

# Mlhovinový plazmaglosář

Petr Kulhánek

*Mlhoviny jsou obrovská vesmírná oblaka plynu a prachu nejrůznějšího původu. Ve velkých rozměrech stačí i nepatrná ionizace a látka se začne chovat jako plazma – čtvrté skupenství hmoty, které se od plynů výrazně liší. V tomto skupenství totiž mohou vznikat kolektivní elektrická a magnetická pole a vytvářet struktury charakteristické pro toto skupenství. Pro snadnou orientaci v těchto zajímavých jevech vám snad pomůže předkládaný glosář.*

## Alfa efekt

Fluktuační rychlostního a magnetického pole způsobují nárůst střední hodnoty magnetického pole ve směru kolmém na původní pole. Základní směr pole se tak může přelévat mezi dvěma základními mody. Například u vláknitého útvaru se pole přelévá z osového na azimutální a naopak.

## Debyeova vzdálenost

Potkají-li se dvě nabitě částice v plazmatu na malých vzdálenostech, bude jejich interakce probíhat podle Coulombova zákona. Na větších vzdálenostech jsou ale jednotlivé náboje stíněny, plazma se chová spíše jako tekutina a převládají kolektivní projevy. Hranice, do které náboje vnímáme jako nestíněné, se nazývá Debyeova vzdálenost.

## Difúze ambipolární

Elektrony jsou podstatně lehčí než kladně nabitě ionty a kladně i záporně nabitě částičky prachu v mlhovině. Přesto z mlhoviny tak snadno neuniknou. Jakýkoli jejich pohyb vyvolá velmi silná elektrická pole, která za elektrony potáhnou i těžší částice. Tomuto jevu se říká ambipolární difúze.

## Difúze magnetického pole

Magnetické pole v mlhovině vznikne v důsledku pohybu nabitých částic. Toto pole má globální charakter a může se měnit dvěma způsoby: Buď samovolnou difúzí – pomalým pronikáním do dalších částí mlhoviny, nebo magnetické silokřivky sledují pohyby plazmatu v mlhovině. Který z obou způsobů převládne,

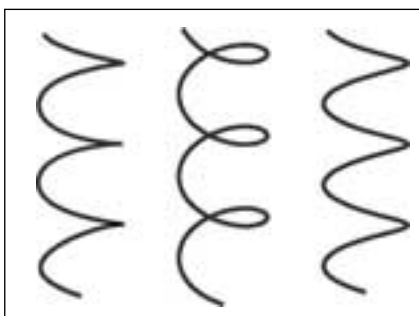
závisí především na vodivosti plazmatu. Ve vysoce vodivém plazmatu hvězd je difúze magnetického pole zanedbatelná, v mlhovinách zpravidla dominantní.

## Drifty

Je-li v mlhovině kromě magnetického pole přítomno ještě další pole (zcela jistě gravitační a někdy i elektrické), které se málo mění v čase a prostoru ve srovnání s periodou a poloměrem gyračního pohybu, dochází k driftům. Jde o odvalování nabitých částic kolmo na obě dvě pole (magnetické a další pole) po křivkách, které nazýváme trochoidy (speciálním příkladem je dobře známá cykloida). Rychlost odvalování (driftu) v gravitačním poli závisí na náboji částic a může vést k separaci náboje. V elektrickém poli probíhá drift kladně i záporně nabitých částic na stejnou stranu a jeho rychlost má maximální hodnotu  $E/B$  (částice jí dosáhnou, jsou-li obě pole navzájem kolmá).

## Gyrace

Typickým pohybem nabitých částic jsou kružnice nebo šroubovice kolem silokřivky magnetického pole. Tomuto pohybu

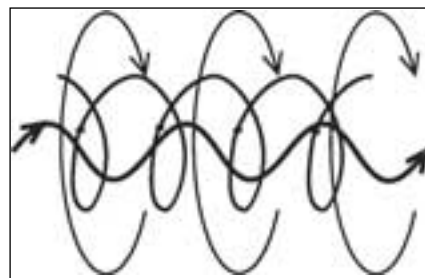


Trochoidy

bu se říká gyrace neboli Larmorova rotace či cyklotronní pohyb (podle cyklotronu, ve kterém nabitě částice konají také rotační pohyby). Frekvence tohoto pohybu se nazývá cyklotronní frekvence a poloměr oběhu Larmorův poloměr. Podle síly pole můžeme ve vesmíru nalézt gyrační pohyby s poloměry v milimetrech i v milionech kilometrů.

## Helicita

Veličina popisující spirálovitost. Při velmi vysoké vodivosti plazmatu (ideálně nekonečné) se helicita magnetického pole zachovává. Při konečné vodivosti je možná rekonekce magnetických silokřivek a helicita se nezachovává. Helicitu můžeme zavádět pro magnetické pole, pro proudovou hustotu, pro rychlostní pole i pro další vektorové veličiny.



Silokřivky magnetického pole v helikálním vlákně

## Lorentzova síla

Lorentzova síla je základní síla působící na nabitě částice v přítomnosti magnetického pole. Tato síla je kolmá na siločáry magnetického pole a na rychlost částice a je úměrná sinu úhlu mezi polem a pohybem částice (je úměrná vektorovému součinu vektoru rychlosti částice a siločar magnetického pole). Magnetické pole nepůsobí na částice pohybující se ve směru silokřivky pole a na nepohybující se částice.

## Magnetický tlak

Magnetické silokřivky se chovají jako jakési pružné médium. Lze dokonce

**Doc. RNDr. Petr Kulhánek, CSc. (\*1959)**  
vystudoval MFF UK, obor teoretická fyzika, v současné době se zabývá fyzikou plazmatu na katedře FEL ČVUT.

zavést pojem magnetického tlaku, kterým působí pole na nabitě částice. Částice jsou vytlačovány z oblastí s vyšším magnetickým tlakem do oblastí s nižším magnetickým tlakem.

### Nestability

Plazma je velmi proměnlivá látka. Mohou za to různé druhy nestabilit, které se ve vesmíru mohou rozvinout ve velmi zajímavé útvary. O nestabilitách hovoříme tehdy, jestliže vlivem malé události (náhodné fluktuace, poruchy způsobené vnějšími vlivy, atd.) dojde k úplné změně konfigurace plazmatu. Uvedme si jen některé z nich: dojde-li k náhodnému zaškrčení plazmového vlákna protékajícího proudem, bude vzniklé magnetické pole toto zaškrčení prohlubovat, až dojde k rozpadu vlákna na malé oblasti – korálky. Tato nestabilita je silně potlačena v helikálních vláknech, kde proud i magnetické pole mají obě válcové složky – axiální (osovou) i azimutální (obvodovou) a tvoří ve vláknech spirály.

Dojde-li k náhodnému ohybu plazmového vlákna protékajícího proudem, bude vzniklé magnetické pole toto prohnutí prohlubovat. Může dojít k rozpadu vlákna nebo ke vzniku zajímavých smyčkových konfigurací. Tato nestabilita je ve zkroucených vláknech částečně potlačena.

Jestliže ve vláknech dojde z jakýchkoli důvodů k separaci elektrického náboje v radiálním směru, vzniká nenulové radiální elektrické pole, které spolu s osovým magnetickým polem způsobuje azimutální drift. Celé vlákno začne rotovat (oblasti různě vzdálené od osy rotují různou rychlostí). Na povrchu vlákna se stýkají dvě oblasti s různou rychlostí (rotující vlákno a okolní prostředí) a může dojít k rozvoji nestability známé z proudění tekutin. Tuto nestabilitu nazýváme diocotronová nestabilita. Typickým způsobem modifikuje povrch vlákna do vírových struktur.

### Optická tloušťka

Optická tloušťka plazmatu souvisí se střední volnou dráhou fotonů v plazmatu. Za opticky řídké se označuje plazma takových rozměrů, které jsou srovnatelné se střední volnou dráhou elektromagnetického záření, které plazmatem prochází. Opticky husté je takové plazma, jehož

rozměry jsou mnohem větší, než je střední volná dráha fotonů, záření intenzivně interaguje s plazmatem. Pojem optické tloušťky plazmatu zavedl Thompson.

### Parametry plazmatu

Plazma lze popsat mnoha parametry. Na jeho chování mají ale nejpodstatnější vliv tři parametry. Jde o velikost indukce magnetického pole, koncentrace a teploty jednotlivých druhů částic (elektrony, ionty, neutrální částice, nabitý a nenabitý prach).

### Parametr beta

Parametrem beta se nazývá podíl skutečného tlaku látky způsobeného tepelným pohybem částic a magnetického tlaku způsobeného přítomností magnetického pole. Čím nižší hodnotu tento parametr má, tím významnější jsou projevy magnetického pole v plazmatu.

### Plazma

Učená definice nám o plazmatu říká: „Plazma je kvazineutrální soubor částic s volnými nosiči náboje, který vykazuje kolektivní chování.“ Pojďme si ji trochu polidštit. To nejdůležitější je, že se v plazmatu nacházejí volné nosiče náboje. Atomy jsou alespoň částečně ionizované. Stupeň ionizace nemusí být příliš veliký, je-li plazmový útvar dosti rozsáhlý. Právě volné nosiče náboje plazma zcela odlišují od plynů. Plazma je vodivé a silně reaguje na elektrická a magnetická pole. Druhá vlastnost je kvazineutralita. Požadujeme, aby v makroskopických objemech bylo vždy v průměru stejné množství kladných a záporných částic. Navenek se plazma jeví jako nenabitá tekutina (kapalina či plyn). Požadavek kvazineutrality vyčleňuje z definice plazmatu nabitě svazky částic, které mají přece jen poněkud odlišné vlastnosti. Poslední součástí definice plaz-

matu je jeho kolektivní chování. Tím se rozumí, že plazma je schopné jako celek svými projevy generovat globální elektrická a magnetická pole a na takováto globální pole reagovat. Do plazmatu většinou nezahrnujeme různé svazky nabitých částic (nesplňují kvazineutralitu) a velmi slabě ionizované plyny – např. plamen svíčky (nesplňují kolektivní chování). Pojem plazmatu poprvé použil Irwing Langmuir (1881–1957).

### Plazmová frekvence

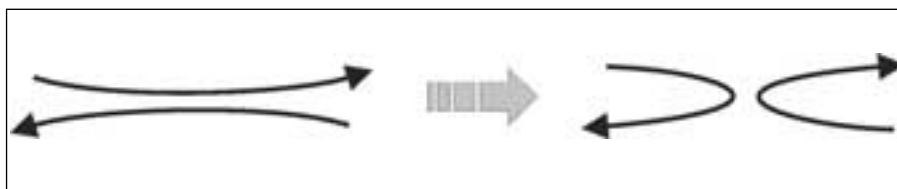
Jednotlivé částice v plazmatu oscilují přirozeným způsobem na tzv. plazmové frekvenci. Nejtypičtější je plazmová frekvence elektronů, která bývá často v radiových nebo optických frekvencích. Plazmová frekvence iontů souvisí s nízkofrekvenčními vlnami, na kterých se například šíří zvukové vlny. Plazmová frekvence nabitých prachových částic koresponduje s ultranízkofrekvenčními vlnovými mody, které mohou způsobit například kolaps části mlhoviny do globule, ze které později vznikne hvězda.

### Rázová vlna

V mlhovinách se mohou šířit nejrůznější typy rázových vln. Jde o oblast plazmatu (zpravidla plošnou), ve které se skokem mění parametry plazmatu (rychlost, koncentrace, magnetické pole, teplota). Typické jsou rázové vlny vzniklé explozí hvězdy nebo rázové vlny vznikající ve spirálových ramenech Galaxie.

### Rekonekce

V oblasti, kde jsou magnetické linie blízko a mají opačný směr, může při konečné vodivosti plazmatu dojít k rozpojení magnetických linií a opětovnému spojení do energeticky výhodnější konfigurace. Od tohoto místa se šíří pomalá rázová vlna.



Rekonekce

## Reynoldsovo magnetické číslo

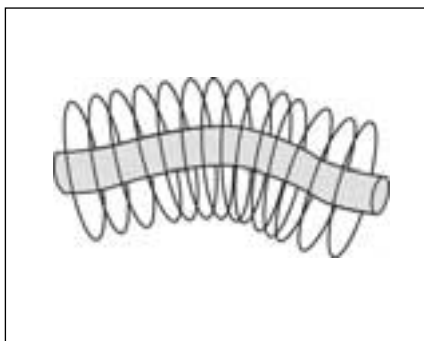
Reynoldsovo magnetické číslo je poměr změny magnetického pole dané pohybem silokřivek spolu s plazmatem (člen zamrzání) ku změnám daným difúzí. Je-li toto číslo rovné jedné, uplatní se stejnou měrou oba procesy. Vysoká hodnota Reynoldsova čísla znamená, že magnetické pole je vmrzlé do plazmatu a pohybuje se spolu s ním. To je situace typická pro hvězdy. Nízká hodnota Reynoldsova čísla znamená, že pole se může měnit převážně difúzními procesy. Tato situace je nejčastější v mlhovinách.

## Stupeň ionizace

Stupeň ionizace plazmatu (poměr počtu ionizovaných částic vůči celkovému počtu částic) je jedním z nejdůležitějších parametrů, který určuje chování plazmatu. Závisí především na teplotě a lze ho v prvním přiblížení odhadnout ze Sahovy rovnice pro jedenkrát ionizované plazma v termodynamické rovnováze. Stupeň ionizace plazmatu v mlhovinách je velmi nízký. I malá ionizace ve velké oblasti může ale způsobit vznik globálních magnetických a elektrických polí a vznik typických plazmových struktur.

## Teplota plazmatu

Teplota je pojem, který souvisí s chaotickým pohybem jednotlivých částic látky. V plazmatu může být situace složitější. Elektronová složka může mít jinou teplotu než iontová a ta jinou než prachová. Závisí na historii vývoje mlhoviny (například, zdali byla mlhovina poblíž hvězdy, která explozí mohla zahřát jen některou složku mlhoviny). Je-li v mlhovině přítomné magnetické pole, vykazují nabitě částice jiné pohyby podél



Pinč

pole a jiné napříč pole. Musíme proto rozlišovat také teplotu ve směru a podél pole.

## Vlákna (pinče)

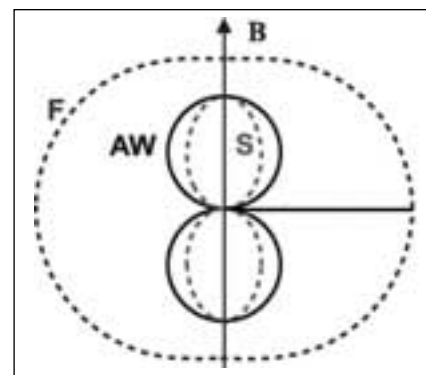
Nejtypičtější plazmatickou konfigurací jsou vlákna protékána elektrickým proudem (pinče). Najdeme je v kanálech blesků, v protuberancích na Slunci i ve vzdálených mlhovinách a v jádrech galaxií. Tak jako jsou pro gravitační interakci charakteristické sférické struktury (hvězdy, globule, planety), tak jsou pro plazma charakteristické struktury válcové. Protékající proud generuje magnetické pole, které obtáčí pinč. Toto pole pinč stlačuje gradientem tzv. magnetického tlaku a proti němu působí gradient tlaku látky a záření. (Ve hvězdách proti gradientu tlaku záření a látky působí gravitace). Přítomnost vláknitých struktur v mlhovinách tak zpravidla znamená přítomnost ionizované látky a magnetických polí.

## Vlny magnetoakustické

Šíření zvuku v plynech je relativně jednoduchou záležitostí. Chaotická složka pohybu se přelévá v uspořádanou a naopak, vzniká periodicky se šířící vlna (periodicky se mění tlak, hustota, teplota). V plazmatu ovlivňuje šíření vlny navíc magnetický tlak. Zvuková vlnoplocha již není kulová, je anizotropní a skládá se ze tří vlnoploch. Kdybychom se nacházeli v mlhovině a naslouchali ve správném směru, uslyšíme zvuk dokonce třikrát. Tyto tři vlny se nazývají Alfvénova vlna, rychlá magnetoakustická vlna a pomalá magnetoakustická vlna. Při slabých polích se Alfvénova a pomalá vlnoplocha šíří stále pomaleji. Při nulovém poli zůstane jen rychlá magnetoakustická vlna a bude mít kulovou vlnoplochu (běžný zvuk). Při nenulovém poli se rozvlní i magnetické silokřivky. Buď se zprohýbají, nebo se prostředím šíří vlny zhuštěných a zředěných silokřivek (tzv. kompresní vlna).

## Vlny elektromagnetické

Šíření elektromagnetických vln plazmatem je relativně komplikovanou záležitostí. Plazmatem mlhoviny se v přítomnosti magnetického pole šíří řádná a mimořádná vlna (tzv. O vlna a X vlna) podobně jako v anizotropním prostředí krystalů. Ve směru podél pole



Vlnoplochy magnetoakustických vln

můžeme pozorovat směsici levotočivých a pravotočivých modů (tzv. L a R vlna). zajímavé jsou nízkofrekvenční módy podél pole, tzv. hvizdy. Vlnoplochy elektromagnetických vln se zakreslují pomocí tzv. CMA diagramů (nazývají se podle svých objevitelů: P. C. Clemman, R. F. Mullaly, W. P. Allis). Elektromagnetické vlny se mohou šířit jen pro některé hodnoty parametrů plazmatu, existují oblasti plazmatu, ve kterých se některé typy vln nemohou šířit.

## Vodivost plazmatu

Vodivost plazmatu je dána charakterem srážek. Vodivost závisí především na teplotě ( $\sim T^{3/2}$ ) a minimálně na koncentraci plazmatu. Při nízkých koncentracích plazmatu brání průchodu proudu malý počet nosičů náboje, při vysokých koncentracích velký počet srážek. S rostoucí teplotou vodivost plazmatu roste (u kovů je tomu naopak), protože účinný průřez srážek klesá. Vodivost plazmatu v mlhovinách je vzhledem k nízké teplotě mlhovin malá. Naproti tomu hvězdné plazma má vodivosti velmi vysoké. Takovému plazmatu se říká ideální, magnetické pole je do něho vmrzlé a pohybuje se spolu s ním. V ideálním plazmatu se zachovává helicitu, spirální struktury přetrvávají po velmi dlouhou dobu.

## Zamrzlé magnetické pole

Ve vysoce vodivém plazmatu jsou magnetické silokřivky silně provázány s látkou. Jakýkoli pohyb plazmatu tyto silokřivky sledují, a zdá se, že magnetické pole je vmrznuté do látky. V mlhovinách se tento způsob změny polí příliš neuplatňuje.