

PERCORSI

EVOLUZIONE DELLA FISICA A CATANIA; ISOTOPI ED ISOTONI PER TERMOMETRI NUCLEARI

A. Rubbino

*Dipartimento di Fisica, Università di Catania
- Corso Italia, 57 95129 Catania*

1. – Evoluzione della Fisica a Catania

Il nostro Presidente, prof. Franco Bassani, mi ha chiesto di descrivere sommariamente per il Nuovo Saggiatore alcune delle mie ultime ricerche e l'evoluzione della fisica a Catania nel decorso mezzo secolo. Avendo gradito e accettato il suo invito, accennerò prima allo straordinario sviluppo della fisica a Catania, che ha consentito anche alla maggior parte del personale operante oggi nel Dipartimento e nei vari Laboratori Nazionali, di poter svolgere la propria attività in sede.

Ho iniziato la mia attività di ricercatore presso l'Istituto di Fisica della nostra Università, nel 1954, quando è venuto a Catania il prof. Renato Ricamo che è rimasto con noi per un decennio come direttore del suddetto istituto.

L'intraprendente e vulcanico prof. Ricamo fondò a Catania nel 1955 il Centro Siciliano di Fisica Nucleare (CSFN) e nel 1957, coadiuvato da alcuni colleghi delle Università di Messina e di Palermo, fece approvare una legge regionale che istituì il Comitato Regionale Ricerche Nucleari (CRRN), con sede presso la Presidenza della Regione Siciliana, per finanziare ricerche di fisica nelle tre sedi universitarie siciliane. Queste iniziative, coadiuvate dal rettore Cesare Sanfilippo, (che definiva Ricamo come la sua «croce e delizia»), permisero di avere cospicui finanziamenti. Sempre negli anni '50, l'Istituto di Fisica fu dotato di un acceleratore, van de Graaff da 2MV di ioni leggeri e di moderni dispositivi sperimentali. Subito dopo l'Università comprò e completò la costruzione dei nuovi

edifici destinati alla fisica in Corso Italia 57. Ciò consentì ai giovani ricercatori e tecnici di acquisire nuove tecniche sperimentali e di operare un salto di qualità nelle ricerche di fisica nucleare.

La rinnovata attività didattica permise inoltre l'inserimento di nuovi valenti giovani ricercatori. Un dato significativo dell'evoluzione della fisica durante la direzione di Ricamo è l'incremento di personale dell'Istituto di Fisica: docenti da 13 nel 1955 a 50 nel 1965, non docenti da 11 nel 1955 a 46 nel 1965.

Nel 1965 Ricamo si trasferì a L'Aquila e la direzione dell'Istituto fu affidata al prof. Italo Federico Quercia fino al 1970, anno in cui Italo ritornò ai Laboratori Nazionali di Frascati.

Nel gennaio 1964 io fui chiamato come *Guest Professor* presso l'Istituto di Fisica Nucleare dell'Università di Frankfurt, allora diretto dal prof. Ervin Schopper, dove ho condotto ricerche sperimentali fino al dicembre 1965. Rientrato a Catania ho instaurato una collaborazione scientifica con i colleghi tedeschi fino al 1990. Relativamente agli anni '60, ricordo che dall'anno accademico 1963/64 il prof. Franco Bassani, vincitore del concorso a cattedra, iniziò il suo triennio di straordinariato a Messina dove lasciò segni indelebili della sua permanenza, come avevano precedentemente fatto, sempre a Messina, i proff. G. Chiarotti e D. Sette.

Verso la fine degli anni '60 (1967/68), l'Istituto di Fisica aveva quattro professori titolari di cattedra. Il direttore prof. Italo Federico Quercia e, per la prima volta, tre fisici siciliani: il prof. Attilio Agodi, il prof. Carmelo Milone e il prof. Antonino Rubbino. Oltre a questi «anziani» l'Università di Catania disponeva di «giovani» eccellenti tecnici, amministrativi e fisici. Molti fisici si sono affermati negli anni successivi conseguendo la cattedra e prestigio internazionale non soltanto in fisica nucleare ma anche per la struttura della materia.

Considerando la rapida evoluzione delle di-

scipline sperimentali e per essere sempre competitivi in campo internazionale, i fisici catanesi formularono un piano dettagliato per la realizzazione di un grande laboratorio di ricerca a Catania. Il piano prevedeva che le spese di gestione, della strumentazione e del nuovo personale fossero prevalentemente a carico dell'INFN e che l'Università provvedesse alla costruzione degli edifici, che restavano sempre di sua proprietà, in un terreno della città universitaria.

Il consiglio direttivo ed i vari presidenti dell'INFN che si sono succeduti in quel periodo hanno sempre avuto grande stima per i fisici catanesi ed erano favorevoli a stipulare l'accordo offrendo inizialmente un miliardo di lire a patto che anche la Regione Siciliana mettesse a disposizione un miliardo di lire. Questa strategia da adottare per coinvolgere l'INFN ci fu inizialmente suggerita dal fraterno amico e collega prof. Claudio Villi, già presidente dell'INFN. Per sensibilizzare i dirigenti dell'INFN, determinanti sono stati i contributi dati: 1) dal prof. Agodi, che in quel periodo, essendo direttore della sezione siciliana faceva parte del consiglio direttivo dell'INFN; 2) dal prof. Quercia, che era già ritornato a Roma per dirigere i Laboratori Nazionali di Frascati.

Per la costruzione degli edifici lodevole è stato prima l'impegno del rettore C. Sanfilippo, e determinante è stato l'indispensabile intervento del rettore G. Rodolico.

Io, durante la mia vice-presidenza del CRRN (presidente del comitato è per legge il presidente della Regione Siciliana), coadiuvato da alcuni colleghi delle tre sedi universitarie siciliane, (mi piace ricordare i proff. Ugo e Beatrice Palma di Palermo e i proff. Vincenzo Grasso e Santi Jannelli di Messina), mi feci promotore per far varare una seconda legge regionale per incrementare le ricerche di fisica in Sicilia.

Questa legge dopo lungo travaglio fu approvata il 12.5.1975.

La legge estendeva i finanziamenti anche alle ricerche di struttura della materia, portava i finanziamenti ordinari annuali da 100 a 250 milioni e assegnava un finanziamento straordinario di un miliardo per la realizzazione del grande laboratorio di Catania.

Il 29.4.1976 la convenzione per la costruzione del «Laboratorio del Sud» a Catania veniva sottoscritta da:

- prof. Gaspare Rodolico, rettore Università di Catania,
- prof. Alberto Gigli Berzolari, presidente INFN,

– prof. Antonino Rubbino, direttore CSFN.

Negli anni successivi, grazie a decisivi interventi del rettore Gaspare Rodolico, dei presidenti INFN Nino Zichichi e Nicola Cabibbo e grazie ad alcuni eccellenti nuovi cattedratici, il Laboratorio INFN del Sud, è diventato Laboratorio *Nazionale* del Sud (LNS), gestito quindi a totale carico dall'INFN. INFN che con cospicui finanziamenti ha dotato il nostro laboratorio di grandi acceleratori anche di ioni pesanti a più elevate energie e di dispositivi sperimentali competitivi in campo internazionale.

Ritengo doveroso ricordare i colleghi che, con lodevole impegno, si sono alternati nella direzione del LNS: proff. Emilio Migneco, Giuseppe Pappalardo e Domenico Vinciguerra oltre a Salvo Sambataro che eletto nel 2000, dopo soli due mesi dalla nomina rassegnava le sue dimissioni a causa dell'inesorabile male che lo aveva colpito.

La prima fase evolutiva della fisica a Catania, fin dagli anni '50, riguarda soprattutto la fisica nucleare. Con le istituzioni della Sezione INFN negli anni '60 e del LNS nella seconda parte degli anni '70, lo sviluppo quantitativo e qualitativo dei fisici nucleari diventò eccezionale.

Ma già nei primi anni '60, alcuni gruppi di giovani si dedicarono a ricerche di struttura della materia, inizialmente coordinate dal prof. I. F. Quercia fino al 1970. Nei primi anni '70, il gruppo di giovani ricercatori, guidati dal prof. Emanuele Rimini, emerse in piena autonomia e come in un crescendo Rossiniano si imporrà all'attenzione del mondo scientifico internazionale fino ai nostri giorni.

Oltre ad avere attivato collaborazioni scientifiche con laboratori italiani e stranieri, il prof. Rimini ha avuto il merito di instaurare, fin dagli anni '70, collaborazioni con centri di ricerca industriali, quale per esempio l'ex ATES-SGS di Catania e di Milano, oggi STMicroelectronics. Questa sua iniziativa ha consentito l'immissione di molti giovani altamente qualificati dall'Università di Catania, anche nella ricerca industriale.

Successivamente anche altri reparti di strutturisti hanno conseguito brillanti risultati. Oggi un considerevole numero di ex-valenti giovani ricopre la carica di professore ordinario o di professore associato anche nel campo della fisica della materia (INFN e CNR).

L'Istituto di Fisica della Facoltà di Scienze dell'Università di Catania è diventato Dipartimento di Fisica nel 1984 e, fino al mese di agosto 2002, ha avuto sede in Corso Italia 57 a Catania.

Oggi il dipartimento ha sede in un nuovo grande edificio, nella città universitaria, accanto al Laboratorio Nazionale del Sud. Il nuovo Dipartimento è stato progettato e la sua costruzione è stata avviata durante il rettorato del prof. Gaspare Rodolico ed è stato completato nel 2002 durante il rettorato del prof. Ferdinando Latteri. L'edificio è costituito da cinque piani con una

superficie coperta complessiva di circa ottomila metri quadrati.

Anche oggi i fisici di Catania godono di grande stima e solidarietà, da parte del nuovo rettore, già dimostrata in varie occasioni.

Il potenziale umano operante a Catania nelle ricerche di fisica fondamentale è riportato nella seguente tabella.

Tabella I. – Fisica a Catania nel 2002.

		Prof. ordinari	Prof. associati	Ricercatori	Tecnici	Amministrativi	TOTALE
UNIVERSITÀ	Dipartimento Scienze	25	32	19	16	9	101
	Istituto Ingegneria	3	5	5	2	3	18
		Dirigenti di ricerca	Primi ricercatori	Ricercatori	Tecnici	Amministrativi	
INFN	Laboratorio Nazionale del Sud	3	9	12	85	11	120
	Sezione di Catania	3	7	12	19	5	46
INFM e CNR	Sezioni di Catania	1	5	12	7	4	29
TOTALE		35	58	60	129	32	314

38

2. – Isotopi ed Isotoni per termometri nucleari

Gli argomenti scientifici di maggior interesse della mia attività di ricerca svolta in Italia ed in Germania sono sotto indicati. I vari ricercatori con i quali ho lavorato in queste ricerche sono stati 32, e 3.2 è il valor medio di autori per articolo pubblicato.

- 1) Reazioni fotonucleari fino ad $E_\gamma = 30$ MeV (1954–1961);
- 2) spettrometria di neutroni (1961–1969);
- 3) reazioni nucleari indotte da neutroni fino ad $E_n = 23$ MeV (1963–1967);
- 4) reazioni (${}^3\text{He}, \alpha$) fino a $E_{{}^3\text{He}} = 13$ MeV (1967–1976);
- 5) applicazioni della termodinamica statistica alla biofisica (1977–1982) ed alla fisica dello stato solido (1980–1982);
- 6) Applicazioni della termodinamica statistica alla fisica nucleare (1983–1994).

Attenendomi alla richiesta del Presidente cercherò di indicare sommariamente alcuni aspetti fondamentali del punto 6), ricordando

prima i componenti del gruppo di valenti giovani ricercatori che ho avuto come collaboratori in questa ricerca. Già fin dal 1977 Evelina Costanzo e dal 1979 Salvo Costa avevano acquisito una qualificata padronanza dei fondamenti della termodinamica statistica (vedi anche punto 5)). Due studenti emergevano tra i laureandi del nostro gruppo, per le loro brillanti doti di ricercatori: Sebastiano Albergo, laureato nel 1984, e Sara Pirrone, laureata nel 1986. Evelina Costanzo ha lasciato il gruppo nel 1986. Albergo, Costa e Pirrone sono stati i miei eccellenti collaboratori che ho avuto il bene di avere fino ai primi anni 90.

Nel 1982 decisi di estendere metodologie di indagine acquisite al campo di ricerca che è di mia maggior competenza specifica, cioè, alla fisica nucleare.

In quel periodo, tra gli argomenti di maggior interesse, era molto intenso lo studio della frammentazione della materia nucleare, altamente eccitata, che si era formata in seguito alle collisioni tra ioni pesanti alle energie intermedie ed alte. Molti dati sperimentali erano noti sulla

emissione di nucleoni e di frammenti leggeri e diverse interpretazioni teoriche sulle collisioni quasi centrali erano state elaborate prevalentemente sulla emissione dei protoni.

Molti lavori riguardavano lo studio di fenomeni collettivi della materia nucleare quali la termalizzazione, la compressione, il flusso idrodinamico, l'equazione di stato, etc. fenomeni che richiedono l'assunzione di un raggiunto equilibrio e la corretta valutazione della temperatura del sistema nucleare considerato.

La maggior parte dei modelli adottati assumeva che, prima della frammentazione con emissione anche di frammenti leggeri, il sistema nucleare potesse raggiungere un equilibrio nell'intero spazio considerato (spazio delle fasi, volume d'interazione..) o in particolari sottosistemi.

L'ipotesi diffusamente adottata era che le collisioni tra ioni pesanti generassero un sistema nucleare molto «caldo» con temperature variabili da T_B di qualche decina di MeV fino a temperature T_A di diverse decine di MeV.

a) Per $T = T_B$ si sarebbero potuti formare frammenti di nuclei leggeri. Per $T = T_A$ la produzione di tali frammenti sarebbe stata drasticamente ridotta e il sistema nucleare altamente eccitato si sarebbe potuto disintegrare emettendo nucleoni liberi e pioni.

b) Non era però da escludere che il sistema nucleare, formato a temperatura T_A , si sarebbe potuto espandere, almeno in parte, portandosi a più basse temperature e a più basse densità attraverso uno o più stadi di reazione. Ad un certo stadio, se la temperatura T e la densità ρ si fossero ridotti notevolmente si sarebbero potuti formare frammenti di nuclei leggeri. Continuando l'espansione del sistema, questi nuovi costituenti non avrebbero potuto subire nuove interazioni. La composizione dei vari frammenti formati rimaneva invariata fino alla loro rivelazione sperimentale.

c) Sulle basi di queste assunzioni abbiamo ritenuto che i frammenti di nuclei leggeri evaporati, se opportunamente analizzati e selezionati, avrebbero potuto dare informazioni sullo stadio finale dei sistemi nucleari esplodenti e quindi anche sulla loro temperatura. Le valutazioni, che si facevano allora, della temperatura destavano in noi molta attenzione (b)) e perplessità (d), e)). Le temperature erano valutate, con procedimento termodinamico, dall'andamento degli spettri evaporativi delle particelle emesse. La maggior parte dei dati noti era rela-

tiva alla emissione di protoni e per la parte terminale degli spettri dove si osserva il ben noto decremento esponenziale.

d) Ma i dati sperimentali dovevano essere trasformati dal sistema del laboratorio al sistema del centro di massa. Queste trasformazioni richiedono l'uso di differenti combinazioni di parametri variabili; spesso difficili da valutare per la complessa ed incerta cinematica della sorgente emissiva. Ciò può dar luogo a notevoli incertezze sulle valutazioni di T soprattutto ad energie intermedie. Alle alte energie gli effetti della variazione dei parametri diventa meno critica. I valori di T , così dedotti, anche per sistemi nucleari esplodenti con emissione di nuclei leggeri, variavano da qualche decina di MeV fino a diverse decine di MeV.

e) Noi non riuscivamo ad immaginare come un sistema nucleare, a temperature T notevolmente eccedenti l'energia di legame per nucleone $B/A \approx 8$ MeV, potesse contenere oltre a nucleoni liberi e pioni anche una apprezzabile percentuale di frammenti composti quali i nuclei leggeri (isotopi di H, He, Li, etc...). Allora le rese dei frammenti nucleari emessi nelle interazioni tra ioni pesanti erano noti essenzialmente per ^1H , ^2H , ^3H , ^3He , ^4He .

Nella nostra analisi abbiamo escluso i protoni, oltre che per le considerazioni d) ed e), anche per i seguenti motivi.

Dagli spettri energetici sperimentali, misurati a grandi angoli, si osservava che, usando stesse combinazioni di proiettile-bersaglio alla stessa energia, l'andamento esponenziale decrescente era simile per ^2H , ^3H , ^3He , ^4He e che le loro rese erano dello stesso ordine di grandezza. Invece gli spettri energetici dei protoni rispetto agli spettri dei frammenti leggeri emessi nella identica reazione ed alla stessa energia, mostravano andamenti decrescenti ben diversi e le rese dei protoni rispetto alle rese dei frammenti erano ben più alte anche per alcuni ordini di grandezza. Ciò sembrava indicare che la maggior parte dei protoni poteva essere emessa anche dalla sorgente formata nel primo stadio della interazione fra ioni pesanti a).

I frammenti leggeri invece potevano prevalentemente essere emessi, assieme ai nucleoni liberi, dalla sorgente formata nello stadio finale del processo evolutivo b).

Imponendo al sistema nucleare esplodente, nel suo stadio finale (*freeze-out*), le condizioni termodinamiche di equilibrio termico e chimico, la densità $\rho(A, Z)$ di un frammento nucleare

(A, Z) costituito da Z protoni e da ($A - Z$) neutroni, può essere espressa (vedi equazione (5) di ref. (1)), nel modo seguente:

$$(1) \quad \rho(A, Z) = \frac{N(A, Z)}{V} = \frac{A^{\frac{3}{2}} \lambda_T^{3(A-1)} \omega(A, Z)}{(2s_{pF} + 1)^Z (2s_{nF} + 1)^{A-Z}} \rho_{pF}^Z \rho_{nF}^{A-Z} \exp\left[\frac{B(A, Z)}{T}\right],$$

dove $N(A, Z)$ è il numero di particelle (A, Z) nel volume V ;

$$\lambda_T^3 = \left[\frac{h}{(2\pi m_0 T)^{\frac{1}{2}}} \right]^3 = \frac{4.2 \cdot 10^{-36}}{T^3} \text{ cm}^3,$$

è il cubo della lunghezza d'onda termica di un nucleone di massa m_0 ;

T è la temperatura espressa in MeV;

$\omega(A, Z)$ è la funzione di partizione interna della particella (A, Z);

s_{pF} e s_{nF} , sono gli *spins* di protoni e neutroni liberi rispettivamente;

ρ_{pF} e ρ_{nF} , sono le densità di protoni e neutroni liberi rispettivamente contenuti nello stesso volume V nel quale sono contenute le particelle composte $N(A, Z)$ alla temperatura T ;

$B(A, Z)$, è l'energia di legame del nucleo (A, Z).

Osserviamo che

$$(2) \quad \frac{\rho(A, Z)}{\rho(A', Z')} = \frac{Y(A, Z)}{Y(A', Z')},$$

dove $\frac{Y(A, Z)}{Y(A', Z')}$ è il rapporto tra le rese sperimentali di due diversi frammenti (A, Z) e (A', Z') emessi.

Consideriamo per una ben definita reazione il rapporto (2) per due frammenti nucleari (A, Z) e ($A + 1, Z$), che abbiano lo stesso Z (ISOTOPI) e che differiscano soltanto per un neutrone. Dalle equazioni (1) e (2) si deduce una relazione che dà ρ_{nF} in funzione di parametri noti e del rapporto $\frac{Y(A + 1, Z)}{Y(A, Z)}$.

Usando lo stesso procedimento, per l'identica reazione, e considerando il rapporto (2) per altri due frammenti nucleari isotopi (A', Z') e ($A' + 1, Z'$), che differiscono soltanto per un neutrone si ricava ρ_{nF} in funzione di parametri noti e del rapporto $\frac{Y(A' + 1, Z')}{Y(A', Z')}$.

I due valori così dedotti di ρ_{nF} sono ovviamente uguali perché si riferiscono alla stessa sorgente emissiva. Da questa uguaglianza si ricava per T una relazione indipendente da ρ_{nF} ,

data da

$$(3) \quad T = \frac{[B(A + 1, Z) - B(A, Z)] - [B(A' + 1, Z') - B(A', Z')]}{\ln f_n}$$

con

$$(3') \quad f_n = \left(\left(\frac{A}{A + 1} \right) \left(\frac{A' + 1}{A'} \right) \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{[2s(A, Z) + 1]}{[2s(A + 1, Z) + 1]} \frac{[2s(A' + 1, Z') + 1]}{[2s(A', Z') + 1]} \cdot \left(\frac{Y(A + 1, Z)}{Y(A, Z)} \right) \left(\frac{Y(A', Z')}{Y(A' + 1, Z')} \right).$$

Procedendo analogamente, ma considerando due distinti rapporti tra frammenti nucleari emessi che abbiano lo stesso N (ISOTONI) e che differiscano soltanto per un protone si ricava per la T la seguente relazione:

$$(4) \quad T = \{ [B(A + 1, Z + 1) - B(A, Z)] - [B(A' + 1, Z' + 1) - B(A', Z')] \} / \ln f_p$$

con

$$(4') \quad f_p = \left(\left(\frac{A}{A + 1} \right) \left(\frac{A' + 1}{A'} \right) \right)^{\frac{3}{2}} \cdot \frac{[2s(A, Z) + 1]}{[2s(A + 1, Z + 1) + 1]} \frac{[2s(A' + 1, Z' + 1) + 1]}{[2s(A', Z' + 1) + 1]} \cdot \left(\frac{Y(A + 1, Z + 1)}{Y(A, Z)} \right) \left(\frac{Y(A', Z')}{Y(A' + 1, Z' + 1)} \right).$$

Nel nostro primo lavoro su questo argomento⁽¹⁾ avendo escluso le rese dei protoni per le motivazioni già descritte, abbiamo utilizzato tutti i dati allora noti sulle rese di ^2H , ^3H , ^3He , ^4He emessi in 19 diverse interazioni tra ioni pesanti per energie $\left(\frac{E}{A_p} \right)$ dei proiettili comprese tra ~ 30 e ~ 2000 MeV per nucleone.

Dai dati sperimentali noti abbiamo dedotto le rese dei frammenti emessi prevalentemente a grandi angoli e comunque attribuibili alla componente di equilibrio con procedimenti descritti in⁽¹⁾.

La valutazione della temperatura T , dedotta sia dall'equazione (3), così come dall'equazione (4), è data da

$$(5) \quad T = \frac{14,3}{\ln \left[\frac{Y(^2\text{H}) \cdot Y(^4\text{He})}{Y(^3\text{H}) \cdot Y(^3\text{He})} 1,6 \right]} \text{ MeV.}$$

I valori di T , calcolati per le varie interazioni, erano tutti inferiori alla massima energia per nucleone disponibile nel centro di massa del sistema esplodente ed erano comprese tra ~ 4 MeV (per $\frac{E_P}{A} \cong 30$ MeV/n) e ~ 10 MeV (per $\frac{E_P}{A} \cong 300$ MeV/n). Soltanto per i valori più alti di $\frac{E_P}{A}$ fino a ~ 2000 MeV/n, T raggiungeva valori massimi di ~ 15 MeV. Valori di T che erano nettamente inferiori alle temperature, allora stimate di diverse decine di MeV, che, essendo ben più alte dell'energia di legame per nucleone $\frac{B}{A} \approx 8$ MeV, suscitavano le nostre perplessità.

In lavori successivi⁽²⁻⁵⁾ a questo primo lavoro⁽¹⁾, pubblicato nel 1985, abbiamo considerato effetti quantistici e i decadimenti in volo dei frammenti emessi⁽⁴⁾ oltre alle variazioni del rapporto $\left(\frac{\text{neutroni}}{\text{protoni}}\right)$ tra lo stadio iniziale e lo stadio finale dei processi studiati⁽⁵⁾.

Abbiamo cercato di spiegare le varie controversie, allora esistenti, tra i valori misurati e quelli calcolati sulla produzione di entropia nelle collisioni tra ioni pesanti⁽³⁾, etc..

Ma è il lavoro⁽¹⁾, dove abbiamo descritto, per la prima volta, il nuovo metodo di valutazione delle temperature nucleari, che dopo diversi anni ma fino ai nostri giorni è stato più frequentemente citato nella letteratura internazionale.

Il grande interesse al nostro lavoro del 1985 è dovuto al fatto che una corretta valutazione della temperatura nucleare è indispensabile in una delle ricerche ancor oggi di punta, che è lo studio della transizione di fase liquido-gas della materia nucleare.

Il metodo da noi allora proposto⁽¹⁾, da diversi anni *widely used*, è spesso indicato come *double ratios of isotope yields* o *isotope ratio thermometer* o *isotope nuclear temperature*, etc. ..

Da ormai diversi anni, circa venti lavori per anno, pubblicati sulle più prestigiose riviste internazionali, citano il nostro lavoro⁽¹⁾.

Come ultima considerazione, desidero far osservare che l'equazione (3) per la valutazione della temperatura nucleare, utilizzando un doppio rapporto di resa tra isotopi potrebbe essere particolarmente indicato anche in astrofisica nucleare.

Infatti, molti dati sono disponibili sulle abbondanze degli elementi pesanti nell'Universo. Poiché sono note anche le abbondanze relative di vari isotopi (con almeno 4 isotopi adiacenti), si intuisce che dall'equazione (3) si possono ricavare le temperature alle quali sono stati formati questi isotopi sia nei processi s sia nei processi r .

Bibliografia

- (1) S. ALBERGO, S. COSTA, E. COSTANZO and A. RUBBINO, *Temperature and free-nuclear densities of nuclear matter exploding into light clusters in heavy-ion collisions. Nuovo Cimento A*, **89** (1985) 1.
- (2) S. ALBERGO, S. COSTA, E. COSTANZO and A. RUBBINO, *Thermodynamic quantities deduced from the emission at large angles of isotopically resolved composite particles. Nuovo Cimento A*, **94** (1986) 151.
- (3) S. ALBERGO, S. COSTA, E. COSTANZO and A. RUBBINO, *A possible solution of controversies between measured and expected entropy production in heavy-ion collisions at intermediate energies. Nuovo Cimento A*, **98** (1987) 503.
- (4) S. ALBERGO, S. COSTA, E. COSTANZO and A. RUBBINO, *Search of quantum and fragment decay effects on observable emission yields of isotopically resolved fragments. Nuovo Cimento A*, **101** (1989) 815.
- (5) S. ALBERGO, S. COSTA, E. COSTANZO and A. RUBBINO, *Observed changes of the neutron to proton ratio from the initial to final stage of nuclear reactions. A possible interpretation and some deduced information. Nuovo Cimento A*, **102** (1989) 1117; S. ALBERGO, S. COSTA, E. COSTANZO and A. RUBBINO, *Nuovo Cimento A*, **101** (1989) 815.

PIÙ VELOCE DELLA LUCE?

F. Selleri

*Università di Bari - Dipartimento di Fisica
INFN - Sezione di Bari
I 70126 Bari, Italy*

1. - Il paradosso causale

Recentemente è apparso su questa rivista un articolo di Erasmo Recami⁽¹⁾ dedicato alla questione dell'esistenza in natura di segnali capaci di viaggiare con velocità superiore alla ben nota «velocità della luce»:

$$c = (299792,4588 \pm 0,0002) \text{ km/s.}$$

Questi segnali vengono di solito chiamati «segnali superluminali» o «tachioni». Anche se molti aspetti della faccenda sono in attesa di un chiarimento sembra ormai possibile che la lunga e difficile battaglia a favore del superamento della «velocità limite» della relatività si concluda con una vittoria ai punti dei pochi coraggiosi che l'hanno combattuta. Fra questi il nostro Recami va sicuramente messo nei primi posti, non solo per motivi cronologici, ma anche per la perseveranza del suo impegno e per la profondità dei suoi contributi. E tuttavia c'è un aspetto della situazione che non è mai stato affrontato in maniera soddisfacente, quello dei paradossi causali, situazioni assurde per cui se

esistono i segnali superluminali (SSL) sarebbe possibile, almeno in linea di principio, modificare attivamente il passato, anche in modo da negare la realtà del presente («uccisione del nonno prima che papà fosse concepito»).

Schematicamente il paradosso causale può essere formulato così: ci sono due personaggi Ferruccio (*F*) e Geltrude (*G*) e il primo si allontana nello spazio dalla seconda con velocità inferiore a *c*. In fig. 1 *ct'* e *ct* sono le linee di universo di *F* e *G*, rispettivamente. A un certo momento *F* dalla sua posizione *F*₁ invia a *G* un SSL. Ricevutolo in *G*₁, *G* attende un certo tempo Δt poi risponde a *F* dalla posizione *G*₂ con un altro SSL. Se tutte le velocità sono possibili, le sole condizioni che i due SSL debbono soddisfare è di apparire in propagazione verso il futuro a chi li ha spediti: perciò la linea *G*₂*F*₂ deve salire procedendo da *G*₂ verso *F*₂, mentre la linea *G*₁*F*₁ deve avere una pendenza minore di quella dell'asse *x'*. Entrambe le condizioni sono soddisfatte in fig. 1.

Ebbene la teoria della relatività speciale (TRS) prevede che la risposta di *G* possa raggiungere *F* in una posizione *F*₂ precedente il suo invio del primo SSL, cioè prevede che il SSL usato per la risposta possa viaggiare verso il passato di *F*. È evidentemente una situazione molto strana, ma la TRS non permette di andare oltre, può solo dichiarare che i SSL sono impossibili. Dato che la rassegnata convivenza con paradossi di questo tipo costituirebbe un tradimento del pensiero razionale, bisogna discutere le conseguenze dei SSL e i cambiamenti da operare nei nostri schemi mentali per raggiungere una situazione soddisfacente.

2. - Le soluzioni proposte

Naturalmente paradossi causali come quello visto sopra sono stati affrontati in molti articoli scientifici. Tuttavia manca ancora una loro soluzione soddisfacente. Vediamo brevemente alcune idee che sono state avanzate.

Dopo avere sottolineato che le velocità di segnale superluminali esistono in natura, Nimtz and Haibel⁽²⁾ discutono il paradosso causale e mostrano che la durata finita del SSL non gli permette di diventare effettivo negli esperimenti compiuti dal gruppo di Colonia. Trovo la loro analisi accettabile, ma di portata molto limitata e non esportabile alle altre numerose

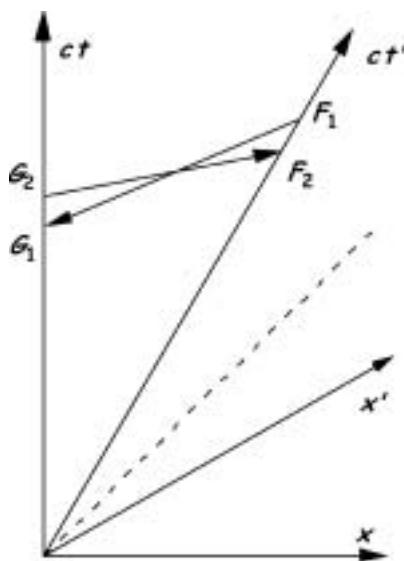


Fig. 1. - In teoria della relatività lo scambio di segnali superluminali fra due osservatori inerziali *F* e *G* può avvenire in modo tale che la «risposta» di *G* giunga ad *F* in *F*₂ prima che egli abbia inviato la «domanda» in *F*₁.

situazioni empiriche in cui i SSL sembrano manifestarsi.

Meno convincente è invece l'analisi di Garrison e soci⁽³⁾ dove la questione se l'esistenza di SSL genera problemi in teoria della relatività speciale trova una risposta sostanzialmente evasiva, basata sul fatto che in certi esperimenti sui SSL non si è trovato alcun conflitto con le equazioni di Maxwell. Essendo queste equazioni consistenti con la relatività, si dice, anche i SSL debbono esserlo. Insomma, Tizio sta bene con Caio, Caio sta bene con Sempronio, quindi Tizio deve star bene con Sempronio. Poi magari li metti assieme e bisticciano!

La proposta di Recami^(4,5) ha almeno il merito di essere un tentativo di natura generale di risolvere i paradossi causali. Afferma di farlo risolvendoli contemporaneamente a un altro problema, il fatto che un tachione (diversamente da una particella ordinaria) può avere segno dell'energia positivo o negativo a seconda del sistema inerziale da cui viene osservato. I classici due piccioni con una fava sono presi con la seguente regola reinterpretativa: «se, nel passare da un primo a un secondo osservatore un tachione passa dal manifestare energia positiva a manifestare energia negativa, per quello stesso secondo osservatore il tachione in esame apparirà muoversi dal futuro verso il passato (rispetto alla direzione del tempo fissata dal comportamento dei consueti macro-oggetti) [e viceversa]». L'applicazione della regola reinterpretativa al caso di fig. 1 è semplicissima. Si può notare che la propagazione da G_2 verso F_2 avviene normalmente verso il futuro di G perché sta tutta sopra al «presente» di G , che è la retta orizzontale passante per G_2 . La stessa propagazione da G_2 verso F_2 avviene invece dal futuro, secondo F , perché sta tutta sopra al suo presente, la retta parallela all'asse delle x' passante per F_2 . Contestualmente si dimostra che l'energia di questo arrivo in F_2 , sarebbe negativa per F . Pertanto F deve assumere che in realtà non si è verificato l'arrivo di un tachione in F_2 , ma la partenza di un anti-tachione da F_2 verso G_2 . A questo punto non solo l'energia «portata via» è positiva, ma il paradosso causale non c'è più perché entrambi i segnali sono partiti da F verso G e il loro ordine d'arrivo in G_1 e G_2 dipende solo dalla loro diversa velocità.

La «regola reinterpretativa» deriva dalla proposta di Feynman⁽⁶⁾ che le normali antiparticelle (positrone, antiprotone, ...) non siano

altro che particelle in viaggio dal futuro verso il passato. Si applichi questa regola sistematicamente ai SSL, dice Recami, e i paradossi causali spariranno. Dal suo punto di vista la formulazione usuale della relatività sarebbe molto limitativa e il mondo reale sarebbe popolato sia da particelle che viaggiano in avanti nel tempo trasportando energia positiva che da particelle duali («antiparticelle») che viaggiano all'indietro nel tempo trasportando energia negativa. Che questa soluzione sia fisicamente inaccettabile, anche perché troppo semplicistica, può essere dimostrato con alcuni esempi contrari.

3. – La freccia del tempo

Se davvero esistono e interagiscono con la materia ordinaria a un certo momento nel futuro sarà possibile fare con i tachioni, qualunque cosa essi siano, ciò che si fa normalmente con le particelle ordinarie (e con le antiparticelle!): preparare delle sorgenti, controllare i tempi di uscita con schermi che si aprono e si chiudono, disporre di fasci a intensità modulabile e così via. Su questa base daremo nel seguito tre argomenti contro il rovesciamento della freccia del tempo.

1) Il paradosso causale può venire complicato a volontà. Consideriamo di nuovo i due personaggi F e G con il primo che si allontana dalla seconda con velocità inferiore a c . A un certo

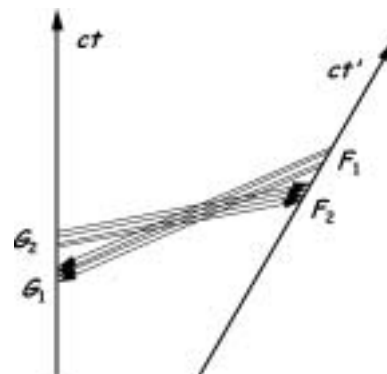


Fig. 2. – Questa volta F dalla sua posizione F_1 manda a G una rapida successione di tachioni opportunamente spazati nel tempo che trasportano un'informazione, per esempio una difficile domanda. Ricevuto in G_1 , G attende un certo tempo Δt poi risponde a F dalla posizione G_2 con un'altra successione di tachioni che contiene la risposta. Anche ora la risposta di G può raggiungere F in una posizione F_2 precedente il suo invio della domanda.

momento F , che ha notato una cancellazione accidentale nella sua enciclopedia elettronica, spedisce un insieme di tachioni opportunamente spaziatosi nel tempo, tutti dotati della stessa velocità superluminale, per porre a G la domanda seguente: «Qual'è la nona parola nella ottantaduesima riga a pagina 1176 del volume XII della Enciclopedia Europea?» G cerca diligentemente la parola in questione e risponde a F con un altro SSL organizzato: «La parola che vuoi è "teleparallelismo".» (vedi fig. 2) La TRS predice che la risposta di G possa raggiungere F prima che egli abbia inviato la sua domanda. Tuttavia, avendo soddisfatto la sua curiosità, F può decidere di non mandare più la domanda. Ma se G non riceve la richiesta di informazione da F come può rispondere a una esigenza tanto complicata? Ovviamente siamo di fronte a un'impossibilità logica. Qui Recami dovrebbe tentare di risolvere il paradosso dicendo che per il secondo gruppo di SSL in realtà è stato il rivelatore di F a produrre dei sistemi che si propagavano in avanti nel tempo fino a raggiungere l'emettitore di G . Ma una semplice inversione della direzione del tempo non può cancellare l'informazione trasportata dal secondo gruppo di segnali: come è possibile la presenza in essi della parola "teleparallelismo" se F (per non parlare del suo rivelatore) non conosceva la parola trasmessa?

2) Il rovesciamento della «freccia del tempo» genera difficoltà insormontabili anche in situazioni ancora più semplici di quella discussa sopra. Consideriamo un fascio di tachioni che in-

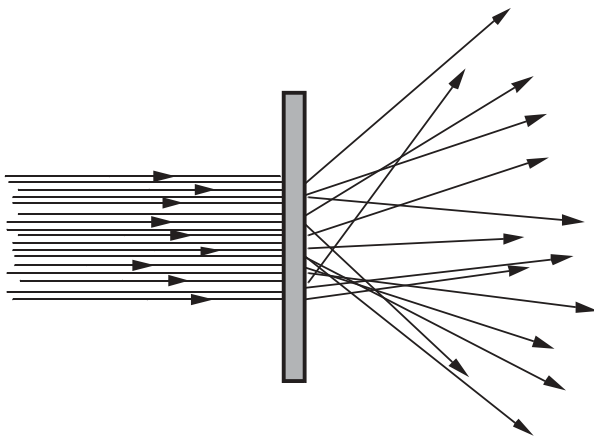


Fig. 3. - Un fascio di tachioni paralleli è disperso in molte direzioni dopo avere subito un processo di diffusione da parte degli atomi che compongono una lamina.

teragisce con una targhetta di un qualche materiale ordinario: quelli diffusi saranno deviati in molte direzioni diverse, perché è impossibile controllare il comportamento individuale nelle singole collisioni. La situazione sarà come quella mostrata in fig. 3. Per qualche osservatore inerziale i tachioni provenienti da sinistra in fig. 3 hanno energia negativa e la «regola reinterpretativa» spingerebbe a dire che in realtà ci sono degli (anti)tachioni che provengono da tutte le direzioni di destra, ma che si muovono parallelamente fra di loro dopo avere urtato gli atomi della targhetta. Ma un tale comportamento è assurdo perché contrasta con le regole più basilari del calcolo delle probabilità: è facile passare dall'ordine al disordine, ma è estremamente difficile procedere nella direzione opposta!

3) Uno degli argomenti spesso usati a favore delle propagazioni verso il passato è che prima ancora di parlare di tachioni ci sono le antiparticelle che «debbono» essere considerate particelle ordinarie che viaggiano all'indietro nel tempo, così come è stato affermato da Feynman⁽⁵⁾. Quindi un positrone, per esempio, sarebbe un normale elettrone che va dal futuro verso il passato. Questo modo di considerare le cose è tuttavia ben poco consistente con le circostanze che portarono alla scoperta del positrone, come è stato fatto notare con grande chiarezza da Alvarez⁽⁷⁾. Molti fisici direbbero che Anderson scoprì il positrone basandosi sull'osservazione che una traccia di tipo elettronico piegava dalla parte sbagliata nel campo magnetico di una camera

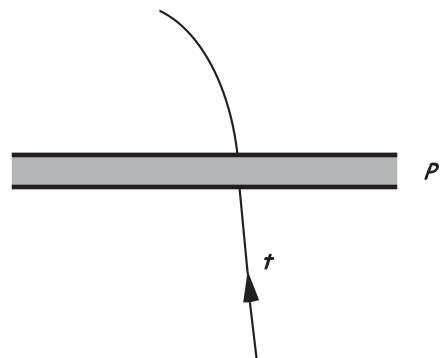


Fig. 4. - La scoperta di Anderson del positrone. La traccia t è prodotta da una particella carica positivamente che si muove verso l'alto e non da una particella carica negativamente che si muove verso il basso, perché dell'energia è persa (dissipata) nell'attraversamento della lamina di piombo P (aumento della curvatura nel campo magnetico).

a nebbia. Ma questo non sarebbe corretto perché altri prima di lui avevano visto tracce di tipo elettronico che curvavano dalla parte sbagliata e l'effetto era sempre stato attribuito a elettroni che si muovevano in direzione opposta *nello spazio*. La scoperta del positrone si basava interamente sul fatto che Anderson sapeva in quale direzione si stava muovendo il suo positrone; aveva piazzato una lamina di piombo nella camera a nebbia e aveva visto che la particella, perdendo energia, aumentava la curvatura della sua traiettoria dopo avere attraversato la lamina (vedi fig. 4). Molti osservatori avevano visto particelle consistenti con l'ipotesi del positrone, ma Anderson fu il primo a poter rigettare tutte le altre alternative. Ecco perché è a lui che viene attribuita la scoperta.

Guardando la traccia t di fig. 4 possiamo dire che se la particella avesse viaggiato dal futuro (sopra la lamina) verso il passato (sotto la lamina) la curvatura della sua traiettoria sarebbe diminuita. Pertanto dovrebbe avere guadagnato quantità di moto ed energia nell'attraversare lo strato di piombo. Data la complessità delle molteplici interazioni con gli atomi nel metallo, la probabilità di un guadagno energetico è estremamente bassa e la sua sistematica osservazione sarebbe del tutto inconsistente con le note leggi della probabilità e della termodinamica. Perciò un positrone non è un ordinario elettrone che viaggia verso il passato!

4. – Le trasformazioni equivalenti

Evidentemente la risoluzione dei paradossi causali richiede qualcosa di più profondo di quanto finora tentato. Fortunatamente la soluzione è a portata di mano, solo che la si voglia accettare. Secondo Poincaré⁽⁸⁾, Reichenbach⁽⁹⁾, Jammer⁽¹⁰⁾, Mansouri e Sexl⁽¹¹⁾ le trasformazioni di Lorentz contengono un termine convenzionale, privo di base empirica, il coefficiente della x nella trasformazione del tempo. Studiando la faccenda le trasformazioni dello spazio e del tempo fra sistemi inerziali sono state riformulate⁽¹²⁾ a partire da ipotesi generali. Così sono state ottenute le «trasformazioni equivalenti» [vedi le (1) qui sotto] che contengono un parametro indeterminato, e_1 , il coefficiente della x nella trasformazione del tempo.

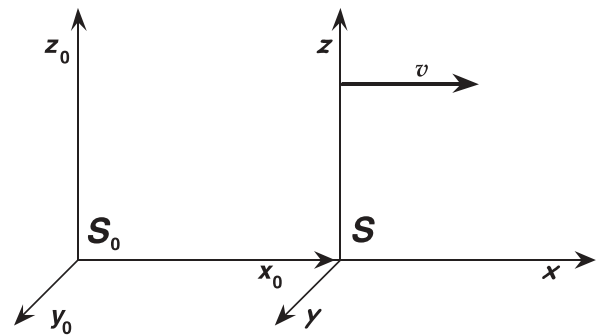


Fig. 5. – Un sistema inerziale S dotato delle coordinate (x, y, z) si muove con velocità $v < c$ rispetto al sistema inerziale isotropo S_0 dotato delle coordinate (x_0, y_0, z_0) . I due sistemi di coordinate si sovrappongono a $t_0 = t = 0$.

La struttura del ragionamento che porta alle trasformazioni equivalenti è la seguente. Dati i sistemi inerziali S_0 e S si considerano due sistemi di coordinate cartesiane ortogonali (vedi fig. 5) e si assume:

i) che in S_0 la velocità della luce abbia lo stesso valore « c » in tutte le direzioni; quindi gli orologi a riposo in S_0 vanno sincronizzati col metodo di Einstein, dopo di che le velocità relative a S_0 possono essere misurate;

ii) che lo spazio sia omogeneo e isotropo e che il tempo sia omogeneo, almeno se giudicati da osservatori a riposo in S_0 ;

iii) che gli assi di S ed S_0 coincidano per $t = t_0 = 0$;

iv) che l'origine di S , osservata da S_0 , sia vista muovere con velocità $v < c$ parallela all'asse $+x_0$, cioè secondo l'equazione $x_0 = vt_0$.

La configurazione geometrica prescelta è quella solita delle trasformazioni di Lorentz mostrata in fig. 5.

Le ipotesi i) e ii) non sono esposte a obiezioni sia dal punto di vista della TRS che da ogni plausibile teoria basata su un sistema privilegiato; per la TRS sono vere in tutti i sistemi inerziali, nel secondo caso possono essere assunte per il sistema privilegiato stesso.

Ora si possono aggiungere due ipotesi dotate di un'ampia base empirica:

v) la velocità della luce di andata e ritorno è la stessa in tutte le direzioni e in tutti i sistemi inerziali;

vi) il rallentamento degli orologi in moto ha luogo con il solito fattore della radice quadrata almeno rispetto a un sistema di riferimento isotropo S_0 .

È stato dimostrato in^(11, 13) che le condizioni

i)-vi) riducono le trasformazioni da S_0 a S alla forma

$$(1) \quad \begin{cases} x = \frac{x_0 - vt_0}{R}, \\ y = y_0; z = z_0, \\ t = Rt_0 + e_1(x_0 - vt_0), \end{cases}$$

dove

$$(2) \quad R = \sqrt{1 - v^2/c^2}.$$

Il valore di e_1 può essere fissato scegliendo una procedura di sincronizzazione degli orologi nei sistemi inerziali diversi da S_0 . Questa è normalmente considerata una scelta totalmente libera, convenzionale. La TRS viene recuperata per un valore particolare di e_1 ($e_1 = -v/c^2R$). Diversi valori di e_1 corrispondono a diverse teorie dello spazio e del tempo, teorie che la ricerca recente ha mostrato essere empiricamente equivalenti in larga misura. Infatti è stato possibile dimostrare che sono insensibili alla scelta di e_1 tutti gli esperimenti interferometrici tipo Michelson-Morley, l'aberrazione della luce stellare, l'effetto Doppler, le occultazioni dei satelliti di Giove, le distanze radar dei pianeti e molti altri esperimenti ancora^(12, 14). Dalle (1) è facile ottenere

$$(3) \quad t - t_0 = (R - 1)t_0 + Re_1x$$

e si vede così che nel «ritardo» $t - t_0$ di un orologio immobile in S nel punto x rispetto all'orologio di S_0 che gli sta passando accanto entrano additivamente due contributi molto diversi. Il termine proporzionale a t_0 è dovuto a un effetto fisico, il ritardo degli orologi in movimento [punto vi)], mentre il termine proporzionale a x dipende dalla convenzione adottata nel sincronizzare gli orologi in S , cioè da e_1 . Una denominazione appropriata per e_1 è «parametro di sincronizzazione».

5. - Dimostrazioni della simultaneità assoluta

L'ipotetica indifferenza della realtà fisica rispetto alla sincronizzazione degli orologi esiste solo finché si trascurano le accelerazioni. Vedremo ora con due diversi esempi, pubblicati negli anni 1995⁽¹⁵⁾ e 1997⁽¹⁶⁾, che la presenza di accelerazioni modifica il quadro concettuale fino al punto di imporre per e_1 la scelta $e_1 = 0$.

Cominciamo con le accelerazioni lineari. Due identiche astronavi **A** e **B** sono inizialmente a

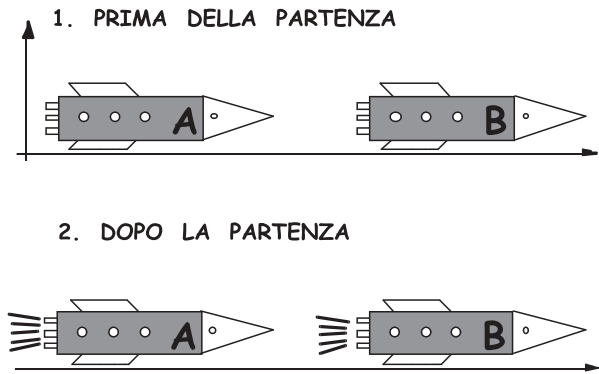


Fig. 6. - Due identiche astronavi **A** e **B** sono inizialmente ferme sull'asse delle x_0 del sistema inerziale S_0 . Dopo aver accelerato esattamente allo stesso modo **A** e **B** sono a riposo in un diverso sistema inerziale S da esse concretamente costituito.

riposo sull'asse delle x_0 del sistema inerziale isotropo S_0 a una distanza d_0 l'una dall'altra. Gli orologi che si trovano al loro interno sono sincronizzati con quelli di S_0 . Al tempo $t_0 = 0$ le astronavi cominciano ad accelerare nella direzione $+x_0$, e continuano a farlo nello stesso identico modo, tale da avere entrambe la velocità $v(t_0)$ ad ogni istante t_0 di S_0 , finché al tempo $t_0 = \bar{t}_0$ raggiungono una velocità preassegnata $v = v(\bar{t}_0)$. Per tutti i $t_0 \geq \bar{t}_0$ le astronavi sono a riposo in un diverso sistema inerziale S (che esse concretamente costituiscono) in moto con velocità v rispetto a S_0 .

Possiamo ora facilmente mostrare che la trasformazione che collega S_0 a S non può essere quella di Lorentz (e, anzi, che è quella «inerziale», data da $e_1 = 0$) perché il ritardo fra i tempi segnati dagli orologi di S e quelli di S_0 non dipende dalla posizione, naturalmente se non si opera alcuna risincronizzazione degli orologi per correggere ciò che la natura ha generato durante la fase accelerativa⁽¹⁴⁾.

La dimostrazione si basa su una osservazione banale: poichè **A** e **B** hanno in ogni istante esattamente la stessa velocità, i loro orologi accumulano esattamente lo stesso ritardo rispetto a quelli di S_0 . Pertanto due eventi simultanei in S_0 , che avvengono in punti diversi dello spazio vicino ai quali le due astronavi stanno passando, debbono essere simultanei anche per **A** e **B**, cioè anche in S . È chiaro allora che si verifica una situazione di simultaneità «assoluta» che è l'aspetto più caratteristico delle trasformazioni inerziali. Infatti, scrivendo due volte la (3) con indici «1» e «2» per le variabili spazio-temporali, si può avere $t_2 = t_1$ co-

me conseguenza di $t_{02} = t_{01}$ (con $x_2 \neq x_1$) solo se $e_1 = 0$.

La simultaneità assoluta rende possibile una descrizione ragionevole della realtà fisica. Per vederlo supponiamo che nelle astronavi vi siano due passeggeri P_A e P_B , che sono gemelli identici. Abbiamo concluso che gli orologi di **A** e **B** sono ritardati allo stesso modo, per cui la trasformazione $S - S_0$ deve essere quella con $e_1 = 0$. Anche l'invecchiamento di P_A e P_B deve essere stato lo stesso dato che in ogni istante prima, durante e dopo la fase accelerativa i due si sono trovati nelle identiche condizioni fisiche. Pertanto P_A e P_B hanno identica età biologica quando i tempi mostrati dai loro orologi sono gli stessi, se questi sono stati sincronizzati in S_0 prima della partenza e mai più modificati dopo. Naturalmente P_A e P_B possono scambiarsi delle fotografie (per esempio via telefax) in cui è registrato il tempo in cui sono state scattate: il gemello che riceve una foto può controllare nei suoi archivi che al tempo mostrato nella foto di suo fratello egli aveva esattamente la stessa apparenza, e dunque la stessa età.

Volendo P_A e P_B possono realizzare una diversa sincronizzazione degli orologi, per esempio quella di Einstein che porta alle trasformazioni di Lorentz fra S ed S_0 . A tale scopo debbono inviare un segnale luminoso da **A** a **B** e debbono modificare il tempo mostrato da almeno un orologio. Tuttavia, se fanno questo, debbono poi concludere di avere avuto età biologiche diverse allo stesso tempo (risincronizzato), perché non possono certo risincronizzare se stessi! Questo fatto dà una chiara prevalenza alle trasformazioni inerziali rispetto a quelle di Lorentz, perché (ahinoi) gli «orologi» biologici non possono essere modificati, dato che l'invecchiamento è un processo irreversibile. Si può concludere che la natura favorisce le trasformazioni inerziali ($e_1 = 0$) per descrivere le proprietà dei sistemi inerziali concretamente prodotti da processi di accelerazione.

Anche con le accelerazioni centripete la natura sceglie $e_1 = 0$. Esiste una grandezza fisica ρ (rapporto delle velocità della luce in due direzioni opposte) per la quale la TRS predice $\rho = 1$ relativamente a tutti i sistemi inerziali. È stato dimostrato in modo estremamente generale⁽¹⁵⁾ che deve invece aversi $\rho = (c + v)/(c - v)$ relativamente a tutti i dischi ruotanti con raggi diversi ma con la stessa velocità periferica v e accelerazione centripeta a arbitraria e dunque anche *arbitrariamente piccola*. Questa $\rho = (c + v)/(c - v)$ si

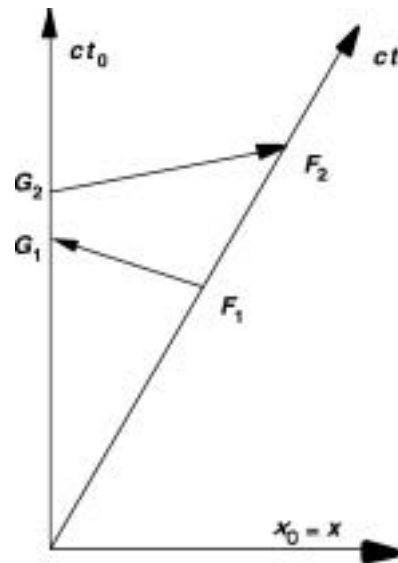


Fig. 7. – Adottando le trasformazioni «inerziali» nessuno scambio di segnali superluminali fra due osservatori inerziali può portare al paradosso causale di fig. 1. Tutti i segnali superluminali debbono salire in figura, ad esempio da F_1 verso G_1 , così come da G_2 verso F_2 .

applica ad ogni piccola regione dei perimetri dei dischi. Perciò la TRS ($\rho = 1$ per $a = 0$) genera una discontinuità fra le accelerazioni arbitrariamente piccole ma non nulle e l'accelerazione zero. Il limite $a \rightarrow 0$ dovrebbe invece essere regolare perché tutte le conoscenze empiriche relative ai sistemi inerziali sono state ottenute in sistemi con $a \neq 0$, per via dei movimenti della Terra. L'eliminazione della discontinuità è possibile se si sceglie il parametro e_1 in modo opportuno: solo $e_1 = 0$ (che porta alla simultaneità assoluta) dà $\rho = (c + v)/(c - v)$ nei sistemi inerziali.

A questo modo l'ambiguità nella sincronizzazione degli orologi viene superata. Una teoria quasi equivalente alla TRS dal punto di vista pratico (anche se molto diversa da quello concettuale) può descrivere correttamente la realtà fisica.

Vedremo ora, per finire, che accade una cosa molto significativa: la scelta $e_1 = 0$ permette di superare i paradossi causali che rendono logicamente impossibili i SSL nella TRS.

Ora la situazione della fig. 1 si presenta modificata: vedi la fig. 7. Come prima Ferruccio (**F**) si allontana nello spazio da Geltrude (**G**) con velocità inferiore a c . Anche in fig. 7 ct e ct_0 sono le linee di universo di **F** e **G**, rispettivamente. Ora però l'asse delle x_0 (equazione $ct_0 = 0$) coincide con l'asse delle x (equazione $ct = 0$) perché le (1) con $e_1 = 0$ danno subito $ct = 0$ se

$ct_0 = 0$. A un certo momento F dalla sua posizione F_1 invia a G un SSL. Ricevutolo in G_1 , G attende un certo tempo Δt_0 poi risponde a F dalla posizione G_2 con un altro SSL. Come prima le sole condizioni che i due SSL debbono soddisfare è di apparire in propagazione verso il futuro *a chi li ha spediti*. Ora però le linee del presente coincidono per i due sistemi. Perciò non solo la linea F_1G_1 deve salire procedendo da F_1 verso G_1 , ma anche la linea G_2F_2 deve salire procedendo da G_2 verso F_2 . Dal basso verso l'alto dobbiamo trovare

$$F_1, G_1, G_2, F_2.$$

Dunque l'evento F_2 non potrà mai trovarsi nel passato di F_1 .

Il paradosso causale è così risolto.

Bibliografia

- (1) E. RECAMI, *Il Nuovo Saggiatore* **17**, No. 1-2 (2001) 21; vedi anche *Il Nuovo Saggiatore* **2**, No. 3 (1986) 20.
- (2) G. NIMTZ and A. HAIBEL, *Ann. Phys. (Leipzig)* **9** (2000) 1.
- (3) J. C. GARRISON, M. W. MITCHELL, R. Y. CHIAO and E. L. BOLDA, *Phys. Lett. A* **245** (1998) 19.
- (4) E. RECAMI, *Lett. Nuovo Cimento* **44** (1985) 587.
- (5) E. RECAMI, F. FONTANA and R. GARAVAGLIA, *Int. J. Mod. Phys. A* **15** (2000) 2793.
- (6) R. FEYNMAN, *Phys. Rev.* **76** (1949) 749.
- (7) L. W. ALVAREZ, in: *Proceedings of the 1975 International Symposium Lepton & Photon Interactions at High Energies, Stanford (1975)*, p. 967.
- (8) H. POINCARÉ, *Rev. Metaphys. Morale*, **6** (1898) 1.
- (9) H. REICHENBACH, *Filosofia dello spazio e del tempo* (Feltrinelli, Milano, 1977).
- (10) M. JAMMER, *Some fundamental problems in the special theory of relativity*, in: *Problems the Foundations of Physics*, a cura di G. Toraldo di Francia (Società Italiana di Fisica, Bologna, 1979) pp. 202-236.
- (11) R. MANSOURI e R. U. SEXL, *Gen. Relat. Gravit.*, **8** (1977) 809.
- (12) F. SELLERI, *Found. Phys.* **26** (1996) 641.
- (13) F. SELLERI, *Bell's spaceships and special relativity*, in: *Quantum [un]speakables, from Bell to Quantum Information*, a cura di R. A. Bertlmann & A. Zeilinger (Springer, Berlin, 2002) pp. 413-428.
- (14) R. MANARESI, *G. Fis.*, **XLIII** (2002) 25; G. PUCCINI e F. SELLERI, *Nuovo Cimento B*, **117** (2002) 283.
- (15) F. SELLERI, *Chinese J. Syst. Eng. Electron.* **6** (1995) 25.
- (16) F. SELLERI, *Found. Phys. Lett.* **10** (1997) 73.