TARTU ÜLIKOOL

Loodus- ja täppisteaduste valdkond

Tartu observatoorium

Füüsika, keemia ja materjaliteaduse õppekava

Mari-Ann Raun

Erinevate k-korrektsiooni algoritmide võrdlus ning mõju galaktikate heledustele

Bakalaureusetöö (12 EAP)

Juhendaja: Elmo Tempel, PhD

Tartu 2025

Erinevate k-korrektsiooni algoritmide võrdlus ning mõju galaktikate heledustele

Lühikokkuvõte:

Universumi paisumise tõttu galaktikad kaugenevad üksteisest ja nende spektrite lainepikkused pikenevad ehk punanihkuvad. Kui galaktikad asuvad erinevatel kaugustel ehk punanihetel, on nende vaadeldav spekter üksteise suhtes moonutatud. Galaktikate üksteisega võrdlemiseks tuleb nende spektrid samale punanihkele teisendada. Selleks kasutatavat parandusliiget nimetatakse k-korrektsiooniks ning seda on vaja galaktikate heleduse korrektseks arvutamiseks.

Käesolevas bakalaureusetöös võrreldi kahe erineva algoritmiga arvutatud k-korrektsioone ning nende mõju galaktikate heledustele.

Võtmesõnad:

Kosmoloogia, punanihe, k-korrektsioon, heledusfunktsioon, galaktikad

CERCS: P520 Astronoomia, kosmoseuuringud, kosmosekeemia

Comparison of different k-correction algorithms and their effect on the luminosity of galaxies

Abstract:

Due to the expansion of the universe, galaxies are moving away from one another and the wavelengths of their spectra get stretched out. This phenomenon is known as redshift. When galaxies are situated at different distances or redshift values, their observed spectrum is deformed in comparison. It is therefore necessary to convert their spectra into a rest-frame at equal redshift using k-corrections. This bachelor's thesis

discusses and compares two different algorithms for calculating k-corrections and the effects of the k-corrections on the luminosities of galaxies.

Keywords:

Cosmology, redshift, k-correction, luminosity function, galaxies

CERCS: P520 Astronomy, space research, cosmic chemistry

Sisukord

1 Peatükk

Ülevaade mõistetest **6**

1.1 Kosmoloogiline punanihe 6

1.2 Heledus ja heledusfunktsioon 7

1.3 K-korrektsioon 7

2 Peatükk

Töö käik ja meetodid **8**

2.1 Vaatlusprogrammid ja andmestikud 8

2.2 Filtrid 8

2.3 kcorrect ja TOPz algoritmid 9

2.4 Valim ja andmetöötlus 10

3 Peatükk

Tulemused **11**

3.1 K-korrektsioonide arvutuste repeteeritavus filtri r näitel 11

3.2 K-korrektsioonide võrdlus GAMA andmestikul 11

3.3 kcorrecti ja TOPz k-korrektsioonide suhe 15

3.4 Heleduste arvutamine 16

3.5 Algoritmide vea hindamine 16

Viidatud kirjandus **24**

II. Litsents 26

Sissejuhatus

Kosmoloogia on astronoomia haru, mis uurib universumi tekkepõhjuseid ja arengut, struktuuri ning seda mõjutavaid parameetreid.

Galaktika spekter on nagu tema sõrmejälg. Spektraalne energia jaotus (*spectral energy distribution*, lühendatult SED) kujutab endast galaktika kiiratava energia jaotust lainepikkustel. Sellest jaotusest saab informatsiooni galaktika kauguse, tüübi, suuruse, vanuse ja koostise kohta.[8]

Selles bakalaureusetöös käsitletakse galaktikate uurimise jaoks olulist probleemi, milleks on täpsem galaktikate heleduse määramine. Konkreetsemalt uuritakse töös k-korrektsiooni mõju galaktikate heledustele, kasutades kaht erinevat k-korrektsiooni algoritmi.

Esimese algoritmi uuritavatest arendasid välja Michael R. Blanton ja Sam Roweis [3] ning see on vabavaraliselt saadaval Pythoni moodulina `kcorrect` [2]. Teine algoritm, nimega TOPz ehk Tartu Observatory Photo-z on Tartu observatooriumis arendatud algselt fotomeetrilise punanihke hindamiseks ja nüüd ka k-korrektsiooni arvutamiseks [11].

Käesoleva töö eesmärgiks on hinnata algoritmide täpsust ja uue TOPz algoritmi sobivust täpsemate k-korrektsioonide arvutamiseks.

Esimeses peatükis antakse ülevaade töös kasutatud astronoomia erialastest terminitest.

Teises peatükis tutvustatakse töö käiku ja meetodeid: vaatlusprogramme, millest pärinevad arvutuste algandmed, filtreid ja k-korrektsiooni arvutamise algoritme.

Kolmandas peatükis näidatakse arvutuste tulemusi joonistena ning võrreldakse algoritmidega arvutatud k-korrektsioone ja neist taastatud heledusi mudeldatud tegelike heledustega.

1 Peatükk

Ülevaade mõistetest

Selles peatükis antakse ülevaade käesoleva bakalaureusetöö jaoks olulistest kosmoloogia valdkonnas kasutatavatest mõistetest ja uurimismeetoditest.

1.1 Kosmoloogiline punanihe

Punanihe on elektromagnetkiirguse spektrijoonte nihkumine pikemate lainepikkuste poole ehk spektri punasema osa suunas, mille tõttu paistab vaadeldav objekt tegelikkusest punasem.

Kosmoloogiline punanihe on tingitud universumi paisumisest. Kuna universum paisub igas suunas sama kiirusega, on näiteks Maal asuva vaatleja jaoks astronoomiliste objektide kaugus proportsionaalne nende eemaldumise kiirusega. Seega võimaldab kosmoloogiline punanihe meil vaatluse läbi leida vaadeldava objekti kauguse. Vaatlusandmetes antaksegi kaugused harilikult punanihke (tähistatud z) väärtustena.

Kosmoloogilist punanihet määratakse kahel viisil: spektroskoopiliselt ja fotomeetriliselt. Spektroskoopilist punanihet määratakse teadaolevate tugevate spektrijoonte nihkumise järgi. Universumi paisumisest vaba (ehk punanihkumata) spektrijoone lainepikkuse võrdlemine galaktika spektri vastavate joontega annabki vahena galaktika punanihke. Spektroskoopiline võrdlus on astronoomias oma täpsuse pärast eelistatud punanihke määramise meetod. [8]

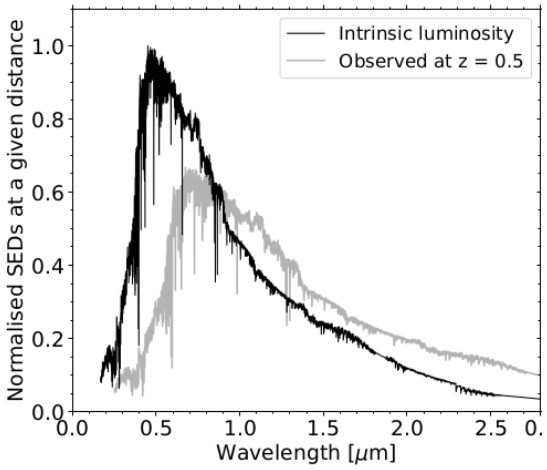
Fotomeetriline punanihe on väiksema täpsusega kui spektroskoopiline, kuid see eest tunduvalt ajasäästlikumalt määratav. Efektiivsemaks universumi kaardistamiseks arendatakse mitmeid erinevaid meetodeid, mis fotomeetrilise punanihke täpsust suurendaksid. [8, 11]

1.2 Heledus ja heledusfunktsioon

Üks olulisemaid parameetreid astronoomias on heledus. Heledus on defineeritud kui elektromagnetilise energia hulk ajaühikus. Heledusfunktsioon näitab, mitu galaktikat on ühes heledusintervallis. Astronoomias väljendatakse heledusi tihti hoopis tähesuurustes: ühikuta logaritmilistes suurustes. Töös kasutatud vaatlusandmed olid enamasti antud voo ühikutes, milleks on Jansky ($1\mathrm{Jy} = 10^{-26}\mathrm{W} \cdot \mathrm{m}^{-2} \cdot \mathrm{Hz}^{-1}$).

1.3 K-korrektsioon

K-korrektsioon on lainepikkusest sõltuv parandusliige, mis teisendab punanihkunud galaktikate spektrid samasse taustsüsteemi, mille punanihe $z = 0$[8]. K-korrektsioon võimaldab omavahel võrrelda erinevatel punanihetel asuvate galaktikate spektreid[5]. Joonisel 1 on halliga kujutatud originaalne punanihkel 0,5 vaadeldud heleduste spekter. Must joon tähistab k-korrigeeritud ehk universumi paisumisest vabasse taustsüsteemi teisendatud spektrit. [9]



Joonis 1. Spekter enne ja pärast k-korrektsiooni (fig 1. [9])

2 Peatükk

Töö käik ja meetodid

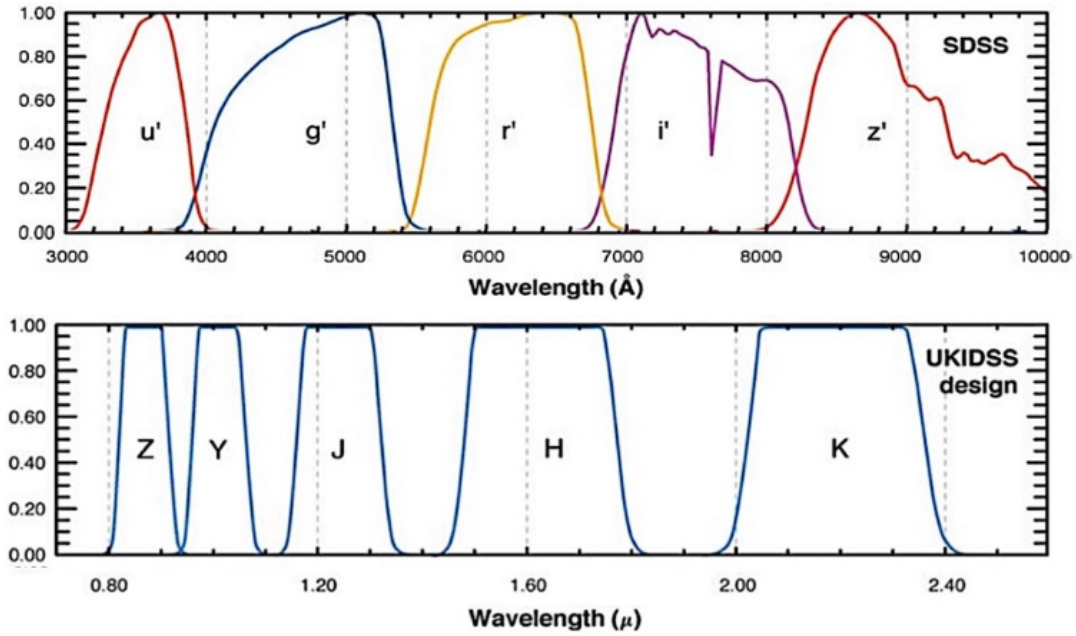
Selles peatükis tutvustatakse kõigepealt töös kasutatud vaatlusprogramme, andmeid ja filtreid. Seejärel on juttu täpsemalt k-korrektsiooni arvutusmeetoditest ning TOPz ja kcorrecti algoritmidest. Lõpuks seletatakse vaatlusandmetest valimi tegemist ning andmetöötluseks ja -analüüsiks kasutatud tööriistade kasutamist.

2.1 Vaatlusprogrammid ja andmestikud

Käesolevas töös on kasutatud vaatlusprogrammi Galaxy And Mass Assembly (siin ja edaspidi GAMA) neljanda andmeväljalaske (DR4) [6] andmeid. GAMA on Euroopa-Australaasia koostöös läbiviidav stereoskoopiline vaatlusprojekt, mis koondab aastatel 2008-2014 Anglo-Austraalia teleskoobiga (AAT) tehtud ning mitmete teiste iseseisvate vaatlusprogrammide vaatlusi [7, 4]. GAMA kataloog põhineb Sloan Digital Sky Survey (SDSS) ja UKIRT Infrared Deep Sky Survey andmestikel [7].
GAMA andmestikust valiti ligikaudu 200 000 galaktikat, mille heledused olid vaadeldud läbi üheksa erineva lainepikkuste vahemikku katva filtri [6].

2.2 Filtrid

Aastate jooksul on paljud vaatlusprogrammid kogunud andmeid galaktikate kohta, kasutades erinevaid filtreid. [3]
Töösse sai valitud üheksa fotomeetrilist filtrit optilises piirkonnas: u, g, r, i, Z, Y, J, H, Ks.
Joonis 2 illustreerib töös kasutatud andmestiku üheksat filtrit nende lainepikkuste vahemikega.



Joonis 2. Valitud üheksa filtrit[1]

2.3 kcorrect ja TOPz algoritmid

Mõlemas võrdluses olevas algoritmis kasutatakse malli sobitamise (*template fitting*) lähenemist. Blantoni Pythoni moodul `kcorrect` leiab sobiva lineaarkombinatsiooni viiest erinevast mallist, ehk galaktikad eeldatakse kuuluvat viite eri tüüpi. Galaktikate vaadeldud heledustele sobitatakse mallspekter, mis võimaldab arvutada k-korrektsiooni.[3]
Blantoni ja Roweis'i artiklis defineeritakse filtrite Q ja R vaheline k-korrektsioon $K_{QR}(z)$ valemiga

$$m_R = M_Q + DM(z) + K_{QR}(z) - 5\log_{10} h, \tag{1}$$

kus m_R on näiv tähesuurus, M_Q on absoluutne tähesuurus ja kosmoloogiline kaugus $DM(z) = 25 - 5\log_{10}(d_L/(h^{-1}\text{Mpc}))$.
`kcorrect` [3] arvutab k-korrektsiooni punanihkel z vaadeldud spektri filtri ja soovitava filtri vahel.
TOPz ehk Tartu Observatory Photo-z on fotomeetrilise punanihke hindamiseks arendatud

Bayesi malli sobitamise lähenemisel põhinev algoritm. TOPz 2025. aasta versiooni on kohandatud k-korrektsioonide arvutamiseks.
TOPz suurim erinevus `kcorrect`iga võrreldes on, et ta kasutab 555 malli, ehk algoritmil on sobitamisel valida 555 galaktika tüübi vahel.[11]

2.4 Valim ja andmetöötlus

Töös kasutati andmetöötluseks ja analüüsiks Pythoni keeles kirjutatud koodi ning spetsiaalselt astronoomia jaoks loodud TOPCATi (*Tool for Operations on Catalogues and Tables*) tarkvara versiooni 4.2-7 [10].
Peatükis 2 kirjeldatud andmestikuga toimiti järgmiselt. Valimi leidmiseks sorteeriti kõigepealt tulpadest välja kõik vaatluspiirkonnast väljapoole jäänud vigased andmepunktid. Seejärel arvutati Blantoni Pythoni paketti kcorrect [2] ja TOPz kasutades k-korrektsioonid GAMA andmestiku galaktikatele. Veendumaks, et k-korrektsioonide arvutamine toimub veatult, peavad tulemused vastama GAMA kataloogis antud k-korrektsioonide väärtustele.
Algoritmide võrdlemiseks genereeriti 50000 spektrit, mille puhul on teada nende täpne heledus [11]. Mõlema algoritmiga arvutati k-korrektsioonid ja heledused, mida võrreldi mudelspektritega. Andmetöötluseks ja jooniste tegemiseks kasutati TOPCATi.

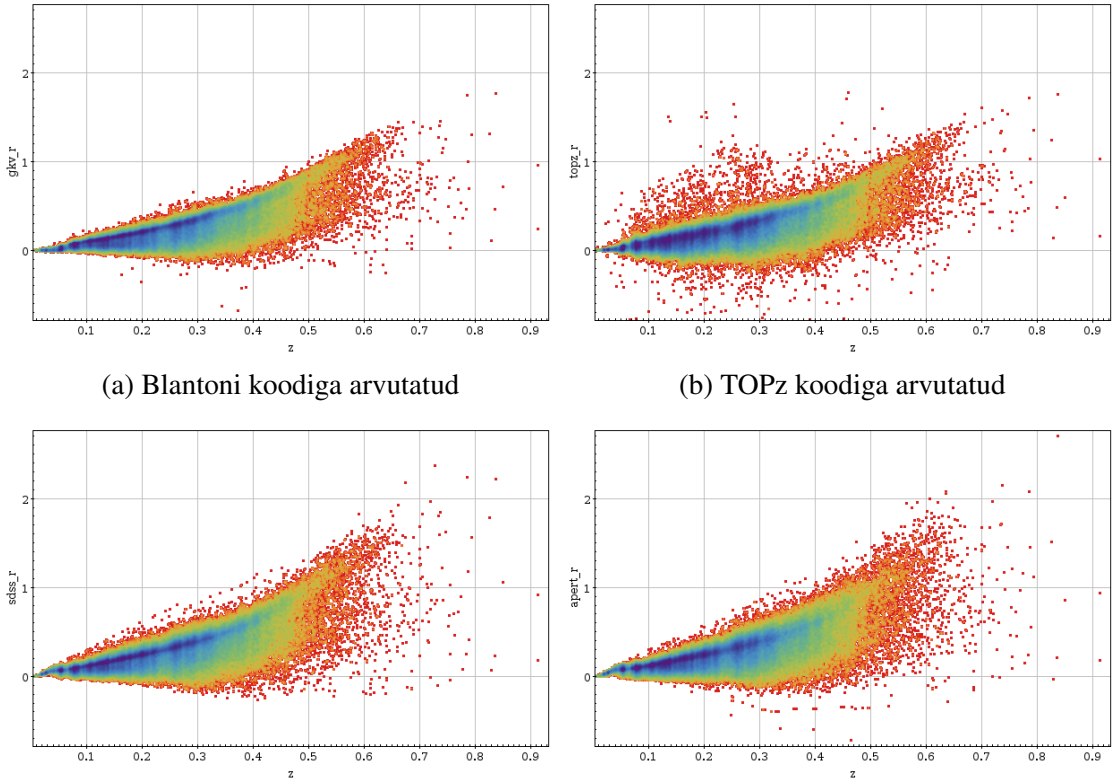
3 Peatükk

Tulemused

3.1 K-korrektsioonide arvutuste repeteeritavus filtri r näitel

Erinevate algoritmide ja algandmete võrdluseks on siin esitatud r-filtri k-korrektsioonid.

Joonis 3. k-korrektsioonid filtris r



(a) Blantoni koodiga arvutatud

(b) TOPz koodiga arvutatud

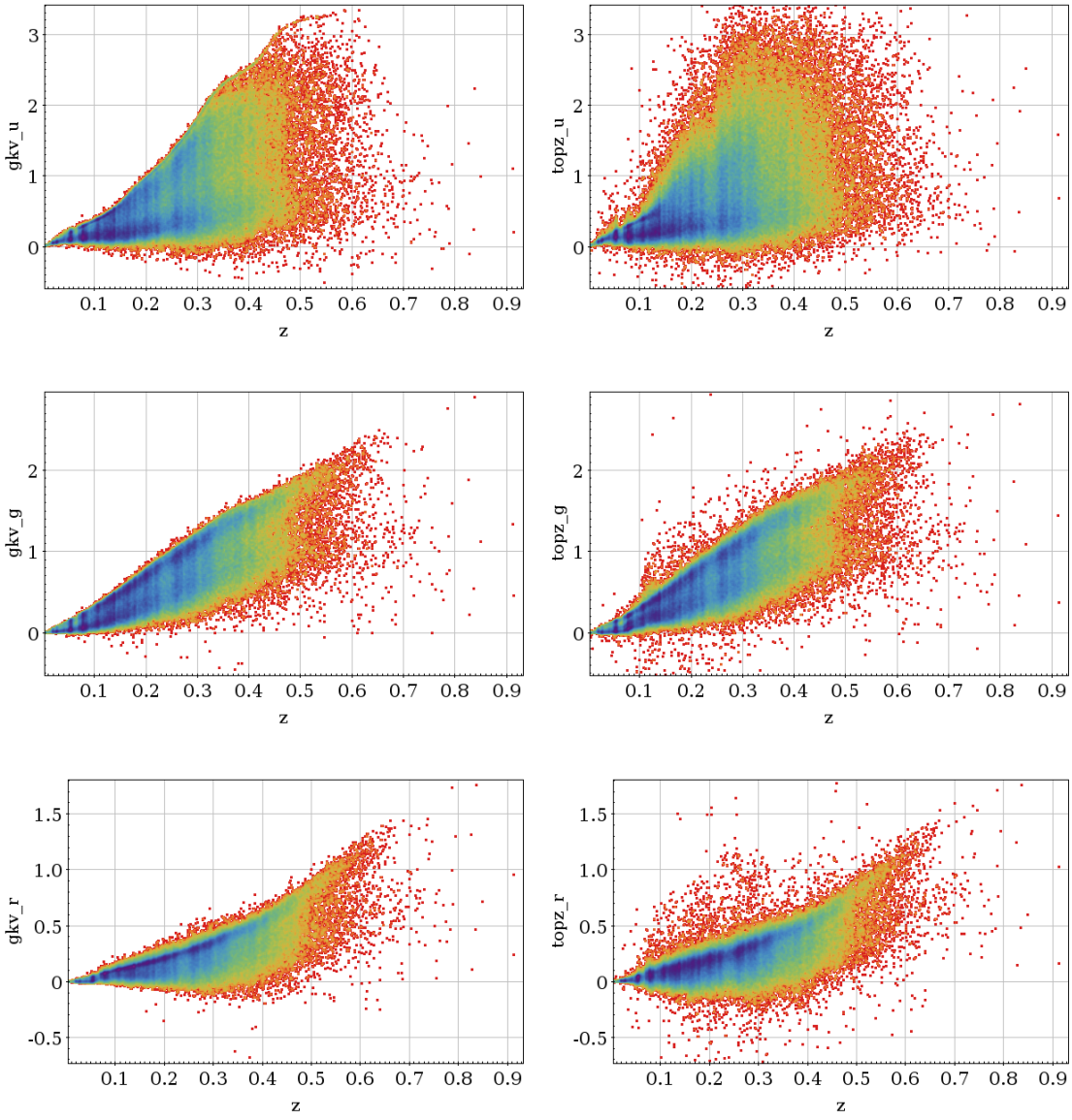
(c) SDSS tabelist

(d) Aperture tabelist

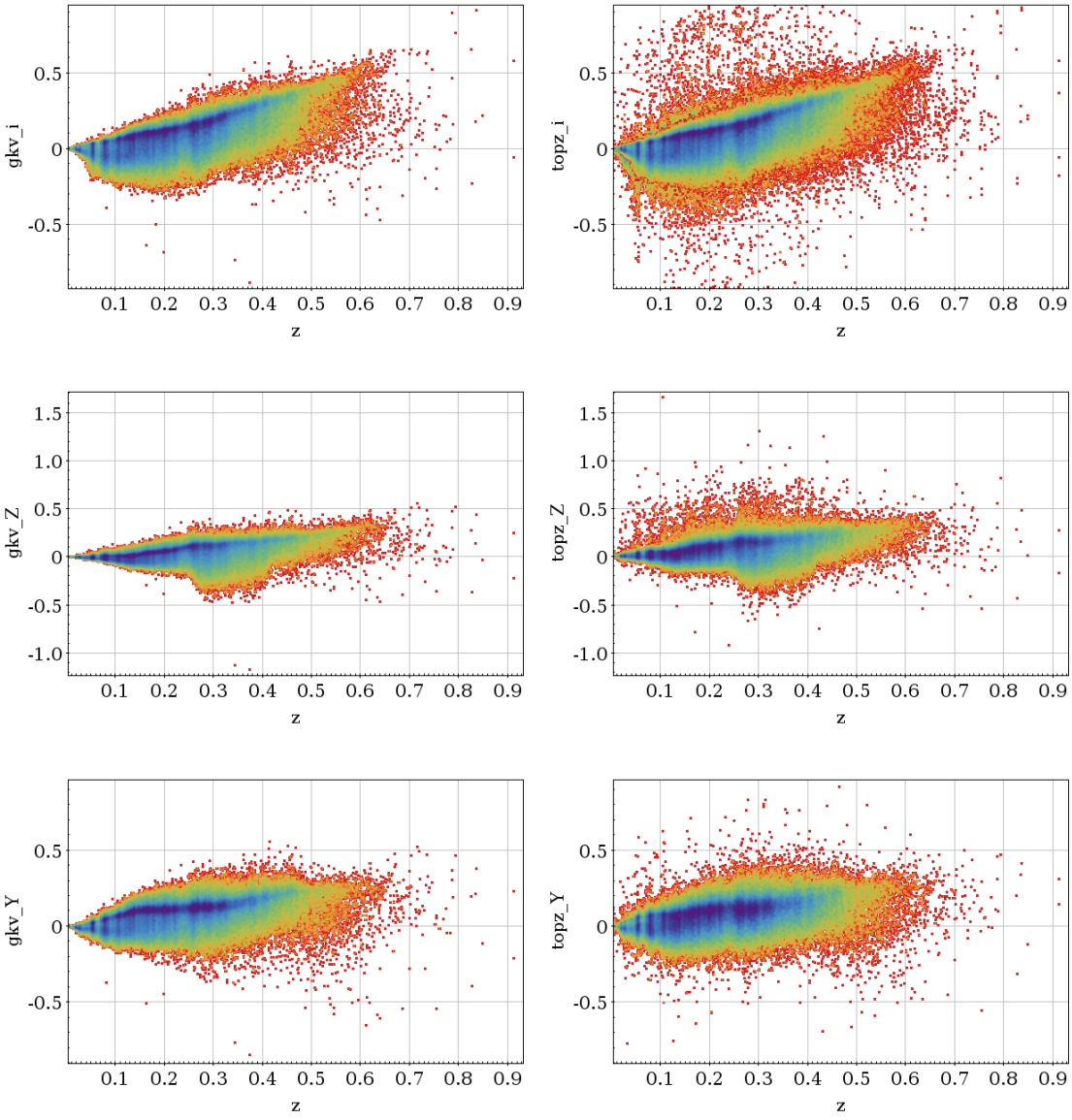
3.2 K-korrektsioonide võrdlus GAMA andmestikul

GAMA vaatlusandmetega arvutatud k-korrektsiooni sõltuvus punanihkest z Blantoni (vasakul) ja TOPz (paremal) algoritmiga üheksas filtris (u, g, r, i, Z, Y, J, H, K).

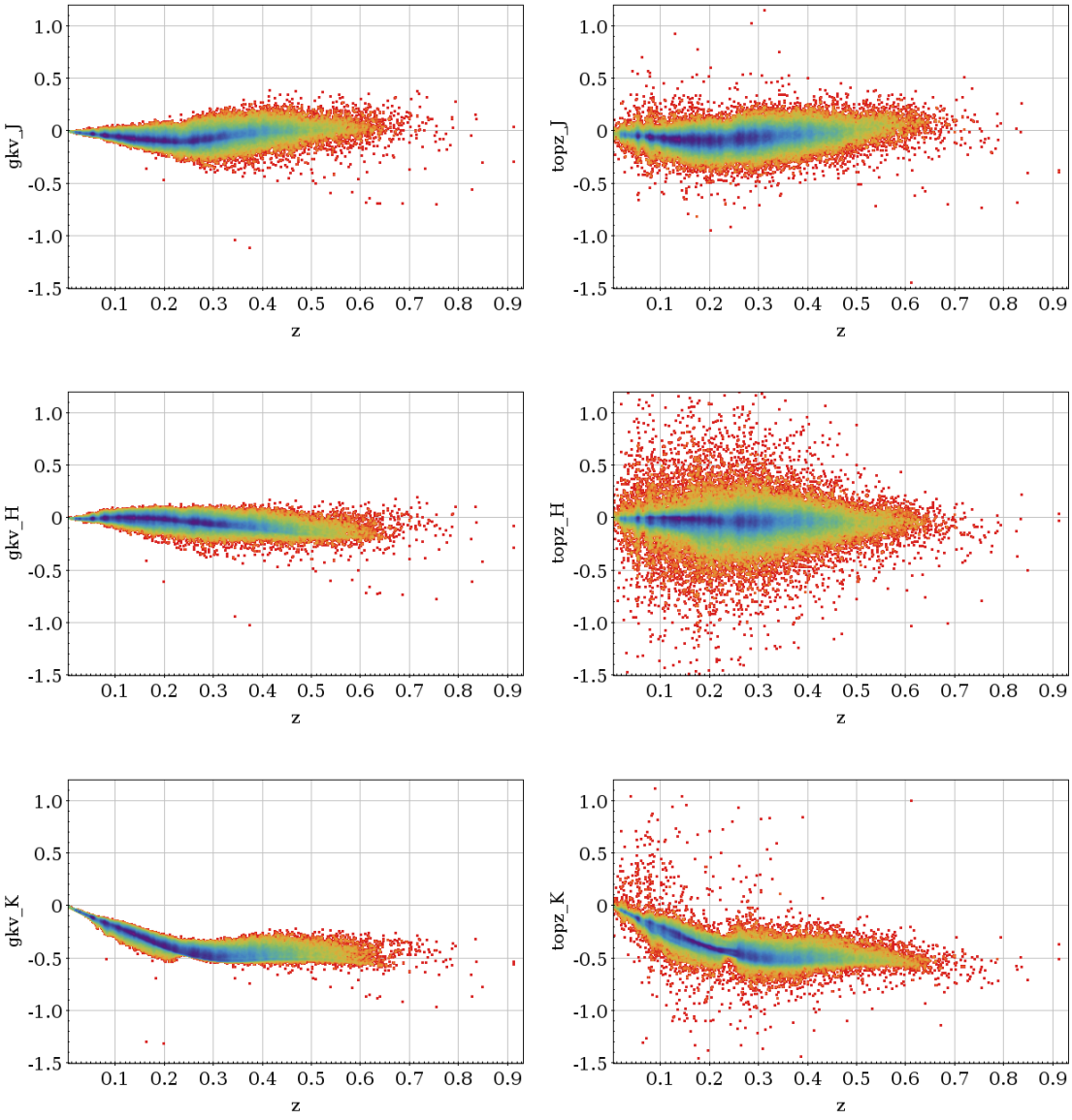
Joonis 4. Blantoni ja TOPz k-korrektsioonid



Joonis 4. Blantoni ja TOPz k-korrektsioonid



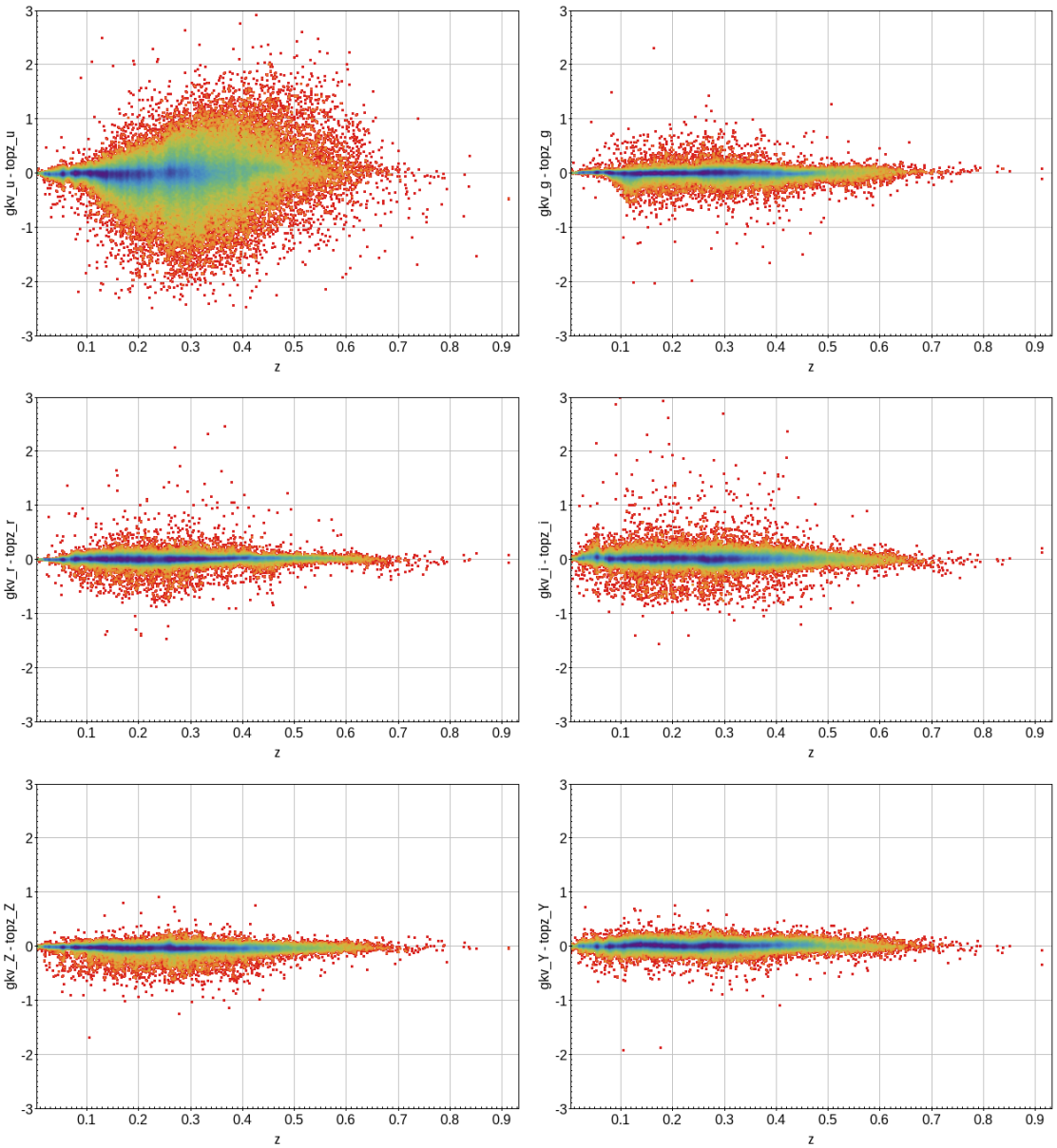
Joonis 4. Blantoni ja TOPz k-korrektsioonid



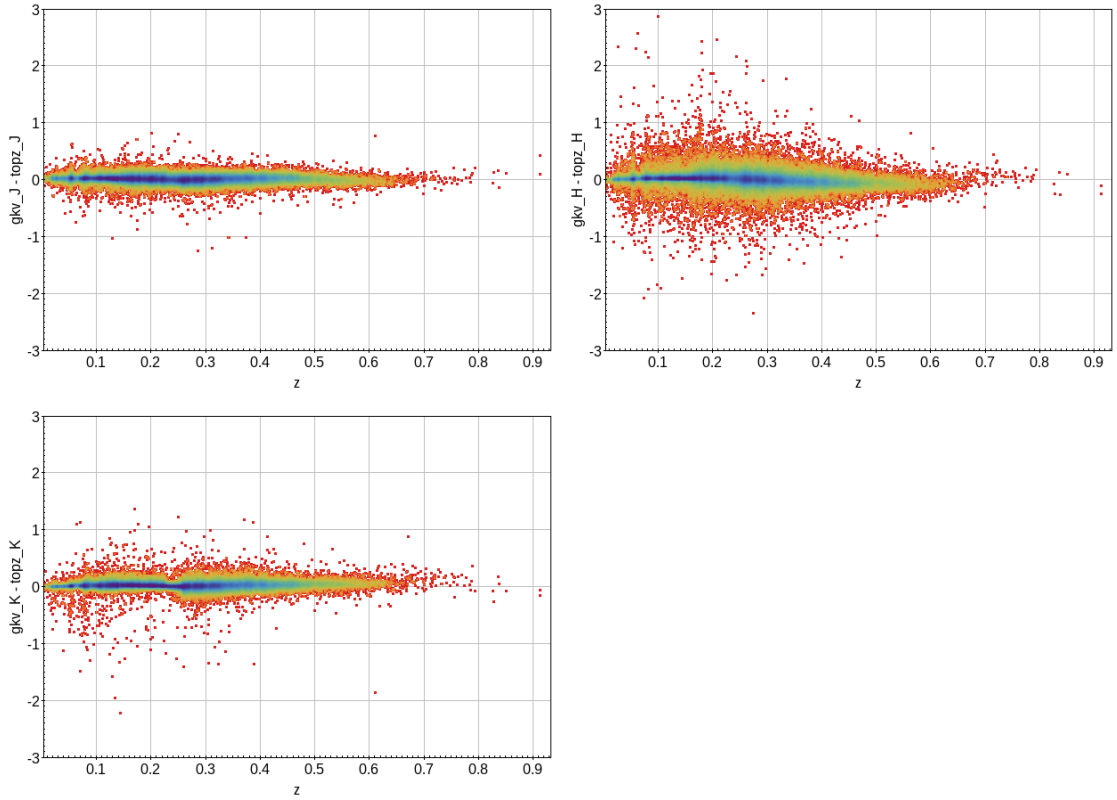
3.3 kcorrecti ja TOPz k-korrektsioonide suhe

Blantoni `kcorrecti` ja TOPz meetodite tulemuste varieeruvuse uurimiseks tehti graafikud nende suhetest. Joonisel 5 on kahe meetodi k-korrektsioonide suhted kõigi üheksa filtri kohta.

Joonis 5. $kcorr_{Blanton} - kcorr_{TOPz}$



Joonis 5. $kcorr_{Blanton} - kcorr_{TOPz}$



3.4 Heleduste arvutamine

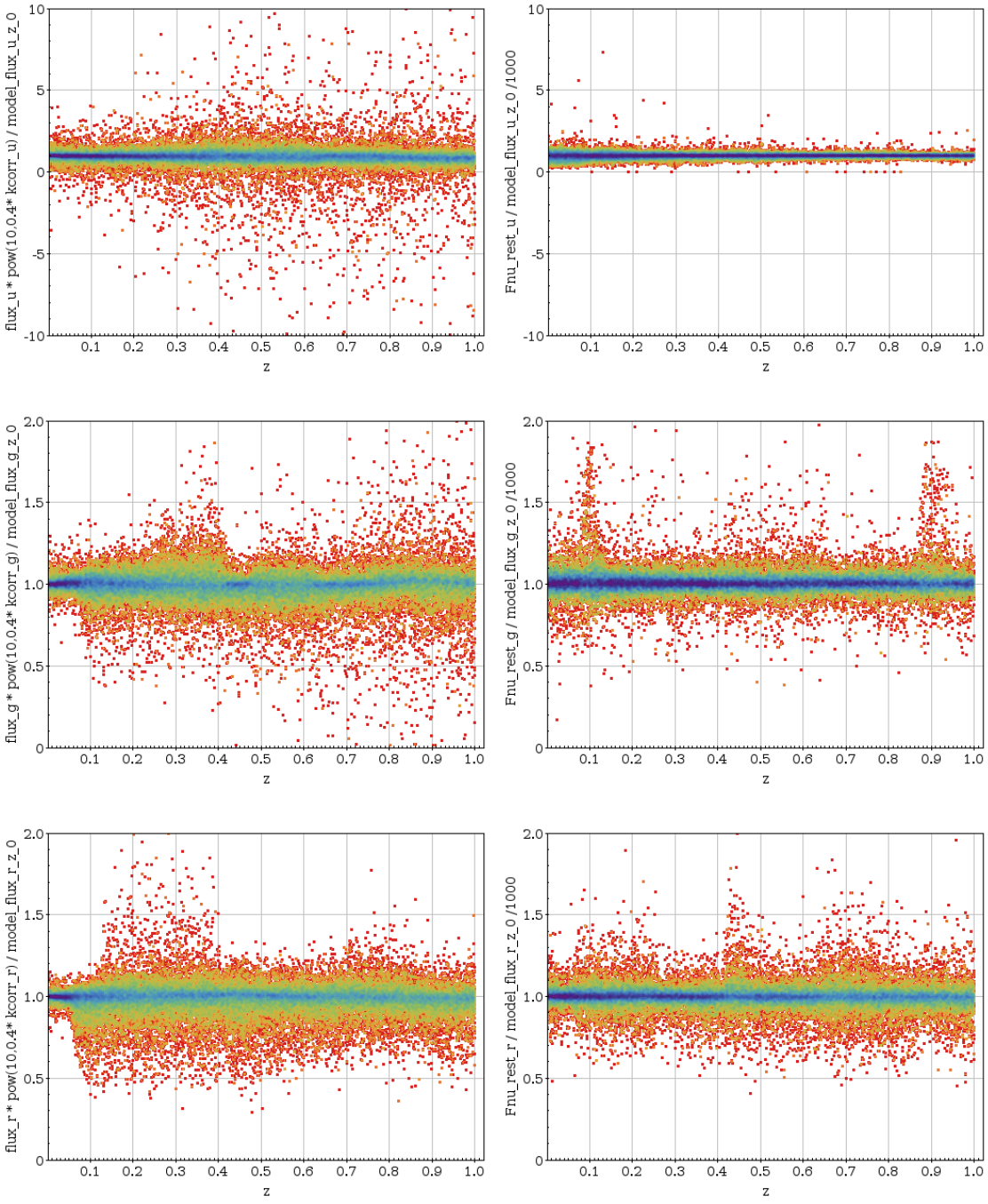
Kahe algoritmiga leitud k-korrektsioonide tulemuslikuks hindamiseks võrreldi nendega arvutatud heledusi mudelspektritega. Mudel koosnes 50 000 genereeritud spektrist. Arvutades mõlema algoritmiga mudelspektrite k-korrektsioonid ja heledused on näha algoritmide täpsus võrreldes algse spektriga.

3.5 Algoritmide vea hindamine

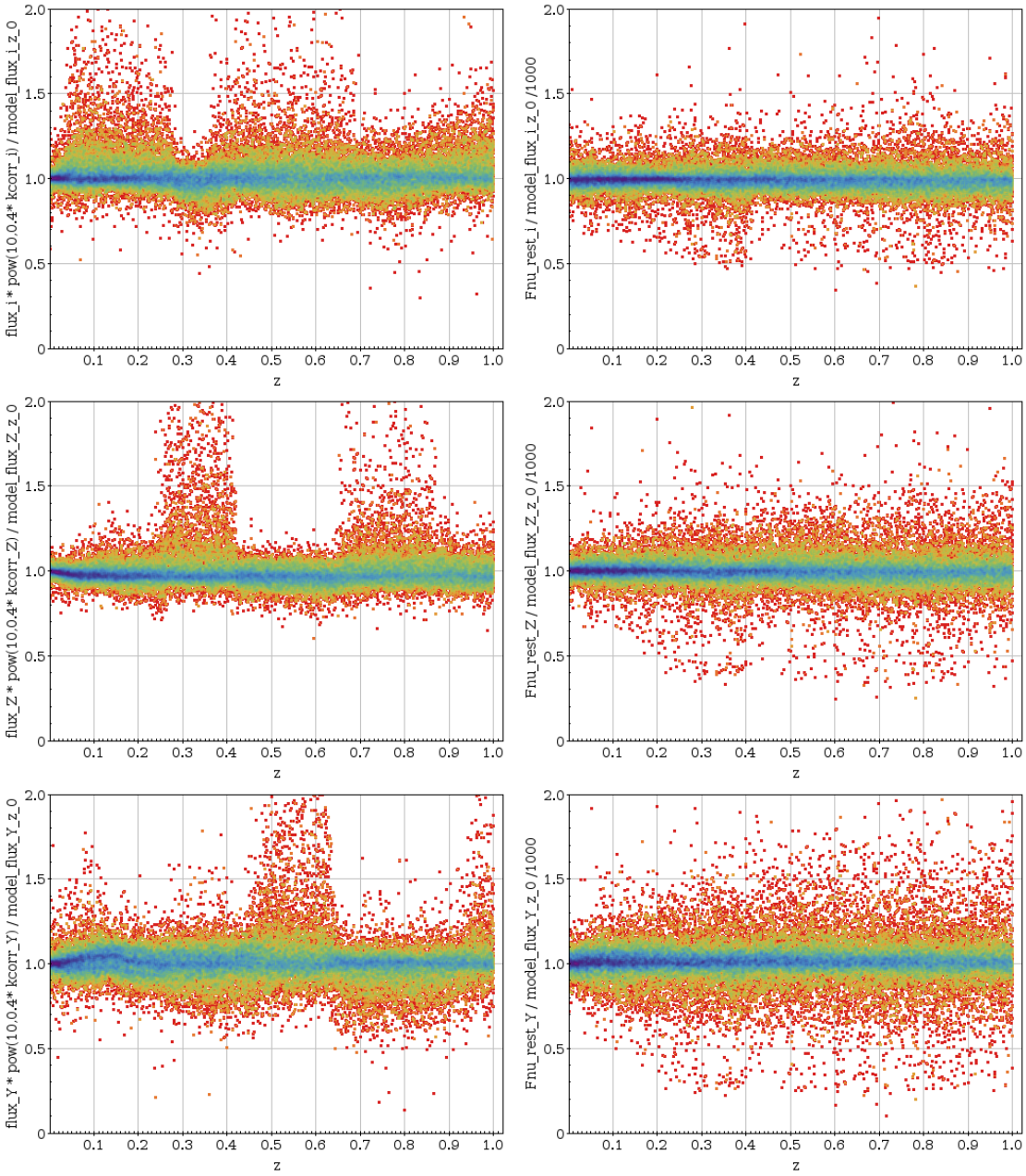
Algoritmide veamäära ja hajuvust üheksa filtri puhul kirjeldavad järgnevad joonised joonisel 7.

Joonistelt on näha, nagu joonis 6 lubas arvata, et TOPz on väiksema hajuvusega ja

Joonis 6. kcorrecti ja TOPz heleduse suhe mudelspektri suhtes

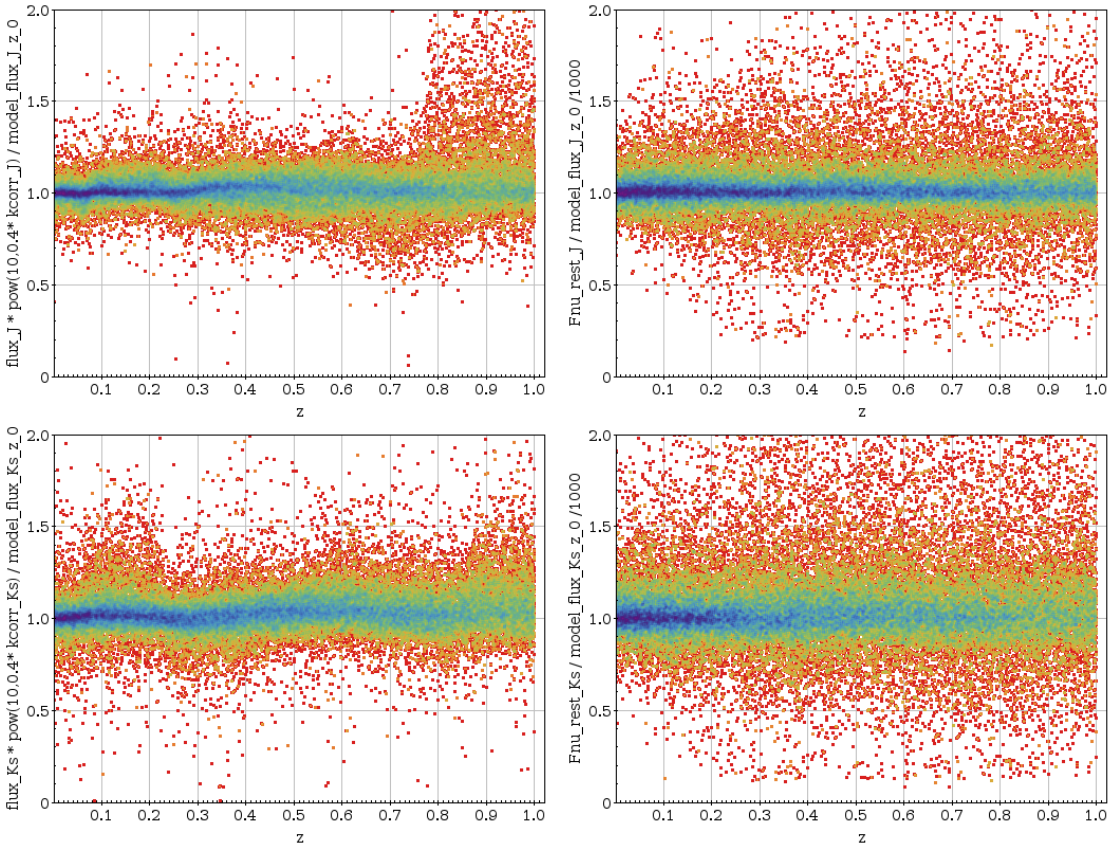


Joonis 6. kcorrecti ja TOPz heleduse suhe mudelspektri suhtes

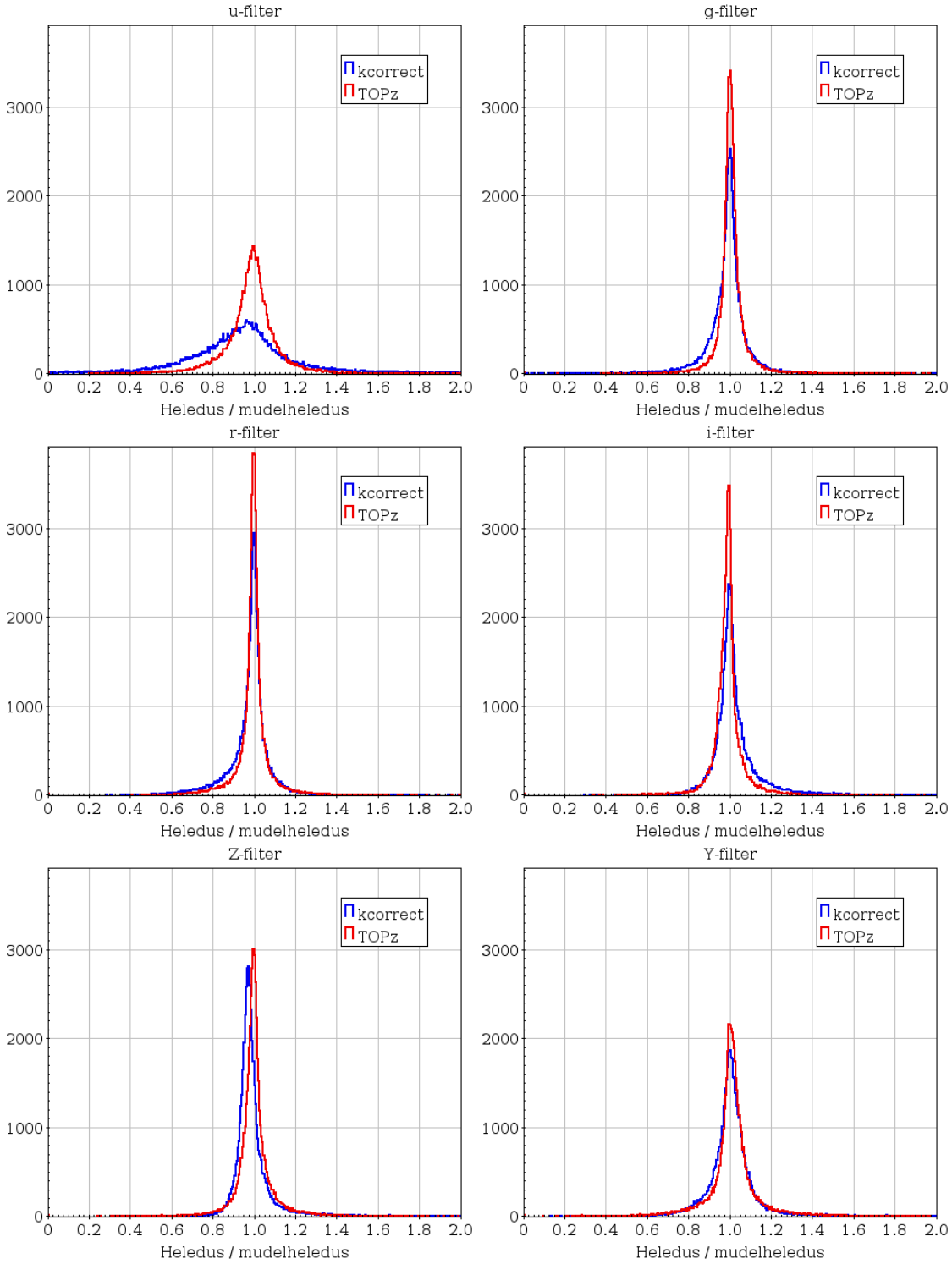


vähemate erinditega.

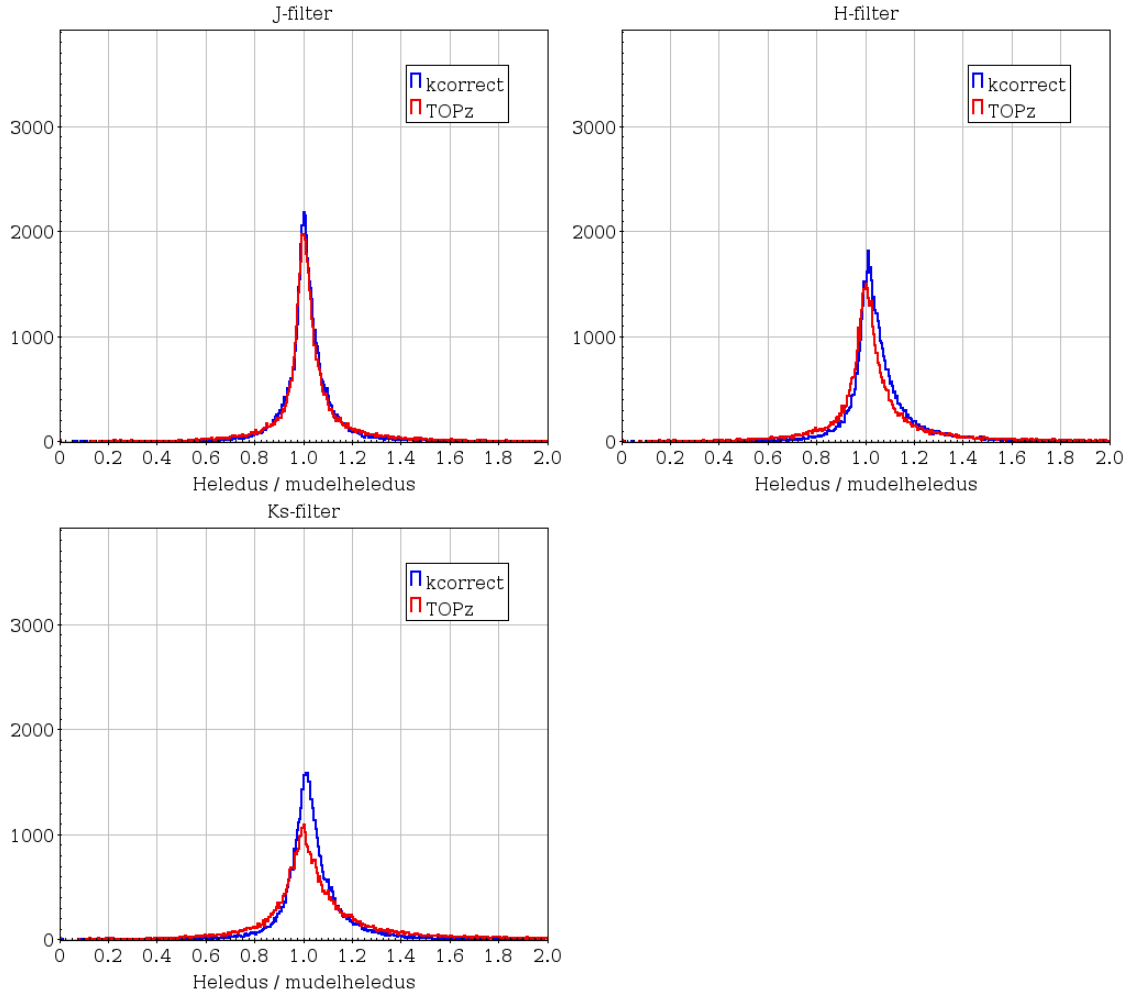
Joonis 6. kcorrecti ja TOPz heleduse suhe mudelspektri suhtes



Joonis 7. Algoritmide heleduste suhte jaotus



Joonis 7. Algoritmide heleduste suhte jaotus



Kokkuvõte

K-korrektsioonide täpsem arvutamine on oluline üha suurenevate andmehulkade juures. Töös näidati, et TOPz-ga saadud heleduste tulemused on järjepidevalt täpsemad kui Blantoni algoritmiga `kcorrect` arvutatud. Lisaks on TOPz k-korrektsioonid võrreldes `kcorrect` algoritmiga nihkevabad ja annavad kuni paar protsenti täpsema tulemuse. Need paar protsenti on olulised järgmise põlvkonna vaatlusprogrammide andmetöötluses, kus vaatlusandmete hulk kordades kasvab.

Viidatud kirjandus

[1] MichaelŠ. Bessell. Standard photometric systems. *Annual Review of Astronomy and Astrophysics*, 43(Volume 43, 2005):293–336, 2005.

[2] Michael R. Blanton. kcorrect, 2023. version 5.1.5.

[3] Michael R. Blanton and Sam Roweis. K-corrections and filter transformations in the ultraviolet, optical, and near-infrared. *The Astronomical Journal*, 133(2):734–754, January 2007.

[4] Simon P. Driver, Sabine Bellstedt, Aaron S. G. Robotham, Ivan K. Baldry, Luke J. Davies, Jochen Liske, Danail Obreschkow, Edward N. Taylor, Angus H. Wright, Mehmet Alpaslan, Steven P. Bamford, Amanda E. Bauer, Joss Bland-Hawthorn, Maciej Bilicki, Matías Bravo, Sarah Brough, Sarah Casura, Michelle E. Cluver, Matthew Colless, Christopher J. Conselice, Scott M. Croom, Jelte de Jong, Franceso D'Eugenio, Roberto De Propris, Burak Dogruel, Michael J. Drinkwater, Andrej Dvornik, Daniel J. Farrow, CarlosŠ. Frenk, Benjamin Giblin, Alister W. Graham, Meiert W. Grootes, Madusha L. P. Gunawardhana, Abdolhosein Hashemizadeh, Boris Häußler, Catherine Heymans, Hendrik Hildebrandt, Benne W. Holwerda, Andrew M. Hopkins, Tom H. Jarrett, D. Heath Jones, LeeŠ. Kelvin, Soheil Koushan, Konrad Kuijken, Maritza A. Lara-López, Rebecca Lange, Ángel R. López-Sánchez, Jon Loveday, Smriti Mahajan, Martin Meyer, Amanda J. Moffett, Nicola R. Napolitano, Peder Norberg, MattŠ. Owers, Mario Radovich, Mojtaba Raouf, John A. Peacock, Steven Phillipps, Kevin A. Pimbblet, Cristina Popescu, Khaled Said, Anne E. Sansom, Mark Seibert, Will J. Sutherland, Jessica E. Thorne, Richard J. Tuffs, Ryan Turner, Arjen van der Wel, Eelco van Kampen, and Steve M. Wilkins. Galaxy And Mass Assembly (GAMA): Data Release 4 and the z < 0.1 total and z < 0.08 morphological galaxy stellar mass functions. , 513(1):439–467, June 2022.

[5] Catherine E. Fielder, Brett H. Andrews, Jeffrey Newman, and Samir Salim. Empirically Driven multiwavelength K-corrections at low redshift. , 525(1):1023–1038, October 2023.

[6] GAMA. Gama dr4, 2024. Andmed alla laaditud 29.10.2024.

[7] GAMA. Gama koduleht, 2025. Vaadatud 30.04.2025.

[8] Kartheik G. Iyer, Camilla Pacifici, Gabriela Calistro-Rivera, and Christopher C. Lovell. The spectral energy distributions of galaxies, 2025.

[9] Marta Reina-Campos and William E. Harris. Rescuer: Cosmological k-corrections for star clusters, 2023.

[10] Mark Taylor. Topcat, 2023. version 4.2-7.

[11] E. Tempel, J. Laur, Z. R. Jones, R. Kipper, L. J. Liivamägi, D. Pandey, G.Šakteos, A. Tamm, A. N. Triantafyllaki, and T. Tuvikene. Topz: photometric redshifts using template fitting applied to gama survey, 2025.

Tänuavaldused

Suur tänu minu juhendajale Elmo Templile, kelle kannatlikkus ja positiivne suhtumine raskustest üle aitasid. Tänan Tartu observatooriumi galaktikate füüsika ja kosmoloogia osakonna teadlasi, kes lõid sõbraliku keskkonna ja inspireerisid.
Erilised tänud minu kursusekaaslastele ja sõpradele nende toe ja ergutuse eest õpinguaastate jooksul.
Südamlik tänu minu emale ja perele.

II. Litsents

Lihtlitsents lõputöö reprodutseerimiseks ja üldsusele kättesaadavaks tegemiseks

Mina, **Mari-Ann Raun**,

(autori nimi)

1. annan Tartu Ülikoolile tasuta loa (lihtlitsentsi) minu loodud teose

   Erinevate k-korrektsiooni algoritmide võrdlus ning mõju galaktikate heledusfunktsioonile,

   mille juhendaja on Elmo Tempel,

   reprodutseerimiseks eesmärgiga seda säilitada, sealhulgas lisada digitaalarhiivi DSpace kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

2. Annan Tartu Ülikoolile loa teha punktis 1 nimetatud teos üldsusele kättesaadavaks Tartu Ülikooli veebikeskkonna, sealhulgas digitaalarhiivi DSpace kaudu Creative Commonsi litsentsiga CC BY NC ND 3.0, mis lubab autorile viidates teost reprodutseerida, levitada ja üldsusele suunata ning keelab luua tuletatud teost ja kasutada teost ärieesmärgil, kuni autoriõiguse kehtivuse lõppemiseni.

3. Olen teadlik, et punktides 1 ja 2 nimetatud õigused jäävad alles ka autorile.

4. Kinnitan, et lihtlitsentsi andmisega ei riku ma teiste isikute intellektuaalomandi ega isikuandmete kaitse õigusaktidest tulenevaid õigusi.

Mari-Ann Raun

02.06.2025