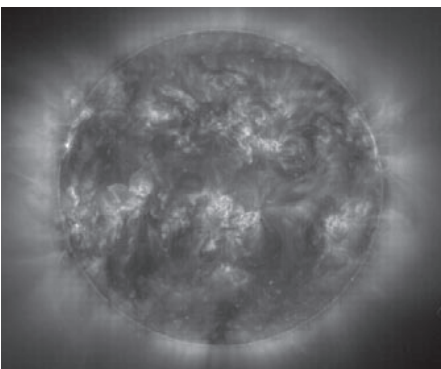
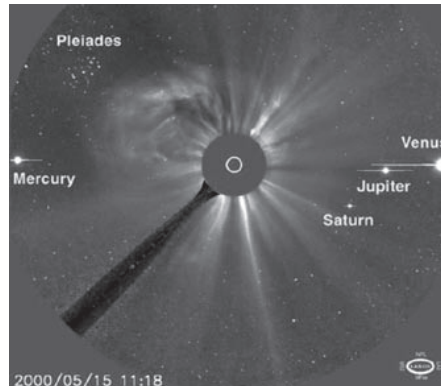


Obr. A1: Yohkoh – „rentgenové“ Slunce

startoval americký satelit SMM (Solar Maximum Mission), který např. kromě registrace tvrdé rentgenové emise s vysokým časovým rozlišením dodal první obrázky těchto rentgenových zdrojů. V tehdejší Sovětském svazu probíhala podobná pozorování na satelitech Interkosmos, Prognoz a nebo Fobos a na těchto satelitních pozorováních se podílel i Astronomický ústav. Velký průlom v oblasti sluneční fyziky způsobil japonský satelit Yohkoh, na kterém byly 4 přístroje, vyvinuté a vyrobené ve spolupráci Japonska, Velké Británie a USA. Snímky Slunce v měkkém rentgenovém oboru měly pro sluneční fyziky téměř šokující kvalitu (obr. A1) a i když satelit po deseti letech přestal v roce 2001 fungovat, jeho data jsou stále užitečná a stále využívána. V roce 1995 byla do libračního bodu L1 vypuštěna evropská sluneční observatoř SoHO, která doposud pracuje a dodává nejenom snímky Slunce v extrémním ultrafialovém oboru (obr. A2), ale i celou řadu dalších parametrů včetně pozorování výronů sluneční hmoty (CME) a nebo pozorování průletu komet v blízkosti Slunce (obr. A3). Americký satelit TRACE, vypuštěný v roce 1998 a stále dodávající data, získává snímky Slunce v extrémním ultrafialovém oboru s velmi vysokým rozlišením 0,5 obloukové vteřiny a tyto snímky ukazují tak jemnou a komplikovanou strukturu magnetických trubic, že je lze považovat za noční mýru teoretiků, kteří se snaží tuto strukturu matematicky modelovat (obr. A4). Jak jsme se již zmínili, Astronomický ústav AV ČR v Ondřejově se zapojil do pozorování Slunce pomocí satelitů ihned, jakmile se naskytla

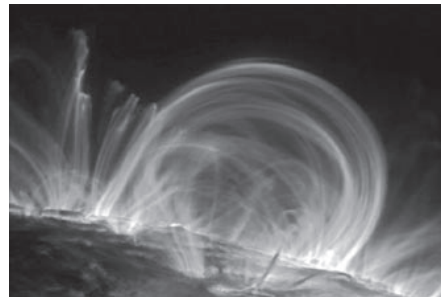


Obr. A2: SoHO – Slunce v čáře 195 Ångströmů



Obr. A3: SoHO – sluneční vítr a planety

první příležitost, tedy na konci šedesátých let v programu Interkosmos. Od té doby až přibližně do roku 1990 se podílel na více než deseti projektech Interkosmos, Prognoz a Fobos, zaměřených na pozorování rentgenové emise Slunce. Po roce 1990 se nám otevřely možnosti spolupráce se státy na západ od nás a podařilo se nám díky spolupráci s ústavem Space Environment Center v Boulderu, USA, získat možnost umístit vědecký přístroj na americký satelit. Tuto možnost jsme získali především proto, že jsme měli dostatek zkušeností v oblasti kosmických technologií, načerpaných během naší dlouholeté spolupráci v rámci programu Interkosmos a také díky tomu, že jsme navrhli přístroj, o jehož výsledky se zajímala i americká Air Force, která financovala vývoj a vypuštění vlastního satelitu. V roce 2000 proto odstartoval první český vědecký přístroj HXRS (Hard X-Ray



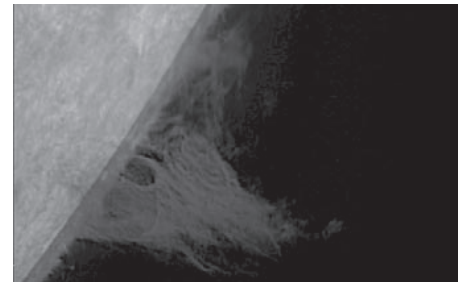
Obr. A4 TRACE – Slunce v čáře 171 Ångströmů

Spectrometer) na satelitu MTL, vypuštěným raketou Taurus ze základny Vandenberg a po dobu tří roků úspěšně měřil s vysokým časovým rozlišením spektrum tvrdé rentgenové emise Slunce (obr. A5). V roce 2002 byl v USA vypuštěn další unikátní přístroj RHESSI, který umožňuje získávat obrázky zdrojů tvrdé rentgenové a gama emise s vysokým prostorovým a spektrálním rozlišením. Posledním hitem slunečních pozorování z kosmu je japonský satelit Hinode, vypuštěný na oběžnou dráhu na konci roku 2006. Na jeho vývoji a výrobě se opět podílely kromě Japonska také USA a Velká Británie. Satelit má na palubě především optický teleskop o průměru zrcadla 0,5 m a může v libovolné čáře optického spektra pozorovat sluneční jevy s rozlišením asi 0,2 obloukové vteřiny (obr. A6). Dalšími přístroji je rentgenový teleskop, pozorující v měkké oblasti



Obr. A5: Přístroj HXRS pro satelit MTL

spektra a XUV spektrometr. Předchozí přehled je pouze malou ukázkou možností, které nám poskytují kosmické technologie při pozorování Slunce. Bez těchto možností by naše znalosti o fyzikálních procesech na naší nejbližší hvězdě byly mnohem menší. I přes obrovské množství napozorovaných dat, která se z přístrojů na satelitech nepřetržitě přenášejí do našich databází, naše znalosti stále ještě nejsou dokonalé a proto tato pozorování budou bezpochyby pokračovat i v budoucnosti; jejich kvalita a tím i vědecká hodnota bude stále narůstat úměrně naší technologické úrovni. ■



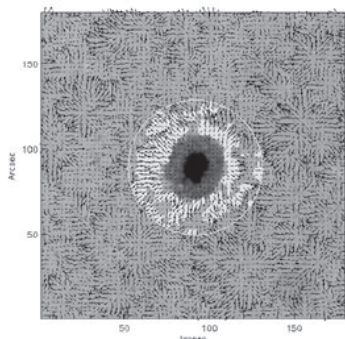
Obr. A6: Hinode – protuberance v čáře H-α.

Dynamika sluneční atmosféry

Michal Švanda, Pavel Ambrož, Michal Sobotka, Mirek Klvaňa

Tímto zajímavým a důležitým tématem se v Ondřejově zabývá skupina *Struktury a dynamiky sluneční atmosféry* (www.asu.cas.cz/~sdsa) spolupracující s řadou odborníků z jiných světových pracovišť. Ze tří vrstev sluneční atmosféry – fotosféry, chromosféry a koróny – je dynamické dění zejména v té spodní vrstvě – fotosféře – řízeno stavem slunečního plazmatu v podpovrchové konvektivní zóně, která k fotosféře bezprostředně přiléhá. Jak již název napovídá, hlavním procesem dominujícím v této vrstvě je konvekce – chaotický způsob přenosu energie s látkou. V případě Slunce je konvektivní zóna opravdu mohutná – ve slunečním tělese zabírá vnějších 30% poloměru, což odpovídá přibližně dvěma třetinám celkového objemu.

V současnosti existují pouze tři metody měření pohybů hmoty nebo struktur ve fotosféře a blízké podfotosférické vrstvě. Nejužitečnější z nich je zejména v poslední době lokální helioseismologie (viz *Astropis* 1/2003), jež jako



Obr. B1: V těsném okolí vyvinuté sluneční skvrny se pozoruje oblast, v níž převažují víceméně středově symetrické pohyby směrem od skvrny – tzv. moat. Pozorované asymetrie v moatu souvisejí s výškou v atmosféře a vývojovým věkem skvrny. Výsledky naznačují, že podpovrchové pohyby v okolí slunečních skvrn mohou být ovlivněny vlastním pohybem sluneční skvrny jakožto útvaru prodírajícího se vrchními vrstvami konvektivní zóny. Tyto výsledky jsou důležitou částí skládačky vedoucí k informacím o celkové stavbě sluneční skvrny a její výškové struktuře.

jednina umožňuje z analýzy projevů zvukových vln postupujících nitrem hloubkovou sondáž.

Alternativou používanou k měření pohybů struktur je metoda local correlation tracking (LCT), jejímž výsledkem je dvojrozměrné vektorové pole. Metoda detekuje pohyby objektů v sekvencích snímků zachycujících stejnou oblast atmosféry v různých časech. LCT není plnohodnotnou alternativou k lokální helioseismologii, spíše jejím doplňkem. Přímé porovnání výsledků obou metod je složitým úkolem často s nejednoznačnými výsledky. Je důležité si uvědomit, že zatímco výsledkem helioseismologické inverze jsou vlastní rychlosti plazmatu, výsledkem použití LCT metody jsou pohyby struktur. Ty jsou produktem dvou obtížně oddělitelných jevů – turbulentní difúze a odnosu struktur proudícím plazmatem.

Celková dynamika konvektivní zóny je téměř neprozkoumaná a ve skutečnosti neznámá s výjimkou velmi mělké vrstvy pod fotosférou. Teprve v posledním desetiletí se ale podařilo na základě helioseismických měření stanovit hloubku konvektivní zóny a její osově symetrickou rotaci a meridionální cirkulaci. U obou těchto základních charakteristik si ale již nejsme jisti, zda hodnoty rychlostí jsou časově konstantní, či zda se jedná jen o epizodu, která se může s časem měnit. Pohyby plazmatu a struktur v různých vrstvách atmosféry se studují zejména s cílem porozumět jejich vazbám k magnetickému poli. Plazma je na Slunci ve vysokém stupni ionizace, proto jsou magnetická pole v něm „zamrzlá“ – pohybující se plazma s sebou unáší zamrzlé magnetické pole a naopak. Pochopení toho, jakým způsobem jsou magnetická pole vynášena do fotosféry, přerozdělována a narušována pohyby plazmatu, je důležitým odrazovým můstkem pro možnost předpovídání aktivních procesů, probíhajících za hranicemi fotosféry.

Skutečně velkorozměrové pohyby zahrnují sluneční rotaci, o níž víme, že je diferenciální (rovník rotující rychleji než póly), a meridionální cirkulaci, pomalé podpovrchové roztékání od rovníku k pólům. Na druhé straně rozměrové klasifikace pak stojí téměř chaotické pohyby jednotlivých umbrálních bodů uvnitř umbrly slunečních skvrn. Stále není úplně jasné, zda jsou výsledky získané s různým prostorovým rozlišením propojeny

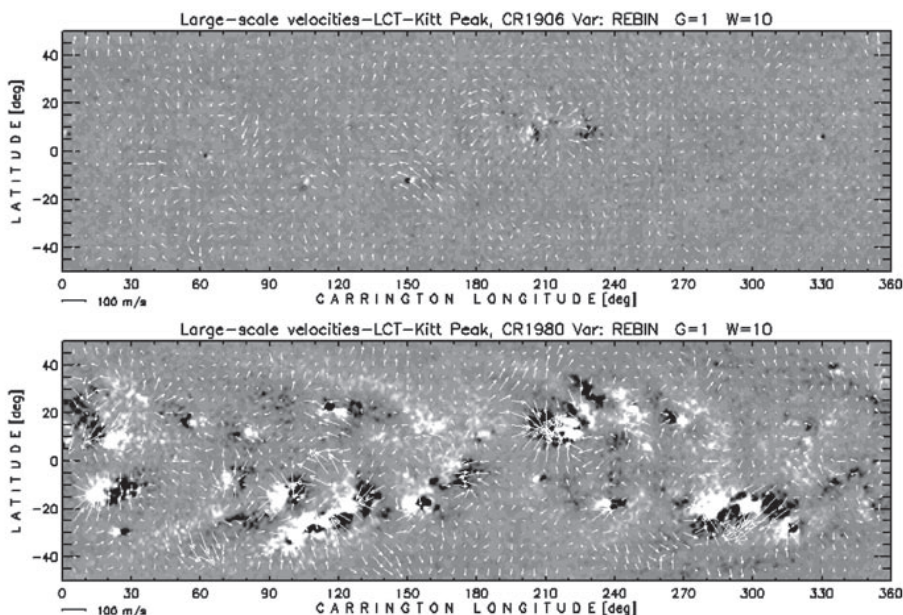
určitým typům pohybů. Práce konzistentně studující dění s různým prostorovým rozlišením současně čekají na vývoj lepších přístrojových experimentů, zejména těch družicových.

Nejen s pomocí techniky LCT tak sluneční fyzikové skupiny SDSA zkoumají dění ve fotosféře. Pozorování pořízená s vysokým rozlišením na dalekohledech na Kanárských ostrovech byla použita pro studium rychlostních polí ve slunečních skvrnách a jejich těsném okolí. Cílem byly zejména jemné struktury v umbře slunečních skvrn. Mimo umbrálních bodů, které se často organizují do stabilnějších útvarů připomínajících degenerované granule, byly pozorovány i podlouhlé struktury s temnými středovými kanály. Na hranicích umbrly se umbrální body pohybují směrem dovnitř a vykazují značné podobnosti k jiným jemným útvarům vyskytujícím se v penumbře – penumbrálním zmům. Vysvětlení těchto pozorovacích fakt je nyní na astronomech zabývajících se počítačovými simulacemi chování plazmatu v silných magnetických polích.

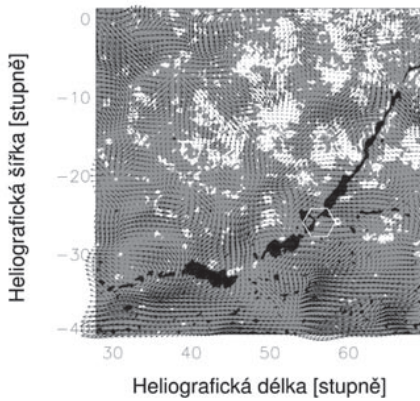
Pro velkorozměrovou dynamiku konvektivní zóny lokální měření s vysokým rozlišením nestačí, je zapotřebí popsat rozsáhlé oblasti slunečního povrchu a ideálně by bylo nahlédnout i do větších hloubek pod fotosféru k samému dnu konvektivní

zóny. Velkorozměrová rychlostní pole jsou podle definice odvozována na charakteristických rozměrech mnohem větších než 100 Mm, často až na 400–500 Mm a s dobou života přesahující 30–60 dní. Rozměrově i časově tomu odpovídající jediný druh homogenního pozorovacího materiálu, který je k dispozici za dlouhé období posledních tří cyklů sluneční činnosti, jsou synoptická pozorování slunečních magnetických polí. Jsou k dispozici alespoň ze dvou zdrojů, magnetické struktury jsou časově proměnlivé a pokud přijmeme předpoklad „zamrzání“ magnetického pole, jsou změny v rozložení a tedy rychlosti transportu magnetického toku odvozené LCT metodou obrazem velkorozměrového proudění. Materiálem vhodným na krátkodobější a také helioseismické studie jsou např. celodisková pozorování družicového kombajnu SoHO. Oba typy materiálu se vyznačují nižším prostorovým rozlišením, které vede k částečnému odstranění rušivých lokálních rychlostí. Lokální rychlosti na granulární škále dosahují stovek metrů za sekundu. Velkorozměrové rychlosti poskytující informace o globálních pohybech plazmatu a o celkovém přerozdělování magnetického pole ve fotosféře jsou však i o více než řád slabší – jedná se o desítky a dost možná i jednotky metrů za sekundu. Extrakce signálu utopeného v o řád významnějším „šumu“ není jednoduchá a vyžaduje mnoho operací spojených s předzpracováním původních dat. Naštěstí matematické postupy dovolují za splnění určitých předpokladů slabý signál zdůraznit a šumové složky potlačit.

Zásadním výsledkem studií je závěr, že velkorozměrová rychlostní pole jsou na Slunci přítomna a že se jejich struktura mění v rámci cyklu aktivity. Z dlouhodobého hlediska jsou důležité osově symetrické složky diferenciální rotace a meridionální



Obr. B2: „Sub-surface weather“ je termín používaný pro mapy podpovrchových toků ve fotosféře s odstraněnou diferenciální rotací a často i meridionální cirkulací. Jejich topologie je odlišná v období slunečního minima (nahore) a slunečního maxima (dole). Patrně jsou náznaky konvergentních toků v aktivních oblastech (na pozadí jsou struktury magnetického pole).



circulace. Otázkou zůstává, zda globální proudění obsahuje také osově nesymetrickou složku. Všechny doposud provedené analýzy ukazují že taková složka existuje a že se v průběhu cyklu aktivity systematicky mění. Ve prospěch její detekce mluví zejména pozorování torzních oscilací. Torzními oscilacemi jsou nazývány pásy zvýšené průměrné zonální rychlosti o 5–10 m/s o šířce přibližně 5 stupňů, které se s cyklem aktivity posouvají směrem k rovníku. Zřejmě tedy souvisejí s výskytem silných lokálních magnetických polí, které se s cyklem aktivity chovají velmi podobně. Přestože dobrý teoretický model stále chybí, nejnovější studie naznačují, že pás torzních oscilací by mohl přímo souviset se sbíhavými pohyby v rozsáhlých aktivních oblastech. Měření ukazují, že oblasti magnetických polí se obecně vůči svému okolí pohybují rychleji, což může souviset s výškovou strukturou magnetických polí v horní vrstvě konvektivní zóny.

Rychlostní struktury ve fotosféře a v podfotosférických vrstvách jsou stále žhavým i ožehavým tématem sluneční fyziky po posledních čtyřicet let. Pohyby jsou základním stavebním kamenem modelů magnetického dynamo. Odpověď na mnohé otázky vycházející z pozorování a měření těchto struktur však dají zřejmě až dokonalé numerické modely. Mnohé informace mohou poskytnout i podobné studie u jiných hvězd, které jsou již díky novým pozorovacím metodám v počátcích svého vývoje. ■

Pozorování Slunce s vysokým rozlišením

Michal Sobotka

Jedním z důsledků fyzikálních podmínek panujících ve sluneční atmosféře je fakt, že mnoho procesů probíhá na velmi malých prostorových škálách a vznikají drobné struktury o velikosti pouhých několika desítek nebo stovek kilometrů. Proto se snažíme pozorovat Slunce s co nejvyšším prostorovým rozlišením. K tomu nám slouží dalekohledy s velkým průměrem objektivu a účinné matematické metody pro rekonstrukci obrazu.

Trochu teorie

Prostorové rozlišení je omezeno samotným dalekohledem a atmosférou Země. Představte si, že

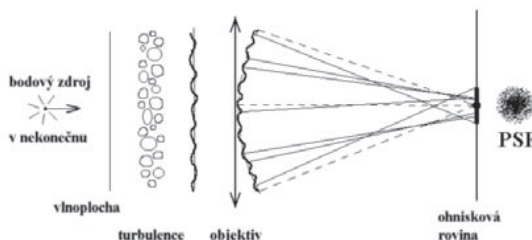
Obr. B3: Měření povrchového horizontálního rychlostního pole pod rozsáhlým filamentem, který se náhle rozpadl, prokázalo změnu charakteru pohybů plazmatu během eruptivní fáze. Proudový kanál detekovaný v době před erupcí podél filamentu po rozpadu zcela zmizel. Proudový kanál je teoretickými modely považován za jednu z fotosférických struktur nutných ke vzniku filamentu. Velikost stříhových pohybů detekovaných v místě, kde rozpad filamentu začal, se zvětšovala v době před erupcí. Stříhové pohyby ukládaly magnetickou energii do nestabilní konfigurace koronálního magnetického pole. Po erupci rychlostní stříh výrazně poklesl. To svědčí o změně nestabilní situace plné napětí v chromosférickém a koronálním magnetickém poli do uvolněného stavu prostřednictvím rekonexe spojené se sluneční erupcí a koronálním výronem hmoty. Pozorování podporují teoretické předpoklady, podle nichž speciální typy fotosférických pohybů mohou ovlivňovat aktivní procesy nebo být přímo jejich spouštěčem.

světlo k nám přichází z bodového zdroje (např. hvězdy) „v nekonečnu“ ve formě rovinných vlnoploch. Turbulence v teplotně nehomogenní atmosféře Země náhodným způsobem narušuje rovinnost vlnoploch. Navíc, dalekohled s konečným průměrem objektivu propustí jen malou část „nekonečné“ vlnoplochy, což se projeví jako známý ohybový jev, případně přidá další deformace způsobené optickými vadami. Výsledkem je, že v ohniskové rovině pozorujeme místo bodového zdroje určitě difúzní rozdělení intenzity, které se nazývá *bodová rozptylová funkce* (PSF, point-spread function, obr. C1). V případě plošného zdroje, jakým je sluneční fotosféra, je obraz každého bodu zdroje rozmyt vlivem PSF. Je jasné, že k dosažení vysokého rozlišení musí být PSF co nejužší.

Sama PSF je konvolucí dvou složek: PSFT dalekohledu a PSFA atmosféry. PSFT ideálního dalekohledu, Airyho funkce, má úzké jádro obklopené difrakčními kroužky. Dá se charakterizovat úhlovou vzdáleností mezi maximem (středem) a prvním minimem (temnou oblastí mezi jádrem a prvním difrakčním kroužkem): $a = 1.22 \lambda / D$, kde λ je vlnová délka dopadajícího světla a D je průměr objektivu dalekohledu. Mez rozlišení a klesá (a obraz se zlepšuje) se zvětšujícím se průměrem objektivu a roste s prodloužením vlnové délky. V případě atmosférické PSFA je situace daleko složitější. PSFA se neustále mění v čase a je velmi obtížné ji určit. Její charakteristikou je *Friedův parametr r* , který vystupuje v podobné roli jako D v PSFT dalekohledu. Friedův parametr je vlastně průměr dalekohledu umístěného mimo atmosféru, který by dával stejné rozlišení jako hypotetický dalekohled o nekonečném průměru pozorující skrz zemské ovzduší. Čím je r větší, tím je lepší kvalita obrazu. V našich podmínkách r většinou nepřesáhne 5–10 cm a na místech s nejlepším astroklimatem na světě dosahuje 30 cm.

Jak dosáhnout co nejvyššího rozlišení

Potřebujeme velký a kvalitní dalekohled postavený na správném místě. Současné velké sluneční dalekohledy mají průměr objektivu okolo



Obr. C2: Část observatoře Roque de los Muchachos, La Palma, Kanárské ostrovy. První zleva je holandský sluneční dalekohled DOT o průměru 45 cm, třetí zleva je metrový švédský refraktor SST vybavený adaptivní optikou. Ostatní přístroje slouží k nočnímu pozorování.

50–100 cm, což při $\lambda=400$ nm odpovídá mezi rozlišení 0,1"–0,2", tj. 70–150 km na povrchu Slunce. Ovzduší musí být průzračné a především teplotně homogenní, aby Friedův parametr byl co největší. Sluneční observatoře, které splňují tyto podmínky, se dají snadno vyjmenovat: Kanárské ostrovy (obr. C2) a Pic du Midi v Evropě, Sacramento Peak a Big Bear v Severní Americe.

Po ukončení pozorování se snímky opravují o vliv PSF. Tato fáze zpracování se nazývá *restaurace obrazu*. Známe-li tvar PSF, můžeme vytvořit matematický filtr, který rozmytí obrazu do značné míry odstraní. PSFT ideálního dalekohledu dobře známe. V současné době se úspěšně používají různé metody, např. *skvrnková interferometrie a fázová diverzita*, které umožňují korigovat i PSFA atmosféry. Je však velmi žádoucí mít možnost opravovat deformace vlnoplochy již přímo během pozorování. Ke korekcím pohybu, distorze obrazu a zaostření slouží *adaptivní optika*. Ve světelném svazku je umístěno deformovatelné zrcátko, které má pružný povrch. Pohyby a průhyb zrcátka jsou řízeny signály CCD kamery se speciální optikou, která sleduje deformace vlnoplochy. Systémy adaptivní optiky, které jsou schopny kompenzovat vliv atmosférické turbulence, pracují na frekvencích 100–1000 Hz. Tyto systémy se začaly používat teprve nedávno, protože k jejich funkci je nutný velmi výkonný počítač. Sluneční daleko-

Obr. C1: Světlo přichází od vzdáleného bodového zdroje v rovinných vlnoplochách. V turbulentní atmosféře Země se vlnoplochy deformují a dále se porušují při průchodu dalekohledem. V důsledku toho se světlo v ohnisku dalekohledu nesoustředí do bodu, ale do difúzní plošky, která je charakterizována rozptylovou funkcí (PSF).