

Helligkeitsänderungen bei erdnahen Asteroiden Zur Erstellung und Analyse der Rotationslichtkurven

Dieter Husar

Abstract: Observations of the near-earth asteroids 2024 MK and 2024 ON are reported. 2024 MK shows a complex light curve which exhibits fast rotation and tumbling with frequencies between $4.7 [d^{-1}]$ and $209 [d^{-1}]$. The synodic rotation period of 2024 ON was determined to be approximately $5.9 [h]$, which is consistent with the rotation period reported from Goldstone Radar observations.

Beobachtungen von 2024 MK

Der erdnahe Asteroid 2024 MK sorgte im Juni 2024 für große Aufmerksamkeit. Weltweit berichteten viele Medien, sowie NASA und ESA, über diesen bemerkenswerten Himmelskörper.



Abb. 1: Physikalische Daten von 2024 MK (Quelle: ESA) [L1]

Nur wenige Tage bot sich die seltene Gelegenheit, einen ca. 12 mag hellen Asteroiden in Erdnähe zu verfolgen und zu versuchen, seine physikalischen Eigenschaften (hauptsächlich die Rotation) zu erkunden. Im Folgenden werfen wir einen Blick auf die umfangreichen Messreihen, die ich mit den Remote-Teleskopen der IAS (Internationale Amateur Sternwarte [L2]) in Namibia parallel durchgeführt habe und deren Auswertung. Die Messreihen des Asteroiden 2024 MK wurden in zwei Beobachtungsnächten am 29. und 30. Juni 2024 durchgeführt. Aufgrund der hohen Winkelgeschwindigkeit des Asteroiden wurden an den IAS-Teleskopen Remote2 und Remote3 jeweils insgesamt 10 Messreihen mit 200 bis 400 Einzelaufnahmen pro Serie erstellt. Diese Serien ergaben die beachtliche Menge von rund 6000 Aufnahmen, die eine Datenmenge von 84 GB umfassten – trotz der Verwendung von Binning 2x2.

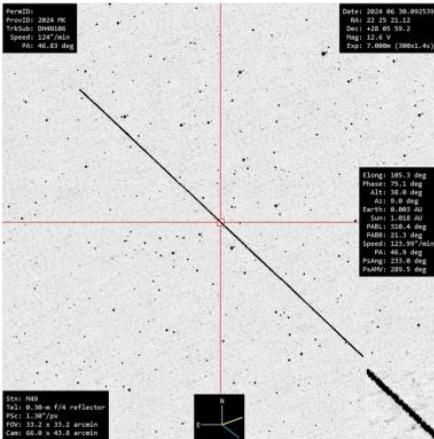


Abb. 2: Spur von 2024 MK im FoV über 7 Minuten

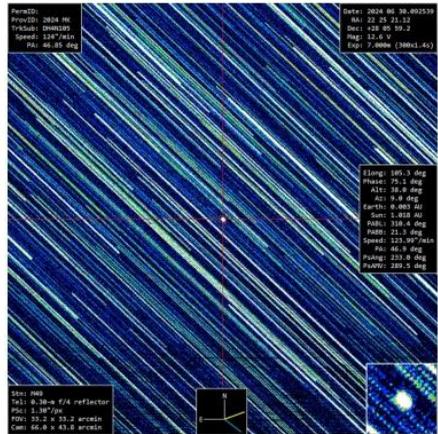


Abb. 3: 300 Aufnahmen von 2024 MK (hier gestackt mit der Winkelgeschwindigkeit des Asteroiden)

Die Aufnahmen konnten erfolgreich mit der Software **Tycho-Tracker** [L3] astrometrisch und photometrisch ausgewertet werden. Die photometrische Genauigkeit wird durch die Verwendung des **ATLAS2** Sternkatalogs [1] ermöglicht, der mittels „Ensemble-Photometrie“ (größere Anzahl von Vergleichssterne in jeder Aufnahme) auch bei einem schnell beweglichen Objekt und damit auch wechselndem Himmelsausschnitt eine gute Vergleichbarkeit sichert. Um die hohe Präzision bei der Astrometrie zu gewährleisten, wurde die PC-Zeitsynchronisation mit einem NTP-Server und GPS-Kopplung durchgeführt, was eine Genauigkeit des Zeitstempels von besser als 0,01 Sekunden ermöglichte.

Auswertung der Lichtkurve

Die Helligkeitsschwankungen des Asteroiden 2024 MK wurden in der Nacht 29./30.06.2024 über einen Zeitraum von vier Stunden erfasst und zeigen komplexe Muster, die auf eine unregelmäßige Oberfläche mit unterschiedlicher Albedo hindeuten. Zu den Variationen in der Reflexion, die aus der unregelmäßigen Form und Struktur des Asteroiden resultieren, addieren sich noch die Variationen durch das Phänomen des "Tumblings" (Tumbling). Zusätzlich kompliziert wird die Helligkeitsänderung auch durch eine Phasenänderung von etwa 10 Grad in nur vier Stunden und die wechselnde Ausrichtung zur Erde.

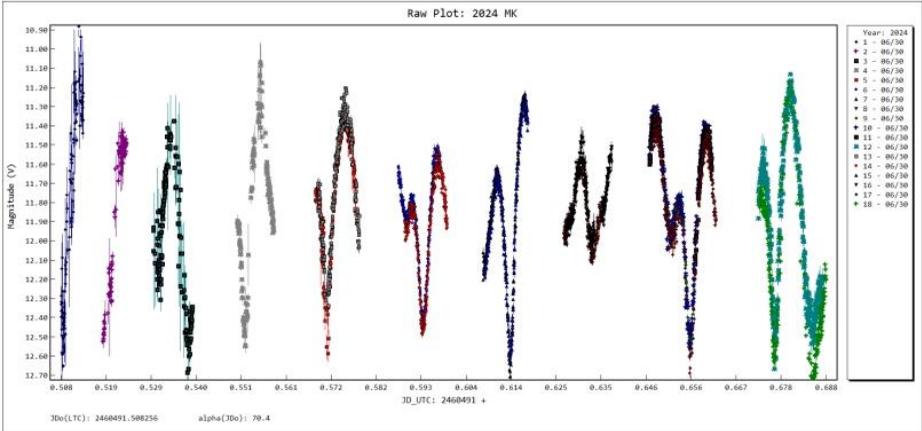


Abb. 4: Helligkeitsänderung (sog. Lichtkurve) von 2024 MK über ca. 4 Stunden (Messungen an beiden IAS-Remote-Teleskopen sind hier überlagert in einem Diagramm dargestellt).

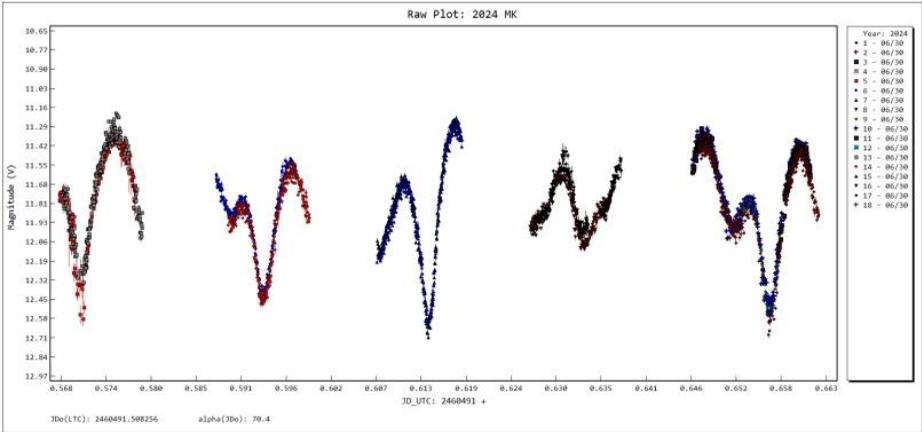


Abb.5: Ein Ausschnitt aus dieser Lichtkurve zeigt die hervorragende Übereinstimmung der Messergebnisse von den beiden Remote-Teleskopen (nahezu gleiche Brennweite, gleiche Kamera; gleiche Filter).

Der Vorbeiflug des 2024 MK wurde auch von anderen Stationen beobachtet. Aufgrund der komplexen Lichtkurve kursierten in der MPML (Minor Planet Mailing List) auch einige Mitteilungen zu Perioden, die offenbar voreilig aus zu kurzen Teilen der Lichtkurve bestimmt worden waren. So einfach war das hier nicht. Die Auswertung mit dem Tycho-Tracker [L3] mit einer einfachen Periodenbestimmung führt nicht zu einem konsistenten Ergebnis (siehe Abb.6)

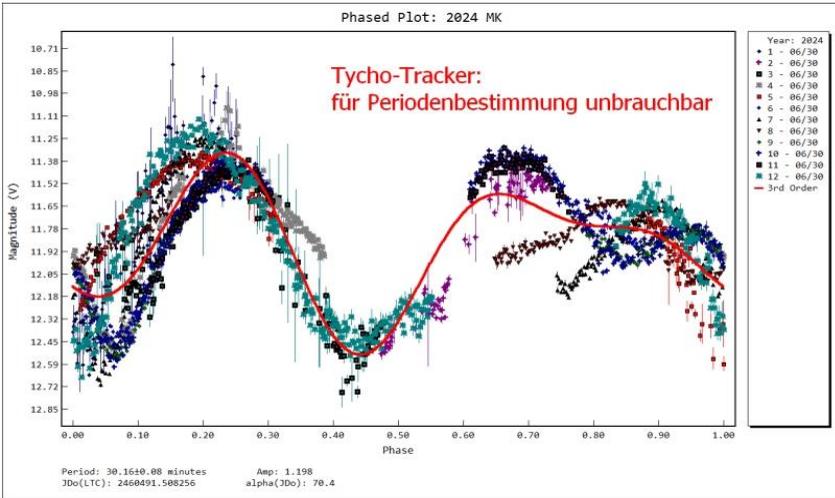


Abb. 6: Die Software Tycho-Tracker ist bei komplexen Lichtkurven zur Periodenbestimmung nicht brauchbar

Zur genauen Analyse der Helligkeitsänderungen kam die Software **Period04** zum Einsatz [L4]. Diese Anwendung, die ursprünglich an der Universität Wien zur Analyse von multiperiodischen Delta-Scuti-Veränderlichen entwickelt wurde, ermöglicht eine Fourier-Analyse der Lichtkurven. Die Analyse mit Period04 ermöglicht eine detaillierte Frequenzanalyse der Rotationslichtkurven. Aufgrund der Komplexität der Bewegungen ist keine einfache Bestimmung einer Rotationsperiode möglich, sondern die Rotationsperiode ist von der Tumblingperiode überlagert.

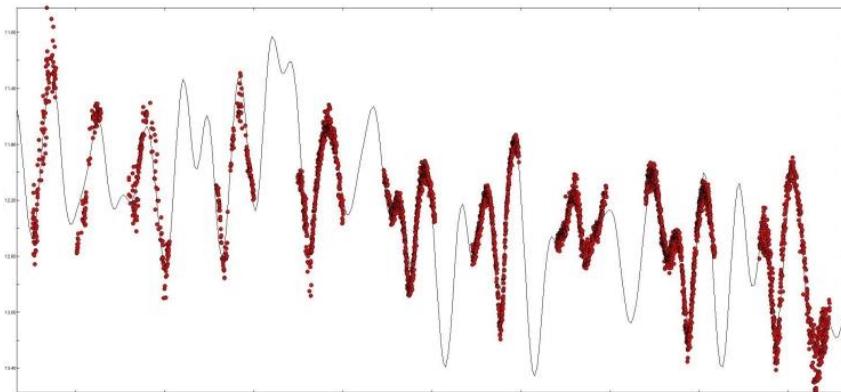


Abb. 7: Mittels der Software Period04 wurde die Lichtkurve hier mit einem Fit aus mehreren überlagerten Fourierfrequenzen mit unterschiedlicher Amplitude angepasst. So lassen sich die einzelnen Ursachen für die Helligkeitsschwankungen separieren.

Die (noch vorläufige) Analyse der Helligkeitsdaten mit Period04 ergab Frequenzen zwischen $4.7 \text{ [d}^{-1}\text{]}$ und $209 \text{ [d}^{-1}\text{]}$. Dem entsprechen Perioden zwischen ca. 7 Minuten und ca. 5 Stunden.

Bei der Analyse wird zunächst die dominante Frequenz f_0 ermittelt. Die dominante Frequenz repräsentiert meist die *Rotationsbewegung*. Diese beträgt bei 2024 MK $f_0 \approx 97 \pm 2 \text{ [d}^{-1}\text{]}$. Dies entspricht einer Rotationsperiode von ca. 14.8 Minuten.

Weitere Frequenzen, die sich aus der Analyse ergeben, werden daraufhin untersucht, ob es sich um harmonische Frequenzen handelt (beispielsweise $2 f_0$ oder $3 f_0$). Diese werden in der Regel durch markante *Oberflächenstrukturen* auf dem Asteroiden oder durch Oberflächenregionen mit unterschiedlicher *Albedo* verursacht.

Frequenzen unterhalb der dominanten Frequenz (zwischen $f \approx 4 \text{ [d}^{-1}\text{]}$ und $40 \text{ [d}^{-1}\text{]}$) können dem *Tumbling* zugeordnet werden.

Auch auf Kombinationen von Frequenzen ist zu achten ($f_x + f_y$ und $f_x - f_y$).

Eine langsame Frequenz ($0.5 - 1 \text{ [d}^{-1}\text{]}$; entsprechend Stunden) kann mit der Änderung der *Beleuchtungsphase* in Verbindung gebracht werden.

Eine sehr langsame Frequenz ($< \approx 0.01 \text{ [d}^{-1}\text{]}$; entsprechend Tage) ergibt sich, weil der Asteroid auf seinem Orbit seinen Abstand zur Erde verändert und damit auch seine *scheinbare Helligkeit*. Die beiden letzten Einflüsse könnten natürlich aus den Orbit-Daten berechnet werden.

Eine endgültige Auswertung, die auch weitere Daten (aus vorangegangenen Nächten und folgenden Nächten) in Betracht zieht, ist noch in der Bearbeitung.

Tumbling (oder dt.: „Taumeln“)

Das Tumbling oder Taumeln ist ein sehr spannendes Phänomen: das Tumbling von Asteroiden, ist eine komplexe, unregelmäßige Rotation um mehrere Achsen. Dies kann durch verschiedene Faktoren verursacht werden, die sowohl interne als auch externe Prozesse umfassen können:

1. Kollisionen: Eine der häufigsten Ursachen für Tumbling sind Kollisionen mit anderen Himmelskörpern. Wenn ein Asteroid von einem anderen Objekt getroffen wird, kann das eine abrupte Änderung in seiner Rotationsachse oder -geschwindigkeit verursachen, die zu einer unregelmäßigen Rotation führt.
2. YORP-Effekt (Yarkovsky-O'Keefe-Radzievskii-Paddack-Effekt): Dies ist ein thermaler Effekt, bei dem die ungleichmäßige Absorption und Emission von Sonnenstrahlung durch den Asteroiden ein Drehmoment erzeugt, das im Laufe der Zeit die Rotation beschleunigen oder verlangsamen kann. In manchen Fällen kann dieser Effekt auch eine instabile, chaotische Rotation auslösen.
3. Gravitationskräfte: In der Nähe von Planeten oder anderen großen Objekten können

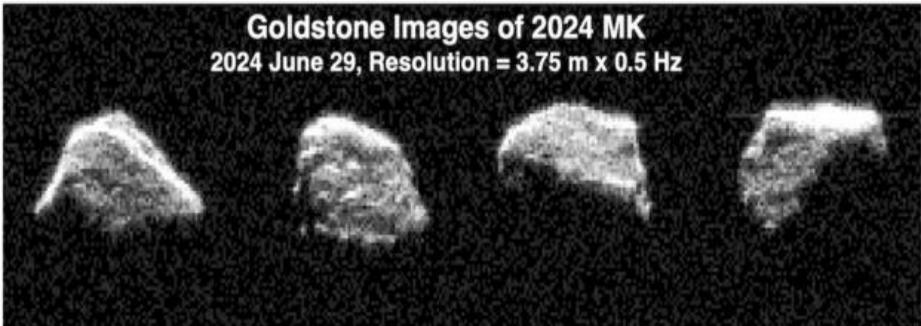
gravitative Wechselwirkungen die Rotationsdynamik eines Asteroiden beeinflussen und ihn aus einer regulären Rotation heraus in ein Tumbling versetzen.

4. Interne Prozesse: Bei manchen Asteroiden, die aus lockerem Material bestehen (sog. „Rubble Pile Asteroids“), kann es zu internen Bewegungen kommen, die die Rotationsachse verändern.

5. Alterung der Asteroiden: Über sehr lange Zeiträume können kleine Kräfte wie Strahlung oder Gasdruck auf die Oberfläche eines Asteroiden wirken und langsam seine Rotation verändern.

Insgesamt entstehen Tumbling-Bewegungen meist durch eine Kombination dieser Faktoren, insbesondere Kollisionen und den YORP-Effekt. Das Tumbling kann über lange Zeiträume bestehen bleiben, da Asteroiden oft keine atmosphärischen oder anderen Mechanismen haben, die die Rotation stabilisieren könnten. [1] - [9]

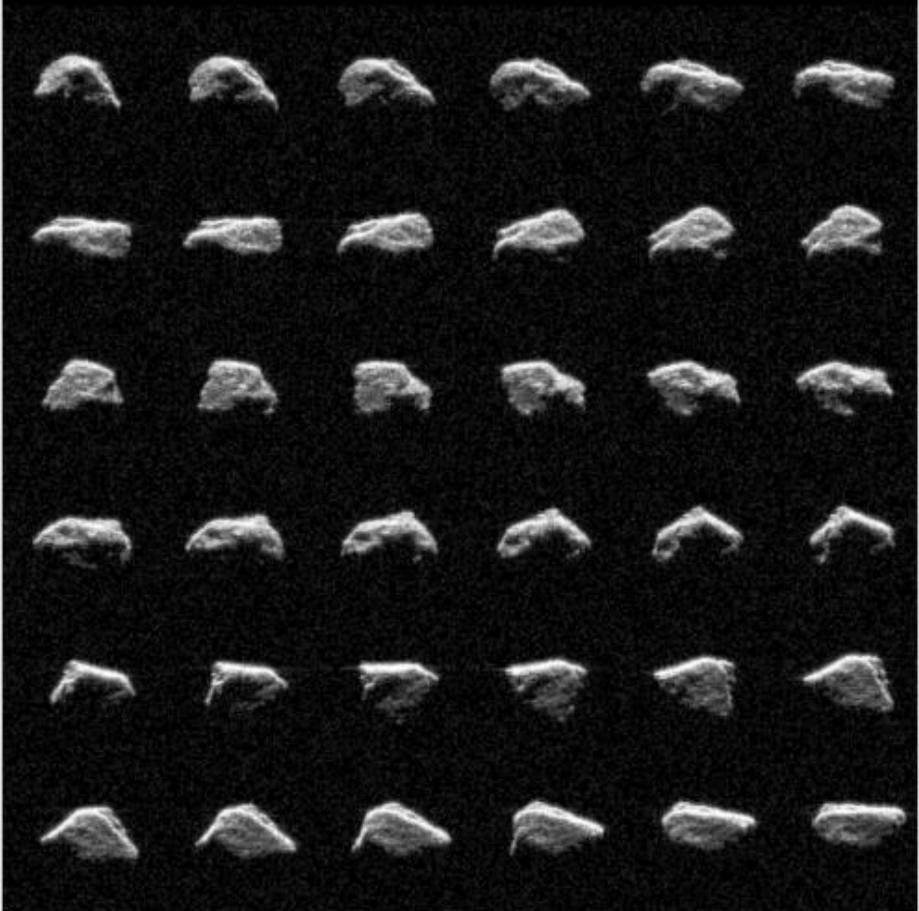
Sehr interessant ist schließlich ein Vergleich der Beobachtungen mit den Ergebnissen der Radarmessungen von Goldstone Radar (ein NASA/JPL-Projekt) [L5]:



Selected delay-Doppler radar images of 2024 MK obtained on June 29 when the asteroid was at about one lunar distance and approaching Earth. Resolution is 3.75 m x 0.5 Hz. Each panel shows a weighted sum of data that span about 20 seconds. D55-14 transmitted and D55-13 received.

Abb.8: Radaraufnahmen von Goldstone Radar (Quelle: NASA/JPL) [L5]

Goldstone Radar Images of Asteroid 2024 MK
2024 June 29, 05:40:08-06:49:01 UT, Resolution = 3.75 m x 0.5 Hz



More delay-Doppler radar images of 2024 MK obtained on June 29.
Resolution is 3.75 m x 0.5 Hz. Each panel shows a weighted sum of data
that span about 20 seconds. D55-14 transmitted and D55-13 received.

Abb.9: Weitere Radaraufnahmen von Goldstone Radar vom 29.06.2024 (Quelle: NASA/JPL) [L5]

An diesen Abbildungen kann man die Rotation und das Tumbling des Asteroiden 2024 MK unmittelbar ansehen.

Beobachtungen von 2024 ON

Auch der Asteroid 2024 ON wurde in Erdnähe wieder so hell (ca. 12 mag), dass er gut mit den IAS-Remote-Teleskopen [L2] beobachtet werden konnte.

Über das ca. 350 m lange Objekt wurde in den Medien als „Kosmische Erdnuss“ berichtet. Die Annäherung an die Erde war mit ca. 2.6 Mondstrecken nicht so groß, wie bei dem zuvor beschriebenen Objekt.



Abb.10: Physikalische Daten von 2024 ON (Quelle: ESA) [L6]

Bei der Beobachtung von 2024 ON wurde eine leicht modifizierte Beobachtungsstrategie mit längeren Belichtungszeiten angewendet, um mit weniger Aufnahmen ein besseres S/N-Verhältnis ($S/N = \text{Signal/Noise}$) zu ermöglichen. Die photometrische Auswertung wurde erneut mit der Software Tycho-Tracker durchgeführt. Die wegen der längeren Belichtungszeit leicht elongierte Abbildung der Asteroidenspur lässt sich mit einer elliptischen Apertur im Tycho-Tracker gut erfassen und führt zu präzisen photometrischen Ergebnissen. Auch hier kam wieder der Sternkatalog ATLAS2 [1] zum Einsatz. Dieser auf den GAIA Daten basierende Katalog ist generell für astrometrische und photometrische Zwecke ideal (s.o.).

In zwei aufeinanderfolgenden Nächten, vom 17. bis 19. September 2024, wurden Rotationslichtkurven erstellt und analysiert. Eine dritte Nacht war wegen leichter Bewölkung leider nicht durchgehend nutzbar.

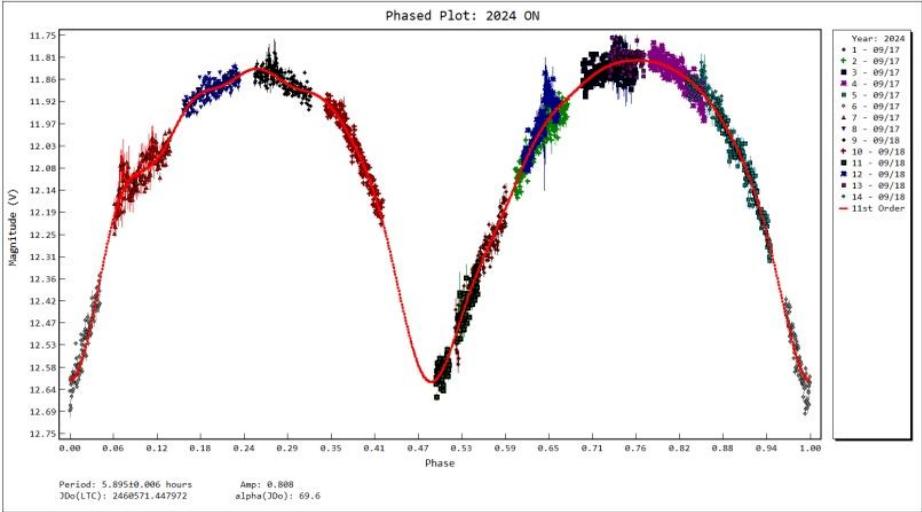


Abb. 11: 2024 ON (Rotationslichtkurve erste Nacht: 2024-09-17/18)

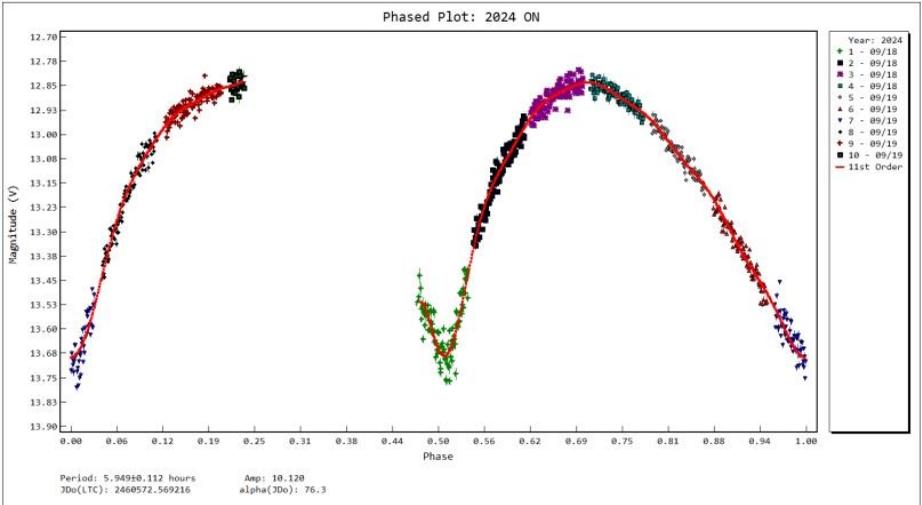


Abb.12: 2024 ON (Rotationslichtkurve zweite Nacht: 2024-09-18/19)

Die Kombination der Daten aus beiden Nächten zeigt die Änderung der Phase des Asteroiden, die ca. 10 Grad pro Tag beträgt. Im Unterschied zu 2024 MK wies 2024 ON kein Taumeln auf, und die synodische Rotationsperiode konnte hier eindeutig bei ca. 5,9 Stunden bestimmt werden. Dies steht auch im Einklang mit den Ergebnissen, die auf der Webseite von Goldstone Radar vermerkt sind [L5].

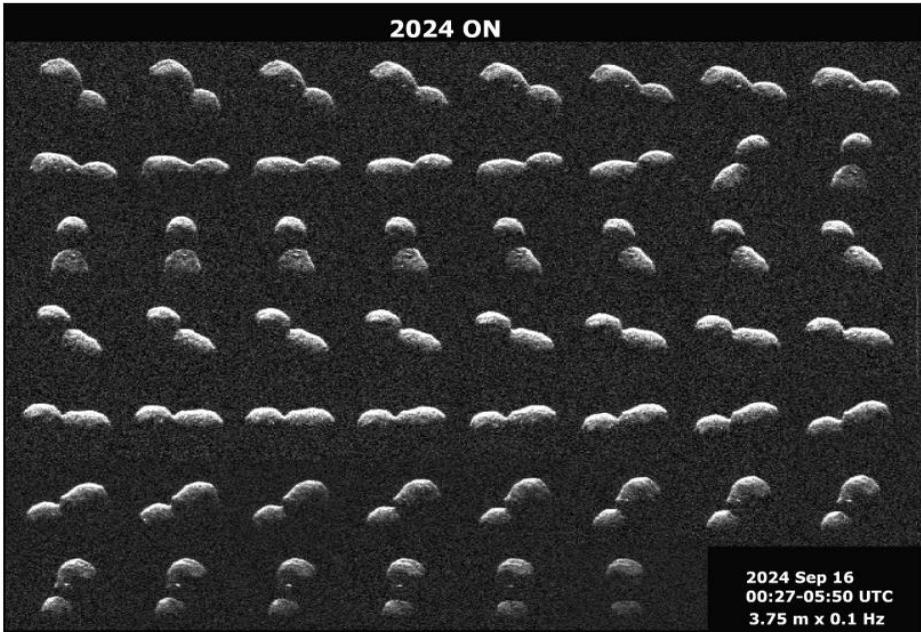


Abb.13: 2024 ON (Aufnahmen von Goldstone Radar vom 16.09.2024) (Quelle: NASA/JPL) [L5]

Die Analyse der Lichtkurve und die Radaraufnahmen bestätigten zudem, dass 2024 ON eine stark elongierte Form besitzt und wahrscheinlich ein Doppelasteroid mit Kontakt ist – ein sogenannter Berührungsdoppelkörper. Dies kommt gar nicht so nicht selten vor. Laut NASA/JPL bei rund 14 % aller erdnahen Asteroiden [L5].

Fazit

Remote-Teleskope an astronomisch exzellenten Standorten – wie die Teleskope der IAS auf Hako/Namibia – erlauben die Messung von Lichtkurven von (12 mag) hellen Asteroiden mit gutem Signal-Rausch-Verhältnis. Die astrometrische und photometrische Auswertung kann mit der Software Tycho-Tracker besonders effektiv durchgeführt werden. Hierbei ist insbesondere der Sternkatalog ATLAS2 von großem Nutzen. In einfachen Fällen lässt sich die Rotationsperiode des Asteroiden dann auch bereits im Tycho-Tracker bestimmen. Für die Analyse komplexer (multiperiodischer) Lichtkurven ist Period04 hilfreich.

Links:

[L1] ESA:

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2024/06/Close_approach_of_asteroid_2024_MK

[L2] IAS: Internationale Amateur Sternwarte: <https://www.ias-observatory.org/index.php/de/>

[L3] Tycho-Tracker: <https://www.tycho-tracker.com/>

[L4] Period04: <http://period04.net/>

[L5] Goldstone Radar und NASA/JPL:

<https://www.jpl.nasa.gov/news/?page=1&topics=Asteroids+and+Comets>

[L6] ESA:

https://www.esa.int/ESA_Multimedia/Images/2024/09/Close_approach_of_asteroid_2024_ON

Literatur:

[1] Tonry, J. L., et al. (2018). "The ATLAS All-Sky Stellar Reference Catalog" The Astrophysical Journal, 867:105.

[2] Scheeres, D. J., et al. (2000). "Dynamics of rotating asteroids." Icarus 147.1: 106-118.

[3] Pravec, P., et al. (2005). "Tumbling asteroids." Icarus 173.1: 108-131.

[4] Rubincam, D. P. (2000). "Radiative spin-up and spin-down of small asteroids." Icarus 148.1: 2-11.

[5] Vokrouhlický, D., et al. (2003). "The YORP effect on small asteroids: Mathematical formulation and examples." Icarus 163.1: 338-353.

[6] Farinella, P., et al. (1998). "The collisional history of asteroids and their spins." Icarus 132.2: 378-387.

[7] Holsapple, K. A. (2007). "Spin limits of Solar System bodies: From the small fast-rotators to 2003 EL61." Icarus 187.2: 500-509.

[8] Kaasalainen, M., et al. (2001). "Models of tumbling asteroids." Icarus 153.1: 37-51.

[9] Harris, A. W., et al. (1996). "Lightcurve observations of tumbling asteroids." Icarus 123.2: 362-372.

[10] Henych, T., & Pravec, P. (2013). "Asteroid rotation excitation by subcatastrophic impacts: A challenge for YORP." MNRS 432.3: 1623-1631.

Dr. Dieter Husar, Hamburg am 09.11.2024; Kontakt: hipoh@gmx.de