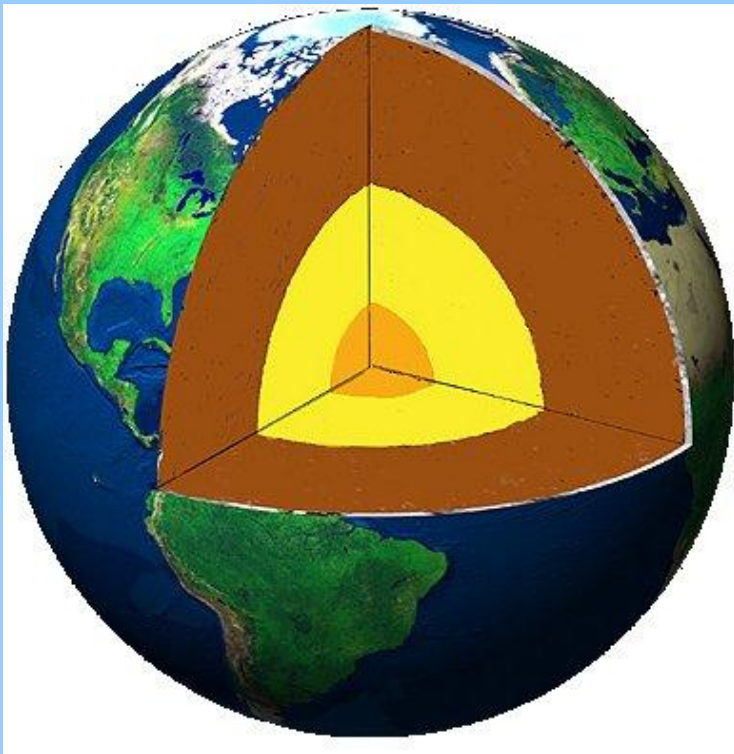


# A forma da Terra, suas dimensões e sua massa



Eder C. Molina  
eder@iag.usp.br  
IAG-USP

# A Terra: forma e dimensões

## A forma da Terra

A mais antiga atribuição de forma à Terra que se conhece é a de **um disco** chato.



Já no séc. VII a.C., Homero e os filósofos gregos afirmavam que a Terra era **um disco** suportando o céu.

# A Terra: forma e dimensões

Mais tarde, no século VI a.C., Tales de Mileto e os babilônios, acreditavam que a Terra era **um disco** que flutuava sobre a água.



Na mitologia Hindu, Chukwa seria a primeira e mais velha das tartarugas, que sustentaria a Terra.

Em alguns relatos, ela carregaria um elefante, Maha-pudma, que estaria sustentando a Terra.

# A Terra: forma e dimensões

Para outros, como Anaxímenes, também de Mileto, o **disco Terra** estaria suspenso sobre um buraco infinito, sustentado pelo ar que o circundava.

Anaxímenes (560-500 a.C.)



Anaxímenes dizia que "o ar infinito era o princípio do qual provém todas as coisas que estão a gerar-se, e que existem, e que não-de existir, e que os deuses e as coisas divinas, e o resto proveniente dos seres por ele produzidos. A forma do ar é a seguinte: quando ele é igual, é invisível à vista, mas é revelado pelo frio e pelo calor e pela umidade e pelo movimento". Frag.144

"E todas as coisas são produzidas por uma espécie de condensação, e depois rarefação, dele (s.c. ar). O movimento existe, e de fato, desde todo o sempre; quando o ar se comprime, logo se gera a Terra, a primeira de as coisas completamente plana - por isso é conseqüentemente levada pelo ar; e o Sol e a Lua e os demais corpos celestes têm na Terra a origem do seu nascimento. O Sol é Terra, mas que, devido à rapidez do seu movimento, obtém calor bastante".Frag.151

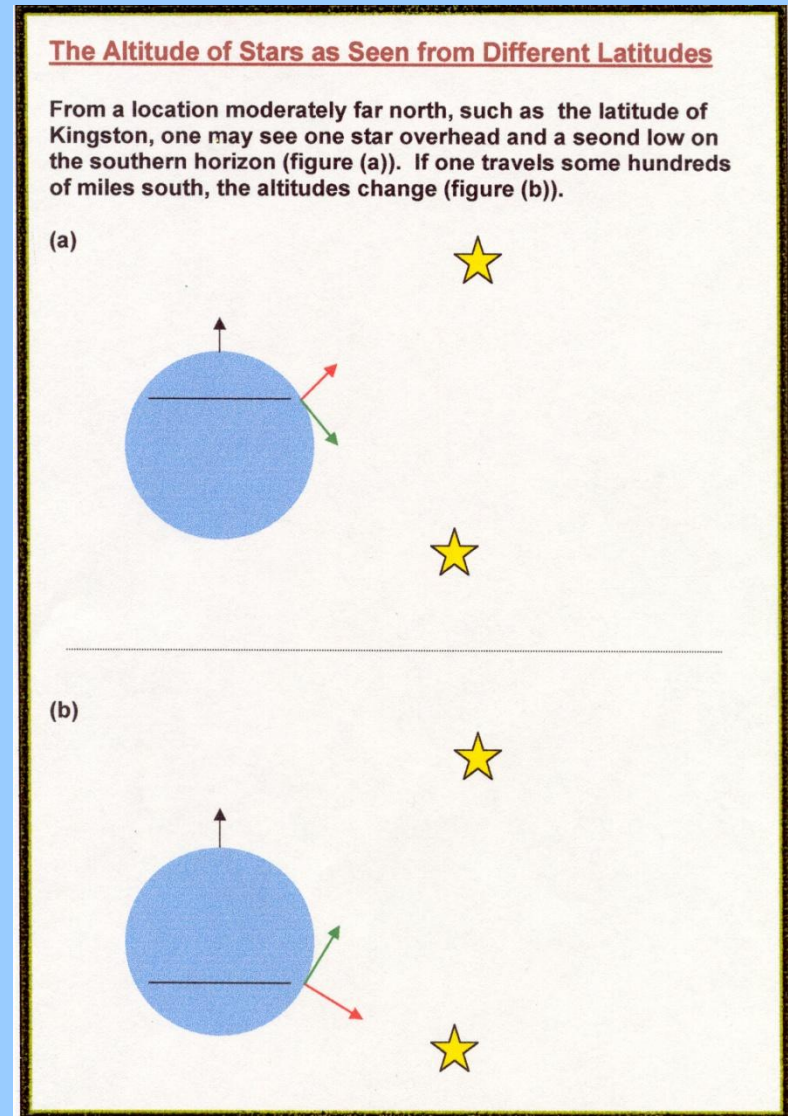
"O mundo uno é considerado como gerado e destrutível, por todos aqueles que dizem que há sempre um mundo, embora não seja sempre o mesmo, mas se torne diferente em diferentes ocasiões de acordo com determinados períodos de tempo, como afirmaram Anaxímenes e Heraclito, e posteriormente os estóicos". Frag.150

# A Terra: forma e dimensões

## Problema:

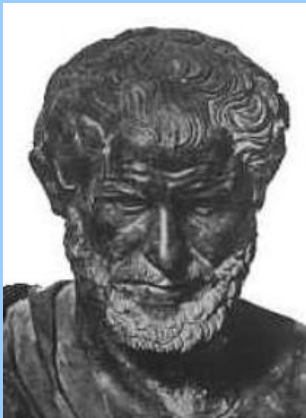
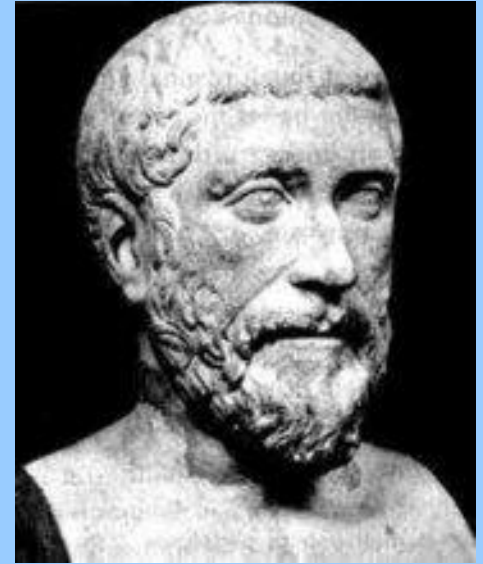
Se a Terra fosse um disco chato, então existiria somente um horizonte, ou seja, as estrelas visíveis em um ponto da Terra seriam vistas exatamente da mesma forma em qualquer outra localidade, e a hora do alvorecer e a duração do dia deveriam ser iguais em todo o planeta.

Na prática isto não é observado. Sabia-se, já naquela época, que em algumas períodos do ano a duração dos dias é bastante diferente se estamos mais ao norte ou mais ao sul.



# A Terra: forma e dimensões

Ainda no séc. VI a.C., Pitágoras e a sua escola deram um grande passo para que a **concepção esférica** da Terra fosse difundida (ironicamente, isto se deveu mais a suas crenças sobre a perfeição da forma esférica e do número 10 do que propriamente pela razão).



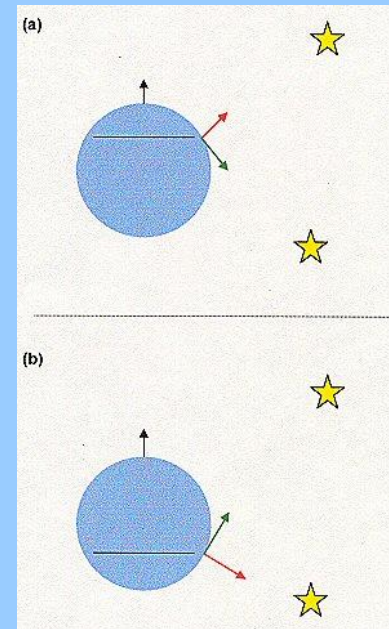
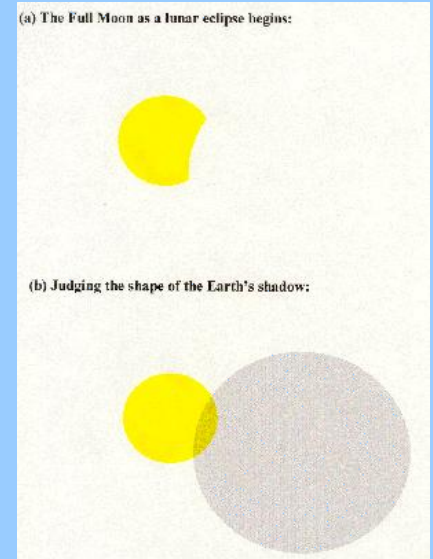
Aristóteles, no séc. IV, apresentou os primeiros argumentos convincentes para a esfericidade da Terra.

Aristóteles explicava os fenômenos com base na teoria do vitalismo considerando a natureza de cada coisa. Por exemplo, por que chove? Chove porque os homens precisam beber água e a natureza da água é servir aos homens. Por que uma pedra jogada para o alto sempre volta a cair no chão? Porque é da natureza da pedra voltar para junto da “Terra-mãe.”

# A Terra: forma e dimensões

Primeiros argumentos convincentes para a esfericidade da Terra:

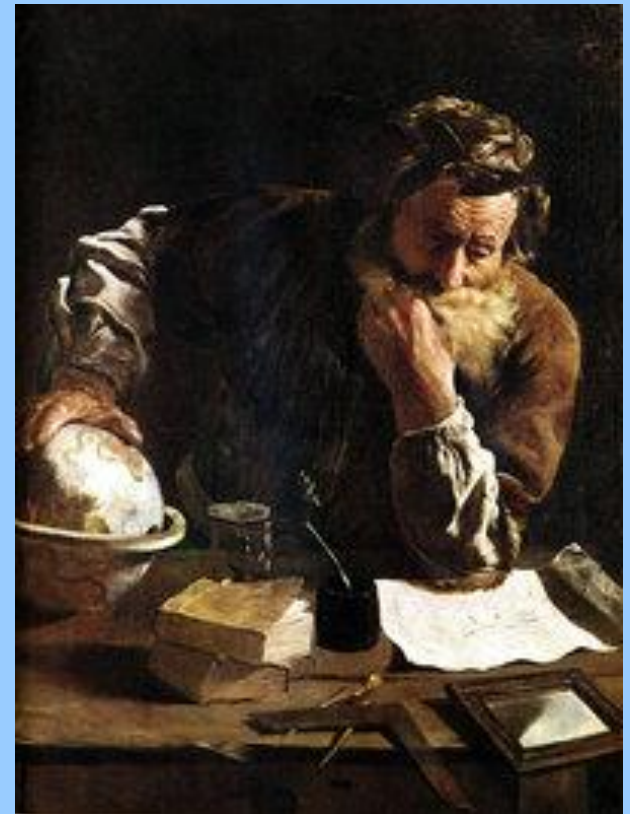
- o **contorno circular** da sombra da Terra projetada na Lua durante os eclipses lunares;
- a **diferença no horário** de observação de um mesmo eclipse para observadores situados em locais diferentes;
- a **mudança no aspecto do céu** conforme a latitude do observador;
- **todos os objetos caem em direção** à Terra.



# A Terra: forma e dimensões

## O tamanho da Terra

No século III a.C., Arquimedes afirmava que a Terra era uma esfera menor do que o Sol e maior do que a Lua e sugeria que a sua circunferência teria uma dimensão máxima de 300.000 estádios (estádio era uma unidade de medida que podia valer de 147 a 192 metros).





## A Terra: forma e dimensões

Eratóstenes de Alexandria, nascido em Cirene, norte da África, em 276 a.C., realizou o primeiro experimento científico para medição da circunferência da Terra.



A engenhosa idéia de Eratóstenes era baseada na hipótese de que, caso a Terra fosse esférica, a sombra de uma bastão observada no mesmo instante em locais diferentes permitiria, a partir de considerações geométricas, o cálculo do diâmetro da esfera.



# A Terra: forma e dimensões

O valor por ele obtido, apesar da precariedade dos métodos de medição utilizados para estimar a distância entre os dois pontos de medida, foi de 250.000 estádios.

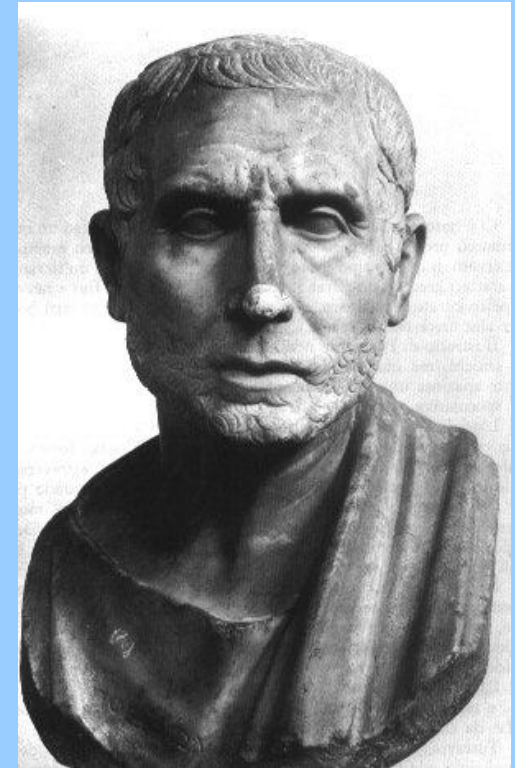
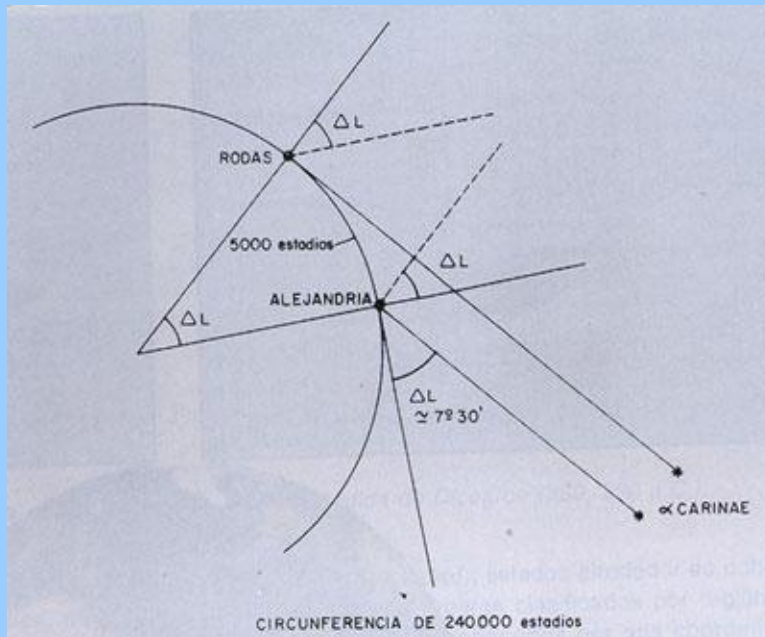
Se considerarmos o valor médio de um estádio, teremos um meridiano terrestre de 46.230 km, muito próximo do valor atualmente observado de 39.941 km.



**Eratóstenes** era bibliotecário-chefe do Museu de Alexandria, no Egito. Um relato em um dos livros da biblioteca indicava que ao meio-dia do solstício de verão podia-se ver o reflexo do Sol em um poço na cidade de Siena, 800 km a sul de Alexandria, indicando assim que o Sol estaria incidindo exatamente na vertical. Na mesma hora, em Alexandria, um obelisco apresentava uma sombra em função da curvatura da Terra. Sabendo o comprimento da sombra e a distância entre as duas cidades ele pôde calcular a circunferência da Terra.

# A Terra: forma e dimensões

Um século mais tarde, Posidônio determinou o raio terrestre por um método semelhante, mas utilizando a posição de uma estrela, obtendo um valor de 240.000 estádios para o comprimento da circunferência.



# A Terra: forma e dimensões

Claudio Ptolomeu, no século II d.C., autor do sistema geocêntrico, atribuiu ao planeta um valor similar ao de Posidônio, reafirmando a esfericidade da Terra.

## **A Terra, como um todo, é sensivelmente esférica**

Pois, se ela fosse côncava, as estrelas que nascem apareceriam primeiro às pessoas do Ocidente; e se fosse plana, as estrelas nasceriam e se poriam para todas as pessoas ao mesmo tempo; e se ela fosse uma pirâmide, um cubo ou qualquer outra figura poligonal, ela apareceria ao mesmo tempo para todos os observadores na mesma linha reta. Mas nenhuma dessas coisas parece acontecer. E está claro, ademais, que não poderia ser cilíndrica com a superfície curva voltada ao nascimento e ocaso e as bases do plano voltadas para os pólos do universo, o que alguns acham mais plausível. Pois assim, nenhuma estrela nunca estaria visível a nenhum dos habitantes da superfície curva e, ao invés disso, ou todas as estrelas nasceriam e se poriam para os observadores, ou as mesmas estrelas seriam sempre invisíveis para uma mesma distância de qualquer um dos pólos a todos os observadores. E, ainda, quanto mais se avança para o pólo norte, mas as estrelas do sul se escondem e as do norte aparecem. Deste modo, está claro aqui que a curvatura da Terra, cobrindo uniformemente as partes em direções oblíquas, prova sua forma esférica de cada lado. (...)

# A Terra: forma e dimensões



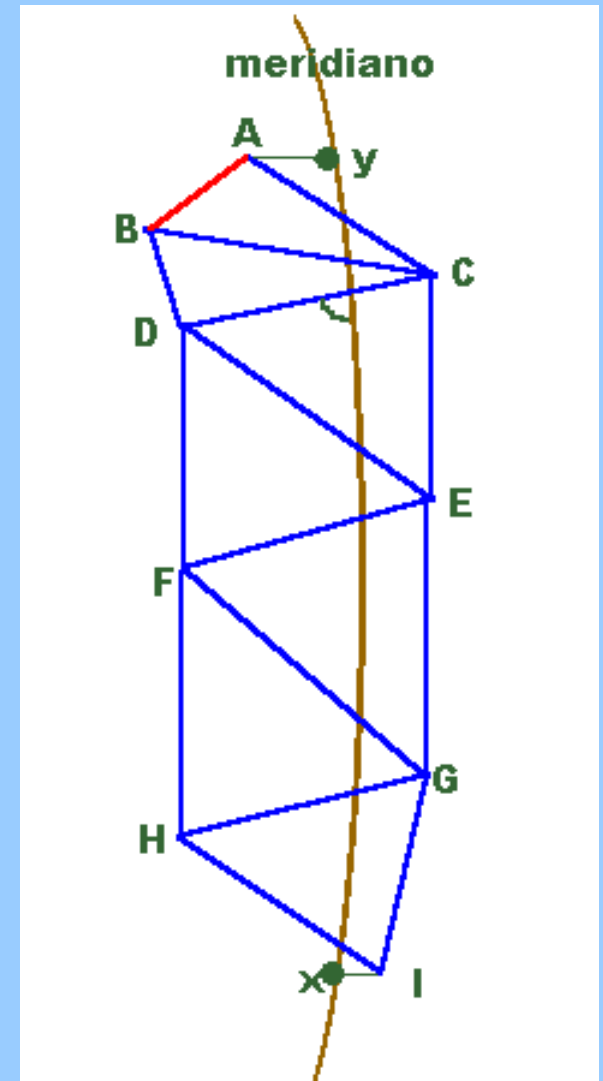
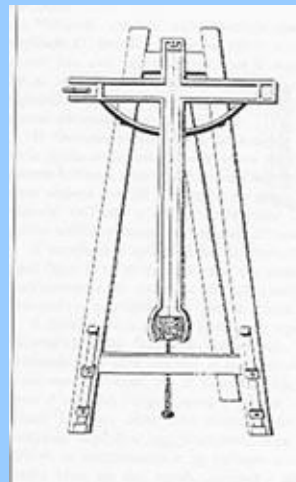
O mapa-mundi segundo Ptolomeu



Depois de Ptolomeu, somente no séc. IX é que outra tentativa para a determinação das dimensões da Terra foi realizada, pelos árabes. O valor obtido, em milhas árabes, daria algo em torno de 42.840 km para a circunferência terrestre, considerando que uma milha árabe corresponde a 2,16 km.

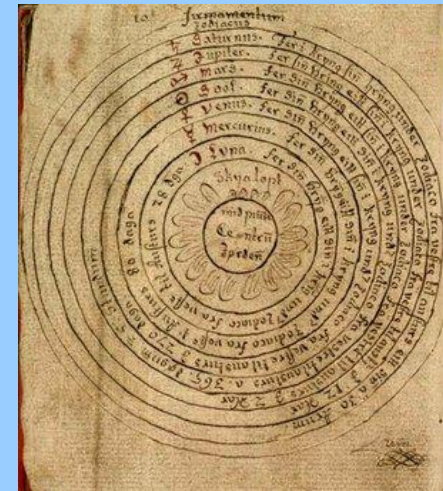
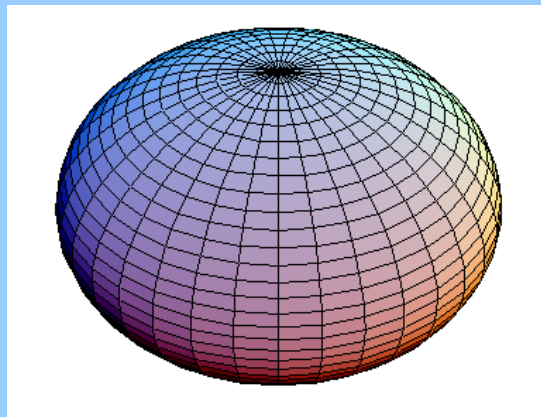
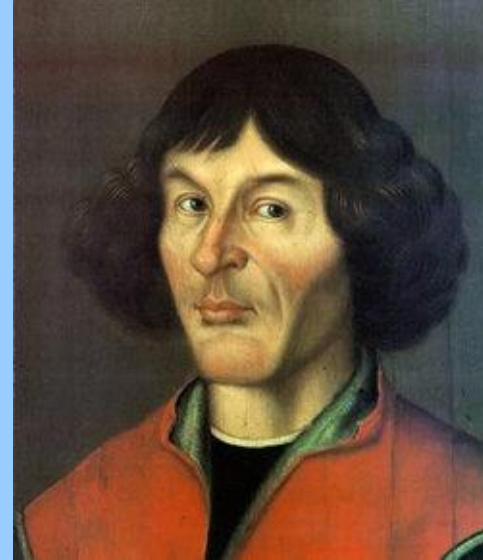
# A Terra: forma e dimensões

Valores mais precisos só foram conseguidos no séc. XV, com a medida de um arco de meridiano por J. Picard, que obteve o valor de 6.372 km para o raio do planeta, o que corresponde a um diâmetro médio de 40.036 km para a Terra. O valor obtido por Picard ficou famoso pelo fato de ter sido utilizado por Isaac Newton para a verificação da Lei da Gravitação Universal.



# A Terra: forma e dimensões

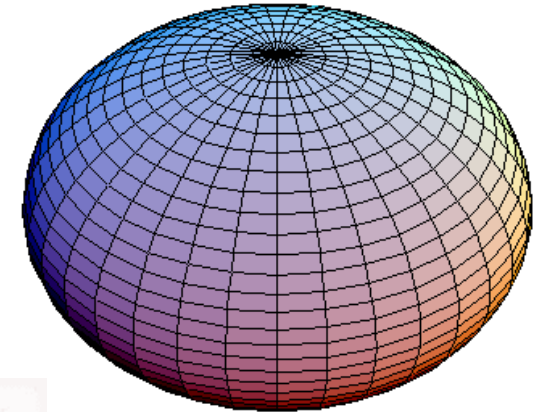
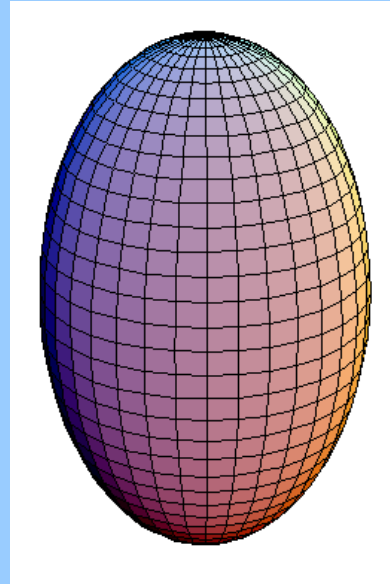
Com a negação do sistema geocêntrico por Copérnico, admitiu-se para a Terra um movimento de rotação e translação ao redor do Sol, o que permitiu que Newton concluísse, a partir de estudos teóricos, que o movimento de rotação causaria um achatamento do planeta nos polos, de forma que a razão entre o diâmetro da Terra no equador e no polo fosse de 230/229, ou seja, o raio da Terra seria ligeiramente menor no polo.



# A Terra: forma e dimensões

Um fato curioso ocorreu em 1718, quando Jacques Cassini realizou uma série de medidas, dando continuidade a um trabalho de Picard, e concluiu que a Terra deveria ser achatada no equador, ao contrário do que a teoria newtoniana previa.

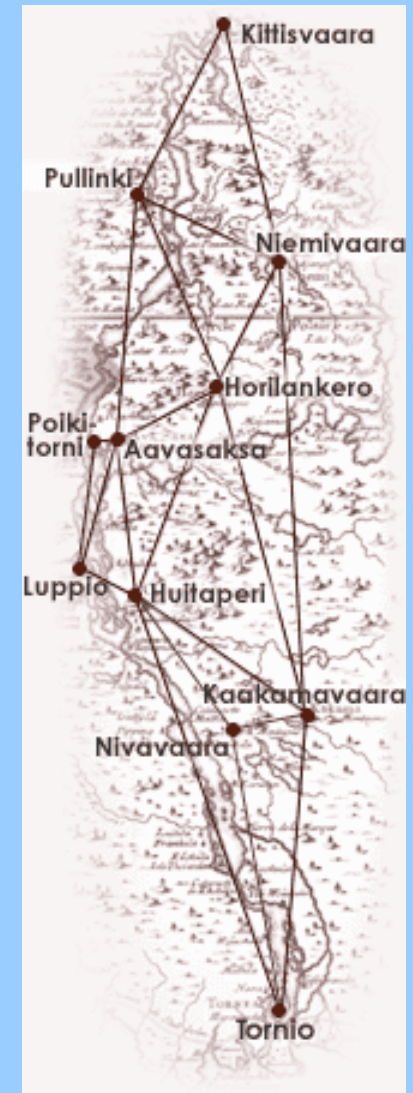
Uma grande controvérsia foi criada na Europa a respeito destes resultados, dando origem a duas expedições patrocinadas pela Academia de Ciências de Paris, com o objetivo de realizar medições de um arco de meridiano próximo ao equador, no Peru, e próximo ao pólo, na Lapônia.





# A Terra: forma e dimensões

O resultado das medições mostrou que um arco de  $1^\circ$  no equador media 110.614 m, e próximo ao pólo, um arco de  $1^\circ$  correspondia a 111.949 m. Estava confirmada, assim, a teoria de Newton, e a Terra a partir de então foi vista em primeira aproximação como um elipsóide de revolução, com o semi-eixo menor coincidindo com o eixo de rotação terrestre.



# A Terra: forma e dimensões

## A massa da Terra

O problema de determinar a massa da Terra só foi resolvido em 1798 por Henry Cavendish, que, utilizando a Lei da Gravitação Universal formulada em 1687 por Isaac Newton, utilizou um engenhoso método que consistia em medir o deslocamento de pequenas esferas de chumbo suspensas por um fio, quando delas se aproximava esferas muito maiores.



# A Terra: forma e dimensões

Pela Lei da Gravitação Universal, deveria haver uma força de atração entre as massas, que poderia ser detectada pelo deslocamento das massas menores. O experimento permitiu a determinação não só da massa, mas da densidade média da Terra (que pode ser obtida dividindo-se a massa da Terra por seu volume, uma vez que as dimensões da Terra já eram conhecidas).

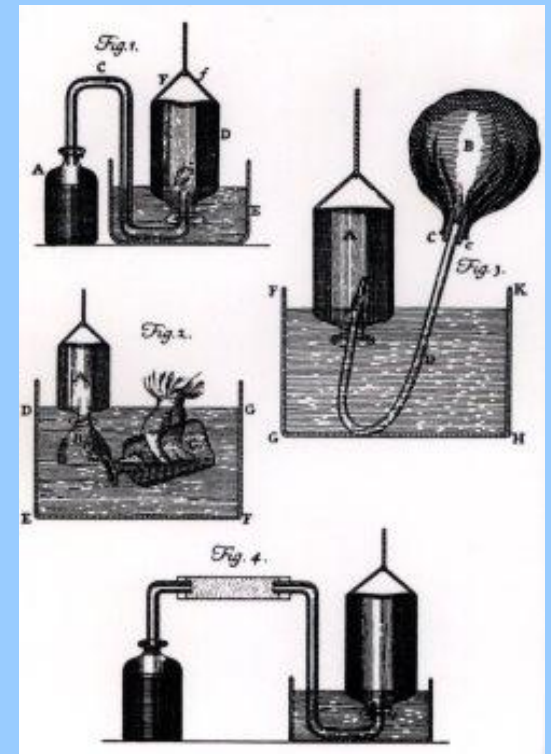


$$\rho_{earth} = \frac{M_{earth}}{\frac{4}{3}\pi R_{earth}^3} = \frac{3g}{4\pi R_{earth} G}$$

# A Terra: forma e dimensões

Cavendish ficou surpreso com o resultado, que mostrava que “**a densidade da Terra é 5,48 vezes superior à da água**”, uma vez que as rochas encontradas na superfície terrestre apresentam uma densidade média de  $2,7 \text{ g/cm}^3$ , ou seja, são 2,7 vezes mais densas do que a água. Isto indicava que as **camadas do interior terrestre** deveriam ter uma densidade muito superior à densidade das rochas da superfície, e, por conseguinte, que a composição das camadas interiores poderia não ser similar à composição das rochas superficiais.

Cavendish trabalhou também com a análise de gases, e estabeleceu que a atmosfera era composta por 79,167% de “ar flogístico” (nitrogênio) e 20,833 de “ar deflogístico” (oxigênio).

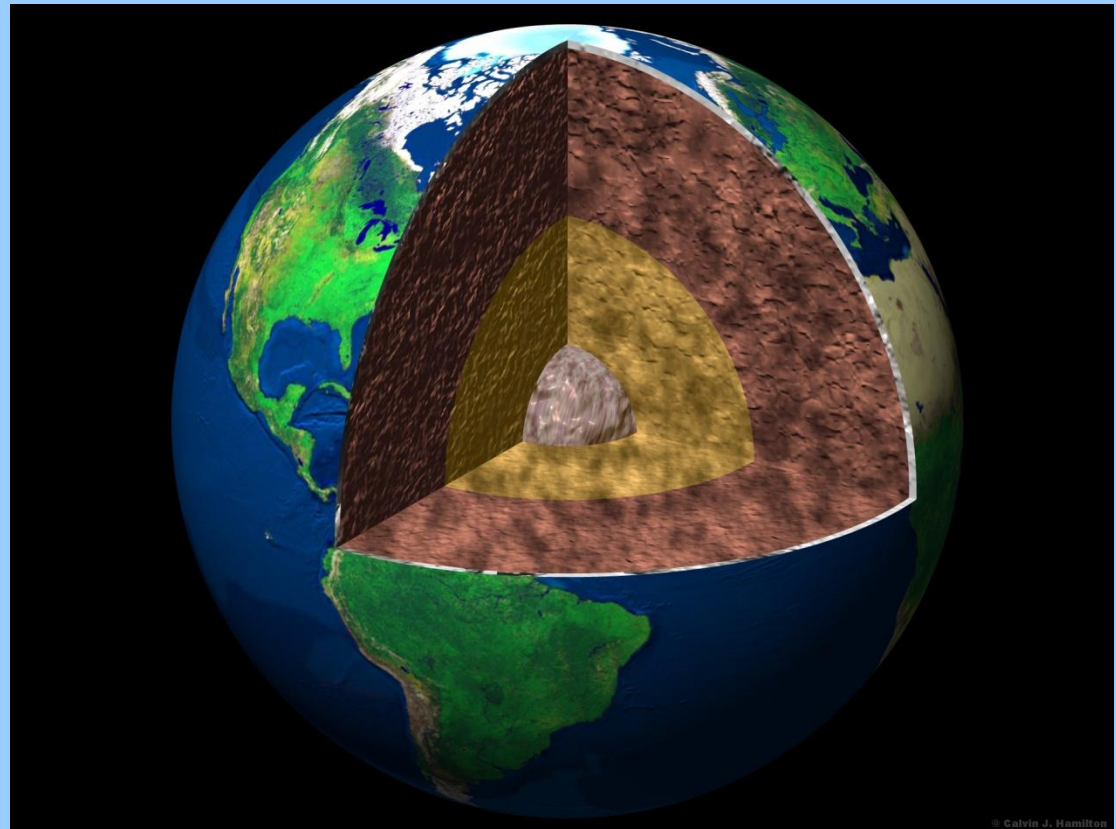


# A Terra

A Terra tem um raio médio de 6.371 km.

Sua estrutura interna é inacessível à observação direta.

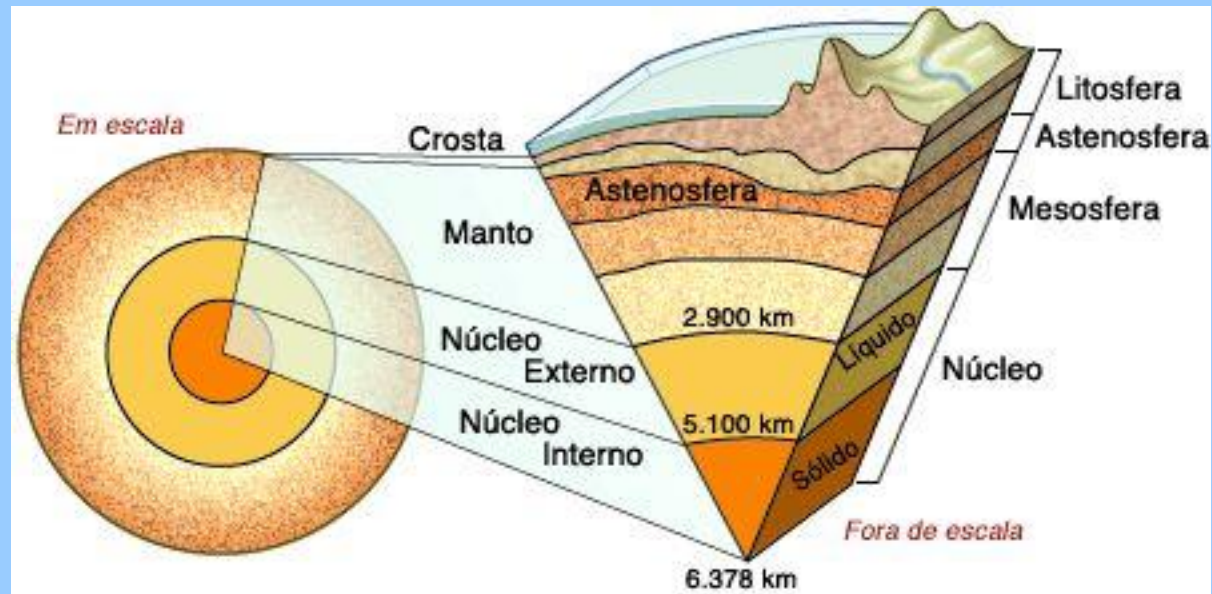
O furo de sondagem mais profundo atingiu no máximo 12 km de profundidade.



# A estrutura da Terra

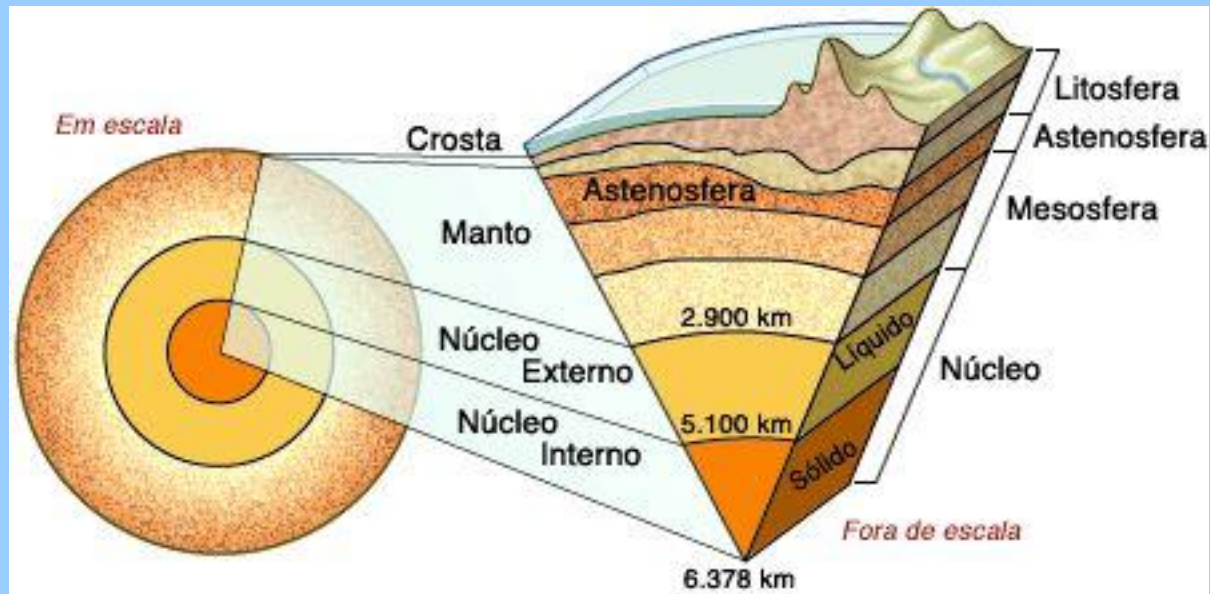
As discontinuidades nas velocidades das ondas sísmicas indicam a presença de camadas na Terra.

- Descontinuidade de Mohorovicic (*Moho*): profundidade de algumas dezenas de km (38 a 40 km) sob os continentes, e alguns km (6 a 8 km) sob os oceanos. Esta descontinuidade caracteriza a **CROSTA** terrestre.



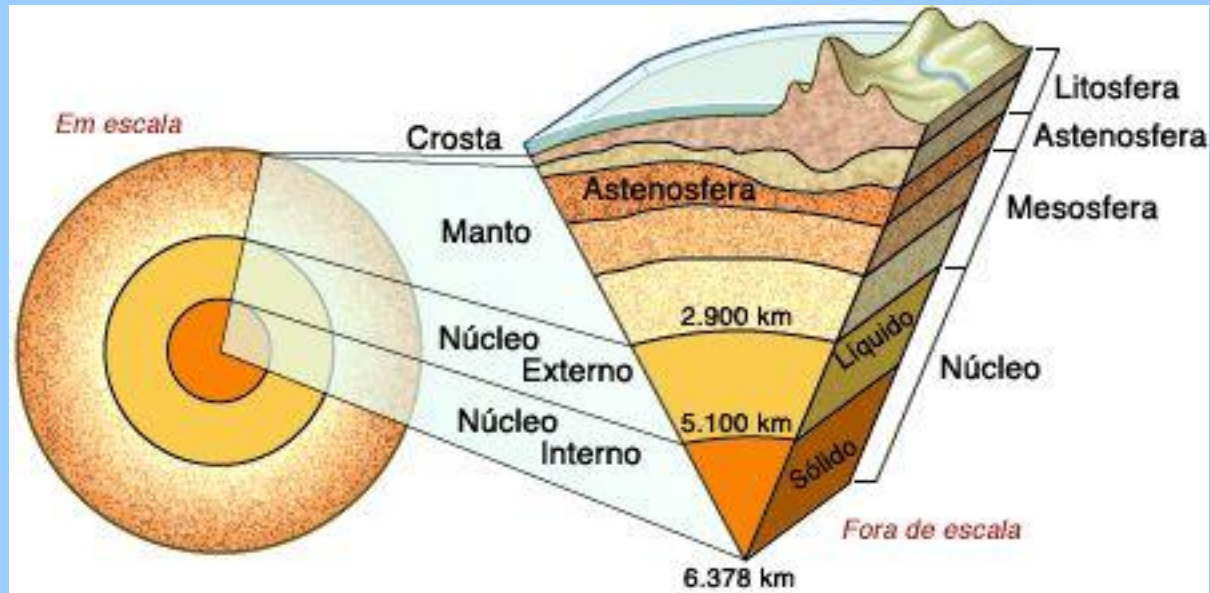
A partir da base da crosta, e atingido a profundidade de 2.900 km, encontra-se uma camada composta por silicatos, denominada **MANTO**.

A parte superior do manto e a crosta sobrejacente constituem a **LITOSFERA**, a camada externa rígida que varia de 70 a 100 km de profundidade nos oceanos, e de 100 a 150 km de profundidade nas regiões continentais.



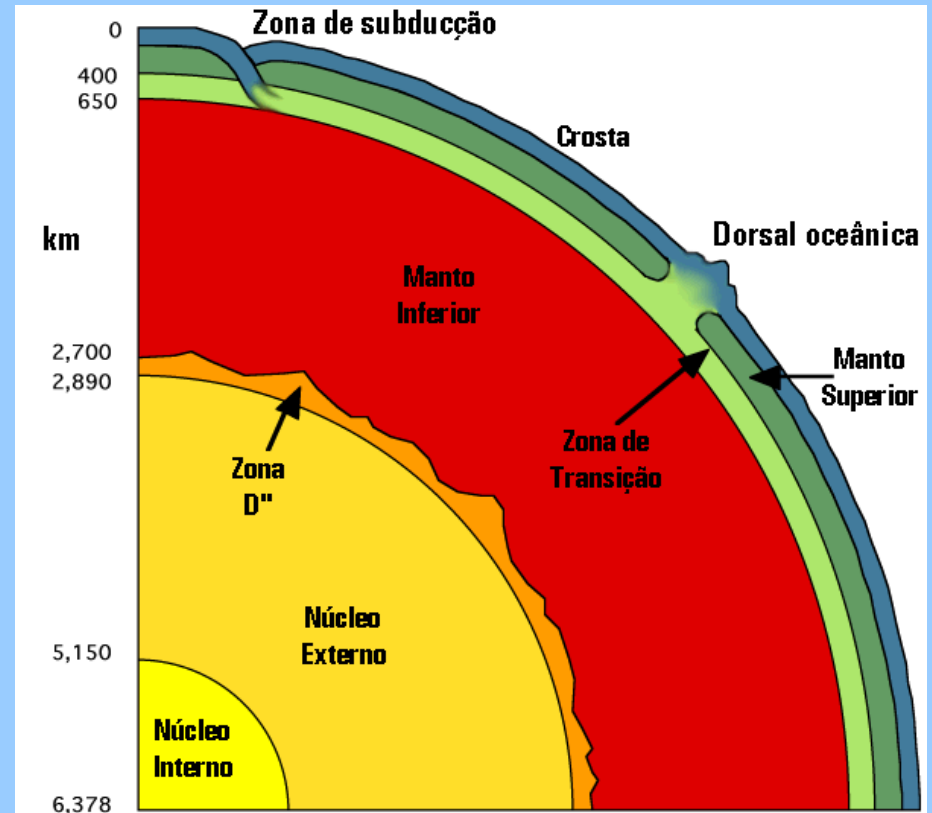
A partir da base da astenosfera, temos o manto inferior, ou **MESOSFERA**, que é uma camada composta basicamente por óxidos de ferro e magnésio e silicatos ferromagnesianos.

A mesosfera se apresenta em estado semi-sólido (comportamento plástico), e possui composição homogênea em sua maior parte.

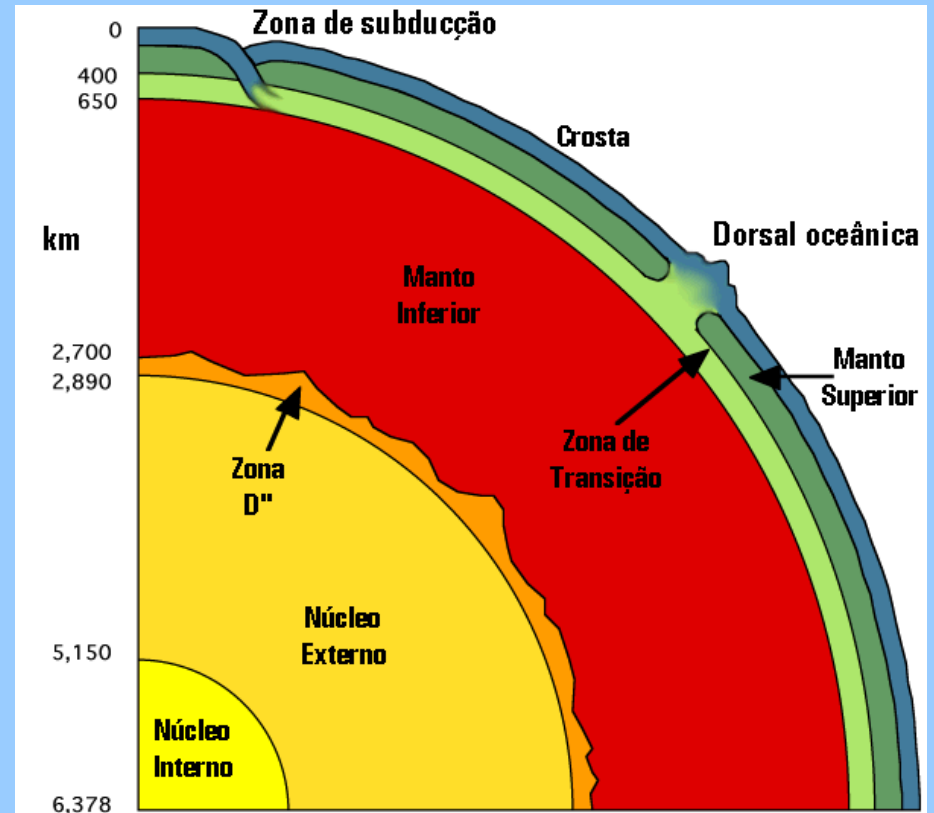




Próximo da interface manto/núcleo encontra-se uma camada de aproximadamente 150 a 200 km de espessura, denominada **camada D''**, detectável pela sismologia, que apresenta aspectos interessantes, como variação lateral de velocidades (sugerindo estrutura lateralmente heterogênea) em extensões comparáveis aos continentes e oceanos da superfície.



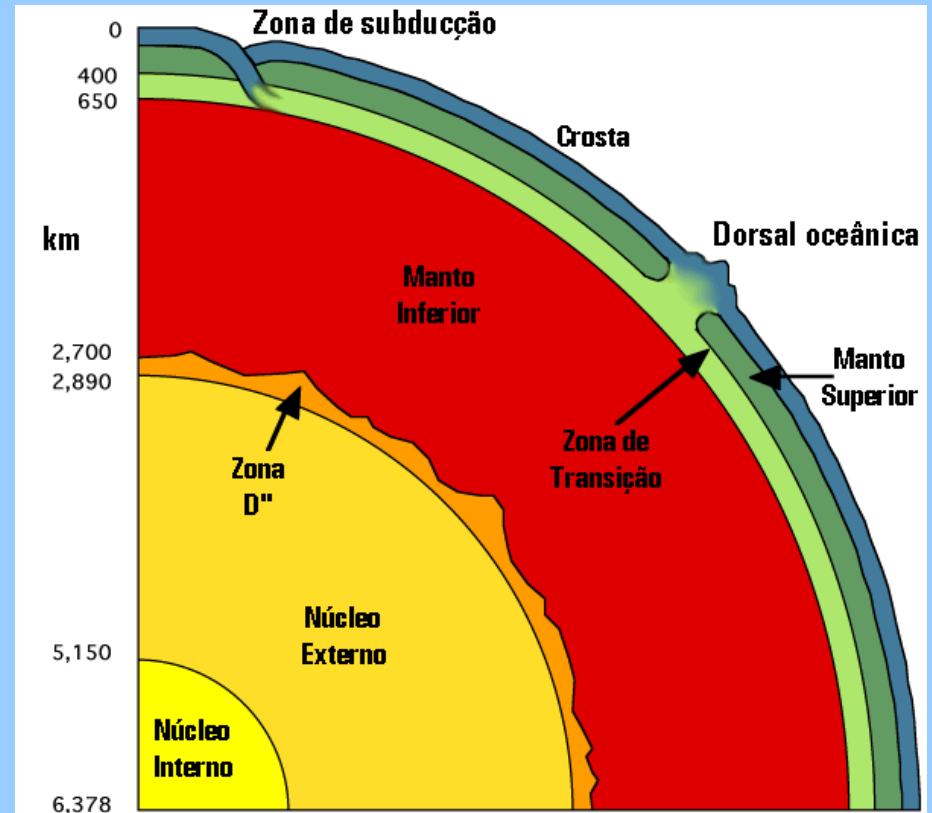
O núcleo terrestre deve ter sido formado por migração dos elementos mais densos para o interior terrestre, com ascensão dos silicatos menos densos para a região superficial. Estudos da composição dos meteoritos e do comportamento das ligas metálicas a altas pressões e temperaturas têm fornecido importantes indicações sobre a provável composição e comportamento desta região.



O núcleo terrestre tem uma parte externa fluida, e uma parte interna sólida.

O núcleo externo vai de aproximadamente 2.900 km até a profundidade de 5.150 km. Sua constituição é de Fe (quase 90%), Ni (pouco menos de 10%), e pequenas quantidades de Si, S e  $O$ . Apresenta-se fluido, com uma viscosidade semelhante à da água. Assume-se que seja homogêneo, devido à convecção e rotação terrestre.

O material do núcleo deve estar se solidificando, incorporando-se ao núcleo interno, e deixando os materiais menos densos no núcleo externo.



O núcleo interno é sólido, apresentando composição similar à do núcleo externo (Fe, Ni, S, Si, O).

Existe a possibilidade do núcleo interno não ser completamente sólido, mas ser uma mistura de fases sólidas e líquidas a uma condição de temperatura e pressão muito próxima da necessária para a solidificação.

Os processos de convecção e interação no núcleo terrestre são fundamentais para a geração do campo geomagnético e processos geodinâmicos.

