

PHY745 — Modélisation de la matière et calcul quantique

Cours

Type de cours : optionnel
Cours préalables : PHQ430 ou équivalent
Crédits: 3
Horaire: mercredi 10h30-12h20, vendredi 8h30-10h20
Local: D3-2031

Enseignant

Nom : Stefanos Kourtis
Bureau : D2-1069
Courriel : stefanos.kourtis@usherbrooke.ca

1 Mise en contexte

Depuis la proposition d'un simulateur quantique universel par Feynman¹, la simulation de la matière quantique occupe une place centrale dans le domaine du calcul quantique. En traitant des modèles de particules et de spins, ce cours démontre le lien entre les propriétés de la matière condensée quantique et les concepts-clés de l'informatique quantique et du calcul quantique.

2 Acquis d'apprentissage ciblés

Objectif principal — se familiariser avec l'*intrication quantique* et l'*entropie d'intrication* et leur importance dans les domaines de la matière condensée quantique et du calcul quantique.

Objectifs spécifiques — À la fin de ce cours, l'étudiant sera capable de :

- utiliser la matrice densité afin de décrire les états quantiques purs et mélangés;
- quantifier l'entropie et l'intrication d'états quantiques;
- exprimer l'évolution temporelle et la mesure d'états quantiques avec des circuits quantiques;
- élucider le lien entre le calcul quantique et la simulation quantique de la matière;
- catégoriser les états quantiques en fonction de la croissance de leur entropie d'intrication;
- caractériser des systèmes quantiques en utilisant le formalisme d'états produits de matrices.

3 Activités pédagogiques

- *Exposés magistraux* : une fois par semaine.
- *Séances d'exercices* : élaborations et exercices dirigés; une fois par semaine.
- *Séances questions-réponses* : une fois par semaine.
- *Devoirs hebdomadaires* : problèmes à résoudre et à remettre pour évaluation.
- *Lectures* : matières hebdomadaires à étudier *avant* les séances d'exercices et de questions-réponses.

¹R. P. Feynman, *Simulating Physics with Computers*, [International Journal of Theoretical Physics 21, 467 \[pdf\]](#)

4 Évaluation

- Devoirs : 50% de la note finale.
- Examen final : 40% de la note finale.
- Présence et participation: 10% de la note finale.

Remarques:

- La date de l'examen final sera fixée par la faculté.
- Les devoirs hebdomadaires sont dus avant 23h59 le dimanche de la semaine *suivante*.
- Les devoirs doivent être élaborés par chaque étudiant.e *individuellement*.
- Les devoirs sont notés ✓ / ✗; les exercices notés ✗ peuvent être révisés et soumis à nouveau.
- La participation au cours implique une présence active aux séances d'exercices.

5 Contenu

Partie I : Éléments de base de l'informatique quantique

- *Semaine 1* : théorie de probabilités (variables aléatoires, corrélations, entropie de Shannon), algèbre linéaire (espace d'Hilbert, opérateurs hermitiens, décompositions).
- *Semaine 2* : postulats de la mécanique quantique, décomposition de Schmidt, impossibilité du clonage quantique.
- *Semaines 3-4* : postulats de la mécanique quantique en termes de la matrice de densité, kung-fu avec la matrice de densité, entropie von Neumann, entropie d'intrication.

Partie II : Matière et calcul quantiques

- *Semaine 5* : portes quantiques, ensembles universels de portes.
- *Semaine 6* : éléments de base de la théorie de complexité, modèle circuit du calcul quantique.
- *Semaine 7* : simulation quantique, modèle adiabatique du calcul quantique.

Partie III : Lois d'intrication et états produits de matrices

- *Semaines 8-9* : lois de volume et de superficie de l'intrication.
- *Semaines 10-11* : formalisme d'états produits de matrices, applications à la modélisation de la matière quantique et du calcul quantique.
- *Semaine 12* : révision.

6 Matériel didactique

Le cours suit des chapitres des ouvrages suivants :

- M. Mézard and A. Montanari, *Information, Physics, and Computation*, Oxford Graduate Texts (2009); version prépublication disponible à <https://web.stanford.edu/~montanar/RESEARCH/book.html>.
- M. A. Nielsen and I. L. Chuang, *Quantum Computation and Quantum Information*, 10th Anniversary Edition, Cambridge University Press (2010). [les pages pertinentes sont disponibles sur Moodle]
- A. Childs, *Lecture Notes on Quantum Algorithms*; disponible à <https://www.cs.umd.edu/~amchilds/qa/>.
- J. C. Bridgeman and C. T. Chubb, *Hand-waving and Interpretive Dance: An Introductory Course on Tensor Networks*, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* **50**, 223001 (2017).

Bibliographie supplémentaire :

- M. M. Wilde, *Quantum Information Theory*, 2nd Edition, Cambridge University Press (2017); version prépublication disponible à <https://arxiv.org/abs/1106.1445>
- B. Zeng, X. Chen, D.-L. Zhou, X.-G. Wen, *Quantum Information Meets Quantum Matter*, Springer, New York, NY (2019); disponible à <https://link.springer.com/book/10.1007/978-1-4939-9084-9>.
- V. Vedral, *Quantifying entanglement in macroscopic systems*, *Nature* **453**, 1004 (2008); disponible à <https://vlatkovedral.physics.ox.ac.uk/nature07124.pdf>.
- L. Amico, R. Fazio, A. Osterloh, and V. Vedral, *Entanglement in many-body systems*, *Reviews of Modern Physics* **80**, 517 (2008); version prépublication disponible à <https://arxiv.org/abs/quant-ph/0703044>.
- U. Schollwöck, *The density-matrix renormalization group in the age of matrix product states*, *Annals of Physics* **326**, 96 (2011), version prépublication disponible à <https://arxiv.org/abs/1008.3477>.
- J. Preskill, *Lecture notes on quantum computation* disponible à <http://www.theory.caltech.edu/people/preskill/ph229/>.