

Il RICH dello spettrometro CLAS12

Attività 2017-2018

July 25, 2017

1 Introduzione

La costruzione di un RICH per lo spettrometro CLAS12 per ottenere l'identificazione di kaoni nel range di impulsi tra 3 e 8 GeV/c è stata proposta dai gruppi dell'INFN di LNF, Fe e ISS, a cui si sono poi aggiunti anche i gruppi di Ba e Ge, oltre a vari istituti internazionali di Stati Uniti, Cile, Germania, Regno Unito, Corea.

La fase di *R&D* del progetto è stata in gran parte finanziata nel corso degli anni dal DOE e dalla CSN3. Nell'estate del 2013, è stato prodotto il Technical Design Report [1] del rivelatore e l'intero progetto è stato revisionato da due comitati di valutazione del JLab con osservatori del DOE. Il primo comitato (a giugno del 2013) ha esaminato la parte tecnica del progetto, mentre il secondo (a settembre 2013) ne ha esaminato la struttura manageriale. Dopo queste due revisioni, il progetto è entrato a far parte ufficialmente dell'upgrade di CLAS12, con un ben definito profilo di spesa da parte del JLab e con dettagliate milestones per seguirne l'evoluzione. Esso prevede la costruzione di un settore del RICH, la cui installazione in Sala B è prevista nell'autunno del 2017 per l'inizio della presa dati con bersagli non polarizzati e polarizzati longitudinalmente [2]. Visto l'impegno finanziario del JLab, il progetto è stato inserito fra quelli direttamente monitorati dal DOE, con rapporti dei progressi ed incontri con rappresentanti DOE trimestrali.

Ad ottobre 2015, si è svolta una review di metà progetto di fronte a un comitato del JLab con osservatori del DOE. Durante questa review, si è esaminato lo stato e sono state riviste tutte le milestones del progetto. Al termine della review, il DOE ha rilassato la supervisione del progetto, rinunciando a richiedere il report trimestrale.

A giugno 2016, al JLab si è svolta la *Experiment Readiness Review* che ha avuto lo scopo di verificare lo stato del progetto alla luce della installazione prevista per settembre 2017. Durante la review non sono emersi rilievi di particolare importanza, tuttavia è stata richiesta una serie di documenti esplicativi delle procedure previste in conformità con le sicurezze del JLab, che hanno richiesto un grosso sforzo da parte del nostro personale tecnico e non sono ancora del tutto completati.

A settembre del 2013 il Ministero della Ricerca ha approvato il progetto premiale CLAS-MED, che prevede la costruzione di un secondo settore del RICH, necessario per gli esperimenti con il bersaglio polarizzato trasversalmente. Questi esperimenti, che richiedono il secondo settore, sono stati selezionati dal comitato scientifico del JLab (PAC41) come

quelli a più alto impatto scientifico e quindi prioritari per la sala sperimentale B. Il piano di spesa programmatico per i due settori del RICH, inviato al Presidente di CSN3, prevede di distribuire l'investimento fino al 2019, con picco di spesa di circa 400k euro negli anni 2015-17 motivato dall'urgenza degli investimenti per la realizzazione del primo settore in tempo per l'inizio della presa dati di CLAS12 ed in parte coperto dai fondi del progetto premiale CLAS-MED.

2 Attività svolta nel 2017

L'attività svolta nel 2017 (fino a giugno compreso) ha riguardato:

- l'assemblaggio della struttura meccanica del RICH al JLab;
- il completamento della produzione della quantità minima richiesta di aerogel del settore ad angolo grande e la produzione del 75% del settore a piccolo angolo;
- il completamento della produzione dell'elettronica di lettura e l'inizio dei test di caratterizzazione e calibrazione;
- la continuazione della produzione degli specchi piani e sferici;
- la realizzazione dei servizi del rivelatore (alimentazione, cooling, linea di azoto, interlock e slow control);
- lo sviluppo del software di ricostruzione, di calibrazione e di slow-control del RICH.

2.1 Meccanica

La struttura meccanica del RICH è costituita da un frame esterno in alluminio e fibra di carbonio. Su questa struttura sono installati gli elementi interni del RICH ed i pannelli di chiusura.

Nell'estate del 2016 è stato effettuato il test finale di assemblaggio del RICH presso la ditta che l'ha costruita. Terminato il test con successo, il rivelatore è stato smontato, imballato e spedito al JLab, dove è arrivato a gennaio 2017.

A marzo 2017 è iniziato l'assemblaggio del RICH in camera pulita al JLab. In questa fase, è stato necessario rivedere le procedure di assemblaggio utilizzate durante il test effettuato in Italia, per renderle compatibili con gli strumenti disponibili al JLab e con le regolamentazioni di sicurezza americane. In Fig. 1 (a sinistra) è mostrata la struttura meccanica del RICH completamente assemblata, inclusi i pannelli di chiusura. Successivamente, i pannelli di chiusura frontali e posteriori sono stati rimossi, per preparare l'installazione degli elementi interni del RICH (Fig. 1 a destra).

In parallelo, sono stati progettati una serie di strumenti per effettuare l'installazione degli elementi interni del RICH. In Fig. 2 è mostrato il telaio di supporto del pannello dell'elettronica, che sarà utilizzato durante l'assemblaggio dell'elettronica di Front-End. Sono in fase di costruzione una scatola buia da montare sul pannello di elettronica per effettuare test con i cosmici e un telaio per l'installazione dei pannelli frontali con l'aerogel. Infine è in

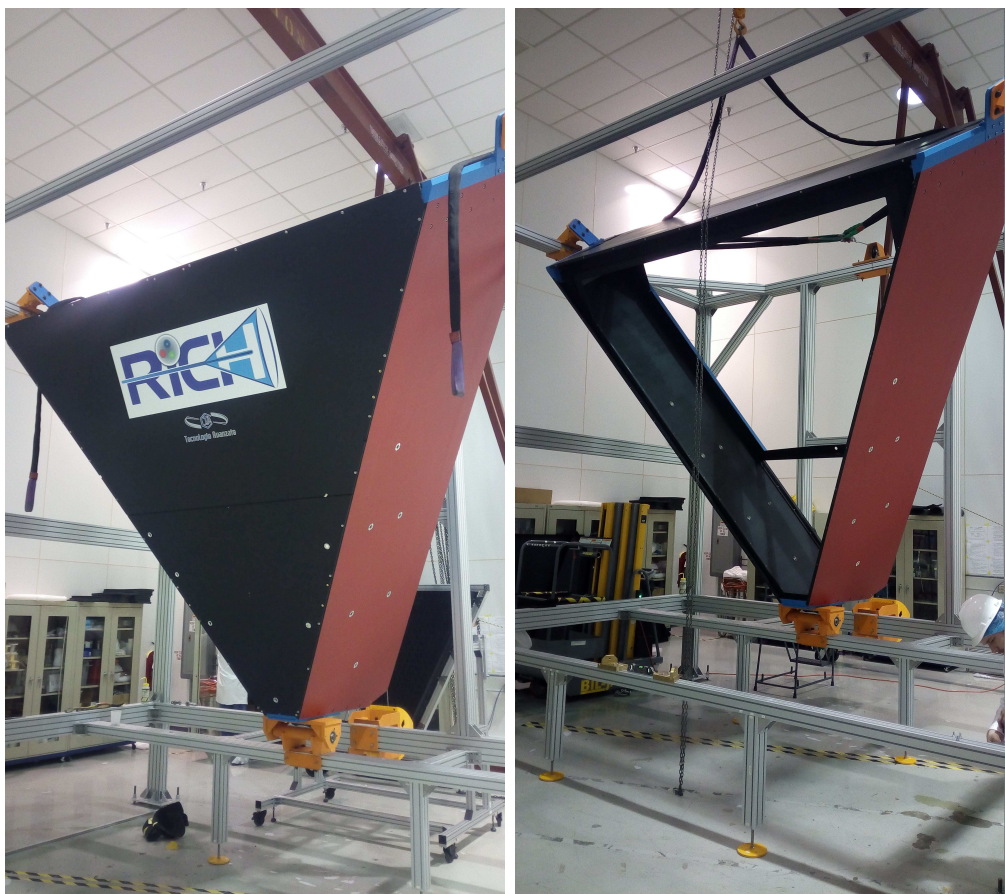


Figure 1: La struttura meccanica del RICH completamente assemblata in camera pulita al JLab (a sinistra) e dopo la rimozione dei pannelli di chiusura (a destra).

fase di completamento la progettazione degli strumenti necessari per il trasporto del RICH dalla camera pulita alla sala sperimentale e per la sua installazione in CLAS12.

2.2 Elettronica

L'elettronica del RICH comprende una scheda di adattamento per la connessione dei fotomoltiplicatori (Adapter), una scheda che contiene il chip di lettura MAROC3 ed una scheda FPGA che configura il chip MAROC3 e che si connette con il sistema di acquisizione di CLAS12. Nel corso del 2016 il JLab ha completato la produzione e la verifica di tutte le schede FPGA. A febbraio 2017 è stata completata la produzione delle schede Adapter e MAROC3. Le schede sono state tutte testate durante la produzione da personale INFN e, quando necessario, riparate in collaborazione con la ditta. In marzo le schede sono state spedite al JLab dove si sono perfezionati i controlli di qualità. Nel maggio 2017 si è avviata una campagna di caratterizzazione con un laser impulsato di ogni singola unità di lettura, composta dai tre tipi di schede citate e dai relativi fotomoltiplicatori, vedi Fig. 2 e Fig. 3. Ogni unità monta fotomoltiplicatori scelti di guadagno simile essendo l'alta tensione comune.

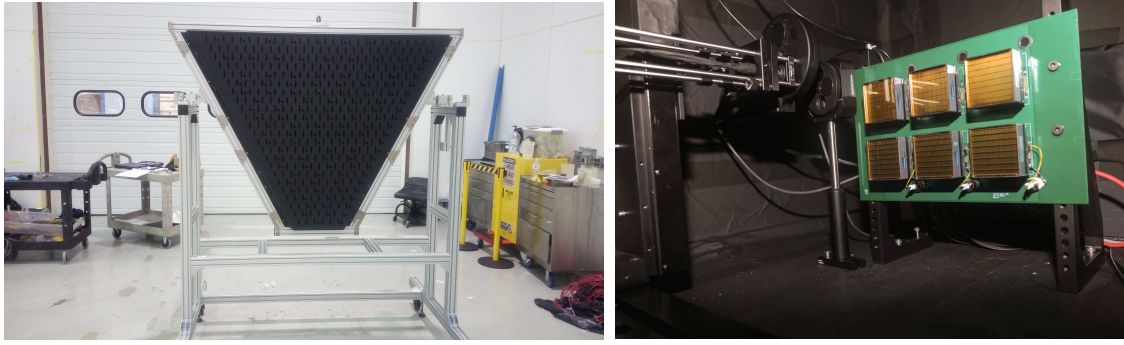


Figure 2: Il pannello dell'elettronica montato sul telaio di supporto (a sinistra). L'apparato laser di test usato per la caratterizzazione della sistema di lettura (a destra).

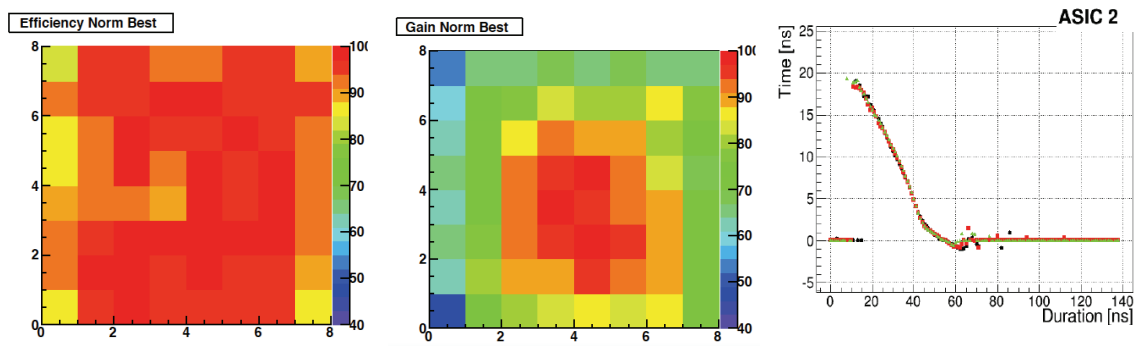


Figure 3: Esempio di mappa di efficienza (a sinistra) e guadagno (al centro) misurata al laser test. Tempo di discriminazione in funzione della durata di un segnale di singolo fotone (a destra). La curva definisce la correzione del time-walk.

La caratterizzazione ha evidenziato che:

- la misura ADC di carica, prevista solo in calibrazione, è lineare nel range di lavoro previsto, vedi Fig. 4;
- la discriminazione dei segnali è efficace già a valori di qualche percento del segnale si singolo fotone tipico, vedi Fig. 5;
- è possibile distinguere il cross-talk ottico e quello elettronico;
- la risoluzione temporale è dell'ordine del ns (come specifica) dopo la correzione degli offsets fra canali e del time-walk dovuto alla carica, vedi Fig. 6;
- la carica può essere stimata dal tempo sopra soglia degli hit digitali.
- l'efficienza di discriminazione è stabile in un ampio range di parametri (HV, soglia, guadagno MAROC3);

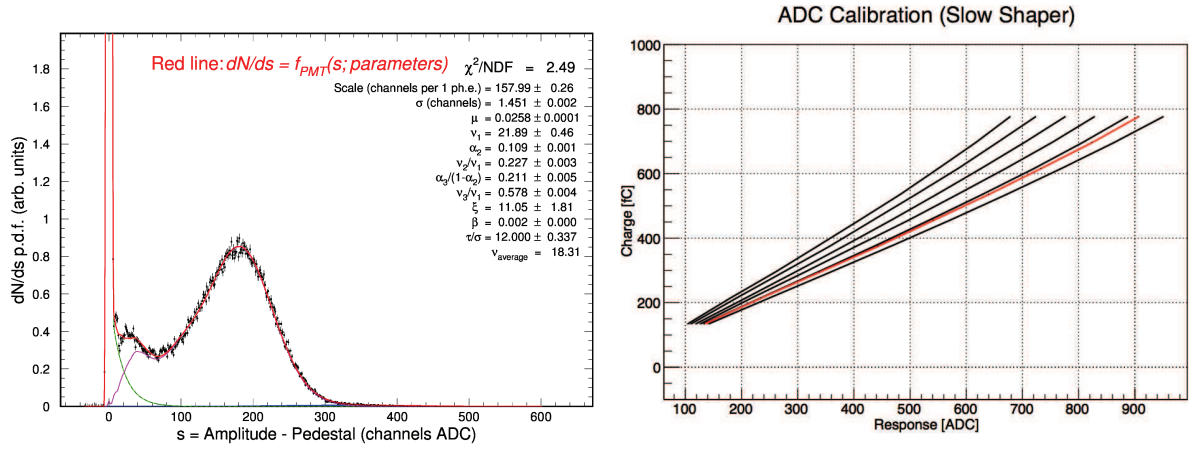


Figure 4: Tipico spettro ADC ottenuto al laser test in regime di singolo fotone (a sinistra). Risposta ADC in funzione della carica iniettata con un generatore di impulsi esterno (a destra).

In vista della costruzione del secondo settore del RICH, studi preliminari sono stati avviati per l'utilizzo di questa stessa elettronica con fotorivelatori di silicio (SiPM) [3]. Sono state realizzate diverse schede di adattamento di matrici di SiPM con l'elettronica del RICH (matrici di diverse dimensioni e di diversi produttori). I primi studi dimostrano la capacità di photon counting e di discriminazione di segnali di singolo fotone dell'elettronica del RICH accoppiata a matrici di SiPM anche a temperatura ambiente, vedi Fig. 7.

L'elettronica del RICH ha già trovato diverse applicazioni con potenziali benefici per il progetto RICH/CLASMED e le attività INFN in generale.

L'elettronica del RICH è stata scelta dal progetto del DIRC (detection of internally reflected Cherenkov light) di sala-D del JLab e verrà usata da gruppi del JLab per ricerca e sviluppo in diversi campi (fra cui PET su vegetali). L'elettronica del DIRC è stata prodotta in aprile 2017 e testata da personale INFN. Queste applicazioni supportano lo sviluppo congiunto dell'elettronica (in particolare gli investimenti del JLab) anche per il secondo settore.

L'elettronica del RICH è stata utilizzata in condizioni realistiche ad un test-beam al Fermilab, per leggere il prototipo di RICH modulare per un futuro collisore elettrone-ione (EIC). La lettura digitale di 4 fotomoltiplicatori ha permesso di isolare il segnale Cherenkov dal fondo [4]. A seguito del test l'elettronica è stata proposta come sistema di lettura comune ai prototipi di rivelatori a luce Cherenkov del consorzio finanziato dal DOE che si occupa dell'R&D per l'identificazione degli adroni ad EIC [5]. Il collisore polarizzato EIC estende la fisica del JLab alle alte energie in sinergia con il BNL (altro laboratorio americano gestito dal DOE) ed è stato recentemente inserito fra le priorità nel Long Range Plan della fisica nucleare americana.

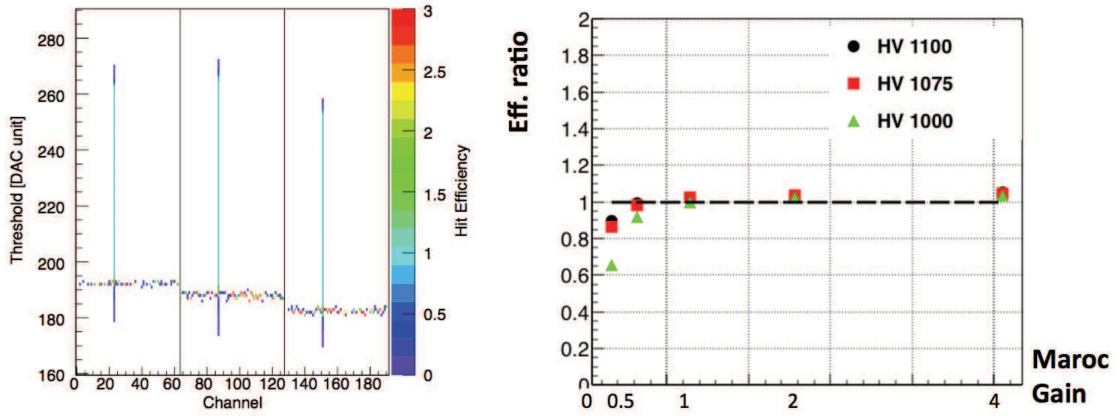


Figure 5: Impulso di test di 50 fC (corrispondente a circa un decimo del segnale tipico di singolo fotone) confrontato con il livello di piedistallo intorno a 200 DAC (a sinistra). Il segnale è iniettato in un canale per ciascuno dei tre chip che compongono la scheda. Efficienza di rivelazione del singolo fotone in funzione dell'alta tensione del fotomoltiplicatore e del guadagno del MAROC3. È visibile una saturazione in un ampio intervallo di valori.

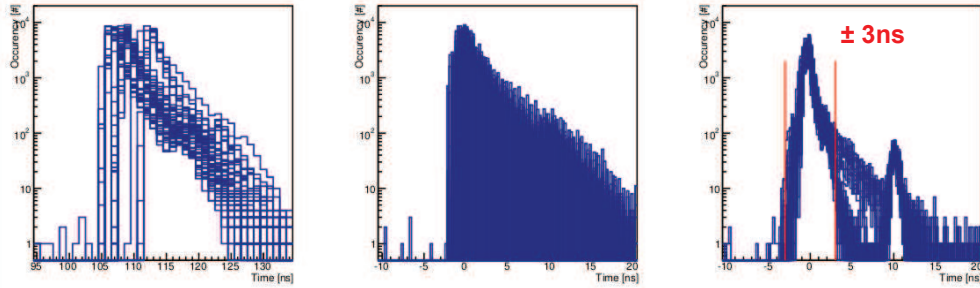


Figure 6: Distribuzione in tempo dei segnali di singolo fotone: senza correzioni (a sinistra), dopo la correzione degli offset temporali (al centro), dopo la correzione del time-walk (a destra).

2.3 Aerogel

Il radiatore di aerogel è installato nel RICH in due settori. Il settore a grande angolo è costituito da due strati di mattonelle di 3 cm di spessore, assemblate sul pannello di chiusura superiore. Il settore a piccolo angolo è formato da uno strato di 2 cm di spessore, assemblato sui due specchi piani frontali.

Durante il 2017, è stata completata la produzione della quantità minima richiesta del settore a grande angolo. Le caratteristiche ottiche delle mattonelle sono state misurate utilizzando uno spettrofotometro presso la Catholic University of America a Washington ed i risultati di queste misure sono state confrontate con i dati forniti dal produttore. Come esempio, in Fig. 8 è riportata a destra la distribuzione dei valori del parametro di trasparenza A_0 forniti dal produttore per le mattonelle del primo strato da 3 cm, con il limite minimo richiesto del 95% indicato dalla linea verticale rossa. A destra sono riportate le differenze,

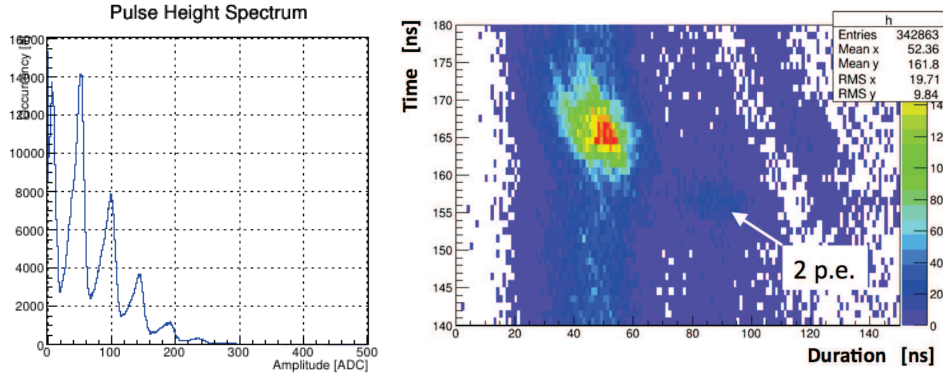


Figure 7: Photon counting con la misura ADC del MAROC as alta intensità di luce laser (a sinistra). Tempo verso durata degli hit di singolo fotone discriminati dal canale TDC del MAROC a luce laser di bassa intensità (a destra). Si possono notare i conteggi di buio, analoghi in ampiezza (durata) ai segnali di singolo fotone ma scorrelati in tempo e un piccolo numero di eventi a due fotoni.

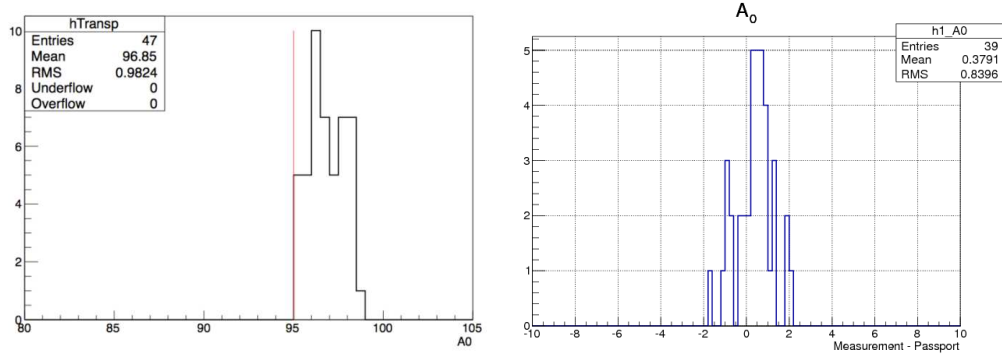


Figure 8: Distribuzione dei valori del parametro di trasparenza A_0 in percentuale fornito dal produttore (a sinistra) e differenze con i valori da noi misurati (a destra).

mattonella per mattonella, tra questi valori e i risultati delle nostra misure. Si sono evidenziate differenze tipiche minori del percento, del tutto compatibili con le variazioni locali attese.

La qualità ottica ottenuta durante la produzione si è mantenuta in linea con le prestazioni sviluppate durante la fase di R&D. La lunghezza di trasmissione media di 50 mm è superiore a quelle ottenute nel passato ad indici di rifrazione minori (con tecniche standard) e confrontabile, se non superiore, a quella ottenuta in Giappone per BELLE-II su mattonelle di spessore inferiore [6], vedi Fig. 9.

All'inizio del 2017 è stata anche avviata la produzione delle mattonelle dello strato da 2 cm di spessore. A giugno, il produttore ha completato la fabbricazione di tutte le mattonelle quadrate, che costituiscono circa il 75% della fornitura. È in corso di completamento la produzione di quelle laterali, che devono essere tagliate a forma trapezoidale o pentagonale.

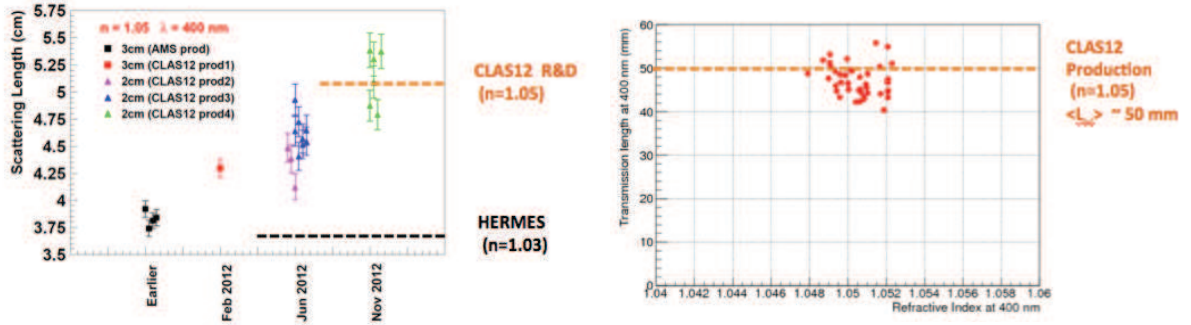


Figure 9: Miglioramento della lunghezza di trasmissione ottenuto durante la fase di R&D (a sinistra). Valori di lunghezza di trasmissione misurati su mattonelle della produzione di aerogel da 3 cm (destra).

2.4 Specchi

Il sistema focalizzante del RICH comprende una serie di specchi piani posti frontalmente davanti all'aerogel e sulle pareti laterali del RICH ed uno specchio sferico composito.

2.4.1 Specchi sferici

Lo specchio sferico, prodotto dalla ditta Composite Mirror Applications (CMA) di Tucson (USA), ha un raggio di curvatura di 2.7 m ed è segmentato in 10 sottospecchi, ciascuno con una superficie di circa 0.5 m². Ciascun sottospecchio è composto da due pelli sottili di fibra di carbonio incollate su un nido d'ape di carbonio. Gli specchi sono stati consegnati al JLab nell'estate del 2017. Le verifiche della qualità degli specchi hanno riguardato misure dimensionali effettuate con una *Coordinate Measurement Machine* (CMM) e misure di accuratezza della superficie sferica. Le verifiche dimensionali hanno confermato che gli specchi sono in accordo con i disegni CAD entro pochi mm, cioè entro le tolleranze del progetto.

La verifica dell'accuratezza della superficie sferica è stata effettuata tramite misure dello spot riflesso dallo specchio quando questo è illuminato da una sorgente puntiforme. Uno specchio perfettamente sferico, se la sorgente ed la fotocamera di rivelazione sono al centro di curvatura, produce uno spot riflesso puntiforme. L'allargamento dello spot è collegato alla risoluzione angolare dei fotoni riflessi tramite la relazione

$$\sigma_\theta = \frac{D_0}{8R} \quad (1)$$

dove R è il raggio di curvatura dello specchio e D_0 indica il diametro dello spot che contiene il 95% della luce riflessa dallo specchio. Nell'immagine di sinistra della Fig. 10 sono mostrati i valori del D_0 degli specchi, tutti intorno a 1.5 mm e ben al di sotto del limite di 2.5 mm. Muovendo la posizione di sorgente e camera lungo l'asse dello specchio, è anche possibile misurare il raggio di curvatura dello specchio, corrispondente alla posizione di minimo D_0 . I risultati, riportati nell'immagine di sinistra della Fig. 10, sono tutti entro le specifiche, indicate dalle linee orizzontali rosse.

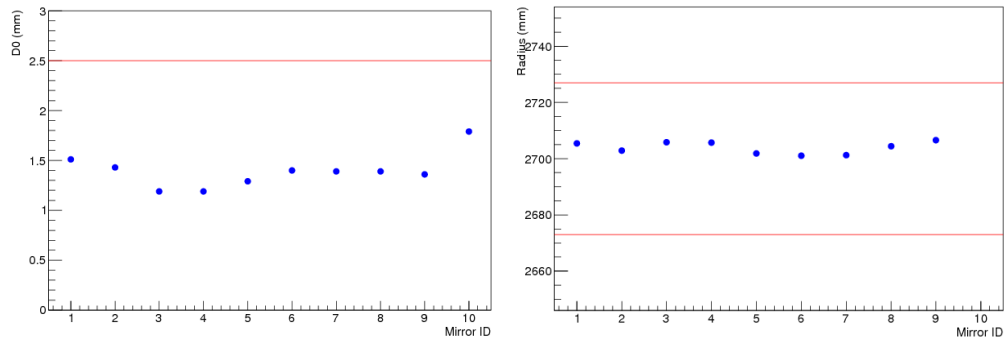


Figure 10: Valori del D_0 (snistra) e del raggio di curvatura (destra) misurati per gli specchi sferici.



Figure 11: Nove dei dieci specchi assemblati sul supporto (a sinistra) e immagini riflesse dallo specchio completo prima (in alto a destra) e dopo (in basso a destra) l'allineamento.

La ditta CMA ha anche costruito il supporto in fibra di carbonio che permette l'assemblaggio dello specchio nel RICH. Un test di assemblaggio e di allineamento degli specchi è stato effettuato nel corso della primavera del 2017 presso la ditta. Nell'immagine di sinistra della Fig. 11 sono mostrati 9 dei 10 specchi assemblati sul supporto. L'allineamento relativo degli specchi è stato effettuato ancora tramite misure di riflessione da una sorgente di luce puntiforme. Nell'immagine di destra in alto, prima dell'allineamento, ciascuno specchio riflette l'immagine della sorgente in una posizione differente. Agendo sulle viti di regolazione degli specchi, è possibile fare in modo che le 10 immagini riflesse si sovrappongano in uno spot dalle dimensioni confrontabili con un singolo specchio, come mostrato nell'immagine di destra in basso. Tutta la procedura di allineamento richiede pochi minuti.

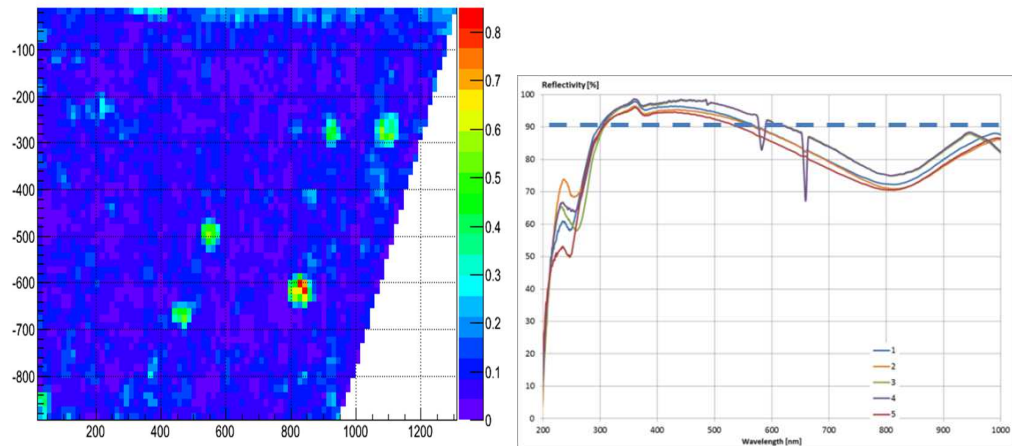


Figure 12: Misura della pendenza locale della superficie dello specchio A2L (a sinistra) e curve di riflettività misurate in 5 punti (a destra).

2.4.2 Specchi piani

Gli specchi piani sono prodotti dalla ditta MediaLario di Bosisio Parini (Lecco) con una tecnica a sandwich, usata nei telescopi, con due pelli sottili di vetro e un nucleo di nido d'ape di alluminio. Le pelli di vetro sono spesse 0.7 mm per gli specchi frontali, che sono in piena accettazione di CLAS12, e di 1.6 mm per gli specchi laterali, fuori dall'accettazione.

La caratterizzazione di questi specchi riguarda la verifica della planarità della superficie e la misura della riflettività. La planarità degli specchi viene misurata con una coordinate measuring machine (CMM). Dalle coordinate dei punti misurati sulla superficie dello specchio con precisioni dell'ordine del micron, è possibile ricostruire, punto per punto, la pendenza della superficie. Un esempio è mostrato nell'immagine di sinistra della Fig. 12 per lo specchio A2L, con la scala di colori che indica la pendenza della superficie misurata in mrad. Le misure indicano che solo una frazione di qualche percento della superficie eccede il limite di 0.3 mrad richiesto. Nell'immagine a destra della Fig. 12 sono mostrate le curve di riflettività misurate in 5 punti sulla superficie dello specchio. Si vede che la riflettività è massima nella regione di lunghezze d'onda tra 300 e 600 nm e raggiunge circa il 95% intorno a 400 nm, dove l'efficienza quantica dei fotomoltiplicatori del RICH è più alta.

La produzione degli specchi laterali è completata e la consegna al JLab verrà effettuata entro luglio 2017. Gli specchi frontali sono invece in produzione.

2.5 Servizi

Nel 2017 sono stati ordinati dal JLab i cavi e le alimentazioni del pannello elettronico ed è stato approntato il sistema a gas, comprensivo della linea di azoto e dal raffreddamento ad aria dell'elettronica, vedi Fig. 13



Figure 13: Compressore di aria secca (a sinistra) e serbatoio e linea di aria compressa (a destra).

2.6 Il software del RICH

Il software per la gestione, l'acquisizione dati, la simulazione e la ricostruzione del RICH è in corso di sviluppo.

La simulazione di CLAS12 è sviluppata in ambiente *Geant4*. La geometria del rivelatore può essere definita sia tramite volumi nativi di *Geant4* che importando i file prodotti in fase di progettazione con il CAD. Tutti gli elementi del RICH sono stati definiti tramite CAD, tranne i fotomoltiplicatori, che nel CAD non hanno una descrizione sufficientemente dettagliata. Studi sono in corso anche per verificare l'adeguatezza della descrizione dello specchio sferico tramite CAD. In Fig. 14 sono mostrati la simulazione di un pione di 8 GeV/c di impulso nel RICH (a sinistra) e la distribuzione attesa di hits nel piano di rivelazione per pioni, kaoni e protoni.

Il software di ricostruzione del RICH, già testato nelle simulazioni effettuate durante la stesura del TDR [1], è attualmente in fase di sviluppo. Dato un certo numero di tracce cariche entranti nel RICH, esso associa ad ogni traccia una possibile ipotesi di particella. Per ogni set di ipotesi, esso calcola la probabilità di avere la distribuzione di hits effettivamente rivelata dai fotomoltiplicatori. L'ipotesi con probabilità maggiore viene assunta come vera ed il rapporto tra la migliore e la seconda migliore ipotesi è utilizzato come fattore di qualità dell'evento ricostruito nel RICH.

Il software di gestione del RICH permette di monitorare, all'interno del sistema di *slow controls* di CLAS12, una serie di parametri: temperatura dell'elettronica di Front End, umidità relativa all'interno del rivelatore, pressioni e flussi dei sistemi del gas, stato degli interlocks. Esso inoltre visualizza, per i circa 25000 canali dell'elettronica di Front-End, il numero di eventi raccolti e le distribuzioni misurate dai TDC e ADC, permettendo di identificare i canali morti o quelli troppo rumorosi.

Il software di acquisizione (DAQ) e' in fase di migrazione dal protocollo TCP/IP utilizzato per collegare poche schede ad un PC desktop a quello SSP sviluppato al JLab compatibile con l'esperimento CLAS12. Il DAQ verrà adottato dal consorzio che sviluppa tecniche di

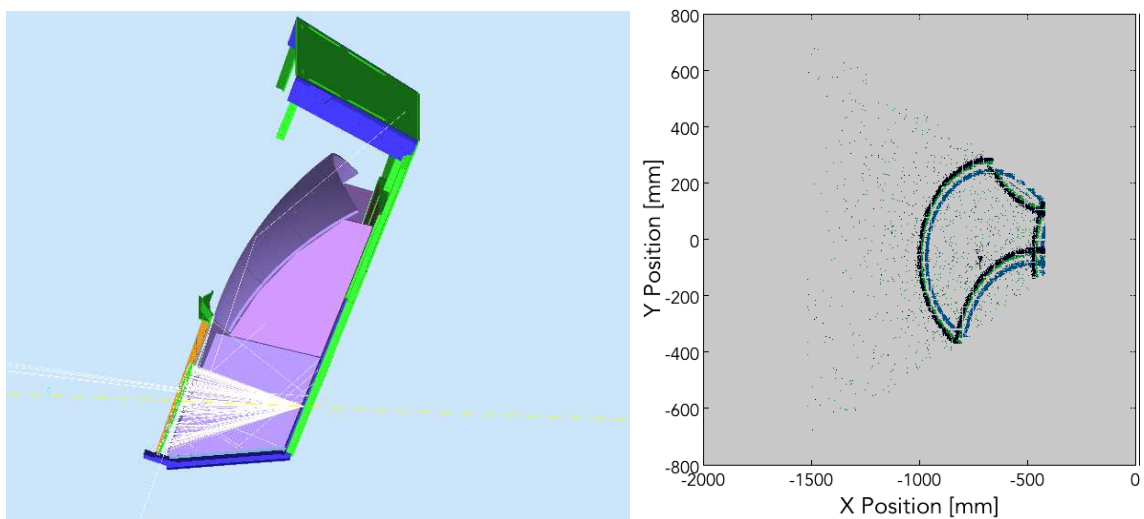


Figure 14: Simulazione di un pione di 8 GeV/c nel RICH (a sinistra) e distribuzione attesa degli hits sul piano dei fotorivelatori per pioni, kaoni e protoni.

identificazione delle particelle per un futuro Electron-Ion collider americano.

3 Attività prevista nel 2018 e richieste

Il completamento dell'assemblaggio del primo settore del RICH e la sua installazione in CLAS12 sono previsti per ottobre 2017, quando inizierà la presa dati in Sala B. L'attività del 2018, oltre al funzionamento del primo settore, prevede essenzialmente l'avvio della costruzione del secondo settore. In particolare, si inizierà la costruzione della struttura meccanica, che seguirà il disegno del primo modulo con minime modifiche, e si avvierà la produzione dell'elettronica di readout. Inoltre si proseguirà con la produzione dell'aerogel, già avviata nel 2017. Pertanto, le richieste per il 2018 sono:

- Produzione aerogel (150 keuro LNF);
- Chip di lettura (80 keuro Fe e 20 keuro RM1);

Completano le richieste fondi di consumo (materiali vari per test dei componenti del secondo modulo del RICH), trasporti e servizi per la spedizione di materiale al JLab.

4 Milestones 2018

1. completamento assemblaggio primo modulo (30 giugno 2018);
2. calibrazione primo modulo (31 dicembre 2018);

References

- [1] http://www.lnf.infn.it/~mirazita/RICH/RICH_TDR.pdf
- [2] M. Mirazita et al., *The large-area hybrid-optics RICH detector for the CLAS12 spectrometer*, NIMA 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.020>.
- [3] I. Balossino et al., *Cherenkov light imaging tests with state-of-the-art solid state photon counter for the CLAS12 RICH detector*, NIMA 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.01.074>.
- [4] C.P.Wong et al., *Modular focusing ring imaging Cherenkov detector for electron-ion collider experiments*, NIMA 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.07.001>.
- [5] A. Del Dotto et al., *Design and R&D of RICH detectors for EIC experiments*, NIMA 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.03.032>.
- [6] M. Contalbrigo et al., *Aerogel mass production for the CLAS12 RICH: Novel characterization methods and optical performance*, NIMA 2017, <http://dx.doi.org/10.1016/j.nima.2017.02.068>.