

PERCORSI

PIÙ VELOCI DELLA LUCE?

Una panoramica sui risultati sperimentali

Erasmus Recami

Università statale di Bergamo; Sezione INFN di Milano

1. – Introduzione

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 pervolgant 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 Superluminali ($V > c$), 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)⁽¹⁾.

Gli oggetti Superluminali sono stati chiamati tachioni, T, da G. Feinberg, con riferimento alla parola greca *ταχύς*, veloce, il che a suo tempo ci ha indotto a coniare il termine bradioni, B, per gli ordinari oggetti subluminali ($v < c$), 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 «Superluminali» sono purtroppo caduti nelle mani (furbe, più che folli) di pranoterapisti e semplici imbrogliatori, che hanno cominciato a spillare quattrini agli ingenui: ad esempio vendendo cessori (!) che curerebbero vari malanni con «l'emissione di tachioni»... Noi ne stiamo qui parlando, però, perchè almeno quattro differenti settori della fisica sperimentale — a conferma di predizioni esistenti da lunga data⁽²⁾ — sembrano oggi suggerire l'effettiva esistenza di moti Superluminali. Tanto che il New York Times ha ripreso il 30 maggio 2000 la notizia di due di questi esperimenti, imitato il dì seguente (e, di nuovo, alla fine dello scorso luglio) dalla stampa di mezzo mondo. In questo rapido scritto informativo, dopo una sommaria introduzione teorica, presentiamo una panoramica ragionata della situazione sperimentale: breve (rimandando per i dettagli a un eventuale futuro articolo), ma con una bibliografia in alcuni casi sufficiente a fornire agli interessati una informazione coerente e adeguata; e senza dimenticare di suggerire — per lo meno nei due settori oggi più alla ribalta — qualche altro meritevole esperimento.

2. – 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 (senza richiedere *a priori* che la velocità c sia invariante), fin dagli anni 1910-13 è stato teoricamente dedotto da Ignatowski, Frank e Rothe, e Hahn che deve esistere una, e una sola, velocità *invariante*; e l'e-

sperienza 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 quando v tende a c . Quindi occorrerebbero 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 e muoiono sempre alla velocità della luce (senza mai avere avuto bisogno di accelerare per raggiungerla), così possono esistere particelle — i tachioni^(1,2) — 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⁽²⁾ in modo da inglobare anche gli oggetti Superluminali; questa estensione è in gran parte dovuta alla scuola italiana. Anche secondo la «Relatività Estesa»⁽²⁾ la velocità c

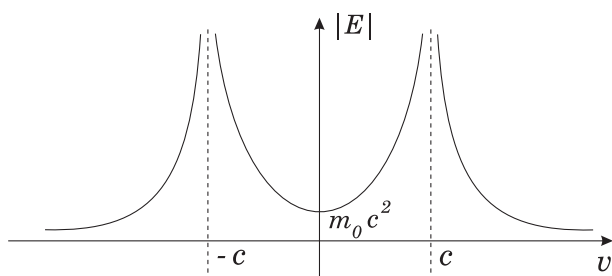


Fig. 1. — Andamento dell'energia di un oggetto libero al variare della sua velocità^(1,2).

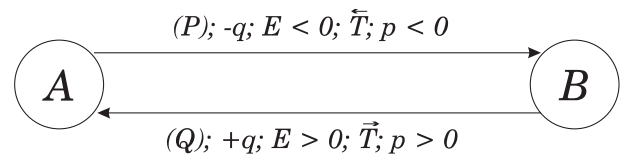


Fig. 2. — Illustrazione della «regola di switching» (o principio di reinterpretazione) di Stueckelberg-Feynman-Sudarshan^(1,4): Q apparirà essere l'antiparticella di P. Vedere il testo.

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.

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 *ab initio* e direttamente pure l'antimateria⁽³⁾. Si trova allora che lo spazio-tempo 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. (Vedere 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)^(2,3).

Ma abbandoniamo l'antimateria (riferendoci, per ulteriori dettagli, p. es. all'articolo apparso su Il Nuovo Saggiatore del 1986, fascicolo n. 4) 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 sem-

plicemente 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⁽⁴⁾ 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)^(4,2).

La fisica teorica di questo secolo ci ha condotto in modo naturale a ipotizzare vari tipi di oggetti: monopoli magnetici, quark, stringhe, particelle esotiche, tachioni, oltre ai buchi neri; e vari settori della fisica non potrebbero procedere senza di loro, benchè di nessuno di essi sia ancora certa l'esistenza (anche perchè tra loro sussistono dei legami finora trascurati: ad esempio, una carica elettrica Superluminale si comporta come un monopolo magnetico⁽²⁾; e un buco nero *a priori* può essere sorgente di materia Superluminale).

3. – La situazione sperimentale

La Relatività Estesa permette di comprendere meglio la fisica *ordinaria*⁽¹⁻³⁾, anche se i tachioni non esistessero. Come si è detto, noi ne stiamo qui parlando, però, perchè 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, sembra indicare che il quadrato m_0^2 della massa m_0 dei neutrini muonici, e più recentemente anche dei neutrini elettronici, sia 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^(5,2). (Nel linguaggio della Relatività Estesa^(1,2), la relazione di dispersione per un tachione libero diventa $E^2 - \mathbf{p}^2 = -m_0^2$, e non c'è quindi bisogno di masse immaginarie...).

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⁽⁶⁾, se i quasars sono davvero molto distanti da noi, come normalmente ritenuto. Ma alcuni autori, come H. Arp, ammonirono che i quasars possono 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⁽⁶⁾: 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*, facenti capo ad esempio alla ref.⁽⁷⁾, le quali sono accettate dalla maggior parte degli astrofisici. Per una discussione teorica, si veda la ref.⁽⁸⁾. Qui menzioniamo soltanto che semplici considerazioni geometriche nello spazio di Minkowski indicano che una *singola* sorgente Superluminale di luce verrebbe osservata^(8,2): i) inizialmente, nella fase di «bang ottico» (analogo al «bang» acustico prodotto da un aereo che viaggi con velocità supersonica costante), come una sorgente intensa che appare all'improvviso; e che ii) in seguito appare scindersi in DUE oggetti che si allontanano l'uno dall'altro con velocità $V > 2c$.

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* e poi analizzando l'evoluzione di pacchetti d'onda — non dipende dalla lunghezza della barriera per barriere opache (effetto Hartman)⁽⁹⁾: il che implica velocità (di gruppo) V Superluminali e arbitrariamente grandi all'interno di barriere sufficientemente lunghe e di lunghezza crescente: vedere fig. 3. Esperimenti che possano verificare questa previsione con, diciamo, elettroni sono difficili. Per fortuna però l'equazione di Schroedinger in presenza di barriera di potenziale è matematicamente identica all'equazione di Helmholtz per un'onda elettromagnetica 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 di guida con larghezza trasversale inferiore a un certo valore di *cut-off*. Un tratto di

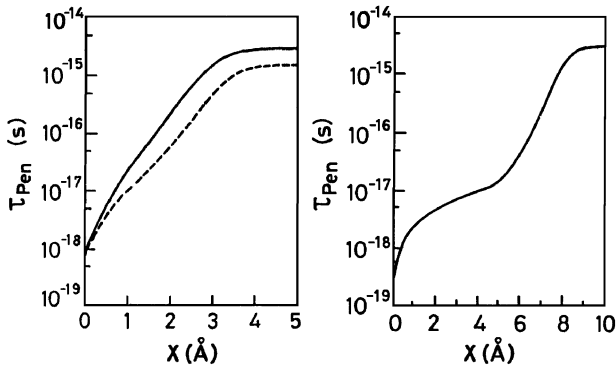


Fig. 3. - Andamento del «tempo di penetrazione» di un pacchetto d'onde al variare dello spazio percorso all'interno di una barriera di potenziale (da Olkhovsky, Recami, Raciti e Zaichenko, ref. (9)). Secondo le previsioni della meccanica quantistica, la velocità all'interno della barriera cresce illimitatamente per barriere opache; e il tempo totale di tunnelling non dipende dalla larghezza della barriera (9).

guida sottodimensionata si comporta quindi come una barriera per l'onda (*photonic barrier*) (10): 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 (10) ricorrendo ad onde evanescenti (per le quali si può generalizzare il concetto di velocità di gruppo (11)); e che le onde evanescenti viaggino con velocità Superluminali è stato effettivamente *verificato* in una serie di famosi esperimenti (cfr. fig. 4).

In effetti, vari esperimenti — effettuati dal 1992 in poi da G. Nimtz a Colonia (12), dal gruppo di R. Chiao e A. Steinberg a Berkeley (13), da A. Ranfagni e colleghi a Firenze (14), e da altri a Vienna, Orsay, Rennes (14) — hanno verificato che i «fotoni tunnellanti» viaggiano con velocità di gruppo Superluminali. Questi esperimenti hanno avuto a suo tempo vasta risonanza (15), anche tra la stampa non specializzata, avendone parlato *Scientific American*, *Nature*, *New Scientist*, e perfino *Newsweek*. Aggiungiamo che dalla Relatività Estesa si sapeva (16) che le onde evanescenti dovevano possedere velocità maggiori di c ; il tutto appare quindi autoconsistente. Le discussioni più vive al riguardo si riferiscono non ai risultati speri-

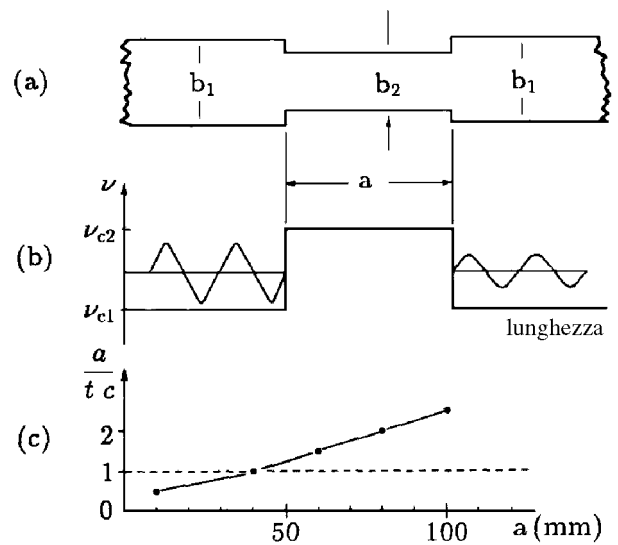


Fig. 4. - Simulazione di tunnelling mediante esperimenti con onde evanescenti (vedere il testo), le quali pure era previsto fossero Superluminali in base alla Relatività Estesa (2). La figura mostra uno dei risultati delle misure in refs. (12), ovvero la velocità media di attraversamento della regione di evanescenza (tratto di guida sottodimensionata, o «barriera») al variare della sua lunghezza. Come previsto (16,9), la velocità media supera c per «barriere» abbastanza lunghe.

mentali (i quali possono essere riprodotti mediante elaborazioni numeriche (17,18) basate sulle sole equazioni di Maxwell), ma alla questione se essi permettano o no l'invio di segnali o di informazione a velocità Superluminali (18,11).

Segnaliamo che l'esperimento *più interessante* di questa serie è quello effettuato con due «barriere» (ad esempio, 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 non dipende dalla lunghezza della guida (normale) intermedia: ovvero che lungo di essa la velocità è infinita (19). Ciò concorda con le previsioni della Meccanica Quantistica per il *tun-*

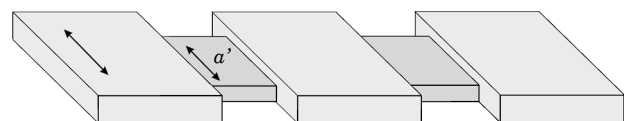


Fig. 5. - L'interessante esperimento in guida d'onda metallica con due barriere (tratti di guida sottodimensionata), cioè con due regioni di evanescenza (19). Vedere il testo.

nelling non risonante attraverso due successive barriere opache (il *tunnelling phase time*, pur dipendendo dall'energia entrante, non dipende dalla distanza tra le due barriere⁽²⁰⁾). Detto importante esperimento potrebbe e dovrebbe 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...).

Non possiamo lasciare del tutto sotto silenzio una ulteriore questione, quella delle «velocità negative» — che, essendo delicata, non potrebbe trovare posto in una rassegna breve come questa —, dato che uno degli ultimi contributi sperimentali che le menziona (effettuato a Princeton da J. Wang *et al.* e pubblicato da *Nature* il 20 luglio 2000) 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^(2,4), ciononostante occorre tenere presente che (quando si abbia a che fare con un oggetto, \mathcal{O} , viaggiante a velocità Superluminale) si può incappare in contributi negativi ai «tempi di transito»⁽²¹⁾: senza che ciò debba essere considerato come qualcosa di non fisico^(2,4). Infatti, ogniquale volta un «oggetto» (particella, impulso elettromagnetico,...) \mathcal{O} supera la velocità infinita rispetto a un certo osservatore, esso passerà ad apparire a quell'osservatore come un «anti-oggetto» $\bar{\mathcal{O}}$ viaggiante nella direzione spaziale opposta^(2,4). Per esempio, passando dal lab a un riferimento \mathcal{F} in moto nella stessa direzione delle particelle o onde entranti nella barriera, gli oggetti \mathcal{O} che attraversano la parte finale della barriera (con velocità quasi infinita^(9,18,20)) appariranno all'osservatore \mathcal{F} quali anti-oggetti $\bar{\mathcal{O}}$ attraversanti quella porzione di barriera in direzione spaziale opposta^(2,4). Nel nuovo riferimento \mathcal{F} questi anti-oggetti $\bar{\mathcal{O}}$ fornirebbero, quindi, un contributo *negativo* al *tunnelling time*: che potrebbe perfino risultare negativo nel suo complesso. Ciò che vogliamo qui sottolineare è che l'evenienza di detti tempi negativi è predetta dalla stessa Relatività, sulla base degli usuali postulati^(2,4,21,9,18). (Nel caso di un pacchetto d'onde non polarizzato, l'anti-pacchetto coincide col pacchetto; se un fotone ha elicità $\lambda = +1$, il suo anti-fotone ha però elicità opposta $\lambda = -1$.) Dal punto di vista teorico, oltre alle

refs.^(21,9,18,4,2), si vedano gli articoli⁽²²⁾. Dal punto di vista sperimentale (*quite interesting!*) si vedano i lavori⁽²³⁾, all'ultimo dei quali si è già accennato. Aggiungiamo qui che, tramite effetti di interferenza quantistica in sistemi atomici a tre livelli, è possibile ottenere dielettrici con indici di rifrazione aventi variazioni rapidissime in funzione della frequenza e con quasi totale assenza di assorbimento di luce (ovvero con induzione quantistica di trasparenza)⁽²⁴⁾. La *velocità di gruppo* di un impulso luminoso che si propaga in un mezzo simile può raggiungere valori molto piccoli, sia positivi sia negativi, e con *assenza* di distorsione dell'impulso. È noto che sono stati realizzati esperimenti sia in campioni di atomi a temperatura ambiente sia in un condensato di Bose-Einstein, che hanno dimostrato la possibilità di ridurre la velocità della luce fino a pochi metri al secondo. Velocità di gruppo simili ma negative — le quali implicano una propagazione Superluminale migliaia di volte maggiore di quelle rivelate per esempio in refs.⁽¹³⁾ — sono state recentemente previste in presenza di tale *electromagnetically induced transparency* per luce in moto in un condensato di rubidio⁽²⁵⁾, mentre i relativi esperimenti sono in corso presso il laboratorio europeo LENS di Firenze.

Ricordiamo, più in generale ma marginalmente, che propagazione di modi collettivi con velocità (di gruppo) maggiore di c può essere (e in alcuni casi, è stata) osservata sfruttando ad esempio la dispersione anomala in vicinanza di una linea di assorbimento, o linee di guadagno lineari e non-lineari, o mezzi dielettrici non dispersivi, o *inverted two-level media*, così come di vari processi parametrici in ottica non lineare (cfr. per esempio G. Kurizki *et al.*, che parlano di modi *tachyon-like*).

D) *Soluzioni localizzate Superluminali delle equazioni d'onda. Le «X-shaped waves»* — Il quarto settore (e trascureremo qui gli altri) è non meno importante. Esso è ridiventato attuale da quando alcuni gruppi di valenti ingegneri (per motivi sociologici la maggior parte dei fisici avevano disertato il campo) hanno riscoperto in una serie di bei lavori che qualunque equazione d'onda — per fissare le idee, pensiamo al caso elettromagnetico — ammette anche soluzioni tanto sub- quanto Super-luminali (oltre alle solite onde aventi velocità c/n). Ricordiamo che, a partire dal lavoro pionieristico di H. Bateman, era lentamente divenuto noto che tutte le

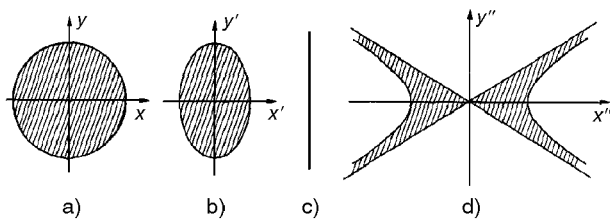


Fig. 6. - Un oggetto intrinsecamente sferico (o al limite puntiforme) appare come un ellissoide contratto nella direzione del moto quando è dotato nel vuoto di velocità $v < c$. Qualora fosse dotato di velocità $V > c$ (anche se la barriera della velocità c non può essere attraversata nè da sinistra nè 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 iperboloido 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).

equazioni d'onda omogenee (in una accezione generale: scalari, elettromagnetiche, spinoriali) ammettevano soluzioni con velocità di gruppo subluminali⁽²⁶⁾. Successivamente cominciarono ad essere costruite anche soluzioni Superluminali: in refs.⁽²⁷⁾ e, indipendentemente, in refs.⁽²⁸⁾ (in un caso mediante la semplice applicazione di una «trasformazione» Superluminale di Lorentz^(2,29)).

Una caratteristica estremamente importante di alcune di queste nuove soluzioni (a cui è dovuta molta dell'attenzione dei colleghi ingegneri) 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, indipendentemente dal fatto che esse siano sub o Superluminali. 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 Estesa si era trovato fin dal 1980 che — mentre l'oggetto subluminalo più semplice che possa essere concepito è una sferetta, o al limite un punto — l'oggetto Superluminale più semplice risulta invece essere (vedere 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⁽²⁾. È degno di nota che le più interessanti soluzioni localizzate sono risultate proprio Superluminali e con una

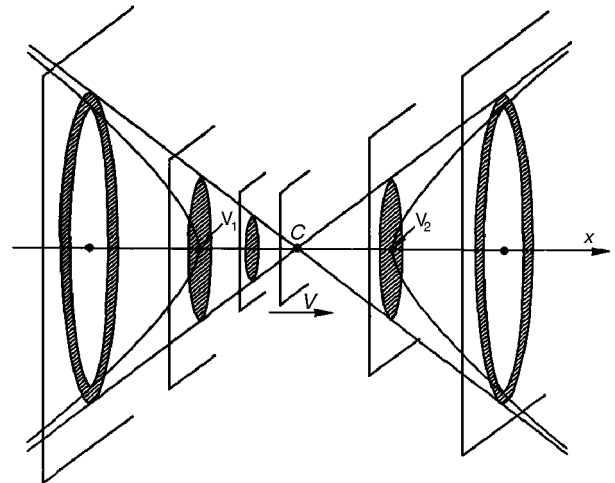


Fig. 7. - Intersezioni con piani ortogonali alla direzione del moto di una *X-shaped wave*⁽³¹⁾, secondo la Relatività Estesa⁽²⁾. L'esame della figura suggerisce come costruire una semplice antenna dinamica atta a generare tali onde Superluminali localizzate (una tale antenna fu in effetti, indipendentemente,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

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, ci si può aspettare che le stesse soluzioni si incontrino nel campo dell'acustica, o delle onde sismiche (e magari anche gravitazionali). In effetti, esse (quali opportune sovrapposizioni di *Bessel beams*) furono matematicamente costruite la prima volta, da Lu *et al.*⁽³²⁾, in acustica: e furono appunto chiamate *X-waves* o, meglio, *X-shaped waves*.

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-beams* 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 Award 1992 della IEEE). Nel caso elettromagnetico, certamente più «intriguing», queste *Superluminal localized X-shaped solutions*, costruite dapprima matematicamente (cfr., ad es., fig. 8) nelle pubblicazioni⁽³⁴⁾, furono successivamente prodotte da Saari *et al.*⁽³⁵⁾ nel 1997 a Tartu con luce visibile (fig. 9), e recentemente da Mugnai, Ranfagni e Ruggeri⁽³⁶⁾ a Firenze con

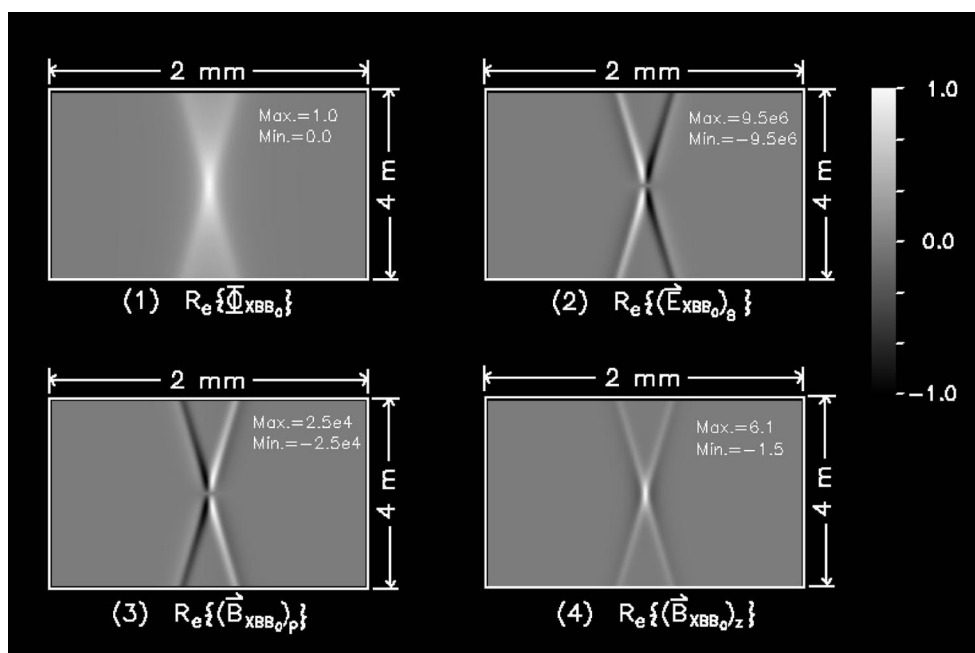


Fig. 8. – Previsione teorica di onde Superluminali localizzate «a formadi X» per il caso elettromagnetico (da Lu, Greenleaf e Recami⁽³⁴⁾, e Recami⁽³⁴⁾).

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 attività sperimentale è in corso, ad esempio, alla Pirelli Cavi di Milano (usando come sorgente un laser a impulsi) e alla F.E.E.C. 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 nonchè più adatte ad alte frequenze, e dall'altro soluzioni localizzate propagantesi Superluminalmente anche lungo normali guide d'onda⁽³⁷⁾.

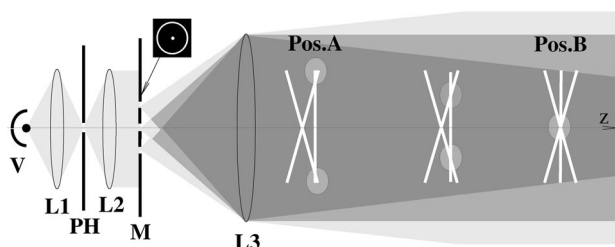


Fig. 9. – Schema dell'esperimento di Saari *et al.* che annunciò (*Phys. Rev. Lett.* del 24 novembre 1997) la produzione in campo ottico delle onde di cui alla fig. 8: vi si vedono le onde Superluminali «a forma di X» che inseguono e raggiungono — come verificato dai risultati — le onde piane (le quali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

Tocchiamo infine il problema della produzione di un'onda Superluminale a forma di X del tipo in fig. 7 (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 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 C avente quale suo asse la retta x lungo la quale si muove la sorgente, e S quale vertice⁽²⁾. 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 spa-

zio-temporale (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 l'ultima ref. ⁽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; però, lungo la loro profondità di campo, anch'esse si propagano certamente a velocità iper- c (ad esempio, possono fare scattare due rivelatori distanti L con un intervallo temporale inferiore a L/c).

Come si diceva, l'esistenza di tutte queste onde Superluminali (o «Super-soniche») a forma di X sembra costituire al momento — insieme, ad esempio, con la Superluminalità delle onde evanescenti — una delle migliori verifiche della Relatività Estesa. È curioso che una delle più importanti applicazioni di queste onde «a X » (che sfrutta la loro propagazione senza deformazione) sia per ora in corso nel campo medico, e precisamente nel campo dell'ecografia ⁽³⁸⁾. 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.

Ringraziamenti

Siamo grati a F. Bassani, A. Bertin, G. Alzetta e S. Bergia per stimolanti discussioni e a M.T. Vasconcelos e C. Vasini per la collaborazione. Si ringraziano inoltre, per alcune discussioni o per l'interessamento, M. Artoni, D. Ahluwalia, J.D. Bekenstein, R. Bonifacio, R. Chiao, A. Del Popolo, A. Degli Antoni, S. Esposito, J. Fanchi, F. Fontana, A. Gigli, H. E. Hernández, L. Horwitz, E. Kapuścik, G. Kurizki, J.-y. Lu, A. van der Merwe, D. Mugnai, G. Nimitz, V.S. Olkhovsky, M. Pavšič, A. Piazzoli, B. Preziosi, A. Ranfagni, R. A. Ricci, P. Saari, M. Santini, A. Shaarawi, D. Stauffer, A. Steinberg e M. Zamboni-Rached.

Bibliografia:

(1) Vedi, p. es., O.M. BILANIUK, V.K. DESHPANDE e E.C.G. SUDARSHAN: *Am. J. Phys.*, **30** (1962) 718; e vedi E. RECAMI e R. MIGNANI: *Rivista Nuovo Cimento*, No. **4** (1974) 209-290,

E 398, e rif. ivi contenuti. Cfr. anche E. RECAMI (curatore): *Tachyons, Monopoles, and Related Topics* (North-Holland; Amsterdam, 1978).

- (2) E. RECAMI: *Rivista Nuovo Cimento*, **9** No. 6 (1986), pp. 1-178 e rif. ivi contenuti. Cfr. inoltre E. RECAMI: in *Annuario 73, Enciclopedia EST*, a cura di E. MACORINI (Mondadori; Milano, 1973), pp. 85-94; *Nuovo Saggiatore*, **2** No. 3 (1986), pp. 20-29.
- (3) E. RECAMI: in *I Concetti della Fisica*, a cura di F. POLLINI e G. TAROZZI (Acc. Naz. Sc. Lett. Arti; Modena, 1993), p. 125-138; E. RECAMI e W.A. RODRIGUES: *Found. Phys.*, **12** (1982) 709-718; **13** (1983) E533.
- (4) E. RECAMI: *Found. Physics*, **17** (1987) 239-296. Vedi anche *Lett. Nuovo Cimento*, **44** (1985) 587-593; e P. CALDIROLA e E. RECAMI: in *Italian Studies in the Philosophy of Science*, a cura di M. DALLA CHIARA (Reidel; Boston, 1980) pp. 249-298; A. M. SHAARANI e I. M. BESIERIS: *J. Phys. A. Math. Gen.*, **33** (2000) 7255.
- (5) Cfr. M. BALDO CEOLIN: «Review of neutrino physics», relazione su invito al *XXIII International Symposium on Multiparticle Dynamics Aspen, CO; Sept. 1993*; E.W. OTTEN: *Nucl. Phys. News*, **5** (1995) 11. Dal punto di vista teorico, vedi ad es. E. GIANNETTO, G.D. MACCARRONE, R. MIGNANI e E. RECAMI: *Phys. Lett. B*, **178** (1986) 115-120 e rif. ivi contenuti; S. GIANI: «Experimental evidence of superluminal velocities in astrophysics and proposed experiments», CP458, in *Space Technology and Applications International Forum 1999*, a cura di M.S. EL-Genk (A.I.P.; Melville, 1999) pp.881-888.
- (6) Vedi, ad es., J.A. ZENSUS e T.J. PEARSON (curatori): *Superluminal Radio Sources* (Cambridge University Press; Cambridge, UK, 1987); I.F. MIRABEL e 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 pag. 18 dello stesso fascicolo); S.J. TINGAY *et al.*: «Relativistic motion in a nearby bright X-ray source», *Nature*, **374** (1995) 141.
- (7) M.J. REES: *Nature*, **211** (1966) 46; A. CAVALIERE, P. MORRISON e L. SARTORI: *Science*, **173** (1971) 525.
- (8) E. RECAMI, A. CASTELLINO, G.D. MACCARRONE e M. RODONÒ: «Considerations about the apparent Superluminal expansions observed in astrophysics», *Nuovo Cimento B*, **93** (1986) 119. Cfr. anche R. MIGNANI E. RECAMI: *Gen. Relat. Gravit*, **5** (1974) 615.
- (9) V.S. OLKHOVSKY e E. RECAMI: *Phys. Rep.*, **214** (1992) 339, e rif. ivi contenuti, in particolare T.E. HARTMAN: *J. Appl. Phys.*, **33** (1962) 3427. Vedi anche V.S. OLKHOVSKY, E. RECAMI, F. RACITI e A.K. ZAICHENKO: *J. Phys. I (France)*, **5** (1995) 1351-1365.
- (10) See, e.g., TH. MARTIN e R. LANDAUER: *Phys. Rev. A*, **45** (1992) 2611; R.Y. CHIAO, P.G. KWIAT e A.M. STEINBERG: *Physica B*, **175** (1991) 257; A. RANFAGNI, D. MUGNAI, P. FABENI e G.P. PAZZI: *Appl. Phys. Lett.*, **58** (1991) 774; Y. JAPHA e G. KURIZKI: *Phys. Rev. A*, **53** (1996) 586. Cfr. anche G. KURIZKI, A.E. KOZHEKIN e A.G. KOFMAN: *Europhys. Lett.*, **42** (1998) 499; G. KURIZKI, A.E. KOZHEKIN, A.G. KOFMAN e M. BLAAUBOER: presentato al *VII Seminar on Quantum Optics, Raubichi, BELARUS (May, 1998)*.
- (11) E. RECAMI, F. FONTANA e R. GARAVAGLIA: *Int. J. Mod. Phys. A*, **15** (2000) 2793, e rif. ivi contenuti.
- (12) G. NIMTZ e A. ENDERS: *J. Phys. I*, **2** (1992) 1693; **3** (1993) 1089; **4** (1994) 1379; *Phys. Rev. E*, **48** (1993) 632; H.M. BRODOWSKY, W. HEITMANN e G. NIMTZ: *J. Phys. I (France)*, **4** (1994) 565; *Phys. Lett. A*, **222** (1996) 125; **196** (1994) 154; G. NIMTZ e W. HEITMANN: *Prog. Quantum Electron.*, **21** (1997) 81.
- (13) A.M. STEINBERG, P.G. KWIAT e R.Y. CHIAO: *Phys. Rev. Lett.*, **71** (1993) 708, e rif. ivi contenuti; *Sci. Am.*, **269** (1993) issue no. 2, p. 38. Vedi anche Y. JAPHA e G. KURIZKI: *Phys. Rev. A*, **53** (1996) 586.
- (14) A. RANFAGNI, P. FABENI, G.P. PAZZI e D. MUGNAI: *Phys. Rev. E*, **48** (1993) 1453; CH. SPIELMANN, R. SZIPOCS, A. STINGL e F. KRAUSZ: *Phys. Rev. Lett.*, **73** (1994) 2308, PH. BALCOU e L. DUTRIEAUX: *Phys. Rev. Lett.*, **78** (1997) 851; V. LAUDEE e P. TOURNOIS: *J. Opt. Soc. Am. B*, **16** (1999) 194.
- (15) *Scientific American* (Aug. 1993); *Nature* (Oct. 21, 1993); *New Scientist* (Apr. 1995); *Newsweek* (19 June 1995).
- (16) Ref. ⁽³⁾, p. 158 e pp. 116-117. Cfr. anche D. MUGNAI, A. RANFAGNI, R. RUGGERI, A. AGRISTI e E. RECAMI: *Phys. Lett. A*, **209** (1995) 227.
- (17) H.M. BRODOWSKY, W. HEITMANN e G. NIMTZ: *Phys. Lett. A*, **222** (1996) 125.
- (18) A.P.L. BARBERO, H.E. HERNÁNDEZ F., e E. RECAMI: *Phys. Rev. E*, **62** (2000) 8628, e rif. ivi contenuti. Vedi anche E. RECAMI, H.E. HERNÁNDEZ F., e A.P.L. BARBERO: *Ann. Phys. (Leipzig)*, **7** (1998) 764-773; A. M. SHAARANI e I. M. BE-

- SIERIS: *Phys. Rev. E.*, **62** (5) in stampa.
- (19) G. NIMTZ, A. ENDERS e H. SPIEKER: in *Wave and Particle in Light and Matter*, a cura di A. VAN DER MERWE e A. GARUCCIO (Plenum; New York, 1993); *J. Phys. I*, **4** (1994) 565. Vedi anche A. ENDERS e G. NIMTZ: *Phys. Rev. B*, **47** (1993) 9605.
- (20) V.S. OLKHOVSKY, E. RECAMI e G. SALESI: «Tunneling through two successive barriers and the Hartman (Superluminal) effects», Report INFN/FM-00/20 (Frascati, 2000) LANL Archives # quant-ph/0002022], in corso di pubblicazione; S. Esposito: (in preparazione); vedi anche A. M. SHAARANI e I. M. BESIERIS: *J. Phys. A. Math. gen.*, **33** (2000) 8559; 7227.
- (21) V.S. OLKHOVSKY, E. RECAMI, F. RACITI e A.K. ZAICHENKO: ref. ⁽¹²⁾, pag. 1361. Vedi anche refs. ^(3,6) E. RECAMI, F. FONTANA e R. GARAVAGLIA: ref. ⁽¹¹⁾, pag. 2807.
- (22) R.Y. CHIAO, A.E. KOZHEKIN A.E. e G. KURIZKI: *Phys. Rev. Lett.*, **77** (1996) 1254; C.G.B. GARRET e D.E. MCCUMBER: *Phys. Rev. A*, **1** (1970) 305.
- (23) S. CHU e WONG W.: *Phys. Rev. Lett.*, **48** (1982) 738; M.W. MITCHELL e R.Y. CHIAO: *Phys. Lett. A*, **230** (1997) 133-138; G. NIMTZ: *Eur. Phys. J. B* (in corso di pubblicazione come Nota Breve); L.J. WANG, A. KUZMICH e A. DOGARIU: *Nature*, **406** (2000) 277; ulteriori esperimenti sono in corso con raggi X a Glasgow (D. Jaroszynski, comunicazione privata).
- (24) G. ALZETTA, A. GOZZINI, L. MOI e G. ORRIOLS: *Nuovo Cimento B*, **36B** (1976) 5.
- (25) M. ARTONI, G.C. LA ROCCA, F.S. CATALIOTTI e F. BASSANI: *Phys. Rev. A* (in stampa).
- (26) H. BATEMAN: *Electrical and Optical Wave Motion* (Cambridge Univ. Press; Cambridge, 1915); R. COURANT e D. HILBERT: *Methods of Mathematical Physics*, vol. **2** (J. Wiley; New York, 1966) p. 760; J. N. BRITTINGHAM: *J. Appl. Phys.*, **54** (1983) 1179; R. W. ZIOLKOWSKI: *J. Math. Phys.*, **26** (1985) 861; J. DURNIN: *J. Opt. Soc.*, **4** (1987) 651; A.O. BARUT et al.: *Phys. Lett. A*, **143** (1990) 349; *Found. Phys. Lett.*, **3** (1990) 303; *Found. Phys.*, **22** (1992) 1267.
- (27) J.A. STRATTON: *Electromagnetic Theory* (McGraw-Hill; New York, 1941), p. 356; A.O. BARUT et al.: *Phys. Lett. A*, **180** (1993) 5; **189** (1994) 277.
- (28) R. DONNELLY e R.W. ZIOLKOWSKI: *Proc. Roy. Soc. London A*, **440** (1993) 541; I.M. BESIERIS, A.M. SHAARAWI e R.W. ZIOLKOWSKI: *J. Math. Phys.*, **30** (1989) 1254; S. ESPOSITO: *Phys. Lett. A*, **225** (1997) 203; J. VAZ e W.A. RODRIGUES: *Adv. Appl. Cliff. Alg.*, **S-7** (1997) 457.
- (29) Vedi anche E. RECAMI e W.A. RODRIGUES Jr.: «A model theory for tachyons in two dimensions, in Gravitational Radiation and Relativity», a cura di J. WEBER e T.M. KARADE (World Scientific; Singapore, 1985), pp.151-203, e riff. ivi contenuti.
- (30) A.M. SHAARAWI, I.M. BESIERIS e R.W. ZIOLKOWSKI: *J. Math. Phys.*, **31** (1990) 2511, Sect. VI; *Nucl Phys. (Proc. Suppl.) B*, **6** (1989) 255; *Phys. Lett. A*, **188** (1994) 218. Vedi anche V.K. IGNATOVICH: *Found. Phys.*, **8** (1978) 565; e A.O. BARUT: *Phys. Lett. A*, **171** (1992) 1; **189** (1994) 277; *Annales Foundation L. de Broglie*, Jan. 1994; e «Quantum theory of single events: Localized de Broglie-wavelets, Schrödinger waves and classical trajectories», preprint IC/90/99 (ICTP, Trieste, 1990).
- (31) A.O. BARUT, G.D. MACCARRONE e E. RECAMI: *Nuovo Cimento A*, **71** (1982) 509; P. CALDIROLA, G.D. MACCARRONE e E. RECAMI: *Lett. Nuovo Cim.*, **29** (1980) 241; E. RECAMI e G.D. MACCARRONE: *Lett. Nuovo Cim.*, **28** (1980) 151.
- (32) J.-y. LU e J.F. GREENLEAF: *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **39** (1992) 19.
- (33) J.-y. LU e J.F. GREENLEAF: *IEEE Trans. Ultrason. Ferroelectr. Freq. Control*, **39** (1992) 441.
- (34) R.W. ZIOLKOWSKI, I.A. BESIERIS e A.M. SHAARAWI, *J. Opt. Soc. Am. A*, **10** (1993) 75; J.-y. LU, J.F. GREENLEAF e E. RECAMI: *Limited diffraction solutions to Maxwell (and Schrödinger) equations* LANL Archives # physics/9610012], Report INFN/FM-96/01 (I.N.F.N.; Frascati, Oct. 1996); E. RECAMI: *Physica A*, **252** (1998) 586.
- (35) P. SAARI e K. REIVELT: «Evidence of X-shaped propagation-invariant localized light waves», *Phys. Rev. Lett.*, **79** (1997) 4135-4138.
- (36) D. MUGNAI, A. RANFAGNI e R. RUGGERI: *Phys. Rev. Lett.*, **84** (2000) 4830.
- (37) Vedi, per es., M.Z. RACHED, E. RECAMI e F. FONTANA: *Localized Superluminal solutions to Maxwell equations propagating along a normal-sized waveguide*, Report INFN/FM-00/01 (Frascati, 10.03.00) LANL Archives # physics/0001039], in corso di pubblicazione; I. BESIERIS, M. ABDEL-RAHMAN, A. SHAARAWI e A. CHATZIPETROS: *Progress in Electromagnetic Research (PIER)* **19** (1998) 1-48; M.Z. RACHED, E. RECAMI e H.E. HERNÁNDEZ-FIGUEROA: (in preparazione).
- (38) J.-y. LU, H.-h.ZOU e J.F. GREENLEAF: *Ultrasound in Medicine and Biology*, **20** (1994) 403; *Ultrasonic Imaging*, **15** (1993) 134.