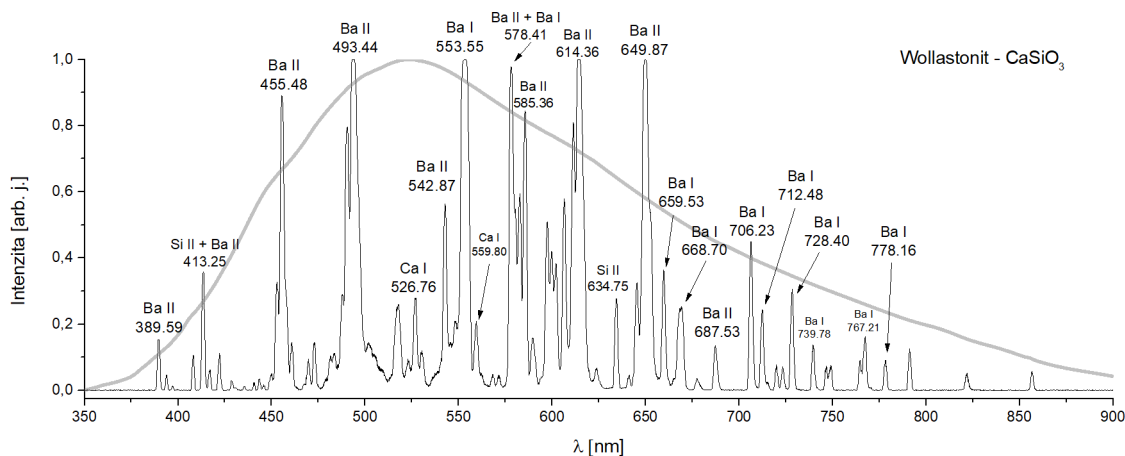


Obr. 8.2: Ablaciční spektrum jaspisu spolu s typickými emisními liniemi atmosferických prvků.

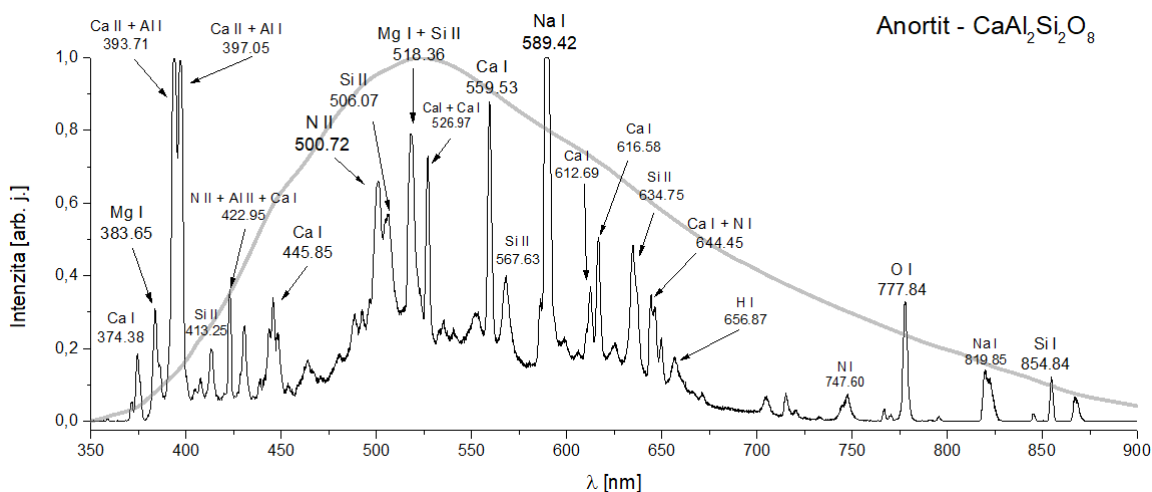
Následně byly u každého spektra určovány emisní čáry odpovídající prvkům z chemického vzorce minerálu. Čáry, které zůstaly nepopsány, náležely příměsím. Prvků odpovídajících těmto neznámým liniím bylo vždy několik, a proto bylo potřeba u těchto kandidátů ověřit, zda se v daném spektru nachází i jeho další typické linie. Pokud nebyly tyto další čáry přítomny, daný prvek byl zamítnut a stejný postup se opakoval do té doby, než se našel prvek vhodný. Pro finální kontrolu správného přiřazení prvku k dané linii bylo ještě sledováno, zda se tato čára vyskytuje i u ostatních minerálů podobného chemického složení. V některých případech také dopomohlo zbarvení vzorku k určení příměsí. Například ablovaný opál měl zelenou barvu, což indikuje přítomnost titanu (Obr. 8.5). Pokud by byl naopak červený, bylo by příměsí železo.

Dalo by se předpokládat, že nejintenzivnější linie budou patřit hlavním složkám minerálů. V některých případech však příměsí, jejichž koncentrace ve vzorku nemusí být nijak velká, značně zastínily tyto hlavní složky. Není tedy pravidlem, že nejsilnější čáry patří nejvíce zastoupeným prvkům. V případě jednoho ze dvou vzorků minerálu wollastonitu, u kterých byla provedena analýza, je touto nejdominantnější složkou baryum (viz Obr. 8.3).

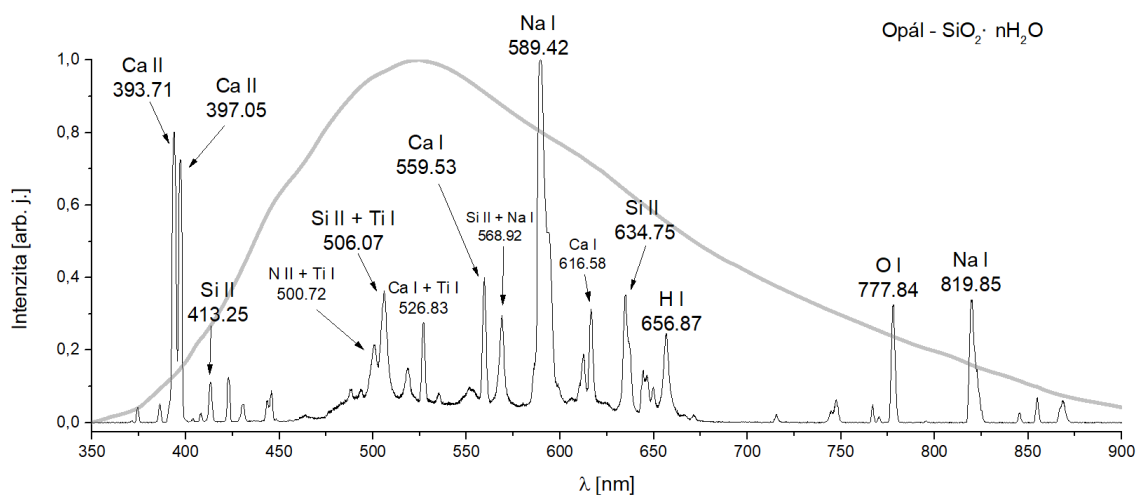
Velmi častými a výraznými příměsemi ve spektrech byly prvky sodík, s výraznou linií odpovídající sodíkovému dubletu na 589.42 nm, hořčík a vápník. Příklady spekter minerálů, u kterých se tyto příměsí značně projeví, lze nalézt na Obr. 8.4, Obr. 8.5, Obr. 8.6.



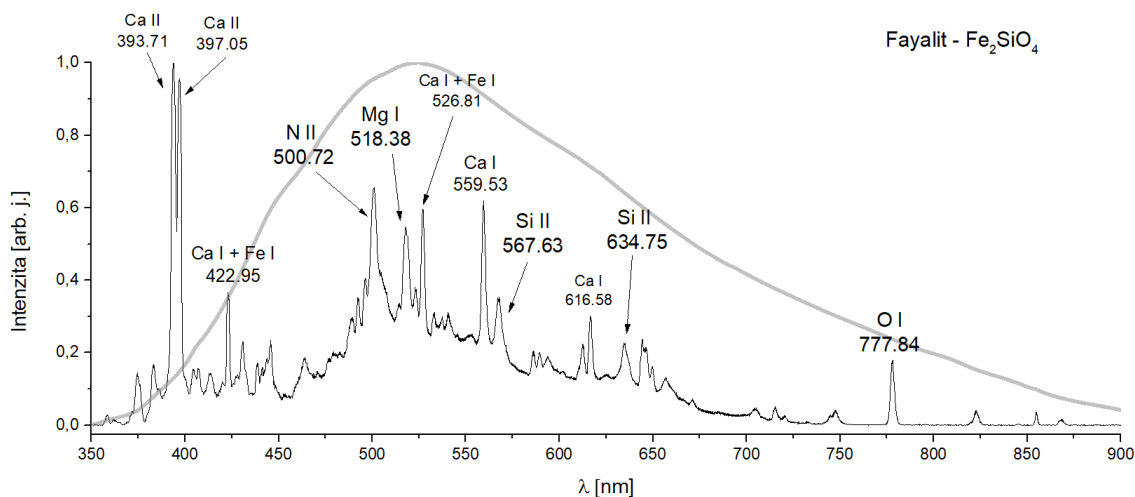
Obr. 8.3: Ablační spektrum wollastonitu s příměsí barya.



Obr. 8.4: Ablační spektrum anortitu s příměsí sodíku a hořčíku.



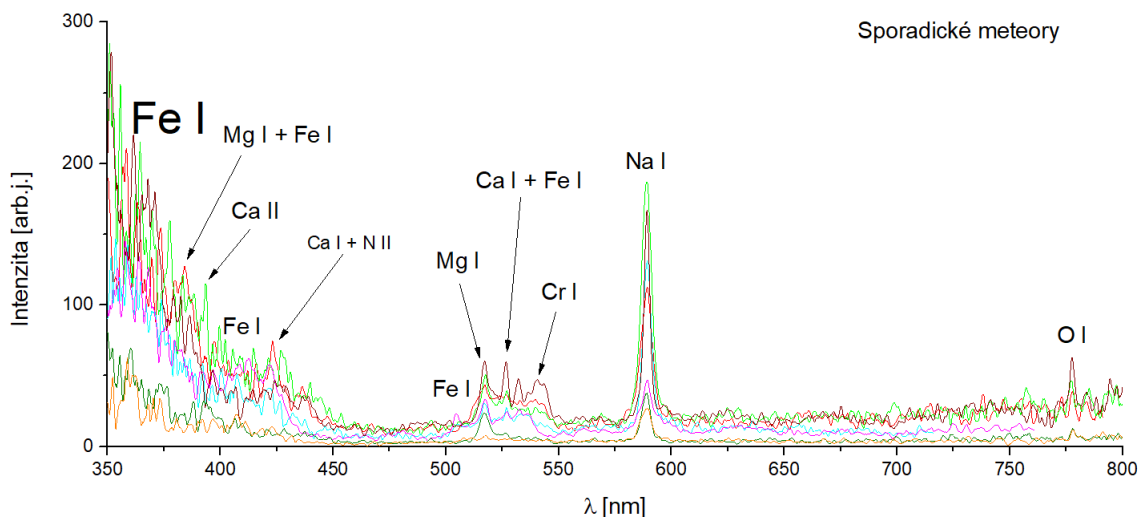
Obr. 8.5: Ablační spektrum opálu s příměsí vápníku, sodíku a titanu.



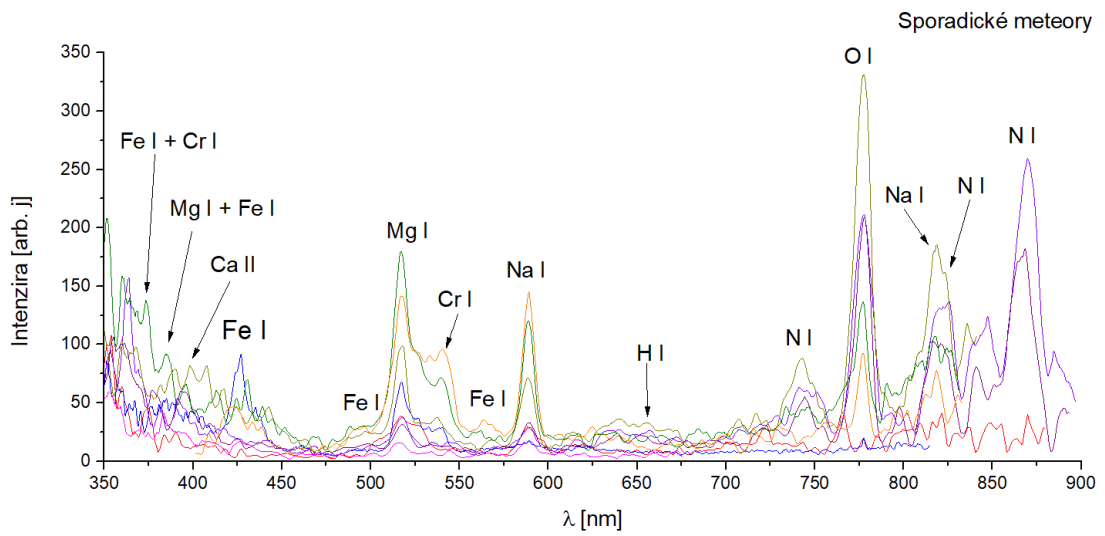
Obr. 8.6: Ablaciční spektrum fayalitu s příměsí vápníku a hořčíku.

## 8.2 Spektra sporadických meteorů

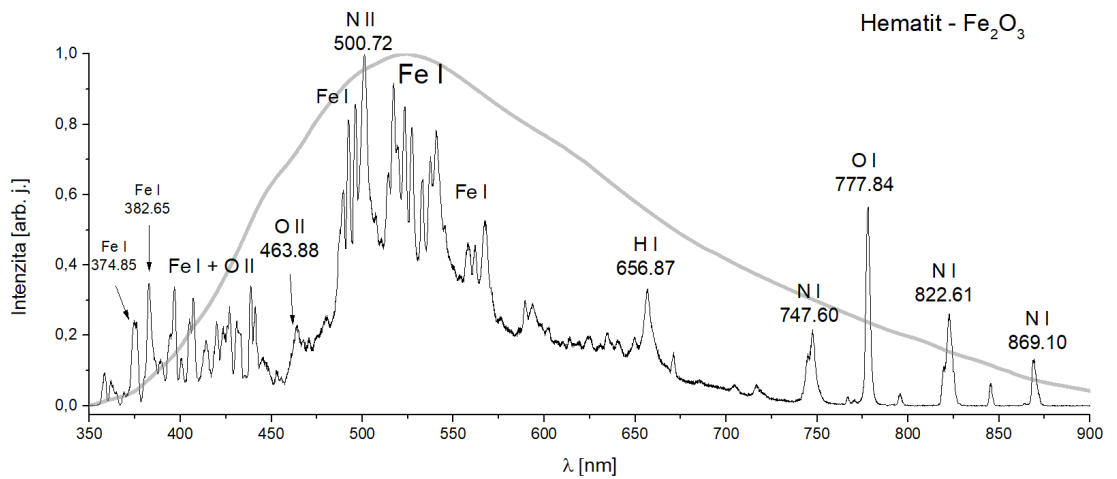
S pomocí vytvořeného kvalitativního atlasu byla následně postupným porovnáváním se spektry minerálů popsána spektra sporadických meteorů (viz Obr. 8.7 a Obr. 8.8). K jejich popisu byla použita především spektra jaspisu (Obr. 8.2), fayalitu (Obr. 8.6), hematitu (Obr. 8.9), egirinu (Obr. 8.10), olivínu v dunitu (Obr. 8.11) a inkluze chromitu v olivínu (Obr. 8.12).



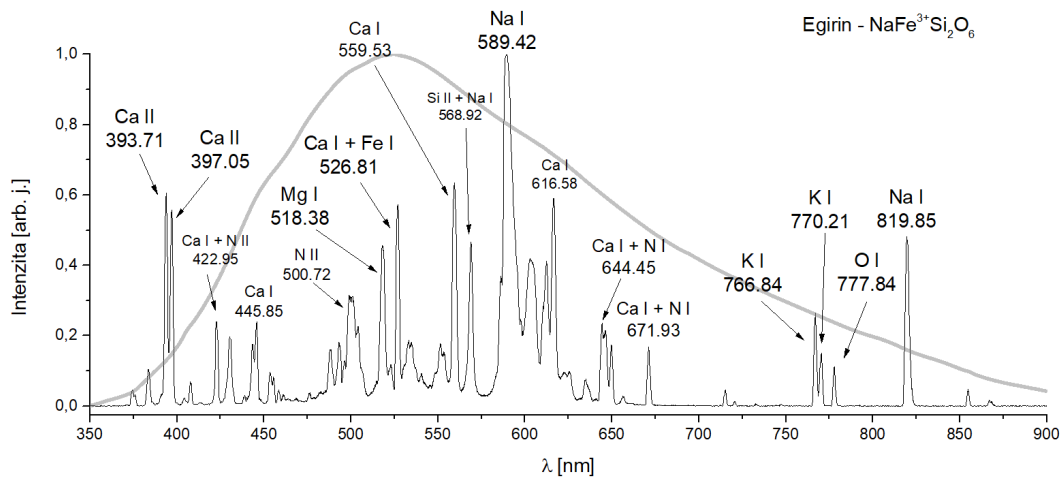
Obr. 8.7: Spektrum sporadických meteorů popsané pomocí sestaveného kvalitativního atlasu spekter minerálů.



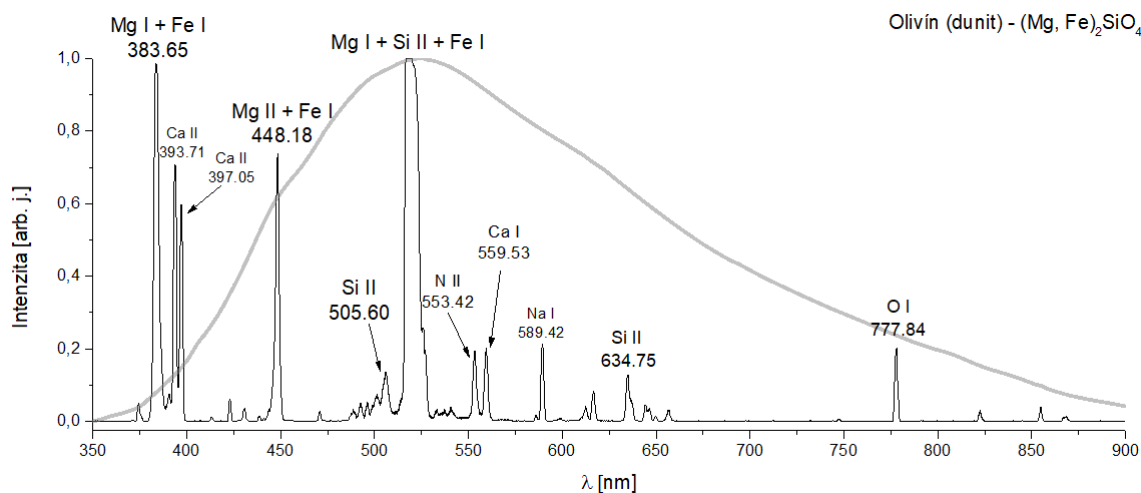
Obr. 8.8: Spektrum sporadických meteorů popsané pomocí sestaveného kvalitativního atlasu spekter minerálů.



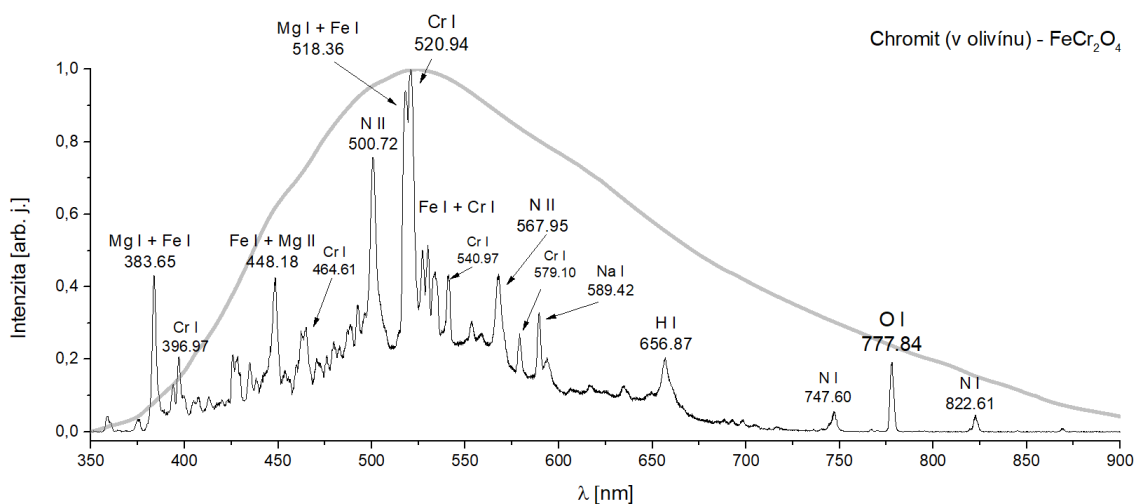
Obr. 8.9: Ablací spektrum hematitu. Zdrojem emise prvků H, N a O je vzduch. Ablace byla provedena za atmosférického tlaku.



Obr. 8.10: Ablační spektrum egrinu.



Obr. 8.11: Ablační spektrum olivínu, který je součástí dunitu.



Obr. 8.12: Ablační spektrum chromitu, který je inkluzí v olivínu.



# Závěr

Hlavním cílem této práce bylo sestavení kvalitativního atlasu spekter minerálů, který bude moci dále sloužit jako pomůcka při prvotním popisu spekter meteorů a jejich kvalitativní analýze. Kvalitativní popis spekter je pilotní informací pro určování prvkového složení plazmatu meteorů a je to první krok k orientaci v jejich reálných spektrech. V případě kvantitativní analýzy meteoroidů je přesná chemická analýza záležitostí až dalších měření a výpočtů a je prováděna pomocí velmi sofistikovaných algoritmů.

První část bakalářské práce pojednává o vzniku chemických prvků. Nejdříve je vysvětlena nukleogeneze velkého třesku, během níž se objevila první jádra vodíku a helia. Dále jsou rozebrány jednotlivé fáze hoření ve hvězdách, které jsou zodpovědné za další těžší prvky až po železo. Prvky s větším protonovým číslem, než má železo, pak vznikají během s-procesů a obzvláště pak r-procesů, které probíhají na konci života hvězdy. Jako poslední je zodpovězena otázka vzniku lithia, beryllia a boru, které jsou produkty spalačních reakcí probíhající v mezihvězdném prostoru.

Po objasnění původu chemických prvků následuje krátké vysvětlení základních principů formování prvních minerálů.

V rámci této bakalářské práce bylo změřeno na 80 LIBS spekter různých vzorků minerálů relevantních z hlediska jejich chemického složení pro spektra meteorů. Druhá část je tedy zaměřena hlavně na základní principy LIBS analýzy a popis průběhu zpracování těchto spekter. Na závěr jsou s pomocí sestaveného kvalitativního atlasu popsána naměřená spektra sporadických meteorů.

V návaznosti na tuto bakalářskou práci budou v budoucnu prováděna měření mikrosondou, měření vysoce rozlišených spekter minerálů, jejich kvantitativní zhodnocení a vylepšení tohoto sestaveného katalogu.

# Literatura

- [1] KULHÁNEK, Petr. *Existoval Velký třesk?*. In: Aldebaran bulletin [online]. Praha: AGA & Štefánikova hvězdárna, 2015 [cit. 2018-06-21]. Dostupné z: [https://www.aldebaran.cz/bulletin/2015\\_11\\_sum.php](https://www.aldebaran.cz/bulletin/2015_11_sum.php)
- [2] ILIADIS, Christian. *Nuclear Physics of Stars*. 2. vyd. Weinheim: Wiley-VCH, 2015. ISBN 978-3-527-33648-7
- [3] NEWTON, David. E. *Chemistry of Space*. New York: Facts On File, 2007. ISBN 978-0-8160-5274-5
- [4] COC, Alain a Elisabeth VANGIONI. Primordial nucleosynthesis. *International Journal of Modern Physics E*. 2017, **26**(08), 1741002-. DOI: 10.1142/S0218301317410026. ISSN 0218-3013. Dostupné také z: <http://www.worldscientific.com/doi/abs/10.1142/S0218301317410026>
- [5] KHOLUPENKO, E. E. *On recombination dynamics of hydrogen and helium* [online]. [cit. 2018-07-06]. Dostupné z: [http://viavca.in2p3.fr/presentations/on\\_recombination\\_dynamics\\_of\\_hydrogen\\_and\\_helium.pdf](http://viavca.in2p3.fr/presentations/on_recombination_dynamics_of_hydrogen_and_helium.pdf)
- [6] LARSON, Richard B. a Volker BROMM. *The First Stars in the Universe*. [online]. 2009 [cit. 2018-06-22]. Dostupné z: <https://www.scientificamerican.com/article/the-first-stars-in-the-un/>
- [7] RAUSCHER, T. a A. PATKÓS. *Origin of the Chemical Elements* [online]. 2016 [cit. 2018-06-22]. Dostupné z: <https://ned.ipac.caltech.edu/level15/Sept16/Rauscher/paper.pdf>
- [8] RAYMAN, Marc. *How old is the Sun?* [online]. 2017 [cit. 2018-06-23]. Dostupné z: <https://spaceplace.nasa.gov/sun-age/en/>
- [9] SIEGEL, Ethan. *The 3 most surprising elements* [online]. 2014 [cit. 2018-06-23]. Dostupné z: <https://medium.com/starts-with-a-bang/the-3-most-surprising-elements-2cc35e9be27e>
- [10] WALLERSTEIN, George, Icko IBEN, Peter PARKER, et al. Synthesis of the elements in stars: forty years of progress. *Reviews of Modern Physics* [online]. 1997, **69**(4), 995-1084 [cit. 2018-06-23]. ISSN 0034-6861. Dostupné z: <https://authors.library.caltech.edu/10255/1/WALrmp97.pdf>

- [11] ROZEHNAL, Jakub. Když vybuchne supernova. KULHÁNEK, Petr, et al. *Astronomie a fyzika: svítání*. Praha: Aldebaran, [2014], s. 114-125. ISBN 978-80-904582-6-0.
- [12] VANGIONI-FLAM, Elisabeth a Michel CASSÉ. Cosmic Lithium-Beryllium-Boron Story. *Astrophysics and Space Science*. 1999, **265**(1/4), 77-86. DOI: 10.1023/A:1002197712862. ISSN 0004640X. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1002197712862>
- [13] HAZEN, Robert M. Evolution of Minerals. *Scientific American* [online]. 2010, **302**(3), 58-65 [cit. 2018-06-26]. DOI: 10.1038/scientificamerican0310-58. ISSN 0036-8733. Dostupné z: <http://www.nature.com/doifinder/10.1038/scientificamerican0310-58>
- [14] HAZEN, R. M., R. T. DOWNS, L. KAH a D. SVERJENSKY. Carbon Mineral Evolution. *Reviews in Mineralogy and Geochemistry* [online]. 2013, **75**(1), 79-107 [cit. 2018-06-26]. DOI: 10.2138/rmg.2013.75.4. ISSN 1529-6466. Dostupné z: <https://pubs.geoscienceworld.org/rimg/article/75/1/79-107/140927>
- [15] HAZEN, R. M., D. PAPINEAU, W. BLEEKER, R. T. DOWNS, J. M. FERRY, T. J. MCCOY, D. A. SVERJENSKY a H. YANG. Mineral evolution. *American Mineralogist* [online]. 2008, **93**(11-12), 1693-1720 [cit. 2018-06-26]. DOI: 10.2138/am.2008.2955. ISSN 0003-004X. Dostupné z: <https://pubs.geoscienceworld.org/ammin/article/93/11-12/1693-1720/44643>
- [16] HAZEN, R. M. a J. M. FERRY. Mineral Evolution: Mineralogy in the Fourth Dimension. *Elements* [online]. 2010, **6**(1), 9-12 [cit. 2018-06-27]. DOI: 10.2113/gselements.6.1.9. ISSN 1811-5209. Dostupné z: <https://pubs.geoscienceworld.org/elements/article/6/1/9-12/137828>
- [17] MIZIOLEK, Andrzej W., V. PALLESCI a Israel. SCHECHTER. *Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS): fundamentals and applications*. New York: Cambridge University Press, 2006. ISBN 05-218-5274-9.
- [18] CREMERS, Dave a Leon RADZIEMSKI. *Handbook of laser-induced breakdown spectroscopy*. Second edition. Chichester: Wiley, 2013. ISBN 978-111-8567-371.
- [19] Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: How it works. *Applied photonics* [online]. 2015 [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: [http://www.appliedphotonics.co.uk/Libs/about\\_libs.htm](http://www.appliedphotonics.co.uk/Libs/about_libs.htm)
- [20] GAUDIUSO, Rosalba, Marcella DELL'AGLIO, Olga De PASCALE, Giorgio S. SENESI a Alessandro De GIACOMO. Laser Induced Breakdown Spectroscopy for Elemental Analysis in Environmental, Cultural Heritage and Space Applications: A Review of Methods and Results. *Sensors* [online]. 2010, **10**(8), 7434-7468 [cit. 2018-06-29]. DOI: 10.3390/s100807434. ISSN 1424-8220. Dostupné z: <http://www.mdpi.com/1424-8220/10/8/7434>
- [21] BOLSHAKOV, Alex. LIBS At Work On Mars. In: *Applied Spectra: Transforming the way the world does chemistry* [online]. 2017 [cit. 2018-06-29]. Dostupné z: <https://appliedspectra.com/mars-lib.html>

- [22] GREICIUS Tony. Coronation's Chemicals. In: *NASA* [online]. 2012 [cit. 2018-06-29]. Dostupné z: [https://www.nasa.gov/mission\\_pages/msl/multimedia/pia16089.html](https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/multimedia/pia16089.html)
- [23] CREMERS, David A. Space Applications of LIBS. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, 2014-2-26, s. 257-291. Springer Series in Optical Sciences. DOI: 10.1007/978-3-642-45085-3\_10. ISBN 978-3-642-45084-6. Dostupné také z: [http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-45085-3\\_10](http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-45085-3_10)
- [24] ULIVI, Paolo a David M. HARLAND. *Lunar exploration: human pioneers and robotic surveyors*. New York: Springer-Verlag, 2004. ISBN 18-523-3746-X.
- [25] RAI, V.N. a S.N. THAKUR. Instrumentation for Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. Amsterdam: Elsevier, 2007, 2007, s. 113-133. DOI: 10.1016/B978-044451734-0.50008-9. ISBN 9780444517340. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444517340500089>
- [26] RUBIN, Alan E. a Jeffrey N. GROSSMAN. Meteorite and meteoroid: new comprehensive definitions. *Meteoritics and Planetary Science* [online]. 2010, 45(1), 114-120 [cit. 2018-06-30]. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2009.01009.x. ISSN 10869379. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1945-5100.2009.01009.x>
- [27] KAISER, T.R. Meteors and the abundance of interplanetary matter. *Space Science Reviews* [online]. 1963, 1(3), 554-575 [cit. 2018-06-30]. DOI: 10.1007/BF00225272. ISSN 0038-6308. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF00225272>
- [28] BELTON, M. J. S. *Mitigation of hazardous comets and asteroids*. New York: Cambridge University Press, 2004. ISBN 05-218-2764-7.
- [29] WEISENBERG, Michael K, Timothy J. MCCOY a Alexander N. KROT. Systematics and Evaluation of Meteorite Classification. LAURETTA, Dante a Harold Y. MCSWEEN. *Meteorites and the early solar system II*. Houston: In collaboration with Lunar and Planetary Institute, 2006, s. 19-52. ISBN 9780816525621.

# Příloha A

## Obsah příloženého CD

Na příloženém nosiči CD se nachází spektra následujících vzorků zpracovaná a popsaná v programu *Origin*:

Albit	Manganová ruda
Ametyst	Mastek
Anhydrit	Měď
Anortit	Meteorit iron
Apatit	Monazit
Basalt	Muskovit
Beryl	Nefelín
Biotit	Obsidián
Bismut	Oligoklas
Braunit	Olivín (dunit)
Bytownit	Opál
Celestin	Ortoklas
Cinabarit	Ortoklas 277
Cinvaldit	Penza
Diopsid	Perla
Dolomit	Prehnit
Egirin	Pyrhotin
Fayalit	Pyrit
Halit	Pyrit – mikrokrystal
Hematit	Rodochrozit
Chalcedon	Sádrovec
Chromdiopsid	Sanidin
Chromit v olivínu	Saponit
Chromit v serpetinu	Serpentin
Ilmenit	Sfalerit A
Jantar	Sfalerit B
Jaspis	Siderit
Kaolinit	Siderit – matrice
Karbid křemíku	Síra
Kobaltin	Slitina chromu a vanadu
Křemen	Titanit
Kunzit	Uvarovit
Labradorit	Vanadit
Laterit nikl	Vanadit
Limonit	Vápenec
Magnetit	Vermikulit
Malachit	Wollastonit
Mangan (hlubokomořský sediment) - matrice	Wollastonit II
Mangan (hlubokomořský sediment)	Zirkon