

COMPITI E SUDDIVISIONE FONDI TRA LE UNITÀ DI RICERCA  
prot. 2005027131

<b>Coordinatore Scientifico</b>	Luigi MOI
<b>Ateneo</b>	Università degli Studi di SIENA
<b>Titolo della Ricerca</b>	Raffreddamento ed intrappolamento di atomi radioattivi per test di simmetrie fondamentali
<b>Finanziamento assegnato</b>	Euro 163.000
<b>Durata</b>	24 Mesi

## Obiettivo della Ricerca

Obiettivo del presente programma di ricerca e' quello di raffreddare e intrappolare nella trappola magneto-ottica operativa a Legnaro tutti e quattro gli isotopi di francio prodotti nel nostro apparato e di realizzare un accurato studio sia di spettroscopia che delle sistematiche, necessario per una futura misura di violazione di parita'. L'esperimento e', come noto, estremamente difficoltoso e richiede una preparazione accurata per migliorare il rapporto segnale-rumore e per minimizzare il rischio di registrare eventi spuri e non significativi. Nel caso del francio le normali difficolta' sono accresciute dal limitato numero di giorni di disponibilita' dell'acceleratore, dalla scarsa conoscenza di questo alcalino e dal numero massimo di atomi che saranno disponibili per la misura. E' inoltre importante sottolineare che fino ad oggi gli esperimenti di violazione della parita' non sono mai stati eseguiti con atomi freddi e intrappolati, cosa che e' invece assolutamente necessaria nel caso del francio. Pertanto gli obiettivi specifici del progetto, visti i risultati fin qui ottenuti, sono:

- intrappolamento degli isotopi di Francio prodotti dalla nostra linea di fascio di Legnaro;
- analisi spettroscopica ad alta risoluzione degli isotopi di francio intrappolati con particolare attenzione allo studio dei livelli 8S, 9S e 7D;
- misura diretta della transizione 7S-7D;
- eccitazione diretta della transizione 7S-8S;
- misure di raggi nucleari osservando gli spostamenti dei livelli atomici a causa dell'interazione iperfine;
- rivelazione della presenza eventuale di dimeri di francio;
- realizzazione di trappole di dipolo elettrico "red- shifted".

## Innovazione rispetto allo stato dell'arte nel campo

L'intrappolamento di atomi radioattivi rappresenta una nuova frontiera della fisica sperimentale, grazie alla possibilita' di realizzare test del Modello Standard delle interazioni elettrodeboli, studi dettagliati dei processi di decadimento alfa e beta e misure di momento di anapolo. Esperimenti in questa direzione sono in corso presso alcuni grandi laboratori americani e, unici in Europa, presso i Laboratori INFN di Legnaro, dove abbiamo realizzato una linea di fascio e una trappola magneto-ottica on line per l'intrappolamento del francio.

A Legnaro abbiamo intrappolato l'isotopo 210 del francio e abbiamo testato con successo su atomi di rubidio le tecniche previste per un miglioramento dell'efficienza complessiva di intrappolamento. Aspetti innovativi di questo progetto sono dati dall'intrappolamento anche degli altri isotopi di francio prodotti a Legnaro, che sono il 208, 209 e il 211, dalla spettroscopia ad alta risoluzione specialmente di transizioni non studiate o poco note, dalla individuazione delle metodologie adatte e delle condizioni migliori per una misura di non conservazione della parita' (APNC). Le sorgenti laser e le metodologie necessarie per l'eccitazione diretta della transizione proibita e per la sua rivelazione saranno messe a punto e testate.

## Criteri di verificabilità

I progressi e i risultati ottenuti nell'ambito del presente progetto potranno essere facilmente verificati considerando i nostri obiettivi principali che sono;

- intrappolamento degli isotopi di Francio prodotti dalla nostra linea di fascio di Legnaro;
- analisi spettroscopica ad alta risoluzione degli isotopi di francio intrappolati con particolare attenzione allo studio dei livelli 8S, 9S e 7D;
- misura diretta della transizione 7S-7D;
- eccitazione diretta della transizione 7S-8S;
- misure di raggi nucleari osservando gli spostamenti dei livelli atomici a causa dell'interazione iperfine;
- rivelazione della presenza eventuale di dimeri di francio;
- realizzazione di trappole di dipolo elettrico "red- shifted".

La completa attuazione del programma dipendera' fortemente dal buon funzionamento dell'acceleratore dei Laboratori di Legnaro e in parte dal taglio attuato alle risorse erogate che forse non ci consentira' l'acquisizione di tutta la strumentazione necessaria.

Una prima fase prevede l'intrappolamento dei vari isotopi prodotti, un loro studio spettroscopico e uno sviluppo della trappola in regime impulsato per ottenere un incremento significativo del numero massimo di atomi intrappolati.

2) La seconda parte del lavoro di spettroscopia atomica riguarderà lo studio dei livelli 8S, 9S e 7D che sono già stati misurati dal

gruppo di Stony Brook, ma solo per l'isotopo  $^{210}\text{Fr}$ . Queste misure richiedono l'uso di un ulteriore laser, iniettato nella MOT, per la eccitazione a due step degli atomi intrappolati. Anche queste misure saranno fatte sui differenti isotopi e produrranno informazioni aggiuntive su strutture iperfini e shift isotopici.

3) Misura della transizione diretta  $7S-7D$ , proibita per dipolo elettrico ma consentita per quadrupolo. Si tratta di osservare una riga debole in una regione di lunghezza d'onda di circa 412 nm. Questo oltre ad essere un risultato molto importante, ci familiarizzerà con i problemi che dovranno essere affrontati nella misura a 506 nm per l'eccitazione diretta della transizione  $7S-8S$ . Infatti lo schema che si dovrà implementare per la misura sulla violazione della parità è fondamentalmente lo stesso.

4) Secondo impegno è quello di ottimizzare il funzionamento della MOT in regime impulsato utilizzando per il caricamento il fenomeno del desorbimento indotto dalla luce (LIAD).

5) verrà fatto uno studio sistematico dell'efficienza complessiva della trappola per i vari isotopi in funzione dell'effetto LIAD e del rate di produzione.

La seconda fase prevede l'eventuale completamento degli obiettivi previsti nel primo anno e uno sforzo più mirato nella direzione di una verifica della possibilità di un esperimento di violazione della parità unito ad una possibile osservazione di dimeri di francio mai osservati fino ad oggi.

6) implementazione di una trappola dipolare red-shifted in linea con la MOT. Per questo scopo verrà acquistato ed usato un laser a neodimio YAG di potenza adeguata. Questo passaggio sarà preceduto da test fatti a Pisa, dove è attualmente disponibile un laser ad anidride carbonica "home made". Questa seconda trappola sarà puramente ottica e consentirà di studiare gli atomi in assenza, o comunque in presenza di perturbazioni esterne trascurabili, così da poter iniziare uno studio sistematico degli effetti spuri che possano mascherare l'effetto dovuto alla violazione della parità.

7) Verrà messa a punto una prima sorgente laser sintonizzabile intorno alla frequenza di risonanza della transizione proibita  $7S-8S$  e verrà implementato il sistema di rivelazione.

8) Uno dei principali problemi per la determinazione accurata della carica debole  $Q_w$  è la scarsa informazione sulla struttura nucleare. Un miglioramento decisivo di vari ordini di grandezza nella precisione di misura delle strutture iperfini è possibile usando tecniche a microonde per eccitare le transizioni all'interno dello stato fondamentale  $7S$ .

9) Uno studio molto interessante consisterà nel tentativo di rivelare la presenza di dimeri di francio eventualmente prodotti da fenomeni di fotoassociazione nella MOT.

## Elenco delle Unità di Ricerca

<b>Sede dell'Unità</b>	Università degli Studi di SIENA
<b>Responsabile Scientifico</b>	Luigi MOI
<b>Finanziamento assegnato</b>	Euro 64.900

## Compito dell'Unità

Il lavoro di ricerca dell'Unità di Siena prevede una strettissima collaborazione con le altre unità coinvolte nel progetto che svolgeranno per massima parte compiti comuni e condivideranno gli obiettivi principali. Le tre unità avranno compiti diversi nel caso di implementazione di nuovi apparati che possono essere testati con atomi diversi dal francio stesso e non necessariamente a Legnaro.

L'attività di ricerca dell'Unità di Siena si svolgerà pertanto sia a Legnaro che a Siena e i punti salienti sono:

a) verrà ultimato lo studio sistematico dell'efficienza complessiva della trappola in funzione dell'effetto di desorbimento dalle pareti della cella della trappola trattate con composti silanici (effetto LIAD) e del rate di produzione per tutti gli isotopi prodotti. Questo studio si avvarrà anche dei risultati ottenuti a Siena con una MOT di sodio,

b) Una volta completato questo studio verranno eseguiti, in collaborazione con le Unità di Pisa e di Ferrara, esperimenti di spettroscopia ad alta risoluzione dei livelli  $8S$ ,  $9S$  e  $7D$  e della transizione di quadrupolo  $7S-7D$  su tutti gli isotopi prodotti a Legnaro, cioè quelli con massa compresa fra 208 e 211.

c) Uno studio molto interessante consisterà nel tentativo di rivelare la presenza di dimeri di francio eventualmente prodotti da fenomeni di fotoassociazione nella MOT. Questo processo è già stato osservato per gli altri alcalini. Le molecole verranno prima ionizzate con un laser impulsato e poi rivelate. Una volta accertata la loro formazione si proverà ad intrappolarle in una trappola dipolare ottenuta utilizzando un laser a neodimio YAG. Queste molecole non sono state fino ad ora mai osservate. È evidente che la loro osservazione e studio ha una importanza notevole per la spettroscopia, ma anche per una conoscenza completa dei processi che possono avvenire in una nuvola di atomi freddi di francio ai fini di una individuazione di possibili effetti spuri in una misura molto delicata di violazione di parità.

d) Nella prospettiva di una misura della violazione della parità sarà fondamentale come primo passo lo sviluppo di una sorgente laser a 506 nm, risonante con la transizione non permessa fra i livelli  $7S-8S$ . È questa una lunghezza d'onda particolarmente "difficile" che può essere ottenuta duplicando laser a diodo operanti nel vicino infrarosso. Le unità di Siena e di Ferrara si occuperanno di questa parte, cercando di reperire se possibile laser a diodi di potenza operanti intorno a 1012 nm e mettendo a punto una cavità per la duplicazione della frequenza.

e) Presso le Unità di Siena e di Ferrara verrà messa a punto una trappola dipolare red detuned che utilizzerà un laser a neodimio YAG. Questo verrà fatto dopo che l'unità di Pisa avrà completato il suo lavoro preliminare utilizzando il loro laser ad anidride carbonica. Questa trappola dovrebbe permettere una efficiente raccolta degli atomi, e anche delle molecole, provenienti dalla MOT. La trappola dipolare e il suo caricamento verranno testate a Siena utilizzando la MOT di sodio già operativa. Questa seconda trappola sarà puramente ottica e consentirà di studiare gli atomi in assenza, o comunque in presenza di perturbazioni esterne trascurabili, così da poter iniziare uno studio sistematico degli effetti spuri che possano mascherare l'effetto dovuto alla violazione della parità.

f) Una volta messa a punto la sorgente laser si cercherà di determinare con precisione la frequenza della transizione proibita perturbando il sistema con campi esterni ed andando a rivelare l'eccitazione attraverso la rivelazione dei decadimenti sui livelli intermedi. Questa parte dell'esperimento verrà eseguita in collaborazione con Ferrara in una camera sotto ultra alto vuoto dove verrà implementata una trappola dipolare FORT in linea con la MOT.

---

<b>Sede dell'Unità</b>	Università degli Studi di PISA
<b>Responsabile Scientifico</b>	Paolo MINGUZZI
<b>Finanziamento assegnato</b>	Euro 40.600

### **Compito dell'Unità**

Il primo passo sarà quello di contribuire a ripetere le misure sulle transizioni già note e più intense, cioè le righe di risonanza D1 e D2, per "imparare il mestiere" di come si lavora in una trappola di Francio. Queste misure saranno fatte per tutti gli isotopi che la linea di fascio è in grado di fornire e permetteranno di determinare le strutture iperfini degli stati  $7S_{1/2}$ ,  $7P_{1/2}$  e  $7P_{3/2}$  in funzione del numero di neutroni. La calibrazione assoluta delle frequenze delle righe osservate sarà basata su uno standard secondario di frequenza ottica riferito a transizioni a due fotoni in Rubidio. Un riferimento assoluto di frequenza consente inoltre di determinare gli shift isotopici delle transizioni e quindi di confrontare le informazioni, critiche ma finora molto scarse, sulla struttura dei nuclei. La seconda fase del lavoro di spettroscopia ottica riguarderà lo studio dei livelli  $8,9S$  e  $7D$ . Queste misure richiedono l'uso di un ulteriore laser, iniettato nella MOT, per la eccitazione a due step degli atomi intrappolati. Anche queste misure saranno fatte sui differenti isotopi e produrranno informazioni aggiuntive su strutture iperfini e shift isotopici per gli stati eccitati. Un tentativo più ambizioso è quello di misurare la transizione diretta  $7S-7D$ , proibita per dipolo elettrico ma consentita per quadrupolo. Si tratta di osservare una riga debole in una regione di lunghezza d'onda (circa 412 nm) differente da quella delle righe D1,2, che richiede un laser intenso: è esattamente lo schema che si dovrà implementare per la misura sulla violazione della parità. Sarà dunque necessario realizzare e caratterizzare il laser sintonizzabile necessario per questo scopo. Le misure di violazione della parità devono essere effettuate in un ambiente fisico con la minima quantità possibile di perturbazioni esterne agenti sugli atomi, perché altrimenti la trattazione degli errori sistematici diventa estremamente complicata e inaffidabile. Da questo punto di vista una trappola MOT non è la struttura ideale. Sarà dunque importante cominciare a studiare la possibilità di trasferire gli atomi catturati nella MOT in una seconda trappola meno perturbatrice. Una opzione molto interessante è quella di implementare una trappola ottica dipolare con laser di frequenza molto lontana dalla risonanza (trappola FORT): si può impiegare per questo scopo un laser infrarosso a CO<sub>2</sub> abbastanza intenso (oltre 10 watt CW). Nei laboratori della Unità di Pisa è attualmente disponibile un laser a CO<sub>2</sub> costruito in casa, che può essere impiegato in test preliminari di funzionamento della trappola FORT. Uno dei principali problemi per la determinazione accurata della carica debole  $Q_w$  è la scarsa informazione sulla struttura nucleare. Questa informazione può essere acquisita tramite tecniche spettroscopiche misurando la struttura iperfine delle transizioni ottiche. Un miglioramento decisivo di vari ordini di grandezza nella misura delle strutture iperfini è possibile usando tecniche a microonde per eccitare le transizioni all'interno dello stato fondamentale  $7S$ . Le strutture iperfini degli isotopi 208-211 del Francio sono comprese nella regione tra 40 e 50 GHz: per realizzare questa idea è dunque necessario preparare un sistema a microonde in grado di eccitare gli atomi nella MOT (o rilasciati dalla MOT) che da un punto di vista geometrico sia compatibile con i vari fasci laser di trappola e di rivelazione. Una possibile risposta a queste richieste è un risonatore di tipo Fabry-Perot a specchi confocali. Per verificare la fattibilità di questo tipo di misure sarà compito dell'Unità di Pisa costruire un apparato a microonde in grado di fare misure spettroscopiche nella regione tra 40 e 50 GHz basate su un interferometro a specchi. Sarà necessario caratterizzare il sistema misurando il fattore di merito e la struttura dei modi, per poi arrivare a un progetto finale che sia compatibile con la struttura complessiva dell'apparato ottico della MOT di Francio.

---

<b>Sede dell'Unità</b>	Università degli Studi di FERRARA
<b>Responsabile Scientifico</b>	Roberto CALABRESE
<b>Finanziamento assegnato</b>	Euro 57.500

### **Compito dell'Unità**

L'azione dell'Unità di Ferrara avverrà in stretta collaborazione con l'Unità di Siena, proseguendo un privilegiato rapporto di collaborazione che va avanti da circa dieci anni, con risultati molto positivi. In una prima fase l'Unità di Ferrara si occuperà della completa caratterizzazione della trappola magneto-ottica di Francio esistente, effettuando uno studio sistematico dei vari isotopi di Francio intrappolati. Verranno misurati il numero di atomi intrappolati, la temperatura e la vita media. Il segnale di intrappolamento del Francio 210 è stato osservato per ora tramite un fotoregistratore. Recentemente è stata acquisita una camera CCD ad alta efficienza quantica nel vicino infrarosso, analogamente a quanto fatto dal gruppo di Stony Brook, in modo da avere la migliore strumentazione atta a caratterizzare la trappola da un punto di vista spaziale e temporale. Per intrappolare i vari isotopi sarà necessario determinare con grande precisione le frequenze dei laser di intrappolamento e di ripompa. Altro compito dell'Unità di Ferrara, insieme a quella di Siena, sarà lo studio e l'ottimizzazione della MOT in regime impulsato, utilizzando l'effetto LIAD, per ottenere un numero di atomi intrappolati molto superiore a quello ottenibile in regime continuo. In particolare verranno utilizzati composti silanici per il rivestimento delle pareti della cella, che hanno la proprietà di desorbire gli

atomi eventualmente adsorbiti quando la superficie viene illuminata da un flash di luce non risonante. Con questo metodo abbiamo ottenuto, sulla trappola di rubidio esistente a Ferrara, la migliore efficienza di caricamento relativamente a trappole magneto-ottiche, e il sistema verrà ottimizzato nel caso del francio.

In una seconda fase si prevede la messa a punto della seconda trappola, in linea con la MOT. L'idea della seconda trappola consiste nell'intrappolare gli atomi in un ambiente nel quale sia possibile effettuare una serie di misure di precisione e in prospettiva nel quale sia possibile realizzare la misura di violazione di parità utilizzando la transizione 7S-8S.

Per quanto riguarda il tipo di trappola, verrà utilizzata una trappola dipolare 'red detuned', utilizzando un laser nell'infrarosso (neodimio). Tali studi verranno effettuati sia con la trappola di sodio di Siena che con la trappola di rubidio esistente a Ferrara. La misura di violazione di parità necessita l'eccitazione della transizione proibita 7S-8S nel francio intrappolato, che richiede una sorgente laser a 506 nm. Le Unità di Ferrara e Siena studieranno la messa a punto di tale sorgente tramite duplicazione della frequenza di laser a diodi di potenza operanti attorno a 1012 nm. Una volta messa a punto la sorgente laser si cercherà di determinare con precisione la frequenza della transizione proibita perturbando il sistema con campi esterni ed andando a rivelare l'eccitazione attraverso la rivelazione dei decadimenti sui livelli intermedi. Questa parte dell'esperimento verrà eseguita in collaborazione con l'Unità di Siena in una camera sotto ultra alto vuoto dove verrà implementata la trappola dipolare in linea con la MOT.

L'Unità di Ferrara parteciperà inoltre alla effettuazione di tutte le altre misure sulla trappola di francio: spettroscopia ad alta risoluzione dei livelli 8S, 9S e 7D e della transizione di quadrupolo 7S-7D, studio della presenza di dimeri di francio eventualmente prodotti da fenomeni di fotoassociazione nella MOT, studio delle sistematiche e del rumore di fondo, etc..

Le competenze disponibili a Ferrara riguardano le tecniche laser (laser a larga banda, trappole magneto-ottiche), progettazione e gestione di linee di fascio, tecniche di vuoto, rivelazione di particelle, elettronica analogica e digitale, acquisizione ed analisi dati. Inoltre la collaborazione con ricercatori dei Laboratori Nazionali di Legnaro assicura le competenze specifiche di fisica nucleare.

---