

Betrachtungen zur Apertur bei nicht aufgelöstem Begleiter

Mario Ennes, Walter Fürtig und Eberhard Splittgerber

Abstract: *Specially for short and medium focal length images crowded fields or nearby optical companions of variables are a challenging situation when using apertures for photometry. Several sophisticated methods are in use to bypass the known problems. We try to get an estimate of the deviations from exact results derived from higher resolution images.*

Die Ergebnisse der Apertur-Photometrie sind abhängig von der geeigneten Wahl der Blendendurchmesser, welche die Berechnung des Veränderlichensignals und des Himmelshintergrundes ermöglichen. Angeregt durch die Frage, ob Aufnahmen mit kurzbrennweitigen Teleskopen oder Objektiven zur Aperturphotometrie prinzipiell und für GP And im Besonderen geeignet sind, werden einige Überlegungen zu diesem Thema angestellt.

Einleitung

Nach der Vorstellung des Feldes GP And wird anhand einer konkreten Beobachtungsreihe von GP And mit einer "nichtauflösenden" Optik dargestellt, welche photometrischen Ergebnisse prinzipiell damit erzielt werden können. Es folgen kurze mathematische Betrachtungen, die die prinzipiellen Grenzen in solchen Fällen ausleuchten und anhand von GP And verifizieren. Abschließend wird ein Ausblick auf mögliche beobachtungstechnische Anwendungen gegeben.

Beobachtungsreihe GP And

Neben vielen anderen Feldern wird auch das Feld GP And regelmäßig an der Sternwarte Sonneberg (WF) photographiert. Zum Einsatz kommt dabei ein Tessar 80/360 mit einer Canon EOS 5D Mark I mit 4386x2920 Pixeln, was zu einer rechnerischen Auflösung von 4.73"/px führt. Als Belichtungszeit wird bis auf wenige Ausnahmen 180 s bei ISO 400 im Raw-Format (CR2) gewählt. Die Feldmitte liegt bei etwa $\alpha=0^{\text{h}} 54^{\text{min}}$ und $\delta=+23^{\circ} 22'$. Die bei gutem Himmel erreichbare Grenzhelligkeit beträgt ca. 14mag.

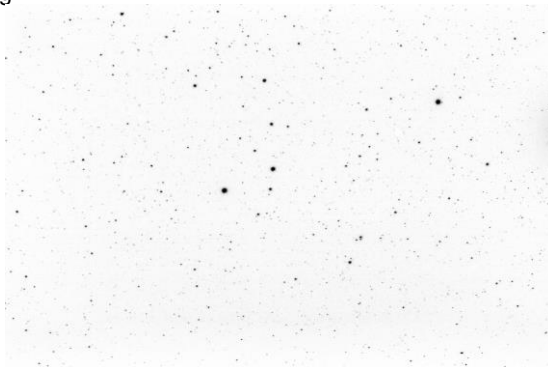


Abb. 1: GP And - Aufnahme: 1.1.2020

Detaildarstellungen der astrometrierten Version in Aladin gestatten es z.B. einen der Gaia-Kataloge ([ESA20]) zu überblenden und mit einem Filter für die Grenzhelligkeit nur die sichtbaren Katalogsterne anzuzeigen. Die Abbildung 2 zeigt die Umgebungskarte als Ausschnitt des Komplettfeldes. Trotz der theoretischen Auflösung von knapp $5''/\text{px}$ der Chip-Objektiv-Kombination (bei $1.66''$ des Tessars) können GP And und sein "optischer Begleiter" TYC 1739-1526-2 in $11''$ nicht getrennt werden. Eine etwas länglichere Form des Sternbildchens in Richtung S-O-O ist bei der Verwendung der oben genannten Aufnahmeoptik allenfalls in extremer Vergrößerung zu erahnen.

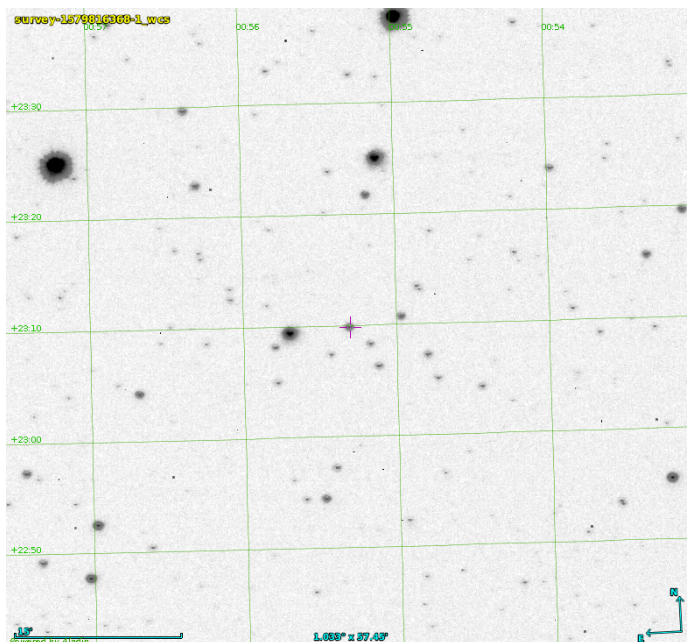


Abb. 2: GP And Umgebung – Detail-Ansicht (Aladin)

Auswertung mit Muniwin

Um der Frage auf den Grund zu gehen, was trotz dieses nichtaufgelösten Begleiters auswertbar ist und wie sich der nahestehende TYC 1739-1526-2 auf die Ergebnisse konkret auswirkt, wurde eine Zeitreihe des Feldes GP And mit Muniwin analysiert. Eine Aufnahmereihe von GP And, die vor zwei Jahren am 1.1.2020 entstand (WF), wurde mit Muniwin für diese Untersuchung ausgewertet (ES). Als Grundlage für die Auswertung standen Aufnahmen zw. 17:30 und 00:00 UTC zur Verfügung. Die zeitliche Veränderung der Helligkeit lässt selbst in dieser einfachen Darstellung die einfachsten Lichtkurvenelemente bereits sehr gut erkennen (siehe Abb. 3). Die Periode lässt sich auf ca. 1h 50min abschätzen und die Amplitude der Helligkeit liegt bei ca. 0.55 mag. Dargestellt ist die Differenz der instrumentellen Helligkeit zw. GP And und einem Vergleichssterne (V-C).

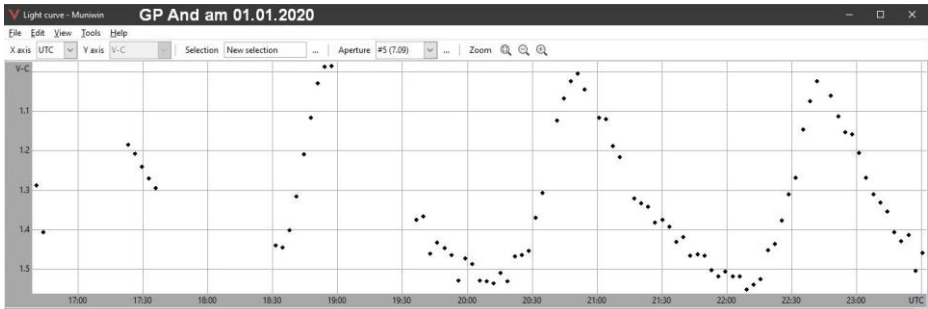


Abb. 3: GP And - Muniwin, Filter: TG

Mathematische Betrachtung

Die in der obigen Lichtkurve beobachtete Amplitude der Helligkeitsschwankung ist durch den mitgemessenen Strahlungsfluss des optischen Begleiters natürlich verfälscht. Im Folgenden wird versucht, eine Abschätzung der Verfälschung im vorliegenden Fall vorzunehmen, als auch eine allgemeingültige Formel für solch eine Abschätzung herzuleiten.

Dazu werden zwei Grenzfälle betrachtet. Fall A beschreibt das System GP And ohne optischen Begleiter, Fall B berücksichtigt den optischen Begleiter von GP And. Fall A und B gehen also von einer *kompletten Einbeziehung* oder *Nichteinbeziehung* des zusätzlichen Strahlungsflusses des Begleiters aus. Dann gilt für die Differenz von Helligkeitsminimum und Helligkeitsmaximum von GP And:

$$\Delta m_A = m_{0A} - m_{1A} = -2.5 \cdot \left(\frac{\phi_0}{\phi_0 + \Delta \phi} \right) \quad (1)$$

$$\Delta m_B = m_{0B} - m_{1B} = -2.5 \cdot \left(\frac{\phi_0 + \phi_B}{\phi_0 + \phi_B + \Delta \phi} \right) \quad (2)$$

m_{0A} Helligkeit GP And im Minimum (ohne Begleiternelligkeit)

m_{1A} Helligkeit GP And im Maximum (ohne Begleiternelligkeit)

m_{0B} Helligkeit GP And im Minimum (mit Begleiternelligkeit)

m_{1B} Helligkeit GP And im Maximum (mit Begleiternelligkeit)

m_B Helligkeit des Begleiters

ϕ_0 Photonenfluss GP And im Minimum

$\phi_0 + \Delta \phi$ Photonenfluss GP And im Maximum

ϕ_B Photonenfluss Begleiters

Um die beiden Fälle A und B quantitativ miteinander vergleichen zu können, wird der Flussquotient in Gleichung (2) durch den Flussquotienten in Gleichung (1) mittels

eines multiplikativen Faktors R beschrieben. Er gibt die Veränderung von $\frac{\phi_0}{\phi_0 + \Delta \phi}$ durch die Anwesenheit eines (oder mehrerer) Begleiters an:

$$\frac{\phi_0 + \phi_B}{\phi_0 + \phi_B + \Delta \phi} \stackrel{!}{=} R(\phi) \cdot \left[\frac{\phi_0}{\phi_0 + \Delta \phi} \right] \quad (3)$$

Auflösen der Gleichung (3) nach R liefert:

$$R(\phi_B) = \left[\frac{\phi_0 + \phi_B}{\phi_0 + \phi_B + \Delta \phi} \right] \cdot \left[\frac{\phi_0 + \Delta \phi}{\phi_0} \right] \quad (4)$$

Setzt man Gleichung (3) in (2) ein, erhält man die gewünschte Darstellung und die Berechnungsformel für die anzubringende Korrektur im Gegensatz zum Fall ohne die Beeinflussung durch einen Begleitstern.

$$m_{0B} - m_{1B} = \underbrace{-2.5 \cdot \log(R(\phi_B))}_{\text{Korrektur}} - 2.5 \cdot \log\left(\frac{\phi_0}{\phi_0 + \Delta \phi}\right)$$

$$\Delta m_B = \underbrace{-2.5 \cdot \log(R(\phi_B))}_{\text{Korrektur}} + \Delta m_A$$

$$\Delta m_A = \Delta m_B + \underbrace{2.5 \cdot \log(R(\phi_B))}_{\text{Korrektur}} \quad (5)$$

Die Richtigkeit der Formel (5) kann z.B. für die beiden Extremfälle kein Begleiter oder ein extrem heller Begleiter überprüft werden.

Der erste Grenzfall liefert: $R(\phi_B=0)=1 \Rightarrow \text{Korrektur}=0 \Rightarrow \Delta m_B = \Delta m_A$

Falls also kein Begleitstern einen Photonenfluss beisteuert, sind Fall A und Fall B wie erwartet identisch, was der idealen Apertur-Photometrie ohne störenden Begleiter entspricht.

Für den zweiten Fall liefert die Gleichung (4) zunächst den $\lim_{\phi_B \rightarrow \infty} R(\phi_B) = \frac{\phi_0 + \Delta \phi}{\phi_0}$
Eingesetzt in (5) ergibt das:

$$\Delta m_B = -2.5 \cdot \log\left(\frac{\phi_0 + \Delta \phi}{\phi_0}\right) - 2.5 \cdot \log\left(\frac{\phi_0}{\phi_0 + \Delta \phi}\right)$$

$$\Rightarrow \Delta m_B = -2.5 \cdot \left(\log\left(\frac{\phi_0 + \Delta \phi}{\phi_0}\right) + \log\left(\frac{\phi_0}{\phi_0 + \Delta \phi}\right) \right)$$

$$\Rightarrow \Delta m_B = -2.5 \cdot \log(1)$$

$$\Rightarrow \Delta m_B = 0$$

Falls der Begleitstern also sehr viel heller als der betrachtete Veränderliche ist, spielt die Helligkeitsschwankung des Veränderlichen keine Rolle und es ist keine Änderung im Photonenfluss beobachtbar. Zur Abschätzung der Größenordnung des Korrektur-

terms im Falle von GP And in den Formeln (4) und (5) werden drei relative Photonenflüsse ϕ_b, ϕ_0 und $\Delta\phi$ benötigt. Mögliche Quellen für die im Folgenden verwendeten Werte sind Online-Kataloge und AAVSO-Lichtkurven. Setzt man für $\phi_B=1$ und für die Helligkeiten des Begleitsterns 12.31 mag, von GP And im Minimum ca. 11.1 mag und im Maximum 10.4 mag an, dann kommt man mit (1) zunächst auf folgende relative Flüsse $\phi_B=1, \phi_0=3.05$ und $\phi_0+\Delta\phi=5.82$.

Insgesamt lässt sich damit die Korrektur zu 0.14 mag ermitteln. Die Amplitude der Helligkeitsschwankung von GP And ist im Falle einer gemeinsamen Apertur-Photometrie des Begleitsterns und von GP And also um ca. 0.14 mag zu gering. Geht man ungefähr von den oben aus der Lichtkurve grob abgeschätzten 0.55 mag (Fall B) aus, landet man bei ca. 0.69 mag (Fall A), was mit den beiden jüngsten Lichtkurven von GP And bei der AAVSO (28.10. / 9.11.21, TG) sehr gut übereinstimmt. An dieser Stelle sei nochmal betont, dass die beiden Formeln (4) und (5) nur bei (z.B. aus Katalogen) bekannten Werten für ϕ_b, ϕ_0 und $\Delta\phi$ eine Abschätzung der ungestörten Amplitude zulassen.

Damit ist zunächst nichts gewonnen. Mit der Beobachtung der Helligkeitsdifferenz Δm_B in Anwesenheit eines (oder mehrerer) Begleiter gelingt es, den Wert für $\Delta\phi$ zu berechnen und damit nur noch zwei Kataloggrößen zu benötigen um die ungestörte Amplitude abzuleiten. Gleichung (2) umgestellt ergibt:

$$\Delta\phi = (\phi_0 + \phi_B) \cdot \left(10^{\frac{\Delta m_B}{2.5}} - 1\right) \quad (6)$$

Zusammenfassend lässt sich also sagen: mithilfe zweier Katalogwerte (ϕ_0, ϕ_B sind berechenbar aus m_{0A}, m_B) und zweier Messwerte (m_{0B}, m_{1B}) lässt sich auch mit einer nichtauflösenden Optik die "wahre" Amplitude eines Veränderlichen mittels Aperturphotometrie berechnen. Bei den gerade gemachten Abschätzungen wurde z.T. mit Werten gearbeitet, die zu verschiedenen Zeitpunkten gewonnen wurden. Wegen des δ -Scuti-Typs von GP And sind Amplitudenwerte über längere Zeiträume nicht vergleichbar und zur Verifikation eines Zusammenhangs nicht geeignet.

GP And zeitgleich mit zwei verschiedenen Optiken

Um die Formel (5) für GP And genauer zu überprüfen, sollte in einem definierten Zeitfenster mit zweierlei verschiedenen Optiken (a und b) eine Lichtkurve über 4-5 h gewonnen werden. Eine der beiden Optiken (a) sollte den optischen Begleiter nicht trennen, die andere (b) hingegen schon. Mit den Reihenaufnahmen der beiden werden dann jeweils die Lichtkurven und insbesondere deren Amplituden bestimmt. Bei der Auswertung der Bilder von (a) sollte darauf geachtet werden, die Apertur so groß zu wählen, dass auch der Begleitstern in die Photometrie von GP And komplett mit eingeht. Die Apertur von (b) sollte möglichst so gewählt werden, dass nur GP And einen photometrischen Beitrag leistet. Mit den so erhaltenen instrumentellen Helligkeiten und den daraus abgeleiteten Lichtkurven kann dann Gleichung (5) überprüft werden. Zusätzlich entsteht in diesem Fall die Möglichkeit die "wahre" Amplitude aus zwei Messungen zu erhalten. Direkt über die Photometrie des aufgelösten Bildes einerseits und mit den ebenfalls daraus enthaltenen Werten für

ϕ_0 und ϕ_B und den Weg über die "reduzierte" Amplitude (Gleichung (6), (4) und (5)) andererseits.

FG Sge als Extrembeispiel

Ein extremes und zugleich prominentes Anwendungsbeispiel für Formel (5) ist der Veränderliche FG Sge ([HRW70], [Ric60]). Entdeckt von Cuno Hoffmeister (S 3702), bekam der Veränderliche die vorläufige Bezeichnung 1943.0377 und erhielt in der 41. Benennungsliste der AG seine endgültige Bezeichnung. Durch zahlreiche photometrische und spektroskopische Eigenmessungen, sowie durch Hinzunahme anderer Messungen konnten W.Fürtig, W.Wenzel sowie G.H.Herbig und A.A.Boyarchuk den Helligkeitsanstieg von FG Sge beginnend ab ca. 1890 bis 1970 sehr genau dokumentieren ([W F71], [HB68]). Ab 1992 zeigte FG Sge dann teilweise sehr starke Helligkeitsschwankungen, die ihn z.T. bis unter 17 mag fallen ließen.

In Abbildung 4 sind die Einzel-Helligkeiten und Einzel-Intensitäten verschiedener Komponenten und Teilsysteme von FG Sge dargestellt. Die Gaia-EDR3-Helligkeit von 19,35 (phot_g_mean_mag) wird als Bezugspunkt der Intensitäten willkürlich auf 1 gesetzt. Alle Begleitsterne in weniger als 10" Entfernung sind in der Intensitätsberechnung berücksichtigt. Den größten Beitrag zur Gesamtintensität von 1069 leistet der Nachbarstern in 8" Entfernung mit 1067. Das Gesamtsystem FG Sge hat damit eine scheinbare Helligkeit von 11,7 mag (der Planetarische Nebel Helixe 1-5 ist dabei nicht berücksichtigt). Soll die minimale Helligkeitsänderung von 0.05mag, die mit dem oben genannten Equipment noch auflösbar ist, detektiert werden, d.h. das Gesamtsystem wäre dann 11,72 mag hell, müsste das Gesamtsystem eine Intensität von 1127 besitzen, d.h. um 57-58 Intensitätsstufen heller sein. Eingesetzt in die Formel für den Korrekturwert ergibt sich $R(\phi_B)$ zu 4.37 mag. D.h. der wahre Helligkeitsunterschied von FG Sge beträgt bei angenommenen beobachteten 0.05 mag in Wirklichkeit schon 4.42 mag, d.h. hier liegt eine große "Untersetzung" der tatsächlichen zur beobachteten Helligkeit vor. FG Sge sollte deshalb, falls möglich, mit einer auflösenden Optik fotografiert und photometriert werden, um Helligkeitsänderungen an der Detektionsgrenze des eingesetzten Systems messen zu können.

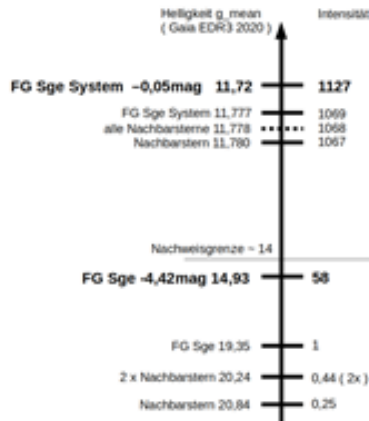


Abb. 4: FG Sge - Helligkeiten und Intensitäten

Andere optische Doppelsterne mit einem oder mehreren Veränderlichen

Die Überprüfung der Gleichung (5) ist natürlich nicht auf GP And und FG Sge beschränkt, sondern sollte mit anderen optisch engen Paaren im Abstand von ca. 10-30" ebenfalls möglich sein. Idealerweise ist der veränderliche Teil dieses Paares ein Kurzperiodischer, damit innerhalb einer Beobachtungsnacht die Amplitude der Lichtkurve bestimmt werden kann. Ob und wie viele andere geeignete solcher Paare es gibt, hängt u.a. von der Reichweite der verwendeten Optiken ab. Interessant sind auch optische Doppelsterne, bei denen der veränderliche Teil, wie bei FG Sge momentan, den wesentlich leuchtschwächeren Teil darstellt. Dort bietet die Formel (5) die Möglichkeit einer Vorabschätzung der tatsächlichen Helligkeitsschwankung des "überstrahlten" Veränderlichen zu bekommen, d.h. eine quantitative Einschätzung, ob sich ein Helligkeitsabfall detektieren lässt und sich eine Beobachtung lohnt.

Eine Liste der Kandidaten, die für Verifizierungsbeobachtungen in Frage kommen, lässt sich automatisiert mit der untenstehenden ADQL (AstronomicalDataQueryLanguage)-Abfrage erstellen. Es werden zu allen Kandidaten aus dem GCVS-Katalog, die im Maximum heller als 12 mag sind, eine Periode kürzer als 0.25d und eine Deklination größer als -20° haben, alle Nachbarn des GaiaEDR3-Katalogs ([ESA20]) im Umkreis von 25" herausgesucht. Die resultierende Liste führt in den ersten drei Spalten GCVS-Informationen (Name, Rektaszension und Deklination) zu dem Veränderlichen evtl. auch mehrfach auf (wenn dieser einen oder mehrere optische Begleiter hat). Es schließen sich fünf Spalten mit Informationen zu dem optischen Begleiter an (Rektaszension und Deklination aus GaiaEDR3, der berechnete Abstand zum Variablen in Bogengrad, die Gaia-Helligkeit im grünen Bereich, sowie eine eindeutige Identifikation im GaiaEDR3-Katalog ([ESA20])). Die jeweils erste Zeile zu einem Variablen ist der Variable selbst mit seinen GCVS und Gaia-Daten. Erkennbar ist dies an der Entfernung im Bereich von 10^{-5} - 10^{-6} ["] (spiegelt die minimal unterschiedlichen Rektaszension- und Deklinations-Werte für den Variablen in beiden Katalogen wieder). Die gemachten Einschränkungen auf Seiten des GCVS-Katalogs entsprechen dem Bildfassungssystem, das an der Sternwarte Sonneberg für die Feldaufnahmen verwendet wird. Sie können durch Abändern der Werte jederzeit an andere Gegebenheiten angepasst werden ([Uni22]).

```
SELECT t1.VarName AS GCVS_NAME,  
t1.RAJ2000 AS GCVS_RA_DEG,  
t1.DEJ2000 AS GCVS_DE_DEG,  
t2.RAJ2000 AS GAIA_RA_DEG,  
t2.DEJ2000 AS GAIA_DE_DEG,  
DISTANCE(POINT('ICRS',t1.RAJ2000,t1.DEJ2000),POINT('ICRS',t2.RAJ2000,t2.DEJ  
2000)) AS DIST_DEG,  
t2.Gmag AS GAIA_GMAG,  
t2.Source AS GAIA_ID  
FROM "B/gcvs/gcvs_cat" t1, "I/350/gaiaedr3" t2  
WHERE t1.magMax<=12.0  
AND t1.Period<=0.25  
AND t1.DEJ2000>=-20.0  
AND 1=CONTAINS(POINT('ICRS',t1.RAJ2000,t1.DEJ2000),  
CIRCLE('ICRS',t2.RAJ2000,t2.DEJ2000, 25/3600.))  
ORDER BY GCVS_RA_DEG ASC, GCVS_DE_DEG ASC, DIST_DEG ASC;
```

Von den insgesamt 374 Variablen, die die Selektionsbedingungen erfüllen, haben 71 keinen optischen Begleiter, 202 2-9 Nachbarn, 93 10-50 Begleiter und 8 mehr als 50(!). Der Spitzenreiter ist V369 Sct mit 118 optischen Nachbarn (siehe folgende Query):

```
SELECT t1.VarName AS GCVS_NAME, COUNT (*) AS N_NEIGHB
FROM "B/gcvs/gcvs_cat" t1, "I/350/gaiaedr3" t2
WHERE t1.magMax<=12.0
AND t1.Period<=0.25
AND t1.DEJ2000>=-20.0
AND 1=CONTAINS(POINT('ICRS',t1.RAJ2000,t1.DEJ2000),
CIRCLE('ICRS',t2.RAJ2000,t2.DEJ2000, 25/3600.))
GROUP BY t1.VarName
ORDER BY N_NEIGHB DESC;
```

Danksagung

Dieser Artikel verwendet Bilder der Sternwarte Sonneberg aus der laufenden Himmelsüberwachung und deren Auswertung (Feld GP And).

Dieser Artikel verwendet das SW-Paket Muniwin in der Version 2.1.29, David Motl et.al.

This research has made use of "Aladin sky atlas" developed at CDS, Strasbourg Observatory, France (see 2000A&AS..143...33B).

Dieser Artikel verwendet das Service Protokoll TAP und die Query-Language ADQL für den Zugriff auf Vizier Tabellen.

Literatur

[Ric60] G. Richter. "Der Nova-ähnliche Veränderliche 377.1943 Sagittae". In: *Astronomische Nachrichten* 285 (Aug. 1, 1960), S. 274

[HB68] G. H. Herbig and A. A. Boyarchuk. "The Peculiar Variable FG Sagittae". In: *The Astrophysical Journal* 153 (Aug. 1, 1968). S. 397

[HRW70] C. Hoffmeister, N. Richter, und W. Wenzel. "Veränderliche Sterne", S. 192,193.

[W F71] W. Wenzel und W. Fürtig. "FG Sagittae". In: *MVS* 5 (Apr. 22, 1971), S. 165.

[ESA20] ESA. Gaia EDR3, cosmos.esa.int/web/gaia/earlydr3.

[Uni22] Université de Strasbourg/CNRS. Tap Vizier. Jan. 2022. URL: <https://tapvizier.cds.unistra.fr/adql/>.

Mario Ennes, Mario.Ennes@t-online.de

Walter Fürtig, w.fuertig@t-online.de

Eberhard Splittgerber, ebing.splitti@web.de