

Proposta de nova vaga: Teorias de Campo Efetivas e Ondas Gravitacionais

1. Uma nova janela para o universo

Algumas das descobertas mais espetaculares dos últimos anos estão diretamente relacionadas à detecção de ondas gravitacionais. Além de confirmarem uma das previsões mais profundas da Relatividade Geral (a propagação de perturbações da curvatura do espaço-tempo), os detectores de ondas gravitacionais modernos, tais como LIGO, VIRGO e KAGRA, abriram um novo olhar sobre o universo, revelando eventos dramáticos como a fusão de buracos negros e estrelas de nêutrons em galáxias a bilhões de anos-luz da Terra. A importância dessas observações foi logo reconhecida por meio do Prêmio Nobel de Física de 2017, concedido a três dos principais pioneiros na construção da nova geração de instrumentos (interferômetros a laser com altíssimo fator de qualidade).

O LIGO teve "*first light*" em 2015 e já em 2017 começaram a surgir alguns resultados surpreendentes. Primeiramente, veio a constatação de que a maioria dos eventos de fusões de buracos negros detectados envolvem objetos com massas acima de ~5 massas solares, chegando até ~100 massas solares – ao contrário das expectativas iniciais, que estimavam uma predominância de objetos com menos do que 5 massas solares. Nesse mesmo ano, em 17 de Agosto, foi detectado um dos fenômenos mais fascinantes já observados: o evento GW170817, que produziu não apenas um sinal claro no LIGO, mas também uma rajada de raios-gama que foi observada pelo satélite Fermi-LAT. Essas duas detecções simultâneas permitiram uma coordenação inédita entre dezenas de telescópios ao redor do mundo, que em menos de dois dias encontraram a contrapartida ótica do evento: uma kilonova dentro de uma galáxia a 130 milhões de anos-luz da Terra. O conjunto dessas observações determinou que o evento foi gerado pela fusão de duas estrelas de nêutrons, que permitiu ao mesmo tempo checar com precisão inédita a Relatividade Geral, testar a Física Nuclear em um regime antes inacessível, além de inaugurar um novo tipo de medida que pode determinar diretamente a taxa de expansão do universo.

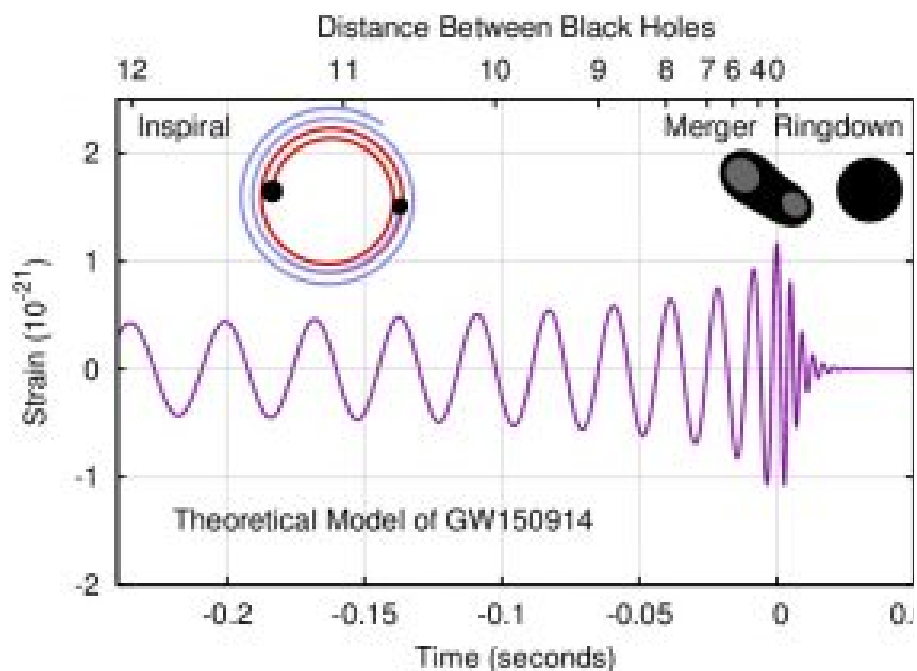
A importância das ondas gravitacionais para testar a Física fundamental, e também como ferramenta para estudar o universo, fica patente nos investimentos feitos pela Europa¹, Estados Unidos e Japão, que estão dedicando enormes recursos às novas gerações de experimentos que vão aprimorar ainda mais a nossa capacidade de medir as ondas gravitacionais, cobrindo um espectro maior de frequências com sensibilidade ainda melhor. A missão LISA (um interferômetro a laser no espaço), da Agência Espacial Europeia, está aprovada e deve ser lançada em 2030. Dois novos detectores na Terra, o Einstein Telescope (ET, europeu) e o Cosmic Explorer (CE, americano), estão na fase final de *Preliminary Design*, sendo que o ET já tem uma *starting grant*, e a *National Science Foundation* dos EUA tem financiado os projetos que viabilizarão o design e a eventual construção do CE².

¹<https://projects.research-and-innovation.ec.europa.eu/en/projects/success-stories/all/sharper-focus-gravitational-waves>

²<https://cosmicexplorer.org/article.html?article=funding>

Com os interferômetros a laser, em conjunto com outras medidas tais como as observações dos *Pulsar Timing Arrays* (PTA), estamos nos aproximando de uma visão completa de eventos que vão desde a vizinhança da Via Láctea até os primórdios do universo. Em termos de escalas físicas, serão observados eventos desde ~ 1 massa solar até milhões de massas solares e chegando potencialmente até as ondas gravitacionais geradas na fase de inflação do universo.

Entretanto, não foram apenas a instrumentação e as observações que tiveram um desenvolvimento extraordinário nas últimas décadas: a exploração dos dados de ondas gravitacionais teria sido impossível sem que uma série de ferramentas teóricas fossem construídas, que permitem prever de modo extremamente preciso a emissão de radiação gravitacional por sistemas dinâmicos. Na figura abaixo temos três regimes: num primeiro momento, dois objetos mantêm uma órbita aproximadamente circular em torno do centro de massa e se aproximam lentamente devido à emissão de ondas gravitacionais. Nesse regime "linear", a radiação gravitacional pode ser estudada até mesmo num curso básico de Relatividade Geral. Porém, assim que o regime passa a ser altamente dinâmico e não-linear, com as trajetórias se desviando rapidamente de órbitas circulares, a radiação não pode mais ser estudada analiticamente. E quando o sistema chega próximo da fase de fusão dos dois objetos e da formação do objeto compacto final, que de fato é quando em geral somos capazes de tirar a maior parte da informação desses sistemas, torna-se necessário o uso de técnicas inteiramente novas. É nesse contexto que os métodos de Teorias Efetivas da Campo tornam-se cruciais para todo o tipo de ciência que envolve as ondas gravitacionais.



Créditos da figura: <http://ccrg.rit.edu/GW150914>

2. A base teórica: Teoria Efetiva de Campos

Começando há mais de vinte anos atrás, Teorias Efetivas de Campos (EFT), de ampla utilização em muitas outras áreas da física, foram desenvolvidas para sua aplicação na gravitação. As EFTs em questão abordam um grande número de novas questões que não estão presentes nas aplicações em outras áreas, como tradicionalmente na física de partículas, física nuclear, etc. Em particular, elas são de grande utilidade quando existem várias escalas de energia que devem ser consideradas. Nas aplicações com grande relevância na detecção de ondas gravitacionais, as EFT são utilizadas para entender a dinâmica de objetos ligados gravitacionalmente. Quando esses objetos num sistema binário orbitam um ao redor do outro, eles emitem energia na forma de ondas gravitacionais. Nas etapas iniciais desse processo, é possível desenvolver uma teoria de perturbações que corresponde a várias "torres" de EFTs aplicadas em diferentes escalas, indo do raio de Schwarzschild até o comprimento da radiação gravitacional, passando por várias outras escalas intermediárias. Além disso, as EFTs estão correlacionadas entre elas, o que introduz um grande número de sutilezas. Essas técnicas de teoria de campos são complementares ao regime mais tardio dos sistemas binários, onde os métodos da relatividade numérica devem ser utilizados.

As EFTs da gravitação contam com todos os elementos de interesse: power counting, analiticidade das contribuições de longa distância, evolução do grupo de renormalização. Os cálculos que resultam permitem previsões de precisão que aumentam grandemente o potencial de utilização dos dados dos detectores de ondas gravitacionais para estudar esses eventos astrofísicos.

Dado que as técnicas dos cálculos pós-Newtonianos (PN) vêm de fato da Teoria Quântica de Campos, existem um grande número de desenvolvimentos delas fora das aplicações em detecção de ondas gravitacionais: teorias de bootstrap gravitacional, técnicas de amplitudes, só para mencionar dois temas recentes.

Finalmente, para poder aplicar esses métodos nos futuros experimentos de ondas gravitacionais, serão necessários cálculos de ainda maior complexidade para os próximos 10 anos. Portanto, existe a necessidade de maiores desenvolvimentos nessa área para poder aproveitar plenamente o poder dos futuros detectores de ondas gravitacionais que irão a testar os confins mais longínquos do Universo.

Um pesquisador teórico nessa área precisa ter um domínio técnico superior na área de teoria quântica de campos. Sua presença no Instituto traria um grande benefício não só em áreas de interesse para a Astrofísica e a Cosmologia, mas também em áreas teóricas que requerem a aplicação dessas novas técnicas. O impacto seria altamente multidisciplinar.

3. Resumo do panorama mundial

O que observamos em diversas universidades de ponta no mundo é a nucleação de grupos em áreas teóricas e experimentais ligadas às ondas gravitacionais e temas relacionados. O que caracteriza os grupos que vêm sendo criados, tanto em instituições de grande e médio porte, é a variedade de linhas de pesquisa de seus membros, que vão desde a instrumentação até aspectos teóricos fundamentais e de modelagem matemática dos fenômenos. Alguns exemplos:

- Harvard (CfA): <https://itc.cfa.harvard.edu/gravity>

- MIT: LigoLab <https://ligolab.mit.edu/> e Kavli <https://space.mit.edu/instrumentation/ligo/>
- Caltech: <https://labcit.ligo.caltech.edu/>
- Cambridge: Kavli <https://www.kicc.cam.ac.uk/research/RTgwaves> & DAMTP <https://www.damtp.cam.ac.uk/research/gr/index>
- Max Planck Institute for Gravitational Physics: <https://www.aei.mpg.de/>

É importante salientar que, no esquema das grandes colaborações internacionais que impulsionam a ciência hoje em dia, tanto pesquisadores com perfis experimentais quanto teóricos cumprem funções essenciais. Enquanto uns constroem e testam os instrumentos, outros extraem valor científico das observações, testam as teorias físicas e propõem os novos fenômenos que devem ser medidos pela próxima geração de experimentos.

Portanto, essa linha de pesquisa adequa-se perfeitamente a projetos de pesquisa transversais, que podem ir desde métodos teóricos à fenomenologia, chegando até mesmo a instrumentação. Além disso, as ondas gravitacionais, em combinação com outras observações utilizando fótons (luz), raios cósmicos e neutrinos constituem os quatro pilares de uma das áreas mais quentes da ciência: a Astrofísica Multi-Mensageiros.

Os novos experimentos planejados para o futuro próximo (*Einstein Telescope* e *Cosmic Explorer*) foram concebidos em termos de equipes multinacionais, com expertises de toda natureza e um consórcio internacional que vai contribuir com a instrumentação, reunindo desde experts em Teoria Efetiva de Campos até físicos experimentais. Nesse sentido, teremos novas oportunidades para um projeto nacional de grande porte e amplo escopo.

4. Extensão e divulgação científica

Há poucas áreas da ciência tão instigantes para o público geral quanto observações de ondas gravitacionais, evidências diretas de buracos negros, colisões de estrelas de nêutrons e fenômenos dessa magnitude. O LIGO mantém diversas páginas onde se pode ter uma amostra dos tipos de atividades de divulgação científica desenvolvidos pela comunidade de ondas gravitacionais³. Tanto as facetas experimental quanto teórica do tema de radiação gravitacional são temas fascinantes, ideais para servir de base para cursos de extensão nos quais os alunos podem aprender a se comunicar com o público geral, ou então na criação de ferramentas audiovisuais.

5. Ensino

Há diversas temáticas dentro dos currículos de graduação e pós-graduação que se relacionam, em algum nível, com a área de ondas gravitacionais.

³ Veja, por exemplo, <https://advancedligo.mit.edu/outreach.html>

Na graduação podemos citar, tanto no Bacharelado quanto na Licenciatura: Introdução à Relatividade (4300337), Cosmologia Física (4300430), Eletromagnetismo I e II (4302303 e 4302304), Física Experimental (várias disciplinas), Gravitação (4300156), Métodos computacionais em Física (4300331), Oscilações e Ondas (4300357), Tópicos avançados em tratamento estatístico de dados em física experimental (4305103), entre outros.

Na pós-graduação temos não somente as disciplinas de Eletrodinâmica, Cosmologia, Relatividade Geral e Tratamento estatístico de dados, como também teremos a oportunidade de criar uma nova disciplina, onde os alunos de mestrado e doutorado serão apresentados ao estado-da-arte da pesquisa na área de ondas gravitacionais, tanto do ponto de vista teórico quanto do observacional.

6. Resumo

O IFUSP tem a oportunidade de trazer um ou mais pesquisadores que atuam em áreas teóricas e fenomenológicas ligadas à ciência com ondas gravitacionais, em particular um especialista em Teorias de Campo Efetivas aplicada a fenômenos gravitacionais no regime não-linear. Um pesquisador com essas características não apenas traria uma área de altíssimo impacto ao IFUSP, como encontraria nos membros docentes atuais uma grande sinergia em termos de áreas de pesquisa, com possibilidades concretas de colaborações profícuas e formação de recursos humanos (em particular estudantes, que têm grande interesse na área). Até mesmo na área de detectores quânticos, amplamente utilizados nos interferômetros a laser, existe oportunidade para colaborações e crescimento.

Quanto a candidatos viáveis para esse concurso, podemos identificar com facilidade excelentes pesquisadores pós-doutores, ou mesmo jovens docentes de outras universidades, que seriam potenciais candidatos a uma vaga nessa área. O número de cientistas que trabalham com ondas gravitacionais tem crescido exponencialmente, com uma quantidade igualmente crescente de jovens pesquisadores com formação nessa área.

Em suma: o Instituto de Física tem uma excelente oportunidade de se inserir numa área da física teórica que experimenta um crescimento explosivo, com pesquisas de alto impacto e grande interesse dos estudantes, além de uma forte atração em termos de extensão e divulgação. Por esses motivos propomos a abertura de uma nova vaga intitulada "Teorias de Campo Efetivas e Ondas Gravitacionais".