



UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI DI BARI
ALDO MORO

DIPARTIMENTO INTERATENEO DI FISICA
"M. MERLIN"



Istituto Nazionale
di Fisica Nucleare

Dottorando:

Domenico Pomarico

Titolo programma di ricerca:

Quantum Simulations for Lattice Gauge Theories

Relatori di Tesi Magistrale:

Prof. Saverio Pascazio
Dott. Francesco Pepe

L'interfaccia tra la teoria dell'informazione quantistica, la fisica della materia condensata e la fisica delle alte energie ha permesso di sviluppare modelli, accompagnati dalle opportune verifiche sperimentali¹, che prevedono l'emergere di proprietà quantistiche a livello macroscopico in corrispondenza di temperature prossime allo zero assoluto, in quanto altrimenti tali effetti vengono nascosti da vari effetti di decoerenza.

Su queste basi il progetto di ricerca va a contestualizzarsi nell'ambito della descrizione dei gas atomici ultrafreddi, ottenuti per mezzo di campi laser classici che consentono un controllo esterno sulla dinamica interna, nell'intento di ottenere un simulatore quantistico, i cui gradi di libertà acconsentano il raggiungimento di capacità computazionali inarrivabili con le attuali tecnologie. Il progetto sarà orientato in particolare allo studio di gas freddi su reticoli.

La realizzazione sperimentale di reticoli ottici con siti occupati da un singolo atomo o ione, tipico della fase isolante di Mott², permette il controllo esterno degli stati dei singoli elementi, codificanti i quantum bits (qubits). Tale indirizzamento a singolo sito consente di fornire delle solide basi al processing dell'informazione quantistica, utilizzando dei gate per l'evoluzione temporale del sistema a molti corpi rappresentato dal gas atomico, di una o più specie, intrappolato nel potenziale periodico del reticolo.

Come introdotto da Feynman, un simulatore quantistico consiste in un sistema sperimentalmente accessibile che replichi effetti quantistici di interesse, sottolineando la complessità di una corrispondente simulazione classica. Supponendo di voler simulare un sistema di N spin $1/2$, la dimensione dello spazio crescerà esponenzialmente secondo 2^N : la scalabilità di un sistema di atomi ultrafreddi in un reticolo ottico permette di raggiungere un corrispondente numero di gradi di libertà, mantenendo un pieno controllo della dinamica dall'esterno.¹⁻³ Queste basi permettono notevoli sviluppi nel campo della fisica della materia condensata attraverso la QED su reticolo, così come si sottolinea la propedeuticità per le teorie di gauge non Abelian, come la QCD nell'ambito della fisica delle alte energie.

Attività del progetto di ricerca

Dal punto di vista fisico-matematico si vuole adoperare l'approccio dettato dal formalismo del gruppo discreto di Schwinger-Weyl per trattare la discretizzazione degli spazi di Hilbert associati ai link⁴ del reticolo, così oltrepassando l'attuale utilizzo di gauge transporter non unitari del Quantum Link Model per sistemi (2+1)-dimensionali. Tale estensione richiede una nuova espressione per la legge di Gauss, selezionante il settore degli stati fisici dello spazio di Hilbert, combinando il mapping del gruppo Abelian $U(1)$ sul gruppo ciclico \mathbb{Z}_n su entrambe le direzioni reticolari. La presenza di nuovi termini energetici relativi al campo magnetico si concretizza con le interazioni di plaquette, da supportare nell'implementazione compatibilmente ai vincoli di gauge.

Dal punto di vista numerico, le transizioni di fase del ground state verranno indagate mediante le tecniche variazionali del Density Matrix Renormalization Group⁵, il cui formalismo ed implementazione disporrebbe della collaborazione del gruppo di ricerca guidato dalla Prof.ssa Ercolessi, coordinatrice del corso di laurea in Fisica dell'Università di Bologna. La ricerca di transizioni di fase, nella variazione dei parametri di massa e carica elettrica, si contestualizza nell'ambito dell'individuazione delle classi di universalità, data l'identificazione nella QED su reticolo (1+1)-dimensionale di un forte legame con la transizione caratterizzante il modello di Ising⁶.

¹ Martinez E. A., Muschik C. A., Schindler P., Nigg D., Erhard A., Heyl M., Hauke P., Dalmonte M., Monz T., Zoller P., Blatt R., *Real-time dynamics of lattice gauge theories with a few-qubit quantum computer*, *Nature* 534, 516-519 (2016).

² Greiner M., Mandel O., Esslinger T., Hansch T. W., Bloch I., *Quantum phase transition from a superfluid to a Mott insulator in a gas of ultracold atoms*, *Nature* 415, 39-44 (2002).

³ Lewenstein M., Sanpera A., Ahufinger V., *Ultracold Atoms in Optical Lattices* (Oxford University Press, 2012).

⁴ Notarnicola S., Ercolessi E., Facchi P., Marmo G., Pascazio S., Pepe F. V., *Discrete Abelian gauge theories for quantum simulations of QED*, *Journal of Physics A: Mathematical and Theoretical* 48, 1-12 (2015).

⁵ White S. R., *Density Matrix Formulation for Quantum Renormalization Groups*, *Physical Review Letter* 69, 2863-2866 (1992).

⁶ Yang D., Shankar Giri G., Johanning M., Wunderlich C., Zoller P., Hauke P., *Analog quantum simulation of (1 + 1)-dimensional lattice QED with trapped ions*, *Physical Review A* 94, 1-19 (2016).