

# Più veloci della luce?

## A proposito della recente cronaca giornalistica

Erasmus Recami

IN QUESTO RAPIDO SCRITTO INFORMATIVO, DOPO UNA SOMMARIAMENTE INTRODUZIONE TEORICA, PRESENTIAMO UNA PANORAMICA RAGIONATA DELLA SITUAZIONE SPERIMENTALE: BREVE (RIMANDANDO PER I DETTAGLI A UN FUTURO ARTICOLO), MA CON UNA BIBLIOGRAFIA IN ALCUNI CASI SUFFICIENTE A FORNIRE AGLI INTERESSATI UN'INFORMAZIONE COERENTE E ADEGUATA; E SENZA DIMENTICARE DI SEGNALARE, PER LO MENO NEI DUE SETTORI OGGI PIÙ ALLA RIBALTA, QUALCHE ALTRO MERITEVOLE ESPERIMENTO.

La possibile esistenza di oggetti più veloci della luce ha attratto l'attenzione dei fisici fin da tempi lontani. Uno dei primi scienziati a nominare particelle *più veloci dei raggi del Sole* è stato probabilmente Lucrezio, nel 50 a.C. circa, nel suo famoso *De Rerum Natura* «Quone vides citius debere et longius ire Multiplexque loci spatium transcurrere eodem Tempore quo Solis pervolant lumina coelum?».

Ancora in epoca pre-relativistica, non pochi furono gli studi al riguardo, da quelli di J.J. Thomson a quelli del grande A. Sommerfeld.

Con l'avvento della teoria della Relatività Speciale di Einstein, a partire dal 1905, si diffuse però la convinzione che la velocità  $c$  della luce nel vuoto fosse necessariamente il limite superiore di ogni velocità. Ad esempio, R.C. Tolman nel 1917 credette di avere dimostrato in un suo *paradosso* che l'esistenza di particelle con velocità maggiori di  $c$  avrebbe permesso l'invio di informazioni nel passato. Tale convinzione bloccò per oltre mezzo secolo, a parte uno scritto isolato (1922) del matematico italiano G. Somigliana, le ricerche sulle velocità Super-luminali ( $V > c$ ), le quali ripresero a partire dagli anni Sessanta e Settanta ad opera soprattutto,

negli Usa, di E.C.G. Sudarshan e collaboratori [1] e, in Europa, di E. Recami e colleghi (R. Mignani e altri) [2].

Gli oggetti Super-luminali sono stati chiamati tachioni,  $T$ , da G. Feinberg, con riferimento alla parola greca  $\tauαχύς$ , veloce, il che a suo tempo ci ha indotto a coniare il termine bradioni,  $B$ , per gli ordinari oggetti sub-luminali ( $v < c$ ), dalla parola greca  $βραδύς$ , lento. Vengono chiamati infine luxoni gli oggetti che viaggiano esattamente alla velocità della luce, come i fotoni.

In anni recenti i termini *tachione* e *super-luminale* sono purtroppo caduti nelle mani (furbe, più che folli) di prano-terapisti e semplici imbrogliatori, che hanno cominciato a spillare quattrini agli ingenui: ad esempio vendendo crotti (!) che curerebbero vari malanni con l'*emettere tachioni*. . . Noi ne stiamo qui parlando, però, perché almeno quattro differenti settori della fisica sperimentale, a conferma di predizioni esistenti da lunga data [3], sembrano oggi suggerire l'effettiva esistenza di moti superluminali. Tanto che il 30 maggio 2000 il *New York Times* riprese la notizia di due di questi esperimenti, imitato il dì seguente dalla stampa di mezzo mondo. [I lavori alla base di quanto segue possono essere scaricati da ResearchGate o,

più facilmente, dal sito [www.unibg.it/recami](http://www.unibg.it/recami) (benché aggiornato solo fino a circa tre anni or sono)].

### Relatività Speciale ed Estesa

Premettiamo che la Relatività Speciale, abbondantemente verificata, può essere costruita su due semplici e naturali postulati: 1) che le leggi fisiche valgano non solo per un osservatore particolare, ma per tutta la classe degli osservatori *inerziali*; e 2) che spazio e tempo siano omogenei e lo spazio sia inoltre isotropo. Dai suddetti postulati si deduce teoricamente che deve esistere una, e una sola, velocità invariante; e l'esperienza diretta ci dice che tale velocità è quella,  $c$ , della luce nel vuoto: infatti, la luce possiede la caratteristica di presentare sempre la stessa velocità nel vuoto, anche se le corriamo incontro, oppure fuggiamo nella direzione opposta. . .

È proprio questa caratteristica, di essere invariante, che rende la velocità della luce del tutto eccezionale; nessun bradione, e nessun tachione, potrà godere della medesima proprietà!

Un'altra (nota) conseguenza dei nostri due postulati è che l'energia totale di una comune particella cresce al crescere della sua velocità  $v$ , tendendo all'infinito.

## PERCORSI DIDATTICI

nito quando  $v$  tende a  $c$ . Quindi occorrebbero forze infinite per far raggiungere a un bradione la velocità della luce. Questo fatto ha generato la diffusa opinione che la velocità  $c$  non possa essere né raggiunta né superata. Però, come esistono i fotoni, che nascono campano e muoiono sempre alla velocità della luce (senza mai avere avuto bisogno di accelerare per raggiungerla), così possono esistere particelle, i tachioni [4], che viaggiano sempre a velocità  $V$  maggiori di  $c$  (vedere fig. 1). Questa circostanza è stata pittorescamente illustrata da George Sudarshan: «Supponiamo che un demografo, che studi i popoli dell'India, se ne esca con l'ingenua affermazione che non c'è nessuno a nord dell'Himalaya, dato che mai alcuno è riuscito a valicare tali montagne. Questa sarebbe una conclusione assurda. I popoli dell'Asia Centrale sono nati e vivono al di là dell'Himalaya: essi non hanno avuto bisogno di nascere in India e poi scavalcare i monti. Analogamente per le particelle più veloci della luce». Aggiungiamo che, sempre a partire dagli stessi due postulati (più un terzo, ancora più ovvio), la teoria della relatività può essere generalizzata [3,4] in modo da inglobare anche gli oggetti superluminali; questa estensione, che ha compiuto i quarant'anni, è in gran parte dovuta alla scuola italiana, mediante una serie di lavori effettuati soprattutto, a partire dagli anni Sessanta-Settanta, a Milano, Catania e Bergamo. Anche secondo la *Relatività speciale Estesa* [3] la velocità  $c$  della luce, oltre che invariante, è una velocità limite: ma ogni valore limite possiede due lati, due fianchi, e vi ci si può avvicinare a priori sia da sinistra, sia da destra. (Tra parentesi, la teoria di cui si sta parlando, inizialmente chiamata *Relatività Speciale Estesa* è ora detta *Non-Restricted special Relativity*).

In realtà, la formulazione usuale della relatività speciale è molto limitativa. Ad esempio, anche lasciando da parte i tachioni, essa può essere facilmente ampliata in modo da includere l'antimateria [5]. Si trova allora che lo spaziotempo è a priori popolato da particelle usuali  $P$  (che viaggiano in avanti nel tempo trasportando energia positiva), e da particelle duali  $Q$  che viaggiano all'indietro nel tempo trasportando energia negativa. Queste ultime a noi appariranno come antiparticelle, cioè come particelle regolarmente in moto in avanti nel tempo e con energia positiva, ma con tutte le cariche additive (ad es. la carica elettrica) cambiate di segno (fig. 2). Per tentare di chiarire, ricordiamo che noi, osservatori macroscopici, procediamo nel tempo in un'unica direzione ben determinata, per cui non possiamo neanche osservare un moto all'indietro nel tempo...; e ogni oggetto di tipo  $Q$ , in viaggio all'indietro nel tempo (con energia negativa), verrà da noi necessariamente reinterpretato come un anti-oggetto, con le cariche cambiate di segno, ma in moto in avanti nel tempo (con energia positiva) [3,5]. Ma abbandoniamo l'antimateria, della quale riparleremo in un prossimo arti-

colo, e torniamo ai tachioni. Una forte obiezione alla loro esistenza si basa sull'opinione che coi tachioni si possano inviare segnali nel passato, per il fatto che un tachione  $T$ , che a un primo osservatore appaia diciamo emesso da  $A$  e assorbito da  $B$ , può apparire ad un secondo osservatore come un tachione  $T'$  in viaggio all'indietro nel tempo con energia negativa. Tuttavia, applicando la medesima regola di reinterpretazione vista più sopra (come è obbligatorio fare),  $T'$  apparirà al nuovo osservatore semplicemente come un antitachione  $\bar{T}$  emesso da  $B$  e assorbito da  $A$ , e quindi in viaggio in avanti nel tempo e con energia positiva, anche se nella direzione spaziale opposta. Con ciò, ogni viaggio nel passato, ed ogni energia negativa, scompaiono... A partire da questa osservazione è possibile risolvere [6] i cosiddetti paradossi causali associati ai moti superluminali: paradossi tanto più istruttivi e divertenti quanto più sofisticati, ma che non possiamo qui riaffrontare (ne sono stati proposti da R.C. Tolman, J. Bell, F.A.E. Pirani, J.D. Edmonds e altri) [6,3]. Accenniamo solo a quanto segue. Il detto principio di reinterpretazione – che fa capo a Stueckelberg-Feynman-Sudarshan-Recami, e

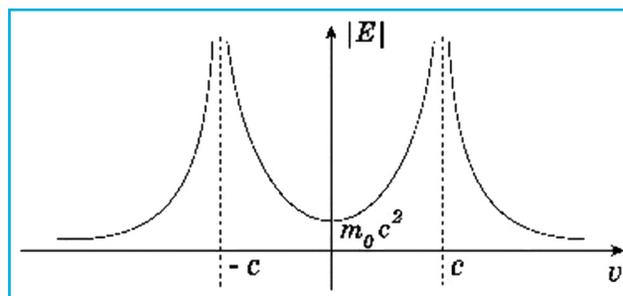


Fig. 1. Andamento dell'energia di un oggetto libero al variare della sua velocità [2,4].

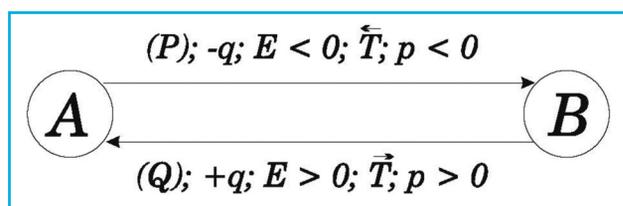


Fig. 2. Illustrazione della regola di switching o principio di reinterpretazione, di Stueckelberg-Feynman-Sudarshan-Recami [3,5]:  $Q$  apparirà essere l'antiparticella di  $P$ . Vedere il testo.

secondo il quale, in parole semplici, i segnali sono trasportati solo dagli oggetti che appaiono avere energia positiva – elimina il trasporto d’informazione all’indietro nel tempo, ma ciò al prezzo di abbandonare l’inveterata convinzione che il giudizio su ciò che è causa e su ciò che è effetto sia indipendente dall’osservatore. Infatti, nel caso esaminato, il primo osservatore giudicherà l’evento in *A* causa dell’evento in *B*. Viceversa, il secondo osservatore giudicherà l’evento in *B* causa dell’evento in *A*. Tutti gli osservatori però vedranno la causa precedere temporalmente il proprio effetto. Il prendere in considerazione nuovi oggetti ci costringe sempre a una critica dei nostri pregiudizi. Se si impone che per tutti gli osservatori nei fenomeni sia soddisfatta la legge di causalità (ritardata), non si deve poi pretendere che siano invarianti anche certi *dettagli* della descrizione dei fenomeni stessi: nella fattispecie, l’assegnazione dei nomi di causa ed effetto [6,2]. Per illustrare la natura delle nostre difficoltà nell’accettare ad esempio che i ruoli di “causa” ed “effetto” dipendano dall’osservatore, citiamo un’analoga situazione che non implica pregiudizi attuali. Per gli antichi Egizi, a conoscenza del solo Nilo e dei suoi tributari che scorrono tutti da Sud verso Nord, il significato della parola *Sud* coincideva con quello di *contro-corrente* e il significato della parola *Nord* con quello di *lungo-corrente*. Quando gli Egizi scoprirono l’Eufrate, che fortunatamente corre da Nord a Sud, essi caddero in una tale crisi che essa è ricordata nella stele di Tutmosi I, la quale ci parla di «quella corrente invertita che va contro corrente (cioè verso Sud) andando lungo corrente».

La fisica teorica di questo secolo ci ha condotto in modo naturale a ipotizzare vari tipi di oggetti: monopoli magnetici, quark, stringhe, particelle esotiche, ta-

chioni, oltre ai buchi neri; e vari settori della fisica non potrebbero procedere senza di loro, benché di nessuno di essi sia ancora certa l’esistenza (anche perché tra loro sussistono dei legami finora trascurati: ad esempio, una carica elettrica superluminale si comporta come un monopolo magnetico; e un buco nero a priori può essere sorgente di materia superluminale). Secondo Democrito, ogni cosa che fosse pensabile senza incontrare contraddizioni doveva esistere da qualche parte nell’universo illimitato. Questo punto di vista, che ricevette da parte di M. Gell-Mann il nome di *totalitarian principle*, è stato espresso nella forma scherzosa «ogni cosa non proibita è obbligatoria». Applicandolo ai tachioni, esso portò ad affermare che se i tachioni esistevano, bisognava trovarli; e se non esistevano bisognava trovarne un chiaro perché...

### La situazione sperimentale

La Relatività Estesa permette di comprendere meglio la fisica *ordinaria*, anche se i tachioni non esistessero come oggetti asintoticamente liberi nel nostro cosmo. Come si è detto, noi ne stiamo qui parlando, però, perché almeno quattro serie di differenti osservazioni sperimentali sembrano indicare l’effettiva esistenza di moti a velocità maggiori di quella della luce.

**A) Neutrini.** In primo luogo, una serie di esperimenti cominciati nel 1971, sembrò indicare che il quadrato della massa dei neutrini muonici, e più recentemente anche dei neutrini elettronici, fosse negativo; il che se confermato vorrebbe dire che (usando il linguaggio naïve comunemente adottato) tali neutrini hanno *massa immaginaria* e sono quindi tachionici, o in buona parte tachionici [7,3]. (Nel linguaggio della Re-

latività speciale Estesa, la relazione di dispersione per un tachione libero diventa in realtà  $E^2 - \mathbf{p}^2 = -m_0^2$ , e quindi non c’è bisogno di masse immaginarie dato che il segno meno è fornito dalla teoria della Relatività stessa).

Nel 1986 noi suggerimmo dei semplici checks sperimentali, mai eseguiti, per verificarne la superluminosità [7]. Ma un esperimento [8] fu effettuato, e reso pubblico, solo nel 2011, tentando di misurare direttamente la velocità dei neutrini muonici emessi dal CERN di Ginevra e sparati in direzione dei laboratori italiani del Gran Sasso, e quivi giunti dopo 730 km di volo.

L’impresa era disperata, perché la figura 1 mostra chiaramente che un tachione ha velocità *V* abbastanza diversa da (maggiore di) *c* soltanto se la sua energia è bassa. Ma l’esperimento *Opera* era sensibile solo a neutrini di energia *E* elevata, circa 17 GeV, dotati quindi di velocità *V* vicinissima a *c* (diciamo  $c + \epsilon$  nel caso superluminale); e un calcoletto da ragazzi mostra che in tal caso il tempo di volo di quei neutrini non è materialmente distinguibile da quello di una particella dotata di velocità *c*, per lo meno lungo distanze terrestri... Perché allora fu annunciata, e poi ritirata, la superluminosità di quei neutrini? Perché nessuno prese in considerazione la banale relazione tra Energia *E* e velocità *V*

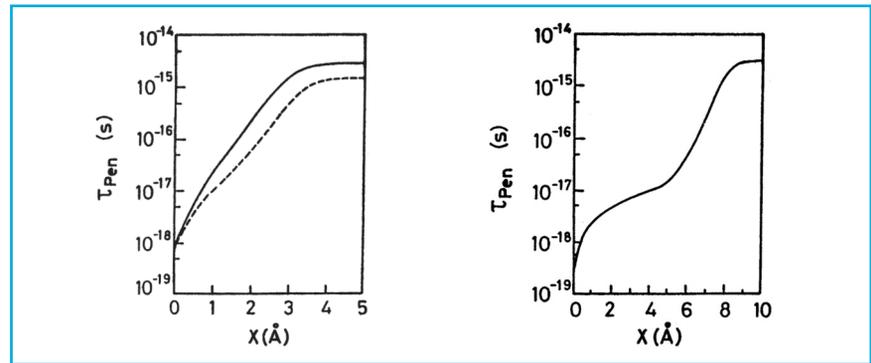
$$E = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{\left(\frac{V}{c}\right)^2 - 1}}$$

fornita in modo naturale (ma rigoroso [3]) dalla Relatività Speciale Estesa nel caso di velocità  $V > c$ . I valori di *V* misurati dall’esperimento potevano essere veri solo nel caso che la massa a riposo  $m_0$  dei neutrini muonici fosse stata dell’ordine di quella dei muoni stessa, cioè molte milioni di volte maggiore di quella comunemente assunta!

Per distanze interstellari e intergalattiche, invece, è possibile misurare direttamente la differenza di velocità di neutrini rispetto a quella  $c$  della luce nel vuoto. E dati molto interessanti esistono infatti per i neutrini giunti dalla Supernova 1987A, esplosa a 170 mila anni-luce da noi.

**B) Micro-quasar galattici.** In secondo luogo, altre osservazioni sperimentali, questa volta astrofisiche, avevano rivelato, sempre a partire dal 1971, la presenza di oggetti molto veloci espulsi dal nocciolo di vari quasars; e tali velocità risultavano apparentemente superluminali se i quasars sono davvero molto distanti da noi, come normalmente ritenuto [9]. Ma alcuni illustri benché isolati autori, come H.Arps, ammonirono che i tali quasars potrebbero essere a noi molto più vicini del previsto; in tal caso quelle velocità potrebbero essere subluminali. Negli ultimi anni, tuttavia, sono state scoperte delle apparenti espansioni superluminali all'interno di corpi (chiamati provvisoriamente micro-quasars) appartenenti alla nostra Galassia [10]; e in questo caso le incertezze sulle distanze sono di poco conto. È d'obbligo ricordare però che per queste osservazioni astronomiche esistono interpretazioni ortodosse, le quali (pur appearing a noi statisticamente deboli [11]) paiono accettate dalla maggior parte degli astrofisici. Per una discussione teorica, si veda la Ref. [11].

Dal punto sperimentale, qui menzioniamo soltanto che semplici considerazioni geometriche nello spazio di Minkowski indicano che una singola sorgente superluminale di luce verrebbe osservata [11,3]: (I) inizialmente, nella fase di *bang ottico* (analogo al *bang acustico* prodotto da un aereo che viaggia con velocità supersonica *costante*),



come una sorgente intensa che appare all'improvviso [11]; e che in seguito (II) appare scindersi in DUE oggetti che si allontanano l'uno dall'altro [3] con velocità relativa  $V > 2c$ .

**C) Onde evanescenti e tunnelling photons.** In terzo luogo, nell'ambito della meccanica quantistica (e precisamente nei fenomeni di tunnelling), era stato calcolato che il tempo di tunnelling, valutato dapprima quale semplice *phase time alla Wigner* [12] e poi analizzando in dettaglio l'evoluzione di pacchetti d'onda, non dipende dalla lunghezza della barriera per barriere *opache* (effetto Hartman) [12]: il che implica velocità (di gruppo, o meglio di picco)  $V$  superluminali e arbitrariamente grandi [12] all'interno di barriere sufficientemente lunghe e di lunghezza crescente (fig. 3). Esperimenti che possano verificare questa previsione con, diciamo, elettroni sono difficili e rari. Per fortuna però l'equazione di Schroedinger in presenza di barriera di potenziale è matematicamente identica all'equazione di Helmholtz per un'onda elettromagnetica [12] che si propaghi ad esempio in una guida d'onda metallica disposta lungo l'asse  $x$ : e una barriera di altezza  $U$  maggiore dell'energia  $E$  dell'elettrone corrisponde ad un restringimento della guida d'onda, ovvero a un segmento

**Fig. 3. Andamento del tempo di penetrazione di un pacchetto d'onde al variare dello spazio percorso all'interno di una barriera di potenziale (da Olkhovski et al, Ref. [12]). Secondo le predizioni della meccanica quantistica, la velocità all'interno della barriera cresce illimitatamente per barriere opache; e il tempo di tunnelling non dipende dalla larghezza della barriera [12].**

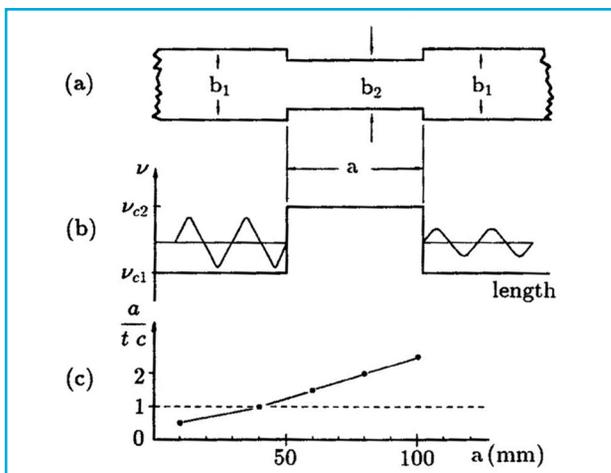
di guida con larghezza trasversale inferiore a un certo valore critico. Un tratto di guida sottodimensionata si comporta quindi come una barriera per l'onda (*photonic barrier* [12]): l'onda vi acquista, così come un elettrone all'interno della barriera quantistica, un impulso o numero d'onda immaginario, assumendovi di conseguenza un andamento lungo  $x$  a caduta esponenziale e divenendo un'onda *evanescente* (per poi ritornare a propagarsi normalmente, anche se con ampiezza ridotta, quando il restringimento cessa e la guida ritorna alle dimensioni trasversali originarie). Quindi un esperimento di tunnelling può essere simulato [12] ricorrendo ad onde evanescenti (per le quali si può generalizzare il concetto di velocità di gruppo [13]); e che le onde evanescenti viaggino con velocità superluminali è stato effettivamente verificato in una serie di famosi esperimenti (fig. 4).

In effetti, vari esperimenti, effettuati dal 1992 in poi da G.Nimtz a Colonia [14], dal gruppo di R.Chiao, A.Steinberg et al. a Berkeley [15], da A.Ranfagni e colleghi a Firenze, e da altri a Vienna, Orsay, Rennes, hanno verificato che i *fotoni tunnellanti* viaggiano con velocità di gruppo superluminali. Questi esperimenti hanno avuto a suo tempo vasta risonanza [16], anche tra la stampa non specializzata, avendone parlato *Scientific American*, *Nature*, *New Scientist*, e perfino *Newsweek*. Aggiungiamo che dalla Relatività Speciale Estesa si sapeva [17] che le onde evanescenti dovevano possedere velocità maggiori di  $c$ ; il tutto appare quindi auto consistente.

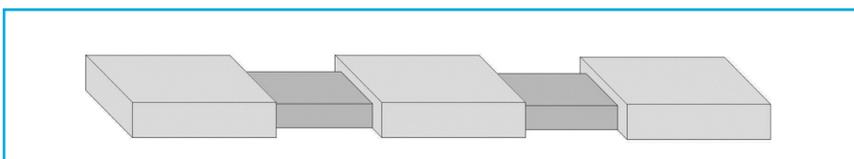
Le discussioni al riguardo si riferiscono non ai risultati sperimentali (i quali possono essere riprodotti persino mediante elaborazioni numeriche [18,19] basate sulle sole equazioni di Maxwell), ma alla questione se essi permettano o no l'invio di segnali, o di informazione, a velocità superluminali [19,13]. Segnaliamo che l'esperimento più interessante di questa serie è quello effet-

tuato con *due barriere* (ad es., con due tratti di guida d'onda sottodimensionata separati da un tratto di guida normale (fig. 5): per onde entro opportune bande di frequenza, cioè per *tunnelling* fuori risonanza, si è trovato che il tempo di attraversamento del sistema di guide d'onda non dipende dalla lunghezza della guida (normale) intermedia: ovvero che lungo di essa la velocità è infinita [20]. Ciò concorda con le previsioni della Meccanica Quantistica per il *tunnelling* non riso-

**Fig. 4. Risultati di tunnelling classico mediante esperimenti con onde evanescenti (vedere il testo), le quali pure era previsto fossero superluminali in base alla Relatività Speciale Estesa [3,4]. Precisamente, la figura mostra uno dei risultati delle misure in Ref. [14], ovvero la velocità media di attraversamento della regione di evanescenza (tratto di guida sottodimensionata, o barriera) al variare della sua lunghezza. Come previsto [17,12], la velocità media supera  $c$  per barriere abbastanza lunghe.**



**Fig. 5. L'interessante esperimento in guida d'onda metallica con due barriere (tratti di guida sottodimensionata), cioè con due regioni di evanescenza [20]. Vedere il testo.**



nante attraverso due successive barriere opache (il *tunnelling phase time*, pur dipendendo dall'energia entrante, non dipende dalla distanza tra le due barriere [21]). Detto importante esperimento poteva essere ripetuto, approfittando anche della circostanza che interessanti regioni di evanescenza si possono facilmente costruire nei più svariati modi o con differenti *photonic band-gap materials* e *gratings* (potendosi usare da *multilayer dielectric mirrors*, a semiconduttori, e cristalli fotonici...). In effetti, l'esperimento riportato in Ref. [22], e che ha avuto risultati molto positivi, è ricorso a due *gratings* in fibra ottica: le previsioni in Refs. [21], confermate teoricamente da fisici quali Y. Aharonov et al., sono state così sperimentalmente verificate nel 2002 presso il Politecnico di Milano [22].

Non possiamo tralasciare una ulteriore questione, che, essendo delicata, non potrebbe trovare posto in una rassegna breve come questa, dato che l'ultimo contributo sperimentale ad essa (effettuato a Princeton da J. Wang et al. e pubblicato da *Nature* il 20.7.00) è uno dei due lavori citati dal *N.Y. Times*, e ripreso a fine luglio 2000 dalla stampa internazionale.

Anche se in Relatività Estesa tutti gli usuali paradossi causali sembrano risolvibili [3,6], ciononostante occorre tenere presente che (quando si abbia a che fare con un oggetto,  $O$ , viaggiante a velocità superluminali) si può incappare in contributi negativi ai tempi di *tunnelling* [23]: senza che ciò debba essere considerato come qualcosa di non fisico [3,6]. Infatti, ogniqualvolta un *oggetto* (particella, impulso elettromagnetico...)  $O$  supera la velocità infinita rispetto a un certo osservatore, esso passerà ad apparire a quell'osservatore come un *anti-oggetto*  $\bar{O}$  viaggiante nella direzione spaziale opposta

[3,6]. Per esempio, passando dal lab a un riferimento  $F$  in moto nella stessa direzione delle particelle o onde entranti nella barriera, gli oggetti  $O$  che attraversano la parte finale della barriera (con velocità quasi infinita [12,19,21]) appariranno all'osservatore  $F$  quali anti-oggetti  $\bar{O}$  attraversanti quella porzione di barriera in direzione spaziale opposta [3,6].

Nel nuovo riferimento  $F$  questi anti-oggetti fornirebbero, quindi, un contributo negativo al *tunnelling time*: che potrebbe perfino risultare negativo nel suo complesso [12]. Ciò che vogliamo qui sottolineare è che l'evenienza di detti tempi negativi è predetta dalla stessa Relatività, sulla base degli usuali postu-

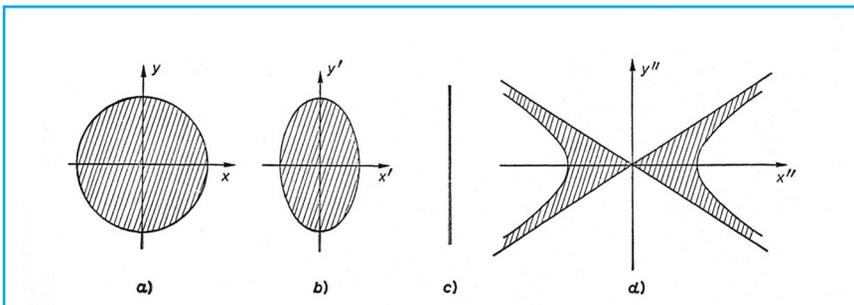
lati [3,6,21,12,19]. (Nel caso di un pacchetto d'onde non polarizzato, l'anti-pacchetto coincide col pacchetto; se un fotone ha elicità, il suo anti-fotone ha però elicità opposta). Dal punto di vista teorico, oltre alle Refs. [21,12,19,6,3], si veda l'articolo [24]. Dal punto di vista sperimentale (quite interesting!) si vedano i lavori [25], all'ultimo dei quali si è già accennato.

**D) Soluzioni localizzate superluminali delle equazioni d'onda. Le X-shaped waves.** Il quarto settore (e trascureremo gli altri) è non meno importante. Esso è ridiventato attuale da quando alcuni gruppi di ingegneri hanno riscoperto in una serie di bei la-

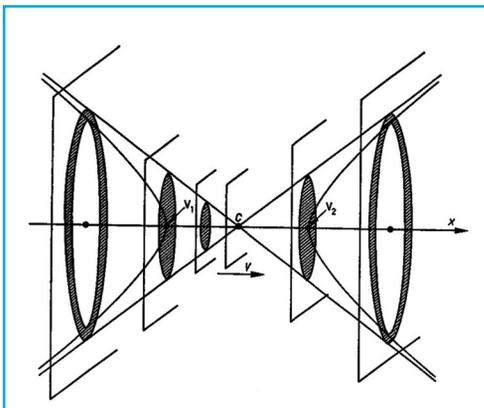
vori che qualunque equazione (lineare) d'onda – per fissare le idee, pensiamo al caso elettromagnetico – ammette anche soluzioni tanto sub- quanto superluminali (oltre alle solite onde piane, o sferiche, aventi velocità  $c/n$ ). Ricordiamo che, a partire dal lavoro pionieristico di H. Bateman, era lentamente divenuto noto che tutte le equazioni d'onda omogenee (in una accezione generale: scalari, elettromagnetiche, spinoriali) ammettevano soluzioni *localizzate* con velocità di gruppo subluminali o luminali [26, 29,30]. Successivamente cominciarono ad essere costruite anche analoghe soluzioni superluminali.

Una caratteristica estremamente importante di alcune di queste nuove soluzioni è che esse si dislocano quali impulsi localizzati e non-dispersivi (o, per usare la terminologia di Courant e Hilbert [26], quali *undistorted progressive waves*). È facile comprendere l'interesse pratico, per esempio, di una trasmissione radio effettuata mediante configurazioni ondose localizzate e monodirezionate, indipendentemente dal fatto che esse siano sub o super-luminali. Al riguardo esistono pure dei brevetti, e due nostri interi libri [29]. Ma i pacchetti d'onda non dispersivi possono essere molto utili anche in fisica teorica per una ragionevole rappresentazione delle particelle fondamentali [30].

Nell'ambito della Relatività Speciale Estesa si era trovato fin dal 1980 che, mentre l'oggetto subluminali più semplice che possa essere concepito è una sferetta, o al limite un punto, l'oggetto superluminali più semplice risulta invece essere (Refs. [31] e figg. 6 e 7) un'onda a forma di X, o al limite un doppio cono, che per di più in un mezzo omogeneo viaggia rigidamente, senza deformarsi [3]. È degno di nota che le più interessanti soluzioni localizzate sono risultate proprio superlu-



**Fig. 6. Un oggetto intrinsecamente sferico (o al limite puntiforme) appare come un ellissoide contratto nella direzione del moto quando è dotato nel vuoto di velocità  $v < c$ . Qualora fosse dotato di velocità  $V > c$  (anche se la barriera della velocità  $c$  non può essere attraversata né da sinistra né da destra) apparirebbe [31] non più come una particella, ma come un'onda a forma di X che si disloca rigidamente (ovvero, come la regione compresa tra un doppio cono e un iperboloidi di rotazione a due falde, o al limite come un doppio cono, che viaggia nel vuoto, o in un mezzo omogeneo, superluminalmente e senza deformazione).**



**Fig. 7. Intersezioni con piani ortogonali alla direzione del moto di un oggetto X-shaped [31], secondo la Relatività speciale Estesa [2,4]. L'esame della figura suggerisce come costruire una semplice antenna dinamica [29] atta a generare tali onde superluminali localizzate (una tale antenna fu in effetti, indipendentemente, adottata da Lu et al. [33] per la prima produzione di questi impulsi non-dispersivi a forma di X).**

minali e con una forma di quel tipo. Anzi, dato che dalle equazioni di Maxwell sotto semplici condizioni si passa alla solita equazione d'onda scalare per ogni componente del campo elettrico o magnetico, era facile prevedere, come poi si è verificato, che le stesse soluzioni si incontrino nel campo dell'acustica, o delle onde sismiche (e perfino gravitazionali). In effetti, esse (quali opportune sovrapposizioni di *Bessel beams*) furono matematicamente costruite la prima volta, da Lu et al. [32] che le chiamarono appunto *X-waves* o, meglio, *X-shaped waves*, in Acustica, e da Recami [32] in Ottica.

Più importante per noi è che le onde a forma di X sono state concretamente prodotte in esperimenti tanto con onde acustiche quanto con onde elettromagnetiche; sono stati cioè prodotti *X-pulses* che, nel mezzo considerato, viaggiano indeformati a velocità maggiori di quella del suono, nel primo caso, e della luce, nel secondo caso. In Acustica il primo esperimento è stato condotto dagli stessi Lu et al. [33] nel 1992, alla Mayo Clinic (e i loro lavori ricevettero il primo premio 1992 della IEEE). Nel caso elettromagnetico, certamente più *intriguing*, queste *superluminal localized X-shaped solutions*, costruite dapprima matematicamente (ad es., fig. 8) nelle pubblicazioni [32,34], furono successivamente prodotte da Saari et al. [35] nel 1997 a Tartu con luce visibile (fig. 9), e quindi da Mugnai, Ranfagni e Ruggeri [36] a Firenze con microonde (e questo è l'articolo apparso sul *Physical Review Letters* del 22 maggio 2000 di cui pure ha parlato la stampa nazionale e internazionale). Ulteriore intensa attività sperimentale era in corso, ad esempio alla Pirelli Cavi di Milano, prima della sua cancellazione, e lo è ora in una ventina di centri di ricerca internazionali in gran parte elencati nei

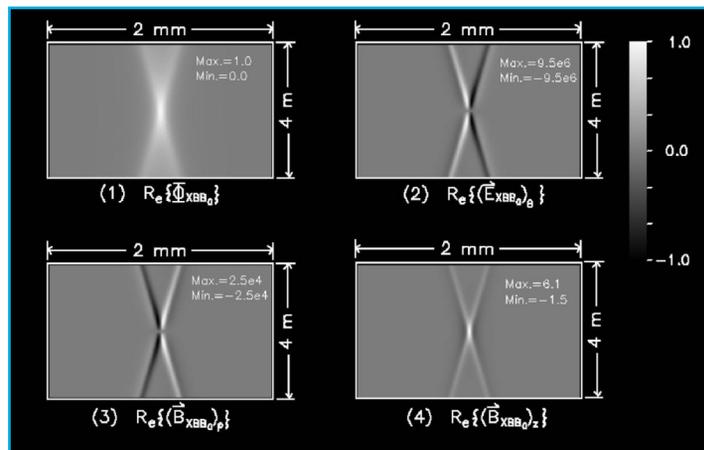


Fig. 8. Previsione teorica di onde superluminali localizzate a forma di X per il caso elettromagnetico (da Lu - Greenleaf - Recami [34], e Recami [34]).

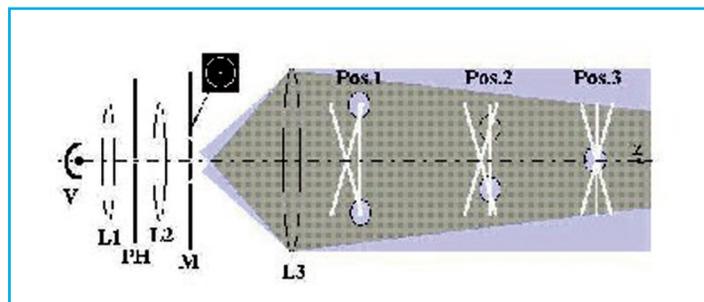
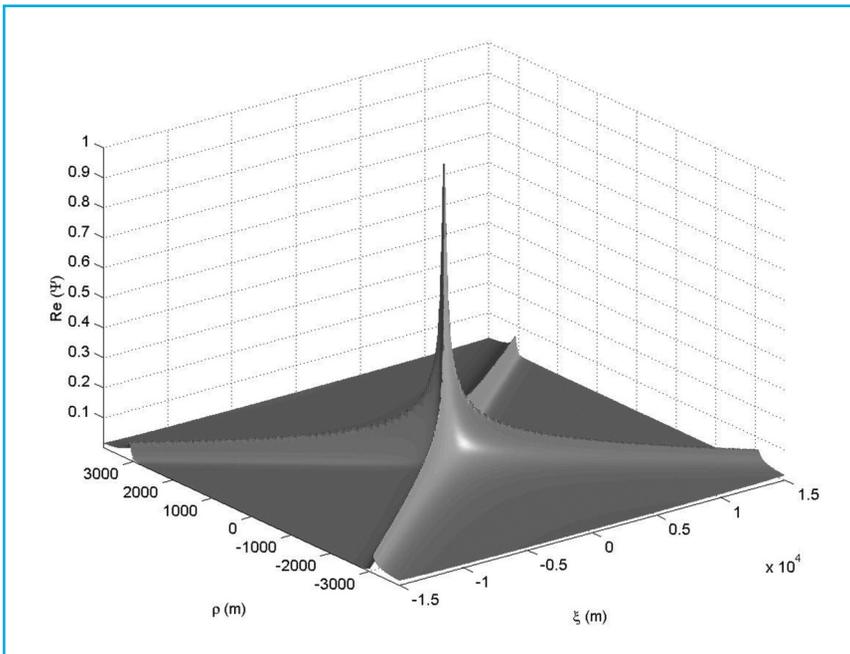


Fig. 9. Schema dell'esperimento di Saari et al. che annunciano (*Phys. Rev. Lett.* del 24 nov. 1997) la produzione in campo ottico delle onde di cui alla fig. 8: vi si vedono le onde superluminali a forma di X che inseguono e raggiungono, come verificato dai risultati, le onde piane (le quali ultime viaggiano regolarmente con velocità c). Un analogo esperimento fu successivamente effettuato con microonde a Firenze da Mugnai et al. (*Phys. Rev. Lett.* del 22 maggio 2000).

volumi [29], tra cui la Facoltà di Energia Elettrica della UNICAMP, Campinas, S.P.; mentre nel settore teorico l'attività è ancora più intensa, per esempio per costruire da un lato nuove analoghe soluzioni ad energia totale finita nonché più adatte ad alte frequenze, e dall'altro soluzioni localizzate propagantesi superluminalmente anche lungo normali guide d'onda [37]. Uno dei recenti risultati più interessanti, anche dal punto di vista applicativo, si riferisce a impulsi non superluminali, ma subluminali: anzi, alle soluzioni delle equazioni (lineari) d'onda aventi velocità zero, cioè con *envelope* statico; a tali straordinarie soluzioni con campo elet-

tromagnetico (o ultrasonico) *fermo* è stato da noi dato il nome di *Frozen Waves* [38]. Esse sono a priori adattissime per esempio per la distruzione di cellule tumorali, senza disturbare minimamente i tessuti anteriori o posteriori o circumpicini [38,39].

Tocchiamo infine il problema della produzione di un'onda superluminale a forma di X del tipo in figg. 7-10 (troncata, naturalmente, nello spazio e nel tempo, mediante l'uso di un'antenna dinamica finita che irraggi per un tempo limitato: in tal caso l'onda manterrà ottime proprietà di localizzazione e superluminalità solo lungo un ampio tratto, o profondità di campo, per poi



**Fig. 10.** Una tipica onda superluminale X-shaped (a forma di X), rappresentata attraverso il quadrato della sua parte reale [29,32]. Essa fu sperimentalmente prodotta nel 1992 in Acustica [33], e nel 1997 in Ottica [35,34].

decadere improvvisamente [32,34]). Possiamo convincerci della possibilità di realizzarla, immaginando il semplice caso ideale di una sorgente superluminale  $S$  di dimensioni trascurabili, dotata di velocità  $V$  nel vuoto e che emetta onde sferiche elettromagnetiche  $W$  (viaggianti ciascuna con la velocità invariante  $c$ ). Le onde elettromagnetiche risulteranno tangenti internamente a un cono involuppo  $C$  avente quale suo asse la retta  $x$  lungo la quale si muove la sorgente, e  $S$  quale vertice [3]. Ciò è analogo a quanto avviene per un aeroplano che si muova nell'aria a velocità supersonica costante. Le onde  $W$  interferiscono negativamente all'interno del cono  $C$ , e costruttivamente solo sulla sua superficie. Possiamo disporre un rivelatore piano ortogonale a  $x$  e registrare intensità e direzione delle onde  $W$  che lo colpiscono, quali funzioni (cilindricamente simmetriche) della posizione e del tempo. Sarà poi sufficiente sostituire il rivelatore piano con una

antenna piana che emetta, invece di registrare, esattamente il medesimo pattern spaziotemporale (cilindricamente simmetrico) di onde  $W$ , per costruire un'onda elettromagnetica  $C$  a forma di cono che si dislocherà lungo  $x$  con la velocità superluminale  $V$  (ovviamente, senza più alcuna sorgente  $S$  nel suo vertice); anche se ogni onda  $W$  viaggia con la velocità invariante  $c$ . Per ulteriori dettagli si veda p.es. Recami in Refs. [32,34]. Qui aggiungiamo soltanto che queste onde localizzate superluminali appaiono mantenere le loro buone proprietà solo finché vengono alimentate dalle onde provenienti (con velocità  $c$ ) dall'antenna dinamica: tenendo conto del tempo occorrente per la loro generazione, queste particolari onde sembrano quindi incapaci di trasmettere informazione a velocità superluminale [29]; però, lungo la loro profondità di campo, esse risultano concentrate in uno spot che si propaga certamente con velocità-di-picco iper- $c$  (probabilmente

possono fare scattare due rivelatori distanti  $L$  con un intervallo temporale inferiore a  $L/c$ ).

Come si diceva, l'esistenza di tutti questi impulsi superluminali (o *Super-sonici*) a forma a X sembra costituire al momento, insieme, ad esempio, con la superluminale delle onde evanescenti, una delle maggiori verifiche della ormai quarantenne Relatività Speciale Estesa.

È curioso che una delle più importanti applicazioni di queste onde a X (che sfrutta la loro propagazione senza deformazione) sia stata effettuata nel settore medico, e precisamente nel campo dell'ecografia [40]. Solo qualche anno fa l'ipotesi che i *tachioni* potessero venire usati per ottenere ecografie in 3 dimensioni avrebbe suscitato l'incredulità, a dir poco, di qualsiasi fisico, incluso chi scrive.

Il presente lavoro è stato parzialmente supportato dalla FAPESP (Brasile) e dall'INFN (Italia).

Siamo grati, per collaborazione o stimolanti discussioni o interessamento, a D. Ahluwalia, F. Bassani, G. Bertagna, I.M. Besieris, R. Bonifacio, C. Vasini, R. Chiao, F. Fontana, E. Giannetto, L. Horwitz, G. Kurizki, J.-y. Lu, A. van der Merwe, D. Mugnai, G. Nimtz, V.S. Olkhovskiy, M. Pavsic, A. Ranfagni, R.A. Ricci, P. Saari, A. Shaarawi, D. Stauer, A. Steinberg, e specialmente a M. Zamboni-Rached e a H.E. Hernandez-Figueroa.

Erasmus Recami  
Università statale di Bergamo  
DMO/FECC, UNICAMP,  
Campinas, SP, Brasile  
Sezione INFN di Milano, Italia  
recami@mi.infn.it

## BIBLIOGRAFIA

- [1] Vedi, ad es., O.M. Bilaniuk - V.K. Deshpande - E.C.G. Sudarshan: *Am. J. Phys.* 30 (1962) 718.
- [2] E. Recami - R. Mignani: *Rivista N. Cim.* 4 (1974) 209-290; 4 (1974) E398, e riferimenti ivi contenuti. Cfr. anche E. Recami (editor): *Tachyons, Monopoles, and Related Topics* (North-Holland; Amsterdam, 1978).
- [3] E. Recami: *Rivista N. Cim.* 9 (1986), fasc. 6 (pp. 1-178), e riff. ivi contenuti.
- [4] Vedi, ad es., E. Recami: in *Annuario 73, Enciclopedia EST*, ed. by E. Macorini (Mondadori; Milano, 1973), pp. 85-94; e *Nuovo Saggiatore* 2 (1986), fasc. 3, pp. 20-29.
- [5] E. Recami: in *I Concetti della Fisica*, ed. by F. Pollini - G. Tarozzi (Acc. Naz. Sc. Lett. Arti; Modena, 1993), pp. 125-138; E. Recami - W.A. Rodrigues: "Antiparticles from Special Relativity"; *Found. Physics* 12 (1982) 709-718; 13 (1983) E533.
- [6] E. Recami: *Found. Physics* 17 (1987) 239-296. Ved. anche *Lett. Nuovo Cimento* 44 (1985) 587-593, ristampato ("The Tolman anti-telephone paradox: Its solution by tachyon mechanics"), in *Electronic J. Theor. Phys. (EJTP)* 6(21) (2009) 1-8; e P. Caldirola - E. Recami: "Causality and Tachyons in Relativity"; in *Italian Studies in the Philosophy of Science*, ed. by M. Dalla Chiara (Reidel; Boston, 1980), pp. 249-298.
- [7] Dal punto di vista teorico, vedi, ad es., E. Giannetto - G.D. Maccarrone - R. Mignani - E. Recami: "Are muon-neutrinos faster than light particles?"; *Phys. Lett. B* 178 (1986) 115-120, e riff. ivi contenuti.
- [8] OPERA Collaboration (T. Adams et al.): "Measurement of the neutrino velocity with the OPERA detector in the CNGS beam"; arXiv:1109.4897v4[hep-ex], (2011).
- [9] Vedi, ad es., J.A. Zensus - T.J. Pearson (editors): *Superluminal Radio Sources* (Cambridge Univ. Press; Cambridge, UK, 1987).
- [10] Vedi, ad es., I.F. Mirabel - L.F. Rodriguez: "A superluminal source in the Galaxy"; *Nature* 371 (1994) 46 [con un commento editoriale, "A galactic speed record", di G. Gisler, a p. 18 dello stesso fascicolo].
- [11] E. Recami - A. Castellino - G.D. Maccarrone - M. Rodonò: "Considerations about the apparent Superluminal expansions observed in astrophysics"; *Nuovo Cimento B* 93 (1986) 119.
- [12] V.S. Olkhovsky - E. Recami: *Phys. Reports* 214 (1992) 339, e riff. ivi contenuti; V.S. Olkhovsky - E. Recami - J. Jakiel: "Unified time analysis of photon and nonrelativistic particle tunnelling"; *Phys. Reports* 398 (2004) 133-178. Vedi anche V.S. Olkhovsky - E. Recami - F. Raciti - A.K. Zaichenko: *J. de Phys.-I* 5 (1995) 1351-1365; G. Privitera - E. Recami - G. Salesi - V.S. Olkhovsky: "Tunnelling Times: An Elementary Introduction"; *Rivista Nuovo Cim.* 26 (2003), monographic issue no. 4 [pp. 54].
- [13] E. Recami - F. Fontana - R. Garavaglia: *Int. J. Mod. Phys. A* 15 (2000) 2793, e riff. ivi contenuti.
- [14] Vedi, ad es., G. Nimtz - A. Enders: *J. de Physique-I* 2 (1992) 1693.
- [15] A.M. Steinberg - P.G. Kwiat - R.Y. Chiao: *Phys. Rev. Lett.* 71 (1993) 708, e riff. ivi contenuti; *Scient. Am.* 269 (1993) issue no. 2, p. 38.
- [16] *Scientific American* (Aug. 1993); *Nature* (Oct. 21, 1993); *New Scientist* (Apr. 1995); *Newsweek* (19 June 1995).
- [17] Ref. [3], p. 158 e pp. 116-117.
- [18] H.M. Brodowsky - W. Heitmman - G. Nimtz: *Phys. Lett. A* 222 (1996) 125.
- [19] A.P.L. Barbero - H.E. Hernández F. - E. Recami: "On the propagation speed of evanescent modes"; *Physical Review E* 62 (2000) 8628-8635, e riff. ivi contenuti.
- [20] Vedi, ad es., A. Enders - G. Nimtz: *Phys. Rev. B* 47 (1993) 9605.
- [21] Vedi, ad es., E. Recami: "Superluminal tunneling through successive barriers. Does QM predict infinite group-velocities?"; *Journal of Modern Optics* 51 (2004) 913-923, e riff. ivi contenuti.
- [22] S. Longhi - P. Laporta - M. Belmonte - E. Recami: "Measurement of Superluminal optical tunneling times in double-barrier photonic bandgaps"; *Phys. Rev. E* 65 (2002) 046610 [pp. 6].
- [23] Vedi, ad es., V.S. Olkhovsky et al.: rif. [12], p. 1361.
- [24] Vedi, ad es., C.G.B. Garret & D.E. McCumber: *Phys. Rev. A* 1 (1970) 305.
- [25] Vedi, ad es., S. Chu - Wong W.: *Phys. Rev. Lett.* 48 (1982) 738; L.J. Wang - A. Kuzmich - A. Dogariu: *Nature* 406 (2000) 277.
- [26] Vedi, ad es., H. Bateman: *Electrical and Optical Wave Motion* (Cambridge Univ. Press; Cambridge, 1915); R. Courant - D. Hilbert: *Methods of Mathematical Physics* (J. Wiley; New York, 1966), vol. 2, p. 760; J.N. Brittingham: *J. Appl. Phys.* 54 (1983) 1179.
- [27] J.A. Stratton: *Electromagnetic Theory* (McGraw-Hill; New York, 1941), p. 356.
- [28] Ved. anche E. Recami - W.A. Rodrigues Jr.: "A model theory for tachyons in two dimensions"; in *Gravitational Radiation and Relativity*, ed. by J. Weber - T.M. Karade (World Scient.; Singapore, 1985), pp. 151-203, e riff. ivi contenuti.
- [29] H.E.H. Figueroa - M.Z. Rached - E. Recami (editors): *Localized Waves* (J. Wiley; New York, 2008), pp. 386: se ne vedano i primi due capitoli, introduttivi; H.E.H. Figueroa - E. Recami - M.Z. Rached (editors): *Non-Diffracting Waves* (J. Wiley-VCH; Berlin, 2013) [pp. 512].
- [30] M.Z. Rached - E. Recami: "Soliton-like solutions to the ordinary Schroedinger Equation within standard QM"; *J. Math. Phys.* 53 (2012) 052102 [pp. 9], cover article.
- [31] A.O. Barut - G.D. Maccarrone - E. Recami: *Nuovo Cimento A* 71 (1982) 509. Si vedano pure i recenti lavori M.Z. Rached - E. Recami - I.M. Besieris: *J. Opt. Soc. Am. A* 27 (2010) 928-934; *A* 29 (2012) 2536-2541.
- [32] J.-y. Lu - J.F. Greenleaf: *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 39 (1992) 19; E. Recami: "On localized 'X-shaped' Superluminal solutions to Maxwell equations"; *Physica A* 252 (1998) 586-610.
- [33] J.-y. Lu - J.F. Greenleaf: *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control* 39 (1992) 441.
- [34] R.W. Ziolkowski - I.A. Besieris - A.M. Shaarawi, *J. Opt. Soc. Am. A* 10 (1993) 75; J.-y. Lu - J.F. Greenleaf - E. Recami: "Limited diffraction solutions to Maxwell (and Schroedinger) equations" [arXiv: physics/9610012], Report INFN/FM-96/01 (I.N.F.N.; Frascati, Oct. 1996); E. Recami: *Physica A* 252 (1998) 586.
- [35] P. Saari - K. Reivelt: "Evidence of X-shaped propagation-invariant localized light waves"; *Phys. Rev. Lett.* 79 (1997) 4135-4138.
- [36] D. Mugnai - A. Ranfagni - R. Ruggeri: *Phys. Rev. Lett.* 84 (2000) 4830.
- [37] Vedi, ad es., M.Z. Rached - K.Z. Nóbrega - E. Recami - H.E.H. Figueroa: "Superluminal X-shaped beams propagating without distortion along a co-axial guide"; *Physical Review E* 66 (2002) 046617 [10 pages].
- [38] Vedi, ad es., M.Z. Rached - E. Recami - H.E.H. Figueroa: "Theory of 'Frozen Waves'"; *Journal of the Optical Society of America A* 22 (2005) 2465-2475; e anche riff. [29].
- [39] L.J. Prego-Borges - M.Z. Rached - E. Recami - H.E.H. Figueroa: "Producing Acoustic Frozen Waves: Simulated Experiments"; *IEEE Trans. Ultrason. Ferroel. Freq. Control* 60 (2013) 2414-2425.
- [40] Vedi, ad es., J.-y. Lu - H.-h. Zou - J.F. Greenleaf: *Ultrasound in Medicine and Biology* 20 (1994) 403; *Ultrasonic Imaging* 15 (1993) 134.