

## PLAZMA – ČTVRTÉ SKUPENSTVÍ HMOTY

**Petr Kulhánek**

České vysoké učení technické v Praze, Fakulta elektrotechnická, katedra fyziky

**Abstrakt:** Příspěvek pojednává o vlastnostech laboratorního i vesmírného plazmatu, zejména o rovnováze a stabilitě plazmových útvarů a různých typech vln šířících se v plazmatu. Krátce je zmíněno i kvarkové-gluonové plazma a jeho objev ve středisku jaderného výzkumu CERN.

**Klíčová slova:** plazma, stabilita, pinč, rekonekce.

### Úvod

Plazma je formou látky, ve které se nacházejí volné nosiče nábojů. Plazma proto reaguje na globální elektrická a magnetická pole a je schopno tato pole samo vytvářet. Plazma bývá zpravidla kvazineutrální, tj. v každém makroskopickém objemu je stejný počet kladných a záporných nosičů náboje. Vlastnosti plazmatu bývají velmi odlišné od vlastností skupenství pevného, kapalného i plynného. Důvodem jsou zejména kolektivní procesy, které nejsou ostatním skupenstvím vlastní. Slovo plazma pro ionizované prostředí poprvé použil americký fyzik a chemik Irwing Langmuir (1881–1957) na základě podobnosti s krevní plazmou.

Plazma není příliš běžným skupenstvím na Zemi, ve vesmíru je ale velmi hojné. Ze svítící atomární látky ve vesmíru tvoří plazma 99 %. V plazmatickém stavu se nachází většina mlhovin, všechny hvězdy a akreční disky v okolí černých děr. Na Zemi nalezneme plazma v kanálech blesků, v ionosféře a samozřejmě v laboratořích plazmových fyziků. K plazmatu nepatří plamen ohně, ve kterém jsou jen zářící excitované atomy s velmi nízkým nebo dokonce nulovým stupněm ionizace.

Tvar plazmatických útvarů dominantně určuje elektromagnetická interakce. Na rozdíl od gravitace, která objektům zpravidla vnutí kulový tvar, způsobuje elektromagnetická interakce v plazmatu vznik vláken a stěn. Těmito útvary protéká elektrický proud generující magnetické pole, jež tyto útvary stlačuje a udržuje v rovnováze proti gradientu tlaku látky.



Obr. 1: Kanál blesku. Zdroj: Chris Maggio, Mississippi College.

### Pohyb nabitých částic

Základním pohybem nabitých částic v plazmatu je Larmorova rotace (někdy také cyklotronní pohyb neboli gyrace). Částice rotují kolmo na siločivky magnetického pole a podél siločivky se pohybují relativně volně. Při tomto pohybu částice charakteristicky září. Za nízkých energií částic jde o tzv. cyklotronní emisi (například

z Jupiteru), při vysokých energiích o synchrotronní emisi (například z Krabí mlhoviny a nebo z výtrysků v okolí černých děr).

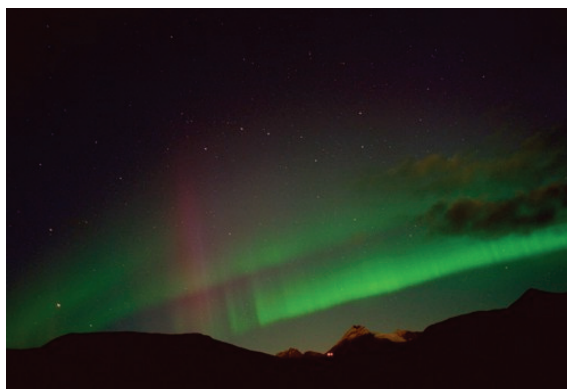
Částice jsou vytlačovány magnetickým tlakem z oblastí silnějších magnetických polí. Tato síla může v některých případech dokonce obrátit směr pohybu částice, dojde k jevu magnetického zrcadla. Magnetická zrcadla se využívají k udržení plazmatu, v zemské magnetosféře vznikají přirozeným způsobem v polárních oblastech, kde je magnetické pole nejsilnější. Částice se pohybují podél siločar a odrážejí se v polárních oblastech zpět. Při tomto pohybu vytvářejí tzv. radiční neboli van Allenovy pásy (u Země vnitřní a vnější). Ve van Allenových pásách se nacházejí i částice s relativistickými rychlostmi, které mohou poškodit přístroje nebo zdraví člověka.

K zajímavým jevům dojde, pokud je v plazmatu kromě magnetického přítomno i nějaké další pole (například elektrické, gravitační nebo pole odstředivých sil). V takové situaci nabitá částice driftuje – odvaluje se kolmo na obě pole. U většiny driftů dochází k různému pohybu elektronů a iontů, v plazmatu se separuje elektrický náboj a vznikají dodatečná elektrická pole.

### Plazmová vlákna a stěny

Pokud plazmatem prochází elektrický proud, vzniká magnetické pole způsobující stlačování plazmatu. Nejběžnější rovnovážnou konfigurací je plazmové vlákno nebo plazmová stěna. Rovnovážné útvary ale nemusí být nutně stabilní. Plazmová vlákna i stěny se různě krotí, zaškrucují a ohýbají. Probíhají-li zde disipativní procesy, a je-li dostatek času, změní se vlákna samovolně do helikálních struktur, ve kterých teče elektrický proud po šroubovici a proudová hustota je rovnoběžná s magnetickými siločarami. Takové proudy se nazývají Birkelandovy proudy a výsledná Lorentzova síla těchto proudů působící na plazma je nulová.

Experimentálně připravil první umělé plazmové vlákno Martin van Marun, který přivedl na drátek napětí ze stovky Leydenských lahví. První řešení rovnováhy plazmového vlákna našel Willard Harrison Bennett (1903–1987) v roce 1934, stabilitou se zabývali Martin Schwarzschild (1912–1997) a Martin David Kruskal (1925–2006) v roce 1954. Dnes je největší laboratoř světa pro výzkum plazmových vláken ve Spojených státech, nazývá se Sandia National Laboratories a v plazmovém vlákně je na tomto špičkovém pracovišti možné dosáhnout proudu až 20 MA. Plazmová vlákna se dnes považují za alternativní možnost pro zvládnutí termojaderné fúze.



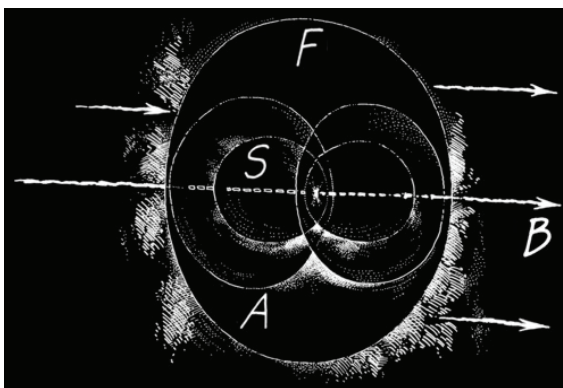
Obr. 2: Polární záře. Expedice Aurora, Norsko 2002. Zdroj: Aldebaran.

Plazmové stěny jsou známy zejména v polárních zářích. Jde o plošný výboj způsobený přítomností elektronů slunečního větru, které excitují a ionizují atomy

a molekuly v atmosféře. Plošné proudy tekoucí v ionosféře poprvé detekoval satelit TRIAD v roce 1973, jejich existenci předpověděl norský fyzik a vynálezce Kristian Birkeland (1867–1917). Dnes známe polární záře nejen na Zemi, ale i na Jupiteru a Saturnu.

### Vlny v plazmatu

V plazmatu může vznikat celá řada vln. Nízkofrekvenční vlny souvisí s pohyby iontů a jsou analogií zvukových vln v ostatních skupenstvích. Pokud v plazmatu vznikne nějaký rozruch, šíří se ve třech vlnoplochách – pomalé, rychlé a Alfvénově. Potenciální posluchač by tak slyšel zvuk natřikrát. Směr šíření magnetozvukových vln silně závisí na orientaci magnetického pole, vlna je anizotropní. Analýza magnetozvukových vln nám může zjistit mnoho zajímavých informací o nitru plazmatu.



Obr. 3. Základní módy magnetozvukové vlny. Kresba Ivan Havlíček.

Vysokofrekvenční vlny zpravidla souvisí s pohyby elektronů, jde o tzv. komplex elektromagnetických vln. Ve směru podél pole se šíří levotočivá a pravotočivá vlna, napříč pole vlna řádná a mimořádná. Šíření elektromagnetických vln je opět silně závislé na orientaci magnetického pole. Existují i elektromagnetické vlny na velmi nízkých (zvukových) frekvencích, takovým vlnám říkáme hvizdy. Objevil je německý fyzik H. Barkhausen v kanálech blesků v roce 1919 a zjistil, že se šíří podél siločar zemského magnetického pole.

Pokud je v plazmatu přítomen prach, vzniklá celá škála mnoha dalších modů vln na ultranízkých frekvencích. Prachové plazma má svá specifika a jeho výzkum se bouřlivě rozvíjí. Známé jsou například experimenty s plazmovými krystaly prováděné fyziky z německého Ústavu Maxe Plancka na Mezinárodní vesmírné stanici.

### Přepojení siločar

Velmi časté je v plazmatu přepojování siločar. Pokud se v nějaké oblasti objeví siločar magnetického pole mířící proti sobě, může dojít k jejich přepojení do energeticky výhodnější konfigurace. Uvolněná energie zahřeje plazma, které může zazářit dokonce i v rentgenové oblasti. Přepojení siločar dobře známe na Slunci (CME – Coronal Mass Ejection). Zde dojde k uvolnění plazmového oblaku (plazmoidu) s vmrznutým magnetickým polem. Plazmoid poté na své cestě sluneční soustavou ovlivňuje magnetosféry planet, ve kterých způsobí silné magnetické bouře.

V zemské magnetosféře probíhá přepojování siločar na čelní rázové vlně nebo v magnetickém ohonu. V roce 2006 byly objeveny obří víry na bocích magnetosféry (o rozměrech až 40 000 km), ve kterých také dochází k přepojování magnetických siločar.

V místě přepojení silokřivek musí být plazma s konečnou vodivostí, které převezme uvolněnou energii. Často k přepojování dochází v tzv. nulové vrstvě magnetického pole na mnoha místech naráz, podél vrstvy vznikají magnetické ostrovy, hovoříme o tzv. ostrovní nestabilitě.

### **Magnetohydrodynamika**

K nejspěšnějším metodám popisu plazmatu patří magnetohydrodynamika. Tento teoretický popis uvažuje plazma jako tekutinu (nebo několik tekutin, například tekutinu elektronů a iontů). K nejjednodušším variantám magnetohydrodynamiky patří ideální magnetohydrodynamika, ve které je tekutina nestlačitelná, elektrický odpor nulový a relativistické jevy zanedbatelné.

Otcem magnetohydrodynamiky je švédský fyzik Hannes Alfvén (1908–1995), který získal Nobelovu cenu za fyziku plazmatu v roce 1970. Alfvén je autorem konceptu zamrzlých polí. Zjistil totiž, že magnetické pole se s časem může měnit buď difúzními procesy a nebo tak, že pole sleduje pohyb plazmatu, je jakoby vmrznuté do plazmatu. Například u slunečního plazmatu dominuje zamrznání oproti difúzi v poměru  $10^8:1$ .

Magnetohydrodynamický popis umožnil pochopit takové jevy, jakým je tzv. tekutinové dynamo, které generuje v plazmatu magnetická pole. Tekutinový popis je výhodný při sledování geneze a pohybu různých modů vln, při vyšetřování stability nebo při určování vlastností helikálních struktur.



Obr. 4: Hannes Alfvén, otec magnetohydrodynamiky.

### **Měření polí**

Zajímavá je také otázka měření magnetických polí. Jen málokdy máme možnost provádět měření přímo v plazmatu za pomoci magnetometru – malé cívky, jejíž proud souvisí s magnetickým polem. Častěji se provádí měření nepřímá za pomoci nějakého jevu. K neznámějším patří určení magnetického pole za pomoci rozštěpení čar ve spektru (tzv. Zeemanova jevu). Jinou možností je Faradayova rotace. Pokud existuje zdroj polarizovaného elektromagnetického záření (například pulzar), můžeme určit magnetické pole ze stočení roviny polarizovaného světla na cestě k pozorovateli. Naopak nepolarizované světlo hvězd je na své cestě vesmírem magnetickým polem polarizováno. Na základě stupně polarizace lze pak určit průměrnou hodnotu magnetického pole (tzv. polarimetrie).

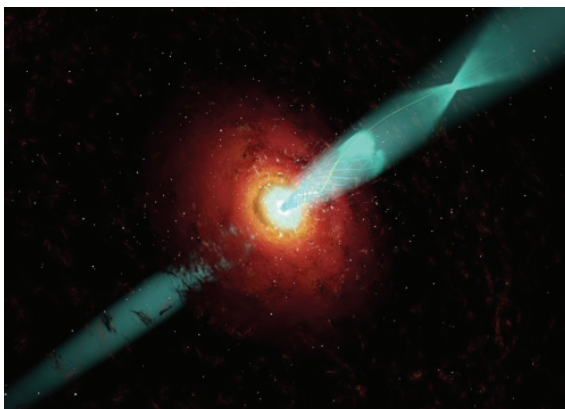
Magnetické pole se také projeví cyklotronními a synchrotronními emisemi elektronů. Z tohoto charakteristického záření lze určit, v jakých magnetických polích muselo vznikat. Všechny uvedené metody vedou zpravidla jen ke zjištění průměrné hodnoty magnetického pole u zdroje nebo na cestě mezi zdrojem a pozorovatelem.

Elektrická pole se v laboratořích měří za pomoci Langmuirových sond, ve vesmírném plazmatu můžeme využít Starkův jev (štěpení spektrálních čar), nicméně ve vesmírném plazmatu jsou globální elektrická pole vzácná.

### Plazma ve vesmíru

Ve vesmíru nacházíme plazma protkané magnetickým polem na všech úrovních. Celá sluneční soustava je ponořena do heliosféry Slunce, většina planet má rozsáhlé magnetosféry interagující se slunečním plazmatem. Největší magnetosférou je magnetický obal Jupiteru, který sahá až do vzdálenosti 5 astronomických jednotek (k dráze Saturnu). Magnetická pole byla detekována uvnitř galaxií i v mezigalaktickém prostoru. V naší Galaxii jsou známa plazmová vlákna s délkou mnoha set světelných roků.

Magnetická pole dominantně ovlivňují fyziku ve výtryscích kolem neutronových hvězd i černých děr. Plazma je zde kolimováno do výtrysků s často relativistickými rychlostmi, ve kterých je plazma udržováno magnetickým polem. Obecně platí, že čím menší objekt, tím silnější pole můžeme nalézt. Většina magnetických polí je do plazmatu vmrznutá a proto například při závěrečném hroucení hvězdy na bílého trpaslíka nebo neutronovou hvězdu dochází k zesílení pole.



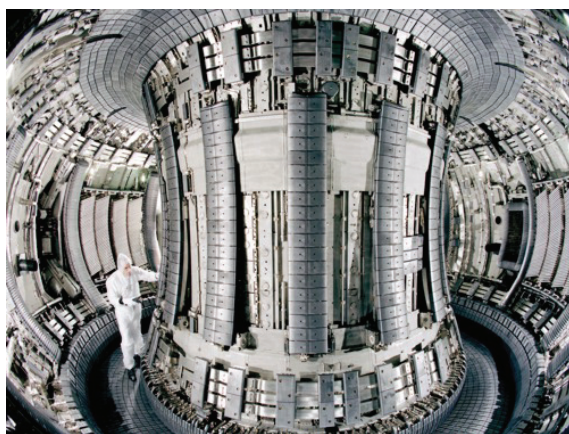
Obr. 5: Výtrysk v okolí aktivního jádra galaxie. Zdroj: Wolfgang Steffen, Instituto de Astronomia, UNAM, Mexico

Nejsilnější pole nacházíme u neutronových hvězd (až  $10^9$  T). Pokud při svém vzniku neutronová hvězda rotuje rychleji než 200 otáček za sekundu, dojde v jejím nitru krátkodobě (na několik desítek sekund) k sepnutí tekutinového dynama, které pole až ztisícinásobí. Takové objekty nazýváme magnetary a indukce jejich magnetického pole dosahuje hodnoty až  $10^{12}$  T. To je již nad tzv. kvantovou mezí (ta je dána polem, při kterém je třeba při Larmorově rotaci částice brát v úvahu Heisenbergovy relace neurčitosti a klasický popis selhává). Magnetické pole magnetarů bývá neuspořádané a prvních několik desítek tisíc roků si „sedá“ do energeticky nejvýhodnější konfigurace. Dochází k častým rekonekcím magnetických siločar, které jsou doprovázeny magnetotřeseními a opakujícími se záblesky na hranici RTG a gama oboru (tzv. SGR – Soft Gamma Repeaters).

## Plazma v laboratoři

Fyzika plazmatu má dnes bohaté aplikační možnosti. Za pomoci plazmatu umíme svářet a obrábět těžko opracovatelné součástky, plazmatem dokážeme nanášet a naprašovat ultratenké vrstvy vynikajících vlastností a kdo by neznal plazmové zobrazovače (displeje) nebo plazmové motory na raketách brázdících sluneční soustavu.

Největší technologický krok je ale teprve před námi. Již po mnoho generací se fyzikové snaží o zkrocení termojaderné fúze probíhající v nitru hvězd v pozemských podmínkách. Ať již jde o tokamaky, inerciální fúzi či fúzi probíhající ve stlačených plazmových vláknkách, je cíl stejný. Udržet plazma po dobu dostatečnou k uskutečnění termojaderné reakce, která přinese více energie, než bylo do systému dodáno. Budoucí termojaderné elektrárny by neměly žádné problémy ani s palivem (deuteria je v oceánech téměř neomezené množství), ani s rizikem havárií (množství radioaktivní látky v reaktoru je minimální), ani s odpadem (radioaktivita produktů je jen krátkodobá).



Obr. 6: Tokamak JET (Joint European Torus).

K největším zařízením současnosti patří například tokamak JET (Joint European Torus) provozovaný v Anglii. JET drží světový rekord v produkovaném fúzním výkonu (16 MW). V relativně blízké budoucnosti (kolem roku 2020) bude dostavěn v blízkosti francouzského městečka Cadarache první experimentální termojaderný reaktor ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor) s předpokládaným výkonem 500 MW. Průměr tohoto tokamaku bude úctyhodných 6 metrů.

## Kvarkové gluonové plazma (QGP)

Není bez zajímavosti, že dnes je možné vytvořit uměle i tzv. kvarkové-gluonové plazma, které se ve vesmíru nacházelo do doby 10 mikrosekund po jeho vzniku. Jde o směsici volných kvarků a gluonů, které se při expanzi vesmíru v čase 10 mikrosekund pospojovaly v nám dobře známé neutrony, protony a další částice.

Kvarkové-gluonové plazma bylo poprvé uměle vytvořeno ve středisku jaderného výzkumu CERN v roce 2000 při dopadu urychleného jádra olova na olověný terčik. Teplota látky po dopadu byla  $10^{12}$  K (stotisíckrát vyšší než v nitru Slunce) a hustota činila 20-násobek hustoty atomového jádra. Ne nadarmo se proto tomuto experimentu začalo říkat Malý třesk.

V posledních letech (2000 až 2009) probíhaly experimenty s QGP v Brookhavenské národní laboratoři v USA na urychlovači RHIC (Relativistic Heavy Ion Collider). Po opětovném spuštění urychlovače LHC (Larg Hadron Collider) v CERNu budou prováděny experimenty s QGP na dvou detektorech – ALICE a CMS.

### **Závěr**

Fyzika plazmatu je bouřlivě se rozvíjejícím oborem. Neustále se vyvíjející plazmové technologie zasahují do stále větší oblasti lidské činnosti. Výzkum ve fyzice plazmatu směřuje zejména k pochopení podstaty mnoha jevů, které jsou zodpovědné za současnou podobu našeho vesmíru. Největší metou současné fyziky plazmatu je uskutečnění řízené termojaderné fúze. Stavba reaktoru ITER spojuje úsilí všech vyspělých zemí světa a tak heslo „Zapálíme Slunce na Zemi“ není vůbec nadnesené.

### **Poděkování**

Příspěvek vznikl v rámci grantu GA AVČR IAA101210801 imulační výpočty DD fúzní reakce.

### **Literatura**

BELLAN, Paul. 2008. *Fundamentals of Plasma Physics*. Cambridge University Press, 2008. ISBN: 978-0521528009.

CHEN, Francis. 2004. *Introduction to Plasma Physics and Controlled Fusion*. Springer, 2004. ISBN: 978-0306413322.

STIX, Thomas Howard. 2006. *Waves in Plasmas*. Springer, 2006. ISBN: 0883188597.

### **Adresa autora**

prof. RNDr. Petr Kulhánek, CSc.  
České vysoké učení technické v Praze  
Fakulta elektrotechnická, katedra fyziky  
Technická 2  
166 27 Praha 6  
Česká republika