



WROCLAW UNIVERSITY
OF ENVIRONMENTAL
AND LIFE SCIENCES

Kartografia Księżyca i jej znaczenie w eksploracji kosmosu

Krzysztof Sońnica, Radosław Zajdel, Grzegorz Bury, Tomasz Kur

Institut Geodezji i Geoinformatyki, UPWr

Etapy kolonizacji Księżyca

Faza 1 – misje przygotowawcze i rozpoznawcze – od 2009 r.

Faza 2 – budowa systemu nawigacji satelitarnej „GPS na Księżycu” – 2021-2029/2031 r.

Faza 3 – Pierwsze misje załogowe i krótkie pobyty na powierzchni, 2028 r.

Faza 4 – Budowa „bazy” i rozwój infrastruktury powierzchniowej, 2031 r.

Faza 5 – Stała obecność i „kolonizacja” powierzchniowa, ???



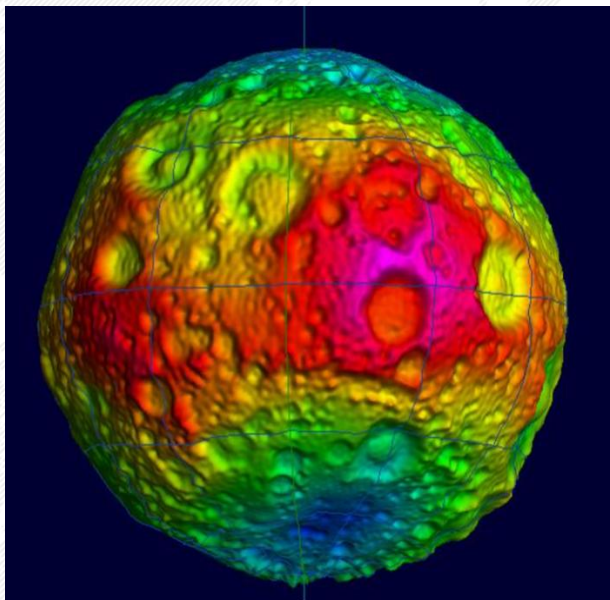
Zdjęcia wykonane przez misję Artemis II

<https://www.houstonpublicmedia.org/articles/news/nasa/space/2026/04/07/548366/artemis-photos-moon-earth-space-nasa/>

Układy odniesienia dla Księżyca

Principal Axis (PA) – układ głównych osi:

- Powiązany z polem grawitacyjnym
- Wyznaczony bezpośrednio z efemeryd



$$I = \begin{bmatrix} A & 0 & 0 \\ 0 & B & 0 \\ 0 & 0 & C \end{bmatrix}$$

$$\bar{C}_{21} = \bar{S}_{21} = \bar{S}_{22} = 0$$

$$\bar{C}_{20} \approx -2.034 \times 10^{-4}$$

$$\bar{C}_{22} \approx 2.239 \times 10^{-5}$$

$$A = MR^2(-\bar{C}_{20} - 2\bar{C}_{22})$$

$$B = MR^2(-\bar{C}_{20} + 2\bar{C}_{22})$$

$$C = MR^2(2\bar{C}_{20} + A + B)$$

$$PA = R_Z(\psi) R_X(\theta) R_Z(\varphi) LCRS$$

Precesja, nutacja, ruch własny

Mean Earth (ME) – układ Ziemi średniej:

- Powiązany ze średnim kier. do Ziemi
- Wymaga uśrednienia obrotu



$$ME = R_X(-p_{2c}) R_Y(p_{1c}) R_Z\left(-\tau_c + \frac{I^2 \sigma_c}{2}\right) PA$$

normalna do ekliptyki w PA, libracja, inklinacja równika wzg. ekl.

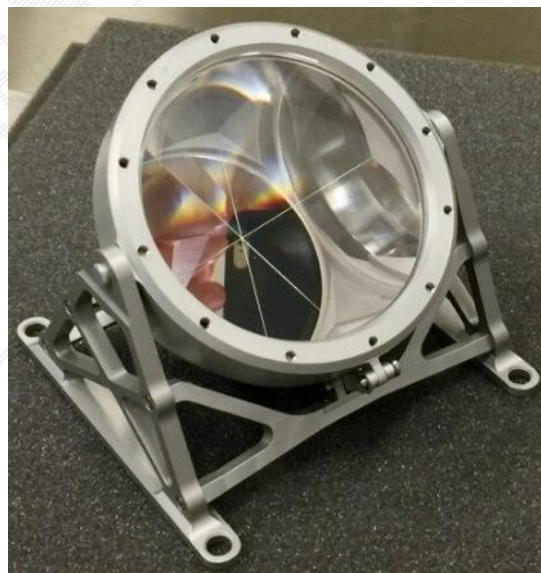
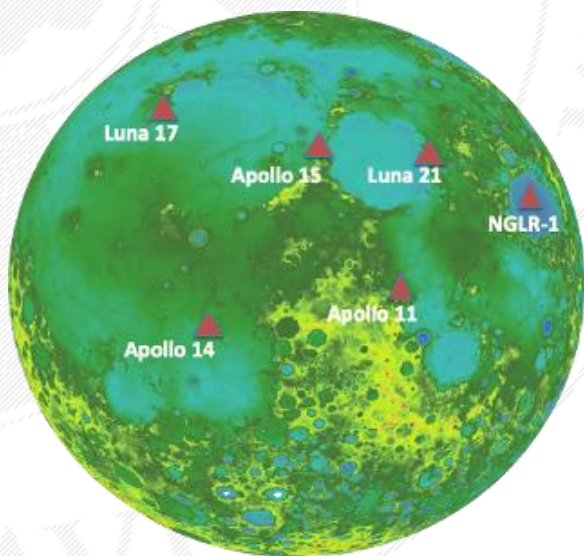
$$X_{PA} - X_{ME} \sim 860 \text{ m}$$

Retroreflektory laserowe

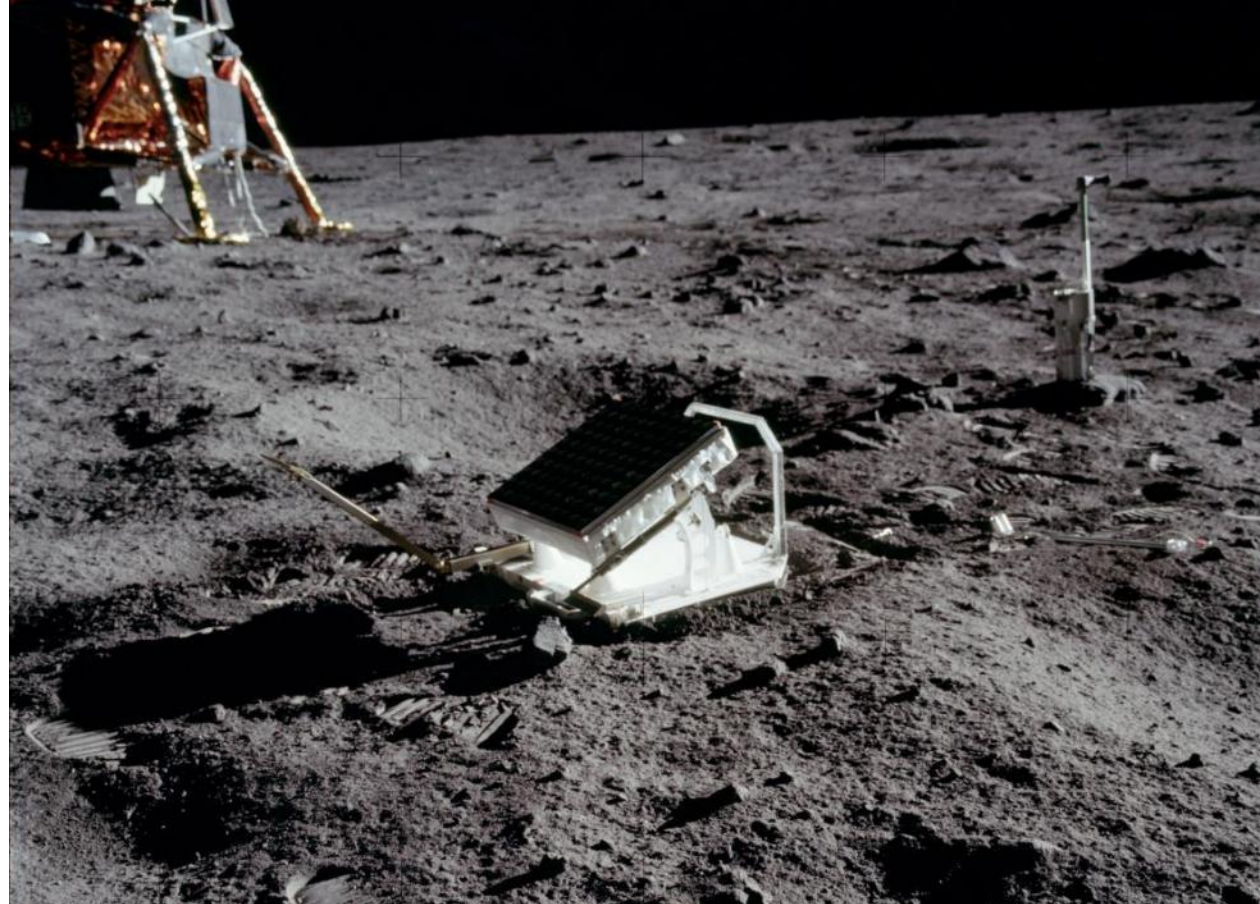
6 retroreflektorów na Księżycu:
Apollo 11, 14, 15, Luna 17, 21
oraz NGLR-1 (od marca 2025!)

Kolejne retroreflektory już od 2026 r.

Księżyc oddala się od Ziemi o 3.8 cm rocznie.



NGLR-1



Stacje laserowe



Graz, Austria



Borówiec, Polska

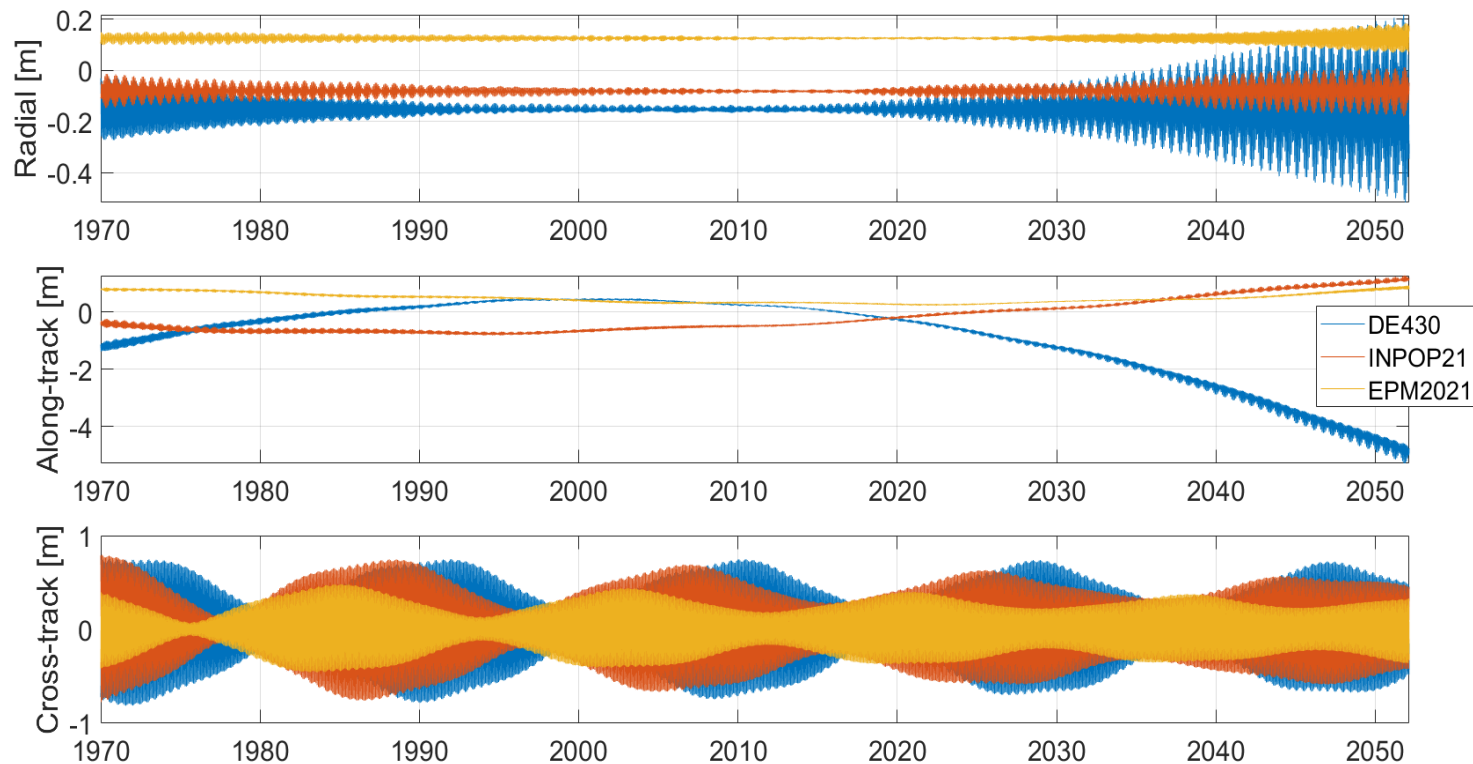


Matera, Włochy

Wetzell, Niemcy



Nowe rozwiązanie układu odniesienia dla Księżyca



Prace w ramach Międzynarodowej Asocjacji Geodezji (IAG) i Międzynarodowej Unii Astronomicznej (IAU).

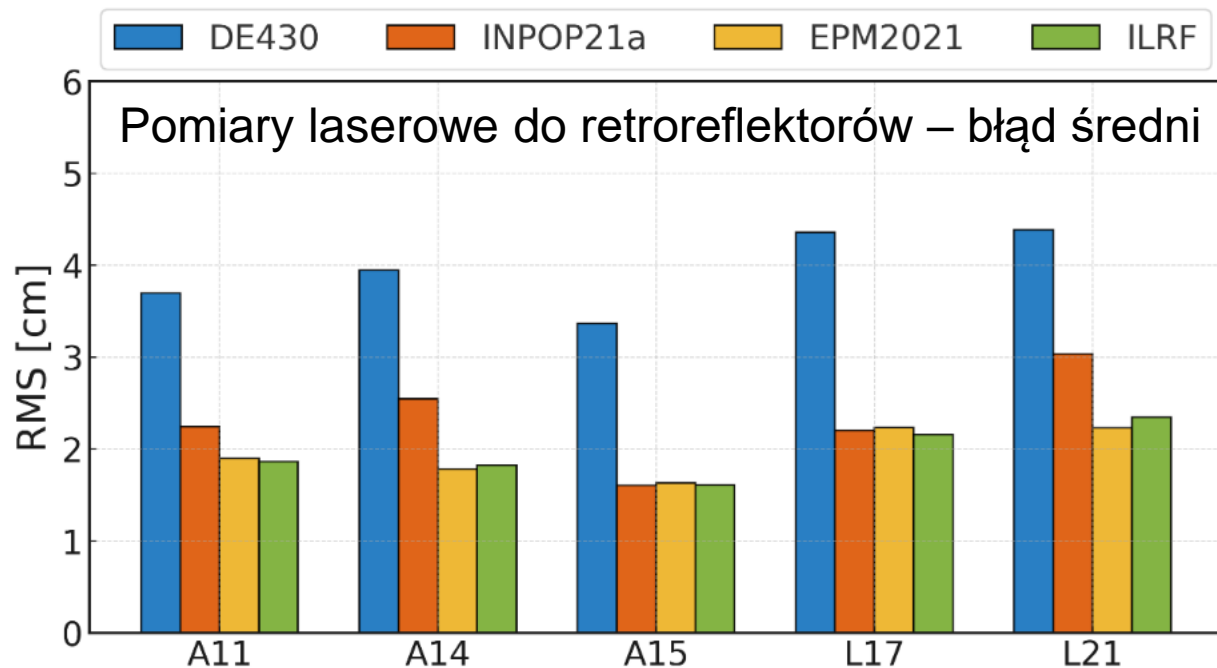
Rozwiązanie autorstwa Sośnica i in. (2026) polega na definicji i wyznaczeniu **początku układu** (środek masy Księżyca), **orientacji** (obrotu) i **skali** układu od 1970 do 2050 r. – Definicja systemu oraz realizacja praktyczna układu odniesienia na podstawie efemeryd.

Pozycję (i orientację) Księżyca można przewidywać z dokładnością kilkudziesięciu cm do 2050 roku!

Początek układu ILRF (środek masy Księżyca względem środka masy Ziemi) – rezydua względem poszczególnych efemeryd (NASA, Francja i Rosja)

Błąd średni [m]	2010-2030	Całość
Początek układu	0.153	0.305
Orientacja	0.086	0.082
Całość	0.176	0.316

Geodezyjny układ odniesienia - ILRF

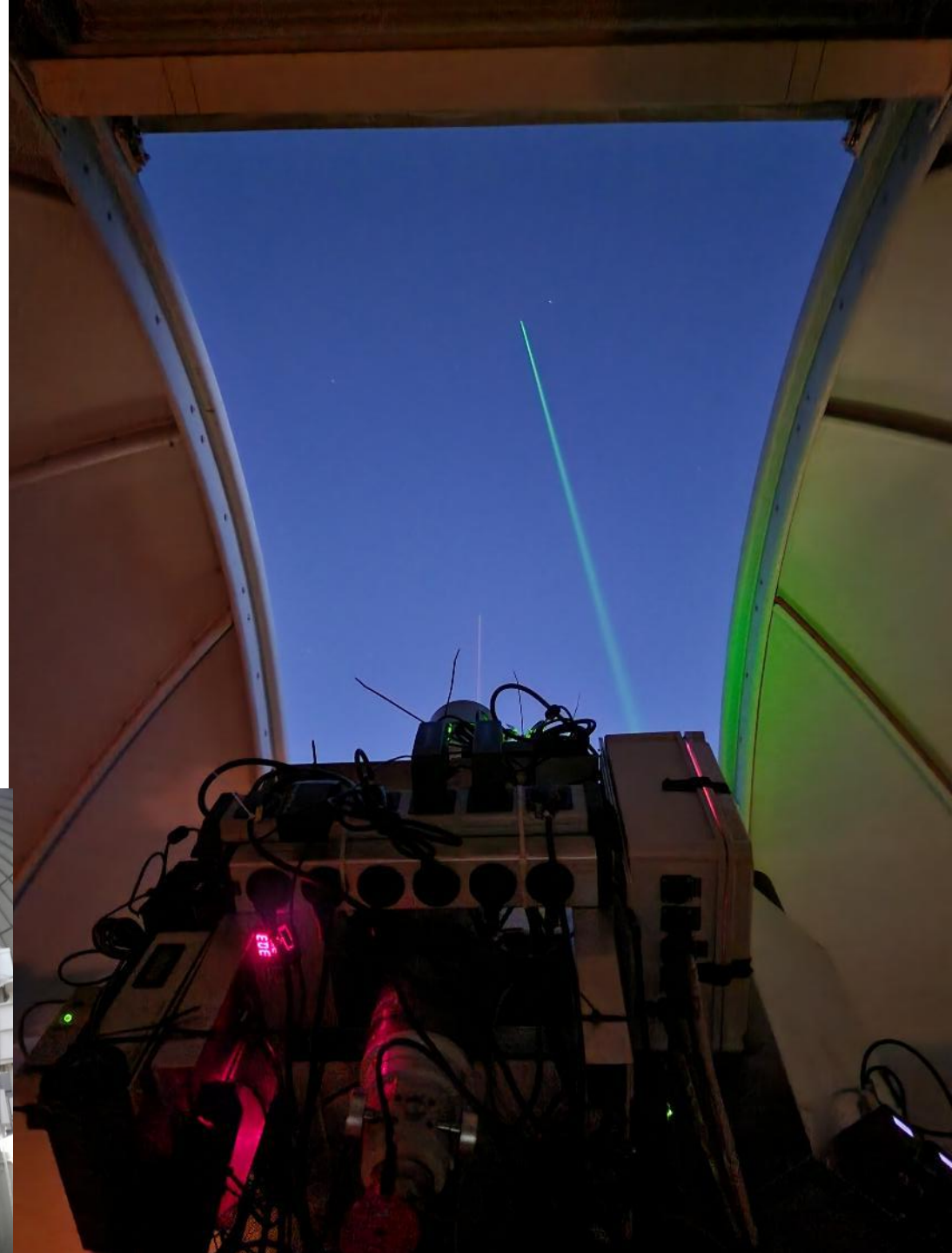


Niebieskie – NASA / JPL

Czerwone – Francja

Złote – Rosja

Zielone – ILRF: Sośnica i in. (2026)



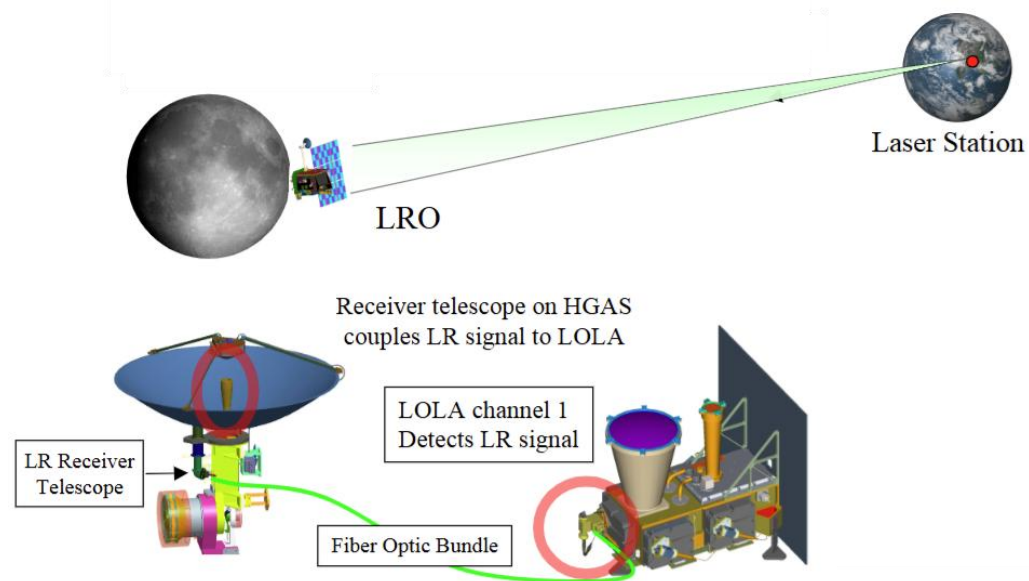
ONZ – ILRF standard międzynarodowy



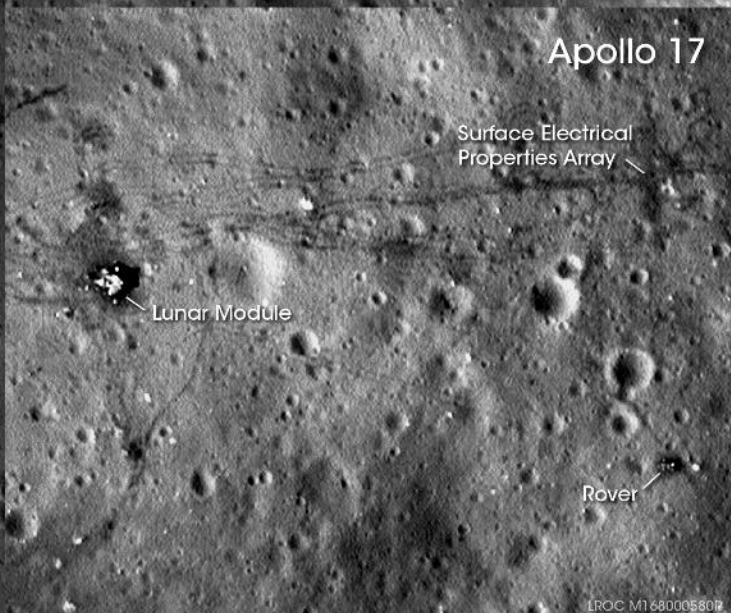
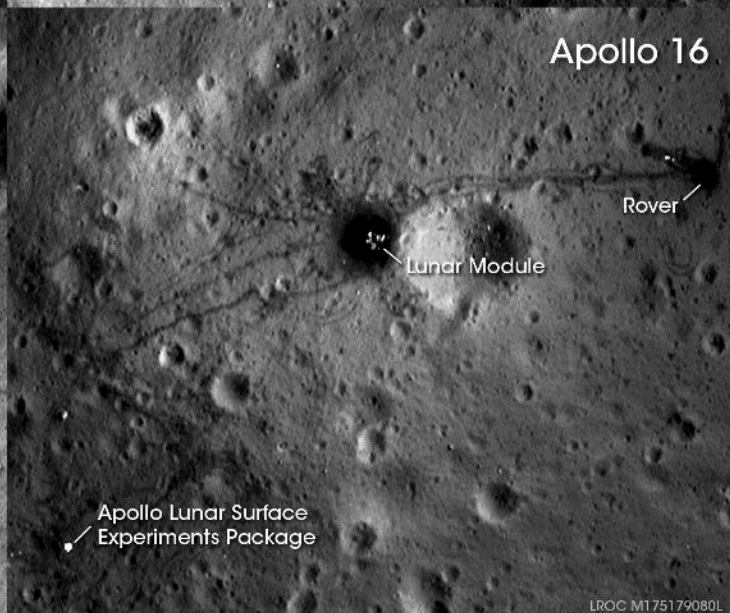
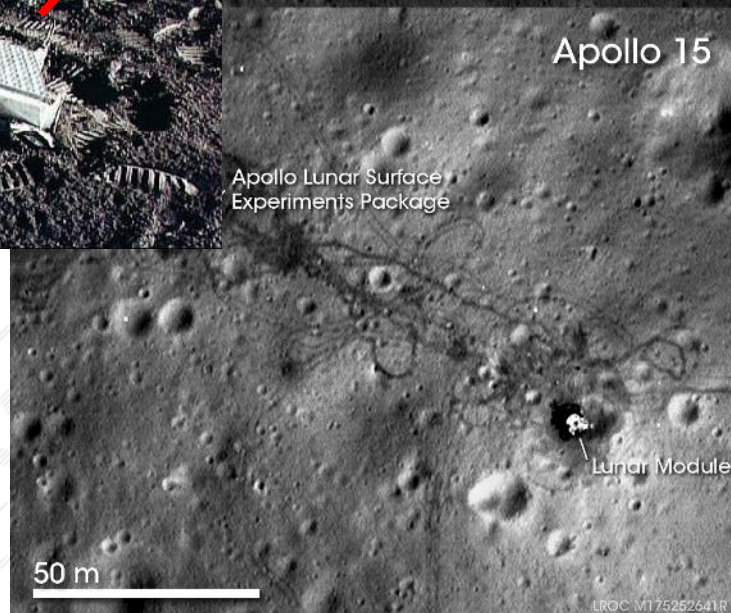
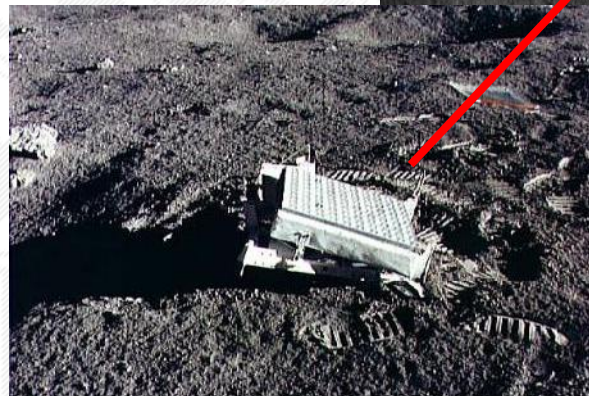
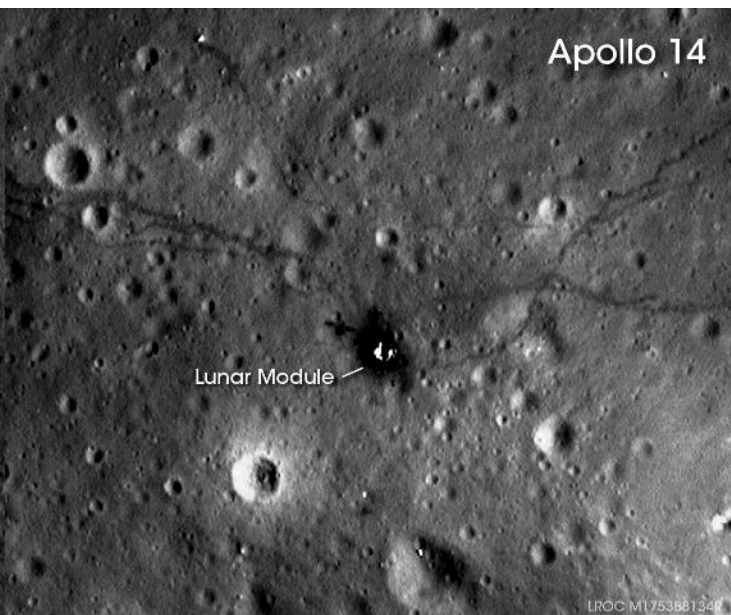
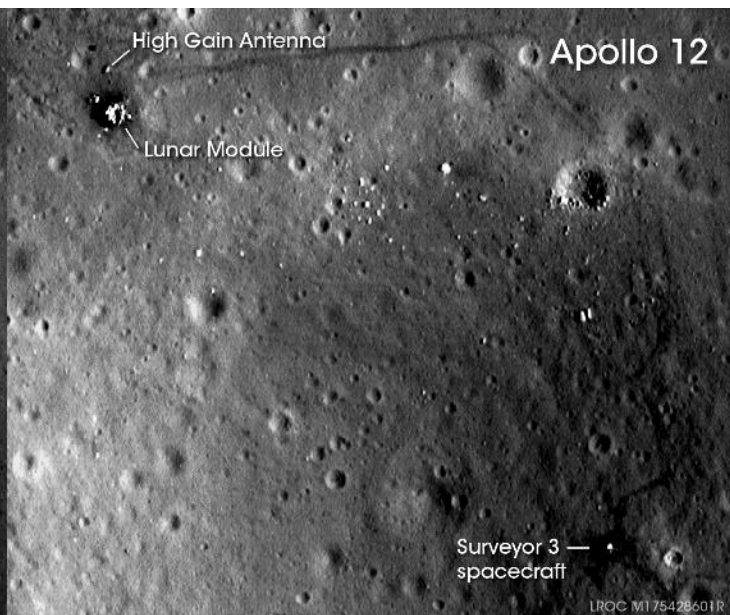
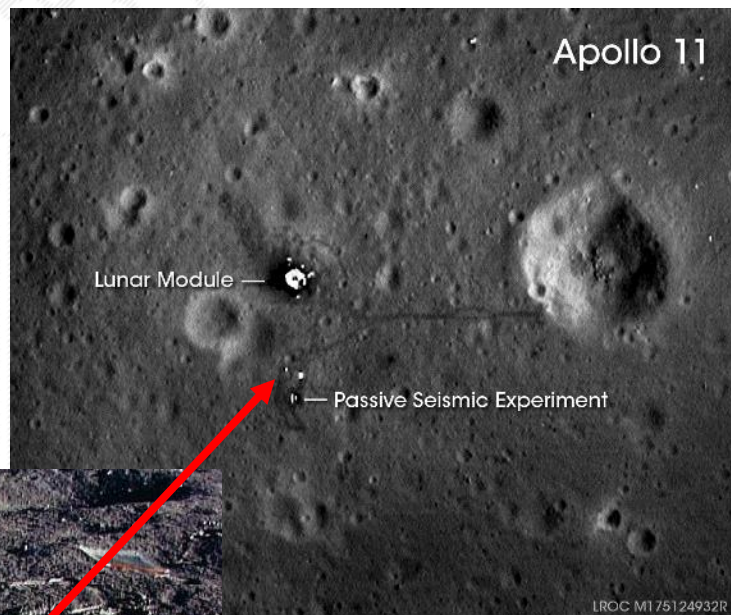
10-13.02.2026 r., siedziba ONZ w Wiedniu

Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)

- Okres: 2009-2026 r.
- Wykonanie szczegółowych **map topograficznych** powierzchni Księżyca.
- Obserwacja regionów biegunowych Księżyca, w tym obszarów wiecznie zacięzionych.
- Identyfikacja miejsc lądowań dla przyszłych załogowych i bezzałogowych misji księżycowych.
- Pomiar poziomu promieniowania kosmicznego na orbicie wokółksiężycowej.
- Identyfikacja złóż lodu wodnego i innych potencjalnych surowców możliwych do przyszłej eksploatacji.

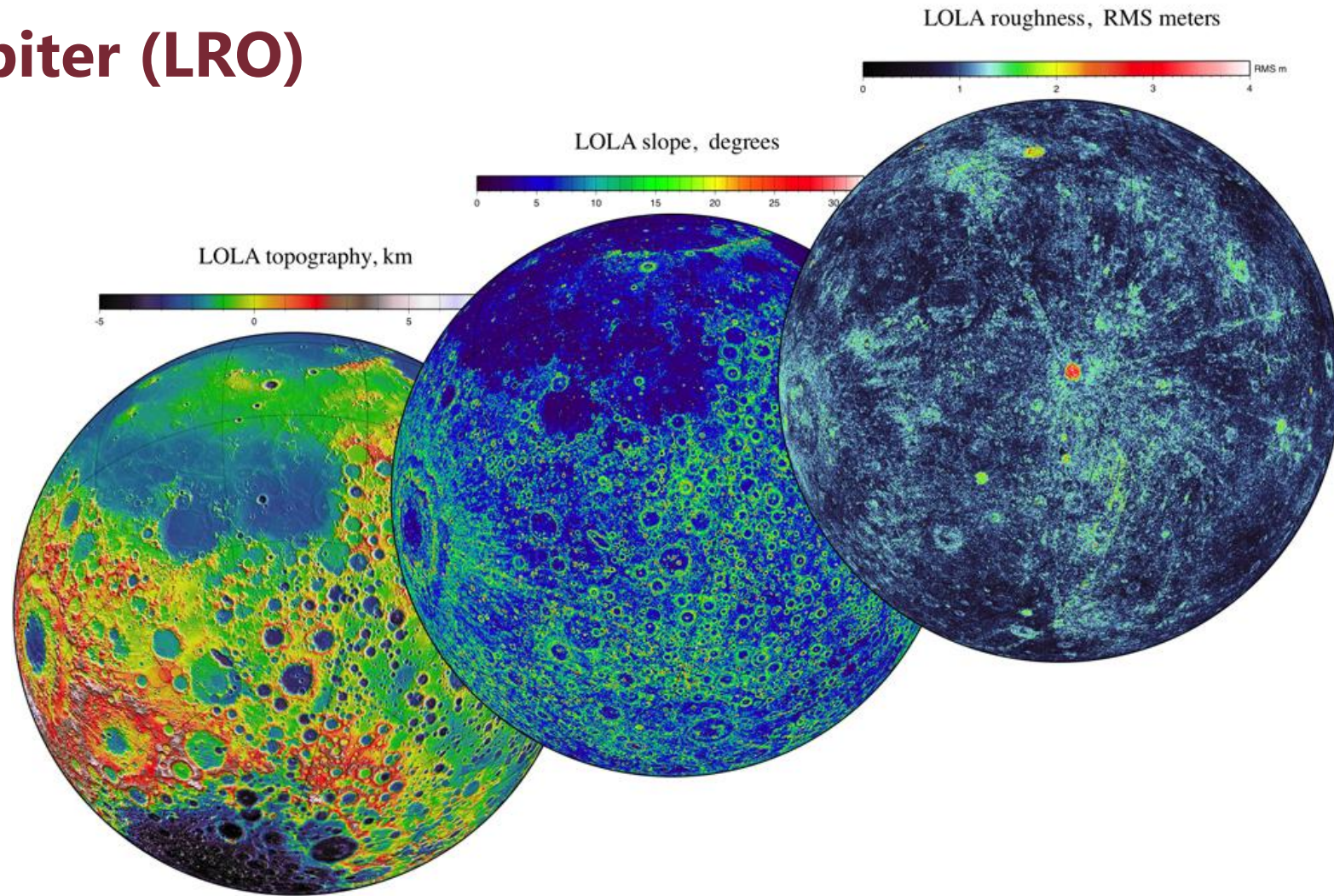


Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO) – ślady astronautów z Apollo



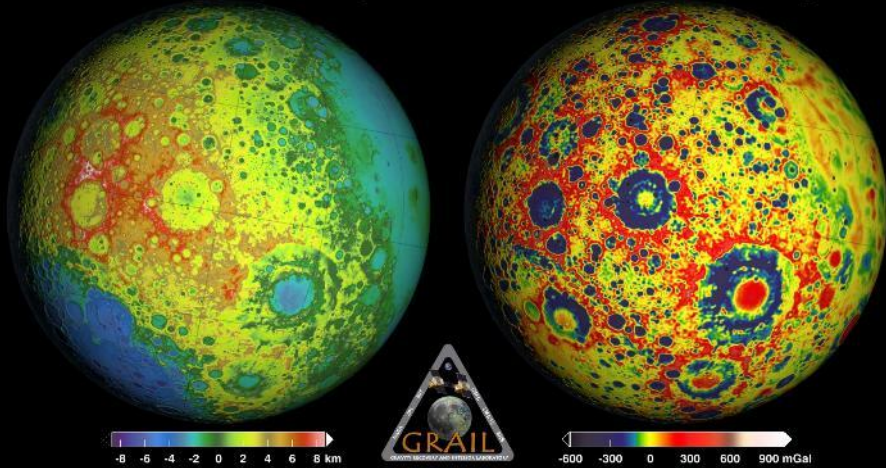
Lunar Reconnaissance Orbiter (LRO)

Modele wysokościowe powierzchni Księżyca, nachylenie stoków, szorstkość powierzchni, miejsca do lądowania, zasoby lodu.



LOLA Topography

Free-Air Gravity



Misja Máni na Księżyc

Koncepcja misji orbitalnej wokół Księżyca wybrana do fazy A Europejskiej Agencji Kosmicznej w ramach programu Terrae Novae – Small Lunar Missions. Projekt Mani, realizowany przez:

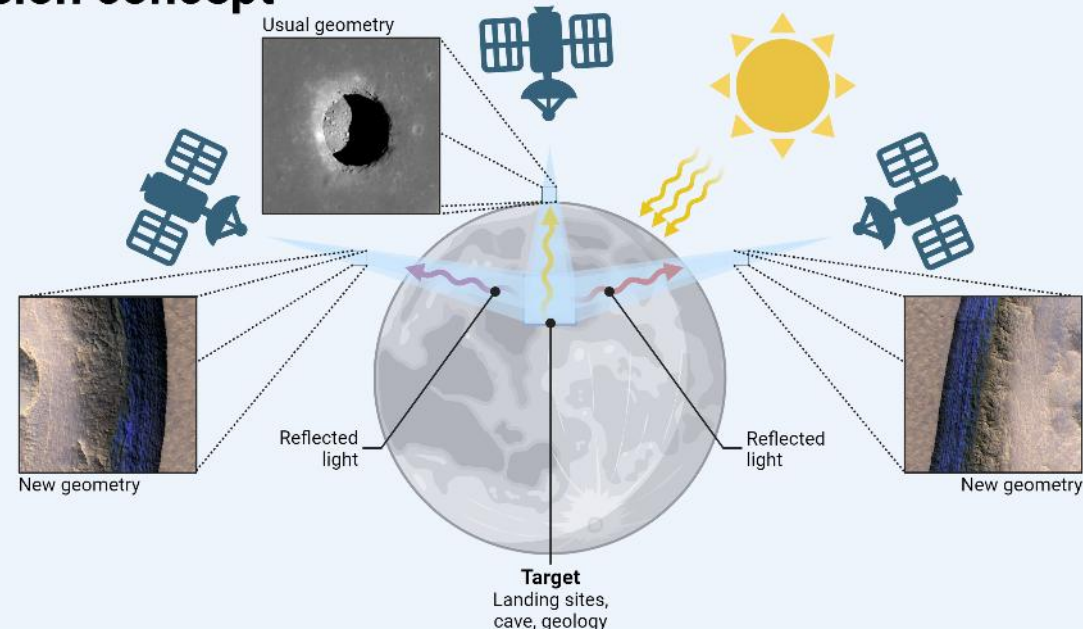
- Uniwersytet Kopenhaski
- Scanway (Wrocław)
- Instytut Nauk Geologicznych PAN (Wrocław)
- Space Inventor
- UPWr (Wrocław) – georeferencja.

Misja ma na celu fotogrametryczne mapowanie powierzchni Księżyca w celu poprawy dokładności danych topograficznych (pixel: 20-25 cm).

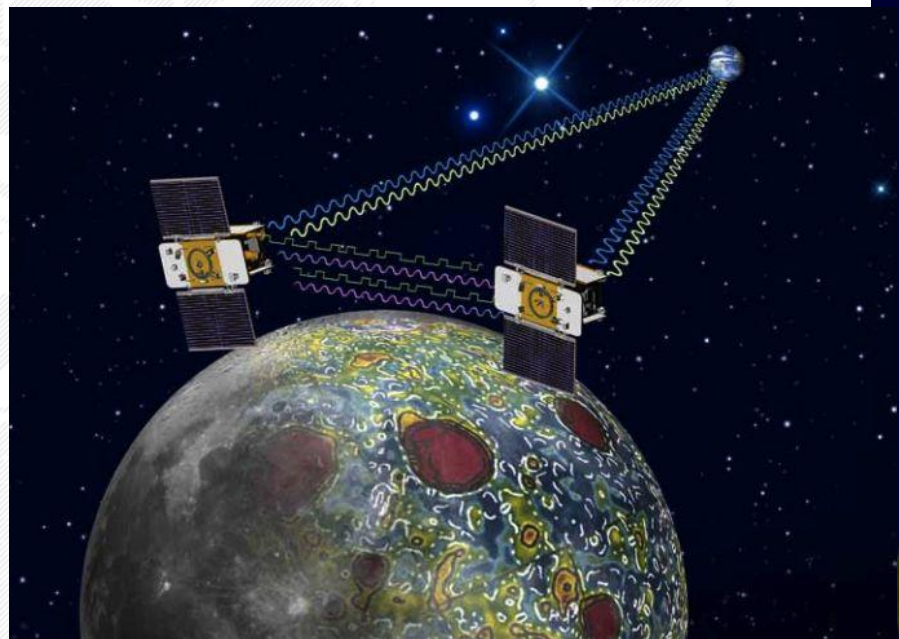
Finansowanie dalszego etapu misji zostało uzyskane w grudniu 2025 r.



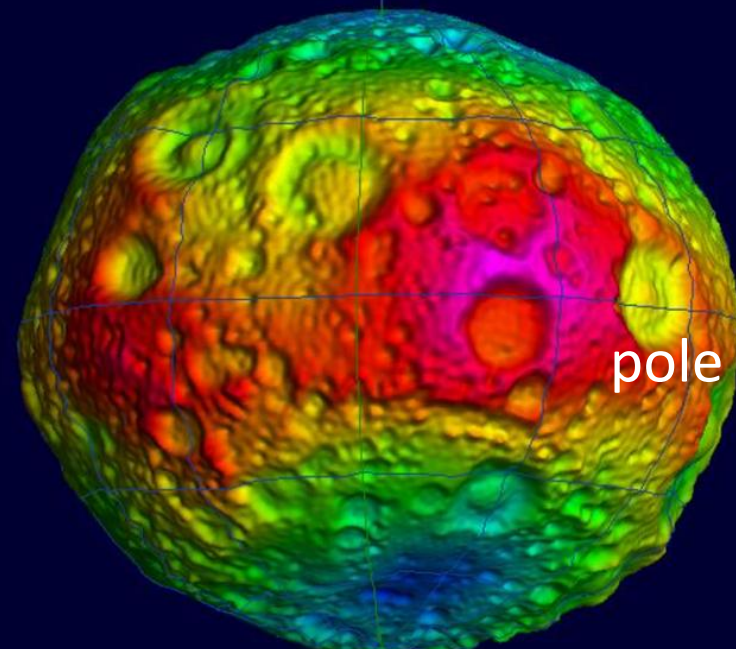
Mission concept



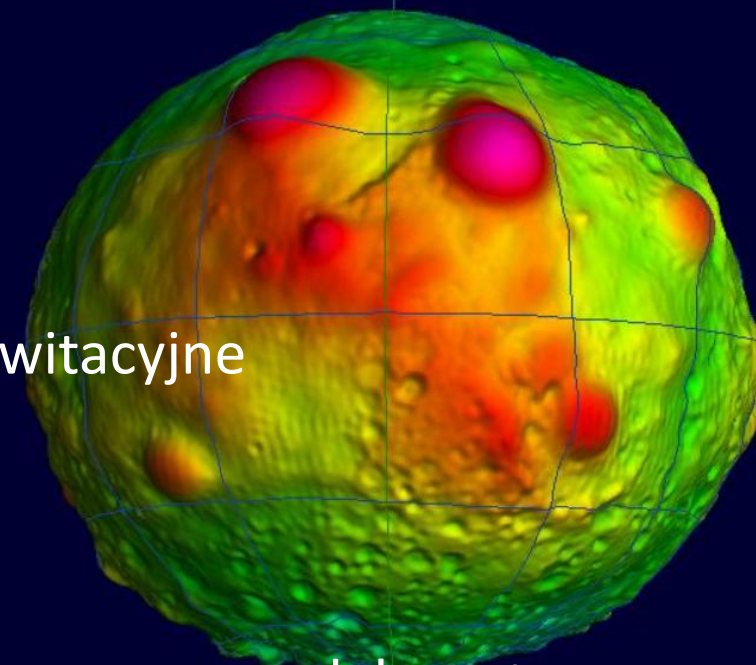
Model pola grawitacyjnego Księżyca



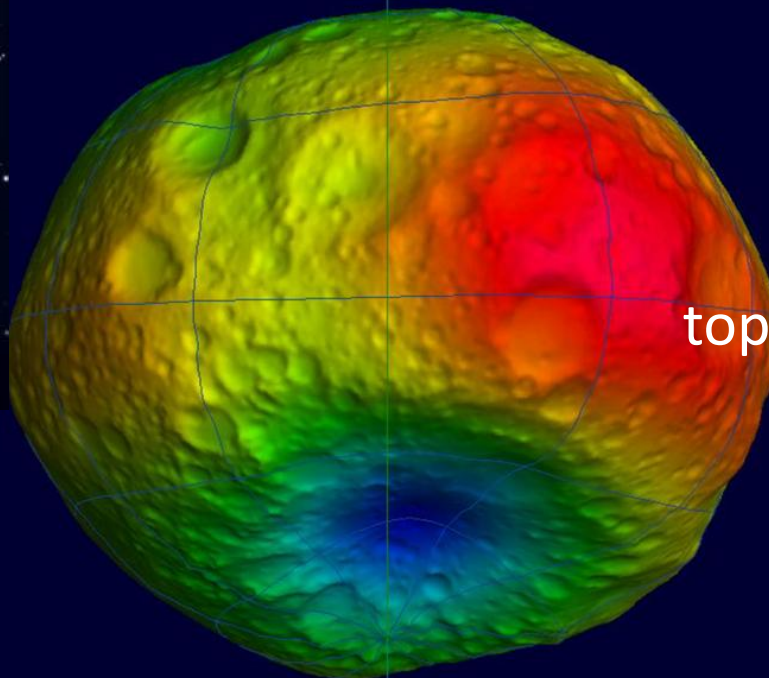
Misja GRAIL



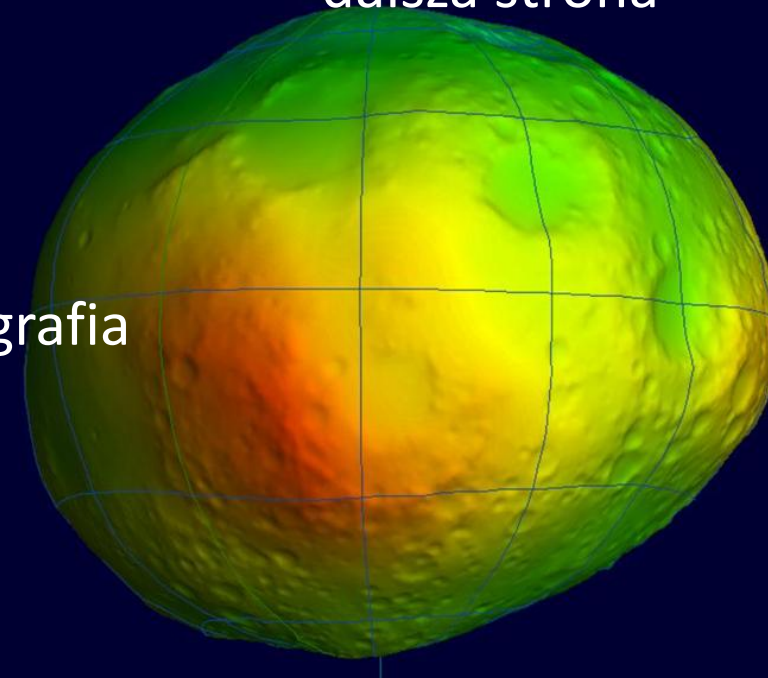
blizsza strona



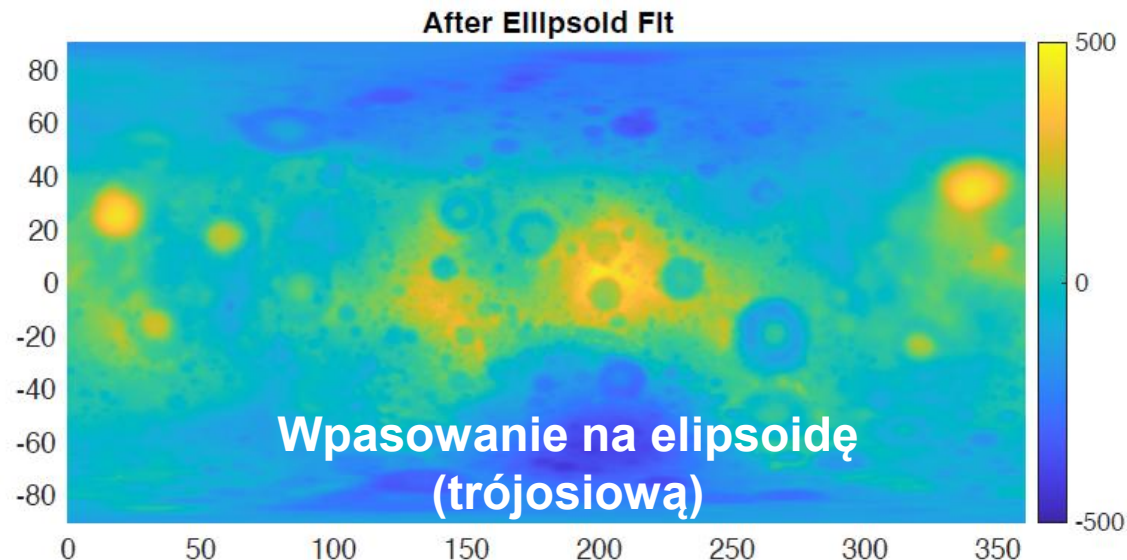
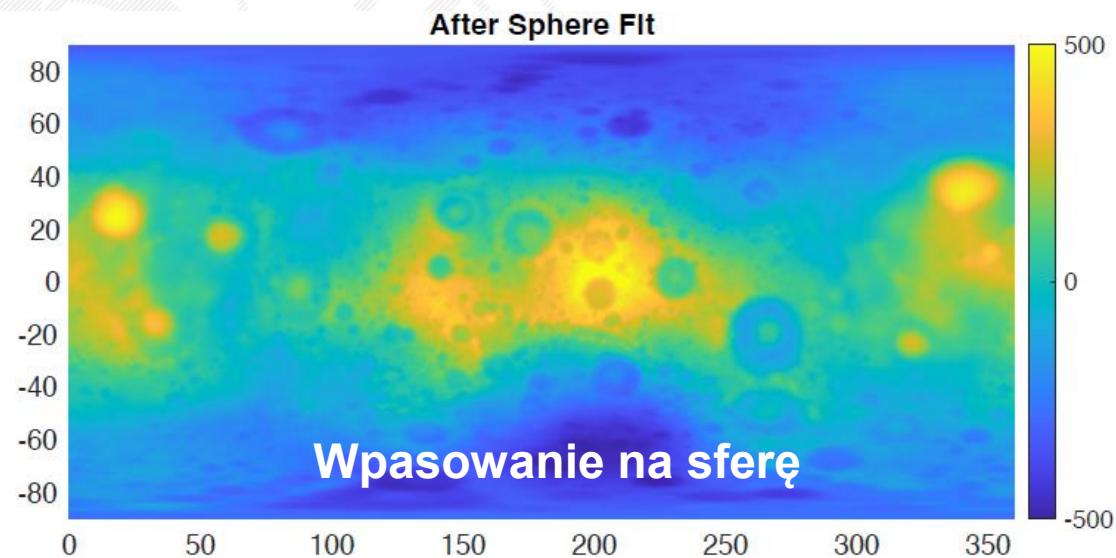
dalsza strona



topografia



Sfera, sferoida albo elipsoida?



Średnie błędy wpasowania:

- Sfera: 193 m / 2326 m RMS (grav. / topo)
- Sferoida dwuosiowa: 165 m / 2228 m RMS (grav / topo)
- Elipsoida trójosiowa: 161 m / 2226 m RMS (grav / topo)

Obecnie używany promień: $R = 1\,737\,400$ m

Minimalny błąd wpasowania: $R = 1\,737\,151$ m (grav/topo)

Dla sferoidy: $a = 1\,737\,898$ m, $b = 1\,735\,658$ m (topo)

$a = 1\,737\,222$ m, $b = 1\,737\,010$ m (grav)

Fienga, A., Sosnica, K., Brinkley, K. J., Defraigne, P., Garner, T. W., Gramling, C., ... & Ventura-Traveset, J. (2025). Report from the IAG JWG 1.1. 3 about Lunar reference frames. In IAU Symposium 401 (La Plata, 2025).

Moonlight – „GPS” na Księżycu

Motywacja:

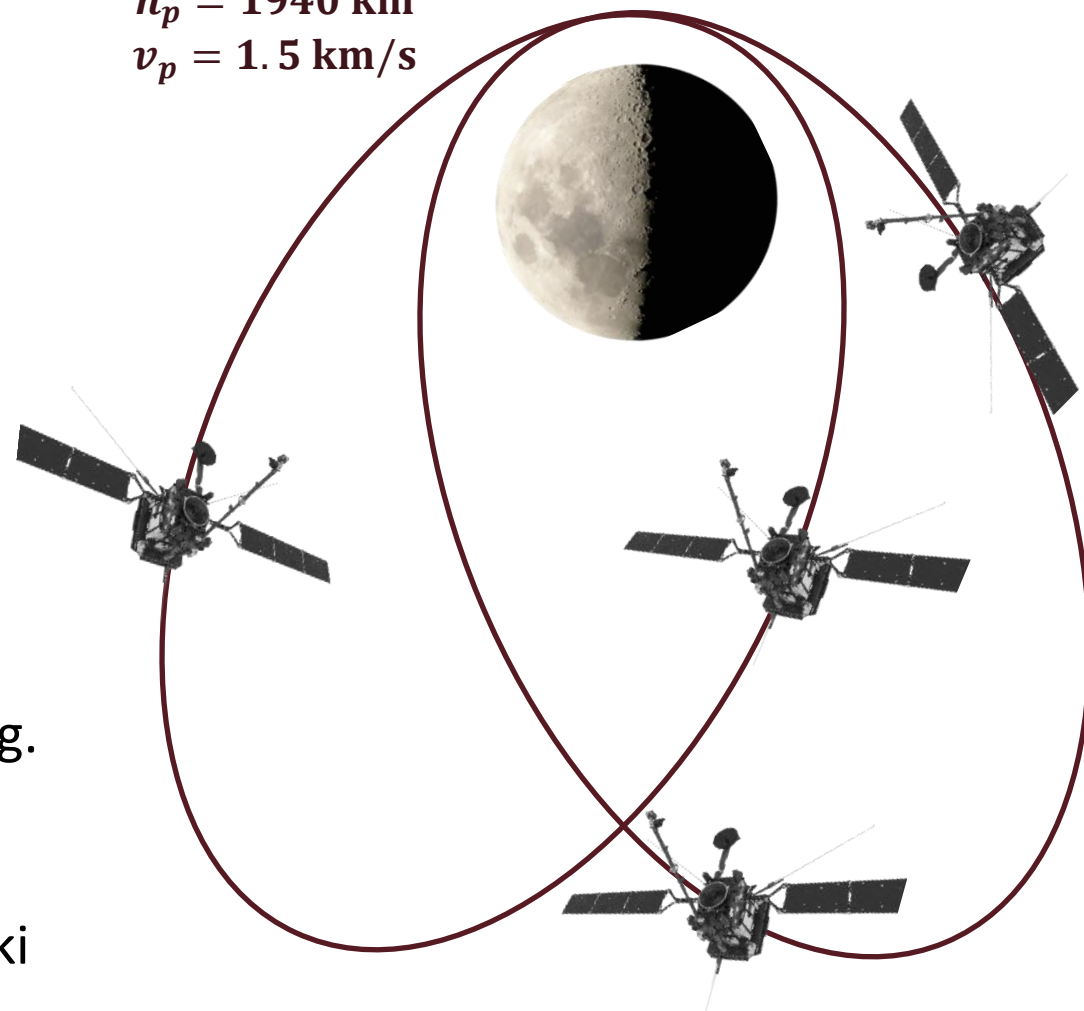
- System nawigacyjny dla Księżycyca
- 400 planowanych misji na Księżyc do 2030 r. (w 2022 r. było 250)
- Lądowanie i nawigacja na powierzchni muszą być bezpieczne (i dokładne)

Realizacja 2029-2031 r.:

- 4 orbitytery ESA do nawigacji + 2 do telekomunikacji
- Orbity mimośrodowe – pozycjonowanie w okolicy bieg. południowego
- Segment naziemny / kontrolny (stacje ESTRACK)
- Segment użytkownika – satelity niskie, lądowiki, łaziki i inne pojazdy
- NASA i JAXA budują własne systemy i współpracują w ramach LunaNet

$$h_p = 1940 \text{ km}$$

$$v_p = 1.5 \text{ km/s}$$



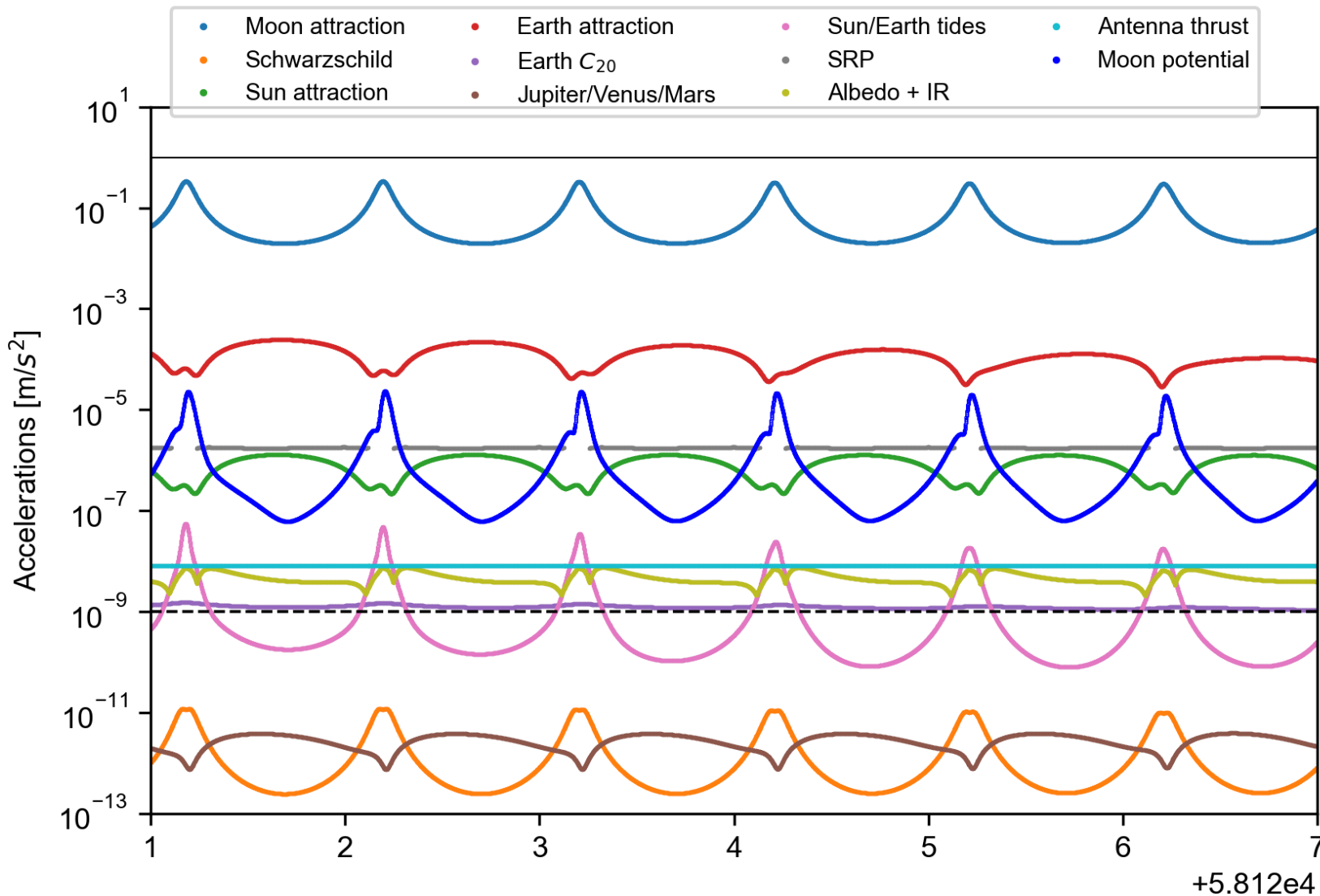
$$h_a = 14040 \text{ km}$$

$$v_a = 0.3 \text{ km/s}$$



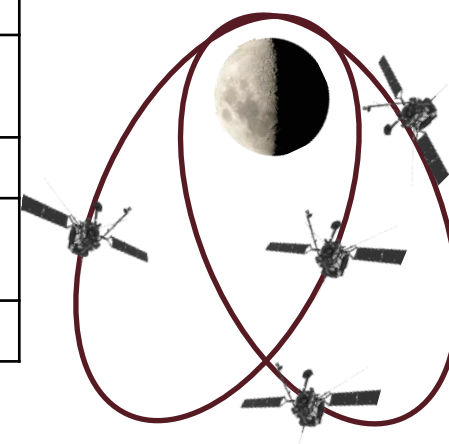
Symulator orbitalny – cyfrowy bliźniak na orbicie Księżycowej

- $i = 60^\circ$
- $e = 0.62$
- $a = 9,737.4$
- $T = 23.95h$



Grawitacyjne
Przyciąganie Księżyca GM_M
Przyciąganie Ziemi GM_E
Geoida Księżyca
Przyciąganie Słońca GM_S
Splaszczanie Ziemi C_{20}
Siły pływowe
Efekty relatywistyczne
Jowisz/Wenus/Mars

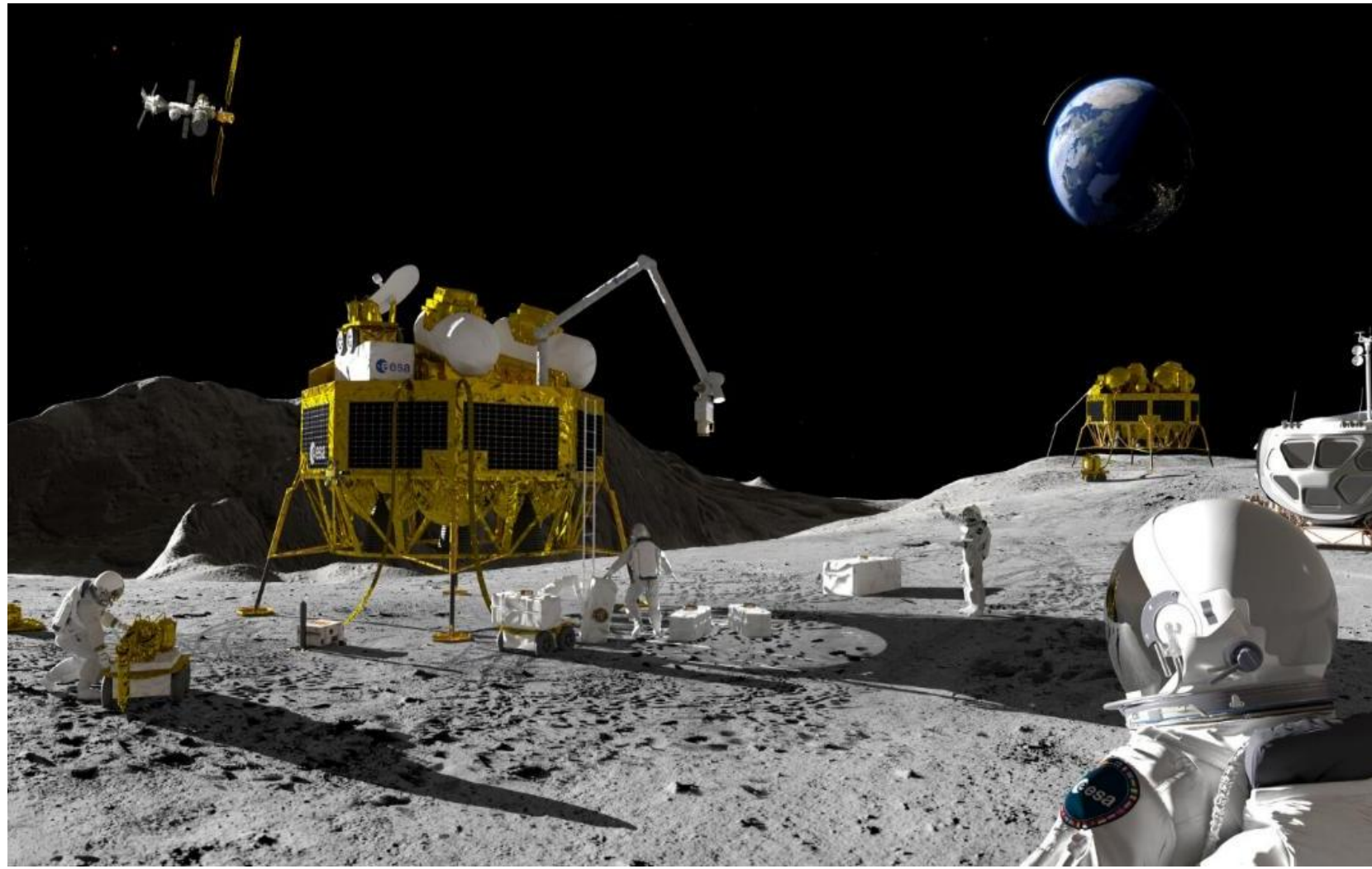
Niegrawitacyjne
Ciśnienie promieniowania słonecznego
Ciąg anteny nadawczej
Albedo (ciśnienie odbite)



NovaMoon – geodezyjna stacja referencyjna na Księżycu



- NovaMoon: propozycja ESA jako geodezyjna stacja badawcza na Księżycu z elektroniką, która może przetrwać 5 lat, dzięki ogrzewaniu.
- Zatwierdzona w listopadzie 2025 r. na Radzie Ministerialnej
- Współautorem koncepcji: zespół z IGiG UPWr
- 3 lądowniki (ESA+JAXA w 2029 r.; ESA+NASA od 2030 r.) – planowano pierwotnie jeden!



Mars – symulator lądownika, łazika oraz drona



Budowa symulatora pozycjonowania:

- Drona (pozycjonowanie kinematyczne)
- Łazika (NMT)
- Stacji (pozycjonowanie statyczne)
- Lądownika (wyposażonego w altimetr do pomiarów wysokości)

Na podstawie pomiarów odległości (jednokierunkowej), Dopplera, odległości dwukierunkowej (i zmian w czasie).

System nawigacyjny na Marsie będzie się składał z 6 satelitów na średnich orbitach i 1 niskiego.

Realizacja ~2034. Projekt MAPS.



ATLAS, ASTRON, MAPS, NovaMoon – partnerzy akademicki i biznesowi

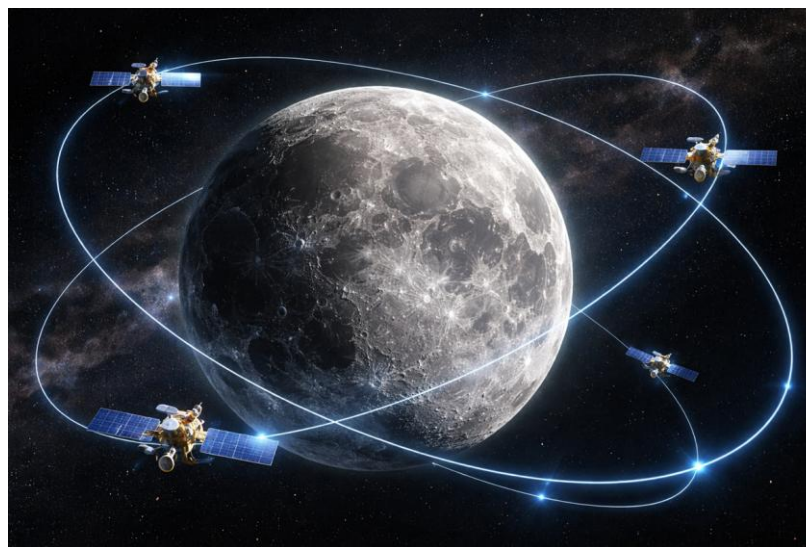
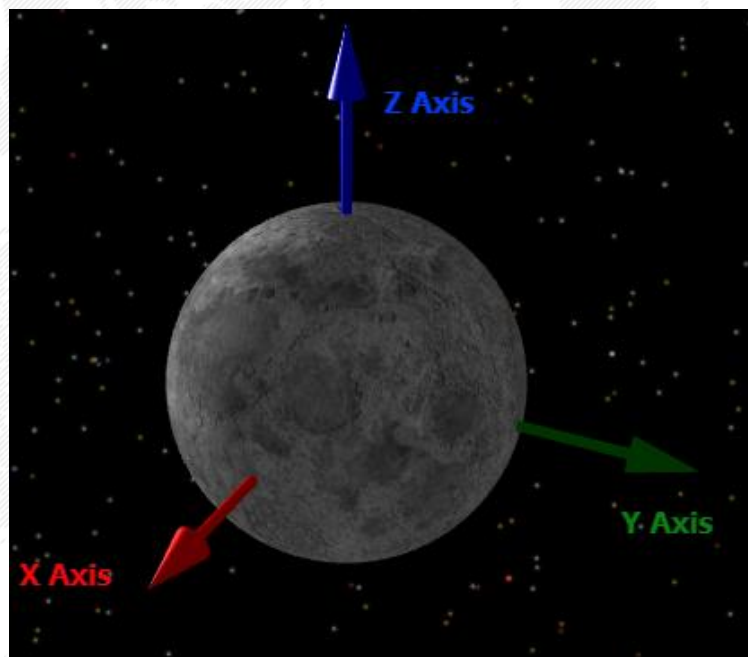


UNIwersytet
PRZYRODniczy
WE WROCLAWIU



Posumowanie działań w ramach ESA

1. Opracowanie pierwszego **Międzynarodowego Księżycowego Układu Odniesienia** (środek masy Księżyca i orientacja do 2052 r.) na podstawie efemeryd – Sośnica i in. (2026)



2. Opracowanie **symulatora orbitera księżycowego** (i marsjańskiego)

3. Opracowanie koncepcji geodezyjnej **stacji referencyjnej na Księżycu**



4. Opracowanie symulatora łazika, drona (tylko Mars), stacji i lądownika.



Moonlight Programme

Connectivity and Secure Communications



WROCLAW UNIVERSITY
OF ENVIRONMENTAL
AND LIFE SCIENCES

Dziękuję za uwagę

Krzysztof Sońnica

Instytut Geodezji i Geoinformatyki, UPWr

krzysztof.sosnica@upwr.edu.pl