

Luleå Gymnasieskola
Naturvetenskapsprogrammet
Gymnasiearbete

Volymbestämning av WASP-33 b

En påvisning samt undersökning av exoplaneten
WASP-33 b med transitmetoden

Viktor Stubbält
NA3C 2018/2019
Handledare: Helena Stenberg

Sammanfattning

Denna rapport strävar efter att påvisa exoplaneten WASP-33 b:s existens via transitmetoden, såväl som att bestämma dess radie samt volym utifrån observationsdata som samlats in under en fotometrisk observation av exoplaneten. Den fotometriska observationen utfördes den 15 februari 2019 med fjärrstyrd användning av Tycho Brahe-observatoriets teleskop (35cm) i Oxie via internetuppkoppling från Luleå. Då väderförhållandena var näst intill optimala förutom en närvarande halvmåne kunde fotografiska mätningar med måttligt hög precision av planetpassagen erhållas. Observationsdatan kalibrerades med hjälp av bias-, flat- och darkbilder via av den astronomiska mjukvaran MaxIm DL. Den kalibrerade datan laddades upp till, och modellenpassades, av Exoplanet Transit Database:s onlineverktyg för analys av ljuskurvor. Slutresultatet uppskattar att WASP-33 b har en radie på $1.7 R_J$ samt en volym på $5.25 V_J$, vilket endast avviker 12.7% respektive 37.6% från tidigare uppskattade värden av (Brown m. fl. 2010).

Nyckelord: planetsystem - stjärnor: individuella (WASP-33) - teknik: fotometrisk

Abstract

This paper aims to detect the existence of exoplanet WASP-33 b via the transit method, as well as determine its radius and volume from observational data gathered during a photometric observation of the exoplanet. The photometric observation was done on the 15th of February 2019 with remote controlled use of the Tycho Brahe-observatory telescope (35cm) located in Oxie via internet connection from Luleå. Except for a present first quarter moon, the weather conditions were near optimal and moderately high precision photometric measurements of the planetary transit were obtained. The data was calibrated using bias, flat, and dark frames and then reduced using the astronomical software MaxIm DL. The reduced data was uploaded to, and model fitted by, the Exoplanet Transit Database's online light curve analysis tool. The final result estimates WASP-33 b to have a radius of $1.7 R_J$ and a volume of $5.25 V_J$, deviating only 12.7% and 37.6% respectively from previously estimated values by (Brown et al. 2010).

Key words: planetary systems – stars: individual (WASP-33) – techniques: photometric

Innehåll

1	Inledning	3
2	Syfte och frågeställningar	3
3	Bakgrund	4
3.1	Transitmetoden	5
4	Metod	6
4.1	Teleskop	7
4.2	Val av exoplanet samt observationsdatum	7
4.2.1	Lutning över horisonten	8
4.2.2	Referensstjärnor	8
4.2.3	Magnitud	8
4.2.4	Amplitud	8
4.3	Exponeringstid	9
4.4	Kalibreringsbilder	9
4.4.1	Darkbilder	10
4.4.2	Flatbilder	10
4.4.3	Biasbilder	11
4.5	Framställande av ljuskurva	11
4.6	Dataanalys	11
4.7	Avvikelse från tidigare värden	12
5	Resultat	13
5.1	Val av exoplanet samt observationsdatum	13
5.2	Observation	14
5.2.1	Fjärrstyrning	15
5.2.2	Exponeringstid	16
5.2.3	Kalibreringsbilder	16
5.3	Kalibration av objektbilderna	18
5.4	Framställning av ljuskurva	18
5.5	Dataanalys	20

5.6	Avvikelse från tidigare värden	21
6	Diskussion	21
7	Tillkännagivanden	23
8	Bilagor	25

1 Inledning

Vår sol klassas som en orange dvärg, eller en G-typ och är en högst ordinär stjärna bland de vi har sett i vår galax. Den har ett system av åtta stycken planeter och är en av hundra tusen miljoner stjärnor i vår galax. Man bör då kunna dra den logiska slutsatsen att det måste finnas massvis med andra planeter som befinner sig i omloppsbana runt andra stjärnor än vår egen i vår galax. På detta sätt har astronomer och forskare resonerat i årtionden, men den första riktiga upptäckten av en s.k. *exoplanet* skedde inte förrän år 1992 då astronomerna A. Wolszczan och D. Frail oavsiktligt gjorde den första upptäckten av en s.k. exoplanet runt en pulsar. (Barnard m. fl. 2008)

Sen dess har antalet upptäckter av exoplaneter ökat explosionsartat. Idag finns det nästan 4000 bekräftade exoplaneter i NASA:s databas för extrasolära planeter (NASA JPL, 2019). Med modernare utrustning kan idag till och med amatörastronomer genomföra lyckade observationer av exoplaneter med den s.k. *transitmetoden*. I nuläget finns över 8000 amatörobservationer gjorda med denna metod från hela världen dokumenterade i onlinedatabasen Exoplanet Transit Database. (ETD 2019)

Denna rapport handlar om just en sådan amatörobservation från februari 2019 av WASP-33 b med användning av Tycho Brahe-observatoriets fjärrstyrda teleskop. Metodiken beskrivs utförligt i avsnitt 4 och de resulterande nya parametrarna presenteras samt jämförs sedan med parametrarna i den tidigare studien av WASP-33 b från (Brown m. fl. 2010) i avsnitt 5. Avsnitt 6 ägnas åt att diskutera resultaten samt hur dess noggrannhet kan ökas med eventuella förbättringar i metodiken.

2 Syfte och frågeställningar

Syftet med denna rapport är att påvisa existensen av en förvald exoplanet med transitmetoden samt att undersöka några av dess fysikaliska egenskaper. Dessa har avgränsats till exoplanetens radie och volym då vissa andra fysikaliska egenskaper som till exempel massa och densitet inte kan bestämmas med transitmetoden utan ytterligare användning av redan uppmätta värden eller andra observationsmetoder.

Rapportens syfte är även att undersöka hur mycket de uppmätta värdena avviker från verkligheten. På grund av alla potentiellt inblandade felkällor är det näst intill omöjligt

att bestämma exakt hur den verkliga radien egentligen ser ut i detta sammanhang utan att färdas till exoplaneten och mäta med ett långt måttband. Det bästa som kan göras i nuläget är istället att följa den vetenskapliga metoden, där den mest noggranna och teoretiska ”verkligheten” man kan uppnå för att jämföra med framställs från medelvärdet av många upprepade försök från oberoende källor.

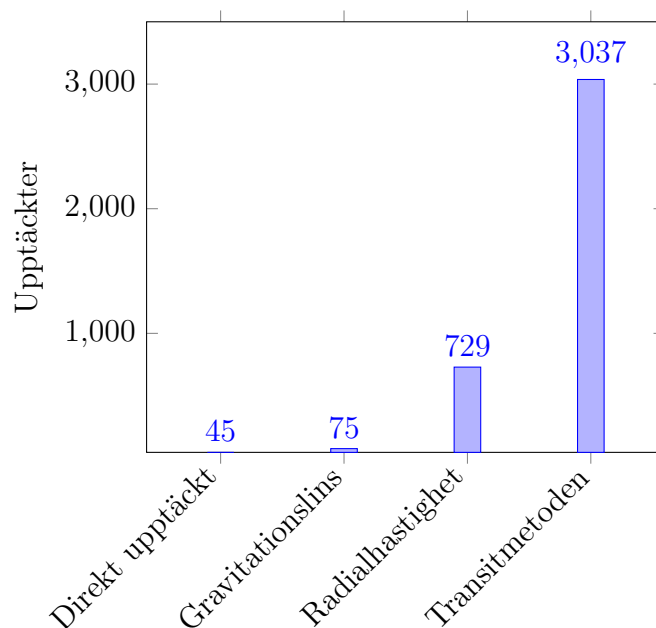
Utifrån dessa syften blir de frågeställningar som ska besvaras i detta arbete följande:

- Vad är den uppmätta volymen av den valda exoplaneten?
- Hur mycket avviker de uppmätta värdena ifrån en tidigare studie?

3 Bakgrund

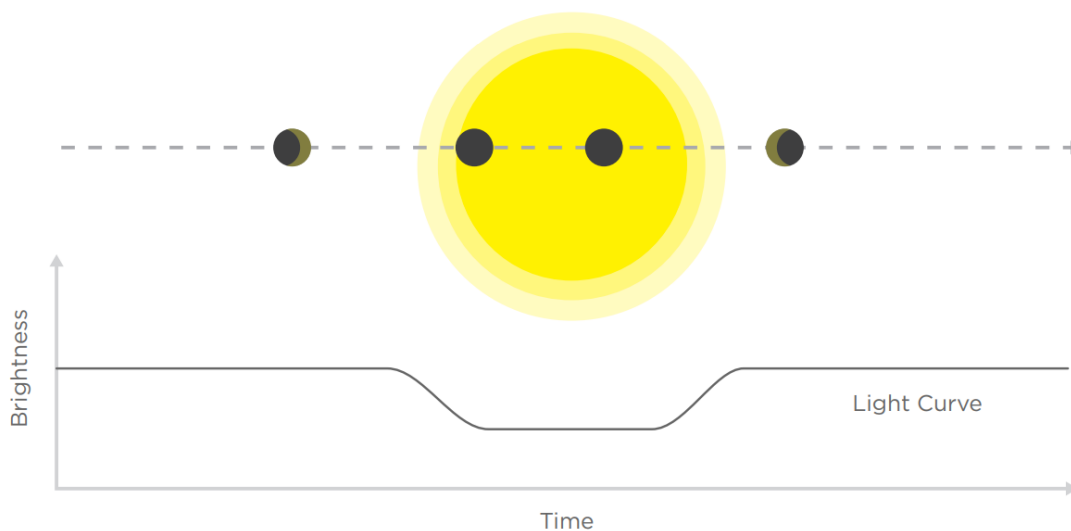
Orsaken till att det dröjde så länge för den första upptäckten av en exoplanet är på grund av den stora svårigheten som följer med att observera en exoplanet. Direkta observationer är näst intill omöjliga då planeter endast avger reflekterat ljus från sin moderstjärna. Sådant svagt ljus drunknar i moderstjärnans ljus på samma sätt som en ficklampas ljus blir till synes osynligt näst intill en strålkastare. Istället brukar man idag främst använda sig av ett flertal indirekta observationssätt. (Jan, Göran och Klas 2012) De fyra huvudsakliga upptäcktsmetoderna brukar kallas:

- Passage eller transitmetoden
- Dopplerspektroskopi eller radialhastighetsmetoden
- Gravitationell linsbrytning
- Direkt fotografering



Figur 1: Antal exoplaneter upptäckta av de mest populära metoderna. (NASA 2019)

3.1 Transitmetoden

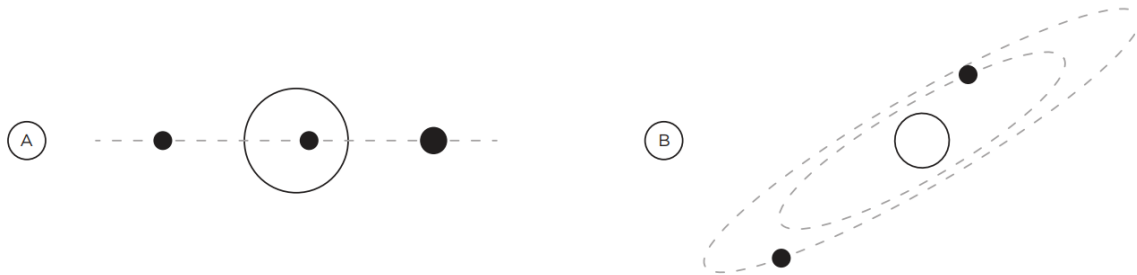


Figur 2: Illustrering av en ljuskurva. (NASA JPL 2015)

Figur 1 visar tydligt att den mest framgångsrika upptäcktsmetoden är just den s.k. transitmetoden. Denna metod går ut på att observera förändringar i den totala mängden ljus emitterad från en stjärna medan en exoplanet passerar framför. Ritar man upp hur stjärnans ljusstyrka förändras längsmed tiden i en graf som i figur 2 får man en s.k. *ljuskurva*. I ljuskurvan kan ett visuellt dipp ses under den tidsperiod då en exoplanet

befinner sig framför stjärnan. (Jan, Göran och Klas 2012) Utifrån djupet på denna nedsänkning kan storleken av exoplaneten beräknas med metoder som beskrivs längre fram i detta arbete i avsnitt 4.6.

Dessvärre måste exoplaneten passera direkt mellan observatörens synväg och stjärnan för att denna upptäcktsmetod ska fungera. Detta innebär att exoplanetens bana måste ses nästan rakt på som i figur 3. På grund av denna begränsning kan därmed inte alla exoplaneter upptäckas från jorden med transitmetoden. (NASA JPL 2015)



Figur 3: Exempel på två solsystem där planetpassage är synligt i (A) men ej i (B).

4 Metod

Planetpassagen kommer att observeras med Tycho Brahe-observatoriets fjärrstyrda teleskop i Oxie. Observationen kommer delvist att fjärrstyras via internet från Luleå, men även manuellt på plats av en ansvarig från observatoriet för handledning via Skype samt för processer som ej kan fjärrstyras, t.ex. att öppna upp skyddskupolen för teleskopet.

4.1 Teleskop



Figur 4: Tycho Brahe-observatoriets fjärrstyrda teleskop. (Tycho Brahe-observatoriet, 2015)

Teleskopet i fråga samt i figur 4 är ett Schmidt-Cassegrain-teleskop av modell Celestron 14 OTA, den har en 35 cm stor öppning och en fokallängd på 3900 mm. Bilderna kommer tas via en CCD-kamera med elektronisk kylning av modell SBIG ST-8300. Kameran har ett synfält av 25×19 bågminuter, en upplösning på 3326×2504 pixlar samt en inbyggd webbserver för styrning av kamerans slutare, exponeringstid m.m. (Tycho Brahe-observatoriet, 2015)

4.2 Val av exoplanet samt observationsdatum

Webbsidan för Exoplanet Transit Database (ETD) innehåller ett verktyg som låter en användare se datum och tider för alla kommande planetpassager synligt från ett valt tidsintervall samt koordinat på jorden. Efter att en molnfri kväll har säkerställts utifrån ett flertal väderrapporter kan en exoplanet samt dess passage väljas från nedanstående kriterier efter att ha angivit Tycho Brahe-observatoriets koordinater på ETD:s webbsida. (ETD 2019)

4.2.1 Lutning över horisonten

Ju närmare horisonten en stjärna befinner sig från oss sett desto mer luft färdas stjärnans ljus genom innan det når fram till oss. För att minska påverkandet av detta exkluderades alla planetpassage som ej skedde minst 30 grader över horisonten under hela passaget. (Gary 2009)

4.2.2 Referensstjärnor

Ett logaritmiskt mått på en stjärnas ljusstyrka kallas för stjärnans *skenbara magnitud* där en högre magnitud medför en svagare ljusstyrka. På grund av att atmosfärens påverkan inte är konstant i varje bild som tas mäts den valda stjärnans minskning i magnitud ej från bild till bild utan mäts istället relativt med andra stjärnor som inte genomgår en planetpassage i samma bild. På så sätt bör dessa stjärnor därmed ha en teoretiskt konstant magnitud. Dessa kallas för referensstjärnor och ger ett säkrare resultat desto närmare deras magnitud är till moderstjärnan för exoplaneten som ska observeras samt desto fler som används. Denna sorts referensmetodik brukar kallas för *differentialfotometri*. För att kunna nyttja denna metodik exkluderades alla planetpassage som ej hade minst 4st lämpliga (inom ± 1.5 magnituder) referensstjärnor runt om sig inom teleskopets synfält. (Gary 2009)

4.2.3 Magnitud

Exoplaneterna i databasen på ETD:s webbsida befinner sig omloppsbanor runt stjärnor som har en magnitud från ungefär 7 till 15. Det gör dem till väldigt svagt lysande objekt på natthimmelen. Som jämförelse anses gränsmagnituden för att kunna se ett objekt på natthimmelen med blotta ögat ligga någonstans i intervallet från ungefär 5,5 till 6,5. På grund av sådana ljussvaga mål, ljusförorening från den närliggande staden Oxie samt en eventuellt närvarande måne bör vissa avgränsningar dras för ökad chans av en lyckad observation. Därför exkluderades alla planetpassage runt en stjärna som hade en magnitud högre än 12. (ETD 2019)

4.2.4 Amplitud

När en exoplanet passerar framför sin moderstjärna brukar den endast minska moderstjärnans ljusstyrka med någon procent från oss sett. Detta kallas för *amplituden*.

En sådan liten skillnad kan vara riktigt svår att observera när man räknar in felkällor som den ständigt fluktuerande atmosfären. För att minska risken av detta exkluderades alla planetpassage som ej blockerade minst 0.01 magnituder av sin moderstjärnas ljus. (Gary 2009)

4.3 Exponeringstid

När teleskopets CCD-kamera tar en bild ges varje pixel ett värde mellan 0 och 65 535 som är linjärt beroende på hur mycket på hur många fotoner som samlades in. Om en pixel uppnår detta maxvärde säger man att den är *översaturerad*. Om stjärnan man valt att observera genomgår en förminskning i ljusstyrka från vad som skulle motsvara ett värde av 80 000 till 70 000 på en pixel skulle denna förminskning alltså ej vara möjlig att uppfatta. Då en längre exponeringstid innebär ett ökat antal insläppta fotoner till kamerascensorn måste kamerans exponeringstid försiktigt anpassas under observationen så att tillräckligt mycket ljus släpps in för att kunna se stjärnorna, men ej tillräckligt mycket för att någon pixel av de relevanta stjärnorna för observationen ska bli översaturerad. (Gary 2009)

4.4 Kalibreringsbilder

Innan analysen av observationen kan ske måste ett flertal typer av kalibreringsbilder tas. Dessa brukar kallas för *darkbilder*, *flatbilder* samt *biasbilder* på svenska.

Objektbilder är de faktiska bilderna som tas av det observerade objektet. När ett ljussvagt objekt fotograferas brukar dessa objektbilder staplas på varandra och sedan divideras med antal staplade delbilder till en bild med medelvärdet från varje pixel i varje delbild. En sådan staplad bild får på så sätt mer information per pixel än vad de olika delbilderna har var för sig. Det finns dock många defekter och brus i dessa objektbilder som måste kalibreras först innan de kan staplas. Staplingen i sig själv minskar det slumpmässiga bruset i bilderna, men trots det finns det kvar andra icke-slumpmässiga defekter i bilderna som behöver korrigeras innan staplingen kan ske. Några exempel är: termiskt brus, vinjettering, damm på linsen och biassignal för att nämna några. Att fixa dessa problem är syftet med kalibreringsbilderna. (Gary 2009)

4.4.1 Darkbilder

Pixlarna på en kamerasensor levererar vanligtvis en elektrisk signal som är linjärt proportionell mot antalet mottagna fotoner från det fotograferade objektet. Detta störs dessvärre av att sensorn även får oönskade elektroner från den underliggande elektroniken. Detta kallas för termiskt brus. Dessa oönskade elektroner orsakas delvis av konstruktionssvagheter i kameran men även av värme i elektroniken som fördelar sig ojämnt och slumpmässigt över hela kamerasensorn, s.k. mörkerström. Detta medför att "svartnivån" i bilden sakta stiger uppåt i gråskalan under långa exponeringar då varje pixel sakta även fylls på "underifrån". För foton med längre exponeringstid blir "svart" alltså aldrig helt svart utan istället ett ojämnt grått brus, även när locket har satts på kamerans öppning. Utöver detta har kamerasensorn sina egna problem med att vissa pixlar är trasiga/överkänsliga och ger ljusa punkter i bilden som brukar kallas för "hot pixels".

Detta problem åtgärdas med att ett antal bilder som kallas för darkbilder tas med helt förtäckt kameran vid samma temperatur och med samma exponeringstid och som för objektbilden. När objektbilden tagits subtraherar man bort darkbilden från objektbilden och eliminerar därmed inverkan av "hot pixels" samt de oönskade elektronerna. Dessvärre innehåller darkbilder också slumpmässigt brus precis som objektbilder. Därför bör flera darkbilder staplas ihop till en s.k. "master dark" först för att minska brusets effekt innan de subtraheras från objektbilden. (Gary 2009)

4.4.2 Flatbilder

Som med darkbilder kan flatbilder också tänkas som att "nollställa" bilden. Skillnaden denna gång är att flatbilder korregerar bort optiska brister istället för brister i kamerasensorn. De flesta teleskop fördelar inte ljus jämnt över kamerans sensor. Detta orsakar vinjettering som leder till att bilderna blir ljusare i mitten och mörkare ut mot kanterna. Om det finns damm på kamerasensorn orsakar det att mörka fläckar dyker upp på bilderna. Flatbilder korregerar detta genom att ta en bild av hur en blank, jämnt upplyst yta ser ut för kameran under dess nuvarande förutsättningar. De tagna flatbilderna staplas sedan på varandra för att minska slumpmässigt brus till en s.k. "master flat" som objektbilden sedan divideras med. (Gary 2009)

4.4.3 Biasbilder

På grund av den digitala räkningsprocessen får elektroniken som ansvarar för kameran problem om den stöter på negativa värden eller om den måste börja med att starta räkningen från 0 för en helt tom pixel. Därför “lyfter” kameratillverkare upp kameran sensorernas pixelvärde så att de får ett startvärde mellan 10–200 när en pixel egentligen är helt tom eller svart.

Detta åtgärdas genom att subtrahera bort en eller flera biasbilder från objektbilden. Biasbilder skapas på samma sätt som en darkbild med en förtäckt lins men med en så kort exponeringstid på kameran som möjligt. (Gary 2009)

4.5 Framställande av ljuskurva

Efter att bilderna som tagits under observationen blivit kalibrerade ska en ljuskurva för planetpassagen framställas. Båda dessa uppgifter har valts att göras i ett astrofotoprogram som heter MaxIm DL. Som nämnt i bakgrunden kommer i denna ljuskurva en minskning i magnitud kunna avläsas mellan ljusstyrkan under planetpassagen och ljusstyrkan före/efter passagen. För att få en trendlinje samt ännu klarare bild av passagen skall datan laddas upp till ETD:s onlineverktyg för modellanpassning av datan.

4.6 Dataanalys

Efter observationen och kalibreringen av objektbilderna sker en dataanalys där ett flertal olika värden skall tas fram för att besvara rapportens frågeställningar.

Andelen ljus som blockeras under en planetpassage är direkt proportionell till hur mycket av stjärnans area som täcks av exoplanetens area. Detta kan skrivas som:

$$\frac{area_{exoplanet}}{area_{stjärna}} = \frac{\pi r^2}{\pi R^2} = \frac{r^2}{R^2} = \text{minskning i ljusstyrka} \quad (1)$$

Där r är exoplanetens radie och R är stjärnans radie. Från denna ekvation kan exoplanetens radie r brytas ut som:

$$r = \sqrt{R^2 \cdot \text{minskning i ljusstyrka}} \quad (2)$$

Från denna ekvation samt ett tidigare bestämt värde av stjärnans radie kan exoplanetens radie bestämmas med att läsa av antal procent ljus som blockerats i ljuskurvan.

Ljuskurvan som MaxIm DL samt ETD:s onlineverktyg producerar visar endast hur stjärnans magnitud förändras med tiden. Trots att magnitud är ett mått på ljusstyrka kan det dessvärre ej användas för att få fram antal procent förändring i ljusstyrka för ekvation (2) då det är en logaritmisk skala. Istället brukar ljusstyrka även anges i den linjära skalan för ljusets flödesdensitet (flux density på engelska). Det vill säga att sambandet mellan förändring i magnitud och förändring i ljusets flödesdensitet alltså först måste räknas ut. Detta samband kan härledas fram från definitionen av ett objekts skenbara magnitud som lyder:

$$m = -5 \log_{100} \left(\frac{F_x}{F_{x,0}} \right) \quad (3)$$

Där F_x är ett objekts observerade ljusflödesdensitet med spektralfiltret x och $F_{x,0}$ är referensljusflödet (nollpunkten) för det filtret. En skillnad i magnitud med bortseende från valt spektralfilter kan skrivas som:

$$\Delta m = m_1 - m_2 = -5 \log_{100} \left(\frac{F_1}{F_0} \right) - \left(-5 \log_{100} \left(\frac{F_2}{F_0} \right) \right) = 5 \log_{100} \left(\frac{F_2}{F_0} \right) - 5 \log_{100} \left(\frac{F_1}{F_0} \right)$$

$$\frac{\Delta m}{5} = \log_{100} \left(\frac{F_2}{F_0} \right) - \log_{100} \left(\frac{F_1}{F_0} \right) = \log_{100} \left(\frac{\frac{F_2}{F_0}}{\frac{F_1}{F_0}} \right) = \log_{100} \left(\frac{F_2}{F_1} \right)$$

$$\frac{F_2}{F_1} = 100^{\frac{\Delta m}{5}} = 10^{0.4 \cdot \Delta m} = \text{ljusstyrkans förändringsfaktor} \quad (4)$$

Där F_1 är ljusflödesdensiteten före/efter planetpassage och F_2 är ljusflödesdensiteten under planetpassage.

Med exoplanetens radie r kan volymen av exoplaneten beräknas med det enkla förhållandet för en sfär (vid antagande av en sfärisk form hos exoplaneten):

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} \quad (5)$$

4.7 Avvikelse från tidigare värden

För att besvara den andra frågeställningen måste den beräknade radien samt volymen jämföras med värden från en tidigare studie. Skillnaden i procent mellan två värden kan

skrivas som 100 gånger skillnaden mellan de två värdena delat på deras medelvärde, eller:

$$\text{skillnad i procent} = \frac{|V_1 - V_2|}{\frac{(V_1 + V_2)}{2}} \cdot 100 \quad (6)$$

Där V_1 och V_2 är värdena nummer 1 och nummer 2.

5 Resultat

5.1 Val av exoplanet samt observationsdatum

Den 15 februari bokades observationen in efter att samtliga väderrapporter lovat en klar och stilla himmel under hela natten. Med ETD:s verktyg för att förutsäga kommande tider för planetpassage valdes exoplaneten WASP-33 b på grund av dess höga amplitud, lämpliga närliggande referensstjärnor, lutning över horisonten under planetpassagen samt dess moderstjärna WASP-33:s (även kallad HD 15082) låga magnitud. I tabell 1 och 2 nedan beskrivs dessa data samt exoplanetens och stjärnans tidigare uppmätta radier av (Brown m. fl. 2010) som längre fram används i dataanalysen.

Parameter	WASP-33
Typ av objekt	Stjärna
Magnitud	8.3
Radie	1.444 Solradier ($R_{\odot}$)

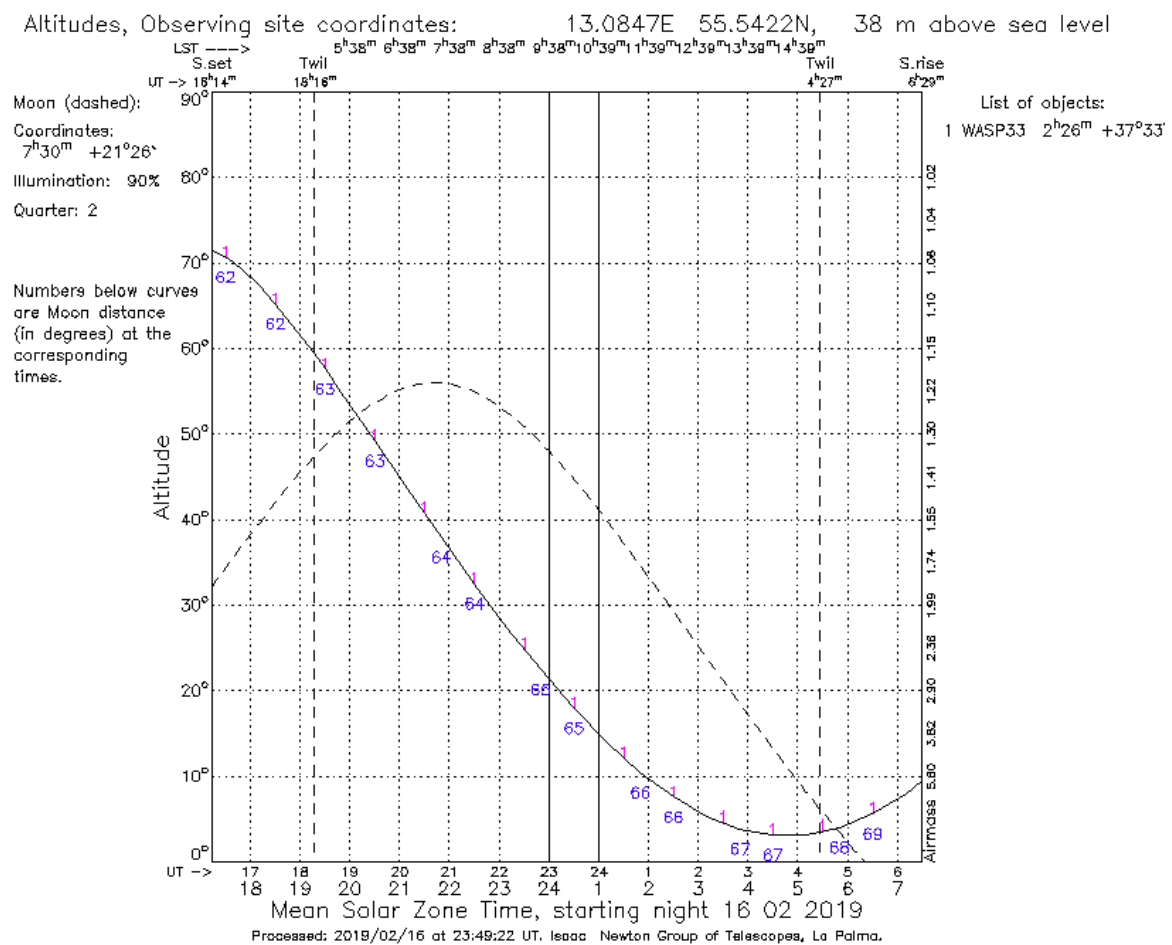
Tabell 1: Data för WASP-33. (Brown m. fl. 2010)

Parameter	WASP-33 b
Typ av objekt	Exoplanet
Radie	1.497 Jupiterradier (R_J)
Amplitud	0.0151 magnituder
Passage börjar, lutning	19:48, 58°
Passage slutar, lutning	22:31, 31°

Tabell 2: Data för WASP-33 b samt planetpassagen. (Brown m. fl. 2010), (ETD 2019)

5.2 Observation

270 foton togs sammanlagt under observationen från 19:56 till 23:22 under natten den 15:e februari 2019. Detta gjordes direkt efter att ha provat sig fram till en lämplig exponeringstid samt efter att ha riktat teleskopet så att WASP-33 och alla referensstjärnor var inom teleskopets synfält. Väderförhållandena var nästintill optimala under natten med en molnfri himmel samt en låg vindhastighet på 3-4m/s bortsett från en halvmåne som befann sig 63° som närmast ifrån den observerade stjärnan längs skyn (se figur 5).



Figur 5: Diagram över WASP-33:s samt månens altitud över horisonten under observationen. (Isaac Newton Group of Telescopes, 2018)

I åtanke på WASP 33:s magnitud på 8.3 valdes 4 stycken lämpliga referensstjärnor inom teleskopets synfält med magnituderna 9.15, 9.35, 9.35 och 9.5 (se figur 6).



Figur 6: Skärmdump av valda referensstjärnor i en objektbild.

5.2.1 Fjärrstyrning

Via en internetanslutning till CCD-kamerans inbyggda webbserver samt ett insticksprogram i planetarieprogrammet Stellarium kunde teleskopet såväl som kameran styras i realtid från Luleå ner till observatoriet i Oxie. På plats fanns även ansvariga från observatoriet som gav rådgivning via Skype under hela observationens gång. En separat kamera fanns dessutom på plats som erbjöd videobevakning av teleskopet i realtid (se figur 7).



Figur 7: Stillbild från bevakningskamerans videoflöde.

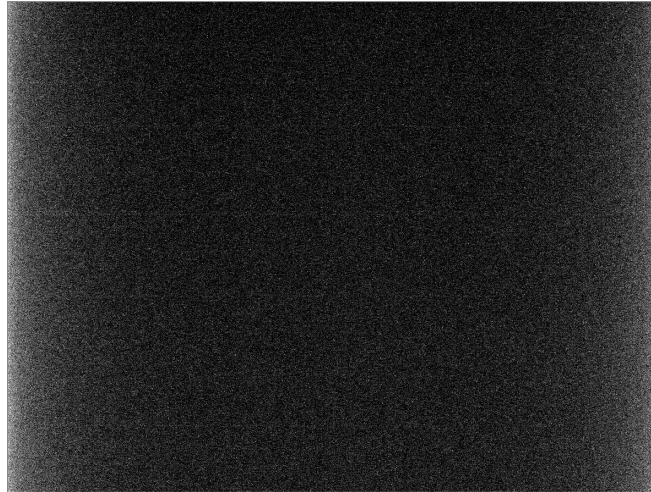
5.2.2 Exponeringstid

En inledande exponeringstid på 10s prövades fram för observationen som sedan sänktes till 9s, 8s, 7s och 5s för att undvika överexponering. Exponeringstiden höjdes därefter gradvist tillbaka till 10s igen efter att ett tunt dislager drog in mot slutet av observationen.

Trots noggrann koll på exponeringstiden blev ungefär 15% av alla objektbilder överexponerade på grund av ett tunt men mycket varierande dis i atmosfären. Dessa exkluderades i den slutgiltiga ljuskurvan.

5.2.3 Kalibreringsbilder

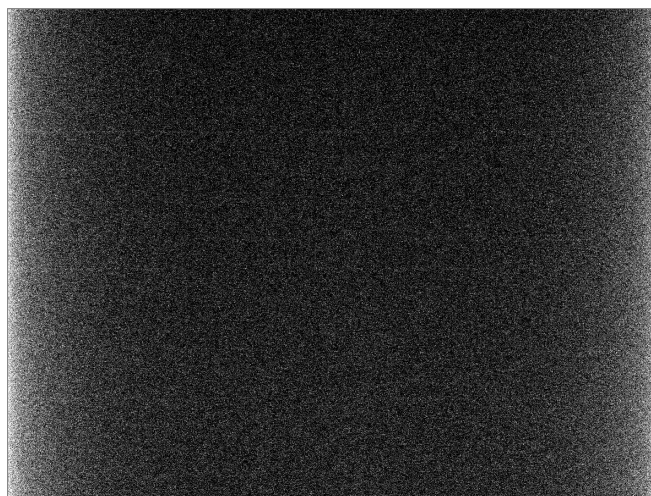
Sammanlagt 10 biasbilder och 50 darkbilder togs efter planetpassagen var över. Med teleskopets öppning täckt av skyddslocket togs 5 set med 10st darkbilder för att matcha de 5 olika exponeringstiderna på objektbilderna (10s, 9s, 8s, 7s, och 5s). CCD-kameran kyldes dessutom ned till -10°C för att förminska mörkerström. För biasbilderna valdes kamerans lägsta möjliga exponeringstid, 0.12s. Slutligen fanns 4st nyligen tagna flatbilder tillgängliga från ansvariga på observatoriet.



Figur 8: Exempel på en tagen darkbild.



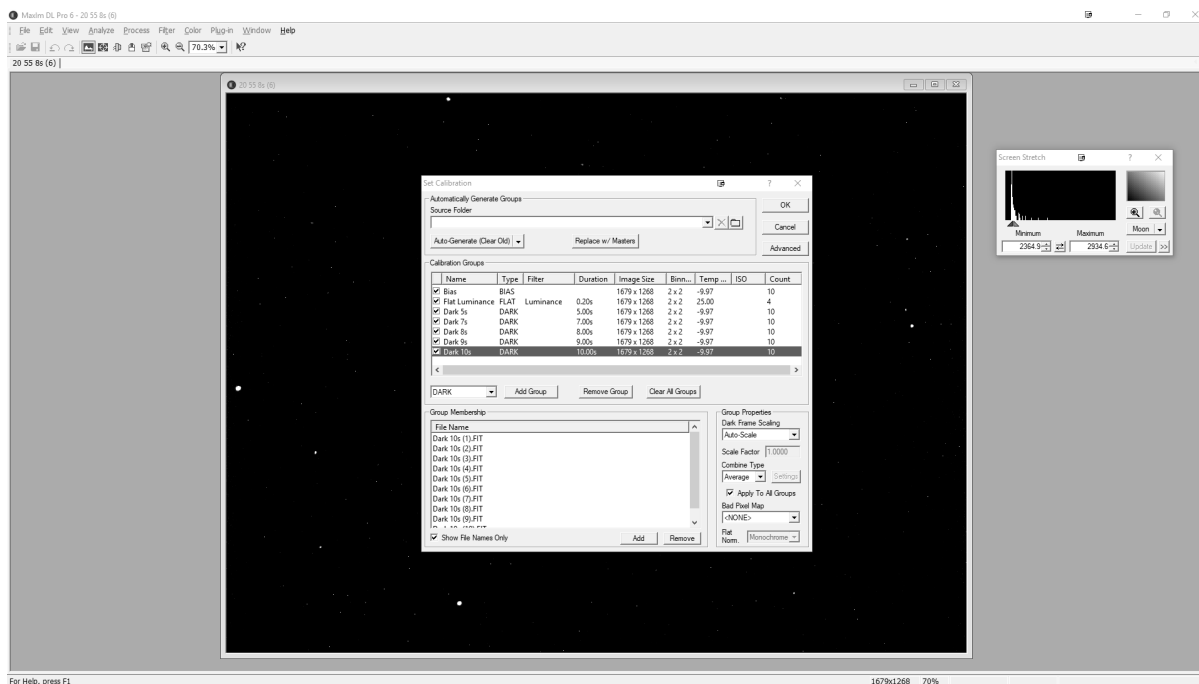
Figur 9: Exempel på en tagen flatbild.



Figur 10: Exempel på en tagen biasbild.

5.3 Kalibration av objektbilderna

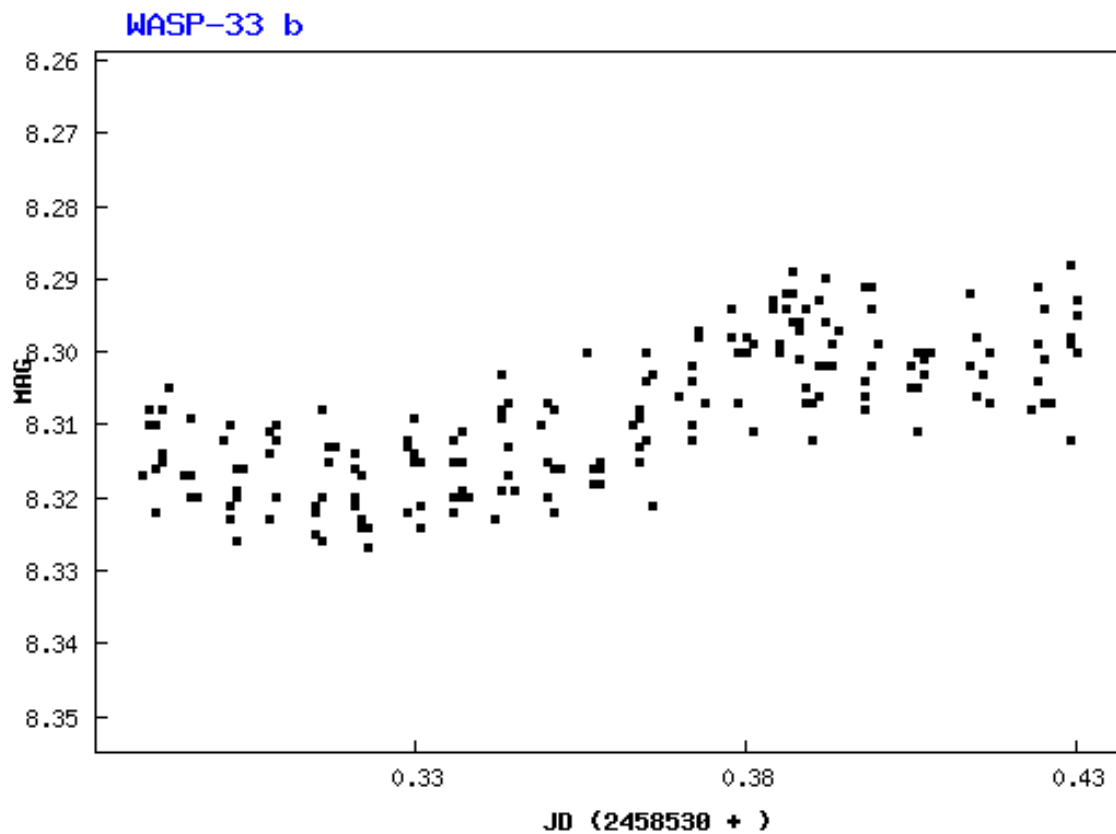
Efter att ha laddat in kalibreringsbilderna i MaxIm DL samt markerat vilka som var darks, flats respektive bias som i figur 11 skapar programmet master darks, master flats samt master bias och applicerar dessa automatiskt till objektbilderna.



Figur 11: Skärmdump av Maxim DLs kalibreringsfönster.

5.4 Framställning av ljuskurva

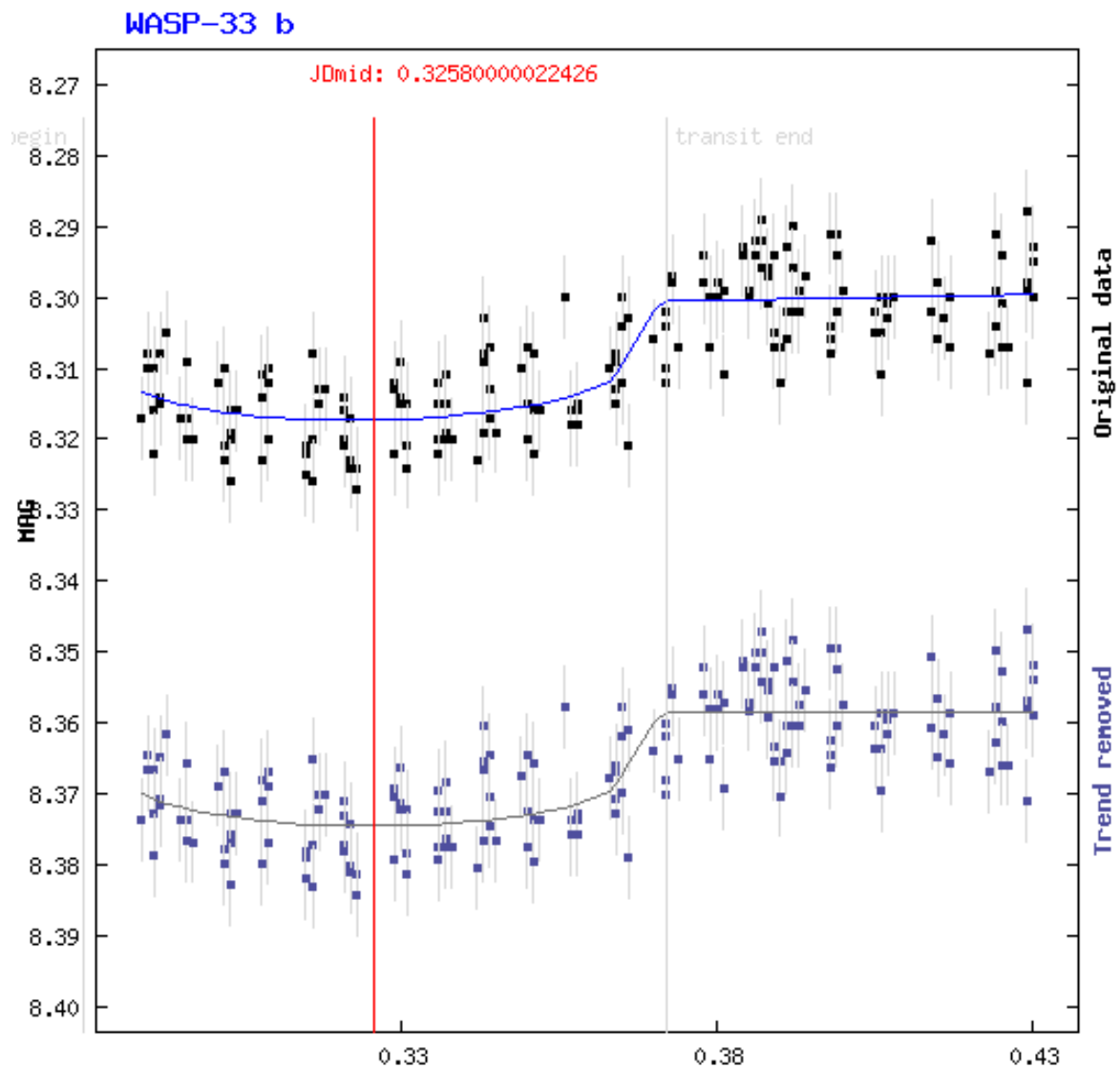
MaxIm DL:s verktyg för differentialfotometri användes för att bestämma förändringen av stjärnans magnitud under planetpassagen. Efter att ha markerat objektstjärnan samt alla referensstjärnor som i figur 6 och ha angivit varje referensstjärnas konstanta magnitud i programmets fotometrivertkyg producerade MaxIm DL automatiskt ett kalkylark med en tabell för magnituden av objektstjärnan vid varje tillfälle ett foto togs (se bilaga 1). Genom att rita upp ett sambandsdiagram från den tabellen kan en grov ljuskurva framställas.



Figur 12: Grov ljuskurva framställd med data från MaxIm DL.

I figur 12 kan denna ses med alla uppmätta värden i till synes lodräta ”klumpar”. Detta beror på att under observationen togs tio exponeringar var 10:e minut som ursprungligen sedan skulle staplas till en enda bild med ett säkrare medelvärde i utbyte mot mindre data. Denna metod övergavs i slutändan då en ljuskurva som istället innehåller varenda tagna bild helt enkelt gav så mycket mer data att det kompenserade för den ökade felmarginalen och därmed gav en tydligare ljuskurva.

För att få en trendlinje samt en ännu tydligare bild av passagen laddades datan upp till ETD:s onlineverktyg för modellanpassning av datan. ETDs verktyg anger ett dipp på 0.0160 magnituder från den framställda ljuskurvan i figur 13.



Figur 13: Modellanpassad ljuskurva (nedre) framställd med ETD:s onlineverktyg. (ETD 2019)

5.5 Dataanalys

Med ett värde av stjärnans radie på $1.444 R_{\odot}$ från tabell 1 kan volymen av exoplaneten beräknas enligt ekvation (2) och (4):

$$\text{ljusstyrkans förändringsfaktor} = 10^{0.4 \cdot \Delta m} = 10^{0.4 \cdot -0.0160} \approx 0.98537 \rightarrow -1.463\%$$

D.v.s. att i jämförelse med dess normala ljusstyrka är WASP-33 0.98537 gånger ljusare under planetpassaget. Detta är ekvivalent med en minskning i ljusstyrka på 1.463%

$$r = \sqrt{R^2 \cdot \text{minskning i ljusstyrka}} = \sqrt{(1.444R_{\odot})^2 \cdot 0.01463} \approx 1.700 R_J$$

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi (1.700R_J)^3}{3} \approx 5.250 \text{ Jupitervolymer } (V_J)$$

5.6 Avvikelse från tidigare värden

Jämförs den beräknade radien av WASP-33 b med den i tabell 2 av (Brown m. fl. 2010) enligt ekvation (5) ges följande avvikelse:

$$\text{skillnad i procent} = \frac{|V_1 - V_2|}{\frac{(V_1 + V_2)}{2}} \cdot 100 = \frac{|1.700R_J - 1.497R_J|}{\frac{(1.700R_J + 1.497R_J)}{2}} \cdot 100 \approx 12.70\%$$

För att jämföra den beräknade volymen av WASP-33 b med en tidigare studie måste först en volym från den uppmätta radien av (Brown m. fl. 2010) framställas för att kunna jämföras med. Detta görs med formeln för en sfär (detta igen också vid antagande av en sfärisk form hos exoplaneten):

$$V = \frac{4\pi r^3}{3} = \frac{4\pi (1.497R_J)^3}{3} \approx 3.588 V_J$$

De två volymerna avviker sig från varandra med följande procent:

$$\text{skillnad i procent} = \frac{|V_1 - V_2|}{\frac{(V_1 + V_2)}{2}} \cdot 100 = \frac{|5.250V_J - 3.588V_J|}{\frac{(5.250V_J + 3.588V_J)}{2}} \cdot 100 \approx 37.61\%$$

6 Diskussion

Rapportens första frågeställning besvaras klart och tydligt i avsnitt 5.5, där WASP-33 b uppskattades att ha en radie på 1.70 R_J samt en volym på 5.25 V_J .

Som nämnt i rapportens syfte jämförs dessa värden med en tidigare studie av WASP-33 b för att få en uppfattning av deras avvikelse från verkligheten och därmed besvara rapportens andra frågeställning. För att få så tillförlitliga värden att jämföra med som möjligt valdes samma rapport som ETD citerar för sina uppgifter om WASP-33 b. Det är en rapport från en observation som gjordes med signifikant bättre utrustning samt som även publicerades i den välkända naturvetenskapliga journalen Monthly Notices of

the Royal Astronomical Society år 2010 (Brown m. fl. 2010). Som tidigare nämnt är det härifrån värdena kommer från för stjärnan och exoplanetens radie, som presenteras i tabell 1 och 2. I jämförelsen erhöles endast en avvikelse på 12.7% i radie samt 37.6% i volym. Trots den större avvikelsen i volym bör man ta i åtanke att det i stor del beror på att avvikelsen ökar i kubik från radien enligt formeln för sfärens volym.

Som nämnt i rapportens syfte kan inte en exoplanets storlek bestämmas med märkvärd säkerhet utifrån en enda studie. Exoplanetens verkliga storlek befinner sig troligtvist nära ett medelvärde/median av tidigare studier som blir säkrare ju fler studier som görs. Däremot kan man tänka att denna rapport har tagit oss närmare exoplanetens verkliga storlek genom att öka provstorleken av dokumenterade observationer av WASP-33 b.

Samtidigt skulle ett flertal ändringar kunna göras i metodiken för att uppnå ett ännu säkrare värde och möjligen minska avvikelsen. Förberedelserna för observationen hade kunnat genomföras märkbart tidigare så observationen i sin tur kunde ha börjat tidigt nog för att hinna samla in observationsdata även före planetpassagen. Då skulle minskningen i ljusstyrka kunna mätas mot data både före och efter planetpassagen. En annan klar förbättring hade varit att ta exponeringar kontinuerligt under hela natten istället för i ”klumpar”. På så sätt hade hålen i ljuskurvan fyllts igen till en mer kontinuerlig samt tydlig bild av planetpassagen. Båda ovannämnda förbättringar hade dessutom gett mer data att jobba med och därmed ett säkrare resultat. En tredje och ytterligare förbättring hade varit att från början välja en konstant samt lägre exponeringstid under hela observationen för att ge ett mer konstant värde på referensstjärnornas magnitud samt undvika överexponering.

Sammanfattningsvis visar denna rapport hur viktiga observationer av exoplaneter är för vår förståelse av planeter i allmänhet. Utan att titta bortom vårt solsystem skulle vi aldrig veta om planeter ens kan växa större i storlek än vår största planet, Jupiter. Som nämnt i inledningen visste vi inte om exoplaneter ens existerade alls innan 1990-talet (Barnard m. fl. 2008). Denna rapport visar att man idag endast ungefär 30 år senare kan bevisa existensen av en exoplanet med relativt amatörmässig teleskoputrustning (i jämförelse med professionella teleskop som är flera meter större i diameter) samt användning av transitmetoden. Utgår man enbart ifrån resultaten i denna rapport kan man även dra slutsatsen att planeter faktiskt kan bli i alla fall minst lika stora som 5.25 gånger Jupiters storlek.

Denna explosiva utveckling av våra kunskaper samt amatörastronomers forskningsmöjligheter om exoplaneter gör det svårt att inte undra: Vad kommer vi veta om 100 år? Eller om 1000 år?

7 Tillkännagivanden

Tack till Peter Linde samt Peter Larsson på Tycho Brahe-observatoriet som möjliggjorde detta arbete genom uthyrning av deras fjärrstyrda teleskop. Stort tack till både Astronomisk Ungdom samt Luleå Gymnasieskola som bidragit med finansiering och därmed möjliggjort detta arbete. Extra stort tack till Signe Fjellström som bidragit med ovärderlig motivation under hela arbetets gång samt Mikael Ingemyr för ursprunglig inspiration och hans till synes oändliga förråd av kloka ord och goda råd.

Referenser

- [Bar+08] Barnard m. fl., utg. *Astronomica*. H. F. Ullmann, 2008, s. 156–159.
- [Bra15] Tycho Brahe-observatoriet. *Användarmanual till Tycho Braheobservatoriets fjärrstyrda teleskop*. 2015, s. 2–13. URL: https://www.tbobs.se/images/docs/TB0_Manual-2015-0.21.pdf.
- [Bro+10] D. J. A. Brown m. fl. “Line-profile tomography of exoplanet transits â“ II. A gas-giant planet transiting a rapidly rotating A5 star*”. I: *Monthly Notices of the Royal Astronomical Society* 407.1 (aug. 2010), s. 507–514. ISSN: 0035-8711. DOI: 10.1111/j.1365-2966.2010.16922.x. eprint: <http://oup.prod.sis.lan/mnras/article-pdf/407/1/507/3086087/mnras0407-0507.pdf>. URL: <https://dx.doi.org/10.1111/j.1365-2966.2010.16922.x>.
- [ETD19] ETD. *Exoplanet Transit Database*. 2019. URL: <http://var2.astro.cz/ETD/index.php>.
- [Gar09] L Gary Bruce. *Exoplanet Observing For Amateurs*. 2nd Edition. Hereford, Arizona: Reductionist Publications, 2009, s. 33–70.
- [JGK12] Pålsgård Jan, Kvist Göran och Nilson Klas. *Ergo Fysik 2*. Liber, 2012, s. 310–311.

- [JPL15] NASA JPL. *Planet Hunters Educator Guide*. Adler Planetarium, 2015, s. 62–65. URL: https://s3.amazonaws.com/zooniverse-resources/zoo-teach/production/uploads/resource/attachment/122/Planet_Hunters_Educator_Guide.pdf.
- [NAS19] JPL NASA. *5 Ways to Find a Planet*. 2019. URL: <https://exoplanets.nasa.gov/5-ways-to-find-a-planet/index.html>.
- [Tel18] Isaac Newton Group of Telescopes. *Object Visibility - STARALT*. 2018. URL: <http://catserver.ing.iac.es/staralt/>.

8 Bilagor

1. Observationsdata framställd i MaxIm DL

Tid	Magnitud				
		20:23	8.314	20:55	8.314
19:56	8.317	20:24	8.312	20:55	8.315
19:59	8.316	20:24	8.320	20:55	8.309
19:59	8.310	20:24	8.310	20:56	8.315
19:59	8.322	20:33	8.322	20:56	8.324
19:57	8.310	20:33	8.321	20:56	8.321
19:57	8.308	20:33	8.325	20:56	8.321
20:00	8.314	20:35	8.326	21:03	8.312
20:00	8.308	20:35	8.320	21:03	8.322
20:00	8.315	20:35	8.308	21:03	8.315
20:01	8.305	20:36	8.315	21:03	8.320
20:04	8.317	20:36	8.313	21:03	8.312
20:06	8.309	20:36	8.313	21:05	8.311
20:06	8.317	20:37	8.313	21:05	8.319
20:06	8.320	20:42	8.316	21:05	8.315
20:07	8.320	20:42	8.314	21:05	8.320
20:14	8.323	20:42	8.320	21:06	8.320
20:14	8.310	20:42	8.321	21:12	8.323
20:14	8.321	20:43	8.324	21:13	8.319
20:16	8.320	20:43	8.317	21:13	8.309
20:16	8.326	20:43	8.323	21:13	8.303
20:16	8.319	20:45	8.327	21:13	8.308
20:16	8.316	20:45	8.324	21:15	8.317
20:17	8.316	20:45	8.324	21:15	8.307
20:13	8.312	20:53	8.322	21:15	8.313
20:23	8.323	20:53	8.313	21:16	8.319
20:23	8.311	20:53	8.312	21:16	8.319

21:22	8.310	21:57	8.297	22:24	8.290
21:22	8.310	21:52	8.306	22:24	8.290
21:24	8.307	21:55	8.304	22:24	8.296
21:25	8.308	22:05	8.300	22:24	8.302
21:24	8.320	22:05	8.307	22:25	8.302
21:25	8.322	22:07	8.300	22:25	8.299
21:25	8.322	22:07	8.298	22:27	8.297
21:25	8.316	22:07	8.298	22:33	8.306
21:26	8.316	22:08	8.311	22:33	8.291
21:24	8.315	22:08	8.299	22:33	8.308
21:32	8.300	22:04	8.298	22:33	8.304
21:34	8.316	22:04	8.294	22:34	8.302
21:34	8.318	22:15	8.294	22:34	8.294
21:34	8.318	22:17	8.289	22:34	8.291
21:35	8.316	22:12	8.293	22:36	8.299
21:35	8.315	22:12	8.294	22:36	8.299
21:35	8.318	22:14	8.300	22:43	8.302
21:42	8.310	22:14	8.299	22:43	8.305
21:44	8.308	22:15	8.292	22:44	8.311
21:44	8.313	22:17	8.296	22:44	8.305
21:44	8.309	22:17	8.292	22:44	8.300
21:45	8.312	22:18	8.296	22:46	8.301
21:45	8.304	22:18	8.297	22:46	8.303
21:45	8.300	22:18	8.301	22:46	8.300
21:47	8.321	22:20	8.294	22:47	8.300
21:47	8.303	22:20	8.305	22:56	8.292
21:44	8.315	22:20	8.307	22:56	8.302
21:58	8.307	22:21	8.307	22:57	8.306
21:55	8.310	22:21	8.312	22:57	8.298
21:55	8.302	22:23	8.302	22:57	8.298
21:55	8.312	22:23	8.306	22:57	8.306
21:57	8.298	22:23	8.293	22:59	8.303

23:00	8.307	23:12	8.294	23:17	8.299
23:00	8.300	23:12	8.294	23:17	8.298
23:00	8.300	23:12	8.301	23:17	8.312
23:09	8.308	23:12	8.307	23:19	8.295
23:10	8.304	23:13	8.307	23:19	8.293
23:10	8.291	23:13	8.307	23:19	8.300
23:10	8.299	23:17	8.288		