

# Merske tehnike vesoljske geodezije

---

- "Space Geodesy techniques", "die Geodätischen Raumverfahren", so danes osnova za vzpostavitev nebesnih in terestričnih referenčnih sestavov:
- VLBI: International VLBI Service (IVS),
- SLR/LLR: International Laser Ranging Service (ILRS),
- GNSS: International GNSS Service (IGS),
- DORIS: International DORIS Service (IDS), v pripravi

Vse omenjene službe skrbijo za koordinacijo in konsistenco rezultatov meritev. Vsi rezultati so na razpolago službi IERS.

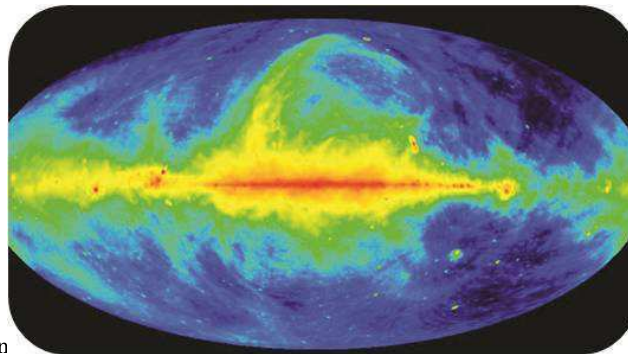
## VLBI

---

- VLBI - **Very Long Baseline Interferometry** - Interferometrija na dolgih bazah.
- VLBI sodi med tehnike t.i. **radio astronomije**.
  - Del astronomije o proučevanju oddaljenih objektov v vesolju na osnovi radio valov, ki ji ti objekti oddajajo.
  - Radio valovi prodirajo skozi plin in prah v vesolju, kot tudi skozi atmosfero z zelo majhno distorzijo.
  - Omogočena pridobitev veliko jasnejših slik, kot je to mogoče z optičnimi teleskopi, saj so motnje v atmosferi zelo majhne v območju radijskih valovnih dolžin.
  - Radio teleskopi so danes najbolj razširjeni instrumenti za opazovanje vseh tipov objektov v vesolju.

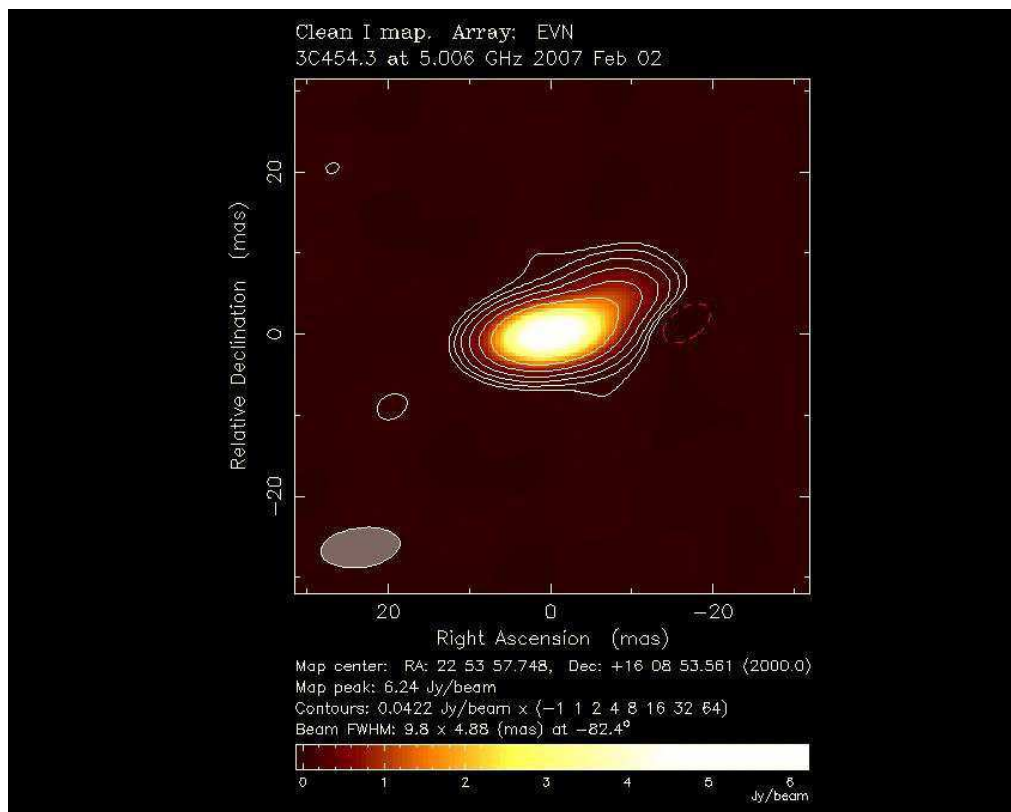
# VLBI in kvazarji

- Izvengalaktični izvori radijskega valovanja (kvazarji "kvazi-zvezdni") oddajajo valove v cm oz. dm območju, katere zabeležijo velike antene radijskih teleskopov (radio astronomija).
- Beseda **kvazar** izhaja iz angleške besede quasar in pomeni: **quasi-stellar radio source**.
- So najbolj oddaljeni objekti v znanem vesolju, ki sevajo mnogo več energije kot običajne galaksije.
- So astronomski objekti, ki navidezno izgledajo kot navadne zvezde z zelo izrazitim premikom proti rdečemu delu spektra - rdeči premik.

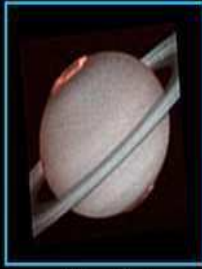


radijska slika Rimske ceste

# "Slika" kvazarja



# Radijske "slike" znanih neb. teles



Ultraviolet  
J. Trauger JPL/NASA



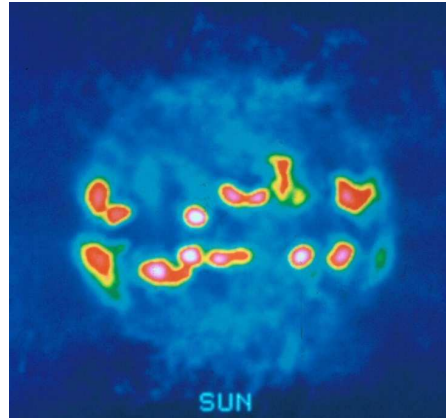
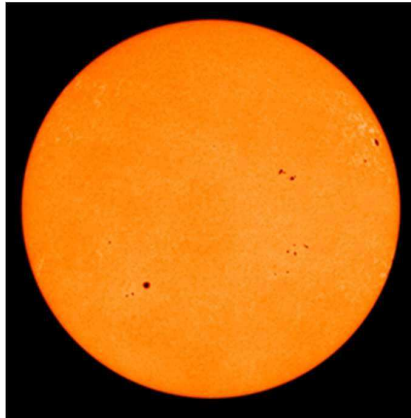
Visible  
NASA/JPL/Voyager



Infrared  
E. Karkoschka UA/HST/NASA



Radio  
NRAO



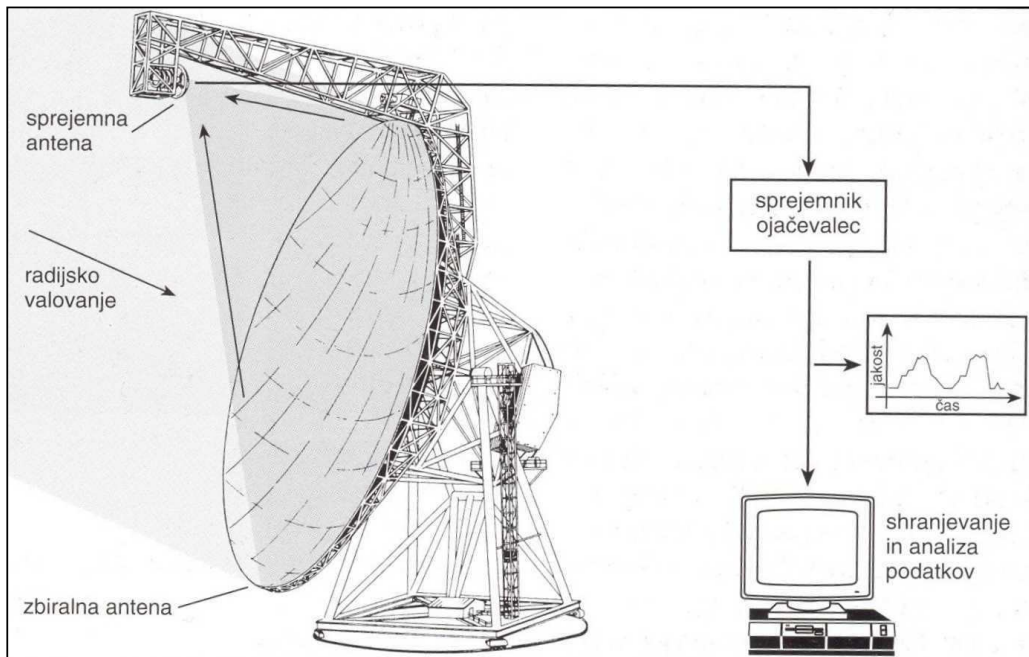
## VLBI

- Izvengalaktični izvori radijskega valovanja (kvazarji "kvazi-zvezdni") oddajajo valove v cm oz. dm območju, katere zabeležijo velike antene radijskih teleskopov (radio astronomija).



# VLBI teleskop

- Uporabni radio teleskopi morajo imeti velik premer, ker je intenziteta radijskih valov, v primerjavi z radiacijo v vidnem spektru majhna.



M. Kuhar - Referenčni sistemi v geodeziji

7

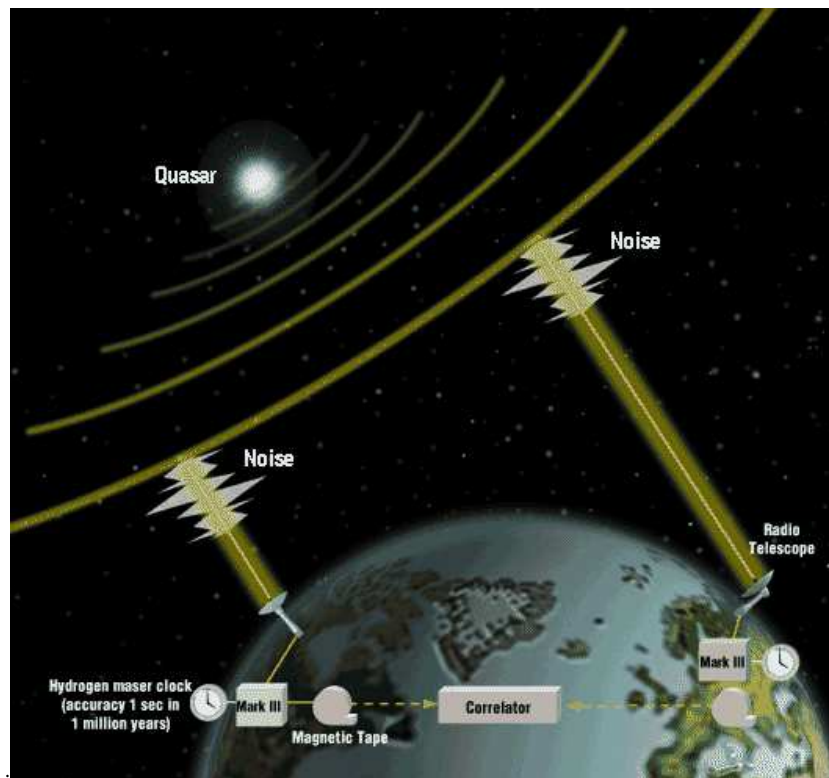
## Delovanje radio teleskopa

- Kako delujejo radio teleskopi?
  - Sprejemajo naravno sevanje radijskega valovanja astronomskih objektov v območju valov od okoli 10m (30MHz) do 1mm (300GHz).
  - Efektivno uporabni so valovi dolžin od 1 do 20cm.
  - Radio teleskopi zelo različnih oblik vendar v osnovi vsi vsebujejo 2 osnovni komponenti: veliko radijsko anteno ter občutljiv radiometer oz. radio sprejemnik.
  - Kvaliteta odvisna od velikosti in učinkovitosti antene in občutljivosti radio sprejemnika.
  - Problemi:
    - Motenje šibkih signalov z umetno ustvarjenimi valovi na Zemlji.
    - Sledenje objektov na nebu.
    - Tehnološko zahtevna izgradnja anten.
    - Zelo draga in zato težko dostopna oprema.

M. Kuhar - Referenčni sistemi v geodeziji

8

# VLBI princip merjenja



M. Kuhar - Referenčni sistemi v geodeziji

9

# VLBI princip merjenja

- ❑ Princip meritev:
- ❑ V 24-urni opazovalni seriji 2-6 anten opazuje isti radijski izvor. Časovni trenutki opazovanj se beležijo na magnetni trak, vsaka točka opremljena z atomskimi urami (potrebna stabilnost frekvence reda velikosti  $10^{-14}$  ali bolje.)
- ❑ Opazovanja z večih anten se analizirajo v korelatorju z metodo interference, kjer se določa časovna in fazna zakasnitev prispelega valovanja v posamezni anteni.
- ❑ Iz meritev je možno določiti bazni vektor med opazovališči.
- ❑ Natančnost določitve koordinat nekaj mm oz. 1mm/leto. Natančnost določitve Zemljine rotacije  $10\mu\text{s}$  oz. 0,2 mas za gibanje Zemljinih polov.

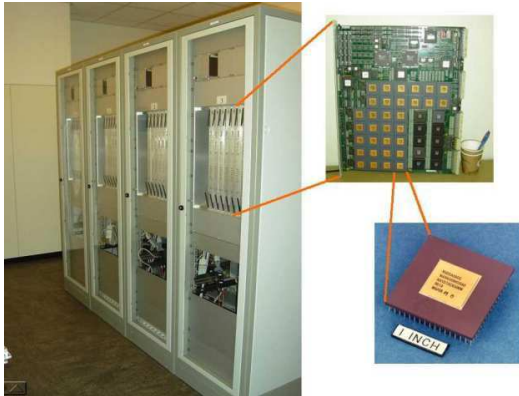
M. Kuhar - Referenčni sistemi v geodeziji

10



# VLBI - obdelava meritev

- Korelator – sistem tisoč procesorjev zmožnih paralelne obdelave 16 milijard operacij v sekundi.



korelator



magnetni trakovi z opazovanji

# SLR in LLR

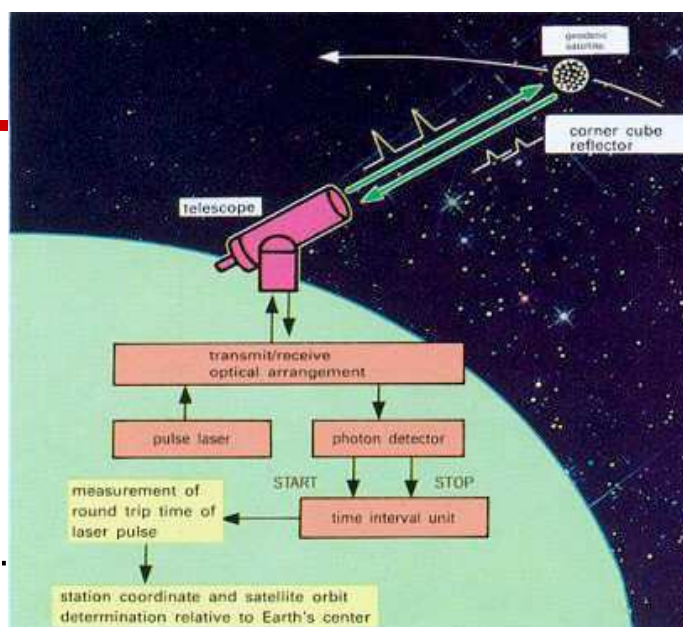
- SLR - Satellite Laser Ranging in LLR - Lunar Laser Ranging.
- Laserji v observatorijih oddajajo kratke impulze, ki se odbijajo od reflektorjev na satelitu oz. na Luni.



# SLR

## Uporaba:

- Določitev težišča Zemlje (najbolj natančna metoda).
- Z merjenjem geocentričnih položajev satelitov omogoča zaznavanje majhnih sprememb v gravitacijskem polju Zemlje
- Spremembe nivoja morja.
- Spremembe volumna ledu na polih.
- Premike zemeljskih mas.
- Vplive sončne energije in letnih časov na Zemeljsko atmosfero.
- Kalibracija radarskih altimetrov.
- Zagotavljanje podatkov za GPS, PRARE in DORIS.
- Potrditev splošne teorije relativnosti.



# SLR

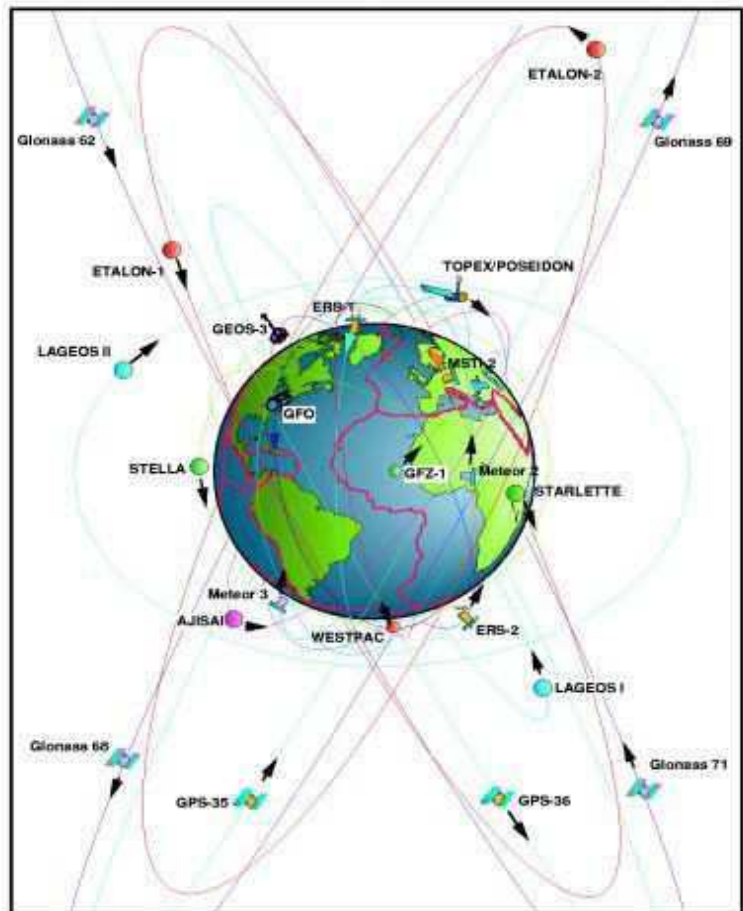
- 43 SLR postaj v 30 državah, od tega je 33 postaj postavila NASA.
- Več kot 40 satelitov je možno zasledovati.
- Natančnost meritev  $\sim 1\text{cm}$ .



## Izbrane SLR postaje po svetu

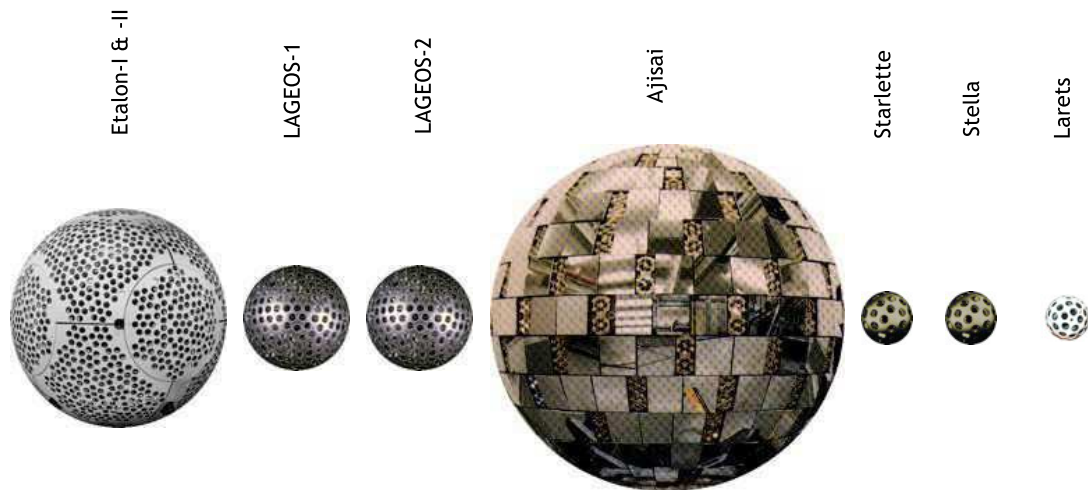


## Trenutna razporeditev satelitov, ki omogočajo meritve SLR





# Primeri SLR satelitov (geodetski)



|                      | Etalon-I & -II | LAGEOS-1 | LAGEOS-2 | Ajisai | Starlette | Stella | Larets |
|----------------------|----------------|----------|----------|--------|-----------|--------|--------|
| Inklinacija          | 64,8°          | 109,8°   | 52,6°    | 50°    | 50°       | 98,6°  | 98,2°  |
| višina perigeja (km) | 10 120         | 5 860    | 5 620    | 1 490  | 810       | 800    | 691    |
| premer(cm)           | 129.4          | 60       | 60       | 215    | 24        | 24     | 20     |
| masa (kg)            | 1415           | 407      | 405,4    | 685    | 47,3      | 47,3   | 23,3   |

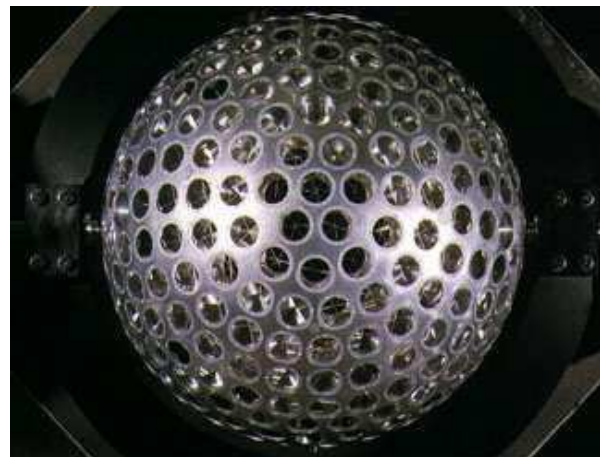
M. Kuhar - Referenčni sistemi v geodeziji

17

# SLR sateliti



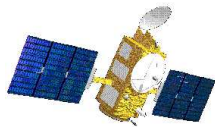
LARETS



LAGEOS 2

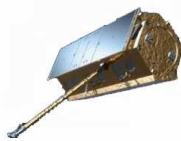
# Izbor satelitov, ki dodatno imajo zrcala

## Jason-2



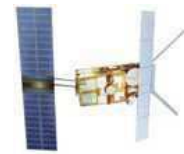
|                  |       |
|------------------|-------|
| Inclina'on       | 66°   |
| Perigee ht. (km) | 1,336 |
| Mass (kg)        | 300   |

## Terra-SAR-X/ TanDEM-X



|                  |       |
|------------------|-------|
| Inclina'on       | 97,4° |
| Perigee ht. (km) | 514   |
| Mass (kg)        | 1 230 |

## ERS-2



|                  |       |
|------------------|-------|
| Inclina'on       | 98,5° |
| Perigee ht. (km) | 785   |
| Mass (kg)        | 2,516 |

## GOCE



|                  |       |
|------------------|-------|
| Inclination      | 96,7° |
| Perigee ht. (km) | 295   |
| Mass (kg)        | 1050  |

## GRACE



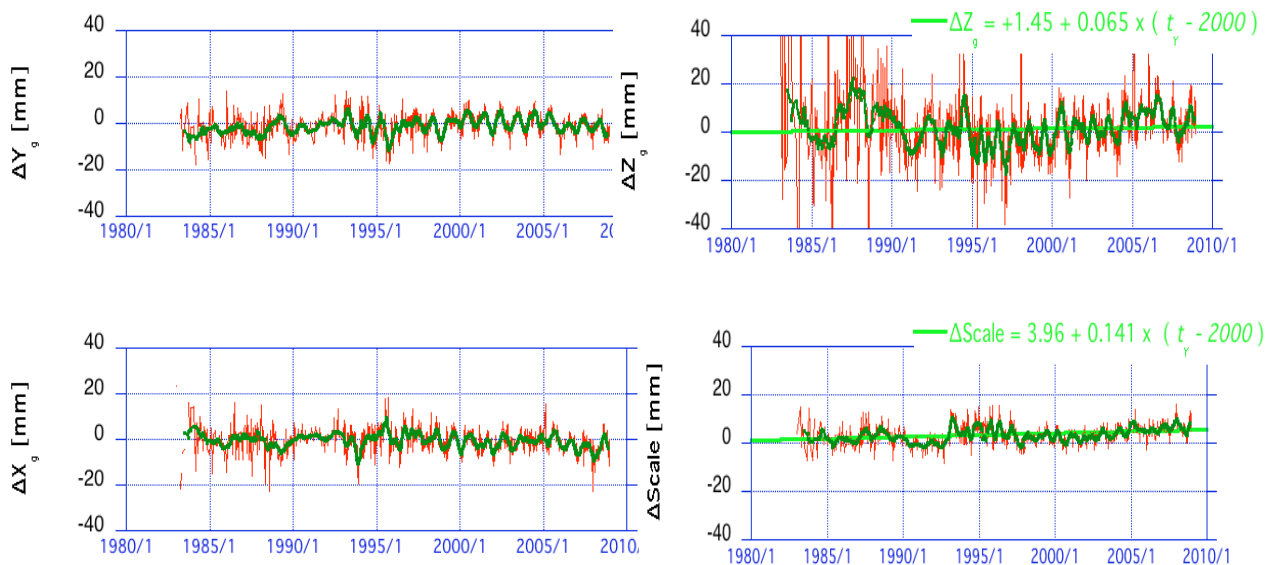
|                  |          |
|------------------|----------|
| Inclination      | 89°      |
| Perigee ht. (km) | 450      |
| Mass (kg)        | 432/sat. |

## Envisat

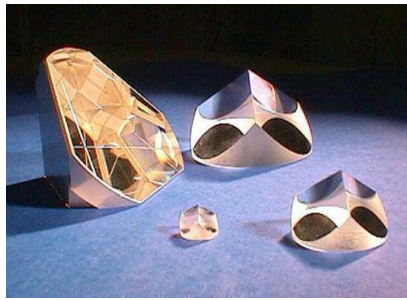


|                  |       |
|------------------|-------|
| Inclination      | 98,5° |
| Perigee ht. (km) | 796   |
| Mass (kg)        | 8 211 |

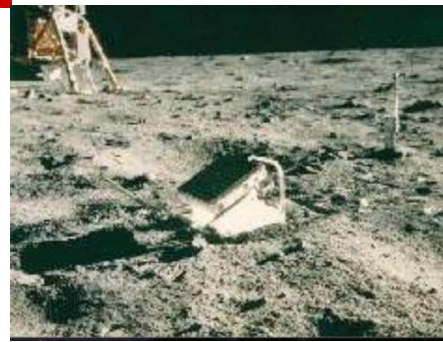
## Določitev izhodišča in merila sestava ITRF2008 s tehniko SLR



# Reflektorji na Luni



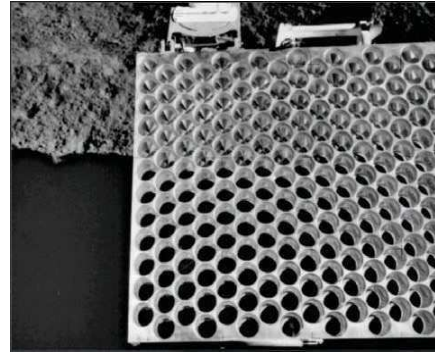
zrcala



Apolo 11A regfektorji



Apolo 14 reflektorji



Apolo 11A reflektorji

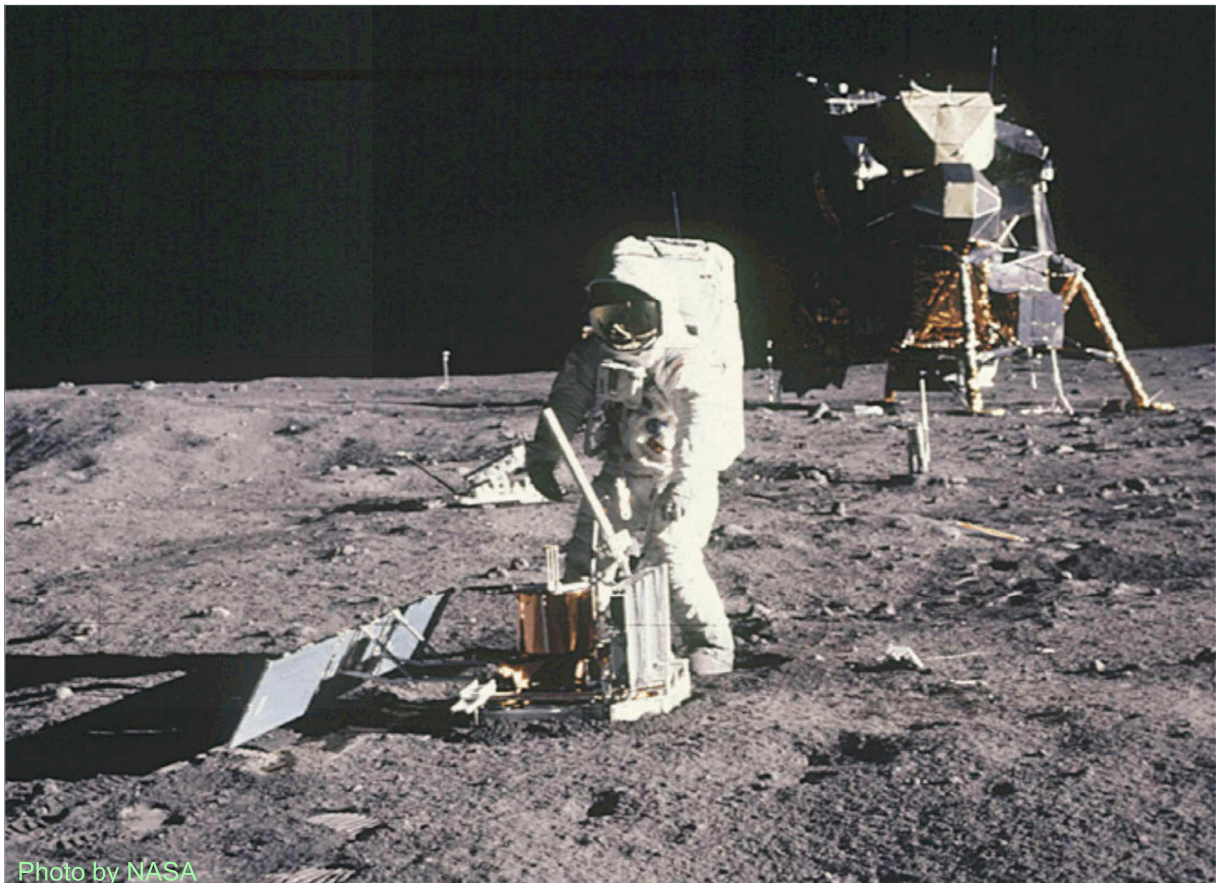
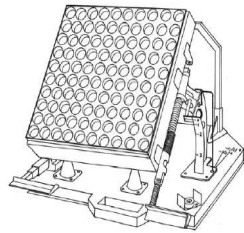
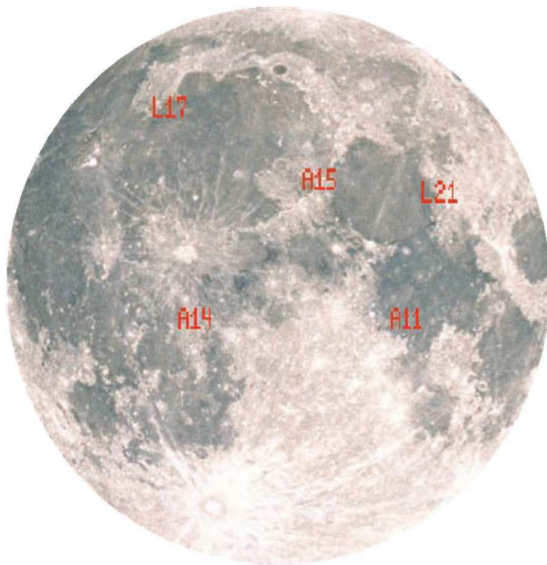


Photo by NASA



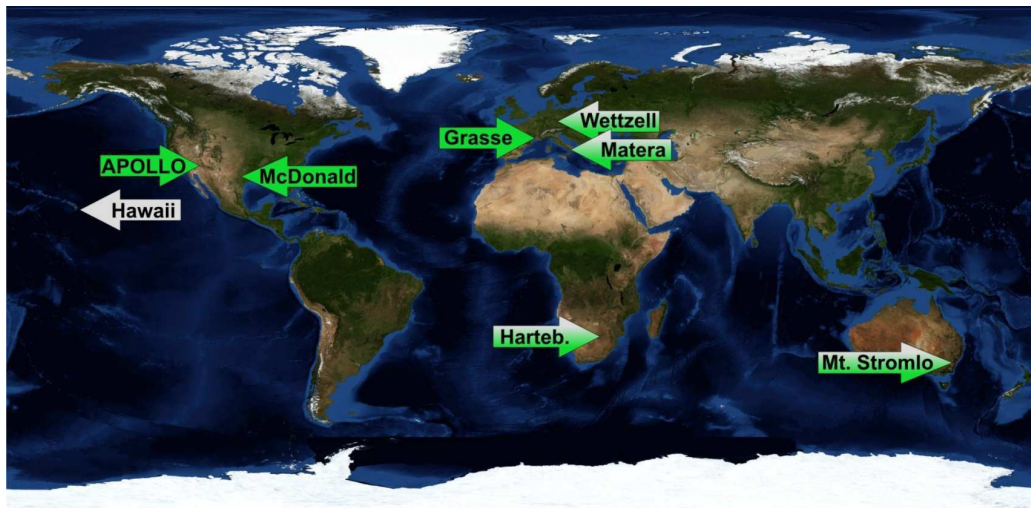
# LLR



- Tri misije Apolo so pustili zrcala na Luni:
- Apolo 11: 100 zrcalnih elementov,
- Apolo 14: 100 zrcalnih elementov.
- Apolo 15: 15 zrcalnih elementov.
- Sovjeti pustili dva istema zrcal na premičnih postajah "Lunohod".
  
- Luna 17: Lunohod
- Luna 21: Lunohod 2
  
- Izguba signala je ogromna:
  1. od vseh oddanih fotonov približno  $10^{-8}$  fotonov doseže reflektorje;
  2. od vseh vrnjenih fotonov približno  $10^{-8}$  fotonov doseže teleskop na Zemlji;
  3. izguba fotonov večja od  $10^{17}$ .

## LLR (2)

- Prej natančnost 10-15 cm, zdaj 3-5 cm in tudi do 1 cm.
- Samo nekaj observatorijev po svetu lahko meri razdalje do Lune:





## LLR (3)

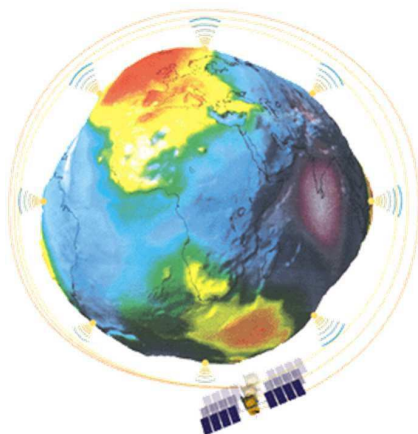
---

- Uporaba LLR meritev:
  - Precizno določanje dimenzij, rotacije in orbite Lune, ugotovljeno premikanje Lune proč od Zemlje 3,8 cm na leto.
  - Variacije v dolžini dneva na Zemlji.
  - Premiki tektonskih plošč na Zemlji.
  - Preizkus Einsteinove teorije relativnosti.

## DORIS

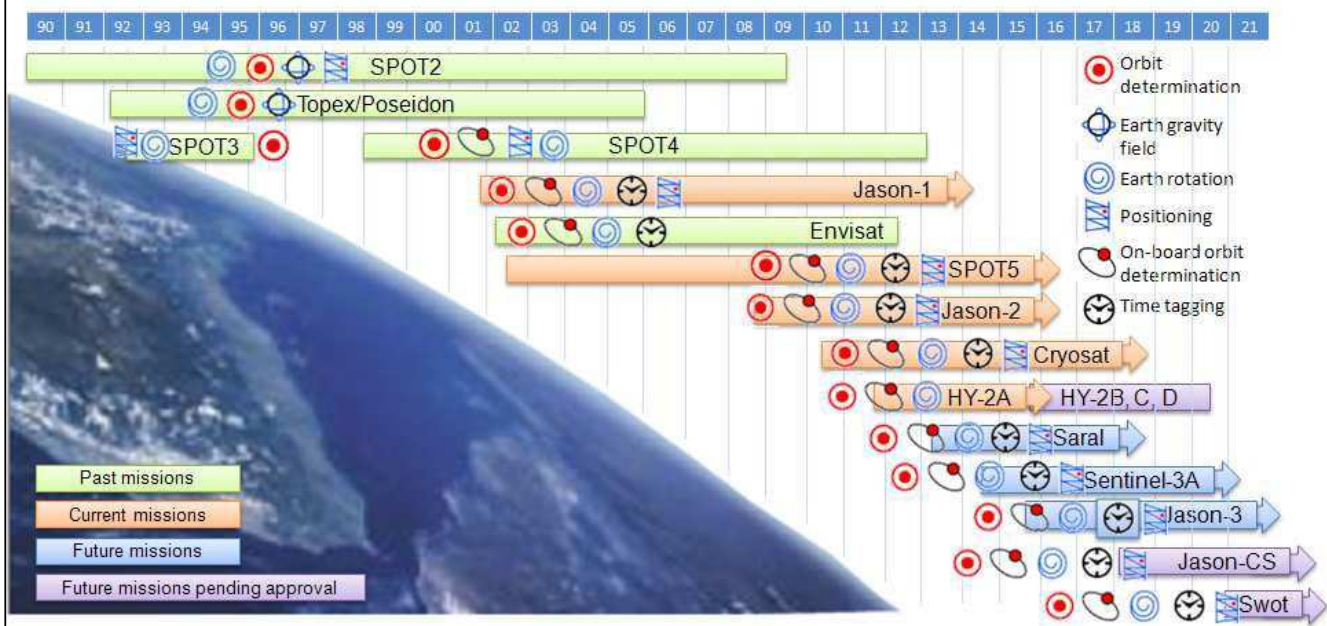
---

- Doppler Orbitography by Radiopositioning Integrated on Satellite – DORIS.
- Dvofrekvenčni sistem (2,03 in 0,40 GHz), ki ga je razvila Francoska vesoljska agencija. Namenjen predvsem natančnemu določanju tirnic satelitov, ki so opremljeni s napravami DORIS.





# Sateliti, opremljeni z DORIS sprejemniki



**IGS**

- IGS - International GNSS Service, mednarodna zveza več kot 200 ustanov, ki upravljajo s permanentnimi GNSS-postajami.
- IGS zbira in arhivira ter razpečuje podatke visoko natančne obdelave GPS- in GLONASS-opazovanj za nadaljnjo znanstveno in inženirsko uporabo.
- Podatki:
  - Precizne efemeride,
  - koordinate permanentnih GNSS-postaj z hitrostmi,
  - podatke o orientaciji Zemlje (EOP "Earth Orientation Parameters"),
  - atmosferske parametre, pridobljene na osnovi obdelave GNSS-opazovanj.