

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

J. L. Alpert

Ionosféra

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 1 (1956), No. 2, 145--155

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/137087>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1956

Institute of Mathematics of the Academy of Sciences of the Czech Republic provides access to digitized documents strictly for personal use. Each copy of any part of this document must contain these *Terms of use*.



This paper has been digitized, optimized for electronic delivery and stamped with digital signature within the project *DML-CZ: The Czech Digital Mathematics Library* <http://project.dml.cz>

IONOSFÉRA

Ионосфера, *Priroda*, 1956, č. 1, str. 13—23.

Mezi význačnými objevy, na které je fyzika 20. století tak bohatá, zaujímá velmi důležité místo objevení ionosféry.

Před třiceti lety bylo experimentálně dokázáno, že od výšek 100 km a výše nad zemským povrchem odrážejí se radiové elektromagnetické vlny. To znamenalo, že plyny, které tvoří vrchní část atmosféry, musí obsahovat mnoho volných elektronů nebo iontů, t. j. že jsou silně ionisovány, a proto byla konečně tato oblast atmosféry nazvána „ionosférou“.

Již dávno před těmito pokusy vznikla hypotéza, že vrchní vrstvy atmosféry jsou dobrým vodičem elektriny a že jejich pohyb ve vnějším geomagnetickém poli vede ke vzniku proudů, jejichž magnetické pole rovněž vyvolává periodické změny zemského magnetismu.

Později, když bylo zjištěno, že radiovými vlnami (délky 5—10 km) lze dosáhnout spojení na velké vzdálenosti s poměrně malými výkony, byla znovu potvrzena hypotéza o existenci vodivých vrstev atmosféry, které udržují kolem Země elektromagnetickou energii, vyzařovanou radiovými stanicemi.

Další důležitý moment nastal koncem 20. let, kdy bylo objeveno, že krátké radiové vlny (délky od 15 až 20 m do 100 až 200 m) mohou „překlenout“ s nepatrnými výkony prostory obepínající celé zemské těleso. Dosud převládal názor, že uskutečnění uspokojivého dálkového radiového spojení je možné pouze na dlouhých radiových vlnách, které se kolem zemského tělesa lépe ohýbají. Při praktickém využívání dlouhých vln bylo nutno zřizovat ohromná a drahá technická zařízení. Pokusy radioamatérů, kteří pracovali s levnými, nedokonalými zařízeními, však ukázaly, že se krátké vlny mnohem lépe šíří kolem Země než vlny dlouhé.

Konečně r. 1925 bylo přímými pokusy dokázáno, že radiové vlny se odrážejí ve výškách kolem 100—130 km a 200—250 km i výše nad povrchem zemským. V březnu r. 1925 bylo toho dosaženo t. zv. methodou variace frekvence, která umožňovala sledovat interferenci radiové vlny přímo přijímané z vysílačky s vlnou odraženou od ionosféry zpět na Zemi.

V září téhož roku byl odraz tohoto druhu dokázán impulsovou methodou, která umožňovala přímo měřit doby zpoždování krátkých radiových signálů, odražených od vzdálených objektů. Použití impulsové metody, o kterou se opíraly téměř všechny další ionosférické výzkumy, znamenalo samo o sobě rovněž důležitý krok v rozvoji rozličné upotřebitelnosti radia; později se tato metoda stala základem radiolokace.

Velmi četné experimentální výzkumy ionosféry, které rychle následovaly za těmito prvními pokusy, ukázaly, že radiové vlny se odrážejí hlavně ve výškách 100—120 km a 200—400 km. Později bylo zjištěno, že ve dne, zejména v létě, vyskytují se ve středních zeměp. šířkách odrážející oblasti ve výšce 200—220 km a 300—400 km, v některých případech dokonce i ve výšce 130—150 km. Kromě toho vyplývalo z různých experimentálních údajů, že ve dne je atmosféra ionisována od výšky 60 km tak silně, že má podstatný vliv na radiové vlny, které se odrážejí ve velkých výškách a že značně zmenšuje jejich energii.

Tak se postupně vyvíjela představa, že ionosféra, jež se rozprostírá od 60—70 km do 300—400 km a výše nad povrchem zemským, sestává z četných ionisovaných oblastí,

více či méně vzájemně izolovaných. Byly nazvány podle rostoucí výšky vrstev: D — vrstva absorpční, vrstvy E (E 1 a E 2) a F (F 1 a F 2), jež někdy bývají zvány vrstvami Kenelly-Heavisideovou a Appletonovou.

Novější raketové výzkumy zároveň ukazují, že výsledky nepřímých pozorování, která se konají na povrchu zemském, lze stěží správně interpretovat, opíráme-li se o koncepci, že ionosféru tvoří několik vrstev.

Co je to ionosféra?

Základní parametry, kterými je ionosféra charakterisována, jsou elektronová (a iontová) koncentrace a počet srážek elektronů (a iontů), nebo jinak závislost počtu volných elektronů, které se nacházejí v cm^3 plynu a počtu pružných srážek elektronů (a iontů) za vteřinu s ostatními částicemi plynu na výšce nad povrchem zemským. Přímá měření těchto hodnot jsou sama o sobě velmi obtížným úkolem. Nepřímá měření na povrchu zemském dovolují určit tyto hodnoty pouze v některých hladinách ionosféry. Teprve v poslední době se podařilo pomocí výškových raket prozkoumat závislost elektronové koncentrace na výšce v rozmezí od 80 do 200 km, avšak analogická měření počtu srážek nebyla dosud ještě uskutečněna.

Jak byla tato měření konána?

Je známo, že rychlost šíření a intenzita vlny, jež postupuje v libovolném prostředí, jsou určeny indexem lomu n a činitelem útlumu κ . V ionosféře závisí tyto veličiny podstatně na elektronové koncentraci N a na četnosti srážek ν volných elektronů s ostatními částicemi. Kromě toho závisí tyto veličiny na frekvenci vlny ω , což také vyplývá ze zákona disperse vln.

Ve vakuu rovná se index lomu elektronových vln jedničce, a proto zde vlna není ovlivňována refrakcí, t. j. dráha jejího šíření zůstává přímočarou. Naopak, absorpční koeficient vlny se rovná ve vakuu nule a nedochází zde tudíž na dráze jejího šíření k tepelným ztrátám energie vlny.

Se zvětšováním elektronové koncentrace stává se index lomu v ionosféře menší než jedna. Při tom čím je větší frekvence vlny, tím méně se liší n od jedničky.

Hodnoty elektronové koncentrace ionosféry jsou takové, že tato zdatně ovlivňuje pouze vlny radiového rozsahu, avšak pro vlny světelné, vyzařované Sluncem, je zcela průzračná. Skutečně, při maximálních hodnotách $N \approx 5 \cdot 10^8$ pozorovaných v ionosféře a při délce vlny 5000 \AA ($0,5 \mu$), ležící v rozsahu viditelného světla, je n téměř rovno jedničce. Vlna délky 10 m, která leží na rozhraní krátkých a ultrakrátkých radiových vln, podléhá v prostředí při této hodnotě N silně refrakci — zakřivuje dráhu svého pohybu, poněvadž index lomu n je řádově 0,77. U vlny na př. délky 20 m je $n = \sqrt{-0,6}$, t. j. stává se imaginární hodnotou. To však znamená, že pro $N \approx 5 \cdot 10^8$ vlna délky 20 m nemůže se v prostředí vůbec šířit. Lze ukázat, že blíží-li se hodnota n nule, pak nastává úplný odraz vlny v takových místech prostředí a vlna do něho téměř neproniká; když se však n stane hodnotou imaginární, proniká vlna do prostředí jenom do vzdálenosti, která je řádově stejná jako délka vlny.

Činitel útlumu vlny se zvětšuje úměrně se součinem $N\nu$ a zmenšuje se se vzrůstající frekvencí.

Útlum elektromagnetických vln, šířících se ionosférou, stává se také zdatněm pouze pro vlny délek několika desítek metrů a více. Tak na př. pro maximální hodnoty součinu $N\nu \approx 10^{10}$ pozorované v ionosféře útlum amplitudy světelných vln, způsobený tepelnými ztrátami, dosáhl by 10% na dráze asi 10^{15} km, t. j. na vzdálenosti téměř miliardkrát větší, než je vzdálenost Země od Slunce; pro vlnu délky 10 m dochází ke stejnému útlumu na dráze 300 km a pro vlnu 50 m na dráze 12 km.

Podobně část rozsahu elektromagnetických vln, které jsou rovněž v ionosféře silně pohlcovány, jsou mikrovlny, které leží v ultrafialové části slunečního spektra, a to zejména vlny od $0,2-0,1 \mu$ až do paprsků röntgenových (délky vlny řádově 10 \AA). Pohlcováním těchto vln vykládá se ionisace atmosféry ve velkých výškách, t. j. vznik vlastní ionosféry a také světla noční oblohy za působení slunečního záření. Zejména proto nedojde k zemskému povrchu ani sluneční záření ultrafialové, ani röntgenové. Kdyby mohla tato záření pronikat atmosférou, potom by nebyl možný život na Zemi v jeho dnešních formách.

Jak se však zkoumá ionosféra radiovými vlnami, zejména vypouštěním výškových raket?

Při pokusech popisovaných v literatuře vybavuje se raketa vysílačkou, která vysílá radiové vlny na dvou, jak se říká koherentních frekvencích, jejichž vzájemný poměr je přesně číslo celé. Frekvence vysílaných radiových vln lze volit tak, aby na jedné z nich — nejvyšší — byl index lomu n ionosféry prakticky roven jedničce. Na druhé — nižší — aby se hodnota n značně od jedničky lišila.

V důsledku Dopplerova efektu budou se lišit frekvence vln přijímaných na Zemi od frekvencí kmitů, vysílaných z rakety, o hodnoty, úměrné rychlosti v pohybu zdroje a nepřímo úměrné rychlosti elektromagnetických vln v prostředí, jež se rovná $\frac{c}{n}$ (c je rychlost světla ve vakuu). Poněvadž pro jednu frekvenci je $n = 1$, avšak pro druhou se od jedničky liší, potom změněním rozdílu dopplerovských frekvencí lze stanovit hodnotu $1 - n$ podél dráhy pohybu rakety. Použijeme-li dále příslušných vzorců, které určují závislost mezi hodnotou n , elektronovou koncentrací N ionosféry a frekvencí vlny, lze vypočítávat závislost N na výšce.

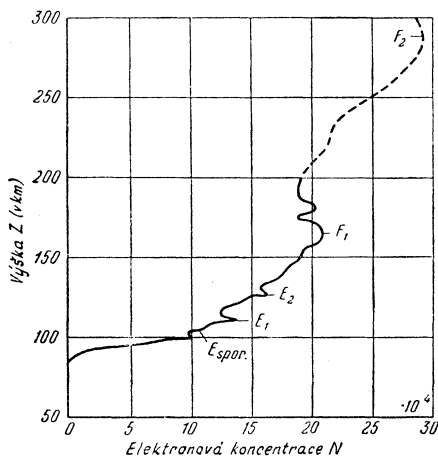
V důsledku vlivu geomagnetického pole je ionosféra dvojlomným prostředím. Proto nejnižší z vysílaných frekvencí vyvolávají v ionosféře dvě vlny — řádnou a mimořádnou. Tyto vlny se šíří v ionosféře různými rychlostmi a mají odlišné činitele útlumu. Na Zemi jsou proto přijímány místo jedné vlny nízké frekvence vyslané z rakety vlny dvě, jež mají v každém místě ionosféry rozdílné hodnoty n . Proto bývají často při takových pokusech přijímány dva rozdíly dopplerovských frekvencí, které určují jedinou hodnotu elektronové koncentrace N a změny této hodnoty od místa k místu.

Počet raketových letů, při kterých byla taková měření konána, dosahuje již několika desítek. Jak se zdá, všechny pokusy neprobíhaly se zdarem, a proto je uveřejněn poměrně malý počet jejich výsledků. Dnes je však již možné srovnávat příslušné údaje za polovinu slunečního cyklu (5—6 let). Jak známo, mění se v období asi 11 let množství skvrn a jiných útvarů pozorovaných na Slunci, se kterými souvisí intenzita slunečního ultrafialového záření. Jak bylo již naznačeno, je existence ionosféry podmíněna tímto zářením, a proto je důležité studovat proměnlivost stavu ionosféry v závislosti na slunečním cyklu.

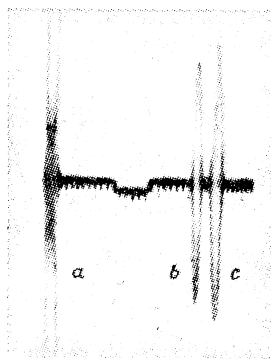
Obr. 1 ukazuje závislost elektronové koncentrace na výšce, jak vyplynula z měření ve dne pomocí raket typu Viking. Na obrázku vidíme, že od 80 km (níže se dosud nepodařilo vykonat přesná měření) neustále vzrůstá elektronová koncentrace ionosféry. Ve výškách 110, 130 a 170 km jsou na křivce $N(Z)$ nepřímá výrazná, avšak zřejmá maxima. Z údajů přímých měření, která byla vykonána v téže době, lze vypočítat další průběh $N(Z)$, který má ještě jedno maximum ve výšce 280 km (na *obr. 1* čárkováno). Výšky Z maxim na křivce dobře souhlasí s výškami vrstev E1, E2, F1, F2, které byly současně pozorovány se Země impulsovou methodou.

Podívejme se nyní, co se vlastně měří impulsovými methodami, jejichž výsledky jsou základem téměř všech dosud nashromážděných údajů o ionosféře.

Vysílačka, u které lze spojitě měnit frekvenci ve velkém rozsahu, vysílá periodicky krátké impulsy radiových vln. Současně se zvláštním přijímačem zachycují impulsy, bezprostředně přiváděné na přijímací antenu a impulsy odražené od ionosféry, které se vzhledem k předchozím zpožďují. Zpoždování rozličných signálů zachycuje se na stínítku katodového oscilografu a zpravidla se neustále fotografuje zvláštním způsobem na kinofilm. „Prohlídka“ ionosféry tímto způsobem v širokém rozsahu frekvencí netrvá při dnešních zařízeních déle než několik vteřin; výsledkem těchto měření je, jak dnes obvykle říkáme, výškově-frekvenční charakteristika ionosféry.



Obr. 1. Závislost elektronové koncentrace N na výšce Z nad zemským povrchem, získaná při letu rakety 7. V. 1954. Čárkovaně jsou zaneseny výsledky impulsových měření.



Obr. 2. Fotooscilogram dubletu signálu, odraženého do ionosféry;

a — přímo přijímaný signál vyslaný vysílačem; b — odražený impuls mimorádné vlny; c — impuls řádné vlny. Svislými čárkami jsou vyneseny t. zv. „časové značky“, příslušející „účinným“ výškám odrazu pro každých 10 km.

Co tato charakteristika ionosféry představuje?

Když vyšle ionosférická stanice impuls na jakékoli frekvenci a tento dosáhne spodní hranice ionosféry a začne do ní pronikat, zpomaluje svůj pohyb, poněvadž grupová rychlost jeho šíření je úměrná hodnotě n . Se zvětšováním výšky elektronová koncentrace roste, vlna dosahuje hladiny, kde se n stává rovno nule a potom hodnotou imaginární. Nad tuto hladinu vlna neprojde a dochází zde k jejímu úplnému odrazu. Odražený impuls je přijímán se zpožděním, které se rovná době jeho šíření až ke zmíněné ionosférické hladině a zpět. Čím je frekvence vlny vyšší, tím hlouběji do ionosféry vlna proniká. Následkem dvojlomu v ionosféře zde vzniknou, jak již bylo řečeno, místo jedné navracející se vlny dvě vlny. Proto, přesně řečeno, musí se vždy místo jednoho vyslaného signálu vrátit zpět od ionosféry dublet signálů (obr. 2). Za jistých podmínek je však rozdíl dob šíření obou odražených impulsů malý a tyto potom na stínítku katodového oscilografu splývají v jediný signál.

Na ionosférických stanicích je registrační zařízení přizpůsobeno tak, že na oscilogramech výškově-frekvenčních charakteristik každý přijímaný impuls zobrazuje stopu, opisující při změně frekvence křivku.

Předpokládejme, že ionosférická stanice koná sondáže ionosféry s nejnižšími frekvencemi. V takovém případě budou se vysílané vlny odrážet na nejnižších ionosférických hladinách a jejich zpoždování bude nejmenší. Zvyšuje-li se frekvence, nastávají odrazy od stále vyšších hladin. Konečně, při jisté frekvenci, dosáhne vlna výšky, ve které je

maximální ionisace N_M . V této oblasti doba šíření impulsu rychle vzroste. Frekvence vlny, při které $n = 0$ v hladině maxima elektronové koncentrace N_M , byla nazvána kritickou frekvencí vrstvy. Při dalším zvyšování frekvence nastává v registrovaném zpoždování skok, poněvadž vlna se začne odrážet ve výškách, které jsou větší než výška maxima N_M . Tých obraz se opakuje, blížíme-li se k další maximální hodnotě N_{M1} , která je větší než první hodnota N_M atd.

Na obr. 3 a 4 jsou dvě takto získané výškově-frekvenční charakteristiky ionosféry. Obvykle se vypočítává místo zpoždování Δt hodnota $z_s = c \Delta t$, zvaná účinnou výškou ionosféry, kterou lze odečítat na ose pořadnic. Na osu úseček se nanáší hodnoty frekvence.

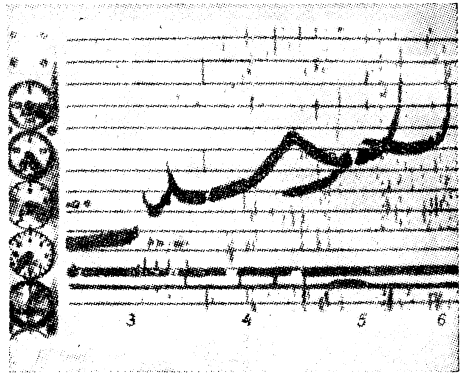
Na charakteristice na obr. 3 spatřujeme čtyři oblasti rychlého růstu zpoždování — účinných výšek odrazů signálů. Jsou zde vidět dvě větve křivek, jež odpovídají dubletu signálů na frekvencích větších než 4 MHz. Při tomto pokusu byla tedy pozorována čtyři maxima ionisace, a to maximum vrstev E1, E2, F1, F2. Na charakteristice na obr. 4 vidíme pouze 2 maxima ionisace (E a F2), při čemž dublet signálů je patrný jenom na konci oblasti F2. Rozdílnost těchto charakteristik se vykládá odlišností výškového průběhu $N(Z)$ za různých podmínek.

Co lze z těchto charakteristik ionosféry získat?

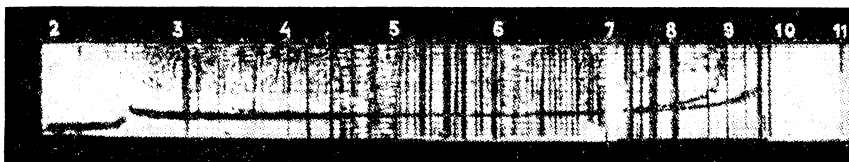
Předně určují tyto charakteristiky přímo a nejpřesněji hodnoty kritických frekvencí f_c (MHz) a tudíž i maximální hodnoty elektronové koncentrace $N_M = 1,24 \cdot 10^3 f_c^2$. V podstatě až dosud prostudované základní zákonitosti ionosféry charakterisují zejména také časovou, výškovou a geografickou proměnlivost hodnot elektronové koncentrace N_M různých maxim ionisace ionosféry nebo t. zv. kritických frekvencí různých vrstev.

Za druhé, pro každou frekvenci lze vypočítat účinné výšky odrazu vlny, což v četných případech umožňuje dosti přesně určit $N(Z)$, t. j. závislost elektronové koncentrace na výšce.

Výsledkem mnohaletých měření, která byla pravidelně konána na různých místech zemského tělesa, byly denní, sezónní, jedenáctileté geografické i jiné zákonitosti chování různých maxim ionisace ionosféry. Bylo zjištěno, že hlavním ionizačním činitelem v celé ionosféře je sluneční záření. Hodnoty N_M vrstev E a F1 mají dostatečně zákonitý denní (obr. 5), sezónní (obr. 6) a šířkový průběh, který odpovídá předpokládané theo-



Obr. 3. Výškově-frekvenční charakteristika ionosféry, fotografovaná za podmínek, kdy bylo možno pozorovat 4 maxima ionisace E1, E2, F1, F2.



Obr. 4. Výškově-frekvenční charakteristika ionosféry, fotografovaná za podmínek, kdy bylo možno pozorovat 2 maxima ionisace E a F2.

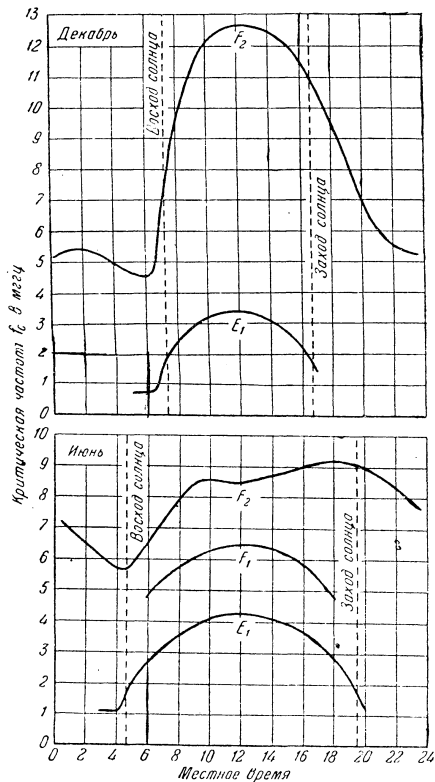
retické závislosti $N_M \approx \sqrt{\sec \chi}$ (χ zenitová vzdálenost Slunce). Maximum E2 vyskytuje se však pouze episodicky, možná proto, že často bývá menší, než maximum E1.

Bylo také zjištěno, že výšky maxim vrstev E se málo mění nad celým zemským tělesem, nezávisle na denní době, roku a cyklu sluneční aktivity. To ukazuje, že vznik různých maxim a jiných zvláštností ionisační křivky není ku podivu proces lokální, nýbrž jev, závislý na dynamice a na stavu ionosféry nad celým zemským tělesem.

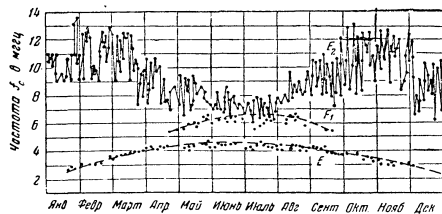
Maximum elektronové koncentrace vrstvy F2 se mění složitěji. Nehledě k tomu,

že ionisace je zde způsobována zejména též ultrafialovým slunečním zářením, nesleduje denní, šířkový a sezónní průběh N_M ve vrstvě F2 výšku Slunce, t. j. průběh intenzity jeho záření. Na př. v létě v poledne nejsou hodnoty N_M vrstvy F2 maximální (obr. 5). V době letního slunovratu (v letních měsících) jsou menší, než v době zimního slunovratu (obr. 6), na rovníku má však N_M minimum, při čemž změna elektronové koncentrace je souměrnější k šířkám magnetickým, než k šířkám geografickým.

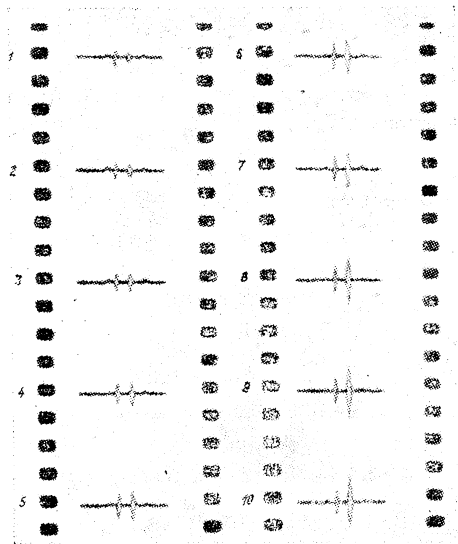
Jak lze vysvětlit tyto a četné jiné dobře se opakující zákonitosti ionosféry — dnes lze s jistotou těžko říci. Ještě složitější jsou jevy pozorované v období t. zv. ionosféric-



Obr. 5. Denní průběh středních měsíčních hodnot kritických frekvencí f_c vrstev E, F1, F2 ve středních zeměp. šířkách; prosinec a červen 1936.



Obr. 6. Sezónní průběh hodnot kritických frekvencí, získaný podle pozorování v Norsku.



Obr. 7. Snímky postupných měření signálů mimořádného a řádného. Fotografováno každou pětinu sekundy.

kých bouří a jiných poruch, kdy většina nebo někdy i všechny obvyklé vlastnosti ionosféry jsou porušeny. Při řešení těchto problémů narážíme na mnoho překážek, způsobovaných nedostačující znalostí vlastností vrchní atmosféry, jež nám současně zastiňuje četné vlastnosti Slunce, jejichž znalost je velmi důležitá k pochopení těchto jevů. Špatně známe charakter různých dějů, které se odehrávají na Slunci a chování slunečního záření na cestě od Slunce k Zemi. Nejjasněji vyniká složitost všech těchto problémů, studujeme-li jevy na severu, v oblasti magnetického a geografického pólu, kde se ionosféra chová často velmi fantasticky.

Struktura ionosféry

Jak je uspořádáno ionisované prostředí, čili t. zv. plasma, které se nachází ve vrchní atmosféře?

Jak již bylo naznačeno, ionosféra vzniká jako výsledek ionisace jednotlivých částic plynů atmosféry, a proto sestává z částic různého druhu: neutrálních atomů nebo molekul plynů, volných elektronů, kladných a také záporných iontů; poslední vznikají jako výsledek nepružných srážek elektronů s neutrálními částicemi plynů, které způsobují, že elektrony k nim „přilnou“. Vystává však otázka, zda jsou tyto částice rozloženy v ionosféře rovnoměrně, nebo v ní vznikají, podobně jako ve spodní atmosféře, nestejně-rodé útvary?

Abychom odpověděli na tuto otázku, vrátíme se znovu k některým vlastnostem radiových vln odražených od ionosféry.

Registrujeme-li v závislosti na čase amplitudu ojedinělého signálu typu, zobrazeného na obr. 2, je tato závislost téměř vždy během času nestacionární. Tak na př. na obr. 7, na kterém jsou snímky dubletů odražených signálů za každou pětinu sekundy, vidíme, že se jejich amplitudy rychle mění. Vrcholy takových signálů opisují obvykle nepravidelnou křivku, která se chaoticky s časem mění. Amplituda se při tom zmenšuje od hodnot maximálních do minimálních za dobu, měnící se od zlomků vteřiny do několika minut.

Z výsledků četných jemných výzkumů vyplynulo, že každý přijímaný jednotlivý signál sestává ve skutečnosti z množství signálů různé amplitudy, které přicházejí do místa pozorování a interferují (vzájemně se skládají) mezi sebou. Doby zpoždování (fáze) těchto signálů se také navzájem liší a mění se chaoticky s časem, rozdíly dob příchodu jednotlivých složek jsou však tak malé, že se jednotlivě neprojeví, nýbrž pozorujeme pouze jediný signál z nich slitý.

Jak vzniklo místo jednoho navracejícího se impulsu množství impulsů odražených od ionosféry?

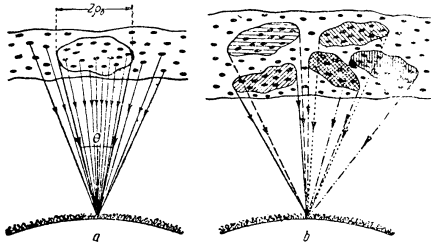
K vysvětlení tohoto úkazu vzpomeňme, že elektromagnetická vlna, odražená od libovolné oblasti, tvořené různorodými částicemi, přichází do místa příjmu jako svazek radiových vln. Lineární rozměry takové odrážející oblasti jsou určeny vzdáleností k místu odrazu a délkou vlny. Lze ukázat, že poloměr odrážející oblasti se v ionosféře mění průměrně v rozmezí od 2 do 8 km.

Je-li však jednotlivá odražená vlna časově nestacionární, pak nezbyvá nic jiného, než předpokládat, že v obvyklém svém stavu oblast, která formuje odražený signál, sestává vlastně z drobnějších ionisovaných nehomogenit (obr. 8a). Ty rozptylují energii dopadající vlny a vedou místo k jedné odražené vlně ke vzniku skupiny „odražených“ vln. Poněvadž změna amplitudy je děj rychlý, t. j. řídí se, jak ukazují pokusy, zákonem náhody, pak musí být v jediné odrážející oblasti dostatek nehomogenit, které se musí chaoticky pohybovat.

Pokusy tento názor skutečně potvrzují a odkrývají nehomogenity různého typu, zvané často ionisovanými oblaky. Nebudeme se zdržovat s podrobnostmi těchto iono-

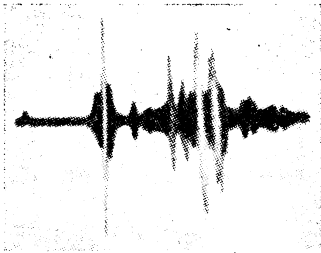
sférických výzkumů a s metodami zpracovávání experimentálních údajů, nýbrž ukážeme, k jakým výsledkům vedou.

Bylo zjištěno, že lineární rozměry zmíněných nehomogenit malého rozsahu se mění ve vodorovné rovině od několika desítek do několika set metrů, při čemž nejčastěji se setkáváme s rozměry 200—300 m. Těmito strukturálním „buňkám“ ionosféry přísluší (podobně jako molekulám) chaotické pohyby o rychlostech řádově 0,2—15 m/sec. Poněvadž životnost těchto nehomogenit, následkem jejich rychlého prolínání — difuze, leží v mezích od zlomků vteřiny do několika minut, proto rychlosti pohybů možná vlastně charakterisují pouze proces vznikání a zanikání těchto nehomogenit, kmitavé pohyby plasmy atp. Rovněž nemáme přesvědčivých dat o poloze těchto nehomogenit. Je možné, že se nacházejí pouze ve výškách kolem 90—120 km.

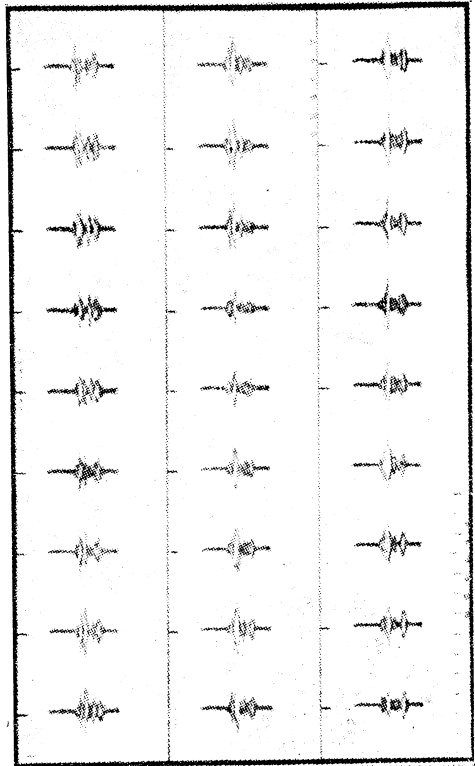


Obr. 8. Schematické zobrazení struktury ionosféry

a — jediná odražející oblast, vytvářející v místě pozorování jediný „odražený“ signál; *b* — stav ionosféry, při kterém současně s nehomogenitami malých rozměrů existují nehomogenity větších rozměrů.



Obr. 9. Fotooscilogram skupiny signálů, odražených nehomogenitami velkého rozměru ve výškovém rozmezí průměrně 300 km.



Obr. 10. Snímky postupných registrací skupiny signálů. Fotografováno každou pětinu sekundy.

Kromě toho jsou někdy pozorovány nehomogenity větších rozměrů (2—10 km). Tyto nehomogenity (*obr. 8b*) způsobují, že v místě příjmu zachytíme místo jednoho slitého impulsu množství vzájemně se skládajících a různě s časem podstatně se zpožďujících impulsů. Tyto skupiny signálů zaujímají na oscilogramu oblast o rozměrech mnoha desítek km (*obr. 9*) a jejich struktura se s časem také složitě mění (*obr. 10*). Tyto nehomogenity jsou pozorovány převážně ve výškách 200—300 km, hlavně v noci. Pohybují-li se rovněž zmíněnými chaotickými rychlostmi není známo.

Bylo také objeveno, že v ionosféře existují víry, jejichž rychlosti se mění od deseti

do několika set m/sec, při čemž nejčastěji se vyskytují rychlosti 70—80 m/sec. Zda to platí v celé ionosféře, není rovněž známo. Bylo však zjištěno, že ve větších výškách, kde se nachází maximum F2, vyskytuje se bohatší spektrum rychlostí vírů s maximem 200—300 m/sec.

Konečně existují jak ve výškách 100—130 km, tak i ve výškách 200—300 km nehomogenní útvary velkého rozsahu o vodorovných rozměrech až 400—500 km. Ve spodní atmosféře jsou mnohdy silněji ionisovány, než vrstva E, a tvoří t. zv. sporadickou vrstvu E.

Jaké jsou příčiny, které vedou ke vzniku popsaných nehomogenit? Jak souvisí s vlastní podstatou ionosféry a do jaké míry jsou vyvolány působením vnějších činitelů?

Na tyto otázky dnes ještě nemůžeme odpovědět. Je třeba napřed rozřešit četné složitě problémy theoretické fyziky a vykonat nové jemné experimentální výzkumy. Jakou máme zvolit metodiku pro tyto pokusy, je rovněž ještě nejasné.

Příčinou vzniku výše zmíněných nehomogenit může být na př.: kmitání plasmy; vlny, které vznikají vzájemným působením elektromagnetických vln a mechanických sil — t. zv. gyromagnetické jevy; konvektivní labilita, která vede na př. ke vzniku granulace na Slunci atp. Nejpravděpodobnějším mechanismem, vedoucím ke vznikání nehomogenit, je asi turbulence ionosféry.

Lze předpokládat, že působením driftu ionosférických oblastí vzniká turbulentní proudění. Toto proudění je podřízeno statistickým zákonům, poněvadž v něm neustále dochází ke vznikání, k zanikání a k opětovnému vznikání vírů, při čemž tento proces probíhá samovolně.

Četná experimentální fakta potvrzují tento názor kvalitativně a do jisté míry kvantitativně. Tak na př. nehomogenita v libovolné oblasti ionosféry se zvětšuje, vzrůstá-li v ní rychlost vírů. To souhlasí s dnešními představami, že turbulence roste se zvětšováním rychlosti proudu částic. Dále bylo zjištěno, že množství energie rozptylované ionosférou na ultrakrátkých vlnách, obecně řečeno, pravidelně ionosférou neodrážěných, řádově také souhlasí s hodnotou odvozenou theoreticky na základě teorie turbulence. Totéž plyne z výzkumů kmitání intensity radiového záření Galaxie na metrových vlnách. Teorie turbulence poskytuje kromě toho rozměry vírů a jejich rychlosti, jež obecně souhlasí s výše uvedenými údaji, které charakterisují nehomogenitu ionosféry. Tak na př. dostáváme, že ve výšce 100 km jsou rozměry vzdušných vírů v rozmezí od 2—8 m a jejich rychlosti v rozmezí 5—8 m/sec. Ve výšce 200 km jsou však rozměry vzdušných vírů řádově 160—1600 m při rychlostech 20—40 m/sec.

Mikrostruktura ionosféry

Zdržíme se nyní velmi krátce u některých údajů o pružných a nepružných srážkách, rozličného typu, elektronů a fotonů s ionty a neutrálními částicemi, t. j. u dějů, které, jak říkáme, charakterisují mikrostrukturu ionosféry.

Při těchto dějích má hlavní význam koncentrace neutrálních částic N_H a koncentrace elektronů N , teplota plynu T , střední tepelná rychlost v a délka volné dráhy elektronů λ , počet pružných srážek elektronů ν a pravděpodobnost fotoionisace, která je obvykle charakterisována efektivním průřezem σ (cm²), a hodnoty efektivního činitele rekombinace α , který charakterisuje rekombinační děje, t. j. zanikání volných elektronů nebo iontů v plasmě.

Nebudeme přihlížet k tomu, jak byly tyto ionosférické parametry změřeny nebo odhadnuty, nýbrž uvedeme pouze jejich hodnoty v *tab. 1* a *2*.

Co ukazuje rozbor těchto údajů?

Z *tab. 1* především vidíme, že vypočteme-li počet srážek elektronů s neutrálními částicemi podle dnes známých hodnot koncentrace neutrálních částic N_H a teploty T

(získaných při raketových výzkumech, při výzkumech vrchní atmosféry radiovými metodami, při výzkumech meteorů a světla noční oblohy atp.), nacházíme uspokojivý souhlas s hodnotami naměřenými pouze ve výškách 100—120 km (E). V oblasti vrstev F1 (200 km) a F2 (300—400 km) se však příslušné hodnoty liší průměrně 10, 50 i 100krát. Co je příčinou takového rozdílu? Souvisí to s nepřesnou znalostí složení, hustoty a teploty vrchní ionosféry? Částečně ano. Hlavně to však naznačuje, že ve vrchní ionosféře mají hlavní význam srážky elektronů nikoli s neutrálními částicemi, nýbrž s ionty. Vypočteme-li theoreticky příslušný počet srážek, pak za známých předpokladů dostáváme hodnoty, blízké experimentálním. Jak to dokázat experimentálně je dosud ještě nejasné. Z toho důvodu a také proto, že bez znalosti ν nelze vypočítávat útlum radiových vln v ionosféře, je objasnění závislosti ν na výšce principiálně zajímavou a pro praxi důležitou úlohou. Dosud se to nepodařilo ani při jediném pokusu.

Ještě překvapivější, dosud však nepochopitelný rozdíl mezi experimentálními a theoretickými údaji vidíme v *tab. 2*.

Tabulka 1.

Různé parametry ionosféry ve středních výškách

Výška Z km	N_H cm ⁻³	N el/cm ³ v poledne	T	ν cm/sec	λ cm	ν sec ⁻¹ experimentálně	ν sec ⁻¹ podle údajů ν a λ
100	$3 \cdot 10^{13}$	$(1-2) \cdot 10^{16}$	220	10^7	50	$(1-5) \cdot 10^6$	$2 \cdot 10^6$
200	10^{11}	$(2-4) \cdot 10^6$	800	$2 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^4$	10^4	10^3
300	$3 \cdot 10^9$	$(5-20) \cdot 10^6$	1500	$2,7 \cdot 10^7$	$6 \cdot 10^5$	$2 \cdot 10^3$	40
400	10^9		2000	$3,0 \cdot 10^7$	$2 \cdot 10^6$		15

Tabulka 2.

Efektivní hodnoty činitelů fotoionisace a efektivní rekombinace

Z km	Fotoionisace cm ²		Rekombinace a cm ³ /sec	
	theoreticky	experimentálně	theoreticky	experimentálně
100—120.	$2 \cdot 10^{-18} - 10^{-20}$	$10^{-18} - 2 \cdot 10^{-17}$	10^{-12}	$2 \cdot 10^{-9} - 10^{-9}(?)$
200—300.	$0,1 \cdot 10^{-17}$	$10^{-16}(?)$	10^{-12}	$(2-5) \cdot 10^{-10}(?)$

Výpočty fotoionisace atomárního (O) nebo molekulárního (O₂) kyslíku na základě kvant ultrafialového záření vedou k závěru, že v oblasti vrstvy E je atomární kyslík pravděpodobně neaktivnější ionisovanou částicí. Tento závěr neodporuje žádným údajům. V oblasti vrstvy F se však theoretické a experimentální hodnoty liší 100krát. Při tom hodnota $\sigma = 10^{-15}$ cm² vypočítaná z výsledků pokusů, nevychází theoreticky ani pro jediný ze známých procesů. Ještě větší rozdíl nacházíme, srovnáváme-li činitele rekombinace. Pro oblast vrstvy E se liší $2 \cdot 10^3 - 10^4$ krát, v oblasti vrstvy F však 200—500krát. Je těžké podat jakýkoli výklad těchto výsledků. Poněvadž kvantové výpočty byly provedeny pouze pro atomární kyslík, pak nezbyvá než předpokládat, že nejen tyto částice, nýbrž i jiné a také možná jiné procesy, jsou důležité pro rekombinaci v ionosféře. Naopak, správnost metodiky výpočtu těchto veličin z experimentálních údajů není dostatečně prověřena, poněvadž theoreticky nebyla zkoumána rovnice rovnováhy ionisace v ionosféře a její řešení, jež jsou základem těchto výpočtů.

*

Výše jsme se seznámili s některými směry ionosférických výzkumů, s četnými známými údaji o ionosféře a v ní prostudovanými jevy. Je patrné, jak jsou tyto výzkumy rozsáhlé. Zároveň s nutností řešit nejobecnější principiální problémy theoretické fyziky se ukazuje, že je třeba řešit složité inženýrské úkoly. Zájmy fyziků a chemiků, geofyziků a astronomů, radioinženýrů a aerodynamiků se v tomto vědním oboru stýkají.

Jaké jsou další směry ionosférických výzkumů?

V historii vědy je známo mnoho příkladů, kdy jakoby nenadále a neočekávaně byly objeveny nové metody nebo teorie, které vedly ke značným úspěchům. Je možné, že s podobnými fakty se setkáme již v nejbližší době i v tomto vědním oboru. Nové směry výzkumů, které se již v posledních letech provádějí, nepochybně naznačují možnosti dalšího pokroku v tomto oboru. Podstatný význam při těchto pokusech budou pravděpodobně mít v nejbližších letech umělé družice Země.

Především je třeba ještě jednou říci, že raketové výzkumy budou jistě hojně přispívat ke značnému prohloubení našich znalostí o ionosféře.

Statistické výzkumy nestacionárních útvarů a pohybů v ionosféře a nové experimentální metody, propracované v této souvislosti, umožní hlouběji prostudovat nestacionárnost a neproniknutelnost ionosféry. Úspěšné řešení z toho vyplývajících úkolů podstatně závisí na dalším vývoji teorie turbulence a tak zvaných gyromagnetických jevů, které dnes umožňují činit pouze orientační odhady.

Velký význam při studiu ionosférických jevů a jejich souvislosti s ostatními jevy na Zemi a s vnějšími činiteli, které na ně působí (sluneční záření, meteorické roje atp.), budou mít radiolokační metody výzkumu meteorů a polárních září a radioastronomické výzkumy záření Galaxie a Slunce a také studium odrazu radiových vln od Měsíce. Máme důvody myslet si, že není daleko den, kdy se takto podaří přímo objevit korpuskulární proudy částic na jejich dráze od Slunce k Zemi. To bude velkým úspěchem a významnou událostí v historii vědy.

Při studiu stavby ionosféry, její geografické a časové proměnlivosti, podstaty a charakteru průběhu ionosférických bouří nad celým zemským tělesem, bude pravděpodobně mít význam další rozvoj method t. zv. šikmé sondáže ionosféry. Podstata těchto měření spočívá v tom, že směrovými antenami se podaří zachytit vlnu, vyslanou šikmo k ionosféře, která se vrátí po rozptýlení od zemského povrchu do vysílacího místa. Tak lze zkoumat složení ionosférické odrážející oblasti, která je vzdálena mnoho set km.

Takové je, neúplně a v krátkosti řečeno, zaměření ionosférických výzkumů podle prací z poslední doby. Kolik pozornosti připoutává k sobě tento vědní obor, je vidět z toho, že pouze v posledních měsících bylo pět mezinárodních konferencí věnovaných těmto problémům. Velký význam se přikládá studiu ionosféry také v programu třetího Mezinárodního geofyzikálního roku, který začne v polovině r. 1957.

Přeložil Dr Jan Pícha