

Nachweis der Begleiter Algol-D und Algol-E und die Geschwindigkeit von Gravitationswellen

Herbert Weidner*

Corresponding author: herbertweidner@gmx.de
Am Stutz 3, D-63864 Glattbach, Germany

In den Langzeitdaten des Luftdruckes findet man die GW des Dreifach-Sternsystems Algol bei $8.073 \mu\text{Hz}$, die mit vier unterschiedlichen Frequenzen phasenmoduliert ist. Zwei Frequenzen können dem Erdorbit um die Sonne und Algol-C zugeordnet werden. Die beiden anderen könnten durch zwei bisher nicht entdeckte Sterne Algol-D und Algol-E erzeugt werden. Der hohe Modulationsindex aller vier PM lässt sich nur erklären, wenn die Ausbreitungsgeschwindigkeit der Gravitationswellen deutlich kleiner ist als die Lichtgeschwindigkeit.

1. Einleitung

Das Sternsystem *Algol* – auch *Beta Persei* genannt – besteht aus (mindestens) drei Sternen *Algol A* ($m = 3.17m_{\odot}$), *Algol B* ($m = 0.7m_{\odot}$) und *Algol C* ($m = 1.76m_{\odot}$), die nur 93 Lichtjahre entfernt sind. Die Umlaufdauer des engen Paares *A-B* beträgt 2.86732 Tage. Der dritte Stern *C* umrundet das binäre System mit der Periodendauer 680 Tage [1] [2]. Die Eigenschaften dieses Trios sind bestens bekannt, weil es seit langem mit elektromagnetischen Wellen beobachtet wird.

Analysiert man die Gravitationswellen (GW) von *Algol*, wandelt sich das Bild: Das System besteht aus zwei Oszillatoren, die in ein (aus astronomischer Sicht) winziges Volumen gepackt sind und GW unterschiedlicher Frequenz erzeugen und abstrahlen.

- Das Binärsystem *A-B* erzeugt $f_{GWa} = 8.073104 \mu\text{Hz}$.
- Das Binärsystem *AB-C* erzeugt $f_{GWb} = 34.033 \text{ nHz}$.

Die beiden Oszillatoren beeinflussen sich gegenseitig, da die Wellenlänge der GW wesentlich größer ist als der gegenseitige Abstand der Sterne. In diesem Artikel wird nur f_{GWa} untersucht. Da kurze Interferometer wie LIGO oder Virgo "blind" sind für Frequenzen unter 20 Hz, benötigt man wesentlich umfangreichere Antennen. Bei der Untersuchung von Eigenresonanzen der Erde hat sich gezeigt, dass Langzeitaufnahmen von Barometern Signale unbekannter Ursache enthalten [3]. In den records weit auseinander liegender Wetterstationen findet man identische Spektrallinien mit den Eigenschaften von Gravitationswellen. Die folgende Untersuchung geht davon aus, dass die Atmosphäre – genauso wie jeder andere Gegenstand – auf GW reagiert und deshalb eine geeignete Antenne für den Empfang von GW ist. Möglicherweise ist die Lufthülle der Erde eine preiswerte Antenne für GW im Frequenzbereich unter etwa 1000 Hz, die sich kaum durch Erdbeben stören lässt.

Die Suche nach GW mit ausreichender spektraler Auflösung erfordert Luftdruckdaten der Mindestdauer zwanzig Jahre (equation (1)). Der Deutschen Wetterdienst DWD speichert ausreichend lange Datenketten [4], die sich nach einiger Vorarbeit verwenden lassen. Um den Einfluss lokaler Besonderheiten und Datenlücken einzelner Wetterstation zu reduzieren, addiert man die Messwerte möglichst vieler Barometer, die über ganz Deutschland verteilt sind und mindestens zehn Jahre lang fast lückenlos in Betrieb waren. Im Zeitraum 2000 bis 2009 wurden 64 Datenketten gefunden, im Zeitraum 2010 bis 2019 nur 51 Datenketten. Weil die Wellenlänge der gesuchten GW mindestens um den Faktor 10^6 größer ist als die gegenseitigen Abstände der Barometer, reagieren alle Instrumente gleichphasig auf die GW. Diese kohärente Addition kann das S/N der gesuchten Signale deutlich verbessern und Spektrallinien sichtbar machen, die bei der Analyse nur einer Datenkette im Rauschen verschwinden.

Auch nahe Himmelskörper regen Erde und Lufthülle zu Schwingungen an, deren Frequenzen man dem tidal potential catalogue HW95 [5] entnimmt. Gemäß dieser Tabelle sollte der Mond bei $7.987 \mu\text{Hz}$ eine starke Anregung verursachen, die in den records des Luftdruckes *nicht* nachweisbar ist. Eine 21-mal schwächere Linie bei $8.07476 \mu\text{Hz}$ unterscheidet sich deutlich von f_{GWa} und ist ebenfalls unauffindbar. Möglicherweise beeinflussen die GW naher Doppelsternsysteme die Atmosphäre stärker als nahe Planeten.

2. Identifikation von f_{GWa}

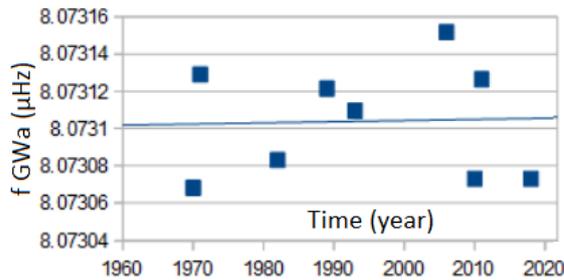


Abbildung 1): Frequenzen f_{GWa} des Systems Algol A-B, errechnet aus Messungen der Umlaufdauer in den letzten Jahrzehnte. Annahme: $f_{GWa} = 2f_{orbit}$. Der variable Massentransfer zwischen den Sternen könnte die auffallenden Unterschiede verursachen.

Zwischen den Jahren 1970 und 2018 wurde das Sternpaar A-B häufig mit elektromagnetischen Wellen untersucht, woraus sich eine mittlere Umlaufdauer von 2.86732 Tagen errechnet. Die Drift wurde nie bestimmt, da die Werte keinen Trend erkennen lassen. Falls $f_{GWa} = 2f_{orbit}$ gilt, sollte bei der Frequenz $8.0731 \mu\text{Hz}$ eine Gravitationswelle messbar sein (Figur 1). Um eine Frequenzauflösung Δf besser als 1 nHz zu erreichen, müssen während eines langen Zeitraums Daten für die Fourieranalyse (FFT) gesammelt werden. Filter dieser geringen Bandbreite benötigen viel Zeit, um sich zu beruhigen. Für die Mindestzeit gilt laut Küpfmüller [8]

$$T_{min} \cdot \Delta f \geq 0.5 \quad (1)$$

Da man bei der erwarteten Frequenz f_{GWa} kein Maximum im Spektrum des Luftdrucks

findet, muss man das Rauschniveau senken. Die einfachste Möglichkeit besteht darin, den Empfänger nur dann mit voller Empfindlichkeit arbeiten zu lassen, wenn die Amplitude der gesuchten GW besonders groß ist. Unterdrückt man das Rauschen während der übrigen Zeit, verbessert das S/N des gesuchten Signals [9]. Da man die Eigenschaften der Antenne noch nicht kennt, muss man eine Funktion V empirisch finden, mit der man die Datenkette multipliziert. Versuche haben gezeigt, dass der Ansatz

$$V = 1 + a \cdot \sin(2\pi t f_{day} + \varphi) \quad (2)$$

zum Erfolg führt. Anmerkungen zu den Parametern dieser Gleichung: Die Rotationsfrequenz der Erde f_{day} muss man im siderealen System berechnen, damit der Winkel Pulsar – Erdmittelpunkt – Barometer während der Messdauer von 20 Jahren konstant ist; die Position der Sonne ist ohne Bedeutung. Die Faktoren a und φ bestimmt man so, dass die Amplitude der Spektrallinie bei f_{GW_a} maximal wird (Figur 2). Für $a = 1.05$ und $\varphi = 1.22$ ergibt sich ein deutliches Optimum. Moduliert man die empfangenen Daten mit dem damit berechneten V , erhält man das in Figur 2 gezeigte Spektrum. Die Halbwertsbreite ist etwas größer als man mit equation (1) berechnet. Das ist Anlass, die Eigenschaften dieser Linie genau zu untersuchen.

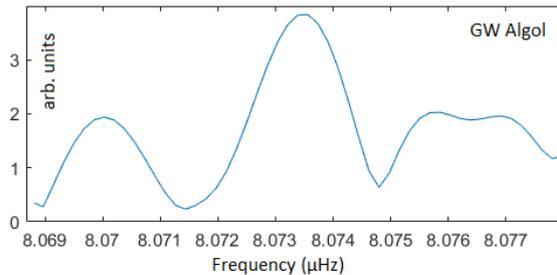


Abbildung 2): *Spektrum des mittleren Luftdrucks in Deutschland in der Umgebung der Frequenz f_{GW_a} . Die Gesamtdauer der Datenbasis (20 Jahre) begrenzt die spektrale Auflösung auf 1.6 nHz.*

Technischer Hinweis: Frequenz und/oder Amplitude des Dauersignals bei f_{GW_a} können sich im Rhythmus mehrerer Frequenzen ändern (Mehrfach-Modulation). Dann tauchen neben f_{GW_a} charakteristische Spektrallinien auf (Seitenbänder). Beseitigt man diese durch Filter, entfernt man die entsprechenden Modulationen. Die Drift der Trägerfrequenz wird dadurch nicht beeinflusst. Die Nachrichtentechnik kennt unterschiedliche Verfahren (MSH-Methode [9] oder Filter), um gezielt eine spezielle Modulation zu dekodieren und andere zu unterdrücken. Das ursprüngliche Ziel dieses papers – nur f_{GW_a} und \dot{f}_{GW_a} zu messen – musste erweitert werden, weil Messungen extrem niederfrequente Modulationen zeigen, die sich nicht durch immer aufwändigere Filter beseitigen lassen.

3. Signalverarbeitung und erste Ergebnisse

Um Frequenz und Drift der GW zu bestimmen, verschiebt man einen schmalen Frequenzbereich um f_{GW_a} des Signalgemisches, das die Antennen liefern, mit dem Heterodyne-Verfahren auf die Zwischenfrequenz $f_{ZF} = 7 \mu\text{Hz}$. Die Frequenz und Drift des Hilfsoszillators iteriert man mit dem Ziel, einen konstanten Wert von f_{ZF} während des gesamten

Analysezeitraums zu erreichen (siehe Figur 3 mit Amplitude $a_D = 0$). Am vorläufigen Resultat $f_{GWa} = 8.0735 \times 10^{-6}$ Hz und $\dot{f}_{GWa} = 3 \times 10^{-21}$ Hz/s fällt auf:

- f_{GWa} ist um 0.4 nHz höher als der Erwartungswert, der mit elektromagnetischen Wellen bestimmt wurde.
- Die Frequenzdrift \dot{f}_{GWa} ist unerwartet gering.
- Mit keiner Variation der Parameter erreicht man einen *konstanten* Wert von f_{ZF} . Unterschreitet die Bandbreite der Signalverarbeitung den Wert 0.3 nHz, weichen die Ergebnisse immer stärker ab vom Mittelwert. Das ist 200-mal mehr als man bei einer linearen Drift erwarten würde. Die Analyse zeigt eine nichtlineare, reproduzierbare Frequenzänderung von f_{ZF} innerhalb dieser Bandbreite, die nicht zufällig aussieht und auch keine einfache Sinusfunktion ist.

Die Methode der selektiven Integration (Appendix A) liefert eine Antwort: Summiert man f_{ZF} über gesamte Messdauer von 20 Jahren mit einem phasempfindlichen Integrator, ist die Hüllkurve keine Gerade: Bei einer konstanten Frequenz wäre der Anstieg streng linear. Eine mögliche Erklärung lautet: f_{GWa} ist phasenmoduliert. Das macht die Hüllkurve wellig und erzeugt Schwankungen im gleichen Rhythmus wie die Modulationsfrequenz (vergleiche Figur 4).

Resultat der ersten Messung: f_{GWa} ist nicht konstant, die Frequenzdrift ist – im Rahmen der vorläufigen Messung – nicht linear. Die Krümmung scheint periodisch zu sein mit einer Zeitkonstante von etwa 10 Jahren. Eine so langsame Modulation ist schwer nachzuweisen, da der Zeitraum der Basisdaten nur 20 Jahre umfasst.

4. Messung der Frequenzschwankung und der Drift

Es gibt Vermutungen, dass ein vierter Stern *Algol D* das bekannte *Algol*-Trio mit der Periodendauer $T_D \approx 20$ Jahre umkreist [7]. Dann müsste sich das Sternpaar *A-B* in diesem Rhythmus bewegen und die Frequenz der GW müsste phasenmoduliert (PM) sein¹.

Zur Überprüfung erweitert man das Iterationsschema (Figur 3): Der Hilfsoszillator-A des Heterodyne-Verfahrens (f_{Osz}) wird durch einen zweiten Hilfsoszillator-B mit dem Startwert $f_D = 1/T_D \approx 1.5$ nHz phasenmoduliert. Dessen Parameter f_D , a_D und ϕ_D iteriert man mit dem Ziel, die sehr langsame und nichtlineare Frequenzdrift von f_{GWa} verschwinden zu lassen. Die Lösung liefert Hinweise zur Ursache dieser PM.

Die Frequenz des Hilfsoszillators-A berechnet man mit der Formel

$$f_{Osz} = f_{GWa} + f_{ZF} + t \cdot \dot{f}_{GWa} + a_D \cdot \sin(2\pi t f_D + \phi_D) \quad (3)$$

¹ f_{GWa} kann mit unterschiedlichen Frequenzen moduliert sein. Wenn man nur sehr tiefe Frequenzen sucht, begrenzt man die Bandbreite nach dem IQ-Mixer auf 0.4 nHz und dämpft höherfrequente Modulationen, deren Seitenbänder außerhalb des engen Filterbereichs liegen. Eine vollständige Auslöschung ist nicht möglich.

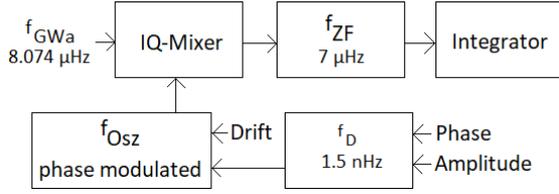


Abbildung 3): *Prinzip der MSH-Methode: Die Parameter Phase und Amplitude des Hilfsoszillators f_D iteriert man mit dem Ziel einer konstanten Frequenz f_{ZF} .*

Die Parameter haben folgende Bedeutung:

f_{GWa} ist die Frequenz der vermuteten GW ($f_{GWa} \approx 8.0735 \times 10^{-6}$ Hz)

f_{ZF} ist im Prinzip beliebig. Hier wird ein unüblich hoher Wert gewählt, weil sich damit die Hüllkurve des selektiven Integrators genauer berechnen lässt. Die Form der Hüllkurve einschließlich der Randbereiche ist das Schlüsselement der folgenden Auswertung.

\dot{f}_{GWa} ist die Frequenzdrift von f_{GWa} ($\dot{f}_{GWa} \approx 3 \times 10^{-21}$ Hz/s)

a_D ist der Modulationsindex der PM unter der Annahme, dass der vierte Stern *Algol D* eine Kreisbahn um das bekannte *Algol-Trio* beschreibt.

f_D ist die Umlauffrequenz des vermuteten Begleiters *Algol D*.

Aus der Phase ϕ_D folgt, wann sich *Algol D* aus Sicht der Erde vor oder hinter dem *Algol-Trio* befindet.

Ziel ist, die Werte der fünf Variablen in equation (3) so zu bestimmen, dass die Amplitude am Ausgang des selektiven Integrators proportional zur Zeit steigt. Dann ist die Zwischenfrequenz unmoduliert. Die Startwerte der Parameter a_D , f_D und ϕ_D muss man per Versuch-und-Irrtum finden, da es keine Anhaltspunkte gibt und die Variablen sich gegenseitig beeinflussen.

Durch Iteration von equation (3) findet man eine erste Lösung, die die Welligkeit am Ausgang des Integrators nicht vollständig beseitigt. Das lässt vermuten, dass es (mindestens) einen weiteren Begleiter *Algol-E* gibt. Um dessen Bahnelemente zu bestimmen, ergänzt man equation (3) mit dem Summanden $a_E \cdot \sin(2\pi t f_E + \phi_E)$. Mit den drei zusätzlichen Parametern lässt sich die Welligkeit weiter reduzieren, aber nicht vollständig beseitigen. Die Welligkeit am Ausgang des Integrators verschwindet vollständig, wenn man die equation (3) mit insgesamt vier Frequenzen phasenmoduliert.

Die MSH-Methode besitzt einen einzigen Parameter, der beliebig gewählt werden und das Ergebnis beeinflussen kann: Die Bandbreite des ZF-Filters zwischen IQ-Mixer und selektivem Integrator (Figur 3). Die Iteration wurde mehrfach mit unterschiedlichen Bandbreiten berechnet ($40 \text{ pm} < \text{BW} < 140 \text{ pm}$). Das Ergebnis ist eindeutig und reproduzierbar:

1. Erdorbit: $a_Y = 0.349686 \pm 0.00013$, $f_Y = (31.69789 \pm 0.000002) \times 10^{-9}$ Hz und $\phi_Y = 4.10554 \pm 0.00005$. ($P \approx 0.99967$ Jahre)
2. Für *Algol-C* gilt: $a_C = 3.06012 \pm 0.0001$, $f_C = (17.04600 \pm 0.00004) \times 10^{-9}$ Hz und $\phi_C = 0.162350 \pm 0.00003$ ($P \approx 1.85894$ Jahre)
3. Für *Algol-D* gilt: $a_D = 1.94034 \pm 0.0001$, $f_D = (2.2651 \pm 0.0014) \times 10^{-9}$ Hz und $\phi_D = 1.19229 \pm 0.00003$ ($P \approx 13.9895$ Jahre)
4. Für *Algol-E* gilt: $a_E = 0.97206 \pm 0.00004$, $f_E = (1.53493 \pm 0.00002) \times 10^{-9}$ Hz und $\phi_E = 0.790656 \pm 0.00001$ ($P \approx 20.6443$ Jahre)

5. Die Frequenzdrift der GWa beträgt $\dot{f}_{GWa} = +23.6(3) \times 10^{-20}$ Hz/s.
6. Beseitigt man diese Modulationen, wird f_{GW} konstant und die Ausgangsamplitude des phasenempfindlichen Integrators steigt fast exakt proportional zur Zeit. Die sehr geringe verbleibende Abweichung von der Linearität ($\approx 10^{-14}$) lässt vermuten, dass Algol A-B keine weiteren Begleiter mit $P < 200$ Jahre besitzt. Noch langsamere Frequenzänderungen lassen sich wegen der kurzen Zeitspanne der Datenerhebung von nur 20 Jahren nicht eindeutig nachweisen.
7. Der perfekt lineare Anstieg der Amplitude am Ausgang des Integrators beweist, dass die Amplitude der eingespeisten Frequenz f_{GWa} während der gesamten Messdauer (20 Jahre) konstant ist.
8. Eine PM durch $f_{GWb} = 34.033$ nHz wird nicht beobachtet. Daraus folgt, dass die langsame GW-Quelle (f_{GWb}) die höherfrequente GW-Quelle (f_{GWa}) trotz des geringen Abstandes nicht beeinflusst.

5. Interpretation aus astronomischer Sicht

Übersetzt man die oben ermittelten abstrakten Ergebnisse der Iteration von equation (3) in astronomische Begriffe, gelten folgende Zusammenhänge: Alle Zeitangaben beziehen sich auf den Start der analysierten Datenketten am 2000-01-01 (MJD = 51544) und gelten unter der Voraussetzung, dass die entsprechenden Himmelskörper Kreisbahnen beschreiben. Die Phasenverschiebung ϕ gibt an, zu welchem späteren Zeitpunkt die messbare Momentanfrequenz maximal blauverschoben ist. Dann muss man die durch den Dopplereffekt erzeugte Frequenzverschiebung Δf zur durchschnittlichen Frequenz f_{GWa} addieren. Die Ergebnisse der oben angegebenen Zusammenstellung lassen sich unabhängig voneinander auswerten, weil sich alle PM linear überlagern.

5.1. Der Erdorbit

Der Erdorbit um die Sonne erzeugt die Phasenmodulation mit der höchsten Frequenz $f_Y = 31.7$ nHz. Die größte Blauverschiebung von f_{GWa} misst man am $365 \cdot \phi_Y / 2\pi = 239$. Tag des Jahres. Die größte Rotverschiebung misst man am 56. Tag; wenn die GW von der Quelle *Algol* stammt, sollte die redshift ihren Maximalwert am 46. Tag erreichen [6]. Das entspricht einem Messfehler von 2,7%.

Der Modulationsindex einer PM ist definiert als: $a_Y = \Delta f_Y / f_Y$. Daraus folgt $\Delta f_Y = 11.084$ nHz – ein unerwartet großer Wert, der sich mit bisherigen Vermutungen nicht erklären lässt. Bisher nimmt man – ohne Beweis – an, dass sich jede GW mit Lichtgeschwindigkeit ausbreitet. Dann würde für den Maximalwert der Dopplerverschiebung

$$\Delta f_Y = f_{GWa} \cdot \left(\sqrt{\frac{c + v_{orbit}}{c - v_{orbit}}} - 1 \right) \approx f_{GWa} \cdot \frac{v_{orbit}}{c} \approx f_{GWa} \cdot 10^{-4} \quad (4)$$

gelten. Tatsächlich misst man den zu großen Wert $\Delta f_Y \approx f_{GWa} \cdot 13.73 \times 10^{-4}$! Ein Messfehler dieser Größenordnung kann nach sorgfältiger Prüfung ausgeschlossen werden. Was verursacht die Abweichung? Die Formeln der PM und des Dopplereffektes sind gut begründet und millionenfach bestätigt. Es bleibt die Korrektur der noch nie überprüften Vermutung, dass sich GW mit Lichtgeschwindigkeit ausbreiten. Für die Berechnung der Empfangsfrequenz f_{GWa} gilt der longitudinale Dopplereffekt, bei dem die Frequenz relativistisch korrigiert ist. Für maximale blueshift gilt

$$f_{GWa} + \Delta f_Y = f_{GWa} \sqrt{1 - \left(\frac{v_{orbit}}{c}\right)^2} \cdot \frac{1}{1 - \frac{v_{orbit}}{v_{GW}}} \approx \frac{f_{GWa}}{1 - \frac{v_{orbit}}{v_{GW}}} \quad (5)$$

Daraus folgt

$$\frac{v_{orbit}}{v_{GWa}} = 1 - \frac{f_{GWa}}{f_{GWa} + \Delta f_Y} = 1.37 \times 10^{-3} \quad (6)$$

Mit diesem Zwischenergebnis berechnet man

$$v_{GWa} = \frac{v_{orbit}}{1.37 \times 10^{-3}} = \frac{27 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}}{1.37 \times 10^{-3}} = 19.7 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (7)$$

Dieses Ergebnis ist wesentlich kleiner als die Lichtgeschwindigkeit und gilt für $f_{GWa} \approx 8 \mu\text{Hz}$. Möglicherweise hängt v_{GW} ab von der Frequenz (Dispersion) und vom Gravitationsfeld in der Umgebung. Das ist noch Spekulation. Immerhin wurden bereits früher Werte kleiner als c gemessen [11].

5.2. Algol-C

Die Dekodierung der PM der GW bestätigt, dass *Algol-C* die GW-Quelle *Algol-AB* mit der Umlaufdauer $P \approx 1.85894$ Jahre = 679 Tage umkreist. Bei Annahme einer kreisförmigen Bahn folgt aus dem Phasenwinkel $\phi_C = 0.162350$, dass dieser Begleiter am $679 \cdot \phi_C / 2\pi = 17.5$ -ten Tag nach 2000-01-01 (MJD = 51544), also zum Zeitpunkt $\text{MJD}_{\text{blau}} = 51561$ maximale blueshift von f_{GWa} erzeugt hat. 340 Tage später ($\text{MJD}_{\text{rot}} = 51901$) verursachte er maximale Redshift.

Bisherige Beobachtungen lassen vermuten, dass die Bahnebene des inneren Paares *Algol-AB* eine Inklination von $\approx 82^\circ$ aufweist. Nimmt man an, dass die Inklination der Bahnebene von *Algol-C* 90° beträgt, hätte man *Algol-C* am Zeitpunkt MJD = 51730 vor *Algol-AB* und am Zeitpunkt MJD = 52070 hinter *Algol-AB* sehen können.

Aus dem Modulationsindex $a_C = \Delta f_C / f_C$ der PM folgt $\Delta f_C = 52.16$ nHz. Dieser Maximalwert der periodischen Frequenzverschiebung von f_{GWa} ist Folge des Dopplereffektes, weil die GW-Quelle um den Schwerpunkt des *Algol*-Systems rotiert. Die Berechnung der Radialgeschwindigkeit ist Aufgabe der klassischen Astronomie. Betrachtet man die GW-Quelle *Algol-AB* als Stern und *Algol-C* als Begleiter, liefert das 3. Keplersche Gesetz die

Bahngleichung für das Zweikörpersystem.

$$4\pi^2(r_{AB} + r_C)^3 = GT^2(m_A + m_B + m_C) \quad (8)$$

Die Radien beziehen sich auf den Schwerpunkt des Trios und wegen des Schwerpunktsatzes gilt $(m_A + m_B) \cdot r_{AB} = m_C \cdot r_C$ (die wahrscheinlichen Begleiter *Algol-D* und *Algol-E* werden hier ignoriert). Mit den Messwerten $m_A = 3.17 \cdot m_\odot$, $m_B = 0.70 \cdot m_\odot$, $m_C = 1.76 \cdot m_\odot$ und $m_C/(m_A + m_B) = 0.456$ [1] errechnen sich $r_{AB} = 1.261 \times 10^{11}$ m und die Bahngeschwindigkeit $v_{AB} = 13.5 \times 10^3$ m/s, mit der die GW-Quelle *Algol-AB* um den gemeinsamen Schwerpunkt ABC rotiert (die Bahngeschwindigkeit von *Algol-C* ist etwa doppelt so groß und nicht messbar, weil *Algol-C* keine GW abstrahlt).

Analog zu den Equations (6) und (7) ergibt sich

$$v_{GWa} = \frac{13.5 \times 10^3 \text{ m s}^{-1}}{6.42 \times 10^{-3}} = 2.1 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}. \quad (9)$$

Dieses Ergebnis (etwa 0.7% der Lichtgeschwindigkeit) ist Referenz der folgenden Berechnungen.

5.3. Algol-D

Die GW der Frequenz f_{GWa} ist auch mit $f_D = 2.2651$ nHz phasenmoduliert. Ursache könnte ein vierter Stern *Algol-D* sein, der die Quelle der GW mit der Umlaufdauer $P \approx 14$ Jahre umrundet. Dieser Stern wurde bisher noch nicht mit elektromagnetischen Wellen beobachtet.

Bei Annahme einer kreisförmigen Bahn folgt aus dem Phasenwinkel $\phi_D = 1.19229$, dass dieser Begleiter am $5110 \cdot \phi_D/2\pi = 970$ -ten Tag nach 2000-01-01 (MJD = 51544), also zum Zeitpunkt $\text{MJD}_{\text{blau}} = 52514$ maximale blueshift von f_{GWa} erzeugt hat. 2557 Tage später ($\text{MJD}_{\text{rot}} = 55071$) verursachte er maximale Redshift.

Nimmt man an, dass die Inklination der Bahnebene von *Algol-D* 90° beträgt, hätte man *Algol-D* am Zeitpunkt $\text{MJD} = 53792$ vor *Algol-AB* und am Zeitpunkt $\text{MJD} = 56349$ hinter *Algol-AB* sehen können.

Aus dem Modulationsindex $a_D = \Delta f_D/f_D$ der PM folgt $\Delta f_D = 4.4$ nHz. Dieser Maximalwert der periodischen Frequenzverschiebung als Folge des Dopplereffektes ist sehr klein, weil *Algol-D* weit entfernt ist vom Zentrum. Dieser Stern wurde noch nie beobachtet, seine Masse m_D ist unbekannt. Er umkreist den Schwerpunkt, dessen Gegengewicht durch $m_A + m_B + m_C = 5.63m_\odot$ gebildet wird. m_D beeinflusst den Bahnradius und kann so gewählt werden, dass v_{GWa} entweder das Ergebnis von Sektion 5.1 oder das Ergebnis von Sektion 5.2 erreicht. Durch Verknüpfung der Equations (5), (6) und (7) mit dem 3. Keplerschen Gesetz erhält man:

- Für $m_D = 3.9 \cdot m_\odot$ ist $v_{GWa} = 19.7 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$
- Für $m_D = 0.303 \cdot m_\odot$ ist $v_{GWa} = 2.1 \times 10^6 \frac{\text{m}}{\text{s}}$

In der folgenden Sektion wird $m_D = 0.303 \cdot m_\odot$ angenommen.

5.4. Algol-E

Die GW der Frequenz f_{GWa} ist auch mit $f_E = 1.53493$ nHz phasenmoduliert. Ursache könnte ein vierter Stern *Algol-E* sein, der die Quelle der GW mit der Umlaufdauer $P \approx 20.6$ Jahre umrundet. Dieser Stern wurde bisher noch nicht mit elektromagnetischen Wellen beobachtet.

Bei Annahme einer kreisförmigen Bahn folgt aus dem Phasenwinkel $\phi_E = 0.790656$, dass dieser Begleiter am $7540 \cdot \phi_E / 2\pi = 949$ -ten Tag nach 2000-01-01 (MJD = 51544), also zum Zeitpunkt MJD_{blau} = 52493 maximale blueshift von f_{GWa} erzeugt hat. 2557 Tage später (MJD_{rot} = 56263) verursachte er maximale Redshift.

Nimmt man an, dass die Inklination der Bahnebene von *Algol-E* 90° beträgt, hätte man *Algol-E* am Zeitpunkt MJD = 54378 vor *Algol-AB* und am Zeitpunkt MJD = 58148 hinter *Algol-AB* sehen können.

Aus dem Modulationsindex $a_E = \Delta f_E / f_E$ der PM folgt $\Delta f_E = 1.5$ nHz. Dieser Maximalwert der periodischen Frequenzverschiebung als Folge des Dopplereffektes ist sehr klein, weil *Algol-E* weit entfernt und wahrscheinlich leicht ist. Dieser Stern wurde noch nie beobachtet, seine Masse m_E ist unbekannt. Er umkreist den Schwerpunkt, dessen Gegengewicht durch $m_A + m_B + m_C + m_D = 5.93m_\odot$ gebildet wird. m_E beeinflusst den Bahnradius und kann so bestimmt werden, dass v_{GWa} entweder das Ergebnis von Sektion 5.1 oder das Ergebnis von Sektion 5.2 erreicht. Durch Verknüpfung der Equations (5), (6) und (7) mit dem 3. Keplerschen Gesetz erhält man:

- Für $m_E = 1.7 \cdot m_\odot$ ist $v_{GWa} = 19.7 \times 10^6 \frac{m}{s}$
- Für $m_E = 0.12 \cdot m_\odot$ ist $v_{GWa} = 2.1 \times 10^6 \frac{m}{s}$

Vermutlich gilt $m_E = 0.12 \cdot m_\odot$.

6. Zusammenfassung

Aus nachrichtentechnischer Sicht ist die Dekodierung der Phasenmodulationen von f_{GWa} eine Standardaufgabe, da das Signal ein gutes S/N aufweist. Für die Interpretation der Ergebnisse aus astronomischer Sicht gilt eher das Gegenteil: Die hohen Werte für den Frequenzhub (Δf) lassen sich nur durch die Annahme erklären, dass sich Gravitationswellen bei tiefen Frequenzen um 8 μ Hz nicht mit Lichtgeschwindigkeit, sondern erheblich langsamer ausbreiten. Noch mehr erstaunt, dass der Wert davon abhängt, ob sich der Sender oder der Empfänger im Strahlungsfeld bewegt. Beides widerspricht den Aussagen der Relativitätstheorie.

Unklar ist auch, ob v_{GW} frequenzabhängig ist, da sich die Ergebnisse bei wesentlich höheren Frequenz um 60 Hz mit der Annahme $v_{GW} = c$ erklären lassen [9] [10]. Die Messung wurde mit genau den gleichen Methoden wie bei 8 μ Hz durchgeführt. Den einzigen Unterschied findet man bei den Antennen. Weitere Messungen werden für mehr

Klarheit sorgen. Die üblicherweise postulierte Verwandtschaft zwischen der Ausbreitung von Licht und von Gravitationswellen bedarf einer grundlegenden Überprüfung.

Literatur

- [1] Baron, F. et al., IMAGING THE ALGOL TRIPLE SYSTEM IN H BAND WITH THE CHARA INTERFEROMETER, 2018, ApJ 752 20, <https://arxiv.org/pdf/1205.0754.pdf>
- [2] Peterson, W. et al., RADIO ASTROMETRY OF THE TRIPLE SYSTEMS ALGOL AND UX ARIETIS, ApJ 737:104 (2011)
- [3] Weidner, H., Puzzling, Very Slow Oscillations of the Air Pressure in Europe, 2022, <https://vixra.org/abs/2211.0148>
- [4] https://opendata.dwd.de/climate_environment/CDC/observations_germany
- [5] Hartmann and Wenzel, Tidal potential catalogue, (1995)
- [6] Calculate radial velocities, www.gb.nrao.edu/GBT/setups/radvelcalc.html
- [7] Jetsu, L., Say hello to Algol's new companion candidates, 2021, <https://arxiv.org/pdf/2005.13360.pdf>
- [8] https://de.wikipedia.org/wiki/Küpfmüllersche_Unbestimmtheitsrelation
- [9] Weidner, H., The GW of the Vela Pulsar and the Receiving Pattern of the Livingston Interferometer, <https://vixra.org/pdf/2305.0105v1.pdf> (2023)
- [10] Weidner, H. Detection of the GW of the Crab Pulsar in the LIGO and Virgo O3b series, <https://vixra.org/pdf/2305.0096v1.pdf>, (2023)
- [11] Weidner, H., Measurement of a Continuous Gravitational Wave near 2619.9 μHz , <https://vixra.org/pdf/2203.0130v1.pdf>, (2022)

A. Appendix Selektive Integration

Ein phasenempfindlicher Integrator wirkt wie ein Bandfilter mit extrem geringer Bandbreite, wählbarer Frequenz und einem "Gedächtnis" für die Phase der bereits bearbeiteten Daten.

Die Datenbasis ist eine Folge von Werten z_n und z_{n+1} , die im Abstand der Samplingzeit T_s gemessen werden. Bei der Analyse einer Schwingung mit konstanter Frequenz f steigt der Phasenwinkel mit jedem Schritt um $\alpha = 2\pi f T_s$. Obwohl jeder Wert z_n durch eine Überlagerung vieler Einzelfrequenzen entsteht, reagiert die selektive Integration kaum auf Rauschen und benachbarte Frequenzen. Grundlage des Integrators ist das Additionstheorem der trigonometrischen Funktionen. Basis sind die beiden CORDIC-Formeln

$$x_{n+1} = z_n + \cos(\alpha)x_n + \sin(\alpha)y_n \quad (10)$$

$$y_{n+1} = \cos(\alpha)y_n - \sin(\alpha)x_n \quad (11)$$

Die Folge der berechneten Werte x_n und y_n hängt ab von Parametern:

- Ohne eingespeistes Signal ($z_n = 0$) und mit den Anfangswerten $x_1 = 0$ und $y_1 = 1$ berechnen die Formeln (10) und (11) die Wertetabelle $x = \sin(2\pi tf)$ und $y = \cos(2\pi tf)$. Die Amplituden sind konstant.
- Startet man mit $x_1 = y_1 = 0$ und speist ein monochromatisches Signal z_n der Frequenz f ein, berechnet man mit den Formeln eine Schwingung, deren Amplitude proportional zur Zeit steigt.
- Wenn die programmierte Frequenz von der eingespeisten Frequenz abweicht oder wenn sich die Phase und/oder Amplitude der eingespeisten Frequenz ändert, variiert die Ausgangsamplitude und der Amplitudenzuwachs ist nicht mehr linear. Wenn man ein Signal entgegengesetzter Phase einspeist, verringert sich die Ausgangsamplitude.
- Wenn man ein phasenmoduliertes Signal z_n einspeist, ändert sich die Hüllkurve im Rhythmus der Modulationsfrequenz.
- Wenn man nur Rauschen einspeist, berechnen die Formeln (10) und (11) eine unregelmäßige Ausgangsspannung geringer Bandbreite, deren Frequenz um f schwankt.

Figur 4 zeigt ein typisches Ergebnis, wenn dem Integrator ein Signal angeboten wird, das mit einem sehr kleinen Modulationsindex $\eta \approx 10^{-4}$ phasenmoduliert ist. Dieses Signal besteht aus der Trägerfrequenz f_0 und den beiden benachbarten Seitenbändern $f_0 - f_m$ und $f_0 + f_m$. Die PM lässt sich mit anderen Methoden nur schwer messen, weil die Amplituden der Seitenbänder wesentlich geringer sind als die Amplitude des Trägers.

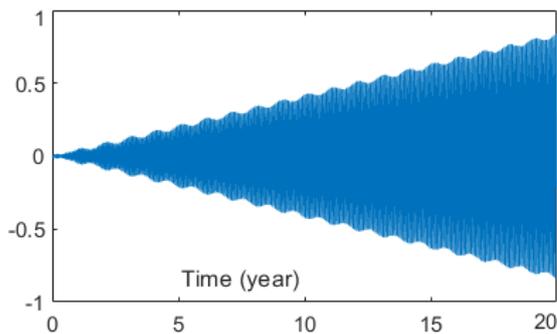


Abbildung 4): *Integrierte Amplitude des PM-Signals von GWb des Sternsystems Algol. Die Welligkeit der Hüllkurve entsteht durch abwechselnde konstruktive und destruktive Interferenz von Trägerfrequenz und Seitenbändern. Bei einer unmodulierten Frequenz wäre der Amplitudenanstieg linear.*