

SZAKMAI ZÁRÓJELENTÉS

Témavezető neve: Ábrahám Péter
A téma címe: A galaktikus és extragalaktikus háttérsugárzás infravörös vizsgálata
A kutatás időtartama: 2002-2005

Kutatásunk célja az Európai Űrügynökség (ESA) csillagászati mesterséges holdja, az *Infrared Space Observatory* (ISO) 1995. novembere és 1998. áprilisa között végzett 2-240 mikrométeres hullámhosszú háttérméréseinek feldolgozása, a bolygóközi és a galaktikus előtérkomponensek valamint a kozmológiai eredetű extragalaktikus infravörös háttérsugárzás tanulmányozása. A négy éves kutatómunka során a következő témákra koncentráltunk ill. a következő eredményeket értük el:

I. Adatbázis felállítása az ISO háttérméréseiből

Az ISO fotométere, az ISOPHOT jelentős számú égi háttérmérést végzett, amelyek elméletileg mind alkalmasak a fent megjelölt tudományos vizsgálatok céljaira. Minőség és használhatóság szempontjából azonban ez a minta meglehetősen inhomogén. A méréshez választható nagyszámú műszer konfiguráció (detektor/szűrő/apertura), mérési mód (a 12 *Astronomical Observing Template* egyike) és integrációs idő függvényében ugyanis mérésről mérésre változhat a kalibráció pontossága, mind a véletlenszerű hibákat, mind a szisztematikus kalibrációs problémákat tekintve. Ezért egy háttér adatbázis felépítése során a jobban értett mérési konfigurációkat érdemes figyelembe venni. Projektünk során a következő – négy különböző mérési módból származó - háttérméréseket gyűjtöttük és rendeztük össze:

- 175 kiterjedt térkép a 60-200 mikronos hullámhossz-tartományban, melyek azzal a kritériummal választottunk ki, hogy ne legyen látható rajtuk fényes kompakt csillagászati objektum mint pl. galaxis, planetáris köd, vagy HII zóna – tehát ideális háttérmérések legyenek.
- Szintén a 60-200 mikronos hullámhossz-tartományban mintegy 1300 mini-térkép. Ezek mindegyike olyan kis területet fed le, hogy az adatokat nem lehet felhasználni az infravörös háttér morfológiai vizsgálatára, azonban az adott irányban egy pontban meghatározható az infravörös ég fényessége.
- Abszolút fotometriai megfigyelések a 3.6-200 mikronos tartományban. Az ISOPHOT speciális abszolút fotometriai módjában (AOT 05/25) 30 égi pozíció irányában végrehajtott 210 mérés. A pontosabb fotometriai nullpont-meghatározás érdekében ez a mód magában foglalja a sötétáram ill. a kalibrációs lámpa null-szintjének megmérését is.
- 29 kis-felbontású színekép közép-infravörös (2.2-11.7 mikron) hullámhosszakon. Az ISO archívumban 62 háttér-színekép található 1024 másodperc vagy hosszabb

expozíciós idővel, ám ezek több mint felét különböző technikai okok (főleg a detektor emlékezése egy korábbi fényes objektumra) miatt ki kellett zárni. A rövidebb expozíciós idejű mérések beépítésének lehetőségét még vizsgáljuk, és ebben együttműködünk Prof. S. Price amerikai csoportjával is.

Ezen listák többsége (az abszolút fotometriai adatok kivételével) már publikálásra kerültek: vagy valamelyik referált cikkünkben, vagy az ISO adatközpont számára készített fotometriai katalógusok részeként.

II. A kalibrációs módszerek finomítása

Ahhoz, hogy az összegyűjtött ISOPHOT háttérképeket valóban tudományos analízisnek vethessük alá, a projekt során szükségesnek bizonyult az ISOPHOT kalibrációjának finomítása. Bár a projekt kezdetén még csak néhány kalibrációs algoritmus újragondolása tűnt szükségesnek, a munkák előrehaladtával mind több korrekciós lépésről derült ki, hogy a heidelbergi ISOPHOT Data Centre által garantált pontosság nem elegendő a háttérképeink megbízható kiértékeléséhez. Ezért kalibrációs munkát végeztünk a következő területeken (a legtöbb témában a heidelbergi ISOPHOT központtal szoros együttműködésben):

- a) Javítottuk az ISOPHOT-S közép-infravörös spektrofotométer abszolút kalibrációját és új effektív térszögeket határoztunk meg a felületi fényesség pontosabb méréséhez
- b) Részt vettünk több kalibrációs együttműködésben (főleg a heidelbergi ISOPHOT Data Centre-rel), melyek célja az ISOPHOT adatfeldolgozás legalapvetőbb korrekciós algoritmusainak (reset interval correction, sötétáram kivonás, signal linearization, tranziens korrekció, beam profilok) ellenőrzése és újra meghatározása (részletek ld. az ISOPHOT honlapon www.konkoly.hu/KISAG/). A cél a pontosság fokozása és a fotometriai nullpont jobb meghatározása volt.
- c) Az új korrekciós algoritmusokat az *ISOPHOT Interactive Analysis* szoftvercsomag egy új verziójában, a PIA V11.0-ban implementáltuk, amely 2002. májusa óta elérhető. Az IDL kód írásában is tevékenyen részt vettünk 2 egy-egy hetes heidelbergi munkatalálkozó keretében.
- d) Szintén együttműködtünk a felületi fényesség kiszámításához használt matematikai formalizmus áttekintésében és a beam profilok helytelen normalizációjának észrevételezésében és kijavításában
- e) Az ISOPHOT hosszú hullámhosszú detektorainak beam profilja nem volt pontosan ismert, pedig ez alapvető az abszolút felületi fényesség fotometriához. 2003-ban befejeztük a beam profilok elméleti modellezését, s így a korábbiaknál nagyobb térbeli felbontásra kiszámolt profilokhoz jutottunk. A modellek tartalmaznak olyan optikai hatásokat is, mint az ISOPHOT műszer off-center helyzetének figyelembe vétele, vagy a színeffektusok vizsgálata. Az eredmények egy ISOPHOT kalibrációs jelentés dokumentálják. Az új elméleti modelleket összehasonlítottuk a mérésekkel, és eredményeink megerősítették, hogy ma már egy jól meghatározott beam profil-t (illetve az arra kiintegrált effektív térszöget) használhatunk az abszolút fotometriában.
- f) Kidolgoztunk egy pontosabb korrekciót a belső kalibrációs lámpa irányából besűrűdő szórt fény levonására (bypassing skylight correction)
- g) Elvégeztük az ISOPHOT adatfeldolgozási lépései közül az utolsó, általunk eddig még nem ellenőrzött terület, a fedélzeti standard lámpa kalibrációjának ellenőrzését. Ennek fő lépései a következők voltak: (1) újra kiértékeljük az ISOPHOT C100 és C200 detektorával végzett összes dedikált kalibrációs mérést, sőt ezt az adatbázist

kiegészítettük további tudományos célú mérésekkel az archívumból, amelyek megfelelőnek tűntek a lámpa fényességének kalibrációjára. Így a mi új kalibrációnk lényegesen több mérésen nyugszik, mint az eredeti. (2) Megvizsgáltuk a detektor válaszában lineáritását a különböző fényességtartományokban. Azt a meglepő eredményt találtuk, hogy az általunk kifejlesztett új kalibrációt használva már nincs szükség a mért jel ún. linearizációjára (amely egyébként egy standard ISOPHOT processzási lépés). (3) Ezután elkészítettük az új kalibrációs görbéket (ezek adják meg az összefüggést a lámpára ráadott elektromos áram és a lámpa fényessége között).

Eredményeink lényegesen megjavították az abszolút felületi fényesség fotometria pontosságát. Az új paramétereket és korrekciós algoritmusokat beépítettük az ISOPHOT Interactive Analysis programcsomag egy új változatába (PIA V11.2). Ezt a szoftvercsomagot több helyen is használják, így pl. az ISOPHOT Data Centre-ben és a Helsinki Observatóriumban. Fontos megjegyezni, hogy kalibrációs eredményeink hozzájárultak az ISOPHOT pontforrás-fotometriájának pontosításához is.

III. Az ISOPHOT háttéréréseiből felállított adatbázis vizsgálata

Az 1300 mini-térképből kapott felületi fényesség értéket összehasonlítottuk a COBE/DIRBE műszer eredményeivel, melyeket az ISOPHOT hullámhosszaira interpoláltunk. Eredményeink szerint a korreláció a két fotometriai rendszer között jó: nincs jelentős nullpont-eltérés, és a relatív skálafaktor is közel van 1-hez. Ezzel kimutattuk, hogy az ISOPHOT felületi fényesség mérései alkalmasak a tudományos analízisre, és az 1300 mini-térképből valamint a 175 nagy térképből kialakult az első nagy adatbázis, amin meg lehetett kezdeni az infravörös háttérsugárzás részletes vizsgálatát.

IV. Az infravörös háttér komponensei: az állatövi fény

A belső Naprendszerben keringő porszemcsék hősugárzása az infravörös ég egyik meghatározó összetevője. Sugárzásának színképe, amely pedig lényeges információkat hordoz a por méreteloszlásáról és összetételéről, nem volt ismert az ISO előtt. Az ISOPHOT-S spektrofotométerrel 29 pozícióban mért spektrumok analízise megmutatta, hogy a színkép nagyon jól közelíthető egy feketetest-sugárzással, amelynek hőmérséklete szisztematikusan változik a Naptól és az ekliptikától mért távolság függvényében. A PAH-oknak tulajdonított 6.3, 7.7, és 11.3 mikronos sávok valamint a 10 mikron körüli amorf és a 11.3 mikronos kristályos szilikátsávok hiánya megmutatta, hogy az infravörös állatövi fény alapvetően a nagy porszemcsék sugárzása, ami jelentősen leegyszerűsítheti ezen előtérkomponens kivonását. Az illesztett Planck-görbék hőmérsékleteloszlása az égbolton jól leírható egy geometriai modellel, melynek bemenő paraméterei a por sűrűség- és hőmérsékleteloszlása a Naprendszerben, a porrészecskék pedig a modellben nagyok az infravörös fény hullámhosszához képest.

A modell sikere azt is mutatja, hogy bár a bolygóközi porfelhő diszkrét forrásokból táplálkozik (üstökösök felbomlása, kisbolygók ütközése) valamilyen – még elég kevésbé ismert – nagyléptékű keveredési hatások folytán a mai bolygóközi felhő meglepően homogén, ami jó hír az állatövi fény pontos levonása, s így a távolabbi (galaktikus, extragalaktikus) háttérkomponensek meghatározása szempontjából.

A Space Science Review folyóirat egy speciális ISO különszámot adott ki 2005. első felében. A szerkesztők felkérésére összefoglaltuk az ISO valamennyi műszere által végzett állatövi fény megfigyeléseket.

V. Az infravörös háttér komponensei: a kisbolygók infravörös sugárzása

Jelenleg mintegy 305 200 kisbolygót ismerünk Naprendszerünkben, melyek 99%-a az ún. kisbolygóövben helyezkedik el. A kisbolygók mérete néhányszor tíz métertől akár 1000 km-ig terjedhet. Mivel hőmérsékletük a 200-300 K-es tartományban van, a kisbolygók hősugárzása az infravörös tartományba esik. Ezért az ekliptikai síkhoz közel a kisbolygók sugárzása fontos komponense az infravörös égi háttérnek.

Azért, hogy pontosabb jóslatot tehesünk ezen háttérkomponens nagyságára, modelleztük a naprendszerbeli kisbolygópopuláció emisszióját. Számolásainkhoz az alapot egy nagyon friss, csak néhány hónapja elérhető adatbázis, a Statistical Asteroid Model (<http://www.psi.edu/pds/SAM-I>) szolgáltatta, amely 1880987 aszteroida pályaelemeit, abszolút magnitúdóját, átmérőjét és albedóját tartalmazza. Ebből bármely adott időpontra és irányra meghatározható a felületegységen látható kisbolygók száma. Az égitestek fényességét a Standard Thermal Model alapján számítottuk ki (Lebofsky et al. 1986). Az eredményeket közvetlenül tudtuk hasznosítani a kisbolygók által okozott konfúziós zaj becslésekben (ld. később).

VI. A galaktikus cirrusz kis skálájú szerkezete

Az égi háttér egyik legfontosabb komponense a galaxison belül elhelyezkedő csillagközi felhők porzemcséinek hősugárzása. 13 égi területen megvizsgáltuk a galaktikus cirrusz felhők térbeli szerkezetét (tehát az ezzel kapcsolatos háttérsugárzás morfológiáját) a felhők infravörös térképeinek Fourier analízisével. A felhők között akadt egészen halvány és viszonylag fényes terület is. A 90-200 mikronos térképek spektrálindeket vizsgáltuk, és azt találtuk, hogy az index – amely a Fourier-színkép meredeksége – értéke nem mindig az irodalomban általában univerzális konstansnak tekintett kanonikus -3 , hanem -5.3 és -2.1 között változhat. Megmutattuk, hogy a pontos érték függ a terület infravörös fényességétől és a hidrogén oszlopsűrűségétől. Ugyanazon terület spektrálindeke különböző hullámhosszakon más és más lehet, hosszabb hullámhosszakon a színkép meredekebb. Ez a megfigyelés magyarázható annak feltételezésével, hogy a látóirányban több, különböző hőmérsékletű porkomponens is található. Az égbolt leghalványabb területein meghatároztuk a jellemző spektrálindeket, melynek értékére -2.3 -at kaptunk. A korrekt spektrálindeke használata nélkülözhetetlen amikor a kozmikus infravörös háttér fluktuációs amplitúdóját kívánjuk meghatározni.

Az IRAS mesterséges hold 1983-ban az egész eget lefedő felmérése során sok olyan hideg forrást talált, amelyeket csak a leghosszabb IRAS-hullámhosszon, 100 mikrométeren lehetett megfigyelni. Ezeket a forrásokat az IRAS mérései alapján a csillagközi ún. cirrusz felhők sűrűsödéseinek tekintették. Az ISOPHOT kiterjedt mérési programot szentelt annak, hogy kiderítse ezen források valódi természetét, és hogy valóban a cirrusz (és így az égi háttér) részei-e. Elkezdtük ennek az adatbázisnak a kiértékelését. Elsőként a legújabb kalibrációs módszerekkel feldolgoztuk a program számára "pilot study"-ként tervezett mérést, amely egy, a Cepheus csillagképben lévő hideg forrást tanulmányoz. Felhasználva az ISOPHOT

nagyszámú szűrőjét, meghatároztuk a "csak 100" forrás spektrális energiaeloszlását 60 és 200 mikrométer között. Eredményeink alapján úgy tűnik, hogy a forrás egy hideg csomó a cirruszon belül, és nem csak oszlopsűrűsége, hanem térfogati sűrűsége is nagyobb, mint a környező anyagé. Ha a többi megmért forrás is hasonló természetűnek bizonyul, akkor a galaktikus cirrusz egy új komponensét sikerül azonosítani és leírni. Ezek további analízise folyamatban van.

VII. A csillagközi por megnövekedett emisszivitása távoli-infravörös hullámhosszakon

Ahhoz, hogy egy háttérkomponens járulékát megfelelően becsülhessük (és levonhassuk), nem elég tudni a benne foglalt porszemcsék mennyiségét (pl. egy csillagközi felhő teljes portartalmát), hanem tudni kell a szemcsék emisszivitását is. Annak kiderítésére, hogy a por távoli infravörös emisszivitása egy állandó érték-e vagy pedig függ a környezet fizikai paramétereitől (pl. hőmérséklet) az ISOPHOT adatait használtuk fel. Első lépésként nyolc csillagközi felhőt vizsgáltunk, amelyekben a cirrusz felhők távoli infravörös hullámhosszakon mért színeit tanulmányoztuk ISOPHOT térképek alapján. A távoli infravörös emissziót az optikai extinkciós térképekkel összevetve azt tapasztaltuk, hogy a por egységnyi extinkcióra eső infravörös emissziója nem csökken a hidegebb területek irányában. Ez ellentétes a várakozásokkal, hiszen a Stefan-Boltzmann törvény alapján a hősugárzás intenzitása a hőmérséklet negyedik hatványával változik. Eredményeink arra utalnak, hogy a por emisszivitása többszörösére nő ezeken a hullámhosszakon, pl. a kisebb individuális porszemcsék nagyobb "fürtökké" való összeállása által.

A második lépésben további 25 területen folytattuk ezen eredmények ellenőrzését. A kiválasztott mezőket 200 mikronos hullámhosszon észlelte az ISOPHOT, az optikai extinkciós térképet pedig a 2MASS közeli infravörös felmérés alapján készítettük el. Az eredmények szerint az emisszivitas függ a porszemcsék hőmérsékletétől. 12-14 K között közel kétszeres emisszivitas-növekedés volt megfigyelhető, amelynek oka lehet jégképződés a szemcsék felszínén, illetve szilícium alapú porrészecskék összetapadása. A nagyobb emisszivitas értékek hiánya azonban kizárja a szén alapú szemcsék jelentős mennyiségét.

Mivel vizsgálatainkba nagyszámú felhőt bevontunk, eredményeink azt sugallják, hogy az egész égen érvényes eredményről van szó. Ennek nagy jelentősége lehet majd amikor a mért teljes fényességből ki kell vonni a cirrusz komponens az extra-galaktikus háttérsugárzás meghatározása céljából. Továbbá, ha a galaktikus por már a viszonylag kis sűrűségű cirrusz felhőkben is nagyobb hatékonysággal sugároz mint eddig feltételezték, az megváltoztatja a távoli infravörös és szubmilliméteres hullámhosszakon jósolható háttérértékeket is.

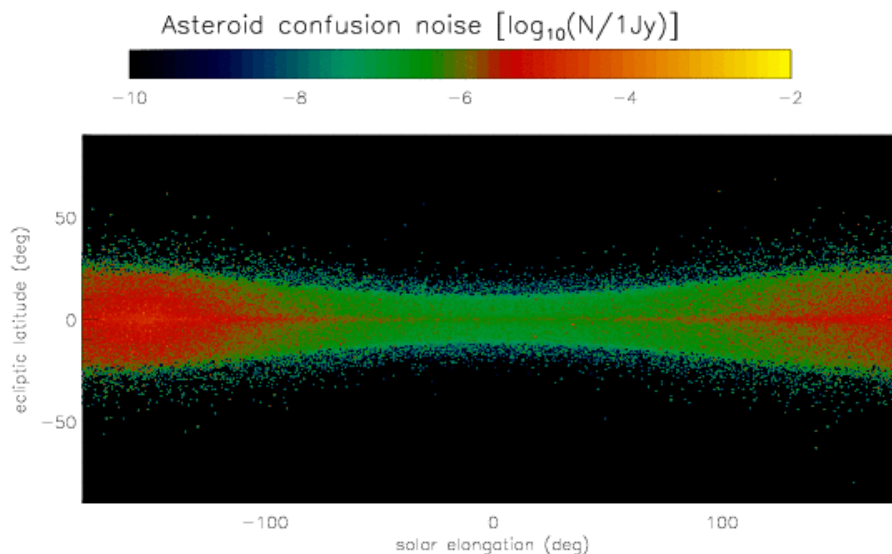
Hogy tovább vizsgálhassuk az effektust, ahhoz több olyan terület kellene, ahol ismerjük a por hőmérsékletét, azaz több olyan ISOPHOT térképre lenne szükség, amelyet legalább két szűrővel megmérték. Sajnos nem sok ilyen eset van, ezért megvizsgáltuk annak lehetőségét, hogy a por hőmérsékletét az IRAS 100 mikrométeres és az ISOPHOT 200 mikrométeres mérése összehasonlításával határozzuk meg. Azt találtuk, hogy az így kapott pontosság - bár rosszabb, mintha két ISOPHOT szűrőt kombinálunk - még mindig kielégítő a tervezett vizsgálatokra. Ezzel lehetőség nyílt nagyszámú ISOPHOT térkép bevonására a por emisszivitási vizsgálatainkba.

Ha a porszemcsék szerkezete valóban változik a csillagközi felhőkben, akkor ennek tükröződnie kell az optikai extinkció hullámhossz-függésében is. Erre utaló találtunk az L1251 sötét felhőben, ahol az R szelektív extinkció értéke a felhő sűrű részeink a szokásos 3.1 helyett 4.5-5-ös értéket is felvehet. Hogy további, az ISOPHOT által észlelt felhőkben is kimérhessük az effektust, megfigyelési programot indítottunk a piszkéstetői Schmidt teleszkóp felhasználásával.

VIII. Az infravörös égbolt konfúziós zajának vizsgálata

Az infravörös ég háttérsugárzásának térbeli fluktuációi okozzák az ún. konfúziós zajt, amely a háttérsugárzás egyik, gyakorlati szempontból rendkívül fontos, paramétere. Ez szabja ugyanis meg, hogy mekkora pontatlanságot követünk el egy pontforrás háttérének levonásakor, tehát hogy egy tökéletes távcsővel és tökéletes detektorral milyen halvány forrásokat figyelhetünk még meg az égen. A konfúziós zaj szoros kapcsolatban van az infravörös háttér komponenseinek (naprendszerbeli, cirrusz, extragalaktikus) térbeli finomszerkezetével, ezért az előzőekben ismertetett eredményeink felhasználhatók a tanulmányozására. Az infravörös ég háttérsugárzásának térbeli fluktuációi, az ún. konfúziós zaj értéke nem csak a háttér fényességétől függ, hanem függ a mérési konfigurációtól is. Ezért megvizsgáltuk a konfúziós zaj függését a mérési konfigurációtól az ISOPHOT összes mérési módjára a 90-200 mikronos hullámhossztartományban. Egy további részletes vizsgálat keretében meghatároztuk a konfúziós zaj amplitúdóját az ISOPHOT műszer távoli-infravörös detektorai által használt különböző mérési forgatókönyvekre, és konkrét számértéket adtunk meg minden egyes ilyen ISOPHOT mérésre (ezek a jóslatok bekerültek közben az ISO archívumába is). Eredményeinket általánosítva jóslatot adtunk a konfúziós zajra több jelenlegi ill. a közeljövőben működni kezdő infravörös űreszköz mérési konfigurációira is (Spitzer/MIPS, ASTRO-F/FIS, Herschel/PACS).

Mivel a kisbolygók térbeli és időbeli eloszlására rendelkezésre áll egy modellünk (ld. V. pont), lehetőség nyílt meghatározni a kisbolygók okozta konfúziós zaj nagyságát. Ezekből az egészen friss eredményekből kiderült, hogy a Herschel műhold esetében ez a konfúziós zaj komponens már nem lesz elhanyagolható, különösen az ekliptikai síkhoz közel (ld. az ábrát). Jelenleg ez a legjobb elérhető modell az aszteroida konfúzió becslésére.



Összefoglalás

Az OTKA projekt célja az infravörös háttérsugárzás komponenseinek vizsgálata és kvantitatív jellemzése volt, azzal a perspektívikus céllal, hogy a különböző „lokális” (naprendszerbeli, galaktikus) komponensek levonása után detektáljuk az izotróp kozmikus háttérsugárzást (az Ősrobbanás után keletkezett első csillagok fénye amely ma már a vöröseltolódás és a porszemcsék által történt elnyelés és újra kisugárzás miatt hosszabb hullámhosszakon figyelhető meg). Az ehhez vezető út során nagyon jelentős energiát fektettünk be az ISOPHOT műszer szinte teljes újrakalibrálásában, amelynek során csoportunk vezető helyet vívott ki az ISOPHOT adatok feldolgozásában. Kalibrációs eredményeinket és módszereinket elérhetővé tettük az ISOPHOT adatközpont és az érdeklődő kollégák számára is. A galaktikus cirrusz finomszerkezetére kapott eredményeinket (miszerint a térbeli eloszlás Fourier-színképeinek meredeksége változik a terület fényességével) azóta több más területen is használják, pl. optikai hullámhosszakon is. A konfúziós zaj meghatározásával kapcsolatban az utóbbi években felgyűlt tapasztalatot elismerve az ESA szerződött csoportunkkal, hogy a 2008-ban startoló Herschel infravörös hold konfúziós zaj programját Budapestről koordináljuk. Ennek része egy olyan szoftvercsomag kifejlesztése is, amely már a mérések tervezési fázisában figyelmezteti az észlelőt, ha a megfigyelni kívánt pontforás a háttér egyenletlenségei miatt nem fotometrálnak elég pontosan. Megemlítendő az is, hogy az extragalaktikus háttér értékére a konfúziós zaj méréseiből 2001-ben tett jóslatunkat azóta sokat idézik az irodalomban. Az infravörös égi háttér tanulmányozása természetesen a jelenlegi OTKA pályázat lezárása után is folytatódik. Jelenleg van folyamatban a nagy háttér adatbázisaink tömeges processzálása az új PIA V11.2 szoftvercsomagunkkal, utána pedig a pályázatunk segítségével az előtérkomponensekre elért nagyszámú eredmény felhasználásával komponensekre bontjuk a mért abszolút fényesség értékeket.

Budapest, 2006. február 26.

Ábrahám Péter
témavezető