Sviluppo di nuove tecniche per lo studio di atomi di Francio in una Trappola Magneto-Ottica

> Giuseppe Mazzocca Dottorato in Fisica XXVI° ciclo

Dipartimento di Fisica e Sc. della Terra- Università di Ferrara - 13 Dicembre 2013

Argomenti Trattati

Descrizione Generale

□ Motivazioni dell'Esperimento

Il Francio per Test di Violazione di Parità Atomica (APV)

La Trappola Magneto-Ottica (MOT)

L'Apparato Sperimentale

Produzione, Trasporto ed Intrappolamento del Francio
Rivelazione della MOT

Risultati

Sviluppo di nuove tecniche per lo studio di transizioni atomiche deboli

Risultati con MOT di Francio: prime evidenze di effetto LIAD su MOT di Rb e Fr da lamina di Ittrio

Prospettive - Conclusioni

Sviluppo di tecniche sperimentali per misure di APNC come test del Modello Standard

- Intrappolamento ad alta efficienza di atomi di Francio in una Trappola Magneto – Ottica
- Misure spettroscopiche di transizioni deboli non ancora osservate



- L'interazione e.m. è la forza dominante nell'atomo
- Tra l'elettrone di valenza ed i nucleoni dell'atomo c'è uno scambio di bosoni virtuali Z⁰ che comporta un effetto di APNC =>

L'Hamiltoniana totale del sistema atomico ha una parte pari ed una dispari sotto riflessione spaziale

 $H=H^{even} + H^{odd} => P^{-1}HP = H^{even} - H^{odd} \neq H$

$$H_{PNC} = H_{PNC}^{Q_W} + H_{PNC}^{spin} + H_{PNC}^{anapole}$$

L'interazione PV dominante è

$$H_{PNC}^{Q_W} = -\frac{G_F}{2\sqrt{2}} Q_W \gamma^5 \rho_N(\mathbf{r})$$

Nel limite non relativistico

$$H_{PNC}^{Q_W} = \frac{G_F}{4\sqrt{2}} Q_W \frac{\bar{\sigma}_e \cdot \mathbf{p_e}}{m_e c} \rho_N(\mathbf{r})$$

La carica debole Q_w è la somma coerente dei contributi alla interazione debole dai 2Z+N quarks up e 2N+Z quarks down:

$$Q_W = 2[(2Z+N)C_V^u + (2N+Z)C_V^d]$$

Le costanti di accoppiamento vettoriali sono date nel M.S.:

$$\begin{cases} C_V^u = \frac{1}{2} - \frac{4}{3}\sin^2\theta_W \\ C_V^d = -\frac{1}{2} + \frac{2}{3}\sin^2\theta_W \end{cases}$$

Sostituendo i valori numerici delle costanti di accoppiamento vettoriale =>

Q_w≈ Z (0.07) – N

La carica nucleare debole ha una più forte dipendenza dal numero di neutroni che di protoni nel nucleo

L'interazione tra nucleo ed elettrone, che viola la parità comporta un mixing degli stati elettronici con opposta parità, in particolare tra gli stati S e P. Es: uno stato S viene ad ottenere una piccola parte dello stato P (per atomi pesanti dell'ordine di 10⁻¹¹) permettendo una transizione di dipolo tra due stati S altrimenti negata.

L'ampiezza A_{PNC} di una transizione che viola la parità è troppo piccola rispetto all'ampiezza A_{em} di una tipica transizione elettromagnetica, per poter essere osservata direttamente ($A_{PNC}/A_{em} < 10^{-5}$) => si misura l'interferenza S, in una stessa transizione, tra le due ampiezze

$$S \propto |A_{PC} + e^{i\theta} A_{PNC}|^2 \approx |A_{PC}|^2 - 2sin\theta A_{PC} A_{PNC}$$

Metodo di Interferenza di Stark:

La transizione e.m. che conserva la parità è ottenuta applicando un campo elettrico esterno, che stimola una transizione di dipolo elettrico E_1 non conservante la parità, che dà il rate di transizione:

$$R \propto \left| A_{Stark} + e^{i\vartheta} E_1^{PV} \right|^2$$
$$R \propto A_{Stark}^2 + k A_{Stark} \cdot \operatorname{Im}(E_1^{PV})$$

Tramite la modulazione della direzione di polarizzazione del fascio laser =>

□ Misura del rate di transizione =>

□ Misura di Im $(E_1^{PV}) =>$ □ Misura di Q_w

$$\operatorname{Im}(E_1^{PV}) = K_{PV} \frac{Q_W}{N}$$



Si utilizza la transizione proibita 7S-8S del Fr applicando un campo elettrico statico 1000 V/cm Atomi polarizzati in una trappola di dipolo ottico. Il rate di transizione cambia quando l'elicità è invertita => discriminazione dell'effetto di violazione di parità

Descrizione Generale Il Francio per Test di APV

□ Il Francio è un buon candidato per realizzare esperimenti di APV:

- □ Semplice struttura elettronica
- APV ha una forte dipendenza da Z
 - □ Fr è l'alcalino più pesante (Z=87)
 - L'effetto di APV è 18 volte più grande nel Fr rispetto al Cs
- □ Fr è un elemento radioattivo con molti isotopi : possibile confronto dei rapporti isotopici APV
- ⇒La Violazione di Parità per la transizione 7S 8S: Test per le interazioni deboli neutre

□ Qualche svantaggio:

Non ci sono isotopi stabili

□ Vite medie molto brevi – Fr²¹⁰ 3,1 m – Fr²²³ 22 m (la più lunga)

Non più di 30 g di Fr sulla superficie terrestre in ogni istante

=> deve essere prodotto per reazione nucleare ed intrappolato per gli studi successivi (necessità di un acceleratore)

□ Non ci sono celle di riferimento per spettroscopia/ calibrazione

Breve vita media e basso rate di produzione possono limitare le misure di APV

Descrizione Generale La Trappola Magneto Ottica

Consente grandi campioni atomici

- \Box Bassa temperatura(T~ 0,1 mK)
- □ Alta densità (~ 10¹⁰ atomi/cm³)
- □ Volume di qualche mm³



Descrizione Generale La Trappola Magneto Ottica

Modello unidimensionale:

Campo magnetico quadrupolare variabile nello

spazio con

B(z)= 0 nel punto centrale, induce uno shift Zeeman nei livelli atomici dipendente dalla posizione

Pressione di radiazione indotta da fasci laser contropropaganti che rallenta gli atomi



Descrizione Generale La Trappola Magneto Ottica

+

Schema 3-D

Sistema Ottico:

- 12 fasci laser: tre coppie ortogonali di fasci contropropaganti detunati verso il rosso:
 - Laser di raffreddamento: Ti:Sa pompato da laser Ar⁺
 - Laser di ripompa : Diodo laser
- Cella con rivestimento silanico
- Sei telescopi per espandere i fasci laser (ingrandimento =5)

 \Box Sei lamine $\lambda/4$ per la polarizzazione circolare dei fasci

Campo magnetico
quadrupolare
usando due avvolgimenti in
configurazione Anti-Helmoltz



=>Forza risultante verso B=0

Esperimento presso i Laboratori Nazionali di Legnaro di INFN Francio prodotto per reazione nucleare di fusione-evaporazione:

¹⁹⁷Au(¹⁸O,xn)^{215-x}Fr

Trasporto in forma ionica alla regione di trappola

□ Neutralizzazione ed Intrappolamento







Prodotti della reazione rallentati e raffreddati da MeV a neV



Fr rivelato dal conteggio delle α emesse durante il suo decadimento



Per selezionare gli ioni da iniettare nella cella MOT, ripulendo il fascio dalla corrente termoionica generata dal bersaglio riscaldato, è stato installato un filtro di Wien nella linea di trasporto.

Quando una particella con carica q e velocità **v** passa attraverso il filtro, sarà deflessa, in quanto soggetta alla forza di Lorentz. Se Bqv = Eq => v = E/B la particella attraversa il filtro senza subire deflessioni dai due campi ortogonali: l'apparato e' quindi un selettore di velocità.

se consideriamo soltanto particelle con carica unitaria, il filtro di Wien agisce come selettore di massa.





Gli ioni di Fr sono focalizzati dentro la cella dove sono neutralizzati da un foglio di materiale a bassa funzione di lavoro (Ittrio o Zirconio)

- Ittrio:
- □ Funzione di lavoro W= 3,1 eV (potenziale di ionizzazione del Fr 4,1 eV)
- □ Temperatura nel range 600 900 °C per aumentare la diffusione
- Y all'interno della cella per consentire l'arresto e neutralizzazione degli ioni ed il rilascio direttamente <u>nella cella</u>



Efficienza di intrappolamento per il Francio



Le misure di transizioni deboli richiedono campioni atomici sufficientemente popolati.

L'efficienza di intrappolamento dipende da parecchi fattori, quali:

□ rivestimento e geometria della cella (W): aumento del tempo di transito di un atomo nella

zona di intrappolamento; possibile ulteriore sorgente di atomi tramite effetto LIAD

- □ vuoto (C): minimizzazione delle collisioni con il gas residuo
- D potenza laser (L), temperatura del neutralizzatore.

L'Apparato Sperimentale Rivelazione della MOT



Risultati

- Isotopi del Fr intrappolati in cw
 - ²¹⁰Fr 1100 atomi
 - ²⁰⁹Fr 270 atomi
 - ²¹¹Fr 180 atomi

Efficienza: 200²¹⁰Fr intrappolati per 10⁵ Fr⁺/s

Isotopi del Fr intrappolati in modo pulsato

- Evoluzione temporale del segnale di fluorescenza della trappola di ²¹⁰Fr
- Accumulazione per 600 sec sul neutralizzatore freddo
- Fascio ionico fermato e neutralizzatore riscaldato a t=30 sec
 Modo pulsato : 8000 atomi di ²¹⁰Fr



Nel 2009 sono stati pubblicati i risultati di queste misure , che migliorano di un ordine di grandezza l'accuratezza delle misure di frequenza relative a transizioni 7S -> 7P di tre isotopi del francio (²⁰⁹⁻²¹¹Fr) e confermano i dati di ISOLDE per gli shifts isotopici per ²⁰⁹⁻²¹¹Fr dedotti. (Optics Letters/Vol. 34/ N.7 - 1 Aprile 2009)

La frequenza della transizione D_2 per ²¹²Fr, riferimento per tutti gli shifts degli isotopi del Fr, è stata corretta con una significativa differenza con il valore di ISOLDE

Isotope	Trapping laser	Trapping transition	D_2 Centroid
209	417 415.087(8)	417 415.125(17)	417433.876(18)
210	417412.448(7)	417 412.486(17)	417433.357(17)
211	417 412.627(9)	417 412.665(18)	417431.643(19)
212			417430.748(17)

21

- □ Nuova tecnica per la rivelazione di transizioni deboli per fasci radioattivi.
- □ Indagine diretta basata sull'eccitazione degli atomi in MOT con fascio laser risonante con la transizione di interesse (probe beam) e rivelazione della distruzione/caricamento della trappola stessa.
- □ Tramite probe beam sono state spazzate diverse righe dell'isotopo 85 del Rb, dai livelli fondamentali di trappola e dai primi livelli eccitati, andando progressivamente su righe a più debole intensità.
- □ Esperimenti con trappole poco popolate (da 100 a 10.000) per avvicinarsi alle condizioni che si hanno con il francio.
- □ La finalita´ e´ rivelare segnali molto deboli, come quelli che indicano un trasferimento di parte degli atomi intrappolati a livelli energetici non ancora indagati, via dipolo magnetico, quadrupolo magnetico, come le linee 7S→6D_{3/2} o transizioni proibite come 7S→8S del Fr.

{Detection of excited level population transfer in a MOT through the measurement of trapped atom number.} Meas. Sci. Technol. **24,** 015201- 2013.

- □ Il laser di intrappolamento è un diodo laser a cavità esterna di 350 mW di potenza sintonizzato sulla transizione chiusa $5S_{1/2}$ ($F_g=3$) \rightarrow $5P_{3/2}$ ($F_e=4$) stabilizzato a 384229.22 GHz, controllato tramite ondametro.
- Il probe beam è dato dal laser Ti:Sa, spazzato attorno una riga di risonanza per qualche centinaio di Mhz.



Studio della linea D1 del ⁸⁵Rb





Gli atomi decaduti dal livello di intrappolamento al $F_g=3$ sono parzialmente spinti fuori dalla transizione ciclica dal probe

Ti:Sa spazzato su 377109,16Ghz sulla transizione: $5S_{1/2}(F_g=2) \rightarrow 5P_{1/2}(F_e=2,3)$



Il laser di eccitazione agisce come ripompa, togliendo atomi dallo stato fondamentale più basso dove sono decaduti.

Studio della linea D2 del ⁸⁵Rb



$$5S_{1/2}(F_g=2) \rightarrow 5P_{3/2}(F_e=1,2,3)$$



Studio del livello 7S_{1/2} del Rb





Intensità di assorbimento circa 300 volte più debole che la linea D1

Massimo valore potenza probe beam



Splitting della linea (effetto Autler-Townes). Forma e separazione dei picchi dipendente dal detuning



Studio dei livelli 5D_{3/2, 5/2} del Rb



Transizioni deboli <750 della intensità riga D1 Probe laser P=350 mW(curva nera) – 1mW(curva rossa)



Intensità assorbimento < 150 volte intensità D1 Probe laser P=8 mW(curva nera) – 1 mW(curva grigia) 35µW(curva rossa)

Risultati – MOT di Fr

Alcuni parametri:

- ■7S_{1/2}(F=13/2)→7P_{3/2}(F=15/2) Laser Ti:Sa a 417412,47 GHz
- ■7S_{1/2}(F=11/2)→7P_{1/2}(F=13/2) Free running diode laser per la ripompa a 366898,77 GHz
- Temperatura del bersaglio di oro: 874° C
- Rate di Fr⁺ rilevato all'ultimo SSBD (il piu' vicino alla cella) di 480 Hz corrispondente a una corrente ionica di circa 6 pA
- ■Tensione al filtro di Wien V_w = 32V

■T_Y = 530°C

Trappola di circa 100 atomi di Fr²¹⁰





Risultati-Prime evidenze di effetto LIAD su MOT di Fr

Coating cella – Effetto LIAD (Light-induced Atom desorption)

- L'effetto consiste nel desorbimento atomico prodotto da luce incoerente
 - □ Modello:
 - Gli atomi incontrano ~1 eV di barriera di potenziale
 - I fotoni della luce di un flash danno loro l'energia per superare la barriera.
 - Il desorbimento è enfatizzato
- Tali proprietà del coating consentono di incrementare la densità nella MOT tramite:
 minima perdita di atomi per absorbimento (superfici con basso coefficiente di absorbimento);
 - accumulazione di atomi, precedentemente absorbiti sulla superficie, tramite desorbimento innescato da luce non risonante.



Risultati-Prime evidenze di effetto LIAD su MOT di Rb e Fr da lamina di Ittrio



Risultati-Prime evidenze di effetto LIAD su MOT di Rb e Fr da lamina di Ittrio



 Prima evidenza di MOT di atomi radioattivi caricata da ittrio per effetto LIAD

MOT molto debole a t=0. Il numero di atomi intrappolati aumenta di circa un fattore tre

Lungo tempo di ripristino

Tecnica per incrementare la popolazione atomica di trappole di atomi radioattivi quali il Fr.

L'attività sperimentale sarà rivolta a due obiettivi principali:

- Ia progettazione, realizzazione e caratterizzazione di nuove celle, che migliorino l'efficienza di intrappolamento per atomi stabili e radioattivi;
- Io sviluppo di nuove tecniche di rivelazione di transizioni deboli e il loro impiego su MOT di rubidio e di francio.
- Si prevede l'avvio di una fase di studio e di progettazione di futuri esperimenti su altri atomi radioattivi.

Sono stati presentati i risultati sperimentali più rilevanti ottenuti nel triennio 2011-2013 presso la facility sita ai Laboratori Nazionali di Legnaro, dedicata all'intrappolamento on-line del francio. L'esperimento in corso a LNL rientra nell'ambito di ricerca di fisica fondamentale dedicata allo studio delle simmetrie nei sistemi atomici. L'obiettivo a lungo termine consiste nello sviluppo di tecniche sperimentali che permettano misure di alta precisione di APNC come test del Modello Standard. I risultati conseguiti in questo periodo pongono importanti basi verso una migliore conoscenza dell'atomo di francio.

