

VAKUUM V VESOLJU

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

Vacuum in the universe

ABSTRACT

In this paper, vacuum environment in the universe is described. All planets in the Solar system including some satellites have an atmosphere, although some of them are in the range of extremely high vacuum. The solar wind is the extension of the solar atmosphere into the interplanetary space. The comets get their typical form by interaction with the solar wind. Interstellar gas clouds, better known as nebulae are also described.

POVZETEK

V članku so opisane razmere v vakuumskem okolju vesolja. Vsi planeti v Osončju ter nekaj satelitov imajo atmosfero, vendar je pri nekaterih tlak v področju ekstremno visokega vakuumu. Sončeva atmosfera prehaja v medplanetarni prostor v obliki sončevega vetra. V interakciji z le-tem dobijo kometi značilno obliko. Opisani so tudi oblaki medzvezdenga plina - značilne meglice.

1 Uvod

Če bi preprostega človeka povprašali po vakuumu – praznem prostoru, bi verjetno najprej pomislil na vesolje in si pred očmi predstavljal astronavta v skafandru. Toda po drugi strani bi marsikateri strokovnjak s področja vakuumske tehnike le skomignil z rameni, ko bi ga vprašali po karakteristikah vakuumu v vesolju. Čeprav gre, fizikalno gledano, za podobne razmere kot v laboratorijskih vakuumskih sistemih, pa je praktično tako oddaljeno od našega delovnega okolja. Namen tega prispevka je orisati razmere v vesolju s perspektive vakuumske znanosti in tehnike.

Pri tem opisu pa naletimo na težavo, ker se astronomija v precejšnji meri zadovolji s kvalitativnim opisom, saj za kvantitativne meritve pogosto nima niti možnosti. In-situ meritev skoraj ne pozna (izjema so avtomatske sonde, ki so vstopile v atmosfero drugih planetov ali merile karakteristike medplanetarega prostora), zato smo večinoma omejeni na analizo elektromagnetnega valovanja. Tudi za laboratorijske metode velja, da je, denimo, prisotnost neke spojine enostavno potrditi, njeno koncentracijo pa precej težje (npr. AES, EDS, XPS itd.). Zato značilni prispevek iz astronomske revije ali knjige dobro opiše dinamiko nekega procesa, zelo skop pa je s konkretnimi vrednostmi. Različni viri pogosto navajajo različne vrednosti. Pri tako težko merljivi količini, kot je tlak, pogosto navajajo le red velikosti, pa še tam so lahko razlike. Tudi v tem članku so mnoge vrednosti zelo približne, neredko so negotove za cel velikostni red, toda vseeno nam bodo ti podatki dali nek vpogled v vakuum v vesolju.

Večkrat pride do nejasnosti ob uporabi pojma *gostota*. Zato v tem prispevku uporabljam pojma *masna gostota* (enota g/cm^3) in *številsko gostota* (enota cm^{-3}). Kadar navajam številsko gostoto nekega plina, so v vrednosti vključeni prispevki vseh delcev (atomov, ionov in molekul), razen kjer je to posebej navedeno. Pojem številsko gostota uporabljam tudi za prašne delce.

2 Atmosfere planetov in satelitov

Planete delimo v dve veliki skupini: plinaste, imenovane tudi planeti velikani (Jupiter, Saturn, Uran in Neptun), ter kamnite (Merkur, Venera, Zemlja in Mars). Deveti planet, Pluton, po svojih značilnostih bolj spada med mala telesa Osončja, kot so asteroidi in kometi.

Plinasti planeti nimajo trdne površine, zato ni jasne meje med notranjostjo planeta in njegovo atmosfero. Ponavadi se za »rob« planeta določi izobaro 1 bar, za katero se tudi navajajo značilni podatki (temperatura, kemijska sestava itd.). Vsi štirje planeti so sestavljeni v glavnem iz vodika in helija, preostalih plinov je le za nekaj odstotkov (CH_4 , NH_3 , H_2O). Tam so tudi aerosoli teh plinov in njihovih derivatov.

Pri vseh manjših telesih Osončja (kamniti planeti, sateliti) je odločilen parameter za obstoj atmosfere polmer. Ubežna hitrost je namreč inverzno odvisna od kvadratnega korena polmera telesa. Zato v grobem velja, da imajo večji planeti gostejše atmosfere od manjših, ki so po velikosti primerljivi z večjimi sateliti. Seveda igra pomembno vlogo tudi temperatura oz. oddaljenost od Sonca. Najgostejšo atmosfero ima Venera, kjer je tlak na površini okrog 90 barov, zaradi izrazitega efekta tople grede pa je temperatura čez $450\text{ }^\circ\text{C}$. Poglavitni vzrok za to je CO_2 , ki zavzema 96 volumskih odstotkov atmosfere. Poleg Venere in Zemlje ima stabilno, gosto atmosfero še Saturnov satelit Titan. Tlak na površini je 1,6 bar, atmosfero pa v glavnem sestavlja dušik in v manjši meri metan ter drugi ogljikovodiki.

Pri treh telesih v Osončju se tlak sezonsko spreminja, saj plin z atmosfere deloma kondenzira v hladnem delu leta (»jeseni«) in sublimira »spomladi«. Najbolj znan primer je Mars, kjer tlak niha med 6 in 9 mbar. Atmosfera je pretežno iz CO_2 in je v ravnovesju s polarnimi kapami, ki jih v glavnem sestavlja trden CO_2 (suhi led). Na podoben način se spreminja atmosfera še na Plutonu in Neptunovem satelitu Tritonu. Glavna sestavina Plutonove in Tritonove atmosfere je dušik z nekaj odstotki metana. Sestava njune površine je podobna sestavi atmosfere, toda v trdnem stanju. Površina in atmosfera sta v ravnovesju.

Na Jupitrovem satelitu Io se redka atmosfera popolnjuje s stalnimi vulkanskimi izbruhi SO_2 . Kot posebno zanimivost, ki še ni v celoti pojasnjena, omenimo redek oblak plazme, ki obdaja Jupiter okoli tirnice satelita Io. Zaradi močnega Jupitrovega magnetnega polja, ki ujame nabite delce s Sonca, je v področju ljnega tira precejšnja gostota nabitih delcev. Le-ti trkajo s površino satelita in razpršujejo njegovo površino (hitrost razprševanja: 1000 kg/s). Malce šaljivo bi lahko rekli, da imamo opraviti z magnetronskim razprševanjem, kjer je Sonce izvir, Jupiter magnet, Io pa tarča.

Na koncu se pomudimo še pri Luni. Razširjena trditev, da je brez atmosfere, ne drži popolnoma, saj zaradi vpliva sončevega vetra (glej poglavje 3) in razplinjanja kamnin nekaj malega plinov le obdaja Luno. Ti so – v približno enakih razmerjih – vodik, helij, neon in argon.

Treba pa je poudariti, da na Luni ni atmosfere v pravem pomenu besede, ker je ubežna hitrost premajhna. Dejansko gre za počasen pretok plinov iz notranjosti Lune v medplanetarni prostor, kjer se plin delno kopiči ob površini. Tlak je na področju ekstremno visokega vakuumu (10^{-12} mbar), številna gostota okrog 10^5 cm^{-3} , masa celotne atmosfere pa le nekaj deset ton. Podobno »atmosfero« ima tudi Merkur in nekateri Jupitrovi sateliti (Evropa, Ganimed, Kalisto).

Vse štiri planete velikane obkrožajo obroči (najbolj znan je seveda Saturnov), ki pa so sestavljeni iz kosov velikosti nekaj centimetrov do nekaj metrov, zato obroči ne spadajo v okvir tega članka.

3 Sonce in sončev veter

Sonce je plinasto telo, zato nima prave površine. »Rob« Sonca definiramo z optično prepustnostjo: sončeva atmosfera je prepustna za vidno svetlobo, notranjost pa ne. Mejno področje je relativno tanko, saj je debelo le 500 km (Sončev polmer je 696.000 km), zato vidimo skozi teleskop Sončev rob zelo ostro. To področje imenujemo fotosfera, njen spodnji rob pa je privzet kot polmer Sonca. Vidna svetloba s Sonca torej izvira iz fotosfere. Pogosto citirana »temperatura Sonca« je z uporabo Stefanovega zakona izračunana za sredino fotosfere in je 5770 K. Tlak fotosfere je velikostnega reda 10 – 100 mbar, odvisno od višine. (Kot zanimivost omenimo razmere v središču Sonca: temperatura $1,6 \cdot 10^7$ K, tlak $2,5 \cdot 10^{11}$ bar, masna gostota 160 g/cm^3 .)

Nad fotosfero je okrog 2000 km debela kromosfera. Njen prispevek k izsevu vidne svetlobe je za štiri velikostne razrede nižji od izseva fotosfere. V kromosferi temperatura raste z višino (od 4500 do 25.000 K), tlak pa pada od 10^{-2} do 10^{-3} mbar. Na vrhu kromosfere temperatura močno naraste (v nekaj sto kilometrih za dva reda velikosti), kar ustreza prehodu v korono. Le-to dobro vidimo ob popolnem sončevem mrku, kjer obdaja prekrito Sončevo ploskev. Korona je precej homogena in zvezno prehaja v medplanetarni prostor. Tlak na spodnjem robu korone je 10^{-4} mbar, na razdalji enega Sončevega polmera od površine pa še vedno 10^{-6} mbar. Temperatura korone je nekaj milijonov kelvinov.

Koronalna plazma se razprostira v medplanetarni prostor. Tok nabitih delcev – pretežno so to vodikova in helijeva jedra – imenujemo sončev veter. Hitrost sončevega vetra raste z oddaljenostjo od Sonca in približno pri Zemljinem tiru doseže končno vrednost okrog 400 km/s. To pospeševanje je posledica interakcije s Sončevim magnetnim poljem. Na razdalji Zemlje je številna gostota sončevega vetra 5 – 10 protonov cm^{-3} , medtem ko je številna gostota ozadja nevtralnega vodika za velikostni red nižja.

Pomembna je interakcija med sončevim vetrom in objektom v Osončju, npr. planetom, satelitom ali kometom. Odločilna sta dva dejavnika: lastno magnetno polje objekta in njegova atmosfera. Če ima planet lastno magnetno polje (Zemlja, planeti velikani), le-to odkloni sončev veter. Pride do udarnega vala, analogno letu nadzvočnega izstrelka. Če planet nima lastnega magnetnega polja (npr. Venera), sončev veter odklanja gosta ionosfera, ki nastane zaradi trkov nabitih delcev z zgornjimi plastmi atmosfere. Pri kometih, ki prav tako nimajo lastnega magnetnega polja, ravno interakcija sončevega vetra s koma (atmosfera kome-

ta) povzroči nastanek ionskega repa (glej poglavje 4). Pri telesih brez magnetnega polja in brez atmosfere (npr. Luna) ni nobene prave interakcije med sončevim vetrom in telesom: na dnevni strani obstreljevanje z ioni, na nočni pa senca – brez sončevega vetra.

4 Kometi in medplanetarni prostor

Kometi so sestavljeni iz treh delov (glej sliko 2). Osnova je trdno jedro iz pomešanega ledu in prahu, premer jedra pa je le nekaj kilometrov. Ko se komet približa Soncu, se površina jedra segreje. Na oddaljenosti okrog 3 AE (AE – astronomska enota je razdalja med Zemljo in Soncem, tj. $1,5 \cdot 10^8$ km) začne s površine izparevati material, pri čemer je hitrost izparevanja med 10 in 10.000 kg/s, pri Halleyjevem kometu celo do 50.000 kg/s. Okoli jedra se oblikuje oblak izparjenega materiala, imenovan koma. Premer kome je do milijon kilometrov (razdalja med Zemljo in Luno je 384.000 km). Kemijska sestava kome Halleyjevega komete je naslednja: 80% H_2O , 10% CO , 3,5% CO_2 , preostanek pa so različne organske molekule (formaldehid, metanol ipd.). Zaradi interakcije s sončevim vetrom ima koma zelo zapleteno strukturo. Številna gostota kome je med 10^4 in 10^6 cm^{-3} .

Iz kome se razteza rep komete, katerega dolžina lahko presega 1 AE. Repa sta dejansko dva: eden je vedno obrnjen stran od Sonca in ga imenujemo ionski rep, drugi pa je nekoliko ukrivljen in ga imenujemo prašni rep. Fizikalna osnova te delitve so sile, ki delujejo na izparjeni material. Pri večjih prašnih delcih prevladuje gravitacija, pri manjših (meja je pri premeru 200 nm) in pri plinu pa prevladuje sevalni tlak. Stvar še dodatno zakomplicira udarni val, ki nastane zaradi interakcije delno ionizirane kome s sončevim vetrom in magnetnim poljem Sonca. Značilni premer prašnih delcev je pod mikrometrom, njihova številna gostota pa je velikostnega reda 10^{-7} cm^{-3} , medtem ko je številna gostota ionov v ionskem repu okrog 2 cm^{-3} (računano na razdaljo 10^6 km od jedra). Za značilno številsko gostoto kometnega repa se sicer navaja vrednosti nekaj deset delcev (atomov, molekul, ionov) na cm^3 . Tolikokrat občudovani kometni rep je torej redkejši od najboljšega vakuumu, pripravljenega v laboratoriju.

Material, ki izpari iz kometov, se počasi razleze po tirnici matičnega telesa. Nastane razpršen obroč okoli Sonca, imenujemo ga meteoroidno vlakno, ki ga zaradi zelo majhne gostote ne vidimo več. Pač pa nanj sklepamo posredno po večji aktivnosti meteorjev (utrinikov), ko Zemlja seka meteoroidno vlakno. Iz opazovanja meteorjev se da izračunati masno gostoto prašnih delcev, in sicer je velikostnega reda 10^{-24} g/cm^3 . Preostali medplanetarni prostor pa je še za dva velikostna reda redkejši, s številsko gostoto reda 10^{-12} cm^{-3} . To vrednost so potrdili z opazovanjem zodiakalne svetlobe, to je šibkega soja okrog Sonca, ki ga pripisemo sipanju na prašnih delcih. Iz opazovanja zodiakalne svetlobe lahko ocenimo parametre medplanetarnega prahu, na plin pa lahko le sklepamo, njegovo številsko gostoto se ocenjuje na 1 cm^{-3} .

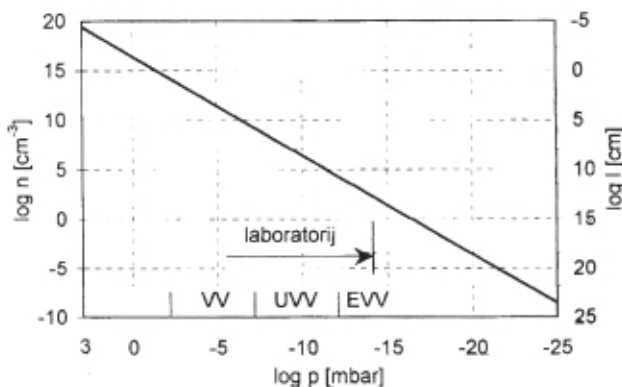
Kot zanimivost omenimo še Oblake Kordiljevskega. Iz mehanike dobro poznan problem treh teles nima splošne analitične rešitve, pač pa obstaja nekaj stabilnih konfiguracij. Ena od njih so t.i. Langrangeove točke L_4 in L_5 , kjer tvorijo tri telesa enakostranični trikotnik v

ravnini gibanja. Če v eno točko postavimo Zemljo, v drugo pa Luno, sta v ravnini vrtenja Lune dve točki, ki z zveznico Zemlja-Luna tvorita enakostranični trikotnik. Gledano z Zemlje sta 60° desno od Lune ter 60° levo od nje gravitacijsko stabilni točki. Na teh točkah so dejansko odkrili med 100 in 10.000-krat večjo koncentracijo medplanetarnega prahu. Po odkritelju nosijo ime Oblaki Kordiljevskega.

5 Medzvezni prostor

Medzvezdno materijo lahko opazujemo le posredno, predvsem iz sipanja svetlobe na poti od izvira (zvezde) do opazovalca. Do večjega dela absorpcije pride na trdnih delcih – medzvezdnem prahu, čeprav zavzemajo le odstotek medzvezdne mase (večina mase medzvezdne snovi se nahaja v obliki plina). Iz razlike v spektrih podobnih, a različno oddaljenih objektov lahko izračunamo ekstinkcijske krivulje, ki so dejansko absorpcijski spektri medzvezdne snovi. Tako so potrdili prisotnost kemijskih vezi C-C (grafit) v ultravijoličnem delu spektra ter Si-O (razni silikati), C-C in C-H v infrardečem. Slednje pripisujejo organskim molekulam s skupnim imenom policiklični aromatski ogljikovodiki (PAH). Medzvezdni prah torej sestavljajo zrna grafita, silikatov in ogljikovodikov. Njihov premer ocenjujejo na 0,25 μm in manj. Številna gostota medzvezdnega prahu je ocenjena na 10^{-13} cm^{-3} , v meglicah pa naraste za vsega nekaj velikostnih razredov, tja do 10^{-9} cm^{-3} .

Medzvezdni plin sestavlja pretežno vodik (70%), in sicer v treh stanjih: nevtraln atomski vodik (H I)¹, ionizirani vodik – proton (H II) in molekularni vodik (H_2); preostali plin je v glavnem helij. Skupaj so opazili čez 50 različnih molekul, od preprostih dvoatomnih (CO ,

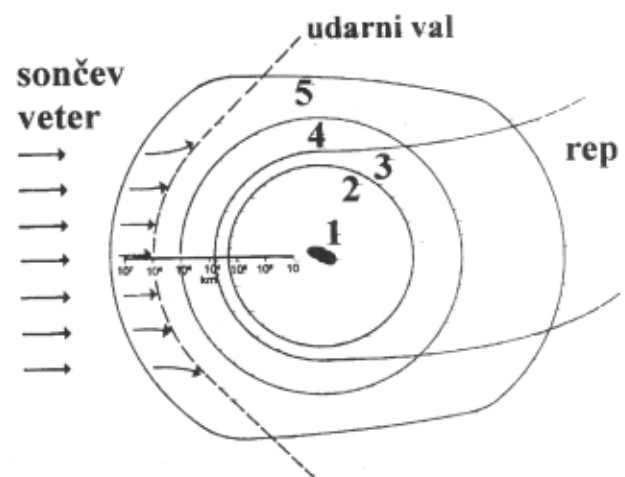


Slika 1: Pretvorba med tremi osnovnimi parametri vakuuma: tlakom (p), številsko gostoto atomov (n) in povprečno prosto potjo (l). Zaradi jasnosti so napisane standardne enote, ki se uporabljajo v vakuumski tehniki. Na dnu so označena tudi področja visokega (VV), ultra visokega (UVV) in ekstremno visokega vakuuma (EVV) ter najnižji vakuum, dosežen v laboratoriju. Diagram je izračunan za vodik pri 300 K.

¹ V astrofiziki se stopnja ionizacije označuje z rimskimi številkami, začeti z osnovnim stanjem. Tako je npr. He I oznaka za nevtralni helij, He II enkrat ionizirani helij.

OH, CH) do organskih verig, vendar je vseh skupaj manj kot odstotek medzvezdnega plina. Opazovanje H I je zelo težavno, saj se večinoma nahaja v osnovnem stanju in do emisije ne more priti. Tudi z opazovanjem absorpcije so težave. Edino uporabno orodje je merjenje radijske črte pri 21 cm kot posledice spremembe spina med paralelnim in antiparalelnim stanjem. Tako so grobo določili parametre t. i. difuznih H I oblakov: temperatura 30 – 80 K, številna gostota 100 – 800 cm^{-3} in masa 1 – 100 Sončevih mas. Obstajajo tudi t. i. molekularni oblaki, v katerih prevladuje H_2 , tam pa lahko številna gostota doseže tudi 10^9 cm^{-3} . V astronomiji dobro poznane meglice so torej v najboljšem primeru še vedno ultra visoki vakuum. Medzvezdni prostor daleč od meglic pa je še precej redkejši. Številna gostota vodika v spiralnih krakih naše Galaksije je ocenjena na 0,1 – 0,7 cm^{-3} , med spiralnimi kraki pa je še en velikostni red nižja.

Na koncu pogledimo še medgalaktični prostor. Po danes dostopnih podatkih je medgalaktični prostor prazen. Na to sklepamo, ker ni absorpcije svetlobe s kvazarjev. Meritve nam dajo le zgornjo mejo za številsko gostoto medgalaktičnega prostora, in sicer $3 \cdot 10^{-11} \text{ cm}^{-3}$ za vodik (povprečna razdalja med atomi je 30 metrov) ter 10^{-15} cm^{-3} za prašne delce. Te vrednosti slonijo na nekaj nezanesljivih predpostavkah, odvisne pa so tudi od uporabljenega kozmološkega modela.



Slika 2: Poenostavljena sestava komete: 1: jedro; 2-5: koma (2: ledeni halo, 3: prah; 4: vidna koma; 5: vodikova korona)

6 Sklep

V prispevku smo preleteli značilnosti planetnih atmosfer in medplanetarnega ter medzvezdnega prostora. V prihodnji številki Vakuumista pa bomo natančneje opisali Zemljino atmosfero in nekatere pojave v njej.

Literatura

Astronomija je ena tistih znanosti, kjer lahko en sam eksperiment zasenči vse prejšnje znanje o neki temi. To je najbolj izrazito pri raziskovanju Osončja, kjer je »eksperiment« dejansko sonda, poslana k drugemu planetu, kometu ipd. O Neptunu, denimo, je bilo pred

obiskom sonde Voyager 2 leta 1986 znanih le nekaj osnovnih podatkov, tedaj pa se je znanje podeseterilo. Zato je treba biti pri branju literature zelo previden pri datumu izdaje. Še najbolj zanesljiv vir je internet, kjer se znanje sproti popolnjuje.

Za iskanje predlagam Nasin portal

<http://sse.jpl.nasa.gov/features/planets/planetsfeat.html>,
od koder je vrsta povezav na sorodne strani. Tabe-
larični podatki so zbrani na
<http://nssdc.gsfc.nasa.gov/planetary/planetfact.html>,
medtem ko je na strani
http://www.jpl.nasa.gov/missions/missions_index.html
ureditev po sondah. Večina novejših podatkov v tem
članku je bila dobljena z naslednjimi sondami (ustrezne
povezave s prejšnjega naslova): Galileo, Voyager 1&2,
Ulysses in Giotto.

Tiskani viri:

Bradley W. Carroll, Dale A. Ostlie, An Introduction to Modern Astro-
physics, Addison-Wesley, Reading, 1996
Martin Harwit, Astrophysical concepts, Second Edition, Springer-
Verlag, New York, 1988
T. Encrenaz, J.-P. Bibring, The Solar System, Springer-Verlag, 1995
Humboldt-Astronomie-Lexikon, Humboldt, München, 1990
Vladis Vujnović, Astronomija 1 / 2, Školska knjiga, Zagreb, 1989 / 90
Mihaela Triglav, Meteorji, DMFA, Ljubljana, 2000

Tabela 1: Osnovni podatki o atmosferah planetov in nekaterih satelitov. Ker planeti velikani nimajo trdne površine, tlak ni napisan.

planet/satelit	tlak [mbar]	povprečna temperatura [K]	sestava
Planeti			
Merkur	10^{-13}	440	O ₂ , Na, H ₂ , He
Venera	92.000	737	CO ₂ 96%, N ₂ 3%
Zemlja	1014	288	N ₂ 78%, O ₂ 21%, Ar 1%
Mars	6	210	CO ₂ 95%, N ₂ 3%, Ar 2%
Jupiter	-	165	H ₂ 90%, He 10%
Saturn	-	134	H ₂ 96%, He 3%
Uran	-	76	H ₂ 82%, He 15%, CH ₄ 2%
Neptun	-	72	H ₂ 80%, He 19%, CH ₄ 1%
Pluton	$3 \cdot 10^{-3}$	50	CH ₄ , N ₂
Sateliti			
Luna (Zemlja)	10^{-12}	250	He, Ne, H ₂ , Ar
Io (Jupiter)		135	SO ₂
Titan (Saturn)	1600	94	N ₂ , CH ₄
Triton (Neptun)	$1,5 \cdot 10^{-2}$	38	N ₂ , CH ₄