

Universidade de São Paulo
Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas
Departamento de Geofísica

Breno Raphaldini Ferreira da Silva

Dinâmica não linear de ondas de Rossby MHD nos dínamos
solar e terrestre.

São Paulo

2014

Breno Raphaldini Ferreira da Silva

Dinâmica não linear de ondas de Rossby MHD nos dínamos
solar e terrestre.

Tese apresentada ao Departamento de Geofísica do Instituto de Astronomia, Geofísica e Ciências Atmosféricas da Universidade de São Paulo como requisito parcial para obtenção do título de Mestre/Doutor em Ciências.

Área de Concentração: Geofísica
Orientador: Prof. Dr. Carlos Frederico Mendonça Raupp

São Paulo

2014

The miracle of the appropriateness of the language of mathematics for the formulation of the laws of physics is a wonderful gift which we neither understand nor deserve. We should be grateful for it and hope that it will remain valid in future research and that it will extend, for better or for worse, to our pleasure, even though perhaps also to our bafflement, to wide branches of learning.

Eugene Wigner

Dedico esta tese à minha avó
Isabel da Silva Raphaldini

Agradecimentos

Agradeço primeiramente ao meu orientador Carlos Frederico Mendonça Raupp, com quem interagi desde o início do meu mestrado e com quem aprendi diversos assuntos sem os quais esta tese não seria possível. Ao professor Igor Ivory Gil Pacca, pelo apoio e orientação desde o final da graduação.

Durante minha formação interagi com diversos professores que influenciaram direta, ou indiretamente neste trabalho, dentre os quais destaco, Ricardo Ivan Ferreira Trindade, Elisabete Maria Gouvea Dal Pino, Clodoaldo Grotta Ragazzo, Manuel Valentim de Pera Garcia, Sônia Regina Garcia, Tercio Ambrizzi, Esteban Tabak (Courant Institute).

Este trabalho é fruto de uma interação de diversos temas aprendidos em diversos departamentos da Universidade de São Paulo: geofísica, ciências atmosféricas, astronomia, física, matemática, matemática aplicada, estatística e oceanografia física. Neste sentido agradeço à Universidade por ter fornecido a possibilidade de interagir com uma variedade tão grande de áreas do conhecimento. Em particular agradeço ao IAG e ao departamento de geofísica, pelo apoio desde a graduação.

Durante estes anos na Universidade de São Paulo tive a oportunidade de fazer muitos amigos, alguns com os quais tive a oportunidade de discutir temas relacionados à tese. Destes destaco, Daniel YassumasaTakahashi, Everton Medeiros, Marcelo Caetano, Enver Ramirez, Reinaldo dos Santos, Gustavo Guerrero, André Seiji Teruya, Jairo Savian, Everton Frigo, Elder Yokoyama, Rafaela Dantas. Agradeço aos demais amigos não listados aqui.

Ao Courant Institute of Mathematical Sciences, no qual fiz meu estágio sanduíche.

Finalmente à minha família por todo o apoio.

Resumo

Dois exemplos de dínamos naturais de grande importância são o dínamo solar e o dínamo terrestre. Em comum ambos os campos magnéticos, do Sol e da Terra, apresentam uma complexa variação temporal em diversas escalas de tempo, incluindo reversões de polaridade do dipolo magnético. Estes campos magnéticos surgem num fluido condutor em movimento sob ação da força magnética e da força de Coriolis. Neste contexto ondas de Rossby magnetohidrodinâmicas surgem como soluções das equações que regem estes dínamos em sua forma linearizada.

Mostramos primeiramente que ondas de Rossby fornecem uma explicação para estrutura espaço-temporal do ciclo solar comumente descrita pelo diagrama de borboleta, como o confinamento das manchas numa faixa que se estende entre -40° e 40° em latitude, a migração da atividade solar em direção ao equador e a ciclicidade na escala decadal.

No contexto do geodínamo mostramos que a troca de energia entre ondas de Rossby, com a inclusão de forçantes apropriadas e dissipação, pode reproduzir diversos aspectos do processo de reversões do campo geomagnético.

Exploramos ainda a possibilidade de acoplamentos entre conjuntos de ondas de Rossby (clusters de ondas), com separação de escalas, produzirem fenômenos como modulações na escala secular nos ciclos solares, incluindo o Mínimo de Maunder, e as variações na frequência das reversões do campo geomagnético, incluindo o fenômeno dos superchrons.

Abstract

Two of the most important examples of natural dynamos are the Solar and Terrestrial dynamos. In common, both magnetic fields of the Sun and Earth, present a complex temporal variation, including the reversal of the magnetic dipole. These magnetic fields are generated in a conducting fluid in movement, in which both magnetic and Coriolis forces act as restoring mechanism. In this context magnetohydrodynamic (MHD) Rossby waves arise as solutions of the equations governing the dynamos in its linearized form.

First we show that MHD Rossby waves provide an explanation for the spatio-temporal structure of the solar cycle, usually depicted in the butterfly diagram, namely, the confinement of the sunspots in a latitudinal band extending from -40° to 40° , the migration of the solar activity towards the equator and the cyclic behavior in the decadal scale.

In the context of the geodynamo we show that the exchange of energy between Rossby waves, including effects of forcing and dissipation, are able to reproduce several aspects of the geomagnetic dipole reversals.

Finally we explore the possibility of coupling between sets of Rossby waves with scales separation as a possible mechanism for phenomena such as secular modulations in the solar cycle, including the Maunder minimum, and variations in the frequency of geomagnetic reversals, including the geomagnetic superchrons.

Índice

1. CAPÍTULO 1 - Introdução:Propriedades básicas do campo geomagnético, do campo magnético solar e a modelagem desses campos usando equações de baixa ordem.....	1
2. Capítulo 2: Um modelo teórico para o ciclo solar.....	28
3. Capítulo 3 Um modelo teórico para as reversões do campo geomagnético.....	49
4. Capítulo 4: Modelos teóricos com separação de escalas: clusters de tripletos ressonantes, modulações no ciclo solar e os superchrons.....	77
5. Capítulo 5: Conclusão e possíveis extensões do trabalho.....	92
6.Apêndice.....	99
7.Referências.....	119

Lista de Figuras

Figura		página
1.1	Jerk geomagnético	5
1.2	Jerk geomagnético	6
1.3	deriva para oeste	8
1.4	posição do pólo norte magnético ao longo do tempo	9
1.5	padrão de magnetização do assoalho oceânico	10
1.6	escala de polaridade	11
1.7	evolução da taxa de reversões geomagnéticas	12
1.8	morfologia das reversões	13
1.9	mancha solar	14
1.10	série temporal de n° de manchas solares	15
1.11	diagrama borboleta	17
2.1	relação de dispersão de ondas de Rossby modo mag-sol	33
2.2	relação de dispersão de ondas de Rossby modo hid-sol	34
2.3	relação de dispersão de ondas de Rossby com campo de fundo mais intenso	35
2.4	perfil latitudinal de K_s^2	39
2.5	solução para um tripleto ressonante	43
2.6	solução para um tripleto ressonante forçado	45
3.1	Relação de dispersão modo magnético-Terra	54
3.2	Relação de dispersão modo hidrodinâmico-Terra	55
3.3	solução para um tripleto ressonante	60
3.4	solução para um tripleto forçado-amortecido	62
3.5	histograma de valores da solução do tripleto	62
3.6	série temporal para com parâmetros que não apresentam resersões	67
	série temporal para com parâmetros que não apresentam resersões mudando a	
3.7	c.i.	68
3.8	trajetória no plano (x,y) referente à fig 3.6	69
3.9	trajetória no plano (x,y) referente à fig 3.7	69
3.10	série temporal para com parâmetros que apresentam resersões infrequentes	69
3.11	trajetória no plano (x,y) referente à fig 3.10	70
3.12	série temporal para com parâmetros que apresentam resersões frequentes	71
3.13	trajetória no plano (x,y) referente à fig 3.11	72
3.14	zoom de uma reversão em particular	72
3.15	moforlogia das resersões em uma sequencia de três reversões	73
3.16	analogia com o movimentto de uma partícula num potencial biestável	74
4.1	cluster de quatro ondas acoplado por dois modos	78
4.2	cluster de cinco ondas acoplado por um modo	79
4.3	cluster de seis ondas em três tripletos	83
4.4	solução para a componente rápida do tripleto num cluster de seis ondas	85
4.5	solução para a componente lenta do tripleto num cluster de seis ondas	86
4.6	comparação com a série temporal de n° de manchas solares	87
4.7	evento do tipo superchron obtito variando forçante térmica	87

4.8	trajetória no plano (x,y) referente à fig 4.7 no período sem reversões	88
4.9	trajetória no plano (x,y) referente à fig 4.7 no período com reversões	88
4.10	evento do tipo superchron obtido num modelo de tripletos acoplados	89