

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie

Z. Plavcová

Kosmická elektrodynamika

Pokroky matematiky, fyziky a astronomie, Vol. 3 (1958), No. 5, 598--606

Persistent URL: <http://dml.cz/dmlcz/139974>

Terms of use:

© Jednota českých matematiků a fyziků, 1958

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>

ASTRONOMIE

KOSMICKÁ ELEKTRODYNAMIKA

1. Úvod

V roce 1956 se ve Stockholmu konala první mezinárodní konference o elektromagnetických dějích v kosmické fyzice. Této konferenci se zúčastnilo 90 delegátů ze 14 zemí. Již z toho je vidět, že o tento vědní obor je v poslední době velký zájem. Tento vzrůstající zájem vyvolaly hlavně výzkumy v radioastronomii.

Značná část elektromagnetických dějů je totiž přímo spojena s emisí radiových vln. Tak na příklad občasné prudké změny ve sluneční atmosféře mají za následek tzv. radiová vzplanutí, která mohou být registrována pozemskými radioteleskopy. Některé z uvažovaných dějů nemají sice žádnou zjevnou souvislost s emisí na radiových vlnách, ale přesto mohou mít nepřímou souvislost s radiovým zářením, a proto i jimi se zabývá radioastronomie. Jsou to na příklad poruchy, které se objevují v nitru magnetických hvězd.

Největší část kosmické elektrodynamiky se zabývá studiem pohybů elektricky vodivého prostředí v přítomnosti magnetického pole. Tuto část nazýváme hydromagnetikou nebo magnetohydrodynamikou.

Prvé práce v tomto vědním oboru se zabývaly původem samotných kosmických magnetických polí. Vznikly různé „dynamové“ teorie, podle kterých určité pohyby vodivého prostředí mají za následek zvětšování nebo alespoň trvání magnetických polí Země, Slunce a magnetických hvězd. Velmi důležitý objev udělal v hydromagnetice Alfven, který první popsal hydromagnetické vlny a dokázal, že mohou přenášet magnetickou energii. Později se hydromagnetická teorie hlavně soustřeďovala na různé mechanické vlivy kosmických magnetických polí. Tak bylo studováno působení magnetického pole na strukturu slunečních skvrn a korony, dále nestabilita způsobovaná magnetickými poli a oscilace magnetických hvězd.

Snad nejzajímavější jsou pro radioastronomy teorie elektromagnetického zahřívání. Některé z novějších teorií jsou probírány dále. V článku je rovněž podán přehled dnešních názorů na magnetické pole Slunce, naší Galaxie a Krabi mlhoviny.

Obvykle se hydromagnetická teorie zjednodušuje zanedbáváním vlivu elektronové setrvačnosti a posuvných proudů. To jinými slovy znamená, že se neuvažují oscilace plasmatu (nebo oscilace prostorového náboje). Tyto mohou být za jistých okolností velmi důležité, na příklad ve spojení se vznikem slunečních radiových vzplanutí. Při určitých problémech musíme studovat dokonce i pohyb jednotlivých iontů. Tomu je tak např. při urychlování kosmických paprsků a při pohybu iontů v magnetickém poli, kdy jsou vysílány radiové vlny, jak předpokládá Alfven a Herlofson. Tímto mechanismem

vysvětlujeme dnes většinu kosmické radiové emise a i určitou část radiové emise sluneční.

Základním studiem v kosmické elektrodynamice je rozbor sinusových vln v plně nebo částečně ionisovaném plynu, který je prostoupený magnetickým polem. (Takovémuto prostředí budeme pro zkrácení nadále říkat magnetoiontové prostředí.) Z takovýchto jednoduchých vln můžeme zkombinovat i složitější rozruchy a můžeme studovat magnetické pole, pohyby plynu, přenos energie a zahřívání. Rozruchy tohoto charakteru jsou totiž asi základem valné části kosmické emise na radiových vlnách (té, která nemá tepelný původ) a rovněž tak kosmických paprsků. Proto jsou v 2. odstavci popsány některé nejnovější výsledky magnetoiontové vlnové teorie.

Teoretické výsledky jsou pak v dalších odstavcích použity pro podmínky, které byly pozorovány v různých oblastech astronomie. Snad nejzajímavějším prostředím je sluneční atmosféra. V ní totiž vznikají jak radiová záření rozličných typů, tak i kvanta s vysokou energií, která vytvářejí ionosféru a částice, způsobující magnetické bouře a polární záře. Všechny tyto úkazy mají asi převážně původ v hydromagnetických dějích. Mimo sluneční atmosféru je probírán i meziplanetární a mezihvězdný prostor, o nichž obou je známo, že jsou to magnetoiontové oblasti, ve kterých se objevují zajímavé elektromagnetické děje. Konečně je v tomto článku diskutována i Krabí mlhovina. Krabí mlhovina vznikla výbuchem supernovy, který se odehrál před 900 lety. Tato mlhovina je velmi silným zdrojem radiových vln. Bylo zjištěno, že má magnetické pole s ohromnou celkovou energií, asi 10^{41} Joulů, což je energie Slunce vyzářená za 10^7 let.

2. Slabé vlny v magnetoiontovém prostředí

Většina dějů v magnetoiontovém prostředí může být studována jako různé druhy vln. Teorie silných vln je zcela nelineární, a proto velmi složitá. Proto byla doposud věnována pozornost hlavně slabým vlnám, u kterých je rozbor daleko jednodušší a které přesto poskytují informace o mnoha složitých dějích. Dobře známe dva druhy těchto vln: řádné (O) a mimořádné (E). V běžné magnetoiontové teorii se však dělají určité zjednodušující předpoklady; na příklad se zanedbává pohyb těžkých iontů a tlak elektronového plynu. Tím se však vylučují různé jiné možné vlny. Výše zmíněné hydromagnetické vlny objevil Alfvén a použil jich v astrofysice. Kromě nich by však měla existovat ještě zvuková vlna, která může být modifikována magnetickým polem, a dále oscilace prostorového náboje neboli oscilace plasmatu.

Úplnější magnetoiontová teorie rozlišuje celkem čtyři vlny. Jsou to za prvé dvě hydromagnetické vlny, které nazýváme Alfvénovy nebo magnetohydrodynamické. Říkáme jim také hydromagnetické vlny O a E , neboť odpovídají radiovým vlnám O a E . Jsou to určité mezní případy; jejich frekvence jsou tak vysoké, že pohyb těžkých iontů je zanedbatelný. Další dvě vlny jsou magnetická zvuková vlna (S) a plasmatická vlna (P).

Detailně byly prozkoumány vlny O a E . Jsou, podobně jako odpovídající radiové vlny, elipticky polarisované. Když se šíří podél nebo kolmo k stabilnímu magnetickému poli, stávají se kruhové, resp. lineárně polarisovanými. Pokud frekvence těchto vln leží daleko pod gyromagnetickou frekvencí těžkých iontů, jsou rychlosti těchto vln nezávislé na frekvenci.

Hydromagnetická vlna S je vlnou podélnou. Na frekvencích hodně pod iontovou gyrofrekvencí má rychlost zvuku a když se šíří podél magnetického

pole, je to většinou čistě zvuková vlna (magnetické pole nehraje roli, slabý vliv však má elektrický volný náboj). Konečně vlna P je nejobecnějším případem oscilací plazmatu; její vlastnosti byly modifikovány přítomností magnetického pole.

Z následujících odstavců jasně vysvítá důležitost magnetohydrodynamických vln v kosmické elektrodynamice. Tyto vlny umožňují přeměnu energie kinetické na elektromagnetickou a naopak. Přenášejí tuto energii z jednoho místa na druhé a rozptylují ji ve formě tepla a někdy i v jiných formách, jako je excitace a ionisace plynových částic a energie kosmických paprsků. Velmi zajímavá je rychlost útlumu těchto vln. V isotropickém vodivém prostředí závisí pouze na elektrické vodivosti σ a vlnové délce λ . Vlna poklesne na hodnotu $\exp(-1)$ původní hodnoty v čase přibližně $\sim \lambda^2$. V magnetoiontovém prostředí je však situace daleko složitější. Elektrická vodivost je totiž tensor a má tři složky: σ_0 podél magnetického pole, σ_1 kolmou k poli a v rovině elektrického vektoru a σ_2 kolmou k oběma. Nedávno byla stanovena efektivní vodivost magnetoiontového prostředí vztahem $\sigma_3 = \sigma_1 + \frac{\sigma_2^2}{\sigma_1}$. Pomocí efektivní vodivosti je možno jednoduchým způsobem určit útlum hydromagnetických vln. Rovněž je možno použitím takto definované vodivosti vyjádřit jednoduše útlum magnetického pole ve vodiči s rozměrem L a ve smyčce s rozměry L ve větším magnetickém poli. Obě jsou dány vztahem $\sigma_3 L^2$.

Tohoto výsledku bylo použito při určování rychlosti absorpce ve sluneční atmosféře a v mezihvězdném prostoru a z toho vznikajícího oteplení plynu.

3. Sluneční atmosféra

Ve sluneční atmosféře dochází k elektromagnetickým dějům nejrůznějších druhů. V mnoha základních problémech nebylo ještě mezi vědci dosaženo shody. Tak na příklad není ještě zcela jasné, proč sluneční korona, ležící mezi relativně chladným Sluncem a ještě chladnějším okolním prostorem, se udržuje na teplotě 10^6 °K a místy až 10^7 °K.

Je téměř jisté, že sluneční atmosféra je zahřívána ze zdola a že potřebná energie se vytváří pohyby hmoty pod povrchem Slunce. Některé z těchto pohybů způsobují pozorované granule; mohou to být ve skutečnosti nadzvukové proudy, vyořující se z povrchu Slunce. Tuto energii musí rovněž přenášet některá ze čtyř výše uvažovaných vln. Proti vlnám S a P jsou velmi podstatné námitky. Až do nedávna se zdálo, že to nemohou být ani magnetohydrodynamické vlny. Doposud se totiž při výpočtu elektrické vodivosti sluneční atmosféry předpokládalo, že je možno zanedbat neutrální atomy. Neutrální atomy mají totiž ve srovnání s ionty velmi malý efektivní průřez pro srážky a mají tedy zanedbatelný vliv na elektronovou frekvenci srážek. Když se však zanedbají neutrální atomy, je elektrická vodivost tak velká, že je vlnový útlum zanedbatelný a tedy i zahřívání plynu je zcela nepatrné.

Při novějších výzkumech se však ukázalo, že neutrální atomy mohou v tomto případě být dosti důležité. Za typických chromosférických podmínek by totiž mohla přítomnost 10% neutrálních atomů zmenšit vodivost až o 8 řádů a podle toho i zvětšit absorpci. Pozorované zahřívání je pak možno vysvětlit vlnami O a E .

Objasníme nyní alespoň zhruba, proč mají neutrální atomy tak pozoruhodný vliv při šíření hydromagnetických vln. Magnetické siločáry můžeme

přirovnat k pružné struně, na kterou jsou navlečeny ionty a elektrony jako korálky. Hydromagnetická vlna je pak elastickou vlnou, která postupuje podél této struny a způsobuje její vibraci, při čemž ionty kmitají dopředu a zpět. Tento pohyb sdílejí jak kladné, tak i záporné ionty. Jejich jediným relativním pohybem je slabý posuv působený elektrickým proudem. Srážka dvou iontů je tedy prakticky bezvýznamná. Situace se však značně změní, když vezmeme v úvahu i neutrální atomy. Ty nejsou nuceny kmitat a mohou tedy dosáhnout značných rychlostí vzhledem ke kmitajícím iontům. A tak srážka atomu s těžkým iontem může způsobit velký přenos energie z vlny do plynu. V případě slabých vln je výsledkem zahřívání celého plynu. Tímto způsobem můžeme tedy vysvětlit vysokou teplotu sluneční atmosféry.

Pozorované mocné pohyby plynů nad slunečními skvrnami, které dosahují rychlostí až několika set kilometrů za vteřinu, naznačují přítomnost velmi silných hydromagnetických vln. Pozorováním tepelné radiové emise bylo zjištěno, že teplota plynu v těch místech je vyšší než 10^7 °K. Toto silné zahřátí může být opět způsobeno vlnami *O* a *E*. V tomto případě jsou však tyto vlny tak silné, že mohou působit ještě i jiné děje.

Když je relativní rychlost iontového plasmatu a neutrálního atomového plynu dosti vysoká, asi 50–100 km/s, mohou být neutrální atomy srážkami s těžkými ionty excitovány a ionisovány. Plyn může dosáhnout daleko vyššího stavu excitace a ionisace, než by odpovídalo jeho „teplotě“ měřené čistě nahodilými rychlostmi jeho částic. Tak může vzniknout silná emise světla, ultrafialových paprsků a paprsků *X*. Ve skutečnosti je to vlastně obloukový výboj; elektrické pole je indukčním polem vzniklým pohybem magnetických siločar. Tímto mechanismem můžeme vysvětlit známé vlastnosti erupcí.

Erupce je obvykle provázena emisí silného radiového šumu. Má tedy erupce a radiový šum asi společný původ. Vlastnímu mechanismu se dobře nerozumí, avšak zdá se, že rozruch přichází z míst, kde se prudce mění elektronová hustota. Až doposud se myslelo, že z nitra Slunce postupují ven plyny s vyšší elektronovou hustotou ve formě jakýchsi mraků, nyní se však zdá, že stejně dobře by to mohly být vlnové jevy. Změřené rychlosti ven se pohybujících diskontinuit v době erupce jsou řádově 10^3 až 10^5 km/s. Rychlost slabé vlny *S* v oblasti s teplotou 10^7 °K je několik set kilometrů za vteřinu. Je však pravděpodobné, že tyto vlny se změní v nárazové vlny, když se pohybují do oblastí s nižší hustotou a že postupují rychleji. Je tedy možno těmito vlnami vysvětlit pomalu se pohybující rozruchy, které zhruba za den po svém vzniku mohou působit geomagnetické jevy obvykle pozorované po erupci — magnetické bouře, ionosférické poruchy a polární záře.

Obtížnější je vysvětlení rychle se pohybujících rozruchů. Uvažovalo se jak o vlnách *O* a *E*, tak o vlně *P*. Ve všech případech jsou však jisté nesnáze.

V případě několika velmi jasných erupcí byly pozorovány i kosmické paprsky. Jejich původ může být vysvětlen rovněž vlnami *O* a *E*. Tyto vlny musí být velmi intenzivní a musí mít dostatečně krátkou vlnovou délku. Ve 4. odstavci je popsán způsob, jakým mohou tyto vlny urychlit ionty až na energie odpovídající kosmickým paprskům.

Fyzikální teorie sluneční atmosféry je tedy více méně záležitostí elektromagnetiky. Totéž platí i pro mnohé hvězdy, o kterých je známo, že mají magnetické pole.

4. Mezihvězdný prostor

Až do nedávna se zdálo velmi nepravděpodobné, že by mohlo ve studeném prostoru mezi hvězdami docházet k nějakým zajímavým elektromagnetickým jevům. Naše Galaxie má diskový tvar s poloměrem asi 50 000 světelných let. V blízkosti roviny Mléčné dráhy leží nepravidelná mračna plynu a prachu, ze kterých se stále tvoří nové hvězdy. Plyn v těchto mračnách, jehož hustota je asi $10-100$ atomů/cm³, je částečně nebo plně ionisován. I plyn mezi oblaky je částečně ionisován, jeho hustota je však velmi malá — asi 0,1 atomu/cm³. A tak celý mezihvězdný prostor je vlastně iontové plasma.

Optickými metodami bylo objeveno v mezihvězdném prostoru magnetické pole. Zdá se tedy, že celá Galaxie je magnetoiontové prostředí. Je tedy zcela možné, že v prostoru mezi hvězdami existují elektromagnetické jevy a obzvláště pak hydromagnetické rozruchy. Tomu nasvědčuje to, že hustota magnetické energie $H^2/8\pi$ je srovnatelná s kinetickou energií nahodilých pohybů plynných mraků. Ve spirálních ramenech je intenzita magnetického pole asi $5 \cdot 10^{-6}$ gaussů, průměrná hustota iontů je 1/cm³ a nahodilá rychlost asi 10 km/s. Poměr magnetické energie ke kinetické je tedy asi 1. Hydromagnetické vlny mohou tedy být dosti mohutné.

Zájem o studium mezihvězdného prostoru po této stránce se ještě zvýšil, když bylo zjištěno, že na radiových vlnách vysílá naše Galaxie z daleko rozsáhlejší oblasti, než je oblast známá z viditelného oboru spektra. Na radiových vlnách má Galaxie zhruba tvar koule, jejíž poloměr je přibližně stejný jako poloměr opticky pozorovatelného disku. Hustota plynu v oblastech, které známe jen z radiového pozorování, je velmi malá. V této „neviditelné“ oblasti Galaxie však existuje rovněž magnetické pole a vznikají zde i kosmické paprsky. Hustota plynu je zde nepatrná, avšak jeho teplota je neobyčejně vysoká — 10^{12} °K nebo i více. Magnetické pole brání rozpínání plynu do vnějšího prostoru. K emisi na radiových vlnách dochází tzv. „synchrotronovým“ procesem. Elektrony a snad i pozitrony se pohybují po spirálách v magnetickém poli a vlivem urychlování vysílají radiové vlny.

Těmito radioastronomickými objevy vyvstaly nové problémy, a to hlavně elektromagnetické. Prvním problémem je původ samého magnetického pole. V pozemských laboratořích vzniká magnetické pole na příklad tehdy, když se připojí elektromotorická síla na vodič a vodičem počne protékat proud. V kosmickém měřítku je však tento jednoduchý mechanismus asi vyloučen, protože obvody připadající v úvahu mají ohromně velkou samoindukčnost. Je spíše pravděpodobné, že ionisovaný plyn, ve kterém je slabé počáteční magnetické pole, se pohybuje takovým způsobem, že napíná magnetické siločáry a tak zvětšuje magnetickou energii na úkor energie kinetické. Dříve se soudilo, že dotyčný pohyb je vlastní turbulence plynu. Tím by však vznikalo neuspořádané magnetické pole. Avšak galaktické magnetické pole se zdá být spíše uspořádané do určitého tvaru, jako by vznikalo z uspořádaného pohybu. Kdyby původní magnetické pole mělo radiální složku, mohla by mít vliv na jeho zesilování diferenciální rotace Galaxie. Magnetické siločáry bychom si pak mohli představit jako elastické pásy spojující dvě soustředná kola, která mají různou rotační dobu. Neustále by se napínaly a svinovaly mezi koly. Tento mechanismus „magnetického rotujícího kola“ by mohl existovat i v Krabí mlhovině.

Galaktické magnetické pole má obzvláštní důležitost ve spojení s kosmic-

kými paprsky. Působí jako jakási „jímka“ na ionty s velkou energií, které krouží po spirále kolem magnetických siločar a zůstávají tak zachyceny po miliony let. Magnetické pole pak může dávat vznik kosmickým paprskům a to mechanismem, který první navrhl Fermi. Ve velmi populární formě lze tuto teorii vysvětlit takto: Celkové magnetické pole se skládá z jednotlivých svazků magnetických siločar. Každý takovýto svazek je spojen s plynným mrakem. Tyto mraky mají nahodilé rychlosti asi 10 km/s. Můžeme je pokládat za jakési „molekuly“ plynové směsi. Jejich hmoty jsou velké, řádově takové, jako je hmota Slunce nebo i větší. Jinými „molekulami“ v této plynové směsi jsou těžké ionty. Tyto ionty se elasticky srážejí s osamocenými mraky magnetického pole a v průměru získávají energii. Je dobře známo, že v plynné směsi je snaha po rovnoměrném rozložení energie mezi jednotlivé složky. Tak podobně v galaktické směsi jsou ionty urychlovány, až po milionu let dosáhnou některé z nich energií kosmických paprsků.

V tomto tvaru má Fermiova teorie určité kvantitativní nedostatky. V upraveném tvaru jsou jednotlivé shluky magnetického pole nahrazeny hydromagnetickými vlnami a urychlování se děje statistickým betatronovým procesem, který je způsobený fluktuacemi v intenzitě pole. Zda může být intenzita kosmických paprsků hrazena tímto způsobem, závisí na intenzitě hydromagnetických vln. Ta pak závisí na rychlosti absorpce vln.

Jak jsme se zmínili již dříve, jsou ve sluneční atmosféře neutrální atomy velmi podstatným činitelem při útlumu vln O a E . Podobně je tomu v Galaxii. V oblastech, kde je plyn zcela ionisován, je útlum, způsobený viskositou a konečnou elektrickou vodivostí, velmi malý. V těch oblastech je Fermiův urychlovací proces dostatečně účinný. Kde jsou však neutrální atomy, tam je situace zcela jiná. I když je přítomno jen neutrální helium (asi 10% veškerého plynu), vzroste absorpce o pět řádů. Do jaké míry je plyn v mezihvězdném prostoru ionisován, není dosud známo. Je však dosti pravděpodobné, že neutrální atomy jsou v galaktickém prostoru poměrně hojně rozšířeny. To však by způsobilo podstatný útlum hydromagnetických vln. Můžeme tedy říci, že Fermiova teorie urychlování, alespoň ve své aplikaci na Galaxii jako celek, nemusí být správná, jestliže galaktický plyn není plně ionisován.

Jiný galaktický elektromagnetický problém vzniká následkem „rozpadového jevu“ magnetického pole. O magnetickém poli, na příklad o tom, které vytváří ocelový magnet, jsme zvyklí uvažovat jako o dynamicky stabilním. Stabilitu však způsobují kohésní síly v oceli. Nebýt toho, celé pole a magnet by se rozpadly na kousky. Když je pole vytvářeno proudy v ionisovaném plynném mraku, snaží se pole rozpadnout. Předpokládáme-li, že gravitační přitažlivostí je udržována rovnováha, můžeme odhadnout intenzitu magnetického pole. Takto získaná hodnota souhlasí s hodnotami odhadnutými jinými metodami.

S podobným problémem se setkáváme i při gravitačním smršťování galaktického plynu při vytváření hvězd. Této kontrakci brání magnetické pole, které je tím stlačováno a zesilováno. Důležité však může být to, že neutrální atomy se mohou pohybovat nezávisle na magnetických siločarách a mohou se tedy stlačovat a vytvářet hvězdy. Magnetické pole a iontová plasma zůstane v původním rozepnutém stavu.

Na těchto několika příkladech je vidět, že i fyzikální teorie mezihvězdného prostoru je do značné míry záležitostí elektrodynamiky.

5. Krabí mlhovina

Krabí mlhovina je vzhledem ke své vzdálenosti od nás (asi 3000 světelných let) vizuálně dosti nevýrazným objektem (NGC 1952). Je však výsledkem mohutné exploze supernovy, která se odehrála před 900 lety. Krabí mlhovina je vlastně expandující plynná obálka, která nyní má již asi 5 světelných let v průměru. Tato mlhovina je silným radiovým zdrojem (IAU 05N2A) s neobvyklým spektrem. Celý vnitřek oblaku září vlastním světlem. Bylo zjištěno, že všechny pozorované hodnoty mohou být vysvětleny elektromagnetickými ději.

Pro zvláštní optické a radiové spektrum nebylo dlouho žádné vysvětlení. Teprve Šklovskij vysvětlení našel. Domnívá se, že v obou případech je emise působena elektrony, které se pohybují po spirále v magnetickém poli. Optické a radiové spektrum jsou tedy součástí jednoho společného spektra, které vzniká synchrotronovým dějem. Správnost této domněnky byla potvrzena zjištěním, že optická emise je částečně lineárně polarisovaná, jak předpověděla teorie.

Aby bylo možno vysvětlit pozorované záření, musí v Krabí mlhovině existovat magnetické pole s intenzitou asi 10^{-3} G, rozměry musí být asi 3 světelné roky a plyn musí mít tlak asi o 5 řádů vyšší nežli v mezihvězdném prostoru.

Tlak magnetického pole, který směřuje směrem ven z mlhoviny, a plyn kosmických paprsků, zachycený v magnetickém poli téměř jako plyn v baloně, činí mlhovinu skutečnou explozivní bombou. Bylo vypočítáno, že kosmické paprsky, zářící synchrotronovým procesem, rozptýlí svou energii v období 200 let nebo i dříve. Protože k výbuchu došlo před 900 lety, musel zdroj energie a urychlovací mechanismus trvat do nedávna a pravděpodobně trvá ještě i dnes. Výkon, potřebný k vysvětlení pozorovaných dějů, má těžko představitelnou hodnotu 10^{26} kW, což je o 4 řády vyšší výkon, než je celkový výkon vyzařovaný Sluncem ve všech formách.

Vyvstává zde otázka původu magnetického pole v Krabí mlhovině. Jedna možnost by byla, že bylo obsaženo ve hvězdě již před výbuchem. Bylo však vypočítáno, že potřebný tlak a energie magnetického pole, když je redukováno do rozměrů hvězdy, je nemožně velký. Jiné možnosti jako je vznik turbulentním pohybem obálky, jsou rovněž vyloučeny.

Jediné možné vysvětlení je, že většina magnetického pole se vytvořila až po explozi. Snad se magnetické pole stále ještě vytváří a to rychlostí odpovídající toku energie o 4 řády vyššímu, než je celkový sluneční výkon. Takovýto výkon vyžaduje velmi pravděpodobně nukleární reakce, které musí pokračovat uvnitř nebo v blízkosti centrální hvězdy. Mimo to zde musí existovat určité pochody, kterými se nukleární energie přeměňuje na energii magnetickou. Důležitým bodem, ke kterému je nutno přihlídnout, je pozoruhodná uspořádanost výsledného magnetického pole.

Je velmi pravděpodobné, že v Krabí mlhovině, podobně jako v mezihvězdném prostoru, jde o mechanismus „magnetického rotujícího kola“. Centrální hvězda, která má počáteční intenzitu magnetického pole v okolí magnetických pólů několik tisíc gaussů, se točí a vytváří solenoidální pole mezi hvězdou a neotáčející se obálkou. Takovýto pohyb by se brzy zabrzdil vlivem elektromagnetických sil, kdyby nějaký mechanismus tomu nebránil. Jestliže dochází v centrální hvězdě k nukleárním reakcím, pak mohou být vyvrhovány některé

produkty ve formě iontů. Tyto vyvržené ionty se musí pohybovat podél magnetických siločar. Děje po sobě následují asi v tomto sledu: Ionty opouštějí centrální oblast, která se roztočila jejich reaktivním pohánějším účinkem. Ionty se dostávají do magnetického pole, kde ztrácejí rychlost a energii, která se zužitkovává na zesílení pole a vzrůst magnetické energie. Silné magnetické pole, „roztočené“ tímto způsobem se rozpíná a zaplňuje mlhovinu. V tomto období slábne.

Magnetické pole by mohlo vznikat ovšem i jiným způsobem. Víme dnes, že nestabilní atomová jádra některých prvků nevyzařují při rozpadu za jistých okolností do určitého směru částice určitého typu stejně intenzivně jako do směru opačného. Tímto porušením „principu zachování parity“*) může vzniknout elektrický proud a snad i dosti silné magnetické pole.

Ať už je původ magnetického pole Krabí mlhoviny jakýkoli, jeho velká intenzita a rozloha ukazují, že dosti velká část galaktického magnetického pole může vznikat v obálkách supernov. V historii Galaxie vzplanulo již asi 10^7 supernov.

Kdysi se uvažovalo o tom, zda vlastně většina galaktických kosmických paprsků nevzniká v době výbuchů nov a supernov. Tehdy se však soudilo, že magnetické pole takto vzniklých mlhovin stále expanduje a zeslabuje se a že tudíž zpomaluje kosmické paprsky inverzním Fermiovým procesem. Nyní se však zdá, že magnetické pole se vytváří až po explozi a že je udržováno v centrální oblasti. V tom případě se mohou kosmické paprsky vytvářet spojitým Fermiovým procesem až po explozi. Zdá se tedy, že původní domněnka o vzniku většiny kosmických paprsků v obálkách supernov je zcela dobře přijatelná.

Jiným radiovým zdrojem, který emituje synchrotronové záření, je zdroj v Panně (IAU 12N 1A). Intenzita magnetického pole je v tomto zdroji asi stejná jako v Krabí mlhovině, jeho objem je ale asi o 9 řádů větší. Tento zdroj, ležící ve vzdálené galaxii, má neuvěřitelnou koncentraci magnetické energie a energie kosmických paprsků. I tímto příkladem je zdůrazněna důležitost vysvětlení původu této energie. Je to v nynější době snad nejdůležitější teoretický problém v radioastronomii.

6. Meziplanetární prostor

Je překvapující, že ve srovnání s jinými oblastmi probíranými výše se toho tak málo ví o meziplanetárním prostředí. Až do nedávna se myslelo, že mimo občasné proudy slunečního plynu, které způsobují magnetické bouře, je meziplanetární prostor prakticky vakuem. Nyní se domníváme, že i tak daleko od Slunce jako je zemská dráha, je hustota plynných částic asi $500/\text{cm}^3$. Směrem ke Slunci pochopitelně vzrůstá. Tento plyn se skládá hlavně z ionizovaného vodíku, jeho teplota může být 10^5 – 10^6 °K. Z hlediska sluneční fyziky jsme vlastně umístěni ve sluneční koruně. Z hlediska ionosférického fyzika má nejbližší část ionosféry teplotu 10^5 °K a rezonanční frekvenci asi 200 kHz.

Ačkoli výše uvedené výsledky jsou spolehlivé, je zde řada dalších problémů, o kterých víme málo nebo nic. Nejdůležitější je otázka magnetického pole. Průměrná hodnota v mezihvězdném prostoru je asi $5 \cdot 10^{-6}$ G, což odpovídá tlaku 10^{-12} dynu/cm². Tlak meziplanetárního plynu v blízkosti Země (před-

*) Viz článek *K otázce zachování parity* v tomto čísle.

pokládáme-li teplotu 10^5 °K) je asi 10^{-8} dynu/cm². Zdá se, že tento plyn má průměrný pohyb směrem od Slunce; v tom případě bude zatlačovat magnetické pole a bude zanechávat Zemi v magnetickém vakuu. Takovýto výsledek by mohl mít velmi důležitý vliv na intenzitu kosmických paprsků a i na její změny.

Na druhé straně se uvažovalo o tom, že oblaka plynu vyvrhovaná ze sluneční atmosféry mohou nésti s sebou své vlastní magnetické pole. Takováto pole by mohla být velmi intenzivní. Mezní intenzita by byla dána z rovnosti plyných a magnetických tlaků. Tlak plynu je 10^{-8} dynu/cm², to odpovídá magnetickému poli asi $5 \cdot 10^{-4}$ G. Kdyby pole bylo silnější, mohlo by expandovat a brzy by se rozptýlilo. Nejsilnější možné pole (předpokládáme-li teplotu 10^6 °K) je asi 10^{-3} G. Tato magnetická mračna v okolí Země by mohla mít vliv na intenzitu kosmických paprsků a byla již použita k vysvětlení určitých pozorovaných změn v intenzitě kosmických paprsků v Zemi.

Na základě nových poznatků o meziplanetárním prostředí bude asi zapotřebí opravit i Chapmanovu-Ferrarovu teorii magnetických bouří. Místo proudu slunečního plynu míjejícího Zemi, bude asi nutno počítat s vlnami v prostředí. Je-li magnetické pole dostatečně slabé, aby se dalo zanedbat ($\ll 10^{-3}$ G) objevuje se nárazová hydrodynamická vlna, jinak nárazová vlna hydromagnetická. V každém případě se však tento problém stává problémem hydro-magnetickým, když se vlna setkává se zemským magnetickým polem.

Podle článku J. H. Piddingtona, *Cosmical electrodynamics*, Proceedings of the IRE, January, 1958.

Z. Plavcová

POZOROVÁNÍ MARSU ZA OPOSICE 1956*)

N. P. BARABAŠOV

Časopis Pokroky matematiky, fyziky a astronomie přinesl již zprávy o výsledcích pozorování Marsu za perihejiové oposice v roce 1956 (III, (1957), č. 2, 221–223). V tomto článku, který napsal N. P. Barabašov, člen Akademie věd Ukrajinské SSR a uveřejnil v Astronomickém kalendáři na rok 1958 (str. 201–210), jsou shrnuta pozorování, vykonaná jednak na Charkovské hvězdárně, jednak na ostatních hvězdárnách v Sovětském svazu. Autor se ve své zprávě zmiňuje také o pozorováních, získaných v Americe a j. Barabašovova zpráva podává stručný a výstižný popis úkazů, pozorovaných na povrchu Marsu v období kolem oposice r. 1956.

Atmosféra na Marsu byla většinou neprůhledná a zaplněná jakousi mlhou, která bránila studiu podrobností na povrchu planety. Během pozorování bylo zaznamenáno mnoho změn, a to jak na povrchu, tak i v Marsové atmosféře. Na Charkovské hvězdárně začala systematická pozorování 15. června. Jižní polární čepička byla v té době výjimečně velká a jasná; nejlépe byla viditelná v modrém a ultrafialovém světle. Naproti tomu v červeném světle byla vidět slabě a v infračerveném nebyla často vidět vůbec. „Moře“ byla v této době celkem málo výrazná, což by bylo možno vysvětlit sníženou průzračností Marsovy atmosféry. Lem kolem polární čepičky byl široký a tmavý. Na povrchu bylo pozorováno několik světlých skvrn, které však nebyly vidět modrým a fialovým filtrem. Temná skvrna severně od *Syrtis Major*, která byla dobře viditelná

*) Astronomičeskij kalendar 1958, str. 201–210.