

Diafilm Hvězdárny v Teplicích

SLUNEČNÍ
RADIOASTRONOMIE

Autoři:

RNDr. Ladislav Křivský, CSc.
Dr. Josef Olmr

Výtvarník:

J. Mašínová

Fotograf:

T. Vaněk

Vyrobil:

KRÁTKÝ FILM PRAHA
Diafilm - 1976

Filmové laboratoře Barrandov

Úvod

Již na konci minulého a na začátku našeho století se konaly pokusy, zda Slunce vyzařuje na rádiových vlnách. Pokusy neměly úspěch, protože přijímače té doby - Branlyho koherery a galenitové detektory - byly málo citlivé. Dnešní přijímače jsou více jak tisíckrát citlivější.

Rádiové záření Slunce poprvé objevil náhodou Angličan J. S. Hey v roce 1942 v době velkých erupcí. Veřejnost se dověděla o tomto objevu až po skončení druhé světové války v roce 1945.

J. S. Hey byl mobilizován jako důstojník k radarovým zařízením. Se svými přístroji - radarem měřícím na 2 metrech - vyhledával nepřátelská letadla, která se pokoušela překročit La Manche. Stínítka byla často rušena emisí neznámé povahy. Příjem byl mimořádně špatný ve dnech 26., 27. a 28. února 1942. Hey hledal příčinu; zjistil, že rušení je zvláště silné, když radar směřuje na Slunce. Když Hey zjistil, že právě tehdy byly na Slunci mohutné skupiny skvrn, došel k závěru, že Slunce je silným zdrojem rádiové emise. Přisoudil emisi správně aktivním oblastem na Slunci. V téže době Američan Southworth objevil rádiové záření Slunce na 3 cm.

Heyova pozorování Slunce byla doplněna Australany Pawseyem, Payem Scottem, McCreedym a Angličany Rylem a Vonbergem.

Různé projevy sluneční činnosti na jednotlivých vlnových délkách - záblesky a vzplanutí - byly zařazeny do jednotlivých typů s určitými charakteristikami.

V roce 1950 J. T. Wild uvedl do provozu rádiový spektrograf, který dává spektrum sluneční emise v širším rozsahu a její změny v čase.

Wild odvodil spektrální klasifikaci slunečních záblesků: rozeznával typ I, II a III. Klasifikaci doplnil v roce 1957 Boischoat o typ IV.

S bouřlivým vývojem vědy a techniky se stavěla větší a větší radioastronomická zařízení, z nichž některá slouží převážně k pozorování Slunce.

Mezi radioastronomickými stanicemi, které se zejména zabývají pozorováním Slunce, jmenujme alespoň některé: Culgoora (Austrálie), Krym (SSSR); Pulkovo (SSSR), Zimenki (SSSR), Bodar (SSSR), Bedford (USA), Tremsdorf (NDR), Nançay (Francie), Floirac (Francie), Slough (Anglie), Arcetri (Itálie), Toyokawa (Japonsko), Hiraiso (Japonsko), Blindern (Norsko), Uccle (Belgie), Nera (Holandsko), Ondřejov (ČSSR).

Velký pokrok v sluneční radiofysice, zejména v interpretaci některých typů záblesků, znamenal rádiový heliograf, který byl uveden v roce 1967 do provozu v Culgoore v Austrálii. Přístroj byl sestaven kolektivem inženýrů a vědců. Byl určen k zaznamenání rádiového obrazu celého Slunce v koróně na vlnové délce 3,75 m (80 MHz).

Rádiový heliograf se skládá z 96 rádiových teleskopů o průměru 13,0 m rozestavěných na kružnici o průměru 3 km.

Výzkumy Slunce na rádiových vlnách nezůstaly bez odezvy ani v Československu. Na observatoři v Ondřejově se po skončení druhé světové války prováděly pokusy s přijímáním rádiového záření Slunce provizorními anténami. Tyto pokusy byly úspěšné. Ještě předtím byl v červenci 1946 zaznamenán rádiový šum na vlnové délce menší než 10 metrů při velké erupci, která byla současně pozorována v optickém oboru. Bylo publikováno i několik teoretických prací. Se systematickou experi-

mentální a pozorovatelskou práci se však započalo až v roce 1953.

Antény rádiových teleskopů jsou parabolická zrcadla. V roce 1953 byly využity parabolické antény z radiolokátorů Würzburg-Riese o průměru 7,5 m. Ještě v roce 1953 se začalo pracovat na vývoji přijímače pro vlnovou délku 56 cm. V roce 1954 byl přijímač v podstatě dokončen, takže s ním už bylo možno pozorovat částečné zatmění Slunce, probíhající 30. června 1954.

V současné době se měří na Ondřejově na vlnových délkách 37 cm (808 MHz), 56 cm (536 MHz) a 115 cm (260 MHz).

Všechny přijímače jsou umístěny v jednom radio-teleskopu, tzv. RT 1.

Svá radioastronomická zařízení doplnil Astronomický ústav ČSAV v Ondřejově v roce 1966 rádiovým spektrografem, pracujícím v rozsahu 50 - 210 MHz. Po rekonstrukci v roce 1972 pracuje rádiový spektrograf ve třech pásmech: 70 - 270 MHz, 270 - 470 MHz, 470 - 870 MHz. Protože rádiový spektrograf pracuje po celý rok, je možno srovnávat jevy zaznamenané na rádiovém spektrografu se záznamem na jednotlivých frekvencích sledovaných radioteleskopem a i přijímač s optickými úkazy. V poslední době byla získána 2 parabolická zrcadla o průměru 3 m, z nichž jedno slouží pro měření velikosti polarizace rádiových záblesků.

Obraz 1

Vlevo: rádiový teleskop ve Dwingeloo (Holandsko).
Vpravo nahoře: Část obrazu sluneční chromosféry.
Vpravo dole: Rádiový tok na vlnové délce 10,7 cm.

Obraz 2 - Fotosféra

Sluneční povrch - fotosféra - má teplotu kolem 6 000 °K; skvrny mají teplotu o 1 200 - 3 000 °K nižší a jeví se nám jako temná místa. V chromosféře - v blízkosti skvrn - dochází k chromosférickým erupcím, které dnes pokládáme za komplexní děj, zasahující fotosféru, chromosféru a korónu. V prostoru kolem erupcí, podle stupně jejich rozvoje, vznikají některé typy rádiových emisí.

Obraz 3 - Detail skupiny slunečních skvrn

Obraz 4 - Erupce

Erupce jsou nejvýznamnějším projevem sluneční činnosti. Vyskytují se v chromosféře a jejich vznik je podmíněn určitou magnetickou konfigurací. Pozorují se nejčastěji ve vodíkové čáře H alfa nebo v čáře ionizovaného vápníku K. Pozorovateli se jeví v čáře H alfa jako zjasnění (často velmi pronikavé) flokulového pole. Teplota v některých částech erupce velmi stoupá (až do 10⁷ °K.). Erupce jsou zdrojem záření X a ultrafialového záření. Jsou rovněž zdrojem záření rádiového a projevují se na záznamech jako záblesky a vzplanutí. K pozorování erupcí se používá zvláštních přístrojů: spektrohelioskopů a chromosférických dalekohledů. Při zvlášť mohutných erupcích se uvolňuje ohromné množství energie. Uvolněná energie velké erupce se rovná 25 miliardám megaton TNT.

Obraz 5 - Spektrohelioskop

I když spektrohelioskop je v poslední době nahražován automatickým chromosférickým dalekohledem, kde stav chromosféry je zaznamenán fotograficky, má stále ještě význam pro některé jeho výhody (například možnost měření šířky čáry nebo sledování jevů s velkými radiálními rychlostmi mimo čáru).

Spektrohelioskop je v podstatě malý a jednoduchý mřížkový spektrograf, který dovolí pozorovat chromosféru ve světle jediné spektrální čáry, jíž je nejčastěji vodíková čára H alfa. Před vstupní a výstupní štěrbinou spektrografu se otáčejí synchronně dva Andersenovy hranolky z flintového skla, takže lze pozorovat plošku v sluneční atmosféře. Posouváním obrazu coelostatovými zrcadly, která jsou umístěna před spektrohelioskopem, je možno v krátké době přehlédnout celý sluneční kotouč. Spektrohelioskop dovoluje pozorovat flokulová pole v aktivních oblastech na Slunci, v nichž dochází k erupcím. Spektrohelioskop slouží především ke studiu chromosférických erupcí, ale též protuberancí a filamentů. Šířku emisní čáry ve spektru erupcí, flokulových polí, protuberancí nebo absorpčních čar filamentů lze měřit pomocí "line-shifteru" (otáčením mřížky), opatřeného stupnicí.

Vlevo: budova, v níž se nachází vedle otočného spektrografu i spektrohelioskop.

Vpravo: schéma spektrohelioskopu.

Obraz 6 - Erupce a pozorování rádiových jevů

Erupce, které pozorujeme v optickém oboru (spektrohelioskopem nebo chromosférickým dalekohledem), jsou velmi často doprovázeny v rádiovém oboru zářivými jevy (záblesky a vzplanutími).

Vlevo nahoře: chromosférický obraz části Slunce.
Vlevo dole: rádiový teleskop ondřejovské observatoře,
jímž se měří rádiové záření Slunce.
Vpravo: Dva dalekohledy ondřejovské observatoře, slou-
žící k optickému pozorování Slunce.

Obraz 7 - Dráha rádiových paprsků v sluneční koróně

Elektronová hustota se zmenšuje se vzdáleností od slunečního povrchu; index lomu se zvětšuje se vzrůstající vzdáleností od Slunce. Dráhy elektromagnetických paprsků v koróně jsou zakřiveny z vnější strany od Slunce. Toto zakřivení je zejména patrné u metrových vln. Obraz ukazuje dráhy paprsků vypočtené pro tři frekvence: 600, 100 a 18 MHz. Je zřejmé, že paprsky blíže středu proniknou hlouběji než paprsky blízké okraji. Kritická vrstva leží tím výše nad fotosférou, čím je frekvence nižší.

Obraz 8 - Vzhled "rádiového" Slunce na různých vlnových délkách

V závislosti na přijímané vlnové délce se mění vzhled "rádiového" Slunce. Jeho tvar je velmi rozdílný na centimetrových a metrových vlnách.

Obraz 9 - Hlavní sluneční emise

Tabulka vysvětlující hlavní sluneční emise.

Obraz 10 - Klidné Slunce

Minimální hodnoty rádiové hladiny pozorovatelné na určité frekvenci, představující hladinu klidného Slunce, jsou nazývané též klidovou (základní) hladinou.

Slunce je jen vzácně úplně klidné. Klidová složka pochází z oblasti nad skvrnami. Klidová hladina nesleduje zcela zákon černého tělesa. Záření této složky je tepelné.

Pracovníci stanice v Nançay pozorovali 15 dní Slunce na 3 cm interferometricky, aby získali obraz o příspěvku klidného Slunce. Vnitřní obálka chodu rádiového toku představuje příspěvek klidného Slunce. Při větším počtu měření obálka by byla symetrická.

Obraz 11 - Pomalu proměnná složka rádiového záření Slunce

Chod rádiového toku na centimetrových a decimetrových vlnových délkách je spojen s výskytem skvrn. Kdybychom našli denní hodnoty rádiového toku a ploch skvrn, našli bychom značný souhlas; vedle nepravidelných variací by byly patrné i variace s rytmem 27 dní. Variace je tím intenzivnější, čím je aktivita Slunce větší. Tuto variaci nazýváme pomalu proměnnou složkou. Je patrná zejména v oboru mezi 3 - 60 cm. Na metrových vlnách je velmi slabá a těžko sledovatelná.

Obraz 12 - Chod rádiového toku Slunce na jednotlivých rádiových vlnových délkách v roce 1964 - 1969

Obraz 13 - Tabulka uvádějící hlavní radioastronomické stanice ve světě

Obraz 14 - Záblesky a vzplanutí

Erupce jsou doprovázeny na rádiových vlnách velmi intenzivní emisí. Na určitých frekvencích může jejich intenzita dosáhnout tisíckrát až milionkrát vyšších hodnot než je klidné Slunce. Záření je netepelné. Abychom plně pochopili podstatu těchto jevů, bylo třeba radiospektrografu. Záblesky a vzplanutí rozdělil J. P. Wild do dvou kategorií, které později (1957) byly doplněny Boischothem o typ IV.

Rozeznáváme vzplanutí s pomalým posuvem (typ II) - rychlost šíření je 1000 - 6000 km/s s trváním desítek minut a záblesky s rychlým posuvem (typ III) - rychlost šíření je až 150 000 km/s. Vzplanutí typu IV a V se jeví jako stabilní emise, zasahující současně velmi široké frekvenční pásmo. Jejich emise nepochází z oscilace plasmu, jako u typu II a III, ani z tepelného mechanismu, nýbrž mají původ v synchrotronním záření. Vzplanutí typu V je krátké, trvá několik minut, a následuje po záblesku nebo skupině záblesků typu III. Je možno je pozorovat jen na metrových vlnách.

Obraz 15 - Rádiové vzplanutí pozorované pomocí rádiového spektrografu

Vzplanutí na jednotlivých vlnových délkách, a to postupně odleva doprava na vlnové délce 37 cm, 56 cm a 115 cm.

Čísla na páskách neodpovídají časovým údajům; platí časové údaje psané rukou.

Obraz 16 - Rádiové spektrografy

K fotografování spektra nebeských objektů se užívá spektrografů, které v optickém oboru jsou spojeny s dalekohledem. V radioastronomii se užívá k pozorování rádiového záření Slunce tzv. dynamického spektrografu. Prvý rádiový spektrograf sestrojil australský radioastronom J. T. Wild v roce 1950. Princip Wildova přístroje spočívá v tom, že přijímač s úzkým pásmem přijímá neustále přeladovanou frekvenci, kterou velmi rychle měníme - několikrát za sekundu - mezi dvěma hodnotami vzdálenými například o jednu oktávu. Je to přijímač, který umožňuje zachytit intenzitu mimořádných jevů v rádiovém oboru (záblesků a vzplanutí) v závislosti na frekvenci. Záznam stopy se provádí na posouvajícím se filmu s časovými značkami. Jestliže sledujeme změny tohoto spektra v čase, dostáváme takzvané dynamické spektrum. Dnes existuje ve světě celkem 11 rádiových spektrografů. Též ondřejovská observatoř má rádiový spektrograf, zkonstruovaný radioastronomickou skupinou. Pracuje v rozsahu 70 - 810 MHz.

- Obr. 17** Vlevo: Přijímací aparatura rádiového spektrografu ve Dwingeloo (Holandsko).
Vpravo: Rádiový spektrograf ve Dwingeloo.

Obraz 18 - Rádiové polarimetry

Polarimetry jsou rádiové teleskopy zvláště uzpůsobené tak, aby bylo možno jimi měřit smysl a stupeň polarizace rádiových vln, pocházejících od jevů sluneční aktivity. Rozeznáváme polarizaci pravotočivou, levotočivou, smíšenou atd. I ondřejovská observatoř vyvíjí polarimetr měřící v rozsahu 470 - 810 MHz.

Obraz 19 - Polarimetr v Neře (Holandsko)

Obraz 20 - Vztahy Slunce - Země

Výzkum vztahů mezi jevy slunečními a pozemskými je důležitým odvětvím astronomie a fyziky Země. Jejich výzkum nevede jen k závěrům teoretickým, nýbrž i ryze praktickým. Slunce neposkytuje Zemi jen nezbytnou energii k životu obyvatel, ale ovlivňuje ionosféru, stratosféru a částečně i troposféru a biosféru. Je známo, že ionizované vrstvy vysoké atmosféry jsou tvořeny převážně ultrafialovým a rentgenovým zářením. Ionosféra se mění v korelaci se sluneční aktivitou. Elektronová hustota ionosférických vrstev D, E a F je úzce spjata s činností Slunce.

Dnes se velmi intenzivně studuje vztah mezi sluneční činností a některými chorobami (např. srdce, nervového systému, krevního oběhu a další).

Vlevo: fading - vymizení příjmu v důsledku erupce a rádiové vzplanutí na 62 a 200 MHz.

Vpravo: Znárodnění možného stavu po erupci v meziplanetárním prostoru. Magnetická porucha, jejíž původ je na Slunci a která se šíří v meziplanetárním prostoru.

Obraz 21 - Zatmění Slunce - rádiový tok

Covington zjistil při částečném zatmění Slunce, při zakrytí velké skupiny slunečních skvrn Měsícem, ostrý pokles rádiového toku na 10,7 cm. Změna toku byla rovněž nalezena nezávisle Lehmanem a Jabsleyem v roce 1949. Rádiový tok - zejména jeho pomalu proměnná složka - závisí na výskytu skvrn na slunečním povrchu.

Na obrázku nahoře zatmění Slunce, pozorované na ondřejpovské observatoři dne 20. května 1966.

Dole: Schematický průběh slunečního zatmění v optickém oboru i v oboru rádiovém. V oboru rádiovém je zřetelný pokles rádiového toku.

Obraz 22- Jas slunečního disku v rádiovém oboru

Zatímco v optickém oboru dochází k ztemnění slunečního okraje, v rádiovém oboru naopak dochází k zjasnění u slunečního okraje.

Obraz 23- Obraz Slunce v optickém a rádiovém oboru

Denně jsou pořizovány obrazy Slunce v optickém a rádiovém oboru. V rádiovém oboru je pořizují stanice ve Fleurs (na 21 cm) a ve Stanfordu (na 9,1 cm). Obrázek Slunce na 21 cm ukazuje zhuštění isofot na rádiovém obraze v místech, kde v chromosféře se nacházejí aktivní centra.

Vlevo: obraz Slunce v optickém oboru (chromosféra). Snímek byl zhotoven montáží protuberančního snímku a snímku slunečního disku v čáře H alfa.

Vpravo: Slunce v rádiovém oboru na vlnové délce 21 cm.

Obrazy 24- 25- Sluneční radioastronomie v ČSSR

Objev rádiové emise z vesmíru Janským nezůstal bez odezvy u československých fyziků a techniků. Druhá světová válka však znemožnila výzkum v tomto směru. Po skončení druhé světové války byly učiněny pokusy k přijímání rádiového záření Slunce provizorními anténami. Pokusy byly úspěšné. Systematická experimentální

práce však byla započata na observatoři v Ondřejově až v roce 1953. V roce 1953 byly získány rádiové lokátory typu Würzburg-Riese s parabolickým zrcadlem o průměru 7,5 m. Postupně se měřilo na vlnové délce 56 cm (1955), 130 cm (1957); přijímač byl přeladěn na vlnovou délku 115 cm (1962) a 37 cm (1959). V současné době se měří na těchto třech vlnových délkách. Svá radioastronomická zařízení doplnil Astronomický ústav ČSAV v Ondřejově rádiovým spektrografem pracujícím v rozsahu 50 - 210 MHz. Rádiový spektrograf byl rekonstruován v roce 1972. Pracuje nyní v rozsahu 70 - 810 MHz. Pokusně se měří polarizace (smysl a stupeň) pomocí polarimetru s parabolickým zrcadlem o průměru 3 m.

Nahoře: záznam vzplanutí na 37 cm, zaznamenaného na ondřejovské observatoři.

Dole: záznam šumové bouře, zaznamenané na ondřejovské observatoři.

Obraz 26 - Treamsdorf

Největší sluneční radioastronomickou stanicí v NDR je Heinrich-Hertz-Institut, observatoř Treamsdorf. Je to klidné místo nedaleko Postupimi, vhodné k radioastronomickým měřením. Přijímacími anténami jsou jednak parabolická zrcadla, jednak Yagiho antény. Měří se na těchto frekvencích: 9500; 2976; 1490; 775; 510; 287; 234; 113; 64; 39,6; 30; 23,5; 15 MHz. Rádiové měření se provádí též v rámci spolupráce socialistických zemí při výzkumu Slunce, již se účastní i Ondřejov.

Některá radioastronomická zařízení - jak vidíme na obrázku - se nacházejí v Heinrich-Hertz-Institutu v Berlíně-Adlershofu.

Obraz 27 - Culgoora

Budova stanice v Culgoora.

Obraz 28 - Culgoora

Velký krok vpřed v radiofyzice Slunce znamenalo uvedení do provozu rádiového heliografu v Culgoora v Austrálii (místo asi 500 km na severozápad od Sydney). Systematické měření s přístrojem začalo v únoru 1968. Přístroj je určen k zaznamenání rádiového obrazu koróny celého Slunce na vlnové délce 3,75 m (80 MHz).

Rádiový heliograf se skládá z 96 parabolických zrcadel o průměru 13 m, rozestavěných v kruhu o průměru 3 km. Obrazy Slunce se pořizují v jednovteřinových intervalech a dvou polarizacích. Rádiový heliograf podává věrný obraz jevů probíhajících v koróně, zobrazuje podrobně sluneční aktivitu, strukturu koróny a její změny během slunečního cyklu. Byl objasněn mechanismus vzplanutí typu II, III, IV. Dnes je možno na heliografu měřit na třech frekvencích: 80 MHz (3,75 m), 160 MHz (1,87 m) a 43 MHz (6,97 m). Vzhledem k velké efektivní ploše heliografu - 6 000 m² - hodí se zařízení rovněž k měření hustoty toku, poloh a úhlových rozměrů rádiových zdrojů a k pozorování záření supernov. Zařízení je pod kontrolou počítače.

Vlevo: průběh rádiových jevů na 3,75 m.

Vpravo: část rádiového heliografu v Culgoore.

Obraz 29 - Nera

Holandská stanice Nera patří k velmi významným stanicím ve světě. Zabývá se především rádiovým výzkumem Slunce.

Vlevo nahoře: rádiový teleskop v Neře.

Vlevo dole: jeden prvek interferometru v Neře.

Vpravo: záznam šumové bouře na 200 MHz pořizovaný v Neře.

Obraz 30 - Green Bank

V popředí ekvatorálně montovaný rádiový teleskop o průměru 29 m. Je v provozu od roku 1959.

Obraz 31 - Harestua

Stanice se zabývá měřením rádiového záření Slunce. Rádiový teleskop v Harestua (Norsko).

Obraz 32 - Floirac

Ve Floirac (Francie) nedaleko Bordeaux se nachází radioastronomická stanice s řadou parabolických radio-teleskopů. Největším zařízením jsou dva rádiové dalekohledy o průměru 25 m. Vedle galaxií se pozoruje i Slunce na frekvenci 930 MHz.

Obraz 33 - Fort Davis

Fort Davis je radioastronomickou stanicí v Texasu (USA), umístěnou ve výšce 1603 m. Měří se zejména rádiové záření Slunce na frekvencích 100 - 580 MHz a 50 - 100 MHz.

Obraz 34 - Humain-Rochefort

Velkou belgickou radioastronomickou stanicí je Humain-Rochefort. Hlavním zařízením je interferometr

o 48 prvcích s průměrem 4 m, sloužící k pozorování rádiových zdrojů. Mimoto se měří rádiové záření Slunce parabolickými zrcadly o průměru 6 a 7,5 m na frekvenci 600 a 408 MHz.

Obraz 35 - Protuberance

Protuberance jsou útvary při slunečním okraji vystupující z chromosféry do koróny podle magnetických siločar a spadající podle siločar opět ke Slunci. Jsou to oblaka vodíku chladnějšího než je okolí. Při eruptivních protuberancích odchází někdy část hmoty do meziplanetárního prostoru. Hustota protuberancí je stokrát až tisíckrát větší než je hustota koróny. Spektrum protuberancí je čárové: známá je zejména Balmerova série vodíku.

* * * *

7220a-76-Mn