



MINISTÉRIO DA CIÊNCIA, TECNOLOGIA, INOVAÇÕES E COMUNICAÇÕES  
**INSTITUTO NACIONAL DE PESQUISAS ESPACIAIS**

## **SIMULAÇÕES TÉRMICAS PARA PD DO LIGO VOYAGER**

Lucas Mateus Duarte Oliveira

Relatório de Iniciação Científica do  
programa PIBIC, orientada pelo  
Dr. Odylio D. Aguiar

INPE  
São José dos Campos  
2021

## RESUMO

Em 11 de fevereiro de 2016 foi anunciada pela colaboração LIGO a primeira detecção de ondas gravitacionais (OG). Tal sinal fora detectado em 14 de setembro de 2015 e denominado como GW150914. O LIGO é um detector interferométrico que utiliza luz laser acumulada para monitorar massas de teste suspensas por pêndulos, tornando-as livres para serem usadas para a detecção de ondas gravitacionais. Desde o início de sua construção, no começo da década de 1990, o LIGO passou por diversas atualizações e melhorias a fim de aumentar a sensibilidade da detecção de OG em várias faixas de frequência. Mais recentemente a LSC (*LIGO Scientific Collaboration*) está trabalhando no desenvolvimento de uma versão do detector, com alterações mais robustas, chamada LIGO Voyager (LV). Uma das etapas para o desenvolvimento do LV, consiste na necessidade de novas tecnologias para resfriamento das massas de teste e dos espelhos do detector.

Palavras-chave: Ondas Gravitacionais. Simulações Térmicas. Projeto LBA. Comportamento caótico. Atrator caótico.

## SUMÁRIO

	<u>Pág.</u>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> . . . . .	<b>1</b>
<b>2 FONTES DE ONDAS GRAVITACIONAIS</b> . . . . .	<b>2</b>
<b>3 DETECÇÕES RECENTES</b> . . . . .	<b>3</b>
<b>4 INTERFERÔMETRO LASER</b> . . . . .	<b>4</b>
4.1 LIGO, aLIGO e LIGO <i>Voyager</i> . . . . .	5
4.2 CONFIGURAÇÕES DO LIGO . . . . .	6
4.2.1 Lasers e Óptica . . . . .	6
4.2.2 Suspensão e isolamento vibracional . . . . .	6
4.2.3 Monitores ambientais . . . . .	6
4.2.4 Ruídos na detecção . . . . .	6
<b>5 CONCLUSÕES</b> . . . . .	<b>7</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS</b> . . . . .	<b>9</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A previsão da existência de ondas gravitacionais (OG) foi proposta por Einstein por meio de uma aproximação de um campo gravitacional em suas equações de campo dada por:

$$R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R = -8\pi\frac{G}{c^4}T_{\mu\nu} \quad (1.1)$$

onde  $T_{\mu\nu}$  é o tensor energia-momento,  $G$  é a constante universal da gravitação,  $g_{\mu\nu}$  é um tensor métrico e  $R_{\mu\nu}$  e  $R$  são o tensor e o escalar de Ricci, respectivamente.

Einstein observou que o espaço e o tempo formam um todo que foi chamado de espaço-tempo, e que ele pode ser deformado. Ele concluiu que o efeito gravitacional não era causado por uma força invisível que agia à distância, mas sim pela deformidade causada no espaço-tempo devido a presença de massas, ou seja, os corpos deslocam-se um em direção ao outro seguindo a deformação causada pelos corpos massivos.

Como foi dito acima, em uma aproximação de um campo fraco, a métrica  $g_{\mu\nu}$  pode ser dada por:

$$g_{\mu\nu} = \eta_{\mu\nu} + h_{\mu\nu} \quad (1.2)$$

onde  $\eta_{\mu\nu}$  é o tensor métrico de Minkowski definido na Relatividade Restrita (RR), e  $|h_{\mu\nu}| \ll 1$ . Fazendo as devidas substituições e manipulações tensoriais, a equação 1.1 pode ser escrita na seguinte forma:

$$\square^2 \bar{h}_{\mu\nu} = -\frac{1}{c^2} \frac{\partial^2 \bar{h}_{\mu\nu}}{\partial t^2} + \nabla^2 \bar{h}_{\mu\nu} = -16\pi \frac{G}{c^4} T_{\mu\nu} \quad (1.3)$$

onde  $\square^2$  é o operador diferencial D'Alambertiano e  $\nabla^2$  o operador Laplaciano.

No vácuo o tensor energia-momento  $T_{\mu\nu} = 0$ , e a equação 1.3 representa uma equação tensorial de onda na qual a solução pode ser dada por:

$$\bar{h}_{\mu\nu} = A_{\mu\nu} e^{[ik(z-ct)]} \quad (1.4)$$

que representa uma onda monocromática na geometria espaço-tempo, propagando-se ao longo do eixo  $+z$  com a velocidade da luz  $c$ , e frequência  $\omega = kc$  (AGUIAR,

2010).  $A_{\mu\nu}$  é um tensor constante e admite simetria na comutação indicial entre  $\mu$  e  $\nu$ , ou seja,  $A_{\mu\nu} = A_{\nu\mu}$ . Essa constante indica a amplitude e modo de polarização da onda gravitacional. Suponhamos um anel de partículas com diâmetro  $D$  posto de forma perpendicular a direção de propagação da onda, ao passar pelo anel a onda gravitacional deforma-o de tal maneira que causa uma variação nas distâncias relativas das partículas deste anel, podendo ocorrer em dois modos distintos de polarização, defasados entre si em um fator de  $\frac{\pi}{4}$ . Tais polarizações são indicadas por  $A_+$  e  $A_\times$ . A primeira indica uma deformação no anel de partículas descrita por uma elipse, cujo o eixo maior e o eixo menor são paralelos aos eixos  $x$  e  $y$ . Por sua vez a segunda polarização representa também uma elipse, rotacionada  $\frac{\pi}{4}$  em relação a primeira. Podemos fazer uma analogia entre ondas gravitacionais e

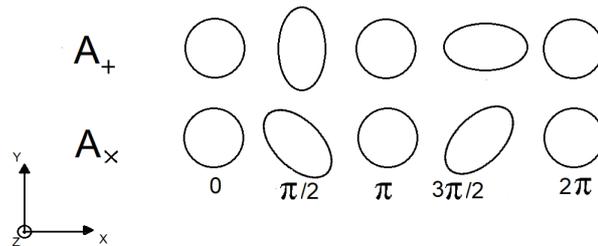


Figura 1.1 - Anéis de partículas e o efeito das polarizações. *Fonte: Produção do autor*

ondas eletromagnéticas. Estas são geradas por cargas elétricas aceleradas. Já as OGs resultam da aceleração de massas. Uma outra diferença que é importante ressaltar é o fato de que, em comparação com as força eletromagnéticas, a interação gravitacional é muito fraca. Em razão disto, somente eventos de magnitude astrofísica são capazes de gerar ondas gravitacionais significativamente detectáveis.

## 2 FONTES DE ONDAS GRAVITACIONAIS

Há uma grande variedade de fontes e eventos astrofísicos que podem produzir ondas gravitacionais, mesmo que esses estejam muito distantes da Terra. Tais eventos podem ser diferenciados pelo espectro de frequência por eles gerados. Por isso, é possível dividir os sinais previstos em sinais de tipo *burst* (explosão), sinais decorrentes das espiralações de sistemas binários compactos, sinais periódicos e estocásticos (CONSTANCIO, 2017).

Sinais de tipo *burst*, são provenientes, por exemplo, de supernovas, que é o colapso gravitacional de uma estrela. Quando ocorre esse colapso, uma grande quantidade de matéria é acelerada em um intervalo de tempo muito pequeno. É nesse momento que são produzidas ondas gravitacionais.

Já sistemas binários compactos podem ser definidos como sistemas compostos por corpos massivos que orbitam em torno de seu centro de massa (CM). Eles podem ser formados por dois buracos negros, duas estrelas de nêutron ou um buraco negro e uma estrela de nêutron. Conforme orbitam, esses sistemas, perdem energia e os corpos que o formam vão se aproximando cada vez mais rápido. Este processo é chamado de espiralação. A frequência e amplitude das ondas produzidas durante esse processo é inversamente proporcional ao período da órbita dos corpos em torno do CM do sistema. Quando a distância torna-se suficientemente pequena, os corpos se fundem, resultando em apenas um corpo compacto. Até esse momento, um outro tipo de sinal é emitido, denominado *chirp*, onde é observado que a frequência da onda emitida é o dobro da frequência orbital do sistema binário. Após o *chirp*, vem a fusão e após esta a fase de *ringdown*, que nada mais é do que os modos normais de vibração do objeto compacto remanescente se ajustando (CONSTANCIO, 2017).

Sinais periódicos, por sua vez, podem ser resultado da rotação não axialmente simétrica de uma estrela de nêutrons (ANDERSSON et al., 2010)(HASKELL et al., 2006)(HOROWITZ; KADAU, 2009), ou quando a mesma estiver precessionando em torno do seu eixo de rotação(CONSTANCIO, 2017).

E por fim, os sinais estocásticos, que são provenientes de fontes astrofísicas não resolvidas, ou objetos cosmológicos exóticos cuja existência não foi confirmada, tais como cordas cósmicas, buracos negros primordiais (RILES, 2013), e ondas primordiais oriundas de processos cosmológicos tais como a inflação (ALLEN, 1996) e cordas cósmicas (VILENKIN, 1985)(VILENKIN; SHELLARD, 2000).

### 3 DETECÇÕES RECENTES

No dia 14 de Setembro de 2015, foi feita a primeira detecção de ondas gravitacionais passando pela Terra, pelos observatórios LIGO, localizados em Hanford, WA e Livingston, LA. Tal sinal, batizado de GW150914(ABBOTT, 2016b), foi produzido pelas fusão de um sistema binário de buracos negros, sendo a massa aproximada do corpo remanescente da fusão de  $62M_{\odot}$ . O sinal que teve duração de  $0.2s$ , variou desde uma frequência inicial de  $35Hz$  à  $250Hz$ , onde a amplitude alcançou seu valor

máximo em torno de  $150Hz$ .

Essa detecção rendeu o *Nobel Prize in Physics 2017* a Reiner Weiss, Barry C. Barish e Kip S. Thorne da *LIGO/VIRGO Collaboration*. Esse fato marcou o início da era da astronomia de ondas gravitacionais e abriu caminho para revolucionar nosso conhecimento sobre o universo.

No mesmo ano, o observatório LIGO detectou outro sinal, o GW151226(ABBOTT, 2016a), devido à coalescência de dois buracos negros, resultando em buraco negro final com massa aproximada de  $20M_{\odot}$ , o sinal teve uma duração de  $1s$  e percorreu uma faixa de frequência de  $35Hz$  à  $450Hz$ , onde alcançou seu pico.

De 2015 até agora muitas outras detecções foram realizadas. O primeiro catálogo (GWTC-1) da LSC (*LIGO Scientific Colaboration*, conta com mais nove detecções. É importante mencionar o evento GW170817 (ABBOTT, 2017), que foi o primeiro sinal detectado proveniente da coalescência de um sistema binário de estrelas de nêutrons. Foi o evento mais longo registrado, desde o GW151226. Ele durou cerca de  $56s$ , sendo o primeiro evento cósmico detectado direta e simultaneamente por ondas gravitacionais e eletromagnéticas, por causa da emissão de luz após a colisão das estrelas de nêutrons.

## 4 INTERFERÔMETRO LASER

Como visto na seção acima, ondas gravitacionais podem ter origem de diversas fontes e objetos, sendo que cada uma delas emite sinais diferentes. Portanto, faz-se necessário a pesquisa e desenvolvimento de tecnologias a fim de detectar os mais variados tipos de sinais. Uma das tecnologias que será abordada agora, é o uso de interferometria laser na detecção de OG.

O funcionamento de um interferômetro a laser (IL), tem como base o interferômetro de Michelson. Uma fonte emite um feixe laser que passa através de um divisor de feixes, o qual redireciona o feixe inicial para dois caminhos perpendiculares. No fim de cada caminho há um espelho que reflete o laser de volta para o divisor, recombinando-os desta maneira, o feixe único segue para o detector.

Os espelhos são ajustados de tal forma que causa uma defasagem de  $180^{\circ}$  entre os feixes combinados, causando assim uma interferência destrutiva, onde o detector registra a menor intensidade de luz possível. Uma onda gravitacional passando, afeta essa condição de equilíbrio, pois alonga e encurta os braços do interferômetro,

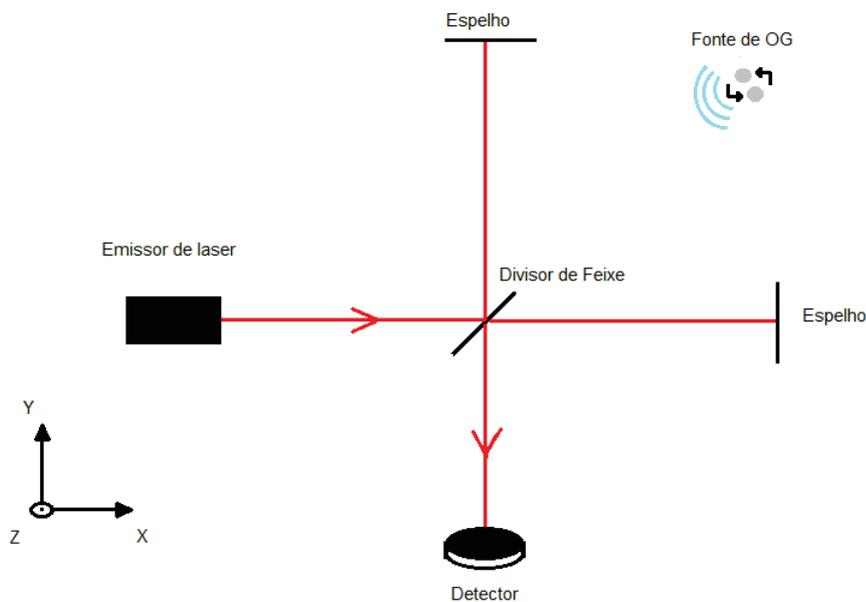


Figura 4.1 - Esquema simples de um interferômetro laser. *Fonte: Produção do autor*

alterando as posições do espelho fazendo com que o detector receba um sinal de interferência diferente da condição inicial.

Para aumentar a intensidade percebida pelo detector é adicionado, em cada braço do interferômetro, um espelho semirreflexivo que confina o laser por mais tempo nos braços, fazendo com que potência do feixe laser nos braços aumente e a detecção da passagem da onda gravitacional seja mais perceptível pelo detector.

#### 4.1 LIGO, aLIGO e LIGO *Voyager*

A LSC é responsável pelos detectores interferométricos mais notáveis da atualidade. A primeira versão do LIGO começou a ser desenvolvida no início da década de 1990, e sua construção terminou no fim da mesma década. Após cinco anos, o LIGO estava pronto para uma corrida científica que foi chamada de S5, que ocorreu entre Novembro de 2005 e Setembro de 2007. Depois disso, o LIGO passou por atualizações chegando em sua versão mais recente, o Advanced LIGO (aLIGO), que foi projetado para diminuir o limite inferior de frequência de detecção de  $40\text{Hz}$  para  $10\text{Hz}$ . O aLIGO iniciou sua primeira corrida científica, denominada O1 em 12 de Setembro de 2015 e conseguiu em dois dias de operação detectar pela primeira vez ondas gravitacionais.

Atualmente, a LSC está trabalhando na pesquisa e desenvolvimento para o LIGO *Voyager*, que operará nas atuais instalações do LIGO. Estão sendo planejadas atualizações mais robustas para aumentar a sensibilidade de detecção, como a implementação de espelhos e suspensões de Silício operando em temperaturas criogênicas a fim de diminuir o ruído térmico causado pelo revestimento dos espelhos. O LV está previsto para entrar em funcionamento até meados da década de 2020.

## 4.2 CONFIGURAÇÕES DO LIGO

### 4.2.1 Lasers e Óptica

O laser do LIGO provém de um diodo-dopado, Nd: YAG que emite um laser de 10W de potência a um comprimento de onda de  $1064nm$ . A estabilização da potência do laser é feita a partir do direcionamento de uma amostra do laser a um fotodetector, no qual filtra o sinal e o devolve para o sistema amplificador de potência. Já a estabilização da frequência do laser é feita em vários estágios, por meio de moduladores e filtros de frequência (ABBOTT et al., 2009).

### 4.2.2 Suspensão e isolamento vibracional

Desde o sistema de Limpeza do modo (MC, do inglês Mode Cleaner) até as massas de teste (ITM e ETM), cada espelho é suspenso por fios de aço, comparados a um pêndulo. Essa suspensão fornece um isolamento vibracional de  $f^{-2}$  sobre sua própria frequência, permitindo que a massa de teste se movimente livremente na banda de frequência da onda gravitacional. O isolamento vibracional ainda conta com isoladores sísmicos, sensores de movimento, atuadores hidráulicos a fim de diminuir o ruído sísmico causado pela movimentação do solo.

### 4.2.3 Monitores ambientais

O LIGO ainda possui um conjunto de sensores a fim de monitorar e identificar distúrbios causados pelo meio ambiente ao detector. Sismômetros e acelerômetros medem a vibração do solo e do próprio detector; microfones mede o ruído acústico; magnetômetros monitoram a presença de campos que poderiam interferir na massa de teste e nos componentes eletrônicos.

### 4.2.4 Ruídos na detecção

Os fatores responsáveis limitantes da sensibilidade do detector são os ruídos fundamentais, que são ruídos inerentes aos instrumentos utilizados no interferômetro.

Para cada faixa frequência da possível onda gravitacional a ser detectada, há um tipo de ruído predominante.

**Ruído Sísmico:** Abaixo de uma frequência de  $10Hz$ , o ruído sísmico é dominante. O aLIGO conta com um sistema de suspensão de isolamento de suspensão composto por um pré-isolador térmico, uma plataforma ativa de isolamento e um sistema de suspensão quadri-pendular. Todo esse conjunto opera a fim de reduzir a perturbação causada pelo movimento, mesmo que mínimo, do solo na região das instalações físicas do interferômetro.

**Ruído Térmico:** Entre  $10Hz$  e  $12Hz$  o ruído térmico predomina. As suspensões das massas de teste do interferômetro estão sujeitas às perdas mecânicas, fazendo com que variações nas forças nos pontos de apoio das massas gerem esse ruído indesejado. O uso de um material com baixa perda mecânica nas suspensões é desejável para diminuir essa perturbação. Por isso, o aLIGO usa fibras de sílica nas suspensões, devido ao alto fator de qualidade que esse material apresenta.

**Ruído Browniano:** Em frequências intermediárias,  $40Hz$  a aproximadamente  $80Hz$  o ruído Browniano prevalece. Ele é causado pelas perdas mecânicas geradas pelo atrito interno no revestimento das massas de teste (CONSTANCIO, 2017). Para diminuir esse ruído, medidas similares às tomadas para minimizar o ruído térmico, estão sendo estudadas. Outra possibilidade para diminuição desse ruído é aumentar a largura do feixe laser usado. Porém, esse aumento é limitado pelo tubo de vácuo e pela estabilidade das cavidades.

**Ruído Quântico:** Já em altas frequências,  $80Hz$ , o ruído quântico é predominante. Causado por fontes de natureza quântica da luz e por processos de fotodetecção usados nos detectores. O ruído de Poisson se sobressai em altas frequências, ele é oriundo de flutuações quânticas relacionado ao número de fótons na saída do interferômetro. Usar um laser de alta potência para determinar com precisão a posição das massas de teste, aumenta a pressão de radiação que perturba a posição da própria massa de teste. A medida tomada para minimizar esse efeito, será aumentar a potência do laser de  $10W$  para  $125W$ . Consequentemente, aumentará a pressão de radiação do laser, e será necessário aumentar o valor da massa de teste, que passará de  $11Kg$  para aproximadamente  $40Kg$ .

## 5 CONCLUSÕES

Nesse trabalho foi feito um estudo teórico a fim de obter o conhecimento do que são ondas gravitacionais, como se formam e quais os mecanismos necessários para compreendê-las.

Ondas gravitacionais são ondas que se propagam pelo espaço-tempo com velocidade da luz  $c$ . Elas foram previstas por Einstein há um século atrás por meio de aproximações em suas equações campo. OGs são um objeto interessante de estudo, pois entender seu processo de formação e suas fontes, pode aumentar nosso conhecimento sobre estrelas, buracos negros e processos cosmológicos que até então estão fora do nosso conhecimento.

Para estudá-las utilizamos os detectores de ondas gravitacionais. Dentre estes, os que mais trouxeram resultados foram os detectores que utilizam interferometria laser. Os interferômetros mais proeminentes da atualidade são os interferômetros da Colaboração *LIGO*. Embora haja resultados surpreendentes que permitiram o entendimento desse fenômeno, existe também limitações impostas por ruídos que interferem nos resultados finais.

O intuito das pesquisa era, uma vez entendido o que são ondas gravitacionais e suas fontes no universo e também a sua detecção por interferometria, estudar o funcionamento dos detectores aLIGO e LIGO Voyager e o desenvolvimento de tecnologias criogênicas para o aperfeiçoamento da sensibilidade do detector. Seriam realizadas simulações térmicas, e experimentos criogênicos envolvendo uma amostra de Silício. Mas devido ao contexto pandêmico, não foi possível realizar as atividades em laboratório.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ABBOTT, B. P. Gw151226: Observation of gravitational waves from a 22-solar-mass binary black hole coalescence. **Phys. Rev. Lett.**, American Physical Society, v. 116, p. 241103, Jun 2016. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.241103>>. 4
- \_\_\_\_\_. Observation of gravitational waves from a binary black hole merger. **Phys. Rev. Lett.**, American Physical Society, v. 116, p. 061102, Feb 2016. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.116.061102>>. 3
- \_\_\_\_\_. Gw170817: Observation of gravitational waves from a binary neutron star inspiral. **Phys. Rev. Lett.**, American Physical Society, v. 119, p. 161101, Oct 2017. Disponível em: <<https://link.aps.org/doi/10.1103/PhysRevLett.119.161101>>. 4
- ABBOTT, B. P.; ABBOTT, R.; ADHIKARI, R.; AJITH, P.; ALLEN, B.; ALLEN, G.; AMIN, R. S.; ANDERSON, S. B.; ANDERSON, W. G.; ARAIN, M. A.; AL. et. Ligo: the laser interferometer gravitational-wave observatory. **Reports on Progress in Physics**, IOP Publishing, v. 72, n. 7, p. 076901, Jun 2009. ISSN 1361-6633. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1088/0034-4885/72/7/076901>>. 6
- AGUIAR, O. D. Past, present and future of the resonant-mass gravitational wave detectors. **Research in Astronomy and Astrophysics**, v. 11, n. 1, p. 1–42, 2010. 2
- ALLEN, B. **The stochastic gravity-wave background: sources and detection**. 1996. 3
- ANDERSSON, N.; FERRARI, V.; JONES, D. I.; KOKKOTAS, K. D.; KRISHNAN, B.; READ, J. S.; REZZOLLA, L.; ZINK, B. Gravitational waves from neutron stars: promises and challenges. **General Relativity and Gravitation**, Springer Science and Business Media LLC, v. 43, n. 2, p. 409–436, Aug 2010. ISSN 1572-9532. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1007/s10714-010-1059-4>>. 3
- CONSTANCIO, M. **Contribuições ao Desenvolvimento Do Multinested Pendula para Isolamento Vibracional Criogênico Do LIGO Voyager**. Tese (Doutorado) — INPE, 2017. 2, 3, 7

HASKELL, B.; JONES, D. I.; ANDERSSON, N. Mountains on neutron stars: accreted versus non-accreted crusts. **Monthly Notices of the Royal Astronomical Society**, v. 373, n. 4, p. 1423–1439, 11 2006. ISSN 0035-8711. Disponível em: <<https://doi.org/10.1111/j.1365-2966.2006.10998.x>>. 3

HOROWITZ, C. J.; KADAU, K. Breaking strain of neutron star crust and gravitational waves. **Physical Review Letters**, American Physical Society (APS), v. 102, n. 19, maio 2009. Disponível em: <<https://doi.org/10.1103/physrevlett.102.191102>>. 3

RILES, K. Gravitational waves: Sources, detectors and searches. **Progress in Particle and Nuclear Physics**, v. 68, p. 1 – 54, 2013. ISSN 0146-6410. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0146641012001093>>. 3

VILENKIN, A. Cosmic strings and domain walls. **Physics Reports**, v. 121, n. 5, p. 263 – 315, 1985. ISSN 0370-1573. Disponível em: <<http://www.sciencedirect.com/science/article/pii/037015738590033X>>. 3

VILENKIN, A.; SHELLARD, E. S. **Cosmic Strings and Other Topological Defects**. [S.l.]: Cambridge University Press, 2000. ISBN 978-0-521-65476-0. 3