



Instituto Principia
Academia da Escola de Talentos

TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

”Antena” do cosmos: LIGO

Turma 2021 Hiperposição dos Charms

Autor:

Arthur Carlos Jacobina Pires Filho

Orientador

Prof Dr Samuel Rocha

Agradecimentos

Agradeço aos meus pais, familiares e amigos pelo apoio e aconselhamento constante.

Ao Stark Bank por patrocinar todas as atividades da Escola de Talentos, inclusive, fornecendo mensalmente a Bolsa Stark que em muito contribuiu com meu desenvolvimento.

Ao professor Samuel Rocha que por todas as horas que passamos discutindo relatividade geral e teorias científicas sempre com muito entusiasmo e vontade de ensinar.

Aos professores Marcelo Guzzo, Ricardo Matheus e Leonardo Lima por proporcionarem reuniões sensacionais todas as semanas de 2021 e pelo empenho em manter a Escola um lugar especial para todos nós.

Ao professor Fabrício Marques pelas rodadas de tira dúvida sempre muito bem conduzidas, compreensivas e didáticas.

Ao empresário Rafael Stark por passar um pouco de seu mindset exemplar no pouco contato que tivemos.

A comunidade iteana por sempre ser muito aberta e disposta a ajudar seus membros com "bizus" em qualquer área da vida, do mercado e da faculdade.

Resumo

Esse trabalho teve por objetivo estudar o estado da arte de observatórios de ondas gravitacionais. Como foco principal, escolheu-se o LIGO, mais bem sucedido experimento nessa área para analisar alguns de seus mecanismos e entender suas possíveis fontes de erro. O LIGO, além disso, é um experimento modelo na engenharia de alta precisão e está entre os mais complexos experimentos feitos pela humanidade. Para fazer este trabalho se fez uma leitura da documentação disponível no site oficial do LIGO e dos papers mais recentes que tratam de temas como a manufatura dos espelhos do LIGO, o sistema DARM length feedback control loop além de recortes do projeto de algumas peças do LIGO, particularmente, do sistema de vácuo.

Abstract

This work aimed to study the state of the art of gravitational wave observatories. The main focus was on LIGO, the most successful experiment in this field, in order to analyze some of its mechanisms and understand its potential sources of error. Additionally, LIGO is a model experiment in high-precision engineering and is among the most complex experiments ever conducted by humanity. To carry out this work, the documentation available on the official LIGO website and the most recent papers addressing topics such as the manufacturing of LIGO's mirrors, the DARM length feedback control loop system, and excerpts from the design of some LIGO components, particularly the vacuum system, were reviewed.

1 Introdução

Relatividade Geral, como proposta por Albert Einstein [3] tem como um de seus ramos o estudo de fenômenos de ordem cosmológica como, por exemplo o próprio espaço tempo, colisões de buracos negros, fusão de estrelas de nêutrons. As ondas gravitacionais são uma das previsões dessa teoria.

Atualmente, conseguiu-se, por meio do LIGO detectar precisamente uma amostra proveniente de ondas gravitacionais [4]. Para validar essa detecção se fez necessário filtrar ruídos provenientes das mais diversas fontes, principalmente, movimentos tectônicos da Terra e atividades humanas próximas.

O objetivo deste trabalho é discutir brevemente os aparatos experimentais que compõem o LIGO destacando a relevância dos sistemas utilizados para a precisão dos dados obtidos.

2 Interferometria a laser

A interferometria é um método ótico de alta precisão baseado na interferência de ondas. Para aplicação desse método, diversas configurações experimentais são possíveis, mas todas elas apresentam um princípio de funcionamento semelhante: dividir um feixe de luz em outros dois um referencial e outro sensível. O feixe sensível sofrerá alterações no seu caminho ótico devido aos fenômenos que se quer estudar, enquanto o referencial tem seu caminho ótico inalterado. Em seguida esses feixes são sobrepostos num detector, criando padrões de interferência.

2.1 Por que o LIGO?

Os principais métodos para detecção de ondas gravitacionais consistem em antenas de massa ressonante, pulsar timing arrays e interferometria a laser. Todos esses métodos tem vantagens e desvantagens a serem considerados, principalmente nos quesitos de sensibilidade e gastos computacionais.

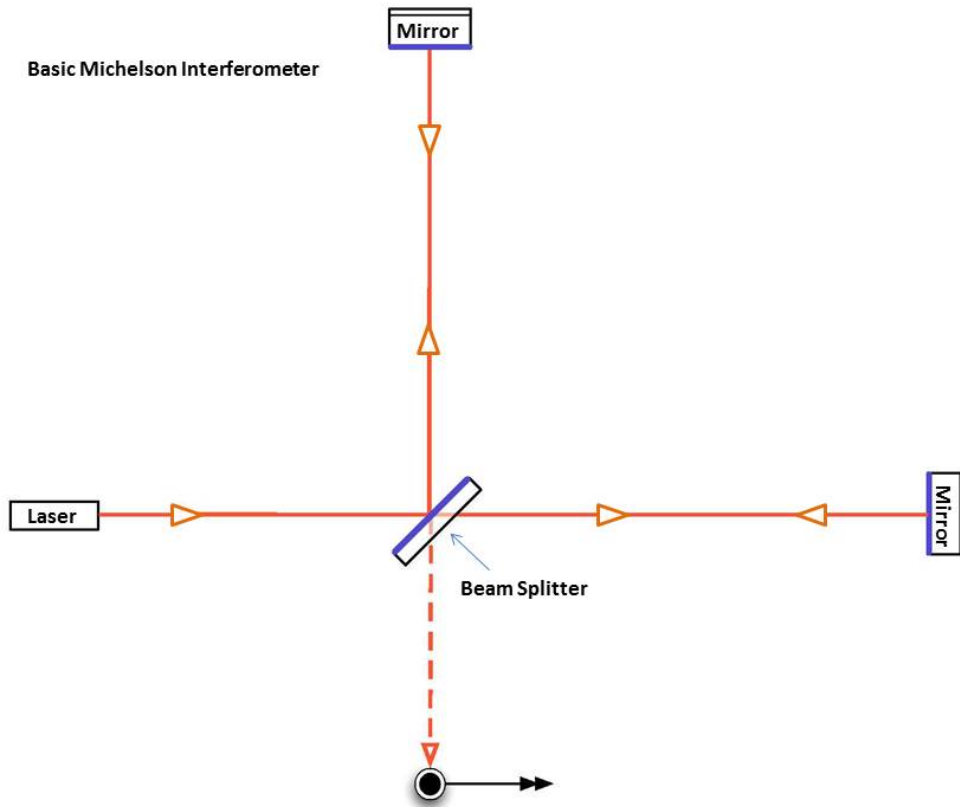
Por exemplo, as antenas de massa ressonante não são sensíveis o suficiente para, de fato, detectar ondas gravitacionais. Enquanto isso pulsar timing arrays envolvem o processamento de quantidades consideráveis de dados (big data) demandando custos computacionais além da necessidade de boas escolhas de dataset.

Neste trabalho escolheu-se estudar o LIGO (LASER INTERFEROMETER GRAVITATIONAL WAVE OBSERVATORY) que utiliza o método da interferometria a laser para detecção das ondas gravitacionais. Esse método é vantajoso porque proporciona sensibilidade suficiente para realizar a detecção em amplas faixas de frequência. Alguns dos problemas ligados a esse método podem ser mitigados por sistemas experimentais que serão discutidos ao longo deste texto.

2.2 O interferômetro de Michelson

O interferômetro de Michelson ocupa um lugar especial na história da física pois foi com ele que se realizou o famoso experimento de Michelson-Morley. Esse interferômetro consiste basicamente em um laser monocromático, um espelho semitransparente que separa o feixe do laser, dois espelhos e um detector. O arranjo dos componentes fica como na figura 1.

Figura 1: Interferômetro de Michelson



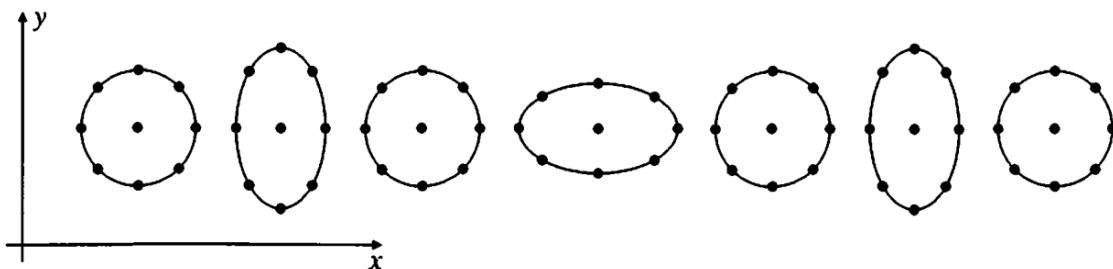
<https://www.ligo.caltech.edu/page/what-is-interferometer>

Certos cuidados são essenciais para manter o experimento preciso, destaca-se principalmente a necessidade de se conhecer alta precisão o comprimento de onda do laser, pois incertezas provenientes de impurezas ou falhas de engenharia do laser podem ser fatais para a detecção de ondas gravitacionais.

2.3 Alteração do caminho ótico por ondas gravitacionais

Previsões teóricas indicam que ondas gravitacionais distorcem o espaço periodicamente em direções perpendiculares (Referenciar Sean Carroll) como ilustrado na figura 2.

Figura 2: O efeito de uma onda gravitacional de polarização + num círculo de partículas de prova.



CARROLL, S. M. Spacetime and geometry : an introduction to general relativity. [s.l.] Cambridge Cambridge University Press, 2019.

Tendo isso em mente o cientista Joseph Weber propôs um experimentos com longas barras de alumínio que deveriam emitir sons devido ao esticamento e compressão sofridos quando atravessadas por ondas gravitacionais. O conceito do experimento em si não está errado, no entanto as vibrações sonoras obtidas por efeitos térmicos e a que seria provocada por uma onda gravitação tem ordens de grandeza semelhantes o que impossibilitou a distinção entre ruídos e detecções. Esse experimento conduz ao questionamento: "Qual é a ordem de grandeza da interação observada entre uma onda gravitacional e o feixe de laser do LIGO?"

2.3.1 Estimativa da ordem de grandeza dos parâmetros mensuráveis

Para estimar a ordem de grandeza dos parâmetros relevantes se utilizará um modelo orbital newtoniano numa situação que a relatividade geral começa a ser relevante. Para efeitos de conta, essa aproximação é suficiente para seu objetivo.

Seja um sistema binário cuja distância da Terra é dada por r , a massa de seus componentes é dada por M , seu raio de órbita é dado por R . sabe-se que o Raio de Schwarzschild do sistema é dado por

$$R_S = \frac{2GM}{c^2}$$

Logo, isolando-se a frequência angular desse sistema e usando na equação

$$f = \frac{\Omega}{2\pi}$$

Obtem-se que

$$f \sim \frac{cR_S^{\frac{1}{2}}}{10R^{\frac{3}{2}}}.$$

Da teoria da relatividade geral sabe-se que a métrica de uma perturbação gravitacional [2] tem como amplitude um valor na ordem de

$$h \sim \frac{R_S^2}{rR}.$$

Para valores típicos de um binário de buracos negros com massa na ordem de 10 massas solares e distância cosmológica na ordem de 100Mpc,

$$R_S \sim 10^{-6} \text{ cm.}$$

$$R \sim 10^7 \text{ cm.}$$

$$r \sim 10^{26} \text{ cm.}$$

Temos as seguintes ordens de grandeza:

$$h \sim 10^{-21}$$

$$f \sim 10^2 \text{ s}^{-1}.$$

Como o braço do LIGO tem comprimento na ordem de Km, a variação de caminho ótico por ciclo é de

$$\delta L \sim 10^{-19} \text{ m.}$$

3 LIGO

Figura 3: Observatórios LIGO



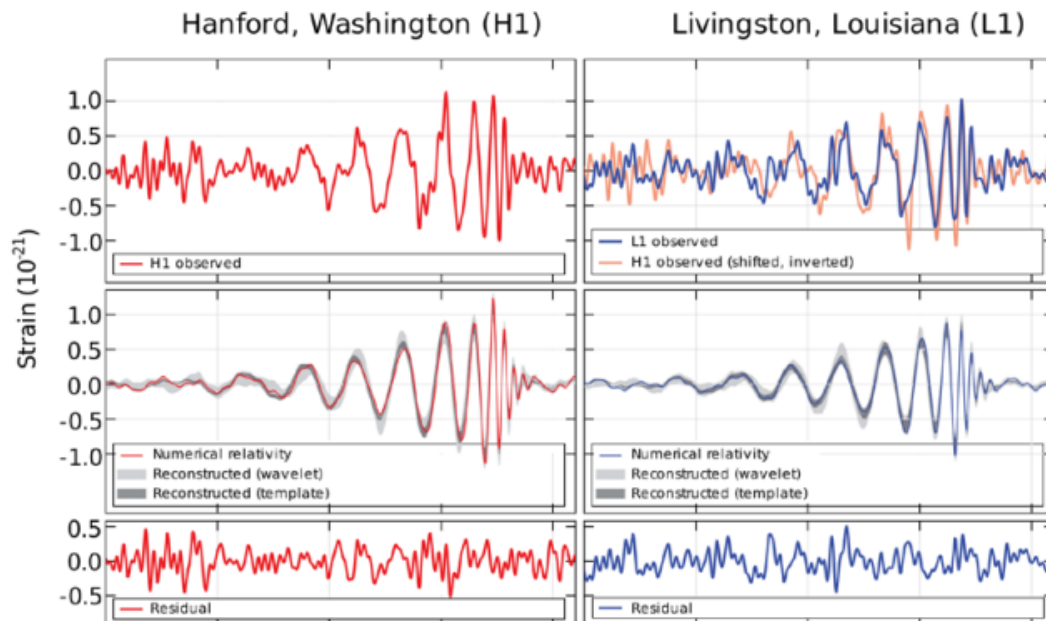
<https://www.ligo.caltech.edu/>

LIGO, Laser Interferometer Gravitational Wave Detector, consiste de dois interferômetros localizados em Hanford e Livingston [5]. Cada interferômetro é composto de dois braços de 4Km posicionados em L. Esses equipamentos servem como uma "antena" capaz de detectar ondas gravitacionais. Embora sua missão seja detectar ondas gravitacionais provenientes de fenômenos violentos e extremamente energéticos como, por exemplo, a fusão de buracos negros, seus dados também podem contribuir para o desenvolvimento de outros ramos da física.

Além disso dados os requisitos de extrema precisão que o estudo de ondas gravitacionais demanda, a tecnologia experimental do LIGO é tão complexa como outros grandes experimental tal qual colisores de partículas.

3.1 Primeira detecção

Figura 4: Dados obtidos na primeira detecção do LIGO



<https://www.nobelprize.org/uploads/2018/06/advanced-physicsprize2017-1.pdf>

Em 14 de setembro de 2015 um forte sinal que podia ser interpretado como onda gravitacional foi detectado pelo LIGO. Primeiramente registrado em Livingston e 6,9 milissegundos depois em Hanford, por uma rápida análise de dados pode-se estimar a localização do emissor da onda gravitacional. Esse feito contribuiu para que, em 2017, Weiss e seus colaboradores fossem laureados com o Prêmio Nobel da Física [9].

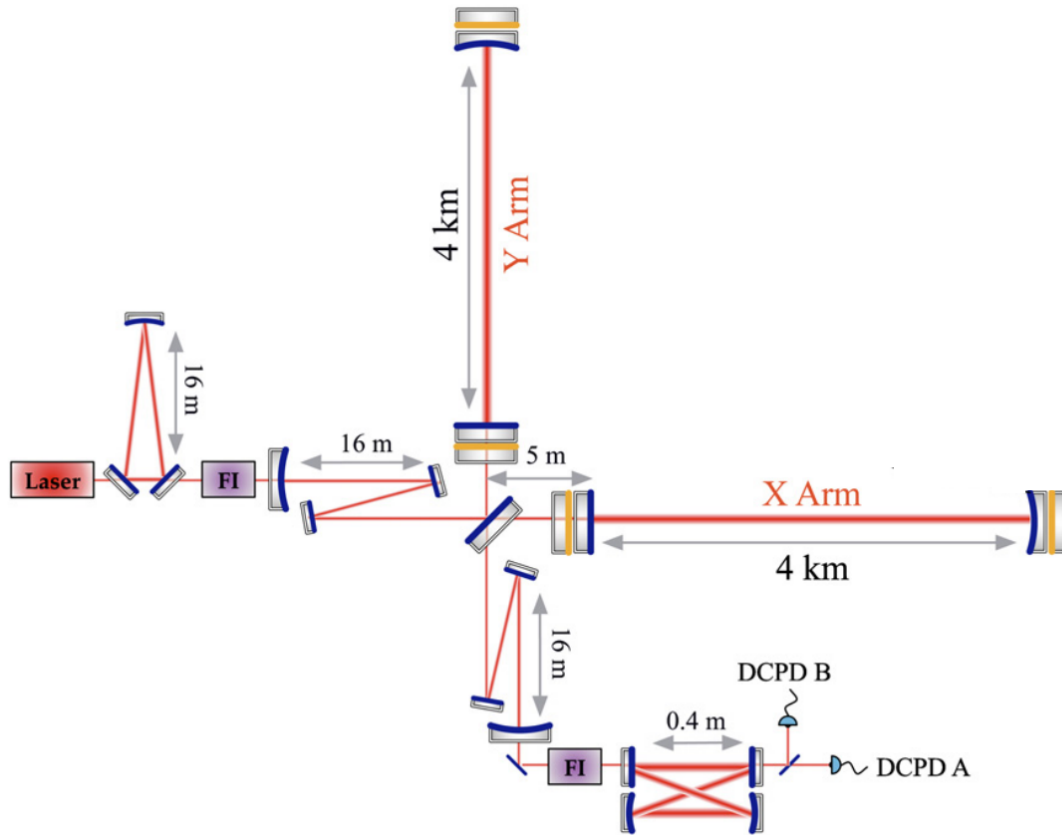
“The Royal Swedish Academy of Sciences has decided to award the Nobel Prize in Physics 2017 with one half to Rainer Weiss and the other half 6 jointly to Barry C. Barish and Kip S. Thorne for decisive contributions to the LIGO detector and the observation of gravitational waves”

3.2 Possíveis fontes de erro para o LIGO

As fontes de erro para um detector como o LIGO podem ser divididas em fontes de erro sistemáticas e fontes de erro aleatórias.

3.3 Fontes de Erro Sistemáticos

Figura 5: Esquema de detectores e mecanismos no LIGO



Os principais erros sistemáticos que se poderia elencar são: perdas óticas, massas teste mal calibradas para ruídos externos, vácuo ineficaz, isolamento térmico pouco eficiente.

3.3.1 Perdas óticas

Como o interferômetro é um sistema ótico, intuitivamente, perdas óticas devem ser uma fonte relevante para somar ao erro sistemático total. De fato, para manter a precisão do experimento, a refletância dos espelhos deve ser próxima de 100%, analogamente, a transmitância das janelas dos sistemas Pcal devem também ser próximas de 100%.

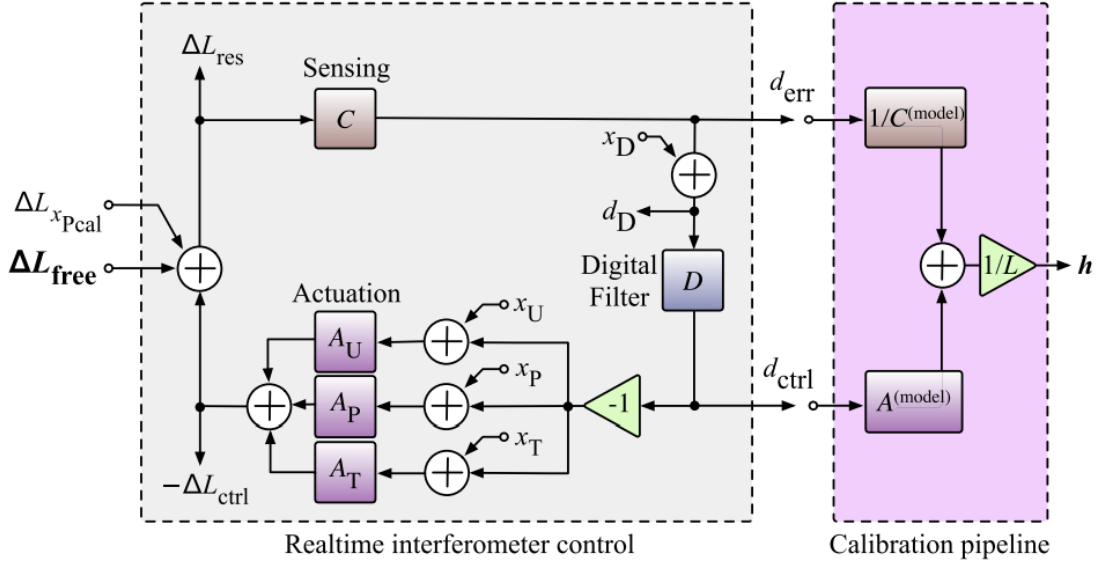
Para cumprir esses requisitos os materiais para compor os espelhos e dos corpos de prova do LIGO devem ser cuidadosamente escolhidos desde os processos de fabricação. Com isso em mente, para os corpos de prova, por exemplo, foi feita uma diferenciação entre safira e sílica fundida, sendo a sílica fundida o material com melhores resultados. [10]

3.3.2 Calibração

A calibração dos braços do LIGO são essenciais para manter a precisão do experimental já que os detectores são precisos ao ponto de movimentos sísmicos ou transito de veículos nas redondezas do experimento serem desastrosas para o resultado final. O sistema utilizado atualmente é baseado num loop de controle do diferencial de braço (DARM control loop) [1], nesse trabalho não se abordará esse conceito com profundidade dado que se fugiria do escopo do texto, no entanto, dado sua relevância, haverá uma breve discussão sobre o método.

DARM control loop

Figura 6: DARM length feedback control loop



https://www.researchgate.net/figure/Advanced-LIGO-differential-arm-DARM-length-feedback-control-loop-gray-box-and-the_fig6_341202511

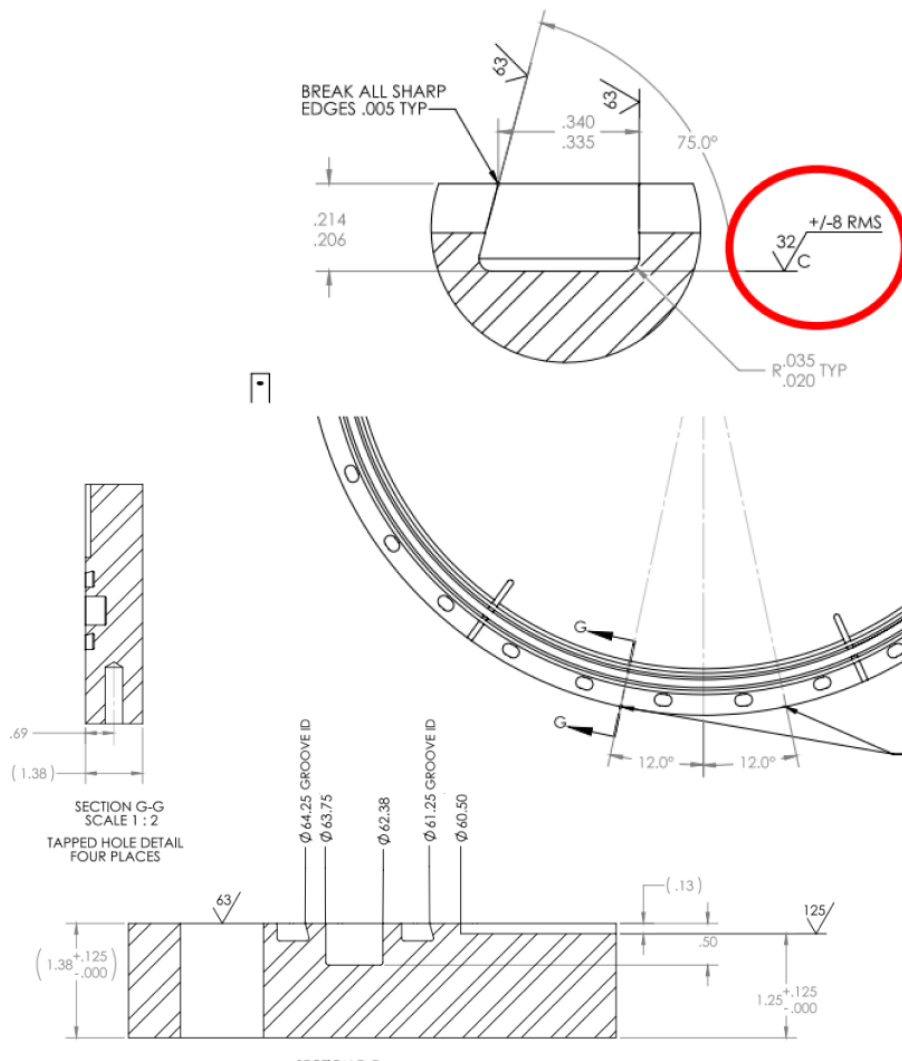
O LIGO conta com um equipamento chamado calibrador de fótons (Pcal) que, mesmo se os detectores estiverem na sensibilidade máxima, tem plena capacidade operacional. Esse equipamento, simultaneamente fornece dados de input para o sistema de controle e corrige o diferencial do braço de acordo com o output do looping de controle.

O looping funciona do seguinte modo: Recebe-se de input dados do diferencial de comprimento de braço causado por entidades externas e do Pcal, em seguida, esses dados são convertidos em um sinal digital d_{err} , esse sinal em seguida é filtrado por uma série de filtros (D) o que resulta em d_{ctrl} . Posteriormente, o sinal é convertido por uma série de atuadores (A) que gerará a resposta ΔL_{ctrl} que suprime o erro externo e gera mais um input para o loop ΔL_{res} conforme ilustrado na figura 6.

3.3.3 Vácuo

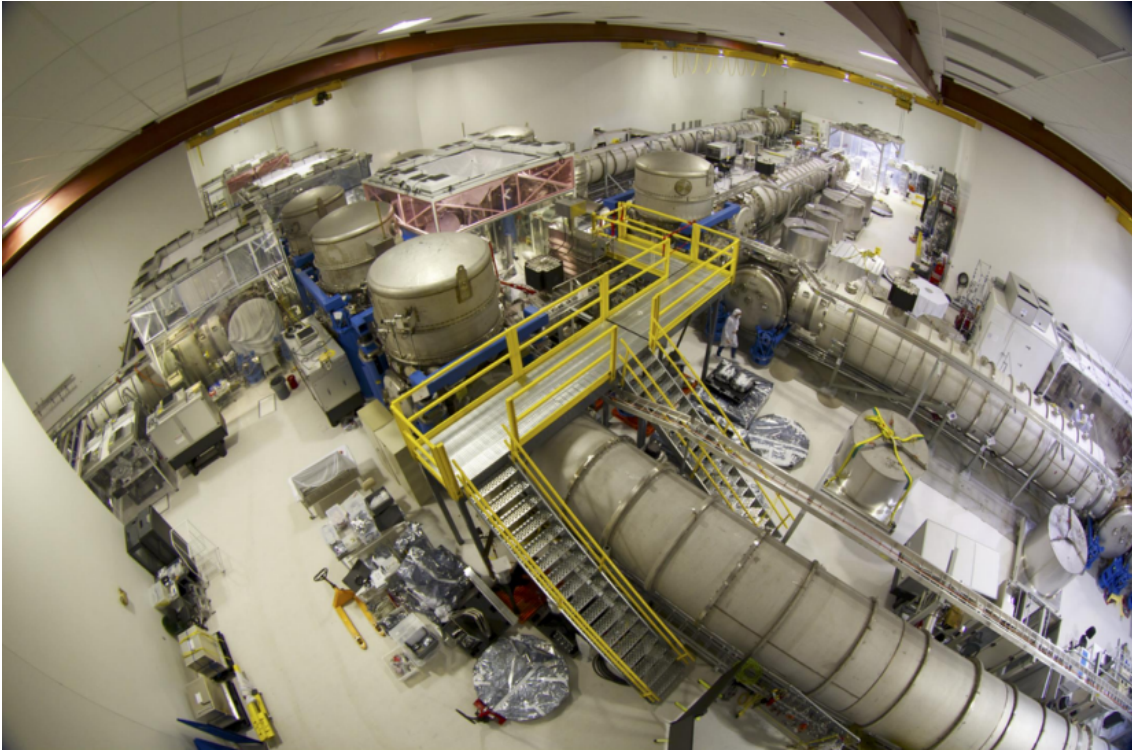
O fechamento a vácuo dos braços do LIGO foi feito com o intuito de reduzir o espalhamento da luz decorrente da presença de gases na câmara, tem baixíssimas taxas de escape de ar e liberação espontânea de gás. Esse sistema de vácuo é o maior sistema de ultra vácuo do mundo ($< 10^{-9} torr$) com um volume bobeadado na ordem de $20.000 m^3$. Para fabricação e instalação desse sistema diversos cuidados tiveram de ser tomados para garantir a integridade do mecanismo e a precisão do experimento final. Alguns desses cuidados são: baixa tolerância para tubulação e flanges e confecção em aço (figura 7), transporte e posicionamento cuidadosos e checagem constante das etapas mencionadas. [8]

Figura 8: Flanges do sistema de vácuo do LIGO



https://dcc.ligo.org/public/0141/G1700589/001/SocalAVS%20Talk_rev.003.pdf

Figura 8: Parte do sistema de vácuo do LIGO



https://dcc.ligo.org/public/0141/G1700589/001/SocalAVS%20Talk_rev.003.pdf.

Acompanhando o sistema de vácuo há diversos subsistemas que garantem o bom funcionamento do LIGO, como por exemplo, uma envoltura de boa parte dos braços em concreto que evita inúmeros transtornos.

4 Conclusão

Dessa forma, com o método utilizado neste trabalho, pôde-se compreender o funcionamento dos mecanismos de detecção de ondas gravitacionais, principalmente, do LIGO que, por sua vez, se baseia no interferômetro de Michelson. Foi observado, também que o LIGO conta com uma engenharia de precisão extremamente detalhista e essencial para a condução do experimento.

Vale resaltar que há mais sistemas que garantem a precisão do LIGO do que os que foram citados neste trabalho, porém considerou-se, por simplicidade, apenas os mais relevantes. Sendo eles: DARM length feedback control loop que garante que as variações dos comprimentos de braço sejam, de fato, devido a perturbações gravitacionais; os lasers e os espelhos do LIGO que garantem que a perda ótica não influencie negativamente nas medições e o sistema de vácuo, um dos maiores do mundo, necessário para o bom funcionamento do experimento.

Portanto, tendo todos esses sistemas em mente, conclui-se que a humanidade mostrou avanços significativos na ciência e na tecnologia, sendo possível medir distâncias menores do que o diâmetro de um próton. Esse feito é notável, porque há cerca de 100 anos, o próprio Einstein não esperava que ondas gravitacionais pudessem, um dia, ser detectadas. No futuro, espera-se que o LISA, primeiro detector de ondas gravitacionais composto por uma constelação de satélites possa proporcionar mais detecções e maior precisão, dado seu braço de 2.500.000Km além dos avanços na engenharia de precisão até seu lançamento [6].

5 Referências

- [1] ABBOTT, B. P. et al. GW170817: Observation of Gravitational Waves from a Binary Neutron Star Inspiral. *Physical Review Letters*, v. 119, n. 16, 16 out. 2017.
- [2] CARROLL, S. M. *Spacetime and geometry : an introduction to general relativity*. [s.l.] Cambridge Cambridge University Press, 2019.
- [3] EINSTEIN, A.; CALDER, N. *Relativity : the special and the general theory*. New York: Penguin Books, 2006.
- [4] GW150914 - The First Direct Detection of Gravitational Waves.
Disponível em: <https://www.ligo.org/detections/GW150914.php>.
- [5] Facilities. Disponível em <https://www.ligo.caltech.edu/page/facilities>.
- [6] LISA - Laser Interferometer Space Antenna -NASA Home Page. Disponível em:
<https://lisa.nasa.gov/#: :text=LISA%20is%20a%20space%2Dbased>.
- [7] Ultra-High Vacuum. Disponível em: <https://www.ligo.caltech.edu/page/vacuum>.
- [8] Vacuum Technology of the LIGO Interferometers. [s.l: s.n.]. Disponível em:
https://dcc.ligo.org/public/0141/G1700589/001/SocalAVS%20Talk_r.ev.003.pdf. *Acesso em : 20jun.2023*.
- [9] The Nobel Prize in Physics 2017. Disponível em: <https://www.nobelprize.org/prizes/physics/2017/press-release/>.
- [10] PENN, S.; HOBART; WILLIAM SMITH COLLEGES. *An Introduction to Advanced LIGO and the Test Mass Mirror Coatings*. [s.l: s.n.]. Disponível em: <https://dcc.ligo.org/public/0037/G080303/000/G080303-00.pdf>.