

České vysoké učení technické v Praze
Fakulta jaderná a fyzikálně inženýrská

Katedra fyziky
Obor: Fyzika a technika termojaderné fúze



**Výkonové lasery ve výzkumu prvkového
složení meziplanetární hmoty pro
aplikace v kosmonautice a astronomii**

**High-power Lasers in Research on
Elemental Composition of Interplanetary
Matter for Applications in Astronautics
and Astronomy**

VÝZKUMNÝ ÚKOL

Vypracovala: Bc. Anna Křivková
Vedoucí práce: RNDr. Martin Ferus, Ph.D.
Rok: 2019

—Zadání práce—

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem svůj výzkumný úkol vypracovala samostatně a použila jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

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

V Praze dne

.....
Bc. Anna Křivková

Poděkování

V první řadě bych chtěla poděkovat svému vedoucímu RNDr. Martinu Ferusovi, Ph.D. za cenné rady, věcné připomínky, vstřícnost a trpělivost při konzultacích. Dále pak patří dík také všem mým kolegům z vědeckého týmu Oddělení spektroskopie z Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského Akademie věd České republiky. Výzkumný záměr byl podpořen Grantovou agenturou ČR v rámci projektu reg. č. 18-27653S a programem Regionální spolupráce AV ČR s kraji, projekty reg. č. R200401801, R200401521 a R200401721. Za podporu našich experimentů děkujeme panu Ing. Miroslavu Krůsovi, Ph.D. a infrastruktuře Pražského laserového systému Ústavu fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. Centrum PALS je společným badatelským centrem ÚFP AV ČR a FÚ AV ČR.

Bc. Anna Křivková

Název práce:

Výkonové lasery ve výzkumu prvkového složení meziplanetární hmoty pro aplikace v kosmonautice a astronomii

Autor: Bc. Anna Křivková

Obor: Fyzika a technika termojaderné fúze

Druh práce: Výzkumný úkol

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

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

Abstrakt: V současnosti hrají hlavní roli v interpretaci dynamiky plazmatu meteorů matematické modely. Nejen teoretické simulace spekter, ale zejména laboratorní experimenty musí představovat základní pilíř kvalitativní a zejména pak kvantitativní evaluace spekter meteorů či ablačních spekter pořízených pomocí satelitů a průzkumných robotů. Cílem tohoto výzkumného úkolu je představit možné využití výkonových laserů v oblasti dálkového a rychlého výzkumu meziplanetární hmoty. V úvodní části je představena spektroskopie laserem indukovaného průrazu (LIBS) a v další části je pak nastíněna laboratorní simulace spekter meteorů za pomoci laserové ablace. Na závěr jsou zmíněna možná budoucí využití výkonových laserů v oblasti astronomie a kosmonautiky.

Klíčová slova: laser, LIBS, meteor, meteorit, meziplanetární hmota

Title:

High-power Lasers in Research on Elemental Composition of Interplanetary Matter for Applications in Astronautics and Astronomy

Author: Bc. Anna Křivková

Abstract: Mathematic models are currently playing a major role in the interpretation of the dynamics of meteoric plasma. Not only these theoretical simulations of spectra, but also laboratory experiments possess a great potential to help with qualitative and quantitative evaluation of the observed data. The aim of this research task is to introduce possible use of high-power lasers in the area of research of interplanetary matter. The introductory part presents a laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS) and in the following section a laboratory simulation of meteoric spectra using laser ablation is outlined. In the conclusion the possible future use of fpower lasers in the area of astronomy and astronautics.

Key words: laser, LIBS, meteor, meteorite, interplanetary matter

Obsah

Úvod	8
I Teoretická část	9
1 Meteoroid, meteorit a meteor	10
2 Spektroskopie meteorů	11
2.1 Historie spektroskopie meteorů	12
2.2 Průlet meteoroidu atmosférou Země	12
3 Spektroskopie laserem indukovaného průrazu - LIBS	15
3.1 Hlavní omezení LIBS	16
3.2 CF-LIBS	17
3.3 Fáze vzniku laserem indukovaného plazmatu	18
II Experimentální část	20
4 Experimentální uspořádání	21
5 Instrumentace	23
5.1 ArF excimerový laser	23
5.2 Nd:YAG laser	23
5.3 Ti:Safírový laser	24
5.4 Terawattový jodový laser Asterix	25
5.5 Astronomický spektrograf	25
5.6 Vysoce rozlišený Echelle spektrograf	26
6 Laser vs. meteor	27
7 Výkonové lasery v kosmonautice a astronomii	29
7.1 Využití LIBS v kosmonautice	29
7.2 Planetární obrana	30
Závěr	32
Literatura	33

Přílohy	36
A Seznam vzorků meteoritů	36

Úvod

Výzkum aplikace výkonových laserů má potenciál významně přispět k rozvoji celé řady badatelských záměrů, které sahají od zkoumání prvkového složení těles meteoroidů spektrální analýzou plazmatu meteorů a tím k poznání mineralogie a distribuce meziplanetární hmoty, zkoumání chemické evoluce sluneční soustavy, pátrání po mechanismech vedoucích ke vzniku života až po témata směřující k aplikacím snad dostupným v budoucnosti, jako je prospekce a těžba nerostného bohatství na asteroidech či mírového využití laserů pro destrukci potenciálně nebezpečných těles, jako jsou blízkozemní planety a kosmické smetí.

Základní metodou k poznávání chemického složení vzdáleného vesmíru je spektroskopie. V současné době je pro interpretaci dynamiky plazmatu meteorů, jejich spekter a dominantních spektrálních charakteristik nejvíce využíváno matematických modelů. Naším záměrem je ukázat, že nejenom tyto teoretické simulace spekter, ale také laboratorní experimenty mají velký potenciál pomoci s kvalitativním a kvantitativním vyhodnocováním pozorovaných dat a s přiřazením důležitých spektrálních charakteristik v emisních spektrech meteorů.

Abychom po všech stránkách porozuměli pozorovaným spektrům, musí být srovnávací laboratorní experimenty prováděny za přesně kontrolovaných fyzikálních a chemických podmínek (koncentrací jednotlivých vzorků, teploty, tlaku a elektronové hustoty), přičemž simulace reálných parametrů systému musí být prováděny pomocí dobře definovaného experimentu, který je snadné kontrolovat v laboratorních podmínkách, a který může být testován pomocí zvolené spektroskopické metody s dostatečnou citlivostí, přesností a opakovatelností. Pro takovouto laboratorní simulaci plazmatu meteorů se ukázaly být velmi vhodnými výkonové lasery.

Tento výzkumný úkol je zaměřen na popis a zhodnocení výhod a limitů této nové experimentální metody založené na laserové ablaci reálných vzorků meteoritů za použití několika laserových systémů: velký terawattový jodový systém PALS, femtosekundový vysoce výkonový Ti:Sa laser, laboratorní Nd:YAG a ArF excimerový laser.

Na závěr jsou v této práci diskutovány další možné aplikace výkonových laserů, a sice využití LIBS v kosmonautice a výzkum fyzikálního působení laserů určených pro případný odklon/urychlení až destrukci.

Část I

Teoretická část

Kapitola 1

Meteoroid, meteorit a meteor

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

Meteoroid

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

Meteor

Slovo *meteor* označuje světelný jev, který nastává při vstupu meteoroidu do atmosféry. Ten se díky tření o molekuly vzduchu ohřívá, což vede až k ablaci (vypařování hmoty meteoroidu) a následné excitaci a ionizaci okolních molekul. Při zpětné rekombinaci atomů pak dochází k tvorbě světelné stopy [2]. Velmi jasný meteor, který se svou září vyrovná i nejjasnějším hvězdám či dokonce měsíci, se nazývá *bolid* [3].

Meteorit

Pokud byl meteoroid dostatečně velký na to, aby dokázal projít celou atmosférou bez toho, aniž by se celý vypařil, potom zbylé těleso, které dopadne na zemský povrch, nazýváme *meteorit* [2].

Kapitola 2

Spektroskopie meteorů

Chemická analýza plazmatu meteoroidu a jeho chování při průletu atmosférou je sám o sobě náročný vědecký problém hodný studie. V momentě vstupu meteoroidu do atmosféry začne docházet díky interakci s nejvyššími vrstvami atmosféry za velmi vysoké rychlosti (až desítky km/s) k jeho rapidnímu ohřevu, ablaci povrchu a rozpadu mateřského tělesa [4, 5]. Začátek ablace meteoroidu závisí na počáteční rychlosti tělesa a hustotě atmosféry. Pouze asi 0,1 - 1 % počáteční kinetické energie meteoroidu je transformováno na viditelné světlo meteoru a jeho atmosferické stopy. Během ablace probíhá ionizace prvků zemské atmosféry i prvků uvolněných ze samotného tělesa. Tyto emisní linie mohou být poté zaznamenány a analyzovány ve spektrech meteorů [10].

Hloubková analýza spekter meteorů může být použita pro základní kvalitativní a kvantitativní prvkovou analýzu a charakterizaci meteoroidů a jejich mateřských těles - asteroidů a komet. Asteroidy a komety jsou pozůstatky materiálu, který se podílel na formování planetesimál a planet. Zbytky asteroidů, které dosáhly zemského povrchu (meteority), nám poté umožňují zkoumat detaily nejenom o jejich vlastnostech, ale také o jejich historii - fyzikální a chemické evoluci sluneční soustavy. I v případě, že je nalezen kus meteoritu, stále zůstává zásadní problém, a to v přiřazení daného meteoritu k jeho mateřskému tělesu.

Ve většině případů však těleso zemského povrchu vůbec nedosáhne a již během svého průletu atmosférou se zcela vypaří a rozpadne. Spektrografickou kamerou zaznamenané emisní spektrum je pak jediným dokladem o jeho chemickém složení. 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. Tyto komplexní informace jsou v současné době dostupné v mezinárodní databázi EDMOND (European viDeo MeteOr Network Database) [13]. Na základě poměrů koncentrací prvků, především Na, Mg, Fe, Ca, Al, vyskytujících se ve vzorku, lze poté meteorit/meteor klasifikovat do specifické skupiny [14].

Kvalita naměřených spekter a následná prvková analýza, jsou momentálně limito-

vány 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.

2.1 Historie spektroskopie meteorů

První pokus o pozorování spekter meteorů provedl profesor A.S. Herschel. Ten vyvinul speciální binokulární spektroskop s hranolem a s jeho pomocí pak pozoroval na sedmáct spekter meteorů. Herschel mimo jiné také pracoval na identifikaci, jakožto zdrojů meteorických rojů [11].

První fotografický záznam spektra meteoru (nutno říci, že zcela náhodný) provedl v roce 1897 na své misi v Peru britský astronom Edward Charles Pickering (1846–1919). Prvními systematictějšími spektrálními analýzami se zabýval na počátku dvacátého století ruský astronom Sergej Nikolajevič Blažko (1870 – 1956). V roce 1907 provedl detailní rozbor spektra meteoru, který sám zachytil na fotografickou desku. Velmi rozsáhle se v pionýrských dobách spektrální analýzy meteorů tomuto oboru věnoval kanadský astronom Peter Mackenzie Millman (1906–1990), který v první polovině 20. stol. prostudoval desítky spekter meteorů a založil jednoduchý klasifikační systém pro spektra meteorů - *World List of Meteor Spectra* [12].

Již tehdy byly ve spektrech meteorů nalezeny emisní čáry řady prvků jako Na, Fe, Ti, Cr, Al, Si vyzařující na charakteristických vlnových délkách. K vyzařování jejich atomárních linií dochází díky vyhasínáním excitovaných stavů atomů v plazmě meteorů. Důležitou informací však není jen vlnová délka, ale také intenzita linií, jež odpovídá zastoupení jednotlivých prvků. To je velice důležité v případě, že cílem spektrální analýzy není pouhá kvalitativní identifikace jednotlivých prvků, která byla v podstatě možná již v době prvních studií prováděných na poč. 20. stol., ale pakliže je stanovováno také kvantitativní chemické složení tělesa meteoroidu. Tato analýza nicméně představuje velmi složitý fyzikální a matematický problém vyžadující podrobné teoretické studium spekter a provedení řady komparativních experimentů za kontrolovaných laboratorních podmínek.

2.2 Průlet meteoroidu atmosférou Země

Detailní popis a pochopení chování padajícího tělesa meziplanetární hmoty v atmosféře je rovněž náročný vědecký problém a je detailně popsáno např. v pracích českého astronoma Zdeňka Ceplechy (1929 – 2009) [4] - [9]. Stručně jej lze nastínit následujícím způsobem:

Když těleso vstoupí do zemské atmosféry, interaguje s jejími vrstvami již v poměrně velkých výškách kolem 120 – 80 km při velmi vysokých rychlostech většinou mezi 11 km/s až 72 km/s). Dochází okamžitě ke srážkám s molekulami vzduchu a k

obrovskému tření. Díky tomu se zvyšuje teplota tělesa, to začíná prskat (může dojít i k fragmentaci). Těleso je neustále zahříváno, až dochází k jeho tavení, materiál se dokonce odpařuje, atomy jsou excitovány až ionizovány. Emisní čáry těchto prvků jsou pak detekovány v meteorickém spektru. Právě v této fázi dochází ke tvorbě světelné stopy (září vlastně plazma, které je složeno z částic, které tvoří těleso, ale i samotnou atmosféru), ve kterou se přemění pouze 0.1 – 1 % původní kinetické energie.

Pokud uvažujeme v detailech typické hodnoty fyzikálních charakteristik meteoru, je situace rozdílná pro různé typy těles. Na rychlosti vstupu do atmosféry a hmotnosti vstupujícího tělesa závisí např. základní charakteristika dráhy meteoroidu, a sice počátek jeho viditelné trajektorie. Pro známé meteorické roje (s retrográdní dráhou, například Leonidy, Perseidy, Orionidy) a sporadické meteory s vysokou geocentrickou rychlostí (80 – 100 km/s) platí, že jejich viditelná fáze průletu atmosférou je někde mezi 120 a 100 km. Naopak meteorické roje a sporadické meteory s nízkou geocentrickou rychlostí (např. Drakonidy) mají iniciační výšku mezi 80 a 90 km. V případě rojů s vysokými geocentrickými rychlostmi (kolem 80 – 100 km/s) mají některé velmi vysokou iniciační výšku, která v ojedinělých případech může být až 150 km nad zemským povrchem. Nejnižší bod viditelné trajektorie meteoroidu (konec ablačního procesu) závisí kromě geocentrické rychlosti a vstupní hmotnosti také na zenitálním úhlu vstupu tělesa do atmosféry. U tělesa s nízkou geocentrickou rychlostí (10–30 km/s) a hmotností v řádech kilogramů může končit viditelná trajektorie letu ve výškách kolem 30 až 50 km nad zemským povrchem.

Speciální případ trajektorie mají meteoroidy, které nazýváme „lízači Země“, kteří do zemské atmosféry vstupují pod velmi malým úhlem. Vhodnou kombinací nízké geocentrické rychlosti a vstupní hmotnosti (v řádech kilogramů) se těleso úplně nevypaří a pokračuje po nové úplně odlišné oběžné dráze kolem Slunce. Pokud těleso, které vstoupilo do zemské atmosféry, mělo dostatečnou hmotnost (typicky větší než 100 kg, v závislosti na geocentrické rychlosti), tak ve 30 km nad zemským povrchem má již velmi malou rychlost. Proto už nedochází k emisi viditelného světla a zároveň je zabráněno kompletnímu vypaření meteoroidu. Poté zbytek tělesa (obvykle těleso ztratí 90 – 95 % jeho hmotnosti) pokračuje po tzv. temné „dráze“.

Za posledním bodem viditelné dráhy meteoru jsou z pozorování známé vektory jeho rychlosti a decelerace – okamžitá rychlost malého tělesa v tomto bodě je obvykle menší než 5 km/s. Dále se těleso pohybuje po dráze volného pádu s danou počáteční rychlostí a směrem, ale je ovlivněno aerodynamickými silami v turbulentní atmosféře. V tomto bodě je důležité určit hustotu tělesa, která závisí na chemickém složení tělesa. Klíčovou věcí v tomto problému je opět zaznamenané spektrum – doklad o chemickém složení tělesa. Rozvoj objektivních pozorovacích metod založených na vysoce citlivých CCTV kamerách, moderních počítačích a specializovaných softwarech způsobil v posledních letech radikální nárůst počtu zároveň zaznamenaných meteorů (ze dvou nebo více stanic). V takovém případě získaná data umožňují výpočet trajektorie meteoru nejen v atmosféře, ale také v meziplanetárním prostoru.

Známa dráha ve Sluneční soustavě je významnou výhodou pro další určení typu a složení tělesa meteoroidu pomocí spektrální analýzy, tyto komplexní informace jsou k dispozici v současné době v databázi EDMOND. Podle analýzy podílu Na,

Fe, Ca, Cr, Mn, Al a Si v tělese může být klasifikováno do známých populací. V tomto případě je také možné použít již známou spektrální analýzu individuálních populací potenciálních mateřských těles tj. asteroidů a komet. Z emisní světelné křivky individuálních prvků odvozené spolu s trajektorií v zemské atmosféře (pro známou rychlost a výšku) je možné stanovit emisní čáry, efektivní teplotu vyzařování a energii excitovaných atomů (na základě součtu intenzit emisních čar). Studium korelací mezi světelnou křivkou meteoru a emise prvků během procesu ablace v atmosféře jsou důležité pro určení bodů fragmentace tělesa. Rychlý nárůst jasnosti meteoru poukazuje na aktuální fragmentaci. V případě dostatečné hmotnosti tělesa vstupujícího do atmosféry je možné rozlišit emise prvků ve vnějších vrstvách tělesa před fragmentací (kůra) a v jádře tělesa (po fragmentaci). Tady ze známé výšky (tedy ze známé hustoty atmosféry) a ze známé okamžité rychlosti tělesa v okamžiku fragmentace je možné vypočítat mechanickou pevnost tělesa, jeho kůry nebo jeho jádra. Mechanická odolnost tělesa je další důležitou hodnotou pro určení původu a vlastností mateřského tělesa. Například mez pevnosti chondritu se pohybuje kolem 3 MPa.

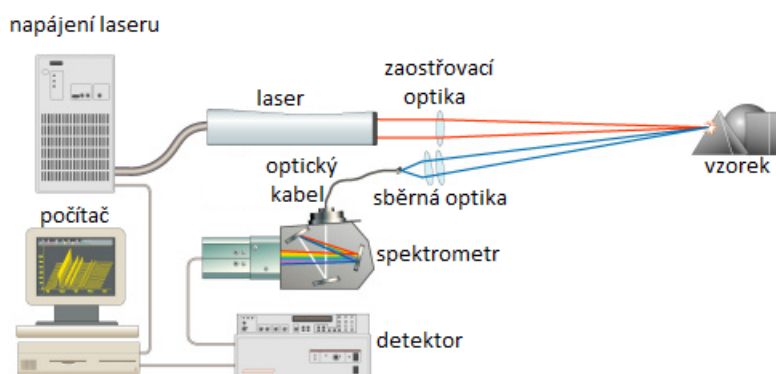
Kapitola 3

Spektroskopie laserem indukovaného průrazu - LIBS

Určení prvkového složení pomocí analýzy emisního spektra plazmatu vytvořeného nad povrchem vypařovaného objektu (meteor) je prakticky totožné laboratorní LIBS prvkové spektrální analýze.

Spektroskopie laserem indukovaného průrazu, zkráceně LIBS (z anglického Laserinduce breakdown spectroscopy) je moderní dynamicky se rozvíjející analytická technika atomové emisní spektroskopie (AES). Základním principem je sběr a interpretace elektronických emisních spekter laserem generovaného plazmatu.

Schéma základní aparatury pro spektroskopii laserem indukovaného průrazu je znázorněno na Obr. 3.1.



Obr. 3.1: Typické uspořádání aparatury pro LIBS metodu [15].

Ať už se jedná o kvalitativní nebo kvantitativní analýzu, základní součástí všech LIBS měření je emisní spektrum zaznamenané pro každé plazma. Při laserovém výstřelu dochází k ablaci části vzorku v místě, kam byl paprsek fokusován, tedy nastává odpařování, atomizace a excitace vzorku, vytváří se plazma. Emitované záření

je poté sbíráno a optickým vláknem přenášeno do spektrometru. Výstupem LIBS měření je spektrum znázorňující závislost intenzity záření na vlnové délce [16].

Ve většině LIBS systémů je laserový paprsek fokusován pomocí jediné čočky nebo zakřivených zrcadel. Systém více čoček je využíván v případě, že je potřeba zaostřit paprsek na délce několika metrů a přitom dosáhnout co největší hustoty výkonu v co nejmenším bodě na vzorku.

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

LIBS má oproti jiným spektrometrickým technikám řadu výhod i nevýhod. Asi nevýznamnější výhodou je absence jakýchkoli preanalytických úprav vzorku například: leštění, mletí, rozpouštění atd., což ji dělá ideální pro tzv. in-situ analýzu. 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 Obr. 3.1).

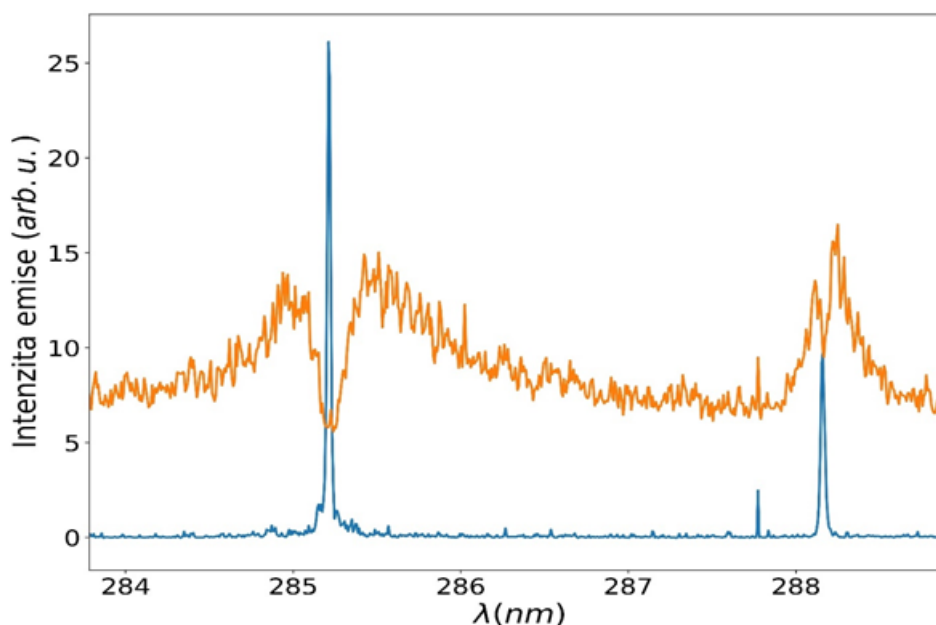
Ablace vzorku může probíhat na vzduchu za atmosférického tlaku, ve vakuu, pod vodou, dokonce i za extrémních podmínek jako je vysoká teplota či tlak. Vzhledem k jednoduchosti LIBS aparatur je možná výroba kompaktních mobilních LIBS spektrometrů či spektrometrů s dálkovou detekcí.

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 najednou. 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 spécií, které jsou situovány velmi blízko sebe. Existují rozsáhlé on-line databáze čar NIST (National Institute of Standards and Technologies) [18], díky kterým lze dané čáry ve spektru přiřadit, avšak někdy jsou linie v databázi tak blízko sebe, že je mnohdy těžké určit, které specii 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.

3.1 Hlavní omezení LIBS

LIBS metoda se samozřejmě potýká také s několika problémy. Pravděpodobně největším z nich je efekt **samoabsorpce emisních linií**. K tomuto jevu dochází v případě, že měřené plazma není dostatečně opticky tenké a záření emitované exci-

tovanými stavy uvnitř plazmové plumy je znovu absorbováno excitovanými stavy na okraji plumy. Díky tomu dojde k poklesu intenzity emitovaného záření specií z vnitřní části plumy. Takovéto linie lze poznat podle typického dvouhrbého tvaru (viz Obr. 3.2). Nižší intenzita, která může být následně zahrnuta do výpočtu, není jediným problémem vyplývajícím ze samoabsorpce. Takto rozdvojenou linii lze totiž snadno zaměnit za dvě sousedící linie, které mohou být následně přiřazeny jiné specií.



Obr. 3.2: Ukázka samoabsorbovaných linií Mg I (285,220 nm) a Si I (288,164 nm) ve vybraných spektrech meteoritu Porangaba. Oranžová barva odpovídá vysokotlakovému spektru a modrá barva spektru měřenému za vakua.

Na výsledky analýzy může mít také vliv tzv. **matriční efekt**, kdy na základě specifických vlastností matrice, jako jsou např. různé chemické vazby jednotlivých prvků v matrici, může dojít k nestechiometrické ablaci daného prvku. Tomuto problému lze předejít použitím bezkalibrační metody spektroskopie laserem indukovaného průrazu CF-LIBS.

3.2 CF-LIBS

Ciucci et. al. (1999) navrhli nový způsob, jak obejít matriční efekt, a to pomocí bezkalibrační spektroskopie laserem indukovaného průrazu (CF-LIBS) [20]. Tato metoda je založena na stanovení elektronové hustoty a excitační teploty laserem buzeného plazmatu [21]. 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) [22], [23]. Druhou podmínkou je stechiometrické ablace, tj. stav kdy koncentrace atomů daného prvku v plazmatu je stejná jako koncentrace daného prvku ve vzorku. Za třetí musí být splněn předpoklad opticky tenkého prostředí, tedy plazma musí mít takovou konzistenci, že fotony emitované uvnitř plumy nejsou znovu absorbovány atomy na okraji plumy, a nedochází tak k samoabsorpci spektrálních čar [21].

Pokud jsou tyto uvedené podmínky splněny, může být plazma považováno za prostorově homogenní zdroj nespojitého záření charakteristických spektrálních linií. Změřené spektrum musí samozřejmě obsahovat detekovatelné izolované reprezentativní linie všech prvků obsažených ve vzorku. Z energetického hlediska je nutno, aby excitované stavy byly obsazeny podle Boltzmannova rozdělení, a ionizované stavy odpovídaly Sahově–Boltzmannově rovnici rovnováhy. V tomto případě může být atomární složení popsáno za použití bezkalibrační metody (CF–LIBS).

3.3 Fáze vzniku laserem indukovaného plazmatu

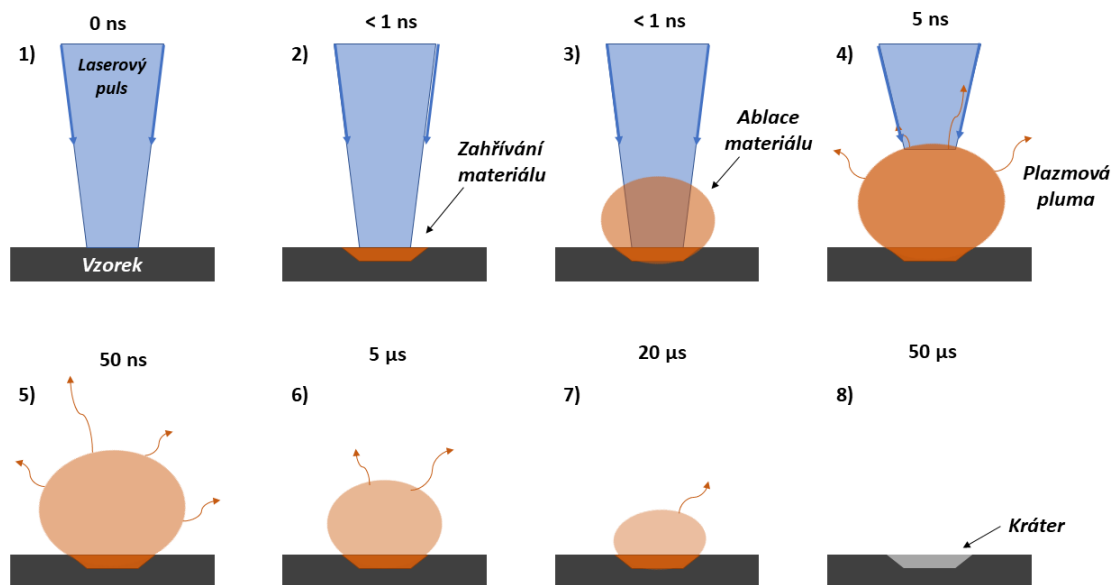
Nezávisle na skupenství vzorku je pomocí pulsního laserového záření, zaostřeného na velmi malou plochu vzorku, generováno plazma. Plošná hustota výkonu v místě nástřelu může dosahovat řádově desítek $\text{GW}\cdot\text{cm}^{-2}$ (ArF ve vzduchu) až desítek $\text{TW}\cdot\text{cm}^{-2}$ (Nd:YAG v dusíku) [24]. Aby došlo k tvorbě plazmatu musí být dosaženo alespoň minimální plošné hustoty, která je označována jako „prahová“ (*breakdown threshold*) a závisí na druhu materiálu, parametrech laseru, okolní atmosféře a jejímu tlaku.

Délka laserového pulzu závisí na technologii laseru a pohybuje se obvykle v řádech 10^{-12} až 10^{-9} s. Celý proces trvá pouze několik μs . Schéma tvorby plazmatu při interakci laserového záření se vzorkem je znázorněno na Obr. 3.3.

Fokusevaný laserový paprsek dopadá na vzorek (1), který se začne zahřívat, tavit a odpařovat (2). Malé množství materiálu je ablováno a spolu s okolní atmosférou vytvoří plazma, což je doprovázeno rázovou vlnou a charakteristickým praskavým zvukem, pakliže docházelo k ablaci v atmosféře (3). Rázová vlna je způsobena nadzvukovou expanzí plazmatu do okolí (její počáteční rychlost bývá několik km/s) [25]. Plazma se tvoří a rozpíná ještě v době trvání pulzu (4).

V této fázi převažuje brzdné záření (*Bremsstrahlung*) a 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*) [24]. 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 dále rozpíná, plazma postupně chladne a začíná zářivá relaxace excitovaných atomů a iontů (5-7). V tomto časovém rozmezí



Obr. 3.3: Schéma průběhu laserové ablace.

má spektrum emitované plazmatem čárový charakter, to znamená, že se skládá z emisí o různých vlnových délkách, které jsou charakteristické pro jednotlivé prvky, přítomné ve sledovaném vzorku. Po rozplynutí plumy zůstane na povrchu malý kráter o velikosti řádově mikrometrů. Množství odpařeného materiálu odpovídá u běžných laserů hmotnosti v řádech nanogramů.

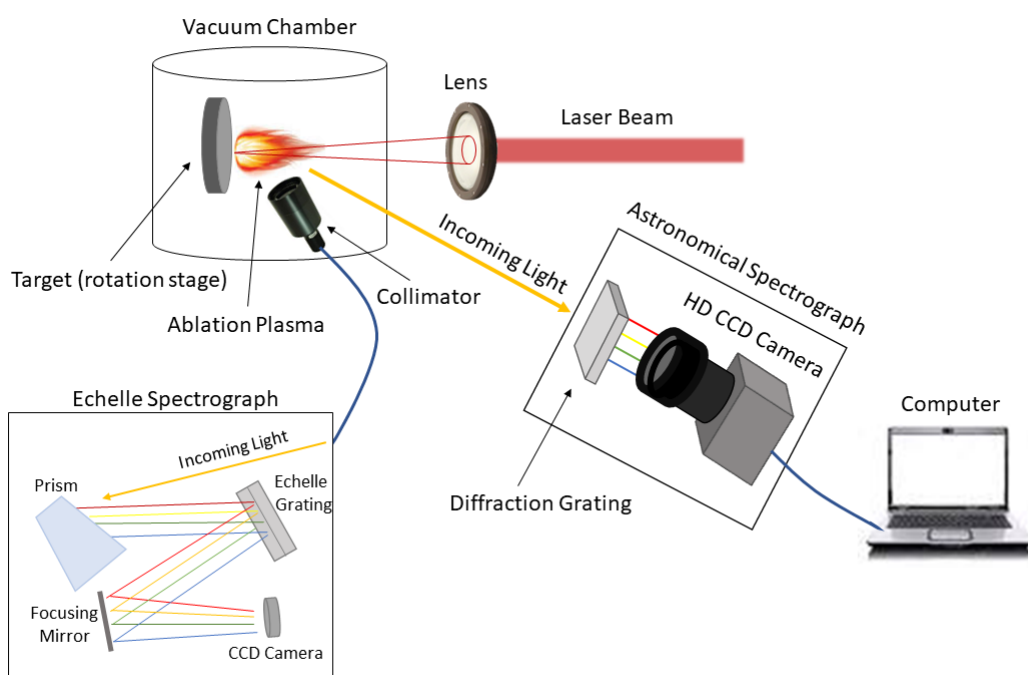
Část II

Experimentální část

Kapitola 4

Experimentální uspořádání

Plazma meteoroidu bylo simulováno v laboratořích Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR a výzkumného centra PALS Ústavu fyziky plazmatu AV ČR. laserovou ablací vzorků převážně chondritických meteoritů pomocí několika různých laserů (viz kapitola 5). Kompletní seznam všech použitých vzorků je uveden v tabulce, kterou lze nalézt v příloze tohoto výzkumného úkolu. Tabulka také uvádí, kterými konkrétními lasery byly dané vzorky ostříleny.



Obr. 4.1: Uspořádání laboratorní LIBS aparatury.

Schéma experimentální aparatury je k vidění na Obr. 4.1. Laserové svazky byly fokusovány pomocí čoček na vzorek, který byl ve většině případů (mimo případ velkého jodového laseru Asterix) připevněn na pohyblivém terči. Nutnost nestatického upevnění vzorku během ablace vyplývá z velké nehomogenity meteoritů.

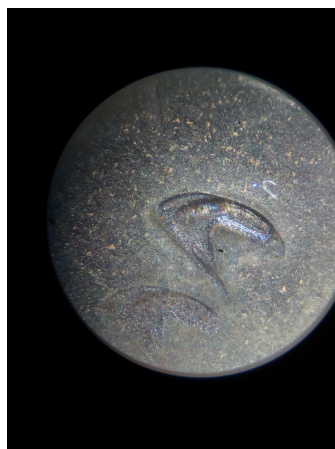
Celý systém byl umístěn ve vakuové komoře vybavené kolimátorem, který byl přímo připojen k vysoce rozlišenému Echelle spektrografu (ESA 4000, LLA Instruments GmbH, Německo) pomocí optického vlákna. Referenční nízce rozlišená spektra byla zaznamenána simultánně pomocí astronomického spektrografu, který je běžně využíván pro přímé spektroskopické pozorování meteorů. Naměřená spektra těchto vzorků meteoritů byla následně průměrována za účelem získání vhodného poměru signálu k šumu.

Kapitola 5

Instrumentace

5.1 ArF excimerový laser

Argon fluoridový laser se řadí se svou vlnovou délkou 193 nm mezi ultrafialové lasery. Za účelem simulace plazmatu meteorů byla nastavena délka pulzu na ~ 10 ns, opakovací frekvence na 1 Hz a energie v pulzu na 50 mJ. Laserový paprsek byl fokusován pomocí SiO čočky s ohniskovou vzdáleností 10 cm. Vzorek meteoritu byl v případě tohoto laseru připevněn na rotační terči s velmi nízkou rychlostí otáček. Na Obr. 5.1 je k vidění stopa výstřelu ArF laserem.

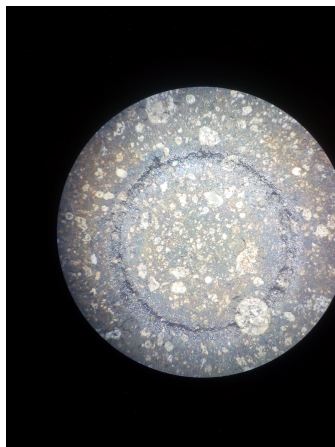


Obr. 5.1: Stopa po výstřelu ArF excimerového laseru na meteoritu JaH 804.

5.2 Nd:YAG laser

V současné době patří Nd:YAG lasery k nejčastějším diodou čerpaným pevnolátkovým laserům. Pro ablaci vzorků meteoritů byly parametry laseru nastaveny na následující hodnoty: vlnová délka na 1064 nm, délka pulzu na ~ 6 ns, opakovací frekvence na 10 Hz a energie byla kolem 450 mJ. Pro fokusaci svazku byla využita CaF čočka o ohniskové vzdálenosti 10 cm. Vzorek byl upevněn na rotační terči s

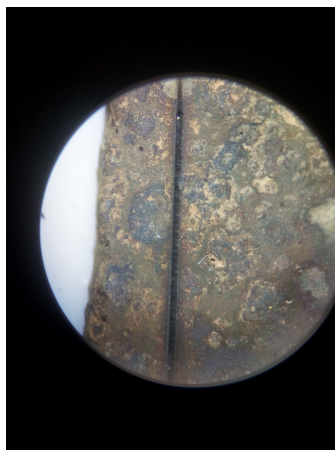
otáčkovou rychlostí větší, než byla v případě excimerového laseru. Stopa po Nd:YAG laseru je na Obr. 5.2.



Obr. 5.2: Stopa po výstřelu Nd:YAG laseru na meteoritu DHO 1763.

5.3 Ti:Safírový laser

Pevnolátkový Ti:Safírový laser (někdy také znám jako $\text{Ti:Al}_2\text{O}_3$ laser je jedním z laditelných laserových systémů hojně využívaných pro vědecké výzkumy. Díky Ti^{3+} iontům je tento laser schopen generovat ultrakrátké pulzy v rozmezí od 650 do 1100 nm [26]. Pro účely tohoto výzkumu byla vlnová délka nastavena na 810 nm, délka pulzu na 50 fs a energie v pulzu byla 1 mJ. Zaostření laserového paprsku byla využita safírová čočka ($f/100$, $f = 1$ m). Vzorčky meteoritů se v tomto případě upevňovaly na podložku s lineárním posuvem. Na Obr. 5.3 je stopa po výstřelu Ti:Sa laseru.



Obr. 5.3: Stopa po výstřelu Ti:Sa laseru na meteoritu DHO 1764.

5.4 Terawattový jodový laser Asterix

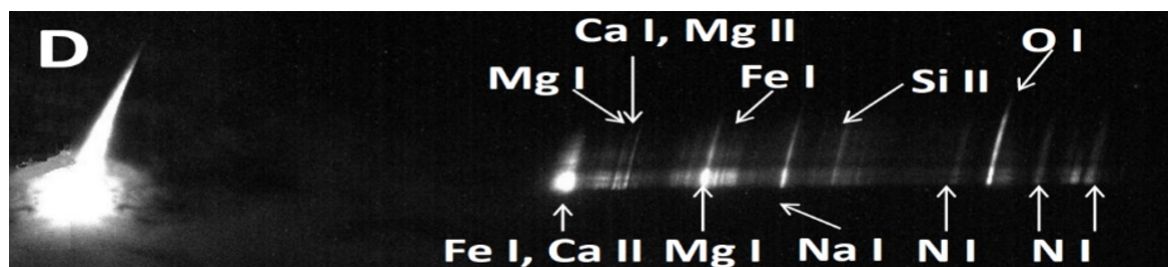
Vzorky meteoritů byly také ablovány subnanosekundovými pulzy (délka pulzu 0,35 ns, vlnová délka 1315 nm, energie 600 J) generovanými vysoce výkonovým jodovým plynovým laserem „Asterix“, který je základním experimentálním zařízením centra PALS (Prague Asterix Laser System). Hustota výkonu laserového svazku na povrchu vzorků dosáhla až $2,2 \text{ TW} \cdot \text{cm}^{-2}$. Laserový paprsek byl fokusován plano-konvexní CaF čočkou ($f/2$; $f = 60$) cm na vzorek, který byl umístěn mimo ohnisko. Průměr laserového spotu byl 1 cm. Vzniklý kráter lze nalézt na Obr. 5.4.



Obr. 5.4: Stopa po výstřelu výkonového jodového laseru Asterix na meteoritu NWA 8212.

5.5 Astronomický spektrograf

Základní princip astronomického spektrografu se během posledních 100 let prakticky nezměnil. Do dnešního dne obsahuje tento spektrograf disperzní prvek (dnes spíše holografickou mřížku než hranol), který způsobuje refrakci různých barev pod různými úhly a dělí tak bílé světlo na spektrum. A dále se také stále skládá z kamery sbírající rozložené barevné složky. Obrázek spektra je zachycen na originální fotografii sestupujícího meteoroidu, jak lze vidět na Obr. 5.5.



Obr. 5.5: Fotografický záznam spektra meteoru.

Tento přístroj užívaný pro zaznamenávání spekter meteorů v současnosti představuje nejlepší rovnováhu mezi cenou a technickými parametry. Současné spektrografické kamery jsou založeny na QHY5LII-m hardwaru, čipu typu CMOS (Complementary Metal–Oxide Semiconductor, Dopovaný kov–oxid polovodič) s rozlišením 1280x960 px, objektivem Tamron ($f/1.00$, $F/3-8$ mm) vybaveným mřížkou o 1000 liniích/mm, která dovoluje rozlišení od 0.97 nm/px.

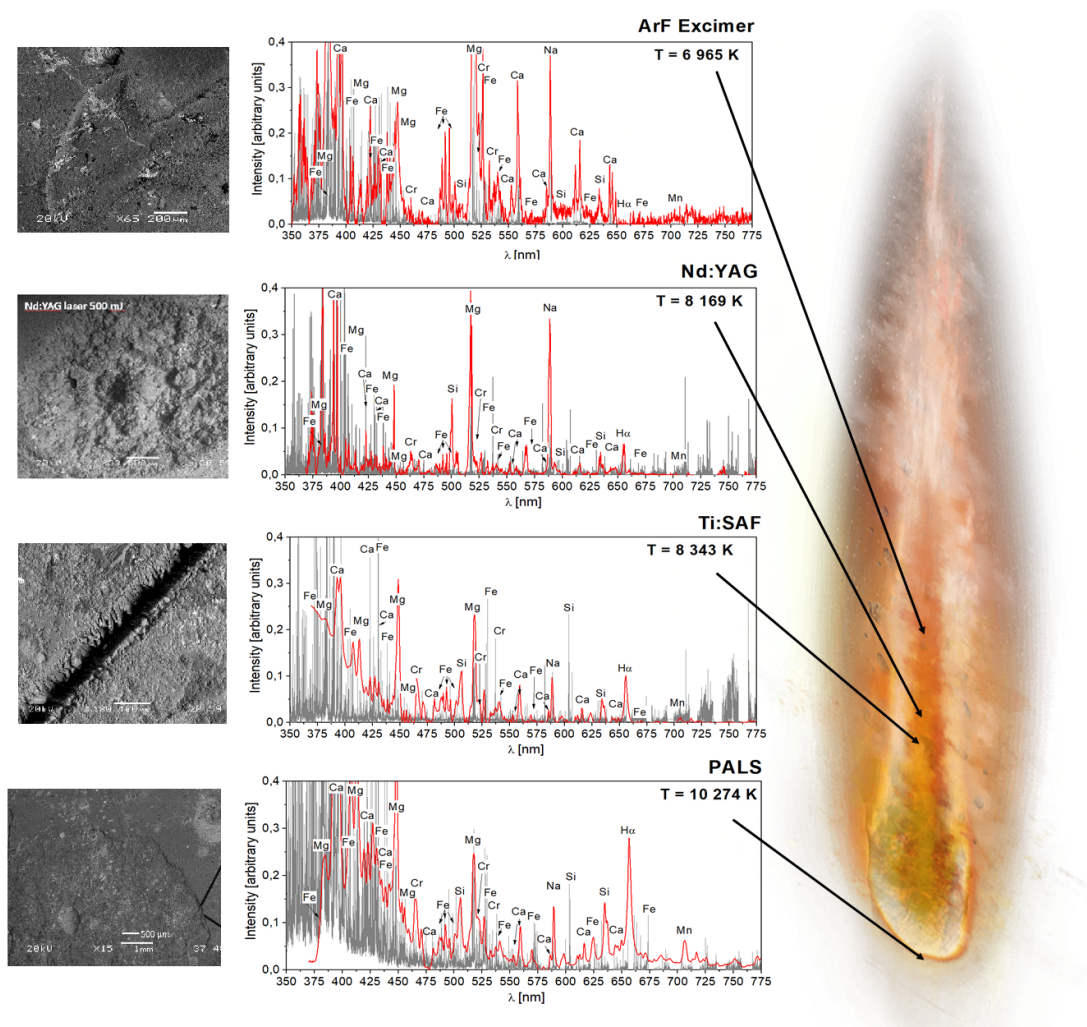
5.6 Vysoce rozlišený Echelle spektrograf

Na rozdíl od astronomického spektrografu, Echelle využívá dvou disperzních prvků vzájemně otočených o 90° - hranolu a Echelle mřížky. Nejdříve světlo projde hranolem, což zapříčiní vertikální disperzi. Dále toto rozložené světlo dopadá na mřížku, čímž se vytvoří vysoká disperze v horizontálním směru spektra. Tento druhý disperzní prvek je nutný k dosažení požadovaného vysokého rozlišení [27].

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 (v UV oblasti ~ 200 nm) do 0,019 nm (ve VIS ~ 780 nm).

Kapitola 6

Laser vs. meteor



Obr. 6.1: Nízce rozlišená (červená) a vysoce rozlišená (šedivá) ablační spektra meteoritů získaná pomocí 4 různých laserů, společně s detailními záběry kráterů. Naprávé straně je pak názorně ukázáno které části plazmy meteoroidu daný laser odpovídá.

Laboratorní studie zaměřené na plazma meteoru se potýká, stejně jako každá ex-

perimentální práce, se základním problémem: jak dosáhnout experimentálních podmínek, které co nejvíce odpovídají skutečnosti.

Velký objem plazmatu vytvořený terawattovým jodovým laserem Asterix vykazuje teploty kolem 10 000 K a expanduje (na základě Dopplerova posuvu spektrálních čar) rychlostí 6 km/s. Navíc je toto zařízení díky vysoké výstupní energii 600 J schopné odablovat poměrně velkou plochu ($\sim 1 \text{ cm}^2$) vzorku meteoritu. Tyto podmínky mohou sloužit jako přibližná simulace oblasti frontální rázové vlny meteoru, která vzniká při ablaci meteoroidu o malých rozměrech během průletu atmosférou (viz Obr. 6.1). Tato přední rázová vlna přispívá k vysokoteplotním komponentům emisních spekter meteorů. Všechny experimenty v případě tohoto laseru byly navíc prováděny za tlaku 2 mbar, což odpovídá výšce ($> 110 \text{ km}$), která je typická pro rané fáze ablace meteoroidu.

Ti:safírový laser a Nd:YAG vykazují velmi podobné teploty pohybující se kolem 8 000 K. Excimerový laser pak dosahuje nejnižších teplot $\sim 7 000 \text{ K}$. Účinky těchto tří laserů se pak dají do jisté míry z hlediska teplot připodobnit vzdálenějším částem (myšleno od čela meteoru) trailu meteoru.

V rámci těchto experimentů jsou prvky odpařovány spolu s celou maticí, stejně jako během sestupu meteoroidů, a zaznamenaná emisní spektra s vysokým rozlišením obsahují hlavní linie obsažené také v meteorovém spektru.

Největším limitem této metody je ale rozdíl v mechanismech vzniku plazmatu u reálných meteorů a laboratorních simulací. Zatímco u reálného meteoru dochází k ablaci a tvorbě plazmatu díky srážkám s molekulami vzduchu a obrovskému tření, při laserové ablaci je přísun energie v podobě proudu fotonů zajištěný pomocí krátkého pulzu laseru (ns – fs) zaostřeného na velmi malou plochu, což následně zapříčiní vznik plazmatu. Plošná hustota výkonu (irradiance) v místě dopadu laserového pulzu totiž dosahuje až stovek $\text{GW} \cdot \text{cm}^{-2}$. Jakákoli pevná nebo kapalná látka je destruuována, vazby mezi atomy jsou roztrhány a v plynu dochází k tzv. optickému průrazu (breakdown). Při vzniku plazmatu se uplatňují multifotonové procesy a lavinová ionizace.

Kapitola 7

Výkonové lasery v kosmonautice a astronomii

7.1 Využití LIBS v kosmonautice

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

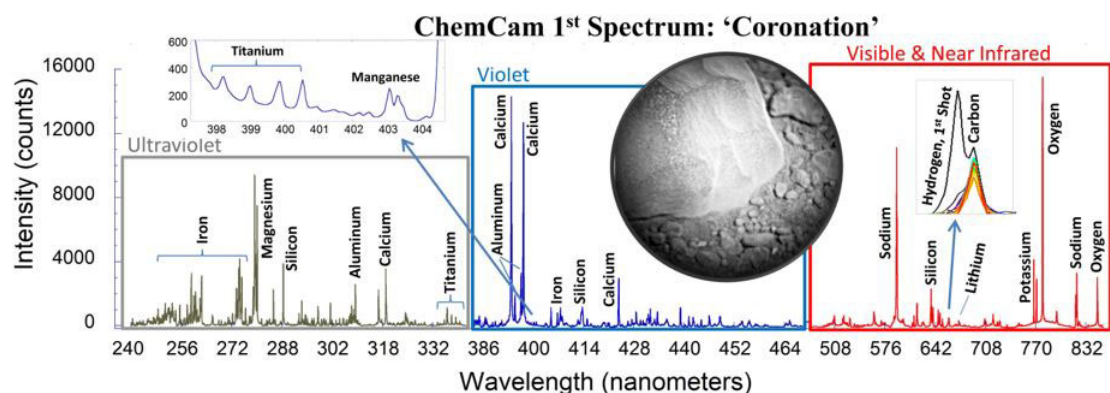
V srpnu roku 2012 na Marsu úspěšně přistál rover *Curiosity* nesoucí také mimo jiné zařízení *ChemCam* (Obr. 7.1), jehož součástí je technologie LIBS. ChemCam je



Obr. 7.1: Zařízení ChemCam, které je součástí roveru Curiosity [28].

navržen tak, aby prováděl rychlou elementární analýzu hornin a půd do vzdálenosti 7 metrů od roveru. Denně může odebírat tisíce spekter a provádět tak analýzu povrchu Marsu nevídanou rychlostí. Díky jednoduchosti dálkového ovládání se stal ChemCam nejčastěji používaným analytickým přístrojem roveru.

První vzorek, jež LIBS spektrum (Obr. 7.2) Curiosity odeslal zpět vědcům do NASA, byl kámen o velikosti pěsti a byl později pojmenován jako „Coronation“ (v překladu „Korunovace“). Od té doby bylo naměřeno více než 200 000 dalších spekter z asi 1500 individuálních cílových míst [28].



Obr. 7.2: První spektrum naměřené na Marsu roverem Curiosity [29].

LIBS technologie se vzhledem ke svým schopnostem rychle a vzdáleně analyzovat cíle i v extrémně nehostinných prostředí pravděpodobně stane zásadním nástrojem také při plánovaných misích na Venuši. Úkolem LIBS má být například určit typy povrchových hornin, jejich mineralogii a strukturu nebo měřit izotopy a sloučeniny síry. Tato data by měla poskytnout odpovědi na otázky, proč je Venuše tolik odlišná od Země a zda byla Venuše někdy jako Země. V současnosti je vědci z NASA rozvíjen plán na misi VITAL (Venus Intrepid Tessera Lander) [30].

V budoucnosti možná bude LIBS efektivní metodou pro prospekci rud a vzácných kovů na asteroidech. Automatizovaná flotila malých satelitů by například mohla ostřelovat povrch asteroidů pomocí laserů a dálkově zaznamenávat spektra, která by sloužila k mapování nerostného v bohatství pásu planetek. Tento koncept byl uplatněn například při návrhu sovětské sondy Dva orla pro průzkum Měsíce [31].

Pomocí spektroskopie laserem indukovaného průrazu lze také monitorovat zdraví raketových motorů. Detekce a charakterizace kovových prvků ve výfukových plynech může naznačovat opotřebení nebo korozi kovu v uhlovodíkem poháněných motorech. Tato informace obdržená za chodu motoru je velmi užitečná a může díky ní dojít k vypnutí mototru ještě před katastrofickým selháním [32].

7.2 Planetární obrana

Výkonové lasery by měly v budoucnu hrát také velmi významnou roli v oblasti obrany planety před potencionálně nebezpečnými tělesy, jako jsou blízkozemní planety (Near Earth Asteroids, NEA) či tzv. kosmické smetí na blízkozemních a geosynchronních orbitálních drahách. Současné vize jsou takové, že by byl laserový paprsek fokusován, pravděpodobně pomocí zrcadel, na povrch blížícího se objektu.

Místě fokusace by docházelo k ohřevu a následné ablaci asteroidu, čímž by došlo k vytvoření jakého si reaktivního pohonu a následnému odklonu tělesa [33].

Cílem našeho dalšího výzkumu je ověření základních parametrů laserových pulzů (délka pulzu, časový profil, prostorový profil, intenzita, polarizace) tak, aby byla dosažena maximální absorpce laserového záření jednotlivými vzorky (reálné meteority různých tříd) a tím se minimalizoval optický výkon finálního laseru. Dále pak bude studováno fyzikální působení laserů určených pro případný odklon/urychlení až destrukci těchto potenciálně nebezpečných těles o modelové velikosti až 10 mm (kosmické smetí), což by mělo vést až k určení potřebného škálování pro odklonění/urychlení těles o daných rozměrech a extrapolaci parametrů potřebných pro lasery schopné působit na větší objekty.

Závěr

Hlavním cílem tohoto výzkumného úkolu bylo představit využitelnost výkonových laserů v oblasti výzkumu chemických vlastností meziplanetární hmoty a jejich budoucím aplikacím v kosmonautice a astronomii.

Úvod teoretické části je věnován problematice a historii spektroskopie meteorů. Následuje představení a zhodnocení omezení spektroskopie laserem indukovaného průrazu (LIBS), jakožto rozvíjející se analytické techniky atomové emisní spektroskopie. K závěru teoretické části je krátce také nastíněna bezkalibrační metoda LIBS.

V druhé části je představena experimentální metoda založená na laserové ablaci reálných vzorků meteoritů, která je určena k laboratorní simulaci plazmatu meteoroidů. Pro účely této simulace bylo využito 4 různých laserových systémů v laboratorních Ústavu fyzikální chemie J. Heyrovského AV ČR a výzkumného centra PALS Ústavu fyziky plazmatu AV ČR.

V závěru jsou diskutovány výhody a limity laboratorní simulace plazmatu meteorů a následně je kriticky hodnocena problematika budoucího využití výkonových laserů pro likvidaci či odklonění blízkozemních objektů a aplikovatelnost LIBS v kosmonautice a astronomii. Tento výzkum bude jedním z našich dalších záměrů.

Literatura

- [1] RUBIN, Alan E. a Jeffrey N. GROSSMAN. Meteorite and meteoroid: new comprehensive definitions. *Meteoritics and Planetary Science* [online]. 2010, **45**(1), 114-120 [cit. 2018-06-30]. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2009.01009.x. ISSN 10869379. Dostupné z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1945-5100.2009.01009.x>
- [2] KAISER, T.R. Meteors and the abundance of interplanetary matter. *Space Science Reviews* [online]. 1963, **1**(3), 554-575 [cit. 2018-06-30]. DOI: 10.1007/BF00225272. ISSN 0038-6308. Dostupné z: <http://link.springer.com/10.1007/BF00225272>
- [3] BELTON, M. J. S. *Mitigation of hazardous comets and asteroids*. New York: Cambridge University Press, 2004. ISBN 05-218-2764-7.
- [4] CEPLECHA, Zdeněk a Douglas O. REVELLE. *Fragmentation model of meteoroid motion, mass loss, and radiation in the atmosphere*. 2005, **40**(1), 35-54. DOI: 10.1111/j.1945-5100.2005.tb00363.x. ISSN 10869379. Dostupné také z: <http://doi.wiley.com/10.1111/j.1945-5100.2005.tb00363.x>
- [5] CEPLECHA, Zdeněk, Jiří BOROVIČKA, W. Graham ELFORD, Douglas O. REVELLE, Robert L. HAWKES, Vladimír PORUBČAN a Miloš ŠIMEK. *Meteor phenomena and bodies* Space Science Reviews. **84**(3/4), 327-471. DOI: 10.1023/A:1005069928850. ISSN 00386308. Dostupné také z: <http://link.springer.com/10.1023/A:1005069928850>
- [6] CEPLECHA Z, MCCROSKY RE (1976) *FIREBALL END HEIGHTS - DIAGNOSTIC FOR STRUCTURE OF METEORIC MATERIAL*. J Geophys Res **81**(35):6257–6275.
- [7] CEPLECHA Z, SPURNY P, BOROVIČKA J, KECLIKOVA J (1993) *ATMOSPHERIC FRAGMENTATION OF METEOROIDS*. Astron Astrophys **279**(2):615–626.
- [8] MCCROSKY RE, CEPLECHA Z (1970) *FIREBALLS AND PHYSICAL THEORY OF METEORS*. Bull Astron INSTITUTES Czechoslov **21**(5):271-.
- [9] BROWN P, et al. (1994) *THE ORBIT AND ATMOSPHERIC TRAJECTORY OF THE PEEKSKILL METEORITE FROM VIDEO RECORDS*. Nature **367**(6464):624–626.

- [10] Spurný P, Ceplecha Z, Borovicka J. *Earth-grazing fireball: Czechoslovakia, Poland, October 13, 1990, 03h27m16s UT*. WGN, J Int Meteor Organ. 19(1):13, (1990)
- [11] Obituary Notices of Fellows Deceased. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences. 1908, 80(542), i-xxxviii. DOI: 10.1098/rspa.1908.0047. ISSN 1364-5021. Dostupné také z: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.1908.0047>
- [12] PART 3: METEOR SPECTRA. RENDTEL, Jürgen. *Handbook for Photographic Meteor Observations*. Edegem, Belgium: André Gabriël, 1993, s. 37-49. ISBN 2-87355-002-3.
- [13] Kornoš L, Koukal J, Píffl R, Tóth J. (2013) *EDMOND Meteor Database*. Proc Int Meteor Conf Poznań, Pol 2013:23–25.
- [14] Nittler, Larry R., McCoy, Timothy J., Clark, Pamela E., Murphy, Mary E., Trombka, Jacob I., and Jarosewich, Eugene. 2004. *Bulk element compositions of meteorites: A guide for interpreting remote-sensing geochemical measurements of planets and asteroids*. Antarctic meteorite research. 17:231–251.
- [15] Laser-Induced Breakdown Spectroscopy: How it works. *Applied photonics* [online]. 2015 [cit. 2018-06-27]. Dostupné z: http://www.appliedphotonics.co.uk/Libs/about_libs.htm
- [16] CREMERS, Dave a Leon RADZIEMSKI. *Handbook of laser-induced breakdown spectroscopy*. Second edition. Chichester: Wiley, 2013. ISBN 978-111-8567-371.
- [17] MIZIOLEK, Andrzej W., V. PALLESCHI a Israel. SCHECHTER. *Laser-induced breakdown spectroscopy (LIBS): fundamentals and applications*. New York: Cambridge University Press, 2006. ISBN 05-218-5274-9.
- [18] Kramida, A., Ralchenko, Y., Reader, J., 2015a. *NIST Atomic Spectra Database* (ver. 5.1). National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD.
- [19] 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>
- [20] CIUCCI, A., M. CORSI, V. PALLLESCHI, S. RASTELLI, A. SALVETTI a E. TOGNONI. *New Procedure for Quantitative Elemental Analysis by Laser-Induced Plasma Spectroscopy*. *Appl. Spectrosc. OSA*, 1999, 53(8), 960 - 964.
- [21] Horňáčková, 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>

- [22] 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>
- [23] 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>
- [24] Vítková, G., 2015. *Spektrometrie Laserem Buzeného Plazmatu (Libs) Vzdálených Objektů* 1–108.
- [25] K. Novotný, J. Kaiser, A. Hrdlička, R. Malina, T. Vémola, D. Prochazka, et al., *Spektroskopie laserem buzeného plazmatu (LIBS)*, (1962) 280–285.
- [26] P. F. Moulton, *Spectroscopic and laser characteristics of Ti:Al₂O₃*, J. Opt. Soc. Am. B 3, 125–133 (1986)
- [27] Echelle Spectrograph Overview | Flexible Spectroscopy Tool. Andor - Oxford Instruments [online]. [cit. 2019-09-10]. Dostupné z: <https://andor.oxinst.com/learning/view/article/echelle-spectrographs-a-flexible-tool-for-spectroscopy>
- [28] BOLSHAKOV, Alex. LIBS At Work On Mars. In: *Applied Spectra: Transforming the way the world does chemistry* [online]. 2017 [cit. 2018-06-29]. Dostupné z: <https://appliedspectra.com/mars-libs.html>
- [29] GREICIUS Tony. Coronation’s Chemicals. In: NASA [online]. 2012 [cit. 2018-06-29]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/mission_pages/msl/multimedia/pia16089.html
- [30] CREMERS, David A. Space Applications of LIBS. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. Berlin, Heidelberg: Springer Berlin Heidelberg, 2014, 2014-2-26, s. 257–291. Springer Series in Optical Sciences. DOI: 10.1007/978-3-642-45085-3_10. ISBN 978-3-642-45084-6. Dostupné také z: http://link.springer.com/10.1007/978-3-642-45085-3_10
- [31] ULIVI, Paolo a David M. HARLAND. *Lunar exploration: human pioneers and robotic surveyors*. New York: Springer-Verlag, 2004. ISBN 18-523-3746-X.
- [32] RAI, V.N. a S.N. THAKUR. Instrumentation for Laser-Induced Breakdown Spectroscopy. *Laser-Induced Breakdown Spectroscopy*. Amsterdam: Elsevier, 2007, 2007, s. 113–133. DOI: 10.1016/B978-044451734-0.50008-9. ISBN 9780444517340. Dostupné také z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/B9780444517340500089>
- [33] Lubin, Philip (April 2015). *Effective Planetary Defense using Directed Energy*. 4th IAA Planetary Defense Conference.

Příloha A

Seznam vzorků meteoritů

Full name	Abbreviation	Group	ArF	Nd:YAG	Ti:SA	PALS
Dhofar 1709	Dho 1709	ordinary chondrite	Y	Y	Y	Y
Dhofar 1764	Dho 1764	carbonaceous chondrite	Y	Y	Y	N
Jiddat al Harasis 804	JaH 804	euclite	Y	N	Y	N
Jiddat al Harasis 815	JaH 815	carbonaceous chondrite	Y	Y	Y	Y
Northwest Africa 3118	NWA 3118	carbonaceous chondrite	Y	Y	Y	Y
Northwest Africa 8212	NWA 8212	ordinary chondrite	Y	Y	Y	Y
Northwest Africa 8214	NWA 8214	carbonaceous chondrite	Y	Y	Y	Y
Ramlat as Salmah 445	RaS 445	ordinary chondrite	Y	Y	Y	Y
Sayh al Uhaymir 567	SaU 567	ordinary chondrite	Y	Y	Y	Y
Sayh al Uhaymir 571	SaU 571	ordinary chondrite	Y	Y	Y	Y
Dhofar 1763	Dho 1763	carbonaceous chondrite	N	Y	Y	Y
Dhofar 1994	Dho 1994	carbonaceous chondrite	N	Y	Y	Y
Jiddat al Harasis 267	JaH 267	mesosiderite	N	Y	Y	Y
Jiddat al Harasis 809	JaH 809	achondrites	Y	Y	Y	Y
Northwest Africa 869	NWA 869	ordinary chondrite	Y	Y	Y	N
Northwest Africa 4561	NWA 4561	Enstatite chondrite	N	Y	Y	Y
Northwest Africa 11273	NWA 11273	Lunar (feldspathic breccia)	N	Y	Y	Y

Tab. A.1: Přehled vzorků meteoritů společně s údaji o tom, jakými lasery byly dané vzorky ablovány (Y=Yes, N=No).