



Plan de cours, automne 2023

PHYSIQUE STATISTIQUE I

PHQ 344

Cours du B. Sc. (physique)

Ce document contient :

/ Mise en contexte / Objectifs / Plan de la matière / Méthode pédagogique
/ Bibliographie / Calendrier

COURS	
Titre :	Physique statistique I
Sigle :	PHQ 344
Crédits :	3
Travaux dirigés :	1 heure/sem
Travail personnel :	5 heures/sem.
Session :	3

PROFESSEURS	
Nom :	André-Marie Tremblay
Bureau :	D2-1065
Tél:	821-8000 p. 62058
Internet:	tremblay@physique.usherbrooke.ca
Disponibilité :	Rendez-vous courriel
Moniteur:	Nicolas Martin
Bureau :	D3-1056
Tél:	821-8000 poste 67681
Disponibilité:	Rendez-vous courriel
	Nicolas.B.Martin@USherbrooke.ca

PLACE DU COURS DANS LE PROGRAMME

Type de cours :	obligatoire
Cours préalables :	MAT 298
Cours concomitants :	
Cours antérieurs utiles :	PHQ-201

Le site www.usherbrooke.ca/moodle contiendra les dernières mises à jour ainsi que toutes les informations sur l'horaire, le plan de cours, les notes etc.

MISE EN CONTEXTE DU COURS

Les cours de physique statistique inscrits au programme familiarisent l'étudiant avec les concepts physiques faisant intervenir un nombre très grand de particules. La mécanique statistique constitue avec la mécanique quantique et la relativité l'un des piliers de la physique moderne. Elle a pour but d'expliquer le comportement de systèmes macroscopiques (incluant un très grand nombre de particules) à partir de leurs propriétés microscopiques. C'est de façon générale la mécanique quantique qui décrit les propriétés et l'évolution des systèmes physiques à l'échelle microscopique. La mécanique statistique est donc construite sur cette description quantique. Il est important que les étudiants perçoivent d'emblée la physique statistique comme une théorie fondamentale, et non pas comme une simple tentative de justifier *a posteriori* la thermodynamique. La démarche consiste donc à présenter la mécanique statistique élémentaire et à expliquer son articulation avec la thermodynamique et la théorie cinétique pour en dégager un point de vue unifié et moderne. La physique statistique permet ainsi de comprendre des phénomènes que les autres branches ne peuvent expliquer en raison d'une approche déterministe. Des applications concrètes peuvent être trouvées dans essentiellement tous les domaines de la physique : physique des solides, électromagnétisme, astrophysique, cosmologie, superfluides, etc. Les deux cours de physique statistique sont obligatoires pour les étudiants du programme de physique.

Le premier cours, Physique statistique I, introduit les notions de probabilités et de statistiques nécessaires à la description statistique de systèmes à l'équilibre thermique; il fait ensuite le lien avec la thermodynamique et donne les outils nécessaires pour faire des calculs concrets à partir de modèles microscopiques.

Une des notions les plus importantes du cours de physique statistique est celle de quantités émergentes, c'est-à-dire ne pouvant pas être « devinées » à partir du comportement de quelques particules seulement. La température absolue représente l'exemple le plus simple de quantité émergente. L'entropie en est une autre.

DESCRIPTEUR

Objectifs : Maîtriser les notions fondamentales de probabilités et de statistique. Apprendre et appliquer les notions de base de physique statistique et de thermodynamique.

Contenu : Notions de probabilités. Ensembles statistiques, états microscopiques et macroscopiques. Entropie, température et lois de la thermodynamique. Machines thermiques. Potentiels thermodynamiques et relations de Maxwell. Ensemble canonique et applications : énergie libre, fonction de partition, gaz parfait, théorème d'équipartition, paramagnétisme, chaleur spécifique des solides.

OBJECTIFS GÉNÉRAUX

Le cours PHQ 344 vise à :

- faire approfondir les notions fondamentales de probabilité et de statistique;
- faire apprendre les notions de base de la physique statistique et de la thermodynamique.

OBJECTIFS SPÉCIFIQUES

À la fin du cours PHQ 344, et pour atteindre les objectifs généraux, l'étudiant devra être capable de

- énumérer les variables thermodynamiques;
- expliquer les notions d'équilibre, de température, de probabilité, de distribution et d'entropie;
- expliquer les transformations des gaz parfaits;
- différencier les états macroscopique et microscopique;

-
- utiliser les principes de la thermodynamique pour résoudre des problèmes liés aux propriétés thermiques de substances à l'équilibre, tel la chaleur spécifique etc...
 - calculer la fonction de partition dans quelques cas simples comme les gaz parfaits classiques, les systèmes de spin.
 - obtenir de la fonction de partition des quantités thermodynamiques observables, comme la chaleur spécifique, etc...
 - mettre en pratique les notions de physique statistique à l'étude de systèmes en contact thermique;
 - expliquer les aspects historiques du développement de la thermodynamique.
 - expliquer pourquoi la température absolue et l'entropie sont deux exemples de quantité émergentes.

COMPÉTENCES

La physique statistique fournit les outils nécessaires pour passer d'une description microscopique quantique à une description macroscopique et ouvre la voie à une grande gamme de domaines comme l'hydrodynamique, la physique du solide, la physique des plasmas, l'astrophysique etc.

PLAN DE LA MATIÈRE

Semaine	Cours	Contenu, thèmes	Objectifs spécifiques
1 et 2	1-2 3-4 5	1. Introduction Survol du domaine, plan de cours Marche aléatoire et distribution binomiale Discussion générale de la marche aléatoire	- Reconnaître la distribution statistique appropriée à un problème donné: Binomiale, Poisson, Gauss. - Obtenir pour ces problèmes la moyenne, l'écart type. - Appliquer ces notions à la marche aléatoire.
3	6-7-8	2. Description statistique de systèmes de particules Formulation statistique du problème mécanique Interaction entre systèmes macroscopiques	- Expliquer la notion d'ensemble statistique et le postulat de base pour l'ensemble microcanonique. - Calculer la densité d'états pour un système macroscopique simple, classique ou quantique. - Expliquer ce qu'est une interaction thermique ou une interaction mécanique entre deux systèmes. - Décrire un processus quasi-statique. - Manipuler des différentielles inexactes.
4-6	9-10-11 12-13 14-15 16	3. Thermodynamique statistique Irréversibilité et l'atteinte de l'équilibre Interactions thermiques entre systèmes macroscopiques Interaction quelconque entre systèmes macroscopiques Résumé: Les lois de la thermodynamique	- Expliquer la relation entre probabilité et nombre d'états accessibles. - Différencier processus réversible et irréversible. - Interpréter la température comme une dérivée du nombre d'états accessibles - Relier le nombre d'états accessibles à l'entropie. - Expliquer l'augmentation d'entropie dans un processus irréversible - Expliquer la mesure de la température - Décrire un réservoir de chaleur - Expliquer l'étroitesse de la distribution de probabilité pour un système macroscopique - Démontrer la croissance monotone de la température en fonction de l'énergie. - Expliquer les forces généralisées - Expliquer les propriétés générales de l'entropie et son comportement lorsque T s'annule. - Calculer l'entropie à l'aide de la densité d'états. - Connaître les trois lois de la thermodynamique et la relation entre entropie et probabilité.
EXAMEN INTRASEMESTRIEL			

7-8	17 à 19 20 - 21	4. Paramètres macroscopiques et leur mesure Mesures de la température, de la chaleur et du travail Machines thermiques et réfrigérateurs	<ul style="list-style-type: none"> - Expliquer comment on mesure le travail, la chaleur, la température absolue, la chaleur spécifique, l'entropie - Énumérer des conséquences de la définition absolue de l'entropie - Reconnaître un paramètre extensif et un paramètre intensif. - Calculer les résultats d'expériences simples où des systèmes de chaleur spécifique différente sont mis en contact. - Expliquer le cycle de Carnot, sa signification physique et son importance historique. - Expliquer le processus de la réfrigération
8,9, et 10	22 23-24 25 - 26 27 29	5. Applications simples de la thermodynamique macroscopique Équations de base Propriétés des gaz parfaits Potentiels thermodynamiques Relations thermodynamiques pour les substances homogènes Expansion libre et avec étranglement Nombre de particules comme variable thermodynamique	<ul style="list-style-type: none"> - Expliquer pourquoi l'énergie interne d'un gaz parfait ne dépend que de sa température. - Comprendre la différence entre chaleur spécifique à pression et à volume constant, pour un gaz parfait. - Connaître la relation entre volume et pression dans un processus adiabatique. - Expliquer comment calculer l'entropie à partir de la chaleur spécifique. - Expliquer l'origine des différents potentiels thermodynamiques et les relations de Maxwell. - Utiliser les transformations de Legendre pour passer d'un potentiel thermodynamique à un autre. - Savoir comment calculer en principe la différence entre les chaleurs spécifiques à pression et volume constant pour une substance homogène quelconque. - Savoir comment obtenir l'énergie interne et l'entropie d'une substance dans un cas quelconque. - Comprendre l'utilité de l'enthalpie dans un processus d'étranglement et expliquer pourquoi ce processus peut autant refroidir que réchauffer. - Savoir ce qu'est le développement du viriel pour la pression. - Calculer les changements d'énergie et d'entropie associés à différents processus. - Calculer certaines propriétés thermodynamiques étant donné certaines observations expérimentales.

11	30- 31- 32- 33	<p>6. Méthodes de calcul : ensemble canonique Divers ensembles représentatifs de situations d'intérêt physique : microcanonique, canonique, grand canonique</p> <p>Calculs dans l'ensemble canonique et grand canonique et connexion avec la thermodynamique</p> <p>Les ensembles peuvent se déduire du principe d'entropie maximale et de la méthode des multiplicateurs de Lagrange</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Connaître la distribution canonique et expliquer sa signification physique et sa relation avec la distribution microcanonique. - Décrire l'utilité de la distribution canonique pour des problèmes simples comme des systèmes de spins libres. - Connaître la définition de la fonction de partition. - Calculer des valeurs moyennes et des quantités thermodynamiques à partir de la fonction de partition. - Expliquer la différence entre les ensembles canoniques, grand canonique et microcanoniques pour ce qui est des fluctuations. - Connaître la méthode des multiplicateurs de Lagrange - Utiliser la fonction de partition pour résoudre des problèmes de systèmes sans interaction. - Utiliser la méthode des multiplicateurs de Lagrange pour déduire les ensembles
12	34 35 36 37 38 39 40	<p>7. Applications simples des ensembles canonique et grand canonique</p> <p>Méthode d'approche générale</p> <p>Gaz parfait monoatomique. Paradoxe de Gibbs</p> <p>Théorème d'équipartition</p> <p>Modèle d'Einstein pour la chaleur spécifique des solides</p> <p>Paramagnétisme</p> <p>Calcul dans l'ensemble grand canonique: hémoglobine et transport d'oxygène</p>	<ul style="list-style-type: none"> - Dériver les propriétés générales de la fonction de partition et sa relation à l'énergie, l'entropie. - Utiliser la fonction de partition pour comprendre les gaz parfaits. - Comprendre le paradoxe de Gibbs et expliquer sa solution. - Expliquer le domaine d'applicabilité de la limite classique de la physique statistique. - Comprendre et appliquer le théorème d'équipartition. - Connaître le modèle d'Einstein pour la chaleur spécifique des solides. - Comprendre le paramagnétisme pour un spin S général avec la fonction de partition. - Application simple et intégrateur de l'ensemble grand canonique et canonique : hémoglobine et transport d'oxygène.
	41	Révision	

MÉTHODE PÉDAGOGIQUE

- Méthode magistrale, mais où il y aura aussi des discussions en équipe suite à des questions à choix multiples auxquelles il sera possible de répondre avec des cartons identifiés à chacune des réponses possibles.
- Horaire :
 - Lundi 10h30 à 11h55 (avec pause de 10 minutes) suivi d'une session d'exercices jusqu'à 12h20 au D3-2030
 - Mercredi, de 13h30 à 14h55 (avec pause de 10 minutes) suivi d'une session d'exercices jusqu'à 15h20 au D4-2025
 - **Il n'y aura pas de cours le lundi 28 août ni le mercredi 30 août. Ces deux cours sont remis aux dates suivantes**
 - - **Le vendredi le premier septembre de 15h30 à 17h30 au local D3-2029**
 - - **Le vendredi 8 septembre de 15h30 à 17h30 au local D3-2029**
 - Le cours du mercredi 18 novembre sera une session d'exercices avec Nicolas Martin.
- Les sessions d'exercices permettront de revenir sur les questions difficiles du devoir et de faire d'autres exercices.
- Il y aura un devoir aux deux semaines.

ÉVALUATION

1. **Moyens d'évaluation:** Un intra, un final et un devoir par deux semaines environ. Autant que possible, les examens seront faits en présence, mais il se peut que d'autres méthodes doivent être utilisées selon la situation épidémiologique.
 - a. **N.B.** Il y aura plus de temps que nécessaire d'alloué pour l'examen intra afin d'enlever de la pression reliée au facteur temps. L'expérience sera répétée pour le final si elle s'avère un succès.
2. **Types de questions:** Surtout des problèmes. Parfois quelques questions sur la théorie présentée en cours.
3. **Pondération:**

Examen partiel, deux heures :	35 %
Examen final, trois heures :	50 %
Devoirs:	15 %

En accord avec la politique de l'Université, s'il était impossible de tenir un examen partiel, la pondération sera remise sur le final.

 - Les devoirs sont en fait plus importants que leur pondération ne le suggère, car ils permettent d'assimiler la matière. **Cependant, ils ne remplacent pas une relecture soignée (d'environ une heure par heure de cours) du matériel présenté en classe.** Cette relecture doit être faite *avant* le cours suivant.

4. Moments prévus pour l'évaluation: Voir le calendrier.

5. Critères d'évaluation:

- Façon de poser le problème (Reformulation, choix des équations).
- Exactitude de l'algèbre de la solution. (Validité du raisonnement)
- Validité des interprétations physiques.
- Unités et résultats numériques.

MODIFICATIONS À L'HORAIRE OFFICIEL

Il n'y aura pas de cours le lundi 28 août ni le mercredi 30 août. Ces deux cours sont remis aux dates suivantes

- Le vendredi le premier septembre de 15h30 à 17h30 au local D3-2029
- Le vendredi 8 septembre de 15h30 à 17h30 au local D3-2029

o Le cours du mercredi 8 novembre sera donné par Nicolas Martin

BIBLIOGRAPHIE

Volume de référence de base:

Fundamentals of statistical and thermal physics
F. Reif
(McGraw Hill, New York, 1965) QC 174.8 R443 1965
(Plus imprimé). Disponible sur
www.amazon.com
www.alibris.com
Chercher : statistical and thermal physics Reif

Excellents volumes récents en français. L'ordre de présentation n'est pas le même mais pas mal tous les sujets y sont:

Physique statistique : des processus élémentaires aux phénomènes collectifs
Christophe Texier, Guillaume Roux
(Dunod, Malakoff, 2017) QC 174.8 T49 2017
Physique statistique
C. Ngô et H. Ngô
(Dunod, Paris, 2008) QC 174.8 N466 1995

Livre grand public au sujet des statistiques et des probabilités:

[*The Drunkard's Walk: How Randomness Rules Our Lives*](#)
Leonard Mlodinow
(Pantheon books, New York, 2008)

Volume plus simple, discutant à fond les notions de base:

Reasoning about luck : probability and its uses in physics

V. Ambegaokar
(Cambridge, New York, 1996) QC 174.8 A43 1996

Deux autres références courantes de niveau un peu plus élémentaire:

Physique statistique (Statistical Physics) (Berkeley physics course, vol. 5)

F. Reif
(McGraw Hill, New York, 1964) QC 21 B47 V5.F

Thermal Physics (Second Edition)

Charles Kittel
(W.H. Freeman, New York, 1980) QC 311.5 K52 1980

Référence un peu plus avancée que le manuel de base. En français et très complet:

Physique statistique

B. Diu, C. Guthmann, D. Lederer, B. Roulet
(Hermann, Paris, 1989) QC 174.8 E54 1989

Référence avancée contenant entre autres une bonne discussion de la convexité:

Du microscopique au macroscopique (Tomes I et II)

Roger Balian
(École polytechnique, Palaiseau, 1982) QC 174.8 B35 1982 V.1 et V.2

Un petit manuel de lecture facile, distrayant sur l'histoire de la physique en général et de la thermodynamique en particulier.

Petite histoire de la physique

Jean-Pierre Maury
(Larousse, Paris, 1992) QC 7 M37 1992

Un ouvrage divertissant et très informatif sur l'histoire des sciences. Très recommandé.

A short Story of Nearly Everything, (La traduction française existe: Une histoire de tout, ou presque...)

Bill Bryson
(Black Swan book, 2004)

Notes de cours sur l'histoire des sciences, dont la thermodynamique. Recommandé.

<http://www.physique.usherb.ca/~dsenech/HS> (lien "Notes de cours")

David Sénéchal

Écrits originaux de fondateurs de la physique statistique. Lecture difficile mais pas inaccessible, particulièrement pour le premier titre.

Investigations on the theory of the Brownian movement

A. Einstein
(Dover, New York, 1956) QC 184 E513 1956

Elementary principles in statistical mechanics

J. Willard Gibbs
(Ox Bow Press, Woodbridge Connecticut, 1981) QC 174.8 G52 1960

Livres dont certaines figures ont été tirées

Brevet élémentaire: Notions de sciences physiques et naturelles

Par une réunion de professeurs
(Librairie générale de l'enseignement libre, Paris, 1937)

Traité élémentaire de physique
Georges Perras
(Beauchemin, Montréal, 1938)

La conquête de l'énergie, de la fronde à l'atome
L. Sprague de Camp
(Les deux coqs d'or. 1962)