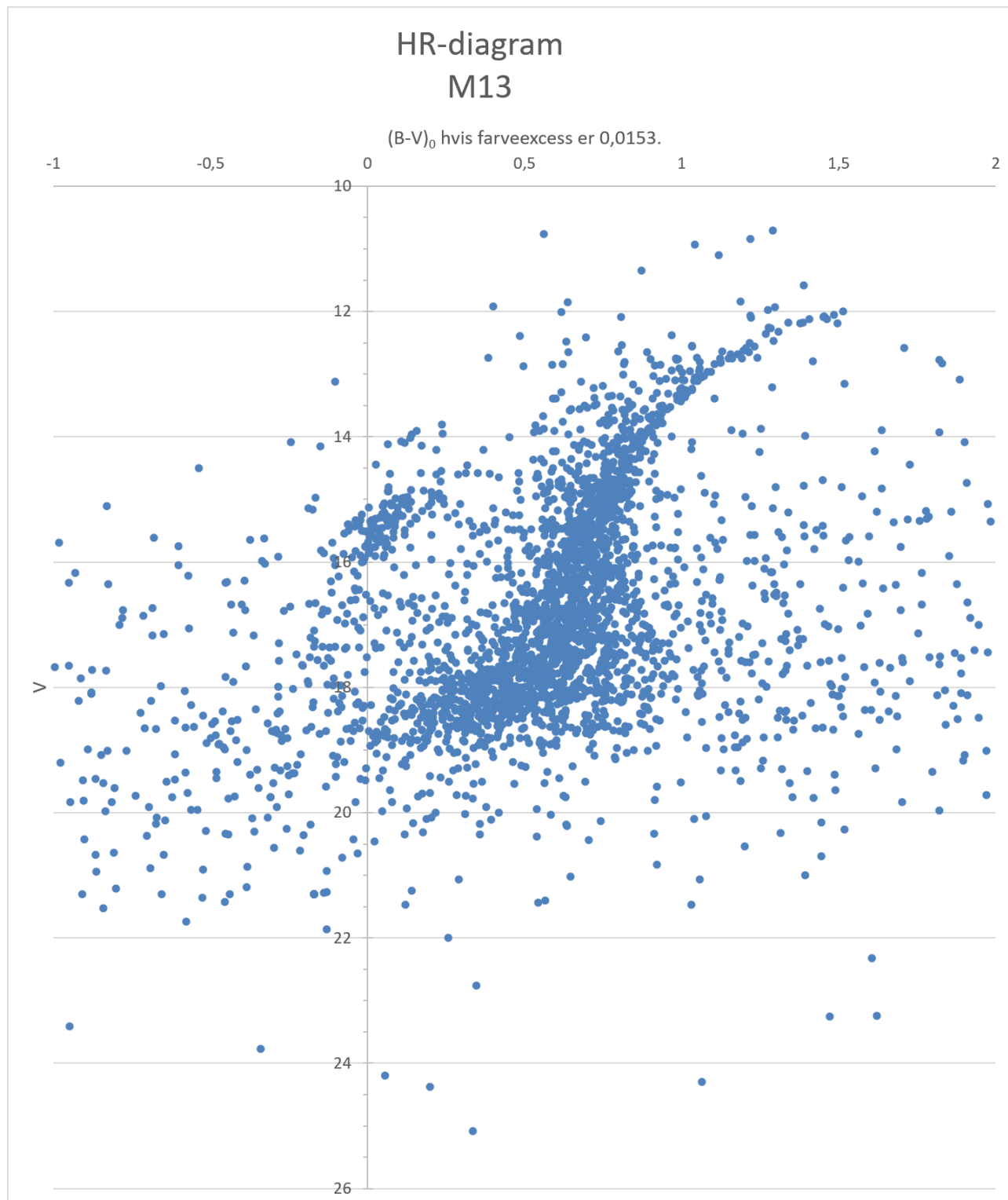


# Fotometri på kuglehobe



I øvelsen *HR-diagrammet med AstroImageJ* kan du lave blændefotometri, som er en intuitiv og god måde at undersøge stjernelys på, hvis man har et begrænset antal stjerner at måle på, og når stjernerne er så langt fra hinanden, at man med den valgte blænderadius (næsten) aldrig ser mere end én stjerne indenfor blænden.

Hvis hoben indeholder et stort antal stjerner, eller at stjernerne ligger meget tæt, er blændefotometri nytteløst, så der lader man en computer fitte en såkaldt punktspredningsfunktion til stjernerne, så man kan få gode fotometriske målinger, selv når stjernerne ligger tæt. Det er den metode, der bruges i denne øvelse.

## 1 Oprids af fremgangsmåden

Først skal man have nogle billeder optaget i passende filtre. Her antager vi Johnsonfiltrene  $B$  og  $V$ . Billederne kan man selv optage med FUT<sup>1</sup>, eller man kan downloade dem via et arkiv<sup>2</sup>.

Billederne analyseres med et program, som finder stjernerne og måler fluxen fra hver stjerne. Derved beregnes instrumentstørrelsesklasserne for en.

Brugeren skal finde 1 eller flere standardstjerner, hvis størrelsesklasser er kendte. Til det kan man bruge APASS-kataloget og programmet Aladin<sup>3</sup>. Man skal derefter identificere standardstjernen i sine resultater. Derefter kan man beregne standardstørrelsesklasser for hver stjerne i hvert billede.

For at kunne tegne et HR-diagram skal resultaterne fra hvert filter flettes sammen, og det gøres via et python-program, der hedder *Parring.py*. Programmet finder også  $B-V$  for en. Man skal selv lave grafen i Excel.

Når HR-diagrammet er tegnet kan man aflæse turn-off-punktet og man kan evt. bruge python-programmet *Temperatur.py* til at kæde farveindekset sammen med temperaturerne.

Ved at bruge programmet *Reddening.py* kan man bestemme absorptionen  $A_V$ . Afstanden til hoben og dens metallicitet  $[Fe/H]$  kan man slå op på Internettet. Nu kan  $M_{\text{turn off}}$  bestemmes og ved hjælp af formel 4 kan alderen af hoben bestemmes.

Herunder følger en detaljeret gennemgang af fremgangsmåden.

## 2 Punktspredningsfunktionen

Når man optager et billede af stjerner, vil lyset blive spredt ud over et antal pixler på detektoren, og der findes 2 typer funktioner, der beskriver hvordan lysets spredes på detektoren. De kaldes for punktspredningsfunktioner - forkortet PSF.

Hvis billedet er optaget udenfor atmosfæren er en *gauss*-funktion god til at beskrive punkterne, og hvis billedet er optaget fra jordoverfladen kan en *moffat*-funktion bruges. Læseren behøver ikke vide hvordan de to funktioner er defineret, men man skal vælge en af dem i fotometriprogrammet, når der skal laves fotometri.

---

1 <https://fut.phys.au.dk/>

2 <https://archive.lco.global>

3 <https://aladin.cds.unistra.fr/java/nph-aladin.pl?frame=downloading>

Der er to parametre, der bruges til at definere funktionerne, og de hedder *Full Width Half Maximum* (FWHM), og  $\beta$  (beta). FWHM bruges ved både gauss- og moffatfunktionen mens  $\beta$  kun bruges ved moffat-funktionen.

Man kan justere i parametrene inde i fotometriprogrammet.

### 3 Teori

Vi skal bruge 2 billeder optaget med Johnson farvefiltrene  $B$  og  $V$ . Den samlede flux i hvert filter bliver målt for hver stjerne, og størrelsesklasserne beregnes for en. Man kan læse mere om filtre og størrelsesklasser i kapitel III i *Astronomibogen*<sup>4</sup>.

Fotometriprogrammet beregner instrumentstørrelsesklasserne  $B_{\text{inst}}$  og  $V_{\text{inst}}$  for stjernerne, dvs. man skal selv omregne farveindekset  $B-V$  til temperaturbestemmelser. Man kan ikke bruge Ballesteros' formel til temperaturbestemmelse, da kuglehobe har en anden kemisk sammensætning end population I-stjerner.

Hvis man vil finde temperaturerne for de forskellige stjerner, kan man f. eks. læse mere om det hos *pystronomy*<sup>5</sup>. Alternativt kan man bruge det vedlagte program *Temperatur.py*, hvor man spørges om  $V_{\text{turn off}}$  samt *metallicitet*. Derefter beregner programmet temperaturen for nogle forskellige  $(B-V)$ -værdier. Du kan selv rette værdierne inde i programmet, så du kan lave en pæn skala for temperaturen.

### 4 Dataopsamling

Benyt f. eks. *Det fjernstyrede undervisningsteleskop*, FUT, til at optage billeder af en kuglehob. Mht. eksponeringstider kan du slå størrelsesklassen,  $V$ , samt overfladelysstyrken,  $\mu$ , for hoben op i Stellarium og omregne til enheden mag/kvadrattuesekund. (Beregninger i kapitel III i *Astronomibogen*.) Derefter kan du beregne optagetider vha. scriptet på astro-gym.dk<sup>6</sup>. Der kan du også lave et visibility-plot, så du kan sikre dig, at hoben er oppe på observationstidspunktet.

Alternativt kan du besøge et arkiv og hente data derfra. Las Cumbres-arkivet kan anbefales.

#### 4.1 Potentielle problemer med dataopsamling (til læreren)

Kuglehobe er gamle, og derfor er der ikke så mange store stjerner i dem. De kan også ligge i Mælkevejens plan, så der er meget ekstinktion fra støv i mælkevejsskiven. Derfor skal man observere i lang tid. Hvis man vil sikre sig, at man får lavet et fint HR-diagram, bør man gøre som følger:

- Tjek vha f.eks. Google hvad de største størrelsesklasser på hovedserien er for hoben.
- Brug derefter en eksponeringstidsberegner<sup>7</sup> til at se, hvor længe man skal observere for at få et rimeligt signal/støj-forhold.
- Pr. 10/7-2026 driver FUT-teleskopet en del, så her kan man ikke observere mere end et lille minuts tid før stjernerne bliver aflange – og derfor svære at analysere.
- Hvis man henter data fra LCO er billederne kalibrerede mht. himmelkoordinater – MEN tjek alligevel om koordinaterne for de to billeder er ens. For de billeder af 47 Tuc jeg downloadede, fandt jeg, at kalibreringen var forskellige, og jeg måtte bruge AstroImageJ til

4 Se <https://astro-gym.dk/tekster>

5 [https://pyastronomy.readthedocs.io/en/latest/pyaslDoc/aslDoc/aslExt\\_1Doc/ramirez2005.html](https://pyastronomy.readthedocs.io/en/latest/pyaslDoc/aslDoc/aslExt_1Doc/ramirez2005.html)

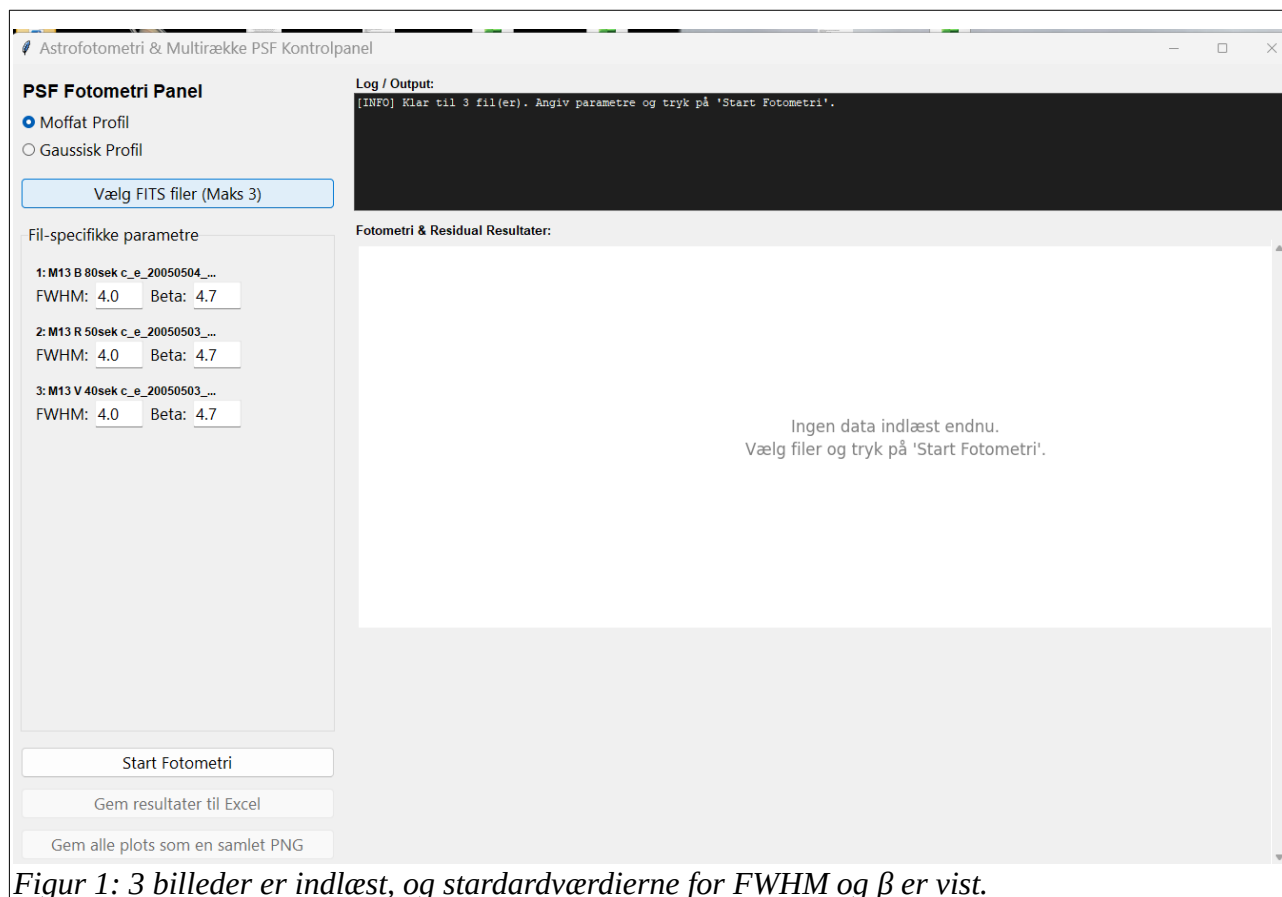
6 <https://astro-gym.dk/planlaeg-observationer/>

7 <https://astro-gym.dk/planlaeg-observationer/>

at lave en ny kalibrering. Det er nok lærerens opgave at sikre dette – for at eleverne ikke skal drukne i teknik.

## 5 Fotometriprogrammet

Åbn *FotometriPSF.py*. Et skærbillede som vist nedenfor dukker op. Skærbilledet er vist, når der er indlæst 3 billeder.



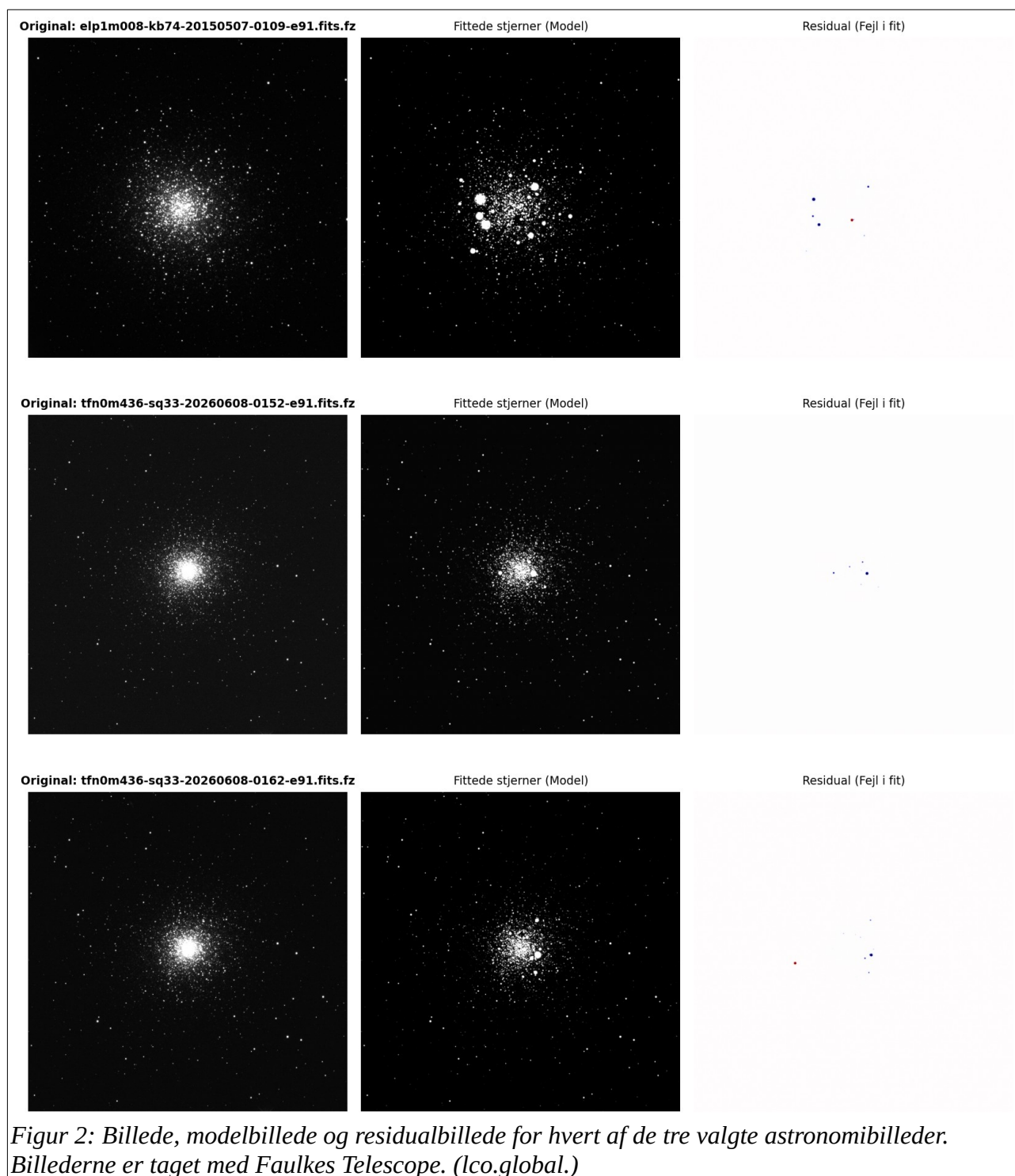
Figur 1: 3 billeder er indlæst, og standardværdierne for FWHM og  $\beta$  er vist.

Juster evt. i parametrene og tryk på knappen *Start Fotometri*. Der går et stykke tid, og oppe i det sorte felt vises, hvad programmet laver.

Programmet leder selv efter stjerner og tilpasser i dette eksempel en moffatprofil til hver enkelt stjerne. Det tæller selv lyset sammen inden for hver modelstjerne, og instrumentstørrelsesklasser beregnes.

Når programmet er færdigt, vises 3 billeder for hvert indlæst billede – et af selve hoben, et af computerens model og et residualbillede, som er forskellen mellem det rigtige billede og modellen. Et perfekt residualbillede er helt hvidt.

Nedenfor er vist resultatet af en kørsel med lidt ændrede funktionsparametre. Man ser, at der er enkelte stjerner, der fejlede, men i det store hele kunne programmet godt modellere stjernerne i kuglehoben.



Når man kører en fotometrisk måling af et eller flere billeder, skal man sikre sig at residualbilledet ser hvidt ud. Hvis det ikke gør skal man justere inputparametrene og gentage målingen.

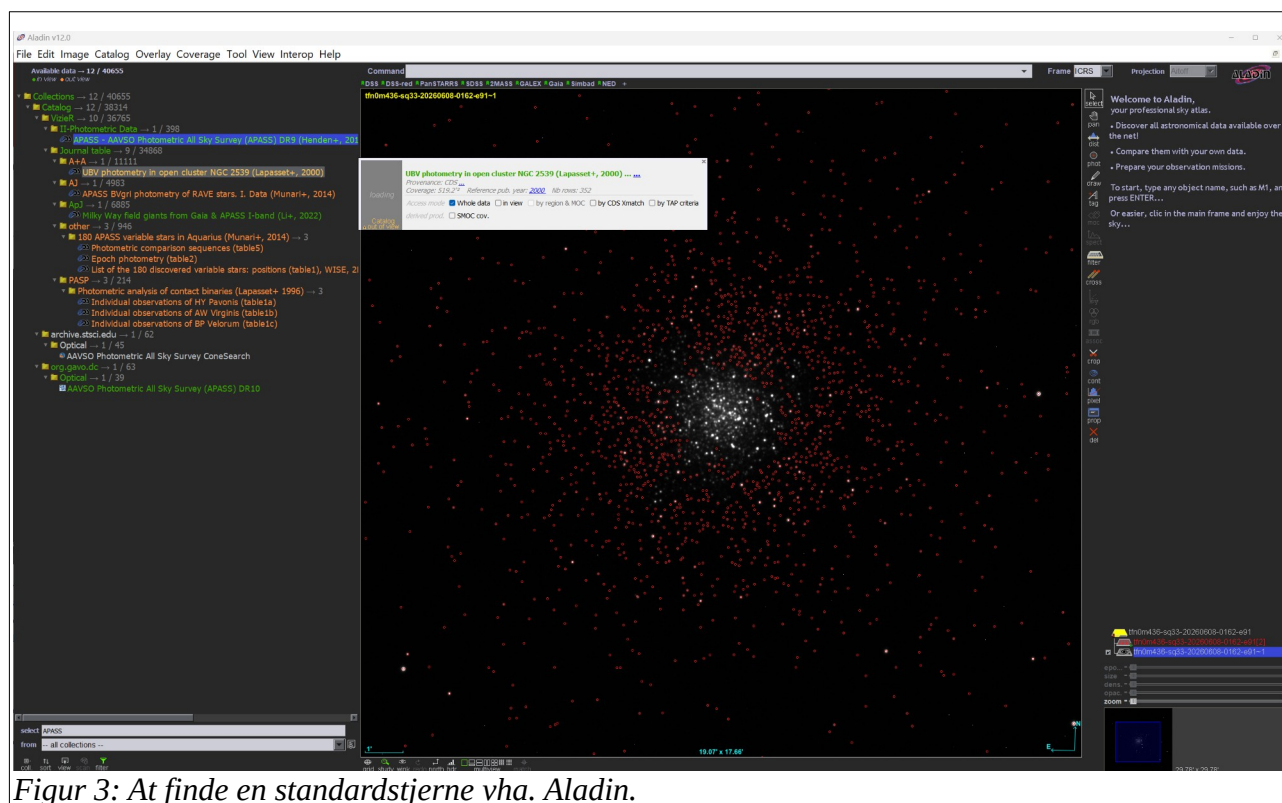
Når man er tilfreds, kan man trykke på knappen *Gem resultater til Excel* samt *Gem alle plots som en samlet PNG*. (Og skriv gerne inputparametrene ned.) Programmet gemmer automatisk målingerne som txt-filer, men de kan være en anelse bøvlede at importere i sit favorit regneark, så derfor er Excel-knappen der til det samme.

## 6 Analyse af resultaterne

Regnearket indeholder instrumentfluxer og -størrelsesklasser. De skal konverteres til standardstørrelsesklasser, og den letteste måde at gøre det på, er at finde en kendt stjerne inde i hvert billede og slå dens størrelsesklasse op. Man kan f. eks. bruge APASS<sup>8</sup>-kataloget, som findes i programmet *Aladin*.

### 6.1 APASS og Aladin

Man kan finde en standardstjerne ved at downloade Aladin-programmet på sin computer. Når det er installeret, skal man åbne et af sine egne billeder (local file), og dernæst skal man vælge APASS-kataloget i menuen *Collections*. Se figur 3.



Figur 3: At finde en standardstjerne vha. Aladin.

Når man trykker på *Load* lægges kataloget ind over ens billede, og så skal man trykke på en af stjernerne, så man kan aflæse *V* og *B*.

Når man har fundet en stjerne fra APASS-kataloget, som også er på ens billede, kan man beregne standardstørrelsesklassen ved hjælp af formlen

$$V_{\text{standard},i} = V_{\text{instrument},i} + (V_{\text{standardstjerne}} - V_{\text{inst,standardstjerne}}) \quad (1)$$

Tilsvarende gælder for de andre farvebånd.

Alternativt kan man inkludere en standardstjerne i sit observationsprogram. Husk at den skal have samme zenithdistance som den valgte kuglehob – i modsat fald skal man til at måle ekstinktion på flere standardstjerner. (Det kræver mindst to timers observationstid.)

<sup>8</sup> <https://cdsarc.cds.unistra.fr/viz-bin/cat/II/336#/browse>

## 6.2 Rødfarvning

Støv i Mælkevejen kan ændre på stjernernes farver, og det skal man tage højde for. Du kan f. eks. søge efter  $A_V$  på nettet, eller du kan gå mere avanceret til værks. Se f.eks. webstedet i noten<sup>9</sup>. Alternativt kan du bruge det vedlagte python-script, der hedder *Reddening.py*. Du skal indtaste ( $RA$ ,  $dec$ ) for hoben, og så slår programmet  $A_V$  op for dig. Du kan beregne de ikke-rødfarvede farveindekser vha. formlen

$$(B-V)_0 = (B-V) - \frac{A_V}{3,1} \quad (2)$$

## 6.3 HR-diagram

Når du har standardværdierne for  $V$  samt  $(B-V)_0$ , kan du tegne et  $((B-V)_0, V)$ -punktplot. Husk at vende talretningen om for 2. akse, så  $V$  falder opad akse.

## 6.4 Brug af turn-off punktet

Slå afstanden til hoben op på nettet. Gør det samme for metalliciteten  $[Fe/H]$ . Beregn turn off-punktets absolutte værdi,  $M_V$ . Det gøres ved hjælp af afstandsformlen

$$V - M_V = 5 \cdot \log(d) - 5 + A_V \quad (3)$$

Nu kan alderen af hoben beregnes<sup>10</sup> til

$$\log_{10}\left(\frac{T}{\text{Gyr}}\right) = a_1 + a_2 \cdot M_V + a_3 \cdot \left[\frac{Fe}{H}\right] + a_4 \cdot \left[\frac{Fe}{H}\right]^2 + a_5 \cdot \left[\frac{Fe}{H}\right] \cdot M_V, \quad (4)$$

$a_1 = -1,305$ ,  $a_2 = 0,515$ ,  $a_3 = -0,396$ ,  $a_4 = -0,018$ ,  $a_5 = 0,049$ .

## 7 Konklusion

Hvad kan du sige om den fundne alder af din kuglehob? Hvis der er andre på holdet, der også har målt på kuglehobe i Mælkevejen, hvad kan I så sige om Mælkevejens alder?

<sup>9</sup> <http://argonaut.skymaps.info/usage#accessing>

<sup>10</sup> <http://arxiv.org/abs/astro-ph/9706128v3>