

ŽÁDOST O UDĚLENÍ GRANTU VAKUUM PRAHA NA ROK 2003

Název projektu:

Studium změn hmotnosti prachových zrn

Navrhovatel projektu:

Jiří Pavlů, 2.ročník PGS

Popis projektu:

Úvod do problematiky

Kosmický prach, tj. zrnka z nejrůznějších materiálů o velikostech $0.1 \div 100 \mu\text{m}$, představuje základ, ze kterého jsou budovány veškeré makroskopické objekty ve vesmíru. Zrnka prachu jsou ovšem v podmínkách kosmického prostoru vystavena vnějším vlivům, které mohou ovlivnit jejich velikost, a to jak směrem nahoru, tak směrem dolů. Za nejvýznamnější proces zmenšující velikost zrněk je považována elektrostatická fragmentace, ale jak bylo ukázáno v *Sternovsky et al. (2001)*, mohou se malá zrnka postupně „vypařovat“ vlivem iontové autoemise. Současně jsou však prachová zrnka v kosmu nepřetržitě bombardována toky vysokoenergetických iontů, které zrnka rozprašují.

Na našem pracovišti se již několik let intenzivně věnujeme studiu nabíjecích a vybíjecích procesů těchto malých zrněk. Při řešení grantu *VAKUUM Praha* v roce 2001 jsme se soustředili na problematiku záporného nabíjení zrna, v současné době jsme zaměřili pozornost na procesy, které vedou k „zmenšování“ zrn.

Popis stávajícího experimentu

V kosmu se prachová zrnka nabíjejí vlivem nejrůznějších procesů (tj. např. fotoemise, sekundární elektron-elektronová emise a attachment elektronů a iontů atd., viz např. *Draine and Salpeter, 1979*). Mezi limitující procesy patří elektronová a iontová autoemise. Aby tyto procesy na prachových zrnech bylo možno studovat laboratorně (a především odděleně), byla ve spolupráci s Max-Planck Institutem v Heidelbergu vyvinuta unikátní aparatura (viz. *Čermák, 1995*), ve které je možno zachytit jediné prachové zrnko v kvadrupólové pasti (viz. *Wuerker et al., 1959*) a působit na něj elektronovým či iontovým svazkem. Prachová zrnka lze v pasti udržet po dobu několika týdnů a měřit tak například různé časové závislosti jejich měrného náboje (Q/m), popř. rovnovážného povrchového potenciálu. Principiální schéma experimentu je na obrázku 1.

Experiment probíhá uvnitř UHV aparatury vybavené již zmíněným elektrodynamickým kvadrupólem, a dále pak iontovým a elektronovým dělem, laserovým optickým systémem s polohově citlivým detektorem, který snímá pohyb prachového zrnka uvnitř pasti, z jehož frekvence lze určit měrný náboj zachyceného objektu dle následující rovnice (viz. *Wuerker et al., 1959*):

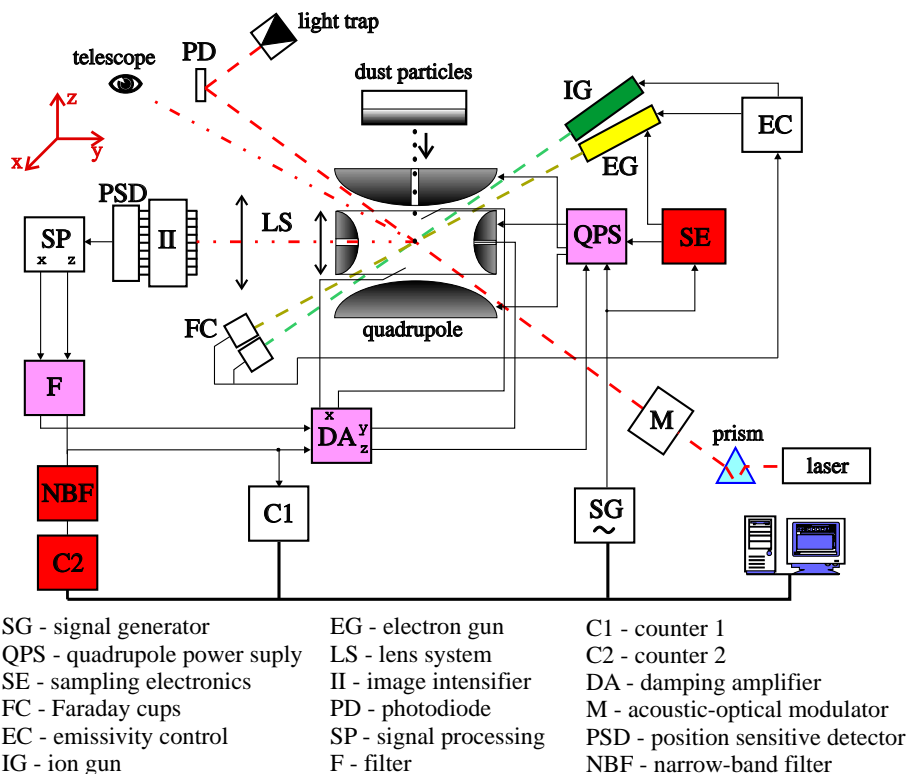
$$\frac{Q}{m} = \pi \cdot r_0^2 \cdot \frac{f_{ac} \cdot f_z}{V_{ac}^{ef}} \cdot \frac{1}{\sqrt{1 + (1.8 \cdot \frac{f_z}{f_{ac}})^2}}$$

r_0 vnitřní poloměr prstencové elektrody

V_{ac}^{ef} efektivní hodnota napětí, přiváděného na jednotlivé elektrody, vůči zemi

f_{ac} frekvence napětí

f_z frekvence kmitů částice ve směru osy \mathbf{z} .



Obr. 1.: Schéma uspořádání experimentu. SG — generátor signálu, QPS — napájení kvadrupólu, SE — elektronika zajišťující vzorkování elektronového svazku, FC — Faradayovy válce, EC — řízení emisního proudu, IG — iontové dělo, EG — elektronové dělo, LS — systém čoček, II — obrazový zesilovač, PSD — detektor citlivý na polohu, SP — zpracování signálu, F — filtr, C — čítač, DA — elektronika zajišťující tlumení kmitů částice, M — akusto-optický modulátor, PD — fotodioda

Současný stav studia

Proces rozprašování jsme teoreticky studovali v *Pavlu and Wild (2000)*, ale experimentálně se nám jeho efekt nepodařilo prokázat, protože odhadnuté výtěžky byly mimo možnosti naší aparatury.

Dopad iontů na prachové zrno může vést k jeho nabití na vysoký kladný potenciál. V prvním přiblížení se zrno nabije na potenciál odpovídající přibližně energii bombardujících iontů. Ovšem pro dostatečně vysoké potenciály bude již elektrické pole kolem zrnka natolik vysoké, že se objeví proces iontové autoemise, která bude povrchový potenciál omezovat. Současně však může u nabitých vzorků vysoké elektrické pole na jejich povrchu podpořit proces odprašování, resp. zvětšit výtěžek iont-iontové sekundární emise.

Pokud bude svazek primárních iontů dopadat pod jiným úhlem (θ) než kolmo na povrch, bude odprašovací výtěžek Y narůstat, neboť se i vybuzená oblast bude přibližovat k povrchu, a tedy více vybuzených atomů bude moci opustit zrno. Při příliš velkém úhlu θ však bude spíše docházet k odrazu než k penetraci iontu do látky a Y opět poklesne.

Obecně lze tuto úhlovou závislost aproximovat funkcí $1/\cos\theta$, i když je tato aproximace velice hrubá. Je vhodné využívat pro konkrétní výpočty naměřené hodnoty z experimentů (lze nalézt např. v *Behrisch, 1981*). Aproximace $1/\cos\theta$ je však použitelná pouze za předpokladu, že materiál zrna je amorfni. V případě monokrystalického materiálu může docházet k tzv. kanálování (*channelling*) primárních iontů do látky pod určitými směry (význačné směry krystalové mřížky). V takovém případě je problém podstatně složitější a my se jím zde nebudeme podrobněji zabývat.

Na závěr tohoto stručného úvodu ještě podotkneme, že v případě, že materiál zrna je složen z více

prvků, může docházet k tzv. preferenčnímu odprašování, kdy se jeden prvek odprašuje více než druhý a mění se tak stechiometrické složení látky, která pak může vykazovat poněkud odlišné vlastnosti. Jelikož užíváme iontový svazek poměrně vysokých energií, je také možnost zmenšení (odprašování) částice uvnitř kvadrupólu. Teorie odprašování je rozpracována v *Sigmund (1969)*. Veškeré experimentálně zjištěné hodnoty odprašovacích výtěžků jsou však pouze pro planární vzorky, nikoliv pro sférická zrna, která mi používáme. Z těchto důvodů byl vytvořen jednoduchý model, popisující odprašování kulové částice (*Pavlu and Wild, 2000*). Vychází z obyčejné diferenciální rovnice pro úbytek hmotnosti

$$\frac{dm}{dt} = -M_{ef}Y\Lambda i_p S,$$

kde

M_{ef} — efektivní hmotnost jednoho atomu vzorku,

Y — odprašovací výtěžek pro kolmý dopad na vzorek,

$\Lambda = \int_0^{\pi/2} \frac{Y(\phi)}{Y} \cdot f(\phi) d\phi$ — úhlová závislost Y pro kulový povrch

i_p — proudová hustota primárních iontů [$\frac{\text{castice}}{\text{s}\cdot\text{cm}^2}$],

$S = \pi r^2$ — plocha, na kterou ionty dopadají.

Z výše uvedených úvah je možno snadno odvodit, že $\Lambda \approx 2$. Dále použitím vztahů

$$m = \rho V = \rho \frac{4}{3} \pi r^3,$$

resp.

$$r = \left(\frac{3m}{4\pi\rho}\right)^{\frac{1}{3}}$$

získáme rovnici

$$\frac{dm}{dt} = -M_{ef}i_pY\Lambda\pi\left(\frac{3}{4\pi\rho}\right)^{\frac{2}{3}}m^{\frac{2}{3}}.$$

Označme si konstanty jako k

$$k = M_{ef}i_pY\Lambda\pi\left(\frac{3}{4\pi\rho}\right)^{\frac{2}{3}},$$

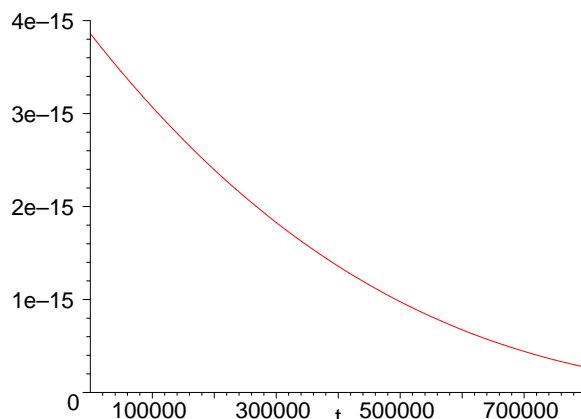
čímž dostaneme obyčejnou diferenciální rovnici

$$\frac{dm}{dt} = -km^{\frac{2}{3}},$$

jejímž řešením je vztah

$$m = \left(m_0^{\frac{1}{3}} - \frac{kt}{3}\right)^3.$$

Tato závislost $m(t)$ je vynesena na obrázku 2.



Obr. 2.: Model úbytku hmotnosti $m(t)$ vlivem odprašování energetickými ionty. Model uvažuje částici SiO_2 ($\Rightarrow Y \sim 0.15$ pro ionty He o energii $\sim 4keV$ podle...) o počáteční hmotnosti $m = 3.8 \cdot 10^{-15}kg$, proudovou hustotu primárních iontů $i = 10^{-5}A/cm^2$.

Největším problémem v našem měření zůstává určení proudu primárních iontů. Částečně neznámé jsou i odprašovací výtěžky pro jednotlivé kombinace materiálů vzorků a působících iontů. Dostupné hodnoty jsou velice omezené.

Cíle projektu

Cílem projektu je experimentální sledování procesů vedoucích ke zmenšování hmotnosti, případně k destrukci prachových zrn v podmínkách simulujících kosmický prostor. Výsledkem bude stanovení příslušných konstant a vazebních sil. Pro splnění tohoto cíle je nutno podstatně zdokonalit detekční systémy ve stávající aparatuře.

Předpokládané úpravy experimentálního systému

Během řešení projektu předpokládáme provést:

- Návrh kamerového systému pro sledování pohybu zrn v kvadrupólové pasti se současným záznamem do počítače. Tento systém umožní sledovat fragmentaci zrn, v optimálním případě i stanovení parametrů fragmentů.
- Výměnu stávajícího He-Ne laseru za polovodičový s větším výkonem pro zlepšení poměru signál/šum při určování frekvence kmitů zrna.
- Úprava vakuového systému a jeho doplnění o možnost napouštění více druhů plynu. Tato úprava nám umožní rozlišit procesy iontové emise a odprašování zrn.

Časový harmonogram projektu

Časový harmonogram vychází z připravovaných měření a je možno ho shrnout asi takto:

- únor – březen 2003: návrh a realizace laserového systému
- březen – duben 2003: návrh úprav experimentální aparatury
- duben – květen 2003: provedení úprav
- květen – červenec 2003: vlastní měření
- srpen – září 2003: vyhodnocení měření a příprava publikace

Návrh využití finančních prostředků

Předpokládáme následující využití finančních prostředků:

- vakuový materiál a práce spojené s rekonstrukcí napouštěcího systému
- elektronický materiál pro úpravy laserového detekčního systému (kamera byla již zakoupena)
- materiál a práce spojené s výměnou laseru (laser byl již zakoupen)
- částečná úhrada cesty řešitele na konferenci o prachovém plazmatu

Řešitel projektu a vědečtí konzultanti

Jiří Pavlů, student 2. ročníku postgraduálního studia (oborová rada *f-2 — Fyzika plazmatu a ionizovaných prostředí*) na Katedře elektroniky a vakuové fyziky ve skupině Kosmické fyziky.

- narozen roku 1977 v Pardubicích
- od roku 1996 student Univerzity Karlovy v Praze, Matematicko-fyzikální fakulty
- v roce 1999 úspěšný řešitel studentského projektu: *Návrh a ověření konstrukce speciálního detektoru pro studium nabíjení prachových částic*
- v roce 2001 obhájil na KEVF MFF UK diplomovou práci na téma: *studium elementárních procesů v prachovém plazmatu* (vedoucí doc. RNDr. Zdeněk Němeček, DrSc.)
- v roce 2002 úspěšný řešitel grantu VAKUUM Praha na rok 2001
- v současné době pracuje na doktorské práci na téma: *Studium elementárních procesů nabíjení prachových zrn* (školitel doc. RNDr. Zdeněk Němeček, DrSc.)

publikace řešitele:

- **J. Pavlů**, J. Wild (2000): *Simulation of Dust Particle Sputtering*, v Proceedings of contributed papers WDS 2000 - part II, ed. J. Šafránková, Matfyzpress (Praha), 238–242.
- **J. Pavlů**, Z. Němeček, and J. Šafránková (2001): *Secondary electron emission from glass microparticles*, v Proceedings of contributed papers WDS 2001 - part II, ed. J. Šafránková, Matfyzpress (Praha), 261–266.
- **J. Pavlů**, J. Šafránková, and Z. Němeček (2002): *Negative charging of dust grains*, v Proceedings of contributed papers WDS 2002 - part II, ed. J. Šafránková, Matfyzpress (Praha), 288–293.
- Z. Němeček, **J. Pavlů**, J. Šafránková, I. Richterová, and I. Čermák (2002): *Secondary Emission from Small Spherical Clusters*, v Dusty Plasmas in the New Millenium: Third International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, ed. R. Bharuthram et al., American Institute of Physics, 378–381.
- **J. Pavlů**, J. Šafránková, Z. Němeček, and A. Velyhan (2002): *Charging properties of Dust Grain Clusters*, v Dusty Plasmas in the New Millenium: Third International Conference on the Physics of Dusty Plasmas, ed. R. Bharuthram et al., American Institute of Physics, 382–385.
- **J. Pavlů**, Z. Němeček, J. Šafránková, and I. Čermák (2003): *Problems of dust grains charging to negative potentials*, Czechoslovak Journal of Physics, *in print*.

vědeční konzultanti

- doc. RNDr. Jana Šafránková, DrSc.
vedoucí skupiny Kosmická fyzika na KEVF MFF UK
- doc. RNDr. Zdeněk Němeček, DrSc.
školitel doktorské práce

Literatura

- Behrisch R. (1981): *Sputtering by particle bombardment I, II*, Springer-Verlag, Berlin.
- Čermák I. (1994): *Laboruntersuchung Elektrischer Aufladung Kleiner Stubtilchen*, Dissertation, MPI-K Heidelberg.
- Draine B.T., Salpeter E.E. (1979): *On the physics of dust grains in hot gas*, The Astrophysical Journal **231**, 77–94.
- Pavlů J., Wild J. (2000): *Simulation of Dust Particle Sputtering*, Proceedings of contributed papers WDS 2000 - part II, Matfyzpress (Praha), 238–242.
- Sigmund P. (1969): *Theory of Sputtering. I. Sputtering Yield of Amorphous and Polycrystalline Targets*, Phys. Rev. **184**, 383–416.
- Sternovsky Z., Němeček Z., Šafránková J., and Velyhan A. (2001): *Ion field emission from micrometer-sized spherical glass grains*, IEEE trans. Plasma Sci. 29(2), 292.
- Wuerker R.F., Shelton H., Langmuir R.V. (1959): *Electrodynamic Containment of Charged Particles*, Journal of Applied Physics **30** (3), 342–349.