

ATOMI KAONICI A DAΦNE: RECENTI SUCCESSI E FUTURE SFIDE

di Catalina Curceanu (Petrascu) e Carlo Guaraldo

Da poco più di un lustro, i Laboratori Nazionali di Frascati dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare hanno arricchito una cinquantennale tradizione nel campo della fisica delle particelle elementari, ricca di prestigiosi successi, con l'apertura di una nuova linea di ricerca, quella degli atomi esotici, in particolare gli atomi kaonici, formati da un nucleo e da un kaone orbitante. La nuova fisica ha obiettivi molto ambiziosi, pur usando tecniche semplici e dirette. Si propone, attraverso misure di transizioni atomiche, lo studio dei principi primi da cui si è articolato il mondo delle particelle: su tutti, i principi di simmetria, in particolare la simmetria chirale e i meccanismi della sua rottura spontanea. Per rispondere alla domanda cruciale sull'origine della massa, come e perché i costituenti ultimi, i quarks, hanno una massa. L'esperimento DEAR a Frascati sull'idrogeno kaonico è già una pietra miliare, punto di riferimento sperimentale, il più preciso mai effettuato, catalizzatore di nuovi approcci teorici. L'esperimento SIDDHARTA sul deuterio kaonico, in fase di installazione, permetterà di scrivere la pagina mancante della descrizione dell'interazione antikaone-nucleone.

Introduzione

L'entrata in funzione dell'acceleratore DAΦNE presso i Laboratori Nazionali di Frascati dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (LNF-INFN) ha aperto nuove strade nello studio della fisica nucleare e adronica dei sistemi cosiddetti "strani" (cioè quelli che contengono il quark strano). Il fascio di kaoni (sistemi composti da un (anti) quark "normale" e un quark "strano") prodotto a DAΦNE dal decadimento delle particelle ϕ , create nelle annichilazioni elettrone-positrone, ha delle caratteristiche uniche al mondo: bassissima energia, altissima purezza ed energia ben definita. Sono caratteristiche ideali per studi nel campo della fisica delle interazioni kaone - nucleone a bassa energia. Le informazioni sperimentali in questo campo sono scarse e poco precise.

Malgrado la storia di DAΦNE sia una storia recente, vista nella prospettiva dei 50 anni del LNF, i successi ottenuti nel campo della fisica adronica e nucleare sono stati notevoli: primati mondiali e/o misure mai effettuate prima. È questo anche il caso delle misure di atomi esotici, in particolare di atomi kaonici, una storia in due tappe: recenti successi, le misure effettuate nel 2001 e 2002 dall'esperimento DEAR (DAΦNE Exotic Atom Research) e future sfide, misure che stanno per essere effettuate nell'ambito dell'esperimento SIDDHARTA (Silicon Drift Detector for Hadronic Atom Research by Timing Application).

DEAR ha effettuato nel 2002 la misura più precise delle transizioni di raggi X nell'idrogeno

kaonico. Tale misura ha migliorato sensibilmente la miglior misura precedente, effettuata negli anni '90 in Giappone (a KEK) e ha fornito un'informazione fondamentale per lo studio della fisica dell'interazione forte a bassa energia. SIDDHARTA si propone di migliorare ulteriormente la precisione della misura di DEAR, di un fattore 5 - 10, e di effettuare la prima misura del deuterio kaonico, una misura difficile, che nessuno è stato in grado di effettuare ad oggi. I risultati di queste misure daranno delle informazioni fondamentali nel campo delle interazioni forti, contribuendo, per esempio, a rispondere alla domanda: perché i nucleoni, protoni e neutroni, pesano quanto pesano?

Questo comporta implicazioni dall'astrofisica alla struttura della materia.

Nella Sezione 1 verrà brevemente spiegata la fisica degli atomi kaonici; nella Sezione 2 verranno presentati i risultati di DEAR, mentre la Sezione 3 contiene un sommario del prossimo esperimento SIDDHARTA. Il lavoro chiude con le conclusioni e le prospettive.

1 - La fisica degli atomi kaonici

Gli atomi kaonici rappresentano un caso particolare di atomi esotici, cioè atomi in cui uno degli elettroni in orbita intorno al nucleo è stato sostituito da un'altra particella con carica negativa (un antiprotone, un muone, oppure un kaone). Un atomo kaonico si forma nel momento in cui un fascio di kaoni, proveniente da un acceleratore di particelle, entra in un bersaglio: i kaoni ral-

lentano, attraverso le interazioni con gli atomi del bersaglio, fino a quando vengono catturati da uno di questi atomi, sostituendo l'elettrone e formando l'atomo kaonico. Nel nostro caso l'acceleratore è il collisore elettroni-positroni DAΦNE in cui viene creata la particella ϕ che decade in kaoni. Essendo la massa del kaone circa 1000 volte più grande di quella dell'elettrone, l'orbita in cui il kaone viene a trovarsi intorno al nucleo nel momento della cattura è un'orbita molto eccitata, cioè ha un numero quantico n molto alto ($n=25$). Segue poi una serie di processi di diseccitazione dell'atomo kaonico. Parte di questi processi avvengono con emissione di raggi X. Nel caso dell'idrogeno e del deuterio kaonici le transizioni di interesse sono quelle che portano il

kaone sul livello fondamentale, $n=1$, con transizioni $2p \rightarrow 1s$ (K_α), $3p \rightarrow 1s$ (K_β), $4p \rightarrow 1s$ (K_γ).

I kaoni negativi, a differenza degli elettroni, non sono particelle elementari, ma particelle composte da quark: un antiquark up e un quark strano. Quando nell'atomo kaonico il kaone si avvicina al nucleo – in seguito ai processi di diseccitazione – subisce, oltre all'interazione elettromagnetica col nucleo (come l'elettrone), anche quella forte (alla quale sono sottoposti solo i quark). L'effetto (per idrogeno e deuterio kaonici) è sensibile soltanto per il livello fondamentale ($1s$) e si traduce in uno spostamento (ϵ) e un allargamento (Γ) del livello fondamentale rispetto alle posizioni calcolate considerando soltanto l'interazione elettromagnetica (vedi Figura 1).

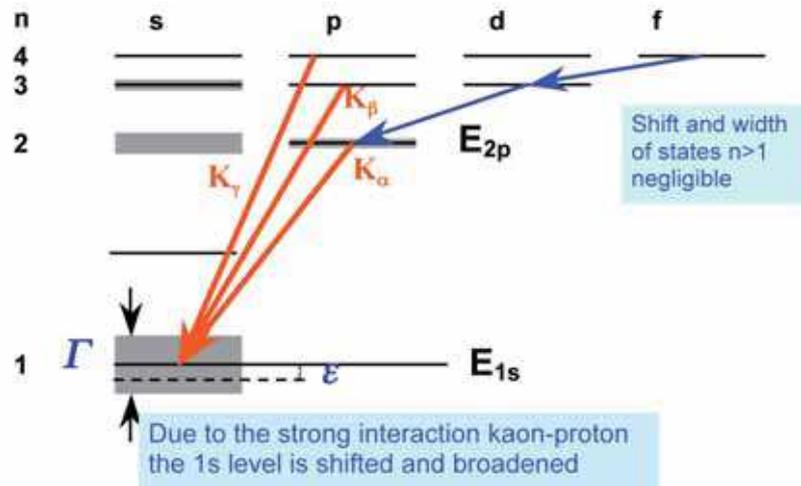


Figura 1

L'effetto della forza forte: spostamento (ϵ) e allargamento (Γ) del livello fondamentale ($1s$) rispetto ai valori calcolati considerando soltanto l'interazione elettromagnetica. Quello che l'esperienza misura sono i raggi X generati nelle transizioni sul livello $1s$, le cosiddette transizioni del complesso K (K_α , K_β , K_γ) da cui si estraggono le quantità ϵ e Γ .

È possibile, dunque, dalle misure dei raggi X generati nelle transizioni sul livello $1s$ estrarre informazioni sulla forza forte fra l'antikaone e il nucleo a energia molto bassa. In particolare, dalle misure di spostamento e allargamento del livello fondamentale per l'idrogeno kaonico si ricava la quantità chiamata lunghezza di diffusione antikaone-protone (a_{K^-p}), definita come l'ampiezza dell'interazione forte antikaone-nucleone a energia cinetica relativa uguale a zero (in "soglia"):

$$\epsilon + i\Gamma/2 = 412 a_{K^-p} \text{ eV fm}^{-1} \text{ (formula di Deser-Trueman)}$$

Una formula simile esiste per il deuterio kaonico,

permettendo di estrarre la lunghezza di diffusione antikaone-deutone (a_{K^-d}).

Dalle lunghezze di diffusione antikaone-protone e antikaone-deutone si possono ricavare le lunghezze di diffusione dipendenti dall'isospin (a_0 per $I=0$ e a_1 per $I=1$):

$$a_{K^-p} = \frac{1}{2} \cdot (a_0 + a_1)$$

$$a_{K^-n} = a_1$$

$$a_{K^-d} = 2 \cdot \left(\frac{m_N + m_K}{m_N + m_K} \right) \cdot a^{(0)} + C$$

dove il primo termine rappresenta l'approssimazione che si ottiene considerando l'interazione

del K^- sui due nucleoni separatamente mentre il termine C è una correzione dell'interazione da tre corpi. In particolare:

$$a^{(0)} = \frac{1}{2} \cdot (a_{K^-p} + a_{K^-n}) = \frac{1}{4} \cdot (a_0 + 3a_1)$$

Le lunghezze di diffusione dipendenti dall'isospin sono le quantità che permettono lo studio dell'interazione forte a bassa energia. Esse sono sperimentalmente accessibili soltanto attraverso questo tipo di misure.

La forza forte è responsabile di tanti processi in Natura, dall'esistenza dei nuclei a quella delle stelle e alla loro evoluzione: la teoria che ne descrive il comportamento prende il nome di Quanto Cromo Dinamica (QCD). Mentre ad altissime energie la QCD descrive sufficientemente bene i risultati degli esperimenti, lo studio del regime di basse energie è tutt'oggi una delle motivazioni di tanti esperimenti fatti in tutto il mondo. Tra l'altro, l'esistenza stessa dei nucleoni (protoni e neutroni) è uno degli effetti del com-

portamento della forza forte a bassa energia – capirne dunque i dettagli può servire anche per capire meglio il mondo intorno a noi e noi stessi.

2 - L'esperimento DEAR – recenti successi

DEAR rappresenta una collaborazione internazionale fra 11 Istituti di 8 paesi (Austria, Canada, Germania, Italia, Giappone, Romania, Svizzera e USA). L'esperimento DEAR utilizza i kaoni negativi prodotti a DAΦNE dal decadimento delle ϕ ($\phi \rightarrow K^+K^-$ nel ~50% dei casi). I kaoni lasciano la zona d'interazione e^+e^- , escono dalla camera da vuoto di DAΦNE attraverso una finestra sottile fatta di fibra di carbonio rinforzata con uno strato di alluminio, vengono ulteriormente degradati in energia mediante una serie di fogli sottili di kapton, entrano in un bersaglio riempito di idrogeno gassoso posizionato sopra la zona d'interazione e vengono infine fermati nell'idrogeno (Figura 2 e Figura 3).

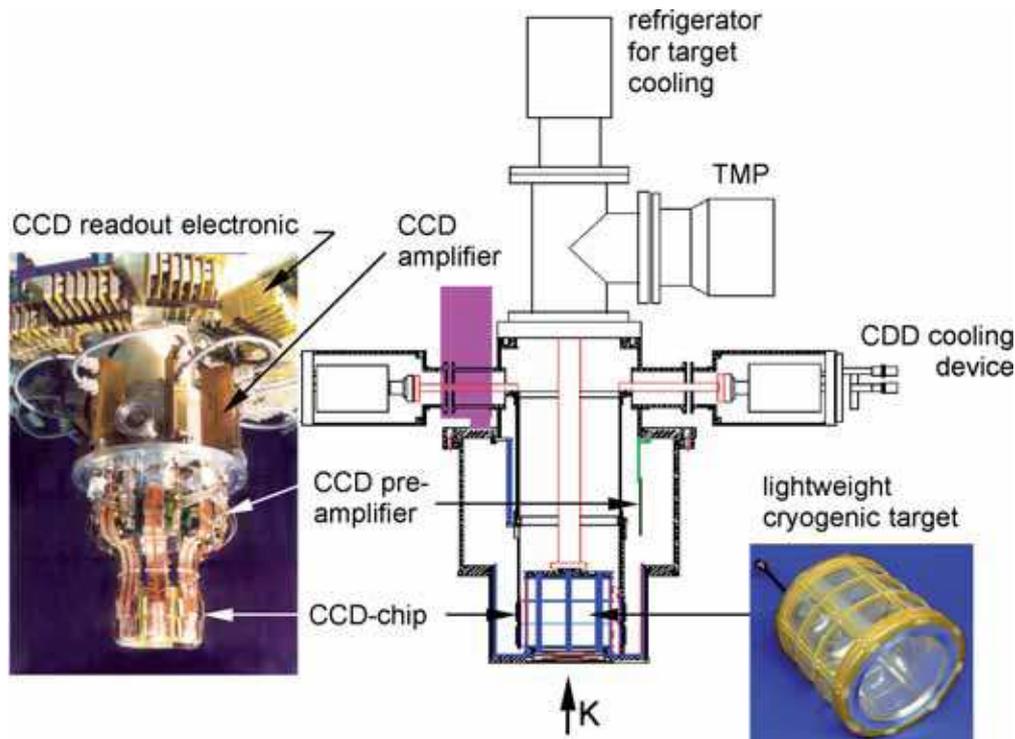


Figura 2

Schema dell'apparato DEAR: al centro il setup completo; a sinistra i rivelatori Charge - Coupled Device (CCD) con l'elettronica di lettura del segnale; a destra il bersaglio di idrogeno.

L'idrogeno, allo stato gassoso, è contenuto in un cilindro di kapton con una struttura portante in fibra di vetro e anelli di rinforzo in alluminio.

Il gas è mantenuto in condizioni criogeniche (25 K) ed è pressurizzato (3 bar). In queste condizioni la densità è di 3.5 g/l (corrispondente a 3%



Figura 3
L'esperimento DEAR installato su DAΦNE (2002)

della densità dell'idrogeno liquido). L'alta densità dell'idrogeno è necessaria per avere un numero di kaoni che si fermano nel bersaglio il più alto possibile e, di conseguenza, un numero alto di atomi di idrogeno kaonico.

Sedici rivelatori di tipo CCD (Charged-Coupled Devices, Marconi Applied Technologies, CCD55-30,) con una superficie attiva totale di 116 cm², sono posizionati intorno al bersaglio per misurare i raggi X prodotti nelle diseccitazioni degli atomi di idrogeno kaonico. Ogni CCD ha un numero di pixel pari a 1242 x 1152, essendo la dimensione del singolo pixel 22.5 μm x 22.5 μm con uno strato sensibile di 30 μm. La risoluzione in energia per raggi X di 6 keV è pari a 150 eV FWHM, ad una temperatura di funzionamento della CCD di 165 K e per un tempo di lettura di 90 s.

Per schermare l'apparato dai raggi X di fondo, prodotti nelle cascate elettromagnetiche generate dagli elettroni e positroni persi dai fasci circolanti nelle pareti della pipe dell'acceleratore e nei materiali del setup, l'apparato DEAR è stato immerso in sofisticate schermature fatte di piombo, rame, alluminio e policarbonati. L'utilizzo di tali schermi protettivi, insieme all'ottimizzazione delle traiettorie dei fasci, hanno permesso a DEAR di effettuare la misura dell'idrogeno kaonico nel periodo ottobre-dicembre 2002, integrando una luminosità di 60 pb⁻¹.

La sfida, vinta da DEAR, è stata quella di riuscire a estrarre un segnale molto piccolo rispetto ai fondi rimasti, malgrado l'utilizzo delle schermature (un rapporto segnale/fondo pari a 1/70). Un rapporto segnale/fondo così basso era dovuto al fatto che i rivelatori CCD, malgrado siano ottimi rivelatori di raggi X

(molto stabili, con ottima risoluzione in energia) sono rivelatori molto lenti (tempo di lettura/CCD intorno al minuto), dunque non triggerabili, cioè il segnale viene letto sempre e non soltanto in coincidenza con la presenza di un kaone che entra nel bersaglio. Come vedremo, è stato questo il punto di svolta per progettare l'esperimento SIDDHARTA.

L'analisi dei dati, effettuata da due gruppi in parallelo (a Frascati e a Vienna), ha permesso di estrarre, dopo la sottrazione del fondo, i segnali generati nei decadimenti dell'idrogeno kaonico (Figura 4), misurando le transizioni K_α, K_β, K_γ e K-high (vedi Figura 1 per riferimento alle transizioni).

Dalle misure effettuate sono stati ricavati lo spostamento e l'allargamento del livello 1s dell'idrogeno kaonico:

$$\varepsilon_{1s} = (-193 \pm 37_{stat} \pm 6_{sys}) \text{ eV}$$

$$\Gamma_{1s} = (249 \pm 111_{stat} \pm 30_{sys}) \text{ eV}$$

I risultati di questa misura sono i più precisi al mondo (vedi Figura 5, dove sono messi a confronto i risultati della misura precedente, effettuata a KEK, e quella di DEAR; le altre 3 misure nella figura sono considerate inaffidabili) e sono stati pubblicati in Phys. Rev. Lett. 74 (2005) 212302.

Assieme alla misura dell'idrogeno kaonico DEAR ha effettuato anche misure dell'azoto kaonico, pubblicate in vari articoli di riviste internazionali (Phys. Lett. B e Nucl. Instrum. and Meth.).

La misura dell'idrogeno kaonico di DEAR ha suscitato un notevole interesse nella comunità dei fisici teorici interessati alla fisica dell'intera-

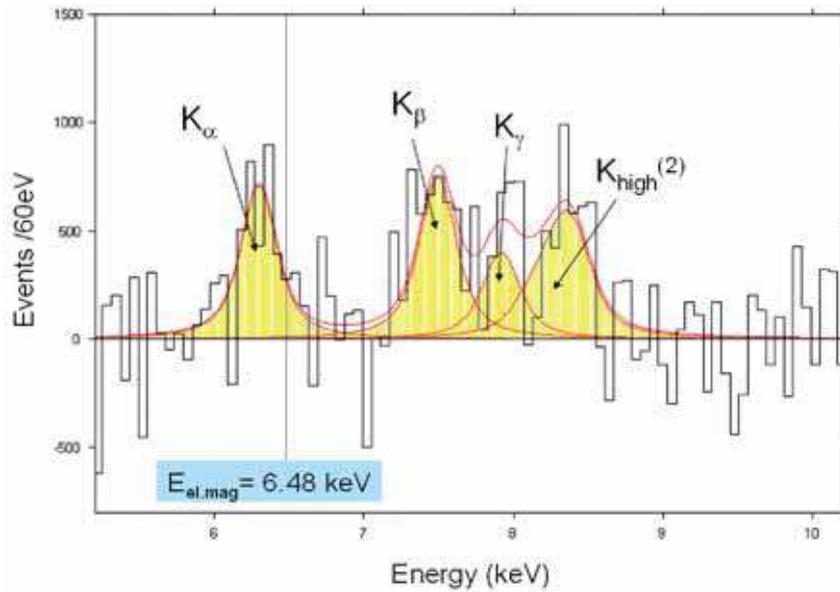


Figura 4
Lo spettro dell'idrogeno kaonico dopo la sottrazione del fondo.

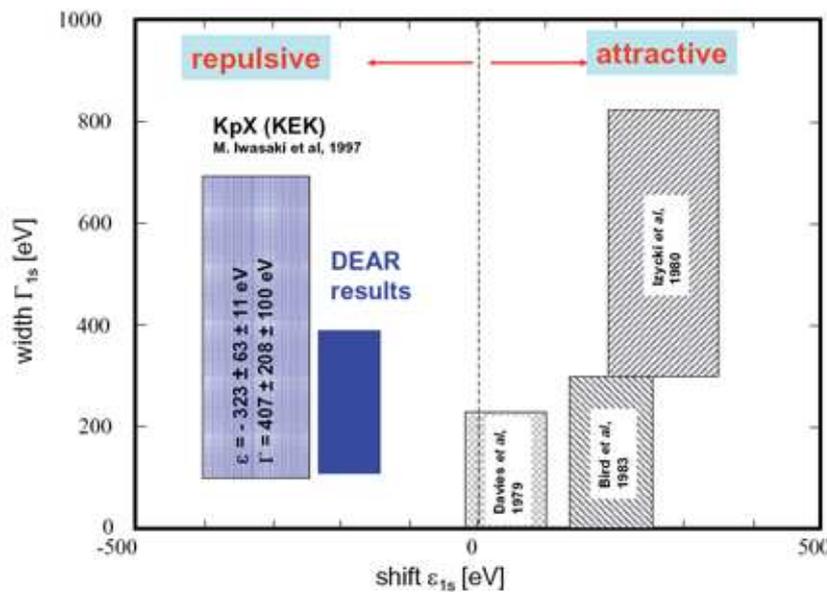


Figura 5
Il risultato della misura di DEAR a confronto con le misure precedenti.
Le misure che stanno a destra sono ad oggi considerate affette da errori e da scartare.

zione kaone-nucleone a bassa energia. Sono stati scritti più di 50 articoli teorici che prendono spunto dai risultati di DEAR.

In questo contesto è apparso evidente l'interesse di effettuare misure ancora più precise di DEAR e, soprattutto, di effettuare anche la misura del deuterio kaonico (misura più difficile di quella dell'idrogeno kaonico in quanto il segnale è più debole).

Tutto ciò ha portato la comunità dei fisici sperimentali a pensare ad una nuova strategia di misura, ad un esperimento, con un nuovo tipo di rivelatore, molto più veloce rispetto alle CCD, con le stesse caratteristiche di efficienza e risoluzione.

È nata così la collaborazione SIDDHARTA, che si appresta a proseguire la linea scientifica di misure di atomi kaonici a DAΦNE.

3 - L'esperimento SIDDHARTA – future sfide

SIDDHARTA nasce nel 2003, come la prosecuzione naturale di DEAR; la collaborazione SIDDHARTA è sostanzialmente quella di DEAR, a cui si sono aggiunti 2 nuovi Istituti (dall'Italia e dal Giappone).

Come abbiamo visto prima, la precisione della misura dell'idrogeno kaonico di DEAR è stata limitata dal rapporto segnale/fondo intorno a 1/70. Per riuscire ad effettuare una misura più precisa, obiettivo di SIDDHARTA, occorre migliorare drasticamente questo rapporto. L'idea che sta alla base di SIDDHARTA è di utilizzare nuovi rivelatori di raggi X molto veloci,

capaci di registrare il segnale delle transizioni X in coincidenza con quello generato dalla coppia K^+K^- creata a DAΦNE. In questo modo, si scartano tutti i raggi X di fondo generati da elettroni e/o positroni persi dai fasci circolanti – maggiore sorgente di fondo in DEAR.

Lo schema di SIDDHARTA è schematicamente mostrato nella Figura 6. I raggi X generati nei decadimenti dell'idrogeno kaonico sono registrati soltanto se emessi in coincidenza con la coppia di kaoni prodotto nel decadimento della ϕ , misurati con un sistema di scintillatori. È stato valutato che i fondi verranno abbattuti di almeno tre ordini di grandezza rispetto a quelli di DEAR.

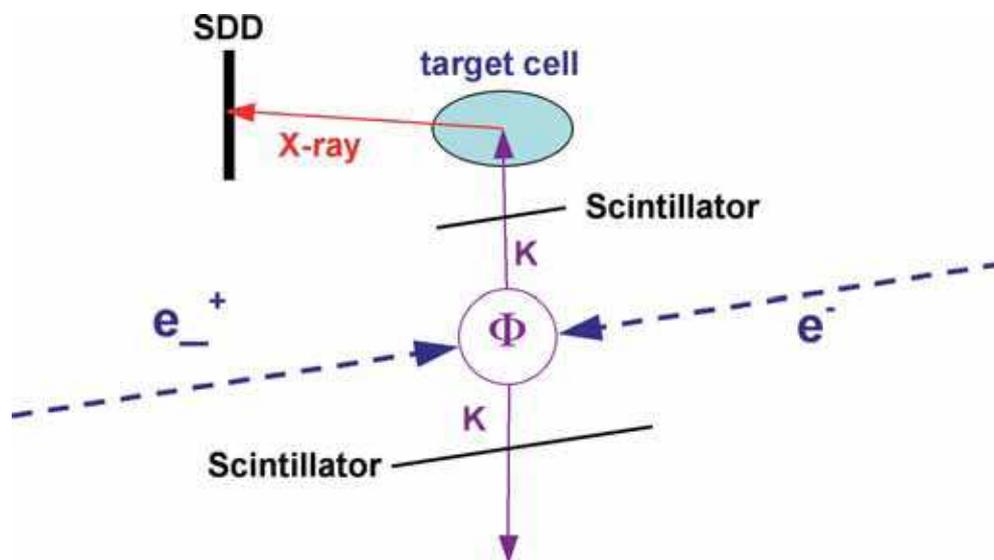


Figura 6

Schema di SIDDHARTA. Coincidenza fra il raggio X emesso dalla diseccitazione dell'atomo kaonico e la coppia K^+K^- creata dal decadimento della ϕ .

I nuovi rivelatori di raggi X utilizzati in SIDDHARTA, progettati e costruiti nell'ambito della collaborazione utilizzando anche fondi europei del progetto HadronPhysics del VI Programma Quadro della EU, sono rivelatori spettroscopici triggerabili di grande area (10 mm^2) di tipo SDD (Silicon Drift Detector), con una risoluzione di 150 eV FWHM a 6 keV e tempi di risposta dell'ordine del μs . Nella Figura 7 vengono mostrati tali rivelatori nella configurazione in cui verranno utilizzati in SIDDHARTA.

SIDDHARTA utilizzerà circa 200 rivelatori, posizionati, come in DEAR, intorno ad un bersaglio riempito con idrogeno/deuterio gassosi in condizioni criogeniche e ad alta pressione, come mostrato nella Figura 8.

Nella Figura 9 è mostrato schematicamente l'apparato SIDDHARTA così come verrà installato su DAΦNE nella seconda metà del 2008. Nella prima metà del 2008 sono già state effettuate con successo, durante il commissioning di DAΦNE, avvenute in seguito alle modifiche effettuate sulla macchina nel 2007, misure di fondi ed effettuate ottimizzazioni delle condizioni di lavoro, utilizzando un setup di test equipaggiato con 12 SDD.

Gli obiettivi di SIDDHARTA sono:

- effettuare una misura dell'idrogeno kaonico 5 - 10 volte più precisa di quella di DEAR;
- effettuare la prima misura del deuterio kaonico;
- effettuare misure dell'elio kaonico (^4He e ^3He);
- studiare la fattibilità di altri tipi di misure di atomi esotici.

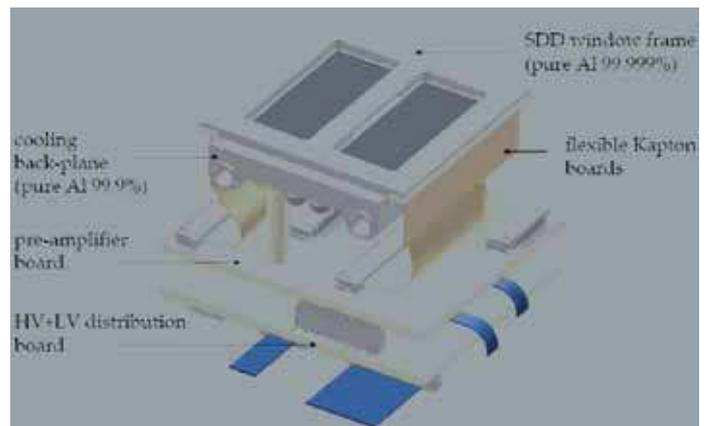


Figura 7

Sinistra: 3 rivelatori SDD assieme al cavo flessibile per la trasmissione del segnale.
 Destra: unità di 6 rivelatori SDD assieme al preamplificatore e alle strutture per l'alimentazione e la trasmissione del segnale

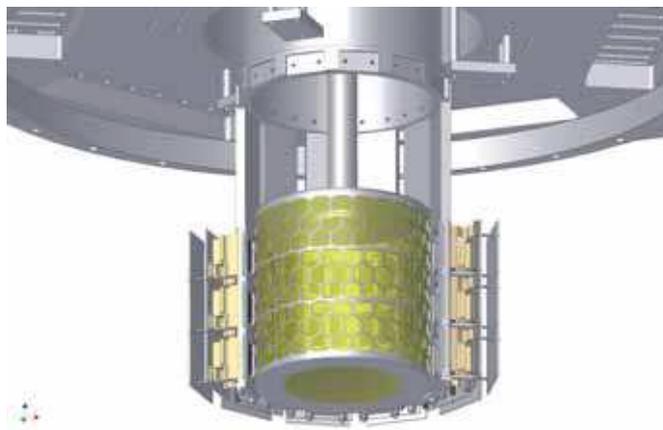


Figura 8

Bersaglio di SIDDHARTA, circondato dai rivelatori SDD.

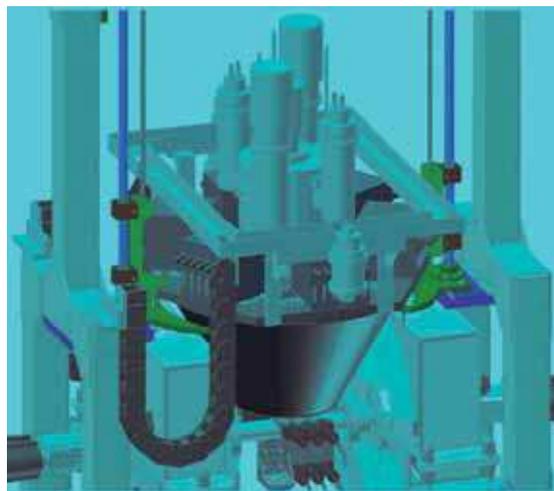


Figura 9

Apparato SIDDHARTA come verrà installato a DAΦNE

Conclusioni e prospettive

Le misure di precisione di atomi kaonici, in particolare dell'idrogeno e deuterio kaonici, giocano un ruolo fondamentale nella fisica dei sistemi "strani" a bassa energia. Negli ultimi 10 anni gli esperimenti effettuati in questo campo a DAΦNE con DEAR sono i primi al mondo come precisione e qualità dei risultati ottenuti. Mentre DEAR ha effettuato la misura più precisa dell'idrogeno kaonico, SIDDHARTA si appresta ad effettuare una misura ancor più precisa e di effettuare la prima misura del deuterio kaonico. Inoltre, nuove misu-

re (altri tipi di atomi esotici, misura di precisione della massa del kaone carico) sono in studio di fattibilità. Tale ruolo leader nel settore della fisica adronica dei sistemi strani a bassa energia è destinato a continuare nei prossimi anni.

In aggiunta, i rivelatori sviluppati sia in DEAR che in SIDDHARTA (CCD e SDD) potrebbero essere utilizzati con successo (ricadute tecnologiche) anche per:

- analisi non-distruttive nelle indagini del patrimonio artistico;
- analisi nel campo della sicurezza
- diagnostica medica.

CATALINA CURCEANU (PETRASCU)

È primo Ricercatore dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Ha svolto il dottorato di ricerca nell'ambito dell'esperimento OBELIX (CERN) nel campo della spettroscopia dei mesoni esotici. Ha coordinato il gruppo dei LNF-INFN nell'esperimento DEAR. Attualmente è responsabile nazionale dell'esperimento SIDDHARTA; spokesperson dell'esperimento VIP (LNGS) e coordinatore INFN per il progetto JRA10, dell'Iniziativa Integrata fra Infrastrutture di Ricerca (I3) "HadronPhysics" nell'ambito del VI Programma Quadro dell'EU. È coordinatore del progetto EOS-Researchers' Night 08, Support Actions FP7.

Contatti

INFN, Laboratori Nazionali di Frascati
Tel. 06 94032321 Fax 06 94032559

Via E. Fermi, 40

00044 Frascati (Roma)
E-mail: petrascu@lnf.infn.it

CARLO GUARALDO

Dirigente di Ricerca dell'Istituto Nazionale di Fisica Nucleare (INFN). Project Coordinator a livello europeo dell'Iniziativa Integrata fra Infrastrutture di Ricerca (I3) "HadronPhysics" nell'ambito del VI Programma Quadro dell'EU. Spokesperson delle collaborazioni internazionali OBELIX al CERN, DEAR e SIDDHARTA ai Laboratori di Frascati dell'INFN, Chair dell'Executive Board della collaborazione DIRAC al CERN. I suoi interessi di ricerca comprendono: fisica nucleare alle energie intermedie con fasci adronici ed elettromagnetici; spettroscopia mesonica; studio degli atomi esotici; macchine acceleratrici. È autore di circa 250 pubblicazioni e di due libri.

Contatti:

INFN, Laboratori Nazionali di Frascati
Tel: 06 9403 2318 fax 06 9403 2559

Via E. Fermi, 40

00044 Frascati (Roma)
E-mail: guaraldo@lnf.infn.it

Bibliografia essenziale:

Misura dell'azoto kaonico: G. Beer et al., "A new method to obtain a precise value of the mass of the charged kaon", Physics Letters B, Vol. 535 (1-4) (2002) pp. 52-58 e T. Ishiwatari et al., "Kaonic nitrogen X ray transition yields in a gaseous target", Phys. Lett. B593 (1-4), (2004), pag. 48

Misura dell'idrogeno kaonico: G. Beer et al., "Measurement of the Kaonic Hydrogen X-Ray Spectrum", Physical Review Letters 94, 212302 (2005).

SIDDHARTA: C. Curceanu et al., "Precision measurements of kaonic atoms at DAΦNE and future perspectives", Eur.Phys.J.A31:537-539 (2007).