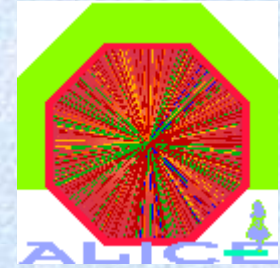




Università degli Studi di Torino

Facoltà di Scienze MM.FF.NN.

Corso di Studi in Fisica



Tesi di Laurea Triennale:

**Studio di un dispositivo di  
accoppiamento tra fibre di quarzo e un  
fotomoltiplicatore**

Relatore: Prof. Mauro Gallio

Co-relatore: Dott. Roberto Gemme

Candidato: Musich Marco

# Contestualizzazione

Questo lavoro è stato svolto nell'ambito dell'esperimento **ALICE** (A Large Ion Collider Experiment) in via di preparazione al LHC del CERN.

Tale esperimento investigherà la fisica dell'interazione forte ad altissima densità di energia, laddove ci si aspetta la formazione del **Quark-Gluon Plasma**.

Ci si è occupati del trattamento del segnale in uscita dai rilevatori **ZDC** (Zero Degree Calorimeters) di ALICE con i quali si intende misurare la centralità degli urti e valutare così la densità di energia raggiunta.

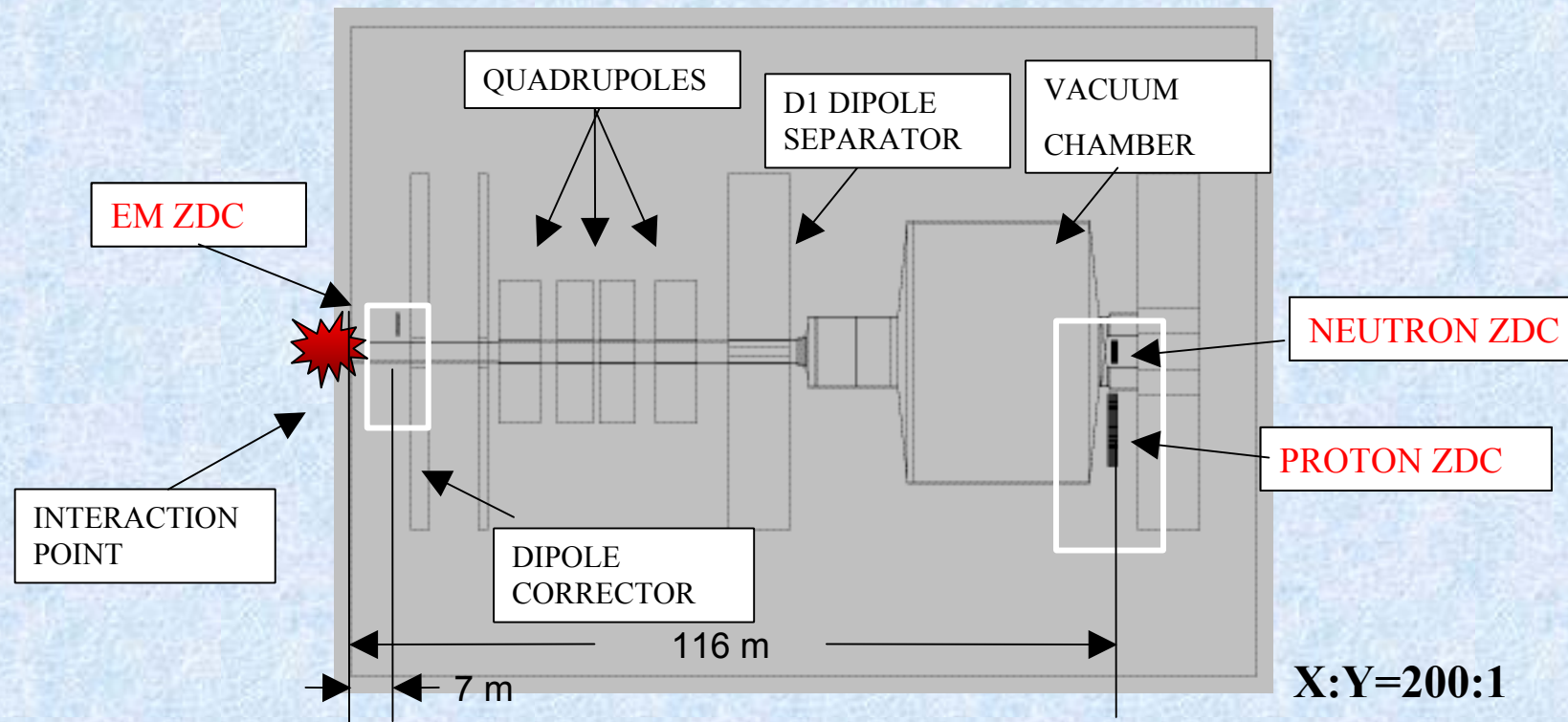
In particolare si è studiato quale fosse la soluzione ottimale per accoppiare le fibre ottiche di quarzo degli **ZDC** con i fotomoltiplicatori dell'elettronica di lettura.

Tale dispositivo di accoppiamento è sostanzialmente una **guida di luce di materiale plastico**, atta a miscelare il segnale luminoso in ingresso, in modo da far perdere memoria al segnale in uscita del punto in cui la luce viene generata.

# Descrizione degli ZDC

I rivelatori ZDC sono costituiti da due set di calorimetri, posti da entrambi i lati rispetto al punto di interazione (I.P.), ciascuno composto da:

1. 2 calorimetri adronici a “spaghetti”, 1 per i neutroni spettatori (ZN) e 1 per i protoni spettatori (ZP), posti a  $0^\circ$  rispetto all’asse di LHC, a circa 116 m dal punto di interazione dove i fasci di particelle collidono.
2. un calorimetro elettromagnetico “in avanti” posto a circa 7 m dall’I.P.



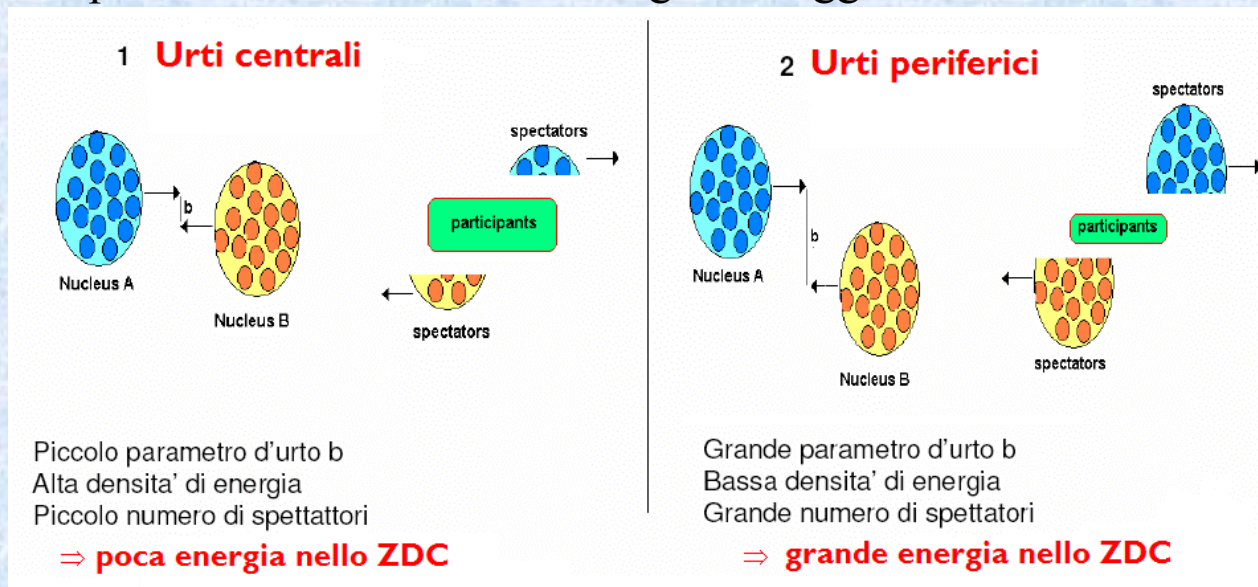


# Utilizzo degli ZDC

- I calorimetri adronici del rivelatore ZDC sono destinati a misurare le energie dei nucleoni spettatori negli urti tra ioni pesanti.
- La misura dell'energia depositata permette di calcolare il numero di nucleoni spettatori (e quindi quello dei partecipanti):

$$N_{\text{spec}} = E_{\text{zdc}} / E_A \Rightarrow N_{\text{part}} = A - N_{\text{spec}}$$

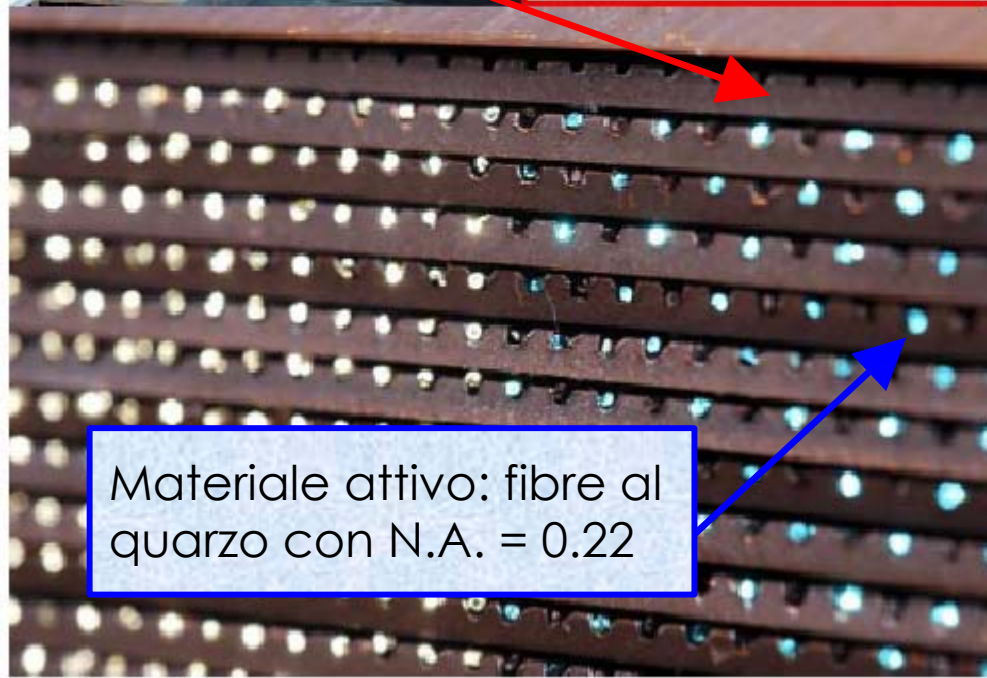
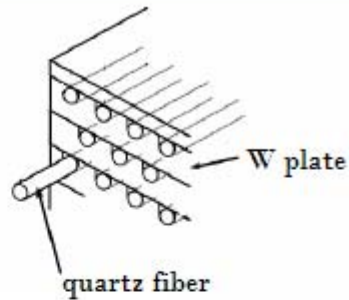
- Noto il numero di partecipanti è possibile determinare la centralità dell'urto, parametro fondamentale per ricostruire la densità energetica raggiunta nell'interazione.



# Struttura del rivelatore

## Struttura interna del calorimetro

Materiale passivo:  
lega di tungsteno



Materiale attivo: fibre al  
quarzo con N.A. = 0.22

- Lo **ZN** e lo **ZP** sono calorimetri a campionamento basati sul seguente principio: le particelle cariche dello sciame adronico generato dai nucleoni spettatori, in un materiale assorbitore, denso, ad alto  $Z$ , producono luce Cherenkov in fibre ottiche di quarzo, uniformemente distribuite nell'assorbitore.

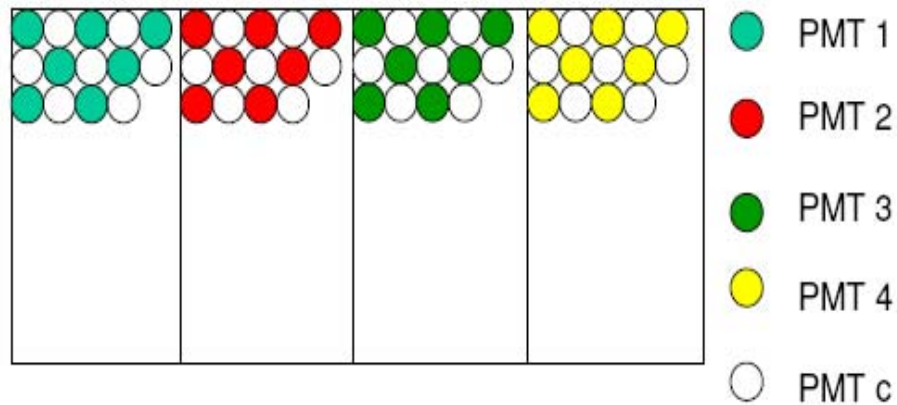
- Le stesse fibre ottiche (che negli ZDC hanno una apertura numerica **N.A. = 0.22**) trasportano la luce generata verso i fotomoltiplicatori.

- Il materiale assorbitore, nello ZN è una lega di tungsteno (W 93.5 %, Ni-Fe 6.5 %), mentre è ottone (Zn-Cu) nello ZP.

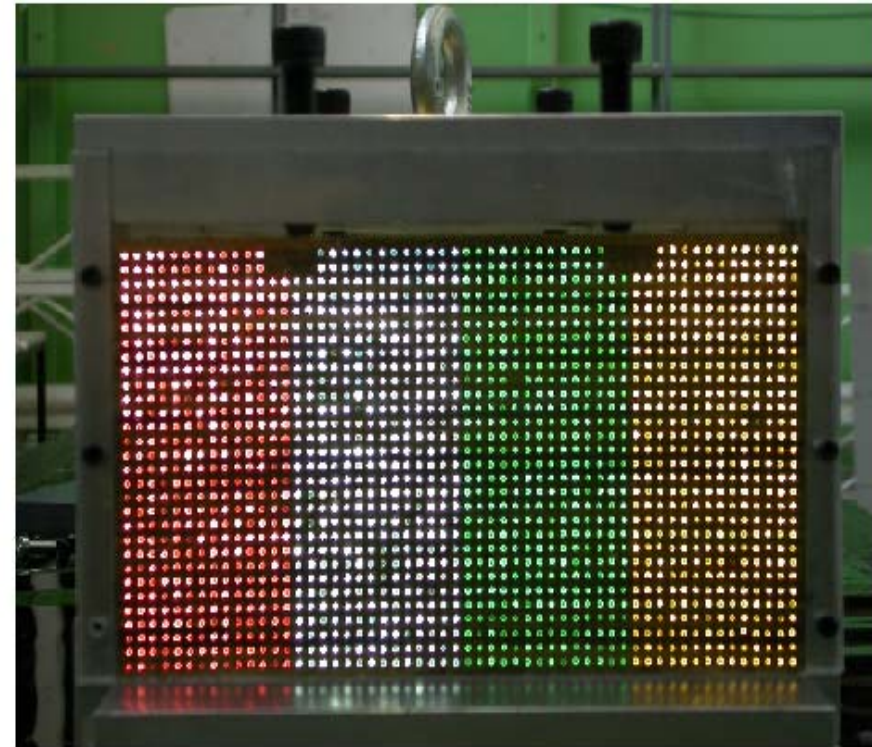


# Descrizione del rivelatore

## Calorimetro ZN

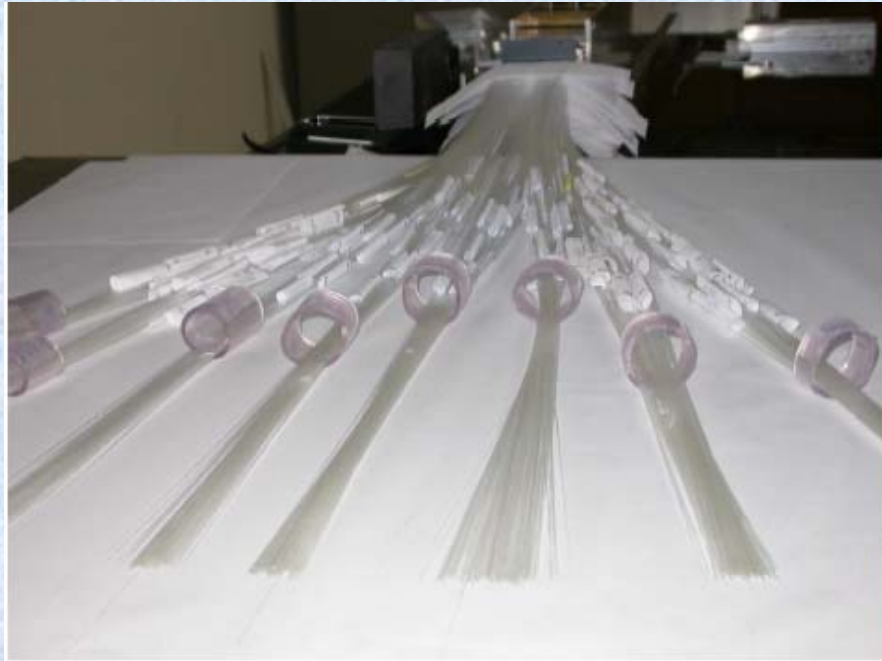


Suddivisione delle fibre ottiche in ZP:  
permette una approssimativa  
ricostruzione del punto di impatto



Una fibra ogni 2 viene mandata ad un fotomoltiplicatore comune **PMTc**, mentre le rimanenti che raccolgono la luce da quattro quadranti vengono connesse ad un fotomoltiplicatore dedicato (da **PMT1** a **PMT4**). I fotomoltiplicatori trasformano il segnale luminoso in segnale elettrico.

# Accoppiamento Fibre - PM



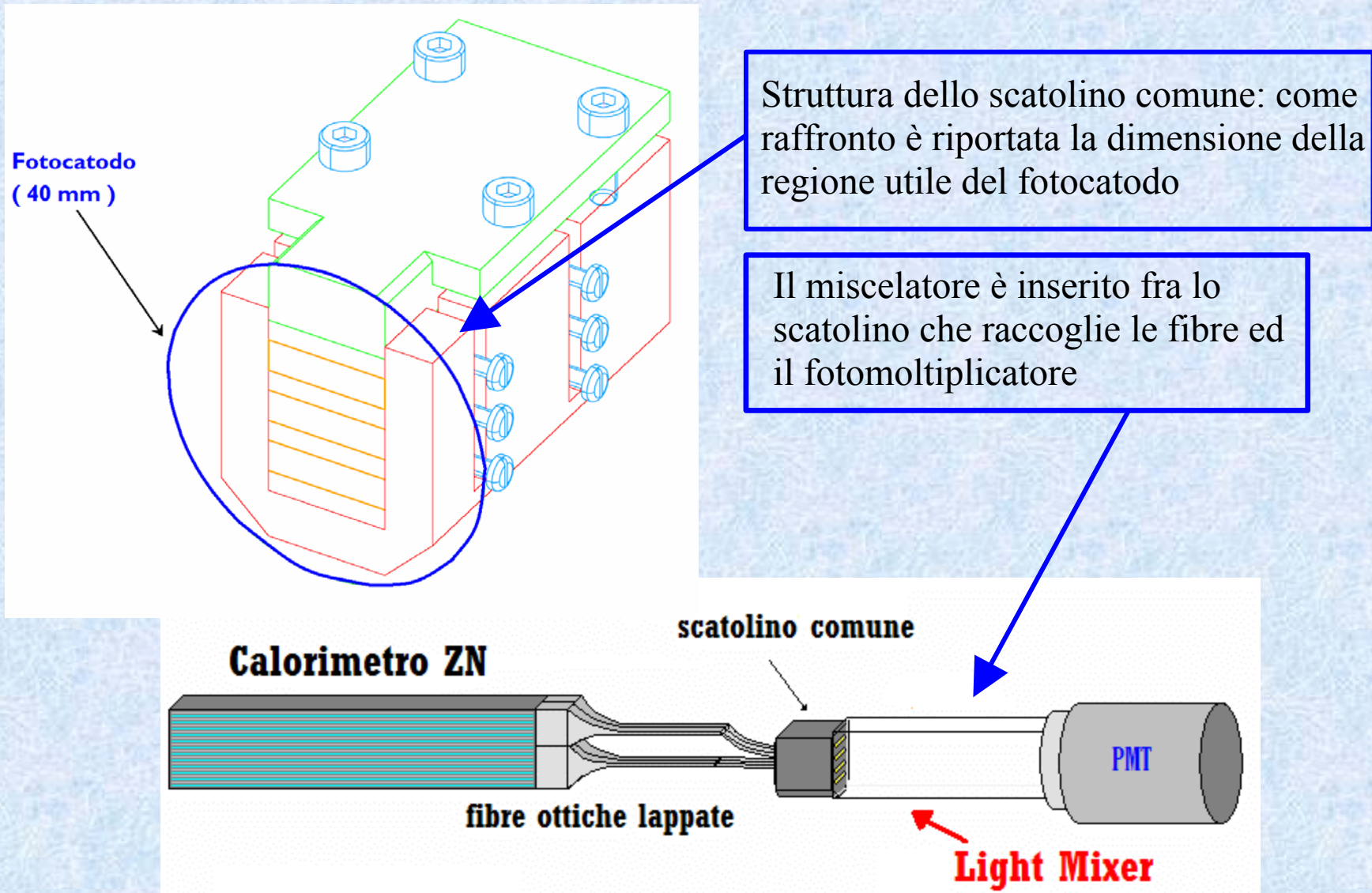
Mazzetti di fibre al quarzo uscenti dallo ZN

Insieme dei cinque scatolini

Le fibre le cui estremità vengono lappate, escono dalla faccia posteriore del calorimetro e qui sono divise in mazzetti. I mazzetti a loro volta sono raccolti da cinque strutture in plastica atte a raccogliere le fibre (*scatolini*), ciascuno dei quali viene poi affacciato ad un fotomoltiplicatore. **Il miscelatore viene inserito tra gli scatolini e il fotomoltiplicatore.**



# Accoppiamento Fibre – PM (II)





# Introduzione al Problema

- Il fotomoltiplicatore trasforma il segnale luminoso in segnale elettrico mediante la produzione di fotoelettroni. Il parametro caratteristico di questa fase è l'efficienza quantica **Q.E.**, definita:

$$Q.E. = \# \text{ fotoelettroni emessi} / \# \text{ fotoni incidenti}$$

- La Q.E. è **funzione della posizione del punto d'impatto dei fotoni sul fotocatodo** a causa di eventuali disuniformità della superficie.



**Peggioramento della risoluzione dello strumento**  
poiché la stessa quantità di fotoni, raccolta però in punti diversi del calorimetro, andando ad incidere in punti diversi del PM, genera diversi segnali elettrici.

⇒ Si tratta pertanto di **inserire tra le fibre e il PM un dispositivo atto a rendere la distribuzione di fotoni in uscita spazialmente il più uniforme possibile.**

# Soluzione proposta

Una soluzione al problema posto consiste nell'inserimento di un *miscelatore di luce* tra le estremità delle fibre ottiche e il fotocatodo.

⇒ Tale dispositivo è essenzialmente un **solido di materiale plastico trasparente** eventualmente ricoperto da un sottile strato alluminizzato, progettato per accogliere al suo interno luce *fortemente localizzata* e restituire all'estremità opposta a quella di ingresso una distribuzione di fotoni *il più uniforme possibile*.

⇒ Il processo considerato viene realizzato sfruttando il fenomeno della *riflessione totale* all'interno della guida di luce.

**Per l'ottimizzazione si è scelto di effettuare una simulazione di tipo Monte Carlo del comportamento della guida di luce mediante il programma di “ray – tracing” *Guide7*, scritto in codice Fortran.**



# Progetto del miscelatore (I)

L'ottimizzazione del miscelatore viene effettuata tenendo fissi i parametri di ingresso della luce entrante ( l'apertura del cono di luce uscente dalle fibre, il numero e la posizione delle sorgenti ) e variando:

- La sezione della guida di luce :

1. Base Circolare
2. Base Quadrata
3. Base Esagonale

- Le dimensioni caratteristiche della guida:

Lunghezza della guida

( le dimensioni della guida sono state espresse in funzione del diametro del cerchio circoscritto alla faccia di base  $d = 33.94 \text{ mm}$  )

- Valutando l'effetto dell'inserimento di un sottile strato di mylar alluminizzato attorno alla superficie della guida

# Progetto del miscelatore (II)

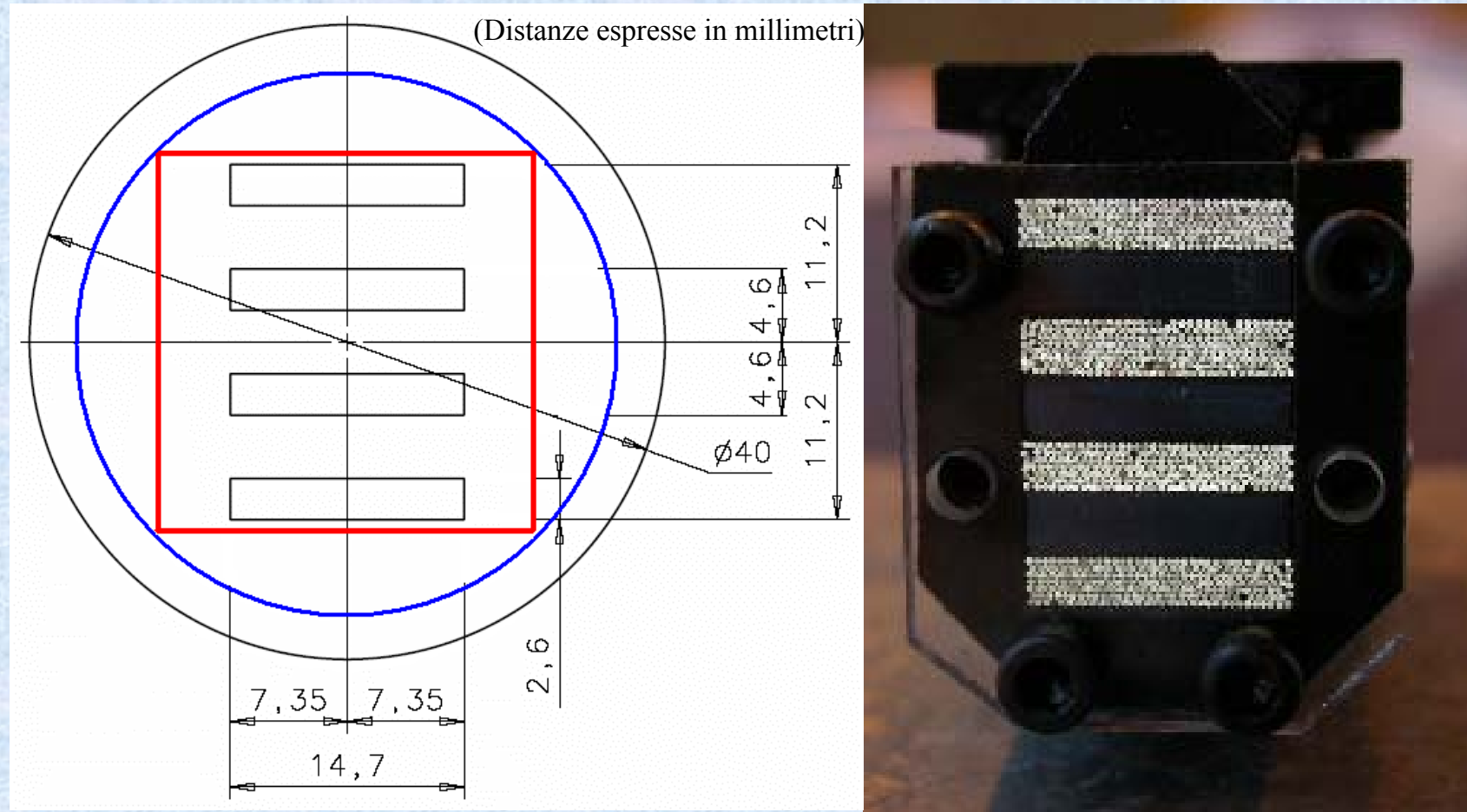
Per migliorare la risoluzione energetica del calorimetro, sono richieste le seguenti proprietà per il dispositivo di miscelazione:

- 1. Le perdite di fotoni devono essere esigue ( minori del 10% ), inoltre la capacità della guida di trasportare fotoni deve essere indipendente dalla posizione d'ingresso della luce.**
- 2. La luce deve essere miscelata in maniera da sopprimere la correlazione esistente tra la posizione di ingresso nel miscelatore, ( a sua volta legata ad una regione del calorimetro ), e una regione del fotomoltiplicatore, anche in questo caso indipendentemente dalla posizione delle sorgenti.**



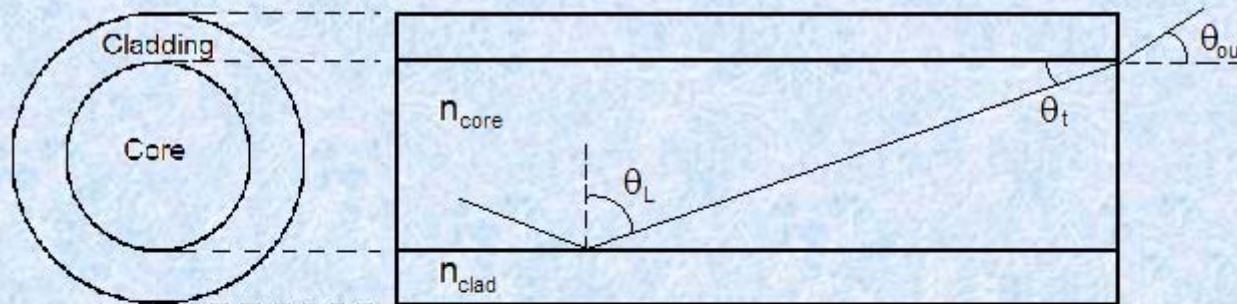
# Specifiche degli scatolini

Dimensioni dello scatolino comune per lo ZN: la dimensione caratteristica del miscelatore  $d$  è stata scelta in modo da consentire l'accoppiamento ottico con tutte le fibre di quarzo.



# Parametri di ingresso della simulazione

Un primo importante parametro è l'angolo di apertura del cono di luce uscente dalle fibra: questo parametro è direttamente collegato all'apertura numerica della fibra:



Definizione angolo limite  $\theta_L = \text{Arccsin} \frac{n_{\text{clad}}}{n_{\text{core}}}$

Legge di Snell  $n_0 \sin \theta_{\text{out}} = n_{\text{core}} \sin \theta_t$

$$\theta_{\text{out}} = \text{Arccsin} \left( n_{\text{core}} \sqrt{1 - \sin^2 \theta_L} \right)$$

$$\theta_{\text{out}} = \text{Arccsin} \left( \sqrt{n_{\text{core}}^2 - n_{\text{clad}}^2} \right)$$

$$\theta_{\text{out}} = \text{Arccsin} (\text{N.A.})$$

Nel caso preso in esame  
l'apertura numerica è N.A. = 0.22

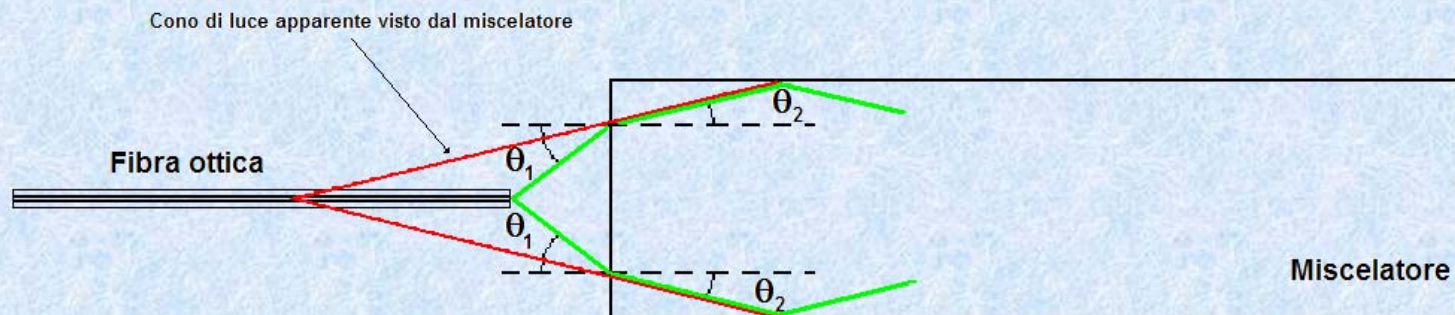
$$\theta = \text{Arccsin} 0.22 = 12.7^\circ$$

**N.B.: i fotoni vengono generati nella simulazione in modo da essere uniformemente distribuiti nell'angolo solido.**



# Parametri di ingresso (II)

Tuttavia la luce uscente dalle fibre ottiche raggruppate negli scatolini, non incide direttamente sulla superficie del miscelatore, ma attraversa una sottile intercapedine di aria, per cui subendo una ulteriore rifrazione attraverso la discontinuità aria-miscelatore il cono di luce entrante si restringe:



Per la legge di Snell la rifrazione sulla faccia d'ingresso del miscelatore è regolata da:

$$n_1 \sin \theta_1 = n_2 \sin \theta_2 \longrightarrow \theta_2 = \text{Arcsin} \left( \frac{n_1 \sin \theta_1}{n_2} \right)$$

che nel nostro caso, dato che  $\theta_1 = 12.7$

$$\theta_2 = \text{Arcsin} \left( \frac{\text{Sin } 12.7}{1.49} \right) = 8.48$$

# Parametri d'ingresso (III)

Altri parametri d'ingresso per la simulazione sono:

- Numero di sorgenti e loro posizione: si è scelto di considerare una posizione della fibra per volta, spostandola ad ogni simulazione.
- Numero di fotoni generato per sorgente (  $10^5$ , un alto numero di fotoni è importante per diminuire le fluttuazioni statistiche )
- Tipo di materiale utilizzato per la guida di luce, caratterizzato dall'indice di rifrazione  $n$ . Si è scelto come materiale il plexiglass con indice  $n = 1.49$
- Levigatezza della superficie: diminuirne la lavorazione introduce un certo grado di variabilità nell'angolo di incidenza.



# Come leggere i risultati

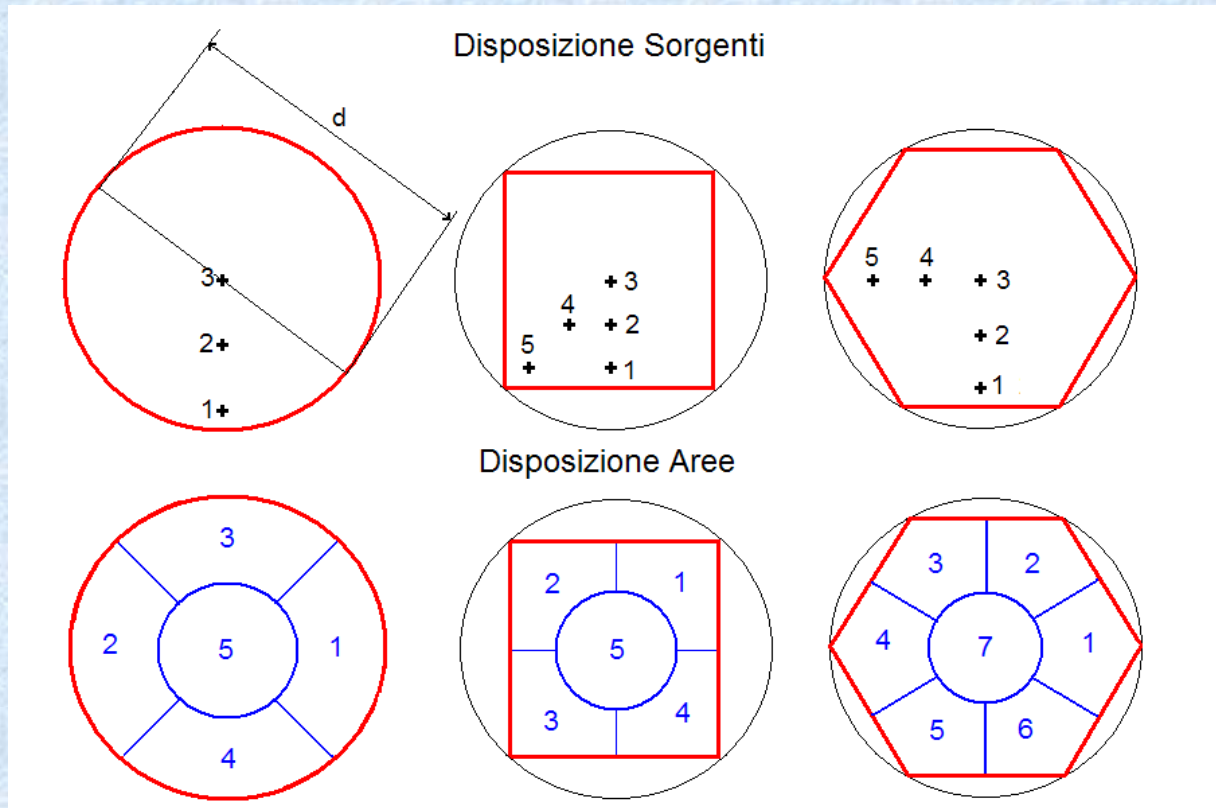
Le forme considerate sono tre: **cilindro**, **parallelepipedo a base quadrata** e **prisma a base esagonale**.

Per ciascuna geometria sono state considerate diverse lunghezze della guida, espresse in funzione del diametro caratteristico  $d$ . *La massima lunghezza considerata è 160 mm, poiché, per motivi meccanici, miscelatori più lunghi non possono essere inseriti nel setup sperimentale degli ZDC.*

I risultati, divisi per tipo di geometria, vengono presentati in tre modi differenti che rendono conto:

- **del numero di fotoni trasportati per ogni lunghezza del miscelatore e per ogni posizione della sorgente.**
- **del grado di miscelazione per ogni lunghezza del miscelatore**

# Come leggere i risultati (II)



➤ Per ciascun tipo di geometria sono state considerate 3 o 5 diverse posizioni per la sorgente di luce, tenendo conto della simmetria della figura di base.

➤ Inoltre la superficie del miscelatore da cui esce la luce è stata a sua volta divisa in un certo numero di regioni più piccole *tutte aventi la medesima area, pari ad un quinto (o un settimo) di quella totale.*

Questa suddivisione è stata importante nello studio dell'accettazione locale, parametro a cui, per ciascuna geometria, è stata dedicata una serie di grafici, che danno una stima **quantitativa** della uniformità locale della luce sulla superficie di uscita del miscelatore.



# Accettanza

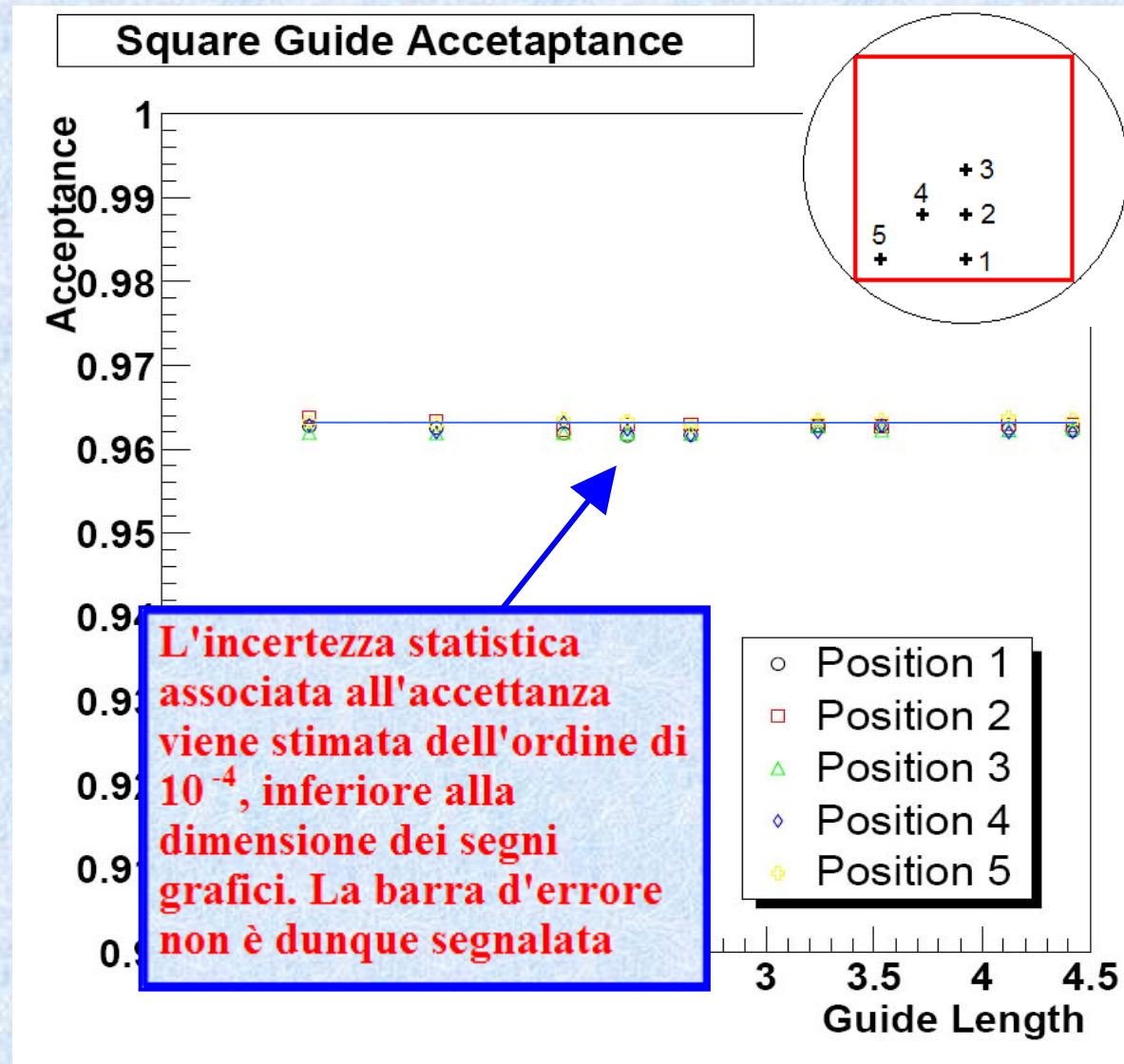
⇒ L'**accettanza** è un parametro fondamentale per la lettura quantitativa dei risultati. Viene definito accettanza della guida di luce o di una sua porzione, il rapporto fra il numero totale di fotoni alla superficie in uscita e il numero totale di fotoni in ingresso nella guida.

$$\text{accettanza} = \# \text{ fotoni in uscita} / \# \text{ fotoni in ingresso nel miscelatore}$$

⇒ Le **accettanze locali** sono definite come il rapporto tra il numero di fotoni uscenti in una determinata regione e un quinto (settimo) del totale dei fotoni trasportati, in modo da essere unitarie in caso di miscelazione perfetta.

$$\text{acc. loc.} = \frac{\# \text{ fotoni in uscita nella regione}}{\# \text{ totale di fotoni in uscita} \times \frac{1}{\text{numero di regioni}}}$$

# Accettanza totale per il miscelatore quadrato



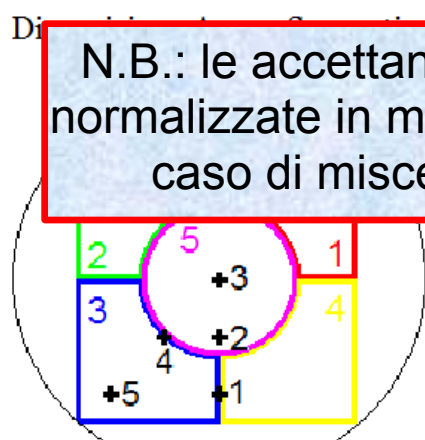
Si nota che l'accettanza totale del miscelatore a base quadrata è molto elevata ( pari a circa **0.96** ) ed è indipendente dalla posizione della sorgente di luce.

Il fatto che l'accettanza totale non sia funzione dalla lunghezza, indica che le perdite di fotoni non avvengono sulla superficie laterale della guida, ovvero che tutte le riflessioni sulle pareti laterali sono totali.

Le uniche perdite sono perciò dovute ad attenuazioni del mezzo.

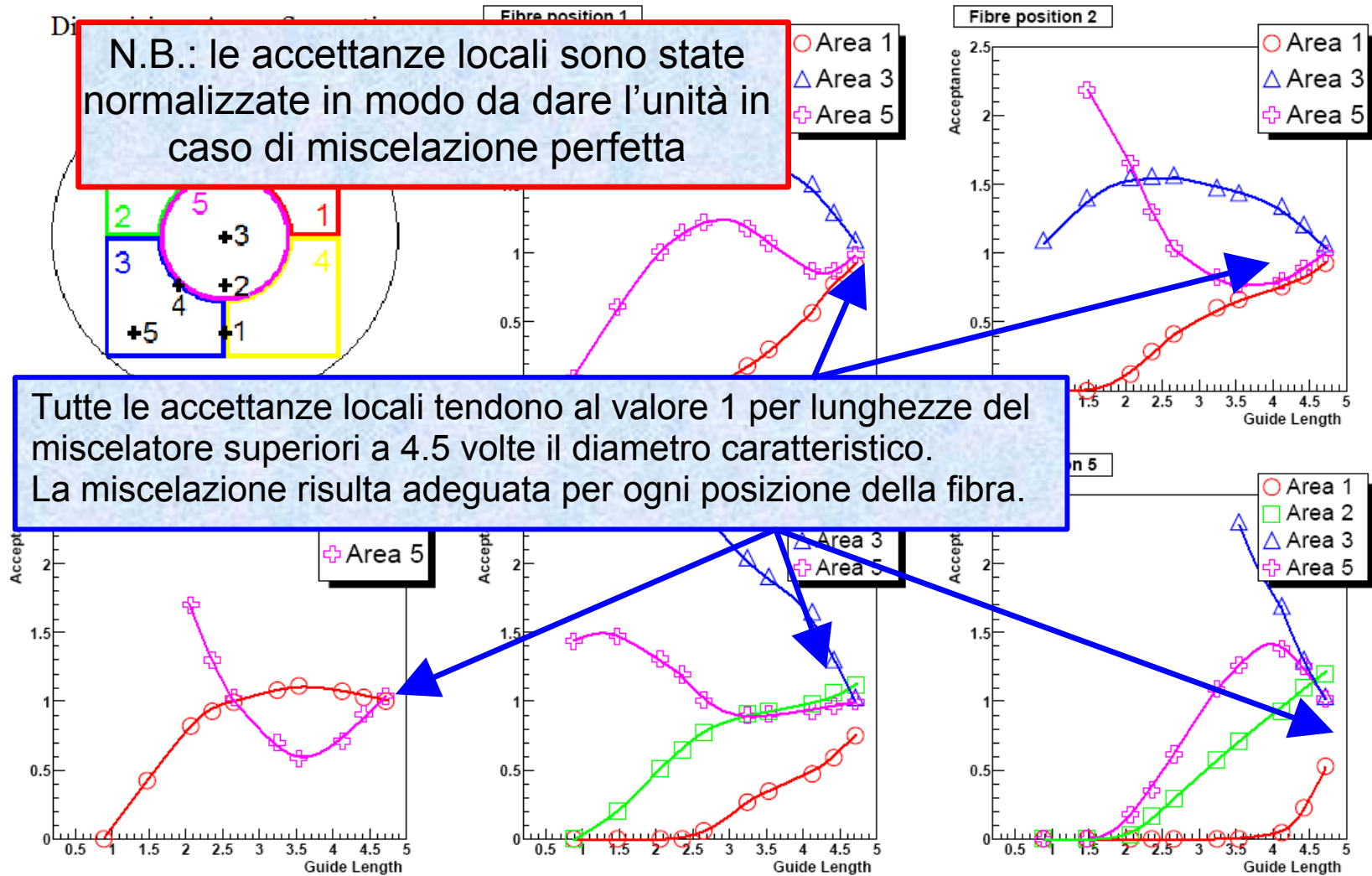


# Accettanza Locale per la geometria a base quadrata

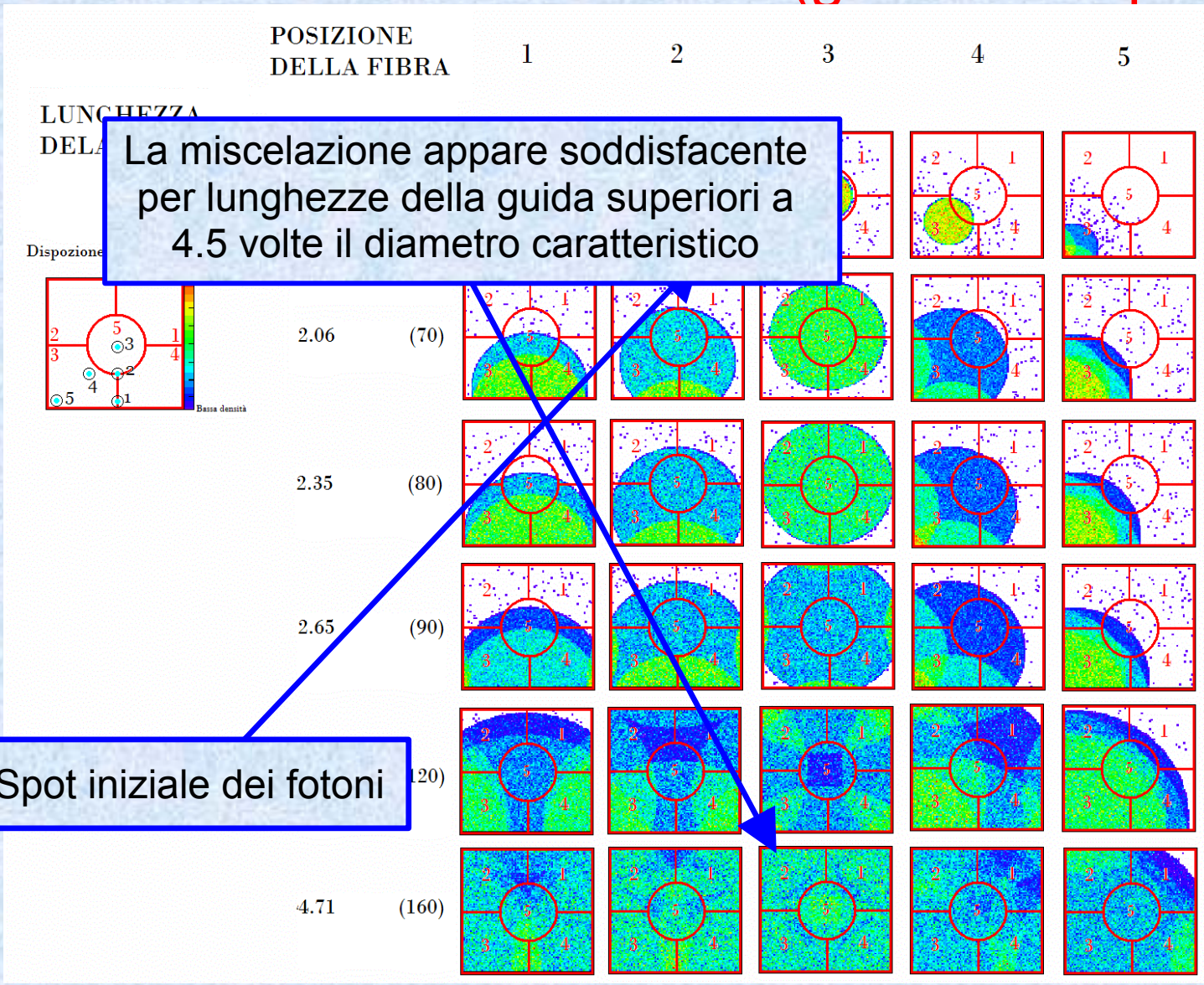


N.B.: le accettanze locali sono state normalizzate in modo da dare l'unità in caso di miscelazione perfetta

Tutte le accettanze locali tendono al valore 1 per lunghezze del miscelatore superiori a 4.5 volte il diametro caratteristico. La miscelazione risulta adeguata per ogni posizione della fibra.

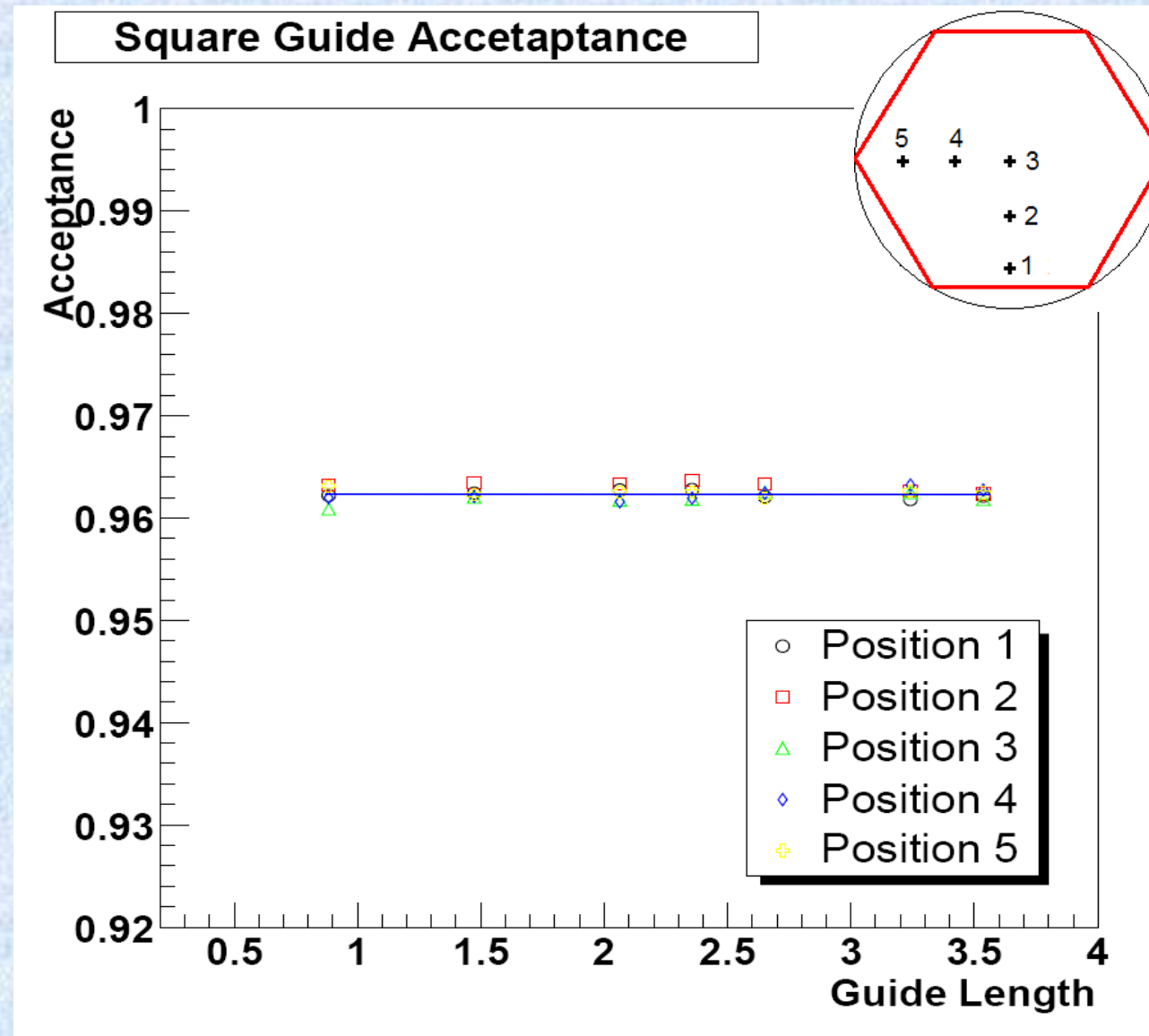


# Distribuzione della luce in uscita (geometria quadrata)



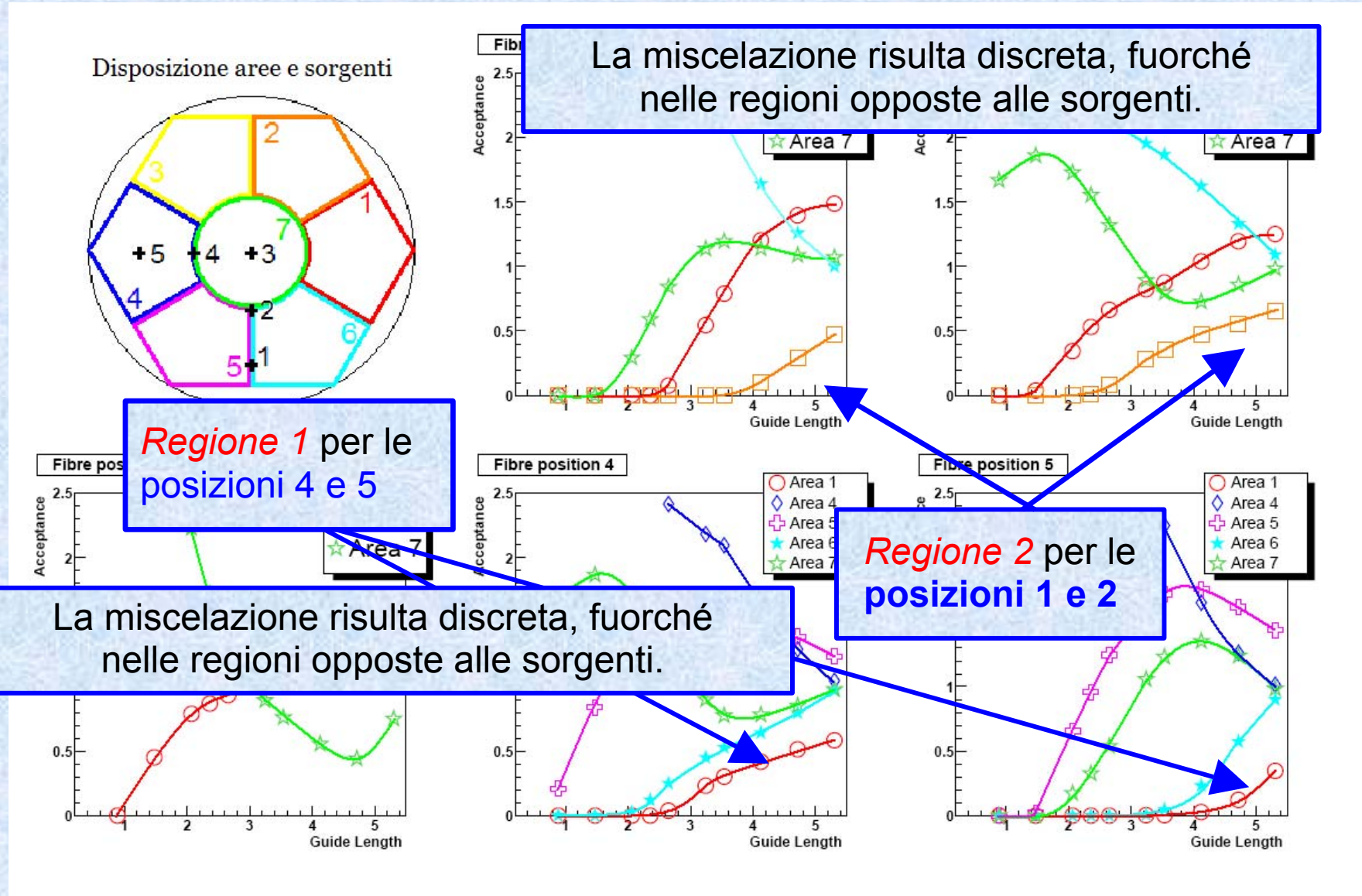


# Accettanza totale per il miscelatore esagonale



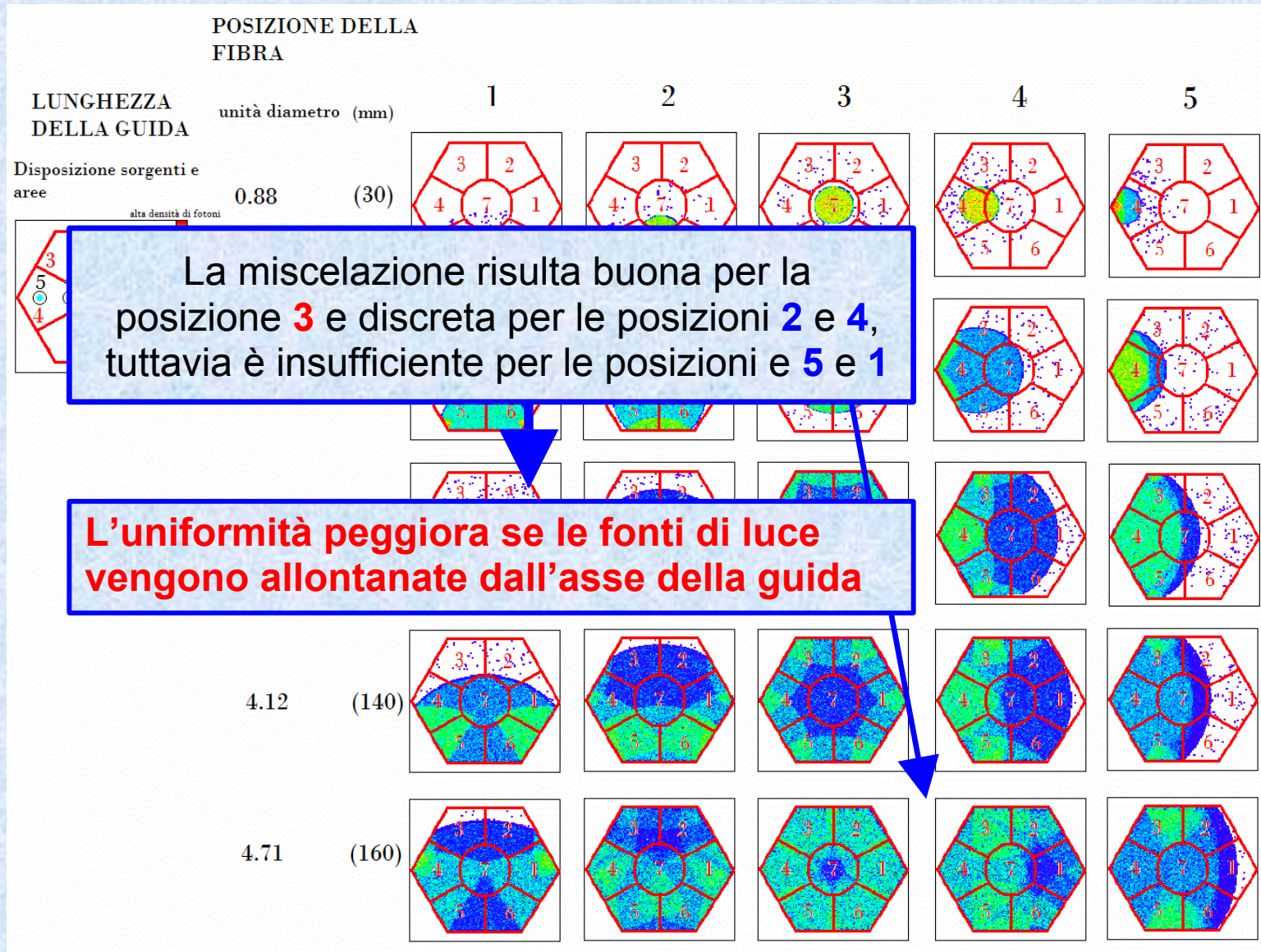
Si nota che, come nel caso della geometria quadrata **l'accettanza totale** si mantiene su valori assai elevati ( $> 0.96$ ) e che è *indipendente dalla posizione delle fibre ottiche e dalla lunghezza del miscelatore*. Tale fenomeno è causato dal fatto che le riflessioni sulle pareti laterali sono totali.

# Accettanza Locale per la geometria a base esagonale





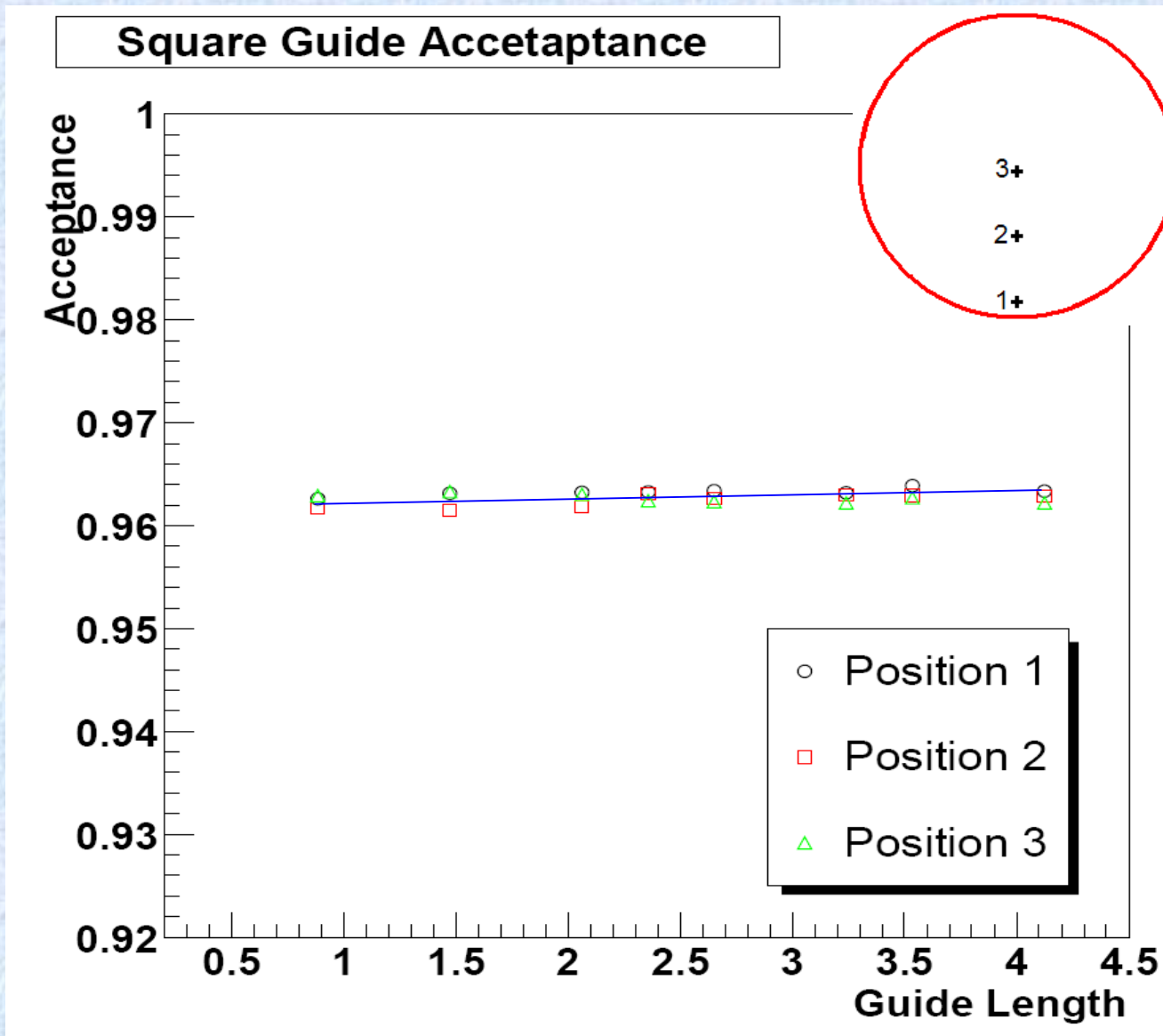
# Distribuzione della luce in uscita (geometria esagonale)



La miscelazione risulta buona per la posizione **3** e discreta per le posizioni **2** e **4**, tuttavia è insufficiente per le posizioni **5** e **1**

**L'uniformità peggiora se le fonti di luce vengono allontanate dall'asse della guida**

# Accettanza totale per il miscelatore cilindrico



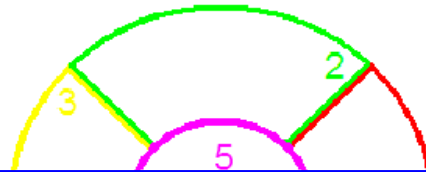
Si nota un alto livello di accettazione totale ( pari circa a **0.96** ) e che questo parametro è indipendente dalla posizione di ingresso della luce nel miscelatore.

L'accettazione totale è inoltre costante all'aumentare della lunghezza della guida di luce.

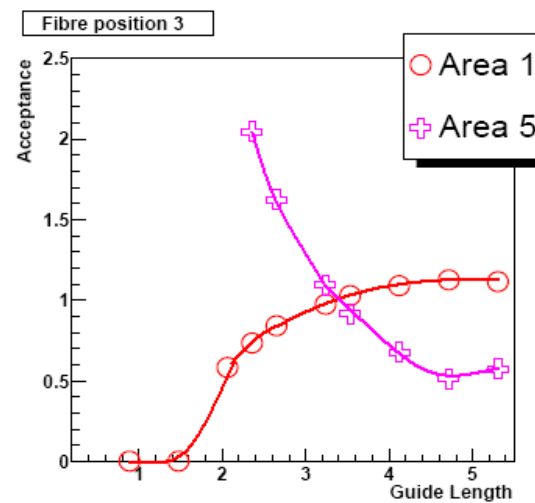
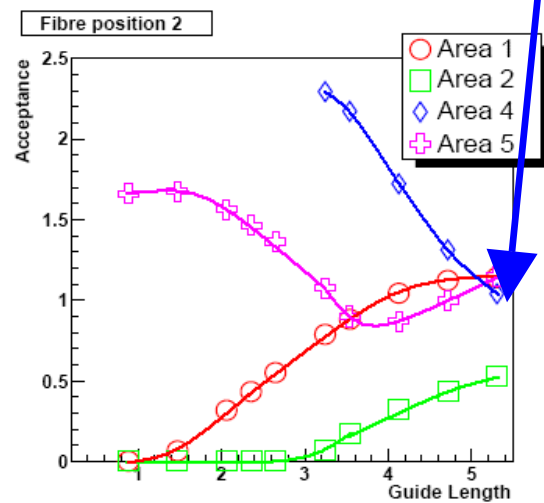
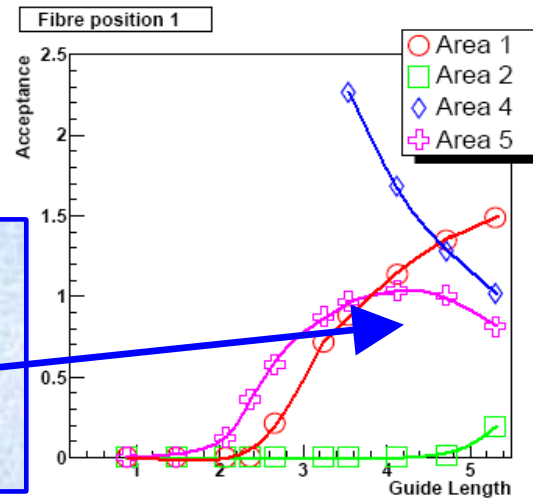


# Accettanza Locale per la geometria cilindrica

Disposizione delle aree e delle sorgenti



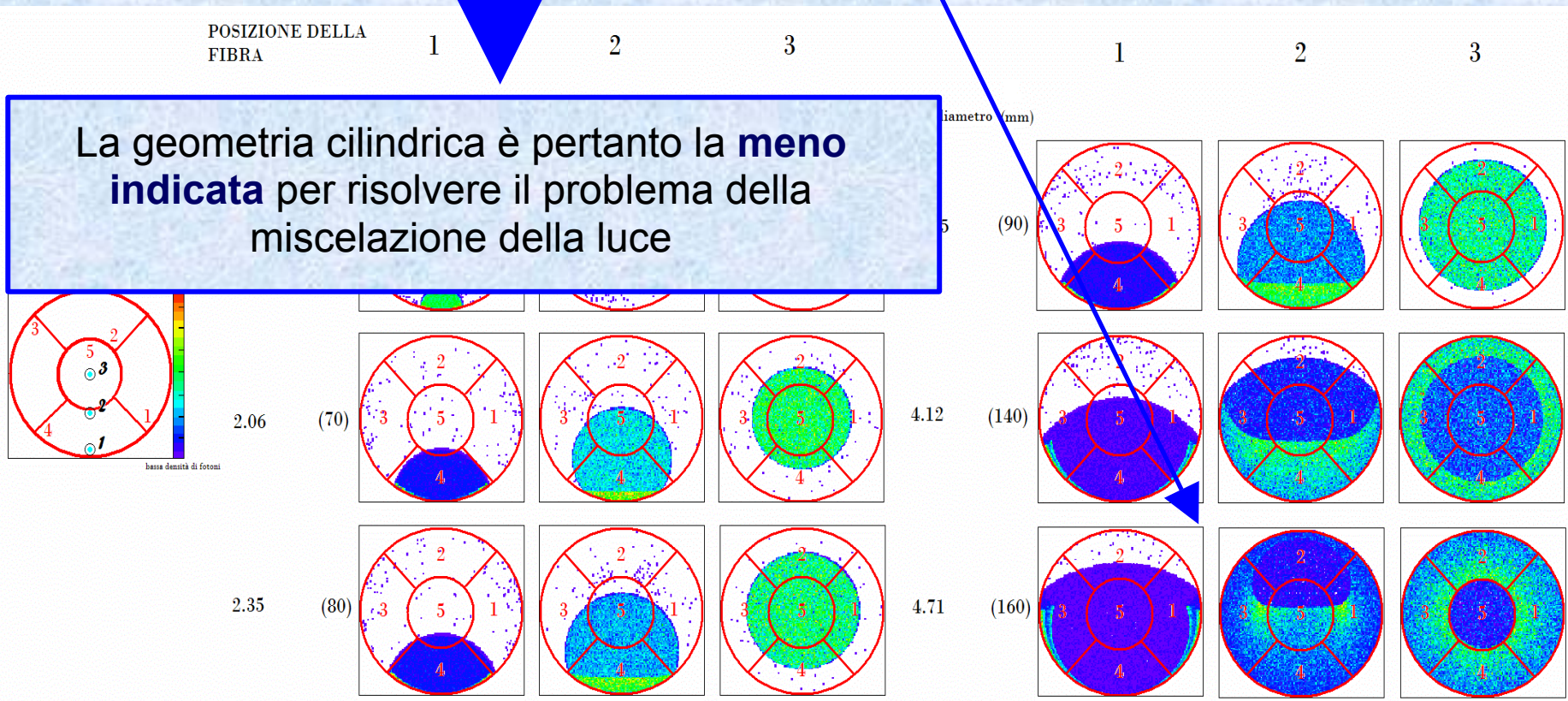
La geometria cilindrica mostra un basso grado di miscelazione per ogni posizione della fibra, soprattutto nelle regioni opposte alle fonti di luci (**regione 2**).



# Distribuzione della luce in uscita (geometria cilindrica)

Anche ad una lunghezza della guida maggiore di **quattro** volte il diametro caratteristico l'uniformità per le posizioni **1** e **3** non è soddisfacente

La geometria cilindrica è pertanto la **meno indicata** per risolvere il problema della miscelazione della luce

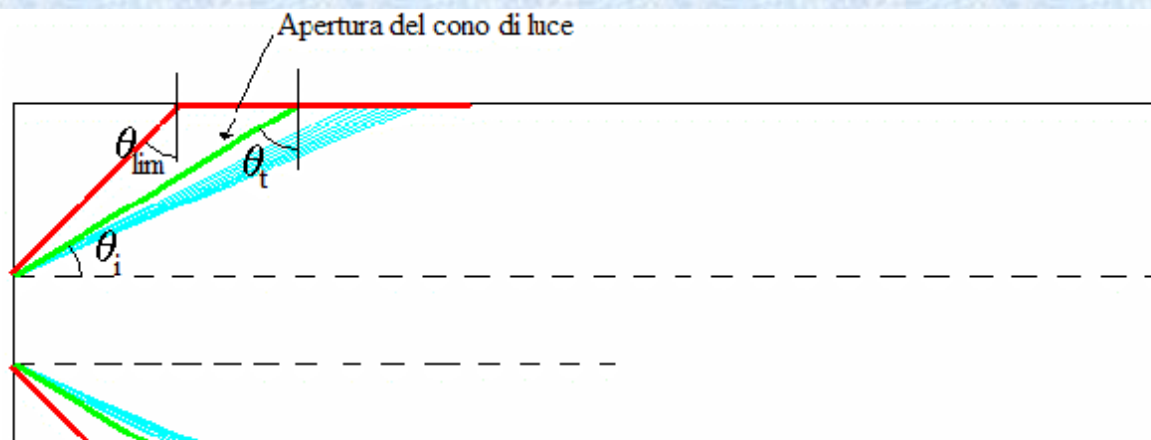




# Discussione dei risultati

- **L'accettanza totale** per tutti i tipi di geometria è assai elevata, si aggira attorno allo 0.96, inoltre è indipendente dalla posizione della fibra e dalla lunghezza della guida: non si può perciò fare selezione in tal senso.

⇒ Tale fatto si spiega osservando che *l'angolo di impatto sulla superficie laterale è sempre superiore all'angolo limite*, poiché l'angolo d'apertura del cono di luce entrante è inferiore al complementare dell'angolo limite per un'interfaccia aria plexiglas.



$$\theta_i < 90^\circ - \theta_{\text{lim}}$$

L'apertura del cono di luce è tale che l'angolo di impatto  $\theta_t$  è sempre superiore all'angolo limite. Per avere riflessione totale l'angolo di apertura del cono deve essere inferiore al complementare dell'angolo limite

Nel nostro caso  
l'angolo limite vale

$$\theta_{\text{lim}} = \arcsin(1/1.49) = 42.1^\circ$$

dunque:

$$\theta_{i, \text{max}} = 90^\circ - 42.1^\circ = 47.9^\circ$$

un angolo ben al di sopra  
dell'apertura del cono (  $8.48^\circ$  )

# Discussione dei risultati (II)

- Per le ragioni sopra esposte una eventuale alluminatura della superficie laterale non migliora in alcun modo l'accettazione totale.
- I grafici per le accettanze locali indicano che si ha un grado di miscelazione sufficiente per lunghezze della guida superiori a  $4.5 \div 5$  volte il diametro caratteristico  $d$ .
- I grafici riguardanti l'uniformità indicano che con la geometria cilindrica si ottiene uno scarso grado di miscelazione. La ragione risiede nel fatto che la simmetria cilindrica comporta una sostanziale conservazione degli angoli di incidenza, limitando il grado di miscelazione.
- I medesimi grafici danno una stima della miscelazione per la guida esagonale relativamente migliore di quella cilindrica, ma quella della guida a sezione quadrata appare ancora migliore.
- La risposta della guida esagonale è tale da non ottenere una miscelazione accettabile fino a lunghezze di circa 5 volte il diametro caratteristico. La guida quadrata, dà invece una miscelazione buona già per lunghezze di  $4 \div 4.5$  volte il diametro caratteristico.



# Conclusioni

Sono state simulati gli effetti della trasmissione della luce all'interno di guide di tre differenti geometrie: **esagonale, quadrata, e cilindrica**.

⇒ L'analisi è stata effettuata valutando tre parametri, *la quantità totale di luce trasmessa, la dipendenza dell'accettanza dalla posizione d'ingresso della luce e l'uniformità della miscelazione*.

⇒ Tutte e tre le forme presentano elevate quantità di luce trasmessa, e a causa del piccolo angolo d'apertura del cono, l'accettanza risulta indipendente dalla posizione d'ingresso per ogni geometria.

⇒ Tuttavia solo il **miscelatore quadrato consente di ottenere una uniformità della miscelazione** adeguata per un utilizzo del medesimo per un calorimetro ad alta risoluzione, nel limite delle lunghezze considerate.

⇒ Concludiamo che per soddisfare le esigenze di uniformità del calorimetro a zero gradi di ALICE è necessario impiegare una guida a base quadrata ( $24 \times 24 \times 160 \text{ mm}^3$ ) di lunghezza non inferiore a 5 volte la lunghezza caratteristica  $d$ .

⇒ La regola empirica è che tanto più la sezione si avvicina a quella circolare tanto è peggiore la miscelazione, malgrado aumenti la superficie di fotocatodo utilizzata.