

ABSTRACT

Candidate: **Giulia Del Pace**

Supervisor: **Dr. Francesco Minardi**

The aim of this thesis work was to realize and characterize tailored optical potentials with a Digital Micromirror Device (DMD), focusing the attention on those geometry that are interesting for experiments with atomic superfluids. The DMD is a reflective Spatial Light Modulator (SLM) that consists in an array of individually controllable micrometer-sized mirrors, through which arbitrary and, if required, time-dependent light patterns can be created. This thesis work demonstrates the suitability of such devices in applications on atomic superfluids.

The first part of the thesis was dedicated to the realization and optimization of a magneto optical trap (MOT) of ^{87}Rb atoms, as a first cooling step to reach the low temperature needed for the Bose-Einstein condensation, where the atomic gas exhibits a superfluid behavior. Atoms from a vapour cell are captured by a 2D MOT that cools them in the radial direction, and a push beam is used to create an atomic beam towards the ultra-high vacuum chamber of the 3D MOT. I took part in the alignment of the laser beam for the 2D and 3D MOT, and performed the optimization of the loading efficiency of the latter. Both the efficiency of the 2D MOT in creating an atomic beam and that of the 3D MOT in trapping atoms have been optimized to finally get a MOT of about 10^9 atoms at a temperature of around 200 μK .

The second part of this thesis was devoted to the realization and characterization of arbitrary light patterns with the DMD. Two different optical setups have been implemented to investigate the ability of the device to create homogeneous potentials, and to produce light patterns on the length scale of the resolution of the optical system. In order to obtain homogeneous light patterns, I wrote a Python feedback program, that improves the quality of the DMD-made image, making it similar to the target image. Combining the feedback program with a spatial filter, it is possible to obtain homogeneous potentials, with residual spatial fluctuations in intensity of 1.4% on the length scale of around 5 μm , greater than the healing length of an alkali condensate. Then, the ability of the DMD to create time-dependent light pattern has been considered. The timing properties of the device allow for the generation of potentials moving with a velocity comparable to that of an atomic superfluid, namely of the order of mm/s. Then, light patterns of length scales of the optical imaging system have been considered. First, a numerical analysis of the point spread function (PSF) of the system has been performed, and the results have been compared with the experimental findings. In particular, a DMD-based method to measure the size of the PSF of the optical system is proposed: a grid of single mirror of the device is used as an array of point sources to measure the resolution of the optical system and to individuate possible aberration that may affect it. In this way, the optical system used for this part of the thesis is demonstrated to be diffraction limited, so that it has been possible to use it to produce light pattern on length scales of a μm . In particular, disordered light pattern has been considered, focusing on two different kinds of disorder: point-like patterns, characterized by random distributions of light spots surrounded by regions of darkness, and granular speckles patterns. Depending on the ratio between the size of the PSF and the mean distance between two disorder elements, the imaged pattern is point-like or speckles. The transition between the two has been explored by varying the PSF of the optical system with an iris. Both for speckles and point-like patterns, the DMD is capable to produce disordered light patterns with a characteristic length of the order of a μm . In conclusion, this thesis demonstrates that the DMD is a versatile and powerful device, well-suited for applications in experiment with atomic superfluid. In particular, persistent currents can be studied realizing a homogeneous ring optical potential, and the superfluid-to-insulator transition can be explored by introducing DMD-made disorder in an atomic superfluid.

ABSTRACT (ITALIANO)

Candidato: **Giulia Del Pace**

Relatore: **Dr. Francesco Minardi**

Questo lavoro di tesi è incentrato nella realizzazione e caratterizzazione di potenziali ottici arbitrari con un Digital Micromirror Device (DMD), con particolare attenzione alle geometrie interessanti per esperimenti con superfluidi atomici. Il DMD è uno Spatial Light Modulator (SLM) basato sulla riflessione: è formato da una matrice di specchi micrometrici individualmente controllabili, mediante i quali è possibile creare potenziali ottici arbitrari e, se richiesto, dipendenti dal tempo. Questo lavoro di tesi dimostra come il DMD sia adatto a soddisfare le richieste delle applicazioni di tali potenziali su superfluidi atomici.

La prima parte di questo lavoro è stata dedicata alla realizzazione e ottimizzazione di una trappola magneto-ottica (MOT) per atomi di ^{87}Rb , come primo livello di raffreddamento per raggiungere le basse temperature necessarie per la condensazione di Bose-Einstein in cui il gas presenta un comportamento superfluido. Gli atomi vengono inizialmente catturati da una 2D MOT che li raffredda in direzione radiale, dopo di che un fascio di push crea un fascio atomico verso la camera ad ultra alto vuoto della 3D MOT. In particolare, durante il lavoro di tesi ho preso parte all'allineamento dei fasci laser per i due stadi di raffreddamento e ho ottimizzato l'efficienza di carica della 3D MOT, ottenendo infine una MOT di circa 10^9 atomi con una temperatura di $200\ \mu\text{K}$.

Nella seconda parte di questo lavoro di tesi mi sono occupata della realizzazione e caratterizzazione di potenziali ottici arbitrari con il DMD. Due diversi setup ottici sono stati implementati per studiare potenziali omogenei e su scale di lunghezza confrontabili con la risoluzione del sistema ottico. Per realizzare potenziali omogenei è stato scritto un programma di feedback in Python, che migliora la qualità dell'immagine realizzata dal DMD confrontandola con un'immagine target. Combinando il programma di feedback con un filtro spaziale è stato possibile ottenere potenziali omogenei, con delle fluttuazioni di intensità del 1.4% su scale di lunghezza di circa $5\ \mu\text{m}$, superiori alla lunghezza di correlazione di un condensato di atomi alcalini. Successivamente si è analizzata l'abilità del DMD di creare potenziali ottici dipendenti dal tempo, verificando che le caratteristiche temporali del dispositivo sono tali da renderlo idoneo per realizzare potenziali in moto con velocità confrontabili con la velocità critica di un superfluido atomico, ovvero dell'ordine di mm/s .

In seguito si sono considerati profili di intensità variabili su scale di lunghezza confrontabili con la risoluzione del sistema di imaging. Per prima cosa è stata effettuata un'analisi numerica della point spread function (PSF) del sistema ottico, dopo di che i risultati così ottenuti sono stati confrontati con delle misure sperimentali. In particolare viene proposto un metodo per misurare le dimensioni della PSF basato sul DMD: una griglia di singoli specchi di tale dispositivo viene usata come matrice di sorgenti puntiformi che vanno a testare localmente la risoluzione del sistema ottico. In questo modo, oltre che avere una misura delle dimensioni della PSF, è possibile anche individuare le eventuali aberrazioni che affliggono il sistema. Con una misura di questo tipo si è verificato che il sistema ottico utilizzato durante questa parte del lavoro di tesi è limitato per diffrazione, cosa che lo rende adeguato per la realizzazione di profili luminosi su scale di lunghezza confrontabili con la sua risoluzione, ovvero dell'ordine di un μm . In particolare sono stati considerati dei potenziali disordinati, concentrando su due diversi tipi di disordine: point-like, caratterizzato da una distribuzione casuale di punti luminosi circondati da regioni di buio, e speckles dal profilo granulare. Si ottiene l'immagine dell'uno piuttosto che l'altro a seconda del valore del rapporto tra le dimensioni della PSF e la distanza media tra elementi di disordine. La transizione tra i due tipi di disordine è stata esaminata andando a variare la risoluzione del sistema, e quindi le dimensioni della PSF, mediante un'iride. Sia per disordine point-like che speckles le lunghezze di correlazione ottenute sono dell'ordine del μm .

In conclusione, questo lavoro di tesi dimostra che il DMD è uno strumento potente e versatile, adeguato per applicazioni in esperimenti con atomi superfluidi. In particolare un potenziale omogeneo ad anello può essere usato

per studiare il fenomeno delle correnti persistenti, mentre introducendo disordine in un superfluido è possibile studiare la sua transizione ad isolante.