

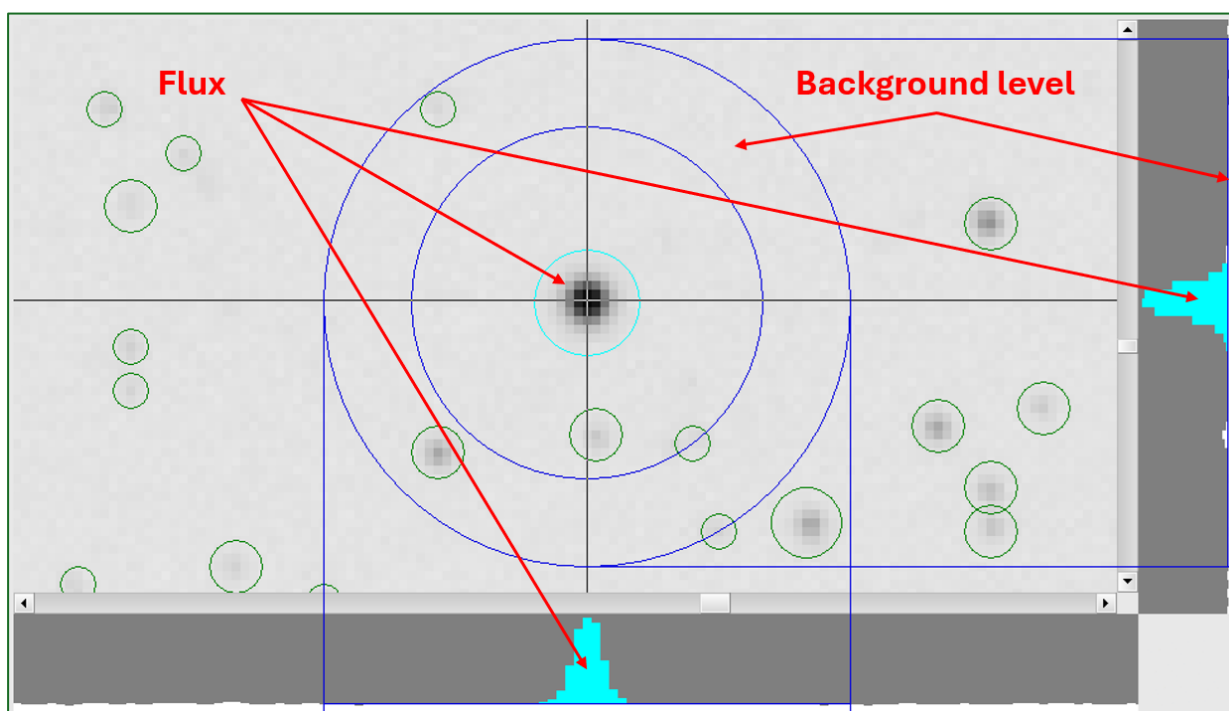
Stručný úvod do fotometrie

Hlavním úkolem fotometrie je měřit **tok** (anglicky **flux**) astronomických objektů a jeho změny v čase. Tok představuje množství světla zachyceného z každého objektu (hvězdy, galaxie, asteroidu, komety atd.) na snímku a počítá se jako součet hodnot (počtů ADU¹) všech pixelů náležejících danému objektu. Jde o pixely uvnitř definovaného kruhu (**fotometrické apertury**) se středem v centroidu hvězdy.

Poznámka:

Pro zjednodušení budeme od této chvíle měřený objekt nazývat proměnnou hvězdou (variable star) nebo jen proměnnou (variable), protože záznam změn jasnosti proměnných hvězd je nejtýpčtějším použitím fotometrie. Takové hvězdy se také často označují zkratkou VAR. Mějme však na paměti, že vše zde vysvětlené platí i pro jiné astronomické objekty, například asteroidy, novy či supernovy.

Hodnoty ADU jednotlivých pixelů však nepředstavují jen množství světla zachyceného z proměnné hvězdy, ale také světlo pozadí oblohy (přirozené pozadí i světelné znečištění) a předpětí snímače. Úkolem fotometrického softwaru je určit hodnotu pozadí a odečíst ji od každého pixelu, aby naměřený tok odpovídal pouze světlu přicházejícímu přímo z objektu.



Pro co nejlepší odhad hodnoty pozadí se tato hodnota neurčuje globálně pro celý snímek, ale samostatně pro každý měřený objekt. Všimněte si tří kružnic kolem hvězdy na obrázku výše. Nejmenší azurová kružnice představuje fotometrickou aperturu. Dvě větší modré kružnice vymezují oblast zvanou **prstenec pozadí**, která se používá k výpočtu hodnoty pozadí.

Tip:

Není výjimkou, že v prstenci pozadí nejsou žádné jiné hvězdy, zejména v oblastech oblohy chudých na hvězdy. Naopak v hustých hvězdných polích Mléčné dráhy je prakticky nemožné vymezit prstenec bez jiné hvězdy. SIPS takové hvězdy z výpočtu pozadí samozřejmě vyloučí, někdy však slabá hvězda zůstane nezjištěna a její světlo hodnotu pozadí ovlivní. Ovlivnit ji mohou i jiné artefakty, například

¹ Zkratka ADU znamená jednotku analogově-digitálního převodníku. Jde o číslo, které vrací A/D převodník při digitalizaci náboje nahromaděného v každém pixelu.

difrakční paprsky jasných hvězd. Zejména pro hustá hvězdná pole se proto důrazně doporučuje zapnout volbu **Použít robustní průměr pro pozadí** v dialogu **Parametry fotometrie**.

Protože lidské vnímání jasnosti není lineární (dokážeme rozlišit opravdu velký rozsah jasností), začali astronomové používat také nelineární jednotku. Tato logaritmická jednotka jasnosti se nazývá **magnituda** a je definována tak, že **stokrát jasnější** objekt (se stokrát větším tokem) se liší o **5 magnitud**. Stupnice magnitud je navíc obrácená, takže nižší magnituda znamená jasnější objekt. Objekt s magnitudou o 1 menší je tedy $\sqrt[5]{100} = 2.5119$ krát jasnější.

Instrumentální magnituda

Podle výše uvedené definice můžeme **instrumentální** magnitudu Mag_I vypočítat z toku F pomocí následující rovnice:

$$Mag_I = -2.5 \cdot \log_{10}(F)$$

Silně závisí na použitých přístrojích (dalekohledu a kameře; odtud název), expoziční době a dalších parametrech. Tok nashromážděný malým objektivem a málo citlivou kamerou bude přirozeně mnohem menší než tok z velkého dalekohledu a špičkové vysoce citlivé kamery.

Tok se bohužel mění také s povětrnostními podmínkami, výškou objektu nad obzorem a dalšími okolnostmi. Samotná instrumentální magnituda proto není užitečná, protože vliv těchto jevů často překryje vlastní změny jasnosti proměnné hvězdy, které chceme měřit.

Poznámka:

Proto nástroje **Fotometrie** ani **Astrometrie** v SIPS nepracují přímo s instrumentálními magnitudami.

Relativní magnituda

K odstranění změn toku způsobených jinými vlivy, než skutečnými změnami jasnosti objektu se jako reference používá další **srovnávací hvězda**. Předpokládá se, že všechny faktory ovlivňující tok proměnné hvězdy působí stejně i na srovnávací hvězdu. Díky logaritmické stupnici magnitud stačí **instrumentální magnitudu srovnávací hvězdy** odečíst od **instrumentální magnitudy proměnné hvězdy** a získáme relativní magnitudu proměnné hvězdy Mag_R .

$$Mag_R = -2.5 \cdot \log_{10}(F_V) - (-2.5 \cdot \log_{10}(F_C))$$

Tento vztah lze zjednodušit na **Pogsonovu rovnici**,

$$Mag_R = -2.5 \cdot \log_{10}\left(\frac{F_V}{F_C}\right),$$

kteřá obchází nutnost počítat mezilehlé instrumentální magnitudy a používá přímo toky.

Nejistotu relativní magnitudy lze definovat následovně:

$$\sigma_{Mag} = \frac{2.5}{\ln(10)} \cdot \sqrt{\left(\frac{\sigma_V}{F_V}\right)^2 + \left(\frac{\sigma_C}{F_C}\right)^2}$$

Použití poměru toků proměnné a srovnávací hvězdy bohužel neodstraní všechny nežádoucí vlivy. Různé barvy naše atmosféra pohlcuje odlišně; červené světlo méně než modré (proto je obloha modrá a Slunce či Měsíc u obzoru působí červeněji). Mají-li proměnná a srovnávací hvězda odlišnou barvu, jejich toky se při změně vzdušné hmoty během pozorování mění rozdílně, a mění se tedy i jejich poměr. Tento efekt (rozdílný poměr extinkce) relativní magnitudu významně ovlivňuje.

Velmi účinným způsobem, jak tento efekt odstranit nebo alespoň potlačit, je zvolit proměnnou a srovnávací hvězdu stejné barvy. Extinkce je pak pro obě hvězdy stejná.

Použití filtru k omezení rozsahu vlnových délek tento efekt rovněž omezuje. K jeho úplnému odstranění by však byl nutný velmi úzkopásmový filtr, který se z různých důvodů ve výzkumu nepoužívá. Šířky pásem standardních fotometrických filtrů dosahují desítek až více než sta nanometrů, takže rozdílné barvy hvězd poměr toků stále ovlivňují.

Absolutní magnituda

Relativní magnituda neříká, jak je objekt „skutečně“ jasný, protože závisí na jasnosti použité srovnávací hvězdy. Vzhledem k logaritmické povaze magnitud neexistuje přirozený nulový bod typu „nulová jasnost“. Jako součást standardu absolutních magnitud se proto volí referenční nulový bod (hvězda s jasností 0 mag).

Absolutní magnitudu² si tedy můžeme představit jako relativní magnitudu vztaženou ke zvolenému referenčnímu bodu (hvězdě nulové magnitudy). Ačkoli je prakticky nemožné vždy vybrat srovnávací hvězdu s nulovou magnitudou, není to nutné. Známe-li absolutní magnitudu srovnávací hvězdy, získáme absolutní magnitudu proměnné hvězdy prostým přičtením absolutní magnitudy srovnávací hvězdy k naměřené relativní magnitudě proměnné hvězdy. Toto zjednodušení má však několik úskalí.

Tok hvězdy se obecně mění s vlnovou délkou podle její teploty (hvězdy se většinou řídí Planckovým zákonem záření černého tělesa). Liší se také citlivost snímáče při různých vlnových délkách, propustnost optiky a atmosféry atd. Pojem „absolutní magnituda“ bez určení barvy (fotometrického systému – intervalu vlnových délek definovaného standardním fotometrickým filtrem) je proto vágní. Hodí se pro obecnou představu o jasnosti nebeského objektu, například při popularizačních přednáškách, ve výzkumu se však nepoužívá.

Poznámka:

Nejslabší hvězdy viditelné pouhým okem mají jasnost přibližně 6 mag, Vega 0 mag, Sirius (nejjasnější hvězda kromě Slunce) –1,5 mag, Jupiter může dosáhnout asi –2,5 mag, Venuše –4,5 mag, úplněk –12,5 mag a Slunce dokonce –26,7 mag.

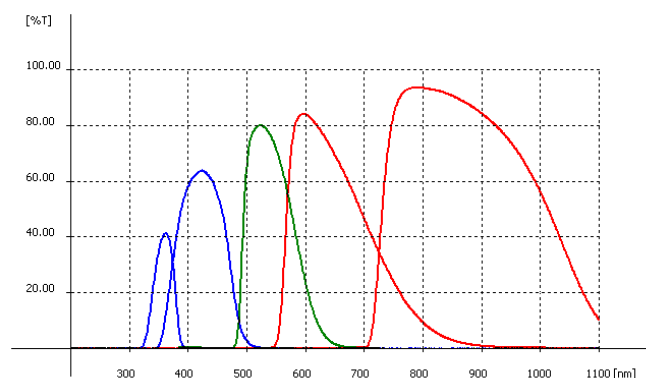
Při diskusi o absolutních magnitudách je barva důležitá. Chladné červené hvězdy jsou například v červeném světle několikanásobně jasnější než v modrém. Podobně může být bílý trpaslík v modré oblasti mnohonásobně jasnější než v červené.

Astronomové postupně definovali několik fotometrických standardů. Ty jsou vždy spojeny se sadou filtrů vymezujících propustné pásmo (rozsah vlnových délek).

Standard Johnson-Cousins

Johnson-Cousins je jeden z nejstarších a stále široce používaných fotometrických systémů. Tvoří jej 5 filtrů označených U (ultrafialový), B (modrý), V (vizuální), R (červený) a I (infračervený). Propustná pásma znázorňuje obrázek níže:

² „Absolutní hvězdná velikost“ zde označuje hvězdnou velikost vztaženou k určitému standardnímu fotometrickému systému, nikoli hvězdnou velikost vyjadřující jasnost objektu ve vzdálenosti 10 parseků.



Poznámka:

Filtry UB_V zavedli Johnson a Morgan v 50. letech 20. století, jejich filtry pro červenou a infračervenou oblast však nebyly konzistentní a obtížně se reprodukovaly. Teprve později Cousins (v 70. a 80. letech) tyto filtry nově definoval, proto se poslední dva někdy označují RC a IC.

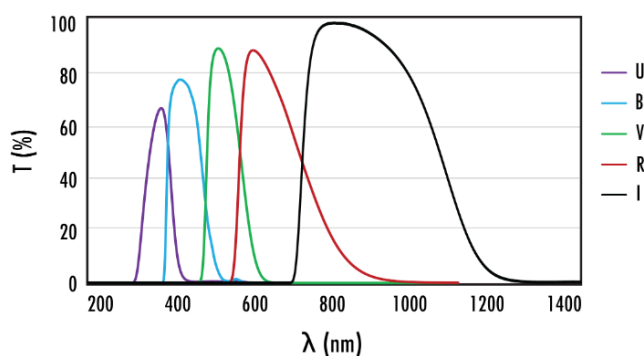
Tyto filtry se vyrábějí přidáním příměsí oxidů kovů přímo do skla, protože technologie tenkých interferenčních vrstev tehdy nebyla dostupná. Sada UB_VRI proto má několik nevýhod:

- Maximální propustnost je výrazně nižší než 100 %; u filtru U dosahuje jen asi 40 %. Používáním těchto filtrů se tedy plýtvá cenným světlem.
- Okraje pásem nejsou příliš ostře vymezené a jednotlivá pásma se výrazně překrývají, což zhoršuje fyzikální interpretaci pozorování.

Standard Bessel (Johnson-Bessel)

Nízká maximální propustnost Johnsonových filtrů, zejména v pásmech U a B, vedla ke snaze sadu UB_VRI modernizovat. Úprava známá jako sada filtrů Bessel nebo Johnson/Bessel se soustředila především na zvýšení maximální propustnosti.

Ačkoli může Besselova aproximace pásem UB_VRI teoreticky dosáhnout 100% maximální propustnosti, ve skutečnosti je výroba takových filtrů prakticky nemožná a maximum je nižší. Besselovy filtry přesto nabízejí významně vyšší propustnost, a tedy kratší expoziční doby a/nebo lepší poměr S/N snímků.

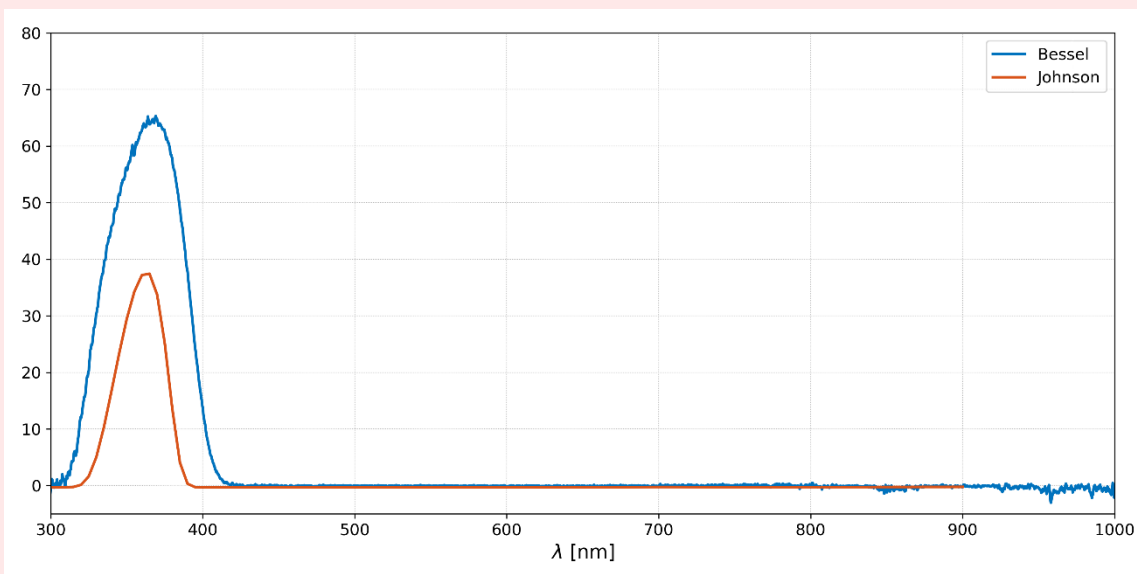


Varianty filtrů Bessel se bohužel neliší jen maximální propustností, ale také rozsahem pásem. Magnitudy Johnson-Cousins a Bessel proto nejsou přímo zaměnitelné a je nutné mezi systémy provádět transformace. Například magnitudy UB_VRI Landoltových polí jsou Johnson-Cousins, nikoli Bessel.

Varování:

Mnoho výrobců dnes místo tradičních filtrů Johnson-Cousins nabízí varianty Bessel. Jen někteří je však správně označují; někdy se nazývají pouze „fotometrické filtry UB_VRI“, nebo dokonce „filtry Johnson-Cousins UB_VRI“, aniž by bylo uvedeno, že jde o varianty Bessel.

Uvažujme například rozdíl mezi filtry Johnson U a Bessel U:



Celkový signál procházející filtrem Bessel U je několikanásobně větší než u Johnson U, ale spektrální rozsah Bessel U je také výrazně širší.

Standard Sloan

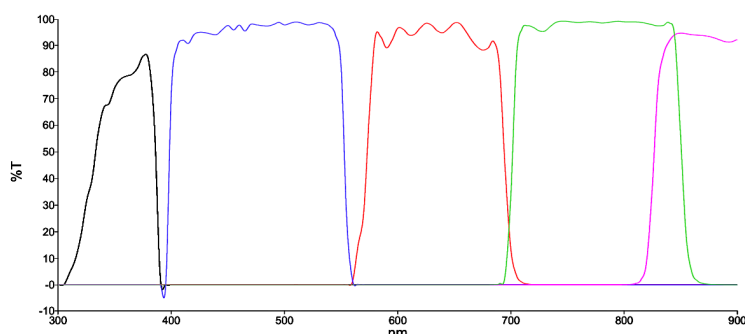
Dalekohled Sloan Foundation Telescope na observatoři Apache Point, použitý pro přehlídku Sloan Digital Sky Survey (SDSS), opustil zastarávající filtry UBVRI a zavedl moderní sadu filtrů s dobře definovanými okraji pásma a vysokou propustností uvnitř pásma. Filtry označené u, g, r, i a z jsou vyrobeny z barevných skleněných substrátů a interferenčních vrstev.

Poznámka:

Zajímavostí je, že pásmo SDSS „z“ nebylo definováno skutečným filtrem, ale pouze klesající citlivostí použitých detektorů.

Pro použití s jinými dalekohledy a kamerami, než původní kamerou Sloan Digital Sky Survey, byl vytvořen mírně upravený standard. Aby se odlišil od původního, označení filtrů doplňuje apostrof (u', g', r', i' a z'). Filtry podle tohoto standardu jsou dnes běžně dostupné.

Upravená Sloanova pásma znázorňuje obrázek níže:



Za zmínku stojí, že téměř celé viditelné spektrum 400–700 nm pokrývají pouhé dva filtry Sloan g' a r'. Jejich maximální propustnost se navíc blíží 100 %, takže zbytečně neplýtávají cenným světlem.

Standard Glass

Filtry Glass JHK pokrývají infračervenou část elektromagnetického spektra. Jednotlivé filtry jsou centrovány přibližně na 1,2 μm , 1,6 μm a 2,2 μm . S výjimkou nedávno uvedených, avšak stále mimořádně

drahých kamer se snímači SWIR jsou tyto vlnové délky pro amatéry nedostupné a SIPS je podporuje pouze pro úplnost.

Poznámka:

Jako obvykle existuje mnoho variant tohoto standardu a řada přehlídek oblohy používala mírně upravené filtry (např. 2MASS), takže je zpravidla nutné magnitudy mezi nimi převádět pomocí transformací.

Absolutní magnituda a Landoltova pole

Protože v zájmovém poli nejsou zaručeny srovnávací hvězdy s přesně definovanými magnitudami a vhodnými barevnými indexy, byl zaveden poněkud složitější, ale obecnější postup vedoucí k absolutním magnitudám. Je založen na transformaci toku na magnitudu kalibrované pomocí takzvaných Landoltových polí – oblastí rovnoměrně rozmístěných kolem nebeského rovníku, takže některá jsou vždy dostupná k pozorování. Hvězdy v těchto polích mají velmi přesně změřené absolutní magnitudy. Původně byly dostupné magnitudy UBVRI, nyní také u'g'r'i'z'. Účelem polí je kalibrovat pozorovací sestavu (dalekohled, kameru a filtry), tedy určit členy transformační funkce, která následně umožní vypočítat absolutní magnitudu pouze z pozorovaných toků.

Transformační funkce může mít například tento tvar:

$$Mag = -2.5 \cdot \log_{10}(F_V) + q + c_1 \cdot CI + e_1 \cdot AM$$

kde:

- *F_V*: naměřený tok objektu
- *q*: posun
- *c₁*: barevný koeficient prvního řádu
- *CI*: barevný index hvězdy (např. magnitudy Johnson B – V)
- *e₁*: extinkční koeficient prvního řádu
- *AM*: vzdušná hmota

Volné parametry *q*, *c₁* a *e₁* se obvykle určují proložení výše uvedené funkce tokům ze snímků jednoho standardního Landoltova pole.

Jak bylo uvedeno výše, naměřený tok se výrazně mění se vzdušnou hmotou (výškou objektu nad obzorem) i s počasím. Nejlepších výsledků se proto dosahuje kalibrací transformační funkce každou noc, případně i několikrát za noc, pokud se podmínky významně mění.

K lepšímu odstranění nežádoucích vlivů a zvýšení přesnosti lze použít složitější transformační funkce, například polynomy vyššího řádu vyjadřující závislost na barvě:

$$Mag = -2.5 \cdot \log_{10}(F_V) + q + c_1 \cdot CI + c_2 \cdot CI^2 + e_1 \cdot AM$$

Lze také použít jiný barevný systém (při použití filtrů Sloan lze místo B–V použít Sloan g'–r'), více barevných indexů současně (Sloan g'–r' a r'–i' v jedné rovnici) atd.

Sborová fotometrie (Ensemble photometry)

Relativní magnitudy dobře vyhovují mnoha vědeckým úlohám: určení okamžiku minima nebo tranzitu, periodické analýze, identifikaci a charakterizaci vícenásobných hvězdných systémů atd. Proto byl nástroj Fotometrie v SIPS původně navržen pouze pro relativní magnitudy. Převod magnitud do absolutního fotometrického systému je navíc časově náročný; kromě cílového objektu vyžaduje snímkování Landoltova pole a rozsáhlé zpracování dat, zejména není-li postup automatizován a používají-li se jen obecné nástroje, například Excel.

Zde přichází myšlenka sborové fotometrie³ – získávání absolutních magnitud pomocí transformační funkce kalibrované na každém zpracovávaném snímku. Landoltova pole se nepoužívají, je však nutné znát barevný index a magnitudu v použitém pásmu pro mnoho hvězd v každém snímku.

Při dostatečném počtu kalibračních hvězd navíc sborová fotometrie umožňuje využít polohu hvězdy v zorném poli ke zvýšení přesnosti. Zahrnutí prostorových změn transformace toku na magnitudu pomáhá kompenzovat chybějící či nekvalitní flat-field korekci, gradienty pozadí atd.

Protože se sborová fotometrie kalibruje pro každý snímek, extinkční koeficient se nepoužívá:

$$Mag = -2.5 \cdot \log_{10}(F_V) + q + c_1 \cdot CI$$

- F_V : naměřený tok
- q : posun
- c_1 : barevný koeficient prvního řádu
- CI : barevný index hvězdy

Kvalita transformace (přesnost absolutní magnitudy) závisí na spolehlivosti magnitud hvězd použitých ke kalibraci. Přesnost roste s počtem kalibračních hvězd; mnoho stovek až tisíc hvězd se známými magnitudami poskytuje dobré výsledky.

Sborová fotometrie v SIPS může používat několik transformačních funkcí lišících se řádem barevných a prostorových členů. Řád barevného členu může být v rozsahu [1..2], řád prostorového členu v rozsahu [0..2] (řád 0 znamená, že poloha hvězdy ve snímku transformaci neovlivňuje). Transformace s nejvyššími dostupnými řády má tvar:

$$Mag = -2.5 \cdot \log_{10}(F_V) + q + c_1 \cdot CI + c_2 \cdot CI^2 + x_1 \cdot X + y_1 \cdot Y + x_2 \cdot X^2 + y_2 \cdot Y^2 + xy \cdot XY$$

F_V je opět tok proměnné hvězdy a CI její barevný index; uvedená transformace však používá také polohu objektu ve snímku X a Y . Volné parametry jsou:

- q : posun
- c_1 : barevný koeficient prvního řádu (povinný)
- c_2 : barevný koeficient druhého řádu (volitelný)
- x_1, y_1 : prostorové koeficienty prvního řádu (volitelné)
- x_2, y_2, xy : prostorové koeficienty druhého řádu (volitelné)

SIPS v současnosti podporuje tři barevné indexy:

- Johnson B – V
- Sloan $g' - r'$
- Glass J – K

Barevné pásmo lze zvolit z těchto možností:

- Johnson-Cousins U, B, V, Rc, Ic
- Sloan u', g', r', i', z'
- Glass J, H, K

Jak bylo vysvětleno dříve, astrometrický katalog použitý pro astrometrické řešení musí obsahovat magnitudy pro zvolený barevný index a pásmo. Katalogy USNO vytvořené z „červených“ a „modrých“ palomarských desek standardní magnitudy neobsahují. Katalog UCAC5 obsahuje magnitudu Gaia G, která bohužel neodpovídá žádnému standardnímu pásmu, a magnitudu Cousins R, což pro ansámblovou

³ Někdy se termín „sborová fotometrie“ používá pro relativní fotometrii využívající více než jednu srovnávací hvězdu (např. protokol AAVSO používá termín „ensemble“ v tomto významu); nezaměňujte ji však se sborovou fotometrií v programu SIPS.

fotometrii nestačí. UCAC4 je proto v současnosti jediným katalogem dostupným v SIPS, který obsahuje magnitudy v mnoha pásmech Johnson-Cousins a Sloan.

Jak bylo uvedeno výše, přesnost ansámblové fotometrie silně závisí na počtu kalibračních hvězd dostupných v každém snímku:

- Při méně než několika desítkách hvězd je přesnost velmi nízká.
- Přibližně sto kalibračních hvězd poskytuje střední přesnost.
- Mnoho stovek nebo tisíc hvězd často zajistí přesnost stejnou nebo lepší než nejlepší relativní fotometrie.

Ansámblová fotometrie obecně přináší několik výhod:

- + Jasnost měřeného objektu se získá přímo v absolutních magnitudách.
- + Nepoužívají se srovnávací hvězdy; není nutné pečlivě hledat neproměnné, nekontaminované srovnávací hvězdy podobné barvy.
- + Odstraňuje odlehlé hodnoty způsobené srovnávací hvězdou (např. průletem družice přes její aperturu).
- + Stejná nebo lepší přesnost než u instrumentálních magnitud (při dostatku kalibračních hvězd).
- + Prostorová závislost potlačuje chyby způsobené vzdáleností VAR/CMP ve snímku.

Má však také některé nevýhody:

- Astrometrická redukce je povinná.
- Jako primární astrometrický katalog je v současnosti nutné použít UCAC4.
- I v UCAC4 v některých oblastech oblohy chybějí magnitudy v určitých barevných pásmech.
- Snímky musí být pořízeny přes standardní fotometrický filtr zahrnutý v katalogu UCAC4 (nefiltrovaná pozorování nelze spolehlivě zpracovat).
- Pro správnou kalibraci je nutný dostatek hvězd v zorném poli (širokoúhlý dalekohled/kamera je velkou výhodou).