

Video-spektroheliograf pro měření fotosférických rychlostních polí

*Miroslav Klvaňa, Astronomický ústav Akademie věd České republiky,
observatoř Ondřejov, Česká republika, mklvana @asu.cas.cz
Václav Bumba, Astronomický ústav Akademie věd České republiky,
observatoř Ondřejov, Česká republika, bumba @asu.cas.cz
Adriana Garcia, Observatorio Astronomico, Universidade de Coimbra,
Coimbra, Portugal, adriana @mat.uc.pt*

Abstrakt

Modelování 3D struktur fotosférických rychlostních polí vyžaduje simultánní informace o rychlostních polích v různých výškách sluneční fotosféry. Tyto informace je možné získat analýzou dat 3D spektrofotometrie ve více spektrálních čarách. K tomuto účelu vyvíjíme video-spektroheliograf. Uvádíme možnosti, které nám popisovaný systém poskytuje, použitou metodu zpracování spektrálních čar a první výsledky, získané ze spekter, pořízených spektrografem astronomické observatoře university v Coimbre.

1. ŘEŠENÁ PROBLEMATIKA

Výzkum rychlostních polí ve sluneční fotosféře prostřednictvím 3D spektrofotometrie zaměřujeme v poslední době na získávání informací o rozložení rychlostních polí v různých výškách sluneční fotosféry. Dosavadní, nám dostupné informace o rychlostních polích, jsme získávali prostřednictvím fotoelektrického magnetografu na základě sady měření, provedených postupně za sebou v různých spektrálních čarách. Ukazuje se, že vzhledem k malému rozdílu hloubek generování fotosférických spektrálních čar jsou chyby v rychlostních polích, získaných metodou postupných měření natolik podstatné, že přímo znemožňují některé analýzy prostorové konfigurace rychlostních polí. Časový posuv mezi měřeními téže oblasti v různých spektrálních čarách vede k pozičním a funkčním nepřesnostem v získaných datech. Proto jsme se rozhodli použít techniku simultánní registrace vybraných spektrálních čar během posuvu slunečního disku po vstupní štěrbině spektrografu. Tato metoda umožňuje přesnou lokalizaci bodů slunečního disku na vstupní štěrbině spektrografu a jejich přesné přiřazení obrazu spektrálních čar. Zpracování takto získaných spekter umožňuje vykreslení spektroheliogramů nejen klasického typu ve středu spektrální čáry, ale i v jejích křídlech. Kombinací takto získaných dat a vhodného programového vybavení jsme schopni měřit například rychlostní pole v různých hloubkách sluneční atmosféry.

2. MOŽNOSTI VIDEOTECHNIKY

Široké uplatnění videoechniky v komerční oblasti způsobuje rychlý vývoj videosystémů, zvyšuje jejich kvalitu a snižuje cenu. Tím se stávají zajímavým technickým prostředkem, který umožňuje stále širší uplatnění i v oblasti astronomie. Vzhledem k vysoké ceně speciálních CCD kamer, určených pro astronomii, jsme při zpracování spektrálních čar použili podstatně levnější videosystém s vysoce citlivou videokamerou.

3. VLASTNOSTI VIDEOSYSTÉMŮ

Videosystém pro zpracování obrazu spektra se skládá ze CCD kamery a počítače, vybaveného kartou pro digitalizaci videosignálu a ukládání digitalizovaných dat do počítače. Videosystém by měl pracovat v reálném čase a ukládat data s maximálním rozlišením, které je videosignál schopen přenést. Kvalitní systém je schopen ukládat 25 digitalizovaných obrazů za sekundu v plném rozlišení 768x576 bodů. Vzhledem k tomu, že pracujeme v monochromatické oblasti, jsou digitalizované hodnoty osmibitové, to znamená, že měřené hodnoty se nalézají v číslicovém rozsahu 0 – 255. Tento rozsah je pro záznam měřených jasů malý a jeví se nám jako určitý nedostatek, komplikující zpracování kontrastních obrazů. Citlivost současných černobílých videokamer dosahuje 0,0035 lux. Pro práci ve spektrografu tato citlivost vyhovuje.

4. VLASTNOSTI CCD ČIPŮ VIDEOKAMER

Na základě maximální dosažitelné citlivosti CCD čipu a nároků na úpravu optického systému jsme zvolili CCD kameru WAT-902H s velikostí čipu 1/2 palce s následujícími parametry [1]:

| | |
|--------------------------------|-------------------|
| počet efektivních pixelů CCIR: | 752 (H) x 582 (V) |
| velikost pixelu pro CCIR [μ]: | 8.6 (H) x 8.3 (V) |
| aktivní plocha čipu [mm]: | 6.4 (H) x 4.8 (V) |
| využitelná plocha čipu [mm]: | 6.2 (H) x 4.6 (V) |
| citlivost čipu použité kamery: | 0.0003 lx |

5. POŽADAVKY NA OPTICKÝ SYSTÉM

Velikost čipu CCD kamery spolu s konečným počtem digitalizovaných bodů klade nové požadavky na optický systém dalekohledu i spektrografu. Většina stávajících dalekohledů a spektrografů byla původně konstruována pro záznam spekter na fotografickou emulzi. Pro porovnání emulze a CCD čipu vezměme klasické rozlišení fotografické emulze 100 čar na mm a velikost pixelu na CCD čipu cca 8μ. Kupodivu vidíme, že rozlišení je v obou případech přibližně stejné. Rozdíl při aplikaci obou systémů je dán tím, že zatím co technologie výroby emulzí je dokonale zvládnutá a není problém vytvořit velkou citlivou plochu, rozměry CCD čipu jsou značně omezené. Proto optické systémy, navrhované pro fotografické emulze, pracují se značnou rezervou vzhledem k rozlišovací schopnosti emulze a jsou konstruovány pro mnohem větší zorná pole.

Z hlediska požadavků na využití informace, obsažené ve spektru, jsou pro nás nejdůležitější rozlišení obrazu podél spektrální čáry a velikost okolí spektrální čáry ve směru disperze. Teoretické rozlišení dalekohledu $\Delta\varphi$ v obl.sec je pro střední pásmo vlnových délek dáno průměrem jeho objektivu D_{dal} v mm:

$$\Delta\varphi = 122 / D_{dal} \quad (1)$$

6. PŮVODNÍ OPTICKÝ SYSTÉM

Použitý optický systém se skládá z horizontálního dalekohledu a spektrografu. Čočkový objektiv dalekohledu o průměru 250 mm s ohniskem $F_D = 4060$ mm je napájen horizontálním coelostatem. Maximální poloměr slunečního disku na obloze je $R_{max} = 978'' = 0,2717^0$. V tomto případě bude maximální poloměr slunečního disku na vstupní šterbině spektrografu:

$$y_{0max} = F_D \cdot \text{tg}(0,2717) = 19,25 \text{ mm} \quad (2)$$

Spektrograf je sestaven z čočkového kolimátoru s ohniskem $f_0 = 1300$ mm a průměrem $D_0 = 150$ mm, reflexní difrakční mřížky a čočkového kamerového objektivu $s.f_1 = 3000$ mm a $D_1 = 132$ mm.

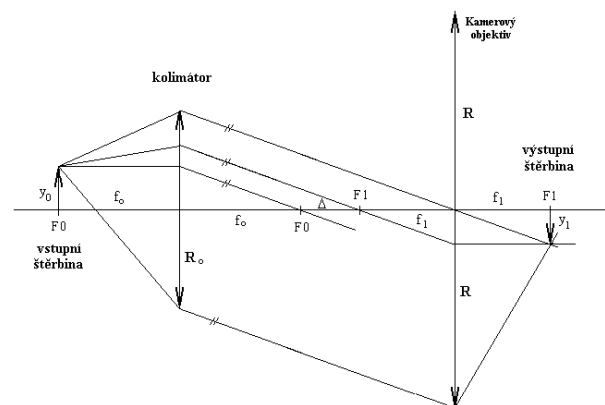
Jak vidíme z obr.1, vertikální zvětšení Z , kolmé ke směru disperze, bude dáno výrazem (3):

$$Z = \frac{y_1}{y_0} = \frac{f_1}{f_0} \quad (3)$$

Dosazením stávajících ohniskových vzdáleností do (3) dostáváme $Z = 2,3$ a maximální výška spektrální čáry h_{max} , odpovídající námi použitému slunečnímu průměru, bude

$$h_{max} = 2 y_{1max} = 2 Z y_{0max} \quad (4)$$

Po dosazení hodnot do výrazu (4) dostáváme pro původní konstrukci maximální výšku spektrální čáry $h_{max} = 88,6$ mm.



Obr.1: Schéma optického systému, popisující vertikální zobrazení ve spektrografu, kolmé na směr disperze.

7. ÚPRAVA OPTICKÉHO SYSTÉMU

Vzhledem k tomu, že větší z obou využitelných rozměrů půlpalcového čipu je pouze 6.2 mm, bude třeba stávající zvětšení upravit. Nejjednodušší úpravou z hlediska zásahu do stávající konstrukce celého zařízení je výměna kamerového objektivu. Upravená výška spektrální čáry, kterou je možno celou zobrazit na CCD čip, bude $h_{upr} = 6,2$ mm. Požadované zvětšení pro zobrazení celého Slunce, vyplývající z této podmínky je podle (3)

$$Z_{upr} = y_1 / y_0 = h_{upr} / 2y_{0max} = 0,16104 \quad (5)$$

a ohnisková vzdálenost nového, upraveného kamerového objektivu pak podle (3) bude $f_{1upr} = 209$ mm.

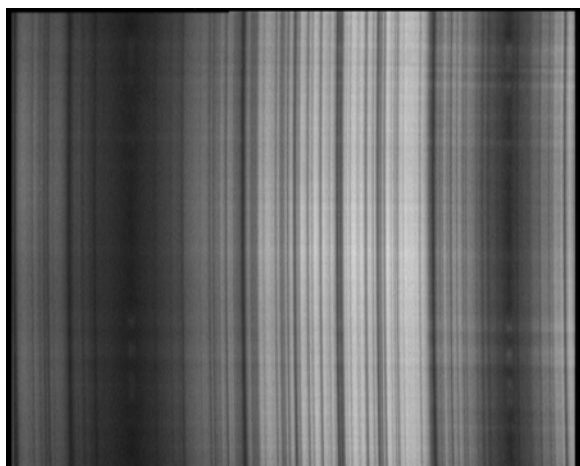
Podle vzorce (1) je teoretické rozlišení dalekohledu 0,5 obl. sec. Praktické rozlišení v daných pozorovacích podmínkách je 1 – 2 obl.sec. Pro dodržení vzorkovacího teorému by bylo třeba zvolit hustotu vzorkování alespoň dva vzorky na obloukovou sekundu, to znamená v nejhorším případě 1956 vzorků na sluneční průměr. Vlastností videosystému nám však dovolují maximální vzorkovací frekvenci pouze 768 vzorků, to znamená 2,5 krát méně. Z toho vidíme, že tento nejjednodušší navrhovaný způsob řešení zdaleka není vhodný pro zobrazení celého slunečního disku.

Pokud plně využijeme maximální rozlišovací schopnost videosystému 768 vzorků na řádek obrazu,

můžeme při reálném rozlišení dalekohledu 1 obl.sec vzorkovat spektrální čáru dlouhou 384 obl.sec, což na čipu kamery představuje 6,2 mm.

Poloměr celého slunečního disku bude v tomto případě $6,2 \times 978 / 384 = 15,79$ mm. V takovém případě bychom v našem optickém systému bude potřebné zvětšení ve spektrografu $Z = 15,79 / 19,25 = 0,82$. Dosazením ohniskové vzdálenosti kolimátoru a požadovaného zvětšení ve spektrografu do (3) dostáváme ohniskovou vzdálenost objektivu CCD kamery $f_l = 1066$ mm. Objektiv s touto ohniskovou vzdáleností umožňuje ve spojení s klasickou videokamerou digitalizovat spektrum, jehož výška odpovídá 384 obl.sec. obrazu Slunce na vstupní štěrbině spektrografu. Pokud bychom tímto způsobem chtěli pořizovat video-spektroheliogramy celého Slunce, museli bychom sluneční disk skanovat nejméně v pěti na sebe navazujících řezech.

Pokud nepožadujeme rychle proměřit celý disk, ale postačí nám spektroheliogramy aktivních oblastí, je z hlediska prostorové rozlišovací schopnosti tato cesta docela dobře použitelná.



Obr.2: Příklad jednoho snímku spektra z dvoutisícové série snímků, pomocí nichž můžeme sestavit spektroheliogram ve vybrané vlnové délce. Vertikálně jsou umístěny různé body slunečního disku, nacházející se právě na vstupní štěrbině spektrografu, horizontálně je vykresleno jejich spektrum. Zleva je čára CaII-K, zprava CaII-H.

8. REGISTRACE SPEKTER

První varianta zkušební video-spektroheliografu byla sestavena z kamerového objektivu s ohniskovou vzdáleností $f_l = 500$ mm, již popisované CCD videokamery a frame grabberu, digitalizujícího videosignál v reálném čase a v plné kvalitě. Princip měření je totožný s klasickou metodou, tzn. během pohybu obrazu Slunce po vstupní štěrbině spektrografu registrujeme průběžně obraz zvolené spektrální čáry včetně jejího okolí.

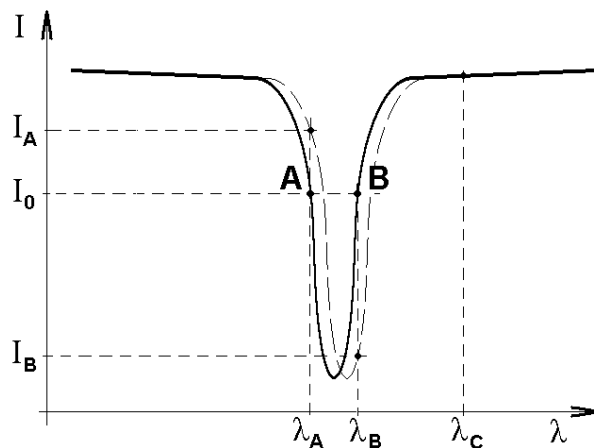
Jak si můžeme podle výše popisovaného postupu odvodit, prostorová hustota vzorkování podél spektrální čáry odpovídá za těchto podmínek jednomu vzorku na

každou obl. sec obrazu. Rychlost pohybu obrazu Slunce po vstupní štěrbině spektrografu jsme zvolili takovou, aby hustota vzorkování měřené oblasti slunečního disku byla prováděna rovněž po jedné obl. sec. Při dané frekvenci videosignálu 25 snímků za sec. jsme segment slunečního disku, vysoký cca 820 sec a zabírající na šířku celý sluneční disk, registrovali přibližně 80 sec. Během této doby jsme uložili přibližně 2000 snímků zvolené spektrální čáry včetně jejího okolí. Hlavním cílem bylo získat materiál pro vytvoření spektroheliogramu – obrazu segmentu slunečního disku ve zvolené vlnové délce.

9. KLASICKÝ SPEKTROHELIOGRAM

Jednotlivé digitalizované snímky (obr.3) obsahují zvolenou spektrální čáru včetně jejího okolí. Každý ze série snímků odpovídá jiné poloze slunečního disku na vstupní štěrbině spektrografu, to znamená jiným bodům slunečního disku.

Vzhledem k vysoké rychlosti měření můžeme zanedbat pohyby spektrální čáry v obraze, způsobené dlouhodobějšími změnami a proto předpokládáme, že škála vlnových délek v každém snímku je stejná a je pevně vázána k jeho okrajům. Jestliže nyní v obraze spektra vybereme určitou vlnovou délku (vertikální pás intenzit v obr.2, kolmý na směr disperze) a tyto intenzity budeme skládat vedle sebe do nového obrazu v pořadí, totožném s pořadím registrace obrazů spektra a odpovídající tím pohybu segmentu obrazu Slunce po vstupní štěrbině, dostaneme obraz této části slunečního disku ve zvolené vlnové délce – spektroheliogram.



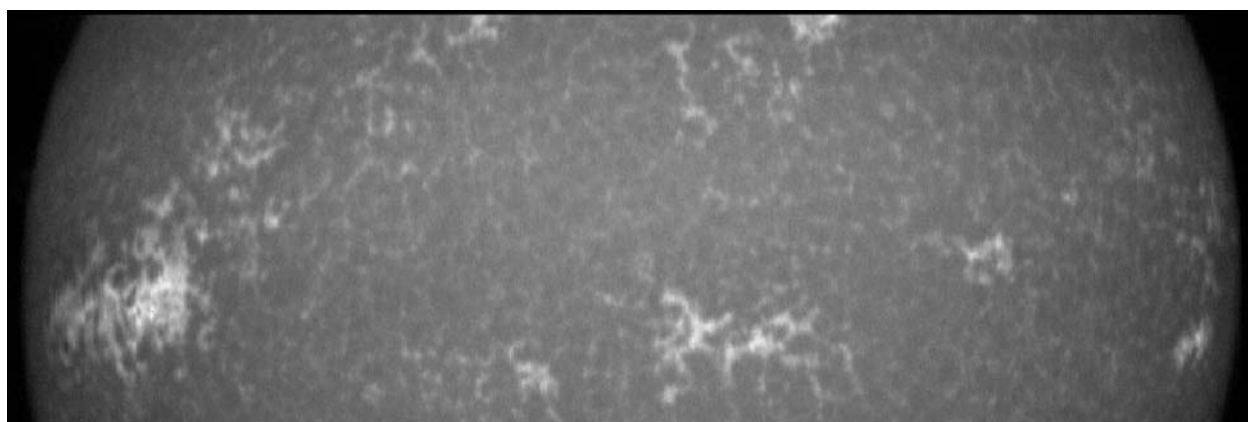
Obr.3: Intenzitní profil jedné ze spektrálních čar na obr.2. Základní poloha spektrální čáry je vykreslena plně. Čára, posunutá vlivem dopplerovských rychlostí, je zobrazena čárkovaně.

10. POSTUP PŘI ZPRACOVÁNÍ

Pokud budeme spektroheliogramy sestavovat právě popsaným způsobem, nebudou výsledky dobré. Jednak zdaleka nevyužijeme už i tak malého číslicového rozsahu v rozmezí 0 – 255 pro popis rozsahu měřených



Obr.4: Spektroheliogram části slunečního disku, pořízený v kontinuu spektra. Na obou okrajích disku vidíme fakulová pole a sluneční skvrny na jeho východním okraji.



Obr.5: Spektroheliogram části slunečního disku, pořízený ve středu spektrální čáry CaII-K3. Vidíme zde supergranulární síť a výrazná zjasnění, korespondující se silným magnetickým polem aktivních oblastí. Oblast je identická s oblastí na obr.4.



Obr.6: Spektroheliogram části slunečního disku, pořízený ve středu spektrální čáry H α . Kromě filamentů jsou zde vidět zjasnění v aktivních oblastech a náznak chromosférických struktur. Jedná se zde o jinou oblast slunečního disku.

intenzit záření a jednak bude výsledný obraz z důvodu malého množství světla ve spektrografu zatížen značným šumem.

Kvalitu obrazu zlepšujeme již při zpracování spekter automatickým nastavením měřených hodnot do maximálního možného rozsahu a lokální, směrově aplikovanou filtrací spektrální čáry.

Příklady spektroheliogramů, získaných touto metodou v kontinuu spektra, v kalciové čáře CaII-K3 a ve vodíkové čáře H α jsou uvedeny na obr.4–obr.6.

Jak je vidět na zobrazených spektroheliogramech, podařilo se nám již zmíněným způsobem snížit hladinu šumů na přijatelnou úroveň. Rozlišovací schopnost spektroheliogramů je v daném případě dána kvalitou pozorovacích podmínek, které v té době nebyly právě

nejlepší. Úpravou stávajícího software se pokusíme ještě zvýšit jejich kontrast.

11. RYCHLOSTNÍ POLE

Vhodnou kombinací spektroheliogramů různých vlnových délek můžeme poměrně snadno zjistit kvalitativní rozložení dopplerovských rychlostních polí v oblasti spektroheliogramu.

Princip metody je velmi jednoduchý: Sestavíme dva spektroheliogramy pro vlnové délky λ_A a λ_B , umístěné v křídlech spektrální čáry, vybrané pro měření dopplerovských rychlostí (viz obr.3). Pokud je spektrální čára v základní pozici (plná čára), jsou intenzity obou spektroheliogramů v bodech A a B rovny intenzitě I_0 .

Jakmile se v důsledku dopplerovských pohybů spektrální čára vychýlí ze základní polohy (čárkovaná čára), intenzita v daném bodě každého z obou spektroheliogramů se změní z I_0 na I_A a I_B . Rozdíl obou intenzit v daném bodě bude úměrný velikosti posuvu spektrální čáry, tzn. dopplerovské rychlosti v daném místě slunečního disku. Výsledný obraz dopplerovského rychlostního pole získáme sečtením negativu prvního dopplerogramu s pozitivem druhého dopplerogramu.

Protože však v daném procesu figuruje profil spektrální čáry, nebude tato závislost lineární. Prostý rozdíl nám dá pouze kvalitativní informaci. Kvantitativní informace o dopplerovských rychlostech dostaneme teprve po aplikaci kalibrační křivky, zahrnující profil konkrétní spektrální čáry a eliminující vliv změn jasu daného bodu v kontinuu spektra.

Takto je možno získat rychlostní pole v určité hloubce sluneční fotosféry. Vzhledem k tomu, že křídla spektrálních čar vznikají v různých hloubkách, můžeme tuto vlastnost využít k sondování rychlostních polí v různých hloubkách. Změnou vzdálenosti bodů A a B od středu spektrální čáry můžeme tuto hloubku měnit. Pokud budou tyto body blízko jejího středu, popisujeme nejvyšší vrstvy fotosféry a s rostoucí vzdáleností bodů od středu spektrální čáry se budeme dostávat do stále hlubších fotosférických vrstev.

Uvedené operace jsou poměrně náročné na kvalitu dat v datovém souboru a proto by bylo vhodné pracovat s vyšším funkčním rozlišením než je 256 hodnot, které umožňuje klasický videosystém.

Cesta zlepšení vlastností videosystémů zvýšením jejich funkčního rozlišení však není reálná, protože z hlediska jejich klasického využití není potřeba tento parametr měnit. Rozhodli jsme se proto v nejbližší době vyzkoušet i klasickou CCD kameru, abychom posoudili rentabilitu nutných vysokých nákladů.

12. MOŽNOSTI KLASICKÉ CCD KAMERY

Aplikace klasické černobílé CCD kamery představuje nepoměrně vyšší finanční náklady. Na druhou stranu však taková kamera poskytuje kvalitnější data a je na nás, kterou cestu zvolíme. Pro srovnání

uvádíme základní parametry klasické kamery CCD-1300LN [2]:

| | |
|-----------------------|----------------------|
| počet pixlů: | 1280(H) x 1024(V) |
| rozměr pixlů: | 6,7 x 6,7 mikronů |
| počet bitů: | 12 |
| aktivní plocha: | 8,5 x 6,8 mm |
| vzorkovací frekvence: | max. 12,5 snímku/sec |

Je zřejmé, že kromě poloviční rychlosti vzorkování jsou všechny uvedené parametry výhodnější. Prostorové rozlišení se díky větším rozměrům čipu téměř zdvojnásobí, což je značná výhoda, která, i když ne zcela ideálně, dovoluje snímat najednou celý sluneční disk. Hlavní výhodou je však dvanáctibitová digitalizace, umožňující místo původních 256 hodnot používat pro digitalizaci 4096 hodnot.

Při zachování původního optického systému by podle výrazu (3) měl mít kamerový objektiv ohniskovou vzdálenost 574 mm.

ZÁVĚR

Spektroheliogramy, získané při pozorování našim video-spektroheliografem během našeho pobytu na observatoři Astronomického ústavu university v Coimbre ukazují, že získávání filtrogramů touto cestou je možné. Z důvodů technických omezení jejich kvalita zatím nedosahuje úrovně kvalitních spektroheliogramů, registrovaných klasickou cestou na fotografickou emulzi, pozorování touto metodou je však podstatně jednodušší a vyhovuje pro běžné sledování sluneční aktivity.

V současné době máme v úmyslu rozšířit zpracování naměřených sérií spektrálních čar, určených pro vytváření filtrogramů v různých vlnových délkách, na stanovení dopplerovských rychlostních polí v různých hloubkách sluneční fotosféry.

Použití klasické CCD kamery pro tyto účely má ve srovnání s videokamerami své nesporné výhody, spočívající v širších technických možnostech. Cena takového zařízení je však minimálně dvacetkrát vyšší a v současné době není zcela zřejmé, zda tyto náklady budou rentabilní.

Poděkování

Tato práce byla realizována díky účinné podpoře grantového projektu GAČR 205/04/2129, Klíčového projektu K2043105 AVČR a Proc 4.1.1. Ac. C. Rep. Checa - GRICES, POCTI - SFA-2-675 from Fundacao para a Ciencia a Tecnologia.

LITERATURA

- [1] Technická dokumentace firmy Watec, 254-2 Nihonkoku, Daihoji, Tsuruoka-shi, Yamagata-Ken, 997-0017 Japan
- [2] Technická dokumentace firmy VDS Vosskuhler GmbH, Weisse Breite 7, D-49084 Osnabruck, SRN