

## 100 anos de Relatividade Geral

Este livro aparece no seguimento de uma conferência de dois dias e que teve lugar em novembro de 2015, organizada conjuntamente pelo Departamento de Física e Astronomia e o Departamento de Matemática.

Esta conferência tinha como objetivo celebrar as 4 comunicações de Einstein à Academia Prussiana de Ciências em 1915. Na primeira destas comunicações, Einstein discute os pontos essenciais da Teoria da Relatividade Geral e resolve a bem conhecida dificuldade da gravitação universal de Newton em explicar o avanço extra do periélio de mercúrio de 43'' de arco/século relativamente ao valor Newtoniano de 570'' de arco/século obtido usando teoria das perturbações. Na quarta comunicação aparecem as equações de campo completas, isto é, na presença da matéria. Estes desenvolvimentos históricos fundamentais são dos mais marcantes da física do século XX, e possivelmente de toda a física. Uma das inúmeras consequências da Teoria da Relatividade Geral é a previsão da existência de ondas gravitacionais que não foram detetadas em setembro de 2015!

É evidente que a FCUP não podia perder a oportunidade de divulgar e celebrar esta efeméride. Nesta Conferência, o primeiro dia, 19 de novembro de 2015, foi de cariz pedagógico e os intervenientes foram Orfeu Bertolami (Vita Mirabilis sobre o conjunto da obra de Albert Einstein), José Carlos Santos que falou sobre a amizade e a colaboração de Einstein com o seu colega de Faculdade, o físico-matemático, Marcel Grossmann, contribuição plasmada no 1º capítulo do livro, e a de João Penedones sobre a possibilidade de ser o espaço-tempo discreto.

No segundo dia, a discussão foi muito mais técnica e versou sobre problemas de ponta da investigação hodierna e foram intervenientes: Pedro Gil Vieira (Medalha Gribov de Física Teórica em 2015), Nelson Nunes (capítulo 3), Robertus Potting (Lorentz invariance, gravity and spontaneous symmetry breaking), Jorge Páramos (capítulo 4), Maria da Piedade Ramos (capítulo 5) e José Velhinho (capítulo 6).

Julgo ser relevante mencionar que a celebração do centenário da Relatividade Geral foi a terceira atividade com organização conjunta DFA-DM:

2005 - Ano Internacional da Física, para celebrar o Annus Mirabilis de Einstein, 1905 ano da publicação de quatro trabalhos essenciais: Explicação do efeito fotoelétrico (março), Explicação do movimento Browniano e Cálculo da constante de Boltzmann (maio), Electrodinâmica dos corpos em movimento/teoria da Relatividade restrita (junho) e  $E = mc^2$  (setembro);

2008 - Unificação do espaço com o tempo  $\Rightarrow$  espaço-tempo, proposta por Hermann Minkowski, professor de Einstein na ETH;

2015 - 100 anos da Relatividade Geral;

2018 (28 de novembro) Centenário da Publicação do célebre artigo de Emmy Noether "Invariante Variations Probleme".

Mas, falemos agora do livro, organizado por José Carlos Santos e João Nuno Tavares.

### **Capítulo 1 – Marcel Grossmann, O parceiro silencioso de Einstein.**

Marcel Grossmann foi responsável por ter chamado a atenção de Einstein para a necessidade de formular as leis da física de forma tensorial e para o teorema da curvatura de Riemann, portanto, uma influência decisiva do ponto de vista técnica, porém, foi também responsável pelo atraso (e alguma confusão) para chegar à formulação final da teoria. De facto, os dois colegas escreveram 2 artigos juntos:

1913 - Entwurf einer verallgemeinerten Relativitätstheorie und einer Theorie der Gravitation, *Zeitschrift für Mathematik und Physik*. Erro no limite Newtoniano da formulação.

1914 - Kovarianzeigenschaften der Feldgleichungen der auf die verallgemeinerte Relativitätstheorie gegründeten Gravitationstheorie, *Zeitschrift für Mathematik und Physik*.

### **Capítulo 2 – Relatividade Geral, uma introdução**

João Nuno Tavares

Uma belíssima introdução pedagógica ao Princípio da Relatividade Geral, ao Princípio de Mach, ao Princípio da Equivalência. Trata também do Disco Rotativo e dos espaços-tempo curvos.

### **Capítulo 3 – Para além da Relatividade Geral**

Nelson Nunes

Observação da expansão acelerada do Universo inferida através do défice de luminosidade de Supernovas Tipo Ia, levou à necessidade de introduzir o conceito de energia escura. Qual a sua natureza?

Energia de vácuo  $\Rightarrow$  constante cosmológica nas equações de campo? Campo escalar – quintessência? Gás generalizado de Chaplygin? Gravitação modificada? Teorias  $F(R)$ ? Teorias Acoplamento não Mínimo matéria-curvatura?

Teorias escalares tensoriais?  $\Rightarrow$  Brans-Dicke (1961), Teoria das Cordas Quânticas fechadas que contém para além da gravitação, o dilatação (e um tensor de segunda ordem antissimétrico) (1974,...).

Teorias de Horndeski (1974) (redescoberta em 2011)?  $\Rightarrow$  Constrangimentos observacionais cosmológicos  $\Rightarrow$  Ondas gravitacionais!

### **Capítulo 4 – O Universo Escuro**

Jorge Páramos

Discussão pedagógica e muito completa sobre as evidências observacionais da matéria escura e da energia escura-constante cosmológica.

## **Capítulo 5 – Elasticidade Relativista**

Maria da Piedade Ramos

A teoria Newtoniana da elasticidade estuda a deformação de corpos sólidos sob a acção de forças. Como é bem sabido, desde que não haja deformações disruptivas, os corpos respondem segundo a Lei de Hooke.

No contexto relativístico a questão surgiu na análise experimental, aquando da deteção de ondas gravitacionais, dado que as primeiras tentativas de detecção envolviam barras ressonantes, que consistiam de cilindros metálicos de várias toneladas resfriados ao ponto de serem supercondutores e estarem suspensos por meio de um campo magnético intenso. Sabemos hoje que as ondas gravitacionais só podem ser inequivocamente detectadas interferometricamente por meio de interferômetros cujos braços têm vários quilómetros de distância. Os braços dos detectores LIGO têm 4 km de extensão. Mas o problema das barras ressonantes deu origem à teoria relativística de elasticidade.

Em 1972 surgiu um trabalho de referência devido a Brandon Carter e Hermann Quintana que colocou o problema da deformação elástica relativística sob bases matematicamente covariante e consistente com a Relatividade Geral. Consideram-se duas variedades:  $M$  (espaço-tempo) com 4 dimensões e uma outra,  $m$ , que representa matematicamente o corpo deformado em 3 dimensões. Define-se então um mapa entre as duas variedades de modo que os objetos fundamentais para se estudar a deformação dos corpos, como o tensor das tensões e o tensor energia-momento da matéria elástica, podem ser construídos de forma completamente covariante.

## **Capítulo 6- Remoção de singularidades cosmológicas em Loop Quantum Cosmology**

José Velhinho

Gravitação Quântica:

- Teoria das Cordas Quânticas (Relatividade Geral em ordem mais baixa, ...)
- Loop Quantum Cosmology (Holonomia).

Cosmologia Quântica (Hartle-Hawking 1983) baseado no formalismo canónico de Bryce DeWitt (1967).

Uma drástica redução do número de graus de liberdade permite entender as condições iniciais para o nosso Universo e as condições para a inflação.

A cosmologia quântica no contexto da Loop Quantum Cosmology permite uma alteração da taxa de expansão, e potencialmente a remoção de singularidades cosmológicas.

**28 de maio de 2019**  
**Orfeu Bertolami**