

Padova, 17 giugno 2021

## **NUOVI ALGORITMI NUMERICI PER VECCHI PROBLEMI**

**Publicata su «Nature Communications» la ricerca del gruppo di Teoria Quantistica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova: un nuovo approccio teorico apre la strada allo studio di fenomeni prima impossibili da indagare**

Le teorie quantistiche di campo, dove la meccanica quantistica e la relatività ristretta di Einstein vengono unificate, sono di fondamentale importanza per la nostra comprensione dei costituenti fondamentali della materia e delle loro interazioni: il loro studio rappresenta una pietra miliare della ricerca contemporanea, che spazia dalla fisica delle particelle, detta anche fisica delle alte energie, alla fisica della materia condensata. Tuttavia, descrivere lo specifico comportamento quantistico di molti corpi è un compito estremamente impegnativo.



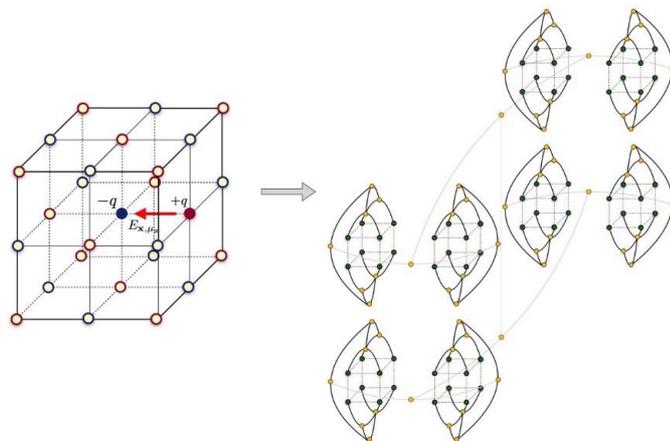
*Simone Montangero*

«Nonostante più di cinquant'anni nello sviluppo di metodi numerici e analitici applicati allo studio di questi sistemi e numerosi grandi successi in questo campo - spiega **Simone Montangero del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Università di Padova e vicedirettore di Padua Qtech center** - molti fenomeni fondamentali sono ancora fuori dalla portata del cosiddetto “Metodo Monte Carlo”, il più potente strumento numerico utilizzato per investigare questi sistemi quando non sono disponibili soluzioni dirette delle equazioni del moto».

L'articolo dal titolo “*Lattice quantum electrodynamics in (3+1)-dimensions at finite density with tensor networks*” pubblicato su «Nature Communications» dal **gruppo di Teoria Quantistica del Dipartimento di Fisica e Astronomia dell'Ateneo patavino**

presenta un nuovo approccio che apre la strada allo studio di fenomeni prima impossibili da indagare, introducendo algoritmi numerici efficienti per indagare le teorie quantistiche dei campi in tre dimensioni spaziali su reticolo, cioè su uno spazio diviso in celle elementari di dimensione finita.

Il lavoro prende in considerazione strutture matematiche complesse, le reti tensoriali, e, per la prima volta, le generalizza dimostrando che possono fornire una descrizione computazionale efficiente del



*Raffigurazione di una coppia elettrone-positrone interagente (a sinistra) e struttura a reti tensoriali tridimensionale usata per le simulazioni numeriche effettuate nello studio (a destra)*

comportamento a bassa energia delle teorie quantistiche dei campi in tre dimensioni, come l'elettrodinamica quantistica. Sfruttando sofisticati algoritmi, è stato possibile studiare in che modo gli elettroni e le loro antiparticelle, i positroni, si organizzano in diversi scenari, finora preclusi, superando il cosiddetto “problema di segno” che impediva l'utilizzo del Metodo Monte Carlo in alcune condizioni. Nella pubblicazione vengono anche analizzati alcuni fenomeni quantistici controintuitivi nel mondo “classico” come l'instabilità del vuoto: nel mondo classico il vuoto è assenza di materia ed energia, in quello quantistico il vuoto è “instabile”, un continuo pullulare di creazioni spontanee di particelle e antiparticelle. In questo contesto si possono dedurre i comportamenti peculiari del potenziale di interazione tra due cariche, che cambia forma a seconda della forza delle interazioni quantistiche, fino all'effetto chiamato “confinamento” che riguarda le interazioni fra i quark.

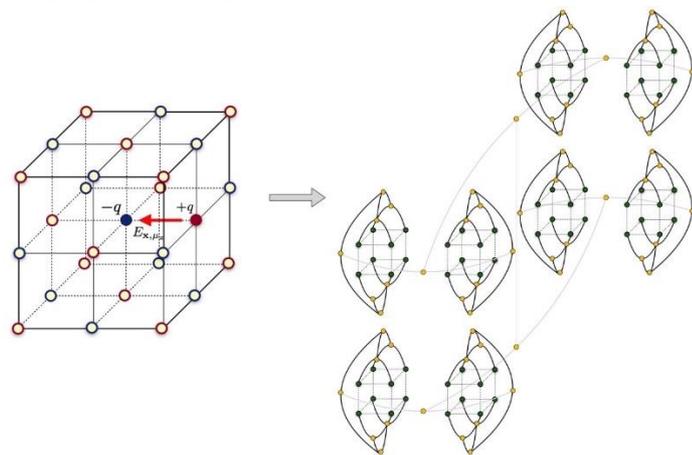
Lo studio mostra per la prima volta le potenzialità dei metodi delle reti tensoriali per lo studio di teorie di campo quantistiche in condizioni realistiche, aprendo nuove prospettive sulla connessione tra fenomeni ad alta energia e teoria dell'entanglement, alla base quest'ultima dei metodi delle reti tensoriali. Sarà possibile quindi applicare le reti tensoriali a processi di interesse per la fisica dei materiali o delle particelle, come il meccanismo di confinamento dei quark nel contesto del Modello Standard delle particelle, cioè quel modello che unifica le forze elettromagnetiche con le forze nucleari deboli (responsabili dei processi radioattivi) e nucleari forti (che riguardano le interazioni tra i quark e tra i neutroni e protoni nel nucleo atomico).

Link alla ricerca: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-23646-3>

Titolo: “*Lattice quantum electrodynamics in (3+1)-dimensions at finite density with tensor networks*” - «Nature Communications» - 2021

Autori: Giuseppe Magnifico, Timo Felser, Pietro Silvi & Simone Montangero

Quantum field theories are of paramount importance in our understanding of the fundamental constituents of matter and their interactions: their study represents a cornerstone of contemporary research, ranging from high-energy particle physics to condensed-matter physics. However, describing their quantum many-body behavior is an extremely challenging task. Despite more than fifty years of developments of numerical and analytical methods to study these systems and numerous great achievements, many fundamental phenomena are still beyond reach of Monte Carlo methods, the most powerful numerical tool used to investigate these systems when no analytical solutions are available.



*Schematic representation of the electron-positron interaction (left) and three dimensional tensor network structure used to simulate the system (right)*

A paper published on Nature Communications this week by the Quantum Theory group of the Physics and Astronomy department of Padova

University, presents a leap forward paving the way to the study of phenomena precluded before, introducing efficient numerical algorithms for investigating lattice gauge theories in the realistic scenario of three spatial dimensions.

The work considers complex mathematical structures, Tensor Networks, and for the first time, generalize them showing that tensor network methods provide a computational efficient description of the low-energy behavior of quantum field theories in three dimensions, such as quantum electrodynamics. By exploiting sophisticated algorithms they study how electrons and positrons organize themselves in the different regimes in scenarios precluded before, overcoming the so-called “sign-problem” that curses Monte Carlo methods in some regimes. They observe some intriguing quantum phenomena completely

counterintuitive in the “classical” world, such as the instability of the vacuum with respect to the spontaneous creation of particles and antiparticles and the peculiar behaviors of the interaction potential between two charges that changes its shape according to the strength of quantum interactions, called “confinement”.

These results show for the first time the potential of tensor network methods to the study of realistic quantum field theories, opening new perspective on the connection between high-energy phenomena and entanglement theory, the latter being at the basis of tensor network methods. These findings could stimulate the application of these strategies to processes of interest in particle physics and challenging open problems that are at the center of theoretical and experimental research efforts, such as the mechanism of quark confinement in the context of the Standard Model.

Link: <https://www.nature.com/articles/s41467-021-23646-3>

“*Lattice quantum electrodynamics in (3+1)-dimensions at finite density with tensor networks*” - «Nature Communications» - 2021

Giuseppe Magnifico, Timo Felser, Pietro Silvi & Simone Montangero