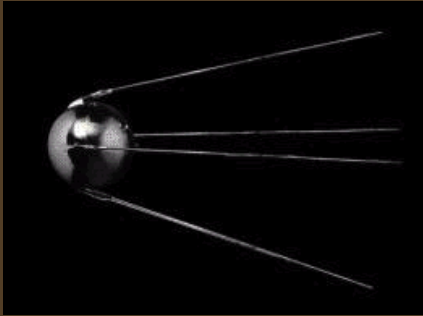


# Geofizikai mérések a Holdon

Tóth Zsuzsanna  
2008. május 6.



# APOLLO program



1957. október 4.: a Szovjetunió felbocsátja a **Szputnyik 1-et**

1961. április 12.: a szovjet **Gagarin** űrrepülése

**John F. Kennedy, 1961. május 25.**

*„...I believe that this nation should commit itself to achieving the goal, before this decade is out, of landing a man on the moon and returning him safely to the earth. No single space project in this period will be more impressive to mankind, or more important for the long-range exploration of space; and none will be so difficult or expensive to accomplish.”*



- az alig tíz évre tervezett kutatási programra 25 milliárd dollárt irányoztak elő (végül összesen **19,408,134,000 dollárba került**)
- a munkálatokban **25.000 vállalat** és kutatóintézet vett részt, mintegy **400.000 ember** közreműködésével



# APOLLO program



Mercury-program, Gemini-program, Ranger project,  
Surveyor project, Lunar Orbiter

Saturn rakéták, parancsnoki egység, holdkomp

Apollo 1, 7, 8, 9, 10



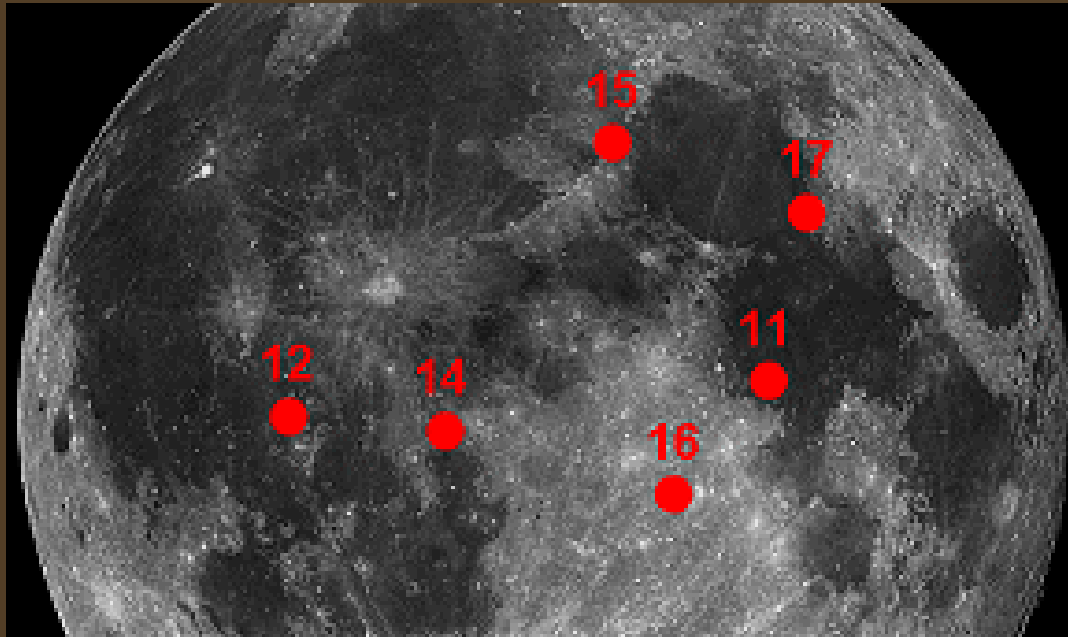
Apollo 11, 1969. július 21. „Eagle has landed.”

*„That's one small step for [a] man, one giant leap for mankind.”*



továbbá: Apollo 12, 14, 15, 16, 17 (1969 – 1972)

# Holdraszállások



Apollo 11	Mare Tranquillitatis	G	Neil Armstrong, Buzz Aldrin
Apollo 12	Oceanus Procellarum	H	Charles Conrad, Alan Bean
Apollo 14	Fra Mauro	H	Alan Shepard, Ed Mitchell
Apollo 15	Hadley/Apennines	J	Dave Scott, James Irwin
Apollo 16	Descartes	J	John Young, Charlie Duke
Apollo 17	Taurus-Littrow	J	Harrison Schmitt, Eugene Carnan



# Geofizikai mérések a Holdon

Mérések a Holdon és Hold körül az Apollo programban:

Soil Mechanics Investigation  
Solar Wind Composition Experiment  
Passive Seismic Experiment  
Laser Ranging Retroreflector  
Lunar Dust Detector  
Lunar Surface Magnetometer  
Cold Cathode Gauge  
Suprathermal Ion Detector Experiment  
Solar Wind Spectrometer  
Lunar Portable Magnetometer  
Active Seismic Experiment  
Charged Particle Lunar Environment Experiment  
S-Band Transponder Experiment  
Bistatic Radar Experiment  
Heat Flow Experiment  
Laser Altimeter  
X-Ray Fluorescence Spectrometer Experiment  
Gamma-ray Spectrometer Experiment  
Alpha Particle Spectrometer Experiment  
Orbital Mass Spectrometer Experiment  
Subsatellite  
Far Ultraviolet Camera/Spectrograph  
Cosmic Ray Detector  
Traverse Gravimeter Experiment  
Lunar Neutron Probe  
Surface Electrical Properties  
Lunar Seismic Profiling Experiment  
Lunar Atmospheric Composition Experiment  
Lunar Ejecta and Meteorites Experiment  
Lunar Surface Gravimeter  
Infrared Radiometer

1)-2) szeizmikus

passzív → szeizmológia

aktív → szeizmika

3) gravitációs

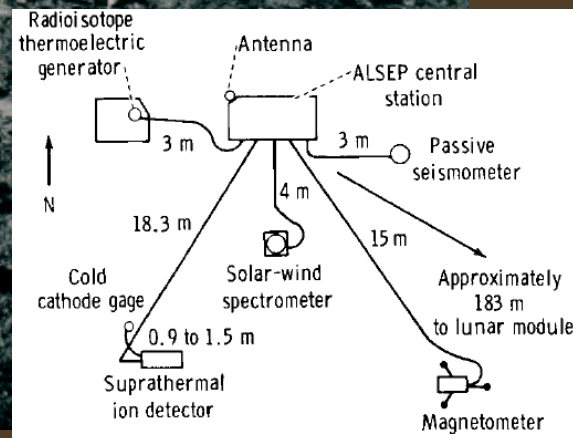
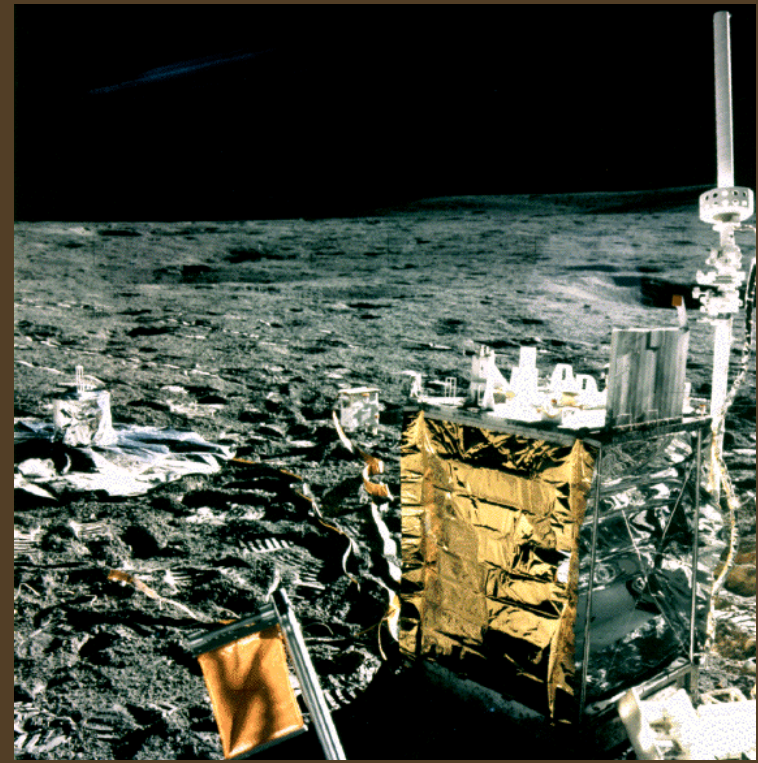
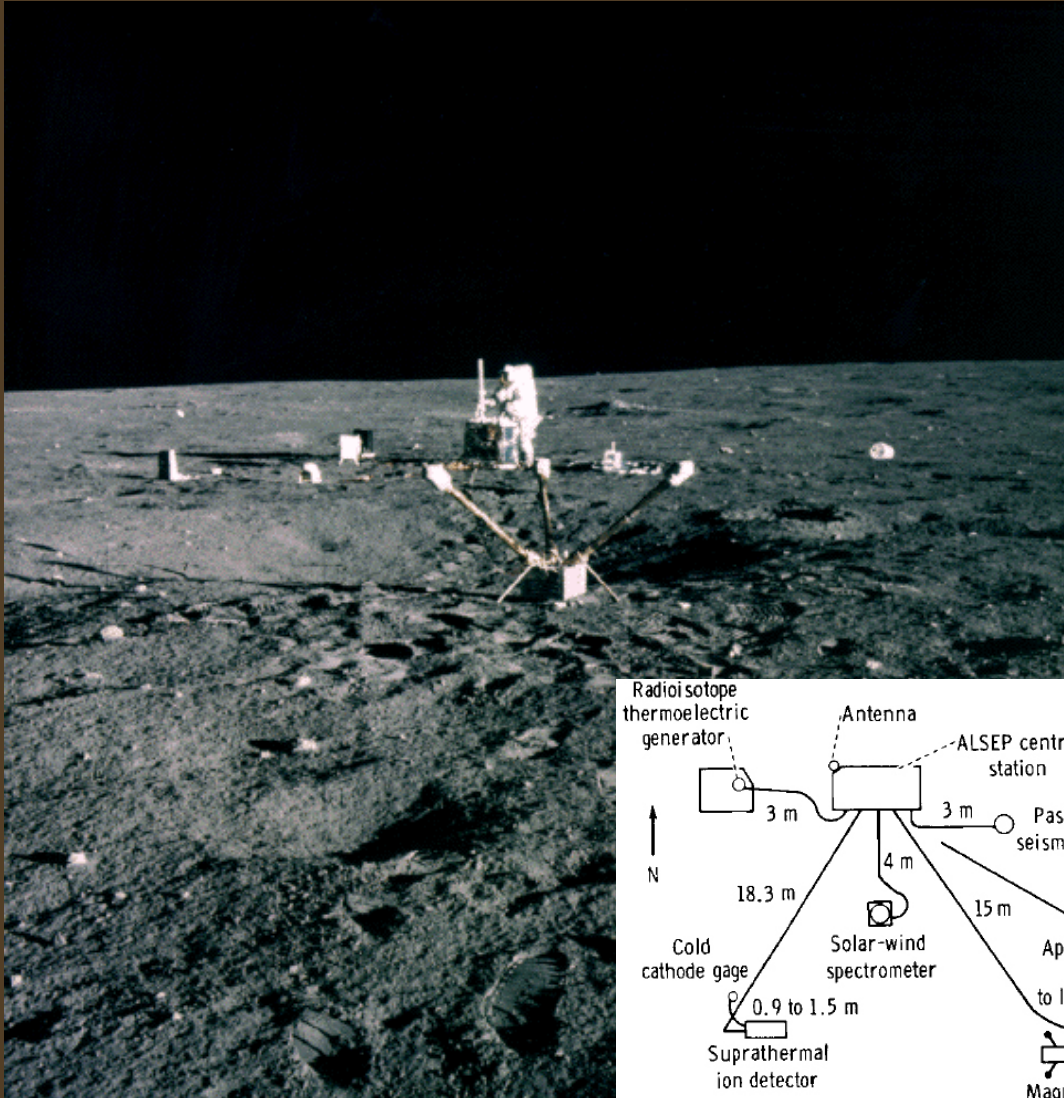
4) mágneses

5) geotermikus

6)-7) egyéb érdekes

# ALSEP

=Apollo Lunar Surface Experiment Package



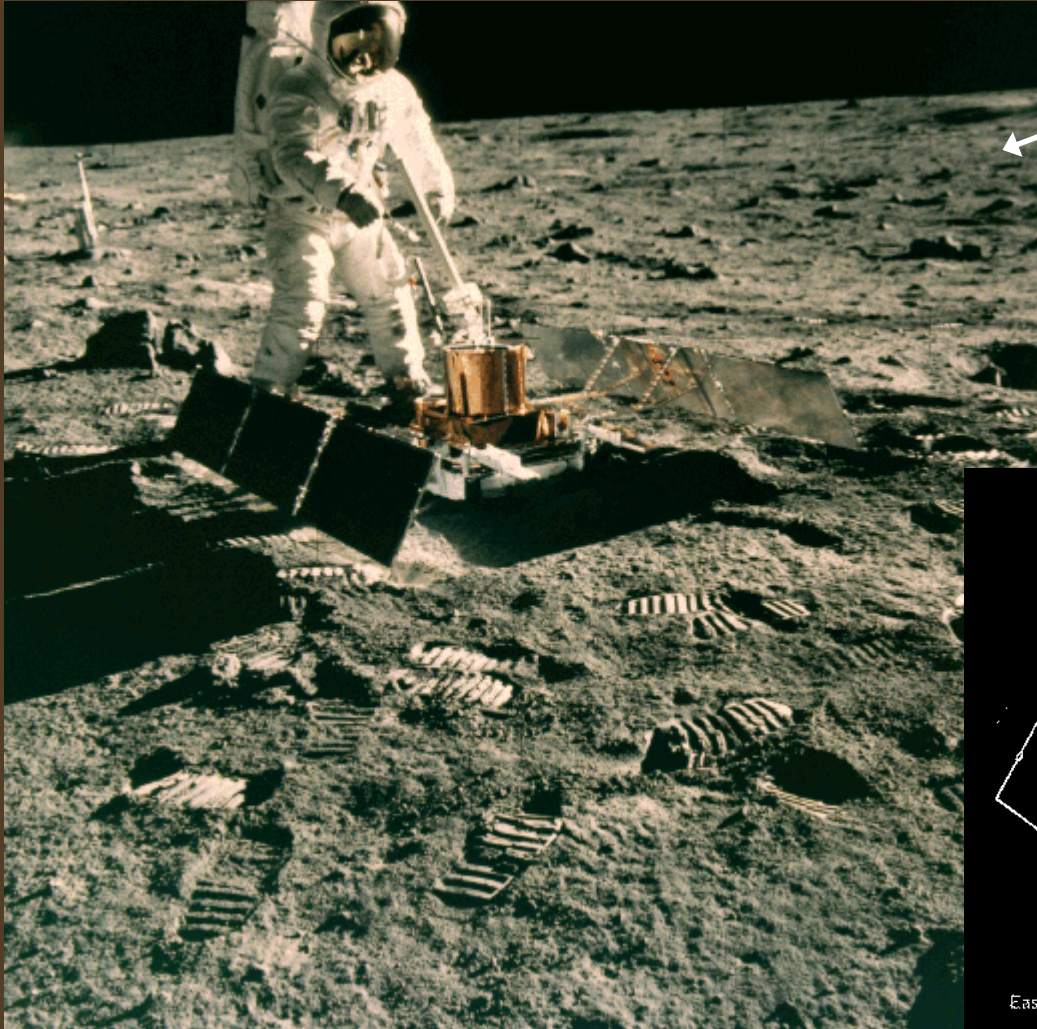
- Apollo 11-nél EASEP
- műszer-csomag elég messze beüzemelve az LM-től
- áramellátás (RTG)
- kommunikáció a Földdel
- central station



# Szeizmológia

## Passive Seismic Experiment Package (PSEP)

## Apollo 11



Buzz Aldrin üzembe helyezi a műszert

- 3 hosszú, 1 rövid periódusú szeizmométer
- 21 napig működött és sugárzott adatokat vissza a Földre

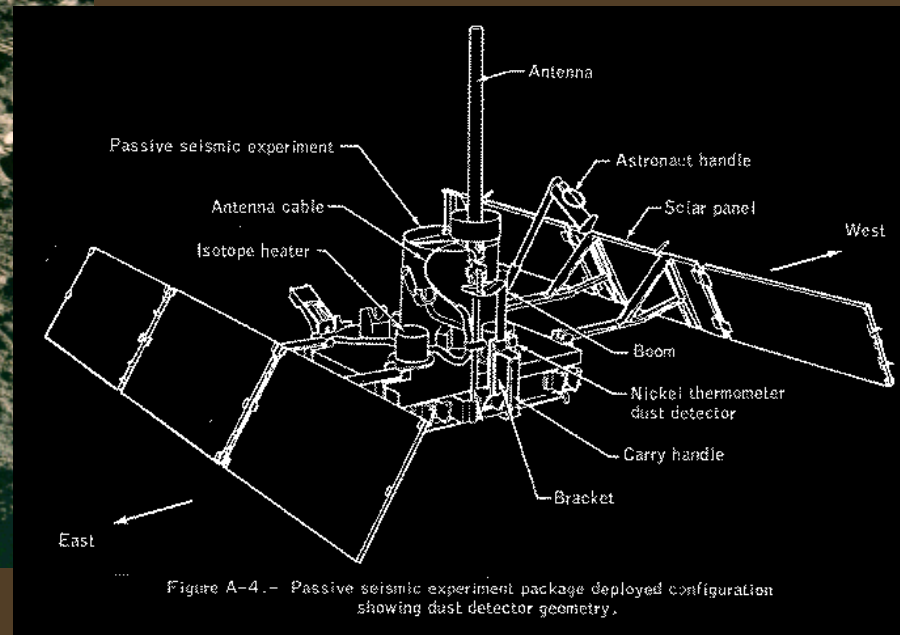
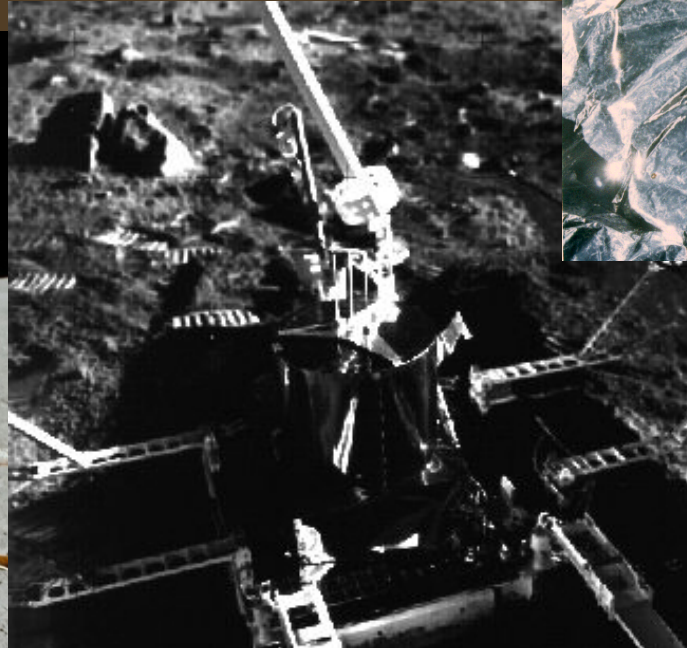
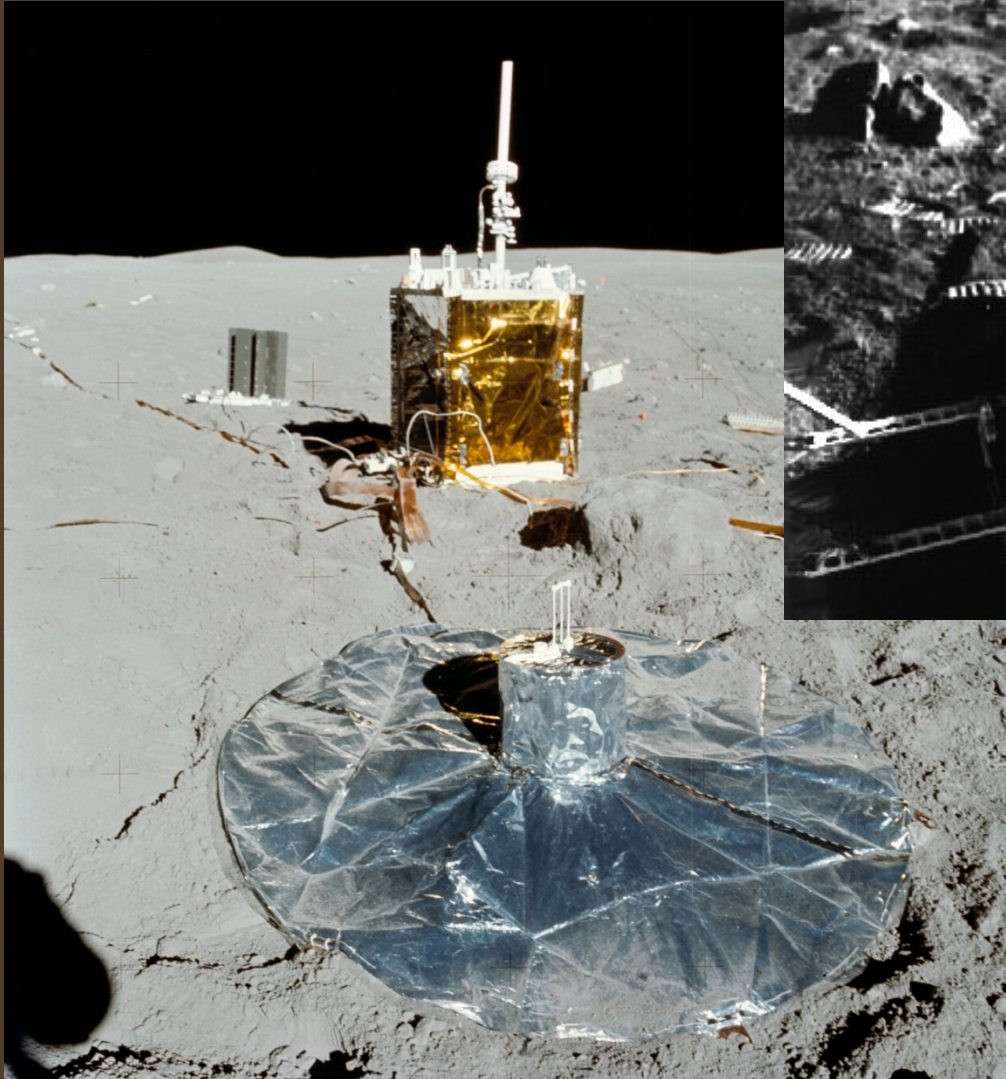


Figure A-4.- Passive seismic experiment package deployed configuration showing dust detector geometry.



# Szeizmológia

## Passive Seismic Experiment (PSE)

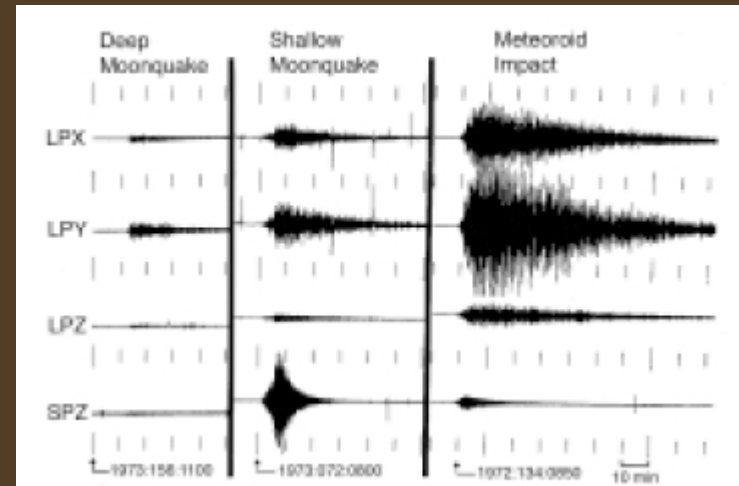
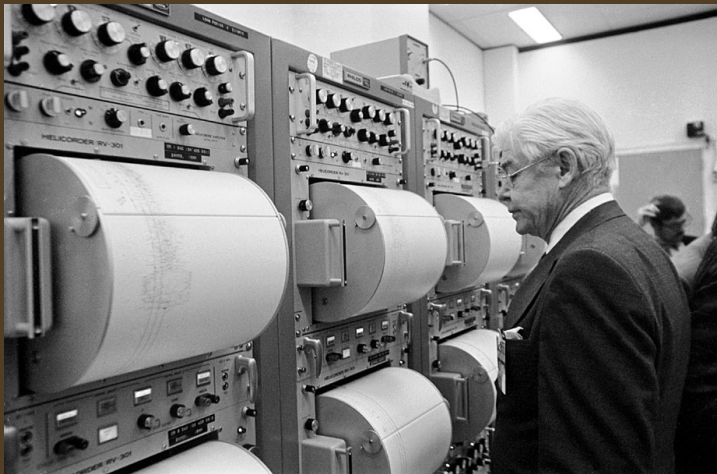


Apollo 12, 14, 15, 16

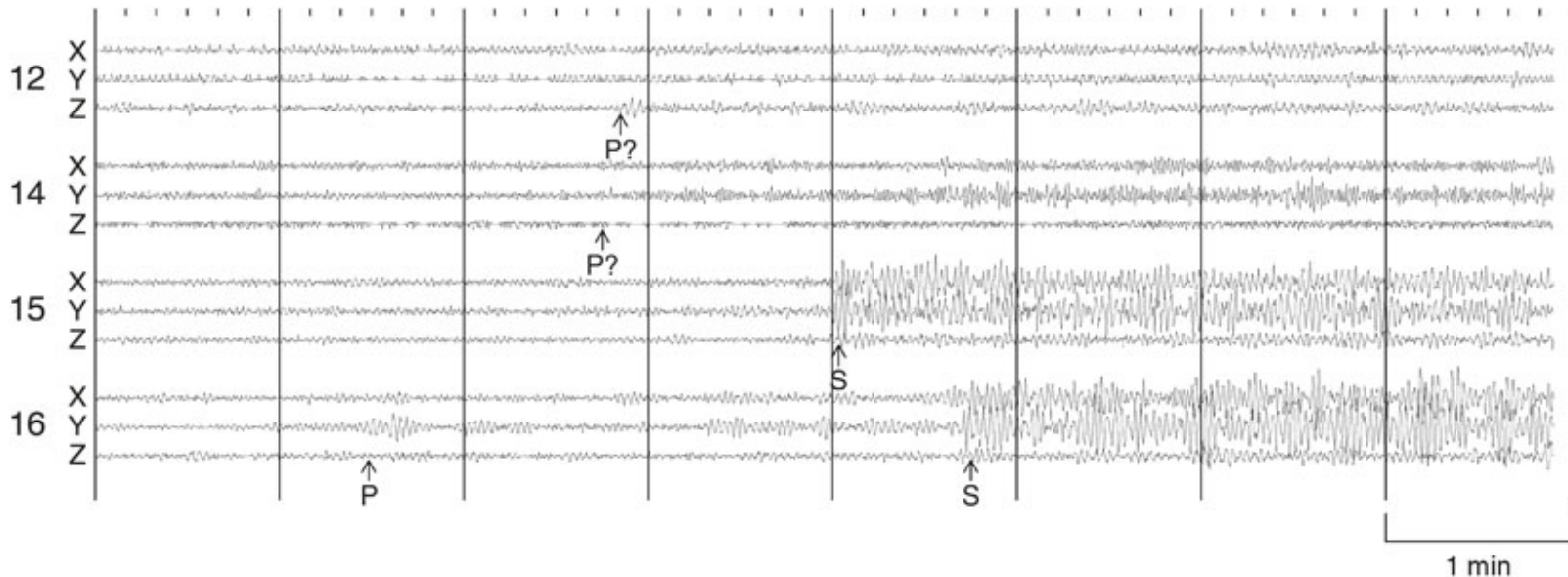
- ALSEP része
- thermal shroud skirt  
hőmérséklet-változás miatti  
billegés ellen
- 1977-ig működtek

# Szeizmológia - Holdrengések

PSEP, PSE



A285



# Szeizmológia: Eredmények

## 1.) a Hold belső szerkezete

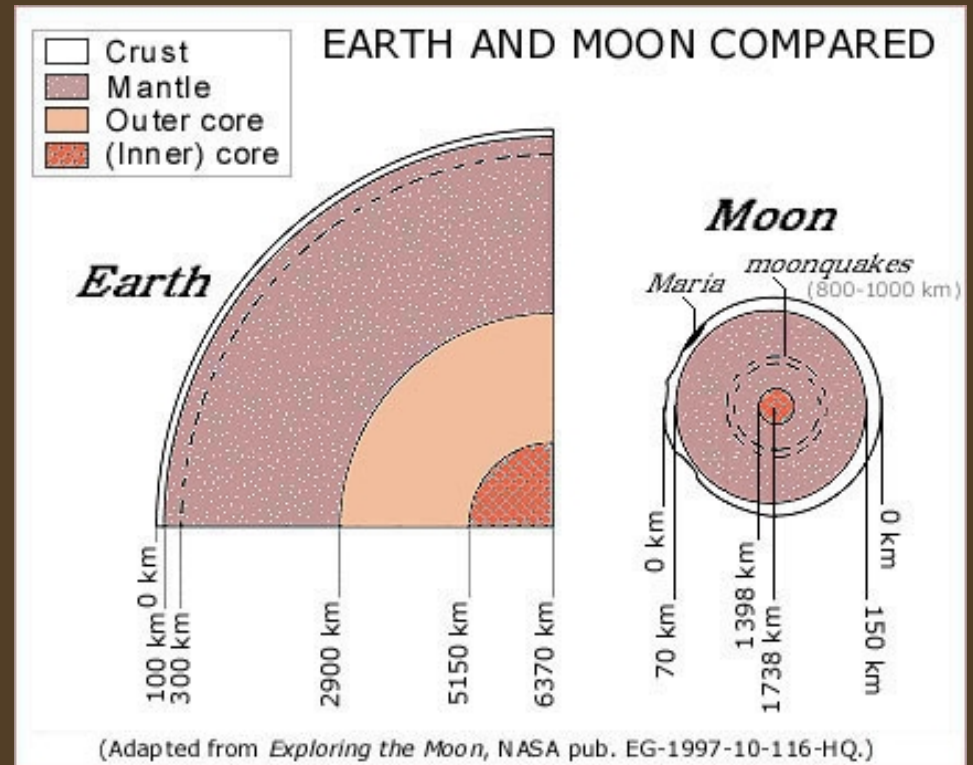
60-70 km vastag kéreg  
min. 1100 km vastag köpeny  
max. 450 km vastag mag

## 2.) szeizmikus források a Holdon

- mély holdrengések (700-1200 km, Föld felőli oldal?)
- termális holdrengések
- sekély holdrengések (50-200 km)
- meteorit becsapódások (1969-1977 >1700)

## 3.) szeizmikus hullámok gyengülése

- a kéreg felső 20 km-e repedezett
- a gyengülés kicsi → hideg, száraz a Hold belseje
- a magban a gyengülés növekszik → olvadt

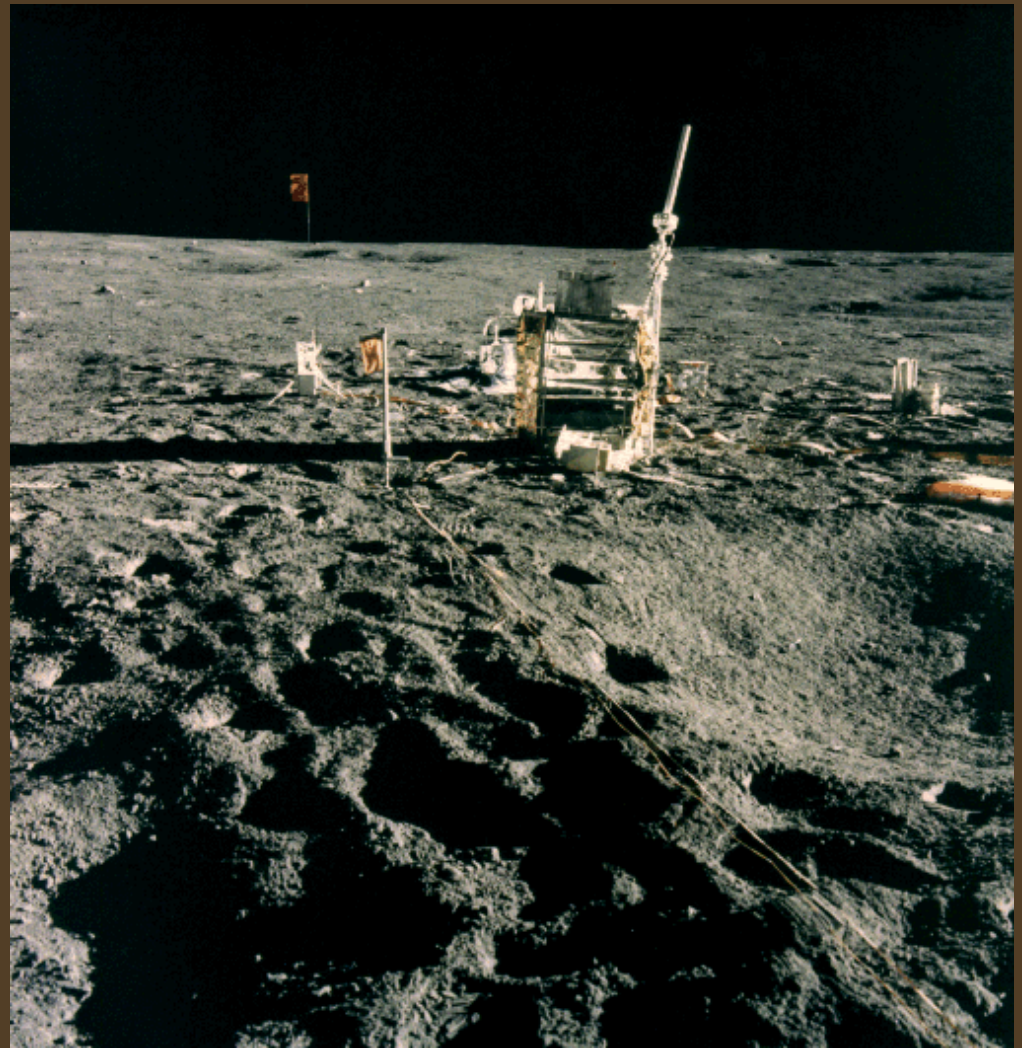




# Szeizmika

## Active Seismic Experiment (ASE)

Apollo 14 és 16



- a mérés célja: a holdkéreg felszínközeli részén a részletes szerkezet megismerése
- 3 geofon egymástól 46 m-re leszúrva a regolitba
- 3-250 Hz tartományban voltak érzékenyek
- behatolás: kb. 460 m



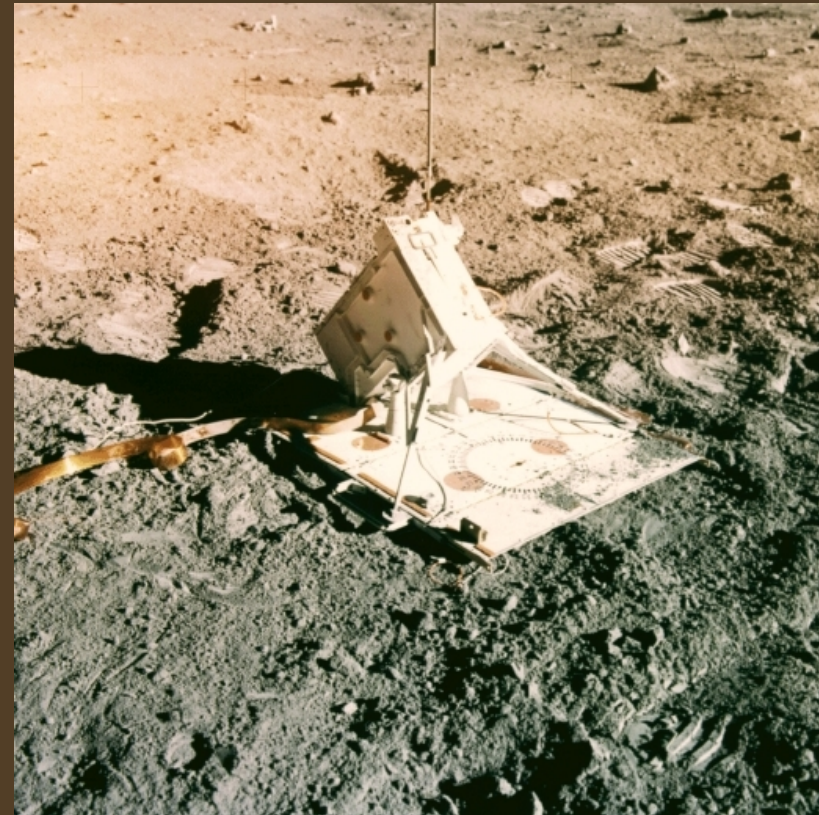
# Szeizmika

## Active Seismic Experiment (ASE)

Apollo 14 és 16

### Szeizmikus források:

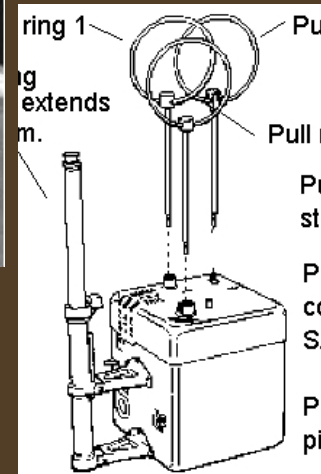
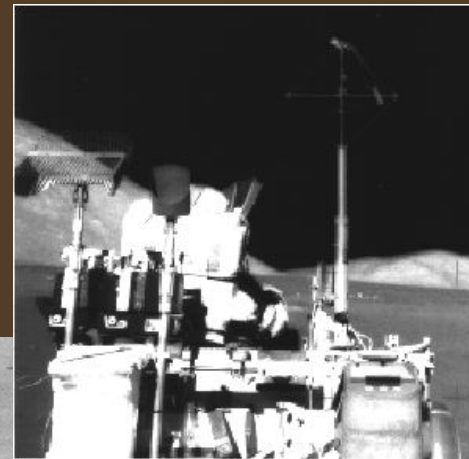
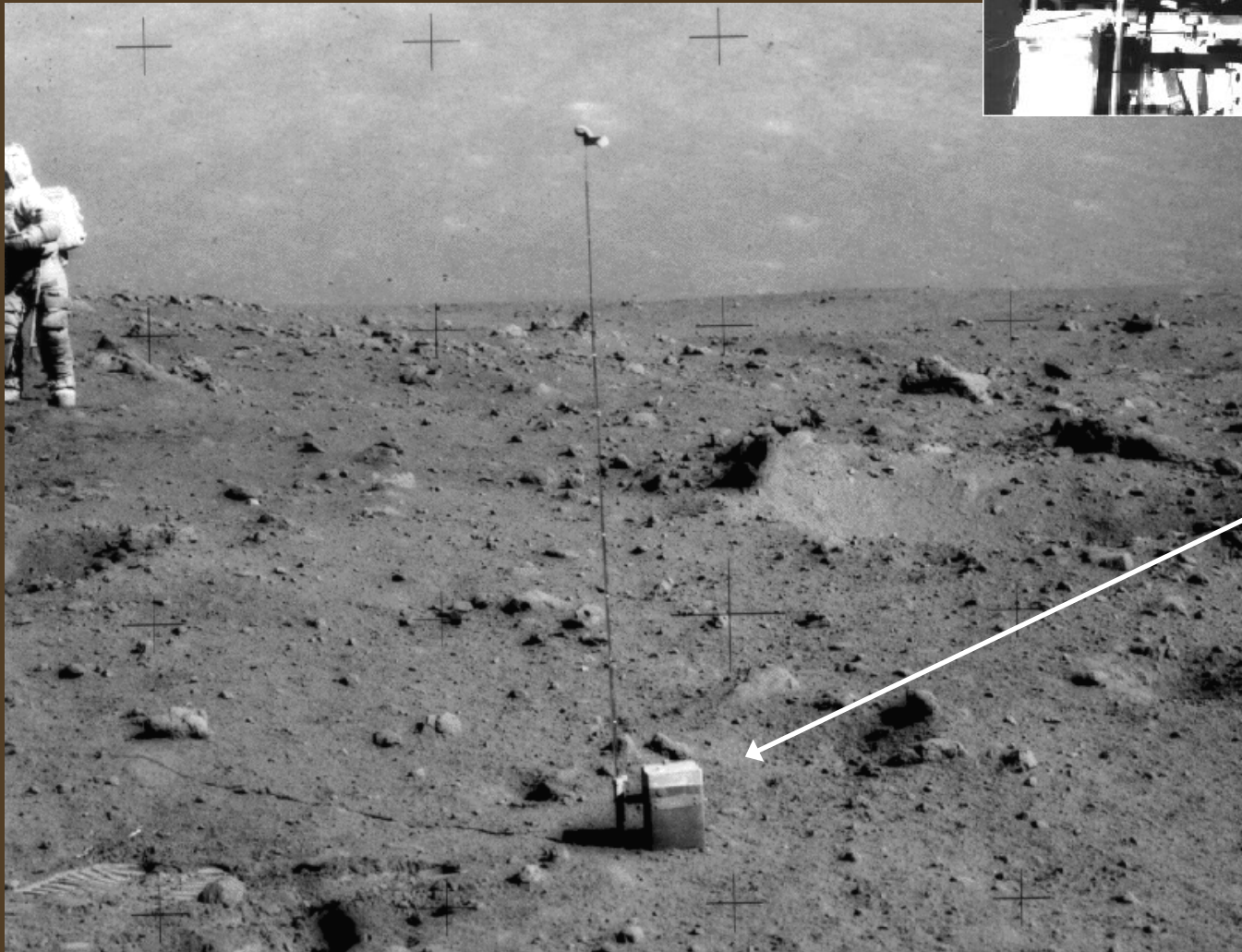
- thumper device  
21 robbanótöltettel
- rocket grenade launcher  
4 rakétatöltettel  
(150, 300, 900, 1500 m)  
csak A-16-on működött



# Szeizmika

## Lunar Seismic Profiling Experiment (LSPE)

Apollo 17

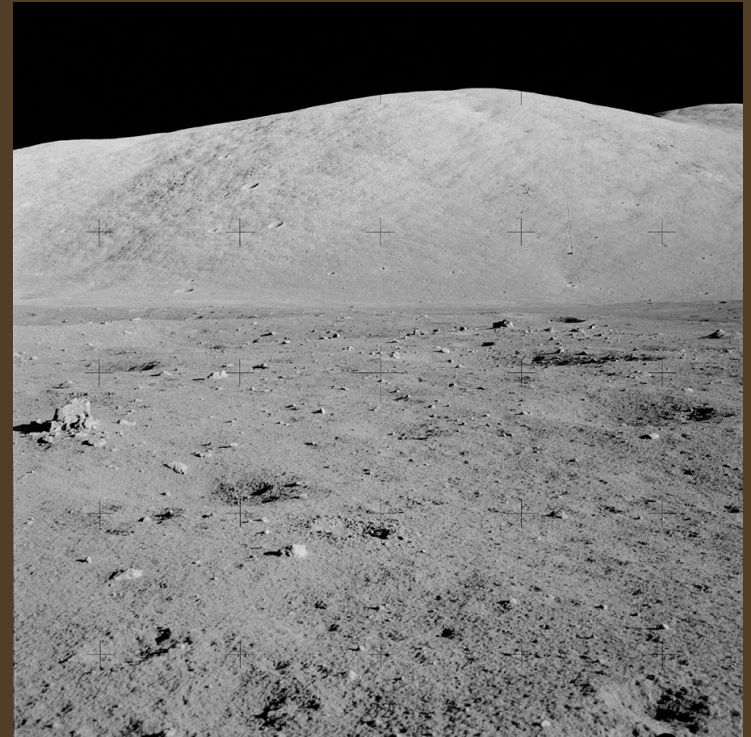


- 4 geofon
- 8 robbanótöltet (100 m – 3,5 km) a geológiai megállóhelyeken rakták ki őket (EVA1 2, EVA2 3, EVA3 3)
- behatolás: néhány km



# Szeizmika: Eredmények

- szeizmikus hullám terjedési sebessége (P hullám) mindhárom leszállási helyen (A-14, 16, 17) **0,1-0,3 km/s** a holdkéreg felső néhány km-ére  
→ töredezett, breccsásodott a kéreg felső része a meteorit becsapódások miatt
- az Apollo 17 leszállási helyén a **felszíni bazalt réteg vastagsága 1,4 km**



*Apollo 17 Taurus-Littrow völgy*

# Gravitációs mérések I.

Lunar Surface Gravimeter (LSG) Apollo 17

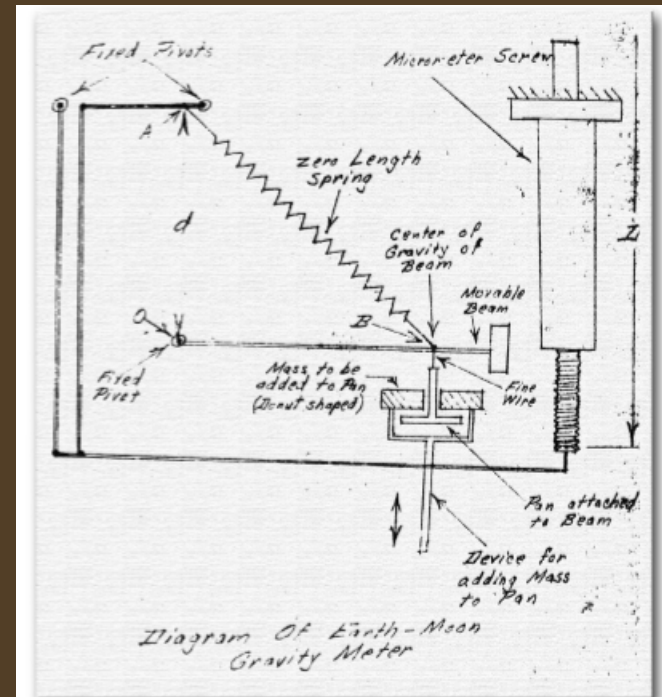


Figure 1. LaCoste's sketch of the key mechanical parts of the moon meter, showing the lunar proof mass. (Courtesy of LaCoste & Romberg.)

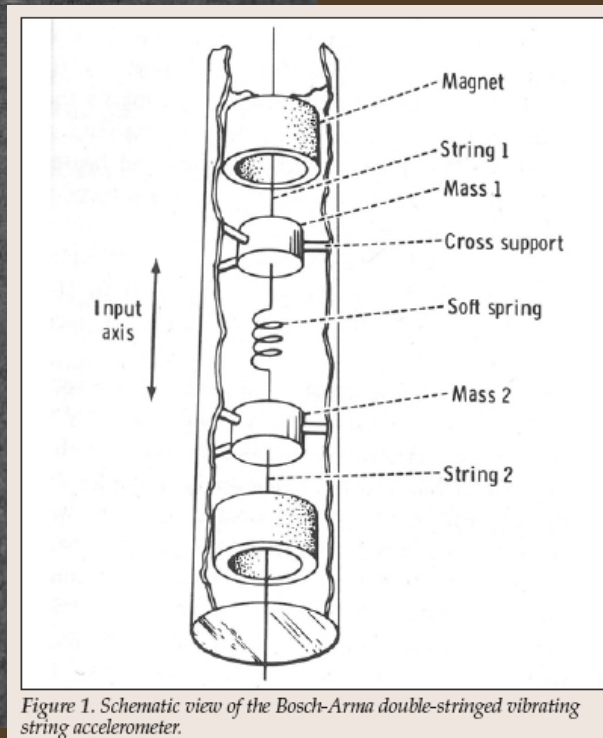
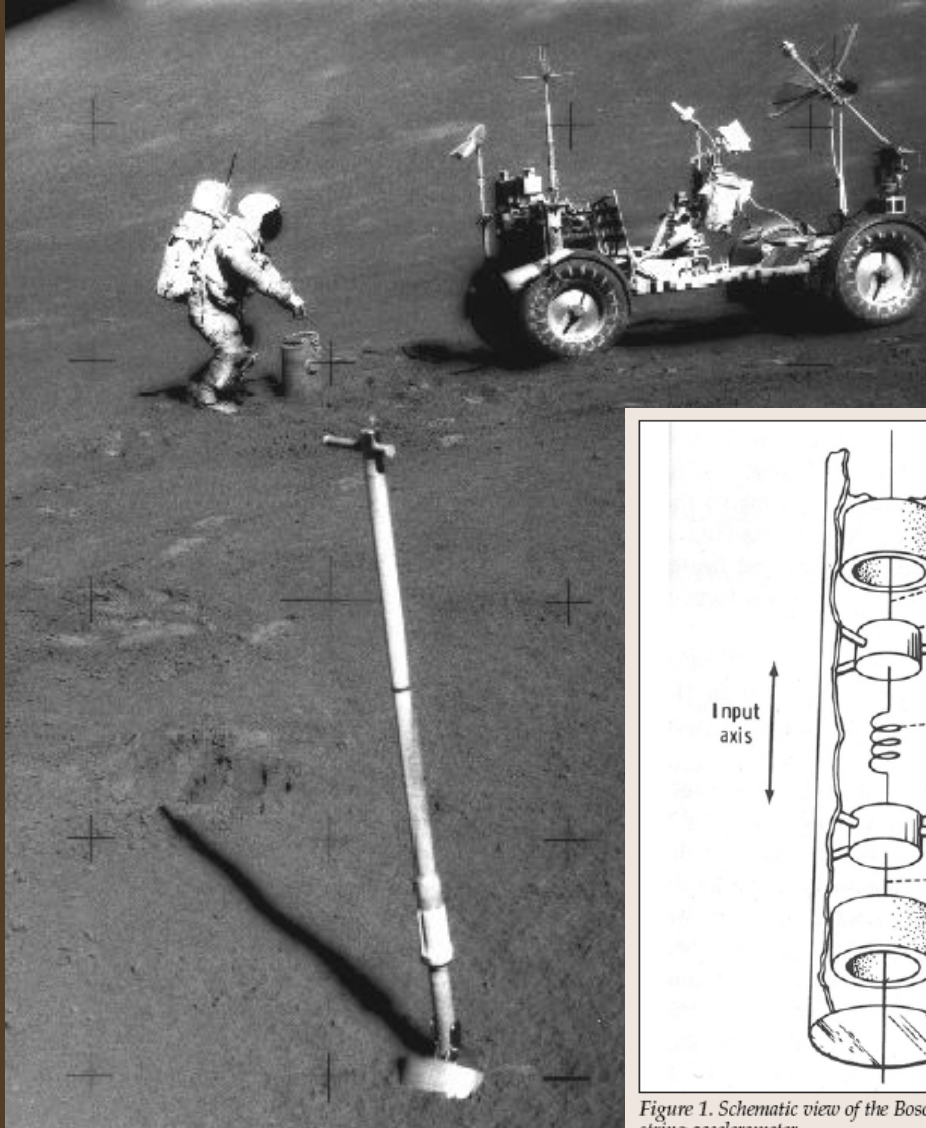
- ALSEP része
- célja: mérések a holdi gravitációról és változásairól, árapály deformációról
- elsődleges célja: gravitációs hullámok kimutatása
- LaCoste & Romberg: Lunar 4
- **a mérés sikertelen volt** tervezési hiba miatt (LaCoste elszámolta magát...)



# Gravitációs mérések II.

Apollo 17

## Traverse Gravimeter Experiment (TGE)



- a mérés célja: a leszállási terület geológiájának megismerése és a  $g$  minél pontosabb megmérése
- traverse → geológiai megállóhelyeken mérés (12)
- Bosch Arma D4E dupla rugós gyorsulásmérő
- motor által vezérelt szintezés
- le kellett olvasni és rádión bemondani a mért értéket
- használata nem volt könnyű
- összesen 26 leolvasás
- topográfia ismerete sztereofotókból



# Gravitációs mérések II.: Eredmények

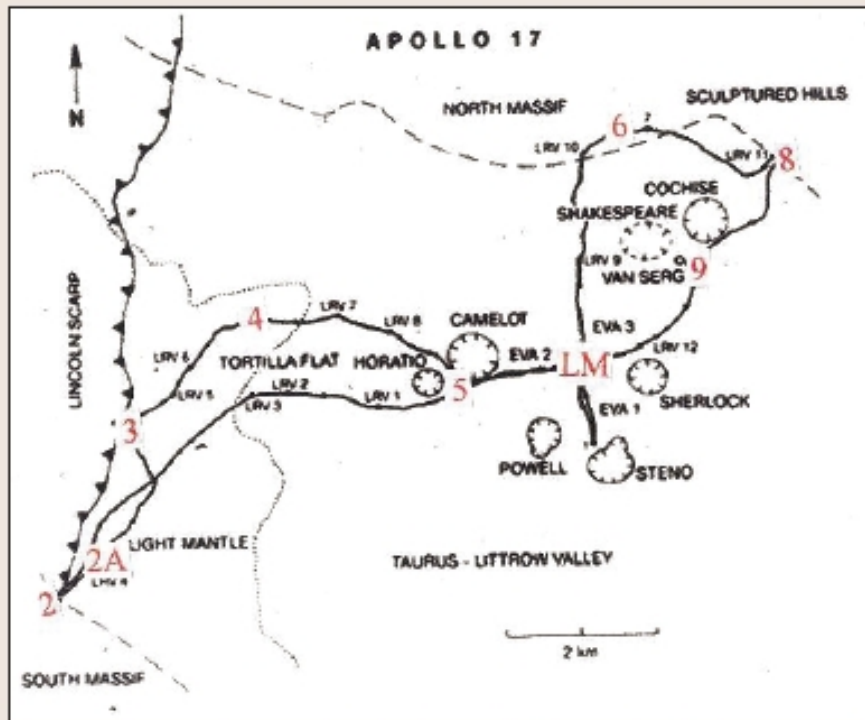


Figure 3. Apollo 17 Taurus-Littrow landing site with the locations of EVAs and gravity stations (red). Station 1, the SEP site, and the ALSEP site were so close to the LM site that they are not shown separately.

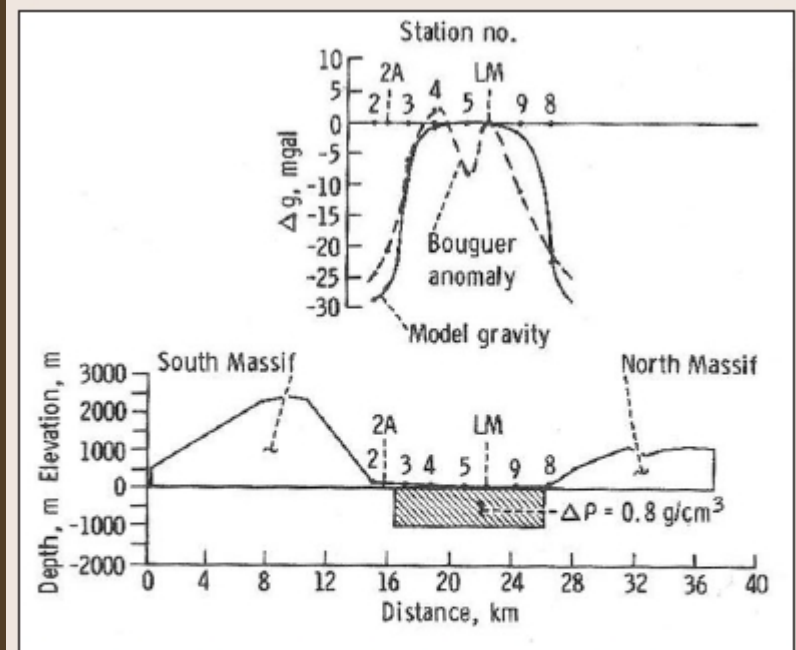


Figure 4. Assumed model for subvalley densities to explain the Bouguer anomaly. The elevation and depth are referenced to the elevation datum (0 m), which is the elevation of the LM site. The shaded rectangle represents a postulated block of basaltic material underlying the valley floor, where  $\Delta\rho$  is the positive density contrast with respect to the brecciated highland material on either side.

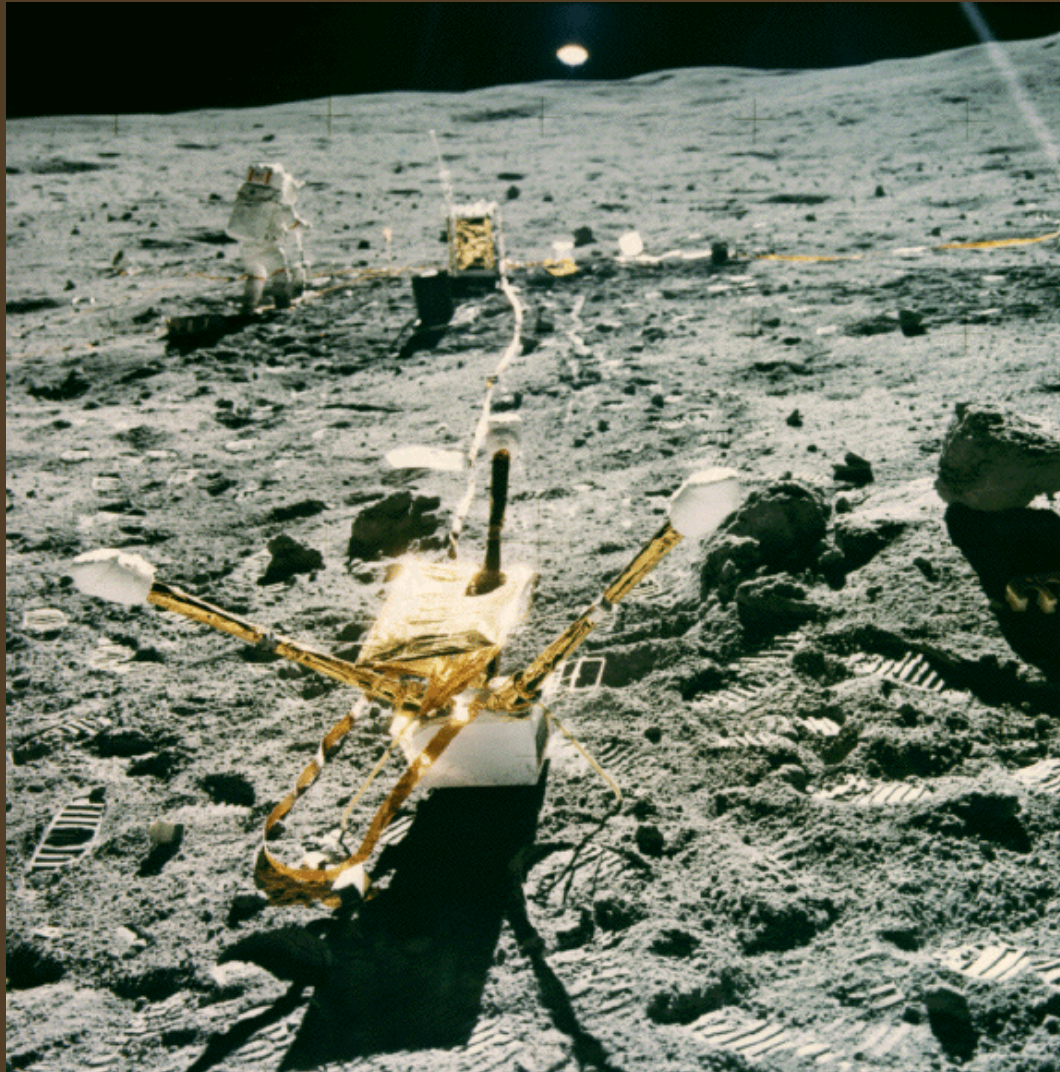
- drift=0 a 7 órás EVA alatt
- free-air korrekció = 0,19 mGal/m kb. ( $2g_n/r$ )
- Bouguer-korrekcióhoz sűrűség a mintákból
- 1 km a völgyben a bazaltréteg vastagsága, meredek a határ, SM lábától 1 km-re kezdődik
- $162\,694,5 \pm 5$  mGal a Taurus-Littrow völgyben ( $=1,626945 \text{ m/s}^2$ )



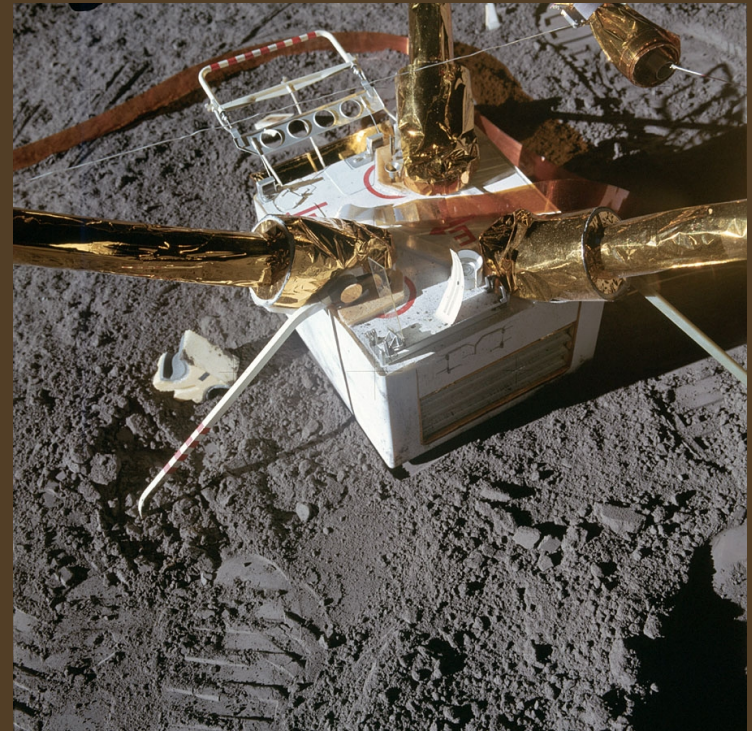
# Mágneses mérések I.

## Lunar Surface Magnetometer (LSM)

Apollo 12, 15, 16



- ALSEP része
- a mérés célja: a mágneses tér mérése, a Hold elektromos vezetőképességének vizsgálata
- Luna 2, 10; Explorer 35 műholdak is mérték a mágneses teret



# Mágneses mérések I.: Eredmények

- a Holdnak **erős helyi mágneses forrásai** vannak
- valamikor rendelkezhetett globális mágneses térrel, a holdi kőzeteknek van **remanens mágnesezettsége**
- a Holdnak 'nincs' atmoszférája, így a napszél a felszínt akadálytalanul éri
- mérési eredmények: A-12 **~38 nT**; A-15 **~6 nT** (→ mascon - nem erősen mágnesezett)
- ez szuperimponálódik a Föld mágneses uszályára, ill. átmeneti zónájára, és a bolygóközi mágneses térre
- electromagnetic sounding: a Hold elektromos vezetőképessége a mélységgel változik (függ a kémiai összetételtől és a hőmérséklettől is)  
→ a vasmag méretének, a köpeny hőmérsékletének megbecsülése
- a mérések alapján:
  - **a köpeny hőmérséklete 500 km-ig biztosan 1000 °C alatt van**
  - **az olvadt kőzet határa 800 és 1500 km közé tehető (PSE – 1000 km)**
  - **igazolt egy kb. 450 km sugarú vasmag**



# Mágneses mérések II.

## Lunar Portable Magnetometer (LPM)

Apollo 14, 16



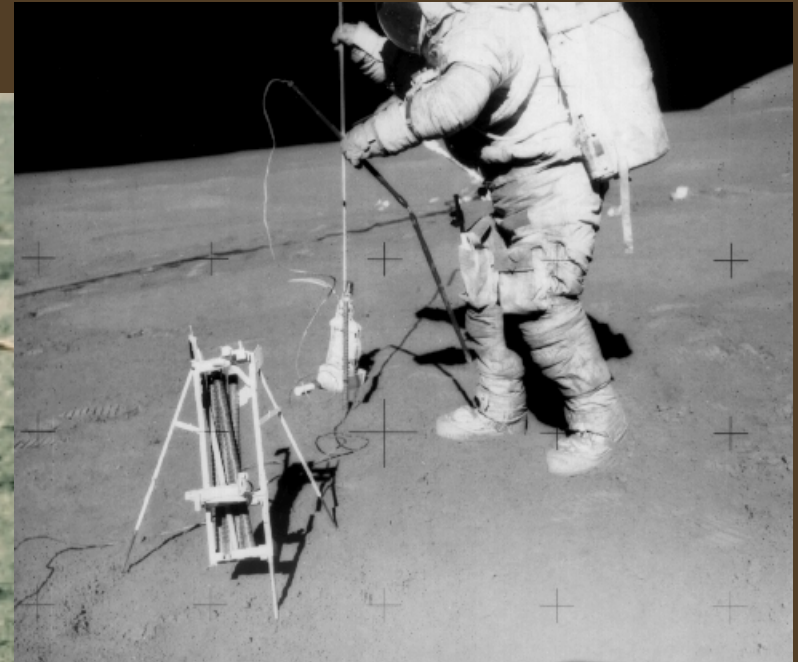
- hordozható magnetométer
- célja: a helyi remanens mágneses tér mérése az űrséta megállóiban (felhasználva az LSM időben változó mérési értékeit)
- A-14: 2 mérés, egymástól 1,1 km-re,  $43 \pm 6$  -  $103 \pm 5$  nT
- A-16: mérések 7,1 km-es távolságon belül,  $121 - 313$  nT
- **eredmény: jelentős különbségek az értékekben**
- ezt igazolják a Hold körül keringő műholdak mérései is



# Geotermika a Holdon

Apollo 15, (16), 17

## Heat Flow Experiment (HFE)



- cél: hőáramlás mérése
- 1,6-2,3 m-es lyukakat kellett fúrni, azokban különböző mélységekben hosszú távon mérték a hőmérsékletet

### Eredmény:

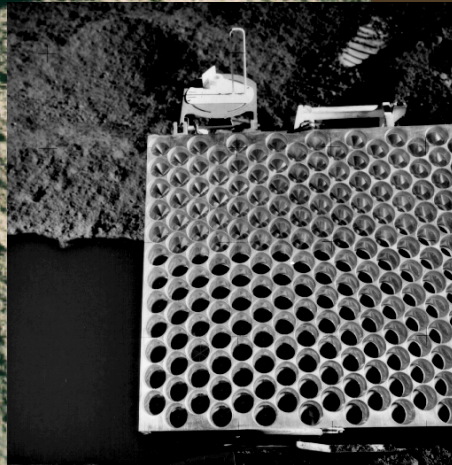
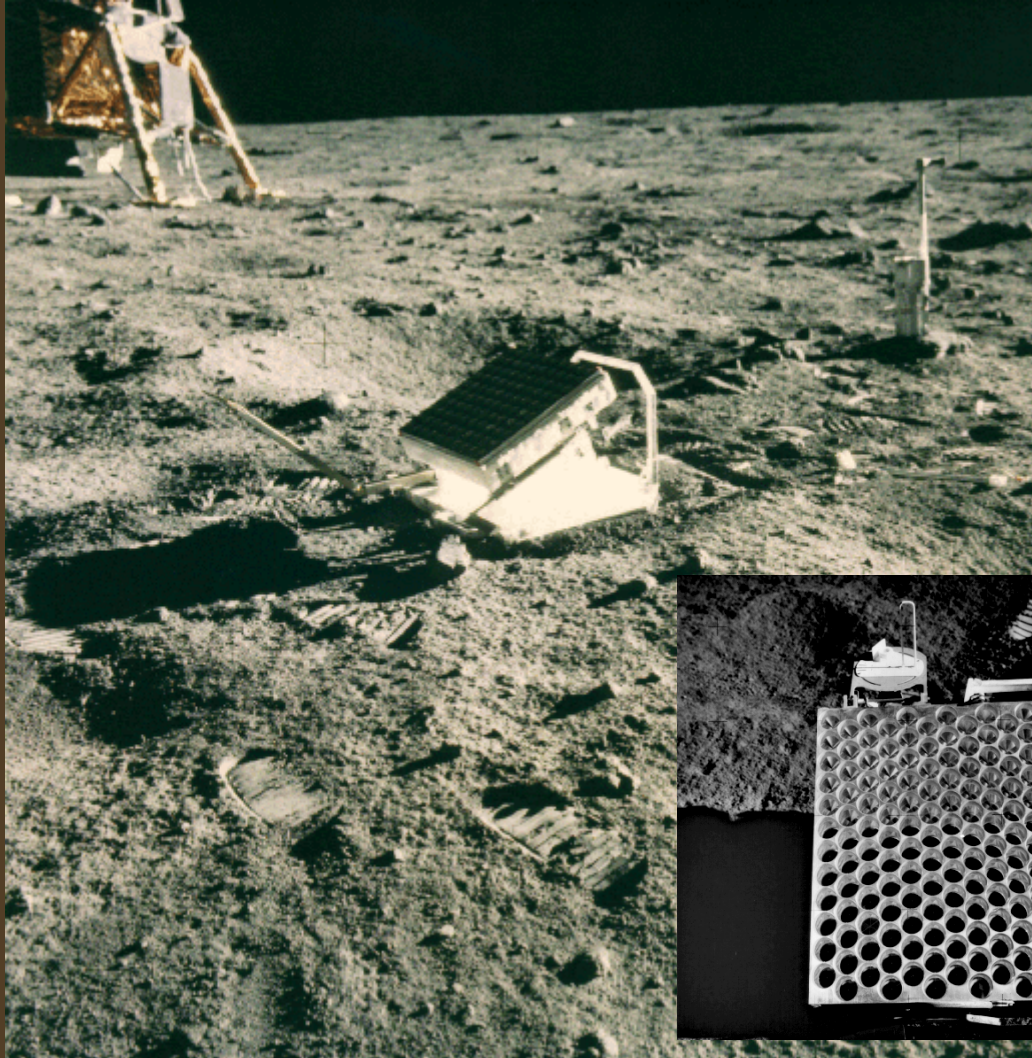
A-15: 21 mW/m<sup>2</sup>, A-17: 16 mW/m<sup>2</sup>  
a hőáramlás 18-24%-a a földinek (87 mW/m<sup>2</sup>), de ez bizonytalan következtetés a 2 mérésből



# Lézertükör

Apollo 11, 14, 15

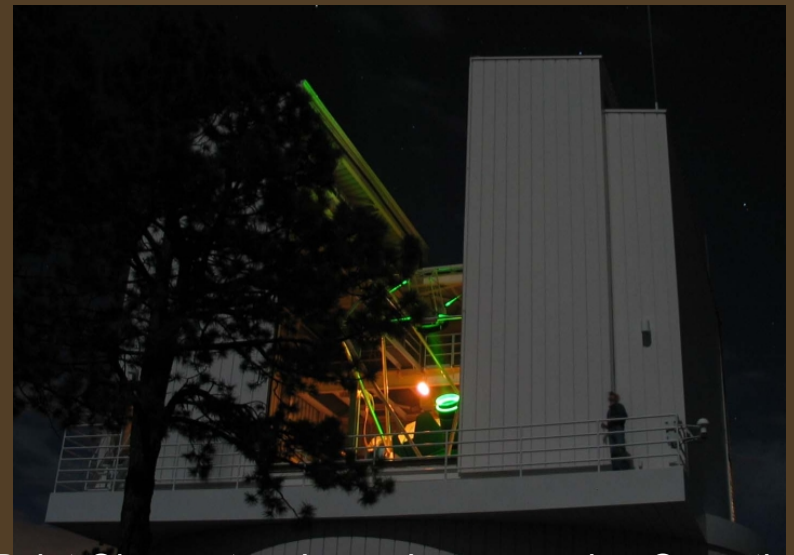
## Laser Ranging Retroreflector (LRRR)



- egyetlen máig működő mérés
- corner-cube reflector: a beeső fényt visszaveri ugyanabba az irányba, ahonnan érkezett
- célja: a Föld-Hold távolság pontos mérése
- mérések: lézerrel
- pontosság: 3 cm (ma már mm)
- a Lunokhod 2 is részt vesz a mérésekben (1973 óta)
- McDonald Observatory, Texas  
Hawaii, California, Franciaország, Németország, Ausztrália

# Lézertükör - Eredmények

- lézernyaláb diszperzió miatt a Hold felszínén 6,5 km széles lesz, a Föld felszínén pedig 20 km → beérkező foton pontos azonosítása lehetséges (több órás mérés)
- **holdpálya** pontos ismerete (változik, átlag érték: 384467 km)
- **napfogyatkozás időpontjának** nagyon pontos kiszámolása (vissza 3400 évvel is)
- **Hold távolodása: 38 mm/év**
- **tömegeloszlás** → 350 km-es mag valószínű
- Newton **gravitációs állandója nem változott** 1969 óta  $1/10^{11}$  pontossággal



APOLLO

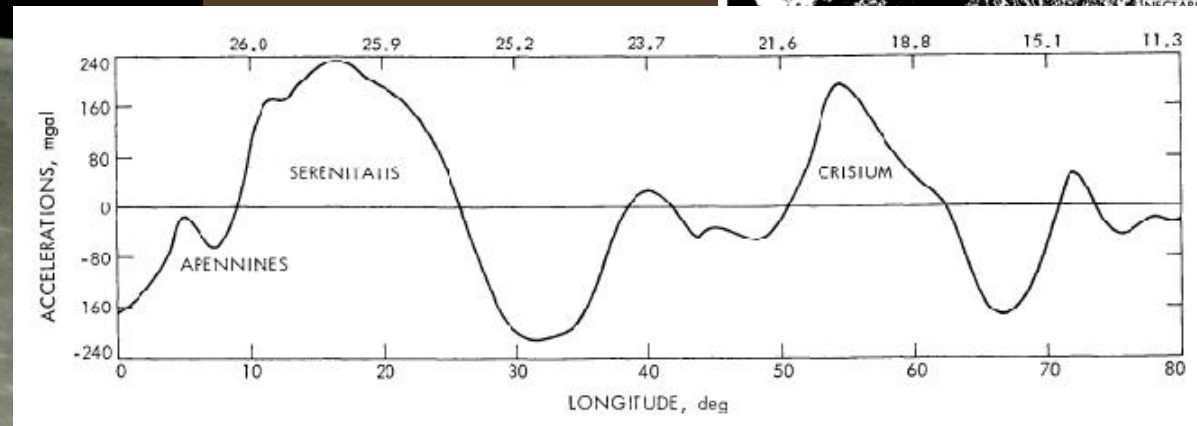
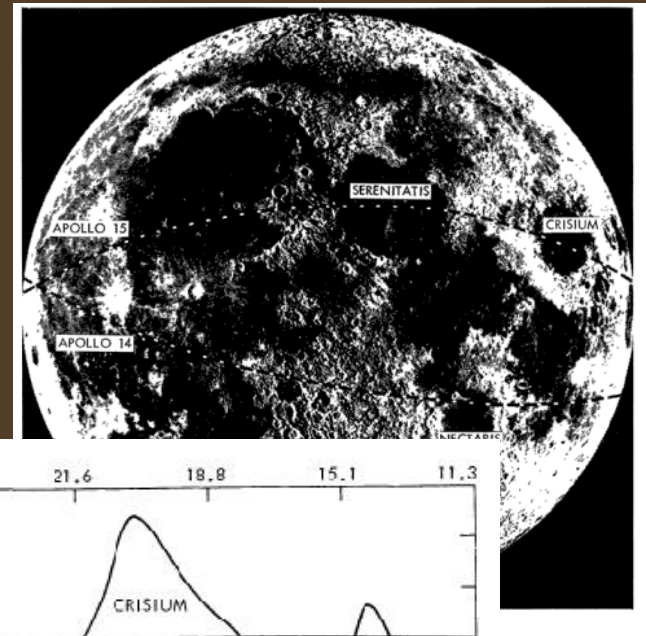
= Apache Point Observatory Lunar Laser-ranging Operation,  
New Mexico, USA



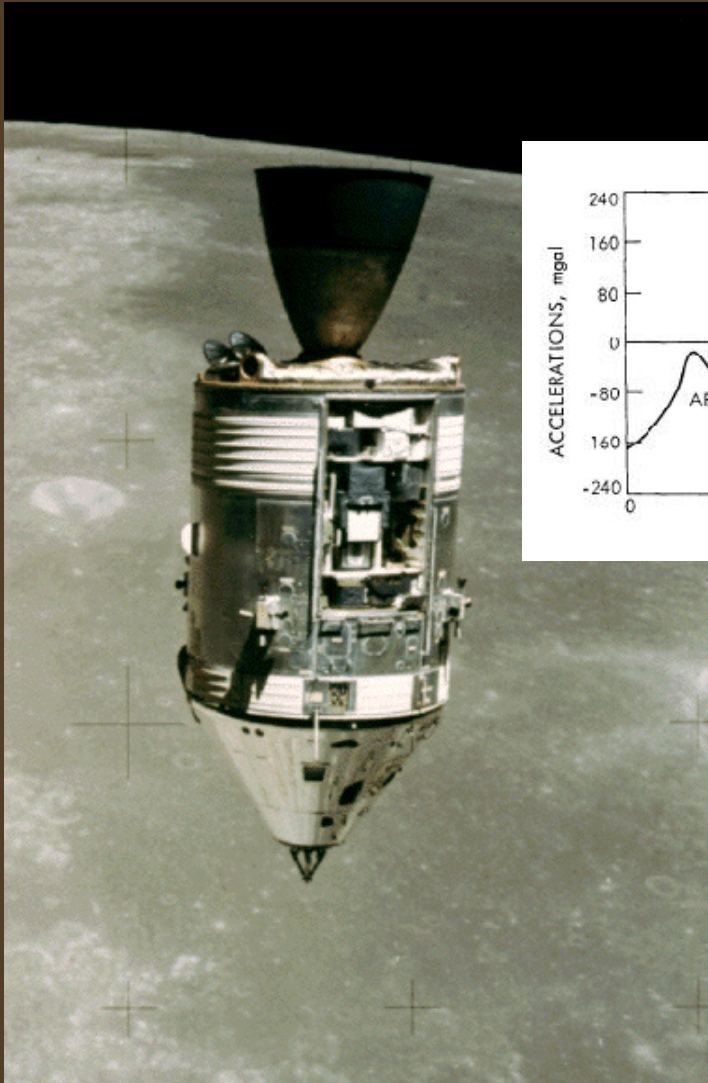
# Doppler Radio Tracking

## S-Band Transponder Experiment (Orbital)

Apollo 14, 15, 16, 17



- = S-sávú válaszadó radarkészülék
- célja: a Hold gravitációs terének vizsgálata, helytől függő változásainak mérése
- rádiójelek frekvenciájának pontos mérése a Földön → a sebesség pontos ismerete
- sebességváltozás oka a  $g$  változása (-Föld és Nap)
- **becsapódási medencék vizsgálata**



# Köszönöm a figyelmet!

## Hivatkozások

- Catalog of Apollo Experiment Operations  
<http://ares.jsc.nasa.gov/HumanExplore/Exploration/EXLibrary/docs/ApolloCat/Apollo.htm>
- Exploring the Moon: Apollo Missions  
[http://www.lpi.usra.edu/expmoon/apollo\\_landings.html](http://www.lpi.usra.edu/expmoon/apollo_landings.html)
- Apollo Program Summary Reports  
<http://history.nasa.gov/apsr/apsr.htm>
- Dancsó Béla: Holdséta; Novella Kiadó, 2004
- Wikipédia