

FISICA TEORICA DELLA MATERIA CONDENSATA E DI ALTRO

Eugenio Tabet*

Lo scrivente (qui di seguito indicato con ET) si era laureato nel 1963 con una tesi teorica (relatore Giovanni Jona Lasinio e correlatore Edoardo Amaldi) sulle correzioni anarmoniche nello scattering dei neutroni nei cristalli. Dopo aver vinto una borsa di studio nel Laboratorio di Fisica dell'ISS, su iniziativa di Jona Lasinio e con il consenso di Mario Ageno ottenne, alla fine del 1964, una borsa di studio del CERN (1) per un soggiorno presso il Laboratorio di Fisica teorica dell'Istituto Unificato di Ricerche Nucleari di Dubna, laboratorio diretto allora da Nikolai Nikolaievic Bogoliubov. La stessa borsa fu vinta anche da Ferdinando de Pasquale, della Facoltà di Ingegneria della Sapienza, dove sarebbe poi divenuto professore ordinario. Mentre ET si trasferì nell'Unione Sovietica da solo, Ferdinando fu accompagnato da sua moglie Liuccia e dal suo primo nato, il piccolo Luigi di pochi mesi. La collaborazione con Ferdinando (che diede luogo anche ad una duratura amicizia) caratterizza tutto il primo periodo dell'attività teorica di ET nella fisica dei sistemi condensati.

Al ritorno da Dubna, alla metà del '65, l'interesse di de Pasquale e di ET si rivolge ai sistemi quantistici macroscopici, cioè a quegli stati della materia nei quali la natura quantistica dei fenomeni si manifesta anche sulla scala dell'esperienza comune (e non solo, come è il caso molto più frequente, se si considerano i fenomeni su scala atomica o subatomica): ci si riferisce, ad es., all'elio liquido sotto la temperatura T_λ o ai metalli superconduttori a temperature inferiori alla temperatura critica T_C . Il primo sistema ad essere studiato è il *liquido di Bose* (un fluido composto da particelle con spin intero), rappresentato in natura dall'elio liquido che, a circa 4 K, subisce una drammatica transizione di fase, assumendo un comportamento

* L'autore ha anche potuto avvalersi del supporto critico di Antonella Rogani, che qui ringrazia.

“superfluido” (caratterizzato dal tracollo della viscosità del fluido) che diventa sempre più pronunciato al tendere di T a 0. Si mostra nei primi lavori (2-4), utilizzando proprietà di simmetria del sistema quale l’invarianza per trasformazioni di gauge infinitesimali (5), che lo spettro delle fluttuazioni di densità a bassa temperatura è privo di gap (diversamente da ciò che accade per i liquidi fermionici, composti, appunto, da particelle con spin semi-intero che ubbidiscono alla statistica di Fermi-Dirac). Nel caso di Bose, la rottura spontanea della simmetria di gauge è associata alla nascita dello stato condensato, nel quale ad una frazione macroscopica n_0 degli atomi di elio è assegnato un valore eguale a zero della quantità di moto (fenomeno conosciuto con il nome di “condensazione di Bose-Einstein”). L’uso di identità di Ward generalizzate, che sono conseguenze del principio di simmetria sopra ricordato, permette di fissare la forma della funzione di risposta (6) ad un campo esterno (ad es. un campo di rotazione). Mediante una dettagliata analisi dei diagrammi di Feynman per la funzione di risposta (dove de Pasquale risulta particolarmente abile), si perviene ad un importante risultato, la connessione esplicita tra la densità fenomenologica del superfluido ρ_s (misurata ad es. in esperimenti nel quale l’elio viene fatto ruotare) e grandezze microscopiche (come n_0) espresse mediante la funzione di Green ad una particella. In tale schema si trova che tale densità è data da:

$$\rho_s = n_0(T) + [n_0(T) V]^{3/2} / 3\pi^2 + n_0(T)^2 \alpha(T) / 2 \quad (1)$$

dove $\alpha(T)$ è una funzione di T eguale a 0 per $T=0$ e V misura l’interazione tra le particelle. Sebbene la (1) sia calcolata in un caso approssimato, la relazione descritta in (4) tra ρ_s e n_0 ha un carattere non perturbativo. In una fase successiva si analizza (7) il comportamento critico (vale a dire in prossimità della transizione) della densità generalizzata dell’elio 4 vicino a T_λ , $\rho_s(k, T)$, mostrando esplicitamente l’esistenza di due regioni, critica ed idrodinamica, separate dalla lunghezza $1/(4n_0V)^{1/2}$. Di nuovo si mostra che il comportamento di $\rho_s(k, T)$ vicino a T_λ è connesso strettamente alla rottura della simmetria di gauge e viene messo in luce il ruolo delle fluttuazioni come correzione alla teoria di campo medio. Successivamente, una analisi analoga venne effettuata per lo studio della risposta di un superconduttore ad un campo

magnetico statico (8). Qui il ruolo della funzione di Green ad una particella è svolto dalla funzione di correlazione parametro d'ordine-parametro d'ordine $T(q)$. Si trova che la rottura della simmetria di gauge produce una parte a lungo range in $T(q)$, come suggerito dal teorema di Goldstone (9). La densità del superfluido delle coppie di Cooper è continua attraverso T_C e $\rho_s(k,T)$ nella zona critica (definita da $k \xi \ll 1$, dove ξ è la lunghezza di correlazione del metallo) è identica a quella trovata nel caso dei bosoni. In conclusione, in questa serie di articoli si mostra il ruolo essenziale della rottura spontanea di simmetria (di gauge e galileiana per i bosoni, di gauge per i fermioni) nel determinare la struttura a lungo range delle funzioni "microscopiche" che descrivono la risposta del sistema ad un campo esterno.

Negli stessi anni, su invito di Renato Ricamo, ET, con Martino Grandolfo (che fu il primo a partire) e Piero Indovina, inizia una lunga attività di insegnamento a L'Aquila (dal 1967 (10) al 1983), con il corso di Istituzioni di Fisica Teorica, mentre Grandolfo tiene il corso di Fisica dei Solidi (dal 1965 al 1969 (11)) e Indovina quello di Spettroscopia (dal 1966 al 1967), tutti e tre nel ruolo di professore incaricato.

Gli inesorabili limiti di questo volume impediscono di fornire una descrizione adeguata di quegli anni pieni di entusiasmo e di speranze per questa piccola pattuglia del Laboratorio che partecipava al debutto dell'Istituto di Fisica di quell'Università, in condizioni certo non facili. L'Aquila allora era molto lontana, raggiungibile com'era solo percorrendo la Salaria, con l'ascesa obbligata al passo Sella di Corno, spesso ghiacciato o addirittura chiuso per vari giorni nel periodo invernale. Le condizioni salariali offerte dall'Università erano piuttosto modeste (circostanza comprensibile, ricevendo tutti e tre una remunerazione stabile dall'ISS), sì che era inevitabile ricorrere a sistemazioni collettive indubbiamente spartane (ad esempio quella di una abitazione nella frazione di Monticchio), che si caratterizzavano per le temperature davvero incredibilmente rigide raggiunte in alcuni momenti dell'anno. Ma le esigenze severe e, al tempo stesso, stimolanti dell'insegnamento, le classi assai poco numerose, il clima cordiale dei rapporti con i colleghi aquilani (12), il senso di "frontiera" che sembrava ai tre di vivere, il tutto nella cornice della straordinaria bellezza e calorosa accoglienza di quella città, fecero di quegli anni un intermezzo nella vita dei tre giovani fisici che non sarà più dimenticato. È giusto riconoscere, anche in questo caso, la lungimiranza di Mario Ageno, che fu sempre convinto del valore che l'esperienza universitaria avrebbe avuto non solo per la formazione scientifica e, più in generale, culturale dei suoi

protagonisti ma, di riflesso, per l'intero Laboratorio. Può essere interessante osservare (13), in proposito, che "Mario Ageno aveva dimostrato una certa apertura alle richieste di nulla osta per effettuare incarichi fuori Roma anche perché la presenza all'ISS gli andava stretta ed una volta confessò che gli sarebbe piaciuto riunire tutti noi in qualche università per portare avanti un progetto di un corso di laurea in fisica".

In parallelo all'attività in fisica sopra citata, il reparto sviluppa un lavoro di analisi di strutture superconduttive (nell'ambito delle equazioni di Landau e Ginsburg), stimolato dal contributo di Antonella Rogani che, laureatasi in Laboratorio con una tesi su questo argomento nel 1971, entrerà in pianta stabile all'ISS nel 1977. Accanto a questo, di cui si accennerà più avanti, il reparto (soprattutto Rogani), fornirà un supporto teorico alle attività sperimentali in superconduttività che i "solidisti" (in particolare Piero Indovina e Sandro Onori) stanno sviluppando, con il prezioso aiuto tecnico di Mario Flamini ed Alfredo Rosati (si veda anche, su questo argomento, il capitolo di Martino Grandolfo in questo stesso volume, dedicato alla Fisica dello Stato solido).

Nel primo lavoro in collaborazione (14), eseguito su un campione di piombo, si mette in evidenza una doppia struttura di transizione superconduttiva, l'una del I ordine per T compreso tra 5.2 e 7.2 K e l'altra del II ordine associata alla presenza di un campo critico di superficie H_{C3} . La struttura di $H_{C3}(T)$ veniva analizzata nello schema di Saint James-de Gennes basato sulle equazioni fenomenologiche di Landau e Ginsburg. Questo lavoro, assieme agli altri dello stesso filone, fu reso possibile dalle eccezionali capacità tecniche profuse nella messa a punto dell'apparato sperimentale e nell'esecuzione delle misure dalle due figure di straordinario valore professionale prima citate, Flamini e Rosati, che sarebbero poi, a distanza di anni l'uno dall'altro, scomparsi prematuramente. La stessa tecnica fu poi utilizzata nel caso del Nb, mostrando che la rapida crescita, per T che tende a T_C , del rapporto H_{C3}/H_{C2} (qui H_{C2} è il campo critico del *bulk* per la transizione del II ordine) richiede la modifica dello schema teorico fenomenologico fino ad allora seguito. L'esame fu esteso al vanadio, con il contributo di Antonella Rogani, mostrando un buon accordo con il modello fenomenologico già utilizzato per il niobio. Il supporto agli sperimentali, da ora in poi, sarà opera essenzialmente di Rogani (15-17). Nel campo più strettamente teorico la ricerca porta

alla determinazione dello spettro delle eccitazioni superficiali tra Δ e Δ_0 (rispettivamente la gap effettiva e quella in assenza di campo magnetico) e della densità degli stati per superconduttori del I tipo in campo magnetico (18), tenendo conto in modo realistico della riflessione delle eccitazioni elementari alla superficie del campione. Successivamente (19) si mostra che il modello di Ginsburg e Landau permette di descrivere il comportamento critico in campo magnetico anche per film di spessore $d \approx \xi$ dove ξ è la lunghezza di coerenza del superconduttore.

Negli stessi anni, sotto lo stimolo delle straordinarie trasformazioni che hanno luogo nella fisica delle transizioni di fase, culminate con i lavori di Kadanoff, Wilson e tanti altri, il reparto teorico organizza e tiene due corsi (ciascuno di una quindicina di lezioni) ai quali partecipano diversi reparti del Laboratorio, l'uno sulla teoria delle transizioni di fase, per l'appunto, e l'altro sulle proprietà dei superconduttori, con evidenti ricadute positive sulla formazione dei fisici che, in vari reparti, si occupano dei sistemi solidi o liquidi.

Un terzo filone di attività si ebbe con la collaborazione di ET ad un gruppo teorico del Dipartimento di Fisica dell'Università "La Sapienza", con Carlo di Castro e Claudio Castellani, e di altri Istituti di ricerca (Gabor Forgacs, Budapest e Sandro Sorella, L'Aquila e, successivamente Patrick Lee e S. Ma del MIT, USA). La collaborazione si estese dall'inizio degli anni '80 fino al 1985, quando vari eventi (tra i quali, a partire dal 1986, l'incidente di Chernobyl, assieme all'incarico di direzione del Laboratorio) fecero sì che tale collaborazione, di grande interesse teorico, non potesse proseguire oltre. Lo scenario è quello della transizione metallo-isolante, dove un sistema di elettroni che interagiscono in un mezzo con distribuzione casuale (disordinata) di impurezze subisce, in funzione della temperatura, il passaggio da uno stato metallico ad uno elettricamente isolante. Numerosi sistemi "reali" sono descrivibili con tale modello e la comprensione del comportamento elettrico e magnetico di tali sistemi ha costituito un serio problema, per molti anni, nella fisica dei sistemi complessi. Il sistema di fermioni (elettroni) considerato inizialmente (20) era un gas di particelle (con funzione d'onda Ψ) non interagenti, soggette ad una interazione locale u con le impurezze descrivibile mediante una

hamiltoniana di interazione data da:

$$\sum_i \int u \delta(\xi - \xi_i) \Psi^+(\xi) \Psi(\xi) d^d \xi$$

dove la somma su i è estesa alla distribuzione di impurezze e d è la dimensionalità del sistema considerato.

L'interazione tra gli elettroni, qui assente, sarà inclusa in lavori successivi (21, 22). Anche in questo caso si analizza la funzione di risposta ad un campo e.m. esterno e si ricorre alla condizione dell'invarianza di gauge per fissare la struttura dei vertici che intervengono in essa. Il comportamento del sistema nella zona critica della transizione richiede, inoltre, un uso esteso delle tecniche del gruppo di rinormalizzazione. Dalla conoscenza della funzione di risposta si possono calcolare le varie grandezze e.m. del sistema, ad es. la conducibilità elettrica in funzione di T e della concentrazione di impurezze. Basandosi sui vincoli imposti alla funzione di risposta dalle identità di Ward si mostra l'esistenza di un punto fisso non banale per la transizione di localizzazione. Si calcolano inoltre gli indici critici per la transizione con uno sviluppo in serie di $\varepsilon = d - 2$ per la dimensionalità del sistema, partendo dalla dimensionalità critica inferiore eguale a 2.

I risultati ottenuti per il caso degli elettroni non interagenti ritrovano con un metodo nuovo la descrizione completa dello *scaling* alla transizione di localizzazione, fornendo lo schema teorico valido anche quando si accende l'interazione.

Si è così calcolata la funzione di risposta densità-densità al primo ordine nell'interazione tra i fermioni (23), mostrando, tra l'altro, che alla transizione la densità degli stati elettronici e la conducibilità tendono a zero (in funzione dell'energia o della frequenza) con indice $\varepsilon/2 = (d - 2)/2$.

Lo studio della transizione metallo-isolante, in presenza di interazione tra gli elettroni, aveva ottenuto un decisivo impulso, nel 1983, da un lavoro sul JETP di A.M. Finkel'shtein, nel quale si riesce a "mappare" il problema su un modello σ non lineare, ben conosciuto in teoria dei campi. Una volta stabilita questa corrispondenza l'algoritmo del gruppo di rinormalizzazione permette di calcolare, ad esempio, lo *scaling* delle grandezze fisiche di interesse. Tra queste si è proceduto (23, 24) al calcolo della suscettibilità magnetica $\chi(k, \Omega)$, che descrive la risposta ad un campo magnetico variabile nel tempo

e nello spazio. Si riesce così a stabilire che la resistenza tende, per $T \rightarrow 0$, ad un valore non nullo (correggendo l'anomalia presente in lavori precedenti) e che, al decrescere di T , $\chi(k, 0)$ e la costante di diffusione di spin subiscono un forte aumento, verosimilmente dovuto alla formazione di cluster localizzati di spin.

L'ultimo filone nel campo della materia condensata consiste nel tentativo di creare un modello capace di descrivere i fenomeni nucleari (25) che alcuni ricercatori (*in primis* Martin Fleischmann e Stanley Pons e poi Steven Jones *et al.*, Francesco Scaramuzzi *et al.*, per citarne solo alcuni) avevano osservato in campioni di palladio o titanio deuterati. Il modello, sviluppato assieme ad Alexander Tenenbaum del Dipartimento di Fisica de "La Sapienza", si propone di individuare un meccanismo credibile capace di comunicare ai deutoni nel metallo l'energia necessaria per innescare la reazione nucleare di fusione e di calcolare poi la resa della reazione in termini di neutroni emessi. L'ipotesi che si assume (sviluppando un'idea di Marzio Cassandro, Giovanni Gallavotti e Giovanni Jona-Lasinio) è che, nel metallo deuterato, si produca una transizione da una fase a concentrazione omogenea di D, c_0 , ad un'altra nella quale coesistono due fasi a concentrazioni superiore e inferiore a quella iniziale, c_+ e c_- . L'energia elastica che risulta in eccesso, nella fase c_- , è capace, liberandosi per riportare il solido all'equilibrio, di produrre rapide implosioni in microdomini del metallo. Per essere più precisi, se u è la velocità del suono nel mezzo, R il raggio di uno di questi microdomini, m la massa atomica del metallo e $\varepsilon = (a_0 - a_-)/a_0$ (dove a_0 si riferisce ai parametri del reticolo omogeneo ed a_- a quello del reticolo a bassa concentrazione), allora

$$E_R = 8\pi u^2 m (R/a_0)^3 \varepsilon^2$$

fornisce l'energia accumulata nella sfera di raggio R , disponibile per fornire ad una coppia di deutoni una ragguardevole energia cinetica, potenzialmente superiore a 150 eV. Nel lavoro iniziale (26) si analizzano in dettaglio i meccanismi energetici assieme al *rate* di fusione nucleare, mettendo anche in evidenza un importante effetto di trascinamento dei deutoni nel corso di riequilibrio del reticolo metallico. Si perviene così al calcolo della resa di neutroni, a varie temperature, in funzione della concentrazione c_0 iniziale. Il modello subì una serie di sviluppi (si veda ad es. (27-29)) nella descrizione

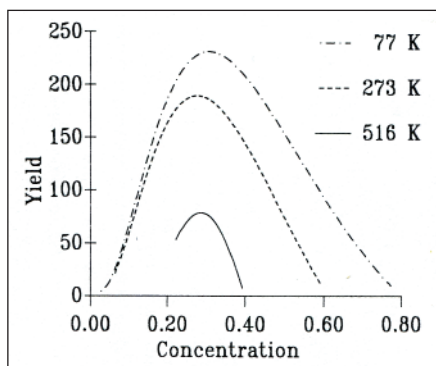


Figura 1 - Resa neutronica (migliaia) *vs* c_0 a diverse temperature, per un grammo-atomo di Pd ($\alpha = 1$) (28).

originali esperimenti intrapresi da Daniele Gozzi (Università La Sapienza, Roma) di riduzione elettrolitica del deuterio ad un catodo di palladio, anche in collaborazione con alcuni dei fisici nucleari del Laboratorio (30).

A partire dalla metà degli anni '80 l'attività di fisica teorica* riceve un significativo ampliamento dei propri filoni di ricerca, con l'acquisizione di una laureata in fisica ad indirizzo sperimentale e di un tecnico elettronico (Barbara Caccia e Stefano Valentini), a partire dalla partecipazione ad un progetto che coinvolge diverse sezioni dell'INFN e il Centro Nazionale Analisi Fotogrammi (CNAF) di Bologna. Il progetto (31) ha l'obiettivo di realizzare una rete in fibra ottica per trasmettere dati ad alta velocità e che possa estendersi su un'area metropolitana. Il progetto doveva sviluppare un'elettronica innovativa necessaria a pilotare il segnale che viaggiava sulla fibra ottica, ma anche studiare dei nuovi protocolli di trasmissione di dati adeguati a garantirne l'integrità e la sicurezza. Negli anni a venire diverrà evidente che la trasmissione sicura e veloce di dati sarebbe stata una esigenza primaria non solo della ricerca biomedica e clinica, ma anche della gestione dei servizi sanitari.

Occorre ricordare che già dal 1981 il personale della Sezione Sanità dell'INFN aveva partecipato ad un progetto pilota dell'INFN

* Le pagine seguenti sono dovute a Barbara Caccia, che desidero ringraziare per il suo contributo.

per la creazione della prima rete di ricerca in Italia che, in questa sua prima fase, collegò le sezioni INFN de “La Sapienza” e della sezione Sanità con i Laboratori Nazionali di Frascati e con il CERN (32). La possibilità di comunicare con posta elettronica e usare le grandi risorse di calcolo del CERN stimoleranno la ramificazione della rete INFN-Net, prima rete italiana di computer, tra le varie sedi dell’INFN e quindi con i dipartimenti di Fisica di moltissime Università italiane. Attraverso il CERN e i *gateway* gestiti dall’INFN diventarono raggiungibili le reti nazionali di altri paesi. Tra il 1986 e il 1987 il Laboratorio di Fisica divenne un nodo di INFN-Net. Si costituì una rete per il calcolo interna allo stesso Laboratorio di Fisica: i file erano condivisi su personal computer distribuiti e il calcolo cominciò ad essere decentralizzato.

Questa esperienza sarà punto di partenza per alcuni aspetti del progetto per lo sviluppo dell’uso di protoni in terapia oncologica (progetto TOP), per il quale si rimanda al relativo paragrafo nel capitolo finale di questo Quaderno. Sulla base della pregressa esperienza nel settore delle reti informatiche e nella gestione di risorse di calcolo fu possibile coordinare un progetto di rete per la protonterapia e la creazione di una cartella clinica ipertestuale *ad hoc* (33, 34).

Di pari passo con l’attività di sviluppo di reti e di calcolo scientifico anche l’attività elettronica introdusse delle novità nel modo di lavorare e nel far maturare nuove competenze. Nel 1989 la componente tecnica del reparto si ampliò di nuove competenze elettroniche (con l’ingresso di Vittorio Dante) e si avviò in modo definitivo un’area di elettronica digitale di supporto alle attività di ricerca del laboratorio. Anche in questo caso l’avvio dell’attività fu legata alla partecipazione ad un progetto di ricerca (Alsat, Jont Project INFN-Digital Equipment) che aveva l’obiettivo di realizzare proprio presso il Laboratorio un Single Board Computer basato su un innovativo chip della Digital (il modello a 64 bit Alpha 21064). Il gruppo di elettronica crebbe in competenze e strumentazione fino a diventare una struttura in grado di progettare e realizzare dispositivi per acquisizione e analisi dati.

L’attività di fisica teorica della materia condensata subirà, a partire dall’inizio degli anni ’90, un’ulteriore svolta, dovuta a diversi fattori:

i) l’ingresso in Laboratorio di due giovani teorici, Paolo del Giudice ed Alessandro Campa, portatori di interessi e competenze

in settori della fisica teorica diversi da quelli sin qui perseguiti (in particolare le transizioni di fase in sistemi quantistici macroscopici);

ii) il temporaneo distacco dal Laboratorio (fino al 1995) di ET, impegnato per tre anni in un altro compito nel Regno Unito. Al ritorno dall'estero ET si dedicherà ad un altro campo di attività computazionale (vedasi il capitolo dedicato agli impianti nucleari);

iii) l'impegno a tempo pieno di Antonella Rogani nel settore della radioprotezione dalle radiazioni ionizzanti (del quale si parla, anche in questo caso, nel capitolo dedicato agli impianti nucleari).

L'ingresso in laboratorio di Paolo Del Giudice ed Alessandro Campa introdusse nell'area di fisica teorica alcune attività di ricerca del tutto nuove.

Fu avviata una nuova linea basata sulla simulazione numerica della dinamica di macromolecole, d'interesse per lo studio del comportamento dei sistemi biologici. Venne implementata una tecnica originale per lo studio di questi sistemi integrando la simulazione numerica di questi modelli con tecniche di fisica matematica. Questa attività, condotta tra il 1990 e il 2000, aveva l'obiettivo di estendere questo approccio a sistemi più complessi e quindi più vicini a sistemi biologici reali e alle applicazioni cliniche (35).

Una seconda linea di attività che fu avviata saldandosi sia con gli aspetti di simulazione numerica che con le competenze maturate nell'area di elettronica fu quella relativa alle neuroscienze computazionali (36). Questa attività si sviluppò negli anni 90 essenzialmente lungo due linee: 1) lo sviluppo di modelli (37, 38), sia attraverso strumenti teorici che tecniche avanzate di simulazione numerica, del comportamento dinamico di popolazioni di neuroni in funzione degli stimoli ricevuti, e in particolare dei meccanismi di plasticità sinaptica, che si pensano sottesi ai processi di apprendimento e alla manifestazione della memoria associativa; 2) la progettazione e realizzazione microelettronica di chip che emulano semplici forme di elaborazione nervosa di dati sensoriali (tipicamente visivi) (39).

Gli obiettivi di questa attività erano il perfezionamento della modellizzazione teorica e la simulazione numerica di semplici sistemi neuronali, per riprodurre alcune caratteristiche sperimentali. L'attività teorica era completata dal confronto diretto con i dati sperimentali avvalendosi di collaborazioni con gruppi sperimentali

in ambito internazionale. L'obiettivo a lungo termine (realizzato poi con successo) era la realizzazione di un sistema elettronico totalmente "neuromorfo", in cui fossero integrate l'acquisizione di segnali visivi, la loro elaborazione e classificazione, allo scopo di riprodurre una semplice versione del meccanismo di "attenzione selettiva". Le attività di progettazione elettronica furono condotte dal Reparto di Fisica Teorica e contribuirono (40) a definire uno standard, a livello internazionale, per le infrastrutture di comunicazione tra chip neuromorfi.

Sempre di più in quegli anni l'approccio computazionale si caratterizzò come una "terza via", complementare a quelle tradizionali, "teorica" e "sperimentale", allo studio dei sistemi complessi di interesse sanitario e biomedico. Nel 2001 l'ISS, confermando una sensibilità rispetto a questo tema, finanziò il progetto Approcci computazionali allo studio di sistemi di interesse biomedico.

Bibliografia e Note

1. Si trattò di due tra le primissime borse di studio che il CERN erogava per soggiorni in Unione Sovietica, dove le difficoltà di natura "burocratica" non mancavano, come è facile immaginarsi, associate, va detto, ad un'accoglienza straordinariamente cordiale (ad es. Dubna sostenne la spesa non indifferente di inviare i due giovani italiani ad un congresso di meccanica statistica che si tenne a Novosibirsk, a quasi 3000 km da Mosca).
2. F. de Pasquale, G. Jona-Lasinio, E. Tabet. Gauge invariance and the structure of the correlation functions of a Bose liquid. *Ann Phys (New York)* 1965;33:381.
3. F. de Pasquale, E. Tabet. Broken symmetries and response functions in He II. In: *Proceedings of XI International Conference on Low Temperature Physics*. St. Andrews, 1968.
4. F. de Pasquale, E. Tabet. Response properties of a Bose liquid. Connection between symmetry breakdown and microscopic definition of the superfluid density. *Ann Phys (New York)* 1969;51:223.
5. Le trasformazioni di gauge sono descrivibili mediante una trasformazione sulla fase della funzione d'onda, combinata, per garantire l'invarianza dell'hamiltoniana, con una opportuna trasformazione sul campo con il quale le particelle del sistema sono in interazione, ad es. un campo di rotazione nel nostro caso o un campo e.m. se si tratta di particelle cariche. La richiesta che una teoria abbia, appunto, la proprietà di essere "gauge invariante" è uno strumento molto potente nel selezionare la struttura della teoria stessa.
6. La funzione di risposta permette di calcolare la corrente generata da un campo esterno che interagisce con il sistema e quindi caratterizza le proprietà dinamiche del sistema stesso.

7. F. de Pasquale, E. Tabet. Scaling behaviour in the microscopic approach to the theory of superfluid helium. *Phys Lett* 1969;29A:197.
8. F. de Pasquale, E. Tabet. Critical behavior in the linear response of a superconductor to a static magnetic field. *Ann Phys (New York)* 1971;65:35.
9. Jeffrey Goldstone ed altri (tra i quali Yoichiro Nambu e Giovanni Jona Lasinio) mostrarono, all'inizio degli anni '60, che la rottura spontanea della simmetria, vale a dire la comparsa di uno stato fondamentale non invariante rispetto alla trasformazione sotto la quale il sistema è simmetrico, produce la comparsa di eccitazioni senza gap nello spettro di risposta del sistema.
10. Nello stesso anno ET entrerà di ruolo all'ISS.
11. Grandolfo poi riprenderà l'insegnamento a L'Aquila dal 1974 al 1975 con il corso di Fisica per Biologi e, successivamente, terrà altri corsi universitari a Perugia, Teramo e Campobasso, mentre Piero Indovina lascerà l'ISS nel 1987 avendo vinto una cattedra all'Università di Napoli.
12. Si pensa ai nomi di Sergio Ravarino, Piero Picozzi, Enzo Tettamanti, Guido Visconti, Alfonso D'Altorio, Sunil K. Gosh, Umberto Villante, Luigi Cordella, Sandro Santucci, Franco Lucari, Roberto Teroni. Con alcuni dei colleghi de L'Aquila furono stabilite anche proficue collaborazioni scientifiche: si veda, per maggiori dettagli, la bibliografia del capitolo di Martino Grandolfo sulla Fisica dello Stato solido.
13. Testimonianza di Piero Indovina raccolta da Martino Grandolfo.
14. P.L. Indovina, S. Onori, E. Tabet. Magnetic field modulation of the microwave impedance of Pb superconducting films. *Solid State Commun* 1970;8:1721.
15. E. Di Crescenzo, P.L. Indovina, S. Onori, A. Rogani. Temperature and thickness dependence of critical magnetic fields in lead superconducting films. *Phys Rev* 1973;B, 7: 3058-3065.
16. P.L. Indovina, S. Onori, A. Rogani, E. Tabet, P. Tonna. Upper critical field behaviour in vanadium near transition temperature. *Solid State Commun* 1976;20:85-88.
17. S. Onori, A. Rogani. Critical magnetic fields in tin superconducting films. *Physica* 1980;100B:93-96.
18. A. Rogani, E. Tabet. Surface excitations of type-I superconductors in a static magnetic field. *Solid State Commun* 1972;11:127.
19. A. Rogani, E. Tabet. Critical magnetic fields in first kind superconducting films. In: *Proceedings of the 14th International Conference on Low Temperature Physics*. Otaniemi, 1975, II, 125.
20. C. Castellani, C. Di Castro, G. Forgacs, E. Tabet. Gauge invariance and the multiplicative renormalization group in the Anderson transition. *J Phys C: Solid State Phys* 1983;16:159.
21. C. Castellani, C. Di Castro, G. Forgacs, E. Tabet. Towards a microscopic theory of the metal-insulator transition. *Nucl Phys* 1983;B 225:441.
22. C. Castellani, C. Di Castro, G. Forgacs, E. Tabet. Disorder and interaction. *Helv Phys Acta* 1983;56:55.

23. C. Castellani, C. Di Castro, P. A. Lee, M. Ma, S. Sorella, E. Tabet. Spin fluctuations in disordered interacting electrons. *Phys Rev* 1984;B 30:1596.
24. C. Castellani, C. Di Castro, P. A. Lee, M. Ma, S. Sorella, E. Tabet. Enhancement of the spin susceptibility in disordered interacting electrons and the metal-insulator transition. *Phys Rev* 1986;B 33:6169.
25. Noti comunemente sotto il nome di “fusione fredda”.
26. E. Tabet, A. Tenenbaum. Displacement flow and deuteron drag in a metal: a path towards fusion. In: *Conference Proceedings. Understanding cold fusion phenomena*. vol. 24. R. Ricci, E. Sindoni, F. de Marco (Eds.). Bologna: SIF; 1989.
27. E. Tabet, A. Tenenbaum. A dynamical model for cold fusion in deuterated palladium. *Fusion Technol* 1990;18:143.
28. E. Tabet, A. Tenenbaum. Nuclear reactions from lattice collapse in a cold fusion model. *Phys Lett A* 1990;144:301.
29. E. Tabet, A. Tenenbaum. Nuclear effects in collapsing lattice model for deuterated palladium: new results. *American Institute of Physics Conference Proceedings* 1991;228:867.
30. D. Gozzi, P.L. Cignini, L. Petrucci, M. Tomellini, G. De Maria, S. Frullani, F. Garibaldi, F. Ghio, M. Jodice, E. Tabet. Nuclear and thermal effects during electrolytic reduction of deuterium at palladium cathode. *J Fusion Energy* 1990;9:241-247.
31. P. Bacilieri, B. Caccia, R. Cardarelli, O. Ciaffoni, M. Coli, D. De Pedis, G. Di Pirro, M.L. Ferrer, A. Ghiselli, A. Martini, G. Medici, G. Mirabelli, E. Pace, M. Pistoni, L. Trasatti, E. Valente, S. Valentini. STARNET, a fiber optic Metropolitan Area Network with centralized control. *Comp Phys Commun* 1989;57:459-465.
32. A. Varaschin. Prima del Web: INFN-Net. *Asimmetrie* 13;2012:13-14.
33. B. Caccia, P. Del Giudice, M. Ferraris, P. Risso, S. Squarcia, S. Valentini. Using WWW as a tool to transmit clinical hadrontherapeutic data in the RITA Project. *Physica Medica* 1997;XIII(1):45-47.
34. Si utilizzarono le risorse di rete disponibili per allestire un prototipo di rete per la protonterapia oncologica per condividere tra i vari centri di radioterapia oncologica immagini cliniche, dati, filmati e per consentire l'interazione a distanza tra esperti operanti in diversi centri. L'obiettivo era la creazione di una risorsa di accesso condiviso a dati e strumenti di lavoro online che aiutasse la comunità medica ad indirizzare i pazienti oncologici che ne avessero avuto bisogno verso i futuri centri italiani di protonterapia.
35. A. Campa. Bubble propagation in a helicoidal molecular chain. *Phys Rev E* 2001;63:63-73.
36. P. Del Giudice, S. Fusi, D. Badoni, V. Dante, D. Amit. Learning attractors in an asynchronous, stochastic electronic neural network. *Network: Comput Neural Syst* 1998;9:183-205.
37. M. Mattia, P. Del Giudice. Efficient event-driven simulation of large networks of spiking neurons and dynamical synapses. *Neural Comput* 2000;12(10):2305-2329.

38. A. Campa, P. Del Giudice, N. Parga and J.-P. Nadal. Maximization of mutual information in a linear noisy network: a detailed study. *Network: Comput Neural Syst* 1995;6:449-468.
39. V. Dante, P. Del Giudice, M. Mattia. Implementation of neuromorphic systems: from discrete components to analog VLSI chips (testing and communication issues). *Ann Ist Super Sanità* 2001;37(2):231-238.
40. V. Dante, Del Giudice. The PCI-AER interface board. In: A. Cohen, S. Shamma, G. Indiveri, T. Horiuchi (Eds). *Report on the Workshop on Neuromorphic Engineerig*. Telluride, CO, July 1-21, 2001. 2001;99-103.