

# Equações Fundamentais da Relatividade Geral h

## Introdução

A Relatividade Geral, formulada por Albert Einstein, é a teoria geométrica da gravitação e a descrição atual da gravidade na física moderna. Essencialmente, ela descreve a gravidade não como uma força, mas como uma curvatura do espaço-tempo causada pela massa e energia. As equações de campo de Einstein são o coração desta teoria, descrevendo como a matéria e a energia curvam o espaço-tempo.

## 1 O Tensor de Einstein

O tensor de Einstein ( $G_{\mu\nu}$ ) descreve a curvatura do espaço-tempo. Ele é definido em termos do tensor de Ricci ( $R_{\mu\nu}$ ) e do escalar de Ricci ( $R$ ):

$$G_{\mu\nu} = R_{\mu\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu\nu}R$$

onde  $g_{\mu\nu}$  é o tensor métrico, que descreve a geometria do espaço-tempo.

### 1.1 Tensor de Ricci

O tensor de Ricci é obtido pela contração do tensor de Riemann ( $R^\rho_{\mu\sigma\nu}$ ):

$$R_{\mu\nu} = R^\rho_{\mu\rho\nu}$$

O tensor de Riemann, por sua vez, é definido em termos das derivadas da conexão de Christoffel ( $\Gamma^\lambda_{\mu\nu}$ ):

$$R^\rho_{\mu\sigma\nu} = \partial_\sigma \Gamma^\rho_{\mu\nu} - \partial_\nu \Gamma^\rho_{\mu\sigma} + \Gamma^\rho_{\kappa\sigma} \Gamma^\kappa_{\mu\nu} - \Gamma^\rho_{\kappa\nu} \Gamma^\kappa_{\mu\sigma}$$

### 1.2 Escalar de Ricci

O escalar de Ricci é obtido pela contração do tensor de Ricci com o tensor métrico:

$$R = g^{\mu\nu} R_{\mu\nu}$$

### 1.3 Conexões de Christoffel

As conexões de Christoffel, também conhecidas como símbolos de Christoffel do segundo tipo, são dadas por:

$$\Gamma_{\mu\nu}^{\lambda} = \frac{1}{2}g^{\lambda\sigma} (\partial_{\mu}g_{\nu\sigma} + \partial_{\nu}g_{\mu\sigma} - \partial_{\sigma}g_{\mu\nu})$$

## 2 As Equações de Campo de Einstein

As equações de campo de Einstein relacionam a curvatura do espaço-tempo com a distribuição de massa e energia nele contida. Elas são escritas como:

$$G_{\mu\nu} = \frac{8\pi G}{c^4}T_{\mu\nu}$$

onde:

- $G_{\mu\nu}$  é o tensor de Einstein.
- $G$  é a constante gravitacional de Newton.
- $c$  é a velocidade da luz no vácuo.
- $T_{\mu\nu}$  é o tensor de energia-momento, que descreve a densidade e o fluxo de energia e momento na matéria.

A constante  $\frac{8\pi G}{c^4}$  é conhecida como a constante de acoplamento gravitacional.

## 3 A Equação Geodésica

As geodésicas representam o caminho de menor ação entre dois pontos no espaço-tempo curvo. Para partículas em queda livre sob a influência da gravidade, suas trajetórias seguem as geodésicas, descritas pela seguinte equação:

$$\frac{d^2x^{\mu}}{d\tau^2} + \Gamma_{\alpha\beta}^{\mu} \frac{dx^{\alpha}}{d\tau} \frac{dx^{\beta}}{d\tau} = 0$$

onde:

- $x^{\mu}(\tau)$  são as coordenadas da partícula em função do tempo próprio  $\tau$ .
- $\Gamma_{\alpha\beta}^{\mu}$  são as conexões de Christoffel.

## 4 O Tensor de Energia-Momento

O tensor de energia-momento ( $T_{\mu\nu}$ ) descreve o conteúdo de energia e momento do espaço-tempo. Sua forma específica depende do tipo de matéria ou campo presente. Por exemplo, para um fluido perfeito, o tensor de energia-momento é dado por:

$$T^{\mu\nu} = (\rho + \frac{p}{c^2})u^{\mu}u^{\nu} - pg^{\mu\nu}$$

onde:

- $\rho$  é a densidade de energia.
- $p$  é a pressão.
- $u^\mu$  é a quadrivelocidade do fluido.

## 5 Conclusão

As equações apresentadas aqui formam a base da Relatividade Geral, descrevendo a interação fundamental da gravidade como a curvatura do espaço-tempo causada pela presença de massa e energia. Estas equações têm implicações profundas para a nossa compreensão do universo, desde a dinâmica dos buracos negros e ondas gravitacionais até a evolução do próprio cosmos.