

Alma Mater Studiorum - Università di Bologna

FACOLTÀ DI SCIENZE MATEMATICHE FISICHE E NATURALI

CORSO DI LAUREA TRIENNALE IN FISICA

Ottimizzazione nella ricostruzione di vertici da interazione di neutrino nell'esperimento OPERA

Relatore:

Prof. Maximiliano Sioli

Candidato:

Elena Gramellini

Anno Accademico 2008-2009

II Sessione

Alle mie nonne,
che più di ogni altro comprendono
l'importanza della conoscenza.

Indice

Introduzione	4
1 La fisica delle oscillazione di neutrini	5
1.1 Breve storia del neutrino	5
1.2 Il neutrino nel Modello Standard	8
1.3 Oscillazioni dei neutrini	9
1.4 Risultati sperimentali	11
2 Esperimento OPERA	14
2.1 Il fascio CNGS	14
2.2 I rivelatori	16
2.2.1 I <i>Brick</i> e le emulsioni nucleari	18
2.2.2 I <i>Target Tracker</i>	18
2.2.3 Gli spettrometri per muoni	19
2.3 Rivelazione del decadimento del τ	20
3 Emulsioni nucleari e sistema di acquisizione dati	23
3.1 Le emulsioni nucleari	23
3.1.1 Proprietà fisico-chimiche delle emulsioni	24
3.1.2 Sviluppo e fissaggio	24
3.1.3 Produzione e <i>refreshing</i>	25
3.1.4 Distorsione e <i>shrinkage</i>	25
3.2 Sistema di <i>scanning</i> automatico	27
3.2.1 Componenti meccaniche	28
3.2.2 Sistema ottico	29

3.2.3	Telecamera e sistema di illuminazione	30
3.3	Sistema di acquisizione dati	31
3.3.1	Elaborazione delle immagini e <i>clustering</i>	31
3.3.2	Ricostruzione delle microtracce	32
3.3.3	Studio delle prestazioni dell'ESS	34
4	Ricostruzione del vertice di interazione	37
4.1	Ricostruzione delle tracce di base	38
4.2	Allineamento delle emulsioni	39
4.3	Ricostruzione delle tracce di volume	41
4.4	Ricostruzione del vertice	42
4.4.1	<i>Pair-based vertexing</i>	42
4.4.2	<i>Global vertexing</i>	45
4.5	Confronto	45
4.5.1	Coordinate spaziali del vertice	47
4.5.2	Molteplicità dell'evento	48
4.5.3	Parametro d'impatto	52
	Conclusioni	58

Introduzione

La fisica del neutrino, in particolare lo studio del fenomeno delle oscillazioni, è un settore in grande sviluppo nel campo della fisica delle particelle in quanto fornisce le prime evidenze di fisica oltre il Modello Standard. Alcuni esperimenti come SuperKamiokande, MACRO e Soudan2 hanno confermato la scomparsa di neutrini di un dato sapore, tuttavia l'evidenza conclusiva del fenomeno delle oscillazioni dei neutrini può derivare solo da un esperimento di apparizione: l'esperimento OPERA, infatti, si prefigge la prima osservazione di apparizione del neutrino dei ν_τ in un fascio puro di ν_μ .

La rivelazione del τ avviene attraverso l'osservazione della sua tipica topologia di decadimento, utilizzando la tecnologia delle ECC (*Emulsion Cloud Chamber*); questo tipo di rivelatore è composto da un bersaglio di piombo, in cui avviene l'interazione di neutrino, e da emulsioni nucleari su cui l'evento viene registrato. In seguito all'analisi delle emulsioni tramite microscopi ottici, vengono registrati i dati on-line; infine l'evento viene ricostruito off-line. Attualmente la Collaborazione OPERA utilizza due programmi di ricostruzione, FEDRA ed EasyReconstruct, entrambi usati dal laboratorio dell'INFN di Bologna. Scopo di questo lavoro di tesi è effettuare un controllo incrociato dei risultati prodotti dai due programmi nella loro applicazione in *brick* reali per ottenere una valutazione di tendenza del loro funzionamento.

Il lavoro è articolato in quattro capitoli: nel primo capitolo si espone brevemente la storia del neutrino, si illustra in particolare il fenomeno delle oscillazione e gli esperimenti che lo hanno indagato; nel secondo è presentato il rivelatore OPERA; nel terzo sono descritte le tecniche di acquisizione delle immagini; il quarto capitolo è riservato alle tecniche di elaborazione off-line ad al confronto degli algoritmi di *vertexing*.

Capitolo 1

La fisica delle oscillazione di neutrini

1.1 Breve storia del neutrino

Radioattività e scoperta del neutrino sono strettamente legate: nel 1931, Pauli postulò, infatti, l'esistenza di questa particella, come “disperato tentativo” [1] di dare spiegazione allo spettro continuo delle energie nel decadimento β .

Lo studio dei fenomeni radioattivi ebbe inizio con la scoperta della radioattività naturale da parte di Becquerel nel 1896. Negli stessi anni, grande contributo diede il lavoro dei coniugi Curie, i quali identificarono la natura nucleare del processo, dividendolo in tre diverse tipologie: α , β , γ . I decadimenti α e β consistono rispettivamente nell'emissione di nuclei di elio e nell'emissione di elettroni negativi da parte del nucleo; malgrado la apparente somiglianza dei processi, la comprensione dello spettro di emissione α fu piuttosto rapida, in quanto esso mostra energie ben definite, corrispondenti alla differenza in massa-energia fra lo stato iniziale e quello finale, mentre la spiegazione dello spettro continuo del decadimento β fu controversa ed aprì una finestra sul mondo, ancora inesplorato, dell'interazione debole.

I prodotti del decadimento β non sono già preesistenti nel nucleo ma vengono creati dall'energia a disposizione all'istante del decadimento; inoltre l'intervallo energetico fra lo stato finale e quello iniziale indica lo spettro di possibili energie che la distribuzione continua può assumere, fino ad un limite

superiore; queste evidenze sperimentali, apparentemente in contrasto con la teoria di Rutherford, crearono negli anni '20 non poca confusione. Solo dopo diversi tentativi, Pauli ipotizzò che si trattasse di un processo a tre corpi in cui l'emissione dell'elettrone fosse accompagnata da un'altra particella, battezzata da Fermi *neutrino*, a cui fosse imputabile la perdita di energia.

Per identificare sperimentalmente il decadimento β come processo a tre corpi, si può utilizzare la conservazione del momento, misurando il momento del nucleo che rincula in coincidenza con il momento dell'elettrone emesso; malgrado le difficoltà tecniche, sono stati condotti esperimenti di questo genere dai quali si è potuto dedurre che la somma vettoriale fra il momento dell'elettrone e quello del nucleo è consistente con una terza particella, non osservata, che trasporta l'energia "mancante" ed ha una massa a riposo vicina allo zero [2].

Sono osservati, sperimentalmente, due tipi di decadimento β : il primo,

$$p \rightarrow n + e^+ + \nu_e, \quad (1.1)$$

avviene esclusivamente all'interno del nucleo ed è chiamato β^+ , il secondo,

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e, \quad (1.2)$$

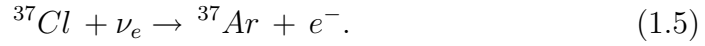
è chiamato β^- . Questi decadimenti evidenziano l'esistenza di due tipi di neutrino, il neutrino (ν) e l'antineutrino ($\bar{\nu}$). La conservazione della carica elettrica richiede che il neutrino sia una particella neutra (da cui il nome), mentre considerazioni statistiche indicano che lo spin del neutrino è $\frac{1}{2}$.

A causa dell'alto potere penetrante e della piccolissima sezione d'urto del neutrino proveniente dal decadimento β ($\simeq 1.2 \times 10^{-43} \div 10^{-38} \text{ cm}^2$, a seconda dell'energia del ν), la rivelazione sperimentale di questa particella non fu possibile fino agli esperimenti ideati da Reines e Cowan negli anni '50. Come sorgente di $\bar{\nu}_e$ fu utilizzato un reattore nucleare, poiché i prodotti della fissione, ricchi di neutroni, davano luogo a numerosi decadimenti β^- , ottenendo un flusso netto di $\bar{\nu}_e$ di circa $10^{13} \text{ cm}^2 \text{ s}^{-1}$. Come rivelatore fu utilizzato uno scintillatore liquido ricco di protoni liberi, intervallato da lastre di cadmio. La cattura di $\bar{\nu}_e$ da parte del protone dava luogo alla reazione:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow n + e^+ \quad (1.3)$$

Il positrone, interagendo con gli elettroni del rivelatore, annichiliva velocemente ($e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$), mentre il neutrone veniva gradualmente rallentato fino ad essere catturato dal Cd, liberando un fotone. Il segnale caratteristico dell'interazione da $\bar{\nu}_e$ risultava, perciò, la radiazione tipica dell'annichilazione e^+e^- (ovvero fotoni a 0.511 MeV) seguita, dopo circa 10 μs dalla radiazione a 9.1 MeV prodotta dalla cattura del neutrone [3].

Sperimentalmente, la differenza fra ν_e e $\bar{\nu}_e$ fu evidenziata da Davis tramite lo studio delle reazioni:



L'apparato sperimentale per l'osservazione delle due reazioni era simile: per entrambe il bersaglio era costituito da un serbatoio di CCl_4 e la verifica della avvenuta reazione era attuata misurando periodicamente la quantità di Ar. Per il primo esperimento, il cui scopo era dimostrare l'impossibilità della cattura di $\bar{\nu}_e$ da parte del neutrone, si utilizzarono antineutrini provenienti da un reattore nucleare, per il secondo neutrini solari. Poiché la presenza dell'Ar fu rivelata solo nel secondo esperimento, Davis concluse che la prima reazione non era osservata, prova del fatto che neutrino ed antineutrino sono particelle differenti [2]. Successivi esperimenti hanno mostrato che una proprietà fondamentale distingue ν_e e $\bar{\nu}_e$: tutti i ν_e hanno il vettore di spin antiparallelo al vettore quantità di moto, mentre tutti i $\bar{\nu}_e$ hanno il vettore di spin parallelo al vettore quantità di moto. Introducendo la quantità

$$h = \frac{\mathbf{s} \cdot \mathbf{p}}{|\mathbf{s} \cdot \mathbf{p}|}. \quad (1.6)$$

chiamata elicità, segue che $h_\nu = -1$ e $h_{\bar{\nu}} = 1$.

Nel 1962 si ebbe la prima evidenza sull'esistenza di diverse famiglie di neutrini, attraverso la scoperta del neutrino muonico. Il ν_μ si differenzia dalla sua controparte elettronica in quanto nell'interazione con un bersaglio produce muoni e non elettroni. Quando nel 1975 al laboratorio SLAC di Stanford fu scoperto un terzo tipo di leptone, chiamato τ , fu teorizzato un

terzo tipo di neutrino, associato al nuovo leptone; il neutrino ν_τ fu rivelato solamente nel 2000 al Fermilab dall'esperimento DONUT. Negli anni novanta al collisionatore e^+e^- del CERN (LEP), il Modello Standard fu messo alla prova e confermato in un vasto range di energie; fu, così, verificata sperimentalmente l'esistenza di sole tre famiglie per i leptoni e quindi anche per i neutrini. Attualmente le ricerche sono rivolte a fenomeni oltre il Modello Standard, ad esempio le oscillazioni dei neutrini.

1.2 Il neutrino nel Modello Standard

Il Modello Standard (MS) è al momento la teoria più completa che descrive il comportamento delle particelle elementari; esso è il risultato della combinazione della quantocromodinamica (QCD) con l'interazione elettrodebole (la quale unifica, a sua volta, elettromagnetismo e interazione debole). Ad oggi, le previsioni del MS sono state in larga parte verificate sperimentalmente con un'ottima precisione. Tuttavia, esso non può essere considerato una teoria completa delle interazioni fondamentali in quanto non comprende la gravità (per la quale non esiste ad oggi una teoria quantistica coerente) e non spiega perché esistano tre generazioni di fermioni. A questo si aggiunga che la teoria contiene oltre 20 parametri fondamentali arbitrari.

Le particelle elementari, secondo il MS, sono suddivise in due classi, i fermioni fondamentali e i bosoni di gauge; questi ultimi sono anche chiamati "bosoni vettori" in quanto sono responsabili della mediazione delle forze: i fotoni per l'interazione elettromagnetica, W^\pm e Z^0 per quella debole e i gluoni per la forza forte. I fermioni fondamentali si dividono a loro volta in quark e leptoni, con un'ulteriore suddivisione in tre famiglie in ordine di masse crescenti.

Nel MS il neutrino è un leptone elettricamente neutro, con spin $\frac{1}{2}$, massa nulla e non si accoppia né con il fotone né con i gluoni, ma solo con i bosoni mediatori della forza debole. Tramite le correnti cariche e neutre dell'interazione debole è possibile accoppiare i neutrini con tutti gli altri fermioni fondamentali. La conservazione del numero leptonico garantisce la presenza di neutrini in tutti i processi leptonici e semileptonici dell'interazione debole,

come il decadimento del μ o del π :

$$\mu^\pm \rightarrow \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + \nu_e(\bar{\nu}_e) + e^\pm \quad (1.7)$$

$$\pi^\pm \rightarrow \nu_\mu(\bar{\nu}_\mu) + \mu^\pm. \quad (1.8)$$

1.3 Oscillazioni dei neutrini

L'oscillazione dei neutrini è un fenomeno quantistico per cui un neutrino cambia sapore durante la sua propagazione dal punto di produzione a quello di osservazione. Affinché si verifichi questo fenomeno, predetto da Bruno Pontecorvo nel 1957 e confermato sperimentalmente da esperimenti come SuperKamiokade, MACRO e Sudan2, è necessario che i neutrini presentino una massa non nulla; poiché il MS assume il neutrino come particella priva di massa, il fenomeno delle oscillazioni dei neutrini può essere considerato come la prima evidenza di fisica oltre il MS.

Il fenomeno delle oscillazioni dei neutrini non permette di ricavare direttamente il valore della massa del neutrino, tuttavia importanti evidenze provengono dalla cosmologia. Assumendo l'ipotesi di universo piatto ($\Omega=1$), il numero atteso dei neutrini primordiali permette di stimare un limite superiore per la somma delle masse dei neutrini dei diversi sapori. Ci si aspetta che la densità dei neutrini sia¹ $N \approx 300$ neutrini/cm³ e che la densità critica, per un universo di circa 1.4×10^{10} y, sia $\rho_c \approx 1 \times 10^{-29}$ g/cm³, pertanto:

$$N \sum m_\nu \leq \rho_c, \quad \sum m_\nu \leq 20 \text{ eV}. \quad (1.9)$$

La precedente somma è estesa a tutti i tipi di neutrino, antiparticelle incluse; si ottiene così il limite di massa per ogni sapore: $m_\nu < 10 \text{ eV}$ [4].

Affinché si verifichi l'oscillazione dei neutrini, devono esistere autostati di massa dei quali i neutrini dei tre diversi sapori devono essere differenti combinazioni lineari. Si consideri, ad esempio, il *mixing* di due sapori, ν_μ e

¹Tale stima è ottenuta dal rapporto fissato fra numero di fotoni e numero di neutrini, risultato della teoria del Big Bang.

ν_τ , in termini di autostati di massa ν_2 e ν_3 e angolo di *mixing* θ :

$$\begin{aligned}\nu_\mu &= \nu_2 \cos \theta + \nu_3 \sin \theta \\ \nu_\tau &= -\nu_2 \sin \theta + \nu_3 \cos \theta\end{aligned}\quad (1.10)$$

L'angolo viene misurato attraverso esperimenti di oscillazione dei neutrini, in cui un fascio di neutrini muonici sviluppa una componente di neutrino del tau, la cui intensità oscilla mentre il fascio si propaga. Se il neutrino muonico viene creato a $t = 0$, allora si hanno gli autostati:

$$|\psi(0)\rangle = -\sin \theta |\nu_2\rangle + \cos \theta |\nu_3\rangle \quad (1.11)$$

Col passare del tempo, i due stati di massa si propagano con fasi diverse, con conseguente mescolamento di ν_μ/ν_τ :

$$\begin{aligned}|\psi(t)\rangle &= -\sin \theta e^{-iE_2 t} |\nu_2\rangle + \cos \theta e^{-iE_3 t} |\nu_3\rangle = \\ &= (\cos^2 \theta e^{-iE_2 t} + \sin^2 \theta e^{-iE_3 t}) |\nu_\mu\rangle \\ &\quad \sin \theta \cos \theta (e^{-iE_3 t} - e^{-iE_2 t}) |\nu_\tau\rangle\end{aligned}\quad (1.12)$$

La probabilità di oscillazione per $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ si calcola tramite:

$$P_{osc.} = |\langle \nu_\tau | \psi(t) \rangle|^2 = \frac{1}{2} \sin^2 2\theta [1 - \cos(E_3 - E_2)t] \quad (1.13)$$

Se, come previsto, le masse dei neutrini sono piccole, tenendo conto dell'impulso del neutrino si può scrivere:

$$E_2 = p + \frac{m_2^2}{2p} \quad E_3 = p + \frac{m_3^2}{2p} \quad (1.14)$$

ed inoltre:

$$\frac{t}{p} = \frac{L}{E} \quad (1.15)$$

Sostituendo tali valori nella (1.13), si ottiene:

$$\begin{aligned}P_{osc.} &= \frac{1}{2} \sin^2 2\theta \left[1 - \cos \left(\frac{(m_3^2 - m_2^2)L}{E} \right) \right] = \\ &= \sin^2 2\theta \left[1.27 \Delta m_{23}^2 (eV) \frac{L(m)}{E(GeV)} \right]\end{aligned}\quad (1.16)$$

Per tenere conto del *mixing* delle tre generazioni si utilizza il formalismo matriciale:

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix} \quad (1.17)$$

in cui U_{PMNS} è chiamata matrice di Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata:

$$U_{PMNS} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{12} & s_{13}e^{-i\delta_{cp}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{cp}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta_{cp}} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{cp}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta_{cp}} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

Nella matrice U_{PMNS} , c e s indicano i coseni e seni dei rispettivi angoli di *mixing* (θ_{12} , θ_{23} e θ_{13}), mentre δ_{cp} è un termine di fase complesso, associato alla violazione CP nel settore leptonic.

1.4 Risultati sperimentali

Le prime evidenze sperimentali del fenomeno delle oscillazioni dei neutrini furono riscontrate nell'osservazione dei neutrini solari. Il sole è un'intensa fonte di neutrini, creati principalmente nella reazione della catena p-p:

$$p + p \rightarrow D + e^+ + \nu_e ; \quad (1.18)$$

i neutrini prodotti hanno energie minori di 0.42 MeV, mentre quelli creati da reazioni che coinvolgono i nuclei di ^7Be e ^8B hanno energie fino a 18 MeV.

Come già accennato in precedenza, il primo deficit di ν_e provenienti dal sole fu osservato da Davis [5], nel 1968, usando un bersaglio di cloro. In un secondo gruppo di esperimenti si utilizzò un bersaglio di gallio, dove l'energia di soglia per la reazione è minore.

L'esperimento Kamiokande del 1983 utilizzava rivelatori Cherenkov ad acqua, rivelando la luce Cherenkov prodotta dall'elettrone a seguito della reazione:

$$\nu_e + e^- \rightarrow \nu_e + e^- . \quad (1.19)$$

Questi esperimenti, sebbene utilizzassero strumentazioni diverse, concordarono sulla discrepanza fra teoria ed esperimento: il flusso di ν_e dal sole risultava dipendente dall'energia dei neutrini e significativamente inferiore al flusso aspettato secondo il Modello Solare Standard. Dalle osservazioni sperimentali, ipotizzando il fenomeno delle oscillazioni e quindi una massa non nulla del neutrino, si ottiene un angolo di *mixing* $\theta_{solare} \approx 400$ mrad ed una differenza delle masse al quadrato pari a $\Delta m_{solare}^2 = 7 \times 10^{-4} \text{ eV}^2$, che corrisponde alla soluzione di *Large Mixing Angle* (LMA) [6].

Evidenze conclusive circa l'oscillazione dei neutrini solari sono state fornite dagli esperimenti SNO (2002) [7] e KamLAND (2003) [8]. L'esperimento SNO sfruttava un rivelatore Cherenkov ad acqua pesante (D_2O), capace di distinguere tre diverse reazioni prodotte da neutrini provenienti dal sole² :

$$(CC) \quad \nu_e + D \rightarrow e^- + p + p \quad (1.20)$$

$$(NC) \quad \nu_x + D \rightarrow n + p \quad (1.21)$$

$$(ES) \quad \nu_x + e^- \rightarrow \nu_x + e^-. \quad (1.22)$$

L'esperimento KamLAND, pur servendosi di un fascio di $\bar{\nu}_e$ provenienti da un reattore nucleare, rispettava la stessa regione di parametri di oscillazione dei neutrini solari. La strumentazione utilizzata comprendeva più di 1800 fotomoltiplicatori ed uno scintillatore liquido di 10^6 kg. Si sfruttava la reazione:

$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n. \quad (1.23)$$

Senza l'ipotesi dell'oscillazione dei neutrini si prevedeva, per il periodo di 515 giorni di attività di KamLAND, un numero di eventi pari a 365.2 ± 23.7 ; il numero di eventi effettivamente osservato fu di 258, confermando la scomparsa dell'antineutrino con un livello di confidenza del 99.998%.

Il fenomeno dell'oscillazione ha ottenuto la piena evidenza sperimentale nell'ambito dei neutrini atmosferici. Questi sono prodotti nei decadimenti dei mesoni carichi negli sciami dei raggi cosmici, in seguito all'interazione fra i raggi cosmici primari con i nuclei dell'alta atmosfera.

Gli esperimenti SuperKamiokande [10], MACRO [11] e Soudan2 [12] hanno confermato la scomparsa del sapore del ν_μ , interpretandola in termini di oscillazione dei neutrini atmosferici. Come Kamiokande, SuperKamiokande era un rivelatore Cherenkov ad acqua in cui la radiazione era rivelata

²Nelle reazioni sono state seguite le seguenti notazioni:
 con ν_x si intende un neutrino di qualunque sapore;
 con CC si intende *Charge Current Reaction*;
 con NC si intende *Neutral Current Reaction*;
 con ES si intende *Electron Scattering*.

da migliaia di fotomoltiplicatori; l'esperimento MACRO (ai Laboratori Nazionali del Gran Sasso), utilizzava invece piani di scintillatori e di tubi a streamer; il rivelatore Soudan2, infine, era composto da strati di ferro e tubi a deriva. Tutti i risultati ottenuti da questi esperimenti sono consistenti con l'oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ con parametri:

$$\Delta m_{atmosferico}^2 \simeq 2.3 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2 \quad (1.24)$$

$$\sin^2 2\theta_{atmosferico} \simeq 1. \quad (1.25)$$

L'anomalia atmosferica fu investigata anche da Chooz (2003), esperimento di tipo *Long Baseline* che utilizzava un fascio di $\bar{\nu}_e$ prodotto artificialmente da un reattore in Francia; la rivelazione sperimentale del neutrino avveniva secondo la reazione di decadimento β inverso. Il maggior risultato dell'esperimento fu evidenziare che il deficit di neutrini atmosferici non è imputabile all'oscillazione $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ [9].

L'ipotesi di oscillazione dei neutrini si è rafforzata ulteriormente grazie all'esperimento K2K; in questo esperimento di tipo *Long Baseline*, un acceleratore creava un fascio di ν_μ che veniva rivelato a più di 200 km di distanza dall'apparato SuperKamiokande. Ancora una volta fu osservata la scomparsa dei ν_μ e fu misurato un $\Delta m^2 \simeq 2.8 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$ [13], nell'ipotesi che il mixing avvenga solo fra due sapori.

La nuova generazione di esperimenti nel campo delle oscillazioni di neutrini, come ad esempio DoubleChooz, è rivolta alla misura del valore dell'angolo di mixing θ_{13} , parametro necessario per la determinazione del fattore di fase δ_{cp} .

Capitolo 2

Esperimento OPERA

L'esperimento OPERA (*Oscillation Project with Emulsion-tRacking Apparatus*) rappresenta una novità nel campo degli esperimenti sull'oscillazione dei neutrini: esso non si limita a registrare la scomparsa di neutrini di un dato sapore, ma ha lo scopo principale di ottenere la prima osservazione diretta dell'apparizione del ν_τ in un fascio puro di ν_μ . Questo esperimento, di tipo *Long Baseline*, opera nello stesso *range* L/E dei neutrini atmosferici, perciò fornirà l'evidenza conclusiva del fenomeno delle oscillazioni di tali neutrini. L'esperimento, inoltre, è in grado di osservare l'interazione di neutrini elettronici e potrà essere utilizzato per investigare il canale $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$.

2.1 Il fascio CNGS

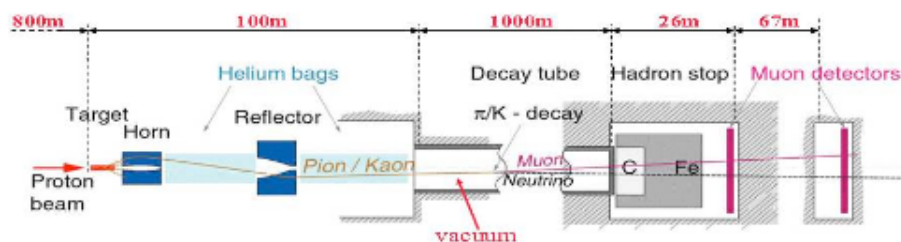


Figura 2.1: Schema delle principali componenti per la produzione del fascio CNGS.

Il fascio CNGS (*CERN Neutrinos to Gran Sasso*), schematizzato in Fig. 2.1, consiste principalmente di ν_μ con un'energia media di circa 17 GeV; la sua purezza è affetta da una contaminazione di $\bar{\nu}_\mu$ del 2.1% e di ν_e e $\bar{\nu}_e$ di circa 0.9%. Il fatto che l'energia dei neutrini sia maggiore dell'energia di soglia per la creazione del leptone τ e che la contaminazione, alla sorgente, di ν_τ sia completamente trascurabile ($\approx 3.0 \times 10^{-6}\%$) assicurano la bontà del fascio per lo studio delle transizioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$.

Il fascio CNGS è prodotto grazie all'utilizzo di un fascio di protoni di momento 400 GeV/c, estratto dall'acceleratore SPS (*Super Proto Synchrotron*) dei laboratori del CERN di Ginevra. Il fascio di protoni collide con un *target*, formato da lastre di grafite raffreddate ad elio, che è stato ottimizzato per sostenere i forti stress termomeccanici dovuti agli urti. Ogni estrazione ha la durata di 10.5 μ s e produce nominalmente 2.4×10^{13} protoni; con 200 giorni di fascio all'anno si stima una produzione di 4.5×10^{19} pot/y (*proton on target/anno*).

Nelle collisioni fra protoni e bersaglio vengono prodotti kaoni e pioni con energie di 20÷50 GeV; questi vengono successivamente focalizzati da due lenti magnetiche lunghe 7 m, chiamate “*horn*” e “*reflector*”, in modo da formare il fascio secondario. A valle di entrambe le lenti sono posizionati due tubi riempiti di elio allo scopo di ridurre la probabilità di creazione di adroni secondari.

Alla fine della zona adibita al *target* inizia il tunnel di decadimento; si tratta di un tubo a vuoto ($p \leq 1$ mbar) lungo 994 m, spesso 18 mm e dal diametro di 2.45 m, circondato da 50 cm di cemento. Le caratteristiche del tubo a vuoto sono state realizzate in funzione della lunghezza di decadimento e della distribuzione angolare delle particelle più energetiche. Un *hadron stopper*, composto da 3 m di grafite e 15 m di ferro, è posizionato al termine del tunnel con il compito di “pulire” il fascio, fermando i protoni che non hanno interagito con il *target* e gli adroni che non sono decaduti; all'interno di questo strumento, sono posizionati rivelatori al silicio che ricevono segnali indotti da K^+ e π^+ , in modo da monitorare i parametri del fascio.

A valle dell'*hadron stopper* sono posizionati due *muon detectors* separati da 67 m di roccia; lo scopo di questi strumenti è rivelare i muoni associati

ai ν_μ nei decadimenti dei K^+ e dei π^+ . Un controllo di qualità del fascio di ν_μ può essere eseguito tramite l'esame della produzione dei μ : i rivelatori di muoni dovrebbero registrare circa $108 \mu/\text{cm}^2$ durante ogni estrazione. Si stima che il fascio di ν_μ abbia una dispersione di circa 2 km quando giunge ai laboratori del Gran Sasso.

L'energia finale del fascio di ν_μ è stata ottimizzata al fine di massimizzare il numero di interazioni ν_τ^{CC} al sito del rivelatore; essa è il risultato del compromesso fra alte energie, che favoriscono la sezione d'urto dell'interazione CC del ν_τ , ed energie minori, che favoriscono il fenomeno delle oscillazioni. Considerando l'efficienza di rivelazione, si prevede l'osservazione di circa 25000 eventi da neutrino in 5 anni di misura, 12 dei quali imputabili all'interazione del ν_τ ; tale stima è effettuata assumendo come valore nominale $\Delta m = 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$. Il numero di eventi attesi, non calcolando le inefficienze del rivelatore, in funzione di un diverso valore di Δm è mostrata in Tab. 2.1.

Δm^2	ν_τ interazioni CC/kton/anno
$1.9 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$	6.6 (10)
$2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$	10.5 (15.8)
$3 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$	16.4 (24.6)
$5 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$	60.5

Tabella 2.1: Numero di eventi attesi da ν_τ nell'ipotesi di *full mixing* in funzione del valore di Δm^2 in OPERA; i valori riportati tra parentesi si riferiscono ad un possibile aumento dell'intensità del fascio.

2.2 I rivelatori

L'esperimento OPERA è posizionato nella galleria C dei laboratori sotterranei del Gran Sasso; la sua configurazione è il risultato di due opposte esigenze: una grande massa del *target*, per raccogliere sufficiente statistica, e un'ottima risoluzione spaziale, per identificare il leptone τ attraverso la sua topologia di decadimento. Il rivelatore è mostrato in Fig. 2.2.

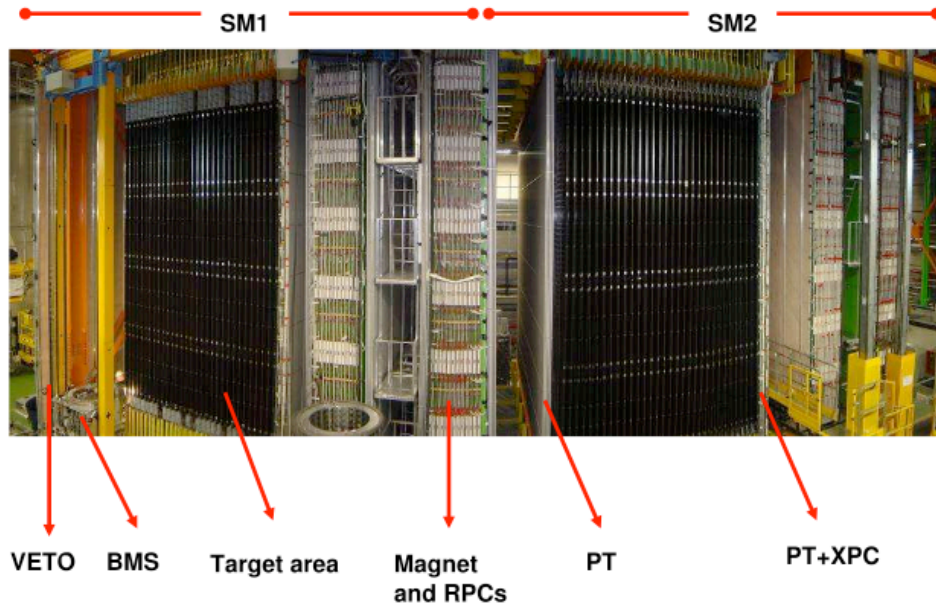


Figura 2.2: Vista *fish-eye* del rivelatore OPERA.

Un sistema di trigger, chiamato VETO, è installato prima del rivelatore per rigettare le tracce provenienti da eventuali interazioni dei neutrini con la roccia. Il *detector*, di dimensioni $10 \times 10 \times 20 \text{ m}^3$, è articolato in due super-moduli (SM) identici ed è un sistema ibrido, poiché si serve sia di rivelatori elettronici che di emulsioni nucleari; i SM sono allineati lungo la direzione del fascio CNGS e sono composti da un bersaglio e da uno spettrometro per muoni. Ogni bersaglio è costituito da 31 pareti di mattoni, chiamati *brick*, intervallate da altrettanti piani di scintillatori plastici, chiamati *Target Trackers* (TT). Il numero complessivo dei *brick* supera 150000 (2668 per parete) per un totale di circa 1250 tonnellate, fornendo così la grande massa necessaria all'interazione; la risoluzione spaziale richiesta (di circa $1 \mu\text{m}$) è garantita dall'utilizzo delle emulsioni nucleari impacchettate nei *brick*. Una coppia di lastre di emulsioni, chiamata *Changeble Sheet* (CS), è associata ad ogni *brick* con lo scopo di assolvere a due importanti compiti: confermare la localizzazione dell'interazione da neutrino nel *brick* segnalato dai TT e fornire le prime tracce correlate all'evento per l'analisi delle emul-

sioni; nel momento in cui il neutrino interagisce con il bersaglio, infatti, i TT segnalano i *brick* in cui è avvenuta, con maggior probabilità, l'interazione; un sistema automatico chiamato BMS (*Brick Manipulator System*) estrae il *brick* più probabile e, dopo l'attuazione della procedura che permette di allineare nuovamente *brick* e CS, questi ultimi vengono estratti e sviluppati; solo nel caso l'interazione venga confermata, il *brick* viene esposto per 12 ore ai raggi cosmici e vi vengono impresse delle marche laterali, per consentire di allineare le lastre con precisione micrometrica; si procede quindi allo sviluppo completo e all'analisi del *brick*.

2.2.1 I *Brick* e le emulsioni nucleari

Il principio di funzionamento del rivelatore, la cui unità fondamentale è il *brick*, è quello delle *Emulsion Cloud Chamber* (ECC); il *brick* è composto da 57 film di emulsioni intervallati da 56 piatti di una lega composta principalmente da Pb e tracce di Ca o Sb, testata sia per una ridotta radioattività che per una alta duttilità. Ogni lastra di piombo ha uno spessore di 1 mm ed è seguita da una coppia di emulsioni, di circa $45\ \mu\text{m}$, fissate ai due lati di una base plastica spessa $205\ \mu\text{m}$. Una particella carica, attraversando una lastra di emulsione, produce una sequenza di grani allineati, detta microtraccia (mediamente una microtraccia è composta da 16 grani). Le dimensioni trasversali del *brick* sono $129 \times 102\ \text{mm}^2$, mentre la dimensione longitudinale è 76 mm, per una massa totale di 8.3 kg; le precedenti caratteristiche sono tali da rendere il *brick* abbastanza maneggevole nel momento della rimozione dal rivelatore, ma anche abbastanza grande da contenere il vertice primario, permettere l'identificazione delle particelle e la ricostruzione cinematica dell'evento. Uno schema del *brick* è rappresentato in Fig. 2.3.

2.2.2 I *Target Tracker*

Scopo principale dei rivelatori elettronici, chiamati *Target Tracker* (TT), è individuare il *brick* in cui è avvenuta l'interazione di neutrino e fornire le informazioni calorimetriche sull'evento; essi sono posizionati a valle di ogni parete di *brick* ed hanno risoluzione spaziale di qualche centimetro. Per

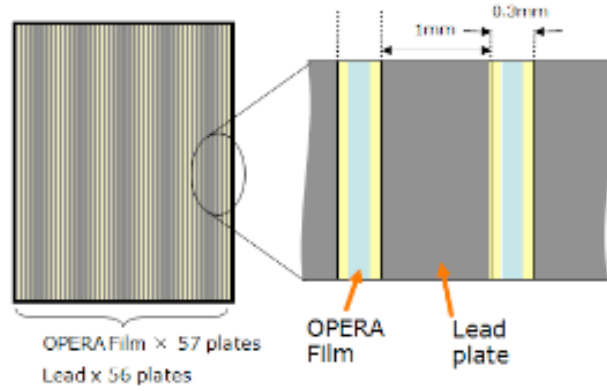


Figura 2.3: Schema del *brick* e della cella ECC.

fornire informazioni bidimensionale sulle tracce ogni TT consta di 8 moduli, 4 disposti verticalmente e 4 orizzontalmente; ciascun modulo consiste, a sua volta, in 64 strisce di scintillatori in materiale plastico lunghe 6.8 m, larghe 26.3 mm e spesse 10.6 mm. Le strisce sono lette da ambo i lati da fibre WLS¹ e da fotomoltiplicatori a multi-anodo. Per processare le informazioni ottenute dai TT viene utilizzata la combinazione di diversi algoritmi, che porta ad individuare il *brick* realmente “colpito” con un’efficienza di circa il 70%.

2.2.3 Gli spettrometri per muoni

Per misurare il momento e la carica dei muoni gli spettrometri presenti nell’esperimento OPERA, raffigurati in Fig. 2.4, sono costituiti da rivelatori attivi (RPC e tubi a deriva) e da un magnete bipolare. Il magnete è composto da due pareti verticali di sezione rettangolare, ciascuna costituita da 12 lastre di ferro distanti fra loro 2 cm, in modo da ospitare piani di RPC; fra le pareti del magnete sono posizionate coppie di tracciatori di precisione (PT)². Una corrente di circa 1600 A magnetizza il ferro, producendo un campo di 1.55 T diretto verticalmente; le dimensioni trasversali del magnete sono 8.7×8.3 m².

¹ *Wavelength Shifting*

² *Precision Tracker*

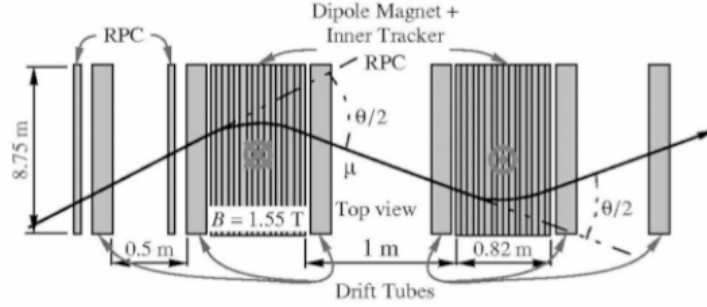


Figura 2.4: Schema dello spettrometro per muoni

I piani di RPC interni al magnete costituiscono il cosiddetto *inner tracker*: ogni piano è composto da 21 RPC di dimensioni $2.91 \times 1.134 \text{ m}^2$ ed ha il compito di raccogliere gli impulsi indotti mediante fasce di rame di *pick-up*; queste fasce, di larghezza 3 cm, sono posizionate verticalmente e orizzontalmente per una lettura 2D. Due piani di RPC collocati davanti al magnete costituiscono l'XPC; il sistema combinato XPC e *inner tracker* ha il compito di fornire una prima ricostruzione, piuttosto approssimativa, della traccia all'interno del magnete, in modo da identificare il muone e facilitare l'accoppiamento del segnale con i tracciatori di precisione. Il sistema misura, inoltre, l'energia degli adroni prodotti dal bersaglio e dei muoni fermati dal ferro.

I tracciatori di precisione sono piani verticali di tubi a deriva capaci di garantire una risoluzione spaziale inferiore al millimetro; tali tubi sono riempiti con una miscela di Ar al 80% e di CO_2 al 20% e sono mantenuti ad una pressione di $1005 \pm 5 \text{ mbar}$. I fili sensibili hanno un diametro di $45 \text{ }\mu\text{m}$ per una lunghezza di 8 m, caratteristica che rende il rivelatore unico nel suo genere. I PT sono posizionati fra le due pareti magnetiche, in modo da fornire una misura del momento angolare della traccia con un braccio di leva di circa un metro [15].

2.3 Rivelazione del decadimento del τ

L'interazione del ν_τ è rivelata nell'esperimento OPERA attraverso la tipica topologia di decadimento del τ in una particella carica (elettrone, muone

o adrone) o in tre particelle cariche. Le caratteristiche che permettono l'identificazione del τ sono la sua vita media breve ($c\tau = 87 \mu\text{m}$) e l'esiguo di momento trasverso a causa della presenza del ν_τ .

Il decadimento del τ può avvenire all'interno del *brick* secondo due modalità: *long decay* e *short decay*, entrambi rappresentati in Fig. 2.5.

Si definisce *long decay* il decadimento del τ in lastre successive alla lastra di piombo in cui è avvenuta l'interazione di neutrino. Per rivelare questo decadimento si analizza l'angolo di “*kink*” (θ_{kink}), ovvero l'angolo fra la direzione della traccia relativa al presunto τ e la direzione della traccia relativa alla particella figlia. La procedura definitiva perché la traccia possa essere considerata un candidato τ è ancora in fase di finalizzazione. Nel *proposal* [14] dell'esperimento tale valore era stato fissato a 20 mrad. Attualmente si sta cercando di caratterizzare questo valore in relazione al momento della traccia.

Si definisce *short decay* il decadimento del τ nella stessa lastra di piombo in cui esso è stato creato. In questo caso l'unica grandezza che è opportuno valutare è il parametro d'impatto (IP) delle tracce associate ai prodotti di decadimento; tale parametro è però fortemente correlato allo *scattering* multiplo e quindi al momento delle particelle. La richiesta per ottenere un candidato τ nell'ipotesi di *short decay* è $\text{IP} > 3\sigma$, dove σ è un parametro che valuta lo *scattering* multiplo. Le particelle rivelate da OPERA hanno in media un momento dell'ordine di 4 GeV/c con σ di circa 2 μm ; sotto queste condizioni, perciò, le tracce che hanno $\text{IP} > 6 \mu\text{m}$ sono candidati τ .

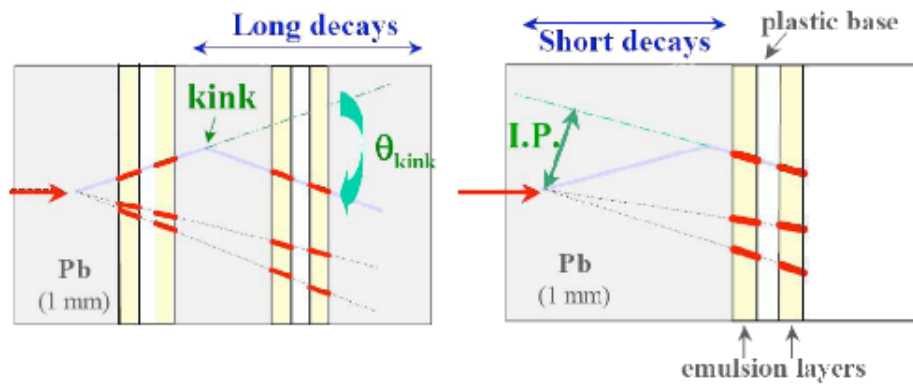


Figura 2.5: A sinistra: schema di *long decay*. A destra: schema di *short decay*.

Capitolo 3

Emulsioni nucleari e sistema di acquisizione dati

3.1 Le emulsioni nucleari

La tecnica delle emulsioni nucleari è stata adottata, in fisica delle particelle, sin dai primi esperimenti sui raggi cosmici subito dopo la seconda guerra mondiale; in particolare essa è stata utilizzata per la scoperta del pione (1947) e nelle prime osservazioni delle particelle charmate (1971). All'epoca l'utilizzo di emulsioni prevedeva l'ispezione manuale dei film da parte di personale esperto. Questa tecnica fu poi quasi abbandonata fino ai primi anni '90, quando lo sviluppo della tecnologia di *scanning* automatico ha permesso di ridurre i tempi di analisi.

La risoluzione spaziale sub-micrometrica, l'assenza di tempi morti e la possibilità di effettuare misure cinematiche sono qualità che rendono le emulsioni nucleari particolarmente adatte allo studio delle particelle a vita media molto breve¹. Inoltre l'automazione della produzione ne rende possibile l'utilizzo in moderni rivelatori di grandi dimensioni: sono state infatti utilizzate su larga scala e con successo, prima che in OPERA, anche nell'esperimento DONUT per l'osservazione diretta del ν_τ .

¹Si prenda ad esempio il τ con $c\tau = 87 \mu\text{m}$.

3.1.1 Proprietà fisico-chimiche delle emulsioni

Le emulsioni nucleari sono formate da microcristalli di AgBr immersi in una gelatina organica; i cristalli utilizzati nell'esperimento OPERA hanno mediamente² un diametro di $0.2\ \mu\text{m}$ e formano un sistema per alcuni tratti assimilabile ad un semiconduttore con un gap di banda proibita pari a 2.6 eV. L'energia persa da una particella ionizzante durante il passaggio nell'emulsione rompe i legami molecolari nel reticolo cristallino creando una coppia elettrone - lacuna; gli elettroni eccitati sono catturati da difetti della superficie del reticolo cristallino, mentre gli atomi di Ag metallico divengono centri dell'immagine latente.

3.1.2 Sviluppo e fissaggio

Grazie al processo di sviluppo fotografico, si rende visibile l'immagine latente tramite un'amplificazione chimica del segnale; lo sviluppo è effettuato attraverso una soluzione (*developer*) che dà luogo ad una reazione di ossido-riduzione, riducendo completamente i cristalli che formano l'immagine latente e lasciando inalterati gli altri; la durata del processo deve essere tale da permettere lo sviluppo completo dei cristalli alterati dal passaggio delle particelle, ma non deve essere troppo lunga da sviluppare grani di fondo (rumore provocato dall'eccitazione termica degli elettroni e definito "*fog*").

Terminato lo sviluppo, una soluzione di trisolfato di sodio (o trisolfato d'ammonio) provvede al processo di fissaggio, rimuovendo il bromuro d'argento rimasto sulla lastra; tale operazione è resa necessaria dal fatto che la mancata rimozione dell'AgBr in eccesso porterebbe ad un offuscamento ed ad una degradazione dell'immagine. La lastra viene infine lavata per eliminare anche i residui del fissaggio.

Al termine del processo la traiettoria seguita dalla particella è osservabile come una sequenza di grani d'argento scuri, dal diametro di circa $0.8\ \mu\text{m}$.

² A garantire l'uniformità delle dimensioni dei cristalli è previsto un controllo durante la produzione industriale delle emulsioni.

3.1.3 Produzione e *refreshing*

La precisione dello spessore del film e la grande quantità di lastre hanno richiesto una produzione di tipo industriale, che è stata affidata alla ditta giapponese Fuji Film. Dal momento della produzione a quello dello sviluppo l'emulsione è sensibile a qualunque particella ionizzante; i raggi cosmici e la radioattività naturale costituiscono perciò un intenso segnale di fondo, che viene parzialmente ridotto da alcune tecniche di “pulizia”.

Immediatamente dopo la produzione viene effettuata la procedura di *refreshing* che permette di eliminare circa il 96% dei centri dell'immagine latente: essa consiste nell' esporre le emulsioni a 30°C e al 98% di umidità per tre giorni. Tale processo riduce leggermente la sensibilità dell'emulsione, definita come il numero di grani sviluppabili per spessore dell'emulsione³. Risultando compatibili con l'efficienza richiesta, le poche tracce rimaste presentano solamente 13 grani/100 μm . Dopo il *refreshing* i film vengono impacchettati sottovuoto, 57 alla volta, e non vengono intervallati da alcuno spessore. Essi sono poi collocati in posizione verticale sulla nave addetta al trasporto dal Giappone all'Italia: la scelta della posizione dei film e della nave come mezzo di trasporto minimizza il flusso integrato dei raggi cosmici, che tuttavia si accumula con una densità di circa 1000 tracce/ cm^2 . Questo fondo è cancellato da una procedura chiamata *virtual erasing*: le emulsioni di un singolo pacchetto sono utilizzate per lo stesso *brick* ma, una volta giunte ai laboratori del Gran Sasso, vengono intervallate dalle lastre di piombo, modificando l'allineamento e permettendo la cancellazione virtuale delle tracce di fondo.

3.1.4 Distorsione e *shrinkage*

Per la ricostruzione corretta delle microtracce all'interno delle emulsioni bisogna considerare due aspetti che modificano fortemente la stabilità della posizione reciproca dei grani durante la fase di sviluppo: distorsione e *shrinkage*.

³ Normalmente la sensibilità è di circa 33 grani/100 μm per una particella a minima ionizzazione.

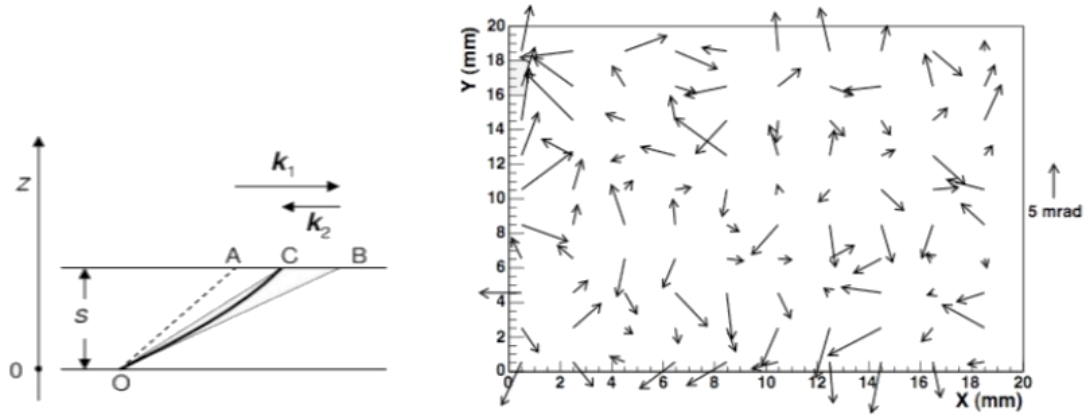


Figura 3.1: A sinistra: effetto della distorsione in sezione verticale. A destra: esempio di mappa della distorsione sul piano orizzontale.

Per distorsione si intende una deformazione locale della superficie dell'emulsione dovuta alle tensioni meccaniche accumulate nello strato di gelatina. Lo spostamento delle tracce registrate nell'emulsione provocato dalla distorsione si può manifestare in diversi modi: le tracce possono rimanere rettilinee, ma cambiare lunghezza e direzione in dipendenza da un coefficiente che è funzione dell'intensità e della direzione della deformazione, oppure possono deformarsi in linee curve, variando direzione e intensità con la profondità. Un esempio di distorsione è presentato in Fig. 3.1. La distorsione non si manifesta uniformemente su tutta l'emulsione, ma varia da una regione all'altra, generalmente in modo graduale se lo sviluppo è stato eseguito correttamente; gli effetti maggiori si presentano ai bordi. La produzione industriale delle emulsioni per OPERA limita comunque gli effetti della distorsione.

Per *shrinkage* si intende una deformazione dovuta alla variazione del volume di emulsione prima e dopo lo sviluppo: la perdita del bromuro d'argento durante il fissaggio fa diminuire lo spessore dello strato di emulsione. Il fattore di *shrinkage* è definito come il rapporto fra lo spessore dello strato di emulsione al momento dell'esposizione e lo spessore dopo il processo di sviluppo. Lo spessore dopo lo sviluppo dipende fortemente dalle condizioni ambientali, perciò le emulsioni sono conservate in luoghi con temperatura e umidità controllate.

3.2 Sistema di *scanning* automatico

I primi esperimenti che utilizzavano le emulsioni nucleari si servivano di microscopi ottici e di ingenti risorse umane per la ricerca e la misura delle tracce; appare evidente che un esperimento come OPERA, con una superficie sensibile di 100000 m^2 , non sarebbe realizzabile senza una tecnologia in grado di eseguire scansioni automatiche.

Il primo progetto di *scanning* automatico, chiamato *Track Selector* (TS), fu creato dall'università di Nagoya e utilizzato negli esperimenti CHORUS [16] e DONUT [17]; questo sistema era stato progettato per rivelare tracce all'interno del campo visivo di una telecamera CCD, ad una velocità di scansione di circa $2 \text{ cm}^2/\text{h}$. La velocità di scansione richiesta dall'esperimento OPERA è almeno $20 \text{ cm}^2/\text{h}$; questa specifica è stata ottenuta grazie allo sviluppo di due sistemi di *scanning* automatico: S-UTS (*Super-Ultra Track Selector*) e ESS (*European Scanning System*).

Il sistema S-UTS, sviluppato dall'università di Nagoya, è un'evoluzione del sistema TS e fa esclusivamente uso, nelle architetture hardware e software, di componenti sviluppati su misura. Il maggior vantaggio di questo strumento è eludere il processo di *stop-and-go* del supporto meccanico durante la presa dati, riprendendo le immagini con una telecamera CCD a 3000 Hz mentre il sistema ottico e quello meccanico si muovono alla stessa velocità.

Al contrario, il sistema ESS, mostrato in Fig. 3.2, fa uso di componenti commerciali, risultando più flessibile e più facile da aggiornare con le migliori tecnologie disponibili sul mercato.

Seguendo un approccio *multi-track system*, con una precisione submicro-metrica si ricostruiscono, via software, tutte le tracce in ciascun campo di vista, indipendentemente dalla loro pendenza.

L'acquisizione dei dati avviene attraverso l'utilizzo di un microscopio, dotato di un opportuno sistema ottico, e di una telecamera CMOS; il microscopio è equipaggiato con un piano motorizzato capace di muoversi lungo gli assi x - y ; la telecamera è montata in cima al tubo ottico che può essere mosso, lungo l'asse z , per spostare il piano focale all'interno della lastra a passi di lunghezza circa uguale alla distanza focale. Per ogni campo di vista si ottiene

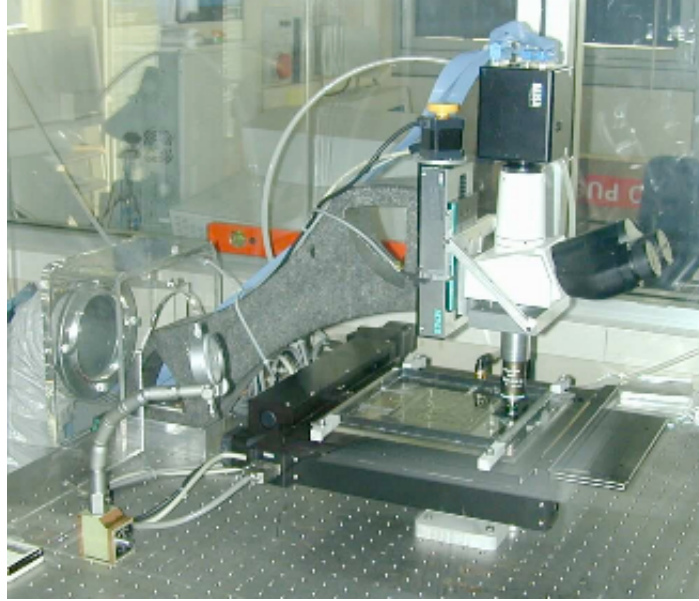


Figura 3.2: Foto del microscopio per lo *scanning* automatico, in dotazione al gruppo dell'INFN di Bologna.

una tomografia ottica, cioè si acquisiscono, con la telecamera, 15 fotogrammi a diversa profondità attraverso lo spessore di ogni strato di emulsione. Un computer gestisce sia i movimenti del piano motorizzato sia quelli dell'asse ottico, registra ed elabora le immagini inviate dalla telecamera, controllandone luminosità e posizione.

3.2.1 Componenti meccaniche

Il supporto meccanico è dotato del motore passo passo *NanoStep RKF Series 5-Phase Microstepping*, che sposta il piano orizzontale su cui è montata l'emulsione grazie al controllo da parte della scheda *FlexMotion*, fornita dalla *National Instruments*. Poiché la stabilità della posizione è fondamentale nelle operazioni di misura, si è scelto il tavolo orizzontale rigido di alta qualità *Micos MS-8* di dimensioni $20.5 \times 20.5 \text{ cm}^2$. Le emulsioni sono inoltre fissate al supporto tramite un sistema di vuoto che evita i movimenti delle lastre al momento della misura. Per gli spostamenti lungo l'asse verticale si è scelta la slitta *Micos LS-110*. Per aumentare ulteriormente la stabilità del

piano di lavoro, il microscopio è montato su banco ottico che riduce le vibrazioni esterne. L'apparato, nella sua completezza, garantisce un'accuratezza nelle misure sia verticali che orizzontali di $0.1 \mu\text{m}$.

Un'importante caratteristica per raggiungere la velocità di *scanning* di $20 \text{ cm}^2/\text{h}$ è il tempo necessario per passare da un campo di vista all'altro, calcolato come la somma fra il tempo di spostamento e quello di assestamento; poiché lo spostamento in x richiede in media 100 ms, mentre quello in y richiede 140 ms, la procedura di *scanning* è programmata in modo da minimizzare lo spostamento in y .

3.2.2 Sistema ottico

I componenti principali del sistema ottico, di cui è dato uno schema in Fig. 3.3, sono la lente di tubo inserita nel gruppo trinoculare e l'obiettivo, forniti entrambi dalla Nikon. La lente è utilizzata per formare l'immagine sul sensore della telecamera. Le richieste per l'obiettivo sono: assicurare la risoluzione sub-micrometrica, la possibilità della messa a fuoco a differenti profondità e l'ingrandimento finale equivalente a qualche pixel per micron. Per ottemperare a queste richieste si è scelto un obiettivo che focalizza l'im-

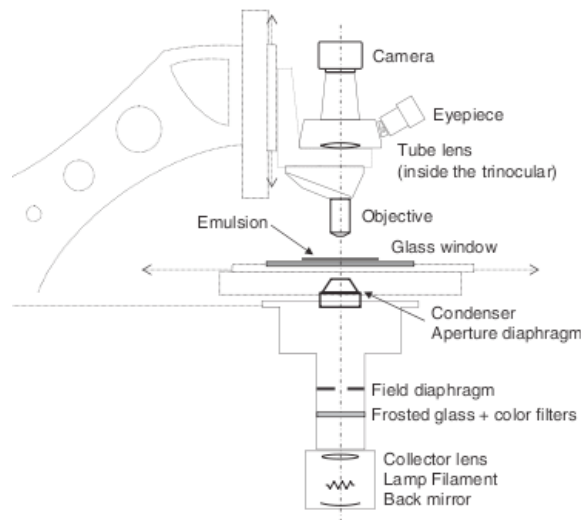


Figura 3.3: Schema del sistema ottico.

magine all'infinito, con un'apertura numerica⁴ $N.A. > 0.8$ ed una distanza di lavoro $W.A. > 0.3$ mm; quest'ultima caratteristica è necessaria in quanto lo spessore complessivo della lastra da analizzare, formata da una base plastica di $205\ \mu\text{m}$ e due strati di emulsione di $44\ \mu\text{m}$, è nominalmente $293\ \mu\text{m}$. Per ridurre i difetti causati dal diverso indice di rifrazione del mezzo interposto fra obiettivo e piano focale nell'osservazione dei due strati di emulsione, in particolare per minimizzare l'aberrazione sferica, si sfrutta un obiettivo ad immersione ad olio: infatti olio, plastica ed emulsione hanno indici di rifrazione molto simili⁵, perciò il cammino ottico può essere considerato omogeneo.

Il sistema ottico deve sottostare ai requisiti di precisione richiesti dall'esperimento, ovvero una risoluzione di 2 mrad, perciò gli errori sistematici dovuti all'allineamento degli *stage*, della sorgente di luce, dei diaframmi e delle lenti deve essere inferiore a 1 mrad.

3.2.3 Telecamera e sistema di illuminazione

Il sistema ESS utilizza una telecamera *Mikrotron MC1310*, dotata di un sensore CMOS di $1.5 \times 1.2\ \text{cm}^2$; il sensore può acquisire immagini monocromatiche con una risoluzione di 1280×1024 pixel fino a 500 fotogrammi/s, tuttavia è utilizzato a 376 fps (*frame per second*) per uniformare l'acquisizione alla velocità del sistema di scansione. La telecamera digitalizza direttamente le immagini, le converte su una scala di grigio a 256 livelli⁶ e le invia al computer per l'analisi.

Il sistema di illuminazione, sviluppato in collaborazione con Nikon-Italy, è a luce trasmessa ed è posizionato sotto il tavolo di lavoro. La luce proveniente da una lampada alogena al tungsteno, regolabile tramite PC e diffusa da un vetro satinato, è messa a fuoco da una lente, chiamata collettore, sul diaframma di un condensatore; il condensatore concentra la luce in un cono

⁴ $N.A. = n \sin \alpha$, dove n indica l'indice di rifrazione del mezzo in cui è immersa la lente e α il semiangolo del massimo cono di luce che entra nell'obiettivo.

⁵ L'olio, la plastica e l'emulsione hanno indice di rifrazione rispettivamente di circa 1.51, 1.48, 1.51.

⁶ Nella scala di grigi 0 indica il nero e 255 il bianco.

luminoso sul piano di lavoro. L'intensità e il colore della luce sono tali da massimizzare il contrasto nell'immagine.

3.3 Sistema di acquisizione dati

Scopo del sistema di acquisizione on-line è elaborare le immagini provenienti dalla telecamera e cercare i grani più scuri, per la ricostruzione delle tracce. Il programma è sviluppato utilizzando il linguaggio C++ ed è strutturato in moduli ben definiti, poiché specifiche sono le funzioni a cui deve adempiere:

1. conservare le informazioni sugli obiettivi in uso e convertire i pixel in micron;
2. gestire l'acquisizione e l'elaborazione delle immagini;
3. gestire i motori del piano mobile e controllarne le modalità di movimento;
4. riconoscere i *cluster* allineati, per usarli nella ricostruzione delle probabili tracce;
5. fare il fit lineare delle tracce;
6. gestire l'Input/Output dei dati;
7. applicare la trasformazione delle coordinate e dei vettori dal sistema di riferimento del microscopio a quello delle emulsioni, definito dalle marche fiduciali impresse sulle lastre.

3.3.1 Elaborazione delle immagini e *clustering*

Le immagini acquisite vengono digitalizzate ed analizzate per cercare i grani; solo pochi grani appartengono alle tracce e rappresentano il segnale interessante, al contrario, la maggior parte dei grani visibili sulla lastra costituisce il rumore di fondo ("*fog*", vedi Par 3.1.2) generato casualmente durante lo sviluppo. E' necessario considerare ulteriori fonti di disturbo nel processo

di elaborazione delle immagini: polvere posata sul sensore, illuminazione non uniforme e difetti nelle emulsioni, quali graffi alla superficie, disomogeneità di trasparenza e impurità.

Il rumore dovuto ai difetti di illuminazione e a punti ciechi sul sensore produce false tracce verticali riprodotte su ogni piatto; queste ultime sono eliminate grazie all'utilizzo di una tecnica chiamata *flat-field subtraction*; essa consiste nel sottrarre ad ogni immagine un'immagine di fondo acquisita al di fuori dell'emulsione. All'immagine viene poi applicato un filtro che aumenta il contrasto a seconda della focalizzazione, annerendo i grani più scuri e illuminando lo sfondo; per ogni pixel il filtro calcola nuovamente il livello di grigio, facendo una media ponderata fra i pixel vicini, tramite l'equazione:

$$f(i_x, i_y) = \sum_{l_x, l_y} K(l_x, l_y) g(i_x + l_x, i_y + l_y) \quad (3.1)$$

dove con g si intende il livello di grigio dei pixel vicini, mentre i pesi sono attribuiti dalla matrice K ,

$$K = \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \\ 1 & -1 & -2 & -1 & 1 \\ 1 & -2 & -4 & -2 & 1 \\ 1 & -1 & -2 & -1 & 1 \\ 1 & 1 & 1 & 1 & 1 \end{pmatrix}. \quad (3.2)$$

Successivamente si applica un'operazione di soglia che determina la binarizzazione dell'immagine: i pixel il cui livello di grigio supera il valore di soglia sono considerati neri, gli altri sono considerati bianchi. Viene poi effettuato il *clustering*: l'immagine è processata da un algoritmo veloce che riconosce i pixel scuri vicini fra loro e li raggruppa per formare un *cluster*; per ogni *cluster* vengono registrate posizione, superficie, forma e centro di gravità. La Fig. 3.4 mostra l'elaborazione dell'immagine.

3.3.2 Ricostruzione delle microtracce

La ricostruzione delle microtracce avviene elaborando le immagini dell'emulsione ottenute a diverse quote nello stesso campo di vista. Ai *cluster* di un campo di vista, che sono circa in numero di 2000-4000, vengono applicati

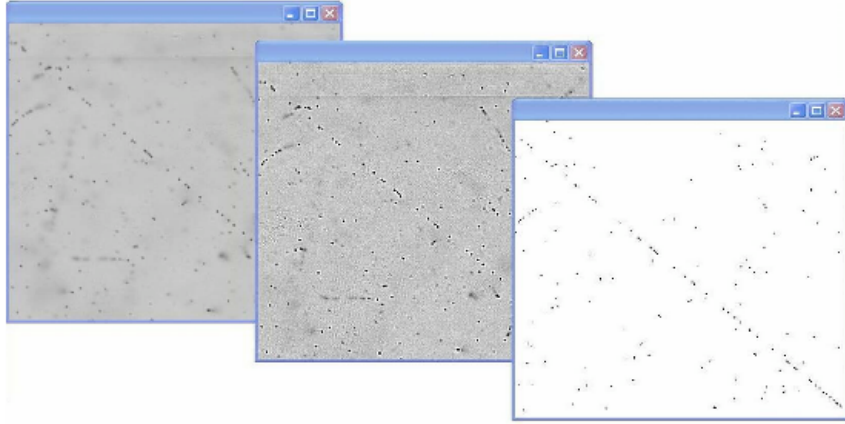


Figura 3.4: Elaborazione dell'immagine. Da sinistra: originale, effetto dell'applicazione del filtro e effetto della binarizzazione.

tagli di qualità, basati su forma e grandezza, che riducono i candidati a formare le tracce a circa il 60% del totale. Se i *cluster* sono allineati si possono considerare buoni candidati per formare la traccia; infatti l'idea su cui si basa il processo di tracciamento è che una particella ionizzante, passata attraverso i due strati di emulsione (chiamati *top* e *bottom*), abbia lasciato una traccia composta da una sequenza di grani allineati giacenti sui diversi livelli della tomografia.

Le microtracce sul *top* e sul *bottom* sono ricostruite separatamente e i loro accoppiamenti sono cercati solo in seguito, per formare le tracce di base.

La ricostruzione delle microtracce può essere suddivisa in due fasi: inizialmente vi è il riconoscimento dei grani allineati; poi viene fatta un'interpolazione lineare e sono calcolate la pendenza della microtraccia e la sua intercetta sulla superficie fra base plastica e emulsione⁷. Ogni campo di vista è suddiviso in celle, di circa $20\ \mu\text{m}$ per lato, ed ogni cella è analizzata singolarmente per ridurre il tempo di elaborazione. Per la ricostruzione della microtraccia si cerca una sequenza di *trigger*, ovvero si considerano i grani appartenenti a due livelli separati da almeno otto strati e in questi otto strati si cercano i grani allineati: per tutte le possibili coppie di grani appartenenti

⁷ La posizione della microtraccia è misurata alla superficie della base plastica per eliminare gli effetti di distorsione nella ricostruzione delle tracce di base.

ai livelli più distanti si costruisce un segmento, quindi si ricercano altri grani nei livelli intermedi, entro una certa tolleranza ($0.22 \mu\text{m}$ per tracce verticali). Se non viene trovato nessun *cluster* intermedio la coppia viene scartata, se invece ne viene trovato almeno uno si continua la ricerca dei *cluster* allineati anche sui livelli esterni. Le microtracce che presentano meno di 6 grani vengono scartate⁸.

Una volta ricostruiti e memorizzati angoli e posizioni delle microtracce, queste ultime vengono analizzate, nel tentativo di tracciare le *basetracks*, unendo una microtraccia sullo strato di emulsione *top* e una corrispondente sullo strato *bottom*. Dal momento che le *basetracks* non presentano effetti di distorsione e presentano un braccio di leva maggiore, la loro risoluzione angolare è migliore di circa un ordine di grandezza rispetto quella delle microtracce. Per la ricostruzione delle tracce di base si veda il Par 4.1.

3.3.3 Studio delle prestazioni dell'ESS

Lo studio della risoluzione intrinseca delle emulsioni è stato effettuato ai laboratori del CERN nel giugno 2004, utilizzando un *brick* composto da 64 emulsioni non intervallate da piombo ed un fascio di π^- di momento 10 GeV/c; le caratteristiche di questo test sono state scelte in modo da minimizzare gli effetti di *scattering* coulombiano multiplo, che avrebbe disturbato la misura. Le emulsioni utilizzate nel test, benché prodotte dalla Fuji Film, erano simili a quelle di OPERA, ma non facevano parte della produzione dedicata all'esperimento; inoltre, dopo il trasporto, fu loro applicata un'ulteriore procedura di *refreshing*.

La dipendenza angolare del sistema di tracciamento ESS è stata testata esponendo il *brick* al fascio di pioni sotto 7 angolazioni diverse: da 0 mrad, ovvero tracce perpendicolari al *brick*, fino a 600 mrad. Per stimare il fondo strumentale, dovuto alla connessione di grani generati casualmente, sono state anche sviluppate lastre non esposte ai pioni. L'intensità del fascio di π^- era calibrata in modo da ottenere una densità di circa 3 tracce/ mm^2 , su un'area di qualche cm^2 . Sono state, quindi, collezionate alcune centinaia di tracce per

⁸ Esse sono circa 1% per una tracce di segnale.

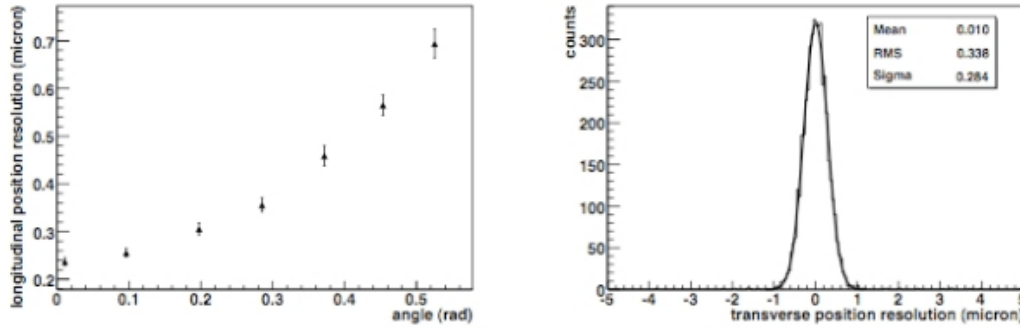


Figura 3.5: A sinistra: residui in posizione in direzione longitudinale in funzione dell'angolo. A destra: residui in posizione nella direzione trasversa.

ogni angolazione. Dopo la misura e la ricostruzione delle tracce all'intero del volume (tracce di volume) sono stati calcolati i residui in posizione fra ogni *basetrack* e la corrispondente traccia di volume ricostruita, in funzione dell'angolo di esposizione al fascio. Per disaccoppiare le componenti dipendenti dalla pendenza della traccia nella valutazione della risoluzione intrinseca, il test ha evidenziato che risulta utile definire due direzioni ortogonali, dette longitudinale e trasversa. La componente longitudinale, infatti, presenta un termine d'errore dipendente dalla pendenza, proporzionale all'incertezza sulla posizione dei grani lungo l'asse z .

Come si evince dalla Fig. 3.5, i residui trasversi, che sono indipendenti dall'angolo della traccia, rappresentano la massima precisione raggiunta ($0.3 \mu\text{m}$), tenendo conto degli errori; i residui longitudinali, invece, sono compresi fra $0.24 \mu\text{m}$ e $0.7 \mu\text{m}$. I residui in angolo, che sono calcolati come la differenza fra gli angoli della traccia di base e quella di volume, aumentano con l'aumentare dell'angolo, come si può notare dalla Fig. 3.6; le tracce perpendicolari infatti sono ricostruite con una risoluzione di circa 1.7 mrad , mentre quelle a grande angolo con una risoluzione di circa 6.3 mrad .

L'efficienza di tracciamento è calcolata allineando sei lastre consecutive e selezionando tracce di volume con almeno cinque tracce di base consecutive; l'efficienza è definita come il rapporto fra il numero di tracce di volume con sei segmenti ed il numero di tracce composte da solo cinque segmenti. L'efficienza di ricostruzione delle tracce perpendicolari è maggiore del 90%

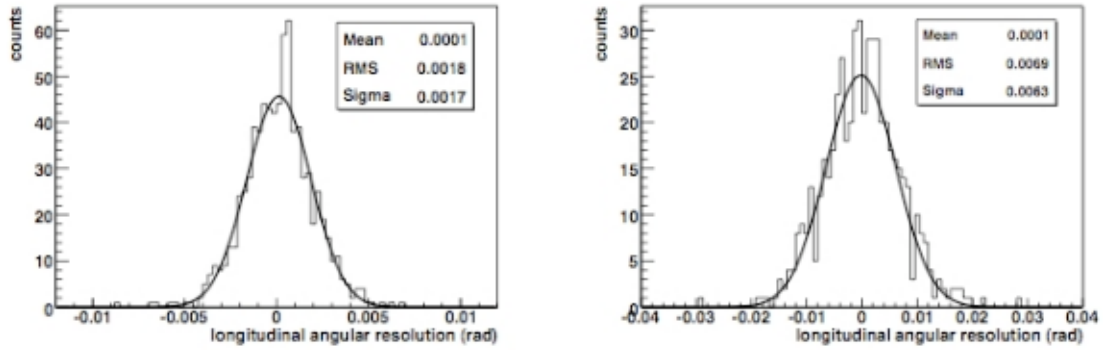


Figura 3.6: A sinistra: residui in angolo all'inclinazione di 0 mrad. A destra: residui in angolo all'inclinazione di 600 mrad.

per le *basetracks* e del 95% per le microtracce. Per gli altri angoli l'efficienza diminuisce fino ad un minimo dell'80% a circa 400 mrad e risale per angoli maggiori, come mostrato in Fig. 3.7 [20]. Il motivo di questo andamento è duplice: per tracce a piccolo angolo vi è un effetto d'ombra dei grani sulle lastre inferiori che aumenta il numero complessivo dei grani misurati; per tracce a grande angolo questo effetto svanisce, ma il numero di grani aumenta perché la particella ionizzante attraversa uno strato maggiore di emulsione.

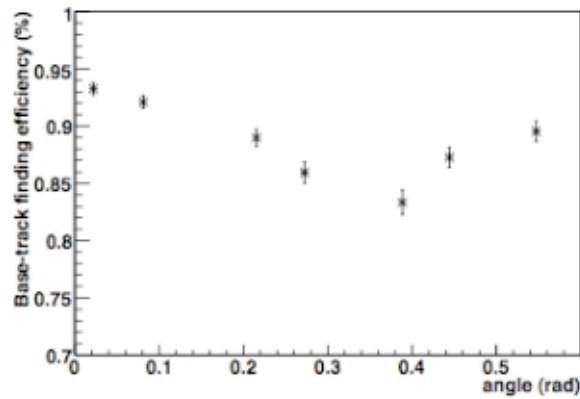


Figura 3.7: Efficienza delle *basetracks* in funzione dell'angolo.

Capitolo 4

Ricostruzione del vertice di interazione

L'individuazione e la localizzazione del vertice d'interazione di neutrino si avvia tramite una procedura chiamata *scanback*. Tale procedura consta di più fasi: seguendo le tracce predette dall'elettronica si connettono le tracce presenti nei CS con quelle nella prima lastra del *brick*; le tracce vengono quindi misurate su tutte le lastre fino al loro punto di stop; se per cinque lastre consecutive la traccia non viene trovata il punto di stop viene confermato.

Si esegue poi la procedura chiamata *total scan*, effettuando una misura di tutte le tracce preseti in una superficie di 1 cm^2 per cinque lastre *upstream* e per sette lastre *downstream* rispetto al punto di stop, per confermare l'interazione di neutrino.

Ottenute le microtracce, la ricostruzione procede off-line in primo luogo con il tracciamento delle *basetrack*, poi con la ricerca delle tracce di volume, ovvero di quelle tracce che sono composte da *basetrack* allineate per più piatti consecutivi e che formano quindi il segnale vero e proprio. L'operazione successiva è la ricostruzione del vertice di interazione di neutrino attraverso gli algoritmi di *vertexing*.

Lo scopo di questo capitolo è il confronto fra i due programmi per l'analisi off-line sviluppati parallelamente all'interno della Collaborazione OPERA: FEDRA (*Framework for Emulsion Data Reconstruction and Analysis*) e EasyReconstruct. In particolare è stato effettuato un confronto relativo fra i due algoritmi di *vertexing* ed un confronto con la ricostruzione manuale, che

per questo lavoro ricopre un ruolo simile alla verità Monte Carlo.

Alcune grandezze utilizzate nel confronto dipendono dal sistema di riferimento utilizzato, il quale è ottenuto grazie alle procedure di allineamento effettuato con i raggi cosmici; le grandezze più significative, però, sono quelle riferite al vertice, ovvero all'evento di fisica di interesse per l'esperimento, calcolate ciascuna nel proprio sistema di riferimento.

4.1 Ricostruzione delle tracce di base

Per la ricostruzione delle tracce di base, entrambi i programmi proiettano le microtracce degli strati *top* e *bottom* al centro della base plastica; se le proiezioni coincidono entro una tolleranza definita sia in posizione che in angolo, viene costruita la traccia di base corrispondente (*linking*). In Fig. 4.1 è mostrato uno schema della ricostruzione della traccia di base.

Viene valutato poi un estimatore della qualità della *basetrack* χ^2 :

$$\chi^2 = \frac{1}{4} \left[\frac{(\theta_{xt} - \theta_{xB})^2}{\sigma_x} + \frac{(\theta_{xb} - \theta_{xB})^2}{\sigma_x} + \frac{(\theta_{yt} - \theta_{yB})^2}{\sigma_y} + \frac{(\theta_{yb} - \theta_{yB})^2}{\sigma_y} \right] \quad (4.1)$$

dove $\theta_{xt(b)}$ e $\theta_{yt(b)}$ sono le proiezioni degli angoli delle microtracce al *top* (t) e al *bottom* (b) rispettivamente nei piani $z-x$ e $z-y$, mentre θ_{xB} e θ_{yB} sono le stesse proiezioni per le tracce in base (B); con σ_x e σ_y si intendono le risoluzioni angolari delle microtracce, empiricamente parametrizzabili secondo

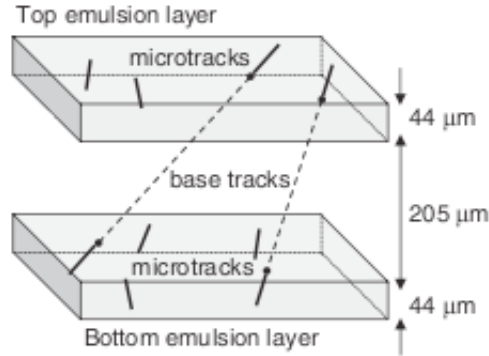


Figura 4.1: Schema della ricostruzione di due tracce di base.

l'espressione

$$\sigma(\theta) = \sigma_0(1 + 4\theta)$$

dove σ_0 è risoluzione angolare per $\theta = 0$ (vedi Par. 3.3.3).

Dopo questa selezione, si cerca di eliminare il fondo rappresentato dalle false tracce di base formate dall'unione di grani del *fog*; poiché esse presentano in genere un grande χ^2 ed un piccolo numero di grani, viene empiricamente applicato il taglio:

$$\chi^2 \leq 0.25 \cdot n_g - 2.5$$

dove per n_g si intende il numero di grani. Recentemente è stato studiato un nuovo tipo di taglio di forma ellittica nel piano (χ^2, n_g) che permette di eliminare una maggiore quantità di fondo mantenendo inalterato il segnale [18].

Le tracce base utilizzate da FEDRA e da EasyReconstruct nella stessa superficie di emulsione dei volumi considerati sono esattamente le stesse, poiché per la procedura di *linking* si è utilizzato un solo algoritmo sugli stessi dati.

4.2 Allineamento delle emulsioni

L'accuratezza dell'allineamento meccanico ottenuto durante l'assemblaggio del *brick* è di circa 0.5 mm. L'utilizzo delle marche fiduciali (vedi Par. 2.2) consente di ottenere una precisione di allineamento di circa 10-15 μm , sufficiente per ricostruire rozzamente le tracce di volume in fase di *scanback*. La precisione richiesta per l'analisi cinematica dell'evento, dell'ordine di qualche μm , può essere raggiunta attraverso l'esposizione del *brick*, dopo la sua estrazione dal rivelatore, a raggi cosmici di qualche GeV [19]. Un buon allineamento è realizzato solo se si ha una densità di tracce penetranti di 1-2 tracce/ mm^2 . E' necessario quindi, definire un nuovo sistema di riferimento, considerando le deformazioni e ottimizzando l'allineamento. Sia FEDRA che EasyReconstruct calcolano per ogni lastra una trasformazione affine, che tiene conto degli spostamenti, delle rotazioni e delle deformazioni delle emulsioni, per connettere con precisione le tracce di base di lastre consecutive.

Al fine di minimizzare gli effetti dovuti alla distorsione delle lastre (vedi Par. 3.1.4), per l'allineamento viene considerato solo un sottocampione di tracce di base. Il sottocampione è selezionato applicando tagli in angolo e in numero di grani; entrambi i *framework* permettono all'utente di modificare tali parametri nel caso l'allineamento con i parametri standard non risulti soddisfacente.

Operativamente, considerando una coppia di lastre consecutive alla volta, si fissa uno dei due piatti mentre si sposta progressivamente l'altro, con lo scopo di massimizzare il numero di tracce di base che coincidono.

Successivamente sono valutati i parametri della trasformazione affine che può essere vista come una sequenza di trasformazioni elementari: uno *scaling* nell'asse x (r), uno *scaling* nell'asse y (s), una rotazione di un angolo θ dell'asse x , una rotazione di un angolo ϕ dell'asse y , una traslazione orizzontale (e) ed una verticale (f). Sintetizzando:

$$\begin{pmatrix} x^{brick} \\ y^{brick} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} r \cos \theta & -s \sin \phi \\ r \sin \theta & s \cos \phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x^{emulsione} \\ y^{emulsione} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} e \\ f \end{pmatrix} \quad (4.2)$$

dove per $x^{emulsione}, y^{emulsione}$ si intendono le coordinate della lastra da allineare, mentre con x^{brick}, y^{brick} si intendono le coordinate delle lastre già allineate. Se necessaria, viene contestualmente applicata anche la traslazione di un *offset* in z . Il processo viene iterato fino a quando, raggiunto il massimo numero di *match* delle tracce di base, i valori della matrice affine si stabilizzano.

Entrambi i programmi permettono all'utente di scegliere se fissare il piatto più *upstream* o più *downstream* nell'allineamento del volume¹; nei volumi considerati si è scelto però di seguire la configurazione standard di entrambi i programmi, tenendo quindi fermo il piatto più *downstream* nella ricostruzione di FEDRA, e quello più *upstream* nella ricostruzione di EasyReconstruct.

¹ Fissando un sistema di riferimento in cui l'asse z positivo coincide con la direzione del fascio di neutrini, si intende per piatto più *upstream* il piatto del volume con z minore.

4.3 Ricostruzione delle tracce di volume

Dopo che il *brick* è stato allineato, entrambi i programmi ricostruiscono le tracce di volume attraverso la tecnica del filtro di *Kalman*; questo algoritmo è un metodo ricorsivo di *track finding* e *track fitting* simultaneo che prende come dati iniziali i parametri delle tracce di base.

Dopo l'applicazione del filtro di *Kalman*, la traccia viene propagata sui piatti successivi e precedenti a quelli su cui è stata trovata, fino a un massimo di tracce di base mancanti pari a 5. Al contrario dell'algoritmo di *tracking* implementato in EasyReconstruct, l'algoritmo di FEDRA necessita di due tracce di base consecutive per innescare la traccia di volume.

Il controllo della consistenza dei due *framework* nella ricostruzione delle tracce di volume è un'operazione preliminare necessaria per confrontare gli algoritmi di *vertexing*; a tal scopo nei vertici considerati si è scelto di analizzare le tracce di volume che entrambi i programmi ricostruiscono congiuntamente. Poiché le variabili angolari sono meno soggette alle differenze di allineamento rispetto alle posizioni, il confronto è effettuato sulle *slope* delle tracce di volume: in particolare sono state calcolate le differenze fra s_x , l'angolo che la traccia forma nel piano XZ, ricostruito da Fedra e quello ricostruito da EasyReconstruct; la stessa operazione è stata compiuta su s_y , angolo che la traccia forma nel piano YZ.

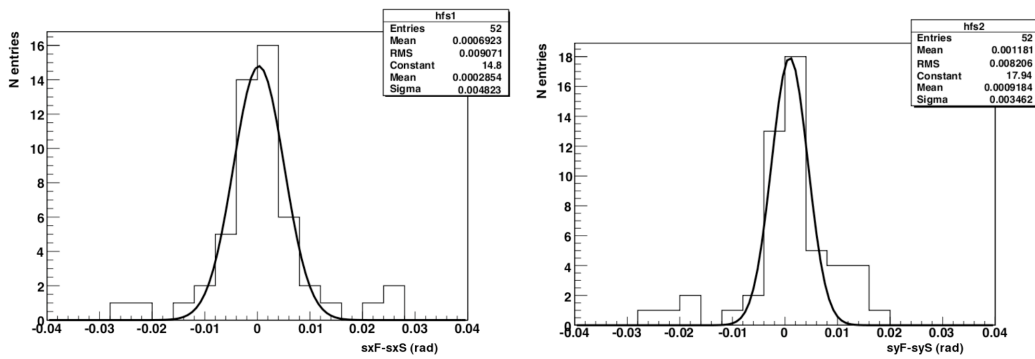


Figura 4.2: Differenze nelle *slope* ricostruite da FEDRA e da EasyReconstruct.

Come si deduce dalle Fig. 4.2, le differenze angolari delle tracce fittate dai due programmi sono dell'ordine di un mrad, quindi le due ricostruzioni possono essere considerate consistenti. Tale risultato è notevole ai fini della ricerca del decadimento del τ , poiché la sua rivelazione avviene, nel caso di *long decay*, attraverso l'analisi dell'angolo di “*kink*”, ovvero attraverso la valutazione delle *slope* delle tracce relative al τ e ai suoi prodotti di decadimento (vedi Par 2.3). Le differenze angolari fra le due ricostruzioni sono comunque abbondantemente inferiori alle richieste per la caratterizzazione di un candidato τ .

4.4 Ricostruzione del vertice

Nella procedura di ricostruzione del vertice, FEDRA ed EasyReconstruct differiscono maggiormente, poiché seguono due diverse filosofie di ricostruzione: il primo si avvale della tecnica chiamata *pair-based vertexing* (PBV), mentre il secondo della tecnica chiamata *global vertexing* (GV)².

4.4.1 *Pair-based vertexing*

La filosofia del metodo PBV si basa sull'osservazione che è facile, a livello computazionale, calcolare la distanza minima fra due linee rette e il punto in cui esse si incontrano; generalizzando, si definisce “vertice” il punto in cui due o più tracce si incontrano e si fermano. In dettaglio, l'algoritmo procede come segue:

1. ricostruite le tracce di volume, si considerano tutte le possibili coppie di tracce, calcolando il punto di minima distanza fra le tracce. Per creare l'accoppiamento, tale distanza deve ricadere entro $30\ \mu\text{m}$, in quanto si considerano le incertezze dovute allo *scattering* multiplo ed agli errori di misura;

² La configurazione standard dell'elaborazione dei vertici di EasyReconstruct implementa la tecnica GB, ma il programma permette all'utente anche la ricostruzione del vertice tramite la tecnica PBV.

2. le coppie sono classificate secondo la loro topologia. In riferimento alla Fig. 4.3, le topologie permesse sono quelle denotate con V,K,A, mentre le altre, classificate come accoppiamenti casuali, vengono scartate;

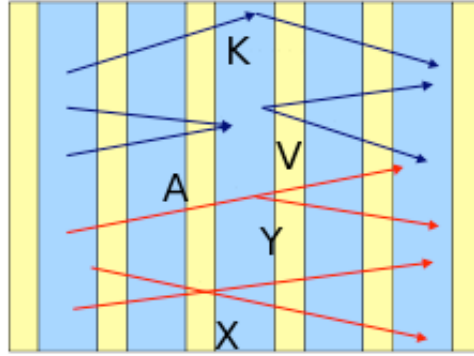


Figura 4.3: Schema del brick e delle topologie possibili nel punto di incontro di due tracce.

3. per ogni punto di incontro si cercano altri punti di incontro vicini entro tolleranze di $30 \mu\text{m}$ nel piano trasverso e $300 \mu\text{m}$ nella direzione longitudinale. Se due punti rientrano entro queste tolleranze vengono considerati un punto unico. Questo step viene ripetuto fino a quando non si formano più punti di incontro.
4. tutti i punti di incontro (a due o più tracce) rimasti sono promossi a “vertice”.

L’approccio PBV è stato utilizzato con successo nell’esperimento CHORUS, per la rivelazione di oltre 10000 eventi di interazione da neutrino; tuttavia esso presenta alcune inefficienze rispetto al metodo GV, descritto nel prossimo paragrafo, le maggiori delle quali sono un grande errore nella ricostruzione della coordinata z del vertice nel caso di tracce con piccola apertura angolare e la possibilità che alcune tracce non siano assegnate al vertice.

Ad esempio si consideri il problema di due tracce che si incontrano in un piano (Fig. 4.4). Sia T la distanza trasversa, θ l’angolo di apertura e Z la

profondità del vertice nel piombo, allora

$$Z = T \cot \theta \quad (4.3)$$

e per θ piccoli

$$\delta Z \approx T \delta \theta / \theta^2. \quad (4.4)$$

Se, in una caso realistico, si assegnassero i valori $T = 10 \mu\text{m}$, $\theta = 10 \text{ mrad}$ e $\delta \theta = 2 \text{ mrad}$, si otterrebbe $\delta Z = 200 \mu\text{m}$: un piccolo errore nell'angolo di apertura può quindi amplificare l'incertezza nella posizione trasversale del vertice.

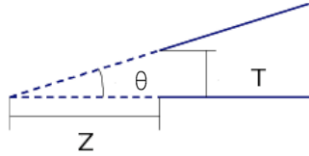


Figura 4.4: Problema di due tracce che si incontrano in un piano.

Un altro esempio di inefficienza nelle ricostruzioni con il PBV è mostrato in Fig. 4.5. Le tracce a sinistra sono le tracce reali che convergono in un unico vertice, mentre quelle a destra sono quelle ricostruite con i corrispondenti accoppiamenti e tolleranze. Le zone in verde rappresentano le tolleranze entro cui avviene l'unificazione dei vertici: poiché esse non si sovrappongono il vertice reale è ricostruito con solamente con due tracce.

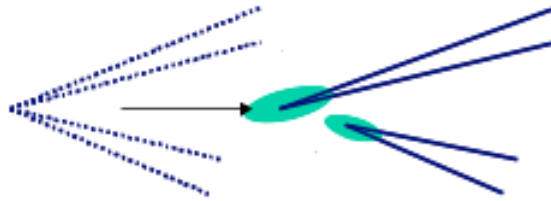


Figura 4.5: A sinistra: riproduzione del vertice reale. A destra: evento ricostruito in due vertici distinti.

4.4.2 *Global vertexing*

La definizione del concetto di vertice nell'approccio GV è differente rispetto all'approccio PBV; infatti il vertice è definito come l'entità topologica data da un gruppo di tracce le cui intercette, in un determinato piano trasversale all'asse z , cadono tutte all'interno di un cerchio di raggio $30 \mu\text{m}$. Poiché una traccia può appartenere ad un solo vertice, in caso di ambiguità la traccia è assegnata al vertice con la massima molteplicità. In dettaglio, l'algoritmo procede come segue:

1. si definisce un insieme di piani perpendicolari a z , con passo Δz all'interno dell'intero volume;
2. le tracce di volume sono propagate per tre celle ($3900 \mu\text{m}$) dal loro punto di stop; si registra quindi l'intercetta delle tracce propagate con ciascun piano dell'insieme;
3. i punti così ottenuti vengono elaborati per ogni piano: se due punti si trovano ad una distanza inferiore a $30 \mu\text{m}$, le tracce corrispondenti formano un *cluster* di tracce;
4. dopo aver collezionato tutti i *cluster* di tracce, si controlla se una traccia appartiene a più *cluster*; in questo caso il *cluster* con molteplicità minore viene eliminato³.
5. i *cluster* rimasti vengono promossi a "vertice"; dopo questo step si procede al calcolo dei parametri del vertice [21].

4.5 Confronto

Scopo di questo lavoro di tesi è effettuare un confronto incrociato dei risultati prodotti dagli algoritmi di ricostruzione FEDRA e EasyReconstruct nelle differenti condizioni di applicazione in *brick* reali per ottenere una valutazione tendenziale di funzionamento e una verifica dei parametri degli

³ Nel caso i *cluster* abbiano la stessa molteplicità si elimina il vertice con z minore.

algoritmi; non è possibile in questa fase operare un confronto puntuale sulla qualità della ricostruzione a causa della ancora bassa statistica.

E' necessario precisare che attualmente sono in fase di studio simulazioni Monte Carlo per riprodurre gli eventi da interazione di neutrino nell'esperimento OPERA. Non esiste, al momento, una simulazione definitiva su cui basare il confronto delle ricostruzioni; non è quindi possibile effettuare una convalida dell'algoritmo di ricostruzione.

Tuttavia, per avere un riscontro veritiero, è stata effettuata l'ispezione manuale dei vertici considerati. L'ispezione manuale consiste nel riconoscimento e nella misura, da parte di un operatore, delle tracce associate al vertice secondo le predizioni dei programmi di ricostruzione; le coordinate del vertice vengono poi ricalcolate secondo i nuovi parametri delle tracce. Ovviamente questo metodo presenta delle inefficienze: soprattutto nei *brick* ad alto *fog* è possibile che l'operatore non identifichi la traccia o che misuri grani di fondo.

Sono stati analizzati ventitré eventi, dei quali otto classificati come “1-prong”, ovvero eventi con molteplicità uguale a uno, e quindici classificati come “multiprong”, ovvero eventi con una molteplicità maggiore di uno.

Ogni evento è stato precedentemente certificato e confermato con la procedura di *scanback*.

Prima di iniziare descrizione dei risultati è utile fornire una stima, seppur grossolana, del “fondo” in cui sono ricercati gli eventi. Il numero di microtracce, tracce di base e tracce di volume per mm^2 varia in modo molto significativo con l'aumentare del *fog* del *brick*; pertanto è riportato in Tab. 4.1 solamente l'ordine di grandezza della densità di tracce con angoli inferiori a 0.6 rad.

	densità (n° di tracce/ mm^2)
microtracce	10^4
tracce di base	10^3
tracce di volume	10^2

Tabella 4.1: Ordine di grandezza della densità di microtracce, tracce di base e tracce di volume con angoli minori di 0.6 rad.

I parametri considerati per il confronto fra FEDRA e EasyReconstruct⁴ sono: coordinate del vertice, numero di tracce associate al vertice e parametro d’impatto delle tracce comuni. Un importante controllo preliminare è stato effettuato sulle *slope* delle tracce di volume ricostruite congiuntamente dai due programmi (vedi Par. 4.3).

4.5.1 Coordinate spaziali del vertice

Parametri naturali su cui basare un confronto di algoritmi di *vertexing* sono le coordinate del vertice ricostruito. Tali parametri sono tuttavia dipendenti dal sistema di riferimento calcolato dalla procedura di allineamento fine dei volumi, operazione che viene effettuata in maniera indipendente nei due *framework*.

Le coordinate spaziali del vertice sono importanti ai fini della localizzazione dell’evento, ma non sono fondamentali nel riconoscimento della topologia di decadimento del τ ; si è operato comunque tale confronto per verificare l’assenza di sistematiche non gestibili negli algoritmi.

Come si deduce dalle Fig. 4.6 e 4.7, la ricostruzione delle posizioni trasversali del vertice nei due algoritmi si discosta dalla ricostruzione manuale al massimo di circa $70\ \mu\text{m}$. Per quanto riguarda il confronto fra le ricostruzioni di FEDRA e quella manuale la distribuzione delle differenze in x ha una media di $1\ \mu\text{m}$ con un RMS di $34\ \mu\text{m}$, mentre la distribuzione delle differenze in y ha una media di $-37\ \mu\text{m}$ con un RMS di $26\ \mu\text{m}$. Per quanto riguarda il confronto fra le ricostruzioni di EasyReconstruct e quella manuale la distribuzione delle differenze in x ha una media di $-14\ \mu\text{m}$ con un RMS di $35\ \mu\text{m}$, mentre la distribuzione delle differenze in y ha una media di $-3\ \mu\text{m}$ con un RMS di $27\ \mu\text{m}$.

La Fig. 4.8 mostra le differenze fra le posizioni trasversali ricostruite dai due programmi: la distribuzione delle differenze in x ha una media di $15\ \mu\text{m}$

⁴ Nei grafici è utilizzata la seguente convenzione: tutte le variabili il cui nome termina con “F” si riferiscono alla ricostruzione con FEDRA, quelle il cui nome termina con “S” alla ricostruzione con EasyReconstruct, quelle il cui nome termina con “_MAN” alla ricostruzione manuale.

con un RMS di $49\text{ }\mu\text{m}$, mentre la distribuzione delle differenze in y ha una media di $-40\text{ }\mu\text{m}$ con un RMS di $25\text{ }\mu\text{m}$.

Per giustificare le differenze fra le coordinate trasversali (x e y) ricostruite con i programmi e quelle ricalcolate attraverso le misure manuali bisogna considerare che il sistema di riferimento delle ricostruzioni è ricalcolato dai programmi con la procedura di allineamento fine, mentre il sistema di riferimento in cui sono effettuate le misure manuali è allineato grazie alle marche laterali, con una precisione di circa $15\text{ }\mu\text{m}$.

Le differenze evidenziate fra le ricostruzioni di FEDRA e EasyReconstruct sono imputabili ai diversi allineamenti; è importante notare che la posizione del vertice è funzione dell'allineamento di tutte le lastre del volume, perciò risente dell'errore complessivo.

Da questo primo confronto si può dedurre che, malgrado vi siano differenze anche dell'ordine di $70\text{ }\mu\text{m}$, le misure manuali e le ricostruzioni sia di FEDRA che di EasyReconstruct sono all'interno di uno stesso campo di vista⁵; entrambe le ricostruzioni risultano quindi uno strumento appropriato per la localizzazione spaziale dell'evento.

La coordinata più soggetta alle differenze di allineamento è la coordinata longitudinale (z). Durante l'allineamento viene applicata ad ogni singolo piatto una correzione in z ; poiché tali correzioni si sommano su tutte le lastre del volume e poiché i piatti di partenza nei due allineamenti sono differenti (cfr. 4.2), le coordinate longitudinali dei vertici non sono confrontabili.

4.5.2 Molteplicità dell'evento

Un parametro importante e facilmente confrontabile nelle due ricostruzioni è il numero di tracce associate al vertice, ovvero il numero di *prong*. Come mostrato in Fig. 4.9, in due casi FEDRA ricostruisce il vertice con una molteplicità superiore a EasyReconstruct, mentre in quattro casi avviene l'opposto. Confrontando questi casi con le ricostruzioni manuali, come si può vedere dalla Fig. 4.11, si scopre che in tre eventi su sei la ricostruzione manuale coincide con quella di EasyReconstruct, in un evento la ricostruzio-

⁵ Per l'ingrandimento 50X il campo di vista è circa $300\times 300\text{ }\mu\text{m}^2$

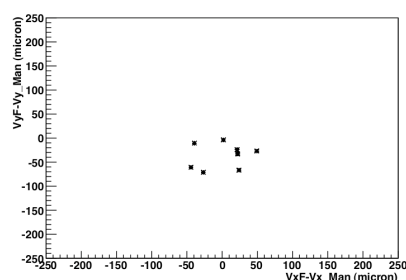


Figura 4.6: Differenza fra la posizione del vertice in y ricostruita da FEDRA e quella misurata in *manual check* in funzione della differenza fra la posizione del vertice in x ricostruita da FEDRA e quella misurata in *manual check*.

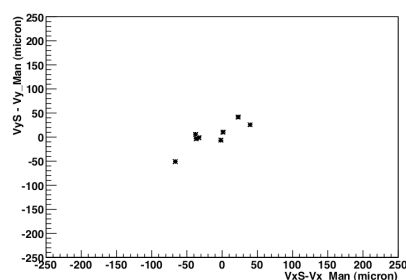


Figura 4.7: Differenza fra la posizione del vertice in y ricostruita da EasyReconstruct e quella misurata in *manual check* in funzione della differenza fra la posizione del vertice in x ricostruita da EasyReconstruct e quella misurata in *manual check*.

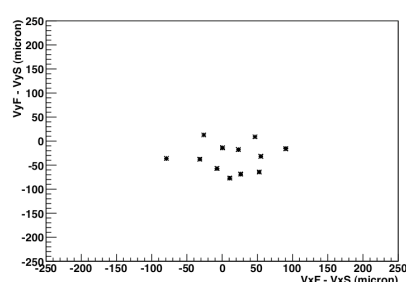


Figura 4.8: Differenza fra la posizione del vertice in y ricostruita da FEDRA e quella ricostruita da EasyReconstruct in funzione della differenza fra la posizione del vertice in x ricostruita da FEDRA e quella ricostruita da EasyReconstruct

ne manuale coincide con quella FEDRA, mentre in due eventi entrambi gli algoritmi sovrastimano la molteplicità del vertice. In Fig. 4.10 è mostrata la distribuzione del numero di *prong* per le tre ricostruzioni.

Dal grafico in Fig. 4.11 si può inoltre dedurre che, benché entrambi gli algoritmi sovrastimino in alcuni casi la molteplicità del vertice, solo nella ricostruzione con FEDRA vi sono casi di sottostima; data la grande quantità di tracce di volume ricostruite non sorprende che gli algoritmi possano sovrastimare la molteplicità attaccando al vertice tracce di volume fittizie.

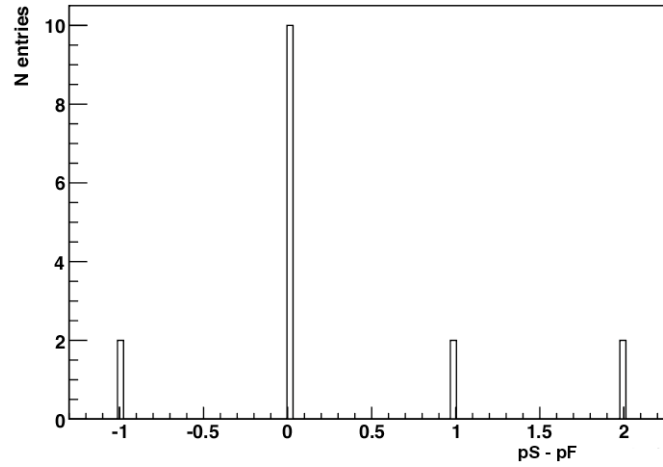


Figura 4.9: Differenza fra il numero di *prong* ricostruito da EasyReconstruct e quello ricostruito da FEDRA.

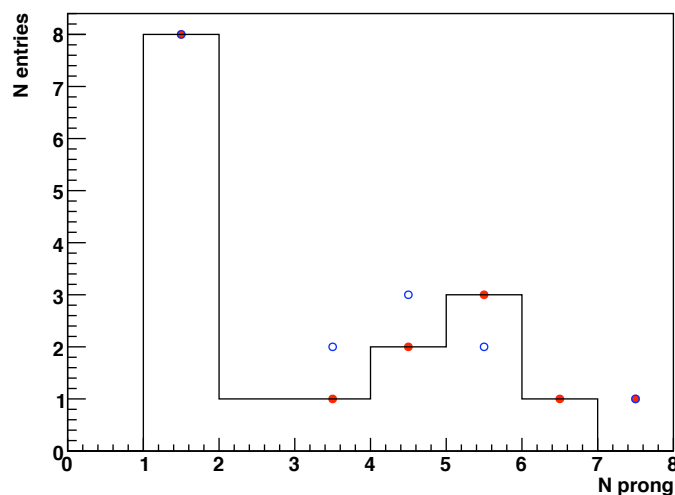


Figura 4.10: Distribuzione del numero di prong ricostruiti da FEDRA (blu), EasyReconstruct (rosso) e visti in *manual check* (istogramma).

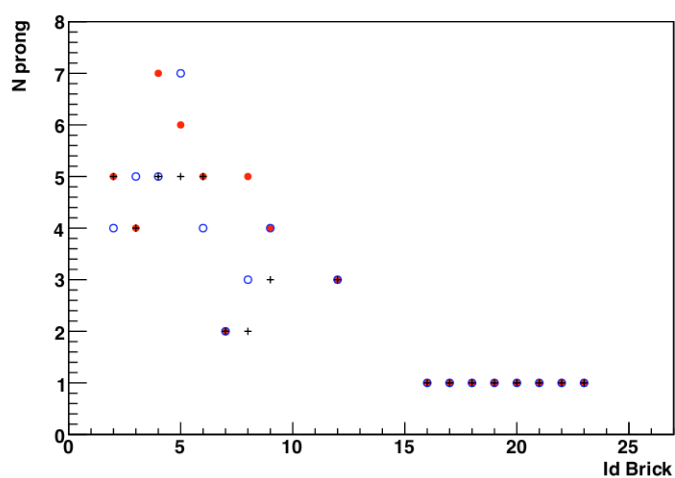


Figura 4.11: Per ogni evento sono riportati in blu il numero di *prong* ricostruiti con FEDRA, in rosso il numero di *prong* ricostruiti con EasyReconstruct, con una croce nera il numero di *prong* visti in *manual check*; nell'organizzazione dei dati gli eventi a 1-*prong* sono quelli con id Brick maggiore di 16.

4.5.3 Parametro d'impatto

Per parametro d'impatto si intende la distanza minima fra la traccia e il vertice, che in questo contesto è considerato come entità geometrica puntiforme.

Il confronto del parametro d'impatto è interessante in quanto esso è una variabile che non contiene esplicitamente gli effetti di allineamento, al contrario delle posizioni del vertice.

Ovviamente, poiché le ricostruzioni dei vertici nei due programmi differiscono nel numero di *prong*, il confronto dei parametri d'impatto è stato effettuato solamente sulle tracce ricostruite da entrambi i *framework*.

Le distribuzioni dei parametri d'impatto sono mostrate in Fig. 4.12, Fig. 4.14 e 4.14: è evidente, che rispetto alla ricostruzione manuale, i parametri d'impatto forniti dai singoli programmi sono maggiori; in particolare, se si calcolano le differenze fra parametri d'impatto ricostruiti e quelli manuali (Fig. 4.15 e Fig. 4.16) si ottiene un *offset* di $4.9 \mu\text{m}$ per la ricostruzione con FEDRA e un *offset* di $7.1 \mu\text{m}$ per la ricostruzione con EasyReconstruct.

La differenza fra i parametri d'impatto ricostruiti da FEDRA e quelli ricostruiti da EasyReconstruct è invece centrata a $-0.05 \mu\text{m}$ (Fig. 4.17). In Fig. 4.18, Fig. 4.19 e Fig. 4.20 sono inoltre mostrate le distribuzioni bidimensionali dei parametri d'impatto.

Si può quindi dedurre l'esistenza di una sistematica nel calcolo del parametro d'impatto in entrambi gli algoritmi di ricostruzione; tale sistematica potrebbe essere spiegata ricordando che, per calcolare il parametro d'impatto, viene utilizzato il fit della traccia di volume e vengono quindi introdotti gli errori ad esso relativi.

Da notare inoltre le larghezze delle distribuzioni mostrate nelle Figg. 4.15, 4.16 e 4.17 ($\sim 10 \mu\text{m}$). Questo valore è al di sopra della tolleranza richiesta per confermare le tracce come appartenenti al vertice. Infatti, dopo la prima ricostruzione del vertice, ogni singola traccia viene valutata sulla base del suo parametro d'impatto. Nel caso in cui esso sia superiore a $10 \mu\text{m}$, la traccia deve essere ulteriormente studiata per verificare la sua appartenenza al vertice, anche in relazione al suo momento. E' chiaro quindi che, con una

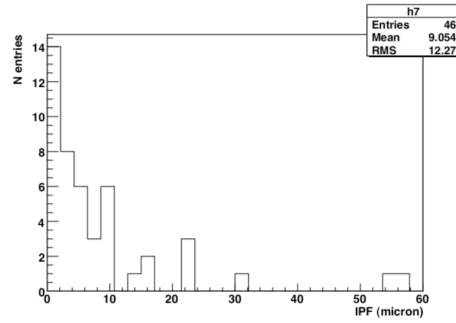


Figura 4.12: Distribuzione dei parametri d'impatto calcolati con FEDRA.

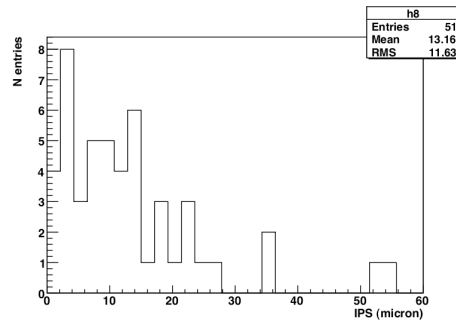


Figura 4.13: Distribuzione dei parametri d'impatto calcolati con EasyReconstruct.

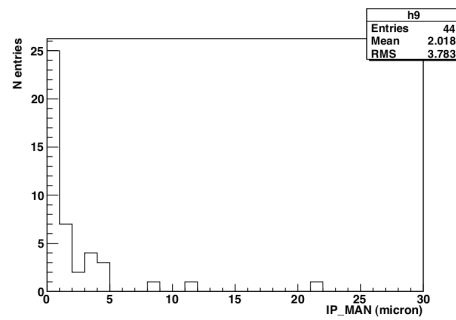


Figura 4.14: Distribuzione dei parametri d'impatto calcolati con le misure manuali delle tracce.

risoluzione di $10\ \mu\text{m}$, il numero di tracce da sottoporre a verifica manuale diventerebbe proibitivo.

Entrambi gli algoritmi prevedono che la costruzione del vertice non venga effettuata solamente con le tracce ricostruite nel piatto più vicino al vertice, ma anche utilizzando le proiezioni delle tracce di volume più lontane; perciò è interessante notare che il parametro d'impatto cresce con la distanza longitudinale della traccia dal vertice (Fig. 4.21 e Fig. 4.22).

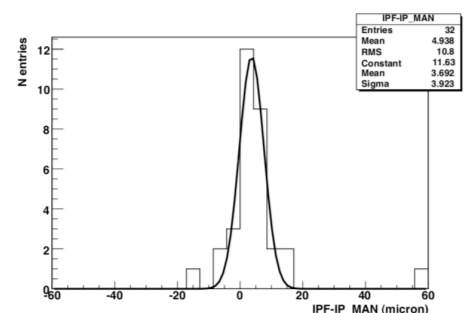


Figura 4.15: Differenza fra i parametri d'impatto ricostruiti da FEDRA e quelli ricostruiti con le misure manuali.

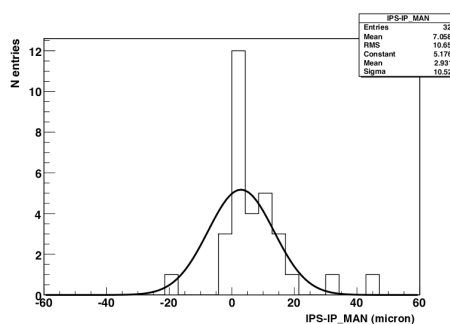


Figura 4.16: Differenza fra i parametri d'impatto ricostruiti da EasyReconstruct e quelli ricostruiti con le misure manuali.

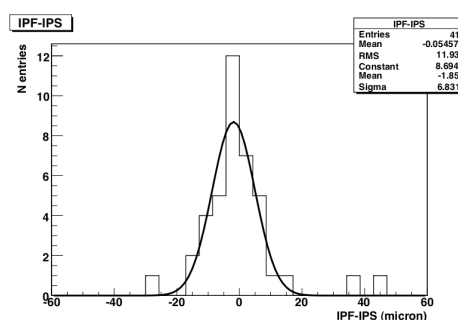


Figura 4.17: Differenza fra i parametri d'impatto ricostruiti da FEDRA e quelli ricostruiti da EasyReconstruct.

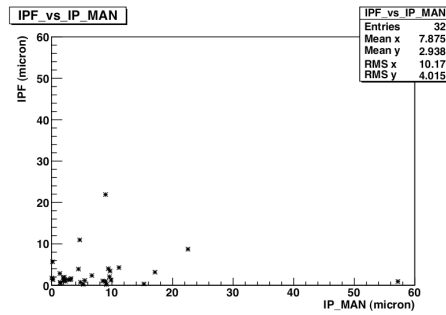


Figura 4.18: Distribuzione dei parametri d'impatto ricostruiti da FEDRA in funzione dei parametri d'impatto ricostruiti con le misure manuali.

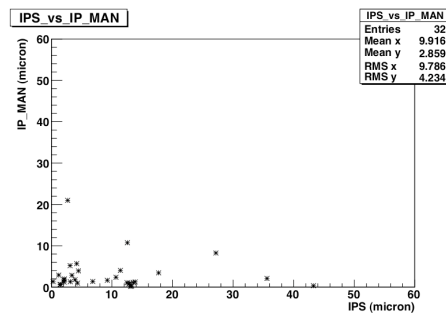


Figura 4.19: Distribuzione dei parametri d'impatto ricostruiti da EasyReconstruct in funzione dei parametri d'impatto ricostruiti con le misure manuali.

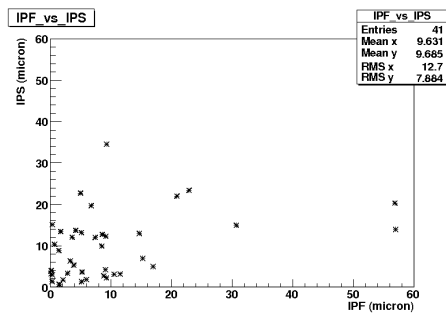


Figura 4.20: Distribuzione dei parametri d'impatto ricostruiti da EasyReconstruct in funzione dei parametri d'impatto ricostruiti da FEDRA.

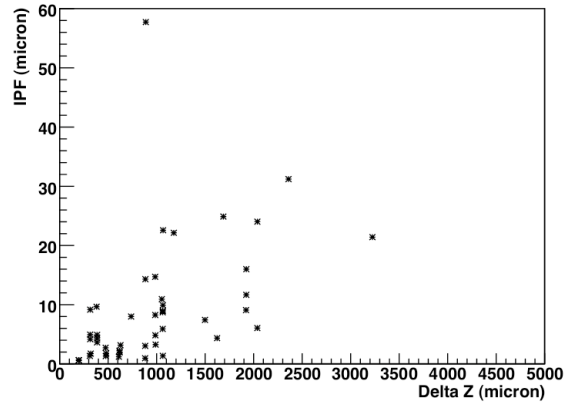


Figura 4.21: Parametri d'impatto in funzione della distanza lungo l'asse z della traccia dal vertice nella ricostruzione di FEDRA.

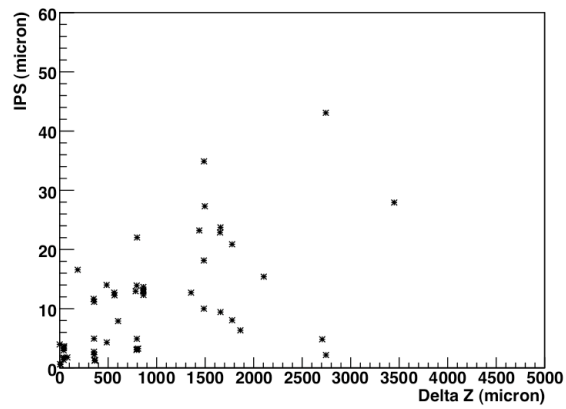


Figura 4.22: Parametri d'impatto in funzione della distanza, lungo l'asse z , della traccia dal vertice nella ricostruzione di EasyReconstruct.

Conclusioni

Scopo dell'esperimento OPERA è la rivelazione di ν_τ in un fascio inizialmente puro di ν_μ per confermare il fenomeno delle oscillazione dei neutrini. Lo strumento fondamentale per la rivelazione dell'interazione del neutrino tauonico è l'emulsione nucleare. Dopo l'analisi delle emulsioni al microscopio ottico e l'acquisizione dei dati, l'evento viene ricostruito off-line. Per la ricostruzione dell'evento sono stati sviluppati nell'esperimento OPERA due programmi dedicati, FEDRA ed EasyReconstruct.

In questo lavoro di tesi tali programmi sono stati confrontati tramite la loro applicazione nella ricostruzione di eventi reali. Si è inoltre operato un confronto fra i risultati prodotti e la ricostruzione manuale dell'evento.

Dall'analisi emerge che la ricostruzione delle posizioni trasversali del vertice per entrambi gli algoritmi è consistente, entro gli errori dovuti all'allineamento, con la ricostruzione manuale; pertanto l'utilizzo di entrambi i programmi di ricostruzione si rivela uno strumento appropriato per la localizzazione spaziale dei vertici di interazione.

Vi sono casi in cui FEDRA sottostima la molteplicità del vertice; poiché le tolleranze degli algoritmi di *vertexing* sono le stesse, la causa di questa sottostima è da ricercarsi nel metodo PBV (*Pair Based Vertexing*).

Confrontando le ricostruzioni delle *slope* delle tracce di volume si evince che FEDRA ed EasyReconstruct sono in ottimo accordo, evidenza che assicura la bontà di questi programmi nelle ricostruzioni angolari delle tracce e quindi nella ricerca di decadimenti di tipo *long*.

Dallo studio dei parametri d'impatto delle tracce che costituiscono il vertice si deduce invece che la ricostruzione delle tracce secondo il metodo del filtro di *Kalman*, utilizzato sia da FEDRA che da EasyReconstruct, introdu-

ce una sistematica nel calcolo di tali parametri. La ricostruzione dell'evento utilizzando solamente i programmi di ricostruzione non fornisce perciò la sensibilità necessaria per identificare il τ nel decadimento di tipo *short*: in questo caso è necessario quindi aggiungere le informazioni ricavate dalle misure manuali, in particolare nella fase di associazione delle tracce al vertice di interazione.

Bibliografia

- [1] W. Pauli, letter to a physicist's gathering at Tübingen, December 4, 1930. Reprinted in Wolfgang Pauli, *Collected Scientific Papers*, ed. R. Kronig and V. Weisskopf, Vol 2, p. 1313 (Interscience: New York, 1964).
- [2] K. S. Krane, *Introductory Nuclear Physics*, John Wiley & Sons (1988).
- [3] F. Reines and C.L. Cowan, *Nature* **178** (1956) 446.
- [4] C. Grupen et al., *Astroparticle Physics*, Springer (2005).
- [5] B. T. Cleveland et al., *Astrophys. J.* **496** (1998) 505.
- [6] A. Strumia and F. Vissani, hep-ph/0606054 (2008).
- [7] Q. R. Ahmad et al., *Phys. Rev. Lett.* **89** (2002) 011301.
- [8] K. Eguchi et al., *Phys. Rev. Lett.* **90** (2003) 021802.
- [9] M. Apollonio et al., *Eur. Phys. J. C* **27** (2003) 331.
- [10] Y. Fukuda et al., *Phys. Rev. Lett.* **81** (1998) 1562.
- [11] M. Ambrosio et al., *Phys. Lett. B* **566** (2003) 35.
- [12] W. W. M. Allison et al., *Phys. Lett. B* **449** (1999) 137; *Phys. Lett. B* **464** (1999) 352; M. Sanchez et al., *Phys. Rev. D* **68** (2003) 113004.
- [13] M. H. Ahn et al., *Phys. Rev. D* **74** (2006) 072003.
- [14] M. Guler et al., experiment proposal (2000) 265pp, CERN/SPSC 2000-028, SPSC/P318, LNGS P25/2000.
- [15] R. Acquafredda et al., *JINST* **4** (2009) P04018.
- [16] S. Aoki et al., *Nucl. Instr. Meth. B* **51** (1990) 466.
S. Aoki, *Nucl. Instr. Meth. A* **473** (2001) 192.
- [17] K. Kodoma et al., *Phys. Lett. B* **504** (2001) 218.

- [18] L. Rossi, *Ottimizzazione nelle procedure di ricerca di particelle nelle emulsioni nucleari dell'esperimento OPERA*, Tesi di Laurea, Bologna 2009.
- [19] E. Barbuto et al. Nucl. Instr. Meth. A **525** (2004) 485-495.
- [20] L. Arrabito et al., JINST2 (2007) P050004.
- [21] E. Barbuto, C. Bozza, C. Sirignano, OPERA Internal Note #78, (2006) Salerno.

Ringraziamenti

Benché l'emerito prof. Umberto Eco dichiari che “è di cattivo gusto ringraziare il relatore”, contravvenendo al *bon ton*, il mio primo e sentito ringraziamento è rivolto al prof. Sioli, che con disponibilità e pazienza mi ha guidato nell'accidentato percorso della stesura della tesi; ringrazio inoltre tutto il gruppo bolognese di OPERA, in particolare il dott. Mandrioli per le preziose correzioni, Gabriele per tutto l'aiuto fornito e per avermi mentito spudoratamente riguardo alle probabilità di riuscita del lavoro, Edu per aver tenuto alto il morale anche nei (miei) momenti di sconforto, Matteo e Michele per aver sopportato di buon grado le mie continue richieste di soccorso e le domande non sempre intelligenti; un ringraziamento speciale va a Laura, senza la quale il mio confronto si baserebbe sul “nulla cosmico”.

Per avermi ospitato in un'oasi di pace in cui scrivere la tesi, nel marasma di questi mesi, porto grande riconoscenza ed affetto a Emilia Lotti e Sergio Flamigni.

Ringrazio chi mi sopporta 365 giorni all'anno, durante gli attacchi di panico e nei momenti di “sclero”, il Topo e la Fede, e chi mi sopporta solo a piccole dosi: Luca, Vinci, la Tasso, la Vasu, Sighi, Riccardo, Edo e le “regaz” del basket.

Ringraziamenti particolari sono indirizzati al prof. Servizi ed al prof. Valli, che, lontani dalla mia quotidianità, mi hanno sostenuto, credendo in me anche nei momenti più grigi, e mi hanno spronato a persistere nelle mie scelte.

Un ultimo ringraziamento specialissimo (anche se non si dice) alla mia mamma perché ... “*per il sostegno fornitomi in questi anni di crescita quanto mai difficili e bla bla bla...*” ... ma c'è bisogno di scriverlo il perché? Perché è la mia mamma, no !?!