

Capitolo 6

Misura del segnale acustico prodotto in acqua da un fascio di protoni (Test Beam)

Risultati dell'esperimento svolto a ITEP

Mosca (Russia) – 14-15 Giugno 2004

Il Capitolo 6 descrive le misure svolte a ITEP (Institute of Theoretical and Experimental Physics), nel periodo 14-15 Giugno 2004. Le misure sono state eseguite utilizzando un fascio di protoni di intensità compresa tra $5 \cdot 10^8$ e $3 \cdot 10^{10}$ p/cycle e di energia 100 MeV e 200 MeV. I risultati dell'analisi mostrano che l'interazione di protoni in acqua produce, effettivamente, un segnale acustico rivelabile; si identifica una dipendenza funzionale tra le caratteristiche del segnale e i parametri del fascio. In particolare, si verifica una dipendenza lineare tra l'ampiezza del segnale misurato dagli idrofoni e il numero di protoni interagenti in acqua. I risultati sperimentali, inoltre, suggeriscono un modello per la descrizione del fascio che consente di interpretare più correttamente i dati acquisiti. L'analisi in frequenza individua il contenuto spettrale dei segnali e fornisce indicazioni per futuri studi e approfondimenti (Capitolo 7).

L' ITEP, Institute of Theoretical and Experimental Physics, (www.itep.ru) è ospitato in una villa del 18esimo secolo, circondata da un vasto parco e da numerosi edifici minori. Esso è sede di numerose attività di ricerca scientifica in diversi settori della fisica, sia teorica che applicata.



Figura 6.1 ITEP – edificio principale.

Presso il Dipartimento di Fisica Medica di ITEP (Medical Physics Department, <http://tom1.itep.ru/index.html>) si praticano cure oncologiche con la tecnica della “prototerapia”, cioè radioterapia delle cellule tumorali con fascio di protoni; i protoni sono accelerati per mezzo di un acceleratore circolare (protosincrotrone)¹.

¹ Alcune brevi notizie sulla storia e le applicazioni del protosincrotrone U10 di ITEP possono essere trovate su <http://www.cerncourier.com/main/article/42/1/3>.
(“ U10 Proton Synchrotron Reaches 40 ” // CERN Cour. – 2002 – v. 42, n. 1, p. 5)

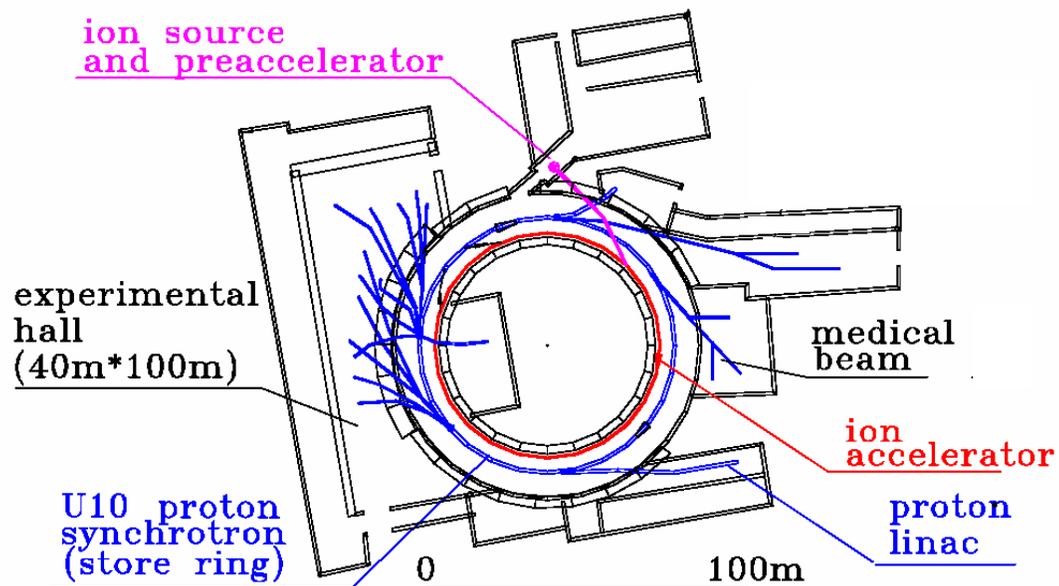


Figura 6.2 Schema del sincrotrone di ITEP [KAT98].

I vantaggi dell'utilizzo di protoni nella terapia tumorale sono legati al meccanismo di deposizione di energia delle particelle cariche nell'attraversare uno strato di materia. In linea di principio, la cura ideale è quella che colpisce il tumore e distrugge le cellule tumorali, arrecando il minor danno possibile alle cellule sane. Questo si traduce nel concentrare la dose di radiazione in corrispondenza del carcinoma, limitando la quantità di radiazione che si deposita altrove nel corpo del paziente [PRE97].

La Figura 6.3 mostra le curve “dose-profondità” per diversi tipi di radiazione comunemente utilizzati in radioterapia. Come si vede, rispetto ad elettroni, fotoni e neutroni, i protoni realizzano lo scopo: piccole quantità di radiazione sono rilasciate in superficie (“plateau” della curva di Figura 6.3); il massimo della dose di radiazione è depositato in profondità, al termine del percorso della particella, in corrispondenza del cosiddetto “picco di Bragg”. Come conseguenza di questo meccanismo di deposizione, l’energia inizialmente posseduta dal fascio di protoni è ben localizzata in un piccolo volume di materia.

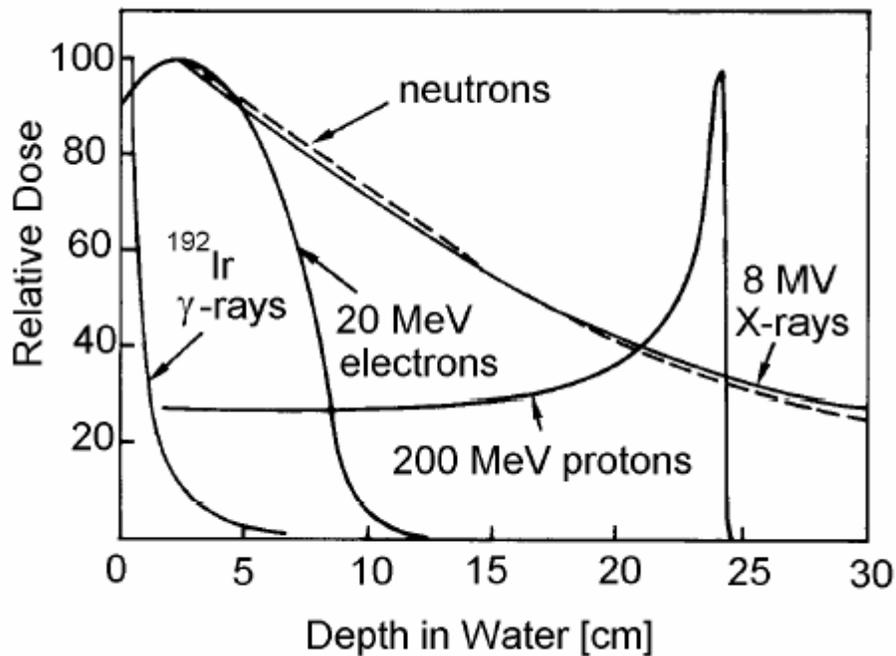


Figura 6.3 Curve dose – profondità per diversi tipi di radiazione [GRU00].

La profondità a cui si presenta il picco di Bragg dipende dall’energia iniziale della particella (Figura 6.4).

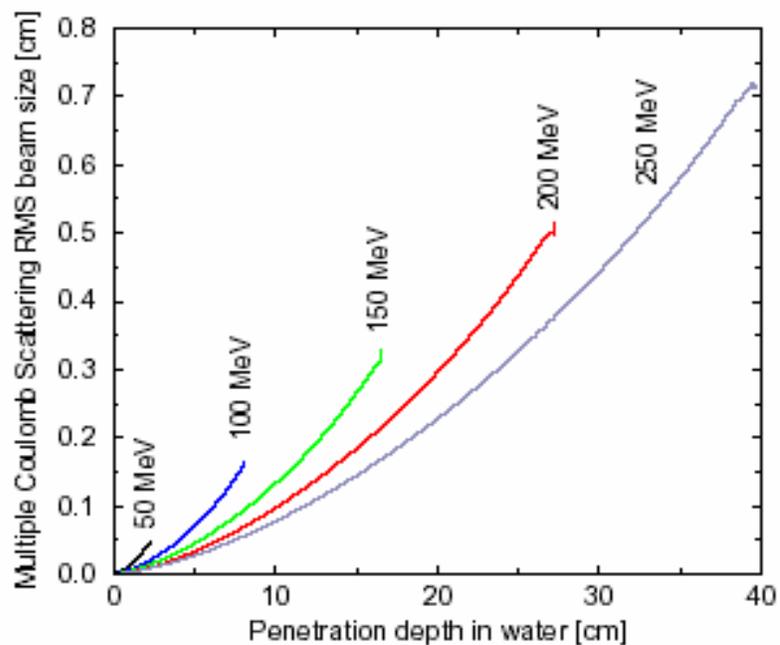


Figura 6.4 La massima profondità di penetrazione in acqua per i protoni corrisponde alla posizione del picco di Bragg e dipende dall'energia iniziale della particella. In particolare, si vede che il picco di Bragg si trova a una profondità di circa 7 - 8 cm per protoni da 100 MeV, e di circa 25 - 28 cm per protoni da 200 MeV.

Il grafico mostra anche l'effetto di Multiple Coulomb Scattering sulla dimensione trasversale del fascio di protoni.

I dati sono il risultato di simulazioni Monte Carlo.

[SAT03]

L'esperimento svolto ad ITEP con fasci di protoni da 100 MeV e 200 MeV costituisce un primo passo nello stabilire l'efficienza della rivelazione acustica sottomarina di particelle. Come spiegato nel Capitolo 3, il segnale acustico riconducibile all'interazione in acqua di un neutrino di alta energia è assimilabile al campo prodotto da una sorgente cilindrica. Riprodurre in laboratorio gli effetti di una sorgente di questo tipo, ad esempio con un acceleratore di elettroni, è cosa piuttosto complicata perché richiederebbe fasci molto energetici e, soprattutto, volumi d'acqua molto estesi. La vasca da utilizzare per realizzare un simile esperimento dovrebbe essere, infatti, abbastanza grande da contenere interamente lo sviluppo dello sciame elettromagnetico prodotto dall'elettrone; inoltre, le dimensioni della vasca dovrebbero essere tali da permettere la formazione e la propagazione del segnale acustico, senza incorrere negli ostacoli costituiti dalle pareti. In prima approssimazione, pertanto, piuttosto che riprodurre esattamente gli effetti indotti da neutrini di alta energia, l'obiettivo è definire le condizioni sperimentali per la produzione sistematica di un segnale acustico in acqua. Il fascio terapeutico di ITEP risponde allo scopo: il fatto che l'energia del fascio è depositata quasi tutta in corrispondenza del picco di Bragg permette la simulazione di una sorgente acustica localizzata. Il volume d'acqua in cui è localizzato il picco di Bragg identifica la sorgente acustica; i parametri della sorgente possono essere controllati variando i parametri del fascio. In particolare, l'intensità del fascio determina la quantità di energia depositata in acqua e, di conseguenza, l'intensità della perturbazione acustica; l'energia delle particelle definisce, invece, la posizione del picco di Bragg (Figura 6.4).

Un esperimento come quello realizzato ad ITEP permette un primo studio sistematico del segnale acustico prodotto dalle particelle; i risultati ottenuti possono essere utilizzati, poi, per procedere allo sviluppo di una tecnica di rivelazione acustica applicabile, eventualmente, ad un telescopio sottomarino.

L'obiettivo dell'analisi dei dati raccolti ad ITEP può essere riassunto nei seguenti punti:

- verificare che la deposizione localizzata di energia in acqua da parte di particelle produca un segnale acustico rivelabile; definire le caratteristiche temporali e spettrali del segnale;
- verificare che il segnale rivelato dipenda dai parametri del fascio; in particolare, identificare il tipo di dipendenza funzionale che lega l'ampiezza del segnale acustico all'energia depositata.

Descrizione delle Misure

- **Apparato Sperimentale**

Per le misure abbiamo utilizzato due idrofoni commerciali (BENTHOS, RESON) e un terzo idrofono, espressamente realizzato per i colleghi di ITEP (definito, da qui in avanti, "ITEP"). In particolare, gli idrofoni utilizzati per le misure sono:

- BENTHOS: è l'idrofono calibrato presso l'Istituto di Acustica "O. M. Corbino";
- RESON: è l'idrofono calibrato presso l'Istituto di Acustica "O. M. Corbino";
- ITEP: si tratta di un idrofono utilizzato nell'esperimento BAIKAL per misure di rivelazione acustica di particelle. Le caratteristiche dell'idrofono (Figura 6.5, Figura 6.6 e Figura 6.7) sono state fornite dai colleghi di ITEP.

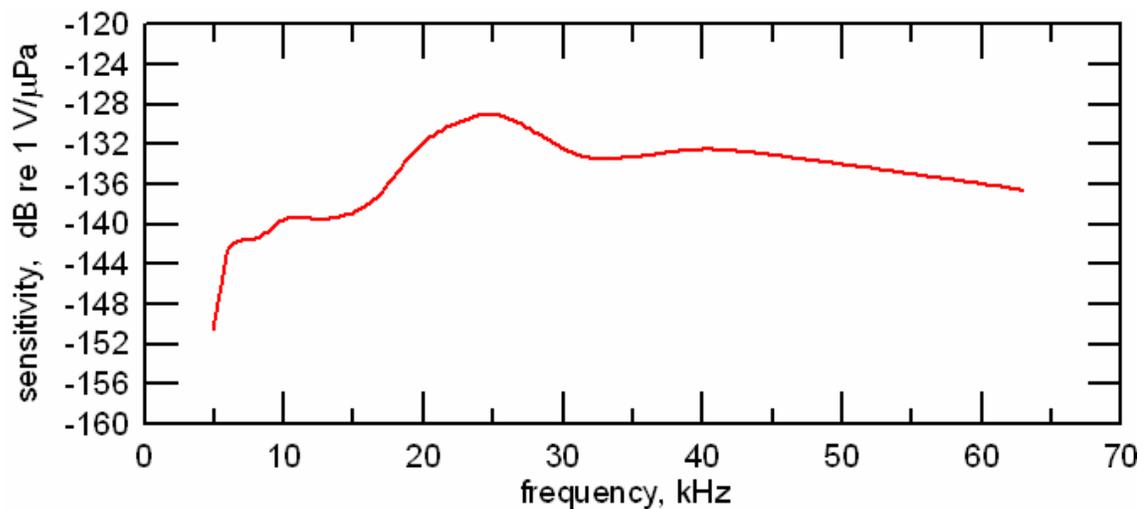


Figura 6.5 Idrofono ITEP – Curva di Calibrazione.

Confrontando la Figura 6.5 con le curve di calibrazione di Figura 5.15 e Figura 5.16, si vede che la sensibilità dell'idrofono di ITEP è circa 40-50 dB superiore a quella degli idrofoni RESON e BENTHOS.

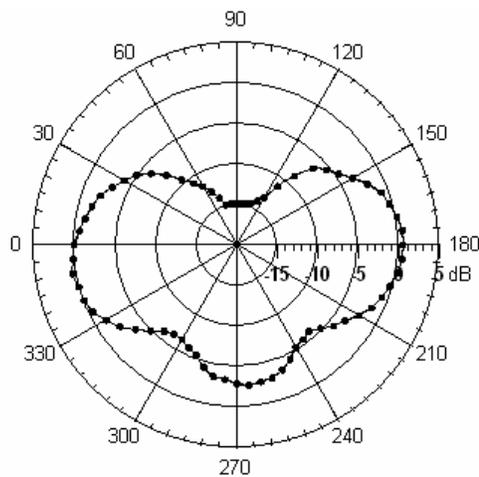


Figura 6.6 **Idrofono ITEP – Risposta nel piano verticale ($\nu = 40$ KHz).**

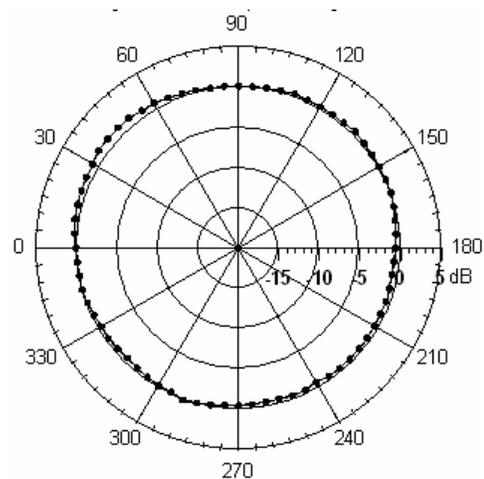


Figura 6.7 **Idrofono ITEP – Risposta nel piano orizzontale ($\nu = 40$ KHz).**

I grafici di Figura 6.6 e Figura 7.6 forniscono informazioni sulla uniformità della risposta angolare; la misura è in dB, riferita al valore di risposta che si ottiene in corrispondenza della posizione zero. In particolare, si vede (Figura 6.7) che la risposta dell'idrofono è uniforme nel piano orizzontale. La risposta nel piano verticale, invece, è attenuata in corrispondenza del cavo (angolo 90°). Il valore $\nu = 40$ KHz è il valore standard per questo tipo di misure.

Gli idrofoni sono posizionati all'interno di una vasca, posta sulla linea del fascio. La vasca, visibile in Figura 6.8 e in Figura 6.9, è realizzata in materiale plastico e ha la forma di un parallelepipedo; le dimensioni sono 50.8 cm × 52.3 cm × 94.5 cm (Figura 6.8); la vasca è riempita d'acqua non salata per il 90% (circa) del suo volume. Le pareti della vasca sono rivestite di materiale fonoassorbente per migliorare l'isolamento acustico del sistema "acqua + idrofoni"; un rivestimento di alluminio, connesso a massa, ha lo scopo di ridurre l'accoppiamento con gli idrofoni del rumore elettromagnetico, dovuto, essenzialmente, all'estrazione del fascio di protoni dal sincrotrone.

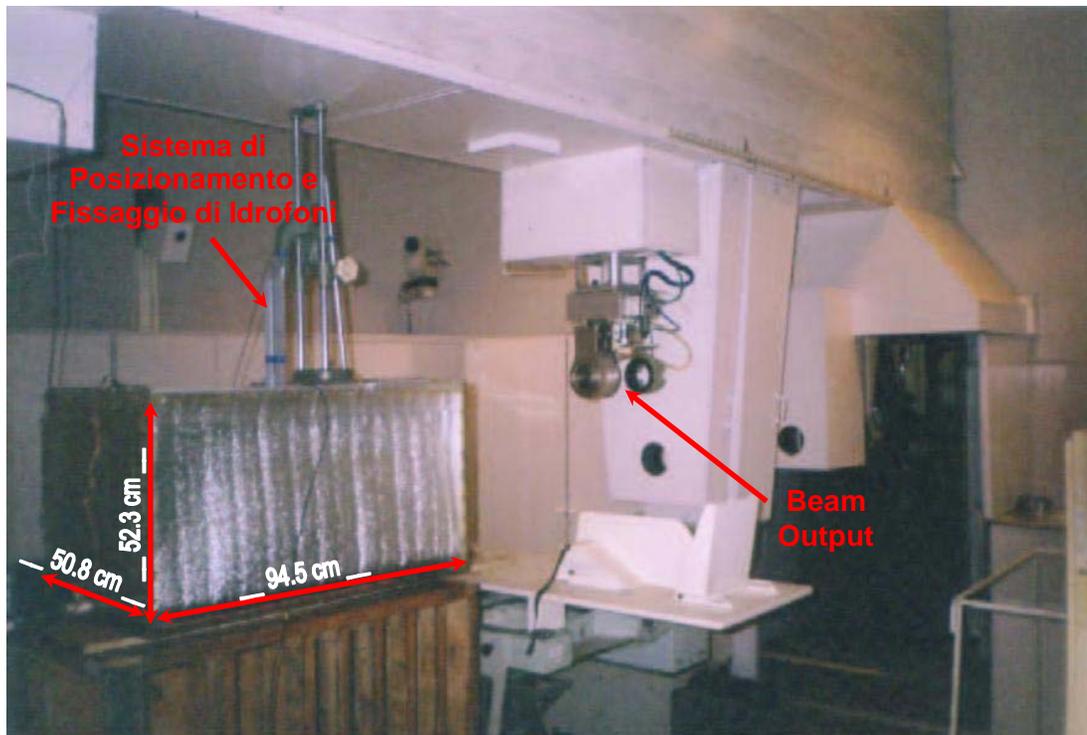


Figura 6.8 Sala sperimentale ad ITEP. Sono visibili:

- vasca per misure acustiche (sono indicate le dimensioni della vasca);
- sistema di posizionamento e fissaggio degli idrofoni all'interno del volume della vasca;
- elemento finale della linea del fascio (Beam Output).

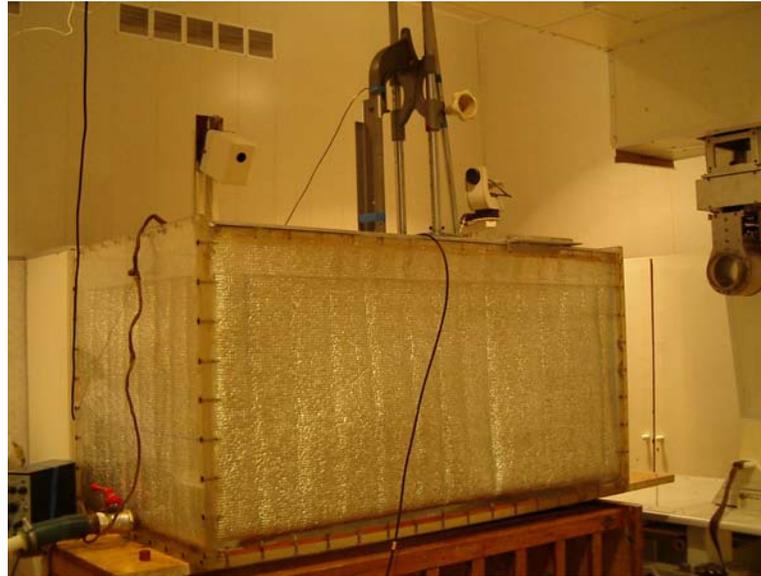


Figura 6.9 La vasca insonorizzata utilizzata per le misure acustiche effettuate ad ITEP.

- **Il fascio di protoni**

I protoni sono accelerati nel protosincrotrone; raggiunto il valore di energia richiesto per le misure (100 MeV oppure 200 MeV), un pacchetto di protoni viene estratto dall'anello del protosincrotrone e indirizzato all'interno del volume della vasca attraverso un tubo, le cui dimensioni sono 59 mm di diametro e 460 mm di lunghezza; lo spessore delle pareti del tubo è 1.5 mm; il tubo di iniezione è chiuso da una finestra di teflon.

La Figura 6.10 mostra la parte terminale della linea del fascio.

La Figura 6.11 rappresenta schematicamente la dinamica dell'interazione del pacchetto di protoni con il volume d'acqua.

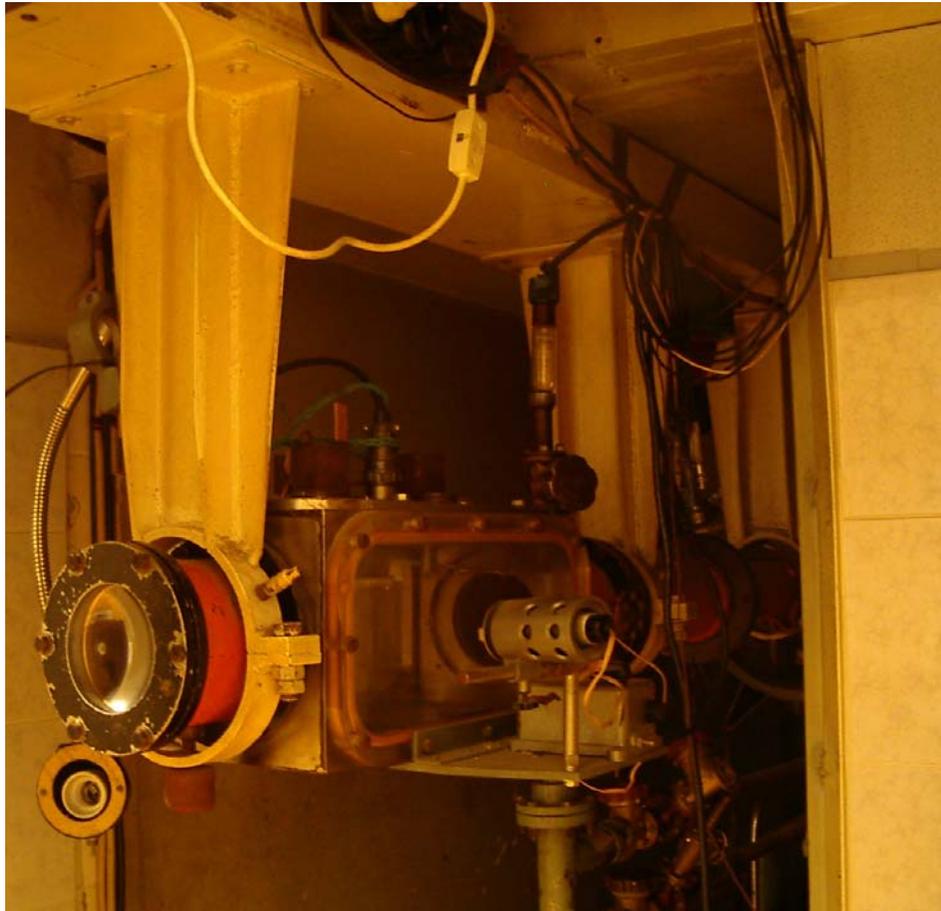


Figura 6.10 Elemento finale della linea del fascio di protoni (Beam Output).

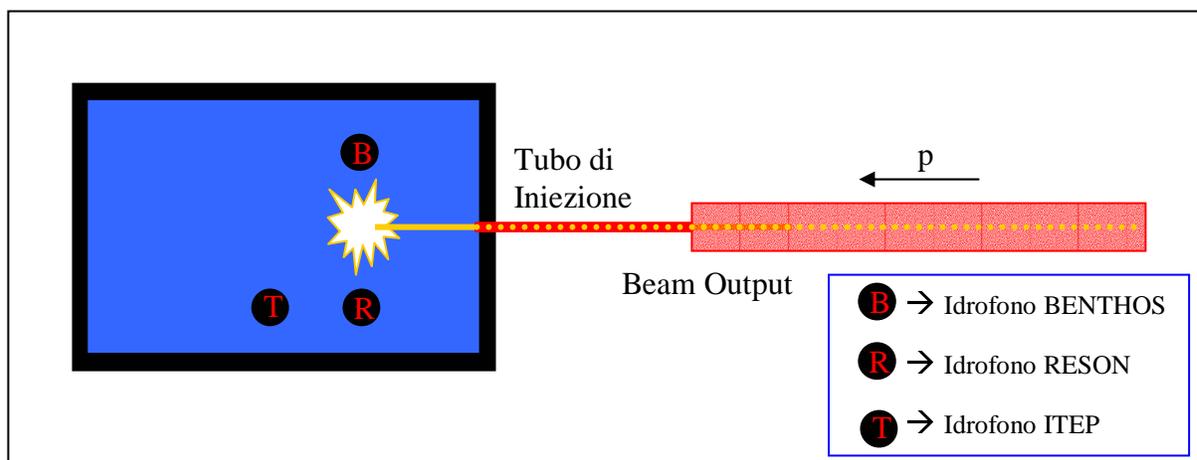


Figura 6.11 Rappresentazione schematica dell'interazione del pacchetto di protoni con il volume d'acqua e del sistema di idrofoni.

La geometria dell'apparato sperimentale è meglio descritta nello schema di Figura 6.12; l'origine delle coordinate da noi scelte coincide con il punto d'ingresso del fascio nel volume d'acqua. In Figura 6.12 è anche rappresentata, schematicamente, la deposizione dell'energia del fascio; i diversi colori della scala cromatica identificano i diversi valori della densità di energia depositata. La regione in rosso corrisponde all'elemento di volume in cui è massima la densità di energia depositata: questa posizione coincide con il picco di Bragg, che è il punto dove si colloca la sorgente acustica e dove ci si aspetta, di conseguenza, il contributo più significativo alla formazione del segnale di pressione. Gli idrofoni, pertanto, sono posizionati in corrispondenza del picco di Bragg, tenendo conto dei risultati di Figura 6.4.

La configurazione di idrofoni di Figura 12 è relativa al caso di protoni di energia $E = 200$ MeV: seguendo le indicazioni di Figura 6.4, l'asse degli idrofoni RESON e BENTHOS è posto a una distanza $d_{\text{BRAGG}} = 25.5$ cm dal punto d'ingresso del fascio nel volume della vasca. Analogamente, nel caso di protoni di energia $E = 100$ MeV, si ricava, dalla Figura 4, $d_{\text{BRAGG}} = 7.5$ cm.

Le distanze tra gli idrofoni leggibili in Figura 6.12 sono solo approssimate: nella realtà possono essere riscontrate piccole variazioni rispetto ai valori indicati, dovute alle differenti dimensioni degli idrofoni e a differenze nelle modalità di fissaggio dei sensori alla struttura di posizionamento.

La Figura 6.13 mostra la disposizione degli idrofoni all'interno della vasca di ITEP; la fotografia rispecchia le indicazioni di Figura 6.12. Il quarto idrofono presente nell'immagine è di proprietà di ITEP; si tratta di un idrofono molto piccolo che, dopo alcune prove di acquisizione, si è rivelato non correttamente funzionante. Pertanto, il segnale rivelato da questo quarto idrofono non è stato preso in considerazione, né in fase di acquisizione, né, di conseguenza, in fase di analisi dei dati.

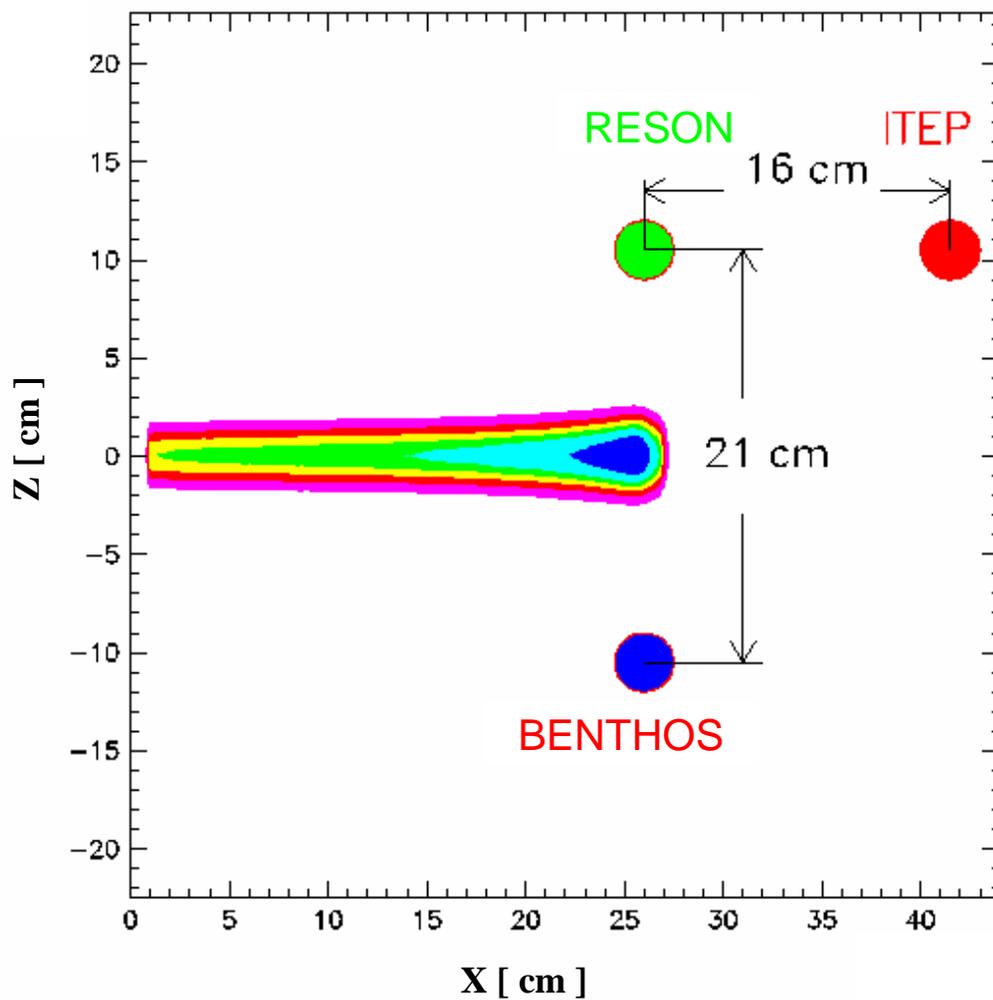


Figura 6.12 Schema della disposizione degli idrofoni nel caso di un fascio di protoni di energia $E = 200$ MeV ($d_{\text{BRAGG}} = 25.5$ cm). Gli idrofoni sono posizionati in corrispondenza del picco di Bragg, che coincide con la zona di massima densità di energia depositata.

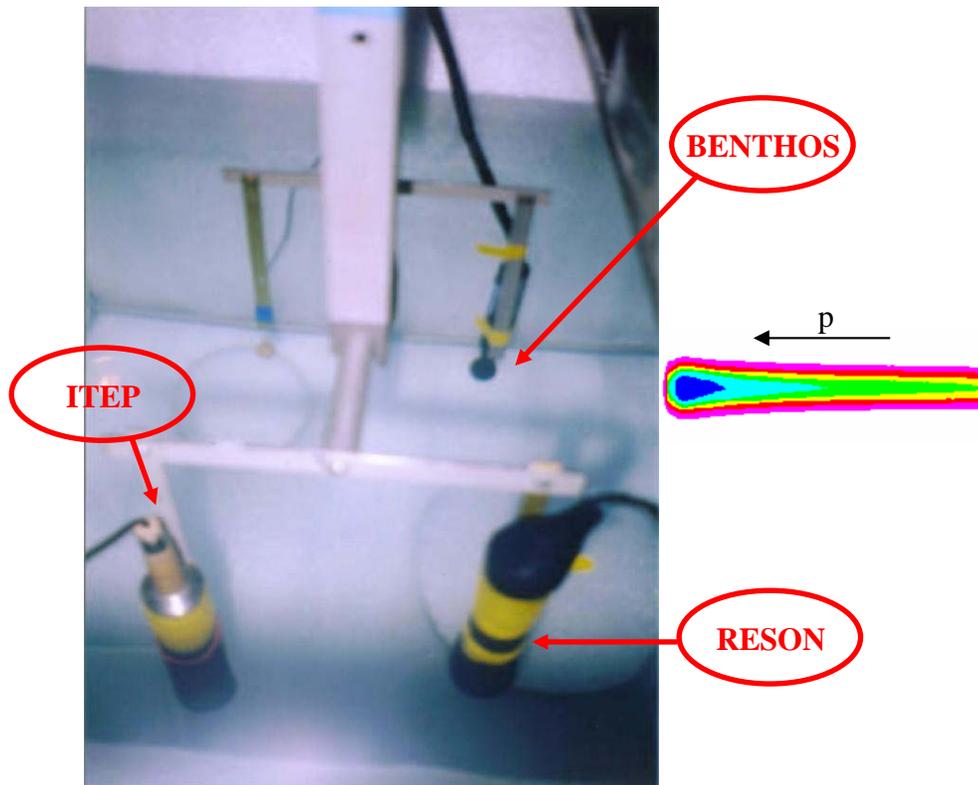


Figura 6.13 Disposizione degli idrofoni all'interno della vasca. È visibile anche un quarto idrofono, sempre di proprietà di ITEP, non utilizzato nella fase di acquisizione e analisi dei dati.

Il fascio utilizzato per le misure ha le seguenti caratteristiche:

- il profilo del fascio nel tempo (Figura 6.14) è una funzione di tipo $\cos^2(t)$;
- il profilo del fascio nei piani XZ e YZ, con Z coincidente con la direzione di propagazione dei protoni, è una funzione di tipo gaussiana (Figura 6.15). Nel caso ideale, il fascio è simmetrico attorno a Z, centrato nell'origine ($x_C = 0$, $y_C = 0$).

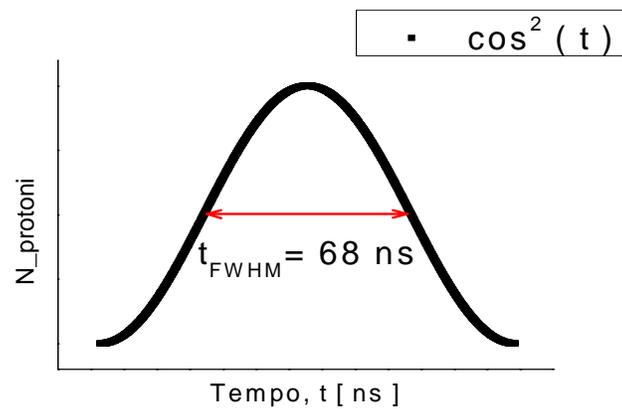


Figura 6.14 Profilo del fascio nel tempo. Nel grafico è indicata la larghezza a metà altezza della distribuzione (FWHM = Full-Width Half-Maximum).

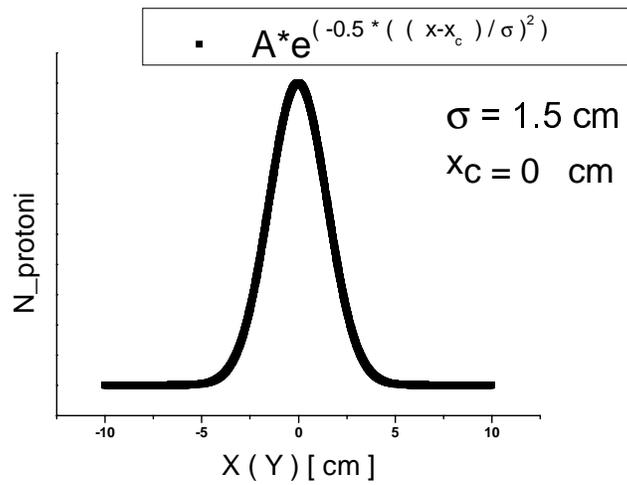
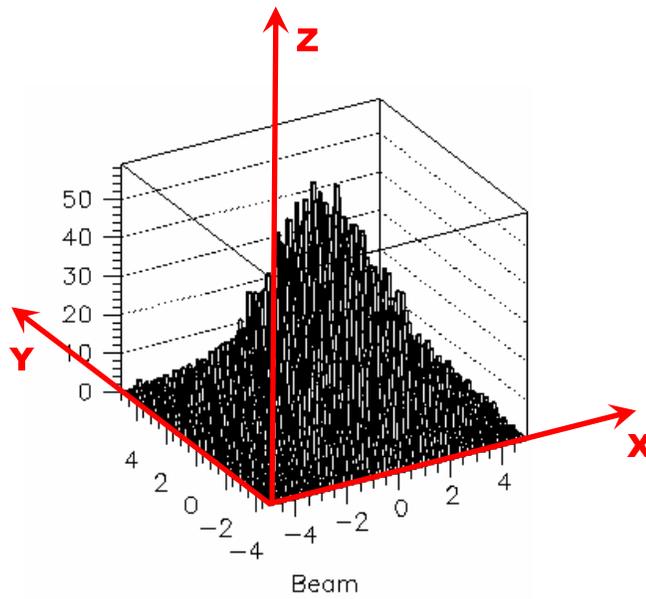


Figura 6.15 Profilo del fascio nei piani XZ e YZ, con Z direzione di propagazione. Si considera una gaussiana ideale, centrata nell'origine ($x_c = 0$, $y_c = 0$). Il valore $\sigma = 1.5$ è un valore indicativo, che tiene conto, però, dei risultati ottenibili con le reali tecniche di focalizzazione del fascio.

Le caratteristiche descritte corrispondono ad un fascio ideale; il modello è, in prima approssimazione, sufficiente per interpretare i risultati. Nella realtà, però, occorre considerare l'effetto delle fluttuazioni statistiche, sia della posizione del fascio, sia della forma del profilo del fascio; bisogna, inoltre, tenere conto di irregolarità nei meccanismi di estrazione del pacchetto e nella geometria della propagazione. In particolare, ci si aspetta che il profilo del fascio attorno all'asse Z non sia simmetrico, né che le particelle si distribuiscano esattamente secondo una gaussiana. Per correggere questi effetti di dispersione in direzione radiale si utilizzano collimatori (fascio collimato). Il collimatore, eliminando le "code" della distribuzione gaussiana, definisce in maniera più regolare il profilo del fascio attorno all'asse Z (Figura 6.16).

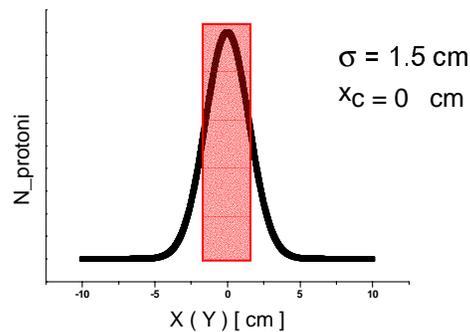


Figura 6.16 Correzione di un collimatore di diametro $d = 2$ cm al profilo del fascio. Si tratta del profilo gaussiano di Figura 6.15. L'area della gaussiana evidenziata dal riquadro rosso corrisponde al numero di protoni che attraversano il collimatore.

La presenza del collimatore, ovviamente, incide sul numero di particelle che interagiscono nel volume d'acqua, cioè sul numero di protoni che contribuiscono alla produzione del segnale acustico. Purtroppo, l'intensità del fascio estratto dal sincrotrone è misurata prima che il pacchetto attraversi il collimatore; questo valore, pertanto, non rappresenta l'intensità "effettiva", non tenendo conto dei tagli operati dal collimatore. Poiché l'ampiezza del segnale acustico misurato dipende dal numero di particelle che effettivamente interagiscono in acqua, il risultato delle misure non è indipendente dal diametro del collimatore. Come sarà spiegato più avanti, utilizzando i risultati dell'analisi, è possibile realizzare una simulazione del fascio che, a partire dal semplice modello di un profilo gaussiano nei piani XZ e YZ, riproduce l'effetto delle correzioni, introdotte dal collimatore.

- **Acquisizione Dati**

Le misure sono state eseguite per due valori di energia dei protoni ($E = 100$ MeV ed $E = 200$ MeV). Per ogni energia, sono stati considerati tre diversi valori di diametro del collimatore ($d = 2$ cm, $d = 3$ cm, $d = 5$ cm). Per ogni valore di collimatore, sono state ripetute diverse acquisizioni, variando l'intensità del fascio. L'intensità è selezionabile attraverso opportune impostazioni di macchina. Le funzioni di acceleratore di ITEP permettono di ottenere valori di intensità compresi tra $5 \cdot 10^8$ e $3 \cdot 10^{10}$ p/cycle (protoni per ciclo).

Lo schema seguente riassume la sequenza di operazioni svolte durante la sessione di misure di ITEP.

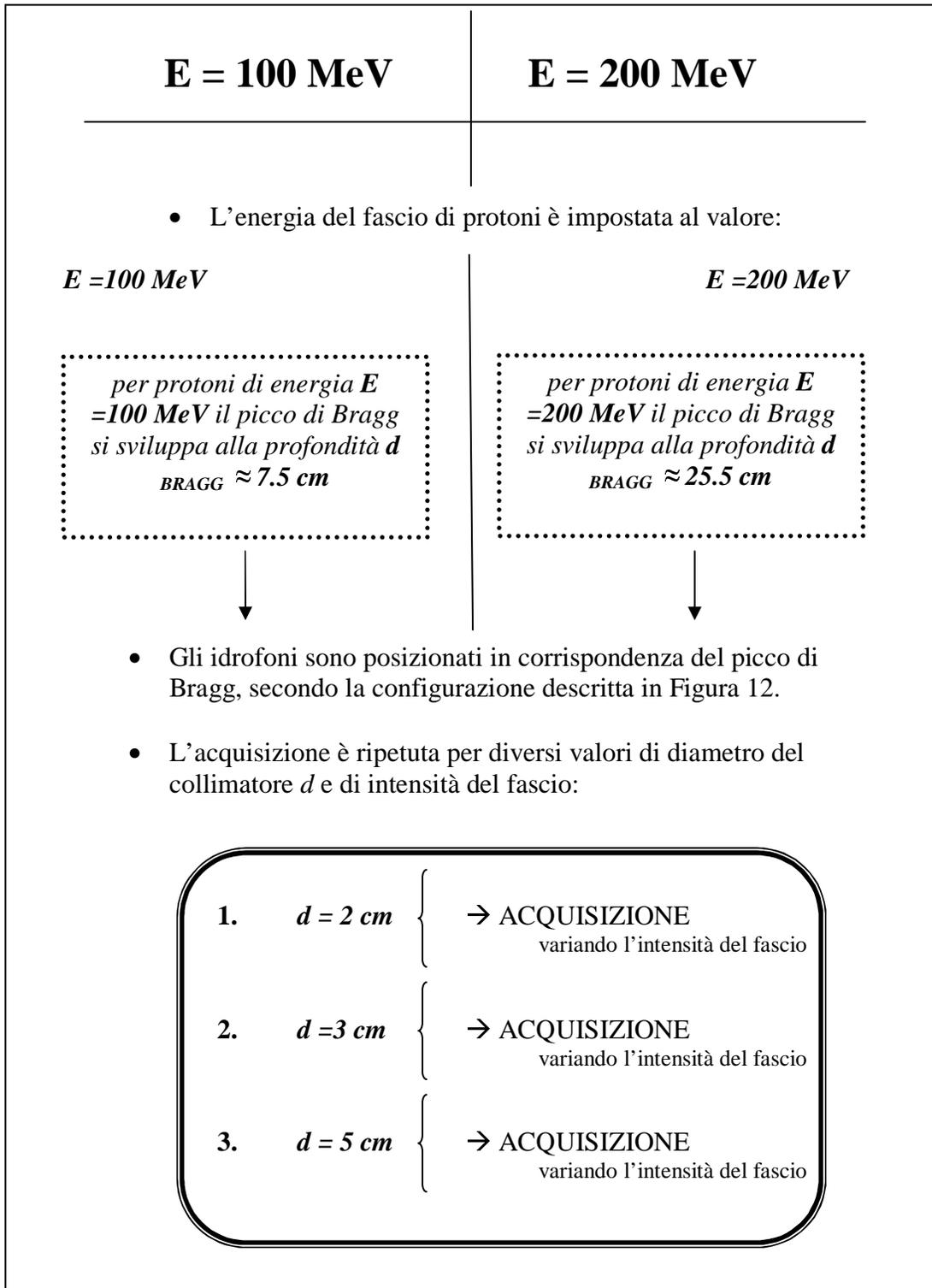


Figura 6.17 Schema riassuntivo delle operazioni svolte per lo svolgimento delle misure ad ITEP.

L'acquisizione dei dati avviene mediante due diversi dispositivi:

- Sistema di Acquisizione NI. $v_C = 100 \text{ KHz}$
- Oscilloscopio Tektronix TDS 3034 $v_C = 10 \text{ MHz}$

Il sistema di acquisizione NI è quello descritto nel Capitolo 4; le specifiche dell'oscilloscopio Tektronix sono raccolte in Appendice 1 e sono consultabili presso il sito della Tektronix: www.tek.com.

Le figure seguenti (Figura 6.18, Figura 6.19, Figura 6.20) mostrano, a confronto, il risultato delle due acquisizioni per il segnale ricevuto dall'idrofono BENTHOS (NI → scheda National Instrument; TTX → oscilloscopio Tektronix). Il confronto è possibile avendo opportunamente scalato l'asse dei tempi, dopo aver individuato una comune origine per la coordinata temporale: il tempo zero è scelto coincidente con l'istante in cui si registra, sull'idrofono, l'impulso elettromagnetico indotto dal segnale di estrazione del pacchetto di protoni. Le figure si riferiscono ad un evento di energia $E = 200 \text{ MeV}$, diametro del collimatore $d = 5 \text{ cm}$, intensità del fascio $N_{\text{protoni}} = 2.80 \cdot 10^{10}$. Come si vede, c'è una buona coincidenza tra il segnale acquisito dalla scheda della National Instrument e quello acquisito dall'oscilloscopio. Le misure di ITEP mettono in evidenza, però, il principale limite della scheda di acquisizione PXI – 4042: il massimo valore selezionabile per la frequenza di campionamento ($v_C = 100 \text{ KHz}$), infatti, non è sufficiente per descrivere in modo esauriente la dinamica del segnale acustico, raccolto a così piccola distanza dalla sorgente. In particolare, nell'esempio mostrato in Figura 6.20 si concentra l'attenzione sull'impulso bipolare: si tratta della porzione di dati che corrisponde all'onda acustica prodotta dall'interazione dei protoni in acqua, ed è, pertanto, l'oggetto dell'analisi. Si vede che l'acquisizione NI fornisce solo 7 campioni, contro i 581 campioni acquisiti dall'oscilloscopio: l'acquisizione TTX realizza una descrizione più completa del segnale; l'analisi, pertanto, è svolta utilizzando, esclusivamente, i dati acquisiti dall'oscilloscopio Tektronix.

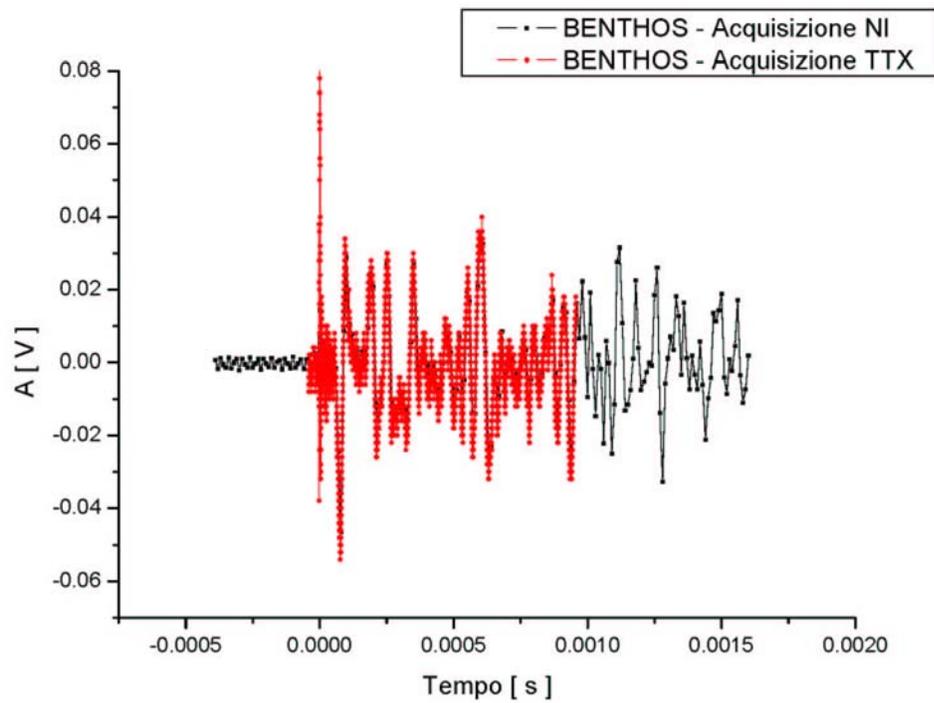


Figura 6.18 Confronto Acquisizione NI \leftrightarrow Acquisizione TTX per l'idrofono BENTHOS. Si osserva una buona coincidenza tra le due acquisizioni.

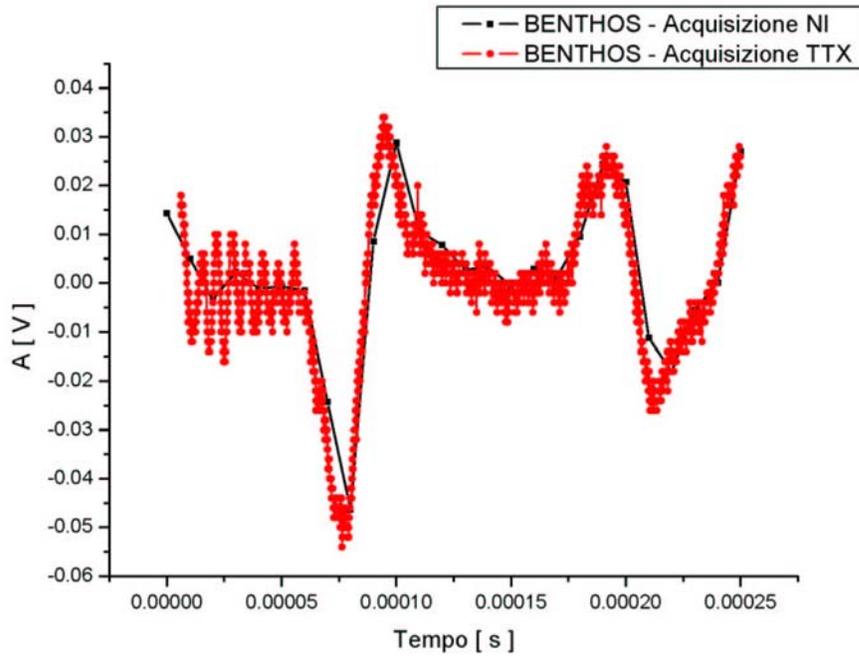


Figura 6.19 Confronto Acquisizione NI \leftrightarrow Acquisizione TTX per l'idrofono BENTHOS. Ingrandimento dell'acquisizione di Figura 6.18.

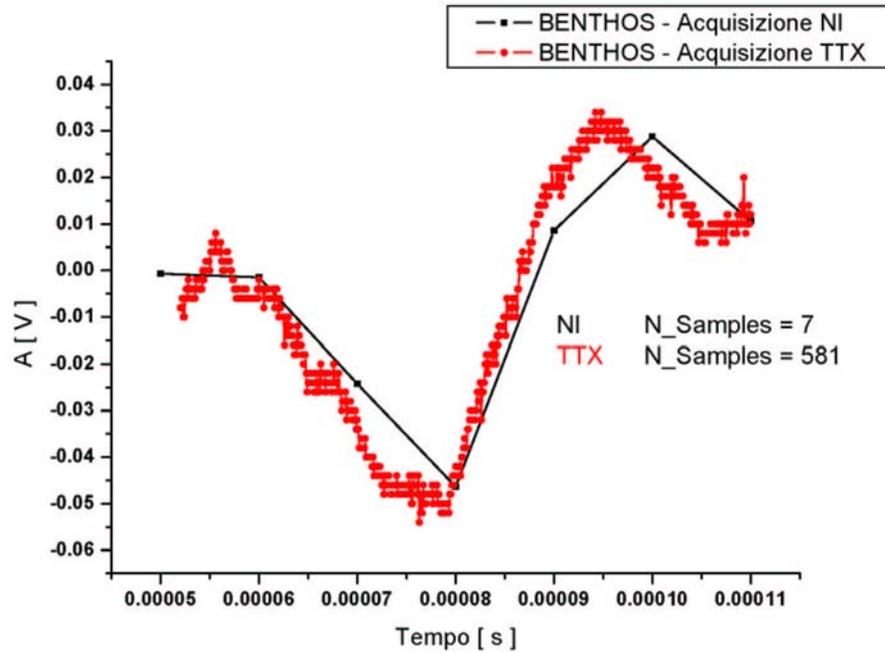


Figura 6.20 Confronto Acquisizione NI \leftrightarrow Acquisizione TTX per l'idrofono BENTHOS. Ingrandimento dell'acquisizione di Figura 6.18, in corrispondenza del segnale di pressione oggetto di analisi. La differenza tra le due acquisizioni è nel valore della frequenza di campionamento; l'acquisizione TTX risulta più conveniente per una descrizione completa del segnale.

L'oscilloscopio Tektronix TDS 3034 è un dispositivo con 4 canali di acquisizione. Per le nostre misure abbiamo così connesso i segnali:

- Canale 1 – BENTOS;
- Canale 2 – RESON;
- Canale 3 – ITEP
- Canale 4 – Beam Current Transformer (BCT)).

Il BCT (Beam Current Transformer) misura l'intensità del fascio. Il segnale proveniente dal BCT contiene l'informazione del numero di protoni estratti dall'anello acceleratore, prima della collimazione.

L'acquisizione è avviata da un segnale, il trigger, prodotto nel momento in cui si invia il comando di estrazione del fascio.

Si produce un evento di acquisizione ogni volta che si completa con successo l'operazione di estrazione del pacchetto di protoni: questa operazione è, infatti, associata all'interazione delle particelle in acqua e alla formazione di un segnale acustico. Gli eventi sono ordinati in cartelle: tutti gli eventi nella stessa cartella sono ottenuti nelle stesse condizioni di misura.

Il programma *WaveStar* permette di visualizzare i dati acquisiti come se questi apparissero sullo schermo di un oscilloscopio. La Figura 6.21 mostra un tipico evento di acquisizione; l'evento rappresentato corrisponde alle seguenti condizioni di misura: energia del primario $E = 200 \text{ MeV}$; diametro del collimatore $d = 5 \text{ cm}$.

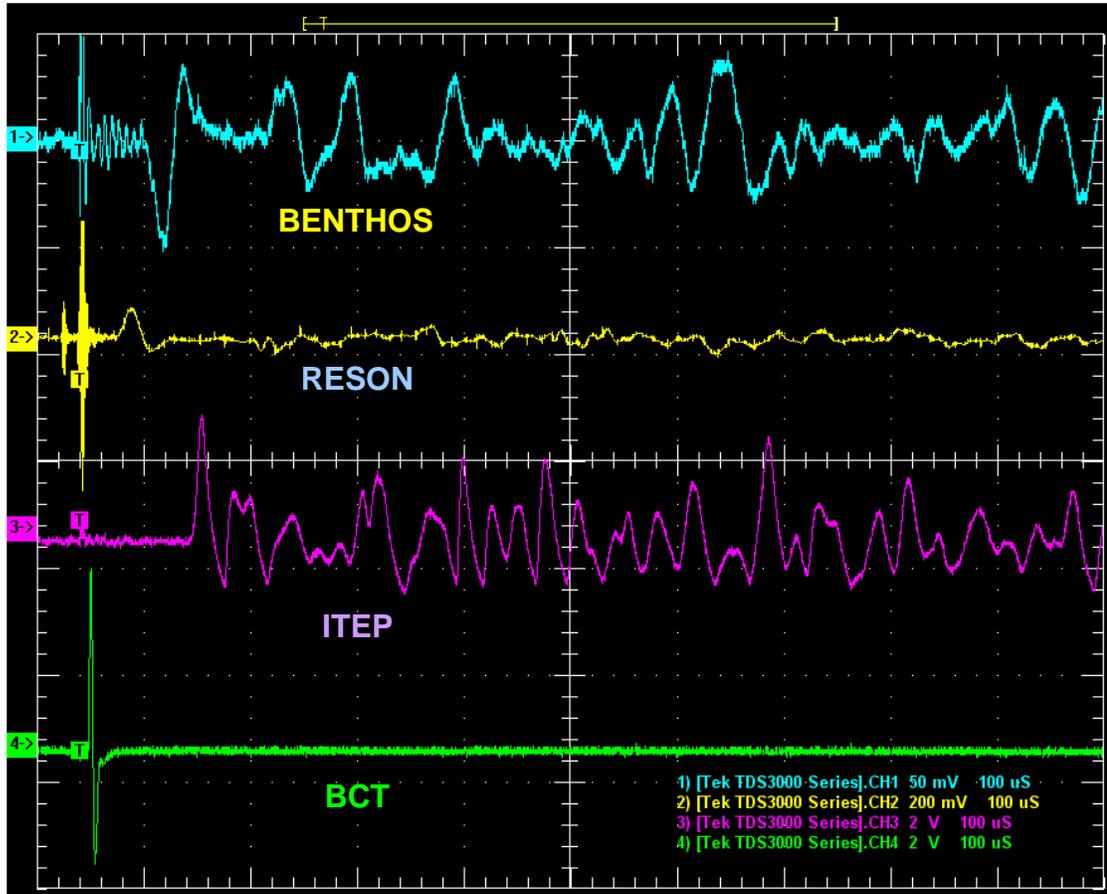


Figura 6.21 Visualizzazione di un tipico evento con il programma *WaveStar for Oscilloscopes*. Da notare che, come specificato nella legenda, la scala delle ampiezze non è la stessa per i quattro canali di acquisizione. La scala temporale, invece, è comune (100 μ s per divisione); il tempo t_0 coincide, per tutti e quattro i canali di acquisizione, con l'istante di trigger. L'evento rappresentato si riferisce ad una acquisizione con $E = 200$ MeV, $d = 5$ cm.

WaveStar permette, oltre alla visualizzazione, anche la conversione dei dati acquisiti in un formato leggibile con il programma *Excel*; da qui è possibile importare i dati su un foglio di lavoro *OriginPro 7.0*. L'analisi è svolta con *OriginPro 7.0*.

Nel seguito, viene descritta la procedura di analisi, facendo riferimento all'evento mostrato in Figura 6.21.

Analisi dei dati

- **Misura dell'intensità del fascio di protoni**

Il BCT misura la corrente istantanea dovuta al passaggio dei protoni. L'ampiezza dell'impulso del segnale da BCT è proporzionale al numero delle cariche, ossia all'intensità del fascio. In particolare, possiamo conoscere l'intensità del fascio estratto dalla relazione:

$$\text{Intensità [N_protoni]} = 2 \cdot 10^8 \cdot K \cdot A_{BCT}[\text{V}]$$

dove K è un coefficiente, il cui valore è legato alle impostazioni del fascio; A_{BCT} è l'ampiezza, misurata in Volt, della parte positiva dell'impulso bipolare.

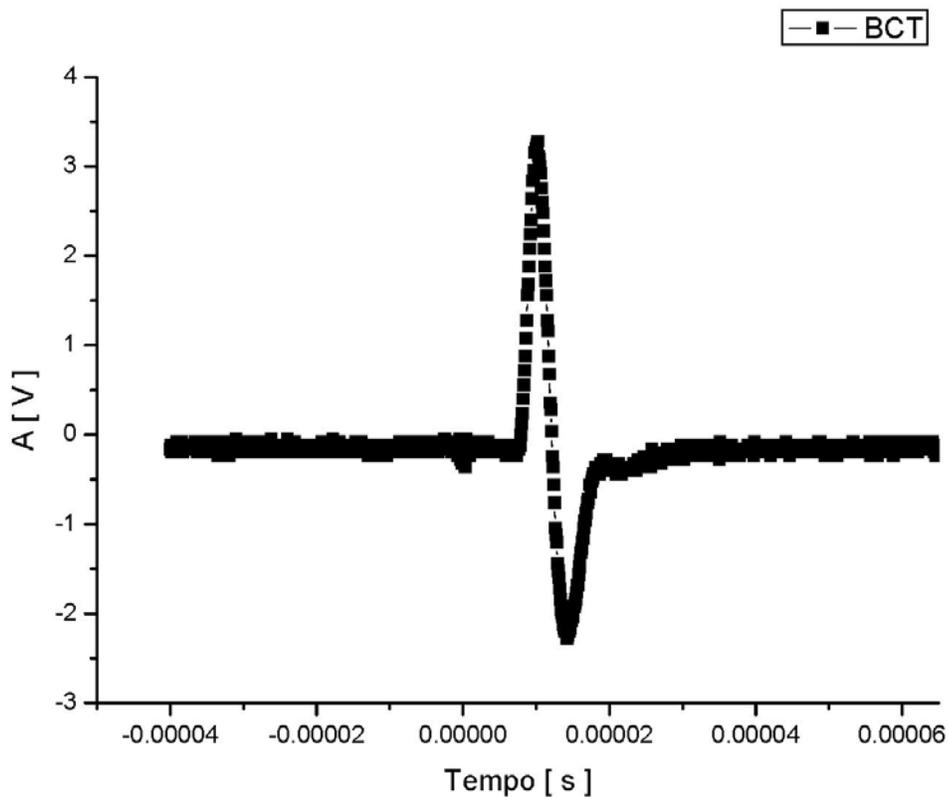


Figura 6.22 Elaborazione con *OriginPro 7.0* del segnale BCT (evento di Figura 6.21).

Per ogni evento, si determina l'ampiezza A_{BCT} [V] con un'operazione di fit. Poiché l'informazione è contenuta solo nella parte positiva del segnale, non è importante scegliere una funzione che descriva analiticamente la forma dell'impulso, ma è sufficiente un fit gaussiano sul primo picco. La funzione di fit è:

$$y = y_0 + A_{BCT} \cdot e^{-\left(\frac{1}{2} \cdot \left(\frac{x-P_1}{\tau}\right)^2\right)}$$

Il risultato dell'operazione di fit è mostrato in Figura 6.23.

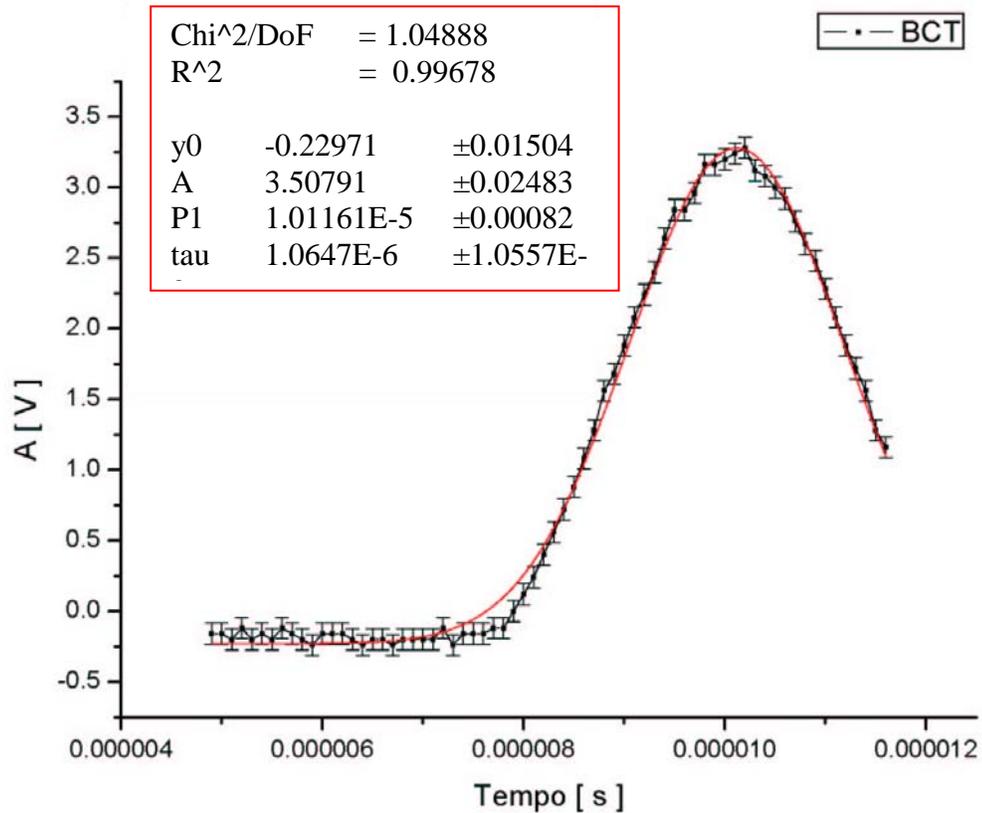


Figura 6.23 Operazione di fit gaussiano sul segnale da BCT (segnale di Figura 6.22).

Il risultato del fit sul BCT è utilizzato non solo per calcolare l'informazione dell'intensità del fascio di protoni estratto dal sincrotrone, ma anche per stabilire, evento per evento, un riferimento temporale. Come già specificato (Figura 6.21), la scala dei tempi è comune a tutti e quattro i segnali acquisiti dall'oscilloscopio e l'origine dei tempi, t_0 , coincide con l'istante di trigger, cioè con l'estrazione del pacchetto di protoni. Tenendo conto dei risultati del fit sul BCT, per ogni evento si definisce un tempo $t_0 = P_1$, dove P_1 , risultato dell'operazione di fit, è il parametro corrispondente al centro della gaussiana che descrive il primo picco del segnale BCT. In questo modo, t_0 coincide, approssimativamente², con l'istante in cui viene depositata in acqua l'energia rilasciata dai protoni; il ritardo con cui si osserva il segnale di risposta sugli idrofoni può essere interpretato tenendo conto del tempo di formazione del segnale acustico e del tempo di propagazione del suono in acqua, funzione della distanza tra sensore e sorgente.

² Il BCT è posto ad alcuni metri dal punto in cui è posizionato l'apparato sperimentale; i pochi nanosecondi che intercorrono fra l'istante in cui i protoni attraversano il BCT e l'istante in cui vengono totalmente frenati in acqua è trascurabile rispetto al tempo necessario per la formazione del segnale acustico (approssimazione di deposizione istantanea di energia, Capitolo 3).

- **Descrizione dei segnali acustici acquisiti dagli idrofoni**

Prima di analizzare in dettaglio il segnale ricevuto da BENTHOS, RESON e ITEP, descriviamo l'aspetto generale della risposta degli idrofoni, facendo riferimento alla Figura 6.24, elaborazione della Figura 6.21.

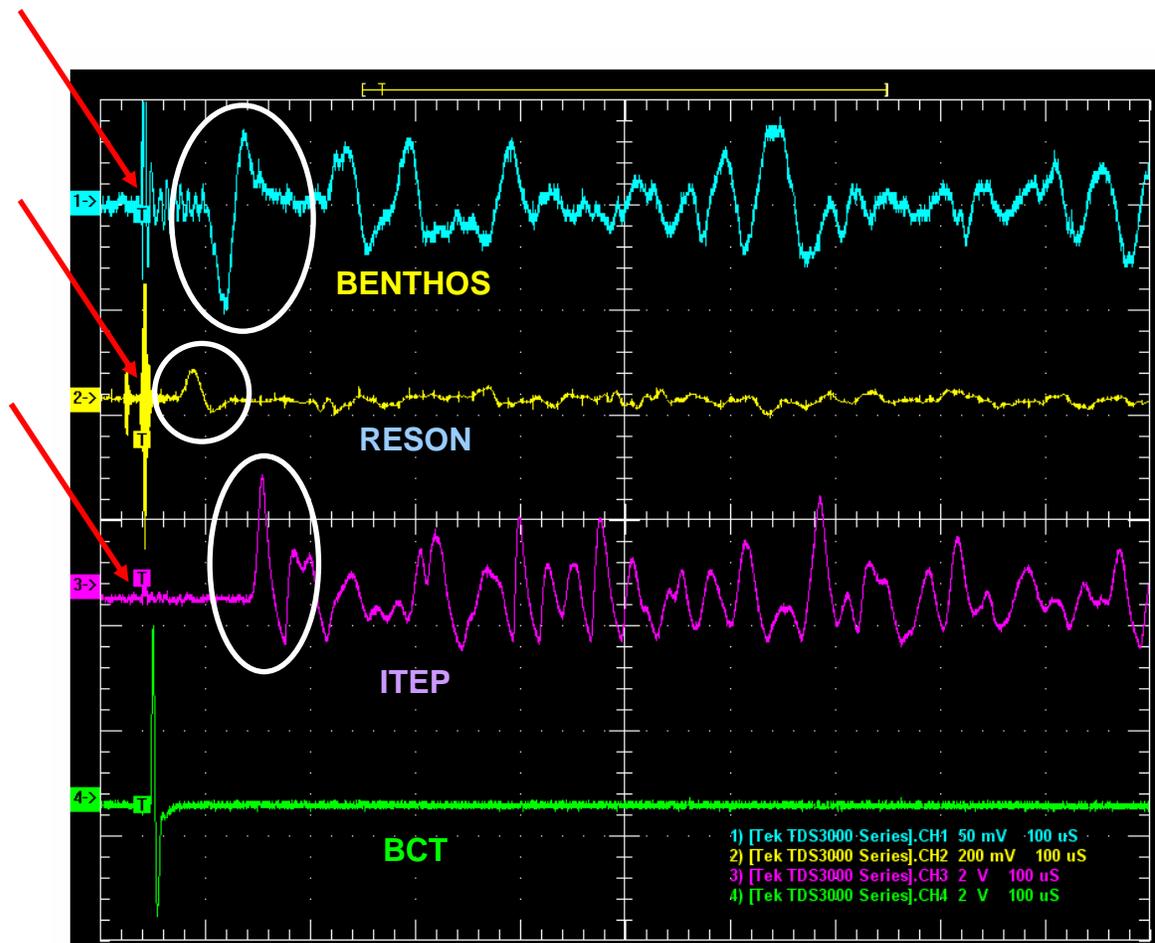


Figura 6.24 Caratteristiche generali del segnale da idrofono (elaborazione della Figura 6.21). Si notano l'impulso indotto dal segnale di estrazione del pacchetto (freccia rossa), l'impulso bipolare oggetto di analisi (cerchio bianco) e le riflessioni. Da notare anche il fatto che il segnale sull'idrofono BENTHOS appare invertito.

Schematicamente, l'aspetto generale della risposta degli idrofoni è costituito da tre elementi:

- Impulso elettromagnetico indotto sull'idrofono dal segnale di estrazione del pacchetto di protoni. È la porzione di segnale indicata con la freccia rossa, più evidente per gli idrofoni BENTHOS e RESON.
- Segnale bipolare. Si tratta del segnale acustico oggetto di analisi, prodotto dalla sorgente localizzata identificata con il picco di Bragg. Nei dati di Figura 6.24, è individuato dal cerchio bianco.
- Riflessioni. Con il termine generico di "riflessioni" si indica tutto ciò che si osserva nella risposta dell'idrofono, oltre al segnale bipolare e all'impulso indotto. Le riflessioni sono escluse dall'analisi³. La presenza di tali ulteriori segnali negli idrofoni è imputabile a diverse cause, tra cui, certamente, le riflessioni del segnale acustico all'interno della vasca, dovute alle sue limitate dimensioni. Bisogna, inoltre, considerare anche l'effetto di altre sorgenti, non coincidenti con il picco di Bragg e non completamente note: ad esempio, il passaggio dei protoni dal vuoto del tubo di iniezione al volume d'acqua è sorgente di perturbazione acustica e produce un segnale che può alterare la forma della risposta dell'idrofono.

Per limitare l'effetto delle riflessioni, l'analisi è svolta selezionando solo un piccolo intervallo temporale in corrispondenza dell'impulso bipolare, come mostrato dal cerchio bianco in Figura 6.24.

³ Ci riserviamo, in futuro, di descrivere anche le altre signature, non casuali, presenti nei segnali degli idrofoni.

È importante notare che il segnale, per l'idrofono BENTHOS, si presenta invertito. Questo fatto può essere interpretato come dovuto a caratteristiche del pre-amplificatore, oppure causato dall'aver invertito i collegamenti di alimentazione. In ogni caso, questo fatto è irrilevante per la presente analisi, che ha lo scopo di valutare la sensibilità della tecnica di rivelazione acustica. Prima di procedere con l'analisi, il segnale del BENTHOS viene, pertanto, cambiato di segno, così da avere, per tutti e tre gli idrofoni, un impulso bipolare prima positivo e poi negativo.

- **Analisi dei segnali acquisiti dall'idrofono BENTHOS**

Per ogni evento, si determina l'ampiezza B_{MAX} [V] del polo positivo dell'impulso bipolare con un'operazione di fit. La funzione di fit è una bipolare:

$$y = y_0 + B_{MAX} \cdot \frac{(x - P_1)}{\tau} \cdot e^{-\left(\frac{(x - P_2)}{2\tau}\right)^2}$$

Il termine y_0 tiene conto della presenza di un offset in DC; il fattore $(x - P_1)$ individua il centro dell'impulso bipolare; il fattore esponenziale, di tipo gaussiano, modula l'ampiezza della funzione, in modo che questa abbia un valore significativo solo in un intorno di P_2 .

Il risultato dell'operazione di fit è mostrato graficamente in Figura 6.25.

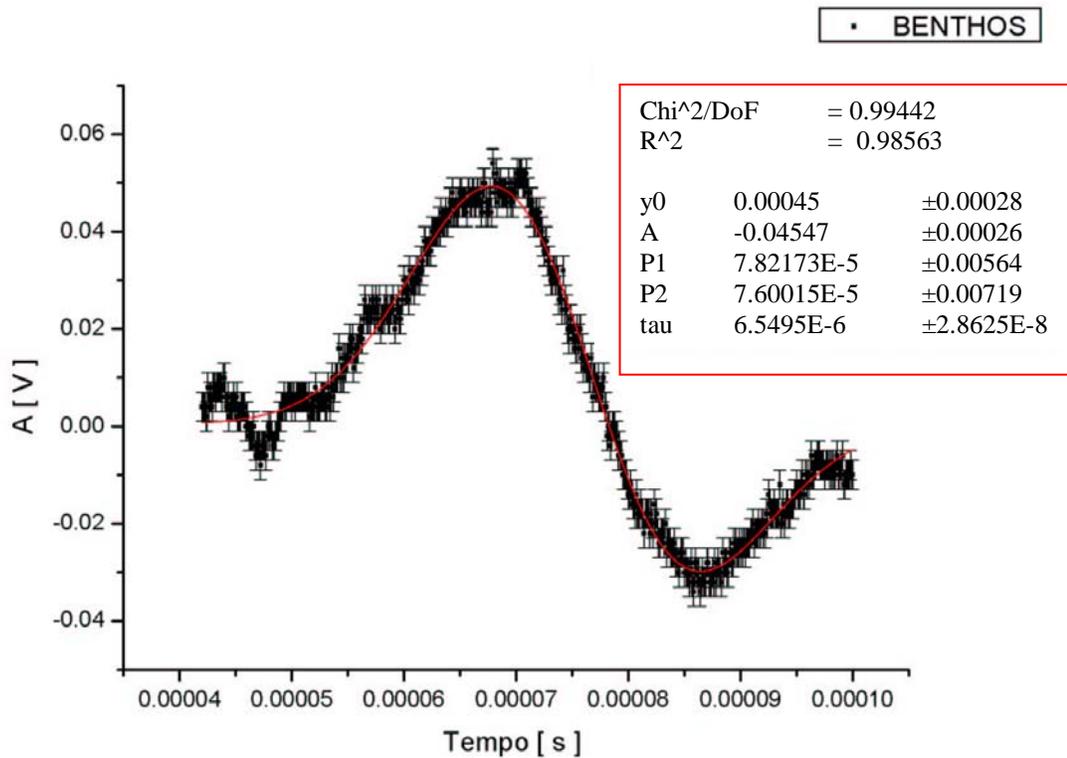


Figura 6.25 Segnale da BENTHOS. Operazione di fit sui dati sperimentali. La funzione di fit è una bipolare. L'evento analizzato è quello di Figura 6.21.

Nel corso dell'analisi, si tiene memoria non solo del risultato dell'operazione di fit per il parametro B_{MAX} , ma anche per i parametri τ , P_1 e P_2 che definiscono la forma dell'impulso. La conoscenza di questi parametri, infatti, permette di tenere sotto controllo come si modifica la forma del segnale al variare dei parametri del fascio e delle condizioni di misura; eventualmente, è possibile rivelare modifiche significative dovute alla presenza di riflessioni o alla sovrapposizione di segnali acustici la cui origine non è riconducibile al picco di Bragg.

- **Analisi dei segnali acquisiti dall'idrofono RESON**

Per ogni evento, si determina l'ampiezza R_{MAX} [V] del polo positivo dell'impulso bipolare con un'operazione di fit. Analogamente al caso del segnale da idrofono BENTHOS, la funzione di fit è una bipolare:

$$y = y_0 + R_{MAX} \cdot \frac{(x - P_1)}{\tau} \cdot e^{-\left(\frac{(x - P_2)}{2\tau}\right)^2}$$

Il risultato dell'operazione di fit è mostrato in Figura 6.26.

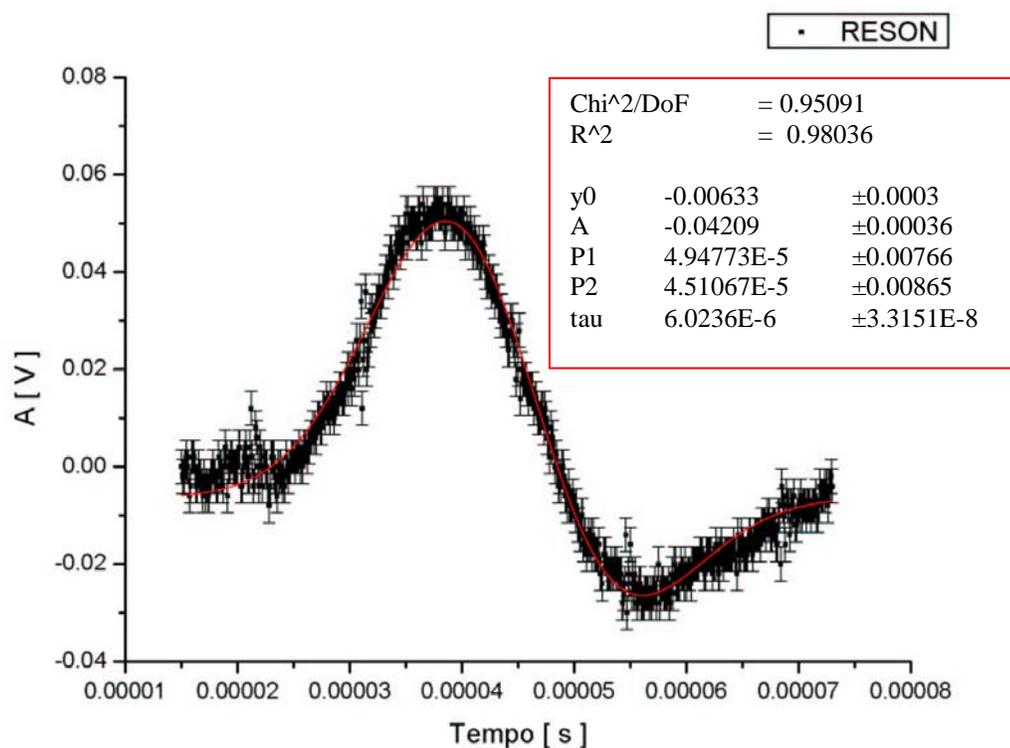


Figura 6.26 Segnale da RESON. Operazione di fit sui dati sperimentali. La funzione di fit è una bipolare. L'evento analizzato è quello di Figura 6.21.

- **Analisi dei segnali acquisiti dall'idrofono ITEP**

Per ogni evento, si determina l'ampiezza T_{MAX} [V] del polo positivo dell'impulso bipolare con un'operazione di fit. Tuttavia, a differenza dei casi BENTHOS e RESON, non si utilizza una funzione bipolare. Questo perché l'impulso acustico registrato dall'idrofono ITEP, come si vede dalla Figura 6.27, appare sovrapposto ad altri segnali, dovuti a riflessioni e alla presenza di altre sorgenti di perturbazione acustica. L'evidente differenza fra i segnali dell'idrofono ITEP rispetto a quelli registrati con BENTHOS e RESON è spiegabile con la diversa distanza degli idrofoni dalla regione in cui si localizza il picco di Bragg (Figura 6.12). Gli effetti descritti sono comunque presenti anche nel caso di BENTHOS e RESON, ma per questi idrofoni l'andamento bipolare è tuttavia dominante, e l'operazione di fit con singola funzione bipolare risulta, nella maggior parte dei casi, abbastanza soddisfacente. Per l'idrofono ITEP, invece, se si volesse descrivere analiticamente l'andamento dell'impulso, sarebbe necessario utilizzare una funzione di fit più complicata, costituita dalla sovrapposizione di più funzioni bipolari (almeno tre). Questa situazione complica notevolmente lo svolgimento dell'operazione di fit, dovendo tenere conto di un numero elevato di parametri. Per semplicità, quindi, si è deciso di svolgere l'analisi con un'unica funzione, di tipo gaussiana, sul primo picco, in quanto l'informazione necessaria, T_{MAX} , è tutta contenuta nella parte positiva del segnale. La funzione di fit è:

$$y = y_0 + T_{MAX} \cdot e^{-\left(\frac{1}{2} \left(\frac{(x-P_1)}{\tau}\right)^2\right)}$$

Il risultato dell'operazione di fit è mostrato in Figura 6.28.

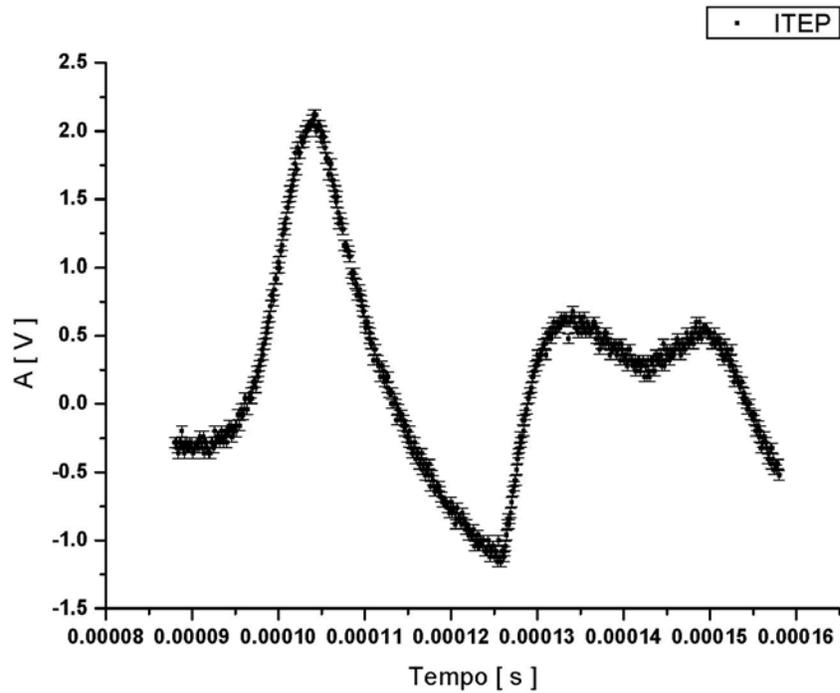


Figura 6.27 Segnale acquisito dall'idrofono ITEP (evento di Figura 6.21). L'impulso bipolare appare sovrapposto ad altri segnali; di conseguenza, non è possibile descrivere analiticamente l'andamento del segnale con una funzione bipolare singola.

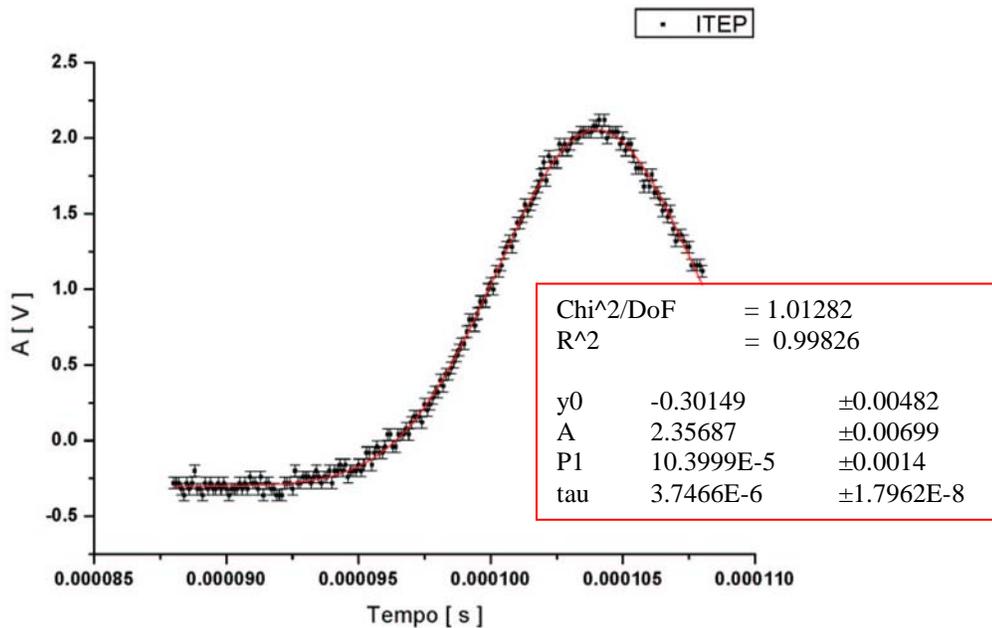


Figura 6.28 Segnale da ITEP. Operazione di fit sui dati sperimentali. La funzione di fit è una gaussiana sul primo picco. L'evento analizzato è quello di Figura 6.21.

La figura seguente (Figura 6.29) mostra, in modo per ora solo qualitativo, che l'ampiezza dei segnali, effettivamente, varia proporzionalmente con l'intensità del fascio.

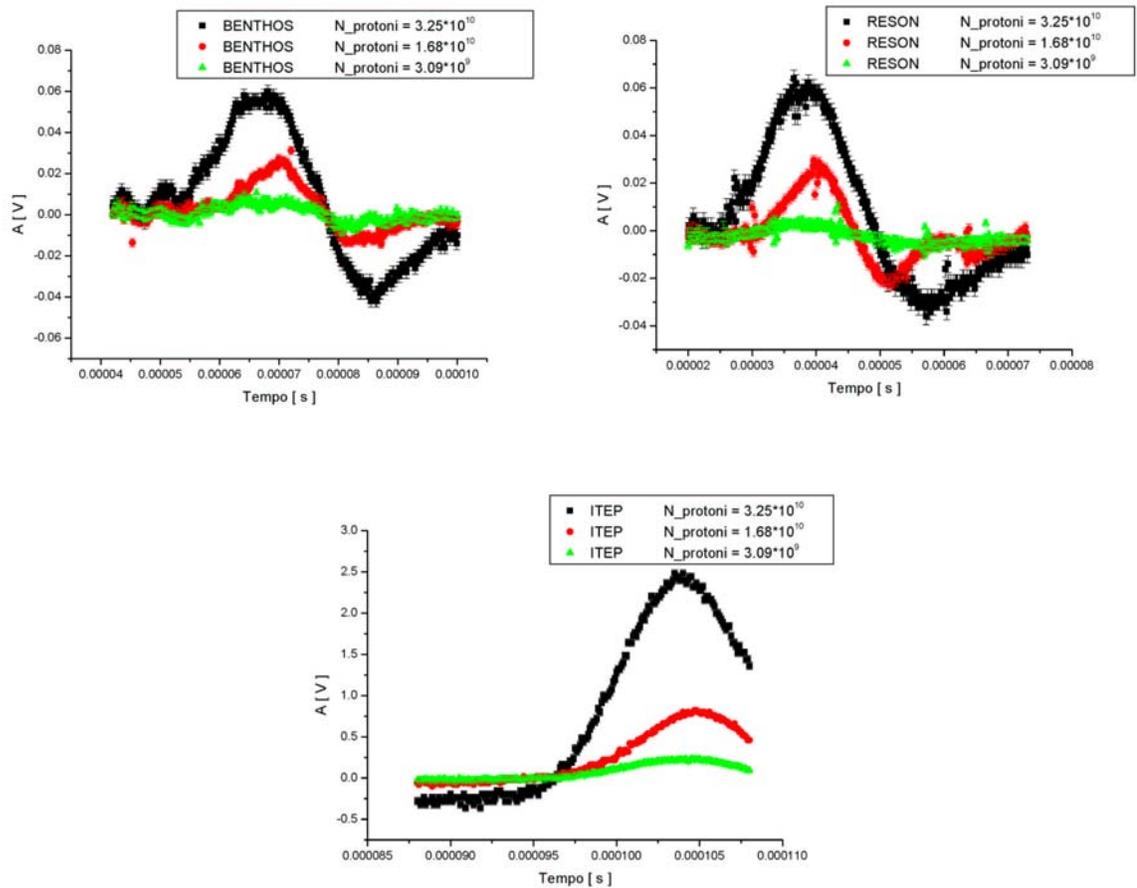


Figura 6.29 L'ampiezza dei segnali varia proporzionalmente con l'intensità del fascio. Si considerano gli eventi con i seguenti valori di intensità:

- $N_{\text{protoni}} = 3.25 \cdot 10^{10}$
- $N_{\text{protoni}} = 1.68 \cdot 10^{10}$
- $N_{\text{protoni}} = 3.09 \cdot 10^9$

Risultati dell'Analisi dei Dati

- **Dipendenza del segnale registrato dagli idrofoni dalle condizioni sperimentali**

L'analisi completa dei dati identifica il tipo di dipendenza funzionale che lega l'ampiezza del segnale rivelato per ogni idrofono al numero di protoni interagenti in acqua. Il risultato è ben rappresentato da una dipendenza lineare del tipo:

$$A_I [V] = a_I + b_I \cdot I [N_protoni]$$

dove l'indice $I = \text{BENTHOS, RESON, ITEP}$ distingue i tre idrofoni.

Le figure seguenti mostrano i risultati separatamente per i tre idrofoni, nelle diverse condizioni di misura. L'errore associato ai punti è quello calcolato dalla procedura di fit. Tutti i punti sono rappresentati con l'errore; quando l'errore non è ben visibile è perché il simbolo che identifica la posizione dei punti sperimentali nasconde la barra di errore.

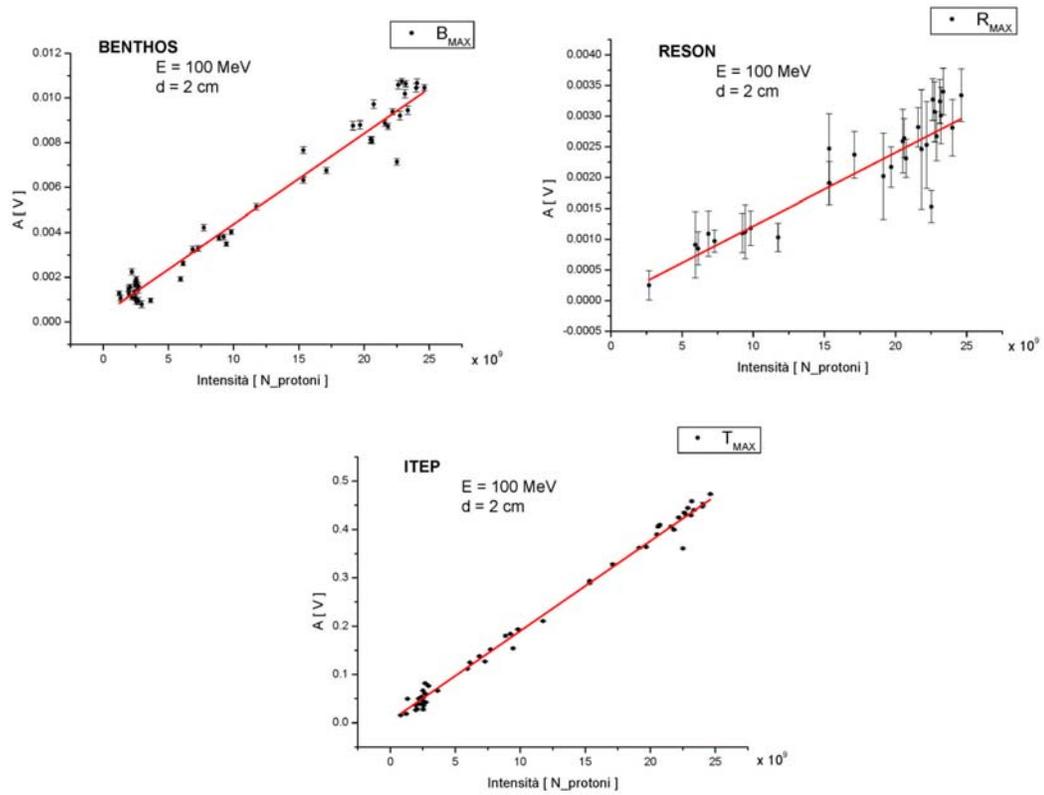


Figura 6.30 Ampiezza del segnale rivelato dagli idrofoni in funzione dell'intensità del fascio. (Energia $E = 100$ MeV; diametro del collimatore $d = 2$ cm).

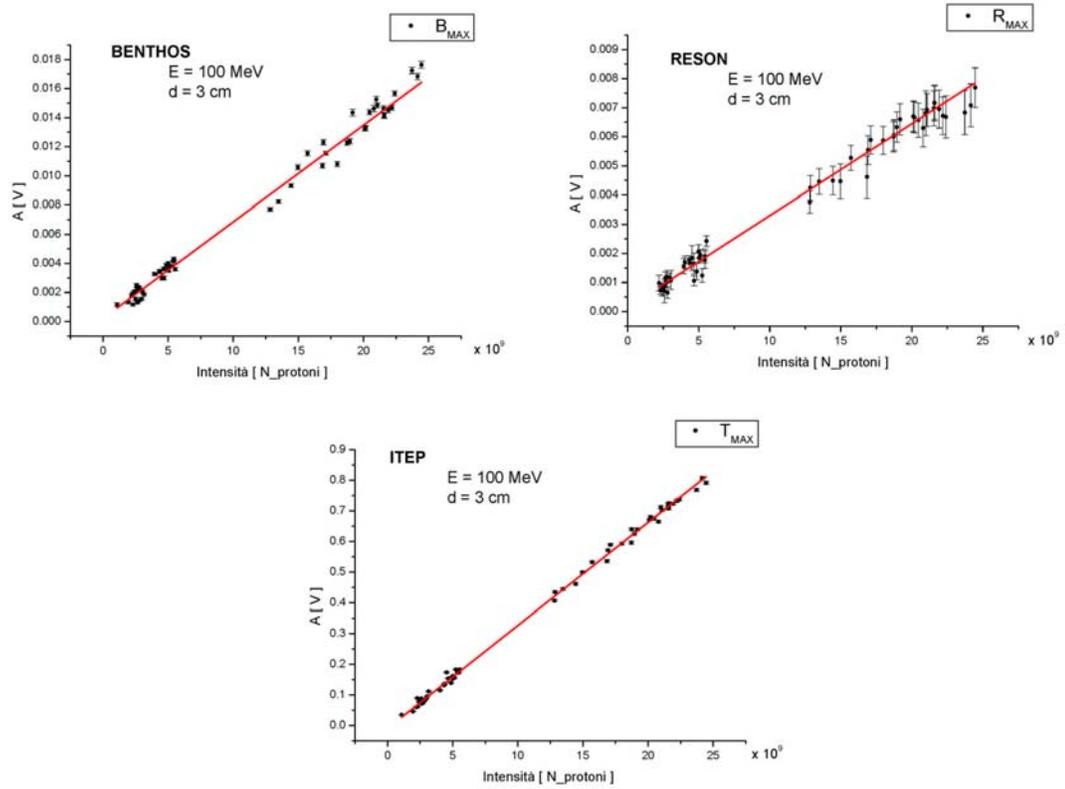


Figura 6.31 Ampiezza del segnale rivelato dagli idrofoni in funzione dell'intensità del fascio. (Energia $E = 100$ MeV; diametro del collimatore $d = 3$ cm).

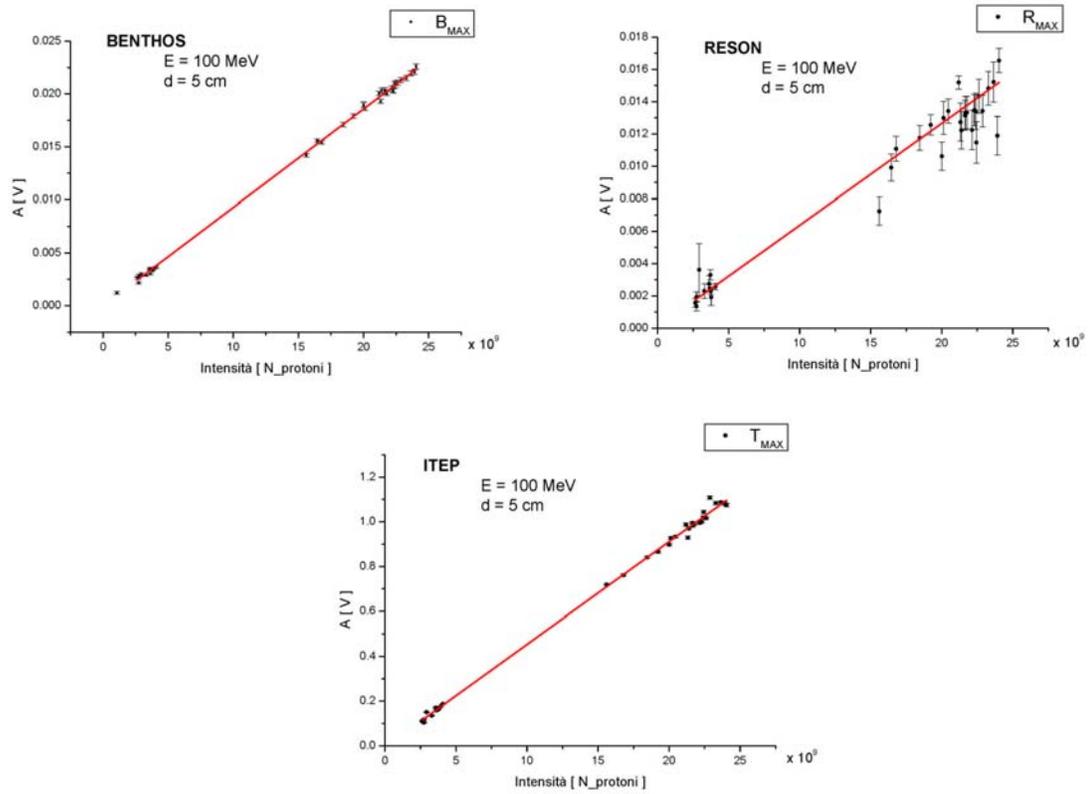


Figura 6.32 Ampiezza del segnale rivelato dagli idrofoni in funzione dell'intensità del fascio. (Energia $E = 100$ MeV; diametro del collimatore $d = 5$ cm).

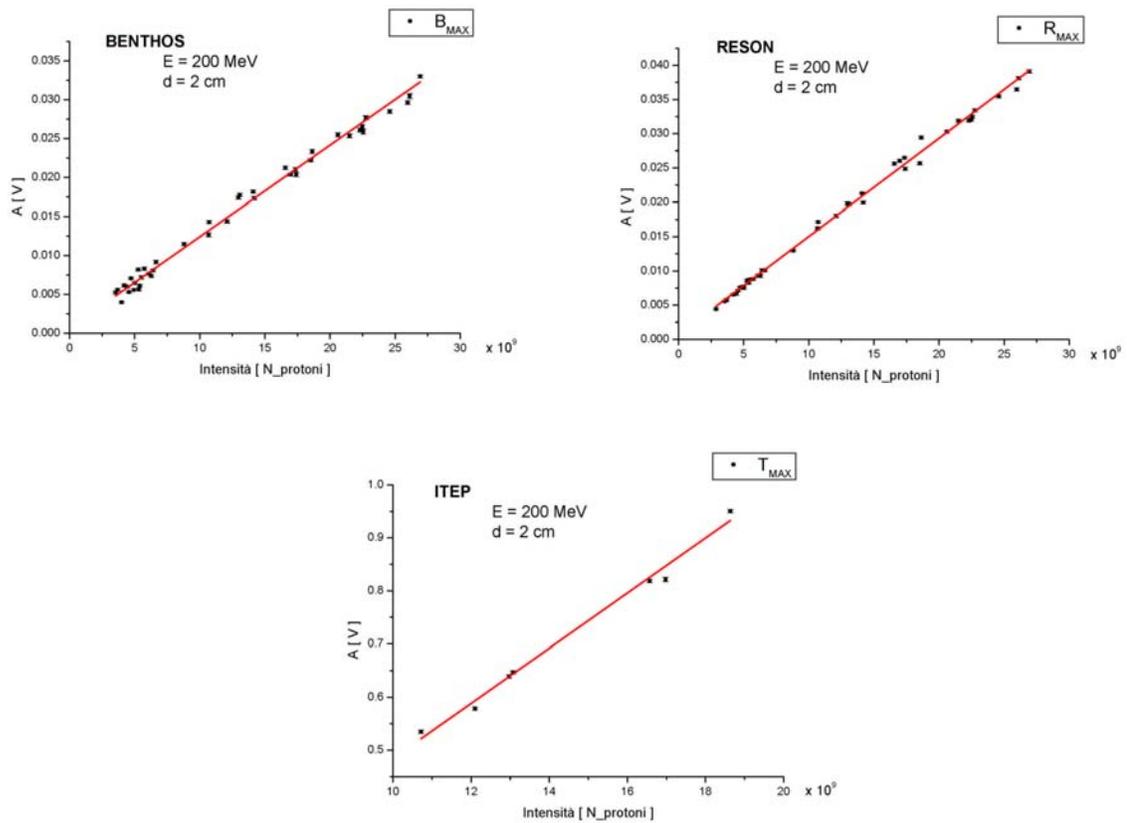


Figura 6.33 Ampiezza del segnale rivelato dagli idrofoni in funzione dell'intensità del fascio. (Energia $E = 200$ MeV; diametro del collimatore $d = 2$ cm).

NOTA: l'idrofono ITEP non è stato utilizzato per tutta la durata dell'acquisizione. È questo il motivo per cui sono disponibili solo un numero limitato di dati.

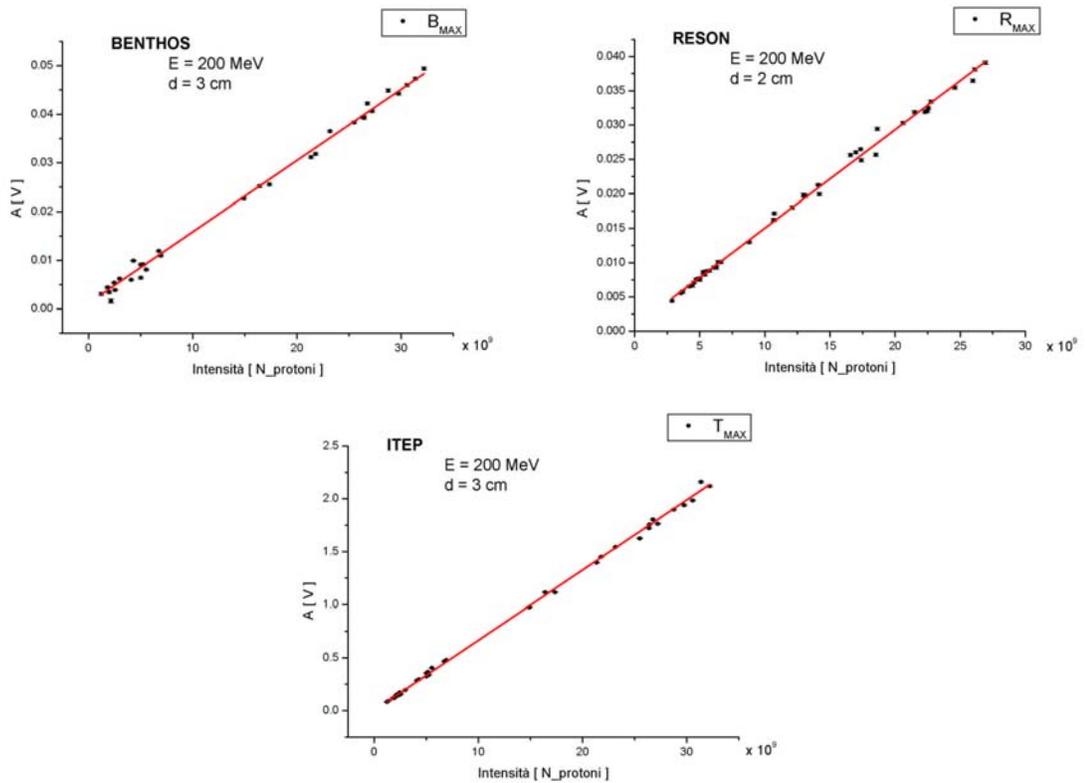


Figura 6.34 Ampiezza del segnale rivelato dagli idrofoni in funzione dell'intensità del fascio. (Energia $E = 200$ MeV; diametro del collimatore $d = 3$ cm).

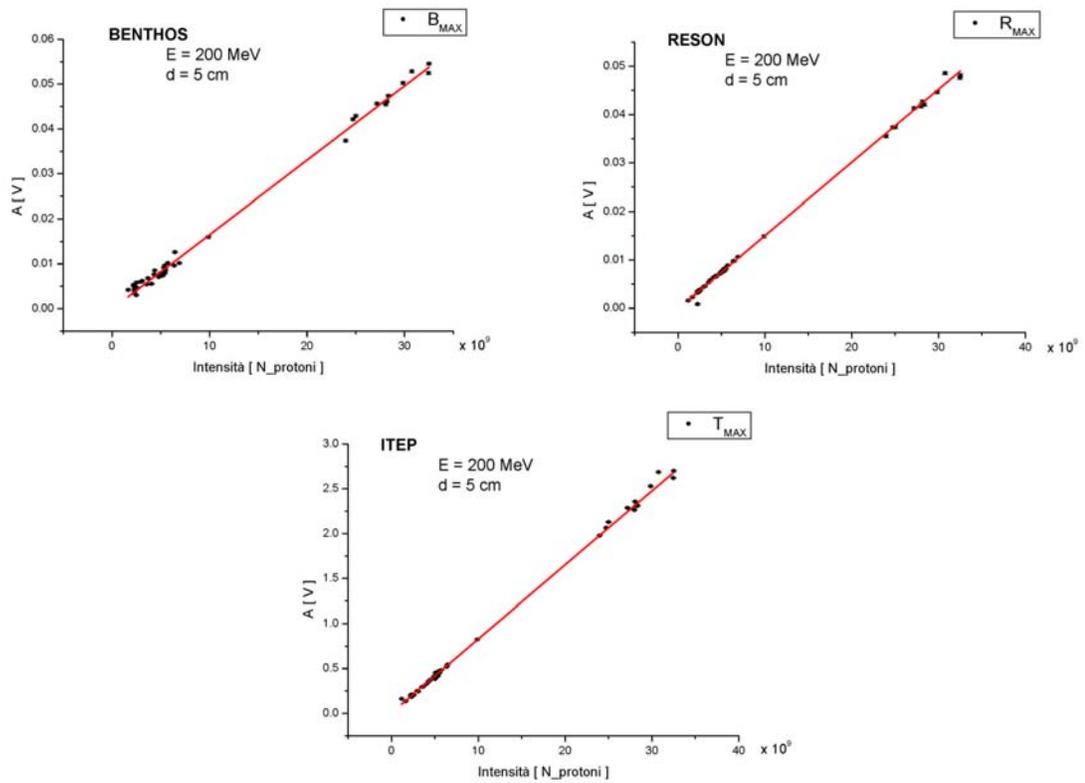


Figura 6.35 Ampiezza del segnale rivelato dagli idrofoni in funzione dell'intensità del fascio. (Energia $E = 200$ MeV; diametro del collimatore $d = 5$ cm).

I risultati dell'operazione di fit lineare sono elencati nella Tabella 6.1, insieme con l'indeterminazione associata ai parametri a (intercetta) e b (pendenza).

Energia	Collimatore	Idrofono	a	b
100	2	BENTHOS	$(3.4 \pm 0.3) \cdot 10^{-4}$	$(4.03 \pm 0.02) \cdot 10^{-13}$
100	2	RESON	$(0.2 \pm 1.4) \cdot 10^{-4}$	$(1.19 \pm 0.09) \cdot 10^{-13}$
100	2	ITEP	$(4.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$	$(1.860 \pm 0.002) \cdot 10^{-11}$
100	3	BENTHOS	$(2.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-4}$	$(6.63 \pm 0.02) \cdot 10^{-13}$
100	3	RESON	$(1.5 \pm 0.5) \cdot 10^{-4}$	$(3.15 \pm 0.07) \cdot 10^{-13}$
100	3	ITEP	$(-9.5 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	$(3.357 \pm 0.005) \cdot 10^{-11}$
100	5	BENTHOS	$(0.3 \pm 3.0) \cdot 10^{-5}$	$(9.28 \pm 0.03) \cdot 10^{-13}$
100	5	RESON	$(0.8 \pm 1.1) \cdot 10^{-4}$	$(6.29 \pm 0.1) \cdot 10^{-13}$
100	5	ITEP	$(-4.9 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$(4.580 \pm 0.007) \cdot 10^{-11}$
200	2	BENTHOS	$(6.6 \pm 0.5) \cdot 10^{-4}$	$(1.175 \pm 0.004) \cdot 10^{-12}$
200	2	RESON	$(7.1 \pm 0.6) \cdot 10^{-4}$	$(1.431 \pm 0.004) \cdot 10^{-12}$
200	2	ITEP	$(-3.5 \pm 0.7) \cdot 10^{-2}$	$(5.19 \pm 0.05) \cdot 10^{-11}$
200	3	BENTHOS	$(1.21 \pm 0.06) \cdot 10^{-3}$	$(1.464 \pm 0.004) \cdot 10^{-12}$
200	3	RESON	$(3.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$	$(1.492 \pm 0.003) \cdot 10^{-12}$
200	3	ITEP	$(2.24 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$	$(6.621 \pm 0.006) \cdot 10^{-11}$
200	5	BENTHOS	$(-0.7 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$	$(1.656 \pm 0.003) \cdot 10^{-12}$
200	5	RESON	$(-0.8 \pm 0.4) \cdot 10^{-4}$	$(1.510 \pm 0.004) \cdot 10^{-12}$
200	5	ITEP	$(5.9 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$	$(8.234 \pm 0.008) \cdot 10^{-11}$

Tabella 6.1 Operazione di fit lineare: valore dei parametri a (intercetta) e b (pendenza) e loro indeterminazione. La Tabella 6.1 è il risultato dell'analisi svolta per la redazione della presente tesi ("GDB").

Alcuni commenti generali sui risultati di Tabella 6.1 sono:

- un'intercetta diversa da zero può essere spiegata con l'esistenza di un segnale (componente DC, rumore elettronico, rumore ambientale) che non è stato completamente compensato in fase di elaborazione dati;
- i valori di b per l'idrofono ITEP sono maggiori di quelli che caratterizzano gli altri due idrofoni; questo è compatibile con il fatto che l'amplificazione dell'idrofono ITEP è maggiore rispetto a quella di RESON e BENTHOS (Figura 6.5): una differenza di 40 dB nell'amplificazione equivale a un fattore 100, proprio quanto si osserva dai risultati della Tabella 6.1.

I ricercatori di ITEP hanno partecipato alle operazioni di acquisizione e hanno proceduto, separatamente da noi, all'analisi dei dati acquisiti. Anche per i colleghi di ITEP, lo scopo dell'analisi è, in prima istanza, investigare il tipo di dipendenza funzionale che lega l'ampiezza del segnale misurato dagli idrofoni all'intensità del fascio. L'analisi è stata effettuata con procedure software indipendenti; in particolare, sono diverse anche le modalità con cui è stata estratta l'informazione dalla risposta degli idrofoni⁴. Il risultato ottenuto è, anche in questo caso, una dipendenza lineare. I parametri della funzione di fit lineare a (intercetta) e b (pendenza) sono elencati in Tabella 6.2. Questi valori possono essere confrontati con il contenuto della Tabella 6.1.

⁴ Invece di ricavare l'ampiezza del segnale acustico dal risultato di un'operazione di fit sull'impulso bipolare, il gruppo di ITEP ha ricercato il massimo del segnale.

Energia	Collimatore	Idrofono	a	b
100	2	BENTHOS	$(5.0 \pm 1.6) \cdot 10^{-4}$	$(4.3 \pm 0.1) \cdot 10^{-13}$
100	2	RESON	$(-1.7 \pm 0.7) \cdot 10^{-4}$	$(5.24 \pm 0.05) \cdot 10^{-13}$
100	2	ITEP	$(-3.4 \pm 2.8) \cdot 10^{-3}$	$(1.90 \pm 0.02) \cdot 10^{-11}$
100	3	BENTHOS	$(3.4 \pm 1.5) \cdot 10^{-4}$	$(6.10 \pm 0.01) \cdot 10^{-13}$
100	3	RESON	$(-2.1 \pm 0.7) \cdot 10^{-4}$	$(7.14 \pm 0.06) \cdot 10^{-13}$
100	3	ITEP	$(-6.0 \pm 2.6) \cdot 10^{-3}$	$(3.23 \pm 0.02) \cdot 10^{-11}$
100	5	BENTHOS	$(1.2 \pm 2.1) \cdot 10^{-4}$	$(8.0 \pm 0.1) \cdot 10^{-13}$
100	5	RESON	$(-2.4 \pm 6.0) \cdot 10^{-5}$	$(9.09 \pm 0.04) \cdot 10^{-13}$
100	5	ITEP	$(1.7 \pm 3.6) \cdot 10^{-3}$	$(4.42 \pm 0.02) \cdot 10^{-11}$
200	2	BENTHOS	$(6.2 \pm 3.0) \cdot 10^{-4}$	$(1.32 \pm 0.02) \cdot 10^{-12}$
200	2	RESON	$(2.3 \pm 5.9) \cdot 10^{-4}$	$(1.57 \pm 0.04) \cdot 10^{-12}$
200	2	ITEP	x	x
200	3	BENTHOS	$(5.6 \pm 2.4) \cdot 10^{-4}$	$(1.60 \pm 0.02) \cdot 10^{-12}$
200	3	RESON	$(-1.2 \pm 0.5) \cdot 10^{-3}$	$(1.9 \pm 0.3) \cdot 10^{-13}$
200	3	ITEP	$(8.7 \pm 4.7) \cdot 10^{-3}$	$(6.67 \pm 0.03) \cdot 10^{-11}$
200	5	BENTHOS	$(1.2 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$	$(1.67 \pm 0.01) \cdot 10^{-12}$
200	5	RESON	$(-2.0 \pm 4.1) \cdot 10^{-4}$	$(1.92 \pm 0.03) \cdot 10^{-12}$
200	5	ITEP	$(2.5 \pm 4.1) \cdot 10^{-3}$	$(8.41 \pm 0.03) \cdot 10^{-11}$

Tabella 6.2 Operazione di fit lineare: valore dei parametri a (intercetta) e b (pendenza) e loro indeterminazione. La Tabella 6.2 è il risultato dell'analisi svolta dai colleghi di ITEP ("ITEP"). I colleghi di ITEP non forniscono informazioni sull'idrofono ITEP, nelle condizioni di misura $E=200$ MeV, $d=2$ cm.

I dati delle tabelle (Tabella 6.1 e Tabella 6.2) sono riportati nei grafici di Figura 6.36; i grafici mettono in evidenza il confronto tra i risultati dell'analisi di ITEP ("ITEP") e quella svolta per la redazione della presente tesi ("GDB").

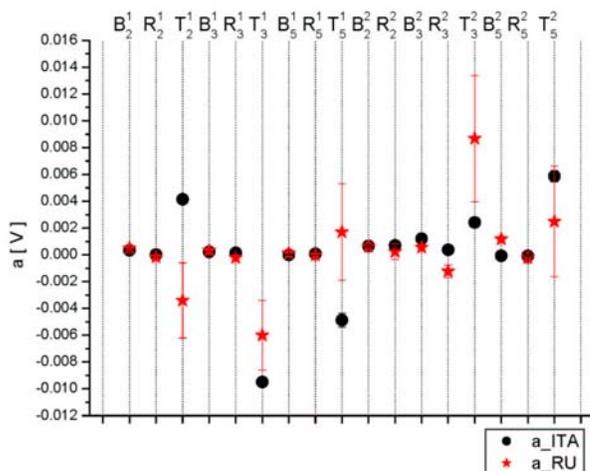


Figura 6.36. a Parametro a .

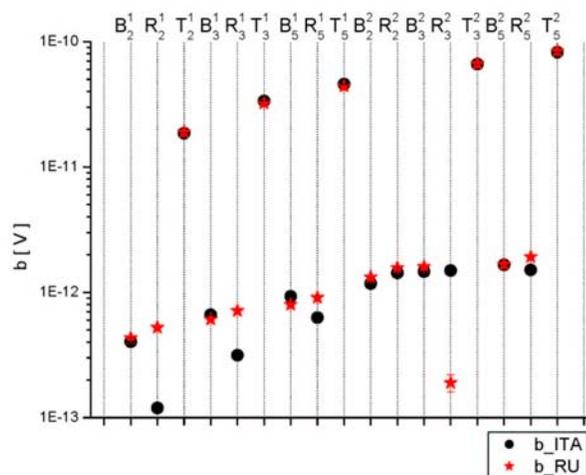


Figura 36. b Parametro b . La scala delle ordinate è logaritmica.

Figura 6.36. Confronto tra i risultati della nostra analisi (GDB) e quelli dell'analisi russa (ITEP). Gli errori inseriti nei grafici sono le indeterminazioni delle tabelle (Tabella 2 e Tabella 3). La notazione I_n^m indica l'idrofono e le condizioni di misura a cui si riferisce il risultato: I = B, R, T (BENTHOS, RESON, ITEP); m = 1, 2 (energia E = 100 MeV, E = 200 MeV); n = 2, 3, 5 (diametro del collimatore d = 2 cm, d = 3 cm, d = 5 cm). I dati sono riportati nei grafici nell'ordine con cui sono inseriti nelle tabelle.

Teoricamente, l'ampiezza della perturbazione acustica prodotta nella regione del picco di Bragg non dipende dall'energia del primario. Infatti, come si vede dalla curva che descrive la perdita di energia in acqua in funzione della profondità di penetrazione (Figura 6.37), sia nel caso $E = 100 \text{ MeV}$ che nel caso $E = 200 \text{ MeV}$ ⁵, la quantità di energia rilasciata dalla particella a fine percorso (picco di Bragg) è la stessa, ovvero circa 50 MeV.

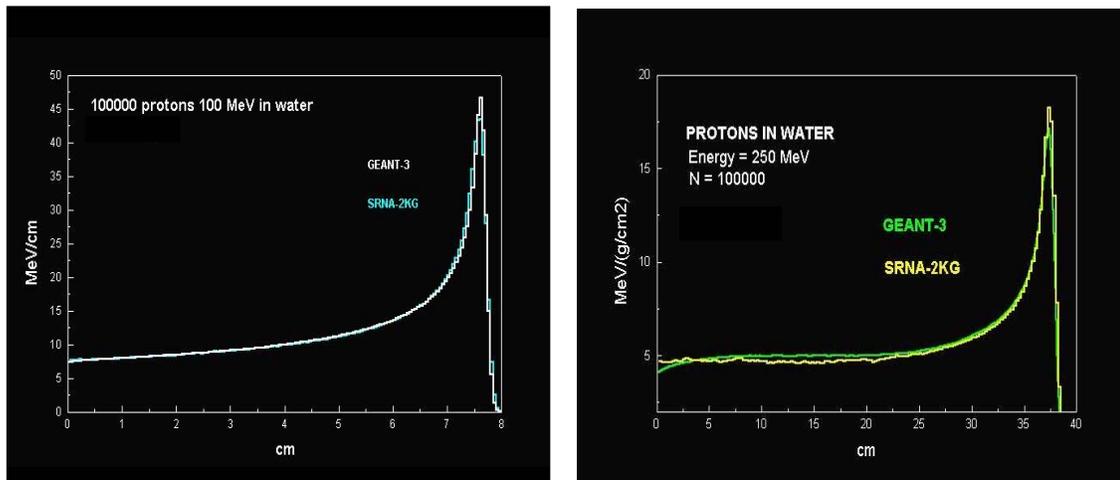


Figura 6.37 Perdita di energia di protoni in acqua, in funzione della profondità di penetrazione. In corrispondenza del picco di Bragg, l'energia rilasciata in acqua è circa 50 MeV, indipendentemente dall'energia del primario. I grafici sono il risultato di simulazioni per due differenti energie del primario ($E = 100 \text{ MeV}$, $E = 250 \text{ MeV}$); la statistica è calcolata su $N_{\text{protoni}} = 100000$ [web11].

⁵ In realtà, la Figura 6.36 mostra la perdita di energia in acqua per protoni di energia $E = 250 \text{ MeV}$. Resta comunque valido quanto detto a proposito della quantità di energia rilasciata in corrispondenza del picco di Bragg.

Ci si aspetta, quindi, che, per ogni idrofono, l'ampiezza del segnale misurato dipenda solo dall'intensità del fascio, cioè dal numero di particelle che contribuiscono a costituire la sorgente, e non dall'energia del primario. Questo significa che, teoricamente, è possibile, per ogni idrofono, rappresentare i risultati dell'analisi su un unico grafico: le misure ottenute con energia del primario $E = 100$ MeV e con energia $E = 200$ MeV dovrebbero essere descritte, in prima approssimazione, dalla stessa coppia di parametri.

I risultati di Tabella 6.1 e Tabella 6.2, però, smentiscono quanto detto. Si osserva che i parametri a e b della dipendenza lineare non sono costanti al variare delle condizioni di misura (energia del fascio e diametro del collimatore), e ciò significa che non è possibile individuare una retta unica che descriva l'andamento dei dati sperimentali.

Per spiegare le differenze tra protoni a 100 MeV e protoni a 200 MeV bisogna, senza dubbio, considerare, come prima cosa, l'effetto del Multiple Coulomb Scattering (Figura 6.4). Dalle simulazioni di Figura 6.37, si vede che, anche se l'energia totale rilasciata a fine percorso è la stessa, indipendentemente dall'energia del primario, varia, nei due casi, la "larghezza" del picco di Bragg, e, di conseguenza, la densità di energia in corrispondenza del picco. Rispetto al caso $E = 100$ MeV, un fascio di protoni con $E = 200$ MeV, per effetto del Multiple Coulomb Scattering, presenta una maggiore dispersione e l'energia rilasciata risulta distribuita su un volume maggiore. Come spiegato nel Capitolo 3, il fenomeno della formazione di un segnale acustico in acqua dipende non solo dall'energia depositata, ma anche dalla densità di energia; tenendo conto di ciò, si giustificano le differenze osservate per i due diversi valori di energia del primario.

Un'altra spiegazione della dipendenza dei risultati dalle condizioni di misura può essere data supponendo che, variando l'energia del primario, cambino le impostazioni di macchina che regolano la focalizzazione del fascio: di conseguenza, il profilo del fascio non è una costante, ma dipende dalla scelta delle condizioni di misura. In altre parole, i risultati dell'analisi confermano che la descrizione fornita in Figura 6.15 è solo un modello semplificato per la distribuzione delle particelle nello spazio; i parametri che descrivono, nella realtà, il profilo del fascio, non sono noti.

Una prima soluzione, seppure sempre approssimata e semplificata, consiste nel riconsiderare il modello del fascio proposto in Figura 6.15, alla luce delle informazioni ottenute dall'analisi. Lo scopo è ricavare a posteriori, dai risultati sperimentali, i parametri che descrivono, nella realtà, il profilo del fascio.

Le considerazioni che seguono sono solo preliminari. Una risposta più completa al problema della ricostruzione dei parametri del fascio è possibile solo se si dispone di una spiegazione soddisfacente per tutti i risultati dell'analisi. Allo stato attuale del lavoro, rimangono alcuni punti non del tutto chiari nell'interpretazione dei dati di risposta degli idrofoni. Inoltre, considerare tutte le variabili significa, inevitabilmente, introdurre complicazioni al semplice modello del fascio proposto in Figura 6.15. La soluzione proposta, pertanto, valida solo a livello preliminare e a scopo esemplificativo del metodo di indagine, considera solo le misure relative a protoni di 100 MeV e i dati di BENTHOS e ITEP. Supponiamo che sia valido il modello semplice di un profilo gaussiano, simmetrico attorno a Z, centrato nell'origine. L'informazione incognita, da ricavare sperimentalmente, è il valore da assegnare al parametro σ ($\sigma_x = \sigma_y$), che definisce la larghezza della distribuzione gaussiana, cioè la dispersione radiale delle particelle nei piani XZ e YZ. Il punto di partenza è l'osservazione del fatto che i risultati non sono indipendenti dal diametro del collimatore, come si vede dalla Figura 6.38 e dalla Figura 6.39. I valori di intensità rappresentati in ascissa sono quelli misurati dal

BCT, e non coincidono con l'intensità "effettiva", cioè con il numero reale di particelle che attraversano il collimatore e interagiscono nel volume d'acqua. È evidente che i valori di intensità misurati devono essere corretti per tenere conto dell'effetto del collimatore, al fine di produrre un allineamento dei dati. Il fattore di correzione dipende dal valore del parametro σ della distribuzione gaussiana.

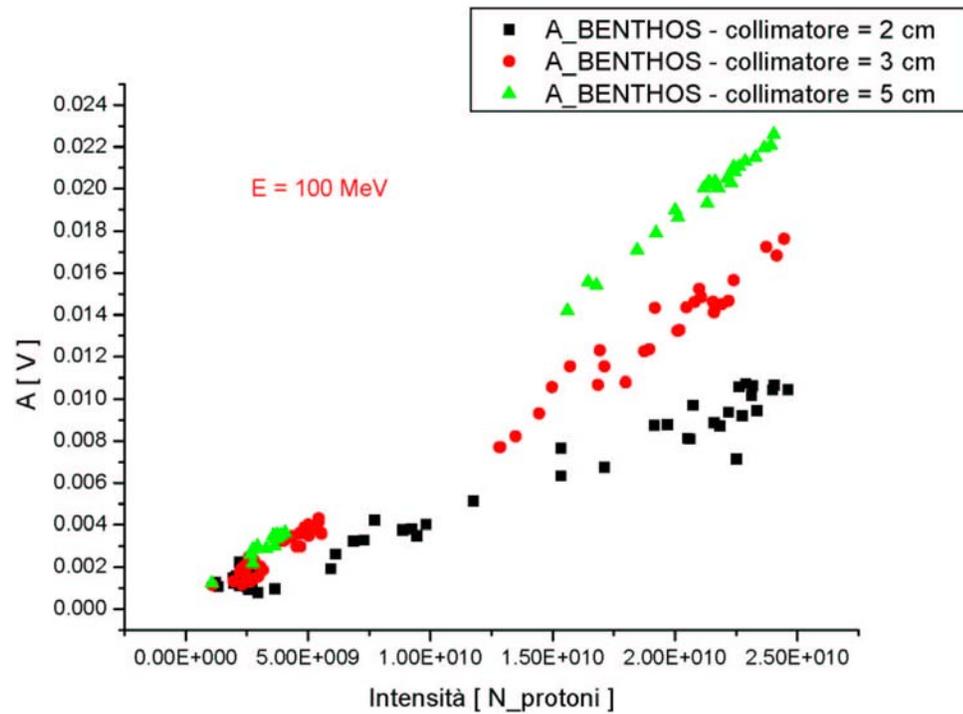


Figura 6.38 Dipendenza dei risultati dal diametro del collimatore. Dati dell'idrofono BENTHOS, con energia del primario $E = 100$ MeV.

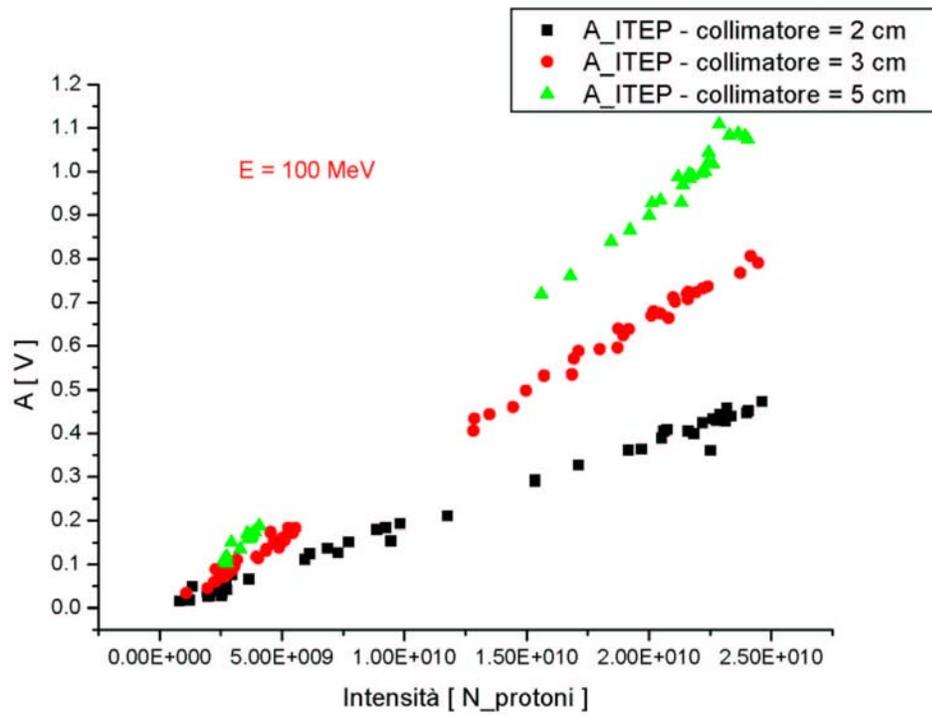


Figura 6.39 Dipendenza dei risultati dal diametro del collimatore. Dati dell'idrofono ITEP, con energia del primario $E = 100$ MeV.

L'informazione resa disponibile dall'analisi è la dipendenza delle ampiezze del segnale acustico misurato dagli idrofoni, per ogni collimatore, in funzione dell'intensità del fascio di protoni estratto dal sincrotrone (Figure 6.30 – 6.32 e dati di Tabella 6.1). In particolare, si considerano i valori di b . I rapporti⁶ $C_x^I = \frac{b_x^I}{b_5^I}$ definiscono, sperimentalmente, l'effetto del collimatore. Il passo successivo è simulare la distribuzione delle particelle nello spazio attorno a Z, sulla base dell'ipotesi di un profilo gaussiano simmetrico in X e Y ($\sigma_x = \sigma_y$), tenendo conto dei collimatori (simulazione di un fascio collimato). La simulazione deve riflettere la situazione reale, descritta dai dati sperimentali. I risultati della simulazione sono confrontati con i risultati dell'analisi; viene selezionato il valore di σ che meglio riproduce la situazione sperimentale. Nel caso dei dati degli idrofoni BENTHOS e ITEP per misure con fascio di 100 MeV, si trova il valore $\sigma = 1.95$ cm. Le Figure 6.40 e 6.41 mostrano i risultati della simulazione.

⁶ La notazione utilizzata è la seguente: I = B, T (BENTHOS, RESON); x = 2, 3 (diametro del collimatore, cm).

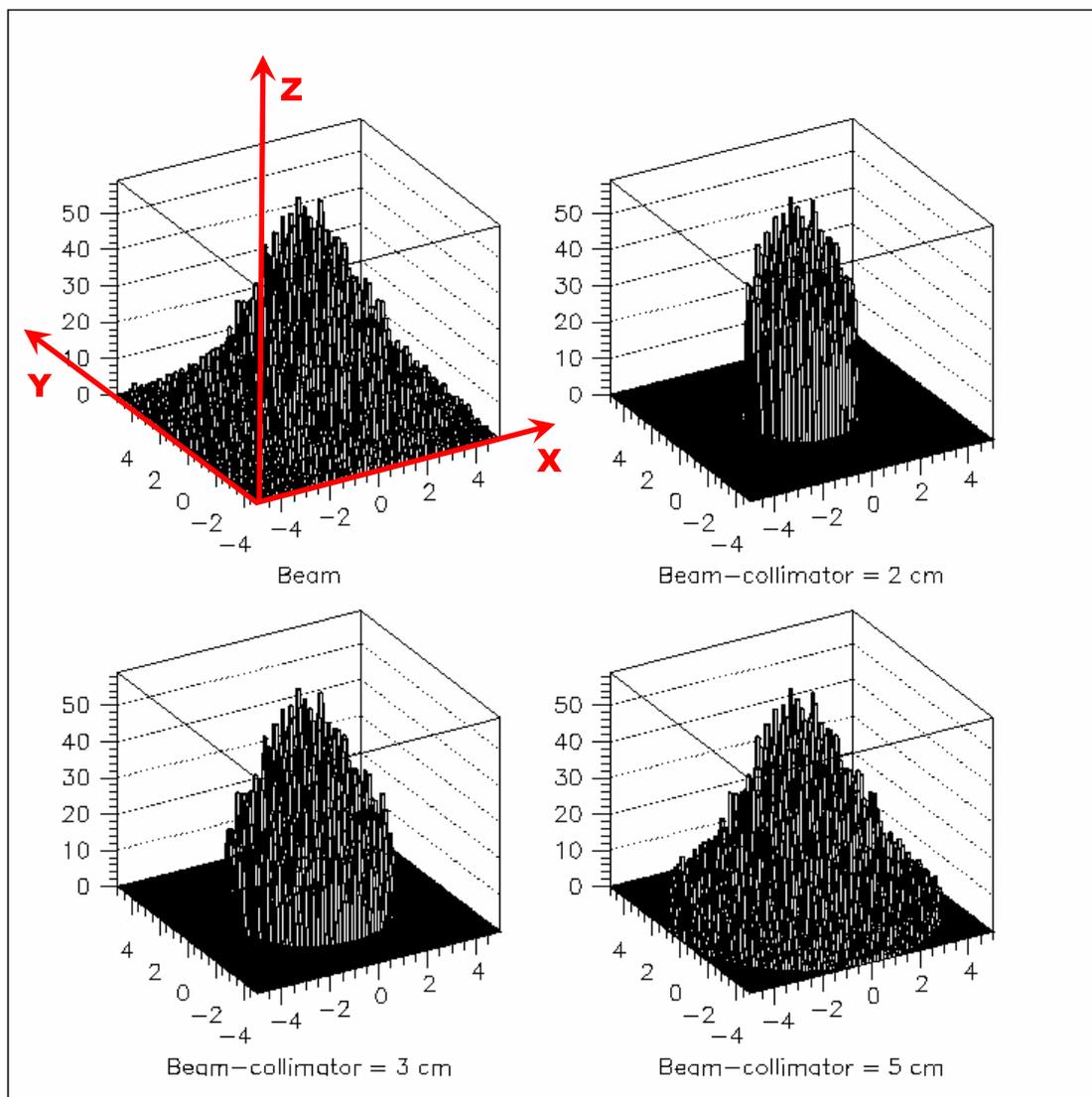


Figura 6.40 Lego-Plot della distribuzione di protoni nei piani XZ e YZ. È evidente l'effetto dei collimatori sulla forma del fascio. La funzione di distribuzione che meglio riproduce i risultati sperimentali è una gaussiana, con $\sigma = 1.95$ cm.

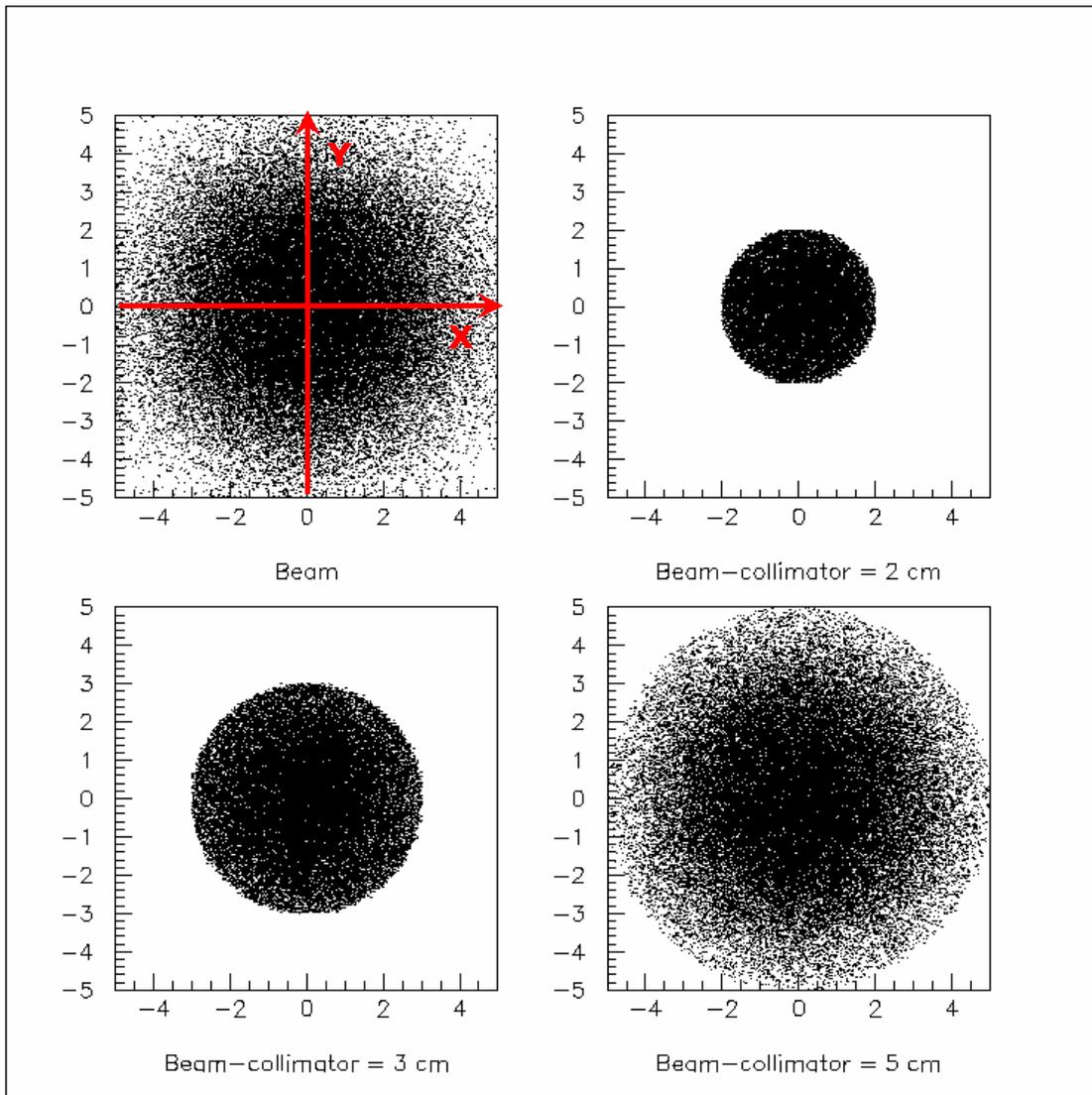


Figura 6.41 Plot bidimensionale della distribuzione di protoni nel piano XZ e YZ (sezione del fascio). È evidente l'effetto dei collimatori sulla forma del fascio. La funzione di distribuzione è una gaussiana, con $\sigma = 1.95$ cm.

I risultati della simulazione con $\sigma = 1.95$ cm sono utilizzati per calcolare il coefficiente di correzione C all'intensità del fascio misurata dal BCT. In particolare, si ha:

$$C(x) = N(x)/N_{TOT}$$

con $N(x)$ = Numero di protoni in un cerchio di raggio (x)

N_{TOT} = Numero totale di protoni

Otteniamo, così, un insieme di valori $C(x)$ che ci permettono di stimare, dal valore misurato (BCT) di protoni estratti, l'intensità del fascio di protoni che ha effettivamente depositato energia in acqua.

Possiamo, quindi, nuovamente graficare l'ampiezza del segnale registrato dagli idrofoni in funzione dell'intensità "effettiva" dei protoni.

Le Figure 6.42 e 6.43 mostrano l'effetto della correzione introdotta sui grafici di Figura 6.38 e di Figura 6.39.

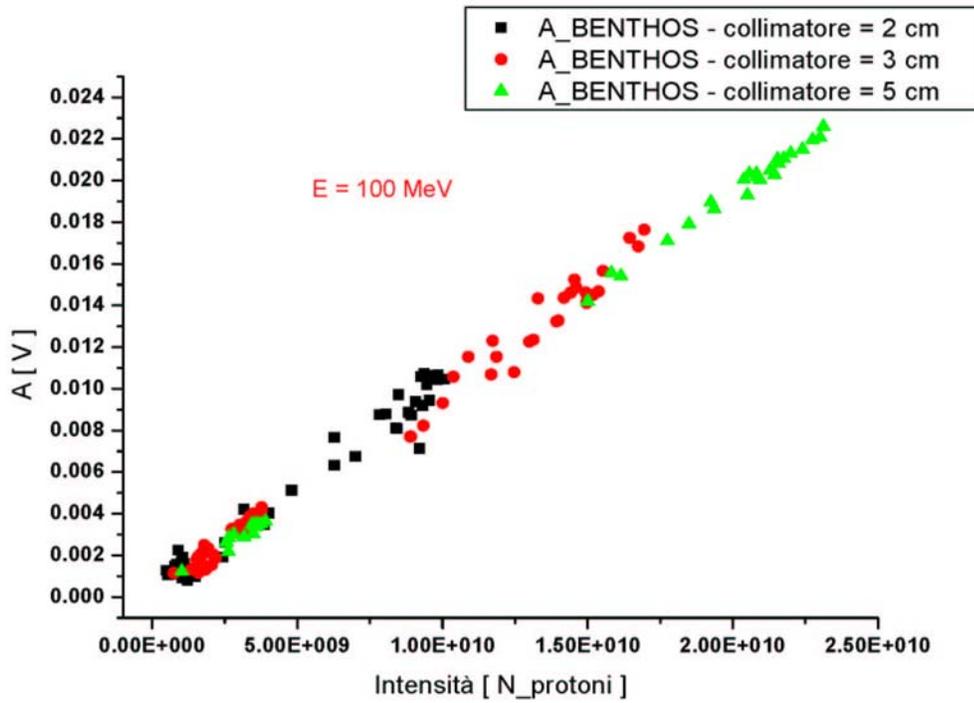


Figura 6.42 Risultati dell'analisi sui dati dell'idrofono BENTHOS, tenendo conto della correzione sull'intensità, calcolata dalla simulazione del fascio.

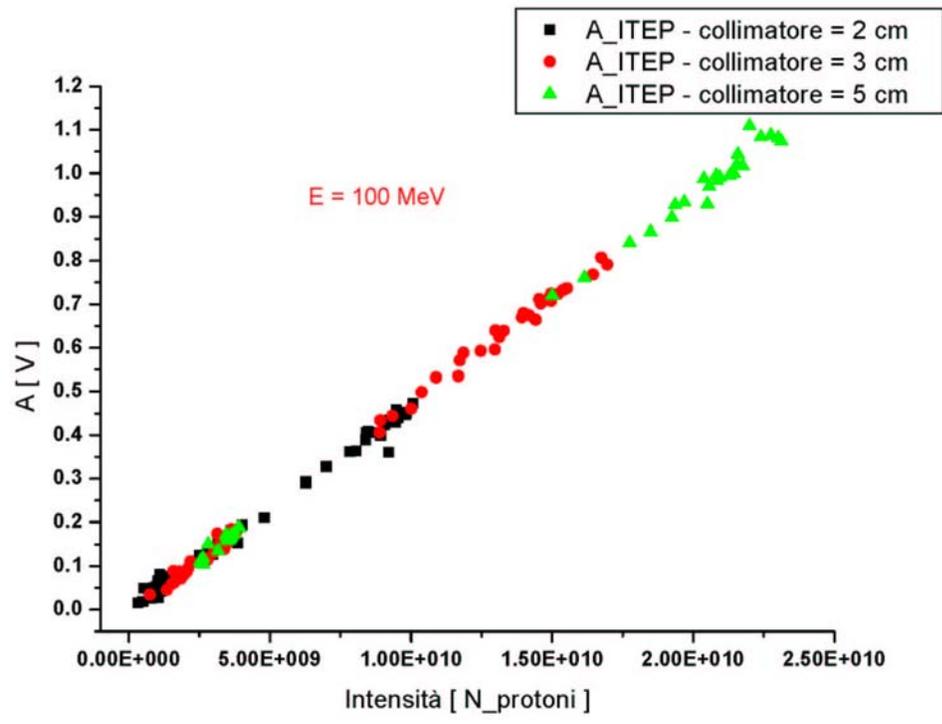


Figura 6.43 Risultati dell'analisi sui dati dell'idrofono ITEP, tenendo conto della correzione sull'intensità, calcolata dalla simulazione del fascio.

- **Analisi in frequenza e stima del segnale acustico in pressione**

Le ultime considerazioni da svolgere a proposito delle misure di ITEP riguardano l'analisi in frequenza dei segnali acquisiti dagli idrofoni. Anche questa parte del lavoro è allo stadio preliminare: sono stati presi in considerazione solo un numero limitato di eventi. I risultati mostrati nelle figure si riferiscono ad un evento nelle condizioni di misura: energia del primario $E = 200 \text{ MeV}$; diametro del collimatore $d = 5 \text{ cm}$.

Per prima cosa, consideriamo lo spettro del segnale acquisito dagli idrofoni. Questa operazione è possibile grazie all'opzione FFT del programma *OriginPro 7.0*, che calcola la trasformata di Fourier dei segnali⁷. La Figura 6.44, relativa all'idrofono BENTHOS, è inserita per esemplificare il risultato dell'operazione FFT sui dati. L'operazione di trasformazione produce una funzione complessa della frequenza. Il grafico rappresenta il modulo (Amplitude) e la fase (Angle) del numero complesso. "Amplitude" si misura in Volt, essendo il segnale originario una misura di tensione; "Angle" è misurato in gradi (deg). La rappresentazione della fase è "unwrapped", cioè "non impacchettata": questo significa che i possibili valori della fase non sono limitati all'intervallo ($0^\circ - 360^\circ$).

⁷ Più precisamente, l'opzione FFT calcola una "Fast Fourier Transform": si tratta di un particolare algoritmo, che riduce al minimo il tempo di calcolo per una DFT (Discrete Fourier Transform).

Informazioni più dettagliate sulla descrizione matematica della DFT e sulla procedura di calcolo FFT possono essere trovate consultando, alla voce "FFT", il manuale di *OriginPro7.0*. Il manuale è disponibile tra le opzioni "Help" del programma.

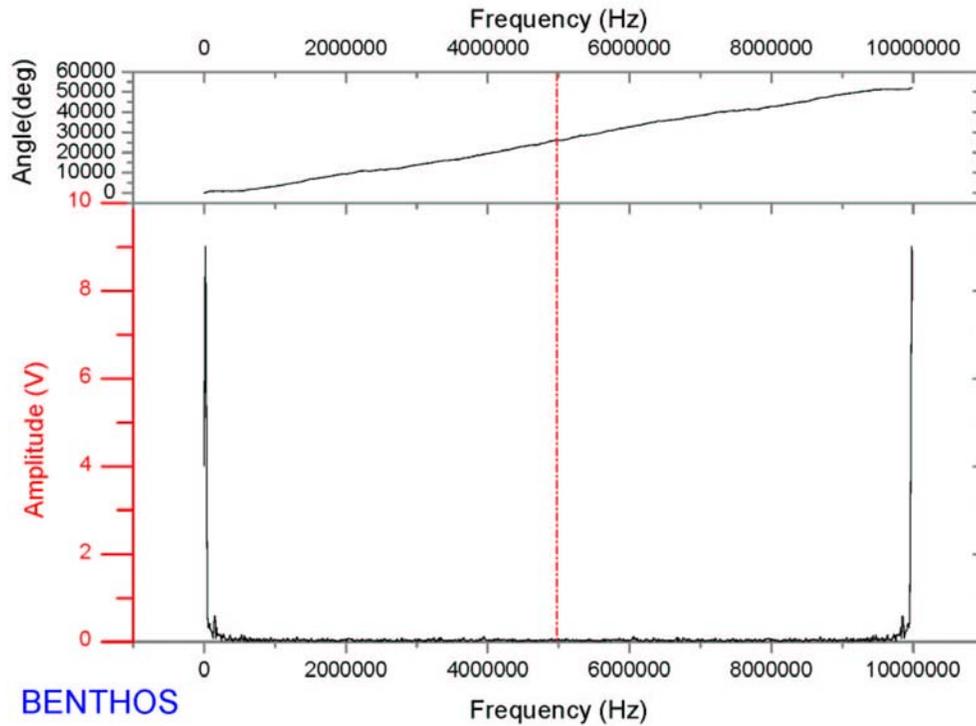


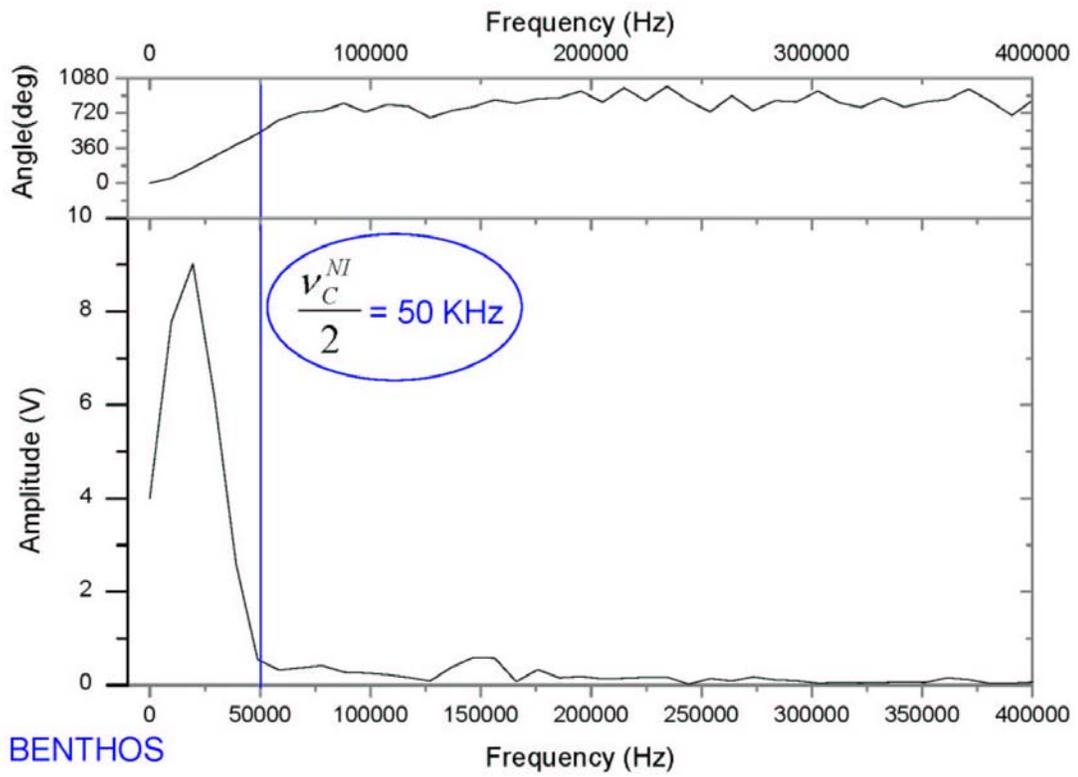
Figura 6.44 Risultato dell'operazione FFT sui dati dell'idrofono BENTHOS (segnale di Figura 6.25).

La linea rossa tratteggiata in Figura 6.44 individua la regione di frequenze alla quale è associata informazione, tenendo conto delle indicazioni del teorema di Nyquist e del fatto che il sistema di acquisizione utilizzato ha una frequenza di campionamento $\nu_C = 10 \text{ MHz}$ ⁸. Per ragioni computazionali, l'algoritmo di calcolo della FFT prende in considerazione l'intervallo di frequenze (0 Hz – 10 MHz); tutto quello che è visualizzato oltre la linea rossa ($\nu = 5 \text{ MHz}$) è l'immagine speculare di quanto rappresentato nell'intervallo (0 Hz – 5 MHz).

⁸ Il teorema di Nyquist, infatti, afferma che, campionando a $\nu_C = 10 \text{ MHz}$, la massima frequenza per la quale si acquisiscono informazioni è $\frac{\nu_C}{2} = 5 \text{ MHz}$. In altre parole, dato un sistema di acquisizione con frequenza di campionamento ν_C , non sono disponibili informazioni relative allo spettro che si estende oltre la frequenza $\frac{\nu_C}{2}$.

Le Figure 6.45 – 6.47 riportano il risultato dell'operazione FFT su un singolo segnale bipolare acquisito separatamente con i tre idrofoni. La scala delle ordinate è ridimensionata per mettere in evidenza la forma dello spettro nella regione delle basse frequenze, dove si osserva il contributo più significativo. I grafici si riferiscono ad un evento con energia del primario $E = 200$ MeV e diametro del collimatore $d = 5$ cm.

La linea blu tracciata nei grafici mette in evidenza la frequenza $\nu = 50$ KHz; questo valore è pari a $\frac{\nu_C^{NI}}{2}$, dove ν_C^{NI} è la frequenza di campionamento della scheda di acquisizione National Instrument. Si conferma, pertanto, che l'acquisizione per mezzo della scheda NI, con $\nu_C = 100$ KHz, non è adatta per la misura dei segnali il cui spettro è rappresentato nelle Figure 6.44 – 6.46: il teorema di Nyquist, infatti, afferma che, in questa condizioni di acquisizione, si perde informazione sul segnale, in quanto lo spettro di ampiezza si estende al di fuori del limite segnato dal valore $\frac{\nu_C^{NI}}{2}$.



BENTHOS

Figura 6.45 Risultato dell'operazione FFT sui dati dell'idrofono BENTHOS (segnale di Figura 6.25) nella regione delle basse frequenze.

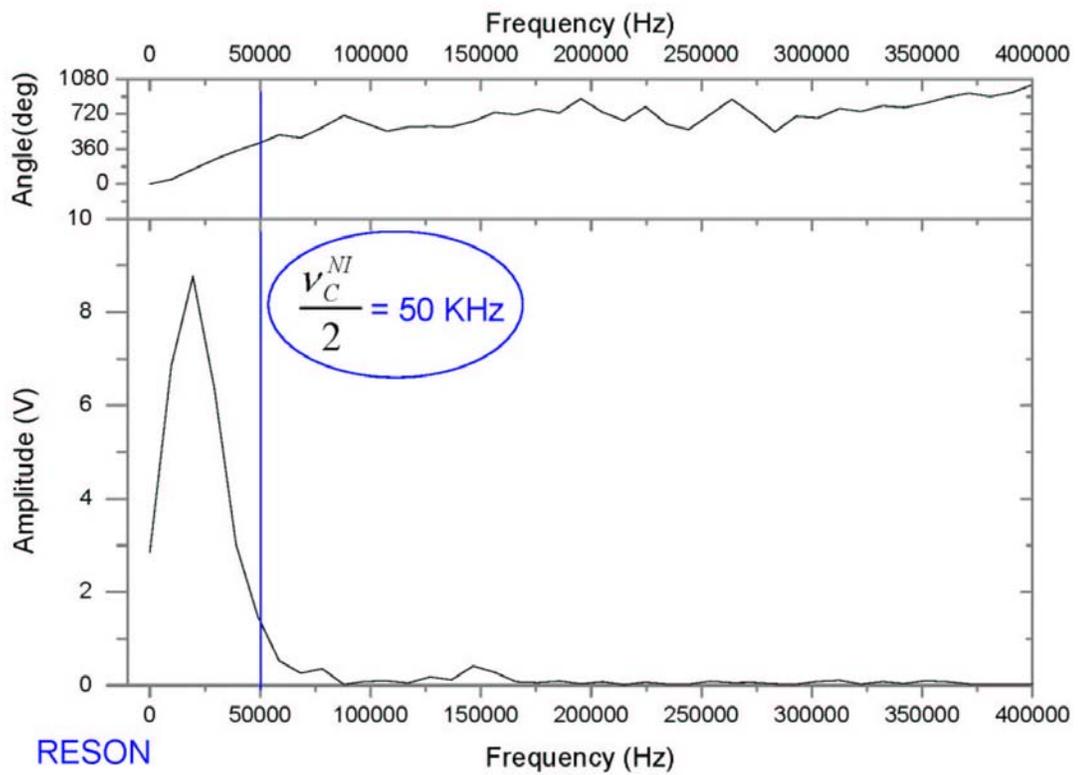


Figura 6.46 Risultato dell'operazione FFT sui dati dell'idrofono RESON (segnale di Figura 6.26) nella regione delle basse frequenze.

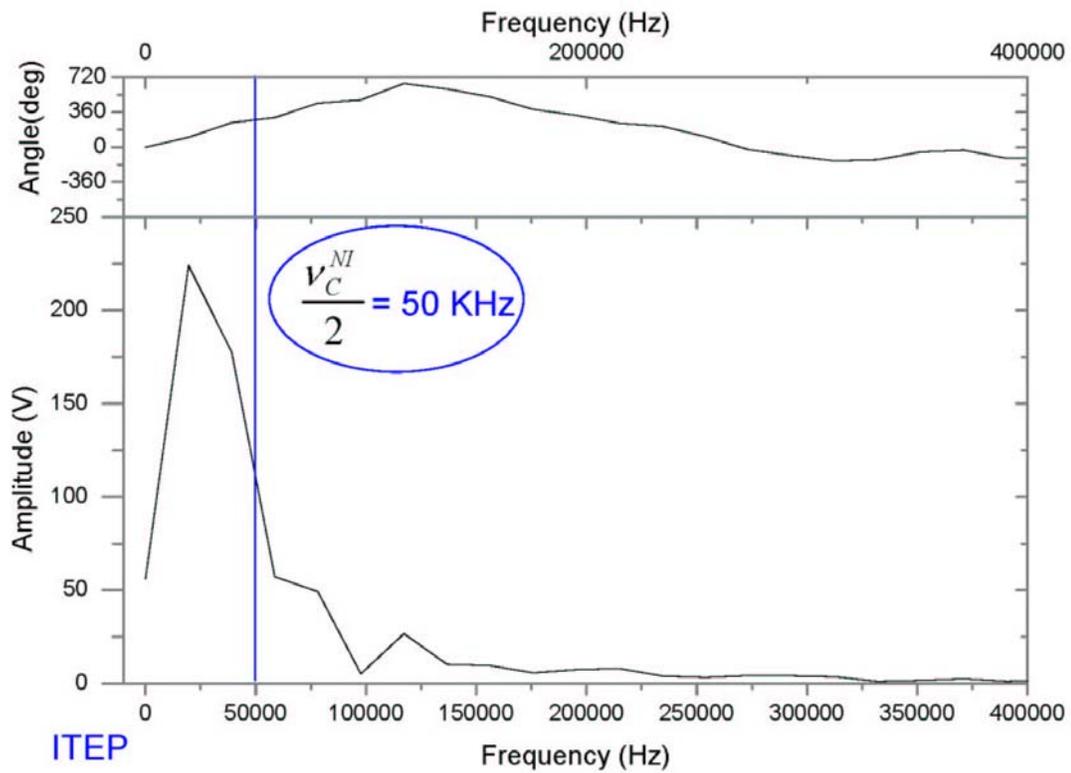


Figura 6.47 Risultato dell'operazione FFT sui dati dell'idrofono ITEP (segnale di Figura 6.27, intervallo temporale $[8.8 \cdot 10^{-5} - 1.28 \cdot 10^{-4}]$) nella regione delle basse frequenze.

Lo scopo finale è passare da una misura di tensione (segnale in Volt) a una misura di pressione (segnale in μPa), cioè ricostruire il segnale acustico originato dalla deposizione dell'energia cinetica dei protoni in acqua, a partire dal segnale di tensione misurato dall'idrofono. Questo è possibile se si conosce la funzione di trasferimento (FdT) del trasduttore. Per gli idrofoni BENTHOS e RESON tale FdT è stata ottenuta con il procedimento di calibrazione illustrato nel Capitolo 5. Per l'idrofono ITEP, si può procedere in maniera analoga, a partire dalle informazioni ricavate dalla curva di sensibilità (Figura 6.5).

Nota la funzione di trasferimento per ogni idrofono, possiamo calcolare:

$$S(\omega)[\mu Pa] = \frac{S(\omega)[V]}{FdT(\omega) \left[\frac{V}{\mu Pa} \right]}$$

dove $S(\omega)$ è il segnale nel dominio della frequenza

$FdT(\omega)$ è la funzione di trasferimento.

L'operazione di FFT calcola il contenuto spettrale del segnale acquisito da ognuno degli idrofoni; l'operazione inversa della FFT restituisce il segnale nel tempo. Se si esegue l'operazione di antitrasformata sul segnale $S(\omega)[\mu Pa]$, si ottiene il segnale di pressione originario nel dominio del tempo. Lo schema di Figura 6.48 riassume la sequenza di operazioni che permettono di passare dal segnale di tensione al segnale di pressione.

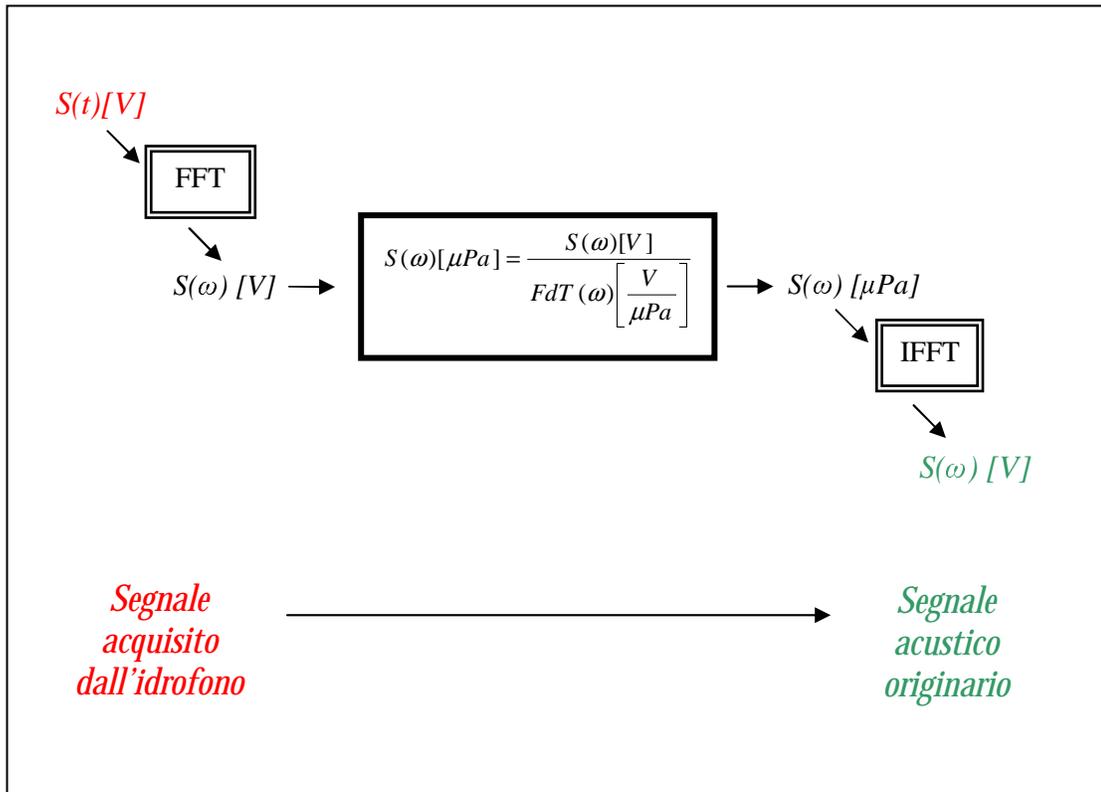


Figura 6.48 Schema delle operazioni che permettono di calcolare, a partire dalla misura di tensione, il segnale di pressione originario.

In generale, la risposta di un idrofono non è la stessa per tutte le frequenze. Le conseguenze più evidenti di questo fatto sono:

- il segnale di tensione risultato dell'operazione di misura è una deformazione del segnale di pressione originario;
- utilizzando due diversi dispositivi trasduttori per lo stesso segnale acustico, si ottengono due diverse misure di tensione.

Questi due effetti sono mostrati nell'analisi che segue, dove si considerano i segnali acquisiti dagli idrofoni BENTHOS e RESON, relativi allo stesso evento fisico.

Si fa riferimento alle curve di sensibilità ricavate dalle misure di calibrazione (Capitolo 5, Figure 5.11 – 5.16); la funzione di trasferimento, individuata con un'operazione di fit sui dati, permette di estendere l'informazione al di fuori dell'intervallo di calibrazione [5 – 25] KHz. Si considerano gli idrofoni RESON e BENTHOS, per i quali è stato eseguito dettagliatamente lo studio della curva di risposta alle diverse frequenze di segnale. Inoltre, gli idrofoni RESON e BENTHOS, come si vede dalla Figura 6.12, sono posizionati simmetricamente rispetto alla sorgente: ci si aspetta, pertanto, di osservare lo stesso segnale acustico sui due sensori.

Il risultato delle operazioni descritte in Figura 6.48 è visibile nelle Figure 6.49 e 6.50; i grafici mostrano l'effetto di deformazione prodotto dalla funzione di risposta del trasduttore. La misura del segnale di pressione è data in μPa , per tenere conto dell'unità di misura con cui sono espresse le curve di sensibilità degli idrofoni ($\text{V}/\mu\text{Pa}$).

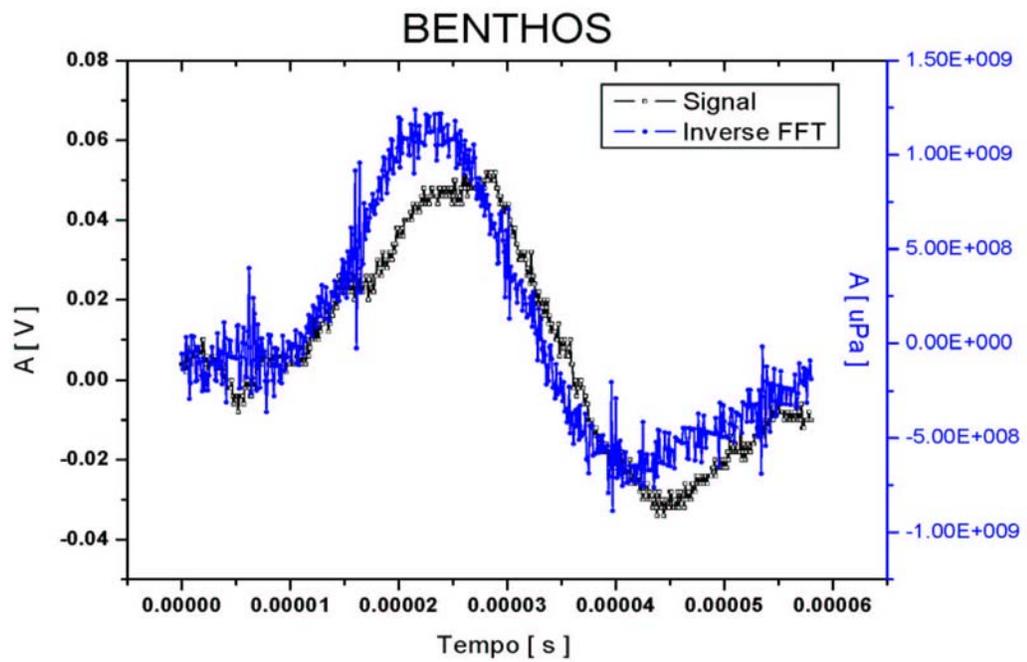


Figura 6.49 Idrofono BENTHOS. Segnale di tensione (curva nera), risultato dell'acquisizione, e segnale di pressione (curva blu), risultato dell'analisi in frequenza.

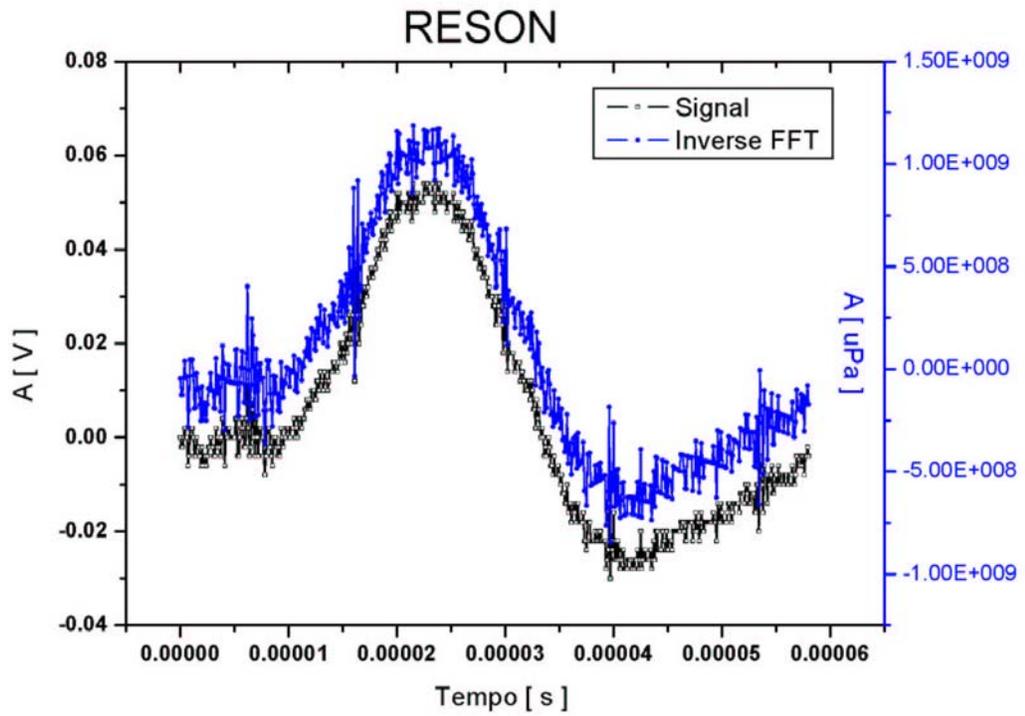


Figura 6.50 Idrofono RESON. Segnale di tensione (curva nera), risultato dell'acquisizione, e segnale di pressione (curva blu), risultato dell'analisi in frequenza.

L'ultima coppia di grafici mette in evidenza quanto descritto a proposito del caso in cui uno stesso segnale di pressione è misurato da due dispositivi con diversa funzione di trasferimento. Sono messi a confronto i segnali delle Figure 6.49 – 6.50. Il risultato è conforme a quanto aspettato: la differenza tra le due acquisizioni (Figura 6.51) dipende solo dalla diversa funzione di trasferimento dei due idrofoni; il segnale di pressione originario (Figura 6.52) è, in entrambi i casi, lo stesso.

Utilizzando le informazioni fornite nel grafico di Figura 6.5 si può formulare, anche per l'idrofono ITEP, analogamente a quanto fatto per il BENTHOS e il RESON, un modello per la funzione di trasferimento, in modo da ricostruire, anche in questo caso, la forma del segnale acustico originario. L'idrofono ITEP, tuttavia, non misura esattamente lo stesso segnale acustico degli altri due idrofoni: come si vede dalla Figura 6.12, infatti, la distanza dell'idrofono ITEP dalla sorgente è diversa da quella che definisce la posizione degli idrofoni BENTHOS e RESON. Ciò implica, tra l'altro, che i segnali acustici riflessi dalle pareti interne della vasca si sovrappongono, per l'idrofono ITEP, proprio con la “semionda” negativa dell'impulso bipolare, producendo una deformazione del segnale. Per questo motivo, nel caso dei segnali di ITEP, non è possibile fare un confronto come quello mostrato nella Figura 6.51 e nella Figura 6.52.

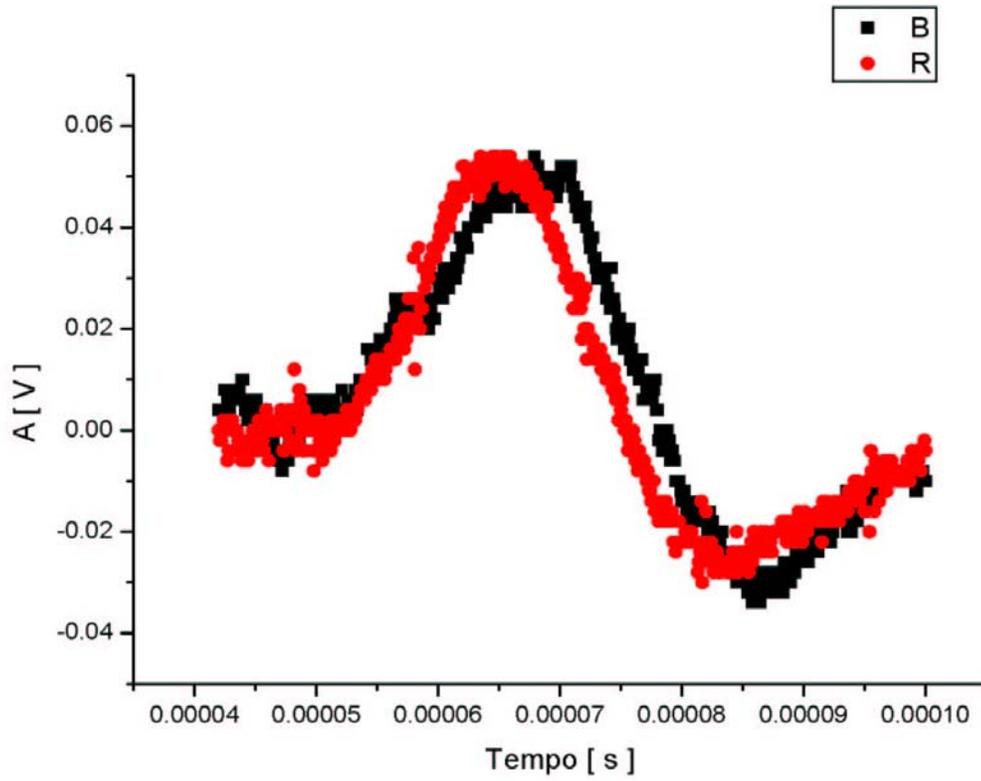


Figura 6.51 Confronto dei segnali di tensione (acquisizione) degli idrofoni BENTHOS (curva nera) e RESON (curva rossa).

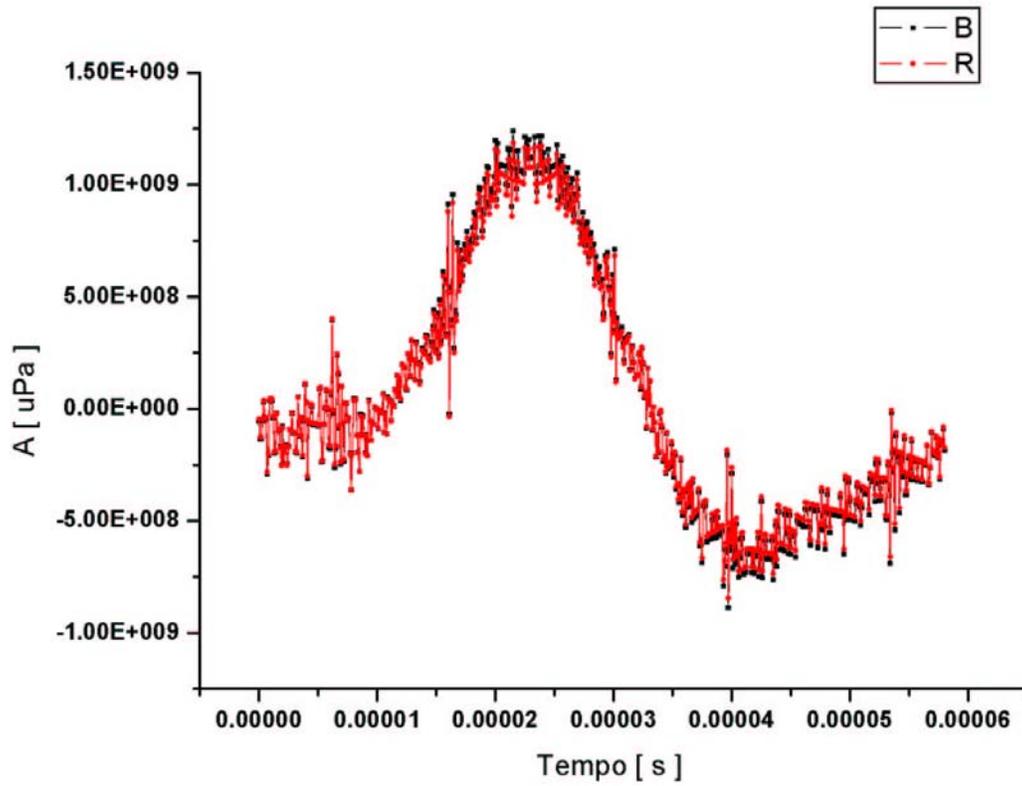


Figura 6.52 Confronto dei segnali di pressione degli idrofoni BENTHOS (curva nera) e RESON (curva rossa).

Propagazione Acustica e Segnali Acustici in Apparatì Sottomarini

I dati in nostro possesso possono essere usati, assieme alla conoscenza della propagazione del suono in acqua descritta nel Capitolo 2, per stimare l'intensità e la forma dei segnali acustici in apparati sottomarini. Effettueremo tale stima assumendo come segnale acustico generato da un neutrino astrofisico il segnale registrato durante le misure effettuate ad ITEP con l'idrofono BENTHOS. In particolare utilizzeremo un segnale registrato nelle seguenti condizioni: $N_{\text{protoni}} = 2.80 \cdot 10^{10}$ ed energia $E = 200$ MeV (Figura 6.53).

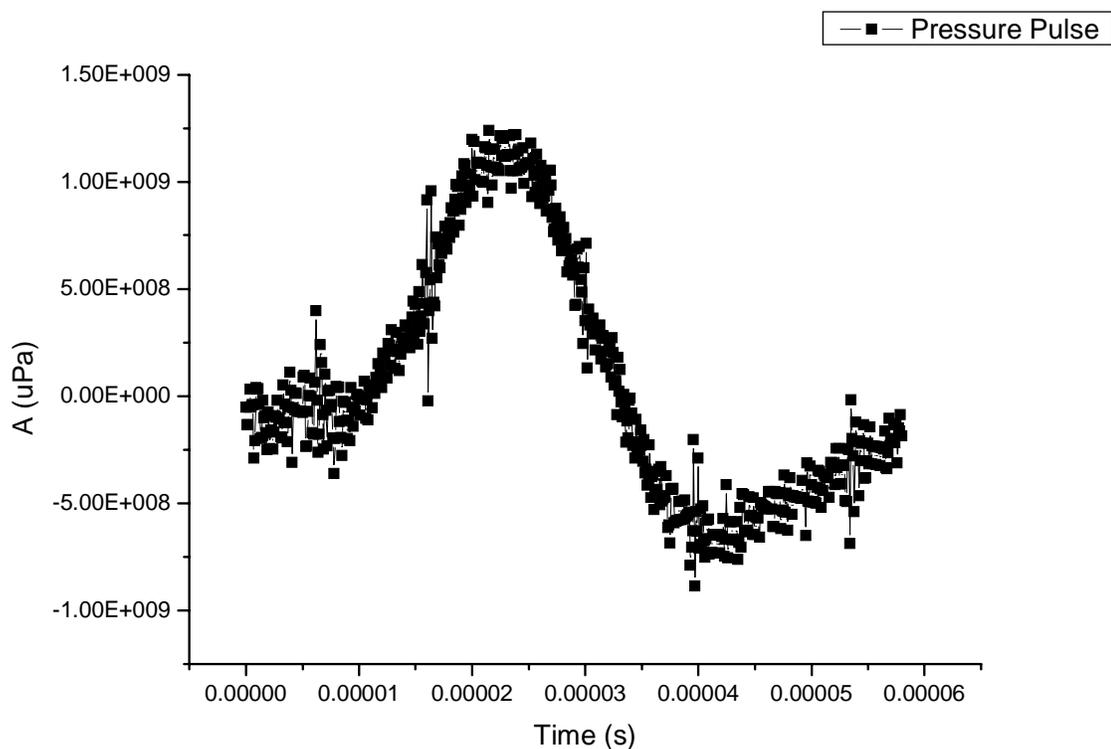


Figura 6.53 Segnale acustico prodotto in acqua da interazione di un fascio di protoni. Il segnale è misurato in prossimità della sorgente (distanza del sensore dalla sorgente $r \approx 10$ cm). L'ampiezza dell'impulso di pressione è in μPa .

La Figura 6.54 rappresenta lo spettro in frequenza del segnale di Figura 6.53 nella regione (10 – 100) KHz, dove si osserva il contributo più significativo allo spettro del segnale.

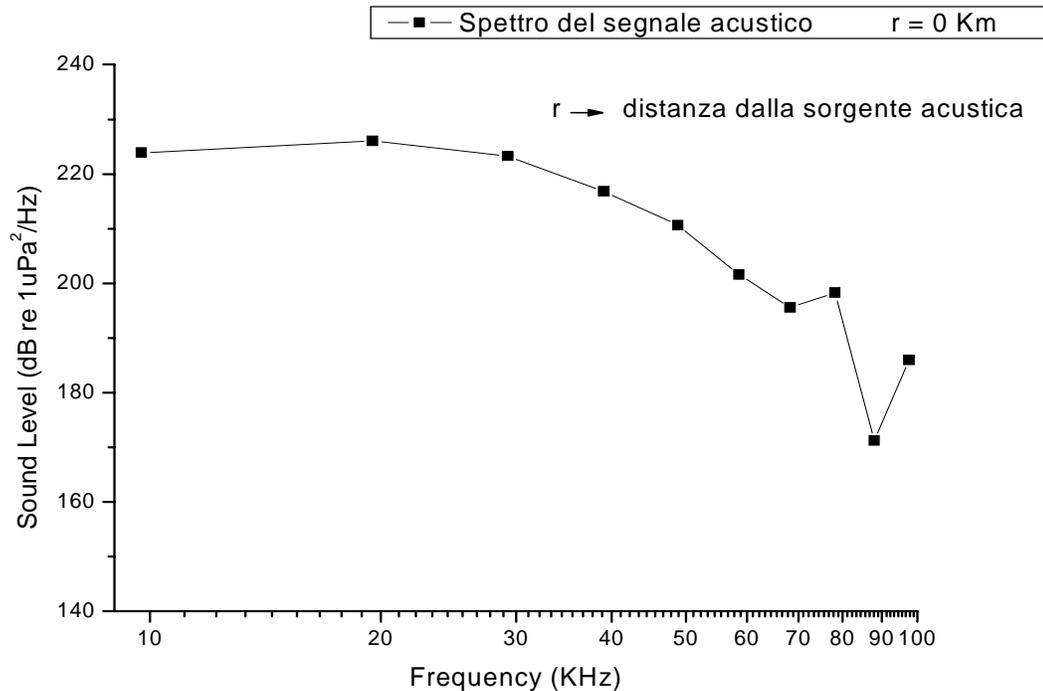


Figura 6.54 Spettro del segnale acustico prodotto in acqua da interazione di un fascio di protoni. Per rendere più agevole il confronto con lo spettro del rumore ambientale, i dati sono rappresentati, in ascissa e in ordinata, come in Figura 2.3 (scala logaritmica per le frequenze e livello di segnale acustico espresso in dB re $1\mu\text{Pa}^2/\text{Hz}$).

Possiamo simulare la propagazione del segnale acustico su distanze di chilometri utilizzando la Formula 2.4 ed il valore di attenuazione, funzione della frequenza, indicato nella Formula 2.5. Nella Figura 6.55 mostriamo gli spettri di segnali acustici propagati per $r = 0.1 \text{ Km}$, $r = 1 \text{ Km}$ e $r = 10 \text{ Km}$, con r distanza dalla sorgente.

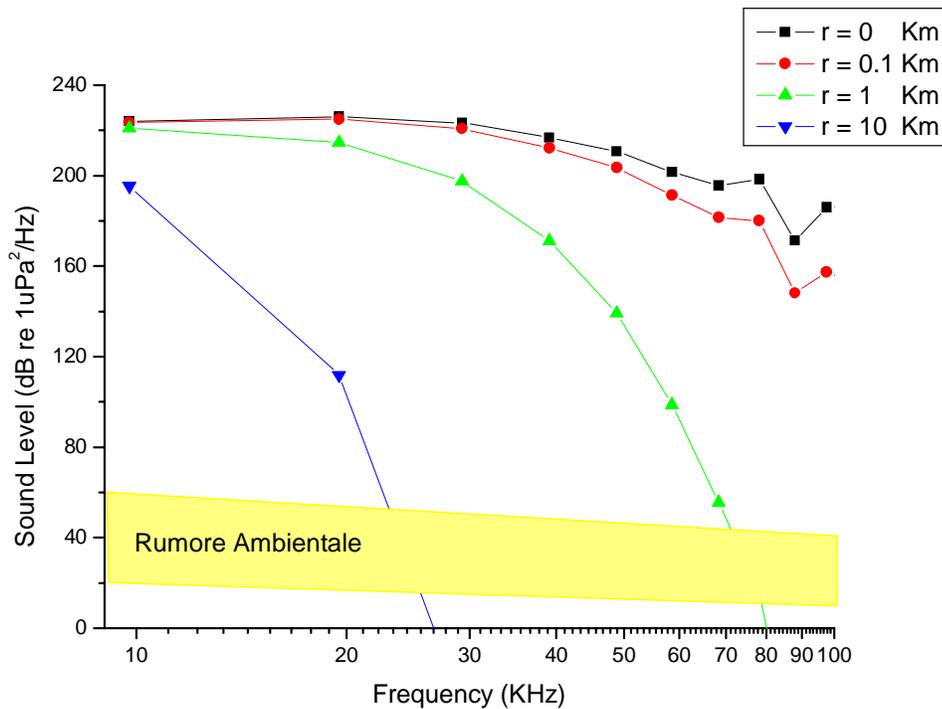


Figura 6.55 Attenuazione del segnale acustico per effetto della propagazione. Le diverse componenti dello spettro di Figura 6.54 ($r = 0$) sono attenuate in misura diversa, essendo l'attenuazione una funzione della frequenza (Formola 2.5). L'attenuazione aumenta al crescere della distanza dalla sorgente. È evidenziato, inoltre, il livello del rumore acustico ambientale, secondo le indicazioni di Figura 2.3.

La banda gialla in Figura 6.55 indica il livello del rumore acustico ambientale nella regione di frequenze esaminata, secondo quanto fornito dalla Figura 2.3. Si vede che segnali come quello di Figura 6.53 sono separati dal rumore anche dopo propagazioni dell'ordine di 1 Km. Allontanandosi dalla sorgente ($r \approx 10$ Km), la separazione segnale - rumore è possibile fino a valori di frequenza $\nu \approx 20$ KHz.

Noto lo spettro in frequenza, è possibile ricostruire l'andamento del segnale di pressione nel dominio del tempo, attraverso un'operazione di antitrasformazione. La Figura 6.56 mostra il risultato di questa operazione per gli spettri rappresentati in Figura 6.55. Si ottiene, in questo modo, la forma del segnale, nel dominio del tempo, misurato a distanze crescenti dalla sorgente acustica. Si vede che, nonostante l'attenuazione, si conserva l'andamento bipolare dell'impulso di pressione.

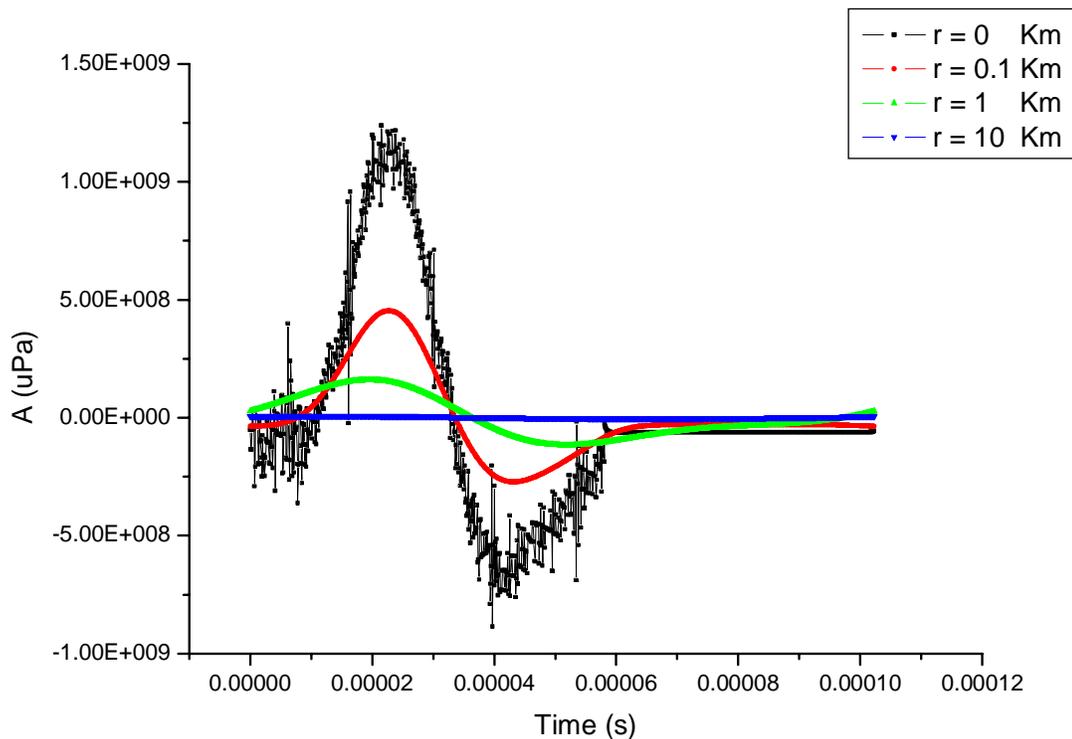


Figura 6.56 Ricostruzione del segnale nel dominio del tempo. Al crescere della distanza dalla sorgente acustica il segnale appare attenuato, ma conserva l'andamento bipolare.