



Ondas Inerciais no Núcleo Externo da Terra

Luiz Gabriel Souza de Oliveira – DCN/CEUNES/UFES
Natália Valadares de Oliveira – DCN/CEUNES/UFES

Copyright 2013, SBGf - Sociedade Brasileira de Geofísica

This paper was prepared for presentation during the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society held in Rio de Janeiro, Brazil, August 26-29, 2013.

Contents of this paper were reviewed by the Technical Committee of the 13th International Congress of the Brazilian Geophysical Society and do not necessarily represent any position of the SBGf, its officers or members. Electronic reproduction or storage of any part of this paper for commercial purposes without the written consent of the Brazilian Geophysical Society is prohibited.

Abstract

This paper aims to discuss strategies to study the problem of existence of inertial waves in the Earth's fluid core. By involving Newtonian fluid dynamics with electromagnetic properties, oscillating at subseismic frequencies, computational modeling of this phenomenon is highly complex, requiring an appropriate theoretical formalism. On the other hand, the detection of these inertial gravity modes by superconducting gravimeter has already proved possible to associate measured eigenfrequencies with the structure and composition of the core. The combination of both approaches provides a powerful tool to study the structure and evolution of the mantle.

Introdução

É atribuída a dinâmica do núcleo externo fluido da Terra, e sua interação com o núcleo interno (sólido), o mecanismo de geração e manutenção do campo geomagnético, com comportamento físico semelhante ao de um dínamo auto-sustentável (Backus et al. 1996).

O campo geomagnético interno do planeta apresenta variações temporais de diversas ordens, como dias ou anos (*jerks geomagnéticos*), passando por variações seculares e associadas a escala de milhares de anos (reversões).

Dentro deste contexto, é necessário ter uma melhor compreensão sobre o comportamento físico e a dinâmica envolvida no movimento, em larga escala, dos metais fundidos que compõem o núcleo externo. Modelos físico-matemáticos complexos, baseados na junção da Dinâmica dos Fluidos e da Eletrodinâmica Clássica, e que constituem a base da Teoria Magnetohidrodinâmica (MHD), possuem ampla aplicação no entendimento estrutura e funcionamento do geodínamo, bem como os fenômenos associados, como a presença de ondas complexas associadas ao movimento dos metais fundidos (Chandrasekhar 1961).

Portanto, este trabalho objetiva discutir uma possível estratégia no estudo de ondas inerciais no núcleo externo terrestre, que constituem uma fonte de informação razoável sobre as condições de temperatura e pressão nesta região, além de fornecer informações sobre a sua

possível estratificação composicional, que certamente exerce influência sobre os mecanismos de gênese e evolução geodinâmica da mesma (Smylie 1974, Crossley 1975, Crossley 1984).

Ondas Inerciais em Fluidos Rotantes: Teoria Básica

Padrões de fluxo oscilatório pode ser esperado no interior do núcleo externo da Terra, dependendo das forças restauradoras de Coriolis, Lorentz e de flutuabilidade, que são muito mais fracas que as forças restauradoras elásticas geradas pelas oscilações livres (Melchior & Ducarme 1986).

Sob esta ótica, a teoria MHD prevê a equação de momento para um fluido com condutividade elétrica e viscosidade newtoniana, de densidade ρ , como sendo:

$$\rho \frac{D\vec{v}}{Dt} = \vec{F}_g + \vec{F}_r + \vec{F}_m + \vec{F}_v \quad (1)$$

com

$$\vec{F}_g = -\nabla P - \rho \nabla V \quad (2)$$

$$\vec{F}_r = -2\rho(\vec{\Omega} \times \vec{v}) - \rho \vec{\Omega} \times (\vec{\Omega} \times \vec{r}) \quad (3)$$

$$\vec{F}_m = \frac{1}{\mu}(\nabla \times \vec{B}) \times \vec{B} \quad (4)$$

$$\vec{F}_v = -\eta \nabla^2 \vec{v} + \left(\zeta + \frac{1}{3}\eta\right) \nabla(\nabla \cdot \vec{v}) \quad (5)$$

representando as forças de corpo (por unidade de volume) associadas a gravidade, rotação, magnetismo e viscosidade. Nas equações (2)-(5), P , V , μ , η e ζ representam a pressão, o potencial gravitacional, a permeabilidade magnética e os coeficientes de viscosidade, respectivamente. Uma vez que o fluido está em movimento com velocidade \vec{v} , temos $\vec{\Omega}$ representando a velocidade angular do planeta.

Levando em consideração as escalas dos termos magnético e viscoso, pode-se escrever (1) na forma:

$$\frac{\partial \vec{v}}{\partial t} + 2(\vec{\Omega} \times \vec{v}) = -\nabla \phi - c^2 \frac{N^2}{g_0} (\nabla \cdot \vec{u}) \hat{z} \quad (6)$$

onde $\Phi = P_1/\rho_0 - V_1$ é a pressão reduzida, \vec{u} o campo de deslocamento das partículas e $c = V_p$ o potencial gravitacional, g_0 a aceleração gravitacional e N a frequência de Brunt-Väisälä, que constitui um importante parâmetro acerca dos efeitos de fluatibilidade (Newman 2012).

Considerando a condição de estratificação no núcleo externo, são obtidas soluções para a equação (6) na forma:

$$i\omega\vec{v} + 2(\vec{\Omega} \times \vec{v}) = -\nabla\Phi - N^2(\vec{u} \cdot \hat{z})\hat{z} \quad (7)$$

como a soma de oscilações esferoidais e toroidais (Chandrasekhar 1961):

$$\{\vec{v}, \Phi\} = \sum \{v^m, \Phi^m\} e^{i\omega t} \quad (8)$$

O procedimento natural na resolução do problema supracitado envolve a transformação das equações diferenciais parciais (EDPs) envolvidas num conjunto de equações diferenciais ordinárias (EDOs), envolvendo expansões envolvendo Harmônicos Esféricos Generalizados, segundo o formalismo apresentado por Phinney & Burridge (1973).

Cabe ressaltar que são assumidas as seguintes condições para a resolução de (1): i) a Terra é prè-tensionada hidrostáticamente; ii) a velocidade angular de rotação é uniforme; iii) o planeta é elipsoidal; iv) o núcleo externo é estratificado e v) a faixa de frequência é compatível com o fenômeno das marés terrestres (Dehant 1988).

Em relação a última condição supracitada, pode-se associar a ocorrência de oscilações forçadas causadas pelos potenciais de maré luni-solares de baixa frequência, que apresentam-se na faixa de frequência subsísmica (Smylie & Rochester 1981).

Rotação e estratificação criam uma analogia matemática governada pela frequência inercial de Coriolis e pela frequência de Brunt-Väisälä. A relação $A = N^2/4\Omega^2$ (inverso do número de Froude) é um importante parâmetro de modelagem, sendo interpretado como a medida da importância relativa da estratificação frente a rotação no movimento oscilatório. Quando $N > 2\Omega$ o núcleo pode ser considerado fortemente estável e os autovalores ω_i devem satisfazer $2\Omega < \omega_i < N$, que significa que os períodos envolvidos devem ter até 12 horas. Quando $N < 2\Omega$, o núcleo é fracamente estável, e os modos de oscilação devem possuir períodos superiores a 12 horas ($N < \omega_i < 2\Omega$). Neste último caso, os períodos são fortemente influenciados pela força de Coriolis, que suporta modos puramente inerciais com períodos superiores a 12 horas (Veronis 1970).

Por tanto, modelos de distribuição de densidades e propriedades reológicas derivados de interpretação de dados sismológicos globais podem ser aplicados no cálculo das frequências das ondas inerciais no núcleo

externo, contribuindo no entendimento de sua estruturação e dinâmica. Contudo, é necessário associar os padrões ondulatórios aqui discutidos com a variação global de algum parâmetro geofísico conhecido. É neste momento que as perturbações no potencial gravitacional terrestre se fazem presentes.

Detecção dos modos inerciais no núcleo externo pela gravimetria por supercondutividade

As observações gravimétricas de Melchior & Ducarme (1986) forneceram as primeiras observações relativas ao núcleo fluido rotante para o planeta, apontando uma condição reológica para o mesmo baseada em rigidez, incompressibilidade e equilíbrio adiabático (*modelo de Poincaré*).

Sendo assim, diferenças observadas entre as frequências calculadas através das equações da teoria MHD e as frequências observadas em dados gravimétricos de longo período constituem uma importante fonte de informação sobre as condições de fluatibilidade, compressibilidade e os possíveis desvios do comportamento rotacional associado núcleo uniforme.

Modos inerciais de gravidade apresentam componente radial de movimento, podendo produzir pequenas mudanças na gravidade medida na superfície da Terra, com amplitudes menores que 10^{-9} m/s², podendo ser registrados por gravímetros supercondutivos (Melchior & Ducarme 1986).

Rotinas padrão de processamento dos dados, que incluem remoção do efeito da pressão atmosférica, correção para o efeito de movimento dos pólos e retirada dos sinais relativos as marés luni-solares na faixa de frequência compatível, permitem a detecção das frequências dos modos inerciais no núcleo externo, baseado na aplicação de técnicas espectrais com base na transformada de Fourier (Melchior et al. 1988).

A possibilidade de obtenção de dados de gravimetria por supercondutividade levantados pelo Global Geodynamics Project (<http://www.eas.slu.edu/GGP/ggphome.html>), de ótima qualidade, permite um estudo mais aprofundado da detecção das ondas inerciais, que realizado em conjunto com modelagens computacionais baseadas na teoria MHD, permite traçar cenários evolutivos mais complexos para esta região que apresenta um papel fundamental na evolução geodinâmica da Terra.

Conclusões

Estudos teóricos sobre ondas inerciais no núcleo fluido terrestre podem fornecer subsídios importantes para o entendimento da evolução geodinâmica do planeta, uma vez que esta camada é a principal responsável pelo campo geomagnético, além de atuar decisivamente no problema de transferência de calor no interior da Terra. Em ambos os processos, a estrutura de densidades e propriedades reológicas são dominantes, e interferem diretamente nos padrões oscilatórios inerciais.

Atualmente encontra-se em desenvolvimento um código computacional que poderá ser aplicado na modelagem das ondas inerciais no núcleo externo terrestre.

Agradecimentos

Os autores agradecem ao Departamento de Ciências Naturais (DCN/CEUNES) pela infraestrutura computacional presente no desenvolvimento da presente pesquisa.

Referências

- Backus, G., Parker, R., Constable, C. 1996. Foundations of Geomagnetism: Cambridge University Press.
- Chandrasekar, S. 1961. Hydrodynamic and Hydromagnetic Stability: Dover Publications.
- Crossley, D.J. 1975. Core undertones with rotation: Geophys. J.R. Astron. Soc., 42, 477-488.
- Crossley, D.J. 1984. Oscillatory flow in the liquid core: Phys. Earth Planet. Int., 36, 1-16.
- Melchior, P.W. & Ducarme, B. 1986. Detection of inertial gravity oscillations in the Earth's core with a superconducting gravimeter at Brussels: Phys. Earth Planet. Int., 42, 129-134.
- Melchior, P.J., Crossley, D.J., Dehant, V.P., Ducarme, B. 1988. Have inertial waves been identified from the Earth's Core? Structure and Dynamics of Earth's Deep Interior (Geophysical Monograph Series), 1-12.
- Newman, W.I. 2012. Continuum Mechanics in the Earth Sciences: Cambridge University Press.
- Phinney, R.A. & Burridge, R. 1973. Representation of the elastic-gravitational excitation of a spherical Earth model by Generalized Spherical Harmonics: Geophys. J. R. Astr. Soc., 34, 451-487.
- Smylie, D.E. 1974. Dynamics of the outer core: Veröff. Zentralinst. Phys. Erde Berlin, 30, 91-104.
- Smiley, D.E. & Rochester, M.G. 1981. Compressibility, Core Dynamics and the Subseismic Wave Equation: Phys. Earth Planet. Interiors, 24, 308-319.
- Veronis, G. 1970. The analogy between rotating and stratified fluids: Ann. Rev. Fluid Mechan., 2, 37-66.