

**FACULTÉ DES ARTS ET DES SCIENCES**  
**DÉPARTEMENT DE PHYSIQUE**  
**HIVER 2023**

**PLAN DE COURS**

---

**Sigle du cours:** PHY 3070

**Titre du cours:** Relativité 2

**Nombre de crédits:** 3

**Professeur:** Paul Charbonneau (B-3013; 343-2332; paulchar@astro.umontreal.ca)

---

### **Description et buts du cours**

Ce cours est offert aux étudiant(e)s de troisième année inscrit(e)s au premier cycle en physique (incluant les programmes bidisciplinaires mathématique+physique et physique+informatique). Le cours PHY-1652, *Relativité 1*, est pré-requis.

Le cours vise à introduire les bases expérimentales, physiques, et mathématiques de la relativité générale. Le corpus théorique du cours se penche sur les deux aspects essentiels et complémentaires de la relativité générale, vue ici principalement comme une théorie de la gravité: (1) comment s'expriment les lois de la physique en espace-temps courbe, et (2) comment la masse-énergie courbe l'espace-temps. Les tests et vérifications classiques de la théorie sont couverts, ainsi que des développements plus récents tels la détection des ondes gravitationnelles, les trous noirs, et les modèles cosmologiques de l'expansion de l'Univers.

### **Horaire des cours, Hiver 2023**

- Mardi 10:30-12:20, B-2061, Campus MIL
- Jeudi 13:30-14:20, A-3521, Campus MIL
- TP: Lundi 16:30-17:20, B-2061, Campus MIL

### **Manuel de cours et ouvrages de référence**

Des notes couvrant l'ensemble de la matière seront disponibles via la page Web du cours. L'achat de l'ouvrage suivant demeure très très très fortement recommandé:

J. B. Hartle, *Gravity. An Introduction to Einstein's General Relativity*, Addison-Wesley (2003)

Du matériel supplémentaire (images, animations) sera également distribué via la page Web du cours, en complément aux notes et à cet ouvrage. Voici quelques autres références bibliographiques d'intérêt:

A. Barrau & J. Grain, *Relativité Générale* (2ème éd.), Dunod (2016)

Carroll, S.M., *Spacetime and Geometry*, Cambridge University Press (réédition 2019),

Misner, C.W., Thorne, K.S., & Wheeler, J.A., *Gravitation*, W.H. Freeman &co. (1973),

Schutz, B., *A First Course in General Relativity*, (2<sup>nd</sup> ed.) Cambridge University Press (2009),

Einstein, A., *The Meaning of Relativity* (5ème éd.), Princeton University Press (1953).

## Évaluation

- Examen mi-session, 40% de la note finale;
- Deux rapports de mini-Projets 10% de la note finale.
- Examen final, “take-home” de 48 heures, couvrant l’ensemble de la matière, 50% de la note finale.

## Page Web

La page Web suivante inclut un horaire détaillé de chaque cours, et donne accès à des copies du matériel didactique supplémentaire présenté en classe (images, animations, etc);

<http://www.astro.umontreal.ca/~paulchar/phy3070/phy3070.html>

---

## MATIÈRE COUVERTE

### 1. Introduction: le principe d’équivalence

- 1.1 Introduction
- 1.2 Masses inertielle et gravitationnelle
- 1.3 L’argument de Galilée
- 1.4 Le principe d’équivalence
- 1.5 Tests du principe d’équivalence
- 1.6 La gravité n’est pas une force
- 1.7 Limites du principe d’équivalence: les effets de marée
- 1.8 Le programme théorique

### 2. Rappel: la relativité restreinte

- 2.1 La relativité Galiléenne
- 2.2 L’espace-temps
- 2.3 Interlude mathématique: vecteurs et tenseurs
- 2.4 Formulation invariante des Lois Physiques

### 3. Description mathématique de la courbure

- 3.1 Les cinq postulats d’Euclide
- 3.2 Mesure et géométrie
- 3.3 Métrique localement Euclidienne
- 3.4 La dérivée covariante
- 3.5 Calcul des coefficients de connexion
- 3.6 L’équation géodésique
- 3.7 Lois de conservation et vecteurs de Killing

### 4. Les tests de la théorie

- 4.1 La métrique de Schwarzschild
- 4.2 Les unités géométriques
- 4.3 Orbites dans la métrique de Schwarzschild
- 4.4 Le redshift gravitationnel

- 4.5 La dilatation gravitationnelle du temps
- 4.6 Précession de l'orbite de Mercure
- 4.7 Déviation de la lumière par le soleil
- 4.8 Délai temporel dans la propagation de la lumière

## 5. La matière-énergie courbe l'espace-temps

- 5.1 Courbure: le tenseur de Riemann
- 5.2 Source: le tenseur de stress-énergie
- 5.3 L'équation du champ d'Einstein
- 5.4 La limite Newtonienne
- 5.5 La constante cosmologique
- 5.6 Lentilles gravitationnelles

## 6. Les ondes gravitationnelles

- 6.1 Linéarisation des équations du champ
- 6.2 Solutions ondulatoires
- 6.3 La détection des ondes gravitationnelles
- 6.4 Évidences et scénarios astrophysiques

## 7. Cosmologie

- 7.1 La métrique de Robertson-Walker-Friedmann
- 7.2 Les équations de Friedmann-Lemaitre
- 7.3 Univers Einstein-de Sitter:  $p = k = \Lambda = 0$
- 7.4 Univers courbes:  $p = \Lambda = 0$  et  $k = \pm 1$
- 7.5 Univers courbes à constante cosmologique  $\Lambda \neq 0$
- 7.6 Évidences et scénarios astrophysiques

## 8. Trous noirs

- 8.1 Dérivation de la métrique de Schwarzschild
- 8.2 Sur l'horizon
- 8.3 Sous l'horizon
- 8.4 Trou noir en rotation
- 8.5 Le mécanisme de Hawking
- 8.6 Évidences et scénarios astrophysiques

## 9. Sur les frontières

- 9.1 L'inertie et le principe de Mach
- 9.2 La nature de l'espace-temps
- 9.3 Singularités et gravité quantique