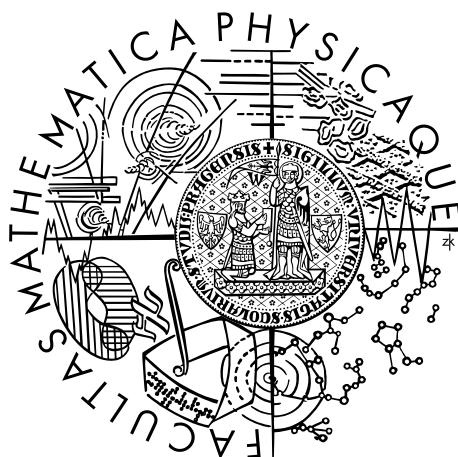


Univerzita Karlova
Matematicko-fyzikální fakulta

DISERTAČNÍ PRÁCE



Marek Vyšinka

Odprašování prachových zrn a jeho vazba na procesy v kosmickém prostoru

Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí disertační práce: prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.

Studijní program: Fyzika

Studijní obor: 4f2 – Fyzika plazmatu a ionizovaných prostředí

Praha 2017

Prohlašuji, že jsem tuto disertační práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím citovaných pramenů, literatury a dalších odborných zdrojů.

Beru na vědomí, že se na moji práci vztahují práva a povinnosti vyplývající ze zákona č. 121/2000 Sb., autorského zákona v platném znění, zejména skutečnost, že Univerzita Karlova má právo na uzavření licenční smlouvy o užití této práce jako školního díla podle §60 odst. 1 autorského zákona.

V Praze dne 7. 7. 2017

Za obětavé vedení, nesčetné rady a trpělivost takřka až božskou děkuji paní prof. RNDr. Janě Šafránkové, DrSc. a panu prof. RNDr. Zdeňku Němečkovi, DrSc. Kolegům z katedry, zejména doc. RNDr. Jiřímu Pavlů, Ph.D., RNDr. Ivaně Richterové, Ph.D., Mgr. Jakubu Vaverkovi, Ph.D. a Mgr. Liboru Nouzákovi, děkuji za spolupráci a čas jež mi věnovali během mnoha konzultací. Doc. Mgr. Ivě Matolínové, Dr. a Mgr. Jaroslavě Novákové, Ph.D. děkuji za měření s elektronovým mikroskopem. Rodičům pak děkuji za důvěru a mnohaletou podporu.

Název práce: Odprašování prachových zrn a jeho vazba na procesy v kosmickém prostoru

Autor: Marek Vyšinka

Katedra: Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Vedoucí disertační práce: prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc., Katedra fyziky povrchů a plazmatu

Abstrakt: Značná část hmoty v kosmickém prostoru se nachází ve formě prachových zrn, malých kousků hornin o rozměrech řádově stovek nanometrů až stovek mikrometrů. Prach je v tomto prostředí vystaven dopadu energetických částic (elektronů, iontů, UV záření), které jej nabíjejí, ale i rozrušují jeho strukturu. Předložená práce se zabývá interakcí iontů s prachovými zrny, která vede jednak k modifikaci jejich povrchu prostřednictvím implantace iontů, ale i k jejich destrukci prostřednictvím odprašování. V rámci práce představujeme dva modely interakce iontů s prachovými zrny – první pro určení implantačního profilu iontů a druhý pro určení tvaru odprašovaného zrna ležícího na povrchu většího tělesa. Výsledný tvar odprašovaného zrna následně porovnáваме s experimentem. Důležitým výsledkem této práce jsou změřené odprašovací výtěžky pro kulová zrna z SiO_2 při různých povrchových potenciálech zrna, které byly dosaženy současným bombardováním ionty a elektrony.

Klíčová slova: ionty, prachová zrna, odprašování, odprašovací výtěžek, implantační profil

Title: Sputtering of dust grains and its consequences for space processes

Author: Marek Vyšinka

Department: Department of Surface and Plasma Science

Supervisor: prof. RNDr. Jana Šafránková, DrSc., Department of Surface and Plasma Science

Abstract: A great part of matter in a space has a form of dust grains, tiny pieces of rocks with the dimensions of hundreds nanometers to hundreds micrometers. In this environment dust grains undergo collisions with energetic particles (electron, ions, UV photons) that leads to their charging and modification. The presented thesis studies ion–dust interactions and is focussed on dust grain modification through ion implantation and its destruction via sputtering process. Two computer models are presented – first for computing the ion implantation profile in the grain and second, for the shape of the sputtered grain lying on the surface of a bigger object. The resulting shape of the grain is compared with that obtained experimentally. Important results of the thesis are measured sputtering yields for spherical SiO_2 grains at several surface potentials obtained by simultaneous ion and electron bombardments.

Keywords: ions, dust grains, sputtering, sputtering yield, implantation profile

*Homo nascitur imperfectus, sed perfectibilis est cum virtutibus et scienciis. Ad scienciam vero aquirendam duo principaliter sunt necessaria, scilicet karitas seu dileccio et sedulitas sive continuacio*¹.

Magister Cristannus de Prachaticz
Algorismus prosaycus, prefacio, ante 1439

¹Člověk se rodí nedokonalý, ale může se stát dokonalejším prostřednictvím ctností a znalostí. K získání vědomostí jsou potřebné především dvě věci, totiž láska čili náklonnost a píle čili vytrvalost.

(Křišťan z Prachatic: Základy aritmetiky, předmluva, před 1439).

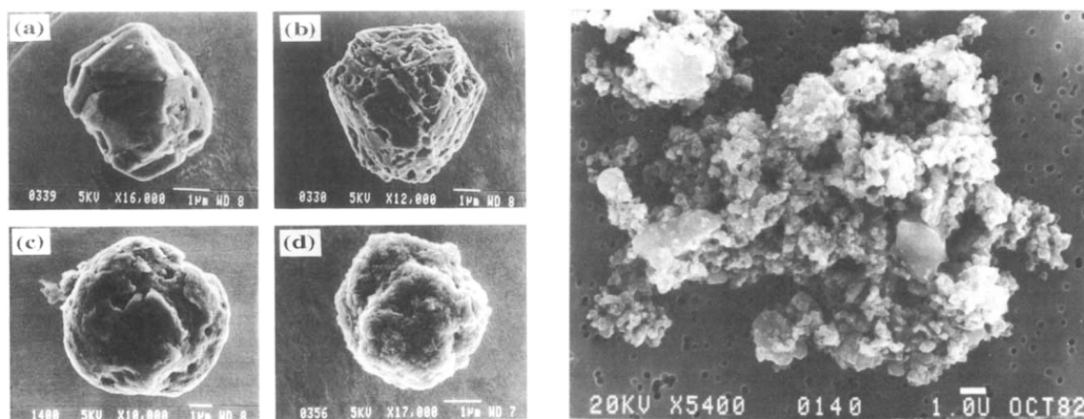
Obsah

Úvod	3
1 Interakce prachových zrn s ionty	7
1.1 Zánik prachových zrn	7
1.1.1 Experimentální práce	7
1.1.2 Teoretické práce	8
1.1.3 Počítačová simulace	9
1.2 Vesmírné zvětrávání	9
1.3 Odprašování	10
2 Experimentální uspořádání	17
2.1 Elektrodynamická kvadrupólová past	17
2.2 Elektronový mikroskop Tescan Lyra 3	18
3 Cíle práce	19
4 Model interakce iontů s kulovými zrny	21
4.1 Implantační profil	21
4.2 Tvar zrna	25
5 Odprašování zrn v pasti a na povrchu	31
5.1 Odprašování levitujícího zrna	31
5.1.1 Určení počtu dopadajících iontů	31
5.1.2 Odprašovací výtěžek	33
5.2 Odprašování zrna ležícího na povrchu	37
5.3 Odprašování zrn z dalších materiálů	40
Závěr	43
Seznam použité literatury	45
Přílohy	55

Úvod

Náš vesmír tvoří z 68 % temná energie, z 27 % temná hmota a jen méně než 5 % připadá na normální hmotu. Z těchto 5 % se nachází drtivá většina (99 %) ve formě plazmatu (hvězdy, hvězdné větry), téměř 1 % je ve formě prachu a zbytek, připadající na větší tělesa, se z tohoto úhlu pohledu zdá býti nevýznamným. Prach tedy zaujímá čtvrtou příčku nejrozšířenější hmoty ve vesmíru a zaslouží si tak patřičnou pozornost.

Pod pojmem prach či prachová zrna budeme dále rozumět částice hmoty s rozměrem v řádu desítek nanometrů až stovek mikrometrů tvořené libovolným materiálem. Nejčastěji se s ním setkáváme v kosmickém prostoru (prachové mlhoviny, prstence planet, povrchy asteroidů a podobných těles, ...), kde může nabývat nejrůznějších tvarů, jak je patrné na obr. 1. Dále prach nalezneme v průmyslu, ať již jako žádaná součást technologie (prášková metalurgie, náplně tiskáren, stavební hmoty – cement, nehašené vápno, ...) nebo jako nevíтанý polutant (prach v tokamacích, prachová zrna vniklá při výrobě čipů, popílek z elektráren ...). V běžném prostředí se vyskytuje jako vzdušný polutant ve formě poléťavého prachu, jehož koncentrace jsou měřeny a sledovány limity. Jeho nebezpečnost tkví v tom, že (zejména frakce PM10 – tedy částice do velikosti 10 μm) má schopnost pronikat hluboko do plic, kam může dopravovat jedovaté látky a choroboplodné zárodky, případně způsobovat záněty (silikóza plic z křemenného prachu).



Obrázek 1: Ukázky kosmického prachu: Vlevo – mezihvězdný prach extrahovaný z meteoritů (a, b – SiC; c, d – uhlík), převzato z [1]. Vpravo – pórezní chondritický slepenec zachycený ve stratosféře (převzato z [2]).

Prachová zrna se poměrně snadno nabíjí, ať již triboelektrickým jevem, tedy třením o jiné materiály, nebo při dopadu energetických částic – elektrony, ionty či fotony ultrafialového (UV) záření. Pohyb nabitých prachových zrn je potom určen zejména elektrickými silami. Pro ilustraci je možné porovnat velikost gravitační

a elektrické síly působící mezi dvěma prachovými zrny v kosmickém prostoru. Budeme-li uvažovat prachová zrna o hmotnosti 10^{-15} kg (což zhruba odpovídá skleněnému zrníčku o průměru cca $1 \mu\text{m}$) mající náboj odpovídající 100 elementárním nábojům, pak poměr elektrické a gravitační síly je cca 4×10^{15} (to znamená, že elektrická síla působící mezi těmito zrny je o 15 řádů silnější než gravitační). Pokud mají náboj stejné polarity, pak jsou poměrně silně odpuzovány a vytváří se elektrostatická bariéra bránící jejich shlukování. Mají-li opačné náboje, jsou naopak silně přitahována a toto přitahování pak stojí v počátcích formování větších kosmických těles od meteoroidů přes asteroidy a vedoucí až k tvorbě planet, kdy jsou již objekty dostatečně hmotné na to, aby převládlo přitahování gravitační silou [3]. Díky tomu, že se jedná o trojrozměrné objekty schopné polarizace (případně přesunu náboje), se mohou dvě prachová zrna vzájemně přitahovat, i když mají náboj stejné polarity.

Na druhou stranu jsou prachová zrna v kosmickém prostoru vystavena i působení vlivů, jež mají za následek jejich destrukci, ať již je to vysoká teplota v blízkosti hvězd nebo dopad energetických iontů z hvězdných větrů či v radičních páslech velkých planet. Ionty dopadající na povrch prachového zrna z něj nejen vyrážejí atomy a snižují tak jeho hmotnost, ale zároveň se samy zabudovávají pod jeho povrch a následně mohou být zrnem přemístěny jinam. Povrch prachových zrn je také důležitým místem pro vznik zejména složitějších molekul, jež jsou v kosmickém prostoru detekovány (atomy a jednodušší molekuly zachycené na povrchu prachového zrna mají dostatek času, aby se potkaly s dalšími molekulami a mohlo dojít k jejich chemické reakci, prachové zrno zároveň může pohltit přebytečnou energii a hybnost, bez čehož by vznik složitějších molekul nebyl možný).

Dalším typickým místem výskytu prachových zrn, kromě volného prostoru širého vesmíru, jsou povrchy takřka všech kosmických těles. V případě objektů bez atmosféry a vlastního magnetického pole je jejich povrch vystaven přímému působení slunečního větru, což vede jednak k nabíjení povrchových vrstev a také k procesu nazývanému kosmické zvětrávání (space weathering). Ten je způsoben odprašováním povrchu dopadajícími ionty a jejich implantací do podpovrchových vrstev (do hloubek řádově desítek až stovek nanometrů). Projevuje se změnou struktury povrchu a změnou jeho optických vlastností – materiál se stává červenější. Nabitá prachová zrna se nad stejně nabitým povrchem mohou vznášet, což bylo pozorováno na Měsíci při misích Apollo jako záře na horizontu (horizon glow) [4]. Přesný mechanismus vzniku tohoto jevu ale není dosud zcela uspokojivě vysvětlen.

Astronauté se na povrchu Měsíce setkali i s dalším efektem týkajícím se měsíčního prachu. Ten vzniká rozbíjením měsíčního povrchu dopadajícími meteory a mikrometeory a v prostředí bez atmosféry zůstávají jeho hrany ostré a přerušené chemické vazby nesaturované (nedochází k erozi tak, jak ji známe ze Země). To vede k velké reaktivitě tohoto prachu a jeho silné dráždivosti, zejména při vdechnutí. Díky svému náboji má tendenci ulpívat na všech předmětech, tedy i na skafandrech astronautů, kteří si jej tak nechtěně přinášejí i do vnitřního prostoru přistávacího modulu. Tohoto prachu je obtížné se zbavit, neboť v měsíčním vakuu není možné použít vysavač ani prach odfouknout. Inspiraci k možnému řešení lze nalézt v oblasti s kosmonautikou zcela nesouvisející a tou je termojaderná fúze. V případě tokamaků se také řeší problém odstraňování prachu z jeho

vnitřních povrchů, které se nacházejí v prostředí velmi nízkého tlaku. Jako řešení se navrhuje zařízení, které by se dalo nazvat „elektrostatický vysavač“ (využívá nabití prachových zrn a jejich elektrické přitažení na sběrnou elektrodu) [5, 6]. Podobného principu se již delší dobu používá v elektrostatických odlučovačích popílků v tepelných elektrárnách.

Je tedy zřejmé, že výzkum prachových zrn je oblast zajímavá a značně široká. Z celé šíře prachové tematiky (výskyt prachu, jeho nabíjení, vlastnosti, dynamika pohybu, zánik, koalescence ve větší celky, . . .) se v předkládané práci zaměříme na jednu velmi úzkou část, na interakce prachových zrn s dopadajícími ionty, tedy jejich implantaci pod povrch a zejména odprašování, které způsobují. V první části práce bude uvedena problematika výzkumu týkajícího se prachových zrn s přehledem výsledků současných prací se zřetelem na odprašování (kapitola 1), jemuž bude věnován závěr této kapitoly. V další části budou popsány aparatury, na kterých byly získány výsledky předkládané práce (kapitola 2) a po uvedení cílů práce (kapitola 3) budou následovat dvě kapitoly výsledků zabývajících se simulací interakce iontů s prachovými zrny (kapitola 4) a měřením odprašování (kapitola 5). Závěrečná část představí krátké shrnutí výsledků a v příloze publikované články, které obsahují nejdůležitější fakta. Nastíní také další směry výzkumu, které vyplynuly z řešení úkolů.

Kapitola 1

Interakce prachových zrn s ionty

Studium interakce prachových zrn s ionty v kosmickém prostoru je motivováno v zásadě 2 otázkami:

1. Jakým způsobem a za jakých podmínek prachová zrna zanikají a jak ovlivňují tyto procesy okolní mezihvězdný prostor?
2. Jak se vlivem dopadajících iontů mění chemické složení a struktura prachových zrn a jakým způsobem se tyto změny projeví při astronomických pozorováních?

Pro první otázku je důležitým pojmem odprašovací výtěžek, doba přežití prachového zrna a obohacení okolního prostoru o materiál zrna. Vznik a zánik prachových zrn zajímal astronomy již v polovině minulého století [7]. Druhá otázka souvisí s pojmem vesmírného zvětrávání (space weathering), kdy dopadající ionty slunečního větru mění složení podpovrchové vrstvy prachových zrn, čímž mění optické vlastnosti pozorovaného prachu a také se tímto způsobem přenáší implantované prvky do míst, kde by se jinak vyskytnout nemohly (tzv. pick-up ions [8] ??). Typicky dochází v podpovrchové vrstvě ke vzniku nanočástic železa (díky preferenčnímu odprašování kyslíku), které způsobují načervenalé zbarvení takto zvětralého materiálu [9, 10, 11].

1.1 Zánik prachových zrn

První výzkumy odprašování sférických vzorků se datují do 50. let, kdy se lidé začínají více zabývat úhlovými závislostmi odprašovacích výtěžků, zejména v souvislosti s odprašováním mřížek tvořených dráty. Asi jako první použil kulatá zrna (o průměru cca 500 mikronů) Wehner [12], který na nich sledoval rychlost odprašování v různých místech zrna.

Experimentálních prací týkajících se odprašování zrn není mnoho a nejčastěji se objevují práce čistě teoretické, případně práce zabývající se počítačovou simulací odprašování. Jejich zařazení není vždy jednoznačné, ale níže uvádím přehled současného stavu výzkumu podle převažujícího charakteru publikované práce.

1.1.1 Experimentální práce

Experimentální práce zkoumající interakce iontů s prachovými zrny naráží na 2 překážky. Tou první je zdroj materiálu. Vzorky skutečného vesmírného prachu

přivezly ve větším množství americká mise Apollo a sovětská Luna [13]. Vzorky z misí Apollo jsou dostupné ve sbírkách NASA [14], ale pro jejich získání je nutné splnit poměrně náročná kritéria. Jako příklad experimentální práce s těmito vzorky, týkající se sekundární elektronové emise, by bylo možné uvést nepříliš zdařilou práci Abbase a kol. [15]. Dalším zdrojem vesmírného prachu byla nedávná mise StarDust, která přivezla relativně malý počet prachových zrn pocházejících z komety Wild2 i mezihvězdného prostoru zachycených v aerogelu [16]. Kosmický prach je také možné získat jeho sběrem ve stratosféře [17], kde ale může být smíšen s prachem pozemského původu a modifikován průletem řídkou atmosférou. Železné mikrometeority je možné extrahovat i z dešťové vody, která je vymyla z atmosféry [18]. Posledním zdrojem kosmického materiálu jsou dopadlé meteority, kdy se jedná o tělesa relativně velkých rozměrů a výrazně poznamenaná průchodem atmosférou. Odprašovací výtěžek meteoritů zkoumal např. Heymann a Fluit [19] a pro kolmý dopad 20 keV argonových iontů jim vyšel odprašovací výtěžek cca 50 amu/ion pro kamenné meteority a 75 amu/ion pro meteorit železný. Většinou se ale právě z důvodu špatné dostupnosti reálného materiálu využívají simulanty kosmického prachu (měsíční: MLS – Minnesota Lunar Simulant, JSC – Johnson Space Center; marsovský JSC Mars-1 a další) [20, 21], což jsou pozemské horniny mineralogicky, chemicky a fyzikálně podobné reálným vzorkům a mechanicky rozmělněné na vhodnou velikost zrn. Je také možné využít některých pozemských minerálů, jejichž přítomnost v kosmickém prostoru je známá, například olivín [22, 23]. Zajímavou práci také přináší Baragiola a kol. [24], který se zabýval odprašováním vrstvy vodního ledu při nízkých teplotách (20–120 K).

Druhý problém experimentálního výzkumu interakce iontů s prachovými zrny spočívá v samotné podstatě prachových zrn jakožto velmi malých a lehkých objektů. Manipulace s jedním prachovým zrnem je obtížná (využívá se buď elektrodynamická past jako v případě naší skupiny [25] či skupiny M. Abbase [15], nebo levitace v plazmatu), a proto se často provádí experimenty s vrstvami prachových zrn [26]. Meyer a kol. [27] odprašovali terč tvořený vrstvou prachu z měsíčního simulantu pomocí iontů podobného složení jako ve slunečním větru (protony a vícenásobně nabitý argon). Odprašovací výtěžek změřený v takovéto konfiguraci sice odpovídá výtěžku z reálného povrchu, ale jelikož může docházet k zachycení a odrazům odprašených atomů (jak ukázal Hapke a Cassidy [28] experimentálně, kdy při odprašování 7 mm koule naměřili odprašovací výtěžek 10× větší než pro vrstvu prachu ze stejného materiálu, a později Cassidy a Johnson [29] počítačovou simulací), bude záležet na konkrétním tvaru povrchu na mikroskopické úrovni a usuzovat na odprašovací výtěžek jednoho zrna lze jen obtížně. Za zmínku ještě stojí práce mých předchůdců, zejména Velyhan a kol. [30, 31], kteří zjistili, že iontové bombardování prachového zrna ovlivňuje jeho autoemisní chování, což se děje zřejmě uvolňováním implantovaných iontů, jak dále studoval Beránek a kol. [8].

1.1.2 Teoretické práce

Mezi základní práce studující odprašování prachových zrna patří práce Draine a Salpetera [32, 33], kteří se zabývali dobou přežití mezihvězdného prachu.

Jedním z prostředí, kde dochází ke vzniku prachových zrn, jsou atmosféry hvězd, které patří mezi rudé obry. Dochází v nich již k syntéze těžších prvků a zároveň jejich povrchová teplota je dostatečně nízká, aby mohlo docházet ke

kondenzaci malých prachových zrn. Studium možného zániku těchto zrn se zabýval ve své práci Woitke a kol. [34], který uvažuje 3 mechanismy zániku prachu v přechodové oblasti mezi hvězdným větrem a mezihvězdným prostředím – vypařování, odprašování a vzájemné srážky prachových zrn. Dochází k závěru, že v uvažované oblasti nehrají tyto procesy velkou roli a prach se dostává do mezihvězdného prostředí bez podstatných ztrát. Nicméně upozorňuje na nedostatek experimentálních dat.

Bianchi a Ferrara [35] studovali vliv prachu na metalicitu (obsah prvků těžších než helium) mezigalaktického prostředí. Pro odprašovací výtěžky pro grafit a olivín používají vypočtené hodnoty pomocí programu TRIM. Dle jejich výpočtů pochází z odprašování 18 % křemíku a 6 % uhlíku v tomto prostředí.

Častěji studované je odprašování prachu vyskytujícího se ve sluneční soustavě způsobené slunečním větrem. Jedny z prvních výpočtů přináší Wehner a kol. [36], který využívá data o slunečním větru ze sondy Mariner II a odprašovací výtěžky různých hornin normované vůči odprašovacímu výtěžku železa.

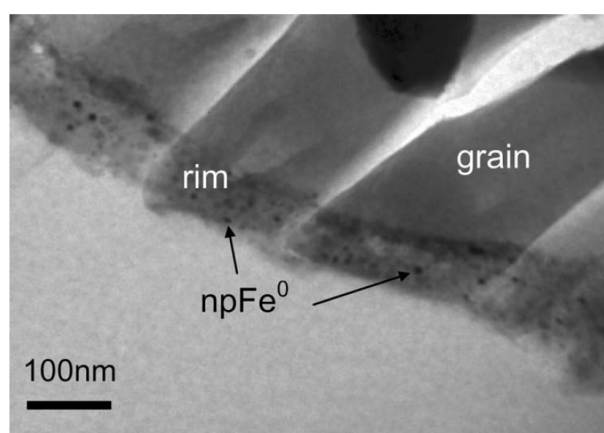
1.1.3 Počítačová simulace

Prachová zrna nabývají velmi nepravidelných tvarů, které se často nahrazují kulovými (jako v naší práci). Pro všechna prachová zrna je ale důležitá úhlová závislost odprašovacího výtěžku, která není známa s dostatečnou přesností, a proto se využívá počítačových simulací, které dokáží zmíněný nedostatek nahradit. První Monte Carlo simulaci odprašování kulových zrn (uhlík a led) uvádí Onaka a Kamijo [37]. Zajímavou práci představuje Jurac a kol. [38], kteří využívají běžně dostupný počítačový kód TRIM (použitý i v této práci – viz. kapitola 4). Dle svých slov jej „přepsali, aby byl schopen pracovat s materiálem libovolného rozměru a tvaru“ a následně jej použili pro kulová zrna. Bohužel detailnější informace o této úpravě ve zmíněném článku chybí a hlavního autora se nepodařilo kontaktovat. Dochází k závěru, že pro malá zrna (o poloměru menším než trojnásobek střední hloubky průniku iontů) nastává zvýšení odprašovacího výtěžku, což způsobuje rychlejší zánik malých zrn v rázových vlnách. Tentýž počítačový kód použili i Gray a Edmunds [39] ke studiu prachových zrn, jejich modifikaci a zániku v rázových vlnách supernov. S tvarem zrna si poradili integrací odprašovacího výtěžku přes všechny úhly dopadu ($Y(E) = \int Y(E, \Theta) \sin \Theta d\Theta$). Podobný problém řešili i Verchovsky a kol. [40, 41] při studiu implantovaných iontů do prachových zrn z období před vznikem sluneční soustavy. Na základě tohoto modelu a změřeného poměru izotopů v prachovém zrně extrahovaném z meteoritu soudí na podmínky, kterými si toto zrně prošlo na své cestě od mateřské hvězdy do naší sluneční soustavy [42]. Zánik nanozrn odprašováním studovali pomocí molekulární dynamiky Bringa a Johnson [43].

1.2 Vesmírné zvětrávání

Zvětrávání, tedy proces, při kterém působením větru a vody dochází k omílání a rozrušování hornin, není ve větší části vesmíru možný. Ale podobně jako hovoříme o kosmickém počasí v souvislosti se slunečním větrem, tak analogicky prostřednictvím slunečního větru dochází ke zvětrávání hornin ve sluneční soustavě. Vesmírné zvětrávání je tak významným procesem měnícím povrchové vlastnosti

kosmických těles [44]. Vzhledem k tomu, že sluneční vítr je proud nabitých částic ze Slunce (tvoří jej především elektrony, protony, jádra helia a malé množství jader těžších prvků), dochází k tomuto zvětrávání prostřednictvím odprašování [45] a implantace iontů [46]. Během tohoto procesu dochází ke změně v podpovrchové vrstvě materiálu zrna a vytváří se amorfni lem (obr. 1.1). Proces jeho vzniku byl pozorován i při laboratorních experimentech [47]. Takto změněná vrstva se potom projevuje jednak změnou absorpčního spektra (a tím i změnou barvy daného zrna) [48, 49, 50], ale i změnou jeho izotopického složení [51, 52]. Změna spektra odraženého světla byla zaznamenána i při iontovém bombardování vzorku skutečného meteoritu [53]. Nejde tedy jen o jev typický jen pro simulanty kosmického prachu, ale i pro reálný materiál. Bradley a kol. přicházejí dokonce s myšlenkou, že implantace vodíkových iontů ze slunečního větru do silikátových zrn může vést ke vzniku vody [54, 55].



Obrázek 1.1: Amorfni lem obsahující nanočástice železa jako důsledek vesmírného zvětrávání zrna měsíční horniny, obrázek z transmisního elektronového mikroskopu. Převzato z [10].

Atomy, které jsou po vystavení účinkům slunečního větru odprašeny z povrchu kosmických těles bez atmosféry utvoří jejich řídkou exosféru (společně s atomy uvolněnými zahřátím hornin a fotodesorpcí) [56, 57]. Simulace tak napomáhají pochopit složení exosféry Měsíce [58, 59] a Merkuru [60] pozorovaných při misích kosmických sond.

1.3 Odprašování

Oprašování nazýváme proces, kdy při dopadu energetických částic (nejčastěji iontů nebo neutrálních atomů) dochází k vyrazení atomů či iontů z povrchu pevné látky. Dochází při tom ke změnám povrchu, jak co se týče tvaru (morfologie), tak i co do chemického složení (stechiometrie povrchu). Atomů terče ubývá, a v případě prostorově malých objektů, jako jsou prachová zrna, může dojít k jejich destrukci. Dopadající atomy se zabudovávají pod povrch a mění tak složení i strukturu odprašované látky. Při studiu odprašování je nejdůležitější veličina odprašovací výtěžek, který je definován jako počet vyražených atomů připadajících

na jeden dopadlý iont podle rovnice 1.1:

$$Y = \frac{N_S}{N_d}, \quad (1.1)$$

kde Y je odprašovací výtěžek, N_S – počet vyražených atomů a N_d – počet dopadlých iontů. V případě odprašování víceatomárních terčů (SiO_2 a jiné oxidy, slitiny, či další chemické sloučeniny) se často zavádí parciální odprašovací výtěžek pro každý druh odprašovaných atomů Y_i , přičemž se používá i celkový odprašovací výtěžek $Y_{tot} = \Sigma Y_i$. Odprašování je často nestechiometrické a takto zavedený celkový odprašovací výtěžek nám neřekne nic o tom, co konkrétně bylo odprašeno. Experimentální zjištění parciálních odprašovacích výtěžků není vždy možné (protože se například měří odprašovací výtěžek pomocí změny hmotnosti, jako v případě této práce). Budu tak dále používat i odprašovací výtěžek definovaný jako odprašená hmotnost (v atomových hmotnostních jednotkách) připadající na jeden dopadlý iont (rovnice 1.2):

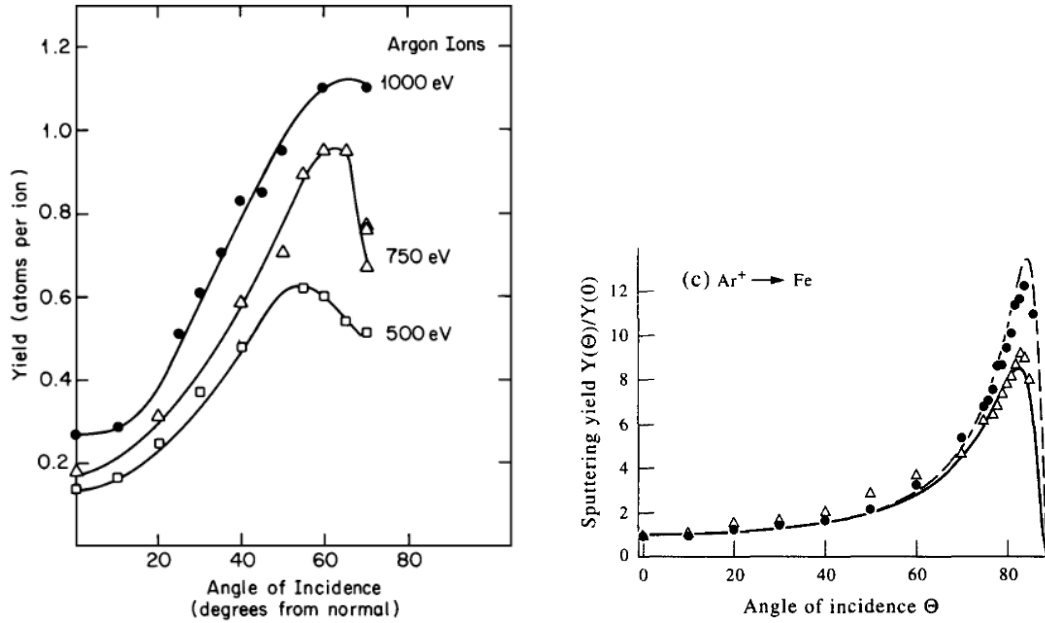
$$Y_m = \frac{m_S}{N_d}, \quad (1.2)$$

kde m_S je odprašená hmotnost. Od klasického odprašovacího výtěžku se pozná podle jednotky (amu/ion). Jeho výhodou je, že přímo určuje hmotnost odprašené látky.

Odprašovací výtěžek závisí zejména na druhu dopadajících iontů, atomů terče, energii dopadajících iontů a úhlu dopadu.

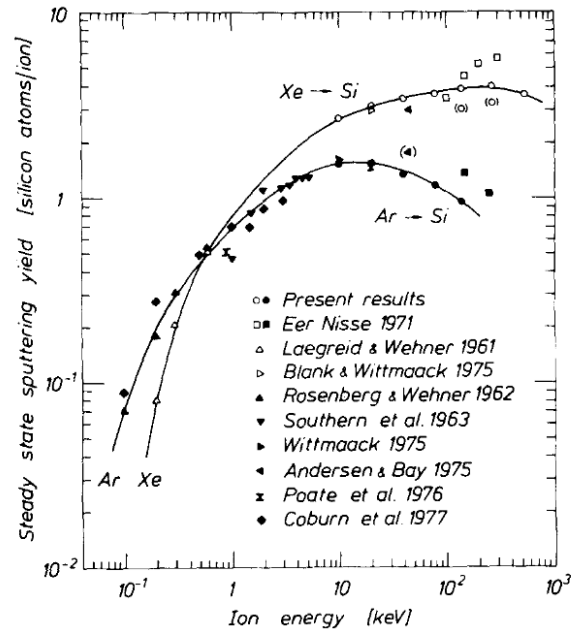
Proces odprašování úzce souvisí s pohybem energetických iontů v látce. Dopadlý iont předává svoji energii atomům a molekulám terče, sám se brzdí a uvádí do pohybu tyto atomy, čímž mohou vznikat celé kaskády pohybujících se částic. Původní iont ztrácí energii jednak srážkami s jádry atomů terče a pak také elektronovým brzděním způsobeným elektronovými obaly terčových atomů. Totéž platí i pro atomy, které uvedl do pohybu. Aby došlo k odprašení atomu z terče, musí být splněny 2 podmínky: 1) atom se v terči musí pohybovat směrem k povrchu a 2) až k němu dorazí, musí mít ještě dostatek energie na překonání povrchové bariéry, aby mohl terč opustit (velikost této bariéry se někdy odhaduje z velikosti výparného tepla dané látky). První podmínkou je možné vysvětlit typický tvar úhlové závislosti odprašovacího výtěžku. Pro kolmý dopad je nejmenší, protože kaskáda pohybujících se atomů míří ve směru primárního iontu do terče (a mírně se při tom rozšiřuje), přičemž zpětný odraz není příliš častý. S rostoucím úhlem dopadu se tato kaskáda nalézá blíže k povrchu a roste pravděpodobnost, že větší počet atomů k němu zamíří. Proto maximum odprašovacího výtěžku nastává pro úhly $60^\circ - 80^\circ$. Pro větší úhly roste pravděpodobnost odrazu dopadajícího iontu, který nevytvoří kaskádu a odprašovací výtěžek prudce klesá (obr. 1.2).

Z popsaného mechanismu je také zřejmé, že musí existovat nějaká prahová (minimální) energie primárního iontu, pod kterou k odprašování nedochází. Je dána tím, že dopadlý iont musí uvolnit atom terče z jeho vazeb, rozpohybovat jej a ještě mu dodat dostatek energie k překonání povrchové bariéry. Tato prahová energie se nachází mezi 70–100 eV. Se zvyšováním energie roste odprašovací výtěžek, ale zároveň i hloubka průniku iontů. Kaskáda sekundárních pohybujících se částic se generuje hlouběji pod povrchem a klesá šance na průnik atomů k povrchu, čímž se odprašovací výtěžek snižuje. Maximální odprašovací výtěžek



Obrázek 1.2: Závislost odprašovacího výtěžku na úhlu dopadu argonových iontů pro diamant (vlevo – převzato z [61]) a železo (vpravo – převzato z [62]). Trojúhelníčky jsou pro energii 200 keV a body pro 800 keV.

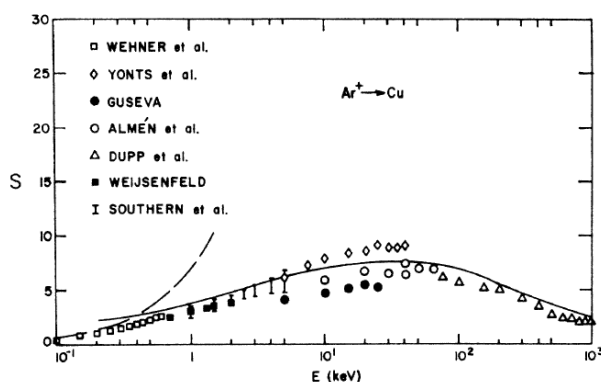
nastává pro určitou optimální energii, při které se tyto protichůdné efekty vyrovnají (obr. 1.3).



Obrázek 1.3: Závislost odprašovacího výtěžku křemíku na energii dopadajících iontů (Ar a Xe). Pevzato z [63].

Ke studiu odprašování je možné přistoupit třemi způsoby: teoreticky, experimentálně a počítačovou simulací. Každý z těchto přístupů má své výhody a nevýhody.

Základní práci v teoretickém přístupu je „Theory of Sputtering“ [64]. Pro odprašovací výtěžek sestavuje integro-diferenciální rovnici odvozenou z Boltzmannovy transportní rovnice. Jako vstupní parametry používá účinné průřezy pro srážky iontů s terčem i atomů terče mezi sebou. Rozlišuje srážky o vysoké energii (Thomas-Fermi cross section) a nízkoenergetické (Born-Mayer cross section) a uvažuje i brždění o elektrony. Nevýhodou tohoto přístupu je nedokonalá znalost účinných průřezů (které přitom navíc jsou použitelné jen v určitém rozmezí energií) a složitost rovnic. Nicméně dává výsledky, které jsou v dobré shodě s experimentem (obr. 1.4) a umožňuje určit odprašovací výtěžek i pro energie a úhly dopadu obtížněji dosažitelné experimentálně.



Obrázek 1.4: Závislost odprašovacího výtěžku mědi na energii dopadajících Ar iontů – porovnání experimentálních dat a Sigmundovy teorie. Převzato z [64].

Experimentální přístup k zjištění odprašovacího výtěžku nemusí spoléhat na aproximace nutné při teoretických výpočtech (známé účinné průřezy, čistá a homogenní látka, ...), ale přináší s sebou jiné obtíže. Pro stanovení odprašovacího výtěžku je nutné znát počet dopadlých iontů a počet vyražených atomů terče. Množství dopadlých iontů je možné zjistit prostřednictvím elektrického proudu tekoucího na vzorek, a to měřením anodového proudu iontového děla (předpokládáme, že všechny ionty dopadnou na vzorek), případně měřením proudu Faradayovým válcem (s předpokladem, že iontový proud je stabilní). Měření proudu tekoucího vzorkem není příliš spolehlivé, neboť odprašené atomy mohou být také částečně ionizovány a dochází též k ionty indukované sekundární emisi elektronů. Větší problém nastává s určením množství odprašených atomů. To je možné zjistit v zásadě třemi způsoby:

1. hmotnostní spektrometrií – je nutné vědět, jakou část odprašených atomů jsme schopni detekovat,
2. metodou „quartz crystal microbalance“ (měření změny rezonanční frekvence křemenného krystalu způsobené změnami hmotnosti) – nevýhodou je, že měřená změna hmotnosti je ovlivněna implantovanými ionty,
3. měřením odprašeného objemu a následným výpočtem odprašeného množství látky.

Prostým vydělením takto získaných počtů dopadlých iontů a odprašených atomů získáme odprašovací výtěžek. Tento způsob je náročný na přesnost měření

i čistotu použitých látek (zdroje iontů a zejména studovaných terčů). Měření jsou také zdlouhavá, neboť je potřeba proměřit odprašovací výtěžek pro různé kombinace iont-terč, více energií a různé úhly. Měření úhlové závislosti odprašovacího výtěžku jsou poměrně řídká a obvykle jen pro několik málo úhlů (typicky pro kolmý dopad, tj. 0° a úhly kolem 70° , kde se očekává maximum odprašovacího výtěžku) [65].

Experimentální práce také ukazují na několik zajímavých efektů, které je třeba brát do úvahy, zejména v kosmickém prostředí. Odprašování skla (SiO_2) pomocí iontů dává o 20–30 % vyšší odprašovací výtěžek než odprašování pomocí neutrálních atomů o stejné energii [66, 67]. To může souviset s potenciálovým odprašováním [68], kdy vícenásobně nabitý iont nepředává terči jen svoji kinetickou energii, ale i energii potenciální (díky svému velkému náboji vytrhne z povrchu elektrony), čímž více naruší vazby a zvýší odprašovací výtěžek v závislosti na náboji i o řád. Tento druh odprašování se uplatňuje jen u nevodivých povrchů (jako např. SiO_2 , Al_2O_3 , NaCl , LiF a další), tedy přesněji u povrchů se silnou elektron- fononovou vazbou, kde elektronické excitace mohou být lokalizovány pomocí zachycených excitonů [69]. V případě vodivých povrchů nebyl tento jev pozorován. Ve slunečním větru jsou těžší ionty téměř zcela ionizované a značná část kosmického prachu je nevodivá. Ačkoliv je tedy těchto těžších iontů ve slunečním větru okolo 1 %, jsou díky své vyšší kinetické energii a potenciálovému odprašování zodpovědné za většinu odprašovacího výtěžku způsobeného slunečním větrem na kosmických objektech [70].

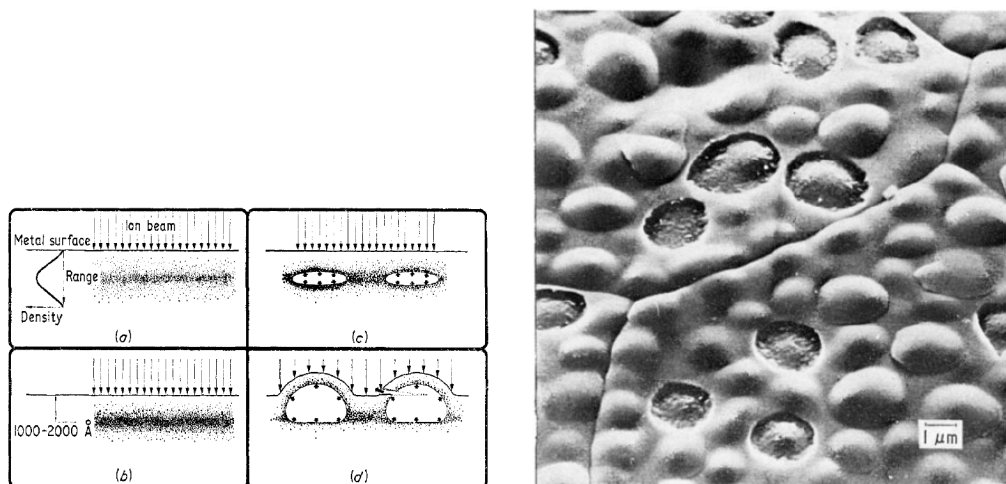
Proti vlivu potenciálového odprašování může jít efekt preferenčního odprašování, kdy se z oxidů snáze odprašuje kyslík, vznikají vrstvy s jeho nedostatkem [71, 72] a povrch se tak stává vodivější. Při iontovém bombardování povrchu může také docházet ke vzniku různých nerovností a struktur [73], které následně mohou ovlivnit odprašovací výtěžek. Při bombardování kovů lehkými ionty bylo pozorováno vytváření bublinek a puchýřků [74]. Tento jev je způsoben implantovanými ionty, jež skončí přibližně ve stejné hloubce a při dostatečné iontové dávce vytvoří bublinku. Ta se s rostoucí dávkou iontů může díky růstu vnitřního tlaku zvětšovat, až se na povrchu projeví vznikem puchýřku náchylného k odloupení (obr. 1.5).

Počítačové simulace odprašování vychází z teoretického přístupu (účinné průřezy srážek) a typicky využívají metodu Monte Carlo, případně metodu molekulární dynamiky. Simulační programy je možné rozdělit do dvou skupin:

1. Krystalické terče: ACOCT [75], Marlowe [76], Kalypso [77]
2. Amorfni terče: ACAT [78], SDTrimSP [79, 80], SRIM¹ [81, 82], TRIDYN [83], F-TRIDYN [84]

Podrobnější přehled o principech počítačové simulace odprašování a starších programech nabízí ve své knize „Computer Simulation of Ion-Solid Interaction“ Eckstein [85], nověji potom od stejného autora kapitola „Computer Simulation of the Sputtering Process“ [86] v přehledové knize „Sputtering by Particle Bombardment. Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies.“

¹SRIM – The Stopping and Range of Ions in Matter je balík počítačových programů, jehož hlavní částí je simulační program TRIM – TRansport of Ions in Matter, <http://www.srim.org/>



Obrázek 1.5: Vznik puchýřků na povrchu kovu bombardovaného ionty He. Vlevo – mechanismus vzniku, vpravo – fotografie povrchu molybdenu ostřelovaného 50 keV ionty He. Převzato z [74].

Pro krystalické terče je důležitá orientace krystalové roviny, která je odprašována, protože při určité orientaci jsou atomy terče v zákrytu a dopadající ionty se mohou dostat poměrně hluboko prostřednictvím jevu zvaného kanálování [87, 88]. Počítačové programy simulující interakci iontů s krystalickými látkami mohou do jisté míry využívat symetrie dané krystalickou mřížkou, ale je otázka, nakolik tato symetrie zůstane zachována během dopadu iontů a jejich pohybu látkou a jak se s těmito změnami simulační program vypořádává.

Část kosmického prachu je v amorfní formě od svého počátku a u krystalických zrn vzniká dopadem iontů amorfizovaná vrstva. Proto jsme se v naší práci zaměřili na programy počítající s amorfními terči. Nejrozšířenější a nejčastěji používaný (i v naší práci) je SRIM. Vede k tomu jeho snadná dostupnost a ovládání, relativní výpočetní nenáročnost a dobrá shoda s experimentálními daty. Vychází z něj i další simulační programy, které zahrnují (na úkor zvýšení výpočetní náročnosti) některé zanedbané efekty, jako například TRIDYN (TRIm DYNamický), který zahrnuje dynamické změny terče během dopadu iontů [89], F-TRIDYN zahrnující hrubost povrchu prostřednictvím fraktální geometrie [84] či SDTrimSP (TRIM.SP je verze TRIMu určená pro odprašování – SPuttering [90], S a D znamená statický a dynamický), který v nejnovější verzi (5.0) má i rozšíření pro výpočet difúze a odplyňování implantovaných vzácných plynů [80].

I přes svoji popularitu a rozšířenost platí SRIM za svoji uživatelskou jednoduchost a rychlost výpočtů přesností, která se projevuje zejména při studiu odprašování, jak upozorňují Wittmaack [91] a Hofsäss a kol. [92]. Vyšší odprašovací výtěžek SRIMu v porovnání s experimentem a problémy v okolí prahové energie hlásí i Sugiyama a kol. [93]. Ačkoliv se SRIM stále vyvíjí (aktuální verze je SRIM-2013), dochází Hofsäss k závěru, že i přes vylepšení v novějších verzích je SRIM optimalizován zejména pro výpočet hloubky penetrace, energetických ztrát a poškození terče (tedy toho, co se děje pod povrchem terče) a odprašování je v něm zahrnuto jen na základní úrovni. Přesnější odprašovací výsledky poskytuje SDTrimSP, který ale postrádá mnohé výhody SRIMu, což brání jeho většímu rozšíření.

Kapitola 2

Experimentální uspořádání

Z předchozí kapitoly je zřejmé, že ke studiu interakce prachových zrn s ionty je možné použít celou řadu technik a experimentálních aparatur. V této kapitole blíže zmíníme dvě, které byly použity v naší další práci. První byla elektrodynamická kvadrupólová past, schopná zachytit a levitovat jedno prachové zrno, a druhou byl elektronový mikroskop TESCAN Lyra 3 vybavený systémem focused ion beam (FIB) pro odprašování, který zobrazuje a opracovává prachová zrna ležící na podložce.

2.1 Elektrodynamická kvadrupólová past

Aparatura vychází z návrhu I. Čermáka [94], kde je též podrobně popsána. Jejím srdcem je elektrodynamický kvadrupól (Paulova past [95]) původně vyvinutý pro zachycování iontů, ale při vhodném nastavení je možné jej použít i pro udržení těžších objektů, jsou-li dostatečně nabitě (prachové zrno je z tohoto pohledu jen velmi těžký iont). Na jednotlivé elektrody je přiváděno vhodné střídavé napětí s frekvencí a velikostí danými nábojem zachyceného zrna. Zrno v této pasti kmitá podle rovnice 2.1:

$$\frac{Q}{m} = \pi^2 r_0^2 \cdot \frac{f_{AC} \cdot f}{V_{eff}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + \left(1.8 \frac{f}{f_{AC}}\right)^2}}, \quad (2.1)$$

kde r_0 je vnitřní poloměr prstencové elektrody kvadrupólu ($r_0 = 10$ mm), V_{eff} je efektivní hodnota střídavého napětí na kvadrupólu ($V_{eff} = V_{AC}/\sqrt{2}$), f_{AC} je frekvence napětí na kvadrupólu a f je změřená frekvence kmitů zrna.

Frekvence jeho kmitů je tedy určena jednak nastavením pasti, ale zejména jeho měrným nábojem (Q/m). Poloha zrna je detekována pomocí PIN diody a ze změny této polohy je následně určena frekvence kmitů, a tím i měrný náboj zrna. Pro osvětlení kmitajícího zrna se používá červený diodový laser (červený kvůli omezení případné fotoemise). Z detekované frekvence se odvozuje signál přiváděný na tlumící elektrody tak, aby zrno kmitalo jen v jednom směru (ostatní jsou utlumené) a v zadané amplitudě rozkmitu. V případě nutnosti je možné kmitu zrna utlumit i připuštěním plynu (nejčastěji He) do aparatury. Zachycené zrno je potom možné nabíjet svazkem elektronů z elektronového děla (Kimball Physics EMG-14) o energiích 40 eV—12 keV či iontů z iontového děla (Colutron) v rozsahu 500 eV – 10 keV, přičemž tyto svazky částic jsou samplovány a dopadají na zrno

jen v době, kdy je na kvadrupólu nulové napětí, aby se zabránilo jejich vychylování elektrickým polem kvadrupólu. Z časové změny měrného náboje (frekvence kmitů) pak můžeme usuzovat na probíhající děje. Celý systém je umístěn v ultravysokém vakuu (cca 10^{-8} Pa), aby se omezil vliv okolní atmosféry na studované procesy. Podrobněji je aparatura popsána v dřívějších pracích [25], [96] včetně jejich pozdějších úprav a vyvinutých procedur k určení dalších charakteristik zrna.

Aby bylo možné o prachovém zrně říci více než velikost jeho měrného náboje, byly vyvinuty techniky měření některých dalších veličin [25], z nichž je v předkládané práci nejdůležitější určení hmotnosti zrna [97]. Toto měření je principiálně jednoduché. Zrno je vybito na co nejnižší náboj (řádově 100 elementárních nábojů) a měří se změny frekvence (měrného náboje) způsobené dopadem jednoho elektronu. Ten je možné získat z elektronového děla, pokud nastavíme energii cca 50 eV (výrobce garantuje stabilní emisní proud až od 500 eV) a chvíli počkáme, dokud nějaký elektron nevyletí. Dělo je poté nutné okamžitě vypnout, aby elektronů nedopadlo více. K tomu i přes veškerou snahu někdy dochází, a proto je nutné toto měření opakovat vícekrát, aby se určilo, kolika elektronům daná změna frekvence odpovídá. Zanedbáme-li změnu hmotnosti zrna způsobenou příchozím či odchozím elektronem (což si můžeme dovolit, neboť je mezi nimi 15 řádů rozdíl), pak zjistíme hmotnost zrna z rovnice 2.2.

$$m = \frac{e}{\Delta \frac{Q}{m}}, \quad (2.2)$$

kde e je velikost elementárního náboje a $\Delta \frac{Q}{m}$ je změna měrného náboje způsobená jedním elektronem.

S touto metodou, v závislosti na šumu v datech (způsobeném většinou šumem v detekční elektronice), je možné měřit s přesností až 10^{-17} kg. Nevýhoda této metody spočívá v nutnosti vybíjet a nabíjet zrno ve velkém rozsahu měrného náboje a při troše nepozornosti se zrno snadno dostane mimo oblast stability, kdy je v kvadrupólu zachycené a může dojít k jeho ztrátě, což je obzvláště nepříjemné v případě dlouhodobých měření na jednom zrně. Naopak výhodou této metody je, že nám poskytne poměrně přesnou znalost hmotnosti zrna bez jakýchkoliv dalších předpokladů.

V této aparatuře můžeme studovat prachová zrna tak, jak se vyskytují ve volném prostoru otevřeného vesmíru. Nicméně prachová zrna nalézáme ještě v jednom typu prostředí, a tím jsou povrchy kosmických těles. K prozkoumání odprašování v tomto prostředí byla použita další experimentální technika.

2.2 Elektronový mikroskop Tescan Lyra 3

Pro experimenty s prachovými zrny ležícími na povrchu byl použit komerčně dodávaný skenovací elektronový mikroskop Tescan Lyra 3¹. K jejich odprašování byl použit svazek Ga iontů o energii 30 keV, který je součástí tohoto mikroskopu. Použití příhodnějších iontů či nižší energie nebylo možné. Prachová zrna byla umístěna na uhlíkovou pásku, aby se zabránilo jejich pohybu vlivem nabití.

¹<http://www.tescan.com/en-us/technology/fib-sem/lyra3>

Kapitola 3

Cíle práce

Proces odprašování prachových zrn je jeden ze základních procesů, kterým mohou být prachová zrna v kosmickém prostoru destruována. Zároveň je jeho studium velmi náročné, protože je obtížné měřit přesně hmotnost prachového zrna a její změny. Proto jsou dosavadní výsledky v této oblasti poměrně vzácné a založené převážně na teoretických výpočtech. Dochází-li již k nějakým experimentům v této oblasti, pak se jedná většinou o studium odprašování povrchu pokrytého silnou vrstvou prachu. Účelem naší práce bylo zaměřit se na studium tohoto procesu na jednotlivých prachových zrnech, což umožnilo získat unikátní výsledky, které lépe vypovídají o procesech v kosmickém prostoru.

Konkrétní cíle práce je možné představit následovně:

1. Vyvinout metodu určení odprašovacího výtěžku levitujícího zrna, zejména s ohledem na zjištění počtu dopadajících iontů.
2. Změřit odprašovací výtěžek skleněného zrna, jakožto analogu kosmického prachu.
3. Stanovit vliv povrchového elektrického potenciálu zrna na jeho odprašovací výtěžek, tj. změřit odprašovací výtěžek pro různé povrchové potenciály.
4. Vyvinout model simulující odprašování zrna a porovnat s ním získané výsledky.
5. Porovnat odprašování zrna levitujícího v prostoru s odprašováním zrna ležícího na povrchu většího tělesa.

Kapitola 4

Model interakce iontů s kulovými zrny

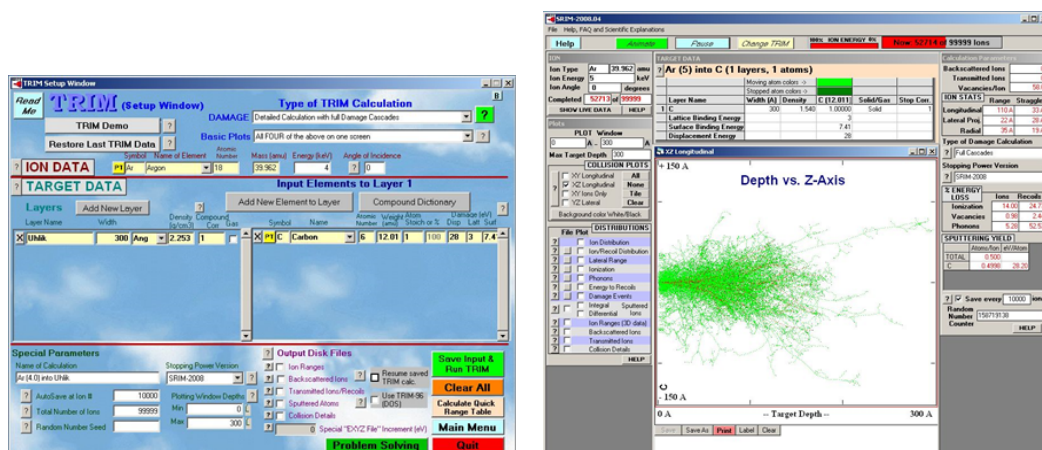
Při interakci energetických iontů s povrchem prachového zrna dochází ke dvěma procesům, a to odprašování materiálu zrna a zabudovávání dopadajících iontů pod jeho povrch. Odprašováním se snižuje hmotnost a mění tvar zrna. Implantované ionty naopak mohou v zrně difundovat a po určité době se část z nich dostane k povrchu a prachové zrno opustí. K popisu tohoto procesu je nutné znát, kromě difúzní konstanty, hloubku implantace a implantační profil (tj. závislost koncentrace implantovaných iontů na hloubce pod povrchem zrna). K lepšímu pochopení obou procesů byly vytvořeny dva počítačové modely, které tyto procesy simulují. První je zaměřen na implantované ionty a jeho výsledkem je implantační profil a odprašovací výtěžek pro kulové zrno vznášející se volně v prostoru. Výsledky tohoto modelu byly použity v pracích [8] ??, [98] jako vstupní parametr pro výpočet difuze implantovaných iontů v prachovém zrně. Druhý model je zaměřen výhradně na změnu tvaru odprašovaného zrna ležícího na povrchu a byl použit v práci [99] ??.

Při tvorbě počítačového modelu je nutné vyřešit dvě úlohy. První je samotná interakce dopadajících iontů s materiálem zrna a druhá spočívá v započítání tvaru a rozměrů zrna. První úloha byla vyřešena volbou počítačového programu simulující interakci iontů s materiálem a byl vybrán softwarový balík SRIM [82], který poskytuje poměrně dobrou shodu s experimentálními daty. Druhá úloha byla zjednodušena volbou kulového tvaru zrn, protože jednak jsou jednodušší pro výpočty (využití symetrie) a také je u nich možné porovnání s experimentem. Podobným způsobem zřejmě postupovali Jurac a kol. ve dříve zmíněné práci [38], ale více podrobností nebylo možné získat a bylo nutné přistoupit k vlastnímu návrhu.

4.1 Implantační profil

Program simulující interakci iontů s pevnou látkou, TRIM (verze 2008.04), počítá s terčí z amorfního materiálu a je založen na metodě Monte Carlo. Uvažuje binární srážky, mezi kterými se částice pohybuje přímočaře a ztrácí energii elektronickým brzděním. Vstupními parametry jsou: materiál terče (druh atomů, jejich vazebná energie, energie nutná k posunutí atomu a energie k opuštění povrchu, hustota) a dopadající svazek (druh iontů, energie, úhel dopadu, počet iontů, které chceme sledovat). Z hustoty terče program počítá volnou dráhu mezi

srážkami iontu s atomy terče a u srážek určuje rychlost a směr pohybu obou zúčastněných částic. Tímto způsobem sleduje iont až do jeho zastavení (pokles energie pod 2 eV) a podobně počítá i všechny ostatní atomy, které uvedl tento iont do pohybu (obrázek 4.1). Výsledkem potom jsou polohy všech atomů, které dopadlý iont přemístil, včetně jeho vlastní polohy. V případě atomů u povrchu se zaznamenává druh, rychlost a směr vyletujících částic.



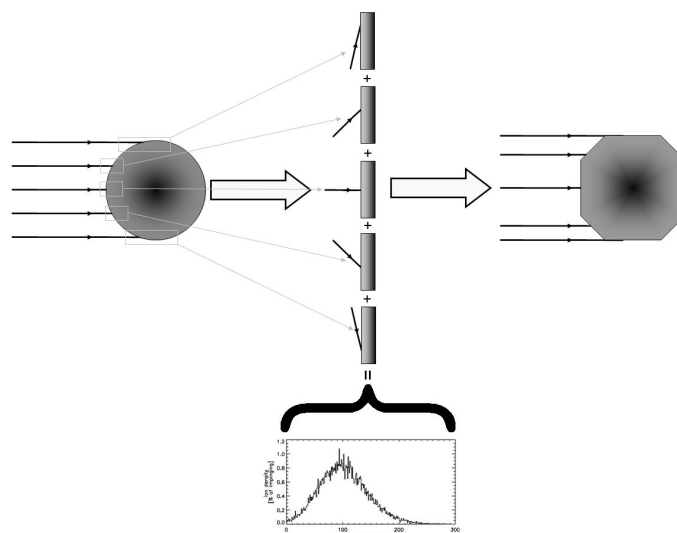
Obrázek 4.1: TRIM. Zadávání dat pro výpočet (vlevo) a průběh výpočtu (vpravo). Grafický výstup je možné potlačit a nechat vypsát výsledná data do souboru.

Drobnou nevýhodou tohoto programu je, že uvažuje terče nekonečných rozměrů (je možné zadat hloubku terče, ale jeho povrch bere jako nekonečnou plochu). Neumožňuje tedy snadným způsobem počítat terče různých tvarů a rozměrů.

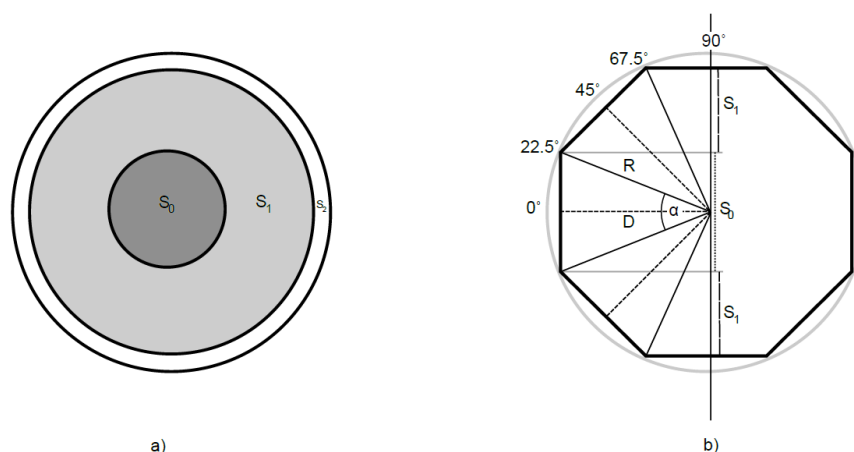
Pro zohlednění tvaru zrna byl napsán program v jazyce IDL [100], který využívá možnosti TRIMu pro automatické zadávání vstupních parametrů a jeho automatické spouštění. Po proběhnutí simulace v TRIMu převezme výsledná data, která dále zpracovává. Kulové zrno bylo pro účely výpočtu nahrazeno mnohoúhelníkovým zrnem (tj. zrnem, jehož průřez měl tvar mnohoúhelníku – samotné zrno pak vzniklo rotací tohoto mnohoúhelníku kolem svislé osy, viz obrázek 4.2). Každá strana mnohoúhelníku (resp. rotací vzniklá ploška) tak měla určený svůj sklon, pro který TRIM počítal hloubku implantace a odprašovací výtěžek. Velikost plochy této plošky (mezikruží tvořené stranou mnohoúhelníku) dává váhu, kterou tato ploška přispívá k celkovému odprašovacímu výtěžku a implantačnímu profilu (obrázek 4.3). Podrobněji je tento postup popsán v příložené práci [101] ??.

Simulační program sestává z následujících procedur:

- pro každý úhel daný úhlovým krokem zavolá TRIM a nechá jej spočítat konečné polohy dopadlých iontů a počty odletujících atomů,
- z výsledných dat vypočítá pro každý úhel implantační profil a odprašovací výtěžek,
- určí výsledný implantační profil za předpokladu, že zrno nerotuje, rotuje kolem jedné osy a rotuje kolem 3 os (tj. každá část povrchu je iontovému svazku vystavena stejně), odprašovací výtěžek byl počítán jen pro tento poslední případ,



Obrázek 4.2: Model pro výpočet implantačního profilu – schéma.



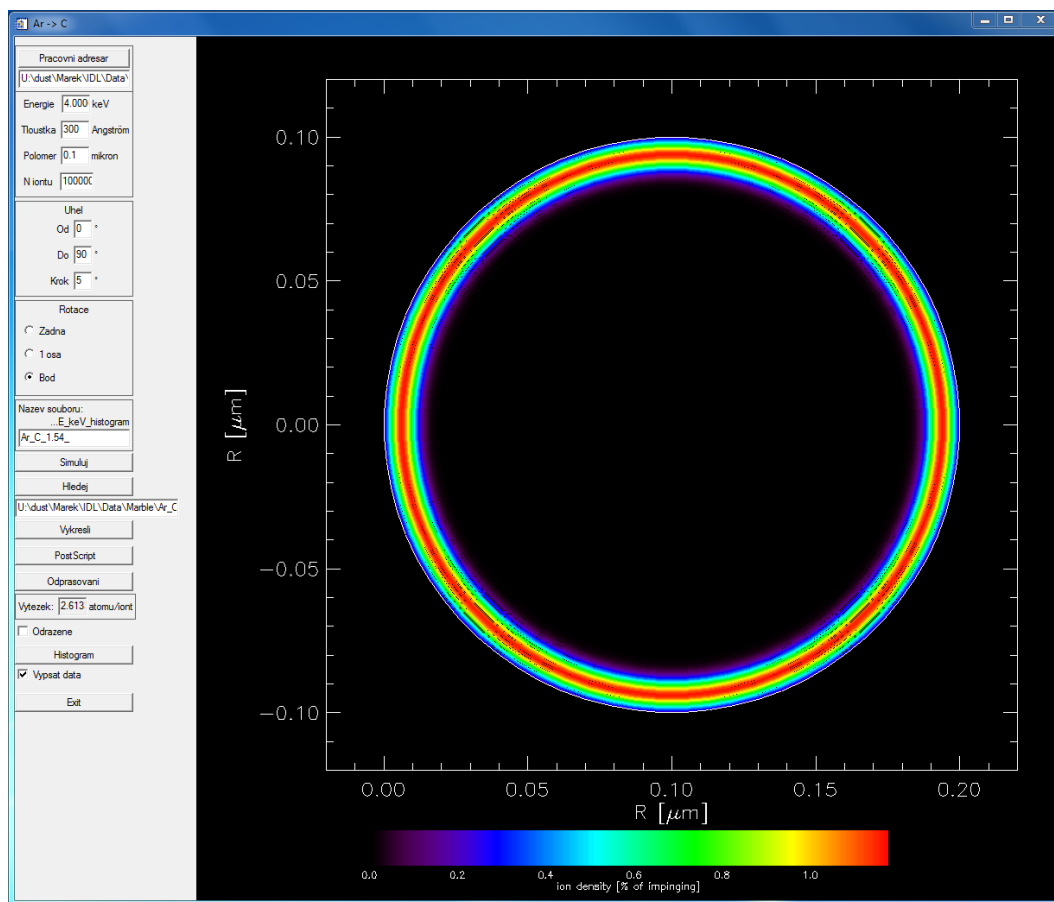
Obrázek 4.3: Model pro výpočet implantačního profilu – určení váhy pro každý úhel dopadu.

- vykreslí výsledný implantační profil a vypíše jeho histogram.

Ovládání a výsledný výstup programu je na obrázku 4.4. V programu je možné nastavit úhlový krok (tj. kolika-úhelníkem se nahradí kulové zrno), přičemž již úhlový krok 5° poskytuje výsledky s dostačující přesností. Dále se nastavuje energie dopadajících iontů, tloušťka terče (slouží jako parametr pro TRIM, měla by být větší než hloubka průniku iontu, který se dostane nejdál), poloměr zrna (slouží jen pro účely vykreslení obrázku) a počet iontů (parametr pro TRIM kolik iontů má vysílat pro každý úhel). Program po skončení vykreslí simulovaná data do obrázku jako průřez zrnem a uloží je do datové struktury, kterou umí zpětně načíst a zobrazit data. Výsledek je možné uložit i ve formě histogramu rozložení implantovaných iontů v závislosti na hloubce pod povrchem (grafický i textový výstup) jak je ukázáno na obrázku 4.5. Pro získání koncentrace pak jen stačí tento histogram přenásobit iontovou dávkou (počtem iontů dopadlých na 1 m^2

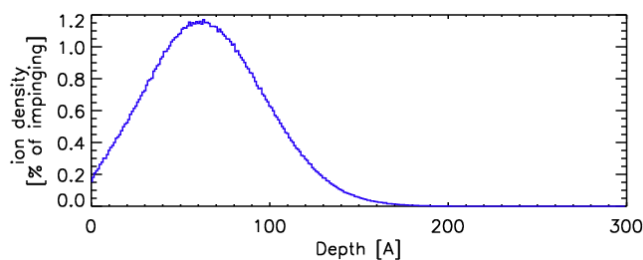
plochy) a dostaneme množství iontů v dané hloubce (počítá se v binech o šířce 1 Angström).

Pro zjednodušení ovládání program předpokládá, že prvotní informace o terči (materiál, hustota) a druhu iontů byly dříve zadány přímo TRIMu prostřednictvím jeho rozhraní. Je také nutné zadat typ simulace (v našem případě „monolayer collision step“) a požadované výstupní soubory (Range3D, Sputtering, Backscattering). TRIM tak vytvoří prvotní strukturu souboru se vstupními daty a náš program ji pak už jen upravuje v parametrech energie svazku, tloušťka terče, úhel dopadu a počet iontů. Pro urychlení se výpočet TRIMu pouští automaticky bez grafického zobrazení.



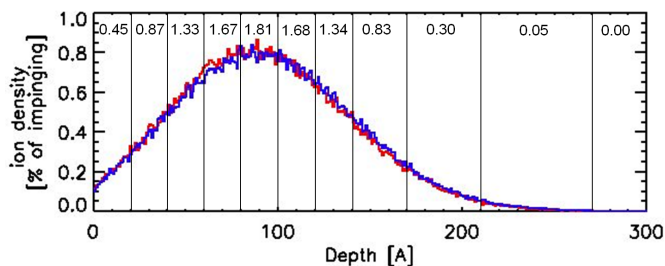
Obrázek 4.4: Program pro výpočet implantačního profilu. Ovládání je v levém sloupci, uprostřed se vykresluje průřez zrnem s implantovanými ionty. V tomto případě byl počítán implantační profil 4 keV argonových iontů dopadajících na zrno z amorfního uhlíku.

Program určí i odprašovací výtěžek za předpokladu zrna rotujícího kolem středu jako váženou hodnotu počtu odprašených atomů pro všechny úhly. Jako váha slouží opět plocha mezikruží odpovídající danému úhlu (obrázek 4.3). V tomto případě neuvažujeme změnu tvaru zrna, ani vliv již implantovaných iontů (TRIM vysílá každý iont do „čerstvého“ terče). Pro odhad vlivu implantovaných iontů byla udělána simulace, kde bylo zrno rozděleno na 11 vrstev, a v každé byla dána koncentrace implantovaných iontů získaná v předchozí simulaci. Setrvávajícím nedostatkem je, že ani tato simulace neuvažuje vliv rozbití meziatomových vazeb v materiálu již dopadlými ionty a vazebné energie pro implantovaný argon nejsou



Obrázek 4.5: Histogram implantace iontů (4 keV argon) do prachového zrna (amorfní uhlík o hustotě $1,54 \text{ g/cm}^3$) pro všesměrové ostřelování (tj. zrno rotující kolem středu). Úhlový krok 5° , počet iontů 10^5 pro každý úhel.

známé (byly použity energie přednastavené v TRIMu a implantované ionty se jen zařadily mezi atomy původního materiálu, čímž efektivně zvýšily hustotu v dané vrstvě). Z výsledků na obrázku 4.6 se dá soudit, že za těchto předpokladů není vliv implantovaných iontů výrazný.

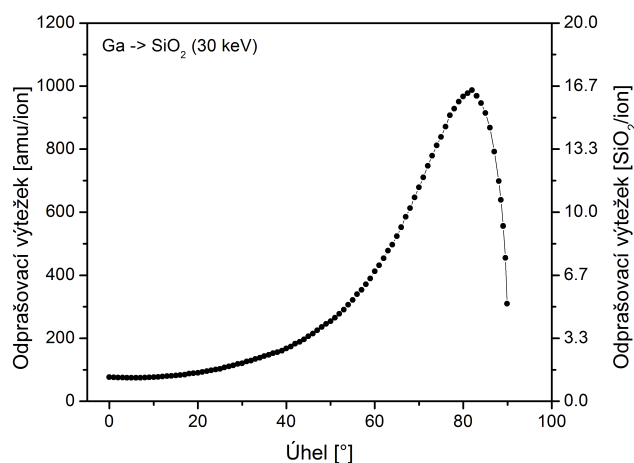


Obrázek 4.6: Porovnání implantačního profilu pro zrno z čistého uhlíku (modrá) a zrno tvořené 11 vrstvami směsi uhlíku a implantovaného argonu (červená). Čísla nad grafem vyjadřují procentuální zastoupení argonu v dané vrstvě. Simulace byla dělána pro 7 keV argon dopadající na amorfní uhlík ($1,54 \text{ g/cm}^3$), úhlový krok 5° , počet iontů 10^4 .

4.2 Tvar zrna

Program simulující odprašování zrna ležícího na povrchu vychází ze stejného principu jako předchozí program (nahrazení kruhu mnohoúhelníkem), ale zaměřuje se na změnu tvaru zrna v průběhu odprašování. Základní podmínkou je, že zrno je na povrchu nehybné, neotáčí se a iontům je vystavena vždy stejná strana. Každá ploška mnohoúhelníku se potom odprašuje rychlostí danou odprašovacím výtěžkem pro její sklon (určeným TRIMem) a počtem dopadlých iontů (určen hustotou iontů ve svazku a sklonem a velikostí této plošky). Jestliže se jedna ploška odprašuje rychleji než ploška sousední, tak z této sousední plošky postupně ubírá patřičnou část, až ji zcela nahradí (podobný princip užil Wege a kol. při studiu odprašování hrotů [102]). Výsledkem této simulace je poloha bodů na povrchu zrna a jejich časový posun (závislý na hustotě iontového proudu). Z původně pravidelného mnohoúhelníku tak vzniká nepravidelný mnohoúhelník a výsledný tvar odprašovaného zrna získáme rotací tohoto mnohoúhelníku.

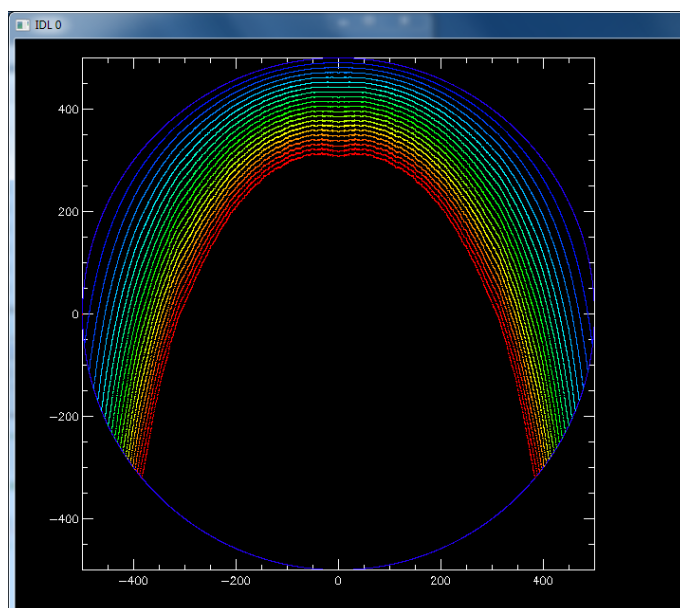
Vstupním parametrem je odprašovací výtěžek pro různé úhly spočítaný pomocí programu TRIM, jak je zobrazený na obrázku 4.7. Není-li zjištěný s dostatečným úhlovým krokem, pak se mezi vypočtenými hodnotami lineárně aproximuje. Toho je zapotřebí, protože úhlová závislost odprašovacího výtěžku skla (ani jiných materiálů) nebyla proměřena s dostatečnou přesností (v literatuře se uvádí hodnoty jen pro některé úhly a navíc v poměrně širokém rozmezí) [107]. Dále je třeba zadat rozměry zrna, hustotu proudu, úhlový a časový krok. Simulační program nemá grafické rozhraní, výsledný tvar je možné vykreslit do souboru a vypsat polohy bodů. Program také dopočítává odprašený objem (hmotnost) za předpokladu rotační symetrie zbytku zrna.



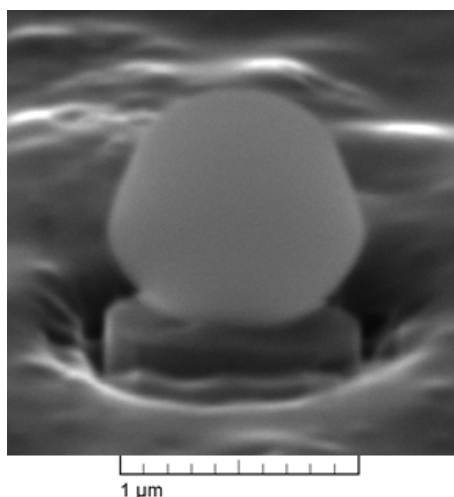
Obrázek 4.7: Odprašovací výtěžek skla (SiO₂) při dopadu 30 keV Ga ionty vypočítaný pomocí programu TRIM (hustota skla 2,2 g/cm³, TRIM 2008.04, monolayer collision step).

Z grafu úhlové závislosti odprašovacího výtěžku (obr. 4.7) je patrné, že je mírně větší pro kolmý dopad než pro úhly do 10° (s minimem kolem 5°). To znamená, že uprostřed zrna by se mělo očekávat formování prohlubně, jak je patrné na obrázku 4.8. Z porovnání s experimentálně pozorovaným tvarem odprašovaného zrna (obr. 4.9) je patrný značný nesoulad. Simulační program byl proto upraven dvěma způsoby.

Nahrazením kulového zrna mnohoúhelníkovým a počítáním každé plošky zvlášť vneseme do modelu umělé hrany (každá ploška se odprašuje různou rychlostí a na jejich hranicích se tak vytváří nespojitost, konec plošky na jedné straně by byl v jiné výšce než začátek plošky následující). Souvisí to též s otázkou, jestli má být na vrcholu zrna bod nebo ploška. Tento problém je umělý a vnesený naší aproximací. Proto první úprava simulačního programu spočívala v zahlazování těchto umělých nespojitostí tak, že výpočet probíhal ve dvou krocích, které v podstatě odpovídaly dvěma situacím – první s ploškou a druhý s bodem na vrcholu zrna. Jejich střídání, tj. jako by se zrno pootočilo o jeden úhlový krok, vyrovnávalo nespojitosti. Fyzikálně by bylo možné tento postup interpretovat tak, že z hrany schodu způsobené nespojitostí byl větší odprašovací výtěžek, který tuto nespojitost zahladil (pohybující se atomy terče byly blíže k povrchu a mohly jej snáze opouštět bokem této hrany). Výsledný simulovaný tvar odprašovaného zrna po



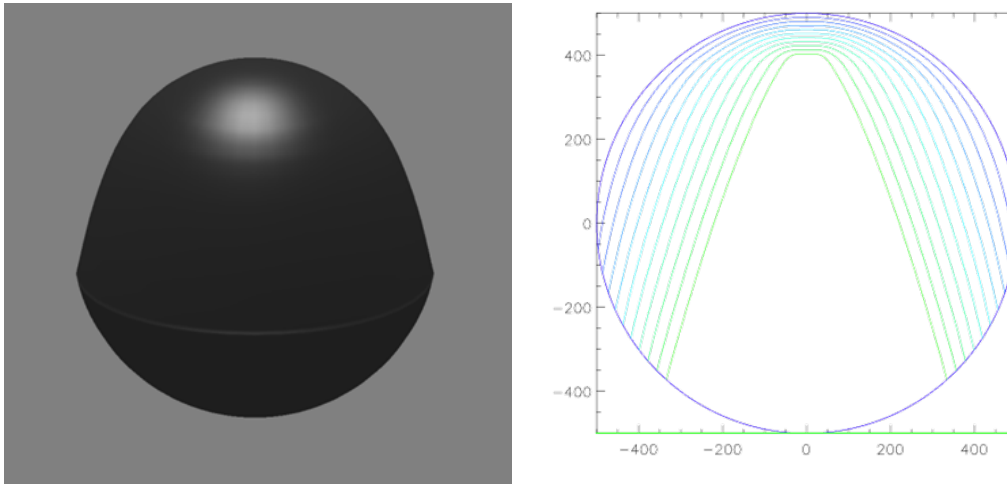
Obrázek 4.8: Výsledný tvar odprašovaného SiO_2 zrna o průměru $1 \mu\text{m}$ při odprašování 30 keV Ga ionty o hustotě proudu $0,9 \text{ A/m}^2$. Jednotlivé linie jsou po 30 s odprašování, patrný je vznik prohlubně ve středu zrna.



Obrázek 4.9: Experimentálně pozorovaný tvar odprašovaného SiO_2 zrna o průměru $1 \mu\text{m}$ při odprašování 30 keV Ga ionty o hustotě proudu $0,9 \text{ A/m}^2$.

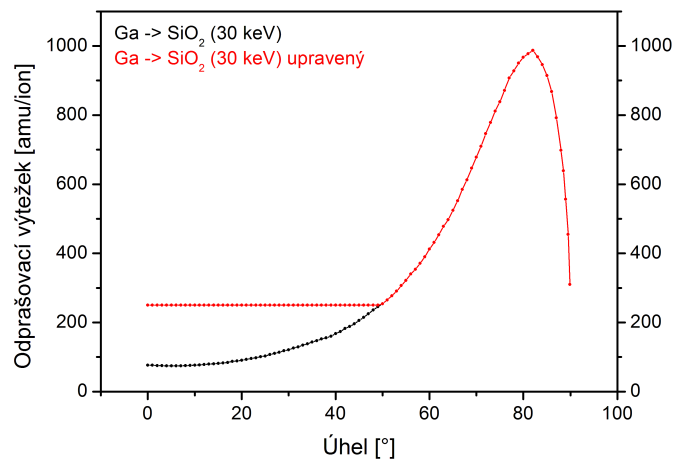
této úpravě, včetně 3D projekce, je na obrázku 4.10. Připomíná spíše paraboloid než experimentálně pozorovaný tvar.

Aby při odprašování vznikla na vrcholu zrna téměř rovná plocha (tedy aby vznikl komolý kužel či tvar náprstku), je potřeba uvažovat jinou úhlovou závislost odprašovacího výtěžku. Ta byla upravena tak, že pro úhly do 50° byla nahrazena konstantou 250 amu/ion , jak je ukázáno na obrázku 4.11. Výsledkem byl tvar, který již poměrně dobře odpovídal tvaru pozorovanému (obr. 4.12). Způsobené to může být buď tím, že TRIM neadekvátně počítá odprašovací výtěžek skla pro dané úhly, nebo sklo vykazuje při daném odprašování anomální chování. Hofsäss a kol. [92] upozorňují, že TRIM nadhodnocuje odprašovací výtěžek pro velké úhly, nicméně se tím příliš nevysvětluje změna odprašovacího výtěžku pro malé úhly.



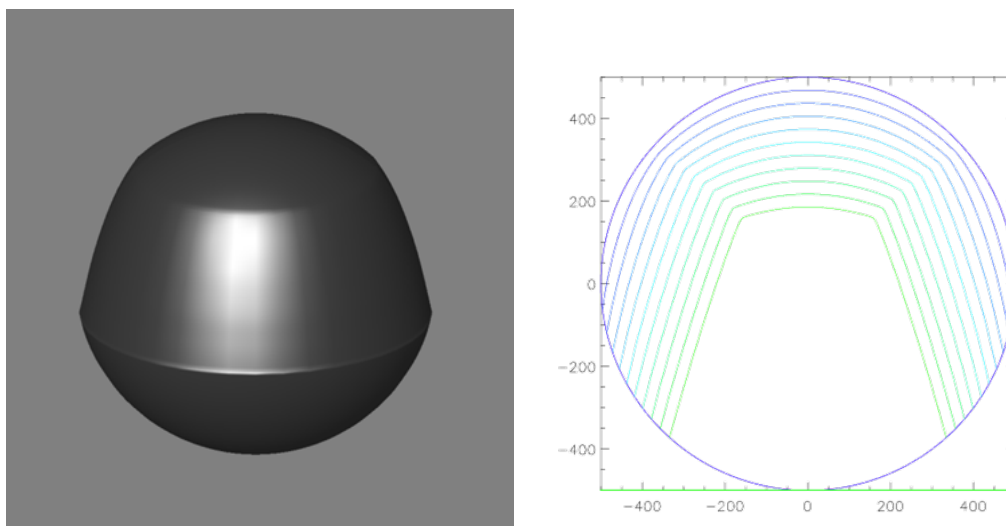
Obrázek 4.10: Výsledný tvar odprašovaného SiO_2 zrna o průměru $1 \mu\text{m}$ při odprašování 30 keV Ga ionty o hustotě proudu $0,9 \text{ A/m}^2$ po úpravě programu (zahrazení nespojitostí mezi jednotlivými úhly) Vlevo – 3D projekce, vpravo – časový vývoj změny profilu zrna.

Do budoucna by bylo vhodné zkusit přepočítat úhlovou závislost odprašovacího výtěžku pomocí SDTrimSP.



Obrázek 4.11: Červeně – upravený odprašovací výtěžek skla (SiO_2) při dopadu 30 keV Ga ionty z obr. 4.7. Úhlová závislost pro úhly do 50° byla nahrazena konstantou 250 amu/ion.

Aplikace této simulační procedury je součástí práce [99] ?? a bude diskutován v další části této práce.



Obrázek 4.12: Výsledný tvar odprašovaného SiO_2 zrna o průměru $1 \mu\text{m}$ při odprašování 30 keV Ga ionty o hustotě proudu $0,9 \text{ A/m}^2$ uvažujeme-li upravenou úhlovou závislost odprašovacího výtěžku dle obr. 4.11.

Kapitola 5

Odprašování zrn v pasti a na povrchu

V kosmickém prostředí (a nejen v něm) se prach vyskytuje v zásadě ve dvou polohách. Buď se volně vznáší v prostoru (třeba meziplanetárním), nebo leží na povrchu nějakého tělesa (Měsíc, asteroidy apod.). V každém prostředí se může chovat poněkud odlišně a tak se práce zaměřila na tyto dva směry.

5.1 Odprašování levitujícího zrna

Postup měření odprašovacího výtěžku je ve svém principu jednoduchý:

- zvážit zrno,
- určit počet dopadajících iontů,
- několik hodin bombardovat ionty,
- opakovat dle potřeby.

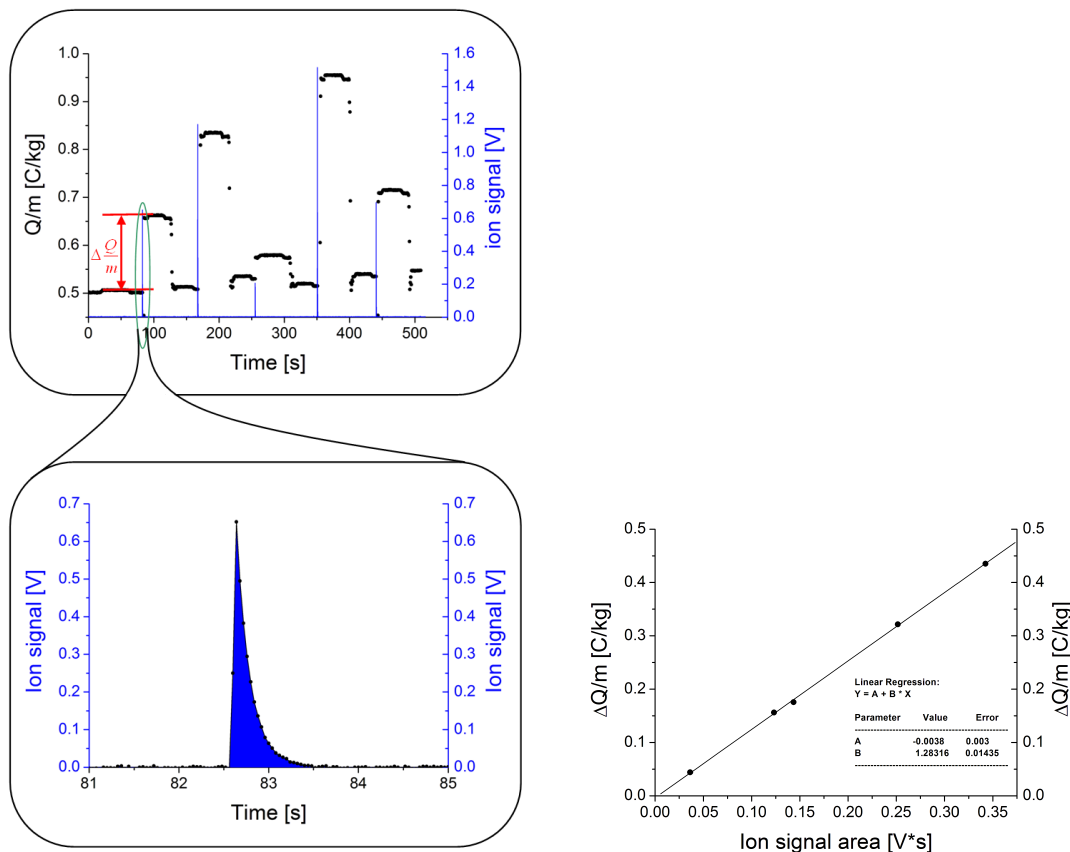
V proceduře se však skrývá několik problémových míst. Jedním je riziko ztráty zrna při vybíjení a nabíjení přes velké rozpětí měrného náboje (0,005–40 C/kg, tedy přes 4 řády). To nastává zejména při přechodu nastavení kvadrupólu 2000 Hz a 137 V, kdy generátor napětí přepíná rozsah a vyše pulz, při kterém je udržení zrna většinou nemožné (tento přechod je nutné provádět pomocí druhého generátoru, který je v této oblasti bezpečný). Druhý rizikový okamžik je nabíjení zrna po jeho vážení, protože při malém měrném náboji i malá změna náboje může vést k rychlé ztrátě podmínek udržení.

Pro odprašování byly používány argonové ionty pro jejich vyšší odprašovací výtěžek (v porovnání s vodíkem či heliem, které by byly z hlediska vesmírného prostředí sice více relevantní, ale neúměrně by prodlužovaly dobu měření). Dalším našim úkolem bylo určení počtu dopadajících iontů.

5.1.1 Určení počtu dopadajících iontů

Pro určení počtu dopadajících iontů byla vyvinuta nová metoda měření, která vychází z předpokladu, že dopadlý iont předá zrnu svůj náboj, přičemž jeho hmotnost změní jen nepatrně. Změna náboje zrna je potom úměrná počtu dopadlých iontů.

Při relativně nízkém náboji zrna na něj byl vystřelen pulz iontů, přičemž byla zaznamenána změna měrného náboje zrna a pomocí Faradayova válce byla změřena i velikost iontového pulzu (obrázek 5.1 vlevo). Tento postup byl opakován několikrát a získaná závislost změny měrného náboje zrna na velikosti plochy iontového pulzu byla lineární (obrázek 5.1 vpravo).



Obrázek 5.1: Postup určení počtu dopadlých iontů. Měření změny měrného náboje a jí odpovídající signál zaznamenaný Faradayovým válcem (vlevo) a lineární regrese takto získaných dat (vpravo).

Lineární regresí získáme konstantu pro přepočet dat zaznamenaných Faradayovým válcem a počtu iontů skutečně dopadlých na zrno. V tomto koeficientu už je zahrnuta i velikost částice, neboť přímo říká, kolik iontů dopadlo na zrno při daném signálu Faradayova válce, jak je uvedeno v rovnici 5.1:

$$N = \frac{B \cdot I_a \cdot m}{e}, \quad (5.1)$$

kde B je směrnice závislosti rozdílu měrného náboje ($\Delta \frac{Q}{m}$) na velikosti iontového signálu z Faradayova válce získaného lineární regresí (obrázek 5.1 vpravo), I_a celkový časový integrál signálu z Faradayova válce získaného za dobu odprašování, m je hmotnost zrna a e je velikost elementárního náboje.

Pokud je zrno nabitě, je nutné tento počet ještě snížit dle OML (orbital motion limit) teorie podle rovnice 5.2:

$$N_i = N_0 \cdot \left(1 - \frac{e \cdot \phi_{max}}{E_0}\right), \quad (5.2)$$

kde N_0 je počet dopadajících iontů podle rovnice 5.1, ϕ_{max} je rovnovážný povrchový potenciál zrna a E_0 je energie dopadajících iontů.

5.1.2 Odprašovací výtěžek

Odprašovací výtěžek byl měřen postupem popsaným výše, tj. sekvencí sestávající z vážení zrna, zjištění počtu dopadajících iontů a několikahodinového odprašování (typicky 3–5 hodin). Pavlů a kol. [103] měřili podobným způsobem odprašovací výtěžek pro zlaté zrno a jedním z jejich závěrů byla hypotéza o vlivu povrchového potenciálu na odprašovací výtěžek. Předpokládali, že pro zrno z nevodivého materiálu bude docházet vlivem elektrického pole k výraznému nárůstu odprašovacího výtěžku v případě nabitých zrn. Ověření této hypotézy bylo jedním z cílů našeho experimentu. Proto byla zvolena skleněná zrna (SiO_2) a měření bylo prováděno pro 3 různé hodnoty povrchového potenciálu:

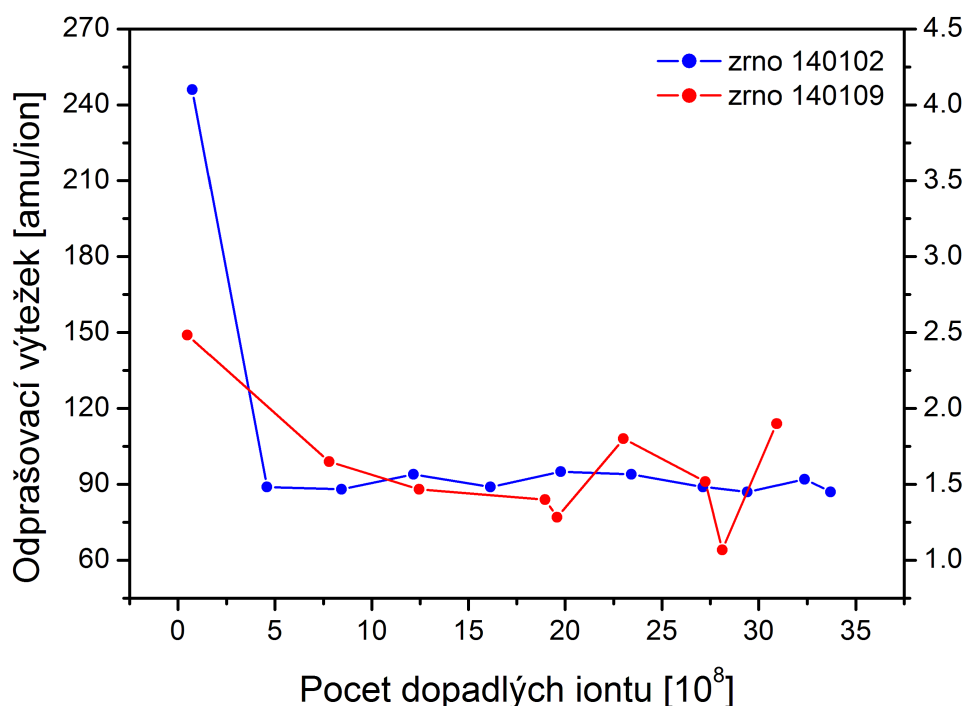
- vysoký o velikosti 1,3 kV (náboj zrna byl dán rovnováhou mezi dopadajícími ionty a elektrony z pozadí generované sekundární emisí na elektrodách, případně ionizací zbytkové atmosféry),
- střední o velikosti 0,8 kV (náboj zrna byl částečně kompenzován svazkem elektronů o energii 1 keV),
- nízký o velikosti 10 V (náboj zrna byl zcela kompenzován 1 keV elektronovým svazkem, přičemž byl stabilizován sekundární elektronovou emisí).

Energie svazku byla volena tak, aby po započtení vlivu povrchového potenciálu byla energie dopadajících iontů ve všech případech stejná.

Náročné se ukázalo měření při středním povrchovém potenciálu. Zatímco elektronový svazek byl stabilní a spolehlivý, u iontového docházelo k výpadkům. Iontové dělo používá jako zdroj iontů výboj, který nebyl vždy zcela stabilní a někdy měl tendenci zhasínat. V obou krajních případech to nepředstavovalo vážný problém (při nízkém potenciálu se výpadek iontů neprojevil, při vysokém sice docházelo k autoemisi a postupnému vybíjení zrna, ale autoemisní proudy byly nízké a ztráta zrna prakticky nehrozila). V případě středního potenciálu, který byl udržován rovnováhou mezi přicházejícími ionty a elektrony, vedla ztráta iontového proudu k vítězství elektronů, rychlému vybití a prakticky okamžité ztrátě zrna, proto je také z tohoto měření nejméně dat.

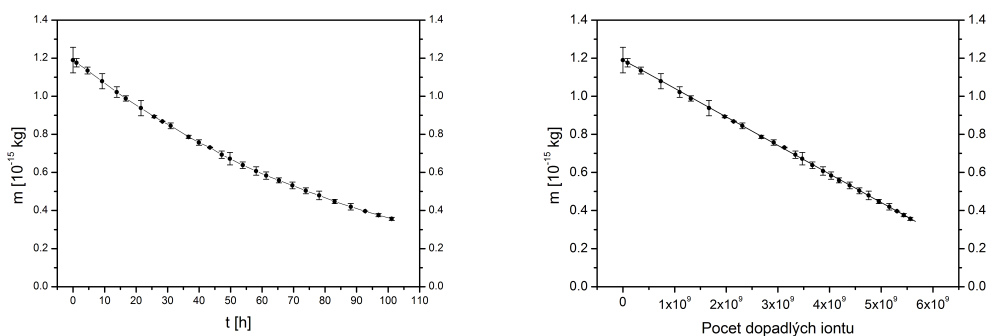
Pro každé nově zachycené zrno byl odprašovací výtěžek při prvním bombardování mírně větší než pro všechna následující (viz graf na obr. 5.2), což si vysvětlujeme prvotním čištěním povrchu zrna iontovým bombardem (mohl se také projevit vliv tvorby rovnovážné vrstvy s implantovaným argonem, která se dále odprašovala a posouvala směrem k centru zrna). Pro další zpracování dat nebyl tento první bod používán. Zrno 140121 (obr. 5.3) tento jev nevykazuje, protože před odprašováním byla část povrchu odpařena intenzivním elektronovým bombardem tak, aby měření mohlo začít s nižší hmotností zrna. Na měřený odprašovací výtěžek neměl tento postup vliv, jak je patrné z měřených hodnot.

Získaná data jsou vynesena do grafů na obrázcích 5.3, 5.4 a 5.5 a nalezneme je v tabulkách v příloze ??, ??, ??. Pokud si vyneseme hmotnost zrna v závislosti na době odprašování, zjistíme, že rychlost odprašování klesá, což je efekt způsobený



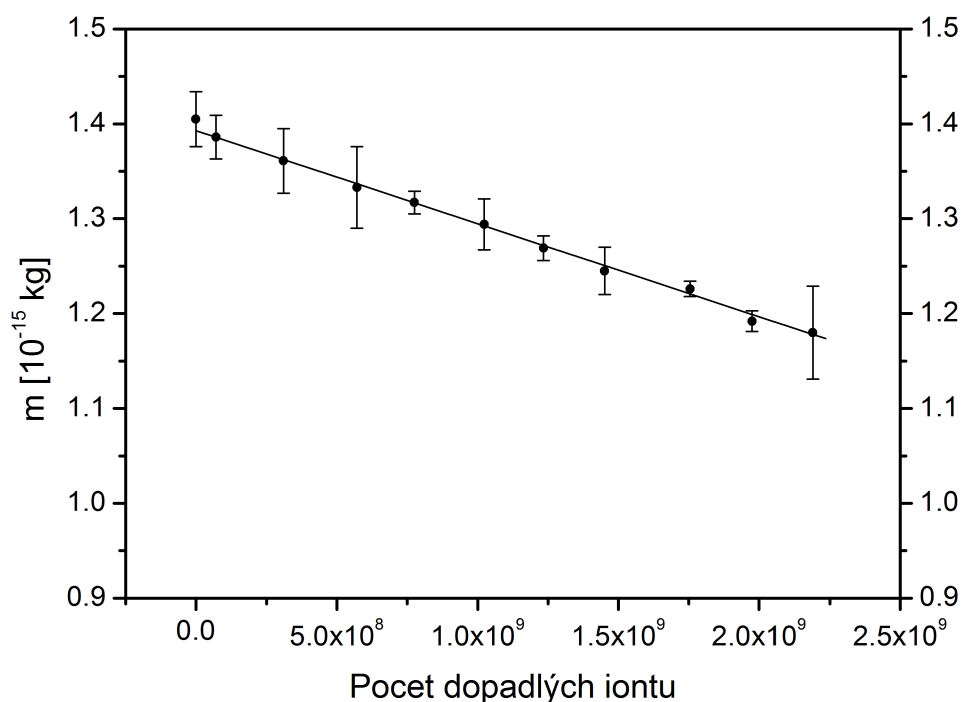
Obrázek 5.2: Závislost odprašovacího výtěžku dvou SiO_2 zrn na počtu dopadlych iontů během odprašování 2 keV Ar ionty při nízkém povrchovém potenciálu (9 V) drženém svazkem 1 keV elektronů.

zmenšující se velikostí zrna (na menší zrno dopadá za stejný čas méně iontů) – graf na obr. 5.3 vlevo. Při vynesení závislosti hmotnosti zrna na počtu skutečně dopadlych iontů pozorujeme lineární závislost – graf na obr. 5.3 vpravo. Pomocí lineární regrese pak určíme odprašovací výtěžek. Získané výsledky jsou shrnuty v tabulce 5.1.



Obrázek 5.3: Časový vývoj odprašování SiO_2 zrna 140121 2 keV Ar ionty při nízkém povrchovém potenciálu (cca 9 V, povrchový potenciál zcela kompenzován 1 keV elektrony) – vlevo. Vpravo – stejná data jako závislost hmotnosti zrna na počtu dopadlych iontů.

Očekávaný výsledek, tedy vyšší odprašovací výtěžek při vyšším povrchovém potenciálu zrna, nebyl pozorován a hypotézu se tak nepodařilo potvrdit. Pozo-



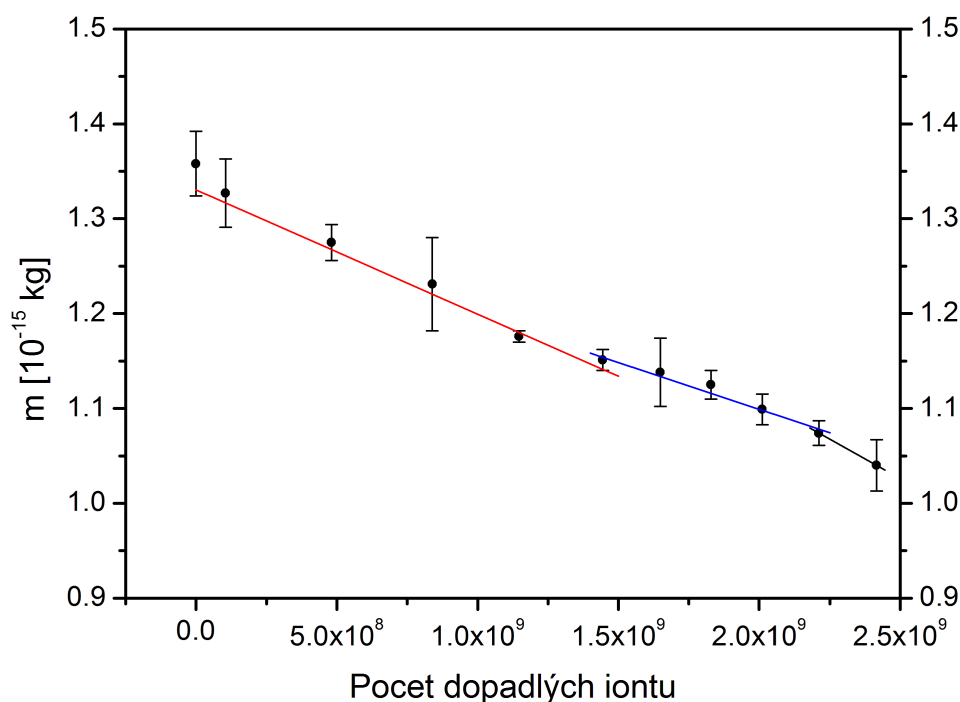
Obrázek 5.4: Závislost hmotnosti SiO₂ zrna na počtu dopadých iontů během odprašování 1,7 keV Ar ionty při vysokém povrchovém potenciálu (cca 1,3 kV, bez elektronového svazku).

Zrno	Obr.	Hmotnost [10 ⁻¹⁵ kg]	ϕ [kV]	E [keV]	E_{dopad} [keV]	Doba odpraš. [h]	Měřený výtěžek [amu/ion]	[SiO ₂ /ion]
140102	5.2	1.49	0.01	2	2	29	91.5 ± 2.5	1.53 ± 0.04
140109	5.2	1.35	0.01	2	2	31	89	1.48
140121	5.3	1.19	0.01	2	2	101	90.2 ± 0.3	1.501 ± 0.004
140823	5.4	1.41	1.3	3	1.7	49	59 ± 5	0.98 ± 0.09
141001	5.5 red	1.36	0.8	3	2.2	20	78 ± 11	1.3 ± 0.2
	5.5 blue	1.15	1.4	3	1.6	20	60 ± 13	1.0 ± 0.2
	5.5 black	1.07	0.01	3	3	5	100	1.66

Tabulka 5.1: Přehled výsledků odprašování SiO₂ zrna pomocí Ar iontů různým povrchovém potenciálu.

rovaný efekt byl právě opačný (nejvyšší odprašovací výtěžek byl při nejmenším povrchovém potenciálu a s jeho růstem klesal). Tento jev je možné vysvětlit dopadajícími elektrony (při nejnižším povrchovém potenciálu jich dopadalo nejvíce), které jednak přinášely další porci energie, a pak také v případě SiO₂ je známo že dopad elektronů zvyšuje odprašovací výtěžek [104]. Fujita a kol. [104] dokonce uvádí, že k nárůstu odprašovacího výtěžku dochází, i když byl povrch SiO₂ nejdříve ostřelován elektrony a až následně odprašován ionty. Tohoto efektu se využívá při výrobě polovodičových součástek.

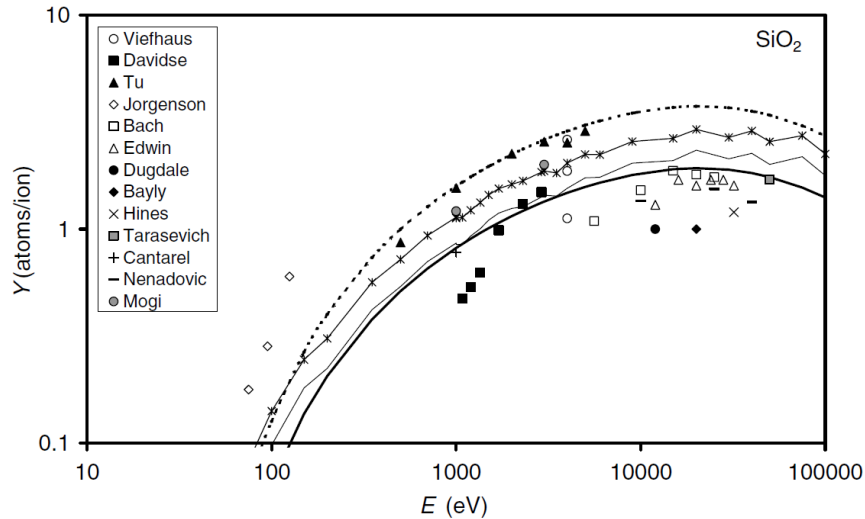
Nepozorování nárůstu odprašovacího výtěžku pro nabitě izolanty může být vysvětleno ještě jedním efektem. Tím je zvýšení povrchové vodivosti skleněného zrna způsobenému preferenčním odprašováním kyslíku. Zrnu se změní složení povrchové vrstvy ve prospěch křemíku. Tento jev byl pozorován u skleněných okének tokamaků [105, 106], i když pro mnohem větší toky.



Obrázek 5.5: Závislost hmotnosti SiO_2 zrna na počtu dopadlych iontů během odprašování 2,2 keV Ar ionty při středním povrchovém potenciálu (cca 800 V, povrchový potenciál částečně kompenzován 1 keV elektrony) – červená křivka. Pro srovnání byla měřena i data pro vysoký povrchový potenciál (1,7 keV Ar ionty, bez kompenzace elektrony) – modrá křivka a pro nízký potenciál (3 keV Ar ionty, 1 keV elektrony) – černá křivka.

Graf na obr. 5.5 ukazuje pokus o změření odprašovacího výtěžku při různých povrchových potenciálech na jednom zrně, aby tak bylo možné vyloučit případný vliv rozdílnosti jednotlivých prachových zrn. Pro vysoký a střední potenciál se podařilo získat dostatečné množství bodů, ale v nejméně rizikovém režimu (při nízkém potenciálu) došlo ke ztrátě zrna při druhém odprašování. Nicméně i odprašovací výtěžek získaný z tohoto jednoho měření odpovídá odprašovacím výtěžkům při nízkém potenciálu získaným na jiných zrnech. Kvůli zaměření iontového děla bylo toto měření prováděno při konstantní energii svazku (ionty na povrch dopadaly s rozdílnou energií podle aktuálního povrchového potenciálu). Nicméně energetická závislost odprašovacího výtěžku skla argonovými ionty v tomto rozmezí není příliš výrazná a vykazuje poměrně široké rozpětí hodnot (obr. 5.6) [107], takže i přes mírně rozdílnou energii jsou získaná data porovnatelná s předchozími měřeními.

Pro lepší přiblížení k podmínkám panujícím ve slunečním větru, který je z 95 % tvořen protony a ze 4 % jádru helia ($2\times$ ionizovaného) jsme se dále pokusili změřit odprašovací výtěžek i pro odprašování heliovými ionty ($1\times$ ionizovanými, tedy bez případného vlivu potenciálového odprašování), který je možné očekávat cca $10\times$ menší než v případě argonu. Bohužel se ukázalo obtížnější získat svazek iontů, protože iontový zdroj nebyl s heliem schopen příliš dobře pracovat (díky



Obrázek 5.6: Kompilace publikovaných odprašovacích výtěžků pro SiO_2 při odprašování Ar ionty. Převzato z [107], str. 10 pro podrobnější popis.

jeho vysoké ionizační energii). Jak je vidět z tabulky ?? v příloze, pohyboval se odprašovací výtěžek mezi -3 a 22 amu/ion se střední hodnotou kolem 22 amu/ion. Získaná data ale nejsou příliš přesvědčivá a toto měření se celkově nedařilo. Při malém výtěžku by bylo potřeba buď zpřesnit měření hmotnosti (které bylo za daných podmínek na hranici možného) nebo významně prodloužit dobu měření, což také nebylo možné (zejména z důvodu udržení prachového zrna a stability iontového svazku).

5.2 Odprašování zrna ležícího na povrchu

Při odprašování zrna ležícího na povrchu byla použita stejná skleněná zrna jako v předchozím případě a pro porovnání bylo měření ještě uskutečněno se zrny uhlíkovými, hliníkovými, zlatými a melaminovými. Aby se zabránilo jejich pohybu, byla zrna přichycena na uhlíkovou pásku (kromě uhlíkových zrn, která jsou vodivá, nenabíjí se a nemají tedy tendenci cestovat po povrchu vzorku, proto stačilo jejich umístění na standardní aluminiový držák bez použití uhlíkové pásky). K odprašování sloužil 30 keV svazek galiových iontů (standardní zdroj iontů v použitém elektronovém mikroskopu).

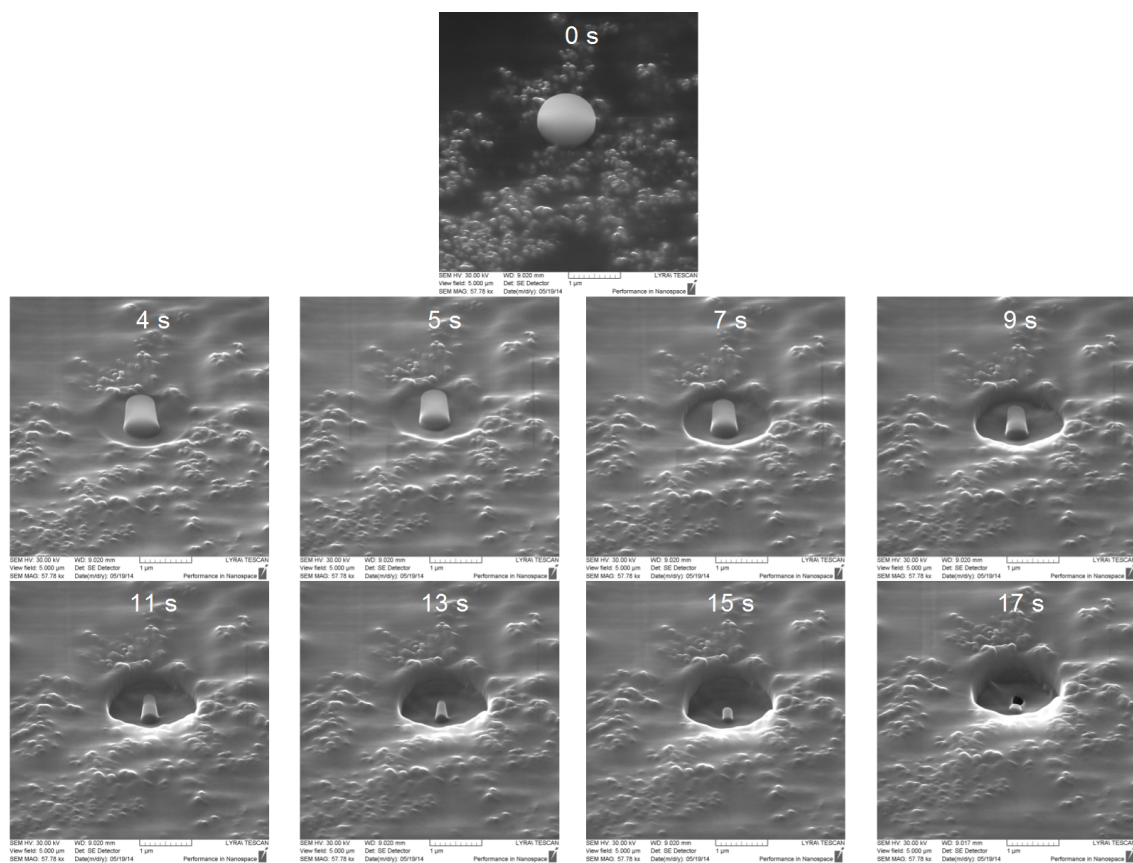
Velikost iontového proudu byla kontrolována Faradayovým válcem, rozměr svazku byl nastaven na 2 nm a svazkem bylo skenováno v oblasti mírně přesahující rozměry zrna (poloměr $0,6$ a $0,8$ μm). Při dostatečné frekvenci skenování (v našem případě cca 10 kHz) můžeme uvažovat plošnou hustotu proudu J jako velikost proudu změřenou Faradayovým válcem (I) dělená celkovou plochou, přes kterou se skenuje, jak uvádí rovnice 5.3:

$$J = \frac{I}{4\pi R_0^2}, \quad (5.3)$$

kde R_0 je poloměr kruhu, přes který iontový svazek skenuje.

Postup měření byl takový, že vybrané zrno bylo několik sekund odprašováno, poté byl získán snímek elektronovým mikroskopem a celý postup byl opakován.

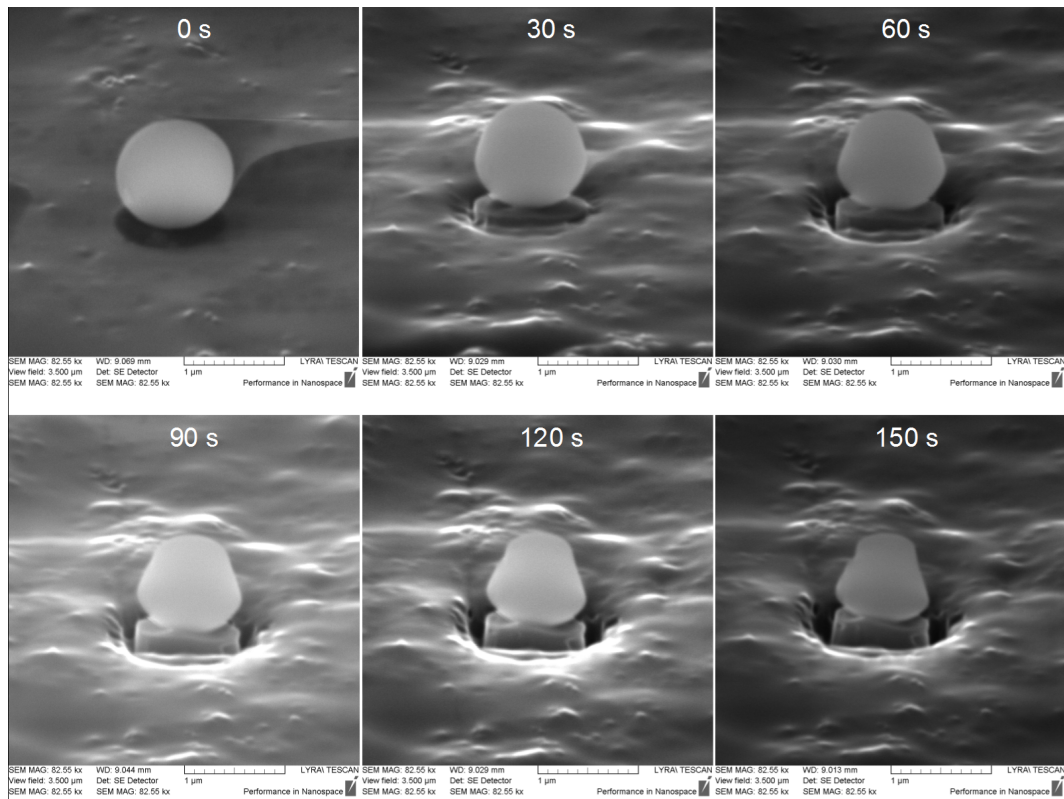
Výsledky pro větší iontový proud jsou na obrázku 5.7 a pro menší proud na obrázku 5.8, kde je lépe vidět postupná změna tvaru. Výsledný tvar připomínající komolý kužel či náprstek nebyl očekáván, ale byl získán opakovaně na několika skleněných zrnech, dokonce i při pokusu o rozříznutí zrna (obrázek 5.9). Na obrázku 5.10 je hromádka prachových zrn (tak jak by pro výskyt zrn na površích bylo přirozenější), a i při jejím odprašování získávala jednotlivá prachová zrna náprstkovitý tvar (pokud nebyla stíněna výše ležícími zrny). Za povšimnutí také stojí, že odprašený materiál se viditelně nekumuloval v prostoru mezi zrny.



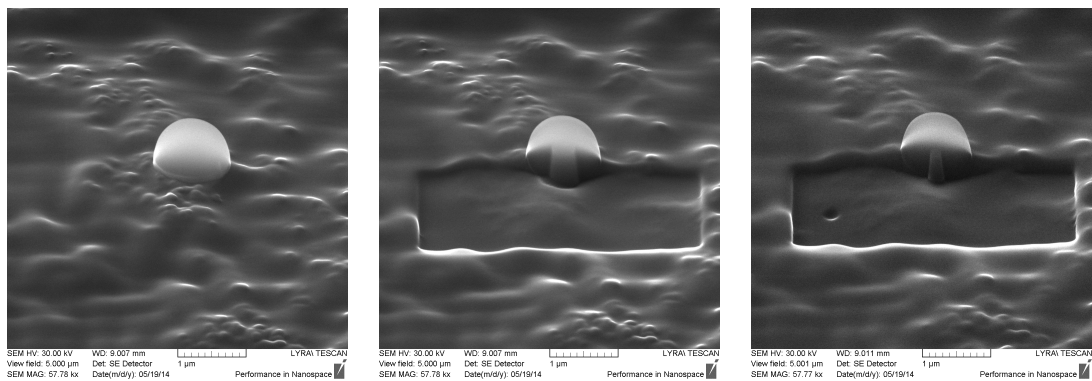
Obrázek 5.7: Časový vývoj odprašování SiO_2 zrna ležících na povrchu pomocí 30 keV Ga iontů. Odprašována je oblast o poloměru $0,8 \mu\text{m}$ proudem 146 A/m^2 . V horní části každého obrázku je uveden čas odprašování.

Pokud budeme předpokládat, že prachové zrno je komolý kužel (rotačně symetrický), jehož spodní podstavou je kulová úseč, můžeme z rozměrů změřených na snímku (obr. 5.11) získat objem zbytku prachového zrna a porovnáním jednotlivých snímků můžeme zjistit odprašený objem a z něj odhadnout odprašovací výtěžek. Ten nebyl konstantní, neboť zpočátku docházelo k rychlému odprašení boků zrna a po dosažení rovnovážného stavu se stabilizoval na konečné hodnotě (graf na obr. 5.12).

Byl studován i vliv dopadu elektronů na odprašovací výtěžek skla (obr. 5.13). Pravá polovina zrna byla vystavena svazku 30 keV elektronů a následně bylo celé zrno odprašováno galiovými ionty. Levá a pravá strana zrna se neodprašovaly viditelně odlišně, takže elektrony na odprašování neměly výrazný vliv. Odprašovací efekt elektronů mohl být potlačen napařenou vrstvičkou materiálu z uhlíkové



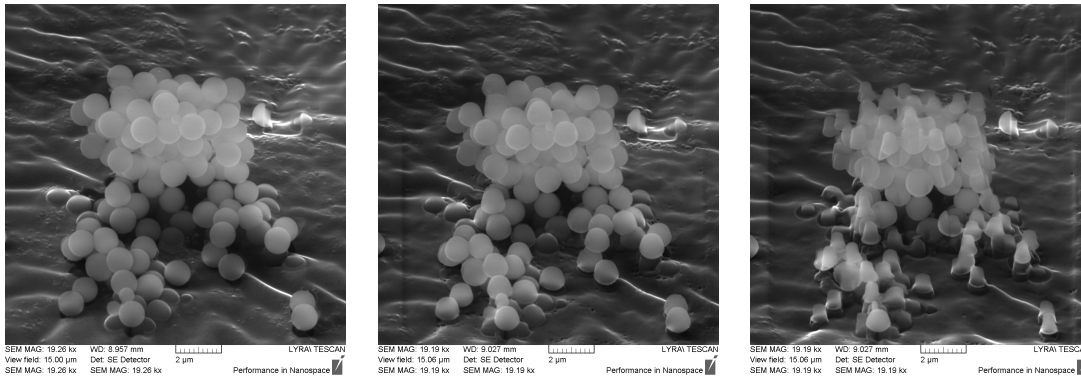
Obrázek 5.8: Časový vývoj odprašování SiO_2 zrna ležících na povrchu pomocí 30 keV Ga iontů. Odprašována je oblast o poloměru $0,6 \mu\text{m}$ proudem $0,9 \text{ A/m}^2$. V horní části každého obrázku je uveden čas odprašování.



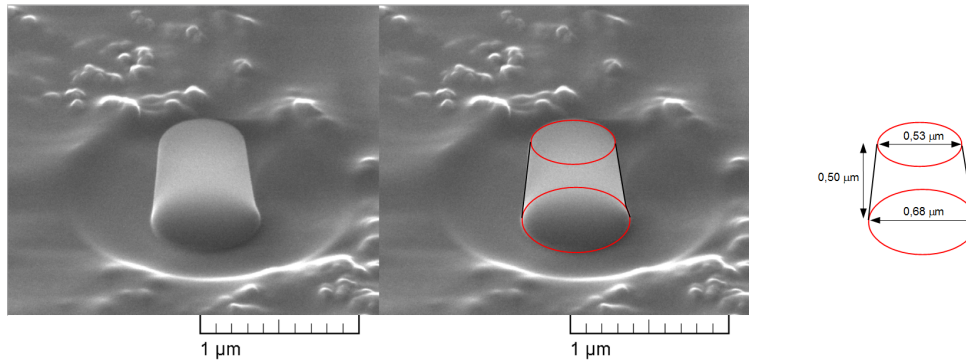
Obrázek 5.9: Půlení SiO_2 zrna ležících na povrchu pomocí 30 keV Ga iontů. Zachyceny jsou různé fáze odprašování, je zřetelně vidět čelní pohled na tvar komolého kužele, který odprašované zrno běžně nabývá.

pásky, případně mohl být skryt v přesnosti pozorování zrna na obrázku z mikroskopu.

Oba experimenty (odprašování v elektrodynamické pasti i odprašování ležícího zrna) byly publikovány v příložené práci [99] ???. Jedním z důležitých závěrů je vliv elektronů na odprašovací výtěžek, které k němu zřejmě přispívají narušováním vazeb v SiO_2 . Zejména v kosmickém prostředí nabývá tento efekt na významu, neboť tamní prachová zrna jsou vystavena dopadu slunečního větru sestávajícího z iontů i elektronů.



Obrázek 5.10: Odprašování hromádky SiO_2 zrn ležících na povrchu pomocí 30 keV Ga iontů, odprašovaná oblast je $13 \times 15 \mu\text{m}$. Vlevo – před odprašováním (v pravé horní části jsou vidět částečně odprašovaná zrna z předchozího měření), uprostřed – po 120 s při proudu 1 A/m^2 , vpravo – po dalších 120 s při proudu $4,2 \text{ A/m}^2$.

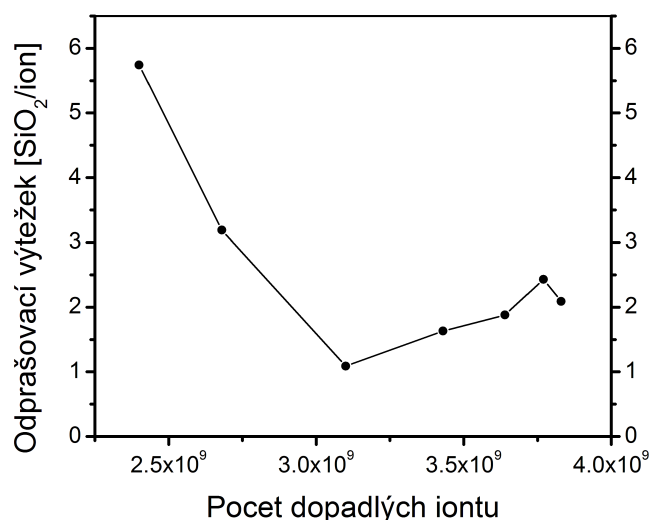


Obrázek 5.11: Měření rozměrů prachového zrna (SiO_2) při odprašování 30 keV Ga ionty. Vlevo – originální snímek pořízený SEM, uprostřed – se zakresleným komolým kuželem, vpravo – výsledné rozměry.

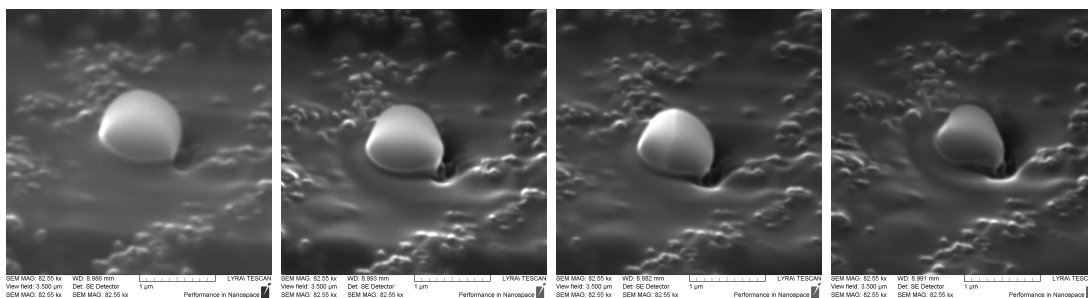
5.3 Odprašování zrn z dalších materiálů

Pro porovnání byly stejným způsobem jako v předchozím případě odprašovány zrna z amorfního uhlíku, hliníku, zlata a melamin-formaldehydu. Poslední z této čtveřice se ve vesmíru nevyskytuje, ale je hojně využíván téměř při všech pokusech s plazmovými krystaly [108, 109, 110]. Melamin-formaldehydová zrna jsou používána i jako izolovaná sonda ke studiu elektrických polí v plazmatu [111], [112], fluktuací náboje ve stínící vrstvě (plasma sheath) [113] či tlaku záření a plynu [114]. Proto jsme se na ně zaměřili důkladněji.

Tvary, které jednotlivá zrna nabývají při odprašování galiovými ionty, jsou vyobrazeny na obrázku 5.14. U všech zrn se projevuje tendence k tvorbě kolmých stěn. Uhlíkové zrno (obr. 5.14 – a) má při odprašování očekávatelný tvar. U hliníkového (obr. 5.14 – b) a zlatého zrna (obr. 5.14 – c) se projevuje jejich vnitřní struktura daná způsobem jejich výroby. Obzvláště je to patrné u zlatého zrna, které spíše než homogenní kulaté zrno připomíná drúzu menší kulatějších částic, čemuž odpovídá i komplikovanější tvar při odprašování. Melamin vykazuje některé rysy podobné skleněným zrnům (tvar komolého kužele), ale mimo to dochází i ke vzniku prohlubní a kanálků vedoucích skrz celé zrno (obr. 5.14 – d).



Obrázek 5.12: Graf závislosti odprašovacího výtěžku na množství dopadlých iontů pro 1 μm SiO_2 zrno odprašované 30 keV Ga ionty (proud 146 A/m^2 – 293 pA dopadající na kruh o poloměru 0,8 μm) ležící na povrchu.

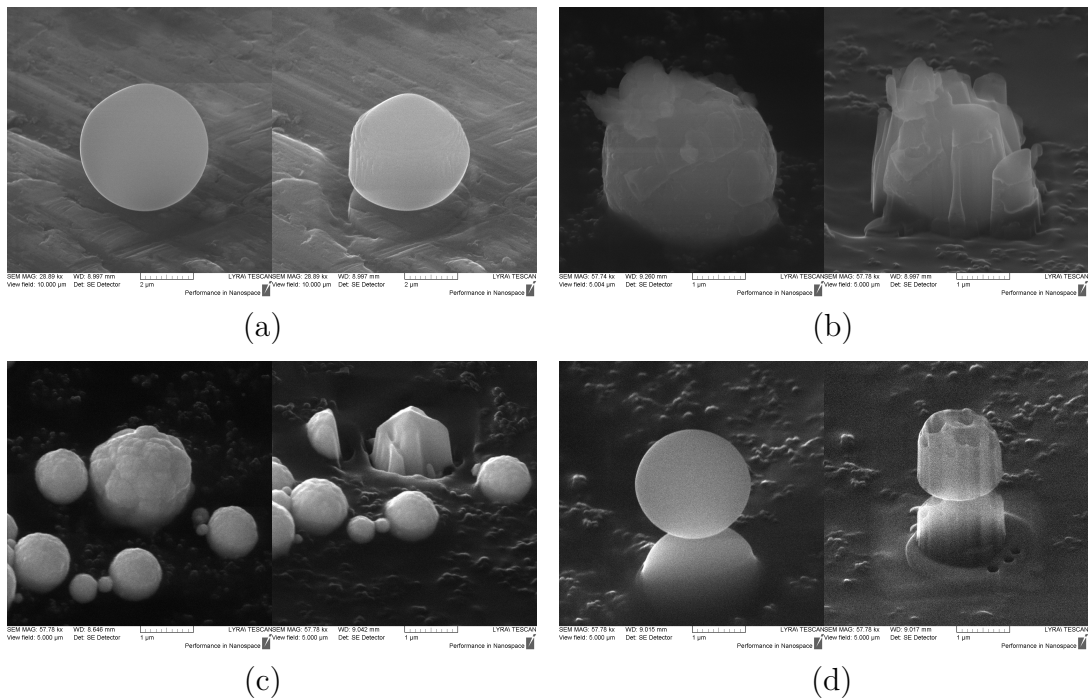


Obrázek 5.13: Vliv elektronů na odprašování SiO_2 zrna. Nejvíce vlevo – pravá polovina zrna byla vystavena 57 s svazku 30 keV elektronů, následně bylo celé zrno odprašováno 30 keV Ga ionty (0,51 A/m^2), poté byla pravá strana zrna opět vystavena elektronům (dalších 333 s) – je již jasně vidět rozhraní elektronového bombardování, kdy na bombardovanou část zřejmě docházelo k napařování uhlíku z uhlíkové pásky. Nejvíce vpravo je zrno po dalších 60 s odprašování ionty.

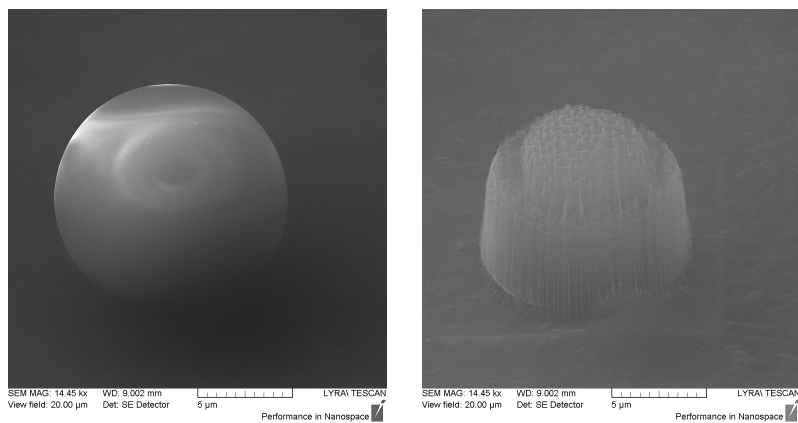
Svědčí to o značné nehomogenitě materiálu.

Při použití větších melaminových zrn (10 μm) dochází ke vzniku ještě podivnějšího tvaru, kdy střed zrna je odolnější a při odprašování zůstává déle (obr. 5.15). Není to jediná zvláštnost v chování zrn z tohoto materiálu. Již dřívější práce upozorňují na některé zvláštnosti těchto zrn, které ovlivňují měření. Zejména je to zmenšující se hmotnost ve vakuu i v plazmatu [25, 115, 116] a změny ve velikosti [117]. Pro experimentátory však jejich výhoda spočívá v tom, že se umí vyrábět sférické s velkým rozsahem velikostí, s dobrou monodisperzitou, mají příhodnou hustotu a dobré optické vlastnosti. Nicméně vzhledem ke zmíněným nevýhodám je jejich používání v plazmatických experimentech vždy třeba uvážit. Náměty pro použití tohoto materiálu jsou v příložené práci [118] ??, kde kromě výše uvedeného ještě podrobněji rozebíráme zmenšování poloměru melaminového zrna způsobenou elektronovým bombardem a výstupní elektronovou práci z to-

hoto materiálu (kterou bylo možné získat až pomocí fotoemise, protože výsledky získané pomocí elektronového ostřelování nevedly k jednoznačným závěrům).



Obrázek 5.14: Odprašování zrn ležících na povrchu pomocí 30 keV Ga iontů. (a) amorfni uhlík ($8,8 \text{ A/m}^2$, 180 s), (b) hliník ($13,7 \text{ A/m}^2$, 70 s), (c) zlato ($35,0 \text{ A/m}^2$, 20 s), (d) melamin-formaldehyd ($24,3 \text{ A/m}^2$, 10 s). Levý obrázek je před odprašováním, pravý po něm.



Obrázek 5.15: Odprašování $10 \mu\text{m}$ melaminového zrna pomocí 30 keV Ga iontů. Vlevo – před odprašováním, vpravo – po 540 s odprašování proudem $1,0 \text{ A/m}^2$.

Závěr

Prach, tedy částičky hmoty o rozměrech řádově mikrony, je z kosmického hlediska značně rozšířenou formou látky, která stála na počátku formování planet a dalších větších kosmických těles. Ve svém prostředí je vystaven mnoha procesům, které vedou k jeho nabíjení, vybíjení, vzniku a zániku. Významným procesem vedoucím k zániku prachových zrn je odprašování způsobené dopadem energetických částic. Klíčovým parametrem odprašování je odprašovací výtěžek, jenž je dán materiálem zrna, jeho tvarem (úhlem dopadu), druhem a energií dopadajících částic. Vzhledem k charakteru prachových zrn (malá velikost i hmotnost) je obtížné získat hodnotu odprašovacího výtěžku experimentálně, a proto byla často odvozována teoreticky z její vypočítané úhlové závislosti pro daný materiál a dopadající ionty.

Tato práce tak představuje jedno z mála přímých měření odprašovacího výtěžku pro kulová zrna ze skla (SiO_2), která je možno považovat za nejjednoduššího zástupce jednoho druhu kosmických zrn (silikáty) a zároveň zástupce izolantů (jejichž odprašovací výtěžky je také obtížné měřit z důvodu jejich nabíjení).

Odprašovací výtěžek pro skleněná zrna o průměru 1 mikron, publikovaný v příložené práci [99] ??, byl $Y_m = (90, 2 \pm 0, 3)$ amu/ion (což odpovídá výtěžku $Y = (1, 501 \pm 0, 004)$ SiO_2 molekul/ion) pro argonové ionty o energii 2 keV při povrchovém potenciálu 10 V drženém bombardováním elektrony o energii 1 keV. Při povrchovém potenciálu 800 V (náboj byl částečně kompenzován pomocí 1 keV svazku elektronů) při energii iontů 2,2 keV byl $Y_m = (78 \pm 11)$ amu/ion ($Y = (1, 3 \pm 0, 2)$ SiO_2 molekul/ion) a pro povrchový potenciál 1,3 kV bez dopadajících elektronů $Y_m = (59 \pm 5)$ amu/ion ($Y_m = (0, 98 \pm 0, 09)$ SiO_2 molekul/ion).

Zvýšení odprašovacího výtěžku nabitých nevodivých zrn díky elektrickému poli se nepotvrdilo, ale projevil se vliv dopadajících elektronů, které zvyšovaly odprašovací výtěžek.

Odprašování skleněných zrn ležících na povrchu vede ke změně tvaru zrna, které v případě skleněných zrn nabývá tvaru komolého kužele. Odprašování je tedy nerovnoměrné a zpočátku rychlejší, než se dosáhne rovnovážného tvaru. Tento tvar není možné vysvětlit pomocí úhlové závislosti odprašovacího výtěžku běžně uvažované (získané pomocí programu TRIM). Pro uhlíková zrna tento efekt nenastává a pro zrna z melamin-formaldehydu, běžně používaná v komunitě prachového plazmatu, dochází k nehomogennímu odprašování a vznikají tak výrazné díry a průstřely zrn jak je uvedeno také v [118] ??.

Při dopadu iontů na prachové zrno se tyto ionty zabudovávají pod povrch (implantační profil byl počítán modelem [101] ??), kde následně mohou difundovat jak do hloubi zrna, tak k jeho povrchu. Tam může docházet k jejich uvolnění, ale to už je zrno na jiném místě v prostoru a implantované ionty jsou uvolňovány převážně ve formě neutrálních atomů. Tento proces byl studován v příložené

práci [8] ?? i experimentálně, kdy se podařilo pozorovat změnu hmotnosti zrna způsobenou únikem těchto difundujících iontů. Další experimenty ale narazily na nemožnost určení teploty zrna, která je klíčovým parametrem ovlivňujícím rychlost difúze.

I přes obtížnost a časovou náročnost provedených měření by bylo zajímavé zopakovat tato měření pro další materiály a získat tak porovnání jejich odprašovací výtěžků. Z hlediska kosmických dějů by bylo zajímavé změřit odprašovací výtěžek pro vodík a helium, jakožto hlavní komponenty slunečního větru. Nicméně jejich očekávané odprašovací výtěžky jsou tak nízké, že jejich změření na současné aparatuře je nereálné. Pro helium byl učiněn pokus o toto měření, ale během mnohahodinového odprašování se nepodařilo získat konzistentní výsledky. Dalším směrem budoucích výzkumů může být měření odprašovacích výtěžků simulantů kosmického prachu, protože mohou naznačit reálný průběh odprašování v kosmickém prostředí. Nicméně velká obtíž bude spočívat v nepravidelném tvaru těchto zrn a z toho plynoucí nelehké interpretaci případných naměřených dat. Pří- nejmenším zajímavé by ale bylo porovnání, zda bude odprašovací výtěžek během odprašování konstantní jako v případě kulatých zrn (lineární závislost hmotnosti na počtu dopadlých iontů), nebo zda se bude měnit tak, jak se bude odprašované zrno zakulacovat (a závislost hmotnosti na počtu dopadlých iontů tak bude nelineární, případně se během odprašování bude k lineární přibližovat).

Při modelování probíhajících procesů, by bylo zajímavé spojit program simulující interakce iontů s látkou (např. zde použitý TRIM, či lépe SDTrimSP, který je pro studium odprašování vhodnější) s technikou CSG (constructive solid geometry). Tu využívají mnohé systémy pro počítačovou grafiku, CAD, ale i například program SIMION modelující elektrická pole, pro vytváření složitých tvarů pomocí jednoduchých objektů (krychle, koule, kvádry, ...). Umožnilo by to poměrně snadno zadávat libovolné tvary prachových zrn a lépe tak počítat jejich interakci s ionty. CSG blok by dodal geometrii zrna a okrajové podmínky, SD-TrimSP by řešil pohyb iontů a atomů v rámci této geometrie. Mohlo by také být možné do takového programu zahrnout i změnu tvaru způsobenou odprašováním, neboť se dá sledovat, odkud vyletují odprašené atomy.

V rámci naší práce byly získány poměrně ojedinělé výsledky – odprašovací výtěžky pro jednotlivá prachová zrna. Byla vyvinuta technika určení počtu dopadajících iontů a zjištěn vliv dopadu elektronů na odprašovací výtěžek (v případě SiO_2 je větší než případný vliv povrchového potenciálu). Určen byl také tvar prachového zrna ležícího na povrchu, je-li odprašováno svazkem iontů. Uděláno tedy bylo mnohé, ale, jak naznačeno výše, další ještě zůstává vykonati, což může být inspirací nově přichozím.

Seznam použité literatury

- [1] ANDERS, E., a ZINNER, E. Interstellar Grains in Primitive Meteorites: Diamond, Silicon Carbide, and Graphite. *Meteorit. Planet. Sci.*, 1993, **28** (4), 490–514. DOI 10.1111/j.1945-5100.1993.tb00274.x
- [2] BROWNLEE, D. E. Cosmic Dust: Collection and Research. *Ann. Rev. Earth Planet. Sci.*, 1985, **13** (4), 147–173. DOI 10.1146/annurev.ea.13.050185.001051
- [3] AKIMKIN, V. V. A Possible Mechanism for Overcoming the Electrostatic Barrier Against Dust Growth in Protoplanetary Disks. *Astron. Rep.*, 2015, **59** (8), 747–761. DOI 10.1134/S1063772915070021
- [4] GRÜN, E., HORANYI, M., a STERNOVSKY, Z. The Lunar Dust Environment. *Planet. Space Sci.*, 1993, **59**, 1672–1680. DOI 10.1016/j.pss.2011.04.005
- [5] CALLE, C. I., MAZUMDER, M. K., IMMER, C. D., BUHLER, C. R., CLEMENTS, J. S., LUNDEEN, P., CHEN, A., a MANTOVANI, J. G. Controlled Particle Removal from Surfaces by Electrodynamical Methods for Terrestrial, Lunar, and Martian Environmental Conditions. *J. Phys.: Conf. Ser.*, 2009, **142** (1), 012073. DOI 10.1088/1742-6596/142/1/012073
- [6] CLARK, P. E., CURTIS, S. A., MINETTO, F., CHEUNG, C. Y., KELLER, J. F., MOORE, M., a CALLE, C. I. SPARCLE: Electrostatic Tool for Lunar Dust Control. *AIP Conf. Proc.*, 2009, **1103** (1), 608–614. DOI 10.1063/1.3115572
- [7] BARLOW, M. J. The Destruction and Growth of Dust Grains in Interstellar Space – I. Destruction by Sputtering. *Mon. Not. R. Astr. Soc.*, 1978, **189** (3), 367–395. DOI 10.1093/mnras/183.3.367
- [8] BERÁNEK, M., VYŠINKA, M., PAVLŮ, J., RICHTEROVÁ, I., NĚMEČEK, Z., a ŠAFRÁNKOVÁ, J. Dust as a Gas Carrier. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2010, **38** (4), 886–891. DOI 10.1109/TPS.2009.2038219
- [9] WIESLI, R. A., BEARD, B. L., TAYLOR, L. A., a JOHNSON, C. M. Space Weathering Processes on Airless Bodies: Fe Isotope Fractionation in the Lunar Regolith. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 2003, **216** (4), 457–465. DOI 10.1016/S0012-821X(03)00552-1
- [10] NOBLE, S. K., KELLER, L. P., a PIETERS, C. M. Evidence of Space Weathering in Regolith Breccias I: Lunar Regolith Breccias. *Meteorit. Planet. Sci.*, 2005, **40** (3), 397–408. DOI 10.1111/j.1945-5100.2005.tb00390.x

- [11] NOBLE, S. K., KELLER, L. P., a PIETERS, C. M. Evidence of Space Weathering in Regolith Breccias II: Asteriodal Regolith Breccias. *Meteorit. Planet. Sci.*, 2011, **45** (12), 2007–2015. DOI 10.1111/j.1945-5100.2010.01151.x
- [12] WEHNER, G. Influence of the Angle of Incidence on Sputtering Yields. *J. Appl. Phys.*, 1959, **30**, 1762–1765. DOI 10.1063/1.1735051
- [13] Lunar and Planetary Institute. <http://www.lpi.usra.edu/lunar/samples/>
- [14] Astromaterials Acquisition and Curation Office, NASA. <https://curator.jsc.nasa.gov/lunar/>
- [15] ABBAS, M. M., TANKOSIC, D., CRAVEN, P. D., LECLAIR, A. C., a SPANN, J. F. Lunar Dust Grain Charging by Electron Impact: Complex Role of Secondary Electron Emission in Space Environments. *Astrophys. J.*, 2010, **718** (2), 795–809. DOI 10.1088/0004-637X/718/2/795
- [16] BROWNLEE, D. The Stardust Mission: Analyzing Samples from the Edge of the Solar System. *Annu. Rev. Earth Planet. Sci.*, 2014, **42**, 179–205. DOI 10.1146/annurev-earth-050212-124203
- [17] DELLA CORTE, V., RIETMEIJER, F. J. M., ROTUNDI, A., a FERRARI, M. Introducing a New Stratospheric Dust-Collecting System with Potential Use for Upper Atmospheric Microbiology Investigations. *Astrobiology*, 2014, **14**(8), 694–705. DOI 10.1089/ast.2014.1167
- [18] LARSEN, Jon. *Search of Stardust: Amazing Micrometeorites and Their Terrestrial Imposters*. 1. vydání., 152 str., Minneapolis, Minnesota: Voyageur Press Inc, 2017. ISBN 978-0-7603-5264-9.
- [19] HEYMANN, D., a FLUIT, F. M. Sputtering by 20-keV Ar⁺ Ions at Normal Incidence on Meteorites. *J. Geophys. Res.*, 1962, **67** (7), 2921–2924. DOI 10.1029/JZ067i007p02921
- [20] TAYLOR, L. A., PIETERS, C. M., a BRITT, D. Evaluations of Lunar Regolith Simulants. *Planet. Space Sci.*, 2016, **126** (7), 1–7. DOI 10.1016/j.pss.2016.04.005
- [21] ALLEN, C. C., JAGER, K. M., MORRIS, R. V., LINDSTROM, D. J., LINDSTROM, M. M., a LOCKWOOD, J. P. Martian Soil Simulant Available for Scientific, Educational Study. *EOS*, 1998, **79** (34), 405–409. DOI 10.1029/98EO00309
- [22] DUKES, C. A., BARAGIOLA, R. A., a MCFADDEN, L. A. Surface Modification of Olivine by H⁺ and He⁺ Bombardment. *J. Geophys. Res.*, 1999, **104** (E1), 1865–1872. DOI 10.1029/98JE02820
- [23] CANTANDO, E. D., DUKES, C. A., LOEFFLER, M. J., a BARAGIOLA, R. A. Aqueous depletion of Mg from olivine surfaces enhanced by ion irradiation. *J. Geophys. Res.*, 2008, **113** (E0911), 6 str. DOI 10.1029/2008JE003119

- [24] BARAGIOLA, R. A., VIDAL, R. A., SVENDSEN, W., SCHOU, J., SCHI, M., BAHR, D. A., a ATTEBERRY, C. L. Sputtering of Watter Ice. *Nucl. Instr. and Meth. in Phys. Res. B*, 2003, **209**, 294–303. DOI 10.1016/S0168-583X(02)02052-9
- [25] PAVLŮ, J., VELYHAN, A., RICHTEROVÁ, I., NĚMEČEK, Z., ŠAFRÁNKOVÁ, J., ČERMÁK, I., a ŽILAVÝ, P. Mass-loss rate for MF resin microspheres. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2004, **32**(2), 704–708. DOI 10.1109/TPS.2004.826120
- [26] MARSHALL, J., RICHARD, D., a DAVIS, S. Electrical Stress and Strain in Lunar Regolith Simulants. *Planet. Space Sci.*, 2011, **59**, 1744–1748. DOI 10.1016/j.pss.2010.11.005
- [27] MEYER, F. W., HARRIS, P. R., TAYLOR, C. N., MEYER III, H. M., BARGHOUTY, A. F., a ADAMS, J. H. Sputtering of Lunar Regolith Simulant by Protons and Singly and Multicharged Ar Ions at Solar Wind Energies. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 2011, **269**, 1316–1320. DOI 10.1016/j.nimb.2010.11.091
- [28] HAPKE, B., a CASSIDY, W. Is the Moon Really as Smooth as a Billiard Ball? Remarks Concerning Recent Models of Sputtering-Fractionation on the Lunar Surface. *Geophys. Res. Lett.*, 1978, **5** (4), 297–300. DOI 10.1029/GL005i004p00297
- [29] CASSIDY, T. A., a JOHNSON, R. E. Monte Carlo model of sputtering and other ejection processes within a regolith. *Icarus*, 2005, **176**, 499–507. DOI 10.1016/j.icarus.2005.02.013
- [30] VELYHAN, A., ŽILAVÝ, P., PAVLŮ, J., ŠAFRÁNKOVÁ, J., a NĚMEČEK, Z. Ion Beam Effects on Dust Grains. *Vacuum*, 2004, **76**, 447–455. DOI 10.1016/j.vacuum.2004.02.008
- [31] PAVLŮ, J., VELYHAN, A., RICHTEROVÁ, I., ŠAFRÁNKOVÁ, J., NĚMEČEK, Z., WILD, J., a JEŘÁB, M. Ion Beam Effects on Dust Grains: 2 – Influence of Charging History. *Vacuum*, 2006, **80**, 542–547. DOI 10.1016/j.vacuum.2005.08.027
- [32] DRAINE, B. T. a SALPETER, E. E. On the physics of dust grains in hot gas. *Astrophys. J.*, 1979, **231**, 77–94. DOI 10.1086/157165
- [33] DRAINE, B. T. a SALPETER, E. E. Destruction mechanisms for interstellar dust. *Astrophys. J.*, 1979, **231**, 438–455. DOI 10.1086/157206
- [34] WOITKE, G. et al. Dust Destruction in Transition Region between Stellar Wind and Interstellar Medium. *Astron. Astrophys.*, 1993, **274**, 451–464.
- [35] BIANCHI, S. a FERRARA, A. Intergalactic medium metal enrichment through dust sputtering. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2005, **358**(2), 379–396. DOI 10.1111/j.1365-2966.2005.08762.x
- [36] WEHNER, G. K., KENKNIGHT, C., a ROSENBERG, D. L. Sputtering rates under solar-wind bombardment. *Planet. Space Sci.*, 1963, **11**, 885–895. DOI 10.1016/0032-0633(63)90120-X

- [37] ONAKA, T., a KAMIJO, F. Destruction of Interstellar Grains by Sputtering. *Astron. Astrophys.*, 1978, **64** (1-2), 53–60.
- [38] JURAC, S., JOHNSON, R. E., a DONN, B. Monte Carlo Calculations of the Sputtering of Grains: Enhanced Sputtering of Small Grains. *Astrophys. J.*, 1998, **503**, 247–252. DOI 10.1086/305994
- [39] GRAY, M. D., a EDMUNDS, M. G. Modification of Dust-grain Structure by Sputtering. *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, 2004, **349**, 491–502. DOI 10.1111/j.1365-2966.2004.07502.x
- [40] VERCHOVSKY, A. B., WRIGHT, I. P., FISENKO, A. V., a PILLINGER, C. T. A Numerical Model of Ion Implantation into Presolar Grains. *Nucl. Phys. A*, 2001, **688** (1-2), 106–109. DOI 10.1016/S0375-9474(01)00678-9
- [41] VERCHOVSKY, A. B., WRIGHT, I. P., a PILLINGER, C. T. Ion Implantation into Presolar Grains: A Theoretical Model. *Publ. Astron. Soc. Aust.*, 2003, **20** (4), 329–336. DOI 10.1071/AS03027
- [42] VERCHOVSKY, A. B., WRIGHT, I. P., a PILLINGER, C. T. Astrophysical Significance of Asymptotic Giant Branch Stellar Wind Energies Recorded in Meteoritic SiC Grains. *Astrophys. J.*, 2004, **607** (1), 611–619. DOI 10.1086/383230
- [43] BRINGA, E. M., a JOHNSON, R. E. Sputtering of Nano-grains by Energetic Ions. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 2002, **193** (1-4), 365–370. DOI 10.1016/S0168-583X(02)00806-6
- [44] HAPKE, B. Space weathering from Mercury to the asteroid belt. *JGR*, 2001, **105** (E5), 10037–10073. DOI 10.1029/2000JE001338
- [45] HAPKE, B. On the Sputter Alteration of Regoliths of Outer Solar System Bodies. *Icarus*, 1986, **66**, 270–279. DOI 10.1016/0019-1035(86)90157-0
- [46] BIBRING, J. P., LANGEVIN, Y., MAURETTE, M., a MEUNIER, R. Ion Implantation Effects in "Cosmic" Dust Grains. *Earth Planet. Sci. Lett.*, 1974, **22**, 205–214. DOI 10.1016/0012-821X(74)90083-1
- [47] DEMYK, K., D’HENDECOURT, L., JONES, A., LEROUX, H., CARREZ, Ph., a CORDIER, P. Laboratory Studies of the Ion-irradiated of Dust Analogs: Application to the Evolution of Interstellar Silicates. In: WITT, A. N., CLAYTON, G. C., a DRAINE, B. T. (Eds.) *Astrophysics of Dust, ASP Conference Series*, vol. **309**, San Francisco, California: Astronomical Society of the Pacific, 2004, pp. 649–664.
- [48] HAPKE, B. Darkening of Silicate Rock Powders by Solar Wind Sputtering. *The Moon*, 1973, **7** (3-4), 342–355. DOI 10.1007/BF00564639
- [49] BIBRING, J. P., a ROCARD, F. Ion Implantation Phenomena in Space. *Radiation Effects*, 1982, **65**, 399–405. DOI 10.1080/00337578208216835
- [50] BIBRING, J. P., a ROCARD, F. Solar wind as the origin of rapid reddening of asteroid surfaces. *Nature*, 2009, **458**, 993–995. DOI 10.1038/nature07956

- [51] PEPIN, R. O., BECKER, R. H., a SCHULTTER, D. J. Irradiation records in regolith materials. I: isotopic compositions of solar-wind neon and argon in single lunar mineral grains. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, **63** (13/14), 2145–2162. DOI 10.1016/S0016-7037(99)00002-2
- [52] PEPIN, R. O., BECKER, R. H., a SCHULTTER, D. J. Irradiation records in regolith materials, II: Solar wind and solar energetic particle components in helium, neon, and argon extracted from single lunar mineral grains and from the Kapoeta howardite by stepwise pulse heating. *Geochim. Cosmochim. Acta*, 1999, **66** (16), 2929–2958. DOI 10.1016/S0016-7037(02)00853-0
- [53] STRAZZULLA, G., DOTTO, E., BINZEL, R., BRUNETTO, R., BARUCCI, M. A., BLANCO, A., a OROFINO, V. Spectral alteration of the Meteorite Epinal (H5) induced by heavy ion irradiation: a simulation of space weathering effects on near-Earth asteroids. *Icarus*, 2005, **174**, 1–35. DOI 10.1016/j.icarus.2004.09.013
- [54] BRADLEY, J. P. Chemically Anomalous, Preaccretionally Irradiated Grains in Interplanetary Dust from Comets. *Science*, 1994, **265** (5174), 925–929. DOI 10.1126/science.265.5174.925
- [55] BRADLEY, J. P., ISHII, H. A., GILLIS-DAVIS, J. J., CISTON, J., NIELSEN, M. H., BECHTEL, H. A., a MARTIN, M. C. Detection of solar wind-produced water in irradiated rims on silicate minerals. *PNAS*, 2014, **111** (5), 1732–1735. DOI 10.1073/pnas.1320115111
- [56] WURZ, P., ROHNER, U., WHITBY, J. A., KOLB, C., LAMMER, H., DROBNIKAR, P., a MARTÍN-FERNÁNDEZ, J. A. The Lunar Exosphere: The Sputtering Contribution. *ICARUS*, 2007, **191**, 486–496. DOI 10.1016/j.icarus.2007.04.034
- [57] WURZ, P., WHITBY, J. A., ROHNER, U., MARTÍN-FERNÁNDEZ, J. A., LAMMER, H., a KOLB, C. Self-consistent modelling of Mercury’s exosphere by sputtering, micro-meteorite impact and photon-stimulated desorption. *Planet. Space Sci.*, 2010, **58**, 1599–1616. DOI 10.1016/j.pss.2010.08.003
- [58] STERN, A. S. The lunar atmosphere: History, status, current problems, and context. *Review of Geophysics.*, 1999, **37** (4), 453–491. DOI 10.1029/1999RG900005
- [59] BENNA, M., MAHAFFY, P. R., HALEKAS, J. S., ELPIC, R. C., a DELORY, G. T. Variability of helium, neon, and argon in the lunar exosphere as observed by the LADEE NMS instrument. *Geophys. Res. Lett.*, 2015, **41** (10), 3723–3729. DOI 10.1002/2015GL064120
- [60] MCCLINTOCK, W. E., VERVACK JR., R. J., BRADLEY, E. T., KILLEN, R. M., MOUAWAD, N., SPRAGUE, A. L., BURGER, M. H., SOLOMON, S. C., a IZENBERG, N. R. MESSENGER Observations of Mercury’s Exosphere: Detection of Magnesium and Distribution of Constituents. *Science*, 2009, **324** (5927), 610–613. DOI 10.1126/science.1172525

- [61] WHETTEN, T. J., ARMSTEAD, A. A., GRZYBOWSKI, T. A., a RUOFF, A. L. Etching of Diamond with Argon and Oxygen Ion Beams. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1984, **2**, 477–480. DOI 10.1116/1.572598
- [62] WETZ, P., KRÜGER, W., SCHARMANN, A., a SCHARTNER, K. H. The Angular Dependence of the Sputtering Yield of Ag, Ni and Fe by High Energy Noble Gas Ions. *Radiation Measurements*, 1997, **27** (4), 569–574. DOI 10.1016/S1350-4487(97)00017-6
- [63] BLANK, P., a WITTMACK, K. Energy and Fluence Dependence of the Sputtering Yield of Silicon Bombarded with Argon and Xenon. *J. Appl. Phys.*, 1979, **50** (3), 1519–1528. DOI 10.1063/1.326140
- [64] SIGMUND, P. Theory of Sputtering. I. Sputtering Yield of Amorphous and Polycrystalline Targets. *Phys. Rev.*, 1969, **184** (2), 383–416. DOI 10.1103/PhysRev.184.383
- [65] ECKSTEIN, W. Sputtering Yields. In: BEHRISCH, R. a ECKSTEIN, W. (Eds.) *Sputtering by Particle Bombardment. Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies.*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, pp. 33–189. ISBN 978-3-540-44502-9.
- [66] MIZUTANI, T. Preferential Sputtering of Oxygen from SiO₂ by Low-Energy Ion Beam and Neutral Beam Bombardment. *Jpn. J. Appl. Phys.*, 1991, **30** (4A), L628–L631. DOI 10.1016/0168-583X(87)90057-7
- [67] MIZUTANI, T. Compositional and Structural Modifications of Amorphous SiO₂ by Low-Energy Ion and Neutral Beam Irradiation. *J. Non-Cryst. Solids*, 1995, **181** (1-2), 123–134. DOI 10.1016/0022-3093(94)00499-4
- [68] AUMAYR, F., a WINTER, H. Potential Sputtering. *Phil. Trans. R. Soc. Lond. A*, 2004, **362**, 77–102. DOI 10.1098/rsta.2003.1300
- [69] SPORN, M., LIBISELLER, G., NEIDHART, T., SCHMID, M., AUMAYR, F., WINTER, H., VARGA, P., GREYER, M., NIEMANN, D., a STOLTERFOHT, N. Potential Sputtering of Clean SiO₂ by Slow Highly Charged Ions. *Phys. Rev. Lett.*, 1997, **79** (5), 945–948. DOI 10.1103/PhysRevLett.79.945
- [70] SHEMANSKY, D. E. The Role of Solar Wind Heavy Ions in the Space Environment. *AIP Conf. Proc.*, 2003, **663**, 683–695. DOI 10.1063/1.1581610
- [71] PAPAARAZZO, E., FANFONI, M., QUARESIMA, C., a PERFETTI, P. Evidence of SiO_x Suboxides at Ar Ion Etched Silica Surfaces. *J. Vac. Sci. Technol. A*, 1990, **8** (3), 2231–2235. DOI 10.1116/1.576741
- [72] COLLART, E., a VISSER, R. J. Deep Surface Damage of SiO₂ by Sputtering with Low Energy Ar-Ions. *Surf. Sci.*, 1989, **218** (2-3), L497–L504. DOI 10.1016/0039-6028(89)90151-9
- [73] ALKEMADE, P. F. A. Propulsion of Ripples on Glass by Ion Bombardment. *Phys. Rev. Lett.*, 2006, **96**, 107602. DOI 10.1103/PhysRevLett.96.107602

- [74] MCCRAKEN, G. M. Deep The Behaviour of Surfaces under Ion Bombardment. *Rep. Prog. Phys.*, 1975, **38**, 241–327. DOI 10.1088/0034-4885/38/2/002
- [75] YAMAMURA, Y., a TAKEUCHI, W. Monocrystal Sputtering by the Computer Simulation Code ACOCT. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 1987, **29** (3), 461–470. DOI 10.1016/0168-583X(87)90057-7
- [76] ROBINSON, M. T., a TORRENS, I. M. Computer Simulation of Atomic-displacement Cascades in Solids in the Binary-collision Approximation. *Phys. Rev. B*, 1974, **9** (12), 5008–5024. DOI 10.1103/PhysRevB.9.5008
- [77] KAROLEWSKI, M. A. Kalypso: a Software Package for Molecular Dynamic Simulation of Atomic Collision at Surfaces. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 2005, **230** (1-4), 402–405. DOI 10.1016/j.nimb.2004.12.074
- [78] YAMAMURA, Y., a MIZUNO, Y. Low-energy Sputterings with the Monte Carlo Program ACAT. *IPPJ-AM-40*, Institute of Plasma Physics, Nagoya University, 1985. <http://dpc.nifs.ac.jp/IPPJ-AM/IPPJ-AM-list.html>
- [79] ECKSTEIN, W., DOHMEN, R., MUTZKE, A., a SCHNEIDER, R. SDTrimSP: A Monte-Carlo Code for Calculating Collision Phenomena in Randomized Targets. *IPP 12/3*, Garching: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik 2007, <http://hdl.handle.net/11858/00-001M-0000-0027-04E8-F>
- [80] MUTZKE, A., SCHNEIDER, R., ECKSTEIN, W., a DOHMEN, R. SDTrimSP Version 5.00. *IPP 12/8*, Garching: Max-Planck-Institut für Plasmaphysik 2011, <http://hdl.handle.net/11858/00-001M-0000-0026-EAF9-A>
- [81] BIRSACK, J. P., a HAGGMARK, L. G. A Monte Carlo Computer Simulation Program for the Transport of Energetic Ions in Amorphous Targets. *Nucl. Instr. Meth.*, 1980, **174** (1), 257–269. DOI 10.1016/0029-554X(80)90440-1
- [82] ZIEGLER, J. F. SRIM - The Stopping and Range of Ions in Matter. www.srim.org
- [83] MÖLLER, W., ECKSTEIN, W., a BIRSACK, J. P. TRIDYN - Binary Collision Simulation of Atomic Collisions and Dynamic Composition Changes in Solids. *Comp. Phys. Comm.*, 1988, **51** (3), 355–368. DOI 10.1016/0010-4655(88)90148-8
- [84] DROBNY, J., HAYES, A., CURRELI, D., a RUZIC, D. N. F-TRIDYN: A Binary Collision Approximation Code for Simulating Ion Interactions with Rough Surfaces. *Journal of Nuclear Materials*, 2017, submitted. arXiv: 1703.00315
- [85] ECKSTEIN, Wolfgang. *Computer Simulation of Ion-Solid Interaction*. 1. vydání. Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1991. ISBN-13 978-3-642-73515-8. DOI 10.1007/978-3-642-73512-4
- [86] ECKSTEIN, W., a URBASSEK, H. M. Computer Simulation of the Sputtering Process. In: BEHRISCH, R. a ECKSTEIN, W. (Eds.) *Sputtering by Particle*

Bombardment. Experiments and Computer Calculations from Threshold to MeV Energies., Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 2007, pp. 21–31. ISBN 978-3-540-44502-9.

- [87] ONDERDELINDEN, D. The Influence of Channeling on Cu Single-crystal Sputtering. *Appl. Phys. Lett.*, 1966, **8** (8), 189–190. DOI 10.1063/1.1754548
- [88] TZANEV, S. J., KARPUZOV, D. S., a KOSYACHKOV, A. A. Influence of Ion Channeling on Backscattering and Sputtering Yields of Niobium Single Crystal. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 1992, **71** (4), 381–386. DOI 10.1016/0168-583X(92)95354-T
- [89] MÖLLER, W., a ECKSTEIN, W. TRIDYN - A TRIM Simulation Code Including Dynamic Composition Changes. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 1984, **2** (1-3), 814–818. DOI 10.1016/0168-583X(84)90321-5
- [90] BIERSACK, J. P., a ECKSTEIN, W. Sputtering Studies with the Monte Carlo Program TRIM.SP. *Appl. Phys. A*, 1984, **34** (2), 355–368. DOI 10.1007/BF00614759
- [91] WITTMACK, K. Reliability of a popular simulation code for predicting sputtering yields of solids and ranges of low-energy ions. *J. Appl. Phys.*, 2004, **96** (5), 2632–2637. DOI 10.1063/1.1776318
- [92] HOFSSÄSS, H., ZHANG, K., a MUTZKE, A. Simulation of Ion Beam Sputtering with SDTrimSP, TRIDYN and SRIM. *Appl. Surf. Sci.*, 2014, **310**, 134–141. DOI 10.1016/j.apsusc.2014.03.152
- [93] SUGIYAMA, K., SCHMID, K., a JACOB, W. Sputtering of Iron, Chromium and Tungsten by Energetic Deuterium Ion Bombardment. *Nuclear Materials and Energy*, 2016, **8**, 1–7. DOI 10.1016/j.nme.2016.05.016
- [94] ČERMÁK, I. *Laboruntersuchung elektrischer Aufladung kleiner Staubteilchen*. disertační práce, Naturwissenschaftlich-Mathematischen Gesamtfakultät, Ruprecht-Karls-Universität, Heidelberg, 1994.
- [95] PAUL, W. Electromagnetic traps for charged and neutral particles. *Rev. Mod. Phys.*, 1990, **62** (3), 531–540. DOI 10.1103/RevModPhys.62.531
- [96] NĚMEČEK, Z., PAVLŮ, J., ŠAFRÁNKOVÁ, J., BERÁNEK, M., RICHTEROVÁ, I., VAVERKA, J., a MANN, I. Lunar Dust Grain Charging by Electron Impact: Dependence of the Surface Potential on the Grain Size. *Astrophys. J.*, 2011, **738** (1):14, 7 stran. DOI 10.1088/0004-637X/738/1/14
- [97] ŽILAVÝ, P., NĚMEČEK, Z., a ŠAFRÁNKOVÁ, J. Size and Density Determination of a Spherical Particle in the Dust Charging Experiment. In: ŠAFRÁNKOVÁ, J. (Eds.) *Proceedings of the 8th Annual Conference of Doctoral Students - WDS'99*, Prague, Matfyzpress, 1999, pp. 252–257. ISBN 80-85863-46-4.
- [98] JEŘÁB, M., VAVERKA, J., VYŠINKA, M., NĚMEČEK, Z., a ŠAFRÁNKOVÁ, J. Relation of Charging History to Field Ion Emission From Gold and

- Carbon Dust. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2010, **38** (4), 798–802. DOI 10.1109/TPS.2009.2036014
- [99] VYŠINKA, M., NĚMEČEK, Z., ŠAFRÁNKOVÁ, J., PAVLŮ, J., VAVERKA, J., a LAVKOVÁ, J. Sputtering of Spherical SiO₂ Samples. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2016, **44** (6), 1036–1044. DOI 10.1109/TPS.2016.2564502
- [100] IDL - Interactive Data Language.
<http://harrisgeospatial.com/ProductsandTechnology/Software/IDL.aspx>
- [101] VYŠINKA, M., VAVERKA, J., PAVLŮ, J., NĚMEČEK, Z., a ŠAFRÁNKOVÁ, J. Depth Profiles of Ions Implanted into Spherical Dust Grains—a TRIM Based Model. In: ŠAFRÁNKOVÁ, J. a PAVLŮ, J. (Eds.) *WDS'09 Proceedings of Contributed Papers: Part II - Physics of Plasmas and Ionized Media*, Prague, Matfyzpress, 2009, pp. 195–201. ISBN 978-80-7378-102-6.
- [102] WEGE, S., BAUTSCH, M., RÜBESAME, D., NIEDRIG, H., a WITTICH, T. Simulation of Ion Sputtering of Rotating Amorphous or Polycrystalline Targets. *Nucl. Instr. Meth. Phys. Res. B*, 1993, **80-81** (1), 94–97. DOI 10.1016/0168-583X(93)96083-O
- [103] PAVLŮ, J., RICHTEROVÁ, I., NĚMEČEK, Z., ŠAFRÁNKOVÁ, J., a WILD, J. The sputtering of dust grains: Aspects of experimental observations. *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2007, **35** (2), 297–302. DOI 10.1109/TPS.2007.891636
- [104] FUJITA, D., ONISHI, K., YAKABE, T., a YOSHIHARA, K. Electron Beam Effects on AES Depth Profiling of SiO₂ Thin Film on Si(001): a Factor Analysis Study. *J. Surf. Anal.*, 2006, **13** (2), 190–199.
- [105] GONZALES DE VICENTE, S. M., MORONO, A., a HODGSON, E. R. Surface Electrical Degradation for Low Mass Ion Implanted SiO₂: Dependence on Ion Mass, Energy and Dose Rate. *Fusion Engineering and Design*, 2007, **82** (15-24), 2567–2571. DOI 10.1016/j.fusengdes.2007.02.020
- [106] GONZALES, S. M., MORONO, A., a HODGSON, E. R. Surface Electrical Degradation of Helium Implanted SiO₂. *Journal of Nuclear Materials*, 2007, **367-370**, Part B, 1014–1017. DOI 10.1016/j.jnucmat.2007.03.172
- [107] SEAH, M.P. and NUNNEY, T.S. Sputtering Yields of Compounds Using Argon Ions. *J. Phys. D: Appl. Phys.*, 2010, **43**, 253001 (13 stran). DOI 10.1088/0022-3727/43/25/253001
- [108] SEURIG, G., MORFILL, G., FORTOV, V., a HOFMANN, P. Complex plasma research on ISS PKE-Nefedov, PK-3 Plus, PK-4, and impact laboratory. *Acta Astronaut.*, 2009, **65** (5-6), 651–656. DOI 10.1016/j.actaastro.2009.01.010
- [109] NEFEDOV, A., MORFILL, G., FORTOV, V., THOMAS, H., ROTHERMEL, H., HAGL, T., IVLEV, A., ZUZIC, M., KLUMOV, B., LIPAEV, A., MOLOTKOV, V., PETROV, O., GIDZENKO, Y., KRIKALEV, S., SHEPHERD, W., IVANOV, A., ROTH, M., BINNENBRUCK, H., GOREE, J., a SEMENOV, Y. PKE-Nefedov: plasma crystal experiments on the International Space Station. *New J. Phys.*, 2003, **5**, 33.1–33.10.

- [110] MORFILL, G., THOMAS, H., ANNARATONE, B., IVLEV, A., QUINN, R., NEFEDOV, A., FORTOV, V., a P.-N. TEAM, Complex plasmas under microgravity conditions: First results from PKE-Nefedov. In: BHARUTHRAM, R., HELLBERG, M. A., SHUKLA, P. K., a VERHEEST, F. (Eds.) *Dusty Plasmas in the New Millennium*, ser. *AIP Conference Proceedings*, vol. **649**, Melville, New York: American Institute of Physics, 2002, pp. 91–109.
- [111] KERSTEN, H., DEUTSCH, H., OTTE, M., SWINKELS, G., a KROESEN, G. Microdisperse particles as probes for plasma surface interaction. *Thin Solid Films*, 2000, **377-378**, 530–536. DOI 10.1016/S0040-6090(00)01439-5
- [112] HARTMANN, P., KOVÁCS, A. Z., REYES, J. C., MATTHEWS, L. S., a HYDE, T. W. Dust as probe for horizontal field distribution in low pressure gas discharges. *Plasma Sources Sci. T.*, 2014, **23** (4), 045008. DOI 10.1088/0963-0252/23/4/045008
- [113] LAND, V., DOUGLASS, A., QIAO, K., MATTHEWS, L., a HYDE, T. The effect of dust charge variation, due to ion flow and electron depletion, on dust levitation. In: NOSENKO, V. Y., SHUKLA, P. K., THOMA, M. H., a THOMAS, H. M. (Eds.) *Dusty/Complex Plasmas: Basic and Interdisciplinary Research*, ser. *AIP Conference Proceedings*, vol. **1397** (1), Melville, New York: American Institute of Physics, 2011, pp. 98–103.
- [114] LIU, B., GOREE, J., NOSENKO, V., a BOUFENDI, L. Radiation pressure and gas drag forces on a melamine-formaldehyde microsphere in a dusty plasma. *Phys. Plasmas*, 2003, **10** (1), 9–20. DOI 10.1063/1.1526701
- [115] CARSTENSEN, J., JUNG, H., GREINER, F., a PIEL, A. Mass changes of microparticles in a plasma observed by a phase-resolved resonance method. *Phys. Plasmas*, 2011, **18** (3), 033701. DOI 10.1063/1.3556677
- [116] KILLER, C., MULSOW, M., a MELZER, A. Spatio-temporal evolution of the dust particle size distribution in dusty argon rf plasmas. *Plasma Sources Sci. T.*, 2015, **24** (2), 025029. DOI 10.1063/1.3556677
- [117] RICHTEROVÁ, I., PAVLŮ, J., NĚMEČEK, Z., ŠAFRÁNKOVÁ, J., a JEŘÁB, M. Electric field influence on secondary emission. In: BOUFENDI, L., MIKIKIAN, M., a SHUKLA, P. K. (Eds.) *New Vistas in Physics of Dusty Plasmas*, ser. *AIP Conference Proceedings*, vol. **799**, Melville, New York: American Institute of Physics, 2005, pp. 395–398.
- [118] VYŠINKA, M., NOUZÁK, L., PAVLŮ, J., NĚMEČEK, Z., ŠAFRÁNKOVÁ, J., a RICHTEROVÁ, I. MF Microspheres: Helping or Puzzling Tool? *IEEE Trans. Plasma Sci.*, 2017, submitted