

LA FISICA NUCLEARE TEORICA NELLA SEZIONE SANITÀ DELL'INFN NEGLI ANNI 1970-80

Claudio Ciofi degli Atti

Gli obiettivi della Fisica nucleare sono molteplici ed ambiziosi: i) capire innanzi tutto la struttura del nucleo atomico (10^{-20} cm), il microscopico *core* degli atomi (10^{-13} cm), dove è concentrato il 99% della massa atomica sotto forma di protoni e neutroni (i nucleoni, N), e come tale struttura possa essere generata dalle particelle (quark e gluoni) portatrici dell'interazione forte che agisce tra i nucleoni; ii) chiarire il ruolo che i nuclei giocano in una varietà di processi, dalla fisica delle interazioni fondamentali, all'astrofisica, alla produzione di energia nelle stelle e ai numerosi aspetti applicativi; iii) comprendere come dai nuclei si sia formata la materia a noi vicina o quella di densità assai più elevata che caratterizza molti oggetti celesti; iv) chiarire il meccanismo attraverso il quale i nuclei atomici e la loro incredibile varietà si siano formati dall'interazione tra quark e gluoni e quindi capire, in ultima analisi, come abbia avuto origine l'Universo.

In Italia le ricerche in Fisica nucleare sono istituzionalmente di competenza dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN), uno dei principali enti di ricerca italiani. L'INFN è strutturato in Sezioni, dislocate presso i Dipartimenti di Fisica delle Università italiane e nei Grandi Laboratori Nazionali (il Laboratorio del Sud, a Catania, i Laboratori di Legnaro, i Laboratori Nazionali di Frascati e il Laboratorio del Gran Sasso). L'origine della collaborazione tra INFN e l'Istituto Superiore di Sanità (ISS) data dagli anni '50, quando un gruppo di ricercatori del Laboratorio di Fisica dell'ISS era impegnato, oltre ai compiti istituzionali, nella progettazione e realizzazione di parti dell'acceleratore di elettroni (elettrosincrotrone) in costruzione presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN. Il Laboratorio di Fisica dell'ISS collaborava con l'INFN sulla base di una convenzione tra i due enti la quale prevedeva che, all'interno dell'ISS, potesse essere ospitata un'unità di ricerca dell'INFN.

Questa unità prevedeva propri ricercatori e tecnici e, nello stesso tempo, alcuni ricercatori e tecnici dell'ISS che, oltre a svolgere i compiti istituzionali legati alla protezione della salute pubblica dagli effetti delle radiazioni ionizzanti, collaboravano con l'INFN nel campo della Fisica nucleare fondamentale. Negli anni '60, l'attività sperimentale in Fisica nucleare svolta dai ricercatori del Laboratorio di Fisica dell'ISS subì un notevole salto di qualità grazie alla proposta di un nuovo ed originale esperimento che ha avuto un notevole impatto sulla Fisica nucleare. Ci riferiamo all'esperimento di diffusione quasi-elastica di elettroni di elevata energia da parte di nuclei, cioè alla reazione nucleare $A(e, e'p)X$.

La proposta consisteva nel bombardare un nucleo bersaglio (A) con elettroni (e) di energia sufficientemente elevata da penetrare all'interno del nucleo ed espellere da questo un protone (p); misurando in coincidenza l'energia e l'impulso dell'elettrone diffuso (e') e del protone espulso ed ipotizzando che quest'ultimo abbandoni il nucleo senza interagire con gli altri nucleoni (*approssimazione impulsiva*), si può risalire all'energia e all'impulso dei nucleoni all'interno del nucleo bersaglio. Per comprendere l'importanza di un tale esperimento è necessario ricordare che negli anni '60 il modello corrente della struttura del nucleo atomico era il cosiddetto modello a *shell* (o a strati), proposto e sviluppato da Maria Goeppert-Mayer (USA), insignita per questo contributo del Premio Nobel per la Fisica nel 1952.

Il modello a *shell* del nucleo, nella forma più semplice, ricorda la struttura di un atomo, con i nucleoni che, al pari degli elettroni in un atomo, si muovono di moto indipendente l'uno dall'altro in un campo medio e su "orbite" che si differenziano per il valore dell'energia e del momento angolare e che si addensano in strati (*shell*) con valori dell'energia confrontabili, riempiti dai nucleoni in accordo con il principio di esclusione di Pauli. Tale modello spiega in effetti molte caratteristiche globali dei nuclei, quali i valori dei momenti angolari, della parità e dei momenti magnetici di particolari classi di nuclei, molte caratteristiche dei decadimenti radioattivi ed altre numerose proprietà. Tuttavia la sua validità intrinseca, cioè i dettagli concernenti il moto dei nucleoni in particolari orbite, non era mai stata sottoposta a verifiche sperimentali dirette e seri dubbi sull'analogia tra atomi e nuclei erano legittimati non solo dalle diversità tra l'interazione elettromagnetica, che regola la struttura

atomica, e l'interazione forte, che regola la struttura dei nuclei, ma anche dall'osservazione che in un atomo esiste un centro di forze, il nucleo atomico, che genera il campo medio, mentre nel caso di un nucleo un centro di forze non esiste. Va anche detto che negli anni '60 era già noto che i nucleoni, a differenza degli elettroni, non sono oggetti puntiformi ma posseggono una struttura complessa formata dall'insieme di quark e gluoni. La vera validità del modello a *shell* poteva essere verificata soltanto andando a studiare il moto di un nucleone all'interno del nucleo, ovvero la sua funzione d'onda. Questo è stato appunto reso possibile tramite la reazione $A(e, e'p)X$ studiata utilizzando il fascio di elettroni dell'elettrosincrotrone dei Laboratori Nazionali di Frascati dell'INFN. L'esperimento, effettuato nel 1964 (1), confermava qualitativamente l'idea base del modello a *shell* e cioè che, nel caso del nucleo di ^{12}C , i protoni occupano due stati con diverso numero quantico associato al momento angolare (l), in particolare $l = 0$ (stato *s*) e $l = 1$ (stato *p*) ai quali, secondo la meccanica quantistica, sono associate due distribuzioni dell'impulso profondamente diverse per un valore dell'impulso p pari a zero: valore massimo della distribuzione se $l = 0$ e valore uguale a zero se $l = 1$. I dati ottenuti rappresentarono la prima verifica sperimentale microscopica del modello a *shell* nella sua forma più semplice.

Chi scrive presentava nel 1969 una tesi di laurea nella quale venivano discussi alcuni aspetti della reazione $A(e, e'p)X$, in particolare i limiti di validità dell'approssimazione impulsiva; successivamente, mentre godeva di una borsa post laurea presso il Laboratorio di Fisica, in un articolo (2) metteva in evidenza alcuni problemi di carattere quantitativo nel conciliare i dati ottenuti con le previsioni del semplice modello a particelle indipendenti. In seguito frequentava i Laboratori di Fisica quale borsista e veniva assunto nei ruoli dell'INFN in forza all'allora Sottosezione Sanità dell'INFN. Da questa data iniziava ufficialmente, presso l'ISS, l'attività in Fisica teorica nucleare nel quadro delle ricerche condotte dal Gruppo IV (Fisica teorica) dell'INFN. Nel frattempo nuovi esperimenti, effettuati presso i laboratori di Saclay (Francia) e NIKHEF (Olanda), caratterizzati da una risoluzione energetica più elevata rispetto all'esperimento effettuato ai Laboratori di Frascati, mettevano in luce ulteriori problemi riguardo la validità del semplice modello a *shell* mostrando, per esempio, che nel caso del nucleo di ^{12}C il numero di protoni nella *shell* "s" e

nella *shell* “p” è minore di quanto previsto dal semplice modello a *shell* a particelle indipendenti, cioè 2 e 4. Da più parti veniva sempre più sostenuta l’ipotesi che, all’interno di un nucleo, i nucleoni non obbediscono totalmente al moto indipendente previsto dal modello a *shell*, ma possono anche trovarsi in stati di forte correlazione reciproca, cosa che li porta ad occupare parzialmente stati energetici normalmente vuoti nel semplice modello a *shell*. Questa ipotesi era motivata in parte dal carattere fortemente repulsivo dell’interazione nucleone-nucleone a piccole distanze e, causa la bassa risoluzione energetica, l’esperimento effettuato ai Laboratori di Frascati non poteva mettere in evidenza queste deviazioni dal modello a *shell*. Questi nuovi risultati stimolavano la comunità dei fisici nucleari sperimentali e teorici a concentrare gli sforzi verso due grandi direzioni: la prima, verso una trattazione più rigorosa dei processi di diffusione di elettroni da nuclei, considerando le possibili deviazioni dall’approssimazione impulsiva, cioè l’interazione nello stato finale del protone espulso, e la seconda, verso l’intensificazione degli sforzi per descrivere i sistemi a molti corpi legati dall’interazione forte non più sulla base di modelli fenomenologici, ma sulla base della soluzione del problema dei molti corpi interagenti che, come è noto, in generale non è risolubile esattamente e presenta, in particolare, notevoli difficoltà di risoluzione soprattutto nel caso di sistemi legati dall’interazione forte.

Nel frattempo, nel 1972, la Sottosezione Sanità dell’INFN veniva elevata al rango di Sezione e veniva diretta prima da Ugo Amaldi, poi da Paolo Salvadori e, dal 1980 al 1987, da chi scrive. L’attività della Sezione si estendeva in tutti i campi della Fisica fondamentale dei nuclei e delle particelle elementari con attività presso i grandi laboratori nazionali e internazionali, in particolare il CERN di Ginevra. L’attività in Fisica nucleare teorica subì poi un forte impulso a seguito dell’inserimento nei ruoli della Sezione Sanità dell’INFN di giovani ricercatori, già dottorandi presso il Laboratorio di Fisica dell’ISS: Omar Benhar, Simonetta Liuti, Giovanni Salmè e Silvano Simula. L’attività del gruppo, uno tra i più numerosi in Italia, venne quindi sempre più rivolta verso le seguenti tematiche:

- la fisica dei sistemi estesi a molti corpi, quali la materia nucleare, partendo dall’interazione NN libera, nell’ambito di nuove teorie per trattare sistemi a molti corpi interagenti (3);

- le proprietà generali della distribuzione di momento ed energia (funzione spettrale) dei nucleoni nei nuclei (4);
- il calcolo di grandezze sensibili alle correlazioni a corto raggio, quali le distribuzioni di momento a grandi valori dell'impulso (5);
- la soluzione dell'equazione di Schrödinger per i sistemi a pochi nucleoni (6);
- il calcolo di modelli di funzioni spettrali (7);
- la teoria della diffusione in generale ed in particolare l'interazione ad alte energie di sonde elettromagnetiche con sistemi adronici (8).

L'attività del gruppo veniva svolta anche in collaborazione con prestigiose istituzioni scientifiche quali la NORDITA (Copenaghen), l'International Centre for Theoretical Physics (ICTP) dell'UNESCO (Trieste), l'Istituto di Ricerche Nucleari di Dubna (URSS), il Centro di Ricerche Nucleari di Saclay (Francia) e con colleghi di varie Università italiane (Roma 2, Pisa, Trieste, Pavia, Genova) e straniere (Oulu in Finlandia, Urbana e Virginia negli USA).

Le ricerche del gruppo di Fisica nucleare teorica hanno fornito notevoli contributi alla ricerca di base in Fisica nucleare, documentati non solo da una nutrita serie di pubblicazioni, ma anche dall'organizzazione di Convegni e Conferenze internazionali. Tra queste meritano di essere ricordate le Conferenze sulle "Teorie a molti corpi" tenutesi, la prima nell'Aula Magna dell'ISS (9) e la seconda nell'edificio dell'ICTP a Trieste (10), i Convegni sui "Sistemi a pochi nucleoni" tenutisi presso i Laboratori Nazionali di Frascati (11) e presso l'ISS (12) e, infine, la XIII Conferenza europea sulla "Fisica dei problemi a pochi corpi" tenutasi presso il Centro di Fisica teorica dell'Isola d'Elba (13).

Nel 1986, chi scrive vinceva il concorso nazionale a Professore ordinario per il raggruppamento Fisica Nucleare e Subnucleare e veniva chiamato all'Università di Perugia. Nel 1998, nel quadro di una riorganizzazione delle Sezioni INFN nell'area romana, la Sezione Sanità veniva trasformata in Gruppo Collegato INFN, orientato soprattutto su attività di Fisica nucleare di carattere sperimentale ed i componenti del Gruppo teorico si trasferirono alle Sezioni INFN di Roma 1 e Roma 3 dove, con crescente successo, continuano la loro attività nel campo della teoria della struttura dei nuclei e delle interazioni fondamentali.

Per concludere, l'attività del Gruppo di Fisica nucleare teorica della Sezione Sanità dell'INFN ha contribuito in maniera sostanziale, negli anni '70-'80, allo sviluppo della moderna fisica nucleare, nella quale il nucleo atomico non è più visto come un sistema di nucleoni puntiformi descritto dal modello a *shell* a particelle indipendenti, ma come un sistema di nucleoni dotati di struttura e che a "corto raggio" (piccole distanze relative) esibiscono forti correlazioni dinamiche il cui andamento possiede un carattere universale (14, 15), avendo di fatto le stesse caratteristiche nei sistemi a pochi nucleoni (^3He) e nei nuclei pesanti (^{208}Pb). Attualmente si sta sempre più evidenziando che una tale struttura a corto raggio ha implicazioni di notevole portata in molteplici campi della Fisica moderna in cui siano coinvolti nuclei atomici. Per citarne solo alcuni, ricordiamo lo studio di vari aspetti dell'interazione forte, le proprietà di sistemi estesi ad elevata densità, quali le stelle di neutroni, lo studio della struttura a quark e gluoni dei nucleoni immersi nel mezzo nucleare, lo studio delle proprietà dei neutrini tramite l'interazione neutrino-nucleo, l'interazione protone-nucleo e nucleo-nucleo a energie relativistiche. Su queste tematiche gli ex componenti del Gruppo di Fisica nucleare teorica della Sezione Sanità continuano ancora oggi a fornire importanti contributi.

Bibliografia

1. U. Amaldi Jr, G. Campos Venuti, G. Cortellessa, G. Fronterotta, A. Reale, P. Salvadori, P. Hillman. Inner-shell proton binding energies in ^{12}C and ^{27}Al from the $(e, e'p)$ reaction using 550 MeV electrons. *Phys Rev Lett* 13 (1964) 341.
2. C. Ciofi degli Atti. Single-particle wave functions of the ^{12}C nucleus from elastic and quasi-free electron scattering. *Nucl Phys A* 106 (1968) 215.
3. G. Benhar, C. Ciofi degli Atti, S. Fantoni, S. Rosati. Variational calculation of nuclear matter. *Nucl Phys A* 328 (1979) 127.
4. C. Ciofi degli Atti, E. Pace, G. Salmè. Analysis of the proton momentum distribution in ^3He . *Phys Lett B* 141 (1984) 14.
5. G. Benhar, C. Ciofi degli Atti, S. Liuti, G. Salmè. Realistic many-body wave functions and nucleon momentum distributions in finite nuclei. *Physics Lett B* 177 (1986) 135.
6. C. Ciofi degli Atti, S. Simula. Variational calculations with correlated basis functions: Three-nucleon and three-alpha-particle systems. *Phys Rev C* 32 (1985) 1090.

7. C. Ciofi degli Atti, S. Liuti, S. Simula. Nucleon spectral function in complex nuclei and matter and inclusive quasielastic electron scattering. *Phys Rev C* 41 (1990) 2474.
8. C. Ciofi degli Atti, S. Liuti. Realistic microscopic approach to deep inelastic scattering of electrons off few-nucleon systems. *Phys Rev C* 41 (1990) 1100.
9. F. Calogero, C. Ciofi degli Atti (Eds). The nuclear many-body problem. In: *Proceedings of the International Symposium on "Present Status and Novel Developments in the Nuclear Many-body Problem"*. Rome, September 19-23 1972. Bologna: Editrice Compositori; 1973.
10. C. Ciofi degli Atti, A. Kallio, S. Rosati (Eds). Proceedings of the International Conference on Recent Progress in Many-body Theories. International Centre for theoretical Physics, Trieste, October 2-7, 1978. *Nucl Phys A* 328, 1979.
11. C. Ciofi degli Atti, E. De Sanctis (Eds). *Proceedings of the Workshop "Few body systems and electromagnetic interactions"*. Frascati (Italy), March 7-10, 1978. Springer-Verlag; 1978.
12. C. Ciofi degli Atti, G. Benhar, E. Pace, G. Salmè (Eds). Theoretical and experimental investigations of Hadronic few-body systems. In: *Proceedings of the European Workshop on Few-Body Physics*. Rome (Italy), October 7-11, 1986. Springer-Verlag; 1987.
13. C. Ciofi degli Atti, E. Pace, G. Salmè, S. Simula (Eds). Few-body problems in physics. In: *Proceedings of the XIIIth European Conference on Few-Body Physics*. Marciana Marina, Isola d'Elba (Italy), September 9-14, 1991. Springer-Verlag; 1992.
14. M. Alvioli, C. Ciofi degli Atti, L.P. Kaptari, C. B. Mezzetti, H. Morita. Universality of nucleon-nucleon short-range correlations and nucleon momentum distributions. *Int J Mod Phys E* 22, 2013, 1330021.
15. C. Ciofi degli Atti. In-medium short-range dynamics of nucleons: recent theoretical and experimental advances. *Phys Rep* 590; 2015. p. 1-85.