

Onde vorticose:

una nuova prospettiva per le comunicazioni radio?

Andrea Cagliero¹, Rossella Gaffoglio¹, Assunta De Vita², Bruno Sacco²

¹Università di Torino - Dipartimento di Fisica

²Rai - Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica

1. INTRODUZIONE

Negli ultimi anni, a seguito della crescente diffusione di servizi a banda larga, si è assistito ad un forte aumento della richiesta di risorse spettrali da parte dei sistemi di comunicazione wireless. La quantità di traffico dati, infatti, raddoppia ogni anno e le previsioni annunciano che sulle reti mobili questo traffico crescerà di circa tredici volte nei prossimi cinque anni [1].

Per far fronte a questo problema, l'evoluzione tecnologica delle telecomunicazioni è indirizzata continuamente allo sviluppo di nuove tecniche che permettano di sfruttare lo spettro elettromagnetico in maniera sempre più efficiente. Tra i possibili approcci alternativi di trasmissione dell'informazione si annoverano, ad esempio, quelli che impiegano diversi schemi di modulazione, tecniche di polarizzazione e di multiplazione o quelli che sfruttano la diversità spaziale/temporale quali, ad esempio, i sistemi **MIMO** (*Multiple Input Multiple Output*).

Oltre alle tecniche sopra citate, recentemente sono stati proposti nuovi metodi, basati sulle proprietà fisiche del segnale e riguardanti la cosiddetta *diversità topologica*. Tale approccio prevede che i segnali siano trasmessi usando diversi stati ortogonali del **Momento Angolare Orbitale** (in inglese *Orbital Angular Momentum*, **OAM**), una grandezza fisica, già nota da tempo nell'ottica, che solo di recente è stata considerata per applicazioni nel campo delle radiofrequenze. L'idea è quella di utilizzare la

Tra le possibili tecniche che consentono un uso efficiente dello spettro elettromagnetico, particolare attenzione ha suscitato negli ultimi anni il tentativo di sfruttare il momento angolare orbitale (OAM) della radiazione elettromagnetica, una grandezza fisica che agisce a livello dei singoli fotoni e non dipende dalla polarizzazione del fascio, bensì dalla sua distribuzione spaziale. Quest'ultima proprietà permette, in linea di principio, di trasmettere e ricevere, alla medesima frequenza portante, un insieme elevato di canali indipendenti, con un conseguente incremento della capacità di trasmissione. Tale prospettiva ha suscitato l'attenzione di diversi gruppi di ricerca, portando alla realizzazione di alcuni importanti esperimenti sia nell'ambito delle radiocomunicazioni che in quello dell'ottica, dove sono stati recentemente elaborati sistemi in grado di codificare e distinguere canali OAM in spazio libero. Nonostante l'esito positivo di questi esperimenti, esistono visioni divergenti sull'argomento ed è tuttora in corso un dibattito scientifico volto a stabilire l'effettivo grado di innovazione dell'OAM nel contesto delle telecomunicazioni rispetto alle tecnologie preesistenti.

Il presente articolo si propone di offrire una panoramica sullo stato attuale degli studi condotti in letteratura, con un excursus sulle tecniche che permettono la generazione dei fasci OAM. Viene inoltre fornita una breve descrizione dei primi esperimenti condotti nel campo delle frequenze radio e delle diverse interpretazioni sui possibili vantaggi legati all'impiego di questi fasci. Infine, sono presentati alcuni ulteriori campi di applicazione dell'OAM, che spaziano dalle nanotecnologie alla fisica quantistica.

caratteristica distribuzione spaziale di fase di ciascuno di questi stati per trasmettere e ricevere, alla medesima frequenza, un insieme elevato di canali indipendenti, con un conseguente incremento della capacità di trasmissione. Oltre ai regimi dell'ottica e delle radiofrequenze, l'OAM ha trovato recentemente applicazioni pratiche in molti altri campi quali i sistemi radar, le nanotecnologie, la fisica quantistica e l'astronomia.

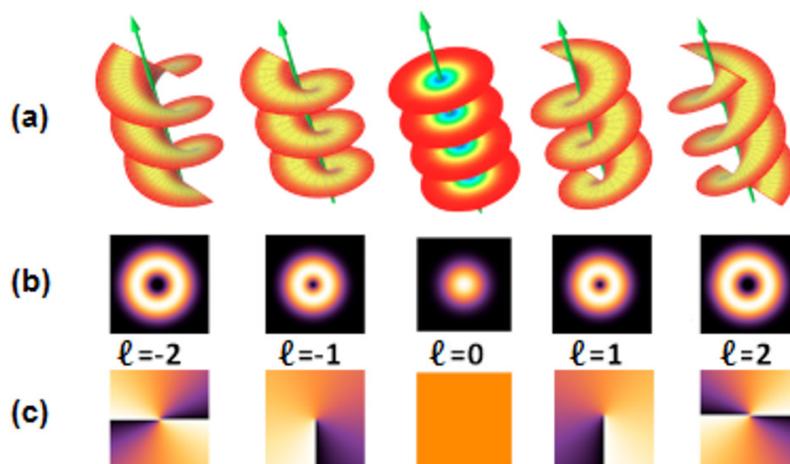
2. IL MOMENTO ANGOLARE ORBITALE (OAM)

Un'onda elettromagnetica trasporta energia e momento lineare nella direzione del vettore ortogonale ai fronti d'onda; com'è noto, il momento lineare è responsabile della pressione di radiazione che si misura su una superficie investita dall'onda. In generale, la radiazione elettromagnetica può anche trasportare momento angolare e questa grandezza comprende due contributi differenti: il *momento angolare di spin (SAM)* e il *momento angolare orbitale (OAM)*. Mentre nel primo caso il momento angolare è associato alla polarizzazione circolare del fascio, nel secondo caso è legato ad una distribuzione elicoidale dei fronti d'onda tipica di particolari modi elettromagnetici noti come *onde vorticosi* o, semplicemente, **OAM**.

Associato a tali fasci è il fattore di fase del campo elettromagnetico $e^{i\ell\varphi}$, dove φ è l'angolo azimutale attorno all'asse del fascio, mentre ℓ è un indice caratteristico che può assumere qualsiasi valore intero ed è legato al contenuto di momento angolare orbitale. Fu solo nel 1992 che Allen e altri [2] dimostrarono matematicamente tali proprietà e suggerirono come si possano generare fasci laser con fase elicoidale convertendo i modi di *Hermite-Gauss*, ampiamente utilizzati in ottica, in modi di *Laguerre-Gauss*. In figura 1 sono riportati i fronti d'onda e i profili di intensità relativi a fasci OAM con diverso indice azimutale ℓ . Il caso particolare $\ell = 0$ è quello relativo alla radiazione convenzionale.

Negli ultimi anni si è assistito ad un progressivo incremento delle applicazioni OAM, che spaziano dalla possibilità di intrappolare e mettere in rotazione particelle microscopiche [2] [3] fino alle nuove proposte per la crittografia e la codifica quantistica dell'informazione [4] [5]. In astronomia l'OAM ha permesso di migliorare il potere risolutivo degli strumenti ottici, agevolando gli studi sulla materia interstellare e sui buchi neri di Kerr [6]. Dal punto di vista delle trasmissioni ottiche in spazio aperto, sono stati recentemente elaborati sistemi in grado di codificare e distinguere un elevato numero di canali OAM [7] [8] [9] e dagli ultimi studi sembra emergere anche la possibilità di una trasmissione OAM in fibra ottica per applicazioni quantistiche [10] [11].

Fig. 1 – Fronti d'onda (a) e rispettivi profili di intensità (b) e fase (c) per diversi indici di vorticosità



3. TECNICHE PER LA GENERAZIONE DI FASCI OAM

Esistono numerosi metodi per produrre fasci OAM alle varie frequenze. Nel dominio dell'ottica, la strategia più semplice consiste nell'impiego degli *Spiral Phase Plates (SPP)* (figura 2 sinistra), elementi ottici sagomati in modo da imprimere una distribuzione di fase elicoidale al fascio gaussiano che li attraversa. Poiché la radiazione elettromagnetica impiega più tempo a percorrere una determinata distanza in un mezzo otticamente denso piuttosto che nel vuoto, è possibile modificare la fase dell'onda attraverso una variazione dello spessore del materiale utilizzato. Un'altra strategia risiede nell'impiego di *ologrammi* generati al computer, che si basano sul calcolo del

profilo di interferenza tra il fascio OAM desiderato e un'onda gaussiana di riferimento. La figura ottenuta, stampata su un ologramma ad alta risoluzione, viene successivamente illuminata con il fascio gaussiano fondamentale ricavando un profilo di diffrazione il cui primo ordine corrisponde alla configurazione cercata, secondo i principi dell'olografia (figura 2 destra). Lo svantaggio di questa seconda procedura consiste nella notevole perdita di potenza, dovuta al fatto che soltanto una frazione dell'intensità iniziale raggiunge il primo ordine di diffrazione.

Come anticipato nella sezione precedente, in ottica esiste anche la possibilità di generare fasci di *Laguerre-Gauss* combinando fasci di *Hermite-Gauss* mediante opportune lenti cilindriche (figura 3).

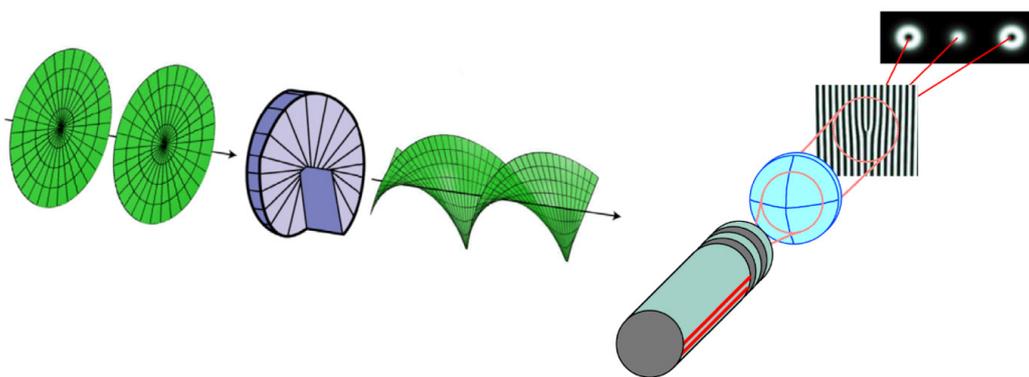


Fig. 2 – Luce non vorticiosa acquista OAM attraversando una SPP (sinistra) o un ologramma (destra) [3] [12]

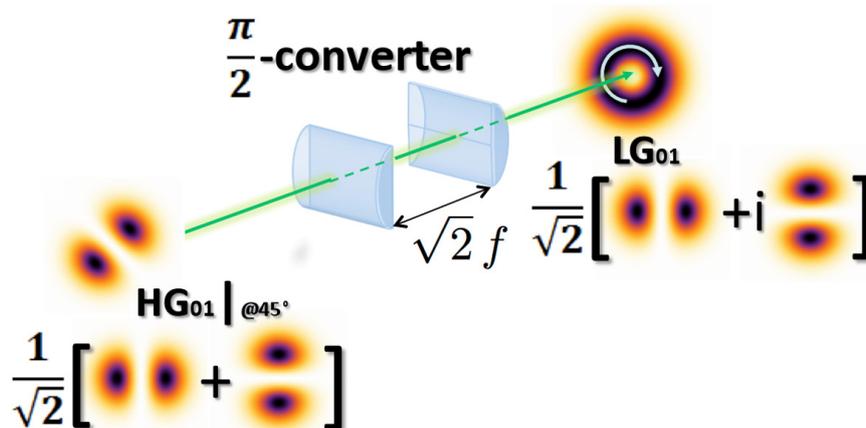


Fig. 3 – Generazione di un modo Laguerre-Gauss come sovrapposizione di modi Hermite-Gauss mediante lenti cilindriche

Nel regime delle frequenze radio, la produzione di fasci **OAM** è stata sperimentata secondo metodologie in larga parte ereditate dall'ottica: anche in questo caso sono impiegati *ologrammi*, che consistono in film dielettrici su cui sono applicate strisce metalliche disposte secondo il profilo di interferenza calcolato, o maschere dielettriche sagomate. Inoltre, è possibile sfruttare le cosiddette *flat phase plates*, superfici piane sfasanti con permittività variabile [13]. Queste ultime sono state concepite con un criterio simile a quello su cui si basano le **SPP**, poiché anche in questo caso l'onda è soggetta ad un ritardo di fase durante la trasmissione attraverso il mezzo, con la differenza che lo sfasamento introdotto è dovuto alla variazione angolare della permittività (figura 4, sinistra). Inoltre, in alcuni recenti esperimenti sono state trasmesse onde radio **OAM** generate da un'antenna parabolica il cui riflettore è stato modificato opportunamente per imprimere la vorticità richiesta (figura 4, destra) [14].

Una valida alternativa ai metodi descritti sopra consiste nel sintetizzare onde radio **OAM** per mezzo di schiere di antenne, vale a dire strutture composte da un certo numero di sorgenti alimentate in modo da riprodurre, a grandi distanze, un preciso profilo di irradiazione. Le sorgenti possono essere dipoli od antenne più complesse e la loro disposizione geometrica, insieme alla scelta delle correnti di alimentazione, determina le caratteristiche del campo complessivo prodotto, quali ad esempio la polarizzazione e la distribuzione dell'energia. Nello specifico, il fronte d'onda elicoidale di un fascio **OAM** può essere generato approssimativamente da una configurazione di N radiatori identici, collocati in maniera equidistante su una circonferenza ed alimentati con un segnale d'ingresso con la medesima ampiezza e sfasamento elettrico pari a $\ell\varphi_n$, dove φ_n indica la posizione angolare dell' n -esima antenna (figura 5) [16].

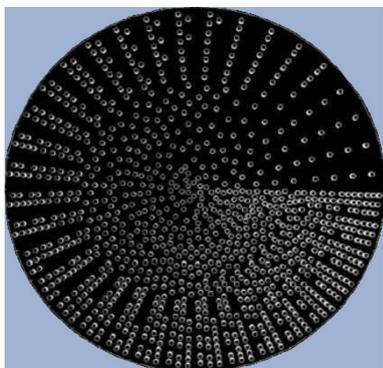
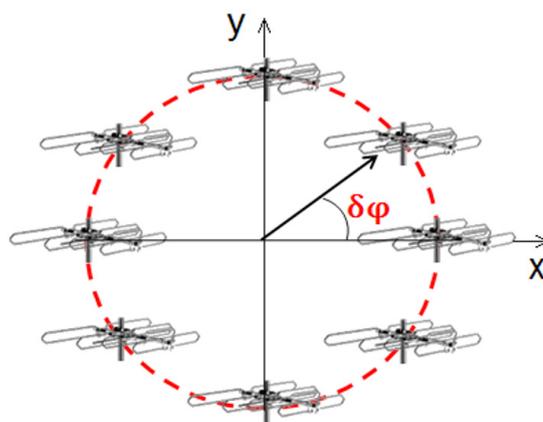


Fig. 4 – Micro-perforated *flat phase plate* (sinistra) [12] e antenna parabolica *twistata* (destra) [15]

Fig. 5 – Schiera circolare di antenne con $N=8$, dove $\delta\varphi=2\pi\ell/N$



4. IL MOMENTO ANGOLARE ORBITALE ALLE FREQUENZE RADIO

4.1 GLI ESPERIMENTI DI VENEZIA E MILANO

L'idea di sfruttare la diversità topologica dei fasci **OAM** nell'ambito delle comunicazioni radio è stata proposta per la prima volta dagli astrofisici Bo Thidé [17] e Fabrizio Tamburini [15] e si è concretizzata nell'esperimento pubblico "Onde sulle Onde", realizzato dagli stessi e dai loro collaboratori il 24 giugno 2011 a Venezia. Lo scopo di questo esperimento è stato quello di dimostrare la possibilità di utilizzare due fasci di onde radio incoerenti, trasmessi ad una stessa frequenza di 2.414 GHz e codificati nei due diversi stati **OAM** $\ell = 0$ e $\ell = 1$ per trasmettere simultaneamente due canali radio indipendenti. Il fascio $\ell = 0$ è stato generato da un'ordinaria antenna Yagi-Uda (figura 6a), mentre il fascio vorticoso con indice $\ell = 1$ ha avuto origine da una parabola *twistata* come quella descritta nel precedente paragrafo (figura 6b).

In una prima fase dell'esperimento, la distribuzione di intensità del fascio vorticoso è stata mappata ad una distanza di 40 m dalla parabola twistata rilevando la presenza di una regione centrale di minimo. L'utilizzo di un opportuno interferometro ha permesso inoltre di verificare una variazione di fase pari a 2π in un piano ortogonale alla direzione di propagazione, intorno alla singolarità centrale, confermando così come i fasci **OAM** preservino la loro struttura vorticoso con la distanza. Successivamente, i due fasci con indici $\ell = 0$ e $\ell = 1$ sono stati modulati in frequenza da due segnali audio indipendenti e trasmessi alla distanza di 442 m dalle sorgenti. Alla ricezione, come illustrato in figura 7, un interferometro di fase costituito da due antenne Yagi-Uda poste ad una distanza reciproca di 4.5 m ha permesso di discriminare i due segnali sfruttando i diversi pattern di fase delle rispettive portanti. Combinando in fase i segnali ricevuti è stato infatti possibile ottenere un'interferenza costruttiva per il caso $\ell = 0$ e distruttiva per il caso $\ell = 1$, mentre una combinazione in controfase ha portato ad un isolamento del segnale audio associato al fascio $\ell = 1$.

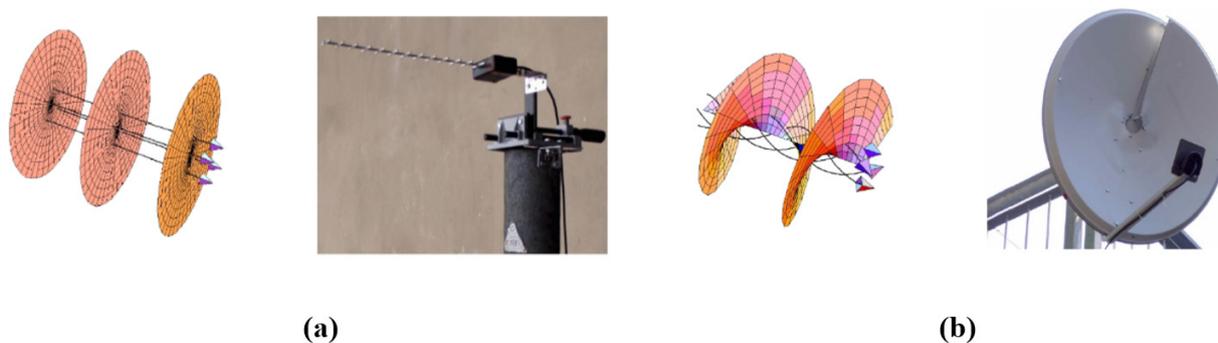


Fig. 6 – (a) Fascio con OAM $\ell = 0$ (antenna Yagi-Uda); (b) Fascio con OAM $\ell = 1$ (parabola twistata) [15]

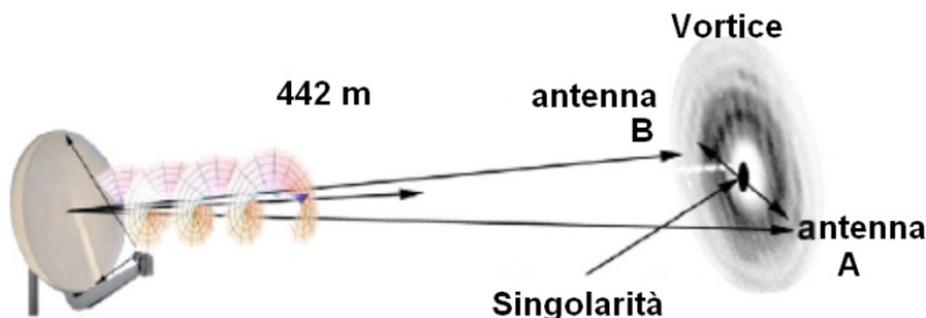


Fig. 7 – Trasmissione e ricezione di un fascio OAM con indice $\ell = 1$ nell'esperimento di Venezia [15]

In un successivo esperimento [18], svolto a Milano nel 2013, Tamburini e il suo gruppo hanno implementato una tecnica di multiplexing e demultiplexing su tre fasci **OAM** con indice $\ell = 1, 0, -1$, polarizzati linearmente e trasmessi alla frequenza di 17 GHz. I fasci sono stati generati e rilevati da parabole twistate di indice ℓ con un diametro di 36 cm e la distanza di link è stata fissata a 100 m, valore di molto superiore alla soglia di far-field relativa al sistema considerato (vedi figura 8). L'esperimento ha permesso di mettere in luce alcuni aspetti fondamentali legati alla trasmissione di fasci vorticosi. Ogni fascio **OAM** con indice ℓ è ricevuto correttamente da una parabola twistata avente lo stesso indice, posta perpendicolarmente alla direzione di

propagazione e centrata rispetto ad essa, in quanto solo in questo caso, in virtù dell'ortogonalità dei modi **OAM**, l'antenna è in grado di compensare gli sfasamenti dell'onda incidente e di respingere radiazione con vorticosità diversa da ℓ proveniente dalla stessa direzione. Se da un lato è stato pertanto necessario massimizzare l'ortogonalità dei modi **OAM**, garantendo l'allineamento tra i sistemi trasmittente e ricevente, dall'altro la presenza di diverse antenne in ricezione ha comportato la necessità di assicurare un adeguato isolamento modale, modificando il puntamento dei singoli trasmettitori in modo tale da sfruttare i diversi pattern di radiazione (si veda l'inclinazione delle parabole twistate in figura 8).

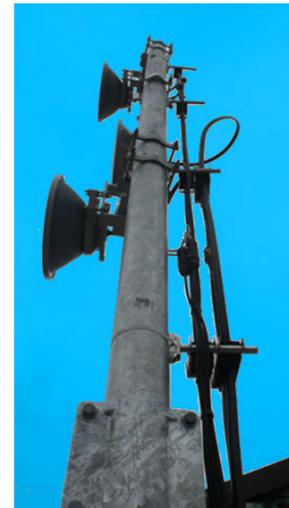
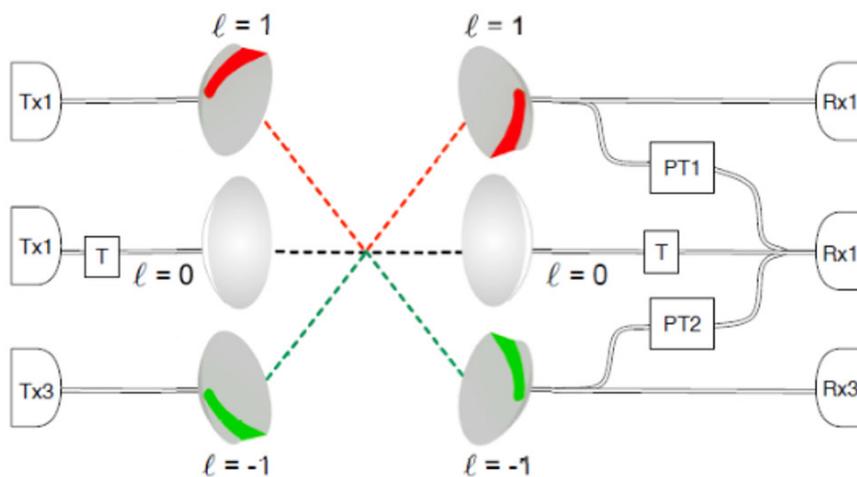


Fig. 8 – Trasmissione e ricezione di fasci OAM nell'esperimento di Milano

4.2 VISIONI DIVERGENTI SULL'IMPIEGO DELL'OAM ALLE RADIOFREQUENZE

Da un punto di vista fisico, la possibilità di sfruttare il momento angolare orbitale della radiazione elettromagnetica per trasmettere simultaneamente più canali radio alla stessa frequenza si presenta come un metodo del tutto nuovo rispetto alle tecniche precedentemente utilizzate per incrementare la capacità di informazione per unità di banda. Nonostante questo, gli esperimenti di Tamburini hanno innescato un acceso dibattito nel mondo scientifico volto a stabilire l'effettivo grado di innovazione del metodo proposto rispetto alle tecnologie preesistenti e ad evidenziarne i limiti pratici di applicabilità. In [19], Tamagnone et al. affermano come l'esperimento di Venezia sia riconducibile ad un particolare tipo di trasmissione **MIMO**, in cui la discriminazione dei segnali alla ricezione si basa sulle differenze nei pattern di fase che caratterizzano fasci **OAM** trasmessi collinearmente con diverso indice azimutale ℓ . Nei sistemi **MIMO** in condizioni di far-field, ovvero a distanze che superano il range di Fraunhofer per il caso in esame, soltanto un segnale può essere trasmesso con successo nell'ipotesi di polarizzazione lineare. Questo comportamento si ritrova nelle trasmissioni di tipo **OAM**, in cui, mantenendo costante la dimensione dell'interferometro di fase, come nell'esperimento di Tamburini, all'aumentare della distanza z dalle sorgenti l'intensità dei segnali ricevuti subisce un'attenuazione proporzionale a $z^{2\ell-2}$, favorendo un'adeguata ricezione del solo modo $\ell = 0$ [20]. Alla luce di queste considerazioni, Tamagnone giustifica l'esito positivo dell'esperimento di Venezia sottolineando come la separazione spaziale tra i sistemi trasmittente e ricevente fosse effettivamente solo di poco superiore alla soglia di far-field. Valutazioni analoghe sull'impiego dei fasci **OAM** nel campo delle radiocomunicazioni sono riscontrabili in [21]. In tale articolo gli autori mostrano esplicitamente come i modi fondamentali relativi ad una trasmissione **MIMO** tra schiere circolari di antenne isotropiche corrispondano esattamente ai fasci **OAM**. Per questa ragione, a loro parere, metodi di discriminazione dei segnali radio basati sul momento angolare orbitale si conducono, sotto particolari condizioni, ad un

sottoinsieme delle possibilità offerte dalle tecniche **MIMO**, non offrendo dunque ulteriori vantaggi in termini di capacità. In risposta a tali considerazioni critiche, gli autori di [22] sottolineano come l'originalità dell'esperimento di Venezia risieda nell'idea stessa di sfruttare l'**OAM**, quantità fisica diversa dal momento lineare e dallo spin, sui quali si basano essenzialmente le tecniche **MIMO** di trasmissione/ricezione. In effetti, la diversità topologica dei fasci vorticosi e la relazione di ortogonalità che li caratterizza potrebbero condurre a semplificazioni tecnologiche nei metodi di codifica/decodifica, oltre che all'individuazione di particolari contesti di applicazione in cui un metodo di distinzione dei segnali ricevuti basato sull'**OAM** sia preferibile alle tecniche preesistenti. Infine è auspicabile che si continui ad approfondire lo studio dei fasci vorticosi dal punto di vista sperimentale, in modo da stabilire con precisione quali siano le massime distanze entro cui sia possibile usufruirne compatibilmente con i limiti dell'odierna tecnologia.

5. COMUNICAZIONI IN NEAR-FIELD

Sebbene le onde vorticosi siano caratterizzate da un'intensità che si attenua maggiormente con la distanza nella regione centrale rispetto alla radiazione ordinaria, nelle applicazioni di near-field tale problematica non è rilevante e pertanto i fasci **OAM** potrebbero rappresentare un modo alternativo per aumentare la capacità del canale e, come già precedentemente accennato, semplificare le operazioni di elaborazione del segnale (*signal processing*) in virtù della loro naturale ortogonalità [23] [24]. In particolare, i modi **OAM** potrebbero essere impiegati per realizzare trasferimenti dati con un'elevata capacità in applicazioni wireless LAN per tipico uso indoor, utilizzando opportune tecniche adattative di codifica/decodifica.

Nonostante questo, è importante precisare come la possibilità di sfruttare l'ortogonalità dei fasci vorticosi per discriminare i segnali ricevuti risulti essere molto sensibile ad eventuali disallineamenti tra i sistemi trasmittente e ricevente, che devono essere disposti uno di fronte all'altro, perpendico-

larmente alla direzione di propagazione. Per questa ragione, piccoli spostamenti rispetto alla direzione di puntamento ottimale si riflettono pesantemente sull'efficienza di comunicazione del link considerato. Tuttavia, questa caratteristica apparentemente negativa può risultare particolarmente interessante per altre applicazioni in cui è di fondamentale importanza che l'informazione scambiata non venga intercettata da parti terze, come la condivisione di dati personali, i pagamenti elettronici, ecc., migliorando quindi la sicurezza già a livello fisico a prescindere da ulteriori protocolli di sicurezza di più alto livello, come le chiavi crittografiche e i sistemi di autorizzazione [25].

6. ULTERIORI APPLICAZIONI

L'interesse per la radiazione elettromagnetica **OAM** sta raggiungendo in questi anni livelli inattesi, soprattutto in ottica.

Uno dei risultati più importanti è consistito nella verifica del trasferimento di momento angolare orbitale tra luce e materia, che ha aperto la strada all'impiego dei fasci vorticosi come utili strumenti per la micromanipolazione (figura 9).

Per quanto concerne la questione della decodifica dei fasci **OAM** nelle comunicazioni ottiche in spazio libero, sono stati recentemente elaborati vantaggiosi sistemi, gli *OAM-sorters*, che permettono l'ordinamento di svariati fasci **OAM** [27] e stanno ormai soppiantando i precedenti apparati che consistevano in sofisticate catene di interferometri ed ologrammi di difficile realizzazione e limitato guadagno. Un *OAM-sorter* consiste in un apparato ottico che effettua una mappa logaritmico-polare trasformando modi azimutali in onde piane inclinate successivamente focalizzate in differenti posizioni laterali (figura 10).

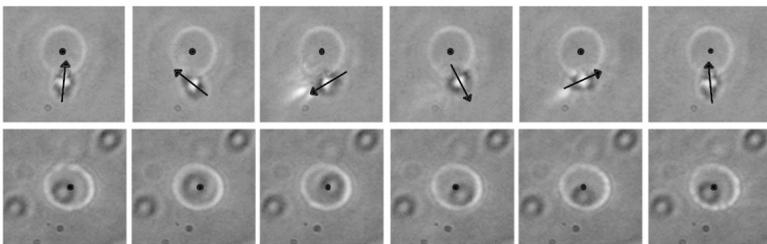
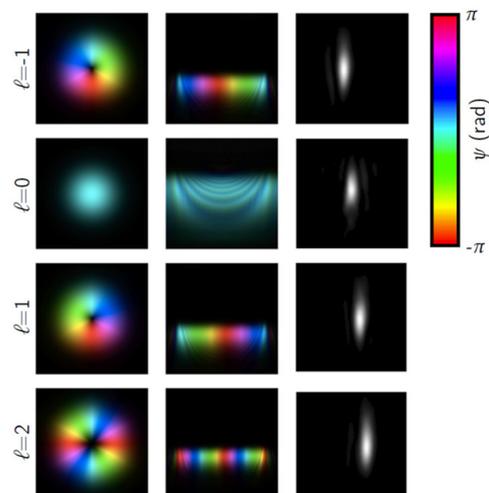
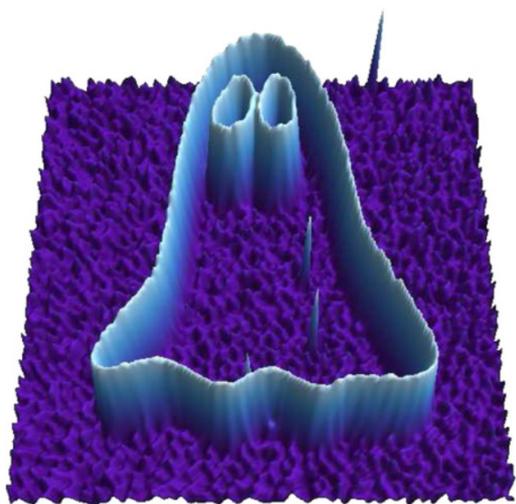


Fig. 9 – Fotografie successive che dimostrano il trasferimento di momento angolare tra luce laser e microparticelle. Nella prima sequenza una particella è messa in rotazione intorno al proprio asse per trasferimento di SAM; nella seconda sequenza, la particella è intrappolata nella regione centrale di un fascio OAM e percorre un'orbita circolare sotto l'azione del vortice [26]

Fig. 10 – Rappresentazione schematica del principio di funzionamento di un OAM-sorter: mediante uso di opportuni dispositivi ottici, i fasci OAM (prima colonna) vengono trasformati in onde piane inclinate (seconda colonna) che sono successivamente focalizzate in posizioni laterali differenti (terza colonna) [27]



Una delle principali ragioni alla base del notevole interesse suscitato dai fasci **OAM** consiste nella possibilità di utilizzarli negli esperimenti di ottica quantistica. Mediante il processo di *parametric downconversion*, un fotone ad alta frequenza attraversa un materiale non lineare generando due fotoni a bassa frequenza. La *parametric downconversion* gioca un ruolo fondamentale negli esperimenti quantistici poiché permette di fornire in uscita due stati che sono tra di loro coerenti (*entangled*) e possono pertanto essere impiegati per la crittografia e la codifica quantistica dell'informazione. I due fotoni in uscita sono prodotti mediante un processo che conserva energia, impulso e momento angolare, pertanto la misura di una di queste quantità per uno dei due fotoni consente di avere diretto accesso alla stessa quantità per l'altro fotone, anche quando i due fotoni sono molto distanti tra di loro. Il vantaggio di utilizzare l'**OAM** a questo proposito risiede nel fatto che ad esso è associato uno spazio degli stati ad alta dimensionalità, che permette di veicolare molta più informazione rispetto al comune impiego della sola polarizzazione (**SAM**) [12]. Per la stessa ragione, l'**OAM** può essere utilizzato nell'*imaging quantistico* [28], un processo che sfrutta la proprietà dell'*entanglement* per fornire immagini dell'oggetto target con risoluzione superiore a quella raggiungibile con l'ottica classica (figura 11).



7. CONCLUSIONI

L'implementazione di tecniche volte a produrre fasci elettromagnetici con diverso indice di vorticosità ha portato alla realizzazione di una serie di esperimenti nell'ambito dell'ottica, che spaziano dalle applicazioni quantistiche alla manipolazione di micro particelle, aprendo così la strada a nuove prospettive tecnologiche.

Recentemente l'impiego dei fasci **OAM** è stato esteso anche alle comunicazioni radio in spazio libero, dove, tuttavia, ha dato origine a varie discussioni sull'effettiva possibilità di superare alcuni aspetti critici, quali la sensibilità al disallineamento tra le antenne trasmettenti e riceventi e l'attenuazione nelle trasmissioni in campo lontano. Ulteriori indagini sui potenziali vantaggi e sui limiti di applicabilità relativi a questo tipo di fasci risultano a nostro avviso doverose e sono già state in parte sviluppate in un esperimento da noi realizzato presso il **Centro Ricerche e Innovazione Tecnologica Rai**, che sarà presentato in un numero successivo di questa rivista. In tale esperimento viene provata la trasmissione simultanea di due segnali DVB-T codificati come modi **OAM** $\ell = 1$ e $\ell = -1$, realizzata mediante l'utilizzo di schiere circolari uniformi di antenne, ad una distanza più di tre volte superiore alla soglia di far-field. A differenza dell'esperimento di Milano [18], i fasci **OAM** sono stati trasmessi colinearmente in modo da sfruttare al meglio la loro intrinseca ortogonalità sull'asse di propagazione. Si rimandano comunque ad un prossimo articolo i dettagli e i risultati di tale esperimento.

Fig. 11 – Un esempio di imaging mediante l'impiego di OAM: le misure di coincidenza tra due fotoni entangled in OAM, uno dei quali è fatto interagire con l'oggetto target, sono utilizzate per ricostruire l'immagine [28]

BIBLIOGRAFIA

- [1] Fonte Cisco: <http://www.cisco.com> (ultimo accesso 10 giugno 2015)
- [2] L. Allen, M. W. Beijersbergen, R. J. C. Spreeuw e J. P. Woerdman, [Optical angular momentum of light and the transformation of Laguerre Gauss laser modes](#), in "Physical Review A", vol. 45, 1992, pp. 8185–8189.
- [3] M. J. Padgett e L. Allen, [Light with a twist in its tail](#), in "Contemporary Physics", vol. 41, Issue 5, 2000, pp. 275-285.
- [4] G. Molina-Terriz, J. P. Torres e L. Torner, [Management of the Angular Momentum of Light: Preparation of Photons in Multidimensional Vector States of Angular Momentum](#), in "Physical Review Letters", vol. 88, 013601, 2001.
- [5] A. Vaziri, G. Weihs e A. Zeilinger, [Superpositions of the orbital angular momentum for applications in quantum experiments](#), in "Journal of Optics B: Quantum Semiclassical Optics", vol. 4, Numero 2, 2002, pp. S47-S51.
- [6] G. Anzolin, F. Tamburini, A. Bianchini, G. Umbriaco e C. Barbieri, [Optical vortices with starlight](#), in "Astronomy and Astrophysics", vol. 488, Numero 3, 2008, pp. 1159-1165.
- [7] G. Gibson, J. Courtial, M. J. Padgett et al., [Free-space information transfer using light beams carrying orbital angular momentum](#), in "Optics Express", vol. 12, Issue 22, 2004, pp. 5448-5456.
- [8] M. P. J. Lavery, D. J. Robertson, A. Sponselli et al., [Efficient measurements of an optical orbital-angular-momentum spectrum comprising more than 50 states](#), in "New Journal of Physics", vol. 15, gennaio 2013.
- [9] A. Dudley, T. Mhlanga, M. Lavery et al., [Efficient sorting of Bessel beams](#), in "Optics Express", vol. 21, Issue 1, 2013, pp. 165-171.
- [10] N. Bozinovic, P. Kristensen, S. Ramachandran e M. Brodsky, [Record-length transmission of photons entangled in orbital angular momentum \(OAM\)](#), Conference paper, Frontiers in Optics 2011, San Jose, California, USA, 2011.
- [11] N. Bozinovic, P. Kristensen e S. Ramachandran, [Are orbital angular momentum \(OAM/Vortex\) states of light long-lived in fibers?](#), Conference paper, Frontiers in Optics 2011, San Jose, California, USA, 2011.
- [12] A. M. Yao e M. J. Padgett, [Orbital angular momentum: origins, behavior and applications](#), in "Advances in Optics and Photonics", vol. 3, Issue 2, 2011, pp. 161-204.
- [13] A. Bennis, R. Niemiec, C. Brousseau, K. Mahdjoubi e O. Emile, [Flat plate for OAM generation in the millimeter band](#), in "EuCAP 2013 – 7th European Conference on Antennas & Propagation", Gothenburg, Sweden, 2013, pp. 3203-3207.
- [14] J. R. Trinder, Patent WO/2005/069 443, 2005.
- [15] F. Tamburini, E. Mari, A. Sponselli, B. Thidé, A. Bianchini e F. Romanato, [Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test](#), in "New Journal of Physics", vol. 14, Issue 3, 2012.
- [16] S. M. Mohammadi, L. K. S. Daldorff, J. E. S. Bergman et al., [Orbital angular momentum in radio - a system study](#), in "IEEE Transactions on Antennas and Propagation", vol. 58, Issue 2, 2010, pp. 565–572.
- [17] B. Thidé, H. Then, J. Sjöholm et al., [Utilization of photon orbital angular momentum in the low-frequency radio domain](#), in "Physical Review Letters", vol. 99, Issue 8, 087701, 2007.
- [18] F. Tamburini, B. Thidé, E. Mari et al., [N-tupling the capacity of each polarization state in radio links by using electromagnetic vorticity](#), Cornell University Library, 2013
- [19] M. Tamagnone, C. Craeye e J. Perruisseau-Carrier, [Comment on 'Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental](#)

- [test](#), in "New Journal of Physics", vol. 14, 2012.
- [20] M. Tamagnone, C. Craeye e J. Perruisseau-Carrier, [Comment on Reply to comment on 'Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test'](#), in "New Journal of Physics", vol. 15, Luglio 2013.
- [21] O. Edfors e A. J. Johansson, [Is orbital angular momentum \(OAM\) based radio communication an unexploited area?](#), in "IEEE Transactions on Antennas and Propagation", vol. 60, no. 2, 2012, pp. 1126–1131.
- [22] F. Tamburini, B. Thidé, E. Mari et al., [Reply to comment on 'Encoding many channels on the same frequency through radio vorticity: first experimental test'](#), in "New Journal of Physics", vol. 14, Novembre 2012.
- [23] Y. Yan, G. Xie, M. P. J. Lavery, et al., [High-capacity millimetre-wave communications with orbital angular momentum multiplexing](#), in "Nature Communications", vol. 5, no. 4876, 2014.
- [24] E. Mari, F. Spinello, M. Oldoni, et al., [Near-Field Experimental Verification of Separation of OAM Channels](#), in "IEEE Antennas and Wireless Propagation Letters", vol. 14, 2015, pp. 556-558.
- [25] F. Spinello, E. Mari, M. Oldoni, et al., [Experimental near field OAM-based communication with circular patch array](#), Cornell University Library, 2015.
- [26] A. T. O'Neil, I. MacVicar, L. Allen e M. J. Padgett, [Intrinsic and Extrinsic Nature of the Orbital Angular Momentum of a Light Beam](#), in "Physical Review Letters", vol. 88, Issue 5, 053601, 2002.
- [27] G. C. G. Berkhout, M. P. J. Lavery, J. Courtial, M. W. Beijersbergen e M. J. Padgett, [Efficient sorting of orbital angular momentum states of light](#), in "Physical Review Letters", vol. 105, 153601, 2010.
- [28] B. Jack, J. Leach, J. Romero, et al., [Holographic ghost imaging and the violation of a Bell inequality](#), in "Physical Review Letters", vol. 103, 083602, 2009.