

Proposta para a contratação de um docente na área de **Sistemas Complexos e Termodinâmica Estocástica e Quântica**

1. Introdução

Entre os grandes desafios científicos de nosso tempo encontram-se os sistemas biológicos, dos mais simples como a dinâmica natural de uma célula aos mais complexos, como a complexa interação entre seres humanos e micro-organismos ou vírus, entre os quais as interações que conduziu o mundo a atual pandemia COVID-19. Os sistemas biológicos são complicados e mesmo quando são feitas propostas de simplificação para a construção de modelos físicos, ainda assim ficamos diante de sistemas complexos. Entretanto, tais sistemas podem e têm sido estudados pelas teorias desenvolvidas dentro da área de física estatística. Por outro lado, as enormes contribuições dentro da física estatística feitas por Planck e por Einstein estão presentes na origem da mecânica quântica. Dessa forma, a física estatística contribuiu significativamente para o entendimento de sistemas complexos, especificamente biológico, da mesma forma que contribuiu, e ainda contribui, para o desenvolvimento da física da matéria condensada.

No Instituto de Física, a pesquisa nas áreas propostas é desenvolvida por alguns grupos, entre os quais o grupo de Física Estatística, cujo número de docentes sofreu uma significativa redução nos últimos anos em função de aposentadorias. Embora os docentes remanescentes continuem a desenvolver pesquisa em áreas multidisciplinares como a modelagem de sistemas complexos, transições de fase de sistemas em equilíbrio e fora de equilíbrio e, mais recentemente, na área de termodinâmica estocástica clássica e quântica, há diversos desenvolvimentos recentes em sistemas complexos e termodinâmica estocástica que poderiam ser investigados por novos contratados, e que, ao que sabemos, têm recebido pouca ou nenhuma atenção por parte de docentes do IFUSP.

2. Sistemas Complexos

Embora tenha recebido maior visibilidade com o anúncio do Prêmio Nobel de 2021, a área de sistemas complexos tem estado na fronteira da pesquisa em física estatística por várias décadas. Mais especificamente, seu foco é a investigação de fenômenos que envolvem muitas unidades elementares que interagem entre si, produzindo uma dinâmica complexa.

Entre as questões científicas atuais e promissoras nesta área, destacamos as seguintes.

- A existência ou não de termalização na presença de competição entre desordem e interações. Aqui tem papel central o fenômeno de localização de muitos corpos, que corresponde à extensão da teoria da localização de Anderson para sistemas interagentes em temperatura finita. Existe uma grande atividade nessa área desde a segunda metade da década de 2000, quando surgiram as primeiras previsões teóricas confiáveis da ocorrência de tal localização e se desenvolveram as técnicas de investigação experimental de sistemas quânticos isolados por meio de redes óticas e átomos frios. Para uma revisão recente, veja a referência [1].
- A investigação de sistemas de matéria mole com o auxílio de técnicas desenvolvidas para meios elásticos desordenados. Trata-se de uma área cuja investigação teórica combina os fundamentais de geometria diferencial e física estatística para lidar com a importância dos defeitos para a compreensão do comportamento reológico de sistemas como tecidos biológicos, suspensões coloidais e materiais granulares. Panoramas recentes da área podem ser encontrados nas referências [2] e [3].
- O desenvolvimento e a utilização de métodos de aprendizagem de máquina para a compreensão e a caracterização de sistemas de muitos corpos clássicos e quânticos interagentes. Aqui o objetivo é, partindo de dados sobre o estado de um sistema extraídos por técnicas como simulações de Monte Carlo clássicas e quânticas, ou por meios de simuladores quânticos experimentalmente produzidos, utilizar métodos de aprendizagem de máquina para identificar os conjuntos de variáveis que permitem a determinação de propriedades estruturais e

dinâmicas de fases de um sistema, bem como da classe de universalidade de seu comportamento crítico. Uma visão geral do assunto pode ser encontrada na referência [4].

- A investigação de novas fases de sistemas fora do equilíbrio, notadamente aquelas induzidas pelo efeito de potenciais periódicos no tempo. Esse é um assunto estudado de longa data, mas cujo interesse ganhou novo vigor com o desenvolvimento de técnicas experimentais de laser e de espectroscopia ultrarrápida. Tem papel de destaque aqui a engenharia de Floquet de materiais quânticos, que permite induzir estados exóticos, com aplicações, por exemplo, em spintrônica. Uma revisão pode ser encontrada na referência [5].
- A recente e intensa atenção dada à disseminação do vírus da covid-19 destaca a importância de ferramentas capazes não apenas de descrever o espalhamento da doença, como também formular mecanismos para impedir sua disseminação [6]. Cabe destacar que várias dessas abordagens são baseadas em métodos estocásticos desenvolvidos dentro da física estatística de não equilíbrio e utilizam conceitos desenvolvidos dentro dessa disciplina, tais como a topologia de redes complexas, transições de fase e criticalidade.

3. Termodinâmica Estocástica e Quântica

Uma outra área que tem tido ultimamente um grande desenvolvimento é aquela que tem sido denominada de termodinâmica estocástica [7–11], que possui fortes conexões com a física estatística e a mecânica quântica [12]. Essa área é resultante do desenvolvimento da termodinâmica de sistemas fora de equilíbrio.

Um organismo vivo é um sistema aberto que é mantido fora de equilíbrio por fluxos de diversos tipos. Para desempenhar as funções biológicas representadas por tais fluxos, é necessária a quebra do balanceamento detalhado, que resulta na irreversibilidade, com o conseqüente consumo de energia e produção de entropia. Tais conceitos têm sido desenvolvidos justamente pela termodinâmica estocástica.

Apesar da primeira máquina térmica quântica ter sido proposta ainda no final da década de 1950, a termodinâmica quântica é uma área de pesquisa relativamente jovem, porém promissora. Um de seus principais objetivos é o estudo e descrição da conversão entre calor, trabalho e informação em sistemas quânticos, em analogia com a termodinâmica convencional e estocástica. Dada a ampla aplicabilidade da termodinâmica e mecânica quântica, há diversos tópicos a serem considerados e questões ainda em aberto, dentre elas, termodinâmica de transições de fase quânticas, controle quântico ótimo ou relações de incerteza termodinâmicas [12].

Cabe notar que dois docentes que desenvolvem pesquisas nessa área estão aposentados ou o serão em breve.

Prognóstico de potenciais candidatos

Listamos a seguir, em ordem alfabética, alguns potenciais candidatos que têm produzido trabalhos de alto nível nas linhas contempladas nesta proposta.

- Danilo Liarte, atualmente no ICTP-SAIFR
- Maíke Santos, atualmente na PUC-Rio
- Nahuel Freitas, atualmente na Universidade de Luxemburgo
- Sarah A. M. Loos, atualmente no ICTP-Trieste
- Tiago Mendes Santos, atualmente no Instituto Max–Planck em Dresden
- Victor Quito, atualmente na Iowa State University
- Wesley Cota, atualmente no Instituto de Medicina Tropical da USP

Referências

[1] Abanin *et al.*, *Rev. Mod. Phys.* **91**, 021001 (2019).

[2] Lubensky *et al.*, *Rep. Prog. Phys.* **78**, 073901 (2015).

[3] Behringer e Chakraborty, *Rep. Prog. Phys.* **82**, 012601 (2019).

[4] Carrasquilla e Torlai, *PRX Quantum* **2**, 040201 (2021).

- [5] Oka e Kitamura, *Ann. Rev. Cond. Matt; Phys.* **10**, 387 (2019).
- [6] Silva et al., *PNAS* **118**, e2104640118 (2021).
- [7] Seifert, *Rep. Progr. Phys.* **75**, 126001 (2012).
- [8] Pigolotti e Pelitti, *Stochastic Thermodynamics: An Introduction*, Princeton University Press (2021).
- [9] Bechhoefer et al., *J. Stat. Mech.* **2020** 064001.
- [10] Lynn et al., *PNAS* **118**, e2109889118 (2021).
- [11] Tomé e de Oliveira, *Phys. Rev. Lett.* **108**, 020601 (2012).
- [12] Noa, Harunari, de Oliveira e Fiore, *Phys. Rev. E* **100**, 012104 (2019).
- [13] Myers, Abah e Deffner, *arXiv: 2201.01740*.

Docentes do IFUSP que apoiam a proposta:

- Adriano Alencar
- André Vieira
- Carlos Fiore
- Gabriel Landi
- Mario de Oliveira