

## Optický návrh zobrazovací soustavy spektrografu s vícekanálovým filtrem

Zdeněk Rail, Daniel Jareš, Vít Lédl, Radek Melich, Zbyněk Melich, Jan Václavík a Pavel Oupický

Ústav fyziky plazmatu AV ČR, v.v.i. - oddělení Optická diagnostika, Skálova 89, 511 01 Turnov, e-mail : vod@ipp.cas.cz

V současné době je v ÚFP AV ČR, v.v.i. – OD vyvíjen v rámci grantu vícekanálový filtr. Bude umožňovat pozorování dějů na Slunci v několika zajímavých pracovních vlnových délkách. Tento filtr je složen z pěti členů a vyznačuje se dlouhou délkou chodu paralelních paprsků.

V referátu je uvedeno několik variant zobrazovacích soustav spektrografů, které jsou optimalizovány pro takový vícekanálový filtr.

### Optical design of imaging system of spectrograph with multichannel filter

At present time multi channel filter is developed within grant in IPP AS CR, v.v.i. It will enable to observe solar phenomena in several interesting working wavelengths. This filter is composed of five members and possesses long optical interval of parallel beams.

In this paper we present several variants of imaging systems of spectrograph which are optimized for this filter.

#### 1. Úvod

Spektrografy, které užívají jako monochromátoru úzkopásmový dvojlomně-polarizačního filtr, bývají nejčastěji konstruovány jen pro jednu pracovní vlnovou délku. Podrobná analýza [1] ukázala možnost rozšíření počtu pracovních propustí filtru. Takový filtr je vyvíjen v ÚFP AV ČR v.v.i. - OD v rámci grantu číslo 1SQ100820502. Měl by pracovat v čárách K II, H-gama, Ba II, H-beta, D1, D3, H-alfa, což umožní získávat výškové profily dějů ve sluneční atmosféře [2].

Zobrazovací soustava k tomuto filtru musí umožnit zobrazení sluneční atmosféry ve všech kanálových propustech.

#### 2. Spektrograf

Samotný spektrograf se skládá ze čtyř logických celků [3]: První je napájecí zobrazovací člen, určující úhlovou rozlišovací schopnost přístroje. V našem případě je požadováno rozlišení 1 úhlové vteřiny, čemuž odpovídá průměr vstupní apertury 150mm. Ohnisková vzdálenost tohoto členu 2000 mm je zvolena s ohledem na optický průměr filtru 30 mm.

Druhou částí spektrografu je kolimační objektiv, který je umístěn za ohniskem vstupního členu. Jeho funkcí je transformovat rozbíhavou vlnu vstupního objektivu do paralelní, vstupující do filtru. Čím více se svazek vystupující z tohoto členu blíží paralelnímu, tím lepší je spektrální rozlišení spektrografu. Svazek procházející filtrem by neměl mít sbíhavost či rozbíhavost horší než 1:35 až 1:40.

Třetí částí spektrografu je samotný vícekanálový filtr. Je tvořen celkem pěti členy [1] – viz obr.1 : První obsahuje karusel s hradíci napařenými Fabry-Perotovými filtry. Další dva členy jsou dvojlomně-polarizační filtry laděné sklonem a teplotou. Obsahují křemenné destičky vyříznuté z krystalu křemene s obecnou orientací řezu. Každý z nich reprezentuje 50 mm chodu paprsků krystalickým křemem. Za těmito členy je hlavní křemenný filtr o celkové délce 300 mm. Poslední, pátý člen, je dlouhý 50 mm a je vyroben z krystalického vápence. Jeho funkcí je zúžení pološířky propustnosti čar. Celková délka chodu paralelních paprsků v tomto spektrografu činí 1000 mm, což je trojnásobek až čtyřnásobek délky chodu paralelních paprsků u běžně vyráběných filtrů pro jednu pracovní vlnovou délku. Protože optický průměr filtrových destiček je 30mm, není u tohoto vícekanálového spektrografu požadováno zobrazení celého povrchu Slunce.

Čtvrtý, poslední člen, je zobrazovací objektiv. Ten vytváří skutečný obraz slunečního povrchu na CCD detektoru. Ohnisková vzdálenost tohoto objektivu pak vytváří měřítko obrazu celého systému. Celková ohnisková vzdálenost systému je zvolena 3000 mm.

V našich návrzích byl obor použitelných vlnových délek rozšířen na rozsah od 390 nm do 1100 nm.

#### 3. Navrhovaná řešení

Pro návrh napájecí zobrazovací soustavy byla původně zvolena mimoosová optická soustava Maksutova [4,5] - viz obr.2, která při průměru 150 mm a ohniskové vzdálenosti 2000 mm vykazovala nejlepší perspektivu splnit zadané požadavky na zobrazovací vlastnosti. Při výpočtu [6,7,8,9] celé konfigurace spektrografu se však ukázala skutečnost, že pro kvalitní korekci optických vad spektrografu bude nutné kolimační a zobrazovací

objektivy navrhnout jako čtyřčočkové, které měly dostatek optických parametrů na kompenzaci zbytkových vad celého systému. Dále bylo nutné použít materiálu FPL53, který je velice měkký. Požadavek na kompenzaci chromatické vady polohy v celém pracovním oboru byl u této soustavy splněn s přesností pouze 2 %, Pro výslednou ohniskovou vzdálenost soustavy  $f' = 3000$  mm činil tento rozdíl 68 mm. Toto komplikované řešení se ukázalo jako nevýhodné a tudíž nebylo realizováno. Ze všech navržených typů spektrografů měl však tento systém největší nevinětované zorné pole o průměru 15 minut. V celém spektrálním oboru bylo u všech obrazů dosaženo geometrických obrazů blízkých difrakčním - viz obr.3.

Pro finální řešení spektrografu byla vybrána čočková soustava, jejíž vstupní člen je netmelený dublet o průměru 150 mm a ohniskové vzdálenosti 2000 mm. Kolimační i zobrazovací objektiv jsou také dublety s obecnými tvarovými parametry. U tohoto systému - viz obr.4, který se vyznačuje jednoduchostí a stabilitou optického řešení, vychází rozdíl ohniskových vzdáleností mezi vlnovými délkami 390 nm až 1100 nm také 2 % - 60 mm při celkové ohniskové vzdálenosti spektrografu 3000 mm. Oproti původní soustavě Maksutova je průměr nevinětovaného zorného pole menší a činí 10 minut.

Výpočet ukazuje, že v celém spektrálním rozsahu od 390 nm do 1100 nm budou geometrické obrazy menší než difrakční v zorném poli o průměru 10 minut, takže soustava bude mít vysoký kontrast - viz obr.5. Všechny čočky této soustavy jsou vyrobeny z chemicky i mechanicky stabilních klasických skel BK7 a F2.

#### 4. Další varianty zobrazovacích soustav

Vynikající zobrazovací vlastnosti má také afokální dvojjzradlová soustava s paraboloidickým primárním a hyperboloidálním sekundárním zrcadlem, blízká Mersenovu systému. Filtrem prochází paralelní svazek z dvojjzradlové soustavy, jako zobrazující člen lze použít mimoosový paraboloid nebo mimoosový Cassegrain - viz obr. 6 a 7, takže vznikne katoptrický systém. Změnou ohniskové vzdálenosti výstupního zobrazujícího zrcadla nebo vzdáleností zrcadel mimoosového Cassegrainu je možné prodlužovat výslednou ohniskovou vzdálenost (2 až 3,5) krát bez zhoršení kvality obrazu - viz obr. 8 a 9. Jejich nevýhodou je centrální stínění a nutnost odclonění parazitních paprsků.

Aby se předešlo centrálnímu stínění, lze napájecí soustavu realizovat jako mimoosový dvojjzradlový systém. Velice vhodný je mimoosový systém Pressman -Camichel se sférickým primárním zrcadlem a sféroidálním konvexním mimoosovým sekundárem - viz obr.10. Ten je při vhodných rozměrech velice snadno výrobitelný. Narozdíl od Kutterovy soustavy má systém Pressman-Camichel na optické ose stigmatické obrazy - viz obr.11. Jeho nevýhodou je malé zorné pole cca 5 minut a horší mimoosové obrazy. Rozdíly mezi ohniskovými vzdálenostmi pro paprsky o vlnových délkách od 390 nm do 1100 nm činí jen 0,5% jeho ohniskové vzdálenosti.

#### 5. Závěr

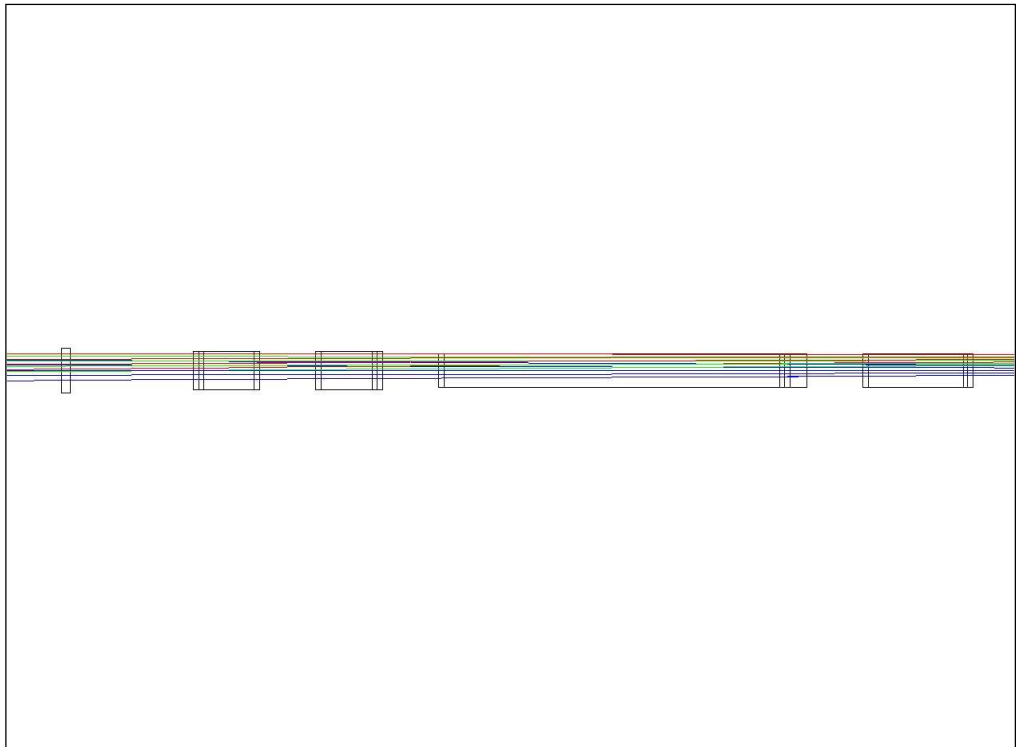
Optický návrh zobrazovací soustavy vícekanálového spektrografu byl optimalizován tak, aby jako celek vykazoval co nejlepší zobrazení. Přestože hlavní pracovní spektrální obor je v intervalu mezi čarami K II až H-alfa, je možné s ním pozorovat i v blízkém IČ oboru. Během hledání variant zobrazovacích systémů byly nalezeny soustavy, které lze potenciálně využít pro spektrografy s jednou nebo dvěma pracovními vlnovými délkami a s kratším chodem paralelních paprsků.

Veškeré optické výpočty byly prováděny v programu ZEMAX.

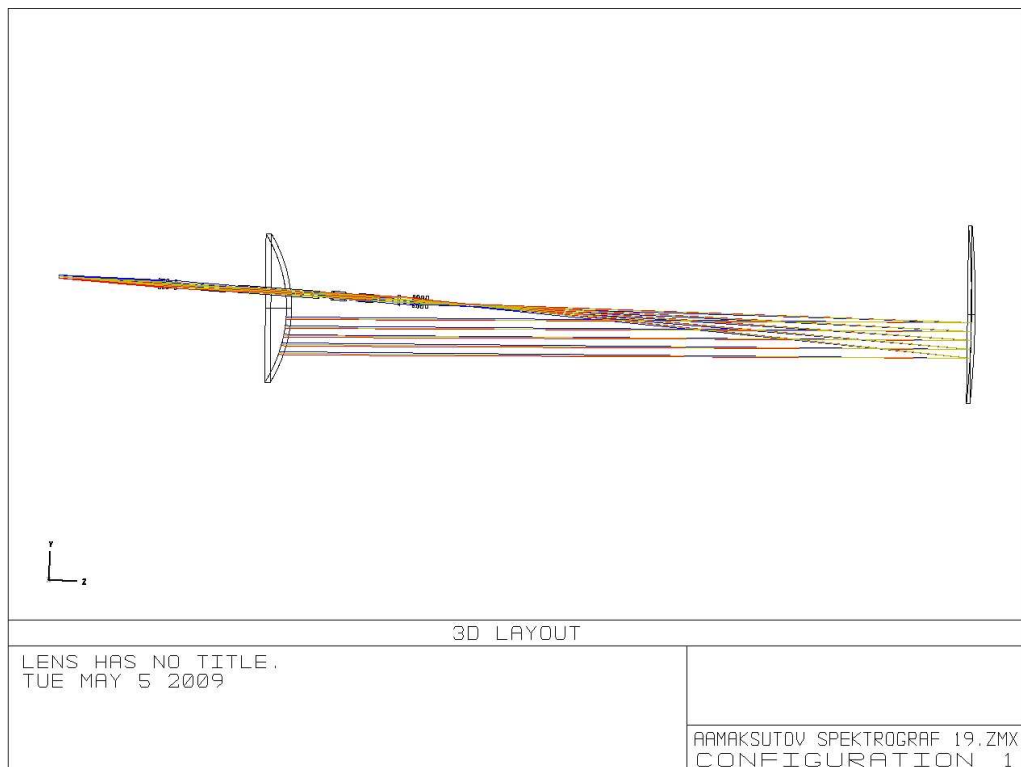
Práce je řešena jako dílčí část úkolu „Podpora projektů cílového výzkumu AV ČR“, číslo 1SQ100820502.

#### 5. Literatura

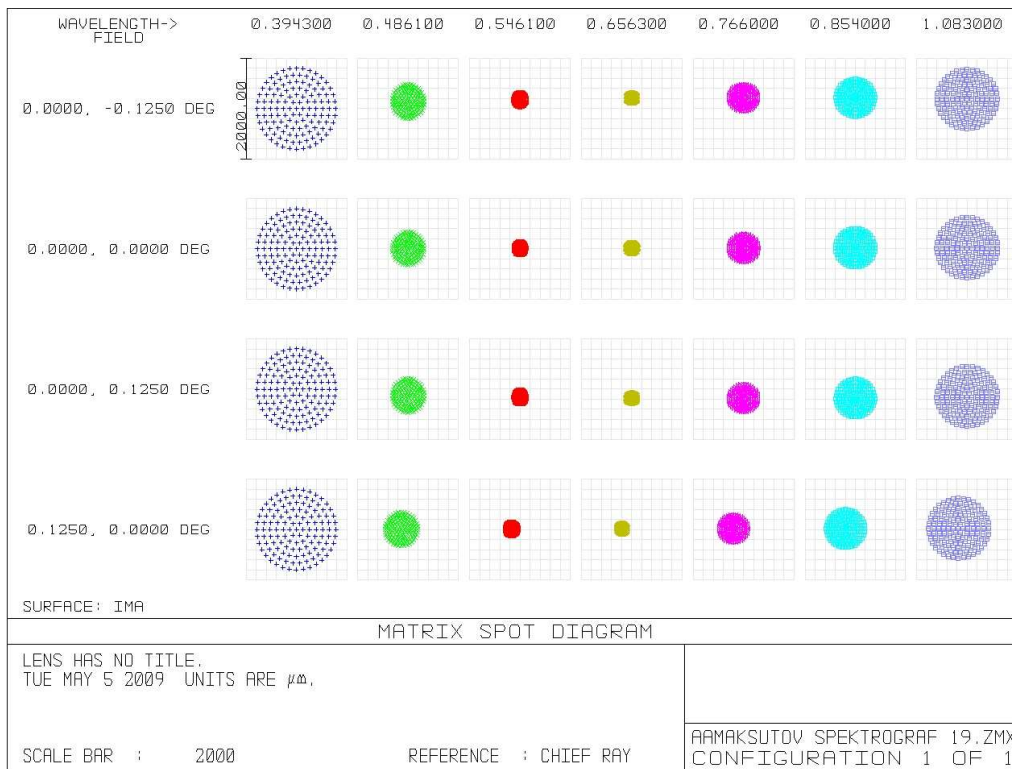
- [1] Melich Z., Melich R., Šolc I., Oupický P., Řetězový filtr pro více astronomicky zajímavých spektrálních čar, Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí, Sborník referátů, rok 2007
- [2] Kuiper G. P., The Sun, The University of Chicago Press, Chicago, Illinois, 1953 (Překlad Dž.Kojper, Solnce, Izdatelstvo innostrannoj literatury, Moskva, 1957)
- [3] Michelson N.N., Optičeskije teleskopy, Izdatelstvo Nauka, Moskva, 1976
- [4] Jareš.D., Lédl V., Rail Z., Zobrazovací soustava pro spektrograf s vícekanálovým Šolcovým filtrem, Člověk ve svém pozemském a kosmickém prostředí, Sborník referátů, rok 2007
- [5] Rail Z., Melich Z., Projekt optické části slunečního robotnického dalekohledu, interní zpráva ÚFP AVČR v.v.i., OD, Turnov
- [6] Rutten van Venrooij, Telescope Optics, Willmann-Bell, Inc., Richmond, Virginia, 2002
- [7] Volosov D.S., Metody rasčeta složnyh fotografičeskich sistem, OGIZ, Leningrad, 1948
- [8] Maksutov D.D., Izgotovljenije i issledovanije astronomičeskij optiki, Nauka, Moskva, 1984
- [9] Optical design Program Zemax, User's Guide, Version 10, Focus Software, Inc., Tucson, 2005



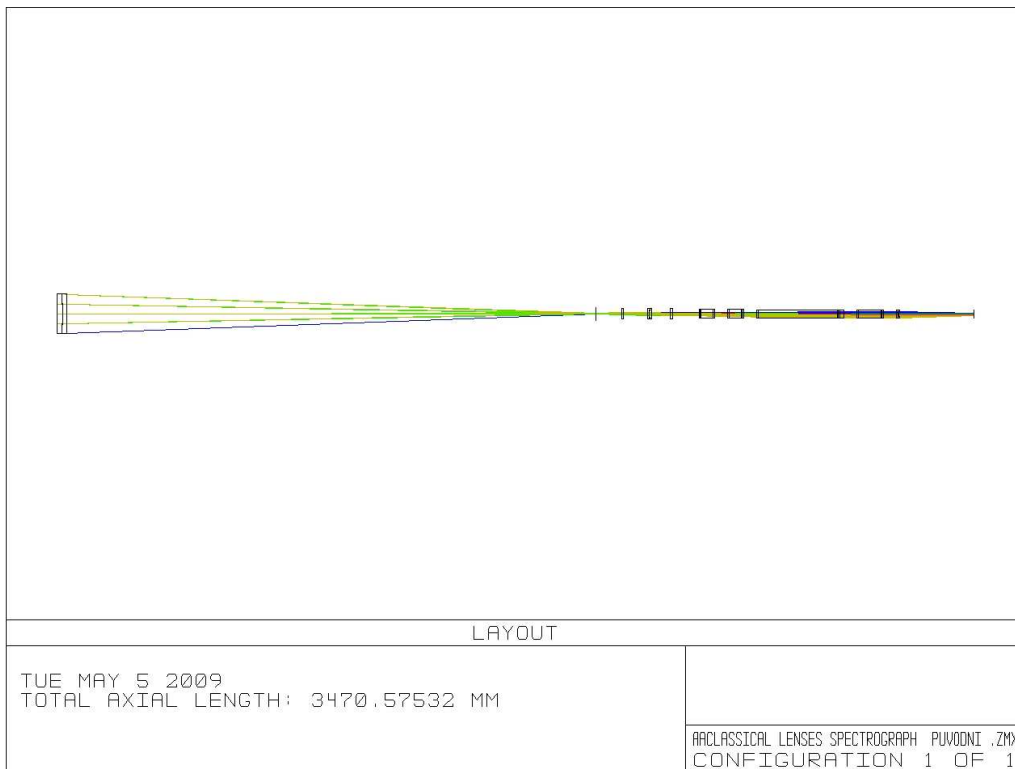
obr.1 – schéma vícekanálového filtru



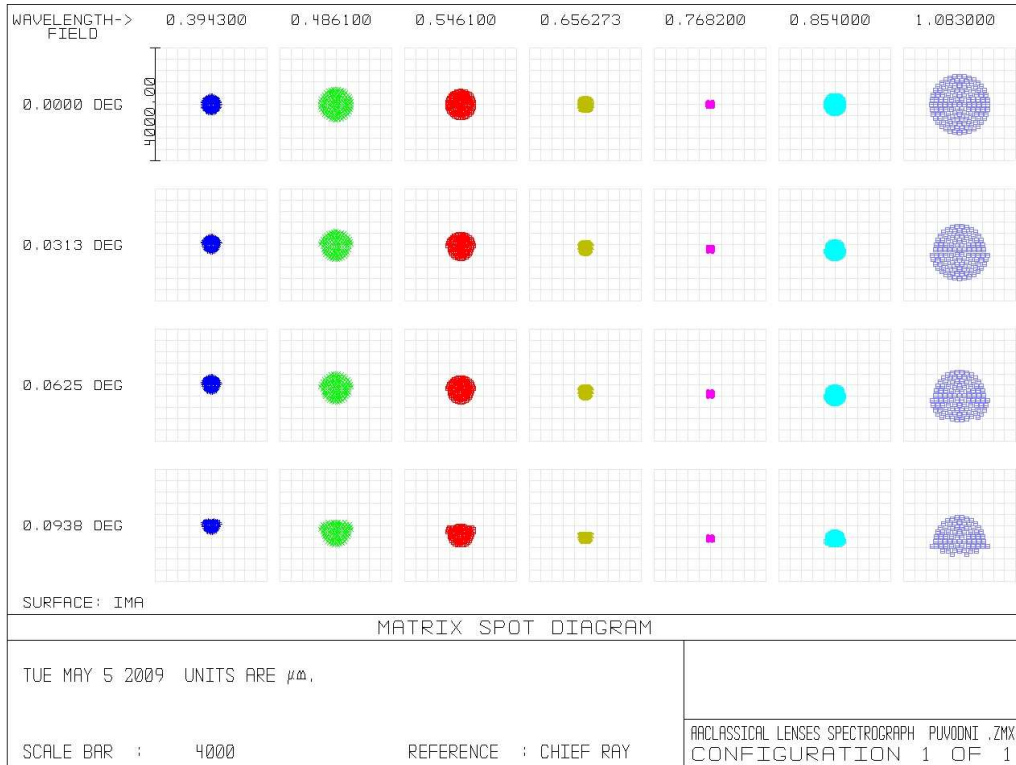
obr.2 – schéma původního návrhu mimoosového Maksutova



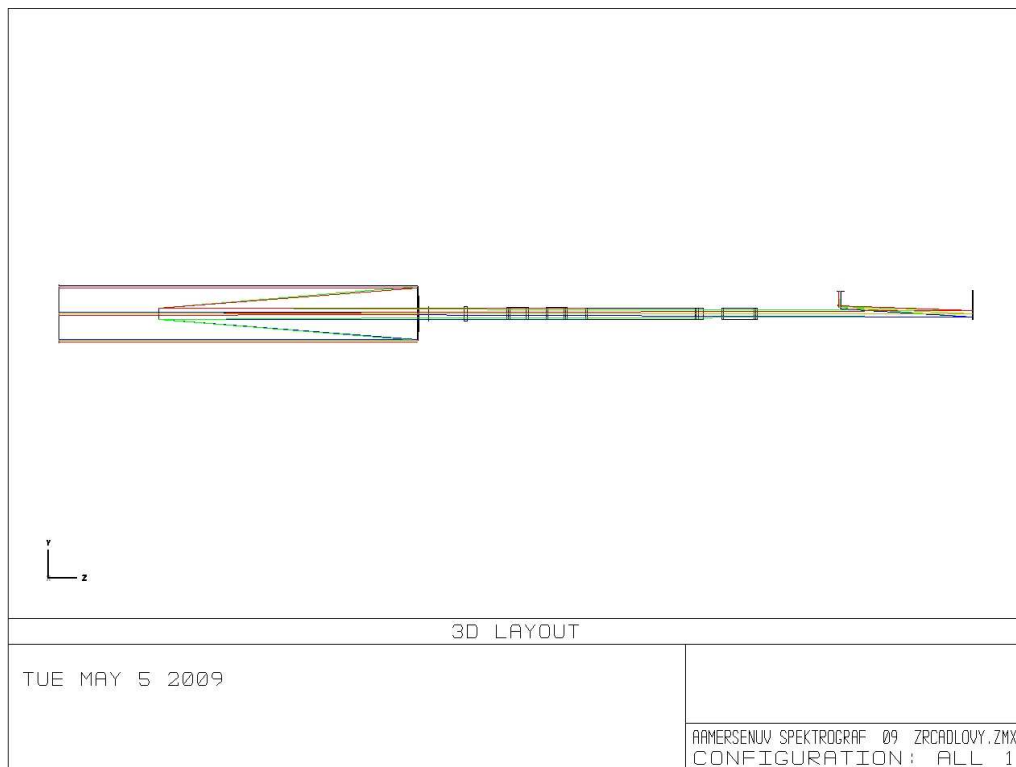
br.3 – matrix spot-diagramy původního návrhu mimoosového Maksutova



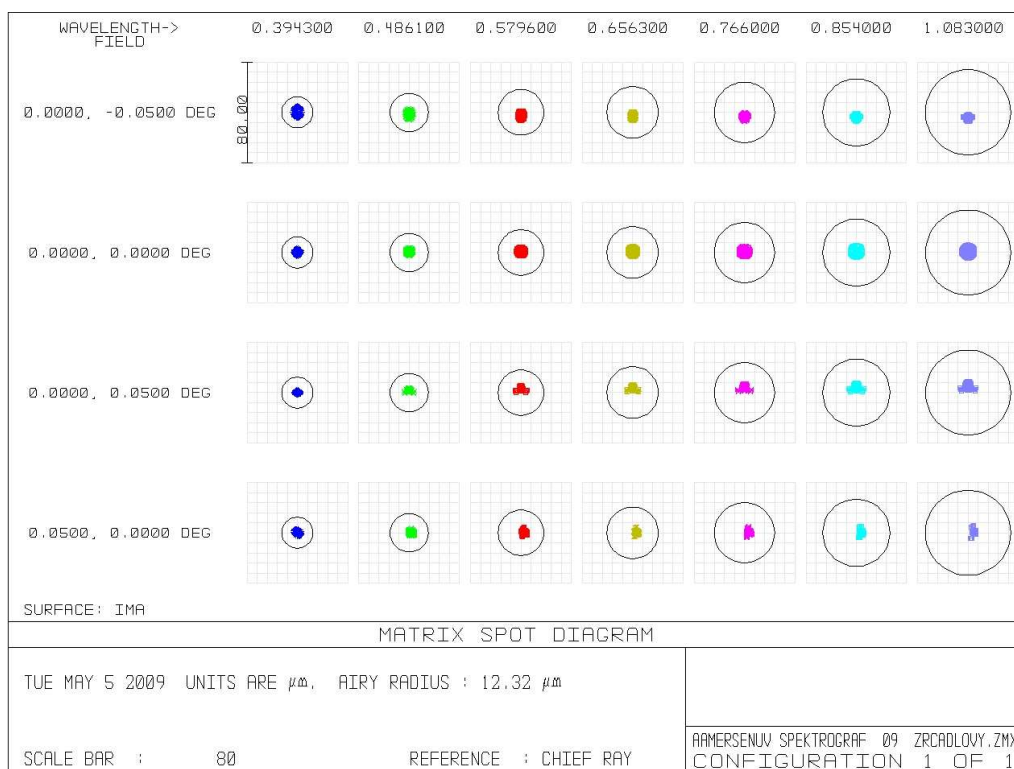
obr.4 – schéma návrhu s klasickým dubletem



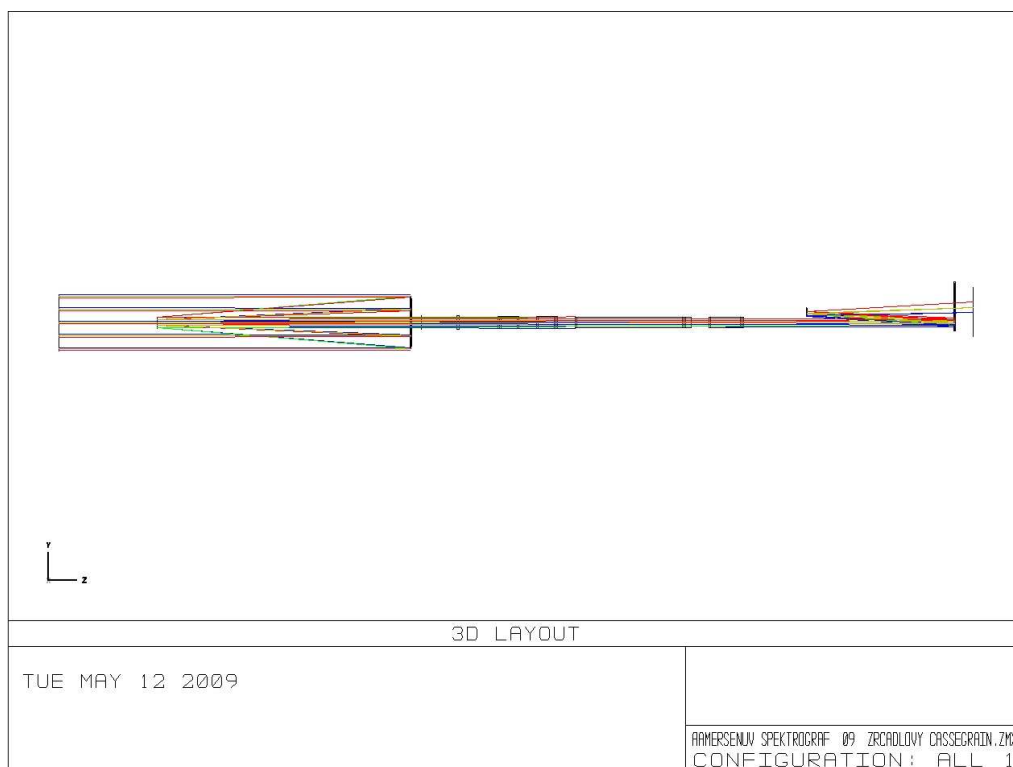
obr.5 – matrix spot-diagramy návrhu s klasickým dubletem



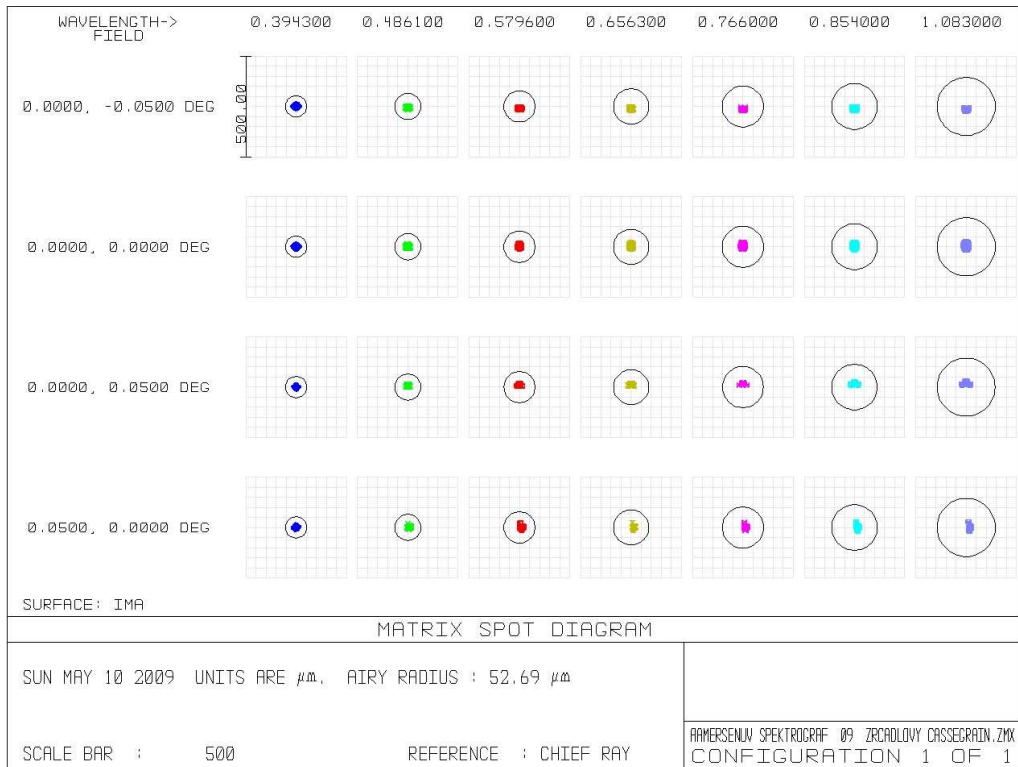
obr.6 – schéma spektrografu s Mersenem



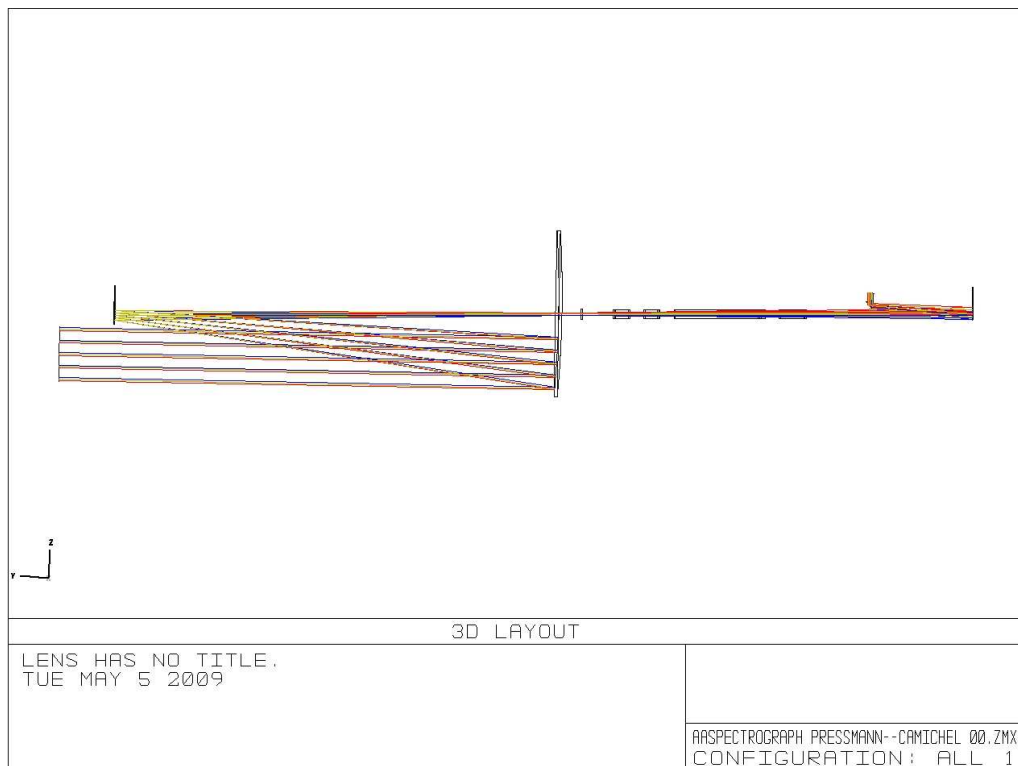
obr.7 - matrix spot-diagramy návrhu s Mersenem



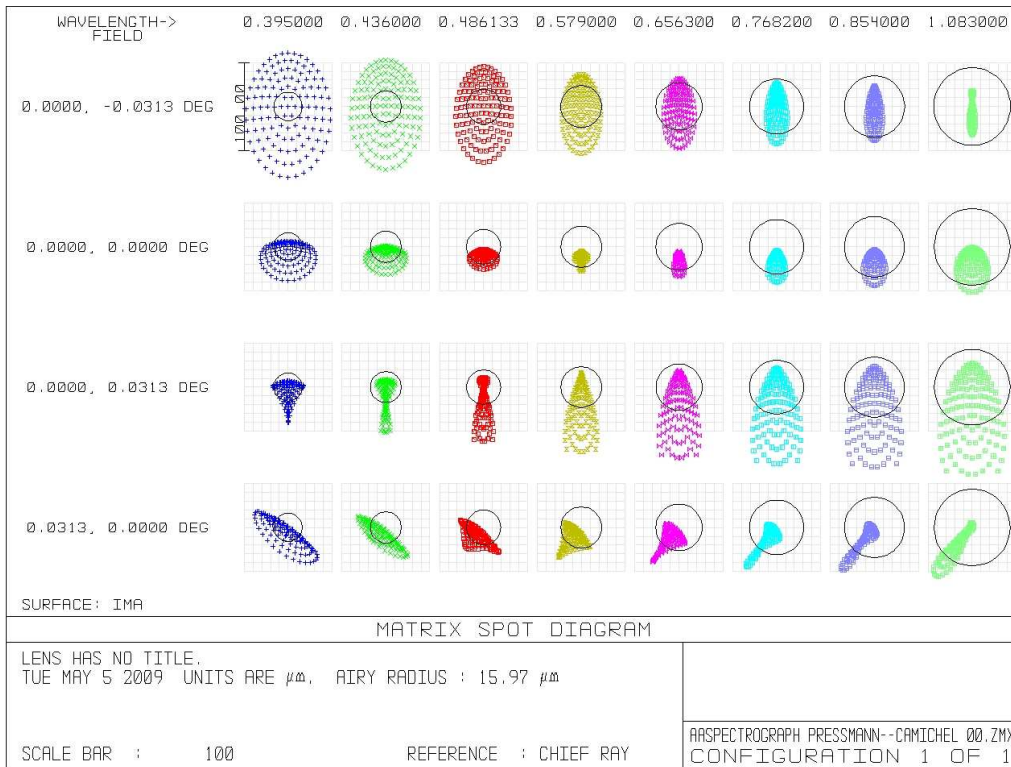
obr.8 – schéma návrhu s Mersenem a Cassegrainem



obr.9 – matrix spot-diagramy návrhu Mersena s Cassegrainem



obr.10 – schéma návrhu Pressman - Camichela



obr.11 – matrix spot-diagramy návrhu Pressman - Camichela