



CARDIAC IMAGER PROJECT
Mechanical Design

Adriano Pepato

INFN-Sezione di Padova, Via Marzolo 8, I – 35131 Padova, Italy

Sommario

La nota riporta i criteri principali di progetto di una camera proporzionale a multianodi a filo, sviluppata per la scintigrafia del cuore, nell'ambito di un progetto finanziato dalla Comunità Europea. I rivelatori ad alto counting rate risultano di grande interesse nell'ambito della medicina nucleare, perchè garantiscono immagini dinamiche ad alta risoluzione statistica, pur a fronte di una consistente riduzione dell'intensità della dose radiogena minima e del conseguente tempo di esposizione. E' stata sviluppata quindi una gamma camera ad elevata velocità riempita di una miscela di Xenon gas ultrapuro ed Etano; il sistema è utilizzato ad una pressione di esercizio compresa tra i 5 ed 10 bar abs. La superficie attiva è di 250x250 mm². Al fine di garantire condizioni di esercizio stabili per tempi lunghi, senza degradazione dell'efficienza, è stato progettato un sistema di purificazione in continua del gas, integrato a bordo del rivelatore. E' stato realizzato un prototipo funzionante da ormai sei mesi presso L'Ecole Superieure de Physique et Chimique di Parigi, ed un secondo prototipo è in fase di allestimento presso la INFN Sezione di Padova e sarà utilizzato presso l'Ospedale Niguarda di Milano.

Il progetto è stato sviluppato presso la Sezione INFN di Padova in collaborazione con:

- BIOSPACE INSTRUMENTS (F);
- CAEN SpA (I);
- CAEN MICRO ELECTONICS (I);
- HAMILTON & HAMILTON (UK);
- ESPCI (Ecole Superieure de Physique et Chimique) (F);
- DIPARTIMENTO DI FISICA GALILEO GALILEI (I);

CARDIAC IMAGER PROJECT

SOMMARIO

1. Generalità.
2. Specifiche tecniche di progetto.
3. Il rivelatore.
 - 3.1. Il rivelatore interno.
 - 3.1.1. Gli elettrodi di lettura.
 - 3.1.2. Il catodo e gli electron field shapers.
 - 3.1.3. I passanti segnale.
 - 3.2. La geometria del serbatoio.
 - 3.3. La scelta dei materiali.
 - 3.4. La tenuta di gas.
 - 3.5. Il sistema di purificazione e di ricircolo.
 - 3.6. L'impiantistica.
4. Serbatoio a pressione.
 - 4.1. Generalità.
 - 4.2. Il coperchio (CO).
 - 4.3. La flangia inferiore (BF).
5. Test di pressione.
6. Funzionamento apparato.
7. Programma di sviluppo.

1. GENERALITA'

Nell'anno 1996 il prof. George Charpak (Nobel Prize on Physics 1993), contattò il prof. Sandro Centro (Dipartimento di Fisica - Università di Padova), il dott. Giovanni Carugno (Sezione INFN di Padova) ed il sottoscritto, per sviluppare un progetto originale per una camera di scintigrafia del cuore, tramite l'utilizzo di sorgenti ionizzanti a bassa energia (20÷ 120 keV), con un profilo ottimizzato per energia tra 60÷ 80 keV (tantalio).

L'ipotesi progettuale iniziale prevedeva:

- l'impiego di un rivelatore del tipo a camera a multianodi a filo (MWPC: multi-wire proportional chamber, [1]);
- una elettronica di read_out che avesse un sampling time molto più elevato rispetto all'elettronica in adozione alle strumentazioni in essere (high-rate & digital electronic read-out, [2]: i problemi delle γ -camere attuali risultando principalmente il basso counting-rate);
- l'utilizzo di un gas ultrapuro ad elevata pressione (xenon gassoso a 6÷10 bar abs, purezza ordine ppb);
- una finestra "trasparente" alle radiazioni ionizzanti γ (per l'energia riportata in precedenza) risultante in una active imaging area di circa 250*250 mm²;
- un funzionamento a tempi lunghi (circa un anno), in ambiente ospedaliero, senza necessità di interventi di manutenzione.

Il progetto doveva poter essere finanziato tramite fondi di ricerca europei, nei quali si avesse un rapporto di partnership con aziende interessate allo sviluppo di un prodotto che avesse successivamente un risvolto non solo scientifico-sperimentale, ma anche commerciale. La prima fase del progetto doveva essere portata a compimento entro la fine dell'anno 1998 (intendendo per la data indicata, che un prototipo fosse in esercizio presso una struttura ospedaliera, ovvero con dei phantoms, presso un laboratorio di ricerca).

Si riportano di seguito le specifiche tecniche e fisiche richieste per il rivelatore interno e per il serbatoio a pressione, unitamente alla descrizione dettagliata del progetto proposto e la descrizione delle fasi di test e di esercizio, relativi alla parte della meccanica del sistema (rivelatore, serbatoio, impianto di purificazione, sistema alta tensione, etc.), di cui mi sono occupato, sia per la fase progettuale, che costruttiva e di test.

2. SPECIFICHE TECNICHE DI PROGETTO

La definizione delle specifiche tecniche dell'apparato in questione, sviluppatasi oltretutto da una discussione con il prof. George Charpak, tramite una attenta analisi del mercato degli apparati medicali ed attraverso una discussione approfondita con il personale medico¹, ha comportato la stesura delle specifiche di progetto riportate schematicamente di seguito:

- 1) realizzazione di due piani sensibili, tra loro ortogonali, di elettrodi indipendenti, con un passo pari ad $i=1.27$ mm (piano X) e distanti tra di loro $d=1.0$ mm (piano Y, tolleranza globale non superiore a $\Delta_d=100$ μm);
- 2) realizzazione di un piano di griglia, orientato indifferentemente rispetto ai piani sensibili ed a una distanza massima non superiore a $D=3.0$ mm;
- 3) area sensibile minima del rivelatore: 250×250 [mm^2];
- 4) finestra di interfaccia tra la sorgente di emissione (paziente) ed il rivelatore, realizzata con materiale avente una elevata trasparenza ai low energy γ photons incidenti, dell'energia succitata: riferimento $t_{h, \max}=0.5$ mm di alluminio;
- 5) gas ultrapuro (xenon) a temperatura ambiente, con implicazioni critiche sulla scelta dei materiali della struttura del rivelatore interno (il tasso di degasaggio essendo molto elevato in genere alla temperatura ambiente di esercizio);
- 6) elevata pressione interna del gas (e.g.: $6 \div 10$ bar abs). L'apparato esistente in commercio risultava lavorare ad una pressione interna di 3 bar abs ([3]: negli anni ottanta Lacey et al. svilupparono una γ -camera con una operating pressure di 3 bar abs, una position accuracy di 2.5 mm ed un counting rate di 890 kHz);
- 7) collimatore in piombo da porsi alla minima distanza dalla regione sensibile del rivelatore, potendo essere facilmente sostituibile, in funzione del tipo di analisi richiesta;
- 8) minimo dead volume nella finestra di ingresso (si chiede in sostanza di evitare fondi bombati per la finestra di tenuta della pressione interna, in quanto il volume sotteso tra l'intadosso della finestra ed il catodo, non potendo essere strumentato, non risulterebbe sensibile, riducendo il rate degli eventi utili nella ricostruzione del segnale);
- 9) dimensioni e pesi il più contenute possibili (esigenze ergonomiche dello strumento e di trasportabilità);
- 10) mobilità dell'apparato rispetto al paziente (traslazioni lungo X, Y, Z e rotazione attorno ad un asse orizzontale);
- 11) costi di produzione limitati;
- 12) possibilità di industrializzazione del prodotto;
- 13) produzione che soddisfi le norme di sicurezza (pur mancando completamente la definizione delle stesse, per il caso specifico in esame);
- 14) lunghi periodi di funzionamento senza necessità di riportare l'apparato in laboratorio (elevata tightness delle giunzioni e mantenimento del livello di purezza del gas: e.g.: pompa di ricircolo e sistema di purificazione integrato);
- 15) riferimento alle misure sperimentali condotte su di un prototipo di test [4], sviluppato in precedenza, che aveva dimostrato l'efficacia e l'efficienza del rivelatore proposto.

3. IL RIVELATORE

3.1. Il rivelatore interno

Il rivelatore interno è costituito essenzialmente da una camera a deriva in gas dove l'anodo è costituito da un piano di griglia e da due piani di lettura secondo due coordinate x ed y , perpendicolari tra loro.

3.1.1 Gli elettrodi di lettura

La tipologia degli elettrodi, le distanze nel piano e tra i piani sono riportate schematicamente in figura 1.

1. prof. Giovanni Parodi - Primario di Cardiocirurgia presso l'Ospedale Niguarda di Milano

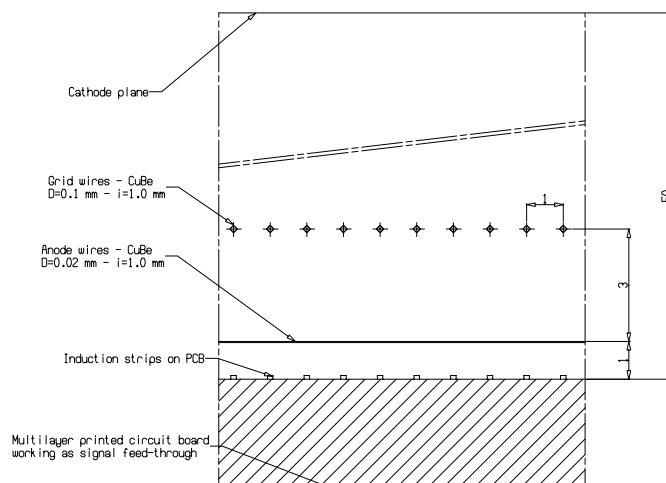


Fig. 1. Definizione del rivelatore interno: cathode, grid, sense-wire plane, induction plane.

La geometria dei piani sensibili e la dimensione del volume sensibile (distanza catodo-anodo) risulta legata necessariamente alle “specifiche della fisica” del rivelatore (counting rate, risoluzione di lettura, moltiplicazione attorno al filo, etc.) ed al soddisfacimento ottimale delle specifiche riportate in § 2.

Nel caso del rivelatore interno, la realizzazione dei piani di lettura è legata alla esigenza di moltiplicazione del segnale e alla “trasparenza” della griglia.

Si sono adottati rispettivamente fili in rame-berillio (CuBe) da $\phi=20 \mu\text{m}$ per i sense wires e da $\phi=100 \mu\text{m}$ per la griglia.

3.1.2 Il catodo e gli electron field shapers

Trattandosi di un apparato che dovrà essere in prospettiva commercializzato, se ne dovevano limitare il numero di componenti e di attività necessarie alla composizione.

Si è quindi adottata la soluzione di un unico circuito stampato realizzato su di un substrato di KAPTON[®],¹ (spessore $s=50 \mu\text{m}$), che contenesse il disegno degli electron field shapers e del catodo, da incollare alle pareti del coperchio in fibra. La catena resistiva viene poi saldata lungo uno ovvero tutti i quattro angoli della scatola, per garantire il degrading dell’alta tensione.

Di seguito si riporta in fig. 4 l’andamento del potenziale elettrico all’interno del volume di drift, per la verifica dell’entità delle distorsioni introdotte dai bordi della camera. Si può rilevare come queste risultino contenute ed accettabili, evitando di dover introdurre una struttura intermedia per la definizione del campo elettrostatico. Le prove sperimentali hanno confermato la adeguatezza della soluzione.

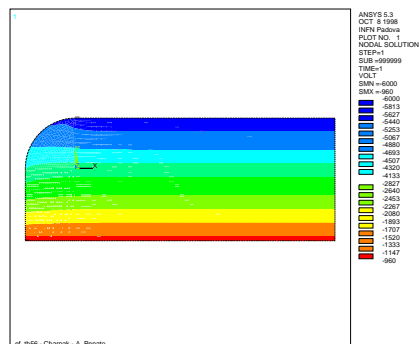


Fig. 2: Distribuzione del potenziale all’interno del campo di deriva (discretizzazione agli elementi finiti - Ansys² rel. 5.3).

1. KAPTON[®] trademark DuPont de Nemours.
2. ANSYS inc; finite elements program; Swansea Univ. rel. 5.3.

3.1.3 Il passante segnale (signal feedthrough)

Dovendosi realizzare una struttura estremamente compatta, si è deciso di saldare i fili su supporti in circuito stampato ancorati sul contorno al circuito stampato multilayers adottato per la realizzazione del piano di induzione e funzionante come signal feed-through (I_SFT chamber § appendice 1, brevetto depositato per conto dell'INFN a nome A.Pepato, etc.). Lo stesso circuito supporta gli integrati dell'elettronica di read-out, le catene resistive ed i condensatori, avendo così dei segnali già amplificati sul signal feed-through, eliminando il problema dell'high voltage e quindi dell'isolamento elettrico dei canali (numero canali sensibili: $256 \times 2 = 512$).

Il circuito I_SFT viene quindi incollato alla BF (dopo che sono stati saldati i connettori tipo SMD), mentre i due piani di fili vengono saldati ad una cornice di vetronite avente spessore $s=1$ mm, ancorata lungo il contorno al sistema. Tale soluzione permette una facile sostituzione della cornice porta_fili, in caso di rottura di un filo. I componenti SMD sono saldati sulla I_SFT e facilmente accessibili per il test elettrico e la loro eventuale sostituzione.

3.2. La geometria del serbatoio

La geometria del serbatoio è essenzialmente dettata dall'esigenza di eliminare i dead-volumes all'interno del rivelatore sensibile.

Il contenimento di una pressione interna di gas così elevata, a fronte di un budget così limitato di materiale, sono in netto contrasto con questa esigenza, in quanto l'unica soluzione percorribile risulta essere l'adozione di una membrana metallica a fondo sferico, assicurando sulla stessa l'azione di sole tensioni di tipo membranale, per le quali dimensionare lo spessore minimo utilizzabile per il contenimento della pressione interna (buon comportamento) ed esterna (pre-vuoto per purificazione sistema: comportamento critico per buckling sulla pelle di spessore così limitato). Rimangono comunque molto critiche la tenuta del gas e l'inevitabile innesco di effetti locali parassiti con elevate sollecitazioni di tipo flessionale sulla membrana.

La soluzione di tipo membranale è stata adottata nel rivelatore esistente, quale progetto di un gruppo di lavoro della NASA.

In particolare il rivelatore progettato per un pressione interna massima di esercizio di 5 bar abs, era sempre stato utilizzato ad una pressione più contenuta (3 bar abs) ed aveva (ha) problemi di leak-spilling del gas ultrapuro (xenon gas ultrapuro: ordine del ppb).

La soluzione da me proposta prevede necessariamente l'adozione di materiali non metallici (minore X_0) e la realizzazione di una finestra che lavori prevalentemente a flessione piuttosto che a trazione pura (membrana), non risultando quindi limitato il valore della pressione interna di contenimento. La soluzione quindi prevede la realizzazione di un pannello sandwich le cui pelli siano composte tramite la laminazione di tapes di fibra di carbonio ad alta resistenza (tabella 1) e la cui anima sia realizzata da una struttura a nido d'ape. Lo spessore globale della finestra, spessore delle pelli e spessore del nido d'ape, si dimensionano in funzione della pressione interna da contenere e della massima deformazione richiesta per il catodo.

Tabella 1: caratteristiche meccaniche e lunghezza media di interazione dei materiali idonei alla realizzazione della finestra trasparente ai raggi γ .

	Alluminio	Titanio	Fibra di carbonio High Resistance
R_a (tens. di snervamento) [MPa]	220	350	1800
Z (numero atomico)	13	22	6
γ (densità) [g/cm ³]	2.7	4.54	1.4
$(Z_a/Z_i)^4 * \gamma_a / \gamma_i$ a=alluminio, i=titanio e/o carbon fibre	1	0.073	42.5
$(Z_a/Z_i)^4 * R_i / R_a * \gamma_a / \gamma_i$	1	0.115	347

La prima ipotesi prevedeva l'inserimento del collimatore all'interno delle pelli in fibra di carbonio (la geometria dei collimatori essendo molto simile a quelli dei cores di honeycomb), ma si dovette rinunciare a fronte dell'esigenza di modificare il collimatore in funzione del tipo di analisi clinica da effettuare. Si valutò quindi la possibilità di adottare un core in fibra di carbonio ovvero di materiali più commerciali, quali NOMEX[®],¹ o alluminio.

Test successivi hanno dimostrato che la trasparenza era garantita anche adottando un core in alluminio ad alta resistenza (date le pressioni specifiche presenti). Si riportano di seguito in fig. 2 e 3 i disegni esecutivi dell'apparato, in particolare del coperchio e della flangia inferiore con i diversi "services" (HV, read-out electronics, sistema di purificazione, pompa di ricircolo).

Allo stesso modo si è deciso di realizzare la flangia inferiore in materiale composito adottando la tipologia a pannello sandwich, sulla quale incollare il detector ed alloggiare tutti i services. La richiesta principale, per la bottom flange (BF), risultava il contenimento della massima deformazione perpendicolare alla giacitura ($\eta_{\max} \leq 0.1$ mm), quindi delle distorsioni sulla lunghezza di drift tra i piani sense-wires ed induzione (modifica del campo elettrico E e quindi della velocità di drift).

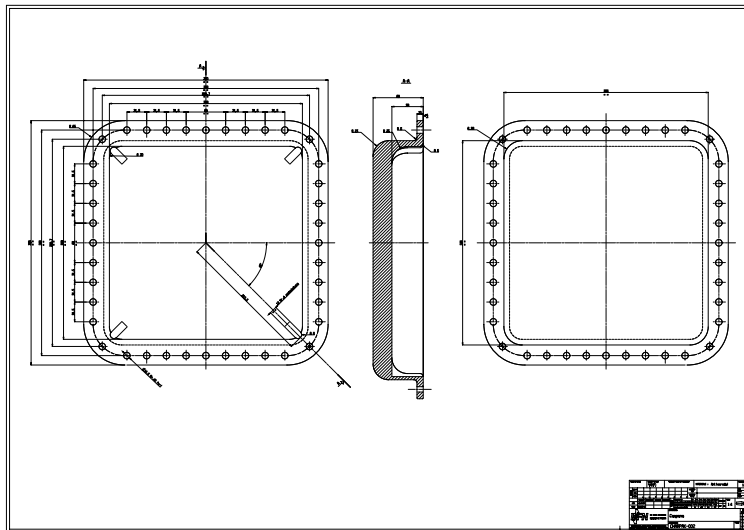


Fig. 3: Coperchio in fibra di carbonio.

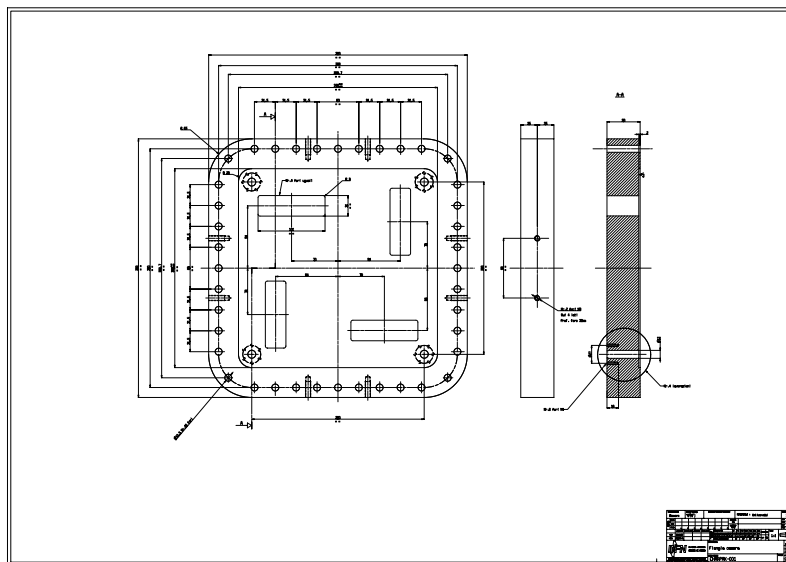


Fig. 4: Flangia inferiore in fibra di carbonio (finestre signal feed_throughs).

1. NOMEX[®] trademark DuPont de Nemours

3.3. La scelta dei materiali

Come riportato in §3.1.1., la scelta del materiale del serbatoio (elemento più critico del progetto meccanico) è intrinsecamente legata alla sua geometria.

In particolare la descrizione dei materiali adottati e le tecnologie costruttive vengono descritte in dettaglio al § 4.1.

3.4. La tenuta di gas

La scelta dello Xenon gas, come principale costituente della miscela, è legata alla efficienza di conversione dei fotoni ed alla risoluzione spaziale, mentre l'etano (10%) è usato per limitare l'effetto fotoelettrico (riduzione emissione fotoelettroni).

Il mantenimento della purezza dello xenon gas in tempi molto lunghi risulta essenziale. Il sistema di purificazione è stato testato inizialmente, per dimostrare il raggiungimento di purezze dell'ordine del ppb [5].

L'apparato richiede inoltre una maintenance semplificata durante il periodo di controllo, a fronte del personale preposto al ripristino del sistema (non è pensabile richiedere per suddetto personale una preparazione analoga al personale INFN, con nozioni tecniche così diversificate: UHV, meccanica, camere a filo, elettronica, etc.). E' stata quindi scelta una giunzione tramite CEFILAC-HELICOFLEX HN¹, ovvero dei giunti toroidali metallici elastici, realizzati tramite l'accoppiamento di un'anima in materiale plastico (VITON) ed un guscio esterno in acciaio inossidabile. Il giunto viene inserito su una flangia speciale che copia la geometria della camera (fig.5): la sostituzione risulta necessaria dopo ogni ciclo di utilizzo.

E' stata poi utilizzata con successo una soluzione a doppia tenuta con filamento in indio, tramite interposizione di una flangia metallica (ALCOA, ovvero alluminio ad alta resistenza, quale ANTICORODAL). Tale giunzione risulta più delicata nella fase di montaggio, ma molto più economica. Il livello di sensibilità ottenuta nel leak test risulta assolutamente identica, con una maggiore elasticità dimostrata del giunto tipo HELICOFFLEX, durante le diverse fasi di carico e scarico della pressione interna (0÷15 bar abs).

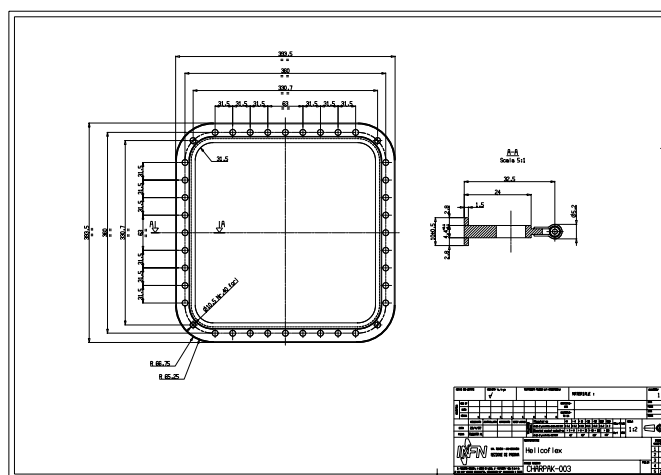


Fig. 5: Disegno della flangia speciale di supporto del giunto HELICOFLEX a doppia tenuta.

3.5. Il sistema di purificazione e di ricircolo

Le particolari condizioni di esercizio del sistema (temperatura ambiente, lungo periodo di funzionamento senza interventi di manutenzione e.g.: 12 mesi, etc.), hanno imposto di integrare a bordo dell'apparato, un impianto di purificazione e ricircolo in continua, massimizzando di conseguenza il tempo di esercizio, senza deterioramento della purezza del gas. Le dimensioni del sistema devono risultare particolarmente contenute per soddisfare le esigenze di trasportabilità dell'apparato medico e le dimensioni ergonomiche di interfaccia con il paziente.

Il sistema di purificazione risulta costituito da una cartuccia di OXYSORB^{®2} che rimuove essenzialmente le impurità elettronegative (principalmente molecole di ossigeno dallo xenon gas), valvole UHV (per facilità di montaggio sono state sostituite le connessioni tipo VCR alle connessioni CF con guarnizioni in rame), da una pompa miniaturizzata ad attuazione magnetica

1. Le Carbone-Lorraine - Cefilac Etancheite, Saint Etienne, France.
2. Messer Grisheim GmbH, Dusseldorf, Germany.

per la ricircolazione del gas in continua¹, in grado di lavorare alla pressione limite di esercizio (10 bar abs).

Si riporta di seguito una foto dell'apparato (fig. 6), nella quale si vede il sistema di purificazione, le linee di IN/OUT del gas, il passante HV per UHV, il passante segnale multicanale (brevetto INFN), etc., disposto sul fondo del BF.

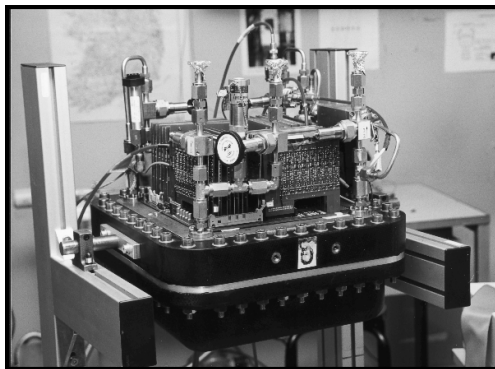


Fig. 6: Foto della porzione inferiore della camera: lay-out linee vuoto, elettronica di front-end, etc.

3.6. Impiantistica

Come riportato in precedenza è stata posta particolare cura nella definizione del lay_out di uscita della strumentazione dell'apparato, dovendosi minimizzare l'ingombro del sistema complessivo, a fronte di stringenti richieste ergonomiche.

Le uscite segnale sono state raggruppate su quattro finestre dove vengono raccolte delle schede per l'alloggiamento della elettronica di read_out. Le linee segnali non sono a tensione.

Sugli spigoli della BF sono disposte le uscite HV, IN/OUT del gas, la cartuccia dell'OXISORB, la pompa di ricircolo e la valvola di sicurezza tarata a 10 bar abs. Non è stato disposto il disco di rottura, in quanto risulta difficile garantire una adeguata tightness di questi sistemi per questi livelli di pressione interna ed in generale necessitano ingombri elevati (fig. 7).



Fig. 7: Lay out impiantistica (purificatore, HV system, safety valve, etc.).

4. SERBATOIO A PRESSIONE

4.1. Generalità

La geometria del serbatoio e le constraints dimensionali dello stesso sono già state riportate in precedenza, così come la scelta dei materiali.

In particolare, pur a fronte della mancanza di una normativa specifica (l'apparato non risulta essere un apparecchio a pressione, in quanto, da un punto di vista normativo, il prodotto del volume interno per la massima pressione di esercizio del gas, risultano inferiori ai limiti assunti dalla normativa italiana vigente per la classificazione degli apparecchi a pressione), ho scelto di adottare un pre-impregnato in fibra di carbonio, con fibre ad alta resistenza e con una resina termo-indurente (di tipo epossidico), che garantisca la massima elasticità possibile al

1. A.S.F. Industries GmbH; Dusseldorf, Germany.

prodotto polimerizzato (limitazione di collassi strutturali per rotture di tipo fragile, tipiche di questi materiali ed attribuibili a shock quali urti accidentali, variazioni rapide del carico interno applicato, fessurazioni non contenute, etc.).

In particolare sono state individuate due distinte categorie di prodotto:

Hexcel¹:

UD (unidirezionale in carbonio HR high resistance):

AS4C/3501-6S RC7 AW100 (densità $\gamma=100$ gr/m²).

PW (tessuto plain weave) in carbonio HR

C193PW/3501-6S RC42 (densità $\gamma=195$ gr/m²).

Seal²:

HM 40 B - 100 REC (densità 156 γ =gr/m²) (tessuto unidirezionale ad alta resistenza).

HM 55 J - 100 REM (densità $\gamma=167$ gr/m²) (tessuto unidirezionale ad alta resistenza).

Carbonio CC 160 ET 441 (densità $\gamma=214$ gr/m²) (tessuto plain weave ad alta resistenza).

Tabella 2: Caratteristiche meccaniche dei materiali adottati.

Materiale	densità [g/m ²]	contenuto di resina [%]	spessore [mm]	resistenza a trazione [MPa]	Modulo elastico [GPa]	resistenza a flessione [MPa]	Modulo elastico [GPa]	ILSS [MPa]
AS4C	100	32%±3	0.1±15%	1400	280	1950	200	75
C193PW	195±4%	40%±3	0.19±15%	720	81	770	75	89
HM 40B	156±4%	32%±3	0.14±15%	1200	230	1800	200	75
HM 55 J	167±4%	40%±3	0.11±15%	2080	310	2010	260	60
CC160ET	2.14±4%	43±3%	0.21±15%	655	76	724	69	83

4.2. Coperchio (COV)

La geometria del coperchio risulta particolarmente complessa, relativamente alle tipologie dei manufatti in composito, in quanto gli spessori delle diverse parti risultano estremamente diversificati. In particolare, la superficie della finestra trasparente ai raggi γ , risulta costituita da una sovrapposizione di tapes unidirezionali lungo X e lungo Y, alternate con tessuti a $\pm 45^\circ$, di volta in volta ruotati di 90° tra loro, sino ad ottenere uno spessore totale di 2 mm.

Il core del sandwich è realizzato con honeycomb in alluminio (Hexcel 5052 Alloy Hexagonal Aluminum Honeycomb, 1/8-5052-.0025), non risultando significativamente più elevata la trasparenza nel caso di honeycomb in fibra di carbonio (estremamente oneroso economicamente), ovvero in NOMEX[®] (essenzialmente carta di aramide, impregnata con resine fenoliche): si è adottato per il coperchio lo stesso spessore necessario per il dimensionamento della BF (fig. 8).

Sono inoltre stati adottati degli inserti in STESALIT^{®3}, laddove era necessario realizzare la transizione degli spessori, ovvero garantire una rigidità molto elevata (flangia bullonata per la tenuta di UHV). Il dimensionamento della bulloneria ed il passo tra le viti è condizionato dalla tenuta UHV in condizione di pressione interna massima (10 bar abs).

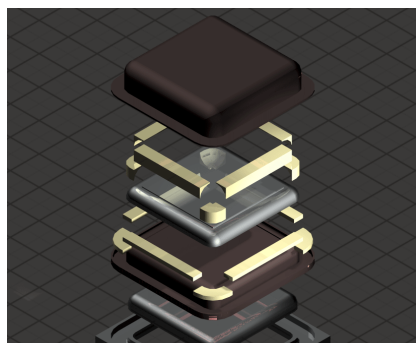


Fig. 8: Vista schematica esplosa dei principali componenti del coperchio in fibra di carbonio.

Le zone di transizione del core in honeycomb (attorno alla finestra trasparente), in corrispondenza al massimo sforzo di taglio, sono state rinforzate con schiume sintattiche

1. HEXCEL, honeycomb & carbon fibre tapes producer, HERCULES, USA.
2. SEAL, carbon fibre tapes revendor MI-I
3. STESALIT AG; Advanced Composite Systems Zullwil, Basel, CH

(essenzialmente resina epossidica caricata con micro-sfere di vetro, al fine di elevare la resistenza specifica a taglio e a compressione). La composizione del manufatto richiede diverse fasi di lavorazione che non vengono descritte.

In particolare, il primo prototipo è stato realizzato presso la ditta MONFRINI S.p.A., mentre il successivo è stato interamente prodotto all'interno del Laboratorio di Materiali Compositi, presso il Laboratorio LAE della Sezione INFN di Padova (c/o LNL; http://ospd03.pd.infn.it/www_cad/alice/LNL_lab.html).

Si riportano di seguito le verifiche di resistenza e di deformazione agli elementi finiti (fig. 9 e 10) ed il risultato delle prove sperimentali (fig. 11), unitamente alla foto del set_up di misura (fig. 12).

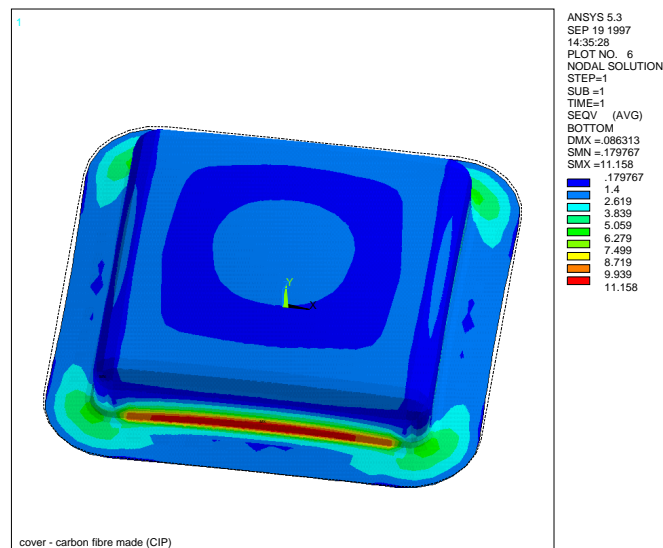


Fig. 9: Stato di tensione massima equivalente, secondo Tsai-Wu.

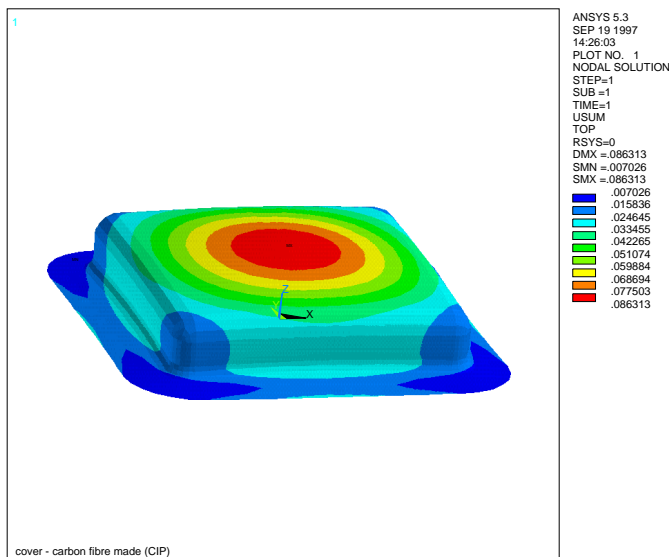


Fig. 10: Stato di deformazione massima (USUM).

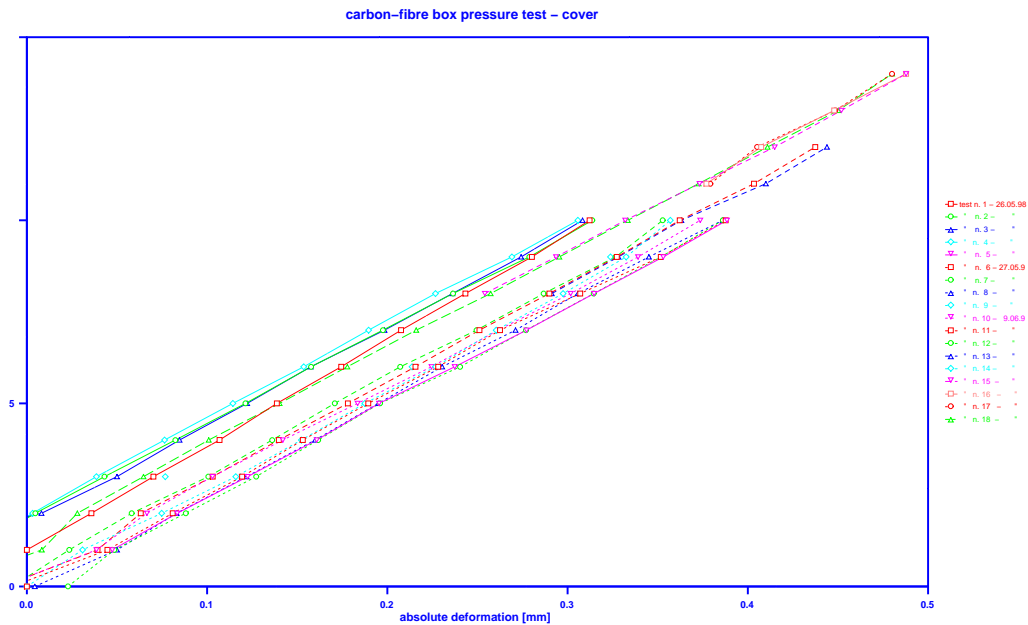


Fig. 11: Andamento della deformazione massima rilevata nel centro ideale della finestra trasparente, al variare della pressione massima interna.

La differenza tra i risultati della simulazione agli elementi finiti e le prove sperimentali risulta accettabile (circa 30%), per analisi con materiali compositi, legata in genere alla tolleranza nelle proprietà meccaniche dei materiali, nella variazione della geometria rispetto alle condizioni nominali di progetto ed alla particolare complessità del modello in esame .

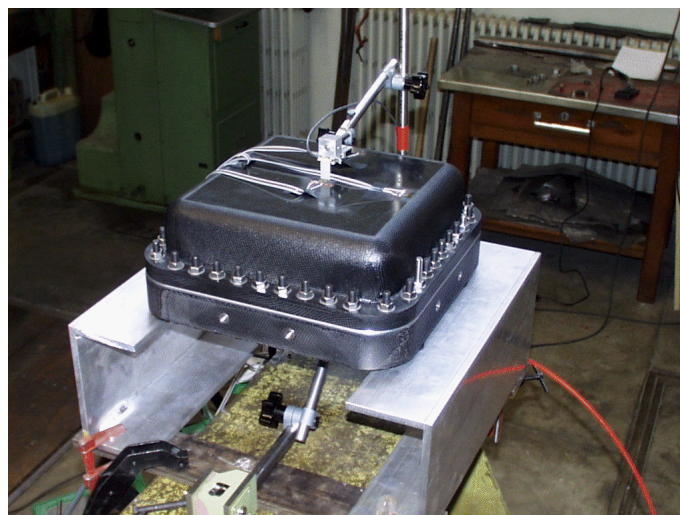


Fig. 12: Set_up misura deformazioni massime (BF e COV) tramite comparatori centesimali e delle tensioni tramite strain gauges (rosette a 120-HBM¹). L'acquisizione è realizzata tramite un sistema DAQ multicanale della HBM.

4.3. Flangia inferiore (BF)

La flangia inferiore deve garantire una deformabilità massima in condizioni di pressione max interna di gas, molto contenuta, oltre ad offrire una idonea disposizione delle uscite dei canali di elettronica di read_out e delle linee di purificazione, HV, etc.

Particolare attenzione è stata posta nella realizzazione del dettaglio della flangia per il passante gas, HV etc. (quattro passanti sugli spigoli) e delle finestre per i passanti segnale.

1. HBM, strain gauge revendor, Germany.

Risultando limitato lo spessore totale dell'apparato e critica la deformazione massima sotto carico, si è adottato un core di hc di alluminio di spessore $t_c=40$ mm e le pelli in fibra di carbonio, hanno uno spessore totale di circa 5 mm. La BF accoglie anche le sedi per le sospensioni del collimatore e per il brandeggio dell'intero sistema (fig. 13).

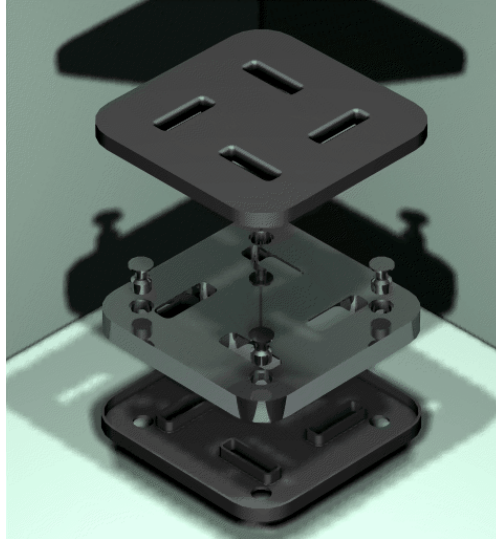


Fig. 13: Vista schematica dei componenti principali della flangia inferiore in composito.

Il core di hc è stato rinforzato con schiume sintattiche lungo il perimetro dove sono alloggiati le viti di serraggio ed in corrispondenza alle finestre per il passaggio dei segnali.

Si riportano di seguito le verifiche agli elementi finiti della BF (fig. 14 e 15), nonché i risultati delle prove sperimentali (fig. 16) ed un foto dell'apparato interno (fig. 17).

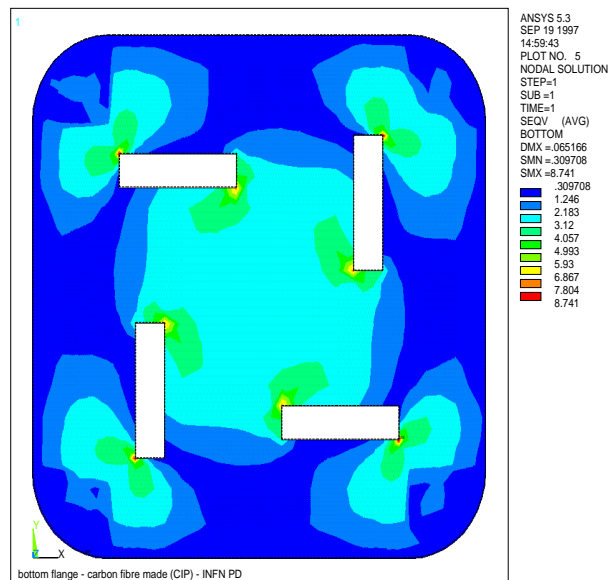


Fig. 14: Stato di tensione massima equivalente, secondo Tsai-Wu.

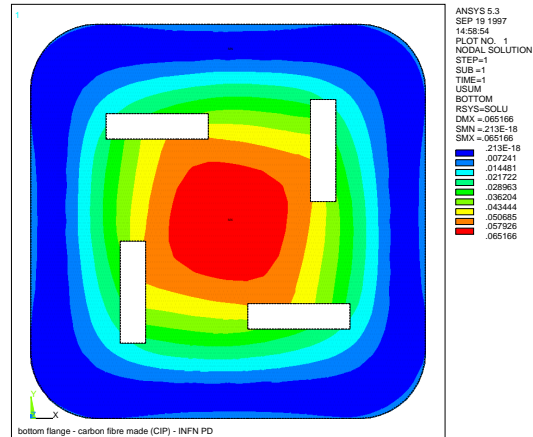


Fig. 15: Stato di deformazione massima (USUM).

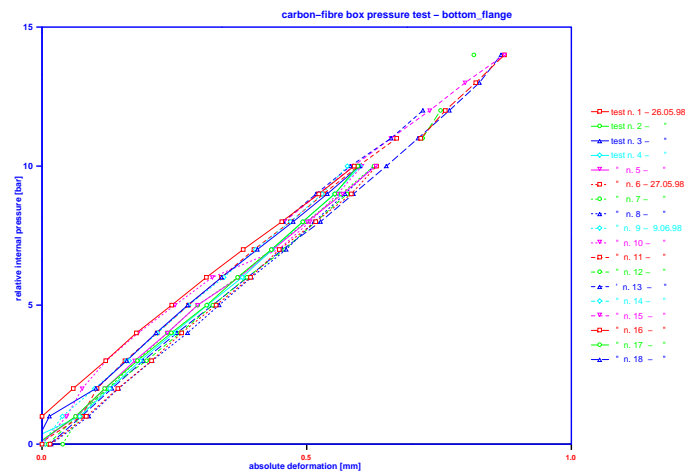


Fig. 16: Andamento della deformazione massima rilevata nel centro ideale della BF, al variare della pressione interna massima.

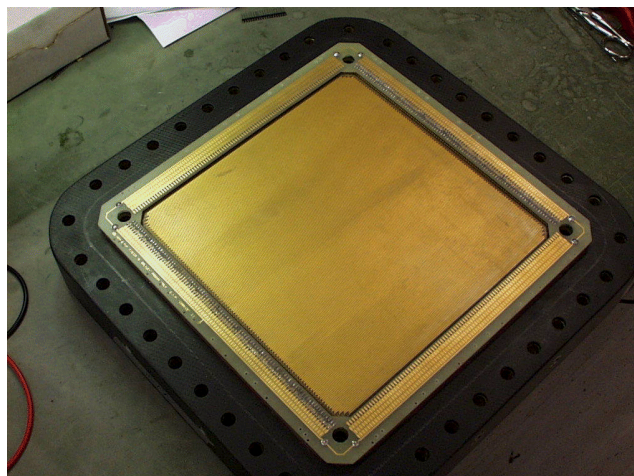


Fig. 17: Foto dell'apparato interno della camera.

5. TEST DI PRESSIONE

L'apparato in esame è stato collaudato sottoponendolo a dei cicli di messa in pressione di gas entro un regime di pressione $p=0\div 15$ bar abs (ciclo di pompaggio, realizzato tramite una pompa primaria e di messa in pressione tramite una bombola di aria compressa).

La misura delle deformazioni ortogonali alla giacitura della finestra e della flangia

inferiore, è stata ottenuta tramite la lettura remota di trasduttori centesimali, mentre lo stato di tensione è stato ricostruito tramite l'applicazione di strain gauges a rosetta ($\pm 120^\circ$, HBM¹), disposte nelle zone ritenute più significative ai fini del controllo dello stato di tensione indotto, in particolare, in mezzeria della BF e del CO, in prossimità delle finestre passanti-elettronica del BF ed in prossimità della zona di transizione CO (estremità della finestra trasparente).

La acquisizione dei segnali indotti è stata condotta nei tests del primo prototipo, tramite un centro di acquisizione multicanale HBM, in adozione presso il Dipartimento di Ingegneria Strutturale dell'Università di Padova. Per il prototipo da noi prodotto, all'interno del succitato Laboratorio di Materiali Compositi, è stato invece acquistato un centro di acquisizione (Spider 8-HBM Hottlinger), avente quattro canali di acquisizione per strain gauges e quattro canali di acquisizione per termoresistenze, trasduttori di pressione e di flusso (frequenza acquisizione 4800 Hz). Il Servizio Elettronico della Sezione di Padova¹, ha poi realizzato un sistema di multiplexing a 32 canali, per ciascun canale analogico di acquisizione, essendo le misure in oggetto di tipo quasi statico. Vi è inoltre un canale digitale, utilizzato per l'indicizzazione dei dati acquisiti.

Nella ricostruzione dello stato di tensione risulta comunque molto difficile correlare i dati sperimentali con i dati di calcolo, in particolare per:

- difficoltà nel posizionamento corretto (contatto ottimale con la superficie ed orientamento corretto della rosetta rispetto all'orientamento preferenziale delle fibre);
- elevata anisotropia intrinseca dei materiali compositi (unidirezionali e tessuti), unitamente alla inevitabile disomogeneità del posizionamento dei diversi strati di materiale;
- assenza di espressioni analitiche di correlazione tensione-deformazione, per sistemi di strain gauges a rosetta, per il caso di anisotropia dei materiali misurati (assunzione di modulo di elasticità omogeneo lungo tutte le direzioni di misura).

Il controllo dei dati sperimentali risulta quindi molto complesso e laborioso e deve essere in genere suffragato da dati sperimentali, realizzati su specimens standard ottenuti con laminazioni il più possibile prossime in termini di materiale e di orientamento delle fibre, rispetto al manufatto realizzato. Risulta evidente che la difformità delle misure dai casi realmente realizzati risulta davvero elevata e comunque non contenibile o eludibile.

Si riportano di seguito le espressioni analitiche adottate e le conclusioni ottenute.

La variazione della resistenza (R) per unità di allungamento (ϵ) è una proprietà intrinseca del materiale adottato nella realizzazione della strain gauge ed è quindi definita dal costruttore (sensibilità), avendo:

$$SA = \frac{\frac{\Delta R}{R}}{\epsilon} = 1 + 2\nu + \frac{\rho}{\epsilon}$$

dove ρ rappresenta la resistività del materiale adottato.

La deformazione lungo gli assi principali risulta:

$$\sigma_1 = \frac{1}{2}(\sigma_x + \sigma_y) + \sqrt{\frac{1}{4}[(\sigma_x - \sigma_y)^2] + \tau_{xy}^2}$$

$$\left. \begin{matrix} \epsilon_1 \\ \epsilon_2 \end{matrix} \right\} = \frac{1}{2}(\epsilon_x + \epsilon_y) \pm \left(\frac{1}{2} \sqrt{\gamma_{xy}^2 + (\epsilon_x - \epsilon_y)^2} \right)$$

6. FUNZIONAMENTO APPARATO

L'apparato risulta essere in funzione a Parigi, presso l'Ecole de Phisque et Chimique, da oramai diversi mesi. La calibrazione viene attualmente ottenuta adottando dei phantoms del cuore, per i quali si hanno già dei dati sperimentali ottenuti con apparati di diversa tecnologia (fig. 18 e fig. 19).

A tutt'oggi il rivelatore ha funzionato in maniera molto soddisfacente, sia in termini di

1. Sig. Sandro Martini, Servizio Officina Elettronica, INFN, Sezione di Padova.

mantenimento del regime di pressione (senza incidente alcuno), che della purezza (grazie all'efficacia del ricircolo e purificazione in continua dello xenon gas ultrapuro), in totale assenza di leaks nella camera.

Il detector interno (camere a fili e circuiti passanti multicanale) non presenta anomalie (scariche elettriche per HV protections inadeguate) e la posizione dei fili risulta nelle tolleranze fissate inizialmente.

Il nuovo detector ormai ultimato dovrà invece essere consegnato all'Ospedale Niguarda di Milano e ragionevolmente dovrebbe iniziare a misurare durante la prossima primavera.

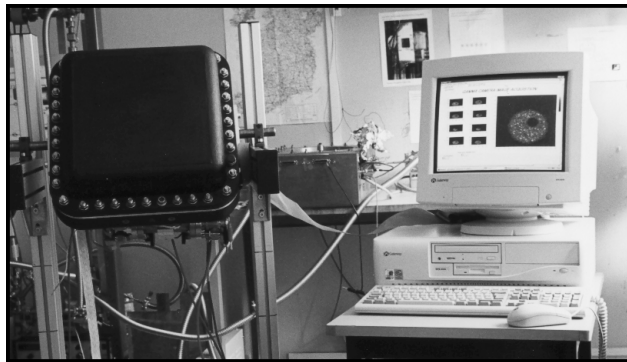


Fig. 18: Set up di misura con phantoms presso l'Ecole de Phisique et Chimique di Parigi.

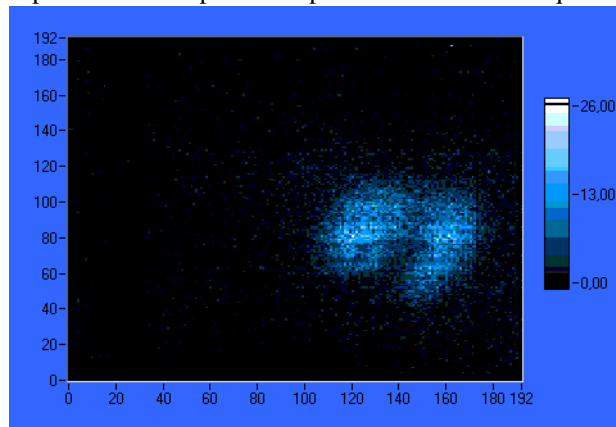


Fig. 19: Immagine digitalizzata del phantom del cuore.

7. PROGRAMMA DI SVILUPPO

La fase iniziale del progetto finanziato dalla Comunità Europea è stata completata con il soddisfacimento di tutti gli impegni presi nella proposta di esperimento ed è stato proposto un progetto per una ulteriore fase di sviluppo dello stesso, che relativamente alla parte della meccanica, ha avuto come elementi preminenti la ridefinizione del progetto considerandone la commercializzazione e la industrializzazione del prodotto ed inoltre, la richiesta di uno studio più accurato della definizione degli standard e delle procedure di certificazione delle fasi di produzione e di tests, in materia di sicurezza.

Non esistono a tutt'oggi normative di riferimento per apparati simili e risulta estremamente critica l'utilizzazione dello stesso, per le evidenti implicazioni in termini di sicurezza.

Una più corretta definizione delle procedure di certificazione risulta inoltre essenziale per garantire una auspicabile commercializzazione del prodotto stesso.

8. RINGRAZIAMENTI

Si ringraziano il sig. Turcato Matteo per il rilevante supporto fornito in fase di realizzazione delle diverse fasi prototipali e di progetto esecutivo dell'apparato, nonchè per la qualità offerta nella realizzazione dei disegni in rendering presentati nelle diverse fasi di presentazione e promozione dell'apparato (EXPO 97 a Tolosa, etc.).

Si ringraziano inoltre i sig. Maniero Denis e Mazzaro Daniele, che hanno realizzato presso il Laboratorio di Materiali Compositi della Sezione di Padova, il secondo prototipo, che dovrà

essere sperimentato presso l'Ospedale Niguarda di Milano.

9. REFERENZE

- [1] *G. Charpak et al.* Nucl. Instrum. Methods 62 (1968) 235.
- [2] *K. Nichols et al.* J. Nucl. Card. 4:1 (1997) 61.
- [3] *J. L. Lacey et al.* J. Nucl. Med. 25 (1984) 1003.
- [4] *G. Charpak et al.* CERN-LHC/97-02 (EET).
- [5] *J.E. Bateman, M. W. Waters and R. E. Jones,* Nucl. Instrum. Methods 135 (1976) 235.
- [6] *A. Pepato et al.* A high-speed, pressurized multi-wire camera for dynamic imaging in nuclear medicine (accepted for publication) NIM, 1999.