

UNIVERZITA KARLOVA
Přírodovědecká fakulta

Studijní program: Klinická a toxikologická analýza



Lukáš Petera

ANALÝZA PEVNÝCH VZORKŮ BEZKALIBRAČNÍ ANALÝZOU LASEREM
INDUKOVANÉHO PRŮRAZU – APLIKACE PRO STANOVENÍ METALURGIE
METEORITŮ

Analysis of solid sample using calibration free laser induced breakdown
spectroscopy – application in metallurgy of meteorites

Bakalářská práce

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

Praha 2018

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto závěrečnou práci zpracoval samostatně a že jsem uvedl všechny použité informační zdroje a literaturu. Tato práce ani její podstatná část nebyla předložena k získání jiného nebo stejného akademického titulu.

Jsem si vědom toho, že případné využití výsledků, získaných v této práci, mimo Univerzitu Karlovu je možné pouze po písemném souhlasu této univerzity.

V Praze dne 19.5.2018

Abstrakt

Cílem práce byl vývoj a aplikace metody bezkalibrační analýzy (CF) spektroskopie laserem indukovaného průrazu (LIBS). Metoda CF-LIBS je používána k rychlé analýze vzorků jakékoliv velikosti, tvaru bez jejich povrchové úpravy za účelem zjištění jejich prvkového složení. Algoritmus CF je navíc použitelný pro studium emisních spekter atomárního plazmatu a horkých plynů rovněž za účelem stanovení jejich prvkového složení. Z tohoto pohledu se jeví velice zajímavá ablační analýza tak komplikovaných matic, jakými jsou meteority a možné porovnávání se spektrální analýzou meteorů.

V rámci předkládané bakalářské práce byla naměřena experimentální ablační spektra vzorků meteoritů Porangaba (L4), Čeljabinsk (LL5), Northwest Africa (869) a Dhofaru1994 (CM2). Na základě naměřených spekter těchto meteoritů byl vytvořen atlas emisních linií a jim přiřazených parametrů spektroskopických přechodů prvků, typicky se vyskytujících v meteoritech. Tento atlas bude dále sloužit jako zdrojová databáze pro automatické programy *Ablator* (automaticky vyhodnocující ablační emisní spektra) a *MeteorMaster* (automatický program pro interpretaci emisních spekter meteorů). Databáze bude použita pro CF-LIBS analýzu meteoritu Porangaba. Databáze je nutná zejména z hlediska dobře známého ovlivnění ablačních spekter maticí vzorků – pro určité penzum analytů je za účelem vysoké přesnosti analýz nutno vytvořit bázi znalostí začínající výběrem vhodných spektrálních čar typických pro vzorek a vykazujících minimální ovlivnění maticí (jinými slovy, za intenzitou spektrální čáry musí být čistě její fyzikální parametry a koncentrace prvku ve vzorku). Jako metoda referenční vůči CF-LIBS analýze, bude sloužit prvková analýza meteoritu Porangaba pomocí EDS/WDS prvkové mikroanalýzy. Budou diskutovány výsledky CF-LIBS analýzy a na závěr bude kriticky diskutován přínos techniky LIBS, jakožto metody poskytující rychlou, snadnou a levnou prvkovou analýzu vzorků.

Klíčová slova:

meteority, meteory, chemické složení meziplanetární hmoty, LIBS, CF-LIBS, bezkalibrační analýza, atomová spektroskopie

Abstract

The aim of this thesis was the development and application of the calibration-free method of the laser induced breakdown spectroscopy (LIBS). The CF-LIBS method is used to quickly analyze of sample of any size and shapes without any required surface treatment, to determinate their elemental composition. In addition, the CF algorithm is also usefull for study of atomic plasma and hot gas emission spectra to determinate their elemental composition. From this point of view, very interesting is ablation analysis of complicated matrices such as meteorites and possible comparsion with spectral analysis of meteors.

In the frame of the presented bachelor thesis, was measured the ablation spectra of meteorite samples Porangaba (L4), Chellyabinsk (LL5), Northwest Africa 869 (L3-6) and Dhofar 1994 (CM2). Based on the measured spectra of these meteorites, was created an atlas of the emission lines and assigned parameters of the spectroscopic transitions of the elements, typically occuring in a meteorites. Thisatlas will also serve as the source database for automatic program *Ablator* (automatically evalueting of ablation emission spcectra) and *MeteorMaster* (automatic program for the interpretation of meteors spectra). The database will be used for CF-LIBS analysis of the Porangaba meteorite. The database is necesry, in particular in terms of the well known influence of sample matrix to ablation spectra. For a certain amount of analytes, it is necessary to create a knowlage base starting with selecting in the appropriate spectral lines typical of the sample and showing minimal affects of the matrix (in other words, the intesity of spectral lines must be influenced only with its own physical parameters and the element concentracion in the sample). S the reference method to CF-LIBS analysis of the Porangaba meteorites will be used EDS/WDS element microprobe. The resultes of CF-LIBS analysisi will be discussed as a method of providing quick, easy and inexpensive esample elemental analysis.

Key words:

meteorites, meteors, Chemical composition of the interplanetary mass, LIBS, CF-LIBS, calibration-free analysis, atomic spectroscopy.

Poděkování

V prvé řadě bych chtěl poděkovat svému školiteli RNDr. Martinu Ferusovi, PhD., za jeho ochotu, vstřícnost a trpělivost při vedení mé bakalářské práce. Dále bych chtěl poděkovat prof. RNDr. Svatopluku Civišovi, CSc., a Ing. Liboru Lenžovi za jejich odborné rady, které mi po celou dobu tvorby mé práce poskytovali Svým spolupracovníkům Ing. Ondřeji Ivankovi, CSc., Ing. Adamu Pastorkovi, Bc. Antonínu Knížkovi a Janě Hrnčířové, společně s výše jmenovanými, bych chtěl poděkovat za všestrannou spolupráci a vytvoření přátelského prostředí na našem oddělení. Za mineralogickou analýzu meteoritu Porangaba bych chtěl poděkovat RNDr. Jakubu Halodovi PhD. Mé největší díky však patří mému kolegovi Mgr. Petr Kubelíkovi, PhD., který mi s vytrvalým úsilím vždy pomohl při řešení problémů, které se během tvorby mé práci vyskytly, a to i ve večerních hodinách.

Na závěr bych chtěl poděkovat své rodině, která mě po celou dobu mého studia vždy podporovala.

Práce byla vypracována na Ústavu fyzikální chemie Jaroslava 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.

Obsah

1. Úvod	11
2. Teoretická část	15
2.1. Meteory a meteority	15
2.2. Původ meteoritů	15
2.3. Meteory	17
2.4. Studium meteoritů	19
2.4.1. Chemie meteoritů	19
2.4.2. Mineralogie meteoritů	21
2.4. Klasifikace meteoritů	22
2.5.1. Fresh a find meteority	23
2.5. Metody používané při studiu meteoritů	24
2.6.1. Elektronová mikroskopie a rentgenová mikroanalýza	27
2.7. Spektroskopie laserem buzeného plazmatu	27
2.7.1. Samoabsorpce emisních linií	30
2.7.2. Matriční efekt	30
2.7.3. Původ emisní spekter	30
2.7.4. Intenzita emisní linie	31
2.7.5. Šířka emisní linie	33
2.7.6. Laserem indukované plazma	34
2.8. Bezkalibrační analýza	39
3. Experimentální část	44
3.1. Seznam použitých chemikálií	44
3.2. Seznam a charakterizace použitých vzorků	45
3.3. Meteorit Porangaba	46
3.4. Instrumentace	47
3.4.1. LIBS	48
3.4.2. SEM EDS/WDS	48
3.5. Tvorba atlasu emisních linií	49
4. Výsledky a diskuze	53
4.1. Katalog emisních linií	53
4.1.1. Železo	55
4.1.2. Hořčík	55
4.1.3. Křemík	55
4.1.4. Chrom	56
4.1.5. Hliník	56
4.1.6. Sodík	56
4.1.7. Vápník	56
4.1.8. Titan	56
4.2. Bezkalibrační analýza	58

4.3.	Spektrum bolidu.....	63
4.4.	Mineralogie a petrologie meteoritu Porangaba	66
5.	Závěr	71
6.	Seznam použité literatury.....	73
7.	Přílohy	78
7.1	Seznam příloh.....	78

Seznam symbolů a zkratk

- LIBS – Laser Induced Breakdown Spectroscopy, spektroskopie laserem indukovaného průrazu
- CF-LIBS – Calibration Free-Laser Induced Plasma Spectroscopy, Bezkalibrační metoda laserem buzeného plazmatu
- CF – Calibration-Free, bezkalibrační
- EDS/WDS – Energy dispersive/wavelength dispersive X-Rays spectroscopy, energeticky disperzivní/vlnově disperzivní rentgenová mikroanalýza
- SEM EDS/WDS – Scanning electron microscope, Skenovací elektronová mikroskopie a EDS/WDS rentgenová mikroanalýza
- EBSD – Electron back Scattered Diffraction, Difrakce zpětně odražených elektronů
- ICP–MS – Inductively Coupled Plasma Mass Spectroscopy, hmotnostní spektroskopie s indukčně vázaným plazmatem
- CCTV – Closed Circuit Television, uzavřený televizní okruh
- ICCD – Intensified Charge-Coupled Device, zesílené integrované zařízení s vázanými náboji
- EDMON – European video Meteor Network Database, databáze evropské sítě pro pozorování meteorů
- CEMeNt – Central European Meteor Network, středoevropská síť pro pozorování meteorů
- BRAMON – Brazilian Observation Meteor Network, brazilská síť pro pozorování meteorů
- NIST – National Institut of Standarts and Technology, národní institut pro standarty a technologie
- LTE – Local Thermodynamic Eyuilibrium, lokální termodynamická rovnováha
- PMD – Percent Mean Deviation, procentuální směrodatná odchylka
- YAG – Ytrium Aluminium Granát
- CAI – Calcium-Aluminium-rich Inclusions, inkluze bohaté na vápník a hliník
- AOA – Amoeboid Olivine Aggregates, améboidní olivínové agregáty
- ANG – Angrity
- ACA – Acapulkoity
- AUB - Aubrity
- BAN – Brekciové anortozity
- BBB – Bazalty a Brekciové Bazalty
- BRA – Brachinity

DIO – Diogenity

EUK – Eukrity

CHA – Chassignity

HOW – Howardity

MES – Mesosiderity

NAK – Nakhlity

NIB – Noritické Impaktem tavené Breccie

OPX – Ortopyroxenity

PAL – Pallasity

SHE – Shergottity

WIN – Winonaity

URE - Ureility

A_{ij} – Einsteinův koeficient spontání emise ze stavu i do stavu j [s^{-1}]

ν_{ij} – frekvence emitovaného záření přechodu ze stavu i do stavu j [Hz]

g_i – degenerace horní energetické hladiny

g_j – degenerace dolní energetické hladiny

E_i – energie horního energetického stavu i [cm^{-1}]

E_j – energie dolního energetického stavu j [cm^{-1}]

E_{ion} – ionizační energie [cm^{-1}]

T – excitační teplota elektronů [K]

$Q_S(T)$ – partiční funkce pro neutrální specie SI při teplotě T

$Q_S^+(T)$ – partiční funkce pro jednu ionizovanou specie SII při teplotě T

C_S – koncentrace daného prvku S

$I(\nu)$ – Integrovaná intenzita

k – směrnice lineární regrese Boltzmanova vynesení

q_s – absolutní parametr lineární regrese Boltzmanova vynesení

L – kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti

S – kvantové číslo celkového spinu

J – kvantové číslo celkového momentu hybnosti

$FWHM$ – Full Width in Half Maximum, šířka píku v polovině jeho výšky [nm]

Ω – parametr Starkova rozšíření [$\text{Å}\cdot\text{nm}^{-1}$]

N_e – elektronová hustota plazmatu [m^{-3}]

m_{el} – hmotnost elektronu ($9,109\,383\cdot 10^{-31}$ kg)

k_B – Boltzmanova konstanta ($0,695\,034\,cm^{-1}/K$; $1,380\,648\cdot 10^{-23}$ J/K)

h – Planckova konstanta ($6,626\ 070 \cdot 10^{-34}$ J·s)

π – Ludolfovo číslo (3,14159...)

F – experimentální parametr

1. Úvod

Ačkoliv se z hlediska zaměření na vzorky meteoritů na první pohled problematika rozvoje CF-LIBS analýzy meteoritů týká spíše astronomie, v pozadí ve skutečnosti stojí sofistikovaná laboratorní činnost z oboru fyzikální chemie, chemické fyziky, spektroskopické analýzy, práce s daty včetně programování, automatizace, tvorby databází, znalosti technologie práce s lasery a optikou a v neposlední řadě také observační část, konstrukce astronomických spektrografů, výpočty drah těles atd., které jsou však nad rámec této práce zabývající se primárně rozvojem laboratorních analytických postupů a příslušné metodologie pro multikomponentní prvkovou analýzu ve složité matici.

Tyto laboratorní postupy jsou použity k chemickému studiu meziplanetární hmoty, většinové materie, která tvoří látku nacházející se v prostoru mezi planetami a Sluncem. Znalost jejího chemického složení je jedním ze základních pilířů studia formování Sluneční soustavy a porozumění obecné chemii a fyzice Sluneční soustavy. Nejdostupnějším vzorkem materiálu meziplanetární látky jsou meteority. Reprezentují zároveň velmi složitou matici – jakousi výzvu pro další rozvoj metod CF-LIBS umocněnou zejména možností využít výsledky čistě laboratorních postupů pro dálkovou detekci chemického složení plazmatu obklopujícího těleso meziplanetární hmoty vstupující do atmosféry. Z hlediska terminologie je vzorek meteoritu poměrně raritní. Jedná se o pouhá rezidua meziplanetární hmoty, jež přežila průlet atmosférou a dopadla na zemský povrch. Většinou však tato tělesa v atmosféře shoří a analýza plazmatu, které je obklopuje před tím, než se zcela rozpadnou, je jedinou cestou ke studiu jejich prvkového složení. Nicméně, celkové průměrné chemické složení přináší cenné informace, stejně jako jejich mineralogie, petrologie a izotopové kompozice (kyslík O^{17} a O^{18} , vodík D a H, uhlík C^{12} a C^{13}) – studované v případě nálezu vzorku. Na základě podrobné analýzy těchto vlastností jsou meteority klasifikovány do specifických tříd, klanů, skupin a podskupin. Klasifikační schéma meteoritů slouží zejména k ucelení informací o jinak poměrně heterogenní meziplanetární hmotě a je jedním ze základů pro další studium Sluneční soustavy. Může se jednat například o určení vztahů mezi mateřskými tělesy jednotlivých meteoritických skupin či zjištění procesů, kterými mohla jednotlivá mateřská tělesa při formování Sluneční soustavy procházet.

Existuje celá řada analytických technik používaných při zkoumání meteoritů. Jedná se například o analýzy pomocí neutronové aktivační analýzy (Shinotsuka and Ebihara, 1997), rentgenové fluorescenční spektroskopie (Rieder and Economou, 1997), hmotnostní

spektrometrie (Franchi et al., 1999), či elektronové mikrosondy (Haloda et al., 2009). Problémem je, že množství materiálu použitelného pro výzkum je limitováno množstvím nalezených meteoritů. Navíc těleso meziplanetární hmoty se při svém pádu většinou zcela vypaří v atmosféře a jen málokdy dopadne jako meteorit, který lze poté laboratorně analyzovat. U nálezů častých zejména v pouštích a arktických oblastech (zejména s ohledem na kontrast mezi materiálem meteoritu a okolním prostředím) navíc naprosto chybí informace o dráze, a tedy původu tělesa. Tato data lze totiž získat jedině přesnou triangulací na základě záznamů pozorování. Vzhledem k rozvoji moderních technologií lze meziplanetární hmotu analyzovat nejen laboratorně ve formě meteoritů (Nittler et al., 2004b), ale také pomocí interpretace emisních spekter plazmatu meteoru provádějícího její sestup atmosférou (Borovicka, 1993). Pomocí sítě specializovaných kamer, lze tento je nejen pozorovat, ale v případě, že je kamera vybavena disperzním prvkem, je možné zaznamenat i emisní spektrum plazmatu. Tato emisní spektra, pakliže jsou správně interpretována, mají potenciál poskytnout informace o prvkovém složení padajícího tělesa. Problémem však je, že spektroskopie obecně není metodou absolutní, a tudíž nelze z intenzit daných emisních linií určit absolutní koncentraci daného prvku bez dříve provedené kalibrace či jiné srovnávací metody (standartní přídavek, vnitřní standart atd.)

Možným řešením problému je tzv. bezkalibrační analýza spektroskopie laserem indukovaného průrazu (Calibration Free – Laser Induced Breakdown Spectroscopy, CF-LIBS). Základním předpokladem je, že po odpaření vzorku následné emisní spektrum laserem buzeného plazmatu těchto par reprezentuje celkové prvkové složení vzorku. Tato spektra jsou interpretována pomocí metody Boltzman-Saahových přímek, jež pro vyhodnocení nevyžadují kalibraci pomocí známých etalonů, ale jejich relativní zastoupení ve vzorku lze vypočítat na základě emisních a fyzikálních vlastností plazmatu. Jednoduchost provedení tuto čistě laboratorní metodu předurčuje pro levnou a rychlou analýzu vzorků různých matric a různého prvkového složení. Před provedením analýzy navíc není nutno vzorek nijak upravovat řezáním, leštěním, pokovením či jinými povrchovými úpravami. LIBS je tak používán např. pro mineralogickou analýzu povrchů zkoumaných v místě přistání robotickými moduly meziplanetárních sond.

Kromě toho se metoda CF-LIBS rovněž jeví jako vhodná referenční metoda pro spektrografii meteorů. Právě díky záznamu a řádné interpretaci emisních spekter meteorů lze určit prvkové složení plazmatem obklopeného a postupně se vypařujícího a rozpadajícího se objektu meziplanetární hmoty vstupujícího ve vysokých rychlostech desítek km za

sekundu do atmosféry Země, a to bez nutnosti jeho fyzického nálezu a následného laboratorního zkoumání. To často ani není možné, většina takových těles se při průletu atmosférou zcela vypaří a spektrální záznam je tak jediným dokladem jejich chemického složení. Díky tomu lze rapidně zvýšit statistický počet prvkových analýz meziplanetární hmoty. Díky parametrům trajektorie meteoru zaznamenaného kamerou lze vypočítat dráhu tělesa v meziplanetárním prostoru a případně určit i jeho mateřské těleso. Vzácným případem jsou poté takzvané meteority s rodokmenem, u nichž je pozorován pád, je známa dráha ve Sluneční soustavě a je fyzicky nalezen díky propočtu místa dopadu při znalosti atmosférické dráhy.

Tímto případem může být například meteorit Porangaba, jehož pád byl zpozorován 9. 1. 2015 v 17:35 světového času nedaleko brazilské metropole São Paulo a jehož část byla nalezena ještě ten samý den. Podrobná prvková a mineralogická studie tohoto meteoritu je dílčí částí této práce.

Cílem této práce je naměřit technikou LIBS experimentální ablační spektra meteoritů (Porangaba (L4), Chelyabinsk (LL5), Northwest Africa 869 (L3-6) a Dhofar 1994 (CM2)). Na základě dat získaných z těchto měření bude sestaven atlas emisních linií prvků, typicky se vyskytujících v meteoritech. Seznam těchto linií bude dále použit jako zdrojová databáze pro automatické programy *MeteorMaster* (automatický program pro vyhodnocení emisních spekter meteorů) a *Ablator* (automatický program pro vyhodnocení ablačních spekter meteoritů) současně vyvíjené na pracovišti oddělení Laserové spektroskopie na Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského Akademie věd České republiky, v.v.i. Pomocí těchto programů, společně s využitím nově vytvořené databáze, bude metodou CF-LIBS vypočteno zastoupení základních prvků v meteoritu Porangaba. Jako referenční analýza pro metodu CF-LIBS bude sloužit komplexní analýza meteoritu Porangaba, která byla provedena pomocí metody elektronové mikroskopie a rentgenové mikroanalýzy (SEM EDS/WDS) v Laboratoři rentgenové mikroanalýzy na pracovišti na České geologické službě v Praze. Výše uvedená databáze bude dále použita ke kvalitativnímu i kvantitativnímu vyhodnocení spektra bolidu, jehož pád i emisní spektrum byly zaznamenány 8.4.2018 kamerovou sítí CEMeNt (Lenžová, 2017) v oblasti nad jižním Maďarskem.

2. Teoretická část

(Rubin and Grossman, 2010) se ve své publikaci snaží vytyčit hranice pro klasifikaci objektů meziplanetární hmoty na základě jejich velikostí. Podle jejich definice jsou meteoroidy tělesa o velikosti 10 μm až 1 m pohybující se v meziplanetárním prostoru, která mohou být jak primárními objekty, vytvořenými akrecí prachových částic, tak objekty odvozenými fragmentací z větších těles. Asteroidy jsou na rozdíl od meteoroidů objekty, které by měly mít takovou velikost, aby byly ze Země pozorovatelné kosmickými dalekohledy a bylo možné určit jejich oběžnou dráhu. Nicméně, přesná definitorická hranice mezi těmito dvěma skupinami prakticky neexistuje. Ve většině případů však za asteroidy považujeme tělesa o velikosti desítek metrů až stovek kilometrů v průměru. Pokud je velikost objektu menší než 10 μm , tak se podle výše citované studie jedná o mikrometeority až také meziplanetární a mezihvězdný prach.

2.1. Meteory a meteority

Pokud se těleso meziplanetární hmoty přiblíží k Zemi natolik, že při svém průletu začne interagovat se zemskou atmosférou, začne docházet vlivem tření o molekuly vzduchu k vypařování hmoty tělesa a k tvorbě plazmatu. Tento atmosférický jev se nazývá meteor a samotné těleso meteoroid. Jako meteor lze obecně definovat jakýkoli světelný úkaz v atmosféře, například blesk. Nicméně v této práci je meteorem myšlen průvodní jev vstupu tělesa meziplanetární hmoty do zemské atmosféry.

Většina meteoroidů se při průletu zemskou atmosférou zcela vypaří. Pokud je však meteoroid dosti veliký a nevypaří se v atmosféře, jeho reziduum dopadne na zemský povrch. Meteoritem potom nazýváme reziduum meziplanetární hmoty, které přežilo průlet zemskou atmosférou a fyzicky dopadlo na zemský povrch.

2.2. Původ meteoritů

I přes široké spektrum prozatím známých druhů meteoritů lze hypoteticky dohledat nejen společný původ jich všech samotných, ale také původ planet, jejich měsíců, či dokonce samotného Slunce.

Již v roce 1734 navrhl švédský vědec Emanuel Swedenborg mlhovinovou hypotézu

(Swedenborg, 1734), podle které (nejen) Sluneční soustava vznikla kondenzací plynů a prachu z mračen, které zde byly pozůstatkem výbuchu předchozích (supernov). Podle radiometrické analýzy primitivních meteoritů (Bouvier and Wadhwa, 2010) je stáří Sluneční soustavy odhadováno na 4,568 miliardy let. Přibližně v tomto období pravděpodobně došlo ke gravitačnímu kolapsu mlhoviny a vznikla oblast zrodu nových hvězd (tzv. *Star Forming Region*, hvězdná porodnice). Jednou z rodících se stálic bylo i Protoslunce obklopené rotujícím diskem plynů a prachu, nazývaným protoplanetární disk. Právě v něm se se začaly srážet prachové částice, které se postupně mohly kumulovat do větších těles. Postupnou akrecí tak vznikaly planetesimály, které se vzájemnými srážkami mohly buďto roztržít na menší tělesa, nebo se mohly naopak dále kumulovat do větších těles. Přesný průběh formování soustavy však není zcela znám. Existuje řada publikací například: (Montmerle et al., 2006; Raymond et al., 2006), které uvádějí hned několik různých hypotéz, jak mohly různé etapy formování Sluneční soustavy probíhat.

Primitivní tělesa, jež vznikla akrecí původní hmoty protoplanetárního disku a která přežila dodnes, nazýváme jako tělesa nediferenciovaná a jedná se o mateřská tělesa chondritů.

Při vzájemné akreci planetesimál začaly vznikat protoplanety, které se při dosažení určité velikosti díky vlastní gravitaci začaly formovat v objekty mající dostatečnou hmotnost, aby jejich vlastní gravitace překonala vnitřní síly pevného tělesa, takže dosáhly tvaru odpovídajícího hydrostatické rovnováze (přibližně kulatého). Vlivem několika faktorů, jako například kinetická energie dopadajících těles, či rozpad krátce žijících radioaktivních isotopů, především ^{26}Al , a opět vlivem vlastní gravitace, začalo docházet k diferenciaci hmoty. Tyto faktory pravděpodobně zapříčinily ohřev protoplanety a tavení původního chondritického materiálu. Vlivem vlastní gravitace poté došlo k hmotnostní separaci tak, že těžší materie (Fe-Ni) začala klesat směrem ke středu tělesa, a naopak lehčí horniny a minerály (silikáty) stoupaly směrem nahoru od středu. Tímto došlo k diferenciaci tělesa a vzniku planet, měsíců a asteroidů s kovovými jádry, kůrou a pláštěm.

Ne všechna diferenciovaná tělesa přežila dodnes. Diferenciovaná tělesa, která se během kolize s jinými tělesy roztržila, se stala zdrojem diferenciovaných meteoroidů neboli achondritů. V tomto případě hovoříme o asteroidálních achondritech. Dále lze hovořit také o planetárních achondritických meteoritech. Ty nalezené na Zemi vznikají impaktem jiného tělesa nejčastěji na povrch Měsíce či Marsu. Vlivem impaktu dojde k refluxu kousků vrchní vrstvy tělesa do meziplanetárního prostoru.

2.3. Meteory

Pokud se objekt meziplanetární hmoty dostane do gravitačního působení Země a následně tak vstoupí i do její atmosféry velmi vysokou rychlostí řádově od několika km/s až po desítky km/s. Vlivem tření o molekuly vzduchu k zahřátí povrchu na teplotu zhruba 3000-6000 K (Jenninskens et al., 2004). Těleso začíná praskat a většinou dochází k jeho fragmentaci. Vlivem zahřívání poté dochází k postupnému odpařování materiálu, jeho následné atomizaci a ionizaci, což vede k tvorbě plazmatu. Toto plazma vytváří charakteristickou viditelnou světelnou stopu, kterou nazýváme meteor. Pokud má meteor jasnost 4 magnitudy a více, jedná se o bolid. Atomy, či ionty daného prvku se v plazmatu vyskytují v energeticky excitovaných stavech. Při zpětném přechodu na nižší energetickou hladinu poté dochází k emisi záření, jehož spektrum nese kvalitativní i kvantitativní informaci o zastoupení prvků přítomných v objektu (Shrbený, 2009; Váňa, 2017).

To, v jaké výšce začne docházet k těmto procesům, závisí na několika parametrech. Jedná se především o geocentrickou rychlost, což je rychlost, se kterou se dané těleso pohybuje vzhledem ke středu Země. Dalším parametrem je vstupní hmotnost, se kterou toto těleso vstupuje do zemské atmosféry. Třetím významným parametrem je zenitální úhel, pod kterým těleso vstupuje do atmosféry. Například pro známé meteorické roje s retrográdní dráhou, jako jsou například Perseidy, či Orionidy nebo sporadické meteoroidy pohybující se vysokou geocentrickou rychlostí (80-100 km/s) platí to, že jejich viditelná fáze průletu atmosférou je ve 120-100 km nad zemským povrchem. Naopak sporadické meteoroidy a meteorické roje s nízkou geocentrickou rychlostí, jako jsou například Drakonidy, mají iniciační výšku kolem 80-90 km nad zemským povrchem.

Speciálním případem meteorů jsou tečné meteoroidy či bolidy, česky slangově „lízači“ Země (angl. Earth-Grazers). Jedná se o objekty, které do zemské atmosféry vstupují pod velmi nízkým úhlem a při vhodné kombinaci geocentrické rychlosti a hmotnosti se objekt při průletu atmosférou ne zcela vypaří a následně opustí atmosféru a pokračuje v pohybu meziplanetárním prostorem po nové trajektorii (Váňa, 2017).

Pokud mělo těleso dostatečně velikou hmotnost, tak ve 30 km nad zemským povrchem má již velmi malou rychlost, a proto již nedochází k výše zmíněné světelné fázi. Těleso se poté pohybuje po tzv. temné dráze. To, zda těleso přežije pád a dopadne na zemský povrch, závisí v neposlední řadě také na materiálu tohoto tělesa. Každý materiál má svou mez pevnosti, která je dána dynamickým tlakem p :

$$p \cong \frac{1}{2} C \rho_v v^2 \quad (1)$$

kde C je součinitel odporu tělesa, ρ_v je hustota vzduchu a v je rychlost tělesa. Pokud dojde k překročení této meze, tak dochází k fragmentaci tělesa. Například mez pevnosti chondritu je 3 MPa, zatímco mez pevnosti železa je 100 MPa. Z tohoto důvodu vyplývá, že železné meteority mají větší šanci “přežít“ průlet atmosférou a dopadnout na zemský povrch než meteority kamenné.



Obrázek č.1: CCTV kamera pro pozorování meteorů naistalována na Hvězdárně ve valašském Meziříčí. Kamera je vybavená i disperzním prvkem pro pozorování a měření emisních spekter meteorů.

Meteoroid většinou průlet atmosférou nepřežije a vypaří se dříve, nežli dosáhne zemského povrchu. Jedinou možností, jak zjistit alespoň prvkové složení padajícího objektu spočívá ve spektrografickém záznamu meteoru. V dnešní době se dynamicky rozvíjí objektivní pozorování pádů meteorů pomocí kamerových sítí, využívajících vysoce citlivých CCTV kamer se specializovaným softwarem, které dokáží zaznamenat trajektorii pádu objektu. Díky znalosti parametrů trajektorie padajícího objektu je možné vypočítat jeho dráhu ve Sluneční soustavě, či dokonce přímo určit jeho mateřské těleso. Spektrografické kamery jsou dokonce schopny zaznamenat emisní spektrum meteoru, díky čemuž je možné provést prvkovou analýzu objektů, které zcela shoří v atmosféře a není tedy možné je analyzovat

laboratorně. Tím se razantně zvyšuje počet chemicky analyzovaných objektů meziplanetární hmoty. Tyto komplexní informace jsou v současné době dostupné v mezinárodní databázi EDMOND (European viDeo MeteOr Network Database) (Kornoš et al., 2013). Na základě poměrů koncentrací prvků, především Na, Mg, Fe, Ca, Al, vyskytujících se ve vzorku, lze poté meteorit/meteor klasifikovat do specifické skupiny (Nittler et al., 2004).

Kvalita naměřených spekter a následná prvková analýza, jsou momentálně limitovány rozlišením spektrální kamery. Zatímco při laboratorních ablacích je používán vysoce rozlišený *Echelle* spektrograf, který pořizuje vysoce rozlišená emisní spektra, tak spektra naměřená kamerou, mají nízké rozlišení, a tudíž je v těchto případech prvková analýza zatížena větší chybou.

2.4. Studium meteoritů

V současné době existuje široké spektrum vlastností, jež jsou předmětem studia meteoritů. Jedná se především o jejich celkové chemické složení, mineralogii, petrografii, určení isotopové kompozice kyslíku či určení stáří samotného meteoritu.

2.4.1. Chemie meteoritů

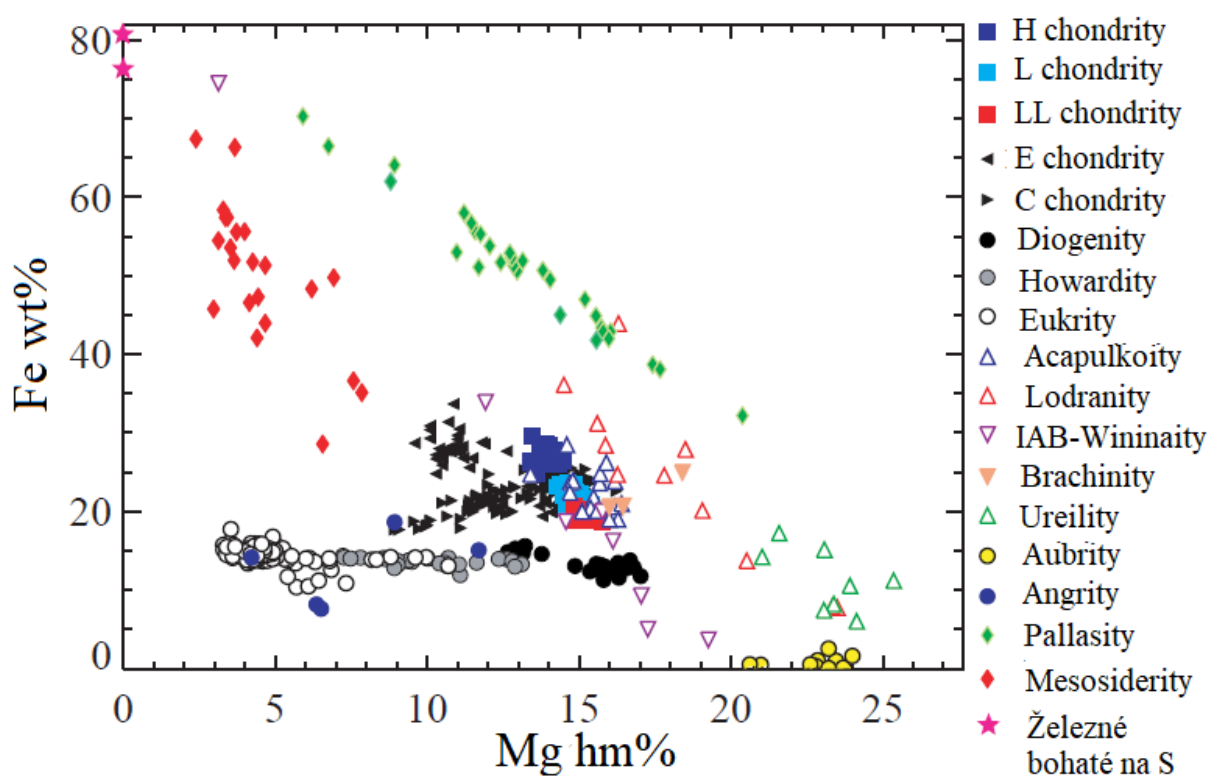
Pod pojmem chemického složení meteoritů je většinou myšleno celkové průměrné zastoupení jednotlivých prvků (*Bulk elemental composition*) (Nittler et al., 2004b), popřípadě jejich oxidační stupeň, ale také se může jednat o obsah sloučenin, jako je například voda či široké spektrum organických sloučenin vyskytujících se v uhlíkatých chondritech (Pizzarello and Shock, 2017).

V meteoritech lze teoreticky nalézt všech 92 přírodních prvků, nicméně k nejvíce signifikantním prvkům patří především Fe, Mg, Si a O. Dále lze mezi významné prvky také zařadit Al, Ca, Na, Cr, Mn a Co. Prvky v meteoritech rozlišujeme podle Goldschmidtovi klasifikace prvků (Goldschmidt, 1937) na prvky litofilní (např. Al, Ca, Cr, K, Mg, Na, P, Si, Ti atd.), které mají vysokou afinitu ke kyslíku a s ním tvoří převážně silikáty a oxidy, chalkofilní (Ag, Au, As, Cd, Cu, Ga, Ge, Pb, Sb, Se, Sn), které mají vysokou afinitu k síře a s ní tvoří sulfidy a prvky siderofilní (Ag, Co, Ir, Mo, Ni, Os, Pa, Pt, Re, Rh, Ru, Ge a W), které mají vysokou afinitu k železu a tvoří s ním tuhý roztok (slitiny).

V případě diferenciovaných těles se litofilní a chalkofilní prvky vyskytují převážně ve vnější

části tělesa a prvky siderofilní se poté převážně vyskytují ve Fe-Ni kovovém jádře.

Dále rozlišujeme prvky podle jejich kondenzační teploty, a to na prvky volatilní (těkavé), středně volatilní a žáruvzdorné (refrakterní). K volatilním složkám se řadí jednak prvky, a to především H, He, N, Ar, Ne atd. a také nízkomolekulární sloučeniny, jako jsou například H_2O , NH_3 , CO_2 . Podle (Mcsween Jr, 2010) jsou středně volatilní a refrakterní prvky rozlišeny na základě jejich 50% kondenzační teploty. Jedná se o teplotu, při níž poloviční množství daného prvku již zkondenzovalo a poloviční množství daného prvku je stále v plynné fázi. Za středně volatilní prvky jsou považovány prvky s 50% kondenzační teplotou ležící mezi 640-1300 K (Mcsween Jr, 2010). Do této skupiny patří například prvky jako Na, P, K, Cr, Cu atd. Refrakterní prvky mají poté hodnotu této teploty vyšší jak chrom (1598 K) a patří mezi ně například Al, Ca, Ti, V, Ni, Ru atd. Na základě poměru koncentrací prvků obsažených ve vzorku, lze meteority klasifikovat do specifických meteoritických skupin.



Obrázek č.2: Graf závislosti celkového obsahu Fe na celkovém obsahu Mg pro různé meteoritické skupiny. Koncentrace jsou uvedeny v hmotnostních procentech. Převzato a upraveno z (Nittler et al., 2004).

Vzhledem k tomu, že je mnohdy složité a pracné stanovit absolutní koncentraci prvku v meteoritu, a to obzvláště při analýze metodou CF LIBS, udávají se jako výsledky pouze

relativní koncentrace prvků, které se většinou vztahují ke koncentraci hořčíku, jež je zvolena jako jednotková.

Nejvhodnějším meteoritem pro vzájemné porovnávání, je uhlíkatý chondrit CI, u něhož se předpokládá, že jeho prvkové složení je totožné (až na vysoce volatilní složky jako H, He atd.) se složením Sluneční fotosféry. V praxi se poté při rozlišování jednotlivých tříd meteoritů, uvádí hodnota Mg-normalizovaných litofilních, chalkofilních či siderofilních prvků vztažená k těmto hodnotám v chondritu CI.

Chemické složení meteoritu nám může poskytnout řadu informací o mateřském tělese meteoritu, a to především o jeho původu. Například vzhledem k předpokladu existence teplotního gradientu v protoplanetárním disku (Kamp and Dullemond, 2004), docházelo vlivem různé teploty v různých částech disku ke kondenzaci různých prvků a sloučenin. Jinými slovy, zastoupení méně volatilních prvků v kondenzátu rostlo se snižující se teplotou, která korelovala se vzrůstající vzdáleností od Slunce. Volatilní složky, které blíže ke Slunci nemohly díky vysoké teplotě zkondenzovat, byly postupně odfouknuty solárními větry. Naopak ve větší vzdálenosti od Slunce byla tak nízká teplota, že zde mohly zkondenzovat i volatilní složky, a to včetně vody. Právě voda v mnoha případech stála za oxidativními reakcemi, které v mnoha případech pravděpodobně vedly ke změně chemického (např. oxidace železa) či minerálního (např. změna olivínu na fylosilikáty) složení. Právě díky výše zmíněným skutečnostem vznikl ve Sluneční soustavě chemický gradient (Palme, 2000), podle kterého se s největší pravděpodobností nejblíže Slunci vyskytují mateřská tělesa vysoce redukovaných enstatických chondritů, poté oxidovanějších obyčejných chondritů a nejdále od Slunce se vyskytují mateřská tělesa uhlíkatých chondritů. Řada dřívějších studií (DeMeo et al., 2009; Gradie and Tedesco., 1982) svými výsledky tuto hypotézu potvrzuje a to na základě měření reflektančních spekter asteroidů, která prokázala, že se mateřská tělesa obyčejných chondritů vyskytují obecně blíže Slunci, než je tomu u mateřských těles uhlíkatých chondritů. Dalším příkladem chemického gradientu může být například obecně známý fakt, že na Marsu je vyšší oxidační prostředí, jak na Zemi.

2.4.2. Mineralogie meteoritů

Podle (Rubin and Ma, 2017) bylo v meteoritech doposud identifikováno kolem 435 minerálů. Jedná se o přirozené prvky, kovy, kovové slitiny, karbidy, nitridy, oxynitridy, fosfidy, silicidy, sulfidy, hydroxysulfidy, teluridy, arsenidy, sulfarsenidy, halogenidy, oxidy,

hydroxidy, uhličitany, sírany, molybdáty, fosfáty, silikofosfáty, oxaláty a křemičitany všech šesti strukturních skupin.

Mineralogie meteoritů není stálá, ale mění vlivem dějů, kterými mateřské těleso meteoroidu v minulosti prošlo. Původní minerály, které vznikly převážně přímou kondenzací ze solární mlhoviny v raných fázích vývoje Sluneční soustavy, lze dodnes pozorovat v chondritech. Jedná se především o minerály přítomné vrefrakterních inkluzích bohatých na vápník a hliník CAI a AOA, které lze najít v primitivních uhlíkatých chondritech, či minerály přítomné v samotných chondrulích, jež jsou součástí většiny chondritů. Tyto původní minerály však mohou být například alterovány vodou, či mohou být přeměněny v důsledku tepelných procesů probíhajících v mateřských tělesech. Na základě odlišností v mineralogii a textuře meteoritů, zavedl (Van Schmus and Wood, 1967) petrologické klasifikační schéma chondritů.

Pokud mateřské těleso meteoroidu projde tavením a následnou diferenciací hmoty, dojde nejen k separaci hmoty na základě její rozdílné hustoty, ale také k promísení jednotlivých minerálů, čímž dojde k tvorbě hornin, jako jsou například bazalty, gabra, pluton atd.

Mezi nejvýznamnější minerály vyskytující se v meteoritech patří především olivín, pyroxeny, plagioklasy, chromit, troilit, minerální sklo, či minerály vyskytující se v Fe-Ni (kamacit, taenit).

2.4. Klasifikace meteoritů

Jako první se pokusil klasifikovat meteority rakouský mineralog Gustav Rose (1864), který na základě mikroskopického pozorování meteoritů tehdejší sbírky v Berlínském univerzitním muzeu, rozdělil kamenné meteority na chondrity a ne-chondrity. Zhruba ve stejné době britský geolog Nevil S. Maskelyne studoval sbírku meteoritů v Britském muzeu a ty následně rozdělil na meteority kamenné (aerolity), železnokamenné (siderity) a železné (siderolity). První klasifikaci meteoritů na základě chemického složení poté provedl Farrington (1907). Na základě předešlých schémat, vyvinul britský mineralog G.T. Prior (1920) klasifikační schéma, které začalo používat názvy jako lodranity, či mesosiderity. Priorovo schéma se stalo základním kamenem pro současnou klasifikaci meteoritů.

Klasifikace meteoritů je široce založena na jejich mineralogických a petrologických charakteristikách a na jejich celkovém průměrné chemickém složení a variaci isotopové kompozice kyslíku. Podle současného schématu pro klasifikaci meteoritů (Weisberg et al.,

2006) se meteority dělí na chondrity, primitivní achondrity a achondrity. Chondrity představují tělesa primitivního akretovaného materiálu, který mohl projít určitou tepelnou metamorfózou, ale nikdy neprošel celkovým tavením a diferenciací hmoty tak, jako achondrity. Primitivní achondrity poté nejspíše představují jakýsi mezistupeň přeměny mezi chondrity a achondrity. Jejich texturální vlastnosti odpovídají spíše achondritům, avšak jejich chemické složení má blíže chondritům (Mcsween Jr, 2010; Weisberg et al., 2006).

Chondrity se dělí do třech tříd a ty dále celkem do 15 skupin. Jedná se o třídu uhlíkatých chondritů (C), která obsahuje 8 skupin (CI, CM, CO, CV, CK, CR, CH, CB), třídu obyčejných chondritů (O), která obsahuje 3 skupiny (H, L, LL), třídu enstatických chondritů (E), která obsahuje 2 skupiny (EH, EL) a na skupiny R a K, které nejsou klasifikovány v žádné třídě. Dále také existuje řada chondritů, které nejsou přiřazeny do žádné skupiny. U každé chondritické skupiny se uvažuje, že pochází z jednoho mateřského tělesa. Některé chondritické skupiny jsou na základě chemických a mineralogických podobností zařazeny do klanů. Klany poté odpovídají společenstvu meteoritů s velice podobnými vlastnostmi, které sice nemusejí pocházet z jednoho tělesa, ale mají původ ve stejné oblasti solární mlhoviny.

Primitivní achondrity se dělí na ureility, acapulcoity, lodranity, winonaity a silikátové inkluze v IAB a IICD železných meteoritech.

Achondrity se dělí na asteroidální skupiny: angrity, aubrity, howardity, eukrity, diogenity, mesosiderity, 3 skupiny palasitů, 15 skupin a mnoho dalších nezařazených železných meteoritů. Dále mezi achondrity patří planetární meteority, například měsíční, či marťanské. Jedná se materiál, který byl při impaktu cizího tělesa s povrchem Marsu, či Měsíce vymrštěn do meziplanetárního prostoru a následně transportován až k Zemi.

2.5.1. Fresh a find meteority

Další možností, jak od sebe vzájemně rozlišit meteority, je mimo výše zmíněné čtveřice kritérií (viz. 2.3.1.) fakt, zda byly meteority pouze nalezeny (v angl. *finds*), a to bez jakéhokoli dříve pozorovaného pádu, nebo zda byl přímo pozorován jejich pád (v angl. *falls*) a na základě místa dopadení byly poté meteority nalezeny (Weisberg et al., 2006). V případě pozorovaných pádů lze uvést například meteoroid a meteorit Čeljabinsk (Челябинский метеороид – метеорит). Úlomky tělesa dopadly 15.2.2013 nedaleko sibiřského města

Čeljabinsk. Podobně možná méně známým, ale zajímavým meteoritem je Porangaba, který 9.1. 2015 dopadl nedaleko brazilské metropole São Paulo. Díky spolupráci brazilských astronomů s Hvězdárnou ve Valašském Meziříčí byl vzorek Porangaby analyzován v naší laboratoři coby partnerské instituci. Obrovský význam *fresh* meteoritů pro jakoukoliv analýzu spočívá v tom, že je známa přesná doba pobytu meteoritu v zemském prostředí. Tu je dobré znát z toho důvodu, že meteorit je v zemském prostředí vystaven kyslíkové atmosféře, která může částečně měnit jeho chemické složení a přírodním živlům, které mohou způsobit jeho zvětrávání. V opačném případě a současně v drtivé většině případů, nacházíme meteority, které v zemském prostředí již strávily značnou dobu.

Klasifikace meteoritů je podrobně rozpracována v Příloze XX této práce, str. XX.

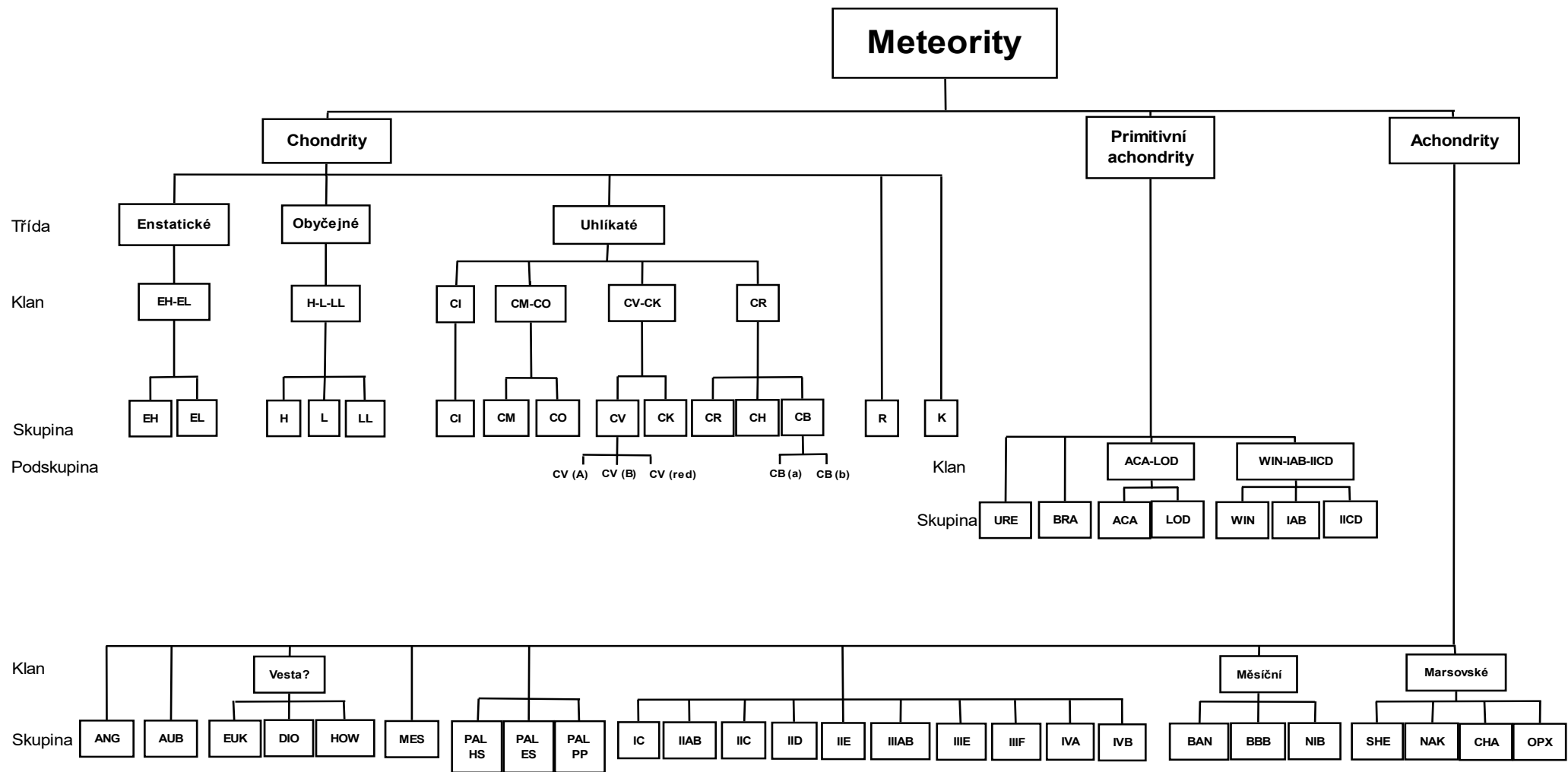
2.5. Metody používané při studiu meteoritů

Pro prvkovou analýzu meteoritů lze využít řadu dalších metod, jako například neutronovou aktivační analýzu (Haloda et al., 2009; Shinotsuka and Ebihara, 1997). Ta je navíc vhodná pro analýzu těžkých stopových prvků, kterými jsou například thorium, či uran (Shinotsuka and Ebihara, 1997). Další metodou může být například Mosbauerova spektroskopie (Abdu and Ericsson, 1997), rentgenová fluorescenční spektroskopie (Rieder and Economou, 1997) a nebo bezkalibrační metoda spektroskopie laserem buzeného plazmatu (Horňáčková et al., 2014). Právě tato metoda je svým principem, kterým je generace plazmatu reprezentujícího složení meteoritu, vhodná ke komparaci spektrografie meteorů.

Mineralogie meteoritu může být také mimo výše uvedené SEM EDS/WDS analýzy studována například rentgenovou difrakcí (Nakamura et al., 2001).

Dalším významným předmětem studia meteoritů je jejich isotopická analýza. Může se jednat například o analýzu isotopového zastoupení kyslíku (Clayton and Mayeda, 1991, 1996; Franchi et al., 1999) (viz. 2.2.3.), která může sloužit pro usnadnění klasifikace meteoritů. Dále pak lze isotopové analýzy využít při radiometrickém určování stáří meteoritu na základě poměru množství mateřských a jejich dceřiných nuklidů (např. $^{206}\text{Pb}/^{238}\text{U}$ a $^{207}\text{Pb}/^{235}\text{U}$). Dalšími předměty tohoto studia mohou být plynné isotopy, například ^{40}Ar a ^{129}Ne vznikající přirozeným rozpadem radionuklidů ^{40}K a ^{129}I . Plynné isotopy jsou normálně sorbovány v meteoritu, avšak pokud těleso prodělá nějaký tepelný šok, například vlivem impaktu, dochází v důsledku ohřátí tělesa k úniku vysoce volatilních složek, a to včetně plyných isotopů. Na základě množství těchto isotopů lze zjistit, před

jakou dobou těleso prodělalo impakt (Bridges et al., 2007). Pro analýzu isotopického složení se používá technika hmotnostní spektrometrie, jež umí vzájemně rozlišit jednotlivé isotopy. Mezi významné analytické techniky studia meteoritů lze také zařadit chromatografické techniky. Ty slouží především k chemické analýze složitých organických sloučenin, jež byly nalezeny v uhlíkatých chondritech (Hayatsu et al., 1977). Jako příklad lze uvést studie (Gelpi and Oro, 1970; Sephton, 2002), ve kterých autoři používají pro analýzu organických sloučenin v uhlíkatých chondritech metodu plynové chromatografie s hmotnostní detekcí (GC-MS). Podařilo se tak například prokázat, že celá řada uhlíkových chondritů obsahuje základní stavební kameny živých soustav (Callahan et al., 2011) a že například nukleové báze detekované v Murchinsonském meteoritu jsou prokazatelně mimozemského původu (Martins et al., 2008).



Obrázek č.3: Klasifikační schéma meteoritů podle (Weisberg et al., 2006). Seznam zkratk: URE – Ureility, BRA – Brachinity, ACA – Akapulkoity, LOD – Lodranity, WIN – Winonaity, ANG – Angrity, AUB – Aubrity, EUK – Eukrity, DIO – Diogenity, MES – Mesosiderity, PAL – Pallasity (HS – hlavní skupiny, ES – Eigel Station, PP – pyroxenové), BAN – Brekciové anortozity, BBB – Bazalty a brekciové bazalty, NIB – Noritické impaktem tavené brekcie, SHE – Shergottity, NAK – Nakhlyty, CHA – Chassignity, OPX – Ortopyroxenity

2.6.1. Elektronová mikroskopie a rentgenová mikroanalýza

Jednou z metod hojně využívaných pro komplexní chemické, mineralogické a petrografické studium meteoritů, je spojení elektronové mikroskopie s prvkovou mikroanalýzou. Při této metodě je nabroušena malá plocha meteoritu, která může být pro zlepšení přesnosti analýzy a zobrazení následně pokryta tenkou vrstvou uhlíku či pokovena. Důvodem je zajištění vodivosti studované plochy materiálu, aby se předešlo nabití povrchu negativním nábojem z proudu elektronů. Elektronový skenovací mikroskop (SEM) ozařuje povrch vzorku svazkem urychlených elektronů. Interakcí takto urychlených elektronů dochází k vyrazení sekundárních elektronů z atomů vzorku a vyzáření rentgenového (RTG) záření. Společně se sekundárními elektrony a RTG zářením, dochází ke zpětnému odrazu části dopadajících elektronů. Sekundární elektrony jsou následně detegovány a na základě jejich energie je vytvořen obraz studovaného povrchu. RTG záření je snímáno energeticky disperzním (EDS) a vlnově disperzním (WDS) analyzátozem. Skenovací mikroskop postupně po řádcích snímá studovanou oblast. Na základě údajů spektrální analýzy RTG záření a obrazu studované plochy jsou pomocí softwaru vytvořeny distribuční mapy jednotlivých prvků. Dále jsou vytvořeny snímky zpětně odražených elektronů (Electron Back Scattering Diffraction, EBSD). Na základě rozdílné difrakce zpětně odražených elektronů, lze na snímku od sebe rozlišit různé krystalografické struktury. Díky této informaci a elementárním distribučním mapám lze zjistit, které minerály jsou ve studované ploše přítomny a jaké je jejich přesné složení. Na závěr je vygenerována fázová distribuční mapa jednotlivých minerálů. Měření musí probíhat za vakua.

Na základě výsledků ze SEM EDS/WDS analýzy lze v případě, že se jedná o chondrit, mimo prvkového a mineralogického složení meteoritu určit i jeho petrologický typ. Na základě charakteristik jednotlivých petrologických typů chondritů, lze diskutovat tepelnou historii mateřského tělesa meteoritu (Trieloff et al., 2003). Existuje řada studií zkoumající meteority výše uvedenou metodou. Jedná se například o studie (Borovicka, 1993; Haloda et al., 2009; Short and Andersen, 1965).

2.7. Spektroskopie laserem buzeného plazmatu

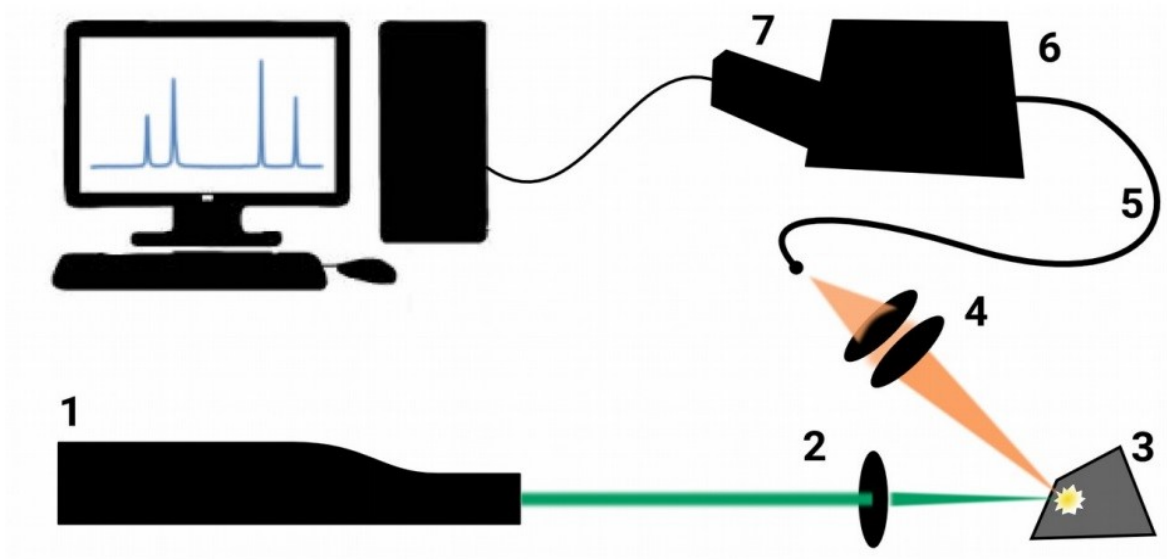
Spektroskopie laserem indukovaného průrazu (**L**aser-**I**nduced **B**reakdown **S**pectroscopy, LIBS) nebo také spektroskopie laserem buzeného plazmatu (**L**aser-**I**nduced **P**lasma **S**pectroscopy, LIPS) je moderní dynamicky se rozvíjející analytická technika emisní

spektroskopie. Základním principem je sběr a interpretace elektronických emisních spekter laserem generovaného plazmatu.

Na povrch vzorku je pomocí zaostřovací optiky fokusován paprsek pulsního laseru, který ablatuje vzorek v místě nástřelu, tj. povrch vzorku je zahříván, odpařován, atomizován a z části ionizován. Polychromatické záření emitované plazmatem je následně pomocí kolimátoru fokusováno a vedeno optickým kabelem do Echelle spektrometru, kde je pomocí dvouprvkového disperzního *Echellet* systému, rozloženo do dvoudimenzionálního obrazce, který je snímán ICCD čipem. Získaný signál je následně převeden specifickým softwarem na spektrum.

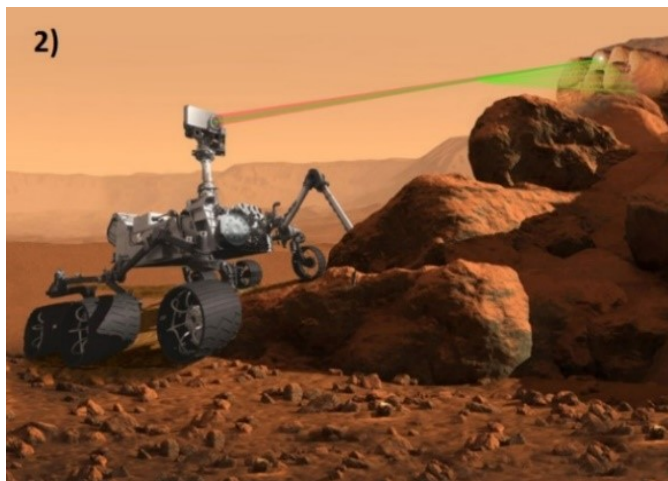
LIBS má oproti jiným spektrometrickým technikám řadu výhod i nevýhod. Asi nevýznamnější výhodou je absence jakýchkoli preanalytických úprav vzorku například: leštění, mletí, rozpouštění atd. V případě laboratorní analýzy pevného vzorku (horniny, meteoritu atd.) lze uvažovat pouze případnou úpravu velikosti. Díky tomu je ušetřena spousta času jinak stráveného preanalytickou přípravou vzorku. Za další výhodu lze považovat minimální destrukci vzorku během analýzy, jelikož při ablaci dochází k odpaření řádově pouze ng- μ g vzorku. Výhodou je také výše zmíněná celkem jednoduchá instrumentace (viz. obrázek 4), kdy k vytvoření měřicí aparatury je za potřebí: pulsní laser, zaostřovací a sběrná optika, optický kabel, spektrometr s detektorem, generátor pro časování laserových pulsů tzv. *trigger* a zařízení pro zobrazování a vyhodnocování spekter (PC).

Ablace vzorku může probíhat na vzduchu za atmosférického tlaku, ve vakuu, pod vodou, dokonce i za extrémních podmínek jako je vysoká teplota či tlak. Vzhledem k jednoduchosti LIBS aparatur je možná výroba kompaktních mobilních LIBS spektrometrů či spektrometrů s dálkovou detekcí.



Obrázek č.4: Základní LIBS instrumentace. 1) Pulsní laser, 2) Zaostrovací optika, 3) Vzorek, 4) Sběrná optika, 5) Optické vlákno, 6) Spektrometr, 7) Detektor, Převzato z (Vítková, 2015)

V obou případech jsou tyto techniky vhodné pro analýzu in-situ, a to v reálném čase s možným využitím od jaderných elektráren až po vesmírný výzkum.



Obrázek č.5: 1) Ruční LIBS zařízení EOS 500 od firmy Bruker (<http://bruker.com>), 2) Dálkové LIBS zařízení jako součást plánované sondy Mars Rover 2020 (<https://mars.nasa.gov>)

Tuto metodu lze použít pro kvalitativní i kvantitativní prvkovou analýzu vzorku pevného, kapalného, ale i plynného skupenství. Dokonce je možné stanovit jedinou analýzou více prvků vedle sebe. Poloha atomárních čar ve spektru má kvalitativní údaj, jelikož každý prvek má své specifické emisní spektrum a její intenzita nese údaj kvantitativní. Nicméně při interpretaci spekter je důležité vzít v potaz možnost koincidence čar. Jedná se o čáry

vzájemně stejných i různých specie, které jsou situovány velmi blízko sebe. Existují rozsáhlé on-line databáze čar NIST (*National Institute of Standards and Technologies*) (Kramida et al., 2015b), díky kterým lze dané čáry ve spektru přiřadit, avšak někdy jsou linie v databázi tak blízko sebe, že je mnohdy těžké určit, které specie daná atomární čára patří. Pokud při přiřazování čar dojde k záměně, ať různého či stejného prvku, může dojít k vnesení hrubé chyby do vyhodnocení, čímž může dojít ke zkreslení výsledku a znehodnocení celé analýzy.

2.7.1. Samoabsorpce emisních linií

Asi největším problémem, co se emisních čar týče, je efekt samoabsorpce. Tento jev nastává v případě, že měřené plazma není dostatečně opticky tenké a záření, které je emitované excitovanými stavy uvnitř plazmové plumy, může být znovu absorbováno excitovanými stavy na okraji plumy. Tím dochází k poklesu intenzity emitovaného záření specií z vnitřní části plumy. Takovéto linie nabývají typický dvouhrbý tvar (Obr.13). Vedle problému s nižší intenzitou, která je následně zahrnuta ve výpočtech, lze také snadno takto samoabsorbovanou linii zaměnit za dvě sousedící linie, které jsou poté přiřazeny jiné specie.

2.7.2. Matriční efekt

Výsledky analýzy mohou být také zkresleny tzv. matričním efektem (E. Tognoni et al., 2010), kdy na základě specifických vlastností matrice jako jsou například rozdílné chemické vazby jednotlivých prvků v matrici, které mohou zapříčinit například nestechiometrickou ablaci daného prvku atd. Tento problém lze vyřešit použitím bezkalibrační metody laserem indukovaného průrazu CF-LIBS.

2.7.3. Původ emisní spekter

Při interakci pulsního laserového záření s povrchem vzorku, dochází k odparu části materiálu, jeho atomizaci a částečné ionizaci. Atomy, ionty, popřípadě i radikály, molekuly a molekulové ionty jsou přitom excitovány do stavů s vyšší elektronovou energií. Tyto stavy jsou však energeticky nevýhodné, a proto dochází po krátké chvíli k jejich deexcitaci. Při deexcitaci dochází k přechodu vybuzených elektronů na nižší energetickou hladinu. Elektron se při deexcitaci může zbavit své přebytečné energie několika způsoby mezi nimiž jsou obecně rozlišovány zářivé a nezářivé přechody. Z hlediska technik emisní spektroskopie jsou zajímavé pouze zářivé přechody.

Vzhledem k tomu, že energie elektronů i atomových orbitalů jsou kvantovány čili můžou

nabývat pouze určitých diskrétních energetických hodnot, tak danému spektrálnímu přechodu také náleží pouze určitá energie. Jinými slovy při zářivé deexcitaci elektronu z vyšší hladiny do nižší dojde k emisi fotonu, jehož energie odpovídá rozdílu hodnot energií daných hladin, mezi kterými došlo k přechodu:

$$\Delta E = E_i - E_j = h\nu_{ij} \quad (3)$$

kde E je energie emitovaného fotonu, E_j je energie vrchní hladiny, E_i je energie spodní hladiny, ν je frekvence emitovaného záření a h (hodnota) je Planckova konstanta. Z tohoto důvodu je daný přechod ve spektru charakterizován jako čára. Energetické hladiny, mezi nimiž dochází k přechodu, jsou jednoznačně spektroskopicky popsány jako tzv. termy. Term je definován kvantovými čísly charakterizujícími daný elektronový stav:

$$2S+1L_J$$

kde S je kvantové číslo celkového spinu, L je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti a J kvantové číslo celkového momentu hybnosti.

Vzhledem k tomu, že energie atomových orbitalů jsou pro každý prvek zcela unikátní, tak i hodnota kvanta energie vyzářeného při přechodu dvou stejně označených atomových orbitalů dvou různých prvků je různá. Pozice emisních čar proto odpovídají tomu, jaké specie jsou v plazmatu přítomny.

2.7.4. Intenzita emisní linie

Intenzita spektrální čáry nám poskytuje údaj o kvantitativním zastoupení dané specie ve vzorku. Je přímo úměrná pravděpodobnosti uskutečnění daného zářivého přechodu. Intenzita emisní spektrální čáry atomu při deexcitaci ze stavu i do stavu j je dána vztahem:

$$I(\nu) = \frac{c_s A_{ij} g_i h \nu_{ij}}{4\pi Q_s(T)} \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \quad (4)$$

kde I intenzita emisní čáry, c_s je koncentrace dané specie, A_{ij} Einsteinův koeficient spontánní emise ze stavu i do stavu j , g_i je stupeň degenerace stavu i , h je Planckova konstanta, ν_{ij} je frekvence emitovaného záření, $Q_s(T)$ je partiční funkce dané specie za teploty T , E_i je energie horní energetického stavu j , T je excitační teplota a k_B je Boltzmannova konstanta.

Einsteinův koeficient spontánní emise má význam pravděpodobnosti daného přechodu za

jednotku času. Pokud částici excitujeme do vyšší energetické hladiny i , tak po čase t určitá část částic deexcituje a přejde do nižšího energetického stavu j . Změnu populace výše excitovaných částic lze popsat rovnicí pro kinetiku prvního řádu:

$$\frac{dN}{dt} = -N \cdot A_{ij} \quad (5)$$

kde N je populace částic excitovaných do vyššího stavu, t je čas a A_{ij} je pravděpodobnost přechodu atomu z excitovaného stavu i do stavu j . Za předpokladu, že částice může deexcitovat různými přechody, z nichž některé mohou být i nezářivé, je nutné upravit předešlý vztah:

$$\frac{dN}{dt} = -N \cdot \sum_k w_{ijk} \quad (6)$$

kde w_{ijk} je rychlostní konstanta přechodu částice mezi stavy, přičemž zohledňuje k způsobů, kterými může dojít k deexcitaci vrchního stavu.

Rychlostní konstantu deexcitace vrchního stavu lze tedy psát jako:

$$w_{ijk} = \sum_k A_{ij} g_{ijk} + \sum_q k_q n_q \quad (7)$$

kde $A_{ij} g_{ijk}$ jsou rychlostní konstanty spontánní emise, k_q je rychlostní konstanta popisující kolize se specií q , která způsobuje vyhasínání a n_q je hustota dané specie q . V bezkolizním prostředí lze člen $\sum_q k_q n_q$ zanedbat.

Rychlostní konstanta je nepřímo úměrná době života energetické hladiny τ :

$$\tau = \frac{1}{\sum_k w_{ijk}} \quad (8)$$

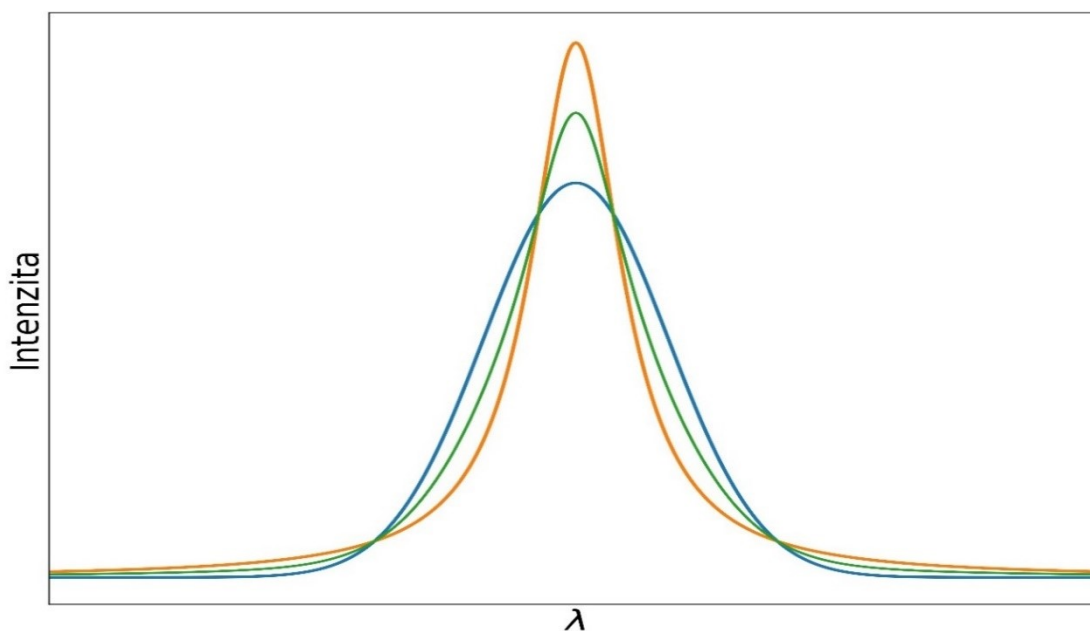
2.7.5. Šířka emisní linie

Přirozená šířka čáry je dána relací neurčitosti mezi energií a časem:

$$\Delta E \cdot \Delta t \geq \hbar \quad (9)$$

kde ΔE je neurčitost energie, Δt je časová neurčitost a \hbar je redukovaná Planckova konstanta. Z tohoto vztahu vyplývá, že čím delší dobu bude trvat deexcitační přechod, tím užší bude daná čára a naopak. Takováto čára má lorentzovský profil.

V reálných systémech jsou však spektrální čáry rozšiřovány vlivem několika jevů. Jedním z nich je neustálý chaotický tepelný pohyb částic, o němž vypovídá Dopplerovo rozšíření. Dopplerovsky rozšiřované spektrální čáry se vyznačují Gaussovským profilem.



Obrázek č.6: Názorná ukázka profilů spektrálních čar. Modrou barvou je znázorněn gaussovský, oranžovou lorentzovský a zelenou barvou Voightův profil emisní linie. Z uvedených profilů je patrné, že Voightův profil je konvolucí gaussovského a lorentzovského profilu čáry. Převzato od Petra Kubelíka.

Důležitým předpokladem pro úspěšnost chemické analýzy pomocí techniky LIBS je znalost dějů probíhajících při interakci laserového záření se vzorkem.

Jelikož je laserové plazma většinou hustě ionizováno, je nezanedbatelným fyzikálním jevem kolizní interakce excitovaných stavů atomů či iontů s nabitými částicemi, které vede ke Starkovu rozšíření, jehož výsledkem je opět Lorentzovský profil. Příspěvek kolizí mezi ionty je malý, a proto je možné celkové kolizní rozšíření aproximovat jako funkci

elektronové hustoty. Ve spektroskopii a fyzice plazmatu jsou tyto vztahy používány k nepřímému stanovení elektronové hustoty.

2.7.6. Laserem indukované plazma

Plazma je charakterizováno jako ionizovaný plyn složený z iontů, elektronů a neutrálních částic. Pro plazma jsou specifické dvě vlastnosti. Jsou to kvazineutralita a kolektivní chování. Plazma označujeme jako kvazineutrální z toho důvodu, že i přestože obsahuje nabitě částice, tak v makroskopickém měřítku se chová neutrálně a zároveň dokáže kolektivně jako celek reagovat na externí elektrické či magnetické pole nebo je generovat.

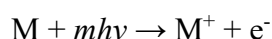
Základními charakteristikami plazmatu jsou elektronová teplota a hustota. Právě na základě jejich znalosti je možné provést bezkalibrační metodu laserem indukovaného plazmatu (CF-LIBS). Vzhledem ke složitosti a množství dějů, které probíhají v plazmatu během jeho vývoje, je určení těchto dvou hodnot příliš složité. Na základě integrální intenzity a profilu emisních linií lze za platnosti několika podmínek provést alespoň jejich přibližný výpočet. Jedná se o podmínku, že se plazma nachází v lokální termodynamické rovnováze, že je plazma dosti opticky tenké a že koncentrace jednotlivých prvků v plazmatu je stejná, jako jejich koncentrace ve vzorku. Více informací ohledně výpočtu elektronové teploty a hustoty je uvedeno v kapitole (Metoda vyhodnocení bezkalibrační analýzou).

2.7.8.1. Fáze vzniku laserem indukovaného plazmatu

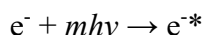
Nezávisle na skupenství vzorku je pomocí pulsního laserového záření, zaostřeného na velmi malou plochu vzorku, generováno plazma. Plošná hustota výkonu v místě nástřelu může dosahovat řádově desítek GW cm^{-2} (ArF ve vzduchu) až desítek TW cm^{-2} (Nd: YAG v dusíku) (Vítková, 2015). Právě plošná hustota výkonu je jedním z parametrů, jež musí být splněn, aby došlo k tvorbě plazmatu. Minimální plošná hustota výkonu je označována jako „prahová“ (*breakdown threshold*). Ta závisí na druhu materiálu, parametrech laseru, okolní atmosféře a jejím tlaku.

Délka pulsu v závislosti na technologii laseru (femtosekundové, nanosekundové) trvá řádově 10^{-12} s (femto) až 10^{-9} s (nano). Celý proces poté trvá pouze několik mikrosekund. Schéma interakce laserového záření se vzorkem za tvorby plazmatu je znázorněno na (Obr.7) Zaostřený laserový paprsek dopadá na povrch vzorku (1), ten se vlivem kumulující se energie začne zahřívat a tavit (2), dochází k absorpci záření a ionizaci (*m je multifotonová*

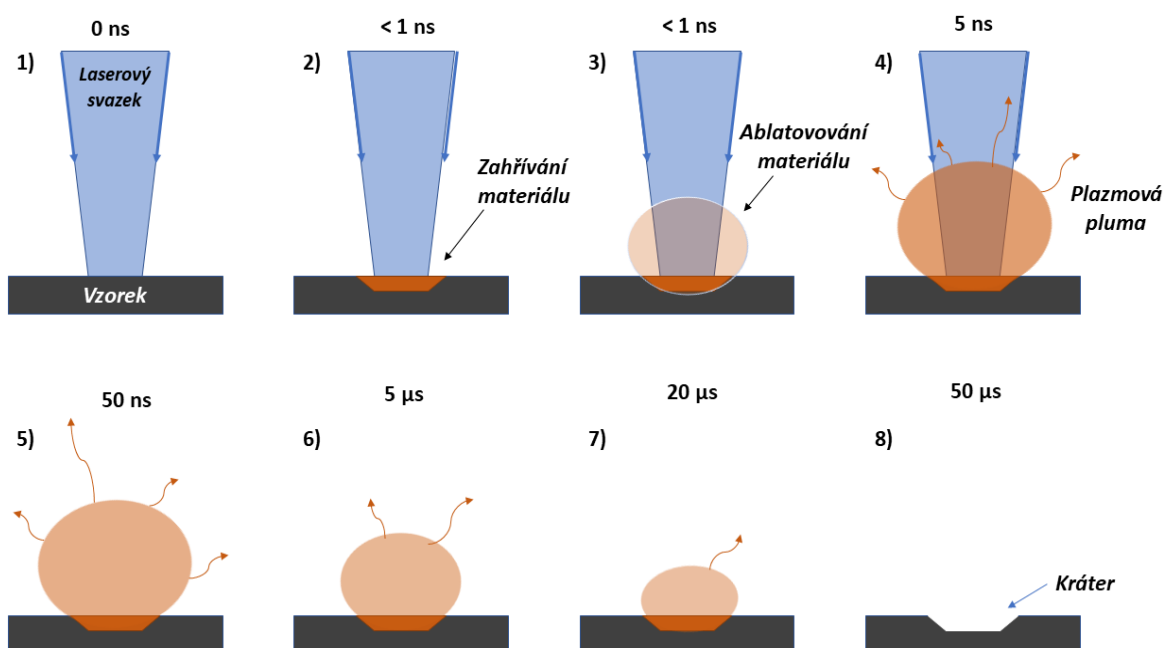
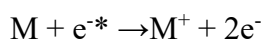
ionizace).



Elektrické pole poté akceleruje elektrony:



Energie elektronů rostou, kolize vyvolají další ionizaci. Dojde k řetězové reakci:

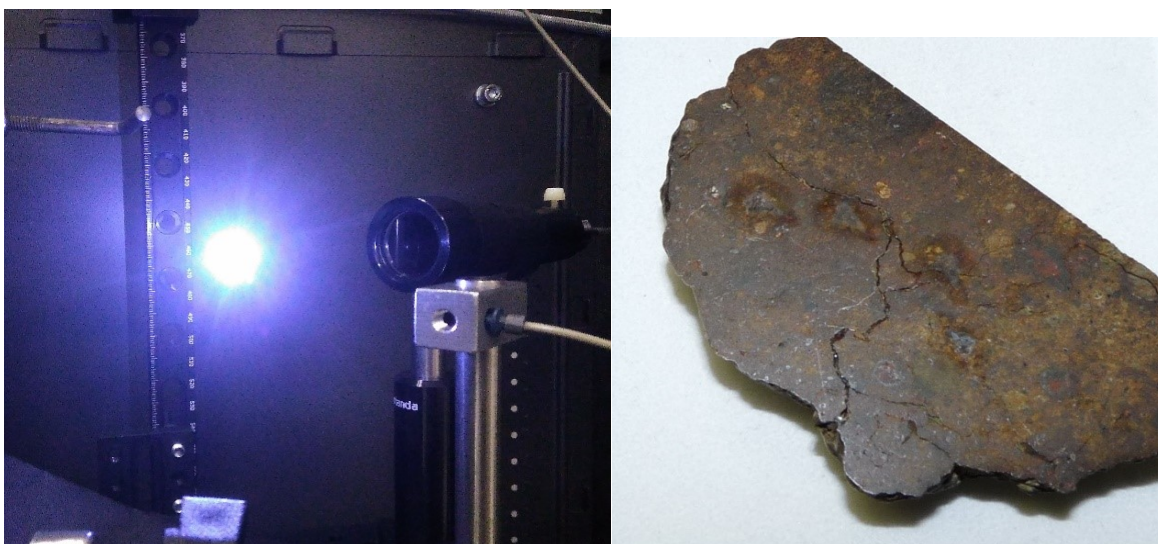


Obrázek č. 7: Schéma laserové průběhu laserové ablace

Jakákoliv látka pevného, kapalného i plynného skupenství je fragmentována, dochází k roztrhání vazeb mezi jednotlivými atomy a v plynu dochází k tzv. optickému průrazu (*breakdown*) (Vítková, 2015). Materiál se ablatuje a vzniká plazmová pluma (3). V případě ablace v atmosféře je vznik plazmatu doprovázen rázovou vlnou, kterou lze identifikovat jako charakteristické prasknutí. Rázová vlna je způsobena nadzvukovou expanzí plazmatu do okolní atmosféry. Plazma se tvoří ještě v průběhu laserového pulsu (4). V této fázi převládá kontinuální emise brzdného záření (*Bremsstrahlung*). Současně s brzdným zářením se zde také vyskytuje záření způsobené rekombinací volných elektronů s ionty. Přesto však vzrůstá hustota elektronů a odpovídající plazmová frekvence natolik, že převyší frekvenci záření laseru, a plazma se tak pro něj stane neprůhledným. Laser dále předává

energii jen vrchní vrstvě plumy, která zamezuje další interakci laseru se vzorkem. Laser tak dále zahřívá pouze plazmovou plumu. Tento jev se nazývá stínění plazmatem (*plasma shielding*) (Vítková, 2015). Tyto formy záření nenesou o studované materiálu žádné informace, a proto v tento okamžik nemá smysl měřit záření emitované plazmatem.

Po skončení pulsu se plazmová pluma začne více rozpínat, začne docházet k chladnutí plazmatu a začíná zářivá relaxace excitovaných atomů a iontů (5-7). V tomto časovém rozmezí má spektrum emitované plazmatem čárový charakter a obsahuje linie všech zde se nacházejících se specií. Po rozplynutí plumy zbyde na povrchu malý kráter o velikosti řádově mikrometrů. Množství odpařeného materiálu odpovídá hmotnosti v řádech nanogramů.

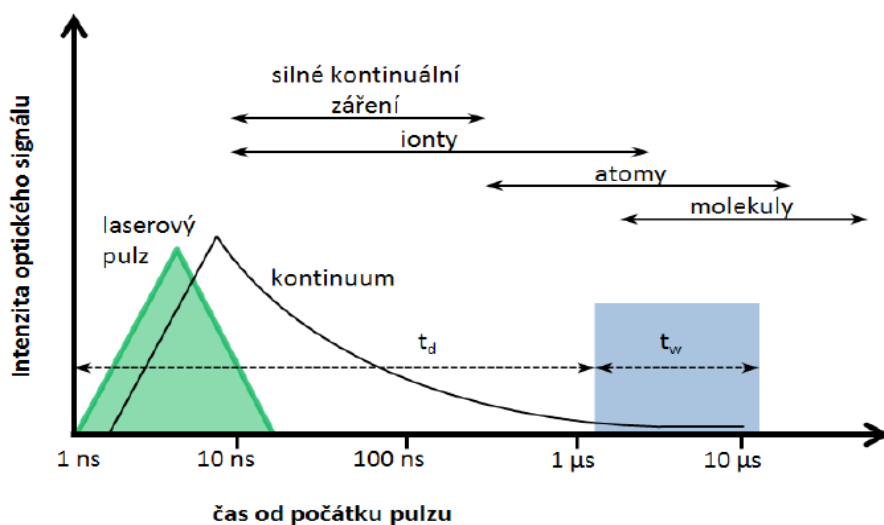


Obrázek č. 8: Vpravo foto průrazu dielektrika. V tomto případě byl použit Nd:YAG laser (1064 nm) v prostředí okolní atmosféry. Vlevo se nachází ukázka ablatovaných míst meteoritu.

2.7.8.2. Parametry měření

Jak již bylo uvedeno výše, laserem indukované plazma je časově proměnné, a ne všechna stadia jeho vývoje jsou pro analýzu vhodná. Příkladem je počáteční stádium tvorby plumy, kdy převládá emise charakteristického brzdného záření a rekombinačního záření, které nenesou žádnou informaci o studovaném materiálu. V tomto případě je nutné aparaturu synchronizovat tak, aby snímání záření emitovaného plazmovou plumou probíhalo až ve fázi, kdy jsou v emisním spektru plumy viditelné linie specií obsažených ve vzorku. To lze zajistit pomocí elektronického zařízení nazývaného *trigger*. Trigger je propojený s laserem i spektrometrem a pomocí zadaných vstupních parametrů pro měření synchronizuje dobu od

počátku laserového pulsu, po kterou nebude spektrometr snímat žádné záření až do doby, kdy začne spektrometr měřit. Tento parametr se nazývá *čas zpoždění (gate delay)*. U nanosekundových laserů to bývá zhruba 1 μs od počátku laserového pulsu. Nastavení *času zpoždění* (obr.4) je důležitým parametrem nejenom kvůli kvalitě změřeného spektra, ale také kvůli tomu, že laserové záření je tak intenzivní, že by v případě snímání záření během probíhajícího pulzu (1-4), mohlo dojít k poškození ICCD čipu ve spektrometru. V opačném případě, tedy pokud by byl *čas zpoždění* příliš velký mohlo by dojít už k poklesu určitých specií a z toho důvodu by spektrum nebylo vůči vzorku dosti reprezentativní.



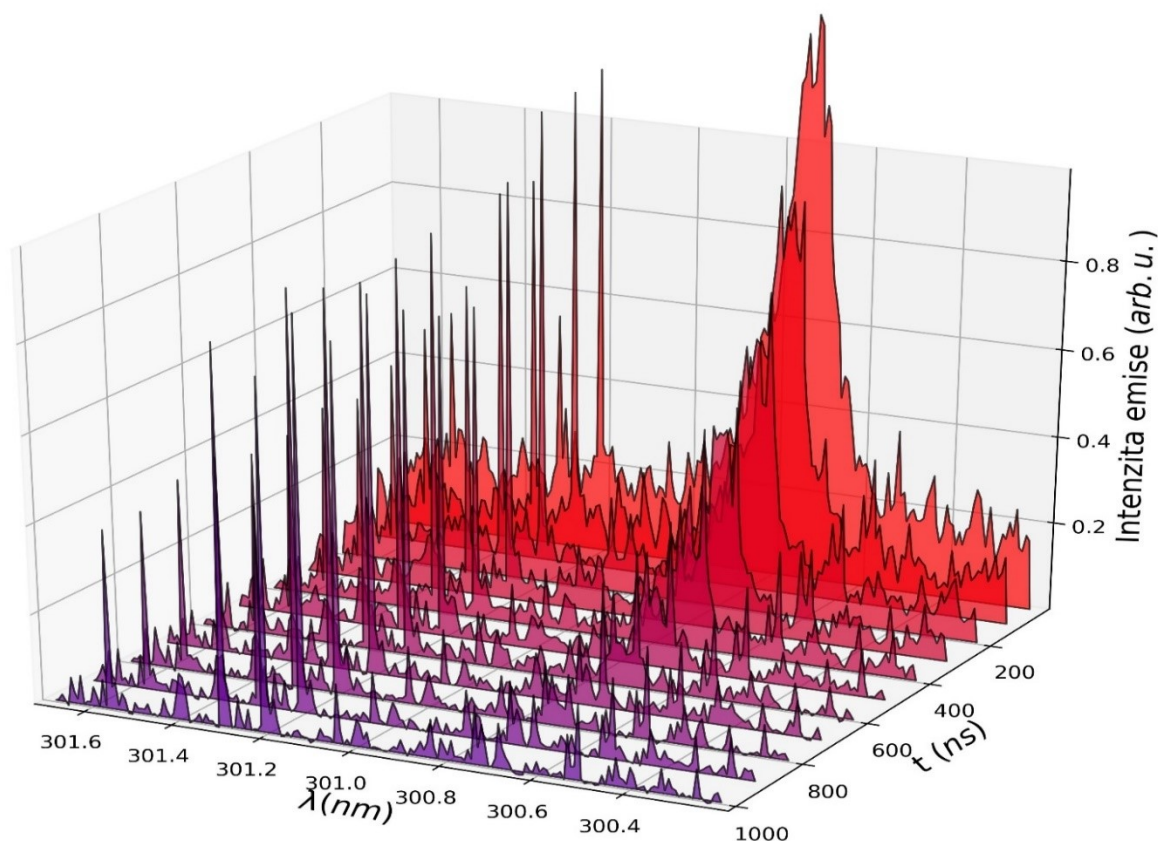
Obrázek č.9: Časový průběh měření. Převzato z (Vítková, 2015)

Druhým parametrem důležitým pro měření emisních spekter technikou LIBS je *integrační čas (gate width)*. Ten udává dobu (šířku měřícího okna), po kterou bude spektrometr snímat emitované záření. V tomto případě, pokud by byl zvolený integrační čas příliš krátký, nedošlo by k naakumulování dostatečného množství signálu, linie by splývaly se šumem pozadí a spektrum by se dalo jen obtížně vyhodnotit. V opačném případě by zas mohlo dojít k tomu, že by délka měřícího okna byla tak velká a zasáhla do počátku dalšího laserového pulsu, což by vedlo opět k poškození ICCD čipu.



Obrázek č. 10: Série fotografií zobrazujících laserovou ablací meteoritu. Směrem zleva vzrůstá velikost plazmové plumy.

Dalšími důležitými parametry pro měření jsou například umělá amplifikace signálu, či správná geometrie měření, kde je nutné, aby kolimátor sbírající emitované záření byl v rovině s plazmovou plumou. To se zdá být samozřejmé, nicméně v některých případech je obtížné správnou geometrii měření nastavit.



Obrázek č. 11: Názorná ukázka časového vývoje emise záření plazmové plumy. Jedná se o spektrum laserové jiskry ve vzduchu o tlaku 90 Torr. Jiskra byla generována Nd: YAG laserem. Frekvence nástřelu byla 5 Hz. Vlnová délka pulzu odpovídala první harmonické frekvenci (1 064 nm). Převzato od Petra Kubelíka.

2.8. Bezkalibrační analýza

Za jednu z bezesporu největších výhod prvkové analýzy pomocí techniky LIBS (Tognoni et al., 2010) lze považovat možnost analyzovat vzorky *in situ* v reálném čase, všech skupenství a to bez jakékoli preanalytické přípravy a s minimální destrukcí analyzovaného materiálu. Pro porovnání například při analýze technikou ICP-MS dochází k úplné destrukci vzorku (rozpuštění do roztoku, který je veden do cívky určené k buzení plazmatu), či při elektronové mikroanalýze je za potřebí leštění vzorku a depozice vodivé vrstvy. Tyto vlastnosti staví techniku LIBS do popředí, jako techniku vhodnou pro rychlou kvalitativní analýzu, která je konkurenceschopnou jiným technikám atomové spektroskopie.

Problém ovšem nastává, pokud je zároveň vyžadována i kvantitativní analýza. V již dříve publikovaných studiích (E Tognoni et al., 2010) autoři poukazují na fakt, že intenzita konkrétní emisní linie studovaného analytu není závislá pouze na fyzikálních parametrech linie a kvantitativním zastoupení jednotlivé specie, ale také na matici, v níž je studovaný analyt přítomen. Tato závislost na matici vede k nutnosti použít například metodu kalibrace, pomocí které se dá zjistit specifická odezva analytu ve specifické matici, či metodu standardního přídávku, která anulují význam matrice. Matrice meteoritů je však velice komplikovaná a variabilní napříč všemi druhy meteoritů a z tohoto důvodu jsou výše popsané metody prakticky nepoužitelné. (Ciucci et al., 1999) navrhli nový způsob, jak obejít matriční efekt, a to pomocí bezkalibrační spektroskopie laserem indukovaného průrazu (CF-LIBS). Tato metoda je založena na stanovení elektronové hustoty a excitační teploty laserem buzeného plazmatu (Hornáčková et al., 2014). Tyto parametry lze vypočítat pomocí integrální intenzity a profilu spektrálních čar, které lze určit přímo z emisního spektra, avšak musí být splněny tři podmínky, bez nichž by určení těchto dvou parametrů nebylo proveditelné. První podmínkou je předpoklad, že po dobu snímání emitovaného záření je plazma v lokální termodynamické rovnováze (LTE) (Cristoforetti et al., 2013; Skocic and Bukvic, 2016; Zhang et al., 2014). Druhou podmínkou je předpoklad stechiometrické ablace, tj. stav kdy koncentrace atomů daného prvku v plazmatu je stejná jako koncentrace daného prvku ve vzorku. Třetí podmínkou je předpoklad opticky tenkého prostředí, tj. plazma má takovou konzistenci, že fotony emitované uvnitř plumy nejsou znovu absorbovány atomy na okraji plumy, a nedochází tak k samoabsorpci spektrálních čar (Hornáčková et al., 2014).

Za těchto podmínek může být plazma považováno za prostorově homogenní zdroj nespojitého záření charakteristických spektrálních linií. To, zda bude spektroskopické měření úspěšné a naměří se spektrum vhodné k analýze a zároveň bude dosaženo LTE, závisí

také na volbě pozice a velikosti pozorovacího okna. Volba pozice a velikosti časového intervalu, ve kterém je záření plazmatu snímáno spektrometrem, hraje důležitou roli pro úspěšnost analýzy, jelikož záření plazmatu ablovaného materiálu je v čase proměnné (viz LIBD obrázek). Důležitou podmínkou však je také to, aby spektrum obsahovalo jasně detekovatelné reprezentativní linie všech prvků, jež jsou ve vzorku obsaženy. Z energetického hlediska je důležité, aby distribuce excitovaných stavů odpovídala Boltzmannovu rozdělení a aby distribuce energie zahrnující stavy iontů odpovídala Sahově-Boltzmannově rozdělení. Pokud jsou splněny výše uvedené podmínky, může být atomární složení popsáno za použití bezkalibrační metody (CF-LIBS) a to na základě následující rovnice:

$$I(\nu) = F \cdot \frac{c_s \cdot A_{ij} \cdot g_i \cdot h \cdot \nu_{ij}}{4\pi \cdot Q_s(T)} \cdot \exp\left(-\frac{E_i}{k_B \cdot T}\right) \quad (10)$$

kde F je experimentální parametr představující účinnost sběru signálu při dané vlnové délce, I intenzita emisní čáry, c_s je koncentrace specíe S, A_{ij} Einsteinův koeficient spontánní emise ze stavu i do stavu j , g_i je degenerace stavu i , h je Planckova konstanta, ν_{ij} je frekvence emitovaného záření, výraz $\exp\left(-\frac{E_i}{k_B \cdot T}\right)$ pro energii vyšší hladiny E_i a termodynamickou teplotu T se nazývá Boltzmannův faktor. Normalizační konstanta Boltzmannova rozložení pro energetické hladiny specíe S $Q_s(T)$ se nazývá partiční funkce. Ta je obecně dána rovnicí

$$Q_s(T) = \sum_i g_i \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) = \sum_i (2J_i + 1) \exp\left(-\frac{E_i}{k_B T}\right) \quad (11)$$

k_B je Boltzmannova konstanta a J_i je příslušné kvantové číslo celkového momentu hybnosti. Partiční funkce pro dané specíe a Einsteinovy A koeficienty lze nalézt například v databázi atomárních čar NIST (*National Institute for Standards and Technology*) (Kramida et al., 2015a).

Určení excitační teploty se provádí pomocí metody Saha-Boltzmannova vynesení (Aragón and Aguilera, 2008). Rovnice (10) může být ve dvoudimenzionálním prostoru nazývaném Boltzmannova rovina formulována v lineárním tvaru:

$$\ln\left(\frac{I(\nu)}{A_{ij} \cdot g_i \cdot \nu_{ij}}\right) = -\frac{1}{k_B T} \cdot E_i + \ln\left(\frac{F \cdot c_s}{Q_s(T)} \cdot \frac{h}{4\pi}\right) \quad (12)$$

Rovnice (12) určuje následující graf:

$$x = E_i \quad (13)$$

$$y = \ln\left(\frac{I(\nu)}{A_{ij} \cdot g_i \cdot \nu_{ij}}\right) \quad (14)$$

Tímto způsobem dostaneme v Boltzmannově rovině graf následující lineární rovnice:

$$y = kE_i + q_s \quad (15)$$

kde

$$k = -\frac{1}{k_B T} \quad (16)$$

$$q_s = \ln\left(\frac{F \cdot c_s}{Q_s(T)} \cdot \frac{h}{4\pi}\right) \quad (17)$$

Tento graf může být přímo použit ke stanovení excitační teploty plazmatu pro uvažovanou specie pomocí vztahu

$$T = -\frac{1}{k_B k} \quad (18)$$

Boltzmannova rovina může být sestavena zvlášť pro atomy i ionty daných prvků. Absolutní člen lineární rovnice q_s pak v našem případě odpovídá zastoupení buď specií SI, nebo SII, a to podle následující závislosti:

$$c_s = \frac{Q_s(T)}{F} \cdot \exp(q_s) \quad (18)$$

Celková abundance daného prvku v ablačním plazmatu je pak dána součtem zastoupení neutrálních a jednou nabitých stavů:

$$c_{\text{celková}} = c_{\text{neutrálů}} + c_{\text{iontů}} \quad (19)$$

Simultánní vynesení stavů atomů i iontů lze analogicky s rovnicí (10) zapsat pomocí rovnice Sahova-Boltzmannova vynesení:

$$\ln\left(\frac{I(\nu)}{A_{ij} \cdot g_i \cdot \nu_{ij}}\right) - \ln\left(\frac{2(2\pi \cdot m_e \cdot k_B \cdot T)^{\frac{3}{2}}}{N_e \cdot h^3}\right) = -\frac{1}{k_B T} \cdot (E_i + E_{ion}) + \ln\left(\frac{F \cdot C_s}{Q_s(T)} \cdot \frac{h}{4\pi}\right) \quad (20)$$

kde N_e je elektronová teplota, T_e je elektronová teplota, a $(E_i + E_{ion})$ je součet energie vyšší hladiny E_i ionizované specíe SII a její ionizační energie do prvního stupně E_{ion} . Stejně tak jako v případě rovnice (12), lze elektronovou teplotu určit ze směrnice k:

$$T_e = -\frac{1}{k_B k} \quad (21)$$

Podmínkou pro dosažení lokální termodynamické rovnováhy plazmatu (LTE) je rovnost excitační teploty a teploty elektronů:

$$T = T_e \quad (22)$$

Výhodou Sahova-Boltzmannova vynesení je možnost grafického vyjádření populování stavů neutrálních atomů i iontů daného prvku pomocí jediné lineární regrese. Pokud je pozorovaná závislost skutečně lineární, lze zkoumané plazma popsat podmínkou LTE. V opačné případě lineární regresi použít nelze.

Podmínka LTE je dále popsána tzv. McWhirterovým kritériem:

$$N_e > 1.6 \cdot 10^{12} T^{1/2} \cdot (\Delta E_{nm})^3 \quad (23)$$

kde N_e je elektronová hustota, T je termodynamická teplota a ΔE_{nm} (eV) je nejvyšší dosažitelný rozdíl mezi energiemi dvou hladin n a m . McWhirterovo kritérium definuje minimální elektronovou hustotu potřebnou pro LTE v plazmatu. Podle této rovnice je minimální elektronová hustota pro laserem indukované plazma blízka hodnotě 10^{16} cm^{-3} .

Elektronovou hustotu lze vypočítat pomocí Lorentzova fitu konkrétní linie:

$$I(\nu) = I_0 \frac{1}{\pi\gamma \left(1 + \left(\frac{\nu - \nu_0}{\gamma}\right)^2\right)} \quad (24)$$

kde I_0 je celková integrální intenzita peaku se středem ν_0 a γ je pološířka linie v poloviční výšce peaku (HWHM). Lorentzovskému profilu odpovídá Starkovo kolizní rozšíření a pokud zanedbáme vliv těžkých částic, závisí šířka peaku v polovině jeho výšky (FWHM) pouze na elektronové hustotě, která pak může být vypočtena pomocí následujícího vztahu:

$$N_e = \frac{2\Omega}{FWHM} \quad (25)$$

kde Ω je parametr Starkova rozšíření. Pokud zanedbáme jeho závislost na elektronové teplotě, můžeme jej určit pro libovolnou linii, a lze tak následně odhadnout elektronovou hustotu plazmatu. (Konjević, 2002) ve své studii uvádí data Starkovských šířek a posuvů pro spektrální linie celé řady prvků spolu s parametry Starkova rozšíření Ω .

Podobné rovnice lze vyjádřit pro všechny emisní linie všech specií v plazmatu.

Faktor F představující účinnost použité instrumentace může být určen normalizací součtu koncentrací všech specií:

$$\sum_S C_s = \frac{1}{F} \sum_S Q_s(T) \exp(q_s) = 1 \quad (26)$$

3. Experimentální část

Na Oddělení spektroskopie Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského Akademie věd České republiky, v.v.i., byla naměřena ablační spektra meteoritů Porangaba, Čeljabinsk, Northwest Africa 869 a Dhofar 1994.

Na základě dat z naměřených spekter byl sestaven atlas emisních linií prvků, typicky se vyskytujících v ablačních spektrech těchto meteoritů.

Tento atlas linií byl dále použit jako zdrojová databáze testovaného automatického programu, jež byl použit k vyhodnocení zastoupení významných prvků v meteoritu Porangaba, metodou bezkalibrační analýzy.

Meteorit Porangaba byl navíc podroben komplexní analýze metodou SEM EDS/WDS v Laboratoři rentgenové mikroanalýz na pracovišti České geologické služby. Prvková analýza meteoritu Porangaba, provedena touto metodou, poté sloužila především pro kontrolu a srovnání s výsledky dosaženými metodou CF-LIBS.





3.1. Seznam použitých chemikálií

Chemikálie	Složení	Čistota [%]	Výrobce
Argon	Argon	99,99995	Linde Gas a.s.
Fluor	Fluor	10,2	Linde Gas a.s.
	Helium	Zbytek	
Helium	Helium	99,9996	MESSER Technogas

Tabulka č.1: Seznam použitých chemikálií s uvedeným složením, čistotou a výrobcem.

3.2. Seznam a charakterizace použitých vzorků

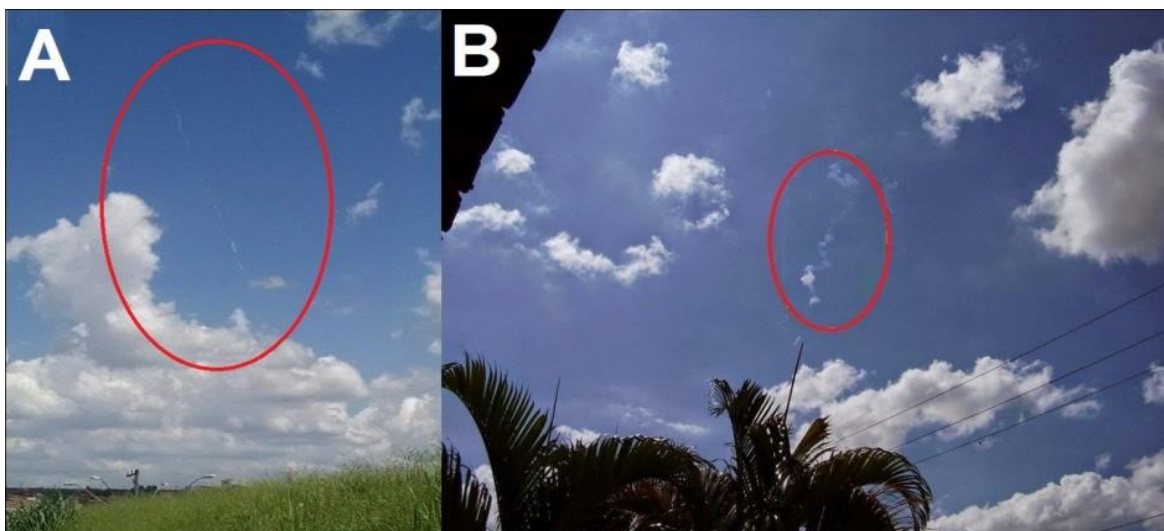
Pro experimentální část byly vybrány čtyři vzájemně se lišící meteority.

Název	Zkratka	Naleziště	Rok nalezení	Pozorovaný pád	Třída	Chemická klasifikace	Petrologická klasifikace	Hmotnost vzorku	Celková známá hmotnost meteoritu	Foto
Porangaba	-	Sao Pulo (Brazílie)	2015	9.1.2015 17:35 UT*	Obyčejný chondrit	L	4	21,1 g	976 g	
Čeljabinsk	-	Čeljabinsk (Rusko)	2013	15.2.2013 3:22 UT*	Obyčejný chondrit	LL	5	10,3 g	~ 1000 kg	
Northwest Africa 869	NWA 869	Severozápadní Afrika +	2000	-	Obyčejný chondrit	L	3-6	8,9 g	~ 2000 kg	
Dhofar 1994	Dho 1994	Zufar (Omán)	-	-	Uhlíkatý chondrit	CM	2	3,2 g	45 g	

Tabulka č.6: Seznam a charakterizace použitých vzorků meteoritů. *- světový čas.

3.3. Meteorit Porangaba

Porangaba (Grossman 2015) byl velmi zářivý bolid, který byl pozorován 9. ledna, 2015 v 17:35 UTC hned v několika oblastech brazilského státu São Paulo. První kus meteoritu byl nalezen ještě ten samý den v blízkosti města Porangaba ve státě São Paulo, Brazílie. Meteorit měřil v průměru 8 cm a vážil 450 g. Na základě fotografií pořízených ve městech Lençóis Paulista (Obrázek č.6, podobrázek A) a Tatuí (Obrázek č.6, podobrázek B) společně s videozáznamem z bezpečnostní kamery ve městě Lençóis Paulista a výpověďmi očitých svědků, Carlos Augusto di Pietro (BRAZilian Meteor Observation Network, BRAMON) a Rodrigo del Olmo Sato (Sociedade Brasileira de Meteorítica) vypočítali trajektorii pádu v atmosféře a oblast pravděpodobného dopadu dalších případných fragmentů.



Obrázek č.12: Podobrázek A ukazuje fotografii z města Lençóis Paulista a podobrázek B ukazuje fotografii z města Tatuí. Oba snímky zachycují přetrvávající stopu bolidu po jeho pádu.

Pomocí vypočtené oblasti pravděpodobného dopadu našel Julio Carvalho da Silva druhý kus meteoritu, který byl vtěsněn v impaktním kráteru, který byl přibližně 10 cm široký a 25 cm hluboký a nacházel se zhruba 3 m od obydleného domu. Malý fragment meteoritu byl uříznut a odeslán ke studiu do Brazilského národního musea (Museu Nacional, Universidade Federal do Rio de Janeiro).

Druhá expedice mající za cíl najít další možné fragmenty, byla vyslána mezi 30. lednem a 1. únorem. Expediční skupina byla tvořena převážně členy BRAMONU. 10. ledna 2015 našla skupina třetí meteorit vážící 520 g. Tento meteorit byl rozdělen na celkem pět částí. Následně

byl jeden kus vážící 26,7 g zaslán do České republiky na podrobnější analýzu.

Výše uvedený kus meteoritu Porangaba byl v České republice podroben komparativní analýze dvěma principiálně odlišnými analytickými technikami. Jako první byla pro analýzu použita metoda bezkalibrační emisní spektroskopie laserem indukovaného průrazu (CF-LIBS), jež byla provedena v laboratoři laserové spektroskopie na Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského v.v.i. Cílem této analýzy bylo zjistit průměrné celkové chemické složení meteoritu. Pro další analýzu byla použita metoda skenovací elektronové mikroskopie (SEM) s energeticky disperzní a vlnově disperzní rentgenovou spektroskopií (EDS/WDS), která byla provedena v laboratoři elektronové mikroskopie a mikroanalýzy České geologické služby v Praze (Haloda J., 2017). Cílem této analýzy bylo pomocí (EDS/WDS) elementární distribuční mapy ve studované oblasti meteoritu a s pomocí snímků z elektronového mikroskopu vytvořit distribuční mapu mineralogického složení vybrané vrstvy. Na základě mineralogického složení byl poté meteorit zařazen do specifické chemické i petrologické třídy. Dále byla také vypočtena dráha meteoroidu a jeho původ v meziplanetárním prostoru (Koukal, J., 2016). Na základě znalosti parametrů pro spektrální přechody (NIST) a zjištěného průměrné celkové chemické složení byla simulována spektra bolidu Porangaba. Nicméně přímý spektrografický záznam bolidu neexistuje.

3.4. Instrumentace

Pro určení mineralogie a chemického složení meteoritu Porangaba byly použity celkem dvě analytické metody, a to metoda emisní spektroskopie laserem indukovaného plazmatu (LIBS) a metoda skenovací elektronové mikroskopie (SEM) s energeticky disperzní a vlnově disperzní rentgenovou spektroskopií (EDS/WDS).

Jako první byla provedena analýza metodou LIBS, která byla použita pro prvkovou analýzu celkového průměrného chemického složení meteoritu a pro získání spektrálních emisních charakteristik. Poté byla provedena analýza metodou SEM EDS/WDS, jejímž cílem byl detailní popis minerální kompozice a přesná chemická analýza. Díky vestavěnému elektronovému mikroskopu, bylo možné pořídit detailní snímek struktury meteoritu. Kombinace obou technik byla použita pro objasnění poměrně jemné a složité struktury meteoritu Porangaba.

Výsledky prvkové analýzy EDS/WDS metodou byly považovány za správné a sloužily jako referenční hodnoty k hodnotám získaným výpočtem metodou bezkalibrační analýzy LIBS.

Metodou CF-LIBS byla společně s meteoritem Porangaba naměřena spektra a bylo vyhodnoceno poměrné prvkové složení meteoritů Čeljabinsk, Northwest Africa 869 a Dhofar 1994.

3.4.1. LIBS

Povrch vzorku meteoritu byl, bez jakékoli předchozí úpravy, ozařován pulsním nanosekundovým ArF laserem s frekvencí nástřelů 10 Hz. Měření probíhalo za atmosférického tlaku i za vakua (cca 10^{-2} Torr). Laser emituje cca 12 ns pulsy o vlnové délce 193 nm a energii 180 mJ. Laserový paprsek je fokusován pomocí křemenné čočky potažené antireflexní vrstvou (ohnisková vzdálenost 50 mm) na pevný vzorek, který je uchycen na stole s posuvem ve všech osách a rotací, čímž se zajišťuje, že při měření dochází při každém laserovém nástřelu k ablaci na odlišných místech, čímž je docíleno větší reprezentativnosti naměřených dat. Celý systém je umístěn ve vakuové komoře, ve které je připevněn kolimátor, který je přes optický kabel propojen s vysoce rozlišeným Echelle spektrometrem (ESA 4000, LLA Instruments GmbH, Německo).

Echelle Spectrograph s vysokým rozlišením: systém spektrometru ESA 4000 Echelle (LLA Instruments GmbH, Německo) je vysoce citlivé optoelektronické zařízení, které je mimořádně citlivé na mechanické a optické namáhání, zejména pokud jde o ICCD kameru. Spektrometr umožňuje současné měření spekter v celé UV – VIS oblasti 200–800 nm s efektivním rozlišením v rozmezí od 0,005 nm (200 nm) do 0,019 nm (780 nm). Při našem měření byl spektrometr nastaven tak, aby spouštěl laserový puls po dobu 500 ns a začal měřit se zpožděním 4 μ s. Délka sběru signálu činila 5 μ s. Zesílení signálu činilo 3500 arb. jednotek.

3.4.2. SEM EDS/WDS

Pro tuto analýzu bylo nutné vyleštit tenký úsek meteoritu Porangaba a elektrodepozicí nanést cca 30 nm silnou vodivostní vrstvu uhlíku. Optické vlastnosti společně s texturálními a mineralogickými charakteristikami byly studovány pomocí petrografického mikroskopu LEICA DMLP.

Skenovací elektronový mikroskop TESCAN MIRA 3GMU (Česká geologická služba v Praze, Česká republika) byl použit pro všechny mikroanalytické studie a pro sběr snímků zpětně odražených elektronů a elementárních distribučních map. Minerální složení bylo stanoveno pomocí automatického analytického systému AZtec Energy OXFORD

INSTRUMENTS s energeticky disperzním rentgenovým detektorem SDD X-MaxN 80 Premium (EDS) a vlnově disperzním rentgenovým detektorem Wave 700 (WDS) pro rentgenové vlnové délky. Oba analytické systémy instalované na zmíněném skenovacím elektronovém mikroskopu TESCAN MIRA 3GMU byly použity pro současnou EDS/WDS analýzu.

EDS/WDS analýza byla provedena za použití urychlujícího napětí 15 kV, proudové hodnotě svazku 20 nA a průměru paprsku 0,090 μm . Pro současnou analýzu EDS/WDS byla pro standardizaci a kalibrační postupy použita kombinace přírodních a syntetických standardů.

Snímky difrakce zpětně odražených elektronů (EBSD) a elementární distribuční mapy byly generovány pomocí urychlujícího napětí 15 kV a 2–10 nA rozsahu proudové hodnoty paprsku.

Obrazy zpětně odražených elektronů (BSE) a elementární EDS rentgenové distribuční mapy byly generovány pomocí urychlujícího napětí 15 kV a 2 až 10 nA rozsahu proudu paprsku. Software AZtec Energy Automated byl použit k sběru elementárních plošných distribučních map zahrnujících kompletní oblast studovanou oblast pro co možná nejvyšší reprezentativnost shromážděných datových souborů. Každá elementární distribuční mapa byla shromážděna s rozlišením 512x512 pixelů s velikostí pixelu 1 μm .

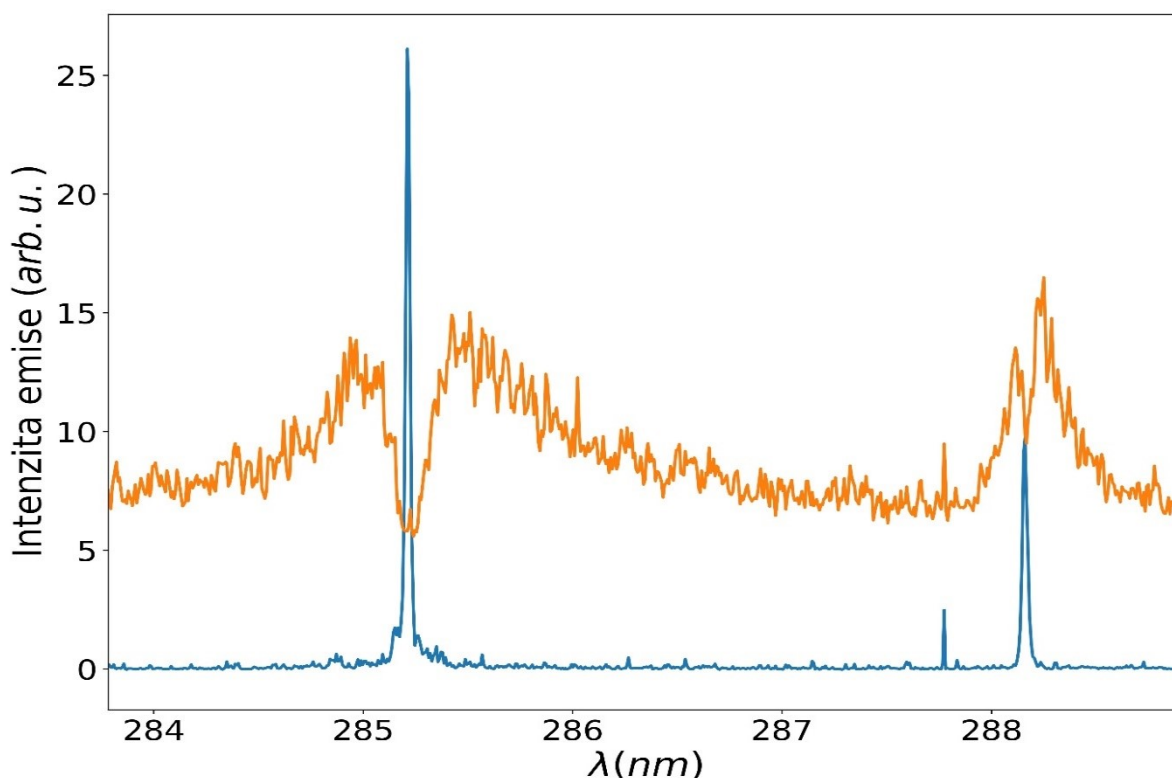
Integrovaný systém zpětně odražených elektronů (EBSD) od firmy Oxford Instruments AZtec HKL Automated, instalovaný na výše zmíněném skenovacím mikroskopu, byl použit pro potvrzení mikrostrukturálních charakteristik studovaného materiálu. Podmínky měření: 15 mm vzdálenost systému od povrchu vzorku, 20 kV urychlující napětí a hodnota proudu elektronového svazku 3,5 nA.

3.5. Tvorba atlasu emisních linií

Byla naměřena ablační spektra meteoritů Porangaba (L4), Čeljabinsk (LL5), Northwest Africa 869 (L-3-6) a Dhofar 1994 (CM2) ve vakuu a za atmosférického tlaku. Pro tvorbu atlasu emisních linií byla vybrána pouze spektra měřená ve vakuu. Důvodem byla značné zatížení spekter linií vykazujících jev samoabsorpce ve vysokotlakých spektrech (viz. Obr. č.13). U meteoritu Porangaba se jednalo o 7 vybraných vakuových spekter a u zbylých meteoritů o 3 spektra.

Detailní analýze emisních spekter meteoritů předcházela předběžná kontrola a manuální přiřazení (na základě databáze NIST) nalezených emisních linií odpovídajících specií. Jako

podklad pro tento dílčí krok analýzy, bylo použito spektrum získané jako průměr všech naměřených spekter. Tímto postupem bylo zajištěno, že data pro manuální kontrolu obsahovala všechny spektrální linie naměřené v různých experimentech. Tímto způsobem bylo manuálně přiřazeno zhruba tisíc emisních linií. Takto získaný seznam emisních linií následně posloužil jako podklad pro kontrolu automatického přiřazení linií spektroskopickým přechodům.



Obrázek č.13: Názorná ukázka samoabsorbovaných linií Mg I (285,220 nm) a Si I (288,164 nm) ve vybraných spektrech meteoritu Porangaba. Oranžová barva odpovídá vysokotlakému spektru a modrá barva spektru měřenému za vakua. Převzato do Petra Kubelíka.

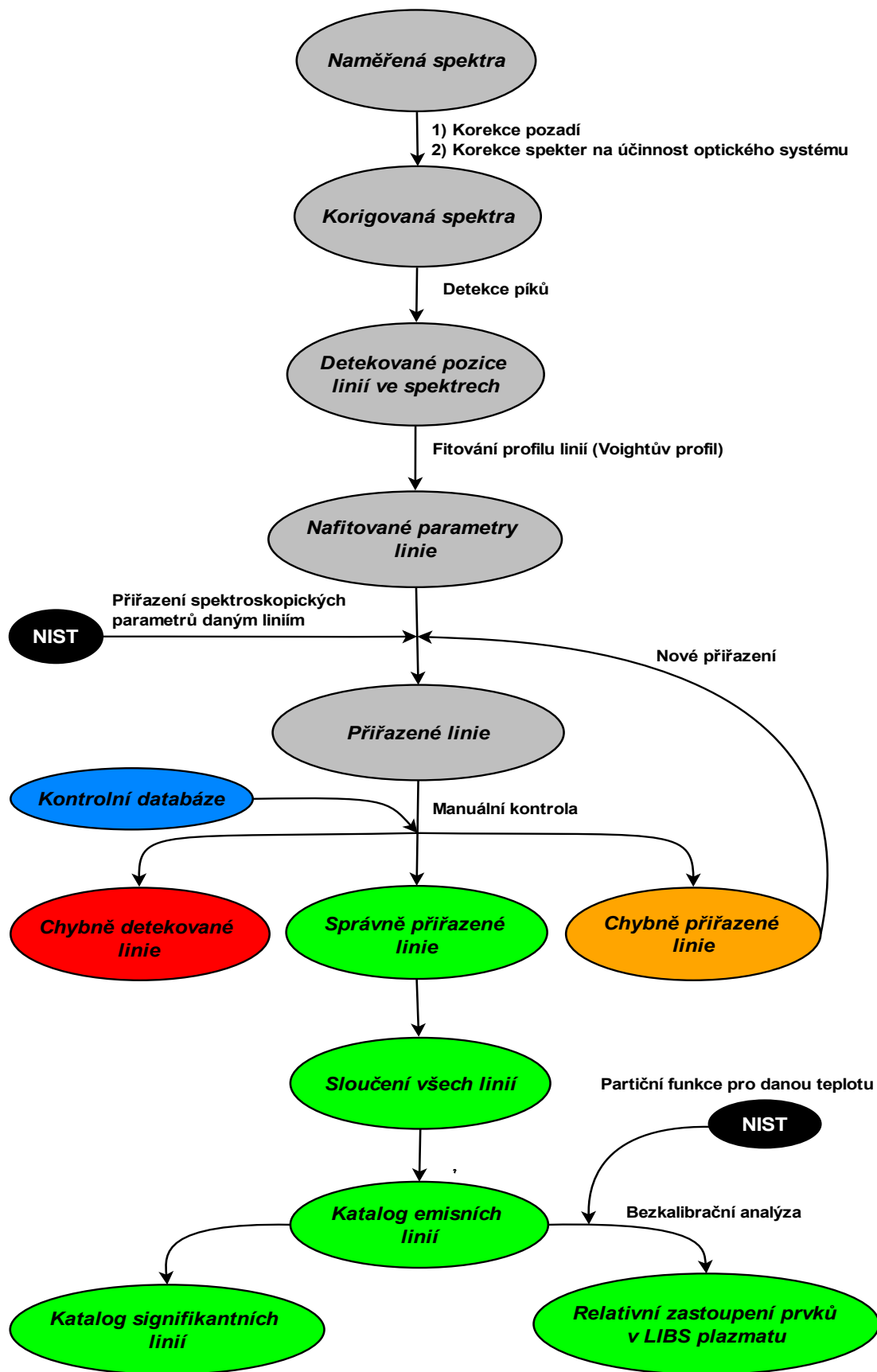
Následně bylo každé spektrum analyzováno samostatně. Nejdříve byla automatickým programem provedena detekce spektrálních linií (*Peak-picking*), pomocí kterého byly detegovány vrcholy linií, jejichž výška byla větší jak pětinašobek výšky šumu daného spektra. U každého spektra byly poté automatickým programem nafitovány parametry linií: pozice linie, integrální intenzita (plocha) linie a FWHM. Linie byly fitovány podle Voightovy funkce. U takto nafitovaných linií bylo poté provedeno automatické přiřazení parametrů spektroskopických přechodů, nezbytných pro bezkalibrační analýzu a pro usnadnění pozdější tvorby atlasu linií. Tyto parametry jsou dostupné v on-line databázi spektrálních linií NIST. Jednalo se především o parametry: Einsteinův A-koefficient, degenerace horní hladiny, energie horní hladiny a elektronová konfigurace a termny horní i

spodních hladiny přechodů.

Následně byla provedena subjektivní vizuální kontrola automaticky přiřazených linií. Ta byla provedena tak, že u každé přiřazené linie bylo na základě předpokládané koncentrace (výskytu) daného prvku ve vzorku rozhodnuto, zda je tato linie přiřazena správně, nebo zda byl nařizované linii přiřazen spektrální přechod jiné specie či zda byla daná linie chybně detekována. Jako podklad při rozhodování o správnosti přiřazení sloužila dříve manuálně sestavená databáze linií. U každé z výše zmíněných situací byl navržen kód, kterým byla každá jednotlivá linie při kontrole označena.

Na závěr byly chybně detekované linie vymazány. U linií, kterým byly přiřazeny parametry jiné specie, bylo přiřazení upraveno manuálně. Opravené a správně přiřazené linie byly sloučeny a společně s takto vybranými liniemi ze spekter dalších analyzovaných meteoritů, byl vytvořen předběžný seznam linií. U spektroskopických přechodů, které se ve výsledném seznamu vyskytovaly vícekrát (byly degekovány ve spektrech několika různých meteoritů) byly následně duplicity vyřazeny na základě kontroly elektronových konfigurací, termů a kvantového čísla celkového momentu hybnosti (J) horních i spodních hladin jednotlivých spektroskopických přechodů.

Na závěr byl z výše vytvořeného atlasu spektrálních čar, vytvořen atlas signifikantních linií. Ty byly již během manuální kontroly automatického přiřazení označeny speciálním kódem tak, aby je později bylo možné. Tyto linie byly vybírány subjektivně na základě několika kritérií, a to především: tvar a symetrie píku, četnost výskytu ve více spektrech a izolovanost daná linie ve spektru.



Obrázek č.14: Stručné schéma tvorby atlasu emisních linií

4. Výsledky a diskuze

V první fázi byl vytvořen atlas emisních linií vyskytujících se v ablačních spektrech meteoritů uvedených v Tabulce 6 na str. 42, jež bude sloužit jako zdrojová databáze pro automatické programy *MeteorMaster* a *Ablator*, současně vyvíjené na našem pracovišti. Z tohoto seznamu byl dále také vytvořen seznam signifikantních linií. Ze získaných spektrálních charakteristik bylo určeno kvalitativní zastoupení významných prvků ve studovaných meteoritech. Tato databáze však bude v návaznosti na předkládanou bakalářskou práci nadále vylepšována a upravována z důvodu požadavku na vysokou přesnost a reprodukovatelnost automatizovaného vyhodnocování spekter z hlediska kvantitativního. Porovnání nejen kvalitativního přiřazení linií, ale také kvantitativního výstupu analýzy provedené programem *Ablator* a *MeteorMaster*, jsou předmětem diskuze v kapitolách 4.3.

4.1. Katalog emisních linií

Byly vytvořeny celkem dva atlasy emisních linií, vyskytujících se v ablačních spektrech meteoritů. Prvním z nich je seznam obsahující 6630 emisních linií a jim přiřazených spektroskopických parametrů, důležitých především pro CF analýzu. Tyto linie byly hledány pomocí automatizovaného software a následně manuálně kontrolovány autorem práce. Jedná se o emisní linie prvků typicky se vyskytujících v meteoritech, jako je Fe, Mg, Si, Ca, Cr, Al, Co, Mn, Na, Ti, Cu, C a S. Dále jsou do databáze zahrnuty linie Ar, Ne, O a N. V případě ablační analýzy za podmínek atmosféry a dále v případě interpretace spekter meteorů lze detegovat i emisní linie těchto atomů. U všech výše uvedených prvků v atlasu byly detegovány a přiřazeny jak linie neutrálních specií SI, tak linie jednou ionizovaných specií SII. Tento atlas bude dále sloužit jako zdrojová databáze pro automatické programy *MeteorMaster* a *Ablator*.

Z výsledků provedené CF analýzy (4.2) vyplývá, že vytvořený atlas spektrálních linií zahrnuje i linie, jejichž identifikace a hodnoty nabitovaných parametrů jsou zatíženy značnou nejistotou. Tato nejistota plyne zejména z přítomnosti samoabsorpce emisních linií, která v některých případech značně ovlivňuje experimentálně získané intenzity spektrálních linií a tím zavádí chybu do následné CF analýzy. Pokud jsou linie velmi pečlivě vybírány operátorem, lze zahrnutí linií vykazujících samoabsorpci či koincidenci předejít. Daní za

tento postup je vysoká časová náročnost. Oproti tomu automatizovaný software za současného stavu beze všech pochyb nebude schopen tyto linie odlišit. To je diskutováno v příslušných kapitolách práce. Cílem dalšího výzkumu musí být vývoj metodiky, která postaví automatizovaný postup na roveň časově náročné manuální práci operátora a přesnosti jiných typů analýz (zejména mikrosondou atd. jak je uvedeno v kapitole 2.5 úvodu zabývající se přehledem analytických technik).

Dalším zdrojem nepřesností může být vliv překryvu spektrálních linií, které rovněž ovlivňují stanovení intenzit, a navíc mohou být příčinou chybného přiřazení linie spektroskopickému přechodu. Nicméně, tento seznam je primární verzí, která bude v nadcházejícím výzkumu s přibývajícimi daty dále upravována. Vzhledem k značnému rozsahu předloženého atlasu spektrálních linií, je však výše zmíněná nepřesnost zahrnutých dat přijatelná a atlas tak může sloužit jako pomůcka při dalších spektroskopických analýzách podobných meteoritů. Vysoký počet přiřazených linií neumožňuje zařadit atlas ve formě tabulky přímo textu této práce, a proto je přesunut do elektronické přílohy této práce ve formátu dokumentu *Microsoft Excel*.

Z tohoto seznamu byly dále vybrány signifikantní linie. Jedná se převážně o linie s vysokou intenzitou, které se vyskytovaly ve většině analyzovaných spekter. Z tohoto důvodu lze tyto linie považovat za linie typicky se vyskytující v ablačních spektrech meteoritů. Tyto linie lze označit jako tzv. *markery*. Jedná se o linie, či série linií, na jejichž základě lze kvalitativně potvrdit přítomnost daného prvku ve vzorku. V ablačních spektrech meteoritů byly nalezeny signifikantní linie prvků Fe, Mg, Si, Cr, Al, Na, Ca

Meteority	Přiřazené linie	Vybrané signifikantní linie
Porangaba	2146	127
Čeljabinsk	2528	181
Northwest Africa 869	2200	209
Dhofar 1994	3323	235
Celkem	6630	321

Tabulka č.3: Počty přiřazených a vybraných signifikantních emisních linií ze spekter jednotlivých meteoritů

Do této databáze bylo vybráno celkem 321 emisních linií. Přesný počet linií všech přiřazených linií, včetně linií signifikantních, vybraných ze spekter určitého meteoritu, je uveden v tabulce č.3. Atlas těchto signifikantních emisní linií je uveden v tištěné příloze této práce.

4.1.1. Železo

Emisní linie železa jsou v ablačních spektrech meteoritů hojně zastoupeny. Celkem bylo nalezeno více jak 2000 linií železa, čímž se jedná nejvíce zastoupený prvek ve spektrech meteoritů. Linie železa jsou nejvhodnější pro stanovení teploty plazmatu za podmínek LTE.

Čáry Fe I i Fe II se vyskytují téměř v celé oblasti UV/VIS spektra. Co se týče signifikantních linií, tak linie Fe I tvoří výrazné pásy v oblasti 330-450 nm a 530-550 nm. Fe II signifikantní linie poté tvoří významný pás mezi 250-300 nm.

Emisní linie železa často koincidují s emisními liniemi převážně Cr, Ti, Mn a Ca.

4.1.2. Hořčík

Emisních linie hořčíku jsou v ablačních spektrech meteoritů méně zastoupeny. Bylo přiřazeno okolo jednoho sta linií hořčíku, vyskytujících se v rozsahu vlnových délek od 279-519 nm. Na druhou stranu hořčík tvoří několik skupin velmi intenzivních signifikantních linií. V případě Mg I jde o triplety vyskytující se okolo 278 nm, 285 nm, 383 nm a dublety na 309 nm, a 518 nm. Mg II poté tvoří kvadruplet okolo 279 nm, triplet kolem 292 nm a 448 nm.

Tyto významné linie hořčíku však často podléhají samoabsorpci.

4.1.3. Křemík

Emisní linie křemíku jsou v ablačních spektrech meteoritů zastoupeny podobně jako linie křemíku. Bylo přiřazeno okolo jednoho sta linií křemíku, vyskytujících se v rozsahu vlnových délek od 212-804 nm. Významný pás signifikantních linií Si I lze nalézt mezi 250-254 nm.

Křemík také stejně jako hořčík a vápník tvoří velmi intenzivní linie, které často vykazují samoabsorpci.

4.1.4. Chrom

V ablačních spektrech meteoritů bylo přiřazeno více jak tři sta linií. Linie chromu lze opět nalézt v celé šíři UV/VIS spektra, avšak většina těchto linií má nízkou intenzitu. Vyjimku tvoří jediná signifikantní linie Cr II na 527,99 nm. Dále se ve spektrech vyskytují pásy emisních linií Cr I v oblastech 357-361 nm a 425-436 nm.

Emisní linie chromu často koincidují s liniemi železa a titanu.

4.1.5. Hliník

Emisní linie hliníku jsou v ablačních spektrech meteoritů málo zastoupeny. Celkem bylo přiřazeno kolem devadesáti linií v rozsahu celého spektra. Významné intenzivní signifikantní linie Al I lze nalézt v první polovině UV/VIS spekter. Jedná se o dvojce čar v rozmezí 307-309 nm a dvojici čar v rozmezí 394-397 nm. Významnou linii Al II lze najít na 411,6 nm.

4.1.6. Sodík

Sodík je z hlediska ablačních spekter problémový prvek. V ablačních spektrech meteoritů bylo sice nalezeno více jak sto linií sodíku vyskytujících se od 247-679 nm, avšak linie sodíku vykazují často samoabsorpci. K nejvýznamnějším intenzivním liniím sodíku patří sodíkový dublet nalézající se na 589,0069 nm a 589,6037 nm. Další intenzivní linii sodíku lze najít na 285,2 nm.

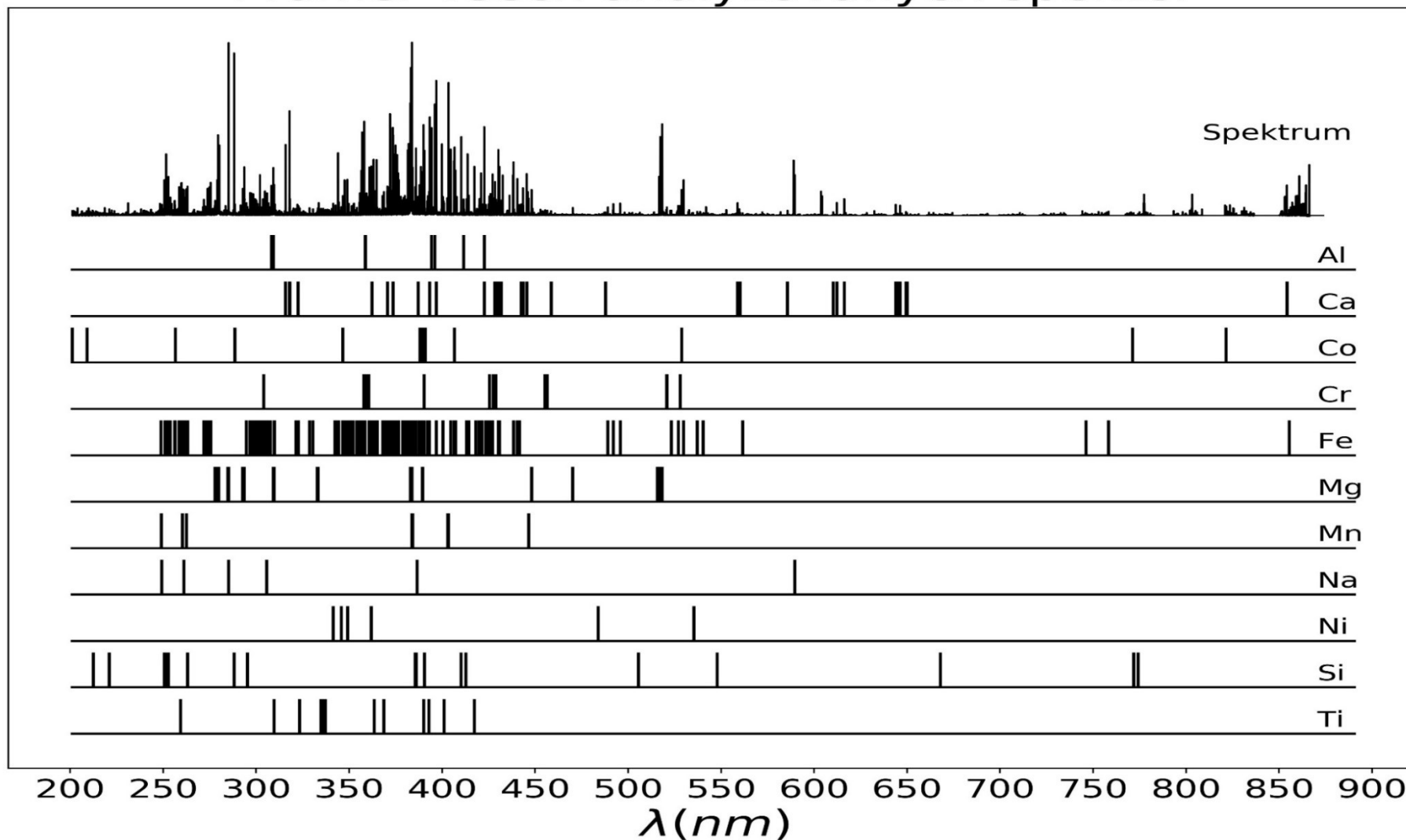
4.1.7. Vápník

Emisní linie vápníku jsou v ablačních spektrech meteoritů zastoupeny zhruba stejně jako emisní linie hořčíku. Celkem bylo přiřazeno více jak sto linií vápníku, vyskytujících se v celé šíři UV/VIS spektra. Významné linie Ca I jsou pozorovatelné v oblasti od 385-450 nm, 550-560 nm.

4.1.8. Titan

Emisní linie titanu v ablačních spektrech meteoritů hojně zastoupeny. Celkem bylo přiřazeno více než 400 linií titanu, avšak nenabývají tak vysokých intenzit jako například železo či hořčík. Ze signifikantních linií Ti I lze zmínit linie na 363,5 nm a 368,7 nm. Často lze najít pásy méně intenzivních linií v oblastech 293-340 nm a 360-400 nm.

Průměr všech analyzovaných spekter



Obrázek č.15: Názorná ukázka pozice (*stick diagram*) signifikantních linií jednotlivých významných prvků. Pro prezentaci bylo vybráno spektrum, jež je průměrem všech analyzovaných spekter všech čtyř meteoritů. Důvodem je přítomnost všech zde znázorněných linií v ilustračním spektru. *Stick* diagramy signifikantních linií jednotlivých meteoritů jsou uvedeny v příloh

4.2. Bezkalibrační analýza

Výše uvedený vytvořený atlas emisních linií byl použit jako zdrojová databáze automatického programu pro CF-LIBS analýzu. Pro analýzu byla náhodně vybrána tři ablační spektra (měřená za vakua) meteoritu Porangaba. Pro posouzení správnosti výpočtu CF analýzy byla použita data z EDS/WDS prvkové analýzy meteoritu Porangaba. Dále byla pro porovnání použita data získaná manuální CF-LIBS analýzou, která byla již dříve provedena školitelem autora této práce, a která je součástí momentálně připravované publikace.

Metody založené na aplikaci Boltzmannova vynesení předpokládají dosažení LTE v ablačním plazmatu. Tento předpoklad je však často splněn nedokonale, především vlivem rychlého rozpínání se plazmatu. Z tohoto důvodu lze v plazmatu definovat několik různých teplot, které se mohou vzájemně svými hodnotami lišit. U ablačního plazmatu se jedná především o excitační teplotu neutrálních atomů (popisuje populování dostupných energetických hladin atomů), excitační teplotu iontů a teplotu ionizační, která popisuje relativní abundance různých ionizačních stupňů daného prvku v plazmatu. V případě této práce byly relativní koncentrace prvků vypočítány CF analýzou, do které byly zahrnuty pouze spektrální linie neutrálních atomů. Následně byly dopočteny relativní koncentrace jednou nabitých iontů pomocí Sahovy rovnice:

$$\frac{c_{j+1}N_e}{c_j} = \frac{2Q^+(T)}{N_eQ(T)} \cdot \left(\frac{2\pi m_e kT}{h^2}\right)^{\frac{3}{2}} \cdot \exp\left(\frac{-E_{j,j+1}}{kT}\right) \quad (27)$$

kde c_{j+1} odpovídá koncentraci iontů, c_j odpovídá koncentraci neutrálnů, $Q^+(T)$ je partiční funkce za teploty T pro ionizované specie, $Q(T)$ je partiční funkce za teploty T pro neutrální specie, m_e je hmotnost elektronu, k je Boltzmannova konstanta, h je Planckova konstanta, T je ionizační teplota a $E_{j,j+1}$ je ionizační energie potřebná k ionizaci neutrálu do prvního ionizačního stupně.

Excitační teplota neutrálních atomů byla určena na základě vztahů (12) (15) a (16) jakožto reciproká hodnota směrnice lineární regrese Boltzmanova (16) vynesení. Jako fixní teplota plazmatu byla zvolena excitační teplota Fe I. Důvodem je její největší přesnost vzhledem k počtu vynesných linií a symetrii Boltzmanova vynesení. Tento postup poskytoval výsledky, které byly v lepší shodě s EDS/EDS analýzou, než v případě zahrnutí iontů přímo

do CF analýzy.

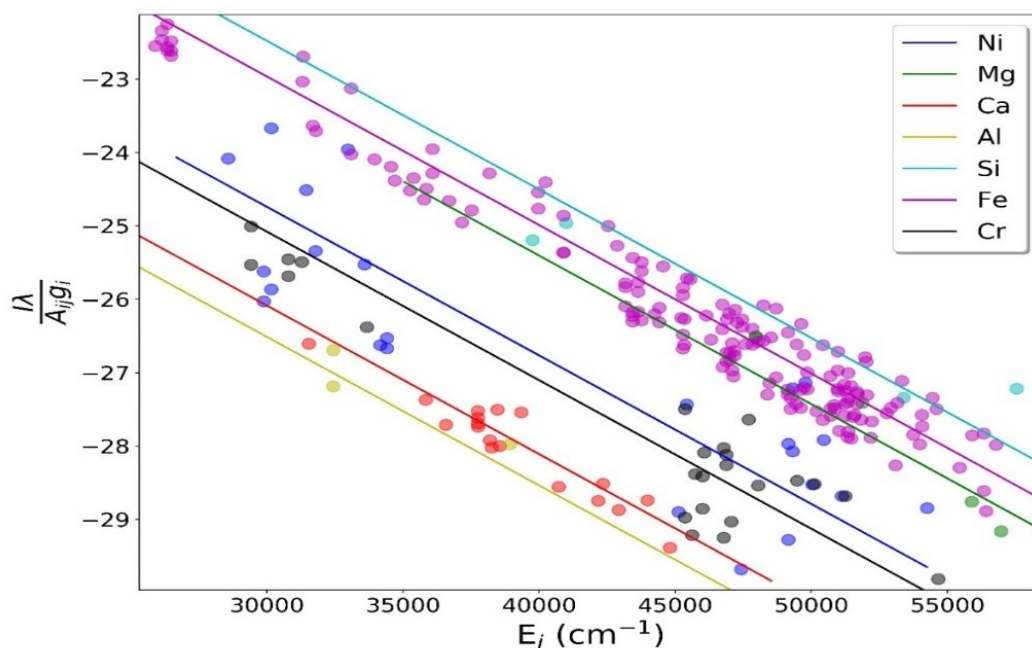
Pro výpočet relativních koncentrací ionizovaných specie je dále nutné znát elektronovou hustotu plazmatu. Tato hodnota byla získána výpočtem z rovnice (25). Jako nejvhodnější linie pro výpočet hustoty plazmatu z emisního spektra je Balmerova $H\alpha$ linie (656,28), jejíž FWHM je na změnu elektronové hustoty nejcitlivější. Nicméně v žádném z vyhodnocovaných spekter nebyla tato linie nalezena. Pro výpočet byla tedy vybrána linie Fe I na 426,047 nm. Parametr Starkova rozšíření Ω pro tuto linii, mající hodnotu 0,11 A/nm, byl vybrán z publikace (Konjević, 2002).

Vypočtené hodnoty excitačních teplot (Fe I) a hustot ablačního plazmatu jednotlivých naměřených spekter, jsou uvedeny v tabulce č.7. Oba tyto parametry byly dále použity pro CF analýzu. Podle zjištěné teploty byla vybrána partiční funkce (jejíž hodnota je závislá na teplotě) a hodnota elektronové hustoty plazmatu byla dosazena do Sahovy rovnice (27) pro výpočet koncentrací jednou nabitých iontů.

Porangaba	T [K]	Elektronová hustota [m-3]
Spektrum 1	9207	5,49E+23
Spektrum 2	8822	7,71E+23
Spektrum 3	11558	4,70E+23

Tabulka č.4: Vypočítané hodnoty teplot a hustot plazmatu.

Vzhledem k výskytu samoabsorpce a možného překryvu spektrálních linií, zahrnovala data použitá pro Boltzmannovo vynesení i odlehle hodnoty. Tyto body byly iterativně odstraňovány do okamžiku, kdy žádná hodnota nebyla identifikována jako odlehlá (odchylka od lineární regrese nepřesahovala trojnásobek směrodatné odchylky). Tímto způsobem byla z Boltzmannova vynesení odstraněna zhruba jedna pětina všech zprvu vnesených linií. Boltzmannovo vynesení pro prvky Mg, Fe, Al, Ca, Si a Na je graficky znázorněno v následujícím grafu:

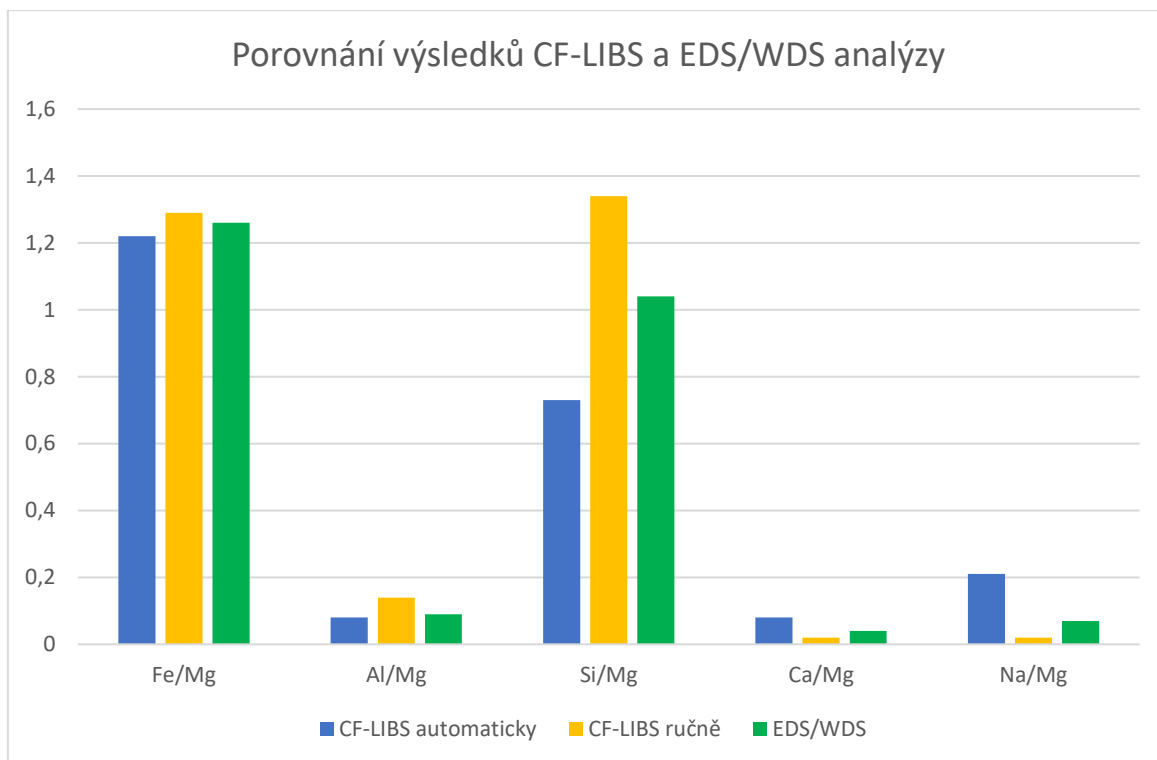


Graf č.1: Grafické znázornění bezkalibrační analýzy jednoho z vybraných spekter meteoritu Porangaba. Každá přímka reprezentuje lineární fit konkrétního Boltzmanova vynesení pro daný prvek.

V grafu č.1 je graficky znázorněna metoda CF-LIBS analýzy. Reciproká hodnota směrnice jednotlivých fitů odpovídá excitační teplotě atomů (v našem případě nerovnováhy je fixována na excitační teplotu Fe I) daných prvků. Hodnoty úseků na ose y jednotlivých lineárních regresí jsou přímo úměrné přirozeným logaritmům relativních koncentrací jednotlivých prvků.

Pro manuální výpočet CF-LIBS analýzy byly vybrány řádově jednotky až desítky emisních linií, které byly na rozdíl od automatického vyhodnocení vybírány na základě subjektivního rozhodnutí školitele. Tímto způsobem tak byly pro výpočet vybrány čáry, které na první pohled nejevily známky samoabsorpce, měly symetrický profil a byly jasně izolované od svého okolí.

Výsledné průměrné hodnoty relativních koncentrací prvků Al, Ca, Fe, Si, Na a Mg normalizovaných na hodnotu koncentrace Mg spočtených automaticky i manuálně metodou CF-LIBS a jejich srovnání s analýzou EDS/WDS, jsou uvedeny v následujícím grafu:



Graf č.2: Grafické porovnání průměrné hodnoty výsledků CF-LIBS a výsledků z EDS/WDS analýzy meteoritu Porangaba.

Z porovnání výsledků všech analýz je patrné, že v nejlepší shodě s EDS/WDS bylo stanovení Fe a Al. U automatické CF-LIBS analýzy Al lze pozorovat dokonce lepší shodu s EDS/WDS analýzou nežli v případě manuálního provedení. V případě Si byl pozorován větší rozptyl koncentrací stanovených oběma použitými metodami CF-LIBS a EDS/WDS. Tento výsledek lze vysvětlit vysokou koncentrací Si ve vzorku a tím i větší pravděpodobností výskytu samoabsorpce, která může společně s překryvem spektrálních linií negativně ovlivnit přesnost analýzy. V případě Na a Ca je pravděpodobně hlavní příčinou nadhodnocení jejich koncentrace překryv některých vybraných spektrálních linií s liniemi jiných prvků. Analýza Na byla navíc založena na nižším počtu spektrálních linií, což může rovněž zvýšit nejistotu ve stanovení.

Elementární analýza meteoritu Porangaba metodou automatické CF-LIBS předložená v této práci, je v dobré shodě s dříve provedenými analýzami (manuální CF-LIBS a EDS/WDS). Vzhledem k tomu, že tato analýza, založená na vytvořeném atlasu spektrálních linií prvků vyskytujících se ve zkoumaných vzorcích meteoritů, byla provedena automatickým algoritmem vyvíjeným na našem pracovišti, byla přesnost vypočtených koncentrací většiny analytů vyšší, než byl původní předpoklad. To ukazuje na dobrou kvalitu dat obsažených ve vytvořeném spektrálním atlasu.

Na základě dosažených výsledků z provedené CF-LIBS analýzy bude v pokračujícím výzkumu věnována pozornost měření časově rozlišených spekter ablačního plazmatu. Cílem bude především zjistit, jak se v určitém čase po laserovém pulzu mění intenzity významných spektrálních linií a nalézt optimální podmínky pro kvantitativní analýzu. Dále budou měřena ablační spektra za různých tlaků a energií laserového pulzu, a to z důvodu pozorování vlivu experimentálních podmínek na výskyt samoabsorpce.

4.3. Spektrum bolidu

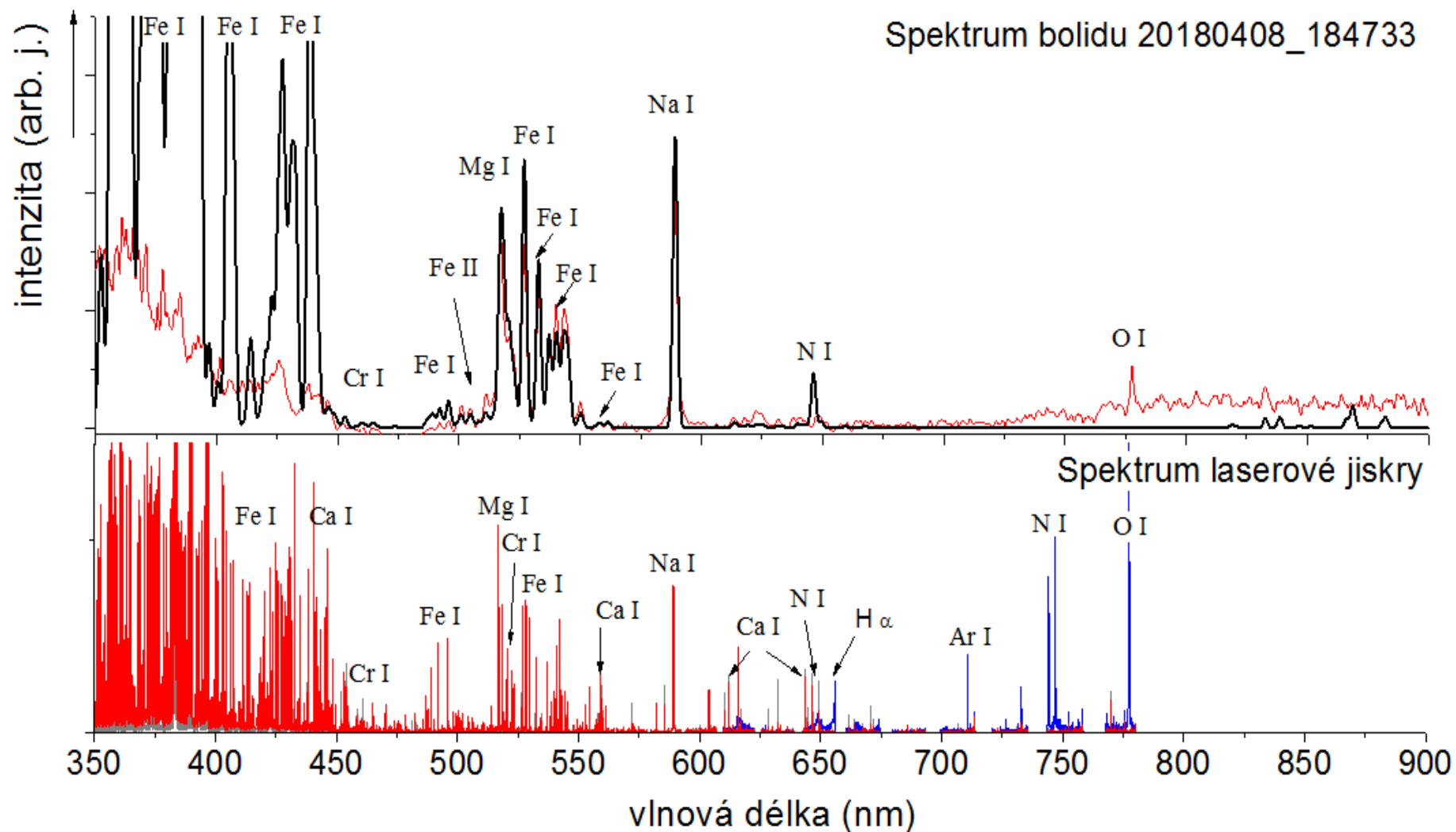
8.4.2018 v 18:47:33 UTC zaznamenala síť pozorovacích kamer CEMeNtu (Lenžová, 2017) téměř osmivteřinový pád jasného meteoru v oblasti nad jižním Maďarskem. Vzhledem k jeho výraznému jas, který se v tu chvíli mohl vyrovnat jas, lze tento meteor označit za bolid. Tento bolid nese označení 20180408_184733 a byl zaznamenán sérií hned několika kamer na jihovýchodní Moravě, a to i včetně spektrografických kamer, které zachytili jeho emisní spektrum. Jedná se o sporadický bolid, tedy těleso, které nepatří žádnému známému meteorickému roji.



Obrázek č.16: Nalevo: Fotografie bolidu 20180408_184733 pořízená poblíž Veszprému (Maďarsko) Autor: M. Landy-Gyebnar. Napravo: Detailní snímek spektra bolidu zaznamenaný spektrografem na Hvězdárně Valašské Meziříčí. Autor: Hvězdárna Valašské Meziříčí

Výše uvedený atlas emisních linií prvků vyskytujících se v meteoritech, která byla vytvořena autorem této publikace, byl použit pro prvkovou analýzu spektra bolidu programem *MeteorMaster*. Poté, co byly na základě databáze přiřazeny signifikantní linie, program provedl bezkalibrační analýzou výpočet prvkového složení padajícího objektu, na jehož základě bylo možné daný meteorit klasifikovat do specifické meteoritické skupiny.

Na následujícím obrázku je vyobrazeno spektrum bolidu zaznamenané spektrografickou kamerou umístěnou na Hvězdárně ve Valašském Meziříčí. Na obrázku je jednak vidět reálné spektrum bolidu a jednak fitované spektrum, podle kterého bylo vypočteno prvkové složení padajícího tělesa. Pro srovnání je pod ním ukázka vysoce rozlišeného laboratorního spektra laserové jiskry na povrchu meteoru.



Obrázek č.17: Spektrum bolidu 20180408_184733 fitované programem MeteorMaster doplněné laboratorním spektrem laserové jiskry na povrchu meteoritu.

druh	označení	Ca	Cr	Fe	Mg	Mn	Na	Reference
SPO	20180408_184733	0,01	0,01	2,9	1	0,002	0,01	CF-LIBS MeteorMaster
PER	20150812_232102	0,4	0,001	1,0	1	0,08	0,02	CF-LIBS MeteorMaster
LEO	20151119_034504	0,1	0,001	1,0	1	0,08	0,01	CF-LIBS MeteorMaster
TAU	20151028_202739	0	0	2,5	1	0	0,03	CF-LIBS MeteorMaster
meteorit	Pallasit Ahumada	0,001	0	2,5	1	0,002	0	(Scott, 1977)
	Mesosiderit Patwar	0,9	0,02	1,4	1	0,04	0,05	(Jarosewich and Brian, 1969)
	Dho 1764 (CV3)	0,1	0,02	1,2	1	0,01	0,003	CF-LIBS měřeno na UFCHJH
	Dho 1709 (LL4)	0,2	0,05	1,4	1	0,02	0,02	CF-LIBS měřeno na UFCHJH

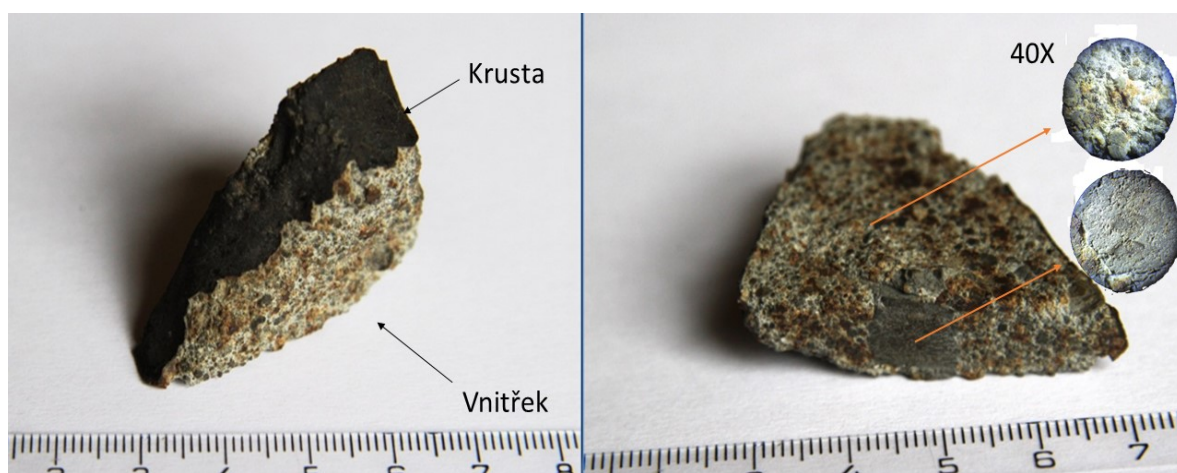
Tabulka č.5: porovnání složení maďarského bolidu 20180408_184733 s jinými meteory a meteority analyzovanými na pracovišti Laserové spektroskopie Ústavu fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského Akademie věd České republiky v.v.i.

Výsledky analýzy prvkového složení bolidu programem *MeteorMaster* jsou uvedeny v tabulce x. Na základě získaných výsledků a na základě klasifikačního schématu podle obsahu Fe a Mg (Nittler et al., 2004) (viz obr č.2) lze usoudit, že daný bolid může být buďto pallasitem, nebo mesosideritem. Nicméně, na základě nízkého obsahu Ca byl daný bolid klasifikován jako palasit. Palasity patří mezi achondritické meteority. Jedná se o olivínové inkluze zalité v Fe-Ni kovu. Jejich původem jsou právě diferenciovaná tělesa. Palasity vznikly při roztržení diferenciovaného tělesa a společně s mesosiderity reprezentují hmotu na vzniklou smíšením rozhraní silikátového pláště a Fe-Ni jádra.

Z kamerového záznamu byla také spočtena dráha tohoto objektu ve Sluneční soustavě (Jakub Koukal). Právě díky kombinaci bezkalibrační analýzy spekter meteorů, jež nám poskytují prvkové složení padajících objektů a výpočtu drah objektů na základě videozáznamů, díky nimž lze určit dráhu a původ tělesa ve Sluneční soustavě, jsme schopni s postupem času mapovat chemické složení meziplanetární hmoty ve Sluneční soustavě, a to bez jakýchkoli nákladů potřebných na stavbu orbitálních satelitů. Aby se však tato vize stala skutečností, musí být pořizovány systematické záznamy, a to značný počtem pozorovacích kamer.

4.4. Mineralogie a petrologie meteoritu Porangaba

Na základě SEM EDS/WDS analýzy byl meteorit Porangaba klasifikován jako obyčejný chondrit L4, čímž byly potvrzeny výsledky dřívější studie (Bouvier et al., 2017). Navíc bylo zjištěno detailní mineralogické složení vybrané reprezentativní plochy meteoritu (Tabulka 6 na str. 73).

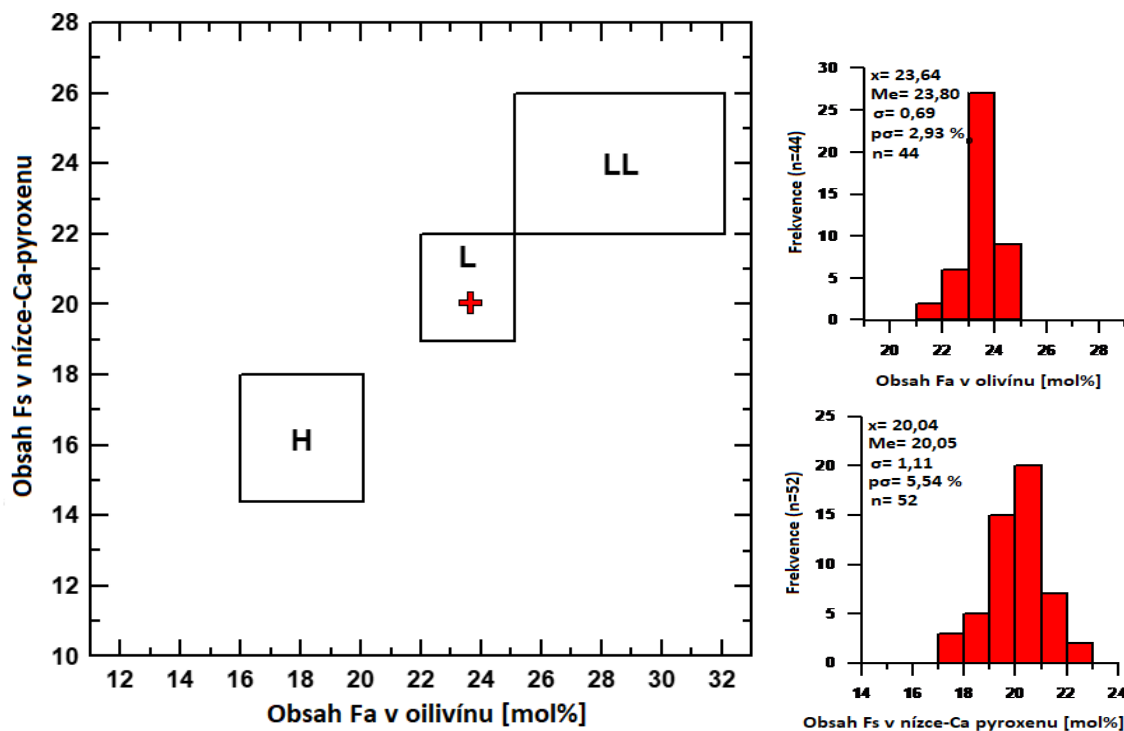


Obrázek č. 18: Meteorit Porangaba určený pro CF-LIBS analýzu. Na fotce vlevo je viditelná neznámá tmavá inkluze.

Na první pohled je patrné, že vzorek meteoritu Porangaba je z části pokryt černou krustou (obrázek). Ta je pravděpodobně pozůstatkem vnější kůry meteoroidu, která vznikla při průletu zemskou atmosférou. Vzorek je výrazně brekciovitého charakteru, kdy horninové úlomky včetně chonder, jsou jen velmi slabě stmeleny a vzorek se jeví jako heterogenní směs různých materiálů. Nápadná je poté tmavá inkluze neznámého původu (obrázek). Mimo přítomných chonder a jemnozrné matrix jsou dále přítomna nepravidelná zrna tvořená převážně kovovou slitinou Fe-Ni s vysokým podílem Fe a okrouhlá zrna tvořená troilitem.

Chemický typ meteoritu byl určen na základě stanoveného obsahu fayalitu v olivínu a ferrosilitu v nízcí vápenatém pyroxenu (Obrázek). Petrografický typ byl pak určen převážně na základě heterogenity složení olivínu ve studované ploše meteoritu. Průměrný obsah fayalitu v olivínu byl stanoven na 23,6 mol% (PMD (Percent mean deviation; procentuální směrodatná odchylka) = 2,9 %) a průměrný obsah ferrosilitu v nízcí vápenatém pyroxenu byl stanoven na 20,0 % (PMD = 5,5 %). Podle (Weisberg et al., 2006) je námi stanovený obsah fayalitu v olivínu typický pro obyčejný chondrit typu L. Petrografický typ byl následně určen pomocí kritérií zavedených (Van Schmus and Wood, 1967), podle kterých je námi zjištěná PMD olivínu specifická pro petrografický typ 4. Tyto výsledky byly zpočteny automatickým

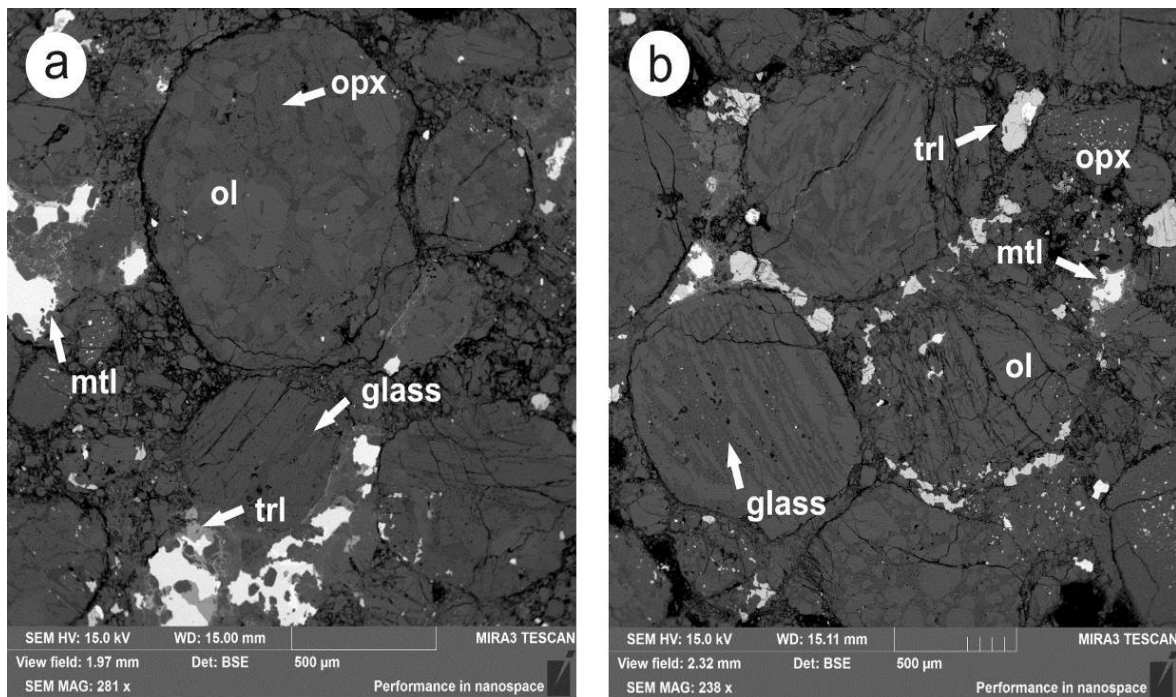
softwarom Aztec Energy od firmy OXFORD INSTRUMENTS.



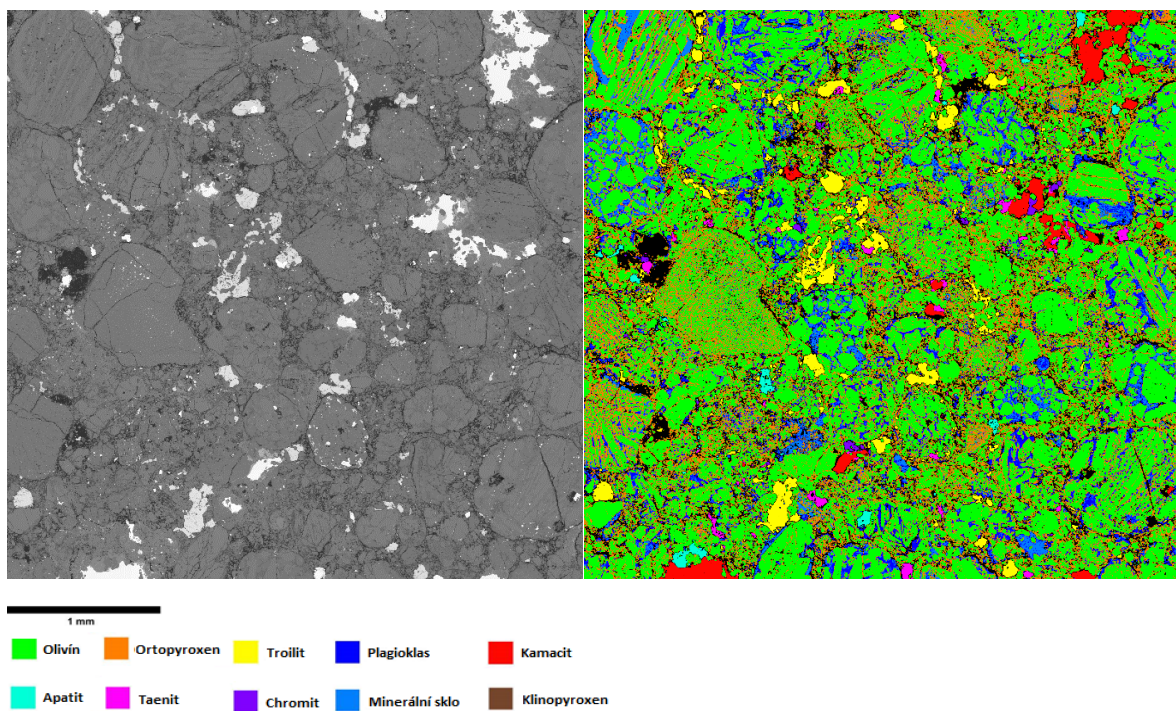
Obrázek č.19: Klasifikační schéma obyčejných chondritů na základě obsahu fayalitu (Fa) v olivínu a ferrosilitu (Fs) v níže-vápenatém pyroxenu. Převzato z publikace připravované autorem.

Na základě studií SEM snímků lze v meteoritu pozorovat jasně viditelné a snadno definovatelné chondrule a jemnozrnnou matrix (Obrázek 20). Velikost chondrulí se pohybuje zhruba mezi 0,4 mm až 5 mm. Chondrule jsou tvořeny převážně olivínem s komplikovanou a nestálou vnitřní strukturou. Příkladem mohou být občasné pozorovatelné linie minerálního skla (obr. 21-vlevo). Toto nedokonale vykrytalizované minerální sklo může indikovat tepelný šok, kterým bylo mateřské těleso pravděpodobně postiženo vinou impaktu s jiným tělesem, či se může jednat o počáteční fázi diferenciaci.

Pomocí EDS/WDS analýzy byla vytvořena distribuční mapa prvků. Snímky odražených elektronů (BSE) poté sloužili pro rozpoznání jemné minerální struktury meteoritu. Kombinací EDS/WDS analýzy a BSE snímků, byla následně vytvořena fázová distribuční mapa jednotlivých minerálů. Jejich obsah byl navíc poté pomocí softwaru *Aztec Phase Map Analysis* přepočten na hmotnostní procenta.



Obrázek č. 20: obrázek zpětně odražených elektronů reprezentující detailní texturu meteoritu Porangaba. Na obrázku jsou vidět jasně viditelné a ohraničené chondruly a jemnozrnná matrix. Minerály: ol-olivín, opx-ortopyroxen, mtl-kovy (taenit, kamacit), trl-troilit a glass-minerální sklo. Převzato z publikace připravované autorem



Obrázek č 21: Vpravo se nachází snímek ozařených elektronů reprezentující vybranou oblast meteoritu Porangaba pro EDS/WDS analýzu. Vlevo se nachází stejná oblast meteoritu, na které je vykreslena fázová distribuční mapa minerálů. Každá barva reprezentuje jeden minerál. Převzato z publikace připravované autorem

V meteoritu byla zjištěna přítomnost řady silikátových minerálů. Ty jsou reprezentovány převážně olivínem (43,8 hm%), pyroxeny (27,4 hm%), plagioklasem (4,5 hm%) a alkalickými skly (6,5 hm%). Chondrule jsou složeny převážně z olivínu (obr.Fázová distribuce).

Dále byla zjištěna značná přítomnost nesilikátových minerálů. Ty jsou reprezentovány především přítomností troilitu (7,5 hm%), minerálního skla (6,5 hm%), kamacitu (5,9 hm%), taenitu (2,2 %) a apatitu (0,6 hm%).

Podrobné prvkové složení jednotlivých minerálů ve studované ploše je uveden v tabulce č.6. Vzhledem ke krátkému pobytu meteoritu Porangaba v zemském prostředí se dá očekávat, že meteorit neprošel žádnou výraznější chemickou, či mineralogickou změnou vůči jeho původnímu složení v meziplanetárním prostoru.

	Plošné zastoupení minerálu [%]	Atomární zastoupení prvků v jednotlivých minerálech [at%]														
		Fe	Si	O	Mg	Ca	Al	Ti	Cr	Mn	Na	K	Ni	Co	S	P
Olivín	44,32	6,79	14,22	57,77	21,74	-	-	-	-	0,15	-	-	-	-	-	-
Ortopyroxen	19,70	4,10	19,77	59,92	15,72	0,24	0,03	0,02	0,06	0,15	-	-	-	-	-	-
Troilit	12,04	50,11	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	0,27	49,63	-
Plagioklas	4,65	0,23	22,26	61,66	0,16	0,85	8,48	-	-	-	5,95	0,41	-	-	-	-
Kamacit	6,30	92,79	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	5,87	1,34	-	-
Apatit	0,90	0,14	0,63	58,80	0,03	22,44	0,00	0,00	39,97	0,03	-	-	-	-	-	13,97
Taenit	0,93	66,20	0,35	-	-	-	-	-	-	-	-	-	33,44	-	-	-
Chromit	0,68	12,87	0,06	57,28	2,24	0,00	3,21	0,93	23,15	-	-	-	-	-	-	-
Minerální sklo	9,43	0,31	21,80	61,44	0,35	1,18	8,29	0,17	-	-	6,27	0,18	-	-	-	-
Klinnopyroxen	1,06	1,85	16,06	49,11	18,40	13,70	0,25	0,06	0,20	0,08	0,28	-	-	-	-	-
Celkové zastoupení prvku ve studované oblasti [at%]	-	16,35	13,46	47,12	12,97	0,55	1,18	0,02	0,37	0,10	0,87	0,04	0,37	0,12	5,98	0,13
Prvek/Mg	-	1,22	1,04	3,63	1,00	0,04	0,09	0,00	0,03	0,01	0,07	0,00	0,03	0,01	0,46	0,01

Tabulka č.6: Přehled zastoupení jednotlivých prvků v jednotlivých minerálech meteoritu Poranagaba. Celkové relativní koncentrace prvků normalizované na hořčík jsou použity jako referenční data k CF-LIBS analýze meteoritu.

5. Závěr

Byla naměřena experimentální ablační spektra meteoritů Porangaba (L4), Čeljabinsk (LL5), Northwest Africa 869 (L3-6) a Dhofar 1994 (CM2). Na základě takto naměřených spekter byl vytvořen atlas obsahující 6330 emisních linií a jim přiřazených parametrů spektroskopických přechodů, potřebných pro bezkalibrační analýzu. Tento atlas je vzhledem ke své velikosti k této práci přiložen pouze formou elektronické přílohy. Dále byl z původního atlasu vytvořen jeden menší atlas obsahující 322 signifikantních emisních linií opět s potřebnými přiřazenými parametry. Tento atlas je k práci přiložen formou tištěné přílohy společně se čtyřmi *stick* diagramy jednotlivých meteoritů.

Tyto atlasy následně posloužily jako zdrojové databáze automatických programů pro bezkalibrační vyhodnocení emisních spekter meteoritů a meteorů. Pro testování automatické analýzy metodou CF-LIBS sloužila experimentální ablační spektra meteoritu Porangaba. Pro porovnání správnosti hodnot získaných z CF analýzy, byl meteorit podroben prvkové EDS/WDS mikroanalýze, jejíž výsledky měly referenční hodnotu vůči hodnotám získaným metodou CF-LIBS. Metodou SEM EDS/WDS společně s interpretací BSE snímků byla provedena podrobná mineralogická analýza vybrané plochy meteoritu Porangaba.

Výsledky u CF-LIBS analýzy potvrdily obecně známý fakt, tedy, že metoda LIBS, co se přesnosti analýzy týče, nedosahuje takových přesností jako, v této práci referenční, rentgenová mikroanalýza či jiné konkurenční techniky, jako například rentgenová fluorescenční spektroskopie či metody využívající k detekci hmotnostní spektrometr (například ICP-MS). Jako řádově chybná se metodou CF-LIBS prokázala analýza křemíku a sodíku. U křemíku lze však poukázat na fakt, že se jedná o matriční prvek a je obecně známo, že matriční prvky se metodou LIBS špatně stanovují. U ostatních prvků a to zejména v případě podrobného výběru vhodných linií, lze docílit i vyšší přesnosti analýzy.

Na druhou stranu, technika LIBS má oproti výše jmenovaným konkurenčním technikám řadu výhod. Jedná se především o absenci nutnosti jakékoliv preanalytické přípravy vzorku (například při SEM EDS/WDS analýze je potřeba vzorek vyleštit a elektrodepozicí nanést vodivou vrstvu). V případě laboratorní LIBS analýzy lze snad jmenovat jen úpravu velikosti vzorku. Další významnou výhodou je to, že během LIBS analýzy dochází ke ztrátám vzorků v řádech ng- μ g, takže lze hovořit o téměř nedestruktivní analýze. Díky velmi jednoduché instrumentaci je LIBS aparatura mobilní a v některých případech jsou již vyráběny i ruční LIBS

spektrometry (SciAps, 2017). Spojení LIBS techniky softwaru zvládající automatickou bezkalibrační analýzu, má metoda CF-LIBS potenciál stát se rychlou, mobilní a *in-situ* měřící analytickou technikou. Technika LIBS již v dnešní době může najít uplatnění při kontrole výroby v hutním průmyslu, jaderných elektrárnách (Vítková, 2015) či při vyšetřování nehod. Za zmínku poté stojí nový projekt, kdy je mobilní LIBS aparatura využívána pro identifikaci druhu pneumatiky z brzdné dráhy automobilu (Prochazka et al., 2016).

Asi za největší výhodu, co se LIBS analýzy lze uvést pořizovací cenu aparatury. Zatímco pořizovací cena celkových sofistikovaných komerčních přístrojů, jako je například elektronová mikrosonda, XRF spektroskop či různé ionizační techniky v kombinaci s hmotnostním spektrometrem, se pohybuje v řádech desítek milionů korun (pro více informací např. (oxford-instruments.com, n.d.)), tak základní komponenty pro LIBS aparaturu, jako jsou Laser, emisní spektrometr a optická soustava, lze pořídit v řádech milionů korun.

Asi největším potenciálem metody LIBS, a spektroskopických technik obecně, je vesmírný výzkum. Díky výše uvedených předpokladů, již LIBS spektrometrem disponuje sonda Mars Curiosity (Bolshakov, 2014), která jí díky její schopnosti rychlé dálkové *in-situ* detekce, využívá pro analýzu tamního prostředí. Podle veřejných informací by měl být LIBS analyzátor součástí speciálního detektoru sondy, která by měla být poslána na misi na Mars v roce 2020 (Nasa.gov, 2016).

6. Seznam použité literatury

- Abdu, Y.A., Ericsson, T., 1997. Mossbauer spectroscopy, x-ray diffraction, and electron microprobe analysis of the New Halfa meteorite. *Meteorit. Planet. Sci.* 32, 373–375.
- Aragón, C., Aguilera, J.A., 2008. Characterization of laser induced plasmas by optical emission spectroscopy: A review of experiments and methods. *Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc.* 63, 893–916. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2008.05.010>
- Bolshakov, A., 2014. Kudos to Laser Induced Breakdown Spectroscopy (LIBS)! [WWW Document]. URL <https://appliedspectra.com/mars-lib.html>
- Borovicka, J., 1993. A fireball spectrum analysis. *Astron. Astrophys.* 279, 627–645.
- Bouvier, A., Gattacceca, J., Grossman, J., Metzler, K., 2017. The Meteoritical Bulletin, No. 105. *Meteorit. Planet. Sci.* 52, 2411. <https://doi.org/10.1111/maps.12944>
- Bouvier, A., Wadhwa, M., 2010. The age of the Solar System redefined by the oldest Pb-b age of a meteoritic inclusion. *Nat. Geosci.* 3, 637–641. <https://doi.org/10.1038/ngeo941>
- Bridges, J.C., Schmitz, B., Hutchison, R., Greenwood, R.C., Tassinari, M., Franchi, I.A., 2007. Petrographic classification of Middle Ordovician fossil meteorites from Sweden. *Meteorit. Planet. Sci.* 42, 1781–1789. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2007.tb00537.x>
- Callahan, M.P., Smith, K.E., Cleaves II, H.J., Ruzicka, J., Stern, J.C., Glavin, D.P., House, C.H., Dworkin, J.P., 2011. Carbonaceous meteorites contain a wide range of extraterrestrial nucleobases. *Proc. Natl. Acad. Sci. U. S. A.* 108, 13995–13998. <https://doi.org/10.1073/pnas.1106493108>
- Clayton, R., Mayeda, T., 1991. Oxygen isotope studies of ordinary chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 55, 2317–2337. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(91\)90107-G](https://doi.org/10.1016/0016-7037(91)90107-G)
- Clayton, R.N., Mayeda, T.K., 1996. Oxygen isotope studies of achondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 60, 1999–2017. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(96\)00074-9](https://doi.org/10.1016/0016-7037(96)00074-9)
- Cristoforetti, G., Tognoni, E., Gizzi, L.A., 2013. Thermodynamic equilibrium states in laser-induced plasmas: From the general case to laser-induced breakdown spectroscopy plasmas. *Spectrochim. ACTA PART B-ATOMIC Spectrosc.* 90, 1–22. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2013.09.004>
- DeMeo, F.E., Binzel, R.P., Slivan, S.M., Bus, S.J., 2009. An extension of the Bus asteroid taxonomy into the near-infrared. *Icarus* 202, 160–180.
- Franchi, I.A., Wright, I.P., Sexton, A.S., Pillinger, C.T., 1999. The oxygen-isotopic

- composition of Earth and Mars. *Meteorit. Planet. Sci.* 34, 657–661.
<https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.1999.tb01371.x>
- Gelpi, E., Oro, J., 1970. Organic compounds in meteorites-IV. Gas chromatography-mass spectrometric studies on the isoprenoids and other isomeric alkanes in carbonaceous chondrites. *Acta Geochemica Cosmochem.* 34.
- Goldschmidt, V.M., 1937. The principles of distribution of chemical elements in minerals and rocks. *J. Chem. Soc.* 655–673.
- Gradie, J., Tedesco, E., 1982. Compositional structure of the asteroid belt. *Science* (80-.). 216, 1405–1407.
- Haloda, J., Týcová, P., Korotev, R.L., Fernandes, V.A., Burgess, R., Thöni, M., Jelenc, M., Jakeš, P., Gabzdyl, P., Košler, J., 2009. Petrology, geochemistry, and age of low-Ti mare-basalt meteorite Northeast Africa 003-A: A possible member of the Apollo 15 mare basaltic suite. *Geochim. Cosmochim. Acta* 73, 3450–3470.
<https://doi.org/10.1016/j.gca.2009.03.003>
- Hayatsu, R., Matsuoka, S., Scott, R.G., Studier, M.H., Anders, E., 1977. Origin of organic matter in the early solar system-VII. The organic polymer in carbonaceous chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 41, 1325–1339. [https://doi.org/10.1016/0016-7037\(77\)90076-X](https://doi.org/10.1016/0016-7037(77)90076-X)
- Hornáčková, M., Plavčan, J., Rakovský, J., Porubčan, V., Ozdín, D., Veis, P., 2014. Calibration-free laser induced breakdown spectroscopy as an alternative method for found meteorite fragments analysis. *Eur. Phys. J. Appl. Phys.* 66, 10702.
<https://doi.org/10.1051/epjap/2014130465>
- Jarosewich, E., Brian, M., 1969. Chemical analyses with notes on one mesosiderite and seven chondrites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 33, 411–416.
- Jenninskens, P., Laux, C.O., Wilson, M.A., Schaller, E.L., 2004. The Mass and Speed Dependence of Meteor Air Plasma Temperatures. *Astrobiology* 4, 709–719.
<https://doi.org/10.1111/j.1466-8238.2007.00324.x>
- Kamp, I., Dullemond, C.P., 2004. The Gas Temperature in the Surface Layers of Protoplanetary Disks. *Astrophys. J.* 615, 991–999. <https://doi.org/10.1086/424703>
- Konjević, N., 2002. Experimental Stark Widths and Shifts for Spectral Lines of Neutral and Ionized Atoms (A Critical Review of Selected Data for the Period 1989 Through 2000). *J. Phys. Chem. Ref. Data* 31, 819. <https://doi.org/10.1063/1.1486456>
- Kornoš, L., Koukal, J., Piffl, R., Tóth, J., 2013. EDMOND meteor database, in: *Proceedings of the International Meteor Conference, Poznań, Poland.* pp. 23–25.

- Kramida, A., Ralchenko, Y., Reader, J., 2015a. NIST Atomic Spectra Database (ver. 5.1). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- Lenžová, N., 2017. Stanice sítě CEMeNt [WWW Document].
- Martins, Z., Botta, O., Fogel, M.L., Sephton, M.A., Glavin, D.P., Watson, J.S., Dworkin, J.P., Schwartz, A.W., Ehrenfreund, P., 2008. Extraterrestrial nucleobases in the Murchison meteorite. *EARTH Planet. Sci. Lett.* 270, 130–136.
<https://doi.org/10.1016/j.epsl.2008.03.026>
- Mcsween Jr, H.Y., 2010. Cosmochemistry.
- Montmerle, T., Augereau, J.-C., Chaussidon, M., Gounelle, M., Marty, B., Morbidelli, A., 2006. 3. Solar System Formation and Early Evolution: the First 100 Million Years. *Earth. Moon. Planets* 98, 39–95. <https://doi.org/10.1007/s11038-006-9087-5>
- Nakamura, T., Noguchi, T., Yada, T., Nakamuta, Y., Takaoka, N., 2001. Bulk mineralogy of individual micrometeorites determined by X-ray diffraction analysis and transmission electron microscopy. *Geochim. Cosmochim. Acta* 65, 4385–4397.
- Nasa.gov, 2016. SuperCam [WWW Document]. URL
<https://mars.nasa.gov/mars2020/mission/instruments/supercam/>
- Nittler, L.R., McCoy, T.J., Clark, P.E., Murphy, M.E., Trobka, J.I., Jarosewich, E., 2004a. Bulk element compositions of meteorites: a guide for interpreting remote-sensing geochemical measurements of planets and asteroids. *Antarct. Meteor. Res.* 233–253.
- oxford-instruments.com, n.d. Oxford instruments [WWW Document]. URL
<https://www.oxford-instruments.com/?src=tn>
- Palme, H., 2000. Are there chemical gradients in the inner solar system. *Sp. Sci. Rev.* 92, 237–262. <https://doi.org/10.1023/a:1005247329412>
- Pizzarello, S., Shock, E., 2017. Carbonaceous Chondrite Meteorites: the Chronicle of a Potential Evolutionary Path between Stars and Life. *Orig. Life Evol. Biosph.* 1–12.
<https://doi.org/10.1007/s11084-016-9530-1>
- Prochazka, D., Bilík, M., Prochazková, P., Brada, M., Klus, J., Pořízka, P., Novotný, J., Novotný, K., Ticová, B., Bradáč, A., 2016. Detection of visually unrecognizable braking tracks using Laser-Induced Breakdown Spectroscopy, a feasibility study. *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.* 118, 90–97.
- Raymond, S.N., Quinn, T., Lunine, J.I., 2006. High-resolution simulations of the final assembly of Earth-like planets I. Terrestrial accretion and dynamics. *Icarus* 183, 265–282. <https://doi.org/10.1016/j.icarus.2006.03.011>
- Rieder, R., Economou, T., 1997. The chemical composition of Martian soil and rocks returned

- by the mobile alpha proton x-ray spectro. *Science* (80-.). 278, 1771–1774.
- Rubin, A.E., Grossman, J.N., 2010. Meteorite and meteoroid: New comprehensive definitions. *Meteorit. Planet. Sci.* 45, 117–125. <https://doi.org/10.1111/j.1945-5100.2009.01009.x>
- Rubin, A.E., Ma, C., 2017. Meteoritic minerals and their origins. *Chemie der Erde - Geochemistry* 77, 325–385. <https://doi.org/10.1016/j.chemer.2017.01.005>
- SciAps, I., 2017. Using Handheld LIBS for Carbon Analysis in Low-alloy and Carbon Steels [WWW Document]. URL <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=13562>
- Scott, E.R.D., 1977. Pallasites—metal composition, classification and relationships with iron meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 41, 349–360.
- Sephton, M.A., 2002. Organic compounds in carbonaceous meteorites. *Nat. Prod. Rep.* 19, 292–311. <https://doi.org/10.1039/b103775g>
- Shinotsuka, K., Ebihara, M., 1997. Precise determination of rare earth elements, thorium and uranium in chondritic meteoritic by inductively coupled plasma mass spectrometry - a comparative study with radiochemical neutron activation analysis. *Anal. Chim. Acta* 338, 237–246. [https://doi.org/10.1016/S0003-2670\(96\)00528-4](https://doi.org/10.1016/S0003-2670(96)00528-4)
- Short, J.M., Andersen, C.A., 1965. Electron microprobe analyses of the Widmanstätten structure of nine iron meteorites. *J. Geophys. Res.* 70, 3745–3759.
- Shrbený, L., 2009. Rozložení meteoritických těles ve sluneční soustavě z přesných fotografických záznamů bolidů.
- Skocic, M., Bukvic, S., 2016. Laser induced plasma expansion and existence of local thermodynamic equilibrium. *Spectrochim. ACTA PART B-ATOMIC Spectrosc.* 125, 103–110. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2016.09.011>
- Swedenborg, E., 1734. *Opera philosophica et mineralia I–III*. Dresden & Leipzig.
- Tognoni, E., Cristoforetti, G., Legnaioli, S., Palleschi, V., 2010. Calibration-Free Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: State of the art. *Spectrochim. Acta - Part B At. Spectrosc.* 65, 1–14. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2009.11.006>
- Tognoni, E., Cristoforetti, G., Legnaioli, S., Palleschi, V., 2010. Review Calibration Free Laser- Induced Breakdown Spectroscopy: State of the art. *Spectrochim. Acta Part B At. Spectrosc.* 65, 1 – 14.
- Trieloff, M., Jessberger, E.K., Herrwerth, I., Hopp, J., Fiéni, C., Ghéllis, M., Bourot-Denise, M., Pellas, P., 2003. Structure and thermal history of the H-chondrite parent asteroid revealed by thermochronometry. *Nature* 422, 502.
- Váňa, P., 2017. Simulace plazmatu meteorů pomocí výkoných laserů: Od laboratorní ablační

spektroskopie ke složení meziplanetární hmoty.

Van Schmus, W.R., Wood, J.A., 1967. A chemical-petrologic classification for the chondritic meteorites. *Geochim. Cosmochim. Acta* 31, 747–765. [https://doi.org/10.1016/S0016-7037\(67\)80030-9](https://doi.org/10.1016/S0016-7037(67)80030-9)

Vítková, G., 2015. Spektrometrie Laserem Buzeného Plazmatu (Libs) Vzdálených Objektů 1–108.

Weisberg, M.K., McCoy, T.J., Krot, A.N., 2006. Systematics and Evaluation of Meteorite Classification. *Meteorites early Sol. Syst. II* 19–52.

Zhang, S., Wang, X., He, M., Jiang, Y., Zhang, B., Hang, W., Huang, B., 2014. Laser-induced plasma temperature. *Spectrochim. ACTA PART B-ATOMIC Spectrosc.* 97, 13–33. <https://doi.org/10.1016/j.sab.2014.04.009>

7. Přílohy

7.1 Seznam příloh

Příloha A – Atlas signifikantních emisních linií s přiřazenými parametry spektroskopických přechodů prvků, typicky se vyskytujících v meteoritech. Příloha je tištěna a je součástí této práce.

Příloha B – Atlas signifikantních emisních linií s přiřazenými parametry spektroskopických přechodů prvků, typicky se vyskytujících v meteoritech. Příloha je odevzdána pouze elektronicky do systémového rozhraní SIS, a to ve formátu dokumentu *Microsoft Excel 2016*.

Příloha C – Podrobná literální rešerše na téma klasifikace meteoritů. Příloha je odevzdána pouze elektronicky do systémového rozhraní SIS, a to ve formátu dokumentu s příponou.pdfA.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
1	Al I	308,215	308,215	58700000	3s2.3d	2D	3/2	32435,45	4	3s2.3p	2P*	1/2	0,00	2
2	Al I	309,272	309,271	72900000	3s2.3d	2D	5/2	32436,80	6	3s2.3p	2P*	3/2	112,06	4
3	Al I	309,288	309,284	11600000	3s2.3d	2D	3/2	32435,45	4	3s2.3p	2P*	3/2	112,06	4
4	Al I	394,396	394,401	49900000	3s2.4s	2S	1/2	25347,76	2	3s2.3p	2P*	1/2	0,00	2
5	Al I	396,152	396,152	98500000	3s2.4s	2S	1/2	25347,76	2	3s2.3p	2P*	3/2	112,06	4
6	Al II	358,693	358,693	26200000	3s.4f	3F*	3	123420,45	7	3s.3d	3D	3	95549,42	7
7	Al II	411,550	411,544	701000	3p.4s	3P*	0	145776,15	1	3s.4d	3D	1	121484,25	3
8	Al II	422,754	422,750	8310000	3s.8f	3F*	3	145131,93	7	3s.4d	3D	2	121483,92	5
9	Ca I	322,584	322,590	16000000	3p6.4s.7d	3D	3	46306,06	7	3p6.4s.4p	3P*	2	15315,94	5
10	Ca I	362,405	362,411	21200000	3p6.4s.5d	3D	1	42743,00	3	3p6.4s.4p	3P*	0	15157,90	1
11	Ca I	387,247	387,254	5400000	3p6.4s.6f	3F*	3	46164,79	7	3p6.3d.4s	3D	2	20349,26	5
12	Ca I	422,668	422,673	218000000	3p6.4s.4p	1P*	1	23652,30	3	3p6.4s2	1S	0	0,00	1

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm-1]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm-1]	g_j
13	Ca I	428,296	428,301	43400000	3p6.4p2	3P	2	38551,56	5	3p6.4s.4p	3P*	1	15210,06	3
14	Ca I	429,909	429,899	46600000	3p6.4p2	3P	1	38464,81	3	3p6.4s.4p	3P*	1	15210,06	3
15	Ca I	430,259	430,253	136000000	3p6.4p2	3P	2	38551,56	5	3p6.4s.4p	3P*	2	15315,94	5
16	Ca I	430,779	430,774	199000000	3p6.4p2	3P	0	38417,54	1	3p6.4s.4p	3P*	1	15210,06	3
17	Ca I	431,865	431,865	74000000	3p6.4p2	3P	1	38464,81	3	3p6.4s.4p	3P*	2	15315,94	5
18	Ca I	442,538	442,544	49800000	3p6.4s.4d	3D	1	37748,20	3	3p6.4s.4p	3P*	0	15157,90	1
19	Ca I	443,484	443,496	67000000	3p6.4s.4d	3D	2	37751,87	5	3p6.4s.4p	3P*	1	15210,06	3
20	Ca I	443,567	443,568	34200000	3p6.4s.4d	3D	1	37748,20	3	3p6.4s.4p	3P*	1	15210,06	3
21	Ca I	445,474	445,478	87000000	3p6.4s.4d	3D	3	37757,45	7	3p6.4s.4p	3P*	2	15315,94	5
22	Ca I	487,806	487,813	18800000	3p6.4s.4f	1F*	3	42343,59	7	3p6.3d.4s	1D	2	21849,63	5
23	Ca I	558,867	558,875	49000000	3p6.3d.4p	3D*	3	38259,12	7	3p6.3d.4s	3D	3	20371,00	7
24	Ca I	559,833	559,848	43000000	3p6.3d.4p	3D*	1	38192,39	3	3p6.3d.4s	3D	1	20335,36	3

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
25	Ca I	560,139	560,128	8600000	3p6.3d.4p	3D*	2	38219,12	5	3p6.3d.4s	3D	3	20371,00	7
26	Ca I	585,753	585,745	66000000	3p6.4p2	1D	2	40719,85	5	3p6.4s.4p	1P*	1	23652,30	3
27	Ca I	610,269	610,272	9600000	3p6.4s.5s	3S	1	31539,49	3	3p6.4s.4p	3P*	0	15157,90	1
28	Ca I	612,221	612,222	28700000	3p6.4s.5s	3S	1	31539,49	3	3p6.4s.4p	3P*	1	15210,06	3
29	Ca I	616,211	616,217	47700000	3p6.4s.5s	3S	1	31539,49	3	3p6.4s.4p	3P*	2	15315,94	5
30	Ca I	643,901	643,908	53000000	3p6.3d.4p	3F*	4	35896,89	9	3p6.3d.4s	3D	3	20371,00	7
31	Ca I	644,954	644,981	9000000	3p6.3d.4p	1D*	2	35835,41	5	3p6.3d.4s	3D	1	20335,36	3
32	Ca I	646,247	646,257	47000000	3p6.3d.4p	3F*	3	35818,71	7	3p6.3d.4s	3D	2	20349,26	5
33	Ca II	315,883	315,887	310000000	3p6.4d	2D	3/2	56839,25	4	3p6.4p	2P*	1/2	25191,51	2
34	Ca II	317,935	317,933	360000000	3p6.4d	2D	5/2	56858,46	6	3p6.4p	2P*	3/2	25414,40	4
35	Ca II	318,121	318,127	58000000	3p6.4d	2D	3/2	56839,25	4	3p6.4p	2P*	3/2	25414,40	4
36	Ca II	370,596	370,602	88000000	3p6.5s	2S	1/2	52166,93	2	3p6.4p	2P*	1/2	25191,51	2

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm-1]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm-1]	g_j
37	Ca II	373,695	373,690	170000000	3p6.5s	2S	1/2	52166,93	2	3p6.4p	2P*	3/2	25414,40	4
38	Ca II	393,367	393,366	147000000	3p6.4p	2P*	3/2	25414,40	4	3p6.4s	2S	1/2	0,00	2
39	Ca II	396,850	396,847	140000000	3p6.4p	2P*	1/2	25191,51	2	3p6.4s	2S	1/2	0,00	2
40	Ca II	854,205	854,209	9900000	3p6.4p	2P*	3/2	25414,40	4	3p6.3d	2D	5/2	13710,88	6
41	Co I	288,646	288,644	1600000	3p6.3d8.(3F).4p	y 2F*	7/2	35450,56	8	3p6.3d7.4s2	a 4F	7/2	816,00	8
42	Co I	346,585	346,579	9200000	3p6.3d7.(4F).4s.4p.	z 4G*	11/2	28845,22	12	3p6.3d7.4s2	a 4F	9/2	0,00	10
43	Co I	388,197	388,188	8200000	3p6.3d7.(4F).4s.4p.	z 4D*	3/2	30443,63	4	3p6.3d8.(3F).4s	b 4F	5/2	4690,18	6
44	Co I	389,409	389,407	69000000	3p6.3d8.(3F).4p	y 2G*	7/2	34133,59	8	3p6.3d8.(3F).4s	a 2F	5/2	8460,81	6
45	Co I	390,990	390,993	110000	3p6.3d7.(4F).4s.4p	z 6G*	11/2	25568,68	12	3p6.3d7.4s2	a 4F	9/2	0,00	10
46	Co I	406,636	406,636	1100000	3p6.3d8.(3F).4p	y 4D*	7/2	32027,50	8	3p6.3d8.(3F).4s	a 2F	7/2	7442,41	8
47	Co I	528,764	528,755	3000000	3p6.3d7.4s.(5F).5s	f 4F	7/2	48201,60	8	3p6.3d7.(4F).4s.4p	z 4D*	7/2	29294,52	8
48	Co I	771,260	771,266	500000	3p6.3d7.(4F).4s.4p	z 2D*	5/2	33462,83	6	3p6.3d7.4s2	b 2P	3/2	20500,71	4

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
49	Co II	201,155	201,152	61000000	3d7.(4F).4p	z 3F*	4	49697,68	9	3d8	a 3F	4	0,00	9
50	Co II	209,091	209,089	80000000	3d7.(2D2).4d	3G	4	113829,01	9	3d7.(2G).4p	z 1F*	3	66017,65	7
51	Co II	256,677	256,684	5200000	3d7.(2G).4d	3G	4	107790,22	9	3d7.(2H).4p	x 3G*	4	68843,43	9
52	Co II	821,601	821,599	5700000	3d7.(4F).5p	5G*	3	97335,68	7	3d7.(4F).5s	e 5F	3	85167,65	7
53	Cr I	304,085	304,084	74000000	3d4.(5D).4s.4p.(1P*)	y 5F*	2	40971,26	5	3d4.4s2	a 5D	3	8095,18	7
54	Cr I	357,868	357,869	148000000	3d4.(5D).4s.4p.(3P*)	y 7P*	4	27935,24	9	3d5.(6S).4s	a 7S	3	0,00	7
55	Cr I	359,344	359,349	150000000	3d4.(5D).4s.4p.(3P*)	y 7P*	3	27820,20	7	3d5.(6S).4s	a 7S	3	0,00	7
56	Cr I	360,536	360,533	162000000	3d4.(5D).4s.4p.(3P*)	y 7P*	2	27728,81	5	3d5.(6S).4s	a 7S	3	0,00	7
57	Cr I	390,287	390,291	3500000	3d4.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	2	33542,10	5	3d4.4s2	a 5D	2	7927,44	5
58	Cr I	425,425	425,434	31500000	3d5.(6S).4p	z 7P*	4	23498,82	9	3d5.(6S).4s	a 7S	3	0,00	7
59	Cr I	427,481	427,480	30700000	3d5.(6S).4p	z 7P*	3	23386,34	7	3d5.(6S).4s	a 7S	3	0,00	7
60	Cr I	428,964	428,972	31600000	3d5.(6S).4p	z 7P*	2	23305,00	5	3d5.(6S).4s	a 7S	3	0,00	7

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
61	Cr I	455,395	455,395	12000000	3d5.(2D1).4p	v 3F*	2	54992,79	5	3d5.(2F1).4s	b 3F	2	33039,97	5
62	Cr I	456,557	456,550	410000	3d4.(5D).4s.4p.(3P*)	y 5P*	3	29824,69	7	3d4.4s2	a 5D	2	7927,44	5
63	Cr I	520,848	520,843	50600000	3d5.(6S).4p	z 5P*	3	26787,46	7	3d5.(6S).4s	a 5S	2	7593,15	5
64	Cr II	527,996	527,988	240000	3d4.(5D).4p	z 4F*	7/2	51788,81	8	3d5	b 4F	9/2	32854,25	10
65	Fe I	248,813	248,814	420000000	3d6.(5D).4s.4p.(1P*)	x 5F*	4	40594,43	9	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7
66	Fe I	252,253	252,248	1140000	3d6.(3H).4s.4p.(3P*)	z 3H*	5	47008,37	11	3d7.(4F).4s	a 5F	4	7376,76	9
67	Fe I	252,285	252,285	213000000	3d6.(5D).4s.4p.(1P*)	x 5D*	4	39625,80	9	3d6.4s2	a 5D	4	0,00	9
68	Fe I	271,902	271,903	142000000	3d6.(5D).4s.4p.(1P*)	y 5P*	3	36766,97	7	3d6.4s2	a 5D	4	0,00	9
69	Fe I	272,104	272,090	104000000	3d6.(5D).4s.4p.(1P*)	y 5P*	2	37157,57	5	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7
70	Fe I	294,779	294,788	18300000	3d7.(4F).4p	y 5F*	3	34328,75	7	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7
71	Fe I	296,686	296,690	27200000	3d7.(4F).4p	y 5F*	5	33695,40	11	3d6.4s2	a 5D	4	0,00	9
72	Fe I	297,316	297,324	18300000	3d7.(4F).4p	y 5F*	4	34039,52	9	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm-1]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm-1]	g_j
73	Fe I	298,354	298,357	27900000	3d7.(4F).4p	y 5D*	3	33507,12	7	3d6.4s2	a 5D	4	0,00	9
74	Fe I	299,947	299,951	17000000	3d6.(5D).4s.4p.(1P*)	x 5F*	5	40257,31	11	3d7.(4F).4s	a 5F	5	6928,27	11
75	Fe I	300,098	300,095	64200000	3d7.(4F).4p	y 5D*	1	34017,10	3	3d6.4s2	a 5D	2	704,01	5
76	Fe I	300,960	300,957	14300000	3d6.(5D).4s.4p.(1P*)	x 5F*	4	40594,43	9	3d7.(4F).4s	a 5F	4	7376,76	9
77	Fe I	302,040	302,049	19400000	3d7.(4F).4p	y 5D*	2	33801,57	5	3d6.4s2	a 5D	2	704,01	5
78	Fe I	302,061	302,064	75900000	3d7.(4F).4p	y 5D*	4	33095,94	9	3d6.4s2	a 5D	4	0,00	9
79	Fe I	302,094	302,107	45500000	3d7.(4F).4p	y 5D*	3	33507,12	7	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7
80	Fe I	303,739	303,739	29100000	3d7.(4F).4p	y 5D*	2	33801,57	5	3d6.4s2	a 5D	1	888,13	3
81	Fe I	304,755	304,760	28400000	3d7.(4F).4p	y 5D*	3	33507,12	7	3d6.4s2	a 5D	2	704,01	5
82	Fe I	305,906	305,909	16300000	3d7.(4F).4p	y 5D*	4	33095,94	9	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7
83	Fe I	306,734	306,724	31200000	3d6.(5D).4s.4p.(1P*)	x 5D*	3	39969,85	7	3d7.(4F).4s	a 5F	4	7376,76	9
84	Fe I	307,571	307,572	31400000	3d6.(5D).4s.4p.(1P*)	x 5D*	2	40231,34	5	3d7.(4F).4s	a 5F	3	7728,06	7

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
85	Fe I	321,407	321,406	118000000	3d6.(5D).4s (6D).4d	e 7P	2	50861,33	5	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7D*	3	19757,03	7
86	Fe I	328,669	328,675	59900000	3d5.(6S).4s2.4p	v 5P*	3	47966,58	7	3d7.(4P).4s	a 5P	3	17550,18	7
87	Fe I	330,597	330,597	40500000	3d5.(6S).4s2.4p	v 5P*	3	47966,58	7	3d7.(4P).4s	a 5P	2	17726,99	5
88	Fe I	342,420	342,428	16100000	3d7.(4P).4p	u 5D*	3	46744,99	7	3d7.(4P).4s	a 5P	3	17550,18	7
89	Fe I	342,675	342,663	19400000	3d6.(3P2).4s.4p.(3P*)	y 3P*	1	46901,83	3	3d7.(4P).4s	a 5P	2	17726,99	5
90	Fe I	342,709	342,699	283000	3d6.(5D).4s.4p.(1P*)	y 5P*	2	37157,57	5	3d7.(4F).4s	a 5F	2	7985,78	5
91	Fe I	344,058	344,061	17100000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5P*	3	29056,32	7	3d6.4s2	a 5D	4	0,00	9
92	Fe I	344,098	344,099	12400000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5P*	2	29469,02	5	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7
93	Fe I	344,370	344,387	7920000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5P*	1	29732,74	3	3d6.4s2	a 5D	2	704,01	5
94	Fe I	346,594	346,586	11900000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5P*	1	29732,74	3	3d6.4s2	a 5D	1	888,13	3
95	Fe I	347,542	347,545	9750000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5P*	2	29469,02	5	3d6.4s2	a 5D	2	704,01	5
96	Fe I	349,053	349,057	6140000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5P*	3	29056,32	7	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm-1]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm-1]	g_j
97	Fe I	349,779	349,784	3080000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5P*	2	29469,02	5	3d6.4s2	a 5D	1	888,13	3
98	Fe I	351,377	351,382	3400000	3d7.(4F).4p	z 3G*	5	35379,21	11	3d7.(4F).4s	a 5F	5	6928,27	11
99	Fe I	352,088	352,085	1500000	3d7.(2G).4p	w 3F*	2	49433,13	5	3d6.4s2	b 3F2	2	21038,99	5
100	Fe I	352,119	352,126	6140000	3d7.(4F).4p	z 3G*	4	35767,56	9	3d7.(4F).4s	a 5F	4	7376,76	9
101	Fe I	354,095	354,108	86500000	3d6.(5D).4s (6D).4d	e 7G	5	51228,55	11	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7F*	4	22996,67	9
102	Fe I	354,199	354,208	95100000	3d6.(5D).4s (6D).4d	e 7G	4	51334,91	9	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7F*	3	23110,94	7
103	Fe I	355,459	355,450	9870000	3d6.(5D).4s (6D).4d	e 5G	2	51370,14	5	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7F*	1	23244,84	3
104	Fe I	355,490	355,492	140000000	3d6.(5D).4s (6D).4d	e 7G	6	50967,83	13	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7F*	5	22845,87	11
105	Fe I	355,847	355,851	17700000	3d7.(4F).4p	z 3G*	3	36079,37	7	3d7.(4F).4s	a 5F	2	7985,78	5
106	Fe I	356,533	356,538	42900000	3d7.(4F).4p	z 3G*	4	35767,56	9	3d7.(4F).4s	a 5F	3	7728,06	7
107	Fe I	357,008	357,010	67600000	3d7.(4F).4p	z 3G*	5	35379,21	11	3d7.(4F).4s	a 5F	4	7376,76	9
108	Fe I	358,114	358,119	102000000	3d7.(4F).4p	z 5G*	6	34843,96	13	3d7.(4F).4s	a 5F	5	6928,27	11

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm-1]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm-1]	g_j
109	Fe I	358,531	358,532	11700000	3d7.(4F).4p	z 5G*	3	35611,62	7	3d7.(4F).4s	a 5F	3	7728,06	7
110	Fe I	358,571	358,571	3750000	3d7.(4F).4p	z 5G*	4	35257,32	9	3d7.(4F).4s	a 5F	4	7376,76	9
111	Fe I	360,880	360,886	81300000	3d7.(4F).4p	z 5G*	2	35856,40	5	3d7.(4F).4s	a 5F	1	8154,71	3
112	Fe I	361,009	361,016	59000000	3d6.(5D).4s (6D).4d	e 7F	6	50342,13	13	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7F*	6	22650,42	13
113	Fe I	361,837	361,830	4890000	3d6.(5D).4s (6D).4d	e 7P	4	50475,29	9	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7F*	5	22845,87	11
114	Fe I	361,877	361,877	72200000	3d7.(4F).4p	z 5G*	3	35611,62	7	3d7.(4F).4s	a 5F	2	7985,78	5
115	Fe I	362,196	362,200	51400000	3d7.(2G).4p	v 3G*	3	49850,59	7	3d7.(2G).4s	a 3G	3	22249,43	7
116	Fe I	363,117	363,110	21500000	3d6.(5D).4s (6D).4d	f 7D	5	50377,91	11	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7F*	5	22845,87	11
117	Fe I	363,142	363,146	51700000	3d7.(4F).4p	z 5G*	4	35257,32	9	3d7.(4F).4s	a 5F	3	7728,06	7
118	Fe I	364,741	364,742	33800000	3d7.(2P).4p	1P*	1	52180,82	3	3d7.(2P).4s	c 3P	1	24772,02	3
119	Fe I	364,783	364,784	29100000	3d7.(4F).4p	z 5G*	5	34782,42	11	3d7.(4F).4s	a 5F	4	7376,76	9
120	Fe I	365,145	365,147	58300000	3d7.(2G).4p	v 3G*	4	49627,88	9	3d7.(2G).4s	a 3G	3	22249,43	7

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm-1]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm-1]	g_j
121	Fe I	367,990	367,991	1380000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5F*	4	27166,82	9	3d6.4s2	a 5D	4	0,00	9
122	Fe I	368,702	368,710	1720000	3d6.(3F2).4s.4p.(3P*)	v 5D*	2	44664,07	5	3d7.(4P).4s	a 5P	3	17550,18	7
123	Fe I	368,726	368,746	8000000	3d7.(4F).4p	y 5F*	4	34039,52	9	3d7.(4F).4s	a 5F	5	6928,27	11
124	Fe I	369,394	369,401	83500000	3d6.(5D).4s (6D).4d	e 7S	3	51570,10	7	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7P*	2	24506,92	5
125	Fe I	370,551	370,557	3210000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5F*	3	27394,69	7	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7
126	Fe I	370,779	370,782	633000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5F*	1	27666,35	3	3d6.4s2	a 5D	2	704,01	5
127	Fe I	370,931	370,925	15600000	3d7.(4F).4p	y 5F*	3	34328,75	7	3d7.(4F).4s	a 5F	4	7376,76	9
128	Fe I	371,990	371,993	16200000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5F*	5	26874,55	11	3d6.4s2	a 5D	4	0,00	9
129	Fe I	372,221	372,202	676000	3d7.(2G).4p	w 3F*	4	49108,90	9	3d7.(2G).4s	a 3G	3	22249,43	7
130	Fe I	372,262	372,256	4970000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5F*	2	27559,58	5	3d6.4s2	a 5D	2	704,01	5
131	Fe I	372,759	372,762	22400000	3d7.(4F).4p	y 5F*	2	34547,21	5	3d7.(4F).4s	a 5F	3	7728,06	7
132	Fe I	372,793	372,781	19100000	3d6.(5D).4s (6D).4d	f 7D	2	50998,64	5	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7P*	3	24180,86	7

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
133	Fe I	373,333	373,332	6480000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5F*	1	27666,35	3	3d6.4s2	a 5D	1	888,13	3
134	Fe I	373,483	373,486	90100000	3d7.(4F).4p	y 5F*	5	33695,40	11	3d7.(4F).4s	a 5F	5	6928,27	11
135	Fe I	373,713	373,713	14100000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5F*	4	27166,82	9	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7
136	Fe I	374,334	374,336	26000000	3d7.(4F).4p	y 5F*	1	34692,15	3	3d7.(4F).4s	a 5F	2	7985,78	5
137	Fe I	374,548	374,556	11500000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5F*	3	27394,69	7	3d6.4s2	a 5D	2	704,01	5
138	Fe I	374,587	374,590	7320000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5F*	1	27666,35	3	3d6.4s2	a 5D	0	978,07	1
139	Fe I	374,822	374,826	9150000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5F*	2	27559,58	5	3d6.4s2	a 5D	1	888,13	3
140	Fe I	375,819	375,823	63400000	3d7.(4F).4p	y 5F*	3	34328,75	7	3d7.(4F).4s	a 5F	3	7728,06	7
141	Fe I	376,375	376,379	54400000	3d7.(4F).4p	y 5F*	2	34547,21	5	3d7.(4F).4s	a 5F	2	7985,78	5
142	Fe I	376,715	376,719	63900000	3d7.(4F).4p	y 5F*	1	34692,15	3	3d7.(4F).4s	a 5F	1	8154,71	3
143	Fe I	378,798	378,788	12900000	3d7.(4F).4p	y 5F*	2	34547,21	5	3d7.(4F).4s	a 5F	1	8154,71	3
144	Fe I	379,851	379,851	3230000	3d7.(4F).4p	y 5F*	5	33695,40	11	3d7.(4F).4s	a 5F	4	7376,76	9

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
145	Fe I	379,953	379,955	7310000	3d7.(4F).4p	y 5F*	4	34039,52	9	3d7.(4F).4s	a 5F	3	7728,06	7
146	Fe I	380,529	380,534	86000000	3d7.(2H).4p	y 3I*	5	52899,00	11	3d7.(2H).4s	b 3H	4	26627,61	9
147	Fe I	380,879	380,873	3540000	3d6.(3F2).4s.4p.(3P*	x 3F*	4	46889,14	9	3d6.4s2	b 3F2	4	20641,11	9
148	Fe I	380,896	380,904	1700000	3d6.(3F2).4s.4p.(3P*	v 3D*	1	49297,64	3	3d7.(4P).4s	b 3P	0	23051,75	1
149	Fe I	381,298	381,296	7910000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 3P*	2	33946,93	5	3d7.(4F).4s	a 5F	3	7728,06	7
150	Fe I	381,579	381,584	112000000	3d7.(4F).4p	y 3D*	3	38175,36	7	3d7.(4F).4s	a 3F	4	11976,24	9
151	Fe I	382,039	382,042	66700000	3d7.(4F).4p	y 5D*	4	33095,94	9	3d7.(4F).4s	a 5F	5	6928,27	11
152	Fe I	382,441	382,444	2830000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	3	26140,18	7	3d6.4s2	a 5D	4	0,00	9
153	Fe I	382,587	382,588	59700000	3d7.(4F).4p	y 5D*	3	33507,12	7	3d7.(4F).4s	a 5F	4	7376,76	9
154	Fe I	382,779	382,782	105000000	3d7.(4F).4p	y 3D*	2	38678,04	5	3d7.(4F).4s	a 3F	3	12560,93	7
155	Fe I	382,857	382,850	322000	3d6.(3G).4s.4p.(3P*)	y 5H*	4	48361,88	9	3d7.(2G).4s	a 3G	3	22249,43	7
156	Fe I	383,323	383,331	4680000	3d7.(4P).4p	u 5D*	4	46720,84	9	3d6.4s2	b 3F2	4	20641,11	9

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
157	Fe I	383,420	383,422	45200000	3d7.(4F).4p	y 5D*	2	33801,57	5	3d7.(4F).4s	a 5F	3	7728,06	7
158	Fe I	384,038	384,044	47000000	3d7.(4F).4p	y 5D*	1	34017,10	3	3d7.(4F).4s	a 5F	2	7985,78	5
159	Fe I	384,096	384,105	136000000	3d7.(4F).4p	y 3D*	1	38995,74	3	3d7.(4F).4s	a 3F	2	12968,55	5
160	Fe I	385,633	385,637	4640000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	2	26339,70	5	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7
161	Fe I	385,988	385,991	9690000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	4	25899,99	9	3d6.4s2	a 5D	4	0,00	9
162	Fe I	387,803	387,802	7720000	3d7.(4F).4p	y 5D*	3	33507,12	7	3d7.(4F).4s	a 5F	3	7728,06	7
163	Fe I	387,872	387,867	7020000	3d6.(3H).4s.4p.(3P*)	y 3G*	3	45562,97	7	3d6.4s2	a 3H	4	19788,25	9
164	Fe I	388,627	388,628	5290000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	3	26140,18	7	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7
165	Fe I	388,708	388,705	3520000	3d7.(4F).4p	y 5D*	4	33095,94	9	3d7.(4F).4s	a 5F	4	7376,76	9
166	Fe I	388,851	388,851	25000000	3d7.(4F).4p	y 3D*	2	38678,04	5	3d7.(4F).4s	a 3F	2	12968,55	5
167	Fe I	389,977	389,971	2580000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	2	26339,70	5	3d6.4s2	a 5D	2	704,01	5
168	Fe I	390,295	390,295	21400000	3d7.(4F).4p	y 3D*	3	38175,36	7	3d7.(4F).4s	a 3F	3	12560,93	7

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
169	Fe I	392,023	392,026	2600000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	1	26479,38	3	3d6.4s2	a 5D	0	978,07	1
170	Fe I	392,290	392,291	1080000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	4	25899,99	9	3d6.4s2	a 5D	3	415,93	7
171	Fe I	392,782	392,792	2600000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	2	26339,70	5	3d6.4s2	a 5D	1	888,13	3
172	Fe I	392,806	392,808	5640000	3d6.(5D).4s (4D).5s	g 5D	4	51350,49	9	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	4	25899,99	9
173	Fe I	393,026	393,030	1990000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	3	26140,18	7	3d6.4s2	a 5D	2	704,01	5
174	Fe I	396,929	396,926	22600000	3d7.(4F).4p	y 3F*	3	37162,75	7	3d7.(4F).4s	a 3F	4	11976,24	9
175	Fe I	400,522	400,524	20400000	3d7.(4F).4p	y 3F*	2	37521,16	5	3d7.(4F).4s	a 3F	3	12560,93	7
176	Fe I	404,576	404,581	86200000	3d7.(4F).4p	y 3F*	4	36686,18	9	3d7.(4F).4s	a 3F	4	11976,24	9
177	Fe I	406,361	406,359	66500000	3d7.(4F).4p	y 3F*	3	37162,75	7	3d7.(4F).4s	a 3F	3	12560,93	7
178	Fe I	407,169	407,174	76400000	3d7.(4F).4p	y 3F*	2	37521,16	5	3d7.(4F).4s	a 3F	2	12968,55	5
179	Fe I	413,201	413,206	11800000	3d7.(4F).4p	y 3F*	3	37162,75	7	3d7.(4F).4s	a 3F	2	12968,55	5
180	Fe I	413,699	413,700	27500000	3d7.(2P).4p	y 1D*	2	51708,31	5	3d7.(2P).4s	a 1P	1	27543,00	3

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm-1]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm-1]	g_j
181	Fe I	414,379	414,387	13300000	3d7.(4F).4p	y 3F*	4	36686,18	9	3d7.(4F).4s	a 3F	3	12560,93	7
182	Fe I	418,170	418,175	23200000	3d7.(4P).4p	u 5D*	3	46744,99	7	3d7.(4P).4s	b 3P	2	22838,32	5
183	Fe I	419,907	419,909	49200000	3d7.(2G).4p	z 1H*	5	48382,60	11	3d7.(2G).4s	a 1G	4	24574,65	9
184	Fe I	421,547	421,542	598000	3d6.(3F2).4s.4p.(3P*	x 3G*	5	47834,55	11	3d6.4s2	b 3G	4	24118,82	9
185	Fe I	423,596	423,594	18800000	3d6.(5D).4s (6D).5s	e 7D	4	43163,33	9	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7D*	4	19562,44	9
186	Fe I	425,010	425,012	20700000	3d6.(5D).4s (6D).5s	e 7D	3	43434,63	7	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7D*	2	19912,49	5
187	Fe I	425,079	425,079	10200000	3d7.(4F).4p	z 3G*	3	36079,37	7	3d7.(4F).4s	a 3F	3	12560,93	7
188	Fe I	426,016	426,000	1570000	3d6.(5D).4s (6D).4d	e 7F	6	50342,13	13	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5F*	5	26874,55	11
189	Fe I	426,046	426,047	39900000	3d6.(5D).4s (6D).5s	e 7D	5	42815,86	11	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7D*	5	19350,89	11
190	Fe I	427,171	427,176	22800000	3d7.(4F).4p	z 3G*	5	35379,21	11	3d7.(4F).4s	a 3F	4	11976,24	9
191	Fe I	430,219	430,219	770000	3d6.(3F2).4s.4p.(3P*	x 3G*	4	47812,12	9	3d7.(2G).4s	a 1G	4	24574,65	9
192	Fe I	430,784	430,790	33800000	3d7.(4F).4p	z 3G*	4	35767,56	9	3d7.(4F).4s	a 3F	3	12560,93	7

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
193	Fe I	438,351	438,354	50000000	3d7.(4F).4p	z 5G*	5	34782,42	11	3d7.(4F).4s	a 3F	4	11976,24	9
194	Fe I	440,470	440,475	27500000	3d7.(4F).4p	z 5G*	4	35257,32	9	3d7.(4F).4s	a 3F	3	12560,93	7
195	Fe I	441,514	441,512	11900000	3d7.(4F).4p	z 5G*	3	35611,62	7	3d7.(4F).4s	a 3F	2	12968,55	5
196	Fe I	489,153	489,149	30800000	3d6.(5D).4s (6D).5s	e 7D	3	43434,63	7	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7F*	4	22996,67	9
197	Fe I	492,045	492,050	35800000	3d6.(5D).4s (6D).5s	e 7D	4	43163,33	9	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7F*	5	22845,87	11
198	Fe I	495,759	495,730	11800000	3d6.(5D).4s (6D).5s	e 7D	4	43163,33	9	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7F*	4	22996,67	9
199	Fe I	523,282	523,294	19400000	3d6.(5D).4s (6D).5s	e 7D	5	42815,86	11	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 7P*	4	23711,46	9
200	Fe I	526,952	526,954	1270000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	4	25899,99	9	3d7.(4F).4s	a 5F	5	6928,27	11
201	Fe I	529,870	529,878	458000	3d6.(3G).4s.4p.(3P*)	v 5F*	2	48238,85	5	3d6.4s2	b 3D	3	29371,81	7
202	Fe I	537,161	537,149	1050000	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5D*	2	26339,70	5	3d7.(4F).4s	a 5F	3	7728,06	7
203	Fe I	540,406	540,415	69200000	3d7.(4F).4d	e 3H	5	54266,72	11	3d7.(4F).4p	z 3G*	4	35767,56	9
204	Fe I	561,565	561,564	26400000	3d6.(5D).4s (6D).5s	e 5D	4	44677,01	9	3d6.(5D).4s.4p.(3P*)	z 5F*	5	26874,55	11

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
205	Fe I	758,363	758,379	302000	3d7.(4F).4p	y 3F*	2	37521,16	5	3d6.4s2	b 3G	3	24338,77	7
206	Fe II	251,602	251,605	1100000	3d6.(3F1).4p	4G*	7/2	89890,40	8	3d6.(3F1).4s	c 4F	9/2	50157,47	10
207	Fe II	252,948	252,954	220000000	3d6.(3F2).4p	y 4F*	9/2	62158,13	10	3d6.(3F2).4s	b 4F	9/2	22637,19	10
208	Fe II	253,672	253,667	57000000	3d6.(3G).4p	x 4G*	11/2	65580,07	12	3d6.(3H).4s	b 2H	11/2	26170,18	12
209	Fe II	253,887	253,891	128000000	3d6.(3H).4p	z 4G*	7/2	60956,78	8	3d6.(3H).4s	a 4H	9/2	21581,62	10
210	Fe II	253,897	253,899	193000000	3d6.(3H).4p	z 4G*	11/2	60625,45	12	3d6.(3H).4s	a 4H	13/2	21251,58	14
211	Fe II	256,254	256,254	179000000	3d6.(5D).4p	z 4P*	5/2	46967,48	6	3d6.(5D).4s	a 4D	7/2	7955,32	8
212	Fe II	258,583	258,576	6600000	3d6.(3F2).4p	y 2G*	9/2	64831,95	10	3d6.(3H).4s	b 2H	11/2	26170,18	12
213	Fe II	258,583	258,588	89400000	3d6.(5D).4p	z 6D*	7/2	38660,05	8	3d6.(5D).4s	a 6D	9/2	0,00	10
214	Fe II	259,841	259,837	143000000	3d6.(5D).4p	z 6D*	5/2	38858,97	6	3d6.(5D).4s	a 6D	7/2	384,79	8
215	Fe II	259,938	259,94	235000000	3d6.(5D).4p	z 6D*	9/2	38458,99	10	3d6.(5D).4s	a 6D	9/2	0,00	10
216	Fe II	260,706	260,709	173000000	3d6.(5D).4p	z 6D*	3/2	39013,22	4	3d6.(5D).4s	a 6D	5/2	667,68	6

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
217	Fe II	261,185	261,187	120000000	3d6.(5D).4p	z 6D*	7/2	38660,05	8	3d6.(5D).4s	a 6D	7/2	384,79	8
218	Fe II	261,377	261,382	212000000	3d6.(5D).4p	z 6D*	1/2	39109,32	2	3d6.(5D).4s	a 6D	3/2	862,61	4
219	Fe II	261,76	261,762	48800000	3d6.(5D).4p	z 6D*	5/2	38858,97	6	3d6.(5D).4s	a 6D	5/2	667,68	6
220	Fe II	262,819	262,820	8000000	3d6.(3H).4d	4H	13/2	103617,58	14	3d6.(3G).4p	x 4G*	11/2	65580,07	12
221	Fe II	262,832	262,829	87400000	3d6.(5D).4p	z 6D*	3/2	39013,22	4	3d6.(5D).4s	a 6D	1/2	977,05	2
222	Fe II	263,108	263,105	81600000	3d6.(5D).4p	z 6D*	5/2	38858,97	6	3d6.(5D).4s	a 6D	3/2	862,61	4
223	Fe II	263,133	263,132	62900000	3d6.(5D).4p	z 6D*	7/2	38660,05	8	3d6.(5D).4s	a 6D	5/2	667,68	6
224	Fe II	272,744	272,738	31000000	3d6.(3H).4p	z 2G*	9/2	62083,12	10	3d6.(3G).4s	a 4G	11/2	25428,79	12
225	Fe II	273,949	273,951	4600000	3d6.(3H).4p	z 2I*	11/2	62662,25	12	3d6.(3H).4s	b 2H	11/2	26170,18	12
226	Fe II	273,949	273,955	221000000	3d6.(5D).4p	z 4D*	7/2	44446,91	8	3d6.(5D).4s	a 4D	7/2	7955,32	8
227	Fe II	274,915	274,918	121000000	3d6.(5D).4p	z 4D*	3/2	45044,19	4	3d6.(5D).4s	a 4D	3/2	8680,47	4
228	Fe II	275,572	275,574	215000000	3d6.(5D).4p	z 4F*	3	44232,54	10	3d6.(5D).4s	a 4D	2	7955,32	8

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm-1]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm-1]	g_j
229	Fe II	275,609	275,616	2300000	3d6.(3D).4p	w 4D*	3/2	72524,56	4	3d6.(3D).4s	b 2D	5/2	36252,93	6
230	Fe II	298,441	298,429	700000	3d6.(3F2).4d	2P	3/2	108105,94	4	3d6.(3D).4p	x 2D*	5/2	74606,86	6
231	Fe II	298,476	298,483	43000000	3d6.(5D).4p	z 4P*	5/2	46967,48	6	3d7	a 4P	5/2	13474,45	6
232	Fe II	298,507	298,496	54000000	3d6.(3F2).5s	e 2F	7/2	100492,02	8	3d6.(3F2).4p	y 2D*	5/2	67000,53	6
233	Fe II	298,556	298,555	23900000	3d6.(5D).4p	z 4P*	3/2	47389,81	4	3d7	a 4P	1/2	13904,86	2
234	Fe II	298,556	298,564	1200000	3d6.(5D).5s	e 6D	7/2	78237,71	8	3d6.(5D).4p	z 4F*	7/2	44753,82	8
235	Fe II	305,836	305,835	2100000	3d6.(3F2).5s	f 4F	7/2	99688,35	8	3d6.(3F2).4p	y 2D*	5/2	67000,53	6
236	Fe II	309,679	309,679	420000	3d6.(3H).5s	e 4H	11/2	98294,91	12	3d6.(3G).4p	x 4F*	9/2	66012,77	10
237	Fe II	309,838	309,835	3100000	3d6.(3F2).4d	4F	9/2	104916,55	10	3d6.(3D).4p	w 4F*	9/2	72650,70	10
238	Fe II	322,771	322,774	8900000	3d6.(5D).4p	z 4D*	7/2	44446,91	8	3d7	a 4P	5/2	13474,45	6
239	Fe II	855,496	855,510	3700000	3d5.(2H).4s.4p.(3P*)	4H*	11/2	109980,63	12	3d6.(3H).5s	e 4H	11/2	98294,91	12
240	Mg I	277,832	277,827	182000000	3p2	3P	1	57833,40	3	3s.3p	3P*	0	21850,40	1

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm-1]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm-1]	g_j
241	Mg I	277,975	277,982	136000000	3p2	3P	1	57833,40	3	3s.3p	3P*	1	21870,46	3
242	Mg I	278,147	278,142	543000000	3p2	3P	0	57812,77	1	3s.3p	3P*	1	21870,46	3
243	Mg I	278,304	278,297	214000000	3p2	3P	1	57833,40	3	3s.3p	3P*	2	21911,18	5
244	Mg I	284,839	284,835	177000000	3s.5d	3D	2	56968,25	5	3s.3p	3P*	1	21870,46	3
245	Mg I	285,167	285,166	235000000	3s.5d	3D	3	56968,22	7	3s.3p	3P*	2	21911,18	5
246	Mg I	285,209	285,213	491000000	3s.3p	1P*	1	35051,26	3	2p6.3s2	1S	0	0,00	1
247	Mg I	309,301	309,298	208000000	3s.4d	3D	1	54192,33	3	3s.3p	3P*	1	21870,46	3
248	Mg I	309,689	309,688	138000000	3s.4d	3D	1	54192,33	3	3s.3p	3P*	2	21911,18	5
249	Mg I	382,929	382,935	899000000	3s.3d	3D	1	47957,06	3	3s.3p	3P*	1	21850,40	3
250	Mg I	383,226	383,230	1210000000	3s.3d	3D	2	47957,03	5	3s.3p	3P*	1	21870,46	3
251	Mg I	383,831	383,829	403000000	3s.3d	3D	2	47957,03	5	3s.3p	3P*	2	21911,18	5
252	Mg I	389,326	389,330	981000000	3p.3d	3D*	1	83511,25	3	3p2	3P	1	57833,40	3

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
253	Mg I	389,553	389,557	235000000	3p.3d	3D*	3	83536,84	7	3p2	3P	2	57873,94	5
254	Mg I	470,300	470,299	21900000	3s.5d	1D	2	56308,38	5	3s.3p	1P*	1	35051,26	3
255	Mg I	516,740	516,732	11300000	3s.4s	3S	1	41197,40	3	3s.3p	3P*	0	21850,40	1
256	Mg I	517,261	517,268	33700000	3s.4s	3S	1	41197,40	3	3s.3p	3P*	1	21870,46	3
257	Mg I	518,351	518,360	56100000	3s.4s	3S	1	41197,40	3	3s.3p	3P*	2	21911,18	5
258	Mg II	279,057	279,054	32000	2p6.6p	2P*	3/2	105629,72	4	2p6.4s	2S	1/2	69804,95	2
259	Mg II	279,093	279,078	401000000	2p6.3d	2D	3/2	71491,06	4	2p6.3p	2P*	1/2	35669,31	2
260	Mg II	279,546	279,553	260000000	2p6.3p	2P*	3/2	35760,88	4	2p6.3s	2S	1/2	0,00	2
261	Mg II	279,793	279,793	79800000	2p6.3d	2D	3/2	71491,06	4	2p6.3p	2P*	3/2	35760,88	4
262	Mg II	292,826	292,830	1430000	2p6.6p	2P*	3/2	105629,72	4	2p6.3d	2D	5/2	71490,19	6
263	Mg II	292,865	292,863	115000000	2p6.4s	2S	1/2	69804,95	2	2p6.3p	2P*	1/2	35669,31	2
264	Mg II	293,645	293,651	230000000	2p6.4s	2S	1/2	69804,95	2	2p6.3p	2P*	3/2	35760,88	4

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm-1]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm-1]	g_j
265	Mg II	448,098	448,113	233000000	2p6.4f	2F*	7/2	93799,75	8	2p6.3d	2D	5/2	71490,19	6
266	Mg II	448,098	448,115	155000000	2p6.4f	2F*	5/2	93799,63	6	2p6.3d	2D	5/2	71490,19	6
267	Mg II	448,131	448,132	217000000	2p6.4f	2F*	5/2	93799,63	6	2p6.3d	2D	3/2	71491,06	4
268	Mn I	383,719	383,720	2700000	3d5.(a 2D).4s.4p.(3P	w 2F*	7/2	64988,22	8	3d6.(3F2).4s	a 2F	5/2	38934,94	6
269	Mn I	384,101	384,107	330000000	3d6.(5D).4p	z 6F*	5/2	43595,50	6	3d6.(5D).4s	a 6D	3/2	17568,48	4
270	Mn I	403,073	403,075	170000000	3d5.(6S).4s.4p.(3P*)	z 6P*	7/2	24802,25	8	3d5.4s2	a 6S	5/2	0,00	6
271	Mn I	403,455	403,448	158000000	3d5.(6S).4s.4p.(3P*)	z 6P*	3/2	24779,32	4	3d5.4s2	a 6S	5/2	0,00	6
272	Mn I	446,467	446,468	439000000	3d6.(5D).4p	z 4D*	5/2	45940,93	6	3d6.(5D).4s	a 4D	5/2	23549,20	6
273	Mn II	249,089	249,091	270000000	3d5.(4D).4p	y 5F*	5	70657,60	11	3d6	a 3H	6	30523,71	13
274	Mn II	260,426	260,430	140000000	3d5.(4F).4p	x 5F*	1	82236,90	3	3d5.(4F).4s	a 5F	2	43850,34	5
275	Mn II	262,561	262,561	260000000	3d5.(4G).4p	z 5H*	5	65658,65	11	3d5.(4G).4s	a 5G	4	27583,59	9
276	Na I	285,295	285,281	538000	2p6.5p	2P*	3/2	35042,85	4	2p6.3s	2S	1/2	0,00	2

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm-1]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm-1]	g_j
277	Na I	386,552	386,543	58000000	2p5.3s.(3P*).3d	4F*	7/2	292449,70	8	2p5.(2P*).3s.3p.(3P*)	4D	7/2	266586,70	8
278	Na I	589,007	588,995	61600000	2p6.3p	2P*	3/2	16973,36	4	2p6.3s	2S	1/2	0,00	4
279	Na I	589,604	589,592	61400000	2p6.3p	2P*	1/2	16956,17	2	2p6.3s	2S	1/2	0,00	2
280	Na II	249,311	249,315	415000000	2s2.2p5.3p	1S	0	308860,80	1	2s2.2p5.3s	1P*	1	268762,96	3
281	Na II	261,184	261,181	220000000	2s2.2p5.(2P*<3/2>).4	2[3/2]*	2	331496,51	5	2s2.2p5.3p	3S	1	293220,33	3
282	Na II	305,730	305,738	45100000	2s2.2p5.(2P*<1/2>).3	2[5/2]*	2	332802,21	5	2s2.2p5.3p	3P	2	300103,92	5
283	Ni I	341,473	341,476	55000000	3d9.(2D).4p	3F*	4	29480,99	9	3d9.(2D).4s	3D	3	204,79	7
284	Ni I	345,844	345,846	61000000	3d9.(2D).4p	3F*	2	30619,41	5	3d9.(2D).4s	3D	1	1713,09	3
285	Ni I	349,293	349,296	98000000	3d9.(2D).4p	3P*	1	29500,67	3	3d9.(2D).4s	3D	2	879,82	5
286	Ni I	361,938	361,939	66000000	3d9.(2D).4p	1F*	3	31031,02	7	3d9.(2D).4s	1D	2	3409,94	5
287	Ni I	483,839	483,864	22000000	3d8.4s.(2F).5s	1F	3	54251,31	7	3d8.(3F).4s.4p.(3P*)	1G*	4	33590,13	9
288	Ni I	535,343	535,339	120000	3d8.(3F).4s.4p.(3P*)	3D*	1	34408,56	3	3d8.(3P).4s2	3P	1	15734,00	3

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
289	Si I	212,416	212,412	297000000	3s2.3p.3d	1F*	3	53362,24	7	3s2.3p2	1D	2	6298,85	5
290	Si I	221,089	221,089	34600000	3s.3p3	3D*	2	45293,63	5	3s2.3p2	3P	1	77,11	3
291	Si I	250,686	250,690	54700000	3s2.3p.4s	3P*	2	39955,05	5	3s2.3p2	3P	1	77,11	3
292	Si I	251,426	251,432	73900000	3s2.3p.4s	3P*	1	39760,29	3	3s2.3p2	3P	0	0,00	1
293	Si I	251,605	251,611	168000000	3s2.3p.4s	3P*	2	39955,05	5	3s2.3p2	3P	2	223,16	5
294	Si I	251,918	251,920	54900000	3s2.3p.4s	3P*	1	39760,29	3	3s2.3p2	3P	1	77,11	3
295	Si I	252,405	252,411	222000000	3s2.3p.4s	3P*	0	39683,16	1	3s2.3p2	3P	1	77,11	3
296	Si I	252,848	252,851	90400000	3s2.3p.4s	3P*	1	39760,29	3	3s2.3p2	3P	2	223,16	5
297	Si I	263,127	263,128	106000000	3s2.3p.3d	1P*	1	53387,33	3	3s2.3p2	1S	0	15394,37	1
298	Si I	288,158	288,158	217000000	3s2.3p.4s	1P*	1	40991,88	3	3s2.3p2	1D	2	6298,85	5
299	Si I	390,551	390,552	13300000	3s2.3p.4s	1P*	1	40991,88	3	3s2.3p2	1S	0	15394,37	1
300	Si I	410,288	410,294	60900	3s2.3p.4s	3P*	1	39760,29	3	3s2.3p2	1S	0	15394,37	1

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
301	Si I	774,256	774,272	5340000	3s2.3p.(2P*<3/2>).6f	2[9/2]	5	62966,61	11	3s2.3p.3d	3F*	4	50054,80	9
302	Si II	295,406	295,413	0,01	3s.3p2	2S	1/2	76665,35	2	3s.3p2	4P	1/2	42824,29	2
303	Si II	385,594	385,602	44000000	3s2.4p	2P*	3/2	81251,32	4	3s.3p2	2D	5/2	55325,18	6
304	Si II	386,25	386,26	39100000	3s2.4p	2P*	1/2	81191,34	2	3s.3p2	2D	3/2	55309,35	4
305	Si II	412,803	412,805	149000000	3s2.4f	2F*	5/2	103556,16	6	3s2.3d	2D	3/2	79338,50	4
306	Si II	505,593	505,598	145000000	3s2.4d	2D	5/2	101024,35	6	3s2.4p	2P*	3/2	81251,32	4
307	Si II	667,948	667,957	1240000	3s2.6d	2D	5/2	118522,93	6	3s2.4f	2F*	7/2	103556,03	8
308	Si II	771,858	771,847	189000	3s2.6p	2P*	3/2	113976,72	4	3s2.4d	2D	5/2	101024,35	6
309	Ti I	259,361	259,364	6900000	3d3.(2G).4p	t 3F*	3	38544,32	7	3d2.4s2	a 3F	2	0,00	5
310	Ti I	363,546	363,546	90900000	3d2.(3F).4s.4p.(1P*)	y 3G*	3	27498,98	7	3d2.4s2	a 3F	2	0,00	5
311	Ti I	368,737	368,734	368000	3d2.(3F).4s.4p.(1P*)	y 3G*	3	27498,98	7	3d2.4s2	a 3F	4	386,87	9
312	Ti I	392,989	392,987	8510000	3d3.(4F).4p	y 3D*	2	25438,91	5	3d2.4s2	a 3F	2	0,00	5

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

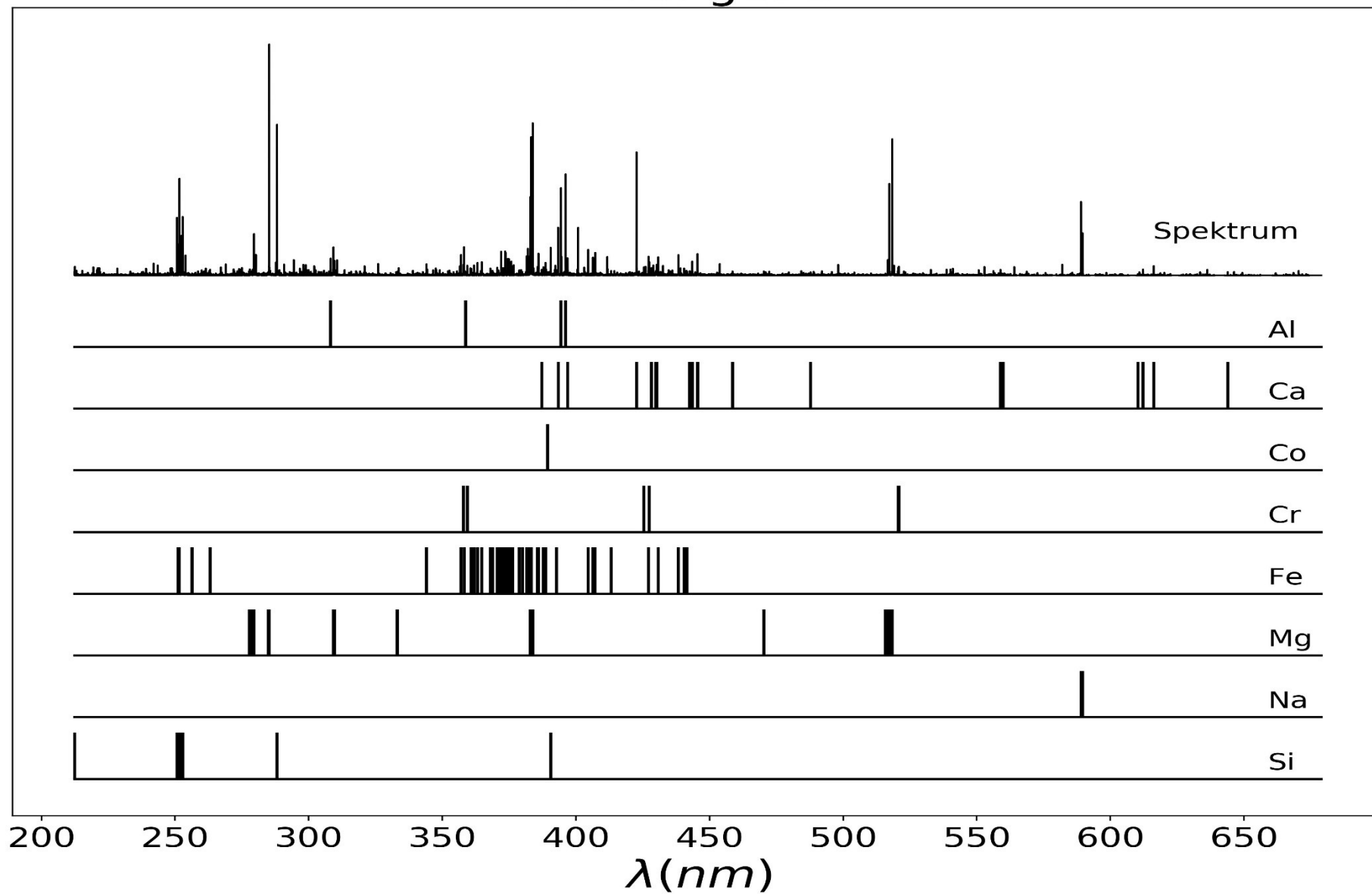
Příloha D – Stick diagramy signifikantních linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Číslo	Specie	λ_{fit} [nm]	λ_{NIST} [nm]	A_{ij} [s ⁻¹]	Konfigurace horní hladiny	Term _i	J_i	E_i [cm ⁻¹]	g_i	Konfigurace dolní hladiny	Term _j	J_j	E_j [cm ⁻¹]	g_j
313	Ti I	400,973	400,966	1390000	3d2.(3P).4s.4p.(3P*)	z 5S*	2	25102,88	5	3d2.4s2	a 3F	3	170,13	7
314	Ti II	309,642	309,642	6010000	3d2.(3P).4p	x 2D*	3/2	44914,87	4	3d3	b 2D2	3/2	12628,85	4
315	Ti II	323,453	323,451	171000000	3d2.(3F).4p	z 4F*	9/2	31301,07	10	3d2.(3F).4s	a 4F	9/2	393,45	10
316	Ti II	334,897	334,903	161000000	3d2.(3F).4p	z 2G*	9/2	34748,51	10	3d2.(3F).4s	a 2F	7/2	4897,72	8
317	Ti II	334,936	334,94	168000000	3d2.(3F).4p	z 4G*	11/2	30240,94	12	3d2.(3F).4s	a 4F	9/2	393,45	10
318	Ti II	336,121	336,121	158000000	3d2.(3F).4p	z 4G*	9/2	29968,33	10	3d2.(3F).4s	a 4F	7/2	225,70	8
319	Ti II	337,280	337,279	141000000	3d2.(3F).4p	z 4G*	7/2	29734,62	8	3d2.(3F).4s	a 4F	5/2	94,11	6
320	Ti II	390,053	390,054	27600000	3d2.(3F).4p	z 2G*	9/2	34748,51	10	3d3	a 2G	9/2	9118,28	10
321	Ti II	417,361	417,353	835000	3d2.(3F).4p	z 4D*	5/2	32698,10	6	3d2.(1D).4s	a 2D	5/2	8744,34	6

Seznam zkratk: λ_{fit} – pozice nafitované linie, λ_{NIST} – pozice linie, již odpovídají následující přiřazené parametry z databáze NIST, A_{ij} – Einsteinův koeficient spontánní emise, J_i respektive J_j je kvantové číslo celkového orbitálního momentu hybnosti horní respektive dolní energetické hladiny, g_i respektive g_j je degenerace horní respektive dolní energetické hladiny, E_i respektive E_j je energie horní respektive dolní energetické hladiny, Term_i respektive Term_j je spektroskopický term horní respektive dolní energetické hladiny.

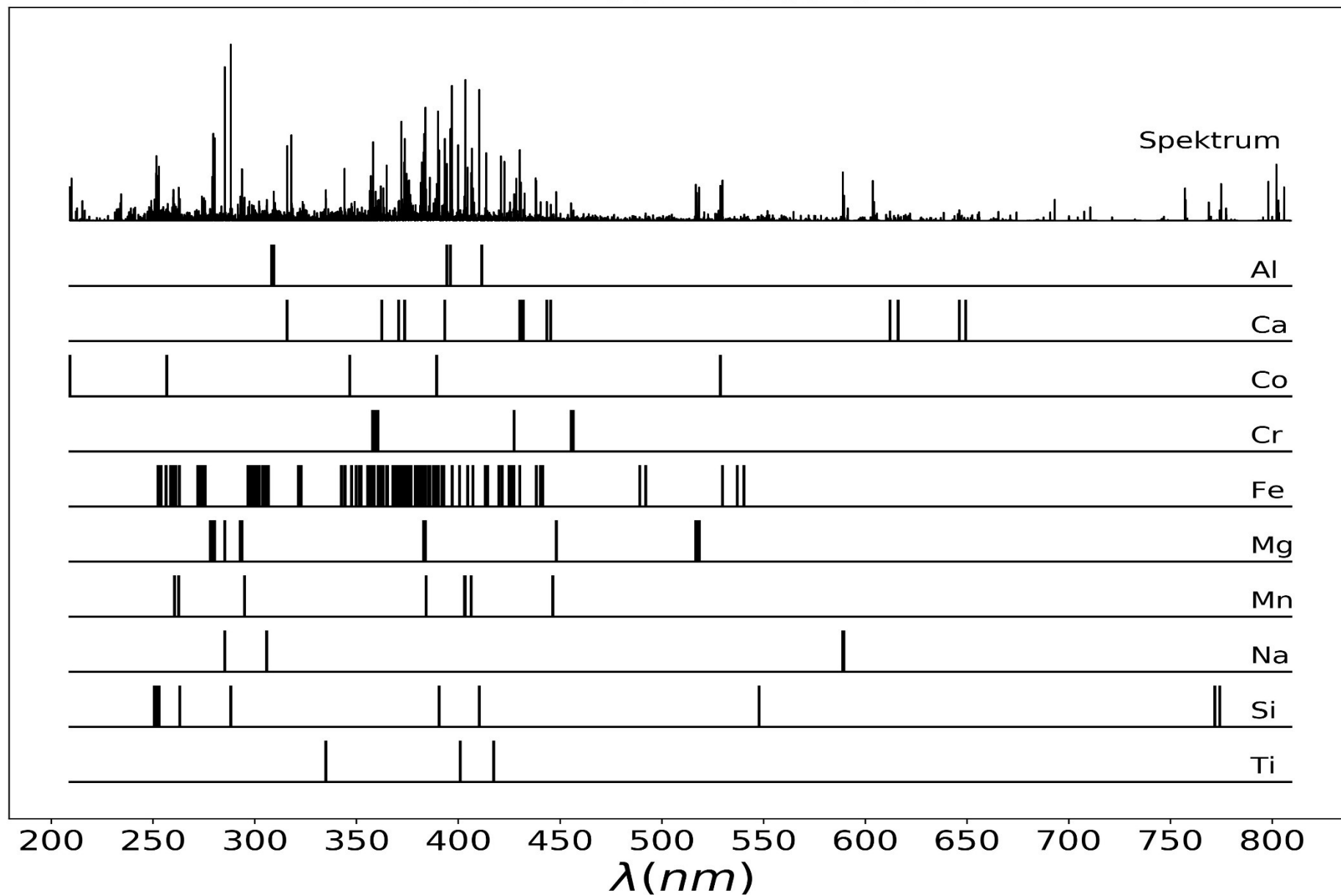
Příloha D – Stick diagramy významných linií pro jednotlivé meteority Porangaba (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Porangaba



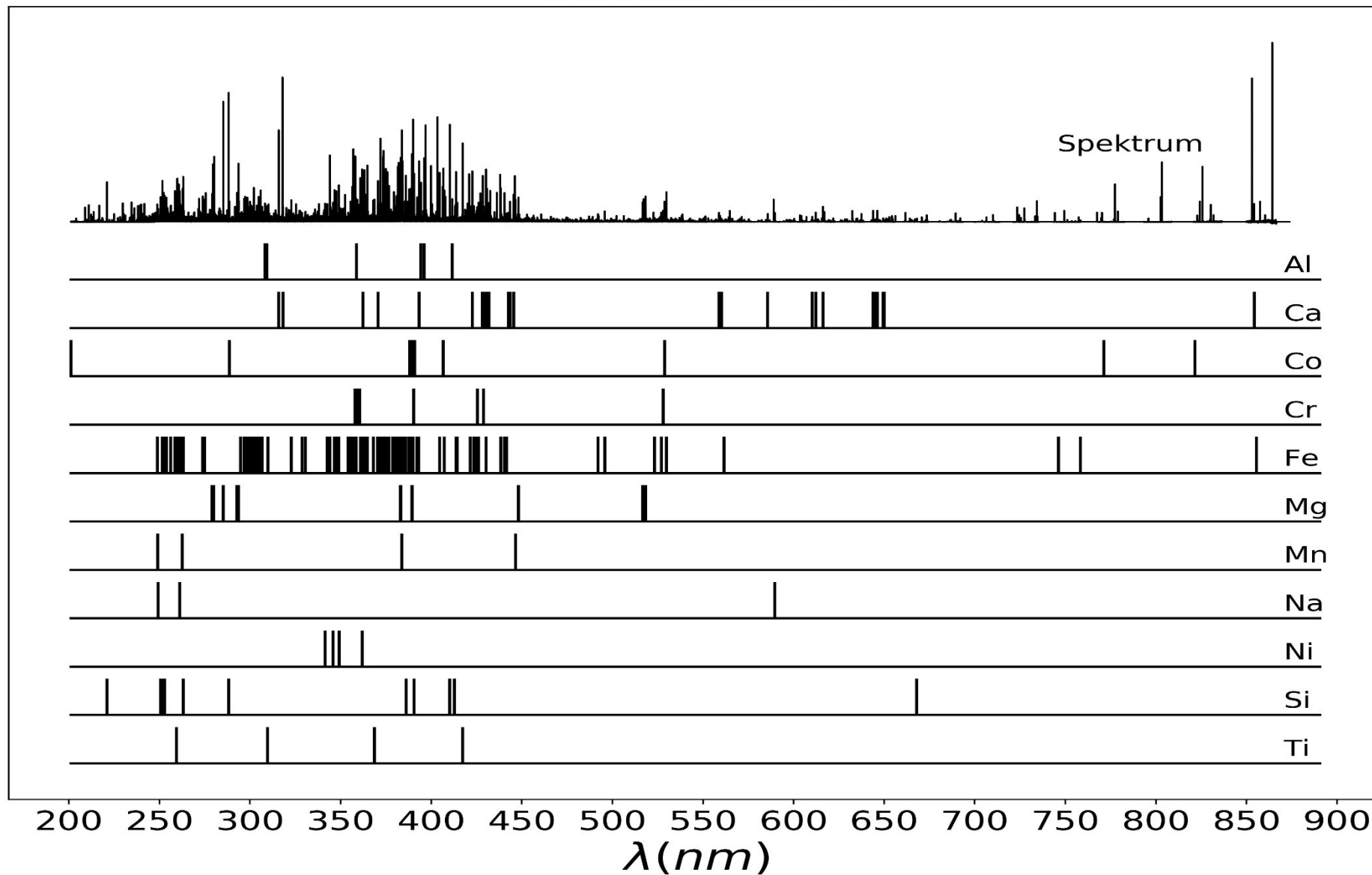
Příloha D – Stick diagramy významných linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Northwest Africa 869



Příloha D – Stick diagramy významných linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Dhofar 1994



Příloha D – Stick diagramy významných linií pro jednotlivé meteority Poranaga (L4), Northwest Africa 869 (3-6), Dhofar 1994 (CM2), Čeljabinsk (LL5). Příloha je tištěna a je součástí pouze této práce

Čeljabinsk

