

# O planeta Terra



IAG-USP 2023

VOCÊ GANHOU UM PRESENTE



COMO DESCOBRIR  
O QUE TEM  
DENTRO DA  
CAIXA?

???





AGITAR A  
CAIXA

PESAR A  
CAIXA





VERIFICAR SE O  
CONTEÚDO RESPONDE  
AO MAGNETISMO

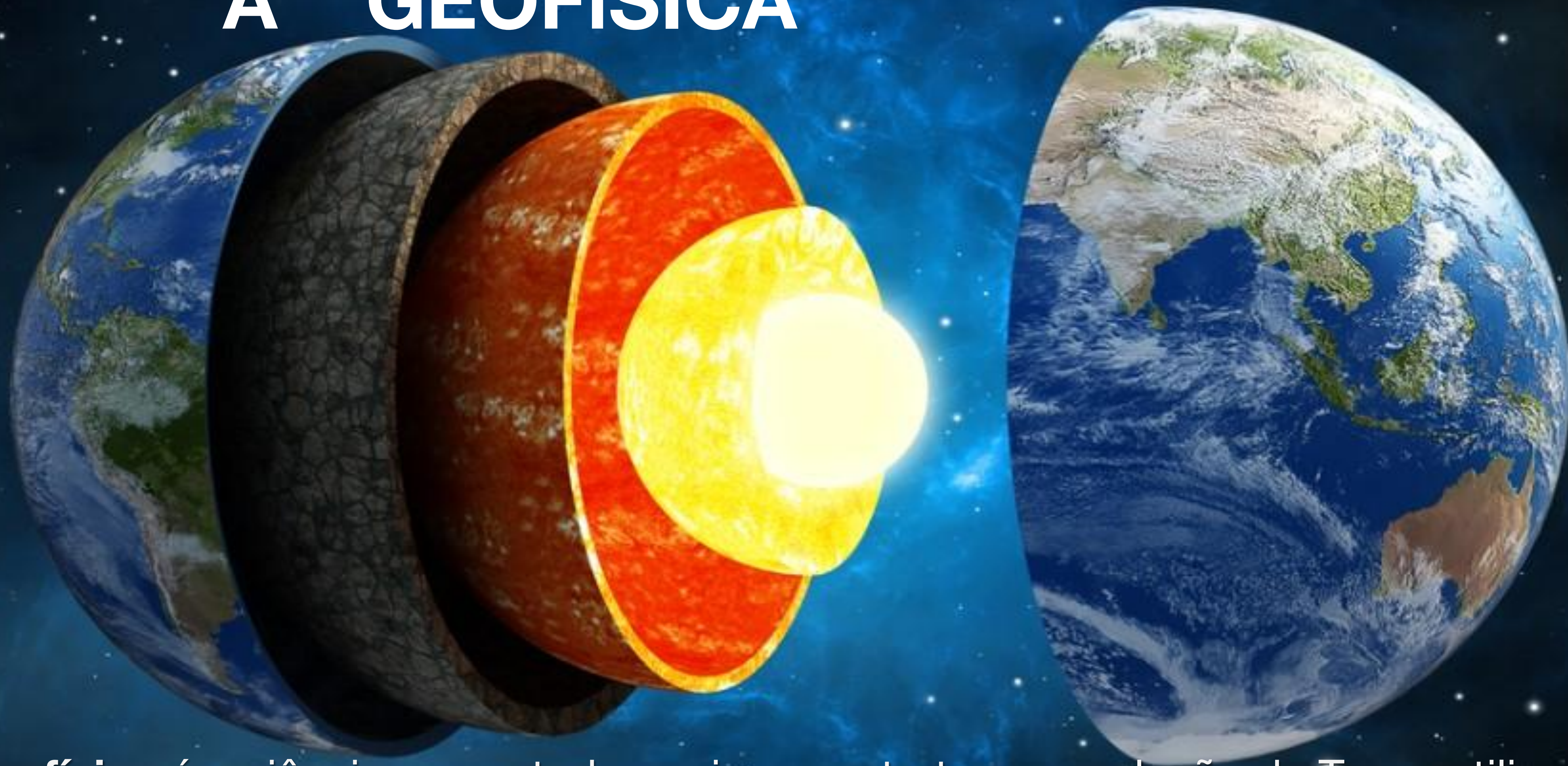
VERIFICAR SE O  
CALOR PASSA POR  
ELA DE MANEIRA  
EFICIENTE



COMO DESCOBRIR O  
QUE EXISTE DENTRO  
DA TERRA?



# A GEOFÍSICA



A **Geofísica** é a ciência que estuda a origem, estrutura e evolução da Terra, utilizando métodos físicos e interpretando os resultados obtidos de acordo com modelos físicos/matemáticos e conhecimento geofísico e geológico.

# A ESTRUTURA DA TERRA

**Considerando a composição química das camadas**

## **Crosta (sólida)**

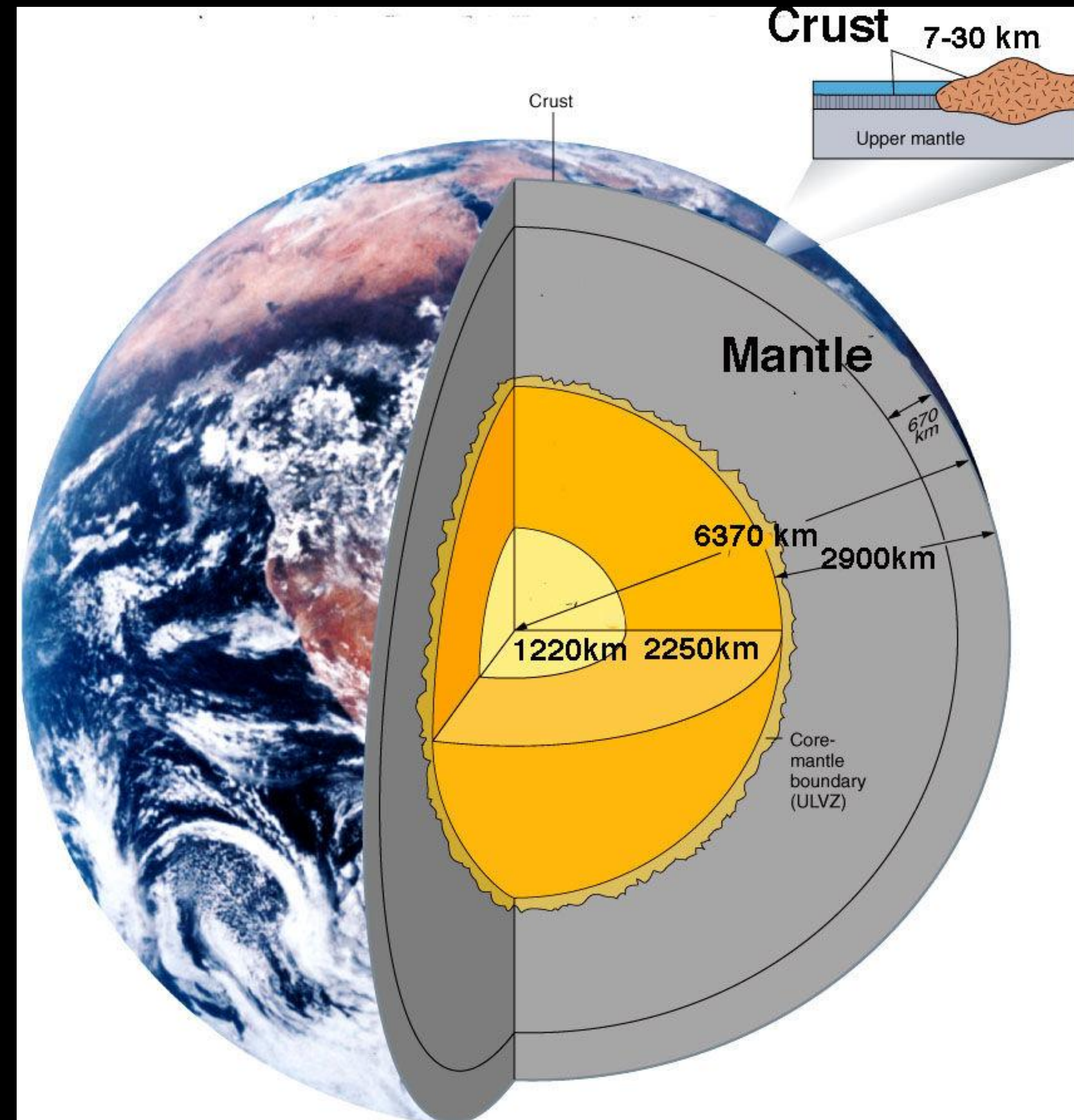
- oceânica 6: 7 km de espessura
- continental: 35 km de espessura

## **Manto (sólido):**

- vai de 6 - 7 km a 2.900 km (sob oceanos);
- vai de 35 km a 2.900 km (sob continentes)

## **Núcleo**

- externo (líquido): 2250 km de raio
- interno (sólido): 1220 km de raio





# A ESTRUTURA DA TERRA

## Considerando o comportamento mecânico dos materiais

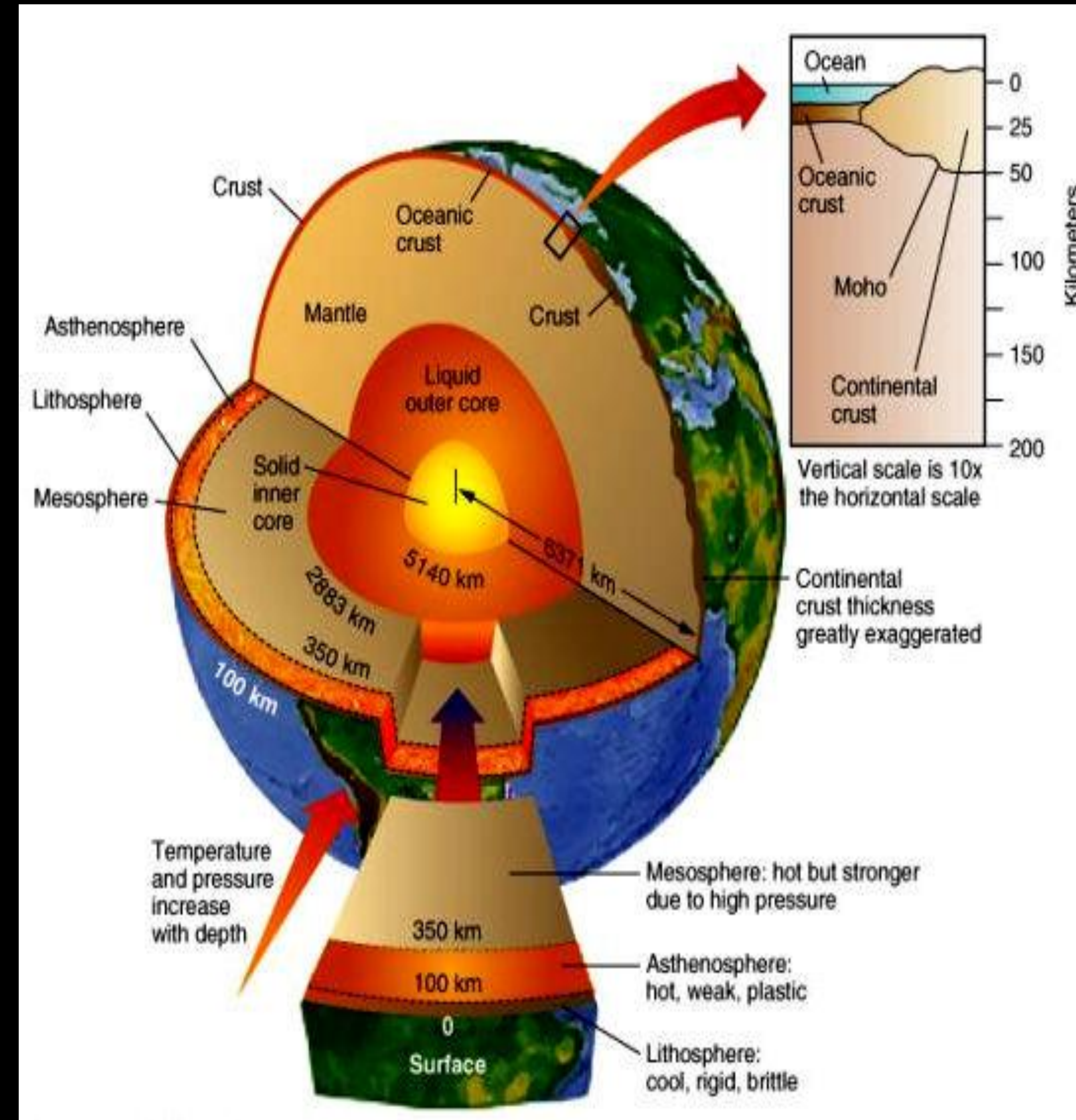
**Litosfera** : abrange a crosta e parte do manto superior; rígida; base definida por uma isoterma de 1200-1300 °C, 100-200 km de espessura

**Astenosfera** : manto superior (350 ou 650 km), arrasto no estado sólido; movimento de convecção

**Mesosfera**: manto inferior; maior viscosidade

**Núcleo externo**

**Núcleo interno**



COMO DESCOBRIR  
O QUE TEM  
DENTRO DA CAIXA  
(TERRA) ?

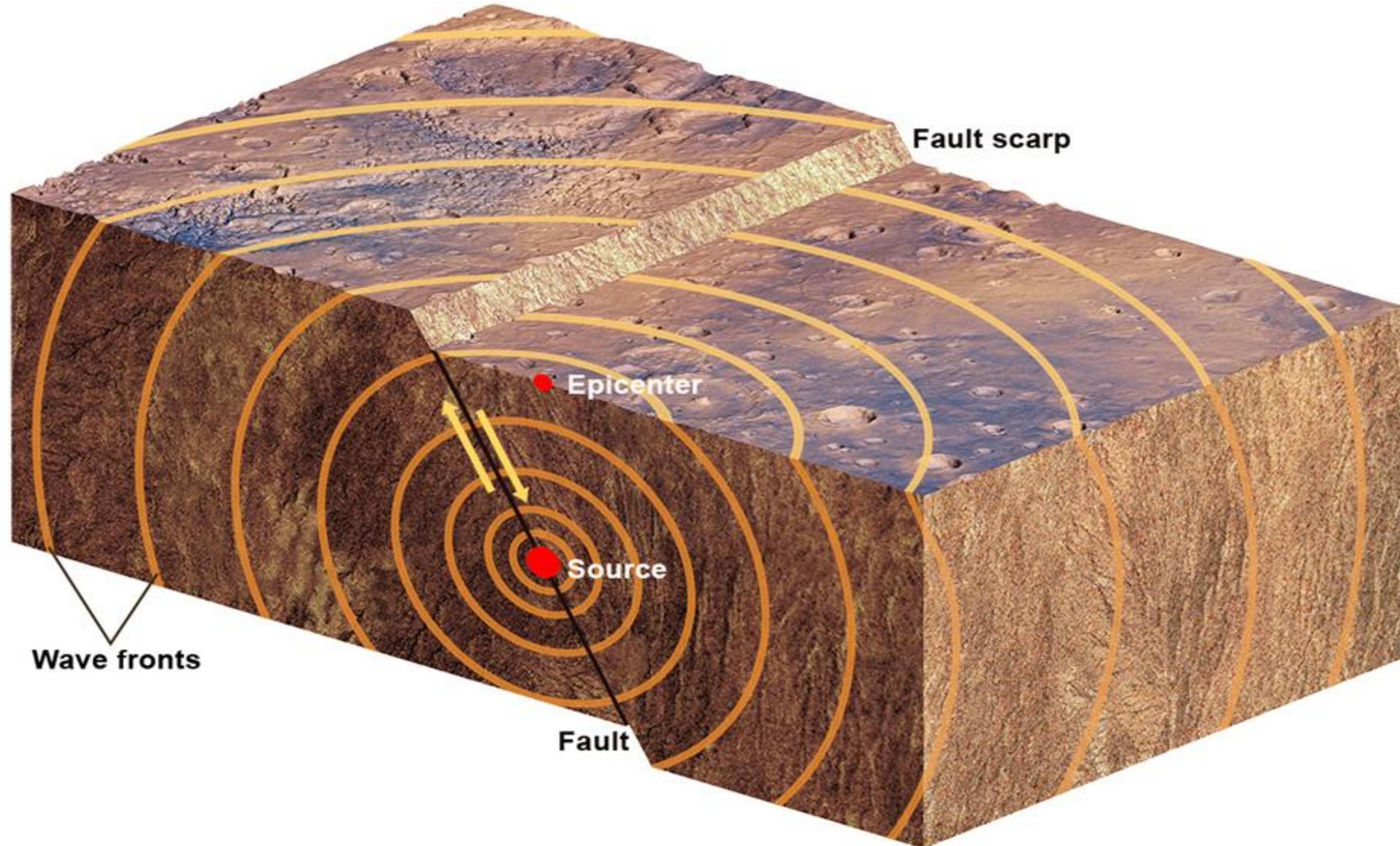
???



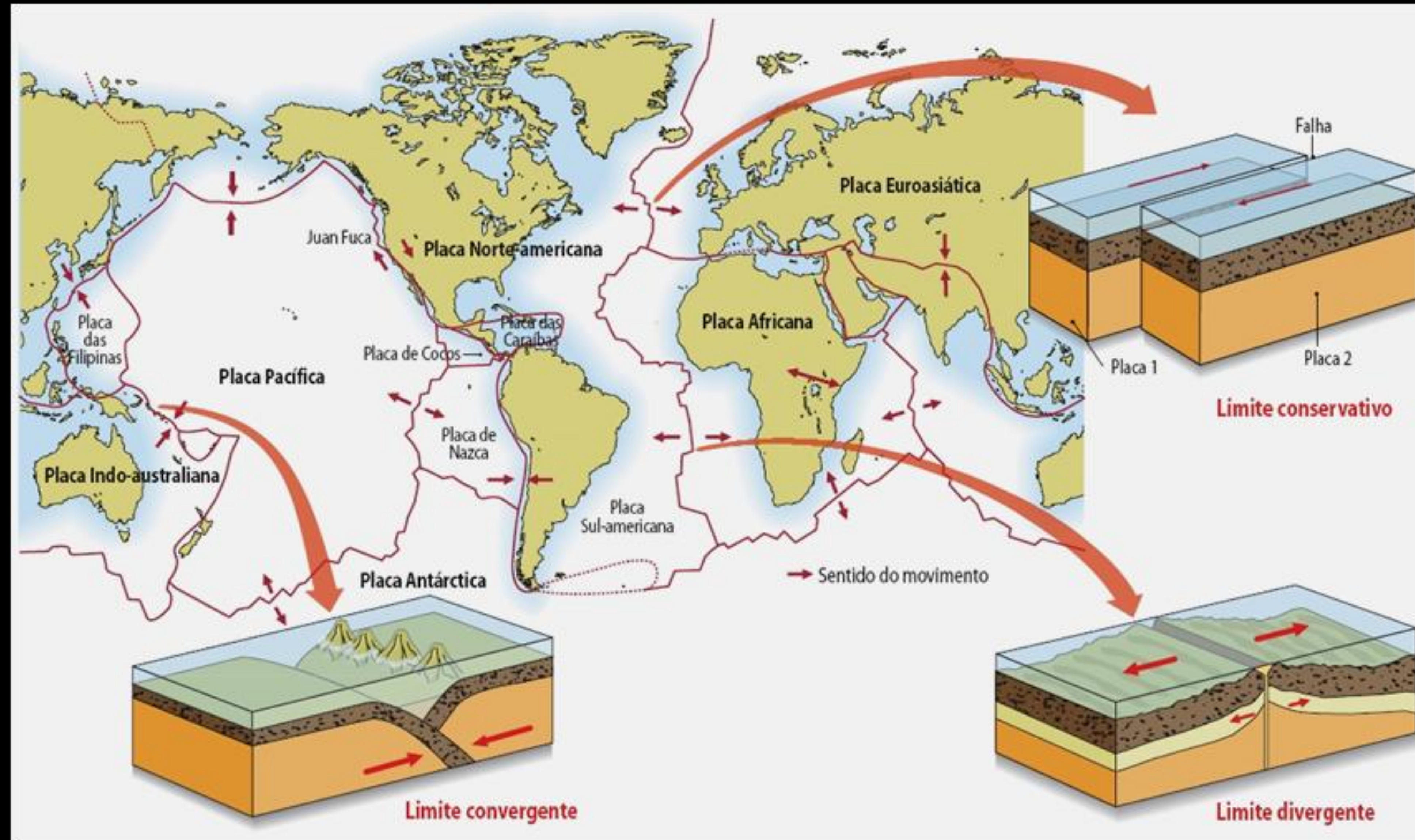
# COMO AGITAR A TERRA?

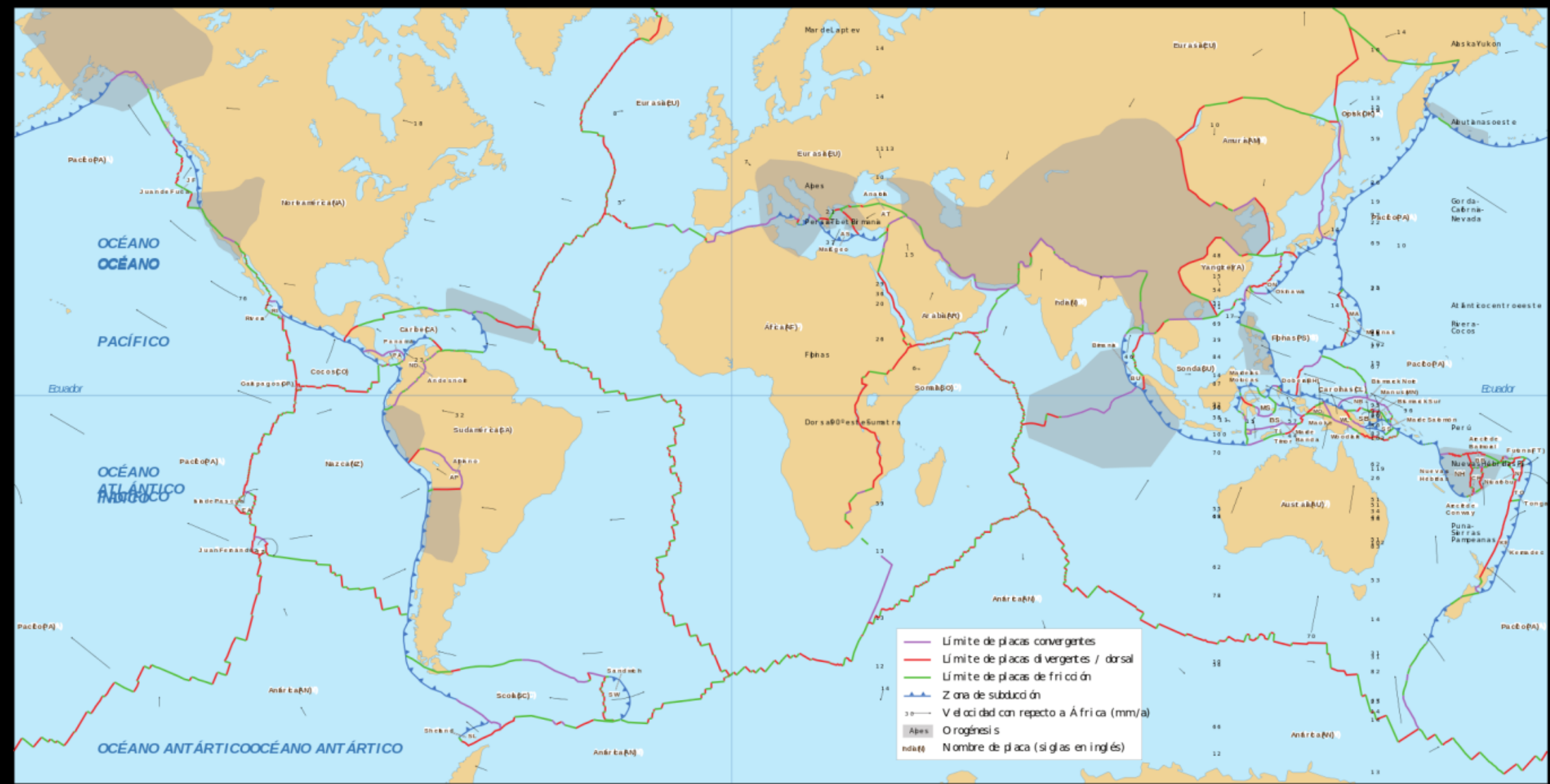
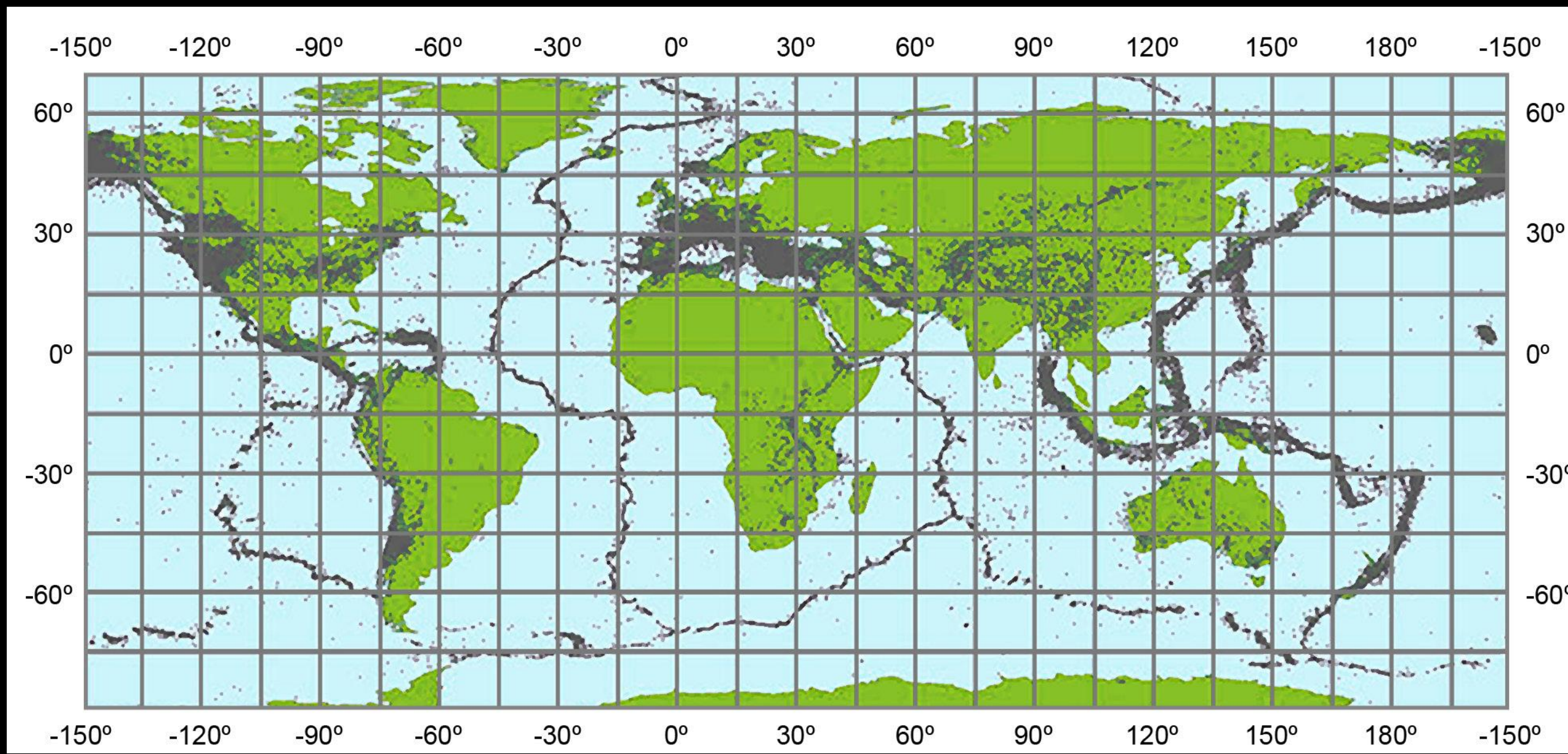


# TERREMOTOS

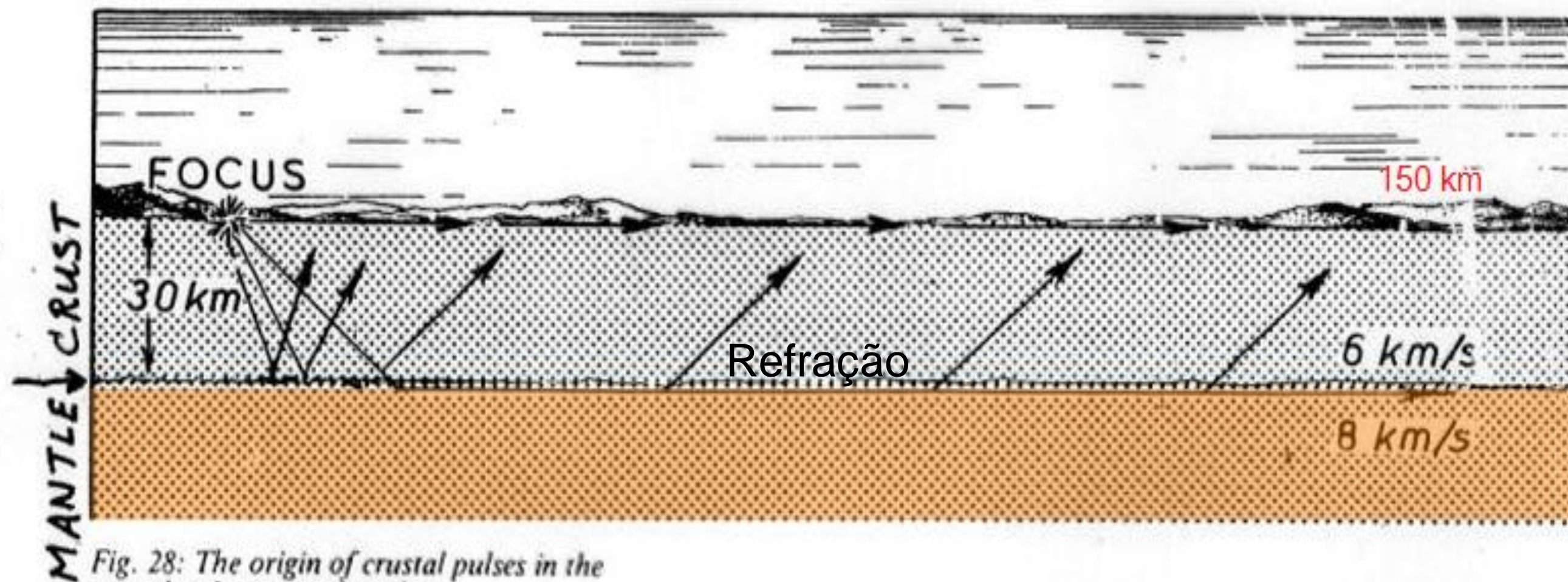
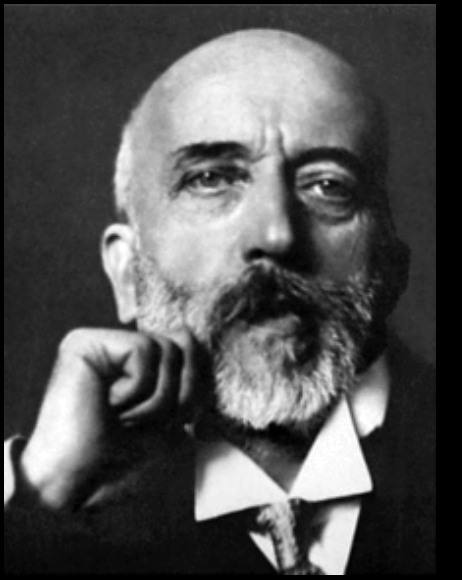


# ONDE OCORRE A MAIORIA DOS TERREMOTOS?

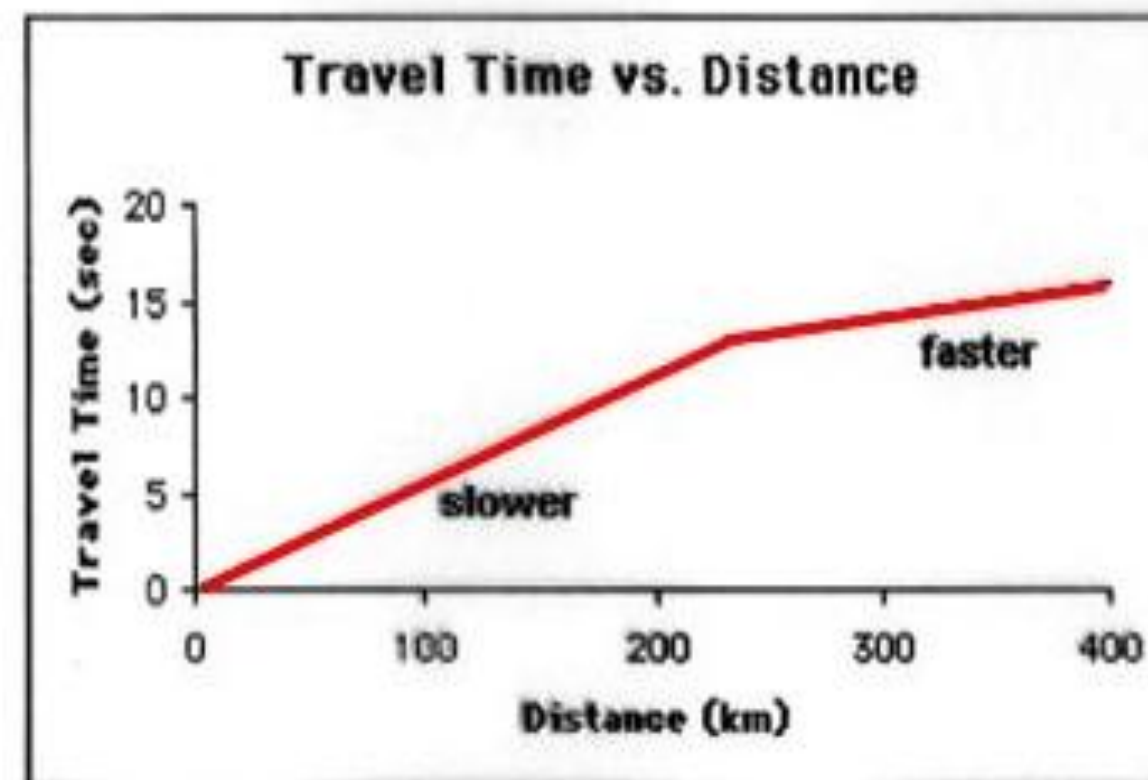




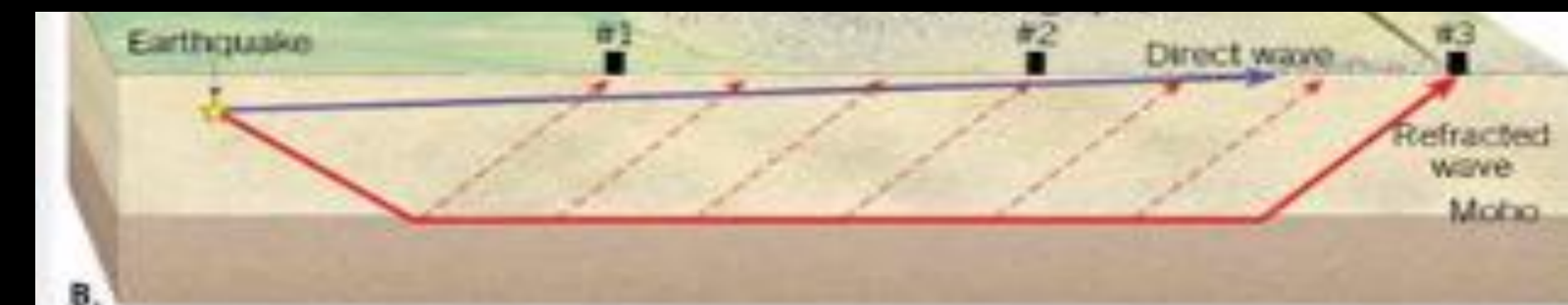
# DESCONTINUIDADE DE MOHO



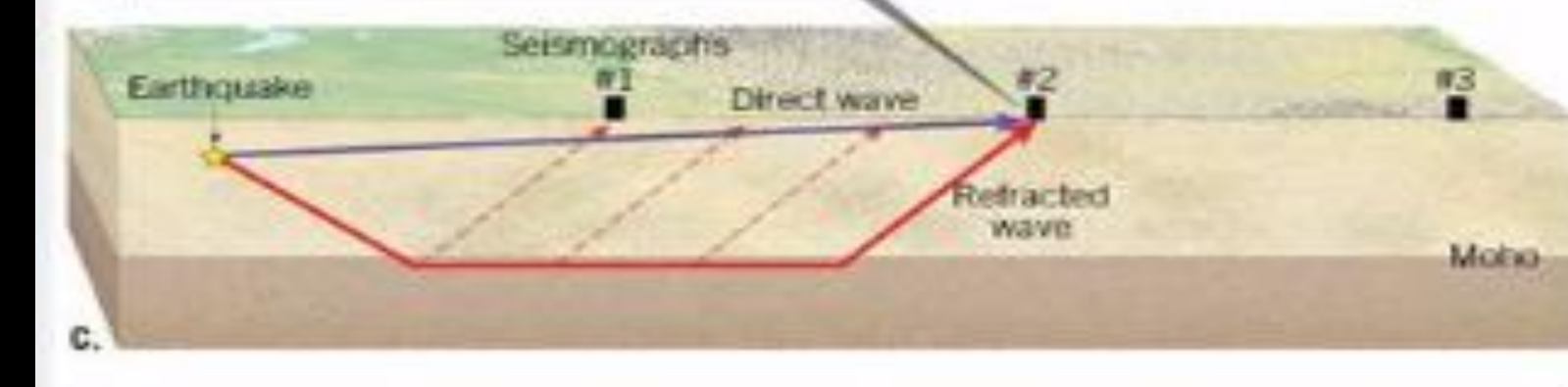
"Moho"  
 Andrija Mohorovicic  
 Zagreb Seismological Observatory  
 1909



Tempos de chegada proporcionais à distância para estações até 150 km



At the cross-over point, both waves arrive at the same time. The distance to the cross-over point increases as the depth of the Moho increases, and therefore can be used to determine the thickness of the crust at different locations.



Para mais do que 150 km de distância, a onda chegava mais rápido do que deveria, se houvesse homogeneidade no interior da Terra.

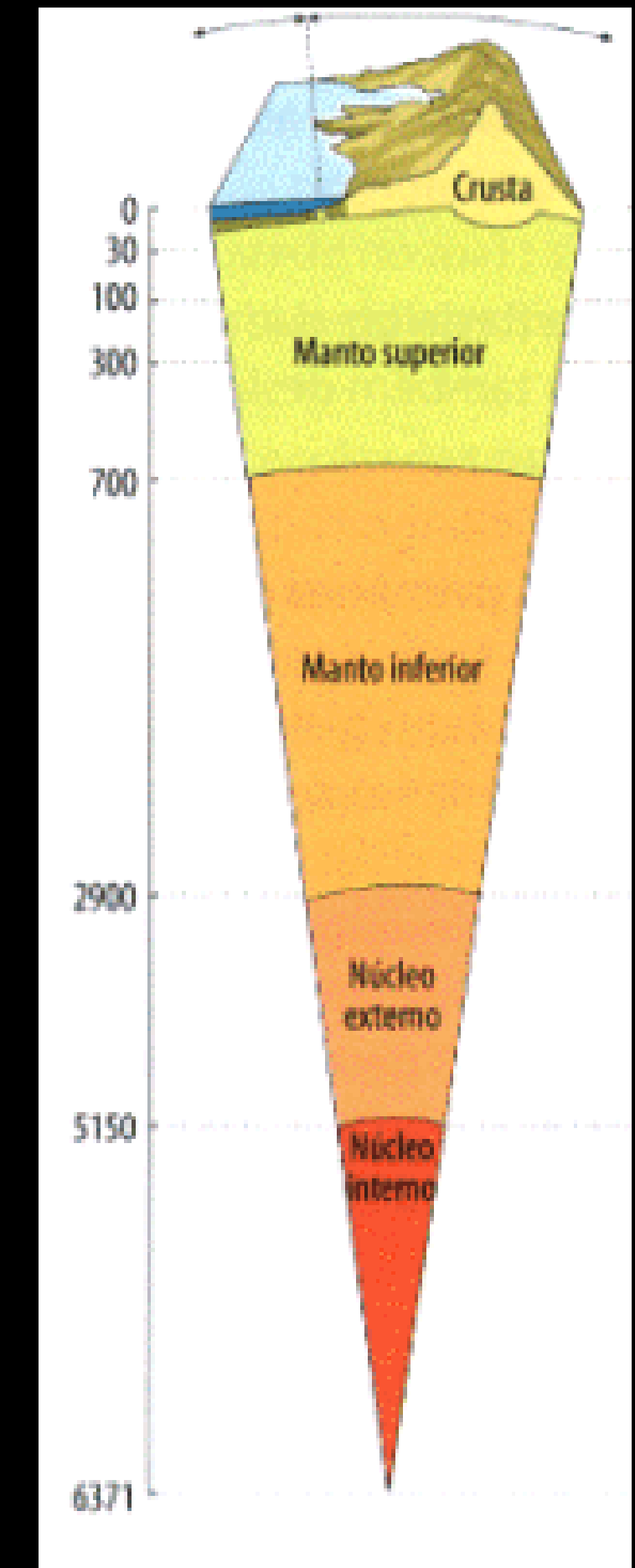
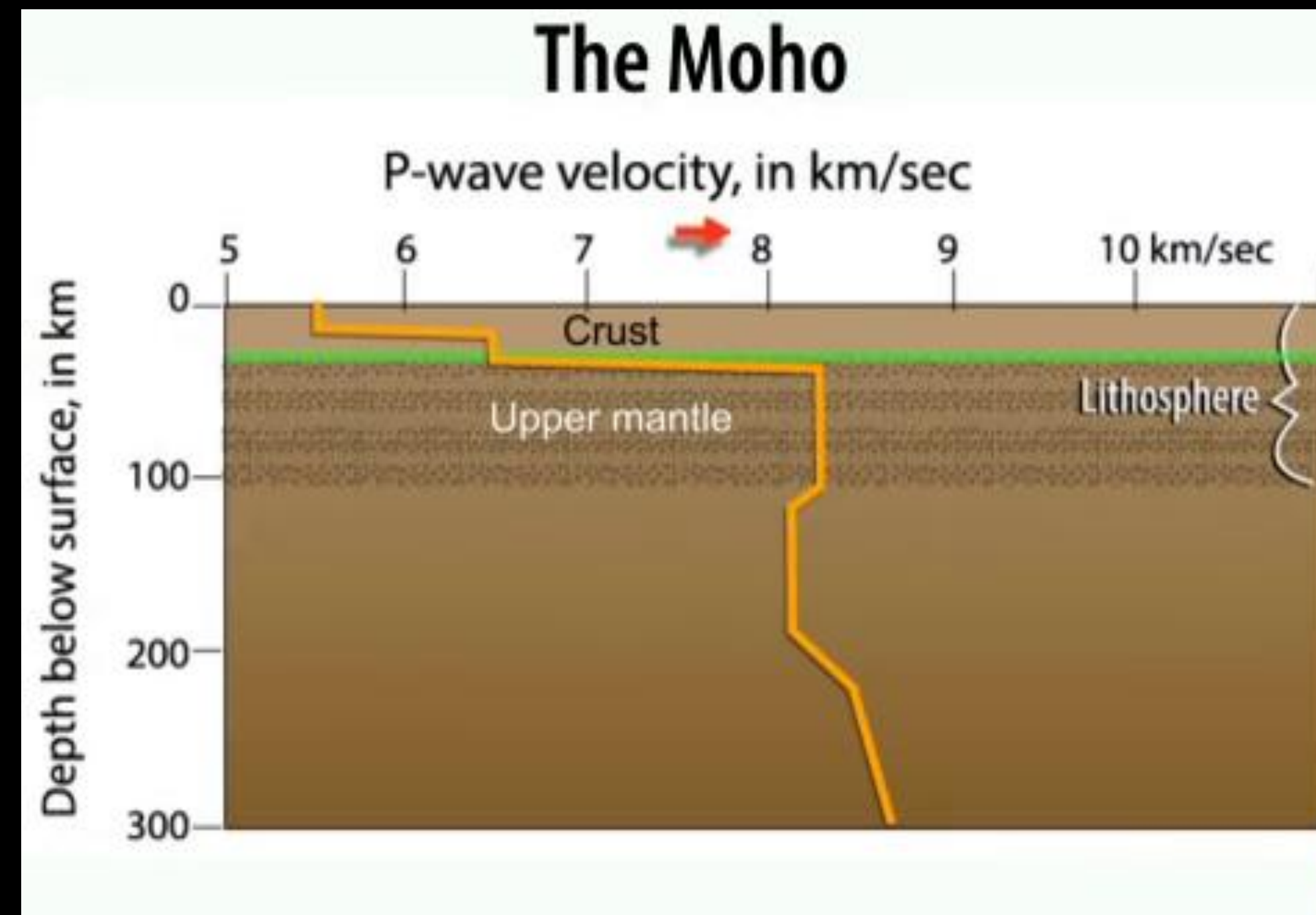
# A CROSTA TERRESTRE



A  $V_p$  aumenta bruscamente de valores entre 6,8 - 7,2 km/s para 8,0 - 8,2 km/s, sendo esta última característica do manto superior

Sob os continentes: média de 35 km

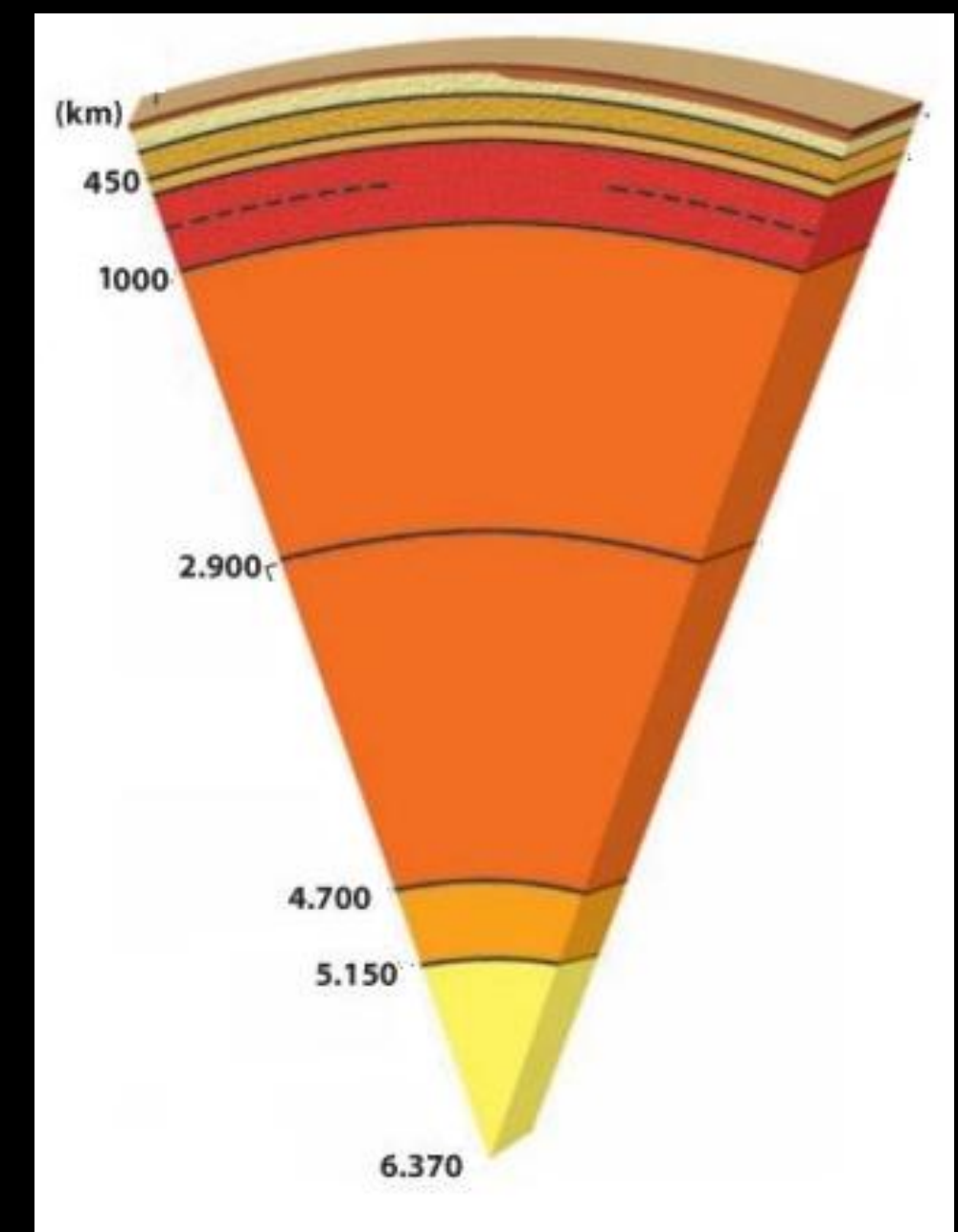
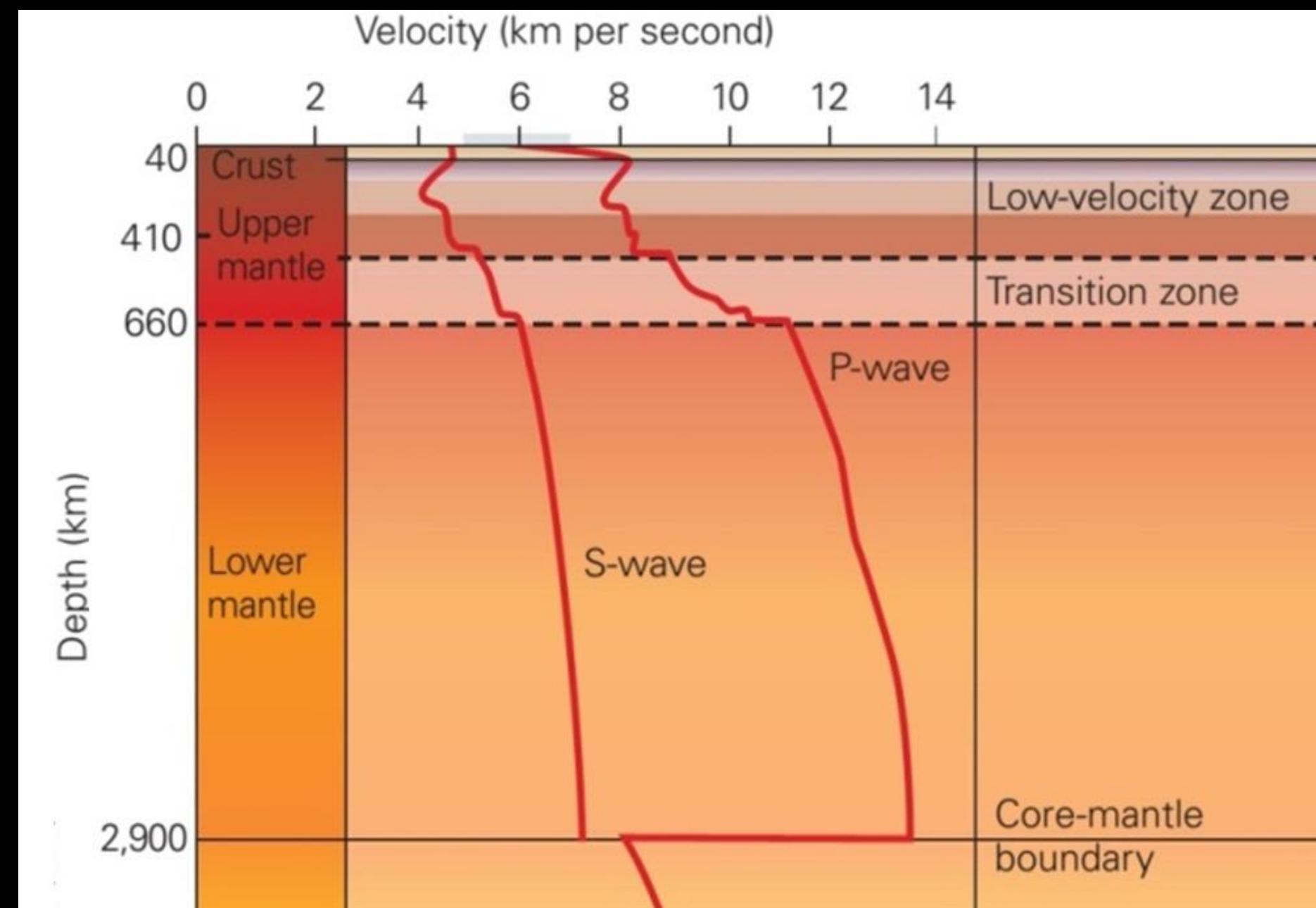
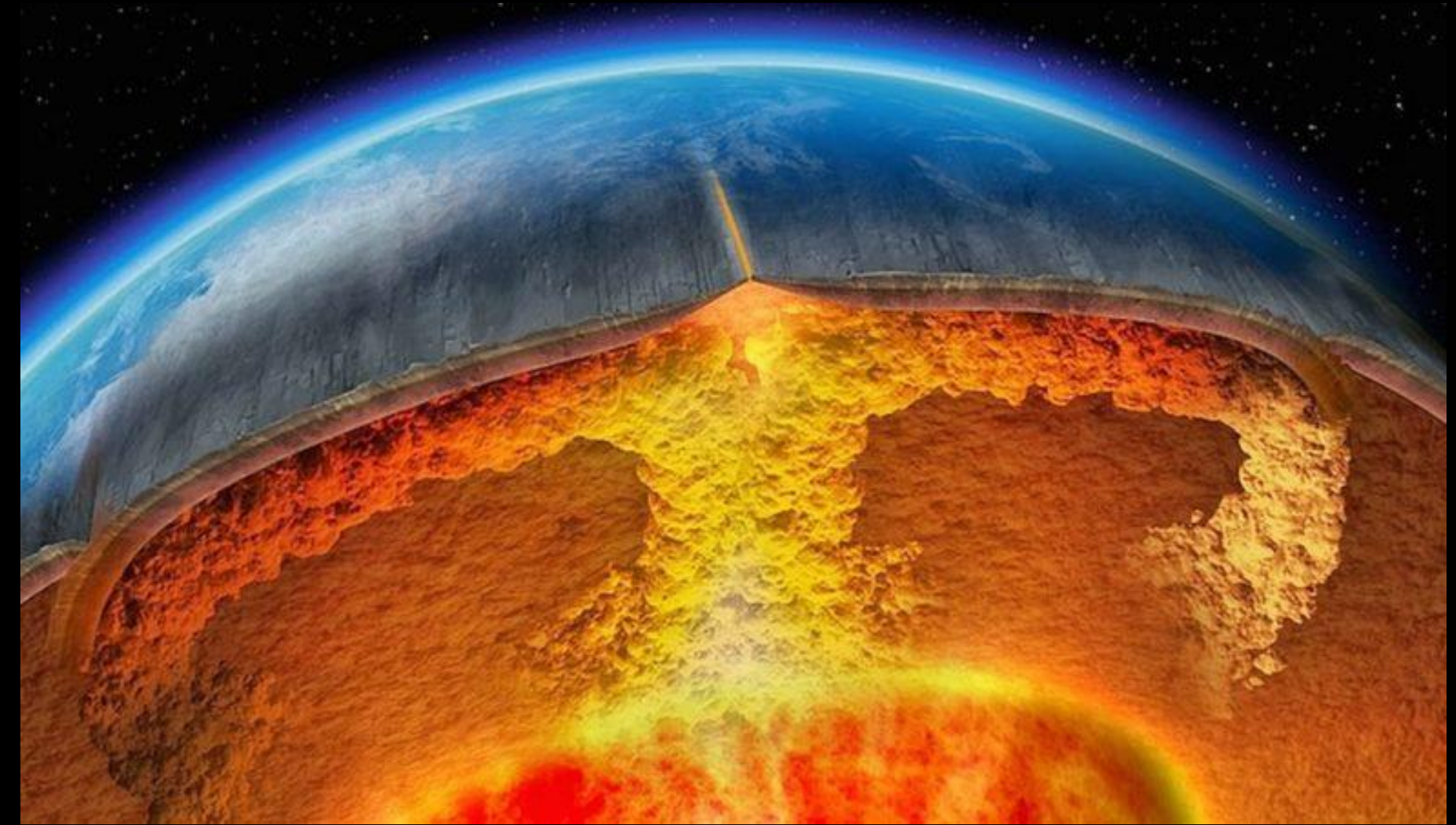
Sob os oceanos: média 6 - 7 km





# O MANTO TERRESTRE

- Concentra 67,2% da massa terrestre e 83% do seu volume.
- Profundidade média de 35 a 45 km – 2900 km sob áreas continentais e de 5 km – 2900 km nos oceanos
- É sólido (passagem de ondas sísmicas do tipo S) e constituído por minerais silicáticos ricos em ferro e magnésio (olivinas e piroxênios), apresentando composição peridotítica.
- Densidade de  $3,5 \text{ g/cm}^3$  a  $5,5 \text{ g/cm}^3$ . A curva de densidade em função da profundidade não é suave, apresentando saltos que sugerem mudanças significativas na composição e/ou arranjo cristalino de suas rochas



# O NÚCLEO TERRESTRE

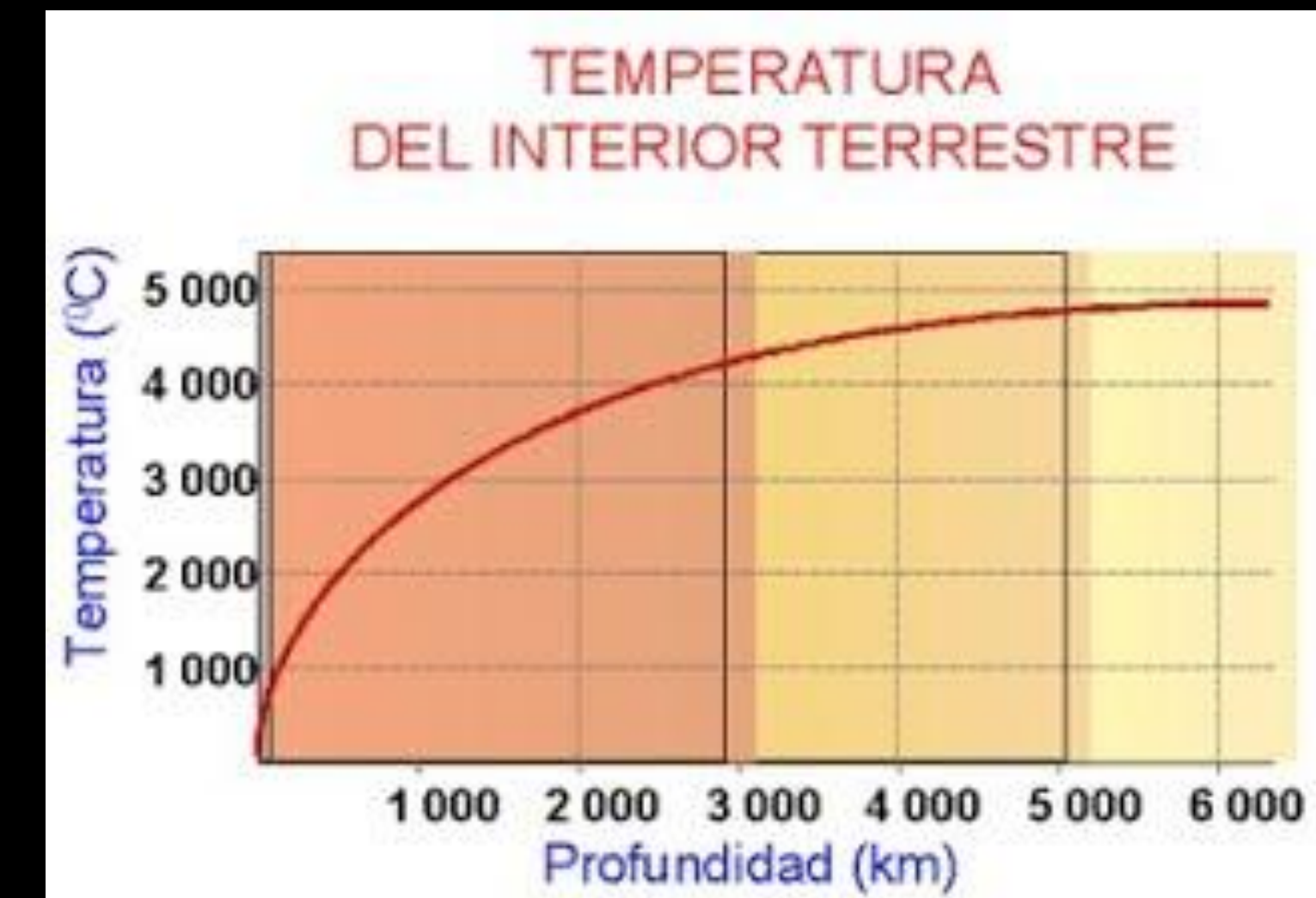
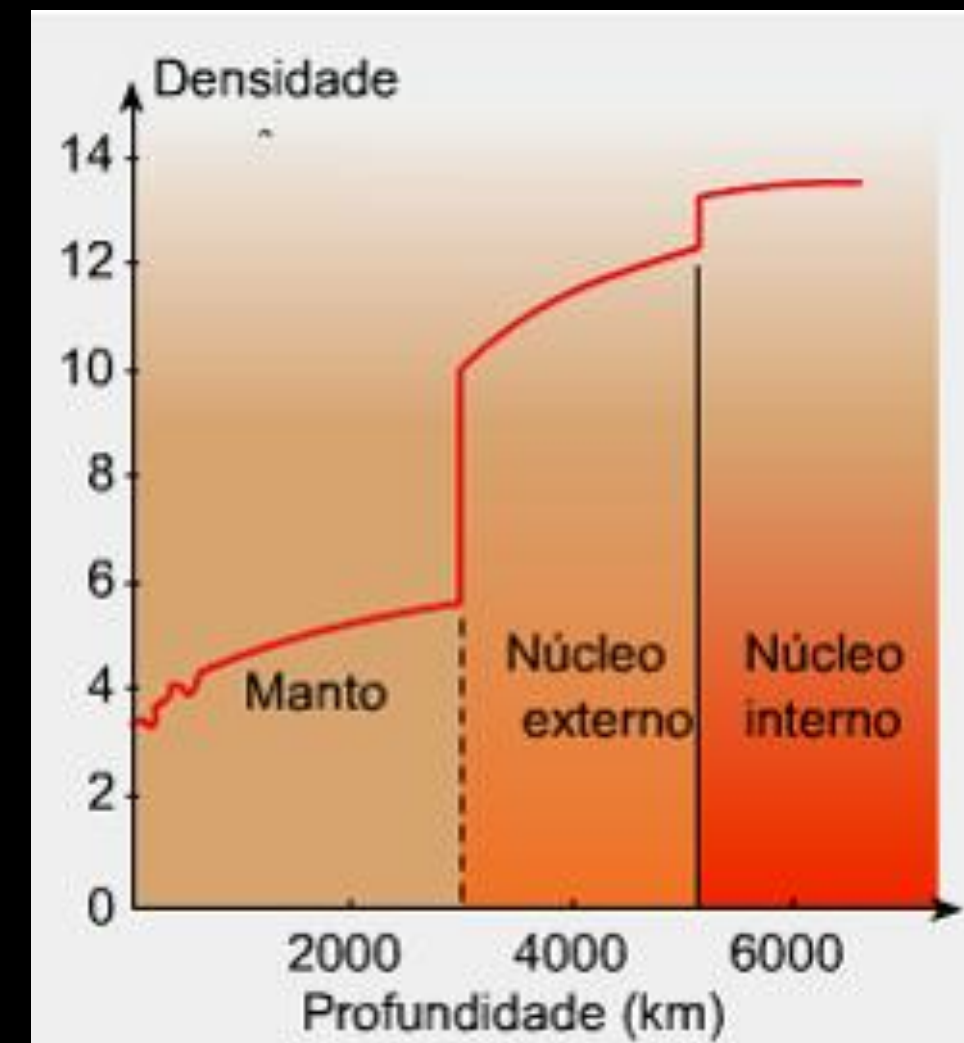
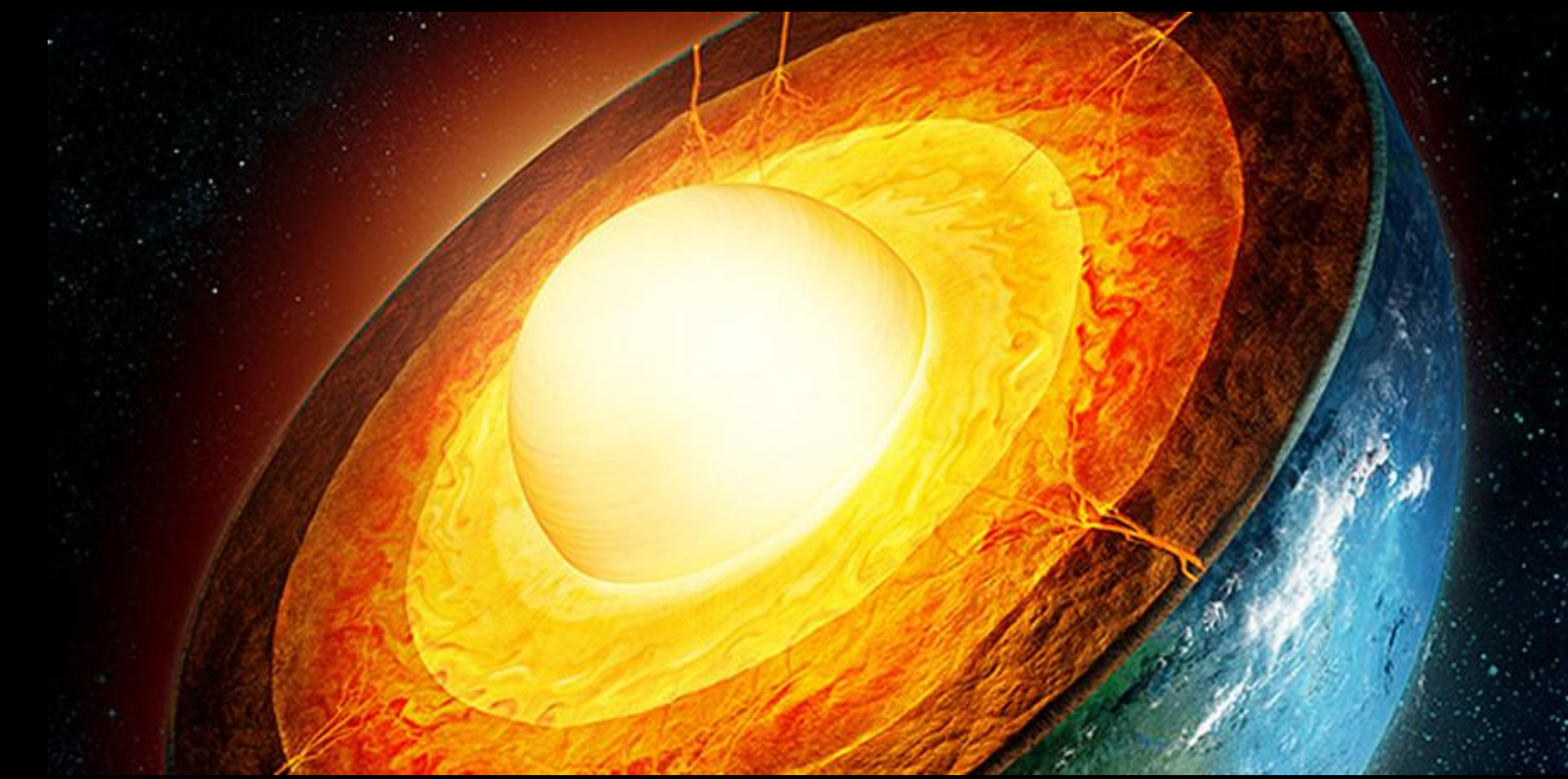
Profundidade: de 2.900 km a 6371 km  
NE/NI: 5.200 km.

Pressão: extremamente alta.  
NE: 1,3 milhões de atmosferas  
NI: 3,5 milhões de atmosferas

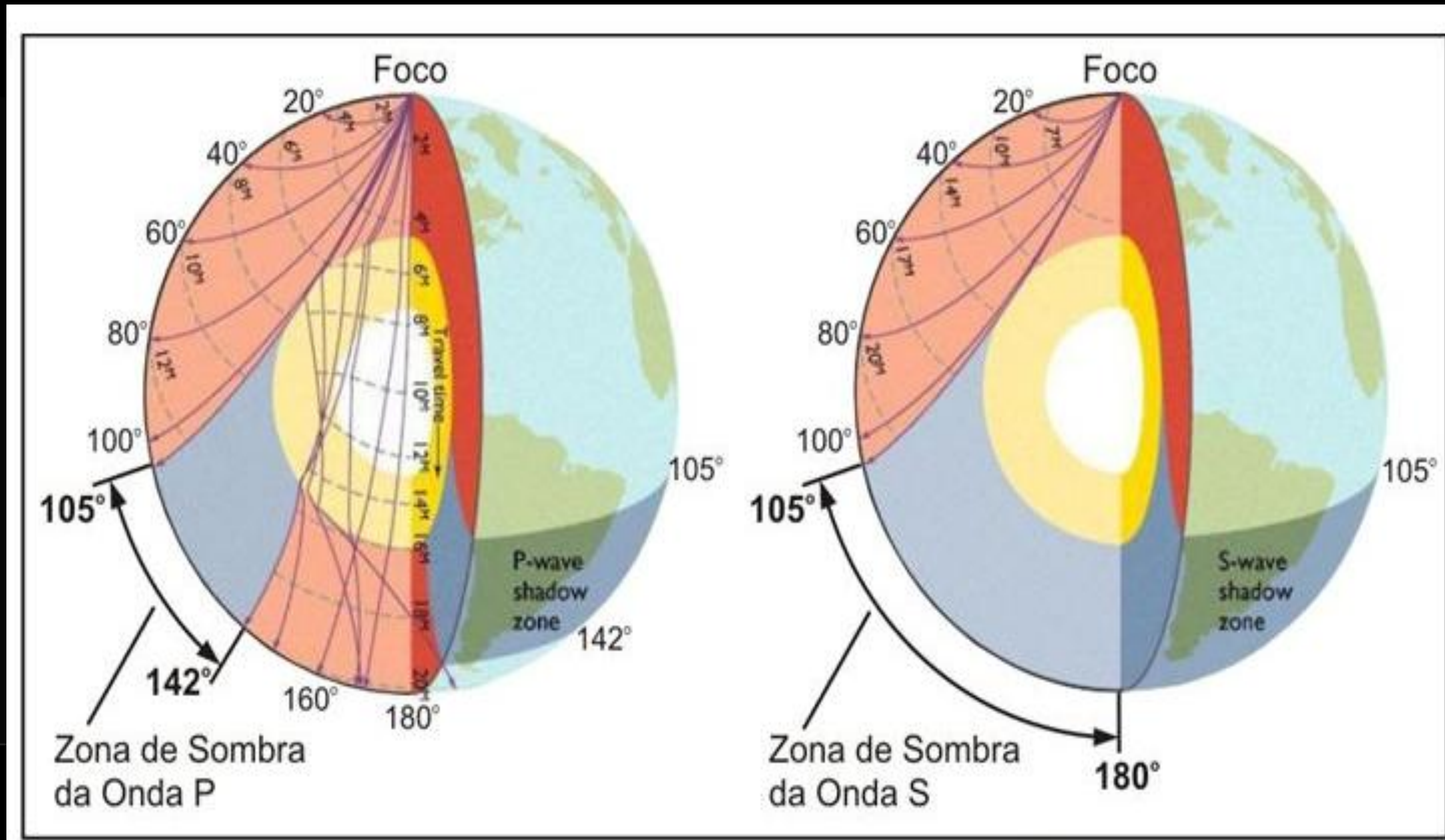
Temperatura: entre 4.000 e 5.000°C

Densidade muito elevada  
Manto/NE: 9,9 g/cm<sup>3</sup>  
NE/NI: 12,6 g/cm<sup>3</sup>  
NI: 13,5 g/cm<sup>3</sup>

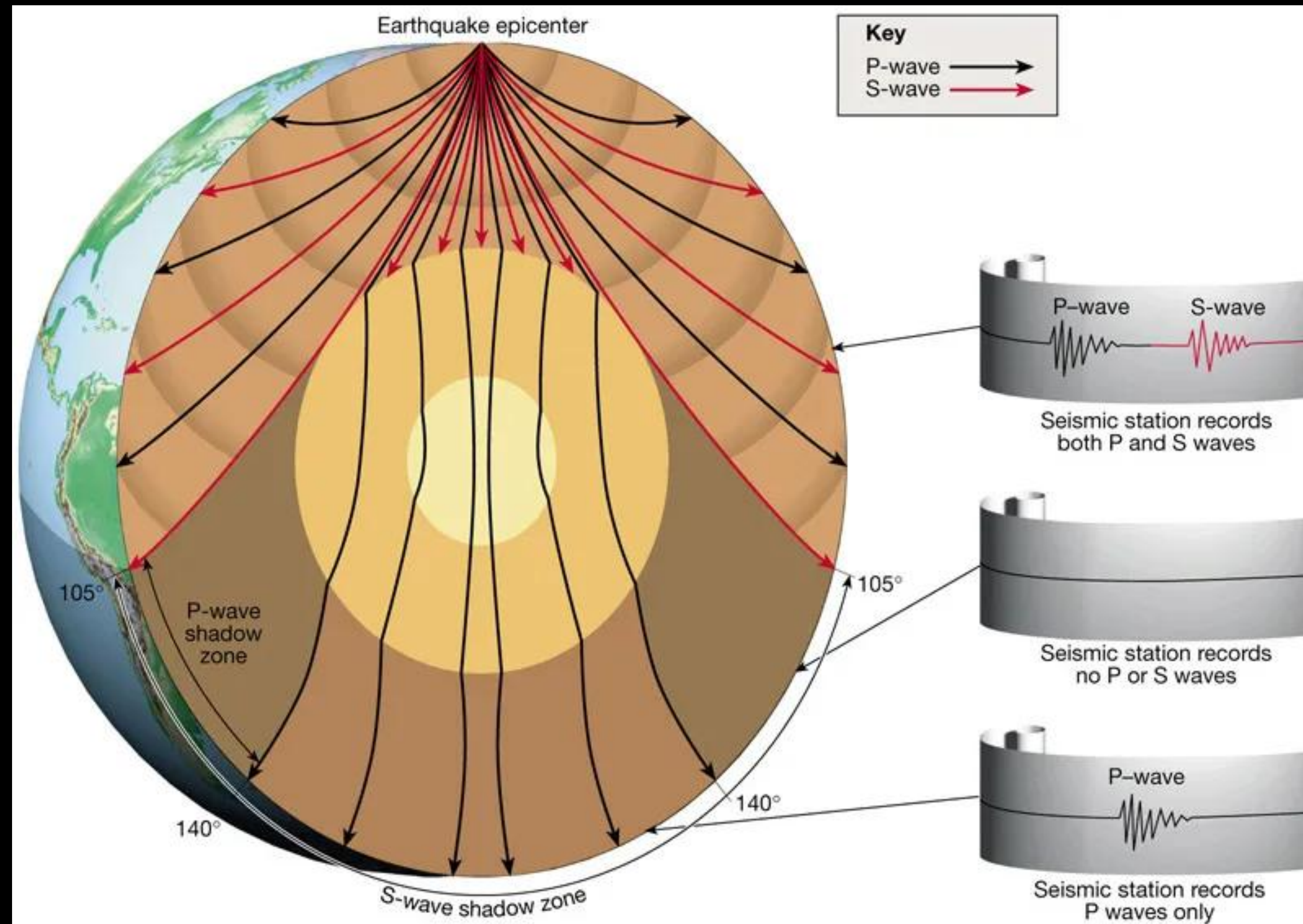
Idade aproximada: dados paleomagnéticos mostram que o núcleo existe há pelo menos 3,5 bilhões de anos



# DESCONTINUIDADE DE GUTENBERG



# DESCONTINUIDADE DE LEHMANN



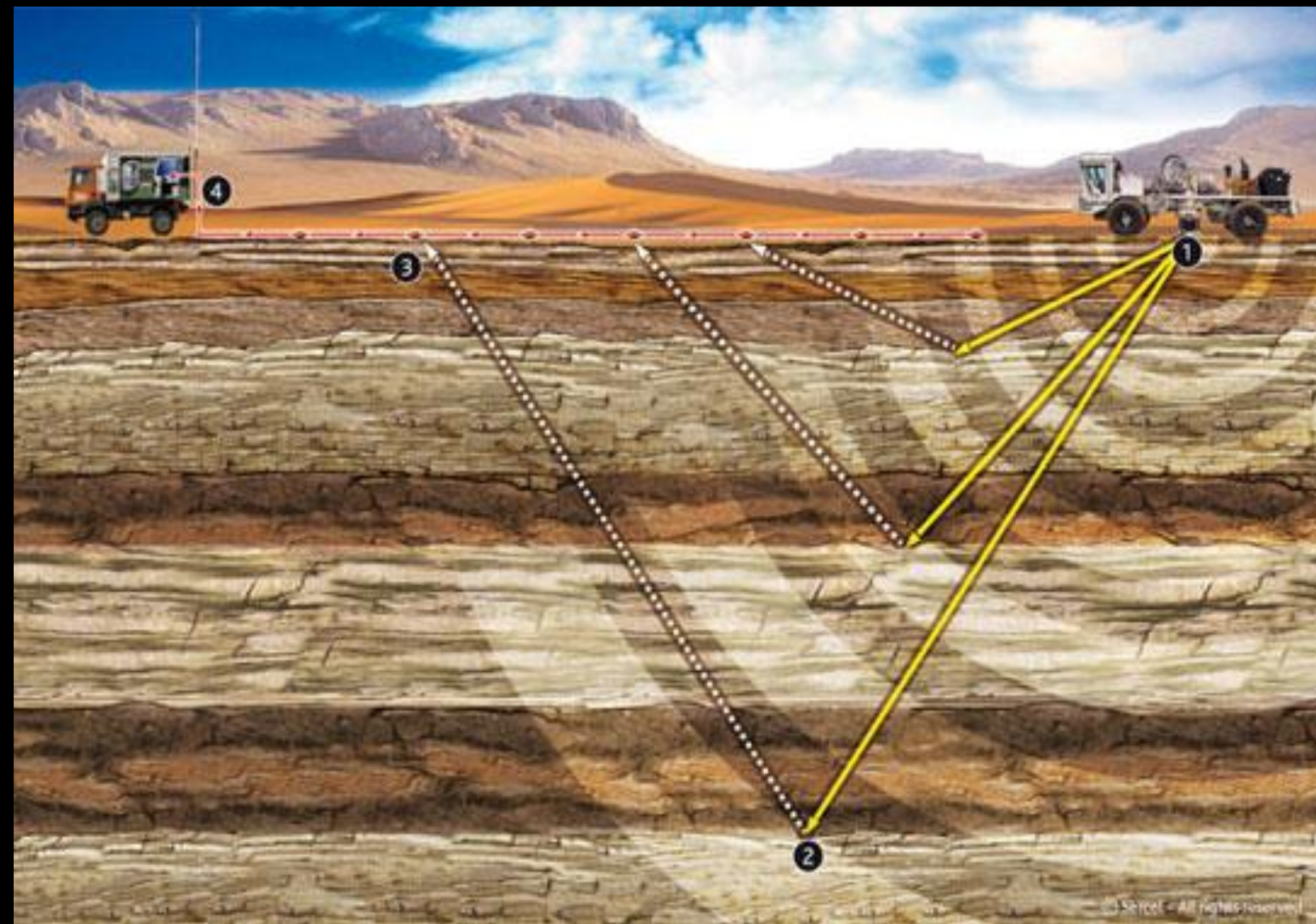
**Inge Lehmann**  
(1888-1993)

Determinou a profundidade e o estado físico do núcleo interno terrestre, em 1936.

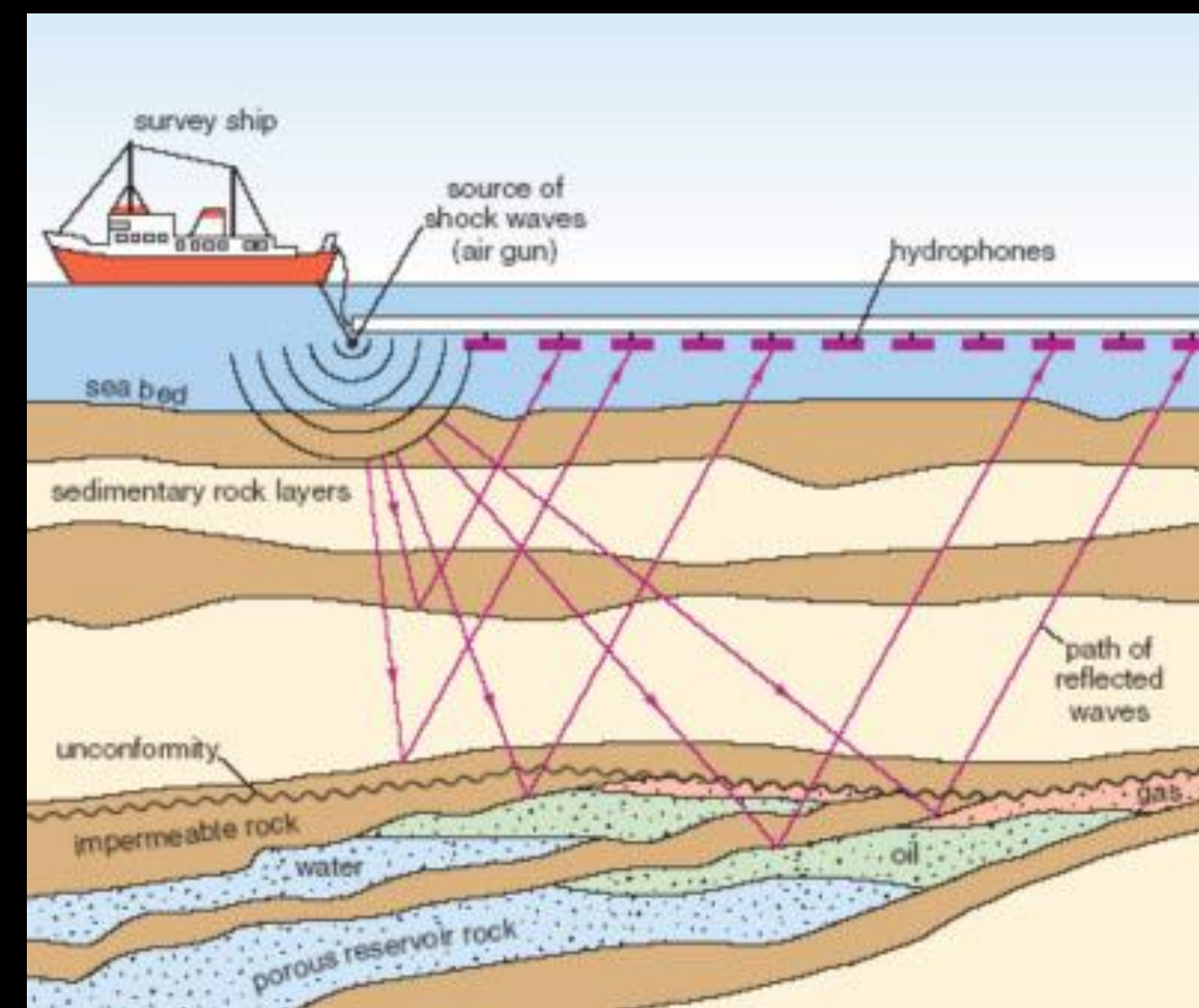
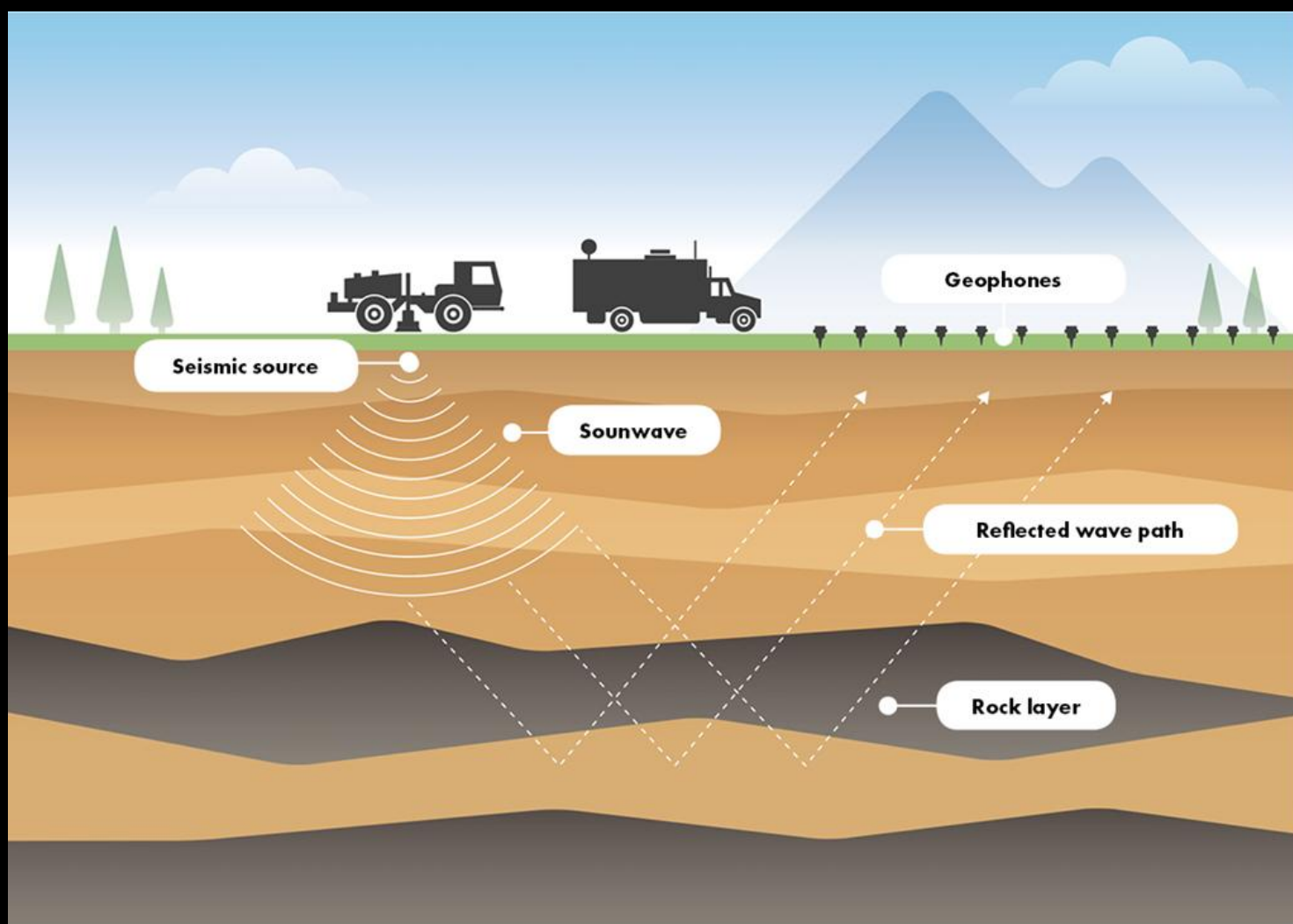
# COMO AGITAR A TERRA?



# E SE A TERRA NÃO QUISE AGITAR?



© Seiscol - All rights reserved



GEOFÍSICA SÓ  
FUNCIONA NA  
TERRA?



# Passive Seismic Experiment

**Apollo 11** JUL 69  
Mare Tranquillitatis  
0.67416°N 23.47314°E  
LM: 21.6 hours EVA: 2.5 hours

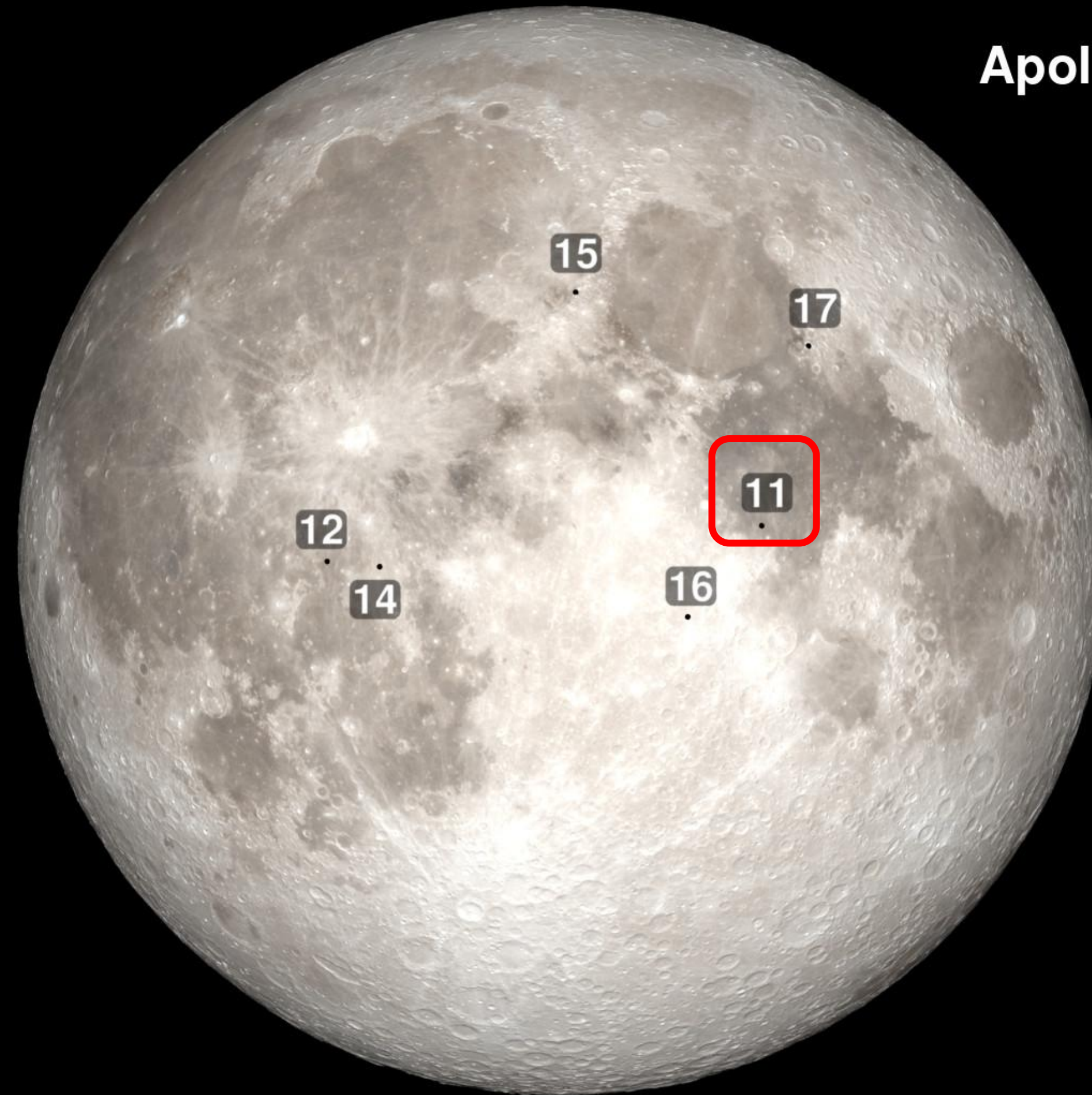
**Apollo 12** NOV 69  
Oceanus Procellarum  
3.0128°S 23.4219°W  
LM: 31.5 hours EVA: 7.8 hours

**Apollo 14** FEB 71  
Fra Mauro Highlands  
3.64589°S 17.47194°W  
LM: 33.5 hours EVA: 9.4 hours

**Apollo 15** AUG 71  
Hadley Rille  
26.13239°N 3.63330°E  
LM: 66.9 hours EVA: 19.1 hours

**Apollo 16** APR 72  
Descartes Highlands  
8.9734°S 15.5011°E  
LM: 71.0 hours EVA: 20.2 hours

**Apollo 17** DEC 72  
Taurus-Littrow Valley  
20.1911°N 30.7655°E  
LM: 75.0 hours EVA: 22.1 hours



## Apollo Landing Sites



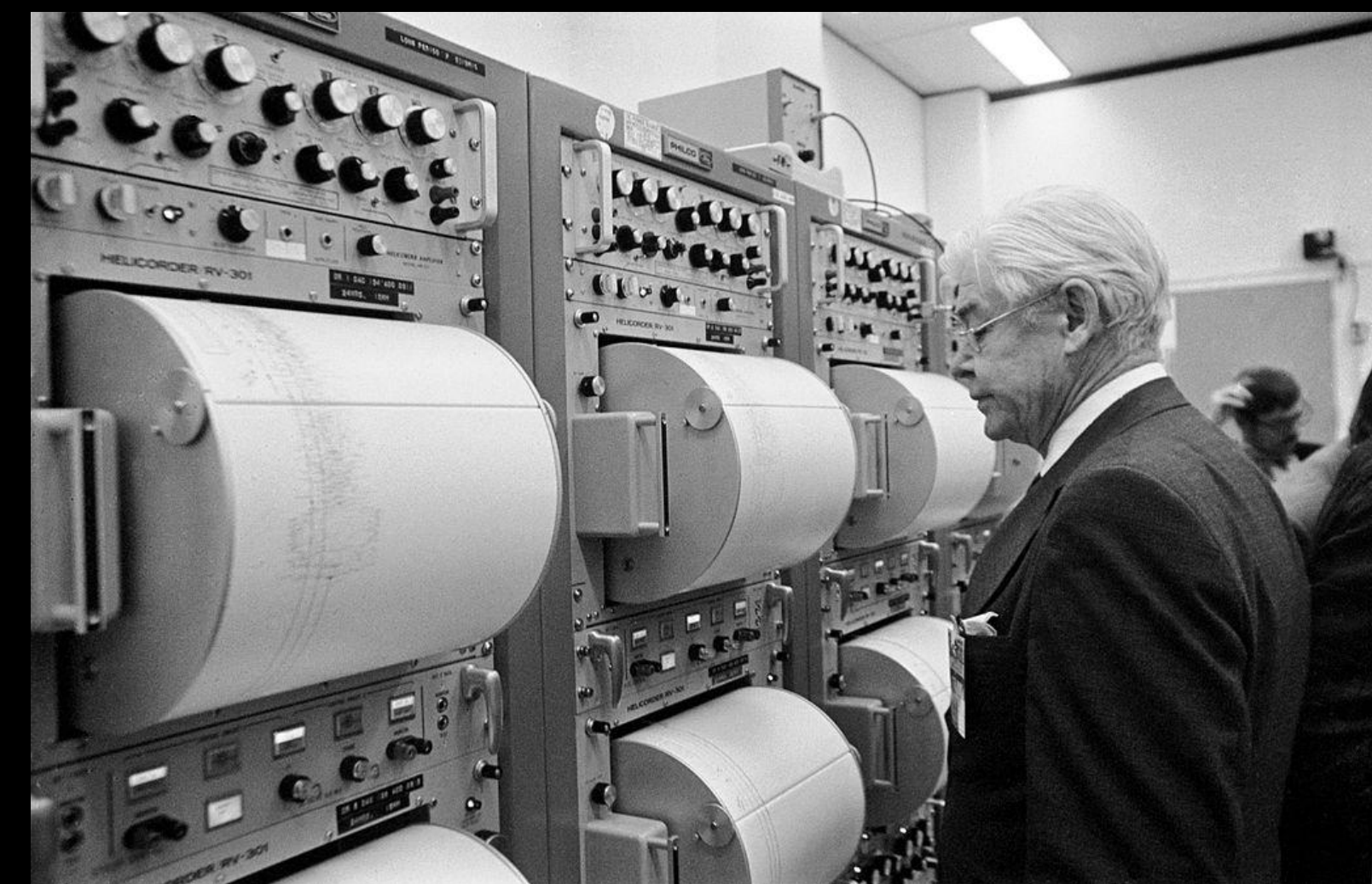


# PSE – Passive Seismic Experiment

Em 1969, Gary Latham, um geofísico do Lamont, mostrou aos astronautas do Manned Spaceflight Center da NASA (atual Johnson Space Center) como equipar o PSE.

O esforço da NASA para colocar um sismômetro na Lua começou em 1959 com o programa Ranger. Ranger falhou. Depois do ranger veio o Surveyor, que começou em 1969 e Maurice Ewing da LDEO foi convidado a ajudar. Ewing foi o primeiro cientista a estudar o fundo do oceano a partir de ondas sísmicas. Latham e Ewing trabalharam juntos nisso. Eles imaginaram que o sismômetro iria funcionar em um foguete e em 1966 foi anunciado que seria na missão Apollo 11

O Experimento Sísmico Passivo Apollo (PSE) consistia em quatro sismômetros implantados no lado visível da Lua entre 1969 e 1972, que continuamente registrou três direções ortogonais de movimento do solo até o final de 1977.



# O INTERIOR LUNAR VISTO PELA GEOFÍSICA

SHARE REPORT

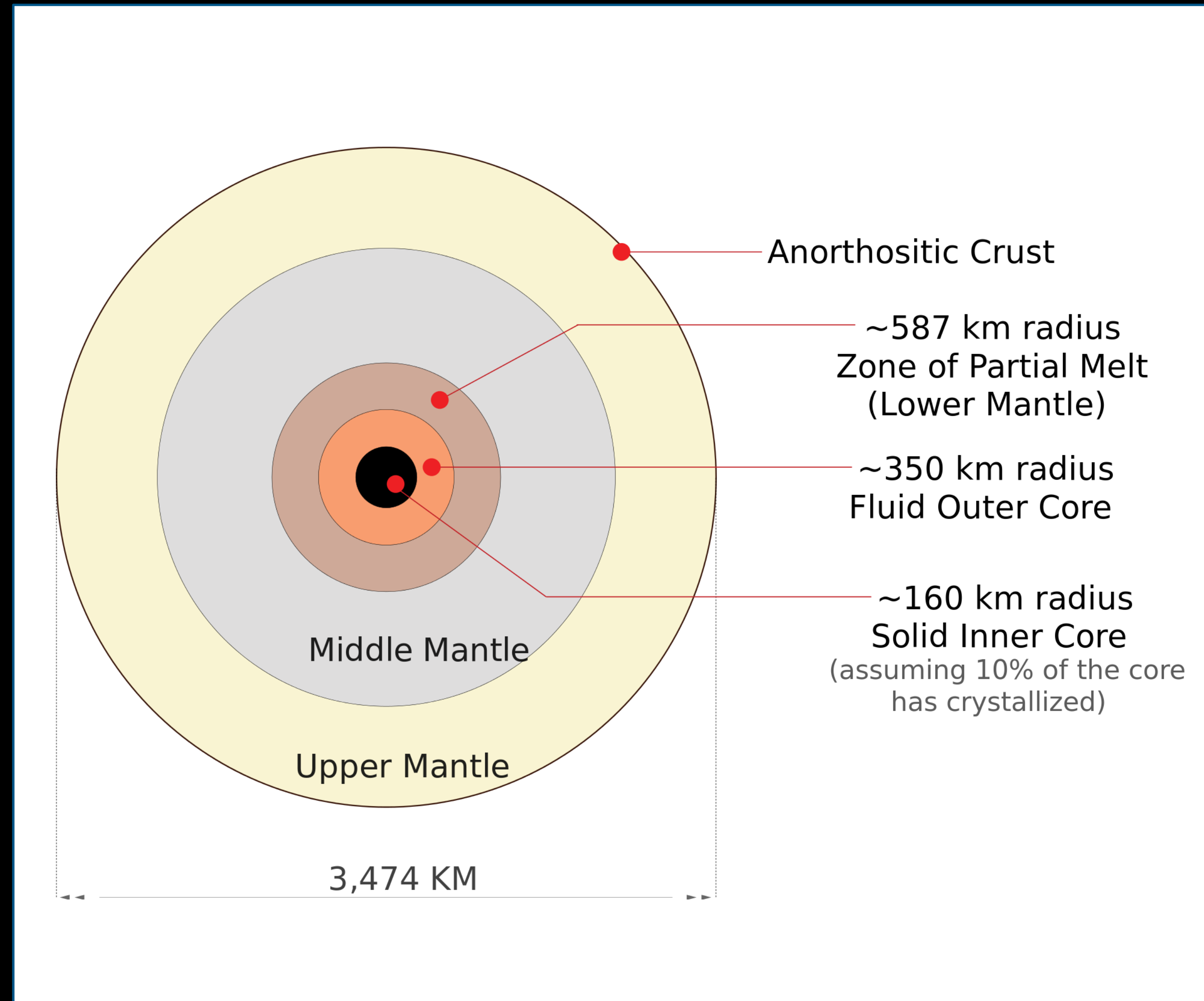
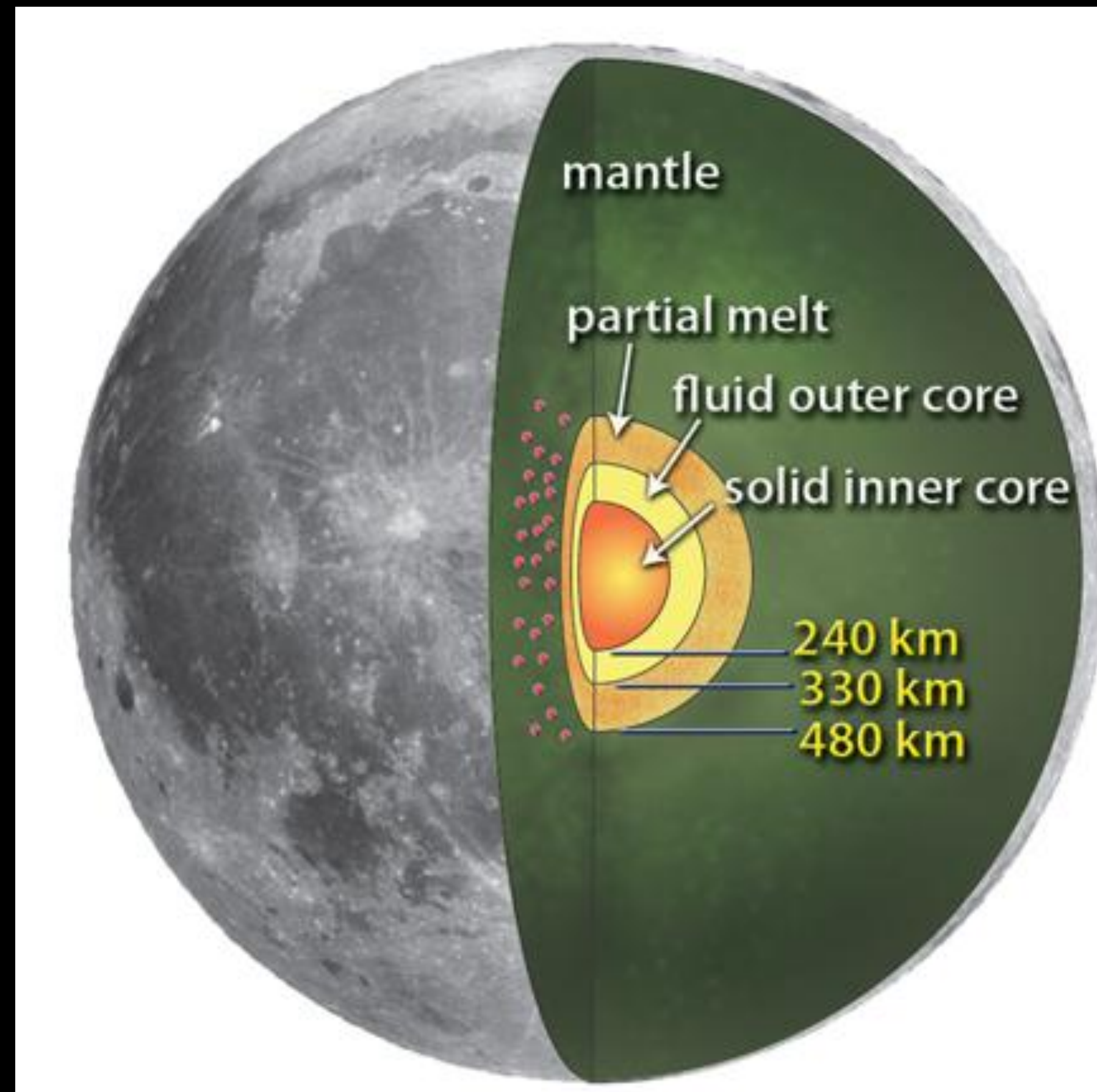
## Seismic Detection of the Lunar Core

Renee C. Weber<sup>1,\*</sup>, Pei-Ying Lin<sup>2</sup>, Edward J. Garnero<sup>2</sup>, Quentin Williams<sup>3</sup>, Philippe Lognonné<sup>4</sup>

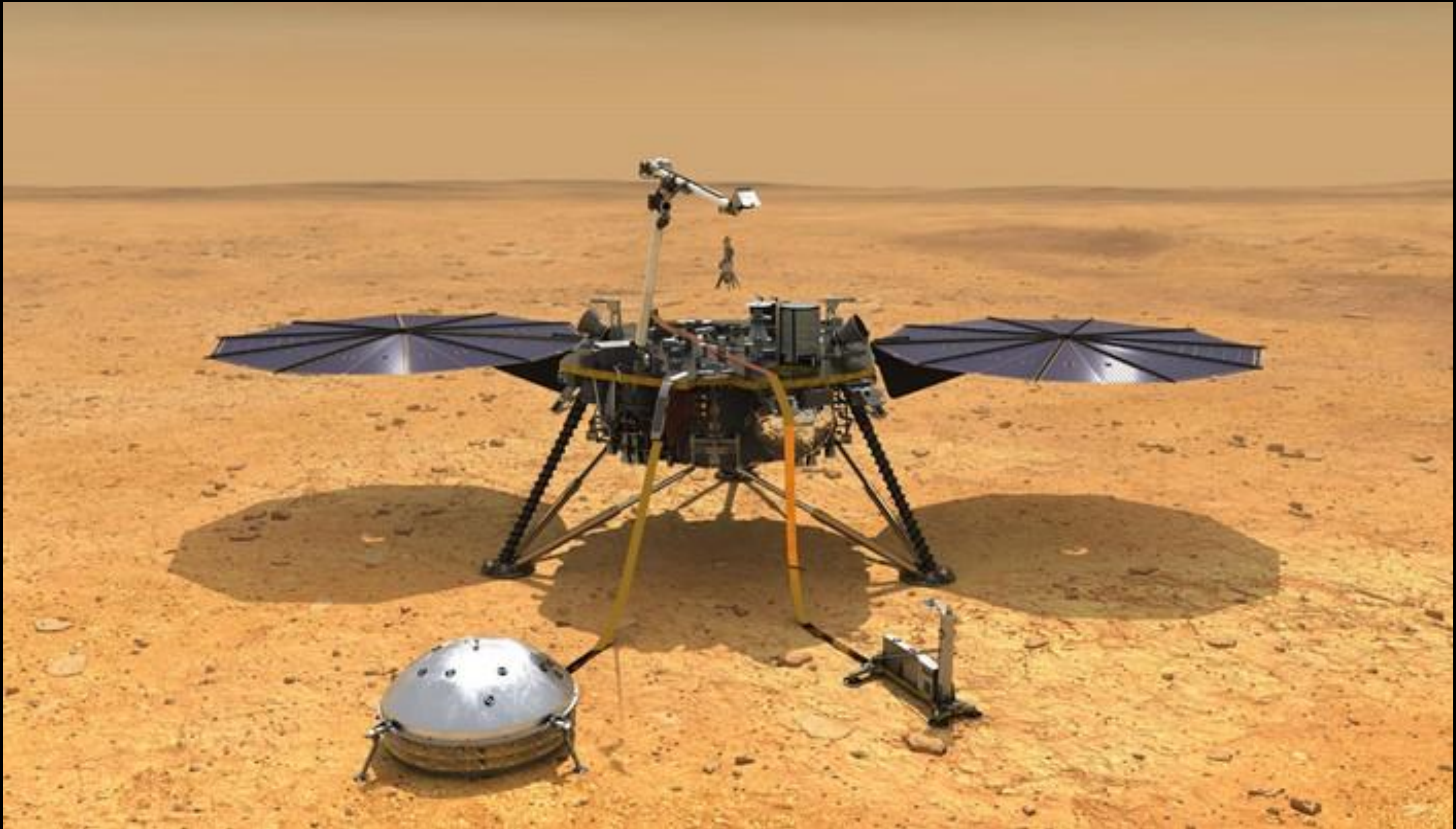
+ See all authors and affiliations

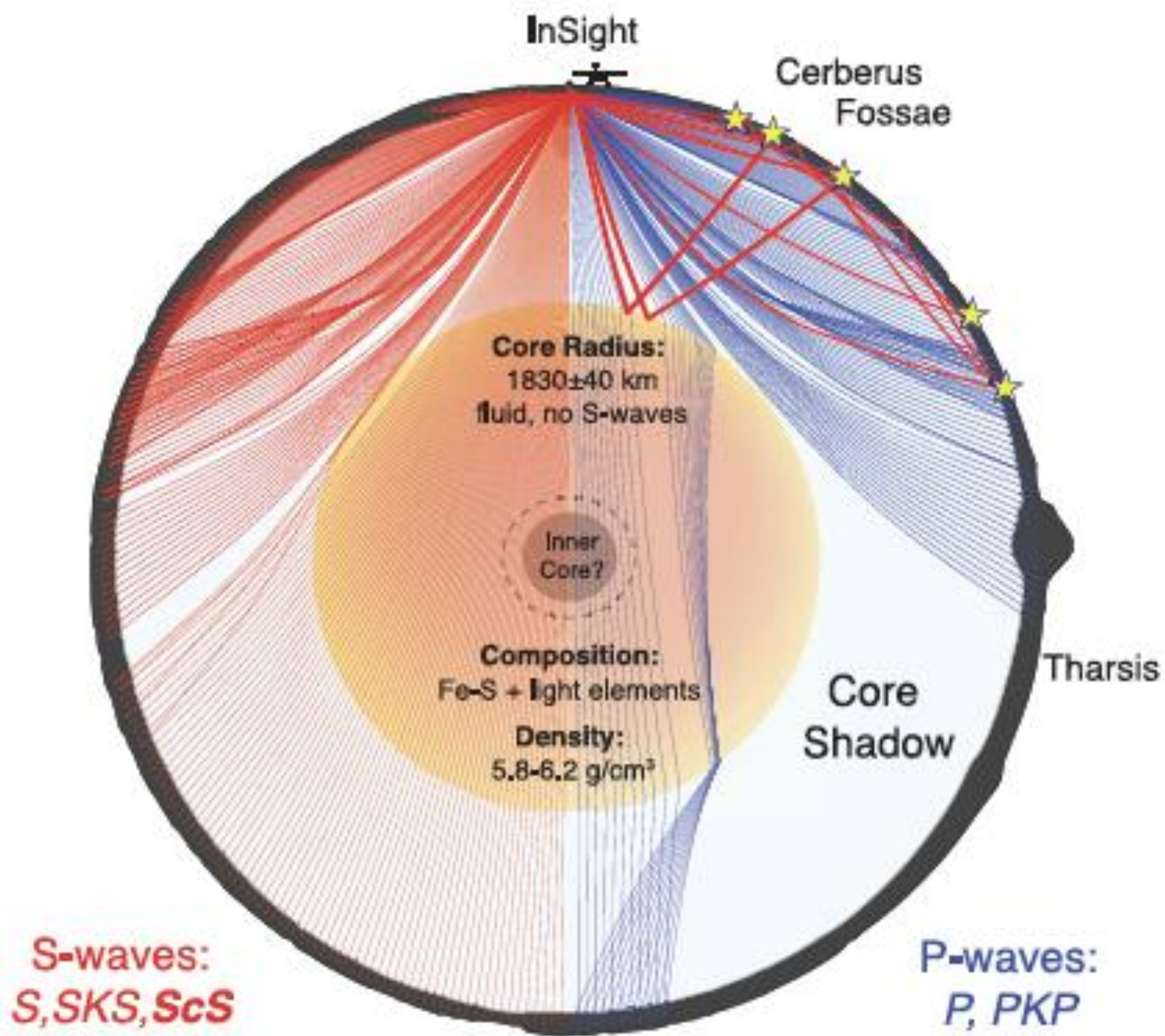
Science 21 Jan 2011:  
Vol. 331, Issue 6015, pp. 309-312  
DOI: 10.1126/science.1199375

Article **Figures & Data** Info & Metrics eLetters PDF



# O INTERIOR MARCIANO VISTO PELA GEOFÍSICA





COMO DESCOBRIR  
O QUE TEM  
DENTRO DA  
CAIXA?

???





AGITAR A  
CAIXA

PESAR A  
CAIXA



# COMO “PESAR” A TERRA?

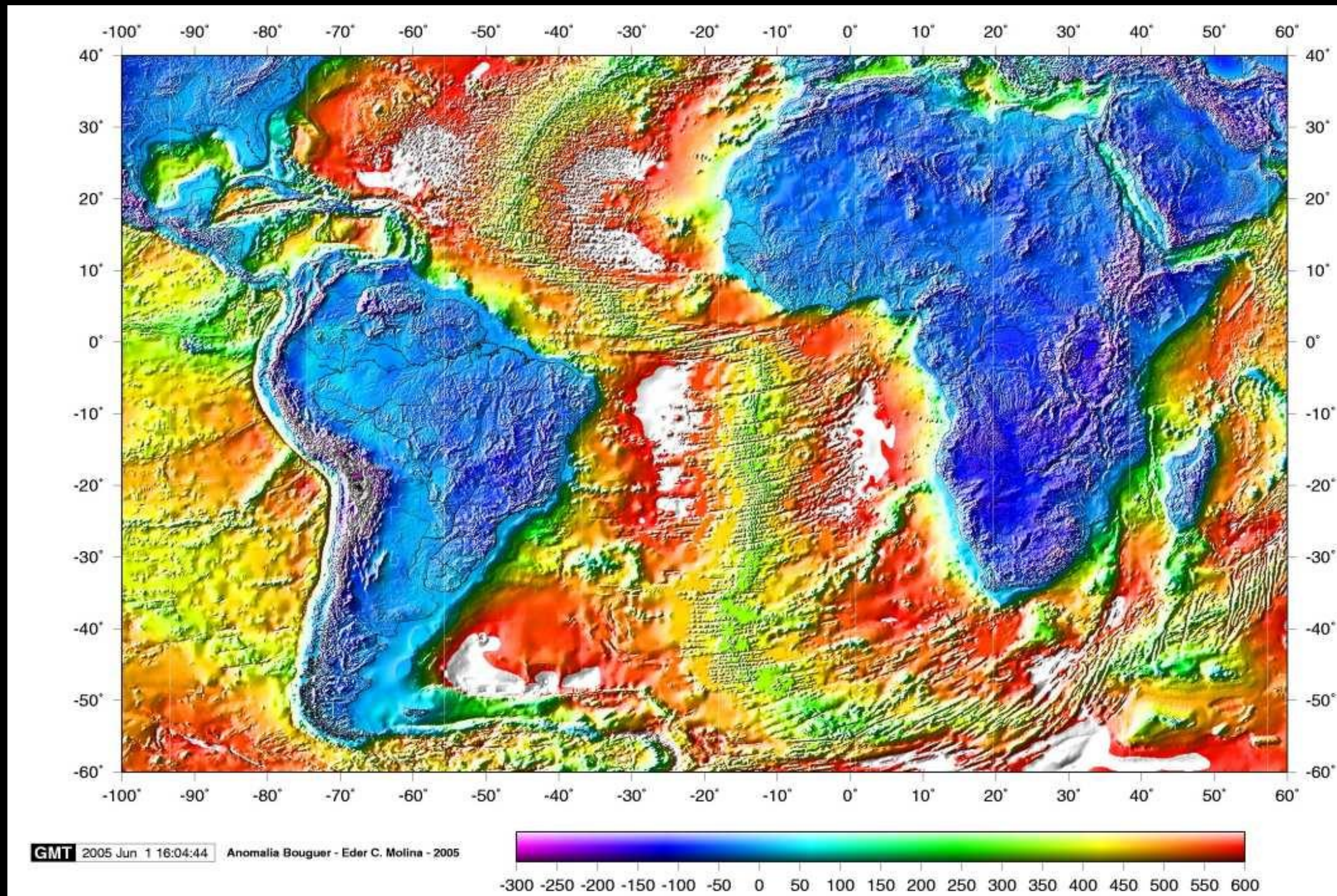
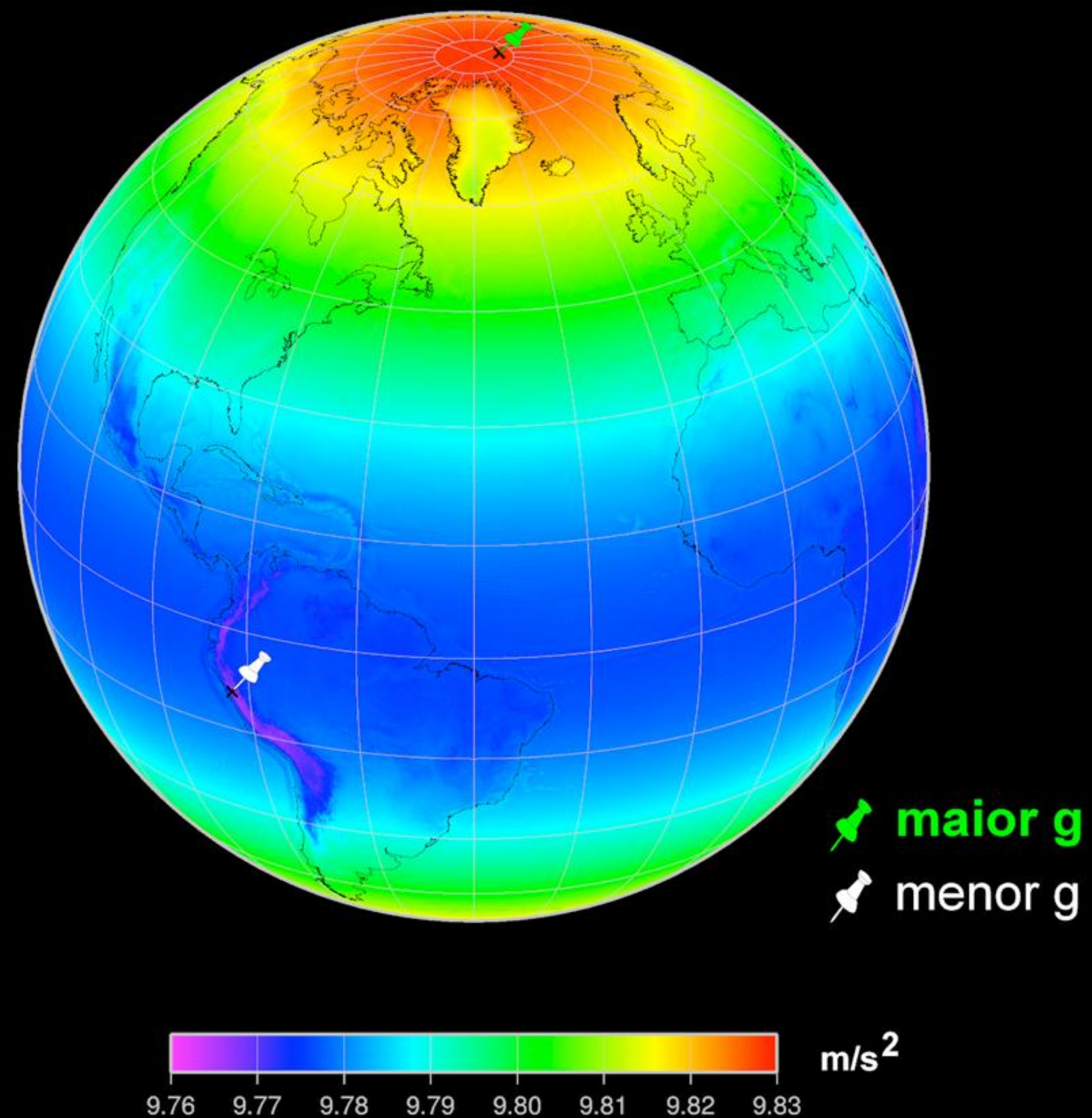


# O USO DE INFORMAÇÕES DO CAMPO DE GRAVIDADE TERRESTRE



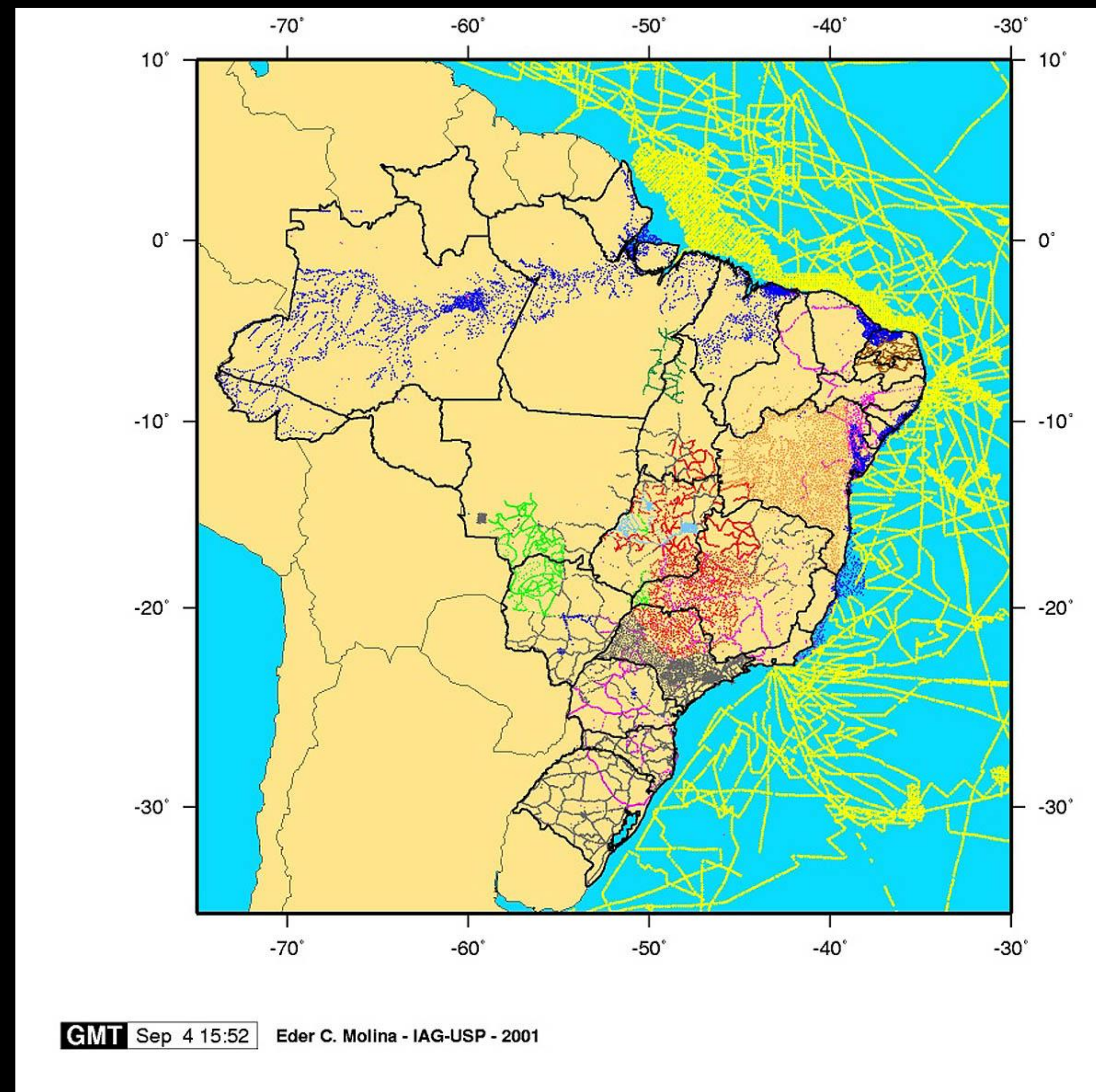
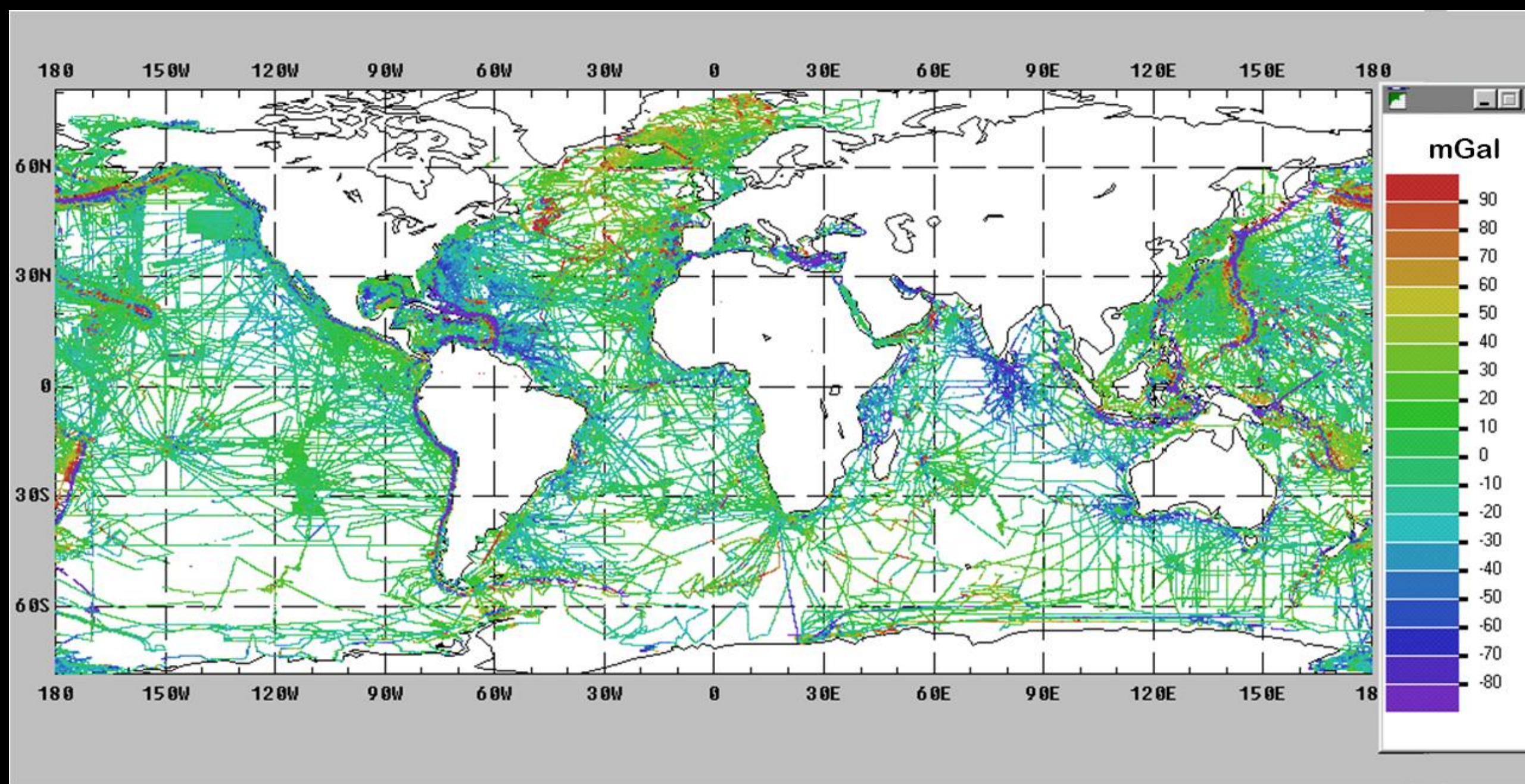


# Gravimetria



A distribuição da densidade no interior terrestre gera deformações no campo de gravidade, que podem ser medidas, permitindo inferir como a massa está distribuída em subsuperfície

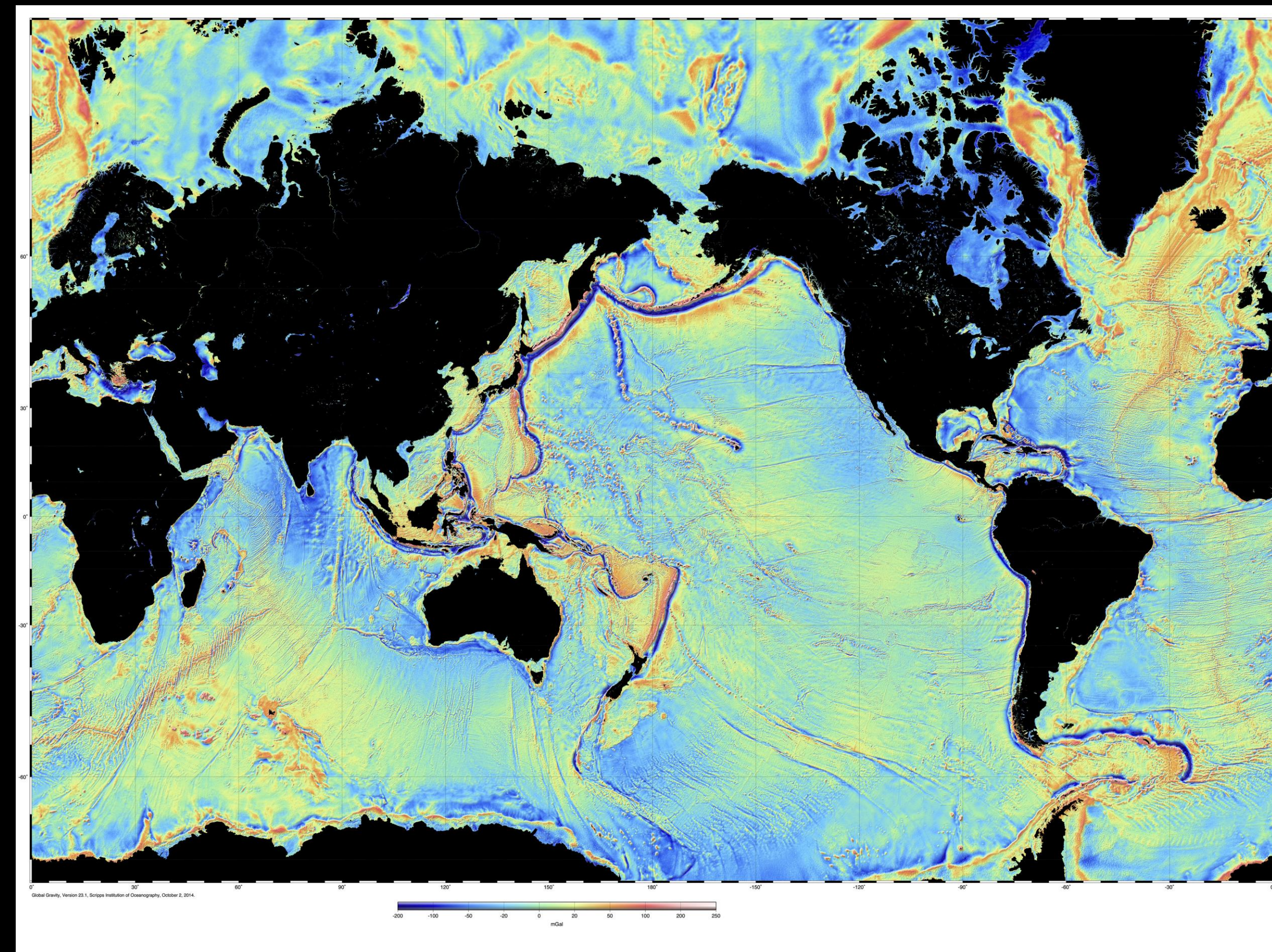
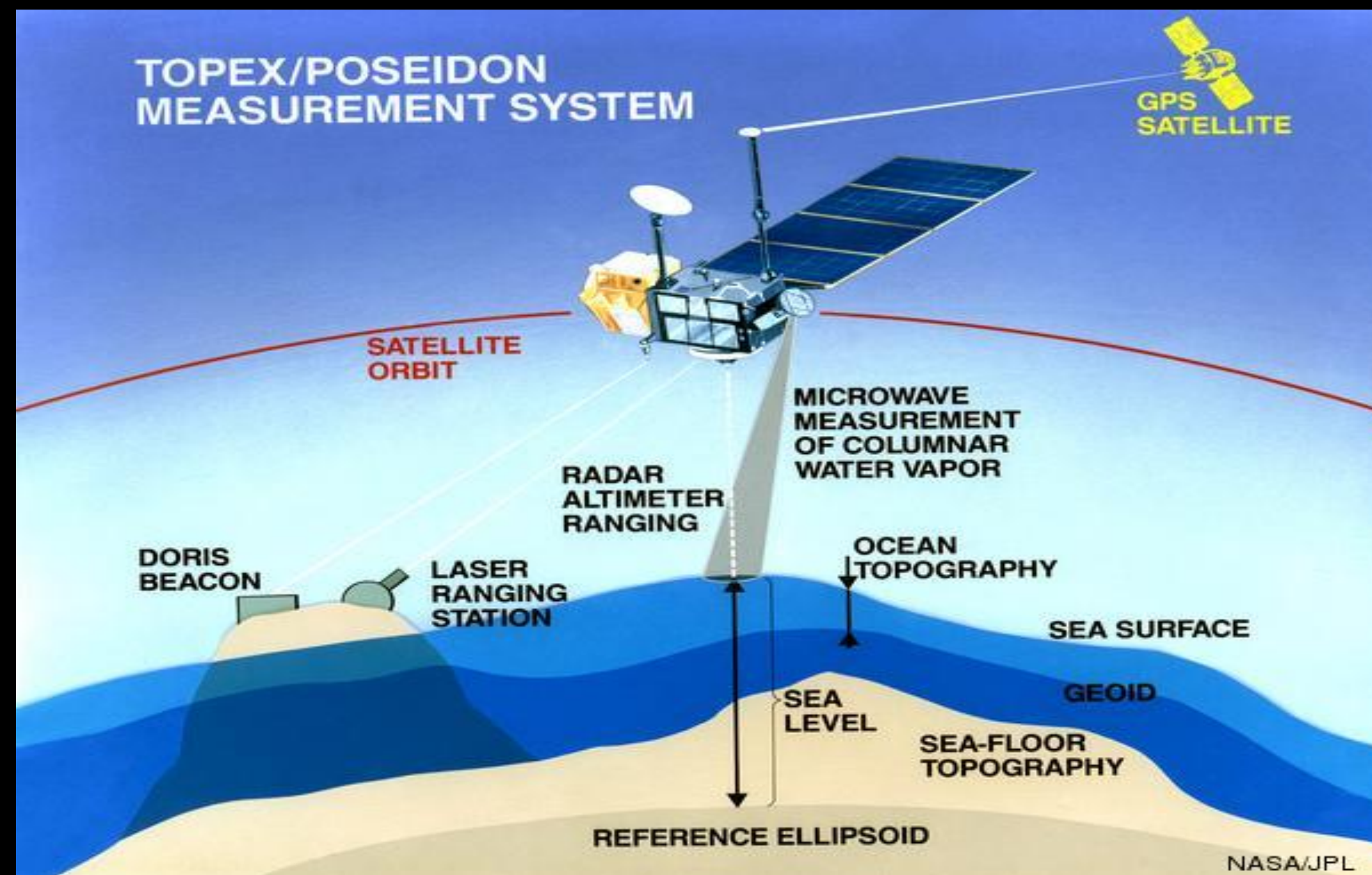
# LEVANTAMENTOS GRAVIMÉTRICOS TERRESTRES E MARINHOS



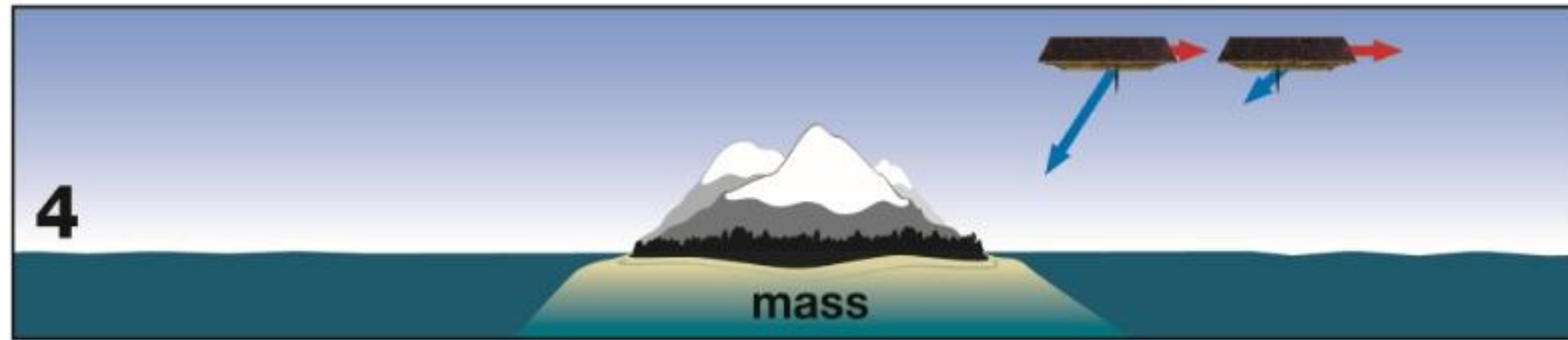
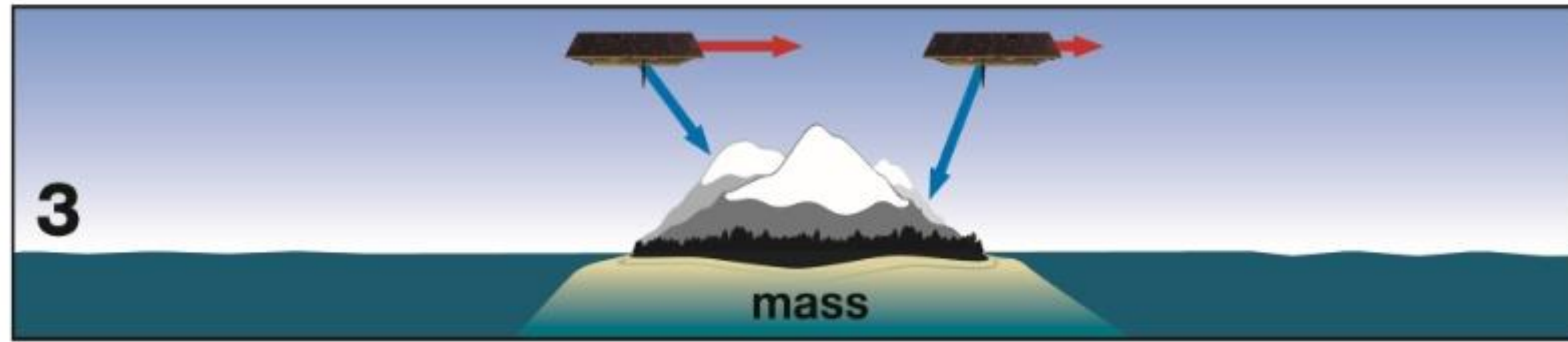
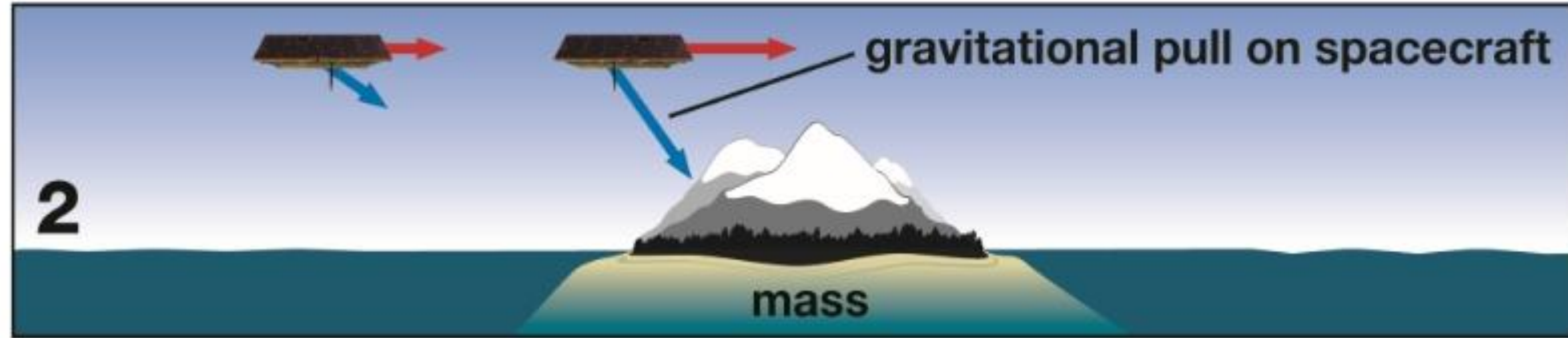
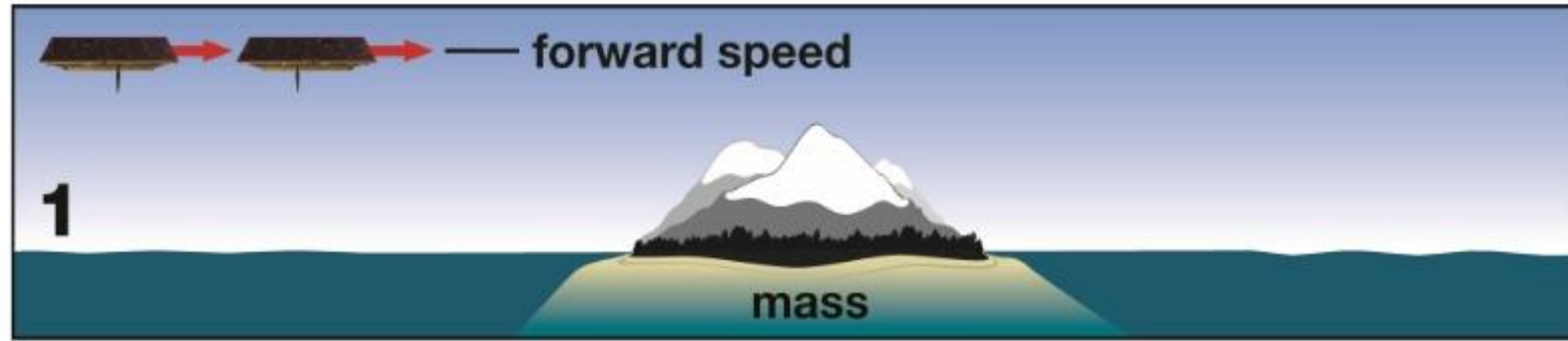
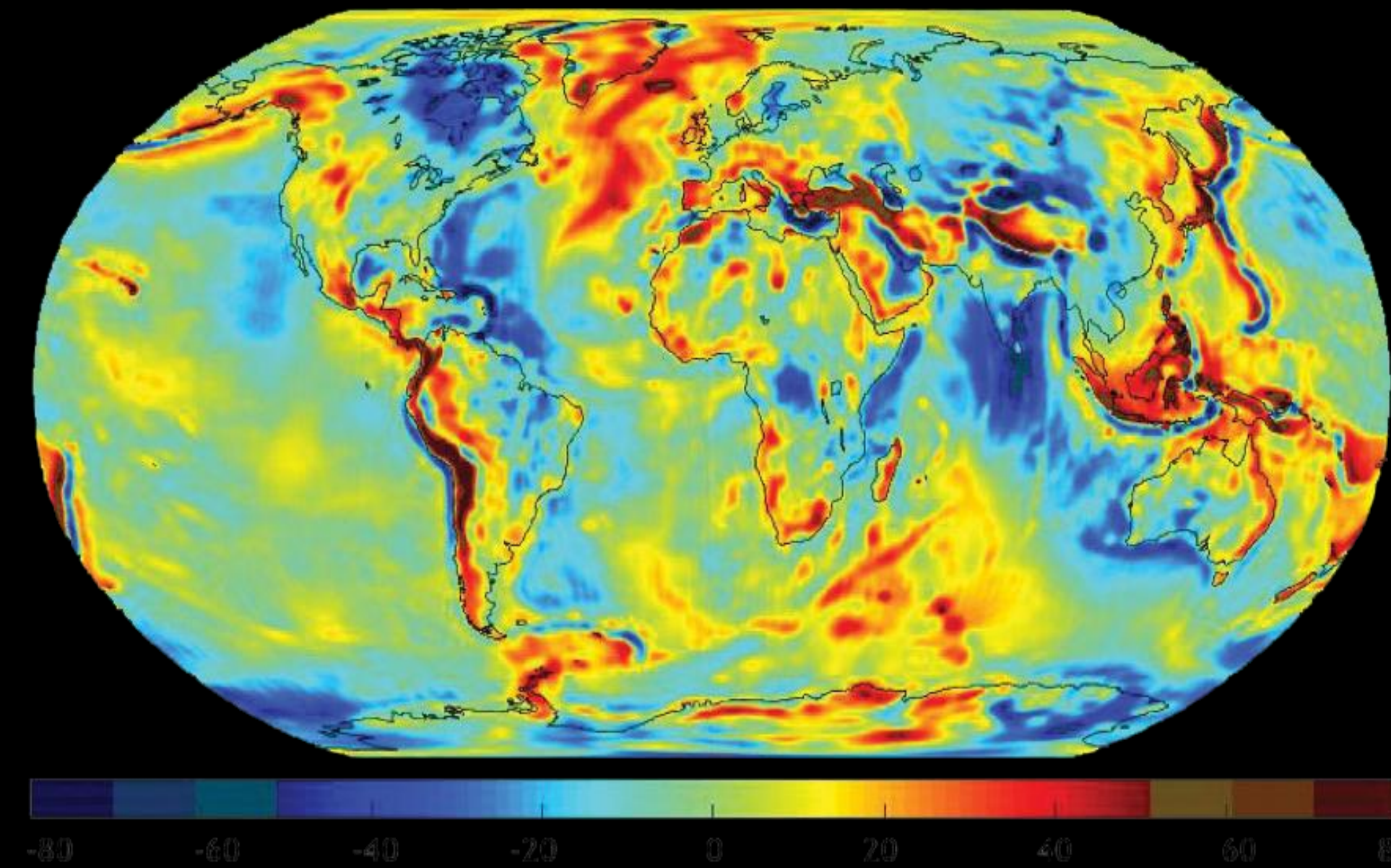
# ALTIMETRIA POR SATÉLITE

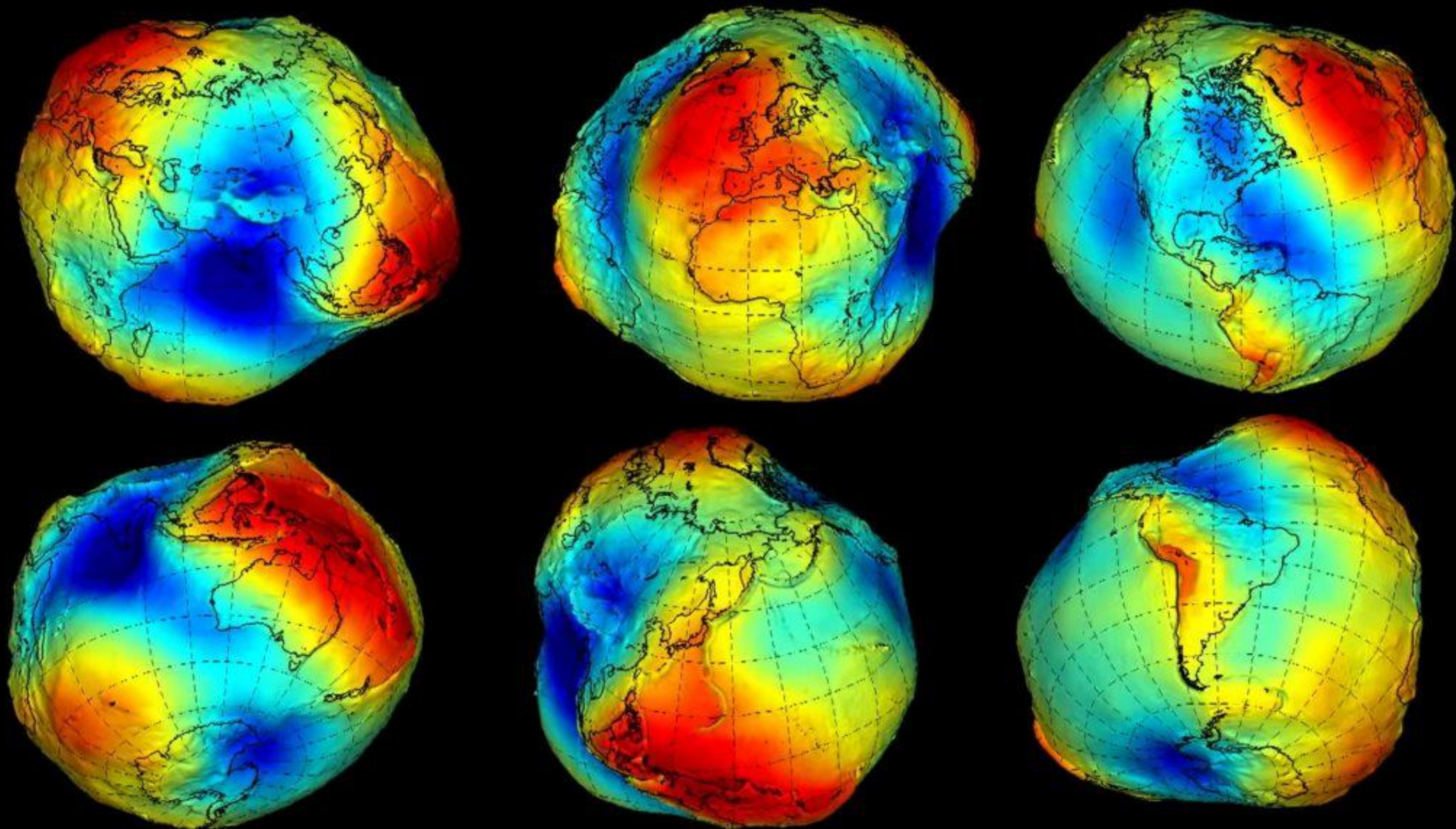
A superfície do oceano segue uma equipotencial do campo da gravidade terrestre. Em primeira aproximação, esta superfície equipotencial seria uma esfera, caso a distribuição de massa da Terra fosse homogênea e ela não tivesse rotação. A rotação faz com que a forma esférica tenda a elipsoidal, e a distribuição irregular de massa faz com que a superfície da água do mar desvie desta forma elipsoidal em até 100 metros em algumas localidades.

Um monte submarino, por exemplo, tipicamente tem 20 km de raio e 2000m de altura, e acaba por deformar a geometria da água do mar ao seu redor.



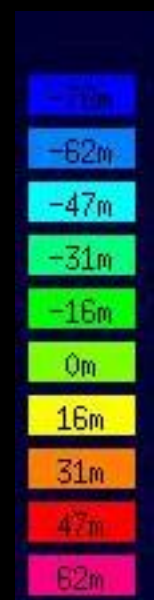
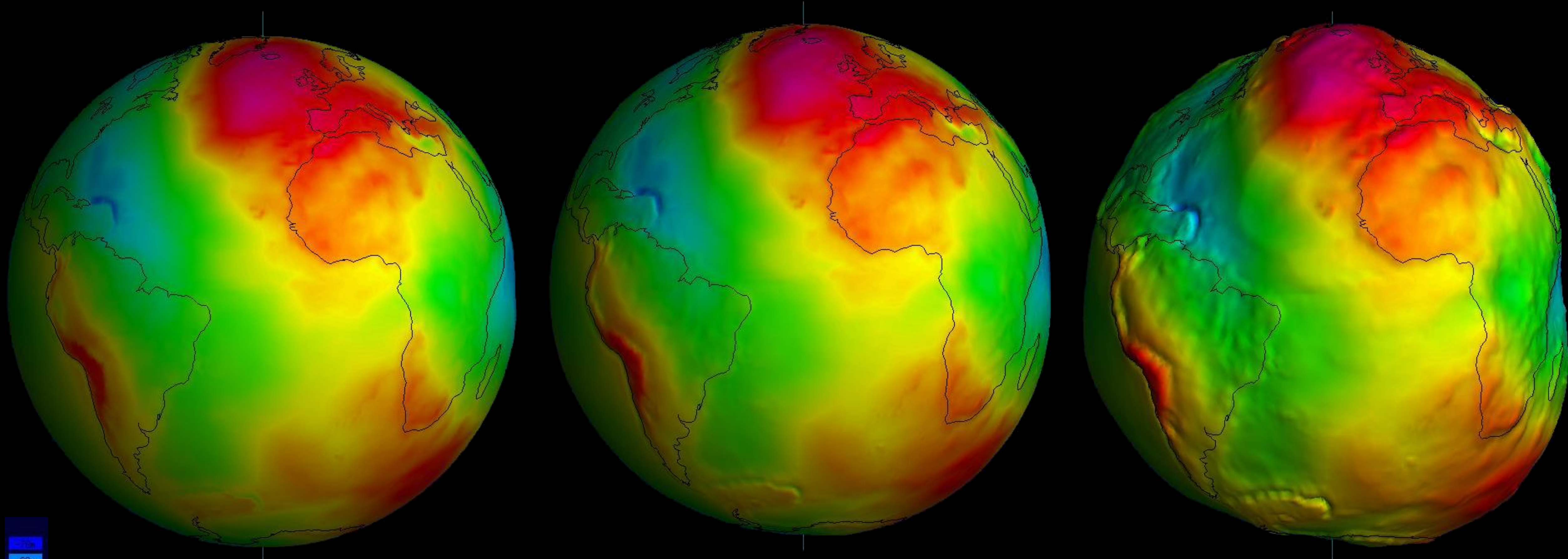
# GRACE





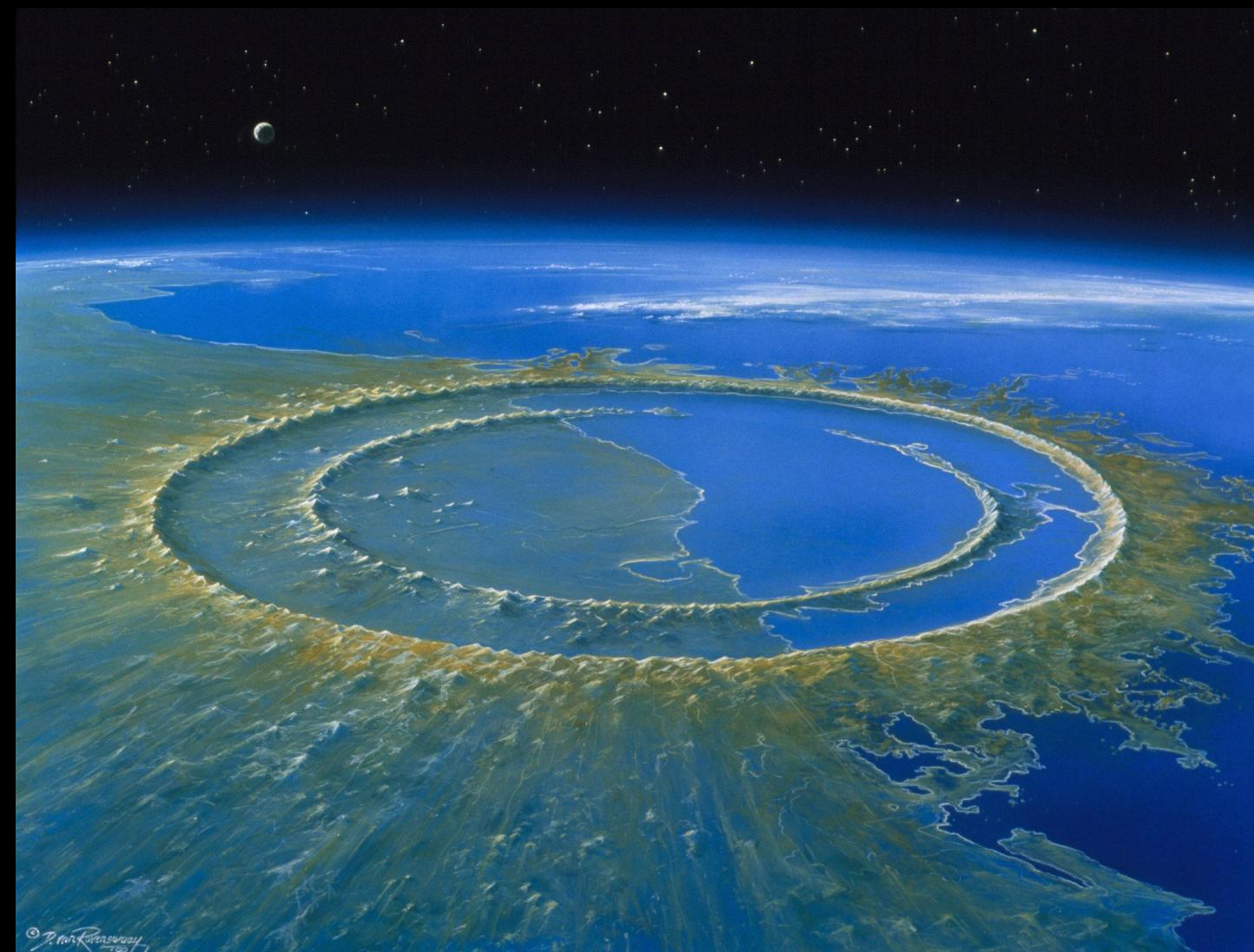
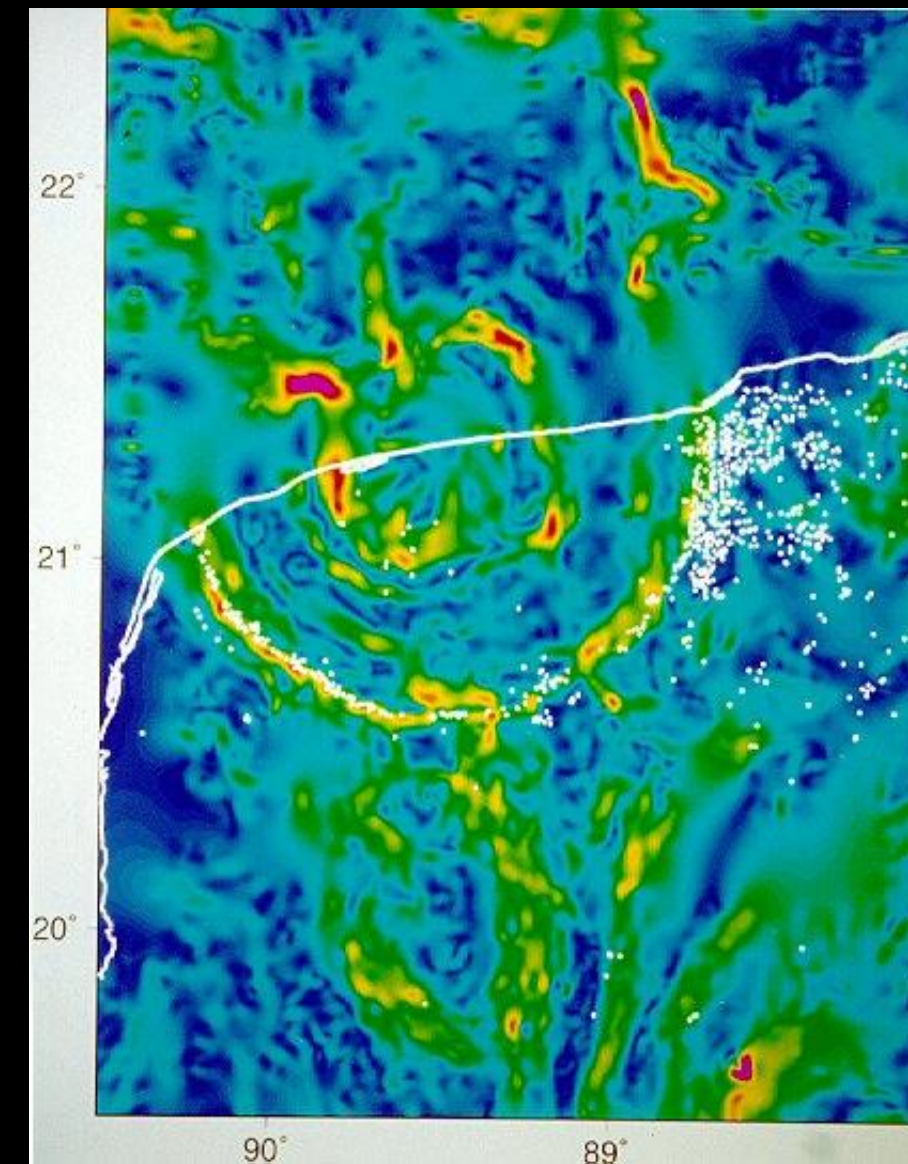
**A TERRA EM FORMA DE BATATA - GOCE**

# ENTÃO, A TERRA É UMA BATATA?

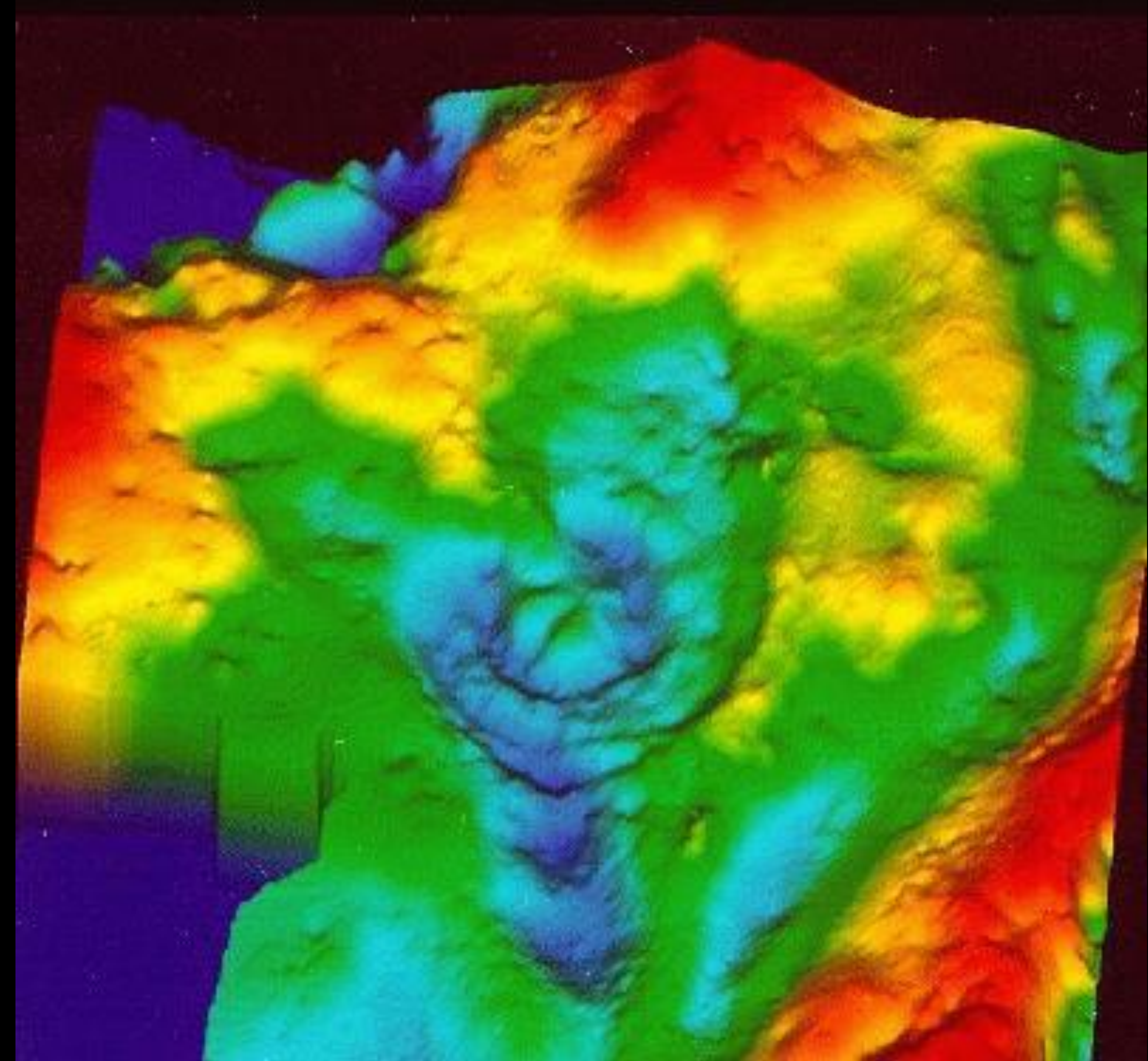


Altura geoidal – modelo XGM2019E\_2159

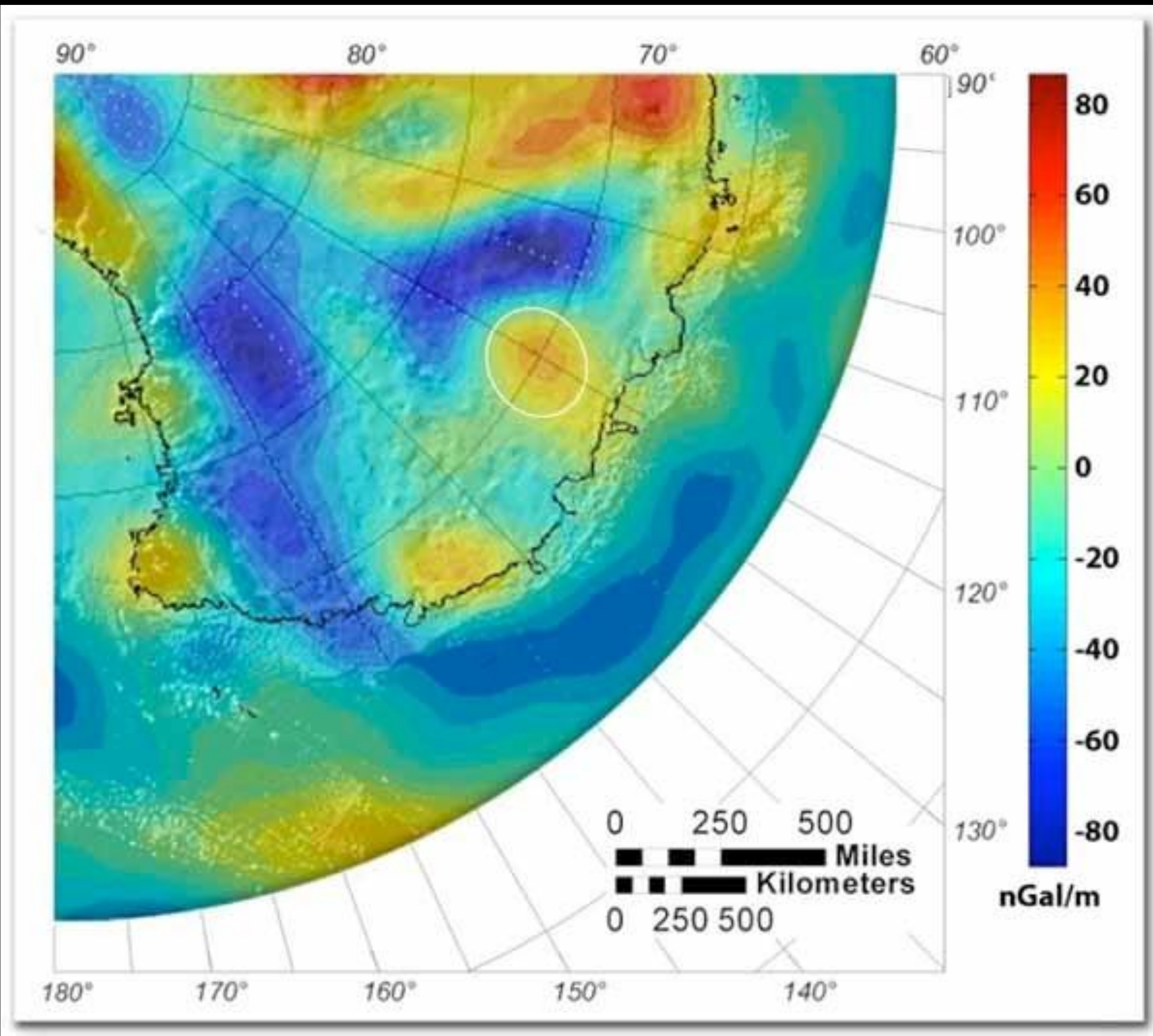
# A CRATERA DE CHICXULUB



Representação artística da área abrangida pela cratera (que não é visível).



Visualização em 3D da anomalia gravimétrica negativa em Chicxulub. A figura está orientada com o Norte apontando para cima.



Variações da anomalia da gravidade, fornecidas pelos dados do GRACE. Regiões com concentração de massa estão em tons alaranjados e vermelhos. O círculo branco mostra a cratera Wilkes Land. Imagem da Ohio State University

A suposta cratera coincide com uma extinção de massa maior do que a dos dinossauros (65 Ma), que ocorreu no Permiano-Triássico (252 Ma). Será que a tectônica de placas começou aqui?

A cratera está abaixo de 2 km de gelo



# Gravimetria na Lua

## TGE - Traverse Gravimeter Experiment



- TGE - Traverse Gravimeter Experiment
- Construído por Draper Labs MIT
- Liderado por Talwani (LDEO)
- Objetivos do experimento:
  - Usar as medidas para entender a estrutura do vale Taurus-Littrow, local de pouso da Apollo 17
  - Obter valores de aceleração da gravidade para comparar com valores terrestres.

**Apollo 11** JUL 69  
Mare Tranquillitatis  
0.67416°N 23.47314°E  
LM: 21.6 hours EVA: 2.5 hours

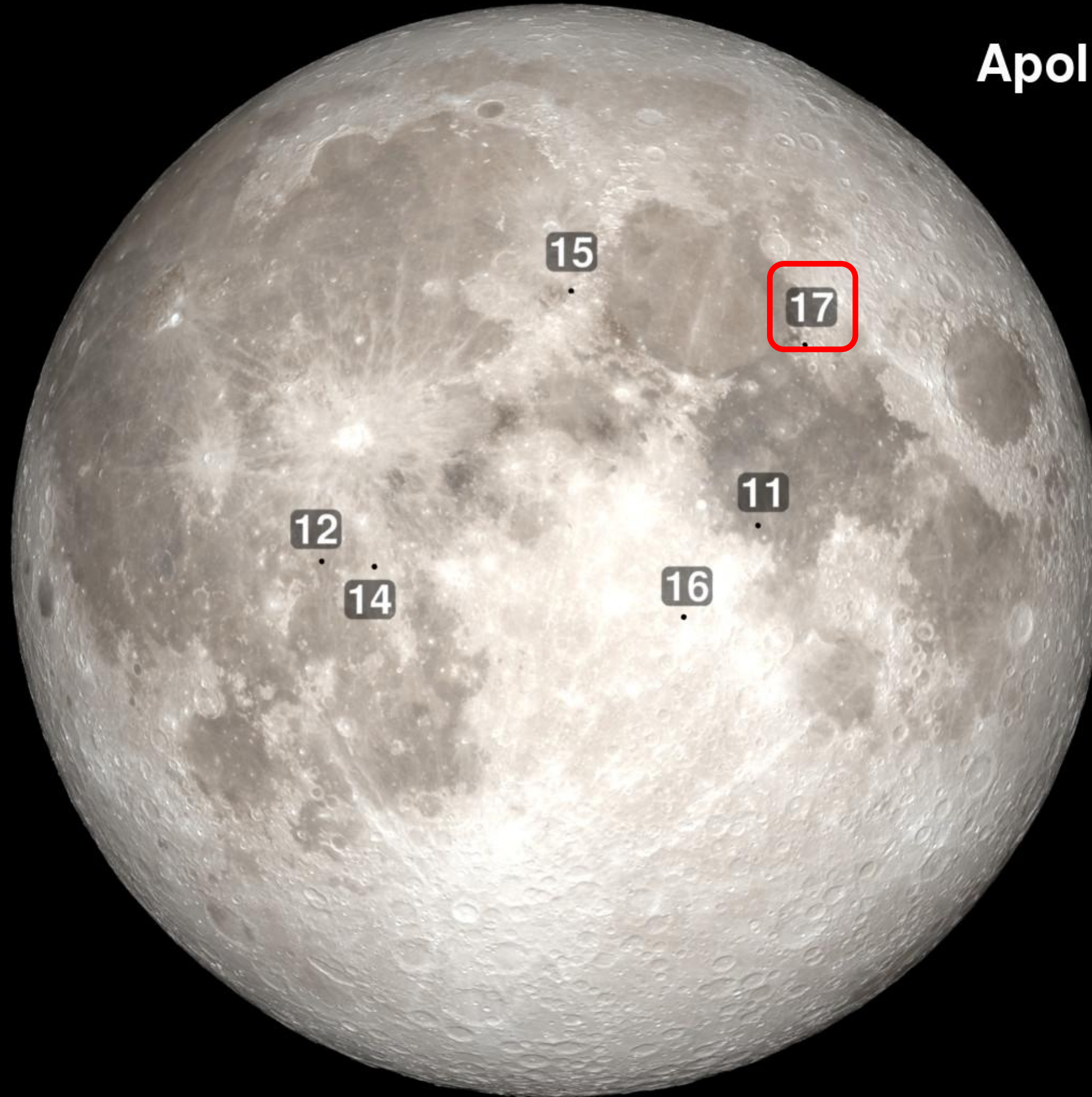
**Apollo 12** NOV 69  
Oceanus Procellarum  
3.0128°S 23.4219°W  
LM: 31.5 hours EVA: 7.8 hours

**Apollo 14** FEB 71  
Fra Mauro Highlands  
3.64589°S 17.47194°W  
LM: 33.5 hours EVA: 9.4 hours

**Apollo 15** AUG 71  
Hadley Rille  
26.13239°N 3.63330°E  
LM: 66.9 hours EVA: 19.1 hours

**Apollo 16** APR 72  
Descartes Highlands  
8.9734°S 15.5011°E  
LM: 71.0 hours EVA: 20.2 hours

**Apollo 17** DEC 72  
Taurus-Littrow Valley  
20.1911°N 30.7655°E  
LM: 75.0 hours EVA: 22.1 hours



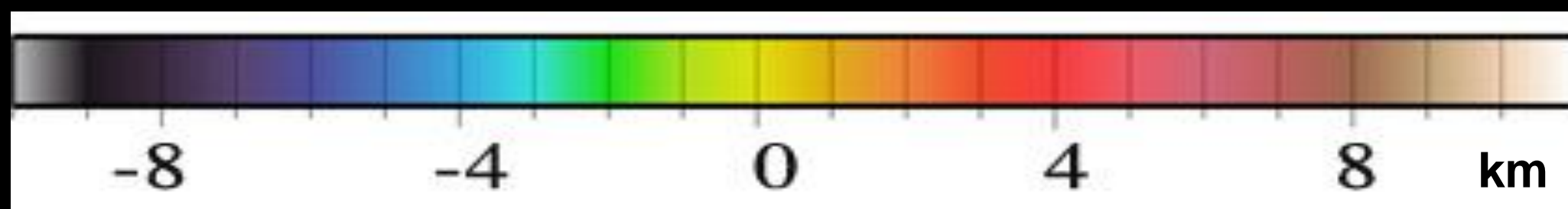
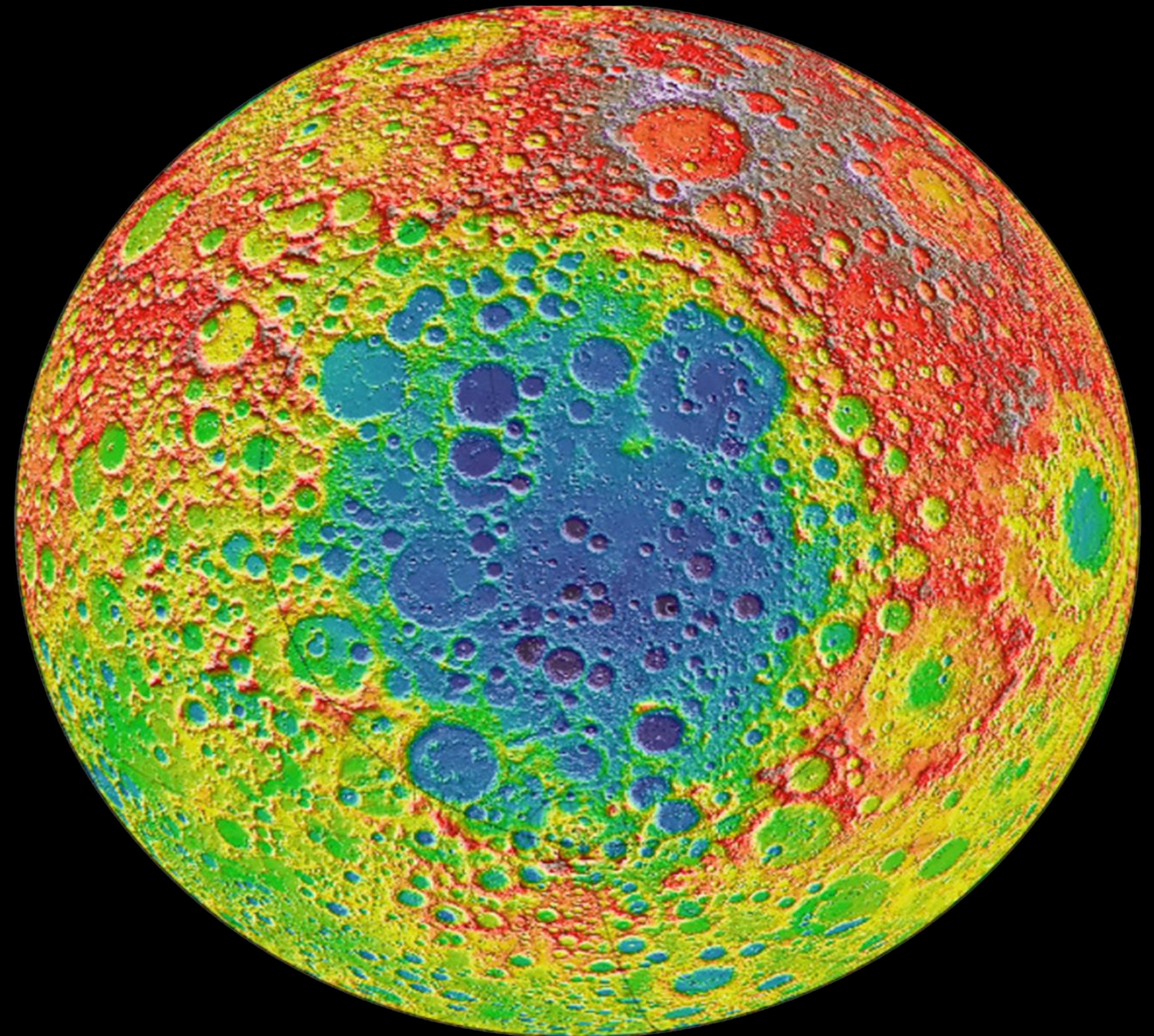
## Apollo Landing Sites



# O campo da gravidade na Lua

Esta imagem centrada no polo sul lunar mostra a bacia Aitken, a maior bacia de impacto lunar (e uma das maiores conhecidas do Sistema Solar), com 2600 km de diâmetro.

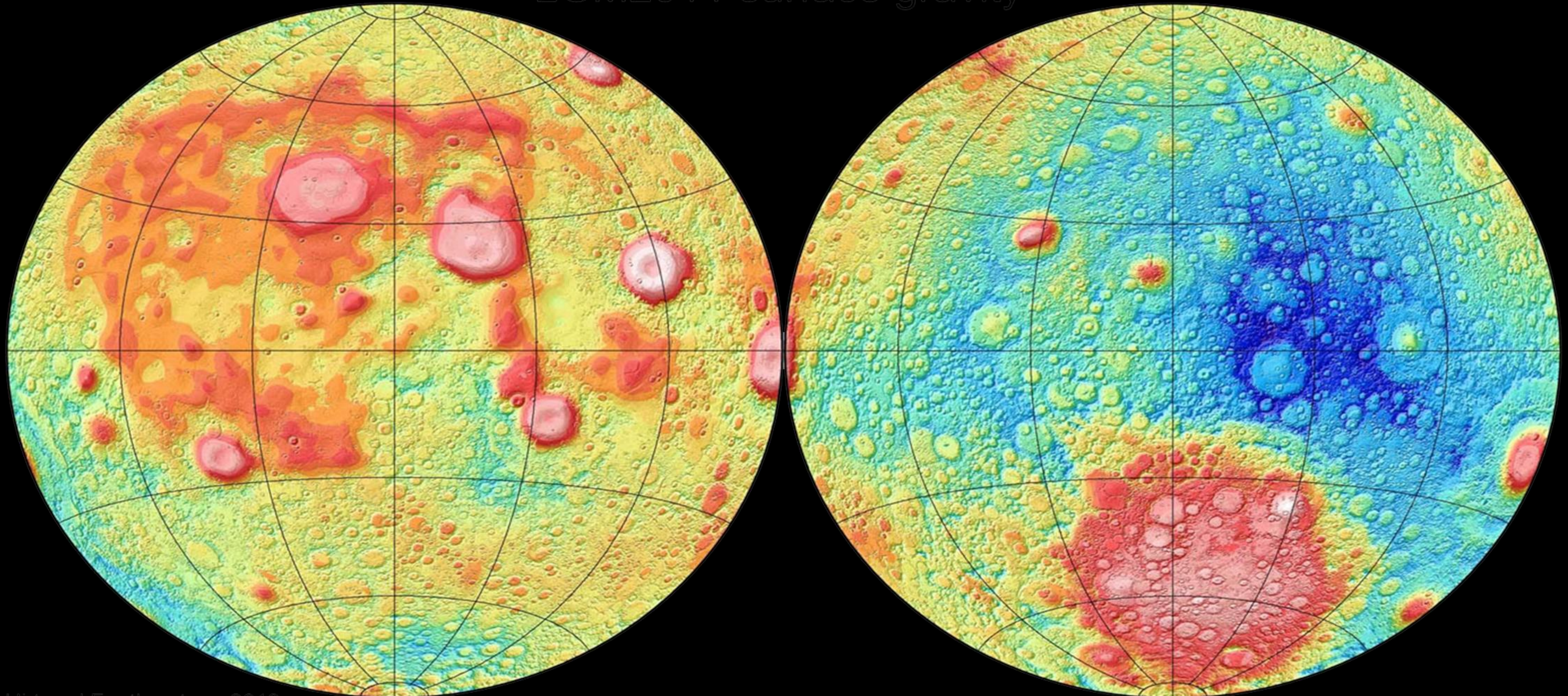
Do ponto mais profundo ao ponto mais alto desta região há uma diferença de topografia da ordem de 15km.



# O campo da gravidade na Lua

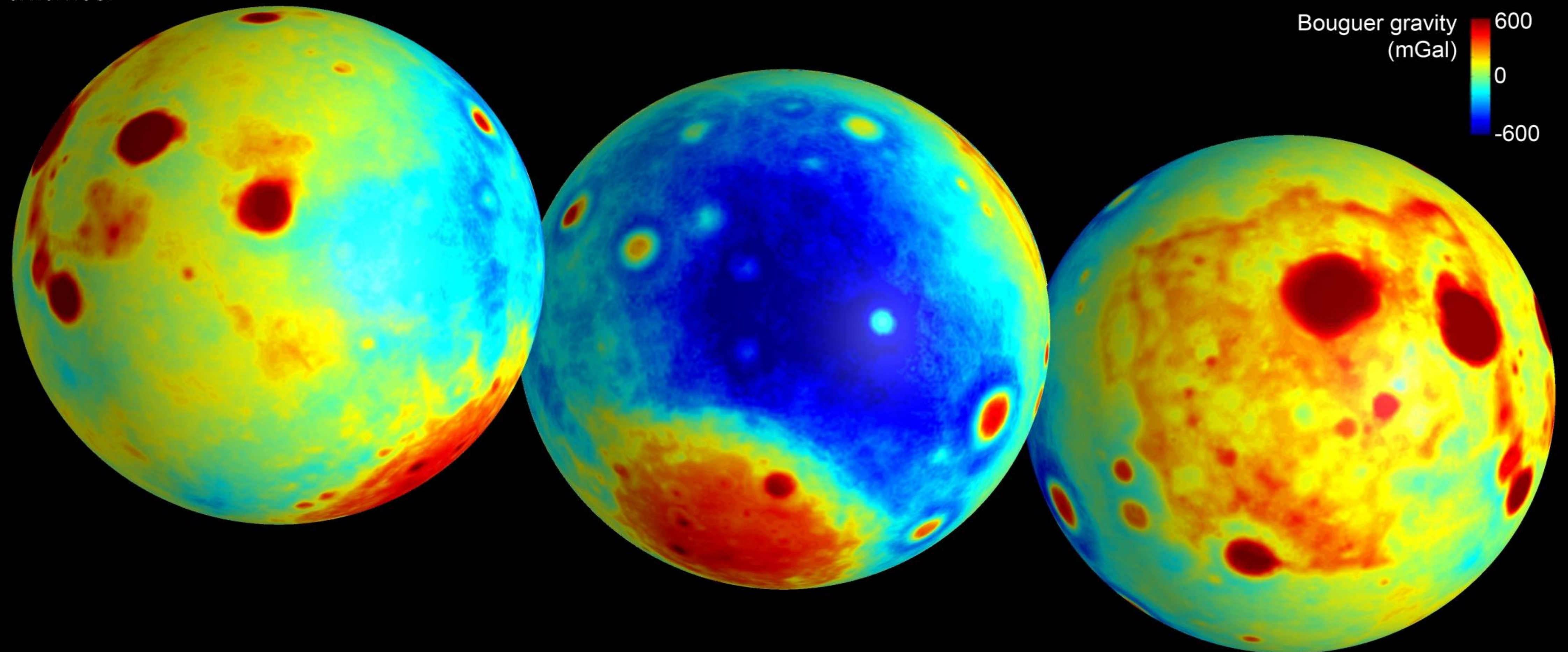
Aceleração da gravidade na superfície lunar em  $\text{m/s}^2$ . À esquerda, o lado visível da Lua (near side), e à direita o lado oculto (far side). Fonte: [Lunar Gravity Model 2011](#)

LGM2011 surface gravity

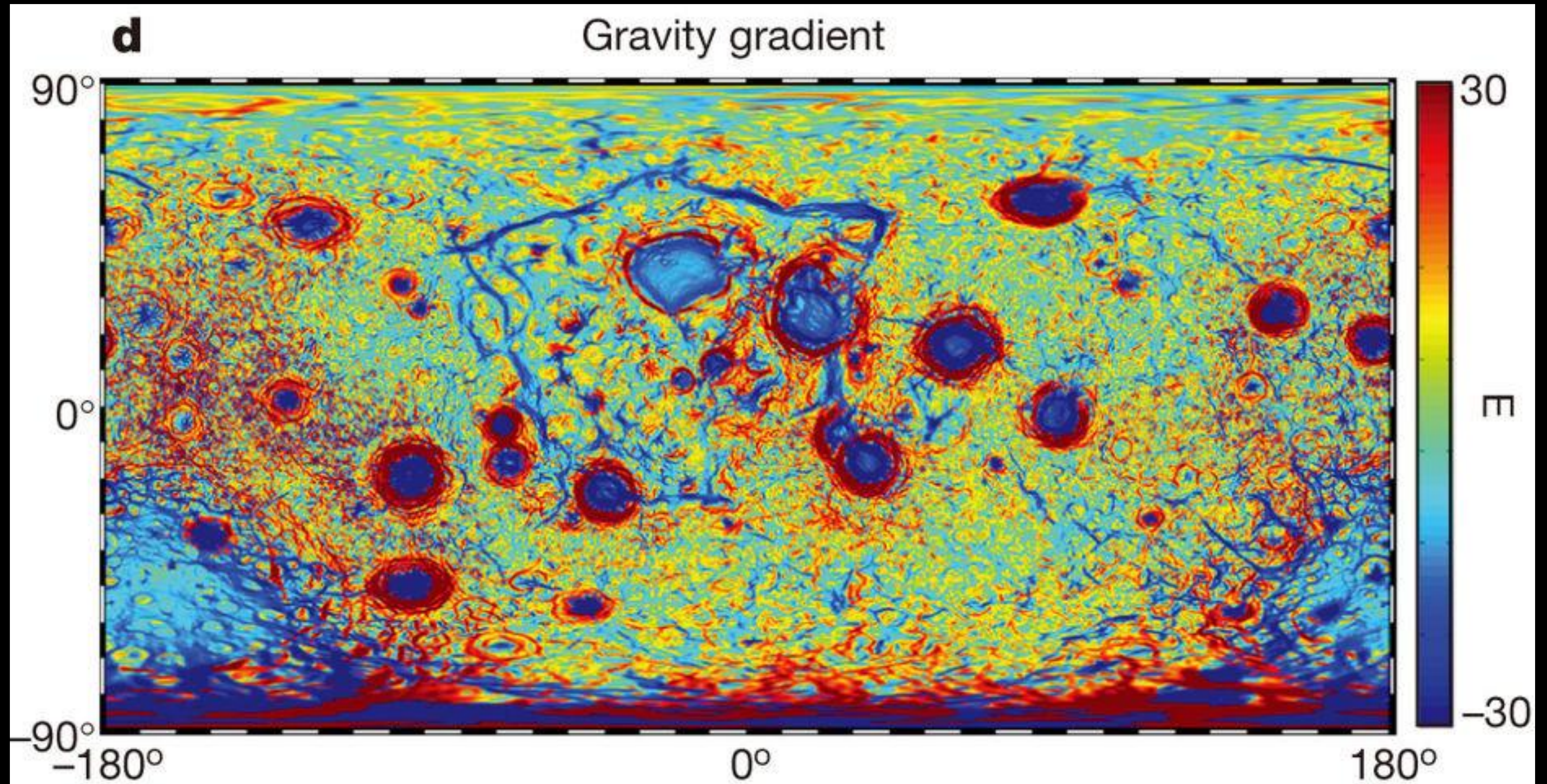


# O campo da gravidade na Lua

Dados gravimétricos ajudaram a vislumbrar, dentre várias coisas, uma solução para um problema muito antigo, relacionado à origem do Mar das Tormentas (*Ocean of Storms*, ou *Oceanus Procellarum*). Imaginava-se que, como a maioria dos *mares* lunares, esta estrutura tinha sido formada pelo impacto de um asteroide ou corpo similar. Se assim fosse, esta seria a maior estrutura de impacto da Lua. Ocorre que, após os dados da missão GRAIL terem sido processados, os cientistas começaram a acreditar em outra possibilidade: o Mar das Tormentas ser produto do vulcanismo lunar. Mares, ou *mare* em latim, são vastas regiões planas da superfície lunar, que acredita-se terem sido geradas pelo impacto de corpos externos.



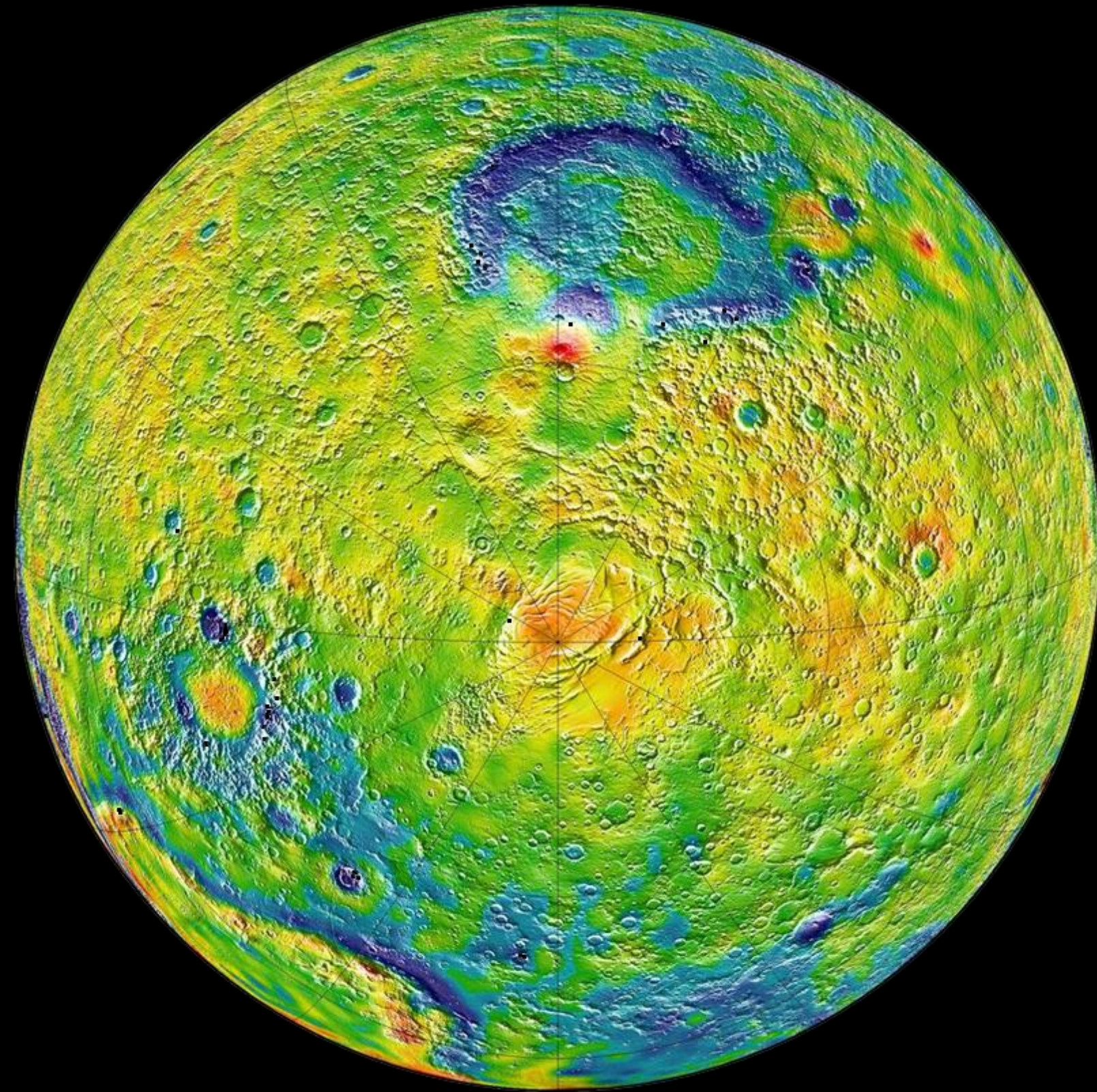
# O CAMPO DA GRAVIDADE NA LUA



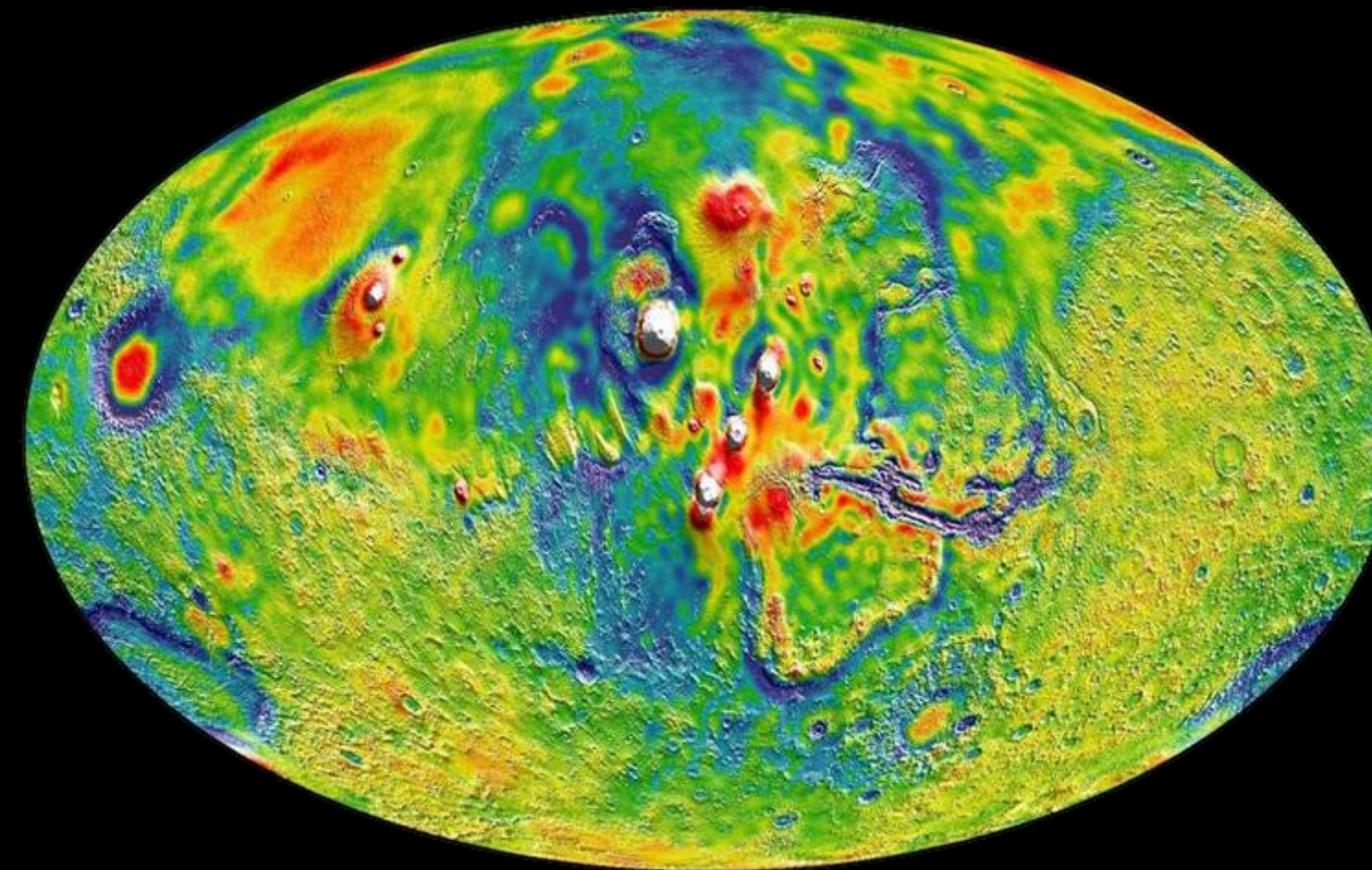
Dados gravimétricos obtidos por satélites da missão GRAIL. Note a grande anomalia no Mar das Tormentas (*Ocean of Storms*, ou *Oceanus Procellarum*).

# O campo da gravidade em Marte

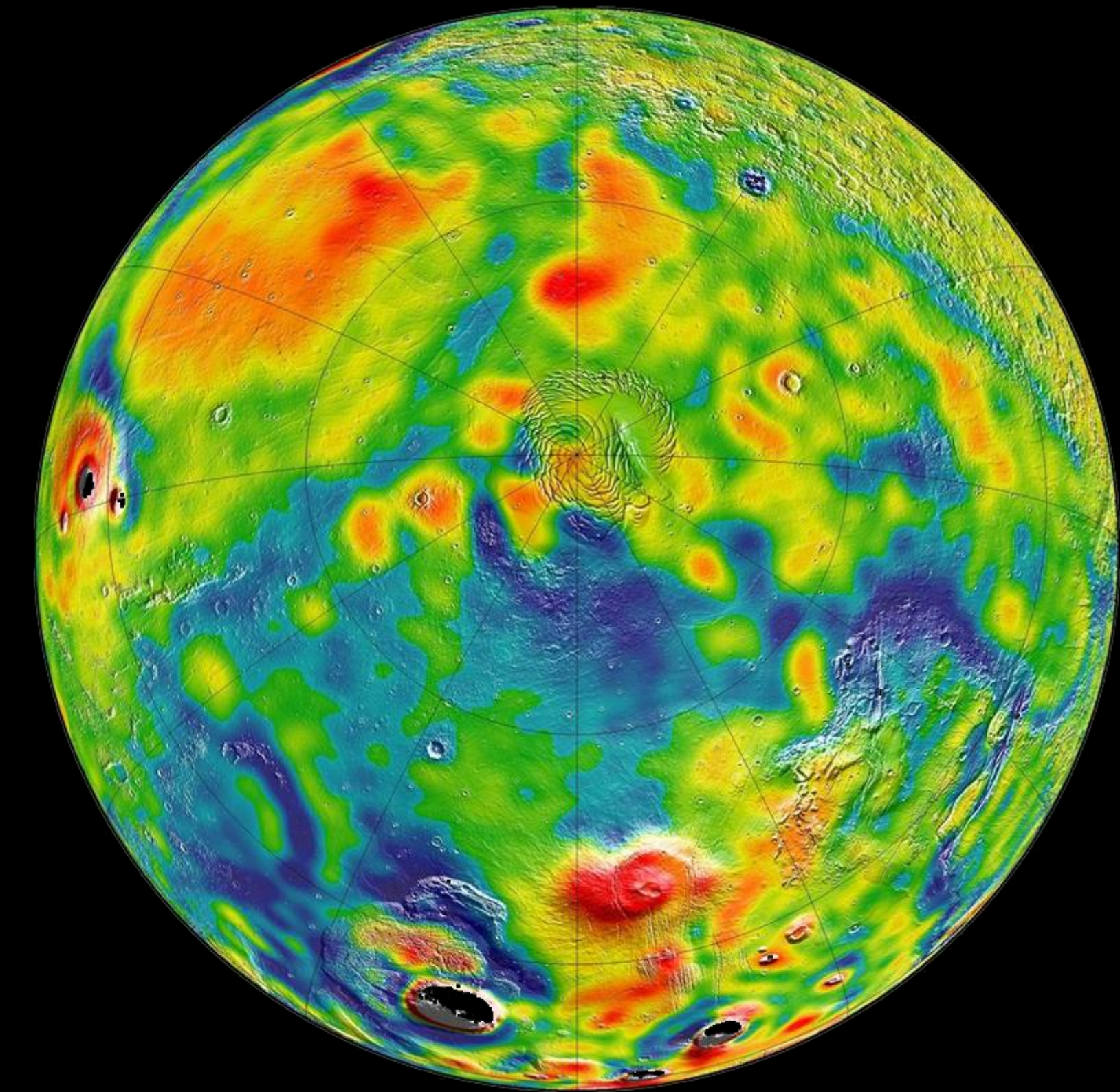
A partir de 16 anos de coleta de dados de três espaçonaves que orbitaram o planeta vermelho os cientistas conseguiram elaborar um mapa detalhado do campo de gravidade de Marte. As naves *Mars Global Surveyor*, *Mars Odyssey* e *Mars Reconnaissance Orbiter* forneceram informações que permitiram não somente caracterizar o campo de gravidade marciano, o que é extremamente importante para balizar as próximas missões.



Campo de gravidade em Marte, olhando a partir do polo Sul, no centro da imagem. Cores do branco ao vermelho indicam locais de aceleração da gravidade elevada, ao passo que cores azuis indicam locais onde a aceleração da gravidade é baixa. Fonte: MIT/UMBC-CRESST/GSFC



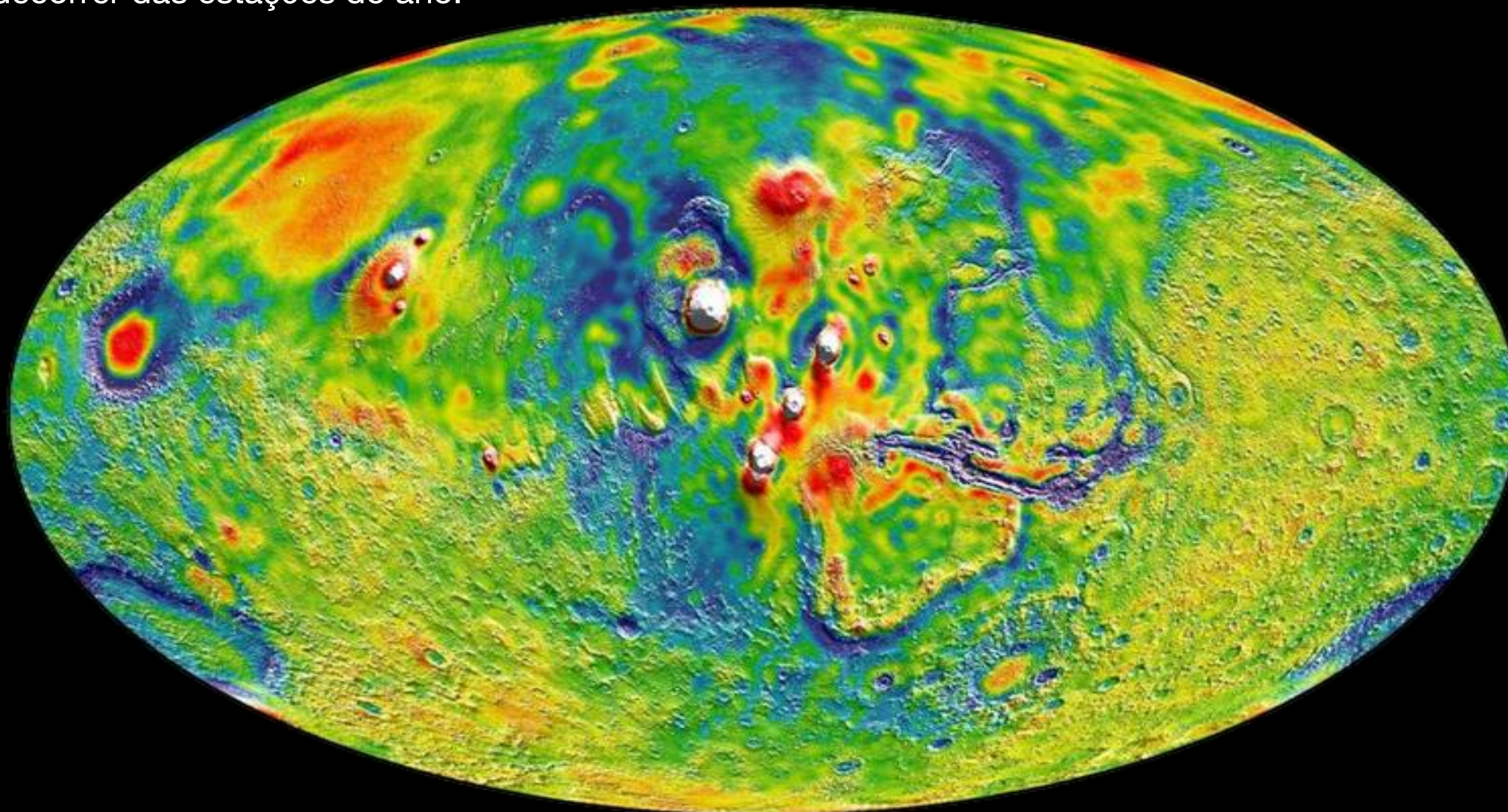
Campo de gravidade de Marte, mostrando ao centro os vulcões da região de Tharsis. Cores do branco ao vermelho indicam locais de aceleração da gravidade elevada, ao passo que cores azuis indicam locais onde a aceleração da gravidade é baixa, possivelmente indicando fraturas na parte superficial da litosfera do planeta. Fonte: MIT/UMBC-CRESST/GSFC



Campo de gravidade em Marte, olhando a partir do polo Norte, no centro da imagem. Cores do branco ao vermelho indicam locais de aceleração da gravidade elevada, ao passo que cores azuis indicam locais onde a aceleração da gravidade é baixa. Fonte: MIT/UMBC-CRESST/GSFC

# O CAMPO DA GRAVIDADE EM MARTE

Estudando a variação do campo de gravidade do planeta vermelho por 11 anos, um ciclo de atividade solar completo, foi possível estimar a massa de CO<sub>2</sub> atmosférico que congela na região dos polos por ocasião do inverno marciano entre 3 a 4 trilhões de toneladas (o que corresponde a 12 a 16% da massa de sua atmosfera) e estudar seu movimento entre os polos sul e norte com o decorrer das estações do ano.

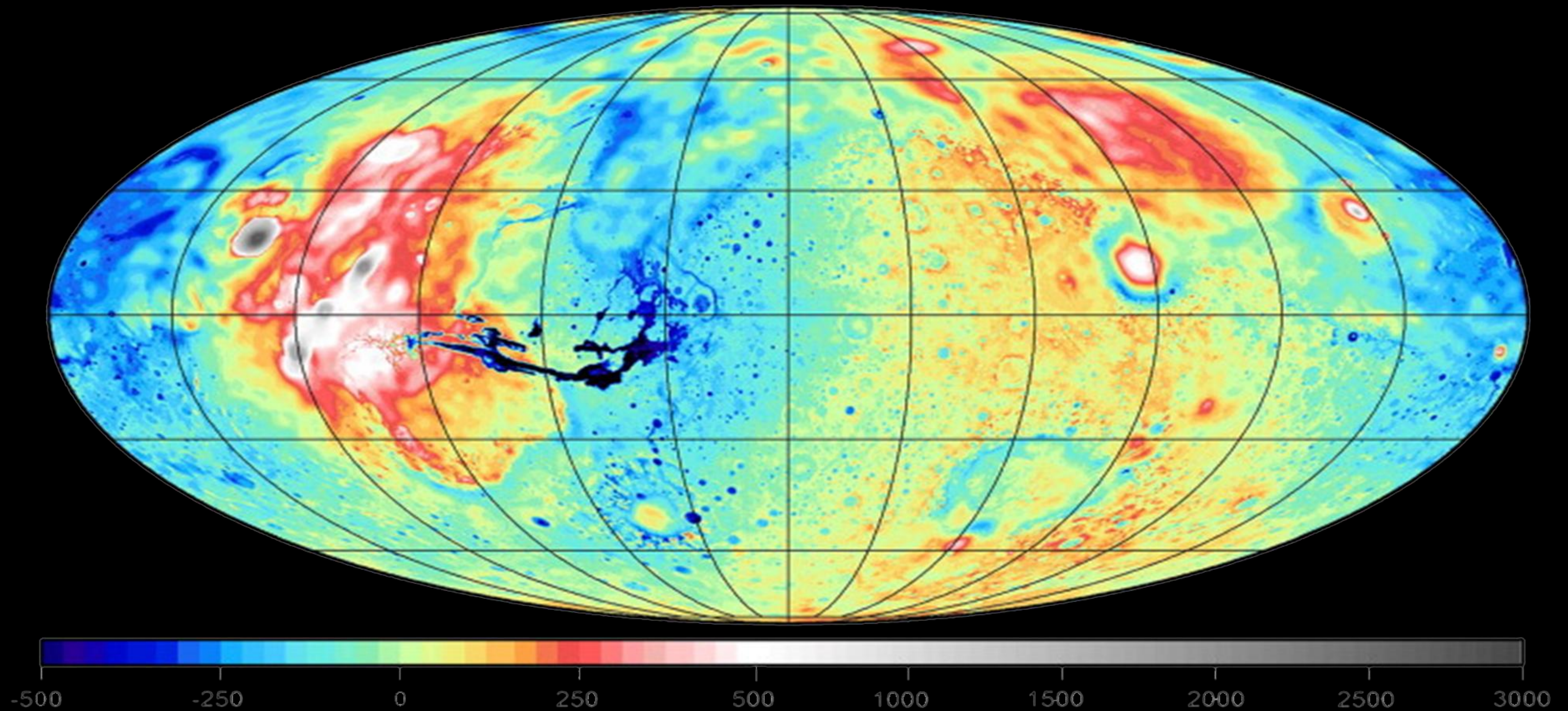


Campo de gravidade de Marte, mostrando ao centro os vulcões da região de Tharsis. Cores do branco ao vermelho indicam locais de aceleração da gravidade elevada, ao passo que cores azuis indicam locais onde a aceleração da gravidade é baixa, possivelmente indicando fraturas na parte superficial da litosfera do planeta. Fonte: MIT/UMBC-CRESST/GSFC



# O campo da gravidade em Marte

**Kilometer-resolution gravity field of Mars: MGM2011** - C.Hirt, S.J.Claessens, M.Kuhn, W.E.Featherstone - Western Australian Centre for Geodesy & The Institute for Geoscience Research, Curtin University of Technology, GPO Box U1987, Perth, WA 6845, Australia - <https://doi.org/10.1016/j.pss.2012.02.006>



MGM2011 anomalia ar livre (em mGal), projeção de Mollweide centrada na longitude de 0°

E SE NÃO  
TIVERMOS  
GRAVIDADE?



E SE NÃO  
TIVERMOS  
GRAVIDADE?



COMO DESCOBRIR  
O QUE TEM  
DENTRO DA  
CAIXA?

???





AGITAR A  
CAIXA

PESAR A  
CAIXA



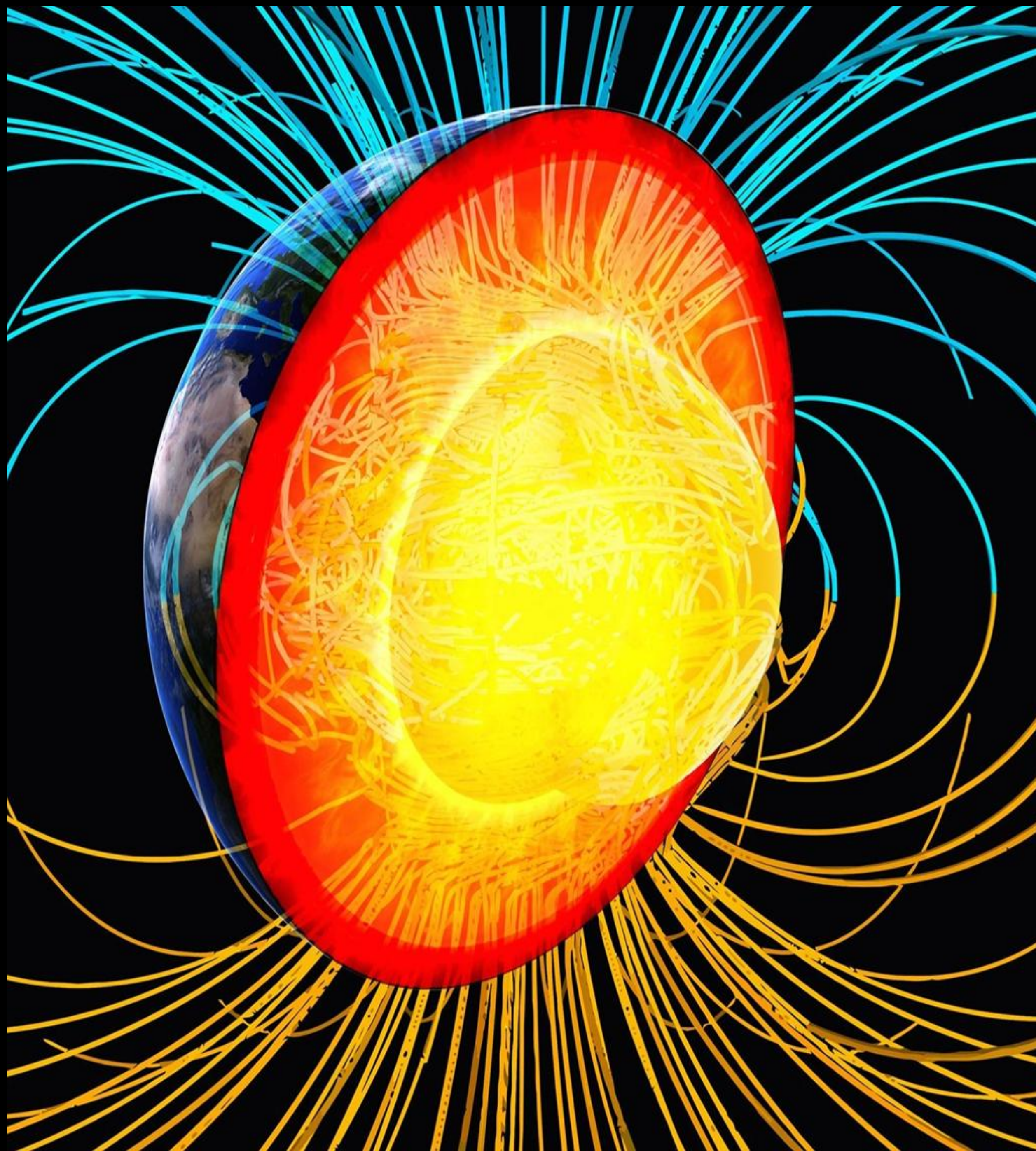


VERIFICAR SE O  
CONTEÚDO RESPONDE  
AO MAGNETISMO

VERIFICAR SE O  
CALOR PASSA POR  
ELA DE MANEIRA  
EFICIENTE

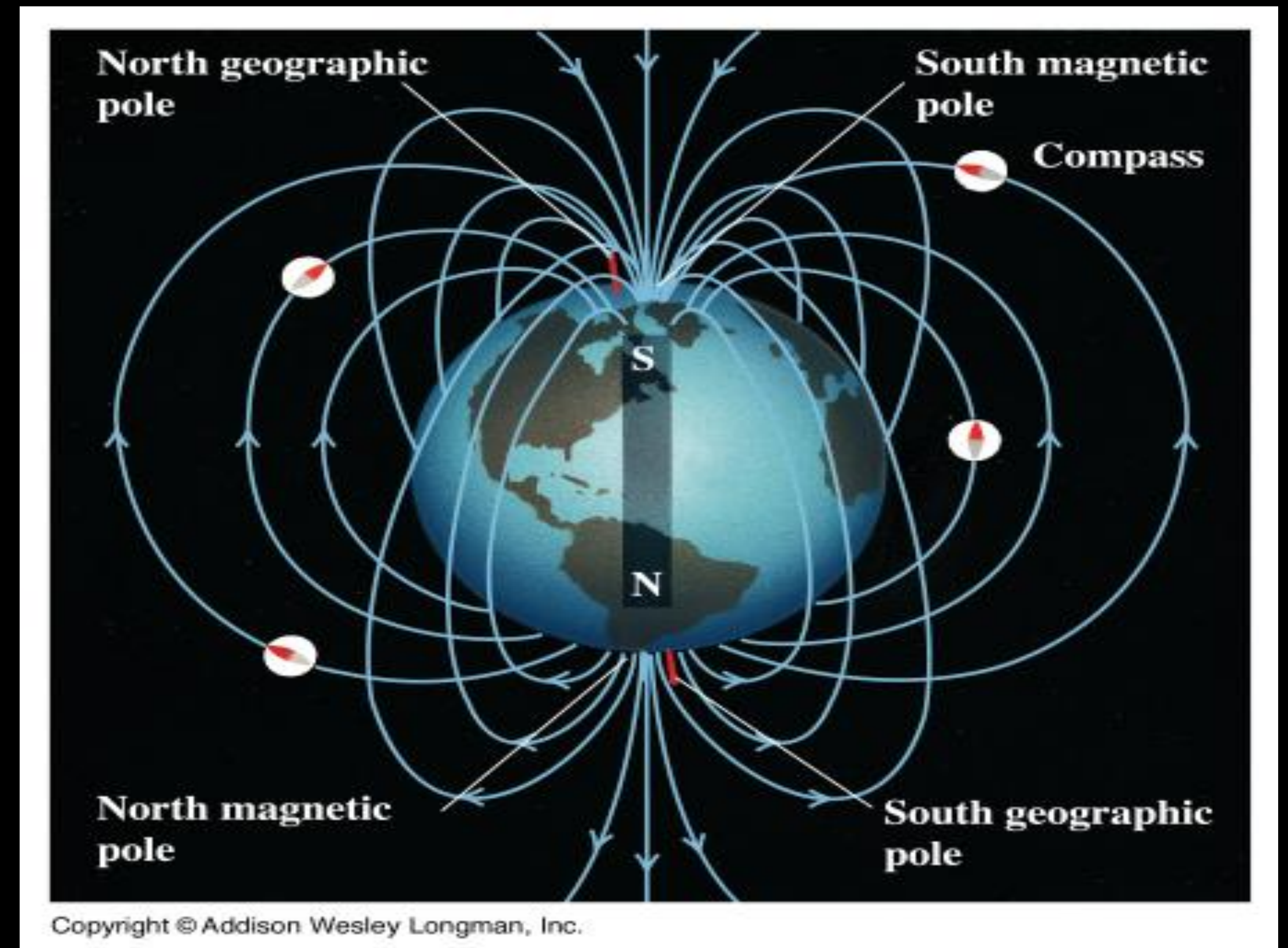


# O CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE



# O campo magnético terrestre

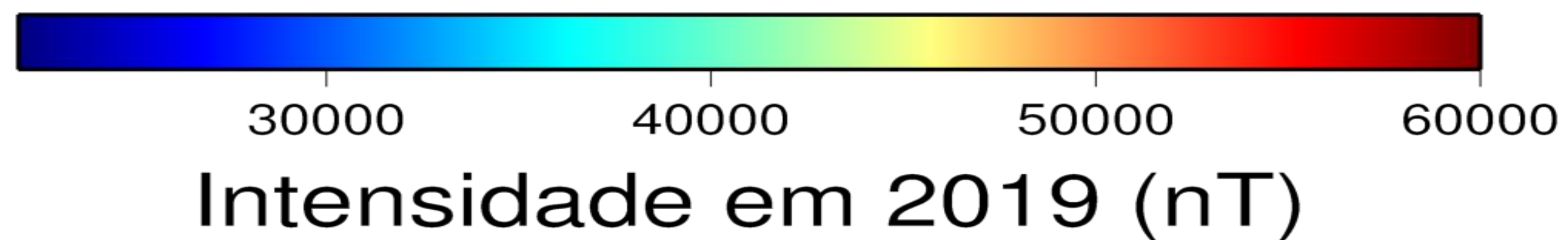
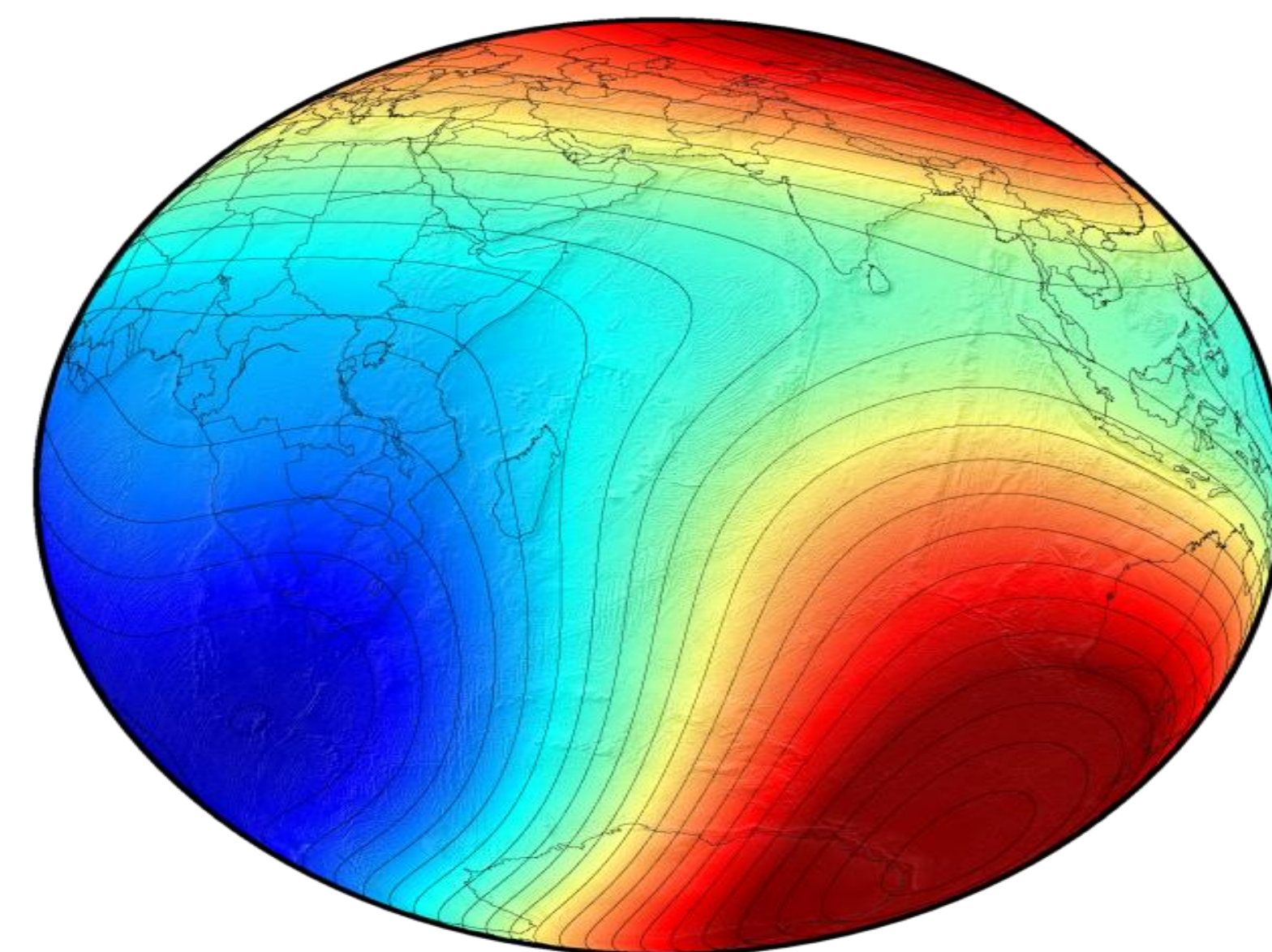
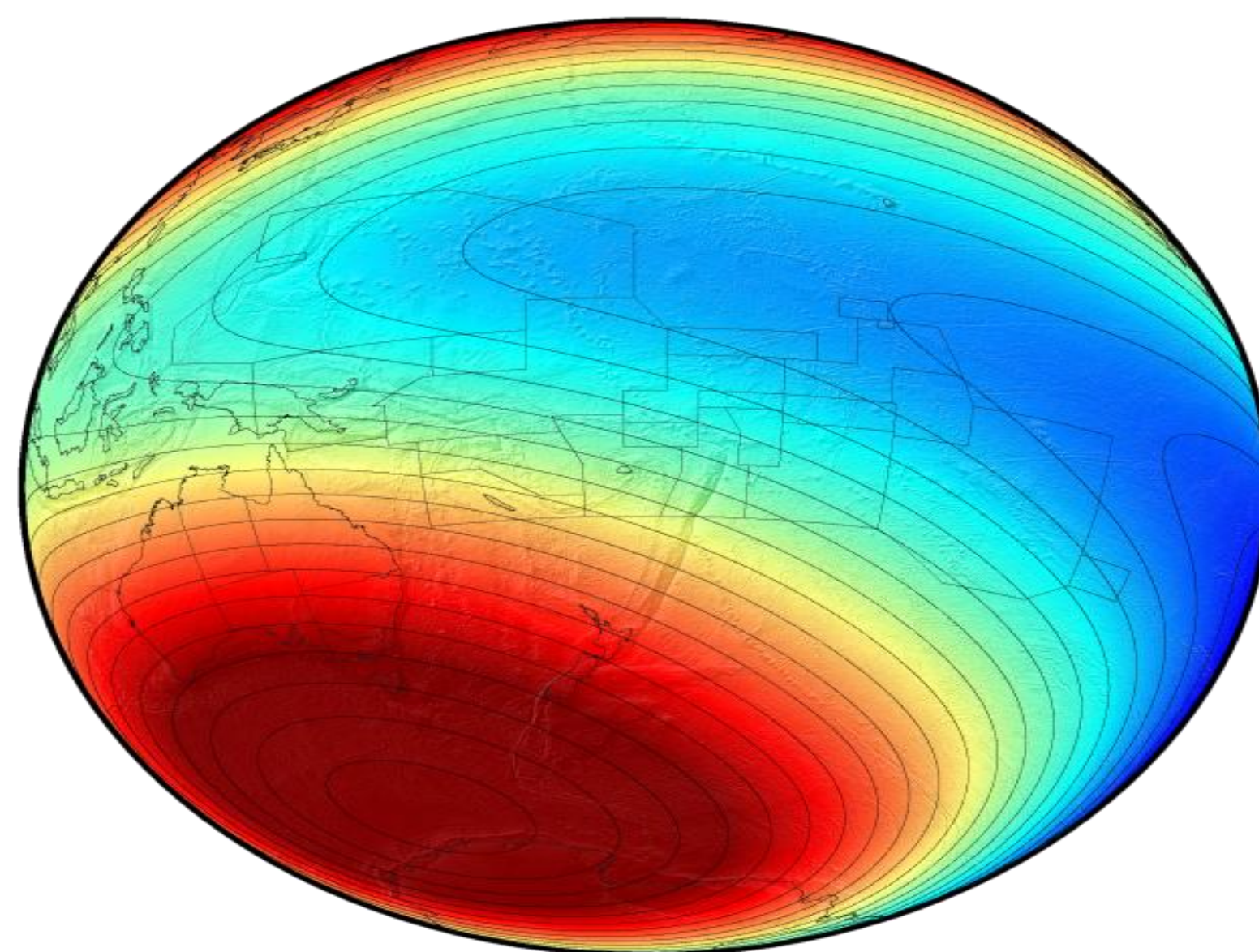
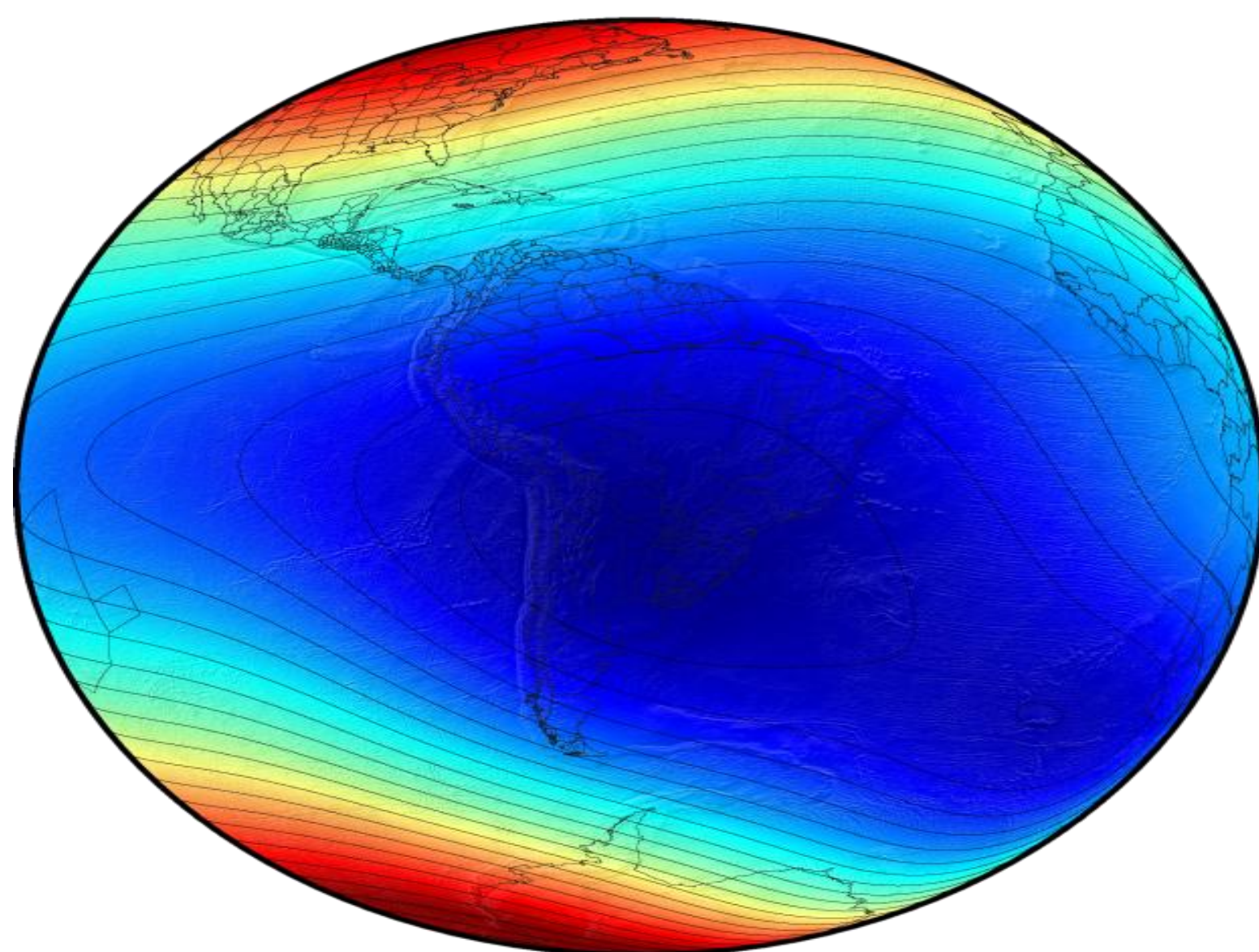
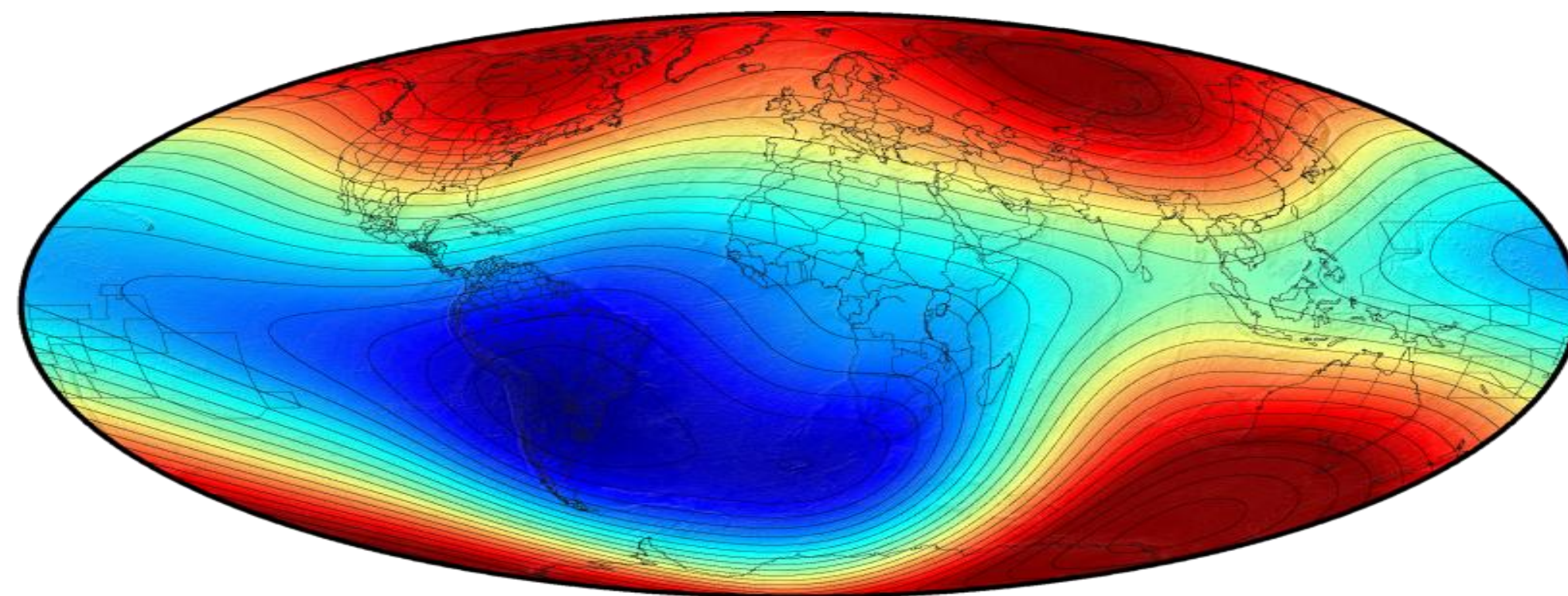
A intensidade do campo geomagnético é muito pequena (cerca de 50.000 nT). Isto corresponde a um campo centenas de vezes mais fraco que o campo entre os polos de um ímã de brinquedo. A intensidade varia conforme a região considerada sobre a superfície da Terra, sendo menor próximo ao equador e aumentando em direção aos polos (60.000 nT no polo magnético norte e 70.000 nT no polo magnético sul).



O campo magnético terrestre é em essência equivalente ao campo de um dipolo, cujo eixo faz um ângulo de  $9.4^\circ$  com o eixo de rotação da Terra, e um pouco afastado do centro da Terra.

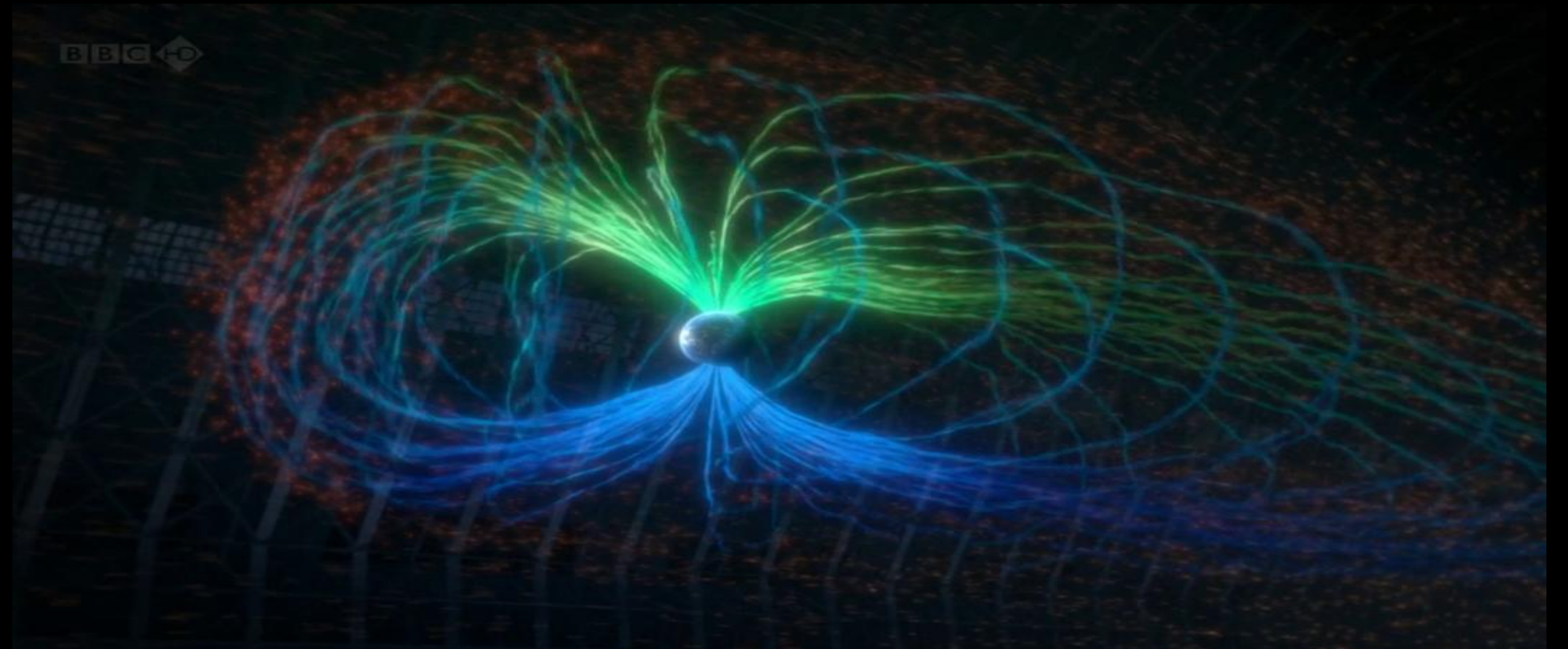


**Variação da intensidade do campo**

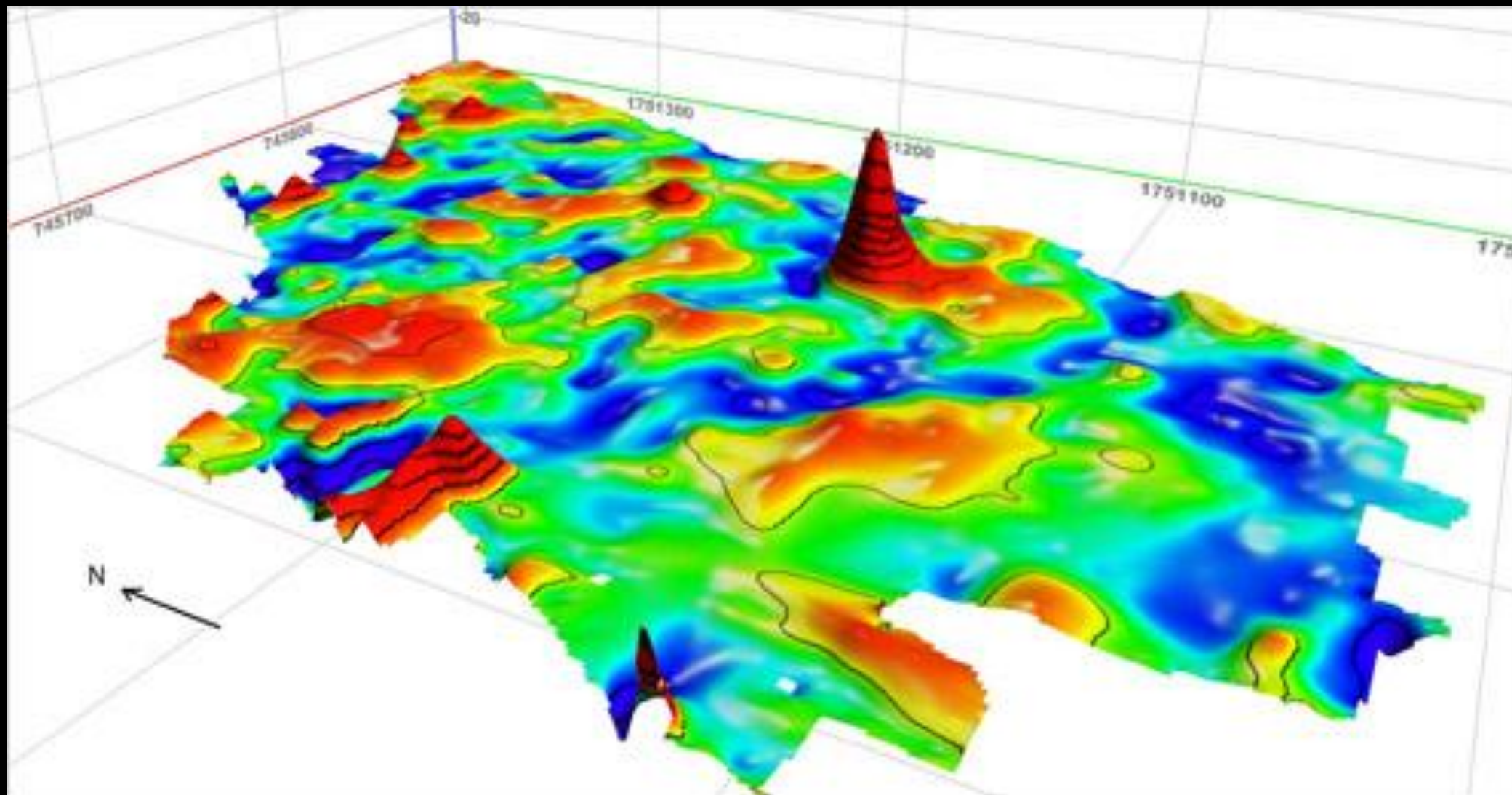
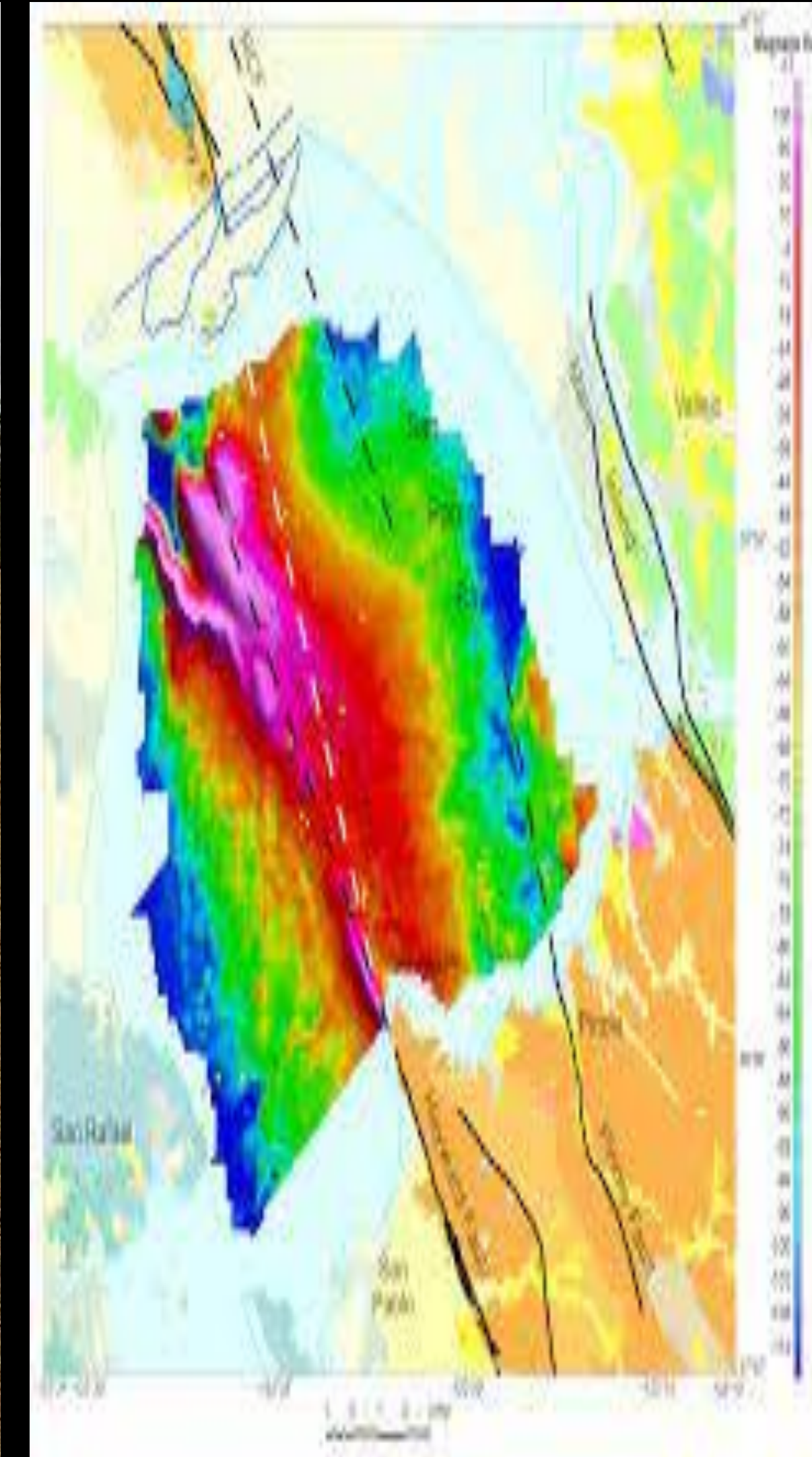


# A ATIVIDADE SOLAR E SUAS IMPLICAÇÕES NA TERRA

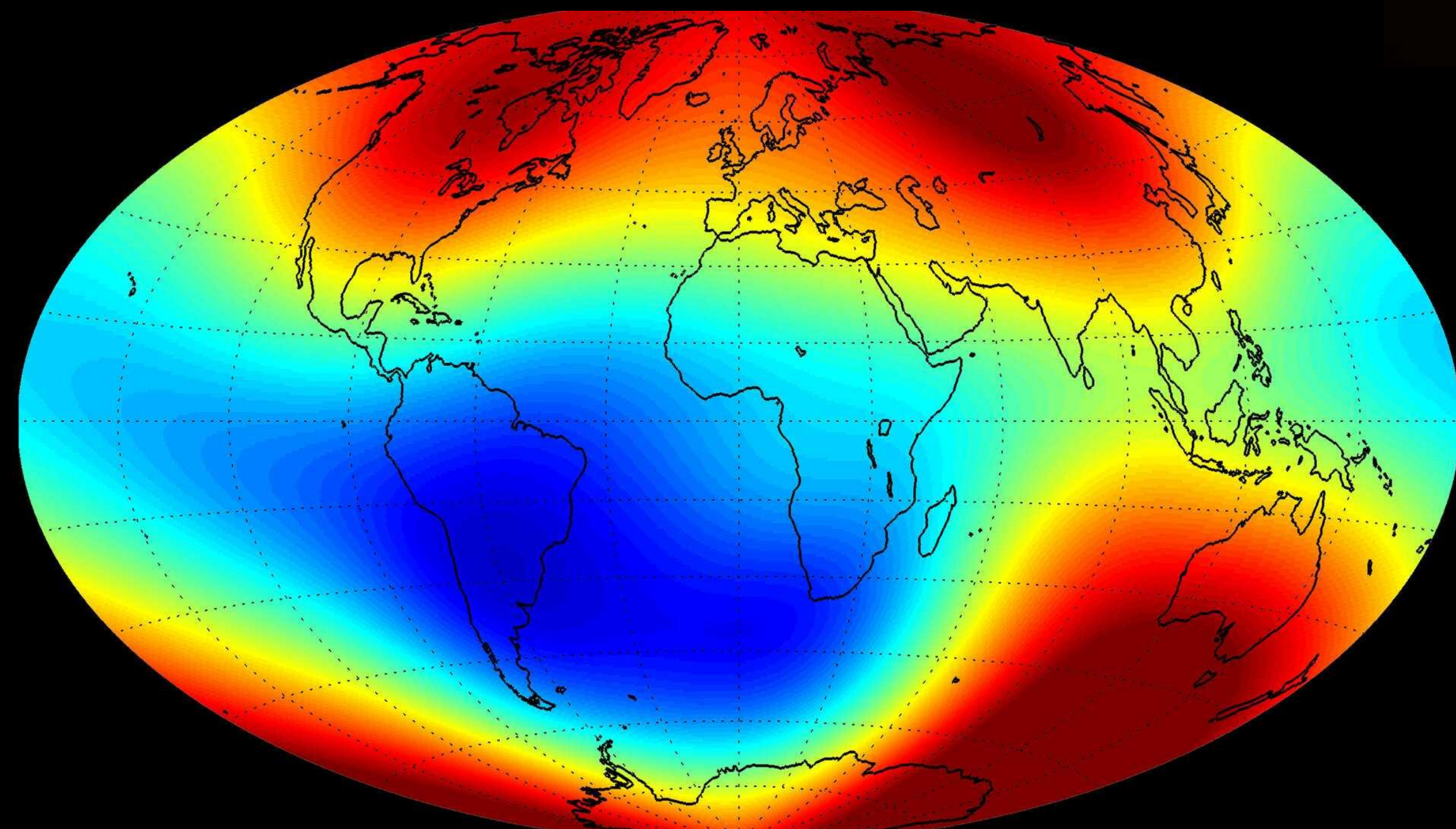
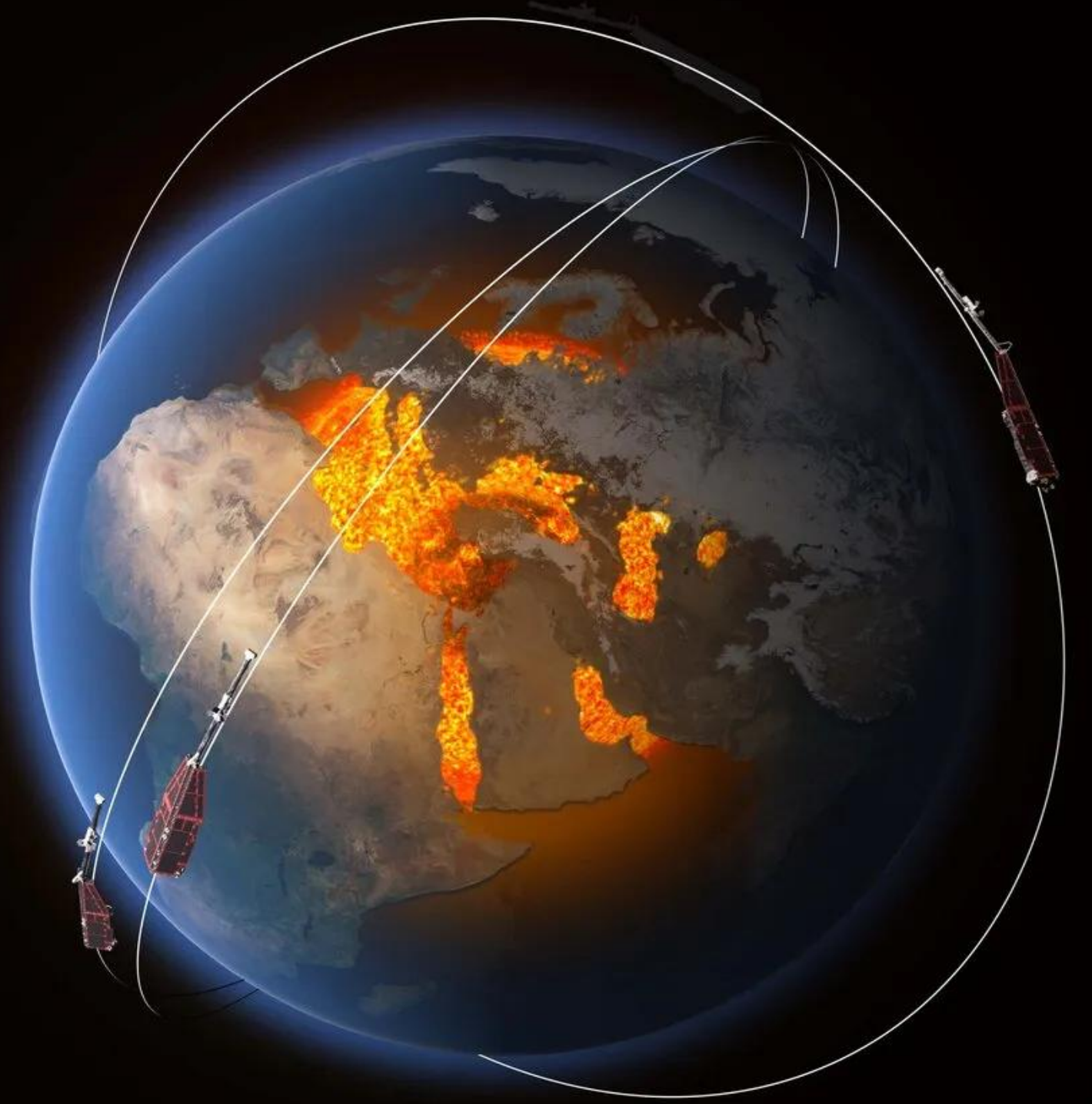
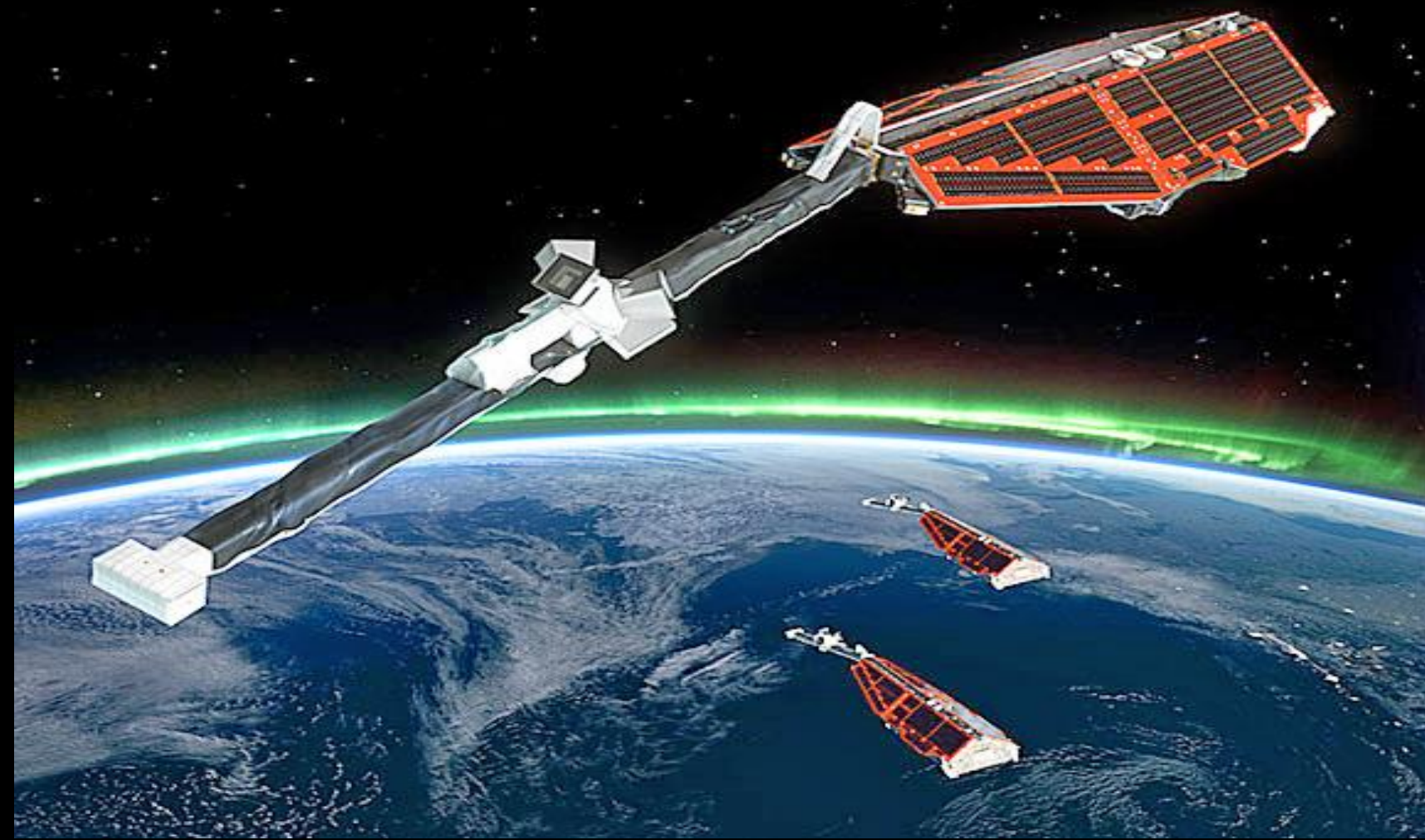




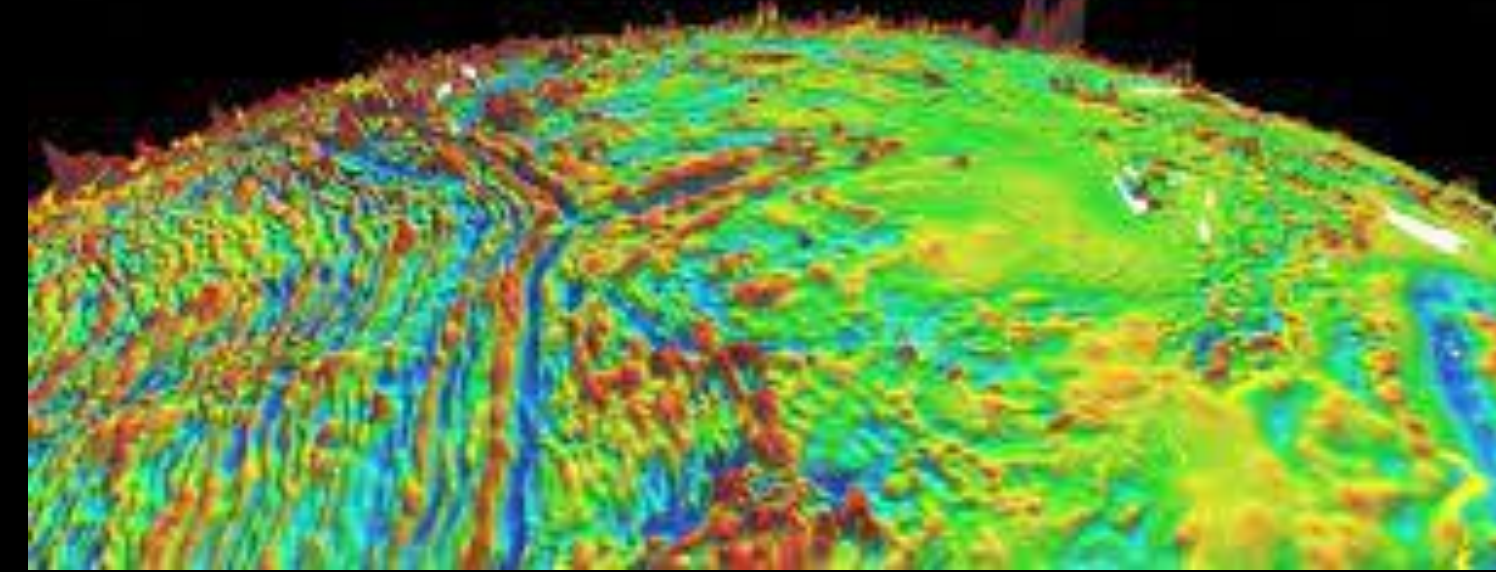
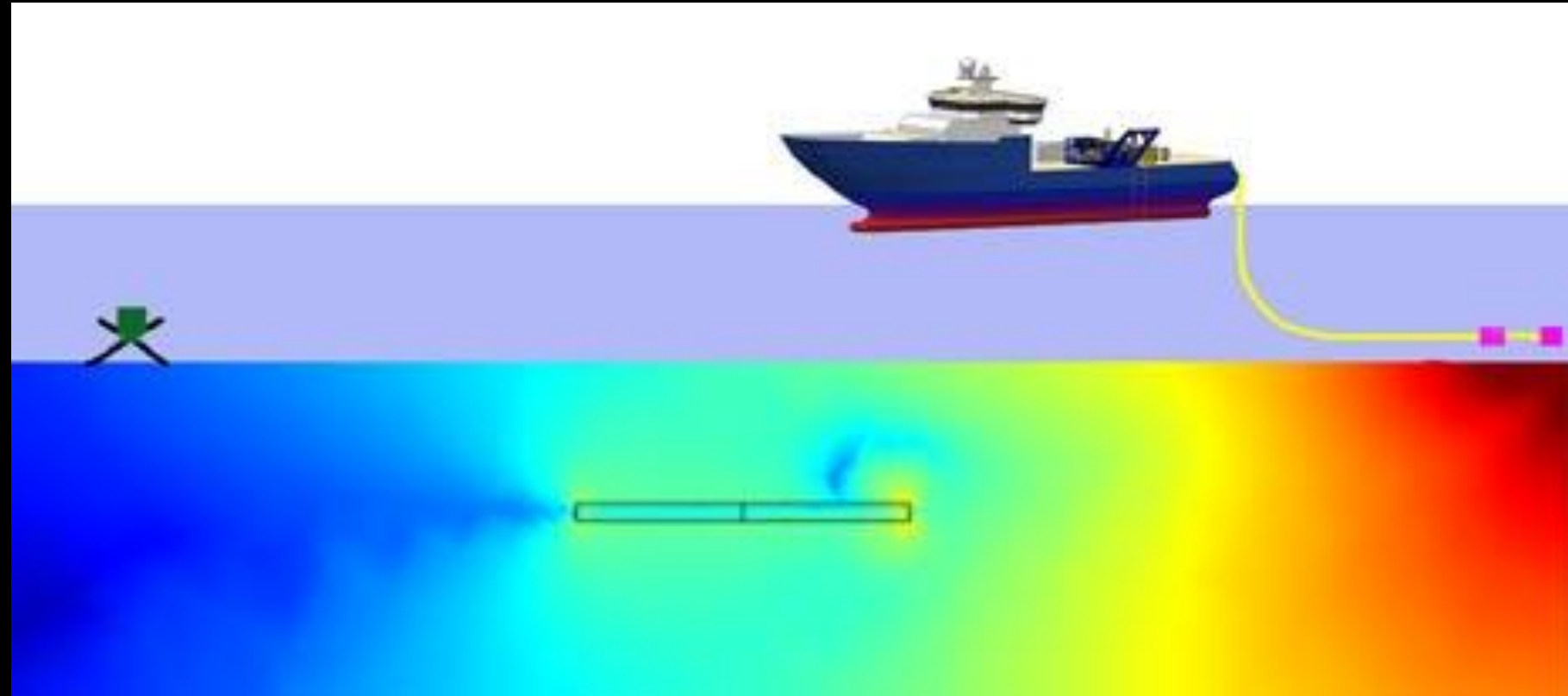
# MEDIÇÃO DO CAMPO MAGNÉTICO TERRESTRE



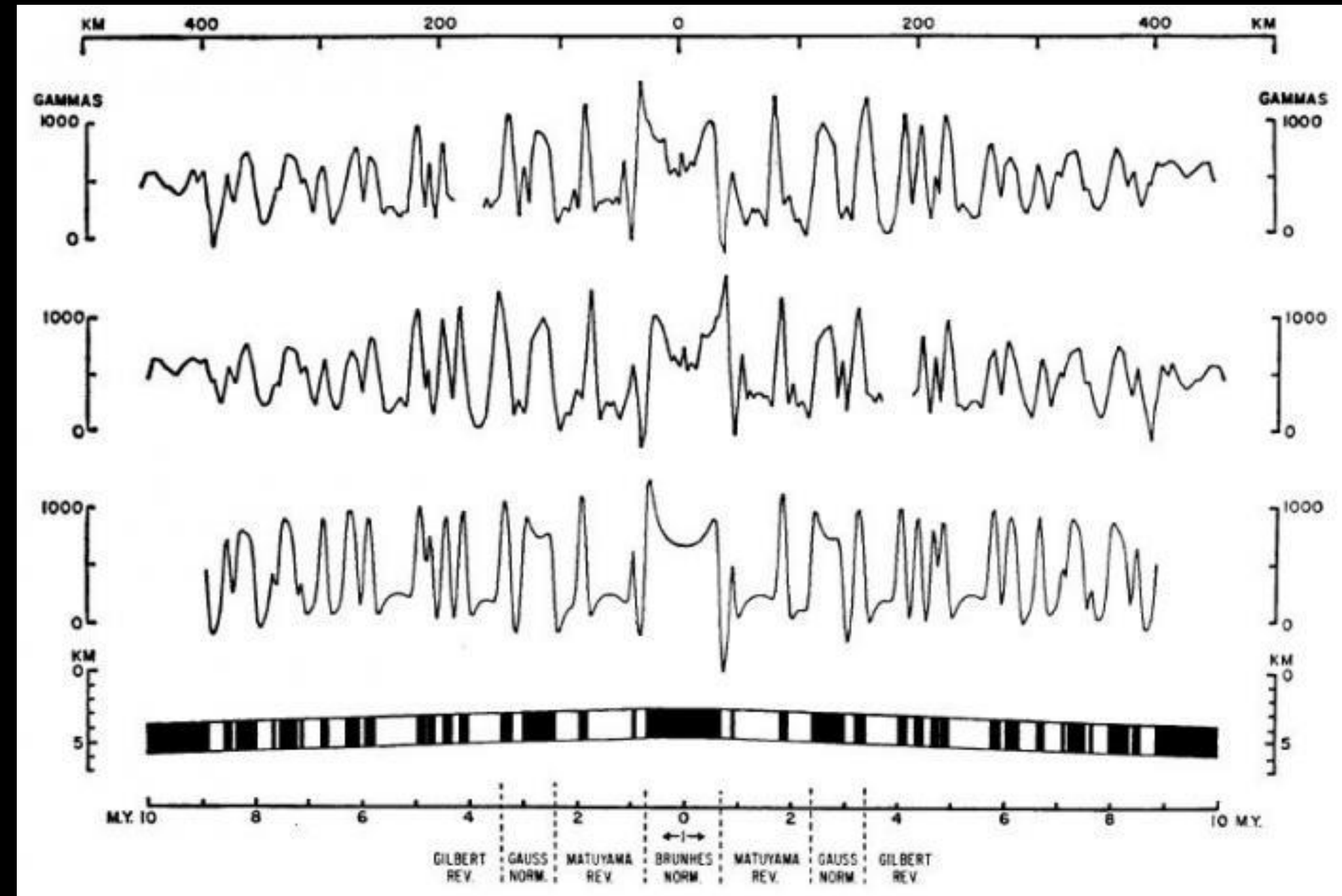
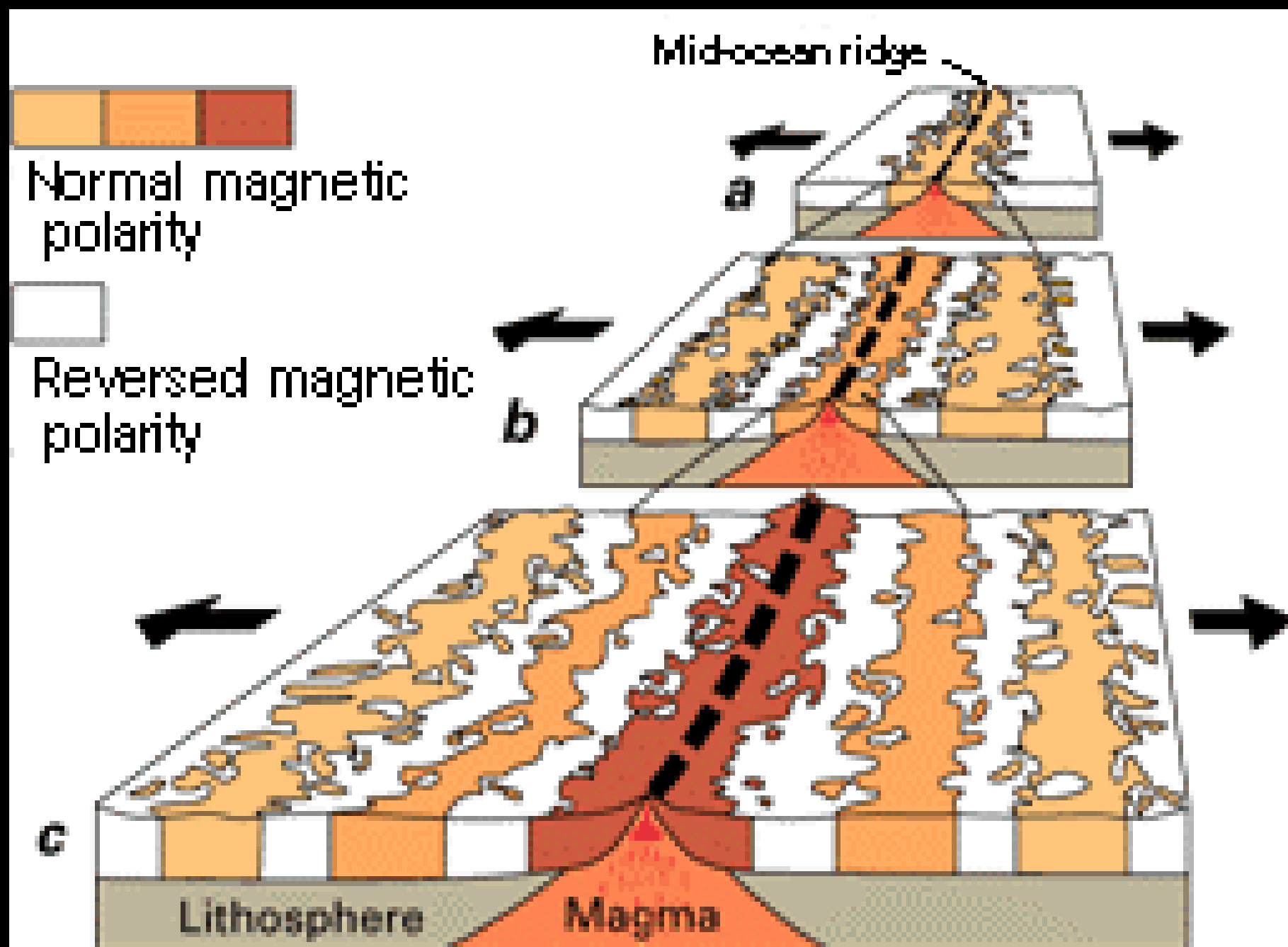
# SWARM



# O PADRÃO ZEBRADO DO ASSOALHO OCEÂNICO



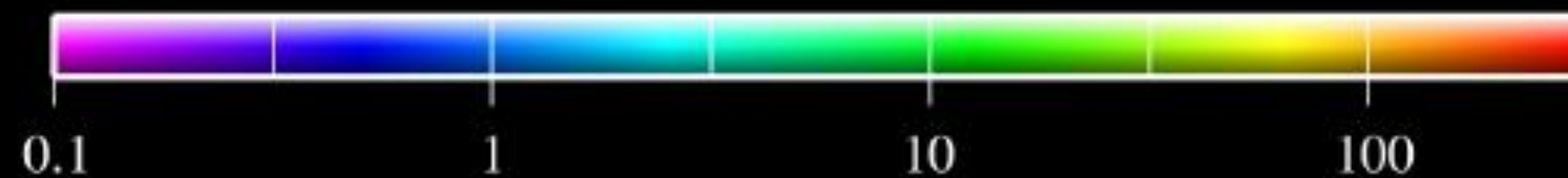
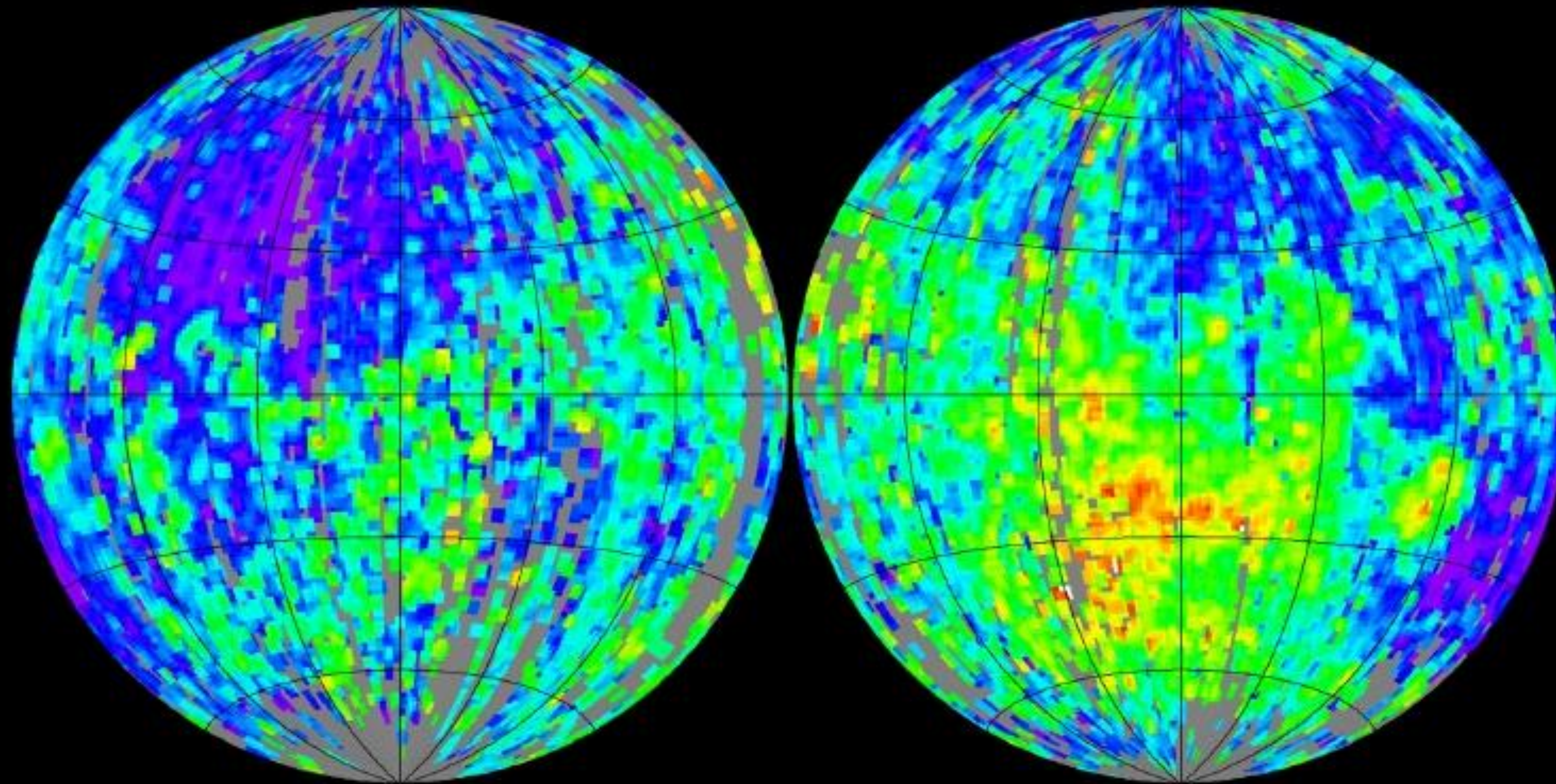
Walter Pitman



# O CAMPO MAGNÉTICO LUNAR

Near side

Far side



Total magnetic field strength, nT

Visualização do campo magnético da Lua, obtido por meio de dados da Lunar Prospector

COMO DESCOBRIR  
O QUE TEM  
DENTRO DA  
CAIXA?

???







AGITAR A  
CAIXA

PESAR A  
CAIXA





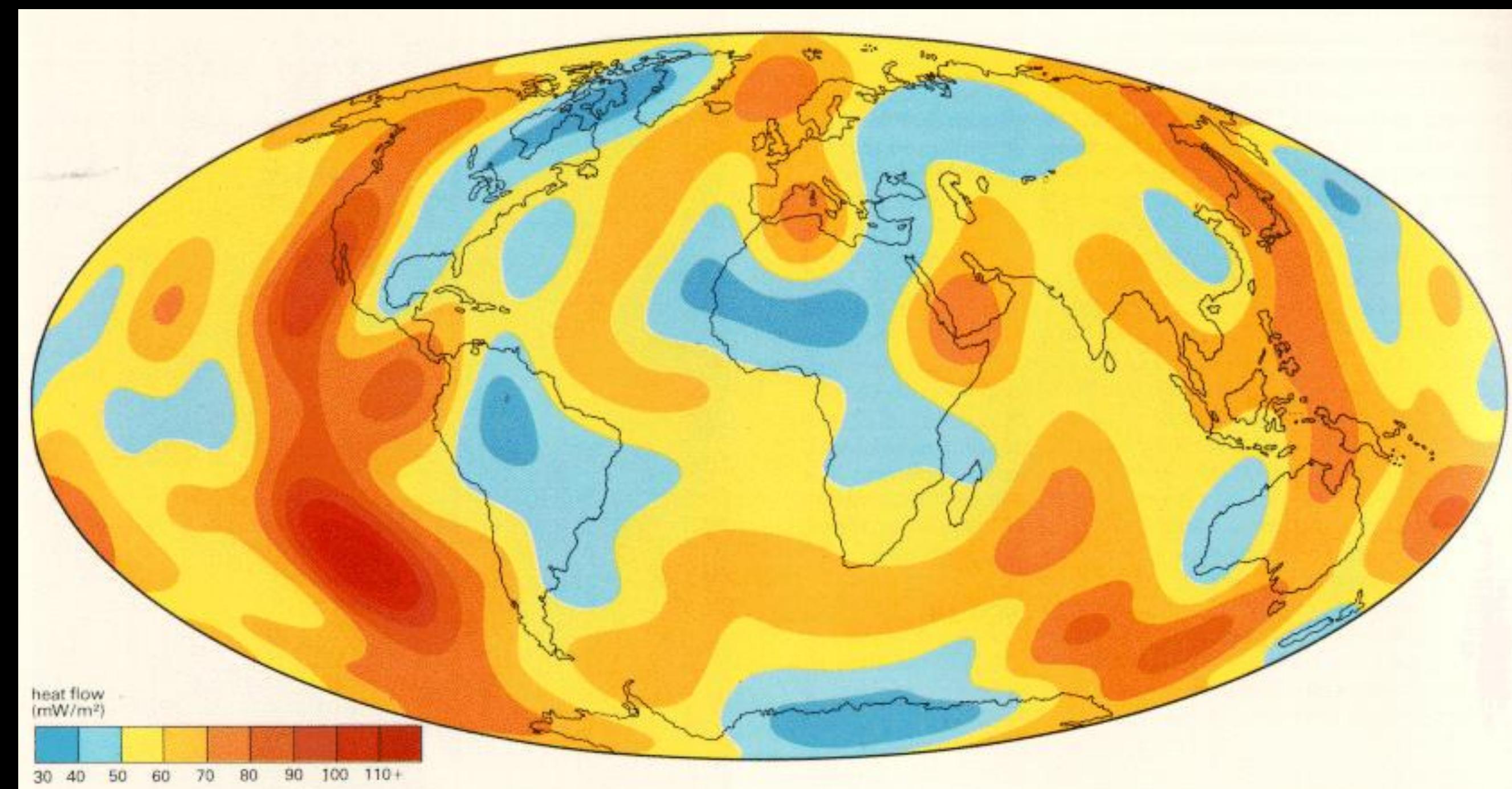
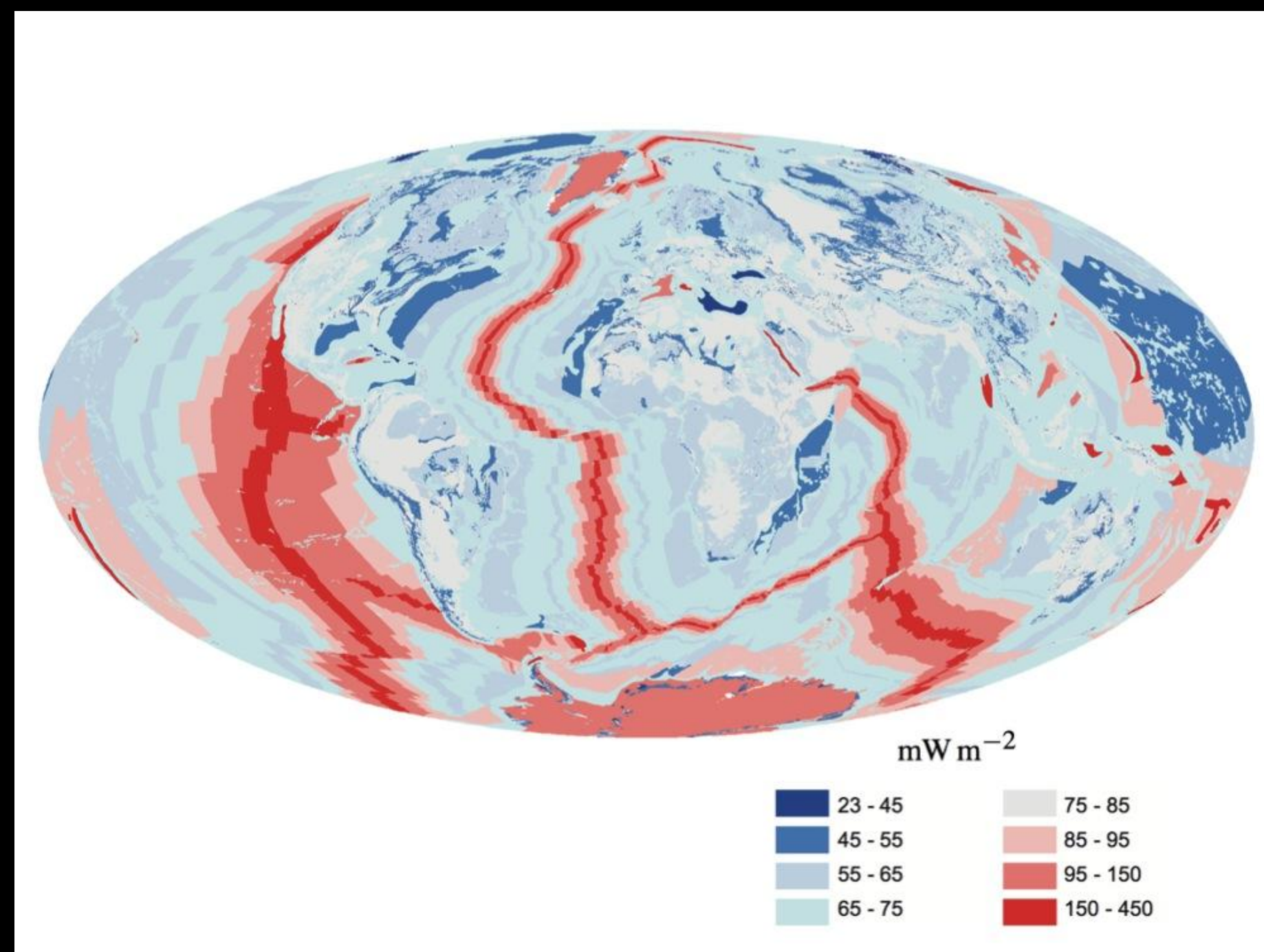
VERIFICAR SE O  
CONTEÚDO RESPONDE  
AO MAGNETISMO

VERIFICAR SE O  
CALOR PASSA POR  
ELA DE MANEIRA  
EFICIENTE



# O FLUXO DE CALOR TERRESTRE

- A investigação da distribuição de fluxo de calor na superfície terrestre permite obter informações importantes quanto à estrutura e processo de formação de grandes províncias geológicas
- A Terra está perdendo calor continuamente para o espaço; a quantidade de calor que passa por área por unidade de tempo é diretamente proporcional à condutividade térmica do material
- A distribuição da temperatura nas camadas superiores da crosta é determinada principalmente por dois fatores: a proximidade de fontes de calor e a condutividade térmica das rochas



# O FLUXO DE CALOR MEDIDO NA LUA

**Apollo 11** JUL 69  
Mare Tranquillitatis  
0.67416°N 23.47314°E  
LM: 21.6 hours EVA: 2.5 hours

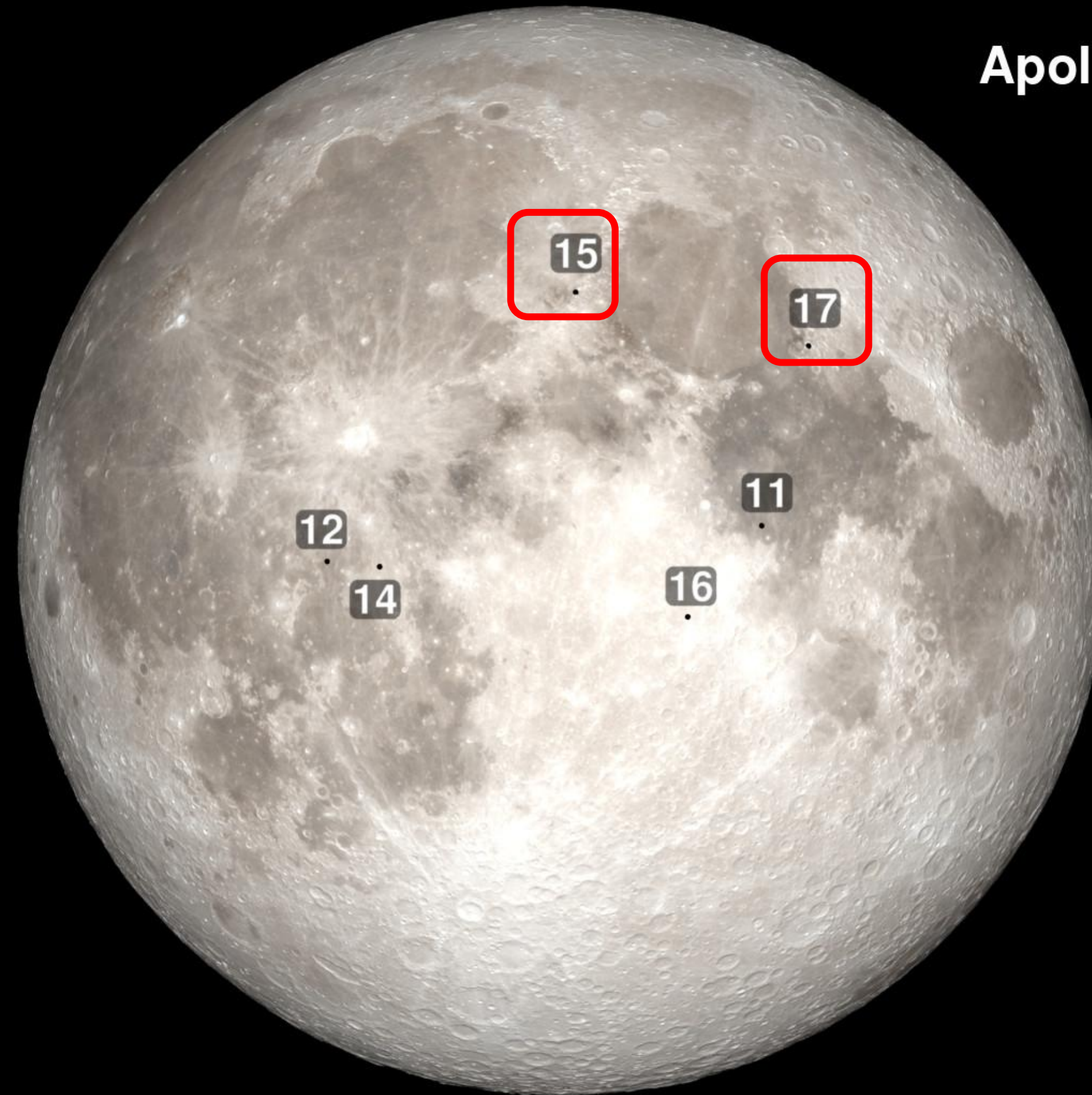
**Apollo 12** NOV 69  
Oceanus Procellarum  
3.0128°S 23.4219°W  
LM: 31.5 hours EVA: 7.8 hours

**Apollo 14** FEB 71  
Fra Mauro Highlands  
3.64589°S 17.47194°W  
LM: 33.5 hours EVA: 9.4 hours

**Apollo 15** AUG 71  
Hadley Rille  
26.13239°N 3.63330°E  
LM: 66.9 hours EVA: 19.1 hours

**Apollo 16** APR 72  
Descartes Highlands  
8.9734°S 15.5011°E  
LM: 71.0 hours EVA: 20.2 hours

**Apollo 17** DEC 72  
Taurus-Littrow Valley  
20.1911°N 30.7655°E  
LM: 75.0 hours EVA: 22.1 hours



## Apollo Landing Sites





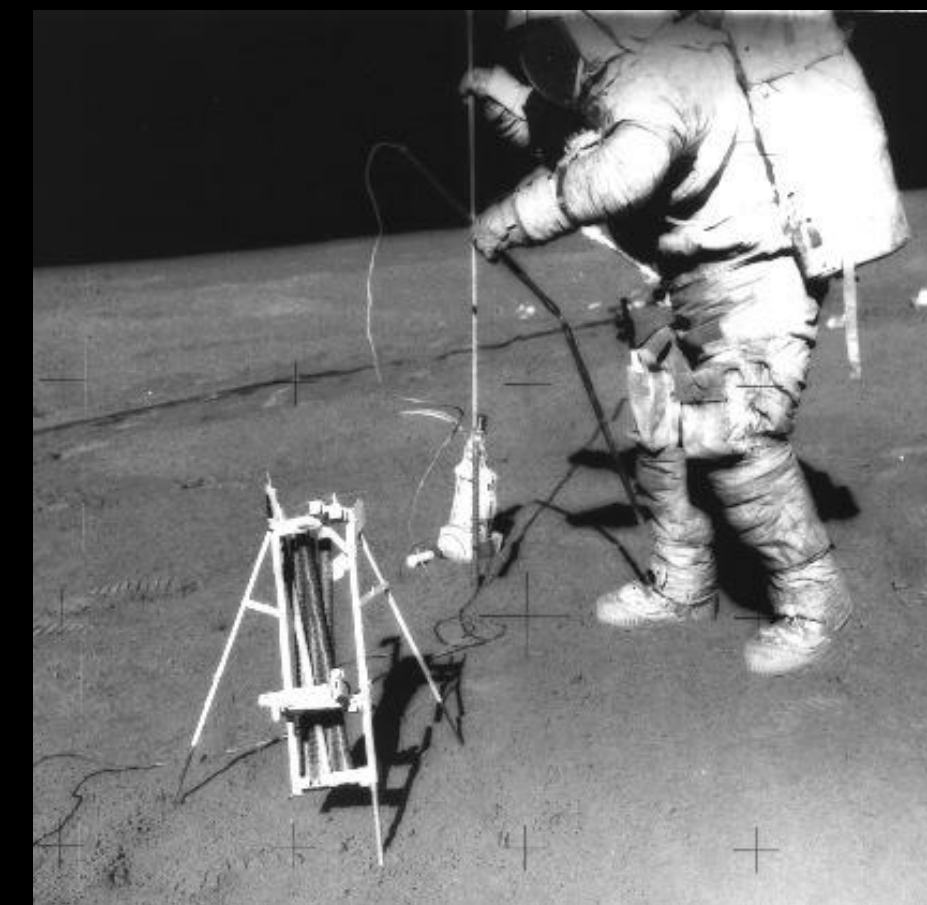
# O EXPERIMENTO DE FLUXO DE CALOR NA LUA

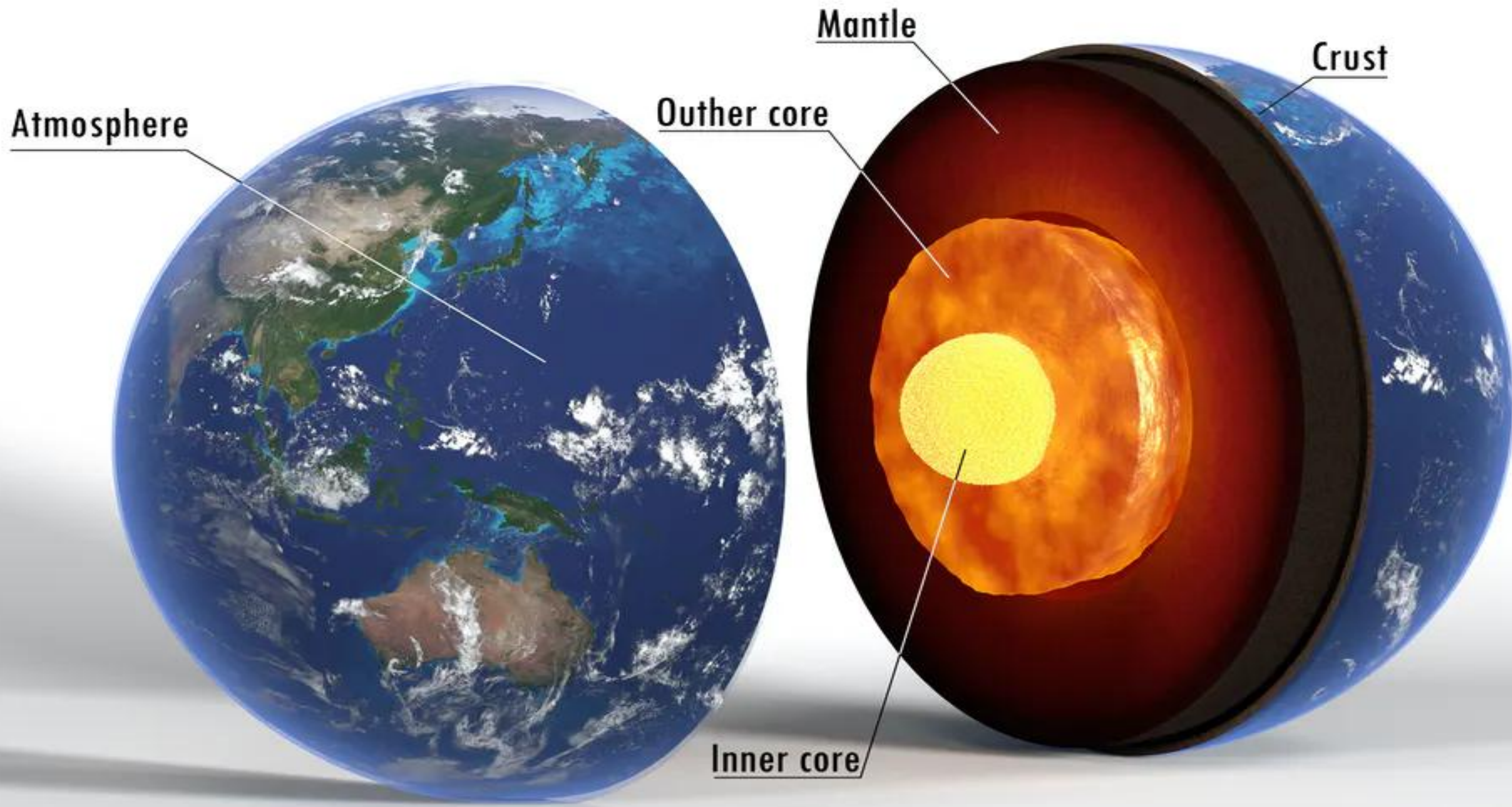
Medições bem-sucedidas foram feitas em dois dos locais de pouso: Hadley Rille, perto da borda da bacia do Imbrium - visitada na Apollo 15 - e Taurus-Littrow, um na margem sudeste de Serenitatis - visitado na Apollo 17

Em cada local, os astronautas enterraram duas sondas no solo lunar para medir a temperatura e a condutividade térmica do solo.

Os experimentos instalados na Lua forneceram informações extensas sobre a temperatura e as propriedades térmicas da camada da superfície lunar até uma profundidade de 3 m

- A Lua é fria
  - 66°C Apollo 15 hadley rille
  - 57°C Apollo 17 aurus littrow
- A temperatura da superfície muda ~ 9 ° F todos os dias
- Menos calor saindo da Lua do que da Terra:  
~17mW/m<sup>2</sup> na Lua e ~91 mW/m<sup>2</sup> na Terra





# O planeta Terra



IAG-USP 2023