

Relazione scientifica

Il microscopio presente a Nagoya è unico del suo genere perché uno strumento completamente custom costruito con accorgimenti tecnologici di avanguardia ma anche con alcune importanti debolezze. Ho potuto verificare i dettagli costruttivi dello strumento e le sue possibilità non evidenziate dalle pubblicazioni [1].

La parte più innovativa dello strumento è il sistema di produzione del fascio. Si basa su un fotocatodo di semiconduttore coperto di Cesio. Il Cesio si consuma facilmente per il processo di fotoemissione ma può essere facilmente ri-sputterato sul catodo grazie ad evaporatore montato direttamente a fianco del fotocatodo. Il fotocatodo viene illuminato da un laser pulsato o continuo con polarizzazione circolare che consente di ottenere due polarizzazioni di spin dell'elettrone emesso opposte. In questo caso lo switch tra i due modi è ottenuto tramite un semplice cambio del segno della polarizzazione circolare del laser.

Tuttavia la complessità del Sistema sta nelle lenti Wien filter successive che permettono di modificare l'asse di polarizzazione in x,y,z. Data la complessità del Sistema la calibrazione delle direzioni di spin è stata fatta prima che il Sistema di polarizzazione fosse attaccato al microscopio e usando un rivelatore Mott. Purtroppo una volta montato sul microscopio non esiste ancora un Sistema di rivelazione che consenta di post-selezionare il fascio polarizzato dopo il campione. Questo farà parte degli sviluppi successivi.

Dopo il Sistema di polarizzazione vi è il microscopio elettronico vero e proprio. Si tratta di un vecchio Hitachi che lavora in ultra alto-vuoto. Questo Sistema quindi richiede una complessa procedura di caricamento dei campioni che richiede un 'intero giorno (diversamente da quanto succede per i comuni microscopi).

Infine il microscopio viene usato fuori dalle condizioni normali di calibrazione dello strumento per cui quasi tutte le operazioni vengono condotte in Free-lens mode che risulta in una notevole difficoltà di utilizzo.

Il lavoro fatto in Giappone è stato perciò di grande importanza per me ma anche per il gruppo giapponese che ha potuto confrontarsi con me su alcuni progetti di ricerca.

In particolare oltre alle tematiche sviluppate di seguito abbiamo cercato di studiare le possibilità attuali di detezione dello spin usando metodi interferometrici. Tuttavia se i risultati teorici sembrano incoraggianti le difficoltà materiali sono legate sia all'utilizzo del microscopio sia alla perdita di coerenza laterale dovuta sia alle instabilità meccaniche sia alla effettiva dimensione della sorgente che, per motivi di efficienza, non può essere più piccolo del fascio laser incidente.

Al di là dei risultati sperimentali ho potuto aprire un importantissimo canale di collaborazione data la stima reciproca tra i due gruppi. Ho inoltre potuto capire alcuni dettagli sperimentali che il gruppo giapponese era restio a raccontare e che possono essere utili per ideare nuove esperienze con elettroni polarizzati in spin.

Tuttavia gli esperimenti iniziati stanno richiedendo più tempo di quello inizialmente preventivato: questo è dovuto in parte ad imprevisti ed in parte a dettagli tecnici di costruzione della macchina che non mi erano stati detti in dettaglio.

Perciò i dati che abbiamo ottenuto sono estremamente preliminari, inoltre alcuni degli esperimenti inizialmente preventivati sono risultati più difficili del previsto. Tuttavia siamo riusciti ad ottenere alcune importanti indicazioni sperimentali che il gruppo giapponese raffinerà sperabilmente nei prossimi mesi.

In particolare ci siamo concentrati su due tipi di esperimenti : rivelazione di asimmetrie di scattering in polveri di NiO e variazioni di intensità in funzione della direzione di polarizzazione in fasci di Bessel.

Nel primo caso abbiamo preso polveri di NiO che ho portato dall'Italia e abbiamo ottenuto la diffrazione, i segnali sembrano essere incoraggianti nel senso che in alcuni casi sembra esserci una asimmetria degli spot di diffrazione. In particolare abbiamo trovato tracce dello scattering magnetico dovuto agli spin contrapposti nel materiale per effetto della caratteristica antiferromagnetica del materiale [2]. Purtroppo però il microscopio lavora solo a 30KeV (un voltaggio per il quale gli elettroni hanno uno scarso potere di penetrazione e i campioni devono essere molto sottili) con una lente obiettivo scarsamente adatta alla diffrazione e questo ha portato molti rallentamenti nelle attività sperimentali.

In ogni caso I primi dati sembrano indicare che lo scattering magnetico generi una super-periodicità non attesa se si considera solo lo scattering dal potenziale elettrostatico del cristallo. Questo è conforme ai dati recentemente ottenuti per questo materiale. Il dato in più è che sembrano esserci indicazioni di una asimmetria di questa diffrazione in funzione della polarizzazione del fascio elettronico. Infatti sebbene un cambio di polarizzazione arbitrario richieda molto lavoro, è piuttosto facile invertire la polarizzazione del laser di eccitazione e ottenere facilmente un segno opposto dello spin.

La significatività di questi dati è tuttavia ancora molto scarsa soprattutto per lo spessore delle polveri ottenute da frantumazione meccanica di un cristallo. Il gruppo giapponese, in stretta collaborazione con me, sta effettuando nuove misure con polveri più sottili. Se anche questo dovesse non essere sufficiente siamo organizzando di spedire nanoparticelle prodotte presso il laboratorio di NANO-CNR di Modena della dimensione di circa 10nm quindi certamente adatti allo scopo.

Abbiamo inoltre effettuato un secondo esperimento usando un complesso ologramma per generare fasci elettronici di Bessel [3]. Il nostro gruppo può essere considerato leader mondiale nella generazione di ologrammi di fase per la generazione di fasci innovativi [4]. Tuttavia nonostante un grande lavoro di ottimizzazione dei nostri ologrammi fatta prima della partenza ci siamo accorti durante l'esperimento che non erano abbastanza trasparenti agli elettroni. Ho così ideato e fatto costruire con un FIB in Giappone una versione diversa dell'ologramma che moduli l'ampiezza della funzione d'onda in modo da generare un fascio di Bessel attraverso una modulazione in ampiezza della trasmissività.

Questo secondo ologramma ha funzionato e così abbiamo potuto studiare il comportamento di questo fascio in funzione della polarizzazione degli elettroni incidenti sull'ologramma.

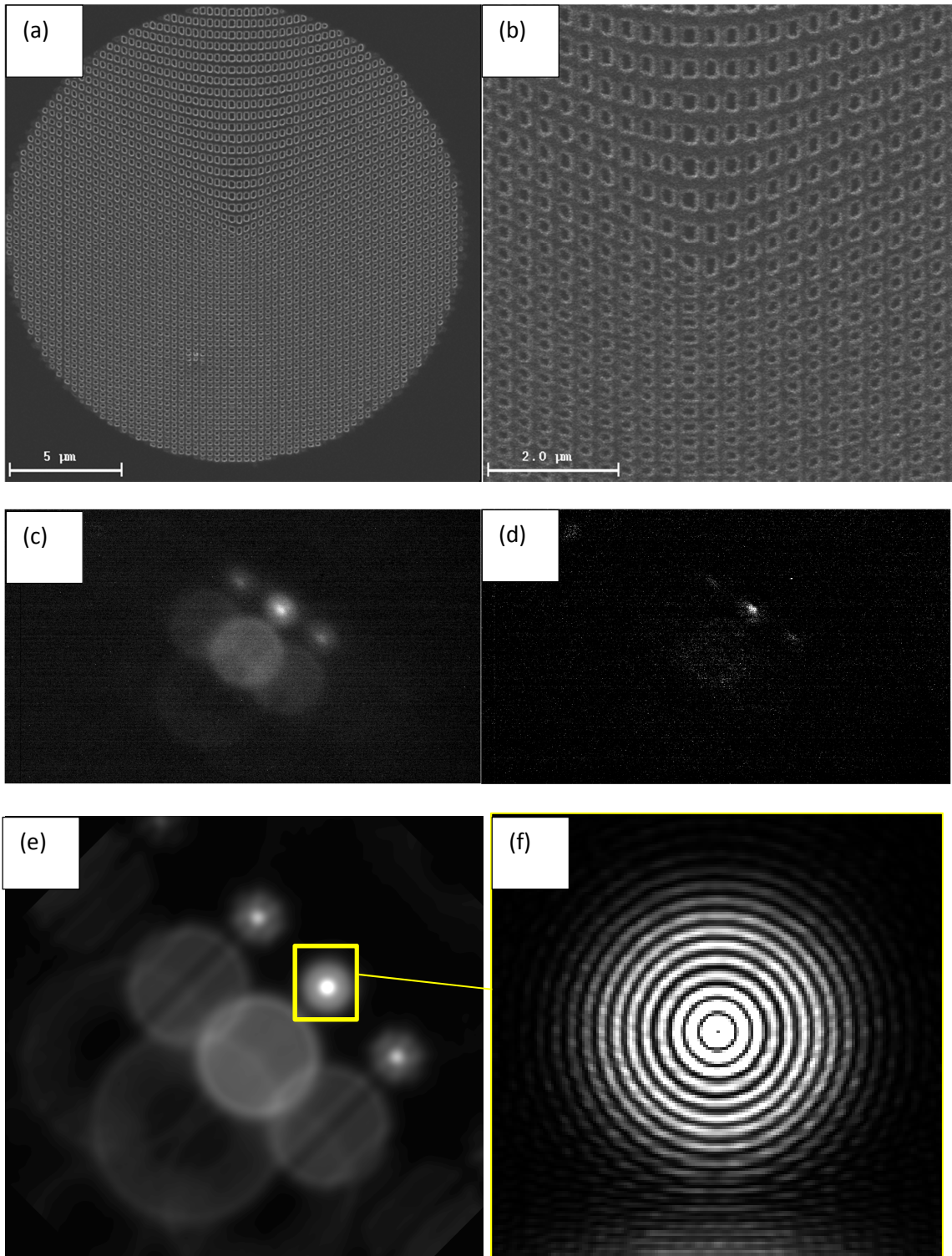
Purtroppo la coerenza laterale del fascio uscente dall'ologramma non è tale da permetterci una visione chiara del fascio ma siamo lo stesso riusciti a vedere un certo cambiamento dell'intensità nel suo centro per effetto della variazione di spin. Sebbene anche questa misura necessiti ulteriori conferme si può sperare che tali cambi di intensità si possano spiegare nel seguente modo:

Il fascio di Bessel che abbiamo creato era dotato di una carica topologica 1 cioè di un momento orbitale quantizzato lungo z pari ad $1h$. Secondo I calcoli effettuati sia da me che da alcuni scienziati in un diverso schema teorico [5], i fasci di Bessel dovrebbero interagire con il campo-magnetico della lente per creare un effetto spin-orbita.

Per effetto di questa interazione il fascio di Bessel cambierebbe sia il suo spin sia la sua carica topologica. Da un punto di vista pratico si tratterebbe di vedere un'intensità ragionevolmente diversa da zero nel centro del fascio laddove in condizioni normali non ci dovrebbe essere intensità.

I dati attuali sebbene molto confusi per effetti di rumore e incoerenza mostrano già che le maggiori asimmetrie dovute allo spin si concentrano effettivamente nel centro del fascio di Bessel.

Sebbene questi dati siano molto preliminari e non abbiamo ancora escluso tutte le possibili cause di errore sistematico i dati sembrano piuttosto incoraggianti



Le figure mostrano (a) l'innovativo ologramma d'ampiezza da me progettato e realizzato nei laboratori a Nagoya tramite FIB. Un dettaglio (b) di fig a mostra la dislocazione al centro del pattern che conferisce all'ologramma e quindi al fascio la carica topologica. La figura (c) mostra la diffrazione di Fresnel dalla

aperture per fascio con spin up lungo z. Fig (d) è invece la differenza di intensità tra le due condizioni di spin che mostra una piccola rumorosità in corrispondenza del fascio di Bessel. Figura (e) ed (f) mostrano una simulazione della diffrazione di Fresnel comprensivo di effetti di incoerenza. E il dettaglio del fascio di Bessel come sarebbe in un caso perfettamente coerente.

In conclusione sebbene i dati non siano conclusivi, ci aspettiamo che le idee messe in campo possano finalmente dare un ruolo nuovo allo spin nel campo della microscopia elettronica. Mi aspetto che i dati dei prossimi mesi possano confermare queste prime parziali evidenze ma questo lavoro richiede molta simulazione e una difficile attività sperimentale.

L'importanza di questi risultati è testimoniata anche dal fatto che il prof Kuwahara sta scrivendo un importante progetto presso le istituzioni giapponesi del valore di milioni di euro per un nuovo e più potente microscopio basato sullo stesso concetto di elettroni polarizzati. All'interno di questo progetto si è impegnato a coinvolgermi nelle ulteriori ricerche pagando con i soldi del suo progetto eventuali altre visite successive.

Referenze

- [1] M. Kuwahara et al. Applied Physics Letters 101, 033102 (2012)
- [2] J. C. Loudon Phys Rev Lett 109, 267204 (2012)
- [3] V. Grillo et al Physical Review X 4, 011013 (2014)
- [4] V. Grillo et al. Applied Physics Letters 104, 043109 (2014)
- [5] K. Y. Bliokh et al. Phys Rev Lett 107, 174802 (2011)