



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CENTRO DE FILOSOFIA E CIÊNCIAS HUMANAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM FILOSOFIA

Disciplina: FIL 510058 - Estudos Avançados em Pesquisa I - Fundamentos de emaranhamento quântico.

Professores: Christian de Ronde

e-mail: cderonde@gmail.com

- **Carga horária total semestral: 60h/a**
- **Aulas:** Encontros síncronos nas quarta feiras, 14:30 às 16:00
Horário de atendimento: quarta feiras -feiras, 16:00 às 17:00 ou em outro horário a combinar com o professor

Ementa: O conceito do emaranhamento quântico. O contexto da criação e discussão do emaranhamento quântico na história da mecânica quântica. As tecnologias que permitem o emaranhamento quântico: tele transporte quântico, criptografia quântica ou computação quântica.

Objetivos: Esta disciplina tem o objetivo de discutir criticamente um dos conceitos centrais nos chamados filosofia e fundamentos da mecânica quântica, a saber, o do emaranhamento quântico. Hoje o conceito de emaranhamento quântico é considerado uma das noções mais características da teoria quântica, dando origem a um grande número de novas tecnologias, como tele transporte quântico, criptografia quântica ou computação quântica. Buscaremos discutir o processo de desenvolvimento histórico do conceito de emaranhamento, desde sua criação em 1935 por Albert Einstein e Erwin Schrödinger, e seu posterior desenvolvimento tecnológico a partir da década de 90 no contexto do processamento da informação quântica. Durante esta disciplina vamos abordar vários dos conceitos usados na formulação ortodoxa da teoria quântica, como 'estado puro', 'estado misto', 'partícula quântica', 'superposição quântica', entre outros.

Conteúdo programático:

- Contexto histórico da mecânica quântica.
- Criação do conceito de emaranhamento quântico.
- O debate filosófico em torno do emaranhamento quântico.
- Tecnologias quânticas baseadas em emaranhamento.

Cronograma por semana:

1. Postulado quântico de Max Planck y observações intensivas.
2. Formalismo do matricial do Heisenberg e formalismo ondulatório de Schrödinger. Regla de Born e interpretação da probabilidade quântica.
3. Niels Bohr: Princípio de correspondência e princípio de complementaridade.
4. Relações ou Princípio da Incerteza de Heisenberg.

5. Colapso quântico de Dirac e origem do “problema de medição”.
6. As O experimento de Einstein-Podolsky-Rosen. O gato de Schrödinger. Superposições quânticas e emaranhamento quântico.
7. Um mapa interpretativo: princípios metafísicos e formalismos. Heisenberg e o retorno do hilemorfismo aristotélico (causalidade final). Bohm e o retorno do atualismo newtoniano (causalidade eficiente).
8. Os problemas empiristas dentro da mecânica quântica: o “não-problemas”. A representação conceptual do formalismo matemático: Invariância e realidade física. Reversão de problemas: contextualidade e superposições.
9. Interpretação Standard do formalismo quântico e metafísica das partículas.
10. As correlações clássicas e as desigualdades de Boole-Bell. Experiência EPR de Alain Aspect.
11. Emaranhamento quântico e uma nova era tecnologica: tele transporte quântico, criptografia quântica ou computação quântica. Emaranhamento quântico como codificação de relacionamentos potenciales.
12. Realismo e anti-realismo do emaranhamento quântico.

Metodologia (atividades síncronas e assíncronas) e Avaliação: A disciplina é autocontende e não requer conhecimento prévio. O curso será realizado por meio de exposições de 1:30h, sempre às quarta feiras, das 14:30 às 16h. Haverá um intervalo de 15 min e o professor ficará das 16:30h às 17:30h à disposição para dúvidas e discussões adicionais, sempre por via ConferenciaWeb RPN da UFSC, cuja chamada se dará alguns minutos antes do início das aulas.

Haverá aulas expositivas e sessões de discussão dos textos da bibliografia básica. A cada semana, um dos participantes da disciplina ficará encarregado de entregar o fichamento de um dos textos indicados para a semana e postar esse fichamento em um fórum específico no Moodle até cada uma das datas indicadas no cronograma. Os demais participantes deverão interagir com dúvidas, apreciações críticas do texto, etc., nesse fórum. Essas atividades seram avaliadas e pontuadas para compor a nota da disciplina. Haverá um trabalho escrito de não mais do que 15 páginas sobre algum tema do curso a ser discutido com o professor e entregue até antes do final das aulas. O texto deverá ser na forma de um artigo.

Bibliografia

- Aerts, D., 1981, *The one and the many: towards a unification of the quantum a classical description of one and many physical entities*, Doctoral dissertation, Brussels Free University, Brussels.
- Aerts, D., 1984, “How do we have to change quantum mechanics in order to describe separated systems”, in *The Wave-Particle Dualism* pp. 419-431, S. Diner, D. Fargue, G. Lochak and F. Selleri (Eds.), Springer, Dordrecht.
- Aspect A., Grangier, P. & Roger, G., 1981, “Experimental Tests on Realistic Local Theories via Bell’s Theo- rem”, *Physical Review Letters*, **47**, 725-729.
- Barnum, H., 2003, “Quantum information processing, operational quantum logic, convexity,

- and the foundations of physics”, *Studies in History and Philosophy of Modern Physics*, **34**, 343-379.
- Bokulich, A. & Jaeger, G., 2010, *Philosophy of Quantum Information and Entanglement*, Cambridge University Press, Cambridge.
- Bohr, N., 1935, “Can Quantum Mechanical Description of Physical Reality be Considered Complete?”, *Physical Review*, **48**, 696-702.
- Bohr, N., 1948, “On the notions of causality and complementarity”, *Dialectica*, **2**, 312-319.
- Bruß, D., 2002, “Characterizing entanglement”, *Journal of Mathematical Physics*, **43**, 4237-4251.
- Bub, J., 2017, “Quantum Entanglement and Information”, *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Spring 2017 Edition)*, E.N. Zalta (ed.), URL = <https://plato.stanford.edu/archives/spr2017/entries/qt-entangle/>.
- Cabello, A., 2017, “Interpretations of quantum theory: A map of madness”, in *What is Quantum Information?*, pp. 138-143, O. Lombardi, S. Fortin, F. Holik and C. López (eds.), Cambridge University Press, Cambridge.
- Carnap, H., Hahn, H. & Neurath, O., 1929, “The Scientific Conception of the World: The Vienna Circle”, *Wissenschaftliche Weltauffassung*.
- da Costa, N. and de Ronde, C., 2013, “The Paraconsistent Logic of Quantum Superpositions”, *Foundations of Physics*, **43**, 845-858.
- da Costa, N. and de Ronde, C., 2014a, “Non-Reflexive Foundations for Quantum Mechanics”, *Foundations of Physics*, **44**, 1369-1380.
- da Costa, N. and de Ronde, C., 2014b, “The Paraconsistent Approach to Quantum Superpositions Reloaded: Formalizing Contradictory Powers in the Potential Realm”, preprint.
- de la Torre, A.C., Goyeneche, D. & Leitao, L., 2010, “Entanglement for all quantum states”, *European Journal of Physics*, **31**, 325-332.
- de Ronde, C., 2016b, “Representational Realism, Closed Theories and the Quantum to Classical Limit”, in *Quantum Structural Studies*, pp. 105-136, R. E. Kastner, J. Jeknic-Dugic and G. Jaroszkiewicz (Eds.), World Scientific, Singapore.
- de Ronde, C., 2016, “Probabilistic Knowledge as Objective Knowledge in Quantum Mechanics: Potential Immanent Powers instead of Actual Properties”, in *Probing the Meaning of Quantum Mechanics: Superpositions, Semantics, Dynamics and Identity*, pp. 141-178, D. Aerts, C. de Ronde, H. Freytes and R. Giuntini (Eds.), World Scientific, Singapore.
- de Ronde, C., 2020, “Unscrambling the Omelette of Quantum Contextuality (Part I): Preexistent Properties or Measurement Outcomes?”, *Foundations of Science*, **25**, 55-76.
- de Ronde, C., 2020, “The (Quantum) Measurement Problem in Classical Mechanics”, in *Probing the Meaning of Quantum Mechanics*, D. Aerts, J. Arenhart, C. de Ronde and G. Sergioli (Eds.), World Scientific, Singapore, in press.
- de Ronde, C., 2020, “Understanding Quantum Mechanics (Beyond Metaphysical Dogmatism and Naive Empiricism)”, preprint.
- de Ronde, C. & Fernández Mouján, R., 2018, “Epistemological vs. Ontological Relationalism in Quantum Mechanics: Relativism or Realism?”, in *Probing the Meaning of Quantum Mechanics*, pp. 277-318, D. Aerts, M.L. Dalla Chiara, C. de Ronde and D. Krause (Eds.), World Scientific, Singapore.
- de Ronde, C., Freytes, H. & Sergioli, G., 2019, “Quantum probability: A reliable tool for an agent or a source of reality”, *Synthese*, DOI:10.1007/s11229-019-02177-x.
- de Ronde, C. & Massri, C., 2017, “Kochen-Specker Theorem, Physical Invariance and Quantum Individuality”, *Cadernos da Filosofia da Ciencia*, **2**, 107-130.
- de Ronde, C. & Massri, C., 2018, “The Logos Categorical Approach to Quantum Mechanics: I. Kochen-Specker Contextuality and Global Intensive Valuations.”, *International Journal of Theoretical Physics*, DOI: 10.1007/s10773-018-3914-0.
- de Ronde, C. & Massri, C., 2019, “The Logos Categorical Approach to Quantum Mechanics: II. Quantum Superpositions and Measurement Outcomes.”, *International Journal of Theoretical Physics*, **58**, 1968-1988.
- de Ronde, C. & Massri, C., 2019, “A New Objective Definition of Quantum Entanglement as Potential Coding of Intensive and Effective Relations”, *Synthese*, DOI: 10.1007/s11229-019-02482-5.

- de Ronde, C. & Massri, C., 2020, "Against 'Particles' and 'Collapses' in Quantum Entanglement", sent (quant-ph/arXiv:1911.10990).
- D'Espagnat, B., 2006, *On Physics and Philosophy*, Princeton University Press, Princeton.
- Deutsch, D., 2004, *The Beginning of Infinity. Explanations that Transform the World*, Viking, Ontario.
- Dieks, D., 2020, "Identical Quantum Particles, Entanglement, and Individuality", *Entropy*, **22**, 134-140.
- Dirac, P.A.M., 1974, *The Principles of Quantum Mechanics*, 4th Edition, Oxford University Press, London.
- Earman, J., 2015, "Some Puzzles and Unresolved Issues About Quantum Entanglement", *Erkenntnis*, **80**, 303-337.
- Einstein, A., Podolsky, B. & Rosen, N., 1935, "Can Quantum-Mechanical Description be Considered Complete?", *Physical Review*, **47**, 777-780.
- Everett, H., 1957, "Relative State Formulation of Quantum Mechanics", *Review of Modern Physics*, **29**, 454.
- Freire Jr., O. 2015, *The Quantum Dissidents. Rebuilding the Foundations of Quantum Mechanics (1950-1990)*, Springer, Berlin.
- Fuchs, C.A. & Peres A., 2000, "Quantum theory needs no 'interpretation'", *Physics Today*, **53**, 70-71.
- Heisenberg, W., 1971, *Physics and Beyond*, Harper & Row, New York.
- Heisenberg, W., 1973, "Development of Concepts in the History of Quantum Theory", in *The Physicist's Conception of Nature*, pp. 264-275, J. Mehra (Ed.), Reidel, Dordrecht.
- Hilgevoord, J. & Uffink, J., 2001, "The Uncertainty Principle", *The Stanford Encyclopedia of Philosophy (Winter 2001 Edition)*, E. N. Zalta (Ed.), URL: <http://plato.stanford.edu/archives/win2001/entries/qt-uncertainty/>.
- Horodecki, R., Horodecki, P., Horodecki, M. & Horodecki, K. "Quantum entanglement", *Reviews of Modern Physics*, **81**, 865-942.
- Howard, D., 2005, "Albert Einstein as a Philosopher of Science", *Physics Today*, **58**, 34-40.
- Jammer, M., 1974, *The Philosophy of Quantum Mechanics*, John Wiley and sons, New York.
- Jammer, M., 1987, "The EPR Experiment in its Historical Development", En *Symposium on the foundations of Modern Physics 1987*, 129-149, P. Lathi and P. Mittelstaedt (Eds.), World Scientific, Singapore.
- Karakostas, V., 2007, "Nonseparability, Potentiality and the Context-Dependence of Quantum Objects", *Journal for General Philosophy of Science*, **38**, 279-297.
- Laurikainen, K.V., 1988, *Beyond the Atom, The Philosophical Thought of Wolfgang Pauli*, Springer-Verlag, Berlin.
- Maudlin, T., 2019, *Philosophy of Physics. Quantum Theory*, Princeton University Press, Princeton.
- Pauli, W., 1994, *Writings on Physics and Philosophy*, Enz, C. and von Meyenn, K. (Eds.), Springer-Verlag, Berlin.
- Rovelli, C., 1996, "Relational Quantum Mechanics", *International Journal of Theoretical Physics*, **35**, 1637- 1678.
- Smolin, L., 2007, *The trouble with physics. The rise of string theory, the fall of a science, and what comes next*, Mariner books, New York.
- Schrödinger, E., 1935, "The Present Situation in Quantum Mechanics", *Naturwiss*, **23**, 807-812. Translated to english in *Quantum Theory and Measurement*, J.A. Wheeler and W.H. Zurek (Eds.), 1983, Princeton University Press, Princeton.
- Shimony, A., 1995, "Degree of entanglement", *Annals New York Academy of Science*, **755**, 675-679.
- Sudbery, A., 2016, "Time, Chance and Quantum Theory", in *Probing the Meaning and Structure uantum Mechanics: Superpositions, Semantics, Dynamics and Identity*, pp. 324-339, D. Aerts, C. de Ronde, H. Freytes and R. Giuntini (Eds.), World Scientific, Singapore.