

Nachweis der kontinuierlichen Gravitationswelle von HM Cancri

Herbert Weidner, Am Stutz 3, D-63864 Glattbach, Germany ¹

HM Cancri ist möglicherweise die intensivste Quelle kontinuierlicher GW in unserer Galaxie. Trotz bekannter Frequenz konnte die Strahlung mangels geeigneter Sensoren bisher nicht nachgewiesen werden. Ein neuartiges Verfahren kann die Phasenmodulation kompensieren und diese CGW in den Aufzeichnungen supraleitender Gravimeter zweifelsfrei nachweisen. Dieses neuartige Beobachtungsfenster wird ein tieferes Verständnis des rätselhaften Sternsystems ermöglichen.

1 Einführung

Im Doppelsternsystem HM Cancri (RX J0806.3+1527) umkreisen sich zwei weiße Zwerge in sehr geringem Abstand und erzeugen dabei eine CGW der Frequenz $f_{CGW} = 6,22$ mHz, die im Messbereich supraleitender Gravimeter liegt.

Die Empfangsfrequenz hier auf der Erde ändert sich im Jahresrhythmus, weil die hohe Bahngeschwindigkeit um die Sonne eine periodische Dopplerverschiebung verursacht. Diese äußert sich als Phasenmodulation des Signals mit $f_{Jahr} = 31,69$ nHz und ist eine verlässliche Signatur jeder CGW. Diese Modulation erzeugt Seitenbänder, weshalb das Signal im Spektrum nicht mehr als isolierte Linie erscheint, sondern als Bündel eng benachbarter Linien. Der Modulationsindex η bestimmt, wie viele Linien mit welchen Einzelamplituden zu erwarten sind. Ein typisches Spektrum (Bild 1) unterscheidet sich kaum von Rauschen und ist schwer zu identifizieren. Das nachfolgend beschriebene Verfahren löst dieses Problem ohne Kenntnis des Spektrums.

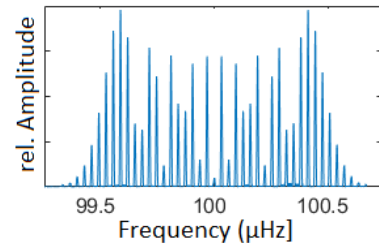


Abbildung 1): Das Spektrum einer phasenmodulierten Schwingung mit $\eta = 10$ füllt ein breites Band. Die Modulationsfrequenz bestimmt den Linienabstand.

CGW lassen sich nur dann erfolgreich nachweisen, wenn das Signal-Rauschverhältnis SNR ausreichend hoch ist. Die Proportion $SNR \propto h_0 \sqrt{T/B}$ liefert Hinweise, wie sich das SNR verbessern lässt. Darin bedeutet h_0 die Amplitude des CGW-Signals, T ist die Beobachtungsdauer und B ist die Bandbreite des Empfängers. Supraleitende Gravimeter zeichnen seit Jahren kleinste Änderungen der Gravitation auf und sind deshalb hervorragende Datenquellen. Schwieriger ist es, die Empfangsbandbreite auf wenige NanoHertz zu begrenzen. Das gelingt nur durch Elimination der Phasenmodulation.

2 Frequenz- bzw. Phasenmodulation

In der Nachrichtentechnik verwendet man phasenmodulierte Signale zur Übertragung von Daten. Das Verfahren ist so eng verwandt mit der Frequenzmodulation, dass beide

¹eMail: herbertweidner@gmx.de

oft verwechselt werden. Vorteilhaft ist, dass sich die jeweiligen Formelsätze ineinander umrechnen lassen.

Obwohl HM Cancri keine Daten sendet, empfangen wir trotzdem ein phasenmoduliertes Signal, weil sich die Erde im Wellenfeld der CGW bewegt. Diese Phasenmodulation ist ein sicherer Nachweis, dass das empfangene Signal nicht in unserem Sonnensystem erzeugt wird und ermöglicht auch, die Richtung zur Quelle zu bestimmen.

Die Formeln der Phasenmodulation setzen voraus, dass die Messdauer mehrere Jahre umfasst. Die Modulationsfrequenz entspricht dann dem Kehrwert der Umlaufdauer um die Sonne und das Spektrum besteht nicht aus einer einzigen Linie, sondern es gleicht einem „Lattenzaun“ aus vielen Linien mit dem gegenseitigen Abstand $f_{Jahr} = 31,69$ nHz (Bild 1). Folgende Formel definiert den Modulationsindex η , der die Amplituden der Spektrallinien bestimmt:

$$\eta = \frac{\text{max. Frequenzabweichung von der mittleren Frequenz}}{\text{Modulationsfrequenz}} = \frac{\Delta f}{f_{MOD}} = \frac{\Delta f}{f_{Jahr}} \quad (1)$$

Die maximale Frequenzabweichung Δf ergibt sich aus dem relativistischen Dopplereffekt aufgrund der Bahngeschwindigkeit der Erde. Kennt man diesen Wert, lässt sich die maximale Frequenzabweichung Δf der GW-Quelle HM Cancri berechnen, die sich fast in der Ebene der Ekliptik befindet. Am 24. April und am 27. Oktober sind die Bahngeschwindigkeiten der Erde etwa gleich und haben den Wert 29626.5 ± 109 m/s [8]. Daraus errechnet sich die maximale Dopplerverschiebung

$$\Delta f = f_{CGW} \cdot \left(\sqrt{\frac{c + v_{Erde}}{c - v_{Erde}}} - 1 \right) \approx 614 \text{ nHz} \quad (2)$$

Der Modulationsindex η erreicht den überraschend hohen Wert 20 und das entsprechende Spektrum beansprucht die Carson-Bandbreite von 1,4 μHz . Es erscheint wenig erfolgversprechend, im Rauschen nach einem Satz von etwa 50 Spektrallinien mit unbekannter Amplitudenverteilung zu suchen. Dazu kommt, dass bei gewissen Werten von η die Amplitude der Trägerfrequenz verschwindet (Nullstellen der Bessel-Funktion).

3 Das modifizierte Superhet-Prinzip MSH

In der Funktechnik verringert man eine hohe Empfangsfrequenz f_E durch Mischung mit einer lokal erzeugten Frequenz f_{OSZ} auf einen tieferen Wert f_{ZF} , weil dieser sich vorteilhafter untersuchen lässt. Für die Frequenzen gilt: $f_{ZF} = |f_E - f_{OSZ}|$

Üblicherweise ist der Wert f_{OSZ} konstant, um den Modulationsinhalt des Signals nicht zu verändern. Bei der Suche nach CGW gilt das Gegenteil: Man muss die bekannte, aber unerwünschte Phasenmodulation entfernen, damit man die Bandbreite verringern kann. Deshalb moduliert man die Frequenz f_{OSZ} mit dem Ziel, eine *konstante* Differenzfrequenz f_{ZF} zu erhalten. Wenn die Modulation von Empfangssignal und Oszillator übereinstimmen, verwandelt sich das „lattenzaunartige“ Spektrum zu einer einzigen Spektrallinie hoher Amplitude. Anschaulich gesprochen: Die vielen Spektrallinien, die in Bild 1 ne-

beneinander liegen, werden so umsortiert, dass sie übereinander liegen und sich zu einer großen Gesamtlänge addieren. Dann gelten folgende Aussagen:

- Bei einem Breitband-FM-Signal verteilt sich die Gesamtenergie auf viele Spektrallinien mit jeweils geringen Amplituden. Bei einem unmodulierten Signal konzentriert sich die Gesamtenergie auf eine einzige Linie hoher Amplitude.
- Eine konstante Frequenz erscheint im Spektrum als isolierte Linie, die sich im Rauschen einfach und eindeutig identifizieren lässt.
- Wenn es gelingt, die Phasenmodulation vollständig zu kompensieren, darf man die Empfangsbandbreite stark verringern, um das SNR weiter zu verbessern. Im vorliegenden Fall lässt sich die Bandbreite etwa um den Faktor 400 reduzieren.

Jede CGW besitzt zwei Signaturen: Eine langsame Frequenzdrift und Phasenmodulation mit 31.69 nHz. Die zusätzliche Phasenmodulation als Folge der Eigenrotation der Erde lässt sich wegen der geringen Geschwindigkeit am Äquator kaum nachweisen. Deshalb beschränkt sich der Ansatz (4) für die lokal erzeugte Schwingung auf nur zwei Eigenschaften, auf die wir weiter unten eingehen.

4 Datenbasis der Untersuchungen

Kann man Gravitationswellen mit Gravimetern messen? Vermutlich ja. Gravitationsdaten werden seit Jahrzehnten aufgezeichnet und das IGETS Potsdam [1] speichert entsprechend lange Datenreihen. Bisher dienen die Gravimeter der Erdbebenforschung, sind unmittelbar auf dem Boden montiert und reagieren deshalb auch auf weit entfernte, kleinste Bodenbewegungen. Stärkere Erdbeben überlasten die Sensoren und verursachen Datenlücken von mehreren Minuten. Diese unregelmäßig auftretenden Erschütterungen des Erdbodens beeinträchtigen die Qualität aller Datensätze. Vor der Veröffentlichung durchlaufen die Signale der Sensoren Tiefpassfilter der Grenzfrequenz 16 mHz, weshalb die Datenreihen der Gravimeter auch den Bereich umfassen, in dem man die CGW von HM Cancri erwartet.

Die Gravimeter sind nicht baugleich und die Datensätze unterscheiden sich, weil die Rohdaten offenbar mit unterschiedlichen Methoden aufbereitet werden: Bei einigen wenigen ist der Rauschuntergrund im interessierenden Frequenzbereich um 6 mHz viel zu groß, andere enthalten zu breite Datenlücken und gelegentlich wurde während der Messperiode am Gravimeter experimentiert. Manche Datenfehler lassen sich durch Hochpassfilter mildern.

Das IGETS speichert monatliche Gravitationsdaten in unterschiedlichen Formaten mit zusätzlichen Hilfsangaben. Bei der Suche nach CGW im Frequenzbereich über 1 mHz kann man den Einfluss der variablen Luftmasse über dem Gravimeter ignorieren und sich auf die lückenlosen Datenreihen der neunten Spalte konzentrieren. Nach der Verkettung zu einer einzigen Datei folgt ein Hochpassfilter, um die störenden Tiden zu entfernen. Zuletzt reduziert man die Frequenz von 6,22 mHz in zwei Schritten auf 6 μ Hz und die

Bandbreite auf 7 μHz . Das verändert nicht den Modulationsinhalt des Signals (Phasenmodulation und Drift), hat aber den Vorteil, dass das Samplingintervall um den Faktor 500 gestreckt wird. Das verkürzt die Rechendauer der folgenden Iterationen, weil sich die Dateilängen um den gleichen Faktor verringern.

5 Erste Suchergebnisse

Im „Rohzustand“ zeigt kein Datensatz der 17 Gravimeter im Frequenzbereich um 6,22 mHz prominente Spektrallinien, die man als CGW deuten könnte. Aber auch falls einige Linien im Rauschen auffallen würden, ließen sich diese mangels Signatur keiner eindeutigen Ursache zuordnen.

Aus diesem Grund wurde ein anderes Verfahren gewählt, um Anzeichen von CGW zu suchen: Vernachlässigt man die Frequenzdrift der CGW, enthält die Gleichung (4) nur drei wählbare Parameter: Die Frequenz der CGW und die beiden Parameter η und φ , aus denen sich die Richtung zur Quelle berechnen lässt.

$$y = \sin(2\pi t f_{CGW} + \eta \sin(2\pi t f_{Jahr} + \varphi)) \quad (3)$$

Es ist mühsam, mit den Einschränkungen $0 < \eta < 20$ und $0 < \varphi < 2\pi$ und $6220 \mu\text{Hz} < f_{CGW} < 6221 \mu\text{Hz}$ das Rauschen nach Anzeichen von CGW zu durchsuchen. Deshalb wurde ein vollständiger, automatisierter Scan mit Schrittweite $\Delta f = 1 \text{ nHz}$ programmiert, der eine einzige markante Auffälligkeit lieferte: Für die Parameterwerte $\eta \approx 10$, $\varphi \approx 4,9$ und $f_{CGW} \approx 6220,64 \mu\text{Hz}$ zeigt das Spektrum im Zeitraum 2009 bis 2018 ein auffälliges Maximum mit dem Signal-Rauschverhältnis vier (Bild 2). Keine andere Parameterkombination führt zu einem vergleichbar guten Ergebnis, das sich auch in den Datensätzen anderer Gravimeter finden lässt. Der

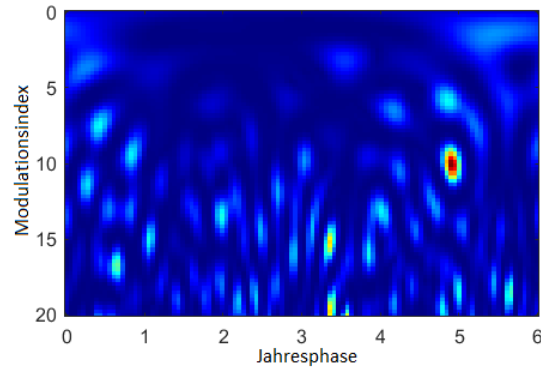


Abbildung 2): *Ein überraschender Intensitätspeak der Spektrallinie $f_{ZF}=5 \mu\text{Hz}$ nach Kompensation der Seitenbänder in Abhängigkeit von η und φ*

Wert von η passt zwar nicht zum Erwartungswert für HM Cancrì, ermunterte aber zu weiteren Untersuchungen, die in folgenden Schritten abläuft:

- Die Datenaufzeichnung eines rauscharmen, supraleitende Gravimeters beginnt an einem 1. Januar um 0 Uhr und endet nach zehn Jahren. Während dieses Zeitraums zeigen sich im Spektrum der Umgebung von 6220,64 μHz keine Auffälligkeiten. Das gilt auch für die Daten anderer Gravimeter.
- Reduziert man die Frequenz dieses Rauschens durch Mischung mit einem *frequenzstabilen* Oszillator auf 6 μHz (Bandbreite 7 μHz), erkennt man auch im Spektrum

der Zwischenfrequenz keine Auffälligkeiten. So weit entspricht das Verfahren einem Superhet-Empfänger üblicher Bauart.

- Ersetzt man den frequenzstabilen Oszillator durch einen *phasenmodulierten* Oszillator der gleichen Frequenz (modifizierter Superhet), ändert sich das Spektrum der Zwischenfrequenz genau dann, wenn die Phasenmodulation folgende Kriterien einhält: Die Modulationsfrequenz beträgt $31,69 \text{ nHz}$, der Modulationsindex besitzt den Wert $10 \pm 0,1$ und die Phasenverschiebung den Wert $4,9 \pm 0,1$. Nur dann beobachtet man bei $f_{ZF} = 1 \pm 0,001 \text{ } \mu\text{Hz}$ ein deutliches Amplitudenmaximum (vergleiche Bild 3).

Die beste Erklärung dieses Maximums lautet: Die Datenaufzeichnung des Gravimeters enthält ein phasenmoduliertes Signal der Frequenz $6220,64 \text{ } \mu\text{Hz}$, dessen Spektrum ähnlich aussieht wie in Bild 1. Das breitbandige Signal kann nicht identifiziert werden, weil keine Spektrallinie des schwachen Signals den Rauschpegel der Gravimeter erreicht.

Sobald die Phasenmodulation des Hilfsoszillators des MSH mit den entsprechenden Werten des Signals übereinstimmen, ändert sich alles: Das vorher breite Spektrum (eingebettet im Rauschen der Zwischenfrequenz) zieht sich zu einer einzigen Linie mit hoher Amplitude zusammen. Das entspricht einer konstanten Zwischenfrequenz, deren Intensität den Rauschpegel deutlich übersteigt. Alle Kenngrößen der gemessenen Phasenmodulation deuten darauf hin, dass sich die Signalquelle weder auf der Erde noch im Sonnensystem befindet. Die Werte der Parameter schließen HM Cancri als Signalquelle aus. Obwohl alle Parameter auf eine intensive CGW hinweisen, wurde die genauere Untersuchung zurückgestellt um sich auf HM Cancri zu konzentrieren.

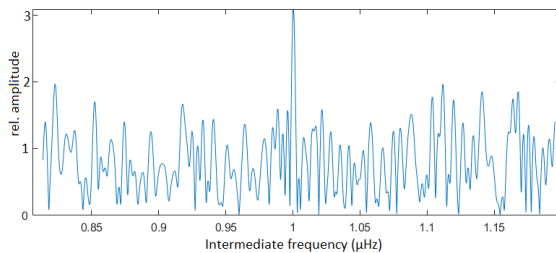


Abbildung 3): *Typisches Spektrum der letzten Zwischenfrequenz des MSH. Ursprünglich verteilt sich die Gesamtenergie der CGW auf etwa 40 Spektrallinien; nach Kompensation der Phasenmodulation konzentriert sich die Gesamtenergie auf eine einzige Spektrallinie.*

6 Vergleich der bisherigen Daten

Im Jahr 1999 wurden die periodischen Änderungen der Röntgenstrahlung des Sternsystems HM Cancri in den Datensätzen des Satelliten ROSAT entdeckt [2]. Eine erste Schätzung ergab die Periodendauer $321,25 \pm 0,25 \text{ s}$. Das System ist im optischen Bereich kaum erkennbar, entsprechend schwierig gestalten sich Messungen der Periodendauer. Weitere Untersuchungen folgten:

- Erste Auswertungen der Beobachtungen im Röntgenbereich [3] ergaben Periodendauern von $321,5393 \pm 0,0004 \text{ s}$ bzw. $321,5465 \pm 0,0004 \text{ s}$. Das entspricht den GW-Frequenzen $6,220079474 \text{ mHz}$ bzw. $6,219940195 \text{ mHz}$. Diese Ergebnisse aus

dem Jahr 2001 wurden möglicherweise anhand zu kurzer Messdauern ermittelt und sind deshalb mit Vorsicht zu betrachten.

- Aus optischen Beobachtungen [4] folgt die Periodendauer 321.5304 s. In Verbindung mit ROSAT-Daten errechnet sich der leicht abweichender Wert 321.53033 s. Die Frequenz der abgestrahlten CGW ist dann 6.220251647 mHz bzw. 6.22025307 mHz.
- Im Folgejahr wurde aus den Chandra-Daten der wohl genaueste Wert 3.11013824 mHz \pm 0.17 nHz ermittelt [5]. Die CGW hatte damals den doppelten Wert 6.22027648 mHz.
- Die Vorversuche der vorliegenden Arbeit enthüllten in den Aufzeichnungen supraleitender Gravimeter aus den Jahren 2009 bis 2018 ein auffallend starkes Signal der Frequenz 6,22064 mHz, das eine CGW sein könnte. Ein Vergleich mit bekannten Daten [5] schließt aus, dass es von HM Cancri stammt.

Strohmayer [5] hat aus Röntgendaten den Wert $\frac{df}{dt} = (3.63 \pm 0.06) \times 10^{-16} \frac{\text{Hz}}{\text{s}} = 11.5 \frac{\text{nHz}}{\text{Jahr}}$ für die Drift der Orbitalfrequenz bestimmt. Für die CGW muss man diesen Wert verdoppeln, weil $f_{CGW} = 2 \cdot f_{Orbit}$.

7 Methodik der Messung einer CGW

Alle folgenden Untersuchungen konzentrieren sich auf den Frequenzbereich 6220 μHz bis 6220,6 μHz . In diesem engen Suchbereich gibt es offenbar mehrere CGW, die sich auf Grund ihrer Phasen und Modulationsindices unterscheiden lassen. Um die Signale von HM Cancri zu identifizieren, benötigt man genaue Startwerte. Jedes Jahr am 22. Juli liegen Erde - Sonne - HMC annähernd auf einer Geraden. Mit ausreichendem SNR könnte man an diesem Tag die unverfälschte Frequenz der CGW messen (Die geringe ekliptische Breite 11^0 von HMC kann man zunächst vernachlässigen). Drei Monate später, am 27. Oktober, fliegt die Erde mit etwa 29 km/s in Richtung HMC. Ein halbes Jahr später, am 25. April, entfernt sie sich etwa gleich schnell von HMC [8]. Diese Termine der maximalen blue-shift bzw. redshift von HMC kann man mit folgendem Ansatz prüfen:

$$y = \sin(2\pi t(f_{CGW} + t \cdot k_{Drift}) + \eta \cdot \sin(2\pi t f_{Jahr} + \varphi)) \quad (4)$$

Die Formel (4) enthält alle notwendigen Parameter, um die empfangbare CGW zu beschreiben. Die Startwerte [5] für HM Cancri lauten:

$f_{CGW} \approx 6,22$ mHz (Frequenz der CGW; jahresabhängig)

$k_{Drift} \approx 23$ nHz pro Jahr

$\eta \approx 20$ (Modulationsindex, folgt aus der ekliptischen Breite der Quelle)

$f_{Jahr} = 31,688$ nHz (konstante Umlauffrequenz der Erde)

$\varphi \approx 1,37$. (Die Datenaufzeichnung der Gravimeter startet am 1. Januar eines Jahres, Astronomen benutzen den Frühlingspunkt 21. März als Phasenreferenz.)

Als Datenbasis dienen die Messreihen von 17 Gravimetern, die sich durch einen geringen Rauschpegel in der Umgebung von 6 mHz auszeichnen und im Zeitraum 1997

bis 2020 fast lückenlos in Betrieb waren: BF1+2 (Deutschland), ST (Frankreich), BH (Deutschland), CO (Österreich), DJ (Benin), MC (Italien), MO1+2 (Deutschland), PE (Tschechei), SU1+2 (Südafrika), OS (Schweden), WE (Deutschland), YS (Spanien), CB (Australien), MB (Belgien)

Aus Messwerten dieser Quellen bildet man 32 Reihen, die jeweils am 1. Januar eines Jahres zwischen 1997 und 2012 beginnen und zehn Jahre umfassen. Nebenbei hat sich auch die Erwartung bestätigt, dass die Addition von Datenreihen unterschiedlicher Gravimeter die Amplitude der CGW vergrößert. Jede Datenreihe wird gleich behandelt:

1. Man verringert die Mittenfrequenz eines schmalen Bereiches um 6220 μHz in zwei Stufen auf die Zwischenfrequenz 6 μHz . Das entspricht einem Superhet üblicher Bauart.
2. Ein phasenmodulierter Hilfsoszillator reduziert die Zwischenfrequenz auf 1 μHz . Die Frequenzdrift dieses Oszillators ist frei wählbar, soll aber etwa 24 μHz pro Jahr betragen. Diese Stufe entspricht einem modifizierten Superhet.
3. Man iteriert die Phase φ , der Modulationsindex η und die Drift des Hilfsoszillators so, dass die Amplitude einer Spektrallinie nahe 1 μHz ein Maximum erreicht. Das bewirkt, dass die Amplituden aller anderen Spektrallinien des phasenmodulierten Signals sinken. Deren Energie fließt in die zentrale Spektrallinie. Kleine Frequenzabweichung ($\Delta f < 10$ nHz) korrigiert man. Größere Abweichung bedeuten, dass das Signal möglicherweise nicht von HM Cancrri stammt und erfordern eine neue Iteration mit veränderten Parametern.
4. Erzielt man ein reproduzierbares Ergebnis mit hohem SNR, stimmen die Parameter des phasenmodulierten Hilfsoszillators mit den Kenngrößen der CGW überein. Diese tabelliert man mit Angabe des Startdatums.

8 Ergebnisse

Die Formel (4) wurde auf 32 Datenreihen angewendet, die jeweils zehn Jahre umfassen und liefert folgende Mittelwerte: $\varphi = 1.319 \pm 0.030$, $\eta = 19.510 \pm 0.163$, and $k_{drift} = 24.356 \pm 0.279$ nHz pro Jahr. Die Toleranzwerte wurden mit dem Jackknife-Verfahren berechnet.

Die Frequenzdrift stimmt gut überein mit der Steigung, die sich aus den Startpunkten allein errechnet (Bild 4) und dem Wert, den Strohmayer angibt [5].

Aus Formel (1) berechnet sich der Frequenzhub

$$\Delta f = \eta \cdot f_{Jahr} = 618.224 \pm 5.165 \text{ nHz} \quad (5)$$

Dieser Wert entspricht etwa dem relativistischen Maximalwert nach Formel (2) und bedeutet, dass sich die Quelle der CGW sehr nahe an der Ebene der Ekliptik befindet. Die tatsächliche ekliptische Breite von HM Cancrri beträgt 11° . Bei einem MSH sind die Parameter des phasenmodulierten Hilfsoszillators identisch mit den Kenngrößen der

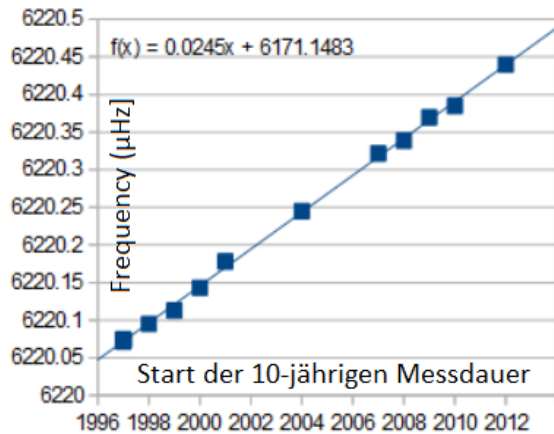


Abbildung 4): Die Startfrequenzen aller 32 Datenreihen als Funktion des Starttermins. Die Ergebnisse unterscheiden meist so wenig, dass die Unterschiede kaum zu erkennen sind. Die letzten Datenpunkte stammen aus dem Jahr 2020. Die Frequenz der CGW erhöht sich um 24,5 nHz pro Jahr.

CGW, die im Rauschen verborgen bleibt. Die Momentanfrequenz des MSH lässt zu jedem Zeitpunkt aus den Abständen benachbarter Nulldurchgänge ermitteln. Das Bild 5 zeigt die Frequenzänderungen des Hilfsoszillators, die der CGW entsprechen. Der Wert φ bestimmt die Zeitpunkte der Extrema:

An jedem 105. Tag im Jahr ist die Frequenz des Oszillators minimal, am 289. Tag jedes Jahres ist sie maximal (gemessen mit Gravimetern).

Misst man mit Chandra, gilt für HM Cancri [8]: An jedem 110. Tag im Jahr ist die Frequenz der CGW minimal, am 295. Tag jedes Jahres ist sie maximal. Besser könnte die Übereinstimmung nicht sein.

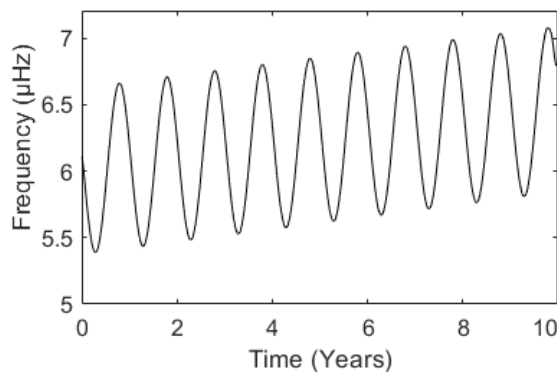


Abbildung 5): Die Frequenz des Hilfsoszillators als Funktion der Zeit. Die Frequenzänderungen und die Zeitpunkte der Extrema gelten unverändert auch für die CGW. Der jahresabhängige Mittelwert der CGW-Frequenz liegt bei 6220 µHz und wurde vor der Bearbeitung auf 6 µHz verringert. (Prinzip des Superhets).

9 Zusammenfassung

In dieser Arbeit wurde nachgewiesen:

- Jedes supraleitende Gravimeter ist ausreichend empfindlich und langzeitstabil, um die CGW von HM Cancri zu messen, obwohl (aktuell) kein Gerät akustisch vom Erdboden isoliert ist und deshalb zahlreiche Störungen aufnimmt. Diese Art der Montage ist verbesserungswürdig.

- Diese CGW ist phasenmoduliert mit f_{Jahr} und besitzt deshalb ein breites Spektrum aus vielen Einzellinien, das im Rauschen verschwindet. Die CGW lässt nur nachweisen, wenn a) eine mehrjährige Messdauer gewählt und b) die Phasenmodulation kompensiert wird.
- Das modifizierte Superhetverfahren MSH kann die Phasenmodulation kompensieren und die zentrale Spektrallinie ausreichend verstärken, um die CGW messbar zu machen.
- Die Frequenz und die Frequenzdrift dieser Messung stimmen sehr gut überein mit den Messwerten der Röntgenastronomie [5] für das Sternsystem HM Cancri.
- MSH liefert auch die Koordinaten der CGW-Quelle. Bedenkt man die häufigen Störungen der Gravimeter durch Erdbeben, ist die Übereinstimmung mit den astronomischen Koordinaten sehr zufriedenstellend.

10 Technische Details der Datenreduktion

Supraleitenden Gravimeter messen im Sekundentakt. In den Aufzeichnungen dominieren die Tiden mit Frequenzen um 11 μHz [6], deren Amplituden mindestens um den Faktor 10^6 höher sind als die Amplitude der gesuchten CGW. Vor der Veröffentlichung durch IGETS werden Datenlücken durch synthetische Tidenwellen gefüllt, dann erfolgt eine erste Dezimation um den Faktor 60, um den Datenumfang zu reduzieren. Beigefügte Daten wie barometrischer Druck enthalten keine nützlichen Informationen, um CGW mit Frequenzen über etwa 1 mHz zu entdecken. Nur bei tieferen Frequenzen muss man den Einfluss der Luftmasse berücksichtigen.

Die Zwischenfrequenz muss höher sein als die Carson-Bandbreite des CGW-Signals von etwa 1,4 μHz , um das FM-Signal verzerrungsfrei verarbeiten zu können (vergleiche Bild 1). Der Wert der Carson-Bandbreite folgt aus dem höchsten Modulationsindex η , den die relativistische Dopplerverschiebung vorgibt.

Bei dem üblicherweise verwendeten Superhetprinzip unterscheiden sich Empfangs- und Oszillatorfrequenz um den Wert der Zwischenfrequenz : $f_{ZF} = f_E \pm f_{OSZ}$. Diese Zweideutigkeit führt zum Problem der Spiegelfrequenz, die dem sogenannten IQ-Verfahren [7] fremd sind und das deshalb bei allen Untersuchungen verwendet wurde. Eine genauere Darstellung des Verfahrens würde den Rahmen dieses Artikel sprengen.

Die Formel (4) gilt für eine kreisförmige Umlaufbahn der Erde. Die Implementation eines präziseren Modells führte aufgrund des schlechten Signal-Rausch-Verhältnisses der Gravitationsdaten zu keinen befriedigenden Ergebnissen.

Literatur

- [1] IGETS Datenbank, GFZ Potsdam, 2021
- [2] Israel G. L. et al., The discovery of 321 s pulsations in the ROSAT HRI light curves of J080622.8+152732 = RX J0806.3+1527, *Astron. Astrophys.* 349, L1–L4 (1999)

- [3] Burwitz V., Reinsch K., 2001, in White N., Malaguti G., Palumbo G., eds, AIP Conf. Proc. Vol. 599. Am. Inst. Phys., New York, p. 522, arxiv.org/pdf/astro-ph/0410453.pdf
- [4] Israel et al., Taking the pulse of the shortest orbital period binary system RX J0806.3+1527, Mem. S.A.It. Suppl. Vol. 5, 148, 2004
- [5] Strohmayer Tod, Precision X-ray Timing of RX J0806.3+1527 with CHANDRA: Evidence for Gravitational Radiation from an Ultracompact Binary, 2005, arxiv.org/pdf/astro-ph/0504150.pdf
- [6] Hartmann and Wenzel, Tidal potential catalogue, 1995
- [7] D.K. Weaver, A third method of generation and detection of single-sideband signals, Proc. of IRE, pp. 903-5, 1956
- [8] Calculate radial velocities of the GBT, www.gb.nrao.edu/GBT/setups/radvelcalc.html