Petr Kulhánek

BLÝSKÁNÍ

AGA
2011

BLÝSKÁNÍ

Petr Kulhánek

2011

BLÝSKÁNÍ

aneb třináctero vyprávění o plazmatu

Petr Kulhánek

2011

Text © Petr Kulhánek
Obálka a grafika © Ivan Havlíček
ISBN: 978-80-904582-3-9

Obsah

Předmluva 10

Chvála plazmatu *10*

1. Blýskání 12

Plazma *13*
Výzkum blesků *15*
Jak vzniká blesk? *19*
Bouřky *23*
Další druhy blesků *24*
Může za vznik blesku kosmické záření? *26*
Gama záblesky a rentgenové záření *27*
Jsou letadla za bouřky bezpečná? *30*
Blesky na ostatních planetách *31*
Víte, že *33*

2. Záhada kulového blesku 34

Kulový blesk *35*
Historicky věrohodná pozorování *37*
Vědecká pozorování *40*
Teorie nepravděpodobné až absurdní *43*
Teorie pravděpodobné až realistické *47*
Napodobeniny kulového blesku v laboratořích *52*
Víte, že *55*

3. Hvizdy, nebeské chóry a lví řevy 56

Magnetosféra Země *57*
Magnetosférické sondy *60*
Jak se šíří elektromagnetické vlny v plazmatu? *65*

Hvizdy *69*
Nebeské chóry *71*
Lví řevy *73*
Hvizdy a chóry na Jupiteru *74*
Víte, že *75*

4. Příběh umírající hvězdy Betelgeuse 76

Aktéři příběhu *77*
Jak se hvězdy rodí *81*
Zdroj energie hvězd *83*
Portréty hvězdy Betelgeuse *87*
Jak hvězdy umírají *89*
Jak umírá Betelgeuse *93*
Víte, že *95*

5. Zapálíme Slunce na Zemi? 96

Štěpení *97*
Slučování *101*
Pinče *104*
Stelarátor a tokamak *107*
Inerciální fúze *111*
České aktivity *115*
Víte, že *117*

6. Plazmové technologie 118

Svítíme si s plazmatem *120*
Dokonalé vrstvy *123*
Úpravy textilu *127*
Sváření, řezání a vrtání *129*
Plazmové obrazovky *132*
Plazmové a iontové motory *136*
Víte, že *139*

7. Malý třesk 140
Kvarky *142*
Silná interakce *146*
Objev kvarkového-gluonového plazmatu *148*
Pokračování experimentů *151*
Sepětí kosmologie a fyziky elementárních částic *154*
Víte, že *155*

8. Helioseismologie 156
Něco málo o Slunci *158*
Dopplerův jev *161*
Od sinusovky ke kulovým funkcím *163*
Přístroje zkoumající sluneční hudbu *167*
Helioseismologie *171*
Analýza dopplerogramů *174*
Víte, že *177*

9. Surfujeme na vlnách 178
Klasické urychlovače elektronů a jiných nabitých částic *179*
Další kouzla – lasery na volných elektronech *185*
Plazmové vlny *187*
Landauův útlum *189*
Urychlovače na pracovním stole *190*
Víte, že *193*

10. Magnetary 194
Magnetické pole ve vodivé tekutině *195*
Tekutinové dynamo *198*
Vlastnosti magnetarů *201*
Trocha historie *204*
Katastrofické rekonexe *206*
Víte, že *209*

11. Solitony 210

První pozorování *211*
Co je soliton? *214*
Experimentální zařízení generující solitony v plazmatu *218*
Solitony v plazmatu *220*
Víte, že *225*

12. Magnetické přepojení 226

Silokřivky a pole *227*
Přepojení silokřivek *230*
Přepojení na Slunci *233*
Přepojování v zemské magnetosféře *236*
Magnetická pěna na okraji sluneční soustavy *238*
Víte, že *241*

13. Šroubovice 242

Helicita *243*
Magnetická helicita *246*
Helicita Slunce *251*
Bezsilová konfigurace *252*
Víte, že *255*

Barevná příloha 257

Literatura 273

1. Blýskání *273*
2. Záhada kulového blesku *274*
3. Hvizdy, lví řevy a chóry *275*
4. Příběh umírající hvězdy Betelgeuse *276*
5. Zapálíme Slunce na Zemi? *277*
6. Plazmové technologie *278*
7. Malý třesk *279*

8. Helioseismologie *280*
9. Surfujeme na vlnách *281*
10. Magnetary *282*
11. Solitony *283*
12. Magnetické přepojení *284*
13. Šroubovice *285*

Rejstřík 286

Rejstřík osob 293

Předmluva

Chvála plazmatu

Když jsem byl ještě malé robě, měli jsme ve škole předmět zvaný přírodozpyt. Tam jsem se dozvěděl o takových vynálezech jako páka, nakloněná rovina a kolo na hřídeli, ale také o třech základních skupenstvích hmoty, tj. tuhém, kapalném a plynném. Teprve při vysokoškolských přednáškách fyziky mi učitelé prozradili, že existuje ještě čtvrté skupenství hmoty: plazma, které se vyskytuje jak na Zemi, tak i ve vesmíru – ve vesmíru je to dokonce skupenství docela běžné. (Sám termín byl do fyziky převzat z biologie, v níž jej zavedl v polovině 19. století Jan E. Purkyně.)

O plazmatu a jeho pozoruhodných vlastnostech jsem se pak dozvídal z učebnic i odborných článků, ale také z populárně-vědeckých článků nebo pořadů. U nás vyšla v roce 1968 v nakladatelství Academia monografie Doc. Josipa Kleczka: „Plazma ve vesmíru a v laboratoři" a v roce 1974 populárně-vědecká kniha Dr. Václava Krejčího: „Plazma – čtvrté skupenství hmoty" v nakladatelství Orbis.

Od té doby profičela sluneční soustavou nesmírná spousta plazmatu v podobě slunečního větru a výzkum plazmatu v laboratorních podmínkách i ve vzdáleném vesmíru výrazně pokročil. Ani pro odborníka není proto snadné udržet si alespoň základní přehled o vlastnostech a projevech plazmatu, jehož studium má právě u nás dlouhou a úspěšnou tradici. Součástí Akademie věd ČR je totiž Ústav fyziky plazmatu, v němž od roku 2000 pracuje i jeden z nejvýkonnějších evropských terawattových laserů PALS. Do roku 2016 bude Dolních Břežanech zbudována ještě výkonnější celoevropská aparatura ELI, schválená mezi prioritami rozvoje vědy Evropskou komisí v dubnu 2011.

Jako na zavolanou tak přichází na knižní trh pozoruhodný spis RNDr. Petra Kulhánka, CSc., profesora aplikované fyziky na ČVUT v Praze a významného popularizátora vědy. Autor v knize ve třinácti vybraných kapitolách seznamuje přístupnou a čtivou formou čtenáře s rozličnými projevy plazmatu na Zemi (blesk, kulový blesk, hvizd a lví řev) v atmosférách a korónách hvězd, ale i v exotických objektech jako jsou pulsary a magnetary. Dále se věnuje možnostem napodobení termonukleárních reakcí ve hvězdách v pozemních magnetických nádobách (stelarátory a tokamaky, včetně kontroverzního projektu ITER) i teoriím a dokonce pokusům, které zkoumají chování horkého plazmatu velmi raného vesmíru, kdy samostatně existovaly volné kvarky a gluony.

Zvláštní kapitola je věnována hvězdné seismologii (asteroseismologii), která započala výzkumem vnitřní stavby Slunce jako helioseismologie, ale nyní si už troufá i na poznávání vnitřní struktury vzdálených hvězd. Sám jsem si nejvíce vychutnal kapitolky o solitonech a magnetické rekonexi (přepojení), protože je to velmi moderní část plazmové fyziky, ale též pro názornost výkladu a vynikající kresby i fotky v obrazových přílohách.

Ostatně ke čtivosti knihy přispívá i standardní závěrečný odstavec každé kapitolky obsahující často překvapivé a málo známé informace o probírané tématice i didaktické poučení na závěr (chtěl bych skoro napsat Poučení z krizového vývoje v daném oboru výzkumu plazmatu, kdyby ten název nebyl zprofanován v období tzv. normalizace po sovětské invazi do Československa). Kdyby se knížka nejmenovala Blýskání, docela by ji slušel titul „Vše, co jsem chtěl vědět o plazmatu, ale styděl jsem se optat“. Domnívám se, že autor v knize, kterou jste právě otevřeli, prokázal znovu jednak svou odbornou zdatnost a jednak pedagogické mistrovství; dokázal tak rok po udělení Ceny České astronomické společnosti Littera astronomica, že si ji opravdu zasloužil.

Praha, srpen 2011 Jiří Grygar

1. Blýskání

Máš-li smůlu, pokouše tě i slimák.
Benjamin Franklin

Někdy v době mých studií na gymnáziu jsme se vydali se spolužákem Vojtou ze základky na výlet na hrad Točník. Jde o malebnou zříceninu mezi Berounem a Rokycany. Šli jsme ze Zdic do obce s prapodivným názvem Hředle a poté po žluté turistické hřebenovce směrem k Točníku. Těsně před zříceninou nebe potemnělo a během několika sekund se rozpoutala bouřka nevídané intenzity. V nadmořské výšce přibližně 450 metrů nám příroda připravila mimořádný zážitek. Silný déšť nás téměř okamžitě promáčel skrz naskrz. Nebyl čas se někam schovat, bouřka vznikla velmi rychle. Déšť ale nepatřil k nejhorším prožitkům. Všude kolem nás dopadaly blesky s ohlušujícím rachotem a co chvíli osvítily ďábelsky se tyčící zříceninu hradu Točník, která se tu a tam vynořovala z okolní tmy. Poprvé jsem měl z bouřky opravdový strach a uvědomoval si bezmocnost nás lidí před přírodními živly. Přibližně padesát blesků dopadlých v mé těsné blízkosti během několika minut se mně hluboce vrylo do paměti a zůstanou v ní do konce života. Tehdy jsem netušil, že nejde o mé poslední setkání s plazmatem a že se plazma stane dokonce každodenní součástí mého budoucího povolání. Lékaři mají pro náš zážitek dokonce pojmenování – *astrafobie* neboli chorobný strach z hromů a blesků. Prý se týká hlavně dětí. Nevěřím. Dodnes si myslím, že jediný člověk, který se opravdu nebál blesků, byla bláznivá Viktorka z naší tehdejší povinné školní četby.

Plazma

Látka v kanálu blesku je typickým příkladem plazmatického skupenství. Než si vysvětlíme, co to plazma je, udělám jednu krátkou jazykovou odbočku. V česky psaných textech se pro plazma jakožto skupenství látky ujal střední rod (popisujeme to plazma, hovoříme o tom plazmatu, setkáváme se s tím plazmatem), zatímco pro

krevní plazmu se ujal rod ženský (v těle nám koluje ta plazma). Samotné slovo plazma je řeckého původu a znamená *formu* či *tvar*.

Pokud budete zahřívat kostku ledu, proběhne při určité teplotě fázový přechod ke kapalnému skupenství. Krystalická vazba se naruší (k tomu je třeba dodat energii v podobě tepla), molekuly vody se částečně osvobodí a jsou schopné samostatného pohybu. Vazby držící kapalinu pohromadě nejsou stálé, ale vznikají a zanikají podle toho, jak se sledovaná molekula v kapalině pohybuje. Kapalina má podobnou hustotu jako pevná látka, obě skupenství společně nazýváme *kondenzované stavy látky*. Při dalším zahřívání se naruší i mezimolekulární vazby v kapalině a látka se přemění v plyn. Hustota tohoto skupenství je podstatně nižší než u pevné látky nebo kapaliny. Plyn má spolu s kapalinou společnou volnost pohybu (tečení), proto oběma skupenstvím říkáme společně *tekutiny*. Na rozdíl od kapaliny mohou plyny vyplnit jakýkoli objem, ve kterém se ocitnou. Pevnou látku, kapalinu a plyn řadíme k tzv. klasickým skupenstvím.

Při dalším ohřevu látky dojde k *ionizaci* – uvolnění některých elektronů z atomárního obalu. K tomu je opět třeba dodat tepelnou energii a narušit určitý druh vazby – tentokrát vazby elektronu s atomovým jádrem. Vzniklé skupenství nazýváme *plazma*. Jeho vlastnosti se od ostatních skupenství velmi odlišují a změna chování při přechodu od plynu k plazmatu je největší ze všech popsaných fázových přechodů. V plazmatu se nacházejí volné nosiče nábojů (elektrony a ionty), a proto plazma jako jediné skupenství reaguje na elektrická a magnetická pole. Tato reakce je kolektivní: nabité částice reagují společně, jako jeden jediný celek. Mohou se pod vlivem polí rozvlnit, vytvořit struktury složené ze stěn a vláken nebo mohou společně vytvořit makroskopická elektrická a magnetická pole. Hovoříme o tzv. kolektivním chování plazmatu. Všeobecně přijímaná definice plazmatu pochází od amerického fyzika a chemika Irwinga Langmuira (1881–1957), který již v roce 1928 použil slovo plazma pro ionizované prostředí, protože mu jeho vlastnosti připomínaly chování krevní plazmy. Langmuir sta-

novil tři základní podmínky, které musí plazmatické skupenství splňovat:

1. *Plazma obsahuje volné nosiče nábojů. Zpravidla jde o elektrony a ionty různé násobnosti, které jsou schopné vést elektrický proud.*
2. *Plazma vykazuje kolektivní chování – reaguje na elektrická a magnetická pole jako celek a je schopné obě pole samo vytvářet.*
3. *Plazma je kvazineutrální, tj. obsahuje v každém makroskopickém objemu stejný počet kladných i záporných částic.*

Není bez zajímavosti, že tuto definici splňují i kovy, někdy proto hovoříme o kovech jako o chladném plazmatu. Některé typy plazmových vln byly poprvé objeveny právě v kovech, například ve vizmutu. Nás ale bude především zajímat plazma, které vzniklo ionizací plynů, ať již z důvodu vysoké teploty nebo vysokého tlaku.

Ve vesmíru je většina atomární látky v plazmatickém stavu. Z plazmatu je složeno nitro hvězd, za plazma lze považovat většinu mlhovin, mezihvězdné i mezigalaktické prostředí. Sluneční soustava je vyplněna plazmatem slunečního větru, plazma se nachází v magnetosférách planet. Jedinými neplazmatickými oázami jsou kamenné planety a měsíce. Naše Země je jedním z mála objektů ve vesmíru, na němž je plazma vzácností. Nalezneme ho ale v ionosféře, v kanálech blesků, v polárních zářích, v jiskrových výbojích statické elektřiny, v továrnách využívajících plazmové technologie a v tajuplných laboratořích plazmových fyziků.

Výzkum blesků

Podstata blesku zajímala mnoho učenců, jedním z prvních byl řecký filosof Aristotelés ze Stageiry (384–322 př. n. l.). Aristotelés tehdy vyslovil domněnku, že blesk je světlo vznícených výparů, které stoupají ze země a srážejí se v mracích. Souvislost blesku s elektřinou prokázal experimentálně až o dvě tisíciletí později americký diplomat Benjamin Franklin (1706–1790).

Málokterý dnešní státník má zálibu v přírodních vědách. Spektrum zájmu současných politiků je poněkud odlišné a řekl bych že jednostranné. V dobách dávno minulých tomu tak ale nebývalo. O americkém státníkovi a diplomatovi Benjaminu Franklinovi lze bez nadsázky také hovořit jako o významném přírodovědci a vynálezci. Mezi jeho záliby patřilo i pozorování bouřek a blesků. V polovině 18. století se rozhodl provádět aktivní experimenty v průběhu bouřek. V roce 1750 publikoval návrh, podle kterého by bylo možné prokázat souvislost bouřek s elektřinou. Za tím účelem nechal postavit ve Filadelfii výzkumnou věž; v průběhu její stavby ho ale napadlo, že by mohl bouřkové projevy zkoumat za pomoci letícího draku, kterého by vypustil směrem k bouřkovému mraku. Nápad to byl opravdu ďábelský a velmi riskantní.

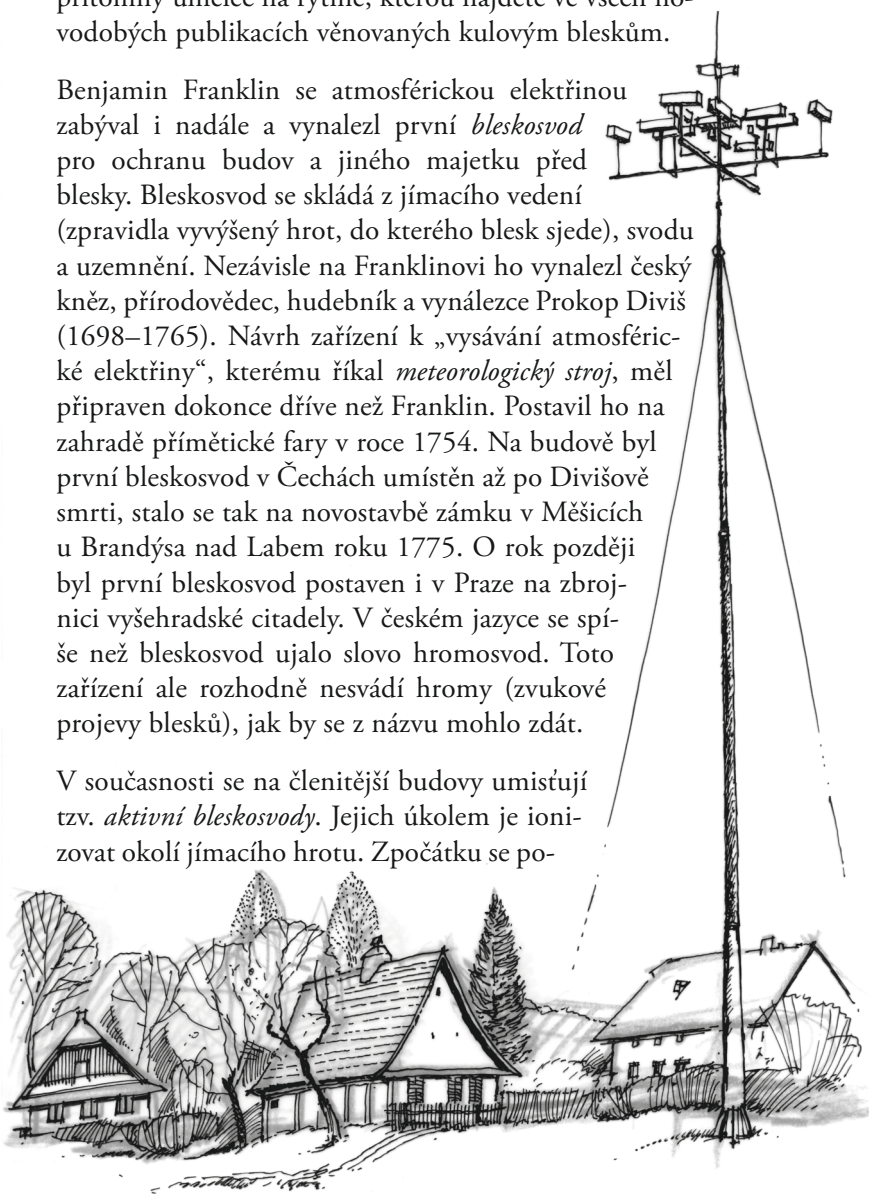
Spolu se synem v roce 1752 postavili draka a čekali na první bouřku. Jakmile se objevil bouřkový mrak, vypustili draka na šňůrce z hedvábí namotané na kovovém klíči. Déšť rychle šňůrku namočil, a tak se stala vodivou. Franklin nejprve pozoroval, že se uvolněná hedvábná vlákénka výrazně napnula. Poté mu z klíče na ruku přeskočila jiskra. Jako první tak dokázal, že bouřková činnost souvisí s elektřinou. Franklin tehdy netušil, že několik týdnů před ním provedl podobný experiment francouzský přírodovědec Thomas François Dalibard (1709–1799) ve vesničce Marly-la-Ville. Dalibard také v roce 1752 dokázal za pomoci 12 metrů vysoké tyče vytvářet při bouřce jiskry. K experimentům ho motivoval Franklinův článek z roku 1750. Franklin se s ním potkal až v roce 1767 při své návštěvě Francie.

Franklin měl při experimentech velké štěstí. Obdobné pokusy dělali i jiní vědci, kteří takové štěstí neměli. Německý profesor Georg Wilhelm Richmann (1711–1753) nepochybně zaujal své současníky experimentem s elektroskopem umístěným na konci neuzemněné kovové tyče, který předváděl za bouřky několika účastníkům shromáždění Ruské akademie věd v Petěrburku. Dokonce se mu podařilo pravděpodobně vyvolat kulový blesk, který ho v zápětí zabil. Budiž mu útěchou, že jeho oběť na poli vědy zaznamenal

přítomný umělec na rytině, kterou najdete ve všech novodobých publikacích věnovaných kulovým bleskům.

Benjamin Franklin se atmosférickou elektřinou zabýval i nadále a vynalezl první *bleskosvod* pro ochranu budov a jiného majetku před blesky. Bleskosvod se skládá z jímacího vedení (zpravidla vyvýšený hrot, do kterého blesk sjede), svodu a uzemnění. Nezávisle na Franklinovi ho vynalezl český kněz, přírodovědec, hudebník a vynálezce Prokop Diviš (1698–1765). Návrh zařízení k „vysávání atmosférické elektřiny", kterému říkal *meteorologický stroj*, měl připraven dokonce dříve než Franklin. Postavil ho na zahradě přímětické fary v roce 1754. Na budově byl první bleskosvod v Čechách umístěn až po Divišově smrti, stalo se tak na novostavbě zámku v Měšicích u Brandýsa nad Labem roku 1775. O rok později byl první bleskosvod postaven i v Praze na zbrojnici vyšehradské citadely. V českém jazyce se spíše než bleskosvod ujalo slovo hromosvod. Toto zařízení ale rozhodně nesvádí hromy (zvukové projevy blesků), jak by se z názvu mohlo zdát.

V současnosti se na členitější budovy umisťují tzv. *aktivní bleskosvody*. Jejich úkolem je ionizovat okolí jímacího hrotu. Zpočátku se po-



Obr. 1. Rodný dům Prokopa Diviše a jeho meteorologický stroj.

užívaly jímací hroty z radioaktivního materiálu, nyní vyšle vrchní část bleskosvodu za bouřky sérii pulzů různých frekvencí, které ionizují okolí hrotu jímací tyče a s předstihem připraví vstřícný vodivý kanál. Aktivní bleskosvody většinou nepotřebují samostatný zdroj energie, obsahují kondenzátor, který se za bouřky automaticky nabije. Chrání objekt do podstatně větší vzdálenosti od jímací tyče než klasický Franklinův bleskosvod. V Praze chrání aktivní bleskosvody například katedrálu sv. Víta, Národní muzeum, Památník národního písemnictví, Pražský hrad a další památky.

Vraťme se ale opět do minulosti. S blesky také experimentoval slavný vynálezce srbského původu Nikola Tesla (1856–1943), který celý život zasvětil pokusům s elektřinou. Je autorem mnoha vynálezů, například střídavého motoru, Teslova transformátoru, vodní turbíny nebo první rentgenové lampy. Jeho posedlost střídavým proudem umožnila široké využití elektřiny v průmyslu i v domácnostech. Na přelomu 19. a 20. století uměle vytvářel blesky v laboratoři v Colorado Springs za pomoci vysokého napětí. Cílem těchto experimentů bylo porozumět chování blesků tak, aby bylo možné před nimi ochránit dálková vedení rozvodů elektřiny.

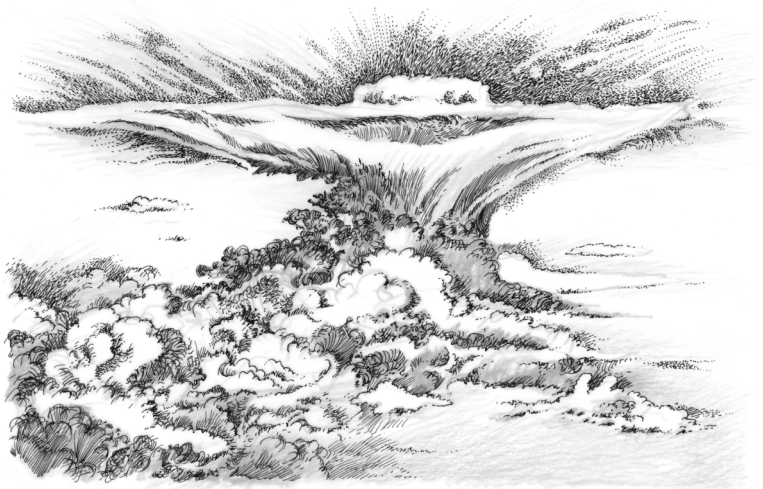
V roce 1905 udeřil v Austrálii v blízkosti Sydney blesk do dutého měděného hromosvodu. Měděná trubka byla po úderu silně zdeformovaná a stlačená směrem k ose. Jev vysvětlil irský profesor fyziky na Univerzitě v Sydney James Arthur Pollock (1865–1922) spolu s australským strojním inženýrem Samuelem Henrym Egertonem Barracloughem (1871–1958) z téže univerzity. Protékající proud vytvořil silné magnetické pole, které stlačilo měděnou trubku. V současnosti tomuto jevu říkáme pinč efekt (z anglického slova *pinch*, které znamená *stlačit*). Část zdeformovaného hromosvodu je dodnes uložena jako vzácná památka na Univerzitě v Sydney. V roce 2005, který byl vyhlášen Mezinárodním rokem fyziky, jsme tak kromě objevu speciální relativity, vysvětlení fotoelektrického jevu a Brownova pohybu (tyto tři fyzikální oblasti jsou spjaty se jménem Alberta Einsteina) mohli také slavit zrod fyziky plazmových vláken neboli pinčů. V pinčích je plazma stlačováno

k ose stejným mechanizmem, jakým byla stlačena měděná trubka australského hromosvodu v roce 1905. S pinči byly v 50. letech 20. století prováděny první experimenty s termojadernou fúzí, které po stočení plazmového vlákna do tvaru toroidu přerostly v dnešní fúzní experimenty na obřích tokamacích.

V současnosti se na mnoha místech provádí aktivní výzkum blesků. Stačí nastřelit do mraku meteorologickou raketu táhnoucí za sebou drátek a umělý blesk může být na světě. Metoda má mnoho výhod. Není třeba čekat na úder blesku. V blízkosti odpalovací rampy mohou být detektory částic, světelného, rentgenového i gama záření, čidla pro měření elektrického a magnetického pole, tekoucích proudů atd. Příkladem mohou být experimenty s meteorologickými raketami prováděné v Mezinárodním centru pro výzkum a testování blesků v Camp Blanding na Floridě, které je řízeno Floridskou univerzitou.

Jak vzniká blesk?

Blesky vznikají v bouřkových mracích (v meteorologii se správně říká oblacích) neboli *Cumulonimbech*. Jejich latinský název znamená doslova dešťový sloupec. Mrak má zpravidla značné rozměry na výšku, horní část je rozšířená, takže se podobá kovadlině vyrůstající z květáku, prostřední část vytváří cosi jako stonek. Ve svislém směru probíhá intenzivní proudění vedoucí na značné turbulence. Proto se letadla těmto mrakům vyhýbají. V bouřkových mracích dochází k separaci náboje. Mechanizmus není přesně znám. Jednou z možností jsou srážky drobných ledových krystalků s ledovými krupkami, při kterých přeskočí z krystalku na kroupu jeden nebo více elektronů. Lehké, kladně nabité krystalky stoupají vzhůru, zatímco záporně nabité kroupy a vodní kapky klesají směrem dolů. Výsledkem je polarizovaný mrak, jehož horní část (kovadlina) má kladný náboj a dolní část (květák) záporný náboj. Meteorologové navrhli i další mechanizmy, které mohou vést ke stejné polarizaci bouřkového mraku.



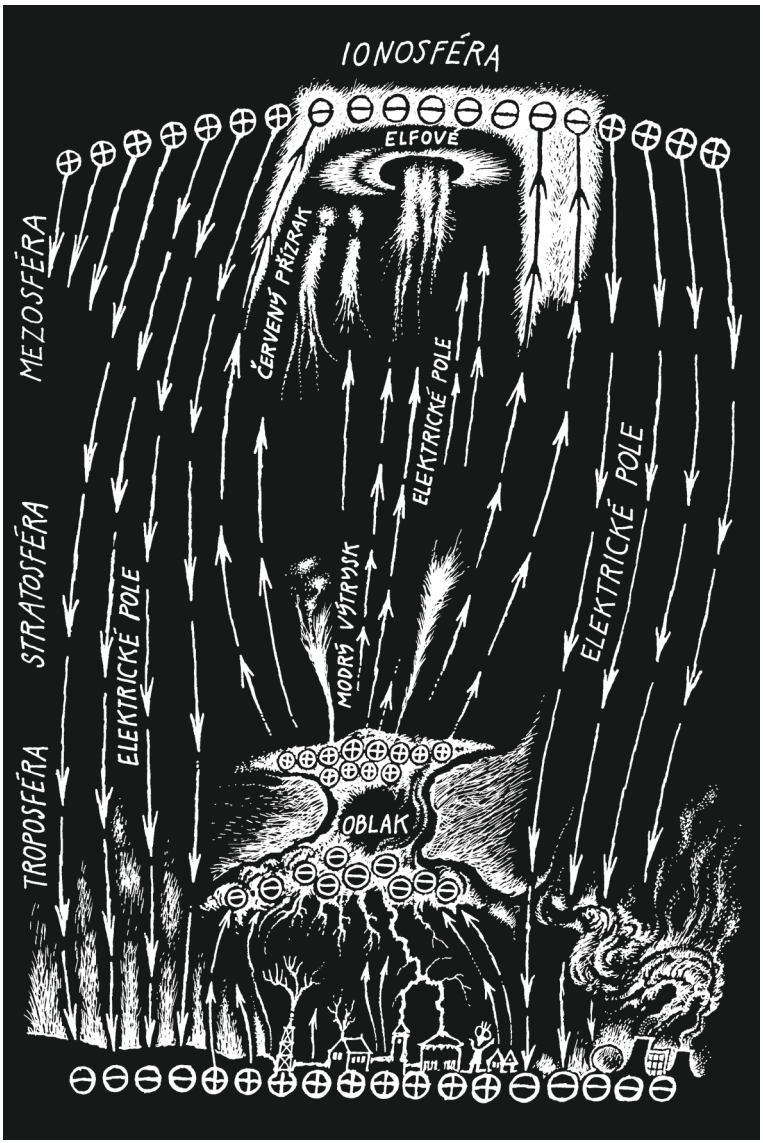
Obr. 2. Bouřkový mrak – *Cumulonimbus capillatus incus*. Horní část obsahuje ledové krupky a její kovadlinový tvar vzniká zastavením vertikálního proudění o tropopauzu. Slovo *capillatus* znamená vlasatý a slovo *incus* kovadlina.

Spodní hrana bouřkového mraku může být od několika set metrů až do několika kilometrů. Horní část mraku dosahuje výšky až 17 kilometrů. Pokud se mrak pohybuje krajinou, jeho spodní (záporná část) odpuzuje v zemi elektrony a přitahuje kladné náboje. Výsledkem je, že pod mrakem má zemský povrch kladný náboj a tato kladně nabitá skvrna sleduje pohyb mraku. Ze spodní strany mraku se směrem k zemi *skokovitě* vytvářejí kanálky záporného náboje, jakási chapadla ne nepodobná chapadlům chobotnice (předvýboje). Vytvoření jednoho úseku trvá přibližně 50 mikrosekund a různými směry se může vytvořit i několik dalších úseků, a tím dochází k větvení blesku. Pokud je na zemi vyvýšená vodivá oblast (strom, komín nebo jen železná tyč), objeví se směrem vzhůru obdobné, ale kratší kanálky (předvýboje) s převládajícím kladným nábojem. Dojde-li k propojení, vytvoří se vodivý kanál *vedoucího výboje* a část záporného náboje ze spodní části mraku rychle proteče směrem k zemi. Vzápětí se objeví *zpětný výboj* (trvá tisícinu sekundy), který přenese kladný náboj ze země k mraku. Právě tento zpětný výboj ohřeje vodivý kanál na teplotu až 30 000 K,

což je pětkrát vyšší teplota než na povrchu Slunce, a my uvidíme zářící kanál blesku. Ohřáté plazma má až pětinásobně vyšší tlak než okolí a rychle expanduje. Vytvoří se nadzvuková rázová tlaková vlna, kterou slyšíme jako hrom. Základní mechanizmus vzniku blesku objasnil jako první německo-americký fyzik Heinz Kasemir (1930–2007) v roce 1950.

Stejným kanálem může výboj proběhnout opakovaně (tam i zpět, tj. záporný výboj k zemi a poté kladný zpětný výboj k mraku). Zpravidla se tak děje dvakrát nebo třikrát, ale jsou i blesky, kdy počet opakovaných výbojů překročil dvě desítky. Jeden výboj trvá příliš krátce na to, aby lidské oko postřehlo jeho strukturu, typicky může jít o několik milisekund. Doba mezi opakovanými záblesky je 30 až 50 milisekund. Lidskému oku se proto zdá, že se bleskový kanál jakoby mihotá. Plazma se vytváří znovu a znovu a jeho vznik se střídá s temnými mezipauzami.

Typické parametry blesku mezi mrakem a zemí	
délka vodivého kanálu	kilometry
průměr kanálu	~ 5 cm
rychlost vytváření kanálu	~ 220 000 km/h
teplota	~ 30 000 K
elektrický proud	~ 30 000 A
potenciálový spád v kanálu	~ 100 V na metr délky kanálu
potenciálový rozdíl v mraku	až 100×10^6 V
přemístěný náboj	~ 10 C
uvolněná energie	~ 100 kWh (400 MJ)
nejvyšší okamžitý výkon	až 1 TW (nikoli po celou dobu)
tlak v kanálu blesku	~ 5 atm



Obr. 3. Země a ionosféra tvoří obří kulový kondenzátor. Náboj země je záporný a ionosféry kladný. V místě, kde se nachází bouřkový mrak, se indukuje obrácené elektrické pole.

Bouřky

Bouřku zažil mnohokrát každý z nás. Bouřky jsou na Zemi velmi častým jevem. Na celém povrchu Země udeří v průměru padesát až sto blesků za sekundu a proběhne 200 000 bouřek denně. Nejčastější frekvence bouří byla naměřena na jedné náhorní planině v jihoamerickém Peru, v nadmořské výšce 2 500 metrů. Na jednu lokalitu se zde vyskytuje 50 až 120 bouřek za rok. Jejich průměrná délka je 45 minut a frekvence blesků 15 až 20 za minutu. Bouřky se objevují náhle, zejména odpoledne a večer. Planina je relativně hodně osídlená a domorodci popisují, že těsně před bouřkou slyší bzučení, vstávají jim vlasy a uši dobytka jiskří. V této oblasti je zasažení dobytka bleskem častým jevem, nezřídka je zasažen i člověk. Celosvětově je ale počet úmrtí člověka z důvodu zasažení bleskem velmi malý vzhledem k ostatním příčinám násilné smrti. Mnohem pravděpodobnější je, že vás srazí na přechodu pro chodce jedoucí automobil nebo vám ze střechy spadne na hlavu taška.

Přesto je dobré za bouřky neriskovat a dodržovat alespoň elementární bezpečnostní pravidla. Pokud nejste zrovna uprostřed zuřící bouřky, je dobré odhadnout její vzdálenost. Světlo blesku se šíří rychlostí 300 000 km/s, zvuk hromu rychlostí 340 m/s. Zatímco světelný záblesk vidíte téměř okamžitě, zvukový doprovod může dorazit až za několik sekund. Je-li bouře vzdálená 1 kilometr, uslyšíte hrom přibližně za tři sekundy. Pokud tedy vydělíte počet sekund, jež uplynuly mezi bleskem a hromem třemi, získáte přibližně vzdálenost bouřky v kilometrech. Zcela v bezpečí jste, pokud je bouře vzdálená přes deset kilometrů, tj. od blesku k zahřmění uplyne přes půl minuty. Uveďme několik jednoduchých zásad chování za bouřky:

1. *Pokud jste doma, počkejte, až bouře přejde. Pokud jste v kovovém objektu, zůstaňte v něm (například v autě, autobuse, ve vlaku). Kovové objekty tvoří tzv. Faradayovu klec a případný blesk bude sveden po kovové schránce do země. Ani z letadla se nedoporučuje za letu vystupovat, zde to platí nejenom za bouřky.*

2. *Pokud se nacházíte v otevřeném terénu, sedněte si na bobek s nohama u sebe a nehýbejte se. Tím minimalizujete pravděpodobnost zásahu bleskem i úraz krokovým napětím od blesku, který udeřil ve vaší blízkosti.*

3. *Za bouře nepobíhejte v otevřeném terénu, nechoďte po hřebenech a vrcholcích hor, neplavte v rybnících a řekách, nestůjte blízko vysokých předmětů. Je-li v blízkosti prohlubeň, přesuňte se do ní.*

4. *Neschovávejte se v jeskyních, často je zde zvýšená radioaktivita (a tím ionizace vzduchu a vodivost), vlhká a vodivá půda, zábradlí a lana, která snadno vedou proud. Jeskyně jsou nejčastějším místem hromadných úrazů při bouřce.*

Chcete-li se pokochat bouřkovou aktivitou v České republice, podívejte se na webovou stránku [3]. Je zde mapa míst, do kterých za posledních deset minut udeřil blesk. Můžete si vyhledat i starší mapy a sledovat vývoj bouřkové činnosti za určité období. Na mapách jsou zakresleny jak normální blesky (se zápornou polaritou), tak blesky s kladnou polaritou, o kterých si teprve povíme.

V historii Země mohly bouřky sehrát značnou roli. V prostředí, které ionizovaly blesky, vznikají různé organické molekuly, a tak mohly časté bouřky na úsvitu dějin Země ovlivnit vznik života. V dobách pozdějších se bouřky staly zdrojem rozsáhlých lesních požárů, jež jsou přirozenou součástí životního cyklu lesa a tím i vývoje naší planety.

Další druhy blesků

K nejčastějším bleskům patří výboje uvnitř mraku nebo mezi různými mraky. Na jeden blesk mezi mrakem a zemí připadnou tři až čtyři blesky uvnitř mraků nebo mezi mraky. Pokud se mrak rychle pohybuje, jednotlivé výboje probíhající v jednom kanálu oko nerozliší a nám se zdá, že vidíme *plošný blesk*.

Z blesků mezi mrakem a zemí tvoří 90 až 95 procent blesky, které jsme popsali. Vycházejí z dolní (záporné) hrany mraku a míří

směrem k zemi. Někdy je nazýváme *blesky se zápornou polaritou*. V pěti až deseti procentech vznikne *blesk s kladnou polaritou*. Záporný (elektronový) předvýboj vychází ze Země a kladný předvýboj z horní vrstvy mraku, většinou míří ve vodorovném směru i několik kilometrů a teprve poté se skloní k zemi. V místě, kde se oba předvýboje spojí a udeří blesk vůbec nemusí být bouřka. Někdy hovoříme o *blesku z čistého nebe*. Základní výboj (elektrony ze země) míří od země k mraku, teprve zpětný výboj, který zahřeje hlavní kanál, míří z mraku na zem. Blesky s kladnou polaritou jsou, co se proudu týče, o řád silnější než blesky se zápornou polaritou a trvají přibližně desetkrát déle. Jsou nejčastější příčinou lesních požárů. Často se vedou diskuse, zda jsou dnešní letadla vůči bleskům s kladnou polaritou dostatečně chráněna. Blesky s kladnou polaritou jsou doprovázeny velkým množstvím nízkofrekvenčních elektromagnetických vln v rádiovém oboru. Směr blesku a tím jeho polaritu snadno určíme z jeho větvení.

Podle tvaru můžeme blesky mezi mrakem a zemí a blesky v mracích dělit na plošné, rozvětvené, vidlicovité, perlové, pavučinové a jiné. Existují ale i výboje vedoucí z horní vrstvy bouřkových mraků směrem vzhůru k ionosféře. K nejznámějším patří tzv. *modré výtrysky*, které míří z výšky přibližně 15 km do výšky 45 až 50 km. Mají charakteristické modré zabarvení, nejužší část je na horní vrstvě mraků a blesk se postupně rozšiřuje směrem do stratosféry. Na existenci různých barevných blesků ve vysokých výškách upozorňovali piloti letadel již velmi dávno. Nikdo jim však nepřikládal většího významu. Seriozní výzkum započal až v 90. letech 20. století, kdy byly tyto blesky nafilmovány z raketoplánu. Nyní se zkoumají i z Mezinárodní vesmírné stanice. Na dolním okraji ionosféry (ve výšce 80 až 90 kilometrů) se objevují různé načervenalé výboje, některé vypadají jako příšerky visící za hlavu z ionosféry dolů, těm se začalo říkat *červené přízraky*. Kolem nich se vytvářejí zářící kruhové oblasti, tzv. elfové (z anglického *elves*, což je zkratka pro *Emissions of Light and Very Low Frequency Perturbations from Electromagnetic Pulse Sources*) nebo přízračná halo. Mechanizmus vzniku těchto atypických blesků je zatím nejasný.

Zcela jiný druh blesků vzniká v prašném prostředí, kde se může snadno vytvářet statický náboj. Jde například o prachová oblaka nad sopkami (viz obrázky 2 a 3 v barevné příloze), prachové bouře v pouštích nebo dým nad lesními požáry. I zde je vhodné prostředí pro vznik výboje podobného blesku, jehož vodivý kanál má délku ve stovkách metrů. U lesních požárů jde svým způsobem o kladnou zpětnou vazbu. Lesní požár vytvoří prach a dým nad hořícím porostem a v něm iniciované blesky pomáhají udržovat požár.

Může za vznik blesku kosmické záření?

Vznik blesku není dodnes zcela pochopenou záležitostí. Typické pole v mraku nemá hodnotu průrazného napětí. Mezi horní a dolní vrstvou mraku může být napětí ve stovkách milionů voltů. Průrazné napětí v mraku se odhaduje na dva miliony voltů na metr, této hodnoty ale elektrické pole v rozlehlém bouřkovém mraku nedosahuje. Při vzniku blesku se proto uplatňují i další faktory, za nejvýznamnější je považováno kosmické záření[1], které atakuje atmosféru a při těchto srážkách vzniká sprška sekundárních částic s vysoce energetickými elektrony (s průměrnou energií 20 megaelektronvoltů[2]), které přibližně sledují směr dráhy primární částice kosmického záření. Vytvoří jakýsi pomalu se rozšiřující „lívanec" rychlých elektronů, které se řítí směrem k zemi. Pokud se na své

1 **Kosmické záření** – proud urychlených částic neznámého původu. Při interakci s atmosférou vzniká sprška milionů i miliard částic. Nejenergetičtější částice kosmického záření, které se dosud podařilo detekovat, mají energie až 10^{20} eV. Sprška z takové částice zasáhne na zemském povrchu mnoho desítek km^2. Tak energetická částice se objeví přibližně jednou za sto let. Kosmické záření může vznikat v supernovách, pulzarech, aktivních galaktických jádrech atd. Naprostá většina částic kosmického záření, okolo 88 %, jsou protony, přibližně 10 % jsou jádra hélia (alfa záření), 1 % elektrony a pozitrony a 1 % těžké prvky. Kosmické záření bylo objeveno v roce 1912 rakouským fyzikem Viktorem Hessem při balónových experimentech ve výšce až 5 500 metrů. S rostoucí výškou stoupala ionizace atmosféry a tím byl prokázán kosmický původ záření. Za objev získal Hess v roce 1936 Nobelovu cenu za fyziku.

2 **Elektronvolt** – jednotka energie. Jde o energii, kterou získá elektron urychlením za pomoci napětí (v potenciálovém rozdílu) jeden volt, 1 eV = $1{,}6\times10^{-19}$ J. Ve fyzice elementárních částic se používají spíše větší násobky této jednotky, kiloelektronvolt (keV, 10^3 eV), megaelektronvolt (MeV, 10^6 eV), gigaelektronvolt (GeV, 10^9 eV) nebo teraelektronvolt (TeV, 10^{12} eV).

cestě potkají s bouřkovým mrakem, pravděpodobně sehrají při vzniku blesků rozhodující roli.

Běžný elektron je elektrickým polem mraku urychlován, ale srážky s ostatními nabitými částicemi v atmosféře (tzv. coulombické srážky neboli tření) ho zase brzdí. Při určité rychlosti se ustaví rovnováha mezi urychlováním elektronu a jeho brzděním a elektron již vyšší rychlost nezíská. Pokud má ale elektron hned na počátku vysokou rychlost (takový elektron může vzniknout jen při srážce kosmického záření s atmosférou), stává se pro něho atmosféra téměř průhlednou a účinný průřez coulombických srážek s atmosférou je minimální. Takový elektron je neustále urychlován elektrickým polem, protože jeho srážky s okolím jsou téměř zanedbatelné. Hovoříme o tzv. *ubíhajících elektronech* (v anglické literatuře *runaway electrons*), které mohou získat relativistickou rychlost a značnou energii. Jejich existenci předpověděl skotský fyzik a objevitel mlžné komory Charles Thomson Rees Wilson (1869–1959) v roce 1924. Právě tyto elektrony mohou ionizovat atmosféru, vytvářet velké množství tepelných (málo energetických) elektronů a menší množství elektronů s vysokou energií, které se také stanou ubíhajícími elektrony. Tím dojde k lavinovitému procesu, průrazu a zformování blesku, jak navrhnul ruský fyzik Alexandr Gurevič (1930) v roce 1992. Ubíhající elektrony sníží průrazné napětí ze dvou milionů voltů na metr na pouhých 200 tisíc voltů na metr. Při průrazu ubíhajícími elektrony by měl vzniknout charakteristický rádiový pulz v megahertzové oblasti. Pulzy odpovídajícího průběhu byly Gurevičem a dalšími detekovány v roce 2003.

Gama záblesky a rentgenové záření

Od 90. let 20. století jsou v bouřkově aktivních oblastech pozorovány krátké gama záblesky, a to jak z oběžné dráhy, tak z pozemských měřících stanic. Záblesky míří většinou z bouřkových oblastí (z výšky 15 až 21 km) směrem vzhůru. Jako první je detekovala ve výšce 500 až 600 km v roce 1994 americká rentgenová družice

CGRO[3], která jich za deset let své existence zachytila 77. Družicová observatoř RHESSI[4] je úspěšnější, z jejích pozorování se zdá, že jich je generováno na celé Zemi přibližně 50 denně. Oproti gama záblesků přicházejících z vesmíru jsou atmosférické gama záblesky velmi krátké, většinou trvají kolem jedné milisekundy. Označujeme je zkratkou TGF (*Terrestrial Gamma-ray Flashes*). Jejich existence byla pro fyziky velkým překvapením. Energie těchto gama fotonů[5] občas překročí i hodnotu 20 MeV. V roce 2003 se Josephu Dwyerovi z Chicagské univerzity podařilo tyto gama záblesky vytvořit i uměle v blescích iniciovaných meteorologickou raketou nastřelenou do mraku.

Jak mohou fotony s vysokou energií při bouřce vznikat? Pravděpodobně je produkují ubíhající elektrony urychlené na relativistické rychlosti. Rychlé elektrony vzniklé interakcí kosmického záření s atmosférou interagují i s polem atypických blesků, například modrých výtrysků, a vytvořit lavinu *relativistických ubíhajících elektronů* mířících směrem vzhůru, která poté vyšle gama záblesk.

Na dalším urychlování ubíhajících elektronů se mohou podílet i hvizdy, nízkofrekvenční elektromagnetické vlny vznikající jako doprovodné projevy blesků. Hvizdy se pohybují podél magnetických indukčních čar Země, rovina jejich elektrického pole se otá-

3 **COMPTON** – Compton Gamma Ray Observatory, první obří družice NASA určená pro výzkum gama záření, hmotnost měla 17 tun a na oběžnou dráhu ji vynesl raketoplán Atlantis 5. 4. 1991. Mise byla ukončena 4. 6. 2000 navedením družice do zemské atmosféry, kde shořela. Přesnost určení polohy zdroje gama záření činila několik stupňů. Družice byla pojmenována po americkém fyzikovi Arthuru Comptonovi, nositeli Nobelovy ceny za fyziku, a to za výzkum rozptylu vysoce energetických fotonů na elektronech. Právě tento mechanizmus sloužil k detekci gama záření na všech čtyřech přístrojích družice.

4 **RHESSI** – Reuven Ramaty High Energy Solar Spectroscopic Imager, malá družice NASA vypuštěná 5. 2. 1992. Jejím hlavním cílem je výzkum uvolňování energetických částic při náhlých slunečních vzplanutích. Pohybuje se na kruhové dráze kolem Země ve výšce 600 km. Pojmenována je podle Reuvena Ramatyho (1937–2001), který je průkopníkem sluneční fyziky, gama astronomie a výzkumu kosmického záření. Ramaty se narodil v Rumunsku, většinu života ale pracoval v USA v NASA.

5 **Gama obor** – elektromagnetické vlnění s vlnovými délkami kratšími než setina nanometru, tj. 10^{-11} m. Frekvence tohoto záření je vyšší než 3×10^{19} Hz. Nejčastěji se záření charakterizuje energií fotonů, která je pro gama záření vyšší než 0,1 MeV.

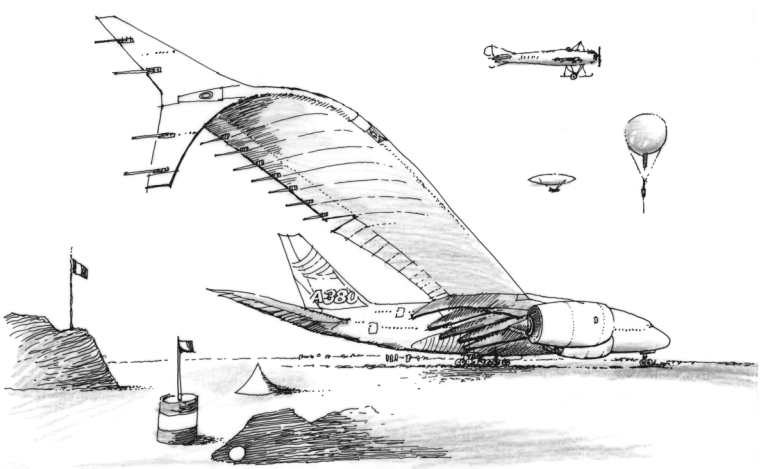
čí ve stejném směru, v jakém se pohybují elektrony po šroubovicích v magnetickém poli. Elektrické pole vlny proto může přispět k dalšímu urychlení elektronů až na jejich relativistickou rychlost. Takové elektrony potom také vyzáří gama záblesk. Navrhovaných mechanizmů je celá řada a pochopení vzniku gama záblesků při bouřkové činnosti se teprve začíná rýsovat v hrubých obrysech.

Jednu milisekundu před prvním zpětným úderem blesku vzniká z neznámých příčin intenzivní rentgenový záblesk. Poprvé ho pozorovali Michael McCarthy a George Parks z Washingtonské univerzity v roce 1984. Pravděpodobně nějak souvisí se skoky při vytváření vedoucího kanálu. Záblesk trvá až minutu a má energii kolem 50 keV. Při bouřkách vzniká i slabý rentgenový šum. V tomto případě nejde o záblesky, ale o signál trvající několik desítek minut. Objeven byl při brazilském experimentu GGR (*Ground Gamma Radiation*) v roce 2005. GGR je scintilační detektor, který zaznamenává fotony v rozsahu energií 60 keV až 2,12 MeV, tedy jak rentgenové tak měkké gama záření. Detektor je umístěn v oblasti Cachoeira Paulista, 3 metry nad zemí, na okraji deštného pralesa. V blízkosti jsou i dvě odpalovací rampy, ze kterých lze uměle za pomoci meteorologických raket vyvolat blesky. Rentgenové záření se ale pravidelně objevuje i za běžné bouřky. Při vzniku ubíhajících elektronů směrem vzhůru by také měly vzniknout urychlené protony mířící směrem k zemi. Při srážkách těchto protonů s uhlíkem, dusíkem, kyslíkem a argonem vznikají v atmosféře v malém množství radioaktivní nuklidy ^{11}C, ^{13}N, ^{16}F, ^{39}Cl a ^{38}Cl s poločasem rozpadu mezi 10 až 100 minutami, což dobře koresponduje s dobou, po kterou je měřeno rentgenové záření. Při experimentech byla detekována spektrální čára odpovídající energii 1,24 MeV. Ta přísluší rozpadu radioaktivního chlóru ^{39}Cl, který vzniká při srážce protonu s argonem. Zdá se tedy vysoce pravděpodobné, že zdrojem rentgenového signálu při bouřce jsou radioaktivní nuklidy vznikající při srážkách urychlených protonů s běžnými atomy atmosféry. Podle některých simulací by mohl být za část rentgenového signálu zodpovědný i rozpad atmosférického radonu v silném elektrickém poli bouřky.

Jsou letadla za bouřky bezpečná?

Letecký provoz je řízen tak, aby letadla, pokud je to možné, nevlétávala do bouřkových oblastí. I přesto je každé komerční letadlo v průměru jednou za rok zasaženo bleskem. V některých případech letadlo prolétávající bouřkovou oblastí blesk přímo iniciuje. Letadla jsou ale vůči tomuto jevu dnes již velmi dobře chráněna. Letadlo se stává součástí elektrického obvodu mezi náboji opačného znaménka. Proud teče vodivými částmi po povrchu letadla, který je navržen tak, aby byl blesk odveden okolo letadla až do speciálních míst (například na zadní hraně křídel), kde jsou umístěny difuzéry podobné malým anténkám, které rozptýlí blesk zpět do atmosféry. Cestující se tak případného blesku nemusejí bát. Nejdůležitější je, aby blesk nepoškodil elektroniku letadla a palivové nádrže. To jsou dvě nejkritičtější místa, která se snaží konstruktéři dnešních letadel chránit na prvním místě.

Poslední velká letecká neštěstí způsobená bleskem se odehrála před více než 20 lety. Pojďme se ale vrátit poněkud zpět. V roce 1963 bylo bleskem (pravděpodobně kladné polarity) zasaženo letadlo



Obr. 4. Difuzéry na zadní hraně křídla Airbusu A380-800 rozptylují atmosférickou elektřinu zpět do mraku.

Boeing 707 společnosti Pan Am při letu z Baltimoru do Filadelfie. V důsledku úderu blesku se vznítilo palivo v první rezervní nádrži. Následovala exploze na levém křídle, po které ztratil personál nad letadlem kontrolu. Všech 81 lidí na palubě zemřelo.

V roce 1967 zasáhl nad Iránem blesk vojenské letadlo Lockheed C-130B patřící Íránským vzdušným silám. Po explozi palivové nádrže zemřelo všech 23 lidí na palubě. V roce 1971 zasáhl blesk v Peru letadlo Lockheed L-188A společnosti Lansa. Vypukl požár a následně odpadlo pravé křídlo. Z 92 lidí na palubě přežila jako jediná sedmnáctiletá německá studentka Juliane Köpcke. Padala z roztříštěného letadla s celou řadou sedaček, které se dostaly do výrazné rotace. Poté ztratila vědomí a probudila se v džungli s relativně lehkými zraněními (zlomená klíční kost, oteklé oči). V roce 1988 zasáhl blesk nad Německem dopravní letoun Swearingen Metroline. Letadlo ztratilo po úderu bleskem křídlo a všech 21 lidí na palubě zemřelo. Databázi leteckých neštěstí s podrobnějšími údaji naleznete na webové stránce [11].

Letecké společnosti přistoupily v 70. a 80. letech k razantním opatřením a v současnosti mohou létat jen letadla splňující speciální certifikáty odolnosti vůči bleskům a obdobné katastrofy by se již neměly u komerčních letů opakovat. Například palivové nádrže jsou zesíleny a palivový systém je konstruován tak, aby v žádné jeho části při zasažení bleskem nemohla přeskočit jediná jiskra. Problémem ale nadále zůstávají malá necertifikovaná letadla. Ta by za bouřky neměla vůbec létat.

Blesky na ostatních planetách

Blesky jsou velmi rozšířeným jevem u všech planet ve sluneční soustavě, které mají atmosféry. V průběhu posledních desetiletí byly detekovány jak na terestrických planetách (Venuši), tak i na obřích planetách (Jupiteru, Saturnu, Uranu i Neptunu). Nejprozkoumanější jsou na Venuši, která má výjmečně hustou atmosféru a na Jupiteru, jenž je největší planetou sluneční soustavy.

Světelné a elektromagnetické záblesky na Venuši byly detekovány již při letech sondy Veněra 11 v roce 1978, která měla jak orbitální, tak přistávací část. Blesky na Venuši pozorovaly i další sondy, například Pioneer Venus (1978–1992), Galileo (sonda prolétla kolem Venuše v roce 1990) a Venus Express (startovala v roce 2005, u Venuše je od roku 2006). Atmosféra Venuše je zcela odlišná od zemské atmosféry, obsahuje 96 % oxidu uhličitého, silný skleníkový efekt ohřívá povrch planety až na 480 °C a povrchový tlak je 90 atmosfér, tedy devadesátkrát vyšší než na Zemi. I přes zcela odlišné podmínky je intenzita blesků a jejich prostorové rozložení obdobné situaci na naší Zemi. Zdá se, že obdobný je i mechanizmus vzniku blesků. Při srážkách přechází elektrony z těžších částic na lehčí. V gravitaci následně těžší částice klesají a lehčí stoupají, čímž dojde k separaci náboje v mracích a ke vzniku elektrického pole. Zatím nejcitlivější přístroje pro sledování atmosférických jevů jsou umístěny na evropské sondě Venus Express, která byla na protáhlé oběžné dráze (250 až 66 000 km) kolem Venuše od roku 2006 do roku 2008. V roce 2008 byla oběžná dráha snížena tak, aby bylo možné pozorovat brzdění sondy o atmosféru. Mise je zatím prodloužena do 31. prosince 2012.

Jupiter je oproti Zemi a Venuši zcela jiným světem. Jde o obří plynokapalnou planetu složenou převážně z vodíku a hélia, jejíž hustota je pouhých 1,4 g/cm^3, tedy srovnatelná s hustotou vody (1 g/cm^3). Hmotnost planety Jupiter je 318krát větší než hmotnost Země, objem 1 400krát větší. Jupiter má oproti Zemi extrémně silné magnetické pole, jeho dipólový moment je 20 000krát vyšší než pozemský. Magnetosféra Jupiteru je největší ze všech planet sluneční soustavy. Na Jupiteru byly detekovány blesky (viz obrázek 4 v barevné příloze) podobné atypickým bleskům z horních vrstev zemské atmosféry (modré výtrysky, červené přízraky). Proudy v blescích jsou na Jupiteru desetkrát až stokrát vyšší než na Zemi. K výzkumu blesků na Jupiteru nejvíce přispěla sonda Galileo (u Jupiteru pracovala od roku 1995 do roku 2003, kdy byla navedena do atmosféry planety a shořela), zajímavé snímky pořídila i sonda New Horizons, která kolem Jupiteru prolétla v roce 2007.

Víte, že

■ Víte, že kolem kanálu blesku vzniká velmi intenzivní magnetické pole, které v místě dopadu dokáže trvale zmagnetovat horniny? Jev se označuje zkratkou LIRM (*Lightning-Induced Remanent Magnetism*, bleskem vytvořený zbytkový magnetizmus).

■ Víte, že blesky, které udeřily do výškových budov (Eiffelova věž, Empire State Building) se větví v nadpoloviční většině případů směrem vzhůru? Míří tedy opačným směrem než běžné blesky v rovinaté krajině a předvýboj obyčejného blesku záporné polarity vychází z budovy, ne z mraku. Prohlédněte si blesky zachycené nad Eiffelovou věží na obrázku 1 v barevné příloze.

■ Víte, že energeticky je jeden bleskový výboj ekvivalentní řádově 100 kilowatthodinám? Stowattová žárovka by mohla svítit přibližně měsíc. Proto není získávání energie z mraků příliš ekonomicky zajímavé. Navíc do místa úderu přichází jen desetina až setina původní energie. Zbytek je rozptýlen v podobě tepla, světla a rádiových vln.

■ Víte, že je v dolní části mraku malá oblast kladného náboje, která se nazývá kladné jadérko? Mechanizmus vzniku této oblasti není dostatečně prozkoumán.

Každý příběh by měl mít na závěr nějaké poučení. A naše vyprávění o blescích? Tak třeba: *Za bouřky buďte opatrní a vše pečlivě sledujte. Vaše setkání s bleskem může být tím posledním.*

2. Záhada kulového blesku

Nadpřirozené je to, co je přirozené,
zatím však nepochopené.
Elbert Hubbard

Těžko již dokážu odhadnout, kolik mně tenkrát bylo let. Možná pět, možná sedm. Seděli jsme v kuchyni a právě utichla prudká letní bouře, když táta náhle zvolal: „Honem se pojďte podívat!“ Bydleli jsme ve druhém patře a pod oknem načeho rodinného domku tenkrát vedlo šikmo přes ulici telefonní vedení a těsně nad ním se pomalu kutálela svítící koule velikosti fotbalového míče. Mohla být od nás tak deset metrů. Ten obraz před sebou – pro jeho neobvyklost – vidím, jako by to bylo včera. Celý úkaz snad mohl trvat půl minuty. Skrze okno nebyl slyšet žádný zvuk. Vidím před sebou pomalý líný pohyb svítící koule podél drátu. Její spodní část se jakoby dotýkala vedení. Bohužel, všechny ostatní detaily se již napříč propasti času vytratily. Nepamatuji se, jak koule zmizela, zda dorazila až k telegrafnímu sloupu, ani jakou měla přesně barvu. Pravděpodobně jsem tenkrát jako jeden z mála uviděl kulový blesk. Škoda jen, že ta chvíle nepřišla o deset nebo dvacet let později, snad bych si zapamatoval více. Od té doby jsem o kulových blescích již slýchával jen z vyprávění.

Kulový blesk

Kulový blesk je jedním z přírodních úkazů, jehož vědecké vysvětlení dodnes chybí. I přes tisíce doložených pozorování není jasné, jak kulový blesk vzniká a jakou má povahu. V české literatuře se podrobně tímto fenoménem zabývá vynikající knížka Ivana Štolla s názvem *Tajemství kulového blesku*, která vyšla v roce 1988. Vřele ji hloubavému čtenáři doporučuji, ani po téměř čtvrt století neztratila nic ze svého lesku.

Je zřejmé, že vznik kulových blesků nějak souvisí s bouřkovou činností. Objevují se v průběhu bouřky, po úderu běžného blesku

nebo těsně po bouřce, zcela výjimečně i za jasného počasí. Existuje i fotografie, ze které se zdá, že z jedné větve běžného blesku vzniká kulovitý útvar, tedy snad kulový blesk. Chování kulových blesků je ale natolik atypické oproti všemu co známe, že tyto útvary vzbuzují respekt a vyvolávají pocit tajemna a nadpřirozenosti. A lidé nadevše milují záhady. Právě proto je kulový blesk natolik populární a každý z nás určitě někde zaslechl nebo četl nějakou těžko uvěřitelnou historku spojenou s kulovým bleskem.

Podle doložených svědectví mají kulové blesky velikost nejčastěji od několika centimetrů až po rozměr běžného míče. Jde o svítící útvary s bílou, žlutou až oranžovou barvou, někdy s namodralým okrajem. Jejich hranice je v některých případech nevýrazná a splývá s okolím, v jiných ostrá, někdy z povrchu kulového blesku srší jiskry nebo vybíhají svítící jazyky. Pozorovatelé v blízkosti nepociťují žádný tepelný vjem. Celý úkaz trvá zpravidla několik desítek sekund. Nejpodivnější je pohyb kulového blesku. Jakoby nepodléhal zákonům gravitace. Někdy se volně vznáší, pomalu přesouvá, jindy prudce poskakuje, tu a tam se zastaví a poté se opět začne pohybovat. Nejčastěji se pohybuje vodorovně. Dokáže projít miniaturní skulinkou, klíčovou dírkou nebo vylétnout komínem. Jsou situace, kdy se objeví v uzavřené místnosti a není zjevné, kudy se do ní dostal. Dotkne se shora nádoby naplněné vodou či vínem a její obsah se odpaří, aniž by nádoba byla poškozena. Pohybuje se podél vodičů nebo jiných předmětů, někdy zcela nehlučně a jindy s tichým bzukotem. Při dotyku člověka dochází většinou k brnění a na kůži se objeví nevýrazné popáleniny, setkání s kulovým bleskem končí smrtí jen ve výjimečných případech.

Někdy se ale přívětivá tvář kulového blesku zcela změní u ukáže energii, která je v něm obsažena. Po vniknutí do místnosti dokáže rozbít nábytek, prorazit stěnu nebo vytrhnout dveřní zárubeň ze zdi. Podobné projevy kulového blesku zažila babička mé bývalé manželky. V tomto případě dokonce uhradila pojišťovna škodu, kterou blesk způsobil.

A jak celý úkaz končí? Někdy se svítící koule potichu rozplyne, jindy rozprskne s ohlušujícím rachotem, tu a tam se rozdělí na několik menších koulí nebo vylétne z uzavřené místnosti komínem. Takže ani závěr jevu není jednotný a neulehčí pátrání po jeho podstatě. Za nejpodivnější lze považovat dva aspekty kulového blesku: je dlouhodobě stabilní (vydrží několik sekund až desítek sekund) a i přes malé rozměry je v něm nahromaděno velké množství energie neznámého původu schopné ničit okolní předměty.

Obr. 5. Rytina G. Hartwiga z roku 1886 patří k raným vyobrazením kulového blesku.

Historicky věrohodná pozorování

V literatuře popsaná pozorování kulových blesků jdou do tisíců. K nejcennějším patří pozorování prováděná profesionálními meteorology, fyziky, chemiky či astronomy, těch je ale bohužel velmi málo. Laici obtížněji odhadují vzdálenost objektu, jeho velikost, rychlost a leckdy zaměňují kulový blesk s jinými jevy, například

Eliášovým ohněm[6], různými světelnými úkazy nebo optickými klamy. Část lidí si také nepochybně vymýšlí a snaží se na sebe vykonstruovaným příběhem upoutat pozornost. I tak ale zůstává mnoho seriózních pozorování, která nás nenechají na pochybách, že kulový blesk je reálným a významným atmosférickým jevem. Na různých místech světa se pořádaly mezi obyvatelstvem různé průzkumy, jejichž cílem bylo získat reprezentativní kolekci pozorování kulového blesku. Vůbec největším souborem jsou výsledky ankety uskutečněné v letech 1975 až 1976 v tehdejším Sovětském svazu časopisem *Nauka i žizň* (*Věda a život*). Získaná kolekce čítá 1062 popisů pozorování kulového blesku. Z odborného hlediska je nejkvalitnějším pramenem precizně zpracovaná monografie pozorování vydaná v roce 1923 německým vědcem Waltherem Brandem (byl v té době doktorandem meteorologa, astronoma a geofyzika Alfreda Wegenera). Z novější doby jmenujme alespoň monografii M. Stenhoffa, ve které je posáno 2 300 událostí. Z prvních dvou pramenů jsou některá pozorování použita ve Štollově pojednání o kulovém blesku, ze kterého pro zpestření textu vybereme tři typické případy:

Příběh první. *K události došlo 20. června 1908 v Helgeraaenu u Larviku v Norsku. Stará paní seděla za bouře ve svém pokoji. Spatřila velkou kouli, větší než lidská hlava, která vstoupila otevřeným oknem a pomalu se pohybovala místností směrem ke kamnům. Koule přeletěla nad stolem aniž se dotkla věcí a tak blízko kolem ženy, že ta se musela naklonit na stranu. Koule krásně svítila, měla duhové barvy. U kamen pak explodovala. V místnosti byla ještě dívka, ani ona, ani stará paní neutrpěly zranění, byly jen ohlušeny výbuchem. Při výbuchu se částečně zřítil komín, kamna byla rozmetána, okna rozbita, tapety odtrženy, zdi poškozeny. Na věšáku začala hořet vesta. V sousední místnosti, jejíž kamna vedla do stejného komínu, byla žena s malým dítětem. Byly dočasně v bezvědomí a utrpěly popáleniny.*

6 **Eliášův oheň** – hrotový výboj statické elektřiny. Dochází k němu za bouřky na vyvýšených místech, hrotech, vrcholcích stromů, stožárů a někdy i na okapech budov. Projevuje se modrým světélkováním dotyčného objektu. Výboj se nepohybuje.

V mnoha případech kulový blesk z místnosti uniká komínem. To by hovořilo ve prospěch jeho elektromagnetické povahy. Vnitřek komínu pokrytý sazemi je dobrým vodičem a komín samotný tvoří kvalitní vlnovod. Ve většině případů pozorovatelé popisují kulové blesky jako bílé, žluté nebo oranžové. Poté statisticky následuje červená a modrá barva. Duhové zbarvení popsané v prvním příběhu příliš časté není.

Příběh druhý. *K události došlo v roce 1946 nad lesním masivem ve Vologodské oblasti v bývalém Sovětském svazu. Velký čtyřmotorový letoun se vracel z průzkumu v Arktidě. Letadlo letělo ve výšce 1 200 metrů, venkovní teplota byla 14 stupňů pod nulou, na letadle se tvořila šedá námraza. Náhle se v pilotní kabině objevila bílá koule, zůstala viset ve vzduchu asi čtyřicet centimetrů před očima navigátora, pulzovala a chvíli se pohupovala nahoru a dolů. Navigátor nepociťoval žádné teplo, jen pichání v hlavě a vůni ozónu. Pak koule pro změnu zezelenala a začala pomalu odplouvat. Nakonec zalezla pod křeslo radisty, a tam s rachotem vybuchla. Radista zmizel v dýmu a roji jisker, ale zůstal nezraněn. Nohy sedadla se roztavily, v letadle vzniknul požár, který se podařilo uhasit. Pilot viděl jasně bílou kouli, která se plazila po křídle a považoval ji za elektrický zkrat. Po prohlídce kabiny se nepodařilo najít žádný otvor, kudy se koule dostala dovnitř letadla.*

Případů pozorování kulového blesku v letadle je relativně velké množství, nikdy však neskončily žádnou tragédií. Jsou zdokumentovány i události v dopravních letadlech, kdy kulový blesk proplul v uličce mezi cestujícími. Ve výše uvedeném příběhu je zajímavý čichový vjem, navigátor cítil vůni ozónu. V mnoha případech je popisován buď sirný zápach nebo právě vůně ozónu, která by mohla vypovídat o ionizaci vzduchu způsobené kulovým bleskem. Roztavení kovových předmětů je také často zmiňovaným projevem kulového blesku.

Příběh třetí. *K události došlo v roce 1981 v Novém Městě u Jáchymova. Každému ze tří přítomných svědků se blesk jevil poněkud jinak; jednomu připadal žlutý se sršením na okraji, druhý udává barvu*

okraje jako fialovou, třetí si všimnul krátkého svítícího ohonu jako u komety. Blesk byl o něco větší než fotbalový míč a během tří až čtyř sekund s velkou důkladností demoloval přízemí rekreační chaluppy. Nakonec pronikl zdí silnou 70 centimetrů a při výbuchu vytvořil v zemi kráter.

Ničivé účinky kulového blesku v některých případech svědčí o značné energii, kterou obsahuje. Jsou ale případy, kdy kulový blesk zanikne mírumilovně – vysvítí se, nebo kdy skončí v rybníce nebo zmizí v zemi. Pokud se v závěru rozprskne, došlo k narušení mechanizmu, který kouli udržuje stabilní. Ne vždy má blesk velikost fotbalového míče. Často jsou popisovány případy malých kuliček velikosti tenisového nebo i jen golfového míčku. I přesto tyto malé rozměry mají značnou energii a ničivou sílu.

V současnosti v České republice žádný výzkumný ústav systematicky nezpracovává pozorování kulových blesků. Je to samozřejmě škoda, existence jakési národní centrály, kam by bylo možné pozorování hlásit by umožnilo jejich profesionální zpracování. Většina současných zážitků buď končí v bulvárních časopisech nebo jsou vyprávěny na večírcích v úzkém kruhu přátel a nebo si je náhodní svědci nechají pro sebe.

Vědecká pozorování

Situací, kdy kulový blesk pozorovali vědci, je jen několik. První pozorování navíc dopadlo tragicky. Šlo o experiment profesora Richmanna, který skončil smrtí. Georg Wilhelm Richmann (1711–1753) se narodil na území dnešního Estonska v rodině pobaltských Němců. Studoval nejprve v Talinu, později na německých univerzitách v Hale a v Jeně. V roce 1741 se stal na základě svých průkopnických prací o elektřině členem Petěrburské akademie věd. Jeho nejbližším spolupracovníkem byl Michail Lomonosov.

V době, kdy v Americe prováděl Benjamin Franklin své první pokusy s atmosférickou elektřinou, sváděl v Rusku Richmann atmo-

sférickou elektřinu ze střechy do laboratoře za pomoci dlouhého drátu, na jehož konci byl elektroskop[7]. Z dnešního pohledu šlo o neuzemněný hromosvod. Pracovníci se často drátu dotýkali, aby podle brnění ruky zjistili, zda je přítomna atmosférická elektřina. Jejich počínání bylo velmi nebezpečné. V roce 1753 sjel za prudké bouře po drátu výboj, který podle očitých svědků vytvořil malou kouli, jež přeskočila na Richmannovo čelo. Richmann stál asi třicet centimetrů od elektroskopu a pozoroval rozestupování jeho lístků. Bez jakéhokoli doteku z konce drátu vyšlo bleděmodré ohnivé klubko velikosti lidské pěsti, které se pohybovalo k čelu profesora Richmanna. Po zásahu se ozvala rána jako při vystřelení z malého děla a Richmann se skácel mrtvý k zemi. Z popisu se zdá, že při experimentu mohl vzniknout kulový blesk, který Richmanna zabil. Na jeho čele byla červená skvrna a boty měl od výboje potrhané. V místnosti se zastavily hodiny, z jedněch dveří byly vyrvány třísky a druhé exploze vyrazila. Později se našli svědkové, kteří viděli kulový blesk připlout zvenčí ke kovové tyči Richmannova hromosvodu. Celé události byl přítomen rytecký mistr Novoselov, který smrt profesora zpodobnil na známé rytině, kde je patrná jasná koule blížící se k Richmannovu čelu.

Lomonosov v době Richmannovy smrti večeřel v sousední místnosti. Smrt profesora Richmanna jím velmi otřásla. Popsal ji v dopise kurátorovi Moskevské univerzity, v němž ho současně požádal o materiální podporu pro vdovu po Richmannovi. Lomonosov si byl dobře vědom, že podobný osud mohl snadno postihnout i jeho samotného a správně pochopil, že se Richmann nechtěně stal živým uzemněním hromosvodu.

Dalším vědcem, který pozoroval kulový blesk, byl americký radioastronom profesor Roger Clifton Jennison (1922–2006). Pracoval na obřím radioteleskopu o průměru 76 metrů v Jodrell Bank. Pořídil rádiovou mapu zdroje Cas A, který je známým pozůstatkem

7 **Elektroskop** – zařízení k měření náboje, dva kovové lístky, které jsou na jedné straně spojené a na druhé volné. Působením náboje se na volném konci odpuzují a z jejich vzájemné vzdálenosti lze usoudit na velikost přítomného náboje.

Obr. 6. Richmannova smrt zachycená na rytině mistra Novoselova.

po explozi supernovy. Podrobně analyzoval také signál ze zdroje Cyg A, který je pro změnu první detekovanou černou dírou v naší Galaxii. Jennison letěl v březnu 1963 za bouře letadlem z New Yorku do Washingtonu. Z pilotní kabiny se za silného hluku vynořila zářící koule o průměru přibližně 22 centimetrů. Koule se

pohybovala vodorovně uličkou mezi sedadly pasažérů ve výšce 75 centimetrů nad zemí rychlostí 2,5 metru za sekundu. Jennisona minula v půlmetrové vzdálenosti. Blesk měl pravidelný kulový tvar s namodralými okraji, svítil asi jako desetiwattová žárovka a nevydával teplo. Událost Jennisona ovlivnila natolik, že se začal kulovými blesky profesně zajímat a publikoval několik článků, poslední v roce 1990, kdy navrhuje, že by kulový blesk mohl být plazmoidem uzavřeným v mikrovlnné rezonanční dutině.

Poslední vědecké pozorování, o kterém se zmíníme, bylo stejně tak nechtěné, jako předchozí dvě. Jeho aktérem se stal v roce 1965 sovětský chemik z Ústavu obecné a komunální hygieny, dosud neznámý Dr. M. T. Dmitriev, když o prázdninách stanoval na břehu řeky Oněgy. Po úderu blesku 70 metrů od stanu se nad řekou objevila koule, která se pohybovala podél 150 metrů dlouhého voru. Blesk se zastavil metr nad stanem, jeho velikost byla přibližně 15 centimetrů, měl jasné bílé jádro a fialový obal. Pak zamířil k lesu, kde se jakoby dotknul několika větví a poté pohasnul. Při zastavení z blesku sršel proud jisker jako při elektrickém svařování. Za ním se táhla stopa namodralého čpavého dýmu a byl cítit zápach ozónu a oxidu dusičitého. Duchapřítomný chemik odebral vzorky vzduchu ze stopy blesku a později udělal jejich chemický rozbor. Z koncentrace ozónu a oxidu dusičitého odhadnul teplotu blesku na 14 000 stupňů Celsia a celkovou energii na 530 J. Odhad energie je ale značně nejistý, existují jiné odhady energie kulových blesků, které dávají hodnoty zcela odlišné.

Teorie nepravděpodobné až absurdní

Existují stovky, možná tisíce teorií o původu kulového blesku. Některé z nich jsou úsměvné a rozumnému čtenáři je jasné, že patří do říše fantasmagorií a pohádek. Nicméně mohou mít racionální jádro, které se objevuje i v teoriích méně odsouzeníhodných. Uveďme jen s krátkými komentáři některé z teorií, jež prozatím ve vědeckém světě zapadly a z dnešního pohledu jsou víceméně mrtvé.

■ **Kulový blesk neexistuje.** Část vědců pochybuje o existenci kulového blesku. K tomuto názoru jsou většinou vedeni ohromnou variabilitou projevů kulového blesku, kterou nelze objasnit jediným mechanizmem a také tím, že některá doložená pozorování lze vysvětlit jinak než za pomoci kulového blesku. Nicméně tak obrovské množství pozorování, ve kterých se stále opakují tytéž scénáře pohybu kulového blesku, nás opravňují k víře, že jde o skutečný fyzikální jev. Možná existuje více druhů kulových blesků a to, co pozorujeme, není jeden jediný jev.

■ **Jde o optický klam.** Pokud se díváme přímo okem na čárový blesk, může nás jeho prudký svit na chvíli oslepit. Po několik sekund až desítek sekund potom oproti tmavšímu pozadí uvidíme jasnou světlou skvrnu. Jde o obraz tzv. slepé skvrny v lidském oku, která se bude pohybovat podle pohybů naší hlavy. Nepochybně lze některá pozorování vysvětlit tímto optickým klamem, ale rozhodně ne všechna. Obraz slepé skvrny neumožní objasnit explozi kulového blesku, jeho pohyb podél vodičů, sršení, zapálení věci, zabití dobytka, zvukové projevy atd.

■ **Jde o jiné optické jevy.** Pozorovatelé bez základních fyzikálních znalostí mohou skutečně zaměnit kulový blesk s halo kolem Slunce nebo Měsíce, se stopou meteoru, který míří přibližně k nám, s odlesky pouličních lamp a jinými optickými jevy. Jde o malou část případů, většinu pozorování nelze touto teorií vysvětlit.

■ **Sání energie z vakua.** V poslední době se často hovoří o dynamickém vakuu a jeho projevech. Zákony kvantové teorie (jde o relace neurčitosti pro pole) neumožňují, aby vakuum bylo úplnou prázdnotou. Vždy je v něm určité množství fluktuací různých polí (elektromagnetického i dalších) a vznikají zde páry částice-antičástice, které vzápětí zase zanikají. Tyto páry způsobují polarizaci vakua, posuvy spektrálních čar i další měřitelné jevy. Z dnešního pohledu je vakuum stav s nejmenší možnou energií, kterou dovolují zákony kvantové teorie. Tato energie je nenulová. Možná je zodpovědná za v současnosti pozorovanou zrychlenou expanzi vesmíru, která je připisována mysteriózní temné energii, která snad

není ničím jiným než projevy dynamického vakua. Představa kulového blesku, který je napájen energií vakua je zajímavá nicméně asi nereálná. Vakuum je nejmenším možným energetickým stavem a z minima lze těžko brát. Tato teorie ani neřeší jakým způsobem je energie vedena a jak je přeměňována do formy kulového blesku, takže ji lze považovat spíše za zajímavý, ale zcela nezpracovaný nápad.

■ **Miniaturní černá díra.** Těžko říci, proč jsou černé díry[8] v populární literatuře i u široké veřejnosti natolik oblíbené. Snad pro jejich neobvyklé chování. V současnosti jde o reálné astronomické objekty, černými děrami se stávají na konci svého vývoje velmi hmotné hvězdy, černé díry nacházíme i v centrech většiny galaxií včetně té naší. Otázka miniaturních černých děr je zatím otevřená a nikdy nebyly pozorovány. To samozřejmě neznamená, že neexistují. Možná by taková miniaturní černá díra kolem sebe vytvořila malou zářící kuličku, ale je naprosto nejasné, jak by při bouřkové činnosti mohla vzniknout a teorie vůbec nevysvětluje podstatné rysy chování kulových blesků (vodorovný pohyb, sršení, exploze, magnetické projevy některých blesků atd.)

■ **Mikrometeority z antihmoty**. Dříve se předpokládalo, že ve vesmíru existují i rozsáhlé oblasti z antihmoty. Současná pozorovací technika to vyloučila. V kosmickém záření jsou sice detekovány jednotlivé antičástice (vznikají při vysoce energetických procesech), ale nikdy nebyl zachycen antiatom. Ty umíme vytvářet jen uměle na velkých urychlovačích. Z dnešního pohledu je zcela nepravděpodobné, že by k Zemi doputoval celý mikrometeorit (například zrnko prachu) z antihmoty. I kdyby tomu tak bylo, anihilace s látkou atmosféry by sice vytvořila zářící kuličku, ale zcela jiných vlastností než jsou připisovány kulovému blesku.

8 **Černá díra** – objekt, který kolem sebe zakřiví čas a prostor natolik, že z něho nemůže uniknout ani světlo. Část z nich vzniká kolapsem hvězdy v závěrečných fázích vývoje, jiné, obří černé díry, sídlí v centrech galaxií. Rotující černé díry kolem sebe vytvářejí akreční disky látky a v ose rotace výtrysky vysoce urychlených částic. Paradoxně akreční disky i výtrysky vznikající v bezprostředním okolí černé díry velmi intenzivně vyzařují.

■ **Kousek sluneční látky.** Ze Slunce se občas oddělí plazmoid (shluk plazmatu s magnetickým polem), který může putovat směrem k Zemi. Zde interaguje s magnetosférou Země za vzniku magnetických bouří a polárních září. Tyto mechanizmy jsou v současnosti relativně dobře prozkoumané a nevedou ke vzniku kulových útvarů.

■ **Lelek nebo sova.** Tito ptáci žijí často ve ztrouchnivělých pařezech, kde se vyskytují fosforeskující látky. Není tedy kulový blesk letícím ptákem, kterému svítí křídla pokrytá drtí ze ztrouchnivělého pařezu? Soudný čtenář si jistě odpoví sám.

■ **UFO s mimozemšťany.** Létající talíře s bytostmi z vesmíru se objevují s železnou pravidelností na stránkách bulváru a jsou oblíbeným tématem neuvěřitelných historek. Je přirozené, že „lidoví myslitelé“[9] přišli i s touto teorií, která vysvětluje vše a nic v jedné jediné konstrukci.

■ **Zjevující se andělé.** Nechci nikomu vyvracet žádnou teorii, každý má jistě právo na svůj názor. Jen bych podotknul, že tito andílci jsou někdy pořádně vzteklými bytůstkami, jež rozmlátí vše, co se jim pod křídla namane.

■ **Duše hříšníků.** Tuto teorii jsem záměrně zařadil až na samý konec. Je mým favoritem na generála hvězdné pěchoty[10] všech teorií kulového blesku a má mé mimořádné sympatie.

9 **Lidoví myslitelé** – označení desek ve třetím šuplíku shora v pracovním stole autora. V těchto deskách končí (nepochybně neoprávněně) mnoho různých teorií zasílaných klasickou i elektronickou poštou. Polovina textů se snaží popřít relativitu (ať speciální či obecnou) bez znalosti matematiky a druhá polovina jsou nejrůznější pateorie (jistě jen z úhlu pohledu autora tohoto textu) na nejrůznější témata.

10 **Generál hvězdné pěchoty** – nejhorší pěvecký výkon v oblíbené televizní soutěži Československá superstar.

Teorie pravděpodobné až realistické

Teorie, která chce být úspěšným (nebo alespoň částečně úspěšným) kandidátem na vysvětlení jevu kulového blesku se musí vypořádat s několika základními problémy.

Prvním z nich je zdroj energie blesku. V zásadě může být elektrostatický (energie elektrického pole), elektromagnetický (energie elektromagnetických vln), chemický (energie vybuzených chemických vazeb nebo energie exotermických chemických reakcí) nebo jaderný. Jaderný zdroj energie nelze zcela opominout, neboť za bouřky dochází k urychlování nabitých částic (alfa částic, protonů), které mohou při srážkách vytvářet nuklidy s krátkým poločasem rozpadu, jež by mohly být potenciálním zdrojem energie, i když pravděpodobně ne dominantním. Je možné, že jsou různé zdroje energie v kulovém blesku kombinovány, možná existuje i více druhů kulových blesků s různými zdroji energie. Se zdrojem energie samozřejmě souvisí i to, jak kulový blesk mizí – někdy klidně, jindy s prásknutím, jindy explozí nebo rozdělením na více kuliček. Správná teorie musí vysvětlit jak vznik, tak trvání i zánik kulového blesku.

Druhou zásadní otázkou je, zda je kulový blesk samostatnou a od okolí izolovanou energetickou jednotkou nebo zda nějak získává energii z okolí. V tomto případě může být zdroj energie i značně daleko od kulového blesku. Příkladem je tichý nezářící výbojový kanál, kterým proudí energie do místa, kde se malá část kanálu navenek zviditelnila v podobě kulového blesku. Mechanizmus by dobře vysvětlil kulové blesky v přírodě, ale ne v uzavřené místnosti nebo v kabině letadla. Zde by ale mohl být kulový blesk napájen například mikrovlnami.

Třetí otázkou, se kterou se teorie musí vypořádat, je mimořádná stabilita kulového blesku. Víme, že vydrží minimálně několik sekund, jsou ale i případy, kdy předváděl své divadlo desítky sekund a někdy i déle než minutu.

Čtvrtým problémem je teplota blesku. Žádný pozorovatel nepociťoval teplo sálající z kulového blesku. Buď musí tedy jít o relativně chladný útvar, který svítí netepelným mechanizmem, nebo jde o horkou kouli, která je od okolí účinně izolována, například elektrickou dvojvrstvou[11] na jejím povrchu.

Poslední položkou na pomyslném seznamu významných problémů k řešení jsou sluchové a čichové vjemy. Správná teorie musí vysvětlit, proč je kulový blesk někdy tichý a jindy šumí a praská a proč po něm zůstává zápach připomínající síru, ozón nebo oxid dusičitý.

Každá ze stávajících teorií vysvětluje některé jevy spojené s kulovým, bleskem. Některá jich vysvětlí více, jiná méně. Všechny jsou ale pracovními hypotézami. Žádná z nich nebyla experimentálně potvrzena na kulovém blesku vytvořeném přirozenou cestou v přírodě. V laboratořích se občas daří vytvářet relativně stabilní kulovité útvary, není ale jasné, do jaké míry souvisí s pozorovanými kulovými blesky. Uveďme stručný přehled nejvýznamnějších teorií, které nebyly zatím zcela zavrhnuty. Skutečné řešení je bohužel dodnes neznámé a jak jsme se již zmínili, může být kombinací stávajících hypotéz, může jít o řešení zcela nové a není vyloučena ani možnost, že fenomén kulového blesku zahrnuje několik různých fyzikálních jevů.

■ **Elektrostatický výboj.** Čárový blesk je elektrostatickým výbojem, zdálo by se tedy přirozené předpokládat, že kulový blesk je jím také. Francouzský fyzik Raimond Planté (1834–1889) tuto hypotézu podpořil experimentálně, když mezi dvěma nabitými elektrodami, na které přivedl vysoké napětí, vytvořil malé ohnivé kuličky. Největší slabinou hypotézy je, že kuličky okamžitě za-

11 **Elektrická dvojvrstva** – plocha na které se skokem mění elektrický potenciál. V reálném případě má potenciál na různých stranách dvojvrstvy různou hodnotu a uvnitř ní se prudce mění. V dvojvrstvě je silné elektrické pole odpovídající gradientu elektrického potenciálu. Na různých stranách dvojvrstvy se hromadí různý elektrický náboj. Dvojvrstva se tak podobá elektrickému kondenzátoru. Dvojvrstvy se často samovolně v přírodě vytvářejí, známe je ze Slunce, z magnetosféry Země a nalézáme je i v laboratorním plazmatu.

niknou, jakmile poklesne napětí na elektrodách. Skutečný kulový blesk přetrvává ještě dlouho po čárovém výboji a mnohdy vzniká i bez něho. Hypotézu je nutné kombinovat s nějakou další, nejlépe s chemickým hořením, které by mohlo kouli udržovat i delší dobu po jejím vzniku.

■ **Chemický blesk.** Za bouřky vznikají v silném elektrickém poli velmi neobvyklé sloučeniny dusíku, ozón, uhlovodíky a mnoho exotických chemických sloučenin, z nichž některé jsou vysoce hořlavé až výbušné. Další atypické sloučeniny vzniknou při dopadu čárového blesku na zem. Pokud se za bouřky rozštěpí molekuly vody na atomy vodíku, máme k dispozici další zajímavý produkt. Vodík je v určitém podílu s kyslíkem extrémně výbušný. Kulový blesk by mohl být hořící koulí vysoce hořlavých látek vzniklých za bouřky. Předpokládal to již Michail Lomonosov (1711–1765), který po smrti profesora Richmanna hovořil o kulovém blesku jako o kouli hořících mastných par (to by v dnešní mluvě odpovídalo hořícím uhlovodíkům). Michael Faraday (1791–1867), objevitel základních zákonů elektřiny a magnetizmu, také zastával názor, že dlouhodobá stabilita a pomalý pohyb kulového blesku jsou neslučitelné s jeho elektrickou povahou a že jeho energie je spíše původu chemického. Ve prospěch chemického blesku hovoří jednak typický zápach ozónu O_3 a oxidu dusičitého NO_2, který popisuje řada svědků, a jednak přímá detekce obou těchto látek ve vzorcích nabraných ze stopy kulového blesku v roce 1965 sovětským chemikem Dmitrijevem při stanování u řeky Oněgy. Proti takto jednoduché hypotéze hovoří několik faktů. Hořící koule by ve vzduchu stoupala vzhůru (ledaže by obsahovala ještě prach nebo jiné těžké příměsi). Dále by z ní sálalo teplo, což se u kulových blesků nepozoruje. Koule by musela být nějak tepelně izolovaná od okolí (což znamená opět kombinaci této hypotézy s některou jinou). Hořící koule chemické povahy by minimálně reagovala na elektrická pole a neměla by magnetické projevy, které byly u kulových blesků pozorovány (praskot v rádiu, zazvonění elektrického zvonku). Je zřejmé, že jde o hypotézu, která v této jednoduché podobě k vysvětlení některých projevů kulového blesku nepostačuje.

■ **Malý bouřkový mráček.** Jde o velmi oblíbenou teorii, jejímž základem je, že kulový blesk je vlastně miniaturní bouřkový mrak, v němž je separován náboj do prostorově odlehlých oblastí. Namísto blesků se v minimraku oblasti různého náboje vybíjejí velkým množstvím jisker, které způsobují svit kulového blesku i jeho často popisované jiskření. V minimraku musí být výrazné turbulence, které separují náboj a velké množství prachu, jenž znemožní rekombinaci opačných nábojů. Stejně jako ostatní, odpovídá tato teorie na některé otázky a jiné zcela neřeší.

■ **Přírodní jaderný reaktor.** Tato hypotéza patří k těm méně pravděpodobným, ale zcela ji zavrhnout nelze. Za bouřky jsou v elektrickém poli urychlovány protony a alfa částice, které po nárazu do jader jiných atomů mohou dát vzniknout radioaktivním látkám s krátkým poločasem rozpadu. Určitou roli by mohl hrát i atmosférický xenon. Tyto rychle se rozpadající nuklidy by mohly být dočasným zdrojem energie. Pravděpodobně by ale opět muselo jít o kombinaci s jiným zdrojem a tedy jinou hypotézou.

■ **Plazmová koule.** Snad nejvžitější je představa kulového blesku jakožto horké plazmové koule. Aby byla hypotéza jen trochu udržitelná, je třeba vyřešit několik zásadních problémů. Proč se koule nerozprskne? Vždyť udržení plazmatu je obrovským problémem i při současných experimentech s termojadernou fúzí. Okamžité rekombinaci by mohla zabránit přítomnost prachu nebo separace náboje do kulových vrstev (jakýsi kulový kondenzátor). Pak již by ale nešlo o plazma, to musí být kvazineutrální. Pokud by byl povrch koule tvořen elektrickou dvojvrstvou, vznikla by zde analogie povrchového napětí, které známe u vodní kapky, a navíc by dvojvrstva vnitřek koule tepelně izolovala od okolí. Takový kulový blesk by nereagoval magneticky. Hypotézu plazmové koule můžeme tvořivě změnit v hypotézu rotujícího plazmového víru. Ten by byl částečně stabilizován rotací, kolem by vzniklo magnetické pole s dalším stabilizujícím účinkem, ale vír by zase bohužel nešlo tepelně izolovat od okolí elektrickou dvojvrstvou. Vidíme, že každá modifikace hypotézy plazmové koule má své klady i zápory.

■ **Vysokofrekvenční elektromagnetický výboj.** Tato teorie se objevila na několika místech, asi nejvíce ji rozpracoval vynikající sovětský fyzik Pjotr Kapica (1894–1984)[12]. Předpokládal, že kulový blesk je mikrovlnným výbojem, kterému je dodávána energie zvenku prostřednictvím mikrovln. Mikrovlny z bouřkové oblasti se odrazí od země a vytvoří stojaté vlnění (to může pronikat i do budov nebo do pilotní kabiny letadla). Blesk se pohybuje zejména vodorovně v místě kmitny mikrovln, kde je mu dodávána energie. V rovině kmitny má relativně volný pohyb, může se kutálet, zastavovat atd. Teorie dobře popisuje průchod blesku komínem (vlnovod) i různé způsoby zanikání blesku. Buď potichu, když pomalu dojde přísun energie, nebo s prsknutím, je-li přísun energie rychle zastaven, či explozí, končí-li přísun závěrečným energetickým impulzem. Není ale známo, zda při bouřce vzniká dostatečné množství mikrovln, aby byl Kapicou navržený mechanizmus realizovatelný.

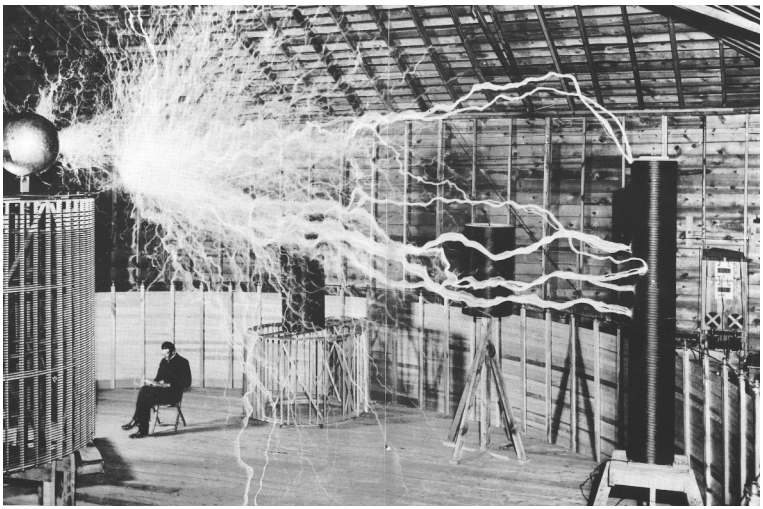
■ **Křemíkový blesk.** V současnosti jde o velmi populární variantu chemického kulového blesku, kterou rozpracovali v roce 2000 novozélandští fyzikální chemici John Abrahamson a James Dinniss z Cantenburské univerzity. Při úderu normálního blesku do půdy se místo dopadu prudce zahřeje a z křemičitanů a oxidu křemičitého vzniknou nanočástice čistého křemíku Si, monooxidu křemíku SiO a karbidu křemíku SiC. Nanočástice mají elektrický náboj a ten způsobí jejich řetězení do vláknité sítě. Vznikne útvar podobný chomáči vaty, jehož část je z půdy vytlačena nad povrch, kde

12 **Pjotr Leonidovič Kapica (1894–1984)** – sovětský fyzik, který je spoludržitelem Nobelovy ceny za fyziku pro rok 1978 za objev supratekutosti helia. Studoval v Petrohradě a v Cambridgi. Pracoval spolu s Ernestem Rutherfordem a v roce 1924 se stal ředitelem výzkumu magnetismu v Cavendishově laboratoři. V roce 1934 byl zadržen při návštěvě Sovětského Svazu a v roce 1935 se stal ředitelem Institutu fyzikálních problémů sovětské Akademie věd v Moskvě. Pokračoval ve výzkumech v oblasti fyziky ultranízkých teplot, zejména helia. V roce 1939 sestrojil zařízení, které bylo schopno produkovat kapalný kyslík ve velkém. Toho bylo využito v Sovětských ocelárnách během druhé světové války. Za přínos vědě byl Kapica oceněn mnoha řády a medailemi. V roce 1934 odmítl Stalinovu žádost, aby pracoval na jaderných zbraních a ve zlém se s ním rozešel. Byl sesazen ze všech vedoucích funkcí a dokonce se musel vystěhovat ze své chaty a domu. Teprve po Stalinově smrti byl v roce 1955 znovu postaven do funkce vedoucího Institutu a tam také setrval až do své smrti.

dochází k postupné oxidaci, při níž se uvolňuje značné množství energie v podobě světla a tepla. Oxidace jak Si tak SiO je bouřlivou reakcí, při které vznikají stabilní molekuly oxidu křemičitého SiO_2. Ten vytvoří na povrchu vatovité struktury jakousi slupku, jež brání další prudké oxidaci. Útvar tak pomalu doutná uvnitř a na povrchu je relativně chladný. Většinou zaujme kulový tvar, který má nejmenší možnou energii. Je ale snadno formovatelný i do jiných tvarů. Může se pohybovat vodorovně, neboť je jeho hustota srovnatelná s hustotou vzduchu. Chomáč si v nitru udržuje vysokou teplotu a může postupně vyhasnout. Pokud vnitřní teplota stoupne nad určitou mez, kulovitá struktura zakončí svůj život explozivně. Autoři teorie detailně vysvětlují většinu z pozorovaných vlastností kulového blesku (ale opět ne všechny). Svou teorii podpořili i experimenty – podobné struktury se jim podařilo vytvořit za pomocí výbojů směřujících do půdy. Abrahamsonova-Dinnisova teorie je velmi nadějná a mohla by popisovat kulový blesk vzniklý v přímé souvislosti s dopadem čárového blesku. Musíme být ale obezřetní. Již mnohokrát se zdálo, že problém kulového blesku je téměř vyřešen a zatím se vždy objevila další, naprosto odlišná a výrazně lepší teorie. V každém případě křemíkový blesk nevysvětluje například kulové blesky v kabinách letadel. Pokud by teorie byla správná, musí existovat i jiný druh kulového blesku ovládaný jinými mechanizmy.

Napodobeniny kulového blesku v laboratořích

V mnoha laboratořích se daří vytvářet různé kulové struktury. Jejich vztah ke skutečnému kulovému blesku ale nebyl ani v jednom případě prokázán. Nikola Tesla (1856–1943) v laboratoři v Colorado Springs při svých experimentech s vysokým napětím dokázal opakovaně vytvářet kulovité struktury o průměru přibližně 4 cm, které přetrvávaly i značnou dobu. Údaje o těchto experimentech se našly v jeho poznámkách a ve výpovědích současníků.



Obr. 7. Nicola Tesla ve své „ďábelské laboratoři“ v Colorado Springs v roce 1900.

Francouzský fyzik Raimond Louis Gaston Planté (1834–1889) vybíjel dva tisíce galvanických článků přes rovinné elektrody, mezi kterými se vytvořily malé poletující ohnivé kuličky. Jejich životnost byla přibližně dvě minuty – existovaly, dokud nedošlo k úplnému vybití baterií. Barvu kuliček ovlivňoval Planté přidáním různých solí. Následovníci prováděli modifikace experimentu s jinými tvary elektrod a různým plynem mezi nimi. V atmosféře obsahující uhlovodíky se H. Nauerovi podařilo vytvořit svítící obláčky o velikosti 2 až 3 centimetry.

Časté jsou experimenty s mikrovlnnými výboji. Kapicova hypotéza se v různých modifikacích objevuje i v posledních letech. V roce 2006 byla publikována práce Vladimira Dikthyara a Eli Jerbyho z Tel Avivské univerzity, kterým se podařilo vytvořit poskakující kouli za pomoci obyčejné mikrovlnné trouby. Energii mikrovln soustředili do špičatého tyčového vlnovodu (mikrovlnného vrtáku), který namířili na různé podklady ze skla, křemíku, germania, hliníku a některých keramických látek. Energie z mikrovlnné trouby v materiálu vytvořila žhavý, tekutý bod. Po odejmutí hrotu se

vytvořila horká kapička, která se přeměnila na volně se vznášející ohnivou kouli měřící okolo 3 cm v průměru. Celý jev trval řádově sekundy. Obdobné experimenty se od téhož roku (2006) začaly provádět i v Max Planck Institutu v Německu pod vedením Kirila Chukanova. Látka uvnitř vytvořené koule údajně vykazuje kvantové vlastnosti a nitro koule se prý chová jako jeden obří atom. Tak jako ve většině těchto experimentů je vztah ke skutečnému kulovému blesku nejasný.

Dalším typem experimentů jsou tzv. pinče. Jde o proudová vlákna stlačovaná vlastním magnetickým polem. Pinč se zpravidla vytvoří explozí drátku připevněného k elektrodám s vysokým napětím. Takové experimenty koná na fakultě elektrotechnické ČVUT v Praze skupina prof. Pavla Kubeše. Ve výboji dochází k turbulencím, k přepojování magnetických silokřivek a nezřídka k vytvoření kulovitých struktur, které jsou pravděpodobně klubkem proudových vláken. Skupina prováděla podobné experimenty i na velkém zařízení ve Varšavě v Institutu IPPLM, kde vznikaly až stovky koulí přežívajících milisekundy. Pro pinč jde o dlouhou dobu, ale pro skutečný kulový blesk je tato doba života příliš krátká, a tak je vztah k přírodnímu kulovému blesku opět nejasný.

Kulový blesk je fenomén, který poutá pozornost lidí odedávna. Viděli jsme, že jde o skutečně reálný jev, jehož existence je potvrzena velkým množstvím pozorování. Obrovská variabilita projevů kulového blesku ale naznačuje, že může jít o několik mechanizmů. Některé kulové blesky jsou zjevně spojeny s úderem čárového blesku, jiné se objevují bez souvislosti s ním. Minimálně v těchto případech může souviset vznik blesku s jinou fyzikální podstatou. Prováděné laboratorní experimenty prozatím také nedokáží dát jednotnou odpověď. Občas se daří vytvářet za různých podmínek kulové struktury, ale jejich souvislost s přírodním kulovým bleskem je velmi nejasná.

Záhada kulového blesku tedy trvá a stejně jako před padesáti lety mají odborníci pocit, že řešení je nadosah a je otázkou několika let.

Víte, že

■ Víte, že útvar podobný kulovému blesku je zachycen na obrazu Eustacha Le Sueura (1616–1655) z roku 1654 s názvem *Mše svatého Martina*, který je umístěn v pařížském Louvru? Nad hlavou kněze se vznáší oranžová svítící koule nepatrně menší než jeho hlava, viz obrázek 5 v barevné příloze.

■ Víte, že u nás jedinou rozsáhlejší anketu k tématu kulových blesků uspořádal časopis *Věda a technika mládeži*? Bylo tomu v roce 1977 a sešlo se přibližně 60 pozorování.

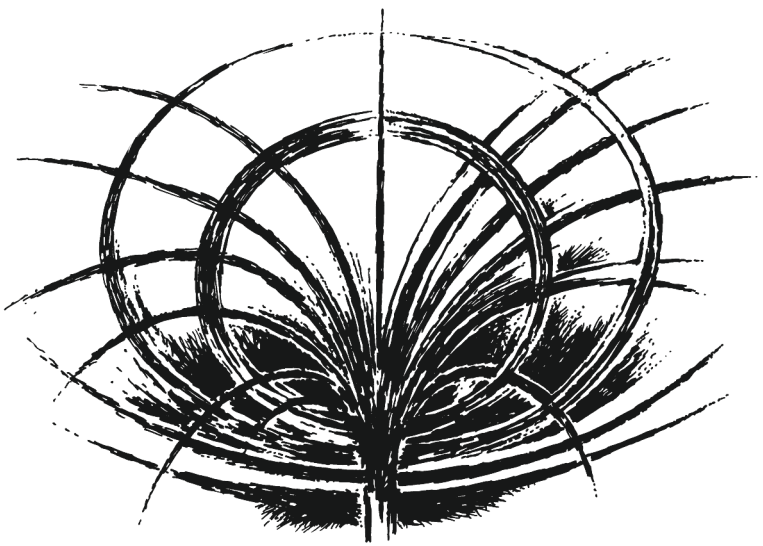
■ Víte, že existuje také velmi vzácný perlový blesk? Vypadá jako velké množství korálků navlečených na šňůrce. Pravděpodobně vzniká rozpadem kanálu čárového blesku tzv. korálkovou nestabilitou známou z teorie plazmových vláken. Není jasné, zda lze jednotlivé svítící oblasti považovat za kulové blesky.

■ Víte, že historky tradované o čertech, kteří přilétají či odlétají komínem mohou mít racionální jádro? Mohlo jít právě o kulové blesky, které často komíny vyhledávají, snad proto, že jde o přirozený vlnovod pokrytý vodivými sazemi, jenž umožňuje blesku snadný průchod.

■ Víte, že jeden kulový blesk by se měl v průměru vyskytnout na 200 čárových blesků?

Rada na závěr: *Pokud potkáte kulový blesk, okamžitě proveďte jeho chemický rozbor, spektrální analýzu, změřte teplotu, elektrické a magnetické pole v jeho okolí a poté ponořte kulový blesk do kalorimetru, abyste zjistili obsah jeho energie. Zajistíte si tím nehynoucí slávu na poli vědy, neboť takové měření i přes mnoho tisíc setkání s kulovým bleskem zatím kupodivu nikdo neudělal!*

3. Hvizdy, nebeské chóry a lví řevy



Strčíte-li si prsty do obou uší,
nemůžete na ně hvízdat!
Neznámý autor

Není to tak dávno, co naše první dáma vyjádřila v parlamentu nespokojenost s průběhem volby prezidenta republiky hvízdáním na prsty. Já sám jsem se tuto techniku nikdy nenaučil, a tak jsem jí mohl jen tiše závidět. Bylo to svérázné vyjádření nespokojenosti, ale v politice nijak neobvyklé. Kdyby politici jen hvízdali a jinak vykonávali svou práci, jistě bychom jim dokázali hvízdání odpustit. Nepochybně bylo mnohem pikantnější, když někdejší představitel Sovětského svazu Nikita Chruščov na půdě OSN sundal dřevák a svým myšlenkám dodal na pádnosti tak, že jím začal mlátit do řečnického pultíku. Inu jiný kraj, jiný mrav. Vraťme se ale k hvízdání. Hvízdá vítr v korunách stromů, hvízdají kulky zbloudilých střel, pneumatiky závodních automobilů, hvízdá meluzína v komíně a hvízdá v našich plicích, když jsme pořádně nastydlí. Hvízdání je běžnou součástí našich životů. V této kapitole nebude ale řeč o ledajakém hvízdání. Hvízdá to totiž i v naší magnetosféře – magnetickém obalu Země, který nás chrání před nabitými částicemi z vesmíru. Nejde sice o hvizdy akustické, ale o zvláštní elektromagnetické vlny, jejichž velmi nízká frekvence umožní člověku sluchový vjem, pokud signál přivedeme na svorky reproduktoru. V tu chvíli se nám odkryje celý nový svět prapodivných zvuků přicházejících z našeho nejbližšího vesmírného okolí.

Magnetosféra Země

V blízkosti povrchu Země vypadá magnetické pole naší planety jako obyčejný dipól. Pokud si ale myslíte, že jeho severní pól je na severu, jste na omylu. Na severu je jižní pól magnetického pole a na jihu severní. Střelka kompasu totiž míří svým severním koncem k jižnímu magnetickému pólu – tedy na sever. Dalším častým

omylem je představa, že magnetický pól je totožný se skutečným zemským pólem (tam, kde prochází povrchem zemská rotační osa). Ani to není pravda. Magnetická osa je skloněna vůči rotační ose o 11,4° a střed dipólu je vůči zemskému středu posunut o více než 500 km. Navíc se magnetický dipól v průběhu dne pohupuje (je to způsobeno interakcí s meziplanetárním magnetickým polem) a jeho poloha na povrchu Země se za jediný den mění v rozsahu mnoha desítek kilometrů. A ani to není vše. Průměrná poloha magnetického pólu se v průběhu let posouvá, v současnosti o 15 kilometrů za rok (1 500 kilometrů za století) ve směru od Aljašky na Sibiř. To znamená, že v budoucnu Aljaška přijde o časté polární záře a tento jev potěší obyvatele Sibiře.

A jak je náš magnetický dipól silný ve srovnání s jinými planetami? Zde je možné porovnávat dvě veličiny. První z nich je *velikost magnetického pole na rovníku* (jednotkou je mikrotesla, zkratka μT). Tato hodnota vypovídá o vlivu magnetického pole na povrchu planety. Magnetické pole klesá se třetí mocninou vzdálenosti od středu dipólu. Chceme-li porovnávat skutečnou velikost dipólu, musíme pole na rovníku vynásobit třetí mocninou poloměru planety (jednotkou je $T \cdot m^3$). Tuto veličinu nazýváme v astronomii *magnetický dipólový moment*. Porovnání obou veličin pro jednotlivé planety je v následující tabulce:

planeta	pole na rovníku (μT)	mg. dip. moment ($T \cdot m^3$)	hmotnost (kg)
Merkur	0,33	6×10^{12}	$3{,}3 \times 10^{23}$
Země	31	8×10^{15}	$5{,}9 \times 10^{24}$
Jupiter	430	160×10^{18}	$1{,}9 \times 10^{27}$
Saturn	21	5×1018	$5{,}68 \times 10^{26}$
Uran	23	$0{,}42 \times 10^{18}$	$8{,}7 \times 10^{25}$
Neptun	14	$0{,}2 \times 10^{18}$	$1{,}0 \times 10^{26}$

Vidíme, že bezkonkurenčně vede Jupiter. Jeho dipólový moment je 20 000krát silnější než zemský a pole na rovníku 14krát vyšší i přes

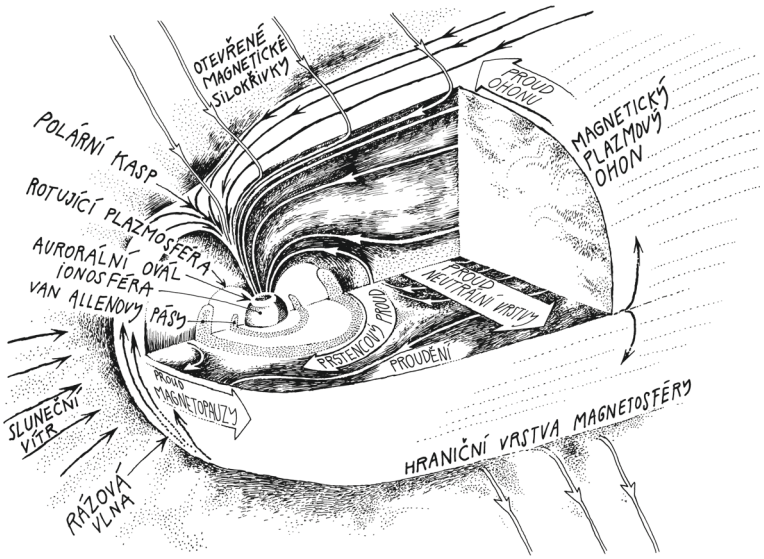
obří rozměry planety (se vzdáleností od středu pole samozřejmě slábne). V tabulce nejsou uvedeny planety Venuše a Mars. Je to proto, že v současnosti žádné vlastní pole nemají. Mars ho kdysi měl a v průběhu času o něj přišel (víme to ze zbytkového magnetizmu v povrchových horninách). Zda měla v minulosti magnetické pole i Venuše, se již nedozvíme. Její povrchová teplota činí 460 °C, což je nad tzv. Curieovou teplotou[13] povrchových hornin, při které zmizí veškeré záznamy o magnetizmu.

Zemský dipól čas od času změní svou orientaci (vymění se severní pól za jižní). Naposledy se tak stalo před 700 000 lety a v současnosti dipólový moment slábne, blížíme se tedy dalšímu přepólování. Bohužel nedokážeme přesně odhadnout, za kolik tisíc roků k němu dojde. V každém případě v průběhu přepólování o svůj ochranný magnetický štít nepřijdeme. Pole nezmizí, jen nebude mít dipólový charakter, ale v průběhu přepólovávání bude složitější. Magnetické silokřivky (správně se má říkat magnetické indukční čáry) budou vypadat nepravidelně jako vlasy na rozcuchaných hlavách uličníků ze známého románu Marka Twaina *Dobrodružství Toma Sawyera*.

Ve větší vzdálenosti od povrchu Země je naše pole deformováno interakcí se slunečním větrem[14] a s meziplanetárním magnetickým polem Slunce. Na denní (směrem ke Slunci) straně se vytvoří čelní rázová vlna, na noční vznikne dlouhý protáhlý magnetický ohon. Čelní rázovou vlnu většina částic slunečního větru obtéká. V prostoru rázové vlny se prudce mění hodnota magnetického pole,

13 **Curieova teplota** – teplota fázového přechodu u magneticky aktivních materiálů. Nad touto teplotou jsou elementární magnety uspořádány chaoticky, pod touto teplotou se vytvářejí magnetické domény jednotně uspořádaných elementárních magnetů a materiál má magnetické vlastnosti.

14 **Sluneční vítr** – proud nabitých částic ze Slunce, které zaplavují celou sluneční soustavu. Zejména jde o protony, elektrony a alfa částice (jádra hélia). Typická rychlost částic u Země je kolem 500 km/s (rychlost zvuku v tomto prostředí je 50 km/s), teplota 3 eV (30 000 K) a koncentrace několik protonů v m^3. Částice vylétávající v polárním směru mají vyšší rychlost (přibližně 750 km/s) a nazýváme je rychlý sluneční vítr. Sluneční vítr objevil anglický astronom Richard Carrington v roce 1859, kdy bylo za půl dne po slunečním vzplanutí narušeno magnetické pole Země.



Obr. 8. Magnetosféra Země.

koncentrace částic i rychlost plazmatu. Rázová vlna je lokalizována 12 až 20 poloměrů Země od naší planety, přesná hodnota závisí na intenzitě slunečního větru a velikosti meziplanetárního magnetického pole. Tloušťka rázové vlny se mění od 100 do 1 000 kilometrů. V oblasti Země je šíře magnetosféry 20 až 30 zemských poloměrů a magnetický ohon se táhne do vzdálenosti 100 zemských poloměrů. V různých oblastech magnetosféry se pohybují nabité částice a tečou elektrické proudy. Nejjednodušším pohybem částic je pohyb po šroubovici podél magnetických silokřivek. Existují ale i další pohyby. Částice se odrážejí v blízkosti pólů (jev magnetického zrcadla), pomalu driftují napříč silokřivek nebo jsou zachytávány v oblasti tzv. van Allenových pásů.

Magnetosférické sondy

Procesy v magnetosféře výrazně ovlivňují lidskou činnost. Magnetosféra je primárním ochranným štítem před částicemi přicházejí-

cími z vesmíru, přesto ji lze v některých situacích výrazně narušit. Pokud se dostane plazmoid[15] ze Slunce do blízkosti Země, ovlivní magnetické pole Země a může dojít k tzv. magnetické bouři, při které magnetické pole silně kolísá. V dlouhých vodičích se indukují nežádoucí elektrické proudy, které mohou poškodit transformátory a ostatní zařízení. Plazmoidy s sebou přinášejí velké množství nabitých částic, které ovlivňují činnost sond a samozřejmě celkový stav magnetosféry. Sledování stavu magnetosféry je důležitým úkolem, někdy hovoříme o *kosmickém počasí*. Parametry magnetosféry měří celá řada družic. Je to užitečné pro pochopení dějů v magnetosféře a ionosféře i pro předpovědi nestandardních situací. V následujícím krátkém přehledu naleznete významné družice z minulosti i současnosti, jež jsou nebo byly určené pro monitorování stavu magnetosféry Země.

■ **IMP-8 (1973–2006)**. Šlo o poslední ze série deseti družic NASA označených IMP (zkratka z *Interplanetary Monitoring Platform*) nebo AIMP (*Anchored IMP*). Družice byla na oběžné dráze ve vzdálenosti 35 zemských poloměrů (Zemi oběhla jednou za 12 dní) a vydržela dlouhých 33 let (je to taková družice vytrvalec) sledovat magnetické pole, plazma a sluneční vítr v blízkosti Země. Poskytovala data jak z magnetického ohonu Země, tak z oblasti před čelní rázovou vlnou.

■ **MAGION (1978–2002).** Družice Magion (*MAGnetosphere and IONosphere*) byly malé československé a později české družice určené pro výzkum magnetosféry a ionosféry, které se konstruovaly v Ústavu fyziky atmosféry AV ČR. Bylo jich vypuštěno pět za pomoci ruských nosných raket. Na přístrojovém vybavení se podílela řada zemí bývalého východního bloku. Poslední družice MAGION 5 měla celkovou hmotnost 68,5 kg a její vnější rozměry za letu byly 1,7 m a 1,08 m. Poslední vědecká data z družice MAGION 5 byla přijata v lednu 2002 a poslední technologická data v prosinci 2002.

15 **Plazmoid** – kompaktní plazmový útvar, někdy nazývaný plazmový oblak, zhustek, shluk, chomáč, klastr. Plazmoid s sebou může unášet tzv. vmrznuté magnetické pole.

■ **Dynamics Explorer (1981–1991).** Tuto americkou misi tvořila dvojice družic DE-1 a DE-2, které obíhaly Zemi na polární dráze ve stejné rovině. Jedna z nich (DE-1) monitorovala horní atmosféru z eliptické dráhy zasahující až do několika zemských poloměrů, druhá (DE-2) byla na nízké dráze. Proto bylo současně možné měřit parametry magnetosféry a atmosféry ve dvou různých výškách. Družice DE-2 ukončila činnost po třech letech, její partnerka na vyšší dráze vydržela pracovat celých deset let. Hned v prvním roce provozu pořídila družice DE-1 historicky první fotografii aurorálního oválu[16] jako celku (v ultrafialovém oboru spektra).

■ **Geotail (1992).** Jde o japonsko-americkou družici obíhající Zemi na protáhlé dráze v rovníkové rovině (sklon –7°). V prvních letech zasahovala dráha až do 200 poloměrů Země a družice Geotail zkoumala nejvzdálenější část zemského magnetického ohonu. V roce 1995 byla dráha upravena tak, aby nejvzdálenější bod dráhy byl ve vzdálenosti 30 poloměrů Země a družice začala sbírat data z blízké části magnetického ohonu Země.

■ **WIND (1994).** Stále fungující sonda NASA, která byla umístěna do Lagrangeova bodu[17] L1 soustavy Země-Slunce (je umístěna 1,5 milionů kilometrů od Země směrem ke Slunci). Může tak studovat vlastnosti slunečního větru, který teprve doletí k Zemi. Sonda tvoří jakousi předsunutou hlídku a poskytuje data o magnetickém poli a částicích (koncentraci, energii) z oblasti, ve které ještě sluneční vítr není ovlivněn naší magnetosférou.

■ **Polar (1996–2008).** Jde o družici NASA z roku 1996, jejíž data se doplňovala s daty ze sondy WIND (důsledně používáme slovo družice pro oběžnici Země a slovo sonda pro ostatní umělá tělesa). Polar je známa skvělými vizuálními a ultrafialovými sním-

16 **Aurorální ovál** – plošný výboj zářící podél 70. geomagnetické rovnoběžky. Je způsoben excitacemi atomů atmosféry pronikané nabitými částicemi slunečního větru. Při zvýšeném přísunu částic se aurorální ovál rozvine do polárních září.

17 **Lagrangeovy body** – pětice bodů v okolí dvojice těles, ve kterých je celková síla (gravitační a odstředivá) působící na satelit nulová. Polohu těchto bodů poprvé vypočítal italsko-francouzský matematik Joseph-Louse Lagrange. Body L1 a L2 leží na spojnici obou těles, L1 mezi nimi a L2 vně, za menším z obou těles.

ky aurorálního oválu a polárních září. Jedinečné jsou nahrávky hvizdů – krátkých nízkofrekvenčních elektromagnetických pulzů šířících se podél zemských magnetických silokřivek, o kterých si povíme podrobněji později v této kapitole. Polar se pohybovala na protáhlé polární dráze s oběžnou dobou 18 hodin a apogeem[18] ve vzdálenosti dvou poloměrů Země.

■ **Cluster (2000).** Tato čtveřice stejných družic pojmenovaných podle latinsko-amerických tanců (Rumba, Salsa, Samba a Tango) byla vypuštěna v roce 2000 Evropskou kosmickou agenturou. Start se povedl až na druhý pokus, v roce 1998 dvě z družic při nevydařeném startu rakety Ariane shořely. Družice letí kolem Země na polární dráze ve vrcholech čtyřstěnu (můžeme říci, že tvoří leteckou formaci), jehož vrcholy jsou vzdáleny 5 000 až 20 000 km. Dráha je volena tak, aby procházela jak čelní rázovou vlnou, tak polárními kaspy[19]. Družice provádějí dosud nejdetailnější prostorová měření parametrů slunečního větru a jeho interakce s magnetosférou Země a vytvořily první třírozměrný obraz zemského magnetického pole. Uskupení Cluster poprvé detekovalo plazmové vlny v magnetopauze, přepojení magnetických silokřivek, obří víry na bocích magnetosféry, pohyby rázové vlny pod nápory slunečního větru a má za sebou i další významné objevy. V letech 2003 až 2007 byla data kombinována s měřeními čínsko-evropské dvojice družic Double Star, z nichž jedna se pohybovala v rovníkové rovině a druhá na polární dráze. Američané připravují projekt MMS (*Magnetospheric Multiscale Mission*) se startem v roce 2014, opět půjde o čtveřici družic letící ve formaci čtyřstěnu. Mise byla inspirována obrovským úspěchem evropského projektu Cluster a stane se jeho přirozeným následovníkem.

■ **THEMIS (2007–2010)**. Název této americké soustavy pěti družic připomíná bohyni pořádku Themis, jež byla dcerou boha nebe Urana a bohyně země Gaie. Samozřejmě, že jde také o zkratku, tentokrát z anglického *Time History of Events and Macroscale*

18 **Apogeum** – nejvzdálenější bod oběžné dráhy tělesa kolem Země.

19 **Kasp** – struktura v magnetosféře, kterou se nabité částice slunečního větru dostávají do polárních oblastí. Slovo vzniklo počeštěním z anglického cusp (roh, cíp).

Interactions during Substorms, což volně přeloženo znamená *Sledování časového vývoje událostí v průběhu magnetických subbouří.* Subbouře je termín používaný pro magnetické události, které způsobují náhlé eruptivní zjasnění polárních září. Šlo o vůbec první americkou misi, při které bylo vyneseno pět družic naráz na palubě jediné nosné rakety. Všechny družice měly stejné přístroje – dva magnetometry, elektrostatický analyzátor (detekuje tepelné elektrony a ionty[20]), anténu pro měření elektrického pole a polovodičový detektor (pro detekci energetických částic). Družice obíhaly Zemi na protáhlých eliptických drahách (s apogeem od 67 000 km do 350 000 km). Hlavním cílem bylo sledovat změny polárních září, jejich náhlá zjasnění nebo rozvlnění a zjistit původ vysoce energetických částic, které při subbouřích vznikají. Dráhy byly voleny tak, aby se vždy po několika dnech celá pětice sešla v magnetickém ohonu Země a provedla současná měření v různých místech ohonu. V roce 2010 byly dvě z těchto pěti družic rekonfigurovány a započaly výzkum slunečního větru v okolí Měsíce pod novým názvem ARTEMIS, což je zkratka z anglického *Acceleration, Reconnection, Turbulence and Electrodynamics of the Moon's Interaction with the Sun*, v českém překladu *Zrychlení, přepojení silokřivek, turbulence a elektrodynamika interakce Měsíce se Sluncem*. Fakticky to znamenalo, že jedna z družic se přestěhovala do Lagrangeova bodu L1 soustavy Země-Měsíc a druhá do bodu L2 za odvrácenou stranou Měsíce. Cílem nové mise je unikátní dvoubodové měření fluktuací ve slunečním větru. Americká NASA tento krok velmi medializovala, zjevně s cílem ukázat, jak umí šetřit peníze tím, že družice z jedné mise využije pro misi jinou.

■ **TWINS (2008)**. Tato dvojice (TWINS-A, TWINS-B) amerických družic sleduje magnetosféru z vysoké výšky na polární dráze. Poskytuje tak stereoskopický obraz vnitřní magnetosféry ze dvou různých míst. Cílem je sledovat velkorozměrovou strukturu magnetosféry a její celkovou dynamiku. Název mise je zkratkou

20 **Tepelné elektrony a ionty** – částice, jejichž celková energie odpovídá teplotě plazmatu. Nejde tedy například o urychlený svazek částic, v němž je celková energie vyšší než energie tepelného pohybu.

z anglického *Two Wide-angle Imaging Neutral-atom Spectrometers*. Současně zkratka *twins* znamená dvojčata.

Náš výčet není samozřejmě úplný, nezmínili jsme se například o činné dánské minidružici Ørsted (1999), o americkém projektu IMAGE (2000–2005) ani o monitorech slunečního větru umístěných v Lagrangeově bodě L1 mezi Zemí a Sluncem (například ACE). Ale i z tohoto krátkého přehledu je snad patrné, že naše magnetosféra a ionosféra je pečlivě monitorována celou flotilou specializovaných družic.

Jak se šíří elektromagnetické vlny v plazmatu?

Když rozsvítíte žárovičku ve vzduchu, bude se světlo od ní šířit v kulových vlnoplochách. V plazmatu je tomu ale úplně jinak. Uvažujme nejprve jednodušší situaci – plazma bez magnetického pole. Zde procházejí jen elektromagnetické vlny vysokých frekvencí, vlny nízkých frekvencí jsou pohlcovány (rozkmitanými elektrony) nebo odráženy. Frekvence, která je akorát na hranici, se nazývá *plazmová frekvence*. Jde o veličinu charakterizující daný druh plazmatu. Plazmová frekvence je přirozená frekvence kmitů elektronů v elektrickém poli iontů a její hodnota je přímo úměrná odmocnině z koncentrace plazmatu:

$$f \approx 9\sqrt{n}.$$

Za koncentraci dosadíme počet elektronů v jednom metru krychlovém a výsledná frekvence vyjde v hertzích. Čím více elektronů (a tím samozřejmě i iontů) je v plazmatu na jednotku objemu, tím vyšší je jeho plazmová frekvence: ve slunečním větru vychází plazmová frekvence v kilohertzích, v naší ionosféře v megahertzích, ve výbojích v plynech v gigahertzích a ve fúzních experimentech až v terahertzích. Vlny vyšší frekvence, než je plazmová, plazmatem procházejí, vlny nižší frekvence nikoli. Pokud pro daný typ plazmatu z experimentu známe tuto hraniční frekvenci pro prů-

chodnost elektromagnetického signálu, můžeme z ní snadno určit koncentraci plazmatu.

Neprůchodnost vln nižších frekvencí než plazmová se využívá při rádiovém spojení na krátkých vlnách (1 MHz až 15 MHz). Tyto vlny ionosférou neprojdou a odrážejí se. Tím umožní i spojení na velké vzdálenosti, ionosféra funguje pro tyto vlny jako zrcadlo.

Je-li v plazmatu magnetické pole, situace se značně komplikuje. Elektromagnetické vlny se šíří v různých směrech různou rychlostí a vlnoplocha již není kulová. Dokonce vznikne více vlnoploch, v nejjednodušším případě plazmatu složeného z elektronů a jednoduchých iontů vzniknou dvě vlnoplochy, takže můžeme detekovat dvě vlny. Je to podobné jako v některých anizotropních krystalech, třeba v křemenu nebo v islandském vápenci, kde se světlo šíří ve dvou vlnoplochách a když takový krystal položíme na noviny, uvidíme písmenka dvojitě (krystal musí být vhodně natočen).

V přítomnosti magnetického pole je pro plazma důležitá nejenom plazmová frekvence, ale i tzv. *cyklotronní frekvence*. Jde o frekvenci oběhu elektronů kolem magnetických silokřivek. Pojmenována je podle cyklotronu – zařízení pomocí kterého se urychlují elektrony kroužící kolem magnetických silokřivek.

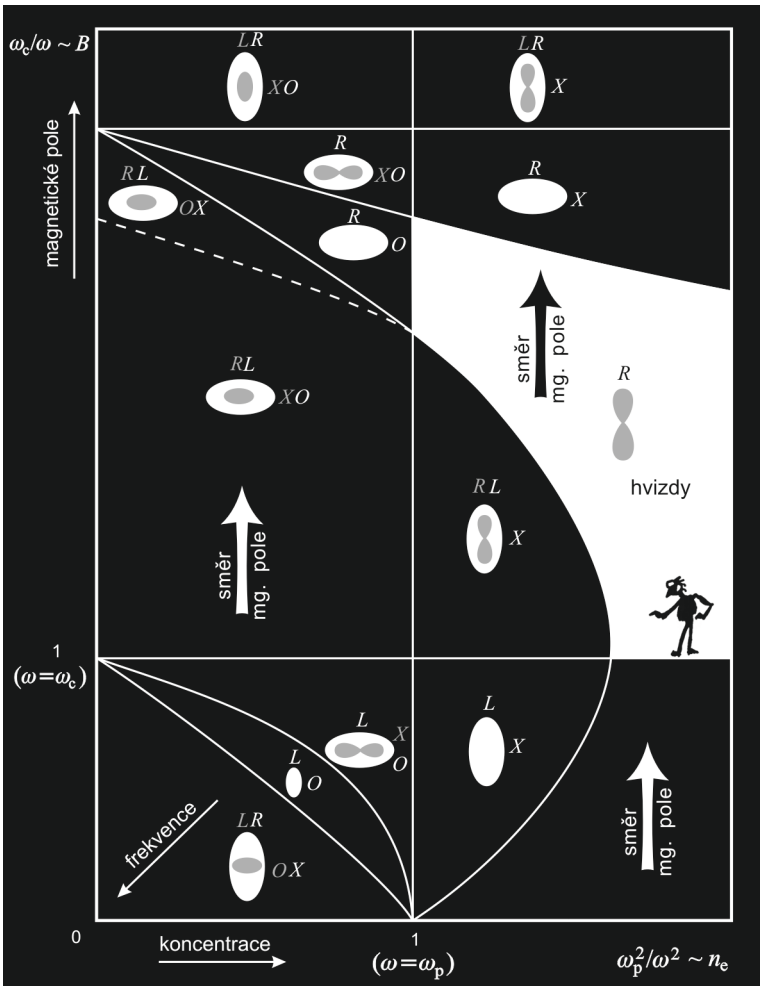
Budeme-li pozorovat elektromagnetické vlny, uvidíme zcela jiný obraz ve směru kolmém na magnetické pole a ve směru rovnoběžném s polem. Kolmo na pole se budou šířit dvě vlnoplochy: *řádná* (O) a *mimořádná* (X). Řádná vlnoplocha je naše stará známá ze situace bez magnetického pole. Její šíření magnetické pole vůbec neovlivnilo a opět pro ni bude platit, že v plazmatu vzniká jen při frekvencích vyšších než plazmová. Tuto vlnoplochu bývá zvykem označovat písmenkem O (z anglického slova *Ordinary*, řádný). Šíření druhé, mimořádné vlnoplochy je silně poznamenáno přítomností magnetického pole. Označujeme ji písmenem X (z anglického slova *eXtraordinary*, mimořádný, které obsahuje písmenko X). Pro náš příběh hvizdů není tato vlna podstatná a proto se jí nebudeme blíže zabývat.

Budeme-li pozorovat šíření elektromagnetické vlny ve směru magnetického pole, uvidíme zajímavý obrázek. Vlna se ve směru pole rozpadne také na dvě vlny, jednu *pravotočivou* (R) a druhou *levotočivou* (L). V pravotočivé vlně bude koncový bod elektrického pole opisovat kružnici ve směru, v němž elektrony krouží kolem silokřivek magnetického pole. O takové vlně říkáme, že je kruhově polarizovaná. Označujeme ji symbolem R (z anglického slova *Right*, pravotočivý). Pokud bude frekvence této vlny totožná s cyklotronní frekvencí oběhu elektronů kolem silokřivek, dojde k rezonanci – intenzivní výměně energie mezi vlnou a kroužícími elektrony. Právě tyto pravotočivé vlny úzce souvisí s hvizdy, lvími řevy a chóry, kterými se budeme v této kapitole zabývat.

Druhá vlna se nazývá levotočivá. Koncový bod elektrického vektoru se také pohybuje po kružnici, ale v opačném směru, než obíhají elektrony kolem silokřivek. U této vlny k žádné rezonanci s elektrony dojít nemůže. Označujeme ji písmenem L (z anglického slova *Left*, levotočivý).

Tvary vlnoploch elektromagnetických vln v plazmatu se pro různé parametry plazmatu zakreslují do tzv. CMA diagramu. Je pojmenovaný podle počátečních písmen jeho autorů (P. C. Clemmow, R. F. Mullaly, W. P. Allis). Ve směru vodorovné osy roste na diagramu koncentrace plazmatu, ve směru svislé osy magnetické pole. Ve skutečnosti se na tyto osy nanáší bezrozměrné parametry, pro vodorovnou osu jde o druhou mocninu plazmové frekvence vydělenou druhou mocninou frekvence vlny, pro svislou osu jde o frekvenci oběhu elektronů kolem silokřivek vydělenou frekvencí vlny.

Prohlédněte si dobře CMA diagram. Ve směru pole můžete vidět R a L vlny, v kolmém směru X a O vlny. Ne vždy jsou přítomny všechny varianty. V oblastech frekvencí nižších, než je plazmová, se například nemůže rozvinout O vlna, proto ji v pravé části diagramu nikde nenajdete. Vzhledem k tomu, jak jsou zavedeny osy na diagramu, je frekvence nejnižší v pravém horním rohu diagramu a nejvyšší v levém dolním rohu diagramu, směr rostoucí frekvence



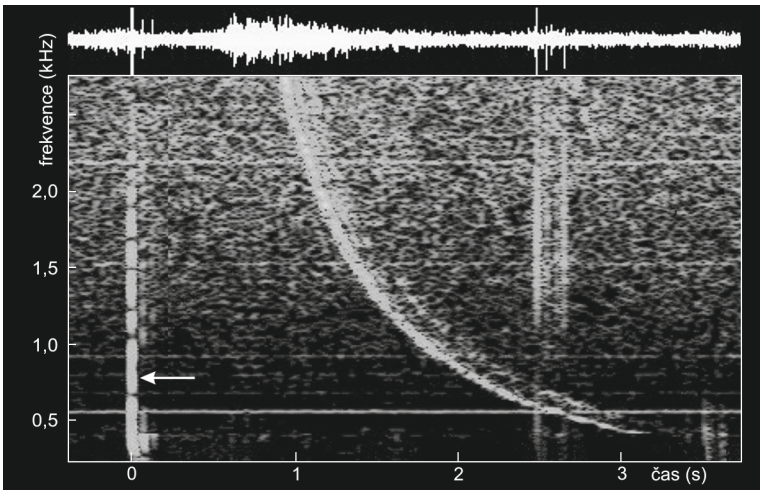
Obr. 9. CMA diagram. Patrné jsou různé tvary vlnoploch pro různé hodnoty parametrů plazmatu.

je naznačen šipkou. Oblast hvizdů, kde se tvoří jedině R vlnoplocha a žádná jiná, je na diagramu zvýrazněna bílým podkladem. Povšimněte si, že kolmo na magnetické pole se v této oblasti žádné vlny nešíří. Na křivkách oddělujících jednotlivé oblasti CMA diagramu je index lomu některé z vln buď nulový nebo nekonečný.

Hvizdy

Viděli jsme, že v přítomnosti magnetického pole nemají vlnoplochy elektromagnetických vln v plazmatu kulový tvar. Na CMA diagramu existuje oblast parametrů, při kterých se v plazmatu může šířit jedině R vlna. Ta postupuje dominantně ve směru magnetického pole, kolmo na pole se nešíří vůbec. Frekvence takových vln bývají velmi nízké (od 100 Hz do 30 kHz), takže zasahují do oblasti frekvencí běžných zvukových vln. Kdyby nešlo o elektromagnetickou vlnu, ale o zvukovou nahrávku, tak bychom uslyšeli charakteristický zvuk podobný hvízdnutí na prsty. Proto se těmto vlnám říká *hvizdy*. Na CMA diagramu je vidět, že hvizdy mají frekvenci nižší než plazmovou (levá hranice oblasti hvizdů) a také nižší než cyklotronní (dolní hranice oblasti hvizdů). Hodnota 1 na vodorovné ose odpovídá plazmové frekvenci a na svislé ose cyklotronní frekvenci.

Hvizdy poprvé objevil německý inženýr Heinrich Barkhausen (1881–1956) v roce 1918. V té době končila první světová válka a při poslouchání nepřátelské komunikace na rádiových vlnách byl přenos rušen silnými hvízdavými zvuky trvajícími několik sekund. Mohlo k tomu přispět možná i maximum sluneční aktivity, které nastalo právě v roce 1918. Barkhausen objevil, jak hvizd může vzniknout – za bouřky při úderu čárového blesku. V kanálu blesku vznikají nízkofrekvenční elektromagnetické vlny, které se začnou šířit ve směru silokřivek zemského magnetického pole. Typicky vznikne hvizd při úderu blesku na jedné polokouli, šíří se podél silokřivky, v oblasti geomagnetického rovníku se vzdálí od povrchu na dva až tři zemské poloměry a je zachycen na opačné polokouli, kde se opět přiblíží k zemi. Zde se po odrazu vydá zpět do místa svého vzniku. Barkhausen publikoval objev v roce 1919 a tento rok je považován za zrod fyziky hvizdů. Magnetosférické hvizdy detailně zkoumal a vysvětlil až v roce 1953 anglický plazmový fyzik L. R. O. Storey ze slavné Cavendishovy laboratoře v Cambridgi. Spočetl, že hvizdy se šíří podél magnetických silokřivek zemského pole a jejich maximální odklon může činit 19°29‘. Úhel se



Obr. 10. Typická nahrávka hvizdu s postupně se snižující frekvencí. Sférika z blesku, který způsobil hvizd na nahrávce je označena šipkou a leží vlevo od hvizdu. NASA, 2001. Další nahrávku hvizdů naleznete na obrázku 6 v barevné příloze.

na jeho počest nazývá *Storeyův úhel*. K odrazu hvizdů od povrchu země může dojít i několikrát, a tak lze pořídit nahrávku jednoho hvizdu často opakovaně, jakoby s ozvěnou. Rychlost pohybu hvizdu je přímo úměrná frekvenci vlny. Čím vyšší frekvence, tím rychleji se vlna pohybuje. Hvizd je ve skutečnosti směsicí různých frekvencí. Pokud nevznikl přímo u pozorovatele, doletí k němu nejprve vysoké frekvence a teprve později nízké frekvence. Tím vzniká iluze hvízdnutí. Na nahrávkách je většinou slyšet i praskoty, kterým říkáme *sféříky* (slovo vzniklo zkráceném anglického *atmospheric signals*). Jde o signály z úderu blesku šířící se s minimální disperzí ionosférou, která funguje jako kvalitní vlnovod.

Hvizdy jsou nahrávány na družicích nebo na specializovaných pozemských stanicích. Jedna z nich patří například Stanfordské univerzitě a nachází se v Antarktidě na základně Palmer, kde může pracovat v létě až 40 vědců. Pořízené nahrávky elektromagnetických hvizdů lze přehrát pomocí reproduktoru nebo je zkonvertovat přímo do zvukového souboru (beze změny frekvence) a lidské

ucho je uslyší. Na internetu lze stáhnout veliké množství zvukových souborů s nahrávkami hvizdů z magnetosféry Země nebo Jupiteru. Některé komerční servery je dokonce nabízejí za úplatu jako vyzvánění do mobilu. Inu kšeft je kšeft a obchodovat se dá dnes téměř se vším, tedy i s hvizdy. Zcela zdarma si můžete hvizdy a další podobné zvuky poslechnout například na www stránkách [31, 32]. Pokud se chcete dozvědět detaily současné teorie hvizdů, naleznete je také v knize S. Sazhina *Whistler-mode Waves in a Hot Plasma* [35].

Nebeské chóry

Chór neboli *sbor* je elektromagnetické vlnění příbuzné s hvizdy. Patří k nejsilnějším signálům ve vnější magnetosféře. Jedná se o krátké, mnohonásobně opakované (až deset za sekundu) zvuky s lineárním nárůstem (nebo poklesem) frekvence. Typické frekvence jsou do 10 kHz. Pokud signál posloucháme jako zvukovou nahrávku, připomíná ranní štěbetání ptáčků, odsud vznikl jeho název chór neboli sbor – opakovaný zpěv mnoha jedinců. Chóry vznikají při interakci plazmových vln šířících se podél magnetického pole Země s pohybujícími se elektrony. Tato interakce narušuje jejich šroubovicové dráhy a způsobuje jejich urychlení ve vnějším van Allenově radiačním pásu[21] z energie 10 až 100 keV na několik MeV. Vzniklé relativistické elektrony mohou poškodit panely slunečních baterií a elektronická zařízení družic. Jsou nebezpečné i pro lidskou posádku. Proto se jim říká „zabijácké“ elektrony. Výzkum hvizdů, chórů a mechanizmu urychlení elektronů je proto nesmírně důležitý.

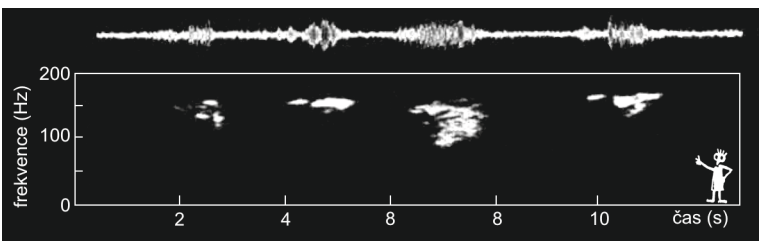
21 **Van Allenovy pásy** – oblasti v okolí Země tvořené nabitými částicemi (elektrony, protony a ionty O^+, He^+) zachycenými magnetickým polem Země ve vzdálenosti 1,2 až 4 poloměry Země. V polárních oblastech se částice odrážejí (jev magnetického zrcadla). Pásy existují dva, vnější složený především z elektronů a vnitřní obsahující hmotnější částice. Částice v pásech pronikavě září. Jejich energie je od 1 keV do 100 MeV. Nejenergetičtější elektrony se nazývají zabijácké elektrony. Pásy objevil James van Allen z Univerzity v Iowě na základě měření družic Explorer 1 a 2. Jsou mimořádným nebezpečím jak pro kosmické sondy, tak pro člověka.

Hvizdy a chóry byly intenzivně sledovány družicí POLAR, družicemi Cluster i dvojicí družic Double Star (TC-1 a TC-2), která je při zvýšené geomagnetické aktivitě poprvé pozorovala i ve velkých vzdálenostech od Země. Právě díky družici TC-1 s rovníkovou dráhou dnes víme, že zdrojem chórů jsou oblasti v blízkosti roviny geomagnetického rovníku vzdálené od Země 6 až 7 zemských poloměrů. Tyto oblasti jsou protažené ve směru silokřivek magnetického pole, mají délku 3 až 5 tisíc kilometrů, napříč silokřivkám měří ale pouze desítky kilometrů. Chóry se pohybují podél silokřivek ve vlnových balících s trváním v desítkách milisekund. Amplituda elektrického pole je přibližně 30 mV/m, magnetického 300 nT. Rychlost pohybu chórů podél silokřivky je zhruba 100 km/s. Intenzivnější chóry jsou pozorovány při zvýšené geomagnetické aktivitě. Pozorován byl i odraz chóru ve vyšších geomagnetických šířkách a jeho návrat do roviny geomagnetického rovníku. Navrácený chór měl nižší frekvenci než původní. Chóry samozřejmě můžeme, stejně jako příbuzné hvizdy, poslouchat jako zvukové nahrávky.

Velmi zajímavá je frekvenční charakteristika chórů. Většinou jsou na nahrávce zaznamenány chóry ve dvou frekvenčních pásech současně. Dolní pás tvoří frekvence od nuly do necelé poloviny cyklotronní frekvence elektronů v místě vzniku chóru. Horní frekvenční pás zabírá naopak frekvence od poloviny cyklotronní frekvence až do cyklotronní frekvence. Mezi horním a dolním frekvenčním pásmem je výrazná mezera (v okolí poloviny cyklotronní frekvence), kde žádný záznam není. Někdy hovoříme o tzv. *vázaných chórech*. Prohlédněte si, jak taková nahrávka vypadá na obrázku 6 v barevné příloze. Důvod existence tiché oblasti na polovině cyklotronní frekvence není známý, i když existují některé zatím neověřené hypotézy. Autorem jedné z nich je T. F. Bell, který publikoval v roce 2009 domněnku, že absence signálu na polovině cyklotronní frekvence je důsledkem šíření vlny v chladném plazmatu, které se chová jako přirozený vlnovod. Zajímavé nahrávky chórů převedené do zvukového záznamu si stáhněte a poslechněte na webové stránce [32].

Lví řevy

Slyšeli jste někdy zařvat lva? Obdobný zvuk uslyšeli američtí fyzikové Edward Smith, Christopher Russell, John Olson a Robert Holzer v roce 1968, když vyhodnocovali záznam z družice OGO-5 a nahrávku si poslechli na reproduktoru. Název *lví řev* (*lion roar*), který zvuku dali, se okamžitě ujal.



Obr. 11. První nahrávka lvího řevu. Družice OGO-5, 12. března 1968, 17:11 GMT.

U historicky první nahrávky družice OGO-5 byla frekvence lvího řevu mezi 160 a 200 Hz. Lví řev je pravděpodobně generován nestabilitami turbulentního plazmatu v magnetosféře. Jedna z nejrozšířenějších hypotéz dává vznik lvího řevu do souvislosti s poklesem magnetického pole. Pokud tlak magnetického pole klesne pod hodnotu tlaku plazmatu, dojde k cyklotronové rezonanční nestabilitě[22], jejímž důsledkem by měl být vznik lvího řevu. Lví řev je opět svou povahou příbuzný hvizdům a souvisí s interakcí R vlny s elektrony. Lví řevy byly pozorovány na družicích ISEE-1, ISEE-2, IMP-6, Geotail, Equator-S, Double Star TC-1 a Cluster. Ukázalo se, že lví řev má frekvenci rovnou několika desetinám cyklotronní frekvence. Existují i dlouhotrvající lví řevy (i přes pět minut), u nichž je frekvence rovna přibližně čtvrtině cyklotronní frekvence. Největší soubor dat byl zpracován z družice Double Star TC-1. Analýza 20 000 nahrávek lvích řevů vedla na průměrnou frekvenci 117 Hz, což odpovídalo přibližně dvěma desetinám cyklotronní frekvence elektronů v daném místě. Lví řevy vznikají

22 **Cyklotronová rezonanční nestabilita** – intenzivní výměna energie mezi elektrony a R vlnami v okolí cyklotronní frekvence, která vede k nestabilitě plazmatu.

v celé magnetické obálce Země a pohybují se obdobně jako klasické hvizdy podél silokřivek magnetického pole.

Hvizdy a chóry na Jupiteru

Hvizdy a chóry byly zaznamenány v magnetosféře planety Jupiter již při průletu sondy Voyager-1 v roce 1979. Sonda Voyager měla na palubě senzor plazmových vln. Objev hvizdů byl od prvopočátku chápán jako nepřímý důkaz existence blesků v Jupiterově atmosféře. Hvizdy na Jupiteru mají podobné charakteristiky jako pozemské. Pohybují se podél silokřivek Jupiterova pole a jejich rychlost pohybu roste s frekvencí. Do určitého místa tak nejprve přicházejí vyšší frekvence a teprve poté nižší frekvence.

Senzor plazmových vln na sondě Voyager zaznamenal i chóry generované v radiačních pásech planety. Za jejich vznik jsou zodpovědné elektrony kroužící kolem magnetických silokřivek. Obdobně jako na Zemi šlo o mnohokrát se rychle opakující zvuky. Každý z nich trval méně než sekundu a s časem rostla jeho frekvence. Frekvenční analýza ukázala, že se chóry skládají se dvou frekvenčních pásem oddělených tichou oblastí v okolí jedné poloviny cyklotronní frekvence, což je totéž, co bylo pozorováno na Zemi. Záznamy hvizdů a chórů v magnetosféře planety Jupiter si můžete prohlédnout na obrázku 7 v barevné příloze.

Současné sondy objevily hvizdům podobné signály i na planetách Merkur, Venuše a Saturn. Hvizdům na planetě Saturn je dokonce věnována značná část knihy Michele Doughertyho a dalších s názvem *Saturn from Cassini-Huygens* [36].

Víte, že

■ Víte, že nejrozsáhlejší magnetosféru ve sluneční soustavě má planeta Jupiter? Magnetický ohon dosahuje až k planetě Saturn a do Jupiterovy magnetosféry by se bez problémů vešlo Slunce i se svou korónou.

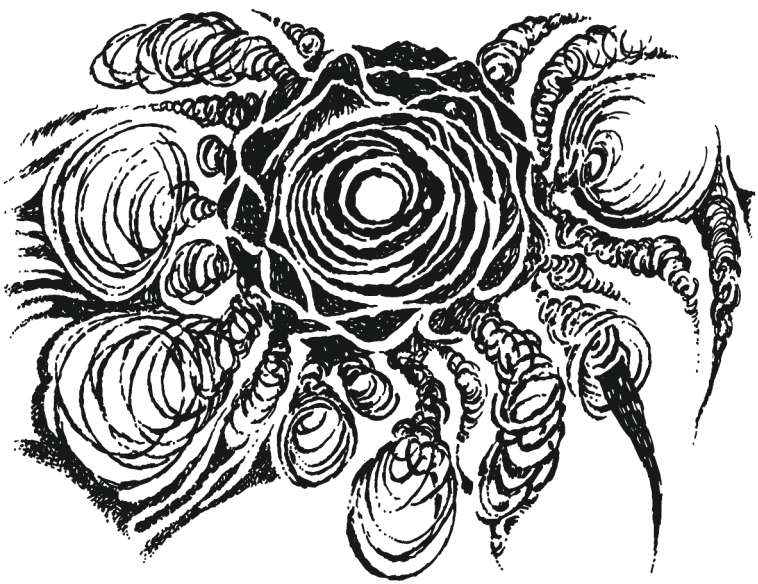
■ Víte, že k nejvýznamnějším třem pracovištím, která se zabývají hvizdy, chóry a lvími řevy, patří Univerzita v Iowě, Univerzita v Oulu a Univerzita ve Stanfordu? Poslední jmenovaná univerzita pořizuje nahrávky hvizdů na antarktické základně Palmer.

■ Víte, že se problematikou hvizdů, chórů a dalších obdobných vln zabýváme i v České republice? Specializovanou vědeckou skupinu vede doc. Ondřej Santolík na Matematicko-fyzikální fakultě Univerzity Karlovy. Skupina úzce spolupracuje s Univerzitou v Iowě.

■ Víte, že existují i hvizdy související s pohyby protonů? Tyto hvizdy jsou provázány s levotočivou (L) vlnou, neboť se protony pohybují podél silokřivek v opačném směru než elektrony.

Poučení na závěr: *Hudbu nebes jste nikdy neměli tak dostupnou jako nyní. Pokud chcete slyšet nebeský chór, nemusíte hulit trávu. A pokud chcete slyšet lva, nemusíte jezdit do Afriky. Stačí si poslechnout nahrávky z družic.*

4. Příběh umírající hvězdy Betelgeuse



Hvězdy netuší, že tvoří souhvězdí.
Jean Cocteau

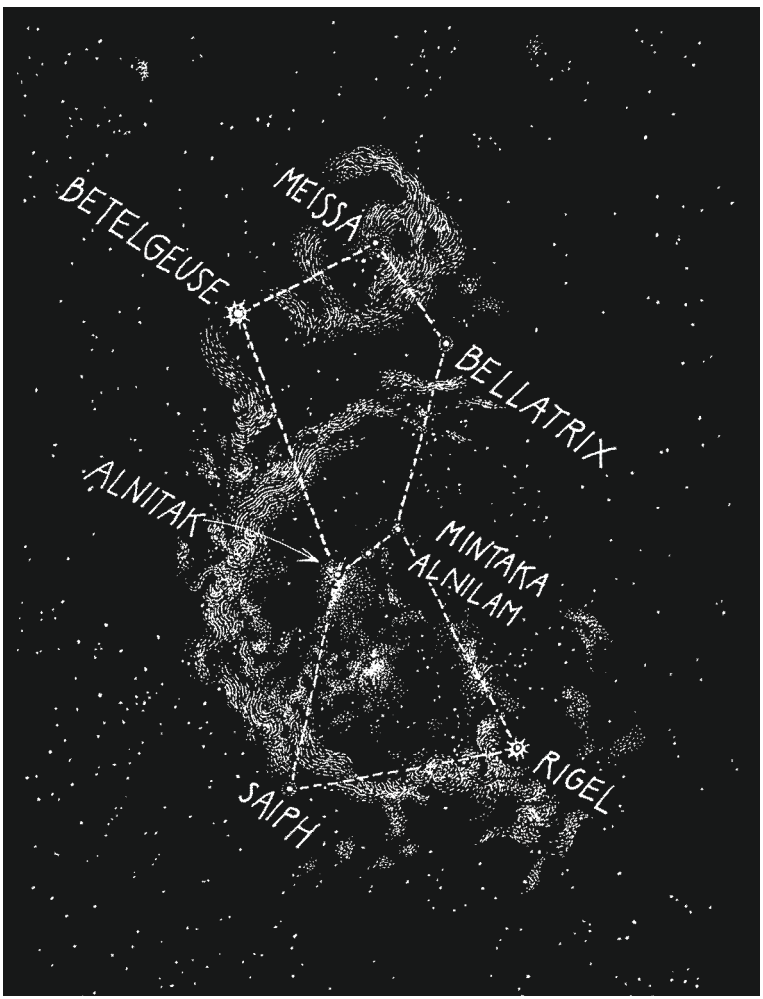
Ty tam jsou doby, kdy si lidé mysleli, že vesmír je neměnný a hvězdy jsou stálice připevněné navěky na křišťálových sférách. Hvězdy mají své osudy jako lidé. Rodí se, žijí a umírají. Z jejich popela vznikají další generace hvězd obohacené o prvky generací předcházejících. Koloběh života a smrti ne nepodobný tomu lidskému. Pohled člověka na hvězdnou oblohu v současnosti se liší od pohledu našich předků i našich potomků. To je jen jeden lidský život příliš krátký na to, abychom postřehli změny v uskupení hvězd na obloze. Za tisíce roků budou naše souhvězdí vypadat jinak. Některé hvězdy se posunou na nová místa, některé se narodí a jiné zemřou. Smrt těch nejhmotnějších končí grandiózní explozí, posledním zábleskem krásy bývalé hvězdy, poslední zprávou o vyhasínajícím životě, tajuplnou explozí supernovy. Na místě zůstane náhrobek v podobě mlhoviny, kterou uvidíme ještě tisíce let. A po tisících let se možná někdo podívá na oblohu a uvidí zašlou slávu bývalé hvězdy. A snad ho napadne otázka: Jaká asi byla, když majestátně svítila na obloze? A jací asi byli lidé, kteří se na ni tenkrát dívali?

Aktéři příběhu

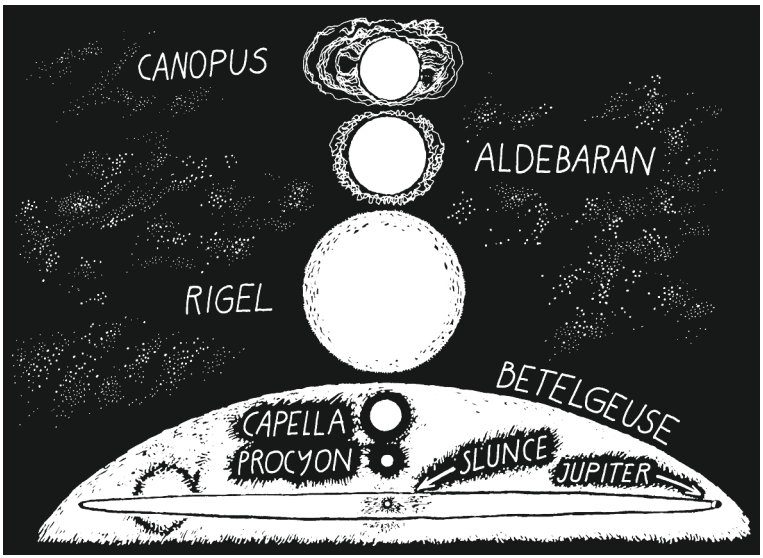
Hlavním hercem v našem příběhu je hvězda Betelgeuse, červený veleobr, kterého nalezneme v pravém rameni nejvýraznějšího zimního souhvězdí Orion. Přestože jde až o druhou nejjasnější hvězdu souhvězdí, má označení *Alfa Orionis*. Písmeny řecké abecedy se zpravidla hvězdy označují v pořadí podle své jasnosti (alfa je nejjasnější, beta druhá nejjasnější atd.). Občas jsou ale výjimky, Betelgeuse je jednou z nich, nejjasnější hvězdou souhvězdí Orion je totiž modrý veleobr Rigel nacházející se v levé noze Orionu.

Druhou postavou je nechtěně naše Slunce, neboť právě s ním budeme hvězdu Betelgeuse neustále porovnávat. Slunce se označu-

je symbolem ☉. Tahle značka se objevila poprvé u starověkých alchymistů. Kroužkem s tečkou označovali jednak roztok (*Solutio*) a jednak Slunce (*Solaris*). Obě slova měla stejnou zkratku *sol*, a pravděpodobně proto se pro ně ujal stejný symbol, který je známý ze starých receptur a učených knih.



Obr. 12. Zimní souhvězdí Orion. Betelgeuse tvoří jeho pravé rameno.



Obr. 13. Porovnání velikosti hvězdy Betelgeuse s některými známými hvězdami a s drahou Jupiteru. Slunce a Jupiter jen vymezují dráhu Jupiteru a na obrázku nejsou ve správném poměru.

Betelgeuse má oproti Slunci obrovské rozměry, její poloměr je tisíckrát větší než sluneční. Kdyby byla ve středu naší sluneční soustavy, dosahoval by její povrch až k dráze planety Jupiter. Přitom hmotnost Betelgeuse je „jen" dvacetkrát větší než hmotnost Slunce. To znamená, že Betelgeuse má velmi malou průměrnou hustotu 10^{-7} g/cm^3, zatímco Slunce má průměrnou hustotu 1,4 g/cm^3. Hustota Slunce je nepatrně vyšší než hustota vody, zatímco hustota Betelgeuse odpovídá desetitisícině hustoty vzduchu za normálních podmínek. Hvězda má malé husté jádro a kolem plynný obal, který tvoří většinu jejího objemu.

Pro životní osud hvězdy je klíčovým parametrem hmotnost. Hvězdy s velkou hmotností, jako má Betelgeuse, žijí jen krátkou dobu, v jejich nitru je vysoký tlak a teplota a jaderné reakce probíhají intenzivněji než u méně hmotných hvězdných bratrů. Stáří Slunce je 5 miliard let a má za sebou necelou polovinu života. Betelgeuse je stará jen 10 milionů roků a je na úplném konci svého života.

Pro chování hvězdy je velmi důležitým parametrem její *povrchová teplota*. Místo teploty se někdy používá *spektrální třída*[23] hvězdy. Slunce má povrchovou teplotu kolem 6 000 K, čemuž odpovídá spektrální třída G2, hvězda Betelgeuse má na povrchu teplotu 3 500 K a jde o červenou hvězdu spektrální třídy M2. Hvězdy s nízkou povrchovou teplotou jsou červené, hvězdy s vysokou povrchovou teplotou svítí modře.

Pro porovnávání jasnosti hvězd na obloze se zavádí tzv. *hvězdná velikost* neboli *relativní magnituda*. Nejjasnější hvězdy mají magnitudu kolem nuly, nejméně jasné hvězdy viditelné lidským okem mají magnitudu mezi 5 a 6. Hvězdy s vyšší hodnotou magnitudy uvidíme jen v dalekohledu. Na obloze jsou ale i jasnější objekty než nejjasnější hvězdy. Venuše může mít magnitudu kolem –4, Měsíc v úplňku –12,6 a Slunce dokonce –26,6. Čím menší číslo, tím jasnější objekt na obloze je. Hvězda Betelgeuse svou jasnost mění, a tak její hvězdná velikost (magnituda) kolísá mezi hodnotami 0,2 až 1,2 s periodou 5,8 let. Hvězdná magnituda ale nevypovídá nic o skutečném *zářivém výkonu hvězdy* neboli *svítivosti*. Slunce je velmi jasné, protože je blízko a Betelgeuse je méně jasná, protože je daleko. Pokud bychom chtěli hvězdy porovnávat mezi sebou, musíme zavést tzv. *absolutní magnitudu*. Jde o magnitudu, kterou by hvězda měla, kdybychom se na ní dívali ze vzdálenosti 10 parseků[24]. Naše Slunce má absolutní magnitudu +4,71 a hvězda Betelgeuse –5; kdyby tedy obě hvězdy byly ve stejné vzdálenosti, Betelgeuse by byla mnohem jasnější než naše Slunce. Přestože je Betelgeuse výrazně chladnější než Slunce, je její zářivý výkon (sví-

23 **Spektrální třída** – rozdělení hvězd podle charakteristiky jejich spektra do základních tříd W, O, B, A, F, G, K, M, L, T. Nejteplejší, modrofialové hvězdy mají spektrum označené W, nejchladnější hvězdy spektrálních tříd M, L a T jsou červené. Spektrální třída odpovídá povrchové teplotě hvězdy. Dělení do spektrálních tříd je příliš hrubé, proto se každá třída ještě dělí na podtřídy s čísly 0 až 9 (například F9, G0, G1 atd.). Mnemotechnická pomůcka pro zapamatování pořadí tříd: Whisky Od Babičky Anastázie – Fantasticky Geniální Koupě! Moderní Léčivo Traumat.

24 **Parsek** – jednotka vzdálenosti, tzv. paralaktická sekunda. Jde o vzdálenost, ze které by velká poloosa dráhy Země kolem Slunce byla vidět pod úhlem jedné obloukové vteřiny. Číselně je 1 pc = 30×10^{12} km, což je zhruba 3,26 světelného roku. Často používanými násobky jsou kiloparsek (kpc) a megaparsek (Mpc).

tivost) je stotisíckrát větší než sluneční. To je způsobeno výrazně větším povrchem hvězdy. Teplota (spektrální třída) a svítivost (absolutní magnituda) jsou základní dva parametry pro klasifikaci hvězd.

Shrňme nyní základní parametry našeho Slunce a hvězdy Betelgeuse do přehledné tabulky:

hvězda	Slunce	Betelgeuse
typ hvězdy	hlavní posloupnost	červený veleobr
vzdálenost	8 svět. minut	~640 svět. roků
stáří	5×10^9 let	~10×10^6 let
hmotnost	1 $M_\odot$ (2×10^{30} kg)	~20 $M_\odot$
poloměr	1 $R_\odot$ (700 000 km)	~1 000 $R_\odot$
hustota	1,4 g/cm^3	~10^{-7} g/cm^3
povrchová teplota	5 780 K	~3 500 K
spektrální třída	G2	M2
zářivý výkon	1 $L_\odot$ (4×10^{26} W)	100 000 $L_\odot$
absolutní magnituda	4,71	–5,1
relativní magnituda	–26,6	0,2 až 1,2

Jak se hvězdy rodí

Hvězdy obvykle vznikají z rozsáhlých zárodečných mlhovin či molekulárních mračen, kterým říkáme hvězdné porodnice. Typická pramlhovina má rozměry desítek světelných roků a celkovou hmotnost tisíců Sluncí. Koncentrace částic bývá v rozmezí 10^5 až 10^9 částic v jednom metru krychlovém. Teplota pramlhoviny musí být nižší než 100 K, jinak by tepelné procesy zabránily gravitačnímu hroucení. Zrod hvězdy probíhá v několika fázích:

zárodečná mlhovina → globule → protohvězda →
→ hvězda hlavní posloupnosti

■ **Zárodečná mlhovina.** Asi nejznámější mlhovinou, ve které vznikají hvězdy, je Velká mlhovina v Orionu. Shodou okolností se nachází ve stejném souhvězdí jako hlavní postava našeho příběhu – hvězda Betelgeuse. Nalezneme ji pod výraznou trojicí hvězd tvořící pás Orionu. Rodící se hvězdy zde pozoroval již v 70. letech 20. století vynikající sovětsko-arménský astrofyzik Viktor Ambarcumjan (1908–1996), který pracoval na Bjurakanské observatoři na území dnešní Arménie. V naší Galaxii je ale hvězdných porodnic celá řada. K dalším patří Orlí mlhovina ze souhvězdí Hada, molekulární mračno v Perseu nebo molekulární mračno v Hadonoši. I v jiných galaxiích pozorujeme oblasti rodících se hvězd, velmi časté jsou u prolínajících[25] se galaxií, jakými je například dvojice galaxií nazývaná Antény, jež se nachází ve směru souhvězdí Havrana.

■ **Globule.** Za určitých podmínek se v pramlhovině mohou objevit shluky nepravidelného tvaru, které jsou dostatečně rozsáhlé a husté na to, aby gravitační síla převládla nad tlakovou silou. Shluk se začne rychle hroutit do svého středu, hovoříme o *globuli*. K prvopočátečním impulzům, jež mají za následek vznik globulí, může patřit například exploze blízké supernovy (a následné stlačení látky v pramlhovině rázovou vlnou), přechod spirálního ramene galaxie přes danou oblast, srážka dvou galaxií, nestability vyvolané přítomností magnetického pole a další jevy. Globule v takové situaci zpravidla vznikají po stovkách až po tisících.

■ **Protohvězda.** Globule se z počátku hroutí velmi rychle, ale v jejím středu narůstá teplota a tlak do té doby, až se ustaví rovnováha mezi tlakovou silou a gravitací. V tuto chvíli vzniká útvar,

25 **Srážka galaxií** – dosti častý jev, při kterém nedochází k přímým srážkám mezi hvězdami (jejich vzájemné vzdálenosti jsou příliš veliké), ale k prolínání mezigalaktického prostředí. To může vést na překotnou tvorbu hvězd v interagujících mlhovinách obou galaxií.

který nazýváme protohvězda. Protohvězda má přibližně kulový tvar a další smršťování probíhá velmi pomalu. Nadbytečná energie uvolňovaná pomalým gravitačním smršťováním je z protohvězdy odváděna zářením. Zde má nezastupitelnou úlohu především prach, který září v široké škále vlnových délek a jeho záření může účinně odvádět energii z nitra protohvězdy. Protohvězda září především v mikrovlnné a infračervené oblasti, proto jsou k pozorování vzniku hvězd výhodné mikrovlnné nebo infračervené observatoře. Ze starších observatoří jmenujme alespoň infračervenou družici IRAS a ze současných přístrojů patří k tomu nejlepšímu, co mají astronomové k dispozici, Spitzerův vesmírný dalekohled v infračervené oblasti a evropská sonda Planck v mikrovlnné oblasti. Protohvězda pohybující se v zárodečné mlhovině před sebou často vytvoří charakteristickou rázovou vlnu podobnou rázové vlně před přídí lodi, jež pluje po hladině oceánu.

■ **Hvězda hlavní posloupnosti.** Při pomalém smršťování protohvězdy se postupně zvyšuje tlak a teplota v nitru útvaru až do okamžiku, kdy je zažehnuta termojaderná syntéza. Zdrojem energie se stane slučování jader vodíku na hélium a z protohvězdy vznikne hvězda se zdrojem energie, který ji bude živit po většinu jejího aktivního života. Hvězdy slučující vodík na hélium se nazývají *hvězdy hlavní posloupnosti*. Tento poněkud podivný název vznikl podle polohy tohoto typu hvězd v tzv. Hertzsprungově-Russellově diagramu, se kterým se seznámíme později v této kapitole (hvězdy slučující vodík v něm vytvářejí nejvýraznější uskupení hvězd, tzv. hlavní posloupnost). Naše Slunce je v současnosti hvězdou hlavní posloupnosti a ještě jí bude po mnoho miliard roků. Hvězda Betelgeuse už má tuto hlavní fázi života hvězdy dávno za sebou. Proto se na chvíli budeme zabývat Sluncem, u kterého slučování vodíku na hélium ještě probíhá.

Zdroj energie hvězd

Zdroj energie hvězd byl po staletí záhadou. Dosti dlouho se předpokládalo, že jím je pomalá gravitační kontrakce hvězdy, a že se

proto v průběhu života každá hvězda postupně zmenšuje. Takový mechanizmus by ale mohl pokrýt energetické výdaje hvězdy maximálně po dobu několika milionů let. Naše Slunce a mnoho dalších hvězd již svítí mnoho miliard roků, a tak je tento mechanizmus nemožný.

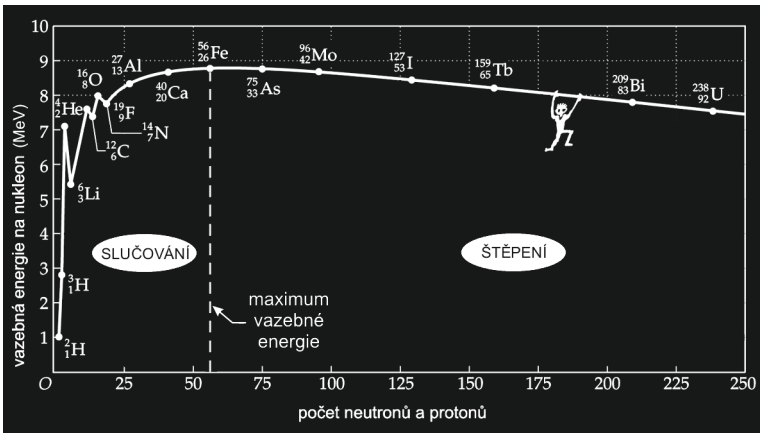
Skutečný zdroj energie hvězd byl odhalen až v souvislosti s poznáváním hmoty na atomární úrovni. Atomy mají obaly z elektronů a jádra z protonů a neutronů. Tato jádra jsou vázána tzv. silnou interakcí, nicméně průměrná vazebná energie na jeden nukleon (energie jádra vydělená počtem částic jádra) se u různých prvků liší. Největší je u železa ^{56}Fe, nižší je u lehčích i u těžších prvků. Průběh vazebné energie pro různé prvky je znázorněn na grafu na pravé straně.

Z grafu je patrné, že z hmoty je možné energii získávat (vytvářet prvky s vyšší vazebnou energií) dvojím způsobem: buď štěpit[26] těžká jádra na lehčí nebo slučovat[27] lehká jádra na těžší. Cílem obou cest je dosáhnout oblasti největší vazebné energie (okolí prvku železa). Štěpení lidé využívají v jaderných elektrárnách. Slučování (fúze) je zdrojem energie v nitru hvězd. Jedním z prvních, kdo podrobně zkoumal možnosti fúzních reakcí v nitru hvězd byl německo-americký jaderný fyzik Hans Bethe (1906–2005). V jádru hvězd hlavní posloupnosti se za vysoké teploty a tlaku v divokém reji srážejí protony, deuterony[28] a další částice. Jen tu a tam se dva protony spojí a vytvoří jádro deuteria, ze kterého unikne pozitron a neutrino. Jednomu konkrétnímu protonu trvá stovky milionů

26 **Štěpení** – způsob získávání energie štěpením těžkých atomárních jader. Je základem současných atomových elektráren, ve kterých jsou jádra štěpena nalétávajícími neutrony. Produktem rozpadu jsou další neutrony, které štěpí další jádra (dojde k tzv. řetězové reakci). První štěpný reaktor postavil Enrico Fermi v roce 1942 v Chicagu.

27 **Slučování (fúze)** – způsob získávání energie slučováním lehkých atomárních jader. Tento proces probíhá přirozenou cestou ve hvězdách. V pozemských podmínkách je základním problémem udržení plazmatu na potřebnou dobu. Může jít o tzv. inerciální fúzi (například iniciovanou laserem), kdy terčík na krátkou dobu drží pohromadě setrvačností nebo o fúzi udržovanou v magnetickém poli (tokamak, pinč).

28 **Deuteron** – jádro těžkého vodíku (deuteria), jde o vázaný stav protonu a neutronu. V průměru na Zemi připadá na 7 000 atomů normálního vodíku jeden atom deuteria. Jde o stabilní izotop vodíku.

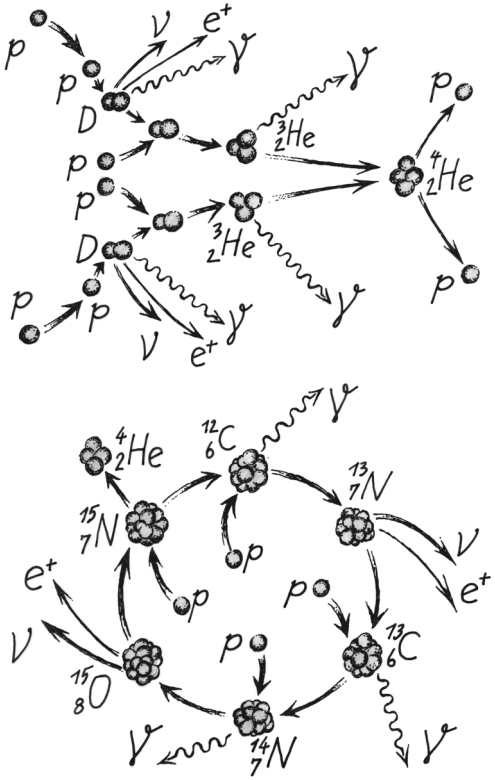


Obr. 14. Graf vazebné energie prvků. Energii lze získat buď štěpením velkých nebo slučováním malých jader.

let, než se sloučí s jiným protonem. Jaderná syntéza probíhá v nitru hvězd velmi pomalu. Proto je tak obtížné ji napodobit v laboratorních podmínkách. Jeden kilogram sluneční látky vydává v průměru výkon pouhých 0,2 miliwattu a nerozsvítil by ani žárovku. Nicméně takových „kilogramů" je ve Slunci 2×10^{30}, takže celkový zářivý výkon je enormní: 4×10^{26} W.

V nitru Slunce, kde je teplota 15 milionů kelvinů, dominuje tzv. *protono-protonový řetězec*. To je reakce, při které se v mnoha srážkách nakonec sloučí čtyři protony na jádro hélia. Při tomto procesu vzniknou ještě pozitrony, neutrina a samozřejmě energie. Ve Slunci probíhá ale i celá řada dalších jaderných reakcí, jednou z nich je i tzv. *CNO cyklus*. Ve Slunci není CNO cyklus hlavním zdrojem energie, ale ve hvězdách s o něco málo vyšší centrální teplotou (postačí 18 milionů kelvinů) tento cyklus dominuje. Jde opět o řadu reakcí se stejným výsledkem: čtyři protony se přemění na jedno jádro hélia, dva pozitrony, neutrina a energii.

V nitru našeho Slunce a ostatních hvězd probíhá i celá řada dalších reakcí, o nichž víme jen velmi málo. Foton unikající z termojaderného kotle k povrchu se prodírá plazmatem, které ho po



Obr. 15. Dvě nejdůležitější reakce – pp řetězec a CNO cyklus.

několikacentimetrové cestě pohltí a opětovně vyzáří v náhodném směru, opět uletí několik centimetrů, opět je pohlcen a vyzářen, třeba směrem zpět k jádru atd. Tímto náhodným procesem se přece jen v průměru náš foton velmi pomalu blíží k povrchu. Foton, který by z nitra Slunce letěl přímou cestou k povrchu jen něco málo přes dvě sekundy, urazí tuto cestu za statisíce až miliony let. Situace je ve skutečnosti ještě složitější. Jeden pohlcený foton je zpravidla vyzářen v podobě většího množství fotonů s nižší energií (delší vlnovou délkou). K povrchu se tedy nedostane foton původní, ale jeho hodně vzdálení potomci. Získávat informace o dějích v nitru Slunce z takto pozměněných fotonů je velmi obtížné. Exis-

tuje ale nadějný způsob, jak pozorovat děje v nitru Slunce takřka v přímém přenosu – pozorování neutrin, která vznikají při termojaderné syntéze. Ta procházejí celým Sluncem bez nejmenších problémů a některá z nich se daří zachytit v našich detektorech. Existují i specializované detektory zkoumající za pomoci neutrin méně běžné větve termojaderné syntézy v nitru Slunce. Jedním z nich je například detektor Borexino umístěný pod italskou horou Gran Sasso, kde se nachází obří evropský komplex podzemních laboratoří. Takové detektory umožňují lépe poznávat procesy probíhající hluboko v nitru hvězd.

Portréty hvězdy Betelgeuse

V době, kdy jsem navštěvoval astronomické kurzy v pražském planetáriu, nám říkali, že hvězdy jsou tak daleko, že je vždy uvidíme jako pouhé body a že ani sebevětší přístroj světa nedokáže hvězdu zobrazit jako kotouček. Prošly dvě desítky let a v roce 1995 se podařilo Hubblovým vesmírným dalekohledem vyfotografovat povrch hvězdy Betelgeuse. Malý načervenalý kotouček jsem si dlouho a s velkou nedůvěrou prohlížel. Opět padnul jeden mýtus, který jsem měl zakořeněný hluboko v paměti. Úhlový rozměr hvězdy Betelgeuse je 0,055" ve viditelném spektru (na vlnové délce 720 nm), v blízkém ultrafialovém oboru jde ale již o 0,125" a ve vzdáleném ultrafialovém oboru činí úhlový průměr Betelgeuse dokonce 0,27".

Přelomový snímek byl pořízen dne 3. března 1995 v ultrafialovém oboru kamerou FOC (*Faint Object Camera*) na Hubblově vesmírném dalekohledu. Na snímku byl patrný nejen nenulový rozměr hvězdy a její atmosféra, ale i zajímavá povrchová skvrna. Velikost horké skvrny byla srovnatelná s průměrem dráhy Země kolem Slunce a byla asi o 2 000 K teplejší než okolní povrch. Zjevná nehomogenita byla prvním svědectvím bouřlivých procesů na povrchu i v nitru umírající hvězdy Betelgeuse, která se nachází v závěrečné fázi svého života.

Od té doby byly nalezeny specializované interferometrické[29] postupy, které umožňují zobrazovat povrchy některých blízkých a obřích hvězd. První pořízená fotografie umírající Betelgeuse odstartovala snímkování hvězdy mnoha přístroji. V roce 1997 byly pořízeny snímky z nově instalovaného anglického interferometru COAST (*Cambridge Optical Aperture Synthesis Telescope*). COAST tvoří čtyři dalekohledy se základnou 100 metrů, které jsou citlivé od blízkého infračerveného oboru až po červenou část viditelného spektra. Každá jednotka je složena ze siderostatu[30] se zrcadlem o průměru 50 cm, ze kterého je světlo namířeno na Cassegrainův dalekohled[31] se zrcadlem o průměru 40 cm. Světlo ze všech čtyř dalekohledů je vedeno hliníkovými trubkami do podzemní optické laboratoře, kde je metodou tzv. aperturní syntézy[32] získán výsledný obraz s rozlišením 0,02". Infračervené snímky z interferometru COAST byly doplněny vizuálním snímkem (zpracovaným stejnou metodou) z Dalekohledu Williama Herschela (WHT), který má průměr 4,2 metru a je postaven na Kanárském ostrovu La Palma. Kompletní výsledky tohoto výzkumu byly publikovány v roce 2000. Na vizuálním snímku byly patrné tři výrazné skvrny. Pravděpodobně jde o vzestupné proudy látky z kolotající hvězdy. Ve velmi blízké infračervené oblasti (905 nm) měla hvězda výrazně menší rozměr a jen jednu viditelnou skvrnu. V blízkém IR (na

29 **Interferometrie** – skládání světla (případně elektromagnetického signálu) z více zdrojů a jeho následné matematické zpracování.

30 **Siderostat** – speciální zrcadlová montáž, na které se zrcadlo pohybuje tak, aby se sledovaná hvězda v centru zorného pole nepohybovala. Ostatní objekty kolem ní opisují kružnice.

31 **Cassegrainův dalekohled** – zrcadlový dalekohled s vrtaným primárním zrcadlem a s vydutým sekundárním zrcadlem před primárním ohniskem. Světelný svazek se odráží od sekundárního zrcadla a vrací se pak v ose dalekohledu otvorem v primárním parabolickém zrcadle do okuláru. Výhoda tohoto typu spočívá v tom, že má podstatně delší ohniskovou vzdálenost a umožňuje tak větší rozlišení. Systém navrhl téměř neznámý francouzský sochař a vědec Sieur Cassegrain v roce 1672.

32 **Aperturní syntéza** – pozorovací metoda, která se používá v radioastronomii a infračervené astronomii ke zvýšení účinné plochy antény, a tedy k dosažení vyššího úhlového rozlišení. V minimálním uspořádání je zapotřebí dvojice dalekohledů, z nichž jeden je umístěn staticky a druhý je mobilní (jeho poloha se průběžně mění). Signál je poté zpracován speciálním matematickým postupem, jehož autorem je britský astronom a matematik Martin Ryle (1918–1984). Za práce v radioastronomii obdržel Nobelovu cenu v roce 1974.

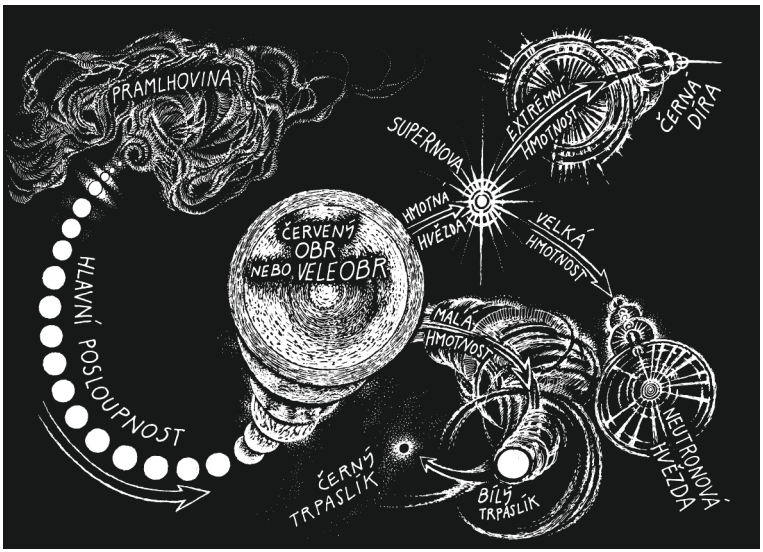
vlnové délce 1290 nm) měla hvězda nejmenší rozměr a nejostřejší hranici. Změna rozměrů s vlnovou délkou je způsobena tím, že v infračerveném oboru vidíme podpovrchové vrstvy a hvězda se jeví menší.

Existenci skvrn na povrchu Betelgeuse se pokusila vysvětlit řada numerických simulací. Z většiny z nich plyne, že hvězda prochází obdobím pulzací a intenzivního mísení látky. Nejpůsobivější simulace pocházejí z dílny Bernda Freytaga z Univerzity v Uppsale), viz [46]. Na obrázku 10 v barevné příloze naleznete současnou představu o podobě této hvězdy.

Jak hvězdy umírají

Již jsme se zmínili, že tempo vývoje hvězdy silně závisí na její počáteční hmotnosti. Životní cyklus Slunce bude trvat přibližně 12 miliard roků, zatímco dvacetkrát hmotnější Betelgeuse bude žít jen 10 milionů let. Po vyčerpání vodíku jakožto paliva v jádře hvězdy dojde k výrazným strukturálním změnám. Hvězda se zpočátku začne smršťovat, v jejím středu poroste teplota a tlak až do okamžiku, kdy se zažehnou další jaderné reakce. Hélium se bude slučovat na uhlík, dusík, kyslík, xenon, a další prvky. Hvězda výrazně zvětší své rozměry a stane se obrem nebo veleobrem. Vždy když dojde k vyčerpání jednoho paliva, zažehne se záhy další reakce a hvězda bude postupně „prohořívat“ na těžší a těžší prvky až po železo, které je energeticky nejstabilnější. Na konci života hvězdy bude v jejím nitru převládat železo, ale ve vnějších vrstvách budou stále ještě existoval i lehké prvky.

Další osud hvězdy bude záležet na její počáteční hmotnosti. Málo hmotné hvězdy projdou tzv. stadiem pulzací, při kterém několikrát odhodí obálku a vytvoří kolem sebe krásné mlhoviny. Nakonec se stanou bílým trpaslíkem, který postupně vychladne na černého trpaslíka. Hmotnější hvězdy budou explodovat jako supernovy a obohatí okolí o těžké prvky, které v nich vznikly. V explodujících obálkách jsou takové energetické poměry, že zde mohou dokonce



Obr. 16. Různé varianty vývoje hvězdy.

vznikat i prvky těžší než železo. Z rozmetané látky bohaté na těžké prvky pak vznikají další generace hvězd. Každý z nás je tak vytvořen z materiálu, který rozházela do svého okolí nějaká supernova. Na místě bývalé supernovy zůstane buď neutronová hvězda nebo pro extrémně hmotné hvězdy černá díra. K závěrečným stádiím života hvězd tedy patří:

■ **Bílý trpaslík** – závěrečné stádium hvězdy, ve kterém elektronový plyn vyvíjí tlakovou sílu (způsobenou Pauliho vylučovacím principem[33]), která zabrání gravitačnímu hroucení. Poloměr je 1 000 km až 30 000 km, hustota řádově 10^3 kg cm^{-3}, maximální hmotnost 1,44 $M_\odot$. Hmotnější bílí trpaslíci jsou nestabilní. Tuto tzv. *Chandrasekharovu mez* odvodil indický fyzik a astronom Subrahmanyan Chandrasekhar (1910–1995) v roce 1930. Již v roce 1834 si německý matematik a astronom Fridrich Bessel

33 **Pauliho vylučovací princip** – dvě částice s poločíselným spinem (například elektron nebo neutron) se nemohou nikdy nacházet ve stejném kvantovém stavu. Důsledkem tohoto principu je tlak kvantové povahy, kterým mohou bílí trpaslíci a neutronové hvězdy odolat závěrečnému gravitačnímu hroucení.

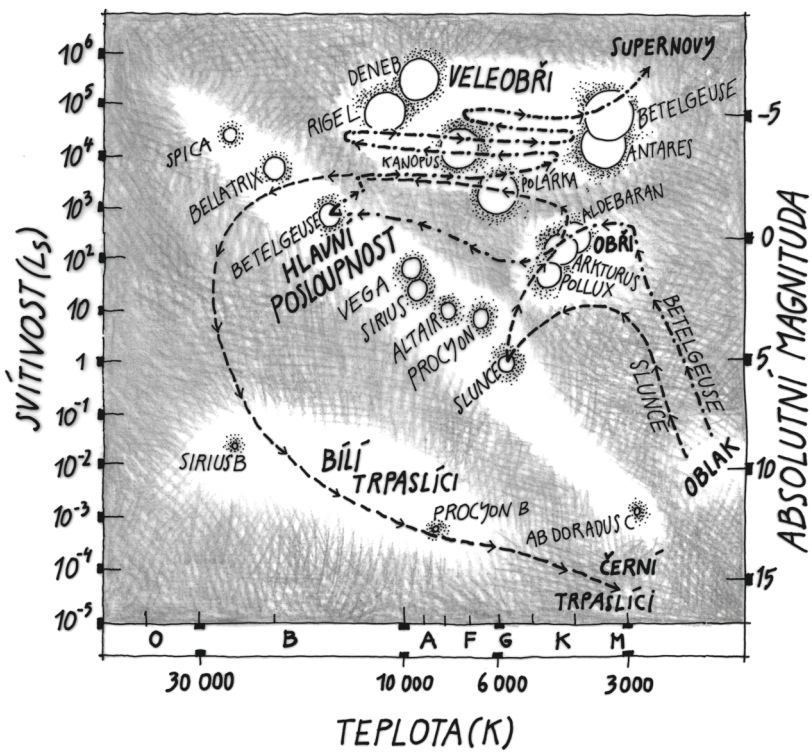
(1784–1846) povšimnul, že hvězda Sírius se pohybuje po vlnkovité dráze. Z toho usoudil, že by měla mít malého průvodce. Tento průvodce (Sírius B) byl objeven v optické dílně bratří Clarků roku 1862, když Alvan Clark testoval objektiv o průměru 45 cm. Sírius B se stal prvním objeveným bílým trpaslíkem. Na Síriu B byla demonstrována správnost newtonovské teorie (vlnovkovitá trajektorie Síria A) i potvrzena obecná relativita (červený posuv světla unikajícího z trpaslíka). Sírius B je enormně malý a hustý bílý trpaslík s průměrem 11 736 km a hustotou $\rho = 3\times10^3$ kg cm^{-3}. Povrchová teplota je 24 800 K, vzdálenost 8,6 světelného roku a hmotnost 1,03 $M_\odot$.

■ **Neutronová hvězda** – závěrečné stádium hvězdy, jejíž nitro je složené především z neutronů. Ty se chovají jako kvantový plyn, který svým tlakem zastaví gravitační hroucení. Hmotnost neutronové hvězdy musí být menší než přibližně 2 $M_\odot$ (tzv. *Tolmanova-Oppenheimerova-Volkoffova mez*). Typický průměr neutronové hvězdy je v řádu desítek kilometrů, průměrná hustota 10^{11} kg cm^{-3} dosahuje hustoty atomového jádra. Neutronové hvězdy vznikají při gravitačním kolapsu velmi hmotných červených veleobrů, při výbuchu supernovy. Obrovský tlak způsobuje sloučení většiny elektronů a protonů na neutrony. Přitom se uvolní velké množství neutrin, která mohou být pozorována našimi detektory. Neutronové hvězdy byly teoreticky předpovězeny ve 30. letech 20. století. První neutronovou hvězdu objevila v roce 1967 mladá asistentka Jocellyne Bellová, která pracovala pod vedením vynikajícího astronoma Anthony Hewishe.

■ **Černá díra** – objekt, který kolem sebe zakřiví čas a prostor natolik, že z něho nemůže uniknout ani světlo. Část černých děr vzniká kolapsem hvězdy v závěrečných fázích vývoje, jiné, obří černé díry, sídlí v centrech galaxií. Rotující černé díry kolem sebe vytvářejí akreční disky látky a v ose rotace výtrysky vysoce urychlených částic. Paradoxně akreční disky i výtrysky vznikající v bezprostředním okolí černé díry velmi intenzivně vyzařují. Existenci černých děr předpověděl na základě Einsteinovy obecné teorie

relativity německý fyzik Karl Schwarzschild (1873–1916) v roce 1916. První černá díra byla objevena v roce 1971 anglickým astronomem Paulem Murdinem. Ztotožnil s ní rentgenový zdroj Cyg X1 v souhvězdí Labutě, který byl známý již od roku 1964.

Teoretici ještě uvažují o možné existenci kvarkových hvězd, ve kterých by gravitaci odolávaly kvarky, z nichž jsou složeny protony a neutrony. Takové hvězdy ale nebyly prozatím pozorovány. Životní osudy hvězd různé hmotnosti je možné snadno znázornit v Hertzsprungově-Russellově diagramu. Na vodorovné ose je teplota (spektrální třída) a na svislé ose svítivost (absolutní magni-



Obr. 17. Hertzsprungův-Russellův diagram. Vykresleny jsou životní dráhy Slunce a Betelgeuse. Je patrné, že hvězdu Antares čeká podobný osud jako Betelgeuse.

tuda). Na obrázku 17 jsou zakresleny základní životní etapy Slunce a Betelgeuse.

Jaký bude osud Slunce a Země? Vodík v jádru Slunce dojde za přibližně 7 miliard roků. V té době se v nitru zažehnou další termojaderné reakce a Slunce se stane červeným obrem. Jeho povrch bude zasahovat až k dnešní dráze Marsu. Slunce bude mít o 20 % nižší hmotnost a planety budou na jiných drahách než dnes. Země se bude pohybovat tam, kde je v současnosti Mars, a tak zůstane nad slunečním povrchem a bude pro tuto chvíli ušetřena okamžité zkázy. V té době ale již Země nebude obyvatelná a veškerá voda se vyvaří a zmizí z naší planety. Země se bude pohybovat sluneční korónou a bude intenzivně na své dráze brzděna. Nebude to trvat dlouho a po spirále se zřítí do Slunce a její osud tak bude definitivně naplněn.

Jak umírá Betelgeuse

Kolik času ještě zbývá umírající hvězdě Betelgeuse do závěrečné exploze, kdy naposledy zazáří a její hvězdný život vyhasne definitivně? Těžko říci. V naší Galaxii v průměru exploduje jedna supernova za století, maximálně dvě. Zkušenosti s tímto jevem máme minimální. Betelgeuse je zjevně na samém konci života a její exploze je dílem okamžiku. Astronomického okamžiku. Snad století. Možná několik set let. A možná také jen několik let. Zajímavá jsou měření průměru Betelgeuse na americké observatoři Mt. Wilson s pomocí interferometru ISI (*Infrared Spatial Interferometer*). Interferometr pracuje v infračervené oblasti spektra, je složen ze tří mobilních jednotek, každá slouží jako siderostat s jedním rovinným a jedním parabolickým zrcadlem. Maximální základna může být až 85 metrů. Přístroj je specializován na interferometrii hvězd. Měření průměru Betelgeuse za 15 let (1993 až 2009) přineslo velké překvapení. Průměr hvězdy se na vlnové délce 11,3 μm zmenšil o 15 % a pokles rozměru Betelgeuse rozhodně není lineární, ale kvadratický. Jde již o závěrečný kolaps? Pravděpodobně nikoli,

může jít o horní část sinusovky a další z mnoha postupně objevovaných pulzací.

Senzacechtiví novináři spojují explozi Betelgeuse s avizovaným koncem světa v roce 2012 a tvrdí, že na obloze budou po několik týdnů zářit dvě Slunce. Co bychom vlastně doopravdy viděli, kdyby Betelgeuse explodovala nyní? Dozajista by šlo o mimořádný astronomický zážitek. Betelgeuse v rameni Orionu by se rozzářila jako ostrý svítící bod, jehož jasnost by mohla dosáhnout až svitu Měsíce v úplňku. Nicméně den by rozhodně nenastal, bez problému bychom v okolí viděli i ostatní jasné hvězdy, stejně tak, jako je běžně vidíme v okolí Měsíce. Svit explodující Betelgeuse by nám umožnil si v noci přečíst noviny a předměty by vrhaly stíny způsobené svitem supernovy.

Ve dne by Betelgeuse byla na obloze vidět jako výrazný svítící bod. Po několika týdnech by levé rameno Orionu zaniklo a na jeho místě se postupně vytvořila mlhovina z materiálu rozmetaného touto gigantickou explozí, v jejímž nitru zůstane neutronová hvězda nebo černá díra. Celou událost astronomové označují jako supernova typu II. Přímé ohrožení Země ze vzdálenosti 640 světelných roků je téměř vyloučené. Pokud by Betelgeuse měla silné dipólové magnetické pole, mohl by být v magnetické ose směrován výrazný rentgenový a gama záblesk. Šance, že by byl namířen právě k Zemi je velmi malá. Navíc hvězdní obři nemívají silné magnetické pole. Betelgeuse je v tomto směru výjimkou, v roce 2010 bylo naměřeno povrchové pole 10^{-4} T. Betelgeuse má velmi pomalou rotaci a klasické tekutinové dynamo v ní není možné. S největší pravděpodobností je zdrojem pole konvektivní proudění plazmatu a při něm vznikající supercely (supergranule). Takové pole ale nebude mít výrazně dipólový charakter a schopnost směrovat gama záření do jednoho výhradního směru. Betelgeuse je z vědeckého hlediska nesmírně cenný objekt a jednou lidstvu přichystá zajímavou astronomickou podívanou, kterou budeme naštěstí sledovat z bezpečné vzdálenosti. Dokonce je velmi pravděpodobné, že v současné době již Betelgeuse neexistuje a signál o jejím konci je na cestě k nám.

Víte, že

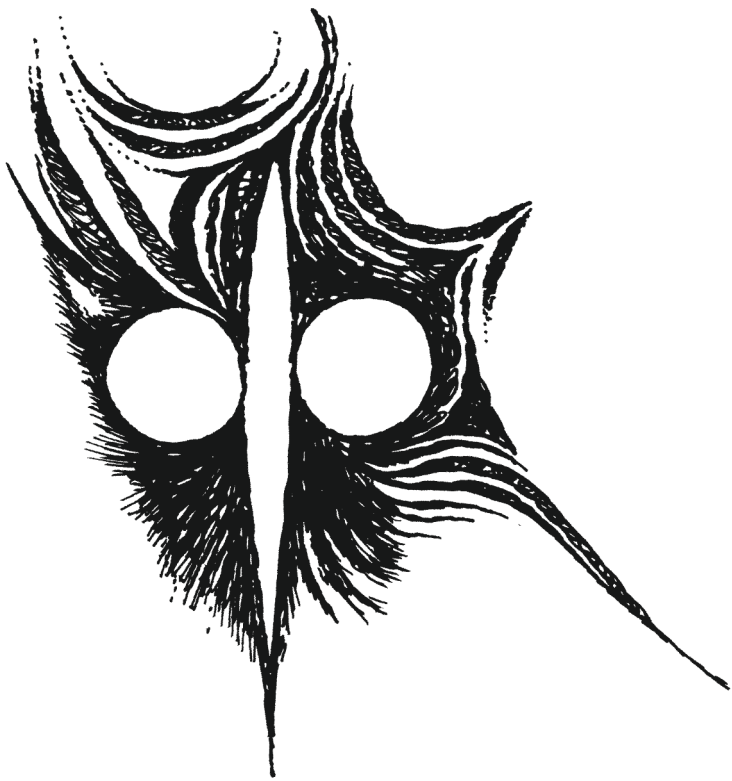
■ Víte, že existují i další hvězdy, u nichž se předpokládá astronomicky blízká exploze? Jednou z nich je extrémně hmotná hvězda Éta Carinae ze souhvězdí Lodní kýl.

■ Víte, že první neutrina jakožto svědectví exploze supernovy, byla zachycena v roce 1987? Šlo o explozi supernovy SN 1987A z Velkého Magellanova mračna a neutrina vznikla při překotné tvorbě prvků těžších než železo v rázové vlně spojené s explozí.

■ Víte, že by se slovo Betelgeuse mělo česky správně číst přibližně tak, jak je napsané? Výslovnost *bítldžús* ze známého filmu Tima Burtona není správná.

Poučení na závěr. *Život ani těch nejúžasnějších hvězd netrvá věčně. Po období krásy a marnivosti vždy přijde rychlý pád.*

5. Zapálíme Slunce na Zemi?



Matematik může tvrdit celkem vzato cokoliv,
ale fyzik si musí zachovat aspoň špetku zdravého rozumu.
Josiah Willard Gibbs

Do dvaceti let vyřeší energetické problémy lidstva termojaderná fúze! Tak to je nadčasová průpovídka, kterou jsem poprvé slyšel na základní škole, poté na střední, na vysoké a naposledy nyní, o 40 let později, navíc doplněnou dalším sebevědomým sloganem: *Zapálíme Slunce na Zemi!* Celá ta dlouhá léta se zdá, že zvládnutí termojaderné fúze je přímo nadosah. Stačí ještě dořešit pár drobných detailů a o blaho lidstva v podobě čistého a téměř nevyčerpatelného zdroje energie bude postaráno. Jenže člověk míní a příroda mění. Plazma v nitru Slunce – obří kouli o poloměru 700 000 km – se chová přece jen jinak než malá nestabilní kulička plazmatu podobná klubku neposedných háďat, kterou se pokoušíme zkrotit v laboratoři. Mám ale pocit, že se plazmoví fyzikové svému cíli nyní opravdu blíží. Za uplynulá desetiletí se v poznávání fúzního plazmatu vykonalo mnoho práce a k realizaci jsou připraveny gigantické projekty ITER a HiPER a další. Nikdy jsme nebyli cíli tak blízko. A kdy to tedy bude? Rusové na to mají úžasné slovo *čuť čuť* a jihoevropské národy říkají *maňána*. Je to určitě výstižnější, než neustále opakovat, že za dvacet let.

Štěpení

Atomové jádro je složené z protonů a neutronů vázaných k sobě silnou interakcí. Energie této vazby je záporná. Vazebná energie je vždy záporná – mají-li být dvě částice vázané, jsou v energetickém minimu, tedy potenciální energie má v místě vazby charakter jakéhosi ďolíčku vzhledem k okolí, ve kterém se částice nacházejí. Někdy také hovoříme o *potenciálové jámě*.

Hmotnost atomového jádra není prostým součtem hmotností všech neutronů a protonů obsažených v jádře, k tomuto součtu

musíme ještě přidat hmotnost odpovídající vazebné energii dle Einsteinova vztahu $E = mc^2$. Vazebná energie je ale záporná, proto je hmotnost jádra menší, než je prostý součet hmotností jeho částic. Ukažme si to na jádře deuteria (těžkého vodíku). Je složené z jednoho protonu a jednoho neutronu. Proton má hmotnost $1{,}6726 \times 10^{-27}$ kg (938,27 MeV), neutron $1{,}6749 \times 10^{-27}$ kg (939,57 MeV). Součet obou hmotností vyjádřených v megaelektronvoltech je 1877,84 MeV. Skutečná hmotnost deuteria je ale jen 1875,61 MeV. Rozdíl mezi prostým součtem hmotností a skutečnou hmotností se nazývá *hmotnostní schodek* a v našem případě činí přibližně 2,2 MeV. Taková je energie vazby mezi oběma částicemi. Jde o 0,1 % celkové hmotnosti částice.

Pokud vyjadřujeme hmotnost v megaelektronvoltech, nemusíme neustále přepočítávat hmotnost na energii a naopak, stejnou jednotku využijeme jak pro vyjádření energie, tak pro vyjádření hmotnosti. Proto je tato jednotka u jaderných fyziků velmi oblíbená a jsou zvyklí ji používat, kde se dá.

Hmotnostní schodek (vazebná energie) je u různých jader různá. Pro porovnávání energie vazby různých jader je výhodné vydělit vazebnou energii počtem neutronů a protonů, tím získáme vazebnou energii na jeden nukleon (nukleon je společné označení pro protony i neutrony). Největší vazebnou energii na nukleon má železo. Prohlédněte si ještě jednou graf vazebné energie prvků na obrázku 14. Z průběhu je zjevné, že pokud chceme manipulací s jádry získávat energii, musíme buď slučovat lehká jádra na těžší (až po železo) nebo naopak štěpit těžká jádra na menší.

Obě dvě cesty se lidé pokoušejí využít ve svůj prospěch. Snadněji je zvládnutelná štěpná reakce, jejíž princip je poměrně jednoduchý. Velká jádra (například uranu ^{235}U) se za pomoci neutronů rozštěpí na menší a přitom se uvolní energie a další neutrony, které rozštěpí další jádra. Pokud je neutronů dostatek, nastane *řetězová reakce*. Neutrony ve štěpném materiálu vznikají přirozenou cestou. Pokud je materiálu málo (tzv. *podkritické množství*), k řetězové re-

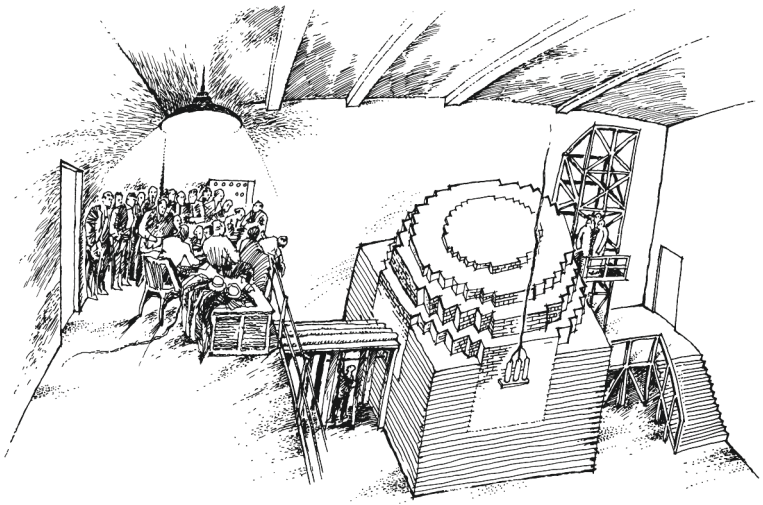
akci samovolně nedojde. Pro mírové účely je třeba především řídit množství a energii neutronů ve štěpném materiálu. Toho lze dosáhnout mnoha způsoby. Ke snížení energie neutronů (rychlé neutrony obtížněji štěpí těžká jádra) se používá *moderátor* (může jím být obyčejná voda, těžká voda[34] nebo uhlík). K pohlcení neutronů a tím řízení intenzity štěpné reakce lze využít například kadmiové tyče zasouvané do reaktoru. Možností je ale více.

První jaderný reaktor byl zkonstruován pod vedením italského fyzika Enrica Fermiho (1901–1954) v roce 1942 na Chicagské univerzitě. V tajné podzemní laboratoři pod sportovním stadionem postavil Fermi s kolegy obří blok z grafitových cihliček a kostek uranu a oxidu uranu. Na stavbu bylo použito 30 tun grafitu (sloužil jako moderátor) a 2,5 tuny uranu. Intenzita reakce byla řízena zasouváním nebo vysouváním kadmiových tyčí. Spuštění reaktoru bylo přítomno velké množství přihlížejících. Zatímco Fermi kontroloval aktivitu v reaktoru, George Weil vytahoval z reaktoru kadmiové tyče, až došlo historicky poprvé dne 2. prosince 1942 v 15:22 místního času k řízené štěpné reakci, viz obrázek 18 na následující straně. V tomto okamžiku se zrodil atomový věk a lidé začali využívat energii skrytou v jádrech atomů.

Kromě tyčí určených k řízení intenzity reakce byl reaktor chráněn další sadou kadmiových tyčí, které by v případě nebezpečí pohltily neutrony a zastavily štěpnou reakci. Byly zavěšeny na provaze a stál u nich muž se sekerou, který by na Fermiho pokyn v případě nebezpečí provaz přesekl. Z dnešního pohledu šlo o poněkud svérázné řešení bezpečnosti jaderného reaktoru. První jaderný reaktor světa dostal název CP-1 (zkratka z *Chicago Pile 1*).

Neřízeným způsobem byla štěpná reakce využita v atomové bombě na konci druhé světové války. Američané bombu připravovali v rámci projektu *Manhattan* v Los Alamos pod vedením Roberta Oppenheimera (1904–1967). Projektu se zúčastnili i vědci, kteří

34 **Těžká voda** – voda, v jejíž molekule je namísto lehkého vodíku těžký vodík, který má v jádře jeden proton a jeden neutron.



Obr. 18. Spuštění prvního jaderného reaktoru pod sportovním stadionem Chicagské univerzity v roce 1942.

postavili chicagský reaktor CP-1. V atomové bombě jsou dvě od sebe oddělená podkritická množství štěpného materiálu (zpravidla plutonia), která se těsně před explozí k sobě přiblíží za pomoci klasické trhaviny. Poté dojde k neřízené řetězové štěpné reakci a explozi. Bomba může obsahovat i přídavný zdroj neutronů, odražeče neutronů atd. První atomové bomby byly svrženy na japonská města Hirošima a Nagasaki v závěru druhé světové války.

První jaderná elektrárna pro mírové účely byla uvedena do provozu v roce 1954 v Sovětském svazu, 110 kilometrů jihozápadně od Moskvy, ve vědeckém městečku Obninsk. Tepelný výkon elektrárny byl 30 MW, elektrický výkon 5 MW. Elektrárna fungovala až do roku 2002. V roce 1956 byla v anglickém Calderu zprovozněna jaderná elektrárna s elektrickým výkonem 50 MW (později 200 MW) a jaderné elektrárny začaly na celém světě růst jako houby po dešti. Dnes jsou zdrojem 13 % elektrické energie světa. Přestože je provoz jaderných elektráren relativně bezpečný,

dochází občas ke katastrofám, z nichž zatím největší byly katastrofy v ukrajinském Černobylu (1986) a v japonské Fukušimě (2011). Velkým problémem jaderných elektráren je uskladňování vyhořelých palivových článků, o které je třeba se starat stovky let po ukončení provozu elektrárny. Množství paliva pro jaderné elektrárny dostupné na Zemi je navíc velmi omezené. Proto se lidstvo pokouší již dlouhá léta o získání energie slučováním lehkých jader.

Slučování

V nitru Slunce i ostatních hvězd probíhá slučování (jinými slovy syntéza, fúze) lehkých prvků přirozeným způsobem. Jde o dlouhodobý a velmi pomalý proces probíhající v ohromném objemu jádra hvězdy. Zvládnutí obdobných reakcí v pozemských podmínkách znamená zcela odlišnou situaci. Energii je třeba získat rychle a z malého objemu plazmatu, které podléhá řadě nestabilit.

Explozivně se podařilo termojadernou fúzi zvládnout ve vodíkové bombě, kterou vyvinuli Edward Teller (1908–2003) a Stanislaw Ulam (1909–1984) v roce 1951. Termojaderné palivo (zpravidla různé izotopy vodíku) je zažehnuto primární atomovou (štěpnou) bombou. Záření z primární bomby stlačí a zahřeje sekundární část s fúzním palivem, ve které proběhne termojaderná exploze. Vodíková bomba byla poprvé otestována Spojenými státy v roce 1952. Sovětský svaz provedl první test vodíkové bomby v roce 1955. Dnes existuje celá řada modifikací tohoto nehumánního zařízení, kterými se ale v této knížce nebudeme zabývat.

Vraťme se k našemu Slunci. V jeho nitru je základním palivem vodík. Účinný průřez[35] srážky dvou jader vodíku je dán slabou interakcí a spojení dvou jader může trvat statisíce let. Tak dlouho není

35 **Účinný průřez** – vhodný způsob vyjádření pravděpodobnosti, že ostřelující částice bude určitým způsobem interagovat s částicí cílovou. Každou cílovou částici nahradíme malou plochou, která vyjadřuje pravděpodobnost interakce. Všechny částice směřující na tuto plochu interagují. Pravděpodobnost interakce tedy roste s velikostí účinného průřezu. Účinný průřez reakce p+p je o 25 řádů menší než reakce D+T.

samozřejmě možné v laboratorním fúzním zařízení čekat, a tak je potřeba první část protono-protonového řetězce (viz obrázek 15), který je hlavním zdrojem energie ve Slunci, přeskočit. Základním palivem v pozemských zařízeních je proto deuterium, jehož slučování může dokonce proběhnout dvěma způsoby. V následující tabulce jsou uvedeny alespoň nejzákladnější reakce vhodné pro získávání energie na Zemi a jejich porovnání s jinými zdroji energie:

reakce	energetický výtěžek (kWh/g)	typ reakce
$D + D \rightarrow {}^{3}He + n$	27 000	slučování
$D + D \rightarrow T + p$	22 000	slučování
$D + T \rightarrow {}^{4}He + n$	98 000	slučování
$D + {}^{3}He \rightarrow {}^{4}He + p$	94 000	slučování
štěpení ^{235}U	24 000	štěpení
$H_2 + O \rightarrow H_2O$	0,0044	hoření vodíku

Bezkonkurenčně nejúčinnější je reakce deuteria s tritiem. Při této reakci vzniká také neutron, který lze využít k dalšímu tvoření tritia. Pokud obalem reaktoru protéká lithium, mohou vyletující neutrony interagovat s jádry lithia, čímž vznikne tritium potřebné pro další pokračování reakce. Při reakci deuteria s tritiem lze získat více než čtyřnásobné množství energie oproti štěpné reakci. Většina konstrukcí fúzních reaktorů se proto zaměřuje na toto palivo. Při fúzi se spotřebovává deuterium a lithium, vzniká energie a jako odpad neškodné hélium.

Na první pohled jde o dokonalý reaktor, jehož palivo (deuterium) ani odpad (hélium) nejsou nebezpečné. V obalu reaktoru samozřejmě vzniká řada radioaktivních prvků, ale vhodnou volbou materiálu lze dosáhnout vzniku jen radioaktivních produktů s krátkým poločasem rozpadu, což je pro případnou havárii velmi příznivé. Poločas rozpadu tritia je přibližně 12 let. Navíc se ve fúz-

ních reaktorech počítá s velmi malým množstvím paliva a havárie fúzního reaktoru by vždy byla (na rozdíl od štěpných reaktorů) jen úzce lokální záležitostí (maximálně stovky metrů), která neohrozí vzdálenější okolí.

V oceánech v průměru připadá na 6 400 atomů normálního vodíku jeden atom deuteria, hmotnostně jde o 0,0312 %, objemově o 0,015 %. Pouhý litr vody obsahuje 1/3 gramu deuteria, které energeticky odpovídá 300 litrům benzínu! Vzhledem k objemu oceánu je deuterium v podstatě nevyčerpatelným zdrojem energie.

V DT reakci odnášejí 80 % vzniklé energie neutrony a 20 % alfa částice (jádra helia). Neutrony předávají svou energii obalu reaktoru, kde vytvářejí další tritium. Jejich energie se přeměňuje v teplo, které bude v budoucnosti konvertováno na elektřinu. Nabité alfa částice je možné udržet v oblasti fúze a využít jejich energie k dalšímu ohřevu plazmatu. Za určitých podmínek je reakce schopná se sama udržet, což znamená, že vzniká více energie, než bylo do reaktoru dodáno. Podmínku pro udržení termojaderné reakce odvodil britský inženýr a fyzik John David Lawson (1923–2008). Ukázal, že v oblasti teplot 10 až 20 keV (100 až 200 milionů kelvinů) musí pro deuterium-tritiový reaktor platit jednoduchý vztah (tzv. *trojný součin*)

$$n \cdot T \cdot \tau > 3 \times 10^{21}\ \mathrm{m^{-3}} \cdot \mathrm{keV} \cdot \mathrm{s}.$$

Součin koncentrace plazmatu, teploty a doby udržení musí být větší než určitá hodnota. Tato hodnota závisí na typu reakce a napravo uvedené číslo je pro DT fúzi. Koncentrace musí být vyjádřena jako počet částic v jednom metru krychlovém, teplota v kiloelektronvoltech (1 keV je přibližně 10 milionů kelvinů) a doba udržení v sekundách. Vztah lze také zapsat za pomoci tlaku:

$$p \cdot \tau > 5\ \mathrm{bar} \cdot \mathrm{s}.$$

Ve vztahu je tlak vyjádřen v barech (1 bar je přibližně atmosférický tlak) a doba udržení v sekundách. Je zřejmé, že pro nízký tlak

plazmatu je třeba dosáhnout dlouhé doby udržení a naopak, má-li plazma vysoký tlak, postačí kratší doba udržení. Je-li Lawsonovo kritérium splněno, mělo by dojít k zažehnutí reakce, která se již bude udržovat sama.

Za důkaz toho, že fúzní reakce v daném systému skutečně proběhla, se považuje detekce fúzních neutronů. První fúzní neutrony na světě byly detekovány na zařízení *Scylla*[36] v roce 1958 v americkém Los Alamos. Šlo o lineární sloupec deuteriového plazmatu, kolem něhož v azimutálním vodiči tekl prudce narůstající elektrický proud, který vytvořil osové magnetické pole udržující po alespoň krátkou dobu plazma na svém místě.

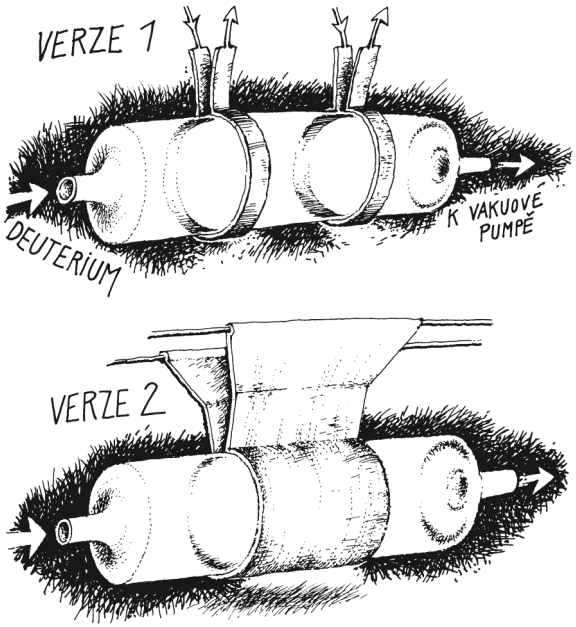
Pinče

V průběhu mnoha pokusů o zvládnutí fúzní reakce se objevilo velké množství zařízení k jejímu uskutečnění. První zařízení, na kterém se vědci pokoušeli uskutečnit fúzní reakci, byl pinč. Jde o lineární sloupec plazmatu, který je stlačován k ose magnetickým polem. Pokud elektrický proud protéká přímo plazmatem v ose sloupce, vytváří se azimutální magnetické pole a hovoříme o tzv. *z-pinči*. Pokud proud teče elektrodou na obvodu sloupce (například v prvním fúzním zařízení Scylla), hovoříme o tzv. *theta pinči*. Označení „*z*“ nebo „*theta*“ vyjadřuje směr toku proudu ve válcové souřadnicové soustavě. Slovo pinč pochází z angličtiny (*pinch*) a znamená stisknout.

Obě dvě základní konfigurace jsou velmi nestabilní a zúžení nebo vybočení sloupce plazmatu se prohlubuje a vede k rozpadu plazmového sloupce. Lepší stabilitu má tzv. *helikální pinč*, v němž mají proud a pole osovou i azimutální složku a vytvářejí šroubovice.

Éra prvních fúzních pokusů byla silně poznamenána studenou válkou mezi západními a východními mocnostmi a většina experi-

36 **Scylla** – fúzní reaktor v Los Alamos pojmenovaný podle mořské obludy se šesti hlavami a dvanácti nohama, jež je známá z řeckých bájí.



Obr. 19. Schéma zařízení Scylla. První verze měla dva závity, druhá jen jeden.

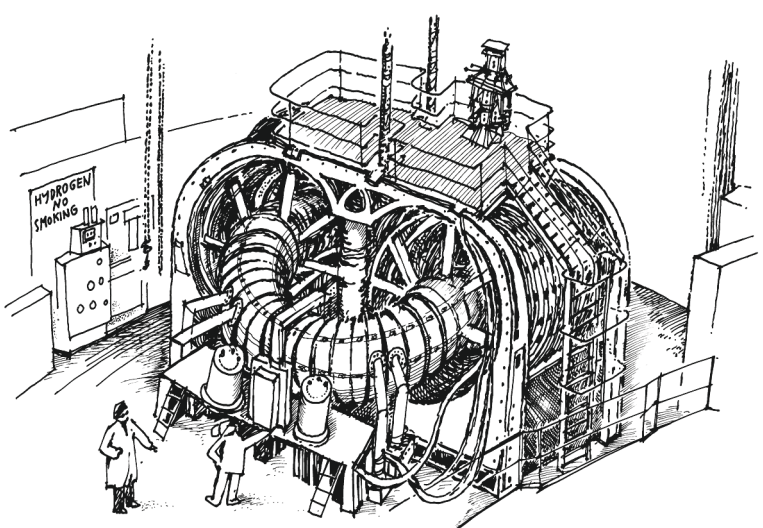
mentů byla udržována v tajnosti. Určité uvolnění přinesla návštěva představitelů Sovětského svazu v čele s Nikitou Chruščovem ve Velké Británii v roce 1956. V delegaci byl vynikající ruský fyzik Igor Kurčatov a delegace navštívila *Ústav pro výzkum atomové energie AERE* v Harwellu, jehož ředitelem byl John Cockcroft. Následné uvolnění ale nebylo příliš výrazné.

Velkou nevýhodou lineárního uspořádání jsou volné konce, kterými plazma uniká. Jedním z řešení jsou magnetická zrcadla, jiným je stočení proudového vlákna do toroidální konfigurace. První toroidální pinč byl postaven na konci 40. let 20. století ve Velké Británii. Proud tekoucí plazmatem generoval poloidální pole (pole ve směru kolem vlákna, u lineárního pinče hovoříme o azimutálním poli), které plazma odtlačovalo od stěn. Tato konfigurace byla ale velmi nestabilní, a proto konstruktéři přidali na obvod komory

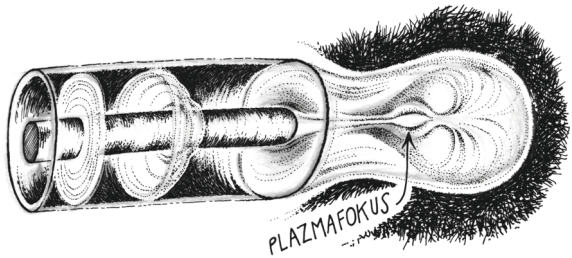
cívky, které generovaly toroidální (osové) pole, čímž vzniknul stabilnější helikální pinč stočený do toroidu. Nejznámějším strojem tohoto typu se stalo zařízení ZETA (zkratka z anglického *Zero-Energy Toroidal Assembly*) uvedené do provozu v Harwellu ve Velké Británii v roce 1957. Při každém experimentu byly sice pozorovány neutrony, později se ale ukázalo, že nepocházely z fúze, ale byly produkovány při nestabilitách probíhajících v plazmatu.

Dalším pinči příbuzným zařízením je plazmafokus tvořený dvěma válcovými elektrodami. Plazma mezi nimi je vytlačováno vlastním polem ke konci elektrod, kde vytvoří typickou deštníkovitou strukturu s hustým lineárním útvarem uvnitř. Právě ten se nazývá plazmafokus (v doslovném překladu plazmové ohnisko). V naší blízkosti je největší zařízení tohoto typu ve Varšavě, v *Ústavu fyziky plazmatu a laserové mikrofúze*. Nazývá se PF-1000, jeho výbojová komora má objem 3,8 m^3 a plazmatem zde teče proud přes 1 MA.

Největším dnešním pinčovým zařízením na světě je *Z-machine* v *Sandia National Laboratories* ve Spojených státech. Na soustavu rovnoběžných wolframových drátků je přivedeno vysoké napětí.



Obr. 20. Toroidální *z*-pinč ZETA patřil k prvním experimentům s fúzní reakcí.



Obr. 21. Plazmafokus.

Drátky explodují, stanou se plazmatem, kterým protéká proud necelých 20 megaampérů po dobu kratší než 100 nanosekund. *Z-machine* je nejintenzivnějším rentgenovým zdrojem na světě. Pokusy s pinči se konají i v Evropě, například na zařízení S-300 v Kurčatovově institutu v Moskvě. Pro výzkum fúze jsou pinče velmi oblíbené, neboť jde o jednoduchou, relativně snadno vyrobitelnou konfiguraci. Pro stavbu termojaderné elektrárny se toto zařízení sice příliš nehodí, ale možná by v budoucnosti mohlo být zdrojem neutronů pro vlastní reaktor.

Stelarátor a tokamak

Toroidální pinč ukázal cestu do budoucnosti. Na toroidální geometrii jsou založeny i dva další typy zařízení – stelarátory a tokamaky. Obě zařízení jsou jistým odrazem studené války tehdejších mocností. Stelarátor byl vyvinut ve Spojených státech a tokamak v Sovětském svazu.

První *stelarátor* vybudoval Lyman Spitzer[37] v Princetonu na počátku 50. let 20. století. Jeho název je zkratkou z anglického *stellar*

37 **Lyman Spitzer (1914–1997)** – americký astrofyzik a spoluzakladatel teoretické fyziky plazmatu. Zkonstruoval první stelarátor. Intenzivně se zabýval mezihvězdným prostředím, plyny, prachem a magnetickými poli. Jako první navrhl v roce 1946, ještě dávno před založením NASA, umístit dalekohled na oběžné dráze. Jeho nesmírné úsilí vedlo NASA k umístění Hubblova vesmírného dalekohledu na oběžnou dráhu. Na jeho počest jsou pojmenovány vztah pro vodivost plazmatu a Spitzerův vesmírný dalekohled pro infračervený obor.

generator, tedy generátor hvězd. Název měl připomínat, že se tyto experimenty pokoušejí uskutečnit na Zemi reakce probíhající ve hvězdách. Ve stelarátoru je toroidální magnetické pole generováno cívkami. Na rozdíl od toroidálního pinče, kde pole kolem plazmového vlákna generuje proud tekoucí plazmatem, je ve stelarátoru toto pole generováno opět cívkami. Buď další sadou, nebo může jít o cívku jedinou, ale s šikmým vinutím. Úspěchy sovětských tokamaků v 70. letech 20. století odsunuly stelarátory do pozadí. Dnes je jich na světě velmi málo, nicméně dosažené parametry fúzního plazmatu jsou srovnatelné s tokamaky. K největším současným stelarátorům patří LHD (z anglického *Large Helical Device*), který funguje od roku 1998 v Japonsku. Ve stavbě je obří stelarátor W7-X v německém Wendelsteinu, který by měl být uveden do provozu v roce 2014. Jeho parametry budou vskutku úctyhodné: plazmový prstenec bude mít průměr 11 metrů a tloušťku zhruba metr. Plazma ve stelarátoru bude mít objem 30 m^3, teplotu až 100 milionů kelvinů a koncentraci 3×10^{20} částic v metru krychlovém. Magnetické pole na udržení plazmatu dosáhne hodnoty 3 tesla. Výboj by měl probíhat kontinuálně po dobu 30 minut s mikrovlnným ohřevem. Časová konstanta pro charakteristický úbytek energie se očekává 0,15 s. Komora s plazmatem bude mít futuristický tvar (viz obrázek 8 v barevné příloze).

Souběžně se stelarátory byly na druhé straně tenkrát rozděleného světa vyvíjeny tokamaky. Na jejich konstrukci se v Sovětském svazu úspěšně podíleli Lev Arcimovič (1909–1973), Igor Tamm (1895–1971) a Andrej Sacharov (1921–1989) v Kurčatovově institutu v Sovětském svazu. Název zařízení tokamak je odvozen z ruského *TOroidalnaja KAmera s MAgnitnimi Katuškami* (toroidální nádoba s magnetickými cívkami). Na rozdíl od stelarátoru tvoří v tokamaku plazmový prstenec jediný sekundární závit obřího transformátoru a poloidální pole kolem prstence generuje proud tekoucí plazmatem, nikoli cívky. V roce 1968 Sověti oznámili, že na tokamaku T-3 dosáhli teplotu 10 milionů kelvinů s dobou udržení setinu sekundy. O takovém úspěchu se zatím nikomu ani nesnilo. Výsledkem bylo, že v 70. letech se většina fúzních zaříze-

ní přestavovala na tokamaky. Dokonce v Princetonu byl ukončen vývoj velmi slibného C-stelarátoru a celé zařízení bylo přestavěno na tokamak.

Plazma v současných tokamacích je dodatečně ohříváno buď elektromagnetickými vlnami nebo svazky částic. Důležitou součástí dnešních tokamaků je *divertor*. Jde o část plazmatické komory, kde plazma nejvíce interaguje se stěnami nádoby. V tomto místě je výhodné odvádět z reaktoru nečistoty a nadbytečné teplo a umístit sondy pro sledování parametrů plazmatu. Poloha divertoru je dána tvarem magnetického pole v blízkosti povrchu plazmatu a pro různé tokamaky se liší.

tokamak	Tore Supra	TFTR	JET	ITER
poloměr prstence (m)	2,4	2,7	3	6,2
poloměr plazmatu (m)	0,7	0,9	1,25	2,0
objem plazmatu (m^3)	25	50	155	837
proud v plazmatu (MA)	1,7	3	5÷7	15
magnetické pole (T)	4,5	6	3,4	5,3
doba výboje (s)	~ 380	~1	10	> 300
nukleární výkon (MW)	~ 0,001	10	16	500

K největším tokamakům patří Tore Supra, TFTR a JET. Připravuje se také stavba obřího tokamaku ITER. Pojďme se s těmito čtyřmi stěžejními přístroji seznámit.

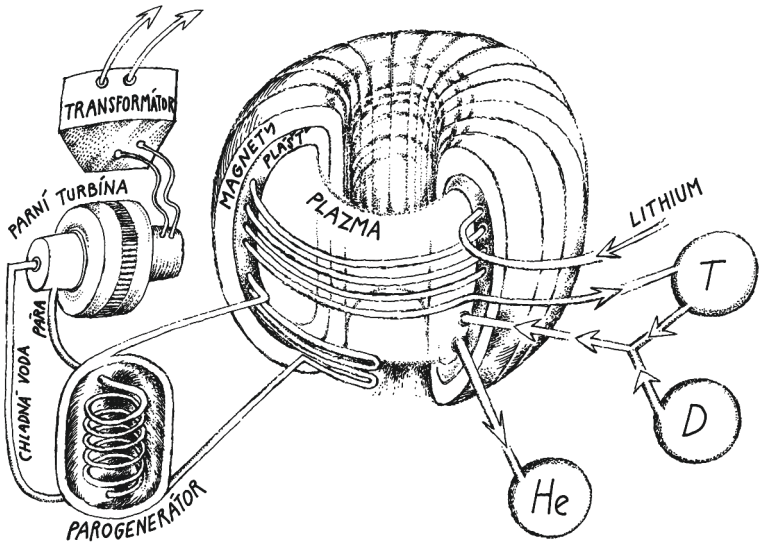
■ **Tore Supra.** Tokamak je umístěn ve Francii v blízkosti hradu Cadarache. Jeho název připomíná, že toroidální pole je generováno supravodivým magnetem, což je u tokamaků spíše výjimkou. Stavba byla započata v roce 1982 a první plazma bylo v tokamaku vytvořeno v roce 1988. V roce 1996 zde dosáhli rekordního udržení plazmatu 2 minuty a v roce 2003 dokonce 6 minut a 21 sekund.

Tore Supra má poloměr plazmového prstence 2,4 m. Ve stejném místě se plánuje stavba dosud největšího tokamaku ITER.

■ **TFTR (Tokamak Fusion Test Reactor).** Jde o americký tokamak, který byl v provozu v Princetonu od roku 1982 do roku 1997. Prstenec plazmatu měl poloměr 2,7 metru. Tokamak je držitelem celé řady rekordů. Byla v něm dosažena nejvyšší teplota 510 milionů kelvinů. TFTR byl prvním tokamakem, který v roce 1993 použil jako paliva směs deuteria a tritia (v poměru 89:11). S tím souvisel i následující rekord – v roce 1994 bylo dosaženo fúzního výkonu 10,7 MW a poprvé tak byla překročena hranice 10 MW, což je výkon, který by postačil pro zásobování 3 000 domácností. V tokamaku se prováděl podrobný výzkum chování alfa částic (jader helia), které vznikají při DT reakci.

■ **JET (Joint European Torus).** Tokamak JET je v současnosti největším tokamakem na světě, nachází se v blízkosti anglického Culhamu. Stavba byla započata v roce 1978 a byla dokončena v roce 1983. První řízená termojaderná syntéza ve „větším množství" byla uskutečněna v roce 1991 (1 MW), v roce 1997 byl dokonce dosažen fúzní výkon 16,1 MW. Doba udržení při tomto experimentu byla tři sekundy a získaný fúzní výkon činil již 65 % dodaného tepelného výkonu. V roce 2004 proběhla rekonstrukce, která umožnila zahájit experimenty, na něž naváže projektovaný tokamak ITER. V současnosti provozuje JET společnost UKAEA (*United Kingdom Atomic Energy Authority*). Tokamak má poloměr plazmového prstence 3 m a poloměr plazmatu 1,25 m.

■ **ITER (International Thermonuclear Experimental Reactor).** Projekt tokamaku, který by měl být posledním předstupněm před komerčním využitím fúze. Slovo *iter* znamená latinsky cestu, jde o symbolickou cestu lidstva ke zvládnutí termojaderné fúze. Po dlouhých letech dohadování o tom, kde by měl mezinárodní tokamak být postaven, bylo v roce 2005 rozhodnuto ve prospěch francouzského Cadarache. V Evropě tak bude nejen největší urychlovač světa LHC (Large Hadron Collider), ale i největší tokamak s poloměrem plazmového prstence 6,2 metru. Energie



Obr. 22. Princip fúzní elektrárny, jejímž srdcem je tokamak.

dodaná fúzní reakcí by měla desetinásobně překročit teplo dodané do plazmatu. Odhadovaný fúzní výkon je 500 MW. Výstavba bude stát 5 miliard eur, tokamak by měl být zprovozněn po roce 2020 a jeho životnost by měla být 20 roků. Sen o zapálení Slunce na Zemi se přiblížil tak, jako nikdy předtím.

Inerciální fúze

U tokamaků a jim příbuzných zařízení bude Lawsonovo kritérium splněno díky extrémně vysoké teplotě v reaktoru a relativně dlouhé době udržení (v případě stacionárního režimu jde o časovou konstantu výměny energie mezi reaktorem a okolím). Samotná koncentrace paliva bývá malá, kolem 10^{20} částic v metru krychlovém. Pro ITER to například znamená celkovou hmotnost paliva nižší než jeden gram. To je samozřejmě vynikající zpráva pro bezpečnost elektrárny. I kdyby došlo k explozi a rozmetání veškerého paliva, je ho natolik zanedbatelné množství, že by okolí reaktoru nebylo nijak významněji ohroženo.

U inerciální fúze je situace v jistém smyslu přesně opačná. Počítá se s krátkou dobou udržení, ale s extrémně vysokou koncentrací paliva. Plazma nebude držet magnetické pole, jako je tomu u tokamaku, ale pouhá setrvačnost. Na kapsli paliva v pevném stavu (říká se jí *peleta*) se posvítí intenzivními lasery, nejlépe mnoha lasery z mnoha stran. V hustém a horkém plazmatu, které vznikne, stačí proběhnout účinná fúze dříve, než se rozletí do stran. Svou setrvačností zůstane vzniklé plazma po malou chvíli na místě původní kapsle, a to postačí.

Laserem řízenou inerciální fúzi lze rozdělit do čtyř fází:

Obr. 23. Základní fáze procesu fúze

■ **Ohřev kapsle.** Na palivovou kapsli o velikosti hrášku (povrch je z plastiku, vnitřek tvoří zmražená směs deuteria a tritia) svítí z různých stran lasery a zahřejí její povrch. Ohřev kapsle lze také uskutečnit rentgenovým zářením nebo svazky iontů.

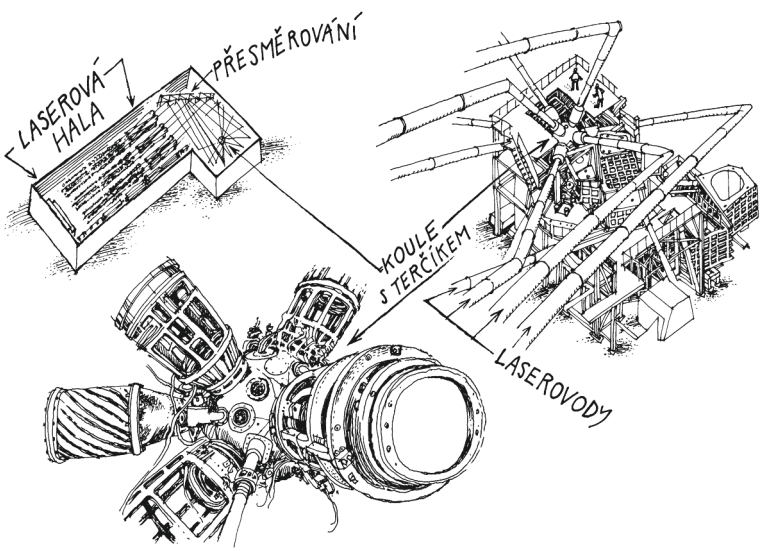
■ **Komprese paliva.** Z povrchu horkého materiálu unikají výtrysky látky, které jako malé raketové motorky stlačují kapsli do centra, kde rychle roste hustota a teplota paliva.

■ **Zážeh paliva.** Palivo zamražené v kapsli má koncentraci přibližně 5×10^{28} částic/m^3. Pokud je stlačeno desetitisíckrát (v centru kapsle bude dvacetinásobek hustoty olova) a teplota dosáhne kolem 100 milionů stupňů, dojde k zážehu fúzní reakce.

■ **Termojaderné hoření.** Fúzní reakce se rychle rozšíří do celého objemu paliva a uvolní energii, která je mnohonásobkem dodané energie. Energie uvolněná v jednom cyklu při DT reakci odpovídá 15 kilogramům spáleného uhlí.

V současných systémech se někdy využívá tzv. metoda rychlého zážehu (anglicky *fast ignition*), při které je ohřev kapsle zajištěn jednou soustavou laserů a při kompresní fázi na kapsli působí další soustava laserů s ultrakrátkým pulzem. K největším zařízením pro laserem iniciovanou fúzi v současnosti patří systémy Gekko XII a NIF. Ke stavbě se připravuje evropský systém HiPER. Opět se s těmito obřími zařízeními ve stručnosti seznámíme.

■ **Gekko XII.** Jde o japonský systém postavený na Univerzitě v Osace v roce 1983. Název zařízení má připomínat gekona (druh ještěrky s přísavkami na prstech). Na kapsli s palivem míří dvanáct Nd:YAG laserů o délce 10 metrů, jejichž základní vlnová délka 1062 nm je převedena z infračerveného oboru na druhou harmonickou frekvenci, jíž odpovídá vlnová délka 531 nm, která je v optickém oboru (zelené světlo). Fáze ohřevu trvá 1 až 2 nanosekundy a do kapsle proudí celkový výkon 10 až 20 terawattů. V letech 1996 až 1997 došlo k přestavbě zařízení tak, aby využívalo metodu rychlého zážehu. V kompresní fázi na kapsli zasvítí ještě



Obr. 24. Gekko – laserem iniciovaná fúze v japonské Osace. Patrné jsou lasery i centrální komora.

další laser s ultrakrátkým pulzem o výkonu 0,5 petawattu[38]. Fúzní zisk se po této úpravě zvýšil třikrát. V letech 2003–2008 proběhla přestavba s názvem FIREX I (z anglického *Fast Ignition Realization Experiment*), kdy se k zařízení přidal laser pro rychlé zapálení. Pulz dosáhnul výkonu 1 petawatt, jeho délka byla 10 pikosekund a energie 10 kilojoulů. V současnosti (2009–2014) probíhá přestavba FIREX II, vyměňují se lasery (pro kompresi i ohřev) za nové s výkonem 50 kilojoulů.

■ **NIF (National Ignition Facility).** Jde o americký systém pro inerciální fúzi postavený v národní laboratoři LLNL (Lawrence Livermore National Laboratory). Stavba započala v roce 1997 a po mnoha průtazích byla dokončena v roce 2009. V současnosti jde o největší laserový systém pro inerciální fúzi na světě. Fotografie ze stavby naleznete na obrázku 9 v barevné příloze, kde je dobře patrná kulová komora futuristického vzezření. NIF pro zapálení fúze využívá ultrafialový pulz o výkonu 500 TW, který v několika pikosekundách osvítí reakční oblast ze 192 směrů současně. Zdrojem pulzů jsou neodymové lasery o základní vlnové délce 1053 nm (infračervený obor), která je převedena na třetí harmonickou frekvenci, jíž odpovídá vlnová délka 351 nm v ultrafialovém oboru. Celková energie laserů je 4 MJ, po konverzi do UV činí 1,8 MJ. Tato energie zahřeje malý kovový váleček, který zhruba polovinu této energie přemění na rentgenové záření a asi 20 % tohoto záření je absorbováno vlastní kapslí s palivem. NIF tedy využívá nepřímý ohřev. Předpokládá se, že po dalších úpravách a optimalizacích by mělo být toto zařízení snad schopno dosáhnout kladného výtěžku reakce, tj. získat více energie, než bylo do systému dodáno.

■ **HiPER (High Power laser Energy Research).** Jde o plánovaný evropský laserový systém pro inerciální fúzi, jehož stavba by měla započít někdy po roce 2013. Na rozdíl od amerického NIF by se měla využít metoda rychlého zažehnutí fúze s dvěma soustavami laserů. Primární lasery způsobí ohřev kapsle a sekundární lasery

38 **Násobky wattů –** kilowatt (10^3 W), megawatt (10^6 W), gigawatt (10^9 W), terawatt (10^{12} W), petawatt (10^{15} W).

s ultrakrátkými pulzy provedou kompresi a další ohřev paliva. Zařízení by (včetně laserů) mělo být veliké jako fotbalový stadion. Předskokanem tohoto zařízení bude laser PETAL stavěný ve Francii, který vygeneruje laserový pulz s výkonem několika petawattů a dobou trvání od 0,5 do 5 pikosekund. Na tomto zařízení se ověří základní fyzikální principy pro stavbu zařízení HiPER, které bude postaveno ve Velké Británii. Na vývoji laserového systému HiPER se podílí i Česká republika.

České aktivity

Česká republika má k fúznímu výzkumu velmi blízko, a to jak v oblasti tokamaků, tak laserové fúze. V České republice je provozován menší tokamak Compass D, který je umístěn v Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd České republiky. Compass D byl do Prahy přestěhován v roce 2006 z anglického Culhamu, kde ho nahradil větší tokamak MAST. Poloměr plazmového prstence je 0,56 metru a poloměr plazmatu 0,3 metru. Co do lineárních rozměrů je Compass D desetkrát menší než ITER, plazmová komora má ale u obou zařízení stejný tvar písmene D, což znamená, že některé fyzikálně zajímavé jevy budou u obou zařízení probíhat shodně. Magnetické pole v tokamaku Compass D může dosáhnout až hodnoty 2,1 tesly.

Compass D není prvním českým tokamakem. Je následovníkem malého tokamaku CASTOR (*Czech Academy of Sciences TORus*), který byl postaven v Kurčatovově institutu v SSSR v roce 1958. Od roku 1977 byl umístěn v Praze a sloužil pro vědecké a výukové cíle Ústavu fyziky plazmatu Akademie věd tehdejší Československé socialistické republiky. V roce 1983 prošel rekonstrukcí a získal novou komoru. Jeho provoz byl ukončen v roce 2006. Poloměr tokamaku CASTOR byl 40 cm, maximální pole 1,5 T. Po demontáži byl převezen na Fakultu jadernou a fyzikálně inženýrskou ČVUT v Praze, kde byl v roce 2009 opětovně zprovozněn pro výukové účely pod novým názvem Golem.

V České republice je na vysoké úrovní i výzkum interakce laserového záření s hmotou (tzv. laserového plazmatu). V Praze se nachází jeden z největších laserů v Evropě PALS (*Prague Asterix Laser System*). Akademie věd České republiky získala laserový systém Asterix IV za jednu německou marku na základě mezinárodní smlouvy s německým *Ústavem Maxe Plancka pro kvantovou optiku*. Pro laser byla v Praze na Mazance vybudována zcela nová moderní laserová hala. Její stavba byla zahájena v lednu 1998 a dokončena v únoru 1999. Modernizovaný laserový systém s názvem PALS byl v nové laboratoři spuštěn v květnu roku 2000.

PALS využívá jódový laser, který pracuje na základní vlnové délce 1 315 nm (v infračerveném oboru) a v jednom pulzu je schopen dodat energii až 1 kJ. Základní frekvence laseru může být transformována na druhou a třetí harmonickou frekvenci, tomu odpovídají vlnové délky 658 nm (červená) nebo 438 nm (modrá). Laser je schopen vystřelit jeden pulz o délce asi 350 ps a výkonu 3 TW cca jednou za půl hodiny. Vědecký výzkum je zaměřen zejména na poznávání extrémních stavů hmoty.

To ale ještě není vše. V České republice, konkrétně v obci Dolní Břežany ve Středočeském kraji, bude již za několik let stát unikátní laserové centrum *ELI Beamlines* (zkratka z *Extreme Light Infrastructure*). Za pomoci špičkových laserů zde budou generovány nejintenzivnější pulzy světla, jaké kdy byly v laboratoři vytvořeny. Výzkumný program bude opravdu bohatý a počítá se zde i s českým příspěvkem k fyzice laserové termojaderné fúze.

A kdy je tedy reálné zvládnutí termojaderné fúze pro komerční účely? Těžko říci, zdá se, že jsme cíli tak blízko, jako nikdy předtím. ITER na poli tokamaků a HiPER na poli laserové fúze by měly být posledními články před komerčním využitím fúzní reakce. Lidstvu tak zbývá do zvládnutí fúze pro mírové účely velmi málo, snad již opravdu jen posledních dvacet roků...

Víte, že

■ Víte, že první neutrina byla objevena v jaderném reaktoru elektrárny v Savannah River v roce 1956? Bylo tím završeno 25 let hledání částice, jejíž existence byla předpovězena na základě energetické bilance beta rozpadu.

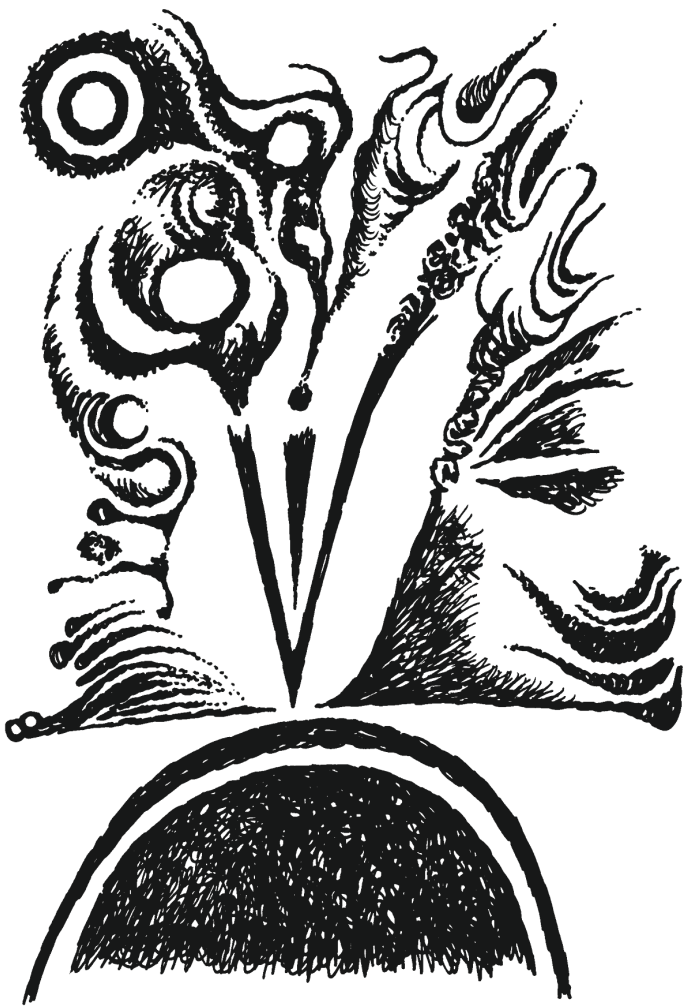
■ Víte, že při explozi supernovy probíhá i energeticky nevýhodná fúze na prvky s jádry těžšími než železo? Nebýt explozí supernov, ve vesmíru by se prvky těžší než železo nenacházely a jaderná energetika by neexistovala.

■ Víte, že se v roce 1989 objevila zpráva o zvládnutí fúze za studena za pomoci elektrolýzy těžké vody? Článek, který vzbudil obrovský ohlas, publikovali Martin Fleischmann a Stanley Pons. Ukázalo se však, že publikované výsledky byly nekorektní a za daných podmínek k fúzi nedochází.

■ Víte, že lze fúzi za studena skutečně provést za pomoci interakce deuteria a atomu tritia, který má v obalu těžký elektron (takzvaný mion)? Reakci nelze ale komerčně využít, neboť k přípravě tritiového atomu s mionem v obalu je třeba větší energie, než se získá z následné fúze.

Poučení na závěr. *To, co zjevně funguje ve hvězdách, nemusí fungovat tak snadno i v našich laboratořích. S velkou houževnatostí lze ale překonat jakékoli překážky.*

6. Plazmové technologie



Údajný vědecký objev nemá význam,
pokud ho nedokážete vysvětlit barmance.
Ernest Rutherford

Je zvláštní, jak málo jsou v povědomí lidí plazmové technologie, přestože za ně platí nemalé peníze. Plazma má pro běžnou populaci nádech něčeho výjimečného až mysteriózního. S plazmovými technologiemi se ale setkáváme na každém kroku. Používáme nože, jejichž ostří bylo zušlechtěno v plazmatické peci, noční město je osvětleno výbojkami, v nichž nám na cestu svítí plazma, mnohé elektronické součástky prošly plazmatickými úpravami, svazkem plazmatu lze vrtat, řezat či svářet, na sobě máme tkaniny s vlákny, jejichž vlastnosti byly vylepšeny plazmatem, do našich domácností se vetřely plazmové obrazovky televizí atd.

První plazmovou technologii vyvinul německý vynálezce Ernst Werner von Siemens (1816–1892) již v roce 1857. Tehdy vynalezl první jednoduchý ozonizátor vzduchu založený na korónovém výboji, aniž by o plazmatu cokoli věděl. Jako novou formu látky objevil plazma až anglický chemik a fyzik sir William Crookes (1832–1919) při svých známých experimentech s výboji v trubicích, které nesou jeho jméno a staly se předchůdci všech dnešních neonových reklam. V roce 1879 nazval Crookes novou formu hmoty *zářící látkou*. Slovo plazma poprvé použil až Irving Langmuir v roce 1928. Opravdový průlom v plazmových technologiích nastal v roce 1953, kdy německý učitel Werner Schmellenmeier připravil první syntetické diamanty v acetylénovém výboji. V 60. a 70. letech probíhaly v Sovětském svazu pokusy s nanášením diamantových vrstev. V roce 1983 se podařilo tuto technologii průmyslově zvládnout v Japonsku. V roce 2000, na přelomu tisíciletí, utratil v průměru každý obyvatel naší planety za nákup plazmových technologií 2 500 Kč za rok, což činí neuvěřitelný světový obrat 500 miliard euro.

Svítíme si s plazmatem

Edisonův vynález žárovky z roku 1879 nepochybně znamenal revoluci v osvětlování vnitřních i vnějších prostranství. Rozžhavené wolframové vlákno vyzařuje spektrum podobné dennímu světlu, a proto prostory osvícené klasickými žárovkami vnímáme jako útulné a příjemné. Neoddiskutovatelnou nevýhodou žárovky je fakt, že většinu elektrické energie přeměňuje na teplo a jen přibližně 5 % na světelnou energii. Na světě se dnes vyrábí 10 miliard žárovek ročně. Pokud by se u všech právě svítících žárovek na světě podařilo zvýšit účinnost konverze elektrické energie na světlo o pouhých 7 %, ušetřila by se energie odpovídající produkci dvaceti jaderných elektráren.

Dnes využíváme jako alternativního zdroje světla nízkotlaké i vysokotlaké výbojky. Obě dvě skupiny jsou založeny na výboji probíhajícím v plazmatu a mohli bychom je s klidným svědomím nazývat plazmové lampy. Věnujme se nejprve nízkotlakým výbojkám, které jsou v domácnostech rozšířenější.

První nízkotlaké výbojky určené k osvětlování domácností se na trhu objevily v roce 1938 a používají se dodnes. Uvnitř trubice se sníženým tlakem probíhá doutnavý výboj v parách rtuti, která emituje elektromagnetické záření v ultrafialovém oboru. Povrch trubice je pokryt fluorescenční[39] látkou, jež převádí ultrafialové záření na viditelné světlo. Výbojky tohoto typu by se správně měly jmenovat *fluorescenční lampy*, v českém jazyce se pro ně ujal trefný název *zářivka*. Zářivky konvertují elektrickou energii na světlo lépe než žárovky, ale mají několik nevýhod. Zejména v prvních fázích vývoje bylo světlo zářivek nepřirozené až nepříjemné. Dnes již jsou vyvinuty fluorescenční látky, které emitují směs vlnových délek alespoň trochu imitujících denní světlo. Zářivky fungující

39 **Fluorescence** – jev, při kterém je v důsledku absorpce světla látkou vyzářeno světlo na jiné, zpravidla delší vlnové délce. Pohlcené fotony excitují elektrony v atomárních obalech a ty poté při přechodu na nižší hladinu vyzáří opět světlo. Při pohlcení dvou fotonů naráz může být vyzářeno i světlo kratší vlnové délky. Jev poprvé pojmenoval v roce 1852 George Gabriel Stokes.

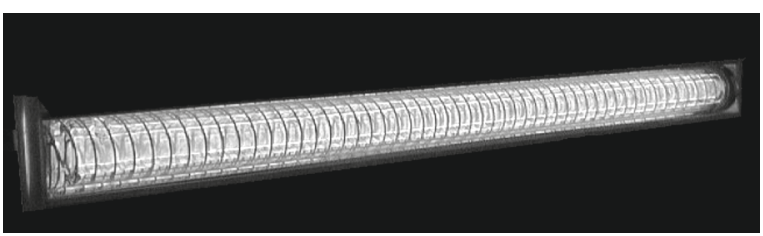
na parách rtuti nejsou příliš ekologické, jejich likvidace je relativně obtížná, nefunkční trubice končí většinou na skládkách, kde se rozbijí a rtuť zatěžuje životní prostředí. V současnosti již existují alternativy nepoužívající rtuť, nicméně rtuťové výbojky se používají nadále ve velkém množství. Po určité době se v klasické zářivce začnou uplatňovat různé oscilace a nestability a světlo poblikává, někdy výboj nenaskočí vůbec. V tu chvíli je třeba dosluhující zářivku vyměnit za jinou.

V 80. letech 20. století se objevily tzv. *kompaktní úsporné zářivky*. Lidé jim nesprávně říkají úsporné žárovky, s původní žárovkou ale nemá toto zařízení nic společného, žádný žár, jak bychom se ze slova „žárovka" mohli domnívat, v nich není. Jde o klasickou výbojovou trubici stočenou do malého prostoru tak, aby kompaktní zářivka velikostí odpovídala normální žárovce. Veškerá pomocná elektronika nutná k iniciaci výboje je její součástí, proto lze kompaktní zářivku našroubovat přímo do objímky určené pro běžnou žárovku. Výboj je buzen střídavým napětím o frekvenci několika desítek kilohertzů. Vhodné světelné spektrum je opět generováno fluorescenční látkou nanesenou na povrch trubice. Současné kompaktní zářivky mají sedmkrát vyšší účinnost konverze elektrické energie na světlo než klasické žárovky.

V posledních letech byla rtuť nahrazena excimery a objevily se tzv. *excimerové lampy*. Podivné slovo *excimer* vzniklo z dvojice anglických slov *excited dimer*. Ultrafialové záření zde vzniká excitací (vybuzením) dimerů – molekul složených ze dvou stejných nebo podobných jednotek. Používají se molekuly argonu Ar_2 (září na vlnové délce 126 nm), kryptonu Kr_2 (146 nm), xenonu Xe_2 (172 nm), dále KrCl (222 nm), XeCl (308 nm) a mnoho dalších variant. Výboj je iniciován elektromagnetickým vlněním rádiové frekvence, takže k jeho zažehnutí nejsou nutné klasické elektrody. Pokud je excimerová lampa určená ke svícení, je vnitřní povrch opět natřen speciálním fluorescenčním nátěrem (luminoforem), který převede ultrafialové záření na viditelné. Excimerové lampy mají životnost až 100 000 hodin (11 let).

Excimerové lampy se často používají i bez luminoforu jako zdroj ultrafialového záření pro medicínské aplikace. Snadno jimi lze sterilovat kontaminované povrchy. Vynikající jsou také při čištění vody. Ultrafialové záření zabíjí choroboplodné zárodky, rozkládá chlorované uhlovodíky a molekuly jedovatého kyanidu (například v odpadních vodách) štěpí na neškodné látky. Jde o jednodušší a kvalitnější čištění vody než za pomoci peroxidu vodíku, ozónu nebo chlóru. Jedinou nevýhodou je, že ultrafialové záření nepronikká příliš do hloubky, a tak lze excimerovou lampou čistit jen malé množství vody. V dermatologii se tyto lampy používají k léčení lupénky, ve stomatologii k bělení zubů nebo vytvrzení fotokompozitů (zubních výplní).

Excimerové lampy mají mnoho dalších aplikací, uveďme na závěr už jen jednu jedinou – vytvrzování tiskařských barev, které znamenalo velký posun v technologii tisku.



Obr. 25. Excimerová lampa bez luminoforu je zdrojem ultrafialového záření.

Druhou skupinou svítidel jsou vysokotlaké výbojky. Na rozdíl od svých nízkotlakých příbuzných fungují buď za atmosférického nebo dokonce za zvýšeného tlaku. Jejich přímým předchůdcem byly obloukové lampy. S obloukovým výbojem mezi dvěma uhlíkovými elektrodami experimentovala na počátku 19. století celá řada vědců. Za jednoho z prvních je považován anglický chemik sir Humpry Davy (1778–1829). Obloukovou lampu použitelnou ke svícení navrhl až v roce 1867 ruský elektroinženýr a vynálezce Pavel Jabločkov (1847–1894). Tato první Jabločkovova svíčka, jak se jí začalo říkat, vydržela svítit necelou hodinu. K jejímu zdokonalení přispěl i český technik a vynálezce František Křižík

(1847–1941). Obloukové lampy v mnoha městech vytlačily dřívější plynové osvětlení.

Dnešní vysokotlaké výbojky pracují za tlaku deseti atmosfér[40] i vyšším. Nejznámější jsou sodíkové výbojky, které se využívají k osvětlení velkých ploch, historických budov, ulic, náměstí a stadionů. Obloukvá lampa s xenonem se prosadila i v automobilovém průmyslu. Oslnivé namodralé světlo je velmi nepříjemné pro ostatní účastníky silničního provozu a jeho použití u automobilů je diskutabilní.

Zářivky, úsporná kompaktní svítidla, excimerové lampy i vysokotlaké výbojky mají jedno společné. Jejich srdcem je plazmatický výboj uvnitř lampy. Až si příště rozsvítíte úspornou zářivku nebo se budete dívat na neonovou reklamu či se jen večer projdete osvíceným nočním městem, vzpomeňte si, že bez plazmatu – čtvrtého skupenství hmoty – by tato svítidla nemohla existovat.

Dokonalé vrstvy

Plazma je vynikajícím médiem k úpravě povrchů různých těles. Drobné předměty lze vsunout do plazmového reaktoru, ve kterém hoří výboj mezi elektrodami. Povrch větších předmětů lze měnit za pomoci různých plazmových hořáků, ze kterých uniká buď úzce směrovaný výtrysk plazmatu, nebo naopak široký kužel plazmatu, který dopadne na velký povrch tělesa. Další možností je tzv. *bariérový výboj*. Jde o dvě (i velmi veliké) plošné elektrody, z nichž alespoň jedna je potažena dielektrikem. Na elektrody je přivedeno vysoké střídavé napětí, jehož frekvence je v oblasti radiovln až mikrovln. Mezi elektrodami vznikne tichý plošný výboj, který bývá zvykem označovat zkratkou DBD (z anglického *Dilelectric Barrier Discharge*, dielektrický bariérový výboj). Výboje DBD se používají k úpravě povrchu velkých předmětů, například různých tkanin, které projíždí mezi elektrodami. DBD výboj má mnoho alternativ,

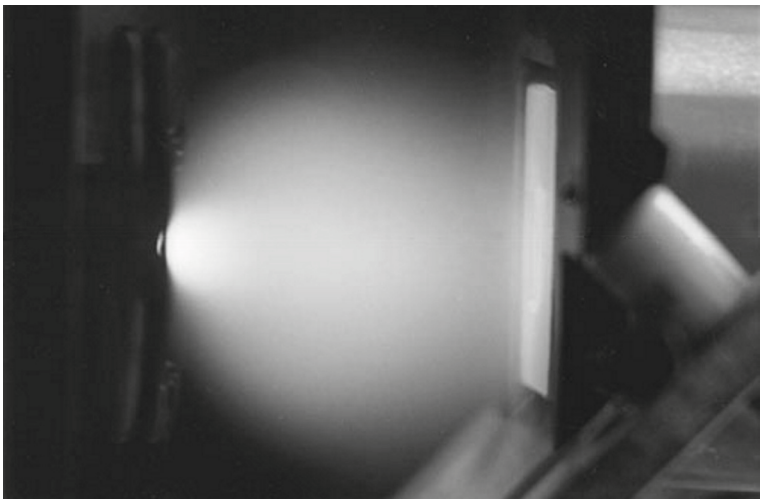
40 **Atmosféra** – jednotka tlaku. Jde o tlak při povrchu země za normálních podmínek, 1 atm = 9,806 65×10^4 Pa.

elektrody mohou být válcové nebo kulové, namísto dielektrika lze využít polovodič atd.

Plazma se zpravidla dělí na vysokoteplotní (např. fúzní) a nízkoteplotní, ve kterém nemusí mít ionty a elektrony stejnou teplotu. Elektrony reagují rychleji na různé podněty (protože mají menší hmotnost) a mohou mít výrazně vyšší teplotu než ionty. V plazmatu využívaném k působení na povrch těles mohou mít elektrony teplotu řádově deset tisíc stupňů Celsia a ionty jen sto stupňů Celsia i méně. Právě horké elektrony mají velkou energii a interagují s povrchy různých těles a mění je. Elektrony mohou narušit chemické vazby, aktivovat molekulární vazby a připravit povrch tak, aby klasický stříkaný nátěr dokonale přilnul. Takto se v mnohých automobilkách lakují nárazníky automobilů. Barva mimořádně drží a stačí jí malé množství. V potravinářském průmyslu se plazmatem upravují obaly výrobků. Efekt je dokonce dvojí. Plazma zničí choroboplodné zárodky a následný potisk na obalu lépe drží.

Plazmatem lze také čistit povrchy kovů. Plazma je zbaví organických nečistot a na povrch kovu pak lépe přilne klasický nátěr. Pokud na těleso namíříme intenzivní plazmový paprsek, můžeme z jeho povrchu odstranit i větší množství materiálu. Tato technika se nazývá plazmové leptání a v současnosti se průmyslově využívá při výrobě počítačových čipů. Aniž byste to tušili, součástky, které máte v počítači, byly připraveny za pomoci plazmové technologie. V budoucnosti nahradí počítačem řízené opracování plazmovým paprskem i klasické broušení optických dílů (čoček a zrcadel). Tato technologie je zatím ve stádiu výzkumu.

Vše, o čem jsme se až doposud zmínili, je jen pasivní opracování povrchu těles. Plazma dokáže ale mnohem více. Energetické elektrony iniciují v plazmatu různé exotické chemické reakce. Plynná náplň, ve které hoří výboj (dusík, kyslík, argon, acetylén ...), se mísí s materiálem elektrod (uhlík, titan, vanad, nikl ...) a v prostoru plazmového reaktoru vznikají různé atypické chemické sloučeniny, které ulpívají na povrchu těles. Řízeným způsobem



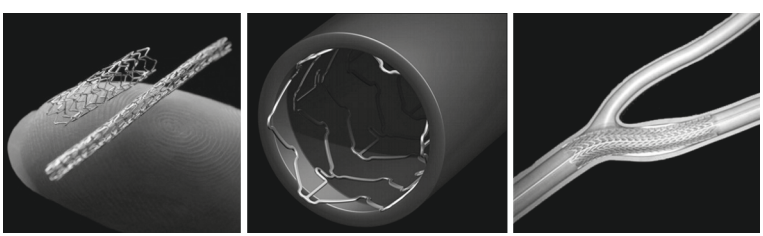
Obr. 26. Nanášení keramické ochranné vrstvy plazmatem.
Naval Research Laboratory.

lze nanášet ultratenké vrstvy mimořádné kvality a mimořádných vlastností. Technologie nanášení vrstev v plazmatu se zpravidla označuje zkratkou PVD (z anglického *Plasma Vapour Deposition*, nanášení plazmových par). Variabilita je obrovská, a tak uvedeme jen několik významných příkladů.

Atmosférický dusík není příliš reaktivní. V plazmatu se ale molekula dusíku štěpí na atomární ionty, které prudce reagují s materiálem elektrod (zejména zahřáté katody bombardované ionty) za vzniku různých nitridů, které jsou mimořádně odolné vůči otěru a jejich tvrdost předčí i diamant. Takové vrstvy se využívají k úpravě povrchu vrtáků, kuličkových ložisek, žiletek, nožů atd. Nitrid titanu je vodivý a velmi vhodný na elektrické kontakty. Stejným způsobem lze ošetřit i povrch mosazných předmětů, například klik. Budou se lesknout mnoho let, povrch bude odolný vůči otěru a navíc může získat zajímavé až fascinující barvy, které nelze docílit žádným klasickým způsobem (například kovově namodralá barva motýlích křídel). Je ale otázkou, nakolik nové vlastnosti vyrovnají ztrátu aseptického efektu původního mosazného povrchu kli-

ky, kvůli kterému byly kliky z mosazi zejména vyráběny. Pokud je v reaktoru přítomen uhlík, vznikají různé karbidy, jejichž tvrdost je také značná. V prostoru reaktoru vykrystalují na povrchu těles i různé diamantu podobné modifikace uhlíku, takže dnes není problémem nanést na předmět diamantový povlak. Takový povlak je nejenom tvrdý, ale má tepelnou vodivost pětkrát vyšší než měď, takže se využívá i k pasivnímu chlazení elektronických součástek.

Za pomoci plazmatu se nanášejí speciální keramické vrstvy na kloubní protézy (ať kyčelní nebo kolenní). Tyto látky mají podobné vlastnosti jako kost, jsou plně biokompatibilní a zajistí dobré držení náhrady kloubu v kosti. Na samotné hlavice kloubních protéz se v plazmatu nanášejí mimořádně tvrdé a otěru odolné vrstvy. Lékaři také používají speciální drátěné válcové trubičky k rozšíření tepen v zúžených místech, říká se jim *stenty*. Tyto stenty se v plazmatu pokryjí tenkou diamantu podobnou vrstvou, která zajistí dokonalou hladkost povrchu (stent nepoškrábe tepnu) a vynikající pružnost (stent tepnu v zúženém místě roztáhne).



Obr. 27. Stenty k rozšíření tepen jsou v plazmatu pokryty diamantu podobnou vrstvou.

Jinou ukázkou vrstev nanášených v plazmatu je úprava povrchu běžných nápojových PET lahví. Každý pivař nad PET lahví oprávněně ohrne nos. *Polyetylentereftalát* (PET) je umělá hmota, kterou relativně snadno prolíná dovnitř atmosférický kyslík a ven z nápoje oxid uhličitý. Pivo má proto jen omezenou dobu trvanlivosti a po určité době ztrácí říz. Pokud je vnitřek lahve za nízkotlakého výboje v acetylénu pokryt 100 nanometrů tlustou vrstvou amorfního uhlíku, sníží se propustnost kyslíku třicetkrát a oxidu uhličitého

sedmkrát. Pivo v takto ošetřené lahvi zůstane v původní kvalitě výrazně déle. Pokud by někomu vadilo mléčné zakalení lahve způsobené vrstvou uhlíku, může zvolit jinou technologii. Vnější povrch lahve lze pokrýt zcela průhlednou vrstvičkou oxidu křemíku, propustnost oxidu uhličitého, který dělá správný říz piva, se sníží čtyřnásobně.

Téměř magií zavání úprava povrchu skel v plazmatu. Na okenní tabule lze v plazmatu nanést ultratenkou vrstvu kovu nebo oxidu kovu. Tato vrstva není vidět, téměř beze ztrát propouští viditelné světlo, ale nepropouští zpět infračervené a tepelné záření delších vlnových délek. Takto upravená okenní tabule sníží tepelné ztráty o 60 %! Světlo prochází zvenku dovnitř, ale teplo zevnitř ven neuniká. Nebo obyčejné brýle. Každému vadí různé odlesky a odrazy. Běžně používané antireflexní vrstvy jsou tvořeny několika tenkými vrstvami, na kterých dochází k tzv. destruktivní interferenci, která částečně vyruší odražený paprsek. Výroba standardní antireflexní vrstvy je složitá a náročná. V plazmatu stačí nanést vhodnou nanovrstvu, jejíž tloušťka je menší než vlnová délka běžného světla. Ta spolehlivě zlikviduje většinu odrazů na rozhraní.V poslední době probíhají experimenty se smáčenlivostí skel. V plazmatu je možné na sklo nanést takové vrstvy, že povrch bude buď téměř dokonale smáčenlivý (vodní kapka se rozpije po povrchu skla do monomolekulární vrstvičky), nebo naopak dokonale nesmáčenlivý (vodní kapka se skutálí z povrchu skla pryč). Kdybychom měli taková skla v automobilech, staly by se stěrače nepotřebným doplňkem.

Nanášení tenkých vrstev v plazmatu prochází bouřlivým rozvojem a je zřejmé, že se s touto technologií budeme setkávat stále častěji.

Úpravy textilu

Textilní průmysl zažívá v posledních letech revoluci způsobenou zaváděním plazmových technologií do výroby. Dříve se vhodných vlastností textilních vláken dosahovalo výhradně mokrou chemickou cestou. Nevýhody této povrchové úpravy jsou zjevné: velká

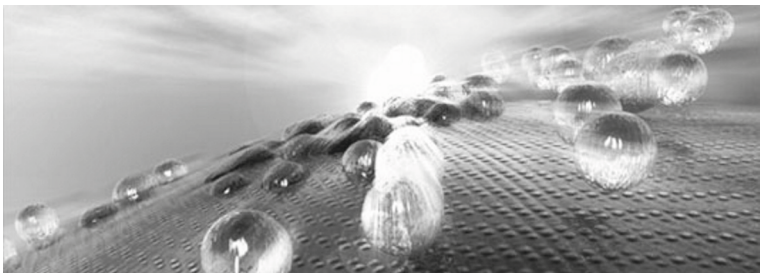
spotřeba chemikálií, zatěžování životního prostředí a prostoje způsobené sušením látek. I když jde o šlágr poslední doby, první plazmatem upravené textilie se objevily již v 60. letech 20. století.

V textilním průmyslu se většinou využívá plošný bariérový výboj za normálního tlaku, který textilii buď připraví pro následné barvení nebo na ni nanese vrstvu vhodné látky, v níž výboj probíhá. Využívají se ale i jiné typy výbojů a namísto rozsáhlých plošných elektrod lze použít většího množství malých válcových elektrod, mezi kterými textilie prochází. Velkou výhodou je suchá cesta úpravy tkanin, není třeba žádného následného sušení. Oproti chemikáliím se dosáhne stejného účinku se zlomkem suroviny.

Nejčastější jsou povrchové úpravy tzv. průmyslových textilií. Při opakovaném průchodu plazmatem je na ně naneseno hned několik vrstev (liší se podle reakčního plynu). Upravená tkanina je odolná proti vodě (nenasákává ji), olejům i různým chemikáliím. Vzhledem k malé tloušťce vrstvy tkanina neztratí nic ze své průdušnosti. Na rozdíl od chemické úpravy může tkaninou vzduch nadále volně procházet. Upravené tkaniny se používají v automobilech, veřejných dopravních prostředcích, v budovách a všude tam, kde tkanina často přichází do styku s deštěm a jinými povětrnostními jevy.

Vlněné výrobky je nutné před běžným nošením vždy ošetřit. Plazmatem se dosáhne tenčí vrstvy než při chemickém ošetření a navíc lepších výsledků. Před barvením vlny je lepší, když vlna projde plazmovým výbojem. Barva lépe drží, je stálejší a nemění se tolik na Slunci ani při praní. Bavlněné tkaniny se většinou upravují za sníženého tlaku v kyslíkovém plazmatu. Vlákna jsou po úpravě lépe nasákavější a takto upravené tričko snadněji saje pot a je příjemnější na nošení. Navíc ho lze obarvit za kratší dobu, s menším množstvím barvy a kvalitněji než bez předchozí plazmatické úpravy jeho vláken.

Plazmové technologie se ale využívají nejen u hotové tkaniny, ale již přímo při jejím tkaní. Textilní vlákno se totiž běžně napouští chemikálií, která zabrání jeho trhání a následným prostojům při



Obr. 28. Plazmatem ošetřená tkanina dokonale odpuzuje vodní kapky. Technologie P2i.

přetrhnutí tkalcovské osnovy. Tato pomocná chemikálie se musí nakonec vyprat, což proces zdržuje a navíc přináší problém co s odpadními vodami. K plazmatem ošetřeným vláknům krycí substance lépe přilne a spotřebuje se jí zanedbatelné množství oproti vláknu bez plazmové úpravy. Zkrátí se čas přípravy vláken ke tkaní a následné vyprání chemikálie je rychlejší (je jí méně) a množství odpadních vod citelně poklesne.

Až si budete příště oblékat na omak příjemné tričko, svetřík nebo ponožky, vzpomeňte si, že s největší pravděpodobností byly textilie na ně použité upraveny pomocí plazmových technologií. Totéž platí o kvalitní obuvi určené do deště a nepohody.

Sváření, řezání a vrtání

Při klasickém obloukovém sváření se přivede napětí na svářené součástky (+) a volně pohyblivou svářecí elektrodu (–). Mezi elektrodou a součástkami vznikne elektrický oblouk a kov odkapávající z rozžhavené elektrody vytvoří spoj.

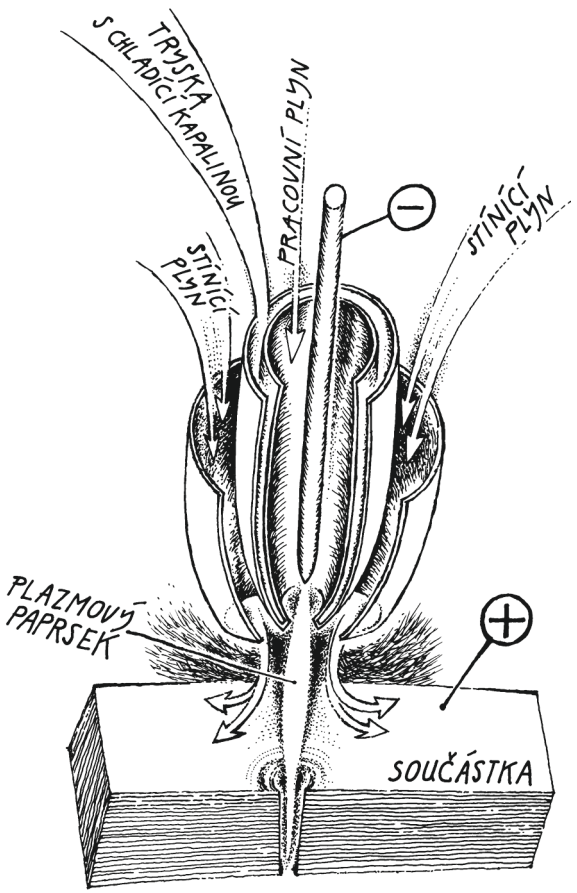
Uspořádání pro plazmové sváření nebo řezání je poněkud odlišné. Hlavním nástrojem je plazmový hořák, jehož součástí je záporná elektroda (zpravidla z wolframu). Je výhodné, když je produkované plazma termalizované, tj. vysokou teplotu mají nejenom elektrony, ale i ionty, které svou energií zahřejí svářené součásti. Kolem elek-

trody proudí v plazmovém hořáku plyn, z něhož vznikne oblouk mezi vnitřní elektrodou a součástkou. Nejčastěji používaným plynem je argon, lze ale použít i hélium. Vzhledem k tomu, že plazma oblouku je tvořeno vháněným plynem, elektroda hořáku – na rozdíl od klasického obloukového sváření – neubývá. Pracovní plyn je do hořáku nejčastěji vháněn měděnou, vodou chlazenou tryskou. Kolem trysky se nachází prostor, kterým proudí tzv. stínící plyn. Ten obklopí plazmový paprsek, chladí okolí sváru a zabraňuje mu ve styku s atmosférickým kyslíkem a vodní párou. Zpravidla jde o směs argonu s oxidem uhličitým nebo s heliem nebo s vodíkem.

Plazmové sváření se objevilo v 60. letech 20. století. Nejprve se využívalo v leteckém průmyslu a později se rozšířilo i do ostatních oblastí. Většinou se tato technologie označuje PAW (zkratka z anglického *Plasma Arc Welding*, sváření obloukem plazmatu). Rychlost plazmatu tryskajícího z hořáku dosahuje téměř rychlosti zvuku a teplota plazmatu je kolem 20 000 °C, pokud je pracovním plynem hélium, je teplota ještě vyšší. Výboj je možné iniciovat vysokofrekvenčním (mikrovlnným polem). V běžném režimu teče plazmatem proud o hodnotě několika desítek ampérů. Pokud je třeba dělat hluboké sváry (například předem vyvrtanou dírkou lze plazmatem vytvořit bodový svár hluboký přes jeden centimetr), je třeba přejít do režimu, při kterém plazmatem teče elektrický proud až stovek ampérů.

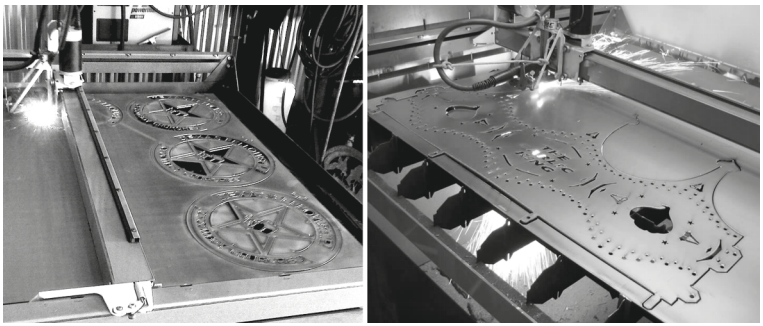
Za pomoci plazmového sváření je možné ale dělat i mimořádně jemné sváry o tloušťce pouhé desetiny milimetru. V tomto režimu teče plazmatem proud nižší než 15 ampérů. Takový jemný svár není možné provádět v ruce, pohyb plazmového hořáku musí být řízen počítačem.

Plazmové hořáky jsou vhodné i pro řezání kovových materiálů. Řezy plazmatem jsou zcela čisté a přesné. Podle schématu uloženého v počítači lze vyříznout prakticky jakýkoli tvar. Plazmové řezačky se vyrábějí od stolních zařízení pro malé firmy až po obří stroje, na kterých lze řezat kovové pláty o ploše několik metrů čtverečních



Obr. 29. Plazmový hořák určený pro plazmové sváření a řezání.

(viz obrázek 11 v barevné příloze). Plazmovým paprskem se také vrtají přesné a malé otvory. Konvenčním mikrovrtákem lze vytvořit otvor o průměru 0,3 mm. Při přípravě plošných (tištěných) spojů jsou ale takové otvory příliš veliké a byly by hlavní překážkou těsnějšího uspořádání součástek na tištěném spoji. Plazmatem lze vytvořit otvory o průměru jako lidský vlas, tj. o průměru 50 mikrometrů. A přesně takové otvory jsou vhodné pro vývody miniaturních součástek umístěných na plošném spoji. Plazmovou



Obr. 30. Řezání plazmatem. Počítač řídí pohyb plazmového paprsku s naprostou jistotou. Výsledkem je přesný a čistý řez.

technologií lze při výrobě tištěných spojů vytvořit až milion otvorů za hodinu. To by bylo jakoukoli konvenční cestou naprosto nemožné.

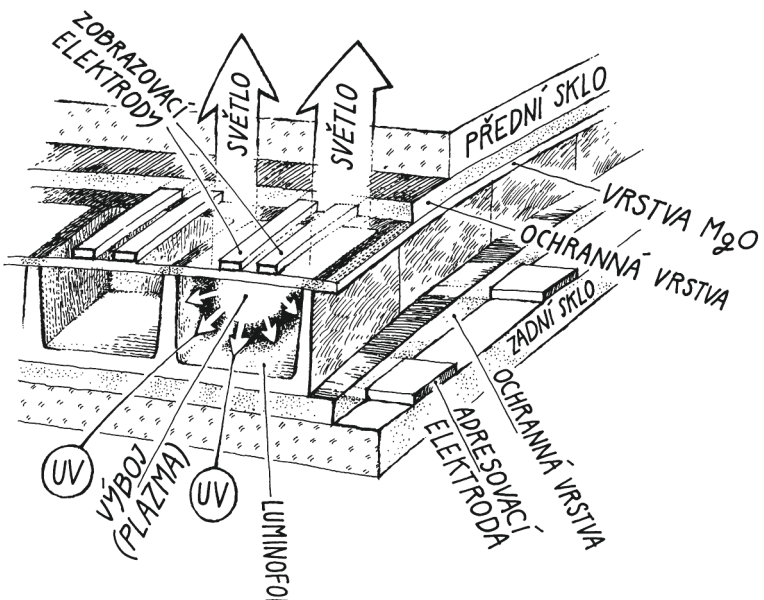
Plazmové obrazovky

První plazmovou obrazovku, tehdy ještě jednobarevnou, předvedla společnost IBM v 80. letech 20. století. Na této první obrazovce svítila oranžová písmena na černém pozadí. Dnes jsou plazmové obrazovky (displeje) běžně používané všude tam, kde je potřebná velká zobrazovací plocha – u informačních systémů na nádražích a letištích, ve velkých halách a na náměstích. Plazmové obrazovky se ale prosadily i u domácích kin – televizí s velkou úhlopříčkou. Vžila se pro ně zkratka PDP (z anglického *Plasma Display Panel*, plazmový zobrazovací panel).

Jaký je základní princip plazmové obrazovky? Jde o plástev mnoha buněk uzavřenou mezi dvěma rovnoběžnými skly. Každá z buněk je vlastně miniaturní fluorescenční lampou (minizářivkou). Plazma je zde vytvářeno doutnavým výbojem ve směsi neonu a xenonu, někteří výrobci přidávají i hélium. Tlak plynu je o něco málo nižší než atmosférický a při výboji vzniká ultrafialové záření. Toto záření dopadá na stěny buňky pokryté luminoforem. Luminofor převede ultrafialový signál na viditelné světlo – červené, zelené nebo

modré. Trojice buněk vždy tvoří jeden obrazový bod, tzv. pixel. Složením červené, zelené a modré lze vytvořit prakticky jakoukoli běžnou barvu. Obrazový vjem tak vzniká aktivně, každá buňka obrazovky skutečně svítí v určité konkrétní barvě. To je podstatný rozdíl od tzv. *LCD displejů* (z anglického *Liquid Crystal Display*, displej z kapalných krystalů), kde barva vzniká tak, že buňky z kapalných krystalů pouze propouští nebo pohlcují světlo z výbojky, která svítí na zadní straně celého displeje.

Plástev buněk plazmové obrazovky je ovládána soustavou elektrod. Na zadní straně jsou vodorovné pásky tzv. *adresovacích elektrod* (tvoří řádky obrazu) a na přední straně svislé pásky tzv. *zobrazovacích elektrod*. Zobrazovací elektrody musí být samozřejmě z průhledného materiálu, aby nerušily obraz. Na jednu buňku připadá jedna adresní elektroda a dvě zobrazovací elektrody, mezi kterými hoří výboj. Proto se jim někdy říká také *výbojové elektrody*. Elektro-



Obr. 31. Jedna z buněk plazmového displeje. Trojice takových buněk tvoří obrazový pixel.

dy jsou uloženy v dielektriku, zobrazovací elektrody jsou od buňky odděleny vrstvičkou izolantu z oxidu hořečnatého.

Napětí přiváděné elektrodami k buňce musí zajistit zažehnutí výboje, utlumení výboje a jeho správnou intenzitu. K tomu se využívá různých triků. Pokud je na zobrazovací elektrody přivedeno střídavé napětí, zažehne se výboj. Bez napětí dielektrikum a oxid hořečnatý výboj zastaví. Napětí na elektrodách je udržováno těsně pod hladinou, kdy začne vznikat plazma a k ionizaci pracovního média dojde i při velmi nízkém zvýšení napětí na adresovací elektrodě.

Každý zobrazovaný snímek je rozdělen na několik kratších podsnímků. Pixely, které mají svítit, jsou zobrazovacími elektrodami přednabity na určité napětí a během zobrazení snímku je napětí aplikováno na adresovací elektrodu, čímž vznikne výboj. Intenzita světla přicházející z jedné buňky (subpixelu) je určována počtem a šířkou napěťových pulzů, které dostává buňka v průběhu podsnímků jednoho snímku.

Věnujme se nyní stručně vlastnostem plazmových obrazovek:

■ **Velikost.** Plazmové obrazovky nelze příliš miniaturizovat. To je dáno tím, že velikost jedné zobrazovací buňky je přibližně 200 μm, u posledních modelů o něco méně. Obraz v HD kvalitě musí mít (1280 na 720 pixelů), tomu odpovídají nejmenší komerčně vyráběné plazmové obrazovky s úhlopříčkou 36" (91 cm), běžně se ale vyrábějí i plazmové obrazovky s úhlopříčkou kolem 4 metrů.

■ **Tloušťka.** Plazmový panel může mít tloušťku kolem 6 centimetrů, celková tloušťka obrazovky je kolem deseti centimetrů, což umožňuje oblíbenou montáž obrazovky na stěnu. Televize potom vypadá jako pověšený obraz.

■ **Kvalita barev.** Plazmové obrazovky mají velmi věrné podání černé barvy. Černá je skutečně černou, nikoli šedivou, jak tomu bývá u jiných systémů (CRT, LCD). Barevná věrnost je u plazmových obrazovek vynikající a je jejich největší předností.

■ **Úhel pohledu.** Na plazmovou obrazovku se můžete dívat bez problémů i z boku. Obraz je dobře zřetelný i při úhlu pohledu 160° až 170°. V tomto ohledu mají LCD displeje co dohánět, při šikmém pohledu není obraz vidět. Poslední generace LCD displejů se snaží tento problém řešit a možný úhel pohledu se u nich s každým rokem zvětšuje.

■ **Spotřeba.** Při pořizování plazmové obrazovky musíte vždy počítat s tím, že její spotřeba je vyšší než u jiných systémů. Spotřeba obrazovky s úhlopříčkou například 50" (127 cm) je přibližně 400 wattů. Jde ovšem o maximální spotřebu, kterou má televize například ve výkladní skříni obchodu nebo v restauraci. V domácnosti si zapnete tzv. *cinema mód*, při kterém obrazovka nedává plný jas a její spotřeba poklesne na 200 až 300 wattů. Důležité je také vědět, že spotřeba při sledování programu prudce kolísá podle intenzity právě vysílaného obrazu. To je zásadní rozdíl oproti LCD displejům, kde je spotřeba při sledování programu stálá.

■ **Infračervený šum.** Přibližně 60 % vynaložené energie se u plazmových obrazovek přemění na teplo. Plazmová obrazovka je intenzivním zdrojem infračerveného vyzařování, které může rušit zařízení v domácnosti založená na přenosu infračerveného signálu (různá čidla a ovladače). Tato zařízení musí mít od výrobce garantováno, že jsou zkonstruována pro provoz v přítomnosti plazmové obrazovky (jsou PDP kompatibilní).

■ **Životnost.** Plazmová obrazovka v průběhu používání ztrácí kontrast. Za životnost obrazovky se považuje doba, po které je kontrast poloviční než u nového výrobku. Dnešní kvalitní plazmové obrazovky mají životnost kolem 30 000 hodin, tj. 8 let, pokud máte televizi zapnutou 10 hodin denně.

■ **Poruchovost pixelů.** Na rozdíl od LCD displejů je poruchovost obrazových pixelů zcela minimální. Pokud ale na televizi svítí mnoho hodin stejný obraz (například logo společnosti ve výkladní skříni), dojde k přehřátí luminoforu a k jeho tzv. *vyhoření* neboli *vypálení statického obrazu*. Jde o nevratné poškození luminoforu

Obr. 32. Typické nevratné vypálení statického obrazu na pozadí aktuálních informací na plazmové obrazovce. Mezinárodní letiště DFW v Dallasu.

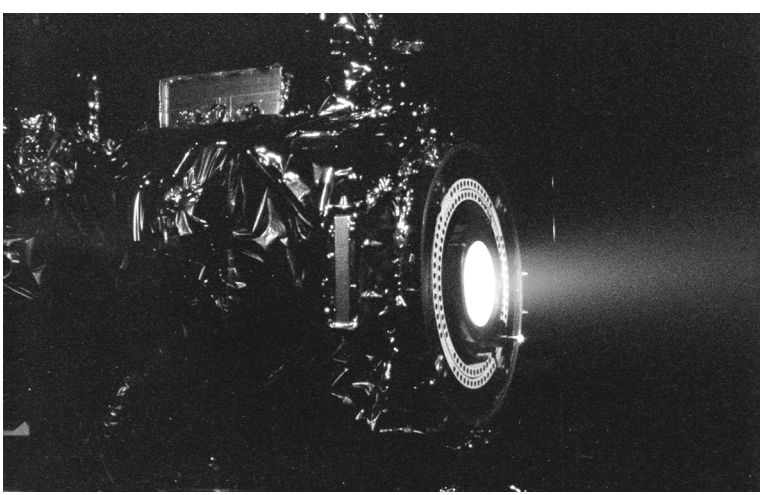
v zobrazovacích buňkách. I při vypnuté televizi je na zhasnuté obrazovce logo patrné. Při běžném provozu k tomuto jevu u soudobých modelů dochází zřídkakdy.

Při pořizování plazmové televize počítejte s kvalitním obrazem na velké ploše, ovšem za cenu vyšší spotřeby a většinou větší pořizovací ceny v porovnání s LCD displeji.

Plazmové a iontové motory

Plazma se od přelomu tisíciletí využívá i k pohonu kosmických sond. Paprsek plazmatu nebo iontů unikající z trysky pohání reakční silou sondu. Plazmové ani iontové motory samozřejmě nemohou nahradit motory chemické, které vyvinou po krátkou dobu obrovský tah a jsou určeny ke startu sondy nebo k razantním manévrům. Plazmové motory jsou přesně opačné. Působí velmi malým tahem po velmi dlouhou dobu a jsou tak předurčeny k dlouhodobým letům nebo k jemným korekcím dráhy. První testy těchto nových typů motorů proběhly již v roce 1999 na ame-

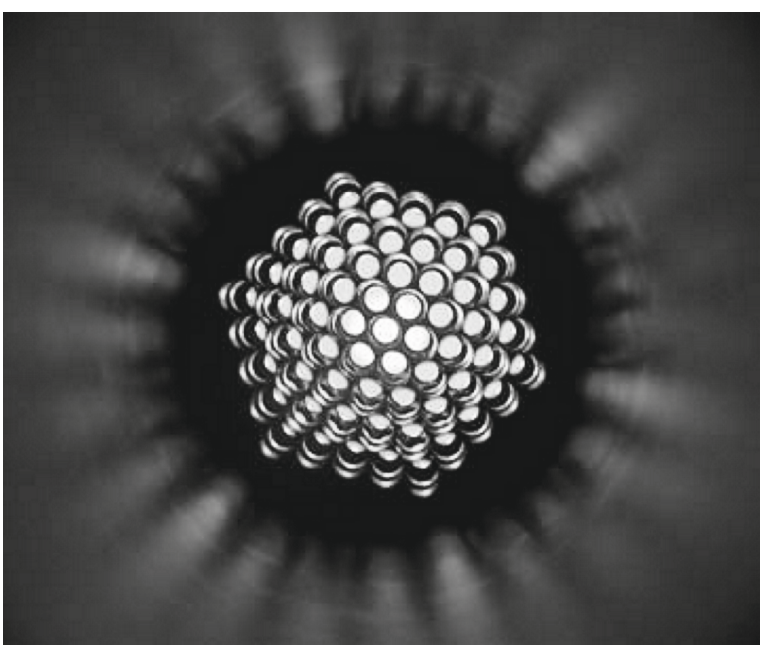
rické sondě Deep Space 1 (1998–2001), která zkoumala planetku Braille a kometu 19P/Borrelly a byla určena k otestování dvanácti nových technologií pro vesmírné lety. Jednou z nich byl iontový motor, v němž byly urychlovány ionty xenonu. Motor používal dutou katodu k produkci elektronů. Ty se srážely s atomy xenonu a ionizovaly je. Ionty xenonu byly urychlovány napětím 1 280 V a emitovány 30 cm velkou tryskou. Do proudu iontů byl vstřikován oddělený svazek elektronů, takže ven z trysky unikal neutrální proud plazmatu (jinak by se sonda za letu nabíjela). Při příkonu 2,3 kW bylo dosaženo tahu 92 milinewtonů. Obdobné motory byly zkoušeny na japonské sondě Hayabusa[41] (2003–2010) a při evropské lunární misi SMART (2003–2006). Počítá se s nimi při evropském misi Beppi-Colombo (2013) k Merkuru a uvažuje se o jejich nasazení při cestě člověka na Mars. Plazmové motory by mohly cestu zkrátit z mnoha měsíců na pouhých 39 dní. Obě dvě největší kosmické agentury světa – americká NASA a evropská ESA – usilovně vyvíjejí kvalitní plazmový motor pro dálkové lety.



Obr. 33. Xenonový motor sondy Deep Space 1. Zdroj: NASA.

41 **Hayabusa (2003–2010)** – japonská sonda, která v roce 2005 přistála na planetce Itokawa, odebrala z ní vzorky prachu a v roce 2010 je dopravila v návratovém pouzdru zpět na Zemi. Pokusný iontový motor fungoval bez nejmenších problémů.

Evropská kosmická agentura vyvíjí plazmové a iontové motory ve spolupráci s Australskou národní univerzitou (ANU). První varianta nového typu iontového motoru byla navržena anglickým fyzikem Davidem Fearnem již v roce 2001, prototyp s názvem DS4G byl vyroben v roce 2006 v ANU a otestován v Evropském kosmickém a výzkumném středisku ESTEC (European Space Research and Technology Centre) v Holandsku. Na rozdíl od předchozích typů tento motor využívá dva stupně elektrického urychlení mezi elektrodami tvaru mřížky. První stupeň zajistí vytažení iontů z přípravné komory a druhý stupeň jejich urychlení. Testovaný motor byl čtyřikrát účinnější než dříve použitý motor měsíční mise SMART. Urychlovací napětí 30 kV umožnilo výstupní rychlost iontů 210 km/s při úhlu výtrysku pouhé 3 stupně (pětkrát užší než u mise SMART). Tak úzký svazek iontů umožní vynikající ovladatelnost kosmické lodi.



Obr. 34. Test iontového motoru DS4G v roce 2006 ve vakuové komoře CORONA (ESTEC). Foto Orson Sutherlan, ANU.

V ESA je současně vyvíjen (opět ve spolupráci s ANU) plazmový motor, jehož autory jsou Christine Charles a Rod Boswell z ANU. Jde o bezelektrodové uspořádání, plazma je vytvářeno šroubovicovou anténou, která je zdrojem vysokofrekvenčního pole. Urychlení probíhá v kombinaci elektrických a magnetických polí, k získání závěrečného impulzu je využívána elektrická dvojvrstva. Právě tento motor, jenž dostal název HDLT (Helicon Double Layer Thruster), je nejnadějnějším kandidátem pro let k Merkuru a v roce 2013 by měl pohánět sondu Beppi-Colombo.

Víte, že

■ Víte, že plazmatem upravené lopatky turbíny snesou vyšší teplotu a takto upravená turbína má vyšší účinnost?

■ Víte, že pigmentový prášek upravený v kyslíkovém plazmatu má na povrchu hydroxylové skupiny a je rozpustný ve vodě? Takováto úprava umožňuje výrobu nových ekologických, ve vodě rozpustných barev.

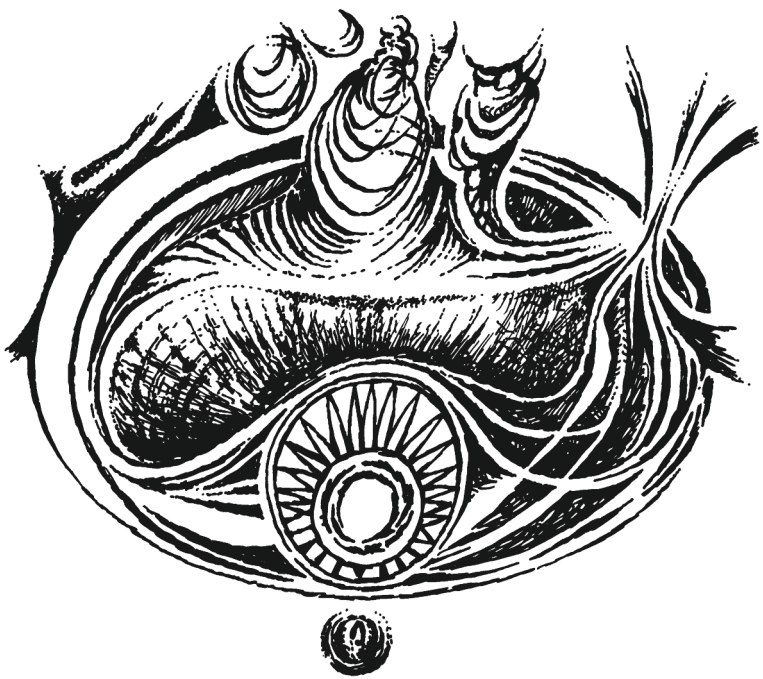
■ Víte, že koronový výboj je součástí odlučovačů popílku v elektrárnách? Díky němu se prach nabije a lze ho poté elektrickým polem odstranit.

■ Víte, že se laserem vytvořené plazma může stát samo aktivním prostředím a začít fungovat jako samostatný laser? Takové lasery mohou zářit i v měkkém rentgenovém oboru.

■ Víte, že výboj v plazmatu dokáže štěpit nespálené uhlovodíky ve výfukových plynech na neškodné sloučeniny? Plazmový reaktor ve výfuku by v budoucnu mohl nahradit dnešní katalyzátory.

Poučení na závěr: *Možná si nejste vědomi, že byste ve svém životě kdy použili čtvrté skupenství hmoty, ale s výrobky založenými na plazmových technologiích se setkáváte na každém kroku.*

7. Malý třesk



Fyzika je jako sex, může přinést praktické výsledky,
ale to není důvod, proč to děláme.
Richard Phillips Feynman

Od okamžiku, kdy vynikající americký astronom Edwin Hubble (1889–1953) v roce 1929 zjistil, že vesmír expanduje, začínalo být čím dál tím jasnější, že náš svět musel být na začátku velmi hustý a horký, tedy v plazmatickém skupenství. Tuto počáteční fázi horké plazmové koule nazýváme Velký třesk. Z měření sondy WMAP[42] víme, že plazmatické období vesmíru trvalo přibližně 400 000 roků, poté se vytvořily elektronové obaly atomů a z plazmatu se stal neutrální plyn. Není ale plazma jako plazma. V úplném počátku byl vesmír vyplněn kvarkovým-gluonovým plazmatem. V čase kolem deseti mikrosekund začaly z této zárodečné polévky vznikat první neutrony a protony a objevilo se vodíkové plazma, které známe z našich laboratoří. Vesmír tedy prošel dvěma plazmatickými obdobími. První byla éra *kvarkového-gluonového plazmatu*, která skončila po prvních deseti mikrosekundách. Pak následovala éra převážně *vodíkového plazmatu*, která skončila po 400 000 letech.

V roce 2000 se podařilo kvarkové-gluonové plazma poprvé vytvořit uměle v laboratoři. Za teploty stotisíckrát vyšší než v centru Slunce a hustoty více než desetkrát vyšší než v atomovém jádře se ve středisku jaderného výzkumu CERN podařilo na krátký okamžik „roztavit" samotné částice atomového jádra – protony a neutrony. Lidstvo se poprvé přiblížilo k unikátním podmínkám, které panovaly na samém počátku vesmíru.

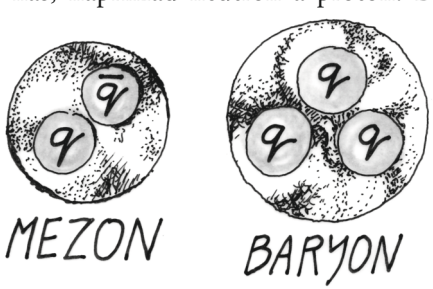
42 **WMAP** – Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, sonda z roku 2001, která pořídila podrobnou mapu fluktuací reliktního záření s úhlovým rozlišením kolem 0,3° a citlivostí 20 μK. Zrcadlo sondy má rozměry 1,4×1,6 m a teplota chlazené části je nižší než 95 K. Data sondy jsou nejdůležitějším zdrojem informací o raných fázích vývoje vesmíru.

Kvarky

Dříve, než se seznámíme s experimenty, ve kterých byla vytvořena látka, jež byla ve vesmíru přítomna na jeho počátku, povíme si něco málo o kvarcích – nepatrných částečkách hmoty, ze kterých jsou tvořeny neutrony a protony – základní stavební kameny atomových jader.

Asi každý již někde slyšel, že atomové jádro se skládá z *neutronů* a *protonů*. A určitě jste také zaslechli slovo *mezon* (částice s hmotností „mezi" elektronem a protonem). Již v šedesátých letech 20. století se začalo uvažovat o tom, že všechny tyto částice nejsou opravdovými elementárními částicemi, ale že jsou složené z menších, snad skutečně elementárních částic. První model tohoto typu navrhli nezávisle na sobě v roce 1964 američtí fyzikové Murray Gell-Mann (1929) a George Zweig (1937). Ony částice, ze kterých má být tvořena hmota, nazval Gell-Mann *kvarky*. Zvláštní slovo kvark nalezl v románu „*Finnegan's Wake*" od Jamese Joyce. Hlavnímu hrdinovi literárního příběhu se zdá sen, ve kterém racci letící za plující lodí křičí: „Tři kvarky pro doktora Marka!" V celém románu se toto slovo již nikde jinde nevyskytuje.

Sám Gell-Mann navrhl existenci prvních čtyř kvarků, později byly do teorie doplněny další dva. Dnes hovoříme o tzv. třech generacích kvarků. Z první generace (kvarky *d* a *u*) jsou tvořeny běžné částice kolem nás, například neutron a proton. Druhá generace



Obr. 35. Hadrony jsou všechny částice složené z kvarků. Mezony jsou z kvarku a antikvarku, baryony ze tří kvarků.

(kvarky *s* a *c*) se vyskytuje zřídka, tyto kvarky najdeme jen ve vysoce energetických procesech, například při srážkách kosmického záření s částicemi horní vrstvy atmosféry. Poslední generaci (kvarky *b* a *t*) umíme vytvořit jen uměle na velkých urychlovačích. Všechny tři generace kvarků se ale ve vesmíru vyskytovaly krátce po jeho vzniku a spoluutvářely jeho budoucí vlastnosti.

kvark	název	náboj	hmotnost	rok objevu
d	down (dolů)	–1/3	7 MeV	1969
u	up (nahoru)	+2/3	5 MeV	1969
s	strange (podivný)	–1/3	150 MeV	1969
c	charm (půvabný)	+2/3	1,4 GeV	1974
b	bottom (spodní)	–1/3	4,3 GeV	1976
t	top (horní)	+2/3	176 GeV	1995

Kvarky mají spin (vlastní točivost) rovný jedné polovině. Částice tvořené z kvarků se nazývají *hadrony* a dělí se do dvou velkých skupin: *mezonů*, ve kterých jsou kvarky přítomny po dvojicích (kvark a antikvark) a *baryonů* složených ze tří kvarků různých barev. Přibližně deset mikrosekund po vzniku vesmíru skončila éra volných kvarků a nastala tzv. *hadronizace* hmoty – spojování kvarků do dvojic (mezonů) a trojic (baryonů). Z kvarkového-gluonového plazmatu vznikal *hadronový plyn*, v němž byla zpočátku řada exotických mezonů a baryonů. Po několika sekundách se exotické částice rozpadly a v hadronovém plynu převládly neutrony a protony.

V tabulkách na následující straně jsou nejznámější mezony a baryony složené z první generace kvarků (*d*, *u*). U mezonů se spin (označen s) kvarků (1/2) může složit souhlasně na hodnotu 1 nebo nesouhlasně na hodnotu 0. U baryonů složených ze tří kvarků může být výsledný spin buď 1/2 (jeden kvark má opačný spin) nebo 3/2 (všechny kvarky mají souhlasný spin). Vodorovná čára nad symbolem kvarku značí antičástici.

Mezony 1. generace			
	stavba	název	s
π^-	$d\bar{u}$	pion	0
π^0	$d\bar{d} + u\bar{u}$	pion	0
π^+	$u\bar{d}$	pion	0
ρ^-	$d\bar{u}$	róon	1
ρ^0	$d\bar{d} + u\bar{u}$	róon	1
ρ^+	$u\bar{d}$	róon	1

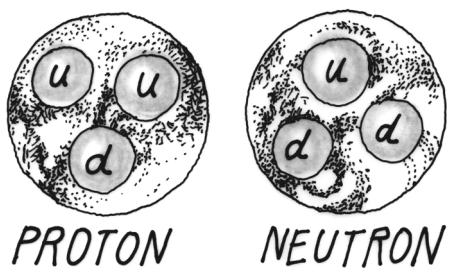
Baryony 1. generace			
	stavba	název	s
n	ddu	neutron	1/2
p	uud	proton	1/2
Δ^-	ddd	delta	3/2
Δ^0	ddu	delta	3/2
Δ^+	duu	delta	3/2
Δ^{++}	uuu	delta	3/2

Samozřejmě existují i částice obsahující jiné kvarky než kvarky první generace. Například mezony obsahující podivný kvark nazýváme kaony. Sehrály důležitou roli při poznávání levopravé symetrie. Baryony obsahující podivný kvark nazýváme hyperony a nacházíme je často v produktech srážek kosmického záření s atmosférou. V počátečních fázích vesmíru byly tyto částice velmi hojné. Uměle je možné vyrobit i různé exotické částice obsahující kvarky *c*, *b* a *t*, jmenujme alespoň charmonium neboli částici J/ψ (vázaný stav kvarku a antikvarku *c*) a ypsilonium (vázaný stav kvarku a antikvarku *b*). Při hledání kvarkového-gluonového plazmatu sehrály významnou roli kaony, hyperon Ω^- (*sss*) a částice J/ψ.

Ještě nesmíme zapomenout na jednu důležitou charakteristiku kvarků – barvu. Kvarky mají poločíselný spin, a proto by podle Pauliho vylučovacího principu neměly existovat dva kvarky ve stejném kvantovém stavu. Přesto se v některých částicích nacházejí dokonce tři kvarky naráz (například částice Δ^{++} je tvořena třemi kvarky *u*). Kvarky se v těchto částicích od sebe musí lišit nějakým kvantovým číslem, které nabývá tří různých hodnot. Fyzikové toto číslo nazvali barva. Může nabývat hodnoty R (červená), G (zelená) a B (modrá), podobně jako barvy na monitoru počítače. Pokud kvarky tvoří částici, je její výsledná barva bílá. Příkladem mohou být baryony, které obsahují tři kvarky různých barev R, G a B (slo-

ží se na bílou) nebo mezony, kde je kvark a antikvark téže barvy (barva a antibarva se vyruší). Tato „barva" však nemá se skutečnou barvou nic společného. Fyzikové barvu zavedli jen pro názornost.

Murray Gell-Mann na základě svého kvarkového modelu z roku 1964 předpověděl existenci částice Ω^-. Tato částice byla nalezena ještě v roce 1964, kdy byl model publikován. V roce 1969 bylo



Obr. 36. Protony a neutrony jsou složeny ze tří kvarků.

v rozptylových experimentech na urychlovači SLAC[43] ve Stanfordu potvrzeno, že neutron a proton se skládají ze tří kvarků. V tomto roce získal Murray Gell-Mann Nobelovu cenu za fyziku – za příspěvek ke klasifikaci elementárních částic.

V roce 1974 bylo objeveno *charmonium,* vázaný stav kvarku a antikvarku *c*. Částice byla po usilovném boji objevena na dvou pracovištích současně: na protonovém urychlovači v Brookhavenu, ve skupině vedené profesorem Tingem (částici nazvali J) a na kolideru[44] SPEAR ve Stanfordu, ve skupině vedené profesorem Richterem (částici nazvali ψ). Objevu předcházel „lítý boj" obou skupin o prvenství. Dnes se toto slavné období dějin fyziky úsměvně nazývá *listopadová J/ψ revoluce* a charmonium nakonec získalo označení

43 **SLAC** – Stanford Linear Accelerator Center, středisko s několika urychlovači, nejznámějším je přes 3 kilometry dlouhý lineární urychlovač patřící Stanfordské univerzitě v Kalifornii, podle něhož je centrum SLAC pojmenováno.

44 **Kolider** – druh urychlovače, ve kterém se urychlují proti sobě dva svazky nabitých částic. V místě, kde je detektor, se tyto svazky magneticky vychýlí tak, aby se v detektoru srazily.

J/ψ. V roce 1976 bylo objeveno *ypsilonium*, vázaný stav kvarku a antikvarku *b*. Poslední kvark *t* byl nalezen v roce 1995 v komplexu Fermilab[45].

Silná interakce

Co drží kvarky pohromadě tak, aby tvořily částici jako je neutron či proton? Je to silná interakce způsobená *gluony*. Slovo *glue* znamená v angličtině lepit nebo lepidlo. Gluony slepují kvarky k sobě dohromady a nedovolí jim uniknout. Je to ale velmi zvláštní lepidlo. Na malých vzdálenostech lepí slabě, kvarky se chovají skoro jako volné částice. Ale běda, vzdálí-li se od sebe více než 10^{-15} m. Tehdy začne gluonové lepidlo působit velmi intenzivně a nedovolí kvarkům vzdálit se z jejich vězení. Proto se po dlouhá léta nepodařilo získat volný kvark. Vždy jsou po dvojicích nebo po trojicích uvězněny v mezonu nebo v baryonu. Na volné kvarky je proto třeba jít oklikou. Dodáme-li částicím velkou energii, přiblíží se při srážkách natolik, že průměrné vzdálenosti mezi kvarky budou menší než 10^{-15} m. Gluonové pojivo přestane účinkovat a kvarky s gluony se začnou chovat jako volné částice. Vytvoří se zcela výjimečný stav hmoty – *kvarkové-gluonové plazma*, které označujeme zkratkou QGP (z anglického *Quark Gluon Plasma*). Právě takové podmínky panovaly ve vesmíru prvních 10 mikrosekund jeho existence a v roce 2000 se je podařilo na malou chvíli napodobit ve středisku CERN. Těmto experimentům se začalo symbolicky říkat *Malý třesk*.

Podivné vlastnosti gluonového lepidla jsou způsobeny tím, že samy gluony jsou barevné (přesně bychom měli říci, že mají stejný kvantový náboj jako kvarky, tzv. barevný náboj). Každý kvark má kolem

45 **Fermilab** – komplex urychlovačů ve Spojených státech, ve státě Illinois. Fermilab byl založen v roce 1967, prvním ředitelem se stal Robert Wilson, účastník projektu Manhattan. V současné době je zde druhý největší urychlovač světa – Tevatron (uzavřen by měl být v roce 2012). K nejvýznamnějším objevům patří objev kvarku *b* (1977), kvarku *t* (1995) a tau neutrina (2000). V současnosti se Fermilab zabývá výzkumem *b* a *t* kvarku, výrobou a výzkumem antivodíku, narušením symetrií v přírodě a výzkumem řady dalších vlastností hmoty a antihmoty za vysokých energií

sebe velký houf gluonů. *Gluonový kožich*, do kterého je kvark obléknut, je dokonce mnohem hmotnější než kvark sám. Čím blíže bychom pronikli ke kvarku, tím by jeho barva slábla. Říkáme, že gluony v okolí kvarku způsobují *antistínění* jeho náboje. Velikost barevného náboje ale určuje kvalitu interakce dvou kvarků, a proto dva velmi blízké kvarky téměř neinteragují. Za všechno mohou gluonové kožichy!

U elektromagnetické interakce podobný jev neznáme. Každý elektron je obklopen houfem fotonů (elektrickým polem, chcete-li), ale tyto fotony nemají elektrický náboj, a proto neovlivňují schopnost elektronů vzájemně interagovat. Elektrony jsou ve skutečnosti *stíněny* virtuálními páry elektronů a pozitronů, a to dokonce i ve vakuu. Zatímco elektromagnetická interakce s přibližováním objektů sílí, u silné interakce je tomu naopak. Přibližujeme-li k sobě dva kvarky, interakce postupně vymizí. Často se hovoří o tzv. *asymptotické volnosti kvarků*. Jak si ji představit? Třeba jako dvě kuličky spojené gumovou páskou. Je-li vzdálenost kuliček malá, páska není napnutá, kuličky její vliv nepociťují a chovají se jako volné. Při větších vzdálenostech kuliček se páska napne a kuličky jsou pomocí pásky intenzivně vázány. Existuje i jiná analogie vazby kvarků: představte si gumový pytel s kuličkami uvnitř. Kuličky se v pytli volně pohybují, dokud jsou jejich vzdálenosti malé. Pokud vzdálenost dvou kuliček bude větší než jsou rozměry pytle, vrátí je jeho pružné stěny zpět k sobě.

Zatím jsme neustále hovořili o vzdálenosti dvou objektů, neboť si ji čtenář může snadno představit. V kvantové teorii se ale častěji hovoří o energii objektů. Pokud mají dvě částice vysokou energii, mohou se k sobě přiblížit na malou vzdálenost. Energie částic je tak do jisté míry nepřímo úměrná jejich možné vzdálenosti. Vše co bylo řečeno o vzdálenostech platí i o energiích. Mají-li kvarky velkou energii (jako tomu bylo při vzniku vesmíru), chovají se jako volné částice. Poklesne-li jejich energie pod určitou mez (přibližně 1 gigaelektronvolt), nastane razantní změna v jejich chování. Začnou se vázat po dvojicích a trojicích a vytvoří mezony a baryony.

Ve vesmíru k tomu došlo v čase 10 mikrosekund, kdy v něm byla teplota 10^{12} K (jeden bilion stupňů) a průměrná energie částic byla 1 gigaelektronvolt. V tomto čase skončila éra kvarkového-gluonového plazmatu a ze zárodečné polévky se vynořily první neutrony a protony – částice, ze kterých jsme složeni my lidé i naše okolí. Cesta k našemu světu byla otevřena.

Objev kvarkového-gluonového plazmatu

Příprava kvarkového-gluonového plazmatu v laboratoři se stala snem experimentátorů někdy na konci sedmdesátých let 20. století. První pokusy tohoto druhu se začaly provádět v 80. letech v Lawrencově národní laboratoři v Berkeley (LBNL, *Lawrence Berkeley National Laboratory*) v USA. V letech 1994 až 2000 se hledání kvarkového-gluonového plazmatu přesunulo do evropského střediska jaderného výzkumu CERN[46]. Svazek vysoce urychlených částic (3,5 TeV, 16 GeV na nukleon) olova ^{208}Pb v urychlovači SPS[47] byl nastřelen na statický terčík, taktéž z olova. Uvolněná energie byla natolik obrovská, že postačila k „rozmělnění" protonů a neutronů na kvarky a gluony. V průběhu šestiletého výzkumu bylo uskutečněno 7 experimentů (NA44, NA45/CERES, NA49, NA50, NA52, NA57/WA97 a WA98), na kterých se podílelo přes 500 vědců z více než dvaceti zemí světa. Experimenty byly také prováděny s atomy zlata nastřelovanými na olověný terčík.

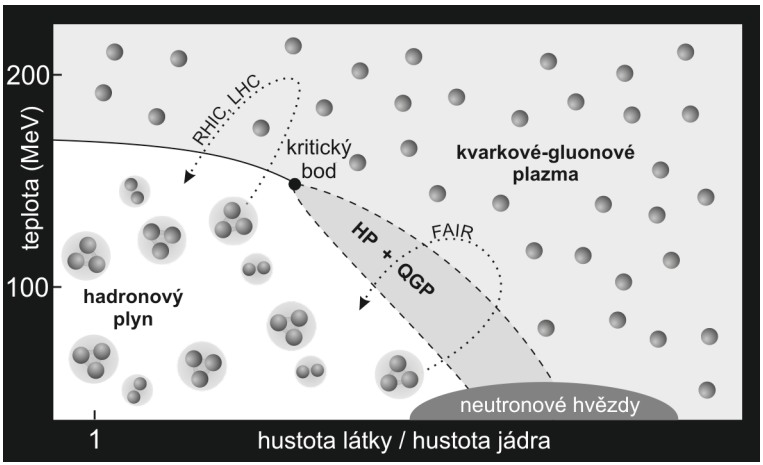
46 **CERN** – Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire, Evropské centrum jaderného výzkumu. Komplex urychlovačů a laboratoří na pomezí Švýcarska a Francie založený v roce 1954. Na výzkumu se podílí 20 členských zemí včetně České republiky. K největším objevům patří objev částic slabé interakce, příprava antivodíku a objev kvarkového-gluonového plazmatu. V laboratořích CERN byl také vynalezen a poprvé použit Web. V současné době je zde vybudován největší urychlovač světa – Large Hadron Collider.

47 **SPS** – Super Proton Synchrotron, urychlovač v koplexu laboratoří CERN s dosažitelnou energií 400 GeV/proton. Urychlovač je v provozu od roku 1976. V roce 1983 zde byly objeveny polní bosony W^+ a W^-slabé interakce, v roce 2000 bylo poprvé vytvořeno kvarkové-gluonové plazma.

V laboratorních experimentech vydrží kvarkové-gluonové plazma po velmi krátkou dobu. Nalétávající urychlená jádra olova způsobí srážky jejich protonů a neutronů s velkou energií. Na krátkou chvíli 10^{-22} sekundy se neutrony s protony přemění na kvarkovou-gluonovou kouli, která se rychle rozpíná a ochlazuje (viz obrázky 12 a 13 v barevné příloze). Kvarky se začnou seskupovat po dvojicích a trojicích do hadronů, vzniká hadronový plyn, podobně, jako tomu bylo ve vesmíru v čase 10 mikrosekund jeho existence.

V laboratoři na vznik kvarkového-gluonového plazmatu usuzujeme nepřímo z jeho projevů, které jsou dobře teoreticky a numericky propočítány. Chování kvarkového-gluonového plazmatu se simulovalo pomocí rozsáhlých paralelních výpočtů skupiny MILC (*MIMD Lattice Computation*), do které patří: Kalifornská univerzita v Santa Barbaře, Arizonská univerzita, Coloradská univerzita, Floridská státní univerzita, Indianská univerzita, Pacifická univerzita, Univerzita v Utahu, Washingtonská univerzita a společnost NORDITA.

Přímé sledování kvarkového-gluonového plazmatu je prakticky vyloučené. Pozorují se ale velmi pečlivě produkty rozpadu kvarkové-gluonové koule. Z teoretických předpovědí je známé, že oproti normálním srážkám hadronů dojde v kvarkové-gluonové fázi k potlačení produkce půvabného kvarku *c* a naopak posílení produkce podivného kvarku *s*. V praxi to znamená snížení počtu pozorovaných částic J/ψ (vázaný stav kvarku a antikvarku *c*) a zvýšení počtu pozorovaných kaonů (mezonů obsahujících kvark *s*). Oba dva jevy byly v experimentech ve středisku CERN pozorovány a šlo o hlavní důkaz toho, že se podařilo připravit kvarkové-gluonové skupenství látky. Samozřejmě je mnoho dalších nepřímých indicií: pozorovalo se zvýšené elektromagnetického vyzařování, zpětný dopočet teplot a hustot energie kvarkové-gluonové koule z hybností vedl na hodnoty převyšující kritickou mez pro vznik kvarkového-gluonového plazmatu, sledování skladby produktů rozpadu odpovídalo vytvoření kvarkové-gluonové fáze atd. Vznik kvarkové-gluonové fáze látky se dá rozpoznat podle sedmi základních ukazatelů:



Obr. 37. Fázový diagram přechodu mezi hadronovým plynem a kvarkovým-gluonovým plazmatem. Šipkami je naznačen průběh srážky těžkých jader na urychlovačích RHIC, LHC a FAIR. Z jader se stane kvarkové-gluonové plazma a poté se expandující kvarková koule přemění na hadronový plyn.

1. **Snížení produkce částic J/ψ**. *Při vysokých energiích se objevují při srážce hadronů částice J/ψ. Při vytvoření kvarkové-gluonové fáze jejich počet razantně poklesne, právě tento jev je velmi dobře pozorovatelný.*

2. **Zvýšení produkce podivných kvarků.** *Při srážkách hadronů vzniká 20 % podivných kvarků. V kvarkovém-gluonovém plazmatu vzniká 40 % podivných kvarků. V experimentech se pozorovalo zvýšené množství kaonů (mezonů s podivným kvarkem) a patnáctinásobné zvýšení počtu částic Ω^- (sss).*

3. **Zvýšení produkce fotonů z QGP:** *Při vyšších energiích by mělo být pozorováno zvětšení počtu fotonů. V experimentu je však značný šum z jiných zářivých procesů, sledování počtu fotonů není příliš průkazné.*

4. **Počet mezonů se spinem 1:** *Prošla-li látka kvarkovou-gluonovou fází, probíhá rozpad na leptonové páry jiným způsobem než obvykle, což se projeví jiným počtem mezonů se spinem 1 (tzv. vektorových mezonů).*

5. **Sledování rozložení hybnosti produktů:** *Hybnosti vyletujících částic odpovídají hodnotě při hadronizaci. Zpětným propočtem lze zjistit, jak horká byla oblast ze které částice vylétly. Pokud vnikla kvarková-gluonová fáze, musí být určená teplota vyšší než kritická teplota fázového přechodu mezi normálním a QGP plazmatem (10^{12} K).*

6. **Sledování skladby různých typů produktů:** *Podle množství různých produktů experimentu lze jiným způsobem odhadnout teplotu při hadronizaci, která musí být vyšší než kritická, pokud vznikla fáze QGP.*

7. **Boseho-Einsteinova interferometrie:** *Z vyhledávání párů částic je statisticky možné odhadnout rozměry oblasti, ve které částice vznikly. Ze známé teploty lze poté dopočíst hustotu energie, která v popisovaných experimentech vyšla dvakrát až čtyřikrát vyšší než kritická hustota energie nutná pro vznik kvarkové-gluonové fáze.*

Na základě splnění všech sedmi indicií byl objev nové formy hmoty, kvarkového-gluonového plazmatu, oznámen 10. února 2000 na slavnostní tiskové konferenci ve středisku CERN.

Pokračování experimentů

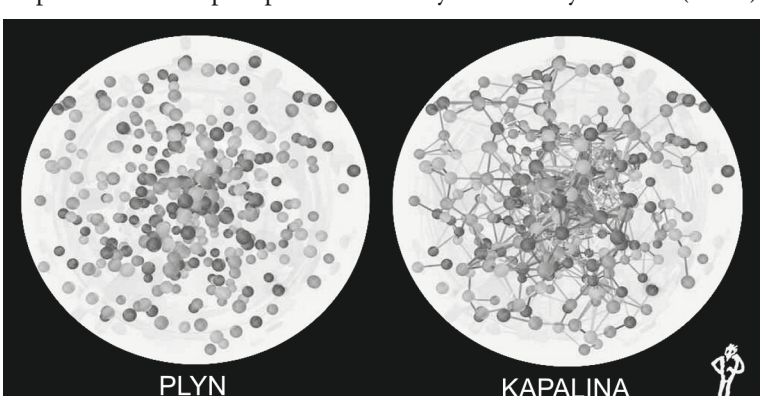
Experimenty prováděné v roce 2000 ve středisku CERN byly na hranici možností tehdejších evropských urychlovačů. V CERNu se navíc připravovala grandiózní přestavba. Byl ukončen provoz elektrono-pozitronového kolideru LEP II a v tunelu dlouhém 27 kilometrů se začal stavět největší urychlovač světa pro hadrony – Velký hadronový kolider (LHC, *Large Hadron Collider*). Stavba měla podle původního plánu trvat pět roků, ale protáhla se na bezmála dvojnásobek.

Experimenty s kvarkovým-gluonovým plazmatem se proto přestěhovaly do Spojených států, do americké Brookhavenské národní laboratoře BNL (*Brookhaven National Laboratory*) na ostrově Long Island v blízkosti New Yorku. Zde se nachází téměř 4 kilometry

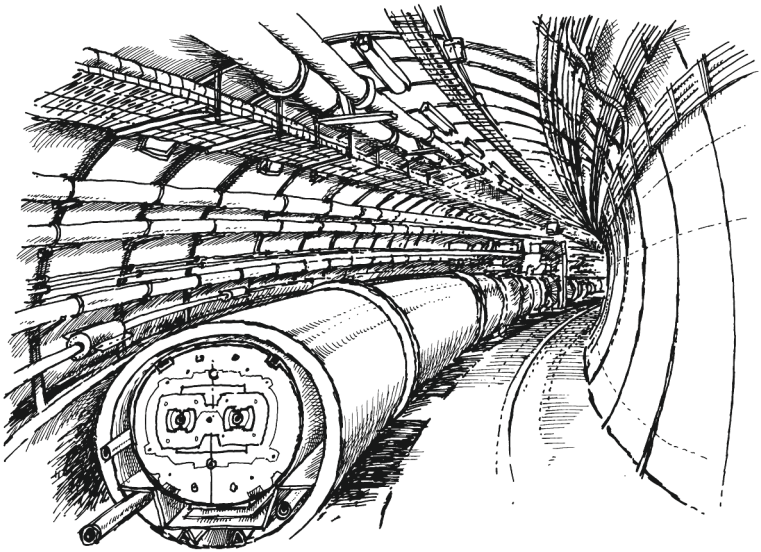
dlouhý urychlovač RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*), který byl v té době největším hadronovým koliderem na světě. Dnes je po LHC na druhém místě. Na RHIC je možné při srážce jader těžkých iontů energie 100 GeV na nukleon (v těžišťové soustavě), což je přibližně desetkrát více než na urychlovači SPS v komplexu CERN, kde bylo QGP objeveno. Experimenty byly (a jsou i nadále) prováděny s izotopem zlata ^{197}Au a izotopem olova ^{208}Pb, produkty srážek jader se zkoumaly na detektorech PHENIX a STAR. Na výzkumu se podílí přes 500 vědeckých pracovníků z 52 vědeckých ústavů celého světa.

Hadronový plyn (v něm jsou kvarky poskládané do dvojic a trojic, nemusí jit jen o protony a neutrony) má zcela odlišné vlastnosti od kvarkového-gluonového plazmatu. Velkým překvapením brookhavenských experimentů bylo, že se kvarky ve fázi QGP nechovaly jako volné částice. Vzniklá látka se spíše chovala jako řídká kapalina. Mezi kvarky se objevily nepříliš silné vazby – nechovaly se ani jako volné, ani nebyly vázány do hadronů. Tato fáze trvala v detektoru pouhých 10^{-20} sekundy, nicméně přinesla více otázek než odpovědí.

V roce 2009 byl v komplexu CERN dostaven v průměrné hloubce přes sto metrů pod povrchem Velký hadronový kolider (LHC)



Obr. 38. Chování kvarků v kvarkovém gluonovém plazmatu se podobá spíše kapalině (napravo) než volným částicím v plynné fázi (nalevo).



Obr. 39. Velký hadronový kolider LHC v komplexu CERN. Na tomto urychlovači dlouhém 27 kilometrů se zkoumá kvarkové-gluonové plazma, stav látky, jaký byl ve vesmíru 10 mikrosekund po jeho vzniku.

o obvodu 27 kilometrů. V kolideru se po většinu roku sledují srážky protonů[48], ke kterým dochází ve čtyřech detektorech: ATLAS, CMS, ALICE a LHCb. V kolideru se ale nesráží jen protony, každý poslední měsíc v roce je věnován srážkám jader těžkých iontů, které vedou na vznik kvarkového-gluonového plazmatu. Specializovaným detektorem pro sledování těchto specifických srážek je detektor ALICE. Historický milník ve výzkumu kvarkového-gluonového plazmatu nastal 7. listopadu 2010, kdy se na urychlovači LHC srazila první dvě jádra olova s vyšší energií než na RHIC. Výzkum kvarkového-gluonového plazmatu se navrátil tam, kde započal, jen na jiný, výkonnější urychlovač. Můžeme se těšit na další zajímavé výsledky a pochopení chování tohoto dosud nepoznaného skupenství látky.

48 **Srážky na LHC** – v těžišťové soustavě je energie každého protonu 3,5 TeV, tj. dohromady 7 TeV. V budoucnosti se počítá s dosažením dvojnásobné energie, tedy 2×7 TeV.

Za několik let by v blízkosti německého Darmstadtu měl ve středisku GSI (z německého *Gesellschaft für SchwerIonenforschung*) vyrůst další zajímavý komplex urychlovačů FAIR (z anglického *Facility for Antiproton and Ion Research*, zařízení pro výzkum antiprotonů a iontů). Na urychlovačích FAIR se budou zkoumat antiprotony a ionty s nejvyšší intenzitou a nejlepší kvalitou svazků. Vznikne 8 kruhových koliderů s obvodem kolem jednoho kilometru, 2 lineární urychlovače a 3,5 kilometru dlouhé kontrolní tubusy pro svazky. Stávající urychlovače ve středisku GSI budou sloužit jako předurychlovače. Podstatná část výzkumu bude věnována kvarkovému-gluonovému plazmatu. Dohodu o výstavbě komplexu FAIR v roce 2010 podepsalo 9 evropských zemí. Předpokládá se, že zde bude pracovat 3000 vědců z 50 zemí světa. Výstavba by měla začít po roce 2013.

Sepětí kosmologie a fyziky elementárních částic

Již v 50. letech 20. století bylo možné na prvních urychlovačích připravit stav látky, který byl ve vesmíru několik sekund po jeho vzniku. O půl století později se podařilo v komplexu CERN připravit kvarkové-gluonové plazma, které bylo ve vesmíru pouhých 10 mikrosekund po jeho vzniku. Na současném největším urychlovači světa LHC bude možné připravit stav látky, jaký ve vesmíru byl pouhou desetinu biliontiny sekundy po jeho vzniku (10^{-13} s). Kosmologie a fyzika elementárních částic se stávají před našima očima jednou jedinou vědeckou disciplinou. Na urychlovačích ověřujeme, jak vypadal vesmír při svém vzniku a vesmír samotný nám poskytuje informace o chování elementárních částic v těch nejextrémnějších situacích. V raném vesmíru měly částice takovou energii, jakou člověk nikdy na žádném urychlovači nedosáhne.

Ověřování úvah o tom, jaký byl raný vesmír lze uskutečnit dvojím způsobem. První možností je dívat se na dosti vzdálené objekty, ze kterých k nám světlo letí velmi dlouho a my vidíme objekt, jak vy-

padal v době, kdy ho světlo opustilo. Druhou možností je aktivně připravovat na urychlovačích stav látky jaký byl v raném vesmíru. Není divu, že vědci nazvali tyto experimenty Malým třeskem.

Víte, že

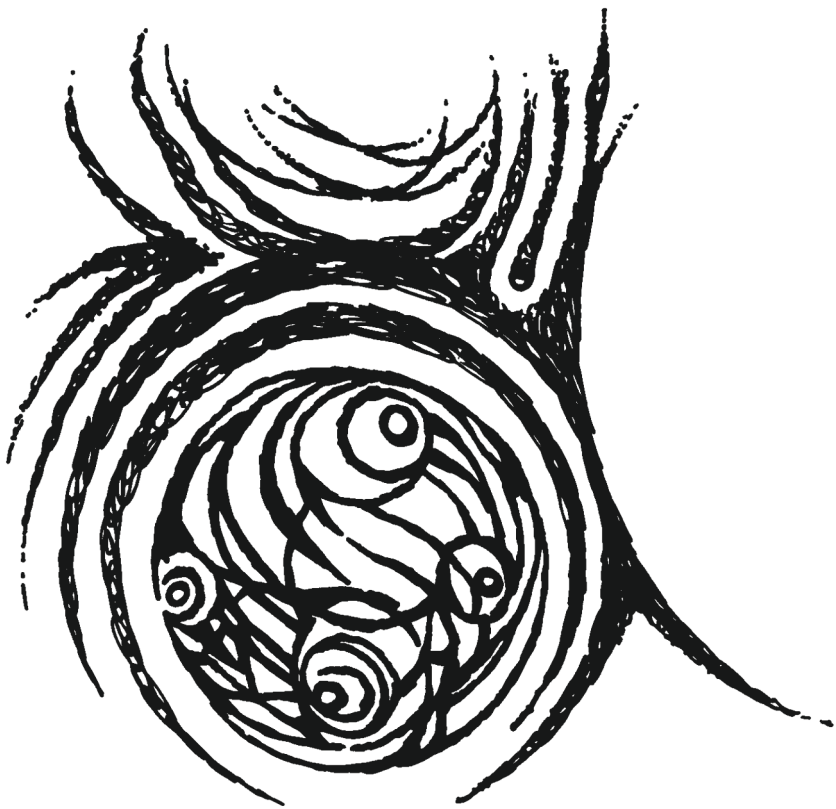
■ Víte, že je kvarkové-gluonové plazma také v nitru velmi hmotných hvězd? Pravděpodobně tvoří vnitřní část jádra neutronových hvězd a možná existují i kvarkové hvězdy, ve kterých je většina látky ve formě kvarkového-gluonového plazmatu.

■ Víte, že v německé středisku GSI byly objeveny prvky meitnerium (^{268}Mt, 1982), hassium (^{278}Hs, 1984), darmstadtium (^{282}Ds, 1994), rentgenium (^{284}Rg, 1994), bohrium (^{272}Bh, 1996) a copernicium (^{285}Cn, 1996)?

■ Víte, že ve středisku CERN vznikl internet? Známý protokol www zde byl původně vyvinut jako nástroj pro sdílení dokumentů v počítačové síti.

Poučení na závěr: *Až si někde přečtete, jak vypadal vesmír pouhý zlomek sekundy po svém vzniku, věřte, že nejde o žádné spekulace, ale o reálné úvahy o stavu látky, jaký dnes dokážeme připravit na největších urychlovačích světa. Neověřené hypotézy začínají až v časech kratších než 10^{-15} s.*

8. Helioseismologie



Cesty, kterými lidé pronikají k podstatě nebeských dění,
jsou stejně podivuhodné jako jevy samotné.
Johannes Kepler

Lenin maják, Lenin zvon, bim bam bom... Tak tenhle poněkud infantilní verš pochází z opěvné básně Vladimira Majakovského na Lenina z dob naštěstí dávno minulých. Kdysi na základní škole jsem se musel naučit tuhle podivnou báseň celou nazpaměť. Kdyby Majakovskij neoslavoval Lenina, ale Slunce, jak to činily mnohé civilizace před námi, mohla báseň přetrvat dodnes a tento nadějný básník nemusel svůj život zakončit v pouhých 37 letech sebevraždou. Verš „*Slunce maják, Slunce zvon, bim, bam, bom*" by totiž byl docela trefný. Slunce se chová jako obrovská rezonanční dutina, která podobně jako zvon zvučí v mnoha tónech. Turbulence ve vzestupných proudech plazmatu pod povrchem tento přírodní zvon neustále rozezvučují. Jako byste na skutečný zvon namířili zevnitř mnoho trysek chrlících na vnitřní povrch zvonu tisíce zrnek písku a on se rozezněl v jemných tóninách daných jeho vlastními frekvencemi. Slunce lze připodobnit k obřímu hudebnímu nástroji. Jsou zde ale dva podstatné rozdíly: 1) hudební nástroje hrají jen občas, Slunce neustále. 2) hudební nástroje mají několik desítek kláves nebo strun či tónů, zatímco Slunce má přes deset milionů vlastních frekvencí. Zvuk Slunce můžeme pozorovat jako jemné chvění jeho povrchu. Pečlivou analýzou těchto oscilací lze zjistit, jaké je Slunce hluboko pod povrchem, nebo dokonce objevit skvrny na jeho odvrácené straně. Je to obdobná technika, jakou využívá lékař při vyšetřování nitra lidského těla za pomoci ultrazvuku nebo seismolog při sledování nitra Země za pomoci seismických vln. V obou případech jsou zvukové vlny, na rozdíl od Slunce, buzeny jen dočasně. Mějte ale trošku trpělivosti. Než si vysvětlíme tuto fascinující techniku, bude užitečné se alespoň orientačně seznámit se slunečním nitrem, s Dopplerovým jevem a kulovými funkcemi. Teprve pak porozumíme snaze odborníků o rozluštění informací zakódovaných ve sluneční hudbě.

Něco málo o Slunci

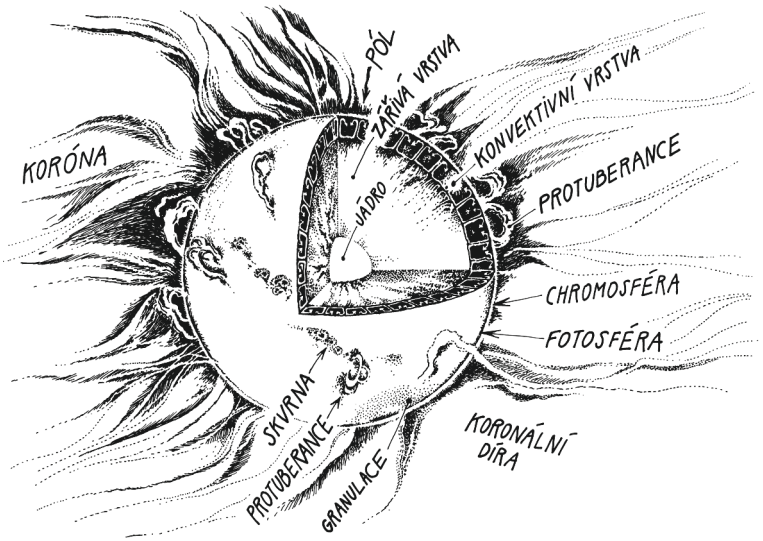
Slunce je hvězdou, stejně tak jako tisíce dalších hvězd, které vidíme na obloze. Jen je k nám relativně blízko, a proto ho vnímáme je výjimečný zdroj světla a tepla. Poloměr Slunce je 700 000 km, hmotnost 2×10^{30} kg. Jde o tzv. hvězdu hlavní posloupnosti, což znamená, že v jejím nitru je zdrojem energie termojaderné slučování vodíku na hélium. Při teplotě 15 milionů kelvinů se v divokém reji srážek protonů a ostatních částic v průměru spojí vždy čtyři protony na jedno jádro hélia, dva pozitrony[49], dvě neutrina[50]. Uvolněnou energii odnáší několik fotonů (viz obrázek 15). Nejvíce zastoupenou sadou reakcí je protono-protonový (pp) řetězec, čestné druhé místo zaujímá uhlíko-dusíko-kyslíkový (CNO) cyklus. S oběma sadami reakcí jsme se již seznámili v kapitole 4 věnované umírající hvězdě Betelgeuse. V nitru Slunce probíhá celá řada dalších reakcí, které již nejsou zdaleka tak dobře prozkoumané jako pp řetězec a CNO cyklus. Pro šíření zvukových vln jsou nejdůležitější tři oblasti: jádro, zářivá vrstva a konvenktivní vrstva.

■ **Jádro**. Jde o nejvnitřnější oblast Slunce. V jádru je soustředěna polovina hmotnosti celého Slunce a produkuje se zde 98 % veškeré energie unikající ze Slunce. Jádro lze tedy považovat za termojaderný kotel, který je výhradním dodavatelem energie pro celou hvězdu. Jádro sahá do vzdálenosti 0,25 $R_{\odot}$, tj. přibližně do 175 000 km od středu Slunce.

■ **Zářivá vrstva**. Energie uvolněná při termojaderné syntéze v jádru se v této vrstvě šíří zářením. Energetický foton uletí v okolním plazmatu několik centimetrů a poté je zachycen a opětovně vyzářen v náhodném směru. Fotony tak putují zcela chaoticky a jen pomalu difundují směrem od jádra. Průchod fotonu k povrchu

49 **Pozitron** – antičástice k elektronu. Teoreticky existenci pozitronu předpověděl Paul Dirac v roce 1928. Experimentálně ho objevil v kosmickém záření Carl Anderson v roce 1932.

50 **Neutrina** – částice, které rodově přísluší k tzv. leptonům. Nemají elektrický náboj, neinteragují silně ani elektromagneticky, látkou většinou procházejí. Neutrina známe ve třech generacích – elektronová, mionová a tauonová. První neutrino bylo objeveno v roce 1956 v jaderné elektrárně v Savannah River.



Obr. 40. Řez Sluncem.

zářivé vrstvy může trvat stovky tisíc až milion roků. Zářivá vrstva se také někdy nazývá vrstva v zářivé rovnováze nebo radiační zóna. Sahá do vzdálenosti 0,713 $R_{\odot}$, tj. její horní část je 500 000km od středu a 200 000km od povrchu Slunce. Jde o stabilní oblast, jež na určitém poloměru rotuje ve všech heliografických šířkách[51] přibližně stejnou rychlostí.

■ **Konvektivní vrstva**. V oblasti nad 0,713 $R_{\odot}$, (200 000 km pod povrchem Slunce) je teplota již natolik nízká, že se dominantním způsobem přenosu energie stane proudění. Vzestupné proudy plazmatu přinášejí energii až k povrchu. Sestupné proudy odnášejí chladnější plazma dolů, k rozhraní mezi zářivou a konvektivní vrstvou. Pro fotony je plazma nadále neprůhledné, opět jsou zachytávány a opětovně vyzařovány v náhodném směru, ale proud horkého plazmatu mířící vzhůru je unáší k povrchu podstatně rychleji než v zářivé vrstvě. Vrcholky proudů jsou na povrchu

51 **Heliografická šířka** – úhlová vzdálenost od rovníku. Heliografická šířka rovníku je 0°, severního pólu 90° a jižního pólu –90°.

Slunce patrné jako zrna, kterým říkáme granulace. Pro konvektivní vrstvu je typická diferenciální rotace, vrstvy v různých heliografických šířkách se otáčejí různou rychlostí.

Slunce – některé parametry	
hmotnost	2×10^{30} kg
poloměr	700 000 km
poloměr jádra	175 000 km
poloměr vrchní části zářivé vrstvy	500 000 km
doba otočení povrchu kolem osy	rovník: 25 dní u pólů: 35 dní
chemické složení	vodík: 70 % hélium: 28 % těžší prvky: 2 %
celkový výkon	4×10^{26} W
průměrná hustota	1,4 g/cm^3
magnetické pole	10 až 300 μT
magnetické pole ve skvrnách	až 0,3 T

Vzestupné a sestupné proudy v konvektivní vrstvě jsou podobné klokotu vařící se vody, turbulence jsou zdrojem zvukových vln, stejně tak, jako když zaslechneme charakteristický zvuk vody vařící se v rychlovarné konvici. Rozdíl je jen ten, že na Slunci jsou vzdálenosti mezi spodní horkou vrstvou a horním chladným povrchem podstatně větší než u vařící se vody v konvici. Větší jsou i proudy a turbulence. Čím větší jsou rozměry hudebního nástroje, tím hlubší tón vydává. Vzpomeňte si na tóny malých houslí a velké basy. A Slunce, to je skutečně obří hudební nástroj a jeho tóny jsou natolik hluboké, že by je lidské ucho nikdy nemohlo uslyšet. Je zde ale i jiný důvod, proč sluneční hudbu neslyšíme. Zvuk potřebuje ke svému šíření látku určité hustoty a v prostoru mezi Sluncem a naší Zemí je koncentrace částic velmi malá. Hudba, jíž vydává Slunce, by u Země nebyla slyšitelná. Přesto ji můžeme zaznamenat

– zvukové vlny rozechvívají sluneční povrch a toto chvění dokážeme pozorovat speciálními přístroji.

Zvukové vlny se, na rozdíl od světelných, snadno šíří slunečním nitrem a přinášejí na povrch cenné informace o procesech v hlubinách naší nejbližší hvězdy. Chceme-li nahlédnout pod sluneční povrch, nemůžeme k tomu použít elektromagnetické záření. To, které vidíme, je generováno v těsné blízkosti povrchu a nese minimum informací o dějích hluboko pod povrchem. Nejsme ale bezradní. Máme dokonce dvě možnosti: zvukové vlny a neutrina. Sluneční látkou snadno procházejí. Neutrina vznikají v termojaderném kotli v jádru Slunce a poté bez problémů proletí zářivou i konvektivní vrstvou a my jejich malou část můžeme zachytit v pozemských detektorech. Pro pozorování zvukových vln jsme vyvinuli specializované přístroje, o kterých si v této kapitole povíme.

Dopplerův jev

Dopplerův jev poprvé zformuloval rakouský matematik a fyzik Christian Doppler (1803–1853) v roce 1842, kdy pracoval na pražském Polytechnickém ústavu (dnešní České vysoké učení technické v Praze). Doppler si povšimnul, že frekvence děje vnímaná pozorovatelem závisí na vzájemné rychlosti zdroje a pozorovatele.

Jde o zcela obecný jev, který se týká všech periodických dějů. Představte si, že po silnici jezdí jedním směrem pravidelně autobusy každé 4 minuty. Pokud budete stát, projede kolem každé 4 minuty autobus. Pokud pojedete na kole proti směru autobusů, budete je potkávat častěji, dejme tomu jednou za tři minuty. Pokud pojedete ve směru pohybujících se autobusů, budou vás míjet méně často, dejme tomu jednou za pět minut. Frekvence děje tedy závisí na vzájemném pohybu zdroje a pozorovatele, pokud se vzájemně přibližují, frekvence je vyšší, pokud se vzdalují, je nižší.

Určitě znáte Dopplerův jev také u projíždějícího automobilu. Automobil vydává hluk na určité frekvenci. Pokud se k vám přibli-

žuje, je frekvence vyšší, než když se vzdaluje. Při míjení uslyšíte charakteristickou změnu z frekvence vyšší na nižší. Vyšší frekvence patří přibližujícímu se autu, nižší vzdalujícímu se. Jako další příklad uvažujme šikmo padající déšť. Padající kapky sice nejsou dokonale periodickým dějem, ale pokud poběžíte proti dešti, budete vnímat vyšší frekvenci kapek a zmoknete více, než kdybyste běželi ve směru padajících kapek. A ještě jeden zajímavý příklad. Znáte triangl? Jde o hudební nástroj ve tvaru trojúhelníku, když do něho udeříte vydává tón určité výšky. Zkuste přitom triangl roztočit. Tón se úplně změní, jeho frekvence bude kolísat podle toho, jak se k vám při otáčení bližší část trianglu přibližuje (má vyšší frekvenci) a poté vzdaluje (má nižší frekvenci).

Nás bude nejvíce zajímat Dopplerův jev pro světlo. Světelné záření většiny zdrojů je složené z mnoha vlnových délek a lze ho za pomoci hranolu nebo mřížky rozložit na spektrum, kde jsou jednotlivé barvy vedle sebe. Duha na obloze není nic jiného než spektrum slunečního světla, které vzniklo lomem na vodních kapkách. Látka vydávající záření má v atomárních obalech některé charakteristické přechody. Elektron, který přeskočil z vyšší hladiny na nižší emituje světelné kvantum o určité frekvenci. Přeskoky mnoha elektronů způsobí vznik tzv. emisní (světlé) čáry ve spektru. Takový mechanizmus funguje například u rozžhaveného plynu, v jehož spektru nalezneme řadu emisních čar. Pokud světlo prochází chladnějším plynem, elektrony naopak zachytávají fotony vhodné frekvence a ve spektru se objeví charakteristické absorpční (tmavé neboli Kirchhoffovy) čáry.

Ve spektru hvězd a galaxií nalezneme jak emisní, tak absorpční čáry. Z jejich posuvu vůči pozadí můžeme snadno zjistit, zda se k nám daný objekt přibližuje, nebo se od nás vzdaluje. V roce 1929 pořizoval americký astronom Edwin Hubble (1889–1953) spektra vzdálených galaxií a zjistil, že jejich spektrální čáry jsou posunuté k červenému konci spektra. To znamenalo, že všechny vzdálené galaxie se od nás vzdalují a vesmír expanduje. (Nelekejte se toho, že vesmír expanduje právě od nás, totéž by viděli i jiní pozorovatelé

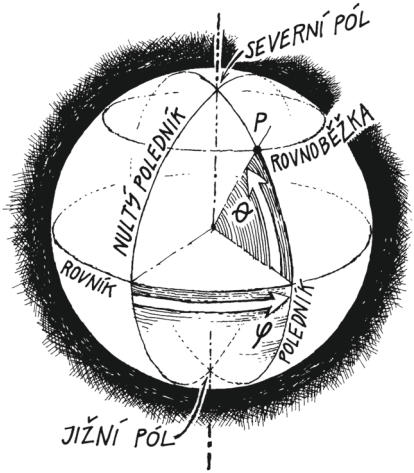
ve vesmíru. Vesmír totiž expanduje z každého místa, ze všech svých bodů, obdobně jako gumová páska, kterou natahujete.)

Dopplerův jev je také klíčovým nástrojem při vyšetřování zvučícího Slunce. Zvukové vlny šířící se Sluncem způsobují jemné chvění jeho povrchu. Látka se v některých místech pohybuje směrem k nám a v jiných od nás, podobně jako voda na rozvlněné hladině. Tyto pohyby způsobují nepatrné, ale přece jen měřitelné posuvy spektrálních čar, ze kterých lze snadno získat velice cenné informace o nitru našeho Slunce.

Od sinusovky ke kulovým funkcím

V rozezvučeném tělese vždy najdete určité typické vlny neboli módy, ze kterých je složeno jakékoli, i velmi složité vlnění. Pokud rozezvučíte napjatou strunu, obdélníkový gong nebo kvádr, jsou oněmi základními módy sinové nebo kosinové vlny různých frekvencí. Funkci sinus zná snad každý. Jejím grafem je pravidelná vlnovka, zkrátka přesně útvar, který bychom u vlnění očekávali. Podobnou funkcí je kosinus, který je jen posunutý tak, že tam, kde má sinusovka vrchol, má kosinusovka uzel (prochází nulou). Ze sinusovek a kosinusovek různých frekvencí můžete skládat různá vlnění. Důležitá je ale i obrácená úloha, které se říká *frekvenční* neboli *Fourierova analýza*. Jde o rozložení obecné vlny na základní frekvenční módy. Ze zastoupení jednotlivých módů (frekvencí) lze pak zjistit velikost zdroje vlnění a jeho další vlastnosti.

Rozezvučíme-li kruhový nebo oválný gong, se sinusovkou nevystačíme. Základní zvukové módy jsou složitější. Nás budou nejvíce zajímat kmity povrchu sféry, kde platí to samé: sinus a kosinus již k popisu kmitů nestačí. Zaveďme si na sféře souřadnice. Nejprve vybereme jednu kružnici, kterou budeme považovat za rovník. Na ní zvolíme počáteční bod, od kterého budeme souřadnice odečítat (na nebeském rovníku jde například o jarní bod, na povrchu Země jde o průsečík s poledníkem procházejícím anglickou Greenwi-



Obr. 41. Souřadnice bodu P na sféře: φ je úhlová délka, θ úhlová šířka.

chí). Nejvzdálenější body od rovníku nazýváme póly, jeden z nich označíme jako severní, druhý jako jižní. Základ souřadnic bychom měli. První souřadnici budeme říkat délka a měříme ji od zvoleného bodu ve stupních ve směru rovníku. Může nabývat hodnot od 0° do 360°. Na Zemi ji nazýváme zeměpisná délka, na Slunci heliografická délka. Body se stejnou délkou leží na poledníku. Druhou souřadnicí bude šířka. Vyjadřuje odklon od rovníku a je měřena opět ve stupních. Body na rovníku mají šířku 0°, severní pól +90° a jižní pól –90°. Na Zemi ji nazýváme zeměpisná šířka, na Slunci heliografická šířka. Body se stejnou šířkou leží na rovnoběžce.

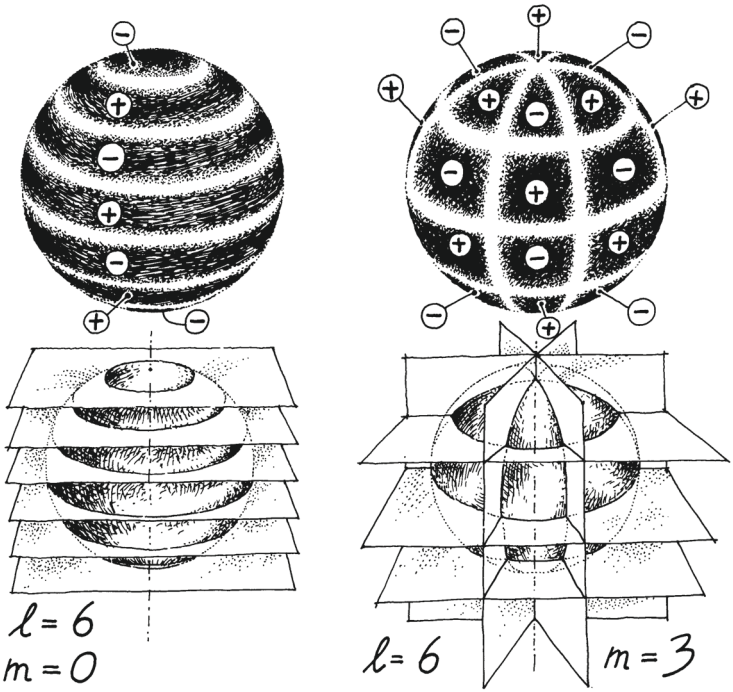
Základní módy kmitů povrchu sféry jsou v matematice popsány tzv. kulovými funkcemi[52]. Na povrchu sféry je to obdoba sinusovky či kosinusovky, kterou známe z kmitů obdélníku. Rozkmitání povrchu sféry znamená, že některá místa se ocitnou ve vzdálenosti větší, než je poloměr sféry (kopečky), jiná ve vzdálenosti menší (údolí). Linie, které zůstaly na původním poloměru nazýváme

52 **Kulové funkce** – z matematického hlediska je o tzv. vlastní stavy úhlové části Laplaceova operátoru.

uzlové linie. Počet uzlových linií na povrchu sféry označujeme písmenem l a nazýváme *sférická harmonická* (také *stupeň oscilací* nebo *vlnové číslo*). Pokud je $l = 0$, sféra jen „dýchá“, tj. nafukuje se a splaskává v radiálním směru. Pro $l \neq 0$ se na povrchu sféry již objevují kopečky a údolí. Čím větší je sférická harmonická, tím menší plochu na povrchu sféry zaujímají kopečky a údolí a tím kratší vlnovou délku má popisovaná vlna. Pro konkrétní hodnotu sférické harmonické l existuje celkem $2l+1$ základních módů vln, které mají všechny stejný počet uzlových linií. Tyto módy označujeme *azimutálním číslem m* (neboli *řádem*), které určuje, kolik uzlových linií protnulo rovník. Nejvyšší možná hodnota je samozřejmě l, tj. všechny uzlové linie protnuly rovník. Nejmenší možná hodnota je nula – žádná uzlová linie rovník neprotnula. Azimutální číslo může mít i záporné hodnoty, jde o zrcadlově symetrická řešení – vlnění vypadá stejně jako s kladným m, ale je jeho zrcadlovým obrazem vzhledem k rovině rovníku. Celkem tedy ke každé sférické harmonické l existuje $2l+1$ základních vlnových módů lišících se číslem m, které může nabývat hodnot $-l$, $-l+1$,..., 0, $l-1$, l. Například pro $l = 2$ existuje 5 vlnových módů lišících se hodnotou $m = -2, -1, 0, 1, 2$.

Pro vysoké hodnoty čísel l a m (na slunečním povrchu mohou tato čísla dosáhnout hodnot i přes 2000) připomíná povrch vlnící se koule šachovnici. Políčka šachovnice jsou oddělena uzlovými liniemi a je-li jedno políčko právě nad původní plochou sféry, budou sousední políčka pod původní plochou sféry. Po čase si svou polohu vymění. Na rozezvučeném povrchu Slunce umíme identifikovat až 10 milionů různých módů s různými čísly l a m. Ty se spolu skládají do výsledného rozvlnění povrchu.

Pokud platí kulová symetrie, mají všechny módy se stejným číslem l stejnou frekvenci. Takový stav se nazývá *degenerací* (degenerace znamená, že módy se stejným l a různým m mají jedinou frekvenci). Je-li symetrie vlnícího se objektu nějak narušena, například rotací objektu, degenerace mizí a například frekvence dvou vlnových módů zobrazených na obrázku 42 bude při rotaci objektu různá.



Obr. 42. Dva ze základních módů vlnění se sférickou harmonickou $l = 6$, tj. na povrchu sféry je šest uzlových linií (dole jsou znázorněny uzlové plochy). Na levém obrázku neprotíná žádná z nich rovník ($m = 0$), na pravém protínají rovník tři ($m = 3$). Na obrázcích jsou počítačem zobrazeny příslušné kulové funkce Y_{lm} (Y_{60} a Y_{63}).

Kulové funkce se objeví všude tam, kde řešíme problematiku se sférickou symetrií. V astronomii se s nimi setkáme ještě například při frekvenční analýze fluktuací reliktního záření. Opět se zjišťuje, jak jsou na snímku fluktuací reliktního záření zastoupeny jednotlivé l a m módy vlnění (tentokrát je naším povrchem koule nebeská sféra v nekonečné vzdálenosti). Z jejich zastoupení je možné určit řadu důležitých charakteristik našeho vesmíru (stáří, zakřivení, zastoupení jednotlivých entit atd.). V kvantové teorii se setkáme s kulovými funkcemi při popisu momentu hybnosti (točivosti) těles. Sférická harmonická l se zde nazývá *vedlejší kvantové číslo* a lze

z něho určit velikost momentu hybnosti tělesa. Azimutální číslo m se v kvantové teorii nazývá *magnetické kvantové číslo* a určuje velikost projekce momentu hybnosti do určité souřadnicové osy. K jedné hodnotě vedlejšího kvantového čísla l opět existuje $2l+1$ různých čísel m, tedy $2l+1$ možných projekcí momentu hybnosti.

Z uvedených příkladů je patrné, jak důležité jsou kulové funkce pro fyziky i matematiky. Každý kvalitní matematický software (například MATLAB nebo MATHEMATICA) umožňuje vykreslit kulové funkce a pokud některý z čtenářů uvedené programové balíky vlastní, může si pohrát s různými druhy základních vlnových módů na sféře (nejprve si jen různé módy zobrazujte, pak je zkuste skládat dohromady).

Přístroje zkoumající sluneční hudbu

Životnost různých módů je na Slunci různá. Může trvat od několika dnů do několika měsíců. V průběhu této doby se vybuzený mód samovolně utlumí. Turbulence v konvektivní vrstvě ho ovšem budou budit znova a znova. Pokud má mít měření zvučícího Slunce nějaký význam, musí trval několikanásobně déle, než je životnost sledovaného módu. A v tom je základní kámen úrazu při pozorování ze Země. Otáčející se Země s sebou přináší střídání dne a noci a tím pádem přerušení pozorování nejdéle po dvanácti hodinách (pokud nepozorujeme z pólu). Problém lze řešit třemi způsoby:

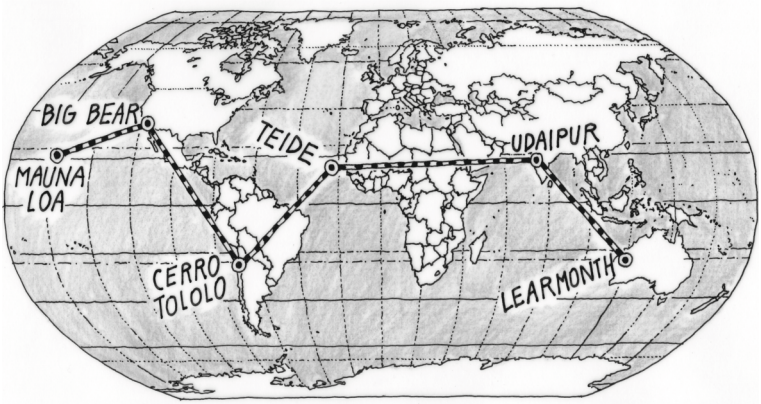
1. **Pozorování z polárních oblastí.** *V okolí pólů trvá den půl roku. Taková pozorovací sada je již dostatečně dlouhá. Proto se uskutečňují expedice, jejichž cílem je dlouhodobé nepřerušované pozorování Slunce z polárních oblastí. Úspěch takové expedice samozřejmě závisí podstatnou měrou na počasí.*

2. **Pozorování z více pozemských stanic.** *Druhou možností je kombinovat data z několika stanic vhodně rozmístěných na povrchu Země. Pokud na jedné stanici Slunce zapadne, převezme její úlohu jiná stanice, ze které je v tu dobu Slunce viditelné. Takovou sítí je například pozorovací síť GONG.*

3. **Pozorování z vesmíru.** *Poslední možností je trvalé pozorování Slunce z vesmíru, kde je možné uskutečnit dlouhé nepřerušované pozorovací sady. K nejproslulejším slunečním observatořím patří SOHO a její následovnice SDO.*

V tomto krátkém přehledu se stručně seznámíme s pozemským projektem GONG a vesmírnými observatořemi SOHO a SDO.

■ **GONG.** Projek\t GONG je součástí americké observatoře NSO (z anglického *National Solar Observatory*, Národní sluneční observatoř). Samotné slovo GONG je zkratkou z anglického *Global Oscillation Network Group* neboli *Globální síť pro výzkum oscilací*. Cílem projektu je výzkum slunečního nitra z analýzy slunečních oscilací zaznamenávaných na povrchu Slunce. Za tím účelem bylo postaveno celkem šest stanic, jejichž polohy umožňují téměř nepřetržité monitorování Slunce. Nejzápadnější je stanice Mauna Loa na Havajských ostrovech. Na západním pobřeží severní Ameriky je kalifornská stanice Big Bear, v Chile v jižní Americe je stanice Cerro Tololo, na Kanárských ostrovech stanice Teide, v Indii observatoř Udaipur a šestici uzavírá australská observatoř LSO (Learmonth Solar Observatory). Všech šest stanic je plně automatických a mohou pracovat bez lidské obsluhy. Jejich srdcem je Michelsonův-Dopplerův interferometr (MDI) na optické lavici, do níž je sluneční světlo přiváděno ve vodorovném směru za pomoci dvou zrcadel sledujících Slunce. Vstupní otvor přístroje je 2,8 cm, ohnisková vzdálenost 1 m. Soustava filtrů vybere okolí absorpční čáry neutrálního niklu s vlnovou délkou 676,8 nm. Laditelné interferometry měří intenzitu této čáry na několika vlnových délkách (resp. frekvencích) v těsném okolí této čáry. Tím je možné určit Dopplerův posuv zvolené spektrální čáry a z něho dopočíst aktuální rychlost plazmatu. Tento proces se provede pro každý pixel. MDI na stanicích GONG měli v letech 1995 až 2001 rozlišení 256×256 pixelů a od roku 2001 pracují s rozlišením 1024×1024 pixelů. Vzniklý obraz radiálních rychlostí plazmatu se nazývá *dopplerogram*. Interferometry na stanicích GONG jsou schopné pořídit jeden dopplerogram za minutu. Pořizují se série snímků

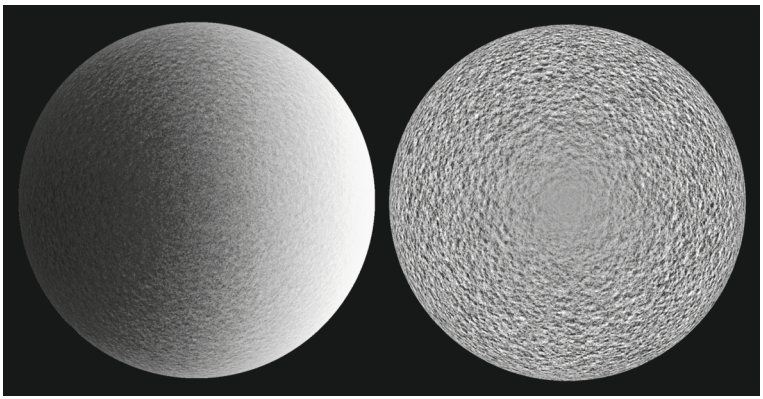


Obr. 43. Síť stanic GONG.

dlouhé 36 nebo 72 dní. Množství dat je tedy enormní, jedna série představuje 51 840 nebo 103 680 dopplerogramů.

■ **SOHO.** Tato sluneční observatoř je společným projektem americké NASA a evropské ESA. Byla vypuštěna v roce 1995 a je umístěna v Lagrangeově bodě L1. Tento bod je 1,5 milionů kilometrů od Země směrem ke Slunci. Vyrovnají se v něm přitažlivé síly Země a Slunce s odstředivou silou vznikající při oběhu sondy kolem Slunce. Název sondy vznikl jako zkratka z anglického *SOlar and Heliospheric Observatory*. Hlavním cílem je pozorování a výzkum slunečního povrchu, atmosféry, koróny a slunečního větru. Základem observatoře je dalekohled EIT o průměru 12 cm. Nás ovšem nejvíce zajímá Michelsonův-Dopplerův interferometr MDI, jehož činnost byla ukončena 12. dubna 2011. Přístroj MDI je podobné konstrukce jako intrerferometry na stanicích GONG. K pořizování dopplerogramů využíval také spektrální čáru neutrálního niklu s vlnovou délkou 676,8 nm a sledoval její změny způsobené oscilacemi. Přístroj pořídil první dopplerogram dne 21. prosince 1995 a poslední dne 12. dubna 2011. Sonda chrlila jeden dopplerogram za minutu s rozlišením 1024×1024 pixelů.

■ **SDO**. Jde o sluneční observatoř americké NASA, která byla vynesena raketou Atlas V na geosynchronní dráhu v únoru 2010. Název observatoře je zkratkou z anglického Solar Dynamics Ob-



Obr. 44. Dopplerogramy pořízené přístrojem MDI na observatoři SOHO. Tmavá barva zobrazuje rychlost plazmatu směrem k pozorovateli, světlá směrem od pozorovatele. Na levém Dopplerogramu je vidět vliv rotace Slunce, na pravém dopplerogramu je rotace Slunce odečtena. Dobře patrná je tzv. supergranulace.

servatory. Data jsou bez ukládání přenášena přímo do pozemské stanice ve White Sands. Základem observatoře jsou čtyři dalekohledy o průměru 20 cm, pomocí kterých je sledováno Slunce celkem v deseti spektrálních čarách (od extrémního UV po viditelné světlo). Jeden snímek je možné pořídit každých deset sekund, a je proto možné z nich snadno skládat videa procesů probíhajících na Slunci. Rozlišovací schopnost je kolem 1 obloukové vteřiny. Dalším přístrojem je EVE (z anglického EUV Variability Experiment), zařízení určené pro sledování fluktuací ultrafialového záření od Slunce, které významně ovlivňuje horní vrstvu atmosféry Země. Na observatoři je také helioseismometr a magnetometr HMI (z anglického Helioseismic and Magnetic Imager), který je následovníkem přístroje MDI na observatoři SOHO. Pořizuje dopplerogramy a současně je schopen vytvořit mapu magnetických polí na povrchu Slunce. Helioseismometr HMI využívá spektrální čáru neutrálního železa o vlnové délce 617,3 nm a má uhlové rozlišení 1″. Jen pro zajímavost: přirozená šířka čáry je přibližně 10 pikometrů, posun čáry způsobený zvukovou vlnou je řádově 0,0002 pm, to znamená, že podíl posunu a šířky čáry je řádově

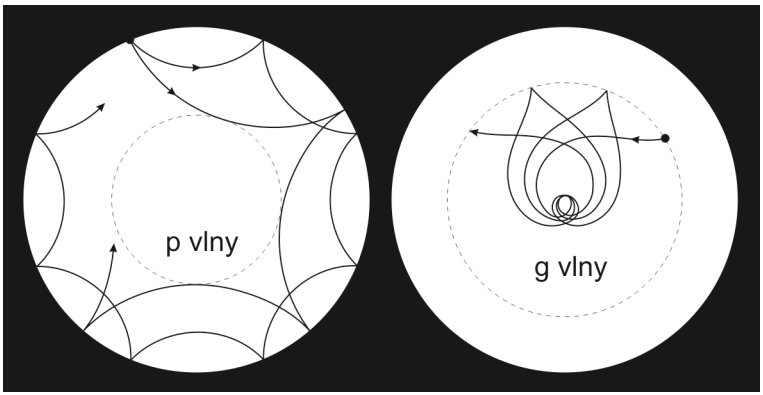
10^{-5}! Sonda tedy musí měřit se zcela výjimečnou přesností. Jeden dopplerogram pořídí za méně než 50 sekund. Vstupní otvor přístroje má průměr 14 cm, ohnisková vzdálenost je 495 cm, rozlišení 4096×4096 pixelů a životnost by měla být delší než pět roků. Jde zatím o nejdokonalejší přístroj schopný pořizovat dopplerogramy. Portrét observatoře SDO naleznete na obrázku 14 v barevné příloze.

Helioseismologie

Helioseismologie je vědní obor, který studuje sluneční nitro na základě pozorování akustických vln na povrchu Slunce. Samotný název vznikl složením tří řeckých slov: *helios* (Slunce, světlo), *seismos* (třesení), *logos* (pochopení, rozprava).

Za počátek helioseismologie lze považovat již rok 1960, kdy američtí astronomové Robert Leighton (1919–1997), Robert Noyes a George Simon objevili (při sledování Dopplerova posunu absorpčních čar) pětiminutové oscilace slunečního povrchu. Pozorovali je v 18 metrů vysoké sluneční věži na observatoři Mt. Wilson v jižní Kalifornii a poté je systematicky zkoumali několik následujících let. Nicméně k plnohodnotnému vědnímu oboru vedla ještě dlouhá cesta. V roce 1970 vysvětlili původ pětiminutových oscilací Roger Ulrich, John Leibacher a Robert Stein. Ukázali, že Slunce může fungovat jako rezonanční akustická dutina a rozezvučit se podobně jako zvon. V roce 1980 byly za pomoci helioseismologie objeveny podpovrchové torzní oscilace Slunce, v roce 1997 plazmové řeky a od roku 2001 je rutinně zobrazována za pomoci zvukových vln odvrácená strana Slunce. Helioseismologie se stala účinným nástrojem pro výzkum naší nejbližší hvězdy.

Slunečním nitrem se, na rozdíl od Země, nešíří různé střižné vlny, ve kterých se látka vysouvá do boků, tedy napříč směru šíření. Sluncem se šíří zejména podélné vlny, ve kterých částice plazmatu kmitají ve směru šíření vlny a tím vytvářejí charakteristické oblasti zhuštění a zředění plazmatu. Ve Slunci rozlišujeme tři základní druhy vln: *p vlny*, *g vlny* a *f vlny*.



Obr. 45. Základní dva druhy vln ve Slunci. Šíření vln p i g je omezeno jen na určitou oblast Slunce, které se pro ně chová jako dutinový rezonátor.

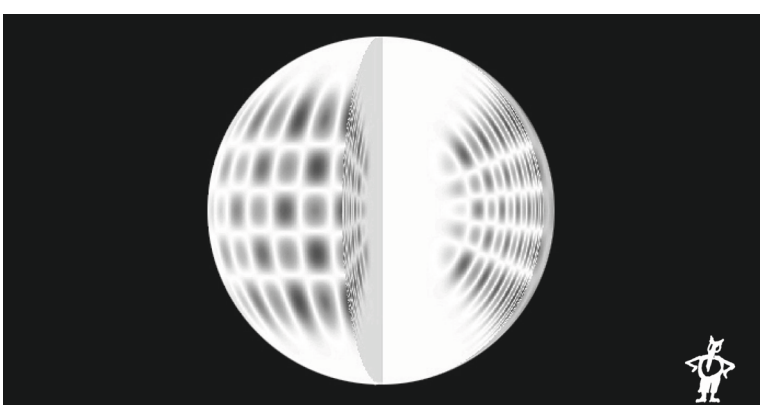
P vlny jsou vlny, kde vratnou silou je tlak plazmatu, proto se označují písmenkem *p* (z anglického *pressure*, tlak). Dobře procházejí slunečním nitrem, odrážejí se od povrchu Slunce a při průchodu Sluncem se mění s rostoucí hustotou a teplotou jejich rychlost. Proto se nepohybují přímočaře, ale postupně se lámou tak, že se dostanou jen do určité vzdálenosti od jádra a poté se vrátí zpět k povrchu (viz obrázek 45). Výsledkem je, že Slunce funguje jako rezonanční dutina, v níž jsou tyto vlny uzavřeny a mohou vytvořit stojaté vlnění.

Jednotlivé módy p *vln* jsou jednoznačně určeny třemi čísly. K sférické harmonické *l* a azimutálnímu číslu *m* přibude ještě radiální číslo *n*, které popisuje vlnění v radiálním směru. Radiální číslo určuje počet uzlů vlny od středu Slunce až k povrchu. Počet módů, na kterých může Slunce zvučet je přes 10 milionů. Různé módy lze využít k výzkumu různých částí slunečního nitra. Na obrázku 46 si povšimněte, že směrem do hloubky vlnová délka p vln roste, tím se mění jejich rychlost, dochází k lomu a odklonu od přímého šíření, jak je patrné na obrázku 45. Vlnové délky p vln jsou od 1 000 km výše. Perioda oscilací zabírá širokou škálu od 1,5 minuty do 20 minut (tomu odpovídají frekvence od 1 do 10 milihertzů) s ostrým maximem kolem 5 minut (frekvence 3,3 mHz). Pětiminutové

oscilace jsou na Slunci nejvýraznější a byly objeveny jako první již v roce 1960. Jejich výchylka na povrchu činí stovky kilometrů. Amplituda rychlosti těchto oscilací je 0,1 metru za sekundu.

G vlny jsou vlny, u kterých je vratnou silou gravitace proto mají v názvu písmeno g. Podle teorie by se měly šířit především ve slunečním nitru a mít frekvenci do 0,4 mHz. Šíří se jen do vzdálenosti 0,7 $R_{\odot}$ od centra, tedy především v jádře Slunce a v zářivé vrstvě. Jde o jediné vlny, které prochází samotným slunečním jádrem. V konvektivní vrstvě jsou g vlny silně tlumené a na povrchu jsou téměř nepozorovatelné. Existuje několik měření, která by mohla souviset s g vlnami, ale žádné z těchto měření není dostatečně průkazné. *F vlny* jsou povrchové vlny, u kterých je vratnou silou gravitace. Připomínají vlny na rybníku nebo na moři. Jejich existence je vázána na povrch Slunce. Označení vln souvisí s anglickým slovem *fundamental* (základní). Sférická harmonická *l* těchto vln bývá relativně nízká, od 117 do přibližně 300.

K vyšetřování podpovrchových vrstev Slunce se dnes výhradně využívají p vlny, které se šíří nitrem Slunce a jejich analýzou lze zjistit řadu zajímavých jevů probíhajících nejen hluboko pod povrchem, ale i na odvrácené straně Slunce.

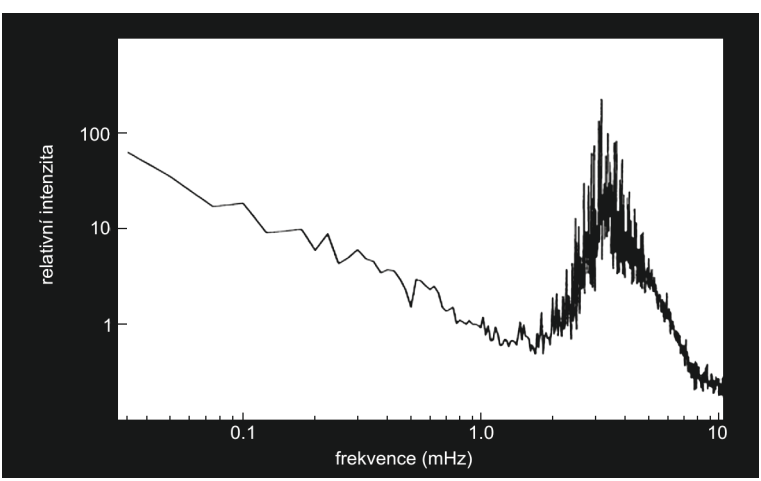


Obr. 46. P vlny na Slunci (n = 14, l = 20, m = 16). Barevnou verzi naleznete na obrázku 15 v barevné příloze.

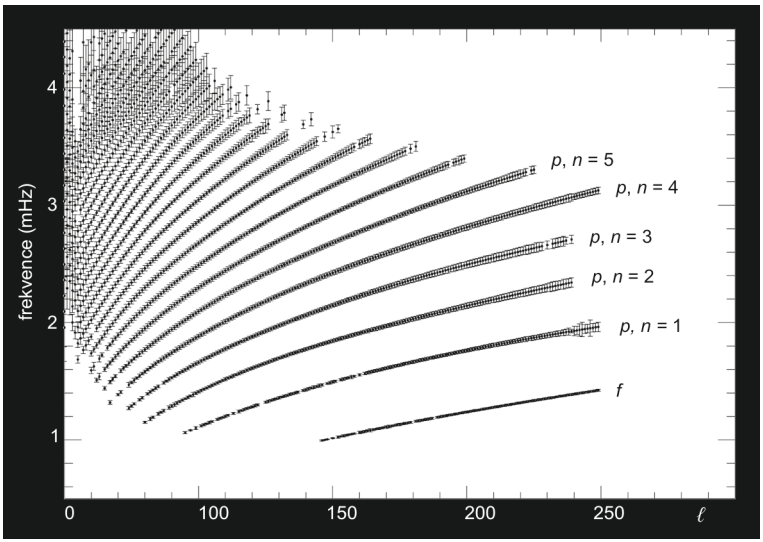
Analýza dopplerogramů

Pořízení sady dopplerogramů je teprve začátek titěrné práce mnoha odborníků. Jednou z úloh je zjištění zastoupení různých frekvencí v sadě měření. Typický výsledek je na obrázku 47. Na první pohled je zřejmé, že nejzastoupenější jsou frekvence kolem 3 mHz, což odpovídá pětiminutovým oscilacím objeveným již v roce 1960.

K nejdůležitějším úkolům patří sestavení tzv. *l-ν* diagramu neboli *grafu disperzní relace*. Na vodorovné ose je sférická harmonická *l*, která je nepřímo úměrná vlnové délce. Na svislé ose je frekvence. Každý identifikovaný mód s určitou sférickou harmonickou a frekvencí představuje jeden bod v diagramu. Pokud identifikujeme velké množství vln a budeme jejich *l* a *ν* vynášet do *l-ν* diagramu, body ho nevyplní spojitě, ale vzniknou v něm zřetelné větve, jako na obrázku 48. Každá z nich odpovídá jednomu konkrétnímu radiálnímu číslu. Pohybujeme-li se po dané větvi směrem vzhůru, klesá vlnová délka a roste frekvence. Nejspodnější větev diagramu patří povrchové *f* vlně. Barevný graf disperzní relace naleznete na



Obr. 47. Zastoupení frekvencí oscilací *p* vln měřené observatoří SOHO mezi 19. únorem a 25. březnem 1996. Pětiminutovým oscilacím odpovídá výrazné maximum na 3,3 mHz.



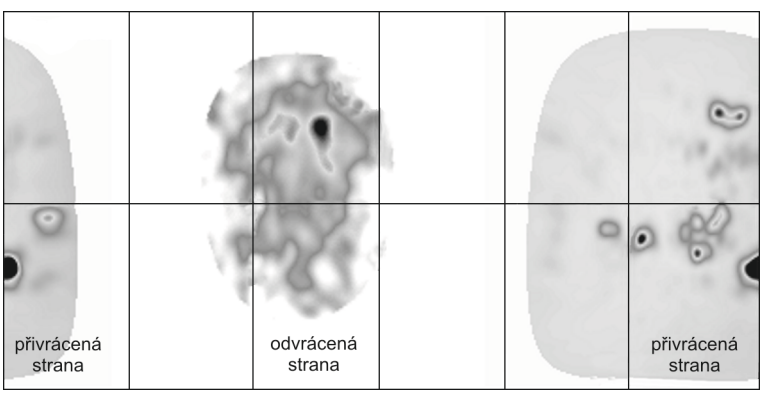
Obr. 48. Graf disperzní relace pro malá čísla *l* sestavený z dvouměsíčního měření přístrojem MDI na sondě SOHO.

obrázku 16 v barevné příloze. Barvou je znázorněna intenzita naměřeného signálu.

Podpovrchové útvary, stejně tak jako skvrny na odvrácené straně Slunce, ovlivní šíření zvukového pole. K nejzajímavějším úlohám patří rekonstrukce obrazu těchto útvarů ze zvukové nahrávky. Jde o komplikovanou matematickou úlohu, které se říká *helioseismická holografie*. Obraz odvrácené strany zrekonstruovaný ze zvukového pole sledovaného na přivrácené straně je sice neostrý, ale základní útvary jsou v něm dobře postřehnutelné. První kvalitnější akustické hologramy odvrácené strany se podařilo získat kolem roku 2000. Jeden z nich vidíte na obrázku 49.

Jaké jsou největší úspěchy helioseismologie? Za pomoci helioseismologie se daří určovat složení, teplotu a pohyby uvnitř Slunce. Rychlost zvukových vln závisí na poměru vodíku a hélia. Slunce vykazuje celou řadu neradiálních oscilací. V roce 1990 se překvapivě ukázalo, že frekvence některých zvukových módů se mění

s časem. Pozorovací sady jsou zatím příliš krátkodobé na to, aby se prokázalo, zda tato změna souvisí s jedenáctiletým cyklem sluneční činnosti či nikoli. Helioseismologie potvrdila, že vnější konvektivní vrstva rotuje diferenciální rotací, zatímco rotace vnitřní zářivé vrstvy se mění s heliografickou šířkou jen velmi málo. Na základě mapování podpovrchových vrstev byly v roce 1997 objeveny rozsáhlé toky plazmatu, jejichž pohyb vyloučil některé modely slunečního dynama. Tisíce kilometrů pod povrchem Slunce probíhají torzní oscilace: střídají se zde pásy rychlejší a pomalejší rotace kombinované s proudy plazmatu od rovníku směrem k pólům (pod povrchem) a zpět (ve větší hloubce). Prohlédněte si obrázek 17 v barevné příloze. Přesně se podařilo změřit polohu a tloušťku *tachokliny* (tachovrstvy) – hranice mezi zářivou a konvektivní vrstvou. Dnes je zjevné, že hlavním zdrojem magnetických polí jsou pohyby plazmatu v blízkosti tachokliny. Heliosesmologie se po roce 2000 stala jedním z nejvýznamnějších pomocníků slunečních fyziků.



Obr. 49. Hologram odvrácené strany Slunce pořízený přístrojem MDI na sondě SOHO dne 12. dubna 2001. Patrná je výrazná skvrna AR 9393.

Víte, že

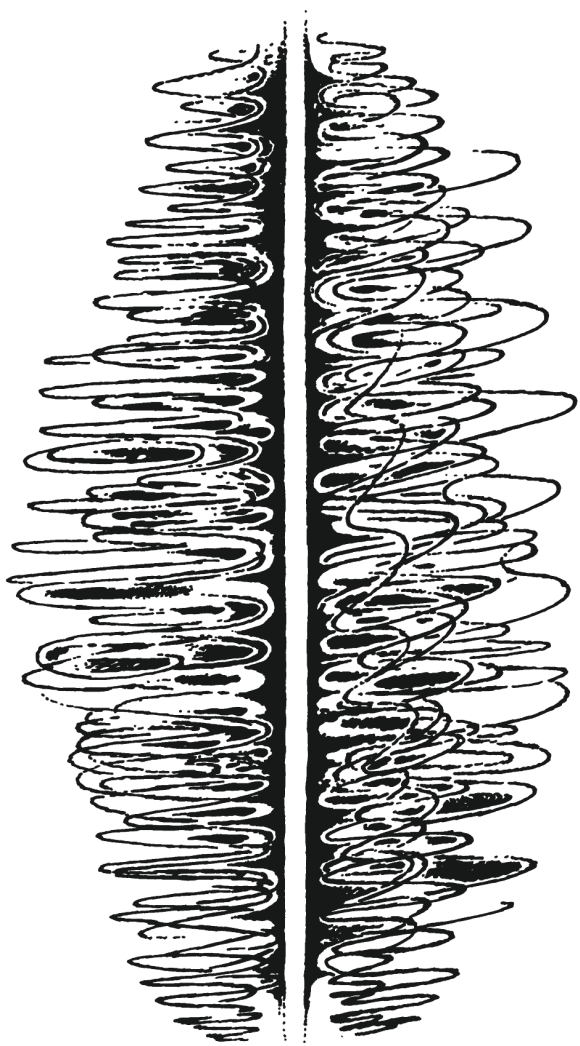
■ Víte, že pro sférickou harmonickou 400 je vlnová délka slunečních oscilací 10 000 kilometrů? Vlnová délka je nepřímo úměrná sférické harmonické. Čím více kopečků a údolí je na povrchu Slunce, tím kratší je vlnová délka.

■ Víte, že na stránkách Stanfordské univerzity vědci přirovnali helioseismologii ke snaze zjistit vnitřní konstrukci piána ze zvuků, které bude vydávat, když ho svrhneme ze schodů?

■ Víte, že se ze Země podařilo naměřit obdobné oscilace jako na Slunci i u 25 blízkých hvězd? Vesmírná observatoř Kepler nalezla oscilace dokonce u 500 hvězd podobných Slunci. Vznikla tak nová vědní disciplína – astroseismologie.

Poučení na závěr. *Se zvukovými vlnami lze dělat různá kouzla. Pomocí nich můžeme například zobrazit odvrácenou stranu Slunce nebo útvary a proudy pod slunečním povrchem.*

9. Surfujeme na vlnách



Jak vzniká vynález? To všichni vědí,
že je něco nemožné, a pak se objeví nějaký blázen,
který neví, že je to nemožné, a udělá vynález.
Albert Einstein

Urychlovače částic si většina z nás představuje jako obří sofistikovaná zařízení, kde se dělá věda za největší peníze a samozřejmě na té nejvyšší úrovni. V některých případech tomu tak skutečně je. Největší urychlovač světa se nachází v blízkosti Ženevy, ve středisku jaderného výzkumu CERN. Nazývá se *Velký hadronový kolider*, jde o prstenec o obvodu 27 kilometrů uložený 100 metrů pod zemí. V jeho blízkosti je postaveno celé vědecké městečko. Již v 70. letech 20. století se ale objevil názor, že by nabité částice mohlo být možné urychlovat v plazmatu pomocí podélné elektromagnetické vlny. Částice by se v její blízkosti pohybovala jako surfař na mořské vlně a získávala by z ní energii. Takové zařízení by mohlo být postaveno na větším pracovním stole v obyčejné laboratoři. První experimenty sice prokázaly správnost myšlenky, ale zásadní technologické problémy znemožnily stavbu skutečného urychlovače tohoto typu. Teprve po roce 2000 se podařilo většinu problémů vyřešit a zdá se, že novému typu urychlovače na plazmových vlnách již nic nestojí v cestě.

Klasické urychlovače elektronů a jiných nabitých částic

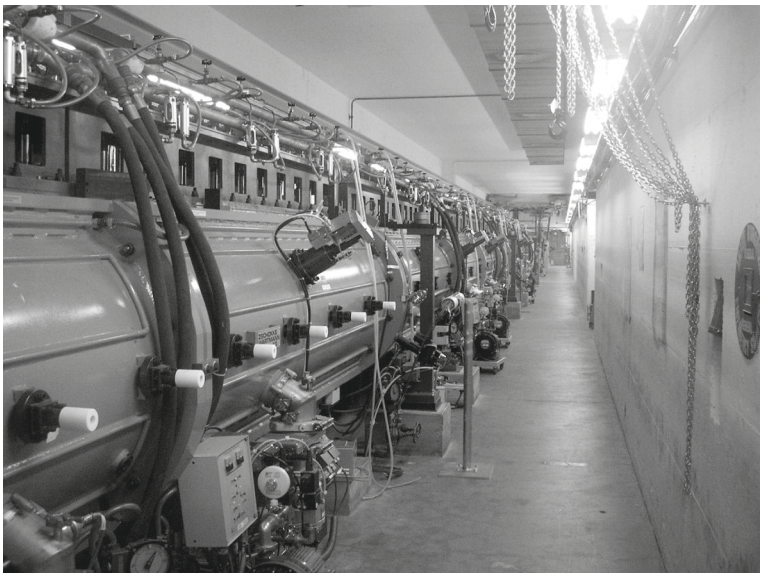
Většina populace má urychlovače spojené se špičkovými pracovišti a vznešeným cílem: zjistit, jak fungují základní interakce při co možná nejvyšších energiích. Ve skutečnosti jsou urychlovače využívané pro základní výzkum jen malým procentem všech zařízení tohoto typu. S urychlovači se setkáváme i v těch nejběžnějších situacích. Vzpomeňte si na klasickou televizi s CRT obrazovkou (takovou tou klasickou, tlustou – dnes je vytlačována moderněj-

šími, plochými displeji). CRT obrazovka je ve skutečnosti obyčejným urychlovačem elektronů. Zkratka CRT znamená *Cathode Ray Tube*, katodová trubice, kde jsou urychlovány elektrony, které při dopadu na stínítko vytváří obraz. Jiným příkladem jsou rentgeny v nemocnicích a na poliklinikách. Opět jde o urychlovač elektronů. Urychlené elektrony dopadnou na terčík a generují rentgenové záření. A do třetice: ve většině elektronických součástek, kterých máte v domácnosti bezpočet, byla při výrobě použita iontová implantace. Ionty urychlené elektrickým polem jsou nastřelovány na povrch, kde vhodným způsobem mění jeho vlastnosti.

Mnoho urychlovačů se používá v nejrůznějších užitečných technologiích, jen malé procento slouží k výzkumu extrémních stavů hmoty. Ale i tento výzkum, i když se zdá být odtržený od běžného života, má praktický dopad, neboť vědci jsou často postaveni před problémy, jejichž řešení lze využít i jinde. Uveďme jeden příklad za všechny. V Evropském středisku jaderného výzkumu CERN bylo třeba neodkladně řešit výměnu datových souborů mezi počítači na různých pracovištích. Výsledkem byl vznik protokolu www a první internet. Dodnes je v komplexu CERN vystaven první internetový server světa. Internet, který dnes využívá téměř každý, je ve skutečnosti vedlejším produktem výzkumu elementárních částic.

Urychlovače lze škatulkovat podle nejrůznějších kritérií. Můžeme je dělit na urychlovače s nízkou nebo vysokou energií, na urychlovače s elektrostatickým nebo oscilujícím polem, na urychlovače lineární nebo kruhové, na urychlovače s jedním svazkem nebo dvěma proti sobě letícími svazky (tzv. kolidery). Další dělení může být podle druhu urychlovaných částic (elektrony, protony, ionty, těžká atomová jádra). Žádné dělení nemůže zcela postihnout variabilitu soudobých urychlovačů, proto si v tomto dozajista neúplném přehledu připomeneme jen některé nejdůležitější typy urychlovačů.

K nejjednodušším urychlovačům patří *elektrostatické urychlovače*. Nabitá částice je urychlována na spádu potenciálu mezi dvěma elektrodami. K získání vysokého napětí lze využít van de Graa-



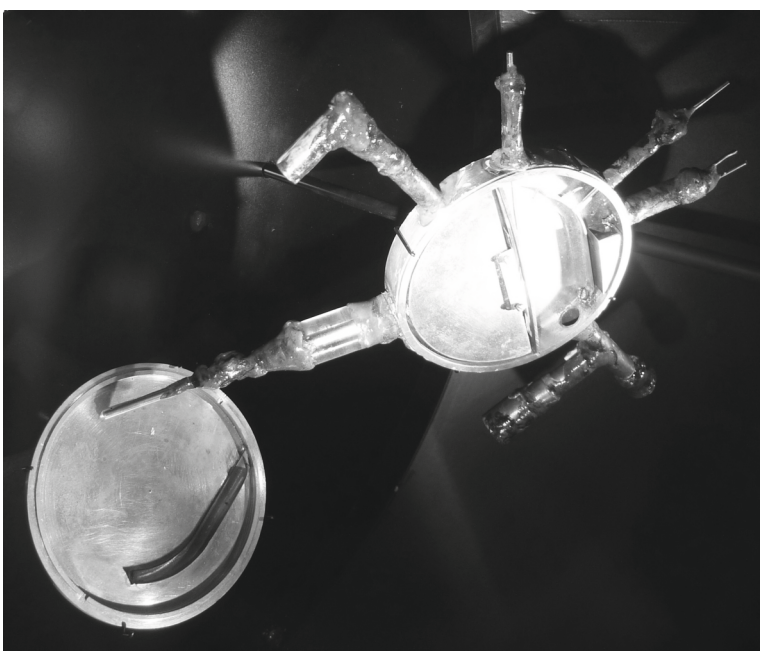
Obr. 50. Lineární urychlovač v komplexu CERN slouží jako první předstupeň pro Velký hadronový kolider LHC. Protony zde získají třetinu rychlosti světla.

fův generátor, kondenzátorové baterie, různé násobiče napětí atd. Urychlovací napětí zpravidla nemůže překročit několik MV (u speciální atmosféry několik desítek MV), neboť hrozí nebezpečí vzniku výboje. V urychlovačích tohoto typu lze nabité částice urychlit jen na malé rychlosti v porovnání s rychlostí světla. Pro mnoho aplikací je to ale dostačující.

V *lineárních urychlovačích* se využívá střídavé napětí přiváděné na soustavu po sobě jdoucích elektrod. Částice je přitahována ke konkrétní elektrodě. Jakmile skrze ní prolétne, změní se polarita napětí a částice je od této elektrody odpuzována a naopak přitahována k elektrodě následující. Proces se neustále opakuje.

Aby tento typ urychlování mohl fungovat, nemůže být proud částic v urychlovači kontinuální. To by se částice poflakovaly v urychlovači kdekoli a některé by byly elektrodami brzděny. Částice jsou do lineárního urychlovače nastřelovány v připravených „balíč-

cích“, jakýchsi shlucích, kterým se slangově říká banče (z anglického slova *bunch*, česky shluk, chomáč, trs). Před urychlovačem bývá speciální magnetický „balíčkovač“, který banče částic připraví. Pokud je cílem urychlit částice na rychlosti blízké rychlosti světla, odpovídá střídání napětí na elektrodách rádiovým a mikrovlnným frekvencím a namísto soustavy izolovaných elektrod je možné použít radiofrekvenční a mikrovlnné rezonanční dutiny, ve kterých částice „surfují“ na stojaté elektromagnetické vlně. Vysoké energie lze dosáhnout za pomoci mnoha rezonančních dutin zvyšujících se frekvencí za sebou. Nejdelší lineární urychlovač byl ve Stanfordském středisku SLAC (*Stanford Linear Accelerator Centrum*), měl délku 3 kilometry a elektrony zde mohly získat energii až 50 GeV. Na něm mohly být urychlovány elektrony i pozitrony. Po výstupu z tříkilometrového urychlovače byly nastřeleny do prstenců, kde obíhaly proti sobě (jejich dráha byla udržována magnetickým po-



Obr. 51. První cyklotron měl průměr přibližně 12 cm a jeho stavba stála Ernesta Lawrence 25 dolarů.

lem) a v místě detektoru došlo ke srážce. Lineární urychlovač ve SLAC tedy fungoval jako kolider. Dnes je v rekonstrukci.

Existují plány na stavbu třicetikilometrového lineárního urychlovače ILC (*International Linear Collider*), zatím ale jen na papíře a v počítačích teoretiků. Dalším obdobným projektem je CLIC (*Compact Linear Collider*). Za průkopníky ve stavbě lineárních urychlovačů jsou považováni britský fyzik sir John Douglas Cockroft (1897–1967) a americký fyzik Robert Jemison van de Graaf (1901–1967).

Průlomem v konstrukci urychlovačů byl *kruhový urychlovač*, ve kterém je dráha nabité částice zakřivena magnetickým polem a částice mnohokrát opakovaně obíhá po stejné dráze, na které je urychlována mezi elektrodami vhodně přiváděným střídavým elektrickým polem. Nejjednodušší zařízení tohoto druhu se nazývá *cyklotron*[53], následovníkem je *synchrotron*[54], jinou alternativou kruhového urychlovače je *betatron*[55]. Výhoda tohoto uspořádání je zjevná: k dosažení stejné energie postačí mnohem menší velikost urychlovače než v lineárním případě. Je to ale něco za něco. Na kruhové orbitě nabitá částice vyzařuje. Při vysokých rychlostech jde o tzv. *synchrotronní záření*[56]. Intenzita tohoto vyzařování je ne-

53 **Cyklotron** – zařízení sloužící k urychlování nabitých částic, které jsou vedeny na kruhové dráze pomocí magnetického pole. Vlastní urychlování probíhá vysokofrekvenčním elektrickým polem v mezeře mezi elektrodami (duanty). K urychlování dochází opakovaně. Prvního předchůdce cyklotronu postavil roku 1929 až 1931 americký fyzik Ernest Orlando Lawrence (1901–1958) z Kalifornské univerzity. Jeho první cyklotron je dnes vystaven v Evropském středisku jaderného výzkumu CERN.

54 **Synchrotron** – další vývojový stupeň cyklotronu, k zakřivení dráhy nabitých částic používá proměnné magnetické pole vhodně synchronizované s urychlujícím elektrickým polem.

55 **Betatron** – urychlovač elektronů navržený Donaldem Williamem Kerstem (1911–1993) z Illinoiské univerzity v roce 1940. Jde v podstatě o transformátor, jehož sekundárním závitem je vakuová trubice ve tvaru torusu. Střídavý proud v primární části urychluje elektrony v sekundáru podél kruhové dráhy. Název je odvozen od rozpadu beta, jehož produktem jsou právě elektrony.

56 **Synchrotronní záření** – záření generované relativistickými elektrony rotujícími kolem magnetických silokřivek. Jde o záření s výraznou polarizací v rovině dráhy elektronu. Záření je soustředěno do úzkého kužele, vyzařováno v původním směru pohybující se částice a má spojité spektrum.

přímo úměrná čtvrté mocnině hmotnosti částice. Čím menší částice, tím více září. Pro elektrony je toto vyzařování pro extrémní energie kritické. Zářením se ztrácí tolik energie, že v urychlování na kruhové dráze není možné pokračovat. Pokud nabité částice vstupují do detektoru, je záření opět problémem, neboť zahltí detektor parazitním signálem. Ve Středisku jaderného výzkumu CERN v blízkosti Ženevy byl ve 27 kilometrů dlouhém tunelu před rokem 2000 v provozu kruhový urychlovač elektronů a pozitronů LEP II *(Large Electron-Positron collider*), na kterém mohly elektrony a pozitrony dosáhnout v těžišťové soustavě při srážce energii až 209 GeV. Před vstupem do detektoru byly v urychlovači zařazeny 300 metrů dlouhé rovné úseky, které snížily parazitní vyzařování na minimum. Dnes je ve stejném tunelu postaven největší urychlovač světa LHC (*Large Hadron Collider*, Velký hadronový kolider), který byl uveden do provozu v roce 2009. Protony ve vstřícných svazcích je možné urychlit na 3,5 TeV, celková energie při srážce je tedy 7 TeV. Protony mají mnohem větší hmotnost než elektrony, a proto je intenzita synchrotronního záření mnohem nižší a neznamená žádný větší problém. V budoucnosti se počítá s dvojnásobnou energií při srážce, tedy celkem s 14 TeV. Na urychlovači LHC je také možné urychlovat těžká jádra a při srážce připravit kvarkové-gluonové plazma (viz kapitola 7). Nabité částice na správné dráze udržují dipólové magnety (zakřivují jejich dráhu) a kvadrupólové magnety (fokusují banče k ose). Vlastní urychlování probíhá v mikrovlnných rezonančních dutinách.

K dalším velkým kruhovým urychlovačům patří americký Tevatron s obvodem 6,3 kilometru, kde je možné srážet protony s antiprotony s energií 1 TeV. Tevatron je postaven ve Spojených státech v blízkosti Chicaga. Jeho činnost má být ukončena v roce 2012. V Brookhavenské národní laboratoři v USA je kruhový urychlovač RHIC (*Relativistic Heavy Ion Collider*) s obvodem 3,8 kilometru. V Evropě fungoval v německém středisku DESY do roku 2007 urychlovač HERA s obvodem 6,3 kilometru, kde bylo možné urychlit elektrony a pozitrony na energii 27,5 GeV a protony na 920 GeV.

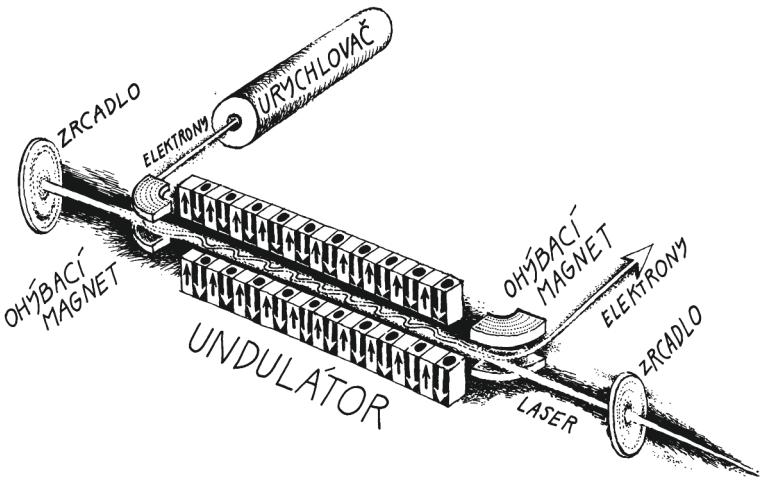
Další kouzla – lasery na volných elektronech

Urychlovač elektronů lze relativně snadno přeměnit na výkonný laser. Na výstupu urychlovače stačí přidat pole periodicky se střídajících dipólových magnetů, tzv. *undulátor*. Trajektorie elektronů se vlivem střídajícího se směru magnetického pole zvlní ve směru kolmém na osy magnetů. A každá nabitá částice, která se pohybuje po zakřivené trajektorii (v tomto případě po vlnovce), nutně emituje elektromagnetické záření. Pokud byl předtím elektron urychlen na rychlost blízkou rychlosti světla, jde o synchrotronní záření. Záření vysílané elektrony je koherentní[57] a splňuje základní podmínku pro laserové záření. Pro velkou amplitudu oscilací částic se zařízení nazývá *wiggler*.

Původně se undulátorem nazýval zapisovací přístroj pro podmořskou telegrafii sestrojený Tedem Lauritzenem. Skládal se ze čtyř vinutých elektromagnetů se střídající se orientací a dvou otočných obloukovitých magnetů na hřídeli. Elektrický proud procházející vinutými magnety vybudil pole, které otáčelo pohyblivými magnety a jejich pohyb byl přenášen na zapisovací zařízení.

Po průchodu undulátorem je třeba elektrony magnetickým polem odklonit a nasměrovat je do útlumového členu. Dále pokračuje koherentní paprsek elektromagnetického záření vhodný k různým experimentům. Zařízení tohoto typu se nazývá *laser na volných elektronech*, zpravidla se označuje zkratkou FEL (z anglického *Free Electron Laser*) a jeho největší výhodou je možnost ovlivnit frekvenci laseru – závisí na rychlosti elektronů vystupujících z urychlovače a na intenzitě magnetického pole. Lasery na volných elektronech jsou laditelné, což je pro mnoho experimentů klíčové.

57 **Koherence** – situace, při které je fázový rozdíl vln z daného zdroje či objektu v určitém bodě prostoru konstantní a nebo se pomalu mění v čase. Opakem koherence jsou nepravidelné a dostatečně rychlé změny fázového rozdílu skládajících se vln. Ideální koherence nelze nikdy dosáhnout. Koherenci si můžete snadno představit na prsou běžící ženy. Má-li podprsenku, je jejich pohyb koherentní (ve fázi). Nemá-li podprsenku, je pohyb chaotický.



Obr. 52. Laser na volných elektronech.

Velký laser na volných elektronech FLASH se nachází v těsném sousedství České republiky, v německém DESY[58]. Celé zařízení včetně urychlovače a undulátoru je dlouhé 260 metrů a laser je laditelný od ultrafialového záření až po měkké rentgenové záření. Jeho využití je skutečně rozmanité. Pomocí laserového záření se dá látka stlačit natolik, že vzniknou extrémní stavy hmoty srovnatelné s nitrem neutronových hvězd. Jinou aplikací je zobrazování malých předmětů. Za pomoci rentgenového laseru lze zobrazit i viry. Laser FLASH u Hamburgu se od roku 2007 používá také k hledání axionů, jednoho z kandidátů na částice temné hmoty. Za pomoci silného magnetického pole by totiž podle teorie mělo být možné změnit rentgenové laserové záření na proud axionů. Zatím byly tyto experimenty neúspěšné, nicméně mají poetický název ALPS (samotné slovo znamená skřítek, je ale současně zkratkou z anglického Axion Like Particle Search – hledání částic podobných axionům).

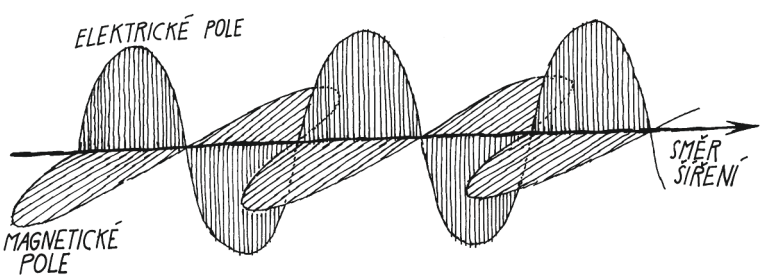
58 **DESY** – Deutsches Elektronen SYnchrotron, německé výzkumné centrum částicové fyziky s laboratořemi v Hamburku a Zeuthenu, které bylo založeno v roce 1959. K nejvýznamnějším zařízením patří urychlovač PETRA a laser na volných elektronech FLASH (zkratka z *Free electron LASer in Hamburg*).

V německém komplexu laboratoří DESY se od roku 2008 staví největší laser na volných elektronech na světě. Zařízení se bude nazývat XFEL (X-ray FEL) a bude mít délku 3,4 kilometry. Bude se využívat jako lineární urychlovač elektronů a s undulátorem jako obří rentgenový laser. S dokončením stavby se počítá v roce 2013. Půjde o zcela unikátní zařízení s proměnnou frekvencí laseru od ultrafialového po rentgenový obor.

Plazmové vlny

Elektromagnetické vlnění se, na rozdíl od jiných vln, může šířit i vakuem. Vlny se šíří rychlostí světla a vzájemná poloha elektrického a magnetického pole je přesně dána pravidly klasické elektrodynamiky. Elektrické pole kmitá kolmo na směr šíření, magnetické také. Proto hovoříme o příčné neboli transverzální vlně. Magnetické pole je navíc kolmé na pole elektrické.

Rovina kmitů elektrického pole se nazývá *rovinou polarizace*. Může jít skutečně o rovinu jako na obrázku, pak hovoříme o lineární polarizaci záření. Tato rovina se ale může postupně stáčet a pokud konec elektrického vektoru opisuje kružnici, hovoříme o kruhové polarizaci. Spolu s rovinou elektrického pole se musí stáčet i rovina magnetického pole, aby obě roviny zůstaly na sebe kolmé.



Obr. 53. Poměry v elektromagnetické vlně ve vakuu

V plazmatu je šíření elektromagnetické vlny poněkud složitější. V přítomnosti magnetického pole vzniká celá řada nejrůznějších

modů, o některých z nich jsme se dozvěděli v kapitole 3. Ale i bez přítomnosti magnetického pole je situace jiná než ve vakuu. Elektrické pole ve vlně působí na elektrony a ionty a rozkmitává je. Elektrony jsou pohyblivější a na elektrické pole reagují svižněji. Ve fyzice se dokonce zavádí speciální veličina – *pohyblivost* (*mobilita*), která popisuje reakci nabité částice na elektrické pole. Jde o koeficient úměrnosti mezi rychlostí, kterou částice získá, a elektrickým polem. Pohyblivost elektronů je podstatně vyšší než pohyblivost hmotnějších iontů. Elektrony mají v plazmatu jakousi přirozenou frekvenci, na které kmitají kolem těžších iontů, říká se jí *plazmová frekvence*. Elektromagnetická vlna s frekvencí vyšší než plazmová frekvence se plazmatem bez problémů šíří. Pokud má ale elektromagnetická vlna frekvenci nižší, než je plazmová frekvence, elektrony se rozkmitají a přeberou energii vlny. Takové vlnění plazmatem neprochází. Příkladem může být naše ionosféra. Vlny vysokých frekvencí ionosférou projdou, vlny nižších frekvencí se od ní odrazí, což využíváme k šíření rozhlasového signálu na větší vzdálenosti. Jev se dá zužitkovat i k měření koncentrace nabitých částic v plazmatu. Plazmová frekvence na ní totiž závisí a pokud se nám podaří zjistit, které vlny plazmatem procházejí a které již ne, není problém nalézt ze změřené plazmové frekvence koncentraci elektronů v plazmatu.

V plazmatu lze ale také vybudit podélnou elektromagnetickou vlnu. Představme si, že na plazma zapůsobí nějaký impulz, který vychýlí všechny elektrony z jejich původní polohy. Elektrony se pohnou vůči hmotnějším iontům určitým směrem. V tu chvíli vznikne mimořádně silné elektrické pole, kterým budou ionty (ty na podnět reagují vzhledem k vyšší hmotnosti jen málo) táhnout elektrony zpět. Elektrony překmitnou kolem iontů na druhou stranu, vznikne elektrické pole opačného směru, které je bude táhnout zase zpět. Výsledkem budou kmity elektronů kolem iontů a oscilující elektrické pole ve směru pohybujících se elektronů. Pokud bychom vzali v úvahu i tepelné děje (chaotický pohyb částic), vznikne vlna elektrického pole šířící se ve směru kmitů pole, tedy podélná vlna. Něco takového není ve vakuu možné. A právě na

těchto podélných vlnách se mohu nabité částice urychlit na značné rychlosti. Podélné vlny v plazmatu lze snadno vyprovokovat například silným laserovým pulzem.

Landauův útlum

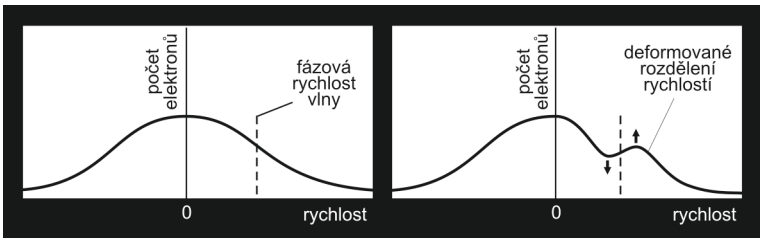
V roce 1946 ukázal vynikající sovětský teoretik Lev Davidovič Landau (1908–1968), že nabité částice mohou interagovat s podélnou vlnou elektrického pole a vyměňovat si s ní energii, aniž by se částice navzájem srážely. Při této interakci odnímají energii vlny a samy tuto energii získávají. Tento čistě teoretický výsledek byl velikým překvapením. Později byl jev skutečně naměřen experimentálně.

Podobně jako surfař surfuje na vodní vlně, můžeme si zjednodušeně představit elektrony surfující na podélné plazmové vlně elektrického pole. Elektrony s příliš malou rychlostí se na vlně pohupují a nevyměňují si s ní energii. Také elektrony s příliš velkou rychlostí si nevyměňují s vlnou energii. Jen elektrony s rychlostí blízkou fázové rychlosti[59] plazmové vlny intenzivně s vlnou vyměňují energii. Obdobně jako surfař jsou elektrony vlnou neseny. Pokud je jejich rychlost nepatrně nižší než fázová, získávají elektrony energii na úkor vlny. Pokud je jejich rychlost vyšší než fázová, jsou brzděné, svou energii ztrácí a předávají ji vlně.

Elektronů s nižší rychlostí je v plazmatu více než elektronů s vyšší rychlostí (na obrázku 54). Tím převládá proces tlumení vlny, sání energie z ní. To je přibližná podstata Landauova útlumu. V důsledku Landauova útlumu dochází ke změně počtu elektronů s danou rychlostí (na obrázku 54 napravo).

Pro velmi nízké fázové rychlosti plazmové vlny je možný i Landauův útlum způsobený ionty. Častější je ale surfování iontů nikoli na

59 **Fázová rychlost** – rychlost šíření bodů vlnění, které mají shodnou fázi. Fázová rychlost nic nevypovídá o šíření energie, informace či hmoty. Může být i vyšší než je rychlost šíření světla ve vakuu.



Obr. 54. Změna rozdělení rychlostí elektronů způsobená Landauovým útlumem

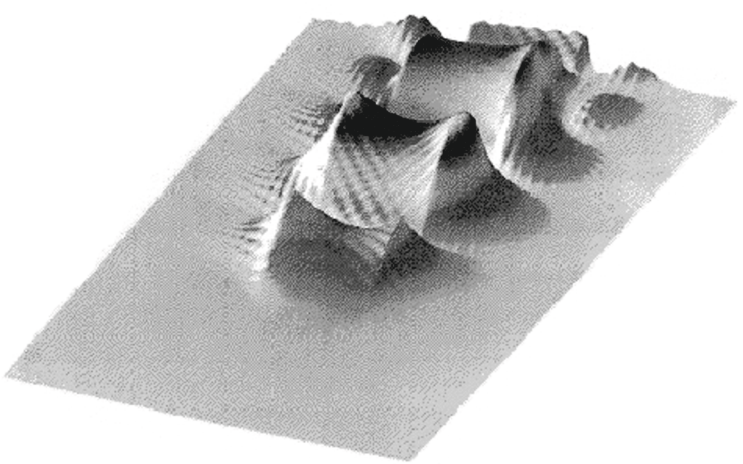
elektromagnetických, ale na zvukových vlnách, které jsou v plazmatu způsobeny pohyby iontů. Proto jim někdy říkáme iontově-akustické vlny. U iontově-akustických vln není hlavní „návratovou" silou elektrostatické pole, ale tepelný tlak a setrvačnost iontů. Ionty mohou silně interagovat s vlnou. pokud je jejich rychlost blízká rychlosti šíření zvuku v plazmatu. Opět převládá odnímání energie zvukové vlně pomalejšími ionty, kterých je v plazmatu více než těch rychlejších, které by svou energii vlně darovaly.

Urychlovače na pracovním stole

Typické urychlovací pole klasických urychlovačů nemůže výrazně přesáhnout 100 MV/m. Již v roce 1979 navrhli Toshi Tajima a John Dawson z Kalifornské univerzity v Los Angeles zcela nový typ urychlovače, ve kterém by elektrony byly urychleny na plazmové vlně podobně jako surfař na vlně v oceánu. Tato zajímavá myšlenka čekala na praktickou realizaci více než čtvrt století. Dnes se zdá, že nic nestojí v cestě urychlovat elektrony v urychlovači nové generace přímo na pracovním stole.

Plazmová vlna může vzniknout při průchodu intenzivního laserového pulzu plynným prostředím. Pulz ionizuje plyn na plazma a s sebou strhává lehké elektrony. Za pulzem vzniká brázda zvlněné koncentrace elektronů a podélného elektrického pole – plazmová vlna. V angličtině se toto pole nazývá „*wakefield*", což by snad šlo přeložit jako brázdové pole, případně pole v brázdě.

Toto pole může při vhodné hybnosti a energii urychlovat elektron, který je nesený na vlně elektrického pole podobně jako výše zmíněný surfař na vodní vlně. Vlnou jsou ovšem zachyceny jen některé z elektronů a ty vytvoří shluky urychlených částic. To je základní princip urychlovače LWFA (zkratka z anglického *Laser Wake Field Accelerator*, laserový urychlovač využívající brázdové pole). V praktických zařízeních se většinou využívají lasery s pulzem kratším než jedna pikosekunda a intenzitou vyšší než 10^{18} W/cm^2 (laserový paprsek přináší na každý centimetr čtvereční výkon jednoho exawattu). Vzniklé brázdové pole má typicky intenzitu 100 GV/m, což je o tři řády více než v konvenčních urychlovačích. Shluky (banče) elektronů o velikosti 10^9 elektronů (tomu odpovídá náboj řádově sto pikocoulombů) mohou být urychleny na energii až 60 MeV. Jde ovšem jen o malý zlomek přítomných elektronů a parametry plazmatu a brázdového pole lze jen obtížně ovlivnit. To je hlavní nevýhodou dosud postavených zařízení, která měla spíše studijní charakter, a nebylo je možné prakticky využít.



Obr. 55. Brázdové pole (wakefield). Za laserovým pulzem vzniká při průchodu prostředím typické zvlněné podélné pole. Na obrázku je různým odstínem znázorněna velikost pole.

Situace se změnila po roce 2004, kdy byly navrženy urychlovače LWFA s více laserovými pulzy. Kromě základního pulzu, který generuje laserové plazma s brázdovým polem, lze dvěma dalšími pomocnými pulzy vytvořit za pulzem stojatou vlnu (rázy). Podélná složka elektrického pole může předurychlit elektron, příčná složka může fokusovat shluk elektronů. Pomocnými pulzy můžeme ovlivňovat parametry plazmatu v brázdě za základním laserovým pulzem. Urychlování je v této konfiguraci dvoustupňové. Elektrony jsou nejprve urychleny v pomalu se pohybující stojaté vlně generované pomocnými pulzy a teprve poté v rychlé brázdové vlně za hlavním pulzem až na rychlost blízkou rychlosti světla. V současných systémech je brázdové pole až 270 GV/m a bylo dosaženo energií až 250 MeV na pouhých dvou milimetrech dráhy. Spektrum urychlených elektronů je monoenergetické.

Urychlovače LWFA znamenají revoluci v možnostech urychlování nabitých částic (v tuto chvíli výhradně elektronů) na malé a střední energie. Hlavní výhodou jsou především malé rozměry urychlovačů tohoto typu, některé mohou být postaveny přímo na pracovním stole. Předurychlení pomocnými pulzy umožňuje ovlivňování parametrů urychlení, bez kterého nejsou možné praktické aplikace. Vývoj probíhá na Coloradské univerzitě, Kalifornské univerzitě v Berkeley, Kalifornské univerzitě v Los Angeles, v Lawrencově národní laboratoři v Livermoru a mnoha dalších pracovištích. Pokud se neobjeví nějaké zásadní technické problémy, mohly by tyto urychlovače být součástí vědeckých pracovišť již za několik let.

Víte, že

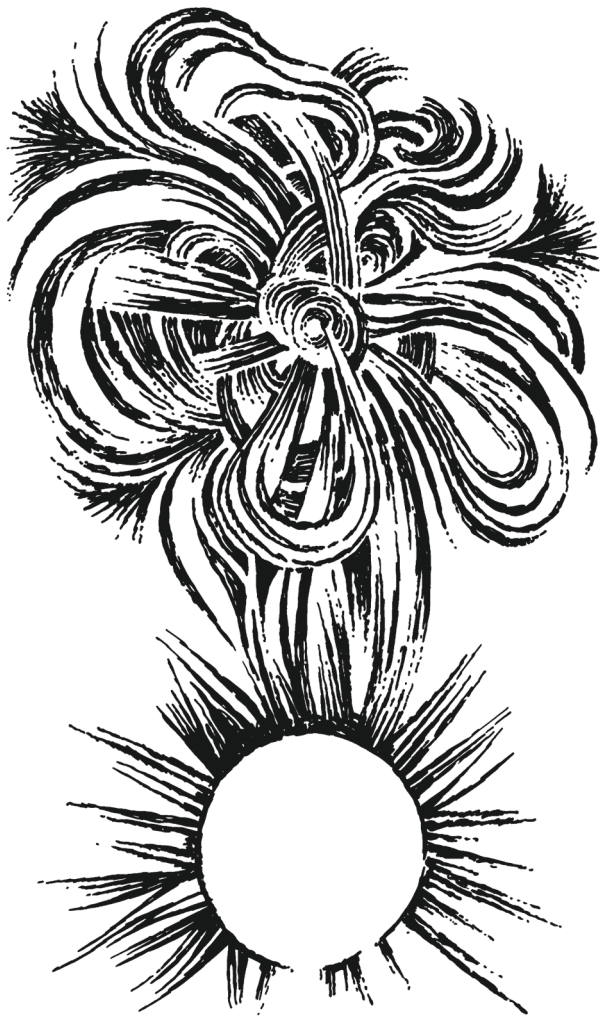
■ Víte, že brázdovým polem se zabývají i odborníci v České republice pracující na laseru PALS (zkratka z anglického *Prague Asterix Laser System*)? Toto badatelské centrum je společným pracovištěm Fyzikálního ústavu AV ČR a Ústavu fyziky plazmatu AV ČR.

■ Víte, že evropský rentgenový laser na volných elektronech XFEL bude laditelný v rozsahu 0,085 až 6 nanometrů? Délka pulzu bude kratší než 0,1 pikosekundy a více než tříkilometrový tunel bude veden zčásti pod hamburskou obytnou čtvrtí Osdorf a bude propojen s bývalým kruhovým urychlovačem HERA.

■ Víte, že maximální teoreticky dosažitelná hodnota podélného pole, které lze v urychlovači LWFA využít k urychlování je dána vztahem $E_{max} = cm_e\omega_p/e$? V tomto vztahu je c rychlost světla, m_e hmotnost elektronu, ω_p plazmová frekvence a e náboj elektronu.

Poučení na závěr: *Lidská vynalézavost nezná mezí. Objevy nových principů umožňují konstrukci zařízení, o kterých nedokázali vědci před několika desítkami let ani snít.*

10. Magnetary

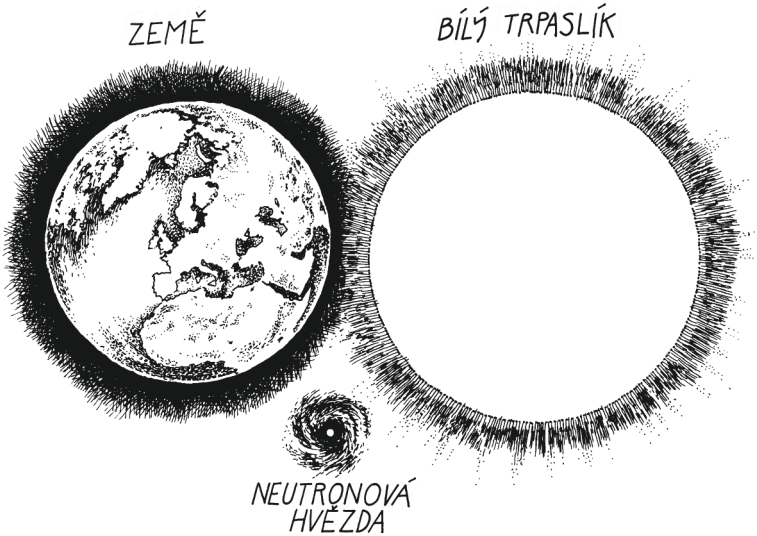


Stal se básníkem.
Pro fyziku měl příliš malou fantazii...
David Hilbert

V poslední době se ukazuje, že magnetická pole hrají ve vesmíru nesmírně důležitou roli. Většina atomární látky je v plazmatickém stavu, chová se jako vodivá tekutina, která velmi prudce reaguje na přítomnost magnetického pole. Z mlhovin s magnetickým polem se rodí hvězdy i planety a magnetická pole určují budoucí vlastnosti vznikající planetární soustavy i její centrální hvězdy. A pokud na planetě vznikne život, magnetický obal planety – magnetosféra – bude pečlivě chránit tento život před nebezpečnými částicemi z vesmíru. Magnetická pole najdeme ve vesmíru v podstatě všude – v planetárních soustavách, v mezihvězdném i mezigalaktickém prostoru, vyplňují nezměrně obrovské dutiny mezi galaxiemi. V okolí černých děr formují výtrysky nabitých částic a napomáhají jejich urychlení na relativistické rychlosti. Když hvězdy umírají, jejich magnetické pole určuje tvar překrásných mlhovin z odhozených vnějších obálek. Určuje ale i chování pozůstatků po bývalých hvězdách – bílých trpaslíků a neutronových hvězd. V těchto závěrečných fázích vývoje hvězd mohou vznikat natolik extrémní magnetická pole, že nemají nikde ve vesmíru obdoby a člověk nemá s takovými poli žádnou zkušenost. I ta nejdivočejší fantazie selhává před tvrdou realitou, kterou nalézáme v přírodě.

Magnetické pole ve vodivé tekutině

Magnetické pole je ve vesmíru zpravidla vázáno na plazma, které se chová jako vodivá tekutina. Měnit se může jen dvojím způsobem. Samovolnou difúzí a unášením plazmatem. Samovolná difúze je způsobená konečným odporem plazmatu. Magnetické silokřivky difundují do okolí podobně jako vůně v místnosti od otevřené lahvičky s parfémem. Druhou možností je pohyb silokřivek spolu



Obr. 56. Porovnání velikosti Země, bílého trpaslíka a neutronové hvězdy.

s plazmatem. Silokřivky jsou vázány na vodivou tekutinu a chovají se, jakoby do ní byly zamrzlé. Pojem zamrzlých magnetických polí poprvé zavedl švédský fyzik Hannes Alfvén (1908–1995), který za své práce ve fyzice plazmatu obdržel v roce 1970 Nobelovu cenu.

Důležitým parametrem popisujícím plazma je Reynoldsovo magnetické číslo. Jde o poměr změn magnetického pole vlivem unášení plazmatem a vlivem difúze. Je-li toto číslo podstatně větší než jedna, dominuje zamrzání, je-li naopak menší než jedna, pole se mění především difúzí. Například pro sluneční plazma má Reynoldsovo číslo hodnotu 10^{10}, magnetické pole je unášeno plazmatem a difúze je zcela zanedbatelná.

Ve hvězdách je magnetické pole zamrzlé do plazmatu. V závěrečných fázích hvězdného vývoje dochází v nitru hvězdy jaderné palivo. Ta se smršťuje, a pokud nedojde k zapálení dalších reakcí, skončí jako bílý trpaslík[60] držený tlakem elektronového plynu,

60 **Bílý trpaslík** – jedna z možných závěrečných fází vývoje hvězd. Hvězda, ve které degenerovaný elektronový plyn vyvíjí gradient tlaku (způsobený Pauliho vylučova-

a nebo jako neutronová hvězda[61] držená tlakem neutronů. U obou konfigurací lze očekávat velmi silná magnetická pole, neboť spolu se smršťováním jsou zamrzlé magnetické silokřivky původního pole stlačeny do velmi malého objemu. U bílých trpaslíků jsou typické rozměry srovnatelné s velikostí naší Země a indukce magnetického pole může dosáhnout hodnot až 10^4 T. Pro srovnání: pole malého magnetu pro připevnění obrázku na lednici má indukci 0,01 T a nejsilnější pole, krátkodobě dosažitelné v laboratoři, má hodnotu 1 000 T. Takové pole dokáží vytvořit v Sandia National Laboratories na „Z" aparatuře.

V neutronových hvězdách je pole ještě silnější, jejich rozměry jsou jen několik desítek kilometrů a pole dosahuje hodnot 10^8 T až 10^9 T. Pokud neutronová hvězda rotuje s velkou rychlostí, může její pole efektem tekutinového dynama dokonce zesílit na hodnotu 10^{10} T až 10^{12} T. A právě objekty s tak extrémním polem nazýváme magnetary.

Pro magnetické pole existují dvě zajímavé hranice. První je tzv. *kvantová mez*. Jde o tak silné pole, že pro popis elektronu rotujícího kolem magnetických silokřivek je třeba vzít v úvahu kvantové

cím principem), který odolává gravitaci. Poloměr je 1 000 km až 30 000 km, hustota řádově 10^3 kg cm^{-3}, maximální hmotnost 1,44 $M_\odot$. Hmotnější bílí trpaslíci jsou nestabilní, tuto tzv. Chandrasekharovu mez odvodil Subrahmanyan Chandrasekhar v roce 1930. Objev prvního bílého trpaslíka: již v roce 1834 Fridrich Bessel předpověděl průvodce Síria A z newtonovské teorie na základě vlnovkovité trajektorie hvězdy Sírius. Průvodce Sírius B byl objeven v optické dílně bratří Clarků roku 1862 (Alvan Clark – test objektivu průměru 45 cm). Sírius B je prvním známým bílým trpaslíkem. Byla na něm demonstrována správnost newtonovské teorie (vlnovkovitá trajektorie Síria A) i potvrzena obecnou relativitou (červený posuv). Sírius B je enormně malý a hustý bílý trpaslík s průměrem 11 736 km, $\rho = 3\times10^3$ kg cm^{-3}. Povrchová teplota je 24 800 K, vzdálenost 8,6 l.y. a hmotnost 1,03 $M_\odot$.

61 **Neutronová hvězda –** těleso tvořené degenerovaným neutronovým plynem o hmotnosti menší než přibližně 2 $M_\odot$ (Tolmanova-Oppenheimerova-Volkoffova mez). Typický průměr neutronové hvězdy je v řádu desítek kilometrů, průměrná hustota 10^{11} kg m^{-3} dosahuje hodnot hustoty atomového jádra. Neutronové hvězdy vznikají při gravitačním kolapsu velmi hmotných červených veleobrů, při výbuchu supernovy typu II. Obrovský tlak způsobuje „vtlačení" elektronů do protonů za vzniku neutronů a neutrin. Neutronové hvězdy byly teoreticky předpovězeny ve 30. letech dvacátého století.

jevy (například relace neurčitosti[62] mezi poloměrem rotace a hybností elektronu). Kvantová mez má hodnotu $4{,}4\times10^{9}$ T a magnetary jsou jediné známé objekty s magnetickým polem vyšším, než je tato mez. Nad kvantovou mezí lze očekávat zcela nové fyzikální jevy. Podle současných znalostí budou samotné atomy protažené ve směru pole v poměru 100:1, molekuly vytvoří polymerní struktury, vakuum bude vykazovat dvojlomné vlastnosti podobně jako krystaly islandského vápence a bude zde docházet k bouřlivé kreaci elektron-pozitronových párů. Silná anizotropie vakua potlačí vzájemný rozptyl elektronů a fotonů. Obraz vzdálené galaxie procházející takovým prostředím bude silně deformován a za jistých podmínek dojde k jevu tzv. magnetické čočky. Jak už bylo zmíněno, magnetary jsou jediné objekty ve vesmíru, u kterých takovéto exotické jevy můžeme studovat!

Druhou hranicí je maximální možná indukce magnetického pole, která se odhaduje na 10^{47} T. Nad touto hodnotou by samovolně vznikající magnetické monopóly měly zabránit dalšímu zvyšování indukce pole. Taková pole se ale ve vesmíru s největší pravděpodobností nevyskytují a jsou zcela mimo naše představy.

Tekutinové dynamo

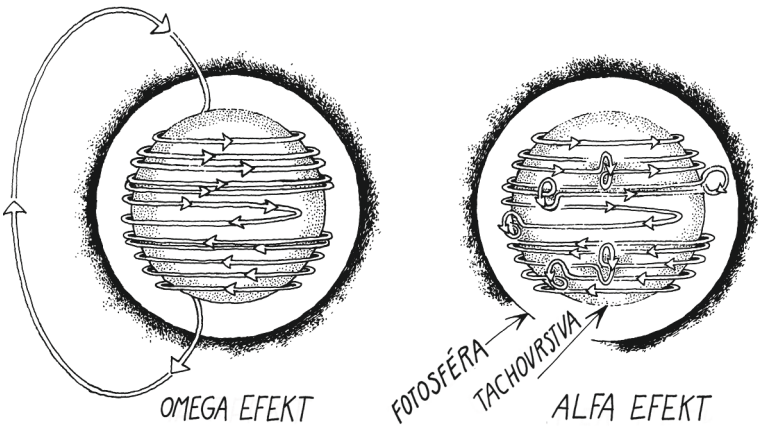
Do roku 1934 fyzikové věřili, že za magnetické pole Slunce a planet je odpovědný prstencový elektrický proud tekoucí v jejich nitru. V roce 1934 anglický astronom Thomas George Cowling (1906–1990) dokázal, že stacionární magnetické pole nemůže být vytvořeno tímto jednoduchým mechanismem. Dnešní teorie tekutinového dynama pochází od amerického astrofyzika Eugena

62 **Relace neurčitosti** – v mikrosvětě není možné současně změřit polohu a hybnost objektů. Změření jedné veličiny naruší měření druhé veličiny. Čím přesněji zjistíme polohu, tím menší informaci budeme mít o hybnosti a naopak. Jde o principiální zákonitost kvantového světa, která souvisí s nekomutativností veličin na elementární úrovni. Relace neurčitosti objevil Werner Heisenberg (1901–1976). Stejné relace platí také mezi energií a časovým intervalem. Ve vakuu mohou po velmi krátkou dobu vznikat ve shodě s relacemi neurčitosti fluktuace (objekty) o určité energii. Čím vyšší energie, tím kratší doba života těchto fluktuací.

Parkera (1927) a skotského astrofyzika Henry Moffatta (1935). Představme si, že například Slunce má na počátku přibližně dipólové pole. Uvnitř Slunce je toto pole zamrzlé ve slunečním plazmatu a proto se celý dipól otáčí spolu se Sluncem. Rotace Slunce je ale diferenciální, na rovníku se Slunce otočí jednou za 25 dní, na pólech jednou za 36 dní. Na rovníku se tedy silokřivky předbíhají a jsou vytahovány v rovníkovém (azimutálním) směru. Takto vytahovaná silokřivka se omotá kolem dokola Slunce přibližně za 8 měsíců. Azimutální pole Slunce sílí a dipólové (poloidální) slábne. Jev samotný nazýváme *omega efekt* podle řeckého písmene omega, kterým se ve fyzice označuje úhlová rychlost rotace. Tomuto písmenu se také podobají tvary deformovaných silokřivek.

Existuje i jev opačný, který z azimutální složky generuje složku dipólovou. Je poněkud složitější a souvisí s chaotickým prouděním sluneční tekutiny. Pod povrchem Slunce existuje tzv. *konvektivní vrstva*, jde o oblast vzestupných a sestupných proudů, které zajišťují přísun energie z nitra Slunce na povrch. Spodní hranice této zóny leží přibližně 200 000 km pod povrchem Slunce (poloměr Slunce je 700 000 km). V oblastech bližších k jádru se energie přenáší zářením, hovoříme o *zářivé vrstvě*. A právě na hranici těchto oblastí dokáže chaotické proudění měnit směr magnetického pole. Vznikající turbulence tekutiny si můžeme představit jako malé víry, které mají na severní polokouli díky Coriolisově síle[63] jiný převládající směr rotace než na jižní polokouli. Stejná síla na Zemi způsobuje, že směr točení atmosférických vírů je na jižní polokouli opačný než u nás. Zamrzlé magnetické pole samozřejmě sleduje i tyto drobné turbulence a jeho silokřivky se vychylují z azimutálního do dipólového směru. Jev nazýváme *alfa efek*t podle tvaru vychýlené magnetické silokřivky.

63 **Coriolisova síla** – síla působící na tělesa, která se pohybují v rotující neinerciální vztažné soustavě tak, že mají složku pohybu kolmou na osu otáčení. Coriolisova síla má směr kolmý na osu otáčení i na rychlost pohybu tělesa. Coriolisova síla je zodpovědná za vznik cyklón a anticyklón ve vzdušných masách a za směr otáčení víru ve výlevce, který je jiný na severní a jiný na jižní polokouli. Je pojmenována po Gustavu Gaspardu de Coriolisovi (1792–1843), který se silami v rotujících soustavách zabýval.



Obr. 57. Alfa a omega efekt. Zdroj: Hvězdy, planety magnety, Mladá fronta 2007.

Kombinace obou jevů způsobuje vždy postupné narůstání jedné složky pole na úkor druhé a přepólování dipólu. U Slunce celý cyklus trvá 22 let. Stejným mechanizmem je pole udržováno a případně i zesilováno i u ostatních hvězd. V závěrečných fázích hvězda kolabuje a tekutinové dynamo přestává fungovat. Zbytkové pole zamrzlé do plazmatu hvězdy je zesíleno kolapsem do menšího objemu (silokřivky při kolapsu zhoustnou). Proto je pole bílých trpaslíků a neutronových hvězd silnější než u hvězd podobných Slunci.

Rotující neutronové hvězdy se ve většině případů projevují jako rádiové pulzary. V oblasti magnetických pólů má magnetické pole indukci přibližně 10^8 T. Rotace neutronové hvězdy vytváří rozvlnění magnetických silokřivek. Tyto magnetické vlny vynášejí v polárních oblastech ven nabité částice, které emitují rádiové vlny. Oblast magnetických pólů se vzdálenému pozorovateli jeví jako horká rádiová skvrna. Pokud není rotační a magnetická osa totožná, dochází k majákovému efektu. Pozorovatel vidí skvrnu jen v některých fázích, neutronová hvězda vysílá pravidelné rádiové pulzy, jejichž perioda je totožná s periodou rotace. Energie, kterou hvězda ztrácí únikem nabitých částic podél silokřivek, způsobuje prodlužování periody rotace. Právě měřením změny periody pul-

zarů lze odhadnout indukci jejich magnetického pole. Existují ale i jiné nezávislé metody měření magnetického pole pulzarů.

Neutronová hvězda není složena jen z neutronů. Pod povrchem se nacházejí i volné elektrony a protony, a tak je nitro neutronové hvězdy vodivou kapalinou, jejíž Reynoldsovo magnetické číslo se odhaduje na 10^{17}, tedy magnetické pole je zcela zamrzlé do této kapaliny. Numerické simulace, které prováděli na konci 80. let dvacátého století Robert Duncan a Christopher Thompson v Princetonu, ukázaly zajímavý fakt. Pokud by nově vzniklá neutronová hvězda rotovala s úhlovou frekvencí vyšší než 200 otáček za sekundu (perioda 5 milisekund), dojde k opětovnému nastartování tekutinového dynama a magnetické pole může zesílit až na neuvěřitelných 10^{12} T, což je pole s hodnotou nad kvantovou mezí. K tomu je ovšem potřeba vysoká teplota a turbulence v nitru neutronové hvězdy. Rychlé ochlazování a zklidňování procesů v nitru způsobí, že tekutinové dynamo přestane fungovat pouhých 10 až 20 sekund po vzniku neutronové hvězdy. Nicméně takto krátkodobě zesílené pole zamrzne do vodivé tekutiny nitra neutronové hvězdy a ta si silné pole ponechá po desítky tisíc let. Vznikl objekt zcela výjimečných vlastností, který nazýváme *magnetar*. Poznamenejme, že slavný pulzar v centru Krabí mlhoviny měl při svém zrodu periodu 20 ms a tak ho tento osud nepotkal.

Vlastnosti magnetarů

Věnujme se nyní nejdůležitějším charakteristikám magnetarů.

■ **Magnetar rotuje velmi pomalu.** Na první pohled by se zdálo, že magnetary jsou nejrychleji rotující neutronové hvězdy. Opak je však pravdou. Extrémně silné pole a rotací indukované vlny rychle odnášejí rotační energii ven v podobě výtrysků nabitých částic. Ve velmi krátké době se magnetar zbrzdí na rotační periodu několika sekund a stane se mnohem pomalejší než běžné rádiové pulzary. Rotační energie magnetarů je oproti ostatním neutronovým hvězdám zanedbatelná, rychle ustanou i magnetické vlny vynášející na-

bité částice do oblasti magnetických pólů, a tak se magnetar nikdy nemůže projevit jako pulzar.

■ **Magnetar září v rentgenovém oboru.** Povrchová teplota magnetaru udržovaná vnitřním třením je dostatečná na tepelné záření celého povrchu v rentgenovém oboru. Dalším zdrojem rentgenového záření (netepelného) jsou nabité částice rotující relativistickými rychlostmi podél magnetických silokřivek. V oblasti pólů tyto částice zahřívají povrch magnetaru a vytvářejí zde horké skvrny, které opět září v rentgenovém oboru. Magnetar je tak zdrojem tepelného i netepelného rentgenového záření, zejména v prvních několika desítkách tisících roků po svém vzniku.

■ **Magnetar má na povrchu pevnou kůru.** Na povrchu všech neutronových hvězd se z atomárních jader vytváří krystalická mříž. Elektronové obaly zde zcela chybí, a tak jde o mimořádně hustou látku v pevném skupenství. Krystalovou mříží se volně pohybují záporné elektrony a neutrony. Celá kůra má tloušťku kolem jednoho kilometru a na spodní straně se volné neutrony nabalují na atomární jádra a vyplňují mezery v krystalické mříži. Spodní část kůry tak má charakter jednoho obrovského atomárního jádra. Kostka na hru „Člověče, nezlob se“ vyrobená z této látky by měla hmotnost deset milionů tun. Pokud by si v některých chladnějších oblastech povrchu jádro udrželo elektron v obalu a vytvořilo atom, byl by tento atom protažený ve směru pole na více než stonásobek svého průměru. Kdyby takových atomů bylo dokonce více, vytvořily by v dané chladnější oblasti na povrchu magnetaru polymerní koberec z velmi neobvyklé látky.

■ **Praskání kůry.** U běžných neutronových hvězd je povrchová kůra stabilní. U magnetarů je ale vystavena enormním tlakům magnetického pole, které tuto kůru prostupuje. Magnetické pole vzniklé v bouřlivých procesech utváření neutronové hvězdy nemá zdaleka minimální možnou energii. Jeho silokřivky se stáčí, přetrhávají a opětovně spojují (přepojují neboli rekonektují), což je doprovázeno opakujícím se praskáním kůry, tzv. *magnetotřesením*. Změna konfigurace povrchu je provázána se změnou topologie

Obr. 58. Magnetar.

magnetického pole a uvolněním energie pole v podobě záblesku v tvrdé rentgenové až měkké gama oblasti. Bouřlivá perioda hledání stavu s minimální energií pole nemůže trvat déle než 20 tisíc let. Opakující se záblesky u mladých magnetarů byly pozorovány od roku 1979 a nazývají se SGR (*Soft Gamma Repeaters*).

■ **Katastrofická rekonexe.** V některých situacích může být energie nahromaděná v magnetickém poli natolik veliká, že dojde ke kompletní změně topologie pole a popraskání kůry ve velkém měřítku. Tato katastrofická rekonexe vede k obřímu gama záblesku, jehož okamžitý výkon je větší než zářivý výkon všech hvězd v celé naší Galaxii. Takové obří záblesky magnetarů byly pozorovány zatím jen tři: v letech 1979, 1998 a 2004. První z nich byl sledován ve Velkém Magellanově mračnu, trpasličí galaxii ve vzdálenosti 157 000 světelných roků, druhé dva přímo v naší Galaxii.

■ **Ohnivá koule.** K přepojení magnetických silokřivek dochází i ve sluneční koróně. Uvolněnou energii magnetického pole zde převezme plazma, které spolu se zamrzlým magnetickým polem

opouští Slunce a vydá se na pouť sluneční soustavou. Takový jev nazýváme koronální výron hmoty. U magnetaru jev začíná podobně. Energii magnetického pole převezmou nabité elektrony a protony. Pole je zde ale natolik silné, že nedovolí těmto částicím opustit magnetar. V místě přepojení vzniká žhavá koule elektronů a protonů, která ztrácí energii pouze zářením. Jde tedy o záblesk „čisté energie", při kterém z magnetaru unikají jen fotony.

Trocha historie

Shrňme nyní přehledně základní objevy týkající se poznání podstaty magnetarů.

■ **1932.** Anglický fyzik James Chadwick (1891–1974) objevil neutron. O pouhý rok později předpovídají švýcarsko-americký astronom Fritz Zwickey (1898–1974) spolu s německo-americkým astronomem Walterem Baadem (1893–1960) existenci neutronových hvězd jako závěrečných stádií hmotnějších hvězd. V témže roce Fritz Zwicky také předpověděl existenci temné hmoty ve vesmíru.

■ **1967.** Doktorandka Jocelyn Bellová Burnellová (1943) objevila pod vedením britského astronoma Antony Hewishe (1924) první neutronové hvězdy. Šlo o rádiové pulzary, které byly nejprve nazvány LGM (*Little Green Men* – malí zelení mužíčkové). Hewish zjistil, že přesné periodické rádiové pulzy nejsou způsobeny interferencí ani mimozemšťany, ale novým druhem hvězd.

■ **1973.** Byl oznámen objev gama záblesků, náhlých vzplanutí neznámé povahy v oboru gama. Dnes je jasné, že bude existovat více mechanizmů vzplanutí gama, která jsou pozorována jak v kosmologických vzdálenostech, tak přímo v naší Galaxii. K záblesků gama dochází přibližně jednou denně a mají trvání od několika milisekund po několik stovek sekund. Může jít o vznik černé díry, splynutí dvou neutronových hvězd nebo o další, dosud neznámé mechanizmy. Záblesky byly pozorovány od konce 60. let vojenskými družicemi VELA, k odtajnění pozorování došlo až v roce 1973.

■ **1979.** Byly objeveny první nepravidelně se opakující zdroje měkkého gama záření, které se dnes označují jako zábleskové zdroje SGR (*Soft Gamma Repeaters*). V roce 1979 byly objeveny hned tři: 7. 1. 1979 v souhvězdí Střelce, 5. 3. 1979 ve Velkém Magellanově mračnu a 8. 3. 1979 v souhvězdí Orla. Záblesk z 5. 3. byl obřím gama zábleskem dosud nevídané intenzity. Záblesk z 8. 3. byl trojitým zábleskem v průběhu dvou dní. Zdroj se poté odmlčel a opakovaně uvolnil další tři záblesky až v roce 1992. SGR byly vyčleněny z ostatních gama záblesků až v roce 1987, kdy již bylo zřejmé, že jde o samostatný jev. Na rozdíl od běžných gama záblesků mají SGR maximum vyzařované energie v tvrdé rentgenové oblasti (tedy na delší vlnové délce) a jde o náhodně se opakující záblesky ze stejného místa. Při běžném vzplanutí SGR vyzáří objekt za sekundu tolik energie, co Slunce za celý rok. Trvání záblesků SGR je od zlomků sekundy po několik sekund. Obdobné objekty v rentgenovém oboru se nazývají AXP (*Anomalous X-Ray Pulsars*). Jde o nepravidelné rentgenové pulzary, jejichž nepravidelnost, jak dnes víme, je opět způsobena praskáním kůry magnetaru. Obří záblesky SGR, za něž je zodpovědná katastrofická rekonexe magnetaru, mají dosvit několik minut a dosud byly pozorovány pouze tři, shodou okolností jeden z nich hned v roce 1979, kdy byly SGR objeveny, ovšem nebyla ještě známa jejich pravá podstata.

■ **1992.** Robert Duncan a Christopher Thompson publikují první ucelenou teorii magnetarů postavenou na zesílení pole tekutinovým dynamem a následných rekonexích magnetických silokřivek. Jejich teorie je podložena četnými numerickými simulacemi. V populární podobě vyšla v únoru 2003 v prestižním časopise *Scientific American*, spoluautorkou se stala ještě objevitelka prvního magnetaru Chryssa Kouveliotou.

■ **1998.** Chryssa Kouveliotou z Marshallova kosmického letového centra v NASA identifikovala první magnetar. Šlo o objekt SGR 1806-20 z května 1998, který se ukázal být magnetarem s rotační periodou 7,5 sekundy. Objev publikovala v časopise Nature 21. května 1998. Tento magnetar za poslední květnový týden emitoval

dalších 50 SGR záblesků! V roce 2003 získala spolu s Robertem Duncanem a Christopherem Thompsonem prestižní cenu Bruno Rossiho za observační potvrzení existence magnetarů. V témže roce získala další prestižní Descartovu cenu za příspěvek k pochopení gama záblesků. V roce 1998 došlo také k druhému případu pozorované katastrofické rekonexe dne 27. srpna 1998.

■ **2004.** Byl detekován poslední registrovaný případ katastrofické rekonexe magnetarů, který uvolněnou energií předčil oba dříve pozorované případy. K záblesku došlo 27. prosince 2004 a popíšeme ho podrobněji v následující kapitole.

■ **2007**. Evropská jižní observatoř oznamuje objev prvního opticky aktivního magnetaru. Objekt byl objeven jako rentgenový záblesk dne 10. června 2007 observatoří SWIFT a má katalogové číslo SWIFT J195509+261406. Magnetar se nachází v souhvězdí Lištičky ve vzdálenosti 16 000 světelných roků. Po pět sekund trvajícím rentgenovém záblesku následovala řada optických záblesků. První z nich byl zaznamenán hodinu po rentgenovém záblesku a trval necelé dvě minuty, objekt se zjasnil čtyřicetkrát. Na objevu se podíleli i vědci z České republiky.

■ **2011.** V době psaní této knihy je známo 21 magnetarů, většina z nich je soustředěna kolem roviny naší Galaxie.

Katastrofické rekonexe

U magnetarů dochází často k povrchovému magnetotřesení, které má za následek opakované uvolnění energie a záblesky SGR. Záblesky se opakují po několika dnech, poté magnetar na mnoho let utichne a následně svou činnost obnoví. Existují ale i extrémy, jako například SGR z 15. ledna 1998, který v 80. letech opakovaně více než stokrát vytvořil gama záblesk. Perioda rotace je přibližně 6,4 sekundy. V devadesátých letech se tento magnetar odmlčel.

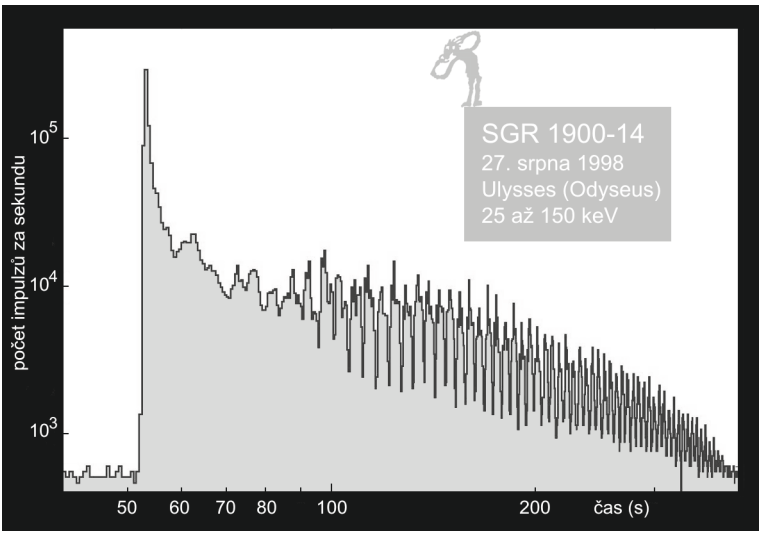
Podle stávající teorie je magnetarů v naší Galaxii enormní množství, snad milion. Opakované záblesky způsobené hledáním mi-

nima magnetické energie jsou ale typické pro prvních 20 000 let života. Poté se magnetar stává poklidným pozůstatkem bývalé hvězdy a navždy se odmlčí. Proto pozorujeme v Galaxii magnetarů jen zhruba jednu desítku, viditelné jsou totiž jen v počáteční aktivní fázi.

Opakovaná magnetotřesení způsobená přepojováním magnetických silokřivek jsou sama o sobě impozantním jevem. Tu a tam ovšem zcela výjimečně dojde ke gigantické explozi gama záření, která odpovídá kompletnímu přebudování topologie magnetických silokřivek. Na Zemi se podobný úkaz podařilo zaznamenat jen třikrát:

■ **1979.** Dne 5. března došlo k úkazu, který v dějinách astronomie neměl obdoby. Gigantický gama záblesk způsobil saturaci všech dostupných přístrojů, které zaznamenaly maximální možné hodnoty intenzity gama záření. Jako první reagovala sonda Veněra 11, poté následovaly v několikasekundových odstupech sondy Veněra 12, Helios 2, Pioneer Venus, u Země tři družice VELA, Prognoz 7 a Einstein a na druhé straně Sluneční soustavy sonda ISEE (dnešní ICE), kde záblesk paradoxně prošel družicí z opačné strany, než kam mířil gama senzor, a přesto došlo k zahlcení měřícího přístroje. Přístroje zaznamenaly 0,2 sekundy trvající obří záblesk, který zahltil přístroje, a poté tři minuty trvající dosvit modulovaný s periodou 8 sekund, která odpovídala rotaci magnetaru. Ze zpoždění detekce postupující rovinné vlnoplochy na jednotlivých družicích bylo možné s vysokou přesností určit polohu zdroje (výpočty trvaly celý rok). Ukázalo se, že záblesk přišel z pozůstatku po explozi supernovy ve Velkém Magellanově mračně, označovaném jako N 49 (viz obrázek 18 barevné přílohy). Celková energie uvolněná při záblesku se odhaduje na neuvěřitelných 6×10^{37} J. Magnetar byl aktivní do roku 1983 a poskytoval další 4 menší záblesky ročně.

■ **1998.** K druhému obdobnému případu došlo 27. srpna, záblesk nese označení SGR 1900+14. Situace se opakovala a opět došlo k saturaci všech dostupných přístrojů na sondách a družи-



Obr. 59. Záznam záblesku magnetaru SGR 1900+14 z roku 1998 ze sondy Odyseus.

cích. Záblesk pozorovaly například sondy Konus, Wind, Ulysses (Odyseus), Beppo-Sax, NEAR, RXTE a další. Intenzita záblesků z roku 1979 i z roku 1998 zhruba tisícinásobně překročila intenzitu běžných SGR způsobených pukáním kůry na magnetarech. Záblesk přišel ze vzdálenosti 20 000 světelných roků, ze souhvězdí Orla, měřená perioda je 5,2 sekundy a celková uvolněná energie se odhaduje na 2×10^{37} J, tedy srovnatelná se zábleskem z roku 1979 (snímek okolí magnetaru pořízený deset let po explozi naleznete na obrázku 20 barevné přílohy).

■ **2004.** Asi vůbec největší nebeskou podívanou nám příroda připravila po vánočních svátcích, 27. prosince. Celková uvolněná energie byla doposud nejvyšší, a to 10^{39} J. Vzniklá exploze byla tak silná, že způsobila ionizaci horních vrstev atmosféry Země. Záblesk byl pozorován mnoha detektory RTG, gama i rádiového záření a samozřejmě i částicovými detektory. Za všechny jmenujme pozorování z RTG observatoří SWIFT a INTEGRAL, z radioteleskopické sítě VLA a z částicového experimentu RHESSI. Tento

magnetar je od nás vzdálen 50 000 světelných roků (průměr Galaxie je přes 100 000 světelných roků), rotuje kolem osy s periodou 7,5 s a poloměr má pouhých 20 kilometrů. Katalogové označení má SGR 1806+20 (viz obrázek 19 barevné přílohy). Pokud by obdobný záblesk vznikl ve vzdálenosti do deseti světelných roků, poškodil by přirozenou ozónovou vrstvu a mohl by vážně zasáhnout do rovnováhy v biosféře Země. Naštěstí v takové blízkosti žádné magnetary nejsou a v celé naší Galaxii jich známe pouze 21.

Postupně jsme si začali uvědomovat roli magnetických polí ve vesmíru, jejich uplatnění v hvězdném vývoji od kolébky v protohvězdné mlhovině až po závěrečné fáze vývoje hvězd. A právě hvězdy s extrémním magnetickým polem mohou ve svých posledních životních okamžicích vyslat gigantické gama záblesky, které nám umožní studovat jevy jinde v přírodě nepozorovatelné.

Víte, že

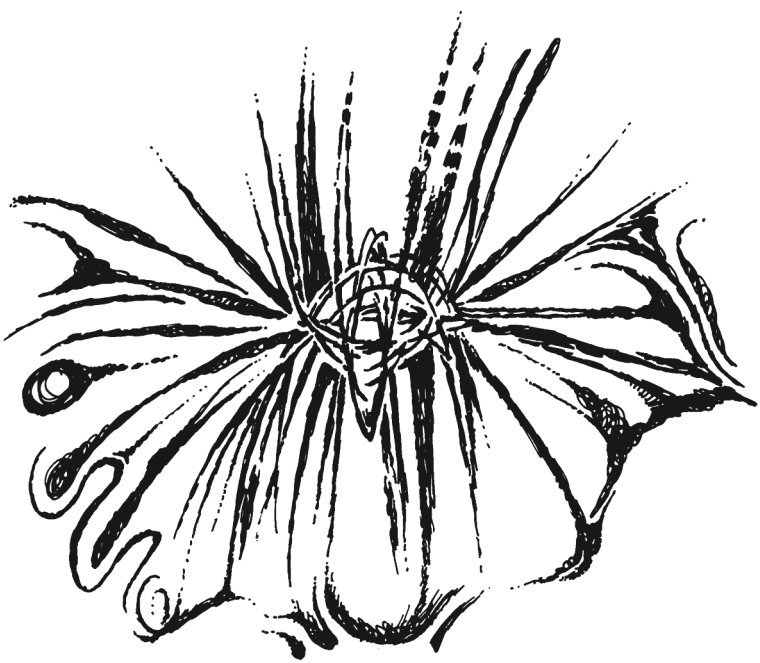
■ Víte, že největším lovcem magnetarů je v posledních letech observatoř SWIFT? Původně je určena k vyhledávání gama záblesků, ale má na palubě i přístroj XRT pro rentgenový obor a UVOT pro UV a optický obor. Startovala v roce 2004.

■ Víte, že bílý trpaslík a neutronová hvězda nemusí být jedinými stabilními pozůstatky hvězdného vývoje? Teoreticky by ještě mohly existovat kvarkové hvězdy, v jejichž nitru by tlaku gravitace odolávaly volné kvarky.

■ Víte, že Jocelyne Bellová-Burnellová, která objevila první neutronovou hvězdu (pulzar), byla klíčovou osobností při kuloárových diskusích na zasedání Mezinárodní astronomické unie v Praze, které vedly v roce 2006 k vyřazení Pluta z rodiny planet?

Poučení na závěr: *Příroda vládne takovými silami, jaké lidstvo nemá a nikdy snad naštěstí nebude mít k dispozici. Při setkání s nimi nevycházíme z údivu.*

11. Solitony



V Bibli se nepíše, že by základní fyzikální teorie měly být lineární.
Enrico Fermi

Vlnění nás potkává v různých podobách téměř na každém kroku. Zpravidla jde o tzv. lineární vlny, které se dají různě skládat do nejroztodivnějších podob. Příroda se ale ne vždy chová lineárně a princip superpozice vln nemusí platit. Za některých situací může vzniknout osamocená vlna šířící se prostorem beze změny tvaru a velikosti. Když se dvě osamocené vlny potkají, projdou skrze sebe jako dva duchové a pokračují dál ve své pouti v nezměněné podobě. Takovým vlnám říkáme *solitony* a v nelineárních dějích jsou stejně důležité jako sinusové vlny v teoriích lineárních. Solitony se jako řešení nelineárních rovnic vyskytují v nejrůznějších matematických modelech z mnoha oblastí – od hydrodynamiky přes fyziku plazmatu až po ekonomické modely fungování trhu. Někdy si říkám, že katastrofální situace v současném školství také musí být jen nějakým solitonem a doufám, že tento soliton jen profičí a po čase zase zmizí. Zatím tomu ale bohužel nic nenapovídá a spíše se zdá, že jde o setrvalý stav...

První pozorování

Počátky solitonové fyziky jsou neodkladně spojeny se jménem skotského inženýra Johna Scotta Russella (1808–1882), který byl nejen vynikajícím fyzikem, ale i konstruktérem lodí, parních automobilů a vynálezcem. Vystudoval Univerzitu v St. Andrews a měl natolik hluboké znalosti, že se ve svých 24 letech stal profesorem na Univerzitě v Eddinburgu. O dva roky později, v roce 1834, zavedl dopravu parními automobily mezi Glasgowem a Paisley. Jeho počáteční úspěch těžko nesli ostatní dopravci, a proto zosnovali dopravní nehodu, při které zemřeli 4 pasažéři. Pravděpodobně šlo o vůbec první automobilovou dopravní nehodu v historii. Russell proto přivítal nabídku společnosti *Union Canal Company*, v rámci

které měl za úkol testovat a konstruovat čluny na kanálu Union. Tento velmi úzký kanál byl postaven v letech 1818 až 1822, spojoval města Eddinburg a Glasgow. Sloužil především pro dopravu uhlí a osob na člunech, jenž musely být taženy koňmi klusajícími po břehu kanálu. Celý kanál má délku 50 kilometrů, většinou vede po vrstevnici a terénní nerovnosti překonává po akvaduktech nebo v tunelech (nejdelší tunel má délku 631 metrů). V srpnu 1834 učinil Russell mimořádný objev, který sám popisuje takto:

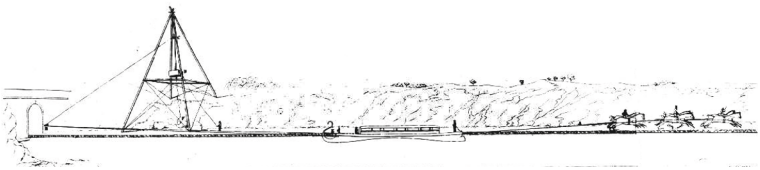
„Díval jsem se na člun, který byl podél úzkého kanálu rychle tažen párem koní. Člun se náhle zastavil, ale nikoliv tak voda, která byla tlačena před přídí loďky. Voda pokračovala v samostatném pohybu a valila se kanálem velkou rychlostí. Zformovala se do osamocené vzedmuté vlny s hladkým kulatým tvarem. Při pohybu se neměnil ani tvar vlny, ani její rychlost. Sledoval jsem vlnu na koňském hřbetu a předjel ji. Stále se valila rychlostí osm až devět mil za hodinu, neměnila svůj tvar – byla dlouhá kolem třiceti stop a vysoká asi jeden a půl stopy. Výška se postupně snižovala, až jsem vlnu ztratil v záhybu kanálu po jedné nebo dvou mílích. S tímto neobyčejným a krásným úkazem, který jsem nazval translační vlnou, jsem se poprvé setkal v srpnu 1834.“

Russell si byl plně vědom výjimečnosti jevu. Jím objevená *translační vlna* (*Great wave of translation*) odporovala zákonitostem hydrodynamiky, které ve svých pracích popisovali Newton a Bernoulli. Russell vybudoval u svého domku v eddinburgské čtvrti New Town rybník a tři roky prováděl různé experimenty – jak doma, tak na kanálu Union. Zjistil, že *translační vlna* má velmi zvláštní a nečekané vlastnosti:

■ Rychlost pohybu závisí na velikosti vlny a šířka na hloubce vody. Translační vlna je mimořádně stabilní a může svůj tvar udržet i několik mil.

■ Na rozdíl od normálních vln se translační vlny nikdy nespojí. Rychlejší vlna projde skrze pomalejší a předběhne ji.

■ Pokud je translační vlna příliš veliká vzhledem k hloubce kanálu, rozdělí se na dvě vlny, jednu velkou a jednu malou.

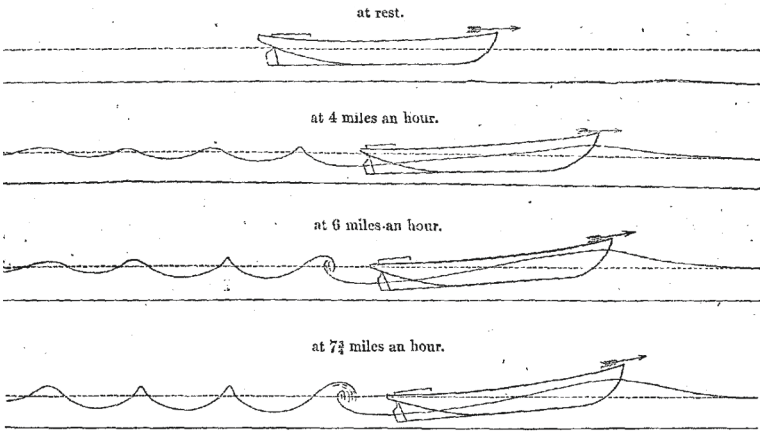


Obr. 60. Russellova kresba člunu taženého koňmi na kanálu Union.

Běžné vlny podléhají tzv. disperzi – různé části vlny se pohybují různě rychle, vlna se rozplývá, snižuje a rychle mizí. Jiné vlny se naopak zúží, zvětší svou výšku a přepadnou dopředu. Objevená vlna jako by měla obě vlastnosti současně a disperze (rozšiřování) byla kompenzována druhým jevem (zužováním). Russell svá pozorování zužitkoval i pro plavbu člunů po kanále. Zjistil, že čelní vlna vytvářející se před přídí očividně brzdí člun. Pokud je ale loď tažena správnou rychlostí, je vynesena na translační vlnu, po níž pohodlně surfuje s minimálním úsilím. Na základě tohoto objevu Russell zavedl noční přepravu z Eddinburgu do Glasgowa, při které cestující spali a koně udržovali správnou rychlost.

Russellův výzkum se nesetkal s ohlasem u ostatních vědců. Učenci nebyli na takový objev připraveni a nechtěli uvěřit, že by existovaly jevy, jež jsou v rozporu s pracemi Newtona a Bernoulliho. Skutečný význam byl doceněn až v 60. letech 20. století, kdy se fyzikové začali zabývat nelineárními jevy v přírodě. Dnes se nikdo nediví, že při komunikaci po optických vláknech urazí světelné pulzy beze ztráty tvaru tisíce kilometrů. Solitony se zabývá nelineární elektrodynamika, fyzika plazmatu, biofyzika, fyzika elementárních částic, fyzika pevných látek atd.

Russell byl svým současníkům znám spíše jako konstruktér lodí. Spolu s Isambardem Kingdomem Brunelem postavil tehdy největší parník světa, proslulou loď *Great Eastern* o délce 210 metrů. Loď byla dostavěna v roce 1859, problémy při spouštění na vodu byly jen začátkem komerčního neúspěchu tohoto obřího plavidla. Při první zkušební plavbě explodoval kotel a zemřelo pět členů posádky, při druhé zkušební plavbě vnikla do lodi voda. Brunela ranila



Obr. 61. Russellova kresba člunu plujícího s různými rychlostmi.

mrtvice. První plavby s cestujícími se zúčastnilo jen 43 pasažérů, přestože se na loď mohlo vejít až 3 000 lidí. Loď byla nakonec využívána při pokládání podmořských telegrafických kabelů.

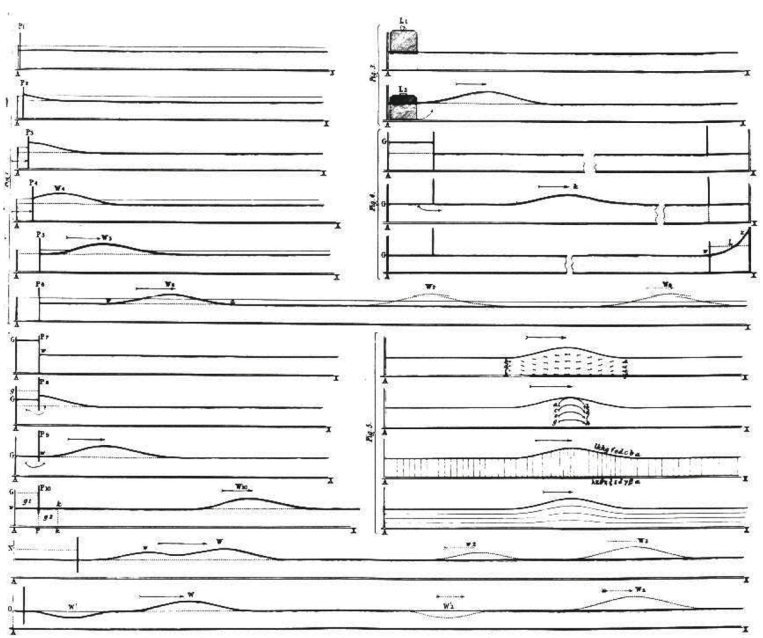
Russell měl mnoho nepřátel a přestože byl vynikající odborník a člen mnoha akademických institucí, byl špatným obchodníkem. Jeho život provázely střídavé úspěchy a neúspěchy, nakonec zemřel v relativní chudobě v roce 1882. Dnes je po něm pojmenován akvadukt na kanálu Union, kde konal své až nyní slavné experimenty.

Co je soliton?

Vlnit se může leccos – výška vodní hladiny, tlak, teplota, elektrické nebo magnetické pole, rychlost tekutiny i další veličiny. Ve fyzice většinou zavádíme jeden zástupný symbol, tzv. vlnovou funkci ψ, za kterou podle potřeby můžeme dosadit tu veličinu, kterou při popisu vlnění máme na mysli. Solitonem nazýváme osamocenou vlnu, jakýsi kopeček na vlnové funkci, který se šíří prostorem beze změny tvaru. Soliton s sebou nese energii, která je lokalizovaná v místě solitonu. Existuje ještě jeden, velmi příbuzný jev, tzv. so-

litonová (schodová) vlna. Liší se tím, že vlnová funkce vytváří namísto kopečku schod, v němž je opět lokalizovaná energie, kterou vlna přenáší z místa na místo (viz obrázek 63 na další straně).

Solitonovou vlnou je například nebezpečná vlna tsunami. Jiným příkladem jsou v televizi často opakované záběry řítících se dominových kostek postavených nadšenci do nejroztodivnějších tvarů. Jedna kostka sráží následující a celkově vzniká dojem, jako by v postavené řadě probíhala nějaká částice, která je kácí. Jde o typickou solitonovou vlnu, před ní kostky stojí, za ní leží a energie putující od místa k místu postupně kostky sráží. Pocit, že „cosi" běží podél řady můžeme ve fyzice vyjádřit pojmem *kvazičástice*. Není to skutečná částice, ale impulz energie šířící se podél postavených kostek (ve skutečnosti nejde doslova o kostky, ale tento pojem se pro domino vžil). Obdobně se chová pohybující se dislokace v krystalu nebo stěna domény ve feromagnetiku.

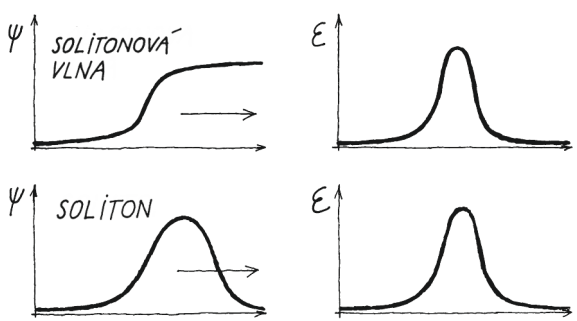


Obr. 62. Russellova kresba translačních vln (solitonů).

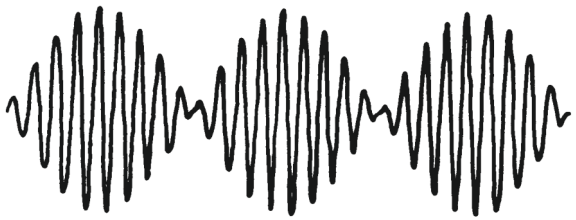
Vraťme se na chvíli k vlastnostem „obyčejných“ vln, pro které platí princip superpozice a lze je skládat. Složíme-li dvě sinusové vlny blízkých frekvencí, objeví se tzv. rázy (zázněje) – řada vlnových balíků vedle sebe (viz obrázek 64).

Budeme-li skládat větší množství vln blízkých frekvencí, můžeme potlačit boční vlnové balíky a při nekonečném množství vln velmi blízkých frekvencí vytvořit jeden jediný osamocený vlnový balík. Různé frekvence se ale budou v tomto balíku šířit různou rychlostí a balík se bude postupně rozplývat (zvětšovat rozměry a snižovat výšku) – bude jevit tzv. *disperzi*. V matematice takové chování popisují lineární rovnice (neznámé jsou v nich pouze v prvních mocninách). Pokud se ale v rovnicích vyskytnou nelineární členy (například třetí mocnina vlnové funkce), chování vln, které rovnice popisuje, se od základu změní. Nelineární členy mohou způsobit tzv. *modulární nestabilitu*, při které jsou vlny s menší amplitudou potlačovány a vlny s větší amplitudou ještě více rostou. Dochází ke stlačování vlnového balíku ve směru jeho pohybu a zvětšování jeho výšky. Jev je přesně opačný k disperzi!

V roce 1895 odvodili holandští matematici Diederik Korteweg (1848–1941) a Gustav de Vries (1866–1934) rovnici pro šíření vln na mělké vodě. Rovnice je nelineární a disperze vlny může být přesně kompenzována modulární nestabilitou. Šedesát let po Russellových pozorováních byl problém vyřešen. Na vodním kanálu



Obr. 63. Solitonová vlna a soliton. Nalevo je prostorový průběh vlnové funkce, napravo průběh hustoty energie. Šipka naznačuje směr pohybu.



Obr. 64. Zázněje.

se skutečně mohou šířit vlny beze změny tvaru a velikosti a jejich existenci lze teoreticky vysvětlit za pomoci nelineárních jevů. Rovnice popisující tuto vlnu se dnes nazývá KdV rovnice (Kortewegova-de Vriesova rovnice). V současnosti je známa řada dalších rovnic z různých oblastí vědy, které poskytují solitonová řešení, například nelineární Schrödingerova rovnice, která se označuje zkratkou NLS (z anglického *Non Linear Schrödinger*). Solitony KdV a NLS mají poněkud odlišné chování:

- KdV soliton je pouze vyboulením vlnové funkce v místě vlny (například vzedmutí vodní hladiny), NLS soliton může vypadat jako vlnový balík, tj. může být obálkou vlny určité frekvence.

- Rychlost pohybu KdV solitonu závisí na amplitudě, rychlost pohybu NLS solitonu nikoli.

- U KdV solitonu je součin výšky vlny a druhé mocniny šířky konstantní, u NLS solitonu takovéto pravidlo neplatí.

- KdV solitony mají po srážce přesně stejný tvar jako před srážkou. NLS solitony si sice ponechají při srážce svou identitu, ale jejich tvar se přece jen poněkud změní.

Zajímavé je, že srážka dvou KdV solitonů nezmění jejich tvar a po srážce se pohybují se stejnou rychlostí a se stejnou energií jako před srážkou. Může se změnit jen jejich fáze, tj. některý ze solitonů (případně oba) se srážkou poněkud opozdí. Přesně takové vlastnosti pozoroval Russell při svých experimentech na vodním kanálu v letech 1834 až 1837, kdy nevědomky založil zcela nové odvětví fyziky – fyziku nelineárních jevů.

Experimentální zařízení generující solitony v plazmatu

V roce 1960 ukázali američtí fyzikové Clifford Gardner a George Morikawa, že vlnu v plazmatu, která se šíří kolmo na magnetické pole Alfvénovou rychlostí[64], lze popsat KdV rovnicí a oscilace hustoty nebo tlaku plazmatu by se mohly šířit jako soliton. O šest let později, v roce 1966, ukázali japonští fyzikové Haruichi Washini a Tosiya Taniuti, že zvukové vlny nesené ionty v plazmatu (tzv. iontově akustické vlny) jsou ve slabě nelineárním přiblížení opět popsány KdV rovnicí.

První experimentální pokusy o nalezení vzruchů šířících se plazmatem jako solitony byly učiněny v 70. letech 20. století. Bylo třeba připravit klidné plazma, v němž by byly náhodné fluktuace hustoty nižší než 1 % průměrné hustoty, a v tomto plazmatu vybudit rozruch o velikosti přibližně 10 % původní hustoty plazmatu. Takový rozruch je možné vybudit například přivedením napěťového signálu na vhodnou elektrodu. Za vhodných okolností se rozruch přemění na soliton. Zcela nevhodné pro tyto experimenty je plazma výboje, ve kterém teče silný elektrický proud, který je rušivým elementem. Popišme si tři důležité aparatury, na kterých byla pozorována řada solitonů v plazmatu.

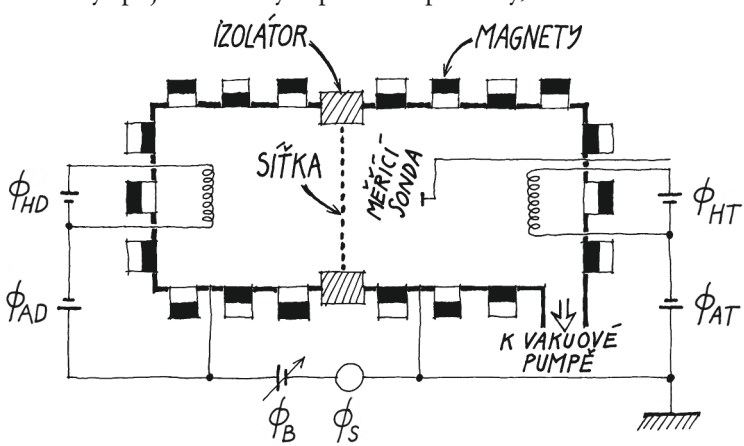
Q aparatura je válcová trubice, na jejíž obou koncích jsou rovinné kovové desky pokryté alkalickým kovem (cesiem nebo draslíkem). Desky jsou zahřáté na vysokou teplotu a do prostoru komory se z nich odpařují ionty a elektrony. Trubice je v silném magnetickém poli, které snižuje difúzi elektronů kolmo na osu trubice. Plazma vznikající v trubici má vyrovnanou teplotu elektronů a iontů, což je jistou nevýhodou tohoto uspořádání. Pokud mají ionty teplotu shodnou s elektrony, je fázová rychlost iontově akustické vlny srovnatelná s tepelnou rychlostí iontů, a ionty proto snadno surfují na

64 **Alfvénova rychlost** – typická rychlost, kterou získá plazma při přeměně magnetické energie na kinetickou. Jde o jednu ze dvou základních rychlostí, kterou se šíří nízkofrekvenční vlny plazmatem (rychlost zvuku a Alfvénova rychlost).

iontově akustické vlně a odnímají jí energii tzv. Landauovým útlumem. Ideální je, když mají ionty teplotu výrazně nižší než elektrony, pak je Landauův útlum na iontech zanedbatelný. Soliton lze v trubici vybudit například napěťovým pulzem přivedeným na vhodnou elektrodu.

Komora s elektronovým dělem je další ze zařízení pro sledování solitonů. Elektrony vnikají do inertního plynu (argonu nebo xenonu) a na své cestě ho ionizují. Přitom vzniká plazma, v němž má elektronová složka podstatně vyšší teplotu než iontová a Landauův útlum iontově akustických vln je zanedbatelný. Jak v Q aparatuře, tak v komoře s elektronovým dělem vznikne plazma, ve kterém je střední volná dráha všech typů částic minimálně desetinásobkem rozměrů aparatury, a proto lze sledovat výhradně vlnové jevy neovlivněné srážkami v plazmatu.

DP aparatura je nejvýznamnějším zařízením, které přispělo k výzkumu solitonů, a proto si ho popíšeme podrobněji. Jedna z mnoha používaných variant je na obrázku 65. První zařízení tohoto typu sestrojili Rudolf Limpaecher a K. R. MacKenzie již v roce 1973. Jde o dvojitou plazmovou komoru (anglicky *Double Plasma*, odsud název DP), obě části jsou oddělené kovovou síťkou. Ta není elektricky spojena s žádným prvkem aparatury, samovolně se nabi-



Obr. 65. DP aparatura.

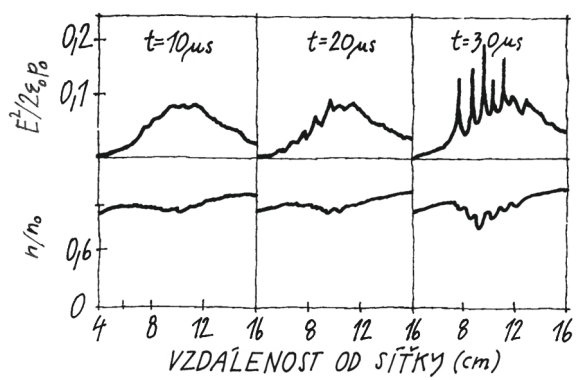
je na záporný potenciál (několika desítek voltů) a brání průchodu elektronů z jednoho objemu do druhého. Napětí ϕ_{HD} a ϕ_{HT} zajišťují žhavení elektrod, ze kterých do komor unikají elektrony. Napětí ϕ_{AD} a ϕ_{AT} tyto elektrony urychlují. Urychlené elektrony ionizují pracovní plyn. Aby elektrony neunikaly z komor, jsou na obvodu řady permanentních dipólových magnetů (sousední řady mají opačnou polaritu), podle velikosti komor jich může být jeden až dva tisíce. Vhodně zvolené napětí ϕ_B brání průchodu iontů mezi komorami.

V první variantě zařízení bylo možné vytvořit přibližně 1 m^3 bezesrážkového plazmatu (střední volná dráha částic byla větší než rozměry aparatury) s koncentrací elektronů 10^7 až 10^{10} částic v centimetru krychlovém, teplotou elektronů 1 až 3 eV a teplotou iontů nižší než desetina teploty elektronů (nízká teplota iontů zajišťuje, že generované iontově akustické vlny nejsou tlumeny Landauovým útlumem na iontech). Permanentní magnety měly indukci 0,2 T a jejich řady od sebe byly vzdálené 10 cm. Soliton bylo možné vyvolat mnoha způsoby, jedním z nich bylo přivedení napěťového pulzu ϕ_S, který měl za následek velkou poruchu hustoty iontů šířící se z přípravné do cílové komory (komora s měřící sondou). Jsou ale i jiné způsoby: přivedení napětí na mřížku, přivedení napětí na kovový předmět ponořený do levé přípravné komory (válcový předmět vytvořil válcový soliton) nebo fotoionizace světlem fokusovaným do určité roviny (vznikl rovinný soliton) či napětí přivedené na pole drátků. Zařízení tohoto typu jsou standardem pro tvorbu a výzkum solitonů spojených s iontově akustickými vlnami a dnes se vyrábějí i s válcovými nebo sférickými komorami.

Solitony v plazmatu

Dnes je solitonů a šiřících se solitonových vln v plazmatu známa celá řada. Některé dokážeme uměle vytvořit v laboratoři, jiné pozorujeme ve vesmírném plazmatu. Připomeňme si některé z těch nejznámějších a nejdůležitějších.

■ **Langmuirův soliton.** Vznik Langmuirova solitonu souvisí s kmity elektronů kolem hmotnějších iontů. Při tomto pohybu je generováno podélné elektrické pole. Vlivem nelineárních dějů může v určité oblasti dojít ke snížení koncentrace elektronů a vytvoření jakési dutiny v plazmatu, která je vyplněna výše zmíněným elektrickým polem. Lokální snížení tlaku plazmatu je kompenzováno zvýšením hustoty energie elektrického pole. Dutina zaplněná polem se pohybuje plazmatem jako NLS soliton. Langmuirův soliton je pojmenován po americkém fyzikovi a chemikovi Irwingu Langmuirovi (1881–1957), který jako první upozornil na existenci vln, z nichž tento soliton vzniká. Někdy se mu také říká kaviton (vyplňuje kavitu – dutinu).



Obr. 66. Langmuirův soliton detekovaný A. Y. Wongem v roce 1977. Je patrné, že snížení koncentrace je kompenzováno zvýšením hustoty energie elektrického pole.

■ **Trivelpiecův-Gouldův soliton.** Tento soliton souvisí opět s elektronovými plazmovými vlnami, ale v ohraničeném prostoru. Vzniká jako komprese plazmatu šířící se podle pravidel KdV solitonu. Nejsnáze se tyto solitony generují v Q aparatuře, se kterou jsme se již seznámili. Experimentálně bylo ověřeno, že součin výšky a druhé mocniny šířky je konstantní a že rychlost solitonu závisí jen na jeho amplitudě. Za prošlým solitonem bylo pozorováno lehké zvlnění plazmatu. Vlny spojené s tímto solitonem

poprvé popsali v roce 1959 Alvin W. Trivelpiece a Roy W. Gould z Kalifornského institutu technologií.

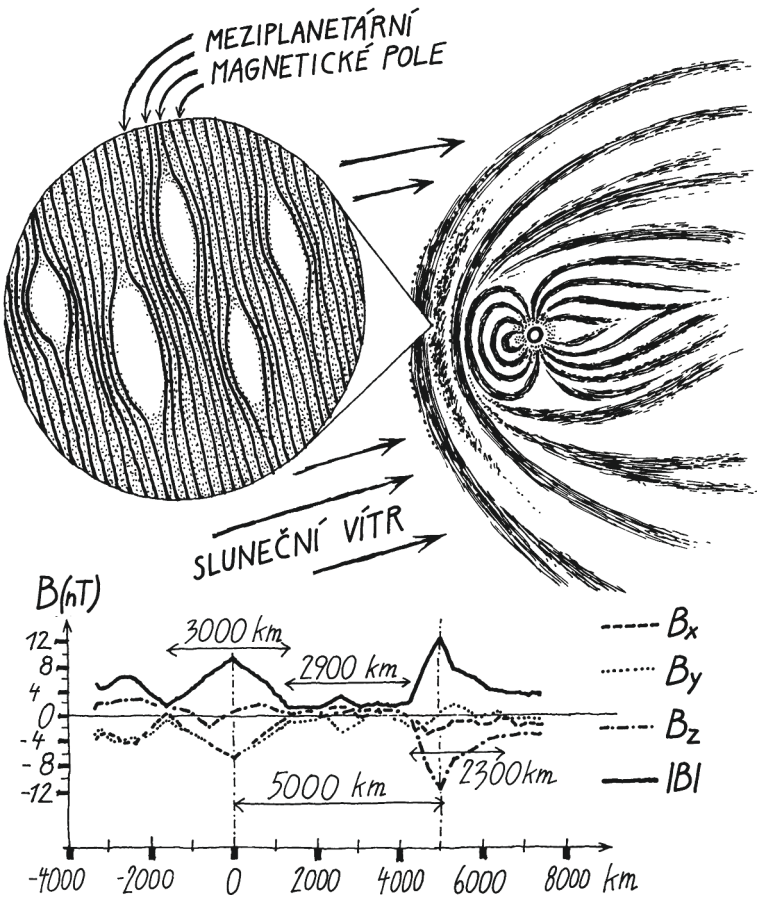
■ **Iontově-akustický soliton.** Soliton tohoto druhu se může vytvořit ze zvukových vln šířících se plazmatem. Tyto vlny jsou, na rozdíl od plynu, neseny ionty, které spolu interagují také prostřednictvím elektrického pole. Jde o nejlépe prozkoumané solitony v plazmatu, snadno se generují v DP aparatuře napěťovým pulzem vhodné frekvence. Bez problémů lze vytvořit rovinné solitony, cylindrické solitony nebo sférické solitony. Iontově-akustické solitony jsou popsány KdV rovnicí a v experimentech se podle ní chovají.

■ **Magnetické bubliny.** Dvě družice Double Star[65] spolu se čtveřicí evropských družic Cluster (viz kapitola 3) zjistily, že sluneční vítr v blízkosti čelní rázové vlny zemské magnetosféry není spojitým tokem částic, ale nachází se v něm různé bubliny o velikosti několika tisíc kilometrů s malým počtem iontů a slabým magnetickým polem (viz obrázek na protější straně). První bublina byla objevena 2. března 2005, kdy sondy pozorovaly společně bublinu v koncentraci iontů, jejíž tvar kopírovalo zeslabené magnetické pole. Bublin bylo při dalším pozorování nalezeno přibližně 150, všechny na vnější straně rázové vlny. Zdá se, že mají protažený tvar ve směru magnetických silokřivek meziplanetárního magnetického pole. Bohužel pozorování neposkytují dostatek údajů pro zjištění, zda mají nalezené útvary charakter solitonů.

■ **Schod v elektrickém potenciálu.** V laboratorním i vesmírném plazmatu se často vytvoří pohybující se schod elektrického potenciálu. Schod potenciálu samozřejmě znamená přítomnost elektrického pole v dané oblasti, které může urychlovat částice s vhodným nábojem a vhodným směrem pohybu. Pokud je schod dosti veliký

65 **Double Star** – čínsko-evropská mise dvou družic zkoumající magnetosféru Země. Společný projekt Čínské národní kosmické agentury CNSA a Evropské kosmické agentury ESA. Družice startovaly v prosinci 2003 a červenci 2004. Jedna ze sond byla navedena na rovníkovou (570 × 78 970 km, sklon 28,5°) a druhá na polární dráhu (700 × 39 000 km, sklon 90°). Jejich data doplňovala měření evropské čtveřice družic CLUSTER. Mise byla ukončena v říjnu 2007.

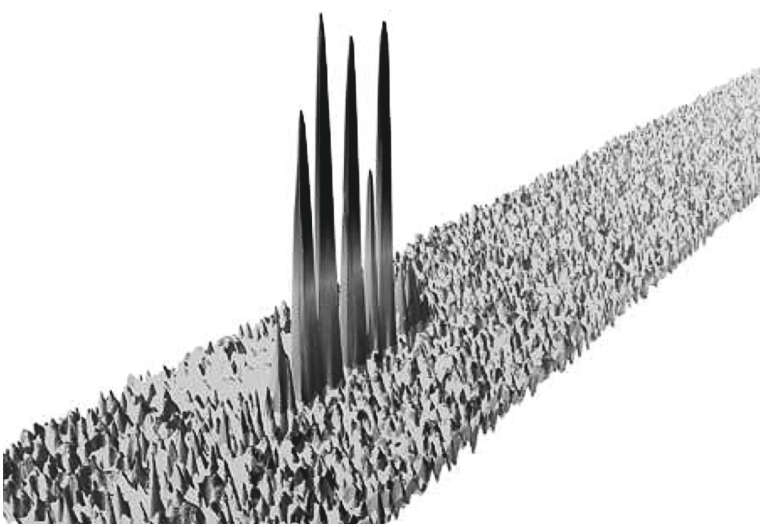
(energeticky je vyšší než průměrná tepelná energie částic), rozdělí se v jeho blízkosti částice do čtyř skupin. První dvě skupiny tvoří elektrony a ionty letící vhodným směrem, které jsou polem urychleny. Druhé dvě skupiny představují naopak elektrony a ionty letící v opačném směru, takže jsou polem zpomaleny. Důsledkem změny rychlosti elektronů a iontů je změna jejich hustoty v blízkosti schodu potenciálu a vytvoření zajímavé struktury. V místě vyššího



Obr. 67. Podivné bubliny před rázovou vlnou zemské magnetosféry.

potenciálu se kumuluje kladný náboj a v místě nižšího potenciálu záporný náboj. Takové struktuře se říká elektrická dvojvrstva a má opět vlastnosti solitonu. V nezměněné podobě se pohybuje plazmatem. Dvojvrstvy vytvářejí různě zprohýbané pohybující se plochy malé tloušťky. V laboratorním plazmatu jde o milimetry, v ionosféře o centimetry, v meziplanetárním prostředí o desítky metrů a v mezigalaktickém prostředí o desítky kilometrů.

■ **Solitonový vláček**. V roce 2002 se podařilo připravit vědcům z Univerzity v Rice Boseův-Einsteinův kondenzát[66] velice zajímavých vlastností. Ultrachladné atomy vytvořily kondenzát jen v některých místech. Vznikla řada až patnácti pohybujících se solitonů připomínajících vláček. Oblasti kondenzátu se přemisťovaly beze změny tvaru, jak je pro solitony typické.



Obr. 68. Solitonový vláček pozorovaný na Univerzitě v Rice.

66 **Boseův-Einsteinův kondenzát** – stav hmoty, kdy se všechny bosony (částice nebo atomy s celočíselným spinem) nacházejí v jediném a také nejnižším možném energetickém stavu. Tyto částice se chovají jako jeden jediný celek (mají tzv. koherentní chování), jsou popsány jednou vlnovou funkcí a mají zajímavé makroskopické vlastnosti. Někdy se pro tento stav hmoty užívá také název bosonový kondenzát, superatom či supermolekula.

Víte, že

■ Víte, že John Scott Russell byl také do jisté míry politikem? V době americké občanské války se pokoušel vyjednat mír mezi znesvářenými stranami.

■ Víte, že název *soliton* vymysleli v roce 1965 američtí fyzikové Norman Zabusky (1929) a Martin Kruskal (1925–2006), když numericky hledali řešení KdV rovnice? Původně chtěli osamocenou vlnu nazvat *solitron*, ale nakonec zvolili koncovku „on". Má evokovat kvazičástici (stejnou koncovku mají opravdové částice foton, proton, elektron).

■ Víte, že tvar KdV i NLS solitonů lze popsat za pomoci matematické funkce hyperbolický sekans? Tato funkce je definována jako převrácená hodnota hyperbolického kosinu a má charakteristický tvar kopečku ne nepodobného hoře Říp.

Poučení na závěr: *Úspěch ve vědě je relativní. Nedá se měřit ani počtem publikací, ani reakcí vědeckých kolegů. To, co neocenili Russellovi současníci se jeví klíčovým objevem o několik generací později.*

12. Magnetické přepojení

Rozvoj vědy a pokrok poznání se stávají stále obtížnější.
Na experimentování již nestačí zápalky a sláma.
Richard Philips Feynman

Když nám soudružka učitelka fyziky (v oné době jsme museli všem učitelkám říkat „soudružko“, často jsme ale oslovení komolili na prosté „souško“) ukazovala známý experiment s tyčovým magnetem a železnými pilinami, které nasypala na papír nad magnet a ony se seřadily podél silokřivek, začal jsem přemýšlet nad tím, proč se všechny silokřivky z jednoho pólu vracejí do druhého. Nebylo mně tehdy jasné, kam půjde silokřivka, která vystupuje přesně v ose magnetu. Po mnoho let jsem si nedokázal na tuhle otázku odpovědět. Dnes už řešení oné záhady znám. Nejenom silokřivka vycházející v ose, ale dokonce celý kužel silokřivek vycházející z pólu magnetu se do něho nikdy nevrátí. Tyto silokřivky se totiž napojují na silokřivky zemského magnetického pole. Právě proto se střelka kompasu hbitě otáčí v severojižním směru. Ve vesmíru je to zcela běžné. Každé těleso, které je zdrojem magnetického pole, má část silokřivek, jež se do něho vracejí, a část, která se napojuje na silokřivky z ostatních zdrojů. Vzniká tak nádherný propletenec magnetických tobogánů, podél nichž se od místa k místu po šroubovicích pohybují nabité částice vesmírného plazmatu. U pohybujících se objektů se dokonce silokřivky rozpojují a znovu spojují do nových konfigurací. Přepojení magnetických silokřivek (někdy se říká rekonexe) je ve fyzice plazmatu nesmírně zajímavým jevem, jemuž bude věnována tato kapitola.

Silokřivky a pole

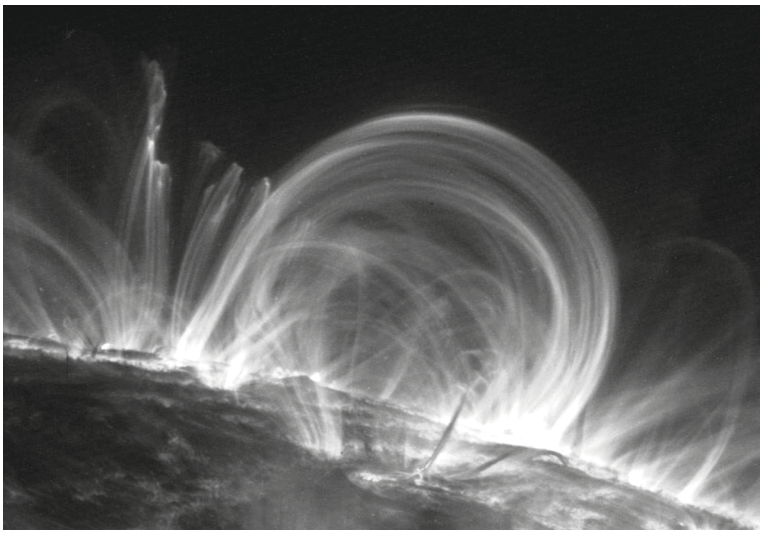
U elektrického pole jsou silokřivky myšlené čáry, podél kterých působí na nabité částice síla. Čím hustší silokřivky jsou, tím větší síla působí. Zobrazit je můžeme například pomocí travních semínek (v poli se z nich stanou elektrické dipólové momenty), která se u silného zdroje elektrického pole seřadí ve směru silokřivek.

U magnetického pole je to poněkud složitější. Na nabité částice působí síla kolmá na silokřivky, nabité částice kolem silokřivek krouží a v jejich směru se pohybují volně. Tím vzniká pohyb po šroubovici podél silokřivek magnetického pole. Opět platí, že čím hustší silokřivky jsou, tím větší síla na nabitou částici působí a tím menší je poloměr šroubovice, po které se nabitá částice pohybuje. Silokřivky magnetického pole můžeme zobrazit za pomoci jemných magnetických pilin, ty se stanou v magnetickém poli malými magnety a zorientují se ve směru silokřivek (silokřivky pilin se propojí se silokřivkami magnetu). Silokřivky magnetického pole je ale možné zobrazit i jinak. Je-li v místě magnetického pole přítomno větší množství nabitých částic, vysílá jejich krouživý pohyb elektromagnetické záření, které vytvoří dojem, jakoby silokřivky byly jakési svítící nitě. Na Slunci takto fotografuje silokřivky magnetického pole v ultrafialovém oboru například sonda TRACE[67], viz obrázek 69.

Je zde i jazykový problém. Má se správně říkat silokřivka nebo siločára? Silokřivka zní poněkud vznešeněji (čáry dělá malé dítě, křivky kreslí vědecké přístroje), siločára se zase používá častěji. Správně není ale ani jedno. V každém oboru lidské činnosti se vyskytují jedinci, kteří namísto podstaty jevů bádají na tím, jak jevy správně pojmenovat a potom svá pojmenování vnucují ostatním. Žádné siločáry ani silokřivky. Pryč s nimi, obě slova neznějí dostatečně vědecky! Správně je *magnetické indukční čáry*. Navzdory těmto jedincům, jejichž snahy jsou jistě myšleny dobře, se v našem textu přidržíme starých dobrých silokřivek (stejně tak mnoho fyziků říká měrné teplo a nikoli měrná tepelná kapacita, jak by si naši normotvůrci přáli).

Silokřivky jsou jen matematickou pomůckou, jak zobrazovat elektromagnetické pole. Chceme-li jít k podstatě věci, musíme se ptát, co je elektromagnetické pole samotné. Samozřejmě, v jistém smy-

67 **TRACE** – Transition Region and Coronal Explorer, sonda NASA vypuštěná v roce 1998 a navazující na práci družice SOHO. Poskytuje vynikající snímky plazmatu rozprostřeného podél silokřivek magnetického pole v ultrafialovém oboru.



Obr. 69. Snímek slunečního plazmatu ze sondy TRACE pořízený v ultrafialovém oboru spektra. Záření nabitých částic zviditelňuje silokřivky magnetického pole. Zdroj NASA.

slu jde opět o matematickou konstrukci, jak popisovat vzájemné silové působení částic. Jenže „pole", to není jen matematika, ale opravdový reálný svět. Pokud rozkmitáme nabitou částici v jednom místě, začne se po určité době sama od sebe pohybovat i částice v sousedství. Co jí přinutilo kmitat? Jak se přenesla energie a hybnost mezi oběma částicemi? Tento přenos právě zprostředkovalo elektromagnetické pole mezi oběma částicemi. Pole je tedy reálnou entitou, je nositelem energie a hybnosti.

Potud klasická elektrodynamika. Skutečný význam elektromagnetického pole odhalila až kvantová teorie. Stavy energie pole jsou kvantované (mění se skokem) a nositeli těchto kvant jsou elementární částice, kterým říkáme *fotony*. Elektromagnetické pole lze proto v kvantové teorii chápat jako soustavu fotonů. Právě fotony přenášejí energii a hybnost od jedné nabité částice ke druhé a způsobují jejich vzájemnou interakci. Kvantová teorie takto nahlíží i na ostatní interakce. Za vzájemné působení dvou částic

jsou zodpovědné polní (intermediální, mezipůsobící) částice. Pro elektromagnetickou interakci jde o fotony, pro silnou interakci o gluony, se kterými jsme se seznámili v kapitole 7, a pro slabou interakci (způsobuje například beta rozpad částic) jde o bosony Z^0, W^+ a W^-. Pro gravitaci zatím kvantovou teorii nemáme, polními částicemi by měly být hypotetické gravitony, které zatím nalezeny nebyly a v nejbližší době pravděpodobně ani nebudou.

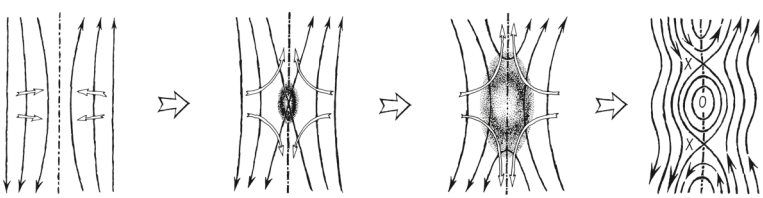
Přepojení silokřivek

Pokud se hovoří o fyzice plazmatu, většinou diskuse sklouzne k přepojení magnetických silokřivek. Jde o jev, s jehož pomocí se daří vysvětlovat řadu dosud nepochopených dějů v plazmatu. Mezi ně patří například jevy v atmosférách magnetarů, náhlá vzplanutí v chromosféře Slunce, jevy na hranici magnetosféry Země a meziplanetárního prostoru, jevy v heliosféře Slunce, stejně tak jako jevy v laboratorním plazmatu. K přepojení magnetických silokřivek dochází na všech nám dostupných škálách.

Pro tento jev není zatím ustálený český název. Nejčastěji hovoříme o přepojení magnetických silokřivek nebo o rekonexi (původní anglický termín je *reconnection*) nebo někdy o magnetickém zkratu. Každý z nás zhruba ví, co je elektrický zkrat. Elektrický proud si najde kratší, výhodnější cestu. Obdobně může dojít k tomu, že magnetické silokřivky prudce změní svou dosavadní topologii do jiné, energeticky výhodnější podoby. Při tom dojde k uvolnění energie, která zahřeje okolní plazma. Někdy natolik, že plazma zazáří i v rentgenovém oboru. V každém případě znamená změna topologie magnetických silokřivek zásadní změnu v chování plazmatu v daném místě.

Pokud má plazma konečnou vodivost, může dojít k transformaci mezi magnetickou, tepelnou a kinetickou složkou energie. Přispívají k tomu proudy tekoucí v plazmatu a následný ohmický ohřev. Představme si, že v plazmatu se k sobě přiblíží dvě oblasti magnetického pole s opačně orientovanými silokřivkami. Mezi nimi je

plocha nulového pole, tzv. *neutrální vrstva*. Oblast kolem neutrální vrstvy se nazývá *difúzní region*. Ten je charakteristický velmi nízkou hodnotou magnetického pole. Právě zde dojde ke změně topologie magnetických silokřivek, jejich přepojení do nové konfigurace s nižší energií. Při přepojení tečou v difúzním regionu velké elektrické proudy, které zahřívají plazma. Energie magnetického pole je transformována do tepelné energie plazmatu. Horké plazma nadbytečnou energii intenzivně vyzařuje do okolí. Makroskopický pohyb plazmatu je při přepojení také ovlivněn. Před přepojením se plazma pohybuje kolmo na silokřivky směrem do difúzního regionu. Po přepojení je plazma vytlačováno ve směru původní orientace magnetických silokřivek. Podle tvaru magnetických silokřivek se střed difúzního regionu někdy nazývá neutrální bod typu X. Pro některé situace způsobí nestability opakované přepojení magnetických silokřivek s periodicky se opakujícími body nulového pole tvaru X a O (na obrázku 70 napravo).



Obr. 70. Přepojení magnetických silokřivek. Plnými čarami je zobrazeno magnetické pole, dutými proudění plazmatu.

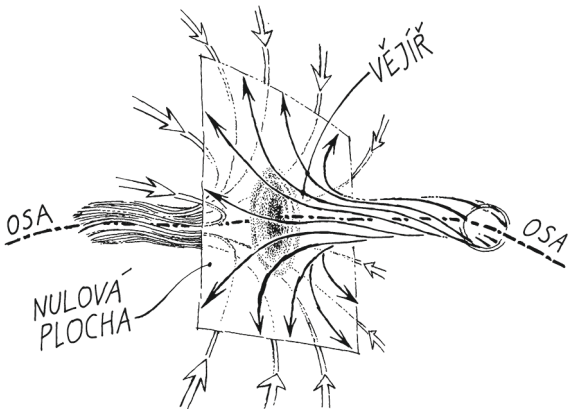
Po přepojení magnetických silokřivek vznikají plazmoidy (kompaktní plazmové útvary, které s sebou mohou unášet tzv. zamrzlé magnetické pole) a výtrysky – oblasti plazmatu, které odnášejí část energie magnetického pole transformovanou do energie kinetické a tepelné.

Pro posouzení rychlosti rekonexe se používá tzv. *index rekonexe* (Machovo-Alfvénovo číslo). Index rekonexe je definován jako poměr rychlosti plazmatu vstupujícího do oblasti přepojení (kolmo na silokřivky) a rychlosti, kterou je plazma samovolně vytlačováno podél silokřivek z oblasti přepojení ven.

Počátky chápání přepojení silokřivek spadají do roku 1946, kdy australský astronom Ronald Gordon Giovanelli (1915–1984) navrhl, že zdrojem ohřevu plazmatu a urychlení částic mohou být nulové body magnetického pole ve tvaru písmene X. Označení magnetické přepojení zavedl anglický fyzik a astronom James Dungey, který v roce 1953 objevil, že změna topologie magnetických silokřivek je možná jedině v plazmatu s nenulovým odporem. V roce 1961 Dungey navrhl, že magnetické přepojení je mechanizmus odpovědný za transport energie slunečního větru do magnetosféry Země.

Pro popis přepojení magnetických silokřivek se používá celá řada více či méně úspěšných modelů. Nejjednodušší je *model samovolného přepojení*, ve kterém plazma samovolně driftuje do oblasti difúzního regionu. Dalším je *Sweetův-Parkerův model*, ve kterém je plazma do difúzního regionu vtlačováno magnetickou difúzí (plazma sleduje difundující magnetické silokřivky). Často se používá také *Petschekův model*, který je postaven na rozvoji tzv. ostrůvkovité nestability v oblasti difúzního regionu a jako první model uvažuje nějakou příčinu přepojení silokřivek. Objevují se ale i modely uvažující vliv turbulencí v plazmatu a pohybů jednotlivých částic, které jsou z hlediska popisu nejpřesnější, ale vyžadují komplikované numerické simulace chování plazmatu v oblasti přepojení magnetických silokřivek.

Pokud má magnetické pole i výraznou složku kolmou na neutrální vrstvu, hovoříme o 3D (prostorovém) přepojení silokřivek. Mechanizmy 3D rekonexe jsou prozkoumány zatím jen velmi málo. Veškeré modely popisující přepojení silokřivek jsou většinou jen stacionární (ustálené v čase), rekonexe má ovšem v mnoha případech eruptivní charakter, který tyto modely nemohou postihnout. Na přepojení magnetických silokřivek mohou mít zásadní vliv i různé další jevy, například separace elektronů a iontů, anomální odpor plazmatu nebo urychlování nabitých částic. K přepojení magnetických silokřivek může dojít i v plazmatu, ve kterém nejsou srážky dominantním jevem. Pak nelze plazma chápat jako tekuti-

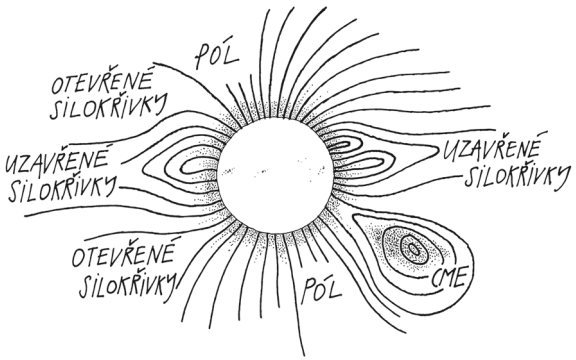


Obr. 71. Třírozměrné přepojení magnetických silokřivek.

nu a k popisu je třeba buď znát pohyby jednotlivých částic nebo využít statistické metody popisu plazmatu. Úplný popis přepojení silokřivek není v tuto chvíli k dispozici, je pravděpodobné, že k přepojení vede celá řada mechanizmů, které se většinou zkoumají za pomoci numerických simulací. Existuje mnoho otevřených otázek: Proč je nejčastěji měřen index rekonexe (poměr vstupní a výstupní rychlosti plazmatu) kolem hodnoty 0,1? Může existovat stacionární přepojení silokřivek a nebo jde vždy o eruptivní jev? Jak z mikroskopických přepojení silokřivek vznikají makroskopické jevy (sluneční erupce, magnetické bouře, koronální výrony hmoty)? Jaká je role turbulencí při přepojení silokřivek? Jak probíhá třírozměrná rekonexe?

Přepojení na Slunci

Slunce je obří plazmatická koule o poloměru 700 000 kilometrů (viz obrázek 40), která je zdrojem magnetického pole pro celou sluneční soustavu. V období minima sluneční aktivity má magnetické pole přibližně dipólový charakter, v období maxima sluneční aktivity, kdy dochází k přepólování slunečního dipólu, je pole výrazně složitější a má charakter nepravidelné vlasaté koule. Cyklus



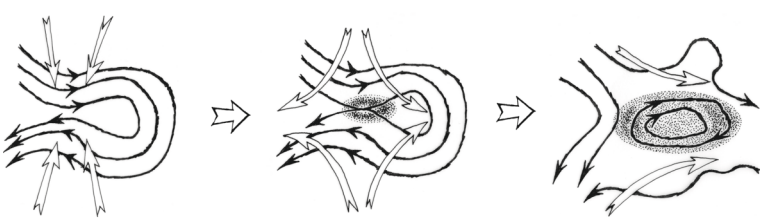
Obr. 72. Sunce v minimu aktivity.

sluneční aktivity trvá přibližně 11 let. Celková doba, za kterou se severní pól vrátí do původní polohy je dvojnásobek, tedy 22 let. Globální sluneční pole vzniká tekutinovým dynamem (viz obrázek 57) zhruba 200 000 kilometrů pod povrchem, kde končí vzestupné a sestupné proudy plazmatu přinášející na povrch energii z nitra Slunce. V období minima vystupují magnetické silokřivky ze severního magnetického pólu a další vstupují do jižního magnetického pólu Slunce. Jen část z nich se ze severního pólu navrací do jižního pólu, většina odplouvá do sluneční soustavy, kde se napojuje na magnetická pole jednotlivých planet. V rovníkové oblasti se napříč sluneční soustavou táhne plocha nulového pole (nad ní má pole opačnou orientaci než pod ní). Tato plocha se nazývá Parkerova plocha podle amerického astrofyzika Eugena Parkera (1927) a je zvlněna do charakteristických spirál (způsobených rotací Slunce). Planety proto někdy procházejí nad touto plochou a jindy pod ní, orientace meziplanetárního slunečního pole se v místě konkrétní planety s časem mění. Na povrchu Slunce má globální pole hodnotu 10 až 200 mikrotesla, jsou zde ale i silná lokální pole, například ve slunečních skvrnách, která dosahují hodnoty až 2 militesla.

K přepojování magnetických silokřivek by mělo podle našich představ docházet při přepólovávání slunečního pole hluboko pod povrchem, kdy z jednotlivých záhybů a kliček na silokřivkách vzniká

opět nové dipólové pole. Tyto procesy probíhají pod povrchem Slunce a naše možnosti, jak je uvidět, jsou jen zprostředkované.

K nejznámějším jevům souvisícím s přepojením magnetických silokřivek patří erupce doprovázené výrony koronální hmoty označované CME (z anglického *Coronal Mass Ejection*). V blízkosti povrchu se nacházejí silná lokální pole (například v okolí slunečních skvrn a protuberancí). Nezřídka se stává, že u protáhlé smyčky magnetického pole se proti sobě dostanou dvě oblasti opačně orientovaných polí. V takovém okamžiku může dojít k přepojení silokřivek a transformaci uvolněné energie do tepelné energie (při průměrné erupci se uvolní energie 10^{25} J). Vznikne horký oblak hmoty zářící většinou v rentgenovém oboru. Hovoříme o tzv. rentgenovém vzplanutí. Od Slunce se přitom může oddělit chuchvalec plazmatu s vmrznutým magnetickým polem, tzv. plazmoid, který se vydá na cestu sluneční soustavou.



Obr. 73. Přepojení magnetických silokřivek při koronálním výronu sluneční hmoty. Plnými čarami je zobrazeno magnetické pole, dutými proudění plazmatu.

Střetne-li se s některou planetou, obtéká rázovou vlnu a polárními kaspy (viz obrázek 8) proniká do magnetosféry planety. Způsobuje polární záře, magnetické bouře a další doprovodné jevy. V roce 2000 dokonce jeden z plazmoidů vyvržených ze Slunce proletěl magnetosférami Země, Jupiteru a Saturnu a na všech třech tělesech postupně vytvořil nádherné polární záře. Sledování výronů koronální hmoty je velmi důležité. Vyvrhnutý plazmoid (pokud letí směrem k Zemi) může vyvolat nejen magnetické bouře, ale i vznik napětí, které je schopné poškodit rozvodné sítě elektrického proudu. Výrony sluneční hmoty CME dělíme podle měřené

intenzity doprovodného rentgenového vzplanutí na B (nevýrazné), C (malé), M (střední) a X (silné).

Dlouhou dobu se také předpokládalo, že zdrojem ohřevu koróny[68] jsou tzv. mikrorekonexe – drobná, ale velmi častá přepojování silokřivek ve sluneční atmosféře, jejichž uvolněná energie je sice o dva řády nižší než v běžných erupcích, ale takových mikroerupcí by mělo probíhat obrovské množství. Vyhledávání bodů nulového pole, ve kterých k mikrorekonexím může docházet, prováděla sonda Hinode[69]. Ukázalo se, že takových bodů je příliš málo na to, aby byl tento mechanizmus při ohřevu koróny dominantní. Větší roli tak pravděpodobně bude hrát ohřev za pomoci rozpadu Alfvénových vln[70]. Existence velkého množství těchto vln v koróně byla potvrzena sondou SDO[71] v roce 2011.

Přepojování v zemské magnetosféře

V zemské magnetosféře (viz obrázek 8) může docházet k přepojení magnetických silokřivek na několika místech. Především jde o čelní rázovou vlnu, a to v obdobích, kdy mají silokřivky meziplane-

68 **Koróna** – vnější atmosféra Slunce volně přecházející do meziplanetárního prostoru. Teplota dosahuje až milionů stupňů Celsia, pravděpodobně je koróna ohřívána rozpadem plazmových vln a lokálními rekonexemi (přepojováním) magnetických silokřivek. **K koróna (kontinuum)** je způsobena rozptylem slunečního světla na volných elektronech. **F koróna (Fraunhoferova)** je způsobena rozptylem slunečního světla na prachových částicích padajících z meziplanetárního prostoru na Slunce, charakteristické jsou absorpční čáry. **E koróna (emisní)** jsou emisní čáry způsobené přechody ve vysoce ionizovaných kovech. Tyto čáry jsou možné jen za vysokých teplot milionů kelvinů.

69 **Hinode** – japonská sonda kosmické agentury JAXA z roku 2006 určená k výzkumu Slunce. Její původní název byl SOLAR-B. Hlavním cílem je výzkum magnetického pole Slunce, jeho vznik a souvislost s generováním slunečního větru a výzkum ohřevu koróny.s

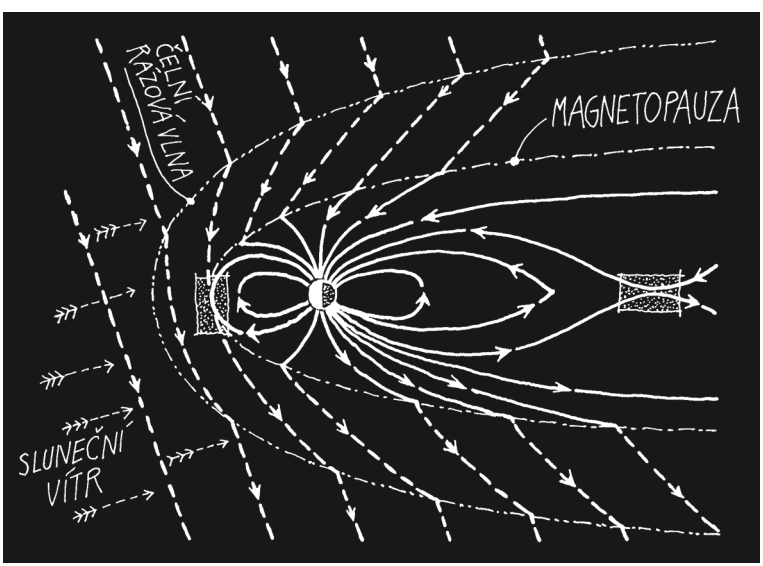
70 **Alfvénova vlna** – příčná magnetoakustická vlna šířící se plazmatem Alfvénovou rychlostí podél silokřivek magnetického pole. V Alfvénově vlně silokřivky vlají sem a tam podobně jako tráva ve větru.

71 **SDO** – Solar Dynamics Observatory, americká sonda určená pro pozorování Slunce, která startovvala v roce 2010. Na palubě má čtveřici dalekohledů s deseti filtry pro různé obory spektra, magnetometr, helioseismometr a detektor sledující změny toku ultrafialového záření.

tárního magnetického pole opačný směr než silokřivky zemského pole. Mají-li silokřivky obou zdrojů shodný směr, dochází k přepojení nad polárním kaspem, kde má v zadní části meziplanetární pole opačný směr než pole Země (obrázek 74).

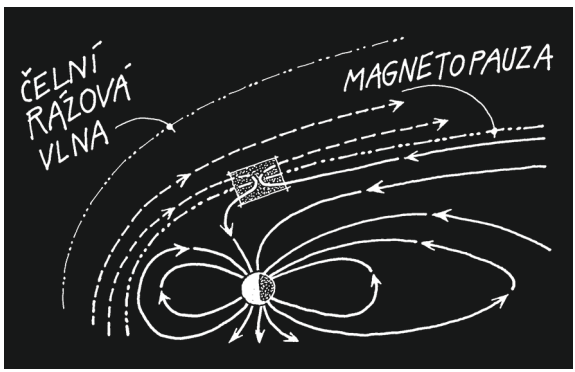
Napojením sluneční silokřivky na zemskou vzniká v obou případech jakýsi vesmírný tobogán, ve kterém po šroubovicích kloužou nabité částice slunečního větru do horních vrstev atmosféry, kde mohou excitovat atomy a molekuly atmosféry a v polárních oblastech vytvořit polární záře.

Další oblastí jsou boky magnetosféry, kde sluneční vítr obtéká zemskou magnetosféru a Kelvinovou-Helmholtzovou nestabilitou zde vznikají obří víry (poprvé je pozorovaly družice Cluster v roce 2001) o rozměrech až 50 000 kilometrů. V těchto vírech se mísí magnetické silokřivky a opět zde dochází k jejich přepojování.



Obr. 74. Oblasti přepojení magnetických silokřivek (šedé obdélníky) při opačném směru slunečního (meziplanetárního) pole. Sluneční silokřivky jsou čárkované, zemské plnou čarou.

Poslední oblastí je protáhlý ohon magnetosféry, v jehož středu je nulová plocha magnetického pole (na jedné straně jsou silokřivky ze severního zemského pólu, na druhé z jižního). V této ploše dochází k pravidelnému přepojování magnetických silokřivek a vzniku magnetických ostrovů, které odtékají ohonem od Země pryč.



Obr. 75. Detailně je zobrazena situace u severního polárního kaspu při souhlasném směru slunečního pole.

Magnetická pěna na okraji sluneční soustavy

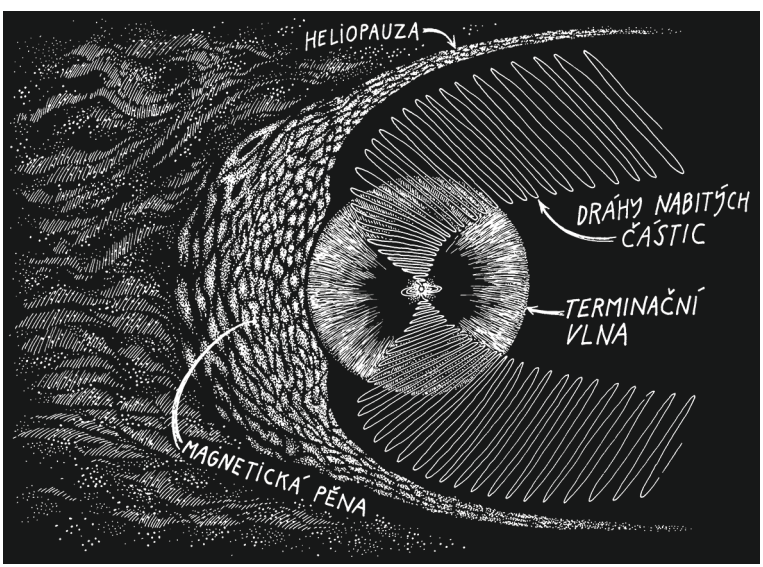
K velkému překvapení došlo v roce 2011 při vyhodnocování dat ze sond Voyager. Mise Voyager patří k jedněm z nejvýznamnějších vesmírných cest lidstva. Sondy startovaly v roce 1977, navštívily obří planety a pořídily jejich unikátní fotografie. V roce 2004 prolétl terminační vlnou[72] Voyager 1 a v roce 2007 Voyager 2. Tím se obě sondy dostaly do vnější části sluneční soustavy, tzv. pláště heliosféry[73]. Přesto, že jejich pouť započala v roce 1977, přinášejí stále nové poznatky.

72 **Terminační vlna** – jiným názvem *rázová vlna slunečního větru* je oblast, ve které rychlost částic slunečního větru klesá na podzvukovou rychlost. Tato oblast má tvar povrchu koule a je vzdálena přibližně 90÷95 astronomických jednotek od Slunce.

73 **Plášť heliosféry** – oblast mezi terminační vlnou a heliopauzou (hranicí heliosféry).

Podle všeho se zdá, že Voyager 1 právě prolétá heliopauzou, tedy hranicí heliosféry. Data z obou sond ale poskytují zcela jiný obraz hranice magnetického vlivu Slunce, než se očekávalo. Rychlost slunečního větru klesá v heliopauze pomalu, nikoli skokem, jak předpovídaly teoretické modely. Za heliopauzou je již mezihvězdné prostředí a rychlost slunečního větru je zde nulová. Od roku 2009 do roku 2011 zaznamenává Voyager 1 postupný pokles radiální rychlosti slunečního větru z hodnoty 60 km/s (208 000 km/h) na nulu. Pokles probíhal lineárně. Obdobně klesala i azimutální složka rychlosti.

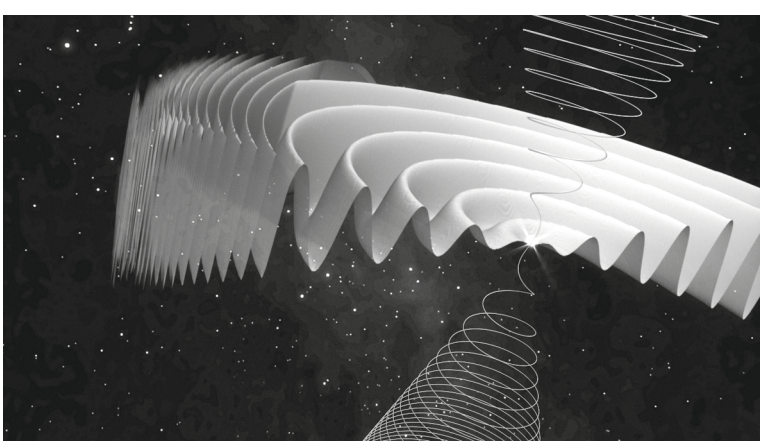
Namísto očekávané ostře ohraničené heliopauzy byla zatím nalezena jen rozsáhlá přechodová oblast, kterou Voyager 1 právě prolétá. Vlastní heliopauzou proletí snad v roce 2012. Přechod z prostředí ovládaného Sluncem do mezihvězdného prostoru by měl být doprovázen prudkým poklesem teploty částic (částice v heliosféře jsou zahřáté slunečním větrem, zatímco částice v mezihvězdném prostoru výrazně chladnější).



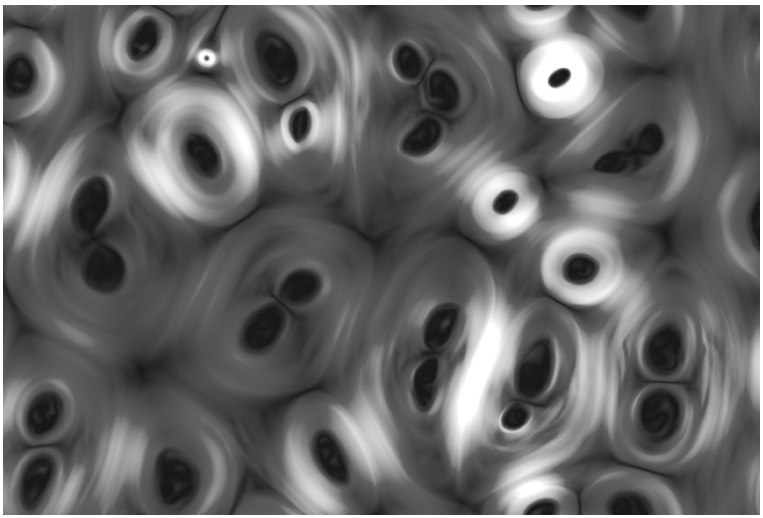
Obr. 76. Magnetická pěna.

Největším překvapením bylo měření intenzity magnetického pole. Ukázalo se, že magnetické silokřivky ve směru pohybu Slunce vůbec nemají obloukovitý tvar, jak by se na blízkost heliopauzy slušelo. Namísto toho vytváří jakousi pěnu podivných magnetických bublin. Voyager 1 vstoupil do oblasti pěny v roce 2007 a Voyager 2 o rok později. Jednu bublinu proletí sondy zhruba za týden, průměr bublin se odhaduje na 160 milionů kilometrů (přibližně jako vzdálenost Země od Slunce). Začíná být nejasné, zda vůbec existuje čelní rázová vlna. Celá oblast mezi terminační vlnou a čelní částí heliopauzy je vyplněna magnetickou pěnou.

Nejpravděpodobnějším vysvětlením původu bublin se v tuto chvíli zdá zvlněná Parkerova plocha nulového pole. V blízkosti heliopauzy jsou pravděpodobně jednotlivé záhyby plochy natolik stlačeny k sobě, že se překrývají (viz obrázek 77) a dochází k častému přepojování silokřivek magnetického pole a k vytvoření bublin, které nejsou spojeny s ostatním magnetickým polem, jde tedy o jakési samostatné magnetické ostrovy. Takováto magnetická pěna by měla velmi intenzivně brzdit kosmické záření a je možné, že právě objevená pěna je nejvýraznějším ochranným prvkem před ním. Celá záležitost je otevřeným problémem, a to, jak vypadá helio-



Obr. 77. Zvlněná Parkerova plocha nulového pole se ve vnější části heliosféry téměř překrývá.



Obr. 78. Magnetické pole se v okolí jednotlivých listů Parkerovy plochy přepojuje, vznikají bubliny.

pauza, může ještě přinést nová překvapení a dramatické změny v našich zažitých představách.

Víte, že

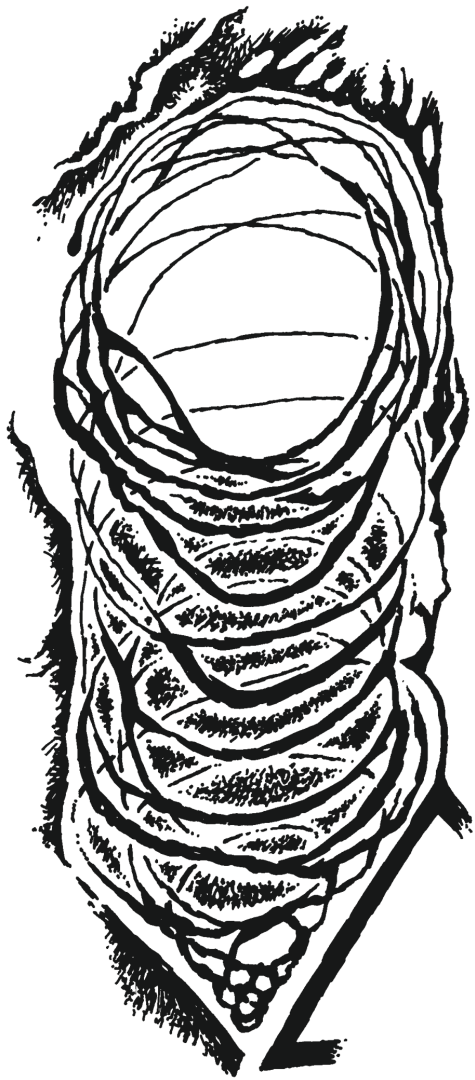
■ Víte, že k přepojení silokřivek často dochází i v laboratorním plazmatu? Probíhá například v tokamacích nebo *z*-pinčových aparaturách.

■ Víte, že toky plazmatu směrem do oblasti přepojení byly poprvé pozorovány na Slunci a samotné přepojení v zemské magnetosféře soustavou družic Cluster v roce 2005?

■ Víte, že sondy Voyager mají radioizotopový zdroj energie, který zajišťuje, že mohou poskytovat data ještě dalších 20 let?

Poučení na závěr: *Některé lidské výtvory překvapí samotné tvůrce. V roce 1977 by nikdo neuvěřil, že sondy Voyager budou funkční ještě v roce 2011.*

13. Šroubovice



Můžeme doopravdy poznat celý vesmír?
Je už tak dost těžké vyznat se v čínské čtvrti.
Woody Allen

Útvary podobné šroubovici nalezneme nejenom v přírodě, ale i v mnoha lidských výrobcích, které považujeme za běžné a již se nad nimi nezamýšlíme. Vždyť kdo si při otevírání láhve vína uvědomí, že vývrtka v jeho ruce kopíruje jednu z nejběžnějších křivek v přírodě? Nábytek je pospojován vruty nebo šroubky, při podpisu převzetí čehokoli použijete propisovačku, ve které se ukrývá pérko ve tvaru šroubovice, otvor do zdi vyvrtáte vrtačkou s vrtákem, jehož ladný tvar nerozpozná jen zmatený politik, co má zcela jiné zájmy než obdivování krás matematických křivek. Při jízdě parníkem se používá lodní šroub, v rodinném domku naleznete točité schodiště a nepochybně bychom našli i další příklady šroubovic v našem přetechnizovaném světě. V přírodě je šroubovice také hojně se vyskytující křivkou. Kopírují ji vlákna DNA nesoucí genetickou informaci, řepný cukr stáčí rovinu světla tak, že koncový vektor elektrického pole opisuje šroubovici, a v plazmatu, kterému je věnována tato kniha, jsou šroubovice opět velmi častými útvary. A tak se vydejme do světa zkroucených vlákének, která nalezneme jak v laboratorním, tak ve vesmírném plazmatu.

Helicita

Již jsme se seznámili s tím, že pole popisujeme za pomoci myšlených čar, kterým říkáme *silokřivky*. Nemusí jít o pole elektrické nebo magnetické, může jít například o rychlostní pole vody tekoucí v řece; potom namísto silokřivek hovoříme o *proudnicích* – myšlených čarách, podél nichž se pohybují nečistoty v proudící vodě.

V matematice se zavádí tzv. *helicita* – charakteristika pole, která je nenulová, pokud mají silokřivky či proudnice tvar šroubovic. Po-

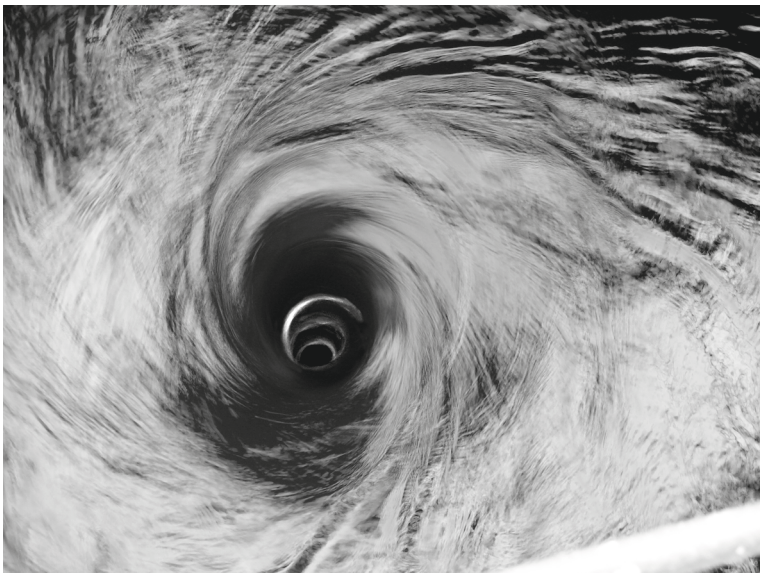
kud se čtenář nechce zabývat detaily zavedení této veličiny, může následující text přeskočit a začít číst rovnou podkapitolu Magnetická helicita.

Helicitu zavedeme nejprve pro rychlostní pole, které si snadno představíme jako proudící kapalinu. Uvažujme, že se v určitém místě kapalina otáčí kolem nějaké osy. Do kapaliny vhodíme v blízkosti osy pylové zrnko (nebo jinou nečistotu) a budeme pozorovat jeho pohyb. *Úhlovou rychlostí* nazveme úhel, který zrnko opíše kolem osy za určitý čas – tedy úhel vydělený dobou, po kterou jsem zrnko sledovali. Úhly můžeme měřit ve stupních (pak má pravý úhel 90°), v gradech (pravý úhel má 100 gradů, což je v desítkové soustavě hezčí číslo než 90) nebo v radiánech[74] (pravý úhel má hodnotu $\pi/2$). Na televizní stanici Nova kdysi ukazovali v pořadu „Czech šmejd" úhloměr, na němž byla u pravého úhlu číslice 100. Paní, která úhloměr zaslala, vyhrála tisícikorunu, protože přece každé malé dítě ví, že pravý úhel má 90 stupňů. Televizní redaktorka vůbec netušila, že by se úhly mohly měřit v něčem jiném a dotyčný úhloměr je pro stavaře, kteří měří úhly v gradech. Netušil to ani jistý student, kterého jsem před několika lety zkoušel z fyziky a několikrát sebevědomě opakoval, že pravý úhel má 95 stupňů. Pokoušel jsem se, aby slevil na 90 nebo naopak přidal na stovku (pak by to bylo v gradech), ale bohužel jsem tenkrát neuspěl.

Nyní zavedeme tzv. *vířivost* neboli *rotaci rychlostního pole*, někdy se také říká *rotor pole*. Jde o vektor, který má směr osy otáčení kapaliny (určený z pravidla pravé ruky[75]) a velikost rovnou dvojnásobku úhlové rychlosti. Vířivost tedy míří kolmo na pohyb otáčející se kapaliny a její velikost je úměrná úhlové rychlosti kapaliny. Tuto veličinu lze ve skutečnosti zavést v kterémkoli bodě kapaliny, nejenom v ose rotace, jak jsme to udělali my. Pokud proudnice daným místem jen procházejí, je vířivost (rotace rychlostního pole) nulo-

74 **Úhel v radiánech** – podíl oblouku a průvodiče. Pravý úhel je oblouk, u kterého opíše konec průvodiče čtvrtinu obvodu kružnice ($\pi r/2$). Po vydělení poloměrem dostaneme hodnotu $\pi/2$.

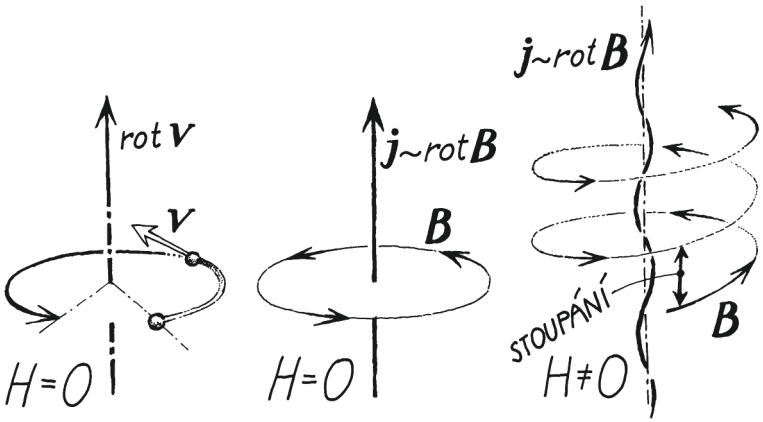
75 **Pravidlo pravé ruky** – prsty pravé ruky směřují podél pohybující se kapaliny, palec určuje směr vířivosti.



Obr. 79. Vířící voda. Kapalina ve víru má nenulovou helicitu.
Foto Karolína Jerjeová, Semily.

vá, pokud se v okolí bodu stáčejí, dostaneme nenulovou hodnotu. Matematici označují rotaci rychlostního pole symbolem „rot **v**“. Dočetli-li jste až sem, jsme právě v polovině cesty k zavedení pojmu helicita.

Pokud se kapalina otáčí, má nenulovou vířivost, ale její molekuly se ještě nemusejí pohybovat po šroubovicích. Může jít jen o kružnice nebo o spirálu (rovinná křivka nakreslená například na papíře). Šroubovice je prostorová křivka s nenulovým stoupáním – závit šroubu se nikdy nevrátí po oběhnutí 360° na původní místo, ale o něco výše nebo níže. Helicita v daném místě je definována jako součin tří čísel: velikosti rychlosti pohybu kapaliny, velikosti vířivosti kapaliny a kosinu úhlu sevřeného oběma vektory. Nenulovost druhého členu zajišťuje, že se kapalina otáčí. Nenulovost třetího členu zajišťuje, že se pohybuje po šroubovici s nenulovým stoupáním. Zkuste si do posledního členu dosadit hodnoty ze situace, kdy se molekuly kapaliny otáčejí po kružnicích – vířivost



Obr. 80. Nalevo: rychlostní pole tvaru víru bez stoupání má rotaci kolmou na rovinu víru a nulovou helicitu. Uprostřed: elektrický proud tekoucí po přímce vytváří nehelikální vír magnetického pole. Napravo: elektrický proud tekoucí po šroubovici generuje magnetické pole s nenulovou helicitou (stoupáním).

míří v ose rotace a je kolmá na pohyb kapaliny, úhel je tedy 90° a kosinus je nulový. Nulová je proto i helicita, protože je nulové stoupání. Žádný pohyb po šroubovici se nekoná.

Snadno můžeme zavést helicitu celého objemu kapaliny tak, že objem rozdělíme na velké množství malých oblastí a sečteme helicity všech těchto elementů (matematik by řekl, že integrujeme přes objem). Helicitu lze zavést pro jakékoli pole, jen proudnice kapaliny nahradíme silokřivkami pole. Helicita pole je nenulová, pokud mají silokřivky tvar prostorových šroubovic.

Magnetická helicita

Magnetické pole působí na nabité částice zcela jinak než gravitace nebo elektrostatické pole. Síla v magnetickém poli totiž nepůsobí ve směru silokřivek, ale naopak kolmo na silokřivky a také kolmo na rychlost pohybu částice. Tím je trajektorie částice zakřivována do charakteristické šroubovice. Velikost síly je dána součinem

velikosti rychlosti částice, velikosti magnetické indukce[76] a sinu úhlu mezi oběma vektory. Na částici nepůsobí síla jen pokud je její rychlost nulová nebo pokud se pohybuje podél silokřivek (pak mají rychlost a magnetická indukce stejný směr a sinus vzájemného úhlu je nulový). Pokud nabitá částice nemá složku rychlosti ve směru silokřivek, pohybuje se kolem silokřivek po kružnici. Pokud má částice i složku rychlosti ve směru silokřivek, složí se pohyb po kružnici s rovnoměrným pohybem podél silokřivek a vznikne šroubovice. Nejpřirozenějším pohybem nabitých částic jsou tedy šroubovice, po kterých částice krouží kolem silokřivek magnetického pole. V nehomogenním nebo měnícím se poli je pohyb samozřejmě složitější.

Nabité částice pohybující se v plazmatu vytvářejí elektrický proud a samy generují magnetické pole – jejich šroubovicový pohyb se do vznikajícího pole nepochybně promítne. Magnetické pole v plazmatu má proto velmi často nenulovou helicitu[77] a jeho silokřivky jsou stočené do charakteristických provazců připomínajících spletené lano. Plazma samotné pak tento tvar kopíruje a vytváří různá stočená neboli helikální vlákna. Magnetická helicita je velmi důležitou veličinou. Využívá se při popisu přepojení magnetických silokřivek, v teorii tekutinového dynama, které vytváří magnetické pole Slunce, v teorii stability magnetického pole a v mnoha dalších oblastech fyziky plazmatu.

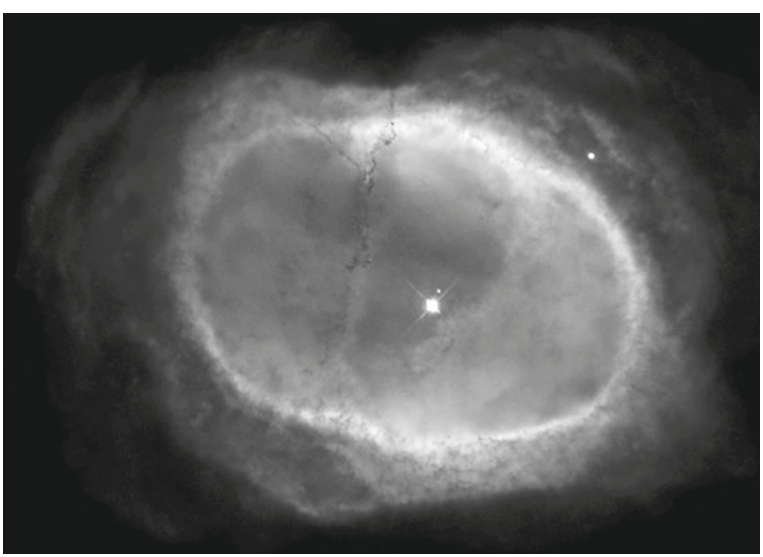
Pro plazma platí za určitých podmínek zákon zachování magnetické helicity, tj. magnetická helicita určitého objemu plazmatu se nemění. K tomu musí být splněny dvě základní podmínky: 1) plazma má natolik vysokou vodivost, že lze jeho elektrický odpor a jevy s ním spojené zanedbat; 2) sledujeme celou magnetickou trubici,

76 **Magnetická indukce** – veličina charakterizující velikost magnetického pole, její jednotkou v soustavě SI je tesla.

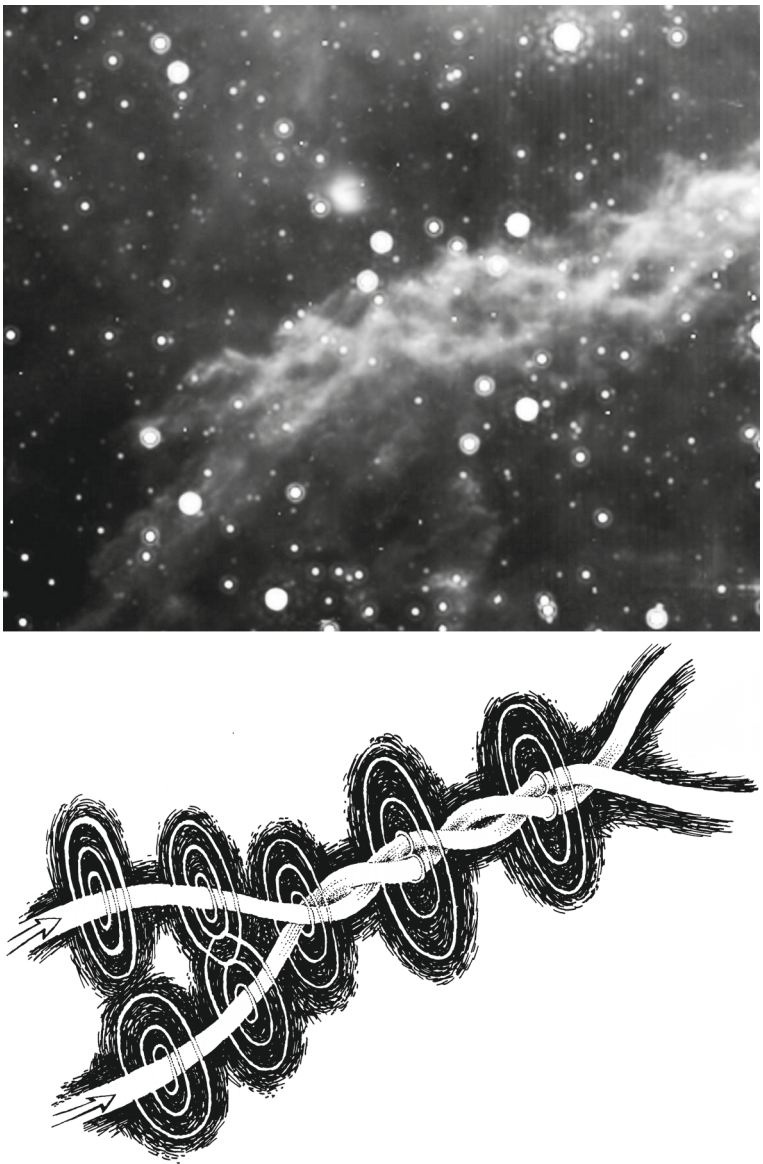
77 **Magnetická, proudová a kinetická helicita** – magnetická helicita, o které zde hovoříme, se ve skutečnosti nepočítá z magnetického pole **B**, ale z tzv. vektorového potenciálu **A**. Jde o pomocnou veličinu, ze které můžeme magnetické pole určit za pomoci vztahu **B** = rot **A**. Helicita určovaná přímo z magnetického pole se nazývá *proudová helicita* a helicita určovaná z rychlosti plazmatu se nazývá *kinetická helicita*.

tj. oblast plazmatu, ze které nevycházejí ven žádné silokřivky. Pokud jsou obě podmínky splněny, celková helicita magnetické trubice se zachovává, tj. ve sledované oblasti zůstávají silokřivky trvale zkroucené do šroubovic.

Má-li ovšem plazma konečný odpor, helicita se nezachovává a postupně se mění. Energie obsažená v helikálním (zkrouceném) magnetickém poli je vždy nižší než energie pole s nezkroucenými silokřivkami, proto v plazmatu dochází samovolně ke vzniku helikálních struktur. Má-li plazma dostatek času, vždy v něm samovolně vzniknou různá zkroucená vlákna. Jde o nejtypičtější útvary pro elektromagnetickou interakci, které pozorujeme jak v laboratorním, tak ve vesmírném plazmatu. Někdy se dokonce objevují vázané dvojice propletených vláken, kterými protéká elektrický proud shodným směrem. Mezi vlákny se vzniklé magnetické pole vyruší (má opačný směr) a vně vláken vzniklé pole stlačuje vlákna směrem k sobě.



Obr. 81. Planetární mlhovina Prasklá osmička (NGC 3132) s dvojitým vláknem uprostřed. Zdroj: NASA/HST.



Obr. 82. Mlhovina Dvojitá šroubovice. V dolní části je dvojvlákno protékané proudem (bílé šipky) a držené magnetickým polem (kružnice). Mezi vlákny má magnetické pole opačný směr a vyruší se. Zdroj: NASA/SST.

Prvním příkladem může být planetární mlhovina[78] s katalogovým číslem NGC 3132. Říká se jí *Prasklá osmička* nebo také *Jižní prstencová mlhovina*. Nachází se na jižní obloze v souhvězdí Plachet ve vzdálenosti 2 000 světelných roků. Tuto krásnou planetární mlhovinu nevytvořila jasná hvězda v blízkosti středu, ale méně jasná hvězda nad ní. Napříč mlhovinou se táhne dvojité zkroucené vlákno chladného plynu, které má šířku 0,0057 světelného roku a délku 0,3 světelného roku. Magnetické pole bylo změřeno na $2{,}8\times10^{-8}$ T, tomu tedy odpovídá celkový proud tekoucí vlákny 4×10^{12} A.

Velmi známou je také mlhovina Dvojitá šroubovice (Double Helix, viz obrázek 82). Mlhovinu objevil v roce 2006 Spitzerův vesmírný dalekohled[79] v těsném sousedství jádra naší Galaxie. Pozorované dvojvlákno je dlouhé 80 světelných roků, nachází se pouhých 300 světelných roků od centrální veledíry[80] ležící ve středu naší Galaxie. Od Země je mlhovina vzdálená přibližně 25 000 světelných roků a nachází se v souhvězdí Střelce. V mlhovině bylo detekováno extrémně silné magnetické pole (tisíckrát silnější než na periferii Galaxie). Jeho přítomnost podporuje správnost hypotézy o magnetickém původu této zajímavé struktury.

78 **Planetární mlhovina** – odhozená obálka hvězdy v jejím závěrečném stádiu vývoje. Za roztodivné tvary planetárních mlhovin může většinou přítomné magnetické pole. Planetární mlhoviny nemají nic společného s planetami, název vznikl na základě podobnosti mlhoviny s kotoučkem planety v malých dalekohledech.

79 **Spitzerův vesmírný dalekohled** – SST (Spitzer Space Telescope) je kosmická observatoř NASA pracující v infračerveném oboru, která byla vynesena na oběžnou dráhu v srpnu 2003 nosnou raketou Delta 7920H ELV. Zrcadlo má průměr 85 cm a je chlazené kapalným heliem na teplotu 5,5 K. Pozorovací spektrální rozsah je 3 μm až 80 μm. Předpokládaná životnost byla tři až pět let, dalekohled ale bez problémů funguje i v roce 2011. Vědecký program observatoře koordinuje Kalifornský institut technologií.

80 **Černá díra v centru Galaxie** – velmi hmotná černá díra (někdy se používá termín veledíra), která má hmotnost 4×10^{6} Sluncí. Navenek se projevuje jako silný bodový rádiový zdroj Sag A*, kolem kterého krouží větší množství hvězd. Z jejich drah je možné určit parametry veledíry. Centrální černá veledíra je také zdrojem rentgenového záření.

Helicita Slunce

Mimořádně zajímavá je problematika magnetické helicity Slunce. Z pozorování Slunce bylo zjištěno, že koronální výrony hmoty popisované v kapitole 12 s sebou trvale odnášejí magnetickou helicitu ze Slunce (tedy pole ve tvaru šroubovic) a transportují ji napříč sluneční soustavou. Každý vyvrhnutý plazmoid má v sobě „zamrzlé" magnetické pole s nenulovou helicitou. Podle současných znalostí vzniká magnetická helicita hluboko pod povrchem Slunce při turbulencích v konvektivní vrstvě. Diferenciální rotace Slunce spolu s Coriolisovou silou způsobují nenulovou helicitu rychlostního pole (tzv. kinetickou helicitu). Proudění plazmatu je ale provázáno s pohybem magnetického pole, a tak se nenulová helicita proudnic přenese na nenulovou helicitu magnetických silokřivek. Jde o statistický jev, který probíhá ve velkém objemu sluneční hmoty. Není dosud známo, jak je helicita vznikající pod povrchem Slunce transportována do fotosféry, chromosféry a koróny. Uvažuje se o torzních plazmatických vlnách, které způsobují minimální vodorovné pohyby látky ve fotosféře, a proto jsou obtížně pozorovatelné. Torzní vlny by mohly být zodpovědné za radiální transport helicity z nitra Slunce ven.

Z pozorování se zjistilo, že magnetické pole nejrůznějších útvarů ve fotosféře, chromosféře, koróně i slunečním větru splňuje tzv. hemisférické pravidlo: celková helicita všech útvarů (včetně slunečních skvrn) na severní polokouli je záporná a na jižní polokouli kladná. Toto pravidlo platí v 70 % až 80 % i pro jednotlivé útvary, tedy nejen pro polokouli jako celek. Není jasné, zda se při přepólování slunečního pole znaménko helicity změní. Pokud její geneze souvisí s rotací Slunce a Coriolisovou silou, nemělo by ke změně znaménka dojít. Výsledky experimentů jsou zatím rozporuplné a nevedou k jednoznačnému závěru. Podle některých měření se zdá, že na počátku slunečního cyklu dochází k narušení hemisférického pravidla, jiné práce to ale vyvracejí. K rozluštění této hádanky bude potřeba dalších měření, k řešení by mohla přispět vynikající japonská sluneční sonda Hinode.

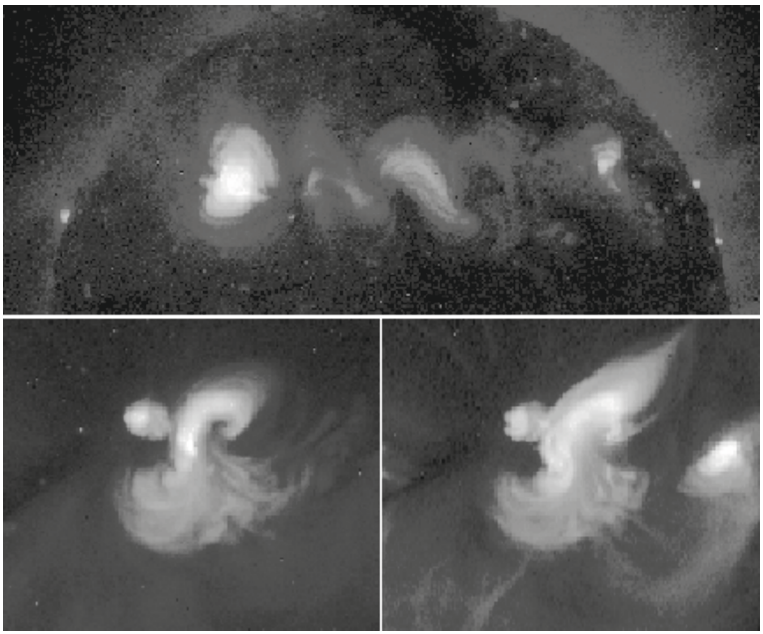
Bezsilová konfigurace

Teče-li elektrický proud po přímce, generuje magnetické pole, jehož silokřivky vytvářejí kolem tekoucího proudu kružnice (obrázek 80 uprostřed). Pokud teče elektrický proud po šroubovici, vzniká helikální pole, jehož silokřivky mají také tvar šroubovic. Velmi zajímavá je situace, kdy je stoupání obou šroubovic stejné (tedy proudové hustoty i magnetického pole) a proud teče podél silokřivek magnetického pole. V matematice se taková pole nazývají *Beltramova pole* – jsou pojmenována podle italského matematika Eugenia Beltramiho (1835–1899). Fyzikové hovoří o tzv. *Birkelandových proudech*, které tečou podél magnetických silokřivek. Jsou pojmenovány podle norského fyzika a vynálezce Kristiana Birkelanda[81], který předpověděl jejich existenci v zemské ionosféře. V roce 1966 byla tato předpověď experimentálně potvrzena navigačním satelitem 1963-38C.

Z předchozího výkladu víme, že na nabitou částici pohybující se podél silokřivek magnetického pole nepůsobí žádná síla. Totéž platí pro elektrické proudy tekoucí podél silokřivek magnetického pole. Birkelandovy proudy nevytvářejí žádné silové působení, proto se situaci, kdy proudy tečou podél silokřivek říká *bezsilová konfigurace*.

Lze ukázat, že právě tento stav odpovídá stavu plazmatu s minimem magnetické energie a plazma se do něho samovolně mění – po dosti dlouhé době dosáhne plazma bez vnějších zásahů vždy bezsilové konfigurace a vzniknou zkroucená vlákna, ve kterých má proudová hustota a magnetické pole stejný směr (buď paralelní nebo antiparalelní). Proudové čáry a magnetické silokřivky tvoří charakteristické šroubovice. Birkelandovy proudy korespondu-

81 **Birkeland, Kristian (1867–1917)** – norský fyzik a vynálezce. Vyráběl umělá hnojiva, vyvíjel elektromagnetické dělo, věnoval se výzkumu polárních září a pohyby nabitých částic v magnetickém poli. Usoudil, že při některých jevech na Slunci se uvolňují do prostoru svazky nabitých částic, které někdy zasáhnou Zemi a vyvolají polární záře. V laboratoři vyrobil *terellu*, malou napodobeninu Země, na které zkoumal podmínky vzniku polárních září.



Obr. 83. Nahoře: severní polokoule Slunce vyfotografovaná v rentgenovém oboru 15. května 1998 sondou Yohkoh. Dobře patrné jsou sigmoidy. Dole: sigmoid před erupcí (8 června 1998 15:19 UT) a po erupci (9 června 1998 16:17 UT). Zdroj: Yohkoh/SXT (Soft X-Ray Telescope).

jící s bezsilovou konfigurací byly pozorovány v zemské ionosféře a magnetosféře, na Jupiteru a na Slunci. Je pravděpodobné, že existují i v mnoha mlhovinách s magnetickým polem.

Na Slunci byly poprvé pozorovány bezsilové helikální struktury japonskou rentgenovou sondou Yohkoh[82]. V rentgenovém oboru jsou patrné typické útvary, které na fotografiích vypadají jako písmeno S. V řečtině odpovídá našemu písmenu S znak sigma, a proto byly tyto útvary nazvány *sigmoidy*. V místech sigmoidů dochází velmi často k erupcím a následnému koronálnímu výronu

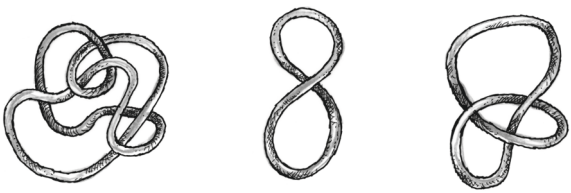
82 **Yohkoh** – japonsko-americká družice z 90. let minulého století, která pozorovala Slunce v rentgenovém oboru od roku 1991. Po deset let získávala velmi cenné informace o sluneční koróně a slunečních erupcích v oblasti rentgenového záření a gama záření. Název je odvozen od japonského slova *Yoko*, které znamená *sluneční světlo*.

hmoty. Magnetické pole útvarů bylo určeno z magnetogramů pořízených sondou SOHO ve stejném čase. Tyto helikální struktury souvisí se silnými elektrickými proudy v pozorovaných provazcích. Proudy vznikají pod povrchem Slunce, pravděpodobně až v dolní části konvektivní vrstvy. Sigmoidy jsou šroubovicové smyčky plazmatu, které na fotografii díky projekci vypadají jako písmeno S. Z konkrétního úhlu pohledu závisí orientace písmene S na tom, zda proud teče ve směru magnetických silokřivek (kladná helicita) nebo proti směru magnetických silokřivek (záporná helvita).

Z uvedených příkladů by se mohlo zdát, že helikální útvary jsou doménou vesmírného plazmatu. To samozřejmě není pravda, obdobné útvary pozorujeme i v laboratorním plazmatu, ale mnohem obtížněji se fotografují, neboť jejich doba života se mnohdy měří jen na mikrosekundy. Přesto byla proudová vlákna stočená do charakteristických šroubovic v některých laboratořích vyfotografována. V mnoha zařízeních se dokonce z důvodu stability helikální pole záměrně vytvářejí. Jde například o helikální pinč, který je stabilnější než varianta s nulovou helicitou. Také v tokamacích má pole helikální průběh, což zamezuje úniku částic a některým nestabilitám plazmatu. Je zřejmé, že šroubovice je jednou z nejdůležitějších křivek v laboratorním i vesmírném plazmatu.

Víte, že

■ Víte, že se pojem helicity poprvé objevil v matematické teorii uzlů? Pokud máte uzel vytvořený z uzavřené smyčky a jeho celková helicita je nulová, podaří se vám ho rozmotat na jednoduchý tvar písmene O. Při nenulové helicitě se vám to nikdy nepodaří.



■ Víte, že se pojem helicita používá i v částicové fyzice? Zde má ale poněkud jiný význam. Jde o projekci spinu (vlastního rotačního momentu částice) do směru pohybu částice. Podle znaménka helicity nazýváme částici levotočivou nebo pravotočivou (můžete si ji představit jako rotující střelu za letu).

■ Víte, že jednotkou helicity v soustavě jednotek SI je tesla na druhou × metr na čtvrtou (T^2m^4)? Jde o jednotku, která je kvadrátem toku magnetického pole. Ten se v soustavě SI měří ve weberech (Wb = Tm^2) a ve starší soustavě cgs[83] v maxwellech (Mx). Rozměr helicity je proto Wb^2 (v SI) nebo Mx^2 (v cgs).

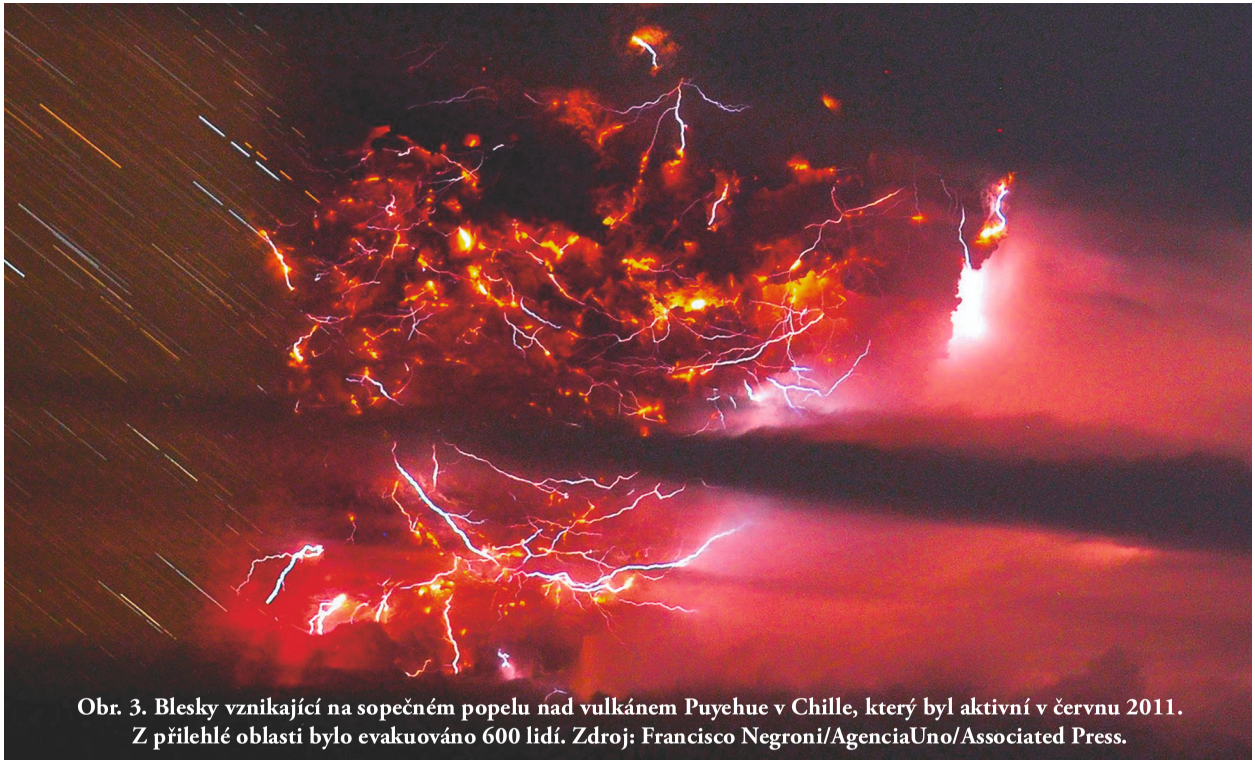
Poučení na závěr: *Až budete při romantické večeři s partnerkou či partnerem otevírat láhev vína, uvědomte si, že tvar vývrtky ve vaší ruce je nejen symbolem blížící se výměny genetické informace, ale připomíná také děje probíhající v plazmatickém prostředí nekonečných hlubin našeho vesmíru.*

83 **Soustava cgs** – starší soustava jednotek, v níž jsou základními jednotkami centimetr, gram a sekunda.

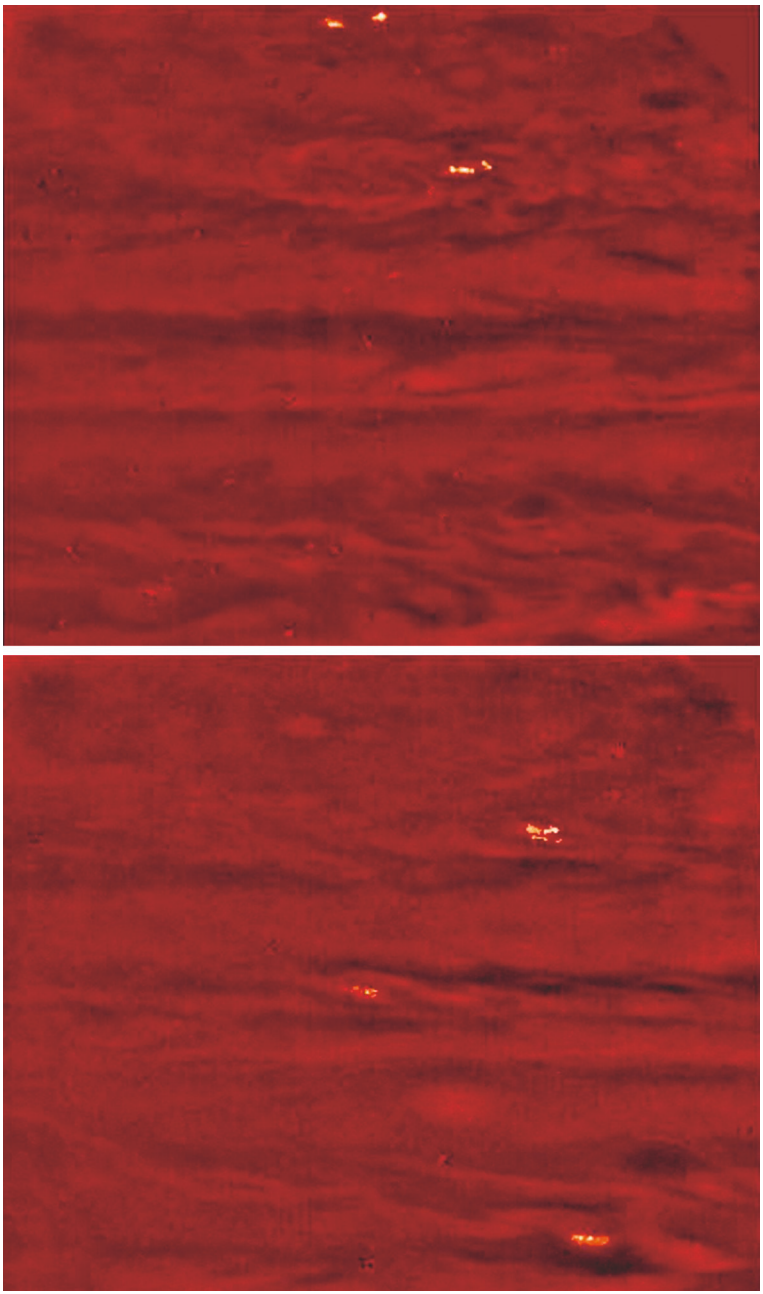
Barevná příloha

Obr. 1. Fotografie Eiffelovy věže v Paříži ze dne 3. 6. 1902 ve 21:20. Patrný je opačně orientovaný blesk typický pro výškové budovy.
Foto: M. G. Loppé.

Obr. 2. Blesky vznikající na sopečném popelu nad vulkánem Puyehue v Chille, který byl aktivní v červnu 2011. Sloupec popele byl vysoký 10 km. Zdroj: Carlos Gutierrez/Reuters.

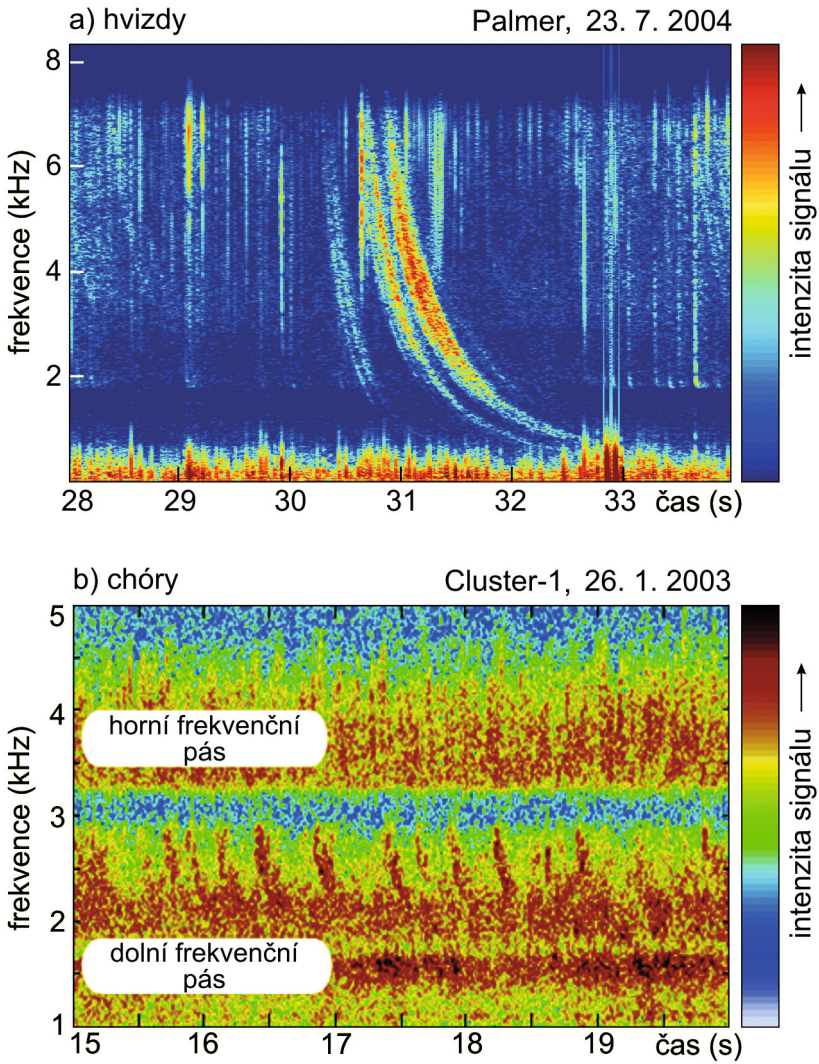


Obr. 3. Blesky vznikající na sopečném popelu nad vulkánem Puyehue v Chille, který byl aktivní v červnu 2011. Z přilehlé oblasti bylo evakuováno 600 lidí. Zdroj: Francisco Negroni/AgenciaUno/Associated Press.

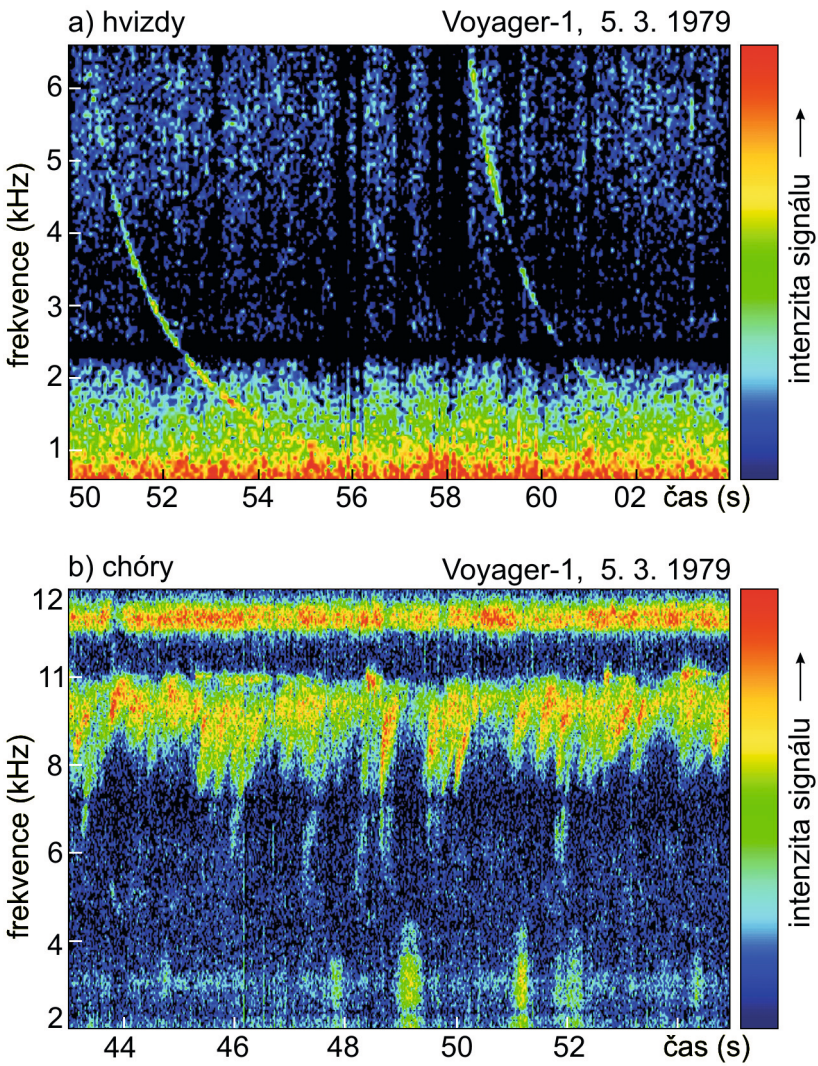


Obr. 4. Bouřkové oblasti s blesky na Jupiteru. Druhý snímek vzniknul 75 minut po prvním. Sonda Galileo, 1997.

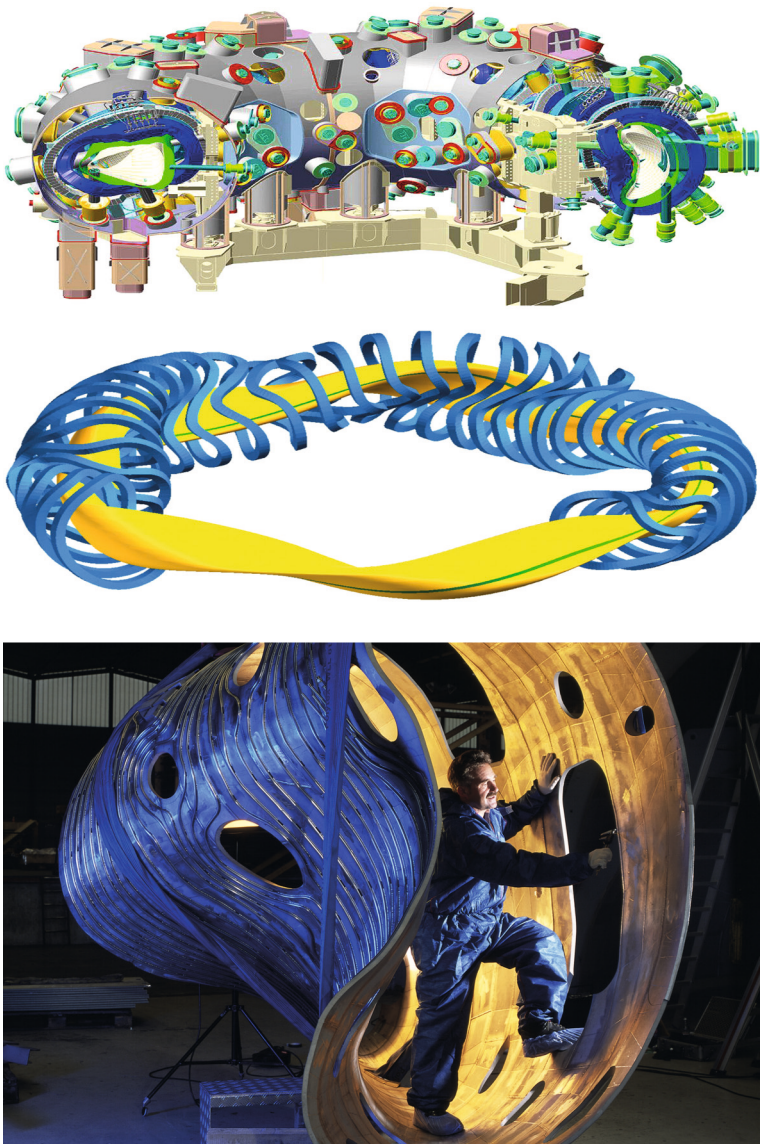
Obr. 5. Eustache Le Sueur: Mše svatého Martina (1654).
Je oranžová koule kulový blesk? Louvre.



Obr. 6. a) záznam hvizdu ze stanice Palmer ze dne 23. července 2004 v 03:55 UT. b) záznam vázaných chórů z družice Cluster 1 z 26. ledna 2003. Cyklotronní frekvence elektronů byla přibližně 6 kHz. Na polovině této frekvence (3 kHz) je mezi oběma pásy „tichá“ oblast.



Obr. 7. Hvizdy a chóry detekované na Jupiteru sondou Voyager 1 v roce 1979. U chórů je patrné rozdělení do dvou frekvenčních pásů oddělených „tichou“ oblastí v okolí 11 kHz (polovina cyklotronní frekvence). NASA, University of Iowa, Oulu, Stanford.

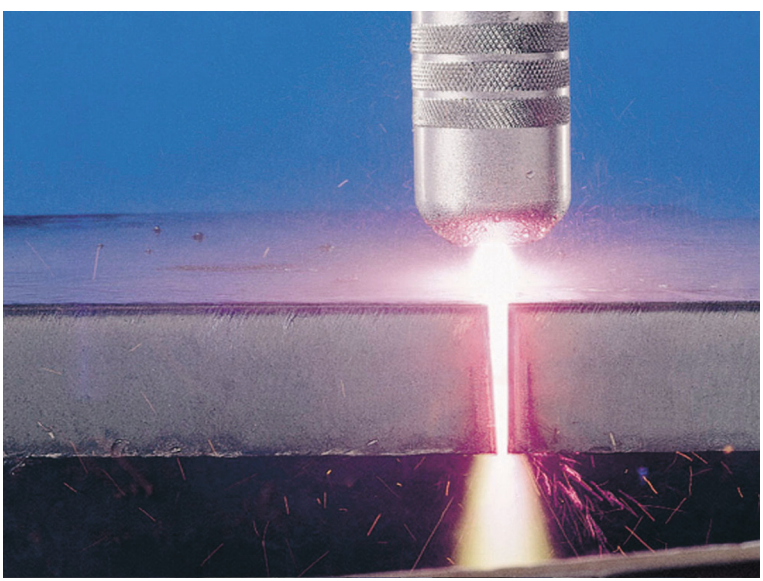


Obr. 8. Futuristický design stelarátoru W7-X. Dole je část komory.

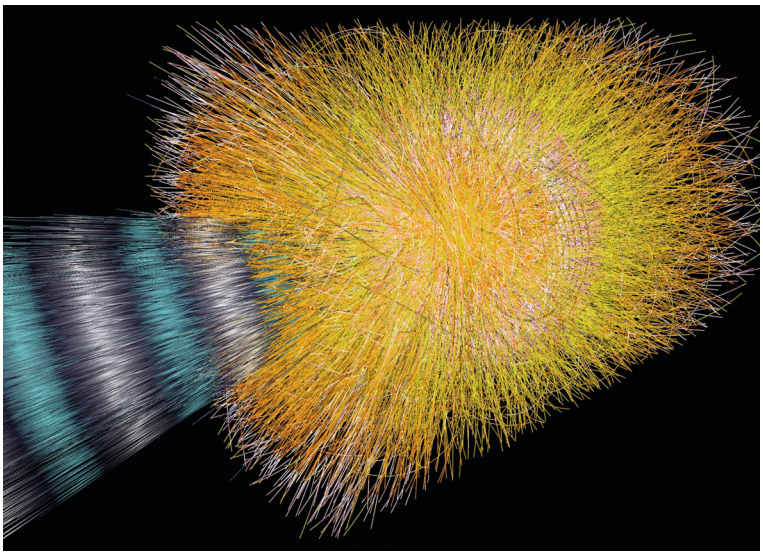
Obr. 9. Stavba zařízení NIF pro laserovou fúzi. Bude se ubírat fúzní elektrárna budoucnosti tímto směrem?

Obr. 10. Umělecká představa hvězdy Betelgeuse. Evropská jižní observatoř.

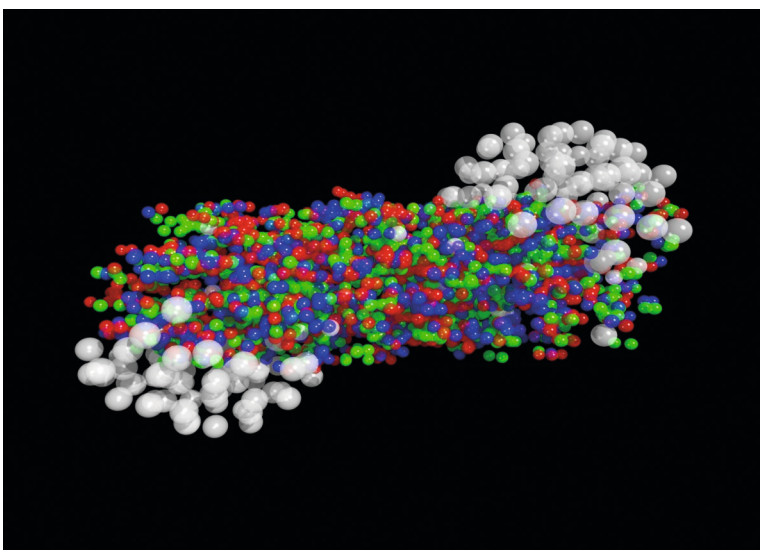
Obr. 11. a) Průmyslové zařízení pro plazmové řezání.



Obr. 11. b) Řezný paprsek je veden za pomoci počítače.

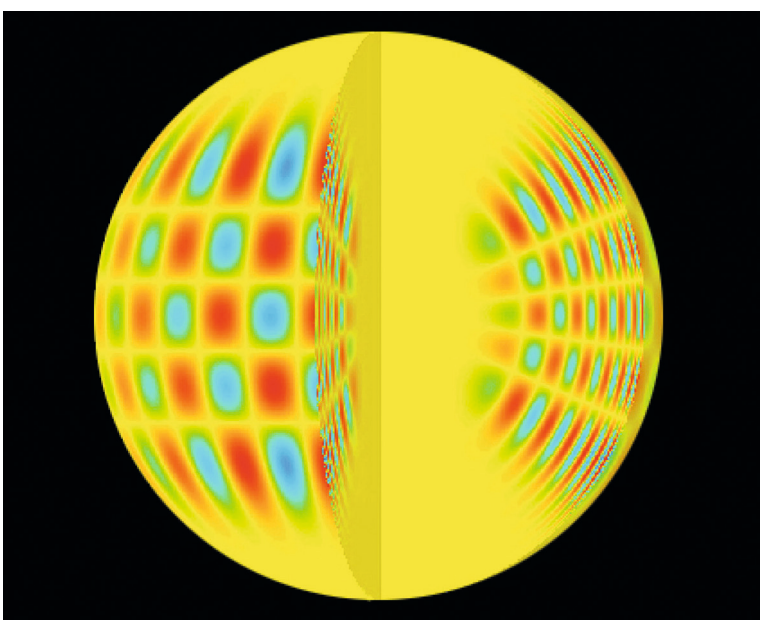


Obr. 12. Numerická simulace srážky dvou jader olova.
Zdroj: Univerzita v Utrechtu.

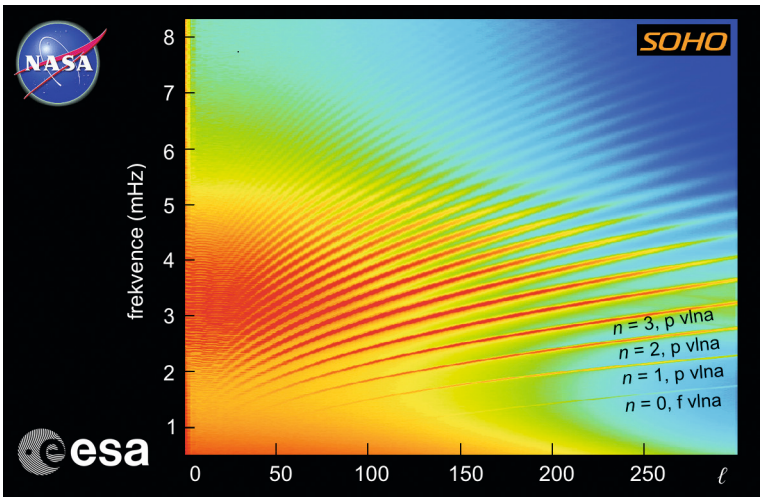


Obr. 13. Kresba srážky dvou jader olova. Šedě jsou neutrony a protony, barevně volné kvarky. Zdroj: CERN

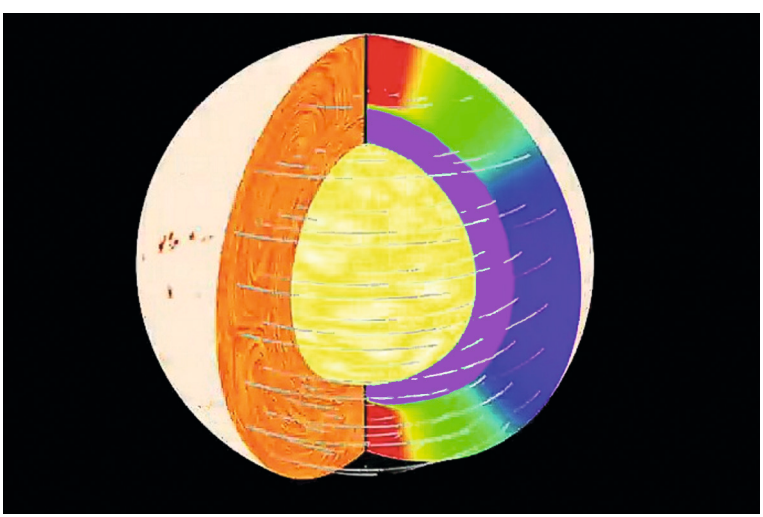
Obr. 14. Sluneční observatoř SDO pečlivě sleduje Slunce čtveřicí dvaceticentimetrových dalekohledů. Na palubě má také interferometr HMI, který je nejlepším přístrojem pro současnou helioseismologii.



Obr. 15. Zvučící Slunce. Na obrázku je znázorněn tzv. *p* mód s charakteristickými čísly $n = 14$, $l = 20$, $m = 16$.

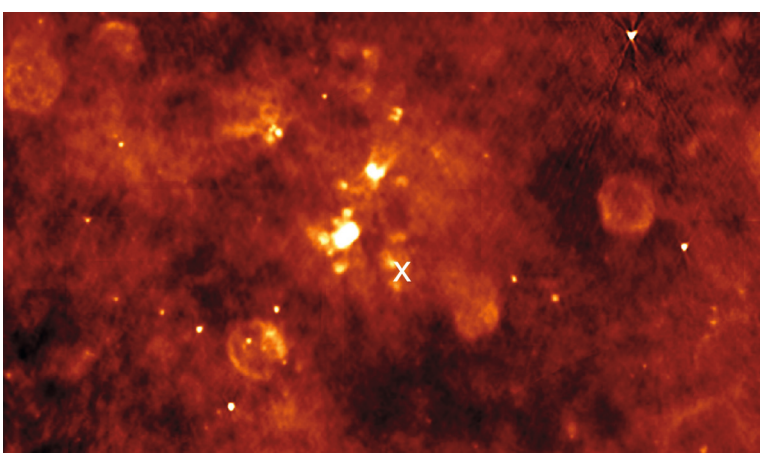


Obr. 16. Disperzní relace pro malé hodnoty sférické harmonické. Jednotlivé linie se liší radiálním číslem *n*. Nejspodnější linie je *f* vlna, ostatní *p* vlny. Barva znázorňuje intenzitu signálu. Nejvyšší (červená) je v oblasti pětiminutových vln (frekvence 3,3 mHz). Zdroj: ESA/NASA/SOHO.

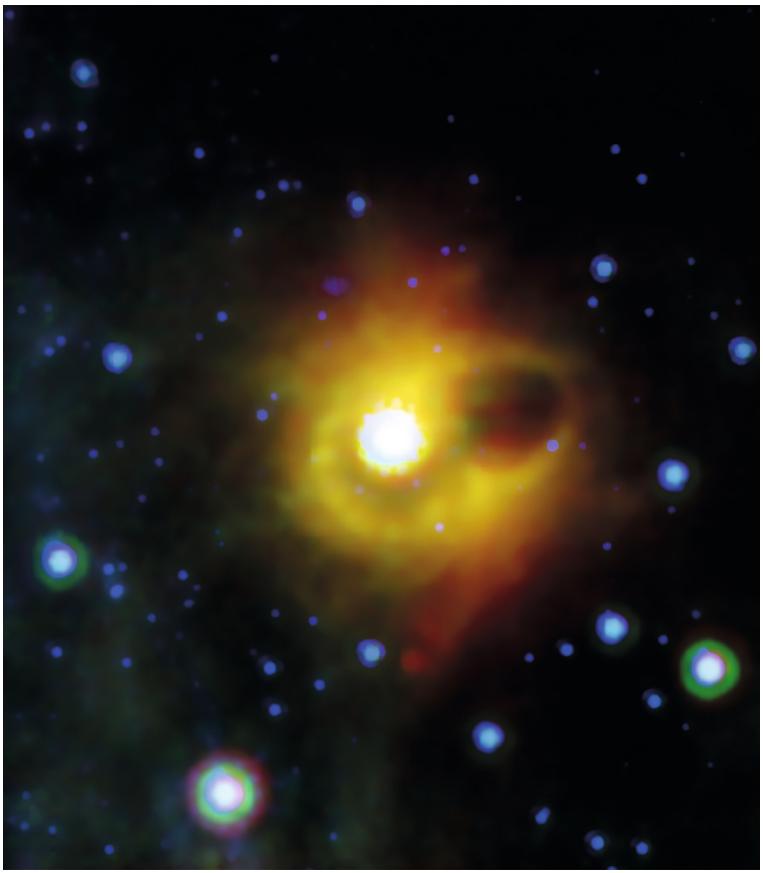


Obr. 17. Podpovrchové proudění Slunce. Napravo jsou zobrazeny toroidální toky (ve směru rotace Slunce) a nalevo meridiální (od rovníku k pólu). Modrá barva u rovníku odpovídá periodě rotace 24,5 dne. Červená u pólu periodě 34 dni. V konvektivní vrstvě probíhá diferenciální rotace. Fialově je znázorněna tachoklina. Zářivá vrstva je znázorněna žlutě, nejeví známky diferenciální rotace.

Obr. 18. Pozůstatek po explozi supernovy N 49 ve Velkém Magellanově mračnu. Fotografie z Hubblova vesmírného dalekohledu zpracovaná v roce 2004 na základě dat pořízených v roce 2000 kamerou WFPC2. Uprostřed mlhoviny zůstal magnetar, který způsobil gigantický gama záblesk pozorovaný v roce 1979.



Obr. 19. Křížkem je vyznačena poloha magnetaru SGR 1806-20 z roku 2004 ze souhvězdí Střelce, zatím nejsilnější pozorované exploze vůbec. Zdroj: University of Hawai.



Obr. 20. Prachový prstenec kolem magnetaru SBR 1900+14 vyfotografovaný deset let po explozi v infračervené oblasti Spitzerovým vesmírným dalekohledem v roce 2008.

Literatura

1. Blýskání

[1] V. A. Rakov and M.A. Uman, *Lightning: Physics and Effects*, Cambridge University Press, 2003

[2] Redakční úvodník: *Aktivní hromosvod. Poručíme hromu blesku?*; Elektro **5** (2008) 24

[3] Aktuální mapa blesků online: *www.in-pocasi.cz/blesky/*

[4] C. T. R. Wilson: *The acceleration of beta particles in strong electric fields such as those of thunderclouds*; Proc. Cambridge Philos. Soc. **22** (1924) 534–538

[5] A. V. Gurevich, G. M. Milikh, R. A. Roussel-Dupre: *Runaway electron mechanism of air breakdown and preconditioning during a thunderstorm*; Phys. Lett. A **165** (1992) 463– 468

[6] A. V. Gurevich, K. P. Zybin: *Runaway Breakdown and the Mysthery of Lightning*; Physics Today (2005) 37–43

[7] A. V. Gurevich, L. M. Duncan et al.: *Radio emission of lightning initiation*; Phys Lett. A **312** (2003) 228–237

[8] J. R. Dwyer et al.: *Energetic Radiation Produced During Rocket-Triggered Lightning*; Science **299**, 694 (2003)

[9] M. P. McCarthy, G. K. Parks: *Further observations of X-rays inside thunderstorms*, Geophys. Res. Lett. **12** (1985) 393–396

[10] U. B. Jayanthi et al.: *Ground gamma radiation associated with lightning and rain*; 29th International Cosmic Ray Conference Pune (2005) 101–104

[11] Plane Crash Info – databáze leteckých katastrof. Online: www.planecrashinfo.com/

[12] P. Kulhánek, J. Rozehnal: *Hvězdy, planety, magnety*; Mladá fronta, edice Kolumbus, 2007

2. Záhada kulového blesku

[13] I. Štoll: *Tajemství kulového blesku*, Horizont, 1988

[14] W. Brand: *Der Kugelblitz*; Hamburk, Grand, 1923

[15] M. Stenhoff: *Ball Lightning – An Unsolved Problem in Atmospheric Physics*; Kluwer Academic-Plenum Publ., New York, 1999

[16] F. Velinský: *Stále záhadný kulový blesk*; 21. století, 21. 11. 2003, online: www.21stoleti.cz/view.php?cisloclanku=2004112101

[17] J. Abrahamson, J. Dinniss: *Ball lightning caused by oxidation of nanoparticle networks from normal lightning strikes on soil*; Nature **403** (2000) 519–21

[18] P. Skřehot: *Stručné základy teorie bouřek*; Meteorologická operativni rada, 2004, online: http://www.astronomie.cz/download/strucne-zaklady-teorie-bourek.pdf

[19] Ch. M. M'Govern: *The New Wizard of the West*; Pearson's Magazine, May 1899, online: http://homepage.ntlworld.com/forgottenfutures/tesla/tesla.htm

[20] V. Dikhtyar, E. Jerby: *Fireball Ejection from a Molten Hot Spot to Air by Localized Microwaves*, Physical Review Letters **96** (2006) 045002

[21] D. Břeň: *Kulový blesk a mikrovlnka*; Aldebaran Bulletin 11/2006,
online: www.aldebaran.cz/bulletin/2006_11_bal.php

[22] P. Kulhánek: *Úvod do teorie plazmatu*; AGA, 2011

3. Hvizdy, lví řevy a chóry

[23] Domovská stránka mise IMP-8;
online: http://spdf.gsfc.nasa.gov/imp8/project.html

[24] Domovská stránka mise Dynamics Exlorer;
online: http://science.nasa.gov/missions/de/

[25] Domovská stránka mise THEMIS;
online: www.nasa.gov/mission_pages/themis/main/

[26] Domovská stránka mise WIND;
online: wind.nasa.gov/

[27] Domovská stránka mise Geotail
online: www-istp.gsfc.nasa.gov/istp/geotail/

[28] Domovská stránka mise Cluster
online: http://sci.esa.int/cluster/

[29] Von. H. Barkhausen: *Zwei mit Hilfe der neuen Verstärker entdeckte Erscheinungen*; Physik. Zeitschr. (1919) 401

[30] L. R. O. Storey: *An investigation of whistling atmospherics*; Trans. Roy. Soc. **246** (1953) 113

[31] Astrosurf: *Nahrávky hvizdů,*
online: www.astrosurf.com/luxorion/audiofiles-geomagnetosphere.htm

[32] Natural Audio Lab: N*ahrávky různých hvizdů, chórů a sferik*; online:
http://naturalradiolab.com/content/view/4/5/

[33] T. F. Bell et al.: *Source regions of banded chorus*; Geophysical Research Letters 36 (2009) L11101

[34] V. Krupař: *Studium šíření emisí typu „Lví řev" z dat družic Cluster*; diplomová práce, MFF UK, 2008; online: http://os.matfyz.cz/prace/2008dipl_vratislav_krupar.pdf

[35] S. Sazhin: *Whistler-mode Waves in a Hot Plasma*; Cambridge Atmospheric and Space Science Series, 1993, 2009

[36] M. K.Dougherty et al.: *Saturn form Cassini-Huygens*; Springer 2009

4. Příběh umírající hvězdy Betelgeuse

[37] Z. Mikulášek: *Úvod do fyziky hvězd*; MU 2000, Brno

[38] P. Kulhánek: *Příběh umírající hvězdy Betelgeuse*; Aldebaran Bulletin 12/2001; online: www.aldebaran.cz/bulletin/2011_12_bet.php

[39] I. Havlíček: *Veleobří červené hvězdy*; Aldebaran Bulletin 10/2005; online: www.aldebaran.cz/bulletin/2005_10_gia.php

[40] Physorg: *Red giant star Betelgeuse is mysteriously shrinking*; June 10, 2009; online: www.physorg.com/news163823639.html

[41] MRAO: *Surface imaging of Betelgeuse with COAST and the WHT*, 1997; online: www.mrao.cam.ac.uk/telescopes/coast/betel.html

[42] J. S. Young et al.: *New Views of Betelgeuse: multi-wavelength surface imaging and implications for models of hotspot generation*; MNRAS, 315 (2000) 635; online: http://onlinelibrary.wiley.com/doi/10.1046/j.1365-8711.2000.03438.x

[43] C. H. Townes, E. H. Wishnow, D. D. S. Hale, B. Walp*: Systematic Change with Time in the Size of Betelgeuse*; The Astrophysical Journal Letters **697** (2009) L127-L128

[44] M. Aurière et al.: *The magnetic field of Betelgeuse: a local dynamo from giant convection cells?*; A&A **516** (2010) L2; online: www.aanda.org/index.php?option=com_article&access=doi&doi=10.1051/0004-6361/201014925&Itemid=129

[45] C. H. Townes, W. Fitelson: *ISI overview*; ppt presentation, 2009; online: www.aldebaran.cz/bulletin/2011_12/ISI_overview.ppt

[46] Bernd Freytag: *Numerical Simulations of Red Giant*; Univerzita v Uppsale; online: www.astro.uu.se/~bf/movie/dst35gm04n26/movie.html

5. Zapálíme Slunce na Zemi?

[47] G. McCracken, P. Stott: *Fúze – energie vesmíru*; Mladá fronta, edice Kolumbus, 2006

[48] P. Kubeš: *Bude Praha jedním z center výzkumu řízené termonukleární fúze?*; ČVUT FEL v Praze, 2006; online: http://www.aldebaran.cz/lectures/2006_kub_fuze.pdf

[49] V. Kopecký*: Zapálíme Slunce na Zemi?*; Astropis **Speciál** (2007) 32–37

[50] M. Řípa: *Jak tokamak a stelarátor soutěžily – letem termojaderným světem*; Vesmír **86** (2007) 583–585

[51] J. Mlynář: ITER – *cesta ke zvládnutí řízené termonukleární fúze*; Pokroky matematiky, fyziky a astronomie **49** (2004) 129–150

[52] J. Mlynář: *Lesk a bída termojaderné syntézy*; Vesmír **77** (1998) 207–211

[53] D. Břeň: *Laser HiPER – další způsob, jak získat fúzní energii*; Aldebaran bulletin 47/2008; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_47_jad.php

[54] European Commision: *Fusion Research, an Energy Option for Europe's Future*; European Communities, 2007; online: http://ec.europa.eu/research/energy/pdf/92-79-00513-8_en.pdf

[55] Domovská stránka projektu ITER: http://www.iter.org/

[56] Domovská stránka projektu NIF: https://lasers.llnl.gov/

[57] Domovská stránka projektu HiPER: http://www.hiper.org/

[58] Domovská stránka projektu Compass D: http://www.ipp.cas.cz/Tokamak/compass/

[59] Domovská stránka projektu PALS: http://www.pals.cas.cz/cz/

[60] Domovská stránka projektu ELI Beamlines: http://www.eli-beams.eu/cs/

6. Plazmové technologie

[61] German Federal Ministry of Education and Research: *Plasma Technology – Process Diversity & Sustainability*; 2001; online: http://www.bmbf.de/pub/plasma_technology.pdf

[62] Instituto Superior Tecnico: *Plasma Welding*; EWF, 2008.

[63] Herbert L. Berk: *Pervasive Plasma State*; Whitley Company (Austin, Texas), 1996; online: http://www.apsdpp.org/outreach/plasma_brochure/

[64] Timothy E. Eastman: *Perspecives on Plasmas – the Fourth State of Matter*; online: http://www.plasmas.org/

[65] Leanne Pitchford: *Plasma Display Panels*: Coalition for Plasma Science, 2004; online: http://www.plasmacoalition.org/plasma_writeups/plasma-display-panels.pdf

[66] Jitka Paitlová: *Plazmové a LCD televize*; ZČU 2008; online: http://home.zcu.cz/~paitlova/

[67] Domovská stránka mise Deep Space 1; online: http://nmp.nasa.gov/ds1/

7. Malý třesk

[68] Petr Kulhánek: *Kvark-gluonové plazma aneb Malý třesk*; Astropis 2 (2001) 6–9

[69] Brookhaven National Laboratory: *Hunting the Quark Gluon Plasma*; BNL-73847-2005 Formal Report, April 18, 2005; online: http://www.bnl.gov/npp/docs/Hunting%20the%20QGP.pdf

[70] Rajiv V. Gavai: *Quark Gluon Plasma: From Lattice QCD*; From Stzrings to LHC II – Advanced School, Fireflies Ashram, Bangalore 11, 2007

[71] Federico Antinori a kol: *Alice a kvarkovo-gluonová polévka*; CERN 2004, česká lokalizace AGA 2009: http://www.aldebaran.cz/download/Alice.pdf

[72] Stuart FoxPosted: *RHIC Collider Creates Quark-Gluon Plasma at 4,000,000,000,000 Degrees Celsius*; Popsci, 16 Feb 2010; online: http://www.popsci.com/science/article/2010-02/rhic-collider-creates-72-trillion-degrees-fahrenheit-quark-gluon-plasma

[73] CERN Press Release: *LHC Experiments Present New Results at Quark Matter 2011 Conference*; CERN 23 May 2011

[74] Domovská stránka detektoru ALICE (A Large Ion Collider Experiment): http://aliweb.cern.ch/

[75] Domovská stránka urychlovače LHC: http://public.web.cern.ch/public/en/lhc/

[76] Domovská stránka urychlovače RHIC: http://www.bnl.gov/rhic/

[77] Peter Braun-Munzinger: *Heavy Ion Physics and Experiments at FAIR@GSI*; NSAC Subcommittee Meeting on Heavy Ion Physics; BNL, 2–6 June 2004

8. Helioseismologie

[78] Michal Švanda: *Helioseismologie, moderní směr ve výzkumu Slunce*; Astropis 1 (2003) 14–17; online: http://astro.mff.cuni.cz/vyuka/AST021/svanda06_2.pdf

[79] Michal Švanda: *Helioseismologie – od oscilací k vnitřní struktuře*; příspěvek na konferenci Člověk ve svém kosmickém a pozemském prostředí; Úpice 20–22.. 5 2008; online: http://www.cbks.cz/2008/referaty/15.pdf

[80] Jørgen Christensen-Dalsgaard: *Helioseismology*; arXiv:astro-ph/0207403v1 18 Jul 2002, 60 stran; online: http://arxiv.org/abs/astro-ph/0207403

[81] NOAO: *Solar Music*; NOAO Educational Text (NASA grant „*Active Learning Exercises in Planetary and Solar Astronomy for K-3 Students*"), 1996; online: http://www.noao.edu/education/ighelio/Solar_Music.pdf

[82] Jørgen Christensen-Dalsgaard et al.: *Helio- and Asteroseismology*; Stanford Solar Center, 1997; online: http://solar-center.stanford.edu/helio-ed-mirror/english/

[83] Dave Armet: *Helioseismology*; Stanford Solar Observatories Group, NSO/GONG, 2010; online: http://gong.nso.edu/info/helioseismology.html

[84] Amara Graps: *Helioseismology*; Stanford SOHO/MDI pages, 2009; online: http://soi.stanford.edu/results/heliowhat.html

[85] P. B. Stark: *Sounding the Sun – Helioseismology*; AAAS Annual Meeting & Science Innovation, Philadelphia, 1998; online: http://www.stat.berkeley.edu/~stark/Seminars/Aaas/helio.htm

[86] Stanford Solar Center: *Helioseismology Tours*; 2008; online: http://solar-center.stanford.edu/heliopage.html

[87] David H. Hathaway: *Surface Waves and Helioseismology*; Marshall Space Flight Center, NASA 2007; online: http://solarscience.msfc.nasa.gov/Helioseismology.shtml

[88] François Bouchy, Fabien Carrier: *Sounds of a Star*; ESO Press Release 0125, 28 June 2001; online: http://www.eso.org/public/news/eso0125/

[89] Petr Kulhánek: *SDO – nejcitlivější vesmírná observatoř pro výzkum Slunce*; Aldebaran bulletin 18/2010; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2010_18_sdo.php

9. Surfujeme na vlnách

[90] T. Tajima, J. Dawson: *Laser Electron Accelerator*; Phys. Rev. Lett. **43** (1979) 267

[91] R. E. Giacone et al.: *Simulations of Pulse Propagation in the Laser Wakefield Accelerator Using a Massively-Parallel Object-Oriented Particle in Cell Code*; Proc. EPAC, 2000, Vienna, Austria

[92] P. Preuss: *Laser Wakefield Acceleration: Channeling the Best Beams Ever*; Research News, Berkeley Lab, 2004

[93] J. Cartwright: *Creating Monoenergetic Electron Beams on Tabletop*, PhysWeb, 2006; online: http://physicsworld.com/cws/article/news/26646

[94] Domovská stránka urychlovače LHC v CERN: http://public.web.cern.ch/public/en/LHC/

[95] Zuzana Vidláková: *Mezinárodní lineární kolider*; Aldebaran bulletin 15/2008; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_15_ilc.php

[96] Michal Marčišovský: *Lasery na báze voľných elektrónov*; Aldebaran bulletin 18/2008; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_18_las.php

[97] Miroslav Havránek: *Zobrazování malých objektů rentgenovým laserem*; Aldebaran bulletin 32/2008; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2008_32_mat.php

[98] Petr Kulhánek: *Honba za vysokými tlaky*; Aldebaran bulletin 6/2010; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2010_06_jup.php

[99] Petr Kulhánek: *Surfování na vlnách – urychlovače budoucnosti?*; Aldebaran bulletin 39/2006; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2006_39_lwa.php

10. Magnetary

[100] Ch. Kouveliotou, R. Duncan, Ch. Thompson: *Magnetars*; Scientific American, 2003; online na stránkce Duncana: http://solomon.as.utexas.edu/~duncan/sciam.pdf

[101] R. Duncan: *Anomalous X-ray Pulsars: Mystery Solved?*, Sky&Telescope, 2005

[102] NASA News: *Cosmic Explosion Among the Brightest in Recorded History*; online: http://www.nasa.gov/centers/goddard/universe/swift_nsu_0205.html

[103] P. Kulhánek: *Magnetary, nejsilnější pole ve vesmíru*; Vesmír 87 (2008), 184–188. Kapitola 10 je upravenou a aktualizovanou verzí tohoto článku.

[104] P. Kulhánek: *Přepojení magnetických silokřivek*; Aldebaran bulletin 23/2005; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_23_rec.php

[105] P. Kulhánek: *Gigantická exploze SGR 1806-20 aneb může být Země ohrožena?*; Aldebaran bulletin 21/2005; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_21_mag.php

[106] M. Stránský: *Extrémní magnetická pole*; Aldebaran bulletin 30/2004; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2004_30_emp.html

[107] P. Sobotka: Objeven explodující magnetar; Leonardo, 25. září 2008; online: http://www.rozhlas.cz/leonardo/vesmir/_zprava/objeven-explodujici-magnetar--497954

[108] N. Rea, N. Schartel, Ch. Winkler: *XMM-Newton and Integral clues on magnetic powerhouses*; ESA News 14 Nov 2008; online: http://www.esa.int/esaSC/SEM1HB4DHNF_index_0.html

11. Solitony

[109] K. E. Longren: *Soliton experiments in plasmas*; Plasma Physics **25**/9 (1983) 943-982

[110] A. C. Scott, F. Y. F. Chu, D. W. McLaughlin: *The Soliton: A New Concept in Applied Science*; Proceedings of the IEEE **61/**10 (1973) 1443–1483

[111] Solitons homepage; Heriot-Watt university, Department of Mathematics; online: http://www.ma.hw.ac.uk/solitons/

[112] P. Kulhánek: *Mise Double Star ukončena!*; Aldebaran bulletin 42/2007; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2007_42_dsm.php

[113] A. Grecu, D. Grecu: *Dust Acoustic Solitons in a Dusty Plasma with Dust Particle Charge Variation*; Physics AUC **18** (2008) 178–187

[114] P. Mendel, M. Tlidi: *Introduction to soliton theory*; Lecture Notes, Université Libre de Bruxelles, 2006; online: http://socaff.inln.cnrs.fr/IMG/pdf/introduction_to_soliton_theory.pdf

12. Magnetické přepojení

[115] Tony Phillips: *A Big Surprise from the Edge of the Solar System*; NASA Features, 9 Jun 2011; online: http://www.nasa.gov/mission_pages/voyager/heliosphere-surprise.html

[116] J. L. Burch, J. F. Drake: *Reconnecting Magnetic Fields*; American Scientist **97** (2009) 392–399

[117] J. T. Gosling: *Magnetic reconnection in the heliosphere – new insights from observations in the solar wind*; Proceedings IAU Symposium No. 257, 2008

[118] A.C. Das: *Reconnection process in Sun and Heliosphere*; NASA Workshop on International Heliophysical Year and Basic Space Science, 2006; online: http://www.iiap.res.in/ihy/school/das_lecture.pdf

[119] S. M. Petrinec et al.: *Location of Magnetopause Reconnection*; LWS Workshop, Boulder, CO; 2004

[120] E. Priest, T. Forbes: *Magnetic Reconnection – MHD Theory and Applications*; Cambridge University Press, 2000

[121] P. Kulhánek: *Úvod do teorie plazmatu*, kapitola *Magnetické přepojení*, str. 158–167; AGA, 2011

[122] P. Kulhánek: *Přepojení magnetických silokřivek*; Aldebaran bulletin 23/2005; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2005_23_rec.php

[123] P. Kulhánek: *Ohřev sluneční korony*; Aldebaran bulletin 9/2009; online: http://www.aldebaran.cz/bulletin/2009_09_cor.php

13. Šroubovice

[124] M. R. Brown, R. C. Canfield, A. A. Pevtsov: *Magnetic Helicity in Space and Laboratory Plasmas*; Geophysical Monograph Series, 1999. 304 stran.

[125] S. Wolpert: *Astronomers Report Unprecedented Double Helix Nebula Near Center of the Milky Way*; UCLA, 2006; online: http://newsroom.ucla.edu/portal/ucla/Astronomers-Report-Unprecedented-6903.aspx

[126] H. Dahlgren: *Filamentary Structures in Planetary Nebulae*; Space and Plasma Physics School of ElectricalEngineering KTH, Stockholm 2006; online: http://www.staff.alfvenlab.kth.se/hanna.dahlgren/seminars/filaments.pdf

[127] A. A. Pevtsov: *What Helicity Can Tell us About Solar Magnetic Fields*; Journal of Astrophysics and Astronomy 29/1-2 (2007) 49-56; online: http://www.nso.edu/staff/apevtsov/personal/publications/papers/pevtsov_prl07.pdf

[128] A. A. Pevtsov: *Welcome to Our Helical Exhibition*; osobní www stránky; online: http://www.nso.edu/staff/apevtsov/www/gallery.html

[129] D. Talbott, W. Thornhill: *The Electrical Universe*; Biblioteca Pleyades, 2011; online: http://www.bibliotecapleyades.net/esp_electricuniverse.htm

Rejstřík

AERE 105
alfa částice 26, 47, 50, 59, 103, 110
ALICE 153
ALPS 186
Antáres 92
antihmota 45, 146
aperturní syntéza 88
apogeum 63, 64
Ariane 63
ARTEMIS 64
astrafobie 13
Atlas (raketa) 169
ATLAS (detektor) 153
atmosféra (atm) 123
aurorální ovál 62–63
AXP 205
baryon 142–147
Beppi-Colombo 137, 139
betatron 183
Betelgeuse 76–95
bezsilová konfigurace 252–253
Birkelandovy proudy 252
blesk 12–33
  červený přízrak 25, 32
  elfové 25
  chemický 49
  jaderný reaktor 50, 84, 99–104, 117
  křemíkový 51
  kulový 35–55
  minimrak 50
  modrý výtrysk 25, 28, 32
  perlový 25, 55
  plošný 24, 25
  s kladnou polaritou, 24–25
  se zápornou polaritou 25
  z čistého nebe 25
Cas A 41
Cassegrainův dalekohled 88
CASTOR 115
CERN 141, 146, 148, 149, 151–155, 179–184
CGRO viz COMPTON
cinema mód 135
CLIC 183
Cluster 63, 72, 73, 222, 237, 241
CME 235
CMS 153
CNO cyklus 85–86
CNSA – viz kosmická agentura
COAST 88
Compass D 115
COMPTON 28
Coriolisova síla 199
CRT 134, 179, 180
cumulonimbus 20
Curieova teplota 59
Cyg A 42
Cyg X1 92
cyklotron 66, 182–183
cyklotronní frekvence 66–67, 69, 72–74

černá díra 42, 45, 90–92, 94, 195, 204, 250
číslo
azimutální (řád) 165
magnetické kvantové 167
Machovo-Alfvénovo 231
Reynoldsovo magnetické 196, 201
vedlejší kvantové 166
vlnové 165
Dalekohled Williama Herschela 88
DESY 184–187
deuterium 84, 98, 102–104, 110, 112, 117
deuteron 84
diagram
CMA 67–69
fázový 150
Hertzsprungův-Russellův 83, 92
l-v 174–175
diamantový povlak 126
difuzér 30
difúzní region 231–232
disperze 70, 174, 213, 216
displej
LCD 133, 135, 136
PDP 132, 135
divertor 109
dopplerogram 168–171, 174
Dopplerův jev – viz efekt
Double Star 63, 72, 73, 222
DS4G 138
DT reakce 103, 110, 112
Dynamics Explorer 62
efekt
alfa 199, 200
Dopplerův 157, 161–163, 168, 171
omega 199–200
pinč 18–19, 54, 84, 104–108, 241, 254
elektrická dvojvrstva 48, 50, 139, 224
elektroda
adresovací 133–134
zobrazovací 133–134
elektron 14, 15, 19, 20, 25–29, 32, 59, 64–65–67, 71–78, 84, 90, 91, 117. 120, 124, 129, 137, 142, 147, 151, 158, 162, 179, 180, 182, 183–193, 196–198, 201, 202, 204, 218–225, 232, 236
elektronvolt 26
elektroskop 41
ELI 116
Eliášův oheň 38
ESA – viz kosmická agentura
ESTEC 138
Explorer 71
Éta Carinae 95
FAIR 150, 154
FEL 185
Fermilab 146
FIREX 114
FLASH 186
fluorescence 120, 121, 132
FOC 87
Fourierova analýza 163
fúze – viz slučování
inerciální 84, 111–115
studená 117
mionová 117
Galileo 32
gama
obor 19, 27–29, 94, 203–205, 253
záblesk 207–29, 94, 203–205, 207–209

Gekko 113
Geotail 62, 73
Gev – viz elektronvolt
GGR experiment 29
globule 82
gluon 11, 141, 143, 144,. 147–155, 230
Golem 115
GONG 167–169
GSI 154–155
hadron 142, 143, 149–152
hadronový plyn 143, 149–152
Hayabusa 137
HDLT 139
helicita 243–255
heliografická
  šířka 159, 160, 164, 176
  délka 164
helioseismologie 156–177
HERA 184, 193
Hinode 236, 251
HiPER 97, 113–116
hmotnostní schodek 98
holografie 175
Hubblův dalekohled 87, 107
hvězda hlavní posloupnosti 81–84, 158
hvězdná velikost 80
hvizdy 56–75
Chandrasekharova mez 90, 197
charmonium 144–145
Chicago Pile 99–100
chór 67, 71–72, 74–75
ILC 183
IMP-8 61
INTEGRAL 208
interferometrie 88, 93, 151, 168–169
ionizace 14, 15, 24, 26, 39, 134, 208
ionosféra 15, 22, 25, 61, 65, 66, 70, 188, 224, 252, 253
iontový motor 136–139
ICE – viz ISEE
ISEE 73, 207
ISI 93
ITER 11, 97, 109–111, 116
Jabločkovova svíčka 122
jaderná elektrárna 84, 100–101, 117, 158
jaderný reaktor 50, 84, 99–103, 117
JAXA – viz kosmická agentura
JET 109, 110
Jupiter 31, 32, 58, 71, 74–75, 79, 235, 253
J/ψ 144–146, 149, 150
kadmiové tyče 99
kaony 144, 149, 150
kasp 63, 235, 237, 238
kaviton 221
kev – viz elektronvolt
kolider 145, 151–154, 179–184
kondenzovaný stav 14
koróna 11, 75, 93, 169, 203, 236, 251, 253
kosmická agentura
  CNSA 222
  ESA 137, 139, 169, 222
  JAXA 236
  NASA 28, 61, 62, 64, 70, 107, 137, 169, 205, 228, 229, 248–250
kosmické
  počasí 61
  záření 26, 240

kulové funkce 157, 164, 166–167
kvantová mez 197–198
kvark 142–146, 209
kvazičástice 215, 225
laboratoř
  Cavendishova 51, 69
  Sandia 106, 197
Lagrangeovy body 62
lampa
  excimerová 121–123
  fluorescenční 120, 132
  Jabločkovova 122
  oblouková 123
Landauův útlum 189–190, 219
laser 10, 84, 112–116, 139, 185–187, 190–193
Lawsonovo kritérium 103–104, 111
LCD – viz displej
LEP II 151, 184
LGM 204
LHC 110, 150–154, 181, 184
LHCb 153
LHD 108
LIRM 33
LSO 168
luminofor 121, 122, 132, 135
lví řev 73
LWFA 191–193
MAGION 61
magnetar 194–209
magnetická pěna 238–241
magnetické zrcadlo 60, 71, 105
magnetický ohon 59–62, 64, 75, 238
magnetosféra 15, 32, 46, 48, 57, 60–65, 71–75, 195, 222, 223, 230, 232, 235–238, 241, 253
magnituda
  absolutní 81
  relativní 80, 81
MAST 115
MDI 168–170, 175, 176
Merkur 58, 74, 137, 139
Mev – viz elektronvolt
mezon 142–150
mikrometeorit 45
MILC 149
MMS 63
moderátor 99
NASA – viz kosmická agentura
NEAR 208
Neptun 31, 58
nestabilita
  cyklotronní 73
  Kelvinova-Helmholtzova 237
  korálková 55
  modulární 216
  osrůvkovitá 232
neutrina 84, 85, 87, 91, 95, 117, 146, 158, 161, 197,
neutronová hvězda 90, 91, 94, 197
New Horizons 32
NIF 113–114
NSO 168
OGO-5 73
ohnivá koule 48, 53, 54
Orion 77, 78, 82, 94
PALS 10, 116, 193
parsek 80
Pauliho princip 90, 144, 196
PDP – viz displej
peleta 112
PET 126

PETAL 115
PETRA 186
PHENIX 152
pinč 18–19, 54, 84, 104–107
  helikální 104, 254
  theta 104
  toroidální 105
  z pinč 104, 241
Pioneer Venus 32, 207
Planck 83
planetární mlhovina 248, 250
plazma 13–15
  kvarkové-gluonové 140–155
  nanášení vstev 123–127
  sváření 129–132
  řezání 129–132
  úpravy textilu 127–129
  vrtání 129–132
plášť heliosféry 238
plazmoid 43, 46, 61, 231, 235, 251
plazmová
  frekvence 65–66, 188, 193
  obrazovka 132–136
  řeka 171
  technologie 118–139
plazmový
  hořák 123, 129–131
  motor 136–139
Pluto 209
podkritické množství 98, 100
pohyblivost 188
Polar 62–63
polarizace 19, 44, 183, 187
pole
  brázdové 190–193
  rotace 244
  vířivost 244
potenciálová jáma 97
povrchová teplota 59, 80, 81, 91, 197, 202
pozitron 26, 84, 85, 147, 158, 182, 184
Prognoz 207
protohvězda 82–83
proton 26, 29, 47, 50, 59, 71, 75, 84, 85, 91, 92, 97–99, 141–146, 148, 149, 152, 153, 156, 180, 181, 184, 197, 201, 204, 225
protono-protonový řetězec 85, 158
přepojení silokřivek 226–241
  katastrofické 206–209
  třírozměrné 232–233
  samovolné 232
  Petschekův model 232
  Sweetův-Parkerův model 232
pulzar 26, 200–202, 204–205, 209
PVD technologie 125
rázová vlna 21, 59, 60, 238, 240
rekonexe – viz přepojení
relace neurčitosti 44, 198
řád oscilací – viz číslo
řetězová reakce 84, 98, 100
RHESSI 28, 208
RHIC 150, 152, 153, 184
Rigel 77
RXTE 208
rychlost
  Alfvénova 218, 236
  blesku 21
  elektronů 185, 224
  fázová 189, 218
  hvizdu 70
  iontů 138
  plazmatu 60, 130, 168, 231, 233, 247
  rekonexe 231

relativistická 27–29, 195
rotace 199
slunečního větru 239
solitonu 217, 221
světla 23, 181, 182, 185, 187, 193
úhlová 244
zvuku 23, 59, 130, 175, 190
rychlý zážeh 113, 114
Saturn 31, 58, 74, 75, 235
sbor 71
Scylla 104–105
SDO 168–171, 236
sférika 70
sférická harmonická 165, 174
SGR 203, 205–209
siderostat 88, 93,
sigmoid 253–254
silná interakce 146–148
Sírius 91, 197
SLAC 145, 182, 183
slučování 83, 84, 85, 101, 102, 158
Slunce 11, 21, 44, 46, 48, 59, 61, 62, 65, 75–81, 83–87, 89, 92–94, 96, 97, 111, 141. 156–177, 198–200, 204, 205, 230, 232, 234–236, 238,–240, 247, 251, 253, 254
sluneční vítr 59, 61, 62, 222, 237
SMART 137, 138
SOHO 168–170, 174–176, 228, 254
soliton 210–225
KdV 217, 218, 221, 222, 225
Langmuirův 221
NLS 217, 221, 225
Trivelpiecův-Gouldův 221–222
solitonová vlna – viz vlna
spektrální třída 80, 81, 92
Spitzerův dalekohled 83, 107, 250
srážka galaxií 82
STAR 152
stelarátor 11, 107–109
stenty 126
Storeyův úhel 70
stupeň oscilací 165
subbouře 64
supernova 26, 42, 77, 82, 89–95, 117, 197, 207
svítivost 80, 81, 92
SWIFT 206, 208, 209
synchrotron 148, 183
synchrotronní záření 183–185
štěpení 84–85, 97, 102
tachoklina – viz tachovrstva
tachovrstva 176
tekutina 14, 195, 196, 199, 214
tekutinové dynamo 94, 197, 198–201, 205, 234, 247
tepelné elektrony 64
terella 252
Tev – viz elektronvolt
těžká voda 99
TFTR 109, 110
TGF 28
THEMIS 63
tokamak 11, 107–116
TOV mez 91, 197
Tore Supra 109–110
TRACE 228, 229
trpaslík
bílý 89, 90–91, 195–197, 200, 209
černý 89

TWINS 64–65
ubíhající elektron 27–29
UFO 46
UKAEA 110
undulátor 185–187
uran (prvek) 98, 99
Uran (planeta) 31, 58, 63
UVOT 209
uzlová linie 165–166
účinný průřez 27, 101
van Allenovy pásy 60, 71
vazebná energie 84–85, 97, 98
VELA 204, 207
Veněra 32, 207
Venus Express 32
Venuše 31, 32, 59, 74, 80
VLA 208
vlna
  Alfvénova 236
  levotočivá (L) 67
  mimořádná (X) 67
  na Slunci F 171–173
  na Slunci G 171–173
  na Slunci P 171–173
  plazmová 187–189
  pravotočivá (R) 67
  řádná (O) 67
  solitonová 215–216
  terminační 238, 240
  translační 212,. 213, 215
vlnovod 39, 51, 53, 55, 70, 72
vodíková bomba 101
Voyager 74, 238–241
vrstva
  konvektivní 159–161, 167, 173, 176, 199, 251, 254
  nanášená 123–127
  neutrální 231, 232
  nulová 238
  zářivá 158
výboj
  barierový (DBD) 123
  vedoucí 20
  zpětný 20
vyhoření 135
WHT 88
wiggler 185
WIND 62, 208
WMAP 141
XFEL 187, 193
XRT 209
Yohkoh 253
ypsilonium 144, 146
zabijácké elektrony 71
zářivka 120–123
  kompaktní úsporná 121
zářivý výkon 80, 81, 85, 203
Z-machine 106–107
Země 15, 22–25, 28, 32, 46, 48, 57–64, 71, 72, 74, 80, 87, 93, 94, 157, 160, 163, 167, 169–171, 177, 196, 197, 207–209, 222, 230, 232, 235, 237, 238, 240, 250, 252

Rejstřík osob

Abrahamson John 51–52
Alfvén Hannes 196
Allen James 60, 71
Allen Woody 243
Allis W. P. 67
Ambarcumjan Viktor 82
Arcimovič Lev 108
Aristotelés ze Stageiry 15
Baade Walter 204
Barkhausen Heinrich 69
Barraclough Samuel 18
Bell T. F. 72
Bellová-Burnellová Jocellyne 91, 204, 209
Beltrami Eugenio 252
Bessel Fridrich 90, 197
Bethe Hans 84
Birkeland Kristian 252
Bose Satyendra 151, 224
Boswell Rod 139
Brand Walther 38
Brunel Kingdom 213
Cassegrain Sieur 88
Clark Alvan 91, 197
Clemmow P. C. 67
Cocteau Jean 77
Compton Arthur 28
Coriolis Gustav 199
Cowling Thomas 198
Crookes William 119
Dalibard François 16
Davy Humpry 122
Dawson John 190
Dikthyar Vladimir 53
Dinniss James 51
Diviš Prokop 17
Dmitriev M. T. 43
Doppler Christian 161
Dougherty Michel 74
Duncan Robert 201, 205, 206
Dungey James 232
Dwyer Joseph 28
Edison Thomas 120
Einstein Albert 18, 91, 98, 151, 179, 207, 224
Faraday Michael 23, 49
Fearn David 138
Feynman Richard 141, 227
Fermi Enrico 84, 99, 211
Fleischmann Martin 117
Fourier Joseph 163
Franklin Benjamin 13, 15–18, 40
Fraunhofer Joseph 236
Freytag Bernd 89
Gardner Clifford 218
Gell-Mann Murray 142, 145
Gibbs Josiah 97
Giovanelli Ronald 232
Gould Roy 221
Gurevič Alexandr 27
Hartwig G. 37

Herschel William 88
Hertzsprung Ejnar 83, 92
Hess Viktor 26
Hewish Anthony 91, 204
Hilbert David 195
Holzer Robert 73
Hubbard Elbert 35
Hubble Edwin 141, 162
Chadwick James 204
Chandrasekhar Subrahmanyan 90, 197
Charles Christine 139
Chruščov Nikita 57, 105
Chukanov Kiril 54
Jabločkov Pavel 122
Jerby Eli 53
Jennison Roger 41–43
Jerjeová Karolína 245
Joyce James 142
Kapica Pjotr 51, 53
Kasemir Heinz 21
Kepler Johannes 157, 177
Kerst Donald 183
Korteweg Diederik 216–217
Kouveliotou Chryssa 205
Köpcke Juliane 31
Kruskal Martin 225
Křižík František 122
Kubeš Pavel 54
Kurčatov Igor 105, 107–108, 115
Lagrange Joseph-Louse 62, 64, 65, 169
Landau Lev 189–190, 219–220
Langmuir Irwing 14, 119, 221
Lauritzen Ted 185
Lavrentěv Oleg 108
Lawrence Ernest 114, 148, 182–183
Lawson John 103–104, 111
Leibacher John 171
Leighton Robert 171
Limpaecher Rudolf 219
Lomonosov Michail 40–41, 49
MacKenzie K. R. 219
Majakovskij Vladimir 157
Martin, svatý 55
McCarthy Michael 29
Michelson Albert 168, 169
Moffatt Henry 199
Morikawa George 218
Mullaly R. F. 67
Murdin Paul 92
Nauer H. 53
Noyes Robert 171
Olson John 73
Oppenheimer Robert 91, 99, 197
Parker Eugene 199, 232, 234, 240, 241
Parks George 29
Pauli Wolfgang 90, 144, 196
Petschek Harry 232
Planté Raimond 48, 53
Pollock James 18
Pons Stanley 117
Ramaty Reuven 28
Reynolds Osborne 196, 201
Richmann Georg 16, 40–42, 49
Richter Burton 145
Russell Henri 83, 92
Russell Christopher 73
Russell John 211–215

Rutherford Ernest 51, 119
Ryle Martin 88
Sacharov Andrej 108
Sazhin S. 71
Schmellenmeier Werner 119
Schrödinger Erwin 217
Schwarzschild Karl 92
Siemens Ernst 119
Simon George 171
Smith Edward 73
Spitzer Lyman 83, 107, 250
Stein Robert 171
Stokes George 120
Storey L. R. O. 69, 70
Sueur Eustach 55
Sweet Peter 232
Štoll Ivan 35, 38
Tajima Toshi 190
Tamm Igor 108
Taniuti Tosiya 218
Teller Edward 101
Tesla Nicola 18, 52, 53
Thompson Christopher 201, 205, 206
Ting Samuel 145
Trivelpiece Alvin 222
Twain Mark 59
Ulam Stanislaw 101
Ulrich Roger 171
Vries Gustav 216–217
Washini Haruichi 218
Wegener Alfred 38
Weil George 99
Wilson Charles 27
Wilson Robert 146
Zabusky Norman 225
Zweig George 142
Zwickey Fritz 204

Petr Kulhánek

Blýskání

aneb třináctero vyprávění o plazmatu

Žádná část této publikace nesmí být publikována
a šířena žádným způsobem a v žádné podobě bez výslovného
svolení autora a sdružení AGA.

Autor: prof RNDr. Petr Kulhánek, CSc., ČVUT v Praze

Sazba: Bc. Martin Batelka, martin@batelka.org

Grafika a obálka: ing. arch. Ivan Havlíček, havlicek@aldebaran.cz

Předsádka: foto Ing. Miroslav Jindra

Formát: 13×20 cm, 304 stran

Obrázky: 96 černobílých, 20 barevných

Nakladatelství: AGA (Aldebaran Group for Astrophysics)

Vydání: první, Praha 2011

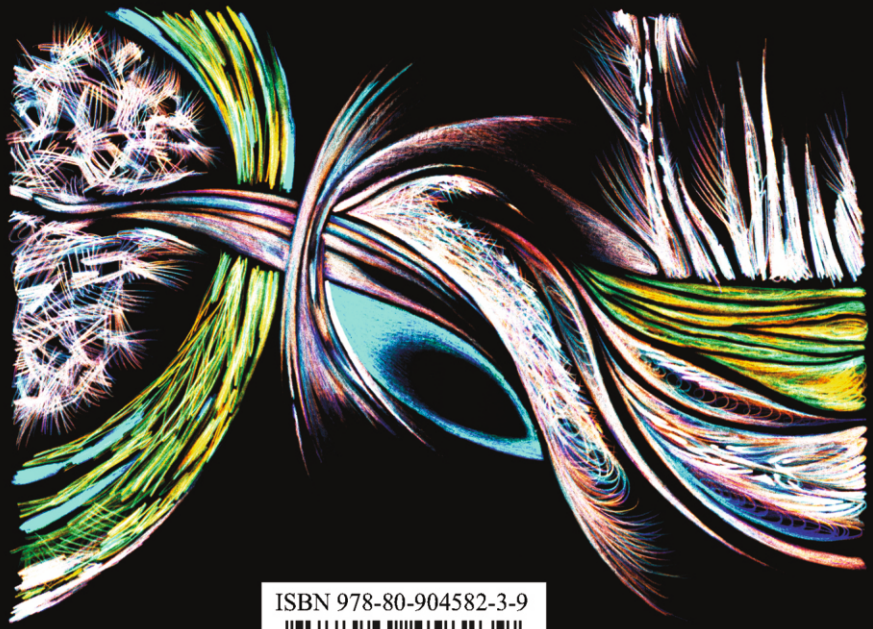
Dotisk: 2013

Tisk: Europrint, a. s.

www.aldebaran.cz

ISBN 978-80-904582-3-9

Ve vesmíru je většina atomární látky v plazmatickém skupenství. Z plazmatu je složeno nitro hvězd, za plazma lze považovat většinu mlhovin, mezihvězdné i mezigalaktické prostředí. Sluneční soustava je vyplněna plazmatem slunečního větru, plazma nalezneme v magnetosférách planet. Jedinými neplazmatickými oázami jsou kamenné planety a měsíce. Naše Země je jedním z mála objektů ve vesmíru, na němž je plazma vzácností. Nalezneme ho ale v ionosféře, v kanálech blesků a v tajuplných laboratořích plazmových fyziků. Plazma se vetřelo i do našich domácností. V kuchyni používáme nože s ostřím ukutým v plazmovém výboji, na sobě máme šaty z textilií upravených v plazmatu a večer usedneme k plazmové obrazovce televize...



ISBN 978-80-904582-3-9

www.aldebaran.cz