

# VAKUUM IN PLAZMA V ZEMELJSKI ATMOSFERI

Miha Čekada, Institut »Jožef Stefan«, Jamova 39, 1000 Ljubljana

## Vacuum and Plasma in Earth Atmosphere

### ABSTRACT

In this paper, the composition and structure of Earth atmosphere is described. Emphasis is given on the chemical reactions in stratosphere and ionosphere, the vacuum environment in the area where manned spacecraft orbit, as well as examples of plasma in nature.

### POVZETEK

V prispevku je opisana sestava in struktura zemeljske atmosfere. Natančneje so opisane kemijske reakcije v stratosferi in ionosferi, vakuumsko okolje v orbiti, kjer krožijo sonde s človeško posadko, in primeri plazme v naravi.

## 1 Uvod

V prejšnji številki Vakuumista smo opisali vakuum v vesolju, pomudili smo se tudi pri atmosferah drugih planetov. V tem prispevku pa bomo natančneje opisali atmosfero na Zemlji. S stališča vakuumske znanosti je najbolj zanimivo dogajanje v zgornjih plasteh atmosfere, saj so tam razmere do neke mere podobne kot v vakuumskih napravah v laboratoriju. Vsem tako poznano vremensko dogajanje je omejeno le na najnižji sloj atmosfere, ki pa nekako ne spada v okvir vakuumistike. Po kratkem opisu zemeljske atmosfere kot celote se bomo podrobneje posvetili nekaj izbranim temam.

Prve meritve in hipoteze o fiziki višjih plasti atmosfere niso starejše od 150 let [1]. To so bili prvi poleti z balonom v stratosfero, pojav nepredvidenih električnih tokov po telegrafskih vodnikih in vzpostavitev medcelinske radijske povezave. Le-ta je napeljevala na razlago, da se radijski valovi odbijejo od neke prevodne plasti v atmosferi, in že ob prelomu stoletja je bila postavljena hipoteza o plasti prostih elektronov in ionov v zgornji atmosferi. Danes ji pravimo ionosfera. Iz čisto praktičnih razlogov (prekinitev električnega toka v omrežju, prekinjena telegrafska zveza) pa so raziskovali motnje v zemeljskem magnetnem polju in s tem povezane električne tokove. Sčasoma so prišli do spoznanja, da je v precejšnji meri za te pojave odgovorna trenutna aktivnost Sonca. Do natančnejše slike je bilo treba počakati do petdesetih in šestdesetih let, ko so lahko izvedli prve in-situ meritve zgornjih plasti atmosfere.

## 2 Sestava in struktura zemeljske atmosfere

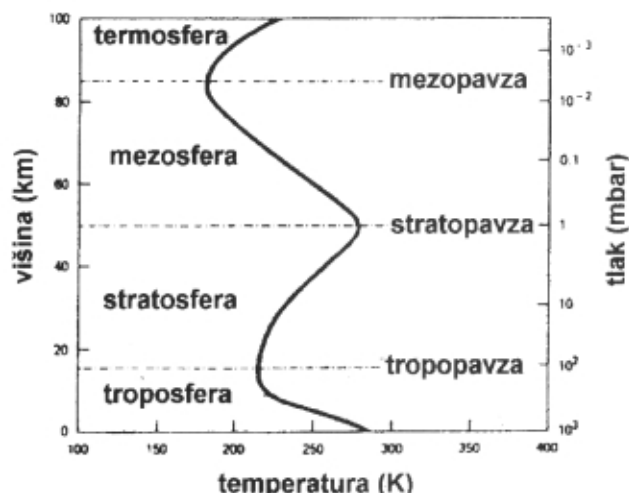
Ob nastanku Zemlje pred 4,5 milijardami let je bila zemeljska atmosfera popolnoma drugačna od današnje. Velike količine vodika in helija, nabrane iz prvotnega protoplanetarne oblaka, so sčasoma zapustile Zemljino privlačno polje. Razlog je v majhni molski masi in s tem povezano veliko hitrostjo molekul. Zemljina gravitacija je prešibka oz. ubežna hitrost premajhna, da bi jih lahko zadržala.

Vsi težji plini so prišli v atmosfero ob vulkanskih izbruhih, pretežno z razplinjanjem magme. Ti procesi v manjši meri potekajo še danes. Najpomembnejši plini

so bili vodna para (H<sub>2</sub>O), ogljikov dioksid (CO<sub>2</sub>), žveplov dioksid (SO<sub>2</sub>) in molekularni dušik (N<sub>2</sub>). V zemeljski zgodovini pa se je sestava bistveno spremenila. Vodna para je kondenzirala in se začela zbirati v oceanih. Ogljikov dioksid se je raztopil v vodi, reagiral s kalcijevimi in magnezijevimi ioni ter tvoril karbonatno oborino, kalcit - CaCO<sub>3</sub> in dolomit - (Mg,Ca)CO<sub>3</sub>. Žveplov dioksid je reagiral z vodno paro in v obliki kislega dežja (H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>) zapustil atmosfero. Edini primarni plin, ki je ostal do danes v atmosferi, je dušik, ki je kemijsko inerten in netopen v vodi [1].

Ves kisik v današnji atmosferi je plod biogene dejavnosti, natančneje fotosinteze. K odlaganju karbonatnih kamnin in s tem odnašanju CO<sub>2</sub> iz atmosfere so tudi odločilno pripomogli morski organizmi. S slabim odstotkom volumskega deleža je argon tretji najpogostejši plin v zemeljski atmosferi. Nastal je radiogeno, in še vedno nastaja, z β-razpadom kalijevega izotopa <sup>40</sup>K. Navsezadnje moramo še omeniti antropogeni prispevek, torej pline, ki so prišli v atmosfero kot plod človekove aktivnosti. Predvidevajo, da je bila koncentracija CO<sub>2</sub> v predindustrijski dobi okrog 280 ppm, kar je za slabo petino manj od današnje vrednosti. Še posebej se ta aktivnost pozna pri plinih v sledovih, najbolj znan primer so klorofluorogljiki, ki jih prej v naravi ni bilo. V tabeli 1 je podana sestava zemeljske atmosfere ob površju.

Čeprav se podatki po literaturnih virih precej razlikujejo, je ustaljena delitev atmosfere na štiri sloje: troposfero, stratosfero, mezosfero in termosfero. Vmesne plasti imenujemo tropopavza, stratopavza in mezopavza. Ta delitev sloni na temperaturnem profilu (slika 1). **Troposfera** se razteza od gladine morja do nekako 10 - 15 km višine. Za primerjavo: Mt. Everest je visok 9 km, komercialni letalski poleti pa potekajo le nekaj kilometrov višje. Temperatura z višino pada, kot smo vajeni iz vsakdanjega življenja. **Stratosfera** se razteza med 10 in 50 km višine, zanjo pa je značilna plast ozona, ki absorbira ultravijolično sevanje iz vesolja,



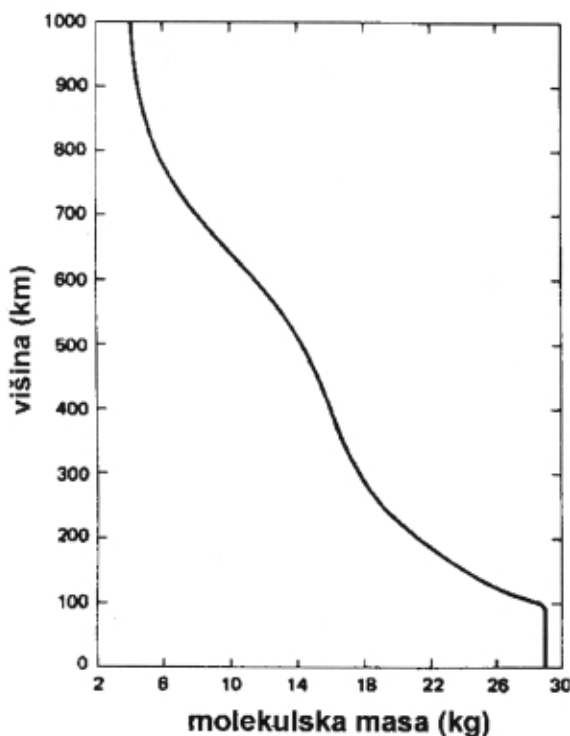
Slika 1: Temperaturni profil zemeljske atmosfere in osnovna delitev na štiri sloje [1]

zato v stratosferi zaradi absorpcije temperatura raste z višino. Med 50 in 80 km se razprostira **mezosfera**, kjer temperatura spet pada. Nad mezosfero je obširna **termosfera** (80 - 1000 km), kjer temperatura ponovno naraste, tja do 2000 K. V spodnjem delu termosfere, imenovanem ionosfera, prihaja do močne absorpcije v ultravijoličnem in rentgenskem področju in s tem povezano ionizacijo molekul. Včasih navajajo še eksosfero, ki z vrha termosfere zvezno preide v medplanetarni prostor /2/. Orbite vesoljskih sond s človeško posadko so na višini 250 - 500 km.

Padanje tlaka z višino do približno 120 km dovolj dobro podaja barometrična enačba:

$$p = p_0 e^{-\frac{Mg}{RT}z}$$

kjer je  $p_0$  tlak na površju Zemlje (1013 mbar),  $M$  povprečna molekulska masa,  $g$  težni pospešek,  $T$  temperatura,  $R$  splošna plinska konstanta in  $z$  višina. V tem področju je stalno razmerje plinov, povprečna molekulska masa je konstantna (slika 2), zato to področje tudi imenujejo homosfera. V višjih plasteh (heterosfera) pa se povprečna molekulska masa močno spreminja.



Slika 2: Profil povprečne molekulske mase /8/

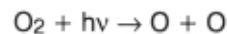
Med fizikalno najpomembnejšimi pojavi v atmosferi, in s stališča vakuumistike najbolj zanimivimi, kaže natančneje opisati kemijske reakcije v stratosferi in ionizacijske procese v ionosferi.

### 3 Ozonska plast

Tropopavza, področje prvega temperaturnega minimuma na višini 10 - 15 km, učinkovito ločuje stratosfero od troposfere. Zato je vremensko dogajanje v glavnem omejeno le na troposfero. Tudi Zemljino površje - oceani in kontinenti - na stratosfero nimajo bistvenega vpliva. Absorpcija ultravijolične svetlobe v stratosferi pote-

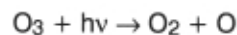
ka skoraj izključno v kisiku oziroma ozonu, čeprav je volumski delež ozona le okrog 10 ppm na višini 25 km, kjer ga je največ. Ta proces ščiti živa bitja na Zemlji pred UV-svetlobo iz vesolja.

Tvorba ozona poteka v dveh stopnjah /1/:

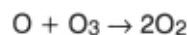


kjer je  $M$  neka tretja molekula, potrebna za ohranitev energije in gibalne količine.

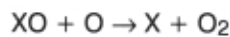
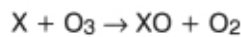
Ozon razpada na tri načine: z absorpcijo ultravijolične svetlobe:



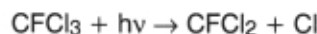
lahko reagira z atomarnim kisikom:



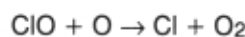
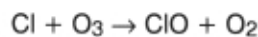
ali pa katalitsko preko  $X=Cl, OH$  ali  $NO$ :



Naštete kemijske reakcije so le najpomembnejše, saj sodeluje še mnogo drugih molekul in ionov. V zadnjem času žal postaja vse pomembnejši zadnji proces, in sicer zaradi antropogenih emisij klorofluorogljikov (CFC-jev, freonov). Za primer si pogledjmo  $CFC_3$  s komercialno oznako CFC-11:



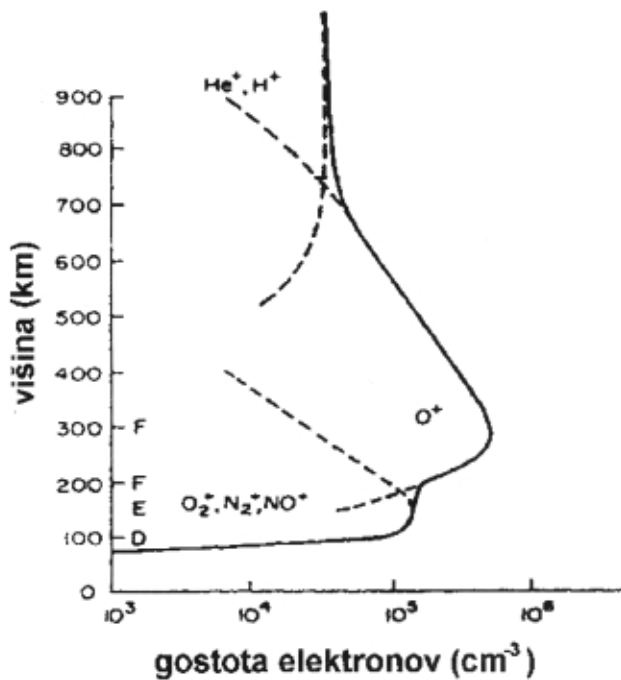
Sproščeni klor pa katalizira razpad ozona:



Na kratko si pogledjmo še toplotno bilanco atmosfere. Gostota svetlobnega toka s Sonca je  $1340 \text{ W/m}^2$ . Od tega se 35 % svetlobnega toka odbije nazaj v vesolje, 47 % absorbira na površju in oceanih, v atmosferi pa le 18 %. Atmosfera je torej relativno dobro prepustna za vidno svetlobo, ne pa tudi za infrardečo, ki jo sekundarno emitira segreto površje Zemlje. Zaradi slabe prepustnosti atmosfere za infrardečo svetlobo je povprečna temperatura zemeljskega površja za  $33^\circ\text{C}$  višja od ravnovesne temperature črnega telesa, izpostavljenega takemu svetlobnemu toku. Govorimo o pojavu tople grede. Najpomembnejši toplogredni plin je vodna para, za velikostni red manj pa  $CO_2$  in nekateri drugi plini ( $O_3, CH_4$  in  $N_2O$ ) /3/.

### 4 Ionosfera

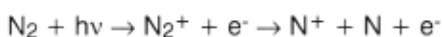
Glede obsega ionosfere ni enotnega mnenja v literaturi. Saj je tudi definicija bolj nejasna, da je ionosfera tisti del atmosfere, kjer je »precej« prostih elektronov in ionov. Spodnjo mejo se postavlja med 60 in 90 km, zgornjo pa od 250 do 1000 km. Opišemo jo lahko kot šibko ionizirano plazmo z naslednjimi značilnimi parametri (velja za višino 120 km): tlak  $10^{-5}$  mbar, gostota ionov  $10^5 \text{ cm}^{-3}$ , gostota nevtralovalov  $10^{11} \text{ cm}^{-3}$ , stopnja ionizacije pa nikjer ne preseže  $10^{-6}$ . V spodnjih slojih, tja do 200 km (imenujemo ju D- in E-sloj), prevladujejo molekularni ioni  $O_2^+, N_2^+$  in  $NO^+$ , medtem ko je višje (F-sloj) pretežno enoatomarni  $O^+$  (slika 3) /1/.



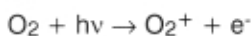
Slika 3: Profil številske gostote elektronov in pripadajočih ionov [1]

Tudi pri gostoti nevtralov so precejšnje razlike. Medtem ko se sestava troposfere in stratosfere praktično ne spreminja z višino, pa v ionosferi delež nevtralnih molekul hitro pada. V F-sloju je tako najpomembnejši nevtral atomarni kisik. Še višje pa postaneta pomembna helij in vodik. Zanju je zanimivo, da je koncentracija ob površju praktično zanemarljiva, z višino pa le neznatno pade.

Medtem ko potekajo reakcije v stratosferi z absorpcijo bližnje ultravijolične in delno vidne svetlobe, pa je v ionosferi v igri daljnja ultravijolična in mehka rentgenska svetloba. Ozon tukaj ne igra nobene vloge. Ključni reakciji sta fotodisociacija dušika:



in kisika:



K tem je treba prišteti še ustrezne rekombinacije in reakcije med posameznimi reaktanti, kamor spada tudi tvorba molekulskega iona  $NO^+$ . Če upoštevamo še manj pogoste molekule, število teh reakcij močno naraste, tako da je dogajanje v ionosferi le delno raziskano. V tem gre tudi iskati dejstvo, da je vpliv antropogenih plinov na atmosfero še slabo poznan. Mnogo slednih plinov v zemeljski atmosferi nastaja pri fotodisociaciji (tabela 1). Ionosfera je zelo nestalna. Njene lastnosti se spreminjajo z geografsko širino, dnevom/nočjo, letnim časom in je povezana z dogajanjem v magnetosferi.

Poznanje razmer v zunanjih plasteh zemeljske atmosfere je zelo pomembno za vesoljske polete, še posebej za področje med 250 in 500 km, kjer navadno krožijo sonde s človeško posadko. Prva težava je razplinjanje sten sonde, ki nekajkrat poveča tlak v neposredni

Tabela 1: Sestava atmosfere pri površini Zemlje [1]

plin	delež (vol.)	izvir
glavne sestavine		
dušik	N <sub>2</sub>	78,08 % vulkanski, biogeni
kisik	O <sub>2</sub>	20,95 % biogeni
argon	Ar	0,93 % radiogeni
voda*	H <sub>2</sub> O	0 - 4 % vulkanski, evaporacija
ogljikov dioksid	CO <sub>2</sub>	0,034 % vulkanski, biogeni, antropogeni
plini v sledovih		
neon	Ne	18 ppmv vulkanski
helij	He	5,2 ppmv radiogeni
metan	CH <sub>4</sub>	1,7 ppmv biogeni, antropogeni
kripton	Kr	1 ppmv radiogeni
vodik	H <sub>2</sub>	0,5 ppmv fotokemični, biogeni
didušikov oksid	N <sub>2</sub> O	0,3 ppmv biogeni, antropogeni
kсенon	Xe	0,1 ppmv radiogeni
ogljikov monoksid	CO	<0,2 ppmv antropogeni, biogeni, fotokemični
ozon	O <sub>3</sub>	<0,1 ppmv fotokemični
nekateri drugi plini pod 0,1 ppmv		
dušikov dioksid	NO <sub>2</sub>	<0,3 ppbv fotokemični, antropogeni
žveplov dioksid	SO <sub>2</sub>	0,2 ppbv vulkanski, antropogeni, fotokemični
CFC-ji (skupaj)	C <sub>x</sub> F <sub>y</sub> Cl <sub>z</sub>	0,8 ppbv antropogeni

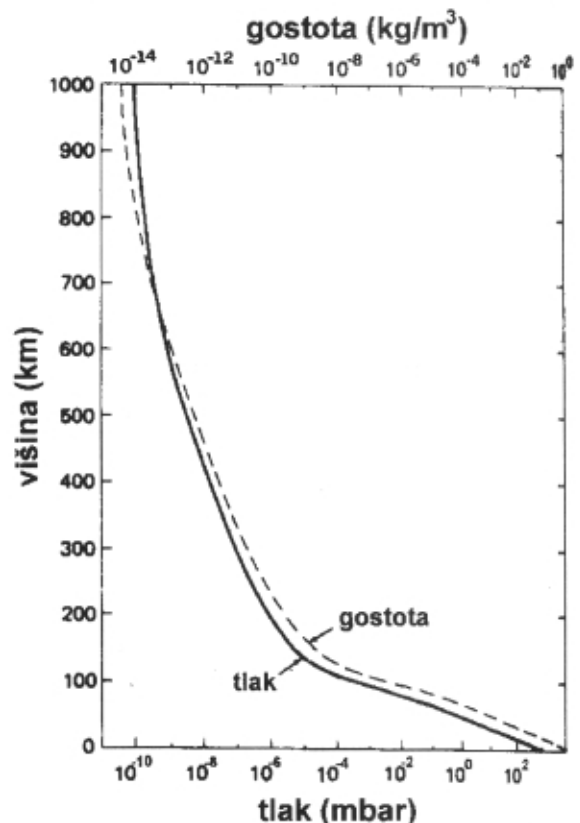
\*Odstotki se razen pri vodi nanašajo na suh zrak.

ppmv = volumski delež proti milijon

ppbv = volumski delež proti milijardi

bližini. Hlapne komponente se utegnejo redeponirati na hladne dele sonde - senzorcje, objektivne ipd., zato je zelo pomembna izbira primernih materialov. Neprimeri so polimeri, pa tudi nekatere kovine, npr. cink [4].

Pogosto slišimo, da so v vesolju zelo primerne razmere (breztežnost, vakuum) za določene nove tehnologije. Pa je res tako? Na višini, kjer krožijo sonde s človeško posadko, je tlak 10<sup>-8</sup> mbar (slika 4), kar v laboratoriju (na Zemlji) dosežemo brez večjih težav. Večji del preo-



Slika 4: Profil tlaka in gostote [8]



Navadni meteorji zasvetijo na višini okrog 100 km, pri čemer je njihova sled dolga nekaj kilometrov, široka pa le nekaj metrov. T.i. bolidi ali ognjene krogle razpadejo na višinah 20 - 50 km. Za močnejšimi meteorji ostane plazemska sled še nekaj minut, tako da uspejo radioamaterji preko nje vzpostaviti radijsko zvezo.

Še danes ni enotne razlage, kakšen je v detajlih proces ločitve naboja v oblakih, ki povzročata nastanek strele. Vsekakor pa se večji delci pretežno nabijejo negativno, manjši pa pozitivno. Delo, ki je potrebno za ločitev nabojev, opravi sila teže. Tako je v splošnem spodnji nivo oblakov nabit negativno, zgornji pa pozitivno. Pri tem pa oblaka ne smemo gledati izolirano, temveč kot del širšega, med seboj povezanega sistema: oblaki v troposferi - ionosfera - magnetosfera. Ionosfera je prevodna in tokovi, ki tečejo po njej, so močno odvisni od trenutnih razmer v magnetosferi. Zato tudi udarec strele ni zgolj razelektritev med spodnjim delom oblakov in zemljo, temveč ga včasih spremljajo pojavi precej višje, v grobem lahko govorimo o razelektritvah med oblaki in ionosfero. Zanimivo je, da so njihov obstoj potrdili šele leta 1990 /7/.

Na kratko si še pogledimo, kako nastane strela, čeprav si ta, edini pojav plazme v neposrednem človekovem naravnem okolju gotovo zasluži poseben članek v eni prihodnjih števil. S prej omenjenim ločevanjem nabojev v nevihtnem oblaku naraste napetost med spodnjim delom oblaka in zemljo na nekaj deset milijonov voltov. Ko je električno polje dovolj veliko, začnejo pospešeni elektroni ionizirati molekule zraka. Kanal plazme se začne kaskadno širiti proti tlom. Ko je »pot« med oblakom in zemljo sklenjena, pride do glavnega udarca, kjer v 200  $\mu$ s steče tok 10.000 A. Kanal plazme se močno segreje in še dodatno ionizira, zaradi udarnega vala vročega zraka pa nastane grom. Po glavnem udarcu ostane kanal še dovolj dolgo ioniziran, da lahko po isti poti sledi še več dodatnih, šibkejših udarcev.

## 7 Sklep

Zemeljska atmosfera nima jasno določene meje, temveč zvezno preide v medplanetarni prostor. Na višini, kjer krožijo sonde s človeško posadko, je tlak v področju ultravisokega vakuumu. Še posebej pomembno pa je, da je naša atmosfera zelo nehomogena, tako

po sestavi, kot po procesih, ki se odvijajo v posameznih plasteh. Velja si tudi zapomniti, da na Zemlji naletimo na plazmo v štirih primerih: v ionosferi, ki obkroža celo Zemljo, v polarnem siju, v meteorjih (utrinskih) in v strelah med nevihto.

## 8 Literatura

- /1/ Encyclopedia of Physical Science and Technology, Academic Press, Orlando, 1987
- /2/ V. Vujnovič, *Astronomija* 1/2, Školska knjiga, Zagreb, 1989/90
- /3/ P. Warneck, *Chemistry of the Natural Atmosphere*, vol. 41 of International Geophysics Series, Academic Press, London, 1988
- /4/ P. Kleber, Proc. IX Internat. Vac. Congress-V Internat. Conf. Solid Surf., Asociacion Española del Vacio y sus Aplicaciones, ur. J.L. de Segovia, Madrid, 1983, 264
- /5/ W. Winnenburger, *Humboldt-Astronomie-Lexikon*, Humboldt Taschenverlag Jacobi, München, 1990
- /6/ M. Triglav, *Meteorji*, DMFA, Ljubljana, 2000
- /7/ S. B. Mende, D. D. Sentman, E. M. Wescott, *Scientific American*, Avg. 1997, 36
- /8/ D. R. Lide, *CRC Handbook of Chemistry and Physics*, 72<sup>nd</sup> edition, CRC Press, Boston, 1991-92
- /9/ J. Hermann, *dtv-Atlas zur Astronomie*, Deutsche Taschenbuch Verlag, München, 1990

Pred tremi leti smo v Vakuumistu pisali o ionskih izviri za pogon vesoljskih plovil (Vakuumist 18/4 (1998)). Opisana je bila naprava, ki so jo vgradili v sondo Deep Space 1. Cilj misije je bil preskus 12 novih tehnologij, med njimi na prvem mestu ionskega pogona, in obisk asteroida 9969 Braille. Čeprav je bila misija prvotno omejena na leto dni (oktober 1998 - september 1999), so jo zaradi odličnega delovanja sonde podaljšali še za dve leti in vključili obisk kometa Borrelly. Dne 18. decembra 2001 so izklopili vse instrumente na sondi in s tem je bil projekt zaključen. Ionski motor je deloval 670 dni in v tem času porabil 90 % zalog goriva (ksenona). Ker se je ionski izvir izkazal kot zelo zanesljiv in ekonomičen, ga bodo vgradili v bodočo sondo »Dawn«, ki bo poletela k asteroidoma Ceres in Vesta leta 2006.