

Mikrokosmos modré planety

Vojtěch Laitl^{1,2,3} a Jaroslav Maxa^{1,3*} ... a ...

Naformátováno: není horní index/
dolní index

¹Hvězdárna Františka Krejčího Karlovy Vary, K Letišti 144, 360 01 Karlovy Vary – Hůrky

²Ústav fyzikální chemie Jaroslava Heyrovského, Dolejškova 3, 182 23 Praha 8

³Měřicí síť Ionozor, <http://www.ionozor.eu>

* hvezdarna.frantiska.krejciho@seznam.cz

Doplníme další spoluautory, případně jejich afiliace, pokud to bude někde chtěno.

Abstrakt

Moderní astronomie se dnes rozvíjí mílovými kroky. Lidem už nestačí teleskopy na zemském orbitu, díky kterým můžeme pozorovat dříve nevidané uchvacující objekty. Naše vrozená touha po poznání nás žene k tomu, abychom uskutečnili dětské sny mnoha z nás a vydali se na meziplanetární a mezihvězdné lety. Dnes tak astronomové i kosmonauté upírají oči k cestě na Mars, aniž bychom si uvědomovali, že i naše modrá planeta skýtá nejedno tajemství, jejichž odhalení nám může mnoho napovědět. Patří k nim i oblaka řídkého studeného plazmatu nacházející se v atmosférické vrstvě zvané ionosféra. Výzkum ionosféry je však dnes jednou ze zásadních otázek základního i aplikovaného výzkumu. Její poznání modely nám totiž může prozradit odpovědi na mnoho otázek z oblasti fyziky, ale i chemie planet zemského typu. Ionizačně-rekombinační procesy, ke kterým v ní dochází, nadto významně ovlivňují kosmické počasí, a hrají tak svou roli mezi faktory ovlivňujícími funkci satelitních a navigačních systémů, ale právě také lidských posádek. Ionosféra samotná také na kosmické počasí reaguje množstvím procesů souhrnně označovaných jako ionosférická odezva. Výzkum ionosféry zahrnující teoretické simulace i reálné experimenty bude tedy v budoucnu stále významnější. V tomto článku představujeme své výsledky, jichž jsme na základě experimentů s nízkofrekvenčními rádiovými detektory dosáhli ve výzkumu nejnižší ionosférické vrstvy D a ionosférické odezvy v tomto regionu.

Více zmíníme, jak je v téhle věci senzační jednak samotné založení, jednak práce Ionozoru. V abstraktu i samotném textu...

Úvod

Ionosféra je vrstva nacházející se v zemské atmosféře v přibližných výškách od 60 do 1000 kilometrů. Podle výšky, stupně ionizace a také mechanismu propagace elektromagnetického záření ji děláme na několik základních regionů. Předmětem našeho výzkumu je nejnižší ionosférická vrstva D ležící ve výškách mezi 60 až 90 kilometry. Nad D ionosférickou vrstvou následují vrstvy E a F, která již přechází do plazmasféry. Vrstva F se může dále členit na vrstvy F1 a F2 a jako typicky letní úkaz může být rovněž pozorována takzvaná sporadická E vrstva.

Plazma nacházející se v ionosférické vrstvě D je nejřidší a nejchladnější z celé ionosféry. Jak bylo zjištěno, elektronová hustota plazmatu v této oblasti se pohybuje pouze ve statisících na kubický metr. Vliv ionizačních procesů a nabitých částic v této oblasti však přesto rozhodně není zanedbatelný.

Největší podíl na ionizačních procesech má sluneční záření. Stupeň ionizace se tak periodicky mění v závislosti na denní době a zdánlivém pohybu Slunce po obloze. V noci je D vrstva téměř úplně rekombinována a přetrvává pouze díky fluktuaci částic z fragmentů vyšších ionosférických vrstev, meteorickým impaktům nebo výbojům kosmického záření. S východem Slunce nastává relativně rychlá ionizace, která s sebou provází opětovný vznik a rozčlenění noční plazmatické chiméry na vrstvy D a E. Stupeň ionizace roste až do místního poledne, kdy začínají převládat rovnovážně rekombinační děje. Nabitých částic tedy ubývá do té doby, než se souběžně se západem Slunce rekombinace dokonce ještě zrychlí, a ve výškách někdejší D vrstvy začnou opět převládat rekombinované fragmenty. Tyto periodické jevy (Obr. 1) byly zkoumány v souvislosti s alternativní detekcí sluneční aktivity či právě kosmického záření. Přestože je lze velmi dobře vysledovat, byl ale jejich další význam doposud spíše marginalizován a pozornost byla věnována ponejvíce svrchním ionosférickým vrstvám.

Je to ale právě malý počet nabitých částic, který činí D ionosférickou vrstvu tak zajímavou. Činí z ní totiž oblast citlivou na jakoukoliv, byť sebemenší změnu elektronového obsahu. Další z vlastností, jimiž je D vrstva v ionosféře jedinečná, je také vysoká hustota neutrálního plynu, díky níž je možné studovat fyzikálně i chemicky zajímavé interakce mezi neutrálními a nabitými částicemi jako ve velké mikrokosmické laboratoři. Neméně zajímavé jsou v tomto ohledu záporně nabité ionty a iontové klastry, z nichž můžeme zmínit klastry $\text{O}(\text{H}_2\text{O})^-$ nebo $\text{OH}(\text{H}_2\text{O})^-$, produkty rekombinace kationtů O^+ či O_2^+ a kladně nabitých vodních klastrů, z nichž v ionosféře převažují ionty H_3O^+ , H_5O_2^+ a H_9O_4^+ . Díky přítomnosti kationtů odvozených od nitrosních sloučenin bychom v ionosféře mohli najít i takové částice, jako dusičnanový anion.

Rekombinace kladných iontů na takovéto produkty je možná právě díky relativně vysoké hustotě neutrálního plynu. Je tak zřejmé, že přítomnost záporných iontů lze očekávat během noci, neboť vznikají při rychlé rekombinaci spjaté západem Slunce. I ve dne však v D ionosférické vrstvě přetrvávají a jejich přítomnost hraje stěžejní roli během ionosférické odezvy na některé vysokoenergetické vstupy.

VLF experiment

Hlavním cílem naší práce však bylo sestavení obecné a fyzikálně korektní metodiky pro pozemní monitorování a výzkum D ionosférické vrstvy. Tato oblast byla již dříve zkoumána například atmosférickými balóny, ale její pozemní monitorování v praxi nepřinášela příliš relevantní výsledky.

Pozemní pozorování totiž využívají radiových signálů, pro něž jsou v určitém rozsahu reflexivní konkrétní ionosférické vrstvy. Představme si ionosférické plazma jako soustavu n elektron-iontových párů vzniklých ionizací plynu a pokusme se popsat její kinetiku. Tento předpoklad ve skutečnosti není zcela korektní, a to právě díky přítomnosti záporně nabitých iontů. Není proto možné uvažovat zcela rovnoměrné rozložení náboje mezi páry elektronů a kladných iontů. Pro potřeby základního zjednodušeného modelu je však tato aproximace přípustná.

Podle Newtonových zákonů následně dojdeme ke zjištění, že elektrony oscilují kolem těžkých iontů, jež jsou ideálně zcela nehybné. Tento oscilační pohyb má svou charakteristickou, elektronové hustotě úměrnou frekvenci ω , již nazýváme elektronovou plazmovou frekvencí. Pokud pak do ionosféry vyšleme pozemním vysílačem radiofrekvenční signál, bude odražen právě ve výšce, kde jeho frekvence odpovídá elektronové plazmové frekvenci.

Radiové signály, pro něž je reflexivní ionosférická vrstva D, se pohybují v desítkách kilohertzů, tedy v pásmu VLF (velmi nízkých frekvencí, z anglického **V**ery **L**ow **F**requencies). Tyto hodnoty jsou však o celé dva řády nižší, než s jakými pracují atmosférické ionosondy, jimiž se standardně monitorují vrstvy svrchní vrstvy zemské atmosféry. Zdálo by se tak, že ionosférická vrstva D je pro pozemní pozorovatele neviditelná.

V 60. letech 20. století však byl objeven princip měření pomocí takzvaných SID monitorů, detektorů náhlých ionosférických poruch (z anglického **S**udden **I**onospheric **D**isturbances) v D ionosférické vrstvě. SID monitory jsou velmi jednoduché indukční cívky, jejichž hlavním komponentem je smyčková anténa sestávající z několika set závitů smaltovaného drátu (Obr. 2). Indukované napětí, které měřením získáme, je následně pomocí Fourierovy transformace převáděno na relativní intenzitu radiových vln. Ve správném rozsahu frekvencí je tak možné zaznamenávat signál odpovídající VLF vysílačům, jejichž signál se odráží právě od ionosférické vrstvy D.

SID monitory jsou v současné době využívány nezávisle na sobě mnoha amatérskými i profesionálními astronomy. Po dobu celých padesáti let však dosud nebyla publikována žádná metoda analýzy měření, která by umožnila popis a sledování reálných fyzikálních parametrů monitorovaného nízkoteplotního plazmatu. My jsme ale takovou metodiku vypracovali, a to s využitím teoretického fyzikálního modelu ionosféry, který byl následně aplikován na reálná měření.

Fyzikální model a jeho aplikace

Základem modelu, s jehož pomocí byly popsány fyzikální parametry D ionosférické vrstvy, byl popis radiového signálu, respektive radiových vln, jejichž spektra jsou po odrazu od ionosféry měřena.

Předpokládejme, že radiový signál je nejprve vyslán pozemním vysílačem, a má tak konstantní frekvenci. Poté cestou k přijímači prochází ionosférou až do té doby, kdy se odrazí od elektronů oscilujících na stejné frekvenci, jakou má on sám. Následně je zachycen SID monitorem v podobě napětí indukovaného na cívce a jsou změřena jeho spektra.

Všimli jsme si, že kolísání intenzity v průběhu různých ionosférických poruch je možné kvantifikovat a odhadnout, o jaký vysokoenergetický vstup se jednalo. Analýzou těchto kvantifikací pro různé parciální funkce spekter jsme stanovili vztah mezi elektronovou hustotou a hladinou intenzity radiového signálu L , který je popsán zdánlivě jednoduchou rovnicí

$$\frac{\partial n}{\partial L} = -\frac{1}{4}L^{-4}.$$

Tuto rovnici je možné znázornit graficky a na základě grafického řešení lze na ionosférickém pozadí odlišit energetické anomálie. Na konturovaném grafu (Obr. 3) si všimneme výrazných výkyvů, jež mohly souviset s meteorickou aktivitou pozorovanou 6. března 2016.

Nevýhodou je, že v rovnici není zahrnut žádný parametr popisující počáteční elektronovou hustotu. Abychom tedy mohli vypočítat celkovou elektronovou hustotu, nabízelo se rovnici buď vyřešit, nebo zahrnout do parciálně diferenciálních vztahů jinou veličinu, již bychom mohli považovat za makroskopicky invariantní. Aby bylo nicméně rovnici vůbec definovat, museli jsme pracovat s velkým množstvím vstupních parametrů, jejichž zahrnutí v obecném řešení parciálního diferenciálu by bylo velmi složité.

Takovouto veličinou jsme zvolili hybnost elektronů a její příslušné změny během ionizačních, respektive rekombinačních procesů. Díky popisu diferenciálů hybnosti elektronů spojenému s údaji o změnách jejich počtu jsme pak již byli schopni popsat distribuci elektronové hustoty a energií v ionosférickém plazmatu vrstvy D.

Výsledky

S využitím výše nastíněného modelu distribuce elektronové hustoty a energie v plazmatu D ionosférické vrstvy jsme pokračovali s popisem reálných fyzikálních parametrů této zajímavé atmosférické oblasti. Mezi jinými vzpomeňme teplotu a také Debyeovu délku a plazmatický parametr. Zjistili jsme, že ionosférické plazma lze označit za plazma ideální, neboť hodnoty plazmatického parametru jsou obecně větší či blíží se ke dvaceti dvěma, čímž je splněna podmínka $N_D \gg 1$ pro počet částic v Debyeově sféře ideálního plazmatu.

V mikrokosmu naší modré planety však mimo tyto fyzikální veličiny hraje zásadní roli vertikální a horizontální drift ionosférického plazmatu a popis jeho mechaniky. Pro popis vertikálního driftu se používají ionogramy, tedy grafy či diagramy znázorňující výšku ionosféry srovnanou s její momentální elektronovou hustotou. Příklad ionogramu D ionosférické vrstvy, opět ze dne 6. března 2016, je ukázán formou 3D časově rozlišeného grafu (Obr. 4). Je-li pak znám vertikální rozměr, je možné spočítat úhel odrazu a aproximovat tak hodnotu rozměru horizontálního (Obr. 5).

Pro sestavení ionogramů jsme využili DGR modely, které se běžně používají pro popis distribuce elektronové hustoty a odhad elektronového obsahu v ionosféře. Stejně jako většina jiných ionosférických modelů se však DGR modely věnují pouze vyšším ionosférickým vrstvám, proto bylo nutné některé parametry a poměry přepočítat, aby byly použitelné za podmínek, jaké v D ionosférické vrstvě panují. Nespornou výhodou ionogramů je skutečnost, že pro jejich sestavení jsme pracovali s úplným diferenciálem elektronové hustoty, s jehož pomocí byla stanovena výška, a tedy i vertikální rozměr distribuce. Pokud tento diferenciál naopak podle výšky zintegrujeme, získáme profil veličiny formálně nazývané úplná či celková elektronová hustota. Ve skutečnosti se však jedná o hustotu nábojovou, neboť integrál zahrnuje všechny momentálně přítomné nabitě částice, nevyjímaje výše zmíněné záporně nabitě ionty nebo iontové klastry.

Tento objev byl velmi zásadní, neboť pokud využijeme profil úplné elektronové hustoty, získáme informace nejen o ionosférickém plazmatu, nýbrž také o vysokoenergetických impaktech, které vyvolaly anomálie v ionosféře. Na základě tohoto předpokladu a znalostech o distribuci energie, případně i elektronové hustoty vysokoenergetických vstupů do ionosféry, je již možné modelovat reálné fyzikální, nebo dokonce fyzikálně chemické vlastnosti těchto jevů a těles.

Uvedli jsme, že nejvýznamnějším zdroje energie disipované ionosférou je sluneční záření. Logickým vyústěním našich modelů tedy byl odhad parametrů slunečních erupcí a jiných poruch. Velmi zajímavým výsledkem je odhad elektronové hustoty sluneční korony v době, kdy došlo k silným heliosférickým poruchám (Obr. 6).

Ionosférická odezva však téměř není limitována vzdáleností, a s její pomocí jsme tak schopni vysledovat chování i objektů mnohem vzdálenějších, než je naše nejbližší hvězda.

Magnetická pole takřka všech těles ve sluneční soustavě jsou ovlivňována magnetickými bouřemi planety Jupiter. Tyto silné výrony magnetické energie mají svůj původ v silových interakcích v soustavě Jupiteru a jeho měsíce Ió, tělesa s nejvyšší vulkanickou aktivitou ve sluneční soustavě. V této soustavě hraje nejvýznamnější roli plazmatický torus, který se kolem Jupiteru vytváří díky ionizovanému plynu, který vyvrhují vulkány Ió během jejího oběhu kolem planety. Anomálie v tomto plazmatickém toru pak indukují magnetické bouře, které při vhodné konstelaci mohou zasáhnout planetu Zemi a ovlivnit její magnetosféru, a tedy i ionosféru. Ionosférická odezva umožnila odhadnout distribuci elektronové hustoty v plazmatickém toru během konkrétní magnetické bouře typu B (Obr. 7).

Specifickou oblastí našeho výzkumu je nepřímá detekce vysokoenergetických výbojů pocházejících z hlubokého vesmíru. Naší síti se podařilo ionosférické anomálie, které vyvolaly výrony energie ze vzdáleného HII regionu LBN 1091. Velmi dobrou motivací pro další výzkum v tomto směru je skutečnost, že tento galaktický klastr byl paralelně zachycen naším malým radioteleskopem a kombinací obou těchto metod jsme konkrétní výron energie popsali nejen v relativní distribuci, ale zčásti i v reálném metrickém prostoru (Obr. 8).

Dalším velmi významným kosmickým souputníkem naší Země je meziplanetární hmota. Každý rok v naší atmosféře shoří tisíce menších i větších meteoroidů, které můžeme pozorovat jako meteory či bolidy. Naší síti SID monitorů se 6. března 2016 podařilo zachytit výjimečně jasný bolid, který rovněž detekovaly kamery České bolidové sítě, kde byl také následně označen jako EN060316. Na základě našeho měření ionosférické odezvy jsme odhadli gradient i celkovou hodnotu elektronové hustoty a distribuci energie a teploty (Obr. 9). S použitím těchto parametrů bylo rovněž možné sestavit emisní spektra tohoto bolidu (Obr. 10).

S ionosférickou odezvou velmi úzce souvisí atomární, iontové a molekulové interakce v ionosférickém plazmatu. V současné době je velká pozornost věnována spektrální detekci konkrétních částic a také obecnému fyzikálně chemickému modelu, jenž by popisoval chování záporně nabitých iontových klastrů. S využitím ionogramů a úplné elektronové hustoty bylo dosud zjištěno, že koncentrace záporných klastrů se mohou pohybovat až v desítkách procent počtu všech nositelů náboje, jejich vliv je tedy rozhodně značný.

Právě v souvislosti s meteorickými impakty byly diskutovány rekombinační reakce vodních klastrů s ionizovanými komponenty meteoroidu, které by mohly vysvětlovat kontinuální detekci různých excitačních stavů v emisních spektrech meteorů detekovaných v ionosféře a také rychlou rekombinaci ionosférického plazmatu, ke které dochází po průletu meteoroidu. Jednou z reakcí, jež můžeme očekávat, je srážka ionizované částice pocházející z meteoroidu s vodním klastem a hydroxylovým radikálem, který je významnou složkou neutrálního plynu D ionosférické vrstvy. Tuto reakci jsme schématicky znázornili na diagramu (Obr. 11).

Chemické procesy v ionosféře mají pro její další výzkum nepopiratelný význam a dá se očekávat jejich zvyšující se potenciál v souvislosti s alternativní detekcí a popisem vysokoenergetických, zejména pak právě meteorických vstupů, pomocí ionosférické odezvy. Naše práce tak položila dobrý základ i v této oblasti.

Závěr

Pomocí jednoduchých SID monitorů a metodiky pozemního pozorování zemské ionosféry vycházející z jejich principu a aplikace teoretického fyzikálního modelu jsme popsali základní i složitější fyzikální, potažmo fyzikálně chemické vlastnosti nejhřidší, nejchladnější, nejnižší a nejméně probádané ionosférické vrstvy D. Náš výzkum položil základy pro budoucí obecnější modely ionosférické odezvy a jejich aplikace pro reálná měření a pozorování.

Stávající výsledky jsou ilustrovány modely, vizualizacemi a interpretovanými měřeními souvisejícími s konkrétními vysokoenergetickými jevy. Zvláštní pozornost jsme věnovali jevům, které se podílejí na vzniku mikrokosmu naší modré planety nebo jej zásadním způsobem ovlivňují, zejména pak tím, že se podílejí či přímo samy tvoří kosmické počasí.

Z našich výsledků jasně plyne, že výzkum ionosféry je zajímavý a aktuální problém základního i aplikovaného výzkumu, a bezpochyby tak tvoří významný kámen v mozaice našeho pozemského mikrokosmu.

Reference

- (1) Radicella, S. M. The Improved DGR Analytical Model of Electron Density Height Profile and Total Electron Content in the Ionosphere.pdf. *Annali di Geophysica* 1995.
- (2) Pfaff, R. F. The near-Earth Plasma Environment. *Space Sci. Rev.* **2012**, 168 (1-4), 23–112.
- (3) Singh, A. K.; Singh, A. K.; Singh, R.; Singh, R. P. Solar Flare Induced D-Region Ionospheric Perturbations Evaluated from VLF Measurements. *Astrophys. Space Sci.* **2014**, 350 (1), 1–9.
- (4) Graves, D. B.; Brault, P. Molecular Dynamics for Low Temperature Plasma–surface Interaction Studies. *J. Phys. D. Appl. Phys.* **2009**, 42 (19), 194011.
- (5) Verronen, P. T.; Ulich, T.; Turunen, E.; Rodger, C. J. Sunset Transition of Negative Charge in the D-Region Ionosphere during High-Ionization Conditions. *Ann. Geophys.* **2006**, 24 (1), 187–202.